

전자회로 일체형 돔 형상의 플라스틱 부품 성형에 관한 연구

성겸손¹ · 이호상[†]

한국교통대학교 항공·기계설계학과^{1,†}

A study on the molding of dome shaped plastic parts embedded with electronic circuits

Gyeom-Son Seong¹ · Ho-Sang Lee[†]

Dep. of Aeronautical & Mechanical Design Eng., Korea Nat'l Univ. of Transportation^{1,†}

(Received March 10, 2020 / Revised March 27, 2020 / Accepted March 31, 2020)

Abstract: Smart systems in different application areas such as automotive, medical and consumer electronics require a novel manufacturing method of electronic, optical and mechanical functions into products. Traditional methods including mechanical assembly, bonding of plastic and electronic circuit cause the problems in large size of products and complicated manufacturing processes. In this study, thermoforming and film insert molding were applied to fabricate a dome shaped plastic part embedded with electronic circuits. The deformation of patterns printed on PET film was predicted by thermoforming simulation using T-SIM, and the results were compared with those by experiment. In order to decrease spring-back after thermoforming, the Taguchi method of design of experiment was used. Through ANOVA analysis, it was found that mold temperature was the most dominant parameter for spring-back. By using flow analysis, gate design was performed to decrease injection pressure. During film insert molding, the wash-out of ink printed on film occurred for Polycarbonate. When the resin was changed to PMMA, the wash-out disappeared due to low melt temperature.

Key Words: Electronic Circuits, Film Insert Molding, Pattern, Thermoforming, Wash-out

1. 서 론

플라스틱 제품의 고감성화를 위해 제품 표면에 다양한 색상과 이미지를 표현할 수 있는 필름 인서트 성형(Film Insert Molding)공법이 새로운 플라스틱 장식기술로 각광받고 있다¹⁾. 필름 인서트 성형의 첫 번째 단계는 인쇄된 필름을 유리전이온도 이상으로 가열하고 진공 또는 프레스를 이용하여 원하는 곡면형상으로 열성형하는 것이다. 그리고 두 번째는 금형 안에 필름을 삽입하고 사출성형을 통해 열가소성 수지와 필름을 일체화시키는 단계이다. 필름 인서트 성형은 사전에 인쇄된 필름을 사용하기 때문에 공정이 간단하고 친환경적인 공법이다.

최근에는 플라스틱 제품의 고감성 외관품질 구현

을 넘어서 전자회로와 소자를 필름에 실장하고 금형 안에서 플라스틱 기구물과 일체형으로 성형하려는 시도가 이뤄지고 있다²⁾. 현재 산업에서는 전자부품 등을 제작하기 위해 금속을 인서트 하여 사출성형하는 방법, 전자회로와 플라스틱제품을 기계적으로 조립하는 방법, 접착제를 사용하여 플라스틱과 전자회로를 접합하는 방법 등을 사용하고 있다. 이러한 방법에서는 제품의 크기가 증가하며, 제조공정이 복잡한 단점이 있다. 또한 적용 제품의 형상 제약이 존재하며, 사용자가 원하는 다양한 기능을 추가하기 어려운 문제가 있다.

최근 핀란드의 Tacto Tek 사에서는 필름에 인쇄회로와 전자 부품을 완벽하게 통합한 IMSE(Injection Molded Structural Electronics)공법을 개발하였다.²⁾ IMSE공법은 기존 필름 인서트 성형공법을 발전시킨 것으로 필름 배면에 전자 회로를 인쇄하고 전자 부품을 실장하는 공정이 추가 된다. IMSE공법을 사

1, † 교신저자: 한국교통대학교 항공·기계설계학과
E-mail: lhs@ut.ac.kr

용할 경우 복잡한 전자부품의 기능을 손상시키지 않으면서 얇고 가벼운 기구물 일체형 제품 생산이 가능하다. 일반적으로 제품의 무게를 약70%이상 줄일 수 있으며, 제품의 두께는 2mm정도로 얇게 제작 가능한 것으로 보고되고 있다²⁾. 한편, DUPONT사에서 사용하는 IMSE에 사용 가능한 신축성 있는 전자잉크를 개발하였다³⁾.

