

## 섬유 강화 사출성형품의 뒤틀림 현상 해석

민남홍<sup>†</sup> · 김성우\* · 박찬석 · 이미혜\*\* · 이기준

서울대학교 화학공학과

\*경기대학교 화학공학과

\*\*부산지방중소기업청

(1996년 10월 1일 접수, 1997년 5월 9일 채택)

## An Analysis of the Warpage Phenomena of the Fiber-Reinforced Injection Molded Parts

Namhong Min<sup>†</sup>, Seong Woo Kim\*, Chan Seok Park, Mi Hye Lee\*\* and Ki-Jun Lee

Department of Chemical Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

\*Department of Chemical Engineering, Kyonggi University, Suwon 442-760, Korea

\*\*Pusan Regional Small and Medium Business Office

(Received 1 October 1996; accepted 9 May 1997)

### 요 약

사출성형품에서 자주 발생하는 뒤틀림은 성형품 전체에 걸친 불균일한 수축 분포로 인하여 나타나는 현상으로서 제품의 수명을 단축시키기 때문에 가장 심각한 문제점으로 지적되고 있다. 본 연구에서는 섬유강화 사출성형품에서의 수축과 뒤틀림 현상의 특성을 이해하고, 또한 이들을 감소시킬 수 있는 조건을 찾기 위하여 30 wt%의 유리섬유가 함유된 PBT수지를 사용한 사출성형 실험과 함께 사출성형공정 해석용 software인 Moldflow(Series 9.02)를 이용한 수치모사를 수행함으로써 수축과 뒤틀림 현상에 대하여 공정조건의 변화, 성형품의 구조 변화 및 섬유배향에 따른 영향을 고찰하였다. 그 결과 밀면이 없는 직육면체 구조의 성형품의 경우 짧은 면이 긴 면보다 뒤틀림이 더 많이 일어났으며, 공정조건의 변화에 대하여 짧은 면보다 긴 면이 더욱 크게 영향을 받았다. 그리고 실험결과에서 사출속도가 증가함에 따라 뒤틀림이 증가하였으나, 보압 증가에 따라 뒤틀림은 다소 감소하였으며, 수치모사에서 이와 같은 경향을 잘 예측하였다. 특히 본 실험에서 사용한 3차원 구조체의 경우, 모서리 부분에서 온도 분포를 균일하게 유지하는 것이 뒤틀림을 억제하는데 가장 중요하다는 것을 알 수 있었으며, 이를 위해서 직육면체 공동의 내부 냉각 온도를 외부 온도 보다 낮게 유지하는 것이 효과적이었다. 이상으로부터 뒤틀림의 주원인은 섬유배향과 모서리 효과라는 것을 밝힐 수 있었다.

**Abstract**—The warpage phenomena occurring frequently in the injection molded parts due to the inhomogeneous distribution of shrinkage are known as serious problems because those may shorten the life cycle of the product. Therefore, in this study the effect of the change of process condition, the change of the structure of injection molded parts and fiber orientation on shrinkage and warpage were investigated by performing an injection molding experiment using PBT (polybutylene terephthalate) resin including 30 wt% glass fiber and a numerical simulation using Moldflow(series 9.02) software. From this study, it was found that the degree of warpage of the short sides was higher than that of the long sides in three dimensional molded parts, whereas the change of the process condition had more significant effect on the long sides rather than short sides with respect to degree of warpage. In addition, the experimental results showed that the degree of warpage increased with the increase of injection rate, but that of warpage decreased with the increase of packing pressure. And numerical simulation could adequately describe experimental results with a similar tendency. Especially, it was revealed that homogeneous temperature distribution over the corner of the three dimensional injection molded parts was the most crucial condition in order to minimize degree of warpage. It was effective to keep the cooling temperature of the inner side of the cavity lower than the outer one. Conclusively, fiber orientation and corner effect were found to be the principal causes of warpage from this study.

**Key words:** Injection Molding Process, Shrinkage, Warpage, Fiber Orientation, Corner Effect

## 1. 서 론

사출성형공정은 압출성형공정과 더불어 플라스틱의 가공에 가장 널리 이용되는 공정 중의 하나이다. 사출성형공정의 장점은 성형품의 생산이 하나의 공정 주기를 통해 이루어지므로 쉽게 자동화할 수 있으며, 복잡하고 정밀한 성형품이라도 짧은 시간 안에 만들 수 있으므로 생산성이 높아 카메라 렌즈, 자동차용 부품 및 광 디스크 등에 이르기까지 다양한 제품의 생산에 이용될 수 있다는 것이다. 그러나 사출성형 제품에서 자주 발생하는 흐름자국(flow mark)이나 함자국(sink mark)과 같은 표면 결점과 제품내 기공(voids) 등은 제품의 질을 저하시키는 요인이 되며, 수축(shrinkage)과 뒤틀림(warpage) 등은 최종 제품의 강도(strength)와 강성도(stiffness)를 저하시켜 결국 제품의 수명을 단축시키는 요인이 되기 때문에 가장 심각한 문제점으로 지적되고 있다. 최근 들어 이러한 현상의 원인을 규명하고 해결하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

수축 현상은 용융상태에 있던 수지가 고화 과정 중 온도 감소에 따른 체적의 감소로 인해 생기는 것으로, 특히 결정성 수지의 경우 응점 부근에서 결정이 형성될 때 급격한 체적의 감소를 보이게 된다. 뒤틀림 현상은 수축이 성형품 전체에 걸쳐 일정한 분포를 갖지 않고 불균일하게 수축되기 때문에 일어나는 현상이다. 즉, 불균일한 냉각 온도, 잔류응력 그리고 고분자 사슬 및 섬유입자의 배향에 의한 물질의 비등방성 등이 주 요인이 되어 성형품은 일정하게 수축하지 않고 원래의 모양에서 뒤틀린 형태를 가지게 된다. 이것은 제품의 외관뿐 아니라 제품의 역학적 성질면에서도 가장 큰 결점으로 남게 된다.

