

단섬유 보강 사출성형품의 휨 감소를 위한 게이트 위치, 성형 조건 및 제품 구조 설계

최두순[#]

Design of Gate Locations, Molding Conditions, and Part Structure to Reduce the Warpage of Short-Fiber Reinforced Injection Molded Part

D. S. Choi

(Received August 21, 2008)

Abstract

Fiber reinforced injection molded parts are widely used in recent years because of their improved properties of materials such as specific stiffness, specific strength, and specific toughness. The demand for products with high precision is increasing and it is important to minimize the warpage of the products. The warpage of short-fiber reinforced product is caused by anisotropy induced by fiber orientation as well as the residual stresses induced during the molding process. In order to reduce the warpage of the part, it is important to achieve successful mold design, processing control, and part design. In the present study, the design of gating system, molding condition, and part structure were carried out and verified with numerical analysis using a commercial CAE code Moldflow. The numbers and locations of gates were iteratively determined, and the molding conditions which can decrease the warpage of the part were investigated. Finally, slight structural modification of the part was conducted to reduce the locally concentrated warpage.

Key Words : Fiber Reinforced Injection Molding, Warpage Analysis, Fiber Orientation, Numerical Analysis

1. 서론

단섬유 보강 사출성형품은 일반 플라스틱 성형품에 비해 우수한 열/기계적 특성 때문에 그 적용 범위가 확대되고 있다. 그러나 섬유배향(fiber orientation)에 따른 이방성 물성 변화 때문에 일반 성형품과는 다른 수축(shrinkage)과 휨(warpage)이 발생하게 된다. 일반적으로 사출성형 제품의 휨은 공정에 의해서 발생하는 잔류응력의 결과로 유발되는데, 이 잔류응력은 사출 성형품에서 재료의 수축률 차이에 의해서 발생된다. 만일, 제품의 모든 구간에서 모든 방향으로의 수축률이 동일하다

면, 제품은 휨이나 뒤틀림이 없이 단순히 크기만 변화한다. 그러나 실제 사출 성형품의 수축은 고분자 및 섬유의 배향, 금형 냉각, 제품과 금형 설계, 공정조건 등의 많은 요인들에 의하여 영향을 받기 때문에 제품 전체에 걸쳐 균일한 수축을 얻기가 힘들다. 특히 단섬유 보강 소재의 경우 다량의 유리 섬유를 함유하고 있기 때문에 유리섬유의 배향 방향과 그 직각 방향의 수축률 차이로 인한 변형이 크다. 최종 제품의 변형은 금형의 설계, 공정 조건에 크게 의존하며, 이 중 게이트의 위치 설계는 수지 유동의 방향과 균형을 지배하여 온도, 압력의 분포를 결정지으므로 금형 설계 중 가장

[#] 교신저자: 인하공업전문대학 기계설계과
E-mail: dschoi@inhatc.ac.kr

중요한 부분이다[1].

CAE 기술의 발전을 통한 많은 해석 프로그램의 등장으로 금형 설계의 시행착오가 줄어들고, 이로 인하여 많은 비용의 절감 효과도 얻게 되었다. 설계자는 이러한 상용 프로그램을 이용하여 결과를 분석하고, 새로운 설계를 도출하여 다시 해석을 수행하는 식으로 설계를 수행할 수 있게 되었다. 또한 이러한 과정까지도 컴퓨터를 이용하여 최적화 프로그램을 수행하도록 하기 위한 연구도 진행되고 있다[1-4]. 그러나 아직까지 이러한 연구가 실제 현장에서 복잡한 형상의 제품에 대하여 설계자의 개입이 전혀 없이 컴퓨터 스스로 최적화를 수행하는 단계에까지는 이르지 못하고 있다.

본 연구에서는 단섬유 보강 사출성형품의 휨 감소를 위한 게이트 위치설계, 성형 조건 및 제품 구조 설계를 수행하고, 수치해석을 통해 이를 검토하였다.

