

## 초전도 자기분리 기술 개발 동향

하 동 우  
한국전기연구원

### 1. 서 론

중국 등 소수국가에 편중된 자원의 수요 증가로 인해 국제 원자재 가격이 폭등하고 자원 무기화가 강화되고 있는 시점에서 한국은 세계적인 금속 소비국이나 광물자원이 빈약하여 95% 이상을 수입하고 있어 무역역조의 심화, 수급불안 및 자원 증속화 요인이 상존하고 있다. 따라서 폐금속 자원의 재활용은 사회적으로 경제적으로 큰 이슈가 되고 있다. 따라서 경제성 있는 방법으로 폐자원을 재활용하거나 저품위의 원료에서 고도정제 기술의 개발이 절실히 필요한 실정이다. 또한 산업의 발달과 전문화 및 생산기술 향상으로 인하여 배출되는 산업폐수의 악성 다양화로 이러한 폐수의 적정처리를 위하여 점차 고도의 처리기술과 시설투자를 필요로 하고 있다. 특히, 펄프, 제지, 염색, 화학산업 등에서 배출되는 폐수는 생물학적 처리와 같은 재래식 수처리 방법으로는 처리가 어려운 난분해성 유기물질을 포함하고 있으며, 수계 방출 시 생태계에 치명적인 영향을 미칠 수 있으므로 이들 물질의 효과적인 처리가 절실히 요구되고 있다. 그리고 인간의 생활이 윤택해지는 현대에 환경문제에 대한 관심이 높아지고 있으므로 고도화된 폐수처리 기술을 필요로 하고 있다.

이 분야의 처리기술로는 물리적, 화학적 그리고 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 제거공정에서 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 현시

점에서 매우 중요하다.

자기분리기술은 이러한 대책중의 하나로서 혼합된 상태의 물질들을 각 물질의 자화 특성을 이용하여 서로 분리해 내는 것을 말한다. 자기분리의 가장 간단한 방법은 영구 자석을 이용하는 것으로 자기분리는 깨진 병 속에서 병뚜껑을 골라내는 장치에서부터, 분쇄된 철광석에서의 광물질 선별, 주물공장에서 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 폐자원의 재활용뿐만 아니라 차세대 환경기술로서 크게 주목받고 있다. 여기에서는 주로 초전도 마그네트에 의한 HGMS 자기분리에 대해 설명하고자 한다.

### 2. HGMS 의 원리

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

그림 1에서처럼 슬레노이드 전자석 내의 강자성체의 필터가 있으면 필터 내로 자속이 집중이 된다.

불균일 자계  $H_e$  [A/m] 중에 놓인 자성입자에 작용하는 자기력  $F_m$  [N]은 입자의 체

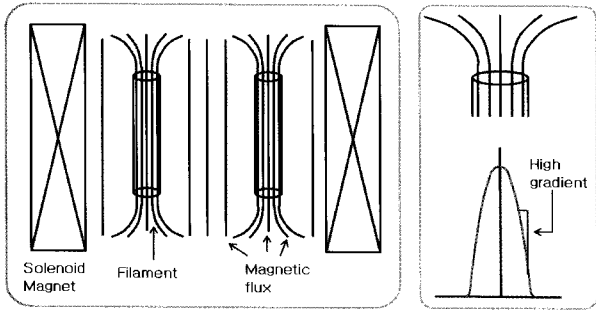


그림 1. 솔레노이드 전자석 내에서의 자기필터로의 자속의 집중.

적  $[m^3]$ 과 자화의 크기  $M_p [A/m]$  그리고 입자가 있는 곳의 자기 기울기  $\nabla H_e [A/m^2]$ 의 크기에 비례한다.  $F_m$ 의 방향은 자계의 기울기 방향이다.

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

여기서  $\mu_0$ 는 진공의 투자율  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} A/m$ 이며, 분리하려는 미립자와 용매의 자화율을 각각  $\chi_p, \chi_f$ 로 하면  $M_p$ 는 다음과 같이 나타 낼 수 있다.

$$M^p = (\chi_p - \chi_f) H^e \quad (2)$$

(1)식에 의하여 만일 입자가 균일한 자계 중에 놓이면 아무리 큰 자계 중에 있어도 입자를 움직이는 자기력은 발생하지 않는다. 즉  $\nabla H_e$ 가 0이 되어  $F_m = 0$ 이 된다. 강한 자기력을 얻기 위해서는  $\nabla H_e [A/m^2]$ 를 극단적으로 크게 하면 된다.