수축과 뒤틀림을 억제하기 위하여 금형온도, 용융온도, 사출속도 그리고 보압 등의 공정조건들과 금형의 형태, 그리고 수지의 선택 등이 일반적으로 사용되어 왔으나, 한 가지 요인의 변화가 다른 모든 요인에 영향을 미치기 때문에 간단한 규칙을 세우기가 용이하지 않다. 그러므로 뒤틀림 현상에 대한 보다 근본적인 원인을 규명하기 위해서는 이러한 외적 요인들에 의해서 영향을 받는 분자 및 섬유배향, 불균일한 수축, 불균일한 냉각조건과 잔류응력 등의 내적 요인들에 대한 연구가 선행되어야 한다. 이를 위하여 지금까지 많은 연구자들은 수축 및 뒤틀림 현상에 대하여 연구를 수행해 왔다[1-5]. Lee와 Dubin[6]은 end-gated bar와 edge-gated plate 금형을 사용하여 Nylon 6과 PET 성형품에 대한 수축 및 뒤틀림을 조사하였으며, Discipio 등[7]은 8 inch의 외경을 가진 ABS 성형품에 대하여 두께를 변화시켜 가면서 수축과 뒤틀림을 측정하였다. Matsuoka 등[8]은 섬유 보강 폴리프로필렌의 평판 성형품에 대하여 적분 모사 프로그램(Integrated Simulation Program)을 사용한 수치모사를 통하여 뒤틀림을 예측하였다. Delbarre와 Pabiot[9]는 여러 공정 조건하에서 평판형 금형과 나선형 금형을 사용하여 PP와 talc 함유 PP 그리고 PBT와 유리섬유 강화 PBT 수지들에 대하여 사출실험을 하였다. 그 결과 사출온도 및 보압의 증가에 따라서 수축량은 감소하였으나 금형 온도 증가에 따라 수축량은 증가하였다. 또한 강화재가 첨가된 경우에는 섬유입자의 배향으로 인한 효과가 수축현상에 지배적인 영향을 미친다고 발표하였다. Rietveld와 Liu[10]는 탄성 상변이 모델을 이용한 수치모사를 통하여 열적 불균형과 금형의 기하학적 불균형이 등방성의 폴리스티렌 사출성형 제품의 뒤틀림 정도에 미치는 영향을 조사하였다. Ni와 Wang[11]은 보압조건에 따른 수축과 뒤틀림 변화에 대해서 C-Mold program을 이용한 수치모사 결과와 실험적인 결과를 비교 분석하였는데, 수축과 뒤틀림은 보압 시간보다는 압력에 의해 더 큰 영향을 받는다고 보고하였다. 사출성형품에서 재료의 비등방성과 뒤틀림의 상관 관계를 밝히려는 연구가 Kikuch와 Koyama[12]에 의해 처음 시도되었는데 그들은 강화재가 혼합된 Nylon 66에 대하여 선형 열팽창 계수( $\alpha$ )로 나타낸 비등방성 정도( $R\alpha$ )

에 따라서 뒤틀림의 크기 및 형태를 실험적으로 측정하였다. 그 결과 강화재가 첨가되지 않은 경우( $R\alpha=1$ ) 보다 강화재가 첨가된 경우( $R\alpha<1$  또는  $R\alpha>1$ ) 뒤틀림이 더 많이 발생하며, 두 경우( $R\alpha<1$ 과  $R\alpha>1$ )를 혼합한 경우에는 비강화 수지보다 뒤틀림이 더 적게 발생한다고 발표하였다.

본 연구의 목적은 사출성형품에 대한 수축과 뒤틀림 현상의 특성을 이해하고, 이들을 억제시킬 수 있는 방안을 모색하기 위한 것이다. 이를 위하여 유리섬유 강화 수지를 사용하여 사출속도, 보압 및 냉각 온도 등의 공정변수들을 변화시켜 가며 사출성형 실험을 실시하였다. 실험에서 금형은 밀면이 없는 직사각형 공동을 사용함으로써 3차원 형상 성형품의 뒤틀림 현상에 대한 구조적 요인을 조사하였다. 또한 상업용 소프트웨어인 Moldflow(Series 9.02)를 이용하여 수치모사를 병행함으로써 실험결과와 수치모사 결과를 비교하였고, 수치모사 결과로부터 수지가 갖는 여러 열적·역학적 이력(thermomechanical history)을 조사함으로써 수축과 뒤틀림에 대한 원인을 해석하였다. 그리고, 사출 후 제품의 인장강도와 인장계수를 측정함으로써 공정조건과 제품의 역학적 성질간의 상관관계를 밝히고자 하였다.

## 2. 수치모사

본 연구에서는 MOLDFLOW Dynamic Series 9.02를 사용하여 수치모사하였으며, HP Workstation 9000/730을 사용하였다. 수치모사에 사용된 유한 요소 모델은 Fig. 1과 같다.

### 2-1. 유동 및 보압해석

유동해석은 수지가 금형의 공동내로 유입되는 충전과정과 수지의 냉각으로 인한 제품의 수축을 보상하기 위한 보압과정으로 구분된다. 이때 사용되는 지배방정식은 다음과 같다.

$$\text{Equation of Continuity; } \frac{\partial \rho}{\partial t} + (\nabla \cdot \rho \vec{v}) = 0$$

$$\text{Equation of Momentum; } \frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) = \rho \vec{g} + [\nabla \cdot \underline{\sigma}] - [\nabla \cdot \rho \vec{v} \vec{v}]$$

$$\text{Equation of Energy;}$$

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T \right) = \beta T \left( \frac{\partial p}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla p \right) + p \nabla \cdot \vec{v} + (\underline{\sigma} : \{ \nabla \vec{v} \}) + \nabla \cdot (k \nabla T)$$

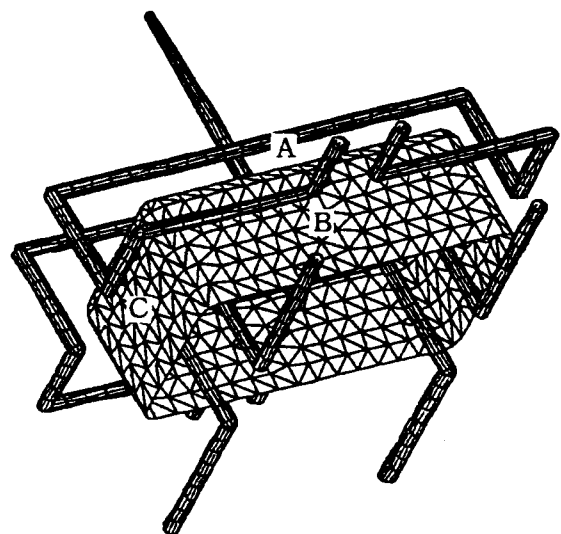


Fig. 1. Finite element mesh for 3-D injection molded part and the cooling pipe circuit.

그리고 해석에 이용되는 기본 가정은 다음과 같다.

- incompressible fluid:  $\nabla \cdot \vec{v} = 0$
- generalized Newtonian fluid:  $\tau = \eta(\dot{\gamma})\dot{\gamma}$
- constant thermal conductivity

## 2-2. 냉각해석

냉각해석은 금형의 온도와 공동내에서 수지의 온도 분포를 해석한다. 이때 이용되는 지배방정식은 유동해석의 에너지식과 같다. 초기의 경계조건으로 전체 금형 온도를 일정하다고 가정하여 유동해석을 실시하고, 이 유동해석의 온도분포 결과가 각 요소에서 end-of-cycle mold 온도 계산을 위해 냉각해석의 초기조건으로 이용되며, 다시 냉각해석을 통하여 얻어진 결과가 유동해석의 초기조건으로 이용되어 전체 금형 온도분포에 따른 공동내 온도변화를 예측하게 된다.

## 2-3. 뒤틀림해석

먼저 PVT data로부터 체적 수축률, 결정성 성분, 금형 억제 효과, 그리고 수지의 배향 효과 등을 고려하여 유동해석에서 얻어진 결과들로부터 수축률을 계산한다.

수축해석에 사용되는 유동해석 결과는 다음과 같다.

