

PEI계 복합 재료를 이용한 탄자 운반체의 사출 성형 기술 개발에 관한 연구

정태형*(한양대), 이범재(충남대), 하영욱(한양대 대학원), 이성계(풍산)

Development of Injection Moulding Method of Sabot using Polyetherimide Composite Material

Tae Hyong Chong*(Hanyang Univ.), Bum Jae Lee(Chungnam Univ.),
Young Wook Ha(Graduate School, Hanyang Univ.), Seong Kei Lee(Poongsan)

Abstract

This research covers the development of new technique for composite injection molding of high stiffness Sabot. An analysis of polymer resin is performed by means of making test specimen mold and doing test with accordance of ASTM test guidelines. Structural analysis and simulation of injection molding process are carried out in order not only to estimate but also to predict the characteristics of molding stresses what both product and structure of mold may have. For structural analysis software, Moldflow and LS-dyna are used and universal test machine is utilized for evaluating performance of sabot.

Cases of adopting this material to sabot are not announced yet in domestic academic world. In addition to that, materials for polymer-metal mixed injection molding are imported on the whole due to deficient level of domestic technology. Therefore, this new developed injection molding technique using PEI material can make it available to ensure the technology of making mold, injection and design. Finally, this technique may be applicable to another sabot having different radius of warheads from now on.

Key Words: PEI(폴리이써이미드), Injection moulding(사출성형), Sabot(탄자운반체),

1. 서론

탄자운반체는 포구내에서 30,000psi가 넘는 포구압력을 견뎌야 하며 비행역학적인(aero-dynamic) 전단응력과 마찰을 받아야 하므로 고압축성, 고파괴인성 및 고내열성을 갖는 소재를 사용하여야만 한다. 이런 조건을 만족하기 위한 수지는 열가소성 수지들이 있고 그 중에서 가장 대표적인 것이 PEI(Polyetherimide)라고 할 수 있다. PEI는 높은 인장강도, 탄성률, 내열성(300°C 이상) 및 파괴인성이 공업용 수지 중 가장 높은 수준이며, 상온에서 굴곡탄성률이 480 kpsi (3,300N/mm²)로 열가소성 수지중에서 가장 좋다. 특히 고온에서도 좋은 물성을 유지하여 180°C에서 인장강도가 6kpsi이고 굴곡탄성률이 300 kpsi로서 다른 고성능 수지보다 월등하다. 따라서, 기존의 알루미늄 및 새로운 탄자운반체의 고강성·경량화 금속재료를 이용한 개별 기계 가공으로 제작되어진 탄자운반체를 고강성, 고분자 복합재료 복합성형에 의한 신제조기술 개발을 통해 탄자운반체용 PEI 수지의 물성 최적화 및 성형특성을 해석하고, 탄자운반체용 PEI/유리섬유 복합재료의 사출성형시의 성형특성 및 최적 성형조건을 도출하여 금형설계^{[1],[2]}에 적용함으로써 사출 조건의 최적화를 통한 복합 사출 금형 개발을 이룰 수 있다. 복합 사출의 경우에 있어서는 과거에 많은 제품이 개발되었으나 방산용 탄자운반체에 신소재를 이용한 고압축성, 고파괴인성, 고내열성을 가진 PEI의 응용으로 경량화 및 대량생산을 위한 금형 및 사출에 관한 자료는 원재료 생산업체 및 선진 국가의 독점으로 이루어져 왔다.

본 연구에서는 PEI 복합 재료의 특성을 분석^[3] 하고, 이 특성에 적합한 복합사출 성형법^[4] 및 금형 개발을 통하여 고압축성 탄자운반체 대량생산 기술을 국산화하고자 한다.

2. PEI 고분자 수지의 특성 시험

2.1 인장강도 시험

재료의 기계적 특성을 분석하기 위한 인장 강도 시험은 ASTM 규격에 준하여 인장 시편을 제작하였다. 시편은 사출전 120℃에서 4시간 동안 건조시킨 후 사출온도 약360℃, 사출압력 1350~1380bar, 금형 온도는 130℃로 LG 100Ton에서 제작하였다.