2. 해석 모델 및 소재 특성

본 연구의 대상 성형품은 Fig. 1 에 나타난 휴대폰 하우징 부품으로, 길이 95mm, 폭 50mm 의 크기에 0.7~1.0mm 의 두께분포를 가지고 있다. 최근 휴대폰 디자인의 슬림화 경향으로 인하여 휴대폰의 두께가 얇아지는 추세이며, 이에 따라 휴대폰 하우징의 두께도 얇아지고 있다. 그러나 두께가 얇아지더라도 제품에 요구되는 강성과 강도를 만족시켜야 하므로 단섬유 보강 소재의 사용이 점차적으로 증가되고 있고, 주로 PC(polycarbonate)나 PA(polyamide)에 유리섬유(glass fiber)를 첨가한 소재들이 많이 사용되고 있으며, 본 연구에서는 PA 에 60%의 유리섬유가 함유된 소재에 대하여 Moldflow [5]를 사용하여 수치해석을 수행하였다.

수지의 점성도 모델 및 상태방정식의 계수는 Solvay 사의 Ixef 1032/9008 의 데이터를 참조하였고, Table 1 과 Table 2 에 나타내었다. 소재의 기계적 물성은

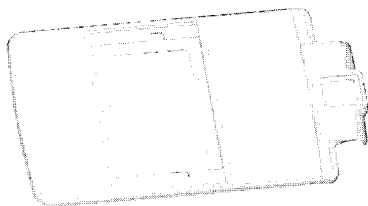


Fig. 1 The geometry of a mobile phone housing

Table 1 Viscosity model constants for Ixef 1032/ 9008

| Coefficients | Value |
|---------------|---------------------|
| n | 0.2191 |
| τ^* (Pa) | 6.034×10^5 |
| D_1 (Pa·s) | 3.841×10^9 |
| D_2 (K) | 452.15 |
| D_3 (K/Pa) | 0 |
| A_1 | 21.01 |
| A_2 (K) | 51.6 |

Table 2 Specific-volume model constants for Ixef 1032 /9008

| Coefficients | Value |
|--------------------------------|------------------------|
| $b_{1,m}$ (m^3/kg) | 6.01×10^{-4} |
| $b_{2,m}$ ($m^3/kg \cdot K$) | 1.89×10^{-7} |
| $b_{3,m}$ (Pa) | 2.329×10^8 |
| $b_{4,m}$ (K^{-1}) | 3.059×10^{-3} |
| $b_{1,s}$ (m^3/kg) | 5.805×10^{-4} |
| $b_{2,s}$ ($m^3/kg \cdot K$) | 9.551×10^{-8} |
| $b_{3,s}$ (Pa) | 4.693×10^8 |
| $b_{4,s}$ (K^{-1}) | 2.00×10^{-3} |
| b_5 (K) | 505.15 |
| b_6 (K/Pa) | 7.801×10^{-8} |

Table 3 Mechanical properties of Ixef 1032/9008

| Property | Value |
|-------------------------------|------------------------|
| Melt density (g/cm^3) | 1.6392 |
| Solid density (g/cm^3) | 1.7834 |
| Young's Modulus $_1$ (GPa) | 23.192 |
| Young's Modulus $_2$ (GPa) | 14.205 |
| Poisson's ratio $_{12}$ | 0.363 |
| Poisson's ratio $_{23}$ | 0.495 |
| Shear Modulus $_{12}$ (GPa) | 6.233 |
| Thermal expansion coeff. $_1$ | 1.322×10^{-5} |
| Thermal expansion coeff. $_2$ | 3.019×10^{-5} |

Table 3 에 나타내었고, 이때 아래첨자는 재료의 주 방향 (principal direction)을 의미한다.

