Journal of Korean Society on Water Environment, Vol. 36, No. 2, pp. 153-163 (March, 2020)
pISSN 2289-0971 eISSN 2289-098X https://doi.org/10.15681/KSWE.2020.36.2.153

총 설

폐수처리 분야에서 자기 분리기술의 응용 현황 및 전망

저소웅[1a] · 임봉수[1b,†] · 최찬수[2]

[1]대전대학교 환경공학과 · [2]대전대학교 응용화학과

Application Status and Prospect of Magnetic Separation Technology for Wastewater Treatment

Shaoxiong Chu[1a] • Bongsu Lim[1b,†] • Chansoo Choi[2]

[1]Department of Environmental Engineering, Daejeon University
[2]Department of Applied Chemistry, Daejeon University
(Received 10 January 2020, Revised 13 February 2020, Accepted 26 February 2020)

Abstract
Magnetic separation technology is an efficient and environmentally friendly technology. Compared with the traditional wastewater treatment technology, the magnetic separation technology has its unique advantages and characteristics, and has been widely applied in the field of wastewater treatment. In particular, the emergence of superconducting magnetic separation technology makes possible for high application potential and value. In this paper, which through consulting with the literatures of Korea, Chinese, United States and other countries, the magnetic separation technology applied to wastewater treatment was mainly divided into direct application of magnetic field, flocculation, adsorption, catalysis and separation coupling technology. Advantages and limitations of the magnetic separation technology in sewage treatment and its future development were also studied. Currently, magnetic separation technology needs to be studied for additional improvement in processing mechanism, design optimization of magnetic carrier and magnetic separator, and overcoming engineering application lag. The selection, optimization and manufacturing of cheap magnetic beads, highly adsorbed and easily desorbed magnetic beads, specific magnetic beads, nanocomposite magnetic beads and the research of magnetic beads recovery technology will be hot application of the magnetic separation technology based on the magnetic carriers in wastewater treatment. In order to further reduce the investment and operation costs and to promote the application of engineering, it is necessary to strengthen the research and development of high field strength using inexpensive and energy-saving magnet materials, specifically through design and development of new high efficiency magnetic separators/filters, magnetic separators and superconducting magnetic separators.

Key words : Magnetic adsorption, Magnetic catalysis, Magnetic flocculation, Magnetic separation, Wastewater treatment

[1a] 박사과정(Ph.D. Student), c375383051@hotmail.com, https://orcid.org/0000-0001-9325-4656
[1b,†] Corresponding author, 교수(Professor), bslim@dju.kr, https://orcid.org/0000-0001-6129-1014
[2] 교수(Professor), cse110@dju.kr, https://orcid.org/0000-0002-0167-9831

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. Introduction

자기분리(磁氣分離, Magnetic Seperation)기술이란 물질이나 원소의 자화 특성에 따라서 외부 자력장을 이용하여 분리해 내는 기술을 말한다(Karapinar, 2003). 자장원에 따라 자기분리는 영구자성분리, 전자분리와 초전도 자기분리로 나눌 수 있고, 응용환경에 따라 습식 자기분리와 건식 자기분리로 나눌 수 있으며, 자기 반응기에 따라 전통 자기분리, 자기 디스크분리(Magnetic Disc Separation), 고구배 자기분리(高句配磁氣分離, High Gradient Magetic Seperation, HGMS)와 개방구배 자기분리(Open Gradient Magnetic Separation, OGMS)로 나눌 수 있다(Sun et al., 2006). 빠른 고효율의 분리 때문에 특히 초전도 자기분리 기술과 고구배 자기분리 기술은 신속한 발전으로 자기분리 기술은 미광선별, 광재회수, 고령토 탁색 등 분야에서 많이 응용하고 있다. 그리고 최근 20 ~ 30년 동안, 자기분리 기술은 생물기술, 폐수처리, 수생태 복원 등 분야에서 많이 연구와 응용이 되고 있다(Yavuz et al., 2009).

일반 폐수처리 기술과 다르게 자기분리 기술은 자력이 직접 오염물질이나 대상물질과 작용해서 물질을 원수에서 이탈하게 하므로 원수에 다른 영향이 없고 분리속도가 빠르고 넓은 용지가 필요 없는 장점이 있다. 특히 고구배 자기분리 기술과 초전도 자기분리 기술에 기인하여 자기분리 기술은 폐수처리 분야에서 발전 가능성과 넓은 응용 가능성을 가지게 되었다. 따라서 본 연구는 관련 문헌연구를 통해 현재 국내·외 자기분리 기술에 대한 폐수처리 분야에서 연구와 응용 현황을 조사하고, 향후 이 분야에서의 추가적인 연구 방향을 제시하고자 한다.

2. Application Case of Magnetic Separation Technology for Wastewater Treatment

인류는 자기 현상을 이용하여 물질을 분리하는 오랜 역사를 오래 가지고 있고 18세기 후반에 자기분리 장치의 개발과 활용을 하기 시작하게 되었다. 기존의 자기분리 기술에는 제한이 있으나 1970년대까지 고구배 자기분리 기술의 개발에 따라 대규모 산업화가 시작됐다. 자기분리 기술은 폐수처리 분야에서 새로운 기술이며 높은 분리 효율의 특징을 가지고 있는 고구배 자기분리 기술의 발전에 기인하여 점차 확대되었다. 고구배 자기분리 기술은 자기분리기에 일정량의 자기 민감성 매체을 채우는 것으로 자기 매체 주변의 자기장이 불일치하게 하여 고구배 자기를 발생하고 자기장을 최대화하여 분리 속도와 효율을 증가시키는 것을 의미한다. 특히 폐수처리 분야에서 자기분리 기술의 연구 및 응용은 주로 고구배 자기분리 기술의 발전에 의해 결정되었다. 고구배 자기분리 기술은 분쇄된 철광석에서의 광물질 선별, 카올린 점토의 정제, 석탄의 정제, 공업폐수처리, 호소정화, 토양복원 및 생물학적 처리기술 등에 대한 연구와 응용이 지금까지 이루어졌다(Borlido et al., 2013; Yavuz et al., 2009).

자기체기술의 신속한 발전은 자기분리 기술의 발전에 크게 공헌하게 하였으며, 자기체의 강도에 따라 약한 자기분리(<1T), 강한 자기분리(<2T)와 초전도 자기분리(>10T) 3가지로 나눌 수 있다(Borlido et al., 2013; Gokon et al., 2002; Li et al., 2012). 여기서 T는 Telsa의 약자로 자속밀도(Magnetic Flux Density)의 단위이다. 영구자석과 구리선으로 만든 상전도 전자석을 이용한 자기분리 기술이 자기장을 발생시키는데 한계가 있고 약한 자성이나 미세 입자를 처리하는 능력도 한계가 있다. 그리고 상전도 전자석을 운전할 때 구리선에 의한 에너지 소모도 무시할 수 없다. 새로 나타난 초전도 마그네트가 영구자석이나 상전도 전자석이 분리할 수 없었던 문제를 해결하고 극저온에서 전기저항이 완전히 제로가 되는 초전도선을 이용하면 이론적인 저항손실이 제로가 되기 때문에 운전 전력을 크게 절약할 수 있다. 따라서 초전도 자기분리 기술은 자기장의 강도를 크게 향상시키고 작동 에너지 소비를 줄이고 자기 분리 능력과 효율을 향상시키며 자기분리의 적용 범위를 넓히는데 혁명을 일으켰다.

높은 전계 강도(Electric Intensity)를 갖는 초전도 자석의 적용으로, 개방구배 자기분리 기술은 폐수처리 분야에서도 잘 적용되고 있다. 고구배 자기분리 기술과 다르게 개방구배 자기분리 기술은 반응기에서 매체로 채워지지 않으므로 더 높은 하수 부하에 적용할 수 있으며 자기 반응기 오염 및 막힘의 문제가 없다. 종래형 자석은 자기장 강도가 제한되기 때문에 효과적인 분리를 달성하기 어렵지만 초전도 자석의 응용은 개방구배 자기분리 기술의 효율을 크게 개선했고 폐수처리분야에서 응용도 촉진되었다. 초전도 자기분리 기술의 신속한 발전에 따라서 응용 가능성을 확대시켰다. 예를 들어 약자성인 초미세 입자의 처리도 가능하다. 또한, 초전도 자석과 고구배 자기분리 기술의 결합으로 처리효율을 항상시키고 고속도·고효율인 처리수단으로 되기 때문에 자기분리 기술이 앞으로 연구와 응용 방향에 더 집중하게 한다.

