

사출기용 배럴의 거동 특성에 관한 수치적 연구

조승현 · 김청균 · 이일권*

홍익대학교 트라이볼로지 연구센터

대림대학 자동차학과*

A Study on Contact Dynamic Characteristics of Screw and Barrels in Injection Molding Machine

Seung hyun Cho · Chung Kyun Kim · Il Kwon Lee*

Tribology Research Center, Hongik University

Department of Automotive Engineering, Daelim College*

Abstracts - Single flighted screw extrusion is the most cost effective method for the production of film, sheet, pipe and the fundamental step in other processes including blow molding and injection molding. The temperature and injection pressure in barrel play a very important role in quality of products. Because thermal distortion and displacement of barrel by temperature difference and injection pressure difference cause irregular resin melting and flow. In this paper thermal distortion and stress of barrel includes pressure and temperature distributions by finite element analysis to understand dynamic characteristics of barrel.

Key Words : Barrel, Temperature, Stress, Finite element analysis

1. 서론

사출기에 사용되는 폴리머는 용융시키기가 어렵고 수지의 색깔을 잘 혼합시키기가 어려우며, 토출되는 수지의 양을 증가시키기 위해 스크류의 회전속도를 증가시키면 과도한 전단력과 높은 온도가 발생하게 된다. 또한, 고체의 수지가 배럴과 스크류의 표면과 미끄럼 마찰을 일으켜서 스크류의 기계적 특성을 약화시키고, 가열기에 의해 스크류에서 발생하는 열팽창에 의해 스크류의 동적 특성이 저하된다. 따라서 사용 목적과 사용하는 수지의 종류에 따라 작업 조건을 최적화하는 것이 바람직하다. 사출기용 스크류에 대해서는 1953년 Carley와 Mckelvey에 의하여 단일 날 스크류가 해석된 이후 압출 성형 모델을 해석하는데 실험뿐만

아니라 다양한 시뮬레이션 기법들이 사용되고 있다.[1-3] 사출기의 성능을 향상시키기 위해서는 스크류의 표면과 배럴의 표면을 특수가공하여 마찰력을 변화시키거나 스크류의 형상을 재설계하여 수지의 전이율 및 압축을 등을 증가시킬 수 있으나 배럴의 온도와 압력조건을 최적화하는 것이 가장 유효한 방법이다. 그러나 사출기가 작동하는 배럴 내부의 온도와 압력분포는 사출 성형제품의 품질에 결정적인 영향을 미침에도 불구하고 정확하게 측정하는 것은 현실적으로 대단히 어렵다. 따라서 본 논문에서는 배럴에 미치는 온도와 압력의 영향을 알아보기 위해 온도와 압력의 조건을 최고 온도와 압력값을 기준으로 각각 6개와 9개로 가정하여 3차원의 유한요소 해석기법을 이용하여 배럴의 변형량과 응력 분포에 대하여 고찰하였다.[4]

2. 모델링 및 해석 조건

2-1. 온도 및 압력

사출기용 배럴에는 고체상태의 수지를 용융 상태로 만들어서 공급부에서 계량부로 전이시키기 위한 방안으로 여러개의 가열패드(heating pad)를 설치하게 된다. 배럴 내부의 온도분포는 미세한 열전도에 의한 스크류 표면과 배럴의 안쪽표면 온도의 변화를 제외하고는 대부분이 폴리머 용제의 온도가 다르기 때문에 위치에 따라 달라진다.[5] 가열패드에 의한 가열과 스크류와 수지와의 마찰에 의한 마찰열 등 배럴 내부의 온도분포는 필연적으로 배럴 내부의 변위량 및 응력 등 동적 특성에 변화를 주게 되어 수지의 전이특성에 대단히 큰 영향을 미친다. 따라서 배럴내부의 온도분포 조절은 사출기의 프로세스를 최적화하는데 가장 편리하고 유효한 방법이 된다. 본 논문에서는 Fig. 1에서 보여주는 바와 같이 스크류의 온도가 호퍼(hopper)에서는 120℃~215℃이고, 계량부에서는 310℃인 6개의 온도 패턴을 기준으로 하였다.

