

사출기 스크류의 변형거동 특성에 관한 수치해석 연구

김청균*, 조승현⁺

(논문접수일 2002. 6. 19, 심사완료일 2002. 8. 17)

Numerical Study on the Behavior Characteristics of a Screw in Injection Molding Machine

Chung Kyun Kim*, Seung Hyun Cho⁺

Abstract

Single flighted screw injection technology 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 of polymer melts and injection pressure play a very important role in the injection molding machine. Thermal distortion and displacement of a screw by temperature difference and injection pressure difference ratio cause a friction and thermoelastic wear by metal-to-metal contact between the screw and the cylinder. In this paper we analyzed thermal distortions of a screw as functions of temperature distribution and pressure profiles by finite element analysis.

Key Words : Screw(스크류), 실린더(Cylinder), Injection Pressure(사출압), Friction(마찰), Wear(마멸), Finite Element Analysis(유한요소해석)

1. 서론

스크류(screw)는 실린더와 함께 사출 성형기의 핵심부품으로 호퍼(hopper)를 통해 공급되는 플라스틱 수지의 이송, 용융, 사출을 하는 중요한 기능을 갖는다. 장축의 스크류는 실린더 내부에서 회전운동을 하면서 공급된 고형체 수지를 완벽하게 용융시키고, 용융 수지를 사출 금형에 공급하여 각종 사출제품을 생산한다.

플라스틱 수지는 스크류의 나선(flight)을 따라 연속적으로 이송되면서 실린더의 외경측에 설치된 히팅밴드(heating band)로부터 전도되는 외부열(20% 정도)과 스크류와 수지 사이에서 발생하는 마찰열(80% 정도)에 의해 용융되고, 용융된 수지는 스크류 선단부로 압송되어 순간 사출하게 된다.

스크류는 환봉에 필요한 형상을 갖는 나선을 가공하여 나선과 나선 사이의 공간을 따라서 수지가 원활하게 이송될 수 있도록 제작되고, 용융 수지는 스크류 선단부로 갈수록

* 주저자, 홍익대학교 기계·시스템디자인공학과 (ckkim@wow.hongik.ac.kr)
주소: 121-791 서울시 마포구 상수동 72-1, Tel: 02-320-1623

+ 홍익대학교 트라이블로지 연구센터

가압되어 금형에 용융 수지를 고압으로 공급할 수 있도록 제작된 사출기의 핵심부품이다. 고형체로 유입된 수지는 스크류와 실린더의 공간을 따라서 이송하는 과정에서 완벽하게 용융되고, 수지의 색상은 균질하게 혼합되어 유동성이 우수한 용융 수지로 변함으로써 사출품은 높은 정밀도와 생산성을 확보할 수 있다.

사출 성형기에서 각종 성형 모델에 대한 해석은 실험뿐만 아니라 다양한 컴퓨터 시뮬레이션 기법을 사용하고 있다⁽¹⁻³⁾. 스크류 나선의 형상이나 개수, 각도 등은 수지의 마찰력, 용융 수지의 밀도, 용융성 등에 중요한 영향을 미치기 때문에 사출기 설계에서 큰 비중을 차지하고 있다.

최근의 사출기는 고온, 고압화 등의 가혹한 사출 환경에서도 잘 용융된 플라스틱 수지를 신속하게 가압, 이송하여 생산성과 정밀도를 확보하려고 신기술 개발을 적극 추진하고 있다. 따라서, 본 연구는 사출 성형기의 핵심부품인 스크류에 대한 변형거동과 응력특성을 유한요소법으로 해석하고, 이들이 스크류의 마멸에 어떠한 영향을 미치는가를 고찰하고자 한다.

2. 해석모델 및 해석조건

2.1 경사비

회전하는 스크류의 한 쪽은 베어링으로 지지하고, 다른 쪽은 자유단으로 캔티레버처럼 하고 있기 때문에 스크류는 자중에 의한 처짐량이 항상 발생한다. 사출기에서는 사출압을 증가시키기 위해서 스크류와 실린더 사이의 간극을 가능한 작게 설계하는데, 일반적으로 간극은 작업조건에 따라 0.08~3.175mm로 제작하고 있다⁽⁴⁾.