자기력을 크게 하기위한 다른 인자로서 입자의 체적  $V$ 와 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 기울기  $\nabla H_e$ 를 향상시키는 것이 가장 효과적이다.

자계 기울기  $\nabla H_e$ 를 크게 하는 수단으로서 자기필터에서 직경 10~수백  $\mu m$  정도의 극세 자성 스테인레스 매트릭스를 여과재로 사용하는 것이다. 이 방법으로 발생할 수 있는 자계 기울기의 자기력은 종래의 자기분리 방법에 비하여 약 1000 배 이상의 처리속도를 가질 수 있는 것으로 이러한 자기분리 방법을 고 자기 기울기 자기분리(High Gradient Magnetic Separation, HGMS)라고 하며, 그

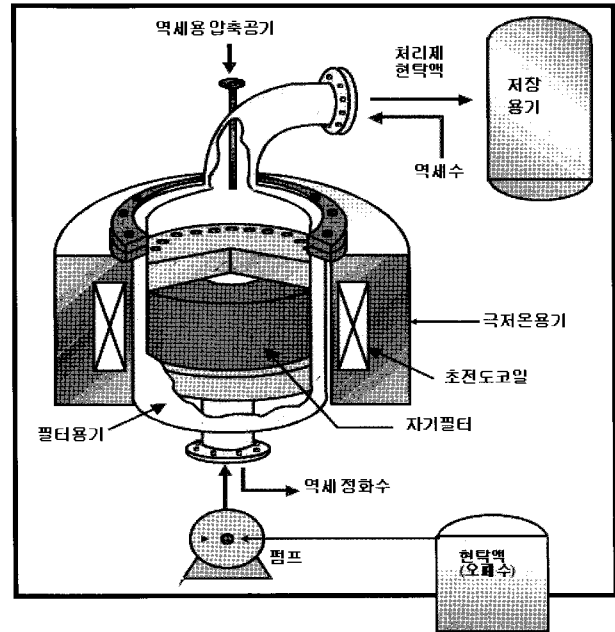


그림 2. 초전도 고 자기 기울기 자기분리(HGMS) 시스템 모식도.

림 2에 초전도 고 자기 기울기 자기분리 시스템의 모식도를 나타내었다.

미세입자의 고속처리 능력뿐만 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].

표 1에는 자기분리기에 사용되는 자석의 종류 및 배열에 따라 발생하는 자기장의 기울기를 비교하여 나타내고 있다. 영구자석의 경우 자석의 배열에 따라서 자기장의 기울기는 상당히 증가하여 Nd 롤 자석의 경우 자기력에 의한 부착력을 의미하는 자기장과 자기장 기울기의 값의 곱( $B \nabla B$ )이  $300 T^2/m$  정도로 커질 수 있지만 HGMS에서 발생하는 자기장 기울기에는 미치지 못한다.

표 1. 자기분리에서 자기장 기울기의 비교.

	BVB ( $T^2/m$ )		
	Nd Drum magnet	Nd Roll magnet	HGMS with steel wool matrix
Suspended magnet	80	300	$5 \times 10^4$

표 2에서는 자기력과 입자크기의 관계를 나타내고 있다. 자기력과 입자의 크기는 3 제곱으로 반비례하는 관계에 있으며, 입자크기가 1/10로 줄어들면 같은 크기의 자기력을 발생시키기 위해서는 1000배의 자화력이 필요하게 된다. 즉 작은 입자를 자기력으로 분리하기 위해서는 작아진 크기의 3 제곱의 큰 자기장을 인가해야 같은 효과를 얻을 수 있다는 것이다. 따라서 영구자석과 전자석을 이용한 자기분리는 초전도 자기분리에 비해 상대적으로 입자크기에 따른 제한이 크다.