고구배 자기분리 기술과 초전도 자기분리 장치의 발전에 따라 응용 범위가 계속 확대되고 주로 화공업(예: 피혁 폐수처리, 제지 폐수처리 등), 금속공업(예: 주물공장 폐수처리, 흑연 폐수처리 등), 석유 및 생산공업(예: 유전 순환수처리 등), 요식업(예: 음식물 쓰레기 폐수처리, 식품가공 폐수처리 등), 채굴업(예: 광산물 처리, 세탄장 폐수처리 등), 도시폐수(예: 생활오수처리, 우수처리, 지하수처리 등) 등 산업에 활발하게 응용되었다(Ambashta and Sillanp, 2010; Zaidi et al., 2014). 그러나 자기분리 기술이 폐수처리분야에 응용하기 위하여 폐수 중 다양한 오염물질이 무자성 물질이어서 직접 자기장에만 통과하면 처리가 어려우므로 이 문제를 해결해야 한다. 그래서 폐수 안에 투입하는 자성매체는 자기분리 기술이 폐수처리분야에서 전반적으로 보급할 수 있도록 하는 핵심요소로 된다. 실제로 생명공학, 세포공학, 폐수처리 및 기타 분야에서 자기분리 기술을 적용하는 것은 대부분 자기매체를 기반으로 하며, 자기매체의 제조 및 적용은 자기분리 기술의 적용 범위를 크게 확대했다(Borlido et al., 2013; Philippova et al., 2011). 그러므로 자기분리 기술은 자성매체의 유무에 따라 직접이용, 자성응집, 자성흡착과 자성촉매로

나눌 수 있다. 폐수처리 분야에서 자기분리의 적용 가치를 더욱 발전시키기 위해 현재 연구 및 응용은 주로 다음과 같은 분야에 집중된다. 즉, 고효율, 저비용인 자성매체의 개발 및 회수 기술, 자기분리 기술과 다른 기술의 결합 및 응용 개발, 자기분리 장치의 연구 및 개발, 자기분리 기술의 보급 및 응용으로 볼 수 있다.

3. Application Type of Magnetic Separation Technology for Wastewater Treatment

3.1 자기장의 직접 이용

자기장을 직접 이용해서 폐수처리 분야에서 적용할 수 있는 원리는 다음과 같이 2개가 있다. 첫째, 자기장을 이용해서 폐수 속 자성 고형물을 부착시킨 후 분리제거함으로써 폐수를 정화한다. 둘째, 자기장이 폐수 속에 물질에 영향을 줄 수 있으므로, 스케일 제거 및 억제, 멸균 플록 침전 촉진, 미생물 활동 촉진 등을 통해 해당 물질을 분리 및 제거한다(Zaidi et al., 2014). 자기장을 직접 이용한 자기분리 기술이 폐수처리 분야에서 이용된 것은 1970년대 부터이다. 미립자 자기분리 기술에 대한 가장 중요한 제한 요소는 입자 크기이다. 자기분리 장치의 구조 및 설계의 개발로 인해 전계 강도가 지속적으로 향상되며 미크론 또는 나노 크기의 입자도 제거 효과를 얻을 수 있다.

Ditsch 등은 고구배 자기분리(1.4T)를 이용하여 자기성 나노 클러스터를 제거하여 입자경, 자기 반응기의 길이 및 유속이 제거효율에 미치는 영향을 탐구하였다. 결과를 보면 입자경과 자기 반응기의 길이를 확대하거나 유속을 줄이는 것은 제거효율을 향상시키는 결과로 나타났다. 따라서 높은 유속(4 cm/s)에서 50 nm 이상 크기를 가진 입자를 99.9 % 제거할 수 있으며 자기 반응기의 길이를 적절하게 증가시키면 더 작은 입자의 제거효율도 더욱 향상시킬 수 있다는 결론을 얻었다(Ditsch et al., 2005).

Ha 등은 초전도 자기분리(6T)를 이용하여 화력 발전소의 폐수 처리효율을 연구한 결과에 의하면 강도를 증가시키고 자성매체의 입자경을 감소해도 제거효율을 향상시키는 것을 알 수 있다. 이 방법으로 철 자성입자를 잘 제거할 수 있을 뿐만 아니라 다른 약한 자성 및 무자성 입자도 크게 제거되는 것을 나타냈다. 폐수처리 분야에서 자기분리 기술의 연구 개발과 응용이 지속적으로 발전함에 따라 연구원들은 자기분리에서 입자의 이동 과정과 분리 메커니즘에 대한 관심이 높아지고 있으며, 컴퓨터 모델링과 실험을 결합하는 수단으로 자기분리 메커니즘을 깊게 이해하고 이론을 완성 시키고 있다(Ha et al., 2011). 그러나 자기분리 기술로 초미세 입자와 자성매체, 오염물질, 복합물질을 분리하기 위하여 최적의 기술을 탐구할 필요가 있다(Sarikaya et al., 2006).

스케일 침전물 자화제거 기술은 또 다른 직접 자기장를 이용한 기술로 많은 연구 및 응용되는 기술이고 화학 물질을 첨가할 필요가 없고, 무독성 및 무공해이며, 관로 및 장비 스케일링을 효과적으로 방지할 수 있으며, 투자 및 운영비가 저렴하고 에너지를 절약하는 친환경 폐수처리기술이다. 스케일 침전물 자화제거 기술의 처리 메커니즘과 처리효과는 여전히 논란의 여지가 있지만(Baker et al., 1997; Wang, 2001), 기본적인 원리는 자기장이 $CaCO_3$, $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, SiO_2, $BaSO_4$, $SrSO_4$, $Ca_3(PO_4)_2$, 철 및 알루미늄 수산화물과 같은 일반적인 오염물질의 조성을 변경하고, 오염물질의 분자 형태가 정전기 반발력을 유발하여 관로 또는 퍼니스(Furnace) 벽에 부착하는 것을 어렵게 한다. Baker 등은 스케일 침전물 자화제거 기술을 사용하여 RO를 통과하는 물을 전처리하여 막오염을 줄였으며, 자화된 물이 $CaCO_3$ 침전의 구성을 변경하여 RO 막과 PVC 관로에 부착되는 것을 방지할 수 있다고 하였다(Baker et al., 1997).

Li 등은 초음과 TDR(Time Domain Reflectometry) 측정법을 사용하여 나노 여과막에서 $CaCO_3$ 표면에 대한 전자기장의 영향을 분석했으며, 자기 처리 후 막오염층이 얇아지고 느슨해졌으며 막오염 문제가 개선되었다. 이는 자기장이 $CaCO_3$의 결정 구조 및 증착 형태에 큰 영향을 미친다는 것을 보여주였다(Li et al., 2007). Luo 등이 스케일 침전물을 자기장에서 억제 공정에 대한 알칼리도, 경도 및 물의 유속의 영향을 조사한 결과에 의하면 자기장 스케일 침전물의 제거 메커니즘이 여전히 명확하지는 않지만 자기장의 스케일 침전물의 제거효과가 있다고 믿어졌다(Luo and Lu, 2000). Liu 등은 실험을 통해 자화수의 스케일 방지 효과에 대한 스케일 제거 및 방지 조건을 최적화하였으며 Ca^{2+} 및 Mg^{2+}의 농도, 알칼리도, pH 값의 영향을 연구하였다. 스케일 유발이온의 아크오 반응을 확대함으로써 스케일 방지가 이루어지고 또는 자화에 인한 CO_2 용해도의 변화가 칼슘과 마그네슘 탄산물의 평형상태를 변화시키기 때문에 스케일을 방지하는 것을 확인할 수 있었다(Liu and Sun, 2000).

Lee 등은 자성분리에 의한 폐절삭유(연마유)의 처리 및 부산물 재활용 공정기술 개발을 실행하였다. 절삭유내 슬러지 감량효율이 평균 85 %이상인 자성분리 장치를 개발하고, 철강 칩 슬러지(Steel Chip Sludge)만을 분리하여 90 % 재활용함으로써 폐기물 처리비용은 80 %로 절감한 결과를 얻었다(Lee et al., 2006).

