

사출성형기 실린더와 금형 캐비티의 실시간 모니터링을 이용한 사출성형공정 비교 분석[§]

박형필^{*†}, 차백순^{*}, 태준성^{**}, 최재혁^{**}, 이병욱^{**}

* 한국생산기술연구원 금형·성형연구부, ** 아주대학교 기계공학부

Comparative Analysis of Injection Molding Process by On-line Monitoring in Cylinder of Injection Molding Machine and in Cavity of Mold

Hyung Pil Park^{*†}, Baeg Soon Cha^{*}, Jun Sung Tae^{**}, Jae Hyuk Choi^{**} and Byung Ohk Rhee^{**}

* Molding & Forming R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology

** Dept. of Mechanical Engineering, Ajou Univ.

(Received May 10, 2010 ; Revised June 29, 2010 ; Accepted June 30, 2010)

Key Words : Injection Molding(사출성형), Nozzle Pressure(노즐압력), Cavity Pressure(캐비티압력), Process Monitoring System (공정모니터링시스템), Injection Speed(사출속도)

초록: 최근 고품질 제품 생산을 위한 방법으로 센서를 이용한 사출공정모니터링 시스템이 적용되고 있다. 그러나 마이크로 금형, 광학용 금형 및 구조가 복잡한 금형에는 센서 설치가 어렵기 때문에, 공정 모니터링 시스템이 적용되기 어려운 단점이 있다. 본 연구에서는 금형과 사출성형기 노즐의 압력을 측정하여 공정 모니터링 데이터의 정량적 지수를 정의하고, 성형품 중량에 대한 상관분석을 수행하여 노즐에 설치된 압력센서의 공정모니터링 적용성을 알아보았다. 또한 공정모니터링 데이터를 분석하여 다단사출속도, 보압 및 제한 사출 압력의 영향에 따른 사출성형기의 공정 제어 특성도 알아보았다.

Abstract: Recently, on-line process monitoring systems using sensors are being extensively used to produce high-quality products. However, the difficulty in installing the sensors within the mold in the cases of micro-molds, optical molds, and molds with complex structures is a serious disadvantage of such process monitoring systems. In this study, the quantitative index of a process monitoring system was evaluated with the mold cavity pressure and the nozzle pressure for the injection molding machine. In order to evaluate the effect of the nozzle pressure, we performed correlation analysis for the weight of the molded product. We also examined the control characteristics of the injection molding machine by analyzing the effect of multistage injection speed, holding pressure, and injection pressure limit on the process monitoring data.

1. 서 론

일반적으로 사출성형공정 중에는 용융수지가 금형 캐비티를 채우는 과정을 확인할 수 없으며, 설정된 계수값대로 공정이 이뤄지는지를 확인하기 어렵다. 따라서 양품의 성형품을 생산하기 위한 성형조건은, 시험사출을 통한 반복적인 시행착오 방식으로 찾아 내고 있으며, 특히 제품 생산 중에 불량품이 발생되면 트러블슈팅(Troubleshooting)에

많은 시간과 비용이 수반된다. 최근 산업계에서는 원가절감 및 불량개선을 위한 기술로서, 금형 내부에 압력 센서를 설치하여 생산공정 이력을 감시하고 정보화하는 기술인 공정모니터링기술(Process Monitoring Technology)이 사용되고 있다. 이 기술은 금형 내부의 압력을 측정하여 사출성형품의 품질을 분석하고, 이를 정량적인 지수로 나타내어 공정관리의 효율성을 증대 시키고, 최적성형조건 탐색 및 불량 원인 분석에도 활용되고 있다.

그러나 금형 내부 상태 모니터링에 관한 대부분의 연구는 성형조건 변화에 따른 캐비티(Cavity) 압력 데이터를 분석하여 최적 사출조건을 도출하는 방법론,⁽¹⁾ 캐비티 압력 데이터의 정량적 지수

[§] 이 논문은 2010년도 대한기계학회 생산 및 설계공학부문 춘계학술대회(2010. 4. 22.-23., 제주 라마다프라자) 발표논문임.

