

물리·화학적 폐수 처리 공정의 연구 동향 고찰

장민혁¹⁾, 강유진¹⁾, 조형근¹⁾, 박주일²⁾, 송신섭³⁾, 고경한³⁾, 차디솜³⁾, 김상우³⁾, 김용범³⁾

1) 한밭대학교 화학생명공학과 석사과정

2) 한밭대학교 화학생명공학과 부교수

3) (주)씨투씨소재

지속적인 산업화로 인해 산업폐수의 오염도가 점차 심해지고 있다. 이를 해결하기 위해 폐수의 종류에 따른 물리·화학적 처리에 대한 연구가 관심을 받고 있다. 최근 들어, 단일 공정뿐만 아니라, 복합공정을 통해 폐수를 더욱 효과적으로 처리 하고자하는 노력이 필수적인 상황이다. 이에 따라, 각 공정에 대한 이해와 현재 연구되어지고 있는 동향에 대한 파악이 중요하다. 본 논문은 폐수의 오염도를 나타내는 다양한 지표에 대한 설명과 고급산화공정, 막 분리 공정, 응집/응결 공정, 흡착 공정을 단일 및 혼성화하여 연구한 여러 논문을 요약과 함께 물리·화학적 폐수 처리 공정의 전망과 연구 동향에 대한 정보를 전달하고자 한다.

1. 배경

최근 국내 폐수에 대한 환경부 통계를 참고하면, 폐수 배출 업소 수, 발생량 및 배출량 모두 지속적으로 증가하는 것으로 나타났다. 이에 따라, 환경부는 유해물질로부터 안전한 물 환경 정책 강화, 공공수역의 위해성 관리 강화, 산업체 폐수 관리 강화 및 폐수 종말처리시설의 운영효율 개선을 포함하여 지속 확충 등 여러 대책으로 폐수 처리 분위기 개선에 노력을 기울이고 있다.^{1,2)}

폐수 내에는 박테리아, 중금속, 미생물 및 유기 물질 등이 존재하며 이의 효율적 제거를

위해 전처리, 본처리 및 후처리 공정이 수반된다. 일반적으로, 전처리는 자갈이나 나무 등과 같은 대형 폐기물을 제거하고 유입수에 포함된 고형물이나 용존성 물질을 제거하여 유기물 부하를 저하 시키는 것을 목적으로 한다. 또한, 본처리(고도 처리)는 부유물질, 유기물, 질소 및 인 등의 오염물질을 제거하는 것을 목적으로 하며 마지막으로, 후처리는 본처리 후 남은 오염물질을 제거하는 것을 목적으로 한다.³⁾

각 처리에 사용되는 공정들은 물리적, 화학적 및 생물학적 크게 세 가지로 분류할 수 있다. 물리적 공정은 혼합, 희석, 침전, 여과 등을 포함하고, 화학적 공정은 확산, 흡착, 산화, 환원 등을 포함하며 생물학적 공정은 조류, 박테리아, 미생물 등을 포함한다. 본 논문에서는 물리 화학적 수처리 공정을 연구한 여러 논문들의 연구 방법 및 결론을 취합하여 현재 수처리 기술의 연구 전망 및 현황에 관한 정보를 전달하고자 한다.

2. 폐수의 오염도를 나타내는 지표

폐수 내 매우 다양한 오염물질을 나타내기 위해 여러 가지 지표가 존재한다. 보편적으로 BOD, COD, TOC 및 TSS 등이 있으며 이 외에도 TN, TP, DO, pH, 탁도, 색도, 산도 및 알칼리도 등이 있다.

2.1 BOD(Biological Oxygen Demand)

BOD는 수질 평가에 가장 널리 사용되는 기준 중 하나로, 20°C에서 5일 동안 생물학 분해 가능한 유기물의 오염 정도를 측정하는 것이며 이는 BOD₅로 나타낸다. BOD₅의 주요 용도는 크게 세 가지이다. 첫 번째는 폐수 및 폐기물의 처리가 규정에 적합한지를 나타내는 지표이다. 두 번째는 BOD₅/COD 비율을 통해 폐수의 생분해성 비율을 나타낸다. 세 번째는 COD/BOD₅ 비율을 통해 폐수 처리장의 규모를 나타내는 지표이다.⁴⁾

2.2 COD(Chemical Oxygen Demand)

ISO 6060의 COD 정의에 따르면 일정 조건에서 시료를 산화제로 처리 시, 용해 및 부유 물질에 의해 소비되는 중크롬산염의 양과 동일한 산소의 질량 농도이다. 현재