Han은 유전개발 및 운영과정 중 나온 유전폐수를 자기분리 기술에 통해 폴리염화알루미늄(poly aluminium chloride, PAC) 85 kg/d, 철분 37 kg/d, 폴리아크릴아마이드 (Polyacrylamide) 18 kg/d을 주입하여 폐수중 전유 오일 농도 300 mg/L, 부유물질 농도 300 mg/L이하의 수질기준을 만족하였다(Han, 2017).

자기장의 작용을 통해 물의 물리적 및 화학적 특성(굴절률, 전기전도도, 유전상수, 표면장력, 점도 및 적외선 흡수율 등)이 변화하여 물과 각 성분이 용해, 결정화 및 중합된다. 습윤, 응고, 증발 특성 및 미생물 시스템은 특정한 영향을 미치므로 자기장에 의해 처리된 물을 자화수라고 한다. 자화수의 사용은 폐수처리분야에 자기장을 직접 적용하기 위한 중요한 연구 방향이며, 또한 자기장이 스케일 방지 성능을 갖는 중요한 이유로 여겨진다. 자기장은 물에서 콜로이드의 안정성을 변화시켜 콜로이드의 침전을 초래하여 이러한 종류의 오염물질 제거에 적용될 수 있다(Wang et al., 1994). 그러나

이것은 여전히 논쟁의 여지가 있으며 일부 연구자들은 자기장이 일부 콜로이드의 응집 속도를 감소시키는 것을 발견하였다(Higashitani et al., 1992).

또한, 자기장은 미생물의 거동에 영향을 미치는 것으로 입증되었으며, 생물학적 효과는 폐수처리 분야에서도 연구되었다(Narsetti et al., 2006). 물속의 일부 박테리아는 자기장의 전류를 감지할 수 있으며, 유도 전류가 충분히 크면 세포가 파괴되어 단백질이 변성되거나 효소 활성이 파괴되어 살균효과를 나타내다(Narsetti et al., 2006). Wu 등이 대장균에 대한 일정한 자기장의 살균 효과를 연구한 결과, 자기장은 대장균에 불활성화 효과가 있으며, 강도는 균종, 온도와 처리 시간 등의 특성과 관련이 있는 것으로 밝혀졌다(Wu and Lin, 2004). 자기장의 살균 효과에 대한 또 다른 이유는 자성물질에 의한 미생물의 흡착 및 소수의 특정 미생물 자체의 자성 변형 때문이다. 또한 폐수처리 분야에서 자기장은 생물학적 처리공정에서의 균종분포 및 생물학적 활성에 상당한 영향을 미침으로 처리효과를 향상시키는 것으로 밝혀졌다(Shi, 2005).

전체적으로, 자기장이 폐수처리분야에 직접 이용되는 기술원리는 수중의 다양한 성분에 대해 영향이 있으므로, 이는 주로 자성 입자의 제거 및 자화수의 이용으로 나눌 수 있다. 그러나 현재 대부분의 수질오염물질은 무자성이므로 직접 분리는 상대적으로 큰 한계가 있으며, 기존의 자기장을 직접 적용한 기술은 발전소 폐수, 제강 슬래그 폐수, 광물 폐수 등에 주로 사용된다. 자화수의 생화학적 효과와 스케일 방지 메커니즘은 명확하게 설명되지 않았으며 논쟁의 여지가 있으며, 이 기술이 적용되어 생산 가치를 가져왔음에도 불구하고 연구 및 사업은 계속 깊이 수행되어야 한다.

3.2 자성응집-자기분리 기술

폐수의 무자성 또는 약한 자성 오염물질의 경우, 자기장만으로 이상적인 분리 효과를 얻을 수 없으며, 오염물질 제거

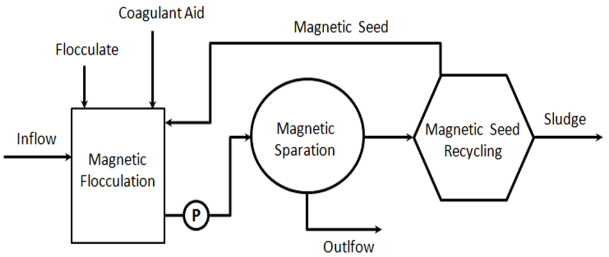


Fig. 1. The flow diagram of magnetic flocculation for wastewater treatment.

목적을 달성하기 위해 자성매체를 추가하고 이를 오염물질과 결합한 다음 자기장을 사용하여 제거한다. 자성응집－자기분리 기술은 응집과 자기분리를 결합하는 분리 방법으로 주로 응집 및 자기분리 두 가지 과정를 포함한다. 즉 자성매체 및 응집제를 동시에 투입함으로써, 응집제는 응집되고, 자성매체을 함유하는 플록은 자기장 조건에서 분리 및 제거된다. 응집기능을 갖는 특정 자성매체을 투입함으로써, 응집은 자성매체 표면의 특정 기능에 의해 달성되고, 최종적으로 자기장에서 분리된다. 일반적인 자성응집-자기분리공정은 Fig. 1과 같게 자기매체 투입, 응집제 투입, 자성응집, 플록분리 및 자성매체 회수로 구성된다.

자성응집-자기분리 기술은 물의 색도, 탁도, 기물, 고형물질, 중금속, 질소, 인 및 방사성 오염물질을 효과적으로 제거할 수 있는 새로운 폐수처리 기술이다(Zaidi et al., 2014). Table 1에 나타낸 바와 같이, 자성응집-자기분리 기술은 수중 입자상 물질 및 유기물질을 효과적으로 제거할 수 있다. 특히 자성응집과 고구배 자기분리 기술과 결합하는 경우가 폐수처리 분야에서 널리 사용되었다. Chin 등은 CMP(Chemical Mechanical Polishing) 폐수에서 이산화규소 나노입자를 제거하기 위해 자성응집-자기분리를 사용했으며, 결과를 보면 800G 외부 자기장에서 처리된 폐수의 탁도가 99 % 이상 제거되어 1NTU로 감소되고 자성매체도 재활용되어 여러 번 사

Table 1. Application of magnetic coagulation in wastewater treatment

Target Wastewater	Condition	Results	References
Chemical Mechanical Polishing Wastewater	Magnetic Particle: Fe_3O_4 by co-precipitation method	Turbidity: Removed from 99NTU to 1NTU	Chin et al. (2006)
Oily Wastewater	Magnetic Particle: Fe_3O_4 Coagulant: PFC Coagulant Aids: PAM	Removing rate of oil: 82 % Turbidity of effluent: 7NTU	Wang et al. (2007)
Smeltery Wastewater	Magnetic Particle: Fe_3O_4 Coagulant: PAC	Removing rate of copper: 98 %	Kang and Yang (2011)
Phosphorus Wastewater	Magnetic Particle: Fe_3O_4 Coagulant: PAC	Removing rate of phosphorous: 98 %	Zhao et al. (2012)
Coal-oil Wastewater	Magnetic Particle: Fe_3O_4 Coagulant: PFS Coagulant Aids: PAM	Removing rate of COD: 56.9 % Removing rate of turbidity: 99.7 %	Guan et al. (2014)
Municipal Wastewater	Magnetic Particle: Fe_3O_4 Coagulant: Al2(SO4)3	Removing rate of COD: 93.5 % Removing rate of SS: 83.2 %	Zhao and Wang (2002)
Restaurant Wastewater	Magnetic Particle: Fe_3O_4 Coagulant: PAC, PAFC, PFS Coagulant Aids: PAM	Removing rate of COD(4,300 ~ 5,000 mg/L): 98 % Removing rate of COD(2,800 ~ 3,400 mg/L): 83 %	Sun et al. (2006)

용될 수 있다. 또한 동시에, 나노 자기미분자의 분산성이 입자들의 충돌에 필수적 유인이며, pH도 자기분리의 효율에 영향을 미치는 중요한 요소라는 것을 발견하였다(Chin et al., 2006).