IMSE 기술은 자동차, 가전제품, IoT 등 여러 산업 분야에서 엄청난 성장 잠재력을 가지고 있다. 하지만 필름에 인쇄된 전자회로나 패턴의 경우 필름 열성형시 패턴의 왜곡이 발생하거나⁴⁾, 전자회로의 접침, 굽김 현상이 자주 발생하는 문제가 있다. 또한 필름 인서트 사출성형 과정에서 워시아웃(Wash-out) 현상으로 잉크에 크랙이 발생해 전자회로의 기능에서 불량이 발생할 수 있다.

그동안 필름의 열성형에 대한 연구⁴⁻¹²⁾가 많이 이루어졌으며, 필름 인서트 사출성형에 관한 연구도 활발하게 수행되어 왔다¹¹⁻¹²⁾. 그러나 IMSE에 관련된 연구는 유럽의 일부 선진기업 중심으로 이뤄지고 있으며, 학계에서 보고된 연구결과는 거의 없는 상황이다.

본 연구에서는 전자회로가 인쇄된 필름에 대해 열성형 과정에서 발생하는 인쇄 패턴의 변형을 예측하였으며, 해석과 실험 결과를 비교하였다. 또한 다구찌 실험계획법을 적용하여 필름 성형시 발생하는 스프링백을 최소화 할 수 있는 공정조건을 도출하였으며, 필름인서트 사출성형 공정에서 발생하는 워시아웃 현상에 대해 고찰하였다.

2. 필름 열성형

2.1. 적용모델

지름 80mm, 높이 20mm를 갖는 돔 형태의 플라스틱 부품을 적용모델로 선정하였다. Fig. 1은 모델링 형상을 나타낸 것이며, 향후 인몰드 코팅 연구를 추가적으로 진행하기 위하여 코팅채널과 오버플로우 영역을 포함하고 있다. TORAY에서 생산한 두께 0.125mm인 PET(XG231)필름 배면에 Fig. 2와같이 검정색의 잉크(Teikoku, IPX Series)를 사용해 배경을 스크린 인쇄하였으며, 이어서 회로의 접점에 해당하는 부위에 알파벳(A~F) 문자를 인쇄하고, 중앙에는 로고 디자인을 인쇄하였다. 또한 전도성 잉크를 사용하여 전자회로를 인쇄하였으며, 총 인쇄층 두께는 0.036mm가 되도록 하였다.

