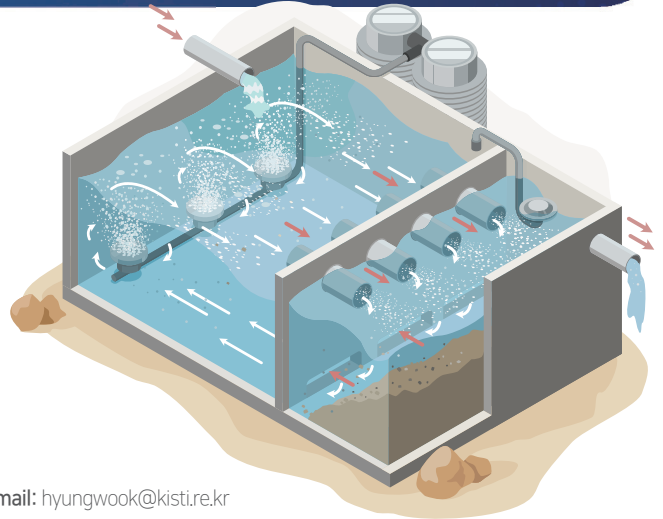


폐수 무방류 시스템(ZLD)



데이터분석본부 호남지원 책임연구원 **박형욱** Tel: 062-951-7711 e-mail: hyungwook@kisti.re.kr

KEY FINDING

1. 폐수 무방류 시스템(Zero Liquid Discharge System, ZLD)은 산업 용수로 활용된 폐수로부터 슬러지를 분리해 유출물을 처리하는 방법으로서 환경 규제를 준수하고, 동시에 다양한 산업 분야의 폐수 배출을 최소화할 수 있음에 따라 최근 전 세계적으로 설치를 의무화하는 추세에 있다.
2. 특히 ESG 경영의 확대와 함께 폐수에서 리튬 및 탄산칼슘 등과 같은 가치있는 자원의 추출 후 재활용하는 연구가 상용화되면서 시스템 운영상 발생하는 경제적 문제점을 극복하고자 하는 연구와 노력이 지속되고 있다.
3. ZLD 시스템의 주요 방법론으로는 증발법, 이온체 흡착, 침전, 멤브레인 필터 적용 및 용매 추출 방식이 활용되어지고 있으며, 국내에서는 국립지질과학원 및 SK에코플랜트, 포스코 등과 같은 대기업과 출연(연)을 중심으로 리튬, 황산나트륨, 가성소다 등 희소 자원에 대한 회수 방식에 대한 지속적인 연구 및 상용화가 진행되고 있다.
4. ZLD 시스템의 세계 시장 규모는 ESG 경영 및 자원 재활용의 확대로 2020년 57억500억 달러에서 연평균 8.2 %의 성장세로 2027년 99억700만 달러에 이를 것으로 전망된다.

1) 시장의 개요

최근 국내 산업 구조가 반도체, 디스플레이, 이차 전지 등 고부가 가치 산업으로 전환되고 있으며, 냉각과 세척을 중시하는 산업의 특성상 필수불가결한 요소자원으로 수자원은 반드시 필요한 상황이다. 특히 기업화 산업단지의 증가로 인해 일반수질 수준이 아닌 순수 수자원을 공업용수로 활용하게 되면서, 오염물질이 포함된 폐수로 인한 환경오염의 가능성이 높아지고 있는 추세이다. 이러한 사태를 방지하기 위해 국가에서는 산업체에서 사용하는 산업 용수와 산업 하

동 등에 의해 발생한 오염 물질이 함유된 수자원의 경우 산업 폐수로 정의하고 있으며, 배출 시설로부터 배출되는 수질 오염 물질이 항상 배출 허용 기준 이하로 배출되도록 수질 오염 방지 시설의 운영을 법령으로 지정해 운영하고 있다. 또한 기업의 경우 역시 폐수를 회수하고 처리하기 전에 슬러지를 응고시키는 방법 등으로 확보된 수자원을 재활용하고 슬러지로부터 고부가가치 자원을 확보하기 위한 방법을 마련하기 위해 노력하고 있으며, 이에 활용되는 공정을 폐수 무방류 시스템(Zero Liquid Discharge System, ZLD)으로 정의하고 있다. ZLD는 산업 용수로 활용된 폐수로부터 슬러지를 분리해 유출물

