

HRT 변화에 따른 미세입자 분리 특성

Characteristics of Micro-Particle Separation according to HRT Changes

안광호 · 안재환[†] · 김이태 · 김석구 · 강성원 · 박은주 · 이영섭*

Kwangho Ahn · Jaehwan Ahn[†] · I-tae Kim · Seoggu Kim

Sungwon Kang · Eunzoo Park · Youngsup Lee*

한국건설기술연구원 환경연구실 · *인천대학교 임베디드시스템공학과

Environmental Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology

*Department of Embedded systems Engineering, Incheon University

(2013년 11월 12일 접수, 2013년 12월 2일 채택)

Abstract : Fluid generated within the sonic or ultrasonic waves are reflected by the wall, while the opposite direction forming a predetermined sound wave to the acoustic standing wave is referred to. In this study, the frequency of 1.0 MHz and 2.0 MHz acoustic standing wave generation module is installed in a continuous particle separation device, the laminar flow of influent, taking into account the hydraulic retention time (HRT) in accordance with changes in particle separation characteristics investigated. Operation of a standing wave in the particle separation device about 1.3~2.8°C temperature is increased, but did not significantly affect the formation of standing waves. During operation, the HRT 1 hr frequency 1.0 MHz 2 hr, 4 hr longer as the particle separation efficiency (turbidity) were 64.1%, 70.0%, 74.3% and, 2.0 MHz has 58.0%, respectively, depending on HRT, 61.8%, 70.7% in the respectively. That is, the same frequency, the HRT treatment efficiency is 10% or more, depending on differences in generation and, 1.0 MHz frequency, 2 hr, 2.0 MHz 4 hr at about 70% or more of the processing efficiency can be maintained. Frequency of 1.0 MHz and 2.0 MHz operation at the same time, as a result, HRT 1 hr, 2 hr, 4 hr particle separation efficiency of 63.8%, respectively, 70.6%, 77.6%, rather than the generation of standing waves appear continuous HRT is affecting a lot of particles to separate could know.

Key Words : Acoustic Standing Wave, Particle Separation, Laminar flow, HRT

요약 : 유체 내에서 발생된 음파 또는 초음파가 반사벽에 의해 반대방향으로 진행하면서 일정한 파동을 형성하는 음파를 음향정재파(acoustic standing wave)라고 한다. 본 연구에서는 주파수 1.0 MHz와 2.0 MHz의 음향정재파 발생모듈을 설치한 연속식의 입자분리장치에서, 유입수의 층류(laminar flow)를 고려하여, 수리학적체류시간(HRT) 변화에 따른 입자분리 특성을 살펴보았다. 정재파 가동에 따른 입자분리장치 내의 수온은 1.3~2.8°C 정도 증가하였으나 정재파 형성에 큰 영향을 주지 않았다. 주파수 1.0 MHz 가동 시 HRT 1시간에서 2시간, 4시간으로 길어짐에 따라 입자분리 효율(탁도)은 각각 64.1%, 70.0%, 74.3%로, 2.0 MHz에는 HRT에 따라 각각 58.0%, 61.8%, 70.7%로 증가된 것으로 나타났다. 즉, 동일한 주파수일 경우 HRT에 따라 처리효율이 10% 이상 차이가 발생하고 있으며, 1.0 MHz 주파수에서는 2시간, 2.0 MHz에서는 4시간 정도에서 70% 이상의 처리효율을 유지할 수 있다. 주파수 1.0 MHz와 2.0 MHz를 동시에 가동한 결과, HRT 1시간, 2시간, 4시간에서의 입자 분리 효율은 각각 63.8%, 70.6%, 77.6% 나타나 연속된 정재파의 발생 보다는 HRT가 입자분리에 많은 영향을 주는 것을 알 수 있었다.

