

## 초전도 자기분리 기술 개발 동향

하동우 책임연구원 (한국전기연구원 초전도연구센터)

### 1. 서론

산업의 발달과 전문화 및 생산기술 향상으로 인하여 배출되는 산업폐수는 악성이면서도 다양화되어, 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 물리적 처리기술로는 스크리닝 (Screening), 침사지 (Grit chamber), 침전 (Sedimentation), 부상 (Flotation), 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 미

립자 제거공정에서 가장 많은 처리시간이 소요된다. 따라서 넓은 처리장이 필요로 하여 폐수처리장 투자비의 대부분이 처리장이 차지하게 된다. 그러므로 보다 빠른 여과방법 및 보다 작은 면적의 처리설비의 개발은 현시점에서 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 자기분리가 사용되고 있다. 다양한 분야에서 자기분리기술을 응용하고 있는데, 그 중 고자기 기술기 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 초전도 마그네트가 결합되면서 지금까지는 분리할 수 없었던 미립자 자성체와 상자성 입자를 고속으로 처리할 수 있는 길이 열리면서 초전도 자기분리기술은 차세대 환경기술로서 크게 주목받고 있다. 여기서는 주로 초전도 마그네트에 의한 HGMS 자기분리에 대해 설명하고자 한다.

## 2. HGMS의 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 솔레노이드 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 체적  $V$  [m<sup>3</sup>]과 자화의 크기  $M^p$  [A/m] 그리고 입자가 있는 곳의 자기 기울기  $\nabla H^e$  [A/m<sup>2</sup>]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/m이며, 분리하려는 미립자와 용매의 자화율을 각각  $\chi_p$ ,  $\chi_f$ 로 하면  $M^p$ 는 다음과 같이 나타낼 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

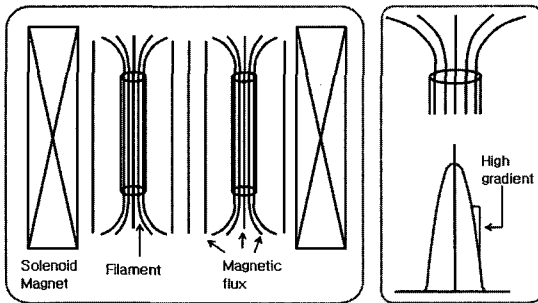


그림 1. 솔레노이드 전자석 내에서의 자기필터로의 자속의 집중.

자기력은 발생하지 않는다. 즉  $\nabla H^e$ 가 0이 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 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 자기 필터의 직경을 10~수백  $\mu\text{m}$  정도의 극세 스테인레스선 매트릭스를 여과재로 사용하는 것이다. 이 방법으로 발생할 수 있는 자계 기울기의 자기력은 종래의 자기분리 방법에 비하여 약 1,000배 이상의 처리속도를 가질 수 있는 것으로 이러한 자기분리 방법을 고 자기 기울기 자기분리 (High Gradient Magnetic Separation, HGMS)라고 하며, 그림 2에 초전도 고 자기 기울기 자기분리 시스템의 모식도를 나타내었다.

미세입자의 고속처리 능력 뿐만 아니라 필터의 세정과 재생도 용이하다. 필터의 내구성이 허용하는 범위 내에서 반복하여 사용할 수 있으므로 반영구적으로 장비 유지보수에 대한 경제성을 가질 수 있으며, 여과필터 사용에 따른 필터 폐기물의 대폭적인 감소로 이차적인 환경오염 문제가 없으므로 환경보

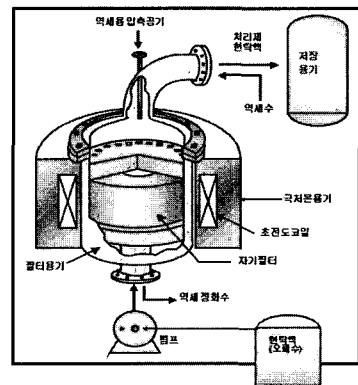


그림 2. 초전도 고 자기 기울기 자기분리 (HGMS) 시스템 모식도.

