

사출성형기용 실린더의 응력안전성에 관한 수치적 연구

김형균*, 김경섭⁺

(논문접수일 2010. 10. 27, 심사완료일 2010. 11. 25)

Numerical Study on the Stress Safety of a Cylinder for an Injection Molding Machine

Chung-Kyun Kim*, Kyung-Seob Kim⁺

Abstract

This study presents the stress safety analysis of a cylinder, which is manufactured by a tempered ASTM D2, tempered SM45C and normalized SM45C materials, respectively. The inner diameter of three cylinder models are 85mm, 95mm, and 110mm and the total length of a cylinder is 2,365mm for a high pressure injection molding machine. The FEM computed results show that the inner diameter of 85mm with a thick thickness of 62.5mm may produce the injection pressure of 325MPa and the inner diameter of 110mm with 50mm thickness reduces up to the injection pressure of 220MPa because of a reduced thickness of a cylinder. These injection pressures are enough for a high pressure injection molding machine assembled by ASTM D2 cylinder. And also, an injection cylinder manufactured by a tempered SM45C material in which is low price may produce 225MPa injection molding pressure and this may sufficiently endure stress safety compared to that of ASTM D2 cylinder material. Thus, this study recommends that tempered SM45C cylinder is appropriated for a mild injection molding machine as an alternative cylinder material when the safety strength and low prices are considered. But the normalized SM45C cylinder material does not meet a stress safety of yield strength in general.

Key Words : Stress(응력), Stress safety(응력안전성), Cylinder(실린더), Injection molding machine(사출기), FEM(유한요소해석)

1. 서론

실린더(cylinder)는 사출성형기의 핵심부품으로 기다란 원통형상을 하고 있다. 실린더의 내부에는 스크류를 넣어서 플라스틱 수지의 이송과 용융, 사출을 위한 챔버역할을 담당하고, 외부에는 가열패드(heating pad)를 설치하여 수지가 사출하기에 적합한 용융상태를 유지하면서 내압에 안전한 강도를 확보하면 된다.

실린더의 원통경이 크면서 길이가 길면 수지를 혼합하고 용

용하는데 유리하지만, 강도안전성 측면에서는 불리하다.

그렇지만, 대형 사출제품을 생산하고, 정밀도를 높이기 위해서는 대구경의 장축 실린더를 사용해야 유리하다. 플라스틱 수지의 용융온도는 250~350℃ 정도로 높으며, 사출압력은 사출제품의 크기와 정밀도 등에 따라 달라지므로 실린더는 사출 특성에 적합하도록 설계해야 한다.

사출성형기용 스크류에 대한 연구⁽¹⁻⁴⁾는 비교적 많이 진행되었지만, 실린더에 대한 연구⁽⁵⁾는 대단히 적은 것으로 조사되었다.

따라서 본 연구에서는 실린더의 소재변경을 통해 FEM으로

* 홍익대학교 트리보-메카-에너지기술 연구센터 (ckkim_hongik@naver.com)

주소: 121-791 서울시 마포구 상수동 72-1

+ 홍익대학교 트리보-메카-에너지기술 연구센터

응력 안전성을 해석하고자 한다. 실린더의 사출압력, 사출온도에 적합한 소재는 실린더의 강도안전성 확보에 중요하지만, 가격도 고려해야할 변수이므로 본 연구에서는 여러 가지 실린더 소재에 대한 응력강도 안전성을 상대적으로 평가하고자 한다.

2. 해석모델 및 사용소재

본 연구에서 사용한 실린더의 외경은 최대 210mm이고, 길이는 2,365mm의 장축모델이다. 실린더의 입구에 수지 고형체를 유입하면, 스크류의 회전력에 의해 앞으로 이송된다. 이때 실린더의 내경부 마찰표면에는 연삭마모, 실린더의 출구에는 용융수지 흐름에 따른 유동마모가 각각 발생한다. 특히, 실린더의 용융부에 형성된 사출압력은 실린더의 응력강도 안전성과 내구성을 결정하는 중요한 설계변수가 된다.

