

# 유한요소법을 이용한 다중날 사출기 스크류의 열거동 특성 연구

조승현 · 이영숙 · 김성원 · 김청균  
홍익대학교 트라이볼로지 연구센터

## A Study on Thermal Behavior Characteristics of Multi-flight Screw in Injection Molding Machine by FEM

Seung Hyun Cho · Young Suk Lee · Sung Won kim · Chung Kyun Kim  
*Tribology Research Center, Hongik University*

**Abstracts** - Screw in injection molding machine is affected by heat flux, pressure on inside barrel, geometry of screw including flight number, pitch and flight angle. Volumetric efficiency increases as the flight number increases, but it didn't show steady tendency according to helix angle of the flight. Heat flux from heating pad and injection pressure play a very important role on the thermal behavior characteristics. The increased number of multi-flight is merits and demerits for a screw efficiency. So, we have to optimize flight number of the screw considering temperature, displacement, distortion and stress of the screw.

**Key Words** : screw, multi-flight, injection, thermo-mechanical characteristics, FEM

### 1. 서론

플라스틱 수지의 가소화를 스크류로 하는 방식은 플랜저 방식보다 이전에 개발되었지만 사출기구에 스크류 방식을 도입하는 것이 플랜저와 비교해서 구조가 복잡하기 때문에 개발할 당시에는 산업계의 관심을 끌지 못했다. 그러나, 플라스틱 수지가 고점도이고 열안정성이 나쁜 경우의 소재를 성형할 필요성이 증가함에 따라 용융상태가 균일하고 양호한 플라스틱 수지를 얻을 수 있는 스크류에 대한 관심이 높아지기 시작하였다. 1958년 서독의 하노버에서 개최된 국제 플라스틱 쇼에 서독의 에커르트 지글러사와 안켈 베르크사가 처음으로 스크류를 사용한 사출성형기를 출품한 이래 스크류에 대한 기술개발이 많이 진행되고 있다.

Gore et al.이 1953년 스크류의 최적 헬릭스 각이 60~72°임을 발표한 이후로 Roberts와 Willis[1], Rehkuger와 Boyd[2]는 실험에 의해 스크류의 동적 유사성 등을 해석하였고, 1964년

에 Roberts[3]는 폴리머 용제의 유동 운동의 영향에 대하여 고찰하였다.

사출기에 사용되는 폴리머는 용융시키기가 어렵고, 특히 수지의 컬러를 맞추기가 어렵다. 토출되는 용융수지의 양을 증가시키기 위해 스크류의 회전속도를 증가시키면, 과도한 전단력과 높은 온도가 발생하게 된다. 또한, 고체의 수지가 베럴과 스크류의 표면과 미끄럼 마찰을 일으켜서 스크류의 기계적 특성을 약화시키고, 가열기에 의해 스크류에서 발생하는 열팽창에 의해 스크류의 동적 특성이 저하된다. 따라서 스크류의 사용 목적과 사용하는 수지의 종류에 따라 작업 조건을 최적화하는 것이 바람직하다.

Roberts와 Willis, Roberts에 의해 스크류의 성능을 향상시키기 위해서 스크류의 형상과 폴리머 수지의 특성을 고려하여 해석을 수행하고 있는데, 스크류가 어떠한 형상을 가지더라도 수지의 이동특성을 예측할 수 있는 이론이 발전되어 왔다.

따라서, 본 논문에서는 이와 같은 이론을 이용

하여 스크류의 토출효율을 계산하고, 스크류 날의 개수 변화에 따른 열적-기계적 거동 특성을 FEM을 이용하여 해석하였다.

