

초전도 마그네트를 이용한 자기분리

하 동 우, 박 성 국
한국전기연구원, 포항산업과학연구원

1. 서 론

산업이 발전함에 따라 공해 물질배출도 함께 증가되어왔으며, 이것은 심각한 사회문제로 대두되고 있다. 특히, 대단위 공단지역의 경우 대기 및 수질 오염으로 인한 피해가 증가하고 있다. 대표적인 환경문제 중 하나인 수질오염은 우리의 생명을 위협하는 가장 직접적인 것으로서 많은 대책들이 대두되어 왔다. 그리고 인간의 생활이 윤택해지는 현대에 환경문제에 대한 관심이 높아지고 있으므로 고도화된 폐수처리 기술이 요구되고 있다.

이 분야의 물리적 처리기술로는 스크리닝(Screening), 침사지(grit chamber), 침전(sedimentation), 부상(floatation), 여과(filtration), 흡착(adsorption) 등이 있고, 화학적 처리기술로는 중화처리(pH조절), 화학적 응집산화(oxidation) 및 환원(reduction), 처리이온교환(ionic exchange) 등이 있고 그 외에도 다양한 미생물을 이용하는 생물학적 처리기술이 있다. 이러한 기술들은 각각 다른 특성과 효과를 지니고 있고 폐수의 종류에 따라 각기 적용방법을 다르게 하고 있다. 화학적 처리공정과 생물학적 처리공정에서는 많은 슬러지를 생성하고 이를 물리적 방법으로 제거하여야 하나 슬러지 및 미립자 제거 공정에서 가장 많은 처리시간이 소요된다. 따라서 넓은 처리장 면적이 필요로 하여 폐수처리장 투자비의 대부분이 처리장이 차지하게 된다. 그러므로 보다 빠른 여과방법 및 보다 작은 면적의 처리설비의 개발은 현실점에서 매우 중요하다.

자기분리기술은 이러한 대책중의 하나로서 혼합된 상태의 물질들을 각 물질의 자화 특성을 이용하여 서로 분리해 내는 것을 말한다. 자기분리의 가장 간단한 방법은 영구자석을 이용하는 것으로 자기분리는 깨진 병속에서 병뚜껑을 골라내는 장치에서부터, 분쇄된 철광석에서의 광물질 선별, 주물공장에

서 사용하는 주물사의 선별작업 등에 이르기까지 많은 분야에서 자기분리기술이 사용되고 있다. 다양한 분야에서 자기분리기술을 응용하고 있는데, 그 중 고구배 자기분리 시스템인 HGMS (High Gradient Magnetic Separation)이 MIT에서 처음으로 제안되었다. 그리고 HGMS 시스템에 초전도 마그네트를 적용하게 되면서부터 자기분리 산업화 가능성을 극대화시키게 되었다. 높은 공극율의 자기필터와 고자장을 발생시킬 수 있는 초전도마그네트가 결합되면서 지금까지는 분리할 수 없었던 미립자 자성체와 상자성 입자를 고속으로 처리할 수 있는 길이 열리면서 초전도자기분리기술은 차세대 환경기술로서 크게 주목받고 있다. 여기에서는 주로 초전도 마그네트에 의한 HGMS 자기분리에 대해 설명하고자 한다.

2. HGMS (High Gradient Magnetic Separation)의 원리

공기, 물, 해수, 유기용매 등의 분산 혼합된 상태의 처리물질들 자화 특성 차이를 이용하여 고자장하에서 자기필터를 통과하여 여과 분리시키는 기술을 말하는 것으로 자기분리의 원리는 다음과 같다[1].

