

## 초전도자기분리장치 기술동향

한국전기연구원  
오상수

### 1. 서론

자기분리란 혼합된 상태의 물질들을 각 물질의 자화 특성을 이용하여 서로 분리해 내는 것을 말한다. 자기분리의 가장 간단한 예를 들어 보자. 페라이트계의 영구자석을 모래와 철가루가 섞인 혼합물에 가까이 가져가면 철가루만을 자기력으로 끌어당김으로서 쉽게 모래로부터 자성입자인 철가루를 분리해 낼 수 있다. 여기서 자석을 자속밀도가 높은 회토류계 자석으로 바꾸면 한번에 끌어당길 수 있는 철가루의 양이 많아지기 때문에 분리 효율을 높일 수 있다. 그리고 만일 영구자석 대신 대구경의 전자석을 사용하면 더 넓은 공간에서 자성입자를 분리할 수 있다. 그러나 영구자석이나 구리선으로 만든 상전도 전자석은 자기장을 발생시키는데 한계가 있고 자속밀도 단위로 2만 가우스(2 테스라) 이상을 발생시키려면 특수한 형태의 마그네트가 필요하다. 그리고 상전도 전자석을 운전하기 위해서는 전자석의 크기에 비례해서 많은 전력이 필요하게 된다. 기존의 자기분리는 영구 자석이나 상전도 전

자석을 이용하는 것으로 깨진 병 속에서 병 뚜껑을 골라내는 장치에서부터, 분쇄된 철광석에서의 광물 질 선별, 주물 공장에서 사용하는 주물사의 선별작업 등에 이르기까지 많은 분야에서 사용되고 있다. 그러나 다양한 분야에서 자기분리기술이 응용될 수 있다는 산업화 가능성을 극대화시킨 것은 선진국의 경우 초전도마그네트기술이 자기분리장치에 적용되기 시작하면서부터이다. 공극율의 높은 자기필터와 고자장을 발생시킬 수 있는 초전도마그네트가 결합되어 지금까지는 분리할 수 없었던 상자성 미세입자를 고속으로 처리할 수 있는 길이 열리면서 초전도자기분리기술은 차세대 환경기술로서 크게 주목받게 되었다.

초전도마그네트는 극저온에서 전기저항이 완전히 제로가 되는 초전도선을 이용하여 아주 높은 자장을 발생시킬 수 있는 장치로 직류로 운전하는 경우 도체의 저항손실이 제로가 되기 때문에 운전 전력을 크게 절약할 수 있다[1]. 용도에 따라서는 초전도코일을 영구전류스위치와 연결하여 폐회로를 만들어 주면 코일의 전류감쇠가 없는 영구전류에 의



한 고안정도의 자장을 발생시킬 수가 있기 때문에 MRI 등에는 초전도마그네트가 이용되고 있다. 초전도자기분리장치란 바로 이러한 초전도마그네트를 이용하여 높은 외부 자장을 발생시킴으로써 자기력을 획기적으로 높일 수 있는 것이 특징이라고 할 수 있다. 최근 응용초전도 기술의 진보로 인해 조작성이 우수한 초전도마그네트 제작이 가능하게 되어 다양한 응용초전도 기기 실현의 꿈이 점차 실현되고 있다. 그 중에서도 자기분리응용이 특히 관심을 끄는 이유는 초전도의 큰 장점인 대공간의 고자장 발생기술을 비교적 소규모시스템으로 활용이 가능하기 때문이다.

본 고에서 논하는 초전도자기분리장치란 초전도마그네트를 이용하여 자장을 발생시키고 마그네트보아 내부에는 극세자성선으로 이루어진 매트릭스 자기필터[2]를 삽입하여 고구배자계를 형성시켜 분리하고자 하는 자성 미립자를 자기필터내의 매트릭스에 자기력으로 포획하는 원리를 이용하는 것이다. 자기력이 기존의 장치보다 크기 때문에 강자성 미립자 뿐만 아니고 약자성, 상자성 미립자도 분리할 수 있으며 전처리를 통하여 세균이나 녹조와 같이 자성이 거의 없는 미생물도 자성분말을 이용하여 flock을 생성시킴으로서 자기분리가 가능하다.

국내에서는 아직 초전도자기분리장치에 대한 연구가 전무하다고 할 수 있다. 일부 중소기업에서 습식 및 건식의 자기분리장치를 연구자석 혹은 상전도 전자석을 이용하여 제작 판매하고 있으며 분리효율이 높은 고구배 자기분리장치도 제작되고 있으나 외부 자장의 한계 때문에 초전도자기분리장치만큼 자기력을 높이는 것은 불가능하다고 할 수 있

다. 미국, 유럽에서는 최근에 카울린 정제용 초전도 자기분리장치를 상용화하였으며 일본에서는 최근에 수질환경오염의 주범인 녹조를 원천적으로 제거할 수 있는 초전도자기분리장치를 개발하고 있다.

