

자성 유체분리에 의한 축산폐수내 부유고형물의 제거

김용하[†] · 서근학 · 오창섭*

부경대학교 화학공학과

*호서대학교 화학공학과

(1998년 12월 2일 접수, 1999년 12월 9일 채택)

Removal of Suspended Solids in Livestock Wastewater Using Magnetic Fluid Separation

Yong-Ha Kim[†], Kuen-Hack Suh and Chang-Sup Oh*

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

*Department of Chemical Engineering, Hoseo University, Asan 336-795, Korea

(Received 2 December 1998; accepted 9 December 1999)

요 약

폐수내 부유된 미세 고형물과 자성 미분체사이에 van der Waals 힘과 같은 부착력이 작용하여 자성 플럭이 형성되며 이와 같은 자성 플럭이 폐수의 흐름과정에서 자성 분리됨에 근거한 자성 유체분리 기술을 축산 폐수내 부유고형물의 제거에 적용한 경우에 있어서, 조업변수와 부유고형물의 제거효율과의 관계를 규명하였다. 96%이상의 제거효율을 얻는데 요구되는 마그네타이트/부유고형물의 질량비는 1.0 이상이 되어야 했다. 자성 유체분리탑내 공탑 액체유속이 증가, 즉 유체력이 상승함에 따라 제거효율이 감소되었으나 마그네타이트/부유고형물의 질량비가 0.8 이상으로 증가되면서 제거효율에 대한 공탑 액체유속의 영향은 매우 약해졌다. 미분체된 제강 슬러지는 시약 마그네타이트를 대체할 수 있는 자성미분체로 가능성을 보였으나 동일한 제거효율을 얻기 위해 요구되는 자성미분체/부유고형물의 질량비가 시약 마그네타이트의 경우보다 약 2.5 배이상으로 높아야 했다.

Abstract – A magnetic fluid separation technology is applied to remove the suspended solids from livestock wastewater. In this study, the effects of operating variables on the removal efficiency are investigated through the test runs using magnetite or sludge from steel-making plant as magnetic fine powders. It is found that the mass ratio of magnetite to the suspended solids should be kept higher than 1.0 in order to obtain more than 96 % removal efficiency. In addition, the removal efficiency decreases with an increase in the superficial liquid velocity, but the effect becomes negligible when the mass ratio of magnetite to the suspended solids is higher than 0.8. The sludge from steel-making shows a promising removal efficiency to use as an alternative to magnetite although a higher mass ratio to the suspended solids is necessary compared with the magnetite.

Key words: Magnetic Fluid Separation, Suspended Solids, Livestock Wastewater, Magnetic Fine Powders

1. 서 론

생활수준의 향상으로 육류 소비량이 증가함에 따라 축산업이 늘어났으며 이에 따라 축산 폐기물 및 폐수가 다량 배출되어 상수원 오염의 주요 원인으로 되고 있다. 축산폐수는 다른 오염원에 비해 발생량은 적으나, 가축의 분뇨, 세정 폐수 및 사료 찌꺼기 등이 함께 배출되면서 환경오염 부하가 매우 높는데 문제가 있다. 특히 유기물, 부유고형물, 질소, 인 등의 농도가 높아 미처리 상태로 방류시 인근 하천 등의 수자원은 물론 호소의 부영양화 현상과 해역의 적조 현상, 그리고 지하수 오염 및 부패시 악취 문제를 유발하게 된다. 이중에서 부유고형물(suspended solids: SS)은 한우, 젓소, 돼지 마리당 각각 하루에 약 3,800, 4,350, 그리고 360 g을 발생하고 있으며 뇨, 세척수

와 함께 배출되는 축산폐수내 부유고형물의 농도는 축산시설과 폐수의 관리방법에 따라 최소 1,000 ppm에서 최대 20,000 ppm까지 분포되어 있다. 축산폐수내 BOD, COD 그리고 총 인, 총 질소의 농도가 부유고형물의 농도와 비례하여 증가되는 것으로 보아 부유고형물의 제거는 유기물과 질소, 인을 동시에 제거할 수 있다는 관점에서도 그 중요성이 높다고 할 수 있다. 축산폐수 처리시설의 방류수내 수질기준을 보면, 축산폐수 정화시설의 부유고형물의 농도가 2000년 1월부터 150 ppm 이하(수질관리지역 50 ppm)이며 축산폐수 공동처리시설의 경우에는 1995년 12월까지 70 ppm이하였으나 1996년 1월 이후부터는 30 ppm이하로 크게 강화되었다. 현재 조업중이거나 설치 예정인 축산폐수 처리시설은 이와 같은 방출수 기준에 맞게 운영 내지는 설치되어야 하며 따라서 기존 설비의 효율 증대와 함께 새로운 기술개발이 시급한 실정이다[1].