그림 3에는 주기율표에 강자성체와 상자성체를 표시한 것으로 파란색으로 표시된 Fe, Ni, Co 강자성체는 약한 자기력 하에서도 빠르게 반응하여 자화값이 커지면서 포화상태에도달하지만 붉은색으로 표시된 상자성체는 그림 4에 나타나듯이 작용하는 자기력에 비례하여 자화값이 상승하게 된다. 상자성체는 강자성체에 비해 인가하는 자장에 비해 작은 자화값을 가지지만 인가하는 자장이 커지면 계속 비례하는 특성을 지니고 있다. 이것은 외부에서 인가하는 자장 값을 아주 높게 한다면 상자성체에 작용하는 부착력이 증가하여 자기분리가 가능하다는 것을 보여준다. 따라서 자기분리에 초전도 자석을 이용하면 작용하는

표 2. 자기력과 입자크기의 관계

Magnetic force vs. particle size		
Particle size [a.u.]	Magnetic susceptibility [a.u.]	Magnetic force [a.u.]
10	1	1000
1	1000	1000

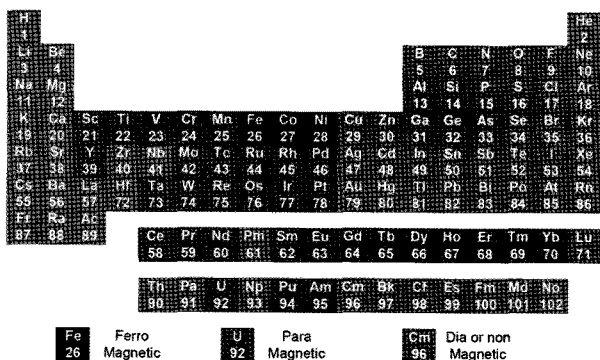


그림 3. 강자성체와 상자성체의 주기율표.

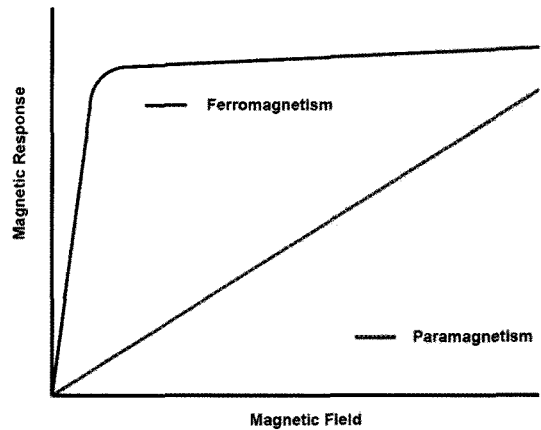


그림 4. 강자성체와 상자성체의 자기응답성.

자기력이 커지게 되고, 자기필터를 사용하는 고구배 자기분리는 상자성체의 자기분리도 가능하게 할 수 있는 장점이 있다.

### 3. 초전도 HGMS의 응용

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

그림 5에는 초전도 HGMS 자기분리의 장점을 나타내었다. HGMS 장치에서 강력한 자기력을 인가할 수 있는 초전도방식은 기존 구리선의 마그네트에 비해 에너지 소모가 훨씬

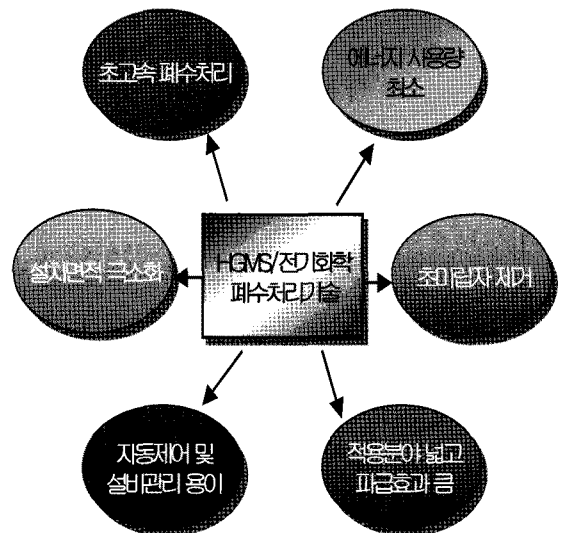


그림 5. 초전도 HGMS 자기분리의 장점.

편 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 경제적이다 할 수 있다.

표 3에는 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.