## 2. 고구배자기분리의 이론과 특징

자기력을 이용해서 자성 입자를 자기분리 하는데에는 자기력을 크게 하는 것이 중요하다. 불균일 자계  $H^e$  [A/m] 중에 놓인 자성입자에 작용하는 자기력  $F_m$  [N]은 입자의 체적  $V$  [m<sup>3</sup>]과 자화의 크기  $M^p$  [A/m] 그리고 입자가 있는 곳의 자계 구배  $\nabla H^e$  [A/m<sup>2</sup>]의 積에 비례한다[3].  $F_m$ 의 방향은 자계의 구배 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 분리를 하려는 미립자와 용매의 자화율을 각각  $\chi_p$ ,  $\chi_f$ 로 하면  $M^p$ 는 다음과 같이 나타낸다.

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

(1)식에 의하여 만일 입자가 균일한 자계 중에 놓이면 아무리 큰 자계 중에 있어도 입자를 움직이는 자기력은 발생하지 않는다. 즉  $\nabla H^e$ 가 0 이 되어  $F_m = 0$  이 된다. 강한 자기력을 얻기 위해서는  $\nabla H^e$  [A/m<sup>2</sup>]를 극단적으로 크게 하면 된다. 자기력을 크게 하기 위한 다른 인자로서 입자의 체적  $V$ 와 자화의 크기  $M^p$ 에 대해서는 입경을 크게 하던가 인

가 자계  $H^\circ$ 를 크게 하여  $M^p$ 를 크게 하는 등의 방법이 필요하다. 자기력을 크게 하기 위해서는 자계 구배  $\nabla H^\circ$ 를 향상시키는 것이 가장 효과적이다. MIT FBNML의 Kolm과 Marston그룹이 생각한 자계 구배  $\nabla H^\circ$ 를 크게 하는 수단으로서 자기필터에서 직경 10 ~ 수백  $\mu\text{m}$  정도의 극세자성스테인레스선 매트릭스를 여과재로 사용하는 것이다[4]. 이 방법으로 발생할 수 있는 자계 구배의 자기력은 종래의 자기분리 방법에 비하여 약 1000 배가 된다. MIT가 제안한 이러한 자기분리 방법을 고구배자기분리 (High Gradient Magnetic Separation, HGMS)라고 한다(그림 1 원리도 참조). 이 방법은 종래의 방법과 비교하여 입자경이 약 100  $\mu\text{m}$  또는 그 이하의 것을 대량으로 고속 분리 처리할 때에 위력을 발휘한다. HGMS은 종래의 여과재에 비하여 다음과 같은 특징을 갖는다.

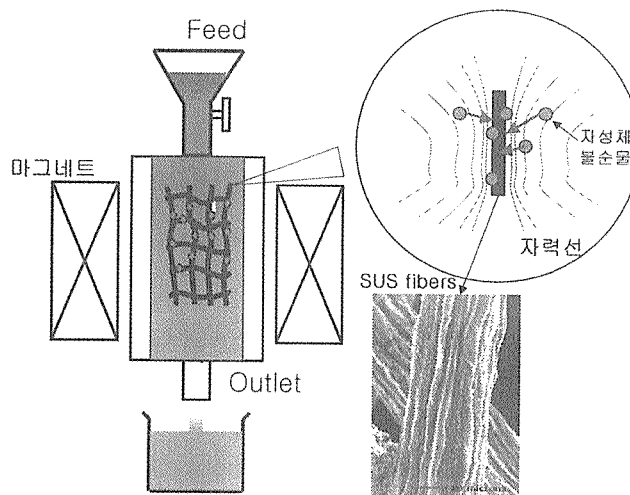
▶ 여과속도가 10 배 이상 빠르다. 과분리입자의

자성차에 기인하는 선택적인 분리력을 직접 입자에 미칠 수가 있기 때문이다.

- ▶ 여과재의 점적율이 필터공간의 3 ~ 6%로 아주 작기 때문에 압력손실이 아주 작다. 그 결과 여과펌프에 대한 부하가 작고, 운전 중에 유량의 변동이 아주 작다.
- ▶ 외부 자계를 끊으면 자기적인 흡착력을 없앨 수 있다. 그 결과 필터의 세정과 재생이 용이하다. 필터의 내구성이 허용하는 범위 내에서 반복하여 사용할 수 있다. 따라서 여과필터 사용에 따른 필터폐기물의 대폭적인 저감이 가능하여 환경보전에 기여한다.

