

## 초박형 도광판의 고속 사출성형에서 충전 불균형에 대한 연구

정태성<sup>†</sup> · 장진혁\* · 김종선\*\*

인하공업전문대학 기계설계과, \*주 코웨이, \*\*한국생산기술연구원  
(2016년 5월 30일 접수, 2016년 7월 4일 수정, 2016년 8월 1일 채택)

### A Study on the Filling Pattern Imbalance in High Speed Injection Molding Process for Thin Light Guide Plate

Tae-Sung Jung<sup>†</sup>, Jin-Hyeok Jang\*, and Jong-Sun Kim\*\*

Dept. of Mechanical Design, Inha Technical College, 100 Inha-ro, Nam-gu, Incheon 22212, Korea

\*Cowan Co., Ltd., Coway R&D Center, Seoul National University Research Park,

1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826, Korea

\*\*Korea Institute of Industrial Technology, #301-303 Bucheon Techno-Park, Ssangyoung3Cha,

397 Seokcheon-ro, Ojeong-gu, Bucheon city, Kyunggi-Do 14449, Korea

(Received May 30, 2016; Revised July 4, 2016; Accepted August 1, 2016)

**초록:** 본 연구에서는 성형해석과 실험을 통하여 초박형 도광판 사출성형에서의 충전 불균형 현상에 대하여 고찰하였다. 8인치, 0.6 mm 초박형 도광판에 대하여 유동계로 측정된 수지의 점도를 이용해 성형 해석을 수행하였다. 해석결과 사출된 수지가 제품부로 유입되기 전 단열가열, 전단가열에 의해 온도가 다른 내외부 영역으로 분리되며, 온도가 높은 외부 수지층은 제품 측면부로 흘러 들어가고, 상대적으로 온도가 낮은 내부 수지층은 제품 중앙부로 유입되면서 점도 차이로 인한 유동저항 차이를 발생시키는 것으로 분석되었다. 수지 온도, 사출 속도 등 실험 조건에 따라 미성형 실험 성형품의 충전 패턴을 해석 결과와 비교하였으며, 사출 속도와 사출 온도가 클수록 측면이 먼저 충전되는 경향이 커지는 결과를 얻었다.

**Abstract:** In this study the filling pattern imbalance was investigated in the injection molding of thin light guide plate by the injection molding simulation and experiments. Injection molding simulation was conducted for thin 8 inch light guide plate (LGP) with 0.6 mm thickness using measured rheological characteristics of resin PC. It is observed that injected resin is heated by adiabatic heating and shear heating and divided into inner layer and outer layer with different temperature. Outer layer resin with high temperature flows into the side section of the cavity, and inner layer resin with relatively low temperature flows into the center section. Thermally separated flows are expected to cause the filling pattern imbalance with a difference in viscosity and flow resistance. Filling patterns of short-shot experiment results for injection speed and temperature were compared with the simulation results. Filling pattern imbalance showed a tendency to increase for higher injection speed and injection temperature.

**Keywords:** high speed injection molding, thin-wall, filling pattern imbalance, shear heating, viscosity.

## 서 론

사출성형 공정은 고분자 성형공정 중 생산성과 성형 정밀도가 높기 때문에 플라스틱 제품의 생산에서 가장 많이 사용되고 있다.<sup>1</sup> 휴대폰, 모니터, TV 등 디스플레이 기능을 가진 다양한 제품에 적용되는 도광판(LGP, light guide plate) 또한

투명 플라스틱 소재를 사출성형하여 제작되고 있다.

최근 IT 제품의 급격한 대면적화, 박육화 추세로 인해 소형 도광판은 0.30 mm, 휴대폰용 배터리 케이스의 경우는 0.25 mm 두께까지 얇아지고 있다.<sup>2</sup> 이러한 플라스틱 제품의 박육화에 대응하기 위하여 수지를 냉각속도보다 빠르게 금형 내에 밀어 넣어 충전을 완료하는 고속 사출성형 공정을 적용하고 있다. 고속 사출성형 공정을 위한 성형장비 및 성형공정에 관한 많은 연구가 있었으며, 사출성형 해석을 이용하여 초박형 제품의 금형 설계, 성형 품질 확보를 위한 최적 공정 조건에 대한 연구도 진행되고 있다.<sup>2-8</sup>

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.

E-mail: tsjung@inhac.ac.kr

©2017 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

도광판과 같은 평판형 제품의 성형에서 균일한 수지의 유동과 충전패턴은 웰드라인(weld line), 기포(air trap), 흐름 자국(flow mark) 등 유동 불균형으로 인해 생기는 불량 방지와 투명 제품의 광학적 성능 향상을 위해 중요하다. 많은 연구에서 사출성형 공정 중 런너에서 전단열 발생 및 이로 인한 용융수지의 점도 저하에 대한 고찰이 이루어졌으며, 주로 다수 캐비티 금형에서 전산 성형 해석과 실험을 통해 런너의 기하학적 형상과 성형 수지, 사출조건의 변화시킴으로써 충전 불균형을 개선하고자 하였다.

한편, 최근 도광판이 대면적화, 초박화, 고품질화 됨에 따라 일반적으로 안정적 성형이 가능한 단일 캐비티 금형을 사용하게 되었고 저점도 광학용 수지의 개발로 제품 품질에 영향을 미칠 정도의 충전 불균형은 발생되지 않았다. 또한 전산 성형 해석기술의 발달로 평판형 제품의 성형에서 충전의 예측은 신뢰성이 매우 높았으므로 이에 의존하여 많은 기술적 문제를 해결하였다.

본 연구에서는 최근 초박형 도광판 성형에서 발생하는 유동역전 특성을 연구하였다. 이를 위해 전형적인 8인치 크기의 도광판 모델에 대하여 전산 성형 해석을 수행하였으며, 공정 조건에 따라 제품 측면부 수지의 유동이 빨라지는 충전 불균형 현상의 원인에 대하여 분석하였다. 또한, 실제 실험과 비교함으로써 성형 해석의 신뢰성에 대하여 고찰하였다.