## 2. 모델링 및 해석조건

Table 1은 본 해석에 사용된 스크류의 재료로서 가장 일반적으로 널리 사용되는 AISI 4140 스틸과 사출 베럴의 재료로서 사용되고 있는 AISI E4340 H 스틸의 물리적, 열적 특성을 보여주고 있다. 본 논문의 해석에 사용한 AISI 4140이 강도가 우수하고 화염 강화(flame hardened) 또는 표면강화 용접(hardsurface welded)을 할 수 있어서 압출 스크류(extrusion screw)나 사출 스크류(injection screw)의 80% 이상에 이용되고 있다. 스크류는 베어링부와 스크류 헤드를 제외하고 온도와 압력에 직접적으로 영향을 받는 피드부, 트랜지션부, 미터링만을 모델링하였는데 외경이 32mm이고 길이가 625mm인 소형 스크류이다.

다중날 스크류의 열적 거동특성을 해석하기 위해서 스크류의 외경과 미터링 깊이는 균일하다고 가정하였고, 스크류와 베럴의 내부표면에 가해지는 압력은 Fig. 1의 압력 분포가 스크류 표면에 수직하게 가해지며, 베럴에 장착된 히터에 의한 열량은 Table 2와 같다. 이와 같이 스크류의 표면에 적용되는 기계적 압력과 열량을 동시에 고려하여 유한요소해석 프로그램 MARC로 열-기계적 복합문제를 해석하였다[4].

Fig. 1은 해석을 위하여 사용한 사출기 내의 압력분포를 보여주고 있다. 베럴 내부의 압력분포는 용융수지의 이송이 주된 목적으로 수지의 공급부에서는 미터링 깊이가 크고, 날의 간격이 크기 때문에 압력이 낮고, 수지의 미터링부에서는 수지의 토출을 위해 미터링 깊이가 낮고, 날의 간격을 작게 하여 압력을 높게 된다. 이때 사출 스트로크의 끝이나 비왕복 밸브의 앞쪽에서는 대단히 높은 압력이 발생하는데, 일반적으로 137.9MPa까지 올라가고 206.84MPa까지 높아지는 경우도 있는데, 본 해석에서는 최대 압력이 17.2MPa이 발생한다. 한편 수지 용제의 온도가 균일하지 않으면 압력도 변하게 되는데 일반적으로 낮은 온도에서 압력이 높고 높은 온도에서 압력이 낮다. 이와 같은 압력 분포가

내부에서 균일하지 않게 되면 스크류의 동적 거동에 부정적인 영향을 미치게 된다. 그러나, 본 논문에서는 사출기 내부의 압력이 대칭적으로 균일하게 분포하고, 수지 용제의 온도변화에 따른 압력분포만이 변한다는 가정을 하여 압력의 영향을 해석하였다.

Fig. 2는 피치길이가 스크류의 성능에 미치는 영향을 해석하기 위한 스크류 날의 개수를 나타내고 있다. 그림에서 보여주는 것과 같이 스크류 날의 개수가 증가하게 되면 피치길이가 짧아지는 효과가 발생하고, 이것은 스크류의 체적효율, 플라스틱 수지 토출량 등에 영향을 미치게 된다.

Table 1. Physical and thermal properties of screw

Material type	AISI 4140 Steel
Young's modulus, MPa	205,000
Tension strength, Yield, MPa	400
Poisson's ratio	0.25
Mass density, kg/m <sup>3</sup>	7,850
Thermal expansion coefficient at 20°C, $\mu\text{m}/\text{m} \cdot \text{K}$	12.2
Thermal conductivity, W/m · K	42.6
Specific heat, J/kg · K	473

Table 2. The inflow of heat flux to the screw

Position Heat flux type	Metering section	Transition section	Feed section
A	7.05KW	6.0KW	5.25KW
B	4.70KW	4.0KW	3.50KW
C	3.76KW	3.2KW	2.80KW
D	2.35KW	2.0KW	1.75KW