전에 기여할 수 있다 [2].

### 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 3에는 초전도 HGMS 자기분리의 장점을 나타내었다. HGMS 장치에서 강력한 자기력을 인가할 수 있는 초전도 방식은 기존 구리선의 마그네트에 비해 에너지 소모가 훨씬 적으면서도 고자기장 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 처리에 적용하기 위해서도 연구가 진행되고 있다 [3,4].

이러한 초전도 자기분리기를 오페수 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 적용 분야와 현재 기술 개발의 수준을 나타내고 있다. 본 기술에 대한 응용연구는 제지업에

사용되는 카울린 점토의 정제, 석탄 정제, 제철소 배수정화, 발전소 응축수의 정화, 하수처리, 호소정화, 방사선 폐액의 회수 등에 대한 연구가 지금까지도 다양하게 이루어지고 있다.

### 4. 초전도 HGMS의 연구 동향

초전도자기분리가 최초로 상용화된 것은 미국 조지아주의 카울린 점토 정제에서 부터이다. 1986년에 이전에 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 운전 경비를 줄일 수 있었다 [5].

영국에서는 1989년 미국 Carpco社의 자회사 Carpco SMS가 영국에 설립되어 Oxford Instruments사로부터 초전도 마그네트를 공급받아 저온초전도 자기분리 시스템을 생산하고 있다. 1990년대 초기에 소형화와 고자계화에 성공하여 영구전류 운전의 5~6 T의 대형 마그네트를 실용화하여, 1999년에 약 30대가 가동 중에 있다 [6].

그림 4는 미국 조지아주의 고령토의 정제에 사용되는 Outotec社의 초전도 자기분리 장치이다. 미국의 SPI 프로그램에 의해 Carpco社에서 개발한 자기분리기인데, 현재는 Outotec社에서 인수하여 제작 및 판매를 하고 있다. NbTi 저온초전도 마그네트를 사용하여 5 T의 자장을 발생할 수 있는 장치로서 주

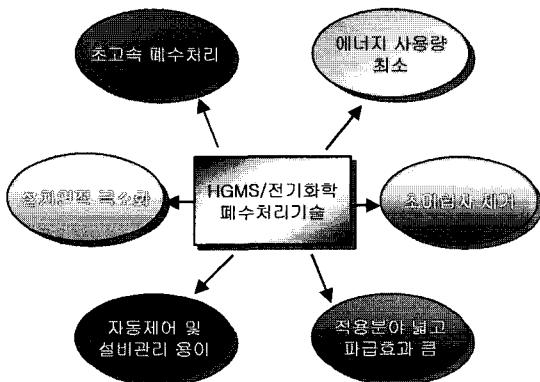


그림 3. 초전도 HGMS 자기분리의 장점.

표 1. 초전도 HGMS 자기분리의 적용분야.

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

로 고령토의 철 불순물을 효율적으로 제거하는데 사용하고 있다.

Dupont, Sumitomo 전공, Acuafine 공동팀은 냉동기냉각형 고온초전도마그네트를 이용하여 철 불순물을 제거하는 카올린정제 실험에 성공하였다. 실험에 사용된 마그네트는 Sumitomo 전공이 개발한 Bi계 선재로 만든 3 T급의 냉동기 냉각형 마그네트이다. 실제로 공업적으로 이용되는 5 종류의 카올린을 사용하였는데, 고온초전도 마그네트를 2.5 T에서 운전하여 처리한 결과와 2 T의 상전도 마그네트에서 처리한 것을 비교하여 카올린의 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 카올린 정제뿐만 아니고 다른 재료 분야에서나 화학프로세스에서 널리 사용될 것으로 주목받고 있다.