일반적으로 폐수내 부유고형물은 서로 같은 전하를 띠고 있어 이때

[†]E-mail: yhkim@mail.pknu.ac.kr

발생되는 정전기적 반발력에 의해 독립적으로 분산되어 있으며 그 자체의 입경이 작고 물과의 낮은 밀도차로 인해 자연침강에는 장시간이 소요된다. 이는 폐수내 부유고형물이 갖고 있는 공통적 특징으로 이 때문에 여과나 이온교환 등 일부 특수한 경우를 제외한 대부분의 폐수처리 공정에서는 부유고형물의 인위적 응집을 위해 응집제 등을 투입하여 고형물의 입경을 크게 한 후 침전 제거시키고 있다. 그러나 이와 같은 방법에는 많은 공간과 시간이 소요되고 응집현상 자체가 폐수의 물리/화학적 물성에 매우 민감하여 응집제의 종류, 사용량, pH, 교반 방법 등에 대한 적정 조건을 찾기가 쉽지 않다. 또한 투입되는 응집제로 인한 2차 오염 때문에 농도도 약성폐수의 환경친화적 처리에는 적용 한계를 보이고 있다. 일반적으로 50-60 μm 이하의 입경을 가진 고형물이 부유된 용액에 미분체를 투입하여 교반하게 되면 미분체와 부유고형물 사이에는 van der Waals 힘이나 정전기 인력과 같은 응집력이 작용하여 부유고형물의 표면에 다수의 미분체가 부착하게 된다. 이와 같은 미분체의 고유 물성에 착안하여 미분체로써 자성을 가진 자성미분체, 예를 들면 미립의 마그네타이트를 용액내에 투입하게 되면 Fig. 1에서 보는 바와 같이 자성을 띤 플럭이 형성되며 이를 원심분리 또는 자력 침전시켜 제거하는 기술이 정제·분리 분야에서 연구되고 있다[2-12]. 본 연구자들은 이와 같은 자성플럭을 폐수의 흐름 관 외벽에 설치한 자석 쪽으로 이동시켜 포집 분리하는 방식으로 폐수로부터 부유고형물을 효율적으로, 그리고 간단하게 제거 가능함을 밝힌 바 있다[13, 14]. 본 연구의 목적은 이와 같은 자성 유체분리 기술의 실용화와 관련하여 축산 폐수를 대상으로 폐수내 부유고형물의 제거 특성에 대한 조업변수의 영향을 실험적으로 평가하는 것이다. 그리고 조업비 저감에 따른 경제성 향상과 자원 리사이클링 등을 고려하여 시약용 마그네타이트 외에 제철소 제강공정에서 부산물로 발생하는 제강 슬러지를 자성미분체로 사용하는데 있어서 제거효율 등을 분체 물성의 측면에서 규명하는 것이다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험에 사용한 자성 유체분리 장치는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 자성 유체분리탑, 폐수와 자성미분체의 교반탱크, 혼합수(폐수+자성미

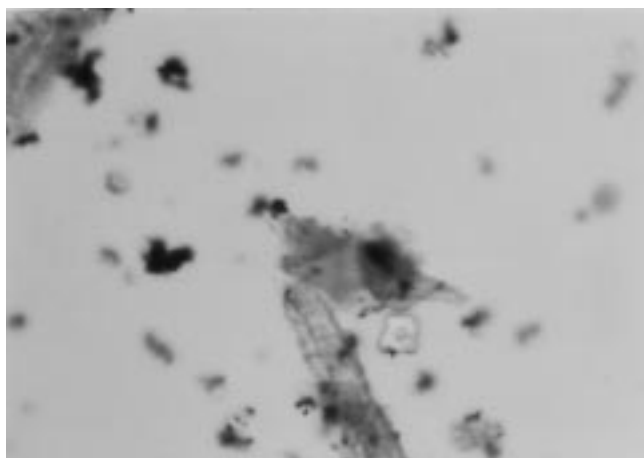


Fig. 1. Photograph of magnetic floc ($\times 400$).