주제어 : 음향정재파, 입자분리, 층류, 수리학적 체류시간

1. 서론

수체 내에 고형물 입자를 분리하는 기술은 고속침전, 응집침전 그리고 멤브레인 등을 이용한 다양한 기술들이 있으나, 각각의 기술들은 여과지의 막힘 현상이나 응집을 위한 화학물질들의 이용으로 또 다른 문제점을 갖고 있다. 입자의 분리기술중 하나로 수체에 추가적인 영향을 미치지 않는 음향정재파(acoustic standing wave) 응용기술을 제안할 수 있으며, 최근에는 미세입자의 분리 및 제어부분에 많은 연구가 진행되고 있다.^{1,2)} 혈액내에서 혈장을 분리하는 기술,³⁾ 반도체 기술을 활용한 실리콘 채널 에칭기술,⁴⁾ 다공성 여재로 충전된 반응기를 이용한 부유성 입자들의 제거⁵⁾ 등

음향정재파를 이용한 다양한 연구가 수행되었다. 기존의 음향정재파에 의한 연구는 음향을 발생시키는 트랜듀서와 음파반사판의 간격이 수 mm 정도로 입자분리 채널의 간격이 좁아 미세입자의 분리효율이 미미하거나 실용화 수준이 매우 제한적인 수준이었다.^{6,7)} 이와 같이 입자분리장치의 분리채널 폭이 작을 경우, 입자분리 장치 내에 트랜듀서에 의한 수온증가로 인하여 미세입자들의 운동속도가 증가되어 정재파의 형성 시, 입자들의 분리 및 배열에 영향을 줄 수 있다.^{8,9)} 본 연구에서는 트랜듀서와 반사판의 간격이 100 mm로 증대시켜 별도의 냉각장치가 필요 없고, 층류(laminar flow)를 형성할 수 있는 입자분리장치에서의 HRT 변화에 따른 입자분리 특성을 살펴보았다.

[†] Corresponding author E-mail: jhahn@kict.re.kr Tel: 031-910-0306 Fax: 031-910-0291

2. 정재파형성의 유체역학적 고려사항

배관에서 액체의 흐름은 레이놀즈수(Reynolds number)에 따라 나타내는데, 개수로(open channel)에서 500 이하에서 층류가 나타나고, 1,000 이상에서 난류의 흐름이 나타나는데, 그 중간지점을 전이영역이라고 나타낸다.^{10,11)} 정재초음파는 음파를 발생시키는 압전체와 일정한 거리에 떨어져 있는 반사체 사이에서 형성되고, 유체 내에 혼합되어 있는 입자들은 압전체의 음향방사력에 의해 형성되는 정재파의 마디면(node)에 모이게 된다. 유입구에서 유입된 유체는 입자 분리 채널을 따라서 정재파가 형성되는 부분에서 층류(laminar flow)로 형성되고, 여기서 정재파의 마디면에 입자들이 정렬되는 층을 형성하며 출구 부분에서 유체와 입자가 분리되어 배출된다.

정재파 형성의 유체역학적 고려사항으로 채널속의 유체 속도를 층류에서 유지되도록 채널의 설계 시 레이놀즈수를 제한할 필요가 있으며, 배관을 통해 채널로 들어온 유체는 급작스런 확대관이나 축소관이 되어 난류를 유발시키지 않도록 단면형상의 설계에 주의해야 한다. 또한 유체가 정재초음파장이 형성되는 구역, 즉 보통 압전재료 부착위치에서 층류를 유지하도록 채널의 입구에서 어느 정도의 인입장(entrance length)을 Fig. 1과 같이 유지할 필요가 있다.^{12,13)}

인입장수(entrance length number) E_L 는 다음과 같고,

$$E_L = \frac{L_c}{d} \quad (1)$$

여기서, L_c 는 완전 전개속도분포 형성 길이(length to fully developed velocity profile)이고, d 는 관 또는 덕트의 직경이다. 층류(laminar flow)가 되기 위한 인입장수(entrance length number)는 다음과 같다.

$$E_L = 0.06Rn \quad (2)$$

Rn 은 레이놀즈수를 나타낸다.

본 실험에서 사용된 반응조의 레이놀즈수는 개수로(open channel)에서 레이놀즈수로 식 (3)과 같이 구하였다.

$$Rn = \frac{4\rho VR_h}{\mu} \quad (3)$$

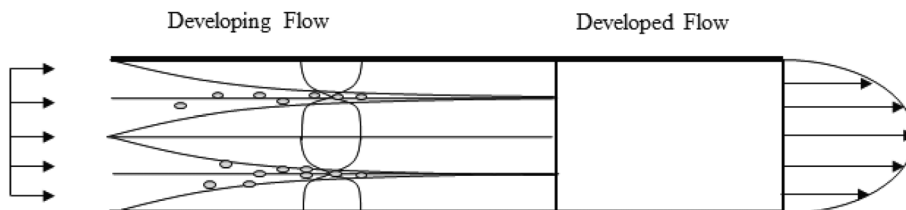


Fig. 1. Schematic diagram of laminar flow.