분산계 내에서 입경 1 $\mu\text{m}$ 이하의 극미세입자에 HGMS를 적용한 경우에는 분산매 분자의 열운동에 의하여 유기된 현탁미립자의 Brown운동이 미립자의 확산력을 발생시키고 이것이 자성선 근방의 자계구배와 미립자의 자화와의 적에 비례해서 생기

〈그림 1〉 HGMS의 원리도



High Gradient Magnetic Separation(HGMS)



는 자기력과 경합할 정도로 크게된다. 이 결과 포획력은 확산력에 비하여 약하기 때문에 미립자를 자성선상에 추적시킬 수가 없다. 단, 자기력은 자성선 근방의 미립자의 현탁농도를 높게한다. 농도변화의 양은 미립자의 입경과 자화의 크기, 자계구배의 크기에 의존한다. 따라서 종래형 HGMS개념에서는 적용할 수 없다. Takayasu 등[5]은 Gerber등 [6]에 의하여 확산을 고려한 자기분리의 연구가 각각 정상프로세스, 과도프로세스에 대해서 이루어져 확

산이 무시할 수 없는 입경 한계  $d$ 가 인가자계  $B = 1 \text{ T}$ , SUS자성선의 선경  $100 \mu\text{m}$ , 자성선의 자화  $M = 1.69/\mu_0[\text{A/m}]$ 로 한 경우 <표 1>과 같이 구하였다.

이 입경 한계치 보다 작은 범위에 있는 현탁미립자를 HGMS필터에 도입하면 자성선 근방의 장소와 먼 장소에서 미립자의 현탁농도에 차가 생긴다. 큰 농도차를 만들 수 있으면 이것을 이용하여 자기 분리 또는 자기 농축이 가능해진다.

<표 1> Brown운동을 무시할 수 없는 미립자경의 최대치

물질명	Fe	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Mn <sub>2</sub> P <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	$\alpha$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CuO	Al	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Au
상대자화율 $d[\text{A}]$	- 300	- 400	$4.72 \times 10^3$ 1,500	$1.47 \times 10^3$ 2,000	$2.42 \times 10^4$ 3,000	$2.08 \times 10^5$ 5,000	$-1.81 \times 10^5$ 7,500	$-2.55 \times 10^5$ 6,000

(주)  $x = x_p - x_r$ ,  $x_p$ 는 미립자 물질의 자화율,  $x_r$ 는 분산매(물)의 자화율( $x_r = -9.05 \times 10^6$ )

### 3. 외국의 기술개발 동향

연구자석을 이용한 자기분리기술이 폐수처리에 이용된 것은 1970년대부터이고 전자석을 이용한 시스템이 일본에서 제철소 배수처리 시스템에 실용화되었다. <표 2>에서 알 수 있듯이 초전도마그네트가 자기분리에 적용되기 시작한 것은 1980년대부터이다. 자기분리 기술 중 성능과 효율이 가장 뛰어난 HGMS기술은 1960년대 말부터 세계적으로 영국, 미국, 일본 등에서 활발하게 연구되기 시작하였다. MIT가 제안한 HGMS는 종래의 방법과 비교하여 입자경이 약  $100 \mu\text{m}$  또는 그 이하의 것을 대량으로 고속 분리처리할 때에 위력을 발휘한다. 기초연구로서는 미립자의 분리메카니즘 연구, 응용연구에서는 제지업에 사용되는 카울린 점토의 정제, 석탄

정제, 제철소 배수정화, 발전소 복수정화, 하수처리, 호소정화, 방사선 폐액의 수복 등에 대한 연구가 지금까지 이루어 졌다. 일본 NEC가 실용화한 페라이트화법은 증금속을 포함한 연구용 폐액을 처리할 수 있으며 또한 유리연마폐기물의 리사이클링에도 응용이 되고 있다. 초전도자기분리장치가 최초로 상용화된 것은 미국 조오지아주의 카울린 점토 정제에서 부터이다. 1985년 경에 그 전에 사용하던 내경 약 2 m의 구리전자석 대신에 저온초전도 마그네트가 도입되었다. 당시는 단지 마그네트만 교체가 된 것으로 가동율의 향상 등과 같은 기술은 개발되지 않았었다.