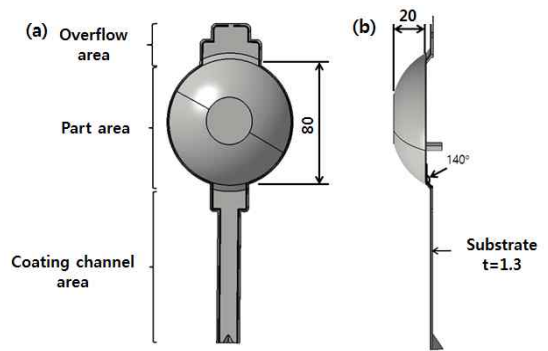


Fig. 1 Dome shaped plastic part: (a) front view, (b) side view

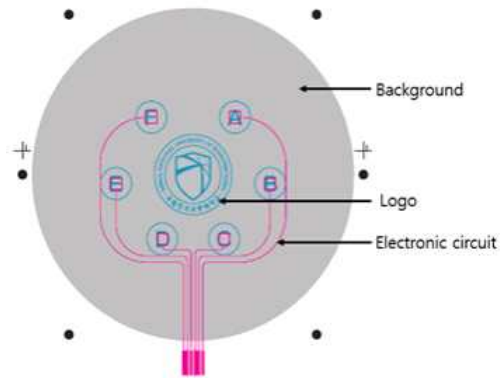


Fig. 2 Printed patterns

2.2. 열성형 해석

열성형에 의한 필름 두께변화를 예측하기 위하여 T-SIM¹³⁾을 사용하여 열성형 해석을 수행하였다. 열성형을 위하여 Fig. 3의 상측 금형이 고정된 상태에서 하측금형이 상승하면서 필름 성형이 이뤄지도록 하였다. 필름과 금형이 접촉하는 중앙 부분만 변형이 발생하도록 허용하고, 접촉 이외의 면에 고정 변위 조건을 설정하였다. Table 1은 해석에 사용된 공정조건을 나타낸다.

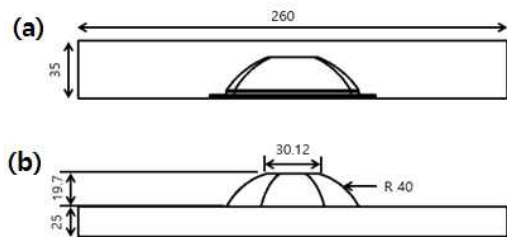


Fig. 3 Schematics of film thermoforming mold: (a) upper mold, (b) lower mold

Table 1 Process parameters used in T-SIM

	Specification	Detail
Film	Material	PET
	Temperature	100°C
	Friction coefficient	0.5
Mold	Temperature	100°C
Ambient air	Temperature	25°C
	Heat transfer coefficient	0.175 W/m ² K

Fig. 4는 열성형에 의한 필름 두께분포를 나타낸 해석 결과이다. 필름 두께가 가장 두꺼운 부분은 양각 금형과 가장 먼저 만나는 필름의 중앙부위임을 알 수 있다⁹⁾. 반면에 필름과 금형이 가장 늦게 접촉하는 부분에서 연신이 크게 발생하고 필름 두께가 상대적으로 작은 것으로 나타났다. 가장 먼저 접촉하는 금형의 윗부분은 필름과 금형사이의 높은 마찰력으로 인해 필름 연신율이 낮기 때문에 필름 두께가 두꺼운 것으로 판단된다.

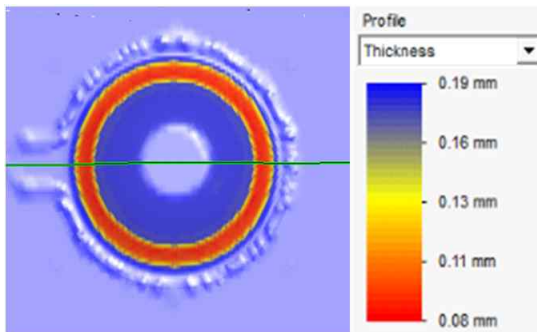


Fig. 4 Predicted thickness distribution after thermoforming

2.3. 열성형 금형제작

열성형을 위하여 Fig. 5와 같이 홀더, 스트리퍼, 펀치홀더 등 3개의 형판으로 금형을 구성하였다. 필름이 중앙 스트리퍼 위에 고정 설치되며, 1차적으로 스트리퍼와 상측 홀더가 형폐된다. 그 후 하측 펀치홀더가 상승하며 필름은 펀치홀더의 형상대로 성형되도록 하였다. 이때 필름 가장자리를 고정하기 위하여 중앙 스트리퍼에 돌출된 비드를 설치하였다. Fig. 6은 제작한 열성형 금형을 나타낸다.

