

## 압출용 스크루의 나선각에 대한 특성설계

최부희\*(서울정수기능대학), 최상훈(건국대 공대)

### Characteristics Design on Helix Angle of the Extruder Screw

B. H. Choi\*(CAD/CAM Dept., SJPC), S. H. Choi(Mech. Eng. Dept., KGU)

#### ABSTRACT

Extruders are the heart of the polymer processing industry. The single most important mechanical element of a screw extruder is the screw. The proper design of the geometry of the extruder screw is of crucial importance to the proper functioning of the extruder. If material transport instabilities occur as a result of improper screw geometry, even the most sophisticated computerized control system cannot solve the problem. For this purpose, characteristics design on helix angle of the extruder screw. This paper presents strength of the screw flight, optimum helix angle versus dimensionless down channel pressure gradient, optimum helix angle versus the power law index in simultaneous optimization, volumetric efficiency versus helix angle at various number of flights and power consumption versus helix angle in the barrel of screw extruder.

**Key Words** : Screw extruder(스크루 압출기), Extruder screw(압출용 스크루), Helix angle(나선각), Screw flight(스크루 날개), Power index law(유동지수), Pressure gradient(압력구배)

#### 1. 서론

압출공정은 신제품의 생산 및 공정개선의 일환으로 다양한 분야에서 1980년대와 1990년 대를 통하여 많은 이용과 더불어 보급이 되었다. 압출공정이란 배럴내에 장치된 스크루를 회전시켜 그 속에 투입되는 원료에 혼합, 가열, 압축등의 처리를 통하여 원하는 물성 및 형상의 제품을 연속적으로 생산하는 가공방법을 말하며, 이기계를 압출기(extruder)라 한다.

스크루 압출기는 스크루의 수에 따라 단축형(single type)과 2축형(twin type)이 있으며, 기능에 따라 원료 공급부(feeding part), 이송부(barrel & screw part), 다이 및 커팅부(die & cutting part), 동력전달부(pulley & gear box part)로 분류된다.

압출기의 처음 사용은 1847년 Guttapercha의 램식 압출기에 의해 해저전선의 피복을 만드는 데서 비롯되어 현재와 같은 스크루 압출기는 1886년 프랑스의 De Wolfe가 개발하여 플라스틱 수지된 제품의 생산에 사용되어 왔다.<sup>(1)</sup> 1978년 Boody는 밀폐형 2축 압출기에 사용되는 스크루의 기하학적 형상에

관한 내용을 발표하였다.<sup>(2)</sup> 현재 스크루 압출기는 여러 산업분야에서 응용되어 사용되고 있지만 압출용 스크루의 기하학적인 설계에 대한 연구는 매우 미진한 실정이다. 1950년대 이후 현재까지 사용되고 있는 대부분의 압출용 스크루는 스크루의 직경과 피치가 같은 스퀘어 피치(square pitch)로 설계된 스크루를 사용하고 있다.<sup>(3)</sup> 이 스퀘어 피치는 나선각(helix angle)이 17.66°에 해당되므로 스크루 압출기의 압출특성에 있어서 최적 나선각이라 볼 수 없다. 만약 스크루의 형상설계가 적당하지 못하여 재료이송의 안정성을 얻을 수 없다면 정교하게 설계된 제어시스템에서도 그 문제를 해결할 수 없게 된다.

나선각은 스크루축과 수직인 면과 스크루 날개(flight)의 사잇각으로서 스크루의 직경과 이송길이에 의해 결정되므로 스크루의 직경 설계시 토출특성을 고려한 나선각의 최적설계가 요구된다.

따라서 본 연구에서는 스크루의 날개 강도, 스크루의 나선각이 압출기의 배럴 내에서 압력구배, 유동지수, 체적효율, 동력소비량에 미치는 영향을 분석하여 압출용 스크루의 형상 설계를 위한 기초자료를 제시하였다.

## 2. 스크루의 기하학적 형상

### 2-1 스크루 압출기

스크루 압출기의 분류는 Fig. 1과 같다.

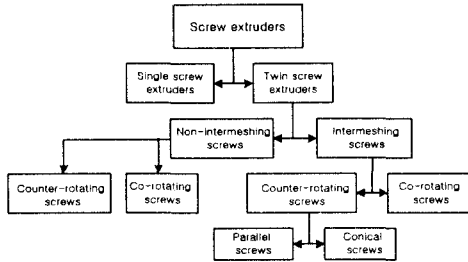


Fig. 1 Screw extruder types

### 2-2 스크루의 명칭

Fig. 2는 단축 스크루의 형상에 대한 명칭을 나타낸다.