영국에서는 1989년 미국 Carpco사의 자회사 Carpco SMS가 영국에 설립되어 Oxford Instruments사로부터 초전도마그네트를 공급받아

〈표 2〉

자기분리 기술의 주요기술연대표

개발시기	대상 기술	마그네트 기술	국 가	개발 수준
70년대	폐수의 중금속 제거	영구자석	일본	◎
	카울린 점토 정제	전자석	미국	◎
	제철소배수의 순화처리	전자석	일본	◎
80년대	발전소복수불순물 제거	전자석	선진국	◎
	광석선별	초전도드럼방식	독일	○
	카울린 정제	초전도마그네트	미국	◎
90년대	유리연마분 리싸이클	영구자석, 전자석	일본	◎
	우천시의 하수처리	영구자석	일본	○
	카울린 정제	초전도마그네트	중국	□
	카울린 정제	고온초전도마그네트	미국	□
	호소 녹조제거	무헬륨초전도마그네트	일본	□
	방사성폐기물 저감	초전도마그네트	미국	△
	자기 크로마트	초전도마그네트	일본	△
1998	녹조 오염수 처리	초전도마그네트	일본 Hitachi	시험운전중
1999	다양한 물질 선별 처리	초전도마그네트	미국 Carpco	

(◎ : 실용화 완료, ○ : 실용화 예상, □ : 시운전중, △ : 기초연구중)

저온초전도자기분리시스템을 생산하게 된다. 그 외의 초전도화는 현재, 발전소 복수 정화, 호소정화, 방사성폐기물의 수복 등의 분야에서도 검토되고 있다. 또한 기초연구에서는 HGMS분리메카니즘에 대한 다양한 연구가 진행중으로 자장 구배가 있는 공간중을 미립자가 그 구배방향으로 이동하는 입자 궤적 모델을 최초로 제안한 것이 영국 Southampton대의 J.H.P. Watson [7] 이며 그 전에는 입자에 작용하는 여러 종류의 힘의 비교만 행하여 졌던 자기분리 필터의 성능해석 수법이 크게 진전되었다. F.J. Friedlaender 등은 입자포획패턴의 관찰이나 R.Geber가 일반화한 이론에 의하여 피포획 입자의 입경에 따른 포획형태가 해명되었다. 이 결과, HGMS이론분리한계가 명확하게 되었

고 응용상 중요한 설계 지침이 제공되었다. 또한 이러한 기초연구를 토대로 하여 HGMS의 여러 아이디어가 제안되었다. 매트릭스 전류통전법, 고구배 자장중의 자성유체가 만드는 자화율 분포를 이용하는 방법, 피분리용 금속의 전처리로서 미생물을 이용하는 방법, 일본의 Ohara는 인접한 자성선의 미립자 분리성능에 미치는 영향을 검토하여 자장구배의 크기보다도 미립자 포획영역의 형상 쪽이 자기 분리 성능에 큰 영향을 주는 것을 명확히 하였다. 즉, 미립자 분리 성능이 90%이상의 경우, 단일 자성선에서 계산한 쪽이 높은 분리성능이 되는 것을 나타낸 것이다. 이러한 연구결과를 바탕으로 하여 핵연료재처리의 정화공정에 적합한 자기필터의 개념설계가 행하여지기도 하였다.