2.4. 실험방법

Fig. 7은 실험에서 사용된 열성형 장비를 나타내며, 필름을 직접 가열할 수 있도록 구성되어 있다. 1

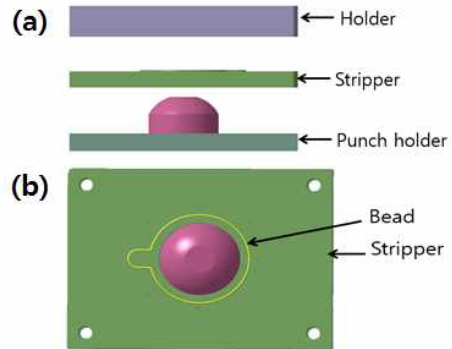


Fig. 5 Thermoforming mold structure (a) front view, (b) middle stripper with bead

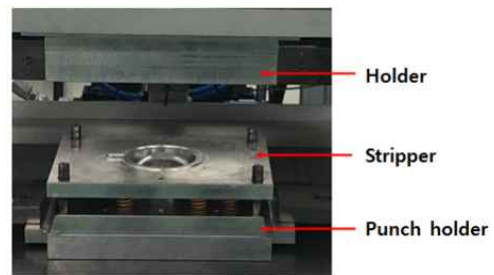


Fig. 6 Photographs of thermoforming mold



Fig. 7 Thermoforming machine

차적으로 중앙 스트리퍼 금형 위에 필름이 2개의 편으로 고정되며, 필름을 직접 가열하는 열선이 슬라이딩 하게 된다. 필름 가열 후 상측 홀더와 중앙 스트리퍼가 만나게 되며, 필름 성형을 위한 가장자리를 잡아주게 된다. 유리전이온도 이상으로 가열된 필름을 성형하기 위해 하측 펀치 홀더가 상승하게 되며, 필름이 하측금형의 형상대로 변형이 일어나게 된다. 실험에 사용된 공정조건은 금형온도 100°C, 필름 가열시간 3초, 필름 성형시간 15초, 금형 형폐 압력 100bar로 설정하였다.

2.5. 패턴 변형해석 및 실험 비교

하측 펀치홀더 금형이 상승하면서 필름 성형이 이루어지고, Fig. 2에서 인쇄된 6개의 원(A-F)이 타원형으로 변형된다. T-SIM을 이용한 해석과 실험 결과를 비교하기 위해 공구현미경(STV-V-1020, SO-METECH, Korea)을 사용하여 변형량을 측정하였다.

타원형으로 변형된 형상에 대하여 내접하는 최소 원과 외접하는 최대원의 지름을 측정하였으며, 최대 원과 최소원 차이의 1/2이 되는 값을 진원도로 정의하였다. 필름에 인쇄된 원형 패턴은 상하, 좌우가 대칭이므로 Fig. 2에서 E와 F에 해당하는 원에 대해 진원도를 측정하였다. 성형 후 해석과 실험에 의한 진원도를 비교하였으며, Table 2는 최소원, 최대원, 진원도 결과를 나타낸다. 해석에 의해 예측한 진원도는 0.14mm의 오차 범위에서 실험과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 2에서 인쇄된 “F” 문자가 열성형에 의해 변형된 형상을 예측한 해석결과와 실험을 비교한 결과가 Fig. 8에 도시되어 있다. 해석에 의해 예측한 “F”문자의 변형된 위치가 실험과 거의 동일한 위치에 있으며, 해석에 의한 변형량도 약 96%이상 실험 결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

Table 2 Roundness measurement(mm)

Alphabet	Analysis	Experiment	Error	
E	Minimum diameter	9.70	9.83	
	Maximum diameter	10.95	10.85	
	Roundness	0.62	0.51	0.11
F	Minimum diameter	9.80	9.83	
	Maximum diameter	10.98	10.72	
	Roundness	0.58	0.44	0.14

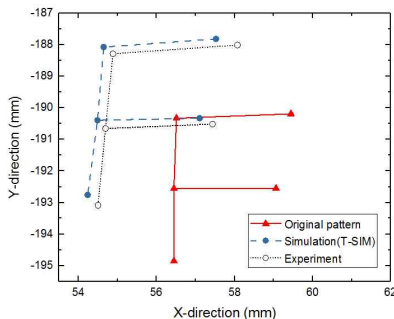


Fig. 8 Comparison of simulation and experiment for deformed shape of alphabet F

2.6. 스프링 백

열성형 이후의 스프링 백은 물체가 변형에 저항하려는 내부 복원력에 의한 현상이며, 필름 인서트 사출성형 과정에서 금형과 필름 사이에 틈이 발생하게 된다. 이로 인해 금형 형폐 시 필름이 금형 캐비티 안으로 들어가면서 주름이 발생하게 된다.

