

PEI계 플라스틱 축대칭 부품의 사출 성형에 관한 연구

하영욱⁺, 정태형*, 이범재⁺⁺

(논문접수일 2002. 6. 12, 심사완료일 2002. 9. 4)

Injection Moulding of Polyetherimide Axi-Symmetric Elements

Young Wook Ha⁺, Tae Hyong Chong*, Bum Jae Lee⁺⁺

Abstract

This research covers the development of axi-symmetric plastic elements for injection molding with insert steel such as high stiffness Sabot. The functional requirements of Sabot are concentricity and fracture resistance about vertical and horizontal forces. For these, an analysis of characteristics of PEI(polyetherimide) polymer is performed by standard test specimen with accordance of ASTM test guidance. Moldflow analysis and simulation of injection molding process are carried out in order not only to estimate of the warpage but also to predict the characteristics of residual stresses which both product and structure of mold may have. A new vertical side injection machine and transverse mold have been constructed. Results of the measuring concentricity and fracture test after molding of Sabot are satisfied to design specification over Cp ratio ≥ 1.33 . Finally, this technique needs more research application to others axi-symmetric elements having different radius with insert steel and structure analysis from now on.

Key Words : Injection Molding(사출성형), Sabot(탄자운반체), PEI(폴리이써이미드), Polymer(고분자)

1. 서론

고분자 수지를 이용한 플라스틱 사출성형 부품 중에는 축대칭 원형으로 이루어진 형상들이 많이 있다. 특히, 제품의 단면 두께가 균일하지 않고 복잡한 경우에 있어서는 사출성형 해석을 통하여 게이트 방식과 위치 및 성형 조건을

결정해야만 요구하는 제품 설계 치수 및 형상을 만족시킬 수 있다. 또한, 사출성형 후의 동심도와 내파단력을 요구하는 제품에 있어서는 고분자 수지 재료의 특성을 분석하고, 사출성형 해석을 통하여 금형 구조와 사출 조건을 설정하여야 한다. 본 연구에서는 복잡한 축대칭 원형 부품이며 강도를 요구하는 탄자운반체를 대상으로 사출성형에 관한 연

⁺ 한양대학교 대학원 기계설계학과

^{*} 주저자, 한양대학교 기계공학과 (thchong@hanyang.ac.kr)
주소: 133-791 서울시 성동구 행당동 17번지

⁺⁺ 충남대학교 정밀공업화학학과

구를 수행한다. 기존 탄자운반체는 알루미늄 절삭가공 및 텅스텐 금속재료를 이용한 개별 기계 가공으로 제작되었다. 따라서, 기계 가공법에 의한 제조 비용 상승 및 대량 생산의 문제점을 가지고 있어 본 연구를 통해 축대칭 원형 부품의 성형기술 기초를 마련하여 기계가공법의 문제점을 해결하고자 한다. 대표적인 축대칭 부품인 탄자운반체의 기능 요구 사항은 동심도와 정면 및 측면 하중에 대한 내파단력이다. 이러한 기능을 만족시키기 위해서는 제품 적용 가능성을 평가하기 위한 고분자 수지 특성을 분석하여 수지를 선정해야 한다. 또한, 금형 게이트 위치와 형식을 선정하기 위한 사출 성형해석을 수행하고, 해석 결과로부터 금형 구조 설계와 사출성형 조건을 설정하여 최종적으로 사출성형된 시제품의 동심도와 정면 및 측면 하중 작용에 대한 내파단력을 확보하는 것을 본 연구의 목적으로 한다. 최종 평가는 다이얼게이지를 이용한 사출성형 제품의 동심도를 측정하며, 만능시험기를 이용하여 정면 및 측면하중에 대한 파단 시험을 통하여 내파단력을 평가하였다. 본 연구에서 사용한 고분자 수지는 포구내에서의 압력, 고마찰, 고압축성, 고파괴인성 및 고내열성에 적합한 PEI(Polyetherimide) 계열⁽¹⁾의 소재를 LNP사의 자문을 통하여 선정하였다. 그러나, 본 소재는 일반 고분자 수지와는 달리 유럽 일부에서 탄피로써 사용하고 있다는 것 이외에는 수지의 성분 및 첨가제 등 그 특성이 알려진 바가 없다. 따라서, 본 연구에서는 고분자 수지에 대한 특성 분석을 실험하여 기초 자료를 확보하고 이들 결과를 해석 기초 자료로 활용하고자 한다.

