韓國精密工學會 2005 年度 秋季學術大會論文集

사출성형 공정에서 고화층이 캐비티 압력에 미치는 영향

이호상* (충주대 기계설계학과)

Frozen Layer Effect on Internal Cavity Pressure during Injection Molding

H. S. Lee* (Dept. Mech. Design, CNU)

ABSTRACT

Experimental and theoretical studies of internal cavity pressure during injection molding of a spiral tube cavity were carried out. The frozen layer thickness and the evolution of internal cavity pressure were calculated using a commercial software (C-MOLD). The evolution of the internal cavity pressure was recorded during injection molding of polystyrene into a spiral tube mold. To explain the differences observed between the calculated and measured internal cavity pressure, a pressure correction factor (PCF) was introduced based on the plane stress theory. This factor was determined by analyzing the stress state in the melt and calculating the frozen layer thickness near the mold wall. The corrected and experimental pressures have been compared to validate the applicability of the pressure correction factor.

Key Words : Cavity pressure (캐비티압력), Frozen layer (고화층), Simulation (시뮬레이션), Pressure correction factor (압력보정계수), Polystyrene (폴리스티렌)

1. 서론

사출성형은 플라스틱 성형에서 가장 널리 사용되는 공법중의 하나로서 충전, 보압, 냉각 등 3 단계로 구분할 수 있다. 충전단계에서 용융된 고분자가 차가운 금형 캐비티로 주입된다. 일단 충전단계가 끝나게 되면, 보압단계에서는 냉각되면서 발생하는 용융된 수지의 수축을 보상하기 위하여 추가적인 수지가 금형 캐비티로 주입된다. 냉각단계에서는 보압단계 이후에 발생하는 공정으로서 성형품을 취출온도 이하로 냉각시키게 된다. 전체 성형사이클을 통하여 다양한 공정변수들이 최종 성형품의 품질에 각각 영향을 미치므로 사출성형 공정은 관리하기 쉽지 않다. 예를들어 보압단계에서 지나치게 높은 압력은 성형품에서 잔류응력을 유발하는 분자배향을 발생시키게 된다.[1] 보압제어, 사출속도 제어 및 캐비티 압력 제어 등을 포함하는 사출성형 사이클을 모니터링하기 위한 많은 방법이 제안되어 있다.[2] 사출성형 사이클 동안 내부 캐비티 압력 제어의 중요성은 많은 연구자들에 의하여 제시되어 왔는데, 그 이유는 내부 캐비티 압력이 실제 성형 공정중 금형 캐비티에서 발생하는 현상을 직접적으로 나타내주기 때문이다.[3-5] 캐비티에서의 압력분포는 사출속도, 사출온도 및 금형 온도, 그리고 숏 크기와 같은 변수들에 의하여 달라지게 된다.

그동안 충전단계에서 고화층 두께를 고려한 수치해석에 대한 연구가 발표되었지만[6], 지금까지 고화층 두께가 압력센서에 의하여 측정된 캐비티 압력에 미치는 영향에 대한 연구는 이루어진바 없다.

본 논문에서는 충전단계에서 내부 캐비티 압력에 미치는 고화층 두께의 영향을 살펴보고자 하였다. 고화층 두께와 내부 캐비티 압력의 추이를 구하기 위하여 상용 소프트웨어인 C-MOLD를 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 계산된 내부 캐비티 압력은 충전단계에서 압력센서를 이용하여 측정된 실험결과와 비교되었다. 사출속도, 숏 크기, 금형 및 수지 온도와 같은 공정 변수들을 변화시키면서 시뮬레이션과 실험결과를 비교하였다. 고화층의 영향을 고려하기 위하여 평면응력이론 [7] 에 기초하여 압력보정인자를 도입하였으며, 보정된 값이 실험

결과와 비교되었다.

2. 실험

2.1 실험장치

압력측정 실험은 사출성형기(Van dorn 55HPS-2.8F)에서 수행되었으며, 스크류 직경은 30mm, 형체력은 500kN, 그리고 사출성형기는 마이크로프로세스 장치에 의하여 제어되었다.

사출성형 실험을 위하여 직경 10.4mm 를 갖는 나선형 튜브 캐비티가 사용되었으며, 금형을 100% 채우기 위한 스크루 행정 거리는 7.315 cm 였다. 2 개의 압력센서(Kistler model 6155 및 6157BA)가 Fig.1 에서 나타낸 위치 1 과 2 에 각각 설치되었다.