COD 측정 방법은 크롬, 수은, 은과 같은 고독성 물질을 사용하므로 환경에 영향을 미칠 수 있다. 이로 인해 최근 전기 촉매, 광촉매 등을 통해 친환경적으로 COD를 측정하는 기술이 개발되고 있다.⁵⁾

2.3 TOC(Total Organic Carbon)

TC(Total Carbon)는 총 탄소량을 나타내는 지표로 TIC(Total Inorganic Carbon)와 TOC 두 가지 지표의 총합이다. TIC는 수질에 큰 영향을 끼치지 않는 탄산염 등의 탄소를 나타내어 오염 지표엔 크게 사용되고 있지 않다. 그러나 TOC는 일반적으로 DOC(Dissolved Organic Carbon)과 POC(Particulate Organic Carbon)의 합을 말하는 것으로 수질 내에서 유기성 오염물질의 함유량을 파악할 수 있기 때문에 폐수 처리 응용 분야에서 매우 중요한 지표 중 하나이다.⁶⁾

2.4 TSS(Total Suspended Solids)

부유 물질은 물속에 현탁되어 탁도를 유발하는 불용성 물질을 나타내는 용어로 일반적으로 직경이 $62\mu\text{m}$ 미만인 미세 입자 물질로 구성된 유기물 또는 무기물을 통칭한다. SS는 빛의 투과 감소, 온도 변화, 고형물 퇴적 등의 문제점이 존재한다. 뿐만 아니라 SS 내에 인, 중금속 및 살충제와 같은 오염물질들의 운반체 역할을 하는 오염 물질이므로 TSS에 따라 수질의 오염 정도를 평가할 수 있다.⁷⁾

2.5 TP(Total Phosphorous)

인은 수용성 액체 내에서 인산염으로 존재하며 이는 인체에 매우 치명적이며 토양의 부영양화 유발 및 수처리 비용 증가 등의 문제점을 가지고 있기 때문에 폐수 처리 시 반드시 제거해야 할 인자 중 하나이다. 이 때문에 폐수 내에 존재하는 인의 총량을 나타내는 지표인 TP를 사용하여 인의 함량을 파악한다.⁸⁾

2.6 TN(Total Nitrogen)

폐수 내의 과도한 질소 함량은 지구 온난화, 지하수 오염, 독성 조류 번식 및 부영양

화 등을 발생시킬 수 있기 때문에 폐수 내에 존재하는 질산염, 유기 질소 등의 총량을 TN이라는 지표로 나타내 질소의 함량을 파악한다.⁹⁾

3. 폐수 처리 공정의 종류

폐수 처리 공정은 물리 및 화학적 공정에 따라 분류가 가능하다. 물리적 공정은 혼합, 회석, 침전, 여과 등을 포함하며 화학적 공정은 환산, 흡착, 산화, 환원 등을 포함한다. 세부적으로 매우 다양한 종류의 공정이 있지만, 현재 많은 연구가 지속해서 이루어지고 있는 AOP, 막 분리 공정 및 응집법, 흡착에 대해 소개하고자 한다.

3.1 AOP(Advanced Oxidation Process)

고도의 산화성 자유 라디칼의 생성을 통해 폐수 내에 존재하는 유기 화합물을 물이나 이산화탄소로 빠르게 분해할 수 있다는 장점을 가진다. AOP는 펜톤, 오존, 전기화학, 광촉매, 플라즈마 등이 존재한다.

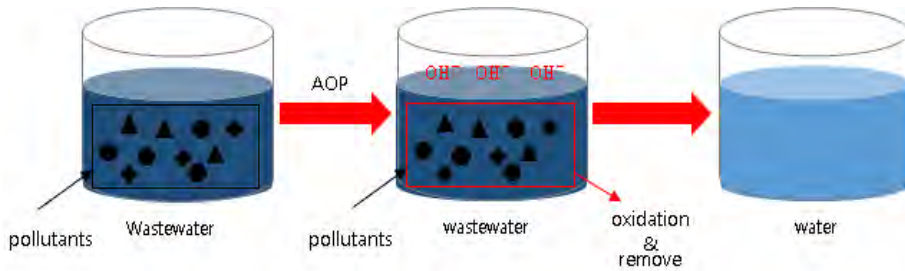


그림 1. AOPs 메커니즘

3.1.1 펜톤(Fenton)

하수 및 폐수의 전처리에 효과적인 수처리 공정으로 산성의 pH 조건에서 펜톤 ($\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$)시약으로 OH 라디칼을 생성하는 방법이다. 이는 산화 반응 이후 현탁 고형물의 응집을 촉진시킨다는 장점이 있지만 고체 촉매를 투입하기 때문에 과량의 슬러지

가 발생한다는 단점 역시 존재한다.¹⁰⁾ 따라서 이를 개선하고자 Heterogeneous Fenton process(HF), Photo Fenton process(PF) 및 Electro Fenton process(EF)가 개발되었다.

