

한국금형공학회지

제14권 제4호, December 2020

- 01 탄성중합체 시일 표면의 미세 딤플에 대한 최적설계
유대원
- 02 사출/압축 공정과 인서트 오버몰딩을 이용한 탄소복합소재 성형에 대한 연구
정의철, 윤경환, 홍석관, 이상용, 이성희
- 03 가습 입자를 활용한 고효율 난방 시스템 개발
이정원, 홍정보
- 04 사출성형공정 모니터링용 엠티 디바이스 개발 및 평가
김종선, 이준한
- 05 컴퓨터 시뮬레이션(PC-CRASH)을 이용한 터널 내 피추돌 차량의 충돌 속도 추정에 관한 연구
한창평, 최홍주
- 06 머시닝센터를 활용한 알루미늄합금의 마찰교반용접 특성 분석
승영춘, 박경도, 이춘규
- 07 알루미늄 사형주조에서 기공 결함 감소를 위한 연구
이동연, 이춘규
- 08 유한요소해석을 이용한 백그라인딩 장비의 구조안정성 연구
위은찬, 고민성, 김현정, 김성철, 이주형, 백승엽
- 09 언더컷 형상의 판재 성형품에 보강용 CFRP 패치의 접합을 위한 공정 기술 개발
이환주, 전용준, 조훈, 김동연
- 10 DSI 성형을 이용한 금속/플라스틱 복합 부품 제조에 관한 연구
하석재, 차백순, 고영배

목 차

01 탄성중합체 시일 표면의 미세 덩플에 대한 최적설계	유대원 / 1
02 사출/압축 공정과 인서트 오버몰딩을 이용한 탄소복합소재 성형에 대한 연구	정의철, 윤경환, 홍석관, 이상용, 이성희 / 11
03 가슴 입자를 활용한 고효율 난방 시스템 개발	이정원, 홍경보 / 17
04 사출성형공정 모니터링용 엠티 디바이스 개발 및 평가	김종선, 이준한 / 25
05 컴퓨터 시뮬레이션(PC-CRASH)을 이용한 터널 내 피추돌 차량의 충돌 속도 추정에 관한 연구	한창평, 최홍주 / 40
06 머시닝센터를 활용한 알루미늄합금의 마찰교반용접 특성 분석	승영춘, 박경도, 이춘규 / 46
07 알루미늄 사형주조에서 기공 결함 감소를 위한 연구	이동연, 이춘규 / 52
08 유한요소해석을 이용한 백그라인딩 장비의 구조안정성 연구	위은찬, 고민성, 김현정, 김성철, 이주형, 백승엽 / 58
09 언더컷 형상의 판재 성형품에 보강용 CFRP 패치의 접합을 위한 공정기술 개발	이환주, 전용준, 조훈, 김동언 / 65
10 DSI 성형을 이용한 금속/플라스틱 복합 부품 제조에 관한 연구	하석재, 차백순, 고영배 / 71
- 사단법인 한국금형공학회 연구윤리규정	/ 78
- 한국금형공학회지 논문투고 및 발행규정	/ 79



탄성중합체 시일 표면의 미세 딴플에 대한 최적설계

유대원[†]

한국폴리텍대학교 창원캠퍼스 컴퓨터응용기계설계과[†]

Optimum micro dimple configuration on the elastomer seal surface

Dae-Won Yoo[†]

Department of Computer Aided Mechanical Design, Changwon Campus of Korea Polytechnic[†]

(Received September 01, 2020 / Revised December 23, 2020 / Accepted December 31, 2020)

Abstract: The seal plays a role in preventing oil leakage when the lip and the rotating shaft come into contact with the fluid and air pressure. Recently, micro dimples or micro pockets are processed and used on the lubrication surfaces of thrust bearings, mechanical bearings, and piston rings. Compared to a smooth surface, micro dimples reduce friction and increase the life of parts. This paper analyzed various kinds of micro dimple shapes on the sealing surface, i.e. circle, rectangle, triangle, and trapezoid. For this purpose, Introduced the design of experiments to work out a micro dimple configuration, unlikely to be damaged from cracks and low in contact stress. As a result, the triangular dimple showed the best results. Optimal factors were dimple size 0.15 mm, dimple depth 0.0383 mm, dimple density 40%, and the maximum equivalent stress was 9.1455 MPa, and the maximum contact pressure was 9.6612 MPa. This paper analyzed the optimal shape of dimples by finite element analysis. As a research project, experiments and comparative analysis of micro dimple shapes are needed.

Key Words: Seal, Micro Dimple, Design of Experiments, Factor, Level

1. 서 론¹⁾

시일(Seal)은 유체의 작용압력에 의해 립(Lip)과 회전축이 접촉하면서 누설(Leakage)을 방지하는 역할을 한다. 누설은 밀봉성에 크게 영향을 받는데 밀봉성능은 접촉되는 시일 립과 축 사이에서 발생하는 접촉압력에 의해서 결정된다. 접촉압력이 낮은 경우는 누설이나 외부 이물질이 유입될 수 있으며, 접촉압력이 높은 경우 접촉면의 초기 마멸로 시일의 기능을 쉽게 잃어버릴 수 있다. 공장 자동화 기계, 산업 기계, 포장 기계, 식품 기계 등의 누설을 방지하는 부품으로 보통 축에 조립되어 사용되고 있다.

최근 10년 사이 스러스트 베어링(Thrust bearing),

미케니컬 시일(Mechanical seal), 피스톤 링(Piston ring) 등의 윤활면에 미세 딴플(Micro dimple) 혹은 미세 포켓(Micro pocket) 형태를 가공하여, 윤활특성에 대한 연구가 집중되고 있다. 이러한 딴플(Dimple)은 크기(Size), 형상(Shape) 및 밀도(Density) 등을 고려하여 재료의 표면에 가공함으로써 윤활유를 저장·공급해주는 역할을 하며, 매끈한 표면에 비해 마찰력을 감소시켜 부품의 수명을 증가시키는 결과를 시험을 통해 증명되고 있다. 현재까지 이러한 딴플 형상에 대해 마찰특성 연구가 많이 진행되어왔다. 하지만 시일에 작용하는 압력에 의해 딴플형상이 변형되는 효과를 반영하지 못하고 있는 실정이다.

딴플은 여러 가지 형태를 가지고 있으며, 대표적으로 원형, 사각, 삼각, 사다리꼴 형태이다. 딴플에 대한 연구 동향은 다음과 같다.

1996년 Etsion^{1,2)} 등은 기계적 밀봉 특성에 대해 표면조직처리(LST : Laser surface texturing) 가공을 통

[†] 교신저자: 한국폴리텍대학교 창원캠퍼스 컴퓨터응용기계설계과
E-mail: yoodw14@kopo.ac.kr

한 실험을 하였다. 윤활 성능을 개선하기 위해서는 반구형 딴플이 최적의 표면 텍스처링 형상이라고 하였으며, 딴플 직경에 대한 깊이의 비가 딴플 형상 최적화를 위한 주요 변수임을 제시하였다. 또한, 레이저 가공방법을 이용하여 미세 딴플을 가공하면, 작용하는 마찰력을 크게 감소시키고, 수명이 증가한다는 결과를 발표하였다.

2006년 Over³⁾ 등은 딴플 내부에 캐비테이션(Cavitation)을 처음으로 적용하였으며, 입구부에서 흡입이 발생하고, 이로 인하여 어느 정도 하중을 지지할 수 있다는 결과를 발표하였다. Hwang⁴⁾은 FLUENT를 사용하여 미세 딴플이 있는 평행 스톱트 베어링의 윤활특성을 해석하였으며, 유막두께, 딴플의 깊이, 위치, 수, 형상에 따라 윤활특성에 큰 영향을 미치는 결과를 나타내었고, 딴플 크기는 0.05~0.10mm 이다. 또한 마찰력은 사각형상이 가장 작았으며, 사다리꼴 형태는 누설 량이 가장 많은 결과를 나타내었다. Kim⁵⁾ 등은 그리스를 유막으로 사용하는 경우 하중이 크고 회전속도가 느릴 때 딴플의 효과가 크다는 것을 측정결과로 분석하였다. Hong⁶⁾은 FLUENT를 사용하여 운동면에 전단력과 마찰에 대한 연구를 하였으며, 딴플 폭과 깊이 비가 1:1 이상의 깊이에 대해서는 더 이상 마찰력 감소효과가 없음을 나타내었다. 또한 배열은 마찰 감소에 큰 영향을 주지 못하며, 내부 압력 분포에는 다소 영향이 있다는 결과를 나타내었다.

Chae^{7,8)} 등은 혼합 윤활 상태 및 수력학적 영역에서 미세 딴플의 밀도에 따른 마찰변화를 시험을 통해 분석하였으며, 딴플이 없는 것에 비해 마찰계수 저감효과를 보였다. 수직하중 30N에서는 23.8%, 32.4%, 36.6%의 밀도를 가진 시험편이 우수한 결과를 나타내었다. 또한 미세 딴플에 대한 크기효과(Size effect)를 연구하였으며, 마찰성능의 주요 인자는 딴플직경을 딴플피치로 나눈 값이고, 0.5일 때 마찰성능이 향상됨을 시험을 통해 확인하였다. 하중 범위에 따라 최적의 밀도가 존재하고 있음을 알았고, 5~30N 범위에서는 32.4%의 밀도를 가진 시험편이 우수하다는 결과를 발표하였다.

본 논문은 현재까지 많이 사용되고 있는 금속, 플라스틱 표면의 미세 딴플효과가 아닌 탄성중합체인 시일 표면에 여러 딴플 형상 즉, 원형, 사각, 삼각, 사다리꼴 형태에 대해 FEM을 통해 응력분포를 해석

하였다. 딴플은 밀도와 연관성이 깊는데 밀도는 딴플의 직경 또는 가로, 세로 길이, 피치의 연관관계를 파악해야 한다. 이에 대해 밀도 공식을 유도하여 제시하였다. 또한 실험계획법(Design Of Experiments)을 통해 딴플 폭 또는 직경, 깊이, 피치 간격을 인자로 최소 등가응력과 최소 접촉압력을 갖는 최적의 인자를 도출하였다.

2. 본론

2.1. 시일 및 여러 딴플 형상

시일과 여러 딴플 형상은 Fig. 1과 같으며, 딴플은 축과 조립되는 시일 표면에 형성되어 있다.

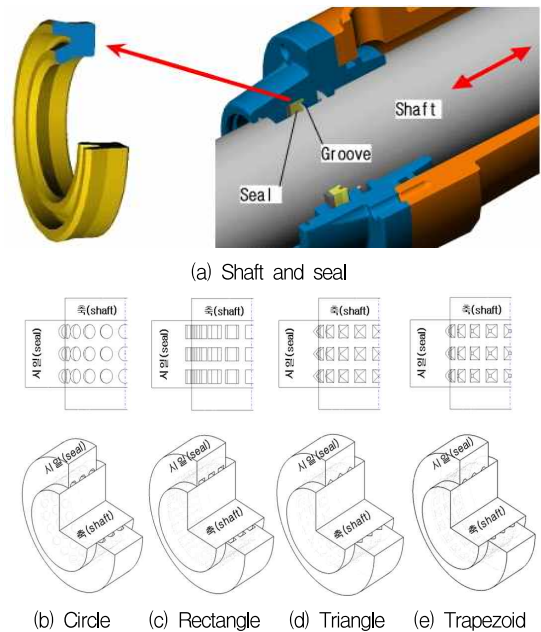


Fig. 1 Seal and dimple shape

2.2. 재료상수 추출

재료상수를 얻기 위해 Fig. 2와 같이 시험편을 제작하였으며, 최근 많이 사용되고 있는 열가소성 폴리우레탄(TPU : Thermoplastic Polyurethane)을 사용하였다⁹⁾. 일축 인장 시험편의 표선거리는 20mm이며, 두께는 2mm를 갖는다. 이축 인장 시험편의 표선거리는 25mm이며, 두께는 일축 시험편과 동일한 2mm를 갖는다. 일축과 이축 인장시험장치는 Fig. 3과 같으며, 시험 조건은 Table 1과 같다.

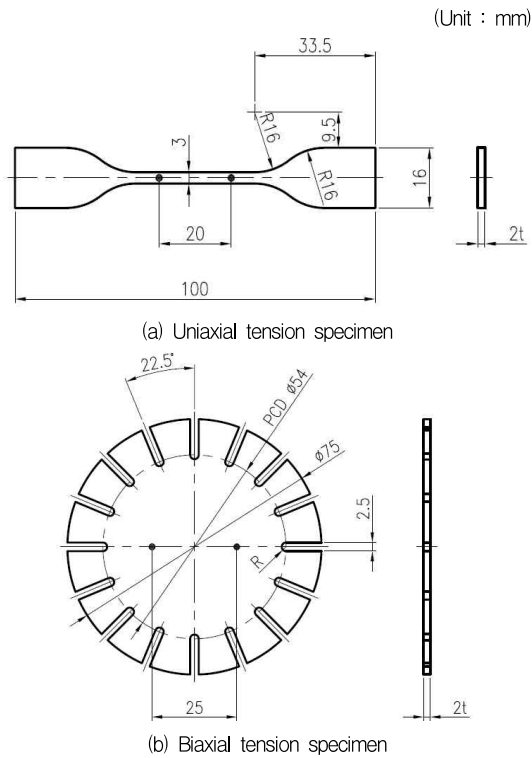


Fig. 2 Uniaxial and biaxial tension specimen

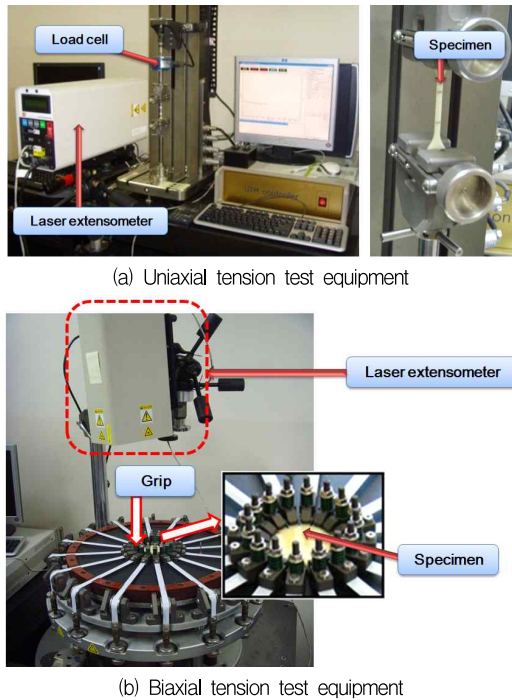


Fig. 3 Uniaxial and biaxial tension test equipment

Table 1 Tension test conditions

Description	Uniaxial test			Biaxial test		
	25	50	75	25	50	75
Strain (%)	25	50	75	25	50	75
Deformation length (mm)	5	10	15	6.25	12.5	18.75
Test speed (mm/min)	10			50		
Gauge length (mm)	20			25		

Fig. 4와 같이 하중의 시작점을 원점으로 이동시키기 위해 시험 데이터(Experiment data)를 영구변형률 ϵ_p 만큼 좌측으로 이동시켰다. 여기서 진 응력(True stress) σ_t , 진 변형률(True strain) ϵ_n 과 공칭 응력(Nominal stress) σ_n , 공칭 변형률(Nominal strain) 과의 관계는 식(1), 변형률의 관계는 식(2)와 같다.

$$\sigma_t = \sigma_n(1 + \epsilon_p) \quad (1)$$

$$\epsilon_t = \frac{\epsilon_n - \epsilon_p}{1 + \epsilon_p} \quad (2)$$

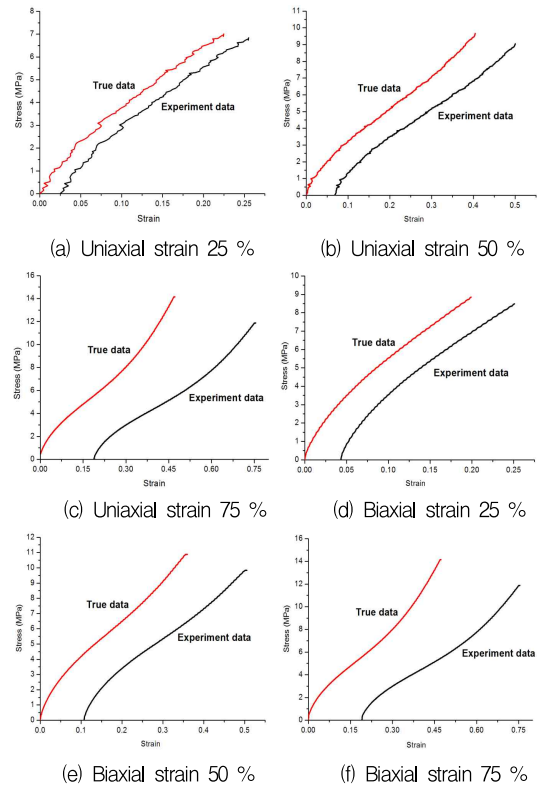


Fig. 4 Uniaxial and biaxial tension test results

Mooney-Rivlin 상수를 구하기 위해 MSC의 curve fitting을 사용하였다. 이는 오차의 제곱 합을 최소화하는 추정량을 구하는 방법 즉, 최소자승법을 뜻한다. 일축과 이축에 대해 각각 Mooney-Rivlin 상수 3차항 값을 추출하였다. 또한 보다 정확한 Mooney-Rivlin 상수를 구하기 위해 Table 2와 같이 일축과 이축 데이터를 합하여 curve fitting하였다.

Table 2 Material properties from experiments

Specimen (TPU, Hs95)	Strain (%)	Mooney-Rivlin Constant (MPa)		
		C_{10}	C_{01}	C_{11}
Uniaxial + Biaxial	25	7.6481	-0.5743	-2.2669
	50	6.5984	-1.5086	0.0634
	75	4.4242	-0.3894	0.1649

2.3. 딤플 밀도 관계식

딤플에 대한 밀도를 계산하기 위해서는 딤플의 직경 또는 가로 세로 길이, 피치의 연관관계를 알아야 한다. 딤플은 원형, 사각, 삼각, 사다리꼴 형태를 나타내고 있다. 또한 Fig. 5와 같이 시일과 축이 접촉되는 부분에서는 원형, 사각 두 개의 면을 형성하고 있기 때문에, 원형과 사각에 대한 밀도 관계를 알아야 한다.

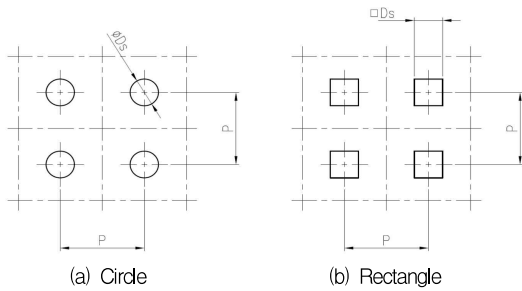


Fig. 5 Variable of circle and rectangle dimple

딤플의 밀도는 식(3)과 같이 정의된다. 여기서, D_p 는 딤플 밀도, A_{td} 는 딤플이 존재하는 전체면적, A_{tr} 은 고무바닥 전체면적이다.

$$D_p = \frac{A_{td}}{A_{tr}} \quad (3)$$

딤플이 존재하는 총 개수 D_{tn} 은 식(4)와 같이 정의된다.

$$D_{tn} = \frac{A_{tr}}{P^2} \quad (4)$$

딤플이 존재하는 전체면적 A_{td} 는 식(5)와 같으며, 여기서 A_d 는 딤플 하나의 면적이다.

$$A_{td} = D_{tn} \times A_d \quad (5)$$

따라서, 밀도 공식은 식(6)과 같이 정리되며, Table 3과 같이 정리된다.

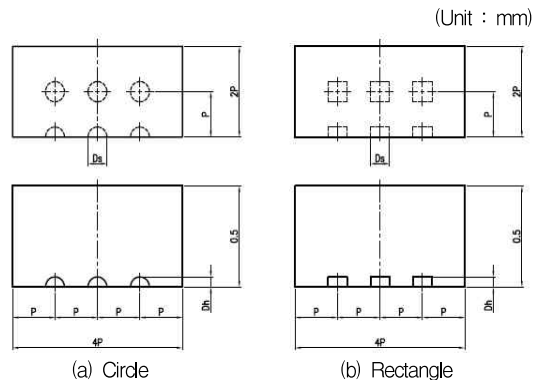
$$D_p = \frac{A_{td}}{A_{tr}} = \frac{D_{tn} \times A_d}{D_{tn} \times P^2} = \frac{A_d}{P^2} \quad (6)$$

Table 3 Dimple density, pitch and size formula

Description	Circle	Rectangle
Dimple area of one (mm ²)	$A_d = \frac{\pi D_s^2}{4}$	$A_d = D_s^2$
Density	$D_p = \frac{\pi D_s^2}{4 P^2}$	$D_p = \frac{D_s^2}{P^2}$
Pitch (mm)	$P = \frac{D_s \sqrt{\pi}}{2 \sqrt{D_p}}$	$P = \frac{D_s}{\sqrt{D_p}}$
Dimple size (mm)	$D_s = \frac{2 P \sqrt{D_p}}{\sqrt{\pi}}$	$D_s = P \sqrt{D_p}$

2.4. 딤플의 주요 치수 선정

딤플의 주요 치수는 Fig. 6과 같이 딤플 크기 D_s , 딤플 깊이 D_h , 딤플 밀도 D_p 로 선정하였으며, 딤플 크기는 $0.1 \pm 0.05 \text{mm}$, 딤플 깊이 $0.05 \pm 0.025 \text{mm}$, 딤플 밀도 $30 \pm 10\%$ 이다. 크기, 깊이, 밀도의 기준 수치는 선행연구에 의한 것이며, 딤플 크기는 $0.05 \sim 0.10 \text{mm}$ 사이, 깊이는 딤플 크기의 절반, 밀도의 경우 23.8%, 32.4%, 36.6%에서 우수한 결과를 나타내었기 때문이다^{10,11}. Table 4는 실험계획법 중 중심합성 내접설계에 대한 계획이며, 각 크기에 대한 피치를 계산하였다.



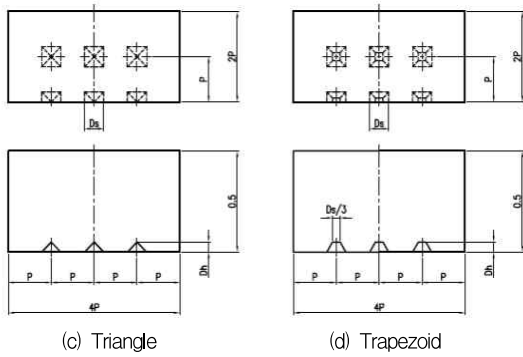


Fig. 6 Dimple model for FEM analysis

Table 4 Calculation of dimple pitch

Std. Run	D_s (mm)	D_h (mm)	D_p (%)	Pitch of circle dimple	Pitch of rectangle dimple
1	0.05	0.025	20	0.099	0.112
2	0.15	0.025	20	0.297	0.335
3	0.05	0.075	20	0.099	0.112
4	0.15	0.075	20	0.297	0.335
5	0.05	0.025	40	0.070	0.079
6	0.15	0.025	40	0.210	0.237
7	0.05	0.075	40	0.070	0.079
8	0.15	0.075	40	0.210	0.237
9	0.05	0.050	30	0.081	0.091
10	0.15	0.050	30	0.243	0.274
11	0.10	0.025	30	0.162	0.183
12	0.10	0.075	30	0.162	0.183
13	0.10	0.050	20	0.198	0.224
14	0.10	0.050	40	0.140	0.158
15	0.10	0.050	30	0.162	0.183

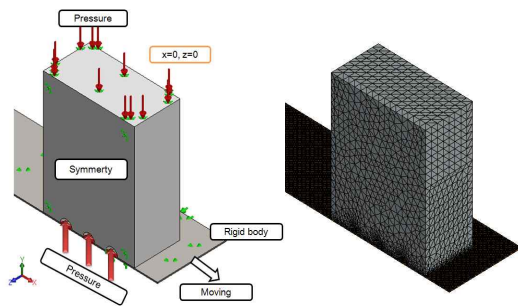


Fig. 7 Boundary conditions

2.5. 경계조건

딤플의 경계조건은 Fig. 7(a)와 같으며, 속도는 0.5m/s, 압력조건은 실의 성능평가 표준시험방법인 KS B ISO 7986의 6.3MPa를 적용하였다. Fig. 7(b)는 유한요소모델이며, 딤플 포켓의 메시는 0.005mm, 전체 메시는 0.025mm로 요소분할 하였다. 유한요소 해석(Finite Element Analysis)을 하기 위해 SOLIDWORKS v. 2020과 SOLIDWORKS simulation v.2020을 사용하여 해석하였다.

2.6. 기준 치수에 따른 해석 결과

각 딤플의 해석결과는 Fig. 8과 같으며, 최대 등가응력과 최대 접촉압력의 값은 Table 5와 같다. 등가응력의 순서는 사각>원형>사다리꼴>삼각이며, 접촉압력은 사각>사다리꼴>원형>삼각 형태이다. 기준 치수로 해석한 결과를 바탕으로 어떤 형상이 좋다

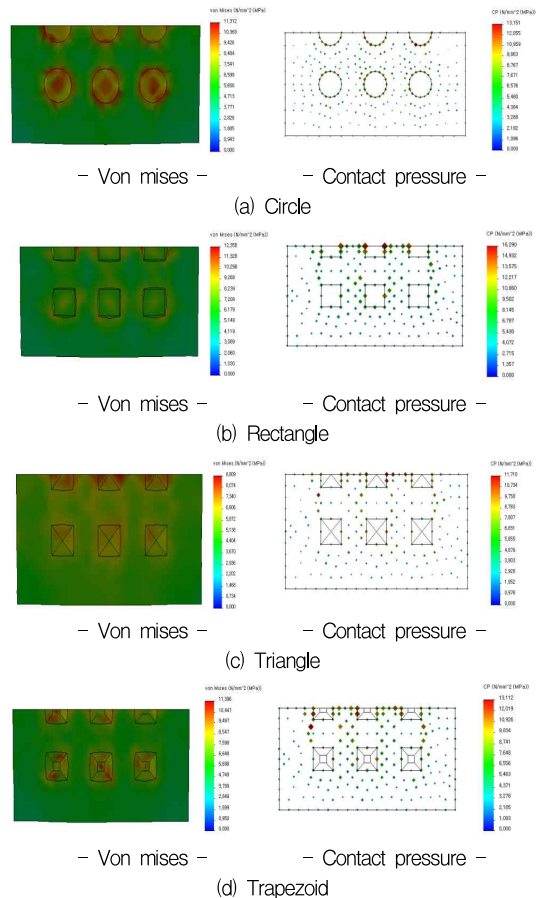


Fig. 8 Results of base dimple model

고 판단할 수 없다. 덩플 크기, 깊이, 밀도의 연관성이 있기 때문이다. 따라서 기준 치수를 바탕으로 실험계획을 계획하고, 등가응력과 접촉압력이 가장 작은 최적의 형상을 찾고자 한다.

Table 5 Results of base dimple model

[unit : MPa]

Description	Max. von mises stress	Max. contact pressure
Circle	10.416	11.981
Rectangle	12.019	16.290
Triangle	8.809	11.710
Trapezoid	9.868	12.682

2.7. 반응표면분석법

반응표면분석법(Response Surface Methodology) 중 중심합성 내접설계에 대한 원형 덩플의 계획은 Table 6과 같으며, 반응치 최대등가응력과 최대접촉압력은 유한요소해석으로 값을 얻은 결과이다. 내접설계를 선택한 이유는 수준의 범위를 초과할 수 없기 때문이다. 실험횟수는 $2n$ 요인실험의 실험 점과 $2na$ 개의 축 점 그리고 $nc \geq 1$ 개의 중심점으로 이루어져 총 실험 점의 수는 $2n+2na+nc$ 개이다. 외접설계의 경우 많은 중심점에서의 실험이 효과적이며,

Table 6 Central composite design of circle dimple

Std. Run	D_s (mm)	D_h (mm)	D_p (%)	Max. von mises stress (MPa)	Max. contact pressure (MPa)
1	0.05	0.025	20	10.416	11.981
2	0.15	0.025	20	8.561	13.732
3	0.05	0.075	20	13.707	11.878
4	0.15	0.075	20	10.339	18.286
5	0.05	0.025	40	11.172	11.442
6	0.15	0.025	40	10.367	15.717
7	0.05	0.075	40	16.539	10.954
8	0.15	0.075	40	13.625	16.990
9	0.05	0.050	30	11.682	12.552
10	0.15	0.050	30	12.084	16.209
11	0.10	0.025	30	11.372	15.987
12	0.10	0.075	30	14.504	16.793
13	0.10	0.050	20	12.818	20.764
14	0.10	0.050	40	14.845	20.279
15	0.10	0.050	30	13.780	19.346

보통 $nc=3\sim 5$ 회, 내접설계의 경우 $nc=1\sim 2$ 회로 충분하다. 여기서, n 은 인자의 수가되며, na 는 축 점의 수, nc 는 중심점의 수이다¹²⁾.

실험 결과는 Table 7, 8과 같다. 통계적으로 유의한 인자는 등가응력의 경우 $D_s, D_h, D_p, D_s * D_s$ 이며, 접촉압력의 경우 $D_s, D_h, D_s * D_s, D_h * D_h, D_p * D_p, D_s * D_h$ 이다. D_p 의 경우 0.619로 유의하지 않지만, 교호효과가 존재하기 때문에 제거할 수 없는 인자이다. 각 요인의 영향력을 판단하는 기준은 유의확률인 P값의 크기로 결정한다. 유의하다, 유의하지 않다는 것은 P값과 유의수준인 $\alpha(0.05)$ 의 값으로 비교하는데, P값이 0.05보다 작다면 유의하다는 것을 의미한다¹³⁾. 여기서, 계수(coefficient)는 효과(effect)를 반으로 나눈 값이며, T 값은 검정 통계량으로 계수를 표준오차로 나눈 값이다. 반응치에 대한 수학적 모형은 코드화된 단위로 식(7), (8)과 같이 표현할 수 있다.

Table 7 Circle CCD results of von mises stress

Term	Coefficient	SE coefficient	T	P
Constant	13.4638	0.3821	35.239	0.000
D_s	-0.8540	0.2702	-3.161	0.010
D_h	1.6826	0.2702	6.228	0.000
D_p	1.0707	0.2702	3.963	0.003
$D_s * D_s$	-1.6146	0.4679	-3.450	0.006

$$YVM = 13.4638 - 0.854 D_s + 1.6826 D_h + 1.0707 D_p - 1.6146 D_s^2 \quad (7)$$

Table 8 Circle CCD results of contact pressure

Term	Coefficient	SE coefficient	T	P
Constant	18.8936	0.4113	45.935	0.000
D_s	2.2127	0.2420	9.144	0.000
D_h	0.6042	0.2420	2.497	0.041
D_p	-0.1259	0.2420	-0.520	0.619
$D_s * D_s$	-4.3999	0.4772	-9.220	0.000
$D_h * D_h$	-2.3904	0.4772	-5.009	0.002
$D_p * D_p$	1.7411	0.4772	3.648	0.008
$D_s * D_h$	0.8023	0.2706	2.965	0.021

$$YCP = 18.8936 + 2.2127 D_s + 0.6042 D_h - 0.1259 D_p - 4.3999 D_s^2 - 2.3904 D_h^2 + 1.7411 D_p^2 + 0.8023 D_s * D_h \quad (8)$$

원형 딥플의 방법처럼 사각, 삼각, 사다리꼴 딥플에 대해서도 수학적 모형을 얻었으며, 사각의 경우 식(9), (10)과 같다.

$$YVM=10.9091-1.7116D_s+1.026D_h+0.3226D_p+0.6372D_s*D_p+0.8077D_h*D_p \quad (9)$$

$$YCP=18.7782+1.6037D_s-0.4774D_h-0.9539D_p-4.6523D_s^2+3.3642D_h^2-2.6053D_p^2 \quad (10)$$

삼각 딥플은 식(11), (12), 사다리꼴은 식(13), (14)와 같다.

$$YVM=11.1049-1.0276D_s+1.5241D_h+0.5556D_p-1.2093D_s^2-0.9279D_s*D_h \quad (11)$$

$$YCP=14.253+0.3209D_s+0.4397D_h-0.9349D_p-4.3301D_s^2+2.5609D_h^2 \quad (12)$$

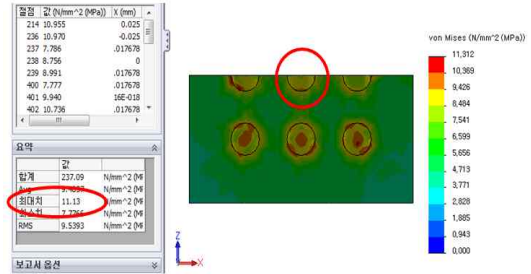
$$YVM=11.1896-1.2992D_s+0.6924D_h+0.6498D_p-1.9502D_s^2+1.364D_h^2 \quad (13)$$

$$YCP=19.0616+0.1739D_s+1.4093D_h-0.8108D_p-3.3855D_s^2-3.063D_p^2 \quad (14)$$

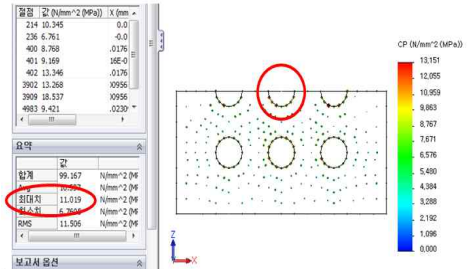
2.8. 반응최적화

중심합성계획법으로 얻은 반응치의 수학적 모형을 가지고, 통계프로그램인 MINITAB v.14의 반응최적화 도구를 사용하여 최적의 인자를 얻었으며, 원형 딥플의 경우 Table 9, Fig. 9와 같다. 피치는 0.092mm의 값을 갖는다. 최적의 인자로 재해석한

결과 최대 등가응력은 11.130MPa, 최대 접촉압력은 11.019MPa로 각각 92.4%, 99.7%의 정확도를 나타내었다.



(a) Max. von mises stress



(b) Max. contact pressure

Fig. 9 FEM results of circle dimple

사각 딥플의 결과는 Table 10, Fig. 10과 같다. 피치는 0.079mm의 값을 갖는다. 최적의 인자로 재해석한 결과 최대 등가응력은 11.352MPa, 최대 접촉압력은 9.3884MPa로 각각 97.2%, 98.6%의 정확도를 나타내었다.

Table 9 Results of response optimization for circle

최적	Hi	Ds (mm)	Dh (mm)	Dp (%)
D	Cur	0.150	0.0750	40.0
0.99997	Lo	[0.050]	[0.0250]	[23.1541]
		0.050	0.0250	20.0

V.M (MPa)				
최소값				
y =10.2877				
d =1.0000				
C,P (MPa)				
최소값				
y =10.9908				
d =0.99993				

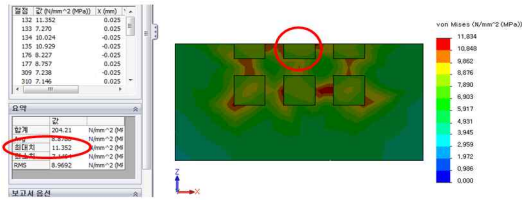
D _s (mm)	D _h (mm)	D _p (%)	Max. von mises stress (MPa)	Max. contact pressure (MPa)
0.05	0.025	23.1541	10.2877	10.9908

Table 10 Results of response optimization for rectangle

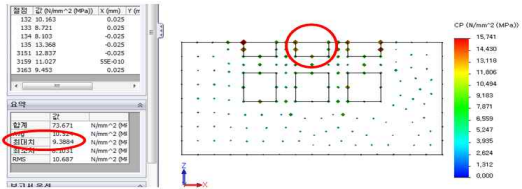
최적	Hi	Ds (mm)	Dh (mm)	Dp (%)
D	Cur	0.150	0.0750	40.0
0.90400	Lo	[0.050]	[0.0415]	[40.0]
		0.050	0.0250	20.0

V.M (MPa)				
최소값				
y =11.680				
d =1.0000				
C,P (MPa)				
최소값				
y =9.5183				
d =0.81722				

D _s (mm)	D _h (mm)	D _p (%)	Max. von mises stress (MPa)	Max. contact pressure (MPa)
0.05	0.0415	40	11.68	9.5183



(a) Max. von mises stress

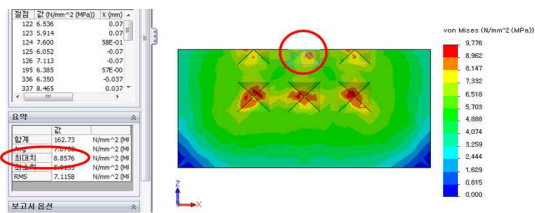


(b) Max. contact pressure

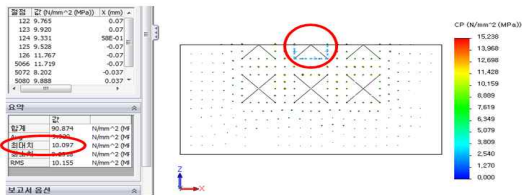
Fig. 10 FEM results of rectangle dimple

Table 11 Results of response optimization for triangle

최적	Hi	Ds (mm)	Dh (mm)	Dp (%)
D	Cur	0.150	0.0750	40.0
1.0000	Lo	0.050	[0.0383]	[40.0]
V.M (MPa)				
최소값				
y = 9.1454				
d = 1.0000				
C.P (MPa)				
최소값				
y = 9.6612				
d = 1.0000				
D_s (mm)	D_h (mm)	D_p (%)	Max. von mises stress (MPa)	Max. contact pressure (MPa)
0.15	0.0383	40	9.1455	9.6612



(a) Max. von mises stress



(b) Max. contact pressure

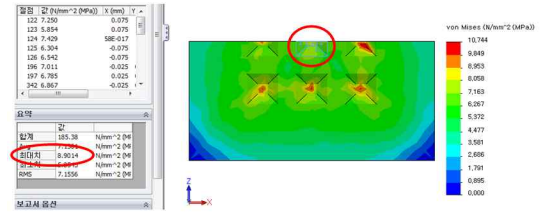
Fig. 11 FEM results of triangle dimple

삼각 덩플의 결과는 Table 11, Fig. 11과 같다. 피치는 0.237mm의 값을 갖는다. 최적의 인자로 재해석한 결과 최대 등가응력은 8.8576MPa, 최대 접촉압력은 10.097MPa로 각각 96.9%, 95.7%의 정확도를 나타내었다.

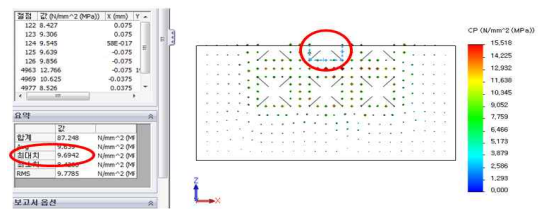
사다리꼴 덩플의 결과는 Table 12, Fig. 12와 같다. 피치는 0.237mm의 값을 갖는다. 최적의 인자로 재해석한 결과 최대 등가응력은 8.9014MPa, 최대 접촉압력은 9.6942MPa로 각각 97.2%, 91.1%의 정확도를 나타내었다.

Table 12 Results of response optimization for trapezoid

최적	Hi	Ds (mm)	Dh (mm)	Dp (%)
D	Cur	0.150	0.0750	40.0
0.99657	Lo	[0.150]	[0.0263]	[40.0]
V.M (MPa)				
최소값				
y = 9.1595				
d = 1.0000				
C.P (MPa)				
최소값				
y = 10.6402				
d = 0.99314				
D_s (mm)	D_h (mm)	D_p (%)	Max. von mises stress (MPa)	Max. contact pressure (MPa)
0.15	0.0263	40	9.1595	10.6402



(a) Max. von mises stress



(b) Max. contact pressure

Fig. 12 FEM results of trapezoid dimple

최적형상 해석결과 Fig. 13과 같이 등가응력과 접촉압력을 모두 고려한다면, 삼각형태의 덩플이 가장 우수하다. 여러 덩플 형상 중 누유의 위험성도 가장

낮고, 마모가 덜 되는 딤플 형상으로 판단된다. 등가응력과 접촉압력을 모두 고려했을 경우 주인자의 최적수치는 딤플 크기 0.15mm, 딤플 깊이 0.0383mm, 딤플 밀도 40%이다. 대부분 밀도가 높은 형태가 유리한 결과를 나타내었다.