압력분포는 수지의 공급부에서 고체수지의 이송이 주된 목적으로 미터링 깊이가 크고, 날의 간격이 크기 때문에 압력이 낮고, 수지의 계량부에서는 수지의 토출을 위해 미터링 깊이가 낮고, 날의 간격을 작게 하여 압력을 높이게 된다.

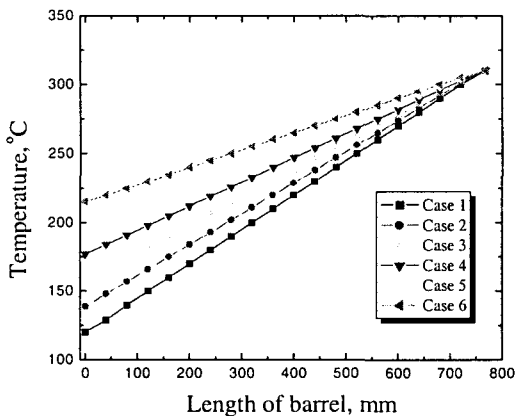


Fig. 1 Temperature distributions of the surface of screw and the inner surface of injection barrel

이때 사출 스트로크의 끝이나 비왕복 밸브의 앞쪽에서는 대단히 높은 압력이 발생하는데 일반적으로 137.9MPa까지 올라가고, 206.84MPa까지 높아지는 경우도 있다.[6]

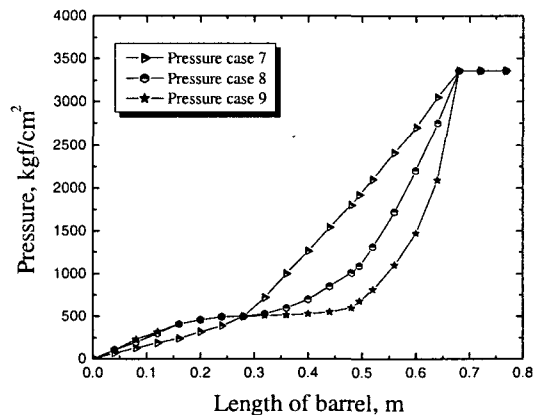
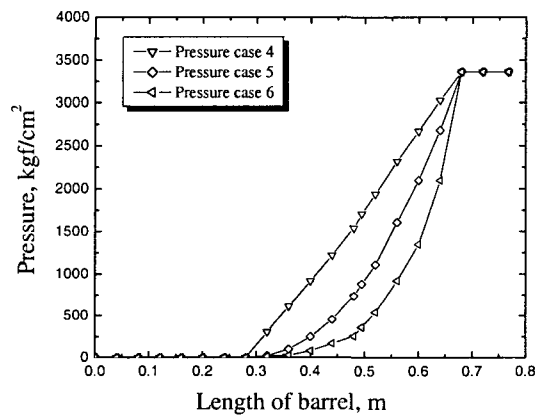
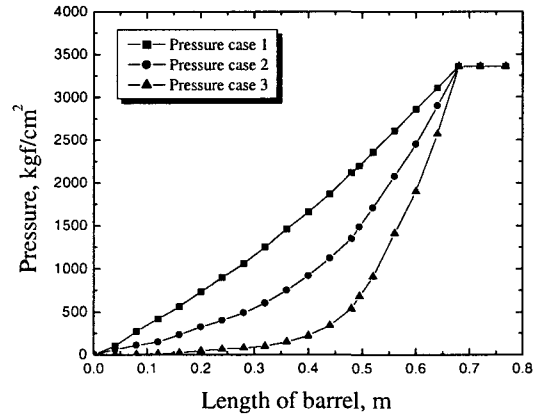


Fig. 2 Pressure distribution at inside injection barrel

본 논문에서 배럴의 사용조건으로 온도와 함께 고려해야할 조건인 내압은 Fig. 2와 같이 모두 9개의 경우를 가정하였는데 이때 최대 압력은 매우 높은 $3,360\text{kgf/cm}^2(329.3\text{MPa})$ 으로 고정하였다.

