

압출용 스크루의 날개형상에 대한 특성설계 최부희*(서울정수기능대학), 최상훈(건국대 공대)

Characteristics Design on Flights Shape of the Extruder Screw

Boo-Hee Choi*, Sang-Hoon Choi

ABSTRACT

Twin screw extruders are the heart of the polymer processing industry. They are used at some stage in nearly all polymer processing operations. This paper is concerned with the basic elements of the extruder design. The proper design of the geometry of the extruder screw is of crucial importance to the proper functioning of the extruder. If the 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, a characteristic design on flights shape of the extruder screw. This paper presents cross section designs of a closely intermeshing twin screw extruder with double-flighted screw elements, and channel depth characteristics for a double flighted corotating self-wiping twin screw extruder.

Key Words : screw extruder(스크루 압출기), twin screw extruder(2축스크루압출기), screw flight(스크루 날개), helix angle(나선각), channel depth(채널깊이), tip angle(선단각), barrel(배럴)

1. 서론

각종 산업에 널리사용되는 압출공정이란 배럴 내에 장치된 스크루를 회전시켜 그 속에 투입되는 원료에 혼합, 가열, 압축등의 처리를 통하여 원하는 물성 및 형상의 제품을 연속적으로 생산

하는 가공방법을 말하며, 이 기계를 스크루 압출기(screw extruder)라 한다. 압출공정이 공업적으로 사용되기 시작한 것은 1847년 Guttapercha의 램식 압출기에 의해 해저전선의 피복을 만드는데서 비롯되어 1900년경에는 소세지(sausage)등의 식품제조에도 사용되었다. 현재와 같은 스크루 압출기는 1886년 프랑스의 De Wolfe가 개발하여 플라스틱 수지제품의 생산에 사용되어 왔다.⁽¹⁾ 1978년 Boody는 밀폐형 2축 압출기에 사용되는 스크루의 기하학적 형상에 관한 내용을 발표하였다.⁽²⁾ 스크루의 구조는 압출기의 종류를 구분하는 데 중요한 요인이 되며 스크루는 크게 재료공급부, 압축부, 계량부로 나누어지며 사용재료와 모형에 따라 스크루의 형상이 달라지게 설계된다. 스크루의 형상설계시 영향인자는 매우 다양하여 1950년대 이후 현재까지 사용되고 있는 대부분의 압출용 스크루는 스크루의 직경과 피치가 같은 사각피치(square pitch) 로 설계된 스크루를 사용하고 있다.⁽³⁾

현재 스크루 압출기는 여러 산업분야에서 응용되어 사용되고 있지만 압출용 스크루의 기하학적인 설계에 대한 연구는 매우 미진한 실정이다.⁽⁴⁾ 스크루의 특성을 이해하기 위하여 먼저 스크루를 기하학적으로 나타내어야 한다. 만약 스크루의 형상설계가 적당하지 못하여 재료이송의 안정성을 얻을 수 없다면 정교하게 설계된 제어 시스템에서도 그 문제를 해결할 수 없게된다.⁽⁵⁾ 밀폐형2축 스크루의 기하학적 형상설계시 가장 기본이되는 설계인자는 스크루 직경, 중심간거리,

그리고 스크루 날개수이다.

따라서 본 연구는 2축 스크루 압출기에 사용되는 스크루의 날개형상을 설계하기 위한 기초연구로서 스크루 날개단면을 설계하기 위하여 스크루의 날개수 변화에 따른 스크루의 단면형상을 기하학적으로 해석하고, 스크루의 채널깊이와 단면적 변화특성에 대하여 연구하였다.