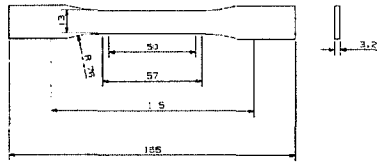


Fig. 1 Specimen for tensile strength test

인장강도와 인장은 ASTM D638에 따라 Fig. 1의 Type I 시편을 이용하여 5mm/min의 cross-head speed로 측정하였다. 총 5개의 시편을 측정하여 그 평균값을 구하였다.

2.2 굴곡강도시험

굴곡 강도 시험은 ASTM에 의해 수행하였다.

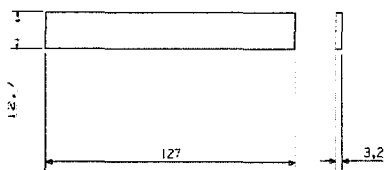


Fig. 2 Specimen for flexural test

굴곡강도와 굴곡탄성율은 ASTM D790에 따라 Fig. 2의 3.2×127×12.7mm 시편을 이용하여 3점 지지하중시험을 하였다. 지지대의 간격은 60mm, cross-head 속도는 2mm/min로 하여 총 5개의 시편을 측정 후 그 평균값을 구하였다.

2.3 Izod-impact 시험

충격강도는 ASTM D256에 따라 Fig. 3의 3mm 두께를 가진 Izod type test 시편을 이용하

여 Izod impact test(test method A)를 실시하였다. 총 5개의 시편을 측정하여 평균값을 구하였다.

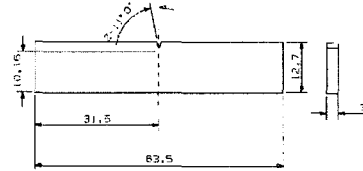


Fig. 3 Specimen for Izod impact test

2.4 수지 열분석 시험

수지 열분석 시험은 TGA열중량분석(Thermogravimetric analysis)을 통하여 수행하였다. 온도 변화에 따른 시료의 무게변화를 측정하여 분석하는 방법이므로 일정한 속도로 온도를 변화시켰을 때 시료의 무게 변화를 측정하는 것으로 고감도의 저울을 사용하여 시료의 온도에 따른 중량변화를 측정하여 가열시 분해성, 반응성과 잔존량 등의 결과를 얻을 수 있다. TGA에 의한 온도-무게 변화량의 곡선으로부터 시료의 열 변화 상태를 알고 정성 및 정량분석을 가능하게 한다. 또한 이 온도-무게 변화량의 곡선은 사용한 시료의 열 안정성(thermal stability) 및 물질의 구성비 등을 나타내주며 가열이 끝났을 때 찌꺼기 양도 알 수 있게 해준다. 측정은 DUPONT 951을 사용하여 건조 질소 기류하에서 20℃/min의 속도로 실시하였다.

2.5 파괴 인성 시험

파괴인성 시험은 ASTM D 5045-95를 사용하였으며, 구체적인 시편 규격은 Fig. 4와 같이 폭(W)=2×두께(B), Span 길이(S)=4×폭(W), 크랙 길이(a)=0.5×폭(W)로 하였다. Instron 기기로 굽힘 mode에서 load speed는 10mm/min를 기준으로 하였고, 얻어진 데이터로부터 P_Q값의 결정은 Fig. 4의 방법과 같이 하였으며, K_{IC}의 계산^[5]은 식(1)과 같다.

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

여기서,

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

$P_Q = \text{load}$, [kN]

B = specimen thickness , [cm]

S = span , [cm]

W = specimen depth(width) , [cm]

a = crack length , [cm]

이다

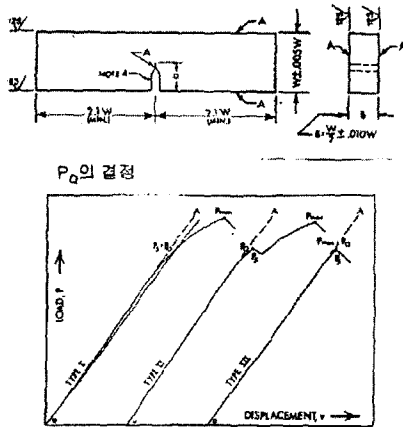


Fig. 4 Specification of test specimen of fracture toughness and determination of P_Q value