- 보압 과정 중 계산된 평형 체적 수축
- 고화시 각 격자점에서의 냉각 속도
- 고화시 각 격자점에서의 전단 응력
- 냉각과정 종료시 각 격자점에서의 온도

수지의 배향 방향에 평행하거나 수직인 방향의 수축은 다음의 공식에 의하여 계산된다.

$$S'' = a_1 M_v + a_2 M_c + a_3 M_r + a_4 M_o'' + a_5$$

$$S^+ = a_6 M_v + a_7 M_c + a_8 M_r + a_9 M_o^+ + a_{10}$$

여기서  $a(i=1, 2, \dots, 10)$ 는 상수들이고,  $M_v$ 는 체적 수축,  $M_c$ 는 결정성 성분 정도,  $M_r$ 은 금형 억제 효과 정도 그리고  $M_o''$ 와  $M_o^+$ 는 수지의 배향 방향에 평행하거나 수직인 방향의 배향효과 정도이다.

각 유한요소에서의 수축 분석으로부터 다음과 같은 결과들이 얻어진다.

- 수지 배향의 방향,  $\Phi$
- 각 요소의 상단과 하단에 대한 수지 배향 방향에 평행한 수축 변형도,  $S''$
- 각 요소의 상단과 하단에 대한 수지 배향 방향에 수직인 수축 변형도,  $S^+$

수축 변형도(shrinkage strain)는 구조해석으로 넘겨져서 각각에 해당되는 nodal loads 값으로 표현된다. 일반적으로 이러한 값은 증분 분석(incremental analysis)을 필요로 하는 비선형 분석을 행해야 하나, 휨(buckling)이 없다면 선형 분석으로도 충분하다. 이러한 선형 또는 비선형 분석으로부터 각 node에 대한 변위와 각 요소에 대한 잔류 응력이 얻어지고, 이 결과들로부터 전체 변형량을 계산하게 된다.

## 3. 실험

본 연구에서는 PBT[poly(butylene terephthalate)] 수지에 30 wt%의 유리섬유가 함유된 단섬유 강화 복합수지(LUPOX GP 2300, LG화학)를 사용하였다. 이 수지에 대한 물성자료를 Table 1에 나타내었다. 이 자료는 모두 MOLDFLOW사에서 측정된 것으로서 수치모사에 이용되었다. PBT수지는 기계적 특성, 전기적 특성, 내열, 내약품

Table 1. Material properties of PBT including 30 wt% glass fiber

Conductivity	0.195 W/m °C
Specific heat capacity	1705.0 J/kg °C
Melt density	1334.69 kg/m <sup>3</sup>
Ejection temperature	205.0 °C
No flow temperature	215.89 °C
Average fiber length	0.2 mm
Average fiber diameter	0.01 mm
Fiber volume fraction	0.18

성 및 성형가공성 등이 우수한 범용수지로서 전기, 전자 및 자동차 산업분야 등에 폭넓게 이용되고 있다. 또한 2차 전이 온도가 낮고(30 °C이하), 결정화 속도가 매우 빠르기 때문에 사출성형시 비교적 저온(30-60 °C)의 금형을 사용하여도 결정화가 충분히 진행되어 안정된 성형품을 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다.

사출기는 Battenfeld사에서 제작된 BA-T 1600/630을 사용하였다. 사출성형 실험에 사용된 금형 및 냉각회로를 Fig. 1에 나타내었다. 금형은 3차원 구조물로 바닥면이 없는 직사각형 공동으로 구성되어 있으며, 수지는 금형의 윗면 중심 부분에서부터 직접 유입되도록 설계되어 있다(direct-sprue gate). 금형내 공동의 치수는 길이 200 mm, 폭 120 mm, 높이 80 mm이며 두께는 3.2 mm로 전면에 걸쳐 일정하다. 이러한 금형은 4개의 모서리를 갖는 3차원 구조로서, 뒤틀림 현상에 대한 구조적 요인과 유동 및 보압전달의 효과를 연구하는데 적절한 구조를 갖는다. 냉각회로의 직경은 8 mm이며, 위치는 공동의 내측 및 외측 벽에서부터 각각 30 mm씩 간격을 유지하고 있다. 냉각온도는 60 °C/60 °C(공동의 외측/내측 또는 금형의 고정판/이동판)인 경우 온조기를 이용하여 회로내로 일정한 온도의 기름이 유입되도록 하였고, 냉각온도가 60 °C/18 °C인 경우 안 쪽 회로에는 냉각수를 유입하였다. 성형공정시 노즐 압력 측정을 위하여 노즐 부위에 센서(Dynisco PT465XL)를 장착하였다. 여기서 측정된 시간에 따른 압력의 측정 자료를 수치모사 실험의 입력조건으로 이용함으로써 수치모사와 실험간의 차이를 줄이도록 하였다.

뒤틀림 측정에는 (주)덕인 사의 3차원 측정기와 자료해석 소프트웨어(Neuro Measure)를 이용하였다. 이 기기의 측정 허용오차는 10<sup>-3</sup> mm로서 측정시 발생할 수 있는 오차를 가능한 한 줄일 수 있었다. 뒤틀림 결과의 정리 위해 윗면을 A면, 긴 측면을 B면, 짧은 측면을 C면으로 정의하였다(Fig. 1 참조). Fig. 2의 뒤틀림 정의와 같이 제품의 뒤틀림 이전의 내측 거리를  $L_0$ 라 하고, 뒤틀림 후 최소 거리를  $L$ 이라 할 때( $L_0 - L$ )을 x-방향 뒤틀림(C면의 뒤틀림),  $\Delta X$ 로 정의하였다. 마찬가지로 y-방향 뒤틀림(B면의 뒤틀림)을  $\Delta Y$ 라 정의하였다.

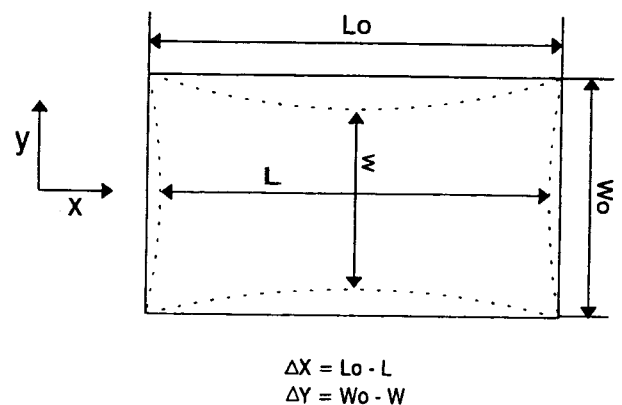


Fig. 2. Definition of the deflection.

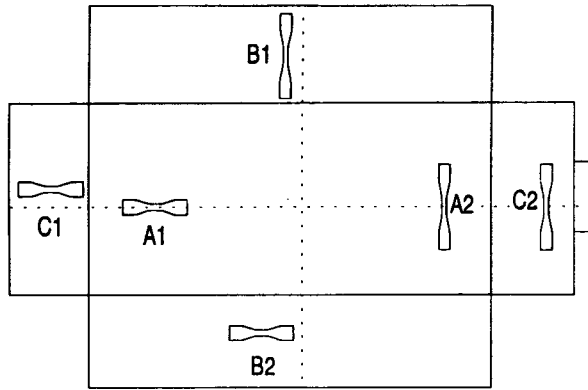


Fig. 3. Location and position of the sample species.

