

박형 도광판의 고속사출성형을 위한 수지 점도 측정 및 수치해석

정태성[#] · 김종선¹ · 하석재² · 조명우²

Measurement of Viscosity and Numerical Analysis of High Speed Injection Molding for Thin-Walled LGP

T. S. Jung, J. S. Kim, S. J. Ha, M. W. Cho

(Received January 8, 2014 / Revised January 14, 2014 / Accepted January 20, 2014)

Abstract

The light guide plate has become the major component for the backlight module in general information technology products (e.g. mobile phones, monitors, etc.). High speed injection molding has been adopted for thin walled LGP giving advantages such as weight, shape, size, and reduction in production costs. In the current study, the rheological characteristics of high liquidity plastic resin PC(HL8000) were measured using a capillary rheometer to improve the reliability of the numerical analysis for high speed injection molding. With the measured viscosity and PVT of PC(HL8000), numerical analysis of injection molding was conducted using the simulation software(Moldflow). Filling time and deflection were predicted and compared with those of traditional PC resins(H3000, H4000). The results show that PC(HL8000) has significantly different rheological characteristics during high speed injection molding. Hence proper properties of the resin should be used to improve the accuracy of numerical predictions.

Key Words : Light Guide Plate, High Speed Injection Molding, Thin-wall, Viscosity, Numerical Analysis, Rheometer

1. 서론

도광판(Light Guide Plate)은 자체 발광능력이 없는 TFT-LCD의 광원 역할을 하는 BLU(Back Light Unit)의 핵심부품으로서 최근 휴대폰, 모니터, TV 등 관련 IT 제품의 발달로 인해 대면적화, 박육화 되어가는 추세이다[1].

도광판은 주로 투명 플라스틱 소재를 사용하여 사출성형을 통해 제작되고 있는데, 현재 도광판의 두께는 0.30mm 정도로 얇아지고 있으며, 휴대폰용 배터리 케이스의 경우는 0.25mm의 두께까지 얇아지고 있다[2]. 이러한 플라스틱 제품의 박육화에 대응하

기 위하여 냉각에 의해 수지의 유동두께가 감소되기 전에 수지를 빠른 속도로 금형 내에 사출하여 충전을 완료하는 고속 사출성형 공정을 적용하고 있다.

고속 사출성형 공정을 위한 생산 장비 및 성형공정에 관한 많은 연구가 진행되었으며, 국내에서는 고응답/고정밀도 성형이 가능하면서 유압 사출성형 시스템 대비 약 70% 에너지 저감 및 친환경 청정생산을 구현하기 위하여 전동식 고속사출성형 시스템이 개발되고 있다. 초박판 제품의 최적 금형 제작 및 품질 확보를 위한 공정 조건 도출을 위해 사출성형 해석을 도입하고 있으며, 성형해석의 신뢰성 향상에 대한 연구도 진행되고 있다[3~6].

1. ㈜유테크

2. 인하대학교 기계공학과

Corresponding Author : Department of Mechanical Design Inha Technical College, E-mail: tsjung@inhatic.kr

한편, 플라스틱 제품의 목적에 따라서 사출성형의 적용수지는 새롭게 조성되고 같은 계열의 수지에도 수많은 종류가 사용되고 있는데, 최근 플라스틱 제품의 고품질화, 경박화 요구가 강해지면서 다양한 고강성, 고유동성 수지가 개발되어 적용되고 있다.

사출성형 해석에 있어서 수지 물성 데이터의 정확성은 해석 신뢰성을 증대시키기 위한 주요 인자이며, 실제 제품에 사용되는 수지와 성형해석에 적용한 소재의 유동특성이 상이한 경우 해석결과에 대한 신뢰성은 크게 떨어지고 해석을 이용한 공정 예측이 불가능해진다.

본 연구에서는 5인치 박형 도광관 성형을 위해 최근 많이 사용되는 고유동성 수지의 유동 특성을 모세관 유동계를 사용하여 분석하고, 사출성형 해석과 실제 사출성형을 통해 기존에 사용되던 수지와 비교하였다.

