

식각 표면패턴의 사출성형에 관한 실험적 연구

黃錦鐘*, 이희관**, 양균의***

An Experimental Study on Injection Molding of Etched Surface Pattern

Jing Chung Huang*, Hi-Koan Lee**, Gyun-Eui Yang***

ABSTRACT

Molding properties of etched surface pattern are presented. Injection molding has given attention on improving dimensional accuracy and productivity. However, the molding of etched surface pattern on plastic parts is not researched relatively for its additional values, which can meet design function and customer's attraction.

Specimens, whose surface patterns are made by print-type etching, are investigated. The molding properties of surface pattern are estimated with roughness deviation of surface pattern on part and mold. The etching properties are related to physical properties of plastic materials and surface roughness of etched pattern. Also, flow mark and gate location can give influence on surface pattern molding. The experimental result can contribute to good molding of surface pattern in injection molding.

Key Words : etching(식각), surface pattern(표면 패턴), surface roughness(표면 조도), roughness deviation(조도 편차), flow mark(플로우 마크), weld line(웰드라인), jetting(제팅)

1. 서론

사출성형은 생산성이 높고 복잡한 형상의 제품 생산 등에 유리하여 프레스 성형을 대체해가고 있으며, 엔지니어링 플라스틱의 개발과 성형의 박막화 등을 통해 강도가 높고 정밀한 제품을 생산하기에 이르렀다.^[1-4] 최근에는 통신기술의 급속한 발전과 함께 컴퓨터, 통신기기, 개인휴대용 기기 산업의 사출제품들은 단소경박한 특징을 가지고 있으며,^[5-8] 이를 위해 성형품의 기하학적 치수 변형을 μm 단위로 제어할 수 있는 미세 사출성형에 관심이 고조되고 있다.^[9]

그러나 제품의 고급화를 위해 제품의 치수 정밀도 뿐 아니라 감성과 기능 만족을 위한 표면 패턴

에 대한 연구가 필요하다. 제품 외관을 미려하게 보이고, 제품 디자인의 기능과 감성을 만족시키기 위해 표면패턴을 제품에 새길 수 있다. 카메라 커버 등의 표면에 패턴을 넣어 제품의 무광택의 고급스런 질감, 촉감, 미끄럼방지 등을 부가하여 부가가치를 높일 수 있기 때문이다. 표면 패턴은 샌드 블라스팅, 방전가공과 레이저 가공 등의 제거방식이나(subtract process), 호빙, 정밀주조, 전기주조, 용사, 화학적 부식 등의 모사방식(replica process)으로 새기는데 균일한 표면조도를 얻어 내는 것이 중요하다. 그러나, 사출성형품의 표면 패턴에 대한 연구가 저조하며, Moldflow, C-mold^[10,11] 등의 상용 해석 시스템에서도 표면 패턴에 대한 해석 등을 지원하지 못하고 있다. 플라스틱 재료, 성형 조건, 금형 식

2002년 4월 3일 접수

* 전북대학교 대학원

** 전북대학교 자동차부품급형 TIC

*** 전북대학교 기계항공시스템공학부, 자동차부품급형 TIC

각면의 표면 조도 등 복합적 요인이 영향을 주기 때문이다.^[12,13]

본 논문은 금형의 표면 패턴이 사출성형품의 표면에 새겨지는 식각성의 연구를 위해 수지 재료, 성형불량 요인 등과 관련하여 실험하고, 식각면과 성형성의 관계에 대해 고찰하였다.

2. 시편의 제작

시편은 일반적으로 사용되는 10종류의 플라스틱 재료를 1-6mm 두께로 60개의 시편을 제작하였다. 금형의 캐비티는 프리하든강(prehardened steel)으로 부식성이 좋은 SCM-4 (JIS)를 재료로 사용하였고, 화학적 부식방식으로 식각했다. 부식액은 FeCl₃, 농도 40%, 액체온도 30℃이며, 저압 스프레이 식각장치를 사용하였고 식각 속도는 분당 20μm 정도이다. 실험 시편의 사출성형 조건은 Table 1과 같다.

