

유리섬유로 강화된 폴리카보네이트의 기계적 물성예측 및 사출성형을 통한 휨의 평가

문다미 · 최태균* · 류민영†

서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과, *서울과학기술대학교 일반대학원 제품설계금형공학과
(2014년 2월 21일 접수, 2014년 4월 7일 수정, 2014년 4월 20일 채택)

Prediction of Mechanical Property of Glass Fiber Reinforced Polycarbonate and Evaluation of Warpage through Injection Molding

Da Mi Moon, Tae Gyun Choi*, and Min-Young Lyu†

Dept. of Mechanical System Design Engineering, Seoul National Univ. of Science & Technology,
232 Gongneung-ro, Nowongu, Seoul 139-743, Korea

*Department of Product Design and Manufacturing Engineering, Graduate School, Seoul National Univ. of Science & Technology,
232 Gongneung-ro, Nowongu, Seoul 139-743, Korea

(Received February 21, 2014; Revised April 7, 2014; Accepted April 20, 2014)

초록: 대부분의 플라스틱 제품은 사출성형을 통해 생산된다. 사출성형에서 성형수축은 피할 수 없으며 이는 제품에 휨이나 뒤틀림을 유발하여 제품의 치수정밀도를 떨어뜨리는 요인으로 작용한다. 사출성형 시 발생하는 휨이나 뒤틀림은 성형조건이나 제품의 형상에도 영향을 받지만 수지의 물성에 따라서도 다양하게 나타난다. 본 연구에서는 제품의 휨을 제어하기 위해 폴리카보네이트를 유리섬유로 보강하여 물성을 예측하였으며, 이를 이용하여 사출성형해석을 실시하였다. 사출성형해석을 통해 유리섬유로 보강된 수지에서 제품의 휨이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구방법의 타당성과 신뢰성을 검증하기 위하여 사출실험을 실시하여 수지의 물성에 따른 휨 값을 분석하였으며 해석과 실험에서 유사한 경향의 휨이 발생하는 것을 관찰할 수 있었다. 결론적으로 본 연구에서 수행한 바와 같이 해석 프로그램을 통해 수지의 물성을 설계하고 이를 통한 휨의 제어가 가능함을 확인할 수 있었다.

Abstract: Most plastics products are being produced by injection molding process. However, mold shrinkage is inevitable in injection molding process and it deteriorates dimensional quality through deflections and warpages. Mold shrinkage depends upon the material property of resin as well as injection molding condition. In this study, material property of resin has been predicted for glass fiber reinforced polycarbonate to control the warpage, and computer simulation of injection molding has been performed using predicted property. It was observed that the deflection of part decreased by the glass fiber reinforced resin. In order to verify the validity of this method and confidence of results, experiments of injection molding were performed. The results of experiments and computer simulations showed good agreement in their tendency of deflections. Consequently, it was concluded that the method of designing the material property of resin conducted in this study can be utilized to control the dimensional accuracy of injection molded products.

Keywords: property prediction, injection molding, deflection, warpage, glass fiber reinforced polycarbonate.

서 론

우리는 일상생활에서 플라스틱 제품을 쉽게 만나볼 수 있다. 화장품이나 문구용품 등 일반 생활용품에서부터 전자제품, 자동차, 항공기부품 등에 이르기까지 다양한 분야에서 플라스틱이 사용되고 있다.¹ 이러한 플라스틱 제품은 대부분 사출성형을 통해 생산된다. 이는 사출성형이 제품의 형상이 복

잡하더라도 쉽게 성형이 가능하고 높은 정밀도를 얻을 수 있으며 대량생산이 가능하기 때문이다. 하지만, 사출성형 제품은 냉각과정에서 온도편차에 따른 수축 불균형과 흐름방향과 흐름직각방향의 수축차이에 의해 제품에 불균일한 수축이 발생한다. 그리고 고온과 고압의 성형조건으로 인해 잔류응력이 발생하며 성형 후 시간이 지남에 따라 제품에 휨이나 뒤틀림 등의 불량을 유발한다.^{2,4} 따라서 제품의 정밀도 향상을 위해서는 변형을 방지하기 위한 대책이 필요하다.⁵⁻⁷