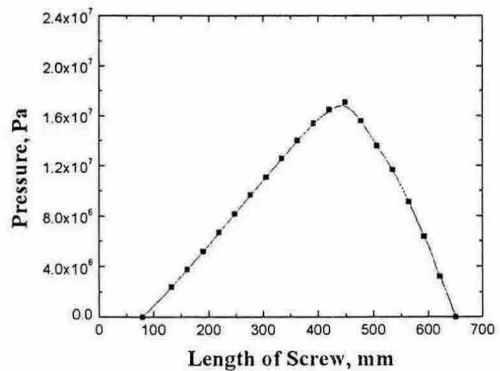


Fig. 1 Pressure distribution of injection barrel

체적효율과 토출량은 스크류 날의 각도와 함께 고려해야 하는데, 일반적으로 스크류 날의 개수가 증가할수록 체적효율은 증가하고, 수지 토출량은 스크류 날의 각도가 약 40~43° 이하에서는 날의 개수가 적을수록 많지만 날의 각도가 약 43° 이상이 되면 각도가 증가할수록 일정한 경향이 나타나지 않고 복잡한 양상이 된다[5].

### 3. 결과

Figs. 3~4는 스크류의 거동특성에 자중과 내부 압력, 히터에 의한 열 유입량이 변위량과 응력에 미치는 정도를 나타낸 그림이다. Fig 3은 스크류의 토출부에서 발생한 최대 변위량을 보여주고 있는데, 수직방향 변위량(처짐량)과 수평방향 변위량은 자중에 의해 가장 많이 발생하고, 길이방향의 변위량은 온도에 의해 가장 많이 발생하였다. 이것은 배럴과의 간극에 의한 간섭량을 설계할 때 중요한 고려사항이 된다. 스크류에 발생한 응력에 미치는 영향은 온도의 영향이 가장 크고, 다음으로 압력이 크며 자중에 의한 영향이 가장 낮게 나타났다. 그러나 이것은 스크류에 가해지는 압력이 균일하다는 가정하에 수행된 결과로서 실제 플라스틱 수지의 불균일성으로 인해 배럴 내부의 압력이 불균해지면 압력의 영향은 급격히 높아진다.

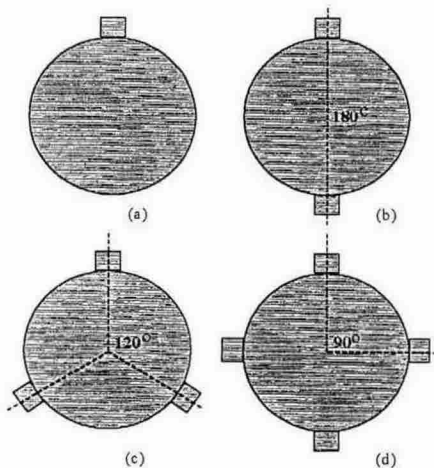


Fig. 2 Cross sections of the screw (a) Single flight, (b) Double flight, (c) Triple flight, (d) Quadruple flight

Figs. 5~6은 열량조건이 Table 2의 A인 경우이고, 스크류에 가해진 압력조건이 Fig. 1과 같을 때 블레이드 날의 각도는 65°이고, 블레이드 날의 개수가 2개인 경우의 결과이다. 즉, 스크류에서 발생한 온도분포와 스크류 날의 개수에 따라 스크류에서 발생한 최고 온도를 보여주고 있다. Fig. 5에서 알 수 있는 바와 같이 미터링부의 스크류 날에서 최고 온도 268°C가 발생하고 트랜지션부에서 264°C가 발생했으며, 피드부에서 최저온도 179°C가 각각 발생하였다. 그리고 Fig. 6에서 나타난 것과 같이 스크류 날의 개수가 1개에서 4개로 증가하면, 동일한 히터의 열유입량 조건에서 최고 온도가 258°C에서 288°C로 무려 30°C가 증가함을 알 수 있다.