3. 금형 설계 및 사출을 위한 사출 성형 해석

사출 성형 해석은 각 금형 설계안에 따른 제품의 변형량과 제품 내에 잔류하게 되는 응력의 변화를 CAE를 통해 알아보고자 진행하였다. 사출해석은 유동해석, 냉각해석, 변형해석을 할 수 있으며, MOLDFLOW S/W를 이용하여 적절한 게이트의 위치 선정과 런너의 크기, 냉각 회로의 설계, 사출 성형 조건, 월드라인의 위치 조절을 하여 제품 정밀도의 증가와 변형을 최소화하였다. 특히 탄자 운반체 금형 설계에 있어서는 사출품의 성능 신뢰성과 탄자 운반체 외관의 동심도 및 수지와 텡스텐의 열팽창 계수의 차이에 의한 치수 변화량의 차이에 의해서 플라스틱 외관상에 크랙의 형상으로 존재하게 되므로 설계시 사출 성형 해석이 필요하다. 크랙의 존재는 사출시 게이트의 위치와 형상에 의한 월드 라인이 형성되면 존재하므로 두께가 가장 큰 위치로 월드 라인을 형성시키기 위하여 와류를 발생시키고 열응력이 최소가 되는 위치를 선정해야한다.

본 연구에서 사용한 2차원 형상에 대한 지배방

정식은 식 (2)와 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x}(S \frac{\partial P}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(S \frac{\partial P}{\partial y}) = G \frac{\partial P}{\partial t} + T$$

$$\rho C_p(T) (\frac{\partial T}{\partial t} + \nu_x \frac{\partial T}{\partial x} + \nu_y \frac{\partial T}{\partial y}) = \frac{\partial}{\partial z} [x(T) \frac{\partial T}{\partial t}] + \eta V \quad (2)$$

여기서, x, y 는 평면좌표계, z 는 두께방향좌표를 나타내며, ν_x, ν_y 는 x, y 방향의 속도 성분, ρ 는 밀도, C_p 는 비열, η 는 점도, V 는 전단 변형률 속도를 나타낸다.

4. 탄자운반체 제품 구조해석

해석 개요 : 본 해석은 탄두마개 플라스틱 제품 Fig. 5에 대하여 실제 실험조건인 Fig. 6, 7과 같은 해석조건을 고려하여 플라스틱 제품에 가해지는 최대 하중을 산출해 보았다.

해석 모델 : 본 해석에 사용된 모델은 제품 도면을 이용하여 3차원상의 CAD Modeling 및 해석 유한요소모델을 처리하여 수행하였다. 해석에 사용된 모델의 물성치는 가장 중요한 부분인 플라스틱 제품의 물성치를 Table. 1의 물성치를 참조하여 Modulus가 가장 작은 3번 물성치를 선정하여 해석을 수행하였다.

Table. 1 Material properties of tensile strength

No.	Stress at Max. Load (Kg/cm^2)	Stress at Max. Load (%)	Modulus (Kg/cm^2)	Strain at User Break (%)	Stress at z-slp Yield (Kg/mm^2)	Strain at z-slp Yield (%)
1	1797	7.68	31,451	7.845	-	-
2	1676	7.82	23,111	8.221	1626	7.56
3	1824	8.16	27,209	8.566	1779	7.90
4	1807	8.18	24,030	8.516	-	-
5	1740	8.02	23,732	8.177	-	-
6	1813	8.46	23,978	8.649	1767	8.20
7	1798	8.08	26,617	8.487	1769	7.90
8	1825	8.62	23,819	8.866	-	-

해석 모델 및 실험(해석) 조건 : Fig. 6의 모델에 치구를 사용하여 Y-방향으로 Notch가 파단될 때까지 하중을 가하였고, Fig. 7과 치구를 사용하여 Z-방향으로 밴드경 끝부위에서 13.30mm되는 지점이 파단될 때 까지 하중을 가하였다.