Heterogeneous Fenton process는 기존 Fenton 공정의 좁은 pH 가동 범위와 많은 철 슬러지가 생성된다는 단점을 보완하기 위한 공정으로 고체 촉매를 사용한다. 이는 철 슬러지가 적게 생산되고 pH 작동 범위가 넓다는 장점 및 안정성이 뛰어나다는 장점이 있으나 촉매 합성 조건이 어려우며 비용 역시 높다는 단점을 가진다.¹¹⁾

Photo Fenton process는 자외선 또는 가시광선 에너지를 사용하여 Fe^{3+} 에서 Fe^{2+} 로의 환원을 가속화 하는 공정으로 초기 Fe^{2+} 농도가 낮아 철 슬러지 생산이 적고 높은 OH라디칼 생산량을 가진다는 특징을 가진다.¹²⁾

펜톤 공정의 큰 단점 중 하나는 펜톤 시약의 빠른 소비로 유기 오염물질의 슬러지 형성이 발생하는 것이다. 이를 개선하는 공정이 Electro Fenton process로 셀의 음극에서 산소 가스 환원을 통해 과산화수소를 직접 제조하여 사용한다. 이는 과산화수소의 운송 및 보관이 필요 없으며 음극에서 Fe^{2+} 의 지속적인 재생이 발생하여 유기 오염물질의 분해율이 더 높다는 특징을 가진다.¹³⁾

단일 공정 연구 논문의 경우 전극 재료, 전압 등을 변경하여 EF 공정의 효율을 증대시키는 연구와 특정 폐수에 대해 여러 공정을 단일로 사용했을 때의 폐수처리 성능 및 공정비용 등을 고려해 최적의 공정을 선정하는 연구가 주를 이루었으며, 복합공정을 사용하는 경우 E/C 및 C/F 등의 공정으로 폐수 전처리를 진행 및 EF 및 PF를 사용한 본처리 후 IFAS 및 AC 등의 공정으로 슬러지를 제거하는 후처리를 통한 폐수처리 성능 증대를 목표로 연구를 진행하는 경향을 보였다.

최근 펜톤 공정과 관련된 연구 논문들이 기존 펜톤 공정에 비해 적은 슬러지 생성 및 처리 성능 향상의 장점을 가진 EF 및 PF 위주로 연구를 진행하는 경향을 보인다. 그러나 기존 펜톤 공정과 비교했을 때의 처리 성능 향상 대비 비용적인 측면에 대한 연구를 비롯해 EF 및 PF의 고질적인 단점인 다량의 화학 물질 사용 및 빛 에너지의 낮은 이용 등의 한계점을 가지고 있으므로 이를 개선하기 위한 방향의 연구가 계속해서 이루어질 것으로 예상된다.

3.1.2 오존(Ozone)

AOP에서 사용되는 주요 화학 물질로 강력한 산화제로 작용한다. 오존은 두 가지 메커니즘을 통해 유기 오염물질을 분해할 수 있다. 첫 번째로 오존 분자가 직접적으로 오염물질을 산화시키는 것. 두 번째는 오존의 분해 시 발생하는 OH 라디칼에 의해 오염물질을 간접적으로 산화시키는 것이다. 이는 오염물질을 직접 산화하거나 강한 OH 라디칼을 생산한다. 뿐만 아니라 용액의 pH에 따라 반응 메커니즘이 달라질 수 있다는 특징을 가진다.^{14,15)}

오존은 강력한 산화력을 통해 COD 및 폐수 내 독성을 효과적으로 감소시킬 수 있으나 유기화합물을 완전히 분해할 수 없다. 이는 즉 TOC를 효과적으로 감소시키기 어렵다는 한계점을 가진다. 이를 개선하기 위한 방향으로 많은 연구가 이루어지고 있다. 단일 공정의 연구로는 오존 투여량을 변경시켜가며 특정 폐수에 대해 COD, TOC, 색상 등의 오염 인자를 최적의 성능으로 제거하고자 하는 경향을 보였으며, 특히 TOC 제거를 위해 폐수에 함유된 페놀 등의 유기 화합물의 제거에 초점을 둔 연구가 많은 것으로 나타났다. 복합공정의 경우 자외선, 과산화수소 및 활성탄 등을 복합적으로 사용하여 COD 및 TOC 제거율을 향상시키고자하는 연구 경향을 보이고 있다. 따라서 오존은 유기화합물 분해에 대한 한계점이 존재하기 때문에 이를 보완하고자 단일공정보단 복합공정을 통해 TOC를 효과적으로 제거하기 위한 방안을 모색하는 연구가 더욱 활발히 이루어질 것으로 예상된다.