따라서, 본 연구에서는 PEI계 수지 특성 분석을 통한 사출성형 해석, 금형 구조 설계 및 사출성형 조건을 설정^(2,3)하고 실제 사출성형 후의 시제품을 이용한 동심도의 평가와 파단력 시험을 통하여 탄자운반체를 대상으로 한 축대칭 부품의 사출성형에 관한 기초 기술을 확보하고자 한다. Fig. 1은 탄자운반체의 구성 단면도를 나타낸 것이다.

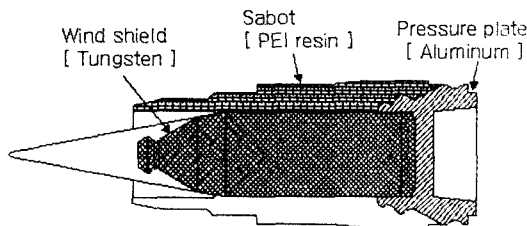
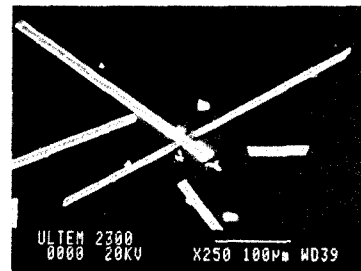


Fig. 1 Schematic view of the Sabot assembly

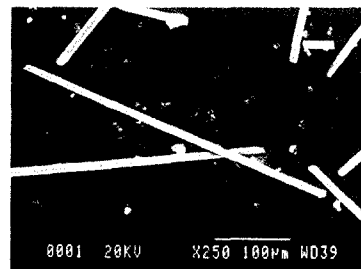
2. PEI계 고분자 수지의 특성 시험

PEI계 고분자 수지는 높은 인장강도, 탄성률, 내열성 및 파괴인성이 고분자 수지 중 높은 수준이며, 상온에서 굴곡탄성률이 3,300MPa로 열가소성 수지중에서 우수한 수지로 알려져 있다. 특히, 고온에서도 기계적 강도를 유지하여 180℃에서 인장강도가 41.3MPa이고 굴곡탄성률이 2,068MPa로서 다른 고분자 수지보다 월등하다. 따라서 탄자운반체에 가장 적합한 고분자 수지로 선정하였다. PEI계 고분자 수지 중에서 일부는 그 물성치들을 원재료 제작 업체에서 실험한 결과들을 제공하여 알 수 있지만 본 연구에서 사용한 수지는 LNP사의 PEI계 수지로 데이터를 확보할 수 없으므로 수지의 물성 분석을 통하여 해석 및 사출 성형시의 중요한 자료로 사용하고자 한다. 수지에 대한 비교 분석은 Ultem PEI와 LNP PEI에 대하여 수지 물성시험⁽⁴⁾과 강도시험 두 분류로 나누어서 수행하였다.

첨가제분석 : Ultem과 LNP수지에 대한 무기첨가제의 차이를 분석하기 위하여 soxhlet후 잔류물(%)을 평가하였다. 그 결과 LNP는 Ultem의 28%보다 약 14%많은 42%가 솔벤트(CH₂Cl₂)에 녹지 않은 것으로 보아 무기 첨가제가 많이 들어