본 연구에서는 Fig. 9에서와 같이 금형에서의 제품 높이(A)와 성형된 필름 높이(B)의 차이인 C를 스프링백으로 정의하였다. 필름 열성형이후 발생하는 스프링백 현상을 최소화하기 위해 실험계획법을 사용해 공정조건이 스프링백에 미치는 영향에 대해 고찰하였다. 스프링백 발생에 많은 영향을 끼칠 것으로 예상되는 공정조건으로 금형온도, 필름가열시간, 필름성형시간, 금형 형폐압력 등 4개의 인자를 선정하여, Table 3과 같이 3수준을 적용하였다.

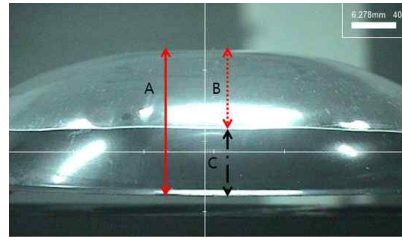


Fig. 9 Spring back

Table 3 Factors and levels used for film thermoforming

Factors	Unit	Level		
		1	2	3
A. Mold temperature	°C	100	115	130
B. Film heating time	s	2	3	4
C. Film forming time	s	10	15	20
D. Mold clamping pressure	bar	80	100	120

다구찌 방법¹⁴⁾의 경우 다양한 직교배열이 있지만 본 논문의 경우 4개의 인자와 각 3개의 수준을 적용하였기 때문에 L_9 직교배열표¹⁴⁾에 따라 각 조건에 대하여 3개씩 성형하고, 각 샘플에 대해 필름의 높이를 측정하였다.

스프링백을 최소화 하는 것이 목적이므로 망소 특성으로 정의하여 S/N비(Signal-to-noise ratio)를 계산하였다. Table 4는 직교배열표와 스프링백을 측정 한 결과이며, Table 5는 분산분석(ANOVA)결과를 나타낸다. Fig. 10은 분산분석(ANOVA)에 의한 인자 별 S/N비를 나타낸 것이며 금형온도가 스프링백 현상에 가장 영향을 많이 주는 인자임을 알 수 있다.

Table 4 L_9 orthogonal for film thermoforming

No	Column no.				Spring back			S/N ratio
	A	B	C	D	#1	#2	#3	
1	1	1	1	1	6.457	6.367	6.546	-16.200
2	1	2	2	2	6.367	6.457	6.367	-16.119
3	1	3	3	3	6.008	5.829	5.919	-15.445
4	2	1	2	3	8.338	7.802	8.43	-18.270
5	2	2	3	1	7.264	7.623	7.623	-17.507
6	2	3	1	2	7.712	7.892	8.34	-18.046
7	3	1	3	2	8.399	9.148	9.264	-19.031
8	3	2	1	3	8.43	8.968	8.878	-18.851
9	3	3	2	1	8.789	8.699	8.878	-18.878

Table 5 ANOVA summary for film thermoforming

Factors	Average			Sum of squares	F value
	1	2	3		
A	-15.92	-17.95	-19.02	14.86	40.22
B	-17.94	-17.54	-17.42	0.44	1.18
C	-17.71	-17.81	-17.38	0.30	0.82
D	-17.53	-17.75	-17.62	0.07	0.19
Sum				15.67	