### 수지의 점도 측정

유한요소 해석법을 이용한 사출성형 공정 예측은 온도와 전단변형률(shear rate)에 따른 점도 등 용융 수지의 점탄성 물성을 기반으로 하고 있다. 따라서 적용 수지의 정확한 유변 물성 값은 해석 신뢰성을 결정하는 주요 인자이다.

수지의 유변 물성은 전단변형률 가변 점도계인 유동계(rheometer)로 측정된다. 유동계는 재료에 유동과 변형을 가하여 물리적인 방법으로 점탄성(viscoelastic) 특성을 분석하는 기기로서, 유변학에서 정하는 동점성계수(dynamic viscosity), 전단점도, 탄성계수(elastic modulus), 저장탄성률(storage modulus), 손실탄성률(loss modulus) 등의 물성 값들을 측정할 수 있다.<sup>9,10</sup> 종류로는 원추-평판(cone-plate) 유동계, 동심 원통(concentric cylinder) 유동계, 세관식(capillary) 유동계 등이 있으며, 원추-평판 유동계는 주로 10 1/s 이하의 낮은 전단변형률의 점도를 측정하는데 사용하고, Hagen-Poiseuille 법칙을 이용하는 세관식 유동계는 10<sup>2</sup> 1/s 이상의 높은 전단변

형률 점도를 측정하는데 쓰인다.

최근 플라스틱 제품의 고품질화, 경박화 요구에 의해 다양한 고강성, 고유동성 수지가 개발되어 쓰이고 있다. 초박형 IT제품용 도광판 재질로는 투명성, 열적, 기계적 특성이 우수한 폴리카보네이트(PC)가 주로 사용되고 있다.

본 연구에서는 신뢰성 있는 성형해석을 위해 근래 다수 도광판 제품에 적용되고 있는 광학용 수지인 PC(HL-8000, Mitsubishi 사)의 물성 값을 측정하였다. Table 1과 같이 각 온도에서 전단변형률 구간에 따라 회전식 점도계(rotational rheometer, DHR-1, TA Instruments 사)와 세관식 점도계(capillary rheometer, SR50, Instron 사)를 사용하여 측정하였다.

측정된 점도를 이용하여 사출성형 해석을 위한 점도 함수를 구하였다. 일반적으로 사출성형 해석에서 사용하는 점도 함수는 지수법칙 모델(power law models), Ellis model, Carreau model, Cross-WLF model 등이 있는데 공정 범위 내에서의 정확성과 그 데이터를 쉽게 얻을 수 있는 모델을 선정하는 것이 중요하다.

Cross-WLF 모델은 온도, 전단변형률, 압력에 의존적인 점도 모델로서 본 연구에서는 측정된 점도 데이터를 이 점도 모델에 맞추어 근사(fitting)함으로써 연구에 적용한 상용 사출성형 해석 프로그램(Moldflow Synergy 2013, Autodesk 사)의 필요 입력 값을 구하였다.

Cross-WLF 모델은 식 (1)을 갖는다.

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau^*}\right)^{1-n}} \quad (1)$$

식 (1)에서  $\eta$ 는 점도(Pa·s),  $\dot{\gamma}$ 는 전단변형률(1/s),  $\tau^*$ 는 뉴턴 유체와 지수 법칙 거동 사이의 전이 구역에서의 전단응력(Pa),  $\eta_0$ 는 전단변형률이 0에 접근할 때의 점도(Pa·s)를 나타낸다.

$$\eta_0 = D_1 \exp\left[\frac{-A_1(T-T^*)}{A_2 + (T-T^*)}\right] \quad (2)$$

전단변형률이 0에 접근할 때의 점도를 나타내는 식 (2)에서  $T$ 는 온도(K),  $T^*$ 는 유리 전이 온도(°C),  $D_1$ ,  $A_1$ ,  $A_2$ 는 WLF 파라미터이며,  $T^*$ 와  $A_2$ 를 나타내는 식은 아래와 같다.

$$T^* = D_2 + D_3 \cdot P \quad (3)$$

$$A_2 = \tilde{A}_2 + D_3 \cdot P \quad (4)$$

여기서,  $\tilde{A}_2$ ,  $D_2$ ,  $D_3$ 는 상수이며,  $P$ 는 압력(Pa)이다.

따라서 Cross-WLF 모델을 적용하기 위해서는 측정된 점도 값에 맞도록  $A_1$ ,  $\tilde{A}_2$ ,  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$ ,  $\tau^*$ ,  $n$ 의 총 7개 상수 값

**Table 1. Measurement Conditions of Viscosity**

Equipment	Rotational rheometer	Capillary rheometer
Shear rate (1/s)	1~200	200~10000
Temperature (°C)	240, 270, 300, 350	

을 결정하여야 하며, 이는 어려운 다변수 함수의 최적화 문제가 된다. 이를 계산하여 주는 고가의 상용 프로그램이 있으나 본 연구에서는 다음과 같은 방법으로 상수 값을 결정하였다.

먼저, 일반적인 사출성형 해석에서와 같이 고압 실험 조건이 필요한  $D_3$  값은 고려하지 않고 무시하였다. 또한 분자의 조성에 의해 어느 정도 범위가 정해지는  $A_1, \tilde{A}_2$ , 유리 전이 온도  $D_2$  값은 문헌과<sup>11</sup> 사출성형 해석 프로그램에서 제공하는 유사 PC 수지의 데이터 값을 참고하여 초기치를 설정하였다. 상수  $D_1$ 은 전단변형률 200[1/s] 일 때 각 측정 온도에서 세관식 점도계로 측정된 점도 값과 계산된 점도 값의 오차가 최소화 되도록 결정하였다.  $\tau^*, n$ 는 측정 온도 240 °C를 기준으로 높은 전단변형률 조건에서 측정된 점도 값과의 계산된 값의 오차가 최소화 되도록 결정하였다. 실제 사출성형에서 사용되는 수지의 온도는 300 °C 이상이므로 높은 온도의 실험 결과를 기준으로 삼아야 하나, 높은 온도, 높은 전단변형률 조건에서는 점도의 감소 크기가 작기 때문에 보다 낮은 온도 조건의 실험 결과를 바탕으로 근사하였다. 이렇게 결정된 초기 상수 값들을 이용하여 주요 변수를 조정하는 몇 번의 시행착오를 거쳐 본 연구의 Cross-WLF 모델 상수를 구

하였으며, Table 2는 실험 데이터에 최대한 근접하도록 결정된 Cross-WLF 모델의 상수들을 보여준다.

