

## 광반응사출성형 시 캐비티 엣지에서 발생하는 미세누출현상에 관한 해석적 연구

라문우<sup>†</sup>

한국생산기술연구원 금형기술그룹<sup>†</sup>

## A numerical study on micro leakage behaviors at cavity edge during photo reaction injection molding

Moon-woo La<sup>†</sup>

Korea Institute of Industrial Technology, Molds & Dies Group<sup>†</sup>

(Received August 05, 2016 / Revised August 31, 2016 / Accepted September 02, 2016)

**Abstract:** Despite technological advance, there have been several troubles in photo reaction injection molding (photo RIM) to produce ultra thin light guide panels (LGP). In this study, micro leakage problem at cavity edge during photo RIM was investigated numerically. In order to obtain optimal processing conditions, we regulated inlet pressure of injected resin at the cavity edge and figured out micro leakage behaviors. At low inlet pressure (less than 100 Pa), though the micro leakage problem was not occurred, another problem, short shot due to not enough driving force, was appeared. More than 1,000 Pa of the inlet pressure, injected resin was rapidly leaked through the micro gap at the cavity edge. Finally, we obtained optimal inlet pressure around 600 ~ 1,000 Pa. At this region, injected resin fully filled the cavity without micro leakage behavior. Based on the present study, further comparative investigations with experimental photo RIM should be performed to find optimal processing conditions for produce ultra thin LGPs.

**Key Words:** Cavity edge, Leakage, Photo reaction injection molding, Simulation

### 1. 서 론

반응사출성형(Reaction injection molding, RIM)은 일반적인 사출성형 공정과 동시에 고분자 수지의 중합반응이 동시에 일어나는 가공공정이다<sup>1,2)</sup>. 반응사출성형 공정에서는 일반적으로 저점도 단량체 상태의 고분자 수지를 사용하기 때문에 일반 사출성형 대비 공정에 필요한 에너지가 급격히 절감되는 장점을 가지고 있다. 일반 사출성형은 알갱이(pellet) 상태의 수지를 유체 상태로 용융시키고, 고점도의 용융 수지(polymer melt)를 금형 캐비티 내에 주입하기 위해서 상당량의 열에너지와 기계적 에너지를 필요로 한다. 이와 달리 반응사출성형의 주원

료는 저점도이기 때문에 스프루, 러너, 캐비티로 이어지는 복잡한 유동 흐름에서도 3.5기압 정도의 낮은 주입 압력으로 사출된다. Scrivo의 연구에 따르면 같은 5 평방인치 면적의 제품을 성형하는데 있어서 일반 사출성형은 대략 1,800톤의 형체력을 필요한 반면, 반응사출성형은 1톤 이하의 형체력을 필요하다고 보고한 바 있다<sup>3,4)</sup>.

이러한 반응사출성형은 고분자 소재의 중합방식에 따라서 열경화성 소재를 사용하는 열반응사출성형(thermal RIM)과 UV 등의 광에너지에 의해서 단량체간의 가교반응이 일어나는 광반응사출성형(Photo RIM)으로 구분된다<sup>5,6)</sup>. 일반적으로 열반응사출성형의 경우 수지를 경화시키기 위해서는 수분 이상의 시간동안 열에너지 조절을 필요로 한다. 이와 달리 광반응사출성형은 캐비티 내 수지가 완전

† 교신저자: 한국생산기술연구원 금형기술그룹  
E-mail: mla@kitech.re.kr

히 충진된 순간 UV와 같은 광에너지 소스를 수초내에 순간적으로 노출하여 노광시키므로 전력사용도 적고 전체적인 공정 시간도 많이 단축되어 제품의 생산성 및 가격경쟁력 확보에 유리하다.