2. 도광관 성형용 수지의 특성 분석

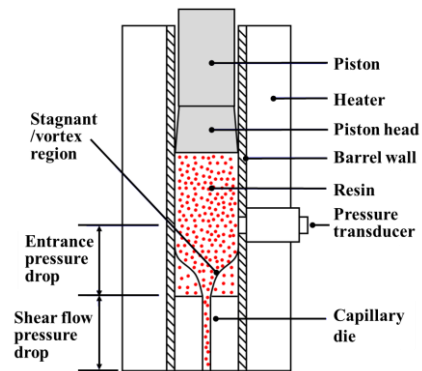
근래 도광관은 투명하고 열적 기계적 특성이 우수하여 다양한 광학 제품에 응용되고 있는 범용 엔지니어링 플라스틱 재료인 폴리카보네이트(PC)를 주로 사용하는데, 본 연구는 근래 다수의 제품에서 적용되고 있는 일본 Mitsubishi사의 PC(HL-8000)를 대상으로 하였으며, 모세관 유동계를 이용하여 유변학적 특성을 분석하고, 성형해석을 위한 수지의 물성데이터를 측정하였다.

전단 속도 가변 점도계인 유동계(rheometer)는 재료에 유동과 변형을 가하여 물리적인 방법으로 점탄성(viscoelastic)특성을 분석하는 기기로서 유동계의 종류로는 모세관 유동계(capillary rheometer), 원추(cone)-원판(plate) 유동계 방식 등이 있는데, 이러한 측정기기로부터 측정 및 분석이 가능한 물성 값들은 유변학에서 정하는 동점성 계수(dynamic viscosity), 전단점도(shear viscosity), 탄성 계수(elastic modulus), 저장 탄성률(storage modulus), 손실 탄성률(loss modulus) 등이 있다[7, 8].

유동계의 종류 중 원추-원판 유동계는 원추와 원판 사이에 유체를 채운 다음 원추 또는 원판을 회전시키며 생기는 토크를 측정하여 유변물성을 구하는 장치로서 주로 10이하의 낮은 전단율 점도를 측정하는데 주로 사용한다. 모세관 유동계는 압력 차에



(a) Photograph of capillary rheometer



(b) Schematic drawing

Fig. 1 Capillary rheometer (SR50)

Table 1 Specification of capillary rheometer(SR50)

Maximum force range	50kN / 11250 lbf
Piston speed	0.0024-1200
Barrel type	Single / Twin Bore
Barrel working length	290 mm
Temperature range	50 – 450℃
Temperature accuracy	± 0.2
Force transducers	1-50 kN
Pressure transducers	3.5-200 MPa

의한 전단유동으로부터 물질함수를 구하는 유동계로서 높은 전단율 10² 이상을 측정하는데 주로 사용되는데, Hagen-Poiseuille's law에 기초하여 일정 압력에 의해 모세관에 내부 저항을 가지고 흐를 때 그 속도는 액체 내의 마찰계수에 반비례하므로, 이 마찰계수를 점도(viscosity)라고 하고, 모세관을 통해 액체를 밀어내어 유출 액량과 압력의 관계로 점성을 측정하는 원리이다.

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 미국 Instron사의 모세관 유동계(capillary rheometer, SR50)를 나타낸다.

모세관 유동계는 열가소성 플라스틱과 복합재료를 ASTM 및 ISO 표준에 따라 측정할 수 있고, 사출 (injection molding), 압출 (extrusion molding), 블로잉 (blow molding), 필름 블로잉 (film blowing)과 같은 프로세스를 시뮬레이션 하면서 용융 강도, 열전도율, 출구 팽창 (die swell) 및 pvT 거동 등과 같은 필수 물성을 측정할 수 있다. 모세관 유동계의 주요 사양은 Table 1과 같다.

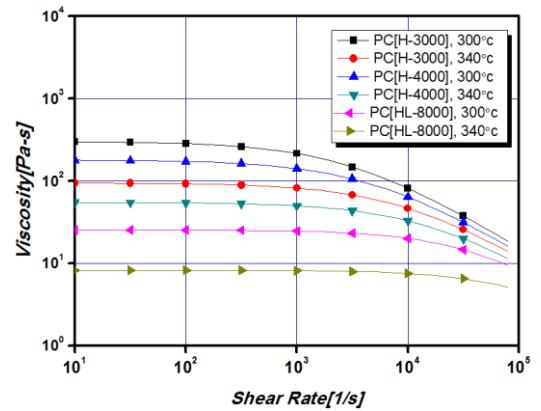
다음의 측정 방법으로 PC(HL-8000)수지의 점도를 측정하였다.

모세관 유동계의 베럴(barrel)을 일반적인 PC의 성형온도를 기준으로 측정온도에 따라 일정 시간 동안 예열(preheating)한 후 속도나 힘을 조정하며 가압(compacting)하여 일정한 전단률(shear rate)과 전단 응력(shear stress)을 측정하였다. 본 연구에서는 260℃부터 360℃까지 20℃간격으로 측정 온도를 정하였으며, 측정된 전단률 및 응력(stress)을 이용하여 식(1)에 나타난 점도 근사식(fitting equation)을 구하였다.