제품의 변형과 휨에 대한 연구가 많이 진행되어 있으며, 보고되는 연구는 성형품의 재료, 성형조건 그리고 제품의 형상

†To whom correspondence should be addressed.
E-mail: mylyu@seoultech.ac.kr

설계가 수축이나 휨에 미치는 영향에 대하여 다루고 있다. 성형조건인 측면에서는 사출속도와 온도, 압력설정을 통해 잔류응력을 최소화시켜 제품의 변형을 줄일 수 있으며, 제품설계 측면에서는 단면의 2차모멘트가 큰 형상을 갖도록 설계하거나 리브설계를 통한 강건설계가 가능하다. 수치 측면에서 본다면 유리섬유(glass fiber)로 강화된 수지의 경우 성형수축이 작을 뿐 아니라 물성이 증가하여 변형이 작게 나타난다.⁸⁻¹⁴

본 연구에서는 제품의 변형을 방지하기 위해 수치에서 요구되는 기계적 물성을 유리섬유의 함량에 따라 예측하고자 하였다. 유리섬유 함량에 따라 예측된 물성을 갖는 수지를 이용하여 사출성형을 하고 휨을 분석하였다. 수치 물성 예측은 상용프로그램을 이용하였으며 폴리카보네이트(polycarbonate, PC)에 유리섬유가 함유되었을 때의 물성을 예측하였다. 예측된 수지의 물성에 따른 휨의 변화를 관찰하기 위해 사출성형 해석프로그램에 적용하여 해석을 진행하였고 실제 사출실험을 진행하여 해석결과와 실험결과를 비교하였다. 본 연구에서는 간편한 이론적인 수지의 설계를 통하여 성형품에 요구되는 조건을 만족시킬 수 있음을 보여주고자 하였다.

수지의 물성설계, 성형해석 및 실험

연구모델. 수지의 물성설계에 따른 사출성형품의 휨을 분석하기 위해 사용한 연구모델을 Figure 1에 나타내었다. 모델은 평판 형상으로 두께는 1.5 mm, 폭은 56.5 mm이며 길이는 91.5 mm이다. 제품의 휨 측정이 용이하도록 비교적 간단한 형상을 연구모델로 선정하였다.

수지설계. 본 연구에서 사용한 수지는 삼양사의 폴리카보네이트인 Trirex® 3022L1-SL 이다. 폴리카보네이트의 기계적 물성이 향상된 수지의 설계를 위해 사용한 보강재는 길이 0.25 mm, 직경 10 µm인 유리섬유이다. Table 1은 수치설계에 사용한 폴리카보네이트(Trirex® 3022L1-SL, Samyang Co., S. Korea)와 유리섬유의 정보가 나타나 있다.

설계된 수지의 물성은 매트릭스 소재의 물성에 영향을 받지만, 같은 매트릭스라 하더라도 보강재의 물성과 형상, 그리고 함유량에 따라서 그 성질의 변화가 다양하게 나타나게 된다.

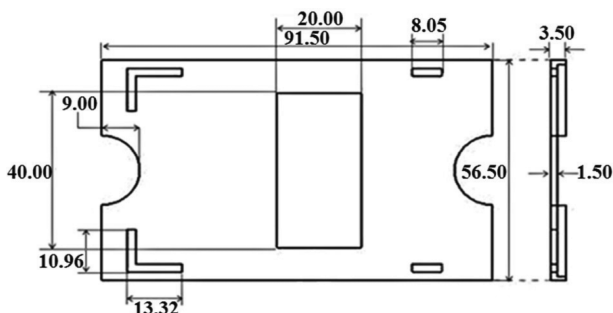


Figure 1. Mold of this study. All dimensions are in mm.

Table 1. Material Properties of Polycarbonate and Glass Fiber

Item	Unit	PC	Glass fiber
Young's modulus	MPa	2280	72000
Poisson's ratio	-	0.42	0.22
Density	g/cm ³	1.19	2.54
Aspect ratio	-		25

본 연구에서는 수치설계 프로그램인 Digimat을 사용하여 수지의 물성을 설계하였다.¹⁵⁻¹⁸ 수지의 물성을 설계하기 위해서는 매트릭스 소재인 폴리카보네이트의 탄성계수, 푸아송 비, 밀도에 대한 값이 필요하며, 보강제인 유리섬유의 탄성계수, 푸아송 비, 밀도 및 세장 비가 필요하다. 본 연구에서는 Table 1의 유리섬유를 각각 20, 30% 함유하는 두 가지 수지의 물성을 설계하였다.