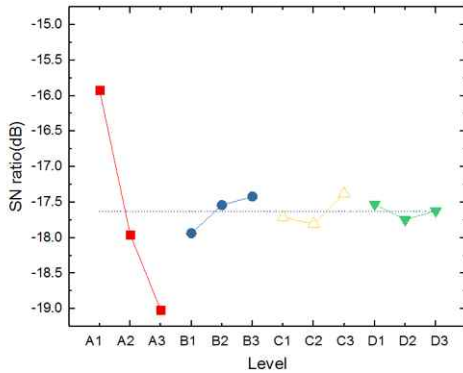


Fig. 10 S/N ratio graph based on table 5

금형온도가 높을수록 성형 후 취출되는 필름의 온도가 높기 때문에 후 변형이 증가하면서 상대적으로 스프링백이 많이 발생하는 것으로 판단된다. 따라서 스프링백을 감소시키기 위해서는 필름이 성형되는 범위 내에서 금형온도를 낮게 설정하는 것이 바람직함을 알 수 있다.

스프링백을 최소화하기 위한 공정조건은 A1, B3, C3, D1 이다. 이 공정조건을 적용해 추가적인 실험을 수행하였으며, 그 결과 스프링백은 5.377mm 로 나타났다. 반대의 결과를 가지는 A3, B1, C2, D2

의 실험 결과는 9.52mm이며, 결국 스프링백 차이가 약 4mm 이상 나타남을 알 수 있었다.

3. 필름 인서트 성형

3.1. 금형설계 및 제작

필름 배면으로 수지가 주입되도록 Fig. 11과 같이 터널게이트를 사용하였으며, 저압성형을 위하여 코팅채널 영역에 사이드게이트 1개를 추가하였다. 이때 2개의 유동이 필름부위에서 만날 경우 전단력에 의해 필름에 주름이 발생하기 때문에 유동해석을 적용하여 Fig. 12의 A-A'아랫부분에서 2개의 유동이 만나도록 게이트 위치 및 크기를 설계하였다.

사출성형 해석을 적용한 결과 터널게이트 1개만 사용한 경우에는 167MPa의 높은 사출압력이 요구되었으나, 2개의 게이트를 사용하여 사출압력을 96MPa로 낮출 수 있었다. 또한 Fig. 13(d)의 해석결과와 같이 2개의 유동이 Fig. 12에서 도시한 A-A'아랫부분에서 만나도록 게이트 위치를 선정하여 필름 주름 발생을 사전에 방지할 수 있도록 하였다.

Fig. 14는 필름 형상을 고려한 금형구조를 나타낸 것이며, 여기서 코팅 캐비티는 향후 추가 연구를 위해 고려한 것이다. 또한 3차원 형상으로 열성형된 필름을 고정측 금형 안쪽에 위치시키고 성형할 수 있도록 하였다. Fig. 15는 필름 인서트 성형금형을 나타낸 것으로 가동측에 코어금형, 고정측에 사출캐비티 금형을 설치할 수 있도록 제작하였다.

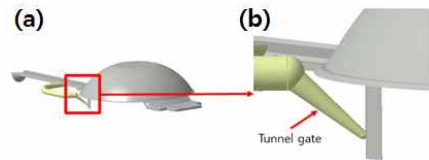


Fig. 11 3D model: (a) runner and gate, (b) tunnel gate

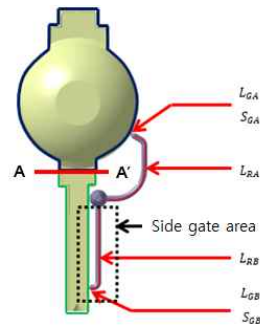


Fig. 12 Gate and runner design

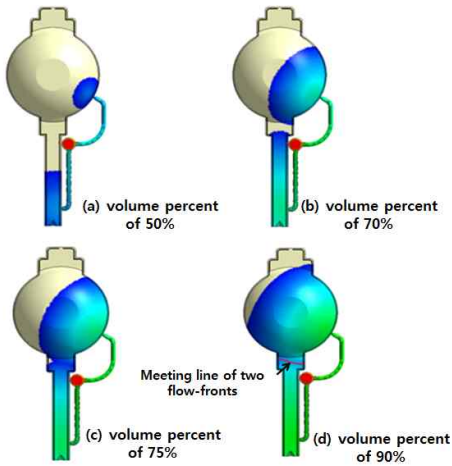


Fig. 13 Flow front advancements

Fig. 14는 필름 형상을 고려한 금형구조를 나타낸 것이며, 여기서 코팅 캐비티는 향후 추가 연구를 위해 고려한 것이다. 또한 3차원 형상으로 열성형된 필름을 고정축 금형 안쪽에 위치시키고 성형할 수 있도록 하였다. Fig. 15는 필름 인서트 성형금형을 나타낸 것으로 가동축에 코어금형, 고정축에 사출캐비티 금형을 설치할 수 있도록 제작하였다.

