

다중날을 가진 스크류의 최적화 설계

최동열 · 조승현 · 김청균
홍익대학교 트라이볼로지 연구센터

The optimum Design of the Multi-flight Screw using Finite Element Analysis

Dong Yul Choi · Seung Hyun Cho · Chung Kyun Kim
Tribology Research Center, Hongik University

Abstract-Capacities of screw are pumping, steady flow of polymer melts, volumetric efficiency, 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. Also the temperature of polymer melts by heating pad and injection pressure play a very important role in the injection molding machine. by computation volumetric efficiency increases as rotating velocity increases, flight number increases, and decreases as friction coefficient increases. but volumetric throughput is different as flight number increases with helix angle variability. 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 thermo-mechanical characteristics of screw.

Key Words: Heat flux, Pressure, Helix angle, Flight numbers, efficiency, FEM

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

Gore et al.은 1953년 발표한 논문에서 드랙, 압력, 누설 유동 등을 고려하여 단일 날

스크류의 드래그 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 동적유사성을 해석하였고[3], 1964년 Roberts는 폴리머 용제의 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 메커니

즘 등을 함께 연구하고 있다.

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, 온도분포, 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 안쪽표면 온도의 변화를 제외하고는 대부분이 폴리머 용제의 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 수지의 공급부에서는 미터링 깊이가 크고, 날의 간격이 크기 때문에 압력이 낮고, 수지의 미터링부에서는 수지의 토출을 위해 미터링 깊이가 낮고, 날의 간격을 작게 하여 압력을 높이게 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 높

고 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

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

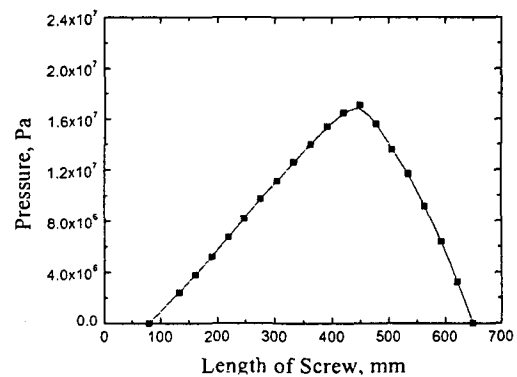


Fig. 1 Pressure distribution at inside injection barrel

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].

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, 미터링만을 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/D비 19.531:1을 사

용하여 해석하였다[8].

또한 피치길이가 스크류의 성능에 미치는 영향을 해석하기 위하여 Fig. 3과 같이 스크류의 블레이드 날의 개수를 1~4개인 모델과 Fig. 4와 같이 헬릭스 각이 스크류의 동특성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 블레이드 날이 한 개와 두 개인 경우의 모델에 대하여 해석을 수행하였다.

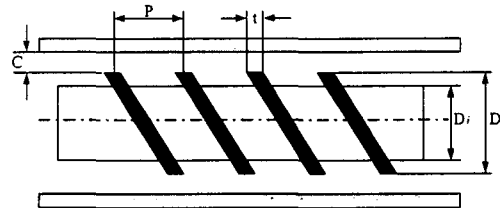


Fig. 2 Analysis model of screw conveyor

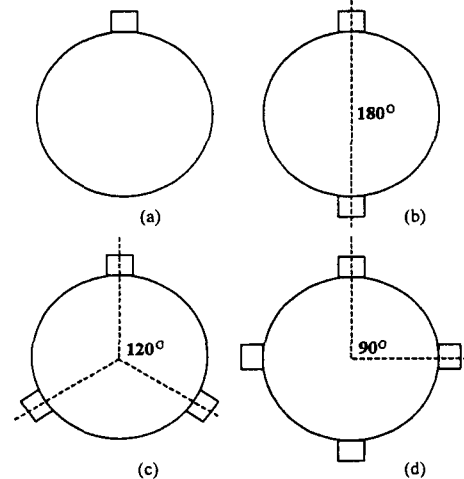


Fig. 3 Cross sections of the screw (a)Single flight, (b)Double flight, (c)Triple flight, (d)Quadruple flight

