

〈論 文〉

폴리프로필렌의 사출성형조건이 성형품의 선형수축률과 중량에 미치는 영향

유중학* · 김희송**

(1994년 3월 10일 접수)

The Effects of Injection Molding Conditions of Polypropylene on the Linear Shrinkage and Weight of Molded Parts

Joong-Hak Yoo and Hei-Song Kim

Key Words : Injection Molding(사출성형), Molding Conditions(성형조건), Gate Freezing(게이트
고화), Packing Time(보압시간), Linear Shrinkage(선형수축)

Abstract

Series of experimental work was performed to mold tensile specimens by using the injection molding machine. Mold temperature, melt temperature and packing time were chosen as processing parameters for studying the effects of those conditions on the linear shrinkage of final product. Here, each processing variable was decided from the numerical simulation and resin manufacturer's suggested value. The effects of molding conditions on the linear shrinkage in flow direction of the resin were analyzed by measuring the parts 2, 10, 30 and 60 days after molding. As a result, the linear shrinkage increased with the higher mold and melt temperature, and the change of mold temperature has shown more influence. The linear shrinkage of polypropylene has been found to progress up to 30 days with the lapse of the time, and the amount of the linear shrinkage has shown to be between 2.14% and 2.75%. In addition, the effects of packing pressure on the weight has shown to be extremely significant up to gate freezing time, and proper packing time of the tensile specimen has been found to be 2.0 seconds.

1. 서 론

플라스틱 사출금형은 복잡한 형상의 단체성형이나 대량생산이 가능하기 때문에 전기전자 제품은 물론 자동차, 항공기의 부품에 이르기까지 많은 공업 제품의 성형에 이용되고 있다. 특히 엔지니어링 플라스틱의 출현 이후에는 종래의 금속 부품의 대체용으로서 정밀 부품의 플라스틱화가 급속히 진행

되고 있다. 거기에 수반하여 성형기술도 더욱 더 고도화되고 있다. 전형적인 사출성형 공정은 충전, 가압, 보압 및 냉각단계로 나뉘어진다. 충전단계는 사출성형기의 스크루가 전진함에 따라 수지가 금형의 캐비티로 유입되어 캐비티에 채워질때까지 지속된다. 가압단계는 스크루가 더욱 전진하여 금형의 캐비티에 압력이 가해지는 단계이며, 이 때 스크루 속도는 감소되며 천천히 전진한다. 수지는 압축성 재료이며 충전단계에서보다 수지를 더 캐비티로 밀어 넣을 수 있다. 가압단계 이후에도 스크루는 완전히 정지하지 않고 한동안 전진을 계속한다. 일반

*정회원, 한국기술교육대학 생산기계공학과

**정회원, 단국대학교 기계공학과

적으로 수지는 용융상태에서 고체상태로 상변화를 일으킬 때 체적감소가 생기며, 이 체적차이를 보상하기 위해 보압단계는 항상 필요하다. 성형공정중 충전과정에 있어서 금형내 수지의 유동상태에 대한 연구가 가장 활발하게 이루어졌다. 이것은 사출성형품의 품질이 수지 충전과정의 유동상태에 크게 의존하고 있으며, 보압, 냉각, 휨 등의 해석을 위하여 충전과정의 해석결과가 필요하기 때문이다. 그러나 수지의 흐름은 비등온, 비정상적 및 용융수지 특유의 점탄성적 특성때문에 대단히 복잡하다.