사출성형 해석 및 휨의 예측. 수지의 물성을 설계할 경우 실제 적용에 앞서 수지의 물성설계가 잘 되었는지에 대한 검토가 필요하다. 이러한 경우에 CAE 프로그램을 통해 사출성형 해석을 진행하고 결과를 토대로 수치설계의 적절성을 판단할 수 있게 된다.¹⁹ 본 연구에서 설계하는 수지의 사용 목적은 사출성형품의 수축을 최소화하여 변형을 제어하는 것이다. 따라서 수지의 물성설계를 통해 성형품의 변형을 줄일 수 있는지를 검증하기 위하여 사출성형 해석을 진행하고 휨에 대한 결과를 분석하였다.

본 연구에서 사용한 사출성형해석 프로그램은 Moldflow (Autodesk 사)이다. Moldflow에서는 해석을 수행하기 위해 수지의 정보를 포함하는 수지 데이터 파일이 필요하게 되는데, 본 연구에서는 Digimat을 이용하여 수지의 물성을 설계하고, 예측한 수지의 물성을 이용하여 Moldflow에서 사용할 수 있는 수치파일을 생성한 후 성형해석을 진행하였다. 해석에 이용한 메쉬는 3D타입이고 총 메쉬의 수는 335455이다. Figure 2는 해석을 위한 모델의 메쉬를 나타내고 있다.

Figure 3은 사출성형 해석에서 적용한 해석조건을 나타낸다. 유리섬유를 함유하지 않은 폴리카보네이트 수지 한 가지와 유리섬유로 강화된 폴리카보네이트 수지 두 가지 등 총

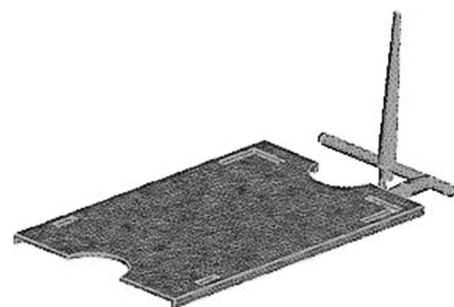


Figure 2. Mesh for computer simulation using Moldflow.

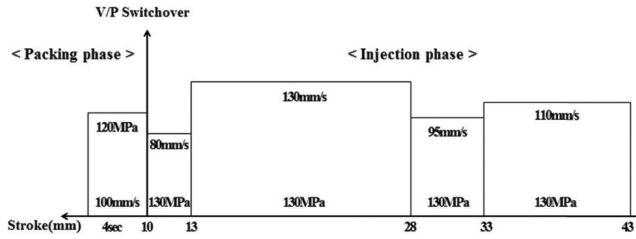


Figure 3. Injection molding condition for computer simulations.

Table 2. Temperatures for Resin and Mold in Injection Molding

Item	Temperature (°C)
PC	290
Material	
PC + GF 20 wt%	305
PC + GF 30 wt%	320
Mold	90

세 가지의 수지에 대해 해석을 진행하였다. 유리섬유로 보강되지 않은 폴리카보네이트에 대한 해석을 함께 진행하여 결과를 비교해봄으로써, 유리섬유를 함유한 수지의 물성 설계를 통해 성형품의 변형이 얼마나 제어되었는지를 판단해 볼 수 있다.

해석에서는 사출온도를 제외한 나머지 성형조건을 모두 동일하게 적용하였다. 사출온도는 세 수지가 유사한 유동특성을 가지도록 각각 다르게 설정하였으며 Table 2에 해석에서 설정한 사출온도 및 금형온도를 나타내었다. 보압 후 냉각시간은 25초로 하였다.

