

자성 유체분리에 의한 양어장 순환수내 부유 고형물의 제거

김용하 · 여평모 · 서근학 · 김행구* · 정우창* · 김순호**
부경대학교 화학공학과, *포항산업과학연구원 용융환원프로젝트팀, **신라대학교 자동차공학과

Removal of Suspended Solids in Aquacultural Recirculating Water by Magnetic Fluid Separation

Yong-Ha KIM, Ryoung-Mo YEO, Kuen-Hack SUH, Hang-Goo KIM*, Uoo-Chang CHUNG* and Soon-Ho KIM**

Department of Chemical Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea

*Smelting Reduction Project Team, Research Institute of Industrial Science and Technology, Pohang, 790-330, Korea

**Department of Automotive Engineering, Silla University, Pusan 617-736, Korea

A magnetic fluid separation technology was confirmed to be very effective to remove the suspended solids (SS) from aquacultural recirculating water. In this study, the effects of operating variables on the characteristics of SS removal were investigated through the test runs using magnetite of 2 μm mean diameter as magnetic powder. Magnetic flocculation here formed by adsorbing fine magnetites on the surface of suspended solid was observed. The strength of magnet was of significance in determining the SS removal efficiency as well as the capacity of the equipment. In addition, the SS removal efficiency decreased with an increase in the superficial liquid velocity, but the effect became negligible when the mass ratio of magnetite to the suspended solids was higher than 1.0.

Key words: magnetic fluid separation, suspended solids, aquacultural recirculating water, magnetic fine powder

서 론

깨끗한 물을 적절하게 공급하는 것은 인간 생존뿐만 아니라 동식물의 성장, 특히 어류의 양식에는 매우 중요하다. 제한된 공간에서 소량의 물을 이용하여 어류를 고밀도로 사육하는 순환식 양어장에서의 수질 오염은 어류의 성장, 더 나아가서는 어류의 생존 여부에 치명적 영향을 미치므로 고도의 수질 관리가 요구된다. 순환식 양식은 물의 재이용을 통해 자연수계에 미치는 환경 오염을 최소화하는 환경친화적이며, 기후조건에 영향을 받지 않는 장점이 있는 반면, 순환수내에는 과잉 공급되어 남아 있는 사료 찌꺼기와 어류의 배설물 등에 기인한 고형물이 농축 포함되는 단점을 갖고 있다. 이들은 미생물에 의한 분해 작용으로 어류에 유해한 NH₃, NO₂⁻를 생성하고 (Liao and Mayo, 1974, Spotte, 1979), 어류의 야가미 손상 (Chapman et al., 1987)과 질병에 대한 저항력의 감소 (Wickins, 1980) 그리고 순환수의 질산화 반응을 위해 설치한 biofilter의 폐쇄를 초래하는 등 어류의 정상적 성장을 방해하게 된다. 따라서 순환수내 고형물의 효율적, 경제적 제거는 순환식 양식의 성공 여부를 결정할 정도로 매우 중요한 사항이다.

순환수내 고형물은 대부분 입경이 100 μm이하로 매우 미세하며 밀도는 약 1.19 kg/m³ (Chen et al., 1993)로 낮기 때문에 침강법의 경우 50 μm이하의 미립자는 쉽게 침강되지 않은 채 부유 고형물 (suspended solids: SS)로 남아있게 된다. 여과 매체를 이용하는 여과법은 침전법에 비해 제거효율은 높지만 압력손실이 커지고 운전비가 높아지는 점이, 그리고 분산된 공기 기포에 부유물을 부착 제거하는 포말분리법은 낮은 제거효율이 문제점으로 지적되고 있다.