스크류의 설치나 사출 작업중에 불가피하게 발생하는 경사비(tilt ratio)는 스크류와 실린더 사이의 간극이 작을수록 수지의 용융조건이나 사출압에 보다 긍정적인 영향을 미치는 중요한 설계변수로 작용한다. 스크류는 경사비에 따라서 실린더의 내측면과 실제로 마찰접촉 운동을 하는 관계로 토크와 마멸량 증가로 인해 스크류와 실린더의 수명을 단축시키는 문제점이 발생한다. 따라서, 스크류의 경사비는 설계조건에서 중요한 의미를 갖는다.

스크류의 경사비 t 는 다음과 같이 주어진다. 즉,

$$t = \frac{m}{c}$$

여기서 c 는 반경간극(radial clearance)을, m 은 스크류의 모

Table 1 Tilt ratio of a screw for a given standard radial clearance, 0.2mm

Tilt ratio, t	1	0.5	0.1	0.05	0.001
Misaligned clearance m (mm)	0.2	0.1	0.02	0.01	0.002

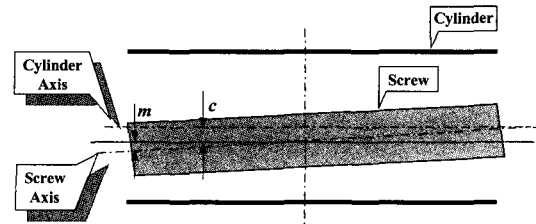


Fig. 1 Analysis model of a tilted screw

서리에서 측정된 스크류의 끝단 경사 정도로 Fig. 1과 같이 나타낸다.

스크류의 경사비가 변형량과 접촉응력 특성에 미치는 영향을 고찰하기 위한 스크류와 실린더 사이의 기준 반경간극을 0.2mm로 설정한다. 이 기준 반경간극에 대한 스크류의 경사비를 Table 1에서 제시하고 있다.

2.2 온도와 압력 모델

실린더에서 스크류로 전달된 열은 스크류의 이송과 용융 작동에 따라서 구조물의 변위량과 응력에 큰 영향을 미치기 때문에 스크류에 적용된 온도분포는 중요한 설계인자가 된다. 외부에서 공급된 전도열이 스크류의 길이 전체에 고르게 공급된다 해도 고형체 수지의 이송과정, 용융과정, 용융된 수지의 균일한 유동과 사출과정은 열의 축적 정도가 약간씩 다르게 작용하기 때문에 스크류는 서로 다른 변형거동을 하게 된다⁽⁵⁾.

Fig. 2에서 제시한 스크류의 온도분포는 수지를 공급하는 구간에서 150℃, 용융수지의 계량부에서 210℃인 온도모델 1을 비롯하여 3가지 온도분포가 스크류에 작용할 경우에 대한 스크류의 변형거동과 응력특성을 해석하였다.

Fig. 3은 스크류의 길이에 따라 분포된 실린더 내부의 압력 분포를 보여주고 있다. 즉, Fig. 3(a)는 스크류의 길이를 따라서 분포된 압력 패턴으로 스크류 선단부의 최고 사출압은 같지만, 최고 사출압이 작용하는 선단부 위치가 서로 다른 경우에 대한 스크류의 압력모델을 제시하고 있다. 반면에 Fig. 3(b)는 최고 사출압이 작용하는 스크류의 위치는