1970년대 초반부터 1차원 흐름에 관한 논문들이 발표되었고 이후 2차원 이상의 흐름에 대한 해석법도 점차 개발되어 왔다. 그 중 하나는 Austin⁽¹⁾에 의해 개발된 Moldflow로서 유동, 냉각, 변형 및 응력해석을 수행하는 다양한 module로 구성되어 있어 제품의 품질과 생산성 향상에 기여하고 있다. 또한 대표적인 연구중의 하나는 코넬대학의 사출성형 프로그램이 있으며, 1974년부터 Wang⁽²⁾ 등은 유한요소법(finite element method)에 의한 2차원의 흐름해석과 유한차분법(finite difference method)에 의한 두께방향의 해석을 개발하여 왔다. Tadmor 등⁽³⁾은 수지의 흐름이 등온이라고 가정하여 등가뉴턴점도(equivalent newtonian viscosity)를 사용한 FAN(flow analysis network)해석방법을 개발하였으며, Kamal과 Kenig^(4,5)는 보압과정을 압축성유체의 비등온유동으로 가정하고, Power-law 모델과 Spencer-Gilmore 상태 방정식을 사용하여 캐비티 내의 압력 분포로부터 유량을 구하고 수지의 평균 밀도를 구하였다. 또한, Friedl 등⁽⁶⁾은 해석을 통하여 사출성형동안의 결정화를 예측하고 결정화가 성형품의 기계적성질에 영향이 있음을 고찰하였고, Sherbelis 등⁽⁷⁾은 충전과 보압단계에서 점성의 전단율과 온도 의존성에 관하여 연구하였다. Chiang⁽⁸⁾은 준3차원에 대한 보압과정의 해석을 가능하게 하였고, 보압과정 중에는 점성모델과 수지의 압축성이, 냉각과정에서는 온도와 냉각률에 따른 물성치 변화의 중요성을 언급하였다. 그러나 위의 연구들은 수치 해석적인 접근방법이며, Moy 등⁽⁹⁾은 금형온도와 용융수지온도가 성형품의 조직에 미치는 영향을 실험적으로 고찰하였으며, Wang 등⁽¹⁰⁾은 사출속도, 용융수지온도 및 보압의 크기에 따른 성형품의 중량과 수축에 대하여 연구되었으며, Cox 등⁽¹¹⁾은 단지 충전시간에 따른 성형품의 외관, 인장성질, 수축 및 중량의 거동을 실험적으로 고찰하

였다.

본 연구에서는 사출성형에서 중요한 인자인 금형온도, 용융수지온도 및 보압시간을 체계적으로 제어한 상태에서 인장시편을 성형하여, 흐름방향의 선형수축률은 성형후 일정한 시간이 지난 다음에 측정을 반복하여 volume relaxation의 영향을 고찰하였고, 각 조건에서의 중량을 측정하여 성형조건이 최종 성형품에 미치는 영향을 실험적으로 연구하는데 중점을 두었다.

2. 실험장치 및 실험

본 실험에서는 사출용량 3.3 oz. 체결력 75 ton인 직압식 사출성형기(IDE 75EN)를 사용하였고, 사출금형의 형판재질은 SM55C, 리너직경 6 mm, 게이트는 사이드게이트 3 mm×1 mm×1 mm(폭×두께