3. 휨 감소를 위한 설계 및 검증

3.1 게이트 시스템 설계

게이트의 위치는 사출성형품의 변형에 많은 영

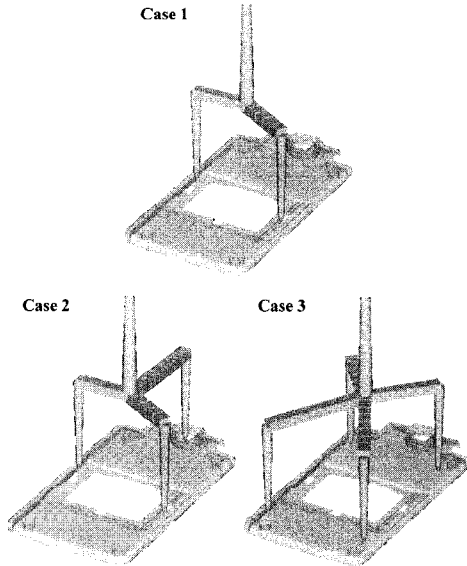


Fig. 2 Three cases of gate systems

향을 끼친다. 일반적인 사출성형에서는 유동의 균일 충전이 잘 일어날수록 사출압, 형체력 등이 감소하며 변형량도 작아진다. 그러나 섬유가 보강된 소재에서는 섬유의 배향이 변형에 미치는 영향이 크므로, 균일 충전 뿐 아니라 변형을 최소화하는 섬유배향이 일어나도록 게이트의 개수 및 위치를 설계하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 Fig. 2 에 나타난 세가지 게이트 시스템에 대하여 수치해석을 실시하고 유동 특성과 변형양상을 살펴보았다. 휴대폰 하우징 부품은 제품의 외장으로, 일반적으로 표면에 드러나는 외관 영역에는 게이트를 위치시키지 않는다. Fig. 2 의 Case 1 과 Case 2 는 이러한 외관 영역을 피해 다른 부품으로 가려지는 곳에 게이트를 위치시켰다. Case 3 는 결과 비교를 목적으로 실제로는 게이트를 위치시킬 수 없는 곳에 위치시킨 후 해석을 수행하였다. 게이트의 직경은 1.0mm, 러너 직경은 빼기구배를 적용하여 2.5~4.0mm 로 설계하였다.

해석에 사용된 성형조건은 수지온도 280°C, 금형온도 130°C, 사출시간 1sec, 보압 100MPa, 보압 시간 6sec 이다.

수치해석 결과 얻어진 충전시간 분포와 섬유배향을 Fig. 3 에 나타내었다. 일반적으로 단섬유 보강 소재의 사출 성형 시 섬유배향은 금형면과 가까운 표면층에서는 충전과정중에 발행하는 높은 전단응력으로 인하여 흐름과 평행한 방향으로 배