이와 같이 본 논문에서 배럴의 거동특성을 해석하기 위해 고려한 온도와 압력조건은 상호관련성이 있어서 수지 용제의 온도가 균일하지 않으면 압력도 변하게 되는데 일반적으로 낮은 온도에서 압력이 높고 높은 온도에서 압력이 낮다. 그러나 본 논문에서는 사출기 내부의 압력이 대칭적으로 균일하게 분포하고, 수지 용제의 온도변화에 따른 압력분포만이 변한다는 가정을 하여 압력의 영향을 해석하였다.

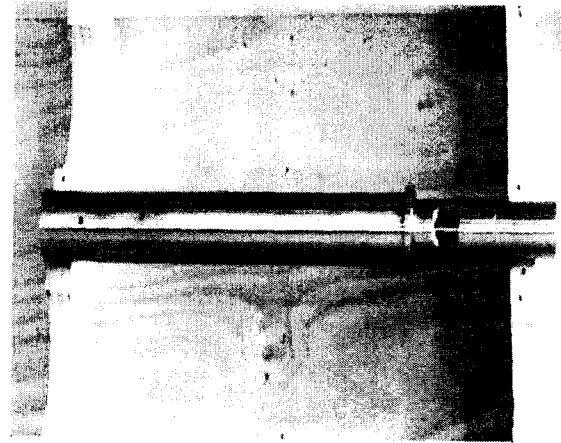
2-2. 소재

압출과 사출기용 배럴의 소재는 많은 외국에서 여전히 질화철을 사용하지만, 1939년 복합금속 배럴이 첫 개발이 된 이후에 점점 복합금속 제품으로 사용 추세가 변해간다. 배럴의 소재중에서 Wexco 666, Bimex AR-1000, Xaloy 101 등은 연마를 방지할 목적으로 사용되는 복합금속이고, 부식을 막기 위한 복합금속으로는 니켈과 코발트가 첨가된 Wexco 555, Bimex CR-3000, Xaloy 306 등이 있다.[6] 본 해석에서는 알루미늄크롬 질화강인 SACM645을 사용하였다. 이 소재의 특징은 표면 내마모성을 위하여 질소를 침투시켜 Al 및 Cr 화합물을 형성한 것으로 침탄보다 가열온도(550°C)가 낮고 변형이 최소로 발생하여 내연기관 부품이나 게이지 블록과 사출기용배럴의 소재로 많이 사용된다.

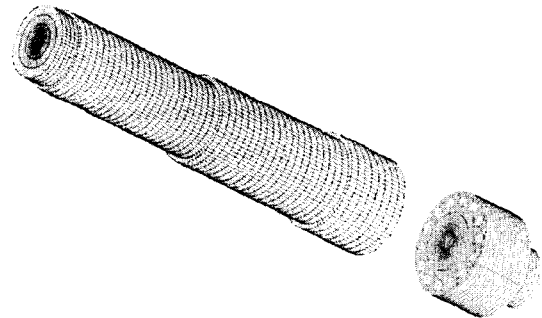
2-3. 모델 및 경계조건

배럴의 내부표면에 가해지는 압력은 Fig. 2의 압력 분포가 표면에 수직하게 가해지며, 배럴의 내부표면의 온도는 Fig. 1의 온도 분포를 적용하였다. 배럴은 호퍼입구를 무시하여 1/4모델을 축대칭모델로 가정하여 해석하였다. Fig. 4(a), (b)는 실제 배럴의 형상과 유한요소 모델을 나타낸 그림이다. 사출기 배럴은 일반적으로 길이/내경비가 18:1, 20:1이고 종종 24:1도 있다. 몇몇 벤티드 사출 배럴의 경우는 L/D가 32:1까지

있으나 최근에는 L/D가 작아지는 추세이기 때문에 현재는 18:1과 24:1이 가장 많이 사용되고 있다.[6] 그러나 본 논문의 배럴은 길이/내경비가 30.72:1인 모델이다. 스크류의 베어링부에 해당하는 위치를 고정하였고 내부표면에 압력과 온도조건을 주었다.