2. 압출용 스크루

스크루 압출기는 Fig. 1과 같이 단축 스크루 압출기와 2축 스크루 압출기로 크게 분류된다. 2축 스크루 압출기는 스크루의 형상 및 축간거리에 따라 틈이 형성되는 밀폐형(intermeshing type)과 틈이 형성되지않는 개방형(non-intermeshing type)으로 나누어지며, 축의 회전방향에 따라 동방향(co-rotating)과 역방향(counter-rotating)스크루로 분류된다. 또한 스크루의 축방향 단면형상에 따라 각형 및 볼 스크루로 구분되며, 각형 스크루는 날개모양이 사다리꼴이며 보통 1조의 나선이다. 볼 스크루는 축의 직각단면이 2조의 나선(2날개)으로 된 볼록렌즈형과 3조의 나선(3날개)으로 된 삼각형이 있으며, 그 단면형상이 연속적으로 비틀어진 나선형을 이루어 축방향 단면이 말안장형을 나타낸다.

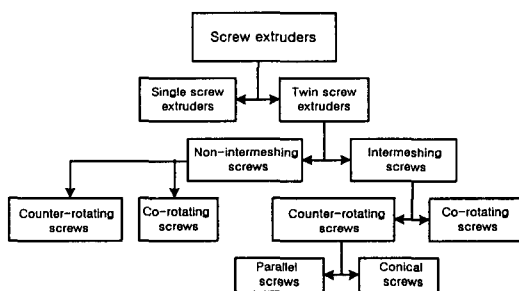


Fig. 1 Screw extruder types

Fig. 2는 직선 날개형상을 가진 스크루의 명칭을 나타내고 있다. 그림에서 나선각 ϕ , 스크루의 피치 S, 배럴의 지름 D_b , 스크루의 바깥지름 D, 스크루의 몸통부 지름 D_s , 스크루의 날개 높이 H(배럴과의 간격을 무시할 때 채널의 깊이),

축방향 채널의 폭 B, 축방향 날개폭 b, 날개와 수직선상의 채널의 폭 W, 날개와 수직선상의 날개폭 w, 스크루 단면의 날개수 p, 배럴의 길이를 L로 정의하였다.

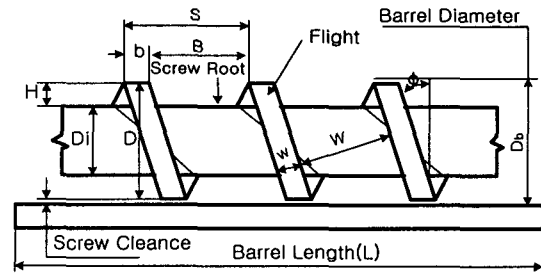


Fig. 2 Screw drawn with straight flights

3. 2축 스크루 단면의 기하학

동방향 2축 스크루 압출기는 날개형상과 밀접한 관계가 있다. Fig. 3은 2날개 스크루의 단면을 나타내고 있다. 두 개의 스크루가 동방향으로 회전시 밀려들어가는 재료는 다른 스크루를 지나기 때문에 스크루 날개는 다른 스크루의 표면을 긁어가는 것처럼 보인다. 이때 재료는 축방향으로 8자 형상의 체적을 가진다.⁽⁶⁾ 2날개 스크루에서 축을 직각 단면을 고려해보면 날개와 채널의 기하학적 형상은 스크루 직경 D(실제는 $D-2\delta$ 이지만 날개의 틈새를 무시한다), 스크루의 축간 중심간거리 C_L , 그리고 스크루 날개수 p에 의하여 결정된다. Fig. 3의 도형에서 스크루의 축간 중심거리 C_L 은 다음과 같이 표현된다.⁽⁴⁾

$$C_L = D \cos(\alpha_i) \quad (1)$$

α_i : 물림부의 반각

물림부의 반각 α_i 는 선단각(tip angle) α_t 와 관련되며 다음식으로 표현된다.

$$\alpha_i = \frac{\pi}{2p} - \frac{\alpha_t}{2} \quad (2)$$

날개높이 H는 회전각 θ 의 함수로 결정할 수 있다. Fig. 4에서 $H(\theta)$ 를 구하면

$$H(\theta) = \frac{D}{2}(1 + \cos \theta) - \left(C_L^2 - \frac{1}{4}D^2 \sin^2 \theta\right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

이 된다.