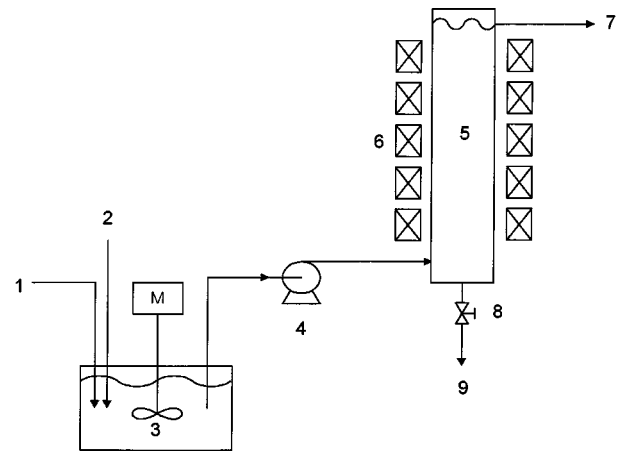


Fig. 2. Schematic diagram of experimental apparatus.

- | | |
|-------------------------------------|-------------------------|
| 1. Magnetic fine powders | 6. Magnet sets |
| 2. Wastewater | 7. Clarified water |
| 3. Mixing tank | 8. Valve |
| 4. Pump | 9. Magnetic floc sludge |
| 5. Magnetic fluid separation column | |

분체) 공급 pump, 자석 세트 등으로 구성되어 있다. 자성 유체분리탑은 직경이 5 cm, 높이가 1 m인 아크릴관으로 제작되었다. 폐수와 자성미분체의 혼합수는 교반 탱크로부터 펌프를 경유하여 자성 유체분리탑의 하부로 유입되어 상부로 흐르는 상향류식이다. 본 실험에서 사용한 자석은 영구자석으로, 가로 2.3 cm, 세로 4 cm, 두께 0.9 cm인 직육면체형이고 표면 자력이 200 Gauss인 저강도 자석과 가로 2.3 cm, 세로 4 cm, 두께 0.9 cm인 직육면체형이고 표면자력이 1,000 Gauss인 고강도 자석의 두 종류이며, 자석 세트는 자석 3개를 상기 자성 유체분리탑의 외벽 원주를 따라 120 도의 각도로 배치하여 구성하였다. 자석 세트는 축방향 약 0.15 m의 간격으로 5단이 설치되어 있으며 폐수와 자성미분체의 혼합수는 이들을 단계적으로 통과하면서 정제되게 된다.

폐수내 부유고형물은 축분을 110 $^{\circ}\text{C}$ 의 건조로에서 24시간 건조한 후 데시케이터에 보관하면서 사용할 때마다 일정량의 무게를 채취한 후 미분쇄하여 준비했으며 이를 20 l의 수돗물에 분산하여 실험용 축산 폐수로 하였다. 이때 얻어지는 축산 폐수내 부유 고형물을 기준으로 입자의 입경분포를 Coulter Multisizer로 측정 한 결과, $-20\mu\text{m}$ 이 9%, $20-30\mu\text{m}$ 이 10%, $30-45\mu\text{m}$ 이 14%, $45-53\mu\text{m}$ 이 14%, $53-63\mu\text{m}$ 이 18%, $63-75\mu\text{m}$ 이 20%, $75-90\mu\text{m}$ 이 8%, 그리고 $90-125\mu\text{m}$ 이 7%이었으며 이때 평균 입경은 약 55 μm 이었다. 이와같은 축산 폐수내 부유고형물의 농도는 축산 농장에서 최초 배출되는 축산 폐수내 부유고형물의 평균농도 1,300 ppm을 기준하여 1,168-1,671 ppm의 범위에서 조절하였다. 자성미분체로써는 1급 시약용 마그네타이트와 제철소의 제강 공정에서 발생하는 제강 슬러지를 사용하였으며 이들의 물성은 Table 1과 같다. 부유고형물에 대한 자성미분체의 질량비가 0-2의 범위에서 일정량의 자성미분체를 축산폐수에 투입하고 약 750 rpm의 속도로 약 5분 동안 교반한 후 자성 유체분리탑으로 이송하였다. 이때 폐수와 자성미분체 혼합수의 공압 액체유속은 0.14-0.85 cm/s의 범위

Table 1. Properties of magnetic powders

Sample	Density (kg/m^3)	Chemical contents(wt%)										
		Fe(Total)	Fe(Magnetic)	Fe(Metal)	FeO	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P
Magnetite	5,150	70.90	68.3	-	-	0.6	0.2	0.2	0.15	0.04	0.12	0.06
Steel sludge	4,230	67.89	-	8.77	78.05	1.50	7.91	0.23	1.44	0.11	0.20	0.1

에서 조절하였다. 각 조건에서의 실험시간은 약 30분, 시료 채취는 2회로 하였다. 폐수내 부유고형물의 농도는 Standard Method에 의해 분석하였으며[15] 부유고형물의 제거효율은 다음 식에 의해 계산하였다.