200년 3월에 일본 물질재료연구소 (NIMS)에서는 멀티코아 프로젝트의 일환으로 고온초전도기술을 이용한 자기분리시스템 시제품 개발에 성공하였다 [7]. 그림 5는 NIMS에서 개발한 HGMS 시스템을 보이고 있다. 실온공간의 직경이 20 cm이고 발생자장이 1.7 T, 동작온도 38 K의 고온초전도마그네트를 이용한 자기분리시스템을 개발하여 자성과 입경이 아주 작은  $\alpha$ 헤마타이트를 물에서 고속으로 분리하는 것에 성공한 것이다. 이 시스템은 초전도 마그네트의 발생 자장을 1 분 내에 증감할 수 있기 때문에 폐수 정화한 후에 시스템 내부에 처리되는 물질을 단시간

내에 밖으로 배출할 수가 있어서 폐수정화시스템으로서 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 Sumitomo 전공이 공동으로 개발하였다. 자기분리의 조작에서는 자기력으로 포획한 미립자를 초전도 마그네트 밖으로 배출시키기 위하여 자기력을 반복하여 감자시킬 필요가 있다. 따라서 가능한 빠르게 여자, 감자가 이루어지는 것이 필요하다. 이번 실험에서 발생 최대자장 1.7 T가 1분 내에 고속 여감자할 수 있음을 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 기준으로, 그리고 환경보호를 위해서는 0.01 mg/L의 기준 이하로 줄여야 한다. 이는 기준 함유하고 있는 비소의 99% 이상을 제거하여야 한다는 의미이다. 이를 위해 일본의 NIMS팀에서는 NbTi와 Nb<sub>3</sub>Sn 선재로 만든 10 T급 초전도 마그네트를 사용한 역세필터 자기분리 장치를 만들어 시험가동 중에 있다 [8]. 그림 6은 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 2004년부터 초전도 HGMS 자기분

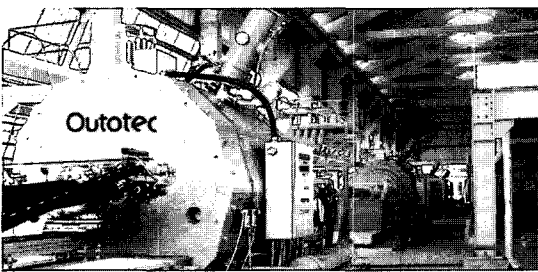


그림 4. 고령토의 정제에 사용되는 Outotec사의 초전도 자기분리 장치.

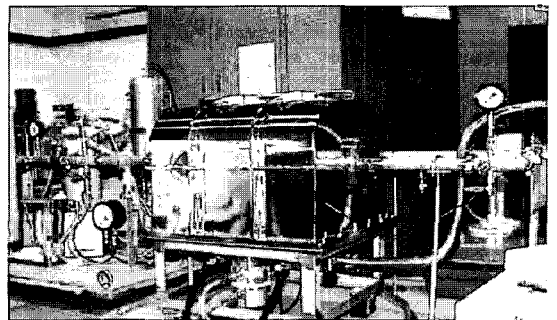


그림 5. NIMS에서 개발한 고온초전도 HGMS 시스템.

리 기초 연구를 수행하였다. 또한 한국전기연구원에서는 제지폐수에 포함된 유기물을 자성체 입자와의 플록 (Floc)을 형성하는 자화 응집공정을 개발하여 초전도 자기분리 장치를 이용하여 폐수를 정화하는 연구를 수행하고 있다. 한국전기연구원에서는 냉동기 냉각 방식의 6 T급 NbTi 초전도 마그네트를 사용하여 HGMS 자기분리 장치를 제작하였으며, Bi-계 고온초전도 코일로 제작한 3 T급전도냉각형 초전도 마그네트를 자체 제작하여 자기분리 실험에 사용하고 있다 [9,10].