부유 고형물이 함유된 폐수 등에 미분체를 투입하여 교반하게 되면 투입된 미분체와 부유 고형물사이에 van der Waals 힘과 같은 인력이 작용하여 플럭 (floc)이 형성된다 (Tsouris and

Yiacoumi, 1997). 이때 투입되는 미분체가 마그네타이트와 같이 자성을 띠고 있는 경우에는 형성되는 플럭도 자성을 띠게 된다고 알려져 있다. 이와 같은 자성플럭을 자력에 의해 형성된 자성 매트릭스에 직접 부착시킨 후 분리 제거함으로써 폐수를 세정할 수 있다는 점에 착안하여 Sakai et al. (1991)은 도시 하수처리의 자력침전이, Terashima et al. (1986)은 중금속의 제거가, Bitton and Mitchell (1973)은 바이러스의 제거가 가능함을 밝힌 바 있다. 본 연구자들은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 폐수와 자성 미분체로 구성된 혼합수의 상향류 흐름에서 혼합수내 자성 플럭을 흐름 관의 외벽에 설치된 자석쪽으로 이동시켜 자석에 포집 분리하고 정제된 순환수는 상부로 이동하는 자성 유체분리 방식으로 폐수로부터 부유 고형물을 효율적으로 그리고 간단하게 제거 가능함을 밝힌 바 있다 (Yeo et al., 1997).

본 연구에서는 이와 같은 자성 유체분리 기술을 양어장 순환수내 부유 고형물의 제거에 적용함을 제안하고 부유 고형물의 제거 특성에 대한 조업변수의 영향을 실험적으로 규명하는 것을 목적으로 하고 있다.

재료 및 방법

본 실험에 사용한 자성 유체분리 장치는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 자성 유체분리 탱, 자성 미분체의 교반탱크, 혼합수 (폐수+자성 미분체) 공급 펌프, 자석 셋트 등으로 구성되어 있다. 자성 유체분리 탱은 직경 5 cm, 높이 100 cm인 아크릴 관으로 제작되었으며, 자석 셋트는 축 방향 약 15 cm 간격으로 5 단이 설치되었다. 자석으로는 가로 2.3 cm, 세로 4 cm, 두께 0.9 cm인 직육면체 형이고 표면 자력이 200 Gauss인 저강도 자석과 가로 2.3 cm, 세로 4 cm, 두께 0.9 cm인 직육면체 형이고 표면자력이 1,000 Gauss인

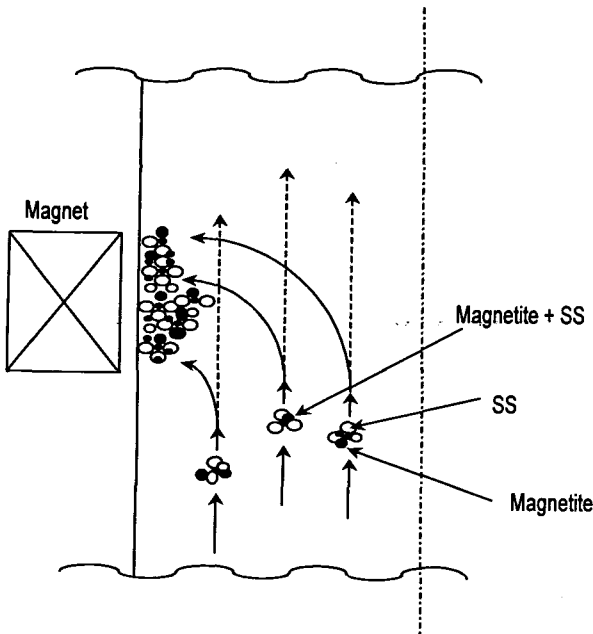
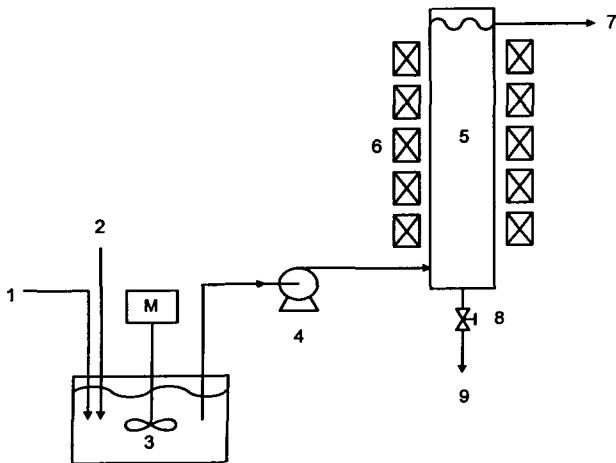


Fig. 1. Principle of magnetic fluid separation.