다른 온도의  $\tau^*$  또한 240 °C의 측정값을 기준으로 설정하였으며, 다른 측정 온도에 동일한 값을 적용했을 때 근사값과 측정치가 잘 맞았다. 보다 정밀한 측정을 위하여 10<sup>5</sup> 1/s 이상 높은 전단변형률 구간에서 점도를 측정하는 것이 필요하다. 측정 장비의 한계로 인해 전단율 10<sup>4</sup> 1/s까지만 측정하였다. 또한 본 연구에서 적용한 사출성형 해석프로그램의 경우 고 전단율 조건에서 전단박화(shear thinning)만을 고려하므로 이전 데이터를 연장하여 사용하였다.

Figure 1은 실험 조건에서 측정된 점도 값과 이를 이용하여 Cross-WLF 점도 모델로 근사한 그래프를 나타낸다. 전단변형률이 낮은 구간에서는 뉴턴 유체와 같이 온도에 따라 일정한 점도 값을 보이나 1000 1/s 이상의 높은 전단변형률 구간에서는 전단변형률이 커짐에 따라 점도가 급격히 낮아지는 것을 알았다.

### 초고속 박판 사출성형 해석

급격한 전산기술의 발달로 플라스틱 제품 생산에서 품질, 생산성 향상 등을 위해 유한요소 해석법을 이용한 사출성형 예측이 보편화되었다. 본 연구에서는 박형 도광판의 초고속 사출성형 공정을 분석하기 위하여 앞서 측정된 수지의 유변 물성을 기반으로 전산 성형해석을 수행하였다.

Table 2. Coefficients of Cross-WLF Viscosity Model

Coefficient	Value
$n$	0.001
$\tau^*$ (Pa)	$1.06 \times 10^6$
$D_1$ (Pa·s)	$2.0 \times 10^9$
$D_2$ (K)	417.15
$D_3$ (K/Pa)	0
$A_1$ (K)	24
$\tilde{A}_2$ (K)	52.6

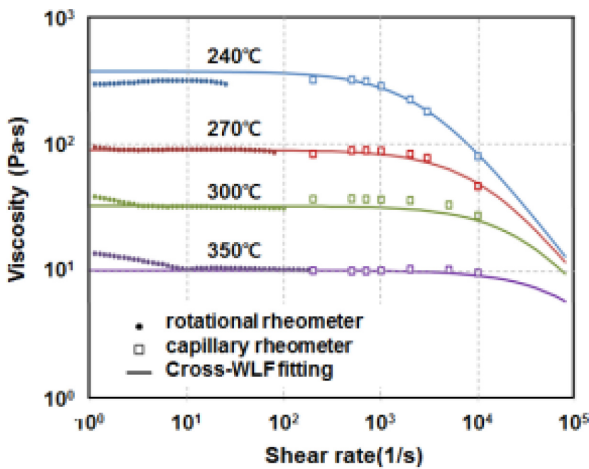


Figure 1. Measured viscosity data and curve fitting of Cross-WLF viscosity model.

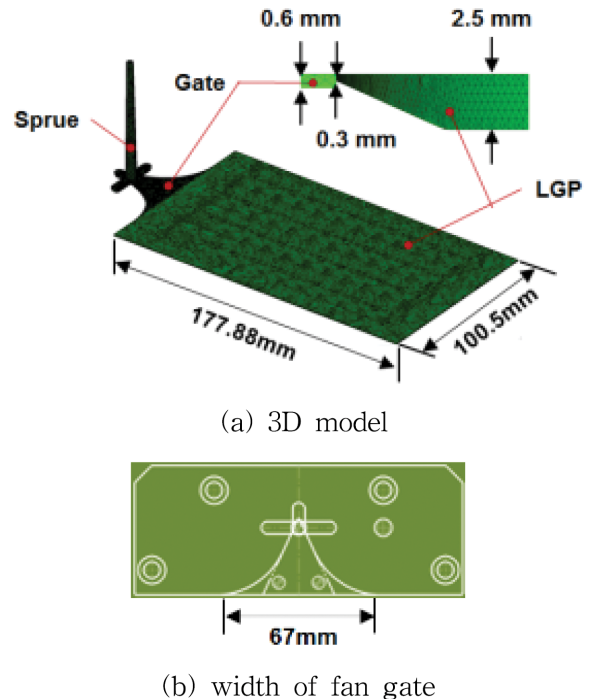


Figure 2. 3D model and mesh result for injection molding simulation of thin LGP.

**Table 3. Tested Mesh Generation Factors**

Factor	Value		
	2D	2.5D	3D
Element			
Global length (mm)	Part	1	2
	Delivery system	2	0.35
Number of layers	8	12	16
Bias ratio	1.0	2.5	

Figure 2는 본 연구의 대상인 박형 도광판의 외형과 성형 해석을 위해 생성된 요소망(mesh)을 보여 준다. 성형품은 8 인치급 도광판으로 가로 100.5 mm, 세로 177.88 mm, 두께 0.6 mm의 크기를 가지고 있다.

제품을 성형하기 위해 적용된 게이트는 도광판과 같은 얇은 평판형 제품 생산에 일반적으로 적용되는 팬 게이트(fan gate) 형상으로 제품 세로 크기의 3분의 2인 67 mm 너비를 가지며, 최근 BLU(back light unit)에 적용되는 광원 성능이 향상됨에 따라 후가공의 용이성을 위하여 도광판의 좁은 쪽에 설계되었다.

