

원심분리기의 채널 설계(I) - 입자의 부유문제와 채널 크기

서용권#

Channel Design of Decanter-Type Centrifuge (I) - Particles' Suspension and the Channel Size

Yong Kweon Suh#

ABSTRACT

In this paper, based on the concept of solid particles' hovering problem the working formula for the channel design of a Decanter-type centrifuge were derived. The Shields' diagram and its curve-fitting formula were used in determining the criterion of particle size for the sediment. By using these formula the designer can determine the sectional configuration of the channel, such as the liquid depth, the normal pitch of the screw-blade arrangement and the bowl diameter.

Key Words : Decanter, centrifuge(원심분리기), Shields' diagram(Shields 선도), particle suspension(입자 부유), bowl diameter(보울 직경), screw pitch(스크류 피치), liquid depth(수심)

1. 서론

원심분리기는 슬러지 등의 이물질이 혼합된 액체를 원심력의 원리를 이용하여 슬러지와 액체를 분리시키는 장치이다. 원심분리기는 일반 제약회사나 실험실에서 사용하는 소규모에서부터 하수처리용의 대형 구조물까지 매우 다양한 크기가 있고, 그 세부적인 원리, 기능, 및 형태에 따른 종류도 또한 다양하다. 본 연구는 하수처리용 또는 이와 유사한 목적으로 사용되는 Decanter 형 원심분리기의 설계에 대한 것으로서 본보에서는 설계의 초기단계에 있어서 중요한 과정으로 취급되는 채널의 설계에 관한 것이다.

Decanter형 원심분리기의 핵심구조는 Fig. 1의 스케치와 같다. 가장 내부에 있는 피드 파이프(feed pipe)와 그 외부의 스크류 축(screw shaft) 및 보울(bowl)은 동심축 상에 설치된다. 스크류 축 표면에는 슬러지를 제거하기 위한 스크류 날개(screw blade)가 부착되어 있다. 피드 파이프는 고정되며 스크류 축과 보울은 회전하는 구조로 되어 있다. 회전 동력이 그림의 우측에서 공급되어 스크류 축을 먼저 회전시키면 이 축의 회전은 좌측의 기어박스(gear box; 그림에서는 표시되어 있지 않음)를 통해 약간만 감속된 뒤 보울에 전달된다. 즉, 스크류 축과 보울은 거의 동일한 크기의 회전속도로 회전한다.