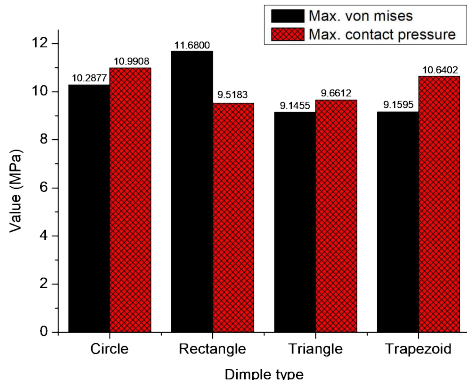


Fig. 13 Results of response optimization for dimple

4. 결론 및 토의

시일 표면의 딤플은 대표적으로 원형, 사각, 삼각, 사다리꼴 형태를 가지고 있으며, FEM을 통해 응력 분포를 해석하였다. 또한 실험계획법을 통해 딤플 폭 또는 직경, 깊이, 피치 간격을 인자로 어떠한 형태가 가장 효과적인지 연구하였다. 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 딤플은 밀도와 연관성이 깊은데 밀도는 딤플의 직경 또는 가로, 세로 길이, 피치의 연관관계를 파악해야한다. 이에 대한 원형, 사각 형태에 대해 밀도 공식을 유도하였으며, 피치 공식, 딤플 크기 공식도 정리하였다.
- 2) 최적형상 해석결과 등가응력과 접촉압력을 모두 고려한다면, 삼각형태의 딤플이 가장 우수한 결과를 나타내었다. 최적인자는 딤플 크기 0.15mm, 딤플 깊이 0.0383mm, 딤플 밀도 40.0%이며, 최대 등가응력은 9.1455MPa, 최대 접촉압력은 9.6612MPa의 값을 나타낸다. 이는 다른 형태의 딤플보다 크랙에 의한 파손 위험성이 가장 낮으며, 접촉압력이 낮아 마찰에 의한 마모가 낮을 것으로 판단된다.
- 3) 딤플 시일에 대해 대표적인 원형, 사각, 삼각, 사다리꼴 형태의 해석과 최적형상을 실험계획법을 적용하여 분석하였으나, 유체해석을 포함한 연구가

필요하다. 또한 실제 딤플 시일에 대한 실험적인 연구가 필요하며, 진행방향에 대해 경사진 딤플 형상도 연구되어야 할 과제이다.

후기

본 연구는 지식경제부 우수 제조 기술연구센터 ATC 사업의 지원을 받아 수행한 연구 결과임. (과제번호:10035983)

참고문헌

- 1) Etsion, I. and Burstein, L., "A Model for Mechanical Seals with Regular Micro Surface Structure", *Trans. of Tribology*, Vol. 39, No. 3, pp. 677-683, 1996.
- 2) Etsion, I., "Analysis and Experimental Investigation of Laser-Textured Mechanical Seal face", *Trans. of Tribology*, Vol. 42, pp. 511-516, 1999.
- 3) Olver, A. V., Fowell, M. T., Spikes, H. A. and Pegg, I. G., "Inlet Suction', a Load Support Mechanism in Non-convergent, Pocketed, Hydrodynamic Bearings", *Proc. IMechE, J. of Eng. Tribology*, Vol. 220, pp. 105-108, 2006.
- 4) Hwang, Y, G., "A Study on the Lubrication Characteristics of Micro-Dimpled Parallel Thrust Bearing", Master Thesis, Gyeongsang National University, pp. 1-69, 2010.
- 5) Kim, S, G., Song, K, C., Kim, S, B. and Chae, Y, H., "Effects of Surface Texturing under Grease Lubrication", *Journal of the KSTLE*, Vol. 24, No. 5, pp. 234-240, 2008.
- 6) Hong, S, H., "Numerical Study on Hydrodynamic Lubrication Characteristics of Laser Textured Surfaces with Micro Dimples", Master Thesis, Chungang University, pp. 1-73, 2009.
- 7) Chae, Y, H. and Kim, S, S., "Influence on a density of micro-scale dimple for surface texturing on friction control", *Autumn*

- conference proceeding of the KSME, pp. 945-950, 2004.
- 8) Chae, Y, H, and Kim, S, S., “The effect of size on friction property of micro-dimple surface to fabricate by photolithography”, Autumn conference proceeding of the KSPE, pp. 50-55, 2004.
- 9) Kim, J, Y., “Shape Design of Thermoplastic Polyurethane Seal for Air Cylinder using the Design of Experiment”, Master Thesis, Korea Polytechnic University, pp. 1-16, 2011.
- 10) Park, T, J, and Lee, J, O., “Lubrication Characteristics of Micro-Textured Slider Bearing : Effect of Dimple Density”, Trans. Kor. Soc. Mech. Eng. A, Vol. 37, No. 4, pp. 437-442, 2013.
- 11) Chae, Y, H, and Kim, S, S., “Influence on a density of micro-scale dimple for surface texturing on friction control”, Autumn conference proceeding of the KSME, pp. 945-950, 2004.
- 12) ELETEC, MINITAB 15® for DOE, pp. 225~307, 2008.
- 13) Yoo, M. H., “A Study on Design Optimization and Stress Relaxation Phenomenon on Lip Seal”, Ph.D. Thesis, Graduate School of Knowledge based Technology and Energy, Korea Polytechnic University, pp. 54-73, 2009.

저자 소개

유 대 원(Dae-Won Yoo)

[정회원]



- 2012년 8월 : 한국산업기술대학교 지식기반기술·에너지대학원 기계시스템설계공학과 (공학박사)
- 2017년 6월~현재: 한국폴리텍대학 창원캠퍼스 컴퓨터응용기계설계과, 조교수

< 관심분야 >

CAE해석, 최적설계, 기계시스템설계

사출/압축 공정과 인서트 오버몰딩을 이용한 탄소복합소재 성형에 대한 연구

정의철^{1,2} · 윤경환² · 홍석관¹ · 이상용¹ · 이성희[†]
한국생산기술연구원 형상제조연구부^{1,†}
단국대학교 기계공학과²

A study on carbon composite fabrication using injection/compression molding and insert-over molding

Eui-Chul Jeong^{1,2} · Kyung-hwan Yoon² · Seok-Kwan Hong¹ · Sang-Yong Lee¹ · Sung-Hee Lee[†]

Department of Shape Manufacturing R&D, Korea Institute of Industrial Technology^{1,†}

Department of Mechanical Engineering, Dankook University²

(Received August 06, 2020 / Revised December 23, 2020 / Accepted December 31, 2020)

Abstract: In this study, forming of carbon composite parts was performed using an injection/compression molding process. An impregnation of matrix is determined by ability of wet and flow rate between the matrix and reinforcement. The flow rate of matrix passing through the reinforcements is a function of permeability of reinforcement, a viscosity of matrix and pressure gradient on molding, and the viscosity of the matrix depends on the mold temperature, molding pressure and shear strain of matrix. Therefore, compression molding experiment was conducted using a heating mold in order to confirm the possibility of matrix impregnation. The impregnation of the matrix through the porosities between the woven yarns was confirmed by the cross-sectional SEM image of compression molded parts. An injection molding process was also performed at a short cycle time, high molding pressure and low mold temperature than those of compression experiment conditions. Deterioration of impregnation on the surface of molded parts were caused by these injection conditions and it could be the reason of decreasing the maximum tensile strength. In order to improve impregnation of matrix on the surface, injection/compression molding and insert-over molding were applied. As a result of applying injection/compression molding and insert-over molding, it was shown that the improvement of impregnation on the surface and the maximum tensile strength was increased about 2.8 times than the virgin matrix.

Key Words: Thermoplastic, Impregnation, Carbon composite, Compression molding, Injection molding, Insert-over molding

1. 서 론

탄소복합소재는 사용되는 모재와 보강재의 종류에 따라 다양하게 구분된다. 그 중 연속섬유를 사용하는 고분자 탄소복합소재는 비강도와 비강성이 우수하여 금속대체 경량화 소재로 각광받고 있다^{1,3}. 연속섬유 고분자 탄소복합소재는 모재의 종류에 따라 열경화성 탄소섬유강화 플라스틱과 열가소성 플

라스틱으로 나뉘는데 그 중 열가소성 탄소섬유강화 플라스틱은 모재의 경화시간이 필요 없고 재활용이 가능하다는 장점이 있어 높은 생산성을 지닐 수 있다^{4,5}. 그러나 열가소성 모재의 높은 용융온도와 점도로 인해 보강재와 모재의 함침이 어려워 기존의 탄소섬유에서 복합소재 성형품으로 제작하는 방식인 RTM이나 필라멘트 와인딩(Filament winding) 방식을 적용하기 어렵다. 이에 대부분의 열가소성 탄소섬유 강화 플라스틱은 탄소섬유 원사와 모재를 함침 시켜 중간재(Prepreg)를 만드는 공정과 중간재를 2차 가공하여 제품을 성형하는 과정으로 나뉘진

1. 한국생산기술연구원 뿌리산업기술연구소 형상제조연구부
† 교신저자: 한국생산기술연구원 뿌리산업기술연구소 형상제조연구부
E-mail: birdlee@kitech.re.kr

다. 중간재는 탄소섬유 원사를 직물 형태로 직조(Weaving) 전에 모재를 함침 시키는 인발(Pultrusion) 공정이나 롤투롤(Roll-to-Roll) 공정 등으로 파우더 또는 필름 형태의 모재를 보강재에 함침 시키는 방법으로 제작된다. 제작된 중간재는 제품에 적용할 수 있는 형상으로 2차 가공 후 열 성형(Thermofoming)을 거쳐 제품으로 제작 된다⁶⁻¹⁰⁾. 복합소재 성형품은 위와 같이 여러 분할된 과정을 통해 제작되며 이러한 분할된 과정들은 많은 제반시설을 요구해 복합소재의 가격상승 및 다양한 제품군에 대한 복합소재 시장진입의 어려움으로 나타나게 된다.

이에 본 연구에서는 다양한 제품군에 중간재 제작이 필요 없는 탄소복합 소재 적용을 위하여 사출 성형용 열가소성 고분자를 직조되어 있는 보강재에 함침 시키는 연구¹¹⁾와 사출성형 공정을 이용하여 복합소재를 제작하는 선행연구¹²⁾를 참고하여 사출/압축 공정과 인서트 오버몰딩을 이용한 탄소복합소재 제작에 대한 연구를 수행하였다..

2. 본 론

2.1. 단순 압축 성형 실험

열가소성 복합소재는 직조된 섬유를 통과하는 모재의 유량과 점도, 보강재의 투과율 및 모재와의 젖음성에 의하여 함침 되어 지는데¹³⁻¹⁵⁾, 이 과정에서 모재의 점도는 성형온도, 성형압력, 모재의 전단 변형률에 따라 변하게 된다. 이에 높은 용융온도와 점도를 가지는 사출 성형용 열가소성 펠렛과 직조된 섬유 보강재 사이의 함침 가능성에 대한 선행 연구¹¹⁾를 토대로 시험에 사용할 보강재와 모재를 선정하고, Fig. 1과 같이 가열 금형을 이용한 단순 압축 실험을 통해 복합소재를 제작하였다. 실험에 사용되는 보강재는 Table 1과 같이 평직 형태로 직조된 탄소 섬유로 각각 씨실과 날실이 약 3천개의 섬유 필라멘트로 구성되어 있으며, 사용된 모재는 사출성형용 PP(Polypropylene)로 밀도, MFR(Melting flow rate), 항복응력에 대한 물성정보를 Table 2에 나타내었다. 단순 압축 성형품의 모재의 함침 여부를 판단하기 위하여 제작된 성형품에 대하여 단면 SEM 측정을 진행하였으며, 측정결과 Fig. 2와 같이 원사 내의 섬유 필라멘트 영역까지 완벽한 함침은 일어나지 않았지만 직조된 원사 사이의 공극에 의한 함침이 일어났음을 확인할 수 있다.

2.2. 일반 사출 성형 실험

사출 성형을 이용한 복합소재 성형 공정은 단순 압축 실험과 다르게 Fig. 3(a)과 같이 비교적 낮은

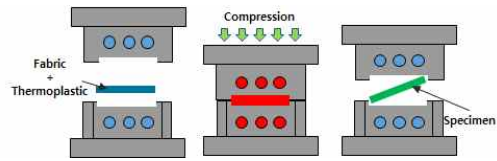


Fig. 1 Schematic of compression molding(CM) process

Table 1 Properties of carbon fabric

Model	CF 3327
Type of yarn	CARBON 3K
Specific weight (g/m ²)	208 ± 12
Density (count/in)	13
Thickness (mm)	0.27 ± 0.05
Average area of porosities (mm ²)	0.25
Weave type	Plain

Table 2 Properties of matrix (PP)

Characteristics	Test method	Value
Density (g/cm ³)	ASTM D1505	0.9
MFR (250 °C, 2.16kg) (g/10min)	ASTM D1238	70
Tensile strength at yield (MPa)	ASTM D638	26

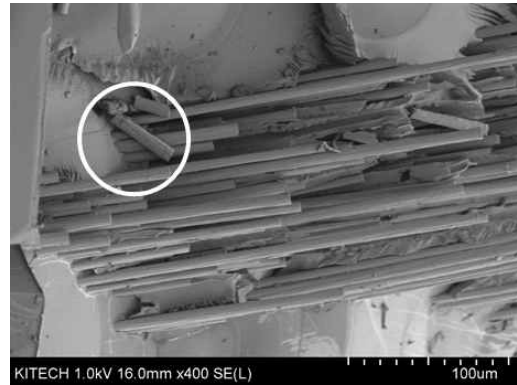


Fig. 2 Cross sectional SEM image of compression molded carbon composites

금형 온도에서 빠른 성형 시간과 높은 성형 압력에서 성형품이 제작된다. 금형 온도와 성형 시간은 모재의 점도에 영향을 주며, 보강재를 통과하는 모재의 유량은 모재에 작용하는 성형 압력과 모재의 점도에 영향을 받으므로 사출 성형 공정을 이용하여 제작한 복합소재는 단순 압축 실험과 다른 성형 결과를 나타내게 된다. 사출 성형 공정에 복합소재 성형을 적용시킨 선행 연구¹²⁾ 결과를 살펴보면 Fig. 4와 같이 성형품 단면에는 모재와 보강재가 함침되어 있지만 성형품 표면에는 모재의 함침이 충분치

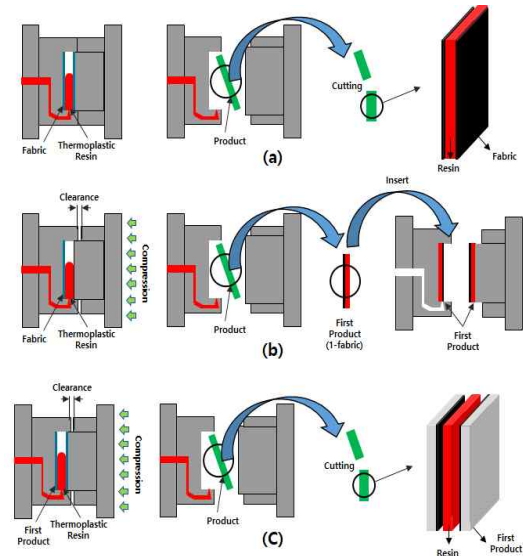


Fig. 3 Schematic of injection molding process : (a) Injection molding(IM), (b) Injection compression molding(ICM), (c) : Insert-over molding(IOM)

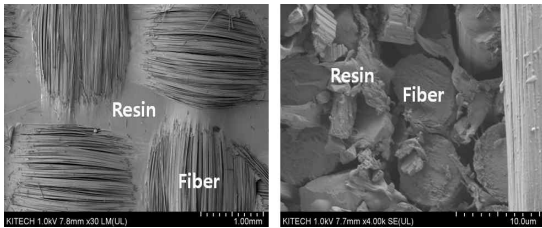


Fig. 4 Cross section and surface SEM image of injection molded carbon composites^{11,12)}

못한 것을 확인할 수 있다. 이는 빠른 성형 시간에도 불구하고 사출 성형 금형은 비교적 낮은 금형 온도를 갖기 때문에 성형과정에서 금형 벽면에서의 모재의 급속한 점도 증가에 의한 함침 저하 현상이라고 생각할 수 있다. 복합소재의 물성은 일반적으로 모재와 보강재 사이의 결합력과 식 (1)과 같이 혼합물 규칙을 따르는데^{16,17)} 성형품 표면의 함침저하 현상은 모재와 보강재 사이의 결합력을 감소시켜 복합소재 성형품의 강도 저하 현상을 유발하게 된다.

$$E_{composite} = v_f E_f + v_m E_m \quad (1)$$

E : Material property

v : Material volume fraction

Table 3 Comparison of the tensile test results of injection and compression molded carbon composites^{11,12)}

Name	Fiber volume fraction	Maximum tensile strength (MPa)	STDEV
Virgin resin	0.000	28.41	1.40
Sample 1	0.256	84.60	3.09
Sample 2	0.367	144.65	2.71
Sample 3	0.480	179.27	0.60
Sample 4 (IM)	0.322	35.16	2.10

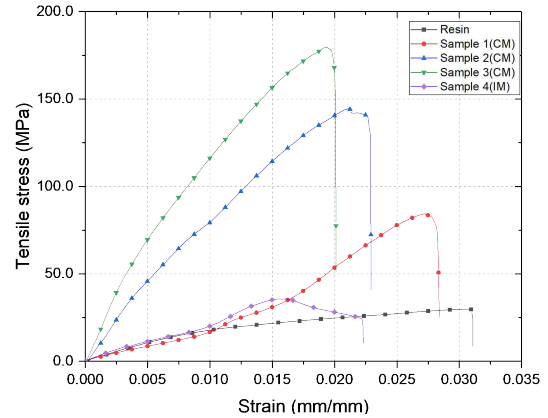


Fig. 5 Comparison of the stress-strain curve of injection molded and compress molded carbon composites^{11,12)}

Table 3와 Fig. 5에 모재, 단순 압축 성형품(CM), 표면함침저하 현상이 발생한 사출 성형품(IM)의 인장 시험 결과를 비교하여 나타내었다. 성형품의 응력-변형률 곡선과 최대 인장강도를 비교해 보면 복합소재의 섬유 체적분율이 증가할수록 최대 인장강도와 영률이 증가하는데, 단순 압축 성형품(CM)의 섬유 체적분율 0.367 일 때의 최대 인장강도가 144.65 MPa 인 것에 비하여 표면 함침저하 현상이 발생한 사출 성형품(IM)의 경우 섬유 체적분율 0.322 일 때의 최대 인장강도가 35.16 MPa에 불과함을 알 수 있다.

2.3. 사출/압축 성형 & 인서트 오버몰딩 성형 실험

사출 성형 공정을 이용한 복합소재 제작 시 발생하는 표면 함침저하 현상을 개선하기 위해서는 사출 금형 벽면에서 모재의 점도가 증가하지 않도록 금형의 온도를 수지의 용융온도와 비슷한 수준으로 가열하여 성형을 진행해야 한다. 그러나 이 경우 표면 함침률 개선을 기대할 수 있으나 높은 금형 온도는 제품 생산 사이클 시간에 큰 영향을 미치게 되므로 본 연구에서는 Fig. 3와 같이 인서트 몰딩을 이용하여 두 번에 걸쳐 복합소재 성형품을 제작하였다.

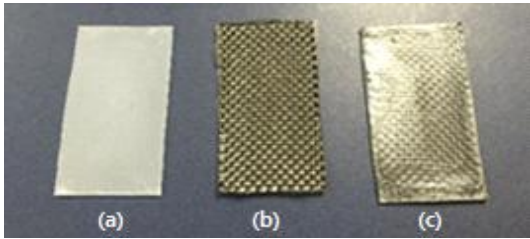


Fig. 6 Pictures of samples made by different process : (a) Virgin matrix, (b) Injection molding(IM), (c) Insert-over molding(IOM)

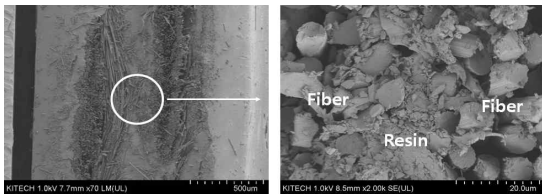


Fig. 7 Cross section and surface SEM image of insert-over molded carbon composites

또한 사출 성형 공정은 성형 과정에서 모재가 캐비티 내로 충전될 때 캐비티 내의 성형 압력이 게이트로부터 멀어질수록 낮아지게 되고 이는 성형품 말단부의 함침 저하 현상을 유발할 수 있으므로 성형품에 성형 압력을 균일하게 주기 위하여 일반 사출성형 공정이 아닌 사출/압축 공정(ICM : Injection compression molding)을 적용하여 복합소재를 제작하였다. 사출/압축 공정을 이용하여 Fig. 3(b)와 같이 1차 성형품을 제작한 후 표면 함침률이 낮은 성형품 표면을 금형 캐비티 중심부에 오도록 다시 인서트 하여 Fig. 3(c)와 같이 복합소재를 제작하였으며, 인서트 오버 몰딩을 이용하여 제작한 성형품 사진을 Fig. 6에 나타내었다. 사출/압축 성형공정과 인서트 오버몰딩을 이용하여 제작한 성형품에 대하여 단면 SEM 측정을 진행하였으며, 측정결과 Fig.7과 같이 2개의 1차 성형품 사이로 모재가 함침 되어 있음을 확인할 수 있었다. 제작한 성형품의 표면 함침 개선에 따른 성형품의 인장강도 변화를 확인하기 위하여 인장시험을 진행하였다.

인장시험 결과 Table 4와 같이 0.345의 섬유 체적분율을 가지며 사출/압축 성형 공정을 적용하여 성형한 성형품(ICM)의 최대 인장강도는 약 54.16 MPa이며, 0.334의 섬유 체적분율을 가지며 인서트 오버몰딩을 적용한 성형품(IOM)의 최대 인장강도는 약 79.90 MPa임을 확인할 수 있다. 모재와 사출/압축성형 공정을 적용한 성형품(ICM), 인서트 오버몰딩을

Table 4 Comparison of the tensile test results of injection/compression molding and insert-over molded carbon composites

Name	Fiber volume fraction	Maximum tensile strength(MPa)	STDEV
Virgin resin	0.000	28.41	1.40
Sample 4	0.345	54.16	0.70
Sample 5 (over molding)	0.334	79.90	0.59

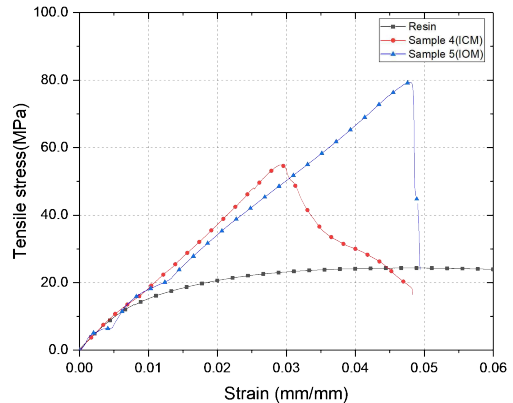


Fig. 8 Comparison of the he stress-strain curve of injection /compression molding and insert-over molded carbon composites

적용한 성형품(IOM)의 응력-변형률 선도를 비교하여 Fig. 8에 나타내었으며, 두 성형품 모두 비슷한 영률을 지니지만 최대인장강도에서 차이를 보임을 알 수 있다.

3. 결론

본 연구에서는 기존의 열가소성 탄소섬유 플라스틱의 제조방법과는 다르게 모재가 함침 되어 있지 않은 직조된 섬유를 이용하여 사출/압축 성형과 인서트 오버몰딩 공정을 통해 중간재 없이 복합소재 성형품을 제작하였다. 사출 성형 공정에 복합소재 성형을 적용하기에 앞서 열가소성 모재의 함침 가능성을 판단하기 위하여 가열 금형을 이용한 단순 압축 실험을 진행하였으며, 성형품의 단면 SEM 측정을 통해 섬유 원사 사이의 공극을 통한 모재의 함침이 일어났음을 확인할 수 있었다. 사출 성형 공정을 이용한 복합소재 성형은 단순 압축 실험과 다르게 빠른 성형 시간과 높은 성형 압력, 비교적 낮은 금형 온도에서 성형품이 제작되고, 성형 과정에서 성형 압력이 균일하지 않기 때문에 성형품 표면에

모재의 함침 저하 현상이 발생하게 된다. 이를 개선하기 위하여 사출/압축 성형과 인서트 오버몰딩 공정을 적용하여 성형품을 제작하고 인장시험을 통하여 공정에 따른 성형품의 인장강도 변화를 확인하였다. 공정 별 성형품의 인장시험 결과 사출/압축 공정만을 이용한 성형품(ICM)의 경우 모재의 최대 인장강도 28.41 MPa 보다 약 1.9배 큰 54.16 MPa의 최대 인장강도를 가졌으며, 인서트 오버몰딩 공정을 추가로 적용한 성형품(IOM)의 경우 약 2.8배 큰 79.90 MPa의 최대 인장강도를 가지는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 인서트 오버 몰딩의 경우 중간재는 사용하지 않지만 2번의 성형 공정을 거쳐야 하며, 0.367의 섬유 체적분율을 가지는 단순 압축 성형품(CM)의 최대 인장강도가 144.65 MPa 인 것에 비하여 0.334의 섬유 체적분율을 가지는 오버몰딩 성형품(IOM)의 경우 79.90 MPa로 약 0.55배 수준에 불과하다. 이러한 점은 성형품의 표면 함침률 개선뿐만 아니라 복합소재 내부의 보강재와 모재 사이의 추가적인 함침 개선이 필요하며 이에 대하여 추가적인 연구가 이루어져야 할 것이다.

후기

본 연구는 한국생산기술연구원 중소중견기업 생산기술 실용화 및 기술지원사업의 신시장창출지원사업(PJE20028)에 의해 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Cole, G. S. and Sherman, A. M., "Light weight materials for automotive applications", Mater. Charact, Vol. 35, pp. 3, 1995.
- 2) Johnston, N. J. and Hergenrother, P. M., "High Performance Thermoplastic: A Review of Neat Resin and Composite Properties", SAMPE symp, Proc, 32nd Int, pp. 1400, 1987.
- 3) K. S. Kim, K. M. Bae, S. Y. Oh, M. K. Seo, K. Seo, C. G. Kang, and S. J. Park, "Trend of Carbon Fiber-reinforced Composites for Lightweight Vehicles", Elastomers and Composite, Vol. 47, No. 1, pp. 65-74, 2012.
- 4) S. H. Lim, "High Performance Thermoplastic Composites", Polymer Science and Tecnology, Vol

- 6, No. 5, pp. 451-458, 1995.
- 5) Yip, H. L. H., Pickering, S. J. and Rudd, C. D., "Characterisation of carbon fibres recycled from scrap composites using fluidised bed process", Plast. Rubber Compos. Process Appl., Vol. 31, pp. 278, 2002.
- 6) S. T. Kim, "Development Trend for Thermoplastic Polymer Composite", Polymer Science and Technology, Vol. 24, No. 1, pp. 25-28, 2013.
- 7) Korean Institute of Science and Technology, "Carbon fiber composite manufacturing technology", 2011.
- 8) Lim, T. C., Ramakrishna, S. and Shang, H. M., 1999, "Axisymmetric Sheet Forming of Knitted Fabric Composite by Combined Stretch Forming and Deep Drawing", Composites: Part B, Vol. 30, pp. 495-502, 1999.
- 9) Nakamura, Y. and Ohata, T., "The Effect of Newly Developed Blank Holder on Press Forming of Glass-Cloth Reinforced Thermoplastic Sheet", Key Engineering Materials, Vol. 137, pp. 40-46, 1998.
- 10) Qin, S., Shang, H. M., Tay, C. J. and Mo, J. X., 1996, "An the Extent of Stretching during Deep Drawing", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 59, No 4, pp. 386-390, 1996.
- 11) E. C. Jeong, K. H. Yoon, J. S. Kim, and S. H. Lee, "A Study on the Production of Carbon Fiber Composites using Injection-molding Grade Thermoplastic Pellets", Transaction of Material Processing, Vol. 25, No. 6, pp. 402-408, 2016.
- 12) E. C. Jeong, J. S. Kim, J. E. Son, K. H. Yoon, and S. H. Lee, "A Study of Mold Technology for Manufacturing of CFRIP Parts", J. Korea Society of Die & Mold Engineering, Vol. 11, No. 3, pp. 25-28, 2017.
- 13) I. Y. Chang, and J. K. Lees, "Recent Development in Thermoplastic Composites : A Review of Matrix Systems and Processing Methods", Journal of Thermoplastic Composite Materials, Vol. 1, No. 3, pp. 277-296, 1988.
- 14) A. G. Gibson, and J. A. Manson, "Impregnation technology for thermoplastic matrix composites", Journal of Composite Manufacturing, Vol. 3, No. 4, pp. 223-233, 1992.
- 15) Stephen Whitaker, "Flow in Porous Media I : A Theoretical Derivation of Darcy's Law", Transport in Porous Media 1, pp. 3-25, 1986
- 16) Ramakrishna, S., Hamada, H., Cuong, N. K. and Macekawa, Z., "Mechanical Properties of Knitted

Fabric Reinforced Thermoplastic Composites”, Proceeding of the 10th ICCM, Vol. 4, pp. 245-252, 1995.

- 17) Hussain, M., Nakahira, A., Nishijima, S. and Niihara, K., “Evaluation of mechanical behavior of CFRC transverse to the fiber direction at room and cryogenic temperature”, Composites: Part A, Vol. 31, pp. 173, 2000.

저자 소개

정의철(Eui-Chul Jeong) [학생회원]



- 2014년 : 단국대학교 기계공학 학사
- 2016년 : 단국대학교 대학원 기계공학 석사
- 2016년 3월 ~ 현재 : 단국대학교 대학원 기계공학과 박사과정

< 관심분야 >
사출성형 및 금형

윤경환(Kyung-Hwan Yoon)



- 1980년 : 서울대학교 기계공학 학사
- 1982년 : 서울대학교 대학원 기계공학 석사
- 1989년 : 미코넬대학교 기계공학 유체역학 박사
- 1993년 ~ 현재 : 단국대학교 기계공학과, 교수

< 관심분야 >
사출성형(광학제품), 환경유체

홍석관(Seok-Kwan Hong) [정회원]



- 2015년 02월 : 단국대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2004년 03월 ~ 현재 : 한국생산기술연구원 형상제조 연구부문, 선임연구원

< 관심분야 >
사출금형 및 공정 해석, 마이크로/나노 성형

이상용(Sang-Yong Lee)



- 1985년 5월~1991년 9월 : (주) LG 전자
- 1991년 10월~현재 : 한국생산기술연구원 형상제조연구부문, 수석연구원

< 관심분야 >
사출금형 및 공정기술, 금형 생산 기술

이성희(Sung-Hee Lee) [정회원]



- 1998년 8월 : 홍익대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2002년 7월~2006년 12월 : 한국생산기술연구원 선임연구원
- 2010년 12월~2014년 1월 : 한국생산기술연구원 부천금형센터 센터장
- 2014년 1월~2015년 3월 : 한국생산기술연구원 한국금형센터 그룹장
- 2007년 1월~현재 : 한국생산기술연구원 금형기술그룹, 수석연구원

< 관심분야 >
고분자성형 및 금형, 급속가열, 복합재료, 전산모사/최적화

가습 입자를 활용한 고효율 난방 시스템 개발

이정원[†] · 홍경보¹

한국생산기술연구원 형상제조연구부[†] · (주)미로¹

Development of high-efficiency heating system using humidifying particles

Jeong-Won Lee[†] · Kyung-Bo Hong¹

Research Institute of Advanced Manufacturing & Materials Technology Shape Manufacturing R&D Department.
Korea Institute of Industrial Technology, Korea[†]
Miro Co. Ltd.¹

(Received September 15, 2020 / Revised December 23, 2020 / Accepted December 31, 2020)

Abstract: Products for heating indoors in low temperature and dry winter are largely divided into products using fossil fuels and products using electricity. The fossil fuels can warm the entire space by convection, but there is a high risk of fire and the frequent ventilation due to the increase in carbon monoxide and carbon dioxide. Heaters using electricity are mainly used because they are convenient to use and are cheap. However, these products can not efficiently warm the air because they use radiation energy. In other words, only the front part exposed to the heater is warm, and the rear part has no heating effect at all. Also, because it emits a large amount of light, fatigue of the eyes is very high. Another problem is that when using electric heaters, the room tends to be dry by high heat. Indoor humidity maintenance is a very important factor in the prevention and treatment of respiratory diseases. Especially, it is essential for health care for infants, bronchial organs and people with weak respiratory because humidity is low in winter. In this study, we conducted a study to develop a product that can improve heating efficiency while maintaining proper indoor humidity by combining heat energy and moisture particles. The concept of humidification and heating at the same time, moisture particles generated in the humidifier pass through the heater, include thermal energy, and the moisture particles with thermal energy are diffused into the space by forced convection, thereby warming the entire space. In addition, the heating time is shortened as the feeling temperature is increased with the high relative humidity, and this has the effect that the heating cost in winter is reduced.

Key Words: Electric heater, Humidity, Humidifier, Heating efficiency, Feeling temperature

1. 서 론

기온이 낮은 겨울철에는 실내 공간을 따뜻하게 하기 위해서 난방기기를 많이 사용하는데 그 중에서도 전기히터는 냄새가 적고 사용이 용이하기 때문에 많이 사용된다. 그러나 전기히터에 의한 난방은 복사열에 의한 것으로 쉽게 공기를 건조하게 하여 실내 습도를 떨어뜨리는 단점이 있다. 또한 히터를 사용하는 주변은 매우 뜨거운 반면 히터를 조금만 벗어나도 열이 제대로 전달되지 않기 때문에 상대적으로 온도편차가 크게 발생한다.

실내 습도 유지는 호흡기 질환예방 및 치료에 매우 중요한 요소이며, 특히 겨울철에는 습도가 낮기 때문에 영유아 및 기관지나 호흡기가 약한 사람에게서는 호흡기계 건강을 관리하기 위해서 필수적인 요소이다¹⁻³⁾. 일반적으로 가습기는 초음파식, 가열식, 자연기화식으로 구분되며, 초음파 가습기는 다른 방식과 비교해서 소비전력 대비 가습량이 많아서 가장 많이 사용되고 있다. 초음파식 가습기로부터 발생하는 수분은 작은 미세 물방울 형태이고 실내로 배출된 이후에 수증기로 증발되어 실내 상대 습도를 변화시킨다⁴⁾.

따라서 본 연구의 목적은 건조한 공기는 열전달률이 낮기 때문에 난방효율이 떨어지므로 사용전력

[†] 교신저자: 한국생산기술연구원 형상제조연구부
E-mail: ljw@kitech.re.kr

대비 효율이 높은 난방을 위하여 초음파 발전에 의해 발생한 수분 입자를 활용한 고효율 난방기기를 개발하고자 한다. 가습과 난방을 하나의 기기에서 동시에 수행하는 개념으로 가습기에서 발생한 수분 입자가 발열부를 통과하면서 열에너지를 포함하게 되고, 열에너지를 품은 수분 입자가 강제 대류에 의해 실내 공간으로 확산되면서 공간의 전체를 따뜻하게 할 수 있는 제품의 개발이다.

개발 제품은 초음파가습기와 전기히터가 하나로 융합된 형태로 기존 제품 대비 저전력으로 동급 이상의 난방이 가능하도록 설계된 에코난방기이며, 본 연구에서는 제품 하드웨어 개발과 병행해서 가열된 가습 입자가 실내 온도에 미치는 영향을 실험을 통하여 분석하였다. 즉 동일한 실내 공간에서 히터만 사용한 경우와 히터와 가습기를 동시에 사용한 경우의 위치와 높이별 온도를 측정한 후 열지수식을 통해 열지수를 계산하고 습도 변화에 따른 체감온도를 비교하였다.

2. 제품 디자인

2.1. 에코난방기 기구설계

에코난방기는 가습과 난방을 동시에 하는 개념으로 초음파가습기에서 발생한 수분 입자가 히터 발열부를 통과하면서 열에너지를 머금고 공기 중으로 배출되도록 하여 열전달을 통한 따뜻한 공기의 확산속도를 높이고 온도 유지 시간을 늘려 난방효율을 높일 수 있도록 고안되었다.

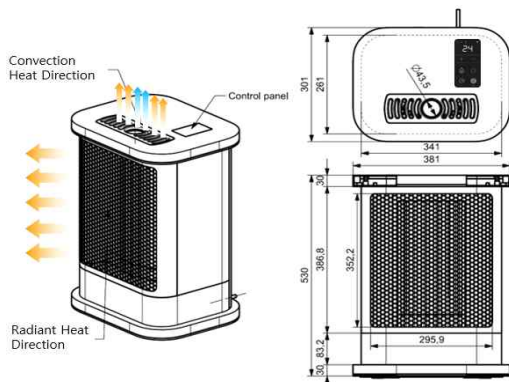


Fig. 1 Eco-heater exterior design concept

Fig. 1에 나타난 것과 같이 제품의 상부 방향으로 는 열풍과 히터에 의해 가열된 가습 입자를 동시에

배출함으로써 대류에 의한 난방이 가능하며, 제품의 정면 방향으로 히터가 내장된 방사 패널에 의해 원적외선이 방사된다. 원적외선 방사에너지는 피가 열체에 직접 전달되기 때문에 따뜻함을 바로 느낄 수 있다.

에코 난방기의 구성은 크게 히터 발열부(heater), 반사판(reflector), 수통(water bottle), 초음파 발생부(ultrasonic humidifier)로 나뉜다. Fig. 2에는 각 구성 부품의 위치 및 크기를 나타내었다. 히터 발열부의 재질은 알루미늄(AL6061)이며, 상세도에 나타난 것과 같이 2D 프로파일을 설계하여 압출공정을 통해 제작한 후 일정 길이만큼 절단하여 사용할 수 있도록 설계하였다. 본 제품 개발에 적용된 발열부 크기는 163.0mm x 56.4mm x 300.0mm(가로x세로x높이)이다. 발열부 전면에는 발열체인 카트리지 히터(300W, 500W)가 장착될 수 있도록 $\varnothing 10\text{mm}$ 구멍이 4개 있으며, 중앙부에는 열풍과 가습 입자가 배출될 수 있도록 $\varnothing 43.5\text{mm}$ 의 구멍을 생성하였다.

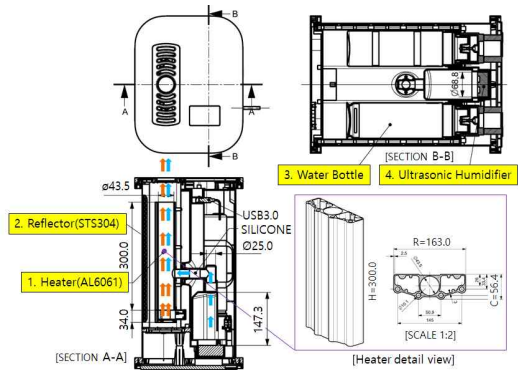


Fig. 2 Operating principle and main components

Fig. 2에 상세도로 표시한 것과 같이 알루미늄 압출공정을 통해 제작된 발열체 표면에는 무기질 바인더가 포함된 원적외선 방사(far-infrared radiation) 코팅재로 코팅처리 하여 원적외선 방사에너지에 의한 난방 효율이 극대화 되도록 설계하였다. 또한 발열체 뒷면에 반사판(STS304)을 설치하여 방사에너지의 손실을 최소화하였다. 초음파 발생부에서 생성된 가습 입자는 발열부 하단부로 유입되도록 구조를 설계하여 발열부에서 생성된 열풍과 가습 입자의 접촉 시간이 길어지도록 하였다. 가습기의 가용 시간을 늘리기 위해서 초음파 발전부를 중심으로 3리터 수통(water bottle)을 2개 설치하였으며 제품이

가동 중에도 안전하게 수통의 교환에 의한 물의 보충이 가능하도록 설계하였다.

물은 세균 번식의 필수조건으로 빠른 속도로 번식하기 때문에 제품의 가습부에는 항상 세균이 존재하며 시간이 지날수록 그 숫자는 기하급수적으로 증가한다. 이를 방지하기 위해서 물이 접촉하는 모든 부품은 세척이 가능하도록 하였으며, 도구 없이 분해 및 조립이 가능하도록 요소 부품에 대한 구조를 설계하였다.

3. 실험

3.1. 실험 방법 및 환경

시중에서 판매되는 3kW급 전기히터를 개조하여 실험을 진행하였다. Fig. 3과 같이 히터의 아래 부분에 400ml/hr 용량의 가습기를 설치하였으며, 가습 입자가 히터의 발열부 중앙을 통과하도록 Ø50mm의 스테인리스 파이프를 설치하였다. 또한 외부 환경의 영향을 최소화하기 위해 출입문과 창문을 밀폐한 상태에서 1시간 동안 난방을 진행하고, 히터의 전원을 끄기 전후의 온도 및 습도의 변화를 구간별, 높이별로 측정하였다. 즉 난방 1시간 동안의 온도, 습도의 변화량과 2시간의 자연냉각에 따른 난방의 지속 시간을 측정하였다.

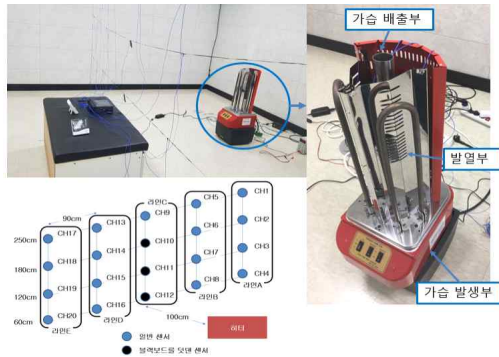


Fig. 3 Experimental environment and temperature sensor location.

실험 공간의 크기(4.0m x 4.7m x 2.7m)는 일반 사무실 정도의 크기이며, 온도센서의 위치는 Fig. 3과 같이 히터의 정면으로 1m 간격을 유지하였으며, 5개의 구간 및 높이 방향으로 0.6m, 1.2m, 1.8m, 2.5m의 간격으로 설치하였다. 실험은 일반히터(3kW

급 히터만 사용)와 에코히터(3kW급 히터 + 가습기) 2가지를 대상으로 실시하였다.