(a) Real barrel



(b) Analysis model of barrel

Fig. 3 Analysis models

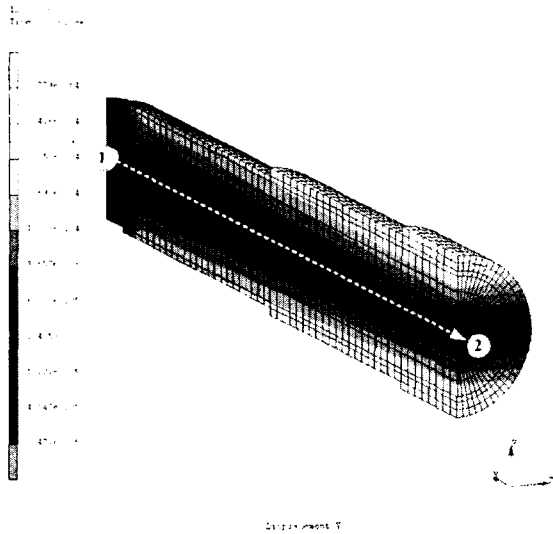
3. 해석 결과 및 토의

3-1. 배럴 내부 온도의 변화

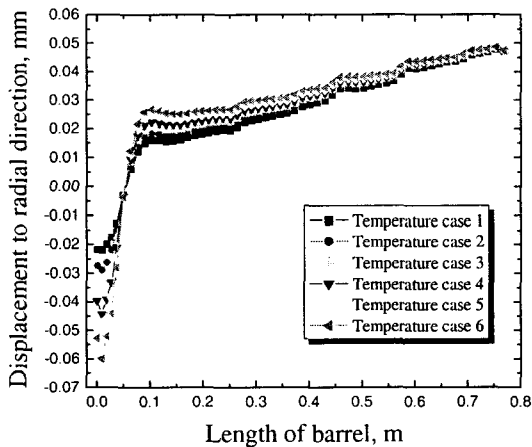
Fig. 4(a)는 배럴의 내부 압력분포가 case 1이고 온도분포가 case 6일 때 배럴에서 발생한 변위량 분포를 나타낸 그림이고, Fig. 4(b)는 배럴의 내부 압력분포가 case 1과 같을 때 내부 온도의 변화에 따라 배럴 내부 표면에서 발생하는 변위량을 Fig. 4(a)의 ①→②방향으로 나타낸 그림이다. 온도와 압력이 배럴 내부에 균일하게 가해진다고 가정하였기 때문에 반경방향으로

발생한 변위량은 대칭적이며, 길이방향으로는 온도가 높은 피드부에서 큰 변위량이 발생하였다.

Fig. 4(b)의 결과에 의하면 배럴 내부의 피드부와 미터링부의 온도차가 클수록 배럴 내부의 변위량도 크게 발생하였다. 사출기를 제작할 때 스크류와 배럴의 간극을 0.8mm~3.175mm로 제작하지만[7], 최근에는 정밀사출기가 출시되면서 간극은 점점 줄어드는 추세에 있다. 따라서 이와 같은 변위량 분포는 균일한 수지의 이동에 불리한 영향을 미칠 수 있다.



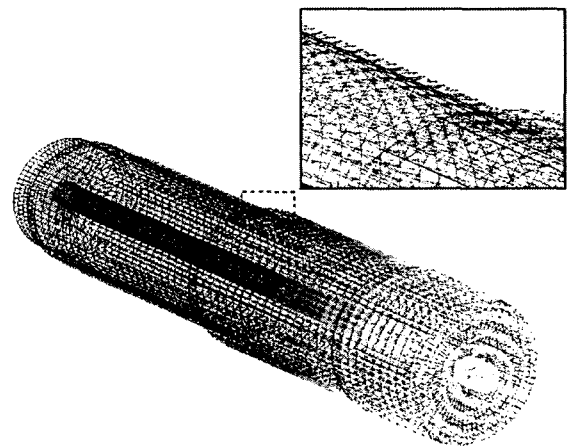
(a)