접수일: 2003년 2월 6일; 게재승인일: 2003년 8월 14일

교신저자: 동아대학교 기계산업시스템공학부

E-mail: yksuh@mail.donga.ac.kr, Tel: (051) 200-7648

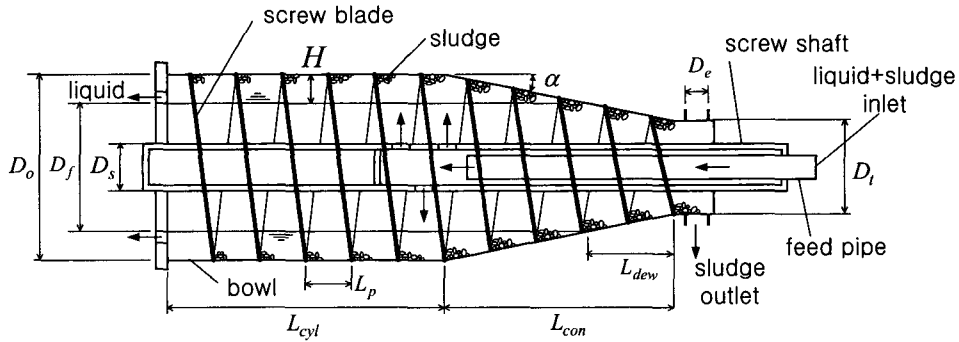


Fig. 1 Schematic illustration of the structure of a Decanter centrifuge

분리시키고자 하는 액체와 슬러지의 혼합물이 피드 파이프를 통해 스크류 축 내면에 투입되면 이것은 자연낙하 또는 강제 배출의 방식으로 스크류 축 구멍을 통해 분출된다. 분출된 혼합액은 스크류 날개, 스크류 축 외면, 및 보울 내면으로 형성되는 채널(channel) 내에 갇혀 스크류 및 보울과 같이 회전한다. 그러면 회전에 의한 원심력으로 액체는 보울의 내면에 밀착되고 이것이 누적되면 Fig. 1과 같이 보울 및 축과의 동심원 형태로 자유표면을 구성한다. 액체의 유입이 계속되면 자유표면은 점점 상승하여 마침내 좌측의 액체 배출구를 통해 액체는 배출된다. 그러나 이 과정에서 액체보다 무거운 슬러지는 액체에 의한 부력보다는 원심력이 더 커서 보울 내면의 바닥에 모인다(가라 앉는다). 한편, 스크류 축은 보울보다 약간 작은 속도로 회전하기 때문에 스크류 작용에 의해 가라앉은 슬러지를 우측으로 쓸어모아서 마침내 슬러지 배출구(sludge outlet)를 통해 밖으로 배출해 낸다.

보울은 단순한 원통형인 실린더와 콘(cone) 형태의 비치(beach; 그림에서 길이 L_{dew} 로 표시한 부분)가 연결된 모양을 취한다. 비치는 슬러지를 건져 올리고 이어서 슬러지에 포함된 액체 성분을 경사면을 통해 좌측으로 흐르게 함으로써 슬러지 출구를 통해 배출되는 슬러지의 함유율을 낮게 하기 위한 목적을 갖고 있다.

Decanter형 원심분리기의 기본적인 개념은 최근의 문헌¹을 통해 알아볼 수 있다.

이러한 원심분리기에 대한 설계는 대부분 경험적이며 설계 후 파일럿 제작 → 시험 → 설계변경 → 재시험 등의 다분히 시행착오적인 방법에 의존하고 있는 실정이며 따라서 신제품 개발의 기간이 길고 또 소요되는 개발비용도 증가한다. 이러한 개발비용의 절감과 개발기간의 단축을 위해서는 좀더 정밀하고 신뢰성 있는 설계공식이 필요하다. 본 연구에서는 원심분리기의 가장 초기단계에서 핵심이라 말할 수 있는 채널의 설계 즉 수심 H , 스크류 날개의 축 방향 피치 L_p (또는 채널의 폭 L_n), 그리고 보울의 내경 D_o 를 결정하는 공식들을 입자의 부유문제와 관련하여 유도하며 이를 실제 문제에 적용하여 보임으로써 설계공식의 타당성을 확보하는 데 그 목적이 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2절에서는 채널의 설계를 위한 기본 개념인 입자 부유의 문제를 설명하며 관련 공식을 제시한다. 제 3절에서는 이를 바탕으로 원심분리기의 채널 설계를 위한 공식을 유도하며, 제 4절에서는 기 설계된 제품에 있어서 입자의 부유와 관련한 임계 직경을 계산하는 과정을 제시한다. 그리고 제 5절에서는 구체적인 설계 예를 제시하고, 제 6절에서 결론을 맺는다.

2. 입자의 부유 문제

원심분리기의 설계에서 가장 중요한 문제 중의 하나는 채널 내 흐름이 격렬하여 물과 비중이 비슷

한 입자들이 바닥에 가라앉지 못하고 부유하는 문제이다. 원심분리기의 채널 설계에서는 이러한 입자의 부유 문제를 반드시 고려해야 한다. 다행히도 다른 학문 분야에서 이러한 문제들이 집중적으로 연구되어 왔고 상당한 데이터들이 축적되어 있기 때문에, 채널의 설계에서는 이들 결과를 이용할 수 있다.