3.2. 열지수(Heat Index, HI)

Houghten(1923)이 인체와 주변 환경간의 열교환 모델을 제시하고 온도와 습도의 복합적 작용으로 체감되는 무더위를 정량화한 이래로 체감온도를 지수화하려는 많은 연구들이 있었다^{6,10}. 무더위를 정량화하고 기온이 높을 경우에 예상되는 피해를 막기 위해 미국 기상대에서는 1980년대 중반부터 이미 Steadman(1979)에 의해 개발한 체감온도(apparent temperature)를 개량한 열지수를 대중들을 위한 일기 예보에 널리 이용하여 오고 있다^{7,10}. 이 열지수는 그늘에 있는 평상복을 입은 표준체형의 인체모델을 상정하여, 다양한 인체 생리학 및 열역학적 이론 및 실험을 통하여 주변 환경과의 열교환시 실제 인간이 느끼는 체감온도를 나타낸다. 열지수는 다양한 생리 열역학적 현상을 식(1)과 같이 기온(°F)과 상대습도(%)로 2가지 요소로 요약된 방정식에서 산출된다^{5,8,10}.

$$Heat\ Index\ (HI) = -42.379 + 2.04901523\ T + 10.14333127\ R - 0.22475541\ TR - 6.83783 \times 10^{-3}\ T^2 - 5.481717 \times 10^{-2}\ R^2 + 1.22874 \times 10^{-3}\ T^2R + 8.5282 \times 10^{-4}\ TR^2 - 1.99 \times 10^{-6}\ T^2R^2 \quad (1)$$

HI : 열지수(°F), T : 온도(°F), R : 상대습도(%)

Table 1 Heat index chart(°C)

Temp (°C)	Relative Humidity(%)												
	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
43	56.6												
42	53.7	57.5											
41	50.9	54.3	58.1										
40	48.3	51.3	54.8	58.5									
39	45.8	48.5	51.6	55.0	58.7								
38	43.4	45.9	48.6	51.6	55.0	58.6							
37	41.2	43.4	45.8	48.5	51.4	54.7	58.2						
36	39.1	41.0	43.1	45.5	48.1	51.0	54.2	57.5					
35	37.2	38.8	40.7	42.7	45.0	47.6	50.3	53.3	56.5				
34	35.4	36.8	38.4	40.2	42.2	44.4	46.8	49.4	52.2	55.2	58.4		
33	33.8	34.9	36.3	37.8	39.5	41.4	43.5	45.7	48.1	50.8	53.5	56.5	
32	32.3	33.2	34.4	35.6	37.1	38.7	40.4	42.3	44.4	46.6	49.0	51.5	54.2
31	30.9	31.7	32.6	33.7	34.8	36.2	37.6	39.2	40.9	42.7	44.7	46.8	49.0
30	29.7	30.3	31.0	31.9	32.8	33.9	35.0	36.3	37.7	39.1	40.7	42.4	44.2
29	28.6	29.1	29.7	30.3	31.0	31.8	32.7	33.7	34.7	35.9	37.1	38.4	39.7
28	27.5	28.0	28.4	28.9	29.4	30.0	30.7	31.4	32.1	32.9	33.7	34.7	35.6
27	26.9	27.1	27.4	27.7	28.1	28.5	28.9	29.3	29.7	30.2	30.7	31.3	31.8
26	26.2	26.4	26.6	26.7	26.9	27.1	27.3	27.5	27.7	27.9	28.0	28.2	28.4

이 열지수 방정식에 의해서 산출된 값을 정리한 열지수표 Table 1에 따르면 고온에서는 습도가 높아지면 인체가 체감하는 온도가 대기의 온도보다 훨씬 더 높아질 수 있음을 알 수 있다.

Table 2에는 열지수에 따른 인체의 반응을 살펴본 실험 결과를 정리하였다^{9,10)}.

Table 2 Possible impacts of high heat index on human body (NOAA, 1980)

Categories	Heat Index	Possible Symptoms
Caution	26.7~32.2℃	Fatigue with prolonged exposure and physical activity
Extreme Caution	32.2~40.6℃	Sunstroke, Heat cramps and heat exhaustion with prolonged exposure and physical activity under these conditions
Danger	40.6~54.5℃	Sunstroke, heat cramps or heat exhaustion are likely. heatstroke with prolonged exposure and physical activity
Extreme Danger	Over 54.5℃	Heatstroke or sunstroke are imminent

낮은 열지수에도 지속적으로 노출되면 불쾌감을 느끼거나 피로를 느낄 수 있고, 높은 열지수에 지속적으로 노출되면 피부가 고온 건조해지고 맥박이 빠르고 강해지며 구토, 기절 등의 위험한 상태에 이를 수 있다고 경고하고 있다. 그러나 본 연구를 통해 개발하려는 에코난방기는 실내의 온도, 습도 등의 공기질을 측정하고 사용자가 설정한 값에 따라 자동으로 제어할 수 있는 스마트 홈케어 센서가 장착되기 때문에 항상 쾌적한 환경을 유지할 수 있다고 판단된다.

본 연구에서는 난방기가 설치된 실내공간의 온도와 습도를 바탕으로 열지수를 계산하였다. 먼저 섭씨단위(℃)로 측정된 온도를 식(2)를 사용하여 화씨단위(℉)로 변환한 다음 식(1)의 열지수식에 대입하여 계산하였다. 최종적으로 난방 성능 비교 그래프에서 사용되는 온도 및 열지수 단위는 다시 식(2)를 사용하여 최종 섭씨 단위(℃)로 변환하여 위치별 온도를 공간적으로 분석하였다.

$$C = 5/9 \times (F - 32) \quad (2)$$

C : 섭씨단위 온도 및 열지수(℃)

F : 화씨단위 온도 및 열지수(℉)

4. 실험결과 및 분석

4.1. 습도 비교

실험 공간 내에 일반히터만 가동했을 경우와 에코히터를 가동했을 경우의 시간에 따른 실내습도 분포를 비교하는 실험을 진행하였다.

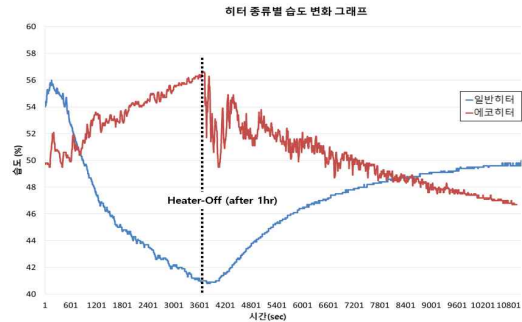


Fig. 4 Humidity comparison (heater only, heater + humidifier)

Fig. 4에 나타난 것과 같이 일반히터의 경우는 히터의 가동과 동시에 실내습도가 54%에서 41%까지 크게 낮아지다가 히터의 가동을 중지하면 원래 상태로 회복되는 경향을 보였다. 반면에 에코히터를 가동했을 때는 가습기의 영향으로 50%에서 56%로 실내 습도가 증가하는 경향을 보였다. 위의 결과를 보면 에코히터와 일반히터의 실내 습도 차이는 약 15% 정도이나 난방기의 가동 시간이 길어지면 더 큰 차이가 발생할 것으로 예상된다.

4.2. 난방 성능 비교 (라인-A, 라인-B)

4.2.1. 온도 변화량

Fig. 3에 나타난 것과 같이 온도센서 위치(히터 전방 1m, 간격 0.9m) 및 높이(0.6m, 1.2m, 1.8m, 2.5m)에 따른 온도분포 측정결과를 일반히터와 에코히터로 구분하여 표시하였다. 온도센서는 총 5개의 라인으로 설치하였으나 가운데(라인 C)는 히터의 직접적 영향이 가장 크고, 라인 D와 라인 E는 라인 A, B의 대칭이기 때문에 분석에서 제외하였다.

아래 그래프와 같이 히터(일반히터)만 가동했을 때는 높이에 따른 성층현상(stratification effect)이 라인 A, B 모두에서 명확하게 관찰되었다. 그러나 히터와 가습(에코히터)을 동시에 가동한 경우에는 높이별 온도 차이가 감소하였으며 1.8m 이하에서는 전반적으로 비슷한 분포를 보였다.

가습 입자를 활용한 고효율 난방 시스템 개발

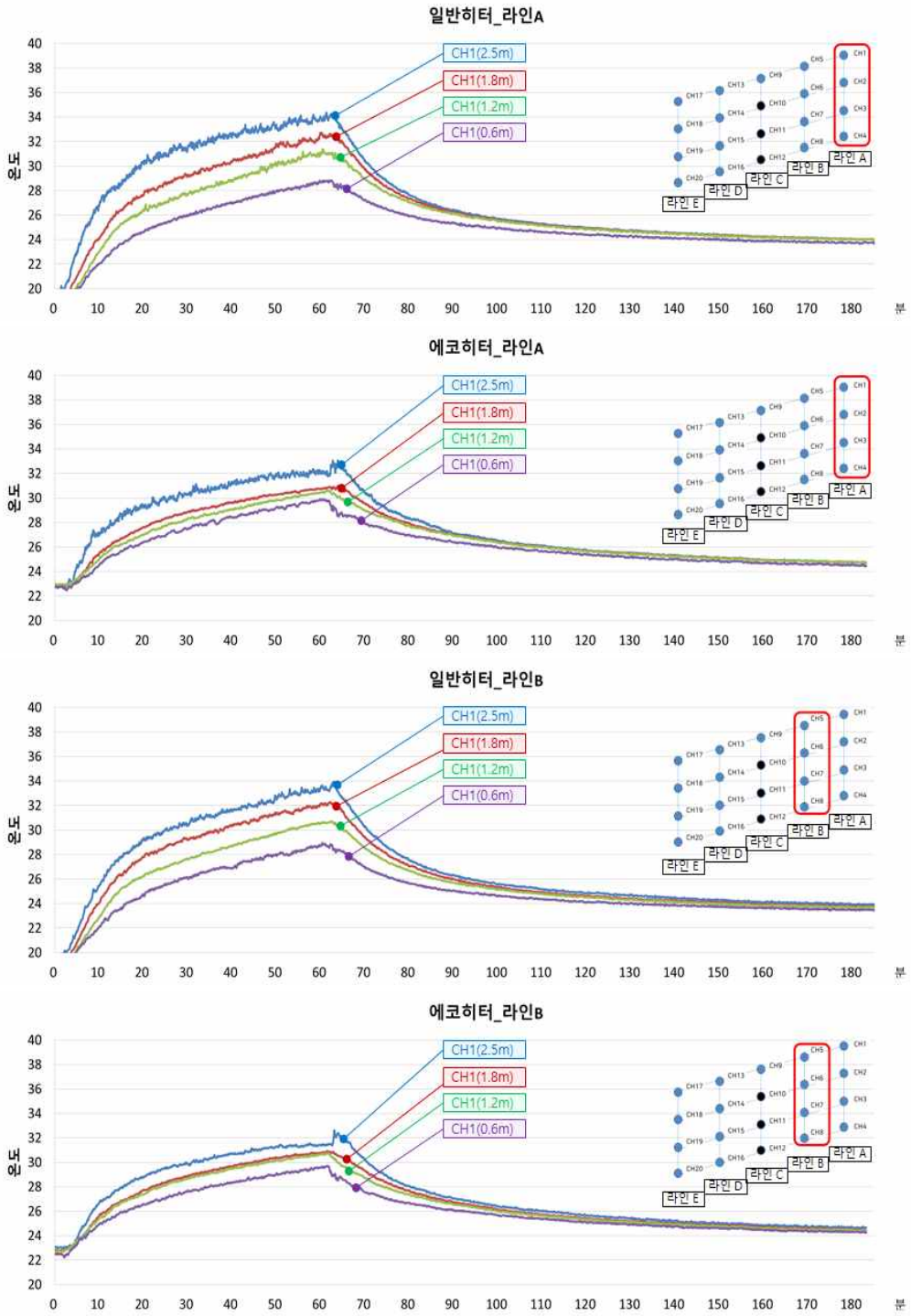


Fig. 5 Temperature transition measurement result(by section, by height).

4.2.2. 열지수 변화량

열지수는 온도와 습도에 따른 사람이 실제로 느끼는 더위를 지수화한 것으로 열지수식(Heat Index)을 활용하여 그래프로 나타내었다. 히터(일반히터)만 사용한 경우는 온도 변화량과 열지수 변화량에 큰 차이가 없었으며, 변화의 유형도 비슷하였다. 그러나 히터와 가습(에코히터)를 동시에 가동한 경우

에는 열지수(체감온도)가 크게 상승하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 가습을 통해 습도를 높게 유지함으로써 체감온도를 높일 수 있으므로 난방효율 증가에 따라 에너지 비용에 대한 부담이 증가하는 겨울철에 난방비를 절약할 수 있는 효과로 이어질 수 있다고 판단된다.

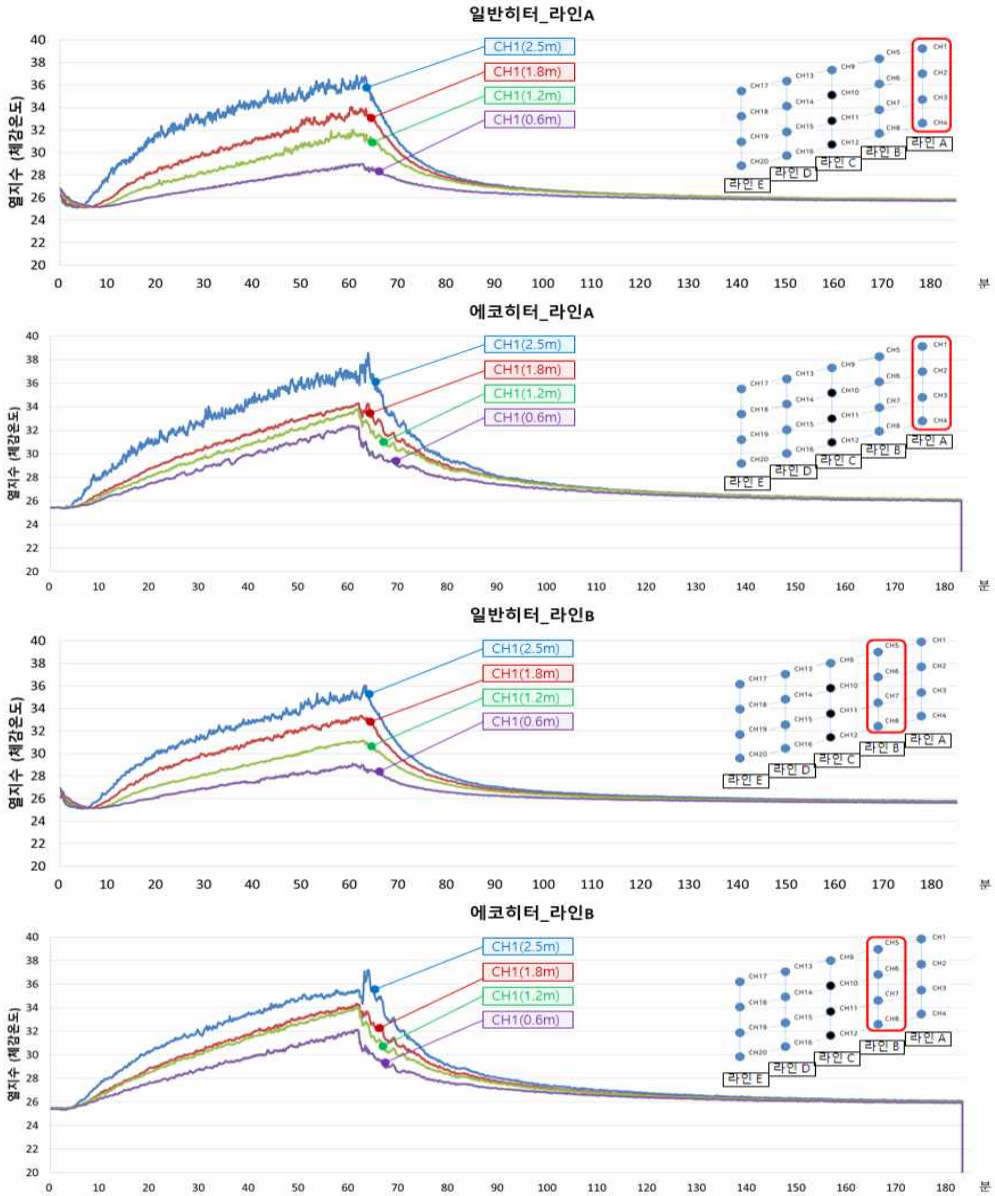


Fig. 6 Results of reflecting the heat index

4.2.3. 일반히터, 에코히터 열지수 변화량 비교

일반히터(붉은색 계열)와 에코히터(파란색 계열)의 열지수 변화량을 하나의 그래프로 나타내었다. 상대습도(%)에 따른 열지수(체감온도)를 비교하였을 경우 일반히터 보다 에코히터의 온도가 높게 나

타났다. 특히 습도 유지가 필수인 영유아나 어린이, 노약자의 생활 높이인 1.2m 아래에서는 그 변화의 차이(1.8~3.0℃)가 뚜렷하게 관찰되었다.

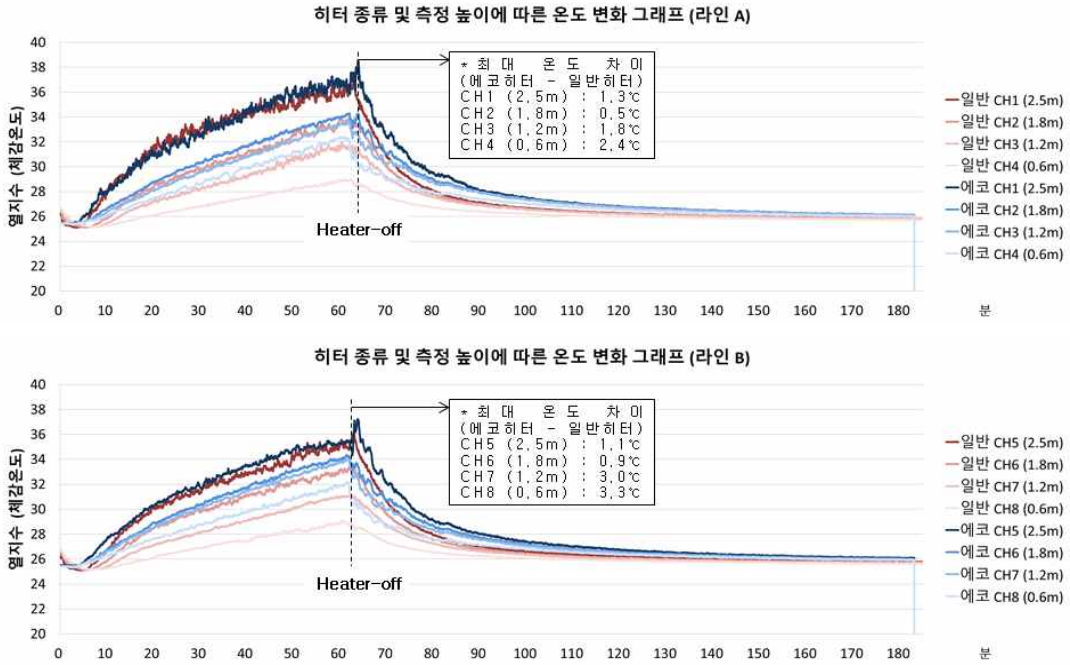


Fig. 7 Comparison graph of temperature transition according to heater type and measurement height.

5. 결론 및 토의

일반적으로 건강 습도의 범위는 40~60%이다. 습도가 낮은 경우는 바이러스의 활동이 왕성하고, 습도가 높은 경우에는 곰팡이의 번식이 우려되기 때문에 실내의 적정 습도 유지는 건강한 삶을 위한 필수조건이다.

본 연구에서는 겨울철에 주로 사용하는 난방기의 개발에 앞서 상대습도가 체감온도에 미치는 영향을 열지수(heat index)를 활용하여 분석하여 보았다. 난방을 위해 히터만 사용한 경우에는 성층효과(stratification effect)가 뚜렷하게 나타났으며 주로 위쪽(2.5m)의 온도가 높은 반면 가습기를 동시에 사용한 경우에는 위쪽과 아래쪽 온도 차이의 폭이 작았다. 특히 아래쪽(1.2m 이하)의 온도가 습도의 영향으로 높게 상승하는 효과가 있었다. 이는 가습 입자

가 히터의 높은 온도 영역을 통과하면서 열에너지를 품고 확산되어 Warm-Water Roof 를 형성하였기 때문이라고 판단된다. 이러한 결과는 빠른 실내온도 상승에 따른 난방효율 증가로 가정의 겨울철 난방비 부담에 대한 감소가 가능하다.

이와 더불어 에코난방기 개발에 있어 무엇보다 중요한 것은 사용자 중심의 제품 디자인이다. 상극 관계인 물과 불이 융합하는 구조이기 때문에 사용자의 안전이 우선적으로 고려되어야 하며, 초음파 가습부는 관리를 소홀히 할 경우 세균번식의 원인이 되기 때문에 탈부착이 용이하고 세척이 쉬운 구조로 설계가 이루어져야 한다.

후기

본 논문은 한국생산기술연구원 기관주요사업 “제

품생산 유연성 확보를 위한 뿌리공정기술 개발 (kitech EO-20-0015)”의 지원으로 수행한 연구입니다.

참고문헌

- 1) S. H. Cho, H. Kim, “A Review of Health Effects of Relative Humidity in Office Building,” Annals of Occupational and Environmental Medicine, Vol. 2, No. 2, pp. 123-133, 1990.
- 2) C. S. Yoon, E. S. Park, Y. J. Choi, “Developing an Instrument for Measuring Comfort Indexes in Office Indoor Environment,” Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design, Vol. 15, No. 4, pp. 97-106, 1999.
- 3) J. G. Park, J. W. Yoon, “A Hygienic Evaluation of Indoor Air Quality in Public Used Buildings,” Korea Society of Environmental Administration, Vol. 9, No. 1, pp. 49-56, 2003.
- 4) J. K. Park “Effects of Ultrasonic Humidifier on the Change in Relative Humidity of Indoor Apartment during Wintertime,” Korea Society of Environmental Administration, Vol. 13, No. 1, pp. 25-34, 2007.
- 5) S. J. Lee, B. Y. Kwon, D. H. Jung, K. H. Jo, M. S. Kim, S. M. Ha, H. N. Kim, B. N. Kim, M. A. Masud, E. I. Lee, Y. K. Kim “Future Prediction of Heat and Discomfort Indices based on two RCP Scenarios,” Atmosphere. Korean Meteorological Society, Vol. 23, No. 2, pp. 221-229, 2013.
- 6) Tromp, S. W. “The impact of the weather and climate on humans and their environment(animals and plants),” Biometeorology, London: Heyden, 1980.
- 7) Steadman, R. G. “The assessment of sultriness Part II; effects of wind, extra radiation, and barometric pressure on apparent temperature,” Journal of

- Applied Meteorology, Vol. 18, pp. 874-884, 1979.
- 8) Rothfusz, L. P. “ The heat index equation(or, more than you ever wanted to know about heat index),” NWS Southern Region Technical Attachment, SR/SSD 90-23, Fort Worth, TX, 1990.
- 9) NOAA, Heat Stress. Asheville, NC; NOAA/NCDC, 1980.
- 10) G. Y. Choi, J. N. Choi, J. W. Kim, S. W. Son, “The Climatology of perceived Sultriness in South Korea,” Journal of the Korean Geographical Society, Vol. 37, No. 4, pp. 385-402, 2002.

저자 소개

이 정 원(Jeong-Won Lee)

[정회원]



- 2015년 2월 : 인천대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2015년 7월~2018년 6월 : ㈜미로 기술연구소, 소장 (기업과건)
- 2007년 12월~현재: 한국생산기술연구원, 뿌리기술연구소 형상제조연구부, 선임연구원

< 관심분야 >

플라스틱 금형/성형, LSR 금형/성형, 의료기기 개발, CAD/CAE

홍 경 보(Kyung-Bo Hong)



- 2016년 08월 : 인하대학교 전자공학과(공학박사 수료)
- 2011년 09월~2014년 1월 : 노바레보 개발팀
- 2014년 2월 ~ 현재 : ㈜ 미로 기술연구소, 과장

< 관심분야 >

사출 금형, 의료기기 개발, 전자기기 제어/개발

사출성형공정 모니터링용 엣지 디바이스 개발 및 평가

김종선[†] · 이준한^{1,2}

한국생산기술연구원 형상제조연구부문^{1,†}
단국대학교 기계공학과²

Development and evaluation of edge devices for injection molding monitoring

Jong-Sun Kim[†] · Jun-Han Lee^{1,2}

RShape Manufacturing R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology[†]
Department of Mechanical Engineering, Dankook University, Korea²

(Received November 03, 2020 / Revised December 23, 2020 / Accepted December 31, 2020)

Abstract: In this study, an edge device that monitors the injection molding process by measuring the mold vibration(acceleration) signal and the mold surface temperature was developed and evaluated its performance. During injection molding, signals of the injection start, V/P switchover, and packing end sections were obtained through the measurement of the mold vibration and the injection time and packing time were calculated by using the difference between the times of the sections. Then, the mold closed and mold open signals were obtained using a magnetic hall sensor, and cycle time was calculated by using the time difference between the mold closed time each process. As a result of evaluating the performance by comparing the process data monitored by the edge device with the shot data recorded on the injection molding machine, the cycle time, injection time, and packing time showed very small error of $0.70\pm 0.38\%$, $1.40\pm 1.17\%$, and $0.69\pm 0.82\%$, respectively, and the values close to the actual were monitored and the accuracy and reliability of the edge device were confirmed. In addition, it was confirmed that the mold surface temperature measured by the edge device was similar to the actual mold surface temperature.

Key Words: Injection molding, Process monitoring, Edge device, Mold vibration, Mold temperature

1. 서 론

플라스틱 사출성형 공정은 다른 제조 공정과 비교하여 보다 짧은 생산 시간을 가지며 대량 생산에 용이하다는 장점을 가진 공정으로 플라스틱을 용융점 이상의 온도로 가열하여 높은 속도와 압력으로 금형 내의 형상으로 사출하는 공정이다. 그러나 성형제품의 형상이 복잡해지고 고정밀 제품의 수요가 높아지면서 해당 장점들이 단점으로 작용할 수 있고, 공정 특성 상 성형온도, 금형온도, 사출속도, 보압 등의 공정변수가 제품의 품질을 결정하는 중요한 요소들로 작용하기 때문에¹⁾ 해당 변수들과 관련한 인자들을 모니터링하여 제품의 품질을 평가하는 연구가 다방면에서 진행되어 왔다.

대표적으로는 사출성형 중에 금형 내로 충전되는 용융 수지의 압력이나 온도를 측정하여 거동을 모니터링하는 방법들이 연구되고 있다^{2,3)}. 해당 방법들은 금형 내로 충전되는 용융 수지의 정보를 센서를 통해 직접 측정하기 때문에 정확한 공정 정보를 얻을 수 있는 장점이 있는 반면, 측정 센서와 시스템이 용융 수지의 고온, 고압 상태를 견딜 수 있어야 하며 복잡한 금형 내에 센서를 설치하기 위한 추가 구조의 설계가 필요하고, 센서의 소형화가 구현되어야 하기 때문에 기술의 도입 비용이 높다는 단점이 있어 일반 산업 현장에 적용하기에는 아직 무리가 있다. 대안적인 방법으로 샷 카운터를 이용하여 금형의 형폐와 형개 신호를 획득하여 전체 생산 제품수와 사이클 타임으로 공정과 제품의 품질을 모니터링하는 방법이 산업 현장에서 사용되고 있다. 해당 방법의 경우, 금형 표면에 기기를 탈부착하는 방

[†] 교신저자: 한국생산기술연구원 형상제조연구부문
E-mail: libra74@kitech.re.kr

식으로 구조의 제약이 없으며 저비용의 장점이 있는 반면, 단순하게 금형의 형폐와 형개 신호만을 측정하기 때문에 사출성형공정과 제품의 품질을 평가하기 위한 정보가 부족하다.

따라서, 본 연구에서는 제시된 문제들을 해결하기 위해 금형의 진동 신호를 감지하는 가속도 센서와 금형 표면의 온도를 측정하는 온도 센서를 탑재한 사출성형공정 모니터링용 엠티 디바이스를 제작하여 금형 표면에 부착하고 신호를 측정하여 공정을 모니터링하였다. 사출성형공정에서 각 공정단계의 전환 시에 발생하는 진동 신호를 측정하고 측정된 진동과 진동 사이의 시간 간격을 분석하여 공정을 모니터링하는 방법을 적용하였다. 또한 추가적으로 금형 표면의 온도 변화도 측정하여 기존 샷 카운터와 같이 설치의 편의성과 저비용의 장점을 가지면서 기존의 공정 정보 부족 문제를 개선하여 보다 정확한 공정 상태를 모니터링할수 있는 장비의 개발을 제시하였다.

2. 공정 모니터링 신호 선정

2.1. 금형의 진동(가속도) 신호 측정

사출성형 중 공정 조건에 따른 금형의 진동 신호 분석에 대한 사전 연구⁴⁾에 기반하여 엠티 디바이스에서 사출성형공정을 모니터링하기 위한 신호로 금형의 진동(가속도) 신호를 선정하였다. 그리고 Fig. 1과 Table 1의 사양을 가진 가속도 측정 모듈을 이용하여 사출성형공정에서의 금형의 진동 신호를 측정하여 모니터링 요소를 선별하였다. 가속도 센서는 엠티 디바이스의 설치 편의성을 고려하여 Fig. 2와 같이 금형 표면에 장착하였으며 사출성형 시 용융 수지의 압력과 스크류 동작에 의한 진동 신호를 정확하게 측정할 수 있도록 고정측 베이스에 설치하였다⁵⁾. 가동측 베이스의 경우, 형체력을 가하기 위한 토글 구조로부터 전달되는 진동으로 인해 실제 성형공정에서 발생하는 진동 신호가 감쇠되거나 변화가 미미하게 측정될 수 있으므로 설치 대상에서 제외하였다.

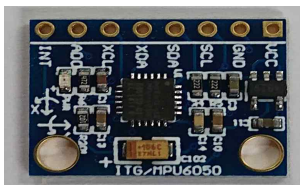


Fig. 1 Accelerometer MPU-6050 module

Table 1 Specification of MPU6050 sensor module

Specification	Value	Unit
Interface	I2C interface	
Measurement range	Min. ± 2 , Max. ± 16	G
Resolution	Min. 16384, Max. 2048	LSB/(degree/s)
Update rate	4 ~ 1,000	hz

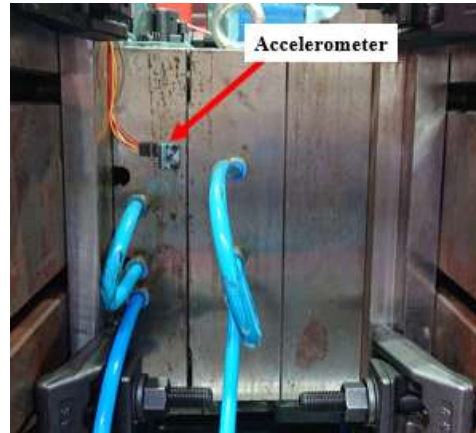
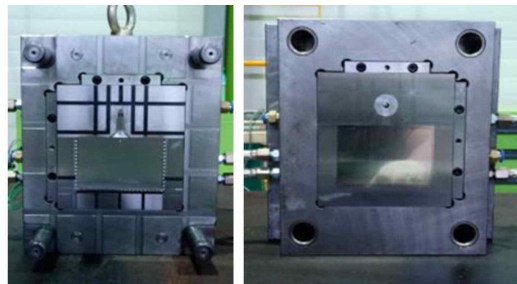


Fig. 2 Installation of accelerometer

신호 검증에는 Fig. 3의 5인치 도광판 금형을 사용하였으며 폴리프로필렌(HOPLENE J-150, LOTTE chemical) 수지로 사출성형을 진행하였다. 가속도 센서는 아두이노 우노 보드(arduino uno board)에 연결하여 사출성형 중 금형의 진동 신호를 획득하였다. 사출성형공정에 따른 금형의 진동 신호는 Fig.4에 나타내었다. Fig. 4의 진동 신호에서 진폭의 변화는 금형의 형폐, 사출시작, 보압절환, 보압종료, 금형의 형개 시점에서 발생하였으며 본 연구에서는 사출시작, 보압절환, 보압종료 시점의 신호를 이용하여 공정을 모니터링하였다.



(a) Movable base of mold (b) Fixed base of mold

Fig. 3 5 inch LGP mold

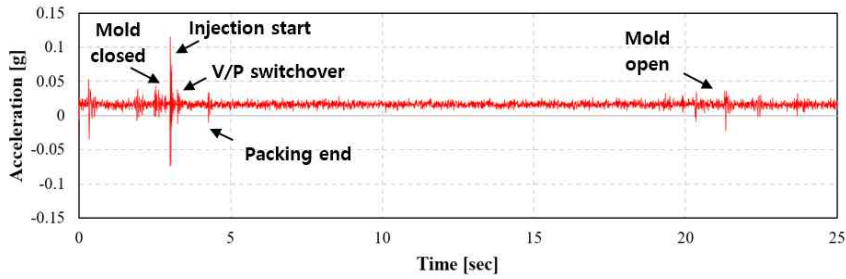


Fig. 4 Mold vibration(acceleration) signal during injection molding

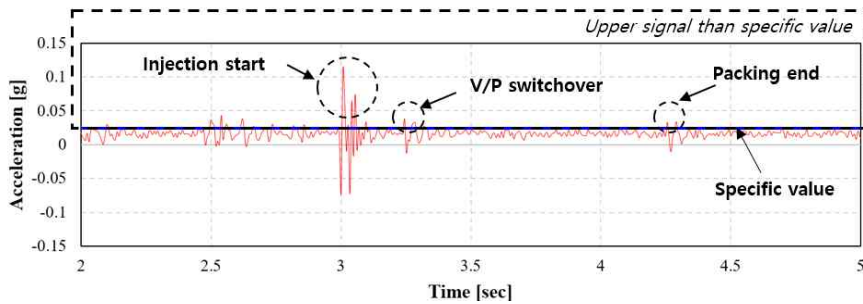


Fig. 5 Mold vibration(acceleration) signal upper than the specific value to calculate process time

2.2. 금형의 진동 신호를 통한 공정 정보 산출

사전 연구⁴⁾에서는 사출성형 중 공정 조건에 따른 금형의 진동 신호 변화에 대해서 연구하여 공정 조건과의 관계성을 분석하였으나 본 연구에서는 사출성형 중 측정된 금형의 진동 신호에서 진폭 변화가 생기는 시점 중 “사출시작”, “보압절환”, “보압종료” 시점의 시간을 이용하여 공정 모니터링 정보를 산출하여 적용하였다. “보압절환” 시점과 “사출시작” 시점의 시간 차이를 계산하여 공정의 “사출시간”을 산출하였으며 “보압종료” 시점과 “보압절환” 시점의 시간 차이를 이용하여 공정의 “보압시간”을 획득하는 방법을 엷지 디바이스에 적용하였다. 또한, “사출시간”과 “보압시간”을 확인하기 위해서 사출성형 중 전체 금형의 진동 신호가 필요하지 않으므로, Fig. 5와 같이 “사출시작”, “보압절환”, “보압종료” 시점에서의 진폭 변화를 감지할 수 있는 특정 값을 설정하여 해당 값 이상의 신호만을 획득하여 공정 정보를 산출하는 모니터링 방법을 적용하였다.

2.3. 금형의 표면 온도 측정

사출성형공정에서 금형의 온도는 온조기의 냉각 수 온도와 사출되는 용융 수지의 온도에 의해서 편차가 발생하며 외부적으로는 대기 온도 등에 따라서도 변화가 발생한다. 따라서, 본 연구의 엷지 디

바이스에는 금형의 진동 신호 이외에 금형 표면의 온도를 측정할 수 있는 센서 모듈을 탑재하여 성형공정의 온도 조건과 변화를 모니터링하는 방법을 적용하였다. 엷지 디바이스가 전력 소모를 고려하여 금형 표면의 온도를 측정하기 위한 센서는 디지털 타입으로 선정하여 데이터 송수신 시의 편의성도 고려하였고 Fig. 6와 Table 2에 선정된 센서를 나타내었다.



Fig. 6 Temperature sensor DFR0024 module

Table 2 Specification of DFR0024 sensor module

Specification	Value	Unit
Interface	Digital	
Measurement range	-55 ~ +125	℃
Measurement precision	0.5	℃
Operation voltage	3.3 ~ 5	V

2.4. 금형의 형폐, 형개 신호 측정

금형의 진동 신호 분석에서 획득 가능한 “사출시간”, “보압시간”의 공정 정보 이외에 전체 공정 시간을 산출하고 금형의 형폐와 형개 시점에서 엣지 디바이스의 트리거(trigger) 신호로 작용할 수 있도록 Fig. 7의 마그네틱 홀 센서(magnetic hall sensor)를 선정하였다. 금형이 형폐될 때와 형개될 때, 가동측 금형에 장착된 자석이 고정측 금형에 장착된 마그네틱 홀 센서에 근접하고 멀어지는 것을 자기장의 변화로 감지하여 형개와 형폐 시점을 파악할 수 있도록 설계하였다. 마그네틱 홀 센서를 이용하여 획득된 형폐 시점의 신호는 공정 모니터링 센서들의 트리거 신호로 작용하여 관련된 측정들을 시작하고 형개 시점의 신호는 센서들의 종료 신호로 작용하여 공정 신호의 측정을 중단하도록 프로세스(process)를 적용하였다. 추가적으로 각 공정에서 측정된 금형의 형폐 시점에서의 시간 차이를 이용하여 각 공정의 전체 사이클 타임(cycle time)을 평가하는 방법을 적용하여 공정을 모니터링하였다.

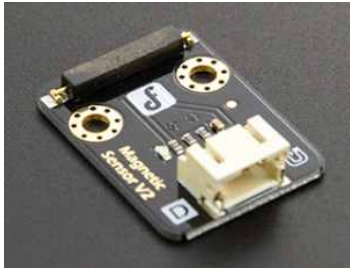
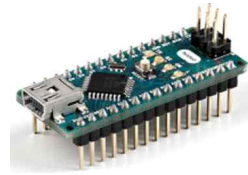


Fig. 7 Magnetic hall sensor DFR0033 module

2.5. 엣지 디바이스 측정 제어

엣지 디바이스의 측정과 제어 과정을 위해 ATmega328 마이크로칩이 내장된 아두이노 나노 보드(arduino nano board, Interaction Design Institutelvera)를 사용하였으며 Fig. 8(a)와 Table 3에 사양을 나타내었다. 아두이노 나노 보드에 제어 프로그램을 업로드하여 전체 공정을 제어하고 엣지 디바이스의 각 센서들은 아두이노 나노 보드와 연결되어 측정된 신호를 전달하고 측정시작과 중단의 명령을 전달받는 구조로 설계하였다. 그리고 추가적으로 아두이노 나노 보드로 전송된 공정 정보를 타 기기로 전송하여 관리하기 위해서 블루투스 4.0 모듈을 사용하였으며 Fig. 8(b)와 Table 4에 사용한 장비의 사양을 나타내었다.



(a) Arduino nano (control module)



(b) HM-10 (bluetooth data transmission module)

Fig. 8 Control and data transmission module of edge device

Table 3 Specification of arduino nano board

Specification	Value	Unit
Microcontroller	ATmega328	-
Flash memory	32 KB of which 2 KB used by bootloader	
SRAM	2	KB
Clock Speed	16	MHz

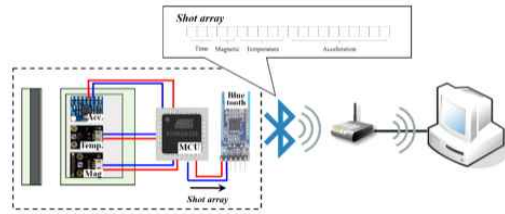
Table 4 Specification of arduino nano board

Specification	Value	Unit
Bluetooth version	4.0	-
BLE chip	Bluetooth Low Energy consumption	
Operating voltage	2.0 - 3.6	v
Cuurent	Consumes 235uA on battery backup	

3. 공정 모니터링 공정 설계

엣지 디바이스의 공정 모니터링 신호 측정은 금형이 형폐될 때의 신호를 기점으로 시작하도록 설계하였으며 엣지 디바이스가 공정을 모니터링하는 순서를 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9(a)와 같이 가동측 금형 표면에 설치된 자석이 고정측 금형 표면의 마그네틱 홀 센서에 근접하여 형폐가 되면, 센서에서 “ON”의 의미로 “1” 신호를 감지하여 디바이스의 제어 보드로 전송한다. Fig. 9(b)의 과정에서 “1” 신호를 전송받은 엣지 디바이스의 제어 보드는 가속도 센서와 온도 센서에 신호 측정 신호를 전달하여 공정 모니터링을 진행하도록 하였다. 가속도 센서의 경우, 공정 정보 평가에 필요한 “사출시작”, “보압절환”, “보압종료” 시점의 진폭 변화 신호만을 획득할 수 있도록 일정 값 이상의 가속도만을 제어 보드로

전송하였으며 가속도 신호 측정 후 금형의 표면 온도 신호를 전송하도록 설계하였다. 사출성형공정 완료 후 Fig. 9(c)와 같이 금형이 열리면 마그네틱 홀 센서는 “OFF” 의 의미인 “0” 신호를 제어 보드로 전달하고 엣지 디바이스의 전체 공정 모니터링을 종료한다. 금형의 형폐와 열개 사이에 측정된 공정 모니터링 신호들은 배열의 형태로 제어 보드에 입력되어서 Fig. 9(d)와 같이 금형의 열개 시 무선 통신을 통해 타 기기로 전송되도록 설계하였다. 본 연구에서는 블루투스 통신 방법을 적용하여 엣지 디바이스에서 측정된 배열 신호를 타 기기로 전송하였다.