여기서 ρ 는 물의 밀도, μ 는 유체의 점성, V 는 유속, R_h 는 수리학적 직경을 나타낸다.

3. 실험 재료 및 연구방법

3.1. 실험재료 및 분석방법

입자분리 실험을 위하여 평균입경 6.8 μm 의 카올린을 이용하였다. 주요 성분은 SiO_2 72.1%, Al_2O_3 19.57%, 미량의 Fe_2O_3 , CaO , MgO 로 구성되었다. 실험 전에 카올린 혼합용액을 30분 동안 침전시켜 자연침강에 의해 분리되는 입자들을 최소화하여 실험하였으며, 이때 초기 카올린 농도와 탁도는 각각 100 ppm, 30 NTU이다. 입자분리실험에 이용된 음향정재파의 주파수는 1 MHz와 2 MHz이며, 각각의 주파수에서 수리학적체류시간(HRT) 변화에 따른 탁도 변화를 알아보고, 1 MHz와 2 MHz의 주파수를 동시에 같이 작동하여 탁도 변화를 실험하였다. 수중에 분리된 입자의 모습은 samsung NX1000 카메라(접사렌즈 60 mm)를 이용하여 촬영하였다. Fig. 2는 카올린의 독립침전 시 입자의 크기 변화를 나타낸 것으로 초기 평균입경은 6.8 μm (최소 : 1.5 μm , 중간 : 5.1 μm , 최대 : 13.2 μm)였으며, 10분후 5.2 μm (최소 : 1.4 μm , 중간 : 4.4 μm , 최대 : 10.0 μm), 30분후 4.7 μm (최소 : 1.4 μm , 중간 : 4.1 μm , 최대 : 8.8 μm)로 점차 평균입자가 감소하였다. 최소입자의 크기는 변화가 없었으며, 최대입자가 점차 감소하는 경향을 나타내었다. 입자의 크기는 Malvern Mastersizer 2000E (Malvern Instrument Ltd., UK)를 탁도는 Turbidity meter (HACH 2100N)을 사용하여 분석하였으며, 유입수는 연속으로 유입하고 유출수를 HRT 변화에 따라 실험하였다.

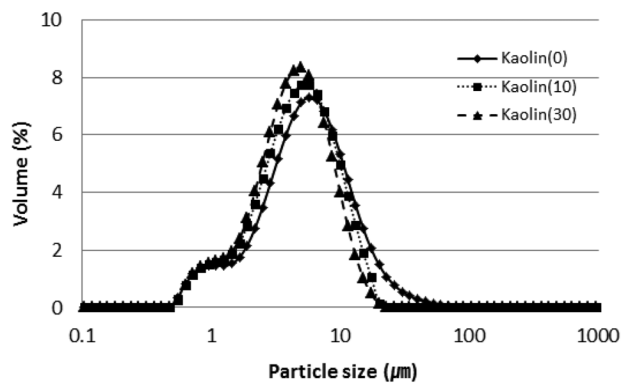


Fig. 2. Particle size distribution of Kaolin by discrete settling.