사출성형 해석 결과 중, 성형 후 제품에 발생하는 휨의 예측 값을 측정하기 위해 Moldflow의 Anchor 기능을 사용하였으며 Figure 4는 연구모델에 Anchor 기능을 적용한 모습을 나타낸다. Anchor는 Moldflow에서 제품의 변형을 측정하는데 사용할 수 있는 기능으로, 사용자가 세 점을 이용하여 가상의 기준평면을 설정한 후 기준평면으로부터 성형품이 얼마나 떨어져있는지를 측정한다. 실험을 통해 얻은 시편의 휨 측정을 고려해볼 때, 기준평면은 측정기의 바닥면이 되므로 해

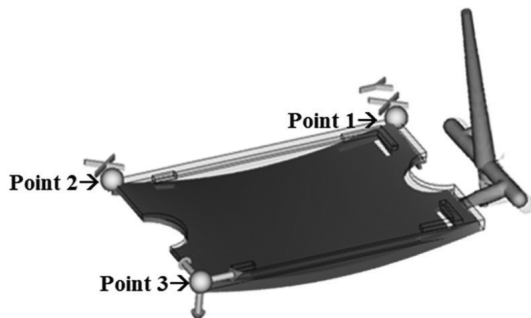


Figure 4. Three base points for the measurement of deflection.

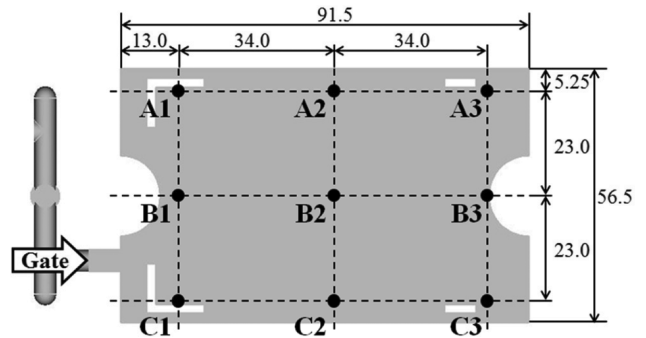


Figure 5. Nine measurement points for the analysis of deflection. All dimensions are in mm.

Table 3. Matrix Grade and Glass Fiber Content for the Design of Glass Fiber Reinforced Polycarbonate

Grade	Content of glass fiber (wt%)
Trirex® 3022L1-SL	0
Trirex® 3500 G20	20
Trirex® 3500 G30	30

석에서도 이와 동일하게 기준평면을 설정하였다.

연구모델의 가장자리의 세 점을 선택하여 기준평면을 설정하였으며 측정 위치에서 기준평면으로부터 성형품의 두께방향으로의 거리 차를 제품의 휨이라고 하였다.

Figure 5는 휨 측정위치를 나타낸다. 흐름방향에 평행인 직선 세 개(A, B, C)와 수직인 직선 세 개(1, 2, 3)를 그어 총 아홉 개의 교차점을 휨의 측정위치로 선정하였다.

사출실험 및 휨의 측정. 본 연구에 사용된 사출기는 TE110-IE2(Woojin Plaimm, S. Korea)이며 형체력은 110 ton, 최대 사출압은 196 MPa, 스크류 직경은 32 mm이다. 실험에 사용한 수지는 본 연구를 통해 설계한 수지와 동일한 유리섬유 함량을 갖는 삼양사의 수지를 사용하였으며 Table 3에 실험에 사용한 수지를 나타내었다. 각 수지의 건조 조건은 110 °C에서 6시간 이상이다. 실험의 사출조건, 사출온도 및 금형온도는 해석과 동일하게 설정하였다.

사출성형 실험에서 정상 사출 상태에 도달하기 까지 다수의 성형을 수행한 후 각 수지 별로 총 다섯 개의 시편에서 휨을 측정하였다. 측정기는 3차원 측정기(Beyond-Crysta C9106, Mitutoyo)이며 측정위치는 해석에서 측정한 위치와 동일하다. 시편을 측정기 위에 올려놓은 후 시편의 두께방향으로 측정하였다. 사출성형 후 24시간 이상 경과 후 시편의 휨을 측정하였으며 다섯 개 시편의 평균 값을 이용하여 결과를 분석하였다.