Fig. 1은 실린더의 대표적인 형상을 보여주는 것으로 최적설계를 수행한 모델이다. 즉, 수지 고형체를 공급받아 혼합하는 실린더 구간 A는 두께를 가장 얇게, 고형체가 혼합되면서 용

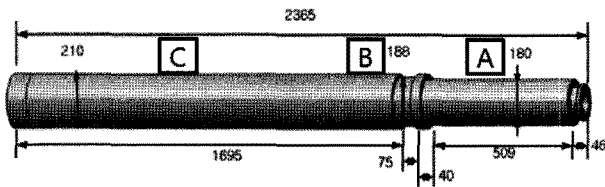


Fig. 1 Typical high pressure cylinder model of an injection molding machine

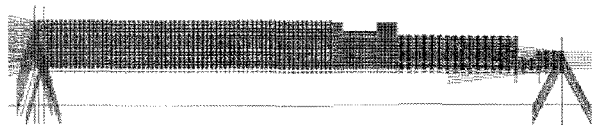


Fig. 2 FEM analysis model

Table 1 Material properties of ASTM D2 steel

Properties	Values
Density, g/cc	7.70
Elastic modulus, MPa	207
Poisson's ratio	0.29
Yield strength, MPa	700

Table 2 Material properties of SM45C steel

Properties	SM45C	
	Tempered steel	Normalized steel
Density, g/cc	7.85	7.85
Elastic modulus, MPa	205	205
Poisson's ratio	0.29	0.29
Yield strength, MPa	490	343

융을 시작하는 천이구간 B는 좀 더 두껍게, 용융수지를 체류시키고 사출하는 용융구간 C는 가장 두껍도록 설계하여 실린더의 강도안전성을 확보하고, 경량화를 추구한 해석모델이다.

Fig. 2는 FEM 응력 안전성에 대한 유한요소해석⁶⁾을 위해 실린더의 축방향 변위와 회전 모멘트를 고정해 해석모델을 보여주고 있다.

사출기용 실린더의 응력강도 안전성 해석에 사용한 소재는 고가의 냉간금형용 합금공구강인 ASTM D2와 저가의 기계구조용강인 SM45C이다. 이들 강재에 대한 물리적 특성은 Table 1과 Table 2에 각각 제시한다.

3. 해석결과 및 고찰

본 연구는 실린더 소재로 사용한 ASTM D2와 SM45C의 응력강도 안전성을 상대적으로 비교하기 위한 것으로, Fig. 1에서 제시한 실린더 모델에 200MPa의 내압이 균일하게 작용한다고 가정하고 해석하였다.

Fig. 3은 장축 실린더에 걸리는 응력분포 해석결과로, Fig. 1에서 보여준 것처럼 실린더를 3개 구간으로 나누어 평가한 결과이다. 즉, 외경이 180mm인 A구간은 고형체가 유입되어 혼합과 용융이 처음 진행되는 곳으로 수지는 스크류에 의해 앞으로 이송되고, 외경이 188mm인 B구간은 수지가 반응용 상태로 혼합되는 천이구간이고, 외경이 210mm인 C구간은 용융수지가 채워져 유동성을 유지하면서 내압이 상승되는 고온, 고압의 불안정한 지역이다.

Fig. 1의 모델에서는 고형체를 유입하는 A구간을 가장 얇게 설계하였으므로 Fig. 3의 결과처럼 응력이 상승하지만, 실제로는 200MPa 이상의 내압으로 올라가지 않기 때문에 안전하다. 그렇지만, 용융수지가 머무는 C구간에서 실린더의 두께를 얇게 설계하면, 실린더에 걸리는 응력이 크게 상승하여 위험해질 수 있으므로 Fig. 1의 모델처럼 두껍게 설계하여 응력강도 안전성을 확보하는 것이 중요하다.