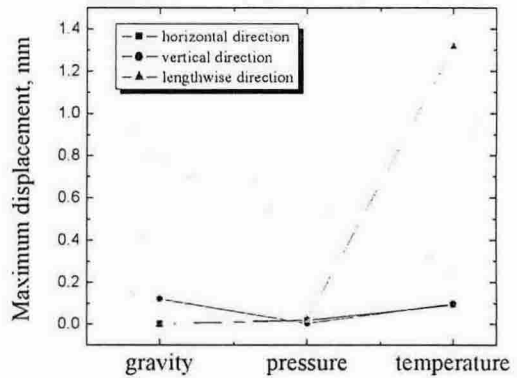


Fig. 3 Comparison between factors affect on maximum displacement of the screw(Heat flux types is A, Flight number is 2)

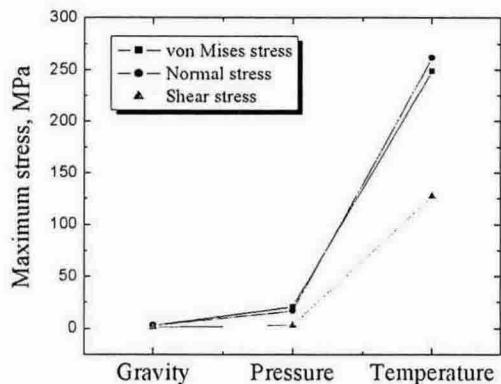


Fig. 4 Comparison between factors affect on maximum stress of the screw(Heat flux types is A, Flight number is 2)

그러나, 실제 사출기에서는 스크류에 가해지는 열은 히터에 의한 가열뿐만 아니라 플라스틱이 스크류와 마찰에 의해 발생하는 전단력 때문에 크게 발생하는데, 플라스틱의 액화가 시작되는 트랜지션부에서 가장 많은 마찰열이 발생한다. 이렇게 스크류와 플라스틱 사이의 마찰에 의한 전단력으로 발생하는 열은 플라스틱의 점도가 감소하면서 다시 전단력이 감소함으로써 자동적으로 발열량은 억제된다. 한편 히터에 의한 내부 온도가 너무 높아지면 플라스틱의 과용융 상태가 되어 스크류와의 마찰효과가 감소하여 수지의 이송력이 감소하게 된다. 즉, 성형온도가 높은 폴리카보네이트과 같은 플라스틱은 히터에 의한 가열이 필요하지만 마찰계수가 높은 폴리

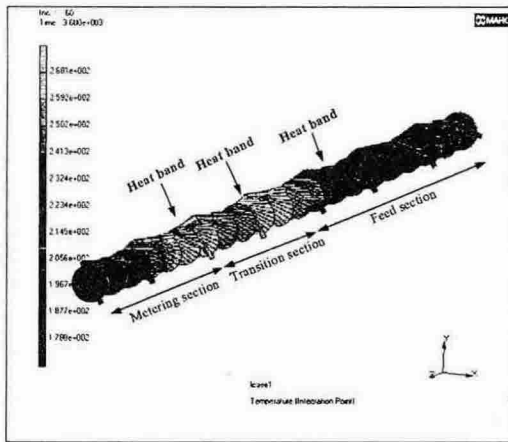


Fig. 5 Temperature distributions on the screw (Heat flux types is A, Flight number is 2)

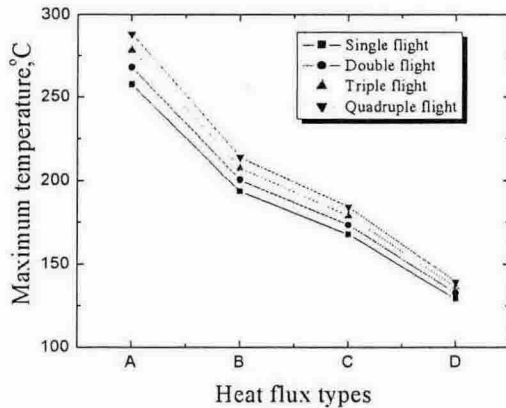


Fig. 6 Temperature distributions of the screw as heat flux types of the heater bands with variable flight numbers

틸렌과 메타크릴과 같은 소재는 전단력에 의한 마찰열이 많이 발생하기 때문에 히터에 의한 가열의 필요성은 낮다.