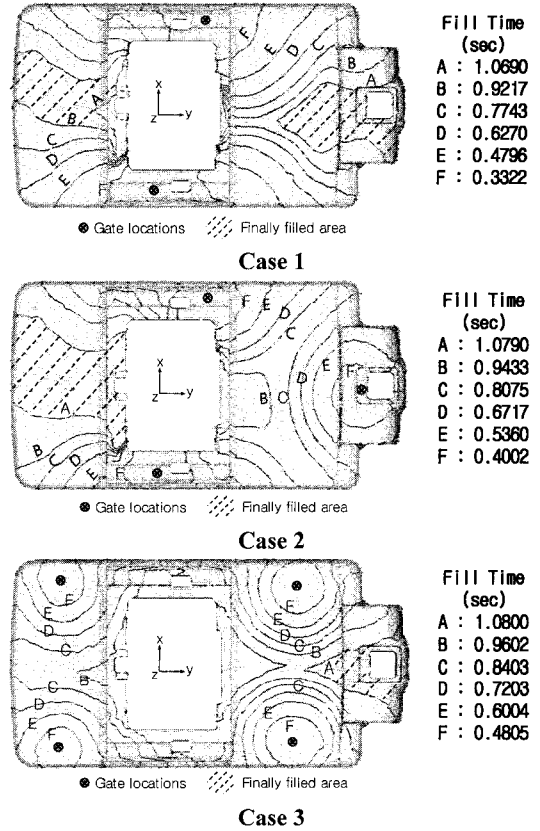


Fig. 3 Fill time and fiber orientation distribution of each case

향하고, 중심부에서는 흐름과 직각 방향으로 배열한다[6]. Fig. 3 의 섬유배향 분포는 두께방향으로의 평균 섬유배향 분포를 나타낸다. 결과를 살펴보면 대부분의 구간에서는 흐름에 평행한 방향과 직각한 방향으로 비교적 균일하게 배향하였으나, 충전 말단에서는 흐름과 직각 방향으로의 배향성이 강한 것을 알 수 있다. 충전 말단에서는 유동이 지속되는 시간이 짧기 때문에 섬유가 전단응력을 받아 흐름방향으로 배향할 시간이 부족하기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 편심된 섬유배향은 섬유길이 방향과 직각방향으로의 수축률 차이를 야기시키고 이것은 제품 변형의 원인이 된다.

Fig. 4 에 각 case 의 제품의 수직방향(z 방향) 변형량 분포를 나타내었다. 결과를 살펴보면 세가지 case 모두 제품의 중앙 부분이 -z 축 방향으로 가라앉고, 네 모서리 부분, 특히 좌측 모서리 부분은 +z 축 방향으로 들리는 양상을 나타내었다. 또한, 일반적으로 게이트 수가 많아질수록, 압력 전달이

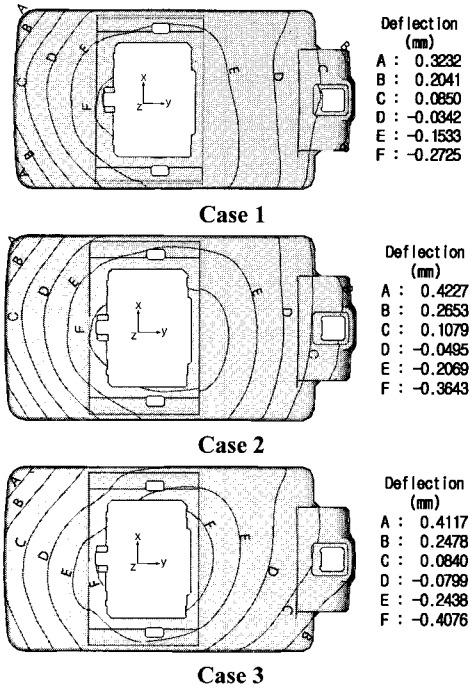


Fig. 4 Vertical deflection distribution of each case

잘 되어 변형량이 적어지는 것과는 반대로, 게이트 수가 가장 적은 Case 1의 변형량이 0.5957mm로 가장 적은 것으로 나타났다. 이것은 섬유배향 분포와 관련해 다음과 같이 해석할 수 있다.

Case 1의 경우 Fig. 3의 섬유배향 분포와 충전양상을 살펴보면 게이트가 중심부에만 위치하고 있으므로 전체적인 유동이 좌우로 일어나고, 최종 충전 구역은 좌우 끝단에 분포하고 있다. 위에서 언급한 바와 같이 충전 말단에서는 섬유배향이 유동의 직각 방향으로 편심된다. 따라서 좌우에 위치한 충전 말단에서 주로 y 축 방향으로의 섬유배향이 발생했고, 이것은 x 축 방향으로의 수축을 일으킬 것이다. 그러나 이러한 영역이 좌우에 균형 있게 위치하고 있으므로 제품 전체의 x 축 방향 수축량은 커지더라도 z 방향의 휨은 적게 일어난 것이다.

반면 Case 2와 Case 3에서는 섬유배향이 한방향으로 편심되는 최종 충전 구역이 제품의 좌측(case 2)이나, 우측(case 3)에만 존재하므로 이 부분의 비균형적인 섬유 직각방향의 수축이 제품의 휨의 원인이 된다.