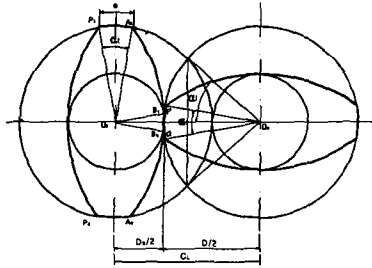


Fig. 3 Basic construction of identical screw cross section

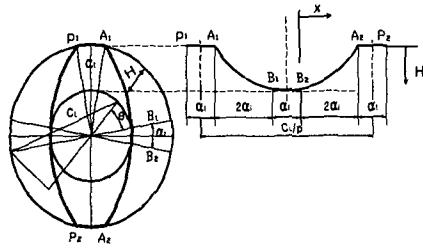


Fig. 4 Screw cross section in plane through and perpendicular to the axis

날개높이 H 는 다음식의 좌표변환을 통하여 x 방향의 궤적에 따라 채널의 단면형을 구할 수 있다. 따라서, $x = (\frac{D}{2})\theta \sin \phi$ 를 적용하면

$$H(x) = \frac{D}{2} \left[1 + \cos \left(\frac{2x}{D \sin \phi} \right) - \left[C_L^2 - \frac{D^2}{4} \sin^2 \left(\frac{2x}{D \sin \phi} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \right] \quad (4)$$

다음은 배럴과 스크루 사이의 유효 단면적을 결정한다. 이것은 배럴의 단면적에서 두 스크루의 단면적을 빼므로써 구할 수 있다. 배럴의 단면적은 다음과 같이 표현된다.

$$A_b = \frac{1}{2}(\pi - \alpha)D^2 + \frac{1}{2} C_L D \sin \alpha_i \quad (5)$$

또한, 축간 중심거리가 스크루의 바깥지름과 같을 때 배럴의 단면적은 $A_b = \frac{1}{2} \pi D^2 = 2A$ 가

된다. Fig. 4에 나타난 2날개의 스크루에서 스크루 한개의 단면적은 다음식과 같다.

$$A_s = p \alpha_i C_L^2 - \frac{1}{2} p C_L D \sin \alpha_i + \frac{1}{2} p \alpha_i \left(C_L^2 + \frac{1}{2} D^2 - C_L D \right) \quad (6)$$

배럴과 스크루 사이의 유효 단면적은 위에 표현된 두 식과는 다르므로 다음과 같이 표현된다.

$$A_o = D^2 \left[\left(p - \frac{1}{2} \right) \alpha_i + \left(p + \frac{1}{2} \right) \sin \alpha_i \cos \alpha_i - \pi \cos^2 \alpha_i + (\pi - 2p \alpha_i) \cos \alpha_i \right] \quad (7)$$

이 방정식은 배럴의 직경이 고정된 경우를 말해주며 유효 단면적은 날개수와 몰림부의 반각 α_i 에 의존된다.

4. 스크루 날개의 형상설계

4-1 날개의 단면형상

스크루의 날개수 p 를 1~4개로 변화시 스크루 날개의 단면형상은 Fig. 5와 같다. 그림에 나타난 바와같이 스크루의 날개수가 증가시 스크루 산의 높이는 점차 감소함을 알 수 있다.

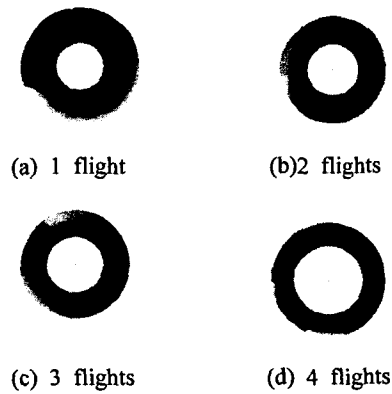


Fig. 5 Shapes of the screw flights in cross section

4-2 날개의 한계높이 결정

스크루 날개의 한계높이는 날개수의 변화에 따라 변하게 되므로 스크루 설계시 중요한 요인이 된다. 채널과의 간격을 무시하면 채널의 깊이

와 같게되므로 $H=0.5(D-D_s)$ 가 된다.⁽⁷⁾ Fig. 6과 같이 선단각이 0일 때 날개수가 2~5인 경우 스크루 날개의 한계높이를 직경비 D/D_s 로 나타내면 각각 2.414, 1.366, 1.180, 1.109가 된다. 날개수가 2에서 3으로 변할 때 스크루의 날개높이는 급격히 감소함을 알 수 있다.