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

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 자석 세기의 영향

본 연구에서 축산폐수내 부유고형물의 제거에 적용하고자 하는 자성 유체분리 기술은 부유고형물의 표면에 다수의 자성 미분체가 부착된 형태의 자성 플러를 폐수의 흐름과정에서 축방향의 중력이나 유체력보다 강한 반경방향의 자력에 의한 포집에 기반을 두고 있다. 폐수의 처리속도를 증가하는 경우, 즉 자성 유체분리탑내 공탑 액체유속을 높히게 되면 축방향의 유체력은 증가되고 이는 결국 부유고형물의 제거에 부정적 영향을 주게 된다. 공탑 액체유속의 증대에 대응하기 위해서는 자성플러 자체의 자성을 높히거나 자성플러의 흐름을 변화시켜 자석이 쉽게 이동되도록 하는 방법외에 자성 유체분리탑의 외벽에 설치된 자석의 세기를 강화하는 방법을 들 수 있다.

Fig. 3은 자성 유체분리탑의 자석 세트에 표면자력이 200 Gauss와 1,000 Gauss인 두 종류의 자석을 사용했을 때 부유고형물의 제거효율에 대한 공탑 액체유속의 영향을 나타낸 것으로 이때 부유고형물의 농도는 1,330-1,452 ppm, 마그네타이트/부유고형물의 질량비는 0.83-1.06으로 하였다. 200 Gauss의 저강도 자석을 사용한 경우에는 공탑 액체유속의 증가에 따라 부유고형물의 제거효율이 급격히 낮아지는데 비해 1,000 Gauss의 고강도 자석을 사용했을 경우는 공탑 액체유속이 약 0.23 cm/s에서 0.53 cm/s까지 높아질 때 약 1-2%정도 감소하는데 그치고 있다. 본 실험 조건에서 부유고형물의 제거 효율을 약 96%로 유지하는데 저강도 자석의 경우에는 최대 공탑 액체유속을 약 0.16 cm/s로 제한해야 하는데 비해 고강도 자석의 경우에는 약 0.5 cm/s의 공탑 액체유속에서도 가능하였다. 이를 근거로 본 실험에서 사용한 자성 유체분리탑에서 축산폐수의 처리 속도를 구하면 저강도와 고강도의 자석 세트별로 각각 0.27 m³/일과 0.84 m³/일로 약 3배의 차이가 생기게 된다. 한편 자력이 없는 상태에서 축산폐수내 부유고형물의 농도를 1,170-1,271 ppm, 그리고 마그네타이트/부유고형물의 질량비를 0.8로 하고 공탑 액체유속을 0.22-0.85 cm/s의 범위에서 부유고형물의 제거효율을 실험한 결과 공탑 액체유속이 0.22, 0.37, 0.56 그리고 0.85 cm/s로 증가함에 따라 부유고형물의 제거효율은 10.7, -5.35, -54.9 그리고 -61.3%로 감소되었다. 특히 공탑 액체유속이 약 0.3 cm/s이상으로 증

가하면서는 배출수내 부유물, 즉 축산 폐수내 부유고형물에 자성미분체가 추가된 총 농도가 축산폐수내 부유고형물의 농도보다 높아져 식 (1)에서 정의한 부유고형물의 제거효율이 - 값을 갖게 됨이 확인되었다. 이상과 같은 결과로부터 자성 유체분리에 의한 부유고형물의 제거에서는 사용하는 자석의 세기, 즉 자력이 부유고형물의 제거효율과 설비의 처리 용량을 결정하는 지배적 변수의 하나임을 알 수 있었다.

3-2. 마그네타이트/부유고형물 질량비의 영향

자성 유체분리에서는 유입되는 폐수내 포함되어 있는 부유고형물과 투입되는 자성미분체와의 흡착을 기본으로 하고 있다. 따라서 일반 흡착에서 볼 수 있는 바와 같이 흡착제 단위 질량당 흡착되는 물질의 양, 즉 단위 질량의 자성미분체가 부착할 수 있는 부유고형물의 양이 제한되어 있어 부유고형물의 제거효율을 높이기 위해서는 자성미분체의 투입 농도가 높아야 한다. 이 때문에 폐수내 부유고형물의 농도가 높을수록 자성미분체의 투입량도 비례적으로 증가하게 된다. 이에 따라 형성되는 자성플러 슬러지의 양도 많아져 이들의 여과와 건조 등 후처리 공정에서의 처리부하가 커지게 되다. 따라서 부유고형물의 농도에 대해 자성미분체의 적정 투입비를 결정하는 것이 매우 중요하다.

