

## Optimum Design of the Screw extruder using Thermo-mechanical Analysis

Seung Hyun Cho, Chung Kyun Kim  
Tribology Research Center, Hongik University

**Key Words:** Screw, Heat flux, Helix angle, Flight, Throughput efficiency, Geometry factor, FEM

**Abstract**—Screw conveyors are used extensively in industrial for conveying and elevating materials. Despite their apparent simplicity, the mechanics of the conveying action is very complex. so many engineers depend on experiential data. Capacities of screw are pumping, steady flow of polymer melts, steady volumetric throughput etc. they are affected by geometry of screw, heat flux, pressure on inside barrel, rotating velocity, friction coefficient at screw surface etc. by computation volumetric efficiency increases as rotating velocity increases and decreases as friction coefficient increases. also it decreases with short pitch length. and double flight screw is more effective than single flight screw. The temperature of polymer melts by heating pad and injection pressure play a very important role in the injection molding machine. so in this paper we analyze thermal distortion and stress of screw includes pressure and temperature distributions by finite element analysis to understand what design factors influence on volumetric throughput efficiency of the screw and thermo-mechanical characteristics of screw.

### Nomenclature

$C$  : Radial clearance, (m)

$D$  : Screw diameter, (m)

$D_i$  : Shaft diameter, (m)

$F_D$  : Frictional drag force due to sliding against barrel, (N)

$F_R$  : Resultant force due to sliding on screw surface, (N)

$F_T$  : Throughput Front force due to sliding on screw surface, (N)

$h_{av}$  : Average height of material on screw surface, (m)

$L$  : Flight length, (m)

$P$  : Screw pitch length, (m)

$R_o$  : Screw radius, (m)

$R_i$  : Shaft radius, (m)

$t$  : Thickness of screw blade, (m)

$Q$  : Volumetric throughput, (m<sup>3</sup>/s)

$V_A$  : Absolute velocity, (m/s)

$V_R$  : Relative velocity, (m/s)

$V_S$  : screw velocity, (m/s)

$\alpha$  : Helix angle of screw, °

$\beta$  : Angle of  $F_T$  to the throughput direction, °

$\lambda$  : Helix angle of particle, °

$\Gamma$  : non-dimensional screw geometry factor

$\omega$  : angular velocity of screw, (rev/s)

$\eta_F$  : Fullness efficiency

$\eta_R$  : Rotational efficiency

$\eta_V$  : Volumetric efficiency

$\mu_s$  : Friction coefficient at screw surface

## 1. 서론

Gore et al.은 1953년 발표한 논문에서 트랙, 압력, 누설 유동 등을 고려하여 단일 날 스크류의 트랙 및 펌핑 성능 등 사출 스크류의 원리를 해석하였다. 그의 해석에 따르면 압축을 위한 최적의 헬릭스 각은 약 60° 이지만 72° 일때가 폴리머 입자의 이동에 더 좋은 결과를 보여주면서 피치의 간격이 짧을수록 더 효과적임을 보여주고 있다[1]. 이후 1962년 Roberts와 Willis[2], Rehkuger와 Boyd는 실험에 의해 스크류의 동적 유사성 등을 해석하였고[3], 1964년 Roberts는 폴리머 용체의 유동 운동의 영향에 대하여 고찰하였다[4]. 이후 스크류를 해석하는데 실험뿐만 아니라 다양한 시뮬레이션 기법들이 사용되고 있는데[5-6], 3차원 모델을 통한 해석도 있지만 대부분은 2차원으로 간략화하여 해석을 수행하고 있으며 복잡한 호퍼 형상이나 수지의 마찰력과 밀도의 측정, 용융 메커니즘 등을 함께 연구하고 있다.

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 스크류의 사용 목적과 사용하는 수지의 종류에 따라 작업 조건을 최적화하는 것이 바람직하다.

한편 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 Roberts와 Willis[2], Roberts[4]에 의해 발전된 이와 같은 이론을 이용하여 스크류의 토출효율을 계산하고 헬릭스 각도와 피치길이 등 스크류의 형상의 영향 뿐만 아니라, 스크류의 뒤틀림, 온도 분포, 응력 등 열적-기계적 특성을 FEM을 이용하여 해석하였다.