Table 1 Injection molding conditions

items	conditions
machine	horizontal type, 3.5 oz
clamping force	80 ton
mold temperature	40℃ (average)
cooling type	drawn into cooling water
plastics	PP, GPPS, LDPE, HDPE, AS, HIPS, ABS, POM, Nylon, PMMA
thickness of specimen	1,2,3,4,5,6 mm

시편의 표면 패턴의 표면조도에 대한 측정은 표면조도기로(Surtronic 3+, Rank Taylor Hobson) 측정하여 금형의 식각면의 표면조도와 비교하여 평가하였다. 또한, 시편의 플로우 마크 등의 유동체적 측정은 윤곽과 표면조도 측정기(SVC 524, mitutoyo)를 이용하였다.

Fig. 1은 인쇄방식의 식각공정을 보여주고 있다. 인쇄방식에는 간접법과 직접법으로 나뉘는데, 간접법은 공정이 복잡하고 숙련을 요구하기 때문에 제한된 일부 분야에서만 적용되고 있다. 실험 시편은 직접법 중에서 구면까지 식각할 수 있는 인쇄방식(printing)으로 제작되었다. 이 방식은 원안 패턴에 대해 카메라로 패턴 필름을 작성한 후 감광성 수지

를 금형에 도포한다. 필름을 금형 표면에 진공밀착시킨 후 금형을 빛에 노출시키면 광경화성 수지의 성질로 인해 패턴위에 내산성이 강한 수지피막층이 형성된다. 피막층에 덮힌 금형을 화학약품으로 부식시키면 금형의 식각면을 얻게 된다.

Fig. 2는 시편 제작에 사용된 금형의 구조로 2매(2 plates type) 방식이다. 화학적 부식 가공 방식으로 패턴을 새긴 사출금형의 캐비티와 몰드베이스를 이용하여 플라스틱 수지를 용융, 냉각 및 고화시켜 제품 표면에 패턴을 성형한다.

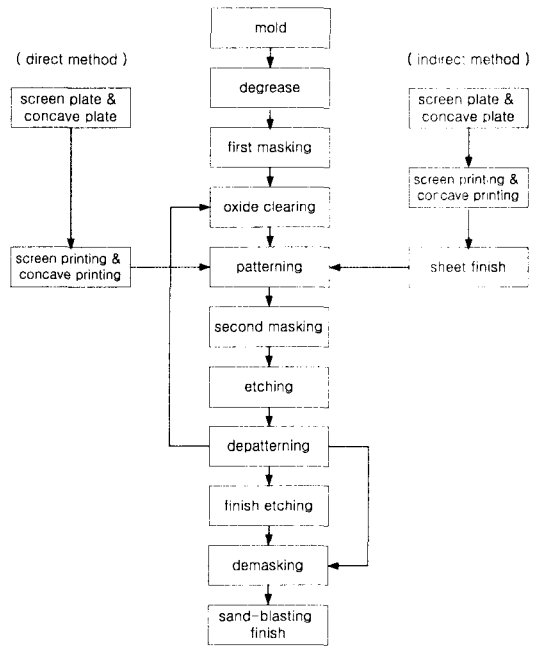


Fig. 1 print-type etching process

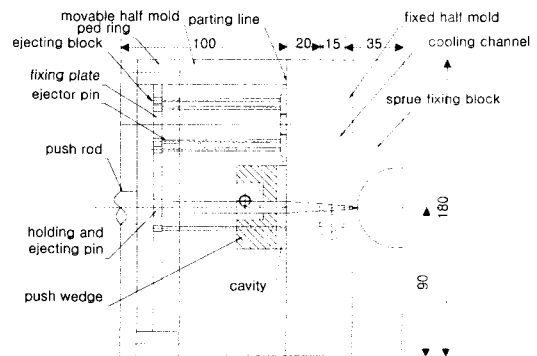


Fig. 2 Structure of injection mold

3. 수지의 물성과 패턴의 성형성 평가

Fig. 3 (a)는 식각면으로 성형된 시편의 6개 영역을 보여주고, (b)는 시편에 새겨진 새틴패턴을 보여준다. 각 영역에 6개의 서로 다른 표면조도의 새틴 패턴을 성형했는데, 표면조도 R_a 가 영역 A에서 $0.5\mu\text{m}$, 영역 B에서 $2.0\mu\text{m}$, 영역 C에서 $3.0\mu\text{m}$, 영역 D에서 $5.0\mu\text{m}$ 이다. 영역 E와 F의 패턴은 사출품에 새긴 패턴을 보여주기 위한 것이다.

