

초음파를 이용한 현탁용액내 입자들의 분리

구영한, 신명근, 조규현*

강원대학교 화학공학과

전화) 0361) 250-6335 FAX 0361) 251-6335

Abstract

In this study, we investigated the theoretical and experimental study for separation of solid-liquid suspensions of water and fine particles using acoustic standing wave. When the acoutic force was not applied, the separation efficiency was decreased as flow rate was increased. When it was applied, the separation efficiency was maintained over 95%.

서론

고-액 분리는 화학공정 및 환경공정에 있어 널리 활용되고 있는 공정이며, 특히 생활폐수 및 산업 폐수 처리분야에서 고-액 분리공정이 차지하는 비중은 매우 크다. 용액중의 입자들을 분리하는 전통적인 방법으로는 중력을 이용하는 자연 침강법, 원심력을 이용한 원심분리법, 응집제를 이용하는 응집법, 필터를 이용하는 여과법등이 있다. 그러나, 이들 장치들을 효율적으로 사용하기 위해서는 용액속에 현탁되어 있는 입자들의 종류 및 물리적인 성질에 따라 그 조작이 달라져야 한다는 단점을 가지고 있다. 따라서, 용액속에 현탁되어 있는 입자들을 분리할 수 있는 새로운 방법들이 대두되는 가운데, 초음파를 이용한 현탁용액내의 입자들을 분리하고자 하는 시도들이 이루어 졌다[1].

진동자에 의해 발생된 초음파는 반사판에 반사되어 정재파를 형성하게 된다. 입자들이 이러한 정재파에 노출되게 되면 입자의 매질과의 밀도차에 따라 정재파의 velocity anti-node 또는 velocity node로 이동하여 초음파 파장의 1/2의 간격으로 응집된다[1]. Acoustic field에서 응집된 입자들은 일정크기로 성장한 뒤, 중력에 의해 침강하고 매질은 acoustic field 밖으로 배출됨으로써 고-액분리가 일어나게 된다.

본 연구에서는 이러한 초음파의 성질을 이용한 고-액 분리 및 이론적인 고찰에 대해 조사하였다.

이론

초음파에 의하여 잡히는 입자에 대한 물질수지 식을 세우면 (1)식과 같다.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} \quad (1)$$

여기서, \dot{m}_{in} 은 input flow rate 이고 \dot{m}_{out} 은 output flow rate 이다. \dot{m}_{in} 은 다음과 같이 나타낼수가 있다.

$$\dot{m}_{in} = C_{in}v_{in}A_{in} \quad (2)$$

여기서, A_{in} 은 유입되는 관의 관경[m^2], C_{in} 는 reservoir 내의 입자의 농도[g/L], v_{in} 는

유입관내에서의 입자의 속도[m/s]이다. v_{in} 가 종단속도에 도달하였다고 가정하였을 경우에 관내에 작용하는 힘의 합은 $\sum F = 0$ 이다. 관내 입자의 속도는 다음과 같이 나타낸다.

$$v_{in} = v_{pump} - \frac{2a^2}{9\mu}(\rho_p - \rho_L)g \quad (3)$$

(3)식을 (2)식에 대입하면 유입되는 입자의 mass flow rate는 다음과 같이 된다.

$$\dot{m}_{in} = C_{in}A_{in}(v_{pump} - \frac{2a^2}{9\mu}(\rho_p - \rho_L)g) \quad (4)$$

Chamber 안에 축적되는 particle의 양은 초음파에 의하여 잡히는 양과 같기 때문에 초음파에 의하여 잡히는 입자의 양은

$$\frac{\partial M}{\partial t} = V \frac{\partial C}{\partial t} = V \frac{\partial C}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial t} \quad (5)$$

으로 나타낼 수 있다. 여기서 오른쪽 부분의 처음부분은 초음파의 진행방향에 대하여 입자의 농도분포를 나타내고 있으며 두번째 부분은 초음파에 의한 입자의 이동속도를 나타낸다. 초음파에 의한 입자의 농도분포는 다음과 같은 식으로 나타낼수 있다[2].

$$\frac{\partial C}{\partial x} = \frac{C_{in}F_a}{k_B T} \quad (6)$$

여기서, k_B 는 Boltzmann constant이고 T 는 절대온도이다. F_a 는 입자에 가해지는 acoustic radiation force[N]이다. Acoustic radiation force는 Yosioka와 Kawasima에 의하여 유도된 식으로 다음과 같이 나타낸다[3].

$$F_a = \frac{4}{3} \pi \hat{\Phi}^2 \rho (ka)^3 \left[\frac{5\beta - 2}{2\beta + 1} - \frac{1}{\beta \sigma^2} \right] \sin(2kx) \quad (7)$$

