

깊이가 깊은 제품의 사출성형에서 보압조건에 따른 캐비티 내압의 분석

김동우 · 강민아* · 김 혁** · 류민영**†

서울과학기술대학교, (현)(주)재영솔루텍, *서울과학기술대학교, (현)한국단자(주), **서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과
(2012년 1월 26일 접수, 2012년 5월 9일 수정, 2012년 5월 25일 채택)

Analysis of Cavity Pressure for Packing Conditions in Injection Molding of a Deep Depth Product

Dong Woo Kim, Mina Kang*, Hyeok Kim**, and Min-Young Lyu**†

Seoul National University of Science and Technology, (now) Jaeyoung Solutech Co. Ltd.

**Seoul National University of Science and Technology, (now) KET Co.*

***Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National of University of Science and Technology,
172 Gongneung 2-dong, Nowon-gu, Seoul 149-743, Korea*

(Received January 26, 2012; Revised May 9, 2012; Accepted May 25, 2012)

초록: 사출성형공정은 충전, 보압, 냉각, 이형 및 취출 순서로 이루어진다. 이러한 공정 중 보압단계에서 캐비티 내에 가장 큰 압력이 주어진다. 따라서 캐비티 내압은 보압전환 시점과 보압의 크기에 가장 크게 영향을 받는다. 캐비티의 큰 내압은 금형에 큰 응력을 집중시켜 금형을 손상시킬 우려가 있으므로 캐비티 내압을 관찰하고 조절하는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서는 이론해석과 실험을 통하여 보압전환 시점과 보압의 크기에 따라 캐비티 내압을 분석하였다. 보압전환 시점이 늦어짐에 따라서 내압이 증가하였다. 또한 보압전환이 늦어지면서 충전시간이 길게 되어 전체적으로 압력을 받는 시간이 길어져 보압 이후 냉각이 끝난 후에도 잔여압력이 존재하였다. 캐비티 내의 압력은 보압크기가 커질수록 비례적으로 증가하는 경향을 보였다. 역시 보압의 크기가 클수록 냉각 후 잔여압력이 증가하였다. 결과적으로 보압전환 시점이 늦고 보압크기가 크면 캐비티 내에 높은 압력이 형성되고 냉각이 끝난 후에도 잔여압력이 존재함을 알 수 있었다. 실험과 해석을 비교해 보았을 때 전체적인 경향은 매우 유사하였으나 해석에서는 잔여압력을 예측하지 못하였다. 캐비티 내압 조절을 위해서는 보압조건의 설정이 중요하며 CAE 해석을 통하여 최적 조건 설정이 가능함을 알 수 있었다.

Abstract: Injection molding operation consists of phases of filling, packing, and cooling. The highest cavity pressure is involved in the packing phase among the operation phases. Thus the cavity pressure largely depends upon velocity to pressure (v/p) switchover timing and magnitude of packing pressure. Developed cavity pressure is directly related to stress concentration in the cavity of mold and it may cause a crack in the mold. Consequently control of cavity pressure is considered very important. In this study, cavity pressure was analyzed in terms of v/p switchover timing and packing pressure through computer simulation and experiment. Cavity pressure was increased as the v/p switchover timing was delayed. Residual pressure after cooling phase was observed when the v/p switchover timing was late, which was due to increased pressurizing time for long filling phase. Cavity pressure was increased proportionally with the packing pressure. Residual pressure after cooling phase was also observed, and it was increased with increasing packing pressure. High cavity pressure and residual pressure have been observed at late v/p switchover and high packing pressure. Compared with simulation and experimental results, the profiles of pressures were very similar however simulation could not predict residual pressure. Packing condition was important for the control of cavity pressure and the optimum condition could be set up using CAE analysis.

Keywords: deep depth product, injection molding, v/p switchover timing, packing pressure, residual pressure.

서 론

플라스틱 제품의 성형법 중에서 사출성형은 생산성이 높고 또한 정밀한 제품을 생산하는데 가장 많이 활용되는 성형법

이다.^{1,2} 사출성형이란 성형하고자 하는 모양이 새겨진 금형(cavity) 안에 용융된 수지를 고온, 고압으로 주입하여 플라스틱 제품을 성형하는 방법이다. 사출성형은 플라스틱의 가소화, 충전, 보압, 냉각, 이형 및 취출의 공정으로 이루어져 있는데 이 중 보압단계에서는 충전 후 수축된 부분을 채워주는 단계로 캐비티 내의 압력이 가장 크게 작용된다.^{3,4} 성형 중

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

캐비티 내의 압력 변화는 보압시기와 그 크기에 의해 결정되며 이러한 캐비티 내의 압력은 싱크 마크나 수축 등의 품질과 깊게 관련이 있다. 캐비티 내의 압력의 크기와 분포에 따라서 금형이 받는 응력의 상태가 다르게 되며 캐비티 내압이 커질 경우에는 큰 응력집중에 의해 금형에 크랙이 발생할 가능성이 높아진다.