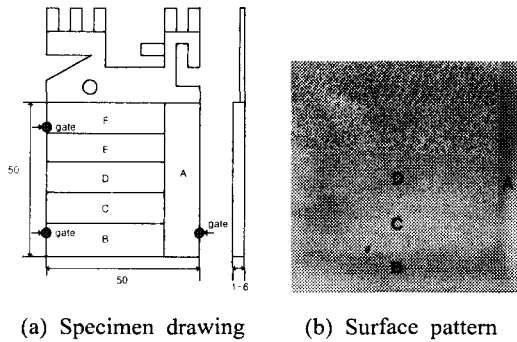


Fig. 3 Specimen

각 수지의 식각면의 성형 정도는 시편 패턴의 표면조도와 금형 식각면의 표면조도를 측정하고, 표면조도의 편차를 계산하여 성형 정도를 평가하였다. 금형 식각면의 표면조도와 시편 패턴의 표면조도를 비교하여, 금형 식각면의 조도에 가까울수록 성형 정도가 좋은 것으로 간주하였다. 각 영역에 대한 표면 조도 측정은 3번 반복해 수행했고, 컷오프(cutoff length)는 2mm이다. 식(1)은 금형 식각면의 표면조도에 대한 각 재료와 영역 패턴의 표면조도의 산포도를 계산하는 식으로, 편차가 작을수록 패턴의 성형이 좋은 것으로 평가할 수 있다.

$$D_{i,j,k} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (S_{i,j,k} - \sigma_{i,j,k})^2}}{n} \quad (1)$$

여기서, $D_{i,j,k}$ 는 금형 식각면의 조도 $\sigma_{i,j,k}$ 에 대한 사출성형품의 조도 $S_{i,j,k}$ 의 편차이다. i 는 영역 A, B, C, D이고, j 는 10종류의 플라스틱 재료, k 는 시편 두께이며, n 은 측정횟수이다.

Fig. 4~7은 시편이 각 영역 A, B, C, D에서 금형 식각면의 표면조도와 시편 표면조도를 식(1)에 의

해 계산한 편차를 나타낸다. Fig. 4는 영역 A에서 각 플라스틱 재료의 표면 조도의 편차를 보여준다. 그림에서 각각 t_1 은 1mm의 시편, t_2 는 2mm의 시편, t_3 은 3mm의 시편, t_4 은 4mm의 시편, t_5 은 5mm의 시편, t_6 은 6mm의 시편이다.

영역 A의 식각면 표면조도 $0.5\mu\text{m}$ 에 가장 근접한 재료는 GPPS이며, AS, PP, Nylon의 순서로 편차가 적으며, 식각면 성형성은 GPPS, AS, PP의 순으로 좋다고 할 수 있다. 식각면의 표면조도와 편차가 심한 것은 POM, HDPE, PMMA이며, 전체적으로 PP 등을 제외하고 시편이 두꺼울수록 편차가 악화되는 경향을 보인다.

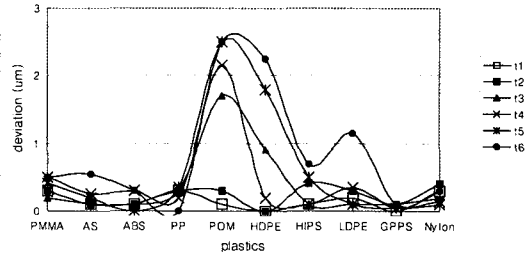


Fig. 4 Roughness deviation on area A

Fig. 5는 영역 B에서 식각면의 표면 조도와 시편 표면조도의 편차를 보여준다. 영역 B의 식각면 표면조도 $2\mu\text{m}$ 에 가장 가까운 재료는 GPPS이고, POM, PMMA이다. 반면, PP, AS, LDPE는 식각면의 표면조도와 편차가 크다. 역시 시편의 두께가 클수록 편차가 심해지는 경향이 있지만, AS, ABS, PP 등은 두께가 작을 때 편차가 심하게 되기도 한다.