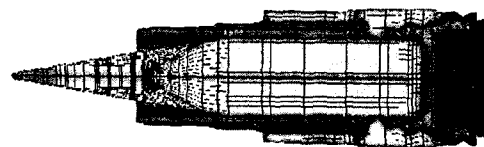


Fig. 5 Analysis finite element model of sabot



Fig. 6 Analysis condition [I]



Fig. 7 Analysis condition [II]

해석 내용 및 조건 : 탄두 마개의 해석 모델은 전체 해석 수행시간을 효율적으로 계산하기 위하여 1/4 대칭(Symmetric) 조건을 부여하여 모델링 하였다. 플라스틱 제품을 제외한 부품의 물성치는 강체(Rigid body)로 가정하여 해석하였고, 각 치구의 하중은 강체의 시간에 대한 강제변위 하중을 적용하여 해석하였다. 그리고, 해석결과로 보고자 했던 최대 하중결과는 플라스틱의 항복응력은 Table. 1의 최대하중에서의 응력을 참조하여 처음 시작되는 시점에서 치구와 플라스틱 제품 사이의 산출되는 하중값으로 나타내었다. 해석에 사용한 소프트웨어로는 유한요소모델링^[6]에 FEMB v.27, 그리고 구조해석 전문 소프트웨어인 LS-DYNA를 사용하여 해석하였다.

5. 금형 설계 및 사출 성형

5.1 금형 구조 및 제조 방법

복합재료의 기본 물성 연구의 결과를 통하여 금형설계에 필요한 성형 유동해석을 수행하여 최적의 유동흐름을 가지도록 복합 이중 사출용 금형을 개발 제작한다. 금형 설계 과정은 Fig. 8과 같은 설계 과정으로 진행된다.

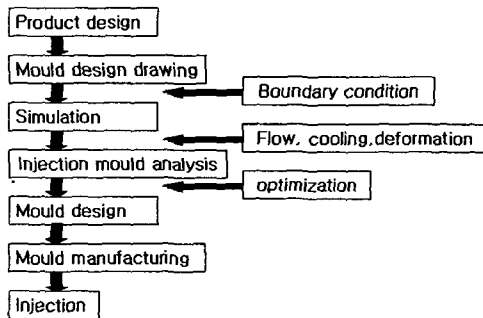


Fig. 8 Flowchart for mould design process

금형 설계의 결과는 사출 성형해석과 구조 해석의 결과를 반영하여 Fig. 9와 같은 조립도를 형성할 수 있다.

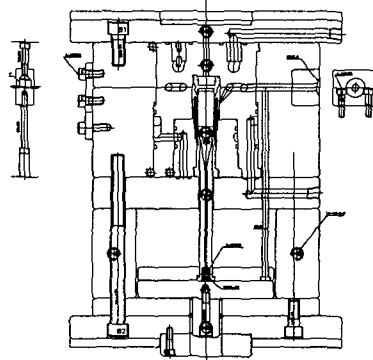


Fig. 9 Assembly of sabot injection molding

5.2 사출 성형 조건 설정

사출 조건은 사출 성형 해석과 제품 동심도 및 외관 품질을 고려하였다. 성형조건은 성형품에 요구되는 품질을 만족시키고 능률적인 생산을 목적으로 온도, 압력, 시간 등의 요인을 구체적으로 설정하였다. 성형조건으로는 용융수지 온도, 사출압력, 사출속도, 사출시간, 냉각시간 등이 있다. 사출성형장비는 동심도의 확보를 위하여 전용 설비를 제작하였다. 복합재료 성형상의 문제점 개선사항으로는 두께방향으로의 열전달차에 의한 열구배(thermal gradient), 불균일한 경화, 수지유동의 편재성 등을 고려하여 사출 조건을 산출하였으며 최적 조건은 외관, 성능, 동심도, 파단시험으로 판단하였다.

6. 결과

재료 시험 결과: 재료 시험 결과는 Table 2, 3과 같다.

Table. 2 Results of material property test

시험방법	LNP-PDX	단 위
인장강도	1830	Kgf/Cm ²
충격강도(아이조드)	7.88	Kgf.Cm/Cm ²
굴곡강도	2150	Kgf/Cm ²
비중	1.6416	-
신장률	1.55	%
굴곡탄성률	117800	Kgf/Cm ²

Table 3. 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
UL2400	0.618	0.307	0.2756	0.445	1.965	0.1108	3.606

또한, 열분석 시험은 Table. 4의 조건으로 시행하면 Fig. 10과 같은 결과를 얻을 수 있다.