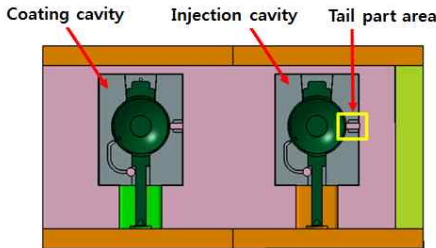


Fig. 14 Mold structure for film insert molding



(a) Movable mold (b) Stationary mold
Fig. 15 Fabricated mold for film insert molding

3.2 실험 및 고찰

필름 인서트 성형실험을 위하여 50톤 사출성형기 (TOYO, Si-50II)를 사용하였다. 또한 사출성형 실험

을 위해 PC(LG Chemical, Lupoy GN2403)와 PMMA(LG Chemical, IH830)를 각각 사용하였다.

Fig. 16은 전자회로가 인쇄된 필름을 열성형한 이후에 금형에 인서트 사출성형한 샘플을 나타낸 것이다. Fig. 16(a)는 PC를 사용한 결과로서 필름에 인쇄된 잉크의 워시아웃 (Wash-out)현상이 심하게 발생하였다. 성형조건은 사출온도 290℃, 금형온도 90℃이며, 높은 수지온도로 인해 필름에 인쇄된 잉크가 용융되고, 수지의 유동에 의한 전단응력으로 인해 워시아웃이 발생한 것으로 판단되었다.

필름의 워시아웃 발생을 해결하기 위하여 수지를 PMMA로 변경하고 실험계획법을 적용하여 전단응력과 압력을 최소화시킬 수 있는 공정조건을 도출하였다. 사출온도 230℃, 금형온도 65℃, 사출속도 40mm/s, 보압 30MPa, 보압유지시간 3초를 적용한 결과 Fig. 16(b)에서 보는 바와 같이 필름의 워시아웃 발생을 해결할 수 있었다.

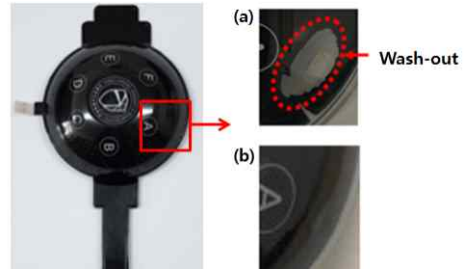


Fig. 16 Film insert molded sample using (a) PC (b) PMMA

4. 결론

본 연구에서는 직경 80mm, 높이 20mm를 가지는 돔 형상의 플라스틱 부품에 대해 전자회로가 인쇄된 필름을 이용한 인서트 성형에 대해 연구하였다. 해석 및 필름 열성형 실험, 인서트 사출성형 실험 등을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 필름 표면에 인쇄된 2개의 원에 대해 진원도를 측정하였으며, 해석에 의한 진원도 예측결과와 0.14mm 오차 범위에서 실험과 잘 일치하였다.
- 2) PET 필름에 대해 열성형이후 발생하는 스프링백을 최소화시키기 위해 다구찌 실험계획법을 사용하였으며, 금형온도가 가장 중요한 공정조건임을 알 수 있었다.
- 3) PC 소재를 사용한 필름 인서트 사출성형에서 높은 금형온도와 수지온도로 인해 게이트 근처에서

워시아웃이 발생하였으며, 반면에 PMMA 소재를 사용한 경우에는 워시아웃 현상이 발생하지 않았다.