## 2. 모델링 및 해석 조건

### 2.1 온도 및 압력

스크류는 고체상태의 수지를 용융상태로 만들어서 공급부에서 계량부로 전이시키기 위한 방안으로 배럴에 여러개의 가열패드(heating pad)를 설치하게 된다. 사출기 내부의 온도분포는 미세한 열전도에 의한 스크류 표면과 배럴의 안쪽 표면 온도의 변화를 제외하고는 대부분이 폴리머 용체의 온도에 영향을 받기 때문에 스크류의 위치에 따라 달라진다[7]. 따라서 본 논문에서는 table 1에서 보여주는 바와 같이 가열 패드에서 가해지는 열량이 4가지인 경우에 대하여 해석을 하였는데 피드부에서 가장 낮은 열량이 가해지고, 미터링부에서 가장 높은 열량이 가해진다.

Fig. 1은 해석을 위하여 사용한 사출기 내의 압력 분포 패턴을 보여주고 있다. 배럴 내부에서의 압력분포는 고체수지의 이송이 주된 목적으로

Table 1. 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

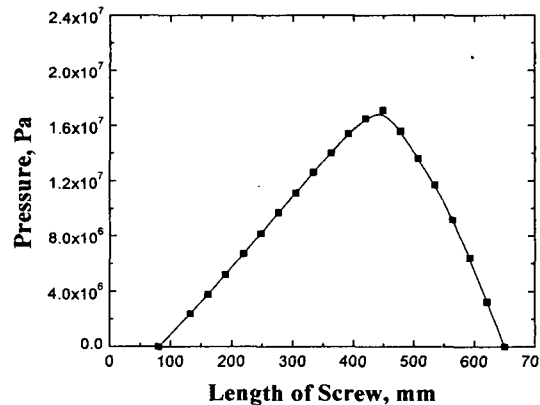


Fig. 1 Pressure distribution at inside injection barrel

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 영향을 미치게 된다. 그러나 본 논문에서는 사출기 내부의 압력이 대칭적으로 균일하게 분포하고, 수지 용제의 온도변화에 따른 압력분포만이 변한다는 가정을 하여 압력의 영향을 해석하였다.

## 2.2 소재

Table 2는 본 해석에 사용된 스크류의 재료로서 가장 일반적으로 널리 사용되는 AISI 4140 철과 사출 배럴의 재료로서 사용되고 있는 AISI E4340 H 철의 물리적, 열적 특성을 보여주고 있다. 스크류의 소재로는 이 밖에도 AISI 4340, Nitralloy 135-M, 300 Stainless, 17-4 PH Stainless 등 여러 가지가 사용되지만 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[8].

Table 2. Physical and thermal properties of screw and injection barrel

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

## 2.3 모델 및 경계조건

스크류의 외경과 미터링 깊이는 균일하다고 가정하였고, 스크류와 배럴의 내부표면에 가해지는 압력은 Fig. 1의 압력 분포가 표면에 수직하게 가해지며, Table 1의 열량을 스크류의 표면에 균일하게 적용하였다. 스크류의 형상이 대단히 복잡하고, 스크류의 표면에 적용되는 기계적 압력과 열량을 동시에 고려해야 하는 관계로 비선형 문제를 해석할 수 있는 유한요소 상용프로그램 MARC로 열-기계적 복합문제를 해석하였다[9]. Fig. 2에서 보여주는 바와 같이 스크류는 베어링부와 스크류 헤드를 제외하고 온도와 압력에 직접적으로 영향을 받는 피드부, 트랜지션부, 제미터링만을 모델링하였는데 외경이 32mm이고 길이가 625mm이다.

사출기 배럴은 일반적으로 L/D가 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 있는데 본 해석에서는 L/D 비 19.531:1을 사용하여 해석하였다[8].