불균일 자계 H^e [A/m] 중에 놓인 자성입자에 작용하는 자기력 F_m [N]은 입자의 체적 V [m^3]과 자화의 크기 M^p [A/m] 그리고 입자가 있는 곳의 자기구배 ∇H^e [A/m^2]의 크기에 비례한다. F_m 의 방향은 자계의 구배 방향이다.

$$F_m = V \cdot \mu_0 M^p \cdot \nabla H^e \quad (1)$$

여기서 μ_0 는 진공의 투자율 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ A/m이며, 분리하려는 미립자와 용매의 자화율을 각각 χ_p , χ_f 로 하면 M^p 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M^p = (x_p - x_f)H^e \quad (2)$$

(1)식에 의하여 만일 입자가 균일한 자계 중에 놓이면 아무리 큰 자계 중에 있어도 입자를 움직이는 자기력은 발생하지 않는다. 즉 ∇H^e 가 0이 되어 $F_m = 0$ 이 된다. 강한 자기력을 얻기 위해서는 ∇H^e [A/m²]를 극단적으로 크게 하면 된다.

자기력을 크게 하기위한 다른 인자로서 입자의 체적 V와 자화의 크기 M^p 에 대해서는 입경을 크게 만들고 인가 자계 H^e 를 크게 하여 M^p 를 크게 하는 등의 방법이 필요하다. 자기력을 크게 하기 위해서는 자계 구배 ∇H^e 를 향상시키는 것이 가장 효과적이다.

자계구배 ∇H^e 를 크게 하는 수단으로서 자기필터에서 직경 10~수백 μ m 정도의 극세 자성 스테인레스선 매트릭스를 여과재로 사용하는 것이다. 이 방법으로 발생할 수 있는 자계구배의 자기력은 종래의 자기분리 방법에 비하여 약 1000 배 이상의 처리속도를 가질 수 있는 것으로 이러한 자기분리 방법을 고구배 자기분리(High Gradient Magnetic Separation, HGMS)라고 하며, 그림 1에 초전도 고구배 자기분리 시스템의 모식도를 나타내었다.

미세입자의 고속처리 능력뿐 아니라 필터의 세정과 재생도 용이하다. 필터의 내구성이 허용하는 범위 내에서 반복하여 사용할 수 반영구적으로 장비 유지보수에 대한 경제성을 가질 수 있으며, 여과필터 사용에 따른 필터폐기물의 대폭적인 감소로 이차적인 환경오염문제가 없는 환경보전에 기여할 수 있다[2].

High Gradient Magnetic Separation - HGMS

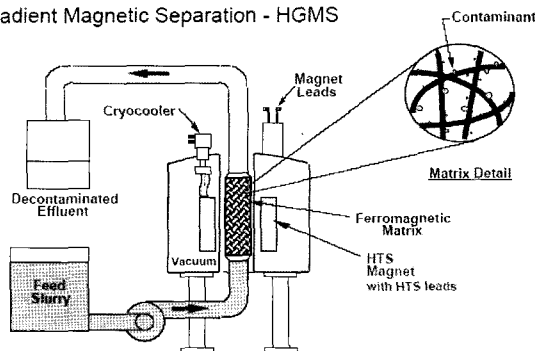


그림 1. 초전도 고구배 자기분리(HGMS)시스템 모식도

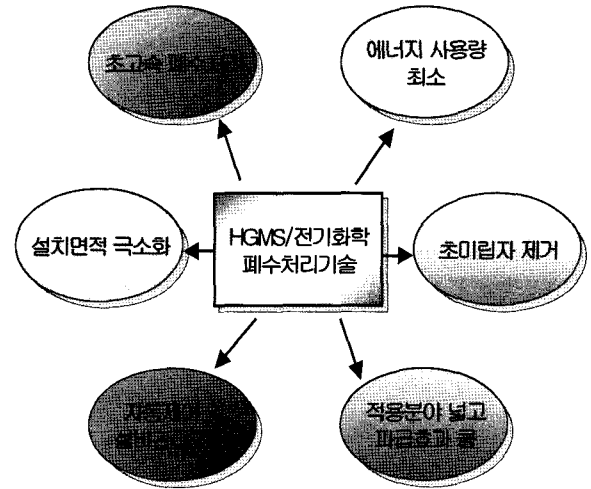


그림 2. 초전도 HGMS 자기분리의 장점

3. 초전도 HGMS의 응용

초전도자기분리의 기본원리는 HGMS 장치에서 강력한 자기력을 인가하여 가스나 액체에 포함된 자성입자를 분리해내는 것으로 자성입자들이 자계의 힘에 의하여 잡아당겨지고 포획됨으로서 제거되는 것이다.