- 1. Magnetite
- 2. Wastewater
- 3. Mixing tank
- 4. Pump
- 5. Magnetic fluid separation column
- 6. Magnet set
- 7. Clarified water
- 8. Valve
- 9. Magnetite+SS sludge

Fig. 2. Schematic diagram of experimental apparatus.

고강도 자석의 두 종류의 영구자석을 사용하였다. 각 자석 셋트는 아크릴관의 외벽 원주를 따라 자석 3 개를 120°의 각도로 배치하여 구성하였다.

순환수용 부유 고형물은 부경대 양어장의 순환수로부터 여과포를 이용하여 슬러지 상태로 포집하고 이를 105°C의 건조로에서 24 시간 건조한 후 데시케이터에 보관하면서 사용하였다. 매 실험마다 케이크형 고형물의 일정량을 채취해 음식물 분쇄기에 의해 약 60 μm 이하로 미분쇄하였으며 미분쇄된 고형물을 수돗물에 분산

하여 실험용 양식장 순환수로 하였다. 이와 같은 순환수에 일정량의 자성 미분체를 투입하고 약 750 rpm의 속도로 5분 정도 교반시켜 준비된 혼합수는 peristaltic pump에 의해 자성 유체분리 탱크의 하부로 유입시켜 상부로 흐르게 하였다. 이때 혼합수는 자성 유체분리 탱크의 높이 방향으로 설치된 5 단의 자석 셋트를 단계적으로 통과하면서 정제되게 된다.

순환수내 부유 고형물의 농도는 실제 조업되고 있는 순환식 양어장에서의 순환수와 최종 방류수내 부유 고형물의 농도를 기준하여 40~670 g/m³의 범위에서, 공탐 액체유속은 0.23~1.02 cm/s (순환수 공급속도 : 0.27~1.2 l/min)의 범위에서 조절하였다. 자성 미분체로는 평균 입경이 2 μm인 마그네타이트를 사용하였으며, 부유 고형물에 대한 자성 미분체의 질량비는 0~2.5의 범위에서 조절하였다. 각 조건에서의 실험시간은 약 30 분 정도로 하였고, 시료 채취는 약 10 분 간격으로 2 회로 하였다. 폐수내 부유 고형물의 농도는 ASTM D2540 에 의해 분석하였으며, 부유 고형물의 제거효율은 다음식에 의해 계산하였다.

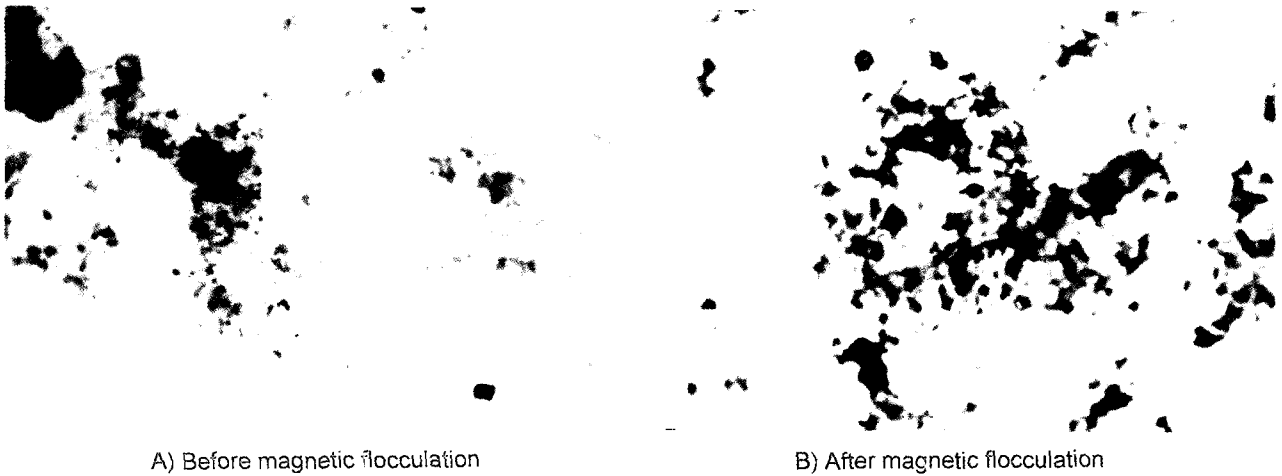
$$\text{Removal Efficiency (\%)} = \frac{C_i - C_o}{C_i} \times 100 \quad (1)$$