연안이나 하천의 바닥지형의 변화 문제와 관련하여 토목/지질/해양공학에서는 채널 내 흐름에 있어서 고체 입자의 부유에 관한 Shields의 선도를 사용하고 있다. Fig. 2는 이의 선도를 보여주고 있다. 이것은 무차원 전단응력

$$T = \frac{\tau_0}{(S-1)\rho_w Ggd} \quad (1)$$

과 바닥 근처 입자의 레이놀즈 수

$$Re_p = \frac{u_* d}{\nu} \quad (2)$$

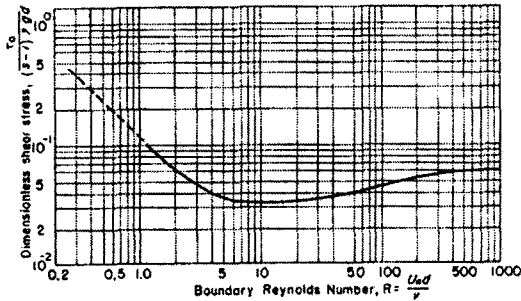


Fig. 2 Shields' diagram²

와의 관계를 나타내는 것이다. 이 식들에서, τ_0 는 바닥에서의 전단응력[Pa], S 는 입자의 비중, ρ_w 는 액체의 밀도[kg/m^3], g 는 중력가속도($=9.8[\text{m/s}^2]$), d 는 입자의 직경[m], u_* 는 바닥에서의 마찰속도[m/s], ν 는 유체의 동점성계수[m^2/s]이다. 또한, G 는 원심력에 따른 인자(centrifugal factor)로서 회전속도가 $N[\text{rpm}]$ 이고 직경이 D 인 위치에서는

$$G = \frac{D(2\pi N/60)^2}{2g}$$

으로 계산된다. 이것은 축으로부터 반경 r 에 있는 질량 m 의 입자가 $\omega (=2\pi N/60)$ 의 각속도로 회전할 때의 원심력 $m r \omega^2$ 과 중력에 의한 입자의 무게 mg 와의 비를 나타낸다.

이 선도는 주어진 유체환경과 입자의 직경을 사용해서 이들 무차원 값을 계산하였을 때 만약 그림의 곡선 위에 점이 놓이면 입자는 부유하고 그 아래에 있으면 입자는 가라앉는 것으로 판단할 수 있게 하는 선도이다. 이 선도에서 입자 레이놀즈 수가 1보다 작은 범위에서는(점선으로 표시) Stokes 범칙에 의한 유체 점성력과 입자의 중력 및 부력이 균형을 이루는 관계식으로 결정된다.

개수로와 같은 채널 내 흐름에서 관마찰계수 λ 와 전단응력과의 관계는 다음과 같다.³

$$\tau_0 = \frac{\lambda}{8} \rho_w V^2 \quad (3)$$

이 식에서 V 는 수로 내 유체흐름의 평균 속도이다. 관마찰계수는 Darcy의 식

$$\lambda = f(Re, \epsilon/D_h) \quad (4)$$

또는 Moody 선도로 구할 수 있다. 여기서 Re 는 채널 내 흐름의 레이놀즈 수로서

$$Re = \frac{VD_h}{\nu} \quad (5)$$

이고, D_h 는 수력직경으로서

$$D_h = \frac{4A}{P} \quad (6)$$

이며 A 는 수로의 단면적, P 는 침수길이이다. 그리고 ϵ/D_h 는 수로 벽의 거칠기를 나타내는 상대조도이다. 원심분리기와 같은 경우에는 일반적으로 매끈한 벽면으로 가정할 수 있으므로 식 (4)로서 Blasius의 식⁴

$$\lambda = 0.3164 Re^{-1/4} \quad (7)$$

을 쓰면 된다.

그리고, 마찰속도와 전단응력 및 관마찰계수와의 관계는 다음과 같다.