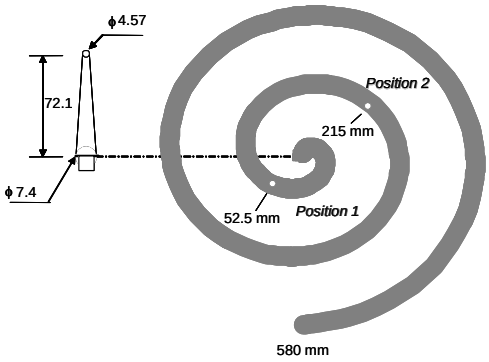


Fig. 1 Schematic of cavity with locations of transducers (all dimensions in mm)

압력센서로부터의 신호는 전하 모니터(Kistler model 5085B)에 의하여 증폭되고, 사출성형기로부터의 스크류 변위센서(LVDT)가 데이터분석장치에 연결되고 측정 데이터는 컴퓨터에 저장되었다. 데이터 분석장치는 개인컴퓨터에 설치된 내셔널 인스투루먼트 데이터 분석 보드(PCI 6024E)와 내셔널 인스투루먼트 신호처리 샤시(SCXI 1000)에 설치된 증폭기(SCXI 1102C)로 구성되었다. 신호는 채널당 300 Hz 의 속도로 처리되며, 전체적인 실험장치의 구조는 Fig.2 와 같다.

사출성형 실험을 위하여 일반적인 폴리스틸렌(Dow Styron 615 APR-26-W) 수지를 사용하였다.

2.2 실험계획

내부 캐비티 압력에 미치는 고화층 두께의 영향을 연구하기 위하여 실험조건표를 구성하였다. 사용된 공정 변수는 사출속도, 금형온도, 사출온도, 그리고 숏 크기이다. 각 변수는 Table 1 에서 보여진 바와 같이 조건에 따라 변화되었으며, 각 조건에 대하여 정상상태에 도달할 때까지 사출성형하고, 실험조건 별로 3 개씩의 샘플을 무작위로 추출하였다. 성형 중 시간에 따른 내부 캐비티 압력과 스크루 위치가 기록되었다. 숏 크기를 확인하기 위하여 각 실험조건에 따른 3 개의 샘플을 전자 저울(Satorius B 4100)을 사용하여 중량을 측정하였다.

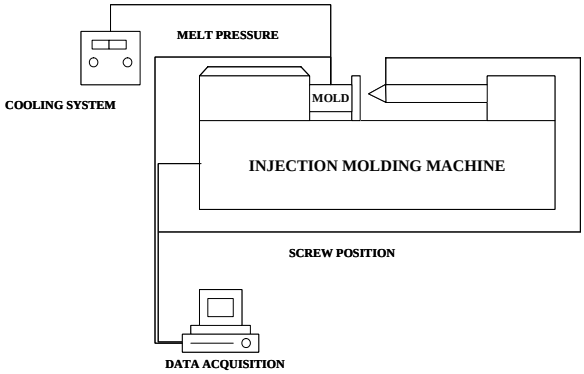


Fig. 2 Schematic of overall experimental setup

Table 1 Experimental processing conditionsTT

Con. Number	Shot size [%]	Melt temp. [°C]	Injection speed [cm/sec]	Mold temp. [°C]
1	75	200	7.62	30
2	86.8	200	7.62	30
3	90	200	7.62	30
4	100	200	7.62	30
5	86.8	180	7.62	30
6	86.8	200	7.62	30
7	86.8	230	7.62	30
8	86.8	200	1.27	30
9	86.8	200	7.62	30
10	86.8	200	15.24	30
11	86.8	200	7.62	30
12	86.8	200	7.62	70
13	86.8	200	7.62	130

3. 실험 및 토의

3.1 압력보정계수

충전과정동안 용융된 수지의 급격한 냉각에 의하여 금형 벽면에서 고화층이 형성된다. Isayev 등[8]은 반 결정성 수지에 대한 사출성형 해석을 통하여, 금형 벽면 근처에서 고화된 고체층이 충전과정에서 형성됨을 나타내었다.

본 논문에서는 충전과정동안 캐비티 압력에 미치는 고화층 생성의 영향을 고려하기 위하여 평면응력 이론에 기초한 압력보정계수인 PCF(Pressure Correction Factor)를 도입하였다.