Zhao 등은 자성응집-자기분리로 도시 하수처리한 연구결과를 보면 15분 이내에 부유물질 제거효율이 80 % 이상인 것으로 나타났으며, 침전지의 설계 부피를 크게 줄일 수 있었다(Zhao and Wang, 2002). Wang 은 자성응집-자기분리를 사용하여 유성 폐수를 처리하고 응고제, 응집보조제 및 자성매체가 처리 효과에 미치는 영향을 조사하여 ① 오일 함량이 100 ~ 200 mg/L 인 경우 제거효율이 83 % 이상에 도달할 수 있으며, 유출수의 탁도는 7 NTU 이하로 낮아지게 하였다. ② 자기 플록 구조가 더 튼튼하고 침전에 필요한 시간을 단축하고 응집 효율을 향상 시키므로 고체 및 액체의 분리를 쉽게 할 수 있고 슬러지의 수분 함량이 감소하였다(Wang et al., 2007). Sun 등은 음식물 폐수처리에 자성응집-자기분리을 적용했으며, 자성 시드(Magnetic seed)를 추가하면 폐수의 분리 시간을 단축하고 슬러지 발생량을 절반으로 줄이면서 COD 제거효율을 높이는 데 도움이 되었다. 예를 들어, COD 가 4,300 ~ 5,000 mg/L인 폐수는 최대 98 %의 높은 COD 제거효율로, COD (2,800 ~ 3,400 mg/L)인 폐수는 83 %의 제거효율을 달성할 수 있었다(Sun et al., 2006).

Zhang 등은 석탄광산폐수를 처리하면서 Lab-scale 규모의 자기응집-지기분리 시스템을 세우고 응집제 사용량, 자성입자의 크기 및 투입량, pH, 교반소독과 침강소독의 최선 조건을 탐구하였다. 결과에 따라 PAC 투입량 100 mg/L, 음이온고분자응집제(Anionic Polyacrylamide) 투입량 4 mg/L, 자성입자 크기 74 μm 투입량 1 g/L, 응고탱크 교반속도 300 r/min, 교반탱크 교반속도 200 r/min, 응집탱크 교반속도 100 r/min의 조건에서 탁도 제거효율은 95 %까지 올라갔다(Zhang et al., 2019). Guan 등은 석탄 액화 폐수처리에 자성응집을 적용한 결과 자기응집의 효과가 전통적인 응집보다 더 우수하다는 것을 발견하였다. 자성 입자의 투입에 때문에 수중 SS의 농도를 증가시키고 입자간에 충돌률은 높아졌다. 또한 자성입자의 비중이 커서 응집플록의 체적은 쉽게 확대하여 더 좋은 침전력을 나타내였다. 그밖에 투입된 자성입자과 응집플록은 결합하여 서로 흡인력 항상시킨 복합성플록으로 되며 더 큰 플록을 이루어졌다. 따라서 자성입자 미투입한 경우보다 응집플록의 형상도 빠르고 단단하게 응집되므로 침전시간이 단축되었고 COD 및 탁도의 제거율이 각각 56.9 % 및 99.7 %에 나타내였다(Guan et al., 2014). 자성 응집은 또한 고농도 독성 및 유해한 유기성 산업폐수 및 양돈장 폐수에도 적용되었으며 좋은 결과를 얻었다. 자성응집-자기분리는 중금속(비소, 카드뮴, 크롬, 구리, 아연, 니켈 등) 및 인에 대한 제거효과가 우수하며 중금속 폐수처리 및 자원회수에 효과적인 수단도 된다(Cui et al., 2010; Shen et al., 2014).

Zhao 등은 폐수 중의 As(V)과 PO_3^{-4}를 처리하기 위해 전처리 기술로 개방구배 자기분리를 사용했으며 자성응집ㅡ초전도 자기분리를 사용하여 모두 98 % 이상 제거하였다(Zhao et al., 2012). Kang 등은 산업폐수에서 Cu^{2+} 이온을 제거하기 위해 자성응집에 대한 실험적 연구를 수행하여 우수한 처리결과를 확인할 수 있었다. 폴리황산 제2철(Poly Ferric Sulfate, PFS)이 100 mg/L, pH가 8, 침전시간이 20 min, 자성매체 투입량이 400 mg/L의 경우에 Cu^{2+} 이온 제거효율은 97 %를 초과하였으며, 유출수 Cu^{2+} 이온 농도는 0.5 mg/L보다 낮게 나타났다(Kang and Yang, 2011). Kim 등은 전기응고법을 이용하여 자성응집제를 투입하고 부유물질을 제거하는 실험을 실행한 결과 표층액체 유속의 증가에 따른 제거효율의 저하는 마그네이트/부유 고형물의 질량비가 증가할수록 감소하였다는 것으로 나타났다(Kim et al., 2014). 자성응집-자기분리는 산업폐수처리 뿐만 아니라 강과 호수의 생태 복원, 특히 인과 부유 생물에 대한 특정 연구와 적용이 가능하다(De Vicente et al., 2011).

전체적으로 자성응집-자기분리는 응집 및 자기분리의 특성을 결합하고 일부 미립자 오염물질, 고분자 유기물질, 중금속 물질 및 인산 이온에 대한 우수한 제거효과를 가지며 널리 사용되었다. 그러나 대부분의 이온 및 소분자 유기 오염물질을 제거할 수 없기 때문에, 기술 촉진 및 적용에 대한 한계도 있다.

3.3 자성흡착-자기분리 기술

자기분리는 자성 담체를 첨가한 후 오폐수 속에 오염물질을 물리적이나 화학적 방법으로 결합한 후, 마지막으로 자성체-오염물 복합체는 외부 자기장에 의해 효과적으로 분리되는 폐수처리분야에서 중요한 수단이다. 자성매체 및 응집제를 물에 첨가하는 것은 매우 효과적인 방법이지만, 많은 이온 또는 용해성 유기물질, 특히 소분자 유기물의 경우 응집에 의해 일반 자성매체와 결합하기가 어렵기 때문에 자기분리로 제거하는 목적을 달성하지 않는다. 자철광, 적철광 및 나노 Fe_3O_4와 같은 종래의 자성매체는 흡착력과 미세 오염물질 제거 효과를 갖지만, 지금까지 자성매체의 흡착능은 제한적이고 선택성도 적으며, 생활오수나 산업폐수를 직접 처리하면 원하는 효과를 얻기 어려웠다(Fang et al., 2010; Xing et al., 2014). 그러나 전통적인 흡착기술과 자기분리를 결합하는 것이 효과적인 해결책이다. Table 2는 폐수처리 분야에 사용된 자성흡착-자기분리 기술의 흡착제, 처리대상물질, 처리효과를 나타내고 있다. 자성흡착체-자기분리의 핵심은 우수한 흡착 성능을 가진 특정 자기매체을 제조하는 것이다. 일부 특정 기능성 물질과 화학물질은 화학침강, 공침법, 수열합법, 코팅 및 기타 방법으로 자기매체의 표면에 첨가하므로써 자성매체의 흡착력을 증가시킨다. 일반적인 자성흡착체는 주로 자성핵형, 자성표면형 및 균일분포형을 가지며, 이는 주로 제조 공정과 관련이 있다 (Fig. 2과 Fig. 3 참조). 이러한 조합은 자성흡착체ㅡ자기분리의 응용 범위를 효과적으로 넓힐 수 있으며, 현재 이 기술은 수중 중금속 이온, 유기물질, 무기물질 및 방사성물질의 제거에 적용되어 만족스러운 결과를 달성하였다.