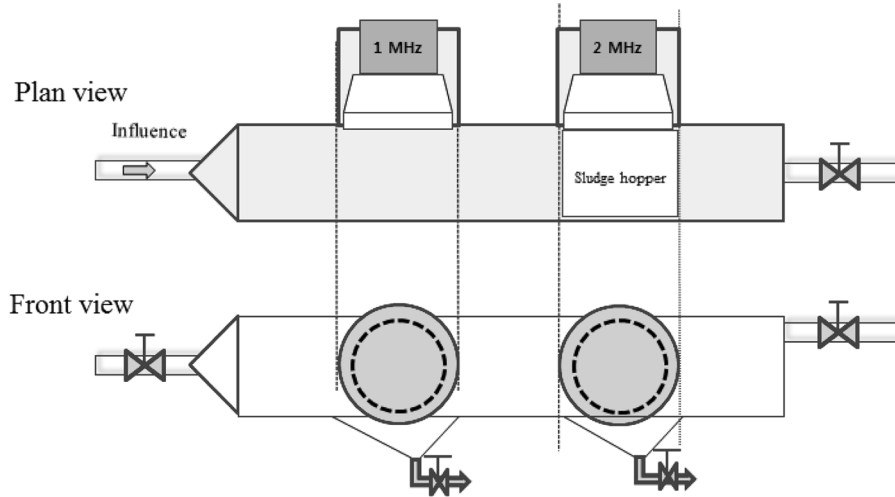


Fig. 3. Schematic diagram of the particle separation device with ultrasonic transducer.

3.2. 입자분리장치

본 실험연구에 사용된 입자분리장치의 구성도는 Fig. 3과 같다. 반응조 제원은 L 480 × W 100 × H 100 mm으로 아크릴 재질로 제작하고, 음파의 반사판은 sus304를 설치하였다. 1.0 MHz와 2.0 MHz (±7%)의 주파수를 갖는 진동모듈(transducer) 내부에는 각각 지름 60 mm의 압전소자(Piezoelectric materials)가 내장되어 있어서 평면의 초음파를 발생 시키게 된다. 유입구는 층류(laminar flow)를 형성할 수 있도록 콘(cone) 형태로 제작되었으며 1 MHz와 2 MHz를 병렬형태로 두어 전단과 후단에서 주파수에 따른 크기가 다른 입자들이 포집될 수 있도록 하였다. 음향 정제파를 형성 시키는 1 MHz 초음파발전기(Megasonic generator, model SS1003)는 최대출력전압 30 W, 전원 AC 220V ± 5% 단상 60 Hz, 소비전류는 2.0 A였으며, 2 MHz 초음파발전기(Megasonic generator, model HS2402)는 최대출력전압 200 W, 전원 AC 220 V ± 5% 단상 60 Hz, 소비전류는 4.5 A를 사용하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 연속반응기 내의 온도변화 및 장치설계

Table 1은 연속반응기 내의 온도변화를 나타낸 것으로 초기 온도는 22~25℃에서 실험이 수행되었으며 HRT 증가에 따라 수온은 점차로 증가하였다. 또한 1 MHz와 2 MHz 각

Table 1. Change of water temperature in the reactor

| Frequency | HRT 0,5 hr | HRT 1 hr | HRT 2 hr | HRT 4 hr |
|-----------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1 MHz | - | 22,0 → 23,8 (1,8℃) | 21,7 → 23,1 (1,4℃) | 21,9 → 23,4 (1,5℃) |
| 2 MHz | - | 22,5 → 24,1 (1,6℃) | 21,1 → 22,4 (1,3℃) | 22,1 → 24,2 (2,1℃) |
| 1+2 MHz | 24,6 → 26,3 (1,7℃) | 25,1 → 26,9 (1,8℃) | 25,3 → 27,1 (1,8℃) | 25,0 → 27,8 (2,8℃) |

각에서 보다 1 MHz와 2 MHz를 병렬로 연결하여 실험한 반응조에서의 온도가 높게 나타났다. HRT 4시간에서 1 + 2 MHz의 온도증가폭은 2.8℃로 다소 높게 나타났으나 입자분리효율에 영향을 주지는 않았다.

식 (3)에서 24℃에서 반응조의 레이놀즈수(Rn)를 계산한 결과, 레이놀즈수가 HRT 0.5시간, 1시간, 2시간, 4시간에서 각각 32.8, 16.4, 8.2, 4.1로 모든 조건에서 500 이하의 층류로 나타났다. 식 (1)과 (2)에서 인입장수(L_e)를 계산하면, HRT 0.5시간, 1시간, 2시간, 4시간에서 각각 0.23 m, 0.11 m, 0.06 m, 0.03 m로 HRT 증가에 따라 짧은 인입장수를 나타내었으며, HRT 0.5시간에서는 본 반응조의 인입장수보다 다소 짧은 인입장수(L_e : 0.19 m)였다.