(a) Ultem PEI



(b) LNP PEI

Fig. 2 Scanning electron micrographs of the PEI

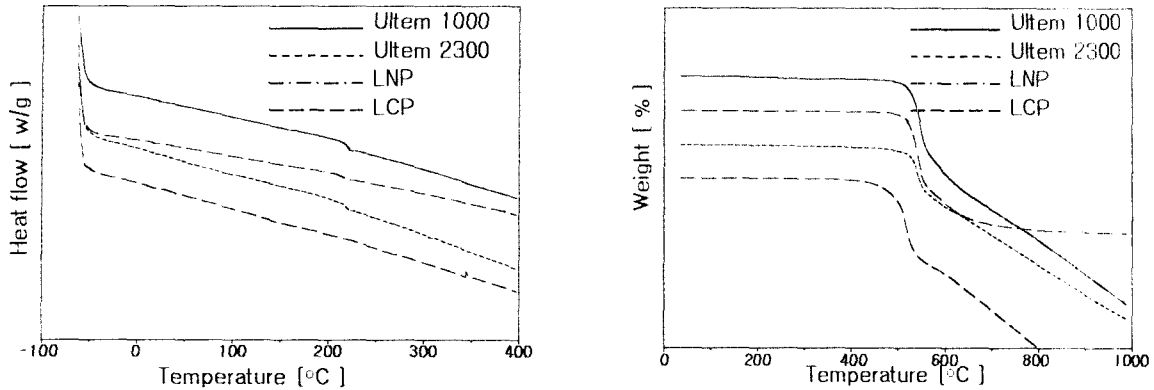


Fig. 3 Analysis of the DSC and TGA

간 것으로 보인다. Fig. 2는 soxhlet으로 분리된 무기첨가제를 분석하기 위해 찍은 SEM사진을 나타낸다. LNP의 유리섬유의 길이가 400 μm 정도임을 알 수 있는데 이는 Ultem과 거의 동일한 수치를 나타내고 있다. 따라서, 유리섬유의 첨가량에만 차이가 있고 섬유 길이에 따른 차이는 볼 수 없었다. 또한, 기계적 특성에 변화를 주는 다른 첨가제의 유무를 판단하기 위하여 전기로에서 800°C 약 8시간동안 수지를 태운 후의 잔류물로서 EDX(Energy dispersive x-ray spectroscopy) 분석을 실시하였다. 그 결과 유리 섬유의 주성분인 Al, Si, Ca만이 존재하는 것을 볼 수 있었다. 결과적으로 Ultem 수지와 LNP 수지는 단지 유리섬유의 양에만 차이가 있음이 판명되었다.

수지 열분석 시험 : 수지 열분석 시험은 DSC(Differential scanning calorimetry)와 TGA(Thermo gravimetric analysis)을 수행하여 사출 성형 온도 조건과 고분자 고유 물성치를 유지할 수 있는 온도에 대한 열적 성질을 분석하였다. DSC 분석은 온도를 -60°C부터 400°C까지 분당 10°C씩 올리면서 시료의 유리전이온도 T_g 를 측정 분석하였고, TGA는 일정한 속도로 온도를 변화시켰을 때 시료의 무게 변화를 측정하는 것으로, 고감도 저울을 사용하여 시료의 온도에 따른 중량변화를 측정하여 가열시 분해성과 잔존량 등을 평가하는 실험으로 온도를 10°C부터 1000°C까지 분당 10°C씩 올리며 태워 잔류물의 중량비 및 열분해 성향을 살펴보았다. Fig. 3은 DSC와 TGA분석 실험 결과를 나타낸 것이다. DSC분석 결과 Ultem1000, Ultem2300, LNP 모두 약 215-220°C 부근에서 T_g 를 가지는 것으로 보아 무기 첨가제에 의해 특이한 열적 성질의 변화는 없다. TGA분석 그래프 상에서 LNP는 Ultem1000과 비슷한 분해 곡선을 갖는 것

을 볼 수 있으며, Ultem 2300과 분해시작온도는 동일하나 540°C부터 분해속도가 Ultem2300에 비해 지속적이며 빠름을 알 수 있다. 따라서 열적 특성 결과 수지의 성형 온도는 400°C 이하로 작업해야 함을 알 수 있다.

인장 강도 시험 : 재료의 기계적 특성을 분석하기 위한 인장 강도 시험은 ASTM D638의 Type I 시편 규격에 준하여 인장 시편을 제작하였다. 시편은 사출전 120°C에서 4시간 동안 건조시킨 후 사출온도 약 360°C, 사출압력 135~138MPa, 금형 온도는 130°C로 LG 사출기 100Ton에서 사출성형으로 제작하였다. 시험 데이터는 총 5개의 시편을 측정하여 그 평균값을 구하였다.