3.1 ASTM D2 실린더의 응력해석

Fig. 4는 85mm~110mm 내경의 실린더에 200MPa의 내압이 균일하게 작용한다고 가정한 경우에 대한 응력해석 결과가

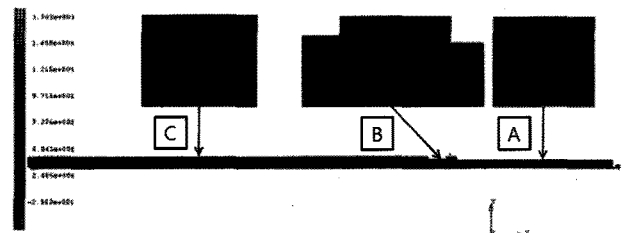


Fig. 3 von Mises stress distribution along the cylinder length

다. Fig. 4의 해석결과에 의하면, 85mm의 내경을 갖는 실린더의 경우는 외경이 180mm(두께는 47.5mm)인 실린더에 플라스틱 수지입자를 유입시키면 구간 [A]에 작용하는 von Mises 응력은 430MPa로 높지만, 외경이 210mm(두께는 62.5mm)로 가장 두꺼운 용융구간 [C]에 작용하는 von Mises 응력은 400MPa로 수지입자를 투입하는 구간 [A]에 비해 6.9%나 향상된 응력강도 안전성을 나타내고 있다.

또한, 110mm의 내경을 갖는 실린더의 경우는 외경이 180mm(두께는 35mm)인 실린더에 수지입자를 유입시키면 [A]구간에 작용하는 von Mises 응력은 540MPa로 크게 높아지고, 외경이 210mm(두께는 50mm)로 가장 두꺼운 용융구간 [C]에 작용하는 응력은 465MPa로 수지입자를 투입하는 [A]구간에 비해 13.9%나 향상된 응력강도 안전성을 나타내고 있다.

Fig. 4의 해석결과에 의하면, 실린더의 두께가 35mm로 가장 얇다는 실린더 모델에서 수지 고형체의 유입구간 [A]에 작용하는 응력 540MPa도 ASTM D2 소재의 항복강도 700MPa의 77.1% 수준으로 안전하다.

결국, ASTM D2 강재로 제작한 실린더에 200MPa의 균일한 내압을 작용시킬 때 실린더의 내경이 증가할수록, 즉 실린더의 두께가 얇아질수록 실린더의 몸체에 걸리는 von Mises 응력은 높아지고, 두꺼울수록 안전하다는 해석결과를 제시한다. 따라서 Fig. 1과 같은 최적설계 모델에서는 상대적으로 내압이 적게 걸리는 수지입자 유입구역 [A]는 35~47.5mm로 얇게 설계하고, 실린더의 취약부로 알려진 용융사출부 [C]구간의 두께는 50~62.5mm로 두껍게 설계하여 실린더의 응력강도 안전성을 확보하면서 경량화를 달성하고, 원가를 절감하는 것이 바람직하다는 결과를 유추할 수 있다.

또한, 실린더를 설계할 때 실린더의 전체길이에 걸쳐서 두께의 진폭 변화를 작게 할수록 플라스틱 수지 고형체를 유입하는 구간 [A]에서 용융사출 구간 [C]에 이르기까지 안전하지만, 두께의 변화가 클수록 불안정해진다.

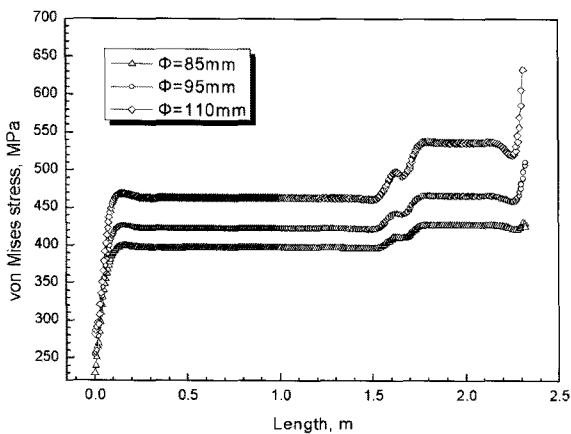
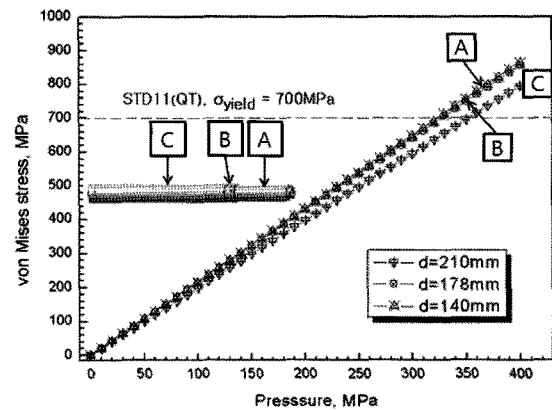