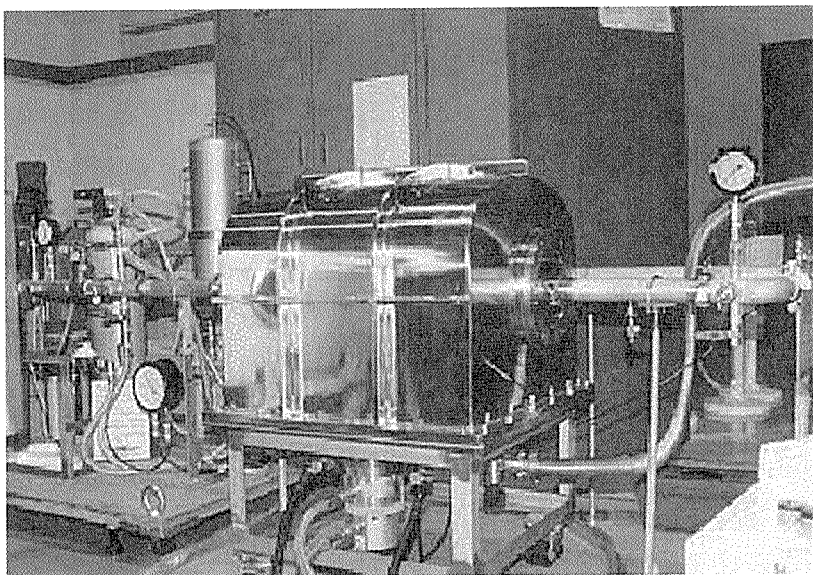


Dupon, Sumitomo전공, Acuafine공동 팀은 냉동기냉각형 고온초전도마그네트를 이용하여 철 분순물을 제거하는 카올린정제 실험에 성공하였다. 실험에 사용된 마그네트는 Sumitomo전공이 개발한 Bi계 선재로 만든 3 T급의 냉동기 냉각형 마그네트이다. 또한 카올린에 관해서는 실제로 공업적으로 이용되는 5 종류의 카올린을 사용하여 행하였다. 고온초전도마그네트 2.5 T운전에서 처리한 결과와 2 T의 상전도마그네트에서 처리한 것을 비교하여 카올린의 품질이 저하하지 않고 처리량을 증가시키는데 성공하였다. 또한 1 분간에 0 ~ 2.5 T의 여감자를 수십회 행하였지만 마그네트에는 아무 이상이 없었다. 앞으로 고온초전도HGMS기술이 카올린 정제 뿐만 아니라 다른 재료 분야에서나 화학 프로세스에서 널리 사용될 것으로 주목받고 있다.

최근 일본 금속재료기술연구소에서는 멀티코아

프로젝트의 일환으로 고온초전도기술을 이용한 자기분리시스템 시제품 개발에 성공하였다(8). 실온공간이 20 cm이고 발생자장이 1.7 T, 동작온도 38 K의 고온초전도마그네트를 이용한 자기분리시스템을 개발하여 자성과 입경이 아주 작은  $\alpha$ 헤마 타이트를 물에서 고속으로 분리하는 것에 성공한 것이다. 이 시스템은 초전도마그네트의 발생 자장을 1 분내에 증감할 수 있기 때문에 폐수 정화한 후에 시스템 내부에 처리되는 물질을 단시간 내에 밖으로 배출할 수 가 있어서 폐수정화시스템으로서는 아주 높은 효율을 달성할 수가 있는 것이다. 더욱이 이 시스템은 액체헬륨이나 특수한 자성보조제를 사용하지 않고 운전이 용이하며 설치장소에 제약이 없는 것이 특징이다. 고온초전도마그네트는 NRIM과 Sumitomo전공이 공동으로 개발하였으며 폭 3.8mm, 두께 0.24mm의 Bi계 고온초전도테이프

〈그림 2〉 최근 일본 NRIM에서 개발에 성공한 고온 초전도 HGMS 시스템



를 가공, 열처리하여 전기절연용 폴리미드 테이프와 보강용 스테인레스테이프를 React & Wind법으로 42개의 더블팬케이크 코일을 만들었다. 이것들을 중심을 맞추어서 적층하여 실온 공간 20cm의 고온초전도마그네트를 만든 것이다. 마그네트의 냉각방식으로는 팬케이크 코일 적층 사이에 18장의 금속판을 삽입하였고, 이 판을 냉동기로서 직접 냉각하는 것으로 초전도마그네트의 운전에 필요한 저온을 유지하였다. 자기분리의 조작에서는 자기력으로 포획한 미립자를 초전도마그네트 밖으로 배출시키기 위하여 자기력을 반복하여 off시킬 필요가 있다. 따라서 가능한 빠르게 여자, 감자가 이루어지는 것이 필요하다. 이번 실험에서 발생 최대자장 1.7 T가 1분내에 고속여감자법을 확인하였으며 충분히 안정한 상태에서 장시간 운전할 수 있는 것이 확인되었다.

자기분리실험에서는 강력한 자기력이 나오기 때문에 직경 50  $\mu\text{m}$ 의 자성스테인레스 섬유를 약자성 스테인레스판에 최대 5.6%의 점적율로 집어 넣어서 이것을 초전도마그네트의 중심에 고정시켜서 자

장을 인가한 것이다. 이관에  $\alpha$ 헤마타이트 분리실험의 결과 유속 4 m/min.에서 최대 99%의 분리성능이 확인되었다. 일본 히타치에서는 녹조제거용 HGMS시스템을 개발하여 녹조오염수의 처리 특성을 평가하였다.

〈표 3〉의 마그네트 동작온도로 보아서 저온초전도마그네트인 것으로 판단된다. 자성응집제를 이용하여 녹조오염수를 전처리하여 자성을 띄게 하고 자기분리한 결과 〈표 3〉에 나타난 것처럼 클로로필이 95% 제거되는 양호한 결과를 확인하였다. 표 4에 나타난 것처럼 현재 외국에서는 많은 회사에서 초전도자기분리장치를 개발하고 있으며 앞으로 고온초전도마그네트가 자기분리장치에 더 많이 적용될 것으로 보인다.