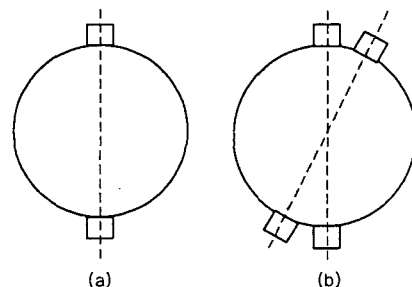


Fig. 4 Cross sections of the screw (a)Single flight, (b)Single-Single flight

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 ³	7,850
Thermal expansion coefficient at 20°C, $\mu m/m \cdot K$	12.2
Thermal conductivity, W/m · K	42.6
Specific heat, J/kg · K	473

3. 결과 및 고찰

3.1 스크류 날(flight) 개수의 영향

폴리머 수지를 용융시킨 후 토출시키는 스크류의 효율을 체적 효율(Volumetric efficiency)이라고 하는데, 스크류의 체적 효율은 Roberts와 Willis[2]가 보여준 바와 같이 식(1)과 같이 회전유동 효율과 층죽 효율의 곱으로 표현된다.

$$\eta_V = \eta_{VR} \eta_F \quad (1)$$

η_V : 체적 효율

η_{VR} : 회전 효율

η_F : 층죽 효율

$$Q = \Gamma \omega D^3 \eta_V \quad (2)$$

$$\Gamma = \frac{1}{8} \left[\left(1 + 2 \frac{C}{D}\right)^2 - \left(\frac{D_i}{D}\right)^2 \right] \left\{ \frac{P}{D} - \frac{t}{D} \right\} \quad (3)$$

C : 스크류의 외경과 베럴사이의 간극

D : 스크류의 외경

D_i : 스크류 축의 직경

P : 피치 길이

t : 블레이드 날 두께

Fig. 5는 스크류 표면에서 마찰계수가 0.3으로 일정하다고 가정할 때 스크류의 헬릭스 각도와 스크류의 블레이드 개수에 따른 체적 효율을 보여주는 그림이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 블레이드 날의 각도가 증가할수록 체적효율은 감소하는데 블레이드 날의 개수가 4개일 때는 완만하게 감소하지만 1개일 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(2)에 의해 정의되는데 스크류에 의한 토출량이 식(3)의 스크류의 무차원 형상

계수 Γ 와 회전속도 ω 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 점착하는 것을 방지하기 위함이다. 그리고 폴리머 입자가 스크류나 베럴에 점착한다는 것은 에너지 손실과 폴리머의 손실을 의미한다.

Fig. 6은 스크류의 블레이드 날의 개수와 스크류의 헬릭스 각도에 따른 토출량을 관찰한 그림으로서 블레이드 날의 개수가 1개일 때는 각도가 35° 보다 크면 급격히 감소하는데 날의 개수가 증가할수록 토출량은 서서히 증가하여 블레이드 날의 개수가 4개일 경우는 각도가 증가할수록 토출량도 증가함을 알 수 있다. 즉 피치길이가 감소하면 반대로 토출량은 증가한다.

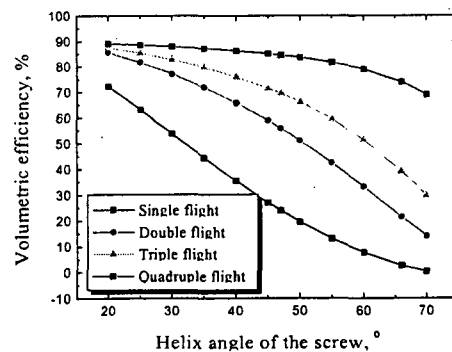


Fig. 5 Volumetric efficiency(friction coefficient is 0.3)

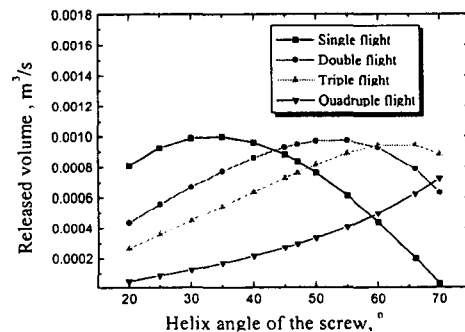


Fig. 6 Released volume with flight number variabilities(friction coefficient is 0.3)

Fig. 7은 열량조건이 Table 1의 B인 경우이고 압력조건이 Fig. 1와 같을 때 블레이드 날의 각도가 65°이며 블레이드 날의 개수가 4개일 때 스크류에서 발생한 온도분포를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 미터링부의 블레이드 날에서 최고 온도 214.1°C가 발생하고, 피드부에서 최저온도 148.4°C가 발생하였다.