Fig. 4는 이와 같은 관점에서 축산폐수내 부유고형물의 농도, 즉 폐수의 단위 부피당 부유고형물의 질량에 대해 투입하는 마그네타이트의 질량비의 변화에 따른 부유고형물의 제거효율을 나타낸 것이다. 이때 부유고형물의 농도는 1,280-1,508 ppm, 공탑 액체유속은 0.23-0.85 cm/s로 하였다. 마그네타이트/부유고형물의 질량비가 0.4이하에서는 마그네타이트/부유고형물의 비가 증가함에 따라 부유고형물의 제거효율이 급격히 상승하였으나 0.4이상에서는 상승기울기가 낮아지면서 완만한 증가율을 보였다. 예를 들어, 부유고형물의 제거효율을 96%이상, 즉 부유고형물의 농도가 1,300 ppm일 때 자성 유체분리로 방출수 기준인 30-50 ppm에 부합되기 위한 요구효율에 육박하기 위해서는 마그네타이트/부유고형물의 질량비가 1.0 이상이 되어야 함을 알 수 있다. 마그네타이트를 전혀 투입하지 않은 상태에서도 공탑 액체유속이 0.23-0.38 cm/s와 0.56-0.85 cm/s에서 부유고형물의 제거효율이 각각 약 70%와 35%를 보이고 있다. 이는 폐수내 부유고형물의 침도분포가 넓어 미세 고형물은 흐르는 폐수에 포함되어 그대로 배출되나 입경이 큰 고형물의 일부는 그 자체의 침강속도가 액체유속보다 높아 자성 유체분리탑내에 침강되어 탑 하부로 가라앉기 때문이다. 이로부터 폐수내 쉽게 침강될 수 있는 고형물은 침전조에서 수분간 체류시켜 미리 제거한 후 자성 유체분리에 적용함으로써 투입되는 자성미분체의 양을 상당량 줄일 수 있는 효과를 기대할 수 있다.

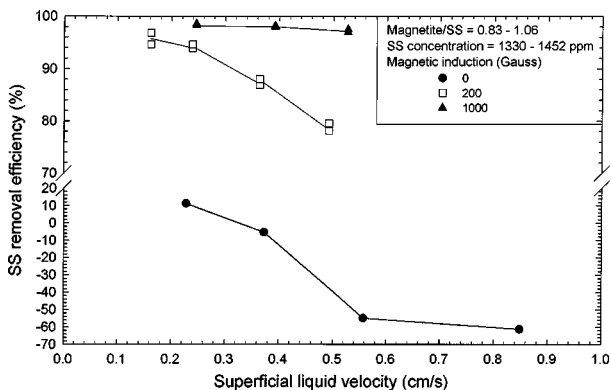


Fig. 3. Relationship between SS removal efficiency and superficial liquid velocity with respect to magnetic induction.

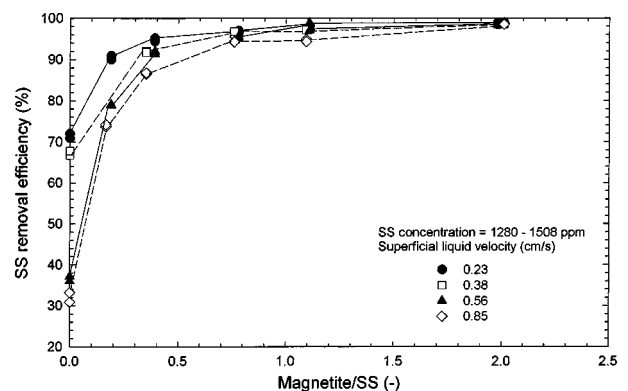


Fig. 4. Effect of magnetite/SS mass ratio on the SS removal efficiency.

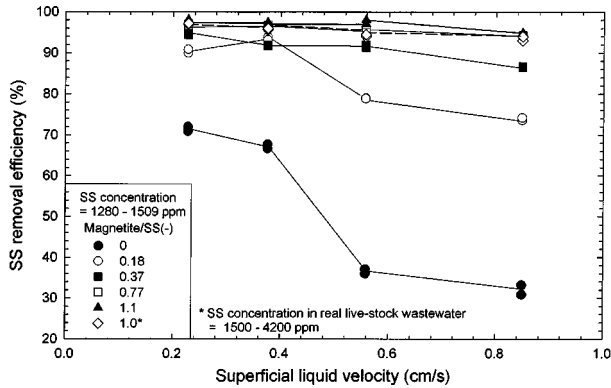


Fig. 5. Effect of superficial liquid velocity on the SS removal efficiency.