최근 전기전자 및 IT관련 제품의 디자인이 다양화되면서 깊이가 깊은 형상이나 복잡한 형태의 금형이 사용되면서 응력집중에 의한 크랙의 문제가 대두되고 있다. 그러나 캐비티 내의 압력에 따른 제품의 품질에 관한 연구는 활발하게 발표되고 있으나 대부분 단순한 형상에 관한 것이며 복잡한 형상에 관한 연구는 매우 미미한 실정이다.⁵⁻⁸ 제품의 모양이 복잡할수록 성형압력이 커지고 또한 금형이 복잡해지면서 결국 금형의 안정성이 문제가 된다. 따라서 깊이가 깊은 제품이나 복잡한 형상의 사출성형 시에 성형조건에 따른 내압크기 변화의 관찰은 제품의 품질뿐만 아니라 금형의 안정성을 검증하기 위해 필요하다.^{9,10}

본 연구에서는 깊이가 깊은 제품의 성형을 위한 금형에서 사출성형 조건에 따른 캐비티 내의 압력변화를 실험과 이론 해석을 통해 조사하였다. 캐비티의 내압은 보압 중에 가장 크게 나타나기 때문에 보압 조건을 달리하여 내압을 관찰하고 분석하였다. 이러한 내압의 관찰은 향후 금형의 안전성 검토에 필요한 요소이다.

실험 및 사출성형 해석

실험 모델 및 압력 측정. Figure 1에 캐비티의 내압분포 분석을 위한 모델을 나타내었다. 제품의 평균 두께는 3.2 mm이고, 전체 외형은 가로 260 mm, 세로 90 mm, 높이 150 mm이다. 사출성형을 위한 게이트의 지름은 $\phi 4$ mm이며 핫 런너를 사용한 밸브 게이트이다. Figure 1(b)에 압력 측정을 위한 센서의 위치를 A와 B로 나타내었다. A점은 B점보다 게이트에 가까운 위치이다. 압력센서는 Priamus사의 직접 압력측정 센서(Piezoelectric)로 6001A와 6001B를 사용하였다.

사출성형기 및 재료. 본 연구에서 사용한 사출기는 Dong Hua Machinery의 FZ450으로 형체력은 450 ton, 최대 사출속도는 160 mm/sec, 그리고 스크류 지름은 75 mm이다. 본 연구에서 사용한 수지는 ABS 컴파운드로 제일모직사의 Starex SF-0509이다.

성형조건 및 컴퓨터 해석. 본 연구에서의 충전과 보압조건이 Figure 2에 도식적으로 나타나 있으며, Table 1에 요약되어 있다. 사출온도는 245 °C, 그리고 금형의 온도는 95 °C로 설정하였다. 캐비티 내 압력을 관찰하기 위하여 캐비티 내압에 가장 크게 영향을 주는 보압전환(v/p switchover) 시점과 보압의 크기를 변경하였다.

Figure 2에는 충전단계와 보압단계에서 스크류의 스트로크

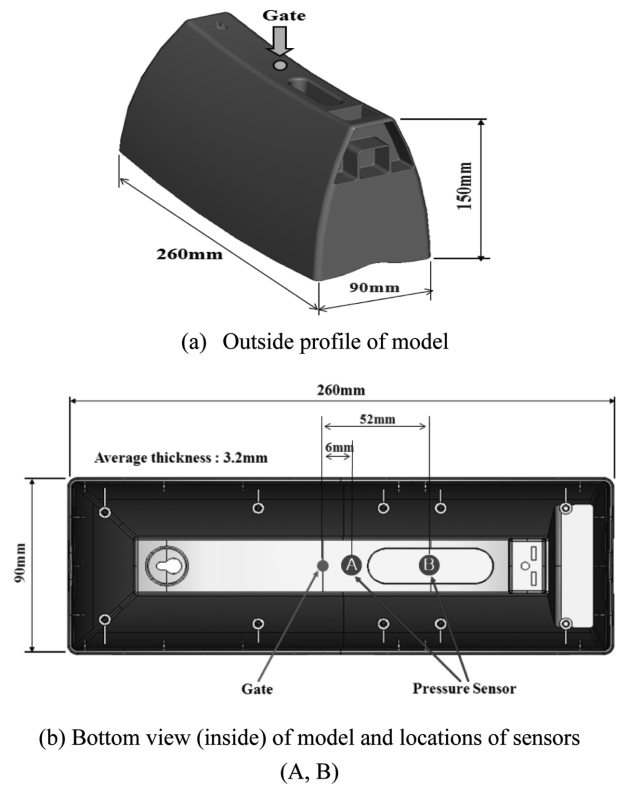


Figure 1. Model and locations of pressure sensors.

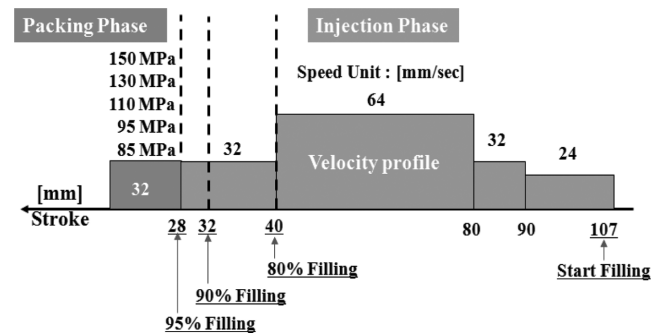


Figure 2. Schematic drawing of injection phase and packing phase.