Fig. 8은 스크류의 가열패드에서 가해지는 열량이 Table 1과 같고, 압력조건이 Fig. 1과 같을 때 헬릭스 각도가 65°이며 스크류의 블레이드 날의 개수가 1~4개일 때 스크류에서 발생한 온도분포를 블레이드 날의 길이에 따라 나타낸 그림이다.

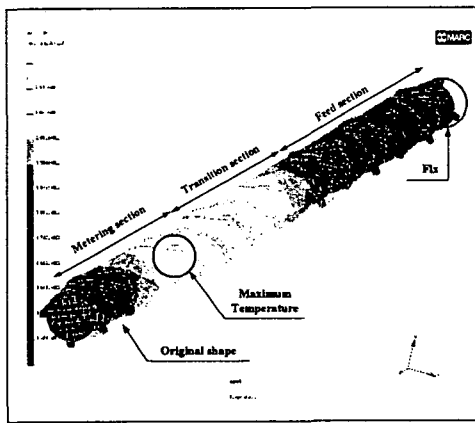


Fig. 7 Temperature distributions on the screw(Heat flux types is B, Helix angle is 65° , Flight number is 4)

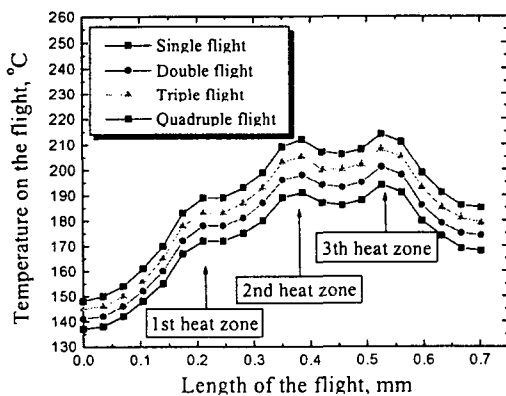


Fig. 8 Temperature distributions at the flight of screw with variable flight numbers

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. 9은 스크류의 가열패드에서 가해지는 열량이 Table 1과 같고, 압력조건이 Fig. 1과 같을 때 헬릭스 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. 10은 열량조건이 Table 1의 B인 경우이고 압력조건이 Fig. 1과 같을 때 블레이드 날의 각도가 65°이며 블레이드 날의 개수가 4개일 때 스크류에서 발생한 최대 응력분포를 보여주고 있는데 베어링에 의해 지지되고 있는 공급부의 처음부분에서 가장 높은 114.2MPa 이 발생하고 있다.

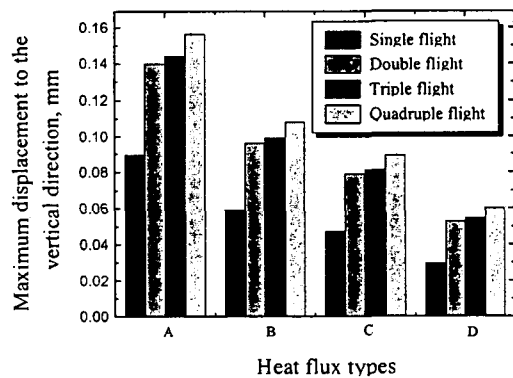


Fig. 9 Maximum displacement to the vertical direction of the screw as heat flux types of the heater bands with variable flight numbers

Fig. 11는 스크류의 가열패드에서 가해지는 열량이 Table 1과 같고, 압력조건이 Fig. 1과 같을 때 헬릭스 각도가 65°이며 스크류의 블레이드 날의 개수가 1~4개일 때 스크류에서 발생한 응력 분포를 블레이드 날의 길이에 따라 보여주고 있는데 피드부의 끝단에서 최대응력이 발생하고 미터링부로 갈수록 응력이 감소하는데 가열패드에서 열량이 가해지는 위치에서 상대적으로 높은 응력이 발생한다.