3.3. 공탑 액체유속의 영향

Fig. 5는 공탑 액체유속의 변화에 따른 부유고형물의 제거효율 변화를 나타낸 것으로 이때 부유고형물의 농도는 1,280-1,509 ppm, 마그네타이트/부유고형물의 질량비는 0-1.1로 하였다. 본 실험에서 택한 공탑 액체유속의 최대값은 0.85 cm/s로 이를 기준한 폐수 처리속도는 약 1.4 m³/일이며, 자성 유체분리탑내 수력학적 체류시간은 약 2분에 해당된다. 어느 경우이나 공탑 액체유속의 증가에 따라 유체력이 증가되면서 자석이 자성플럭을 당겨서 포집하는데는 부정적 영향을 미쳐 부유고형물의 제거효율은 감소되는 경향을 보였다. 공탑 액체유속의 증가에 따른 제거효율의 감소 기울기는 마그네타이트/부유고형물의 질량비의 증가에 따라 감소하였는데, 특히 마그네타이트/부유고형물의 질량비의 값이 0.8 이상인 경우 제거효율에 대한 공탑 액체유속의 영향은 매우 약해짐을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 부유 고형물의 농도가 1,500-4,200 ppm인 실제 축산 폐수를 사용한 실험에 있어서도 마그네타이트/부유고형물의 질량비가 1인 조건에서 마찬가지로 관찰되었다.

또한 마그네타이트가 포함되지 않은 경우에 공탑 액체유속이 0.56 cm/s 이상으로 높아지면서 부유고형물의 제거효율은 약 35% 이하까지 낮아지는 것을 기준하면 마그네타이트의 초기 첨가효과가 매우 높음을 보이고 있다. 또한 공탑 액체유속이 낮은 경우에는 미미했던 부유 고형물의 제거효율에 대한 마그네타이트/부유고형물의 질량비의 영향력이 공탑 액체유속의 증가에 따라 현저하게 높아지는 것으로 알 수 있다. 이는 마그네타이트/부유고형물의 질량비가 어느 값, 본 실험조건에서는 약 0.8 이상이 되면 부유고형물의 제거에 공탑 액체유속과 같은 유체력의 영향력은 감소되고 마그네타이트/부유고형물의 질량비와 같이 자성에 관계된 힘이 보다 강하게 작용하는 것을 의미한다.

3.4. 자성미분체의 영향

지금까지 자성 유체분리에서 자성미분체로 사용해 온 것은 시약 마그네타이트로 kg당 가격이 30-40 불에 해당된다. 자성미분체를 폐수 내 부유고형물의 농도에 따라 적정 비율로 투입되어야 하는 자성 유체분리의 조업 특성상 부유고형물의 농도가 높은 폐수의 자성 유체분리에서 시약 마그네타이트를 사용하게 되면 기존의 활성 오니 또는 응집 침전시스템에 비해 경제력이 낮아지게 된다. 자성 유체분리탑에서 분리 배출된 자성플럭 슬러지를 건조 및 연소시켜 부유고형물이 제거된 마그네타이트를 회수하여 재사용할 수도 있지만 마그네타이트의 손실과 자성 흡착력의 저하가 생기게 되어 일정량의 새로운 마그네타이트를 계속 보충하여야 한다. 따라서 이와 같은 마그네타이트를 대체할 수 있는 저렴한 자성미분체의 확보는 자성 유체분리 기술의 상용화와 경제성 향상에 중요한 의미를 가진다[16].

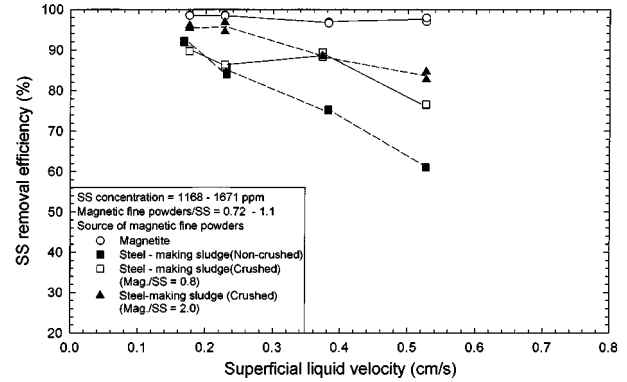


Fig. 6. Effect of superficial liquid velocity on the SS removal efficiency for different magnetic fine powders.