4.2. HRT 변화에 따른 탁도변화

Fig. 4는 1 MHz에서 HRT 변화에 따른 탁도변화를 나타낸 것으로 정제파 형성 후 40분까지 30 NTU에서 약 15 NTU로 급격하게 탁도가 감소되었으며 이후 서서히 감소하였다. HRT 1시간, 2시간 및 4시간에서의 입자제거효율(탁도 기준)은 각각 64.1%, 70.0%, 74.3%로 나타났다. Fig. 5는 2 MHz에서 HRT 변화에 따른 탁도변화를 나타낸 것으로 1

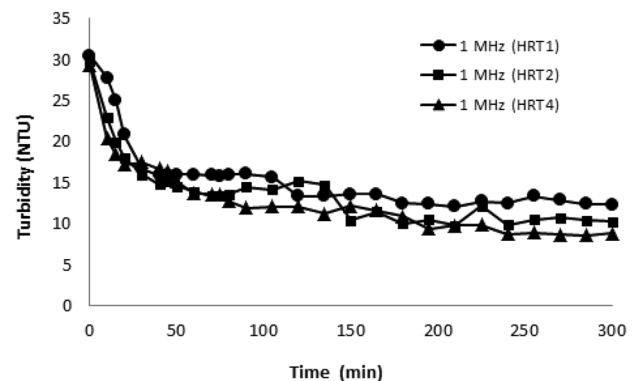


Fig. 4. Change in turbidity according to the HRT variation at 1 MHz.

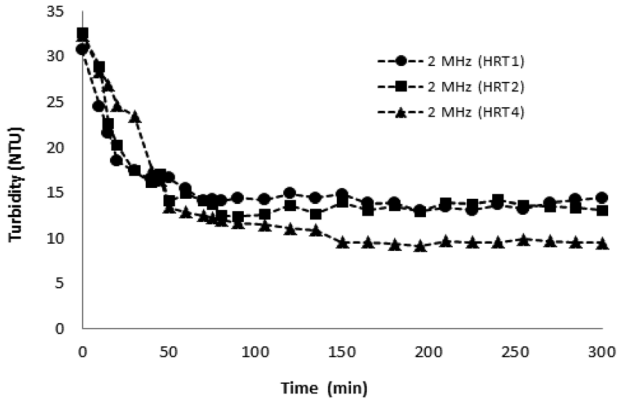


Fig. 5. Change in turbidity according to the HRT variation at 2 MHz.

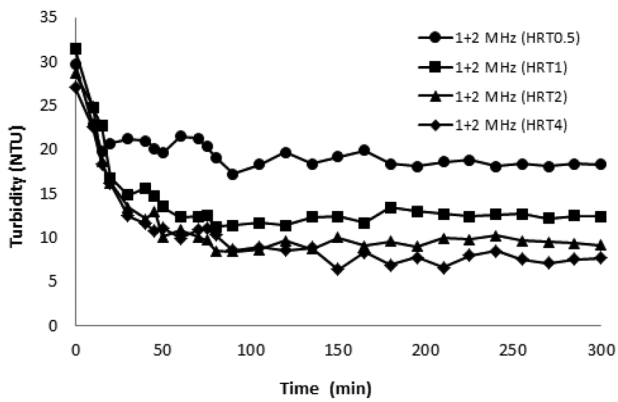


Fig. 6. Change in turbidity according to the HRT variation at 1+2 MHz.

MHz와 유사하게 정재파 가동 후 50분까지 급격하게 감소하였으며 이후 서서히 감소하였다. 수리학적 체류시간 별 입자제거효율은 Fig. 6은 1 MHz와 2 MHz를 동시에 병렬로 연결하여 HRT 변화에 따른 탁도 변화를 나타낸 것으로 정재파를 가동하고 약 40분까지 급격하게 탁도가 감소하였으며, HRT의 증가에 따라 탁도가 감소하였다. HRT 0.5시간~4시간에서의 입자제거효율은 각각 46.6%, 63.8%, 70.6% 그리고 70.7%로 나타나 70% 이상의 제거효율을 목표로 할 경우 HRT 2시간 이상을 유지하는 것이 적절할 것으로 사료된다.