Fig. 3에 인장물성 측정을 위한 시편 제작의 위치를 나타내었다. 그림에서와 같이 유동방향에 평행인 방향(1-방향)과 이에 수직인 방향(2-방향)의 물성 차이 및 위치에 따른(A, B & C면) 물성의 차이를 고려하여 시편을 제작하였다. 인장물성 측정에 사용된 시편의 규격은 ASTM D638에 따랐으며, 측정시 사용된 UTM의 인장속도는 1 mm/min로 일정하게 유지하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4-1. 공정조건에 따른 뒤틀림 변화

###### 4-1-1. 사출속도의 영향

공정조건에 따른 뒤틀림 측정값과 수치모사로부터 예측된 값을 Table 2에 나타내었다. C면의 뒤틀림( $\Delta X$ )에 비하여 B면의 뒤틀림( $\Delta Y$ )이 공정조건에 따라 큰 차이를 보이고 있으며, 또한 C면의 뒤틀림이 B면보다 전체적으로 큰 값을 갖는다는 것을 확인할 수 있다. 이에 대한 원인으로는 수지 충전시 B면으로부터 유입된 유동선단이 C면에서 만나면서 형성된 용착선(weld line)으로 인하여 냉각시 수축이 불균일하게 일어나고, 또한 사출속도의 변화에 따라 B면에서의 수지의 유동 속도 및 전단 속도가 C면에서 보다 더욱 민감하게 변화하기 때문으로 볼 수 있다. 전단속도가 변화한다는 것은 곧 전단속도에 지배를 받는 섬유입자의 배향이 영향을 받는다는 것으로, 섬유입자 배향의 변화가 뒤틀림의 양상을 결정하는 중요한 요인으

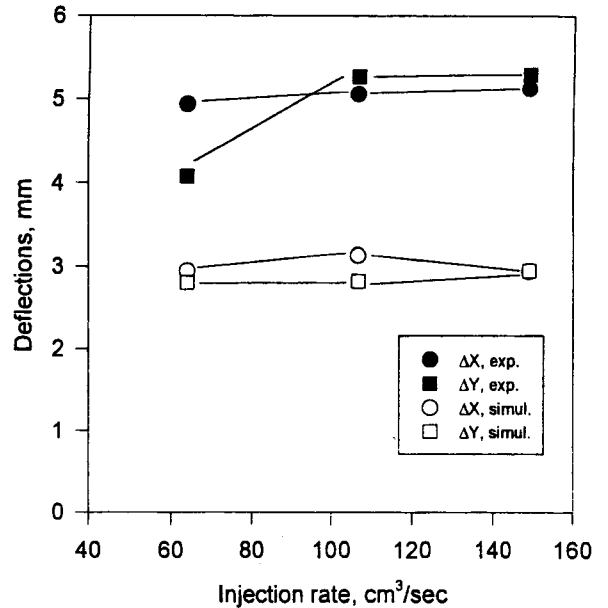


Fig. 4. Deflections as a function of injection rate when the packing pressure is 62.7 MPa.

로 작용한다고 생각할 수 있다.

Fig. 4에 보압이 62.7 MPa일 때 사출 속도에 따른 뒤틀림의 변화를 나타내었고, 사출 속도가 증가함에 따라 뒤틀림이 약간 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 사출 속도에 대한 영향은 섬유의 배향 때문으로 추측할 수 있다. Fig. 5에 충전 후 두께 방향에 따라 중심(grid 1)에서부터 표면(grid 10)까지 각각의 grid layer에서의 섬유입자의 배향을 나타내었다. C면에 있는 섬유입자들은 대부분 아래 쪽(z-방향)을 향하고 있으며, B면에서는 대부분 z-방향에 대해서 45° 정도 경사를 이루고 있다. 여기서 중요한 사실은 C면에서의 섬유배향 방향은 공정조건에 따라서 큰 차이가 없이 대부분 z-방향을 향하고 있다는 것이다. 이는 z-방향으로의 수축 및 뒤틀림을 감소시키며, 상대적으로 이에 대한 수직 방향(x-방향 또는 y-방향)의 수축 및 뒤틀림을 증가시킨다는 것을 의미하는 것이다.

Fig. 6에 사출속도가 63.9 cm³/sec인 경우와 141.1 cm³/sec인 경우에 대해 몇몇 요소에서의 속도와 전단속도 분포를 나타내었다. 그림

Table 2. Comparison of the experimental values with the simulated values of deflection at the given specific operating condition

Processing conditions			Deflections (mm)			
Cooling temp. (Top/Bottom, °C)	Flow rate (cm³/sec)	Packing press. (MPa)	Simulation		Experiment	
			$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta X$	$\Delta Y$
60/60	63.9	32.6			5.1287	0.9242
		47.5	3.1913	2.9872	5.0944	2.7065
		62.7	2.9442	2.8702	4.9313	4.0710
	106.5	33.3	3.6247	3.2548	5.3041	3.3790
		46.9	3.3631	3.0354	5.3070	4.6761
		62.3	3.1305	2.8166	5.0524	5.2653
	149.1	32.9	3.3953	3.3947	5.1249	3.8290
		47.7	3.1312	3.1613	5.1275	4.6554
		61.2	2.9326	2.9401	5.1199	5.2901
	60/18	45.7	3.3174	1.6679	4.6430	-2.3065
		32.8	3.5493	1.7683	4.4919	-2.1413
		46.3	3.5243	1.7176	4.6298	-0.3703
		62.4	3.2434	1.5873	4.5493	-0.1974
	149.1	47.5			4.5248	-0.1100

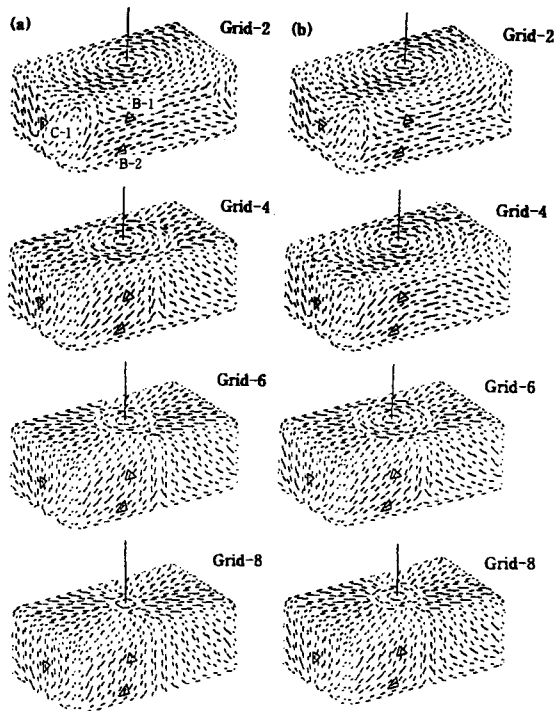


Fig. 5. Fiber orientation at the given grid layers. Here Grid-1 refers to the center layer and Grid-10 to the surface layer.  
(a) injection rate:  $63.9 \text{ cm}^3/\text{sec}$ , (b)  $149.1 \text{ cm}^3/\text{sec}$ .