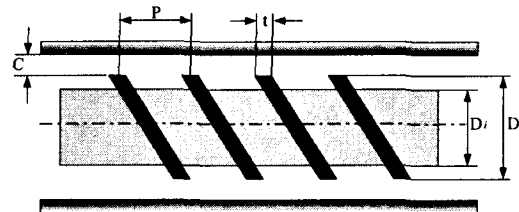


Fig. 2 analysis model of screw conveyor

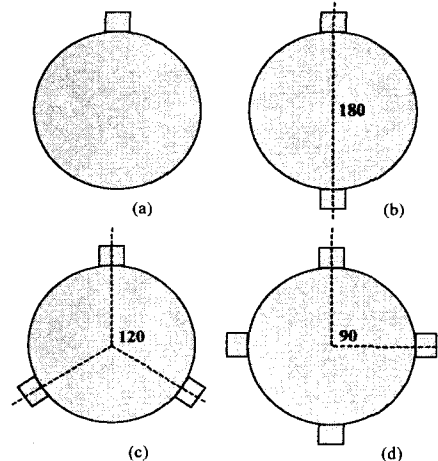


Fig. 3 Cross sections of the screw (a)Single flight, (b)Double flight, (c)Triple flight, (d)Quadruple flight

또한 피치길이가 스크류의 성능에 미치는 영향을 해석하기 위하여 Fig. 3과 같이 스크류의 블레이드 날의 개수를 1~4개인 모델을 해석하였다.

식(1)-(2)은 스크류에 의해 발생하는 수지의 토출량을 계산하는 수식으로서 토출량이 스크류의 형상, 회전속도 그리고 효율에 지배를 받는다는 것을 알 수 있다.

### 3. 결과 및 고찰

스크류의 회전운동에 의해서 폴리머 수지는 스크류의 블레이드 날의 방향으로 회전운동을 하면서 토출된다. 이와 같은 회전유동은 폴리머 수지와 블레이드 날 사이의 마찰에 의해서 발생하는 것으로서 블레이드 날의 각도의 변화에 영향을 많이 받는다. 또한 이것은 블레이드의 임의의 위치에서 반경방향으로 일정한 폴리머 수지의 접선 방향의 속도에 의해 결정된다. 이처럼 수평 스크류에 의한 폴리머 수지가 회전유동을 일으키는 정도를 나타낸 것이 회전유동 효율(Rotational efficiency)로서 다음의 식으로 표현된다.

$$\eta_R = \frac{2}{(\zeta_o^2 - \zeta_i^2)} \int_{\zeta_i}^{\zeta_o} \left\{ 1 - \frac{1 + 2\pi\mu_s \zeta}{4\pi^2 \zeta^2 + 1} \right\} d\zeta \quad (1)$$

이때  $\zeta = \frac{r}{P}$   $\zeta_o = \frac{R_o}{P}$   $\zeta_i = \frac{R_i}{P}$  으로 표현할 수 있고,  $\zeta = \frac{r}{P} = \zeta_{av}$  라고 가정하면 회전유동 효율은 다음과 같이 간단히 표현된다.

$$\eta_R = 1 - \frac{1 + 2\pi\mu_s \zeta_{av}}{4\pi^2 \zeta^2 + 1} \quad (2)$$

스크류의 회전운동에 의해 이동하는 폴리머 수지는 스크류의 축과 블레이드 날 사이의 공간에 의해 이동한다. 그러나 스크류가 회전운동을 하고 축과 블레이드 날 사이의 공간이 불균일해서 폴리머 수지가 이동하는 공간에 여유가 생기게 된다. 이렇게 블레이드 날 사이로 폴리머 수지가 얼마의 양으로 이동하는지를 나타낸 것이 충족 효율(Fullness efficiency)이다. 식 (3)에서 표현한 바와 같이 스크류의 충족 효율은 피치의 길이에 반비례하고 블레이드 날 사이에 있는 폴리머 수지의 평균높이에 비례한다.

$$\eta_F = \frac{h_{av}}{P} \quad (3)$$

폴리머 수지를 용융시킨 후 토출시키는 스크류의 효율을 체적 효율(Volumetric efficiency)이라고 하는데, 스크류의 체적 효율은 Roberts와 Willis[2]가 보여준 바와 같이 식(4)와 같이 회전유동 효율과 충족 효율의 곱으로 표현된다.