4.3. 입자분리 효율

Fig. 7은 주파수 및 HRT 변화에 따른 탁도 제거효율을 나타낸 것으로 정재파 가동 후 안정화된 1시간 이후부터의 유출수 탁도 자료를 이용하여 제거효율을 산정하였다. 1 MHz에서 탁도 제거효율은 60~68%였으며, 2 MHz에서 탁도 제거효율은 59~67.5로 1 MHz와 2 MHz가 유사한 제거효율을 나타내었다. 일반적으로 정재파 형성에 있어 0°C일 때 음속(c, 1,500 m/sec)은 주파수 1 cycle의 길이인 파장과 주파수의 곱에 비례하여 1 MHz의 주파수에 파장 λ는 1.5 mm가 되며, 2 MHz에서는 0.75 mm가 되어 1 MHz보다 2 MHz에서 더 작은 입자들이 정재파의 노드면에 분리·응집

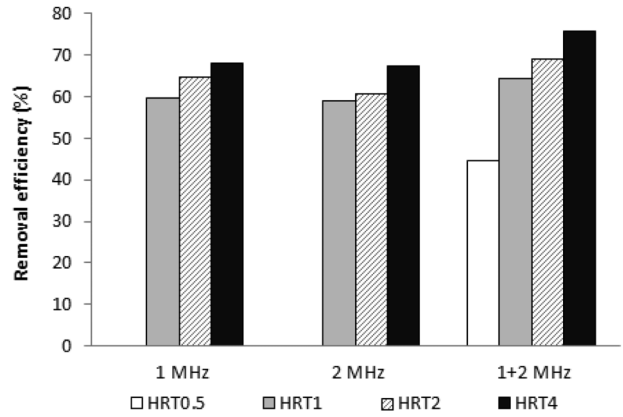


Fig. 7. Removal efficiency according to the HRT variation.

되는데,¹⁴⁾ 본 실험에서는 30분 침전된 카올린의 미세입자로 1 MHz와 2 MHz에서의 제거효율이 유사하게 나타났다. 1 MHz와 2 MHz를 병렬로 연결하였을 때 탁도 제거효율은 HRT 0.5에서는 44.7%로 낮게 나타났으며, HRT 1시간에서 4시간까지 64.2~75.6%로 병렬로 연결하였을 때 탁도 제거효율이 향상되었다. 1 MHz와 2 MHz 각각의 주파수 변화에 비해 1 MHz와 2 MHz를 병렬로 연결하여 실험하였을 때의 제거효율이 높게 나타났다. HRT 0.5시간~4시간을 유속으로 계산하면 0.19 cm/min~1.5 cm/min가 되는데, 기존 연구¹⁵⁾에서 유속범위 0.5~2.0 cm/min에서 95% 이상의 높은 분리효율을 나타낸바 있으나, 이는 5,000 mg/L의 고농도 카올린을 사용하여 약 200 mg/L로 낮춘 탁도 제거효율로 본 실험에서의 저농도 미세입자의 제거효율과는 차이가 있는 것으로 나타났다.

4.4. 주파수의 연속적 변화에 따른 탁도변화

Fig. 8은 입자분리장치의 HRT를 1시간으로 고정시킨 상태에서 음향정재파 발생모듈의 운전조합을 변화하였을 때 탁도의 변화를 나타낸 것이다. 운전 초기부터 120시간까지는 1 MHz와 2 MHz 트랜듀서를 동시에 작동시키고(1+2 MHz), 이후 1시간 동안은 2 MHz 트랜듀서는 OFF 시킨상