3.1.3 전기화학적 산화(EO; Electrochemical Oxidation)

EO는 불용성 전극을 사용하여 양극에서 오염물질의 산화가 일어나며 음극에서 중금속의 환원이 일어나는 산화 환원 반응을 활용하는 폐수처리 공정이다. 양극의 오염물질 산화방법은 직접 산화와 간접 산화로 분류가 가능하다. 양극의 직접 산화의 경우 PbO_2 및 붕소 도핑 다이아몬드(Boron Doped Diamond) 등의 양극을 사용하여 표면에서 전자이동을 일으켜 오염물질을 산화시키는 직접 산화와 백금 및 금속 산화물 등의 양극을 사용하여 염소와 같은 활성종을 생성하여 오염물질을 산화시키는 간접 산화로 분류할 수 있다. 음극의 경우 PTFE, CNT 등의 탄소재료를 사용하며 환원반응을 통해 양극과 마찬가지로 직접 및 간접적으로 오염물질 제거가 가능하다.^{16,17)}

전기화학적 산화 공정은 처리 효율이 높고 설비가 간단하며 화학물질의 추가 투입이 불필요하다는 장점을 가진다. 그러나 양극의 전극 물질이 부식에 상대적으로 취약하며 부식에 상대적으로 안정한 재료의 경우 비용이 높아 공정비용 증가 및 중금속, 무기물 등에 의한 저항 증가 등의 단점 역시 존재한다. 이를 보완하고자 새로운 전극물질 개발 및 기존 전극 보안을 목표로 연구를 계속해서 진행되고 있다. 특히 BDD 및 Ti/RuO₂ 등의 재료를 전극으로 사용한 전기화학적 산화 공정의 연구가 활발히 진행되고 있으며 계속해서 기존 단점 보완 및 처리 성능 개선을 목표로 연구가 진행될 것으로 예상된다.

3.1.4 광촉매(Photocatalyst)

광촉매란 ZnO, TiO₂, ZrO₂, SnO₂, 등의 반도체 기반 물질이 빛과 반응하여 촉매작용을 하는 촉매를 일컫는다. 광촉매가 빛과 반응하여 촉매작용시 산화되어 전자가 발생하게 되는데 이를 폐수처리에 적용할 경우 생성된 전자는 광촉매 표면에 부착된 수분과 반응 후 OH 라디칼과 산소 이온을 생성하여 유기물, 염료, 세균 등을 제거한다.

광촉매는 높은 분해 효율 및 슬러지 발생이 없다는 장점이 있지만 약품을 이용하여 폐수의 pH를 조절해야 한다는 점과 촉매 투여량의 최적화가 필요한 것, 자외선 및 가시광선 등을 조사시키기 위해 필요한 에너지, 광촉매 회수 등의 단점이 존재한다. 이로 인해 펜톤 공정 등의 여타 수처리 기술과 광촉매 기술을 비교했을 때 성능 및 효율이 상대적으로 떨어진다는 지적이 계속해서 이어지고 있다. 따라서 여타 공정과 복합적으로 사용하여 단점을 개선하고자 하는 연구가 이루어지고 있다. 과산화수소, 오존 등의 약품과 함께 사용하여 자외선 조사 효율 증대, 광촉매 내에 귀금속 담지를 통한 오염물질 분해 효율 증대 및 흡착제를 활용하여 광촉매 표면에 오염물질 접촉을 더욱 증대시키는 등의 연구가 지속적으로 이루어지고 있다.¹⁸⁾

3.1.5 플라즈마(Plasma)

폐수처리를 목표로 사용되는 플라즈마는 전극이 폐수와 접촉되어 있을 때 방전이 발생하면 물을 분해시켜 OH 라디칼 및 H 라디칼을 생성하는 AOP 공정이다. 비열 플라즈마(Non thermal plasma)가 주로 사용되며 플라즈마의 주요 방전으로 코로나방전(CD), 아크방전(AC), 접촉 글로우 방전 전기분해(CGDE), 유전체 장벽 방전(DBD)이 있

으며 방전 종류에 따라 작동 모드 및 조건이 다르게 나타난다.¹⁹⁾

플라즈마 처리는 용매가 없기 때문에 친환경적인 방법으로 여길 수 있다. 플라즈마는 보편적으로 전류 조절 및 균일한 플라즈마 생성이 용이한 저압 구동을 사용한다. 현재 플라즈마 기술은 화학 물질 요구량 감소, 작동 시간 단축, 무용매 공정, 고효율, 간단한 작동, 에너지 요구량 감소 등 매우 다양한 장점이 존재하므로 활발한 연구가 진행되고 있다.²⁰⁾

3.2 막 분리 공정(Membrane filtration process)

미세공을 가진 분리막을 사용하여 일정 크기의 오염물질을 분리할 수 있는 기술이다. 막 분리 공정은 필터 기공의 크기에 따라 정밀여과, 한외여과, 나노여과, 역삼투 네 가지로 분류할 수 있다.