3.2 헬릭스 각도의 영향

Fig. 12은 스크류의 가열패드에서 가해지는 열량이 Table 1과 같고, 압력조건이 Fig.1

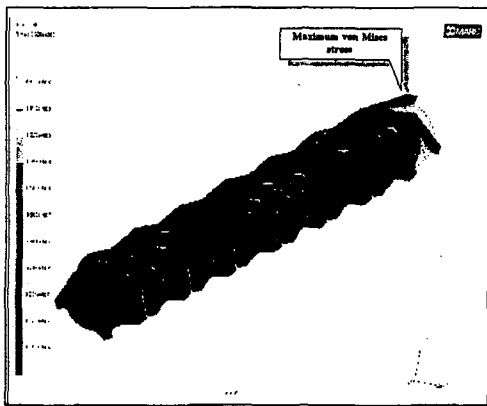


Fig. 10 von Mises stress distributions on the screw(Heat flux types is B, Helix angle is 65° , Flight number is 4)

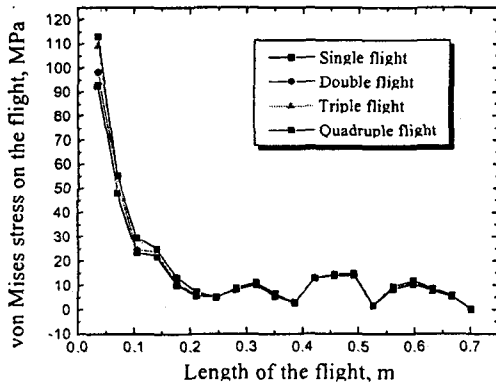


Fig. 11 von Mises stress distributions at the flight of screw with variable flight numbers

과 같을 때 블라이드 날의 각도의 변화와 블레이드의 형태가 최고 온도에 미치는 영향을 관찰한 그림이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 스크류에서 발생한 최고 온도는 Fig. 4(a)와 같이 블레이드 날이 한 개로 가공된 스크류가 Fig. 4(b)와 같이 두 개로 가공된 경우보다 평균 약 20°C가 낮게 발생하였다. 이것은 Fig. 4(a)와 같은 스크류 모델이 수지와와의 접촉면적이 작아서 열의 유입이 적게 발생하기 때문이다. 또한 Fig. 4(a) 모델을 기준으로 헬릭스 각도의 변화를 46° ~66° 까지 관찰한 결과 헬릭스 각도가 46° 에서 210°C가 발생한 후 헬릭스 각도가 증가할수록 발생 온도는 감소하다가 각도 55° 인 경우에 가장 낮은 온도 196°C가 발생하고 다시 증가하는 경향을 보여주고 있다. 이와같은 결과로부터 스크류의 헬릭스 각도 55° 가 최적의 헬릭스 각도임을 알 수 있다.

Fig. 13은 스크류의 가열패드에서 가해지는 열량이 Table 1과 같고, 압력조건이 Fig. 1과 같을 때 블라이드 날의 각도의 변화와 블레이드의 형태가 수직방향으로 발생하는 변위량에 미치는 영향을 보여주고 있다. 스크류에서 수직방향으로 발생한 최고 변위량은 Fig. 4(a)와 같이 블레이드 날이 한 개로 가공된 스크류가 Fig. 4(b)와 같이 두 개로 가

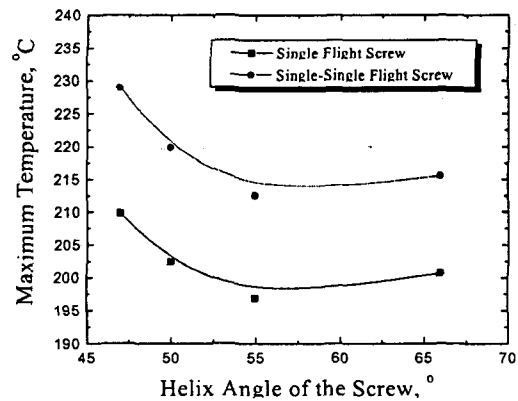


Fig. 12 Difference maximum temperature between single and single-single flight screw according to Helix angle variations of the screw

공된 경우를 비교할 때 헬릭스 각도가 46° 인 경우는 각각 0.053mm 와 0.047mm 로 차이가 0.006mm 에 불과하지만 헬릭스 각도가 66° 인 경우 차이가 0.017mm 로 증가하였다. 이와 같이 헬릭스 각도가 증가할수록 Fig. 4(a), (b)의 모델에 따라 수직방향으로 발생한 변위량의 차이가 증가한다. 또한 Fig. 4(a) 모델을 기준으로 헬릭스 각도의 변화를 $46^\circ \sim 66^\circ$ 까지 관찰한 결과 헬릭스 각도가 46° 에서 55° 까지는 수직방향으로 발생한 변위량의 차이가 거의 없으나 헬릭스 각도 55° 이후에 급격히 증가한다.