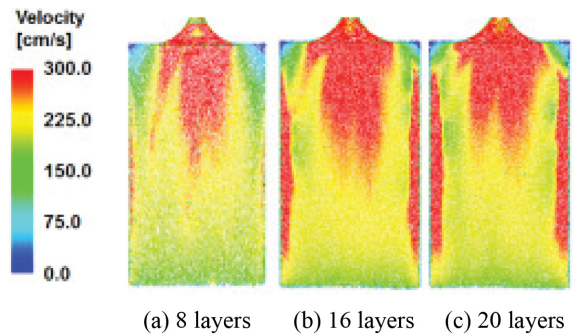
플라스틱 사출성형 공정에서 제품의 크기와 특성, 요구 성능 등에 따라 다양한 형태의 게이트가 적용되는데, 팬 게이트는 얇은 평판 형태의 제품에는 전체적으로 균일한 수지의 유동을 유도할 수 있어 평평도(flatness)를 향상하고, 웰드라인 등 불량을 방지하며, 유동 속도 차이에 의한 압부 발생, 복굴절 등을 억제하여 투명제품의 광학적 특성을 향상시키는 것으로 알려져 있다.

사출성형 제품 개발에 있어 전산 성형해석을 통해 발생할 수 있는 여러 가지 결함을 줄일 수는 있지만, 유한요소해석법(finite element method)은 실제 상황을 수학적으로 근사화한 것이므로 모두 맞다고 할 수 없다. 특히, 요소의 종류, 모양과 크기, 정확한 수지의 유변 물성 등은 해석 시간과 결과의 신뢰성에 많은 영향을 미치기 때문에 신중하게 결정되어야 한다.

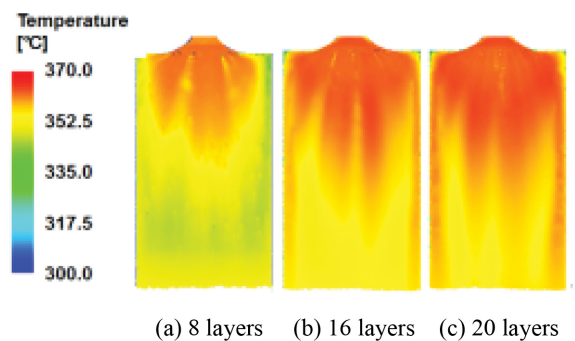
복잡한 계산을 효율적으로 수행하기 위해 2차원과 3차원, 각각의 장단점을 조합한 2.5차원 등 다양한 형태의 유한요소구조가 개발되었으며, 해석 시간과 정밀도 측면에서 차이가 있다.

본 연구에서 적용한 상용 사출성형 해석 프로그램에서는 Table 3과 같이 요소망의 종류, 요소의 크기(global length), 두께 방향 분할층(layer)의 수, 분할층의 밀도가 표면에 치우진 정도(bias ratio) 등을 설정할 수 있으며, 설정 값에 따라 계산할 요소의 양과 해석 시간에 큰 차이를 보인다. 따라서 결과의 신뢰성을 얻을 수 있는 범위에서 최소 해석 시간이 소요되는 요소망 생성조건을 선정하여야 한다.

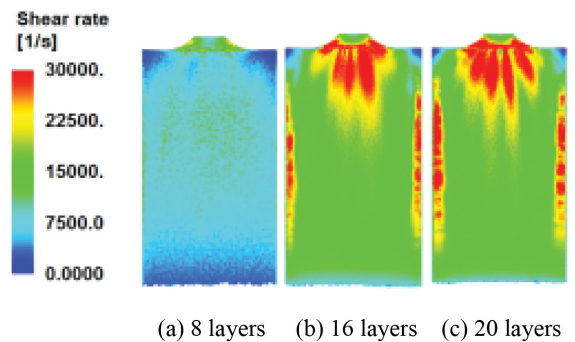
일반적으로 도광판 제품의 성형해석에서는 해석시간을 고려하여 제품부(part)의 요소 크기를 1 mm, 이를 제외한 유동



**Figure 3.** Predicted distribution of velocity at the center region in thickness direction for different mesh layers.



**Figure 4.** Predicted distribution of temperature at the center region in thickness direction for different mesh layers.



**Figure 5.** Predicted distribution of shear rate at the center region in thickness direction for different mesh layers.

시스템(delivery system)부의 요소 크기를 2 mm 정도로 하고, 8개의 분할층을 가진 3차원 또는 2.5차원 요소망을 사용하나 본 연구에서는 신뢰도 높은 해석을 위해 Table 3과 같이 다양한 조건에서 사전 해석을 수행하였다.

Figure 3, Figure 4 그리고 Figure 5는 사전검토 해석의 일부를 보여주고 있는데, 동일한 해석 조건에서 요소망의 분할층 수에 따라 두께 방향 중심부에서 예측된 수지의 유동 속도, 온도, 전단율을 나타낸다. 해석 결과에서 보면 16 layers 요소망과 20 layers 요소망이 큰 차이가 없었으며, 8 layers



**Table 4. Selected Mesh Generation Conditions**

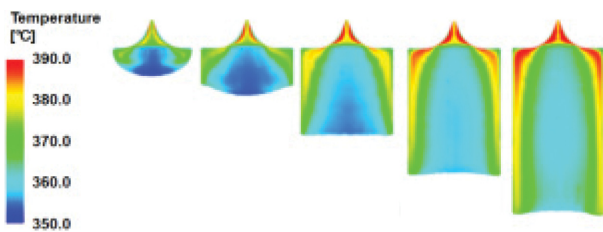
Factor		Value
Element		3D
Global length (mm)	Part	1
	Delivery system	0.35
Number of layers		16
Bias ratio		1.0

**Table 5. Injection Molding Conditions for CAE**

Melt temperature (°C)	350
Expected mold temperature (°C)	(80)
Coolant inlet temperature (°C)	90
Injection speed (mm/s)	100, 200, 300, 400 500, 600, 700, 800
V/P switchover	99% filled

요소망의 해석 결과와는 다소 다른 결과를 보여주었다. 한편, 도광판의 사출성형해석에서 일반적으로 많이 적용하는 8 layers의 경우 약 1시간의 해석시간이 소요되었으나, 검토된 16 layers 요소망은 약 10시간, 20 layers는 약 22시간이 해석에 필요하였다.