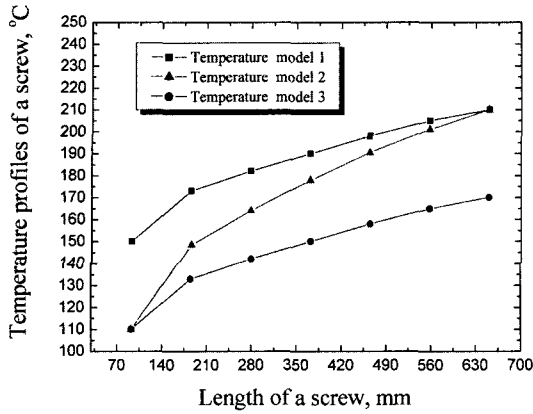
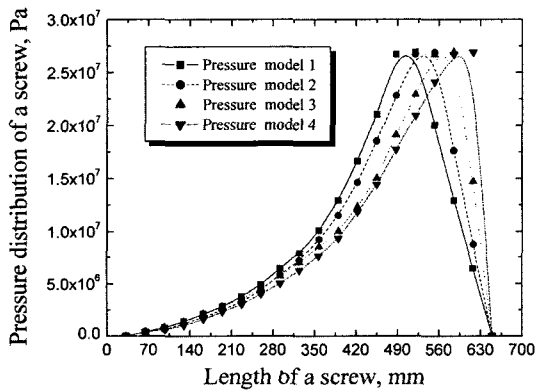
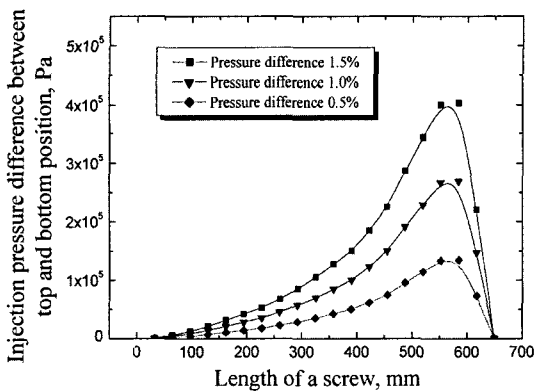


Fig. 2 Temperature distribution along the screw length



(a) Uniformly distributed pressure model



(b) Pressure difference ratio model

Fig. 3 Pressure distribution model as a function of a screw length

같지만, 스크류 선단부의 최고 사출압이 다른 3가지 모델에 대한 압력분포를 보여주고 있다.

수지가 스크류의 나선을 따라서 용융, 이송하면서 발생된 압력분포는 수지의 용융이나 이송성에 관련된 사출 설계의 중요한 변수이다. 따라서 스크류의 공급부는 고형체의 이송이 주목적이므로 스크류의 미터링 깊이와 나선 간격을 크게 하기 때문에 압송 압력은 비교적 낮아진다. 그러나, 스크류의 계량부에서는 수지의 안정적 송출을 위해 미터링 깊이를 낮게 하고, 나선 피치를 작게 하여 가능한 사출압을 높여준다. 용융된 수지의 온도가 균일하지 않으면 압력도 변하게 되는데, 일반적으로 낮은 온도에서는 압력이 높아지고 높은 온도에서는 압력이 낮아진다. 이와 같은 압력 분포가 스크류와 실린더에서 균일하지 않으면 스크류의 변형거동에 중대한 영향을 미치게 된다.

2.3 스크류 소재

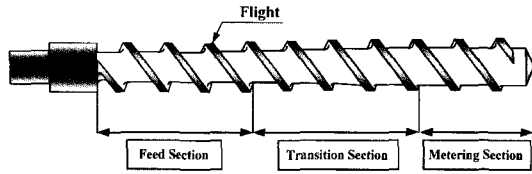
스크류 소재는 AISI 4140, AISI 4340, Nitralloy 135-M, 300 Stainless, 17-4 PH Stainless 등 여러 가지가 사용되고 있다. 본 연구에서 사용한 AISI 4140은 기계적 강도가 우수하고, 화염경화에 의한 경도증가가 용이하므로 사출이나 압출용 스크류의 80% 이상을 점유하고 있다⁽⁶⁾. AISI 4140 소재의 기계적, 열적 특성치는 Table 2에서 제시하고 있다.

2.4 해석조건과 경계조건

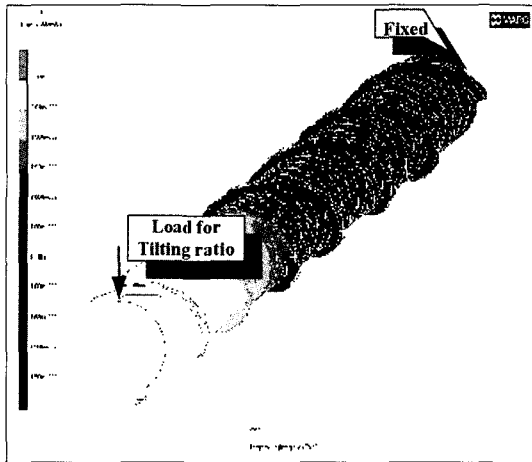
Fig. 4(a)와 같은 스크류 모델에서 외경과 미터링 깊이는 균일하고, 스크류 표면의 온도는 Fig. 2에서 제시한 온도분포가 작용한다고 가정한다. 또한, 스크류에 가해지는 압력 분포는 Fig. 3에서 제시한 압력분포가 스크류 마찰 접촉표면에 수직하게 가해진다고 가정한다. 스크류는 나선 형상이 비대칭적으로 복잡하고, 스크류에서 발생하는 사출압력과 온도를 동시에 고려해야 하므로 비선형 접촉거동 문제를 해