결과 및 고찰

1) 자석 세기의 영향

본 연구에서 양어장 순환수내 부유 고형물의 제거에 적용하고자 하는 자성 유체분리 기술은 Photo 1에서 보는 바와 같이 부유 고형물의 표면에 다수의 자성 미분체가 부착된 형태의 자성 플럭을 순환수의 흐름과정에서 중력이나 유체력보다 강한 반경방향의 자력에 의한 포집에 기반을 두고 있다. 순환수의 처리속도를 증가하는 경우, 즉 자성 유체분리 탱크내 공탐 액체유속을 높히게 되면 축방향의 유체력은 증가되고 이는 결국 부유 고형물의 제거에 부정적 영향을 주게된다. 공탐 액체유속의 증대에 대응하기 위해서는 자성 플럭 자체의 자성을 높히거나 자성 플럭의 흐름을 변화시켜 자석에 쉽게 이동되도록 하는 방법외에 자성 유체분리 탱크의 외벽에 설치된 자석의 세기를 강화하는 방법을 들 수 있다.

Fig. 3은 자성 유체분리 탱크의 자석 셋트에 표면자력이 200 Gauss와 1,000 Gauss인 두 종류의 자석을 사용했을 때 부유 고형물 제거효율에 대한 공탐 액체유속의 영향을 나타낸 것이다. 이때 부유 고형물의 농도는 280~487 g/m³, 마그네타이트/부유 고형물의 질량비는 1.16~1.5 로 하였다. 200 Gauss의 저강도 자석을 사용한 경우에는 공탐 액체유속의 증가에 따라 부유 고형물의 제거효율이 급격히 낮아지는데 비해 1,000 Gauss의 고강도 자석을 사용했을 경우는 공탐 액체유속이 약 1.0 cm/s까지 높아져도 부유 고형물의 제거효율은 거의 일정한 값을 보였다. 본 실험 조건에서 부유 고형물의 제거 효율을 약 93%로 유지하는데 저강도 자석의 경우에는 최대 공탐 액체유속을 약 0.2 cm/s로 제한해야 하는데 비해 고강도 자석의 경우에는 약 1 cm/s의 공탐 액체유속에서도 가능하였다. 이를 근거로 본 실험에서 사용한 자성 유체분리 탱크에서의



A) Before magnetic flocculation B) After magnetic flocculation
 Photo 1. Photos of floc before and after magnetic flocculation obtained from microscope (x 400).

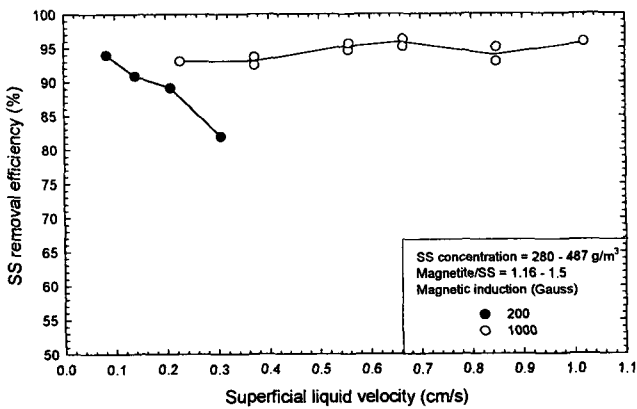


Fig. 3. Relationship between SS removal efficiency and superficial liquid velocity with respect to the strength of magnet.

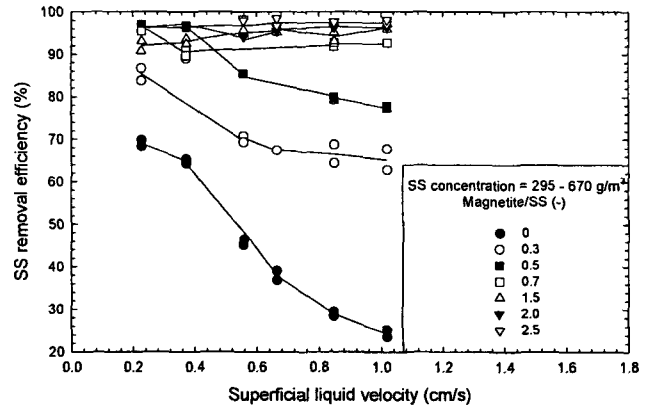


Fig. 4. Effect of superficial liquid velocity on the SS removal efficiency.