굴곡 강도 시험 : 굴곡강도와 굴곡탄성률은 ASTM D790에 따라 3.2×127×12.7mm 시편을 이용하여 3점 지지하중 시험을 하였다. 지지대의 간격은 60mm, 크로스헤드(cross-head) 속도는 2.8mm/min로 하여 총 5개의 시편을 측정한 후 그 평균값을 구하였다.

Izod 충격 시험 : 충격강도 시험은 ASTM D256A에 따라 3mm 두께를 가진 Izod 충격 시편으로 실시되었다. 시험은 총 5개의 시편을 측정하여 평균값을 구하였다.

파괴 인성 시험 : 파괴인성(K_{IC})은 ASTM D5045-95 규격에 의해 시험하였으며, 폭(W)×길이(S)×두께(B)=16.0mm×64mm×8mm, 균열길이(a)는 8mm인 시편을 이용하여 시험을 수행하였다. 굽힘 모드에서 하중 속도 10mm/min를 기준으로 식 (1)을 이용하여 K_{IC} 값⁽⁵⁾을 계산하였다.

$$P_{max}/P_Q \leq 1.10, K_{IC} = (P_Q S / BW^{3/2}) f(a/W) \quad (1)$$

여기서,

Table 1 Results of material property test

Test	LNP-PEI	Ultem PEI
Tensile strength [MPa]	179.5	144.5
Flexural strength [MPa]	244.6	210.8
Izod impact [MPa · mm]	7.53	5.4

Table 2 Results of fracture toughness test

Composites	W	B	a	a/W	f(a/W)	P_Q	K_{IC}
LNP	0.618	0.307	0.2756	0.445	1.965	0.1355	4.41
Ultem2300	0.618	0.307	0.2756	0.445	1.965	0.1108	3.606

$$f(a/W) = [3(a/W)^{1/2} - 1.99 - (a/W)(1 - a/W)(2.15 - 3.39a/W) + 2.7a^2/W^3] / [2(1 + 2a/W)(1 - a/W)^{3/2}]$$

이며,

P_Q 는 하중[kN], B 는 시편두께[mm], S 는 간격[mm], W 는 시편폭[mm], a 는 균열길이[mm]이다.

Table 1과 2는 강도 실험 결과를 나타낸 것으로 LNP 수지가 Ultem 수지에 비해 우수한 강도 특성을 가지고 있어서 탄자 운반체 적용에 더 타당함을 알 수 있다. 따라서 수지 실험 데이터를 이용하여 사출성형 해석과 성형 조건 및 내파단력을 위한 수지 선정에 활용하였다.

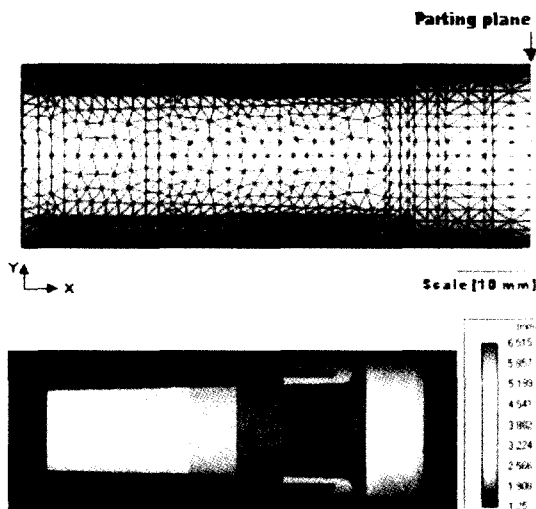


Fig. 4 3-Dimensional modeling and distribution of thickness for moldflow analysis