Table 2 Material properties of a screw

AISI 4140 Material	Values
Young's modulus, MPa	205,000
Poisson's ratio	0.25
Mass density, kg/m ³	7850
Thermal expansion coefficient at 20 °C, μ m/m · K	12.2
Thermal conductivity, W/m · K	42.6
Specific heat, J/kg · K	473



(a) Analysis model of a screw



(b) Boundary condition

Fig. 4 FEM model and boundary condition

석할 수 있는 MARC⁽⁷⁾를 이용하여 해석하였다.

스크류의 해석 모델은 사출압력과 온도에 직접 노출되어 영향을 받는 공급부, 압축부, 계량부에 대한 모델링을 하였고, 유한요소해석 모델링에 사용된 유한요소 메시와 절점의

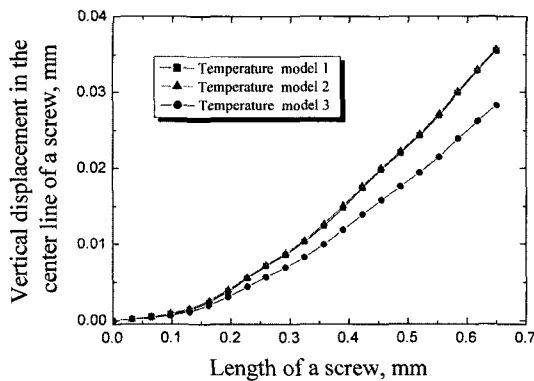


Fig. 5 Vertical displacement of a screw for various temperature models

개수는 각각 1160, 1533개이다. 스크류는 Fig. 4(b)와 같이 우측단을 고정하였고, 스크류의 경사도를 Table 1과 같이 변화시켰을 경우에 스크류의 변형거동과 응력에 미치는 특성 문제를 고찰하였다.

3. 해석 결과 및 토의

3.1 변형 거동량 해석

Fig. 5는 스크류의 중심축에서 발생된 처짐량을 해석한 결과로 Fig. 2의 3가지 온도분포 모델을 사용하였다. 처짐량 해석 결과에 의하면 스크류 고정단인 베어링 지지부에서 자유단인 스크류의 선단부로 갈수록 변형 거동량이 포물선적으로 증가하고 있음을 보여준다. 즉, 스크류에 작용하는 온도분포가 150~210℃인 온도모델 1인 경우와 110~210℃인 온도모델 2인 경우는 수직방향으로 발생된 최고 변위량이 0.037mm로 거의 같으나, 110~170℃로 낮은 온도분포를 나타낸 모델 3인 경우는 스크류의 온도가 0.028mm로 낮은 결과를 보여주고 있다. 즉, 스크류의 수직 공급부에서는 열팽창으로 발생하는 변위량이 유사하게 나타났지만, 스크류의 선단부로 갈수록 최고온도가 210℃(온도모델 1과 2의 경우)에서 170℃(온도모델 3의 경우)로 크게 낮기 때문에 그 처짐량도 0.028mm로 24.3% 덜 처진 결과를 제시하고 있다. Fig. 5와 같은 수직방향의 변위량은 예상된 결과로 스크류 선단부의 온도, 즉 수지 용융부의 온도가 낮을수록 스크류의 강성도가 상대적으로 좋아지기 때문이다. 그러나, 낮은 온도는 용융수지의 유동성이 나빠지고, 동시에 수지의 균질성에서 떨어지기 때문에 가능한 스크류의 강성도를 증