막 분리 공정은 약품을 사용하지 않는 환경 친화적 공정이며 수질 개선 또한 우수하다는 장점이 있다. 특히 필터의 기공 크기가 다양하므로 폐수의 주된 오염 물질의 크기에 맞는 필터를 사용하여 오염물질을 효과적으로 제거할 수 있다는 장점을 가진다. 그러나 막 오염에 의한 병목현상, 멤브레인의 교체 등의 단점이 존재한다.²¹⁾

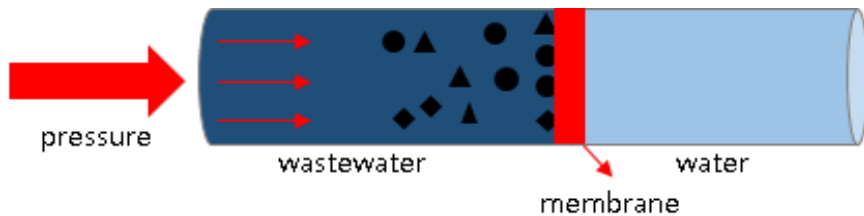


그림 2. 막 분리 공정 메커니즘

3.2.1 정밀여과(microfiltration)

정밀여과 공정에 사용되는 MFM(microfiltration membrane)은 기공 크기가 약 0.1 ~5 μm , 두께가 10~150 μm 이다. 이는 물리적 분리 원리에 따라 부유 입자, 병원체,

대형 박테리아, 단백질 및 효모 세포와 같은 물질을 제거할 수 있다. 유체 역학적 저항이 낮기 때문에 높은 오염물 제거 및 용매 흐름을 위해 낮은 정수압을 필요로 한다는 단점이 존재한다.²²⁾

3.2.2 한외여과(ultrafiltration)

한외여과 공정에 사용되는 UFM(Ultrafiltration membrane)은 기공 크기가 약 $0.001\sim 0.1\mu\text{m}$, 두께는 $150\sim 250\mu\text{m}$ 이다. MF와 마찬가지로 상당히 큰 분자를 여과하기 때문에 삼투압 현상 대부분을 무시할 수 있으므로 공정비용을 크게 줄일 수 있다. 그러나 이온성 물질 및 중금속과 유기화학 물질 등이 쉽게 제거되지 않는다는 단점이 존재한다. 현재 시판되는 UFM은 폴리 아크릴로 니트릴, 폴리 에테르 설펜, 폴리 비닐 클로라이드 및 폴리 설펜 등 다양한 폴리머 재료를 이용하여 제조한다.²³⁾

3.2.3 나노여과(nanofiltration)

나노여과 공정에 사용되는 NFM(Nanofiltration membrane)은 $0.001\mu\text{m}$ 미만의 기공 크기, $150\mu\text{m}$ 두께를 가진다. 나노 여과 공정은 용질 또는 용액에서 화학 물질을 분리한다는 특징이 있다. 이는 계면 중합 특히 중합체의 얇은 활성층에 의해 좌우된다. 회수율이 높으며 운영비용이 낮고 환경에 미치는 영향이 적다는 장점이 있으나 유기 용질 및 용매를 여과할 경우 압력 구배로 인한 대류, 농도 구배로 인한 확산 및 반발 효과 등의 변수로 인해 복잡하므로 성능 평가가 매우 어렵다는 단점이 존재한다.²⁴⁾

3.2.4 역삼투막(Reverse Osmosis)

역삼투막 공정에 사용되는 ROM(Reverse osmosis membrane)은 NFM과 마찬가지로 기공 크기가 $0.002\mu\text{m}$ 미만의 기공 크기, $150\mu\text{m}$ 두께를 가진다. 빠른 유속, 무기염 반발 등의 장점으로 인해 현재 막 분리 공정 중 가장 유망한 기술로 평가받고 있다. 유기 및 무기 오염물질, 세균, 바이러스, 중금속을 포함한 이온성 물질에도 90% 이상의 높은 제거 효율을 가진다. 막의 침전 현상이 적기 때문에 막의 수명이 긴 장점이 있지만 정수 후 pH가 낮아지며 폐액이 발생한다는 단점이 존재한다.²⁴⁻²⁶⁾

3.3 응집 및 응결(Coagulation and flocculation)