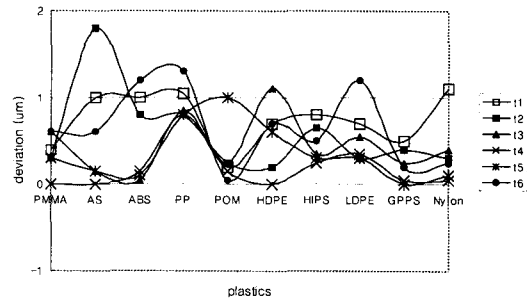


Fig. 5 Roughness deviation on area B

Fig. 6은 영역 C에서 식각면의 표면조도와 시편

의 표면조도의 편차를 보여준다. 영역 C의 식각면 표면조도 $3\mu\text{m}$ 에 가까운 재료는 GPPS, POM, PMMA의 순이다. 반면, PP, LDPE, Nylon은 급형의 표면조도와 편차가 심하다. 전체적인 경향이 선명하지는 않지만, 영역 A, B에서의 편차에 비해 두께 1, 2mm에서 편차가 심해졌고, 두께 3mm이상에서 편차가 적은 것을 알 수 있다.

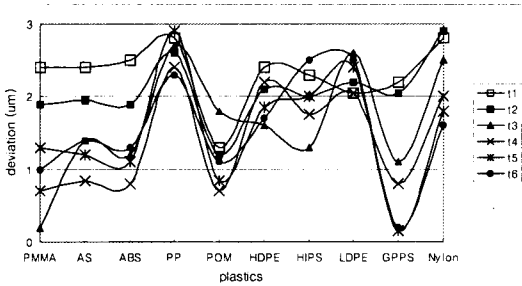


Fig. 6 Roughness deviation on area C

Fig. 7은 영역 D에서 식각면의 표면 조도와 시편의 표면조도의 편차를 보여준다. 영역 D의 식각면 표면조도 $5\mu\text{m}$ 에 가까운 재료는 GPPS, ABS, PMMA이다. 반면, PP, HDPE, Nylon은 식각면의 표면조도와 편차가 심하다. 전체적으로는 영역 C와 비슷한 경향을 보이고 있다.

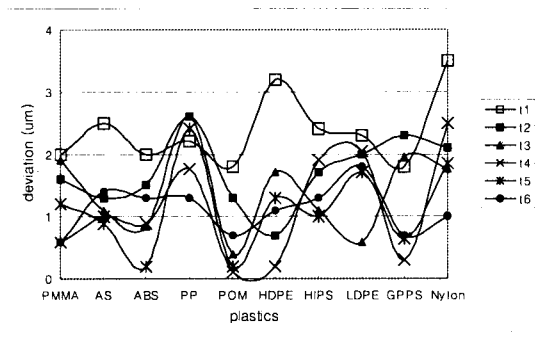


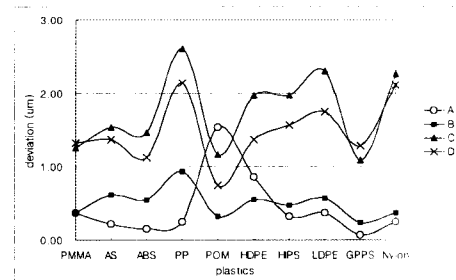
Fig. 7 Roughness deviation on area D

Fig. 8은 각 시편이 각 영역에서 가지는 표면조도 편차의 평균을 보여주며, 식(2)를 이용해서 구했다.

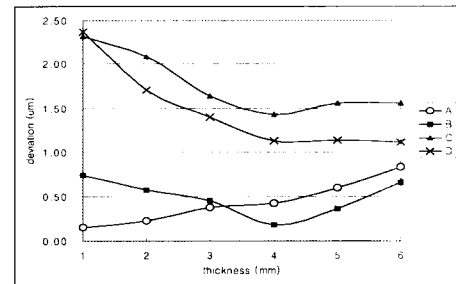
$$S_{i,j} = \frac{\sum_{k=1}^{N_k} D_{i,j,k}}{N_k} \quad (2)$$

여기서, $S_{i,j}$ 는 각 시편이 각 영역에서 가지는 표면조도의 편차이며, 식(1)에서 각각의 편차를 시편별로 분류한 후 평균을 이용한 것이다. N_k 는 시편의 두께의 수이다.