Fig. 14는 스크류의 가열패드에서 가해지는 열량이 Table 1과 같고, 압력조건이 Fig. 1

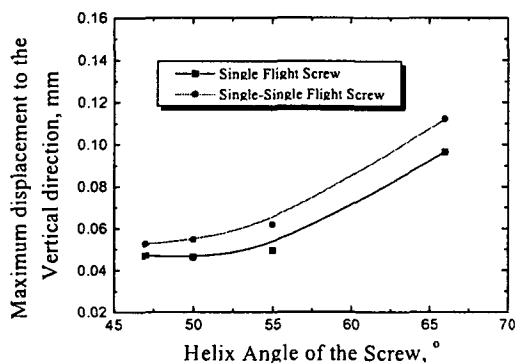


Fig. 13 Difference maximum displacement to the vertical direction between single and single-single flight screw according to Helix angle variations of the screw

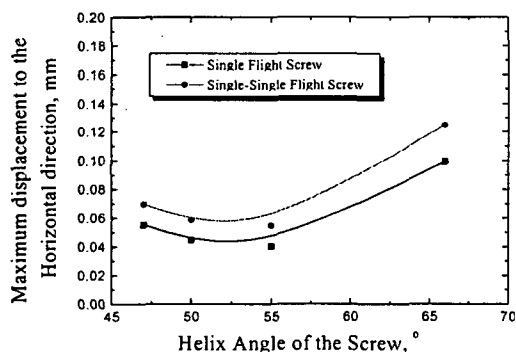


Fig. 14 Difference maximum displacement to the horizontal direction between single and single-single flight screw according to Helix angle variations of the screw

과 같을 때 블라이드 날의 각도의 변화와 블레이드의 형태가 수평방향으로 발생하는 최대 변위량에 미치는 영향을 보여주고 있다. 스크류에서 수평방향으로 발생한 최대 변위량은 Fig. 4(a)와 같이 블레이드 날이 한 개로 가공된 스크류가 Fig. 4(b)와 같이 두 개로 가공된 경우를 비교할 때 헬릭스 각도가 $46^\circ \sim 55^\circ$ 인 경우에 약 0.015mm 로 작게 발생하였고 헬릭스 각도가 66° 때 0.023mm 로 차이가 증가하였다. 한편 Fig. 4(a) 모델을 기준으로 헬릭스 각도의 변화를 $46^\circ \sim 66^\circ$ 까지 관찰한 결과 헬릭스 각도가 46° 일 때 0.056mm 가 발생한 후 헬릭스 각도가 증가할수록 최대 수평방향 변위량은 감소하다가 각도 55° 인 경우에 가장 낮은 수평방향 변위량은 0.04mm 가 발생하고 다시 증가하는 경향을 보여주고 있다. 베럴과의 설계 간극 0.2mm 를 감안한다면 직접적인 마멸은 발생하지 않지만 베럴과 스크류사이의 고용체를 고려한다면 스크류의 수평방향으로 발생하는 변위량은 마멸에 영향을 미치기 때문에 각도 55° 가 최적의 헬릭스 각도 설계조건이 된다.

Fig. 15은 스크류의 가열패드에서 가해지는 열량이 Table 1과 같고, 압력조건이 Fig. 1과 같을 때 길이방향으로 발생하는 최대 변위량에 블라이드 날의 각도의 변화와 블레이

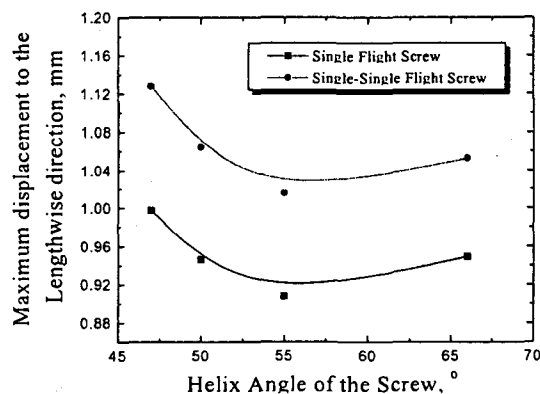


Fig. 15 Difference maximum displacement to the lengthwise direction between single and single-single flight screw according to Helix angle variations of the screw