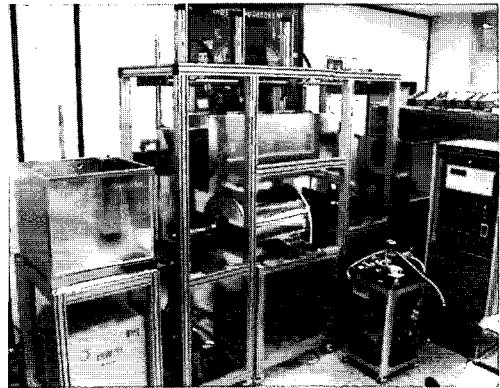
그림 7은 한국전기연구원에서 제작한 초전도 HGMS 자기분리 장치의 외관을 보이고 있다. 그림 7(a)는 6 T급 NbTi 초전도 코일로 이루어진 전도냉각형 초전도 마그네트를 수평식으로 작업이 이루어지게 제작한 장치로서 제지폐수의 수처리를 위하여 고안되었다. 마그네트의 상온 보아는 100 mm이며, 수처리 공정 동안 페라이트계 스테인레스 자기필터의 투입 및 이동이 자동으로 이루어지고 있다. 이 시스템은 또한 제철소의 열연공장 및 후판공장의 냉각수에 포함된 슬러지를 제거하는 실험에도 사용되었다. 그림 7(b)는 Bi-2223 고온초전도 코일로 이루어진 전도냉각형 고온초전도 마그네트 시스템으로 한국전기연구원에서 직접 제작하였으며 이 장치를 폐수 처리를 위한 자기분리 장치에 사용되었다. 최대 발생자장이 3 T이며, 70 mm의 상온보아와 200 mm의

높이로 되어있다.

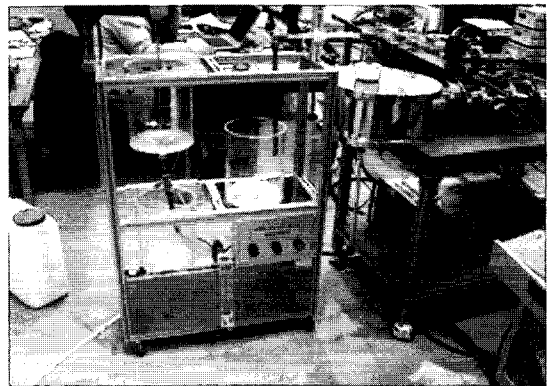
한국전기연구원에서는 산업폐수의 정수 처리 외에 유리 및 요업재료의 원료정제와 폐기물에서의 자원회수를 위하여 초전도 자기분리 장치의 활용의 가능성을 위하여 실험을 수행하고 있는 중이다.

## 5. 초전도 자기분리 기술의 전망

국내에서의 초전도 HGMS 자기분리 기술은 기초



(a) NbTi 초전도 코일



(b) Bi-계 고온초전도 코일

그림 7. 한국전기연구원에서 제작한 초전도 HGMS 자기분리 장치 (a) NbTi 초전도 코일, (b) Bi-계 고온초전도 코일을 사용한 전도냉각형 초전도 마그네트.

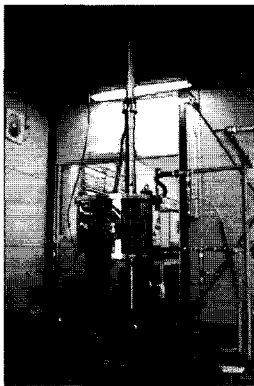


그림 6. 일본의 지열발전용 지하수의 비소를 제거하기 위한 역세필터 방식의 자기분리 시스템.

연구 수준에 머물고 있는 새로운 융합기술로 환경 분야 및 자원 정제·회수 분야에서 기술혁신을 주도 할 것으로 보인다.

최근 인류의 지속적인 생존을 위해 세계적으로 녹색기술과 친환경 기술의 요구가 높을 뿐만 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 고온초전도 코일을 적용하거나 냉동기를 부착한 무헬륨 전도냉각 시스템 기술이 개발되기 시작하면서 2003년부터 초전도 자기분리기가 일본, 미국 등에서 산업화되어 시장규모를 형성하면서 앞으로 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.

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

## 참고 문헌

[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 Sperator", 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, 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

## 담당위원



성명 : 하동우

◆ 학력

- 1985년 경북대학교 공과대학 금속공학과 공학사
- 1987년 경북대학교 대학원 금속공학과 공학석사
- 2001년 연세대학교 대학원 금속공학과 공학박사

◆ 경력

- 1987년 - 현재 한국전기연구원 초전도연구센터 책임연구원
- 2004년 - 2005년 미국 NHMFL 방문 연구원