3. 금형 설계 및 사출을 위한 사출성형 해석

축대칭 부품인 탄자운반체의 게이트의 수와 위치 및 게이트의 종류를 선정하기 위하여 사출성형 해석을 수행하였다. 이들 결과로부터 금형 설계안을 제시하고자 한다. 유동해석을 위한 상용 소프트웨어로는 C-mold v2000.1^(6,7)을 사용하였으며, 해석을 위한 3차원 모델은 Fig. 4에 도시하였다. 요소 크기 1.5mm의 삼각요소를 이용한 유한요소 메쉬(mesh)를 5,530개를 생성하였다. 경계조건은 압력과 온도의 함수로 구성하였으며, 해석과정을 위한 데이터로 고분자 수지는 열적 성질 및 흐름성이 유사한 Ultem을 사용하였고, 금형 재질은 캐비티측은 STAVAX를 코아측은 알루미늄과 텅스텐으로 설정하였다. 냉각수는 물을 사용하였고, 사출기는 85톤, 냉각시간 40초, 싸이클 타임 70초, 노즐온도 300℃, 사출압력은 13MPa를 해석 조건으로 입력하였다. 이들 설정 항목에는 수지의 열전도계수 $k=0.25(W/m \cdot K)$, 비열 $C_p=2000(J/kg \cdot K)$, PVT 선도 등이 포함되어 있다.

게이트의 종류는 핀게이트를 사용하였으며, 웰드라인(weld line)의 위치는 제품의 두께가 가장 두꺼운 부분에 생길 수 있도록 게이트의 위치를 조절하였다. 해석을 위한 게이트의 수는 동심도 확보를 위하여 2점, 4점 방식과 게이트 위치는 금형 파팅면과 하단에서 20mm 위치에 대하여 해석을 수행하였다. Fig. 5는 성형해석을 위한 런너의 형상과 게이트 수(2점, 4점)를 나타낸 것이다.

사출성형 해석 결과 : 사출성형 해석은 게이트의 위치 변화에 따른 수축 변형과 응력 상태를 해석하였다. Table 3은 사출시의 게이트의 위치 변화에 따른 4가지 금형 설계안에 대한 제품의 최종 변형 및 수축량의 변화를 나타낸 것으로, T

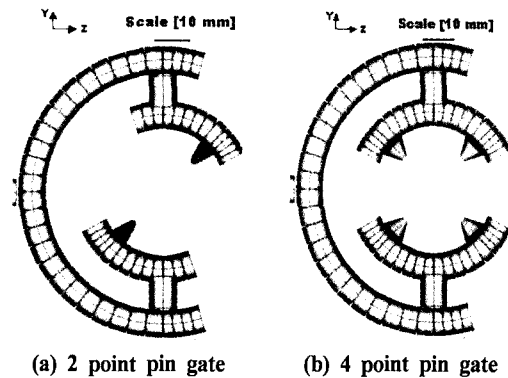


Fig. 5 3-Dimensional modeling of gate and runner

Table 3 Results of shrinkage deformation [mm]

Axis	TG2	TG4	MG2	MG4
X	0.1485 ~ -0.200	0.1373 ~ -0.175	0.1413 ~ -0.188	0.1389 ~ -0.1639
Y	0.1117 ~ -0.106	0.1108 ~ -0.108	0.111 ~ -0.1158	0.1147 ~ -0.1167
Z	0.2123 ~ 0.088	0.1844 ~ 0.101	0.2333 ~ -0.0897	0.1956 ~ -0.0951
Total	0.2123 ~ 0.088	0.1844 ~ 0.101	0.2333 ~ -0.0897	0.1956 ~ -0.0951

Table 4 Results of residual stress [MPa]

Layer	TG2	TG4	MG2	MG4
#1	47.84	29.97	34.24	23.95
#2	28.05	31.69	34.42	25.30
#3	22.25	29.12	22.99	23.96
#4	33.47	31.94	28.61	25.69

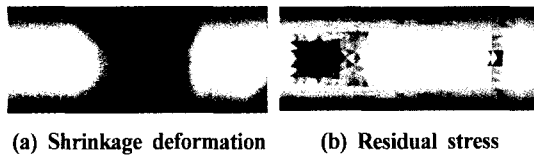


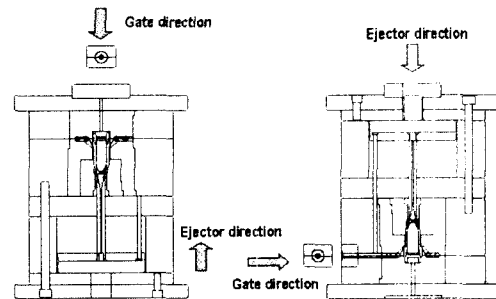
Fig. 6 Results of shrinkage and residual stress for middle four gates (MG4)