[†] Corresponding Author, php76@kitech.re.kr

© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

(Index)를 특성치로 정의하고 이를 제품 특성과의 상관관계 규명을 통해 공정에 적용하는 방안에 관한 연구,⁽²⁻⁴⁾ 공정 모니터링을 이용한 캐비티 내부의 수지 유동 특성을 분석하여 사출성형 CAE 해석 신뢰도 향상에 관한 연구⁽⁵⁾ 등을 통해 이뤄졌다. 또한 노즐(Nozzle)의 압력 및 온도 데이터를 이용한 공정관리 방안에 관한 연구⁽⁶⁾도 수행되었지만, 공정조건 변화에 따른 노즐 및 캐비티의 압력 데이터에 대한 비교 분석 연구는 활발하지 않은 실정이다.

따라서 본 연구에서는 캐비티와 사출성형기 노즐에 압력센서를 설치하여 사출속도(Injection Speed)와 보압(Holding Pressure)에 따른 캐비티와 노즐의 압력을 측정하여 정량적 지수를 정의하고, 이 지수와 성형품 중량에 대한 상관분석을 통하여 공정관리에 대한 적용성을 알아보았다. 또한 다단사출성형, 보압 및 제한 사출압력의 영향에 따른 사출속도, 캐비티 및 노즐 압력 데이터를 분석하여 사출성형기의 공정 제어 특성에 대해서 알아보았다.

2. 실험장비

2.1 실험조건 및 재료

실험에는 Arburg 사의 25Ton 유압식 사출성형기(최대 사출압력 : 1570bar)를 사용하였다. 제품은 사각 BOX 형상(크기 : 70mm * 50mm * 20mm)이며, 재료는 LG Chemical 의 ABS(Grade : HF 380)를 사용하였다. 성형 압력 측정을 위해서 캐비티와 사출성형기 노즐부에 Kistler 사의 압력 센서(모델명:

6157BA, 4085A)를 설치하였으며, 사출성형기에 기본적으로 장착된 변위센서(Potentiometer)를 이용하여 사출속도를 측정하였다.

실험은 사출속도와 보압에 대해서 3수준의 L₉ 직교배열표를 이용한 다구찌 실험을 진행하였다. 사출성형기의 노즐부와 금형에서 측정되는 압력에 대한 효과적인 비교 분석을 위해 사출속도와 보압을 제어인자로 선택하였다. 그 이외 조건인 수지온도(220℃), 금형온도(70℃) 및 보압시간(5sec)은 모두 동일하게 적용하였다. 실험 중에 발생하는 오차를 제거하기 위해 모든 공정조건에 동일하게 충전율 98%에서 보압절환(Switch-Over)이 이루어지도록 매 실험마다 조건을 설정하였다. Fig. 1 과 Table 1 은 실험장비 및 실험조건을 나타내고 있다.

3. 사출성형 실험

3.1 성형 영향인자 및 상관관계 분석

사출속도와 보압이 성형품 중량에 미치는 영향을 알아보기 위해서 다구찌 분석을 수행하였으며, 실험결과에 대한 S/N 비 분석을 수행하였다. Table 2 에 보듯이, 보압이 중량에 대한 기여도가 더 큰 영향인자임을 확인할 수 있다.

일반적으로 사출성형공정은 다양한 외란 인자의 영향으로 공정조건이 변동될 수 있기 때문에 도출된 최적 조건을 지속적으로 유지하기 어렵다. 따라서 지속적인 공정 관리를 위해서는 성형품 품질과 가장 상관도가 높은 정량적 공정 지수를 활용한 품질관리가 필요하다.

본 연구에서는 대표적인 공정 모니터링 데이터

Table 1 Control factors and their levels

Control Factor		Level 1	Level 2	Level 3
A	Injection Speed [cm/sec]	16.8	28.0	39.2
B	Hold Pressure [bar]	450	625	800

Table 2 S/N ratios of injection speed and holding pressure to the part weight

Level	Injection Speed	Hold Pressure
1	26.33 [dB]	26.18 [dB]
2	26.34 [dB]	26.33 [dB]
3	26.35 [dB]	26.51 [dB]
Deviation	0.02	0.33
Rank	2	1