순환수 처리 속도를 구하면 저강도와 고강도의 자석 셋트별로 각각 0.34 m³/일과 1.7 m³/일로 약 5 배의 차이가 생기게 된다. 이와 같은 결과로부터 자성 유체분리에 의한 부유 고형물의 제거에서는 사용하는 자석의 세기가 부유 고형물의 제거효율은 물론 설비의 처리 용량을 결정하는데 지배적임을 알 수 있다.

2) 공탑 액체유속의 영향

Fig. 4는 부유 고형물의 제거효율에 대한 공탑 액체유속의 영향을 나타낸 것으로 부유고형물의 농도는 295~670 g/m³, 마그네타이트/부유 고형물의 질량비는 0~2.5 로 하였다. 본 실험에서 공탑 액체유속의 최대 값을 약 1.02 cm/s 로 하였는데 이를 기준했을 때 직경 5 cm의 자성 유체분리 탑에서 양어장 순환수의 처리속도는 약 1.7 m³/일이며, 높이가 100 cm인 자성 유체분리 탑 내 수력학적 체류시간은 약 1.6 분으로 1~2 시간 단위의 일반 침전조에 비해 매우 짧은 편이다. 자성 유체분리 탑에서 순환수의 처리속도는 공탑 액체유속과 비례관계에 있어 부유 고형물의 제거효율이 적정값 이상으로 유지되는 한 공탑 액체유속을 높이는 것이 바람직하다. 공탑 액체유속의 증가는 순환수의 축 흐름 방향으로 유체력의 증가를 가져와 자석이 반경방향으로 자성 플럭를 당겨서 포집하는데는 부정적 영향을 주게되어 부유 고형물의 제거효율은

감소되는 경향을 보였다. 여기서 부유 고형물의 제거효율에 대한 공탑 액체유속의 영향은 마그네타이트/부유 고형물의 질량비가 감소함에 그 영향력이 차츰 높아짐을 알 수 있는데, 본 실험조건에서는 마그네타이트/부유 고형물의 질량비가 0.5 이하인 경우 공탑 액체유속이 높아지면서 부유 고형물의 제거효율이 현저히 떨어짐을 보이고 있다. 마그네타이트를 전혀 투입하지 않았을 때, 즉 마그네타이트/부유 고형물의 질량비가 0 인 경우에는 순환수가 일종의 침전조를 통과면서 액체의 유속보다 큰 침전속도를 가진 부유 고형물만이 침전조에 남게 되면서 유출수내 부유 고형물이 일부 제거되는 효과를 볼 수 있었지만, 부유 고형물의 제거효율에 대한 공탑 액체유속의 영향력은 가장 높게 나타났다. 즉, 공탑 액체유속이 0.23 cm/s에서는 부유 고형물의 제거효율이 약 68%이었으나 공탑 액체유속이 1.02 cm/s로 높아지면서는 약 23%까지 낮아졌다. 이를 기준하면 마그네타이트의 초기 첨가효과는 공탑 액체유속이 높을수록 높음을 보이고 있다. 한편 마그네타이트/부유 고형물의 질량비가 어느 값, 본 실험에서는 0.7 이상으로 높아지게 되면 공탑 액체유속별 부유 고형물의 제거효율에 큰 차이가 없는 것으로 보아 부유 고형물의 제거에 유체력보다는 부유 고형물과 자성 미분체로 형성된 자성 플럭 자체의 자화력이 보다 강하게 작용함을 알 수 있다.