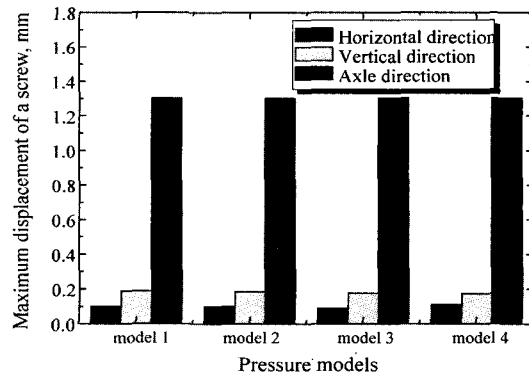
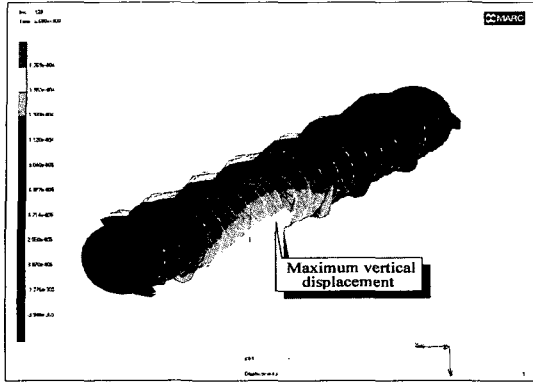
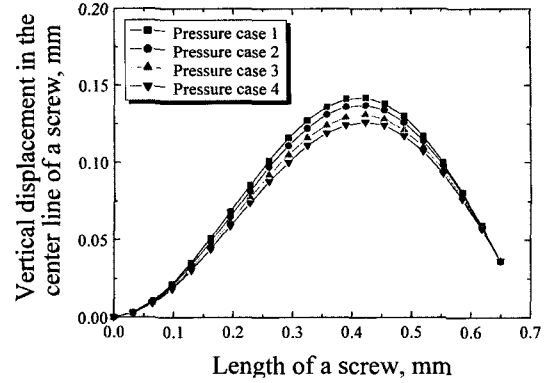


Fig. 6 Maximum displacement of a screw for given three temperature profiles



(a) Displacement distribution



(b) Vertical displacement profiles for four pressure models

Fig. 7 Displacement distribution of a screw as a function of a screw length

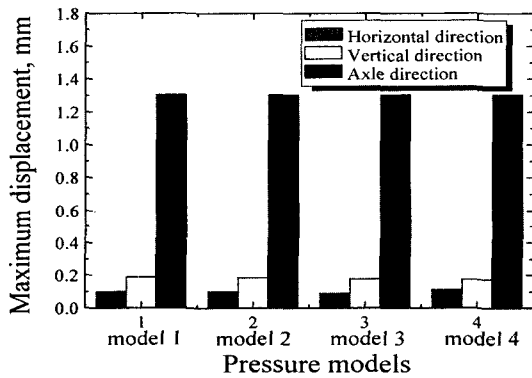


Fig. 8 Maximum displacement of a screw for given four pressure profiles

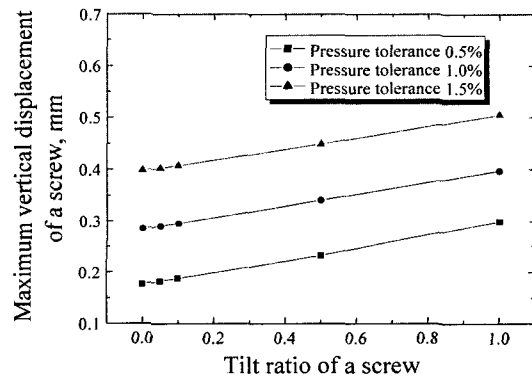


Fig. 9 Maximum vertical displacement of a tilted screw for given three pressure difference ratios

가시키면서 스크류의 처짐량을 줄이려는 최적설계와 소재 개발이 필요하다.

그러나, Fig. 2의 온도분포에 의한 처짐량 해석 결과로 제시된 0.037mm와 0.028mm는 초기의 기준 반경간극 0.2mm 이내에 충분히 들어가기 때문에 스크류 선단부의 온도를 높게 유지하면서 사출하는 210℃의 경우가 보다 우수한 사출 성형기의 작동조건이 된다.