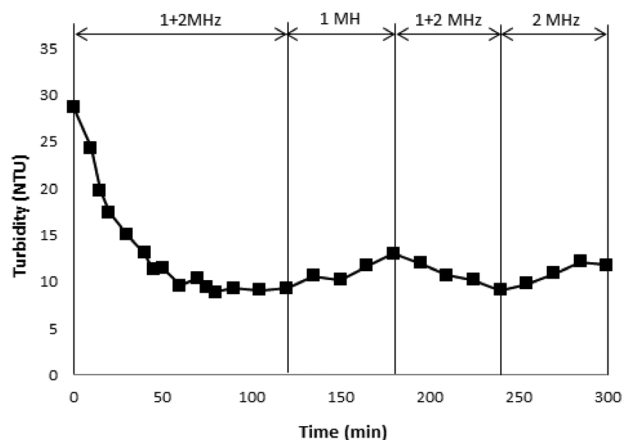
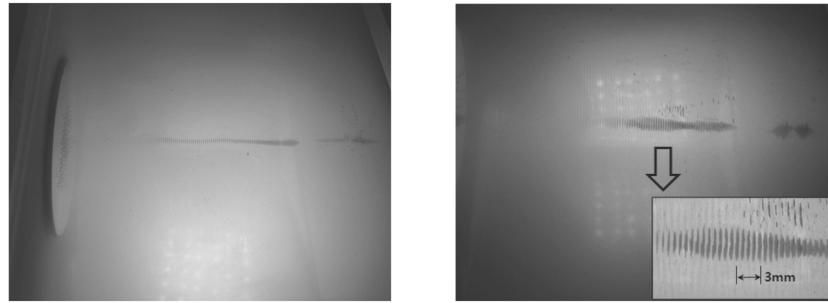


Fig. 8. Removal efficiency of turbidity according to the frequency change at HRT 1 hr.



(a) Initial floc formation by standing wave (b) Floc formation and sedimentation

Fig. 9. Particle separation and arrangement by standing wave formation.

태에서 1 MHz만 가동시켰다. 계속해서 다음 1시간은 다시 1 + 2 MHz의 정재파를 가동하고 이후 2 MHz로 실험하였다. 실험 초기, 약 50분까지 비교적 뚜렷한 정재파의 형성으로 수중의 입자가 정재파의 노드면에 분리되고, 분리된 입자들은 서로 플록을 형성하면서 비중 차이로 침강되는 모습을 보여주었다. 반응시간 120분까지 탁도 제거율은 72% 정도로 안정화 단계를 유지하였다. 120분 이후, 1 MHz만 작동시킬 경우 탁도가 62% 정도를 증가하였다가 다시 1 + 2 MHz를 작동하면서 탁도가 감소하여 70% 이상의 제거효율을 유지하는 것으로 나타났다. 2 MHz만 작동할 경우도 1 MHz만을 작동시킨 경우와 유사한 탁도 제거율을 보였다.

Fig. 9는 카올린 0.1 g/L 농도에 대한 주파수 1 MHz의 HRT 1시간에서 정재파 가동시간에 따른 입자분리모습을 촬영한 사진이다. 초기 정재파 형성에 따라 입자들이 길게 node에 배열되며 연속으로 유입되는 입자에 따라 점차 플럭(floc)이 형성되고 일부는 침강된다. 수중의 입자농도가 증가하면 정재파에 의해 분리된 입자들이 플럭형성 속도가 증가하게 되고 비중이 무거워진 플럭은 중력에 의해 침전된다. 입자들이 받는 힘이 중력(gravity)보다는 부력(B, buoyance)과 음압력(F_A , acoustic force)이 크에 따라 입자들이 음향정재파의 절점면에 배열되어 있으며,^{12,14,16} 플럭형성으로 비중이 커진 입자들이 부분적으로 침전되는 현상이 나타났다.

5. 결론

1 MHz와 2 MHz 주파수의 음향정재파를 이용하여 연속 반응기에서 HRT 변화에 따라 카올린의 입자분리 특성을 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 반응조를 레이놀즈수에 따라 설계한 결과, 층류를 형성하였으며 반응조 내 수온은 1 + 2 MHz에서 HRT 증가에 따라 수온이 2.8°C 증가하였으나 정재파에 의한 입자의 배열에는 영향이 없었다. 정재파 형성 후 약 40분에서부터 입자분리층 형성 및 플럭의 증가로 인해 입자분리장치내부의 탁도가 급격하게 감소하고, 이후 탁도 농도가 서서히 감소하는 경향을 나타냈다. 주파수 1.0 MHz 가동 시 HRT 1시간에서 2시간, 4시간으로 길어짐에 따라 입자분리 효율(탁도)은 각각 64.1%, 70.0%,