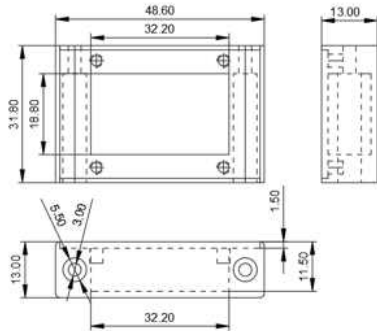
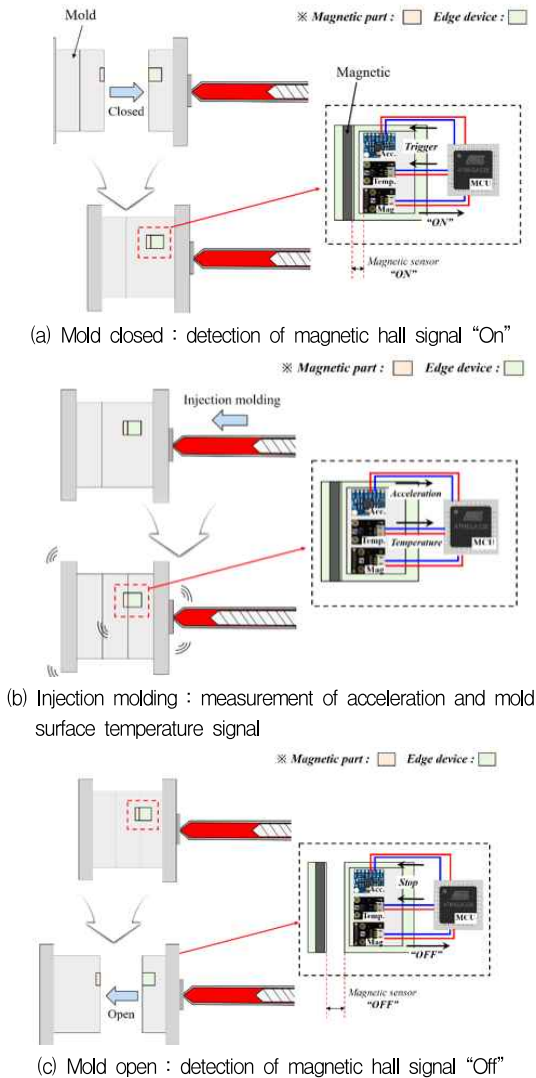


(d) Data transmission by bluetooth module after mold is opened
Fig. 9 Edge device monitoring process according to the injection molding sequence

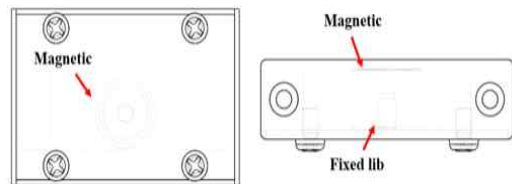
4. 엣지 디바이스 설계 및 제작

엣지 디바이스는 자석부, 측정부, 제어부의 총 3개 파트로 구성하였으며 자석부는 금형의 가동측 베이스 표면에 설치하고 측정부와 제어부는 고정측 베이스 표면에 설치하도록 설계하였다. 자석부와 측정부는 측정부 내 마그네틱 홀 센서가 금형의 형폐와 열개 동작 시 신호를 감지할 수 있도록 위치를 조정 후 각 금형에 설치할 수 있도록 설계하였다.

4.1. 자석부



(a) Dimensions of magnetic part



(b) Magnet fixing method in magnetic part

Fig. 10 Design of magnetic part that make up the edge device

엣지 디바이스의 자석부는 금형의 가동측 베이스 표면에 설치하는 파트로 내부에 마그네틱 홀 센서와 상호작용할 수 있는 자석을 고정시킬 수 있는 구조

로 Fig. 10과 같이 설계하였다. Fig. 10(a)는 자석부의 설계도면을 나타내었으며 Fig. 10(b)는 실제 자석부와 자석을 조립하였을 때 내부 모습을 투영하여 나타내었다. 마그네틱 홀 센서와 상호작용하는 자석은 자석부 내부의 고정 리브(fixed lib)로 고정되어 내부에서 움직임을 제한하도록 설계하였다. 자석부와 금형의 표면은 볼트 체결 구조로 고정할 수 있도록 설계하였으며 제작은 3D 프린터(UP mini 2, Tiertime)를 사용하여 ABS(C-21-01, UP Filla) 수지로 진행하였다. Fig. 11에 제작된 엣지 디바이스의 자석부를 나타내었다. Fig. 11(a)는 자석부의 플라스틱 케이스(plastic case)로 내부에 자석이 탑재될 수 있도록 공간을 구성하였으며 자석은 Fig. 11(b)의 플라스틱 커버(plastic cover)의 리브에 고정되어 플라스틱 케이스와 결합되는 형태로 제작하였다.



(a) Plastic case of magnetic part



(b) Plastic cover with fixed magnet of magnetic part

Fig. 11 Manufactured magnetic part by 3D-print

4.2. 측정부

엣지 디바이스의 측정부는 금형의 고정측 베이스 표면에 설치하여 가동측 베이스 표면의 자석부와 서로 상호작용할 수 있도록 하였으며 내부에 가속도 센서, 온도 센서, 마그네틱 홀 센서가 위치하여 공정 정보를 측정할 수 있도록 Fig. 12와 같이 설계하였다.

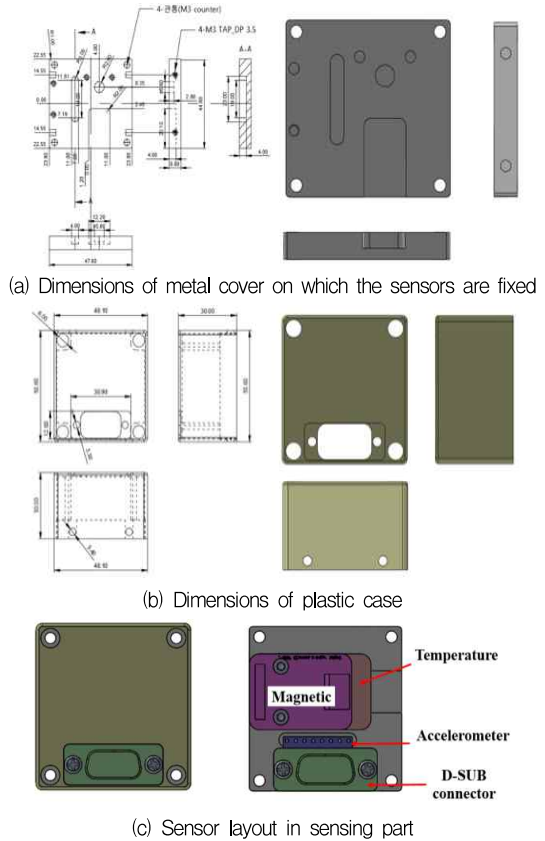


Fig. 12 Design of sensing part that make up the edge device

측정부에서 각 센서들이 고정되는 부분을 플라스틱으로 제작할 경우, 금형에서 전달되는 진동 신호와 금형의 표면 온도가 정확하게 측정되지 않는다. 진동 신호는 플라스틱으로 인해 감쇠되어 센서로 전달되고 금형 표면 온도는 금형의 재질인 금속과 플라스틱의 열전도율 차이로 인해 정확한 온도가 센서에서 측정되지 않는다. 따라서, 측정부의 가속도 센서와 온도 센서가 실제 금형의 정보를 정확하게 전달받을 수 있도록 센서와 금형 표면 사이의 전달 매개체를 Fig. 12 (a)의 금속 커버와 같이 금형과 동일한 재질로 설계하여 신호의 왜곡을 최소화하였다. 또한 플라스틱 케이스와 금속 커버의 접촉으로 인한 신호의 감쇠, 혹은 왜곡을 최소화하기 위해 Fig. 13과 같이 금속 커버와 플라스틱 케이스 사이의 볼트 체결 부위만 접촉하도록 갭(gap) 설계를 진행하였으며 이는 Fig. 14의 측정부와 금형의 표면 사이의 접촉에도 반영되어 금속 커버만 금형에 접촉할 수 있도록 플라스틱 케이스는 갭(gap) 설계를 진행하였다.

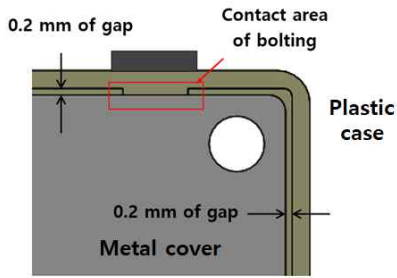


Fig. 13 Gap design between metal cover and plastic case

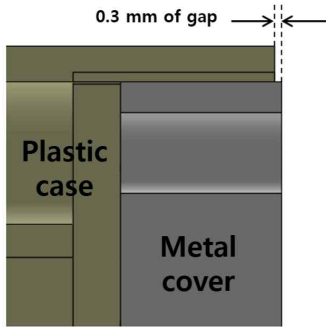
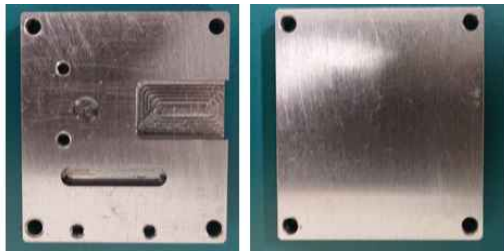


Fig. 14 Gap design between plastic case and mold surface

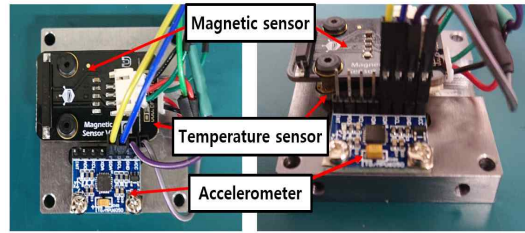
측정부의 금속 커버는 KP4M 금속 재질로 가공하여 제작하였으며 플라스틱 케이스는 자석부와 동일하게 3D 프린터를 이용하여 제작하였다. Fig. 15에 제작된 측정부를 나타내었다.



(a) Metal cover of sensing part



(b) Plastic case of sensing part

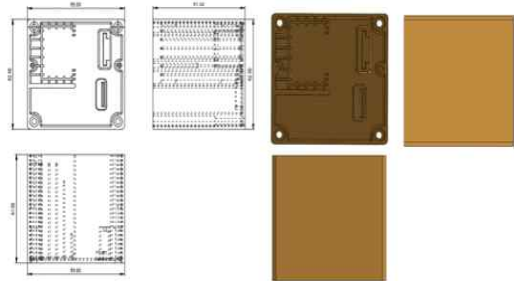


(c) Sensor layout on metal cover of sensing part

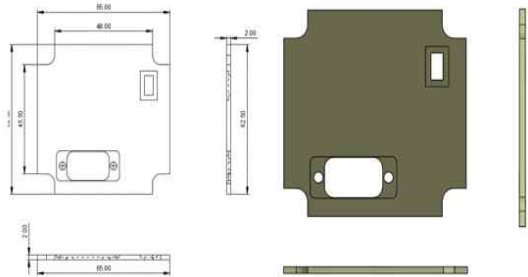
Fig. 15 Manufactured sensing part

4.3. 제어부

엣지 디바이스의 제어부는 금형의 고정측 베이스 표면에 설치하여 측정부와 케이블로 연결되어 상호 측정 신호와 제어 신호를 전달받을 수 있도록 Fig. 16와 같이 설계하였다. Fig. 16(a)의 제어부 플라스틱 케이스에는 아두이노 나노 보드(arduino nano board)를 설치하여 측정부의 전달 신호를 전달받고 전체 모니터링 과정을 제어할 수 있도록 하였으며 블루투스 4.0 모듈을 설치하여 측정 완료된 공정 신호를 타 기기로 전송할 수 있도록 설계하였다. 또한 설치와 측정의 편의성을 고려하여 내부에 9V 배터리를 장착할 수 있도록 설계하였으며 Fig. 16(c)와 같이 모듈과 배터리를 배치하였다.

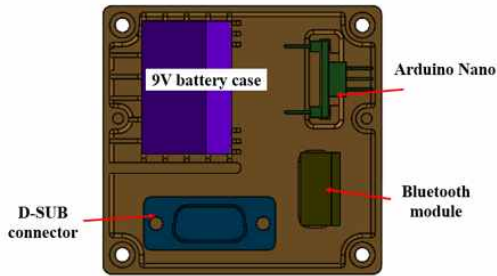


(a) Dimensions of plastic case where the modules of the control part are placed



(b) Dimensions of plastic cover

Fig. 16 Design of control part that make up the edge device (continued)



(c) Control, power, transmission module layout in sensing part
Fig. 16 Design of control part that make up the edge device

제어부의 플라스틱 케이스와 커버도 자석부와 동일하게 3D 프린터를 이용하여 제작하였으며 Fig. 17에 제작된 제어부를 나타내었다. 옛지 디바이스의 제어부와 측정부는 D-SUB 9핀 케이블을 이용하여 상호 신호를 전달받을 수 있도록 설계하였으며 전체 옛지 디바이스의 연결을 Fig. 18에 나타내었다.

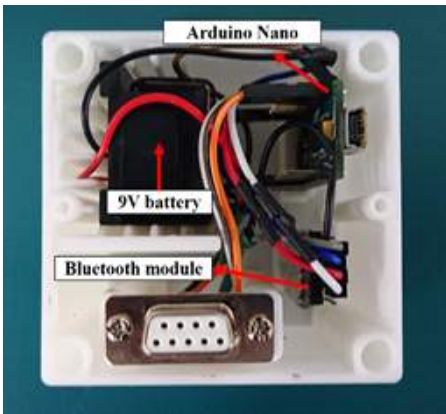


Fig. 17 Manufactured control part

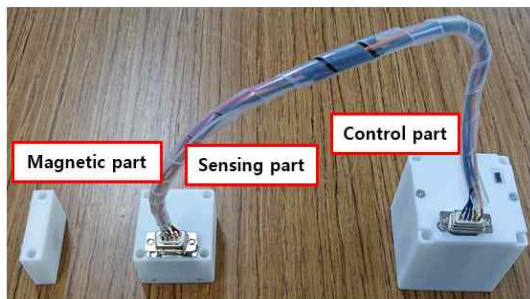


Fig. 18 Manufactured edge device for process monitoring

4.4. 제어 프로그램

옛지 디바이스의 제어는 아두이노 나노 보드를 통해 진행되며 아두이노 IDE로 설계한 프로그램을

나노 보드로 Fig. 19와 같이 업로드하였다. 금형의 형폐 시 마그네틱 홀 센서의 “1” 신호를 획득하기 위해 while 구분을 사용하여 프로그램하였으며 “1” 신호가 측정된 뒤 해당 시간을 기록하도록 설계하였다. 다음, 일정 값 이상의 금형의 진동 신호에 대한 값과 시간을 기록하도록 설계하였으며 금형 표면의 온도도 측정하여 배열에 저장하도록 하였다. 마지막으로 금형이 형개될 때, 마그네틱 홀 센서가 “0” 신호를 측정하고 제어 보드에 저장된 공정 신호는 블루투스 모듈을 통해 타 기기로 전송하도록 제어 프로그램을 Fig. 20과 같이 설계하였다.

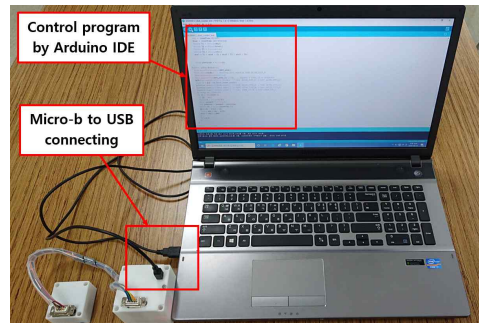


Fig. 19 Upload control program to edge device



Fig. 20 Control program using arduino IDE code

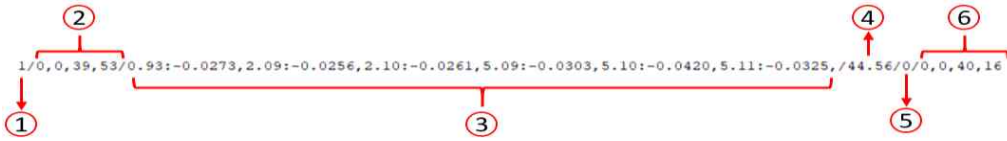


Fig. 21 Measured and transferred monitoring data

Table 5 Process data calculated from edge device monitoring data

No.	Measured data	Data value	Application	Calculation
1	Mold closed	1 (mold closed)	-	-
2	Mold closed time	0, 0, 39, 53 (day, hour, min, sec)	Cycle time	[N+1] cycle time = [N+1] mold closed time - [N] mold closed time
3	Acceleration	0.93:-0.0273 (time[sec]:Acceleration[g])	Injection time, packing time	The measurement time is divided into 3 parts and the median value of each section is calculated. - Injectoin start : 0.93 s → Median : 0.93 s - V/P switchover : 2.09 s, 2.10 s → Median : 2.10 s - Packing end : 5.09 s, 5.10 s, 5.11 s → Median : 5.10 s Injection time and packing time are calculated using the time difference between each section time. - Injection time : Median of V/P switchover 2.10 - Median of injection start 0.93 = 1.17 s - Packing time : Median of packing end 5.10 - Median of V/P switchover 2.10 = 3.00 s
4	Mold surface temperature	44.56℃	-	
5	Mold open	0 (mold open)	-	
6	Mold open time	0, 0, 40, 16 (day, hour, min, sec)	Cooling time	Cooling time = Mold open time - (Mold closed time + Injection time + Packing time + measurement delay time)

4.5. 공정 모니터링 데이터 분석

제작된 엣지 디바이스를 이용하여 신호 전송 및 데이터 분석을 진행하였으며 Fig. 21의 측정된 데이터는 Table 5와 같은 방법으로 분석하여 공정을 평가하였다. Fig. 21의 배열에서 1번 항목은 금형의 형폐 신호로 “1”로 표시되며 엣지 디바이스의 모니터링 시작을 표시하며 2번 항목은 금형 형폐 시의 시간을 나타낸다. 2번 항목의 금형 형폐 시간을 이용하여 전체 사이클 타임을 평가할 수 있으며 각 샷(공정)에서 금형의 형폐 시간의 차이를 사이클 타임으로 정의하였다. 3번 항목은 가속도 신호이며 일정 값 이상의 가속도 값이 측정되며 시간도 같이 기록된다. 3번 항목의 가속도 신호는 “사출시작”, “보압절환”, “보압종료”의 3가지 부분으로 구분되며 각 부분에서의 중앙값(median)으로 해당 시점의 시간을 평가한다. 각 부분의 중앙값들의 차이로 사출시간과 보압 시간을 평가할 수 있으며 Table 5에 나타내었다. 4번 항목은 금형의 표면 온도 항목으로 해당 시점의 금형 표면온도가 표시되며 5번 항목은 금형의

형개 신호로 “0”으로 표시되고 6번 항목에 형개 시점의 시간이 기록된다. 본 연구에서 개발한 사출서형공정 모니터링용 엣지 디바이스는 Fig. 21과 Table 5의 분석을 통해 사이클 타임, 사출시간, 보압시간, 금형 표면 온도, 냉각 시간을 평가할 수 있다.

5. 사출성형공정 모니터링 평가

5.1. 금형 온도 변화 모니터링 평가



Fig. 22 Installation of edge device

5인치 도광판 금형에 Fig. 22와 같이 사출성형공정 모니터링 엷지 디바이스를 장착한 후 Fig. 23과 같이 150톤 고속사출성형기(LGE150-III-DHS, LSMtron)을 이용하여 공정 모니터링 평가를 진행하였다. 금형의 온도 변화를 모니터링하기 위해 사출성형기는 실제 사출성형은 진행하지 않으면서 기계만 작동하는 드라이 사이클(dry cycle)로 구동하고 온조기의 냉각수 온도를 45℃로 설정한 후 금형의 온도가 상온에서 상승하는 과정을 엷지 디바이스를 통해 모니터링하였다.

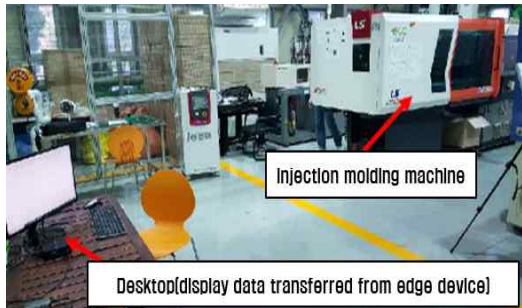


Fig. 23 Injection molding process monitoring test

Fig. 24와 Fig. 25에는 엷지 디바이스에서 블루투스를 통해 전송되어 데스크탑에 표시되는 데이터와 금형의 온도 변화에 대한 모니터링 결과를 나타내었다. 실험 결과, 엷지 디바이스를 통해 모니터링한 금형의 온도는 온조기로 설정한 냉각수 온도로 상승하는 것을 확인할 수 있으며 접촉식 온도계로 금형 표면의 온도를 직접 측정된 결과, 엷지 디바이스에서 모니터링한 온도와 유사한 값을 나타내는 것을 확인하였다.

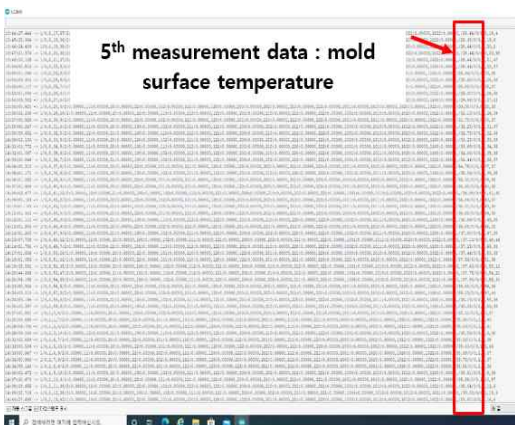


Fig. 24 Desktop displayed data transferred from edge device

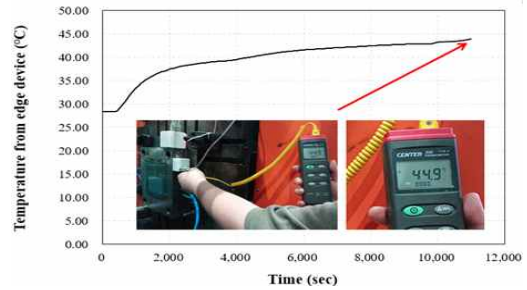


Fig. 25 Mold surface temperature

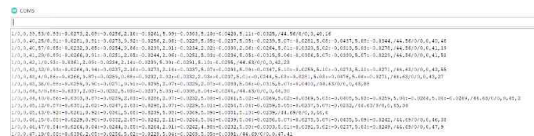
5.2. 공정 시간 모니터링 평가

사출성형공정 모니터링용 엷지 디바이스의 공정 시간 모니터링 평가를 진행하기 위해 Table 6의 성형 조건을 적용하여 5가지 조건의 사출성형을 진행하고 엷지 디바이스의 모니터링 데이터와 사출성형기 상에 기록된 셋(공정) 데이터를 비교하였다. 각 성형조건들은 사출시간, 보압시간, 냉각시간, 사이클 타임을 각기 다르게 구현한 조건들이며 이를 통해 엷지 디바이스의 공정 시간 모니터링 기능을 평가하였다.

Table 6 No.2 Injection molding conditions

Conditions	Value					Unit
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	
Melt temperature	225	225	225	225	225	℃
Mold temperature	50	50	50	40	40	℃
Injection speed	25	20	45	40	30	mm/s (screw diameter 25 mm)
Packing pressure	220	200	200	290	225	bar
Packing time	3.00	1.00	2.00	3.00	4.00	sec
Cooling time	15.00	25.00	30.00	30.00	35.00	sec

Fig. 26에는 각 성형조건에 대해 엷지 디바이스에서 저송된 데이터가 타 기기에서 모니터링되는 결과를 나타내었으며 해당 결과들을 Table 7부터 Table 11에 각 모니터링 항목에 맞게 정리하여 나타내었다.



(a) No.1 injection molding conditions : 225℃ of melt temperature, 50℃ of mold temperature, 25 mm/s of injection speed, 220 bar of packing pressure, 3.00 sec of packing time, 15.00 sec of cooling time

Fig. 26 Displayed monitoring data transferred from edge device according to injection molding conditions (continued)

CGMS

No.	Mold closed time (min, sec)	Injection start	V/P switchover	Packing end	Mold surface temperature (°C)	Mold open time (min, sec)
1	1, 16	0.90	2.35	3.34	43.94	1, 46
2	1, 56	0.89	2.34	3.35	43.94	2, 26
3	2, 36	0.87	2.32	3.29	44.00	3, 6
4	3, 16	0.85	2.30	3.31	44.00	3, 47
5	3, 56	0.93	2.38	3.38	44.00	4, 27
6	4, 36	0.87	2.32	3.33	44.00	5, 7
7	5, 16	0.94	2.39	3.39	44.00	5, 47
8	5, 56	0.91	2.36	3.36	44.00	6, 27
9	6, 37	0.85	2.30	3.26	44.00	7, 7
10	7, 17	0.88	2.33	3.33	44.06	7, 47

(b) No.2 injection molding conditions : 225°C of melt temperature, 50°C of mold temperature, 20 mm/s of injection speed, 200 bar of packing pressure, 1.00 sec of packing time, 25.00 sec of cooling time

CGMS

No.	Mold closed time (min, sec)	Injection start	V/P switchover	Packing end	Mold surface temperature (°C)	Mold open time (min, sec)
1	1, 0	0.84	1.45	3.42	43.63	1, 35
2	1, 45	0.91	1.52	3.47	43.69	2, 21
3	2, 30	0.87	1.49	3.44	43.69	3, 6
4	3, 15	0.85	1.47	3.45	43.69	3, 51
5	4, 1	0.90	1.48	3.49	43.63	4, 36
6	4, 46	0.86	1.45	3.43	43.63	5, 21
7	5, 31	0.91	1.52	3.49	43.63	6, 7
8	6, 16	0.90	1.5	3.52	43.63	6, 52
9	7, 1	0.86	1.47	3.46	43.56	7, 37
10	7, 47	0.92	1.52	3.52	43.56	8, 22

(c) No.3 injection molding conditions : 225°C of melt temperature, 50°C of mold temperature, 45 mm/s of injection speed, 200 bar of packing pressure, 2.00 sec of packing time, 30.00 sec of cooling time

CGMS

No.	Mold closed time (min, sec)	Injection start	V/P switchover	Packing end	Mold surface temperature (°C)	Mold open time (min, sec)
1	50, 2	0.86	1.62	4.58	39.94	50, 39
2	50, 48	0.93	1.70	4.66	39.94	51, 25
3	51, 35	0.90	1.63	4.64	39.94	52, 12
4	52, 21	0.89	1.62	4.61	39.94	52, 58
5	53, 7	0.91	1.66	4.65	39.94	53, 44
6	53, 54	0.94	1.69	4.67	40.00	54, 31
7	54, 40	0.91	1.66	4.66	39.94	55, 17
8	55, 27	0.93	1.69	4.67	39.94	56, 3
9	56, 13	0.92	1.66	4.65	39.94	56, 50
10	56, 59	0.86	1.63	4.60	39.94	57, 36

(d) No.4 injection molding conditions : 225°C of melt temperature, 40°C of mold temperature, 40 mm/s of injection speed, 290 bar of packing pressure, 3.00 sec of packing time, 30.00 sec of cooling time

CGMS

No.	Mold closed time (min, sec)	Injection start	V/P switchover	Packing end	Mold surface temperature (°C)	Mold open time (min, sec)
1	44, 13	0.91	1.92	5.88	39.94	44, 56
2	45, 6	0.87	1.84	5.84	40.00	45, 49
3	45, 58	0.89	1.88	5.84	40.00	46, 41
4	46, 51	0.89	1.87	5.85	40.00	47, 34
5	47, 43	0.89	1.85	5.85	40.06	48, 26
6	48, 36	0.89	1.87	5.85	40.00	49, 19
7	49, 29	0.91	1.87	5.88	40.00	50, 12
8	50, 21	0.93	1.89	5.89	40.06	51, 4
9	51, 14	0.93	1.91	5.89	40.06	51, 57
10	52, 6	0.92	1.93	5.89	40.06	52, 50

(e) No.5 injection molding conditions : 225°C of melt temperature, 40°C of mold temperature, 30 mm/s of injection speed, 225 bar of packing pressure, 4.00 sec of packing time, 35.00 sec of cooling time

Fig. 26 Displayed monitoring data transferred from edge device according to injection molding conditions

Table 7 Measured data by edge device for No.1 conditions

No.	Mold closed time (min, sec)	Acceleration time (sec)			Mold surface temperature (°C)	Mold open time (min, sec)
		Injection start	V/P switchover	Packing end		
1	39, 53	0.93	2.10	5.10	44.56	40, 16
2	40, 25	0.91	2.08	5.08	44.56	40, 48
3	40, 57	0.85	2.02	5.02	44.56	41, 19
4	41, 29	0.90	2.06	5.06	44.56	41, 51
5	42, 01	0.93	2.12	5.12	44.63	42, 23
6	42, 32	0.94	2.12	5.12	44.63	42, 55
7	43, 04	0.87	2.03	5.03	44.63	43, 27
8	43, 36	0.90	2.07	5.07	44.63	43, 58
9	44, 08	0.86	2.03	5.03	44.63	44, 30
10	44, 40	0.87	2.05	5.05	44.63	45, 02

Table 8 Measured data by edge device for No.2 conditions

No.	Mold closed time (min, sec)	Acceleration time (sec)			Mold surface temperature (°C)	Mold open time (min, sec)
		Injection start	V/P switchover	Packing end		
1	1, 16	0.90	2.35	3.34	43.94	1, 46
2	1, 56	0.89	2.34	3.35	43.94	2, 26
3	2, 36	0.87	2.32	3.29	44.00	3, 6
4	3, 16	0.85	2.30	3.31	44.00	3, 47
5	3, 56	0.93	2.38	3.38	44.00	4, 27
6	4, 36	0.87	2.32	3.33	44.00	5, 7
7	5, 16	0.94	2.39	3.39	44.00	5, 47
8	5, 56	0.91	2.36	3.36	44.00	6, 27
9	6, 37	0.85	2.30	3.26	44.00	7, 7
10	7, 17	0.88	2.33	3.33	44.06	7, 47

Table 9 Measured data by edge device for No.3 conditions

No.	Mold closed time (min, sec)	Acceleration time (sec)			Mold surface temperature (°C)	Mold open time (min, sec)
		Injection start	V/P switchover	Packing end		
1	1, 0	0.84	1.45	3.42	43.63	1, 35
2	1, 45	0.91	1.52	3.47	43.69	2, 21
3	2, 30	0.87	1.49	3.44	43.69	3, 6
4	3, 15	0.85	1.47	3.45	43.69	3, 51
5	4, 1	0.90	1.48	3.49	43.63	4, 36
6	4, 46	0.86	1.45	3.43	43.63	5, 21
7	5, 31	0.91	1.52	3.49	43.63	6, 7
8	6, 16	0.90	1.5	3.52	43.63	6, 52
9	7, 1	0.86	1.47	3.46	43.56	7, 37
10	7, 47	0.92	1.52	3.52	43.56	8, 22

Table 10 Measured data by edge device for No.4 conditions

No.	Mold closed time (min, sec)	Acceleration time (sec)			Mold surface temperature (°C)	Mold open time (min, sec)
		Injection start	V/P switchover	Packing end		
1	50, 2	0.86	1.62	4.58	39.94	50, 39
2	50, 48	0.93	1.70	4.66	39.94	51, 25
3	51, 35	0.90	1.63	4.64	39.94	52, 12
4	52, 21	0.89	1.62	4.61	39.94	52, 58
5	53, 7	0.91	1.66	4.65	39.94	53, 44
6	53, 54	0.94	1.69	4.67	40.00	54, 31
7	54, 40	0.91	1.66	4.66	39.94	55, 17
8	55, 27	0.93	1.69	4.67	39.94	56, 3
9	56, 13	0.92	1.66	4.65	39.94	56, 50
10	56, 59	0.86	1.63	4.60	39.94	57, 36

Table 11 Measured data by edge device for No.5 conditions

No.	Mold closed time (min, sec)	Acceleration time (sec)			Mold surface temperature (°C)	Mold open time (min, sec)
		Injection start	V/P switchover	Packing end		
1	44, 13	0.91	1.92	5.88	39.94	44, 56
2	45, 6	0.87	1.84	5.84	40.00	45, 49
3	45, 58	0.89	1.88	5.84	40.00	46, 41
4	46, 51	0.89	1.87	5.85	40.00	47, 34
5	47, 43	0.89	1.85	5.85	40.06	48, 26
6	48, 36	0.89	1.87	5.85	40.00	49, 19
7	49, 29	0.91	1.87	5.88	40.00	50, 12
8	50, 21	0.93	1.89	5.89	40.06	51, 4
9	51, 14	0.93	1.91	5.89	40.06	51, 57
10	52, 6	0.92	1.93	5.89	40.06	52, 50

엣지 디바이스에서 측정된 모니터링 데이터와 사출성형기 상의 샷(공정) 데이터를 비교한 결과를 Table 12부터 Table 16에 나타내었다. 사이클 타임 항목에서는 1번 조건이 평균 0.59±0.02%, 2번 조건이 0.23±0.01%, 3번 조건이 0.76±0.46%, 4번 조건이 1.03±0.26%, 5번 조건이 0.91±0.21% 오차를 나타내며 실제 사출성형기에서 측정되는 사이클 타임과 유사한 수준의 값이 엣지 디바이스에서 측정되었다. 사출시간 항목에서는 각각 0.51±0.57%, 0.97±0.55%, 1.83±1.17%, 2.03±1.24%, 1.65±1.32%의 오차를 보이며 전체적으로 5% 미만의 작은 수준의 편차를 나타내었다. 이는 보압 시간 항목에서도 확인되며 각각 0.23±0.30%, 0.85±1.29%, 1.25±0.84%, 0.63±0.43%, 0.48±0.39%의 오차로 설정된 보압 시간과 유사한 수준을 나타내었다. 따라서, 금형의 온도 변화 모니터

링과 사이클 타임, 사출시간, 보압시간의 모니터링 결과를 토대로 본 연구에서 개발한 사출성형공정 모니터링용 엣지 디바이스의 높은 모니터링 정확성과 신뢰성을 확인하였다.

반면, 냉각시간의 경우에는 각각 8.93±3.20%, 6.26±0.04%, 6.71±1.63%, 7.22±1.01%, 6.11±0.85%의 비교적 큰 오차가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이는 사출성형기 작동 등에 의한 오차이며 냉각 공정이 종료된 후, 금형이 형개되어 마그네틱 홀 센서의 신호가 “0”이 될 때까지의 시간 지연 등이 엣지 디바이스 신호에 포함되어 있기 때문에 편차가 다른 공정 시간보다 크게 나타난다. 그러나 동일한 공정에서 일정한 수준의 냉각 시간 값을 나타내는 것을 확인할 수 있으며 공정의 변화를 감지하고 평가하는 지표로써 사용가능하다.

Table 12 Compared data from edge device and injection molding machine (No.1 conditions)

No.	Process(cycle) time(sec)			Injection time(sec)			Packing time(sec)			Cooling time(sec)		
	Edge device	Injection molding machine	%Error	Edge device	Injection molding machine	%Error	Edge device	Injection molding machine	%Error	Edge device	Injection molding machine	%Error
1	32	31.81	0.60	1.17	1.17	0.00	3.00	3.00	0.00	16.90	15.00	12.67
2	32	31.81	0.60	1.17	1.17	0.00	2.99	3.00	0.33	16.93	15.00	12.87
3	32	31.82	0.57	1.17	1.17	0.00	3.00	3.00	0.00	15.98	15.00	6.53
4	32	31.82	0.57	1.16	1.17	0.85	3.00	3.00	0.00	15.94	15.00	6.27
5	32	31.82	0.57	1.19	1.17	1.71	2.98	3.00	0.67	15.90	15.00	6.00
6	32	31.81	0.60	1.18	1.17	0.85	2.98	3.00	0.67	16.90	15.00	12.67
7	32	31.82	0.57	1.16	1.17	0.85	3.00	3.00	0.00	16.97	15.00	13.13
8	32	31.82	0.57	1.17	1.17	0.00	3.00	3.00	0.00	15.93	15.00	6.20
9	32	31.81	0.60	1.17	1.17	0.00	3.00	3.00	0.00	15.97	15.00	6.47
10	32	31.81	0.60	1.18	1.17	0.85	2.98	3.00	0.67	15.97	15.00	6.47
Avg.	32	31.82	0.59	1.17	1.17	0.51	2.99	3.00	0.23	16.34	15.00	8.93

Table 13 Compared data from edge device and injection molding machine (No.2 conditions)

No.	Process(cycle) time(sec)			Injection time(sec)			Packing time(sec)			Cooling time(sec)		
	Edge device	Injection molding machine	%Error	Edge device	Injection molding machine	%Error	Edge device	Injection molding machine	%Error	Edge device	Injection molding machine	%Error
1	40	40.09	0.22	1.46	1.45	0.69	0.99	1.00	1.00	26.55	25.00	6.20
2	40	40.10	0.25	1.43	1.45	1.38	1.01	1.00	1.00	26.56	25.00	6.24
3	40	40.09	0.22	1.45	1.45	0.00	0.97	1.00	0.00	26.58	25.00	6.32
4	40	40.09	0.22	1.43	1.45	1.38	1.01	1.00	1.00	26.56	25.00	6.24
5	40	40.09	0.22	1.43	1.45	1.38	1.00	1.00	0.00	26.57	25.00	6.28
6	40	40.09	0.22	1.45	1.45	0.00	1.01	1.00	0.50	26.55	25.00	6.18
7	40	40.10	0.25	1.44	1.45	0.69	1.00	1.00	0.50	26.57	25.00	6.26
8	40	40.10	0.25	1.43	1.45	1.38	1.00	1.00	0.00	26.57	25.00	6.28
9	40	40.09	0.22	1.47	1.45	1.38	0.96	1.00	4.50	26.58	25.00	6.30
10	40	40.09	0.22	1.43	1.45	1.38	1.00	1.00	0.00	26.57	25.00	6.28
Avg.	40	40.09	0.23	1.44	1.45	0.97	0.99	1.00	0.85	26.56	25.00	6.26

Table 14 Compared data from edge device and injection molding machine (No.3 conditions)

No.	Process(cycle) time(sec)			Injection time(sec)			Packing time(sec)			Cooling time(sec)		
	Edge device	Injection molding machine	%Error	Edge device	Injection molding machine	%Error	Edge device	Injection molding machine	%Error	Edge device	Injection molding machine	%Error
1	45	45.24	0.53	0.61	0.60	1.67	1.97	2.00	1.75	31.43	30.00	4.75
2	45	45.23	0.51	0.61	0.60	1.67	1.95	2.00	2.50	32.44	30.00	8.13
3	45	45.24	0.53	0.62	0.60	3.33	1.95	2.00	2.75	32.44	30.00	8.12
4	46	45.24	1.68	0.62	0.60	3.33	1.98	2.00	1.00	32.40	30.00	8.00
5	45	45.24	0.53	0.58	0.60	3.33	2.01	2.00	0.50	31.41	30.00	4.70
6	45	45.24	0.53	0.59	0.60	1.67	1.98	2.00	1.00	31.43	30.00	4.77
7	45	45.24	0.53	0.61	0.60	1.67	1.97	2.00	1.50	32.42	30.00	8.07
8	45	45.24	0.53	0.60	0.60	0.00	2.02	2.00	1.00	32.38	30.00	7.93
9	46	45.24	1.68	0.61	0.60	1.67	1.99	2.00	0.50	32.40	30.00	8.00
10	45	45.24	0.53	0.60	0.60	0.00	2.00	2.00	0.00	31.40	30.00	4.67
Avg.	45	45.24	0.76	0.61	0.60	1.83	1.98	2.00	1.25	32.01	30.00	6.71

Table 15 Compared data from edge device and injection molding machine (No.4 conditions)

No.	Process(cycle) time(sec)			Injection time(sec)			Packing time(sec)			Cooling time(sec)		
	Edge device	Injection molding machine	%Error	Edge device	Injection molding machine	%Error	Edge device	Injection molding machine	%Error	Edge device	Injection molding machine	%Error
1	46	46.38	0.82	0.76	0.74	2.70	2.96	3.00	1.33	32.28	30.00	7.60
2	47	46.38	1.34	0.77	0.74	4.05	2.96	3.00	1.33	32.27	30.00	7.57
3	46	46.38	0.82	0.73	0.74	1.35	3.01	3.00	0.33	32.26	30.00	7.53
4	46	46.38	0.82	0.73	0.74	1.35	2.99	3.00	0.33	32.28	30.00	7.60
5	47	46.38	1.34	0.75	0.74	1.35	2.99	3.00	0.33	32.26	30.00	7.53
6	46	46.38	0.80	0.75	0.74	1.35	2.98	3.00	0.67	32.27	30.00	7.57
7	47	46.38	1.34	0.75	0.74	1.35	3.00	3.00	0.00	32.25	30.00	7.50
8	46	46.38	0.82	0.76	0.74	2.70	2.98	3.00	0.67	31.26	30.00	4.20
9	46	46.38	0.82	0.74	0.74	0.00	2.99	3.00	0.33	32.27	30.00	7.57
10	47	46.38	1.34	0.77	0.74	4.05	2.97	3.00	1.00	32.26	30.00	7.53
Avg.	46	46.38	1.03	0.75	0.74	2.03	2.98	3.00	0.63	32.17	30.00	7.22

Table 16 Compared data from edge device and injection molding machine (No.5 conditions)

No.	Process(cycle) time(sec)			Injection time(sec)			Packing time(sec)			Cooling time(sec)		
	Edge device	Injection molding machine	%Error	Edge device	Injection molding machine	%Error	Edge device	Injection molding machine	%Error	Edge device	Injection molding machine	%Error
1	53	52.61	0.74	1.01	0.97	4.12	3.96	4.00	1.00	37.03	35.00	5.80
2	52	52.61	1.16	0.97	0.97	0.00	4.00	4.00	0.00	37.03	35.00	5.80
3	53	52.60	0.76	0.99	0.97	2.06	3.96	4.00	1.00	37.05	35.00	5.86
4	52	52.61	1.16	0.98	0.97	1.03	3.98	4.00	0.50	37.04	35.00	5.83
5	53	52.61	0.74	0.96	0.97	1.03	4.00	4.00	0.00	37.04	35.00	5.83
6	53	52.61	0.74	0.98	0.97	1.03	3.96	4.00	0.50	37.06	35.00	5.89
7	52	52.61	1.16	0.96	0.97	1.03	4.01	4.00	0.25	37.03	35.00	5.80
8	53	52.61	0.74	0.96	0.97	1.03	4.00	4.00	0.00	37.04	35.00	5.83
9	52	52.61	1.16	0.98	0.97	1.03	3.98	4.00	0.50	37.04	35.00	5.83
10	53	52.61	0.71	1.01	0.97	4.12	3.96	4.00	1.00	38.03	35.00	8.66
Avg.	53	52.61	0.91	0.98	0.97	1.65	3.98	4.00	0.48	37.14	35.00	6.11

4. 결론 및 토의

본 연구에서는 사출성형 중 금형의 진동(가속도) 신호와 금형 표면의 온도를 측정하여 공정을 모니터링하는 사출성형공정 모니터링용 옛지 디바이스를 개발하였다. 옛지 디바이스는 금형 표면에 설치할 수 있는 구조로 가속도 센서, 온도 센서, 마그네틱 홀 센서를 적용하여 개발하였다. 사출성형 중 금형의 진동 신호를 측정하여 사출시간과 보압시간을 산출하였으며 마그네틱 홀 센서를 이용하여 금형의 형폐, 형개 신호를 감지하고 사이클 타임과 냉각시간을 측정한다. 다음 사출성형기 상에 기록되는 셋(공정) 데이터와 비교하여 해당 디바이스의 정확성과 신뢰성을 평가하였다.