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} = \sqrt{\frac{\lambda}{8}} V \quad (8)$$

실제 원심분리기에 이 개념을 적용해보자. 채널 내 흐름의 깊이를 $H = 0.03$ [m]로 가정하고, 채널의 폭 L_n 은 대략 피치 L_p 와 같다고 가정하여 $L_n = 0.12$ [m]로 둔다. 그러면 수력직경은

$$D_h = \frac{4 \times 0.03 \times 0.12}{0.12 + 2 \times 0.03} = 0.08 \text{ [m]}$$

이다. 동점성계수를 $\nu = 2 \times 10^{-6}$ [m²/s]로 가정하면 채널흐름 레이놀즈 수는

$$Re = \frac{0.08 \times 1.16}{2 \times 10^{-6}} = 46400$$

이 된다. 여기서 채널내 평균속도로서는 $V = 1.16$ [m/s]가 적용되었다. 이어서 관마찰계수를 Blasius의 식 (7)을 사용하여 구하면

$$\lambda = 0.3164 \times 46400^{-1/4} = 0.022$$

가 된다. (이 값은 레이놀즈 수의 변화에 따라 크게 달라지지 않는다.) 전단응력은

$$\tau_0 = \frac{1}{8} \times 0.022 \times 1000 \times 1.16^2 = 3.7 \text{ [Pa]}$$

이다.

이제 입자의 직경이 1[mm]인 경우에 대해 Re_p 를 구해보면 다음과 같다.

$$Re_p = \frac{\sqrt{0.022/8} \times 1.16 \times 0.001}{2 \times 10^{-6}} = 30$$

G-factor가 420인 경우, 무차원 전단응력은 아래와 같이 계산된다.

$$T = \frac{3.7}{0.025 \times 1000 \times 420 \times 9.8 \times 0.001} = 0.035$$

여기서 입자의 비중으로서 $S = 1.025$ 가 사용되었다. Shields 선도에 의하면 이 점은 바로 곡선 상에 있다. 즉 주어진 원심분리기 장치에서는 직경 1 [mm] 이하의 입자는 부유하기 때문에 제대로 걸러지지 않는다는 결론을 얻을 수 있다.

3. 채널단면 설계공식 및 계산 순서

원심분리기에서 입자의 부유문제와 관련된 설계 파라미터는 여러 가지 있지만 여기서는 채널의 폭 L_n , 채널의 깊이 H , 및 보울의 외경 D_o 을 정하는 것을 목표로 두고 공식을 정리한다.

우선 채널의 폭 L_n 은 보울 직경 D_o 의 f_{Ln} 배, 그리고 채널의 수심 H 는 채널 폭 L_n 의 f_H 배로 설정한다.

$$L_n = f_{Ln} D_o \quad (9)$$

$$H = f_H L_n \quad (10)$$

채널단면의 수력직경의 공식은 아래와 같다.³

$$D_h = \frac{4HL_n}{L_n + 2H} \quad (11)$$

실제 설계에서 Shields 선도를 쓰기는 불편하다. 그러므로 아래와 같은 곡선맞춤의 공식을 쓰기로 한다.⁵

$$T = 0.22\beta + 0.06 \times 10^{-7.7\beta} \quad (12a)$$

$$\beta = \alpha^{-0.6} \quad (12b)$$

$$\alpha = Re_p T^{-1/2} \quad (12c)$$

이 식에서 입력은 Re_p 이고 출력은 T 이다. 이 비선형 산술방정식의 근은 Newton-Rhapson 방법으로 구하면 된다. 단, Re_p 의 공식은 식 (8)을 (2)에 대입한

$$Re_p = \frac{\sqrt{\lambda/8} V d_c}{\nu} \quad (13)$$

이다. 여기서, d_c 는 부유하지 않는 입자의 최소 직경이다.

한편, 식 (1)에서 G 는 보울 직경을 기준으로 한 G_o 가 되어야 한다. G_o 의 식

$$G_o = \frac{D_o(2\pi N/60)^2}{2g}$$

과 τ_0 의 식 (3)을 대입하면 식 (1)은

$$T = \frac{\lambda V^2}{(\pi/15)^2(S-1)D_o N^2 d_c} \quad (14)$$

가 된다. 이어서, 유량 Q [m^3/hr]로부터 구할 수 있는 평균속도의 식

$$V = \frac{Q}{3600HL_n} \quad (15)$$

을 식 (14)에 대입하면

$$T = \frac{\lambda Q^2}{(240\pi)^2(S-1)D_o L_n^2 H^2 N^2 d_c} \quad (16)$$

가 된다. 이 식으로부터 D_o 를 구하기 위해 (9)와 (10)의 관계식을 사용하면

$$D_o = \left[\frac{\lambda Q^2}{(240\pi)^2(S-1)f_{Ln}^2 f_H^2 N^2 T d_c} \right]^{1/5} \quad (17)$$

을 얻는다.