Fig. 8 (a)를 보면 시편의 두께와 영역이 달라도 패턴의 성형성이 가장 양호한 것은 GPPS이고, 그 다음으로 좋은 것이 ABS, PMMA이다. 반면, PP, Nylon, LDPE는 패턴 성형성이 나쁜 것으로 평가되었다. PP는 영역 A를 제외하고는 다른 영역에서 패턴 성형성이 불량하며, 식각면의 표면조도가 좋은 곳에서는 패턴 성형성이 좋지만 거친 부분에서는 패턴 성형성이 현저하게 악화되는 경향을 보였다. 그러나, POM과 HDPE는 영역 A에서 패턴 성형성이 나쁘고 그 외 영역에서는 양호하며, PP와 달리 표면조도가 좋은 곳에서 패턴 성형성이 불량하고 거친 영역에서는 패턴 성형성이 양호한 경향을 보였다. Fig. 8 (b)를 보면, 식각면의 표면조도 $0.5\mu\text{m}$ 에서 시편의 두께가 얇은 것이 패턴 성형성이 좋지만, 식각면의 표면조도가 $2.0\mu\text{m}$ 이상에서는 두께가 클수록 패턴 성형성이 좋은 것으로 평가되어 식각면 조도가 패턴 성형성에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.



(a) average deviations by plastics



(b) average deviations by thickness

Fig. 8 Roughness deviations of surface pattern

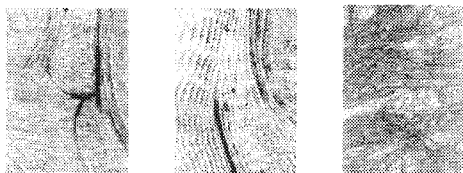
Fig. 8 (a)에서 GPPS가 시편의 두께와 식각면의 표면조도에 상관없이 가장 좋은 패턴 성형성을 가지는 것은 재료 수축율이 가장 작기 때문이다. 영역 A에서 패턴 성형성이 불량한 POM과 HDPE는 두께방향으로 각각 최대 수축율과 팽창율을 가지고 있다. 두께가 크면 수지 냉각속도가 느려 수축변화가 크게 일어나기 때문에 두께가 클수록 표면조도 편차도 커지게 된다. PE는 대체로 패턴 성형성이 좋지 않지만, 상대적으로 LDPE는 분자간 연결성이 좋고 안정되어 HDPE보다 좋은 성형성을 가진다.

그러나 Fig. 8 (b)에서 보는 것처럼 거친 식각면으로 박막 성형할 때 표면조도 편차가 2 μ m 이상을 보이는 것은 수지의 수축율 등의 물리적 성질과 함께 다른 요인에 의해 영향을 받는 것으로 생각된다. 표면이 거칠거나 박막제품의 성형시 수지의 유동 흐름 불량에 의한 성형 불량 요인이 크게 작용한 것으로 보이며, 다음 장에서 이에 대한 분석을 하였다.

4. 표면의 성형불량과 패턴 성형성의 관련

4.1 표면의 성형불량의 영향

패턴 성형성은 플라스틱 수지의 물성뿐 아니라 제팅(jetting), 웰드라인(weld line), 플로우 마크(flow mark) 등 사출제품 표면에 발생하는 성형불량에 의해 영향을 받는다. 플로우 마크 등은 사출제품 표면에 존재하는 성형 불량으로 제품 외관을 저하시키고, 웰드라인에는 응력집중이 발생하여 제품의 국부적 파손 등을 일으킨다.^[14] Fig. 9에서 사출제품 표면에 발생하는 성형불량 부위를 보여주고, (a)는 웰드라인, (b)는 제팅, (c)는 플로우 마크이다.



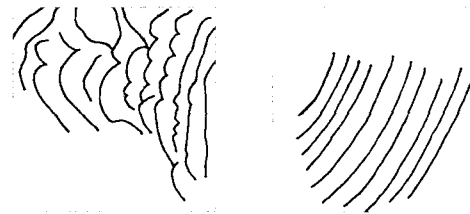
(a) Weld line (b) Jetting (c) Flow mark

Fig. 9 Types of surface pattern in molding errors

플로우 마크가 패턴 성형성에 미치는 영향을 연구하기 위해 3점식 게이트로 성형한 시편의 표면에 존재하는 플로우 마크의 궤적과 플로우 마크 형상

에 영향을 주는 요인을 조사하였다. 시편의 표면을 현미경(x15)으로 관찰하였는데, 표면조도가 가장 나쁜 시편에는 플로우 마크가 존재하고 있었다. 패턴 성형성이 좋은 재료는 GPPS, ABS, PMMA 등으로 그 중에 GPPS 표면에는 플로우 마크가 적고 매끄럽고 평탄하였다.