결과 및 토론

수지의 물성 예측. 폴리카보네이트에 유리섬유가 첨가되면

Table 4. Predicted Material Properties Using Simulation Program

			Content of glass fiber (wt%)		
Item		Unit	20	30	
Material property	Young's modulus	E_1	GPa	7.87	11.34
		E_2		3.06	3.46
	Poisson's ratio	ν_{12}	-	0.3992	0.3883
		ν_{23}	-	0.5938	0.6121
	Shear modulus	G_{12}	MPa	983.31	1109.7
Density	ρ	g/cm ³	1.3314	1.4156	

등방성이던 물성이 이방성을 갖게 된다. 즉 수지의 흐름방향과 흐름 직각방향에서의 물성이 다르다. 수지의 물성설계를 통해 얻을 수 있는 결과로는 흐름방향의 탄성계수 E_1 과 흐름 직각방향의 탄성계수 E_2 , 흐름방향 변형률에 대한 흐름 직각방향 변형률의 비를 나타내는 푸아송비 ν_{12} 와 흐름 직각방향 변형률에 대한 두께방향 변형률의 비를 나타내는 푸아송비 ν_{23} , 밀도 ρ 및 전단탄성계수 G_{12} 이다. Table 4는 유리섬유의 함유량에 따른 설계수지의 물성을 나타내었다.

유리섬유를 20% 첨가하여 설계한 수지의 흐름방향의 탄성계수는 매트릭스의 탄성계수의 3.5배이며 흐름 직각방향의 탄성계수는 매트릭스의 1.4배이다. 유리섬유를 30% 첨가하여 설계한 수지의 흐름방향의 탄성계수는 매트릭스의 탄성계수의 5.0배이며 흐름 직각방향의 탄성계수는 매트릭스의 1.5배이다. 흐름방향과 흐름 직각방향의 탄성계수는 유리섬유의 함유량이 증가함에 따라 증가하였으며 이는 매트릭스에 비해 유리섬유의 탄성계수가 크기 때문에 나타난 결과이다. 흐름방향의 탄성계수는 흐름 직각방향의 탄성계수에 비해 크게 증가하였는데 이는 섬유배양의 결과이다.

해석과 실험의 유동패턴 비교. 해석과 실험의 유동패턴을 미충전 실험으로 비교하였다. Figure 6은 해석과 미충전 실험 상의 시간에 따른 충전 패턴을 비교한 것을 나타낸다. 수지가 캐비티 내로 들어간 후 게이트가 있는 오른쪽 벽면을 따라 방사형으로 충전되며 게이트에서 가장 먼 좌측 하단부가 가장 마지막에 충전되었다. 실험과 해석의 유동패턴을 비교 해본 결과 유사한 유동 패턴을 보이는 것을 확인하였다.

해석과 실험의 힘 패턴 비교. 해석에서 힘은 Figure 7과 같이 나타난다. 게이트에서 멀어질수록 힘이 더 크게 나타난다. 힘의 측정은 제품을 기준평면에 올려놓고 측정하므로 Figure 7과 같은 형태로 측정하기 어렵다. 따라서 Figure 8과 같은 상태로 해석결과를 관찰하고, 이를 실험과 비교하였다.

유리섬유로 보강되지 않은 폴리카보네이트와 유리섬유로 보강된 두 개의 폴리카보네이트, 총 세 가지의 수지에 대한 힘의 해석 값과 측정 값을 Figure 9~Figure 11에 나타내었다.

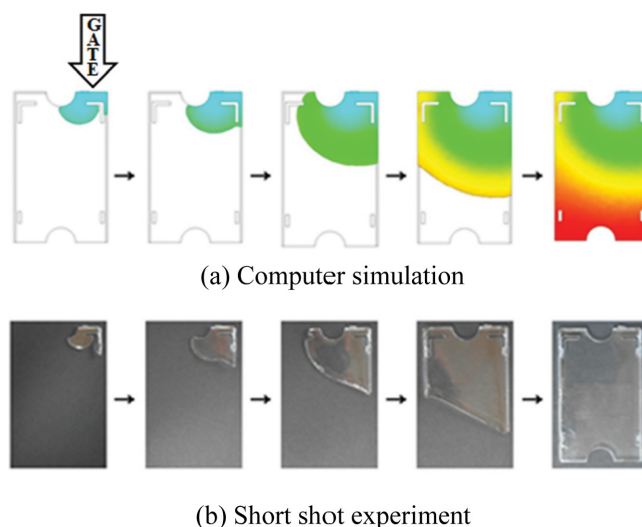


Figure 6. Comparison of filling pattern between (a) computer simulation; (b) short shot experiment.