Table. 4 Results of fracture toughness test

시험방법	LNP-PDX		비고
비중(23/23℃)	1.293	1.395	-
인장강도	1850	1720	Kgf/cm ²
신장율	1.7	1.3	%
회분	40.3	42.7	%
TGA	TGA-Chart참조		

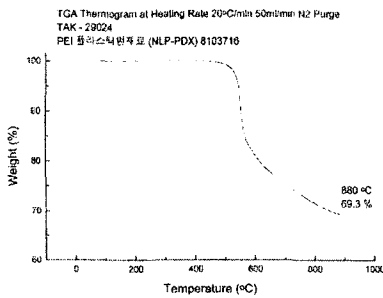


Fig. 10 Results of thermo gravimetric analysis

사출 성형 해석 결과 : 해석결과는 게이트의 위치 변화에 따른 수축 변형과 응력 상태를 해석하였다. Table. 5는 5가지 금형 설계안에 대한 제의 최종 변형/수축량각 경우에 대한 제품의 수축 변화를 보여주며, Fig. 11은 잔류응력 상태를 나타낸다.

Table 5. Results of deformation for injection simulation

	TG2	TG4	MG2	MG4	MD4
X축	0.1485 ~ -0.2003	0.1373 ~ -0.1751	0.1413 ~ -0.188	0.1389 ~ -0.1639	0.1438 ~ -0.1773
Y축	0.1117 ~ -0.106	0.1108 ~ -0.1083	0.111 ~ -0.1158	0.1147 ~ -0.1167	0.126 ~ -0.1554
Z축	0.1141 ~ -0.1044	0.1133 ~ -0.109	0.1129 ~ -0.1223	0.1159 ~ -0.1185	0.1165 ~ -0.1189
Total	0.2123 ~ 0.08409	0.1844 ~ 0.101	0.2333 ~ -0.0896	0.1959 ~ -0.0851	0.222 ~ 0.09554



(a) longitudinal direction (b) Radial direction
Fig. 11 Residual stress for case MG4
(Number of middle gate : 4)

구조해석 결과 : 해석조건 1의 결과는 Fig. 12와 같다.

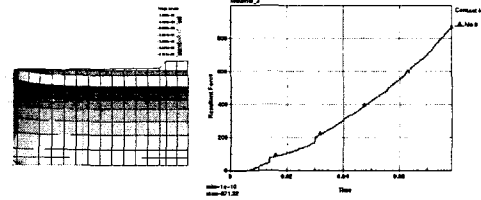


Fig. 12 Maximum stress of 1st test condition

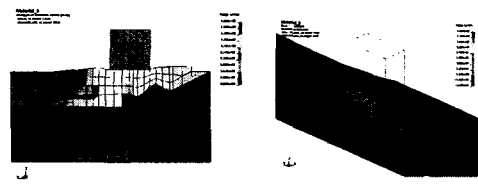


Fig. 13 Maximum stress of 2nd test condition

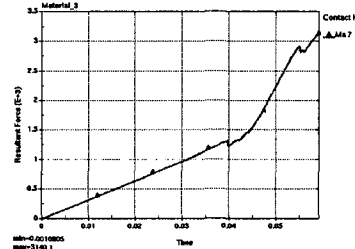


Fig. 14 Maximum force of 2nd test condition

위의 해석결과에서 판단된 최대 하중은 실제 플라스틱시편에서 실험된 물성치의 양상으로 탄성영역과 소성영역이 분명하게 구별되는 매우 Brittle한 물성치 임을 감안할 때 각 물성치 도표에서 제시된 Break Strain(%)값보다는 최대하중이 걸리는 Yield Stress값을 기준으로 판단하는 것이 더 정확하다. 또한, 해석 조건(1)을 수행한 결과는 Fig. 12와 같이 치구와 플라스틱사이의 최대 하중은 실제 실험에서의 최대하중이 일어나는 위치와 동일하게 나타난다는 것을 알 수 있으며, 노치부의 최초 파단^[7] 양상은 Yield Stress가 걸리는 맨 앞단 부위가 거의 근사한 수치를 나타내고 있어 동일한 하중이 면적대비로 발생할 경우 노치부로 응력집중이 발생 또는 이동되어 파단이 일어날 것임을 판단할 수 있다. 해석조건(2)를 수행한 결과는 Fig. 13, 14와 같이 치구와 플라스틱 사이의 최대 하중의 위치는 탄체와 결합되는 플라스틱 내부에서 먼저 파단이 일어남을

알 수 있다.

사출 조건 결과 :사출 조건은 성형해석의 결과와 경험적 지표를 바탕으로 Table. 6과 같이 설정 결과를 얻을 수 있다.