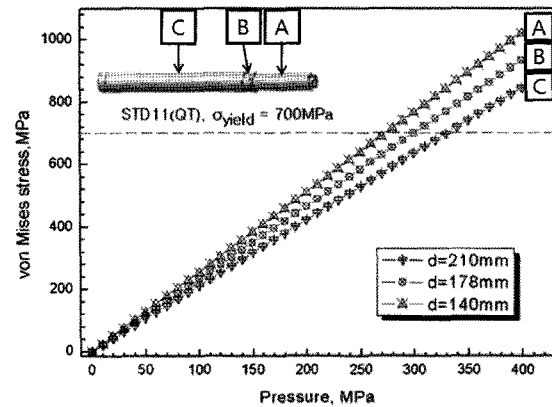
Fig. 4 von Mises stress of tempered ASTM D2 cylinder for various inner diameter in axial direction

Fig. 5는 실린더의 내경을 85mm~110mm로 설계하고, 최고 내압을 400MPa까지 작용한 상태에서 응력강도 안전성을 해석한 결과이다. 여기서, 고형체를 공급하여 혼합하는 구간 [A]의 외경은 140mm, 혼합된 고형체를 용융하는 천이구간 [B]의 외경은 178mm, 용융수지가 체류하는 사출구간 [C]의 외경은 210mm로 Fig. 1의 해석모델보다는 약간 작게 설정하고 실린더에 작용하는 von Mises 응력을 해석하였다.

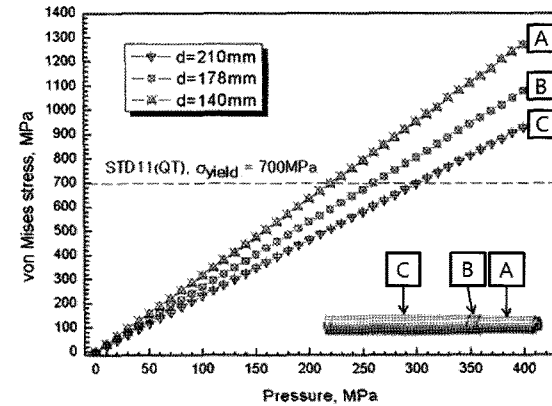
실린더의 응력에 대한 Fig. 5의 해석결과에 의하면, 실린더



(a) Inner diameter of a cylinder, 85mm



(b) Inner diameter of a cylinder, 95mm



(c) Inner diameter of a cylinder, 110mm

Fig. 5 von Mises stress of a ASTM D2(QT) cylinder for an injection molding machine

에 작용하는 내압이 증가함에 따라서 실린더에 걸리는 von Mises 응력은 선형적으로 증가한다. 또한, 실린더의 두께를 가장 얇게 설계한 고행체의 투입구간 [A]에서 상대적으로 높은 응력이 발생하고, 수지가 용융하여 혼합하기 시작하는 천이구간 [B]에서는 약간 높게, 그리고 두께를 가장 두껍게 설계한 용융구간 [C]에서는 가장 낮은 응력이 발생하고 있음을 알 수 있다.

즉, Fig. 5(a)는 내경이 85mm인 실린더에 내압 325MPa를 작용하면 실린더의 두께가 가장 얇은 [A]구간에서 ASTM D2(QT) 소재의 항복응력 700MPa에 도달하기 때문에 실린더의 응력강도 안전성은 높게 유지된다. Fig. 5(b)는 실린더의 내경이 95mm인 실린더에 내압 275MPa를 작용하면 두께가 가장 얇은 [A]구간에서 ASTM D2(QT)의 항복응력 700MPa에 도달한다. 이것은 가장 두꺼운 내경 85mm의 실린더에 비해 내압이 15.4%나 떨어진 응력이므로 안전성은 상대적으로 약화된 것이다. Fig. 5(c)는 내경이 110mm인 실린더에 내압 220MPa를 작용하면 실린더의 두께가 가장 얇은 [A]구간에서 ASTM D2(QT)의 항복응력 700MPa에 도달한다. 이것은 가장 두꺼운 내경 85mm에 비해 내압이 32.3%나 더 떨어져 상대적으로 가장 취약한 실린더 모델이지만, Fig. 5의 해석모델에서 제시한 사출성형기의 상용사출압력 200MPa보다 10%나 높으므로 응력강도 안전성은 대단히 우수하다 할 수 있다.