$$\eta_V = \eta_{VR} \eta_F \quad (4)$$

Fig. 4는 스크류 표면에서 마찰계수가 0.3으로 일정하다고 가정할 때 스크류의 블레이드 날의 각도와 스크류의 블레이드 개수에 따른 체적효율을 보여주는 그림이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 블레이드 날의 각도가 증가할수록 체적

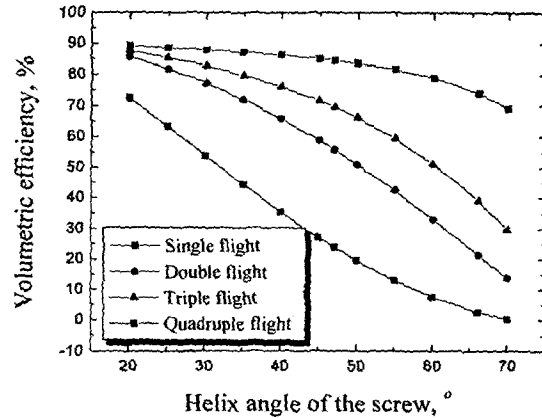


Fig. 4 Volumetric efficiency(friction coefficient is 0.3)

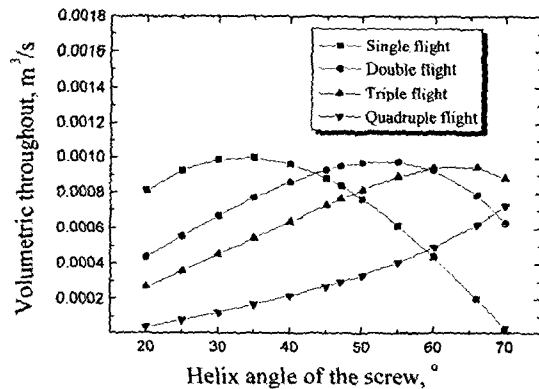


Fig. 5 Volumetric throughput with flight number variabilities(friction coefficient is 0.3)

효율은 감소하는데 블레이드 날의 개수가 4개일 때는 완만하게 감소하지만 1개인 경우는 급격히 감소함을 알 수 있다. 블레이드 날의 개수가 증가하는 피치길이의 감소를 의미하는 것이기 때문에 피치길이가 감소하면 체적효율이 증가한다는 것을 알 수 있다.

스크류에 의해 토출되는 폴리머 수지의 양은 식(5)-(6)에 의해 정의되는데 스크류에 의한 토출량이 스크류의 무차원 형상계수  $\Gamma$  와 회전속도  $\omega$  그리고 체적효율에 의존한다. 이때 토출량에 지대한 영향을 미치는 스크류의 무차원 형상계수에서 스크류의 외경과 베럴사이의 간극  $C$ 이며,  $C$ 는 폴리머 수지 최대 입자 크기보다 최소 1.5배 이상은 되어야 하는데, 이것은 폴리머 입자가 스크류나 베럴에 접촉하는 것을 방지하기 위함이다. 그리고 폴리머 입자가 스크류나 베럴에 접촉한다는 것은 에너지손실과 폴리머의 손실을 의미한다.

Fig. 5는 스크류의 블레이드 날의 개수와 스크류의 헬릭스 각도에 따른 토출량을 관찰한 그림으로서 블레이드 날의 개수가 1개일 때는 각도가  $35^\circ$  보다 크면 급격히 감소하는데 날의 개수가 증가할수록 토출량은 서서히 증가하여 블레이드 날의 개수가 4개인 경우는 각도가 증가할수록 토출량도 증가함을 알 수 있다. 즉 피치길이가 감소하면 반대로 토출량은 증가한다.

$$Q = \Gamma \omega D^3 \eta_V \quad (5)$$

$$\Gamma = \frac{1}{8} \left[ \left(1 + 2 \frac{C}{D}\right)^2 - \left(\frac{D_i}{D}\right)^2 \right] \left\{ \frac{P}{D} - \frac{t}{D} \right\} \quad (6)$$