따라서 단섬유 보강 소재의 사출 시, 섬유배향 편심지역을 균형있게 배치하는 것이 제품의 휨 감소에 효과적이라는 결론을 얻을 수 있다.

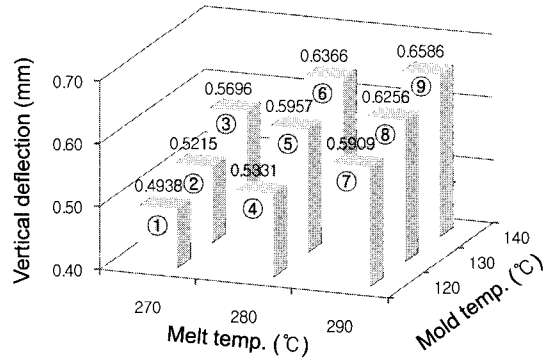


Fig. 5 Vertical deflections according to the injection molding conditions

3.2 성형 조건 선정

윗 절에서 언급한 바와 같이 적절한 게이트 위치 설계를 통하여 섬유배향의 편심으로 인한 수축의 균형을 맞추어 주는 것은 휨 감소에 중요하다. 그러나 휨의 원인이 섬유배향의 편심으로 인한 이방성 수축이기 때문에, 편심 자체를 줄여주는 것 역시 휨 감소에 도움이 된다.

초기에 고르게 분포되어 있던 섬유배향이 사출 성형 과정 동안 특정 방향으로 편심되는 원인은 충전과정 중의 전단응력 때문이다. 따라서 충전과정 중의 전단응력을 줄일 수 있으면 제품내의 섬유배향의 편심정도를 줄이는 것이 가능하다. 충전과정 중의 전단응력을 줄이기 위해서는 사출속도를 감소시켜 전단변형률을 감소시키거나, 수지온도 및 금형온도를 상승시켜 소재의 점성을 낮추는 방법이 있다. 그러나 사출속도를 감소시키는 것은 본 연구의 해석모델과 같이 얇은 제품의 경우에는 미성형 발생의 원인이 된다.

따라서 Case 1의 게이트 위치에 수지온도와 금형온도를 각각 3 가지로 변화시켜가며 해석을 수행하고, 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

결과를 살펴보면 예상과는 다르게 수지온도, 금형온도를 상승시킨 경우 휨이 더 크게 발생하였다. 원인을 살펴보기 위하여 Fig. 5의 ⑤번 조건과 ⑥번 조건의 수지자체의 수축 차이로 인한 휨 량과 섬유배향으로 인한 휨 량을 독립적으로 계산하여 변형량 분포를 Fig. 6에 나타내었다.

결과를 살펴보면 Fig. 6 (a)에서와 같이 섬유배향으로 인한 휨 량은 ⑤번 조건의 경우 0.9674mm, ⑥번 조건의 경우 0.9769mm로 거의 동일하고, Fig. 6 (b)에서와 같이 수축 차이로 인한 휨은 ⑤번 조

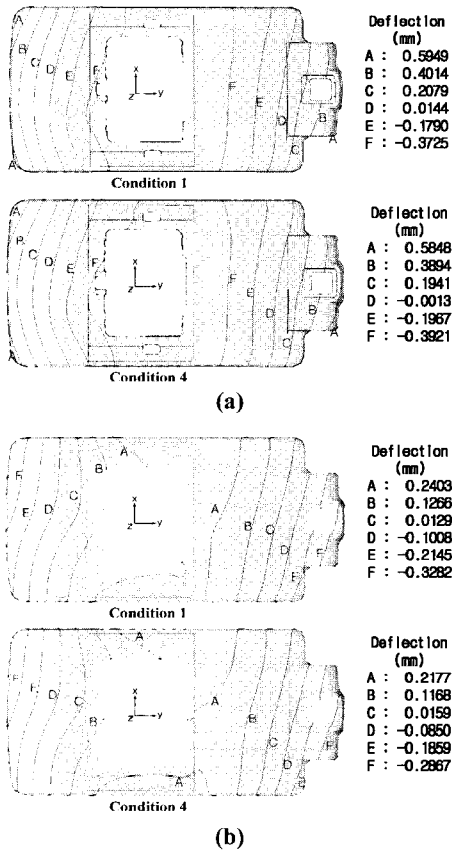


Fig. 6 Vertical deflection distribution caused by (a) fiber orientation effects and (b) differential shrinkage