Kim 등은 Mesostructured Silica Containing Magnetite (MSM)를 사용하여 자성매체을 제조하였으며 Cu^{2+}의 흡착을 실험하였다. 결과를 보면 흡착 기능성 층으로 사용되었으며,

Table 2. Magnetic adsorbent preparation and application in wastewater treatment

Adsorbent	Target Material	Result	References
Fe_3O_4-MSM	Cu^{2+}	Magnetisability: 6.9 emu/g Adsorbance: 0.5 mmol/g Adsorbent recovery is fast and efficient	Kim et al. (2003)
Zirconium Magnetic Adsorbent	PO_4-P	Removing rate: 97 % Removing rate reaches highest in pH=6 Recycle rate of adsorbent: 98.8 %	Lim et al. (2012)
Fe_3O_4/FeOOH	PO_4-P	Magnetisability: > 6emu/g Effluent P concentration: <0.1 mg/L	Li et al. (2018)
Nanocrystalline $Fe_{3-x}La_xO_4$ Ferrite	Congo Red	Magnetisability: >11.4 emu/g Adsorbance: 79.1 mg/g Desorption efficiency: 92 %	Wang et al. (2011)
Fe_3O_4/MnO_2	Pb^{2+}	Saturation magnetization: 54.7 Am^2/kg Maximum adsorbance: 142 mg/g Adsorbance is susceptible to pH	Zhang, Chen et al. (2013)
γ-Fe_2O_3	As(Ⅴ)	Magnetisability: 71.7, 19.6, 64.3 emu/g Adsorbance: 16.7, 50, 25 mg/g Adsorbance is due to specific surface area of the nanoparticles and pH effect	Tuutijärvi et al. (2009)

Cu^{2+} 흡착량이 속 되고 외부 자기장를 통하여 자성매체를 신속하게 회수되는 것으로 밝혀졌다(Kim et al., 2003). Lim 등은 자기분리가 가능한 지르코늄음(Zironium)을 이용하여 가성 흡착제를 합성하고 이의 흡착특성을 연구하였다. 결과를 보면 인 제거과정에서는 공존 음이온의 영향이 거의 없이 중성 영역인 pH 6에서 가장 높은 인 제거효율을 나타내었고 1 % NaOH와 1.5 % H_2SO_4를 이용하여 재생이 가능하였다는 것을 보였다(Lim et al., 2012).

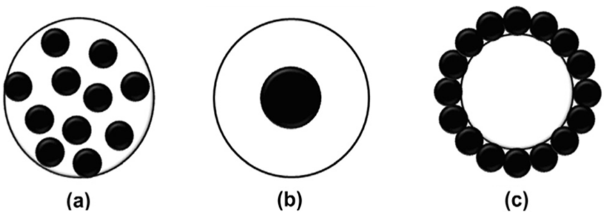
Li 등은 공침법으로 자성 흡착제(Fe_3O_4-FeOOH)를 제조하여 초도전 자기분리기과 결합하고 도시하수 중에 인을 제거하는 연구를 시행하였다. Fe_3O_4/FeOOH의 몰 비율은 1:8일 때는 뚜렷한 자화성능을 보였고 도시하수중 인 농도 1.8 mg/L에 0.1 mg/L이하까지 처리하였다. 자성 흡착제에 흡착된 인을 수산화나트륨(NaOH)으로 탈리시킨 후에 자성 흡착제는 회수할 수 있고 재활용도 가능하였다(Li et al., 2018).

Wang 등은 공침법에 의해 $Fe_{3-x}La_xO_4$ 나노 복합성 흡착제를 제조하여 콩고레드(Congo Red) 폐수처리에 적용하였으며, 란타넘(La) 원소를 첨가하여 자성매체의 콩고레드 재료의 흡착능력을 37.4 mg/g에서 79.1 mg/g로 크게 향상시켰다, 자성매체는 La를 첨가한 후에도 여전히 우수한 강자성을 나타냈다(Wang et al., 2011). Zhang 등은 공침법을 사용하여 크러스트 맨틀 구조의 자성 흡착제 Fe_3O_4/MnO_2를 제조하고 납을 제거하는 데 사용했으며 최대 흡착량은 142 mg/g인 결과를 얻었다. 전체적으로, 자성 복합 흡착 재료의 연구는 최근 매우 인기 있는 연구 영역으로 되고 자성 코어 재료의 용이한 분리 특성 및 흡착제의 흡착 특성에 기초하여 유기 오염물질, 중금속 이온 및 방사성 오염물질이 효율적으로 제거될 수 있다(Zhang, Chen et al., 2013).

나노 물질의 특정한 표면 활성 및 거대한 비표면적으로 인해, 최근에 나노-흡착제가 자기 분리분야에서 사용되어 왔으며, 이는 나노-자기분리 기술의 응용에서 큰 진전을 이루었다 (Sharma et al., 2009). 자성 나노입자의 표면 물리적 및 화학적 특성이 크게 변화하여 오염물질을 흡착할 수 있게 되었으며 Fe_3O_4 나노흡착제의 처리 능력은 해당 미크론 크기의 물질에 비해 5 ~ 10배 크다. 현재, 자성 나노입자는 다양한 중금속 이온, 유기 오염물질, 방사성 오염물질 등의 제거를 위한 흡착제로 사용하여 우수한 제거효과를 나타냈다(Tuutijärvi et al., 2009). 나노 물질과 그 환경에서의 응용은 현재 뜨거운 연구 방향이고, 자성 나노 흡착물질은 잠재적으로 건강 위험이 있지만(Tang and Lo, 2013), 자성 물질의 도입과 고구배 자기분리 기술의 결합 및 응용은 건강 위험을 크게 감소시킬 것이며 나노 흡착물질의 재활용도 촉진한다. 초전도 자기분리 기술 및 자기분리장치 설계의 추가 개발 및 개선으로, 자성 나노 흡착제는 폐수처리 분야에서 큰 응용 전망을 가질 것으로 예상된다. 총체적으로, 폐수처리 분야에서 중요한 처리기술으로써 자성흡착제-자기분리 기술은 많은 관심을 받았지만, 핵심은 특정 자성흡착제 및 자성 나노흡착제의 개발이다. 재료과학의 결합을 통해 이 기술은 폐수처리 분야에서 중요한 분리 방법이 될 것이다.

3.4 자성촉매－자기분리 기술

촉매 산화는 난분해성 유기물, 일부 중금속 이온 및 기타 오염물질을 처리하는 효과적인 방법이지만 폐수처리분야에서 응용의 큰 문제는 촉매 회수이며, 이 문제는 폭넓은 연구와 응용에 따라 더 많은 관심을 끌고 있다. 자성 물질 및 촉매 물질에 의한 자성 촉매 복합제(자성촉매)의 제조는 촉매회수를 해결하는 효과적인 방법이며, 최근에 점점 주목을 받고 있다. 일반적인 자성촉매 구조와 이미지 사진(TEM)은 Fig. 2와 Fig. 3에 각각 나타내고 있다. 촉매의 촉매 분해성 및 자성 물질의 용이한 분리로 인해 오염물질의 제거 및 촉매 물질의 회수 및 재활용이 효과적으로 달성될 수 있으며 나노 촉매의 환경 건강에 대한 위험성도 줄였다.



(a): Magnetic particles homogeneously structure (b): Magnetic core structure (c): Magnetic shell structure

Fig. 2. The structures of magnetic beads.

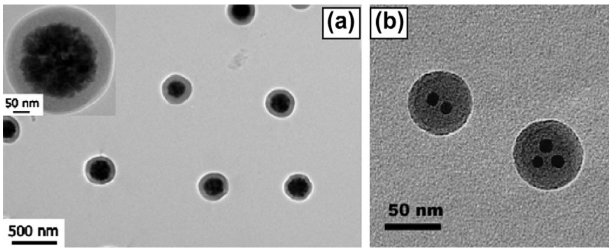


Fig. 3. The TEM images of magnetic beads.

TiO_2는 일반적인 광촉매이며 촉매 효과가 좋아서 현재 자성 TiO_2 촉매에 대한 많은 연구가 있다. Su 등은 공침법-소성에 의해 $TiO_2/SiO_2/Fe_3O_4$ 복합 촉매를 제조하고 이를 안식향산의 분해에 적용하였으며 pH 3과 온도 750°C의 조건에서 거의 97 %를 제거하고, 자기장 하에서 촉매의 회수율이 90 % 이상의 결과를 성취하였다(Su et al., 2012). Ma 등은 수열법과 졸겔법(Sol-gel Method) 결합하여 제조하는 $CoFe_2/TiO_2$, $CoFe_2/CoFe_2O_4/TiO_2$, $CoFe_2O_4/TiO_2$의 구조, 모습, 자화강도와 메틸렌 블루(Methylene Blue) 처리효능을 연구시행하였다. 목적은 강자성촉매를 얻고 폐수처리후에 편하게 촉매를 회수 및 재활용이다. 이 촉매중에 $CoFe_2O_4/TiO_2$의 메틸렌 블루 처리효율은 72 % 높게 나타냈다. 또한 분석결과에 의하여 촉내의 성능은 입자 크기, 계면 조성(Interfacial Compositions), 결정화도와 TiO_2 및 기타 입자의 비율에 관련된다고 하였다(Ma et al., 2018). Zhang 등은 공침법으로 $Fe_3O_4/BiOCl$ 기반인 나노 복합 재료를 제조하여 로다민 B(Rhodamine B)과 메틸렌 블루를 처리하는 과정중에 자성 광촉매로 사용하여 결고 처리효율은 100 %로 나타냈다. 처리 메카니즘의 연구 결과에 따라 이 복합 재로은 Core-shell 구조인 TiO_2 재료보다 더 강한 광촉매 활성을 가지고 있고 자기정에서도 분산과 수집 가능하니까 촉매효과와 촉매 회수율을 상승시킨다(Zhang et al., 2009). Zhang 등은 공침법에 의해 $ZnFe_2O_4/BiVO_4$ 복합 자성 광촉매를 제조하고 이를 메틸렌 블루 염료의 가시광 촉매 처리에 적용한 결과를 보면 복합의 촉매 능력이 $BiVO_4$ 촉매의 촉매 능력보다 우수함을 발견하였다(Zhang et al., 2013). Table 3는 폐수처리 분야에 사용된 자성촉매-자기분리 기술의 흡착제, 합성방법, 처리대상물질, 처리효과를 나타내고 있다.