3) 마그네타이트/부유 고형물의 질량비의 영향

자성 유체분리에서는 두 종류의 분체, 즉 폐수내 부유 고형물과 투입되는 자성 미분체와의 흡착을 기본으로 하고 있다. 따라서 일반 흡착에서 볼 수 있는 바와 같이 흡착제 단위 질량당 흡착되는 물질의 양, 즉 단위 질량의 자성 미분체가 부착할 수 있는 부유 고형물의 양이 제한되게 된다. 이와 같은 조건에서 부유 고형물을 확실하게 제거하기 위해서는 폐수내 부유 고형물에 자성 미분체가 많이, 그리고 강력하게 부착되어 자화성이 높은 자성 플러키 형성되어야 한다. 이를 위한 전제조건으로는 부유 고형물과 자성 미분체사이에서 응집력으로 작용하는 van der Waals 힘이 증가되어야 한다. 식 (2)에서 보는 바와 같이 van der Waals 힘은 두 분체 사이의 거리의 제곱에 반비례하며 이 거리는 자성 미분체의 투입량이 많을수록 감소된다. 이로부터 자성 미분체의 투입량 증가는 결과적으로 부유 고형물의 제거효율을 높히게 됨을 예측할 수 있다.

$$F_{vw} = ar^{-2} \quad (2)$$

한편 자성 미분체의 투입량 증가는 자성 미분체의 투입 비용은 물론 궁극적으로 자성 플러키 슬러지의 발생을 증가시키게 되어 이들의 탈수와 건조 등 후처리 공정에서의 처리 부하가 커지게 되는 문제가 있다. 따라서 부유 고형물의 제거효율과 비용의 양 측면을 고려하여 순환수내 부유 고형물의 양을 기준하여 자성 미분체의 적정 투입비를 결정하는 것이 매우 중요하다.

Fig. 5는 이와 같은 관점에서 순환수내 부유 고형물의 농도, 즉 순환수의 단위 부피당 부유 고형물의 질량에 대해 투입되는 마그네타이트의 질량비의 변화에 따른 부유 고형물의 제거효율을 나타낸 것이다. 이때 부유 고형물의 농도는 295~670 g/m³, 공탑 액체유속은 0.23~1.02 cm/s로 하였다.

마그네타이트/부유 고형물의 질량비가 약 0.5 이하에서는 마그네타이트/부유 고형물의 질량비가 증가함에 따라 부유 고형물의 제거효율이 급격하게 상승함을 보이며, 0.7~1.5의 범위에서는 완만하게 증가하다가 약 2.5에서는 마그네타이트/부유 고형물의 질량비에 관계없이 부유 고형물의 제거 효율이 약 97%에 수렴하는 것으로 보아 약 1.0 이 적절한 값으로 판단된다.

4) 부유 고형물의 농도 영향

순환수내 부유 고형물을 제거한 후 이들의 재사용 여부를 결정하는 것은 잔존하는 부유 고형물의 농도가 된다. Fig. 6은 순환수내 초기 부유 고형물 농도의 변화에 따른 자성 유체분리 탑을 통한 처리수내 부유 고형물의 농도를 나타낸 것으로 이때 마그네타이트/부유 고형물의 질량비는 0.87~1.67, 공탑 액체유속은 0.23 cm/s와 0.56 cm/s로 하였다. 순환수내 초기 부유 고형물 농도가 약 40 g/m³에서 600 g/m³까지 약 15 배로 증가했음에도 처리수내 부유 고형물의 농도는 순환수내 초기 부유 고형물의 농도에 관계없이 대부분 20 g/m³이하에 분포되었다. 이는 본 실험에서 설정된 마그네타이트/부유 고형물의 질량비와 공탑 액체유속의 조건하에서 부유 고형물의 표면으로의 자성 미분체의 부착이 평형에 도달되었기 때문으로 판단된다.

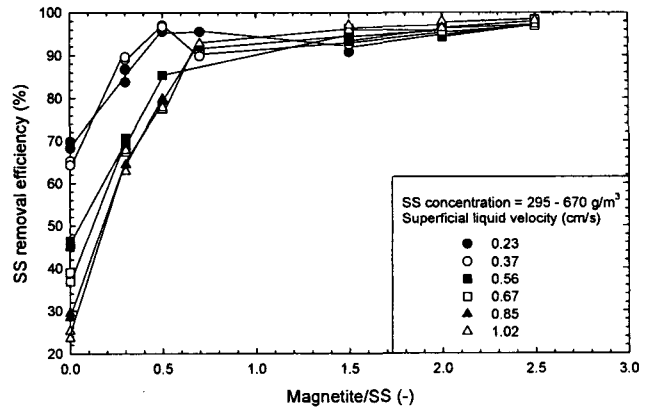


Fig. 5. Effect of Magnetite/SS mass ratio on the SS removal efficiency.