폐수 처리에 주로 사용되는 공정 중 하나로 금속염 응고제(Coagulants) 및 고분자 응집제(Flocculants)를 사용해 폐수에 존재하는 용해 고체, 콜로이드 및 유기 오염물질 등의 오염물질을 제거하는 고-액 분리법 중 하나이다. 이는 응집제를 첨가하여 오염물질을 응집시킨 후 응고제를 첨가하여 오염물질을 침전시키는 원리를 이용하는 방법이다. 응고제는 염화 제 2 철, 황산 알루미늄, 석회, 황산 철 등을 이용하며 응집제는 음이온성 폴리 아크릴아미드 등의 이온성 고분자 전해질을 이용한다.²⁷⁾

응집/응결 공정은 약품 투입으로 각종 오염물질들을 빠르고 효율적으로 제거할 수 있으며 이를 통해 전체 공정시간을 크게 단축시킬 수 있다. 그러나 무기염, 유기염, 고분자 등의 화학 약품을 사용하는 공정이기 때문에 AOP 및 막 분리 공정에 비해 친환경적인 공정으로 평가할 수 없다. 응집제 최적의 투여량을 결정하기 위해선 많은 실험이 필요하며 폐수의 상태에 따라 최적의 투여량이 계속해서 변경될 수 있다. 뿐만 아니라 응집/응결 공정 후 독성을 가진 많은 양의 슬러지가 발생하므로 이를 중화 및 제거하기 위한 추가적인 공정이 필요하다. 위와 같은 단점을 개선하고자 무기/유기 합성 약품을 개발하여 응집제 성능 개선, 슬러지 독성 감소를 위한 중화제 첨가, 폐수 종류에 따른 투여량에 대한 수학적 모델링 등 다양한 연구가 이루어지고 있다.

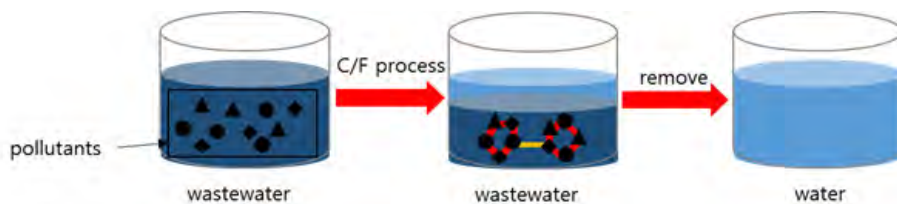


그림 3. 응집/응결 공정 메커니즘

3.4 흡착 (Adsorption)

염료 및 중금속 등과 같은 오염물질을 흡착제를 통해 제거하는 폐수 처리 공정이다. 흡착 공정의 효율은 초기 농도, 온도, 흡착제 용량, pH 등에 비례한다는 특징이 있다.

흡착제는 보편적으로 활성탄, 제올라이트 등을 사용한다.²⁸⁾

활성탄 등의 값싼 흡착제를 사용할 경우 고효율 저비용 공정이며 상대적으로 단순한 공정이라는 장점이 존재하며 재생을 통해 여러 번 사용이 가능하다는 장점을 가진다. 그러나 시간이 경과함에 따라 흡착제의 처리 능력이 점차 감소하기 때문에 수명이 존재한다. 이로 인해 수명을 다한 흡착제의 교체 및 처분 비용이 추가적으로 발생하며, 부유물질 등과 같은 유기물 처리 시 흡착제의 성능이 급격히 감소한다는 단점 역시 존재한다. 위와 같은 단점을 보완하고자 바이오매스 활성탄 및 페타이어 등과 같은 석유 폐기물을 재활용하여 제조한 활성탄의 흡착 성능 연구가 지속해서 이루어지고 있다. 뿐만 아니라 흡착 공정에 치명적인 유기 오염물질 등을 제거하기 위한 전처리 공정을 추가적으로 진행하고 있으며, 여러 공정을 흡착 공정의 전처리로 가장 적합한 공정을 파악하는 연구가 지속적으로 이루어지고 있다.²⁹⁾