3.2 SM45C 실린더의 응력해석

FEM 응력강도에 대한 Fig. 6의 해석결과에 의하면, 실린더의 내경이 85mm일 때 플라스틱 수지 고행체를 혼합하고 이송하는 실린더(두께는 47.5mm로 가장 얇음)의 [A]구간에서는 430MPa로 높지만, 실린더의 두께가 62.5mm로 가장 두꺼운 [C]구간에서는 400MPa로 낮아진 von Mises 응력을 나타내고 있다.

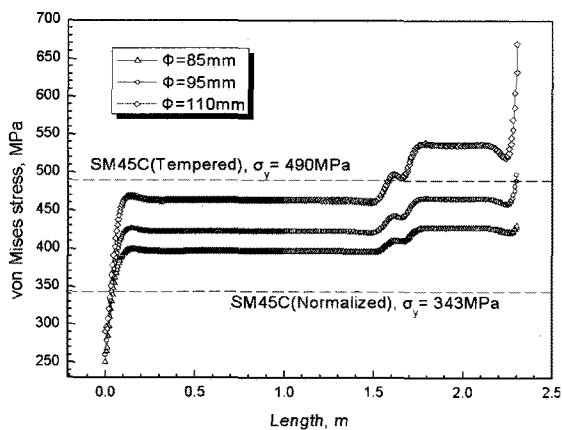
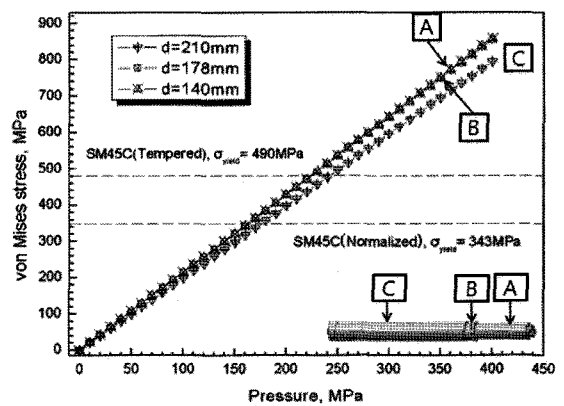


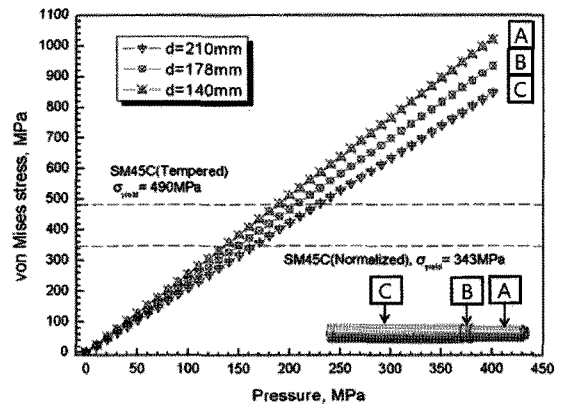
Fig. 6 von Mises stress of SM45C (tempered and normalized steels) cylinder for various inner diameter in axial direction

또한, 실린더의 내경이 95mm일 때 고행체 수지를 유입하는 실린더의 구간 [A](두께가 42.5mm로 가장 얇음)에서는 470MPa로 크게 높지만, 용융수지를 사출하는 57.5mm 두께의 실린더 구간 [C]에서는 425MPa로 낮아진 von Mises 응력이 발생한다. 따라서 [C]구간의 응력강도 안전성은 [A]구간에 비해 9.6%나 높아진 결과를 제시한다.