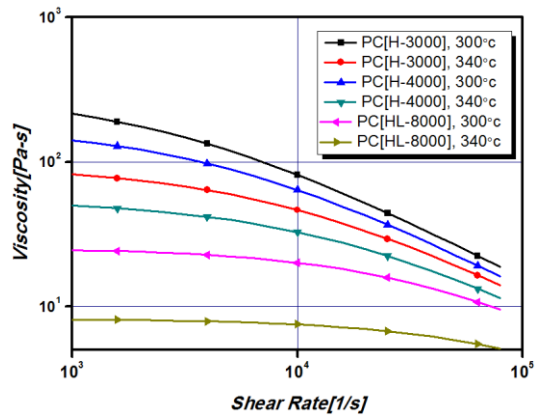
$$\eta(\alpha, T, \dot{\gamma}) = \frac{\eta_0(T)}{1 + \left(\frac{\eta_0(T)\dot{\gamma}}{\tau^*} \right)^{1-\alpha}} \left(\frac{\alpha}{\alpha - \alpha} \right)^{(C_1 + C_2\alpha)} \quad (1)$$

여기서, η , $\dot{\gamma}$, T 는 점도(viscosity), 전단률(shear rate), 온도를 각각 의미하며, $\eta_0(T) = B \exp(T_b/T)$ 이며, 다른 값들은 점도 근사식을 위한 상수이다.

Fig. 2(a)는 전단률(10~10,000)에서의 성형온도 300℃와 340℃에서 측정된 PC(HL-8000)와 Autodesk사의 성형해석 소프트웨어인 Moldflow Insight에서 물성 데이터를 제공하고 있는 동일 회사의 일반적인 PC 수지 PC(H-4000)과 PC(H-3000)의 점도를 비교한 그래프를 나타낸다. Fig. 2(b)는 사출성형 구간에서의 전단률(1,000~100,000)에 따른 점도를 나타낸다. 3가지 수지 모두 온도 증가에 따라 점도가 민감하게 감소였으며, 기존 PC(H-3000/4000) 수지가 고유동성 수지인 PC(HL-8000) 보다 전단률 증가에 따른 점도 감소율은 컸지만 모든 영역에서 점도값 자체는 높다. 성형수지의 점도에 대한 정보는 재료의 제조사에서 제공하는 MI(melt index)로 판단할 수 있지만, MI는 주로 낮은 전단율 100이하에서 측정이



(a) Shear rate(10~100,000)



(b) Shear rate(1,000~100,000)

Fig. 2 Comparison of viscosity according to polymers (PC;HL-8000, H-4000, H-3000)

이루어진다. 본 논문에서 사용한 PC 수지의 MI값은 측정온도 300℃, 하중은 1.2kg에서 PC(H-3000)는 30g/10min, PC(H-4000)는 63g/10min, PC(HL-8000)는 140g/10min이다. MI가 가장 큰 PC(HL-8000)수지의 흐름성이 좋다는 것을 알 수 있으며, 점도 측정결과에서도 도광관 성형용 PC(HL-8000)수지는 일반적인 PC(H-3000/H-4000)보다 동일 전단률 및 온도에서 점도가 낮은 것을 측정을 통해 확인할 수 있었다. PC(H-3000)의 MI값은 PC(H-4000)와 약 2배정도 차이를 보이며, 점도 그래프를 비교한 결과 동일 전단율에서 점도가 MI값과 비슷하게 약 50% 정도 차이를 보였다. Table 2는 각 수지의 MI값과 점도를 나타낸다.

Fig. 3은 일반적인 PC(H-3000/4000)수지와 고유동성 PC(HL-8000)수지에 대한 온도와 압력 변화에 따른 부피변화를 나타낸다. pvT 특성을 나타내는 일반

Table 2 Viscosities according to polymers

Shear rate [1/s]	H-3000		H-4000		HL-8000	
	300 °C	340 °C	300 °C	340 °C	300 °C	340 °C
10 ⁰	300.0	94.4	179.1	54.8	25.4	8.23
10 ¹	297.8	94.1	178.2	54.6	25.3	8.23
10 ²	283.7	92.3	172.4	54	25.2	8.22
10 ³	214.9	81.9	141.4	49.8	24.5	8.13
10 ⁴	81.3	46.5	63.8	32.7	20.1	7.51
Melt Index	30 g/10min		63g/10min		140g/min	
	300 °C / 1.2 kg					