광반응사출성형은 폴리우레탄(polyurethane) 계열의 광반응 수지를 이용한 공정 개발을 통해 폭넓게 이용되었다. 초창기 반응사출성형은 제품을 사출한 후 캐비티 내를 용제로 세척하는 등의 공정 상 불편함이 많았다. 그러나 폴리우레탄을 이용한 광반응사출성형을 통해 캐비티 내 주입된 원액을 모두 사출하여 세척 공정을 제거함으로써 제품 대량 생산이 가능하게 되었다. 이후 광반응사출성형을 통해 나일론 블록 공중합물, 에폭시 수지, 불포화 폴리에스터, 하이브리드 수지 등 다양한 수지를 이용한 공정기술이 개발되어 산업 제품 제조에 적용되었다. 이러한 광반응사출성형 기술의 확대를 통해 자동차 용판재 및 부품, 각종 사무용 기기 및 전자기기의 하우징, 스키 등의 고강도 스포츠 용품, 가구 외장, 신발 골격 등 산업 전반의 여러 제품을 제작하는데 활용되고 있다.

최근에는 디스플레이 장치로 가장 널리 사용되는 LCD(liquid crystal display)의 후면 빛 조사 부품인 도광판(light guide panel) 제조를 위해 광반응사출성형이 적용되고 있다. 노트북, 스마트폰, 테블릿PC 등 디스플레이를 탑재한 모바일 장치들은 지속적으로 제품의 소형화, 박형화를 요구하고 있다. 이에 따라 LCD 소형화, 박형화를 위해 LED광원의 크기는 점점 작아져서 최근에는 0.4mm 크기의 LED가 보편적으로 사용되고 있으며, 이보다 더 작은 0.3mm LED도 개발이 완료되어 상용화를 앞두고 있다. 이와 더불어 도광판의 초박형화를 위한 연구개발도 지속되고 있다. 일반적으로 도광판은 투명한 열가소성 수지를 사출성형하여 제작되며, 초박형 도광판 제작을 위해서 최근에는 고속사출기를 이용한 용융 수지 고속 주입, 압축성형을 통한 박형화 및 표면 패턴화 방법들이 고안되었다. 그러나 0.3mm 크기의 LED에 대응하기 위해서는 도광판 또한 그 이하의 두께가 되어야하는데, 일반적인 사출성형 공정으로는 거의 불가능하다고 할 수 있다. 이러한 한계를 뛰어넘기 위해서 수지 유동성이 뛰어난 광반응사출성형을 통해 0.3mm 이하의 초박형 도광판 제작을 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

초박형 도광판 제작을 위한 광반응사출성형에도 아직까지 극복해야할 기술적 한계들이 있다. 광반응

수지 주입 및 제품 취출을 위한 금형 설계 측면의 문제들 뿐만 아니라 올바른 제품 성형을 위한 광원 배치 및 광에너지 전달, 수지유동 제어 및 누출방지 등의 문제들도 극복해야할 과제들이다.

본 연구에서는 광반응사출성형을 통한 초박형 도광판 제작에 있어서 해결되어야 할 여러 문제들 중에서 캐비티 내 수지유동 제어를 통한 제품 성형 및 이 때 캐비티 엣지의 미세틈을 통한 누출에 대해서 수치 해석으로 현상을 확인하고 문제 방지를 위한 공정제어 대책을 제안하는 연구를 수행하였다.

## 2. 실험

### 2.1. 광반응사출성형 개요

본 연구에서는 Fig. 1과 같은 광반응사출성형 개요를 기반으로 수행되었다. 금형은 캐비티를 형성하는 하측과 결착철(tie rod), 구동 실린더 등의 상측으로 구성되었다. 그리고 금형하측에 UV LED 어레이를 부착하여 UV 광원을 캐비티 내에 조사할 수 있도록 하였고, 원활한 노광을 수행하기 위해 금형하