일반적으로 원심분리기의 제품사양을 명시할 때는 채널 폭 L_n 보다는 스크류의 축방향 피치 L_p 를 사용하여 나타낸다. 둘 사이의 관계는 아래와 같다.

$$\sin \theta_o = \frac{L_n}{\pi D_o}, \quad L_p = L_n \cot \theta_o \quad (18)$$

여기서 θ_o 는 스크류 외경에서의 스크류 날개의 나선각(helix angle)이다.

이상의 공식으로 채널의 중요 설계 파라미터를 결정하기 위한 계산순서를 정리하면 아래와 같다.

- (1) 먼저, 용량 Q [m^3/h], 입자의 비중 S , 보울의 회전속도 N [rpm], 유체의 동점도 ν [m^2/s]를 정한다.
- (2) 제거하고자 하는 최소 입자직경 d_c 를 설정한다. 그리고 상수 f_{Ln} , f_H 를 결정해 둔다.
- (3) 반복계산의 초기치로서, 예를 들어 $\lambda = 0.022$, $T = 0.05$ 를 가정하여 식 (15)로 D_o 를 구한다.
- (4) 식 (9), (10)으로 L_n 과 H 를 계산한다.
- (5) 식 (5), (7)에 의해 λ 를 계산한다.
- (6) 식 (15)에 의해 V 를 구한다.
- (7) 식 (13)으로 Re_p 를 구하고,
- (8) 이어서 비선형 방정식 (12)를 반복적으로 풀어서 T 를 구한다.
- (9) 식 (17)로부터 D_o 를 계산한다.
- (10) 수렴시까지 과정 (4)~(9)를 반복한다.

4. 임계 입자직경의 확인을 위한 계산공식

기 제작된 원심분리기에서 임계 입자직경 d_c 는 아래 순서대로 계산하여 확인할 수 있다.

- (1) Q , S , N , H , L_n , D_o 가 정해진 상태에서,
- (2) 식 (15)로 V 를 계산한다.
- (3) 식 (11)로 D_h 를 계산한다.
- (4) 식 (5), (7)에 의해 λ 를 계산한다.
- (5) d_c 를 임의로(예; 0.001[m]) 가정한다.
- (6) 식 (13)으로 Re_p 를 계산한다.
- (7) 만약 Re_p 가 1 이하가 되면 흐름은 층류이므로 입자의 부유문제는 없는 것으로 하여 계산을 종료한다. 그렇지 않으면,
- (8) 식 (12)를 반복계산으로 풀어서 T 를 구한다.
- (9) 식 (14)의 변형인

$$d_c = \frac{\lambda V^2}{(\pi/15)^2 (S-1) D_o N^2 T} \quad (19)$$

으로부터 d_c 를 계산한다.
 (10) 수렴시까지 (6)~(9)의 과정을 반복한다.
 Table 1은 외국의 P사에서 홈페이지를 통해 공개한 두 가지 중형 제품에 대한 계산결과이다.

Table 1 Numerical results for a product the specification of which is given in a Web page

	Q [m ³ /hr]	D _o [m]	H [m]	L _p [m]	d _c [m]
P-Co. (Med.-2)	45	0.470	0.099	0.150	0

위 결과를 보면 주어진 설계사양으로는 입자의 직경과 관계없이 모든 크기의 입자가 침강한다. 물론 실제로는 작은 입자가 침강하려면 그만큼 많은 시간이 소요되기 때문에 채널의 길이도 충분히 커야 할 것이다. 따라서 최적 설계의 입장에서 보면 $d_c=0$ 의 결과는 결코 바람직한 것은 아니다. 채널의 길이(따라서 보울 및 스크류의 길이)를 정하는 문제는 이 다음 논문에서 다룰 것이다.