에서 사출 속도가 감소하면 냉각 효과는 증가하고 공동내 수지의 온도는 감소한다. 이로 인해 고화층(속도 또는 전단속도가 0인 층)의 두께는 증가하게 되어 섬유 배향이 불균일하게 분포되어 있는 표면(skin)층이 증가하게 된다. Fig. 7에 각각의 요소에서 섬유 입자의 배향 정도를 나타내었다. 각 요소에서 막대의 방향은 섬유 입자의 배향 방향을 의미하며, 원에 가까워질수록 불균일한 분포를 갖게 된다는 것을 의미한다. 여기서 사출 속도가  $63.9 \text{ cm}^3/\text{sec}$ 인 경우(a)와

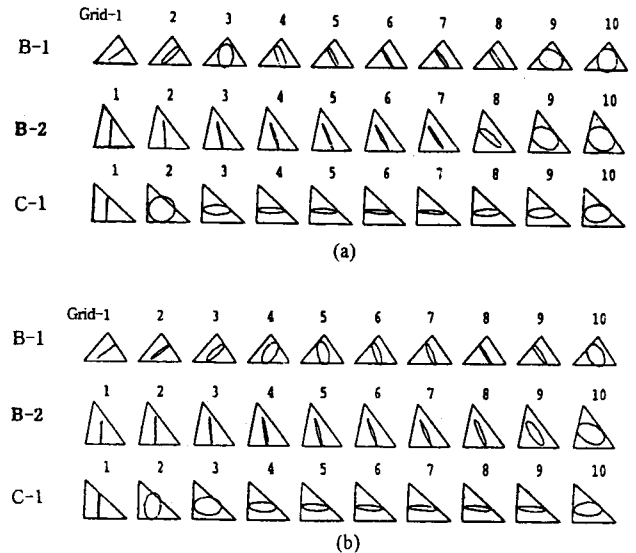


Fig. 7. Fiber orientation at each element of the given grid layers.  
(a) injection rate:  $63.9 \text{ cm}^3/\text{sec}$ , (b)  $149.1 \text{ cm}^3/\text{sec}$ . The positions of the elements B-1, B-2 and C-1 are referred to Fig. 5.

$149.1 \text{ cm}^3/\text{sec}$ 인 경우(b)를 비교해 보면 (a)의 경우가 표면 근처에서 더 불균일한 분포를 갖는 것을 알 수 있다. 즉 앞에서 지적한 바와 같이 사출 속도의 감소는 skin층이 증가하게 되고 섬유입자는 불균일한 배향을 하게 된다. 섬유입자들이 불균일하게 배향되면 면적 수축률이 감소하게 되어 결과적으로 뒤틀림이 적게 일어난다. 결론적으로 사출속도가 증가하게 되면 섬유입자들의 배향성은 증가하게 되고 이로 인해 섬유의 배향방향에 수직인 방향으로의 수축률은 증가하게 되어 변형이 더 크게 발생한다고 해석되어진다. 이러한 고찰은 앞에서 지적한대로 사출 속도가 변화하여도 C면의 배향에는 큰 차이가 없으므로 뒤틀림이 공정조건의 변화에 큰 영향을 받지 않으며, B면에서는 사출속도에 따라 섬유의 배향이 영향을 받아서 뒤틀림이 공정 조건에 따라 큰 차이를 보이는 사실을 입증하여 준다

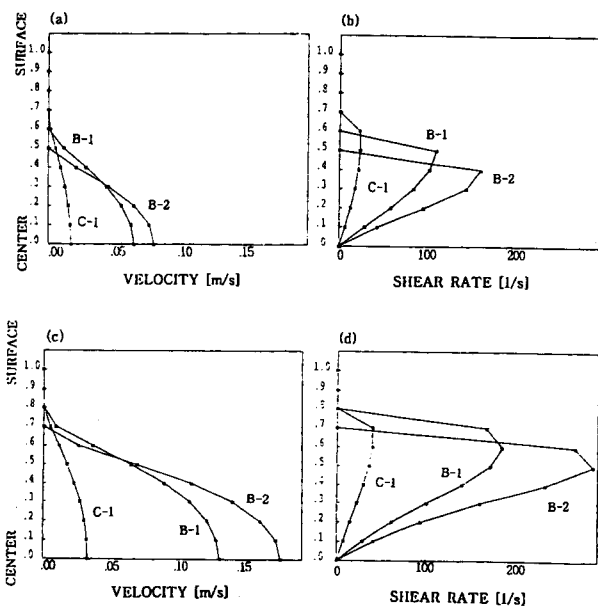


Fig. 6. Velocity and shear-rate profiles when the injection rates are (a), (b)  $63.9 \text{ cm}^3/\text{sec}$  and (c), (d)  $149.1 \text{ cm}^3/\text{sec}$ .

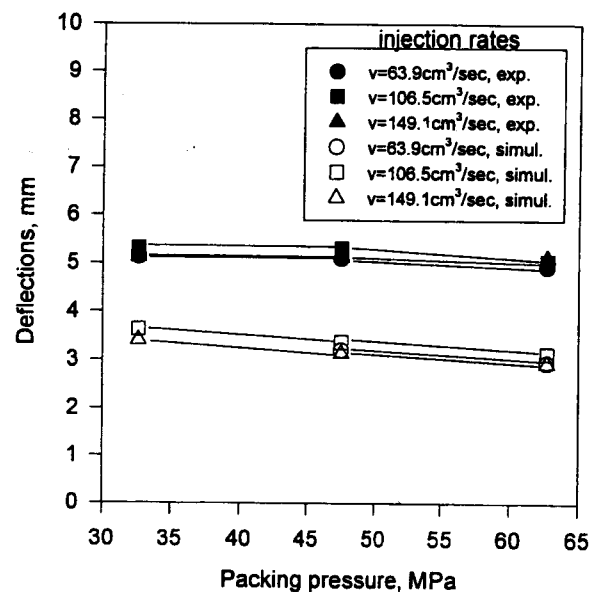


Fig. 8. The x-directional deflection as a function of packing pressure for the various injection rates when the cooling condition is  $60^\circ\text{C}/60^\circ\text{C}$ .

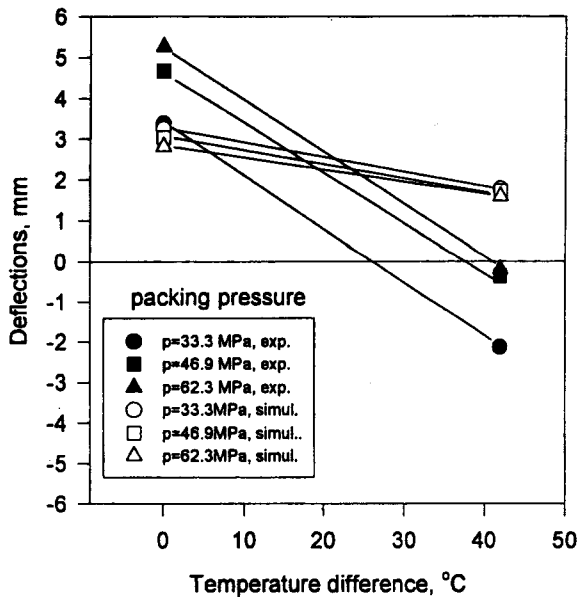


Fig. 9. The y-directional deflection as a function of temperature difference between outer and inner cooling circuit for the various pressures when the injection rate is 106.5 cm<sup>3</sup>/sec.