Fig. 6은 스크류에 작용하는 Fig. 2의 3가지 온도모델에 대한 스크류의 수직, 수평, 길이방향으로 발생된 열팽창 변위량을 보여주고 있다. 스크류에 작용하는 온도분포가 150~210℃인 온도모델 1의 경우는 수평방향으로 최대 변위량 0.0513mm가 왼쪽으로 발생하고, 수직방향으로는 0.0865mm

의 변위량이 아랫쪽으로 발생하였다. 그러나, 온도분포가 110~210℃인 온도모델 2의 경우는 수평방향으로 0.044mm의 최대 변위량이 왼쪽으로, 수직방향으로 0.0814mm의 최대 변위량이 아랫쪽으로 각각 발생하였다. 또한, 110~170℃인 온도모델 3의 경우는 수평방향으로 0.0371mm의 최대 변위량이 왼쪽, 수직방향으로 0.0664mm가 아랫쪽으로 각각 발생하였다. 그러나, 스크류에 작용된 3가지 온도모델에 대하여 길이방향으로 발생한 변위량은 수직방향이나 수평방향의 변위량에 비해 1.293mm, 1.175mm, 0.974mm로 크게 발생하였지만, 수지의 용탕공간이 상대적으로 크기 때문에 길이방향의 변위량은 길이방향으로는 극미한 영향을 준다. 따라서, 스크류와 실린더의 접촉거동에 미치는 영향

이 작다. 그러나, 스크류에서 발생된 수평방향이나 수직방향으로 발생된 변위량은 실린더와 간섭이 발생하면서 마찰과 마멸을 증대시키기 요인으로 작용하기 때문에 변형량 발생을 적극 억제해야 한다. 이들 해석결과에 의하면 스크류 계량부의 온도보다 스크류의 열팽창에 가장 큰 영향을 미치고 있다는 사실을 알 수 있다.

Fig. 7(a)는 스크류에 작용하는 온도분포가 150~210℃ (모델 1)이고, 스크류의 경사비가 0.01로 양호하며, 스크류에 작용하는 압력분포가 Fig. 3(a)에서 제시한 압력모델 3에 대해 스크류의 접촉표면에서 발생한 수직방향의 최대 변위량 분포를 보여주고 있다. 스크류에서 발생된 최대 변위량은 압력이 최대가 되는 지점보다 약간 뒤쪽인 계량부의 시작부근에서 발생하고, 사출압의 영향을 받아서 아랫 방향으로 약간 변형되고 있음을 Fig. 7(a)에서 알 수 있다. Fig. 7(b)는 스크류에 작용하는 온도가 150~210℃인 온도모델 1에서 스크류의 경사비가 0.01이고, 스크류의 길이방향을 따라서 작용하는 압력분포가 Fig. 3(a)에서 제시한 4가지 모델과 같을 경우에 스크류의 접촉표면에서 발생한 수직방향의 변위량 분포를 스크류의 중심축에 대하여 제시한 결과이다. 이들 해석결과에 의하면, 최대압력 발생점은 스크류의 선단부로 갈수록 수직방향의 변위량이 오히려 감소하고 있음을 알 수 있고, 스크류의 압축부 후반부와 계량부 전반부에서 가장 큰 변위량이 발생하고 있다.

Fig. 8은 Fig. 7의 해석조건을 사용한 결과로 스크류의 접촉표면에서 발생한 수평, 수직, 길이방향의 최대 변위량을 제시하고 있다. 즉, 수평방향으로 발생한 변위량은 압력분포가 Fig. 3(a)의 압력모델 4인 경우가 0.11mm로 가장 크게 발생하였고, 압력모델 1인 경우는 0.099mm로 그 다음으로 크며, 압력모델 3인 경우는 0.0884mm로 가장 작게 나타났다. 또한, 수직방향으로 발생한 변위량은 압력모델 1인 경우가 0.1871mm로 가장 크게 발생하였고, 압력모델 2인 경우는 0.1831mm, 압력모델 3인 경우는 0.1769mm, 압력모델 4인 경우는 0.1726mm가 각각 발생하였다. 그러나, 스크류의 길이방향으로 발생한 변위량은 모든 압력분포에 대해 1.302mm로 일정하다는 사실은 스크류에 작용하는 압력은 수직이나 수평방향 변위량에 큰 영향을 미칠 수 있지만, 길이방향으로는 온도에 따른 불균일성이 큰 문제라는 사실이다.