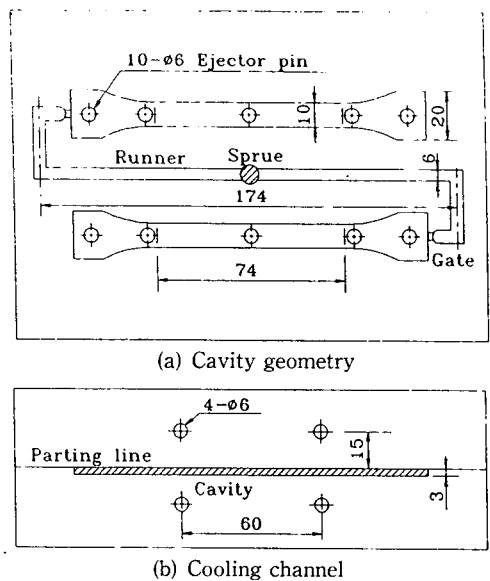


Fig. 1 Cavity geometry (a) and cooling channel configuration (b) in the mold

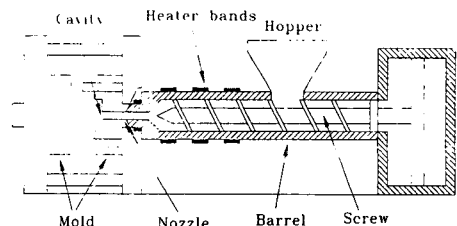
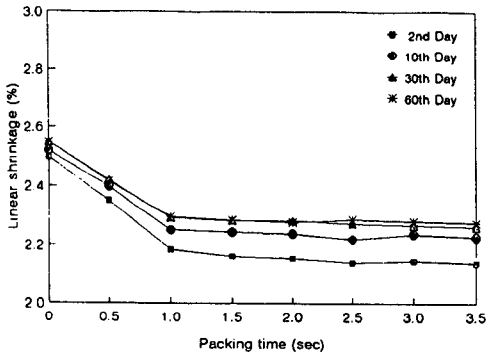


Fig. 2 Schematic diagram of injection molding machine

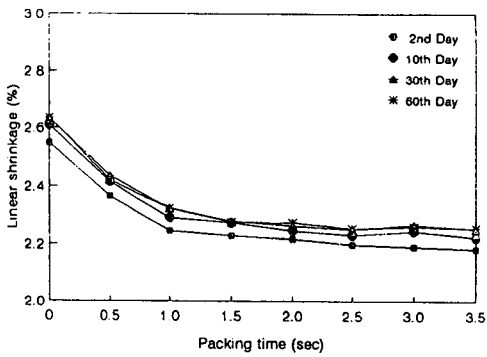
는 큰 유량에 의해 전단률이 높아지기 때문이며, 긴 충전시간의 경우에는 캐비티에서의 열전달이 많아져 온도가 낮아지고 점도가 증가하기 때문이다.⁽¹²⁾ 금형설계시 캐비티내의 압력과 온도가 적절하게 작용하도록 MOLDFLOW에서 유동해석을 실시하여 러너직경 6 mm와 사이드게이트 3 mm×1 mm×1 mm를 결정하였으며, 성형조건중 사출시간 1.6초

와 냉각시간 10초도 해석한 결과를 이용하였다.

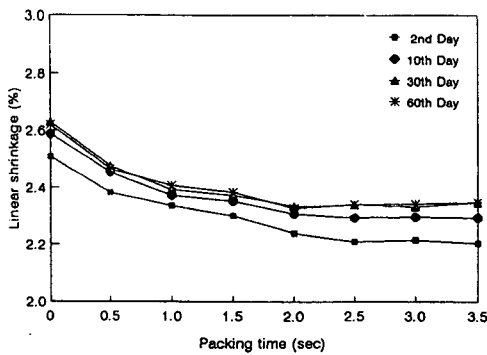
선형수축률은 용융수지의 방향성, 밀도차 및 결정화도에 따른 수축률로써, 사출압력에 의해 게이트를 통과한 수지가 유동방향으로 배향(orientation)하는데 이 배향은 원래의 무질서상태(random-coil)로 복귀하려는 성질을 갖으므로 유동방향의 수축이 발생된다.