그림 2에는 초전도 HGMS 자기분리의 장점을 나타내었다. HGMS 장치에서 강력한 자기력을 인가할 수 있는 초전도방식은 기존 구리선의 마그네트에 비해 에너지 소모가 훨씬 적으면서도 고자장 발생이 가능하기 때문에 자기분리의 효율과 성능을 대폭 향상시킬 수 있고 미립자 및 상자성체까지 자기분리가 가능하기 때문에 현재도 비소(As)나 우라늄(U)과 같은 특수한 물질의 분리 처리에도 적용하기 위해 연구가 진행되고 있다[3],[4].

이러한 초전도자기분리기를 오폐수 처리에 사용하면 소형설비에서 고속처리가 가능하기 때문에 기존의 침전 여과 방식에서 소요되는 대규모 토목 공사를 생략할 수 있기 때문에 경제적이라 할 수 있다.

표 1에는 초전도 HGMS 자기분리의 여러 산업 분야에서의 적용분야와 현재 기술 개발의 수준을 나타내고 있다. 본 기술에 대한 응용연구는 제지업에 사용되는 카울린 점토의 정제, 석탄 정제, 제철소 배수정화, 발전소 복수정화, 하수처리, 호소정화, 방사선 폐액의 수복 등에 대한 연구가 지금까지도 다양하게 이루어지고 있다.

표 1. 초전도 HGMS 자기분리의 적용분야

항목 분야	처리 물질	수준 및 효과
상수원 및 호소	녹조, 질소, 인	클로로필 95%, 질소 93% 제거 효과 입증
공단 폐수	중금속 이온 (Fe, Mn, Zn, Ni, Co, Cu)	상전도 장치로 효과 입증 (대학의 중금속 폐수처리)
제철소	Fe ₃ O ₄ , C, SiO ₂ , CaO, MgO, MnO, Al ₂ O ₃ , P ₂ O ₅ , Fe(OH) ₂	상전도 장치로 효과 입증 (히타치 제철소)
요업 재료	Fe ₃ O ₄ , TiO ₂ , FeS	카울린 중의 우라늄 1 ppm이하 제거 효과 입증
CRT	유리 연마제로부터 철분	상전도 장치로 효과 입증 (NEC)
도시 가스 정제	니프타, 부탄 중의 철분	2~3 mg/liter 제거
원자로	Pu(플루토늄), U(우라늄)	기초 연구 단계

4. 초전도 HGMS의 연구동향

초전도 자기분리기가 최초로 상용화된 것은 미국 조오지아주의 카울린 점토 정제에서 부터이다. 1986년에 그 전에 사용하던 내경 약 2 m의 구리 전자석 대신에 2 T의 저온초전도 마그네트가 도입되었다. 당시는 고자장 발생을 목적으로 마그네트만 교체된 것이었지만 전력소비는 5%, 장치 크기는 34%, 중량은 42%를 줄일 수 있었다. 그리고 자기필터 재생을 위한 마그네트의 여자 및 감자 시간을 1분 이내로 줄일 수 있어 생산속도에 따른 운전 경비를 줄일 수 있었다[5].

영국에서는 1989년 미국 Carpcos사의 자회사 Carpcos SMS가 영국에 설립되어 Oxford Instruments사로부터 초전도마그네트를 공급 받아 저온초전도 자기분리시스템을 생산하고 있다. 1990년대 초기에 소형화와 고자계화에 성공하여 영구전류 운전의 5~6 T의 대형 마그네트를 실용화하여, 1999년에 약 30대가 가동 중에 있다[6].