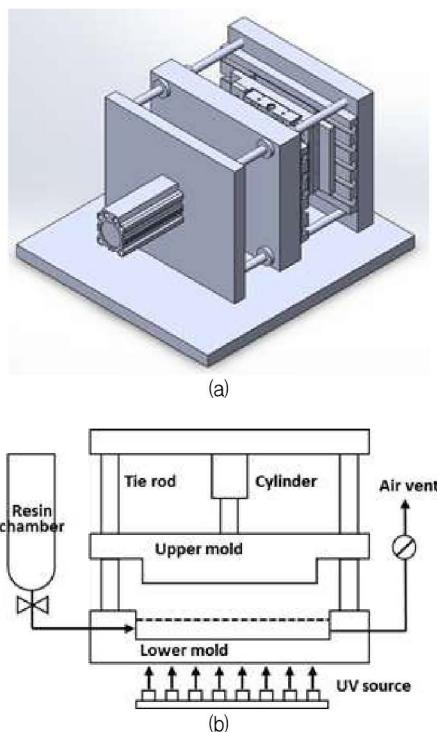


Fig. 1 Schematic diagrams of mold: (a) 3D and (b) 2D

Table 1 Density and dynamic viscosity of resins

	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Dynamic viscosity (Pa·s)
Resin #1	1.09 × 103	9.022
Resin #2	1.11 × 103	11.837

축은 투명한 석영유리(quartz) 소재로 설계하였다. 그 밖에 수지 주입을 위한 챔버와 통기부를 삽입하여 제품성형이 잘 될 수 있도록 하였다. 실제 성형시에는 금형상측이 올라가서 캐비티가 약 67mm 높이로 열리도록 하고, 수지주입과 동시에 금형상측을 하강하여 최종 캐비티 높이가 0.21mm가 되도록 하였다. 광반응사출성형을 위한 소재는 폴리우레탄 계열의 직접제조 레진을 이용하였다. 사용한 소재의 밀도 및 점도는 Table 1과 같다.

## 2.2. 미세누출현상 해석 – 물리모델

광반응사출성형 시 캐비티 엣지에서 발생하는 미세누출현상을 해석하기 위하여 Comsol multiphysics 5.0 프로그램의 층류 2상 유동, 레벨셋 (laminar two-phase flow, level set) 모듈을 이용하였다<sup>7)</sup>. 해석을 위한 물리모델은 아래와 같은 운동량 전달식, 물질 연속식, 레벨셋 방정식으로 구성되었다.

$$\rho \frac{\partial \underline{u}}{\partial t} + \rho (\underline{u} \cdot \nabla) \underline{u} = \nabla \cdot [-p \underline{I} + \mu (\nabla \underline{u} + (\nabla \underline{u})^T)] + \underline{F}_{st} + \underline{F}_q \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \underline{u} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \underline{u} \cdot \nabla \phi = \gamma \nabla \cdot (-\phi(1-\phi) \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} + \epsilon \nabla \phi) \quad (3)$$

$\rho$ : 수지 밀도       $\underline{u}$ : 유동 속도

$t$ : 시간                   $\mu$ : 수지점도

$p$ : 압력                   $F_{st}$ : 표면장력

$\underline{F}_q$ : 중력                   $\phi$ : 레벨셋 함수

$\gamma, \epsilon$ : 수치 안정화 파라미터

수치해석 시간종속(time-dependent) 모델을 적용하여 시간에 따라서 유입된 수지의 유동경향을 확인하였다.

Table 2 Element parameters for meshing

Parameter	Value
Maximum element size	3 μm
Minimum element size	0.006 μm
Maximum element growth rate	1.1
Curvature factor	0.2
Resolution of narrow region	1
Number of elements at intermediate interface	200