#### 4. 초전도 HGMS의 연구동향

초전도자기분리기가 최초로 상용화된 것은 미국 조지아주의 카울린 점토 정제에서 부터이다. 1986년에 그 전에 사용하던 내경 약 2m의 구리 전자석 대신에 2T의 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 운

표 3. 초전도 HGMS 자기분리의 적용분야.

적용 분야	처리 대상
산업 폐수	제지폐수의 재활용수, 도금공장, 염색공장, 제철공장, 생활하수의 인 제거, 슬래그 분리
환경 보전	고령토의 철분제거, 오염재료의 고순도화 실리콘 결정 회수, 전지 활물질 정제
자원 정제	폐광산의 중금속 제거, 지하수의 비소등 난분해성 제거, 원자력 발전의 방사선 원소 분리

전 경비를 줄일 수 있었다[5].

영국에서는 1989년 미국 Carpco사의 회사 Carpco SMS가 영국에 설립되어 Oxford Instruments사로부터 초전도마그네트를 공급받아 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 6은 미국 Eriez사에서 만든 2.5T의 전도냉각형 초전도 마그네트와 실제 탈철공정에서 사용하고 있는 자기분리 장치를 나타내고 있다.

그림 7은 미국 조지아주의 고령토의 정제에 사용되는 Outotec 사의 초전도 자기분리 장치이다. 미국의 SPI 프로그램에 의해 Carpco사에서 개발한 자기분리기인데, 현재는 Outotec 사에서 인수하여 제작 및 판매를 하고 있다. NbTi 저온초전도 마그네트를 사용하여 5T의 자장을 발생할 수 있는 장치로서 주로 고령토의 철 불순물을 효율적으로 제거하는데 사용하고 있다.

그 외에도 Dupon, Sumitomo 전공, Acuafine 공동 팀은 냉동기냉각형 고온초전

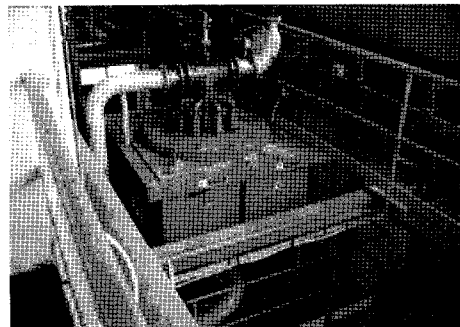


그림 6. 미국 Eriez 사의 2.5T 초전도 자기분리 장치.

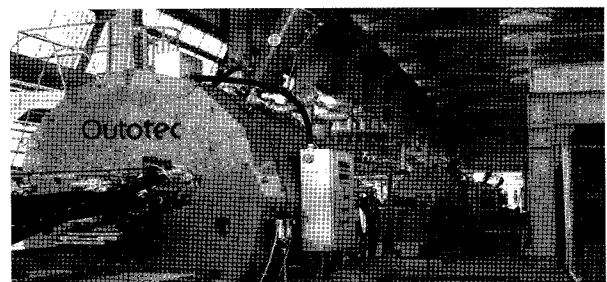


그림 7. 고령토의 정제에 사용되는 Outotec 사의 초전도 자기분리 장치.

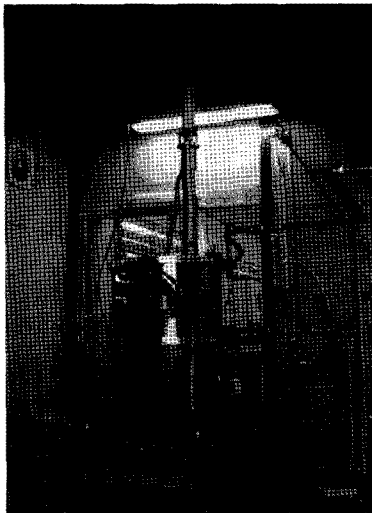


그림 8. 일본의 지열발전용 지하수의 비소를 제거하기 위한 역세필터 방식의 자기분리 시스템.

도 마그네트를 이용하여 철 분순물을 제거하는 카올린정제 실험에 성공하였다.

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 Nb<sub>3</sub>Sn 선재로 만든 10 T 급 초전도 마그네트를 사용한 역세필터 자기분리 장치를 만들어 시험가동 중에 있다[8]. 그림 8은 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.