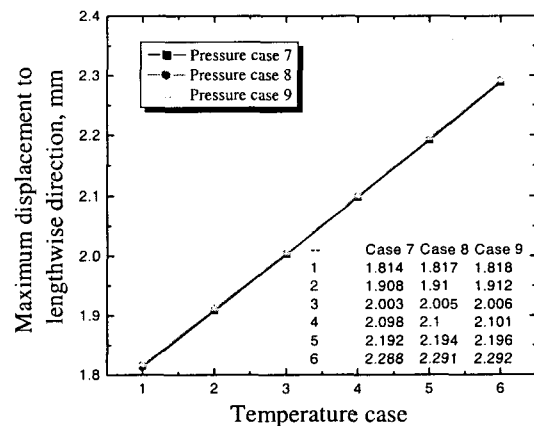
(b)

Fig. 4 Displacement distributions at inner surface of the barrel along length for various values of temperature case with pressure case 1

Fig. 5(a)는 배럴의 내부 압력분포가 case 7이고 온도분포가 case 6일 때 배럴에서 발생한 최대 변위량 분포를 나타낸 그림이고, Fig. 5(b)는 배럴의 내부 압력분포 모델 중 가장 가능성이 있는 case 7~9와 같을 때 내부 온도의 변화에 따라 배럴에서 발생한 최대 변위량을 나타낸 그림이다. Fig. 5(a)에서 보여주는 바와 같이 배럴의 변형은 반경방향으로도 발생하지만 길이 방향으로 발생하는 것이 지배적이다. 그리고 변형 패턴은 배럴의 내부 압력분포에는 영향을 받지 않으나 배럴 내부의 온도분포에는 큰 영향을 받아서 배럴의 미터링부와 피드부의 온도



(a)

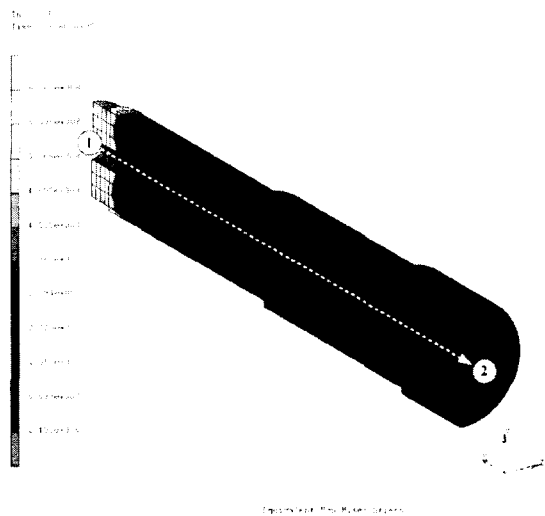


(b)

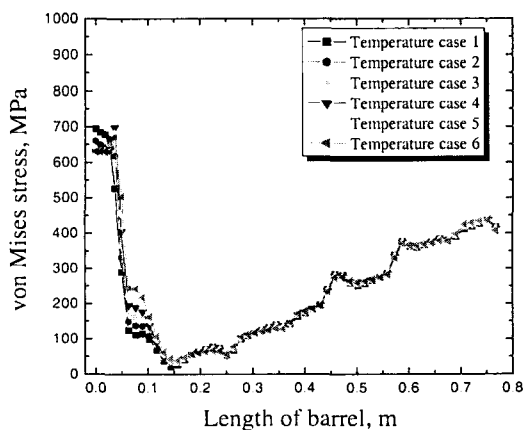
Fig. 5 Maximum displacement of the barrel to lengthwise direction for various values of temperature case with pressure case 1

차가 가장 작은 온도 케이스 6에서 가장 많은 변형이 발생하였다.

길이방향으로 변형이 크게 발생한 것은 배럴의 두께방향으로는 짧은 시간동안 온도가 전도되어 온도차가 거의 없으나 길이방향으로는 항상 큰 온도차가 유지되어 열변형이 길이방향으로 발생하기 때문이다. 배럴은 Fig. 3에서 보여주는 바와 같이 몸체와 헤드부를 볼트로 결합을 하는데 이와 같이 배럴의 길이방향으로 발생한 큰 변형은 배럴의 헤드부의 고정부인 볼트와 홈에 과도한 하중을 가하게 되어 파손의 원인이 된다.