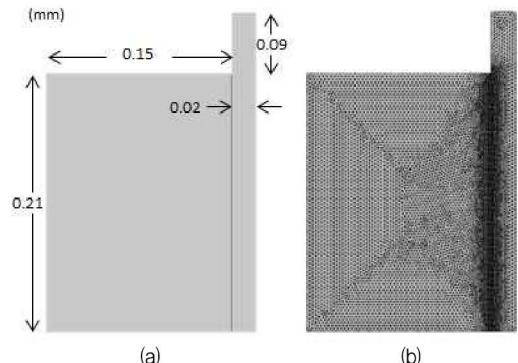


Fig. 2 (a) Geometry and (b) Meshes for the simulation of micro leakage behavior

## 2.3. 미세누출현상 해석 – 기하구조

광반응사출성형 시 캐비티 엣지에서 발생하는 미세누출현상을 해석하기 위하여 Fig. 2(a)와 같은 구조를 모델링하였다. 성형 시 캐비티는 최종 제품의 두께인 0.21mm를 형성하도록 하였고, 캐비티 엣지의 미세틈은 금형가공 공차를 고려하여 0.02mm로 설정하였다. 전체 캐비티에서 발생하는 수지 유동을 해석하기에는 컴퓨팅 리소스가 많이 요구되어 특별히 캐비티 엣지에서 가까운 0.15mm 영역에서만 확 인하도록 모델링 하였다.

## 2.4. 미세누출현상 해석 – 메쉬구조

해석을 위하여 자유삼각(free tetrahedral) 형태의 메쉬를 이용하였다(Fig. 2(b)). 메쉬 형성을 위한 기본 세팅은 Table 2와 같다. 특별히 캐비티와 미세틈 사이의 중간층(intermediate interface)에서는 상세한 해석을 위해 200개의 고정 메쉬를 지정하였다. 그 결과 총 17,261개의 메쉬가 형성되었다.

## 2.5. 해석 파라미터 설정

상기와 같은 미세누출현상 해석에 대한 셋업을 기초로 하여 수지가 주입되는 상황에 따른 누출경

향을 확인해 보았다. 광반응사출성형 시 금형상측이 내려옴에 따라서 주입된 수지가 캐비티 중앙에서 외곽부로 퍼지게 된다. 이때 대략적으로 발생하는 압력 범위를 해석 도메인 내 수지의 유입 압력으로 정의하여 100 Pa, 600 Pa, 1,000 Pa에서의 미세누출 현상을 확인하였고, 인위적으로 극한 상황을 연출하여 10,000 Pa 유입 압력에서의 누출 현상을 추가적으로 확인하였다.

초기( $t = 0$ ) 중간측(intermediate interface) 좌측 도메인은 수지로, 우측은 공기(air)로 설정하였고, Fig 2(a)와 같이 전체 도메인의 좌측 경계(boundary)는 유입구(inlet), 우상측 경계는 유출구(oulet)으로 지정하였으며, 모든 경우에 대해 유출구의 압력은 0 Pa으로 고정하였다. 시간종속에 따른 시간범위는 0.05초 간격으로 총 1초 동안 확인하였다.

### 3. 실험결과 및 분석

#### 3.1. 시간에 따른 미세누출경향 - 레진1

레진1에 대한 시간에 따른 미세누출경향은 Fig. 3과 같다. 그럼 상 0.5초와 1.0초 일 때의 유동 진행 사항을 나타내었다. 유입압력이 100 Pa일 경우, 수지가 거의 움직이지 않는 것을 확인할 수 있다 (Fig. 3(a)). 이는 해당 유입압력에서 유동 발생을 위한 충분한 구동력을 얻지 못하는 것을 의미한다. 시간이 지나도 유동이 엣지까지 도달하지 못하는 것으로 보아, 실제로 본 조건에서 성형할 경우 캐비티 내 형상을 충분히 채우지 못할 가능성이 높다.

유입압력이 600 Pa일 경우, 수지가 엣지에 도달한 이후 더 이상의 유동이 진행되지 않음을 확인할 수 있다 (Fig. 3(b)). 이는 미세틈에서 형성되는 유동 선단의 표면장력이 유동 진행과 반대방향으로 작용하여 평형을 이룸으로써 더 이상의 유동이 진행되지 않는 것으로 이해된다. 따라서 레진 1의 경우에는 600 Pa의 유입압력 조건이 미세누출 없이 제품을 충진할 수 있는 최적의 조건이라고 할 수 있다. 다만, Fig 3(b)에서 확인할 수 있듯, 우측 하단의 코너에서 공기가 트랩되는 것을 확인할 수 있다. 해석상으로는 해당 영역이 완전히 막혀있는 구조로 설정하였으나, 실제 성형 시 우측 하단에도 미세한 틈을 배치한다면 수지의 누출 없이 공기층만 빠져나가서 온전한 형상을 형성할 것으로 판단된다.