에 따른 속도 프로파일과 보압의 크기를 나타내었다. 스트로크 40, 32, 그리고 28 mm는 충전에서 보압으로 전환되는 시점을 나타낸 것이다. 그림에서 점선으로 경계를 나타낸 것처럼 세 가지로 시도하였다. 사출성형에서 보압전환 방법은 네 가지로 구별된다. 즉, 스트로크에 의한 방법, 사출기의 실린더 압력에 의한 방법, 시간에 의한 방법, 그리고 캐비티나 노즐의 압력에 의한 방법 등이다. 본 연구에서는 스트로크에 의한 방법을 이용하였다.

Table 1에는 사출기 스크류의 스트로크 위치에 따른 보압전환 시점과 보압의 크기를 나타내었다. 표의 스트로크에서 가장 왼쪽의 숫자가 보압으로 전환되는 시점의 스트로크 위

Table 1. Injection Molding Conditions

No	Stroke at v/p switchover (mm)	Packing pressure (MPa)
1	32/40/80/90107	85
2	40/80/90107	85
3	28/40/80/90107	85
4	32/40/80/90107	95
5	32/40/80/90107	110
6	32/40/80/90107	130
7	32/40/80/90107	150

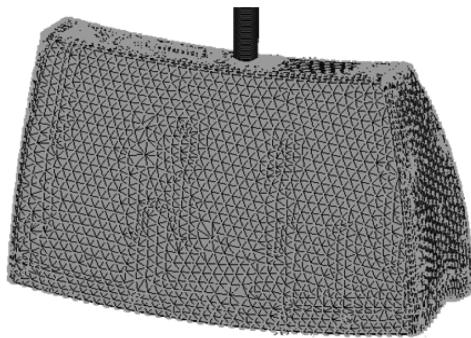


Figure 3. Mesh for the computer simulation of injection molding.

치이다. 보압전환 시점이 스트로크 40, 32, 그리고 28 mm인 경우, 보압으로 전환될 때의 캐비티내의 충전은 각각 80, 90, 그리고 95%이다. 스트로크의 가장 오른쪽의 숫자는 사출이 시작될 때의 스트로크 위치이다. 모든 실험에서 107 mm로 동일한 위치에서 사출이 시작되었고 충전에서 보압으로 전환되는 위치만 다르다.

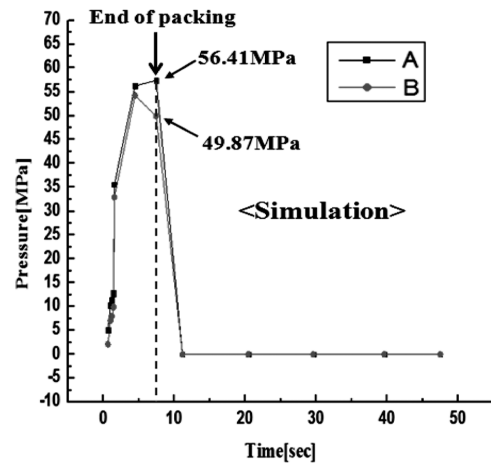
보압 단계에서 보압의 크기는 Table 1의 1번 조건, 즉 보압 크기 85 MPa, 보압전환 시점은 캐비티의 90% 충전인 스트로크 위치 32 mm인 경우를 기준조건으로 정하고 보압크기를 변경하여 보압조건을 설정하였다. 4번~7번 조건은 보압의 크기를 95~150 MPa로 설정한 것이다.

캐비티에서의 압력변화를 모사하기 위해 사출성형해석 전용 프로그램인 Moldflow를 사용하였다. Figure 3은 해석을 위한 메쉬를 보여주고 있다. 테트라 메쉬 형태의 3차원 4면체 요소(요소 수 253049개)로 해석을 하였으며 해석 조건은 사출실험의 조건과 동일하게 설정하였다.

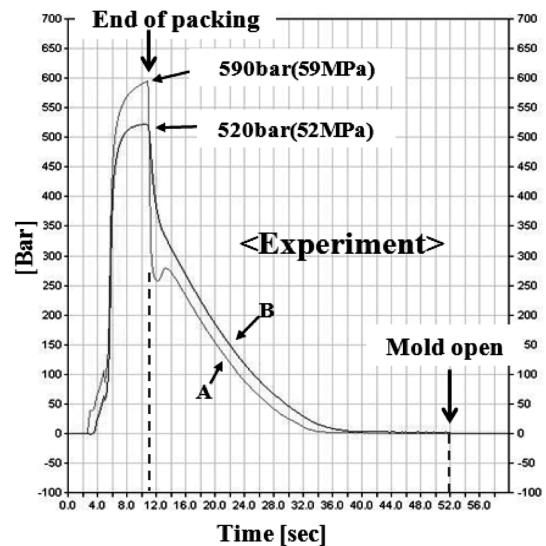
결과 및 토론

보압전환 시점에 따른 캐비티 압력. 보압전환 시점이 충전의 80, 90, 그리고 95% 때의 해석과 실험의 결과가 Figure 4, Figure 5 그리고 Figure 6에 나타나 있다.

Figure 4는 보압전환 시점이 충전의 80%일 때의 결과이다.