(a)



(b)

Fig. 6 von Mises stress distributions at inner surface of the barrel along length for various values of temperature case with pressure case 1

Fig. 6(a)는 배럴의 내부 압력분포가 case 1이고 온도분포가 case 6일 때 배럴에서 발생하는 von Mises 응력 분포를 나타낸 그림이고, Fig. 6(b)는 배럴의 내부 압력분포가 case 1과 같을 때 내부 온도의 변화에 따라 배럴 내부 표면에서 발생하는 von Mises 응력을 Fig. 6(a)의 ①→②방향으로 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 배럴의 고정부에서 대단히 높은 응력이 발생하였고 배럴의 내부에서는 피드부에서 높은 응력이 발생하였다. 길이방향으로 발생한 응력분포를 살펴보면 온도 케이스에 따라서 배럴의 미터링부에서 응력차가 상대적으로 크게 발생하였고 피드부로 갈수록 발생한 응력차가 거의 없는 것을 알 수 있다. 이것은 배럴의 미터링부에서 온도 케이스별 온도차가 크지만 피드부로 갈수록 온도 케이스별 온도차가 없기 때문이다.

3-2. 배럴 내부 압력의 변화

Fig. 7은 온도 분포가 case 1과 같고, 압력조건에 따라서 배럴의 내부표면에서 발생한 변위량 분포를 나타낸 그림으로서 배럴의 트랜지션부에서 압력조건에 따라 변위량이 달라지는 것을 알 수 있다. Fig. 2의 압력 조건에서 배럴의 고정부와 피드부는 압력차가 매우 작기 때문에 발생한 응력차도 매우 작다. 이와 같은 결과로부터 배럴 내부에서 발생하는 변위량 분포는 내부에서 발생하는 압력분포에도 큰 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 배럴 내부의 온도분포가 case 1, case 3, case 6과 같을 때 압력조건에 따라 배럴에서 발생한 최대 변위량을 나타낸 그림이다. 최대 변위량은 길이방향으로 발생하였는데 Fig. 5(b)와는 달리 길이방향으로 발생한 변위량은 압력조건에 따라 영향을 적게 받는 것으로 나타났다. 그러나 배럴 내부의 온도에는 큰 영향을 받아서 배럴 내부의 온도차가 작은 case 6과 배럴 내부의 온도차가 큰 case 1의 경우의 변위량 차이가 약 28%이다. 이와 같은 결과는 위에서 언급한 바와 같이 배럴의 최대 변위량은 배럴의 온도에 가장 큰 영향을 받는다는 것을 의미하며 배럴의 안정적인 동적특성을 위해서 배럴의 적절한 온도제어가 필요하다.

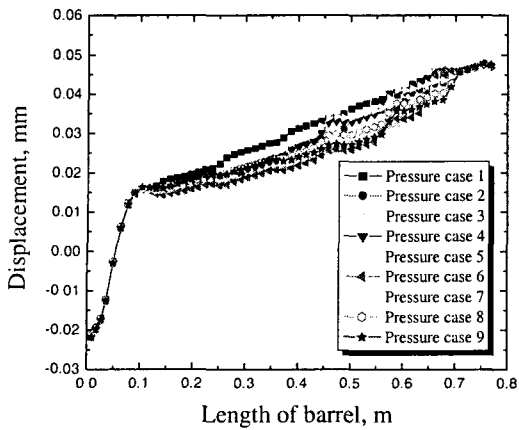


Fig. 7 Displacement distributions at inner surface of the barrel along length for various values of pressure case with temperature case 1

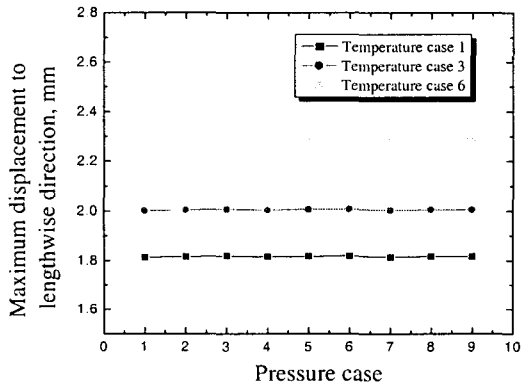


Fig. 8 Maximum displacement of the barrel to lengthwise direction for various values of pressure case