Table. 6 Results of injection condition for sabot

종 명	SABOT(관통자)	CAVITY	1	
재 료 명	PEI(LNP-PDX)	GATE 방식	터널식	
성 형 기	85TON 다테성형기			
성 형 조 건				
성형작업	작 업 조 건	테 이 터	비 고	
원 재 료 조 건	GRADE	PDX-E-98480-PE		
	건조 온도	150		
	건조 시간	4~5HR		
온 도 조 건	NOZZLE	300		
	HEATER .1	335		
	HEATER .2	330		
	HEATER .3	300		
성 형 조 건	계 량	50		
	SCREW 위치	35		
	SCREW 위치	20		
	SCREW 위치	12		
	형	사출 속도 .1	85	%
		사출 속도 .2	80	%
		사출 속도 .3	75	%
	조	사출 압력 .1	140	
		사출 압력 .2	130	
		사출 압력 .3	125	
		보 압 .1	40	
		보 압 .2	25	
보 압 .3		15		
건	보압 속도	35,20,15		
	관 량	11		
	SCREW 속도	40		
	배 압	0		
	사출 시간	2		
시 설 정	보압 시간	8		
	보압 시간	2.0.5		
	냉각 시간	40		
	CYCLE TIME	78		

금형 및 동심도 결과 :금형의 코아의 형상 가공 결과와 제품의 동심도 결과를 각각 나타낸 것이 Fig. 15와 Fig. 16이다.

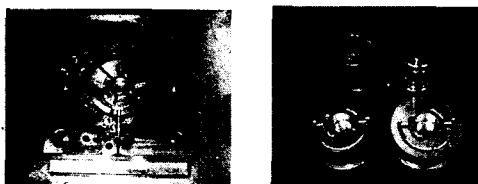


Fig. 15 Mould plate and core for sabot

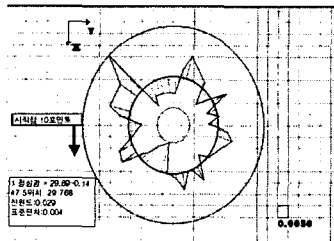


Fig. 16 Eccentricity of sabot

Fig. 16에서와 같이 제품의 진원도는 $\pm 0.015\text{mm}$ 이내가 설계 범위이며 이때 완제품의 진원도는 0.029mm 를 얻었다. 결과적으로 Fig. 17과 같은 구성품들을 사출성형으로 개발 완료하였다.

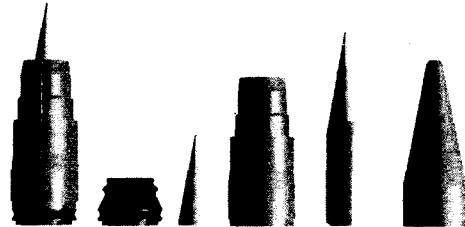


Fig. 17 Parts of sabot by injection moulding

7. 결론

본연구를 통해서 고분자 수지의 기계적 특성과 열적 특성을 분석하였다. 또한, 사출 성형 조건을 설정하기 위한 사출 성형 해석을 수행하였고, 금형 가공 형상을 제품 특성에 맞게 설계 하였다. 따라서, 복합 사출을 통한 탄자운반체의 국산화 개발에 성공하였다.

향후 구경이 다른 여러 종류의 탄자 운반체를 사출 성형에 의한 경량화 및 국산화 개발의 기초 기술을 확보 하였고 금형 설계 및 사출 성형 기반 기술의 틀을 마련하였다.

참고문헌

- [1] 유중학, 변성광, "사출금형설계", 동명사, 2000 .
- [2] 신남호, 1993, 2000, "플라스틱 금형설계·제도", 한국산업정보센터.
- [3] Vishu Shah, 1998, Handbook of Plastic Testing Technology, 2nd ed, John wiely & Sons, canada, pp 67~69.
- [4] Pye, R. G. W., 1983, "Injection Mould Design" pp. 135~254.
- [5] T. L. Anderson, 1995, "Fracture Mechanics" 2nd ed, pp. 365~381.
- [6] Daryl L. Longan., 1993, A First course in the finite element method, pp. 418~508.
- [7] Gotoh, M., 1985, "A Simple plastic constitutive equation with vertex effect", Engng. Fracture Mech., 21-4, pp. 673~684.