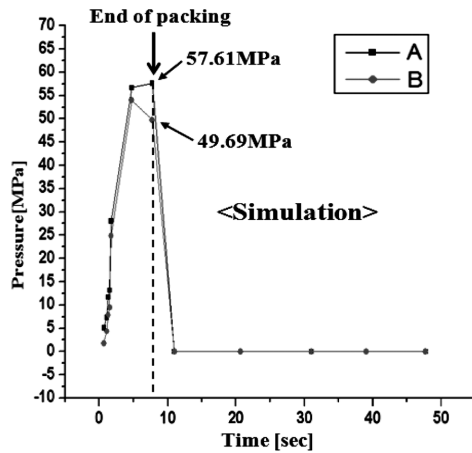
(a) Simulation of pressure profile



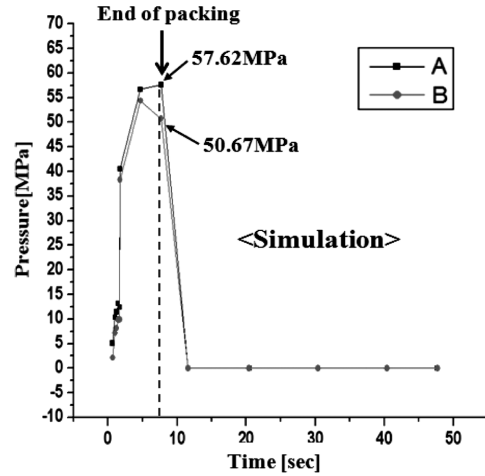
(b) Measurement of pressure

Figure 4. Cavity pressure profiles for v/p switchover of 80% filling; A and B indicate the position of sensors shown in Figure 1.

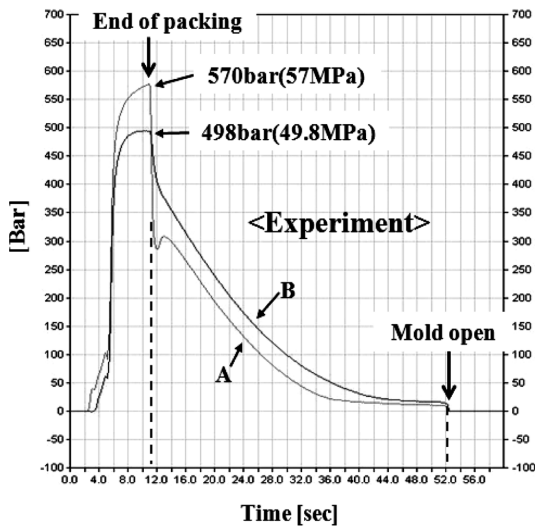
해석과 실험의 결과가 매우 유사하게 나타났으며 보압이 시작되는 시점에서 압력이 급격히 증가하면서 보압이 끝나는 시점에서 최고의 압력을 보이고 있다. 보압완료 시점의 해석 결과는 게이트에 가까운 A점은 56.41 MPa, B점은 49.87 MPa이며 두 위치간의 압력차이는 6.54 MPa로 나타났다. 실험에서는 A점은 59 MPa, B점은 52 MPa로 측정되었으며 두 위치간의 압력차이는 7 MPa로 나타났다. A는 게이트와 가까운 위치고 B는 게이트와 다소 떨어져있어서 압력의 차이가 있다. 해석에서는 B점의 압력이 보압과정 중간에 최고점을 보이고 있고, 보압완료 시점에서는 압력이 다소 떨어진다. 그러나 실험에서는 A점, B점 모두 보압완료 시점에서 최고압력을 보이고 있다. 충전에서 보압으로 전환되는 시점이 캐비티의



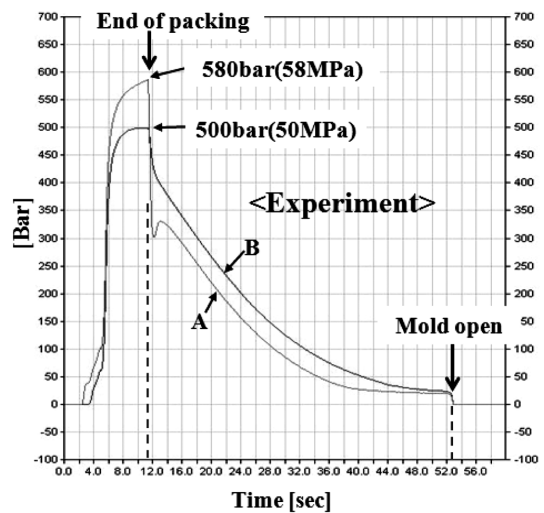
(a) Simulation



(a) Simulation



(b) Experiment



(b) Experiment

Figure 5. Cavity pressure profiles for v/p switchover at 90% filling; A and B indicate the position of sensors shown in Figure 1.

Figure 6. Cavity pressure profiles for v/p switchover at 95% filling; A and B indicate the position of sensors shown in Figure 1.

100% 충전 이전이기 때문에 캐비티의 최고압력은 실험과 해석 모두 보압단계에서 나타나고 있다. 보압이 끝나고 냉각이 진행되면서 압력이 0으로 접근하는데, 해석에서는 압력이 급격히 떨어지고 실험에서는 어느 점까지 급격히 떨어지고 그 이후에는 서서히 떨어지고 있다. 해석에서는 수지가 냉각되면서 수축에 대한 구속이 없는데 반해, 실제에서는 수지가 냉각되면서 수축될 때 금형에 구속되어 압력이 급격히 떨어지지 않고 서서히 떨어지는 것으로 판단된다.