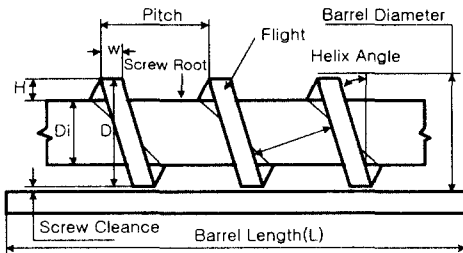


Fig. 2 Screw drawn with straight flights

단축 스크루에서 배럴길이(L)와 스크루 직경(D)과의 비(L/D)는 매우 중요하다. L/D가 크면 마찰력이 크게 작용하여 같은 조건에서 가해지는 힘이 커지지만 스크루가 1회전 시 이송물질은 1피치만큼 이송되지 않는다. 단축 스크루 압출기에 적용되는 drag-flow 방정식은 스크루의 정사각형 홈에 이송물질이 수직방향으로 작용한다는 가정 하에 기초를 둔다. 스크루의 단면적은  $A = \pi h D \sin \phi$  가 되므로 이송량(drag-flow)은 다음식으로 표현된다.<sup>(4)</sup>

$$Q = n(\pi^2 D^2 p H \sin \phi \cos \phi)$$

여기서 상수 n은 물질에 따라 다르며 이상적인 운전 조건에서 1/2이 된다. n이 작은 값일 때 스크루의 회전수를 높게하고 스크루의 직경도 크게 해야한다.

### 2-3 스크루 나선각의 기본설계

스크루 설계시 스크루의 안지름과 바깥지름은 스크루의 물림상태와 채널의 깊이에 따라서 결정되며, 나선각은 스크루축과 나란한 방향에서 스크루의 나선형 날개(flight)로부터 날개까지의 거리 또는 스크루의 피치에 의해 결정된다. 단축 스크루 압출기는 일반적으로 스크루의 직경크기와 같은 1피치의 리드(lead)로 설계된다. 스크루의 피치는 날개를 분할하여 다중 피치로 만들 경우 매우 중요하다. 분할된 스크루인 경우 날개수를 1 ~ 4개로 분할시 나선각  $\phi$ 는  $15^\circ \sim 8^\circ$ 의 범위가 된다.

Table 1 Helix angle and resulting number of pitches per diameter

Helix angle( $\phi$ )	Pitch ( $P_s$ )	$P_s / D$
17.66	1.00 D	1.00
15	0.84 D	1.18
10	0.55 D	1.80
8	0.44 D	2.26
6	0.33 D	3.00
5	0.27 D	3.60

Table 2 Design data of standard extruder screw

Screw Name	Symbols	Standard
Total length	L	20D ~ 30D
Length of feed section	$L_f$	4D ~ 8D
Length of metering section	$L_m$	6D ~ 10D
Number parallel flights	p	1
Helix angle	$\phi$	$17.66^\circ$
Flight width	w	0.1D
Channel depth in feed section	H	0.1D ~ 0.15D
Channel depth ratio	$\gamma$	2 ~ 4

### 2-4 스크루의 형상

스크루의 날개수 p를 1~4개로 변화시 스크루의 형상은 Fig. 3과 같다.

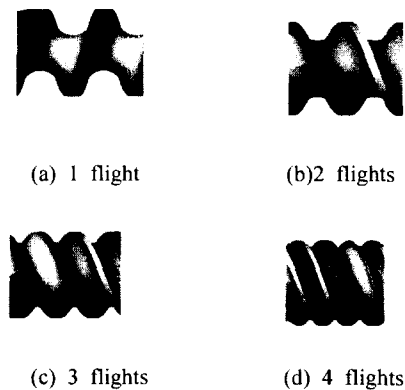


Fig. 3 Shape of extruder screw

### 3. 스크루 나선각의 특성 해석

#### 3-1 스크루 날개의 강도 해석

스크루가 회전시 스크루 날개에 받는 부하는 날개 측면에 작용하는 압력차  $\Delta P$ 에 의하여 발생되므로 날개 선단에 작용하는 전단응력은 스크루 표면에서 최대가 된다. 스크루 날개 높이 H, 날개 폭을 w, 스크루 날개의 허용전단응력을  $\tau_a$ , 압력차를  $\Delta P$ 라 하면 H와 w의 비는 다음식으로 정리된다.<sup>(5)</sup>

$$\frac{H}{w} < \left[ \frac{1}{3} \left( \frac{1}{4} + \frac{\tau_a^2}{\Delta P^2} \right)^{1/2} - \frac{1}{6} \right]^{1/2}$$