자성 촉매제는 폐수처리, 심지어 대기 및 토양 오염 처리에도 응용 가능성을 가지고 있다. 기존 촉매 공정에 비해 자성촉매-자기분리기술은 자성 매체의 회수율을 크게 향상시켜 경제성이 높은 처리 수단이고 잠재적인 환경 위험도 줄일 수 있다. 따라서, 자성 촉매제의 연구는 향후 자성촉매분리 분야, 특히 폐수처리 분야에서 더 큰 관심을 가지게 될 연구이다.

3.5 자기분리 결합 기술

자기장은 자성 입자에만 작용할 수 있으므로 폐수처리 분야에서 더 효과적이기 위해서는 응집 또는 흡착과 결합되어야 한다. 그러나, 수질 요건의 개선으로, 단일 폐수처리 기술에서는 원하는 효과를 달성할 수 없고 다중 처리기술의 결합이 미래의 폐수처리 개발 방향이다. 높은 분리 성능으로 인해, 고구배 자기분리 기술은 촉매 산화, 생화학 처리기술 및 막분리기술을 포함한 다른 많은 폐수처리 기술과 결합될 수 있다. Table 4는 폐수처리 분야에 자기분리 결합 기술의 응용 연구를 나타냈다. Ihara 등은 전기응집, 고구배 자기분리 및 전기 화학적 산화공정을 결합하여 매립장 침출수를 처리하였다. 일부 유기오염 물질과 대부분 총인은 자성응집-자기분리 단계에서 효과적으로 제거하여 유량이 100 L/h인 경우에도 총인 제거율은 여전히 90 %를 초과하는 것을 발견하고 자성응집-자기분리 단계를 통과하여 남은 유기물질과 암모니아성 질소는 전기화학적 산화공정으로 제거될 수 있다(Ihara et al., 2004). 또한, 전기 응집－자기분리 단계는 후속

Table 3. Magnetic catalyst preparation and application in wastewater treatment

Adsorbent	Preparation Method	Target Material	Result	References
$TiO_2/SiO_2/Fe_3O_4$	Coprecipitation Method	Benzoic Acid	Magnetisability: 28 emu/g Removing rate: 97 % Recycle rate: >90 %	Su et al. (2012)
$CoFe_2/TiO_2$, $CoFe_2/CoFe_2O_4/TiO_2$, $CoFe_2O_4/TiO_2$	Hydrothermal Method Sol-gel Method	Methylene Blue	Maximum removing rate: 84 % Removing rate by $CoFe_2/TiO_2$: 75 % Photocatalytic performance relates to the particle size, interface compositions, crystallinity and the thewire between TiO_2 and magnetic particles.	Ma et al. (2018)
$Fe_3O_4/BiOCl$	Coprecipitation Method	Rhodamine B Methylene Blue	Target material is completely degraded. Degradation efficiency and rate are similar to BiOCl. Same catalytic rate can be maintained even decomposition recovery 5 times.	Zhang et al. (2009)
$ZnFe_2O_4/BiVO_4$	Coprecipitation Method	Methylene Blue	Removing rate: 99 %, better than pure $ZnFe_2O_4$(59 %) and $BiVO_4$(70 %)	Zhang, Wang et al. (2013)

전기화학적 산화공정의 효율을 향상시킬 수 있고, 매립지 침출수에서 COD, TP, NH_4^+-N을 효과적으로 제거할 수 있는 것으로 밝혀졌다. 자기분리와 생명공학의 조합은 또 다른 중요한 응용 방향이며, 자기장의 생물학적 영향은 미생물 처리의 효율성을 향상시킬 수 있다. 현재 가장 인기 있는 공정은 BioMag 공정과 MagBR(Magnetic Bio-Reator) 공정이고 (Zhou and Ni, 2009), 원칙적으로 생물 반응기를 사용하여 유기 오염물질을 분해한 다음 고구배 자기분리로 인을 제거하는 효과가 좋기 때문에 일부 하수처리장에서 사용된다. 자기분리가 막처리기술과 결합되는 연구 방향은 자기분리에 의한 막오염을 감소시켜 전체 막시스템의 처리 효율 및 수명을 향상시킨다(Baker et al., 1997).

Chen 등은 막여과 공정의 무기 오염을 연구하기 위해 고구배 자기분리기를 사용했으며, 자화 전처리를 사용하면 막투과플럭스의 감쇄를 효과적으로 줄일 수 있으며 저압 세척 후 막투과플럭스 회복율이 90 %이며 무자기 전처리 조건보다 32.4 % 더 높다. 자화전처리 후 여과막의 표면에 형성된 $CaCO_3$은 더 이상 조밀한 방해석 구조가 아니라 부드럽고 여과하기 쉬운 아라고나이트(Aragonite) 구조이며, 이는 여과막의 안정적인 작동을 유지하는데 유리하다(Chen et al., 2015).

Gao 등은 자력 응집과 고구배 자기분리 기술로 사탕수수 혼합액을 전처리하여 후기 단계에서 초여과막의 부하를 줄였으며, 자기 응집은 분명히 오염물질을 제거하고 막오염을 줄이며 초여과막의 막투과플러스를 유지할 수 있음이 밝혀졌다. 또한 전체 공정의 색도 및 탁도 제거에 원하는 효과를 달성했으며 사탕수수 혼합액의 순도는 80.2 % 이상 유지된다 (Gao et al., 2009).

Wang 등은 자기분리와 막여과를 결합하고 원하는 세정 효과를 달성하기 위해 자기 강화 세정공정을 설계하였다. 자기분리는 촉매 산화와 같은 폐수처리 기술과 결합하여 특정 오염물질을 제거한 후 처리 부하를 줄이고 후처리수 조건을 개선하기 위해 자기분리를 사용한다. 단위 결합은 폐수처리 문제를 해결하는 매우 효과적인 방법이며 다양한 기술의 결합을 통해 효율성이 높고 소비량이 적은 오염물질을 제거할 수 있다. 따라서, 자기분리 기술의 대중화 및 적용은 다른 처리기술과 반드시 결합될 필요가 있으며, 고구배 자기분리와 결합한 기술은 폐수처리 분야에서 매우 중요한 위치를 차지할 것으로 예상된다(Wang et al., 2014).

Dong 등은 가스보조식 자기분리(gas assisted magnetic separation, GAMs)기술을 이용하여 인공폐수 중 카드뮴(Ⅱ)을 제거 실험을 시행하였다. 결과를 보면 거품의 부상덕분에 큰 거리에 무질을 보획 제한을 극복하고 분리 속도을 대폭 증가하였다. 이 연구 중에 에틸렌디아민 기반으로 개량한 자성 폴리-글리시딜 메타크릴산 미립자(ethylenediamine-modified magnetic poly-(glycidyl methacrylate) microspheres, EMPs)는 카드뮴의 흡착제로 제조되었고, 카드뮴(Ⅱ)을 90 % 흡착된 EMPs는 넓은 가스유량의 범위에서 5분 이내 회수하였다 (Dong et al., 2015). 가스보조식 자기분리 기술은 낮은 에너지 요구, 작은 공간 요구 및 작동 편리한 장점이 있어서 폐수처리분야에서 넓은 응용의 가능성을 판단할 수 있다.