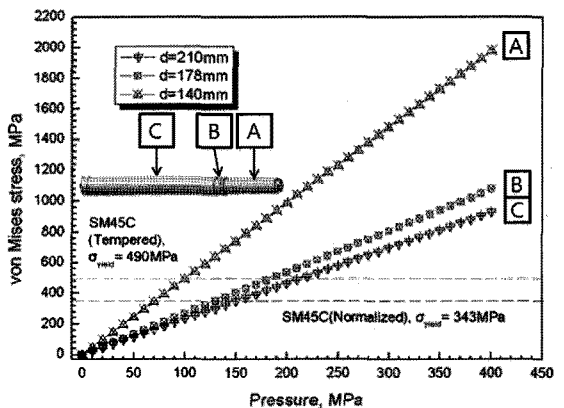
또한, 내경이 110mm일 때 실린더의 두께를 35mm로 가장 얇게 설계한 고행체의 유입구간 [A]에서는 540MPa로 크게 높아진 von Mises 응력을 발생하고, 용융수지를 체류하면서 사



(a) Inner diameter of a cylinder, 85mm



(b) Inner diameter of a cylinder, 95mm



(c) Inner diameter of a cylinder, 110mm

Fig. 7 Maximum von Mises stress of a SM45C cylinder

출하는 ㉔구간의 두께를 50mm로 두껍게 설계한 경우는 465 MPa의 낮은 von Mises 응력을 발생한다. 하지만, SM45C의 낮은 항복강도를 고려할 때 강도안전성을 확보하기가 어렵다.

SM45C 강재로 제작한 실린더에 내압이 작용할 때 내경이 증가할수록, 즉 실린더의 두께가 얇아질수록 실린더의 몸체에 걸리는 von Mises 응력은 높아지고, 해석모델에서 제시한 것처럼 상대적으로 위험한 용융수지 체류구간 ㉔를 두껍게 설계함으로써 플라스틱 수지 고형체를 투입하는 입구보다는 상대적으로 안전하다할 수 있지만, SM45C 실린더는 내압을 제한적으로 사용해야 안전하다.

즉, 템퍼링 SM45C 소재의 항복강도는 490MPa로 높기 때문에 110mm 내경(두께는 35mm임)의 실린더를 제외하고는 전반적으로 안전하지만, 노멀라이징 SM45C 소재의 항복강도는 343MPa로 낮기 때문에 실린더 소재로 사용하기에는 불안정하다. 따라서 SM45C 소재의 저렴한 가격과 사출허용압력을 고려한 최적설계가 필요하다.

Fig. 7은 Fig. 5에서 보여준 해석모델처럼 85mm~110mm의 내경부에 최고의 사출내압 400MPa를 적용할 때 실린더에 작용하는 응력강도 안전성을 해석한 결과이다. Fig. 7의 해석결과에 의하면, 사출내압이 증가함에 따라서 실린더에 걸리는 von Mises 응력은 선형적으로 증가한다. 즉, 실린더의 두께가 가장 얇은 고형체 투입구간 ㉑에서는 응력이 가장 높게 나타났고, 수지가 용융하면서 혼합하기 시작하는 ㉒구간에서는 약간 높게, 그리고 실린더의 두께가 가장 두꺼운 용융사출 구간 ㉔에서는 가장 낮게 발생하였다.

실린더의 내경을 85mm로 설계할 때, Fig. 7(a)에 의하면 실린더의 두께가 가장 두꺼운 ㉔구간에서 보다 안전한 von Mises 응력을 보여주고 있다. 템퍼링 처리한 SM45C 소재의 항복강도 490MPa를 고려하면 두께가 가장 얇은 실린더의 ㉑구간에 작용하는 내압은 225MPa까지, 그리고 노멀라이징 처리한 SM45C의 항복강도 343MPa를 고려하면 실린더에 작용하는 내압은 160MPa까지 안전한 해석결과를 보여준다. 실린더의 내경을 95mm로 설계할 때, Fig. 7(b)에 의하면 상대적으로 두께가 얇아진 ㉑구간에서 von Mises 응력은 높게 걸리고, 템퍼링 처리한 SM45C의 항복강도 490MPa를 고려하면 실린더에 작용하는 내압은 190MPa로 내경 85mm에 비해 15.6%나 줄어든 응력강도 안전성을 나타내고, 노멀라이징 처리한 SM45C의 항복강도 343MPa를 고려하면 실린더에 작용하는 내압은 135MPa까지는 안전하지만 크게 약화된 안전성을 나타내고 있다. 실린더의 내경을 110mm로 설계할 때, Fig. 7(c)에 의하면 상대적으로 두께가 가장 얇아진 ㉑구간에서 높은 응력이 걸리고, 템퍼링 처리한 SM45C의 실린더에 작용하는 내압은 95MPa로 내경 85mm에 비해 57.8%나 크게 줄어들었고, 노멀라이징 처리한 SM45C의 실린더에 작용하는 내압은 70MPa로 안전한 사출작업을 진행하기는 어려운 응력강도 안