Fig. 4는  $\tau_a / \Delta P$ 의 변화에 따른 H/w의 특성을 나타내고 있다. 스크루설계에서 일반적으로 사용되는 H/w가 1~2일 때  $\tau_a / \Delta P$ 는 3~13의 값으로 나타난다. 일반적으로  $\tau_a / \Delta P$ 는 25보다 크므로 날개 끝단에서 전단응력을 무시할 수 있을 때 필요 이상의 강도를 갖게 된다. 따라서 스크루의 날개높이와 날개폭의 비 H/w는 3까지 설계가 가능함을 알 수 있다.

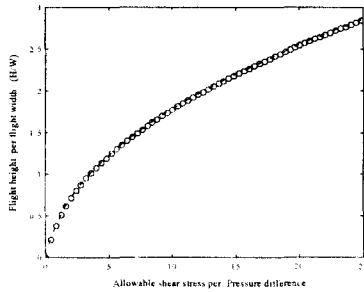


Fig. 4 Slenderness ratio versus  $\tau_a / \Delta P$

#### 3-2 압력구배와 나선각 관계

스크루에 투입되는 원료가 점성이 낮은 경우 전단속도를 무시할 수 있는 유체를 뉴턴유체라 정의하고, 점성이 높아 전단속도의 영향을 받는 원료를 비뉴턴 유체라 할 때 유동지수(Power law index) n은 다음과 같이 정의 된다.

n=1 (Newtonian case)

n=0 (non-Newtonian case)

스크루의 축방향 압력 P와 배럴의 길이 L과의 비 (P/L)를 압력구배  $g^*$ 라 하면 Fig. 5는 유동지수가 n=0.4, n=0.6, n=0.8, n=1.0으로 변할 때 무차원 압력구배에 따른 최적 나선각을 나타내고 있다. 최적 나선각은 유동지수 n값에 매우 의존성이 강하게 나

타남을 알 수 있다. 나선각과 무차원 압력구배는 반비례하며 나선각이 17.66° 이하에서는 유동지수 영향이 크게 작용함을 알 수 있다.

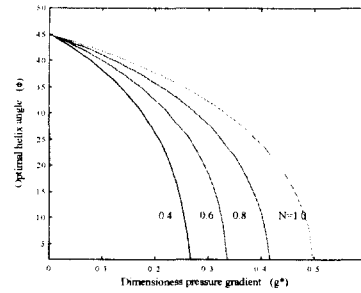


Fig. 5 Optimum helix angle versus dimensionless down channel pressure gradient

#### 3-3 유동지수와 나선각 관계

최적의 나선각은 유동지수와 날개폭의 변화와 함수관계가 있다. 날개수를 p, 날개 모서리선과 수직되는 선의 날개 윗면의 폭을 w, 스크루의 외경을 D라 하면 감소된 날개폭은  $w^* = \frac{bw}{\pi D}$  가 되며, 최적 나선각은 다음식으로 정의 된다.<sup>(6)</sup>

$$\sin \phi_r^* = \left( \frac{n}{2n+2} \right)^{1/2} + w^* \left( \frac{n+2}{4n} \right)$$

Fig. 6은  $w^*$ 의 변화에 대한 유동지수와 최적 나선각과의 관계를 나타내고 있다. 그림에서 나선각이 30° 이하에서는  $w^*=0$  인 경우만 유동지수가 적용되며, 나선각 17.66° 에서 유동지수 n의 값은 0.2로 나타났다.