그림 9는 일본 스미토모 플랜트 엔지니어링사에서 제작한 초전도 자기분리 장치를 보이고 있다. 자기분리기, 반응조, 믹서 등을 밀도있게 배치하여 차량 탑재형으로 만들어 필요로 하는 곳에 용이하게 이동할 수 있는 편리성을 지닌 장점이 있다. 그리고 필터 교체에 자신들만의 노하우를 가진 것으로 제작되었다. 모바일형 자기분리 장치로 트럭에 싣고 이동하면서 자기분리를 실시할 수 있기 때문에 처리량이 많지 않은 경우뿐만 아니라 초전도 자기분리 적용을 위한 시험에 유용하게 사용할 수 있다.

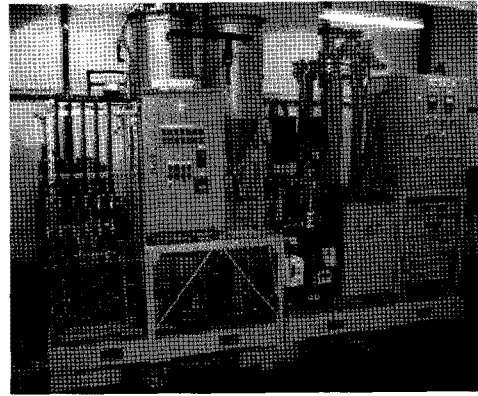
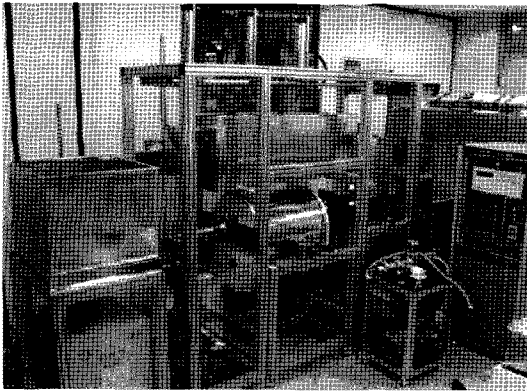


그림 9. 일본 스미토모 플랜트 엔지니어링사에서 제작한 초전도 자기분리 장치.

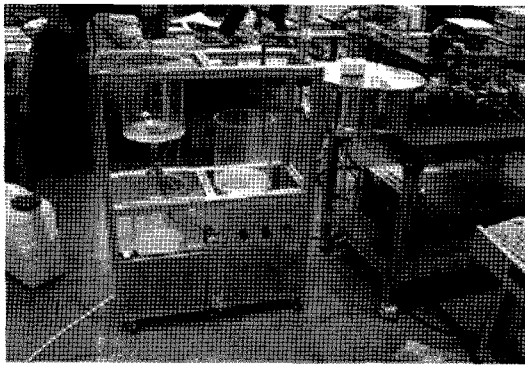
국내에서는 한국전기연구원과 포항산업과학연구원이 공동으로 2004년부터 초전도 HGMS 자기분리 기초 연구를 수행하였다. 또한 한국전기연구원에서는 제지폐수에 포함 된 유기물을 자성체 입자와 플록(floc)을 형성하는 응집공정을 개발하여 초전도 자기분리 장치를 이용하여 폐수를 정화하는 연구를 수행하고 있다. 한국전기연구원에서는 냉동기 냉각 방식의 6 T 급 NbTi 초전도 마그네트를 사용하여 HGMS 자기분리 장치를 제작하였으며, Bi-계 고온초전도 코일로 제작한 전도냉각형 초전도 마그네트를 자체 제작하여 자기분리 실험에 사용하고 있다[9]-[10].