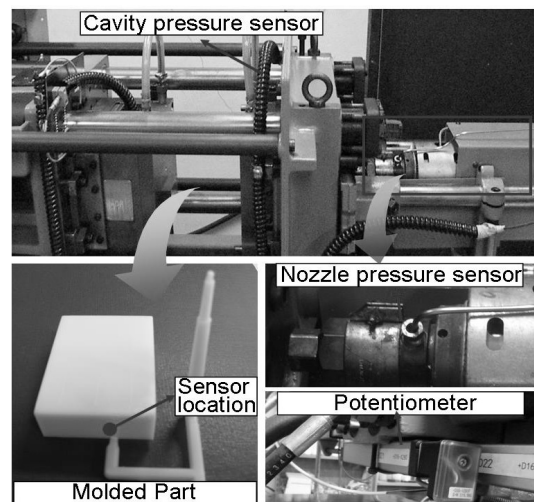


Fig. 1 Photos of sensor installations and locations for the process monitoring system

Table 3 Result of correlation analysis for the nozzle and the cavity pressures

Process Monitoring Index		Coefficient of Correlation
Cavity Pressure	CPK	0.9949
	CPIK	0.9748
	CPIC	0.9835
Nozzle Pressure	NPK	0.2875
	NPIK	-0.1287
	NPIC	0.7248

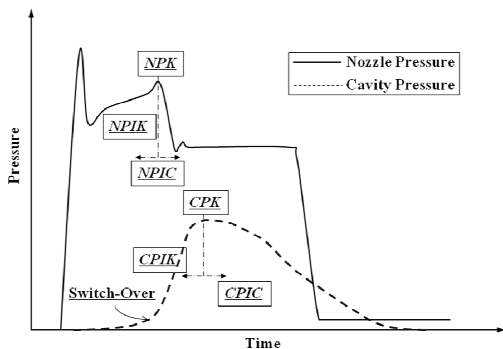
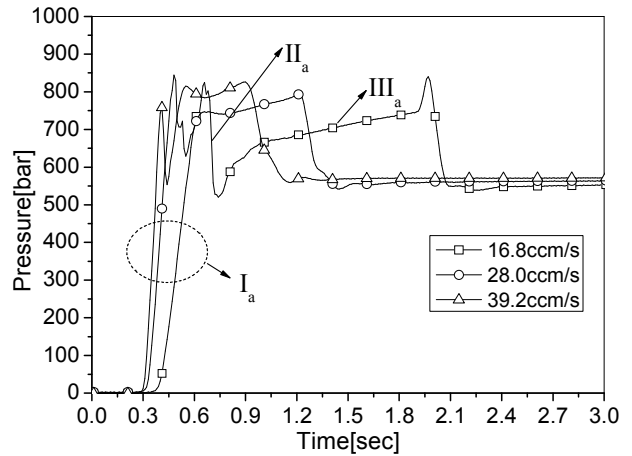


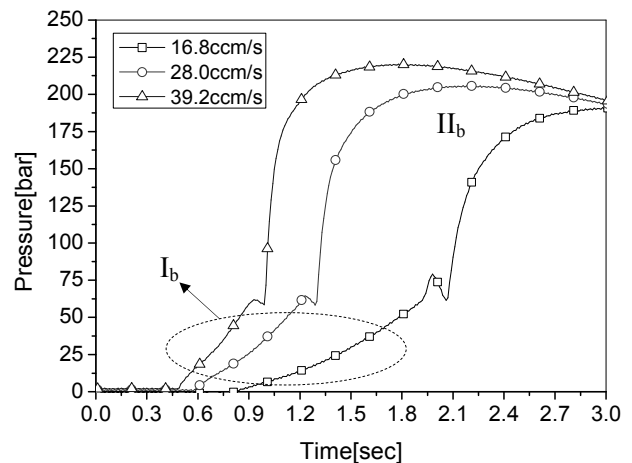
Fig. 2 Definition of process monitoring indices

에 대한 정량적 지수화를 위하여 Fig. 2 와 같이 정의하였다. 캐비티 압력에 대해서는 최대 압력값(CPK), 최대 압력값까지의 적분값(CPIK), 전체 압력 적분값(CPIC)의 지수를 정의하였다. 노즐 압력의 경우는 수지가 노즐을 통과하는 시점에 1 차 최대 압력값이 발생되며, 이는 사출성형기 노즐 선단부에서의 수지 압축 현상에 의해서 발생하는 압력이기 때문에, 노즐 압력의 최대 압력값(NPK)과 최대 압력값까지의 적분값(NPIK)은 보압질환 전에 발생하는 최대 압력을 기준으로 하여 지수를 정의하도록 하였다.