그림 3은 미국의 SPI 프로그램에 의해 미국의 Carpcos사에서 개발한 자기분리기를 보이고 있다. NbTi 저온초전도 마그네트를 사용하였으며 주로 카울린클레이의 철 불순물을 효율적으로 제거하는데 사용되었다.

Dupon, Sumitomo전공, Acufine공동 팀은 냉동기냉각형 고온초전도마그네트를 이용하여 철 불순물을 제거하는 카울린정제 실험에

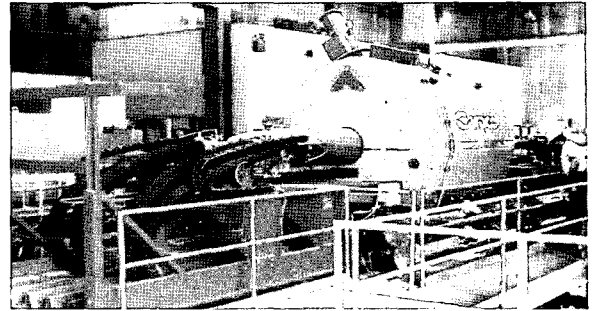


그림 3. SPI프로그램에 의하여 Carpcos에서 개발한 자기분리기

성공하였다. 실험에 사용된 마그네트는 Sumitomo전공이 개발한 Bi계 선재로 만든 3 T 급의 냉동기 냉각형 마그네트이다. 실제로 공업적으로 이용되는 5 종류의 카울린을 사용하였는데, 고온초전도 마그네트를 2.5 T에서 운전하여 처리한 결과와 2 T의 상전도 마그네트에서 처리한 것을 비교하여 카울린의 품질이 저하하지 않고 처리량을 증가시키는데 성공하였다. 또한 1분간에 0~2.5 T의 여감자를 수십 회 행하였지만 마그네트에는 아무 이상이 없었다. 앞으로 고온 초전도 HGMS 기술이 카울린 정제뿐만 아니고 다른 재료 분야에서나 화학프로세스에서 널리 사용될 것으로 주목받고 있다.

2000년 3월에 일본 물질재료연구기구재료연구소 (NIMS)에서는 멀티코아 프로젝트의 일환으로 고온초전도기술을 이용한 자기분리시스템 시제품 개발에 성공하였다[7]. 그림 4는 NIMS에서 개발한 HGMS 시스템을 나타낸 것이다. 실온공간이 20 cm이고 발생자장이 1.7 T, 동작온도 38 K의 고온초전도마그네트를 이용한 자기분리시스템을 개발하여 자성과 입경이 아주 작은 α 헤마타이트를 물에서 고속으로 분리하는 것에 성공한 것이다. 이 시스템은 초전도 마그네트의 발생 자장을 1분 내에 증감할 수 있기 때문에 폐수 정화한 후에 시스템 내부에 처리되는 물질을 단시간 내에 밖으로 배출할 수 가 있어서 폐수정화 시스템으로서 아주 높은 효율을 달성할 수가 있는 것이다. 더욱이 이 시스템은 액체헬륨이나 특수한 자성보조제를 사용하지 않고 운전이 용이하며 설치장소에 제약이 없는 것이 특징이다. 고온초전도 마그네트는 NRIM과 Sumitomo전공이 공동으로 개발하였다.