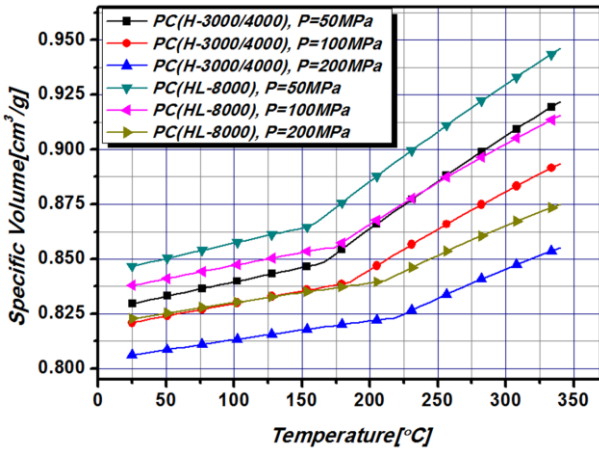


Fig. 3 Comparison of pvT data according to polymers (PC;HL-8000, H-4000, H-3000)

적인 Tait 방정식에서 액상의 비체적을 나타내는 $b_{1,m}$ 은 PC(HL-8000)가 8.75×10^{-4} , 기존 수지는 8.58×10^{-4} 로 나타나 비체적이 증가하여 밀도가 낮은 것을 알 수 있고, 온도에 따른 체적 변화율을 나타내는 $b_{2,m}$ 은 5.46×10^{-7} 로 기존 수지와 동일하였다. Moldflow에서 제공하는 PC(HL-3000)과 PC(HL-4000)의 pvT값은 동일하다.

3. 실험장치 및 성형해석

3.1 사출성형해석을 위한 모델링

본 논문에서는 5인치 박형 도광판을 제작하기 위하여 앞서 측정된 PC(HL-8000)의 물성과 일반적인 PC(H-3000/H-4000)를 적용하여 전산성형해석 수행함으로써 각 수지의 성형특성을 분석하였다. 시뮬레이션 도구는 Autodesk Moldflow Insight 2012을 사용하

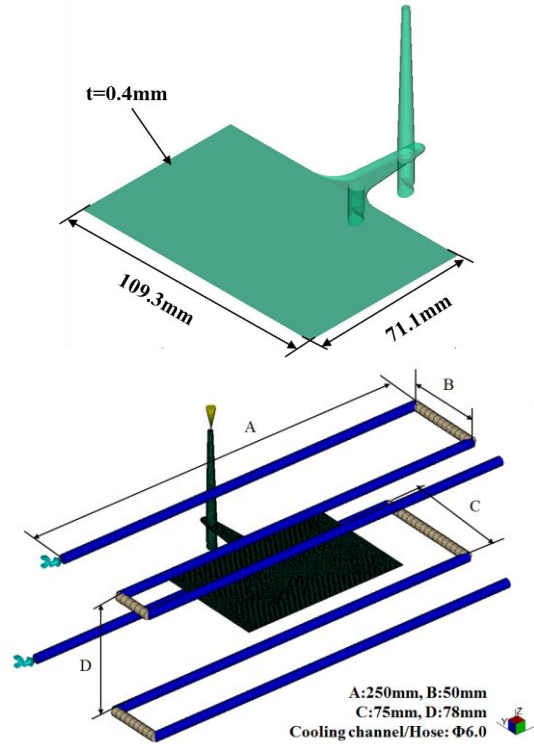


Fig. 4 View of 3D model and mesh result for injection molding analysis

였으며, 사출속도(injection speed)에 따른 각 수지의 충전 시간을 비교하였고, 충전, 보압, 냉각과정의 해석을 통해 PC 수지에 따른 제품의 변형량을 예측하였다.

Fig. 4는 성형해석을 위한 유한요소와 냉각시스템의 모델링을 나타낸다. 성형품은 가로 109.3mm, 세로 71.1mm, 두께 0.40mm의 크기를 갖는 박판 형태의 5인치 도광판으로 성형을 위하여 가로 30.35mm인 팬 게이트(fan gate)가 적용되었다. 도광판이 평판 구조의 형상을 지니는 점을 고려하여 45,412개의 노드(node)를 가지는 dual-domain 메쉬(mesh)를 사용하였으며, 일치도(match percent)는 97.5%를 나타내었다.