Fig.3 에서 보여진 바와 같은 두꺼운 벽을 갖는 원통의 경우 변형은 축에 대하여 대칭이다. 이때 응력에 대한 평형방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d\sigma_r}{dr}+\frac{\sigma_r-\sigma_\theta}{r}=0 \qquad (1)$$

여기서 σ_θ 과 σ_r 은 각각 요소의 측면에 작용하는 접선방향과 반경방향 응력을 나타낸다. 반경방향 변형율 ε_r 과 접선방향 변형율 ε_θ 는 반경방향 변위 u 와 연관된다.

$$\varepsilon_r=\frac{du}{dr},\quad \varepsilon_\theta=\frac{u}{r},\quad \gamma_{r\theta}=0 \qquad (2)$$

응력과 변형율 관계는 다음과 같다.

$$\sigma_r=\frac{E}{1-\upsilon^2}\left(\varepsilon_r+\upsilon\varepsilon_\theta\right) \qquad (3a)$$

$$\sigma_\theta=\frac{E}{1-\upsilon^2}\left(\varepsilon_\theta+\upsilon\varepsilon_r\right) \qquad (3b)$$

여기서 υ 는 프와송비이다.

식(2), 식(3a), 식(3b)를 식(1)에 대입하면 다음과 같은 반경방향 변위에 대한 평형방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d^2u}{dr^2}+\frac{1}{r}\frac{du}{dr}-\frac{u}{r^2}=0 \qquad (4)$$

위 방정식의 해는 다음과 같다.

$$u=C_1r+\frac{C_2}{r} \qquad (5)$$

그리고 식(3a)의 σ_r 은 다음과 같다.

$$\sigma_r=\frac{E}{1-\upsilon^2}\left[C_1(1+\upsilon)-C_2(\frac{1-\upsilon}{r^2})\right] \qquad (6)$$

내부반경 a 와 외부반경 b 인 원통에 대하여 경계조건은 다음과 같다.

$$(u)_{r=b}=0,\quad (\sigma_r)_{r=a}=-P \qquad (7)$$

여기서 P 는 내부 캐비티 압력에 해당된다.

위 경계조건식을 식(5)와 식(6)에 각각 대입하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\sigma_r=\frac{-a^2}{\left(a^2+b^2\right)+\upsilon\left(a^2-b^2\right)}\left[\left(1+\upsilon\right)+\left(1-\upsilon\right)\frac{b^2}{r^2}\right]P \qquad (8)$$

한편 측정된 캐비티 압력, P_m 은 다음과 같다.

$$P_m=-\left(\sigma_r\right)_{r=b}=\frac{2a^2}{\left(a^2+b^2\right)+\upsilon\left(a^2-b^2\right)}P \qquad (9)$$

고화층 두께 f 를 도입하면, $a=b(1-f)$ 의 관계를 갖게 되고, 측정된 캐비티 압력 P_m 과 고화층이 없는 경우의 내부압력 P 사이의 관계식을 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$P_m=PCF\times P \qquad (10)$$

여기서 PCF 는 압력보정계수(pressure correction factor)이며, 다음과 같이 정의된다.

$$PCF=\frac{2\left(1-f\right)^2}{\left[1+\left(1-f\right)^2\right]-\upsilon\left[1-\left(1-f\right)^2\right]}\cdot K \qquad (11)$$

여기서 K 는 Fig.3 에서 보여진 바와 같이 캐비티 면과 압력센서면 사이에서 존재하는 기하학적 차이(d), 냉각속도에 따른 고화온도의 변화 등과 같은 오차를 교정하기 위한 실험변수이다.