Table 4는 본 연구에서 사전 해석 결과를 비교 검토하여 결정된 박형 도광판 제품 해석에 적합한 요소망 생성 조건을 보이며, Table 5는 본 연구의 박형 평판 성형품 사출공정에 적용한 공정 조건을 보여준다. 해석에서 냉각수의 설정 온도는 90 °C이고, 계산된 금형 코어의 표면 온도는 약 80 °C이다. 일반적인 초박형 도광판 성형의 경우 충전 속도는 0.5초 이내로 매우 짧으며, 초고속 사출기라 하더라도 이러한 짧은 충전 시간 중에 다단으로 사출 속도를 제어하는 것은 어렵다. 따라서 성형해석에서도 실제 제품생산과 동일하게 사출 속도는 1단계로 고정하였다. 또한 초박판 사출성형 제품의 경우 얇은 두께로 인해 제품 냉각시간이 1초 이하로 매우 짧기 때문에 일반 사출성형과 같이 충전을 90% 전후에서 보압을

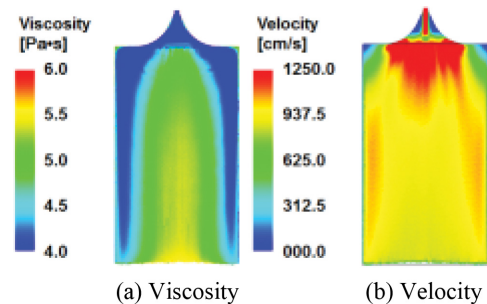


**Figure 6.** Predicted filling patterns and distribution of temperature at the center region in thickness direction for different fill times (800 mm/s).

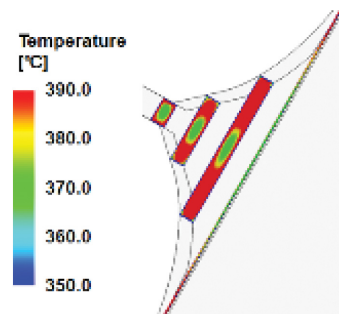
가하면 낮아진 사출 압력으로 인한 수지 역류와 충전되기 전에 성형부 말단 고화가 이루어지는 미성형이 발생하게 된다. 따라서 초박판 제품 성형의 경우 사출단계에서 대부분의 충전이 완료되는 공정을 실무적으로 적용하고 있다.

Figure 6은 사출 속도 800 mm/s에서 충전 패턴과 충전 시간에 따라 두께 방향 중심 위치에서의 온도 분포 변화를 나타낸다. 충전 패턴을 보면, 사출 초기에 유동선단이 불룩한 형상으로 중앙부를 통하여 수지가 빠르게 유입되지만 충전이 진행될수록 제품의 측면부가 중앙부보다 먼저 성형되었다. Figure 6의 온도 분포에서 성형 초기에 게이트 측면에서 발생한 국부적인 온도 상승이 충전이 진행될수록 점차적으로 증가하여 사출 온도보다 높은 390 °C에 이르렀다. 또한 가열된 수지가 게이트의 측면을 통해 들어가 게이트와 캐비티 측면의 온도는 캐비티의 중심보다 높을 것으로 예측된다.

Figure 7은 보압 전환(v/p switchover) 시점에서 예측된 제품 두께 방향 중심 위치의 수지 속도와 점도 분포를 나타내는데, 제품 중앙부와 측면부의 온도 차에 의해 측면의 점도가 낮고, 유동 속도가 중심부보다 컸다. 해석 결과를 통해 초박형 도광판 성형에서 제품 측면 충전과 중앙부 충전이 역전되는 현상의 원인은 측면부 수지의 국부적인 온도 상승으로 점도가 감소하여, 유동저항이 낮아진 쪽으로 수지가 빠르게 유입되었기 때문이다.



**Figure 7.** Predicted results at the center region in thickness direction at 99% filled (800 mm/s).



**Figure 8.** Predicted temperature at cross sections of gate for injection speed 800 mm/s.

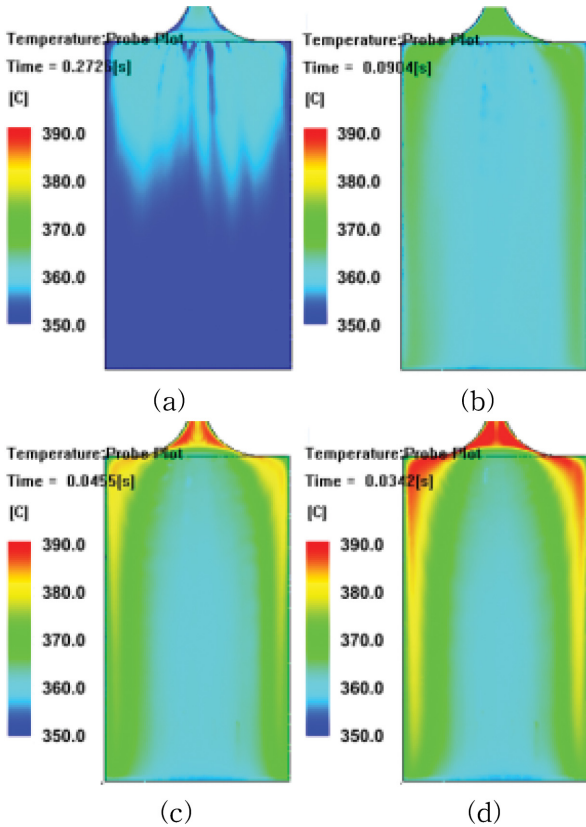


Figure 9. Distribution of temperature at the center region in thickness direction at v/p switchover time for different injection speed (a) 100 mm/s; (b) 300 mm/s; (c) 600 mm/s; (d) 800 mm/s.