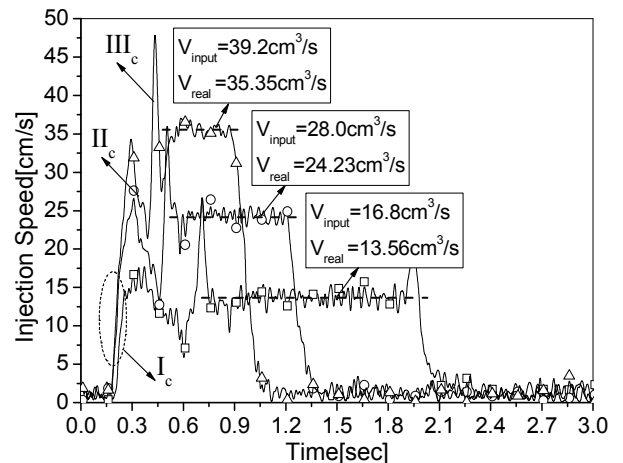
실험계획법에 따라 성형된 성형품의 중량과 공정모니터링 데이터를 각 조건별로 상관분석을 하였으며, 계산된 상관계수를 Table 3 에 나타내었다. 캐비티 압력 공정 지수인 CPK, CPIK, CPIC 모두 중량과 높은 상관도를 보였으며, 이를 통하여 캐비티 압력이 성형품 중량과 밀접한 관계가 있음을 확인 할 수 있었다. 노즐 압력 공정 지수 중 NPIC 가 중량과 상관도가 높은 것으로 나타났으나, 캐비티 압력의 상관도 보다는 낮은 결과를 보였다.



(a) Nozzle pressure data



(b) Cavity pressure data



(c) Injection speed data

Fig. 3 Measured nozzle and cavity pressures, and the injection speed data from the potentiometer

이러한 이유는 캐비티 압력은 제품 형성부에서 측정하기 때문에 성형 외란인자에 대한 영향이 적은 반면에, 노즐 압력은 사출성형기에서 발생하는 공정 변동 영향과 스프루, 러너, 게이트에서 발생되

는 압력손실, 그리고 게이트 고화 이후에 발생하는 스프루, 러너의 과충전 등의 외란 인자가 영향을 미쳐 상관도가 작게 나타난 것으로 판단된다.

3.2 사출속도에 따른 공정데이터 변화

Fig. 3 에는 사출속도 변화에 따른 노즐과 캐비티 압력 및 측정된 사출속도를 나타내고 있다. Fig. 3(a)는 노즐 압력 데이터로써, 사출속도가 빠를수록 압력 상승의 기울기가 증가됨을 알 수 있다. 충전 초기에 발생하는 노즐 압력 상승(I_a)은 용융수지 내부에 잔류하고 있는 gas와 노즐부의 수지 흐름 방지를 위한 스크류 강제후퇴(Suck Back)에 의한 영향과 직경이 작은 노즐을 통과하기 전에 스크류 선단부에서 발생하는 수지 압축 현상에 의한 것이다. 압력이 상승되어 수지가 노즐을 통과하기 위한 허용압력에 도달하면 용융수지는 노즐부를 통과하면서 급격한 압력 강하(II_a)를 보이며, 그 후에 2 차 압력 상승 점이 발생된다. 이 2 차 압력 상승은 용융수지가 게이트에 도달하여 발생하는 현상이며, 캐비티 충전 중에 발생하는 유동저항에 의해서 압력이 점차 상승(III_a)하는 결과로 볼 수 있다. Fig. 3(b)의 캐비티 압력은 사출속도의 영향으로 압력 발달에 차이를 보이며(I_b), 보압 전환 이후의 압력에도 차이를 보인다(II_b). 이는 수지 고화층의 영향이 다르게 나타나기 때문이다. Fig.

3(c)는 사출속도의 측정결과를 나타내고 있다. 가스 및 스크류 강제 후퇴로 인한 실린더 내부 여유 공간의 영향으로 초기 사출속도의 증가(I_c)가 나타나며, 이후 수지의 압축현상(II_c)으로 인하여 사출속도가 점차 떨어지는 결과를 확인할 수 있다. 압축된 수지는 노즐을 통과하며 높은 사출속도가 순간적으로 발생되고(III_c), 이후에 설정된 속도에 도달됨을 볼 수 있다. 이때 설정된 속도와 실제 측정 속도에 차이를 보임을 알 수 있으며, 사출속도가 빠를수록 그 차이가 커짐을 알 수 있다.