후기

본 연구는 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No.2018 R1D1A3B07045339)으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 1) Leong, Y.W, Yamaguchi, S., Mizoguchi, M., Hamada, H., Ishiaku, U.S. and Tsujii, T., "The effect of molding conditions on mechanical and morphological properties at the interface of film insert injection molded polypropylene-film/polypropylene matrix", Polym. Eng. Sci., Vol. 44, No. 12, pp. 2327-2334. 2004.
- 2) Oulu, P.N., Kempele, S. and Kempele, P.R., "Multilayer structure for accommodating electronics and related method of manufacture", Tacto Tek Oy, US Patent, No. 9724869B2, 2017.
- 3) Dupont, In-Mold Electronic Technology, <http://www.dupont.com/products-and-services/electronic-electrical-materials/printed-electronics/products/in-mold-electronic-technology.html>.
- 4) Liu, R.H., Young, W.B. and Ming, H.P., "Design of the printing pattern on film for three dimensional molded interconnect devices, Adv Polym Technol", Vol. 37, No. 6 ,pp. 1722-1731, 2018.
- 5) Islam, A., Hansen, H.N. and Giannakas, N., "Quality investigation of miniaturized moulded interconnect devices(MIDs) for hearing aid application", Manufacturing Technology, Vol. 64, No.1, pp. 539-544, 2015.
- 6) Poller, S. and Michaeli, W., "Film temperatures determine the wall thickness of thermoformed parts", SPE ANTEC, Vol. 38, No. 1 , pp. 104-108, 1992.
- 7) Yoo, Y. G. and Lee, H. S., "Effects of processing conditions on thickness distribution for a laminated film during vacuum-assisted thermoforming", Trans. Mater. Process., Vol. 20, No. 3, pp. 250-256, 2011.
- 8) Yoo, Y. G. and Lee, H. S., "Numerical and experimental analysis of laminated-film thickness variation in vacuum-assisted thermoforming", Trans. Mater. Process., Vol. 22, No. 3, pp. 171-177, 2013.
- 9) Lee, J. K., Virkler, T. L. and Scott, C. E., "Effects of rheological properties and processing parameters on ABS thermoforming", Polym. Eng. Sci., Vol. 41, No. 2, pp. 240-261, 2001.
- 10) Seong, G.S., Lee, H.S., "A study on the thickness distribution and pattern deformation of films in vacuum-assisted thermoforming", J. Korea Society of Die & Mold Engineering, Vol. 12, No. 2, 2018.
- 11) Hwang, H. S., "A study on a wash-out phenomenon in two-component injection molding", Proc. KSTP Spring Conf., pp.233~237, 2013.
- 12) Son, J.W., Lee, S.H. and Lee, H.S., "Experimental study on wash-out and warpage in in-mold coating with film inserts, Trans. Korea Soc. Mech. Eng. A, Vol. 42, No. 3, pp. 213~219, 2018.
- 13) Acuiform, "Computer Simulations of Transforming and Blowing Molding", <http://www.t-sim.com/index.html>, 2005.
- 14) Phadke, M. S., "Quality Engineering using Robust Design", AT&T Bell Lab., Prentice Hall, 1992.

저자 소개

성 겹 손(Gyeom-Son Seong)



- 2019년 8월 : 한국교통대학교 항공기계설계학과 (공학석사)
- 2019년 9월~현재: ㈜인탑스 기술연구소

< 관심분야 >

사출성형 및 금형, 필름인서트성형

이 호 상(Ho-Sang Lee)

[정회원]



- 1989년 2월 : 서울대학교 기계설계학과 (공학박사)
- 1989년 1월~1995년 2월 : LG전자 생산기술원, 책임연구원
- 1995년 3월~1996년 7월 : 고등기술연구원, 책임연구원
- 1996년 8월~현재: 한국교통대학교 항공기계설계학과, 교수

< 관심분야 >

사출성형 및 금형, CAE해석