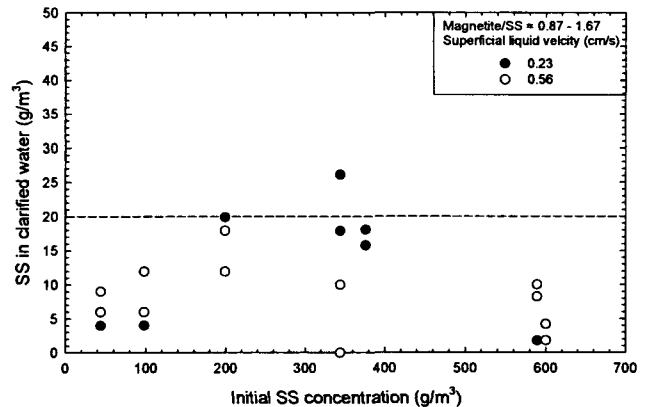


Fig. 6. Effect of initial SS concentration on the SS concentration in clarified water with respect to superficial liquid velocity.

5) 부유 고형물의 흡착평형

폐수내 부유 고형물의 자성 유체분리는 부유 고형물의 표면에서 다수의 자성 미분체가 부착되어 먼저 자성 플러키가 형성되고, 이와같이 형성된 자성 플러키가 모두 자력에 의해 포집된다고 보면 부유 고형물의 자성 유체분리도 기존의 흡착등온 이론으로 해석이 가능하다. 흡착이 평형에 도달했을 때 흡착제 단위 질량당의 흡착량, q와 용액내 잔류하는 흡착물질의 평형농도, C_{eq}와의 관계는 다음과 같은 Freundlich 또는 Langmuir의 흡착등온식을 따르게 된다.

$$q = K_1 C_{eq}^n \quad : \quad \text{Freundlich} \quad (3)$$

$$q = \frac{K_2 C_{eq}}{1 + b C_{eq}} \quad : \quad \text{Langmuir} \quad (4)$$

Fig. 7은 공탑 액체유속을 0.23 cm/s로 하였을 때 자성 미분체로 사용한 마그네타이트와 부유 고형물사이의 흡착 관계를 표면에서 불균일한 흡착에너지를 갖는 흡착에 적합한 Freundlich 흡착등온식으로 나타낸 것이다. 식 (3)에서 흡착제의 상대적 흡착용량을 나타내는 K₁ 값은 0.63, 그리고 흡착 강도를 나타내는 n은 0.34

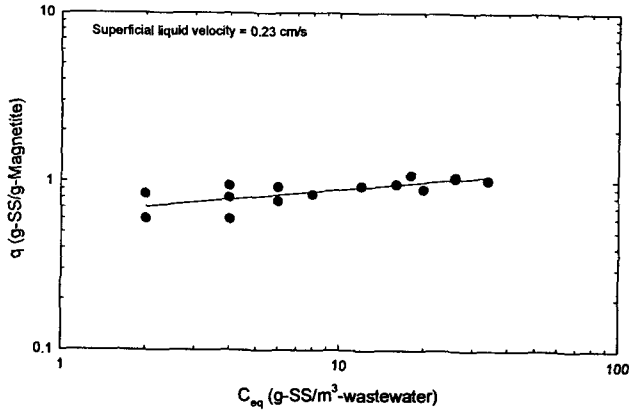


Fig. 7. Freundlich isotherm for the adsorption of fine magnetites on suspended solids.

로 나타났다. 자성 유체분리 탭을 통과한 처리수내 부유 고형물의 평형농도가 20 g/m³인 조건에서 마그네타이트의 단위 질량당 부유 고형물의 흡착량, q는 약 1.0 g-SS/g-Magnetite로 파악되었으며, 처리수내 부유 고형물의 평형농도가 높을수록 증가되는 경향을 보였다.

요 약

자성 미분체와 부유 고형물사이에 작용하는 응집력에 의해 부유 고형물의 표면에 다수의 자성 미분체가 부착된 형태의 자성 플러를 형성하고 이들을 자력 분리하는 방식의 자성 유체분리 기술이 양어장 순환수내 부유 고형물의 제거에 적용 가능함을 확인하였다.