3.3 다단 사출속도에 따른 공정데이터 변화

일정한 사출속도를 설정하여 사출을 하더라도 유동 단면적이 좁은 부위에서는 수지의 유동속도가 빠르고, 유동 단면적이 넓은 곳에서는 유동속도가 느려지게 된다. 수지 점도 관점에서 보면, 빠른 유동 속도는 수지의 전단가열을 일으켜 마찰열을 발생시키기 때문에 점도를 낮추는 효과를 가져오지만, 유동속도가 느린 경우는 마찰열의 발생량보다 전도에 의한 금형으로의 열손실이 크기 때문에 점도 증가를 일으킨다. 이러한 점도 증가는 사출압력을 증가시키며 잔류응력이 높아지는 원인이 된다. 따라서 광학제품 및 두께 변화가 심한 제품은 수지의 유동 속도를 일정하게 유지하기 위하여 사출속도를 다단으로 제어하며, 또한 게이트 부에

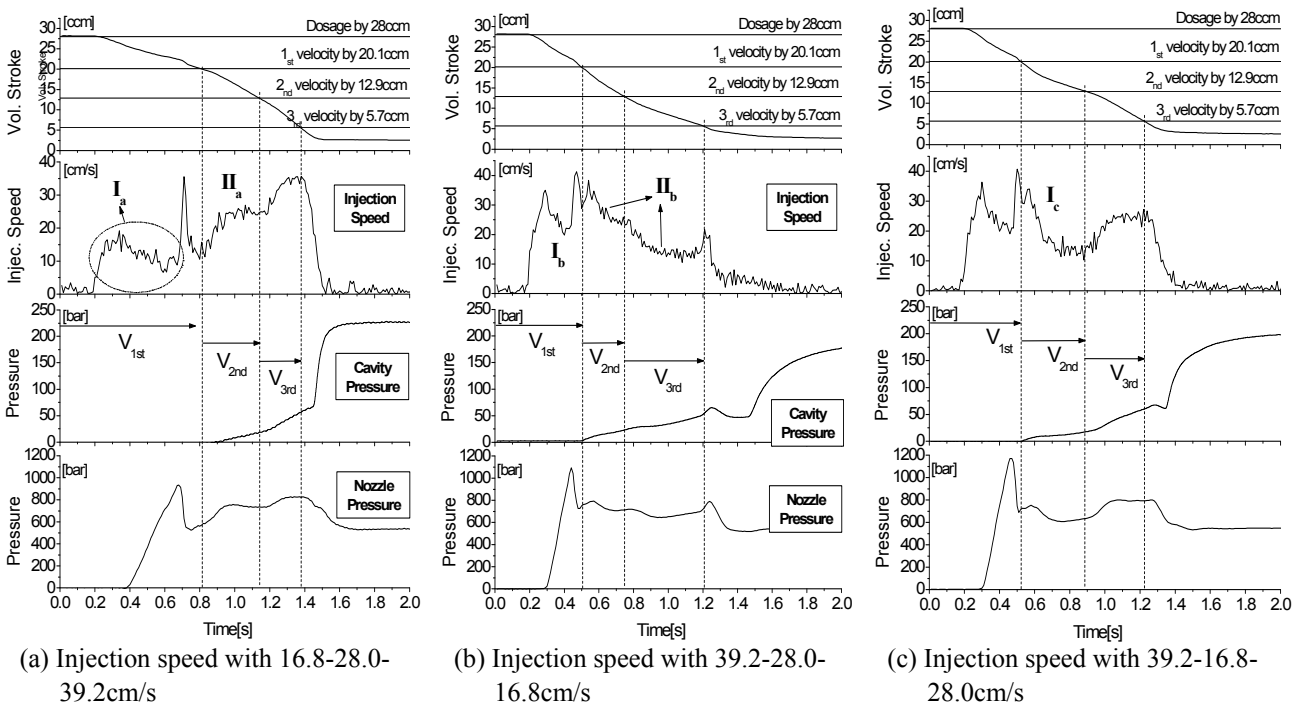


Fig. 4 Process monitoring data according to multi-stage injection speed

서 발생하는 젓팅 발생의 억제, 보압절환 시 발생하는 높은 사출압력의 저감을 위해서도 이용된다. 특히 높은 사출압력은 형체력의 증가를 가져오며 금형수명 단축 및 플래쉬 발생의 원인이 되기 때문에 다단 사출속도 제어는 매우 중요하다. 일반적인 다단 사출속도 제어 방법은 캐비티의 체적 변화 위치를 고려하여 속도 변환 지점을 정의하고, 이를 사출성형기의 계량거리에 따른 사출 속도로 설정하여 이용한다. 그러나 사출성형기의 제어 응답특성 문제로 계산된 속도 변환점에서 정확한 속도제어가 되기는 어려운 단점을 가지고 있다.