Fig. 3은 이 제품에 대한 Re_p - T 의 관계를 Shields 선도와 함께 나타낸 것으로서, 어떠한 Re_p 에 대해서도 무차원 전단응력의 곡선이 Shields 선도 아래에 위치하기 때문에 입자의 부유 문제는 없는 것임을 이해할 수 있다.

5. 실제 제품설계에 대한 공식 적용의 예

임의로 선택한 용량 50 [m³/h]급 제품의 설계를 위한 계산 결과를 제시한다. 이 용량은 일반적으로 중용량 내지는 대용량급에 속한다.

우선, 설계를 위한 중요 제원은 아래와 같다.

$$Q = 50 \text{ [m}^3\text{/h]}, N = 2000 \text{ [rpm]}, S = 1.025$$

이에 대해 $f_{Ln} = 0.4, f_H = 0.5$ 로 하여 입자의

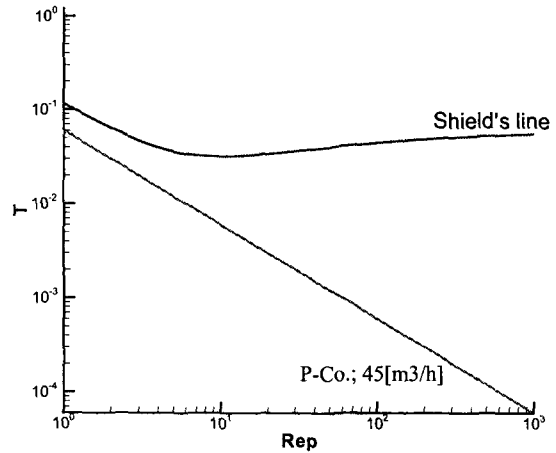


Fig. 3 The dimensionless wall-shear-stress T versus the particle Reynolds number Re_p obtained for a medium-size product of P-Co. Also shown is the Shields' line

입체직경 d_c 를 달리 하여 D_o, L_p , 및 H 를 계산하면 결과는 Table 2와 같다. (여기서 d_c 를 0.0001 ~ 0.001 m의 범위로 선택한 것은 다소 임의적이거나, 제조회사의 경험을 참고하여 정한 것이다.) 이어서, $f_{Ln} = 0.35, f_H = 0.5$ 로 하였을 때는 Table 3, 세 번째로 $f_{Ln} = 0.4, f_H = 0.25$ 로 하였을 때는 Table 4의 결과를 얻을 수 있다.

Table 2 Numerical results for the parameters $Q = 50$ [m³/h], $N = 2000$ [rpm], $S = 1.025$ with $f_{Ln} = 0.4$ and $f_H = 0.5$

d _c	D _o	L _p	H
0.0001	0.460	0.190	0.092
0.0002	0.443	0.184	0.089
0.0004	0.397	0.165	0.079
0.0006	0.361	0.151	0.072
0.0008	0.335	0.140	0.067
0.0010	0.316	0.132	0.063

Table 3 Numerical results for the parameters $Q = 50$ [m^3/h], $N = 2000$ [rpm], $S = 1.025$ with $f_{Ln} = 0.35$ and $f_H = 0.5$

d_c	D_o	L_p	H
0.0001	0.514	0.186	0.090
0.0002	0.494	0.179	0.087
0.0004	0.441	0.161	0.077
0.0006	0.400	0.146	0.070
0.0008	0.371	0.136	0.065
0.0010	0.350	0.128	0.061

Table 4 Numerical results for the parameters $Q = 50$ [m^3/h], $N = 2000$ [rpm], $S = 1.025$ with $f_{Ln} = 0.4$ and $f_H = 0.25$

d_c	D_o	L_p	H
0.0001	0.617	0.254	0.062
0.0002	0.590	0.243	0.059
0.0004	0.523	0.216	0.052
0.0006	0.474	0.196	0.047
0.0008	0.439	0.182	0.044
0.0010	0.414	0.172	0.041

위 결과를 보면, f_{Ln} 과 f_H 가 일정할 때, d_c 의 증가와 더불어 D_o , L_p , H 는 모두 감소한다. 이는 분리시키고자 하는 입자가 커지면 식 (1)과 (3)에서 보는 바와 같이 채널 내 흐름의 평균 유속을 크게 할 수 있으며, 이는 바로 채널의 크기를 전반적으로 작게 설계할 수 있다는 것을 의미한다. 외경 D_o 는 실제로 원심분리기의 회전속도를 결정하는 가장 중요한 설계인자이다. 외경이 커질수록 진동/소음 및 안정성의 관점에서 회전속도는 감소시키는 경향이 있다. 따라서 작은 직경은 이러한 면에서 유리하다.