Table 4. Magnetic coupling technology and application in wastewater treatment

Applied Technology	Target Material	Result	References
High Gradient Magnetic Separation Electrocoagulation Electrochemical Oxidation	Landfill Leachate	Removing rate of TP: 90 %(@Flow rate 100 L/h); Process of electrocoagulation using iron electrodes and high gradient magnetic separation might improve the charge efficiency in electrochemical oxidation.	Ihara et al. (2004)
BioMag Process(Magnetic coagulation and activated sludge process) MagBR Process	Municipal Wastewater	Removing rate of COD: >94 % Removing rate of BOD: >96 % Removing rate of TN: 98 % (TN_{Eff} <1 mg/L)	Zhou et al. (2009)
Membrane Filtration	Inorganic Calcium Scale	Recovering rate of membrane specific flux: 90 %(32.4 % higher than without pretreatment) Magnetizing pretreatment can effectively retard the decline of membrane specific flux.	Chen et al. (2015)
Flocculation-High Gradient Magnetic Separation Ultrafiltration Lustration	Cane Mixed Juice	Membrane flux; 17.0 L/m^2h (@Magnetic seeds: 50 mg/L, Magnetic flocculants: 3.5 mg/L, 0.2 MPa) Color value of Effluent: 400 ~ 600 IU Turbidity: 10 ~ 30 MAU	Gao et al. (2009)
Magnetic Enhanced Flocculation Membrane Filtration (MEFMF) Process	Surface Water	Flux recovery rate: >97 % (@Magnetic induction: 6 mT, Aeration intensity: 500 L/m^2min, Washing time: 5 min, 0.04 MPa) On-line intermittent magnetic cleaning could be more effective in removing colloidal and organic pollutants on membrane surface.	Wang et al. (2014)
Gas-Assisted Magnetic Separation	Industrial Wastewater	Recovering rate: 90 %(@5 min) Increase capture distance. Small energy requirements, small space requirements, rapid operation, flexibility of application to various metals at various scales, and moderate cost.	Dong et al. (2015)

4. Conclusion and Respect

자기분리 기술은 직접분리, 자성응집, 자성흡착, 자성촉매 그리고 다른 기술과의 결합을 통해 폐수처리 분야에 다양하게 응용되고 확장시킬 수 기술이다. 따라서, 자기분리 기술의 장점을 충분히 활용하고 폐수처리 분야에서의 응용을 촉진하기 위해서는 다음과 같은 측면에서 연구 전망을 제안할 수 있다.

1) 자성 입자를 기반으로 하는 자기분리 기술은 폐수처리에서 중요한 수단이 될 것이며 저렴한 자성 입자, 높은 흡착력 및 쉽게 탈착되는 자성입자, 새로운 자성입자, 특히 특정 자성입자 및 나노 복합 자성입자의 선택, 최적화 및 제조, 자기입자 회수기술에 대한 연구가 필요하다.

2) 자기분리 장비의 투자 및 운영 비용을 줄이고 기술 공법의 응용을 홍보하기 위해서는 고자기강도, 저비용 및 에너지 절약 자석 재료, 특히 새로운 고효율 자기분리기/필터, 자기분리기 및 초전도 자기분리 장치에 대한 연구 및 개발을 강화해야 한다.

3) 자기분리와 다른 폐수처리 기술의 결합은 미래 자기분리 응용의 가장 중요한 형태가 될 것이다. 막기술, 촉매기술 및 생물학적 처리기술과 자기분리의 결합은 폐수처리 분야에서 한 자리를 차지할 수 있다. 반면, 공정응용 분야에서는 여전히 크게 지체되고 있으므로 자기분리 기술의 홍보 및 대중화은 점점 더 많은 관심을 받아야 된다.

References

Ambashta, R. D. and Sillanp, M. (2010). Water purification using magnetic assistance: a review, *Journal of Hazardous Materials,* 180(1), 38-49.

Baker, J. S., Judd, S. J., and Parsons, S. A. (1997). Antiscale magnetic pretreatment of reverse osmosis feedwater, *Desalination,* 110(1), 151-165.

Borlido, L., Azevedo, A. M., Roque, A. C. A., and Aires-Barros, M. R. (2013). Magnetic separations in biotechnology, *Biotechnology Advances,* 31(8), 1374-1385.

Chen, Q., Feng, Y., and Dong, B. (2015). Research on inorganic scale pollution control of nano-filtration membrane using high gradient magnetizing pretreatment, *Industrial Water Treatment,* 35(3), 34-36.

Chin, C. J. M., Chen, P. W., and Wang, L. J. (2006). Removal of nanoparticles from CMP wastewater by magnetic seeding aggregation, *Chemosphere,* 63(10), 1809-1813.

Cui, L., Wang, K., and Wang, Y. (2010). Experimental study on large scale of piggery wastewater by magnetic flocculation, *Industrial Safety and Environmental Protection,* 36(5), 3-4.

De Vicente, I., Merino-Martos, A., Guerrero, F., Amores, V., and De Vicente, J. (2011). Chemical interferences when using high gradient magnetic separation for phosphate removal: consequences for lake restoration, *Journal of Hazardous Materials,* 192(3), 995-1001.

Ditsch, A., Lindenmann, S., Laibinis, P. E., Wang, D. I. C., and Hatton, T. A. (2005). High-gradient magnetic separation of magnetic nanoclusters, *Industrial & Engineering Chemistry Research,* 44(17), 6824-6836.

Dong, T., Yang, L., Zhu, M., Liu, Z., Sun, X., Yu, J., and Liu, H. (2015). Removal of cadmium(II) from wastewater with gas-assisted magnetic separation, *Chemical Engineering Journal*, 280(15), 426-432.

Fang, M., Mishima, F., and Akiyama, Y., and Nishijima, S. (2010). Fundamental study on magnetic separation of organic dyes in wastewater, *Physica C: Superconductivity and its Applications,* 470(20), 1827-1830.

Gao, J., Ma, S., Xie, Z., Mo, H., Lu, J., Chu, L., and Du, L. (2009). Study on magnetic seeds and flocculationg-high gradient magnetic separation and ultrafiltration lustration in cane mixed juice, *The Food Industry,* 6, 17-18. [Chinese Literature]

Gokon, N., Shimada, A., Hasegawa, N., Kaneko, H., Tamaura, Y., Lto, K., and Ohara, T. (2002). The magnetic coagulation reaction between paramagnetic particles and iron ions coprecipitates, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials,* 246(1), 275-282.

Guan, D., Yuan, L., Xu, J., and He, D. (2014). Treatment of coal-to-oil production wastewater enhanced by magnetic flocculation technology, *Environmental Science & Technology,* 37(9), 141-144.

Ha, D., Kwon, J., Baik, S., Lee, Y., Han, K., Ko, R., Sohn, M., and Seong, K. (2011). Purification of condenser water in thermal power station by superconducting magnetic separation, *Physica C: Superconductivity and its Applications,* 471(21), 1530-1532.

Han, G. (2017). Experiment and comparison of waste liquid treatment technology in daqing grape flower oilfield, *Oil-Gasfield Surface Engineering*, 36(2), 21-24. [Chinese Literature]

Higashitani, K., Okuhara, K., and Hatade, S. (1992). Effects of magnetic fields on stability of nonmagnetic ultrafine colloidal particles, *Journal of Colloid and Interface Science*, 152(1), 125-131.

Ihara, I., Kanamura, K., Shimada, E., and Watanabe, T. (2004). High gradient magnetic separation combined with electrocoagulation and electrochemical oxidation for the treatment of landfill leachate, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity,* 14(2), 1558-1560.

Kang, X. and Yang, Y. (2011). An experimental study in removal of copper ions from industrial wastewater by magnetic flocculation, *Industrial Water & Wastewater,* 42(3), 24-27.

Karapinar, N. (2003). Magnetic separation of ferrihydrite from wastewater by Magnetic seeding and high-gradient magnetic separation. *International Journal of Mineral Processing*, 71(1), 45-54.

Kim, Y., Lee, B., and Yi, J. (2003). Preparation of functionalized mesostructured silica containing magnetite(MSM) for the

removal of copper ions in aqueous solutions and its magnetic separation. *Separation Science and Technology,* 38(11), 2533-2548.