드의 형태가 미치는 영향을 나타낸 그림이다. 스크류에서 길이방향으로 발생한 최대 변위량은 Fig. 4(a)와 같이 블레이드 날이 한 개로 가공된 스크류가 Fig. 4(b)와 같이 두 개로 가공된 경우와 비교할 때 헬릭스 각도가 $46^\circ \sim 66^\circ$ 인 경우에 약 0.109mm가 작게 발생하였다. 그리고 Fig. 4(a) 모델을 기준으로 헬릭스 각도의 변화를 $46^\circ \sim 66^\circ$ 까지 관찰한 결과 헬릭스 각도가 46° 일 때 1mm가 발생한 후 헬릭스 각도가 증가할수록 최대 길이방향 변위량은 감소하다가 각도 55° 인 경우에 가장 낮은 길이방향 변위량은 0.906mm가 발생하고 다시 증가하는 경향을 보여주고 있다. 따라서 스크류의 헬릭스 각도 55° 가 최적의 헬릭스 각도임을 알 수 있다.

회전운동을 하는 스크류는 형상의 비대칭에 의하여 발생하는 온도와 압력이 불균일해진다. 이와 같은 온도와 압력은 스크류의 비틀림을 발생시키는데 Fig. 16는 스크류의 가열패드에서 가해지는 열량이 Table 1과 같고, 압력조건이 Fig. 1과 같을 때 스크류의 비틀림에 블레이드 날의 각도의 변화와 블레이드의 형태가 미치는 영향을 나타낸 그림이다. 스크류에서 발생한 비틀림은 Fig. 4(a)와 같이 블레이드 날이 한 개로 가공된 스크류가 Fig. 4(b)와 같이 두 개로 가공된 경우와

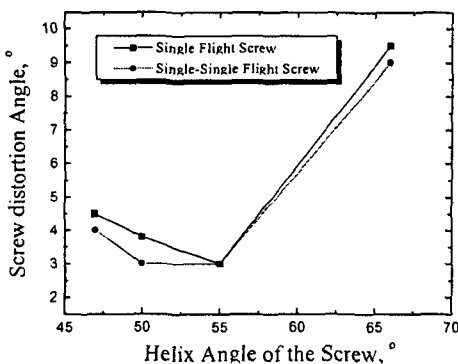


Fig. 16 Difference distortion angle between single and single-single flight screw according to Helix angle variations of the screw

비교할 때 헬릭스 각도가 46° 일 때 각각 4° , 4.5° 이 반시계 방향으로 날이 한 개로 가공된 스크류가 비틀림이 0.5° 적게 발생하였다. 그리고 헬릭스 각도가 50° 인 경우는 각각 3.9° , 3° 로 차이가 0.9° 로 커지나 헬릭스 각도 55° 에서는 가장 작은 3° 가 비틀림이 발생하였다. 그러나 헬릭스 각도 66° 인 경우는 비틀림이 각각 9.5° , 9° 로 급격히 증가하였다. 스크류에서 발생하는 비틀림은 스크류의 정속, 정량의 수지 토출에 부정적인 영향을 미치기 때문에 구동성능을 저하시킨다. 따라서 위에서 설명한 바와 같이 헬릭스 각도 55° 가 가장 안정적인 설계 각도임을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 스크류의 최적 설계를 위하여 스크류 날의 개수를 1~4개로 다양화하고, 헬릭스 각도를 변경시키면서 스크류의 체적효율, 토출량, 온도분포, 변위량, 응력 등을 해석하였다. 해석결과에 의하면 헬릭스의 각도는 작아질수록, 블레이드 날의 개수는 증가할수록 체적효율은 증가하고 수지의 토출량은 블레이드 날의 개수, 다시 말해서 피치길이에 따라 헬릭스 각도의 변화에 따라 경향이 달라지기 때문에 스크류의 사용조건에 따라 날의 각도와 개수를 달리할 필요가 있다. 그러나 사용조건에 요구되는 효율을 제외한 온도분포, 치짐량, 뒤틀림 등 열-기계적 특성을 고려한다면 헬릭스 각도가 55° 일 때 가장 우수한 결과를 보여주고 있다.

위의 결과로부터 판단할 때 체적효율과 열-기계적 특성을 우선 고려한다면 헬릭스 각도가 55° 이고, 블레이드 날의 개수는 많을수록 좋고, 토출량과 열-기계적 특성을 우선시한다면 헬릭스 각도는 55° 이고, 블레이드 날의 개수는 2개로 설계하는 것이 바람직하다.

또한 스크류의 길이에 따른 온도분포와 응력 등 열-기계적 특성이 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.