(a) Melt temperature 205°C

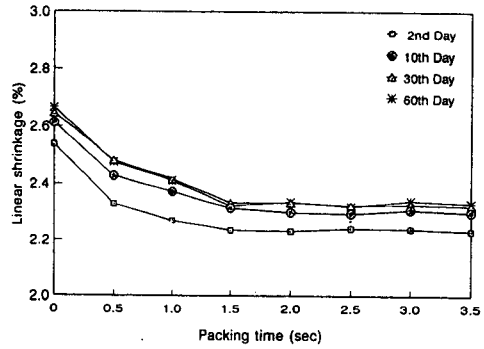


(b) Melt temperature 220°C

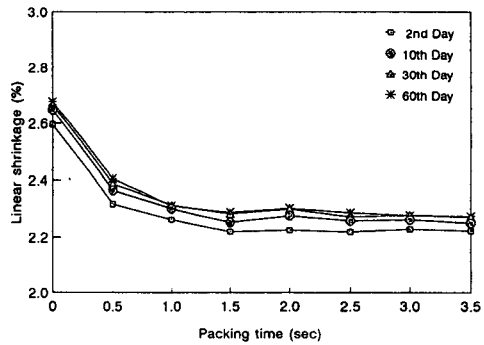


(c) Melt temperature 235°C

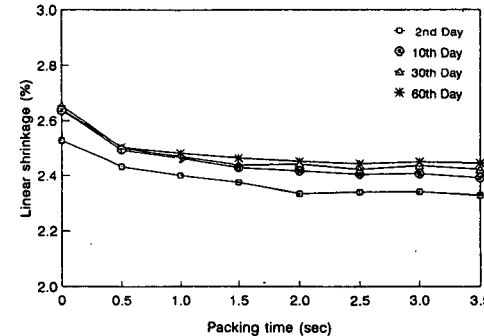
Fig. 3 Linear shrinkage variation for various packing times.(Mold temperature T_m was fixed at 30°C)



(a) Melt temperature 205°C



(b) Melt temperature 220°C



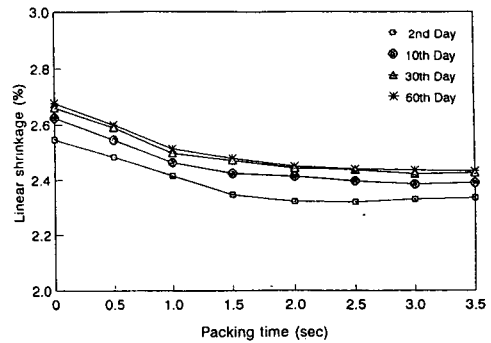
(c) Melt temperature 235°C

Fig. 4 Same as Fig. 3 but $T_m=45^\circ\text{C}$

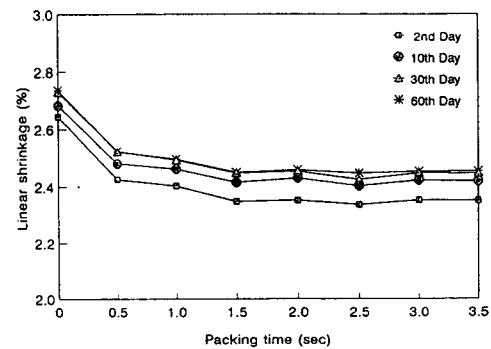
Figs. 3, 4, 5는 Table 2에 나타낸 바와 같은 성형 조건일 때 각각의 조건에서 취출된 5개의 성형품에 대한 평균 선형수축률을 2일, 10일, 30일, 60일 경과 후 측정된 결과이며, 성형조건의 변화가 선형수축률에 미치는 영향을 나타낸다. Fig. 3의 (a), (b), (c)는 금형온도를 30°C로 일정하게 유지하고, 용융수지의 온도가 각각 205°C, 220°C, 235°C로 변화할 때 선형수축률의 변화인데, Fig. 3(a)에서는 보압시간을 1.5~2.0초까지 증가시킬 때 선형수축률의 감소현상을 알 수 있으며, 2.0초 이후는 거의 변화가 없음을 보여주고, Fig. 3(b)에서 2.0초, Fig. 3(c)에서는 2.5초 이후 거의 변화가 없음을 알 수 있다. Fig. 4의 (a), (b), (c)는 금형온도가 45°C, 용융수지의 온도가 각각 205°C, 220°C, 235°C로 변화할 때 선형수축률의 변화인데, 공히 보압시간이 2.0초 이후에는 거의 변화가 없게 나타난다. Fig. 5의 (a), (b), (c)는 금형온도가 60°C, 용융수지의 온도가 각각 205°C, 220°C, 235°C로 변화할 때 선형수축률의 변화를 보여주며, 보압시간이 Fig. 5(c)의 경우만을 제외하고 2.0초 이후 수축률은 거의 일정하게 위에서와 같은 경향을 나타낸다. 보압시간은 게이트의 크기와 냉각율에 따라서도 영향을 받는다. Fig. 3, 4, 5에서 선형수축률은 성형조건에 따라 2.14%에서 2.75%까지의 차이를 나타낸다. 또한 보압시간의 증가에 따라 선형수축률의 변화가 적어지기 시작하는 보압시간은 금형온도와 수지 온도가 변화할 때 1.5초에서 2.5초 사이이며, 금형온도와 수지 온도가 높을수록 보압시간이 길어야함을 알 수 있다. 이것은 게이트의 고화(freezing)가 일어난 후의 보압은 선형수축률에 미치는 효과가 없음을 보여준다. 용융수지온도나 금형온도가 높으면 충전완료 및 게이트 고화시에 캐비티내의 수지온도가 높으므로 수축률이 커진다.