74.3%로, 2.0 MHz에는 HRT에 따라 각각 58.0%, 61.8%, 70.7%로 증가된 것으로 나타났다. 즉, 동일한 주파수일 경우 HRT에 따라 처리효율이 10% 이상 차이가 발생하고 있으며, 1.0 MHz 주파수에서는 2시간, 2.0 MHz에서는 4시간 정도에서 70% 이상의 처리효율을 유지할 수 있다. 주파수 1.0 MHz와 2.0 MHz를 동시에 가동한 결과, HRT 1시간, 2시간, 4시간에서의 입자분리 효율은 각각 63.8%, 70.6%, 77.6% 나타나 연속된 정재파의 발생 보다는 HRT가 입자분리에 많은 영향을 주는 것을 알 수 있었다.

이상과 같은 실험을 통하여 정재파 발생 모듈과 반사판의 간격이 100 mm 이상의 넓은 입자분리장치에서도 미세입자 분리가 원활이 이루어짐을 알 수 있었다. 향후 지속적인 연구를 통하여 실규모의 환경시설에 입자분리장치의 적용 및 구현이 가능할 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업(2013-0058-1-1)의 연구비지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

KSEE

참고문헌

- Hwang, S. H. and Koo, Y. M., "Effects of operation and design parameters on the recovery of microorganisms and particles in ultrasonic sedimentation," *HWAHAH KONGHAK*, **39**(6), 788~793(2001).
- Cho, S. H., Park, J. H., Ahn, B. and Kim, K., "Finite element analysis of a particle manipulation system using ultrasonic standing wave," *Trans. KSNVE*, **20**(1), 3~9(2010).
- Bekker, M. C., Mayer, J. P. Pertorius, L. and Van Der Merwe, D. F., "Separation of solid-liquid suspensions with ultrasonic acoustic energy," *Water Res.*, **31**(10), 2543~2549(1997).
- Laurell, T., Petersson, F. and Nilsson, A., "Chip integrated strategies for acoustic separation and manipulation of cells and particles," *Chem. Soc. Rev.*, **36**, 492~506(2007).
- Gupta, S. and Feke, D. L., "Acoustically driven collection of suspended particles within porous media," *Ultrasonics*, **35**,

- 131~139(1997).
6. Shin, B. S. and Danao, M. C., "Characteristics of particle separation in suspension using an ultrasonic standing wave," *J. Biosyst. Eng.*, **37**(2), 113~121(2012).
 7. Lipkens, B., Dionne J., Trask, A., Szczur, B., Stevens A. and Rietman E., "Separation of micron-sized particles in macro-scale cavities by ultrasonic standing waves," *Physics Procedia*, **3**, 263~268(2010).
 8. Spengler, J. and Jekel, M., "Ultrasonic conditioning of suspensions-studies of streaming on particle aggregation on a lab-and pilot-plant scale," *Ultrasonics*, **38**, 624~628(2000).
 9. Dargie, P. G., Hill, M., Wood, R. J. K. and Jarris, N. R., "An investigation into the feasibility of flow-through ultrasonic separation," Research report in Mechanical engineering consultancy service, University of Southampton, Oct. (1997).
 10. Akan, O., *Open-Channel Hydraulics* Elsevier, Amsterdam, the Netherlands(2006).
 11. Chanson, H., *The Hydraulics of Open Channel Flow*, Arnold, London, UD(1999).
 12. Velimir, M. R., "Principles of Acoustic Devices," John Wiley & Sons, Inc., New York(1983).
 13. Harris, N., Boltryk, R., Glynne-Hones, P. and Hill, M., "A novel binary particle fractionation technique," *Physics Procedia*, **3**, 277~281(2010).
 14. Ahn, J., Kang, S., Ahn, K., Kim, I. T., Kim, S. G., Ahn, H. and Lee, Y., "Characteristics of particle separation in water using lab-scale acoustic standing wave," *J. Kor. Soc. Environ.*, **34**(12), 787~791(2012).
 15. Koo, Y. H., "Separation of cells and fine particles in suspension using an ultrasonic solid-liquid separator," Master thesis, Kangwon National University, Korea(2000).
 16. Lee, Y. S. and Kwon, J. H., "A smart device for particle separation in water using ultrasonic standing waves," *Water Sci. Technol.*, **6**(1), 173~183(2006).