플로우 마크는 불규칙적 궤적과 원호 궤적 2가지 종류가 발견되었다. Fig. 10은 시편 표면에 존재하는 플로우 마크로 (a)는 6mm 두께의 LDPE에 존재하는 불규칙적 궤적과 (b)는 5mm 두께의 PP에 존재하는 원호 궤적이다. 원호 궤적의 플로우 마크는 상단에서 우하단과 좌하단으로의 흐름을 가지고 있는데, 상단의 게이트가 주 게이트(gate)이며 우하단과 좌하단의 게이트가 부 게이트 역할을 하기 때문이다.



(a) Random type(LDPE, t=6) (b) Arc type (PP, t=5)

Fig. 10 Flowmarks of etching surface

각 두께의 PP 시편을 관찰하면 Fig. 11과 같이 플로우 마크의 흐름 방향은 상단의 게이트에서 우하단과 좌하단으로 흐르며, 두께가 두꺼울수록 플로우 마크의 곡선이 많아진다.

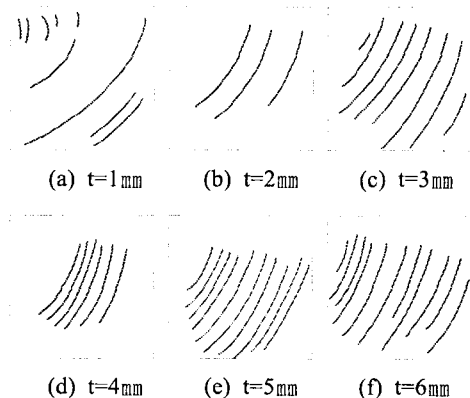


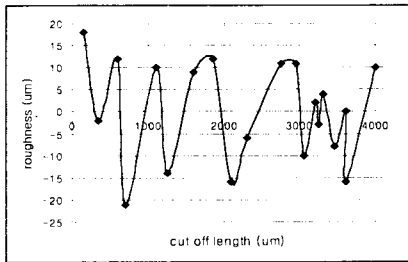
Fig. 11 Flowmarks on PP

PP(두께 6mm시편)에 있는 플로우 마크가 같은 두께의 LDPE보다 작은 표면조도 편차를 갖는 이유는 LDPE가 불규칙 케적의 플로우 마크를 가지기 때문이다. 즉, 균일한 간격의 원호 케적이면 표면조도 편차가 작지만 불규칙적 케적은 표면조도편차가 큰 것을 알 수 있다.

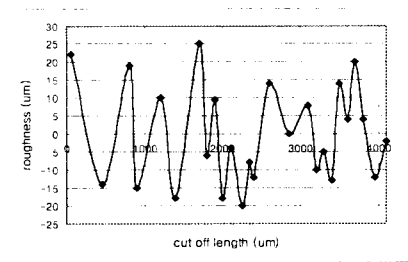
Table 2는 성형불량 부위에서 측정한 표면조도의 편차를 정리한 것이다. 제팅이 발생한 POM과 HDPE, 플로우 마크 케적이 남은 PP와 HIPS, 웰드 라인이 존재하는 AS와 ABS에서 편차가 각각 2 μ m 이상으로 성형불량이 적은 GPPS의 편차 1.1 μ m, 0.8 μ m보다 매우 컸다.

Table 2 Deviations in bad molding of surface patterns

		thickness	area	deviation
Good molding	GPPS	3	C	1.1
	GPPS	1	D	0.8
Jetting	POM	5	A	2.5
	HDPE	4	C	2.2
Flow mark	PP	3	C	2.7
	HIPS	6	C	2.5
Weld line	AS	1	D	2.5
	ABS	1	C	2.5



(a) Good molding of surface pattern on POM



(b) Bad molding of surface pattern on PP

Fig. 12 Profiles of surface pattern

표면 패턴의 성형성 검사를 위해서 윤곽 및 표면조도 조합형 형상측정기를 사용하였다. 측정 위치는 영역 D의 중앙이며, 수평 방향으로 측정되었다. Fig. 12 (a)는 양호한 패턴 성형성을 가진 POM의 표면조도 상태이며, Fig. 12 (b)는 불량한 패턴 성형성을 가진 PP의 표면조도 상태이다.