성형후 시간이 지남에 따른 선형수축률의 변화상을, 습도 60%인 장소에서 측정된 결과를 Fig. 3, 4, 5에 나타낸 것이며, 공히 2일후, 10일후로 시간이 경과함에 따라 선형수축률의 변화는 점차 감소하는 경향을 보였고, 30일이 지난후 측정시는 거의 변화가 없음을 알 수 있었다. 이것은 30일 이후 측정치가 60일 이후의 측정치와 측정오차 범위내에 있음에서 알 수 있다.

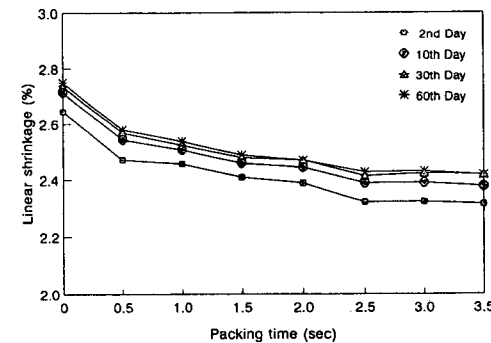
Fig. 6(a)는 금형온도가 30°C, 45°C, 60°C로 높아짐에 따른 선형수축률의 변화를 성형후 30일 경과된 성형품에 대해 보압을 2.0초에서 3.5초까지 가



(a) Melt temperature 205°C



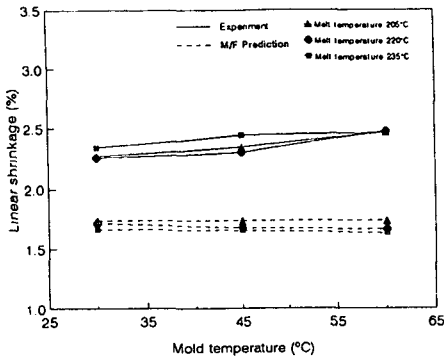
(b) Melt temperature 220°C



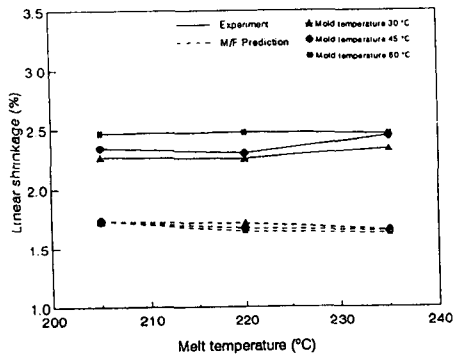
(c) Melt temperature 235°C

Fig. 5 Same as Fig. 3 but $T_m=60^\circ\text{C}$

한 성형품들의 평균수축률을 구하여 나타낸 것으로써 금형온도의 증가가 선형수축률에 0.15% 정도의 증가요인이 되었다. Fig. 6(b)는 수지온도가 205°C, 220°C, 235°C로 증가함에 따른 선형수축률의 변화를 Fig. 6(a)와 같은 방법으로 나타낸 것으로써, 다른 조건들을 일정하게 하였을 때 수지온도는 금형온도보다 선형수축률에 미치는 영향이 크지 않음을 알 수 있다. Fig. 6은 금형온도와 용융수지온도가