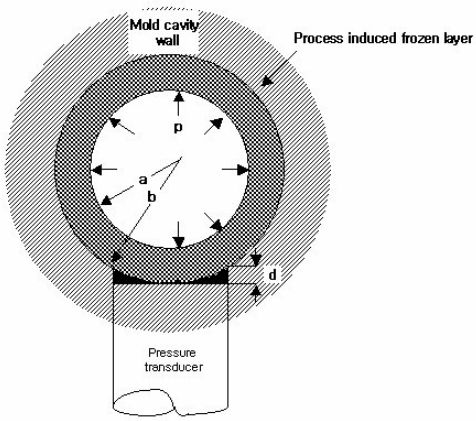


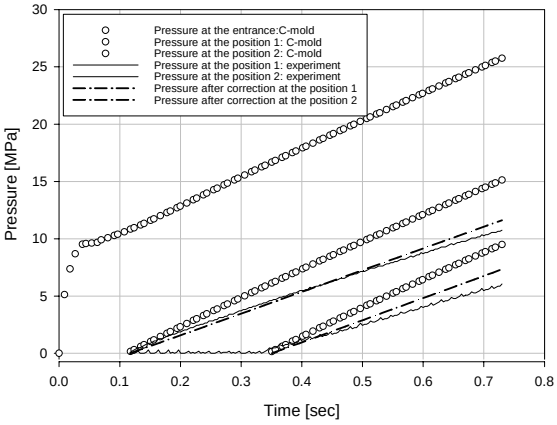
Fig. 3 Schematic representation of the cross section of the spiral typed mold cavity with mounted locations of transducers (all dimensions in mm)

3.2 금형온도의 영향

Fig.4 와 5 는 각각 금형온도가 30 °C와 130 °C인 경우에 대하여 측정된 압력과 시뮬레이션된 압력 추이를 나타낸다. Fig.4 를 살펴보면 금형온도 30°C인 경우 시뮬레이션과 실험에 의한 캐비티 압력 차이는 위치 1 과 2 에서 각각 3.79 와 2.65 MPa이다. 이것은 고화층이 내부 캐비티의 압력에 영향을 미치고 있기 때문으로 판단된다. PS의 경우 계산된 수지 온도가 유리전이온도, T_g =100 °C에 도달하는 위치를 기준으로 하여 나선형 튜브의 반경방향 고화층을 결정하였다. 또한 식(11)에서 K=0.8 을 적용한 PCF를 사용하여 시뮬레이션된 캐비티 압력을 보정하였으며, 보정된 압력과 실험에 의해 측정된 압력의 차이는 각각 0.86 과 1.27 MPa이 되었다. PCF를 사용하여 시뮬레이션된 압력을 보정한 결과는 실험값과 잘 일치함을 보여준다.

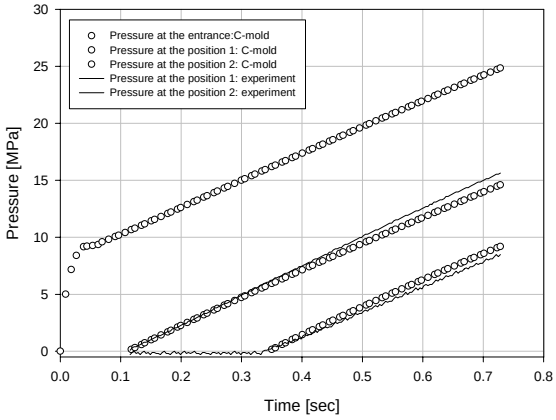
Fig.5 는 높은 금형온도의 영향을 나타낸다. 높은 금형 온도는 유동저항을 감소시키고 캐비티 압력을 낮추며 금형온도 130 °C에서 측정된 캐비티

압력은 시뮬레이션 된 압력보다 위치 1 에서 약간 높고 위치 2 에서는 약간 낮은데 별 차이가 없음을 볼 수 있다. 이 경우는 금형온도가 T_g 보다 높기 때문에 고화층이 형성되지 않으며, 따라서 시뮬레이션된 결과는 PCF를 고려하지 않아도 측정된 결과와 잘 일치하게 되는 것이다.



Melt Temperature [^oC]:200, Injection Stroke [cm]:6.35, Injection Speed [cm/sec]:7.62,Boost Pressure [MPa]:13.79, Mold Temperature [^oC]:30

Fig. 4 The effect of frozen layer on measuring internal cavity pressure at a mold temperature of 30^oC.



Melt Temperature [^oC]:200, Injection Stroke [cm]:6.35, Injection Speed [cm/sec]:7.62,Boost Pressure [MPa]:13.79, Mold Temperature [^oC]:130

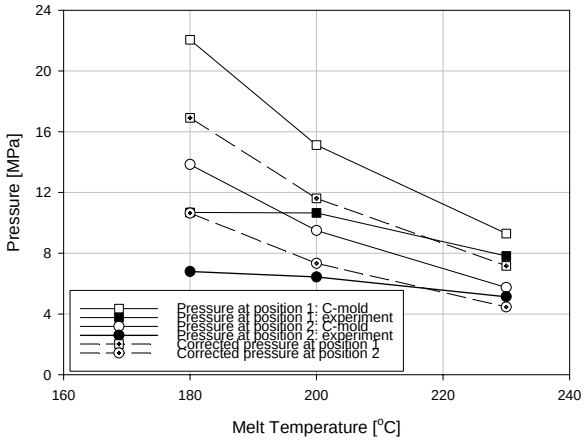
Fig. 5 The effect of frozen layer on measuring internal cavity pressure at a mold temperature of 130^oC