미국에서는 Carpcos사, Acuafine사 등에서 HGMS자기분리장치를 상용화하여 제품을 판매한 적이 있으나 대부분 NbTi 저온초전도선으로 만든 마그네트를 사용하였다.

비록 상전도 방식이지만 히타치에서는 제철소의 폐수처리용으로 HGMS장치를 개발하여 ① 고로·

〈표 3〉 Hitachi(社) 초전도자기분리장치의 사양과 수질 분석결과

자석동작 온도	3.9 - 5.2 K		
예냉시간	18 시간		
여자속도	0.009T/s		
소비전력	7.0 kW		
1일 처리능력	400ton		
항 목	원 수	처 리 수	제 거 율
클로로필 ( $\mu\text{g/L}$ )	1594	76	95%
COD(mg/L)	82.6	11.5	86%
T.N(mg/L)	11.4	3.3	71%
T.P(mg/L)	1.05	0.07	93%

전로·진공탈가스로서 발생하는 배기가스의 세정폐수(스프레이한물로서 가스중의 미립자를 세정 집진한 폐수), ② 연속주조, 조괴·분괴압연, 열간 압연시의 후판강 표면의 산화물이나 슬러그 제거를 위한 스프레이 폐수, ③ 냉간압연시에 압연롤 윤활수, ④ 박판표면의 산·알칼리 세정폐수, ⑤ 박판의 도금폐수 등을 정화시키는 분야에 HGMS기술을 활용한 실적이 보고되고 있으며 이러한 상전도방식의 제품은 앞으로 초전도마그네트를 이용한 HGMS장치로 바뀔 것으로 예상된다.

#### 4. 적용 분야 및 기대 효과

초전도방식은 자기분리의 효율과 성능을 대폭 향상시킬 수 있고 오폐수 처리에도 효과적으로 적용할 수 있다. 이러한 초전도자기분리장치를 오폐수 처리에 사용하면 소형설비에서 고속처리가 가능하기 때문에 제철소의 배수처리, 여름철 수질 환경오염의 주범이 되고 있는 녹적조처리, 쓰레기 매립지의 악성침출수 처리, 제조 공장에서 중금속 처리에 적용하면 기존의 침전 여과 방식에서 소요되는 대규모 토목 공사를 생략할 수 있기 때문에 경제적이라 할 수 있다.

자기분리장치는 혼합물질이 건조한 상태의 것이냐 아니면 용액상태의 것이냐에 따라 건식(dry)과 습식(wet)으로 구분되며, 혼합물질을 자기분리장치로 주입시키고 선별된 물질을 이동시키는 방식에 따라 드럼형, 콘베이어 벨트형, 튜브형등의 다양한 형태로 분류된다. 그리고, 선별된 물질을 자석에서 떼어내는 방식으로는 중력이나 원심력을 이용하는

방식과 자석을 충·방전시키는 방법, 자석은 그대로 두고 선별·포획된 물질을 담고 있는 용기를 자장영역 밖으로 끄집어내어 분리시키는 왕복방식(reciprocating type)등이 있다. 혼합물의 형태와 선별하려는 물질의 자기적·물리적 성질에 따라 적절한 형태의 자기분리장치가 선택되게 된다.

비록 자기분리장치가 다양한 형태와 기능을 가지고 서로 다른 목적으로 사용된다 할지라도 그것의 동작원리 및 기본구성은 대동소이하다. 따라서, 다양한 형태의 자기분리 장치를 동시에 연구·개발하는 것보다는 특정목적에 사용될 우수한 성능의 자기분리장치를 개발하고, 개발된 기술을 다른 형태의 자기분리장치에 응용하여 적용범위를 확대시킴과 동시에 전반적인 성능향상을 도모하는 것이 바람직하다.

최근 환경에 대한 관심이 높아지고 있으나 이런 관심에도 불구하고 지구 환경 특히, 수자원 환경은 날이 갈수록 악화 일로를 걷고 있다. 미국 일본 등의 선진국에서는 자기분리장치를 이용하여 호소나 강의 녹조를 제거·정화하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 이와 같은 선진국의 연구에 발맞추고 동시에 앞으로 전개될 세계 및 국내 환경시장의 변화에 적절히 대처하기 위해서는 여러 측면에서 장점을 가진 오폐수 녹조처리용 자기분리장치의 개발이 시급하다고 할 수 있다. 환경산업 뿐만 아니라, 자기분리장치의 개발이 화학산업, 철강산업등의 여타 다른 산업에 미치는 영향은 지대할 것으로 판단된다. 이러한 초전도자기분리장치는 외국에서도 카올린클레이 정제용으로 일부 상용화된 것을 제외하고는 산업적으로 상용화하기 위한 연구 개발이 활발