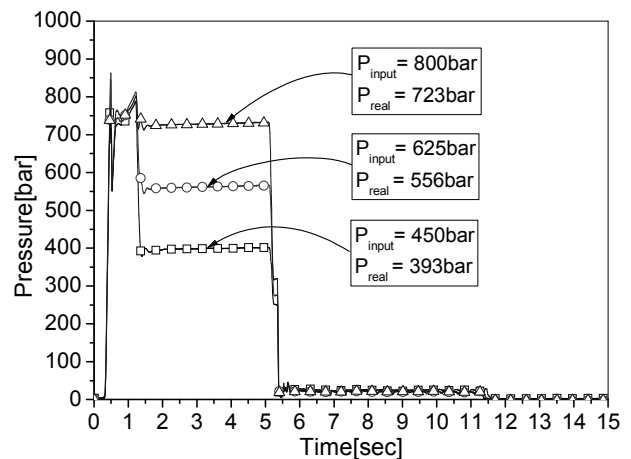
Fig. 4는 3 단의 사출속도 변화에 대한 스크류 이동거리, 사출속도, 캐비티 압력 및 노즐 압력에 대한 측정 결과이며, 전체 계량거리 28ccm에 대해서 20.1ccm 까지를 1 차 사출속도, 12.9ccm 까지를 2 차 사출속도, 5.7ccm 의 보압절환까지를 3 차 사출속도로 정의 하였다. Fig. 4(a)의 경우, 1 차 사출속도는 수지 선단부가 노즐부를 통과하며 사출속도의 변화가 심하게 나타난다(I_a). 이는 앞서 기술한 수지의 압축 현상과 노즐부를 통과하며 발생하는 순간적인 속도증가로 발생한 현상이다. 2 차 사출속도로 변화될 때는, 설정된 속도로 제어되기 위해서 사출속도가 증가되는 것을 볼 수 있으며(II_a), 설정된 사출속도에 도달하는데 약 0.1 초의 응답시간이 소요됨을 확인할 수 있다. 3 차 사출속도로 변화될 때는 설정된 사출속도 변화점에서의 제어가 되지 않음을 볼 수 있으며, 2 차 사출속도와 동일한 현상이 발생됨을 알 수 있다. Fig. 4(b)의 경우, 1 차의 빠른 사출속도의 영향으로 수지의 유동이 노즐과 게이트를 통과하였음을 확인할 수 있으며(II_b), 2 차와 3 차 사출속도(II_b)는 Fig. 4(a)와 다르게 설정된 사출속도 제어에 약 0.2 초의 시간이 소요됨을 볼 수 있다. Fig. 4(c)의 경우, (a)와 (b)의 현상이 복합적으로 나타남을 볼 수 있다. 특히 빠른 사출속도에서 느린 사출속도로 변화될 때는 관성 효과로 인하여 설정된 속도 변환점 이후에서 사출속도 변화가 발생됨을 확인할 수 있다(I_c).

3.4 보압에 따른 공정데이터 변화

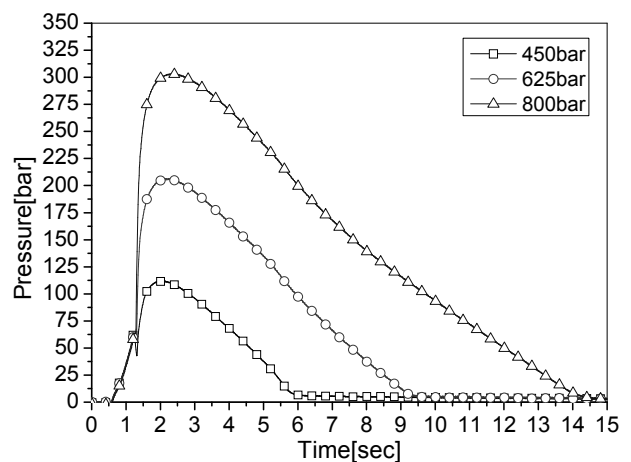
캐비티로의 수지 충전이 종료되면 금형 내부는 정압 상태로 유지 되며, 냉각에 따른 체적 수축이 발생한다. 수축은 성형품의 변형, 잔류응력 및 치수오차 등의 문제를 일으키기 때문에, 성형 중의 적절한 보압 유지는 필수적이다.