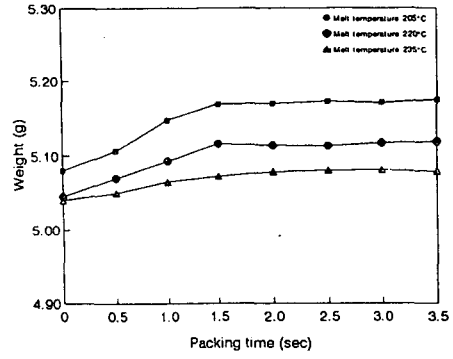
(a)



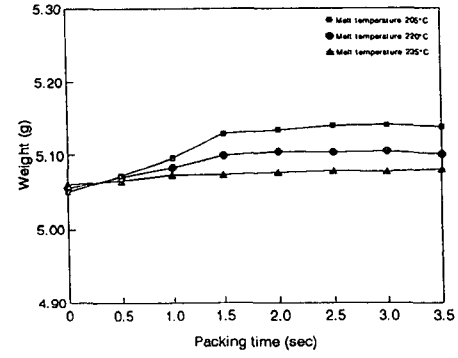
(b)

Fig. 6 Measured average linear shrinkage vs. (a) mold temperature and (b) melt temperature

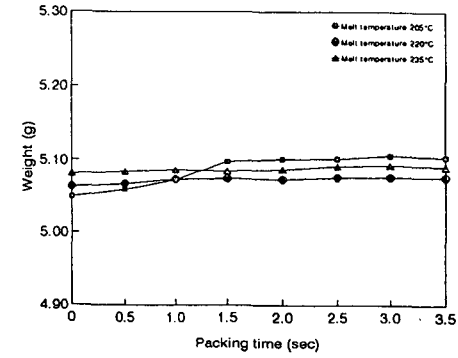
선형수축률에 미치는 영향을 실험결과와 함께 MOLDFLOW에서 수축예측한 결과를 점선으로 나타내었다. 예측된 수축률은 1.7% 부근에서 거의 일정하지만 약간 감소하는 경향을 나타내고 있다. 여기에서 선형수축률은 해석결과에 비해 실험값이 약 0.6% 정도 크게 나타났으며, 이는 아직도 수치해석에서 결정화도 등을 완전히 고려하지 못한 것이 원인으로 보인다. 성형품의 수축은 고분자재료의 이완현상(relaxation phenomena)과 성형조건에 따라 변화하며, 폴리프로필렌은 유동방향과 수직인 방향 및 두께방향 순으로 작은 값을 나타낸다.⁽¹³⁾ 금형온도는 용융상태에서 캐비티내로 사출된 고온의 수지를 냉각고화하고 금형으로부터 취출할 수 있을 정도의 강성을 갖게 하는데 필요한 수지온도를 조절하는 변수가 된다. 금형온도가 높아지면 제품 취출후 열적 수축, 상변화에 의한 수축 및 취출후의 압축이 풀림에 기인하는 체적변화등의 결과로써 수축률이 커짐을 알 수 있다.⁽¹⁴⁾ 폴리프로필렌



(a)



(b)



(c)

Fig. 7 Weight of molded parts vs. packing time for (a) $T_m=30^\circ\text{C}$, (b) $T_m=45^\circ\text{C}$ and (c) $T_m=60^\circ\text{C}$, respectively

과 같은 결정성수지는 금형온도가 높아짐에 따라 성형품은 냉각속도가 늦어짐으로 결정화도가 증가하여 수축률이 크게됨을 Fig. 6(a)에서 보여준다. 수지온도가 높을수록 열적 수축으로 인하여 수축량이 커지지만 금형내의 수지밀도, 냉각시간 등에 관계된 결과로써 크기가 결정될 수 있다. 또한 계이