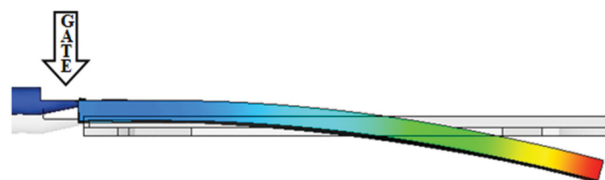


Figure 7. Deflection in computer simulation.



Figure 8. Result of deflection using anchor in Moldflow.

회사의 측정위치는 Figure 5에서 표시한 아홉 군데이다.

전체적으로 보면 해석과 실험에서 유리섬유의 함유량이 증가할수록 휨이 감소하는 것을 알 수 있다.

세가지 수치 모두 실험과 해석의 휨 패턴이 유사하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 제품의 중앙에 해당하는 A2, B2, C2에서 가장 큰 휨이 관찰되었다. 유리섬유의 함유량이 증가할수록 휨의 크기가 감소하였다.

Figure 10의 유리섬유 20 wt% 첨가한 설계수지의 경우 해석에서 측정된 휨의 예측 값이 Figure 9의 유리섬유로 강화하지 않은 수지에 비해 40%~85% 감소하였고, 실제 실험에서 측정된 휨의 값은 76%~91% 감소하였다. Figure 11의 유리섬유 30 wt% 첨가한 설계수지의 경우 해석에서 측정된 휨의 예측 값이 유리섬유로 강화하지 않은 수지에 비해 44%~86% 감소하였고, 실제 실험에서 측정된 휨의 값은 81%~92% 감소하였다. 본 연구에서는 유리섬유를 폴리카보네이트에 첨가하여 물성을 설계한 수지를 이용하여 사출성형

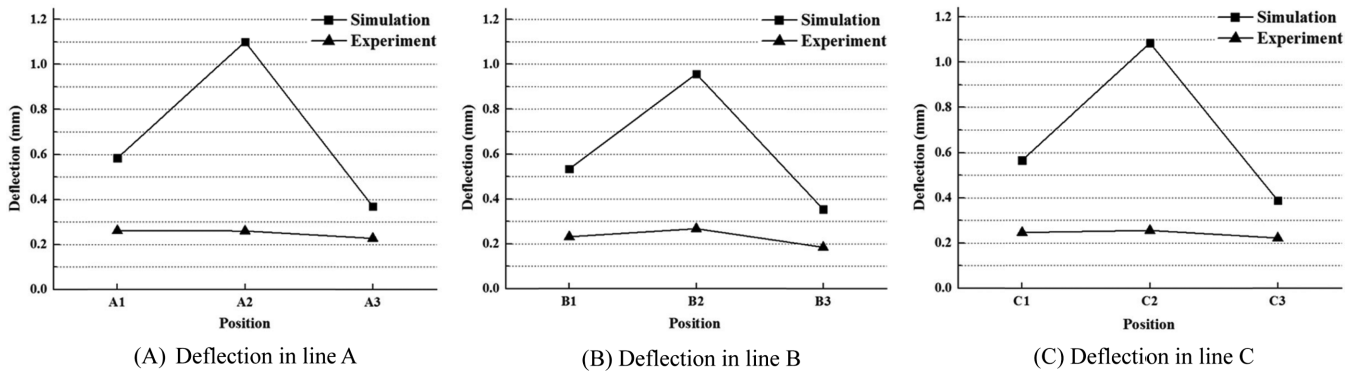


Figure 9. Comparison of deflections between simulation and experiment for non-reinforced polycarbonate.