Kim, Y., Park, K., and Oh, C. (2014). Survey on electrocoagulation to purify contaminated water, *Journal of Energy Engineering,* 23(3), 17-20.

Lee, S., Kim, H., Kim, D., Kim, O., Lee, M., and Lee, J. (2006). *Development of technology for recycling the waste cutting oil and by-products by magnetic separation,* Ministry of Environment. [Korean Literature]

Li, J., Liu, J., Yang, T., and Xiao, C. (2007). Quantitative study of the effect of electromagnetic field on scale deposition on nanofiltration membranes via UTDR, *Water Research,* 41(20), 4595-4610.

Li, S., Wang, M., Zhu, Z., Wang, Q., Zhang, X., Song, H., and Cang, D. (2012). Application of superconducting HGMS technology on turbid wastewater treatment from converter, *Separation and Purification Technology,* 84, 56-62.

Li, Y., Tan, S., Zhang, W., Sun, Z., and Zhou, B. (2018). Recovery of phosphorus in sewage wastewater using magnetized FeOOH and superconducting magnetic separation, *Desalination and water treatment*, 133, 167-176.

Lim, D., Kim, Y., Kim, D., Lee, T., and Lim H. (2012). Synthesis and phosphorus adsorption characteristics of zirconium magnetic adsorbent having magnetic separation capability, *Journal of Korean Society of Water and Wastewater,* 26(3), 431-442. [Korean Literature]

Liu, Y. and Sun, X. (2000). Restraint of scale formation by magnetized water and its mechanism, *Journal of Harbin Institute of Technology,* 32(1), 86-90. [Chinese Literature]

Luo, M. and Lu, Z. (2000). A study of influence of magnetic field on anti-scale effect in water treatment, *Technology of Water Treatment,* 26(4), 218-221.

Ma, Y., Sun, Y., Zhu, X., and Ruan, Y. (2018). The synthesis of $CoFe_2O_4$, $CoFe_2$, $CoFe_2/CoFe_2O_4$ and their applications in photocatalysis, *Journal of Anhui University(Natural Science Edition)*, 42(1), 54-60. [Chinese Literature]

Narsetti, R., Curry, R. D., Mcdonald, K. F., Clevenger, T. E., and Nichols, L. M. (2006). Microbial inactivation in water using pulsed electric fields and magnetic pulse compressor technology, *IEEE Transactions on Plasma Science,* 34(4), 1386-1393.

Philippova, O., Barabanova, A., Molchanov, V., and Khokhlow, A. (2011). Magnetic polymer beads: recent trends and developments in synthetic design and applications, *European Polymer Journal,* 47(4), 542-559.

Sarikaya, M., Abbasov, T., and Erdemoglu, M. (2006). Some aspects of magnetic filtration theory for removal of fine particles from aqueous suspensions, *Journal of Dispersion Science and Technology,* 27, 193-198.

Sharma, Y., Srivastava, V., Singh, V., Kaul, S., and Weng C. (2009). Nano adsorbents for the removal of metallic pollutants from water and wastewater, *Environmental Technology,* 30(6), 583-69.

Shen, Z., Mei, R., and Wei, Y. (2014). Pilot research on treating wastewater by magnetic flocculation, *Environment Engineering,* 32, 367-369. [Chinese Literature]

Shi, W. (2005). The biologic effects of magnetization in sewage treatment, *Journal of Lanzhou University(Natural Sciences),* 41(2), 38-40. [Chinese Literature]

Su, T. L., Chiou, C. S., and Chen, H. W. (2012). Preparation photocatalytic activity, and recovery of magnetic photocatalyst for decomposition of benzoic acid, *International Journal of Photoenergy,* 26, 909678.

Sun, H., Shi, S., and Wang, P. (2006). Research on the application of several complex magnetic flocculants to restaurant wastewater, *Industrial Water Treatment,* 26(8), 55-58.

Sun, W., Li, Z., Wu, S. and Jia, S. (2006). Application of magnetic separating technology in polluted water treatment, *Journal of Magnetic Materials & Devices,* 37(4), 6-10.

Tang, S. C. and Lo, I. M. (2013). Magnetic nanoparticles: essential factors for sustainable environmental applications, *Water Research,* 47(8). 2613-2632.

Tuutijärvi, T., Lu, J., Sillanpää, M., and Chen, G. (2009). As(V) adsorption on maghemite nanoparticles, *Journal of Hazardous Materials,* 166, 1420-1415.

Wang, J., Yang, J., Jia, H., and Zhang, H. (2014). Enhanced magnetic cleaning in magnetic enhanced flocculation membrane filtration process, *Chemical Industry and Engineering Society of China Journal,* 65(12), 4997-5003.

Wang, L., He, Y., Fan, H., Hu, Y., and Wei, Y. (2007). Magnetic flocculation separation method for the treatment of oily wastewater. *Environmental Engineering,* 25(3), 12-14.

Wang, L., Li, J., Wang, Y., and Zhao, L. (2011). Preparation of nanocrystalline $Fe_{3-x}La_xO_4$ ferrite and their adsorption capability for congored, *Journal of Hazardous Materials,* 196, 342-349.

Wang, R. (2001). Test of anti-scale by powerfully magnetic waterprocessor, *Technology of Water Treatment,* 27(4), 239-241.

Wang, Y., Pugh, R., and Forssberg, E. (1994). The influence of interparticle surface forces on the coagulation of weakly magnetic mineral ultrafines in a magnetic field, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 90(2-3), 117-133.

Wu, D. and Lin, D. (2004). Study on sterile of stable-magnetic field, *Jiangsu Preventive Medicine,* 4, 3-5. [Chinese Literature]

Xing, Z., Tang, B., Chen, X., Fu, F., Zhang, Z., and Lu, Z. (2014). Adsorption mechanism of acid red 73 onto magnetic nanoparticles Fe_3O_4 from aqueous phase, *Acta Scientiae Circumstantiae,* 34(9), 2246-2255.

Yavuz, C. T., Prakash, A., Mayo, J., and Colvin V. (2009). Magnetic separations: from steel plants to biotechnology, *Chemical Engineering Science,* 64(10), 2510-2521.

Zaidi, N. S., Sohaili, J., Muda, K., and Sillanpää, M. (2014). Magnetic field application and its potential in water and wastewater treatment systems, *Separation & Purification*

Reviews, 43(3), 206-240.

Zhang, L., Wang ,W., Zhou, L., Shang, M., and Sun, S. (2009). Fe_3O_4 coupled BiOCl: A highly efficient magnetic photocatalyst, *Applied Catalysis B: Environmental,* 90, 458-462.

Zhang, W., Wang, M., Zhao, W., and Wang, B. (2013). Magnetic composite photocatalyst $ZnFe_2O_4/BiVO_4$:synthesis, characterization, and visible-light photocatalytic activity, *Dalton Transactions,* 42(43), 15464-15474.

Zhang, X., Chen, J., Han, J., and Zhang, G. (2013). Preparation and evaluation of shell-core structured Fe_3O_4/MnO_2 magnetic adsorbent for Pb(Ⅱ) removal from aqueous solutions, *Acta Scientiae Circumstantiae,* 33(10), 2730-2736.

Zhang, X., He, X., Wei, M., Li, F., Hou, P., and Zhang, C. (2019). Magnetic flocculation treatment of coal mine water and a comparison of water quality prediction algorithms, *Mine Water and the Environment*, 38(1), 391-401.

Zhao, H. and Wang, J. (2002). Experiment in treatment of municipal wastewater by magnetic flocculation, *Journal of Lanzhou Railway University(Natural Sciences),* 21(3), 79-82. [Chinese Literature]

Zhao, Y., Xi, B., Li, Y., Wang, M., Zhu, Z., Xia, X., Zhang, L., Wang, L., and Luan, Z. (2012). Removal of phosphate from wastewater by using open gradient superconducting magnetic separation as pretreatment for high gradient superconducting magnetic separation, *Separation and Purification Technology,* 86, 255-261.

Zhou, M. and Ni, M. (2009). Application technology and development trend of magnetic separation technology in water treatment engineering, *Water-Industry Market*, 8, 48-53. [Chinese Literature]