Fig. 6은 여러 대체 자성미분체중의 하나인 제강 슬러지를 사용했을 때 공탑 액체유속의 변화에 따른 부유고형물의 제거효율 변화를 나타낸 것으로 이때 부유고형물의 농도는 1,168-1,671 ppm, 자성미분체/부유고형물의 질량비는 0.72-1.1로 하였다. 제철소에서 제공된 제강슬러지를 그대로 사용했을 때 공탑 액체유속이 낮은 조건에서는 시약 마그네타이트를 사용한 경우와 비교하여 제거효율의 저하가 약 10-15%에 그쳤으나 공탑 액체유속이 높아지면서는 제거효율의 저하가 약 20-35%까지 높아지는 문제점이 확인되었다.

자성미분체로 사용된 마그네타이트나 제강 슬러지와 같은 구형 분체는 식 (2)에서 보는 바와 같이 분쇄 등을 통해 입경이 작아질수록 비표면적은 증가된다.

$$S_w = \frac{6}{\rho_p d_p} \quad (2)$$

이와 같은 구형 분체와 관련된 대표적인 힘으로는 침강을 지배하는 중력과 분체사이의 부착을 지배하는 van der Waals 힘을 들 수 있는데 이들은 각각 식 (3)과 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F_g = \frac{\pi}{6} d_p^3 \rho_p g_c \quad (3)$$

$$F_{vw} = k d_p \quad (4)$$

이 두 힘이 서로 같아지는 평형 입경은 식 (5)와 같이 정의되며 일반적으로 약 30-50 μm에 해당된다. 따라서 흡착체는 최소한 이보다 작은 입자가 되어야 중력보다는 부착력이 커지면서 흡착기능을 갖게 되는 것이다[17].

$$d_{eq} = \sqrt{\frac{6k g_c}{\pi \rho_p g}} \quad (5)$$

Fig. 7은 본 실험에서 사용된 자성미분체별 입도분포를 측정한 결과이다. 시약 마그네타이트의 평균입경은 약 2.1 μm으로 평균입경이 약 60 μm인 제강 슬러지에 비해 미분말에 속함을 알 수 있다. 식 (2)에서 보는 바와 같이 입경이 작아 비표면적이 높은 시약 마그네타이트는 중력에 비해 부유고형물과의 부착력이 커 부유고형물의 제거효율이 높았던 반면 상대적으로 입경이 큰 제강 슬러지는 대부분이 그대로 중력 침강되어 흡착기능이 떨어지는 것으로 판단되었다. 따라서 제강 슬러지의 전처리 과정으로 미분쇄가 필요하였으며 본 실험에서는 건식 마모밀을 사용하여 미분쇄하였다. 이와 같이 미분쇄된 제강 슬러지의 평균입경은 Fig. 7에서 보는 바와 같이 약 2.5 μm로 시약 마그네타이트의 평균입경에 상당히 접근되었음을 확인하였다.

미분쇄된 제강 슬러지를 사용했을 때 공탑 액체유속의 변화에 따른 부유고형물의 제거효율 변화는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 미분쇄전

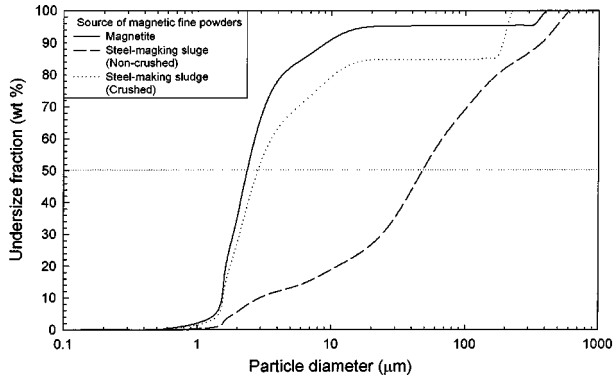


Fig. 7. Particle size distribution of the magnetic fine powders used in this test.

에 비해 부유고형물의 제거효율이 약 10-20% 증가되었다. 이때 공탐 액체유속이 높을수록 분쇄 전과 후사이의 제거효율 차이가 높게 나타났다. 한편 미분쇄된 제강 슬러지를 사용하는 경우 동일한 제거효율을 얻기 위해 요구되는 자성미분체/부유고형물의 질량비는 시약 마그네타이트의 경우보다 높아야 했다. 예를 들면, 0.23 cm/s의 공탐 액체유속에서 약 95%의 제거효율을 위해 요구되는 자성미분체/부유고형물의 최소 질량비가 시약 마그네타이트와 미분쇄된 제강 슬러지에서 각각 약 0.8과 2.0으로 제강 슬러지의 투입량이 시약 마그네타이트보다 약 2.5배 많아져야 함을 알 수 있다.