그림 9은 한국전기연구원에서 제작한 초전도 HGMS 자기분리 장치의 외관을 보이고 있다. 그림 9의 (a)는 6 T 급 NbTi 초전도 코일로 이루어진 전도냉각형 초전도 마그네트를 수평식으로 작업이 이루어지게 제작한 장치로서 제지폐수의 수처리를 위하여 고안되었다. 마그네트의 상온 보아는 100 mm이며, 수처리 공정 동안 페라이트계 스테인레스 자기필터의 투입 및 이동이 자동으로 이루어지고 있다. 이 시스템은 또한 제철소의 열연공장 및 후판공장의 냉각수에 포함된 슬러지를 제거하는 실험에도 사용되었다. 그림 10의 (b)는 Bi-2223 고온초전도 코일로 이루어진 전도냉각형 고온초전도 마그네트 시스템으로 한국전기연구원에서 직접 제작하였으며 이 장치를 폐수처리를 위한 자기분리 장치에 사용되었다. 최대 발생자장이 3 T이며, 70mm의 상온보아와 200 mm의 높이로 되어있다.

실리콘 잉곳에서 웨이퍼로 가공하는 공정에서 슬러리가 다량 발생하는데 자기분리를 이



(a) NbTi 초전도 코일



(b) Bi-계 고온초전도 코일을 사용한 전도냉각형 초전도 마그네트.

그림 10. 한국전기연구원에서 제작한 초전도 HGMS 자기분리 장치. (a) NbTi 초전도 코일, (b) Bi-계 고온초전도 코일을 사용한 전도냉각형 초전도 마그네트.

용하여 재활용하면 경제적인 손실을 막을 수 있다. 그림 12는 실리콘 슬러리의 자기분리 전후 EDS 분석결과를 나타낸 것으로 슬러리 중 와이어 파편인 철성분의 제거효과가 나타난다.

한국전기연구원에서는 초전도 자기분리의 또 다른 적용을 위해서 화력발전소 복수기의

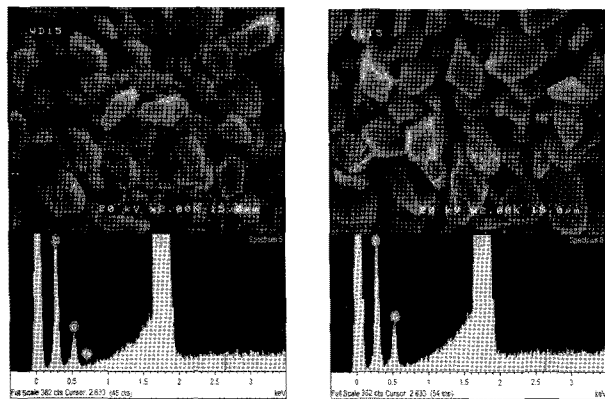


그림 11. 실리콘 슬러리의 EDS 분석.

냉각수를 실험 중에 있다. 화력발전소의 복수기는 냉각수를 사용하여 증기의 온도를 낮추고 냉각수 온도의 포화압력까지 압력을 떨어뜨려 잠열을 빼앗아 물로 되돌리는 원리를 이용하여 증기원동기로부터 배출되는 수증기를 냉각시키는 장치이다. 복수는 정상운전 중일 때는 증류수에 해당하지만 냉각 후 재가열시 용해도의 감소로 인해 산화철이 석출되고 여러 가지 장애요인으로 작용한다. 화력발전소에서 스케일의 생성속도를 늦추기 위해 적용하는 수처리법으로 산소처리법이 있다. 철이온으로 구성되어 있는 보호피막의 용해도 차이를 이용하는 방법으로 산소를 주입하여 산화반응을 유도하여 용해되지 않는 치밀한 피막을 만들어서 스케일물질의 생성을 억제하는 방법이다. 이 방법으로 수처리를 하면 기존의 방법에서 생성되던 마그네사이트가 헤마타이트로 산화하게 되고 생성된 헤마타이트는 주기적으로 제거가 필요하다. 그림 12는 화력발전소 복수기 냉각수의 XRD 분석으로 마그네사이트와 헤마타이트가 검출되었으며 상대적으로 자화값이 낮고 입자크기가 작은 헤마타이트의 제거가 중요하다.

그림 13은 화력발전소 시료의 실험 전후 사진으로 영구자석으로 자기분리한 시료와 초전도 자기분리를 실시한 시료를 나타내고 있다. 영구자석의 경우 검붉은 빛의 시료가 붉은 빛으로 연해지는 정도의 결과를 보였지만 초전도 자기분리의 경우 확연한 차이를 보이고 있다. 따라서 화력발전소 복수기 냉각수에 초전도 자기분리의 적용은 가능성이 큰 것으로 판단하여 실험 중에 있다.