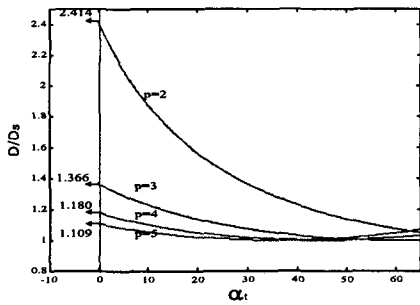


Fig. 6 Limit value of D/D_s as number of flights in free cross-section

4-3 날개의 선단폭 설계

선단폭 e 는 Fig. 7의 도형에서 선단각 α_t 로부터 구하면 $e = D \sin \frac{\alpha_t}{2}$ 가 되며, 축방향 스크루의 날개폭은 $b = e \tan \phi$ 가 되므로 스크루의 피치와 직경이 같은 사각피치(square pitch)인 경우 스크루의 나선각 $\phi=17.66^\circ$ 이므로 $b=0.318e$ 가 된다.

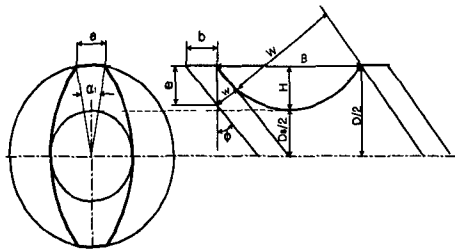


Fig. 7 Screw geometry of cross and axis section

또한 선단각과 날개높이 H 와의 관계는 회전각 θ 의 함수로 결정되므로 스크루의 바깥지름 $D=50\text{mm}$, 날개수 $p=2$ 인 경우 선단폭 $e=0, 0.1D, 0.15D, 0.2D$ 으로 변할 때 선단폭과 날개높이와의

관계는 Fig. 8과 같이 나타난다. 그림에서 $D_s/2$ 는 10.355 mm, 13.758mm, 15.366mm, 16.916mm로 증가하므로 스크루의 날개 높이는 감소함을 할 수 있다.

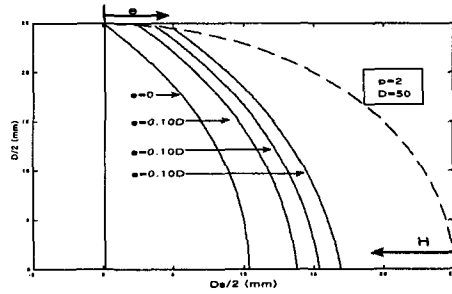


Fig. 8 Cross flights height at various flight width

Fig. 9는 선단폭이 증가할 때 스크루 단면의 형상 변화를 나타내고 있다. 선단폭의 증가는 스크루의 몸통부 반지름이 증가하므로 배럴과 스크루사이의 공간이 감소함을 알 수 있다.