Fig. 12는 표면조도의 최대값과 최소값을 측출한 것으로 POM의 표면조도 최대값과 최소값에 대한 표준편차는 11.5 μ m, PP의 표면조도 표준편차는 13.7 μ m로 POM이 PP보다 표면조도가 균일한 경향을 보였다. 또한, POM과 PP의 평균조도 R_a 도 각각 6.27 μ m, 8.441 μ m로 전체적인 표면조도도 균일하였다.

4.2 게이트의 영향

시편은 3점식 게이트를 통해서 수평식 사출방식으로 금형 내부에 용융수지를 주입시키고, 용융수지의 주입순서를 제어하는 방식으로 성형하였다.

패턴 성형성에 대한 게이트 영향을 파악하기 위해 각 영역의 표면조도의 분포를 조사하였는데, Fig. 13은 패턴 성형성이 양호한 POM과 불량한 PP에 있어서, 각 영역의 최대 표면조도(H)의 분포를 나타낸 것이다. Fig. 13에서 보면 최대 표면조도가 우하단으로 집중되어 있다.

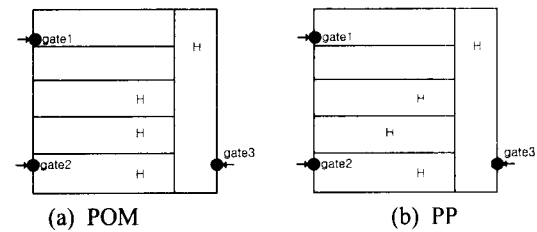
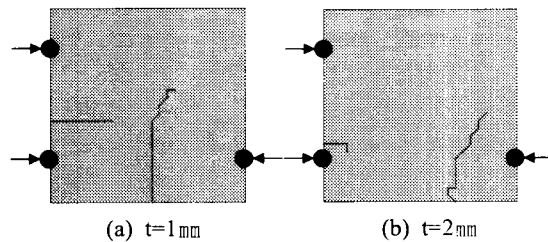


Fig. 13 Distribution of maximum surface roughness on each area



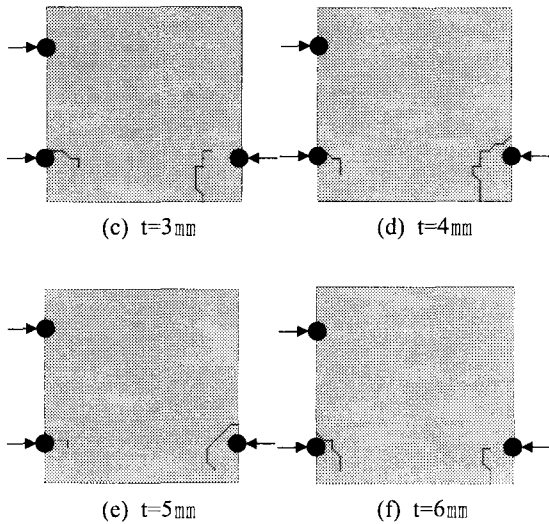


Fig. 14 Weldlines in C-mold simulation (PP)

Fig. 14는 Table 1과 수지의 점도 등 조건으로 C-mold 시스템을 활용하여 각 살두께의 성형품에 대해 유동해석한 결과이며, PP성형시 웰드라인이 발생하는 부위를 보여준다. 성형품의 표면조도측정값과 해석상의 웰드라인은 우하단 게이트 부근에서 유사한 것을 알 수 있고, 이러한 현상은 3점식 게이트 방식에서는 ABS, POM, PP 등의 플라스틱 수지, 시편 두께에 관계없이 비슷한 양상을 보였다. 해석상으로는 부게이트 gate2와 gate3 부근에서 웰드라인이 발생하는 것으로 해석되었으나 실제 성형품에서는 gate3 부근에서만 웰드라인이 발생하였다. 그러나, 웰드라인이 크게 발생하는 gate3 부근에서는 성형품의 최대표면조도와 해석상의 웰드라인 분포가 비슷한 궤적을 보이고 있다.

게이트가 2개 이상인 다점식 게이트 방식의 사출성형에서 웰드라인이 발생한다고 알려져 있는 것처럼^[13,14,15] 본 실험에서도 3점식 게이트로 인한 웰드라인이 부게이트 부근에서 발생하였다. 3점식 게이트를 통해서 동시에 급형으로 용융수지가 주입되어 부게이트 gate3 주변에서 수지의 냉각, 사출압의 저하 등으로 인한 유동성 저하로 인해^[16-19] 부게이트 gate3 부근에서 웰드라인 등 성형불량이 발생하며, 이로 인해 식각면의 패턴 성형성이 특히 좋지 않은 것으로 생각된다.