자성 유체분리에 의한 순환수내 부유 고형물의 제거에 있어서 조업변수인 자석의 세기, 공탑 액체유속, 마그네타이트/부유 고형물의 질량비, 그리고 부유 고형물의 농도의 영향 평가에서는,

1. 자성 유체분리에 의한 부유 고형물의 제거에서는 사용하는 자석의 세기가 부유 고형물의 제거효율은 물론 설비의 처리 용량을 결정하는데 지배적임을 확인하였으며,
2. 공탑 액체유속의 증가, 즉 유체력의 상승에 따른 제거효율의 저하는 마그네타이트/부유 고형물의 질량비가 증가, 즉 자성 플러 자체의 자화력이 보다 강하게 작용하면서 감소하였다. 본 실험조건에서는 공탑 액체유속과 자성 미분체의 투입량, 그리고 처리수내 부유 고형물의 농도 등을 고려시 마그네타이트/부유 고형물의 적정 질량비는 약 1.0임을 알 수 있었다.

사용 기 호

- b : constant in equation for adsorption isotherm [m³/g]
- C_{eq} : equilibrium concentration of suspended solids in the effluent [g/m³]
- C_i : concentration of suspended solids in the influent [g/m³]
- C_o : concentration of suspended solids in the effluent [g/m³]
- F_{vw} : van der Waals force [N]

- K₁ : constant in equation for adsorption isotherm [(m³)ⁿ / (g)ⁿ]
- K₂ : constant in equation for adsorption isotherm [m³/g]
- n : constant in equation for adsorption isotherm [-]
- q : g-suspended solids/g-Magnetite [g/g]
- r : distance between two powders [m]
- a : van der Waals constant for attraction [N · m²]

사 사

본 연구는 한국과학재단 지정 우수공학연구센터인 부경대학교 해양산업개발연구소의 98년도 연구비 지원에 의해서 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

Baeyens, J., D. Geldart and S.Y. Wu. 1992. Elutriation of fines from gas fluidized beds of Geldart A-type powders-effect of adding superfines. Powder Tech., 71, 71~80.

Bitton, G. and R. Mitchell. 1974. The removal of *Escherichia Coli*-bacteriophage T₇ by magnetic filtration. Wat. Res., 8, 549~551.

Chapman, P.E., J.D. Popham, J. Griffin and J. Michaelson. 1987. Differentiation of physical from chemical toxicity in solid waste fish bioassay. Water, Air, and Soil Pollution, 33, 295~308.

Chen, S., M.B. Timmons, D.J. Aneshansley and J.Jr. Bisogni. 1993. Suspended solids characteristics from recirculating aquacultural systems and design implications. Aquaculture 112 : 143~145.

Liao, P.B and R.D. Mayo. 1974. Intensified fish culture combining water reconditioning with pollution abatement. Aquaculture, 3, 61~85.

Sakai, Y., S. Kurakata and F. Takahashi. 1991. Magnetic forced sedimentation of flocs in activated sludge supplemented with ferromagnetic powder of iron oxide. J. Ferment. Bioeng., 71 (3), 208~210.

Spotte, S.H. 1979. Seawater aquariums, The captive environment. Wiley, New York, 413 pp.

Terashima, Y., H. Ozaki and M. Sekine. 1986. Removal of dissolved heavy metals by chemical coagulation, magnetic seeding and high gradient magnetic filtration. Wat. Res., 20 (5), 537~545.

Tsouris, C. and S. Yiacomou. 1997. Particle flocculation and filtration by high-gradient magnetic fields. Separa. Sci. Tech., 32 (1~4), 599~616.

Wickins, J.F. 1980. Water quality requirements for intensive aquaculture : A Review, Symposium on New Developments in the Utilization of Heated Effluents and Recirculation Systems or Intensive Aquaculture. ELFAC, 11th Session, Stavanger, Norway, 28~30 May.

Yeo, P.M., Y.H. Kim, K.H. Suh, and I.K. Suh. 1997. Removal of suspended solids from wastewater by magnetic fluid separation. Theories and Application of Chem. Eng., 3 (2), 2933~2936 (in Korean).

1999년 6월 15일 접수
1999년 9월 15일 수리