유입압력이 1,000 Pa일 경우, 수지가 엣지 상단부

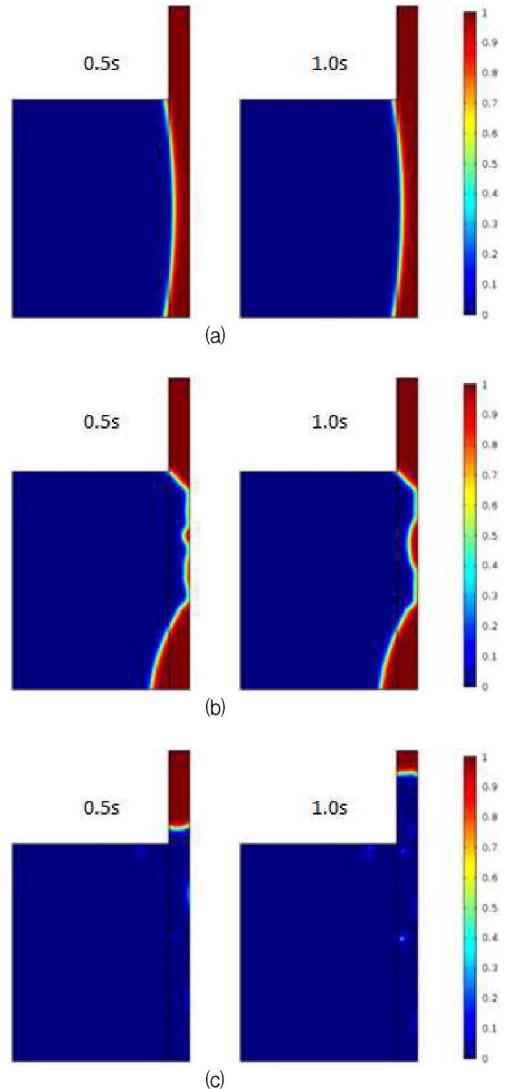


Fig. 3 Results of micro leakage behavior using resin 1 at inlet pressure of (a) 100 Pa, (b) 600 Pa, and (c) 1,000 Pa

로 누출되는 것을 확인할 수 있다 (Fig. 3(c)). 본 해석은 1초 동안 확인하였지만, 더 긴 시간동안 지속적으로 확인한다면 수지가 계속 누출될 것은 자명하다. 실제 성형 시 누출을 방지하기 위해서는 해당 조건 이하에서 성형이 이루어져야 할 것이다.

#### 3.2. 시간에 따른 미세누출경향 - 레진2

Fig. 4는 레진2에 대한 시간에 따른 미세누출경향 해석 결과 (각각 0.5초, 1.0초 시점)이다. 유입압력이 100 Pa일 경우, 레진2 또한 수지가 거의 움직이지

않는 것을 확인할 수 있다 (Fig. 4(a)). 수지가 옆지에 도달한 이후 더 이상의 유동이 진행되지 않음을 통해 레진 2는 100 Pa의 유입압력 조건이 미세누출 없이 제품을 충진할 수 있는 최적의 조건이라고 할 수도 있으나, 그 이상의 조건에서도 누출이 일어나지 않는 것으로 보아, 본 조건은 실제 상황에서 유동을 거의 발생시키지 않을 가능성이 높다.