Decanter형 원심분리기의 설계는 본 논문(I)에서 제시한 설계공식 이외에, 앞에서 언급한 바와 같이 입자가 침강할 수 있게 충분한 시간이 확보되도록 보울의 길이를 정하는 계산 공식이 필요하며, 이에 대해서는 이 다음 논문(II)에서 다룬다.

6. 추가 검토

원심분리기 설계자의 입장에서는 설계를 위한 기초계산도 중요하지만 입자의 입계 직경 d_c 가 설계 파라미터에 의해 어떠한 영향을 받는지 파악하는 것도 그에 못지 않게 중요하다.

식 (17)을 다르게 쓰면 아래와 같다.

$$d_c = \frac{\lambda Q^2}{(240\pi)^2(S-1)f_{Ln}^2 f_H^2 N^2 T D_o^5} \quad (17)$$

한편, Shields' 선도 Fig. 2를 보면, 입계 무차원 전단 응력 T 는 입자 레이놀즈 수가 5 이상에서는 레이놀즈 수에 따른 변화가 크지 않다. 따라서 위 식에서 이 값을 상수로 보고, 계속해서 유량 Q , 채널 형상비 f_{Ln} , f_H , 및 비중 S 가 일정하다고 본다면, 입계 직경은 대체로 회전속도의 제곱에 반비례하고 직경의 5승에 반비례함을 알 수 있다.

따라서 입계직경을 감소시키기 위해서 원심분리기를 크게 설계하느냐 아니면 회전속도를 크게 하느냐 하는 선택의 문제에 직면하게 된다. 이러한 문제는 또한 기계의 진동/소음 및 안정성과 관련되어 결정해야 할 사항이며, 덧붙여 보울의 길이와도 관련된다. 후자의 문제는 다음 논문에서 논할 예정이다.

7. 결론

본 연구를 통해 실제 산업현장에서 바로 적용할 수 있는 원심분리기의 설계를 위한 기초계산 공식과 이를 사용한 계산 과정을 정립화할 수 있었다.

입자의 입계직경은 대체로 회전속도의 제곱에 반비례하며 보울 내경의 5승에 반비례할 것으로 예측되었다.

분리시키고자 하는 입자의 직경이 작아질수록 원심분리기의 직경이 커지거나 아니면 회전속도가 커져야 한다. 이 선택의 문제는 사용자의 요구, 제품의 가격 등을 고려하여 최적으로 결정되어야 할 것이다. 더불어 회전속도의 증가에 따른 지지 베어링의 성능/수명 및 소음/진동 면에서도 검토되어야 할 사항이다.

후 기

본 연구는 한국과학재단(KOSEF) 지정 신소형재
가공청정 공정개발 연구센터(과제번호; R12-2002-
058-01004-02003)의 지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. Records, A. and Sutherland, K., Decanter Centrifuge Handbook, Elsevier Advanced Technology, 2001.
2. Wood, A. M. M. and Fleming, C. A., Coastal Hydraulics, The MacMillan Press Ltd., 1981.
3. Maeng, J. S., Suh, Y. K. and Kim, K. C., Fluid Mechanics(in Korean), Byung-Jin Pub. Co., 2003.
4. Boo, J. S., Suh, Y. K., Song, D. J. and Kim, K. C., Fluid Mechanics(in Korean), Pearson-Education, 1997.
5. Vanoni, V. A.(ed), Sedimentation Engineering, Manuals and Reports on Engineering Practice, No. 54, ACSE, New York, 1975.