3.2 도광판 사출 성형 조건

실제 도광판 사출성형과 동일한 공정 조건을 성형해석에 적용하였으며, Table 3은 주요 공정 조건을 보여준다. 실험에 사용된 고속 사출 성형기는 일본 Sumitomo사에서 제작된 SE130DUZ-HP의 전동식 사출 성형기로서 주요 제원은 Table 4에 나타내었다.

Table 3 Injection molding conditions

Injection temp.		340 °C
Mold temp.		90 °C
Cooling temp.		80 °C
Cooling time		8sec
V-P crossover position		6mm
Ram Position		Injection Speed
Posirion0	29.5mm	95mm/s
Posirion1	26mm	660mm/s
Posirion2	20mm	720mm/s
Posirion3	15mm	210mm/s
Posirion4	10mm	85mm/s
Posirion4	6mm	-
Packing pressure		Duration
Packing pressure1	400Mpa	0.5s
Packing pressure2	450Mpa	0.5s
Packing pressure3	400Mpa	3.5s

Table 4 Specification of injection molding machine

Maximum machine injection stroke	114 mm
Maximum machine injection rate	491 cm ³ /s
Machine screw diameter	25 mm
Maximum machine injection pressure	392 MPa
Maximum injection speed	1,000 mm/s
Maximum machine clamp force	130 ton

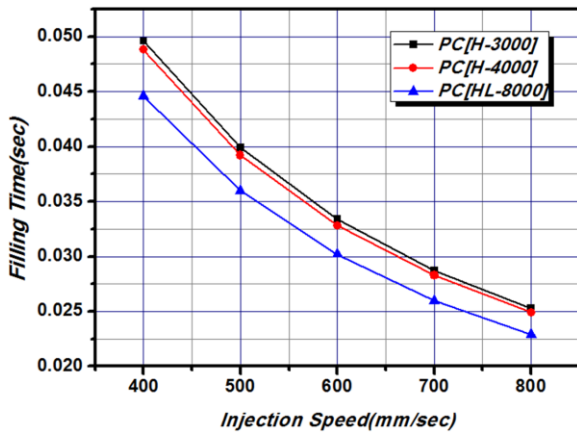


Fig. 5 Predicted fill time according to injection speed

4. 성형해석 및 실험결과

Fig. 5는 단일 사출 속도로 충전 하였을 때 사출 속도(injection speed) 변화에 따른 충전 시간(fill time)의 변화를 그래프로 나타낸 것이다. 해석 결과 측정

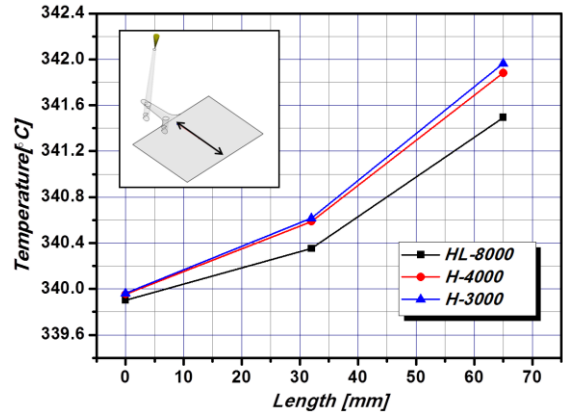


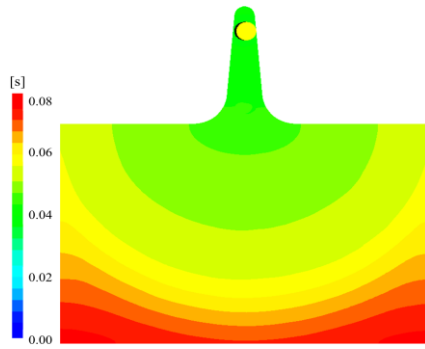
Fig. 6 Predicted temperature at flow front with various viscosities(PC; H-3000, H-4000, HL-8000, Injection speed: 600mm/sec)

된 PC(HL-8000)가 기존 수지 보다 점도가 낮아 유동성이 증가되어 기존 수지의 충전 시간 보다 약 10.7% 정도 감소를 확인할 수 있었다. 또한 PC(H-3000)과 PC(H-4000)의 사출속도에 따른 충전 시간은 PC(H-4000)수지가 약 1.6%정도 작은 것으로 나타났다. 각 수지에 대한 최대 사출압은 PC(HL-8000)이 약 159.2MPa 이며, PC(H-3000)과 PC(H-4000)은 각각 약 273.1MPa, 약 330.8MPa 작용하는 것을 확인할 수 있었다.