이러한 수지의 온도상승은 초박판 사출에서 높은 성형 압력으로 인한 단열가열, 금형과 맞닿아 고화된 수지층과 내부로 유동하는 수지층 사이의 속도구배와 전단현상으로 인한 전단 가열(shear heating)이 복합적으로 작용되었기 때문이다. 사출된 수지는 Figure 8과 같이 제품부로 유입되기 전 스프루와 런너, 게이트를 지날 때 단열가열, 전단가열에 의해 온도가 다른 내외부 영역으로 분리되며, 온도가 높은 외부 수지층은 제품 측면부로 흘러 들어가고, 상대적으로 온도가 낮은 내부 수지층은 제품 중앙부로 유입되면서 점도 차이로 인한 유동저항 차이를 발생시키는 것으로 예측된다. 또한 초고속 사출에서 전단 가열에 의한 수지의 온도 상승은 널리 알려진 것이나 최근 도광판의 초박화 진행으로 인한 단열가열 효과 증가, 제품에 비하여 상대적으로 부피가 큰 유동시스템에서의 수지 온도층 분리로 인해 기존 도광판 성형에서와 다른 유동패턴 보이고 있다.

한편, 사출 속도 조건이 클수록 속도 구배도 증가하므로 Figure 9와 같이 사출 속도가 높은 조건에서 더 많은 전단 가열이 발생하고 측면으로 더 높은 온도의 수지가 들어가기 때문에 측면의 충전이 역전되는 현상이 더 크게 나타난다고 할

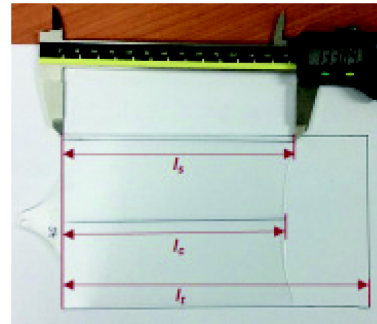


Figure 10. Definition of center flow length  $l_c$ , side flow length  $l_s$ , total flow length  $l_t$ .

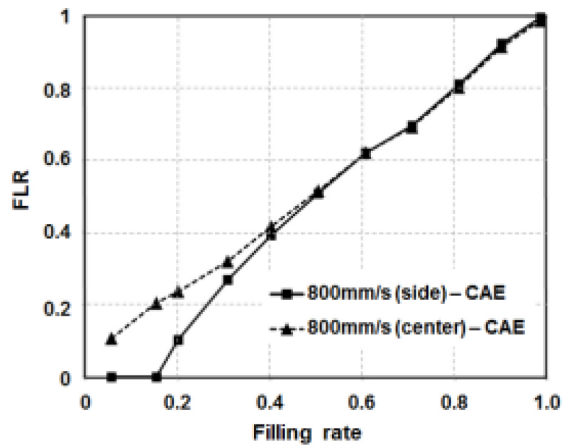


Figure 11. Flow length ratio (FLR) of predicted filling pattern for injection speed of 800 mm/s according to filling rate.

수 있다.

다양한 해석 결과를 정량적으로 비교하기 위하여 Figure 10과 같은 분석치를 도입하였다. 그림에서 제품 중앙부 유동거리와 측면부 유동거리와 제품 전체 길이를 각각  $l_c$ ,  $l_s$ ,  $l_t$ 라고 정의할 때, 제품길이 전체에 대한 중앙부와 측면부의 유동거리의 비(flow length ratio, FLR)는 다음과 같이 계산된다.

$$\text{FLR of side} = \frac{l_s}{l_t} \tag{5}$$

$$\text{FLR of center} = \frac{l_c}{l_t} \tag{6}$$

Figure 11은 사출 속도 800 mm/s일 때 성형해석으로 예측된 중앙부의 유동거리 비와 측면부 유동거리 비를 충전율(filling rate)에 따라 나타낸 것이다. 여기서, 충전율은 제품의 총 부피와 충전된 수지의 부피 비이다. 사출 속도 800 mm/s인 경우 제품 충전이 약 60% 진행되었을 때 측면부 유동선단이 중앙부보다 빨라지는 유동 역전 현상이 생기는 것을 알 수 있다.

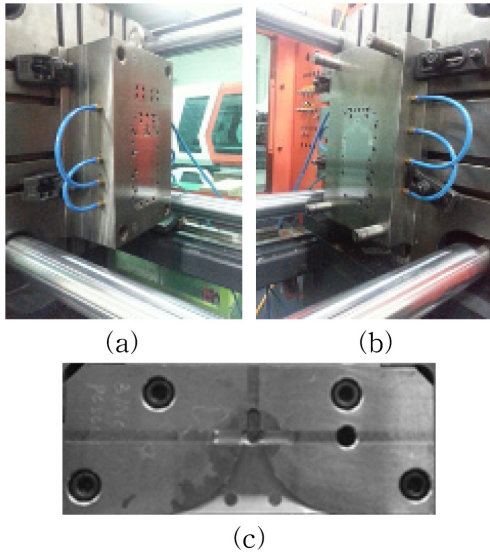


Figure 12. Pictures of 8 inch LGP mold (a) moving part; (b) fixed part; (c) fan gate.

Table 6. Injection Molding Conditions for Short-Shot Experiment

Factor	Exp. Set 1				Exp. Set 2	
Melt temp. (°C)	350				300	325 350 370
Inject. speed (mm/s)	200	400	600	800	800	

초고속 사출성형 실험

초고속 사출성형 시험을 통하여 예측된 성형해석 결과를 확인하였다. 실험에 사용된 금형은 Figure 12와 같이 Figure 2의 모델링과 동일한 크기의 박판 성형품을 제작할 수 있는 2단 사출금형이다. 냉각 채널은 캐비티 코어가 균일한 온도 분포를 가질 수 있도록 등 간격으로 설치하였으며, 해석 조건과 최대한 유사하게 실험하기 위해 금형 표면온도를 측정하여 금형 표면온도가 약 80°C가 되도록 금형 온도 조절기의 냉각수 온도를 조절하면서 시험하였다.

본 실험에서 성형을 위해 사용된 사출성형기(LGE150II-UHS, LS엠트론 사)는 최대 형체력 150 ton, 최대 사출용량 54 cm<sup>3</sup>인 인라인 스크류식 사출 장치와 토글식 형체장치를 갖추었으며, 최대 사출 속도 1000 mm/s까지 가능한 초고속 전동식 사출성형기이다. 스크루 직경이 25 mm, 최대 사출압력 3500 kg/cm<sup>2</sup>이다.