β 와 σ 는 각각 liquid 와 particle의 density ratio 및 sound velocity의 비이다. k 는 wave number[m^{-1}]이고 a 는 입자의 반지름[m]이다. 초음파장에서의 입자의 속도는 초음파의 힘과 유체에 의한 항력에 의하여 결정되며 이에 대한 motion balance를 세우면 다음과 같이 된다[4].

$$m \frac{\partial v}{\partial t} = F_D + F_a \quad (8)$$

이에 따라 입자의 속도는 다음과 같이 나타낸다.

$$v_a = \frac{F_a}{6\pi\mu a} [1 - \exp(-\frac{6\pi\mu a}{m'}t)] \quad (9)$$

따라서 (5)식은 다음과 같이 나타낼수 있다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{CF_a^2}{k_B T(6\pi\mu a)} [1 - \exp(-\frac{6\pi\mu a}{m'}t)] \quad (10)$$

(4)식과 (10)식을 (1)식에 대입하여 output mass flow rate에 대하여 정리하면

$$\dot{m}_{out} = C_{in}A_{in}(v_{pump} - \frac{2a^2}{9\mu}(\rho_p - \rho_L)g) - \frac{CF_a^2}{k_B T(6\pi\mu a)} [1 - \exp(-\frac{6\pi\mu a}{m'}t)] \quad (11)$$

이되며 분리효율은 다음과 같이 나타낸다

$$SE = (1 - \frac{\dot{m}_{in}}{\dot{m}_{out}}) \times 100\% \quad (12)$$

실험 방법

실험에 사용된 현탁입자는 크기가 0.1 ~ 4 μm 인 kaolin(China clay, Sigma)을 사용하였으며 매질로서는 초순수 물을 사용하였다. 초음파 분리장치는 실험실에서 자체 제작하였으며, 2~3 MHz를 발생시키는 초음파 발생장치, ceramic 진동자(Tokin, 5 cm) 및 반사판으로 구성되어 있다. Reservoir의 농도 및 초음파 분리장치의 운전조건이 분리효율에 미치는 영향에 대해 조사하였다.

결과 및 토의

Figure 1은 초음파가 분리효율에 미치는 영향에 대해 살펴본 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이, 초음파를 조사하지 않았을 때 약 75%의 분리효율을 나타내었으나, 초음파를 조사한 결과 분리효율이 96%로 증가하였음을 볼 수 있었다. 이를 통해, 초음파의 acoustic force가 현탁용액내 입자들의 분리에 영향을 끼침을 알 수 있었다.

Superficial velocity가 분리효율에 미치는 영향에 대해 살펴보았다(Figure 2). 그림에서 보는바와 같이, 초음파를 가하였을 경우, 유속 0.5~1.25 cm/min에서 95%이상의 일정한 분리효율을 나타내었다. 그러나, 초음파를 가하지 않았을 경우, 유속이 증가함에 따라 분리능이 감소함을 알 수 있었다.

Reference

- [1] M. C. Bekker, J. P. Mayer, L Pretorius and D. E. Van der Merwe "Separation of solid-liquid suspension with ultrasonic acoustic energy" *Wat. Res.*, 11(10), 2543 - 2549(1997)
- [2] Kenji Yasuda "Blood concetration by Superposition of higher Harmonics of Ultrasound " *Jpn. J. Appl. Phys.*, 36, 3130-3135(1997)
- [3] Martin Groschl "Ultrasonic separation of suspended particle -Part I : Fundamental" *Acoustica*, 84, 432-447(1998)
- [4] Yasuda K. and T. Kamakura "Acoustic radiation force on micrometer-size particle" *Appl. phys Lett.*, 71(13), 1771-1773(1997)

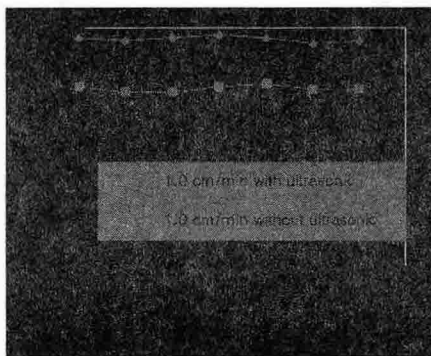


Figure 1. time dependence of separation efficiency at concentration of reservoir 5g/L voltage 30V

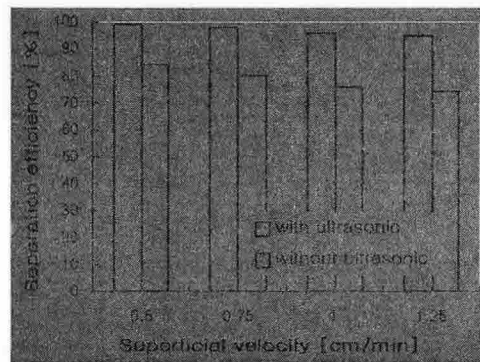


Figure 2. Influence of superficial velocity on separation efficiency. Concentration of reservoir: 5g/L, Voltage: 30 V