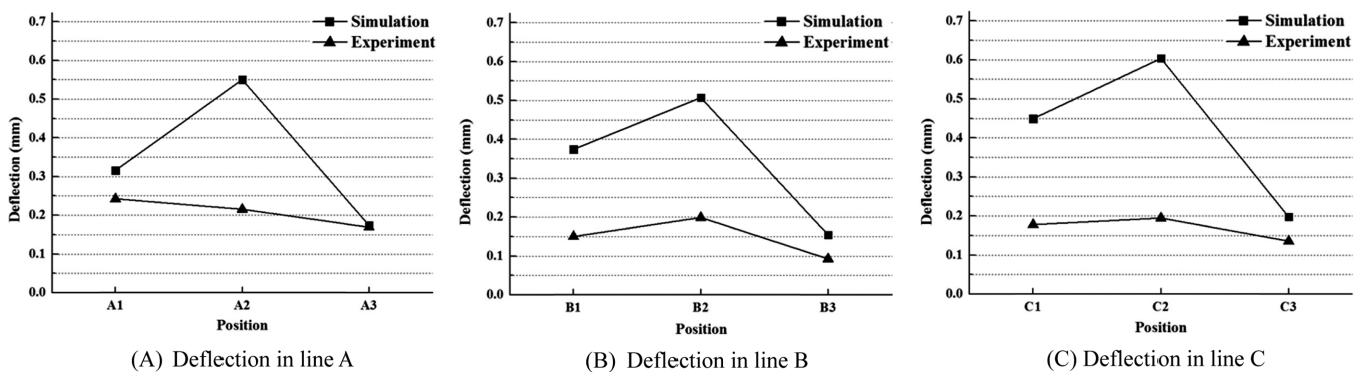


Figure 10. Comparison of deflections between simulation and experiment for 20 wt% glass fiber reinforced polycarbonate.

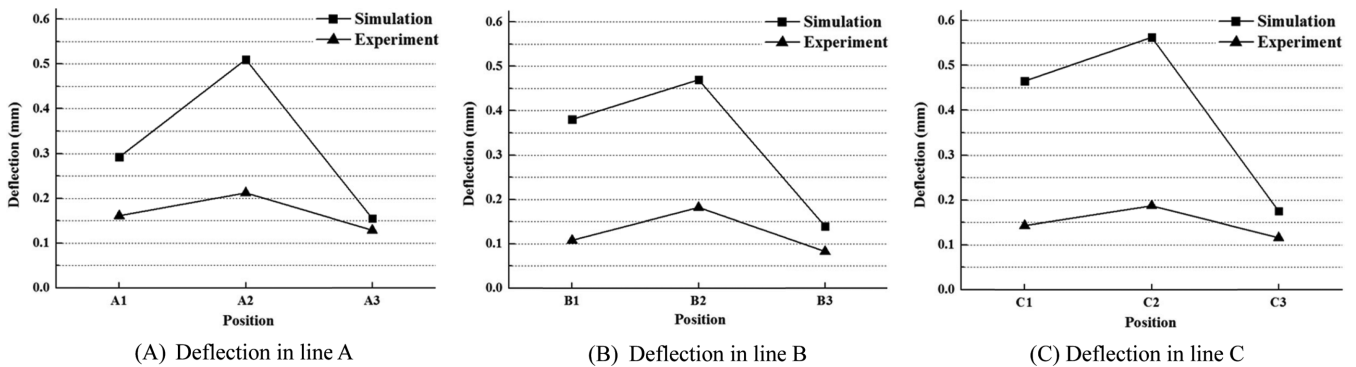


Figure 11. Comparison of deflections between simulation and experiment for 30 wt% glass fiber reinforced polycarbonate.

을 진행하였을 때, 성형품의 휨이 크게 줄어드는 것을 관찰할 수 있었다.

실험과 해석에서 대략 휨 경향은 유사하지만 값의 크기는 차이가 있었다. 특히 휨이 가장 크게 나타난 중앙의 A2 부분에서 해석과 실험의 차이가 가장 컸다. 이러한 차이의 원인은 휨의 측정 시 3차원 접촉식 측정기에서 접촉에 의해 변형이 다소 감소되어 측정되는 영향이 있었던 것으로 사료된다. 또한 해석에서는 유리섬유의 크기가 모두 균일하고 이상적으로 분포하지만 실제 실험에서는 유리섬유가 깨지면서 길이가

줄어들고 유리섬유의 분산 역시 해석처럼 이상적으로 나타나지 않았기 때문으로 사료된다.

결론

본 연구는 사출성형품의 휨을 제어하기 위해 폴리카보네이트에 유리섬유가 첨가된 수지를 설계하였다. 그리고 해석을 통하여 설계된 수지의 휨을 분석하였고 실험을 통하여 이를 검증하였다. 수지설계는 상용 프로그램을 이용하였는데 유리

섬유의 함유량과 배향방향에 따른 탄성계수와 푸아송비, 밀도 및 전단계수 등을 설계할 수 있었다. 이론적으로 설계한 수지의 예측된 물성 값을 사출성형해석 프로그램과 연계하여 연구모델의 휨을 예측하는 것이 가능함을 보여주었다.