Fig. 5(a)는 노즐에서 측정된 압력을 나타내고 있으며, 설정된 보압의 값과 노즐에서 측정된 값에

차이가 있음을 알 수 있다. 이는 설정된 보압은 사출성형기의 유압이기 때문에, 실린더 내부를 통한 압력 전달 시 발생하는 압력 손실로 노즐부 측정 압력과 차이를 발생시키는 것이며, 보압이 높을수록 압력 차이가 커짐을 알 수 있다. Fig. 5(b)는 보압에 따른 캐비티의 압력 데이터를 나타내고 있으며, 보압이 450bar 로 낮은 경우는 보압이 종료되는 시점에서 내부 압력이 대기압까지 떨어짐을 볼 수 있다. 이는 냉각에 의한 성형품의 체적 수축을 보상하지 못하였음을 의미하며, 이때 성형품 표면에 싱크마크가 발생되었다. 보압이 800bar 로 높은 경우는, 성형품 파팅 라인에 미세 버(Burr)가 발생됨을 확인하였다. 이는 높은 압력으로 인한 금형 변형을 의미한다. 따라서 Fig. 5(a)의 최대 사출압력을 기준하여 625bar 의 보압이 적절한 것으로 판단하였으며, 양호한 성형품을 얻을 수 있었다.



(a) Nozzle Pressure



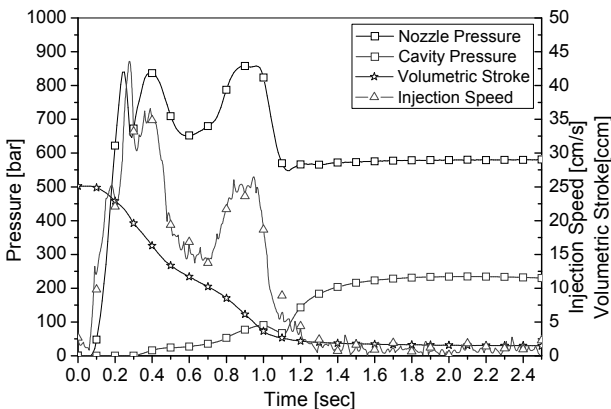
(b) Cavity Pressure

Fig. 5 Process monitoring data according to holding pressure

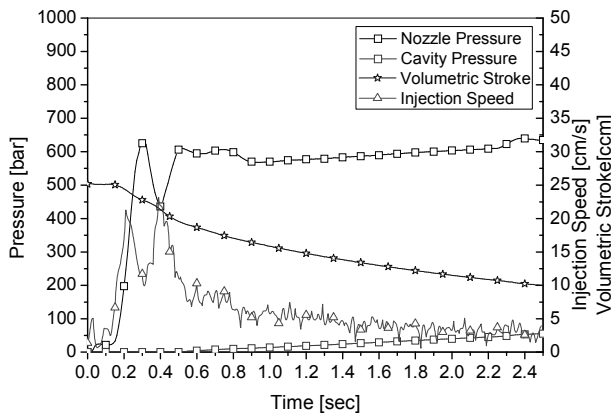
3.5 제한 사출압력

사출성형기에서 사출속도는 입력 범위가 최대 사출속도를 기준으로 0~100%까지 사용할 수 있으며, 사출압력 또한 0~100%까지 사용할 수 있다. 일반적으로 사출성형기에서 설정하는 사출압력은 사출성형 장비를 보호하기 위해 설정하는 값을 의미한다. 사출압력 설정이 없다면, 사출속도에 의해서 발생하는 유동저항으로 사출성형기 스크류 선단부에는 높은 압력이 작용하게 되고, 이로 인하여 스크류 파손 및 사출성형 장비에 악영향을 미치게 된다. 따라서 사출압력의 설정을 통하여 스크류 선단부에 작용하는 압력이 설정된 값에 도달하게 되면 스크류 및 사출성형 장비 보호를 위해서 성형제어 방식을 사출속도 제어에서 압력제어 방식으로 변환하도록 하는 기능이다. 그러나 현재 대부분의 성형기술자들은 사출압력의 기능을 성형제어인자로 오인하고 있는 실정이다. 따라서 사출압력 설정에 따른 성형특성에 대해서 알아보았다.