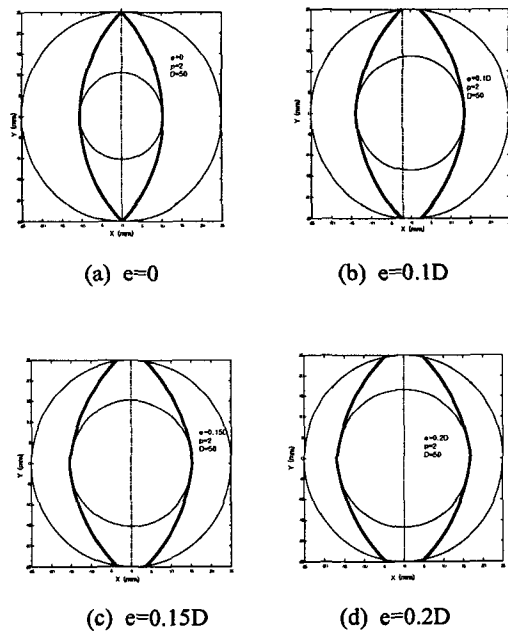


Fig. 9 Shapes of screw flight at various flight tip width

4-4 스크루 채널의 단면 설계

날개높이 H 는 스크루의 축 방향 x 의 궤적에 따라 채널의 단면형상을 구할 수 있다. 채널의 단면형상은 나선각 ψ 와 함수관계가 있으므로, 스크루의 날개수 p , 피치 S 및 선단폭 e 의 변화에 따른 채널의 단면형상을 설계하였다. Fig. 10~Fig. 12는 채널의 단면형상의 설계결과를 나타내고 있다. Fig. 10에 나타난 바와같이 날개수 증가에 따라 채널의 폭과 스크루의 날개높이가 감소함을 알 수 있으며, Fig. 11은 $e=0.1D$, $p=2$ 인 조건에서 스크루의 피치가 $0.4D$ 에 $1D$ 로 증가할 때 $x=0$ 인 최대 날개높이 일정하지만 채널의 폭은 증가함을 알 수 있다. Fig. 12는 $p=2$ 인 조건에서 스크루의 선단폭이 증가할 때 채널의 폭과 날개높이는 감소함을 알 수 있다.

따라서 채널의 폭과 스크루의 날개높이는 날개수와 선단폭에 반비례하며, 스크루피치는 채널의 폭에 비례하지만 $x=0$ 인 조건에서는 날개높이에 영향을 미치지 않음을 알았다.

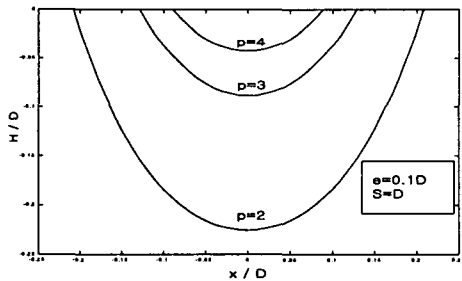


Fig. 10 H/D versus x/D at various numbers of flights($e=0.1D$)

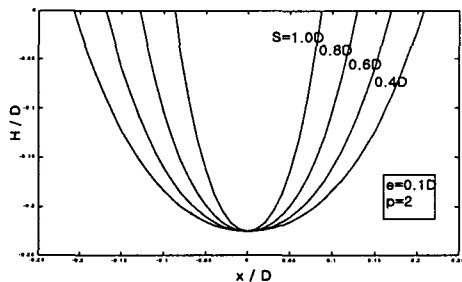


Fig. 11 H/D versus x/D at various S/D ($e=0.1D$)