는 파팅 면인 끝단을 나타내며, M은 파팅 면으로부터 -x축으로 20mm 위치를 표시한 것이다. 숫자 2와 4는 게이트의 수를 의미한다. Table 4는 노치부 끝단에서의 잔류 응력 값을 나타낸 것이다. 성형해석에 의한 수축 결과는 끝단 2점 게이트(TG2)와 끝단에서 20mm 위치에 4점 게이트(MG4) 방식이 수축량이 가장 작고, 잔류 응력 해석 결과를 4개의 노치부(#1,#2,#3,#4) 위치에서 출력한 결과 파팅 면에서 20mm 위치에 4점 게이트(MG4) 방식이 응력 상태가 균일하며 안정적임을 알 수 있었다. 따라서, 결과로부터 파팅 면에서 20mm 안쪽으로 4점 핀 게이트 방식이 금형 설계 방안으로 가장 적절함을 확인하였다. Fig. 6은 MG4에 대한 수축과 잔류 응력에 대한 해석 결과만을 나타낸 것이다.

4. 금형 설계 및 사출성형

4.1 금형 구조 및 제조 방법

사출 성형기⁽⁸⁾에 따른 성형법에는 수평 사출 방식과 수직 사출 방식 두 가지로 크게 분류할 수 있다. Fig. 1에서와 같이 탄자운반체는 윈드실드, 사봇, 압력판 3가지로 나누어져 있다. 이들을 사출성형법으로 동시에 조립하기 위해서는 금형 내부에 윈드실드와 압력판을 인서트하여 1공정으로 성형하여야 한다. 윈드실드와 압력판의 무게는 200g으로 수평 사출 방식으로는 인서트 부분의 금형 틈새와 윈드실드의 중량으로 인하여 인서트시 처짐 현상 발생으로 동심도를 만족시킬 수 없다. 따라서, 시제품 동심도 유지를 위해 수직 사출 방식으로 결정하였다. 그러나, 수직 사출 방식은 일반적으로 금형의 상측에 수직으로 노즐이 위치해야 하나 사출성형 해석 결과와 같이 노치가 있는 원형 부품에 대해서는 수평 방향에서 노즐이 위치해야 한다. 따라서, 본 연구에서는 수직 사출기를 개조하여 금형의 파팅면과 수평 방향으로 노즐이 위치하도록 하였으며, 이로 인하여 일반적인 금형의 장착 방향과는 반대로 이젝터의 방향이 상측에 위치하도록 개발하였다. 금형의 구조도 성형해석에 따라 사출기에 맞추어서 2단금형으로 동심도 및 잔류 응력을 최소화하기 위하여 Fig. 7의 (a)인 기존 구조를 (b)와 같이 게이트의 위치와 이젝터의 방향을 새롭게 개발하였다. 게이트의 방향을 (b)와 같이 측면에 위치시킴으로서 성형해석 결과를 최대한 고려하여 금형을 설계·제작하였다. Fig. 8은 Fig. 7의 구조를 이용하여 제작된 금형 형상을 나타내며, Fig. 9는 사출 성형시의 인서트 작업의 개념을 보여주고 있다.



(a) Conventional structure (b) Proposed structure

Fig. 7 Structure of sabot mold for injection molding



Fig. 8 Mold plate and core for sabot



Fig. 9 Injection molding for sabot assembly

4.2 사출성형 조건 설정

사출 조건은 사출성형 해석 결과를 바탕으로 시제품 동심도 및 외관 치수를 고려하여 설정하였다. 즉, 성형온도는 TGA시험결과 및 성형해석에 의해 약 300℃ 부근에서 히터의 온도를 설정하였으며, 냉각시간은 40초, 사출압력은 1차 14.5MPa, 2차 13MPa, 3차 12.5MPa로 설정하였다. 또한, 충전 시간 2초를 포함하여 전체 싸이클 시간을 72초로 설정한 결과 제품 설계 치수, 파단력 시험 및 동심도 모두 만족할 만한 결과를 얻을 수 있었다. Table 5는 성형 조건에 대한 결과를 나타낸다.