Figure 5는 보압전환 시점이 충전의 90%일 때의 두 위치에서의 캐비티 내압을 보여주고 있다. 해석과 실험에서 보압전환이 충전의 80%일 때와 경향이 같고 압력 값도 큰 차이를 보이고 있지 않다. 실험에서 보압 후 냉각완료 시점, 즉 금형이 열리는 시점에서 A점, B점의 압력이 10~18 MPa 수준으

로 나타났다. 이는 보압전환 시점이 늦어지면서 충전시간이 길게 되어 전체적으로 압력을 받는 시간이 길어져 보압이 끝난 후에도 압력이 남아있는 즉, 잔여압력이 존재하는 것으로 보인다. 이 잔여압력이 존재하는 이유는 수지가 냉각되면서 캐비티내의 압력이 대기압까지 떨어지지 않아서 나타나기도 하지만, 금형의 변형에 의해 제품이 휘면서 압력센서를 계속 누르기 때문에 나타날 수도 있다.

Figure 6은 보압전환 시점이 충전의 95%일 때의 두 위치간의 캐비티 내압을 나타낸 것이다. 실험에서 수행한 보압전환 시점에 따른 캐비티 내압의 변화는 크게 변하지 않았다. 그러나 냉각이 끝나고 금형이 열리는 시점에서 잔여압력은 다소 증가하였다.

Figures 4-6의 압력 프로파일에서 보압이 완료된 후 A와

B점의 압력이 급격히 떨어지는 현상을 보이는데, 이는 밸브 노즐을 사용하는 게이트에서 보압이 완료되고 밸브가 잠겨지면서 수지공급이 차단되고 압력전달이 없기 때문에 나타나는 현상이라 판단된다.

Figure 7은 보압완료 시점에서의 해석과 실험의 압력을 비교한 것이다. 보압전환이 충전의 80%일 때 해석과 실험값이 다소 차이가 나고 있다. 그러나 보압전환 시점이 90, 95%인 경우 해석과 실험의 차이가 매우 작았다. 전체적으로 보압전환 시점에 따라 보압완료 시점의 압력은 크게 변함이 없다.

Figure 8은 보압 후 냉각이 완료되는 시점, 즉 냉각이 끝나고 금형이 열리는 시점에서 측정된 A와 B점의 잔여압력을 보여주고 있다. 보압전환 시점이 늦어질수록 A점과 B점의 잔여압력이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것은 보압전환이 늦어지면 충전시간이 오래 지속되기 때문에 상대적으로 압력을

받는 시간이 길어져 나타난 현상이라 판단된다. 이러한 잔여압력은 제품에 잔류응력으로 존재되거나 금형의 변형을 유발할 수 있다.

보압크기에 따른 캐비티 압력. 사출성형에서 보압과정은 충전이 끝나고 수지가 수축하는 양을 보상하고 최종적으로 수지가 캐비티에 완전히 충전하도록 해주는 단계이다. 따라서 성형품의 품질은 이 보압과정에 크게 지배된다. 보압과정에서 조절하는 변수는 앞절에서 살펴본 보압전환 시점과, 보압크기 그리고 보압시간이다. 보압크기와 보압시간 중 캐비티 내의 압력 크기에 영향을 주는 것은 보압크기이므로 여기서는 보압의 크기를 조절하여 캐비티 내의 압력을 관찰하였다. Figures 9~11은 보압크기가 85, 110 그리고 150 MPa일 때 캐비티 내의 압력 프로파일을 보여주고 있다.

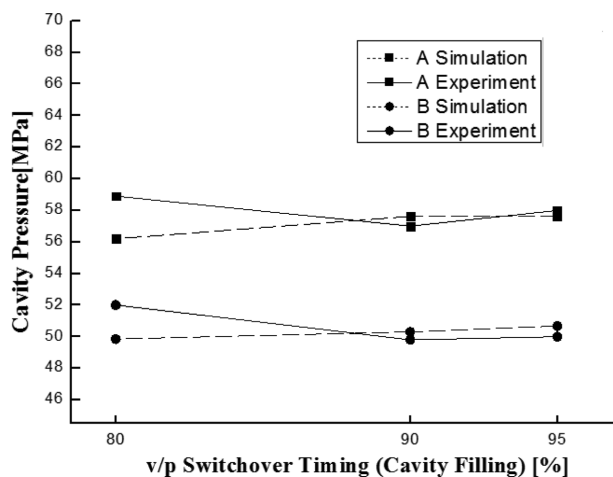


Figure 7. Pressures at the end of packing phase vs v/p switchover timing.