그러므로 동일한 히터에 의한 가열조건은 플라스틱 소재의 특성에 따라 조절해야 하는데 스크류 날의 개수가 증가하면 스크류의 온도가 높아지기 때문에 필요한 내부온도를 얻기 위해 히터에서 가하는 열량을 낮출 수가 있어서 에너지 절감에 효과적이다. 또한, 위에서 설명한 바와 같이 성형온도가 높거나 마찰계수가 낮아서 플라스틱과 스크류와의 마찰력에 의한 마찰열을 기대할 수 없는 소재인 경우에 특히 적합하다.

Fig. 7은 스크류의 자중에 의해 발생하는 처짐량을 스크류 날 개수에 따라 나타낸 그림이다. 날의 개수가 1개인 경우는 0.1272mm의 처짐량이 발생하였으나 날의 개수가 증가할수록 스크류의 무게가 감소하기 때문에 처짐량은 감소하고 있다. 본 연구의 대상인 소용량 사출기의 스크류는 큰 문제가 되지 않지만 사출기의 용량이 증가할수록 스크류의 자중에 의해 발생하는 처짐량은 안정적인 스크류의 구동에 매우 중요한 설계요소가 될 수 있다.

Fig. 8은 스크류의 히터에서 가해지는 열량이 Table 2의 A와 같고, 압력조건이 Fig. 1과 같을 때 날의 각도가 65°이며 스크류 날의 개수가 2개일 때 스크류에서 발생한 수직방향의 변위량 분포를 보여주고 있다. 스크류는 날 형상의 영향으로 시계방향으로 뒤틀리는 거동을 나타내기 때문에 최대 수직방향 변위량(처짐량)은 스크류 토출부의 오른쪽 끝단에서 발생하고 있다. 이와 같이 스크류는 가해지는 압력과 열에 의해 시계방향으로 뒤틀리면서 길이방향으로 늘어나는 변형 패턴을 보여주는데, 시계방향으로 발생한 뒤틀림 각을 나타낸 그림이 Figs. 9~10이다.

Fig. 9는 스크류의 히터에서 가해지는 열량이 Table 2의 A와 같고, 압력조건이 Fig. 1과 같을 때 날의 각도가 65°이며 스크류 날의 개수가 1~4개일 때 스크류의 토출부 끝단에서 발생한 뒤틀림각을 나타낸 그림으로서 날의 개수가 1개일 때 시계방향으로 약 9.2°의 뒤틀림각이 발생한 후 날의 개수가 증가할수록 뒤틀림각이 증가하여 날의 개수가 4개일 때는 약 10.9°의 뒤틀림 각도가 발생하였다. 따라서 스크류 날의 개수가 증가할수록 스크류는 시계방향으로 큰 전

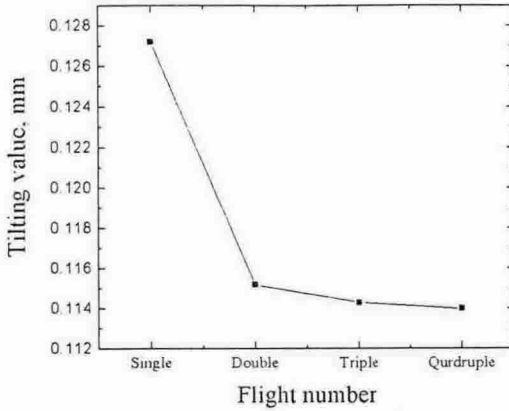


Fig. 7 Maximum tilting value of the screw with variable flight numbers(Heat flux type is A)