유입압력이 600 Pa, 1,000 Pa일 경우, 레진 1과 유사한 경향이 나타남을 확인하였다. 유동선단의 표면장력이 유동 진행과 반대방향으로 작용하여 평형을 이룸으로써 더 이상의 유동이 진행되지 않았다. 레진 1

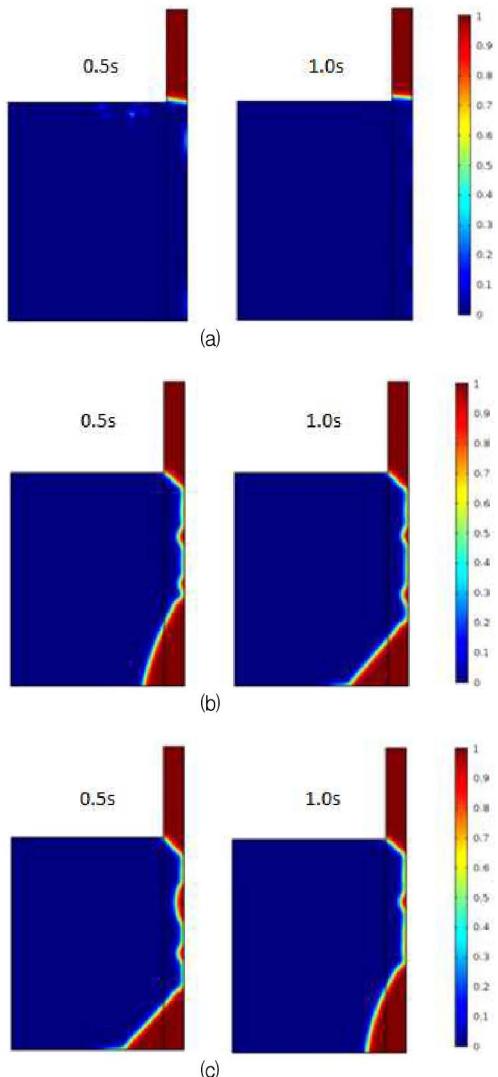


Fig. 4 Results of micro leakage behavior using resin 2, at inlet pressure of (a) 100 Pa, (b) 600 Pa, and (c) 1,000 Pa

과 달리 레진 2는 점도가 더 높아서, 상대적으로 높은 압력 조건에서도 유동선단의 힘평형이 유지되는 것을 알 수 있다. 그리고 레진 1과 마찬가지로 우측하단 코너에서는 공기가 트랩되는 것을 확인하였다. 이 또한 실제 성형 시 우측 하단에도 미세한 틈을 배치하여 트랩을 해결할 수 있을 것이다.

### 3.3 극한 조건의 미세누출경향

Fig. 5는 레진 1, 2에 대해 가상의 극한 조건을 부여하였을 때 옆지에서 나타나는 미세누출경향 해석 결과이다. 앞선 조건과 달리 유동이 빠르게 진행되므로 이 경우 각각 0.05초와 0.3초 때의 상황을 나타내었다. 레진 종류와 상관없이 상당히 빠른 속도로 유동이 진행되어 순식간에 옆지를 통해 미세누출이 일어남을 확인할 수 있다. 특히 강한 유입압력에 의하여, 시간이 지남에 따라 우측 하단 코너에 트랩된 공기층이 유동의 전단력에 의하여 유동방향으로 떨려 들어가 점점 소멸되는 것을 확인할 수 있다. 레진 2의 경우 Fig. 5(d)와 같이 트랩된 공기가 버블형태로 올라가고 있음을 알 수 있고, 실제 1초까지 해석을 더 진행하였을 경우 공기층이 미세틈을 통해 빠져나가는 것을 확인할 수 있다.