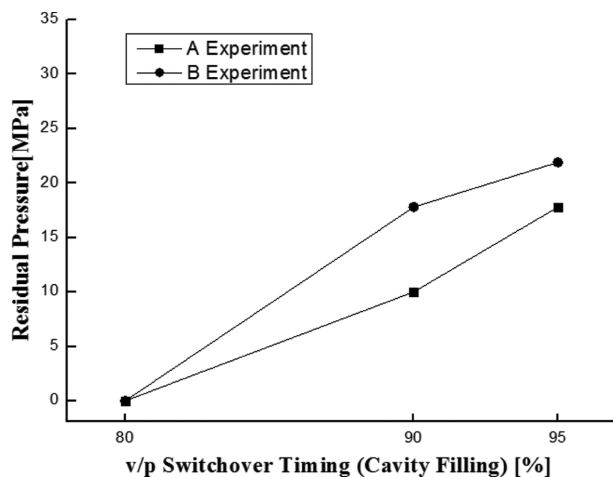
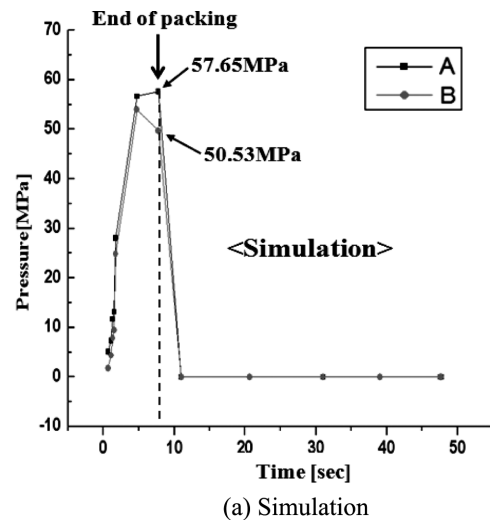
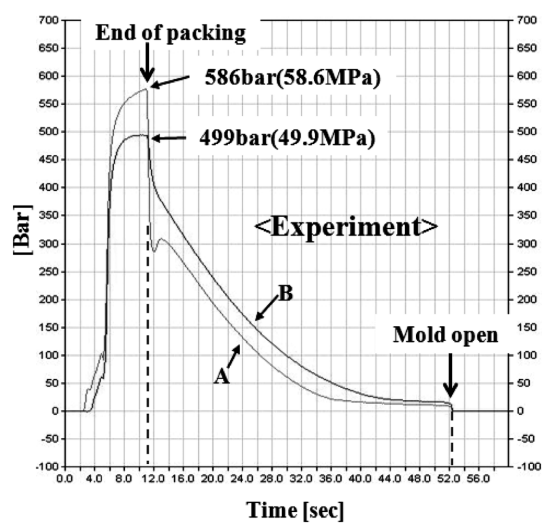


Figure 8. Residual pressures at the end of cooling phase vs v/p switchover timing.



(a) Simulation

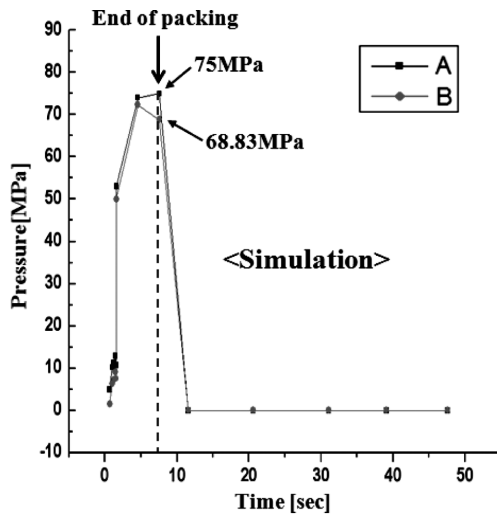


(b) Experiment

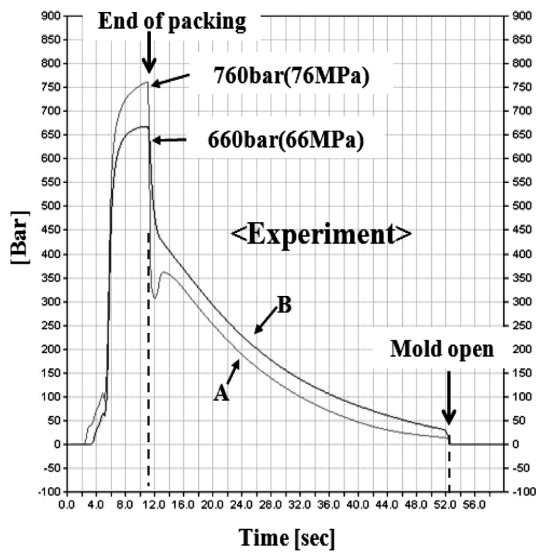
Figure 9. Cavity pressure profiles at 85 MPa of packing pressure; A and B indicate the position of sensors shown in Figure 1.

Figure 9는 보압크기가 85 MPa일 때의 두 위치에서의 압력이다. 해석에서 보압완료 시점의 A점은 57.65 MPa, B점은 50.53 MPa이며 두 위치간의 압력차이는 7.13MPa로 나타났다. 실험에서 A점은 58.6 MPa, B점은 49.9 MPa이며 두 위치간의 압력차이는 7.7 MPa로 나타났다. 보압전환 시점에 따른 캐비티 압력과 마찬가지로 게이트에 가까운 A점 위치가 B점 위치보다 높은 압력을 보였다. 해석과 실험결과가 매우 유사하게 나타났다. 실험에서 보압 후 냉각완료 시점, 즉 금형이 열리는 시점에서 A와 B점의 압력은 10과 18 MPa로 잔여압력이 존재하였다.