건의 경우 0.5685mm, ㉠번 조건의 경우 0.5044mm 로 ㉠번 조건의 경우가 더 적다. 즉, 수지온도와 금형온도의 상승이 섬유배향으로 인한 휨에는 거의 영향을 미치지 못했으나, 압력전달이 고르게 전달되어 수축 차이로 인한 휨은 약간 개선시킨 것이다.

그러나 실제 휨은 ㉠번 조건의 경우가 더 적다. 이것은 본 연구의 대상제품의 경우 섬유배향으로 인한 휨 양상과 수축 차이로 인한 휨 양상이 서로 반대되기 때문이다. 즉, 섬유배향으로 인한 휨은 제품 중앙부가 가라앉고 (-z 축 방향), 제품 좌우부분이 들리는데 (+z 축 방향), 수축 차이로 인한 휨은 그 반대로 중앙부가 들리는 양상이기 때문이다. 따라서 개별적 원인으로 인한 휨이 더 적더라도 그것이 중첩된 실제 변형에서는 휨이 더 크게 나타난 것이다. 이러한 현상은 제품 형상이나 냉각

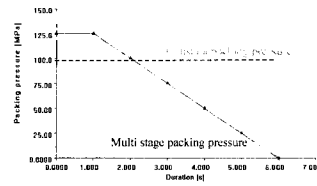


Fig. 7 Multi stage packing pressure control

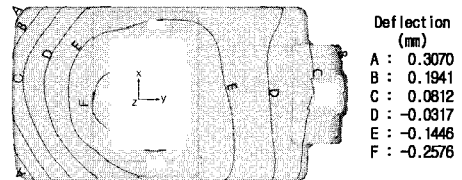


Fig. 8 Vertical deflection distribution of each case

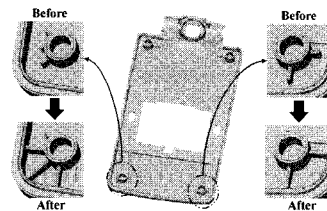


Fig. 9 Structural modification of the part

채널 위치, 수지특성 등 여러 요인에 의해 달라질 수 있으나, 섬유배향의 편심정도를 감소시키기 위해 수지온도, 금형온도를 상승시키는 것이 반드시 제품의 변형을 감소시키지는 않는다는 결론을 얻을 수 있다.

또한 휨을 최소화하는 온도조건은 ㉠번 조건이나 금형 및 수지온도의 감소는 사출압 증가, 제품 표면불량, 웰드라인 등의 불량이 발생할 수 있으므로 이러한 요인들을 종합적으로 고려하여 결정되어야 할 것이다.

공정 조건 개선의 두번째로는 보압 제어를 검토하였다. 사출의 보압 단계는 고화에 따른 수지의 수축을 보상해주기 위하여 설정된 압력으로 수지를 계속 밀어넣는 과정이다. 이때 게이트에서 가까울수록 보압과정에서 보충되는 수지의 양이 많고 이것은 게이트로부터의 거리에 따른 수축 편차를 일으켜 휨의 원인이 된다.

따라서 거리에 따른 수축률 편차를 감소시키기 위하여 Fig. 7 과 같이 일정 보압 조건을 다단보압으로 변경하여 거리에 따른 캐비티(Cavity) 내부압력의 편차를 줄이도록 하였다.