Fig. 6은 열량조건이 table 1의 B인 경우이고 압력조건이 Fig. 1와 같을 때 블레이드 날의 각도가  $65^\circ$  이며 블레이드 날의 개수가 4개일 때 스크류에서 발생한 온도분포를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 미터링부의 블레이드 날에서 최고 온도  $214.1^\circ\text{C}$ 가 발생하고, 피드부에서 최저온도  $148.4^\circ\text{C}$ 가 발생하였다.

Fig. 7은 스크류의 가열패드에서 가해지는 열량이 table 1과 같고, 압력조건이 Fig. 1과 같을 때 블레이드 날의 각도가  $65^\circ$  이며 스크류의 블레이드 날의 개수가 1~4개일 때 스크류에서 발생한 온도분포를 블레이드 날의 길이에 따라 나

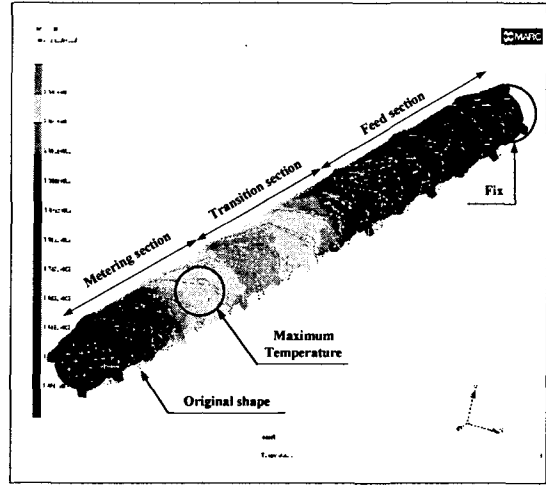


Fig. 6 Temperature distributions on the screw(Heat flux types is B, Helix angle is  $65^\circ$ , Flight number is 4)

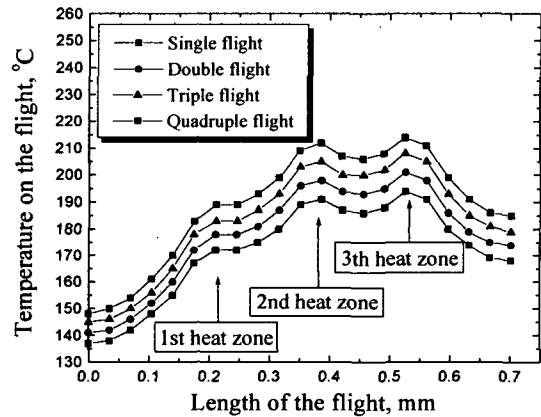


Fig. 7 Temperature distributions at the flight of screw with variable flight numbers

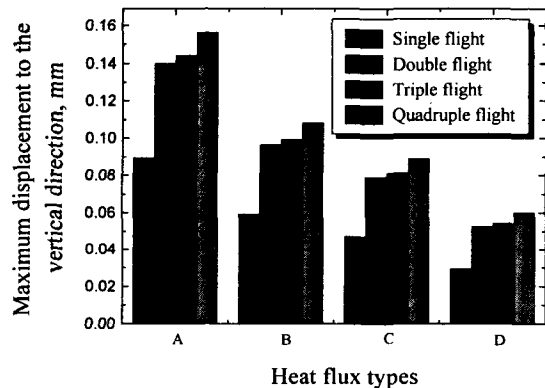


Fig. 8 Maximum displacement to the vertical direction of the screw as heat flux types of the heater bands with variable flight numbers

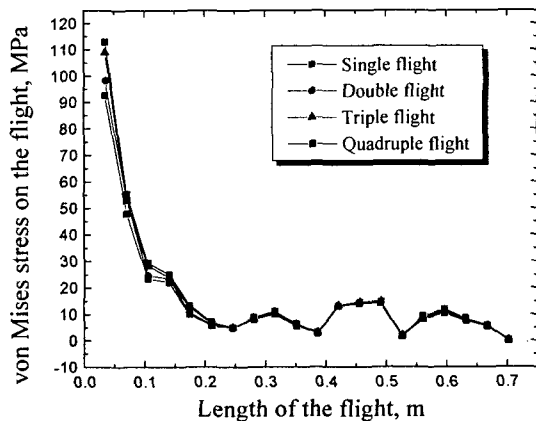


Fig. 9 von Mises stress distributions at the flight of screw with variable flight numbers

타낸 그림이다.