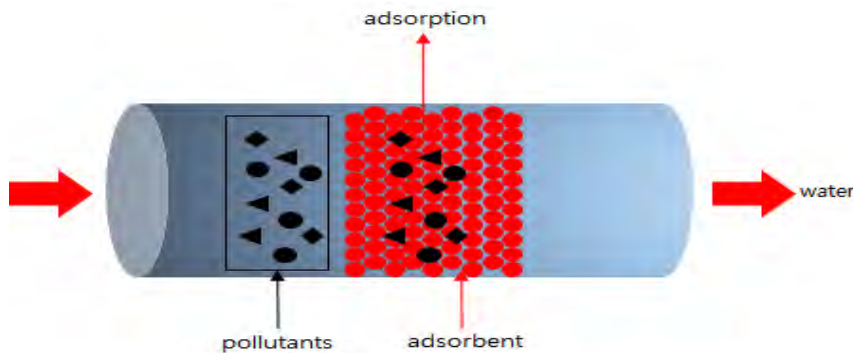


그림 4. 흡착 공정 메커니즘

4. 결론

4차 산업혁명 시대에 들어 각종 환경문제에 대한 관심과 우려가 지속해서 증가하고 있다. 이와 비례해 가정 및 산업에서 발생하는 폐수의 강도, 종류, 배출량 역시 증가하는 추세이며 이를 해결하기 위해 세계적으로 많은 투자를 하고 있는 실정이다. 이와 관련하여 많은 연구진들이 물리·화학적 수처리 공정의 성능 및 효율을 개선시키려는 연구

를 계속해서 하고 있다. AOP는 폐수 내에 펜톤, 오존 등의 약품을 투입시키거나 전극, 광촉매 등을 사용하여 직접적으로 OH라디칼을 생성시켜 유기물질의 산화 및 살균효과를 제공하는 공정으로써 슬러지법, 응결/응집뿐만 아니라 두 개 이상의 AOP 혼성화 공정을 결합하여 연구를 진행하는 경향을 보였다. 막 분리 공정의 경우 필터로 사용되는 소재의 종류 및 조제 비율 등을 변경시켜가며 최적의 성능 조건을 찾는 연구가 주를 이뤘다. 응집/응결 공정의 경우 AOP 특히 펜톤과 결합시켜 성능을 증진시키는 연구가 주를 이루었으며 이 외에도 응집제의 종류에 따른 성능 평가 연구 역시 활발히 진행되고 있다. 마지막으로 흡착의 경우 섬유 산업 및 중금속 세척수에서 발생하는 폐수의 처리에 대한 연구를 확인할 수 있었다.

사사

본 논고는 환경부 상하수도 혁신기술개발사업(과제번호: 2020002690013)으로 이루어진 성과물입니다.

핵심어 : 폐수처리공정, 오염도, 고도산화공정, 막 분리 공정, 응집/응결, 흡착

참고문헌

1. Ministry of Environment. (2019). *Environmental Statistical Yearbook 2019*(No. 32). Sejong : ME.
2. Ministry of Environment. (2019). *Industrial wastewater generation and treatment, environmental pollution discharger investigation, approval statistics No. 106005*. Sejong: ME.
3. H. B. Choi. (2006) *An overview of high concentration wastewater treatment methods*. Seoul : Konetic.
4. S. Jouanneau et al. (2014). Methods for assessing biochemical oxygen demand (BOD): A review. *Water Research*, 49(1), 62-82.
DOI: 10.1016/j.watres.2013.10.066
5. R. B. Geerdink, R. S. Hurk & O. J. Epema. (2017). Chemical oxygen demand: Historical perspectives and future challenges. *Analytica Chimica Acta*, 961(8), 1-11.
DOI: 10.1016/j.aca.2017.01.009
6. G. R. Aiken. (1992). Chloride interference in the analysis of dissolved organic carbon by the wet oxidation method. *Environmental Science & Technology*, 26(12), 2435-2439 DOI: 10.1021/es00036a015
7. G. S. Bilotta & R. E. Brazier. (2008). Understanding the influence of suspended solids on water quality and aquatic biota, *Water Research*, 42(12), 2849-2861.
DOI: 10.1016/j.watres.2008.03.018
8. P. Mohajeri, C. M. S. Smith, H. W. Chau & N. Lehto. (2020). Powdered ALLODUST /ALLOCHAR Augmented Single Batch Aerobic Reactor (SiBAR) for High Concentration Phosphorous Removal from Agricultural Wastewater. *Journal of Water Process Engineering*, 36, 101301. DOI: 10.1016/j.jwpe.2020.101301