급형 식각면과 사출품의 표면조도의 편차가 웰드라인 상에서 가장 크게 나타는 것으로 보아 패턴

성형성에 크게 악영향을 미치는 것은 수지의 물성이나 식각면의 표면조도보다는 웰드라인 등 성형불량이라고 생각된다.

5. 결론

본 논문에서는 플라스틱 수지에 대한 표면패턴 성형성을 급형의 식각면과 성형된 패턴조도의 관계에서 실험 및 분석하였으며, 표면패턴 성형성은 플라스틱 수지의 물성과 식각면의 표면조도, 성형품의 두께 및 게이트 등에 영향을 받는 등 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 전반적으로 사출물의 두께와 식각면의 표면조도 등의 조건이 달라도 수축률이 적은 수지가 표면패턴 성형성이 가장 양호하였다.

2. 급형의 식각면 조도가 큰 경우 박막 성형에서 패턴 성형성이 악화된 것은 수지의 물성보다 수지유동의 저하가 패턴 성형성에 더 큰 영향을 미쳤기 때문이다.

3. 또한, 급형 식각면의 표면조도, 수지의 종류와 시편 두께 등보다는 웰드라인 등 성형불량이 존재하는 부위에서 패턴 성형성이 악화되었다.

참고문헌

1. 홍명용, "사출성형기술 I," 기전연구소, pp. 32-33, 241, 1999.
2. 이국용, "플라스틱기술," 성안당, pp. 155, 175, 284, 1999.
3. 이성출, "플라스틱 사출성형조건 CONTROL법," 기전연구소, pp. 76, 2001.
4. 조용무, "사출성형이론," 일진사, pp. 175, 210, 2001.
5. C. H., Kua, "On the residual stress of thin-wall injection molded products," 6th FADMA conference, No. 77, 2001.
6. Qin zou, et al, "Optimization of injection design part1: gate location optimization," Polymer Engineering and Science, Vol. 30, No. 15, pp. 873- 882, 1990.
7. C. Liu, et al, "Process studies in precision injection molding-1: process parameters and precision," Polymer Engineering and Science, Vol.

- 36, No. 1, pp. 1-9, 1996.
8. M. Saeki, et al, "Experimental investigation of surface roughness in ultra-precision cutting of plastics," JSPE, Vol. 67, No. 2, pp. 311-315, 2001.
 9. H. Eberle, "Micro-injection mould technology, kunststoff plast europe," pp. 1344-1346, 1998.
 10. T. H. Gwon, et al, "Moldflow design guide - a resource for plastics engineers," Bunundang Press, 2002.
 11. W. S. Tsou, "C-mold design guide - injection mold," wunjing press, 1999.
 12. C. W., Lee, et al, "A knowledge-based CAD system for deliver design in injection molding," KSPE, spring conference, pp. 723-726, 2001.
 13. C. W., Lee, et al, "Intelligent design system for gate and runner in injection molding," KSPE, Vol. 18, No. 9, pp. 192-203, 2001.
 14. S. J., Lin, et al, "Optimizing the weldline strength of injection molded liquid crystal polymers," 6th FADMA conference, No. 96, 2001.
 15. H. Hamada, et al, "The V-notch at weld lines in polystyrene injection moldings," Polymer Engineering and Science, Vol. 30, No. 15, pp. 931-936, 1990.
 16. A. K., O'Brien-soucy, et al, "Development of weld line strength in injection-molded polymethyl methacrylate," J. of injection molding technology, Vol. 4, No. 3, pp. 152-158, 2000.
 17. Y. G. Son, et al, "Weldline morphology of injection molded modified poly(phenylene-oxide)/polyamide-6 blends," Polymer Engineering and Science, Vol. 41, No. 3, pp. 554-565, 2001.
 18. H. Hamada, et al, "Effects of weldline on strength of fiber reinforced thermoplastics injection molding," Kobunshi Ronbunshu, Vol. 44, No. 9, pp. 649-656, 1987.
 19. K. W. Cho, et al, "Evaluation of the weldline strength of thermoplastics by compact tension test," Polymer Engineering and Science, Vol. 37, No. 7, pp. 1217-1225, 1997.