실험 결과, 사출성형공정 모니터링용 옛지 디바이스를 통해 측정된 금형의 진동 신호는 “사출시작”, “보압절환”, “보압종료” 구간으로 구분할 수 있으며 해당 구간의 중앙값(mediana)을 대표 시간으로 정하여 “보압절환” 시간과 “사출시작” 시간의 차이는 “사출시간”, “보압종료” 시간과 “보압절환” 시간의 차이는 “보압시간”으로 평가하였다. 그리고 실제 사출성형기에 기록되는 시간과 비교하였을 때, “사출시간”은 $1.40 \pm 1.17\%$, “보압시간”은 $0.69 \pm 0.82\%$ 의 오차를 가지며 매우 정확한 공정 시간을 모니터링하는 것을 확인하였다.

마그네틱 홀 센서에 측정되는 금형의 형폐 신호를 이용하여 형폐 시점을 옛지 디바이스에 기록하였으며 각 공정에서의 형폐 시점 간의 차이를 이용하여 사이클 타임을 평가하였다. 옛지 디바이스에서 모니터링한 사이클 타임과 실제 사출성형기 상의 사이클 타임을 비교한 결과, $0.70 \pm 0.38\%$ 의 매우 작은 오차로 실제와 유사한 사이클 타임을 획득할 수 있음을 확인하였다.

반면, 옛지 디바이스에서 측정되는 사이클 타임과 사출시간, 보압시간을 이용하여 산출한 냉각시간의 경우에는 실제 사출성형기 상에 설정한 냉각시간과 비교하여 $7.05 \pm 1.99\%$ 의 오차를 나타내었으며 이는 다른 공정 시간과 비교하여 다소 큰 수준이다. 그러나 해당 편차는 사출성형기 구동과 옛지 디바이스 측정 방식에 따른 기계적인 편차로 동일한 공정에서 일정한 수준의 동일한 값을 나타내는 것을 확인할 수 있으며 공정의 변화를 감지하고 평가하는 지표로서 사용가능함을 확인하였다.

따라서, 본 연구에서 개발한 사출성형공정 모니

터링용 옛지 디바이스는 사출성형공정에 대한 단계별 공정시간과 금형의 온도를 정확하게 모니터링할 수 있어 기존 모니터링 방식 대비 보다 효율적이고 정확한 공정 관리와 제품의 품질 관리를 구현할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 금형에 추가적인 구조 가공 없이 표면에 부착하는 방식으로 설치 편의성을 향상시켰으며 저비용의 가속도 센서, 온도 센서, 마그네틱 홀 센서를 적용하여 비용적인 면에서 일반 산업 현장의 기술 도입 장벽을 낮출 수 있을 것으로 기대된다.

후기

본 연구는 기획재정부의 중소중견기업생산기술 실용화및기술지원 사업(Project No. JF200027)의 지원과 산업통상자원부의 기계산업핵심기술개발사업(Project No. KM200224, 10067766)의 지원으로 진행되었습니다.

참고문헌

- 1) Mok, S. L., Kwong, C. K., Grasser, F., D'Arrigo, A., and Colombi, S., “Application of artificial neural network and fuzzy logic in a case-based system for initial process parameter setting of injection molding”, *J. Intell. Manuf.*, Vol. 13, No. 3, pp. 165-176, 2002.
- 2) Michaeli, W., and Schreiber, A. “Online Control of the Injection Molding Process Based on Process Variables”, *Adv. Polym. Tech.*, Vol. 28, No. 2, pp. 65-76, 2002.
- 3) Chen, J. Y., Yang, K. J., and Huang, S. M., “nline quality monitoring of molten resin in injection molding”, *nt. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 122, pp. 681-693, 2018.
- 4) Lee, J. H., and Kim, J. S., “A study on monitoring for process time and process properties by measuring vibration signals transmitted to the mold during injection molding”, *J. Korea Society of Die & Mold Engineering*, Vol. 14, No. 3, pp. 8-16, 2020.
- 5) Zhang, Z., Chen, J. C., and Zhu, J., “Development of an in-process, gap-caused flash monitoring system in injection molding processes”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 26, pp. 1237-1245, 2005.

저자 소개

김 종 선(Jong-Sun Kim)

[정회원]



- 2005년 8월 : 단국대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2006 3월~현재: 한국생산기술연구원 형상제조연구부(금형), 수석연구원

< 관심분야 >

사출성형 및 금형, 유동해석

이 준 한(Jun-Han Lee)

[학생회원]



- 2017년 2월 : 단국대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2017년 3월~현재 : 단국대학교 기계공학과 (박사과정)
- 2015년 3월~현재: 한국생산기술연구원 형상제조연구부(금형), 학연협동과정생

< 관심분야 >

사출성형 및 금형, 유동해석

컴퓨터 시뮬레이션(PC-CRASH)을 이용한 터널 내 피추돌 차량의 충돌 속도 추정에 관한 연구

한창평¹ · 최홍주[†]

상지대학교 스마트자동차학과¹ · 상지대학교 전자공학과[†]

A study on the estimation of impact velocity of crashed vehicles in tunnel using computer simulation(PC-CRASH)

Chang-Pyoung Han¹ · Hong-Ju Choi[†]

Department of Smart Automobile Engineering, Sangji University¹

Department of Electronic Engineering, Sangji University[†]

(Received December 06, 2020 / Revised December 28, 2020 / Accepted December 31, 2020)

Abstract: In a vehicle-to-vehicle accident, the impact posture, braking status, final stopping position, collision point and collision speed are important factors for accident reconstruction. In particular, the speed of collision is the most important issue. In this study, the collision speed and the final stopping position in the tunnel were estimated using PC-CRASH, a vehicle crash analysis program used for traffic accident analysis, and the final stopping position of the simulation and the final stopping position of the traffic accident report were compared. When the Pride speed was 0km/h or 30km/h and the Sorento speed was 100m/h, the simulation results and reports matched the final stopping positions and posture of the two vehicles. As a result of the simulation, it can be estimated that Pride was collided in an almost stationary state.

Key Words: PC-CRASH, Collision Velocity, Final Position, Prediction Model, Accident Reconstruction

1. 서 론

산지와 구릉이 70% 이상인 우리나라의 지형 특징으로 고속도로 설계 시 터널의 수요와 터널의 장대화가 증가하는 추세를 보인다. 터널 진입 전후 속도 차, 폐쇄적이고 어두운 터널 내 주행환경에 따른 운전자의 터널 내 심리적 불안감 변화 등은 사고의 위험성을 높인다. 터널 내 교통사고 원인 중 약 80% 이상이 운전자 과실로 인한 것이다. 고속도로 터널 내 교통사고는 인명피해를 동반한 대형 사고가 잦고, 2차, 3차 사고를 유발할 수 있다. 터널 내 교통사고로 인한 사고처리 시간은 다른 구간보다 길게 나타날 가능성이 크다.

조병찬은 고속도로 터널을 대상으로 주간에 터널

구간에서 자유속도로 주행할 때 터널 구간에서의 속도 변화를 살펴보고 이러한 속도 변화에 영향을 미치는 요인을 분석하였다¹⁾.

박주환은 터널 구간 교통사고에 영향을 미치는 교통 및 도로 조건 등 교통사고 영향 요인을 토대로 회귀 분석을 수행하여 터널 구간 교통사고 예측 모형을 개발하였다²⁾.

EDR 기록 정보 추출이 가능하지 않은 사고 차량에 대해서는 차량의 파손 사진과 최종 정지 위치 등을 바탕으로 사고 재구성을 해야 한다. 차대 차 사고에서 충격 자세, 제동 여부, 최종 정지 위치, 충격 지점 및 충돌 속도는 사고 재구성을 위한 중요한 요소이다. 특히, 충돌 속도는 가장 중요한 쟁점이다.

PC-CRASH는 교통사고 분야에서 사고 재구성에 사용하는 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램이다. Newton 역학을 기반으로 충돌 전 속도 및 충돌 자세 등과 같은 다양한 변수들을 고려하여 차량의 충돌 후 거

1. 상지대학교 스마트자동차학과
[†] 교신저자: 상지대학교 전자공학
E-mail: choifeilong@sangji.ac.kr

동을 모사할 수 있고 사고에 대한 해석 및 3차원 사고 재구성을 할 수 있다³⁷⁾.

본 연구에서는 컴퓨터 시뮬레이션(PC-CRASH)을 이용하여 터널 내 차대 차 충돌 사고 속도에서 충돌 속도와 최종 정지 위치를 추정하였고, 교통사고 조사 보고서의 최종 정지 위치와 비교하였다. 이를 토대로 시뮬레이션에서 추정된 충돌 속도 결과를 검증하였다.

2. 충돌 속도 추정

사고 장소는 영동고속도로 둔내터널 입구로부터 약 2.8km 진입한 터널 내이고, 사고지점으로부터 후방에 비상주차대가 위치한다.

평창 방면에서 원주 방면으로 설치된 둔내터널 길이는 약 3.3km이고 사고지점은 터널 입구로부터 약 2.8km 진입한 편도 2차로 상에서 앞서 주행하던 프라이드가 불상의 원인으로 제동 정지하는 것을 뒤늦게 발견하고 프라이드의 후미 좌측 부위를 쏘렌토의 전면 우측 부위로 충돌하여 프라이드가 앞으로 튕겨서 전면 우측 부위로 노면을 충돌하고 약 10시 내외 방향으로 2차로 상에 최종 정지하고, 쏘렌토는 프라이드보다 앞으로 더 진행하여 1차로 상에 전진이 약 12시 방향을 향해 최종 정지한 사고이다.

사고 현장에서 타이어 흔적은 찾아볼 수 없었고, 프라이드 후미의 함몰된 손상 정도로 볼 때 쏘렌토의 우 전면으로 충돌한 사실이 있으나, 양 차량의 위치를 표시하지 않아 명확한 최종 위치를 알 수 없다. 두 차량의 파손 부위에 따른 충돌 거동을 검토하여 충돌 속도를 추정한다.

사고 현장에 프라이드의 속도를 추정할 만한 명확한 물리적인 흔적이 없어 충돌 직전 속도를 추정하기는 어렵다. 프라이드가 쏘렌토보다 앞서 진행한 점으로 보아 쏘렌토보다 속도가 낮은 것으로 추정할 수 있고, 쏘렌토가 영동고속도로로 최고 제한속도보다 높게 주행했다면 CCTV에 적발되었을 것으로 사료되며, 속도 초과로 적발된 기록이 없다면 쏘렌토의 추정 속도는 최고 제한속도 범위 내외일 것으로 추정할 수 있다.

일차원 상대 충돌에서 쌍방이 50km/h 속도로 정면 충돌하였을 때, 상대 충돌 속도는 식 (1)처럼

$$V = 50 + 50 = 100\text{km/h} \quad (1)$$

이다. 추돌인 경우에는 대체적으로 1차원 충돌이다. 앞차의 속도가 50km/h이고 뒷차의 속도가 100km/h

로 추돌한 경우, 상대 충돌 속도는 식(2)처럼

$$V = 100 - 50 = 50\text{km/h} \quad (2)$$

이다. 충돌 전에는 추돌 차량(쏘렌토)의 속도가 피추돌 차량(프라이드)의 속도보다 높지만, 충돌 후에는 피추돌 차량의 속도가 추돌 차량의 속도보다 낮아진다.



Fig. 1 The front right side of Sorento is collapsed

Fig. 1처럼 쏘렌토의 우 전면부터 우 전륜 부위가 함몰되어 있고, 조수석 문짝에 부분적인 간접 손상이 발생하였다. 쏘렌토의 좌 전면을 포함한 좌측 부위 손상은 미미한 정도이다.

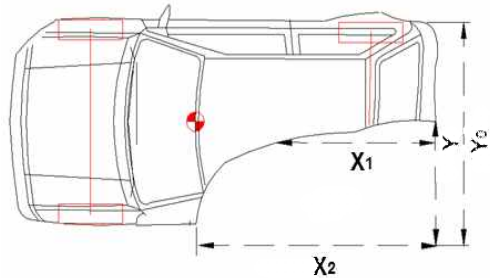


Fig. 2 Damaged part of pride

프라이드는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 좌측 후미 부위부터 운전석 부위까지 함몰되어 지붕이 손상되었다. 운전석 시트가 조수석으로 밀려 있고, 운전석 안전벨트가 기둥에 감겨 있다. 전면 유리 우측은 간접 손상으로 파손되고, 앞 범퍼 우측 부위가 파손되는 등 프라이드는 쏘렌토로부터 추돌 되어 차체 후부가 운전석 부위까지 심하게 압착 되었다.

프라이드의 파손 상태는 약 $X_1 = 1.30\text{m}$, $X_2 = 1.91\text{m}$, $Y = 0.96\text{m}$ 및 $Y_0 = 1.605\text{m}$ 로 추정된다.

프라이드 소성 변형량을 토대로 충돌 유효 속도의 산출 방법을 적용하여 사고 당시 쏘렌토의 충돌 속도를 산출한다. 프라이드의 평균 손상 깊이를 식(3)과 같이 구하면

$$X = \frac{Y}{Y_0} \times \frac{X_1 + X_2}{2} = 0.96\text{m} \quad (3)$$

이므로, 유효 충돌 속도는 식(4)와 같이 구하면 $V = 105.3X \approx 101.1\text{km/h}$ (4)이다. 즉, 프라이드의 후미를 추돌한 쏘렌토의 속도는 약 101.0km로 추정할 수 있다.

3. 피충돌 차량의 충돌 속도 추정

두 차량의 파손 부위에 따른 충돌 거동에 대하여 검토한 결과 교통사고 조사 보고서의 최종 정지 위치는 Fig. 3과 같다.

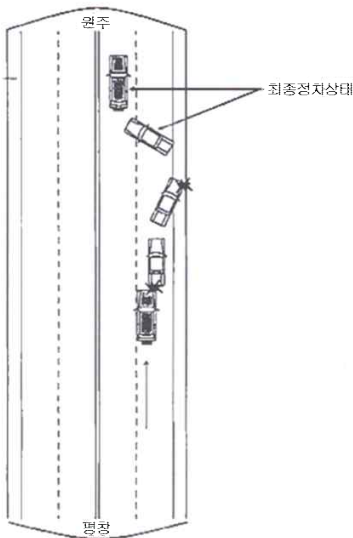


Fig. 3 Final position estimation

Fig. 3에서 프라이드는 1, 2차로에 걸쳐 10시 방향 각도로 최종 정지하였고, 쏘렌토는 1차로에 12시 방향 각도로 정지하였다.

교통사고 분야에서 사고 재구성에 사용하는 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램인 PC-CRASH를 이용하여 충돌 속도와 최종 정지 위치를 추정한다. 쏘렌토 주행 속도는 100km/h로 일정한 상태로 정하고, 프라이드 속도를 90km/h부터 10km/h씩 감속하여 시뮬레이션을 수행하였다.

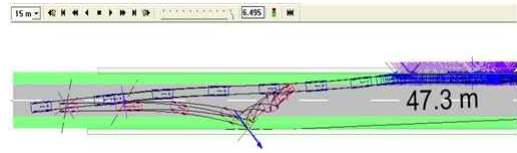


Fig. 4 Simulation 1

Fig. 4의 시뮬레이션 조건은 Table 1과 같다.

Table 1 Simulation 1

START VALUES	프라이드	쏘렌토
Velocity magnitude v [km/h]	90	100
Heading angle [°]	0.71	5.20
Velocity direction β [°]	0.71	5.20
Yaw velocity [rad/s]	0.00	0.00
Center of gravity x [m]	35.54	29.92
Center of gravity y [m]	-1.44	-1.35

Fig. 4에서 두 차량의 최종 위치에서 거리는 약 47.3m이다. 프라이드는 10시 방향 각도로 1차로에 최종 정지하며 Fig. 3의 결과와 유사하다. 쏘렌토는 차로를 벗어나 옹벽을 충돌하며 진행하므로 좌측 부위 손상을 추정할 수 있고, Fig. 1과 일치하지 않는다. 쏘렌토는 12시 방향 각도로 최종 정지하고, 정지하기까지 시간은 약 6.495초이다.

Fig. 4에서 쏘렌토의 좌측 부위 손상이 Fig. 1과 일치하지 않는다.

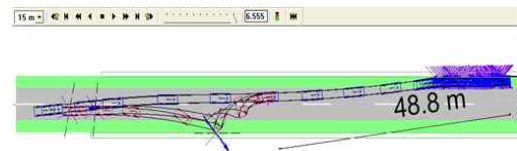


Fig. 5 Simulation 2

Fig. 5의 시뮬레이션 조건은 Table 1에서 프라이드 속도만 80km/h로 변경하였다. Fig. 5에서 두 차량의 최종 위치에서 거리는 약 48.8m이다. 프라이드는 12시 방향 각도로 1차로에 최종 정지한다. 쏘렌토는 차로를 벗어나 벽을 계속 충돌하며 진행하다 약 6.555초 후에 최종 정지하므로 좌측 부위 손상을 추정할 수 있다.

Fig. 5에서 프라이드의 방향과 최종 위치가 Fig. 3과 일치하지 않고, 쏘렌토의 좌측 부위 손상이 Fig. 1과 일치하지 않는다.

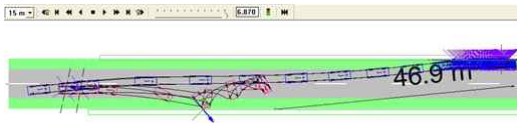


Fig. 6 Simulation 3

Fig. 6의 시뮬레이션 조건은 Table 1에서 프라이드 속도만 70km/h로 변경하였다. Fig. 6에서 두 차량의 최종 위치에서 거리는 약 46.9m이다. 프라이드는 2시 30분 방향 각도로 1, 2차로에 걸친 자세로 최종 정지한다. 쏘렌토는 차로를 벗어나 벽을 계속 충돌하며 진행하다 약 6.870초 후에 최종 정지하므로, 좌측 부위 파손을 추정할 수 있다.

Fig. 6에서 프라이드와 쏘렌토의 방향과 최종 위치가 Fig. 3과 일치하지 않고, 쏘렌토의 좌측 부위 손상이 Fig. 1과 일치하지 않는다.

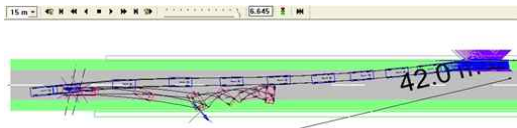


Fig. 7 Simulation 4

Fig. 7의 시뮬레이션 조건은 Table 1에서 프라이드 속도만 60km/h로 변경하였다. Fig. 7에서 두 차량의 최종 위치에서 거리는 약 42.0m이다. 프라이드는 3시 10분 방향 각도로 2차로에 최종 정지한다. 쏘렌토는 차로를 벗어나 벽을 계속 충돌하며 진행하다 약 6.645초 후에 최종 정지하므로, 좌측 부위 파손을 추정할 수 있다.

Fig. 7에서 프라이드와 쏘렌토의 방향과 최종 위치가 Fig. 3과 일치하지 않고, 쏘렌토의 좌측 부위 손상이 Fig. 1과 일치하지 않는다.

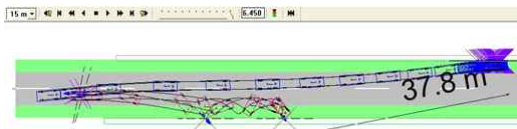


Fig. 8 Simulation 5

Fig. 8의 시뮬레이션 조건은 Table 1에서 프라이드 속도만 50km/h로 변경하였다. Fig. 8에서 두 차량의 최종 위치에서 거리는 약 37.8m이다. 프라이드는 2시 방향 각도로 노면에 걸쳐 최종 정지한다. 쏘렌토는 차로를 벗어나 벽을 계속 충돌하며 진행하다 약 6.45초 후에 최종 정지하므로, 좌측 부위 파손을 추정할 수 있다.

Fig. 8에서 프라이드의 방향과 최종 위치가 Fig. 3과 일치하지 않고, 쏘렌토의 좌측 부위 손상이 Fig. 1과 일치하지 않는다.

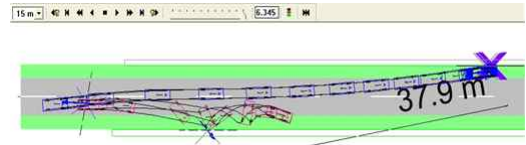


Fig. 9 Simulation 6

Fig. 9의 시뮬레이션 조건은 Table 1에서 프라이드 속도만 40km/h로 변경하였다. Fig. 9에서 두 차량의 최종 위치에서 거리는 약 37.9m이다. 프라이드는 1시 방향 각도로 노면에 걸쳐 최종 정지한다. 쏘렌토는 차로를 벗어나 벽을 계속 충돌하며 진행하다 약 6.345초 후에 최종 정지하므로, 좌측 부위 파손을 추정할 수 있다.

Fig. 9에서 프라이드와 쏘렌토의 방향과 최종 위치가 Fig. 3과 일치하지 않고, 쏘렌토의 좌측 부위 손상이 Fig. 1과 일치하지 않는다.

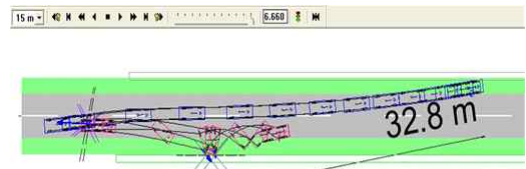


Fig. 10 Simulation 7

Fig. 10의 시뮬레이션 조건은 Table 1에서 프라이드 속도만 30km/h로 변경하였다. Fig. 9에서 두 차량의 최종 위치에서 거리는 약 32.8m이다. 프라이드는 11시 30분 방향 각도로 노면을 일부 걸쳐 최종 정지한다. 쏘렌토는 차로를 벗어나 벽을 계속 충돌하며 진행하다 약 6.660초 후에 11시 30분 방향으로 최종 정지하므로, 좌측 부위 파손을 추정할 수 있다.

Fig. 10에서 프라이드와 쏘렌토의 방향과 최종 위치가 Fig. 3과 일치하지 않고, 쏘렌토의 좌측 부위 손상이 Fig. 1과 일치하지 않는다.

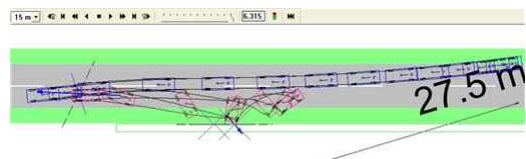


Fig. 11 Simulation 8

Fig. 11의 시뮬레이션 조건은 Table 1에서 프라이드 속도만 20km/h로 변경하였다. Fig. 11에서 두 차량의 최종 위치에서 거리는 약 27.5m이다. 프라이드는 11시 방향 각도로 노면에 걸쳐 최종 정지한다. 쏘렌토는 차로를 벗어나 벽을 계속 충돌하며 진행하다 약 6.315초 후에 11시 30분 방향으로 최종 정지하므로, 좌측 부위 파손을 추정할 수 있다.

Fig. 11에서 프라이드와 쏘렌토의 방향과 최종 위치가 Fig. 3과 일치하지 않고, 쏘렌토의 좌측 부위 파손이 Fig. 1과 일치하지 않는다.

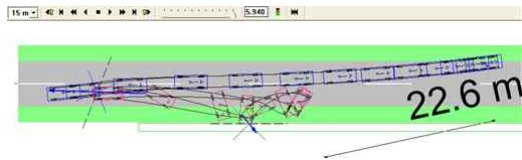


Fig. 12 Simulation 9

Fig. 12의 시뮬레이션 조건은 Table 1에서 프라이드 속도만 10km/h로 변경하였다. Fig. 12에서 두 차량의 최종 위치에서 거리는 약 22.6m이다. 프라이드는 옹벽을 1회 충돌하고 10시 방향 각도로 후미가 노면에 걸쳐 최종 정지한다. 쏘렌토는 차로를 약간 벗어나 약 5.940초 후에 11시 30분 방향으로 최종 정지한다. Fig. 12에서 쏘렌토의 방향과 최종 위치가 Fig. 3과 일치한다.

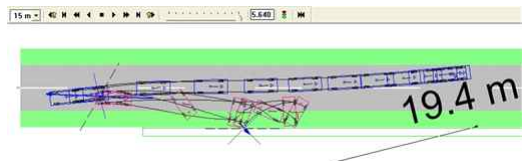


Fig. 13 Simulation 10

Fig. 13의 시뮬레이션 조건은 Table 1에서 프라이드는 정지 상태로 변경하였다. Fig. 13에서 두 차량의 최종 위치에서 거리는 약 19.4m이다. 프라이드는 옹벽을 1회 충돌하고 10시 방향 각도로 노면에 최종 정지한다. 쏘렌토는 차로를 약간 벗어나 약 5.640초 후에 11시 50분 방향으로 최종 정지한다.

Fig. 12에서 프라이드와 쏘렌토의 방향과 최종 위치가 Fig. 3과 일치한다.

시뮬레이션 결과 두 차량의 충돌 직전 속도가 높을수록 충돌 후 이동하는 거리가 크다는 것을 확인할 수 있다.

프라이드 속도 10km/h, 쏘렌토 속도 100km/h인 조건의 시뮬레이션 9와 프라이드 속도 0km/h, 쏘렌토 속도 100km/h인 조건의 시뮬레이션 10의 결과가 교통사고 조사 보고서에서 나타난 두 차량의 최종 정지 위치 및 자세와 유사하다는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 시뮬레이션 9보다 시뮬레이션 10의 결과가 두 차량의 최종 정지 위치 및 자세와 유사하다는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 영동고속도로 둔내터널 입구로부터 약 2.8km 진입한 터널 내에서 발생한 사고의 충돌 속도를 PC-CRASH를 통한 시뮬레이션을 이용하여 추정하였다.

후미 좌측 부위가 대파된 프라이드와 전면 우측 부위가 함몰된 쏘렌토의 물적 자료는 있지만 양 차량의 최종 정지 위치를 마킹하지 않아 명확한 위치가 불분명하여, 두 차량의 파손 부위에 따른 충돌 거동에 대하여 검토한 결과를 토대로 작성한 교통사고 발생 보고 실황조사서에 명시된 두 차량의 최종 정지 위치 및 자세를 토대로 시뮬레이션을 수행하였다.

프라이드 소성 변형량을 토대로 충돌 유효 속도의 산출 방법을 적용하면, 쏘렌토의 충돌 직전 속도는 약 101.1km/h로 추정할 수 있다.

피추돌 차량인 프라이드의 충돌 속도를 추정하기 위하여 PC-CRASH 시뮬레이션을 적용한 결과 100km/h의 속도로 진행하던 쏘렌토가 불상의 이유로 정지하였거나 10km/h 미만의 속도로 진행하던 프라이드를 추돌하였다는 것을 확인할 수 있었다.

향후 EDR 기록 정보가 존재하는 사고 사례와 비교 분석을 통해 PC-CRASH를 통한 시뮬레이션에 대한 신뢰성을 높일 수 있을 것이다.

참고문헌

- 1) Cho Byeong-chan, "A Study on the Factors Affecting the Speed Change in Tunnel", Hanyang University, 2010. 2.
- 2) Joo-Hwan Park, "Development of Traffic Accident Prediction Model for Highway Tunnel Section", Chonnam National University, 2012. 2.
- 3) Sanghyeon Lim, Wontaek Oh, Jihun Choi and

- Jongchan Park, “Estimation Collision Speed of Vehicle by Using PC-CRASH Collision Optimizer”, Transactions of KSAE, Vol. 27, No. 12, pp. 911-917, 2019.
- 4) Jong-Duck Kim and Jun-Kyu Yoon, “Reliable Study on the Collision Analysis of Traffic Accidents Using PC-Crash Program”, The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication(IIBC), Vol. 12, No. 5, pp. 115-122, 2012. 5.
- 5) Wang-su Ha and Seok-young Han, “Establishment of Important Impact Parameters of Traffic Accident Reconstruction Program 'PC-CRASH'”, Journal of Korean Society of Transportation, Vol. 21, No. 2, pp. 155-164, 2003. 04.
- 6) Jihun Choi, Jonhcheol Bag, Woosik Park, Myungchul Park and Seungchul Bae, “Study on the collision analysis by genetic algorithm in PC-CRASH”, Korean Journal Science, Vol. 10, No. 1, pp. 39-44, 2009.
- 7) Yong-Soon Choi, Se-Ryong Baek, Jong-Kil Jung, Jeong-Kwon Cho and Jun-Kyu Yoon, “A Study on the Rollover Behavior of SUV and Collision Velocity Prediction using PC-Crash Program”, The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication(IIBC), Vol. 18, No. 2, pp.

227-235, 2018.

저자 소개

한 창 평(Chang-Pyoung Han) [정회원]



- 1994년 2월: 경희대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2012년 3월~2019년 2월: 상지영서대학교 자동차과, 부교수
- 2020년 3월~현재: 상지대학교 스마트자동차학과, 부교수

< 관심분야 >

교통사고 분석 및 재현, 자동차 설계 및 안전

최 홍 주(Hong-Ju Choi) [정회원]



- 2000년 2월 : 건국대학교 전자공학과 (공학박사)
- 2012년 3월~2020년 2월 : 상지영서대학교 국방정보통신과, 조교수
- 2020년 3월~현재: 상지대학교 전자공학과, 조교수

< 관심분야 >

안테나 설계, RF 회로 설계, 이동통신시스템

머시닝센터를 활용한 알루미늄합금의 마찰교반용접 특성 분석

승영춘¹ · 박경도² · 이춘규[†]

공주대학교 금형설계공학과^{1,†} · 한국폴리텍대학 화성캠퍼스²

Analysis of friction stir welding characteristics of aluminum alloy using machining center

Young-Chun Seung¹ · Kyoung-Do Park² · Chun-Kyu Lee[†]

Department of Metal Mold Design Engineering, Kongju National University^{1,†}

Department of Computer Applied Mechanical Design, Hwaseong Campus of Korea Polytechnic colleges²

(Received December 11, 2020 / Revised December 26, 2020 / Accepted December 31, 2020)

Abstract: The purpose of this study was to analyze the change in tensile strength characteristics of the weld when the welding speed and rotational speed of the tool, which are representative variables of the friction stir welding process. The equipment used in the experiment was Machining Center No. 5. The material used in the experiment is an AA6061-T6 alloy, and a rolled plate with a thickness of 2mm was used. Two experimental variables were selected, the welding speed of the tool and the rotational speed of the tool. The experimental conditions were selected in the range in which a healthy weld could be obtained through a preliminary experiment. The welding speed of the tool was increased to 100mm/min, 200mm/min, and 300mm/min, and the rotational speed of the tool was increased to 1000rpm, 2000rpm, and 3000rpm. As a result of the experiment, the tensile strength increased as the rotational speed of the tool changed at each tool welding speed. In addition, as the welding speed of the tool increased, the tensile strength of the weld was increased. The condition with the highest tensile strength of the weld was found to be a tool feed speed of 300 mm/min and a tool rotation speed of 3000rpm.

Key Words: Friction stir welding, Aluminum alloy, Machining center, Tensile test

1. 서 론

마찰교반용접은 재료를 용융점 이하에 접합시키는 일종의 고상용접 기술로서 미국과 유럽, 일본 등을 중심으로 꾸준히 발전하고 있으며 최근 장비사용에 대한 특허 로열티(Patent Royalty) 문제가 해결되면서 국내에서도 활발하게 연구가 진행되고 있는 추세이다¹⁻³⁾.

마찰교반용접은 비소모성 재료로 특수하게 제작된 공구를 회전시켜 용접하고자 하는 모체에 일부 삽입시켜 마찰열을 발생시키고 강제 이송을 통해

소성유동을 발생시켜 접합이 이뤄지는 공정이다. 특히 용접 공정 중 발생하는 열이 재료의 용융점을 넘지 않아 용융용접이 가지는 기공, 불활성가스 발생 등의 단점이 없으며 모체의 80% 이상의 강성을 가지는 장점을 가지고 있으며, 전 세계적으로 산업분야에서의 적용 범위가 점차 확대되어지고 있다. 특히 마찰교반용접은 알루미늄 합금과 같은 저융점 경량합금의 용접에 특화되어 있다고 해도 과언이 아니다⁴⁾.

알루미늄 합금은 실용되고 있는 구조용 금속 중에서도 우수한 특성을 가지고 있으며 항공기, 철도 차량, 자동차, 조선 등 각종 수송기기 부품에 널리 사용되어지고 있다. 또한 최근 전 세계적으로 대기 오염에 따른 환경 문제와 이에 따른 환경규제의 강

1. 공주대학교 금형설계공학과

† 교신저자: 공주대학교 금형설계공학과

E-mail: ckt1230@kongju.ac.kr

화와 함께 화석연료의 고갈에 따른 에너지 절약 문제가 대두되면서 이를 해결하기 위한 대체 소재로서 각광받고 있다. 그러나 알루미늄합금은 많은 장점과 함께 해결해야할 몇 가지 단점을 가지고 있다⁵⁾. 특히 용점이 낮고 활성도가 높아 용융용접에서 산소와 접촉할 경우 발화하거나 쉽게 산화되는 단점을 가지고 있어 일반적인 용융용접으로는 작업이 쉽지 않은 실정이다^{6,7)}.

따라서 본 연구에서는 상용 머시닝센터를 활용하여 알루미늄 합금 중 가장 널리 사용되고 있는 6000 계열의 AA6061-T6 합금을 이용하여 마찰교반용접을 실시하였으며 공정변수 중 대표적인 공구의 이송속도와 회전속도의 변화가 용접부분의 인장강도 특성에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

2. 실험방법

2.1. 실험 조건

예비실험을 통해 건전한 용접부분을 갖는 용접 범위를 선정하였으며, 본 실험의 조건을 Table 1에 나타내었다.

마찰교반용접 공정 변수 중에서도 가장 대표적인 변수인 공구의 이송속도와 공구의 회전속도로 선정하였으며, 각각의 변수들을 3가지 수준으로 변화시켜 일정한 공구 이송 속도하에서 공구의 회전속도가 변화할 때 용접부분의 인장강도 특성과 공구의 이송속도가 증가할 때 용접부분의 인장강도 특성을 분석할 수 있도록 설정하였다.

Table 1 Factors and each levels for experiment

Factor	Experimental conditions		
	Level 1	Level 2	Level 3
Welding speed (mm/min), (A)	100	200	300
Rotation speed (rpm), (B)	1000	2000	3000

2.2. 실험장치

Fig. 1에 본 실험에서 사용한 장치인 머시닝센터를 나타내었다. AA6061-T6 합금의 마찰교반용접을 적용을 위해 상용 MCT(Machining Center Tooling System, 모델: VX500)를 사용하여 실험을 수행하였으며, 실험재료를 안전하게 고정하기 위해 특수 제작된 지그로 클램핑하였다.



Fig. 1 Friction stir welding experiment device

2.3. 실험공구

Fig. 2에 본 논문에서 사용한 마찰교반용접 공구의 사진과 각 부분에 대한 치수를 나타내었다. 실험을 위해 공구는 열간가공용 합금 공구강인 STD61 재료를 CNC선반을 이용하여 가공 후 진공열처리 작업을 통해 제작하였다.

Table 2에 실험에 사용된 마찰교반용접 공구의 치수 및 제원을 표시하였으며, 공구의 크기는 예비실험을 통해 선정하였고, 숄더부분의 지름은 16.0 mm, 핀 부분의 지름은 4.0 mm, 핀 부분의 길이는 1.5 mm 로 제작하였다.

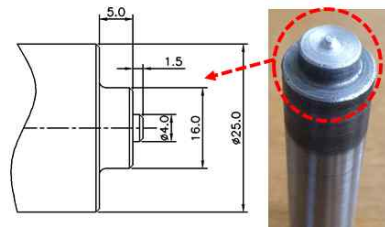


Fig. 2 Friction stir welding tool

Table 2 Tool dimensions and specifications

Item	Tool
Shoulder diameter (mm)	16.0
Pin root diameter (mm)	4.0
Pin length (mm)	1.5
Material	STD61 (tool steel)

2.3. 실험재료

본 논문에서 사용한 재료는 AA6061-T6 합금으로서 기계적 강도가 우수하여 고강도를 요구하는 수송기계 부품에 주로 사용되고 있으며, Mg와 Si의 함량이 많고, 인성과 피로강도 개선을 위해 Mn, Cr,

Cu가 다량 함유된 6000계열 Al-Mg-Si 합금으로 분류된다.

Table 3에 AA6061-T6 합금의 화학적조성을 나타내었으며, Table 4에 기계적 성질을 나타내었다.

실험에 사용된 재료는 두께 2.0 mm의 박판을 가로 100 mm, 세로 150 mm로 절단하여, 세로방향으로 맞대기 방식으로 용접을 실시하였다.

Table 3 Chemical composition of AA6061-T6(wt%)

Al	Cr	Ti	Mn	Fe	Si	Cu	Mg
bal.	0.35	0.15	0.15	0.70	0.4	0.15	1.2

Table 4 Mechanical properties of AA6061-T6

Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Hardness (Hv)	Elongation (%)
310	276	107	17

2.4. 실험공정

Fig. 3에 마찰교반용접공정의 기본 개념을 나타내었다. 공구는 시계방향으로 회전하고 핀 부를 모체에 완전히 삽입한다. 또한 용접부분 표면 및 내부에 충분한 마찰열을 발생시키기 위해 솔더 부분을 0.3 mm 추가 삽입한 후 정해진 이송속도로 이송하였다.

마찰교반용접부분은 공구의 회전방향과 이송방향이 같은 전진부분(Advancing Side)과 공구의 회전방향과 이송방향이 반대인 후퇴부분(Retreating Side)으로 구분할 수 있으며, 후퇴부분에 소량의 버(Burr)가 생성된다.

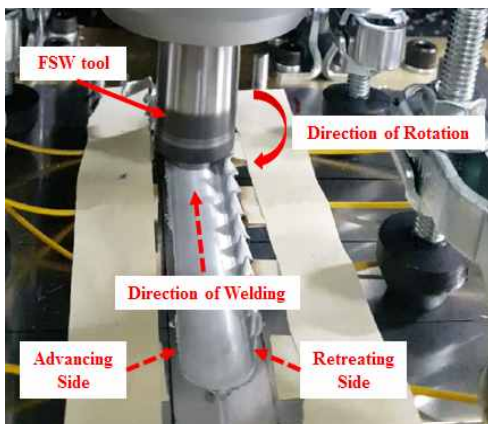


Fig. 3 Friction stir welding process concept

Fig. 4에 대표적인 용접부분의 형상을 나타내었다. 본 논문에서는 충분한 입열 발생을 고려하여 모든 조건에서 동일하게 솔더 부분을 0.3 mm 추가 삽입하였으며, 4초간 대기 후, Table 1과 같은 조건을 적용하여 100mm 길이로 전진하면서 용접 실험을 수행하였다.