Figure 10은 보압크기가 110 MPa일 때 두 위치에서의 압



(a) Simulation

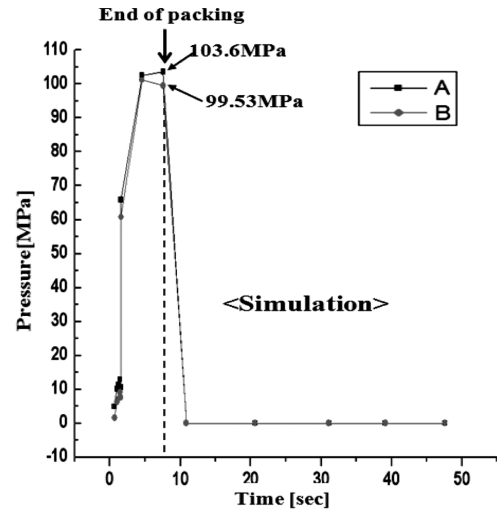


(b) Experiment

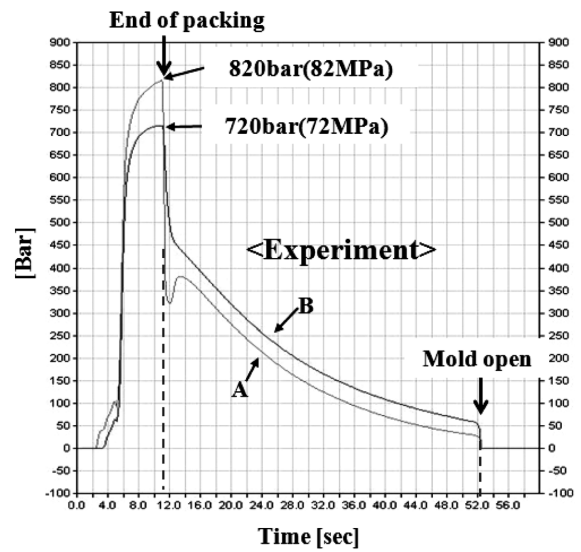
Figure 10. Cavity pressure profiles at 110 MPa of packing pressure; A and B indicate the position of sensors shown in Figure 1.

력을 보여주고 있다. 해석결과는 보압완료 시점에서 A점은 75 MPa, B점은 68.83 MPa이며 두 위치간의 압력차이는 6.17 MPa로 나타났다. 실험결과에서는 A점이 76 MPa, B점이 66 MPa이며 두 위치간의 압력차이가 10 MPa로 나타났다. 해석과 실험결과간 두 위치간의 압력차이가 A점에서는 1.31% 차이로 실험결과가 높게 나왔고 B점에서는 4.28% 차이로 해석결과가 높게 나타났다. 실험결과에서 냉각완료 시점에서 A점의 압력은 15 MPa, B점의 압력은 32 MPa로 잔여압력이 관찰되었다.

Figure 11은 보압크기가 150 MPa일 때의 각 측정 점에서의 캐비티 내압을 나타낸 것이다. 해석결과는 보압완료 시점



(a) Simulation



(b) Experiment

Figure 11. Cavity pressure profiles for packing pressure of 150 MPa; A and B indicate the position of sensors shown in Figure 1.

에서 A점은 103.6 MPa, B점은 99.53 MPa이며 두 위치간의 압력차이는 4.07 MPa로 나타났다. 실험결과에서는 A점에서 82 MPa, B점에서 72 MPa로 두 위치간의 압력차이가 10 MPa로 해석결과보다 크게 나타났다. 해석과 실험결과간 두 위치에서의 압력차이가 A점에서는 21.6 MPa, B점에서는 27.53 MPa로 해석결과가 모두 높게 나타났다. 이러한 현상은 실험 시 과도한 보압의 크기로 인해 제품에 플래시발생이나 사출기 스크류의 체크 링에서 수지의 역류에 의한 것으로 판단된다. 해석에서는 플래시 발생이나 체크 링에서의 역류에 의한 압력강하를 계산하지 못하지만 실제에서는 압력이 과다할 때 플래시가 발생되거나 체크 링에서 수지의 역류로 캐비티의 내압이 떨어질 수 있다. 실험결과에서 보압 후 냉각완료 시

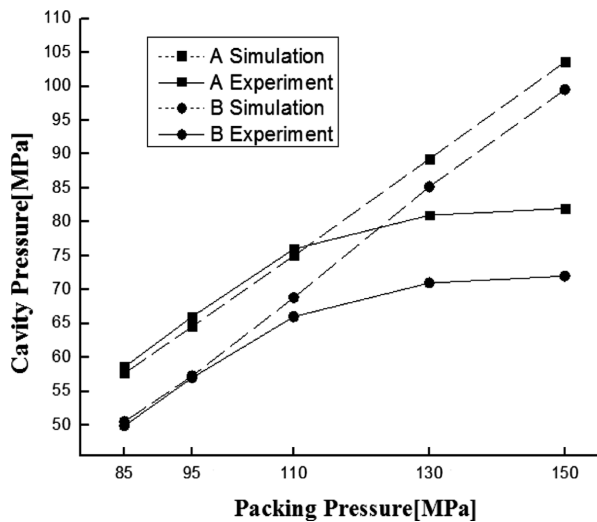


Figure 12. Pressures at the end of packing phase vs packing pressure.