(Table 2).

#### 4-1-2. 보압 영향

Fig. 8로부터 x-방향 뒤틀림은 보압이 증가함에 따라 감소한다는 것을 알 수 있는데, 이것은 일반적으로 알려진 바와 같이 보압이 증가하게 되면 수지의 수축을 그만큼 보상해 주기 때문에 결과적으로 뒤틀림이 감소한다는 사실과 일치한다. 또한 감소하는 정도는 실험보다 수치모사의 경우가 더 큰 것으로 나타났다. Moldflow를 이용한 수치모사에서는 공동내에서 유동 및 보압과정 중 수지가 받는 압력을 실제보다 높게 예측하는 것으로 알려져 있다. 따라서 이러한 오차로 인하여 사출 후 수지의 부피 수축률을 실제보다 더 작게 예측하게 됨으로써 뒤틀림이 더 적게 일어나는 것으로 예측하였다.

#### 4-1-3. 냉각 조건의 영향

Fig. 9에 냉각 온도차(상자 안 쪽과 바깥쪽의 냉각회로 온도차)에 따른 y-방향 뒤틀림의 변화를 나타내었다. 실험결과에서 냉각 온도차가 클 경우  $\Delta y$ 가 음의 값을 갖는다. 음의 값은 3차원 구조물의 옆면(B면)이 바깥쪽으로 휘어져 나온다는 것을 의미한다. 즉, 제품의 내부와 외부의 냉각 온도차가 없는 경우, 앞에서 살펴보았던 모든 결과들은

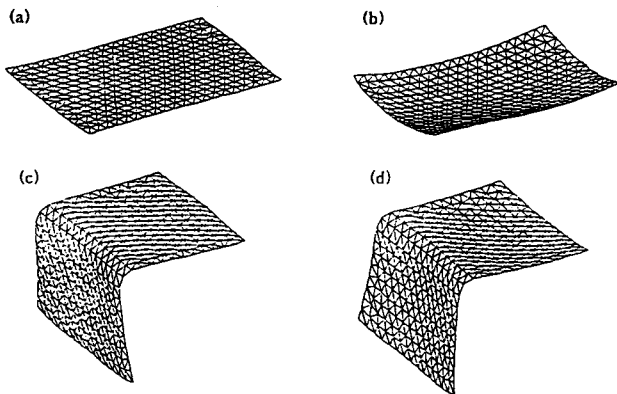


Fig. 10. Warpage of injection molded parts of flat-plate and L-plate type for the cooling conditions of 60 °C/60 °C: (a), (c) and 60 °C/20 °C: (b), (d).

양의 값(즉, 안쪽으로 휘어 들어가는 형태)을 나타내었으나 온도 차이가 있는 경우(약 40 °C)에는 이와 반대의 경향을 보였다(Table 2 참조). 이에 대한 원인으로서는 3차원 구조물의 모서리 부근에서 발생할 수 있는 냉각속도의 차이(즉, 모서리 내부에서는 heat sink가 적어서 외부보다 냉각이 잘 이루어지지 않는다.) 때문인 것으로 생각된다. 이러한 해석의 타당성을 검토해보고자 본 연구에서는 다음과 같이 간단한 구조(1개의 모서리를 갖는)에 대하여 수치모사하였다.

#### 4-2. 모서리 효과

3차원 구조 성형품의 경우에는 모서리 부분에서 수축이 불규칙하게 발생하여 제품의 뒤틀림을 유발하게 된다. 이러한 모서리 효과에 대한 원인을 조사하고 그에 대한 대책을 마련하고자 다음과 같이 수치모사하였다.

먼저, 모서리를 갖지 않는 경우(평판형)와 한 개의 모서리가 있는 경우("┐"자형)에 대하여 뒤틀림 양상을 비교하였다. 또한 각각의 금형에 대하여 냉각 온도차(윗면/아래면 또는 바깥쪽/안쪽)에 따른 뒤틀림의 변화를 관찰하였다.

Fig. 10(a), (b)에 평판 성형품의 변형된 모양을 나타내었다. Fig. 10(a)에서 윗면과 아래면의 냉각 온도가 같을 때 뒤틀림은 거의 일어나지 않았으며, Fig. 10(b)에서 윗면 온도(60 °C)와 아래면 온도(20 °C) 차이를 준 경우, 제품의 중심 부분이 아래쪽으로 변형된 것을 관찰할 수 있다. Fig. 9(c), (d)에는 L판 성형품의 뒤틀린 형태를 나타내었다. Fig. 10(c)에서 온도차가 없는 경우에는 옆면이 안쪽으로 휘어 들어간 것을 확인할 수 있으며, Fig. 10(d)에서는 온도차가 있을 경우(60 °C/20 °C) 윗면은 아래로 휘었으나 옆 면에서는 큰 뒤틀림이 일어나지 않았음을 알 수 있다. 평판의 경우는 냉각 온도차가 없는 경우에 윗면과 아래면의 공동내 온도차가 거의 없으며, 냉각 온도차가 있는 경우에는 제품의 윗면이 3-15 °C 정도 더 높다는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 L판의 경우에는 모서리에서 다른 양상을 보이고 있다. 즉 온도차가 없는 경우(60 °C/60 °C)에 오히려 모서리 부분에서 심한 온도차(-15 °C, 안 쪽 면의 온도가 더 높음)를 보이고 있다. 이처럼 냉각 온도차가 없는 경우에 모서리에서 안쪽 온도가 높은 이유는 바깥쪽으로는 열전달이 잘 되어 냉각이 원활히 진행되는 반면, 안쪽에서는 구조적 요인으로 열의 유출(heat sink)이 없게 되어 냉각이 훨씬 작게 일어나기 때문이다. 그러므로 안쪽의 온도는 바깥쪽보다 항상 더 높은 온도를 유지하게 된다. 이러한 모서리에서의 냉각의 불균형과 두께 방향 온도차로 인하여 상대적으로 냉각시 수축률의 차이가 있게 된다. 이를 설명하기 위해 Fig. 11에 제품의 단면도를 개략적으로 나타내었다. Fig. 11에서 모서리의 바깥쪽은 온도가 더 낮기 때문에 고화가 먼저 일어나며 안쪽은 상대적으로 고화가 늦게 일어나면서 수축이 진행되어 옆쪽면의 끝 부분을 끌어당기는 효과가 있고 바깥쪽은 이미 고화되어 굳어 있는 상태이므로 수축으로

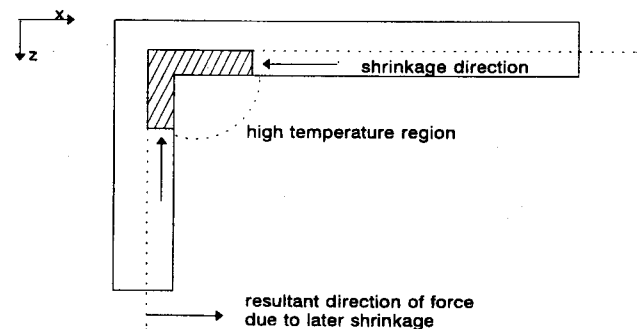


Fig. 11. The cross section of L-plate type injection molded parts.