해석과 실험에서 모두 유리섬유의 함유량이 증가할수록 휨이 감소하였다. 이는 유리섬유로 인해 수지의 강도가 증가하여 휨을 견딜 수 있게 되었으며 또한 유리섬유는 매트릭스인 폴리카보네이트에 비해 수축이 작아 전체적으로 수축이 줄어들었기 때문에 나타난 결과이다.

실제 사출실험의 결과와 함께 비교해 본 결과 성형해석을 통해 실제와 유사한 경향의 휨 패턴을 예측해주는 것을 확인하였다. 이는 직접 실험을 진행하지 않고도 수치설계가 적절하게 되었는지를 해석을 통해 판단할 수가 있다는 것을 의미한다.

본 연구에서는 해석과 실험에서 휨의 측정 값 사이에 다소 큰 차이가 있어 휨에 대한 측정 값을 정량적으로 비교하는 것은 어려웠다.

본 연구를 더 발전시켜 해석과 실험 결과의 차이를 다소 줄인다면, 해석의 활용도가 더 높아질 것이다. 결국 해석 프로그램을 이용하여 성형 후 제품에 발생하는 휨을 수준 이하로 낮추면서 필요한 강도를 만족하는 수지의 물성 설계가 가능할 것이다.

감사의 글: 본 연구는 보건복지부 보건의료연구개발사업의 지원에 의하여 이루어진 것이며 이에 감사드립니다(HN12C0066).

참 고 문 헌

1. M. Lee, J. H. Kim, S. R. Park, and M.-Y. Lyu, *Elast. Compos.*, **44**, 373 (2009).
2. M.-Y. Lyu and H. Y. Kim, *Polymer Science and Technology*, **20**, 157 (2009).
3. M. Lee and M.-Y. Lyu, *Elast. Compos.*, **48**, 300 (2013).
4. S. T. Won, T. B. Kim, S. Lee, J. M. Won, K. H. Cha, and M.-Y. Lyu, *Elast. Compos.*, **47**, 336 (2012).
5. M.-Y. Lyu, J.-H. Mo, and W.-J. Chung, *Elast. Compos.*, **38**, 295 (2003).
6. M.-Y. Lyu and J.-H. Mo, *Trans. Mater. Process*, **13**, 515 (2004).
7. H. Y. Na, B. C. Yoon, S. H. Kim, and S. J. Lee, *Elast. Compos.*, **48**, 133 (2013).
8. M. Lee, H. Kim, and M.-Y. Lyu, *Polymer(Korea)*, **36**, 555 (2012).
9. M. Lee, H. Kim, and M.-Y. Lyu, *Polymer(Korea)*, **36**, 677 (2012).
10. F. Liu, H. Zhou, and D. Q. Li, *J. Reinf. Plast. Compos.*, **28**, 571 (2009).
11. X. Chen, Y. C. Lam, and D. Q. Li, *J. Mater. Process. Technol.*, **101**, 275 (2000).
12. D.-S. Choi and Y.-T. Im, *Compos. Struct.*, **47**, 655 (1999).
13. A. D. Drozdov, A. Al-Mulla, and R. K. Gupta, *Comput. Mater. Sci.*, **28**, 16 (2003).
14. K.-C. Ha, J.-R. Hwang, and J.-L. Doong, *Polym. Polym. Compos.*, **4**, 563 (1996).
15. *Digimat 4.3.1 Manual*, e-Xstream Engineering, 2012.
16. O. Pierard and I. Doghri, *Int. J. Mult. Comp. Eng.*, **4**, 521 (2006).
17. O. Pierard, C. Gonzalez, J. Segurado, J. LLorca, and I. Doghri, *Int. J. Solids Struct.*, **42**, 6945 (2007).
18. I. Doghri and L. Tinel, *Int. J. Plasticity*, **21**, 1919 (2005).
19. J. W. Park, J. H. Ahn, Y. M. Park, and M.-Y. Lyu, *Elast. Compos.*, **47**, 347 (2012).