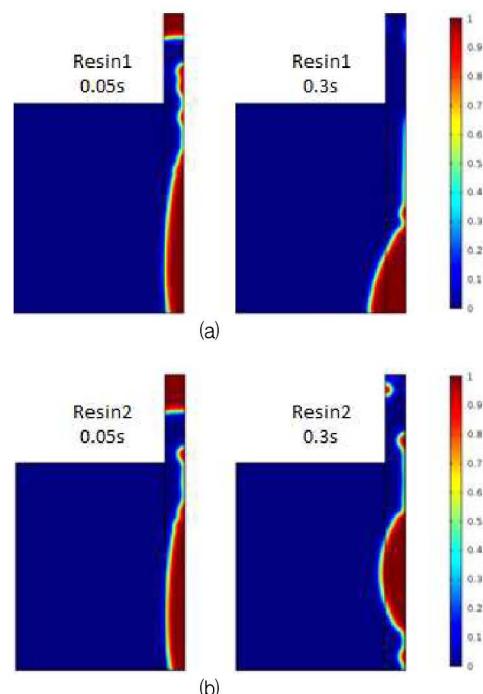


Fig. 5 Results of micro leakage behavior at ultimate inlet pressure (10,000 Pa): (a) Resin1 and (b) Resin2

#### 4. 결론 및 토의

본 연구에서는 광반응사출성형에 의한 초박형 도광판 제작 과정에서 공정상 어려움으로 작용하는 여러 문제점 중, 캐비티 내 수지 충진 과정 시 캐비티 옛지의 미세틈을 통한 누출에 대해서 수치 해석적으로 분석하였으며, 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 100 Pa의 유입압력에서는 유동이 거의 발생하지 않았다. 이 경우 실제 성형 시 미충진 등의 문제를 발생할 수 있을 것이다.
- 2) 600 Pa의 유입압력에서는 레진1, 2 모두 누출 없이 충진되는 것을 확인할 수 있었다. 다만, 코너에서 공기가 트랩되는 문제가 발생되었으나, 이는 해당 구역에 미세틈을 추가함으로써 해결 가능하다.
- 3) 1,000 Pa의 유입압력에서는 레진1의 경우 미세누출이 발생하는 것을 확인하였다. 상대적으로 점도가 높은 레진2의 경우 해당 조건에서도 미세누출이 일어나지 않음을 알 수 있었다.
- 4) 10,000 Pa 극한의 유입압력에서는 레진 상관없이 빠른 속도로 미세누출이 발생하였고, 빠른 유동에 의한 강한 전단력으로 인하여 코너에 트랩된 공기층이 유동을 따라 올라가는 것을 확인하였다.

본 연구에서는 광반응사출성형 시 캐비티 옛지에서 발생하는 미세누출현상에 관한 해석적 연구를 실시하였지만, 이를 기초로 하여 성형 시 수지 주입에 따른 현상을 실험적으로 확인하고 본 결과와 비교분석 할 필요가 있다. 이러한 후속 연구를 통해 광반응사출성형을 통한 초박형 도광판 제작을 위한 최적의 공정조건을 도출할 수 있을 것이다.

#### 후기

본 연구는 산업통상자원부의 산업현장핵심기술 수시개발사업(과제번호 10060476)의 지원을 통해 수행되었다.

#### 참고문헌

- 1) 김경동, 김도현, 이광희, 김성철, 반응사출성형 (RIM) 공정의 최근 동향, 폴리머, 제8권, 제5호, 289-299, 1984.
- 2) Castro, J. M., and C. W. Macosko. "Studies of mold filling and curing in the reaction injection molding process." AIChE Journal, Vol. 28, No. 2, pp. 250-260, 1982.
- 3) Becker, Walter E., Reaction Injection Molding. Van Nostrand Reinhold Company, 1979.
- 4) Sweeney, F. Melvin. Introduction to reaction injection molding. Technomic Pub Co, 1979.
- 5) Manzione, Louis T. "Simulation of cavity filling and curing in reaction injection molding." Polymer Engineering & Science, Vol. 21, No. 18, pp. 1234-1243, 1981.
- 6) Koh, W.- G, and Pishko, M.. "Photoreaction injection molding of biomaterial microstructures," Langmuir, Vol. 19, No. 24, pp. 10310-10316, 2003.
- 7) Vetterling, William T. "Multiphase Laminar Flow with More Than Two Phases." Proceedings of the 2015 COMSOL Conference in Boston, 2015.