5. 동심도와 파단력 시험 결과

동심도 측정법 및 시험 결과 : Fig. 10은 사출성형 후의 제품의 동심도를 측정하는 방법을 나타낸 것으로 상단, 중단, 하단 세부분에 다이얼 게이지를 장착하여 동심도를 측정하였다. 사출 제품의 동심도에 대한 설계 편차 범위는 0.15mm 이내이다. 사출 성형 제품의 형상 공차에 대한 진원도 측정을 30개의 시료로 측정한 결과 공정능력지수 $C_p \geq 1.33$ 을 만족하고 있음을 Table 6의 좌측 데이터로부터 확인할 수 있었으며 우수한 치수 안정성을 얻었다.

파단력 측정법 및 시험 결과 : 수직 파단 시험과 수평 파단⁹⁾ 시험은 만능시험기 위에 탄자운반체를 고정시킨 후 하중

Table 5 Results of injection condition for sabot

	Sabot	Cavity	I
Material	PEI(LNP-PDX)	Gate type	Tunnel
Machine	85TON vertical injection		
Conditions of injection molding			
	Specification	Condition	Remarks
Material	GRADE	PDX-E	
	Drying temperature	150 [°C]	
	Drying time	4 [hr]	
Injection temperature	Nozzle	300 [°C]	
	Heater .1	335 [°C]	
	Heater .2	330 [°C]	
Molding condition	Heater .3	300 [°C]	
	Back stroke	50 [mm]	
	Screw position	35 [mm]	
	Screw position	20 [mm]	
	Screw position	12 [mm]	
	Injection velocity 1	85 [mm/sec]	
	Injection velocity 2	80 [mm/sec]	
	Injection velocity 3	75 [mm/sec]	
	Injection pressure 1	14 [MPa]	
	Injection pressure 2	13 [MPa]	
	Injection pressure 3	12.5 [MPa]	
	Back pressure 1	4 [MPa]	
	Back pressure 1	2.5 [MPa]	
	Back pressure 1	1.5 [MPa]	
	Screw velocity	40 [rpm]	
Injection time	Filling time	2 [sec]	
	Packing time	8 [sec]	
	Packing time	0.5 [sec]	
	Cooling time	40 [sec]	
	Cycle time	78 [sec]	

이 균일하게 가해질 수 있도록 치구를 이용하여 정하중을 가하는 시험이다. 수직 파단력과 수평 파단력의 설계 기준치는 각각 490N과 15,680N 이상의 하중에 견뎌야 한다. 수직 파단 시험은 탄자운반체를 만능시험기에 수직으로 고정시킨 후 하중속도 5mm/min으로 노치 부위가 파단될 때

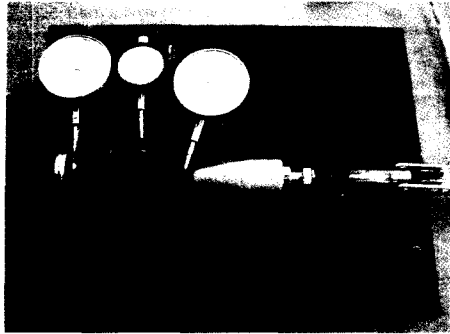


Fig. 10 Concentricity test after Injection molding

까지의 하중을 측정하는 시험이며, 수평 파단 시험은 탄자운반체를 수평으로 고정시킨 후 폭 6.5mm×6.5mm 치구를 사용하여 파팅면에서 -x 방향으로 13.30mm 지점을 하중속도 5mm/min으로 파단될 때까지 하중을 가하는 시험이다. Table 6은 그 시험 결과를 나타낸 것으로 모두 공정능력지수 Cp≥1.33을 만족하고 있음을 알 수 있다.