트의 단면적이 크면 용융수지의 캐비티에로의 유입은 원활하게 되고 압력전달도 용이하여 성형수축률은 작아지지만, 성형품의 두께가 두꺼워지면 결정화가 느려짐으로 성형수축률은 커진다.⁽¹³⁾

본 실험에서 사용한 금형의 형상에 대한 적정 보압시간을 고찰하기 위하여 보압시간의 변화에 따른 성형품의 무게를 측정하였으며, Fig. 7은 Table 2와 같은 성형조건으로 성형된 제품의 중량과 보압시간과의 관계를 보여준다. Fig. 7(a), (b), (c)는 금형온도가 각각 30°C, 45°C, 60°C일 때 수지온도변화에 따른 제품 중량을 나타내는데, 보압시간 1.5~2.0초에서 게이트 고화가 일어나므로 그 이후는 거의 영향을 받지 않음을 잘 보여주고 있다. 여기에서 시간의 경과에 따른 중량의 변화는 거의 없어 하나의 그림으로 표시하였다. 보압시간을 길게 하면 캐비티내에 이미 사출되어 체재하고 있는 용융수지가 냉각되어 부피가 줄어드는 동시에 이 줄어든 부피를 보상하기 위하여 보압에 의해 더 많은 수지가 들어간다. 따라서 보압과정 중 아주 낮은 전단률상태에서 용융수지의 유로 중 가장 단면적이 작은 게이트 주변의 용융수지에 냉각과정이 집중적으로 나타나며 점도는 급격히 증가한다. 이에 따라 용융수지의 캐비티 유입이 제한을 받고 마침내는 게이트의 용융수지가 완전히 고화되어 캐비티속으로 수지 유입이 전면 중지됨으로써 중량 증가가 이루어지지 않음을 Fig. 7에서 확인할 수 있다. 또한 게이트 고화 이후의 제품 중량은 Fig. 7(a), (b), (c)에서 수지온도가 205°C, 220°C, 235°C로 높아짐에 따라 평균 중량의 차이가 각각 0.095 g, 0.058 g, 0.015 g으로써 금형온도가 상대적으로 높을 때 제품 중량 변화폭은 많이 줄어들었다. 이것은 용융수지 온도와 금형온도가 증가함에 따라 일정 온도 이상에서의 점도 차이는 크지 않고 온도만이 영향을 미치게 되므로 중량이 감소됨을 알 수 있다. Fig. 7(b)와 (c)에서 보압시간이 낮을 때 제품중량의 변화가 일관성이 없는 것은 사출성형기 조작시 충전이 끝나는 시간을 제어하므로 사출량의 조절이 일정치 못하기 때문에 짧은 보압시간에 따른 사출량의 변화 및 역류현상에 의한 것으로 보인다. 따라서 선형수축률의 변화는 보압시간이 2.0~2.5초 이상의 성형품에 대하여 결과를 나타내는 것이 타당하다는 것을 밝힌다.

본 실험에서는 금형온도, 용융수지온도 및 보압시간만의 변화가 고려되었지만 성형품의 품질과 기

계적성질에 영향을 미칠 수 있는 사출시간, 사출압력, 최대 캐비티압력, 보압의 크기 및 냉각시간등의 공정변수 및 결정화⁽¹⁵⁾에 관한 연구가 필요하리라고 본다.

4. 결 론

본 연구에서는 폴리프로필렌 인장시편의 성형과정에서 금형온도, 수지온도 및 보압시간이 성형품의 선형수축률과 중량에 미치는 영향을 규명하였다. 또한 충전해석을 통하여 얻을 수 있는 권고값과 수지제조 회사에서 권고하는 범위내의 수치에 대해 성형조건의 변화가 미치는 차이를 규명하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 선형수축률은 폴리프로필렌과 같은 결정성수지에서 수지회사가 권고하는 범위내의 수지온도와 금형온도가 높아짐에 따라 증가하였고, 금형온도의 영향이 더 크다는 것을 알 수 있었으며, 실험값이 Moldflow에 의한 해석결과보다 약 0.6% 크게 나타났다.