블레이드 날의 개수가 증가할수록 열량이 가해지는 표면적이 증가하기 때문에 온도가 높게 발생하는데 피드부에서 트랜지션부로 갈수록 온도가 증가하다가 미터링부의 끝단에서 온도가 감소하는 것을 알 수 있는데 스크류의 성능을 유지하기 위해서는 미터링부의 끝단에서 온도를 균일하게 유지해주는 것이 중요하다.

Fig. 8은 스크류의 가열패드에서 가해지는 열량이 table 1과 같고, 압력조건이 Fig. 1과 같을 때 블레이드 날의 각도가 65° 이며 스크류의 블레이드 날의 개수가 1~4개일 때 스크류에서 발생한 수직방향의 변위량 분포를 보여주고 있다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 같은 열량조건에서는 블레이드 날의 개수가 증가할수록 변위량은 커지는데 가열패드에서 가해지는 열량이 table 1의 B와 같을 때 블레이드 날의 개수가 1개일 때 0.0593mm이고, 블레이드 날의 개수가 4개일 때 0.1085mm이 발생한다.

Fig. 9는 스크류의 가열패드에서 가해지는 열량이 table 1과 같고, 압력조건이 Fig. 1과 같을 때 블레이드 날의 각도가 65° 이며 스크류의 블레이드 날의 개수가 1~4개일 때 스크류에서 발생한 응력 분포를 블레이드 날의 길이에 따라 보여주고 있다. Fig. 6에서 표시한 피드부의 끝단에

서 최대응력이 발생하고 미터링부로 갈수록 응력이 감소하는데 가열패드에서 열량이 가해지는 위치에서 상대적으로 높은 응력이 발생한다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 스크류의 최적화 설계를 위하여 스크류의 체적효율, 토출량, 온도분포, 변위량, 응력 등을 해석하였다. 해석결과에 의하면 블레이드 날의 각도가 작아질수록 체적효율은 증가하는데 블레이드 날의 각도에 따른 토출량은 블레이드 날의 개수, 다시 말해서 피치길이에 따라 경향이 다르기 때문에 스크류의 사용조건에 따라 날의 각도와 개수를 달리할 필요가 있다.

또한 스크류의 길이에 따른 온도분포와 응력이 불균일한 것을 알 수 있는데 이와 같은 해석결과는 스크류의 구동 성능을 약화시키기 때문에 가열패드의 위치나 개수를 변경하여 트랜지션부와 미터링부의 온도분포와 응력분포를 균일하게 해야한다.

#### 참고 문헌

- [1] R.T. Fenner, "Extruder Screw Design," Iliffe, London, 1970.
- [2] A.W. Roberts, A.H. Willis, Proc. Inst. Mech. Eng. 176, 1962.
- [3] G.E. Rehkuger, L.L. Boyd, Trans. Am. Soc. Agric. Eng. 98, 1962
- [4] A.W. Roberts, Proc. Inst. Mech. Eng. 178, 1964.
- [5] I.R. Edmondson and R.T. Fenner, Polymer, 16, 49, 1975.
- [6] J. Shapiro, A.L. Halmos and J.R.A. Pearson, Polymer, 17, 905, 1976.
- [7] Osamu Amanol, Shirou Utsugi "Temperature Distribution of Polymer Melts Along the Screw Axis in Injection Molding," ANTEC '87 pp. 250~251.
- [8] "Plasticating Components Technology," Spirex Co., 1992.
- [9] MARC Analysis Research Corporation, 1994, Computer Program MARC, California, USA.