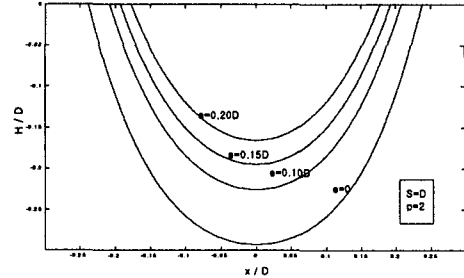


Fig. 12 H/D versus x/D at various flight tip width

4-5 스크루와 배럴의 단면적 특성

2축 스크루 압출기에서 배럴의 단면적을 A_b , 스크루 축 1개의 단면적을 A_s , 배럴과 스크루사이의 단면적을 A_0 , $C_L=D$ 인 경우 배럴의 단면적을 A 라고 할 때 스크루의 날개수 변화에 따른 스크루와 배럴과의 단면적비 관계는 Fig. 13~Fig. 15과 같다. Fig. 13은 날개수가 2, 3, 4로 증가할 때 $e=0$ 인 조건에서 스크루와 배럴의 단면적비 A_s/A_b 는 각각 0.2, 0.34, 0.41로 증가하며 e 값의 증가에 따라 단면적비도 증가함을 알 수 있다. Fig. 14는 날개수가 증가할 때 b/D 와 A_s/A_b 는 감소함을 알 수 있다. 또한, Fig. 15는 날개수가 증가할 때 b/D 와 A_s/A 와의 관계를 나타낸 그래프로서 $b=0$ 인 조건에서 $p=2, 3, 4$ 로 변할 때 스크루의 단면적비는 각각 0.36, 0.67, 0.81로 증가함을 알 수 있다. 스크루의 날개수가 2에서 3으로 증가할 때 스크루의 단면적은 1.86배 증가하므로 상대적으로 배럴과 스크루사이의 유효 단면적이 감소된다. 따라서 압출능력을 고려한 적정 스크루의 날개수는 2개가 적합하다고 판단된다.

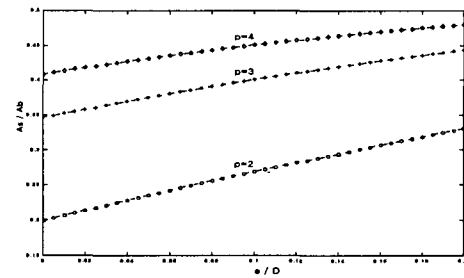


Fig. 13 A_s/A_b versus e/D at various numbers of flights

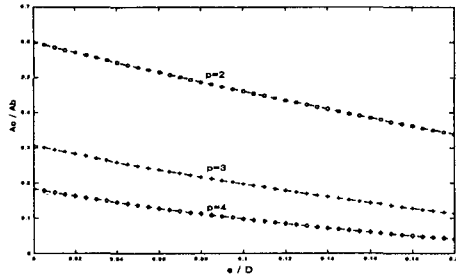


Fig. 14 A_o/A_b versus e/D at various numbers of flights

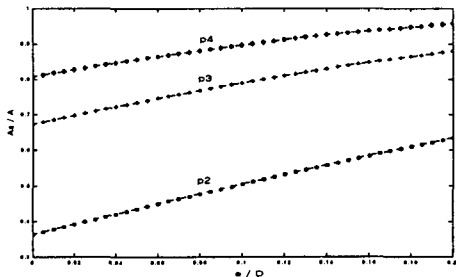


Fig. 15 A_s/A versus e/D at various numbers of flights

5. 결론

본 연구는 2축 스크루 압출기에 사용되는 스크루의 날개형상을 설계하기 위한 기초연구로서 스크루 날개단면을 기하학적으로 해석한 결과 다음과 같이 요약된다.

- 1) 스크루의 날개수와 선단폭 변화에 따른 단면 형상을 모델링하였다.
- 2) 채널의 폭과 날개높이는 날개수와 선단폭에 반비례한다.
- 3) 스크루의 피치와 채널폭은 비례하지만 $x=0$ 인 지점에서 날개높이는 스크루 피치의 변화에 관계없이 일정한 값을 갖는다.
- 4) 스크루단면의 날개수를 2개에서 3개로 증가 시 스크루 날개의 한계높이는 급격히 감소하고, 스크루의 단면적은 1.86배로 증가하므로 압출능력을 고려한 적정 날개수는 2개임을 알았다.

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. Chris Rauwendaal, "Polymer Extrusion", Hanser /Gardner Publications, Inc., pp.351-355, 1994.4.
5. Donald G. Baird, "Polymer Processing Principles and Design", John Wiley & Sons, Inc., pp.213-221, 1998.
6. H. Potente, U. Melisch and K. P. Palluch, "A Physico-Mathematical Model for Solids Conveying in Co-Rotating Twin Screw Extruders", Int. Polymer Processing XI, pp.21-41, 1996.
7. Anderson Lee, Jamie Ferguson, "Optimization of Large Scale Twin Screw Compounders", Polyloefins, pp.221-232, 1999.