(2) 선형수축률에 미치는 보압시간의 영향이 게이트 고화까지는 매우 크며, 그 이후는 거의 일정하였다. 또한 수지의 결정화 및 volume relaxation에 따른 수축은 30일까지 진행되어 경시변화가 정밀성형에서 중요한 인자임을 알 수 있었다.

(3) 게이트 고화에 의한 중량 변화를 통하여 본 인장시편의 적정 보압시간은 2.0초임을 얻을 수 있었고, 충분한 보압이 가해졌을 때 금형온도가 증가함에 따라 중량변화폭이 줄어들어 안정적으로 되었다.

(4) 정밀사출성형을 위해서 성형품 취출후 시간 경과에 따른 수축률변화를 연구하는 것이 중요하다는 것을 보여주었다.

참고문헌

- (1) Colin Austin, 1992, *Shrinkage Data in Moldflow's CAE Analysis*, Moldflow Pty. Ltd., pp. 196~220.
- (2) Wang, K. K. et al., 1977, "Computer-Aided Injection Molding System," *CIMP Progress Report*, No. 4, pp. 9~45.
- (3) Tadmor, E., Broyor, E. and Gutfinger, C., 1974, "Flow Analysis Network(FAN): A Method for

- Solving Flow Problems in Polymer Processing," *Polym. Eng. and Sci.*, Vol. 14, No. 9, pp. 660~665.
- (4) Kamal, M. R. and Kenig, S., 1972, "The Injection Molding of Thermoplastic, Part I : Theoretical Models," *Polym. Eng. and Sci.*, Vol. 12, pp. 294~301.
- (5) Kamal, M. R. and Kenig, S., 1972, "The Injection Molding of Thermoplastic, Part II : Experimental Test of the Model," *Polym. Eng. and Sci.*, Vol. 12, pp. 302~308.
- (6) Friedl, C. F. and McCaffrey, N. J., 1991, "Crystallisation Prediction in Injection Molding," *SPE ANTEC Technical Papers*, 50, pp. 330~332.
- (7) Sherbelis, G. and Friedl, C., 1992, "The Importance of Low Temperature Viscosity to CAE Injection Molding Simulation," *SPE ANTEC Technical Papers*, 49, pp. 954~957.
- (8) Chiang, H. H., 1989, "Simulation and Verification of Filling and Post-Filling Stages of the Injection-Molding Process," Ph. D. Thesis, University of Cornell, Ithaca, New York.
- (9) Moy, F. H. and Kamal, M. R., 1980, "Crystalline and Amorphous Orientations in Injection Molded Polyethylene," *Polym. Eng. and Sci.*, Vol. 20, No. 14, pp. 957~964.
- (10) Wang, K. K. et al. 1983, "Computer Aided Design and Fabrication of Molds and Computer Controll of Injection Molding," *CIMP Progress Report*, No. 10, pp. 130~136.
- (11) Cox, H. W. and Mentzer, C. C., 1986, "Injection Molding: The Effect of Fill Time on Properties," *Polym. Eng. and Sci.*, Vol. 26, pp. 488~498.
- (12) Greener, J., 1986, "General Consequences of the Packing Phase in Injection Molding," *Polym. Eng. and Sci.*, Vol. 26, pp. 886~892.
- (13) 홍명웅, 류제구, 1989, 사출성형, 기전연구소, 서울, pp. 165~179.
- (14) Rubin, I. I., 1972, *Injection Molding Theory and Practice*, John & Wiley Sons, New York, pp. 270~281.
- (15) Chen, T. Y., Wang, V.W. and Bozarth, M. J., 1992, "Crystallization and Its Effect on the Processing of Polypropylene," *SPE ANTEC*, pp. 72~76.