결국, 스크류에서 발생된 사출압의 최고값이 스크류의 선단부로 갈수록 수평방향과 수직방향의 변위량이 낮아지거나 완화된다는 사실에 주목할 필요가 있다. 또한, 스크류의 길이방향 변형량은 사출압력에 의존하는 것이 아니라 스

크류에 작용하는 작동온도에 크게 의존하기 때문에 모든 사출압에 대하여 같은 변위량 1.3mm가 제시되었다. 이러한 사출압에 따른 변위량 해석에서 스크류가 실린더에 직접 접촉하여 마멸량 발생에 영향을 미치는 수직방향이나 수평방향의 변위량은 사출압의 최고점이 스크류의 선단부로 갈수록 유리하지만, 수평방향으로 발생한 변위량을 함께 고려한다면 Fig. 3(a)의 압력분포 모델 3이 가장 적합한 압력분포라는 사실을 알 수 있다.

실린더 내부에서 발생된 사출압이 불균일해지면 스크류의 윗면과 아랫면에 가해지는 압력차가 Fig. 3(b)에서 제시한 것처럼 서로 달라진다. 스크류의 최고 사출 압력차가 발생될 경우에 스크류의 경사비가 수직방향으로 발생하는 최대 변위량에 미치는 영향을 Fig. 9에서 보여주고 있다. 해석결과에 따르면, 스크류의 경사비가 증가할수록 수직방향으로 발생한 스크류의 최대 변위량은 선형적으로 증가한다. 여기서 스크류의 윗면과 아랫면에서 발생된 사출 압력차 비율이 0.5% 이상되면 스크류와 실린더 사이의 기준 반경간극 0.2mm를 초과하기 때문에 스크류 표면이 실린더 내경측과 직접 접촉하게 되어 마멸이 발생할 수 있다. 그러나, 스크류의 윗면과 아랫면의 압력차 비율이 0.5%이고, 경사비가 0.5인 경우 스크류의 선단부에서 0.23mm의 처짐량이 발생하였다. 이 때에 발생된 최대 변위량 0.23mm는 스크류의 반경간극 0.2mm를 초과하였기 때문에 스크류 표면에서는 마멸이 발생하게 된다. 이러한 해석결과는 스크류에 작용하는 불균일한 압력차 비율이 대단히 중요한 영향을 미치고, 동시에 스크류의 경사 기울기도 스크류의 마찰특성에 중요한 설계 변수라는 사실이다.

요약하면, 스크류와 실린더의 미끄럼 마찰면이 직접 접촉하게 되면 접촉지점에서는 국부적으로 발생된 마찰열에 의하여 스크류는 마찰손상을 받다가 마멸을 발생하게 된다. 스크류가 작동온도나 사출압에 의해 불안정해지면 스크류의 거동량이 증가하면서 마찰 토크의 증가와 마멸을 일으키는 원인으로 작용하므로 스크류는 최적화 설계를 해야 한다. 결국, 스크류의 거동특성 안정성을 확보하기 위해서는 다음의 사항을 고려해야 한다.

- ① 스크류의 반경간극을 가능한 크게한다.
- ② 스크류의 경사비를 최대한 작게 하여 스크류의 진직도를 균일하게 유지함으로써 동적균형을 확보해 준다.
- ③ 스크류에 작용하는 압력차를 작게 하여 사출압의 원주방향 평형을 맞추도록 한다.
- ④ 스크류와 실린더의 열적 강성도가 큰 소재를 사용한다.
- ⑤ 스크류의 작동조건에 적합한 최적화 설계를 통하여 변

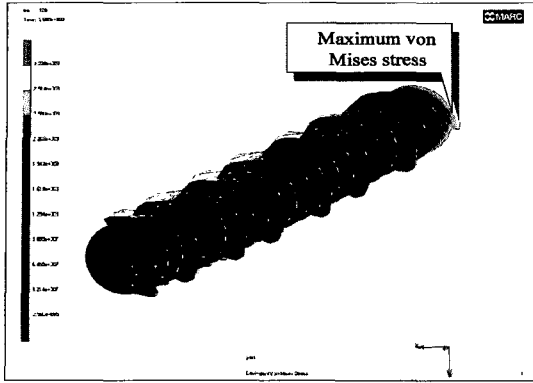


Fig. 10 von Mises stress distribution of a screw

형거동이 작도록 한다.

3.2 응력 해석

Fig. 10은 스크류의 온도가 150~210℃이고, 스크류의 경사비가 0.01이며, 사출압이 Fig. 3(a)에서 제시한 압력모델 3과 같을 때에 스크류에서 발생한 von Mises 응력 분포도를 보여주고 있다. 스크류의 우측단에 설치된 베어링에 의해 지지되고 있는 끝단에서 von Mises 최고응력 324.8MPa이 발생하고 있다.