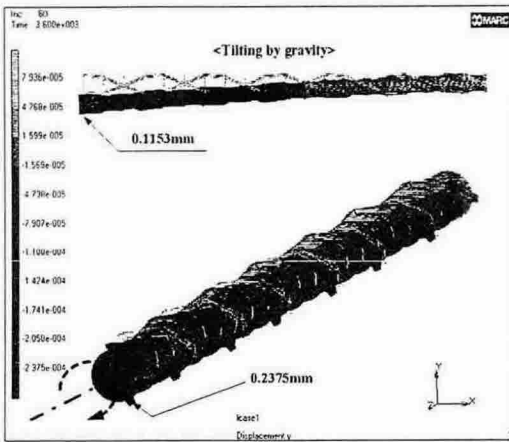


Fig. 8 Displacement distributions to vertical direction of the screw(Heat flux types is A, Flight number is 2)

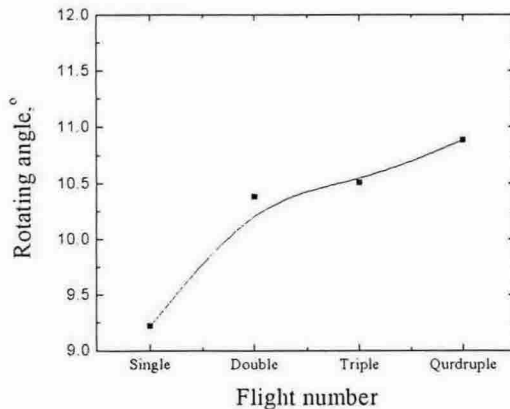


Fig. 9 Tilting angle of the screw with variable flight numbers(Heat flux type is A)

단력을 받아 불안정한 거동을 나타낸다.

Fig. 10 스크류의 가열패드에서 가해지는 열량이 Table 2의 A와 같고, 압력조건이 Fig. 1과 같을 때 블레이드 날의 각도가 65°이며 스크류의 날의 개수가 2개일 때 스크류에서 발생한 응력 분포를 스크류의 위치에 따라 보여주고 있다. 스크류가 고정된 피드부의 끝단에서 최대 267MPa의 응력이 발생하고 미터링부로 갈수록 응력이 감소하는데 가열패드에서 열량이 가해지는 위치에서 상대적으로 높은 응력이 발생한다. 그러나 트랜지션부와 미터링부를 확대한 그림에서 표시한 것과 같이 트랜지션부와 미터링부에서는 약 20~30MPa의 낮은 응력이 발생한다. 한편 스크류 표면의 응력분포는 원통표면에서 높은 응력이 발생하였고 스크류 날과 원통이 만나는 모서리에서 다음으로 높은 응력이 발생하였는데, 이것은 열량과 압력이 표면의 수직방향으로 가해지기 때문이며, 실제 플라스틱 수지가 스크류표면과 마찰에 의해 전단력이 발생하는 부분도 스크류 날과 날 사이의 공간으로서 플라스틱 수지와 마찰을 고려한다면 이와 같은 표면에서의 응력차는 더욱 확대될 것이다.

Fig. 11은 압력조건이 Fig. 1과 같을 때 블레이드 날의 각도가 65°이며 스크류의 날의 개수가 1~4개일 때 스크류에서 발생한 응력 분포를 히터에서 가해지는 열량의 종류에 따라 나타낸 그림으로서 히터에서 가해지는 열량이 작을수록, 날의 개수가 작을수록 발생한 응력은 높아지는 경향을 보이고 있다.