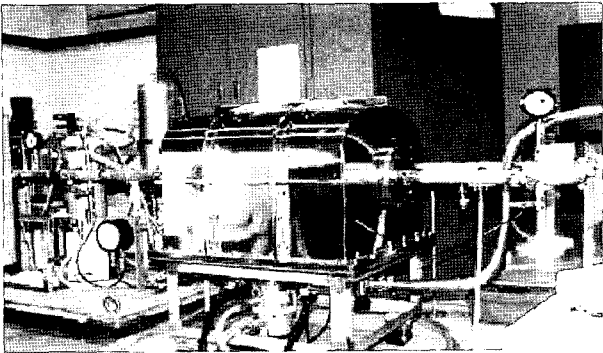


그림 4. NIMS에서 개발한 HGMS 시스템

자기분리의 조작에서는 자기력으로 포획한 미립자를 초전도 마그네트 밖으로 배출시키기 위하여 자기력을 반복하여 off시킬 필요가 있다. 따라서 가능한 빠르게 여자, 감자가 이루어지는 것이 필요하다. 이번 실험에서 발생 최대자장 1.7 T가 1분 내에 고속여감자법을 확인하였으며 충분히 안정한 상태에서 장시간 운전할 수 있는 것이 확인되었다.

일본의 지열발전을 하고 있는 지하수에는 비소(As)가 3.4 mg/L를 함유하고 있는데, 이를 빗물처럼 방류하기 위해서는 0.1 mg/L의 표준으로, 그리고 환경보호를 위해서는 0.01 mg/L의 표준 이하로 줄여야 한다. 이는 기존 함유하고 있는 비소의 99% 이상을 제거하여야 한다는 의미이다. 이를 위해 일본의 NIMS 팀에서는 NbTi와 Nb₃Sn 선재로 만든 10 T 급 초전도 마그네트를 사용한 역세필터 자기분리장치를 만들어 시험가동 중에 있다[8].

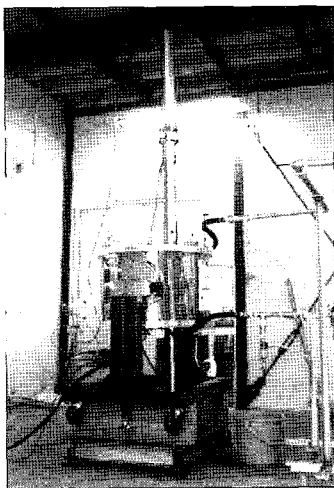


그림 5. 역세필터 방식의 자기분리 시스템

그림 5는 역세필터 방식의 비소 자기분리 시스템을 보이고 있다. 현재는 비소의 함유량이 0.1 mg/L 이하로 자기분리를 행하고 있으며 고속 처리를 위한 후속 연구를 진행하고 있다.

국내에서는 한국전기연구원과 포항산업과학연구원이 공동으로 환경부의 차세대 핵심 환경기술개발사업으로 2004년부터 초전도 HGMS 자기분리 과제를 수행 중에 있다. 냉동기 냉각 방식의 6 T 급 NbTi 초전도 마그네트를 사용하여 HGMS 자기분리 장치를 제작하였으며 자기필터 설계와 제작 및 전기화학적 산화 및 자성체 응집처리 등의 기초 연구를 수행하고 있다[9]. 그림 6은 한국전기연구원 에서 제작 중인 수평필터 방식의 초전도 HGMS 자기분리 장치의 외관을 보이고 있다. 폐수의 자기분리 공정 동안 필터의 이동, 세척을 위한 필터의 제거 및 투입을 자동화할 목적으로 구성되었다. 이 시스템은 제철소의 열연공장 및 후판공장의 냉각수에 포함된 슬러지를 제거하기 위하여 적용할 예정이다.

5. 초전도 자기분리 기술의 전망

초전도 HGMS 자기분리 기술은 국내에서 아직 개발된 적이 없는 새로운 기술로 환경 분야에서 기술혁신을 주도할 것으로 보인다. 환경기술은 선진국에 지불하는 기술도입료가 다른 분야에 비해 2배 정도로 국내 자체기술