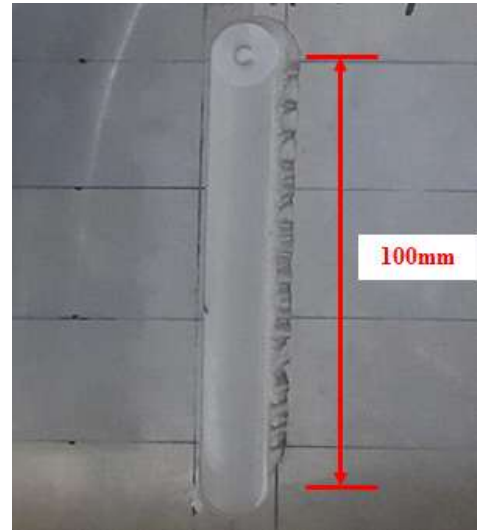


Fig. 4 Friction stir welding shape

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. 마찰교반 용접부 표면

본 연구에서는 모든 공정변수의 조합인 9개 조건에서 실험을 실시하였으며, 실험의 신뢰성을 높이기 위해 모든 조건에서 3회 반복실험을 실시하였다.

실험을 실시한 후 그중에서 용접부 인장강도가 가장 높게 나온 Case 3의 용접부 표면형상을 Fig. 5에 나타내었다.

총 27회의 모든 실험 조건에서 용접부는 육안검사를 시행한 결과 결함이 발생하지 않은 것으로 고찰되었다.

3.2. 마찰교반 용접부 인장실험

Fig. 6은 마찰교반용접부의 인장시험을 위한 시험편으로서 ASTM E8 standard 표준 규격을 적용하였으며, 인장시험편 절단시 발생할 수 있는 열 영향을 최소화하기 위하여 와이어컷팅 가공을 통해 시험편을 제작하였다.

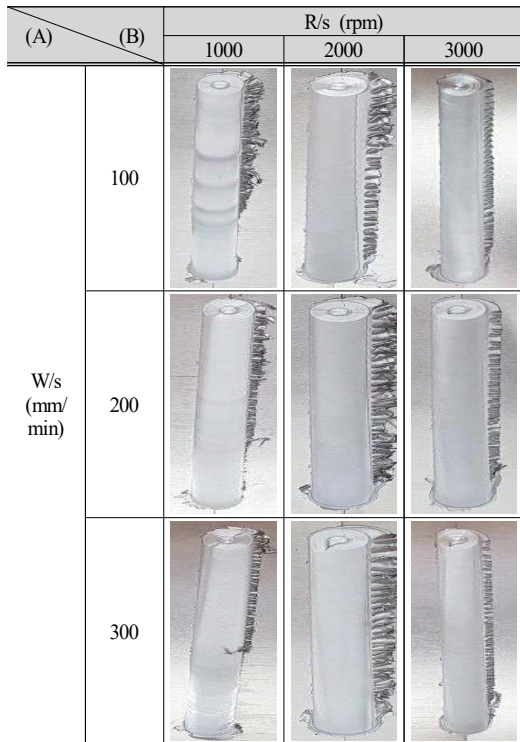


Fig. 5 friction stir welding surface shape of case 3

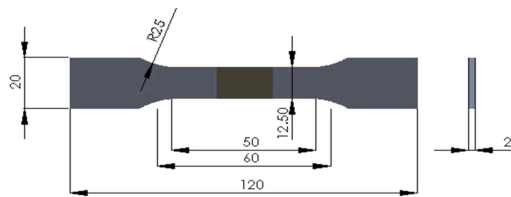


Fig. 6 Specimen for tensile test

Fig. 7에는 인장실험 후 파단된 인장시험편을 나타내었다. 마찰교반용접부분은 공구의 진행 방향과 이송방향이 같은 Advancing Side(AS)부와 서로 반대 방향인 Retreating Side(RS)부로 구분되며, 인장실험 결과 모든 조건에서 AS부에서 파단이 발생하였다. 이는 용접 중 AS부가 RS부보다 더 큰 내부응력이 발생하는 것으로 사료된다.



Fig. 7 Fractured tensile test piece

Table 5와 Fig. 8은 본 실험에서 실시한 총 27회 마찰교반용접부의 인장강도 결과를 나타낸다.

마찰교반용접부분의 인장강도는 공구의 이송속도와 회전속도가 증가할수록 증가하는 경향을 나타내었으며, 모재 인장강도의 70 ~ 90% 범위로 양호한 값을 나타내었다.

Table 5 Tensile strengths of all experimental conditions

No.	Factors		Tensile strength(MPa)		
	W/S (mm/min), (A)	R/S (rpm), (B)	Case1	Case2	Case3
1	100	1000	242.62	233.43	248.55
2	100	2000	246.17	227.05	240.90
3	100	3000	254.53	249.85	255.67
4	200	1000	267.14	261.88	269.22
5	200	2000	276.65	269.83	281.61
6	200	3000	280.23	279.71	282.77
7	300	1000	281.55	276.49	270.27
8	300	2000	287.85	281.65	291.15
9	300	3000	280.37	291.04	291.19

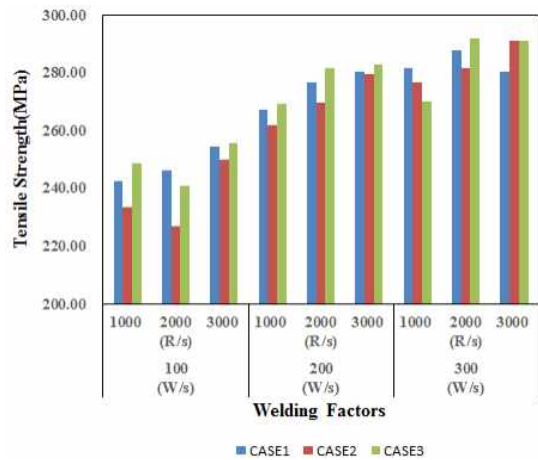


Fig. 8 Tensile strengths of all experimental conditions

3.3. 마찰교반 용접부 단면

Fig. 9에 마찰교반용접부분의 단면 형상을 나타내었다. 용접 진행방향과 직각방향으로 단면을 절단하여 마운팅 작업 후 폴리싱 작업을 하였으며, 에칭 후 단면 형상을 촬영하였다.

모든 조건에서 내부 단면에서 기공이나 결함을 발견되지 않았으며, 교반을 통한 소성유동의 흔적이 뚜렷하게 나타나는 것으로 고찰되었다.

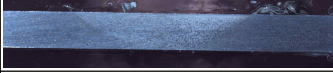
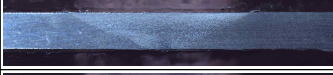
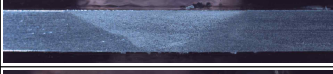



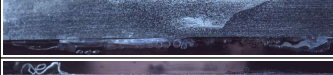
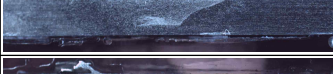

No.	Factors		Weld section
	(A)	(B)	
1	100	1000	
2	100	2000	
3	100	3000	
4	200	1000	
5	200	2000	
6	200	3000	
7	300	1000	
8	300	2000	
9	300	3000	

Fig. 9 Weld section shape of all conditions

4. 결론 및 토의

본 연구에서는 상용 머시닝센터를 활용하여 알루미늄 합금 중 대표적인 AA6061-T6의 마찰교반용접d에서 공구의 이송속도와 공구의 회전속도의 변화가 용접부분의 인장강도 특성에 미치는 영향에 대해 분석하였으며, 용접부분의 표면 및 단면형상을 통해 결함 유무를 확인하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 공구의 이송속도 100 mm/min, 200 mm/min, 300 mm/min 범위와 공구의 회전속도 1000 rpm, 2000 rpm, 3000 rpm 조건의 모든 조합에서 육안검사에 의한 용접부분의 표면에는 결함이 발생하지 않은 것으로 고찰되었다.

2) 공구의 이송속도 100 mm/min, 200 mm/min, 300 mm/min 각각의 조건에서 공구의 회전속도가 1000 rpm, 2000 rpm, 3000 rpm 으로 증가할수록 용접부분의 인장강도는 증가하는 경향을 나타내었다.

3) 공구의 이송속도 300 mm/min 공구의 회전속도

3000 rpm 조합의 조건에서 용접부분의 인장강도가 291.19 MPa로서 가장 높게 나타났으며, 모재 인장강도의 약 94 %의 값을 나타내었다.

4) 본 연구에서 실시한 모든 조건에서 인장실험 결과 전진부분(Advancing Side)에서 파단이 시작되는 것으로 고찰되었으며, 이는 용접 중 AS부분이 RS부분보다 더 큰 내부응력이 발생하는 것으로 사료된다.

5) 용접부분 단면 촬영 결과 실험의 모든 조건에서 교반을 통한 소성유동의 흔적이 뚜렷하게 관찰되었으며, 내부 기공이나 결함 등은 고찰되지 않았다.

향후 용접 공정변수 변화에 따른 용접부분의 인장강도 특성 변화를 통계적 분석을 통한 정량적인 추가 검증이 필요하다고 판단된다.

참고문헌

- 1) H. T. Kim, S. C. Kil, "Recent Research Trend of Friction Stir Welding Process", Spring Conference of The Korean Welding and Joining Society, Vol. 49, p. 77, 2008.
- 2) James, M. N, Hattingh, D. G. and Bradley, G. R., "Weld Tool Travel Speed Effects on Fatigue Life of Friction Stir Welds in 5083Aluminum", International Journal of Fatigues, No. 25, pp. 1389-1398, 2003.
- 3) H. S. Park, Y. H. Lee, W. D. Choi, J. B. Ko, "A Study on the Effect that Pin Shape and Welding Speed have an Influence on Mechanical Strength in Friction Stir Welding Al6061-T6", Journal of The Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 17, No. 4. pp. 22-28, 8. 2008.
- 4) S. K. Jang, M. S. Han, J. I. Jeon, "Effects of Tool Rotation and Transition Speed during Friction Stir Welding of Al 7075-T651 Alloy", Journal of The Korean Society of Mechanical Engineers(A), Vol. 11, No. 4, pp. 532-539, 2007.
- 5) S. K. Jang and S. H. Shin, "A Development of Optimizing Tools for Friction Stir Welding with 2mm Thick Aluminum using a Milling Machine", Journal of The Korean Society of Marine Engineering, Vol. 25, No. 4, pp. 91-96.
- 6) Won, S. T., Kim, W. K. and Goo, B. C.,

- “Mechanical Properties of Joints according to Welding Methods and Sensitivity Analysis of FSW’s Welding Variables for A6005 Extruded Alloy of Rolling Stock,” Journal of The Korean Society for Railway, Vol 13, No. 2, pp. 131-138.
- 7) S. W. Kim, W. B. Lee, D. W. Kim, Y. M. Yeon and S. B. Jeong, “The Joints Properties of Friction Stir Welded 5052Al Alloy”, KWS 2003-Autumn, pp. 69-71, 2003.

저자 소개

승 영 춘(Young-Chun Seung)

[학생회원]



< 관심분야 >
사출 금형 제작

- 2019년 3월~현재: 공주대학교 테크노융합대학원 산업디자인.금형융합전공 (석사과정)

박 경 도(Kyoung-Do Park)



< 관심분야 >
사출 금형 및 유동 해석

- 2012년 2월: 부경대학교 (공학석사)
- 2019년 3월~현재: 한국폴리텍대학교 화성캠퍼스 컴퓨터응용기계과 조교수

이 춘 규(Chun-Kyu Lee)

[정회원]



< 관심분야 >
프레스 성형 및 금형

- 2014년 8월 : 공주대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2010년 3월~2016년 12월 : 유한대학교 금형설계공학과 교수
- 2016년 12월~2018년 3월 : 한국폴리텍 대학 창원캠퍼스 금형디자인과 교수
- 2018년 4월~현재: 공주대학교 금형설계공학과 교수

알루미늄 사형주조에서 기공 결함 감소를 위한 연구

이동연¹ · 이춘규[†]

공주대학교 금형설계공학과^{1,†}

A study on the reduction of blow hole defects in aluminum sand casting

Dong-Youn Lee¹ · Chun-Kyu Lee[†]

Department of Metal Mold Design Engineering, Kongju National University^{1,†}

(Received December 14, 2020 / Revised December 29, 2020 / Accepted December 31, 2020)

Abstract: In this study attempted to prevent defects due to blow holes among defects of sand casting products. It was intended to reduce the defect rate by reducing the blow hole of the inner surface. Currently, expectations and requirements for the quality level of non-ferrous aluminum casting in the casting industry are increasing. In addition, the shape is complex and the shrinkage precision is required. Among them, the test prototype is expensive to manufacture the mold, and the production time is also long, and the product is manufactured by sand casting. At this time, the highest defect rates are defects caused by shrinkage defects, surface defects, and blow holes.. At this study, the manufacturing time was shortened by using the shape of the fluid movement path in advance. Also, it is possible to reduce defects due to blow holes.

Key Words: Blow hole, Reduction of defect rate, Aluminum, Sand casting

1. 서 론

비철금속은 열과 전기 전도성이 뛰어나고 용융점이 낮아 가공이 용이하여, 단일금속 또는 합금형태로 전기 전자, 자동차, 기계, 화학, 철강, 조선 등 각 산업 분야에 필수적인 기초소재 이다¹⁾.

비철금속으로 제작된 부품들은 현재 글로벌 과제인 부품 경량화라는 시대적 요구에 따라서 합금의 소재들이 부품으로 제조되어, 교체에 대한 연구가 지속해서 이뤄지고 있다. 또한 알루미늄의 제작은 주조 단조 압출 압연 등 다양한 공정을 통해 1차 가공을 통해 제작, 열처리 공정을 통한 후, 2차 절삭가공 공정을 통해 제작되고 있다²⁾.

주조는 금속을 용해한 후 액체 상태의 용융 금속을 특정한 형상의 주형에 주입하고 냉각시켜 소요

한 형상의 제품을 만드는 공정이다³⁻⁵⁾.

연구동향을 살펴보면, Lee는 열처리가 복합재료의 기계적 성질에 미치는 영향에 대한 실험적 연구를 시행하였으며⁶⁾, Cheon와 J. H. Perepezko는 주조 과정에서 용탕이 주형 내부로 주입되어 응고되는 과정에서 냉각시간에 따른 온도차에 의해 발생하는 수축현상에 대하여 연구하였다^{7,8)}.

비철금속 주조 방법 중에서 사형주조는 알루미늄의 온도를 끓는 점 이상으로 높여 사용하는 것을 기본으로 하여 타 재질의 부품을 사용할 시 변태점을 상회하는 경우 삽입 부품의 형태를 변화시켜 문제를 가져온다.

현재 사형주조에서 삽입 부품을 추가하여 사용하는 것은 아이볼트 대응의 볼트를 추가하여 사용하는 정도에 그치고 있다. 또한 사형주조의 경우 2차 절삭가공 중 홀 가공 시 단축 또는 다축 가공의 필요로 인해 많은 시간과 인력 및 비용이 발생하게 된

1, † 교신저자: 공주대학교 금형설계공학과
E-mail: ckt1230@kongju.ac.kr

다. 이때 주조물의 특징적 결합인 기공 또는 크랙으로 인하여 제품을 사용하지 못하는 일이 빈번히 발생하고 있다.

따라서 본 연구는 요구된 홀 경로에 따라 굽힘 성형한 파이프를 삽입하여 기공의 영향을 최소화 하였다. 또한, 제작 시 주조제품의 내부 기공으로 발생하는 문제를 해결하고자 CAE를 통한 최적의 주조 방안을 도출 하고, 사형을 제작하여 실험을 통하여 검증하고자 한다.

2. 제품설계 및 성형해석

2.1. 제품설계

Fig. 1에 본 연구에서 적용한 주조 제품의 형상을 나타내었으며, 제품 내부의 홀 가공 시 가공 방향이 여러 방향인 경우 주물을 제작할 때에는 해당 부위 제품의 두께를 두껍게 맞춰 제작하게 된다. 이로 인하여 제작 후에도 해당 부위에 기공이 발생하여 제작자 및 사용자 모두 피해가 발생하는 경우가 다반사이다.

특히 제품의 특징이 유기체를 사용해야 하는 경우 기공 발생에 의해 주물 제품과 가공 제품 모두 불량 처리되는 경우가 매우 많다.

본 연구에서는 이러한 불량현상을 최소화하기 위하여 제품의 내부에 파이프를 삽입하여 유기물 누수 및 홀 다축가공의 시간을 감소할 수 있도록 설정하였다. 주물의 두께를 얇게 설정하여 내부의 기공 불량률을 줄일 수 있도록 제품을 설계하였다. 또한 파이프의 길이는 추가 가공을 고려하여 돌출되는 길이로 제작하였다.

2.2. 인서트 부품설계

주물 제작에 필요한 주형의 제작 시 규사의 결합제로 사용되는 유기 화합물로 액상의 합성수지와 경화제를 배합하여 생산하는 사형 설비를 사용하여 사형성 주형법을 이용하였다.

사형에 주물을 주입할 때, 알루미늄 용탕의 온도는 750℃를 사용하고, 사형의 온도는 상온 상태에서 성형하게 된다.

Fig. 2에 나타낸 것과 같이 파이프의 고정 방식은 사형에 알루미늄 스톱 바를 고정하는 pocket을 생성하여 삽입 후 상하형의 사형을 조립하는 방법을 확정하여 설계하였으며, 스톱바의 크기 결정은 식(1)

을 사용하여 알루미늄 주입 시 인서트 파이프의 부상을 방지하도록 하였다.

$$\text{스톱바 Size (mm)} = W (\phi 1.5D) \times L (\phi 3D) \times H (t=\phi D) \text{-----(1.1)}$$

여기서, W는 스톱바의 폭을 나타내며, L은 길이, H는 두께를 나타낸다.

실험에 사용된 파이프의 소재는 STS 304를 사용하였고, 스톱 바의 재질은 알루미늄 용탕소재와 같은 AC4C를 사용하였다.

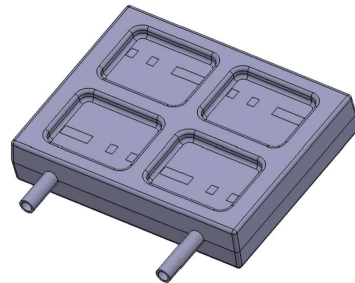


Fig. 1 Experimental product modeling

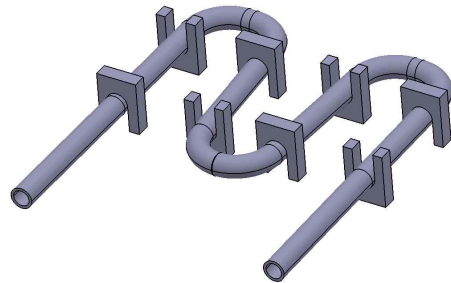


Fig. 2 Fixing the pipe via stop bar

2.3. 충전 해석

사형주조의 경우 사출성형이나 다이캐스팅 성형과는 다르게, 자동으로 주입시간을 설정하는 것이 아니라 사람이 레들을 이용해 주입한다. 때문에 주입시간의 오차가 발생하게 된다. 그러므로 주입시간에 따른 오차 범위를 최대한 줄이는 방법을 적용하여 해석조건을 적용하였다.

Table 1에는 성형해석에 사용된 재료의 조건을 나타내었으며, 주물품의 성형해석에 많이 사용되는 Any Casting 프로그램을 사용하였다.

Fig. 3에 나타낸 것과 같이 해석 결과 총 충전 시

간은 2.25 sec 가 소요되는 것으로 고찰되었으며, 충전된 제품의 총 무게는 6.4 Kg으로 예측되었다. 또한 여기에 유동되는 통로인 스프루(Sprue)와 런너(Runner) 등을 포함한 무게로는 약 10 Kg이 소요되는 결과 값을 얻었다.

Table 1 Insert sand casting analysis

Name	Type	Material Name
pipe	INSERTED	STS304
cavity	CAST (CAVITY)	AC4C
core	CAST (CAVITY)	AC4C
gate runner	CAST (CAVITY)	AC4C
riser	CAST (CAVITY)	AC4C
insert block	ATTACHED	AC4C
Mold (Generated)	MOLD	Furan sand

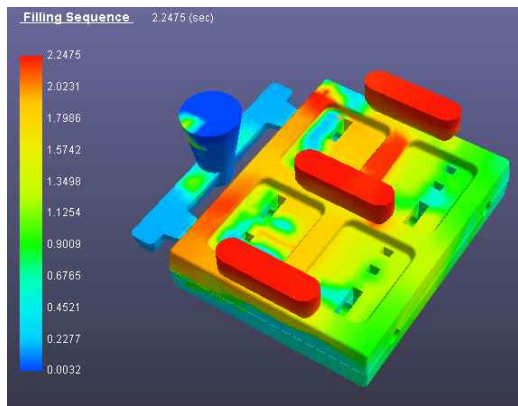


Fig. 3 Filling analysis image

2.3. 기공발생 위치 분석

Fig. 4에 나타난 것과 같이 성형해석 프로그램을 이용하여 기공의 발생 예상 위치를 분석하였다.

해석에 대한 분석 결과 게이트의 우측 상단부분에서 에어트랩(Air trap)에 의한 미세한 가스 포켓(Gas pocket)이 발생하는 것으로 고찰되었다. 이는 주형을 제작하는 과정에서 Ø1 mm 이하의 작은 구멍을 뚫어 가스를 제거해야 할 것으로 사료된다. 또한 해석에서 나타난 노란색이나 하늘색의 에어 트랩은 성형품을 구성하는 이외의 부분으로 성형과정에서 주형 밖으로 노출되는 구역으로 제품에는 영향을 미치지 않는 것으로 사료된다.

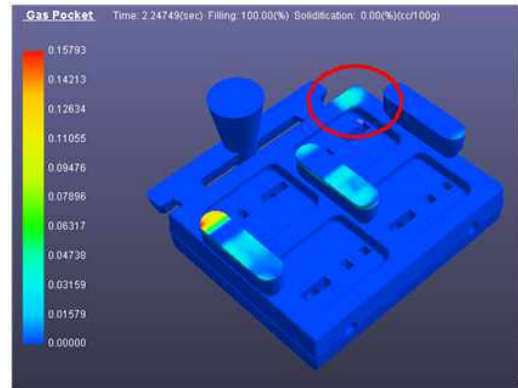


Fig. 4 Gas pocket analysis image

2.4. 목형제작

성형해석에서 얻어진 결과를 기반으로 목형설계를 진행하였으며, 설계한 Data를 기반으로 3D 설계를 통해 Power Mill Cam Program을 이용하여 오차 발생을 최소화 할 수 있도록 하였다. Fig. 5에 나타난 것과 같이 한국 기전 HKM 12030의 조각기를 사용하여 목형 상·하형을 제작하였다.

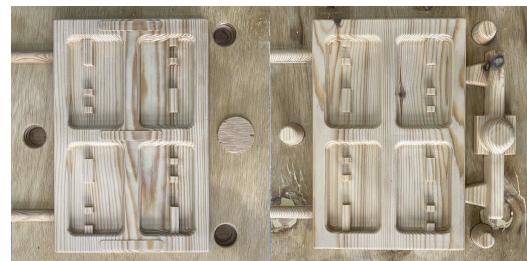


Fig. 5 Product wooden mold (left: upper, right: lower)

2.5. 실험용 소재 성분 분석

주입 전 소재 분석용 시편을 Fig 6과 같이 제작하였으며, FPI-M 5000 성분 분석기를 이용하여 시험용 소재의 성분 분석을 시행하였다. AC4C 소재의 시편 성분을 Table 2에 나타내었으며, 용해 후 분석 결과를 Table 3에 나타내었다. 이는 주입 전 용해로의 상태와 제품에 주입될 성분인 AC4C가 적합한가를 판단하기 위한 검증으로, 3회를 시행하였다. 한 곳의 용광로에서 추출한 시료라 하더라도 오차가 발생할 수 있어, 평균값으로 소재 성분 분석표를 작성하고 이를 비교한 결과, 용해로의 주물 성분이 부품을 제작하기 위한 기준 성분 이내로 적합한 것으로 판단되었다.



Fig. 6 Specimen for material analysis

Table 2 Analysis of the components contained in the specimen

Si	Fe	Cu	Mg	Ni	Zn
7.06	0.118	0.014	0.368	0.001	0.001
Cr	Pb	Sn	Mn	Ti	Al
0.0015	0.0019	0.001	0.0005	0.130	92.29

Table 3 Analysis of ingredients after melting

Si	Fe	Cu	Mg	Ni	Zn
6.788	0.214	0.183	0.423	0.009	0.005
Cr	Pb	Sn	Mn	Ti	Al
0.017	0.002	0.001	0.085	0.088	92.20

2.6. 제품제작

목형을 통해서 사형을 제작하였으며, 응고시간은 약 15분의 제작 평균 응고 시간을 사용하였다.

인서트 부품은 사형 제작 시 적용한 수축률 값인 알루미늄의 X축은 1.012, Y축은 1.011, Z축은 1.01의 각각의 방향에 따른 상이 한 수축률을 적용하여 제품의 제작 시 요구사항인 인서트 파이프의 간격을 적용하였다.



Fig. 7 Sand Mold Assembly (Check the temperature of the insert part)

Fig. 7과 같이 삽입될 용융된 주물과 파이프의 온도차로 인한 폭발 위험이 있어, 삽입 부품의 주입 전 온도를 150 °C로 기초 가열을 통해 위험 요소를 제거하였다.

사형의 조립과정에서 삽입 부품의 고정 여부와 스톱바의 직각 유지를 확인하면서 조립을 시행하였으며, Fig. 8과 같이 주입 시 알루미늄 용해로의 온도는 용융점(660.1 °C)을 넘은 750 °C를 사용하여 주입 후 유동성을 확보할 수 있도록 설정하였다.

Fig. 9에는 사형에서 탈사한 제품과 쇼트피닝 후의 완성된 제품을 나타내었다.



Fig. 8 Injection operation

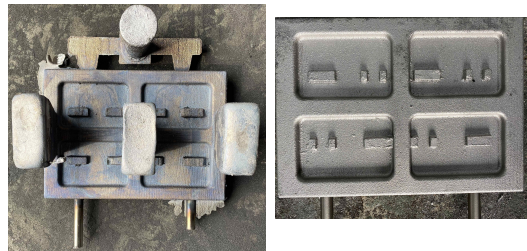


Fig. 9 Stripping work (left: after stripping, right: after shot peening)

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 열처리 및 경도시험

Fig. 10은 열처리 이후의 완성된 제품을 나타내었다. 제품의 경도에 대한 요구사항을 적용하여 열처리 조건 AC4C T6 Type의 열처리를 진행하였다.

열처리 후 경도 측정은 5회를 실시하였다.



Fig. 10 AC4C T6 Heat treatment

Fig. 11은 열처리 후 경도측정 검사 성적서를 나타내었으며, 경도 측정을 통하여 제품의 평균의 요구사항을 확인하였다. 측정결과 평균 AC4C T6의 합격기준인 HB-70을 상회하는 부분별 평균 94.2로 측정 결과 값이 도출되어, 사형주형 제품의 열처리 정도에 적합한 것으로 고찰되었다.

열처리 검사 성적서
(Heat Treating Inspection Report)

고객명 Customer	종류 Type	용 Metal	수량 Quantity	검사 Inspection	검사일자 Inspection Date
비밀번호 IDENT CODE	제품 Part	열처리 Lot Lot No.	1	주요성 Priority	2020.09.29
제조업체 Process	AC4C	열처리 Lot Lot No.		성문 열처리 SHUNG MUN HEAT TREATMENT -heat treating of aluminum-	
열처리 방법 Treatment	AC4C	열처리 Lot Lot No.		HONG MUN KI 21, Seodaejeon 1-gil, Miryang-si, Gyeongsang-do	
열처리 조건 Treatment Condition	AC4C	열처리 Lot Lot No.		열처리 온도 TTL: 1301-477-7000 팩스 FAX: 1301-477-7000 이메일 E-MAIL: hmk7000@hanmail.net	
열처리 온도 10 min 180°C 8 hr 160°C 8 hr A/C					
검사 항목 Content of Inspection	규격 Specification	열처리 Heat Treating	검사 Inspection	검사 결과 Inspection Result	
1. 경도	비밀번호 IDENT CODE	LOT	열처리 Heat Treating	X1	X2
2. 경도	비밀번호 IDENT CODE	LOT	열처리 Heat Treating	X3	X4
			열처리 Heat Treating	X5	X6
			열처리 Heat Treating	X7	X8

되었으며, 사용될 제품의 검사 기준에 적합한 것으로 판단된다.



Fig. 13 Check pipe insertion surface

Fig. 11 Heat treatment report

3.2. 파괴검사

Fig. 12에 나타난 것과 같이 내부의 기공이나 크랙의 형태를 확인하기 위해 스톱바 위치를 잘라내어 육안 검사를 실시하였다. 확인 결과 제품 내부의 기공이나 크랙은 발생하지 않은 것으로 고찰되었다. 스톱바와 알루미늄 주물소재의 이분화된 모습 또한 고찰되지 않았다. 그러나 외부의 형태에서 플래시(flash)에 의한 버(Burr)의 발생으로 추후 작업이 필수적으로 필요하다고 판단된다.



Fig. 12 Visual inspection of internal pores

Fig. 13에 나타난 것과 같이 제품의 절단작업을 통하여 내부 다축 홀 구간에 기공 발생이나 고온으로 인한 형태 변형이 발생하였는지를 육안 검사하였다.

검사결과 다축 홀 구간에는 기공이나 크랙, 온도로 인한 형태의 변형이 발생하지 않은 것으로 고찰

4. 결론 및 토의

사형주조에서의 대표적인 불량인 기공이나 내부의 크랙 발생을 없애고, 다축 홀을 갖는 제품을 설계하여, 성형 해석과 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻게 되었다.

- 1) 충전 해석 결과 총 충전 시간은 2.25 sec 가 소요되는 것으로 고찰되었으며, 충전된 제품의 총 무게는 6.4 Kg으로 예측되었으며, 유동되는 통로인 스프루(Sprue)와 런너(Runner) 등을 포함한 무게로는 약 10 Kg이 정도가 소요되는 결과 값을 얻었다.
- 2) 기공발생 위치 해석에 대한 분석 결과 게이트의 우측 상단부분에서 에어트랩(Air trap)에 의한 미세한 가스 포켓(Gas pocket)이 발생하는 것으로 고찰되었으며, 이는 주형을 제작하는 과정에서 Ø1 mm 이하의 작은 구멍을 뚫어 가스를 제거해야 할 것으로 사료된다.
- 3) 삽입될 용융된 주물과 파이프의 온도차로 인한 폭발 위험이 있어, 삽입 부품의 주입 전 온도를 150 °C 정도로 기초 가열을 통해 위험 요소를 제거하여야 한다.
- 4) 제품을 절단하여 육안검사를 실시한 결과 제품 내부의 기공이나 크랙은 발생하지 않은 것으로 고찰되었으며, 스톱바와 알루미늄 주물소재의 이분화된 모습 또한 고찰되지 않았다.
- 5) 육안검사결과 다축 홀 구간의 기공이나 크랙, 온도로 인한 형태의 변형이 발생하지 않은 것으로 고찰되었으며, 사용될 제품의 검사 기준에 적합한

것으로 판단된다.

본 연구에서는 단순 사각형 형태의 다축 홀을 갖는 제품의 기공이나 크랙 발생에 대하여 연구를 수행하였으나, 향후 복잡한 형상이나 다층의 다축 홀을 갖은 제품에 대하여 연구가 수행되어야 할 것이라 사료된다.

참고문헌

- 1) Materials Industry Human Resource Development Committee, ISC 2019 Industry Workforce Status Report, 2019.
- 2) Kim Young-sun, "A study on the temperature distribution and thermal deformation prediction of AC4C casting material for tire mold", Korean Master's Thesis Chosun University, Gwangju, 2008.
- 3) J. Szekely and A. S. Jassal, Metall. Trans, Vol. 9B, p. 389, 1978.
- 4) J. Cambell, Mat. Sci. & Tech, Vol. 17, p. 885, 1991.
- 5) Y. T. iM, "Solidification Analysis of Casting and Semi-solid Forging", Vol. 21, No. 3, pp. 155-162, 2001.
- 6) Lee Jun-woo, "Experimental Study on the Effect of T6 Heat Treatment on the Mechanical Properties of Al18B4O33 / AC4CH Composites", Domestic Master's Thesis Gyeongsang National University, Gyeongsangnam-do, 1999.
- 7) B. W. Cheon, "The Effect of the Metallic Mold Cooling System on the Solidification Structures and

the Mechanical properties for Al alloy Casting", Dong-A University, 1994.

- 8) J. H. Perepezko and S.E. Lebean, "Aluminum Transformation Technology and Application", J. of ASM, 1981.

저자 소개

이 동 연(Dong-Youn Lee)

[정회원]



- 2019년 3월~현재: 공주대학교 테크노 융합대학원 산업디자인-금형융합전공 (석사과정)
- 2019년 8월~현재: 미광금속 연구소 팀장

< 관심분야 >
프레스 다이 및 사출 금형

이 춘 규(Chun-Kyu Lee)

[정회원]



- 2014년 8월 : 공주대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2010년 3월~2016년 12월 : 유한대학교 금형설계공학과 교수
- 2016년 12월~2018년 3월 : 한국폴리텍 대학 창원캠퍼스 금형디자인과 교수
- 2018년 4월~현재: 공주대학교 금형설계공학과 교수

< 관심분야 >
프레스 성형 및 금형

유한요소해석을 이용한 백그라인딩 장비의 구조안정성 연구

위은찬^{1,3} · 고민성¹ · 김현정¹ · 김성철² · 이주형³ · 백승엽[†]

인덕대학교 융합기계공학과^{1,†}

에이엠테크놀로지(주)²

서울과학기술대학교 기계설계로봇공학과³

A study on structural stability of Backgrinding equipment using finite element analysis

Eun-Chan Wi^{1,3} · Min-Sung Ko¹ · Hyun-Jeong Kim¹ · Sung-Chul Kim² ·

Joo-Hyung Lee³ · Seung-Yub Back[†]

Department of Mechanical Convergence Engineering, Induk University^{1,†}

AM Technology Co.,Ltd²

Department of Mechanical Design and Robot Engineering, Seoul National University of Science&Technology³

(Received December 28, 2020 / Revised December 26, 2020 / Accepted December 31, 2020)

Abstract: Lately, the development of the semiconductor industry has led to the miniaturization of electronic devices. Therefore, semiconductor wafers of very thin thickness that can be used in Multi-Chip Packages are required. There is active research on the backgrinding process to reduce the thickness of the wafer. The backgrinding process polishes the backside of the wafer, reducing the thickness of the wafer to tens of μm . The equipment that performs the backgrinding process requires ultra-precision. Currently, there is no full auto backgrinding equipment in Korea. Therefore, in this study, ultra-precision backgrinding equipment was designed. In addition, finite element analysis was conducted to verify the equipment design validity. The deflection and structural stability of the backgrinding equipment were analyzed using finite element analysis.

Key Words: Backgrinding, Structural stability, safety factor, Deflection analysis

1. 서 론

최근, 반도체 산업이 발전함에 따라 전자기기 소형화 등 반도체 집적도 향상이 진행되고 있으며, Multi Chip Package에 활용할 수 있는 매우 얇은 두께의 반도체 웨이퍼가 요구되고 있다. 고품질의 반도체 웨이퍼 수용에 대응하기 위해 현재 웨이퍼의 두께를 감소시키는 백그라인딩(Backgrinding) 공정의 연구^{1,2)}가 활발하게 이루어지고 있으며, 백그라인딩(Backgrinding) 공정을 수행할 수 있는 장비 개발이 추진되고 있다³⁾.

백그라인딩 공정은 회로공정이 완료된 후 테스트를 마친 웨이퍼에 적용되며, 웨이퍼의 후면을 얇게 연마함으로써, 웨이퍼 표면의 존재하는 회로공정으로 인한 오염물을 제거하고, 웨이퍼의 두께를 수십 μm 로 감소시키는 공정이다. 이러한 백그라인딩 공정은 기본적으로 3가지의 세부 공정으로 분할할 수 있으며, 순서대로 Tape lamination 공정, Back-Grinding 공정, Wafer mounting 공정으로 정의되며, 이때 Wafer mounting 공정은 칩을 분리(Chip saw)하기 위한 준비단계로서 Chip Saw 공정으로 통합하여 정의될 수도 있다. 세부공정은 웨이퍼의 목표로 하는 최종 두께에 따라 공정의 순서가 변경될 수도 있으며, 보다 세분화 될 수도 있다.

고품질의 반도체 웨이퍼를 형성하기 위해서는 반

1. 인덕대학교 융합기계공학과

† 교신저자: 인덕대학교 융합기계공학과

E-mail: sybaek@induk.ac.kr

도체 웨이퍼의 cell과 주변회로간의 평탄도 및 웨이퍼 전체 두께의 균일성, 백그라인딩 공정의 단위시간당 연마량 등의 성능들이 일정 수준 이상이어야 한다⁴⁾.

현재 국내에는 독립된 단일 공정을 위한 웨이퍼 연마 장비 및 가공 기술이 개발되었으나 R&D용의 100 ~ 200mm 웨이퍼 가공으로 한정되었으며, 300mm 웨이퍼용의 전자동 백그라인딩 장비는 전무한 실정이다.

이에 본 연구에서는 초정밀 백그라인딩 장비를 설계하였으며, 가상의 시뮬레이션 상에서 해석을 통해 장비 설계 타당성을 검증하고자 고품질의 웨이퍼를 가공하는데 있어 중요한 요소인 상정반 및 하정반의 평탄도와 백그라인딩 장비의 구조안정성을 예측하는 유한요소해석을 진행하였다.

2. 백그라인딩(Backgrinding) 장비 해석

2.1. 설계 모델 및 경계조건

본 연구에서는 ANSYS Workbench를 사용하여 유한요소해석을 진행하였으며, static structural 기능을 통해 백그라인딩 장비의 각 주요 구조물인 상정반, 하정반, base frame에 자중(自重)이 적용되었을 때의 처짐량 및 안전계수를 예측하였다.

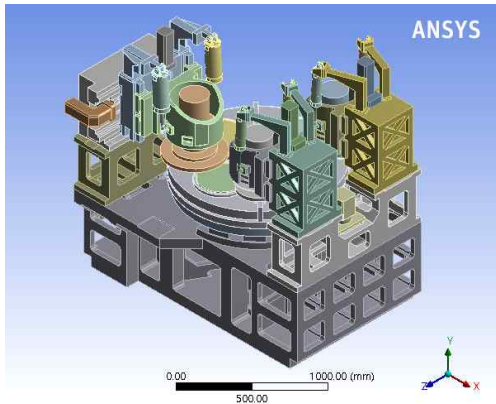


Fig. 1 Finite element model of backgrinding equipment

먼저, static structural 기능을 이용한 유한요소해석을 진행하기 위하여 Fig. 1에서 나타낸 바와 같이 각 부품의 기하학적 형상을 저해하지 않는 선에서 간략화 작업을 진행하여 백그라인딩 장비 모델을 구성하였으며, 정밀한 해석 결과를 위하여 ANSYS

의 자동요소생성 기능을 사용하여 mesh를 생성하였고, 총 절점 수 1,176,625개, 총 요소 수 613,086개로 mesh를 형성한 후 해석을 진행하였다.

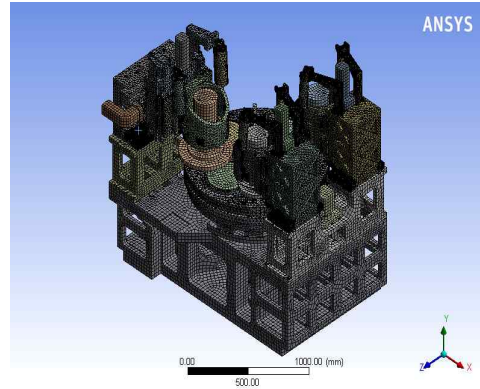


Fig. 2 Mesh generation of backgrinding equipment model

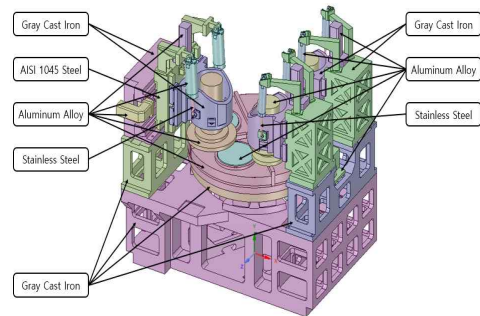
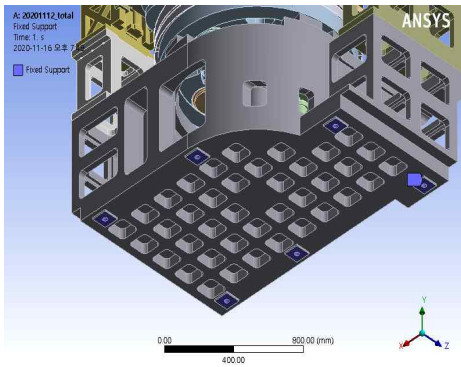


Fig. 3 Materials applied for backgrinding equipment model

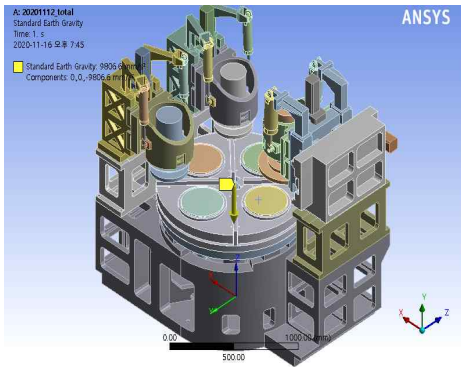
Table 1 Material properties

	Gray Cast Iron	AISI 1045 Steel	Aluminum Alloy	Stainless Steel
Density	7200 kg/m ³	7870 kg/m ³	2770 kg/m ³	7750 kg/m ³
Young's Modulus	110 GPa	200 GPa	71 GPa	193 GPa
Poisson's Ratio	0.28	0.29	0.33	0.31

Fig. 2는 mesh가 생성된 백그라인딩 장비 모델을 나타내고 있으며, 각 구조물 간의 접촉 조건은 구조물 간의 연동 및 성능을 고려하여 Bonded 조건과 Frictionless 조건으로 설정하였고, Fig. 3은 백그라인딩 장비 모델에 적용된 재질을 나타내고 있으며, 각각의 구조물에는 Gray Cast Iron, Aluminum Alloy, Stainless Steel, AISI 1045 Steel 재질을 적용하였고, Table 1은 각 재질의 물성치를 나타내었다.