6. 결론

동심도와 내파단력을 요구하는 탄자운반체를 대상으로 축대칭 부품의 사출성형 방법을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

PEI계 고분자 수지의 기계적 특성과 열적 특성을 분석하여 탄자운반체가 요구하는 특성에 부합되는지를 평가하고, 사출 성형시의 사출 조건을 제시하였으며, 동심도와 내파단력을 확보하기 위한 금형 설계안 및 사출 방식을 사출 해석을 통하여 제시하였다. 동심도와 파단력의 시험 결과는 모두 공정능력지수 Cp≥1.33 이상으로 상당히 우수한 결과를 얻을 수 있었다.

향후 지름이 다른 여러 종류의 축대칭 부품에 대한 적용과 구조해석을 좀 더 면밀히 수행하여 탄자운반체 적용 기술 확대가 필요하다.

참고 문헌

(1) Extrand, C. W., Bhatt, S., 2001, "The mechanical properties of insert-molded poly etherimide (PEI) /C-fiber poly ether ether ketone(PEEK) composites",

Table 6 Results of concentricity and fracture resistance test of sabot assembly

Concentricity				Vertical fracture resistance				Horizontal fracture resistance			
Nominal	0.150 mm			Nominal	490.000 N			Nominal	15.000 N		
Upper tol				Upper tol				Upper tol			
Lower tol				Lower tol				Lower tol			
DATA INPUT				DATA INPUT				DATA INPUT			
NO.	DATA	U	L	NO.	DATA	U	L	NO.	DATA	U	L
1	0.029	0	0	1	546.644	0	0	1	15729	0	0
2	0.032	0	0	2	536.464	0	0	2	7576.4	0	0
3	0.041	0	0	3	540.47	0	0	3	4198.4	0	0
4	0.041	0	0	4	550.786	0	0	4	3483.2	0	0
5	0.029	0	0	5	545.272	0	0	5	17385	0	0
25	0.032	0	0	25	530.796	0	0	25	20186	0	0
26	0.051	0	0	26	543.41	0	0	26	15130	0	0
27	0.051	0	0	27	538.004	0	0	27	19156	0	0
28	0.042	0	0	28	543.018	0	0	28	16954	0	0
29	0.043	0	0	29	540.176	0	0	29	17342	0	0
30	0.025	0	0	30	546.644	0	0	30	7856.6	0	0
Test result				Test result				Test result			
n	30	EA		n	30	EA		n	30	EA	
R	0.042			R	517.307			R	17109.512		
σ _{n-1}	0.017			σ _{n-1}	11.517			σ _{n-1}	1205.541		
σ _{n-3}	0.052			σ _{n-3}	522.157			σ _{n-3}	11527.911		
CP	2.14			CP	1.64			CP	0.912		
CPK				CPK				CPK			

Journal of Materials Science, 36(19), pp. 4603 ~ 4610
 (2) R. G. W. Pye, 1983, "Injection Mould Design", fourth edition, pp. 135 ~ 254.
 (3) 이태홍, 이성수, 2000, "AUTO CAD를 이용한 프라스틱 사출금형 자동설계의 개발에 관한 연구", 춘계학술대회 논문집, 한국공작기계학회, pp. 397 ~ 402.
 (4) Vishu Shah, 1998, Handbook of Plastic Testing Technology, second edition, John Wiley & Sons, Inc., Canada, pp. 67 ~ 69.
 (5) Gotoh, M., 1985, "A Simple plastic constitutive equation with vertex effect", Eng. Fracture Mech., 21-4, pp. 673 ~ 684.
 (6) Peter Kennedy, 1995, Flow Analysis of Injection Molds, Hanser/Gardner Publications, Inc., pp. 6 ~ 108.
 (7) 한국시뮬레이션 기술, 2000, Computer Aided Plastics Application, (주)브이엠테크, pp. 4.1.1-6.1.44.
 (8) Friedrich Johannaber, 1994, Injection Molding Machines, third edition, Hanser/ Gardner Publications, Inc., pp. 214 ~ 259.
 (9) Serope Kalpakjian, 1992, Manufacturing Processes for Engineering Materials, second edition, Illinois Institute of Technology, pp. 35 ~ 92.