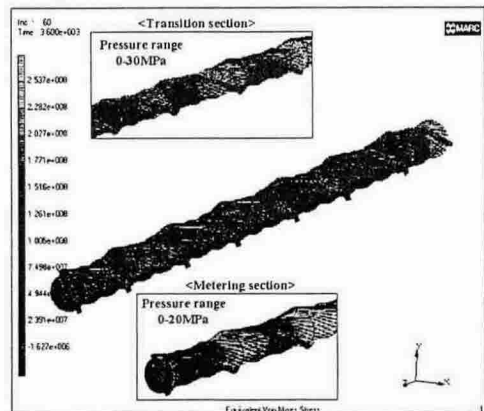


Fig. 10 von Mises stress distributions of the screw(Heat flux types is A, Flight number is 2)

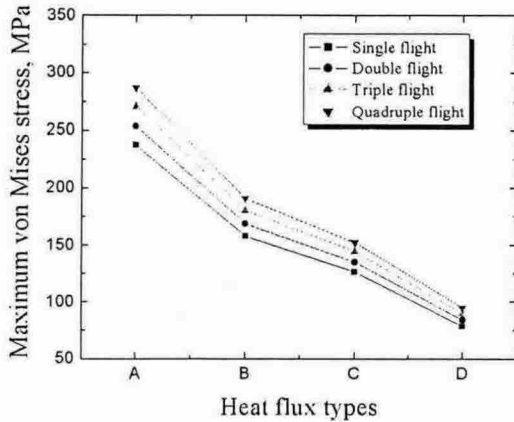


Fig. 11 von Mises stress distributions of the screw as heat flux types of the heater bands with variable flight numbers

#### 4. 결론

스크류의 열거동 특성에 미치는 요소를 살펴 보면 온도의 영향이 가장 크다는 것을 알 수 있다. 그러나 플라스틱 용융 수지가 불균일하여 베럴 내부의 압력이 불균일하게 되면 압력의 영향이 급격히 높아지게 되며, 스크류의 크기가 증가할수록 스크류의 무게에 의한 처짐량이 증가하기 때문에 베럴과의 간섭이 발생할 수 있으며, 스크류의 불안정한 회전거동에 의해서 플라스틱 수지의 용융이 불균일해 질 수 있음을 유의해야 한다.

스크류 날의 개수가 증가할수록 스크류의 온도가 증가하게 되는데 스크류의 온도가 증가하는 것은 동시에 장·단점이 될 수 있다. 히터에서 가해지는 동일한 열량에서도 스크류의 온도를 증가시킬 수 있기 때문에 적은 에너지로 같은

효과를 낼 수 있고, 플라스틱 수지의 이송력을 증가시킬 수 있다. 그러나 온도가 적정 이상으로 높아져서 플라스틱 수지가 과용융상태로 되면 플라스틱의 점도가 감소하여 오히려 이송력이 감소하고, 플라스틱 수지의 종류에 따라 성질이 변하는 경우도 있다. 따라서 플라스틱 수지의 특성과 작업조건에 따라 히터에서 가해지는 열량을 조절할 필요가 있다. 그리고 스크류 날의 개수가 증가하면 스크류의 무게가 감소하여 처짐량은 감소하지만 날의 표면에 가해지는 압력과 열에 의해 뒤틀림은 오히려 증가하게 된다. 또한, 날의 개수가 증가할수록 응력은 증가하며, 체적효율은 날의 개수가 증가할수록 높아지지만 토출량은 날의 각도에 따라 달라진다.

이와 같이 스크류는 체적효율, 토출량, 플라스틱 수지의 특성, 플라스틱 수지 용융액의 균질성, 변위량(거동)특성 등을 종합적으로 고려해서 스크류 날의 개수를 최적화해야 한다.

#### 참고문헌

- [1] A.W. Roberts, A.H. Willis, Proc. Inst. Mech. Eng. 176, 1962.
- [2] G.E. Rehkuger and L.L. Boyd, Trans. Am. Soc. Agric. Eng. 98, 1962
- [3] A.W. Roberts, Proc. Inst. Mech. Eng. 178, 1964.
- [4] MARC Analysis Research Corporation, Computer Program MARC, California, USA, 1998.
- [5] 최동열, 조승현, 김청균, "다중날을 가진 스크류의 최적화 설계," 한국윤활학회 춘계학술대회, pp.248~256, 2001.