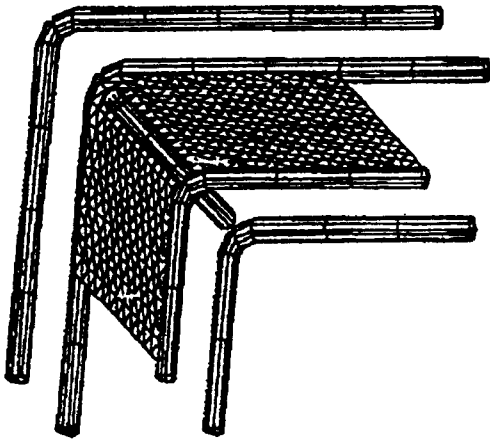


Fig. 12. A suggested cooling pipe circuit for warpage control.

인한 힘은 (+)x-방향으로 작용하게 될 것이다. 이러한 사실은 평판 제품의 경우 아래 면의 온도가 더 낮은 경우( $60^{\circ}\text{C}/20^{\circ}\text{C}$ )에 아래쪽이 먼저 고화되고 위쪽이 나중에 고화가 일어나면서 수축되므로 결과적으로 중심 부분이 아래쪽으로 들어간(또는 양끝 네 모서리가 올라간) 모양을 유지하게 되는 사실에서도 확인할 수 있다. 따라서 L판 제품과 같이 3차원 구조를 갖는 경우에는 이러한 모서리 효과로 인하여 전체적인 뒤틀림 형태가 결정되게 된다. 한편, L판형 제품에서 냉각 온도차를  $40^{\circ}\text{C}$ 로 유지하더라도 모서리에서는 온도차가 거의 없게 되므로 이러한 모서리 효과는 나타나지 않게 된다. 다만 윗면에서  $40^{\circ}\text{C}$ 의 온도차로 인하여 윗면의 중심 근처에서 아래쪽으로 휘어진 모양을 나타내게 된다.

따라서 본 연구에서는 온도차 조절만으로는 뒤틀림 제어에 있어서 만족할 만한 결과를 얻을 수 없었기 때문에 또 다른 방안으로 Fig. 12와 같이 모서리 부근에 양면으로부터 10 mm씩 간격을 둔 냉각라인을 추가로 설치한 냉각회로를 재설계하였다. 그 결과를 Fig. 13에 나타내었다. 이때 모든 냉각 회로의 냉각수 온도를  $60^{\circ}\text{C}$ 로 일정하게 유지하였는데, 결과에서 알 수 있듯이 제품 전체에 걸쳐 온도차가 심하지 않으며( $-0.128\sim 2.515^{\circ}\text{C}$ ), 그 결과 x-방향과 z-방향의 뒤틀림이 모두 앞의 경우보다 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

위의 간단한 수치모사에서 얻은 결과를 바탕으로 본래의 3차원 구조물에서 B면과 C면 모두 안쪽으로 휘어 들어가는 것( $+\Delta x$ ,  $+\Delta y$  방향)은 위에서 설명된 모서리 효과에 의한 영향 때문인 것으로 결론지을 수 있다(냉각 온도차  $60^{\circ}\text{C}/60^{\circ}\text{C}$ 인 경우). 냉각 온도차가 없을 경우 모서리에서는 안쪽의 온도가 최고  $20^{\circ}\text{C}$  정도까지도 높게 나타난다. 따라서 공정 조건에 따른  $\Delta x$ 와  $\Delta y$ 의 변화 경향에 대한 주요인은 모서리 효과와 섬유입자의 배향 방향인 것으로 생각할 수 있다. 냉각 온도차가  $60^{\circ}\text{C}/18^{\circ}\text{C}$ 인 경우 실제 실험에서 측정된 값들은 (-)값을 나타내었지만, 수치 모사에서는 이를 예측하지 못하였다.

#### 4-3. 인장물성

Fig. 14와 15에 인장계수 및 인장강도에 대한 측정 결과를 나타내었다. 이때 측정에 사용된 시편의 위치는 Fig. 3과 같다. 이러한 결과를 통해 다음과 같은 사실을 알 수 있었다. 첫째, 섬유의 배향 방향(1방향)에 대한 인장 물성이 수직 방향(2방향)보다 훨씬 뛰어나다. 둘째, 1방향 인장강도는 B면이 가장 작고 반대로 2방향 인장강도는 B면이 가장 크다. 이것은 수치모사 결과에서 살펴본 바와 같이 섬유입자의 배향이 A면에서는 x-방향으로, C면에서는 z-방향으로, 그리

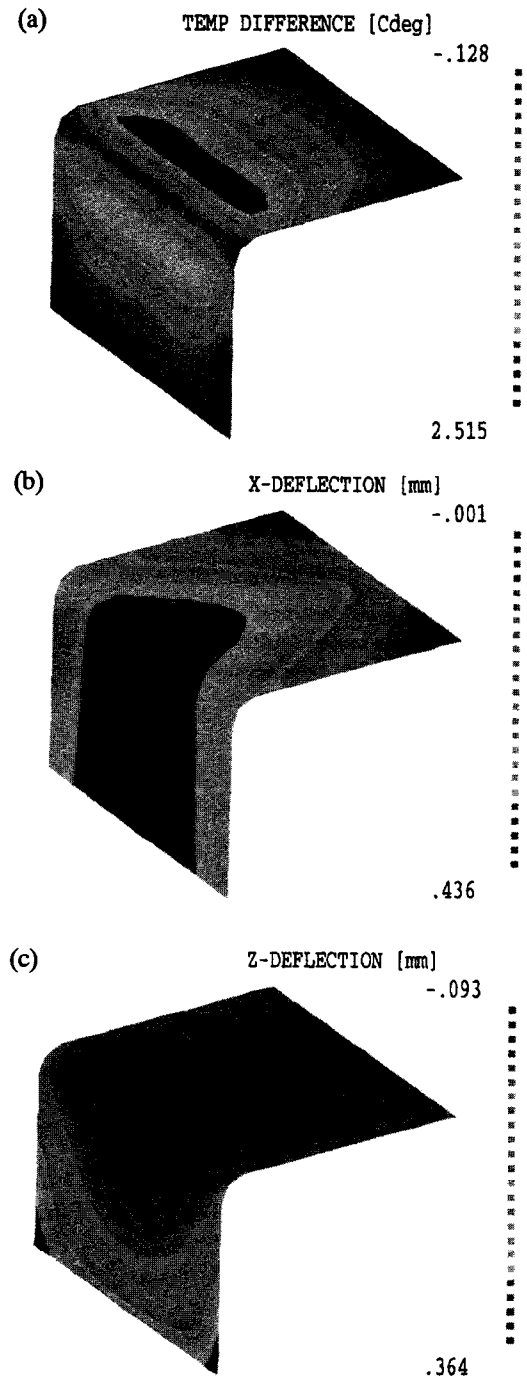


Fig. 13. The L-plate type injection molded parts with the suggested cooling pipe circuit.