〈표 4〉

선진국에서의 자기분리장치 산업현황

업체 명(국적)	생산품목과 주요특징	비 고
Oxford Instruments (영국)	OGMS용 무헬륨 초전도마그네트 (연구용)	초전도마그네트 생산업체
Dupont (미국)	고온초전도자기분리장치 개발중	신규사업으로 추진중이며 Aquafine과 공동으로 스미토모의 전도냉각 고온초 전도마그네트를 사용한 자기분리장치 제작 시험 성공
Aquafine (미국)	영구자석, 상전도 방식의 건·습식 자기 분리장치 생산 중이며 OGMS, HGMS 초전도자기분리장치도 최근에 개발중.	자기분리장치 생산업체
Carpco (미국, 핀란드)	영구자석, 상전도 방식의 건·습식 자기 분리장치 생산 중이며 OGMS, HGMS 초전도자기분리장치도 최근에 개발중. - 초전도OGMS : 4 T - 초전도HGMS : 5 T	자기분리장치 생산업체
Eriez Magnetics (미국)	영구자석 및 상전도방식의 각종 자기분 리장치 생산중이며 고온초전도HGMS자 기분리장치 개발 예정	LANL과 공동 연구중
Cryomagnetics (미국)	자기분리용 HGMS, OGMS 초전도마그 네트 생산(OEM), Aquafine에 공급	초전도마그네트 생산업체

하게 진행 중으로 고성능의 고온초전도선재와 냉매 없이도 초전도마그네트를 냉각할 수 있는 냉동기 부착의 전도냉각기술이 개발되면서 다양한 목적의 초전도자기분리장치가 5년 이내에 상용화되어 고부가가치의 핵심 환경기술로서 자리잡을 것으로 예상된다. 초전도자기분리기술의 산업적 적용 분야를 보면 다음과 같이 아주 다양한 분야에 활용이 가능한 것을 알 수 있다.

- 제지업용 카울린점토 정제
- 석탄정제
- 제철소 배수정화

- 발전소 복수 정화
- 하수처리
- 호소정화(녹조)
- 방사성폐액의 수복
- 중금속 폐액의 처리(페라이트화)
- 유리연마폐기물의 리사이클링

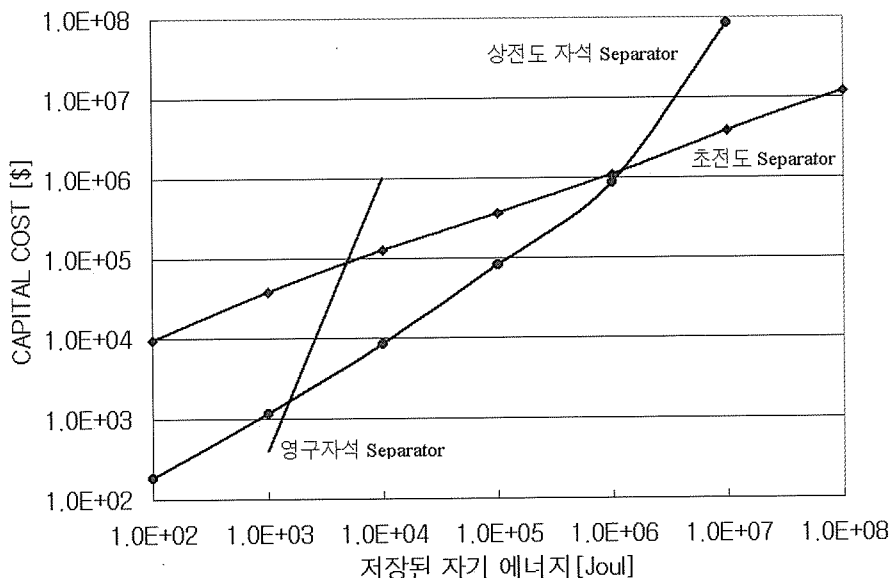
초전도자기분리기술은 국내에서는 아직 개발된 적이 없는 새로운 기술로 환경분야에서 기술 혁신을 주도할 수 있을 것으로 보인다. 한국환경기술개발원이 예측한 “세계의 환경시장전망(1996)”에 따르면 우리나라 환경시장은 연평균13.4%의 성장을