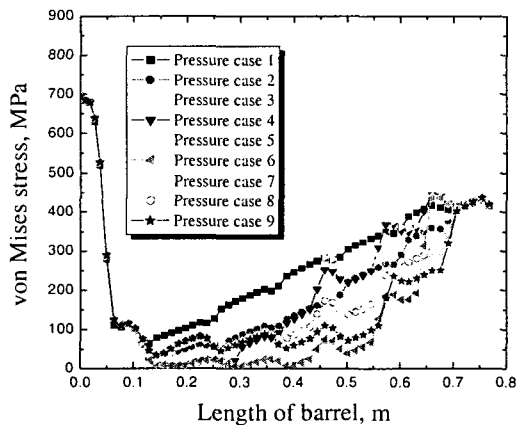


Fig. 9 von Mises stress distributions at inner surface of the barrel along length for various values of pressure case with temperature case 1

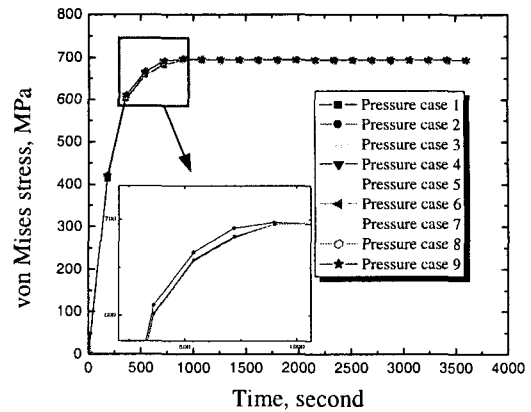


Fig. 10 von Mises stress distributions at inner surface of the barrel as function of time for various value of pressure case with temperature case 1

Fig. 9는 배럴 내부의 온도분포가 case 1과 같을 때 압력조건에 따라 배럴 내부에서 발생한 von Mises 응력분포를 나타낸 그림이다. Fig. 2와 같이 압력차가 큰 배럴의 트랜지션부에서 높은 응력차가 발생하여 최대 6배의 차이가 난다. 그리고 배럴의 피드부에서는 약 400MPa로 동일한 응력이 발생하였다. 배럴 소재의 허용응력이 최대 280MPa임을 감안한다면 모든 압력조건에 경우 배럴의 압력조건으로 바람직하지 않기 때문에 배럴 내부의 압력을 낮추기 위한 최적조건을 고려해야 한다. Fig. 10은 배럴의 고정부쪽 내경에서 발생한 응력을 시간에 따라 나타낸 그림으로서 약 15분이 경과한 후 응력이 항복응력에 수렴하는 것을 보여주며 발생한 응력의 경향이 압력조건에 따라 차이가 크지 않다.

4. 결론

본 논문에서는 사출성형품의 품질에 결정적인 영향을 미치는 사출기용 배럴의 온도와 압력에 의한 동적특성을 유한요소법에 의해 해석하였다. 해석결과에 의하면 배럴은 압력과 온도 중에서 온도의 영향을 많이 받는다. 특히 피드부에서 발생하는 높은 온도를 가능한 낮추는

것이 배럴의 열팽창을 감소시키는 가장 유효한 방법이다. 그리고 배럴의 허용응력을 고려하여 배럴의 온도와 압력을 대폭 낮추는 것이 필요하다.

참고 문헌

- [1] R.T. Fenner, "Extruder Screw Design," Iliffe, London, 1970.
- [2] I.R. Edmondson and R.T. Fenner, *Polymer*, 16, 49, 1975.
- [3] J. Shapiro, A.L. Halmos and J.R.A. Pearson, *Polymer*, 17, 905, 1976.
- [4] MARC Analysis Research Corporation, 1994, Computer Program MARC, California, USA.
- [5] Osamu Amanol, Shirou Utsugi "Temperature Distribution of Polymer Melts Along the Screw Axis in Injection Molding," ANTEC '87 pp. 250~251.
- [6] "Plasticating Components Technology," Spirex Co., 1992.
- [7] D. Todd, "Heat Transfer in Twin Screw Extruders," ANTEC '88 pp. 54~58.