3.3 사출온도의 영향

Fig.6 은 사출온도가 측정된 캐비티 압력과 시뮬레이션된 압력에 미치는 영향을 나타낸다. 캐비티 압력은 사출온도가 증가함에 따라 감소한다. 이것은 수지의 점도가 유동저항에 영향을 미치고 있음을 나타낸다. 폴리스틸렌 수지의 점도는 온도에 크게 영향을 받고 전단속도가 증가함에 따라 점도가 크게 감소한다[9]. 따라서 수지는 일정한 사출속도에서 사출온도가 높을 경우 전단박하 현상(shear thinning)이 나타나기 쉽다. 강한 전단박하 현상의 영향으로 사출온도 180 ^oC와 200 ^oC사이에서 위치 1 의 측정된 캐비티 압력 차이는 겨우 0.38 MPa 인 반면, 사출온도 200 ^oC와 230 ^oC사이에서의 차이는 2.83 MPa 이다.

사출온도 180 ^oC의 경우 측정 압력과 시뮬레이션된 압력 사이에서 11.87MPa의 매우 큰 차이가 나타나는데, 이것은 사출온도가 낮을 때 고화층의 두께가 크게 증가하게 된다는 사실에 기인한 것으로 판단된다.

높은 사출온도에서 고화층의 두께는 감소하므로 시뮬레이션된 압력과 측정된 압력사이의 차이는 작아진다. 얇은 고화층 형성에 관한 설명은 사출온도 230 ^oC에서 살펴볼수 있는데, 실험과 시뮬레이션에 의한 캐비티 압력 차이는 단지 위치 1 에서 1.48MPa, 위치 2 에서 0.61MPa이었다. 이와 같이 고화층 두께의 감소는 금형 캐비티에서 계산과 측정 압력 사이의 차이를 감소시킨다.



Injection Stroke [cm]:6.35, Injection Speed [cm/sec]:7.62, Boost Pressure [MPa]:13.79, Mold Temperature [^oC]:30

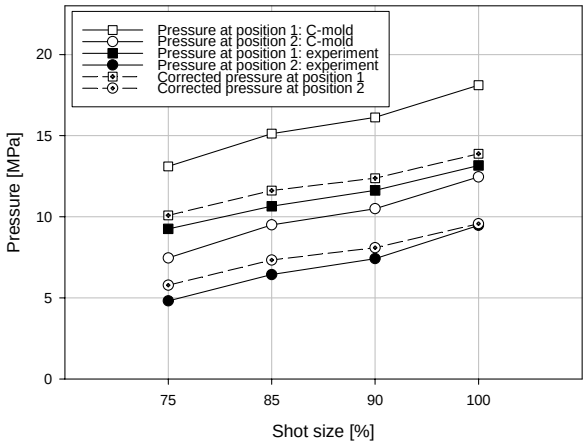
Fig. 6 The effect of frozen layer on measuring internal cavity pressure as a function of melt temperature at a mold temperature of 30 ^oC

3.4 숏 크기의 영향

Fig.7 은 측정된 캐비티 압력에 미치는 숏 크기의 영향을 나타낸다. 그림으로부터 숏 크기가 증가함에 따라 캐비티 압력이 증가함을 볼 수 있다. 이것은 길어진 충전시간으로 설명될 수 있는데, 많은

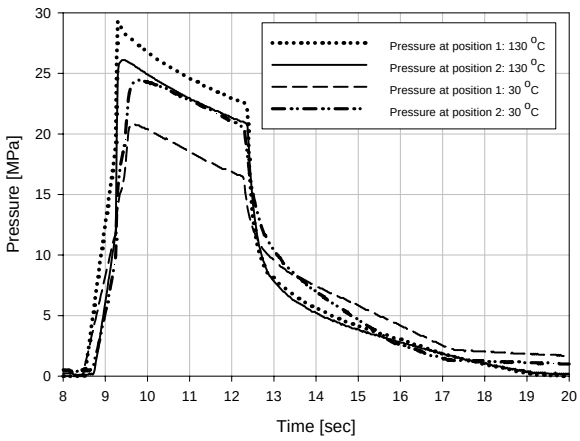
수지가 캐비티로 주입될수록, 캐비티의 더욱 많은 체적이 수지에 의해 채워지므로 유동저항이 더욱 커지게 된다. 100% 숏 크기에 도달할 때까지 내부 캐비티 압력이 증가하고 있으며, 실험과 시뮬레이션결과 사이에서의 압력차이는 숏 크기에 관계없이 거의 일정하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 캐비티 압력 차이가 거의 일정한 이유는 동일한 금형온도와 사출온도의 사용으로 고화층 두께의 변화가 작기 때문이다.