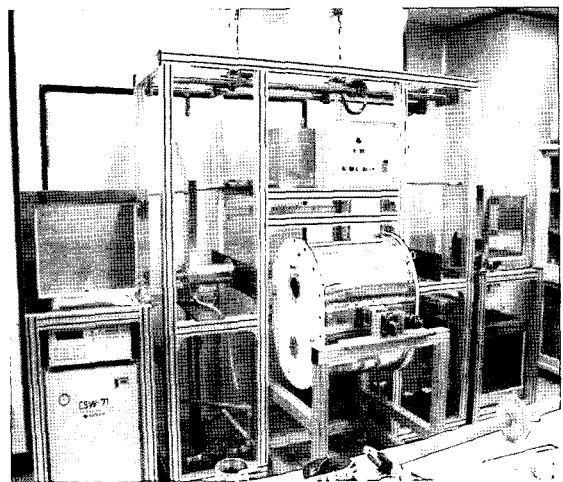


그림 6. 한국전기연구원에서 제작 중인 자기분리 시스템

의 개발이 시급하다고 할 수 있다. 한국에서는 아직 초전도자기분리기술이 개발되거나 장치가 제품화된 적이 없으며 외국에서도 현재 실용화 연구 중이기 때문에 현재 시장규모를 예측하기가 어렵다. 그러나 최근 고온 초전도자석을 적용하거나 냉동기 부착 무헬륨 냉각시스템 기술이 개발되기 시작하면서 2003년경부터 초전도자기분리장치가 일본, 미국 등에서 산업화되어 시장규모를 형성하면서 여러 분야에 보급이 크게 증가할 것으로 예상된다.

앞으로는 국민이 삶의 질을 평가하는 데 있어서 자연 환경적 풍요의 정도가 중요한 잣대로 작용할 것이다. 초전도 자기분리기는 이와 같은 환경적 측면에서의 국민의 삶의 질을 향상시키는데 일조 할 것이다.

참고문헌

- [1] R. Gerber, "Partical Capture in High Gradient Magnetic Separation", in Physics Programs, A. D. Boardman, Ed., Chichester: Wiley, pp. 149-186 (1980).
- [2] Takeshi Ohara, 電子總合研究所報告書, 第 858號, 第 1章 (1985).
- [3] A. Chiba, H. Okada et. al., "Removal of Arsenic from Geothermal water by High Gradient Magnetic Separation", IEEE Trans. on Appl. Supercon., vol 12, no. 1, pp. 952-954 (2002).
- [4] K. Taahata, S. Nishijima et. al., "Superconducting High Gradient Magnet Seperator", IEEE Magnetics, vol. 24, no. 2, pp. 878-880 (1988).
- [5] T. Ohara, T. Watanabe et. al., "Development of Superconducting magnetic Separation System", 應用物理, 第 71卷, 第 1號, pp. 57- 61 (2002).

- [6] J. H. Watson: Supercond. Sci. & Technol. vol. 5, pp. 694 (1992).
- [7] H. Kumakura, T. Ohara et. al., Physica C 350, pp.76 (2000).
- [8] H. Okada, Y. Kudo et. al., "Removal System of Arsenic from Geothermal water by High Gradient Magnetic Separation-HGMS Reciprocal Filter", IEEE Trans. on Appl. Supercon., vol 14, no. 2, pp. 1576-1579 (2004).
- [9] 하동우, 김태형, et al., "초전도 전자석을 이용한 제철소 폐수처리용 자기분리 연구", 한국전기전자재료학회 2006 하계학술대회 논문집, vpl. 7, pp. 87-88 (2006).

저자이력



하동우(河東雨)

1981-1985년 경북대학교 금속공학과 학사, 1985-1987년 경북대학교 금속공학과 석사, 1995- 2001년 연세대학교 금속공학과 박사졸업, 2004-2005년 미국 NHMFL 방문연구원. 1987-현재 한국전기연구원 책임연구원



박성국(朴誠國)

1975-1982년 경북대학교 금속공학과 학사, 1982-1984년 경북대학교 금속공학과 석사, 1984-1989년 교토대학교 금속공학과 박사, 1989-현재 포항산업과학연구원 책임연구원