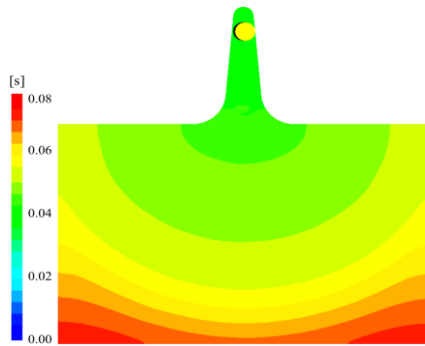
각각의 수지는 점도 비교에서는 약 50%정도 차이를 보였지만 실제 성형에서는 고점도 수지의 경우 Fig. 6에서 보이는 바와 같이 마찰에 의한 전단열과 압력이 증가하여 수지의 점도가 낮아지는 효과가 생기므로 각 수지 별 충전 시간의 차이는 수지의 점도 차이보다 작았다.

Fig. 7은 Table 3의 실제 성형 조건 및 다단 사출속도를 적용하여 PC(H-3000), PC(H-4000) 및 PC(HL-8000)에 따른 충전 패턴을 예측한 결과를 나타낸다. 성형해석 결과 각 수지의 충전 시간은 PC(H-3000)이 0.0772sec, PC(H-4000)이 0.0743sec, PC(HL-8000)은 0.0655sec 로 예측되었으며, 기존 PC(H-3000/H-4000)은 제품 중앙 끝단 부분에서 유동 정체 현상이 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 반면 PC(HL-8000)은 정체현상이 발생하지 않았다.

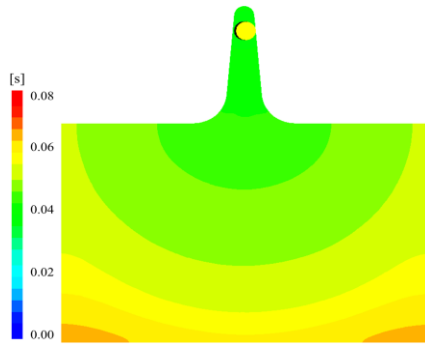
Fig. 8은 본 연구에서의 PC(HL-8000)수지를 적용하여 제품을 성형한 것을 보여주며, 실제 성형에서도 성형 해석과 같은 충전 패턴을 확인할 수 있다.



(a) PC(H-3000)



(b) PC(H-4000)



(c) PC(HL-8000)

Fig. 7 Predicted the filling pattern with various polymer viscosities (PC; H-3000,H-4000, HL-8000)

Fig. 9는 각각의 수지에 대하여 도광관 제품의 전체 변형량을 나타낸다. 도광관 제품의 변형 형태는 제품 말단부분에서 최대 변형이 발생한 것을 확인할 수 있으며, 각 수지에 대해 변형량은 PC(H-3000)과 PC(H-4000)이 약 0.61mm, 약 0.60mm이며, PC(HL-8000)이 약 0.46mm로 예측되었고, 수지의 불균일 수축이 주요 원인으로 분석되었다.

Fig.10은 충전완료 시점에서 캐비티 내의 온도분

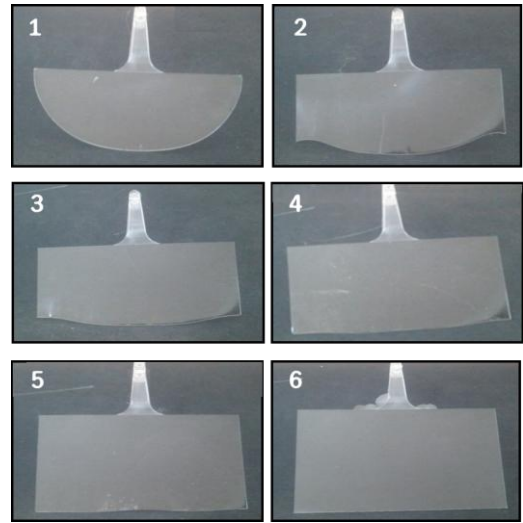
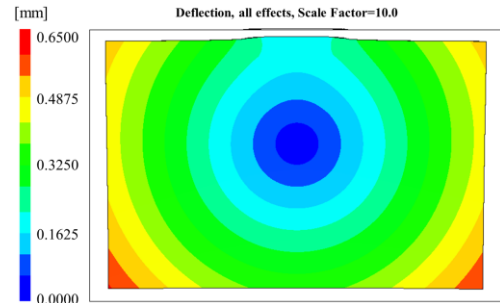
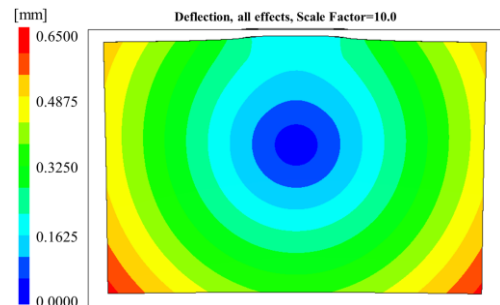