금형온도를 30 ºC 및 130 ºC로 유지한 상태에서 100% 숏 크기에서의 측정된 캐비티 압력은 Fig.8 에서 보여지고 있다. 예측된 바와 같이 위치 1 에서의 캐비티압력은 위치 2 에서의 값보다 높고, 보압 이후의 압력감소는 금형온도 30 ºC 및 130 ºC 모두에 대하여 위치 1 과 위치 2 에서 서로 일치하고 있다. 위치 1 에서 캐비티 압력이 급격하게 최대치를 나타내는 것은 참고문헌[10]에서 설명된 바와 같이 사출시스템의 관성에 기인한 것으로 판단된다. 금형온도 30 ºC의 경우에서 특이한 현상이 관찰되었는데, 위치 2 에서의 캐비티 압력이 충전단계가 끝난 후에 위치 1 에서의 값을 초과하고 있다. 또 다른 흥미 있는 관찰은 압력감소이다. 위치 1 에서 13 초 이후 압력감소율은 위치 2 에서의 값보다 늦다. 이와 같은 현상은 위치 1 에서 충전 및 보압 단계에서 형성된 고화층이 위치 2 에서의 고화층보다 두껍다는 사실에 기인한 것으로 판단된다.



Melt Temperature [ºC]:200, Injection Speed [cm/sec]:7.62, Boost Pressure [MPa]:13.79, Mold Temperature [ºC]:30

Fig. 7 The effect of frozen layer on measuring internal cavity pressure as a function of shot size

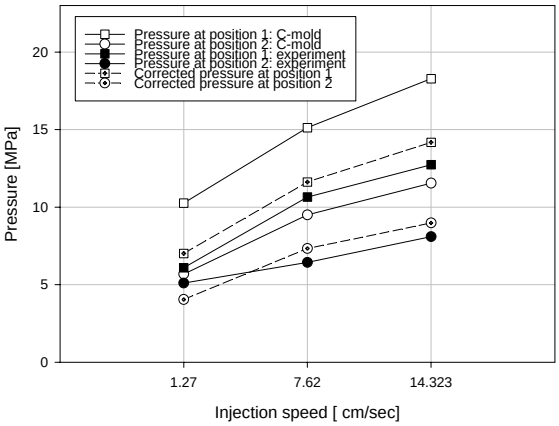


Melt Temperature [ºC]:200, Injection Stroke [cm]:7.315, Injection Speed [cm/sec]:7.62, Boost Pressure [MPa]:13.79, Mold Temp. [ºC]:30, 130.

Fig. 8 The effect of frozen layer on measuring internal cavity pressure at a shot size of 100 %

3.5 사출속도의 영향

사출속도의 영향과 관련하여 Fig.9 에서 보여진 바와 같이 사출속도가 증가함에 따라 내부 캐비티 압력은 증가한다. 이것은 유량이 증가하게 됨에 따른 결과로 쉽게 이해될 수 있다. 실험과 시뮬레이션결과 사이의 초기 압력 차이는 관찰된 사출속도 범위에서 거의 일정하였다. 그러나 PCF 를 사용하여 시뮬레이션결과를 보정한 이후에는 사출속도 1.27 cm/s 의 경우 위치 1 에서의 보정된 캐비티 압력은 크게 감소하여 실험치에 잘 접근하였으며, 반면에 높은 사출속도에서는 압력이 약간 감소하여 다소 차이를 보이고 있다. 이것은 낮은 사출속도에서 형성된 두꺼운 고화층 의하여 설명될 수 있는데, 그 이유로서 용융된 고분자는 낮은 사출속도에서 냉각될 수 있는 많은 시간을 갖게 되기 때문이다. 위치 2 에서 보정된 시뮬레이션결과는 측정된 압력과 잘 일치하고 있다는 사실을 볼 수 있다. 이것은 낮은 사출속도에서 상대적으로 두꺼운 고화층이 PCF 값에 기여를 하기 때문인 것으로 보여진다. 또한 사출속도가 느릴 경우 위치 1 과 위치 2 사이에서 측정된 캐비티 압력 차이는 다른 사출속도 (7.62 와 15.24 cm/s)에 비하여 작다는 사실을 볼 수 있는데, 이것은 낮은 사출속도에서 상대적으로 빠른 고화층이 형성됨을 나타내는 또 다른 예이다.