거듭 2005년에는 20조 8,300억원의 시장을 형성할 것으로 예상되고 있다. 수질환경분야가 기술개발 건수 비율로 25.5%가 되며 초전도자기분리기술이 수질환경 분야에 도입되면 단기적으로는 10%, 장기적으로는 20%정도의 점유율을 확보할 것으로 예상된다. 환경기술은 선진국에 지불하는 기술도입료가 다른 분야에 비해 2배 정도로 국내 자체기술의 개발이 시급하다고 할 수 있다. 우리나라에서는 아직 초전도자기분리기술이 개발되거나 장치가 제품화 된 적이 없으며 외국에서도 현재 실용화 연구중이기 때문에 현재 시장규모를 예측하기가 어렵다. 그러나 최근 고온초전도마그네트를 적용하거나 냉동기 부착 무헬륨 냉각시스템 기술이 개발되기 시작하면서 2003년경부터 초전도자기분리장치가 일본, 미국 등에서 산업화되어 시장규모를 형성하면서 여러 분야에 보급이 크게 증가할 것으로 예상

된다.

기존의 상전도 자기분리장치를 고온초전도 자기분리장치로 교체 할 수밖에 없는 가장 큰 이유는 기존의 자기분리장치가 과도한 전력소비로 많은 운전비용을 소모한다는 점이다. 기존 자기분리장치는 1.5~2.0T급에서 약 300~400kW의 전력을 소모한다. 그러나 동급의 고온초전도 자기분리장치가 만약 30~40K의 온도에서 운전될 경우 전력소모는 약 12kW정도에 불과하다. 일반적으로 자기분리장치의 수명이 약 25년 정도이고, 한해 운전시간이 평균 8000시간인 것을 감안하면, 1년간 한 대당 절약되는 비용은 약\$95,000에 이르며 자기분리장치의 수명동안 약 2백40만 달러가 절약된다. 이것은 대당 약 50MkWh에 해당하는 전력량이다. 이런 경비절감 효과는 자기분리장치의 용량이 증가함에 따라 커지게 된다. 만약 기존의 상전도 자기분리장치

〈그림 3〉 사용 마그네트별 운전비용 비교



가 고온초전도 자기분리장치로 대체될 경우 위와 같은 직접적인 경비절약 효과뿐만 아니라, 자기분리장치를 필요로 하는 모든 화학 정제 공정의 단가를 절감시킬 수 있으며 이에 따른 효과는 가히 상상을 초월할 것이다. 그리고, 전력소비의 감소는 자기분리장치의 사용영역을 더욱더 확장하는데 중요한 역할을 할 것이다.

## 5. 결 론

지금까지 초전도자기분리기술의 원리와 특징 그리고 외국의 기술개발동향에 대해서 개괄적으로 살펴 보았다. 초전도마그네트기술은 하루가 다르게 발전하고 있으며 적은 소비전력으로 높은 자장을 발생시킬 수 있는 것이 최대 장점이다. 최근에 냉동기 기술의 발달에 힘입어 액체헬륨이 전혀 필요 없는 전도냉각 초전도마그네트 시스템이 개발되고 있기 때문에 냉각조작이 아주 편리해지고 있다. 따라서 초전도마그네트의 생산비용이 절감될수록 자기분리장치에 많이 적용될 것으로 보인다.

우리나라에서 매년 수질환경 문제가 심각한 사회 문제가 되고 있다. 초전도자기분리장치를 개발하면 고속으로 수처리가 가능하기 때문에 여러 환경분야에 유용하게 사용될 수 있다. 특히 초전도자기분리 장치는 소면적에서 처리속도를 대폭 높일 수 있기 때문에 폐수 및 하수처리장에도 대규모 활용이 가

능하다고 할 수 있다. 앞으로 우리나라에서도 초전도자기분리기술에 대한 많은 관심이 필요하며 첨단 환경기기의 산업화를 위한 연구개발 투자도 하루빨리 이루어져야 할 것이다.

## 참고문헌

- [1] "Case studies in superconducting magnets", Yukikazu Iwasa, Plenum Press
  - [2] T. Ohara, IEEE Trans. on Mag. MAG-20, (1984) 436.
  - [3] "최근의 자기분리연구", T. Ohara, 일본 전자 기술총합연구소 보고서 55권 5호(1991)
  - [4] H.H. Kolm:US patent 3, 567, 026(1971), 3, 676, 337(1972)
  - [5] M. Takayasu, R. Gerber, and F.J. Friedlander:IEE Trans, on Mag. MAG-19 (1983)2112
  - [6] R.Gerber, M.Takayasu, and F.J. Friedlander:IEE Trans, on Mag. MAG-19(1983)2115.
  - [7] J.H.P. Watson:J. Appl. Phys., 44(1973)4209.
  - [8] Internet homepage <http://www.nrim.go.jp>
- 참고