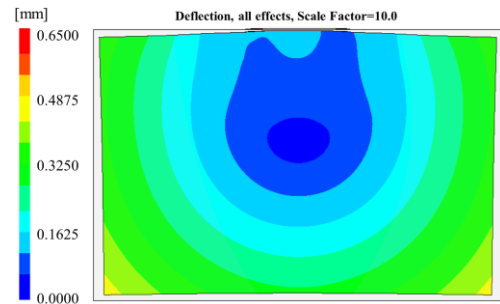
Fig. 8 The result of experiment using PC(HL-8000)



(a) PC(H-3000)

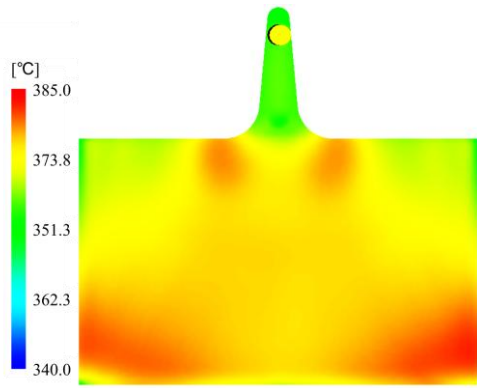


(b) PC(H-4000)

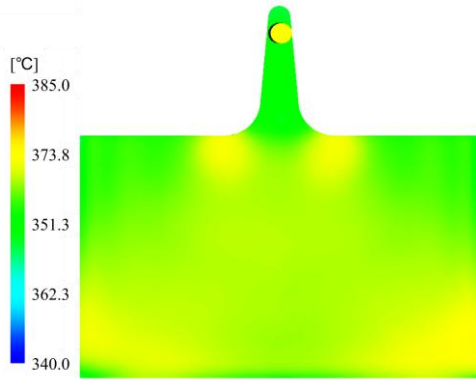


(c) PC(HL-8000)

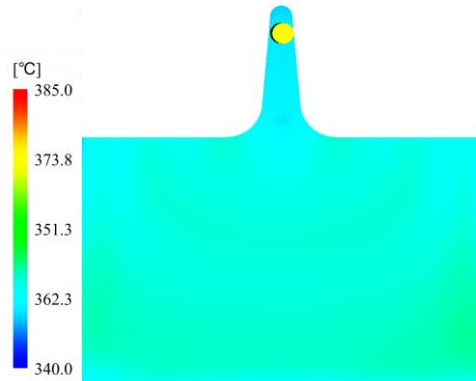
Fig. 9 Predicted total deflection with various viscosities (PC; H-3000, H-4000, HL-8000)



(a) PC(H-3000)



(b) PC(H-4000)



(c) PC(HL-8000)

Fig.10 Predicted of bulk temperature at end of fill with various viscosities (PC; H-3000, H-4000, HL-8000)

포를 보여주는데 각 수지에 대한 도광관 제품의 평균온도는 PC(H-3000)와 PC(H-4000)수지는 약 369.7℃, 약 364.8℃이며, PC(HL-8000)는 약 350.1℃로 예측되었다. 또한, Fig. 11은 수지의 종류에 따라 게이트와 인접한 부분과 제품 끝단에 작용하는 압력의 예측결과를 나타낸다. 게이트 부근과 제품 끝 단의 압력 차는 점도가 낮은 PC(HL-8000)이 약 41.74MPa, PC(H-

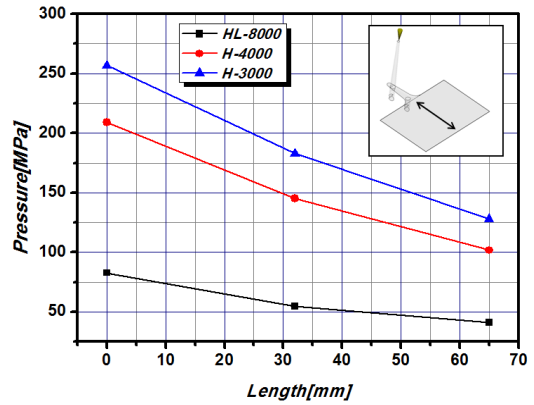


Fig. 11 Predicted of pressure at end of fill with various viscosities (PC; H-3000, H-4000, HL-8000)