(a) temperature difference, (b) x-directional deflection, (c) z-directional deflection.

고 B면에서는 z-방향에  $45^{\circ}$  정도의 경사를 유지하고 있기 때문인 것으로 생각된다. 셋째, 냉각조건에 따라서는 바깥쪽과 안쪽의 온도차가 있을 때( $60^{\circ}\text{C}/18^{\circ}\text{C}$ ), 인장 계수는 감소하였으나 인장강도에는 큰 변화가 없었다. 냉각조건에 따라 인장 계수가 큰 차이를 보이는 이유는 온도차에 따른 섬유배향의 차이 때문이라 생각되며, 바깥쪽과 안쪽의 온도차가 있는 경우가 온도차가 없는 경우보다 인장계수가 작지만 더 고른 분포를 보임으로써 물성이 안정된 사출성형품을 만들 수 있게 된다.

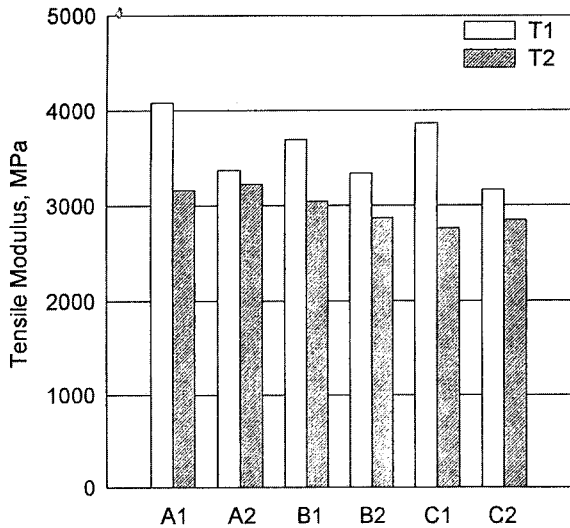


Fig. 14. Tensile modulus as a function of the location of sample species with the conditions of which the injection rate is  $106.5 \text{ cm}^3/\text{sec}$  and the packing pressure is  $33.3 \text{ MPa}$  ( $T1=60/60^\circ\text{C}$ ,  $T2=60/18^\circ\text{C}$ ).

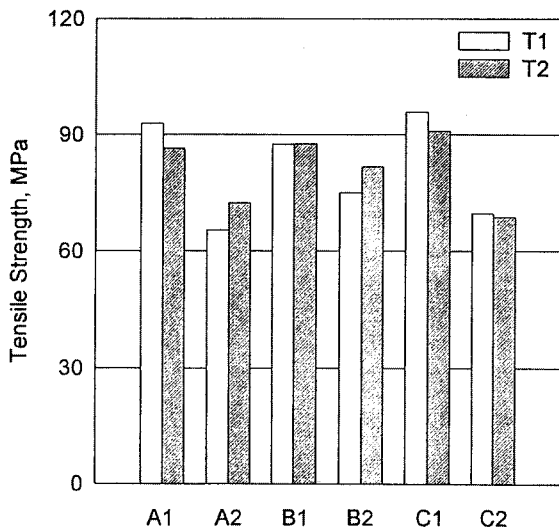


Fig. 15. Tensile strength as a function of the location of sample species with the conditions of which the injection rate is  $106.5 \text{ cm}^3/\text{sec}$  and the packing pressure is  $33.3 \text{ MPa}$  ( $T1=60/60^\circ\text{C}$ ,  $T2=60/18^\circ\text{C}$ ).

## 5. 결 론

30 wt%의 유리섬유가 함유된 PBT수지를 사용한 사출성형품에 대

한 뒤틀림 현상을 사출성형 실험 및 수치모사로 해석한 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

(1) 3차원 구조물의 성형품에 있어서 C면이 B면보다 뒤틀림이 많이 일어났다. 이는 C면에서의 비효과적인 보압전달 및 weld line 형성에 의한 불균일한 수축에 기인한 것으로 볼 수 있다.

(2) B면에서의 뒤틀림이 C면에서 보다 공정조건에 따라 더욱 민감하게 변화하였다. 이는 B면에서의 전단속도가 사출속도의 변화에 따른 영향을 더 크게 받음으로써 B면의 섬유배향에 민감하게 작용한 때문이라 생각된다.

(3) 사출속도가 증가하게 되면 전단속도도 증가하게 되고, 또한 냉각효과의 감소로 인하여 섬유의 배향이 불균일한 분포를 갖게 되는 skin층이 감소함으로써 뒤틀림이 증가한 것으로 나타났다.

(4) 뒤틀림을 최소화하기 위해서는 삼차원 모서리 부분에서 온도 분포를 균일하게 유지하는 것이 가장 중요하며, 이를 위해서 내부 냉각 온도를 외부 온도보다 작게 유지하는 것이 효과적이었다.

(5) 섬유강화 사출성형품의 인장물성은 보압과 사출속도에 따라서는 큰 변화가 없었으나, 냉각조건에 따라서는 바깥쪽과 안쪽의 온도차가 있을 때( $60^\circ\text{C}/18^\circ\text{C}$ ) 섬유배향의 차이로 인해서 인장계수가 감소하였다.

## 참고문헌

- Williams, R.: *Modern Plastics*, Sept.(1967).
- Harry, D.: *SPE Technical Papers*, 27(1971).
- Jacques, M. St.: *Polym. Eng. Sci.*, **22**, 4, March(1982).
- Wang, K. K., et al.: Progress Report No. 15, Cornell Injection Molding Program(1990).
- Wang, K. K., Himasekhar, K., Chiang, H. H., Jong W. R. and Wang, V. W.: *ANTEC Proceedings*, 37(1991).
- Lee, C. G. and Dubin, A.: *ANTEC Proceedings*, 375(1990).
- Discipio, W., Wagle, A. and McCarthy, A. P.: *ANTEC Proceedings*, 283(1990).
- Matsuoka, T., Takabatake, J. I., Koiwai, A., Inoue, Y., Yamamoto, S. and Takahashi, H.: *ANTEC Proceedings*, 369(1990).
- Delbarre, P., Pabiot, J., Rietsch, F. and Daurelle, J. F.: *ANTEC Proceedings*, 301(1991).
- Rietveld, J. X. and Liu, S. J.: *ANTEC Proceedings*, 1349(1992).
- Ni, S. J. and Wang, K. K.: *ANTEC Proceedings*, 1612(1993).
- Kikuchi, H. and Koyama, K.: *Polym. Eng. Sci.*, **34**, 1411(1994).
- Mozes, K. P.: *ANTEC Proceedings*, 2726(1993).