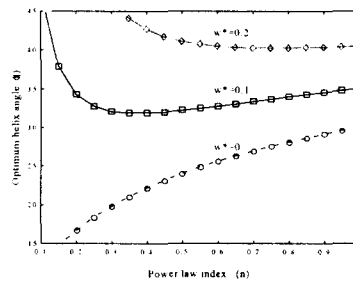


Fig. 6 Optimum helix angle versus the power law index in simultaneous optimization

### 3-4 나선각과 체적효율 특성

Fig. 7은  $w=0.1D$ 일 때 날개수의 변화에 따른 나선각과 체적효율 특성을 나타내고 있다. 체적효율은 나선각이 작을 때 급격히 상승하고 클 때는 완만하게 상승한다. 작은 나선각에서 날개수가 증가하면 체적효율은 상당히 떨어짐을 알 수 있다. 나선각이  $17.66^\circ$  일 때  $p=1$ 이면 체적효율은 85%가 되지만  $p=4$ 이면 체적효율은 50%로 감소한다. 또한 나선각이  $30^\circ$  일 때  $p=1$ 이면 효율이 95%가 되지만  $p=4$ 이면 75%가 된다. 따라서 체적효율은 날개수에 반비례하고 나선각에 비례함을 알 수 있다.

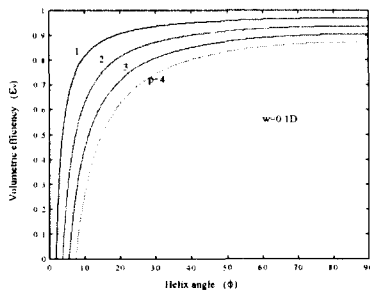


Fig. 7 Volumetric efficiency versus helix angle at various numbers of flights( $w=0.1D$ )

### 3-5 나선각과 동력소비

Fig. 8은 스크루 날개 높이  $H$ 의 변화 따른 나선각과 동력소비 특성을 나타내고 있다. 나선각이 스퀘어 피치인  $17.66^\circ$  이하에서는 스크루의 날개높이의 영향을 거의 받지 않지만 동력 소비는 크게 증가함을 알 수 있다. 또한  $10^\circ$  이하에서는 동력소비가 급격히 증가하므로 스크루의 나선각은  $10^\circ$  이상으로 설계해야 함을 알 수 있다.

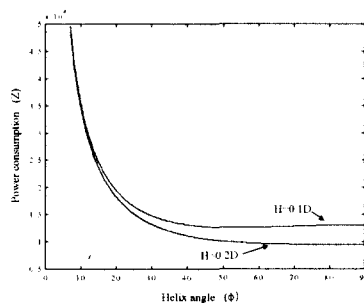


Fig. 8 Power consumption versus helix angle

## 4. 결론

본 연구는 단축 스크루 압출기에 사용되는 스크루의 나선각에 대한 특성설계를 위하여 압출기의 배럴 내에서 스크루날개의 강도, 압력구배, 유동지수, 체적효율, 동력소비량과의 관계를 해석한 결과 다음과 같이 요약된다.

1. 스크루 날개높이와 날개폭의 비는 1~3까지 가능함을 알았다.
2. 나선각과 무차원 압력구배는 반비례하며 나선각이  $17.66^\circ$  이하에서는 유동지수영향이 크게 작용한다.
3. 나선각이  $30^\circ$  이하에서는  $w^*=0$  인 경우만 유동지수가 적용되며, 나선각  $17.66^\circ$  에서 유동지수  $n$ 의 값은 0.2로 나타났다.
4. 체적효율은 날개수에 반비례하고 나선각에 비례한다.
5. 나선각  $10^\circ$  이하에서는 동력소비가 급격히 증가하므로 스크루의 최소 나선각은  $10^\circ$  이상의 설계가 요구된다.

## 참고문헌

1. James L. White, "Twin Screw Extrusion", Hanser Publishers, pp.50-73, 1990.
2. Boody, M. L., "Geometry of Fully Wiped Twin Screw Equipment", Polym. Eng. Sci., Vol.18, 1978.
3. Grwegory A. Cambel, "Screw Design Newtonian Fluid Flow", ANTEC'96, pp.136-142, 1996.
4. Fabrizio G. Martelli, "Twin-Screw Extruders : Basic Understanding", Van Nostrand Reinhold Company, pp.1-7, 1983.
5. Chris Rauwendaal, "Polymer Extrusion", Hanser /Gardner Publications, Inc., pp.351-388, 1994.
6. Donald G. Baird, "Polymer Processing Principles and Design", John Wiley & Sons, Inc., pp.213-221, 1998.