(a) Fixed condition



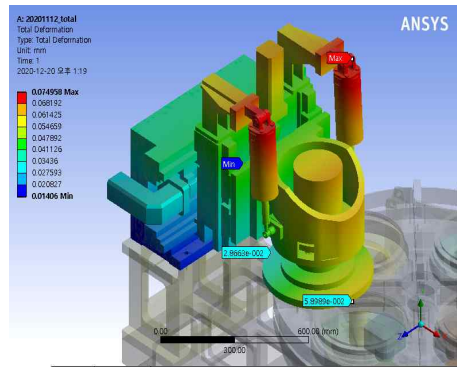
(b) Load condition

Fig. 4 Boundary condition of backgrinding equipment model

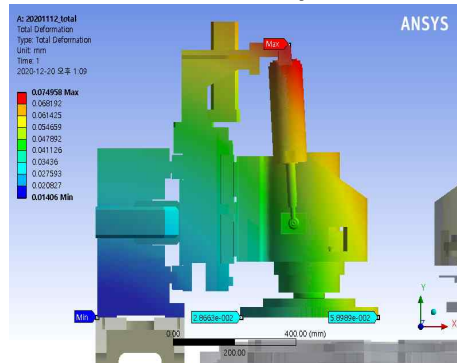
Fig. 4는 백그라잉딩 장비 모델에 적용한 경계조건을 나타내고 있으며, Fig. 4(a)에 나타난 바와 같이 base frame 밑면 고정점에 고정조건을 부여하였고, Fig. 4(b)에 나타난 바와 같이 백그라잉딩 장비 전체 모델에 하중조건으로 중력을 부여하였다.

2.2. 상정반 모델 해석 결과 및 분석

상정반 모델은 웨이퍼가 장착되는 패드가 형성되어 있으며, 패드가 회전됨과 동시에 슬러리(Slurry)가 투입된 하정반에 가압되어, 상정반과 하정반 사이에 배치된 웨이퍼를 기계적 및 화학적으로 연마하는 주요 구조물이고, 상정반 패드의 평탄도에 의해 웨이퍼에 형성되는 마찰력 및 압력이 상이하게 형성되므로, 가공되는 웨이퍼 최종품질에 많은 영향을 미친다. 이에 해석 결과를 통하여 상정반 패드의 처짐을 분석하고자 패드의 양 끝 부분의 변형량을 측정하였고, 가공품질 뿐만 아니라 장비 자체 수명 및 안전사고에 이어질 수 있는 하중으로 인한 소성변형 또는 파손 문제를 방지하기 위하여 장비의 안전계수를 측정하였다.



(a) Isometric image



(b) Side view image

Fig. 5 Analysis result of top board model(Total deformation)

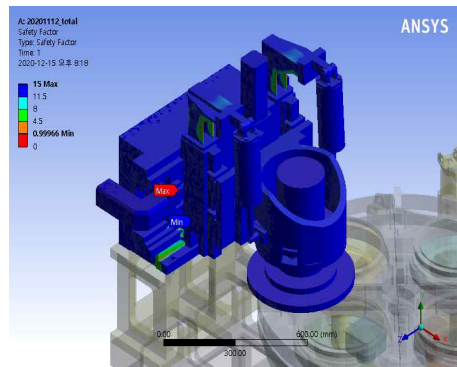


Fig. 6 Analysis result of top board model(Safety factor)

Fig. 5 및 Fig. 6은 상정반 모델의 유한요소해석 결과를 나타내고 있으며, 상정반 모델에서는 패드 구조물의 처짐이 예측되었다. 상정반 패드 밑면을 기준으로 가장 높은 점에서의 변형량과 가장 낮은 점에서의 변형량을 측정하기 위하여 probe기능을 적용하였으며, 각각 28 μ m와 58 μ m의 값이 측정되었고, 약 30 μ m 높이차가 형성되는 것을 확인하였다. 또한 하중에 의하여 이송모터와 연결된 가로축 이송스테

이지에서 안전계수의 값이 1 미만으로 형성되는 것이 예측되었다.

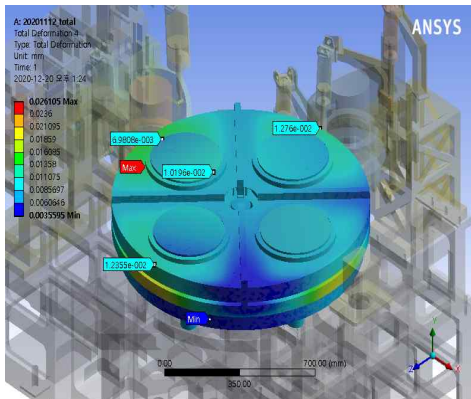
백그라잉딩 공정을 통해 연마된 웨이퍼의 두께 값이 수십 μm 인 것을 고려하였을 때, 상정반 패드의 평탄도는 매우 낮은 것으로 판단되나, 이는 회전이 고려되지 않은 정지상태에서의 결과 값이므로 추후 상정반 패드의 회전을 고려한 해석을 진행한 후 본 해석의 결과 값과 비교 분석하여 설계보완을 하는 것이 적절할 것으로 판단되며, 가로축 이송스테이지에서 소성변형이 있을 것으로 예측되므로, 이송 스테이지의 설계보완이 필요할 것으로 판단된다.

2.3. 하정반 모델 해석 결과 및 분석

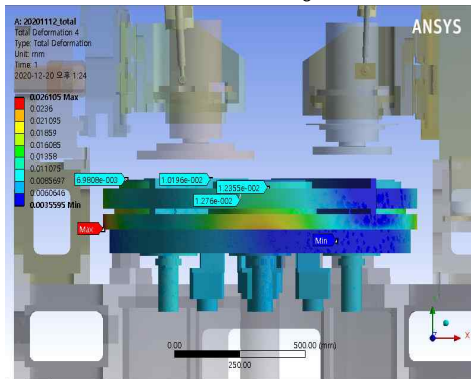
하정반 모델은 턴테이블 구조물과 각 공정에 적합한 복수개의 패드로 구성되어 있으며, 하정반 패드 표면에 슬러리(Slurry)가 투입된 후 상정반 패드에 의해 이송 및 가압되는 웨이퍼 후면에 접촉되어 연마하는 주요구조물이다. 이때 하정반 패드 또한

상정반 패드와 동일하게 평탄도에 의하여 접촉되는 웨이퍼 후면에 형성되는 마찰력 및 압력이 상이하게 형성되므로 가공되는 웨이퍼 품질에 많은 영향을 미친다. 이에 유한요소해석을 진행하여, 턴테이블 구조물의 안전계수 및 복수개의 하정반 패드 중 가장 많은 변형량이 발생된 패드의 최대값 및 최소값의 변형량을 측정하였다.

Fig. 7은 하정반 모델의 유한요소해석 결과를 나타내고 있으며, 전체적으로 턴테이블 구조물에서 처짐이 예측되었고, 세부적으로 하정반 패드에서 처짐이 예측되었다. 턴테이블구조물 및 하정반 패드 또한 probe기능을 이용하여 각 상면을 기준으로 가장 높은 점에서의 변형량과 가장 낮은 점에서의 변형량을 측정하였다. 턴테이블 구조물에서는 최소 변형량 12.3 μm 와 최대 변형량 12.7 μm 이 측정되어, 약 0.4 μm 의 미세한 차이가 형성되는 것을 확인하였으며, 하정반 패드에서는 최소 변형량 6.9 μm 와 최대 변형량 10.1 μm 이 측정되어, 약 3.2 μm 의 차이가 형성되는 것을 확인하였다.

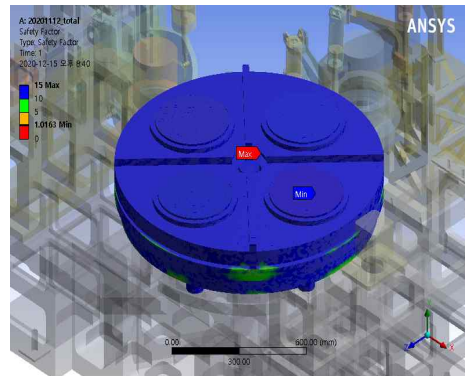


(a) Isometric image

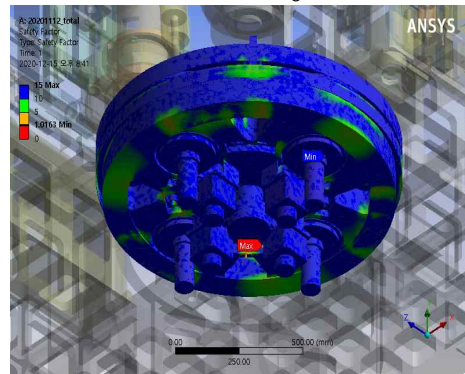


(b) Side view image

Fig. 7 Analysis result of lower plate model(Total deformation)



(a) Isometric image-1



(b) Isometric image-2

Fig. 8 Analysis result of lower plate model(Safety factor)

Fig. 8은 안전계수의 결과 값을 나타내고 있으며, 전체적으로 1 이상의 값으로 형성되는 것이 예측되었다.

턴테이블 구조물의 해석 결과값은 base frame에 지지됨으로 인하여 매우 미세하게 형성된 것으로 판단되며, 하정반 패드의 처짐량 또한 Backgrinding 공정을 통해 연마된 웨이퍼의 두께 값이 수십 μm 인 것을 고려하였을 때, 오차율이 10% 미만으로 형성되므로 문제가 없을 것으로 사료된다. 변형량의 분포 및 안전계수의 분포를 고려하였을 때, 하중에 의한 응력이 하정반 전체로 분산되면서 안전계수가 높게 나온 것으로 분석되며, 하정반 구조물의 설계 타당성이 검증된 것으로 판단된다.

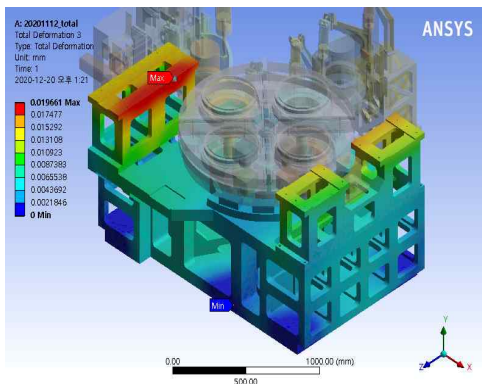
2.4. Base frame 모델 해석 결과 및 분석

base frame은 백그라인딩 공정을 수행하는 상정반 및 하정반을 지지하는 중요한 구조물로서, base frame의 구조적 변형 문제가 생길 경우 상정반 및

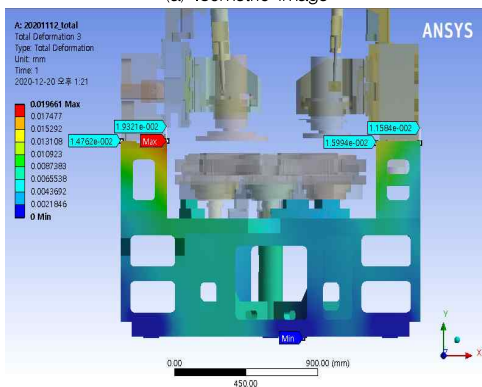
하정반의 위치결정오차 및 평탄도의 정밀도가 낮아져 웨이퍼 가공품질에 악영향을 형성할 수 있다. 이에 유한요소해석을 진행하여, 전체적인 base frame의 안전계수 및 주요 변형 위치의 변형량을 측정하였다.

Fig. 9는 base frame 구조물의 유한요소해석 결과를 나타내고 있으며, 해석 결과 상정반과 결합되는 면에서 가장 큰 변형이 발생된 것으로 예측되었다. 상정반과 결합되는 면에서의 최대 변형량은 $19\mu\text{m}$, 최소 변형량은 $14\mu\text{m}$ 로 측정되었으며, 약 $5\mu\text{m}$ 의 높이차가 형성되는 것을 확인하였다.

Fig. 10에서는 base frame 구조물의 안전계수를 나타내고 있으며, 그 값은 매우 낮은 0.67 값이 예측되었고, 주로 고정점에 형성되는 것을 확인하였다. 백그라인딩 공정의 정밀도를 고려하였을 경우 상정반과 결합되는 면에서의 약 $5\mu\text{m}$ 의 높이차는 오차 범위인 것으로 판단된다.

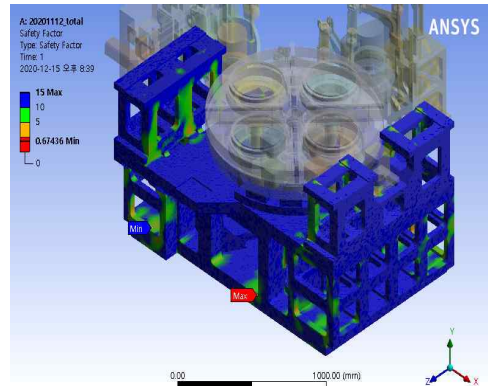


(a) Isometric image

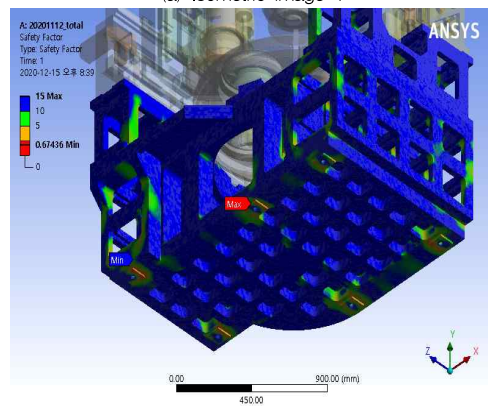


(b) Side view image

Fig. 9 Analysis result of base frame model(Total deformation)



(a) Isometric image-1



(b) Isometric image-2

Fig. 10 Analysis result of base frame model(Safety factor)

그러나, 안전계수의 경우 백그라인딩 장비를 지탱하는 고정퓏 전체에서 안전계수의 값이 낮게 형성되었으며, 이는 base frame의 무게 뿐만 아니라 상정반 및 하정반의 무게가 고정퓏에 집중된 것이 원인으로 사료되고, 안전계수의 값이 0.67인 것을 고려하였을 때, 고정퓏에서는 소성변형이 아니라 파손될 확률이 높을 것으로 판단된다.

3. 결 론

본 연구에서는 백그라인딩 장비의 구조안정성과 설계 타당성을 검증하기 위하여 유한요소해석을 진행하였고, 하중을 적용하였을 때의 처짐량과 안전계수를 측정 및 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 자중이 적용될 경우 상정반은 패드 구조물에서 약 30 μ m의 매우 높은 처짐량이 발생되었으며, 가로축 이송 스테이지에서 안전계수의 값이 1 미만으로 형성되었고, 이는 백그라인딩 공정을 통해 연마된 웨이퍼의 두께 값이 수십 μ m인 것을 고려하였을 때, 상정반 패드의 평탄도가 매우 낮은 것으로 판단되며, 설계보완이 필요한 것으로 판단된다.

2) 하정반 구조물은 턴테이블 구조물에서 약 0.4 μ m의 미세한 차이가 형성되고, 하정반 패드에서 약 3.2 μ m의 높이차가 형성되는 것을 확인하였으며, 안전계수는 전체적으로 1 이상의 값으로 형성되었으므로, 장비 설계 및 백그라인딩 공정을 진행하는 것에 문제가 없을 것으로 판단된다.

3) base frame 구조물은 상정반과 결합되는 면에서 약 5 μ m의 높이차가 형성되는 것을 확인하였으며, 안전계수는 매우 낮은 0.67 값이 예측되었는데, 이는 base frame 뿐만 아니라 상정반 및 하정반의 무게가 고정퓏에 집중되어 파손이 발생할 것으로 분석되며, base frame의 구조적 문제점은 상정반 및 하정반 정밀도에 직접적으로 영향이 형성되므로 설계보완이 필요할 것으로 판단된다.

위의 결과들을 고려하였을 때, 본 연구에서 설계한 백그라인딩 장비는 설계보완이 필요한 것으로 판단되나, 본 해석의 경우 상정반 및 하정반의 패드 구조물의 회전이 고려되지 않은 정지상태에서의 결과 값이므로 추후 상정반 패드 및 하정반 패드의 회전을 고려한 해석을 진행한 후 본 해석의 결과 값과 비교 분석하여 설계보완에 관한 연구가 이루어져야

할 것이다.

후기

본 논문은 산업통상자원부 기계산업핵심기술개발사업 “반도체 웨이퍼 후면 Full Auto Backgrinding 장비 실증” 과제번호(2009804) 연구비 지원으로 진행되었습니다. 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

- Gao, S., Dong, Z., Kang, R., Zhang, B., and Guo, D., “Warping of silicon wafers subjected to back-grinding process”, Precision Engineering, 40, pp. 87-93, 2015.
- Pei, Z. J., “A study on surface grinding of 300 mm silicon wafers”, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 42(3), pp. 385-393, 2002.
- Chen, R., Li, S., Wang, Z., and Lu, X., “Mechanical model of single abrasive during chemical mechanical polishing: molecular dynamics simulation”, Tribology International, 133, pp. 40-46, 2019.
- Seong, H. S., “An equipment Trends and Process Technology for Chemical Mechanical Polishing”, The Magazine of the IEIE, 40(12), pp. 46-58, 2013.
- Lee, B. Y., “Evaluation of Vertical Displacement of Door of Built-in Bottom-Freezer Type Refrigerator by Structural Analysis”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers 19(2), pp. 89-96, 2020.2

저자 소개

위 은 찬(Eun-Chan Wi)

[학생회원]



- 2019년 08월~현재: 서울과학기술대학교 기계설계로봇공학과 석사과정
- 2019년 03월~현재: 인덕대학교 산학협력단, 연구원

< 관심분야 >

초정밀 절삭가공, CAD/CAE

고 민 성(Min-Sung Ko)



- 2018년 02월~현재: 인덕대학교 융합 기계공학과 학부과정
- 2020년 05월~현재: 인덕대학교 산학 협력단, 연구원

< 관심분야 >

CAD/CAE, 초정밀나노가공

이 주 형(Joo-Hyung Lee)



- 2011년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학박사)
- 2012년 5월~2015년 8월: 한국표준과학연구원, 선임연구원
- 2015년 8월~현재: 서울과학기술대학교 기계설계로봇공학과, 조교수

< 관심분야 >

펄토초 레이저, 정밀측정

김 현 정(Hyun-Jeong Kim)

[학생회원]



- 2019년 3월~현재: 서울과학기술대학교 기계설계로봇공학과 석사과정
- 2019년 3월~현재: 인덕대학교 산학 협력단, 연구원

< 관심분야 >

E-Beam, Laser, 초정밀나노가공

백 승 엽(Seung-Yub Baek)

[정회원]



- 2007년 2월: 인하대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2008년 2월~2009년 2월: 유한대학교 금형설계과 조교수
- 2009년 3월~현재: 인덕대학교 융합 기계공학과, 부교수

< 관심분야 >

초정밀나노가공, CAD/CAM/CAE

김 성 철(Sung-Chul Kim)



- 2000년 2월: 부산대학교 정밀기계공학과 (석사)
- 2000년 2월~현재: 에이엠테크놀로지, 연구소장

< 관심분야 >

초정밀가공, 연삭가공, 레이저가공

언더컷 형상의 판재 성형품에 보강용 CFRP 패치의 접합을 위한 공정기술 개발

이환주¹ · 전용준² · 조훈² · 김동언[†]

국민대학교 자동차공학과¹

한국생산기술연구원 형상제조연구부^{2,†}

Development of a process to apply uniform pressure to bond CFRP patches to the inner surface of undercut-shaped sheet metal parts

Hwan-Ju Lee¹ · Yong-Jun Jeon² · Hoon Cho² · Dong-Earn Kim[†]

Department of Automotive Engineering, Kookmin University¹

Shape Manufacturing R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology^{2,†}

(Received December 19, 2020 / Revised December 28, 2020 / Accepted December 31, 2020)

Abstract: Partial reinforcement of sheet metal parts with CFRP patch is a technology that can realize ultra-lightweight body parts while overcoming the high material cost of carbon fiber. Performing these patchworks with highly productive press equipment solves another issue of CFRP: high process costs. The A-pillar is the main body part and has an undercut shape for fastening with other parts such as roof panels and doors. Therefore, it is difficult to bond CFRP patches to the A-pillar with a general press forming tool. In this paper, a flexible system that applies uniform pressure to complex shapes using ceramic particles and silicone rubber is proposed. By benchmarking various A-pillars, a reference model with an undercut shape was designed, and the system was configured to realize a uniform pressure distribution in the model. The ceramic spherical particles failed to realize the uniform distribution of high pressure due to their high hardness and point contact characteristics, which caused damage to the CFRP patch. Compression equipment made of silicone rubber was able to achieve the required pressure level for curing the epoxy. Non-adhesion defects between the metal and the CFRP patch were confirmed in the area where the bending deformation occurred. This defect could be eliminated by optimizing the process conditions suitable for the newly developed flexible system.

Key Words: CFRP patchwork, Flexible mold, Undercut, Multi-material, Sheet metal forming, Bonding

1. 서 론

차량의 연비 및 배기가스 규제가 강화됨에 따라 주요 자동차 제조사는 탄소섬유 복합소재 (Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP)를 이용한 경량차체 개발 관련 연구를 진행하고 있다. 그러나 양산형 차량에 적용하기 위해서는 탄소섬유의 높은 소재 단가와 공정 비용 절감이 요구된다. 이를 위해 기존 금속 부품의 특정 영역을 CFRP 패치로 강화하는 다

종소재 성형기술이 관심을 받고 있다.

자체 구조물 중 필러는 전면-측면 충돌 및 전복 사고에서 운전자의 생존 공간을 확보하는 주요 부품이다. 글로벌 완성차 업체를 중심으로 다중소재 부품 성형공법의 기술 실증을 위해 A필러와 B필러를 선택하고 있다. 독일의 B社は 금형 표면의 온도 제어가 가능한 프레스 공정기술을 이용하여 핫스탬핑 성형품에 CFRP 패치를 접합하는 공정을 B필러에 적용하였다. A필러 내부에는 브레이딩 공정으로 제작된 CFRP 보강재를 삽입하여 가격 경쟁력과 경량화를 구현하였다¹⁾.

일반적으로 필러는 충돌 관련 규제 대응을 위해

1. 국민대학교 자동차공학과

† 교신저자: 한국생산기술연구원 형상제조연구부

E-mail: kdu0517@kitech.re.kr

내·외측 패널의 중심부에 고강도 보강재가 배치되는 3층 구조로 제작된다. A필러의 경우 충돌 안정성과 더불어 사고 예방을 위해 운전자의 측면부 시야 개선 목적으로 작은 단면 구조가 요구된다. A필러는 전면의 윈드실드, 상부의 루프 패널 및 측면의 도어와 체결을 위해 언더컷 형상을 갖는 단면구조로 되어있다.

금속 성형품에 CFRP 패치가 접합된 하이브리드 부품의 경우 계면 품질 향상 및 CFRP 패치의 내부 결합 저감 등을 위해 경화 공정 중 온도와 압력의 정밀 제어가 요구된다. 기존 오토클레이브 공정의 낮은 성형성을 극복하기 위해 완성차 업체는 프레스를 활용한 복합소재 고속 성형기술을 개발하고 있다. 그러나 A필러는 내부의 언더컷 구조로 인해 일반적인 프레스 장비와 금형으로 프리프레그의 경화 공정에서 요구되는 압력 제어가 어렵다^{2,4)}.

본 연구에서는 세라믹 입자와 실리콘 고무를 기반으로 하는 가변형상 가압장치를 고안하였다. 이를 활용하여 언더컷 형상을 갖는 부품의 내측에 배치된 CFRP 패치를 접합하였다. 에폭시 프리프레그의 경화 공정에서 요구되는 압력 수준의 확보와 더불어 균일한 압력이 작용하는지 확인하였다. 금속과 CFRP 패치의 접합 품질의 분석을 통해 다중소재 하이브리드 부품 성형에 프레스 공정기술의 적용 가능성을 검토하였다.

2. 실험모델 및 공정설계

2.1. 언더컷 포함 기준모델 설계

기존 차량에 적용된 A필러의 단면을 Fig.1(a)에서 살펴보면 내·외측 패널과 보강재로 구성된 3층 구조임을 확인할 수 있다. 본 논문에서는 언더컷 형상을 갖는 외측 패널에 기계적 물성을 보강하는 CFRP 패치를 프레스 공정으로 접합하는 시스템을 제안하고 있다. 개발 시스템을 검증하기 위해 기준 A필러의 단면 형상을 대상으로 벤치마킹을 진행하여 실험에 필요한 기준모델 형상을 Fig.1(b)와 같이 도출하였다.

본 논문에서 기준모델은 차체 구조와 외장품에 많이 사용되는 440MPa 냉연강판(SPRC440)으로 제작하였다. 보강을 위한 CFRP 패치는 SK 케미칼社의 직조형 프리프레그를 적층하여 라미네이트 형태로 활용하였다. 강판재로 제작된 내·외측 패널의 체결 성능과 A필러의 강성을 확보하기 위하여 보강용 CFRP 패치는 Fig. 1(b)에 표시된 단면 영역에만 배치하였

다. CFRP 패치를 기준 모델의 하측 면과 양쪽 굽힘 성형 영역에 한정하여 CFRP 성형품이 용접 또는 기계적 체결 과정에서 파손되지 않도록 설계하였다.

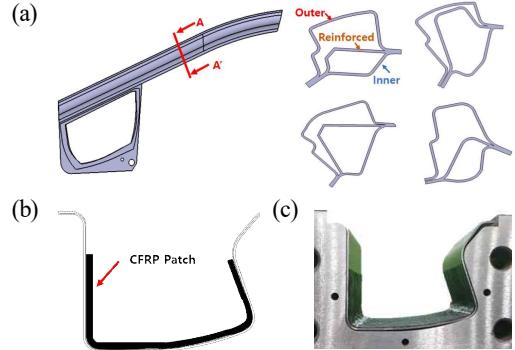


Fig. 1 Test model of metal-CFRP hybrid A-pillar; (a) cross-section view of A-pillar; (b) the position of CFRP patch on the inner surface of undercut-shaped sheet metal part; (c) Lower mold with cartridge heaters installed for temperature control

2.2. 보강용 CFRP 패치 접합공정 설계

다중소재로 구성된 기준모델에서 강판재 부품의 언더컷 형상은 프로그래시브 공정을 이용하여 제작하였다. 강판재 성형품의 내측에 탄소섬유 라미네이트를 수동으로 적층하였다. 이종 소재의 접합 품질은 계면 조건에 따라 상이하다⁵⁾. 본 논문에서는 접합 강도 향상 기술을 포함하지 않아 금속과 라미네이트 사이의 계면에는 별도의 표면 개질을 수행하지 않았다. 프리프레그에 포함된 에폭시를 이용하여 경화 과정에서 접합되는 동시 접합(co-bonding) 공정을 적용하여 별도의 접합용 필름 없이 일체화하였다. 강판재 성형품 하부 금형에 카트리지 히터를 설치하여 표면 온도를 프리프레그 경화 조건에 맞춰 Fig.2와 같이 다단으로 제어하였다⁶⁾.

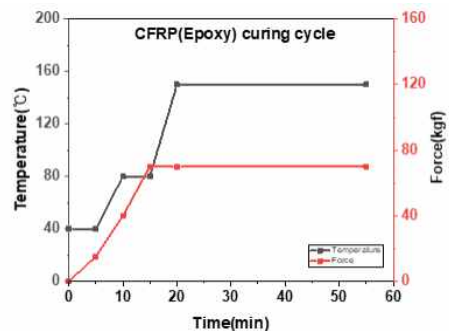


Fig. 2 Process conditions of epoxy prepreg

3. 균일 가압구조 제작 및 성능비교

3.1. 가변형상 기반 언더컷 내부 가압

CFRP 패치가 설계된 기계적 성능을 구현하기 위해서는 수지 중량비 및 내부 결합 등 성형품의 품질 제어가 중요하다. 이를 위해 에폭시 경화 공정 중 라미네이트의 표면에 균일한 압력 및 온도 조건과 조율된 정밀한 압력 제어가 요구된다. 본 논문에서는 세라믹 구형 입자와 실리콘 고무를 이용하여 언더컷 형상 내부의 이중 소재 접합면에 균일한 압력을 부여하는 형상 가변형 압축 시스템을 Fig.3과 같이 제작하고 성능을 평가하였다.

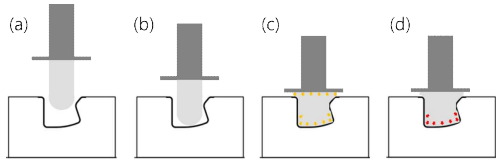


Fig. 3 Schematic diagram of the operation of the surface pressure control system using a shape variable punch

3.2. 세라믹 입자 기반 균일 가압 시스템

임의형상 부품의 표면에 균일한 압력을 부가하기 위해 세라믹 구형 입자로 구성된 가압시스템을 제작하였다. 세라믹 입자는 실리콘 대비 고온 안정성이 높고, 미세입자의 충진을 통해 복잡 형상 부품에도 적용이 가능하다. 이와 더불어 구형 입자 사이에 생성되는 개방형 기공은 프리프레그의 경화를 위해 가열된 성형품을 취출 가능한 온도까지 냉각하는 채널로 활용이 가능하다.

2~20mm 지름의 세라믹 구형 입자를 사용하여 입자 크기별 언더컷 금형 형상부의 충진 특성을 Fig.4와 같이 비교 분석하였다. 조건별 단면의 영상 분석을 통해 금형 표면과 구형 입자 사이의 영역을 비교해 보면 2mm의 입자에서도 약 3,000mm²의 미충진이 확인된다. 작은 입자를 사용하여도 점 접촉 특성 및 형상에서 기인하는 최대 충진율로 인해 균일한 압력 부여가 어려운 것을 확인하였다.

3.3. 실리콘 고무 기반 균일 가압 시스템

실리콘 고무 가압 펀치는 Shinetsu社의 상온 경화형 room-temperature-vulcanizing(RTV) 실리콘으로 제작되었다. 실리콘 고무 펀치는 유연한 재질로 구성된 가압 구조물로 치수 안정성 및 표면 이형성이 높

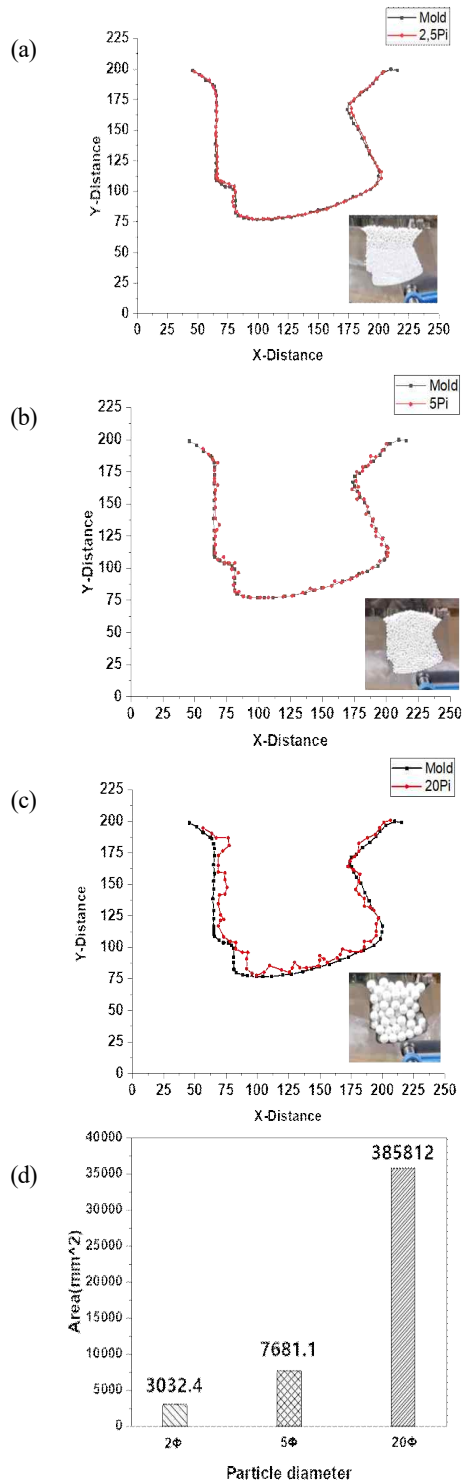


Fig. 4 Analysis of unfilled area according to particle size: (a) Filled using a 2mm diameter particles; (b) 5mm; (c) 20mm

아 별도의 패키징 없이도 CFRP 패치의 가압 성형이 가능하다. 실리콘 고무는 세라믹 입자와 달리 금형과의 접촉면에서 완전 충진을 Fig.5(b)에서 확인할 수 있다.

실리콘 고무에 경화제와 오일의 혼합비율을 조절하여 변위에 따른 가압력 수준을 확인하였다. 2절에서 설계된 기준모델 금형을 사용하여 실리콘 펀치 상부의 가압 깊이에 따른 하중 변화를 Fig.5(c)와 같이 점검하였다. 실리콘 오일 첨가량이 증가할수록 가압체의 유연성이 증가하며, 변위에 따른 가압력 변화의 비선형 특성도 감소 되어 압력 제어에 유리하다고 판단된다. 그러나 실리콘 오일이 많이 사용될수록 내구성 저하와 더불어 고온 작동에서 소재의 유연성 저하 등 고온 물성의 분석이 필요하다.

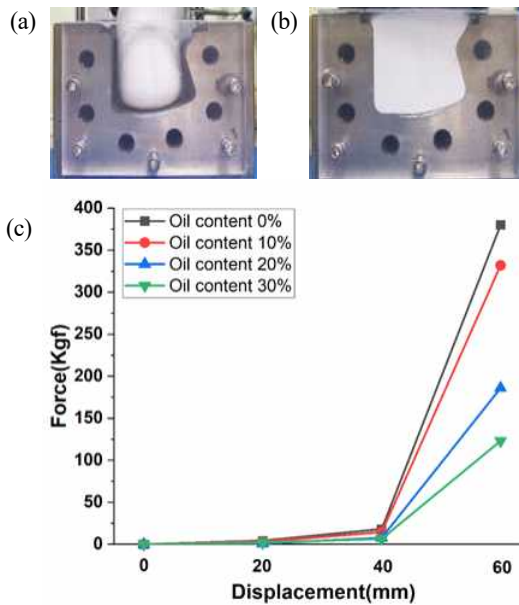


Fig. 5 Changes in load-displacement characteristics of silicone punch according to the amount of silicone oil.

3.4. 시스템 별 가압 수준 성능 비교

본 논문에서 제안된 세라믹 입자와 실리콘 고무를 이용한 압축 시스템의 압력 수준 및 균일도를 점검하였다. 에폭시 프리프레그의 경화에서 요구되는 압력 수준을 고려하여 0.2~10MPa 범위의 압력 감지가 가능한 감압지를 이용하여 분석을 진행했다. 2장에서 설계된 기준모델의 단면을 5개 영역으로 분할하고 위치별 압력을 확인하였다.

지름 2mm의 세라믹 입자를 사용한 가압시스템은 전체 영역에서 압력 수준이 불충분하였다. CFRP 패치의 성형 및 접합에 필요한 수준의 면압을 구현하기 위하여 시스템의 하중을 증가하면 구형 형상에서 기인되는 점 접촉 특성으로 인해 하중이 집중되면서 CFRP 패치의 파손이 발생하였다. 해당 불량은 고온 내구성이 확보된 두꺼운 유리섬유 패브릭으로 압력을 분산하여 해결이 가능하다. 그러나 표면의 패브릭 추가로 인해 날카로운 모서리 등을 갖는 복잡형상 부품에 균일한 가압이 불가하였다.

감압지 이미지 분석을 이용한 실리콘 시스템의 압력 분포는 Fig.6(b)에서 확인할 수 있다. 고굴곡 영역에 가해지는 최소 압력은 3MPa로 다른 영역 대비 상대적으로 낮으나 에폭시 경화에 사용 가능한 수준이다. 실리콘 고무가 언더컷 영역을 완전 충진한 것으로 Fig.5(b)에서 확인되나, 감압지 분석에서는 언더컷 외곽부에 압력이 집중되는 결과를 보인다. 복잡형상에 능동적으로 대응하여 균일한 압력을 구현하기 위해서는 실리콘 조성의 추가적인 최적화가 필요하다.

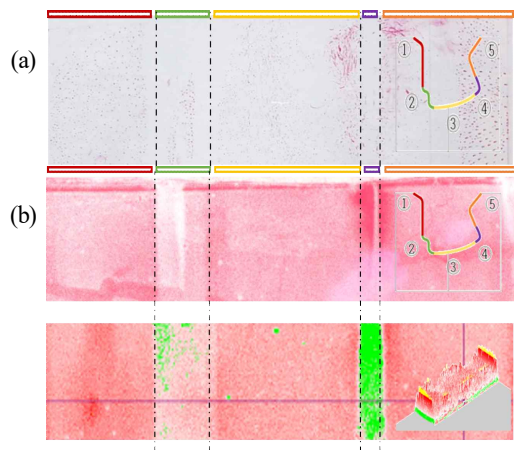


Fig. 6 Analysis of pressure distribution by location using prescale film; (a) result using 2mm diameter ceramic particles; (b) results using silicone rubber

4. 성형품 분석

3절에서 CFRP 패치의 성형과 접합 공정에 적용 가능하다고 판단되는 실리콘 가압 펀치를 이용하여 기준모델 형상의 하이브리드 부품을 제조하고 접합면을 분석하였다.

실리콘 고무 시스템을 이용하여 CFRP 패치를 접합한 부품의 단면을 Fig.7에 표시하고 있다. 모서리의 다중소재 접합면에서 층간 박리와 유사한 불량이 확인된다. 일반적으로 굽힘 성형된 CFRP 부품에서는 주름, 수지 과잉과 같은 불량이 쉽게 확인되며, 이는 두꺼운 라미네이트 내부에 적층된 플라이 상호 간의 층간 이동성이 낮아서 발생한다⁷⁾.

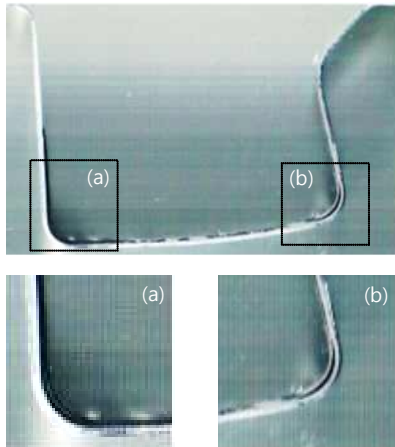


Fig. 7 Non-adhesion defects in the bent corner of Metal-CFRP hybrid parts

	25°C	35°C	45°C
2 plies	1982.56mm ² 	836.91mm ² 	831.18mm ²
3 plies	3228.36mm ² 	2816.9mm ² 	874.49mm ²
4 plies	3369.19mm ² 	1513.71mm ² 	439mm ²

Fig. 8 Analysis of the area of non-adhesion defects at the metal-CFRP interface according to the stacking temperature and the number of stacked plies.

라미네이트의 적층 조건에 따른 접합면의 비접착 영역의 변화를 Fig.8에서 확인할 수 있다. 성형된 금속 판재 위에 수동으로 적층하는 작업 온도를 증가하면 적층 불량이 감소한다. 온도 상승에 의한 수지의 흐름성이 향상되어 금속과 CFRP의 초기 접착 상태가 개선됨에 따른 효과라고 판단된다. 관련된 불량을 저감하기 위해서는 신규 개발된 가압 시스템에 적합한 온도와 압력을 반영한 공정절차 수립이 필요하다.