Melt Temperature [^{o}C]:200, Injection Stroke [cm]:6.35, Boost Pressure [MPa]:13.79, Mold Temperature [^{o}C]:30

Fig. 9 The effect of frozen layer on measuring internal cavity pressure as a function of injection speed

4. 결론

고화층 두께가 내부 캐비티 압력에 미치는 영향을 관찰하기 위하여 공정변수들을 변화시키면서 실험적 연구를 수행하였다. 평면응력 이론과 실험에 기초를 둔 압력보정계수를 도입하여 시뮬레이션결과와 측정된 캐비티 압력을 비교하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 금형온도가 낮을 경우 시뮬레이션에 의한 캐비티 압력은 실험치와 큰 차이를 보였으나, 압력보정계수를 적용한 결과 실험과 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있었다.

(2) 금형온도가 수지의 유리전이온도보다 높을 경우에는 고화층이 형성되지 않아 압력보정계수를 적용하지 않았음에도 시뮬레이션 결과는 측정된 압력과 잘 일치하였다.

(3) 사출온도가 증가함에 따라 캐비티 압력은 감소하였으며, 사출온도가 높을 경우 고화층 두께의 감소로 인하여 시뮬레이션에 의한 압력과 실험값과의 차이는 감소하였다.

(4) 숏 크기가 증가함에 따라 캐비티 압력은 감소하였으며, 실험과 시뮬레이션에 의한 압력차이는 숏 크기에 관계없이 거의 일정하게 나타났다.

(5) 사출속도가 증가함에 따라 캐비티 압력은 증가하였으며, 압력보정계수를 적용한 캐비티 압력은 대부분의 공정조건에서 실험과 잘 일치하였다.

(6) 압력보정계수의 정의에서 도입된 실험변수 K 값을 규명하기 위하여는 튜브와 다른 단면 형상을 갖는 캐비티에 대한 연구와 냉각속도가 고화온도에 (또는 유리전이온도)에 미치는 영향등에 대한 추가적인 연구가 필요할 것이다.

참고문헌

1. Isayev, A.I., Ed. “Injection and Compression Molding Fundamental”, Marcel Decker, New York, 1987.
2. Agrawal, A. R., Pandelidis, I.O. and Pecht, M., “Injection-molding process control-A review”, Polym. Eng. Sci., Vol. 27, pp. 1345-1357, 1987.
3. Groleau, R.J., “Transducer Based Injection Molding”, SPE ANTEC, Vol.35, pp.260-263, 1989.
4. Thomas, C.L., Tseng, A.A., Bur, A.J. and Rose, J.L., “Solidification sensing for closed loop control of injection molding hold time”, Advan. in Polym. Technol., Vol.15, pp.151-163, 1996.
5. Berger, J.L. and Gogos, C.G.,, “A numerical simulation of the cavity filling process with PVC in injection molding”, Polym. Eng. Sci.,Vol. 13, pp. 102-112,1973.
6. Chen, B.S. and Liu, W.H., “Numerical simulation and experimental investigation of injection mold filling with melt solidification”, Polym. Eng. Sci.,Vol. 29,pp. 1039-1050, 1989.
7. Ugural, A.C. and Fenster, S.K.,“Advanced strength and applied elasticity”, Elsevier, New York,1981.
8. Isayev, A.I., Churdpunt, Y. and Guo, X.,“Comparative study of Ziegler-Natta and Metallocene base polypropylenes in injection molding: Simulation and Experiment”, Intern. Polym. Proess., Vol.15, pp.72-82 ,2000.
9. Plastic insight Version 3.1 “Material properties”, Moldflow software Inc.,2002.
10. Titomanlio,G. and Piccarolo, S., “On the packing holding flow in the injection molding of thermoplastic polymer”, J. Appl. Polym. Sci., Vol.35, pp.1483-1495, 1988.