9. Y. Ye et al. (2021). Bio-membrane based integrated systems for nitrogen recovery in wastewater treatment: Current applications and future perspectives. *Chemosphere*, 265, 129076.
DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.129076
10. Konetic. (2012). *Fenton Oxidation Technology Education*. Seoul: konetic.
11. M. Zhang, H. Dong, L. Zhao, D. Wang & D. Menga. (2019). A review on Fenton process for organic wastewater treatment based on optimization perspective. *Science of The Total Environment*, 670(20), 110-121.
DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.03.180
12. J. A. S. Pérez, I. M. R. Sánchez, I. Carra, A. C. Reina, J. L. C. López & S. Malato. (2013). Economic evaluation of a combined photo-Fenton/MBR process using pesticides as model pollutant. Factors affecting costs. *Journal of Hazardous Materials*, 244-245(15), 195-203.
DOI: 10.1016/j.jhazmat.2012.11.015
13. C. A. M. Huitle & E. Brillas. (2009). Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods: A general review. *Applied Catalysis B: Environmental*, 84(3-4), 105-145.
DOI: 10.1016/j.apcatb.2008.09.017
14. O. Khalifa, F. Banat, C. Srinivasakannan, F. A. Marzooqi & S. W. Hasan. (2021). Ozonation-assisted electro-membrane hybrid reactor for oily wastewater treatment: A methodological approach and synergy effects. *Journal of Cleaner Production*, 289(20), 125764.
DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.125764
15. C. V. Rekhate & J. K. Srivastava. (2020). Recent advances in ozone-based advanced oxidation processes for treatment of wastewater: A review. *Chemical Engineering Journal Advances*, 3(15), 100031.
DOI: 10.1016/j.cej.2020.100031

16. S. G. Segura, J. D. Ocon & M. N. Chong. (2018) Electrochemical oxidation remediation of real wastewater effluents: A review. *Process Safety and Environmental Protection*, 113, 48-67.
DOI: 10.1016/j.psep.2017.09.014
17. C. A. M. Huitle & M. Panizza. (2018). Electrochemical oxidation of organic pollutants for wastewater treatment. *Current Opinion in Electrochemistry*, 11, 62-71.
DOI : 10.1016/j.coelec.2018.07.010
18. R. Suresh, S. Rajendran, P. Senthil Kumar, Dai-Viet N. Vo & Lorena Cornejo -Ponce. (2021). Recent advancements of spinel ferrite based binary nanocomposite photocatalysts in wastewater treatment. *Chemosphere*, 274, 129734.
19. R. K. Singh, L. Philip & S. Ramanujam (2017). Rapid degradation, mineralization and detoxification of pharmaceutically active compounds in aqueous solution during pulsed corona discharge treatment. *Water Research*, 121(15), 20-36.
DOI: 10.1016/j.watres.2017.05.006
20. C. M. L. Anzaldo, M. E. G. López, A. A. P. Fonseca, L. E. C. Barba & J. R. R. Ortíz. (2021). Plasma-enhanced modification of polysaccharides for wastewater treatment: A review. *Carbohydrate Polymers*, 252(15), 117195.
DOI: 10.1016/j.carbpol.2020.117195
21. H. H. Kim. (2008). *Evolution and Implications of Water Treatment Technology*. Seoul: SGRI
22. S. F. Anis, R. Hashaikh & N. Hilal. (2019). Microfiltration membrane processes: A review of research trends over the past decade. *Journal of Water Process Engineering*, 32, 100941.
DOI: 10.1016/j.jwpe.2019.100941
23. T. Ahmad, C. Guria & A. Mandal. (2020). A review of oily wastewater treatment using ultrafiltration membrane: A parametric study to enhance

- the membrane performance. *Journal of Water Process Engineering*, *36*, 101289.
DOI: 10.1016/j.jwpe.2020.101289
24. M. A. A. Fatah. (2018). Nanofiltration systems and applications in wastewater treatment: Review article. *Ain Shams Engineering Journal*, *9(4)*, 3077-3092.
DOI: 0.1016/j.asej.2018.08.001
25. J. J. Torres, M. Cuello, N. A. Ochoa & Cecilia Pagliero. (2021). Biodiesel wastewater treatment using nanofiltration membranes. *Process Safety and Environmental Protection*, *148*, 825-833.
DOI: 10.1016/j.psep.2021.02.013
26. C. Liu, Y. Liu, Y. Guo, C. Wang, Z. Hu & C. Zhang. (2019). High-hydrophilic and salt rejecting PA-g/co-PVP RO membrane via bionic sand-fixing grass for pharmaceutical wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal*, *357(1)*, 269-279.
DOI: 10.1016/j.cej.2018.09.151
27. C. S. Lee, J. Robinson & M. F. Chong. (2014). A review on application of flocculants in wastewater treatment. *Process Safety and Environmental Protection*, *92(6)*, 489-508.
DOI: 10.1016/j.psep.2014.04.010
28. S. D. Gisi, G. Lofrano, M. Grassi & M. Notarnicola. (2016). Characteristics and adsorption capacities of low-cost sorbents for wastewater treatment: A review. *Sustainable Materials and Technologies*, *9*, 10-40.
DOI: 10.1016/j.susmat.2016.06.002
29. A. E. Burakov et al. (2018). Adsorption of heavy metals on conventional and nanostructured materials for wastewater treatment purposes: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *148*, 702-712.
DOI: 10.1016/j.ecoenv.2017.11.034