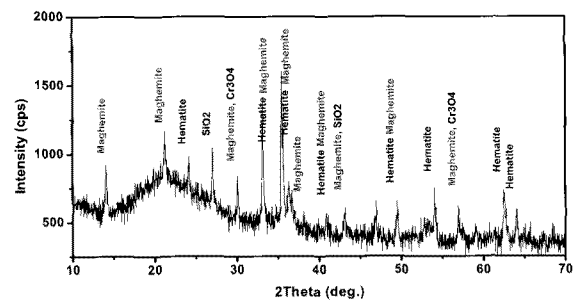


그림 12. 발전소 복수기의 잔류물의 XRD 분석 결과.

한국전기연구원에서는 산업폐수의 정수 처리 외에 유리 및 요업재료의 원료정제와 폐기

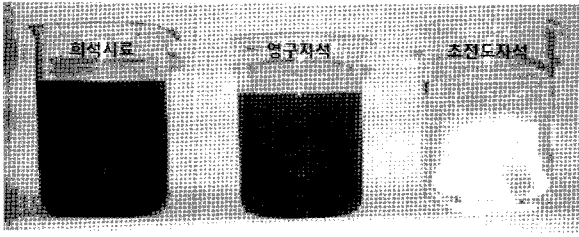


그림 13. 화력발전소 시료에서 영구자석과 초전도자석의 자기분리 비교.

물에서의 자원회수를 위하여 초전도 자기분리 장치의 활용의 가능성을 위하여 실험을 수행하고 있는 중이다.

### 5. 초전도 자기분리 기술의 전망

국내에서의 초전도 HGMS 자기분리 기술은 아직까지는 기초연구 수준에 머물고 있지만 앞으로 새로운 융합기술로 환경 분야 및 자원 정제·회수 분야에서 기술혁신을 주도할 것으로 보인다.

최근 인류의 지속적인 생존을 위해 세계적으로 녹색기술과 친환경 기술의 요구가 높을 뿐 아니라 자원의 고갈로 인해 저품위 자원의 정제 및 폐기물에서의 자원 회수를 통하여 자원 재활용의 필요성이 강조되고 있다. 한국에서의 초전도 자기분리 기술의 연구가 기초적인 수준으로 진행 중에 있으며, 외국에서도 현재 일부 실용화된 수준이어서 정확한 시장 규모를 예측하기는 어렵다. 그러나 최근 고온 초전도 코일을 적용하거나 냉동기를 부착한 무헬륨 전도냉각 시스템 기술이 개발되기 시작하면서 2003년부터 초전도자기분리장치가 일본, 미국 등에서 산업화되어 시장규모를 형성하면서 여러 분야에 보급이 크게 증가할 것으로 예상된다.

고자기장 발생이라는 장점을 이용하는 초전도 자기분리 기술은 기존의 기술의 한계를 극복할 수 있는 새로운 융합기술로서 도금산업, 염색산업에서 발생하는 난분해성 물질의 제거에서 각광을 받고 있으며, 나노기술과 접목하여 흡착력이 우수한 공정 및 물질을 개발하여 바이오 및 새로운 환경 분야의 기술을 개척하고 있기도 하다. 또한 폐기물의 재활용에 있어 고자기장을 이용한 자기분리 기술은 기존 기술에 비해 유용금속의 회수 한계를 극복하여 환경적인 측면과 아울러 경제성 측면에서

도 밝은 전망을 보이고 있어 다른 기술들과 함께 조합을 하게 되면 더욱 실용화의 가능성을 높일 수 있을 것이라 여겨진다.

앞으로는 국민이 삶의 질을 평가하는 데에 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 하계 학술대회 논문집, vol. 7, pp. 87-88 (2006).
- [10] T.H. Kim, D.W. Ha et. al., "The study of coolant waste of rolling plate

process by high gradient magnetic separation", KIASC, vol. 11, No.4, pp. 1-5, (2009).

- [11]D.W. Ha, T.H. Kim et. al, "Purification of wastewater from paper factory by superconducting magnetic separation", IEEE Trans. of Applied Supercond., will be published. in 2010.

### 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 초전도연구센터장.