Table 6과 같은 성형 조건에서 수지 온도와 사출 속도에 따른 성형 실험을 진행하였으며, 초박판 사출성형 과정을 확인하기 위하여 충전량을 단계적으로 늘려가며 사출하는 미성형 (short shot) 시험을 수행하였다. Figure 13과 Figure 14는 실

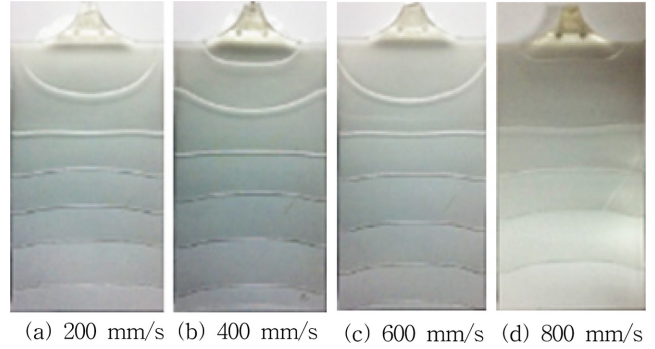


Figure 13. Experimental results for different injection speed condition.

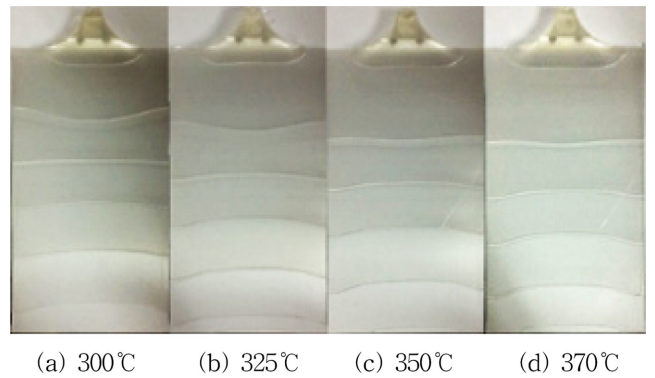


Figure 14. Experimental results for different melt temperature condition.

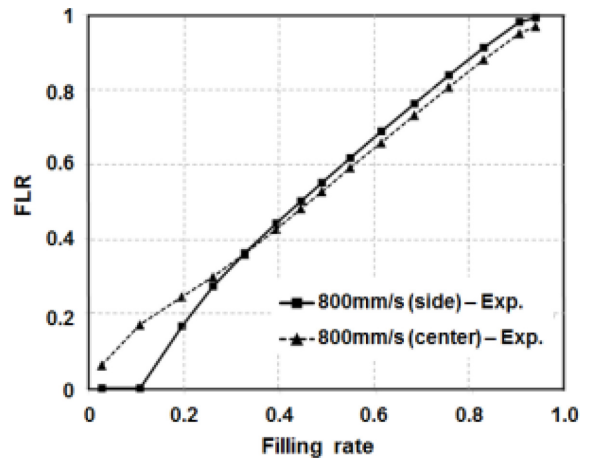


Figure 15. Flow length ratio (FLR) of experimental result for injection speed of 800 mm/s according to filling rate.

험 조건에서 얻어진 미성형 시편을 겹쳐서 찍은 사진을 보여 준다. 모든 조건에서 일정 비율 이상 충전된 후 측면의 유동 선단이 중심보다 앞서 나가는 형상을 보였으며, 사출 온도가 높을수록 사출 속도가 증가할수록 유동 역전현상은 심화되는



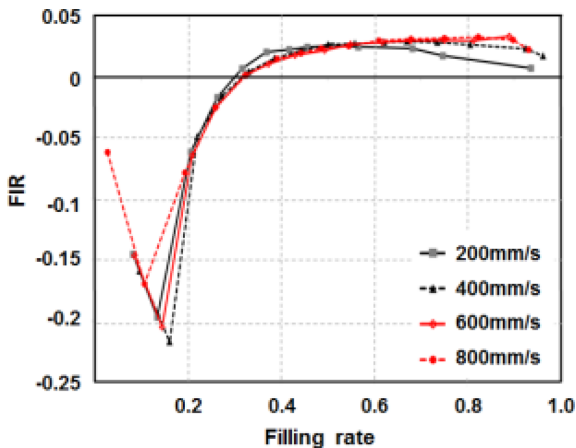


Figure 16. Filling imbalance ratio (FIR) of experimental result for different injection speed condition in all range of filling rate.

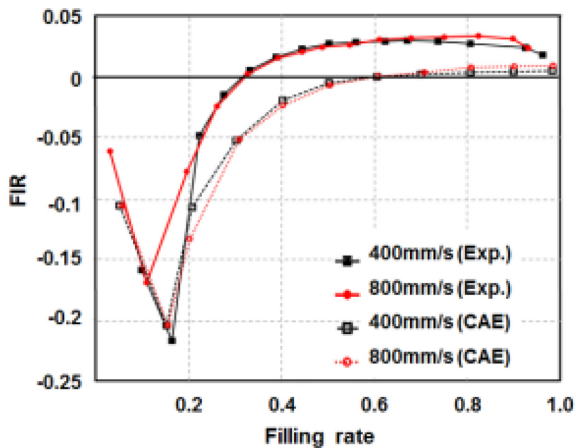


Figure 17. Comparison of FIR of experimental filling pattern and predicted filling pattern using CAE according to injection speed.

것을 확인하였다.

### 결과 및 토론

Figure 15는 앞서 계산한 중앙부와 측면부의 유동거리의 비를 실제 실험에 대하여 적용한 것이다. Figure 11과 Figure 15를 보면 두 그래프 모두 충전율이 낮은 부분에서는 제품 중심부의 충전이 앞섰지만 일정 비율이상 충전이 된 이후에 제품 측면의 충전이 역전되어 그래프가 교차하는 지점이 발생한다는 공통점이 있다.