이들의 결과를 요약한 Fig. 11에 의하면, 실린더 내부에서 발생한 사출압이 불안정해지면서 스크류의 윗면과 아랫면에 가해지는 압력차 비율이 Fig. 3(b)와 같이 제시될 때 스크류의 경사비 변화에 따른 최대 응력값을 보여주고 있다. 스크류와 실린더의 축중심이 평행한 경우, 즉 경사비 0을 기준으로 하고 스크류의 윗면과 아랫면의 압력차 비율이 0.5%, 1%, 1.5%일 때에 스크류에서 발생한 von Mises 최고응력은 323.7MPa, 333.2MPa, 343.1MPa로 증가한다. 이것은 스크류에 작용하는 불균일 압력차 비율이 증가할수록 스크류에 걸리는 응력은 크게 증가하여 스크류 지지부에 대한 부하를 걸게 된다. 또한, 스크류의 경사도가 증가할수록 스크류에 걸리는 von Mises 응력은 선형적으로 완만하게 증가한다는 것은 스크류에 작용하는 압력차에 의한 영향에 비해 상대적으로 작다는 사실이다.

4. 결론

본 연구에서는 스크류에 작용하는 온도분포와 압력분포

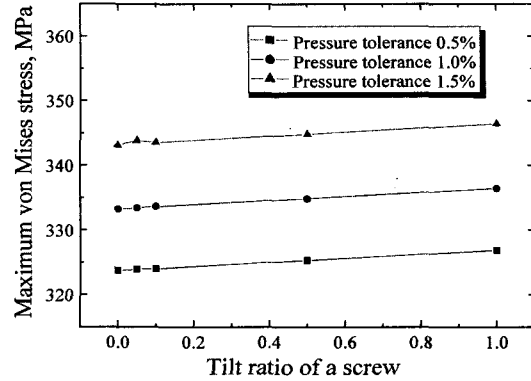


Fig. 11 Maximum von Mises stress of a tilted screw for given three pressure difference ratios

가 스크류의 변형량 거동 및 응력에 미치는 영향에 대해 유한요소법으로 해석하였다.

스크류에 작용하는 온도의 균일한 분포보다는 특히 계량부에서 발생하는 온도를 가능한 낮추는 것이 열팽창에 의해 발생하는 수직과 수평방향의 변위량이 감소되고, 스크류에서 발생된 압력분포의 최대 압력이 발생하는 위치가 스크류의 선단부로 이동할수록 사출압력에 의한 처짐량이 감소한다. 스크류와 실린더와의 마찰작용에 의해 발생하는 열탄성 마멸은 온도에 의한 열팽창보다 불균일 압력차 비율에 의해 발생하는 처짐량이 더 크게 영향을 미치며, 불균일한 압력차 비율이 0.5% 이상되면 경사도에 관계없이 접촉에 의한 마멸이 발생하게 된다. 온도변화가 스크류의 길이방향 변위량에 큰 영향을 미치지만, 실제의 사출기 성능에는 중요하지 않다. 그러나, 사출 압력차 비율에 의한 불안정성이 발생되면 수평방향과 수직방향의 변위량에 직접 영향을 미치게 되고, 이것은 스크류와 실린더가 상호간에 간섭을 일으키게 되어 마멸을 직접 일으키는 원인으로 작용한다.

스크류의 압력차 비율이 작아도 경사도가 증가하면 처짐량 증가로 마멸이 발생할 수도 있다. 따라서, 스크류에 작용하는 압력을 균일하게 하기 위하여 스크류의 온도분포를 균일하게 하고, 플라스틱 수지가 균일하게 용융되어 이송하도록 해야 하며, 스크류의 경사비는 스크류와 베어링의 강성도를 크게 설계하여 회전 스크류의 강성도를 확보해야 한다.

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) D. Todd, "Heat Transfer in Twin Screw Extruders", ANTEC '88 pp. 54~58, 1988.
- (5) O. Amanol and S. Utsugi, "Temperature Distribution of Polymer Melts along the Screw Axis in Injection Molding", ANTEC '87 pp. 250~251, 1987.
- (6) "Plasticating Components Technology", Spirex Co., 1992.
- (7) MARC Analysis Research Corporation, California, USA, 1994.