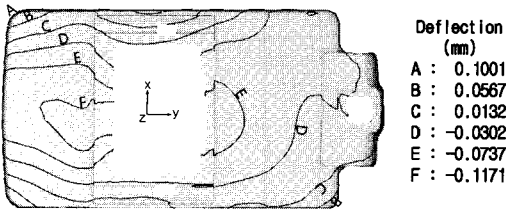


Fig.10 Vertical deflection distribution after structural modification of the part

다단보압조건으로 수치해석을 실시한 결과 휨량은 0.5646mm 으로 5.3% 감소하는 것을 확인하였고, 그 결과를 Fig. 8 에 나타내었다.

3.3 제품 구조 변경

Fig. 8 의 휨 양상에서 제품 우측, 특히 모서리 부분의 +z 축 방향으로의 휨이 크다는 것을 알 수 있다. 이러한 모서리 부분에 집중된 휨을 감소시키기 위하여 Fig. 9 에 나타낸 것과 같은 구조 개선을 실시하였다. 초기 설계안에는 모서리 부분에 조립을 위한 보스(boss) 구조가 있고, 보스와 제품을 잇는 거싯(gusset) 구조가 있었다. 이때 Fig. 9 에서와 같이 거싯을 연장시켜 제품면에 이어서도록 제품의 구조변경을 수행하였다. 구조 변경 후 Case 1 의 게이트 위치와 Fig. 5 의 ⑤번 조건 및 다단보압을 적용하여 수치해석을 수행하고, 변형 해석 결과를 Fig. 10 에 나타내었다. 결과를 살펴보면 전체 휨량은 0.2172mm 로 61.5% 감소하고, 모서리 부분에 집중된 휨이 상당부분 개선되었음을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 단섬유 보강 사출성형품의 휨 감소를 위하여 게이트 위치 설계, 공정조건 선정 및 제품 구조변경을 수행하고, 수치해석을 통하여 이를 검증하였다. 이러한 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 세가지 게이트 시스템을 설계하고 수치해석을 통하여 휨을 최소화하는 게이트 위치를 찾고, 그 원인을 분석하였다.

(2) 섬유배향의 원인이 되는 유동 중의 전단응력을 감소시키기 위해 금형온도와 수지온도를 증가시키는 것이 반드시 휨량을 감소시키는 것이 아님을 확인하였다.

(3) 보압 다단 제어를 통하여 제품의 휨량을 5.3% 감소시켰다.

(4) 특정 부분에 집중된 휨을 제품 구조 변경으로 크게(61.5%) 개선 가능함을 확인하였다.

본 연구에서의 게이트 위치에 따른 유동특성, 공정조건, 제품 구조 등이 변형에 끼치는 영향의 분석 결과는 향후 단섬유 보강 사출성형을 위한 금형 및 제품설계, 공정조건 선정에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] R. K. Irani, B. H. Kim, J. R. Dixon, 1995, Towards Automated Design of the Feed System of Injection Molds by Integrating CAE, Iterative Redesign and Features, *Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME*, Vol. 117, No. 1, pp. 72~77.
- [2] I. Pandelidis, Q. Zou, 1990, Optimization of Injection Molding Design. Part I : Gate Location Optimization, *Polymer Engineering and Science*, Vol. 30, No. 15, pp. 873~882.
- [3] I. Pandelidis, Q. Zou, 1990, Optimization of Injection Molding Design. Part II : Molding Conditions Optimization, *Polymer Engineering and Science*, Vol. 30, No. 15, pp. 883~892.
- [4] M. Saxena, R. K. Irani, 1993, An Integrated NMT-Based CAE Environment - Part II : Applications to Automated Gating Plan Synthesis for Injection Molding, *Engineering with Computers*, No. 9, pp. 220~230.
- [5] P. Kennedy, 1993, *Flow Analysis Reference Manual*, Moldflow Pty. Ltd., Australia.
- [6] K. H. Han, Y. T. Im, 1999, Modified Hybrid Closure Approximation for Prediction of Flow-induced Fiber Orientation, *Journal of Rheology*, Vol. 43, No. 3, pp. 569~589.