각 실험 조건에서 제품 중앙부와 측면부의 충전 불균형 정도를 비교하기 위하여 다음과 같이 충전 불균형률(filling imbalance ratio, FIR)를 정의하였다.

$$FIR = \frac{l_s - l_c}{l_t} \quad (7)$$

Figure 16은 Table 6의 실험 조건 Set 1에서 사출 속도와 충전율에 따른 FIR 값의 변화를 나타낸 것이다. 그래프에서 충전율이 증가함에 따라 FIR 값 또한 증가하는 경향을 보였는데, 이는 충전이 진행됨에 따라 측면과 중심 위치의 유동 불균형이 증가되어 유동 역전 현상이 심화되는 것을 나타낸다. 또한 충전율이 약 0.3인 지점을 기준으로 FIR 값이 음수에서 양수 값으로 바뀌는데 이는 제품 성형이 약 30% 진행되면 제품 측면의 유동이 역전됨을 의미한다. 그리고 충전율이 약 0.6 이상이 되는 지점부터 사출 속도 조건에 따라 FIR 값이 차이를 보였으며, 사출 속도가 높을수록 측면이 먼저 충전되는 경향이 커졌다.

실험 결과와 해석 결과를 비교하기 위하여 성형해석으로 예측된 충전패턴에 대하여 FIR 값을 계산 후 Figure 17에 나타내었다. Figure 17에서 성형해석의 경우 실제 사출에 비해 사출 속도에 따른 FIR 값의 차이가 크게 나타나지 않는 것을 확인하였다. 또한 FIR 값이 0보다 커지는 지점 즉, 측면의 유동이 역전되는 지점이 충전율 약 0.6으로 실제 사출에서 측정된 0.3보다 느리다. 이는 성형해석에서 초박관 사출의 충전 역전 현상이 어느 정도 모사되나, 실제 실험에 비하여서는 전단발열로 인한 유동 불균형을 다소 낮게 예측하고 있었으며, 실제 성형에서의 금형 표면 거칠기 등이 정확히 고려되지 못하였기 때문으로 사료된다.

### 결론

본 연구를 통해 다음의 결론을 얻었다.

(1) 유한요소해석을 통해 박판 제품의 고속 사출성형에서 제품 중앙부와 측면부의 충전 불균형 현상의 원인에 대하여 분석하였다. 신뢰성있는 해석을 위해 회전 점도계와 세관식 점도계를 이용하여 적용 PC 수지의 유변 물성을 측정하고, 적절한 요소망 생성 조건을 설정하였다.

(2) 해석결과 유동 시스템 및 제품 측면에서 전단 가열에 의하여 온도가 상승한 수지가 캐비티 측면으로 들어가는 것을 확인하였다. 측면으로 들어간 고온의 수지는 더 낮은 점도를 갖게 되므로 온도가 낮고 상대적으로 점도가 높은 중심부의 수지보다 유동 저항이 적어 더 빨리 흐르게 되는 것을 속도 분포 해석 결과를 통해 알 수 있다.

(3) 실제 성형시험을 통하여 해석결과와 비교하였다. 실험 결과 사출 속도와 수지 온도 조건이 높을수록 충전불균형 정도(FIR) 값이 큰 것을 확인하였다. 해석에서의 FIR 값은 실험과 마찬가지로 충전 패턴이 역전되는 현상을 보이지만 실험 결과에 비해 상대적으로 작은 값을 가졌다.

사출성형 공정에서 정확한 유동패턴의 예측은 웰드라인, 공기 간섭 등 다양한 불량 요인 방지를 위해 중요하다. 최근 초박형 도광관 생산이 본격화 되면서 충전불균형으로 인해 웰드라인, 유동 속도 차이로 인한 광학적 성능저하 등 다양한



품질 문제가 발생되고 있다. 따라서 초고속 사출에서 전단발열을 고려하여 유동을 균일화할 수 있는 유동 시스템 및 냉각 설계 방안 등에 대한 추가 연구가 필요하다.

**감사의 글:** 본 연구는 산업통상자원부 산업원천기술개발 ‘다층구조 제품생산을 위한 다색다중 1200 mm/s급 초고속 전동 사출성형시스템 개발(Project No. 10040061)’과 한국생산기술연구원 ‘수요기반형 플랫폼 R&D 사업(Project No. JA160028)’의 연구비 지원으로 수행 되었습니다.

## 참 고 문 헌

1. J. W. Woo, J. S. Hong, H. K. Kim, and M. Y. Lyu, *Polym. Korea*, **40**, 175 (2016).
2. T. S. Jung, J. S. Kim, S. J. Ha, and M. W. Cho, *Trans. Mater. Process*, **23**, 41 (2014).
3. Y. C. Chiang, H. C. Cheng, C. F. Huang, J. L. Lee, Y. Lin, and Y. K. Shen, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **55**, 517 (2011).
4. S. Yin, F. Ruan, and J. Wang, *Adv. Mater. Res.*, **538**, 1145 (2012).
5. M. H. Tsai, K. L. Ou, C. F. Huang, H. C. Cheng, Y. K. Shen, C. Y. Chang, C. H. Wu, J. H. Chen, and P. Guan, *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, **35**, 1097 (2008).
6. Y. K. Shen, W. Y. Wu, S. Y. Yang, H. M. Jian, and C.-C. A. Chen, *J. Reinf. Plast. Compos.*, **23**, 1187 (2004).
7. C. Feng, J. Kuo, and T. L. Su, *J. Mater. Eng. Perform.*, **16**, 539 (2007).
8. S. C. Chen, W. H. Liao, J. P. Yeh, and R. D. Chien, *Polym. Test.*, **31**, 864 (2012).
9. J. L. White, *Principles of Polymer Engineering Rheology*, John Wiley & Sons, 1990.
10. Z. Tadmor and C. G. Gogos, *Principle of Polymer Processing*, John Wiley & Sons, 1979.
11. T. Terje and A. Erik, *MekIT'07: 4th Natl Conf. on Computational Mechanics*, S4104, Trondheim, 23–24 May (2007).