4. 결 론

부유고형물이 포함된 폐수에 자성미분체를 투입하고 교반하게 되면 부유고형물과 자성미분체사이에 작용하는 응집력에 의해 부유고형물의 표면에 자성미분체가 부착된 형태의 자성플록이 형성된다. 이들을 폐수가 흐르는 관 외벽에 설치한 자석쪽으로 이동시켜 포집 분리하는 방식에 의해 폐수내 부유고형물을 제거할 수 있는 자성 유체분리 기술을 축산폐수에 적용했을 때 부유고형물의 제거효율에 대한 조업 변수와 자성미분체의 영향을 규명하고자 한 본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 마그네타이트/부유고형물의 질량비가 0.4 이하에서는 마그네타이트/부유고형물의 비가 증가함에 따라 부유고형물의 제거효율이 급격히 상승하였으나 0.4 이상에서는 상승기율이 낮아짐을 알 수 있었으며 96% 이상의 제거효율을 얻는데 마그네타이트/부유고형물의 질량비는 1.0 이상이 되어야 한다.
- (2) 공탐 액체유속의 증가, 즉 유체력의 상승에 따른 제거효율의 저하는 마그네타이트/부유고형물의 질량비가 증가, 즉 자성플록의 자력이 증가되면서 감소하였는데 본 실험범위에서 마그네타이트/부유고형물의 질량비의 값이 약 0.8 이상인 경우 제거효율에 대한 공탐 액체유속의 영향은 매우 약해짐을 알 수 있었다.
- (3) 미분쇄된 제강 슬러지는 시약 마그네타이트를 대체할 수 있는 자성미분체로 가능성을 보였으나 동일한 제거효율을 얻기 위해 요구되는 자성미분체/부유고형물의 질량비가 시약 마그네타이트의 경우보다 높아야 했다.

- (4) 부유고형물의 제거효율과 처리속도를 증대시키고 발생되는 자성 플록 슬러지의 양을 최소화하기 위해서는 자석 세기의 증대와 자성 미분체의 흡착능 향상 등을 위한 기술개발이 요구되었다.

감 사

본 연구는 부경대학교 '96 기성회연구비 지원에 의해서 수행되었으며 이에 감사의 뜻을 표합니다.

사용기호

- C_i : concentration of suspended solids in the influent [ppm]
 C_o : concentration of suspended solids in the effluent [ppm]
 d_{eq} : equilibrium diameter of particle [m]
 d_p : diameter of particle [m]
 F_g : gravitational force [N]
 F_{vw} : van der Waals force [N]
 g : acceleration of gravity [m/s^2]
 g_c : gravitational conversion factor [$kg \cdot m/N \cdot s^2$]
 k : constant in equation for van der Waals force [N/m]
 S_w : specific surface area of powders [m^2/kg]
 U_l : superficial liquid velocity [cm/s]
 ρ_p : density of particle [kg/m^3]

참고문헌

1. The Ministry of Environment: "Management Plan of Livestock Wastewater," (1997).
2. Anderson, N. J., Bolto, B. A., Dixon, D. R., Kolarik, L. O., Priestley, A. J. and Raper, W. G. C.: *Wat. Sci. Tech.*, **14**, 1545(1982).
3. Anderson, N. J. and Priestley, A. J.: *Wat. Res.*, **17**, 1227(1983).
4. Bitton, G., Mitchell, R., de Latour, C. and Maxwell, E.: *Wat. Res.*, **8**, 107(1974).
5. Bitton, G. and Mitchell, R.: *Water Research*, **8**, 549(1974).
6. Bolto, B.A.: *Waste Management*, **10**, 11(1990).
7. de Latour, C.: *IEEE Trans. Magnetism*, **MAG-9**, 314(1973).
8. de Latour, C. and Kolm, H. H.: *J. AWWA*, 325(June 1976).
9. de Latour, C.: *J. AWWA*, 443(August 1976).
10. de Latour, C.: *J. AWWA*, 498(September 1976).
11. Kolarik L.O.: *Wat. Res.*, **17**, 141(1983).
12. 田島 秀二, 日本應用磁氣學會誌, **22**, 1010(1998).
13. Kim, Y. H., Suh, K. H. and Kang, J. Y.: Korean Patent No. 0248174 (1999).
14. Yeo, P. M., Kim, Y. H., Suh, K. H. and Suh, I. K.: *Theories and Applications of Chemical Engineering*, **3**, 2933(1997).
15. APHA, AWWA and WEF: "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater," 18th ed., EPS Group, 4(1992).
16. Kim, Y. H. and Suh, K. H.: Korean Patent Application No. 26528 (1998).
17. Jimbo, G.: in "Funtai no Kagaku," Kodansha, 17(1985).
18. Volesky, B.: "Biosorption of Heavy Metals," CRC Press, 7(1990).