전성을 보여준다.

SM45C 소재에 대한 Fig. 7의 응력강도 안전성 해석결과에 의하면, 템퍼링 처리한 SM45C 소재의 항복강도가 노멀라이징 처리한 소재보다 42.9%나 높기 때문에 대부분의 사출압력에 견디므로 안전하고, 소재가격도 ASTM D2보다 저렴하기 때문에 사출기의 실린더 소재로 고려할 필요가 있다. 또한, ASTM D2 소재의 항복강도는 700MPa로 템퍼링 SM45C의 490MPa에 비해 42.9%나 더 높기 때문에 FEM 응력강도 안전성 해석결과에서 보여준 것처럼 대단히 안전하므로 높은 사출압력을 필요로 하는 경우에 장축의 실린더에 사용하는 것이 바람직하다.

4. 결론

본 연구에서는 사출용으로 널리 사용하는 ASTM D2 템퍼링 소재의 응력강도 안전성을 FEM으로 해석하였고, 상대적으로 가격이 저렴한 템퍼링 및 노멀라이징 처리 SM45C 소재에 대한 안전성도 함께 비교하였다.

FEM 해석결과에 의하면, 실린더의 내경이 가장 작은 85mm(두께는 가장 두꺼운 62.5mm임)의 ASTM D2 실린더는 내압을 325MPa, 내경이 가장 큰 110mm의 실린더는 내압을 220MPa 이내에서 사용하면 고압용 사출기는 대단히 안전하다. 또한, 내경이 85mm인 SM45C 템퍼링 소재로 제작한 실린더는 내압을 225MPa, 내경이 중간인 95mm인 실린더의 내압은 190MPa 이내로 사용하면 안전하다. 하지만, SM45C를 노멀라이징 처리한 소재로 제작한 실린더의 von Mises 응력은 항복강도 343MPa를 넘어서므로 극히 제한적으로 사용해야 안전하다.

또한, ASTM D2로 제작한 실린더는 고압사출을 필요한 경우에 사용하고, 템퍼링 처리한 SM45C 실린더 소재도 어느 정도의 응력강도 안전성을 확보하고 있으므로, 특히 소재의 가격 대비 안전성을 검토하여 사출기의 사출압력에 적합한 실린더를 제작하는 것이 좋다.

참고 문헌

- (1) Amanol, O., and Utsugi, S., 1987, "Temperature Distribution of Polymer Melts along the Screw Axis in Injection Molding," *ANTEC '87*, pp. 250~251.
- (2) Todd, D., 1988, "Heat Transfer in Twin Screw Extruders", *ANTEC '88*, pp. 54~58.
- (3) Kim, C. K., and Cho, S. H., "Numerical Study on the Behavior Characteristics of a Screw in Injection Molding Machine," *Jour. of the KSMTE*, Vol. 11, No. 5, pp. 30~37.

- (4) Kim, C. K., Kim S. W., and Park, G. M., 2002, "Experimental Study on the Friction and Wear of Tribotreated Screw," *Jour. of the KSMTE*, Vol. 11, No. 6, pp. 24-30.
- (5) Cho, S. H., Kim, C. K., and Lee, I. K., 2003, "A Study on Contact Dynamic Characteristics of Screw and Barrels in Injection Molding Machine," *Proceedings of the 37th KSTLE Annual Conference 2003*, pp. 341~347.
- (6) MARC Analysis Research Corp., 1999, *MARC Version 7.3*, California, USA.