4000)은 약 107.4MPa, PC(H-3000)은 약 128.7MPa 로 예측되었다. 따라서 고유동성 수지인 PC(HL-8000)은 기존 수지보다 충전 공정 후에 발생하는 압력 편차의 감소 및 온도 분포가 균일하여 수축에 의한 변형이 감소한 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 5 인치 0.4mm 두께를 가진 박형 도광관 성형을 위해 근래 다수의 박육 제품에서 적용되고 있는 고유동성 수지인 PC(HL-8000)를 대상으로 모세관 유동계를 이용하여 성형해석을 위한 점도 데이터 및 pvT 데이터를 측정하였다.

또한, 기존에 사용되던 일반적인 수지인 PC(H-3000/H-4000)와의 충전 패턴 비교 및 변형해석을 수행하였다.

최근 개발된 고유동성 PC 수지는 기존 수지와 비교하여 우수한 점도 특성을 갖는 것을 확인하였고, 비교 분석된 각각의 수지는 점도 비교에서는 약 50%정도 차이를 보였지만 실제 성형에서는 고점도의 수지의 경우 마찰에 의한 전단열로 인해 수지의 점도가 낮아지는 효과가 생기므로 충전 속도에 따른 충전 시간의 차이는 수지의 점도 차이보다 작았다. 한편, 고유동성 PC 수지는 제품 성형 시 내부의 온도가 낮고, 압력편차가 기존 수지보다 적어 취출시 부피 수축량 감소되고, 변형량도 감소할 것으로 예측 되었다.

본 연구에서 측정된 수지의 유변학적 물성 자료는 다양한 제품의 성형성 예측에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단되며, 향후 성형해석 결과와 실제

제품의 변형 비교 검증, 고속 사출 성형 조건 최적화를 위한 추가적인 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 산업원천기술개발 ‘다층구조 제품생산을 위한 다색다종 1,200mm/s 급 초고속 전동 사출성형시스템 개발’ 과제 연구비 지원으로 수행되었습니다(Project No. 10040061).

REFERENCES

- [1] M. C. Song, Z. Liu, M. J. Wang, T. M. Yu, D. Y. Zhao, 2007, Research on Effects of Injection Process Parameters on the Molding Process for Ultra-thin Wall Plastic Parts, *J. Mater. Process. Tech.*, Vol. 187, pp. 668~671.
- [2] J. Aho, S. Syrjala, 2012, Shear Viscosity Measurements of Polymer Melts using Injection Molding Machine with Adjustable Slit Die, *Polym. Test.*, Vol. 30, No. 6, pp. 595~601.
- [3] M. H. Tsai, K. L. Ou, C. F. Huang, H. C. Cheng, Y. K. Shen, C. Y. Chang, C. H. Wu, J. H. Chen, P. Guan, 2008, Study on Micro-injection Molding of Light Guiding Plate by Numerical Simulation, *Int. Commun. Heat Mass*, Vol. 35, No. 9, pp. 1097~1100.
- [4] Y. K. Shen, W. Y. Wu, S. Y. Yang, H. M. Jian, C-C. A. Chen, 2004, Study on Numerical Simulation and Experiment of Light Guide Plate in Injection Molding, *J. Reinf. Plast. Comp.*, Vol. 23, No. 11, pp. 1187~1206.
- [5] C. Feng, J. Kuo, T. L. Su, 2007, Optimization of Injection Molding Processing Parameters for LCD Light Guide Plates, *J. Mater. Eng. Perform.*, Vol. 16, No. 5, pp. 539~548.
- [6] C. J. Hwang, J. S. Kim, J. G. Oh, C. Jeong, H. J. An, Y. M. Heo, J. D. Kim, K. H. Yoon, 2008, Molding Stability of Hydro-mechanical High Speed Injection Molding for Thin-wall(0.3mm) LGP, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 17, No. 8, pp. 657~661.
- [7] J. L. White, 1990, *Principles of Polymer Engineering Rheology*, John Wiley & Sons, New York, p. 272.
- [8] Z. Tadmor, C. G. Gogos, 1979, *Principle of Polymer Processing*, John Wiley & Sons, New York, pp. 889~895.