Fig. 6은 동일 성형조건에서 사출압력 설정 차이에 따른 측정 결과를 나타내고 있다.



(a) Maximum injection pressure : 1100bar



(b) Maximum injection pressure : 700bar

Fig. 6 Process monitoring data according to maximum injection pressure

Fig. 6(a)는 사출성형기의 최대 사출압력을 1100bar로 설정한 경우로써, 설정 사출속도(39.2-16.8-28.0cm/s)로 인해서 발생하는 사출성형기의 최대 사출압력 900bar보다 높기 때문에 설정된 사출속도를 재현하면서 충전이 이루어짐을 확인할 수 있다. 그러나 Fig. 6(b)와 같이 사출압력을 최대 사출압력 보다 낮은 700bar로 설정한 경우, 초기에는 설정된 사출속도로 충전이 진행되지만, 최대 사출압력이 700bar를 초과한 이후에는 사출속도 제어가 이뤄지지 못하고 압력에 의해서 제어됨을 확인할 수 있다. 이를 통하여 사출압력이 제한 압력의 기능으로 사용됨을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 사출성형기의 노즐, 스크류 속도와 캐비티 압력 데이터의 공정 모니터링을 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 보압이 사출속도보다 성형품 중량 변화에 큰 영향을 미치며, 측정된 압력 데이터와의 상관 분석을 통하여 캐비티 압력 특성치의 상관도가 높게 나타남을 알 수 있었다.

(2) 캐비티 압력 데이터에 비해서 상대적으로 상관도는 낮지만, 노즐 압력 데이터의 NPIC가 제품 중량과의 상관관계가 높은 것으로 나타났다. 공정 및 금형 관리 측면에서 노즐 압력데이터의 활용이 효과적이기 때문에 향후 이에 대한 연구가 필요한 것으로 판단된다.

(3) 캐비티 내부의 압력 변화를 노즐 압력과 측정된 사출속도로 분석할 수 있었으며, 공정 입력 값이 실제 제어값과 차이가 있음을 알 수 있었으며, 본 실험 결과가 최적 사출성형조건 도출에 도움을 줄 것으로 판단된다.

후기

본 연구는 중소기업청의 중소기업기술혁신개발사업, 지식경제부의 지역산업기술개발사업, 지식경제부와 한국산업기술진흥원의 전략기술인력양성사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

(1) Kim, J. M., Jun, J. H. and Lyu, M. Y., 2005, "Pressure Distributions in the Cavity in Injection Molding for Various Operational Conditions," *Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf.*, pp.214~219.
 (2) Chen, Z., Turng, L. S. and Wang, K. K., 2006,

- “Adaptive Online Quality Control for Injection-Molding by Monitoring and Controlling Mold Separation,” *Polymer Engineering and Science*, Vol. 46, No. 5, pp.569~580.
- (3) Wen, S. S. L., Jen, C. K. and Nguyen, K. T., 1999, “Advances in On-line Monitoring of the Injection Molding Process Using Ultrasonic Techniques,” *Int'l Polymer Processing*, Vol. 14, pp.175~182.
- (4) Park, H. P., Kang, J. G., Jang, H. G., Cho, Y. G. and Rhee, B. O., 2006, “The Analysis of Process Conditions and Application of the Process Monitoring System to Minimize Shrinkage of Injection Molded Parts,” *Korea Society of Rheology Conference*, pp.25~28.
- (5) Michael, R. and Rodney, J., 2002, “Comparing Cavity Pressure Sensor Technologies Using In-Mold Data,” *ANTEC 2002*.
- (6) Stephan, O., Alexandre, P. and Christopher, J. B., 1998, “A Process Monitoring and Control System for Injection Molding Using Nozzle-Based Pressure and Temperature,” *Polymer Engineering and Science*, Vol. 2, No. 3, pp.141~148.