5. 결론 및 토의

본 연구에서는 언더컷을 갖는 복잡형상 부품 내부에 CFRP 패치를 접합하는 가변형상 가압 장치를 제작하고 이종소재 접착면의 품질을 분석하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

1) 세라믹 입자의 강한 경도와 형상 특성으로 인해 CFRP 패치의 표면의 국부적인 파손이 발생하여 프리프레그 성형 및 경화에 필요한 균일 압력 구현은 어렵다.

2) 실리콘 고무를 활용한 형상 가변형 가압장치를 구현하였으며, 경화제 및 실리콘 오일 등의 첨가를 통한 조성 제어로 접합 공정 중 하중 제어가 가능하다.

3) 고굴곡 굽힘 성형에서는 이종 소재 계면에서 비접촉 불량이 발생할 수 있으며, 이를 개선하기 위해서는 CFRP 패치의 적층 공정 온도의 최적화가 필요하다.

4) 유연한 구조를 갖는 가압장치를 적용함으로써 언더컷 형상 부품의 내부에도 기계적 물성의 부분 보강을 위한 CFRP 패치의 접합을 프레스 장비로 구현하였다.

참고문헌

- 1) WANG, Zheng, et al., "Manufacturing and investigation of steel-CFRP hybrid pillar structures for automotive applications by intrinsic resin transfer moulding technology", International Journal of Automotive Composites, 2.3-4: pp. 229-243, 2016.
- 2) FIORE, V.; VALENZA, A.; DI BELLA, G., "Mechanical behavior of carbon/flax hybrid composites for structural applications", Journal of

- Composite Materials, 46.17: pp. 2089-2096, 2012.
- 3) LÖCHTE, Christian, et al., “Form-flexible handling and joining technology (formhand) for the forming and assembly of limp materials”, Procedia CIRP, 23: pp. 206-211, 2014.
 - 4) SADOWSKI, T., et al., “Gradual degradation of a thin-walled aluminum adhesive joint with omega cross section under bending”, International Journal of Adhesion and Adhesives, 89: pp. 72-81, 2019.
 - 5) ZINN, Carolin, et al., “Shear strength and failure behaviour of laser nano-structured and conventionally pre-treated interfaces in intrinsically manufactured CFRP-steel hybrids”, Composites Part B: Engineering, 151: pp. 173-185, 2018.
 - 6) REINHART, Gunther (ed.). Handbuch Industrie 4.0: Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2017.
 - 7) Thor, Michael, et al., “Mechanisms of Origin and Classification of Out-of-Plane Fiber Waviness in Composite Materials – A Review”, J. Compos. Sci., 4(3), p. 130, 2020.

저자 소개

이 환 주(Hwan-Ju Lee) [정회원]



- 2017년 3월~현재: 국민대학교
자동차공학 박사과정

< 관심분야 >
복합소재(CFRP) 성형/가공, 구조해석

전 용 준(Yong-Jun Jeon) [정회원]



- 2012년 2월: 대구대학교
기계공학과 (공학석사)
- 2012년 3월~현재: 한국생산기술연
구원 형상제조부문, 연구원

< 관심분야 >
판재성형 및 금형, 판재성형해석

조 훈(hoon Cho)



- 2004년 3월: 성균관대학교 신소재공
학과 (공학박사)
- 1992년 3월~현재: 한국생산기술연
구원, 수석연구원
- 2017년~현재: 한국 주조공학회 기
술이사
- 2008년~현재: 한국 동기술연구조합
이사

< 관심분야 >
고순도화, 합금개발, 연속주조, 압출 및 인발

김 동 연(Dong-Earn Kim) [정회원]



- 2006년 8월: 서울대학교
기계공학과 (공학박사)
- 2008년 9월~2013년 11월: 삼성전자
삼성종합기술원, 전문연구원
- 2013년 12월~현재: 한국생산기술연
구원 형상제조부문, 수석연구원

< 관심분야 >
프레스 금형, 고강도 판재 성형, 복합소재 성형

DSI 성형을 이용한 금속/플라스틱 복합 부품 제조에 관한 연구

하석재¹ · 차백순² · 고영배[†]

(주)하랑에이엠아이 R&D 센터¹ · 한국생산기술연구원 형상제조연구부문^{2,†}

A study on the manufacturing of metal/plastic multi-components using the DSI molding

Seok-Jae Ha¹ · Baeg-Soon Cha² · Young-Bae Ko[†]

Harang AMI Co. Ltd. R&D center¹

Shape Manufacturing R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology^{2,†}

(Received December 18, 2020 / Revised December 26, 2020 / Accepted December 31, 2020)

Abstract: Various manufacturing technologies, including over-molding and insert-injection molding, are used to produce hybrid plastics and metals. However, there are disadvantages to these technologies, as they require several steps in manufacturing and are limited to what can be reasonably achieved within the complexities of part geometry. This study aims to determine a practical approach for producing metal/plastic hybrid components by combining plastic injection molding and metal die casting to create a new hybrid metal/plastic molding process. The integrated metal/plastic hybrid injection molding process developed in this study uses the proven method of multi-component technology as a basis to combine plastic injection molding with metal die casting into one integrated process. In this study, the electrical conductivity and ampacity were verified to qualify the new process for the production of parts used in electronic devices. The electrical conductivity was measured, contacting both sides of the test sample with constant pressure, and the resistivity was measured using a micro ohmmeter. Also, the specific conductivity was subsequently calculated from the resistivity and contact surface of the conductor path. The ampacity defines the maximum amount of current a conductive path can carry before sustaining immediate or progressive deterioration. The manufactured hybrid multi-components were loaded with increasing currents, while the temperature was recorded with an infrared camera. To compare the measured infrared images, an electro-thermal simulation was conducted using commercial CAE software to predict the maximum temperature of the power loaded parts. Overall, during the injection molding process, it was demonstrated that multifunctional parts can be produced for electric and electronic applications.

Key Words: Metal/Plastic Hybrid Components, DSI(die slide injection) mold, Low-Melting Alloy, Electrical Conductivity, Ampacity

1. 서 론)

MCM(multi-component injection molding)은 2개 이상의 재료를 사용하는 다색/다종 부품으로 구성되는 제품을 금형 내에서 복합성형을 통해 한 번에 성형으로 제조할 수 있는 기술을 나타낸다. 최근 자동차 및 항공기 부품 등에서 한 번의 공정으로 금속과 플라스틱 재료를 복합 성형하여 부품의 기능성 향

상 및 경량화를 목적으로 복합 성형기술에 관한 연구가 증가하고 있다^{1,2)}. 복합 성형 기술 중 금속 제품을 개별 성형 후 성형된 금속 부품을 플라스틱 금형 안에 삽입하여 성형하는 인서트 사출성형과 이중 플라스틱 수지를 한 금형에서 성형하는 공정으로 구분된다. 일반적으로 금속과 플라스틱 복합 부품 생산을 위한 공정기술은 금속 부품의 인서트 사출 성형 공정이 대부분이지만, 이러한 인서트 사출 성형 및 오버몰딩(overmolding) 공정기술은 여러 공정이 소요되며, 동시에 복잡한 형상 부품의 제조에는 한계가 발생한다. 또한, 이중 재료의 경우 열가소성/열경화성 플라스틱 소재에만 제한적으로 적용

1. (주)하랑에이엠아이

† 교신저자: 한국생산기술연구원 형상제조연구부문

E-mail: kaiser74@kitech.re.kr

되고 있으나, 최근 금속과 플라스틱 재료를 한 공정으로 복합 성형하여 기능적이고, 경량화된 부품의 수요가 증가하고 있다.

금속과 플라스틱 재료를 이용한 하이브리드 제품은 기본 금속 구조물과 비교할 때 제조 비용 및 성형품의 경량화 등의 이점을 가지고 있는 것이 특징이다. 또한, 최근에는 인서트 사출성형공정에서 금속과 플라스틱 이중재료의 접합성능을 향상시키기 위해 인서트 하는 금속 표면에 레이저 가공 및 부식, 아노다이징 공정 등과 같은 화학적 처리 방법을 이용해 나노 구조를 갖는 앵커링(anchoring)형상을 제작한 후 플라스틱 성형을 통해 금속과 플라스틱 하이브리드 구조물을 제조하는 공정개발이 연구되고 있다³⁻⁶⁾.

또한, 금속과 플라스틱 재료를 이용한 하이브리드 제품을 제조하기 위한 복합 성형 기술 중 독일 아헨 공과대학 내 IKV(Institute of Plastics Processing, IKV)연구소에서는 저융점 금속 소재와 열가소성 플라스틱 수지를 사용하여 하나의 플라스틱 사출 금형 안에서 성형하는 공정기술을 개발하였다⁷⁾. C. Hopmann는 금속과 플라스틱 부품의 복합성형기술에서 사출 성형용 금형 안에서 플라스틱 성형 후 플라스틱 성형품 표면 상에 저융점 금속을 분사하여 플라스틱 표면 상에 금속 회로를 성형하는 IMMS(In-mold spraying)기술을 개발하였고, 저융점 금속 분사 후 가공된 플라스틱 표면에 따른 금속의 접착 평가 및 증착된 금속의 전기적 특성, 형상 정밀도 평가를 수행하였다⁸⁾.

하지만, 현재까지는 금속과 플라스틱 복합 성형에 관한 연구가 초기단계에 있으며, 이를 위한 합금소재 개발, 금속 성형을 위한 다이캐스팅 공정과 플라스틱 사출 성형을 위한 통합 성형 시스템 및 금형 개발이 필요한 상황이다. 본 논문에서는 금속 다이캐스팅 공정과 플라스틱 사출 공정을 하나의 금형 시스템을 이용하여 금속과 플라스틱 재료를 하나의 부품으로 제조하는 기술로, 용융된 금속을 분사하는 방식이 아닌 플라스틱 부품에서 유동채널을 먼저 성형한 후, 그 유동채널을 통해서 용융된 금속이 주입되는 방식으로 금형 및 공정을 개발하였다. 또한, 재료 측면에서 금속 소재의 기능성과 저융점 열적 특성을 고려하여, 기존 사출성형 시스템에 적용이 가능한 다이캐스팅 모듈과 금형을 개발하는 것이 목적이다.

따라서 본 논문의 목적은 금속/플라스틱 복합 성형품을 성형하기 위한 다이캐스팅 모듈을 포함한 플라스틱 사출성형용 DSI(die slide injection) 몰드(mold)를 제작하였고, 개발한 DSI 금형(mold)을 이

용하여 저융점 금속과 열가소성 플라스틱을 사용하여 금속 도선부 및 플라스틱 캐리어 제품을 벌크(bulk)형태로 한 금형 내에서 성형하고, 성형된 제품의 치수정밀도, 전기전도도 및 전류용량 등과 같은 전기적 특성 평가를 수행하였다.

2. 금속/플라스틱 일체형 부품 제조공정

2.1. 다이캐스팅 공정용 저융점 금속 선정

금속/플라스틱 하이브리드 복합 성형품의 제조를 위해 본 논문에서는 용점이 낮은 합금으로 알려진 솔더(solder)합금에 대한 소재를 적용하였다. 금속 성형을 위해서는 솔더 합금 중 약 200°C 이하의 온도에서도 액상을 유지할 수 있는 저융점 금속으로 Sn-Zn 계열 및 Sn-Bi 계열로 분석되었다. 저융점의 금속 성형을 위해 Sn-Zn 계열 및 Sn-Bi 계열의 소재 중 플라스틱 구조체 상에 금속 도선을 성형하기 위해 금속 소재의 특성에서 electro conductivity 인자가 높은 것으로 선정하였다. 따라서 본 논문에서는 저융점 금속 중 Sn-8Zn, Sn-4Zn-10Bi, Sn-6Zn-10Bi, Sn-14Bi-3Zn, Sn-14Bi-6Zn, Sn-18Bi-6Zn, Sn-20Bi-1Zn 및 Sn-20Bi-5Zn 소재들을 선정하였으며, Fig. 1과 같이 선정한 8종류의 저융점 금속 소재들의 electro conductivity 및 latent heat 데이터를 조사하여 나타낸 것이다.

본 논문에서는 약 200°C 이하의 온도에서도 액상을 유지할 수 있는 합금은 Sn-Zn 계열 및 Sn-Bi 계열에서 일반적으로 상용화 되어 있고, 현재 금속/플라스틱 복합성형에 관한 연구에서 가장 많이 사용하고 있는 재료인 MCP200(Sn-8Zn) 합금을 성형 재료로 선정하였다^{7,8)}.

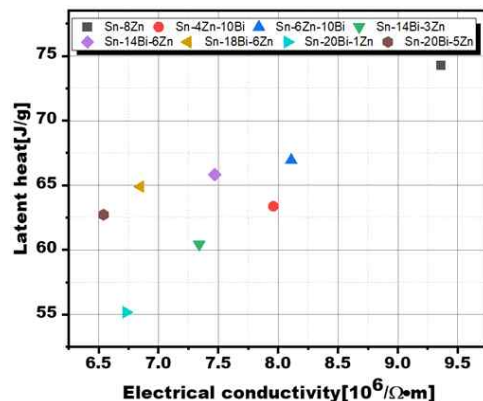


Fig. 1 Analysis of material characteristics for selection of a low-melting metal

2.2. DSI 금형 설계

본 논문에서는 금속 성형을 위해 Cold 챔버 방식의 다이캐스팅 모듈 구조를 고려하여 금속도선 및 플라스틱 캐리어류 부품 제조를 위한 DSI(die slide injection) 금형을 제작하였다. 일반적으로 DSI 금형은 플라스틱 사출성형에서 제품의 상부 또는 하부를 1차로 사출성형하고 금형 코어가 이동한 후 2차 사출성형을 통해 최종 완성시키는 이중 사출 성형 공정에 하나이다. 본 논문에서는 금속과 플라스틱 재료를 동시에 성형하기 위해 1차로 플라스틱 재료를 성형하고 금형 코어가 이동한 후 2차 성형에서는 저융점 금속을 성형하기 위한 구조로 금형을 설계하였다. DSI 금형 구조는 Fig. 2와 같이 다이캐스팅 모듈 반대편에 1차 플라스틱 사출성형 후 플라스틱 성형품을 2차 다이캐스팅 성형공정으로 진행할 수 있도록 공압 방식의 액츄에이터를 사용하여 이송하는 모듈을 장착하였다. 또한, 금속 다이캐스팅 부에서는 금속 성형공정 시 발생하는 기포를 제거하기 위하여 금속 유동부 끝 부분에서 오버플로우(overflow) 존을 설계하였다.

금속/플라스틱 복합 구조체 성형을 위한 저융점 금속의 성형에서 다이캐스팅(die casting)모듈은 Cold chamber 방식의 모듈로 제작하였다. 일반적으로 Cold chamber 방식은 챔버가(chamber)가 공기 중에 노출 된 상태에서 래들을 이용하여 용탕을 주입 후

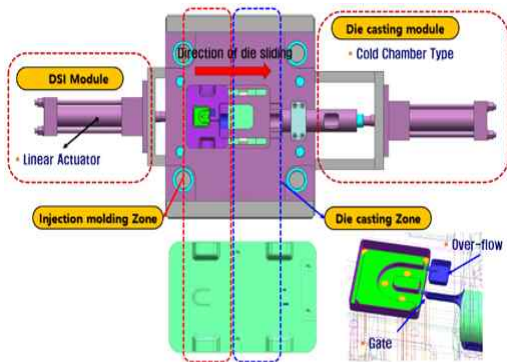


Fig. 2 Structure of DSI(die slide injection) mold for integrated plastic/metal multi-components

금형 안을 채우는 방식으로 고압을 인가하여 내부 기포를 제어할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 본 논문에서는 저융점 금속 성형을 위해 Cold chamber 방식의 다이캐스팅 모듈을 제작하여 기초성형실험

에 사용하였다. Fig. 3은 금속/플라스틱 복합 구조체 성형을 위한 수직형 사출 성형기, 금속/플라스틱 성형용 DSI금형 및 콜드 챔버 방식의 다이캐스팅 모듈에 관한 실험장비를 나타낸다.

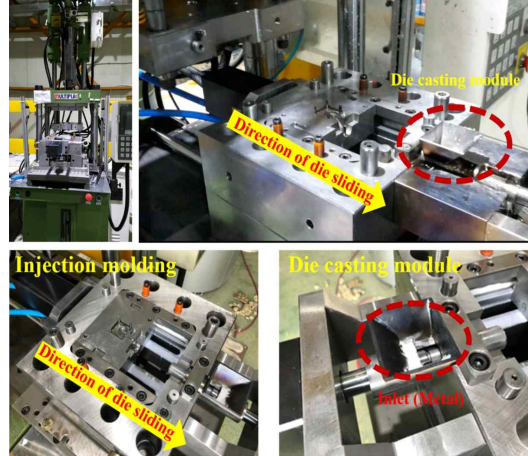


Fig. 3 Experimental set-up for fabrication of integrated plastic/metal multi-components

2.3. DSI 금형을 이용한 금속/플라스틱 복합 부품성형

금속/플라스틱 복합 구조체 성형을 위해서 성형 시 저융점 금속의 플래시 방지를 위해 플라스틱 성형부와 금속 다이캐스팅 성형부의 파팅 라인에 실링 구조를 적용하여 2차 금속 다이캐스팅 성형공정 시 금형 형폐 구조에서 금형 상단부에 강제 눌림을 통해 저융점 용융금속의 플래시를 방지할 수 있도록 설계하였다. Fig. 4(a)는 플라스틱 사출부에 적용된 플래시 방지를 위한 실링부 형상의 개념도를 나타낸다. 플라스틱 실링부를 평가하기 위해서 금속/플라스틱 복합 구조체의 제품 형상은 Fig. 4(b)와 같이 전체크기는 30mm×30mm이며, 금속 도선부 형상은 형태이고, 도선 단면적은 3.2mm×3.2mm이며, 금속 도선부의 유동길이는 57.8mm를 갖는 형상으로 설계하였다. 설계한 제품에 대하여 금속 성형 시 용융금속 플래시(flash) 방지를 위한 플라스틱 성형품의 실링부 형상 평가를 위한 기초성형 실험을 수행하였다. 기초 성형 실험에서 사용한 플라스틱 성형용 수지는 PA66(KEP사, 2330GFH BL)이며, 2차 다이캐스팅을 위한 저융점 금속은 앞 절에서 선정한 MCP200(Sn-8Zn)의 저융점 금속을 사용하였다.

품에서 금속 도선부의 측정 위치를 나타낸다. 금속 도선 단면적 3.2mm×3.2mm을 갖는 형태의 치수 정밀도의 측정결과는 금속/플라스틱 소재의 복합 성형된 제품 5개를 3회 반복 측정한 결과 Fig. 7(b)와 같이 제품 설계 치수인 3.2mm에서 약 + 0.1mm 공차를 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

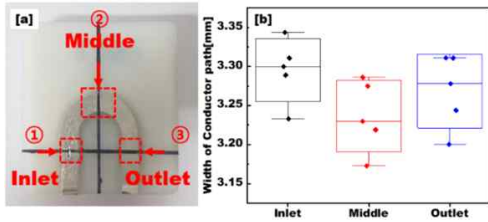


Fig. 7 Measured data and measuring position for evaluation of dimension accuracy in metal conductor path (cross-section area: 3.2mm×3.2mm, flow length: 57.8mm): (a) measuring position, (b) result of measured data

또한, 동일한 저용점 금속 및 플라스틱 소재를 활용하여 금속 도선 단면적은 2.8mm×2.8mm로 동일하고, 금속/플라스틱 성형품 외형 치수크기가 45mm×45mm이며, 저용점 금속 도선부의 유동길이를 161.9mm로 증가시킨 확장형 금속 도선부에 대한 치수 정밀도 측정을 수행하였다. 금속/플라스틱 복합 구조체의 성형품은 한 개당 3부분(유동 입구부, 직선부, 유동 끝부분)의 단면으로 절단하여 금속 도선 채널의 폭(width)에 대한 치수를 측정하였다. 측정 방법은 앞선 형태의 도선 측정과 동일한 방법으로 수행하였다. Fig. 8는 금속 도선부 유동길이 161.9mm에 대한 금속 도선 폭 치수측정을 위한 측정위치 및 측정결과를 나타낸다. 치수측정 결과 금속 도선 단면적은 2.8mm×2.8mm, 유동길이 161.9mm인 금속과 플라스틱 복합 성형품은 약 +0.08mm 이내로 금속이 성형된 것을 확인할 수 있었다.

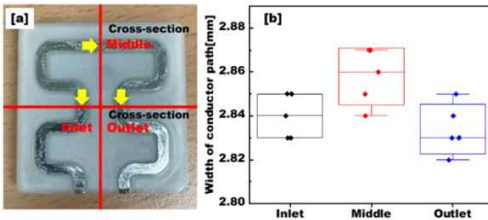


Fig. 8 Measured data and measuring position for evaluation of dimension accuracy in metal conductor path (cross-section area: 2.8mm×2.8mm, flow length: 161.9mm): (a) measuring position, (b) result of measured data

3.2. 전기전도도 및 전기용량

금속과 플라스틱 복합 성형에서 성형된 저용점 금속의 전기전도도 측정을 위해 저용점 금속인 MCP200(Sn-8Zn)를 사용하였으며, 시편 형상의 크기를 40mm×40mm, 두께 2mm로 제작하였다. 전기전도도의 측정은 표면 저항 측정장치(4-point probe)를 통해 면저항을 측정하였고, 면 저항 측정에 사용된 시편 크기에 대한 보정계수는 4.512, 시편 두께에 대한 보정계수는 0.6337로 설정하였다. Fig. 9는 저용점 금속의 전기전도도 평가를 위한 면 저항 측정 원리 및 계산식을 나타낸다. 또한, 측정된 면 저항값을 이용하여 식(1)을 활용하여 전기전도도 값으로 환산 하였다.

$$\sigma = \frac{L}{R \cdot A} \left[\frac{S}{m} = \frac{1}{\Omega \cdot m} \right] \quad (1)$$

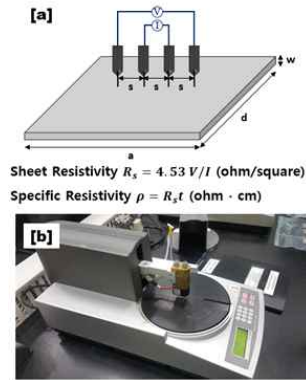


Fig. 9 Experimental set up for measuring electrical conductivity

식(1)에서 A는 성형 시편의 단면적을 나타내며, L은 표면저항측정 프로브의 간격을 나타낸다. 금속/플라스틱복합 성형품에서의 금속 도선부의 측정된 저항값을 이용하여 전기전도도 환산값은 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Results of electro conductivity

	Sheet resistivity [Ω/□]	Electrical conductivity[S·m]
Specimen [A]	0.229	2.18E+06
	0.176	2.84E+06
	0.184	2.72E+06
Specimen [B]	0.194	2.58E+06
	0.307	1.63 E+06
	0.212	2.36 E+06
Specimen [C]	0.159	3.15 E+06
	0.243	2.05 E+06
	0.229	2.18 E+06
Specimen [D]	0.211	2.37 E+06
	0.208	2.41 E+06
	0.172	2.91 E+06

금속/플라스틱 복합 성형품에서 금속 도선부의 전기용량 평가를 수행하였다. 전기용량 실험에서는 금속 도선부에 직류전류를 인가하여 발생하는 열을 적외선 열화상 카메라를 이용하여 측정하였고, 실험에 사용한 전압 및 전류 조건을 적용하여 열전달 연계 시뮬레이션을 수행하였다. 전기용량 평가를 위해 도선 단면적 3.2mm×3.2mm 제품과 2.8mm×2.8mm 성형품에 대하여 평가를 수행하였고, 실험에 사용된 조건은 전류는 6.4A이고, 전압은 0.4 volt로 설정하여 전기용량 실험을 수행하였다.

Fig. 10(a)은 금속 도선부 유동길이 57.8mm(단면적: 3.2mm×3.2mm)를 갖는 금속 도선부의 전기용량 발열 측정결과 금속 도선부의 최대온도는 약 40°C로 확인되었으며, 전기-열 전달 연성해석 결과에도 동일하게 금속 도선부 형상에서의 최대온도가 40°C로 확인이 되었다. 또한, Fig. 10(b)와 같이 동일한 전류와 전압을 이용하여 금속 도선부의 유동길이 161.9mm(단면적: 2.8mm×2.8mm)를 갖는 금속 도선부에 대한 전기용량 평가를 수행하였다. 측정 및 시뮬레이션 결과 금속 도선부의 최대온도는 약 53°C로 확인되었으며, 앞선 형태의 성형품 보다 단면적이 작아 전류용량이 증가되어 발열온도가 상승한 것으로 판단된다.

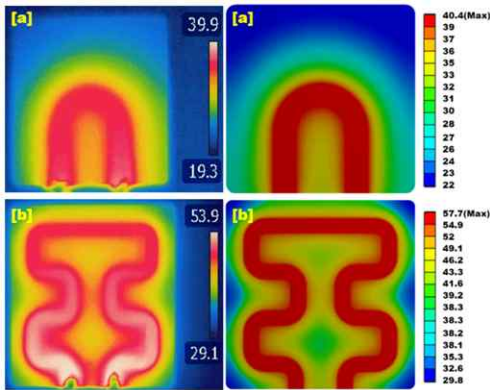


Fig. 10 Comparison of thermal camera image and simulated temperature distribution: (a) Cross-section area: 3.2mm×3.2mm, flow length: 57.8mm, (b) Cross-section area: 2.8mm×2.8mm, flow length: 161.9mm

4. 결론

본 논문에서는 금속/플라스틱의 복합성형을 위한 금속 다이캐스팅 성형과 플라스틱 사출 통합 성형

을 위한 기존 플라스틱 사출성형기와 저융점 금속을 성형하기 위한 Cold chamber 방식의 다이캐스팅 모듈 및 통합 성형을 위한 DSI 금형을 개발하였다. 개발된 DSI 금형을 사용하여 금속 도선부를 갖는 플라스틱 복합 제품을 성형하였으며 치수정밀도, 전기적 특성 평가를 수행하였다.

1) 금속/플라스틱 복합성형을 위한 DSI 금형을 제작하였으며, 플라스틱 사출 성형 후 저융점 금속 성형 시 유동 플래시 방지를 위하여 플라스틱 성형품 상단 부분에 밀폐구조를 위한 실링 형상부를 제작하여 금속 유동 플래시 방지 및 금속 성형부의 치수정밀도를 향상 시킬 수 있었다.

2) 금속/플라스틱 통합성형을 위한 다이캐스팅 모듈을 통한 저융점 금속의 치수정밀도와 전기전도도의 측정결과에서는 단면적 3.2mm×3.2mm에서 치수 정밀도가 약 +0.1mm 오차가 발생하였으며, 단면적 2.8mm×2.8mm에서는 치수 정밀도가 약 +0.08mm하는 것을 확인할 수 있었다.

3) 성형된 저융점 금속의 전기전도도 평가는 측정 시편을 제작하여 4-probe 방식의 표면저항측정기를 사용하여 면 저항값을 측정하고, 전기전도도 환산식을 사용하여 결과값을 도출한 결과 평균 전기전도도 값은 2.45×10^6 S/m을 갖는 것을 확인할 수 있었다.

4) 성형된 금속/플라스틱 성형품에 대한 금속 도선부의 전기용량을 측정하기 위하여 직류전류 및 전압을 인가하여 열화상 카메라를 사용하여 발열온도가 도선 단면적 3.2mm×3.2mm에서는 약 40°C, 단면적 2.8mm×2.8mm에서는 약 53°C가 발생하는 것을 확인할 수 있었고, 동일 제품형상을 이용하여 전기-열 연성해석을 통하여 동일한 발열온도가 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

후기

본 연구는 산업소재핵심기술개발-첨단뿌리기술사업의 지원(과제번호 10077472, 20004272)으로 진행되었습니다.

참고문헌

1) Leo Hoffmann, Birgit Faist, Kim Kose, Fred Eggers, hite, Laser-Supported Production. 10(1) pp. 44-49, 2017.

- 2) Hanna Paul, Michael Luke, Frank Henning, J. Plastics Technology. 10(4) pp. 118-141, 2014.
- 3) Christian Hopmann, Julian Schild, Simon Wurzbacher, A. Erman Tekkaya and Sigrid Hess, "Combination technology of deep drawing and back-moulding for plastic/metal hybrid components", J Polym Eng 2017.
- 4) Fuminobu Kimura, Shotaro Kadoya, and Yusuke Kajihara, "Effects of molding conditions on injection molded direct joining under various surface fine-structuring", The international Journal of Advanced Manufacturing Technology, 101, pp. 2703-2712, 2019.
- 5) R. Boros, P. Kannan Rajamani, J. G. Kovacs, "Combination of 3D printing and injection molding: Overmolding and overprinting", eXPRESS Polymer Letters, Vol. 13, No. 10, pp. 889-897, 2019.
- 6) Pan Zhang, Jing Chen, Xiumin Chen, Cha Li, Youbing Li, Chaolong Yang, and Tian Xia, "Study on integrally molded PA6/304 stainless steel by micro-nano pressing technology", Journal of Adhesion Science and Technology.
- 7) Walter Michaeli, Christian Hopmann, Jan Fragner, and Tobias Pfefferkorn, "Injection molding of conductor paths: integration of functionality by the use of a metal/thermoplastic hybrid material", J. Polym. Eng., 31, pp. 479-487, 2011.
- 8) Christian Hopmann, Kirsten Bobzin, Roman Schoeldgen, Mehmet Oete, Johannes Wunderle, Thomas F. Linke and Philipp Ochotta, "IMKS and IMMS: two methods for the production of plastic parts featuring metallic areas", J. Polym. Eng, 2015.

저자 소개

하 석 재(Seok-Jae Ha) [정회원]



- 2015년 8월 : 인하대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2015년 9월~2017년 1월 : 인하대학교 산학협력단 기계기술연구소, 박사후연구원
- 2017년 2월~2020년 2월 : 한국생산기술연구원 금형기술그룹, 박사후연구원
- 2020년 3월~현재 : (주)하랑에이엠이 R&D센터, 연구소장

< 관심분야 >

CAD/CAM, 마이크로 절삭가공, Maskless Lithography

차 백 순(Baeg-Soon Cha) [정회원]



- 1996년 11월: 독일 브라운슈바이크공대 기계공학과 (공학박사)
- 1999년 10월~현재: 한국생산기술연구원 수석연구원

< 관심분야 >

생산기술, 금형/성형

고 영 배(Young-Bae Ko) [정회원]



- 2001년 8월: 홍익대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2003년 5월~현재: 한국생산기술연구원 수석연구원

< 관심분야 >

사출성형, 열/구조 해석

사단법인 한국금형공학회 연구윤리규정

제정 2014년 01월 01일

개정 2016년 03월 01일

개정 2016년 12월 27일

서문

‘사단법인 한국금형공학회’(이하 ‘학회’라 한다.)는 산업고도화에 큰 기여를 하고 있는 금형, 금형을 이용한 성형, 금형 제조에 관련된 학문을 연구하는 학술단체로 기술향상과 관련 산업의 기술발전 및 회원 상호간의 친목과 단결을 목적으로 한다.

본 연구윤리규정(이하 “윤리규정”이라 한다.)은 본 학회 회원(이하 “회원”이라 한다.)이 이러한 역할을 수행하는 과정에서 지켜야 할 연구윤리의 원칙과 기준을 규정한다. 회원들은 학술연구 수행 및 연구논문 발표 시 연구윤리를 준수하며, 학회의 규정에 포함되지 않은 사항들은 국제윤리강령을 따른다.

<http://publicationethics.org/resources/international-standards-for-editors-and-authors>
(개정 2016. 03. 01.)

제1장 총칙

제1조(목적)

이 규정은 학회와 관련된 학술활동이 인간의 존엄성과 가치를 침해하거나 사회 공동의 이익을 손상하지 않는 높은 윤리적 수준을 유지하기 위하여, 학회 구성원들이 지켜야 할 윤리적 기준을 제시, 학문 및 사회 발전에 건강하게 기여함에 그 목적이 있다.

제2조(윤리규정 적용범위)

- ① 이 규정은 학회가 발간하는 모든 학술지 및 학술대회, 심포지엄, 워크숍, 포럼 등 학술활동 전반에 적용한다.
- ② 이 규정은 위 학술활동과 관련된 저자, 심사위원, 편집위원, 사무국 실무자에게 모두 적용한다.
- ③ 기타 위에 정하여 지지 않은 범위는 교육부 및 산하기관의 각급 규정을 준용할 수 있다.

.....

※ 이하 연구윤리규정은 한국금형공학회 홈페이지(<http://www.ksdme.com/>) 참조

한국금형공학회지 논문투고 및 발행규정

제정 2014년 01월 01일

개정 2016년 12월 27일

개정 2019년 02월 26일

제1조(목적)

이 규정은 '사단법인 한국금형공학회'(이하 '학회'라 한다.)의 정관 제4조 제3항에 따라 발간되는 '한국금형공학회지'(이하 '학회지'라 한다.) 논문의 투고 및 게재에 대한 사항을 규정함을 목적으로 한다.

제2조(투고자)

투고논문의 교신저자 및 제1저자는 학회 회원이어야 한다. 단, 편집위원장이 특별히 인정하는 자는 예외로 할 수 있다.

제3조(책임 및 윤리규정 준수)

- ① 투고논문의 책임은 저자(들)에게 있다.
- ② 투고논문에 대하여 모든 저자들은 '(사)한국금형공학회 연구윤리규정'을 준수하여야 한다. 연구윤리규정을 위반할 경우 편집위원장은 논문의 게재를 불허 또는 취소할 수 있으며, 규정에 따라 징계 할 수 있다.

제4조(연구범위)

논문의 연구범위는 금형공학 및 산업에 관한 분야를 중심으로 연구내용의 다양한 산업에의 적용을 위하여 정밀가공 및 측정, 생산시스템, 설계 및 재료, 공작기계, 나노마이크로기술, 임의형상제조시스템, 녹색생산기술 등을 포함하는 연관 기술 분야로 하며 다른 간행물에 발표되지 않은 논문이어야 한다.

제5조(투고 구분)

학회지에 투고되는 논문은 아래와 같이 구분하며, 기본면수는 6면 이내로 하되 내용에 따라 초과할 수 있다.

1. 일반논문: 학술성 또는 실용성이나 응용성이 우수한 논문
2. 기술논문: 타 학회지에 발표되지 않은 것으로 논문에 준하며, 그 내용이 응용에 중점을 둔 논문
3. 특집논문: 별도로 규정된 특집논문 규정에 따라 작성된 논문
4. 기타투고: 전망, 해설, 강좌, 기타 원고 등

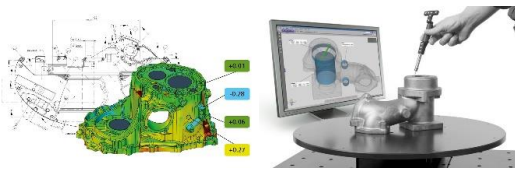
.....

※ 이하 논문투고 및 발행규정은 한국금형공학회 홈페이지(<http://www.ksdme.com/>) 참조

ATOS 3차원 스캐너

독일 GOM사의 혁신적인 3차원 스캐너

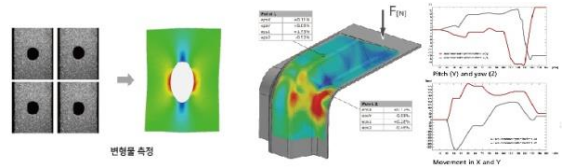
- 고품질의 데이터 출력
- 3차원 편차 비교
- 단면, 기하공차, 경향 분석
- 자동화된 PDF 보고서 출력
- Reverse Engineering (역설계)



ARAMIS 변형률 측정기(DIC)

3차원 모션 & 변형 분석 시스템

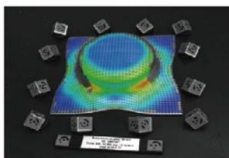
- 실시간 패턴/포인트 추적 분석
- Strength assessment (강도 평가)
- Vibration analysis (진동 분석)
- Durability study (내구성 테스트)
- Crash test (충돌 테스트)



ARGUS 성형 분석 시스템

광학식 판재 성형 분석 시스템

- 기존 Strain Gauge, 변위 센서 대체
- 부품 표면의 Strain
- 변형 (major and minor strain 등)
- 두께 감소율
- Forming Limit Diagram (FLD)

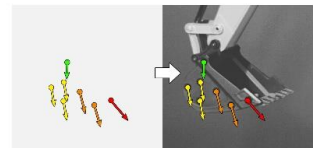


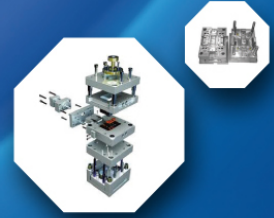
Strain 및 두께 감소를 분포

TRITOP 3차원 변위 측정기

사진 계측법을 이용한 전문 측정기

- 변형 전/후 비교
- 3D 좌표, 변위
- 변형, 굽힘, 비틀림, 처짐(강성측정)
- 회전 각도
- 상대 변위 (Point - Line - Plane)





금형수출 세계 1위 달성

한국금형센터가 앞장서겠습니다.

개 요

- 사업규모** 경기도 부천시 산업로 7번길 64(부지면적 : 11,758㎡, 건축연면적 9,036㎡)
- 시설규모** 업무동(지상4층, 지하1층), 시험생산동·기술지원동(지상1층), 프레스동(지상1층)
- 주요기능** 시험생산, 기술개발지원, 인력양성, 수출 및 정보지원

대한민국의 금형허브센터



금형산업 글로벌 경쟁력 강화 및 첨단기술 R&D 지원

- 수도권 중소 금형업계의 납기 단축 및 원가 절감을 위한 시험생산(tryout) 지원
- 금형 기술의 첨단화·융복합화에 대응하기 위한 고부가가치 금형기술 연구개발(R&D)
- tryout과정에서 발생하는 애로 기술 지원(one-stop solution 및 컨설팅)
- 금형설계·해석 및 부품가공·측정 등 공정 단계별 one-stop 종합지원체계 구축
- 금형업계의 해외마케팅 지원, 전문인력 양성을 위한 교육훈련 및 창업보육지원
- 수도권 금형 업계의 현장 밀착형 공통애로기술 지원
- 전국 금형지원센터의 장비·인력 DB 등 통합정보망 구축을 통한 '금형허브' 기능 수행

건축장비 : 총 217종

- R&D 지원 장비
 - 래속조형 : 하이브리드금속3D프린터, 풀컬러복합제조기
 - 정밀가공 : Two-Head(고속가공&지그연삭)복합가공기, 펄토초&5축레이저패턴가공기
 - 정밀측정 : 초정밀 (0.3 μm) 3차원측정기, 초정밀비접촉3차원측정기
 - 유변물성 : 회전식 점탄성측정기, 고온모세관점도계, 미세만능재료시험기
 - 사출성형 : 사출압축성형기, 초고가속 사출성형기
- Tryout 지원 장비
 - 사출성형 : 18ton ~850ton 23종
 - 프레스 : 400ton, 800ton, 200Ton(다이스포팅)
 - 측정가공 : 접촉/비접촉 3차원측정기, 5축가공기, 문형(12.5호기)머시닝센터, 금형수정 범용장비등

임 원

명예회장	이하성(공주대학교)			
회 장	허영무(한국생산기술연구원)			
부 회 장	이영재((주)제이씨텍) 최두선(한국기계연구원)	조명우(인하대학교) 윤길상(한국생산기술연구원)	김영춘(공주대학교) 김선경(서울과학기술대학교)	윤재웅(공주대학교) 구본홍((주)브이엠테크)
감 사	양지경((주)케이애플)	백승엽(인덕대학교)		
총무이사	최계광(공주대학교)	김용대(한국생산기술연구원)		
재무이사	장성호((주)가온솔루텍)	고영배(한국생산기술연구원)		
기획이사	강석주(한국산업인력관리공단)	남승돈(유한대학교)		
학술이사	한성렬(공주대학교)	김흥규(국민대학교)	정태성(인하공업전문대학)	이호철(한밭대학교)
	서태일(인천대학교)	이성희(한국생산기술연구원)	윤여권(유한대학교)	김현필(한국폴리텍5대학)
	정연승(유한대학교)	이종구(경기과학기술대학교)	김기주(동명대학교)	김선용(유한대학교)
	고병두(유한공업고등학교)	조용무(동서올대학교)	이종선(대진대학교)	조용주(한국생산기술연구원)
	이호상(한국교통대학교)	박 근(서울과학기술대학교)	김영민(한국생산기술연구원)	이형욱(한국교통대학교)
	라문우(한국기술교육대학교)	현승균(인하대학교)	강대민(부경대학교)	
국제이사	김종덕(한국생산기술연구원)	류호연(한국생산기술연구원)		
산학이사	강선영((주)엘피케이하이테크)	장영주((주)우리일렉)	원용기((주)비즈엔몰드)	장준수(LG전자)
	이인휘(LG전자)	양우(유한프리스전(주))	권영삼((주)썬타택)	

편집위원회

편집위원장	조명우(인하대학교)			
편집부위원장	민경호(한국폴리텍2대학)			
편집이사	이춘규(공주대학교)	이창환(서울과학기술대학교)	김병희(강원대학교)	최승겸(조지아공대)

한국금형공학회지 제14권 제4호

2020년 12월 31일 발행

편집인 한국금형공학회지 학회지편집위원회
조명우

발행인 회장 허영무
발행처 사단법인 한국금형공학회

주 소 15014) 경기도 시흥시 오이도로 49-6 (정왕동)
전 화 031) 8084-8600
팩 스 031) 8084-8604
홈페이지 www.ksdme.com