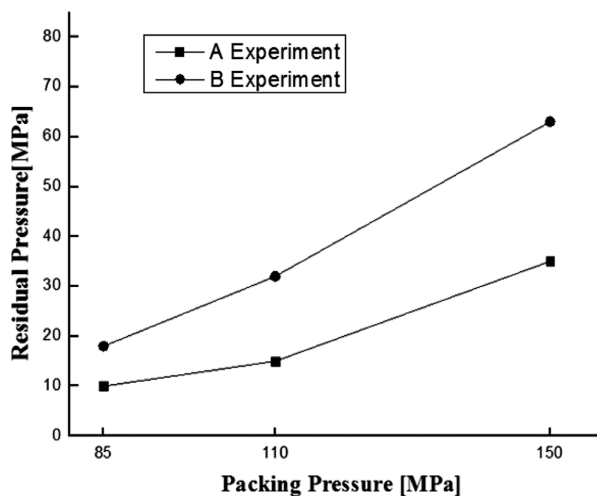


Figure 13. Residual pressures at the end of cooling phase vs packing pressure.

점에서 A점, B점의 압력은 35, 63 MPa로 보압크기가 커짐에 따라 잔여압력도 증가한 것을 알 수 있다.

보압이 클수록 이에 비례하여 캐비티 내압이 크게 증가함을 보였고, 압력 프로파일은 유사하게 나타났다. 성형조건 중 압력의 설정은 캐비티 내의 수지가 받는 압력과 직접적인 관련이 있어 캐비티 내의 압력조절을 위해서는 압력설정이 가장 효과적임을 알 수 있다.

Figure 12는 보압크기에 따른 보압완료 시점에서 해석과 실험의 압력을 비교한 것이다. 보압크기가 110 MPa까지는 해석과 실험의 차이가 작으나, 보압크기가 110 MPa보다 클 때는 해석과 실험의 차이가 크게 나고 있다. 보압의 크기가 커질수록 실험과 해석에서의 압력 차이가 큰 것은 해석과 실험에서 수지의 비압축성의 차이, 실제 사출에서 일어나는 스크류와 체크링에서 역류, 그리고 캐비티 내의 압력이 클 때 실제 성형공정에서 일어날 수 있는 플래시 등에 의한 것으로 판단된다. 전체적으로 보압크기에 따라 보압완료 시점의 압력이 비례적으로 변화하였다.

Figure 13은 냉각완료 시점에서 측정한 A점과 B점의 잔여압력을 보여주고 있다. 보압크기가 증가함에 따라 A점과 B점의 잔여압력이 증가한다. 이는 보압크기와 잔여압력이 매우 밀접하게 관련이 있음을 보여준다. 잔여압력이 클수록 제품에 잔류응력이 많아지거나 금형이 변형될 가능성이 크다.

결론

본 연구는 사출성형공정의 보압단계에서 캐비티 내에서 받는 압력분포를 관찰하기 위한 연구로서 사출성형해석 프로그램과 실험을 통하여 접근하였다. 보압전환 시점에 따른 캐비티 내의 압력분포에서는 보압전환 시점이 늦어짐에 따라서 캐비티 내의 압력증가는 미미하였으나 보압이 늦어짐에 따라 충전시간이 길어져 전체적으로 압력을 받는 시간이 길어져 냉각 후의 잔여압력이 증가하였다. 캐비티 내의 잔여압력을 줄이기 위해서는 보압전환 시점을 일찍 시작해야 함을 시사한다.

보압크기를 변경하였을 때 캐비티 내에서 받는 압력이 보압크기가 커질수록 비례적으로 증가하는 경향을 보였고 잔여압력 또한 보압크기에 비례적으로 증가하였다. 따라서 캐비티 내에 잔여압력을 줄이기 위해서는 보압크기를 적절히 작게 가져가는 것이 바람직하다. 그리고 해석과 실험의 결과를 비교해보았을 때 보압완료 시점까지의 압력의 값은 다소 편차가 있지만 전체적인 압력 프로파일 경향으로 보았을 때 유사하였다.

감사의 글: 본 과제(연구)는 지식경제부와 한국산업기술진흥원의 전략기술인력양성사업으로 수행된 결과입니다. 본 논문(연구)은 지식경제부의 지식경제 기술혁신사업(WC-300) 지원으로 수행된 결과입니다.

참 고 문 헌

1. T. A. Osswald, L.-S. Turng, and P. J. Gramann, *Injection Molding Handbook*, Hanser, Munich, 2000.
2. M.-Y. Lyu and H.-Y. Kim, *Polymer Science and Technology*, **20**, 157 (2009).
3. I. I. Rubin, *Injection Molding Theory and Practice*, John Wiley & Sons, New York, 1972.
4. D. G. Baird and D. I. Collias, *Polymer Processing*, John Wiley & Sons, New York, 1988.
5. V. Leo and C. H. Cuvellez, *Polym. Eng. Sci.*, **36**, 1961 (1996).
6. J. F. Luye and G. Regnier, *Polym. Eng. Sci.*, **40**, 1692 (2000).
7. B. Kim, W. Jang, J. Kim, C. W. Chung, Y.-H. Park, and S. Choe, *Polymer(Korea)*, **25**, 855 (2001).
8. A. Kramschuster, R. Cavitt, D. Ermer, Z. Chen, and L.-S. Turng, *Polym. Eng. Sci.*, **45**, 1408 (2005).
9. S. J. Hwang and M.-Y. Lyu, *Transaction of Materials Processing*, **17**, 528 (2008).
10. H. Zhou, Z. Wang, J. Li, and D. Li, *Polym. Eng. Sci.*, **51**, 785 (2011).