을 처리하는 방법으로서 산업체에서는 범용적 공업 용수를 공급받아 용도에 맞게 재처리할 수 있으며, 방류되는 하·폐수가 전혀 없어 수질 오염을 원천적으로 차단하고 물의 재이용을 극대화하는 장점을 가지고 있는 시스템이라고 할 수 있다.

현재 국내의 경우 수질 오염 물질 배출 시설에 대한 배출 규제를 기본으로 하되 일부 물질의 배출 허용 기준 준수 여부만을 검토하고 있으나, ESG 경영과 같은 환경 보호에 대한 대중의 인식이 높아지면서 상수원 보호 구역과 같이 배출 구역의 수질 기준이 엄격한 지역과 오염 총량제 적용 지역의 경우 ZLD는 필수적인 설비로 제시되고 있다. 하지만 대표적인 ZLD 시스템 중 하나인 시계식 증발 압축 방식의 경우 100억 원대의 설치비와 운영비가 소요되어 집에 따라 슬러지에서의 자원 회수 효율화를 위한 맞춤형 무방류 시스템에 대한 지속적인 연구가 진행되고 있으며, 시장의 가능성에 대한 기대 역시 증가하고 있는 추세이다.

2) 정책 및 규제 현황

선진국의 경우 CWA(Clean Water Act), 미국 EPA (Environmental Protection Agency) 및 SDWA(Safe Drinking Water Act)와 같은 환경 규정으로 폐수 배출에 대한 부과금이 ZLD 설치 비용을 초과하는 경우가 많아지면서 ZLD 시스템의 도입이 강력히 추진되고 있다. 일례로 미국에서는 1970년대 콜로라도 강 주변 공장 증설로 인해 염분 농도가 증가하는 현상이 발생한 바 있으며, 이로 인해 공장 폐수 배출 허가에 수년이 소요되자 공장에서는 허가 기간의 단축을 위해 ZLD를 도입하기 시작한 바 있다. 특히 강 주변에 있는 발전소에서 이온 농도가 높은 배연 탈황 폐수와 냉각탑 배출수가 발생되었는데, 이온 농도가 높은 폐수는 수계로 배출할 때 염의 농도가 증가하는 상황을 야기할 수 있어 정책적으로 주변 60 개소 발전소에서 ZLD가 적용된 바 있다. 또한 라스베이거스 지역과 같은 지하수 담수화

시설을 이용하는 내륙 지방의 경우 100 % 재활용을 위한 ZLD 시스템의 적용을 위해 지자체와 협력해 주민을 설득하고 협력하는 과정을 거치고 있다.

중국의 경우 2020년3월31일 “국가 수자원 보호 및 관리 법”을 개정해 수자원과 생태계를 보호하기 위해 수계로의 오염 물질 배출을 억제하고 물의 재이용을 촉진하는 계획을 수립하였으며, 특히 폐수 재활용률을 2030년까지 50 %, 2050년까지 70 %로 높이는 정책을 마련한 바 있으며, 이에대한 해결책으로 ZLD 시스템에서 찾고 있는 실정이다.

인도의 경우 역시 수질 오염을 방지하기 위해 강력한 규제를 하고 있으며, 2015년에는 하루 25 m³ 이상의 폐수를 방류하는 섬유 공장에 ZLD 설치를 의무화한 바 있다. 29 개의 염색 공장에 ZLD 시스템이 설치되어 물을 재이용하고, 폐수에 존재하는 염을 회수해 사용하고 있으며, 그 외 양조 공장, 발전소, 석유 화학 공장 등으로 확장되고 있다.

국내의 경우 다량의 용수를 필요로 하는 산업 활동에 처리수 사용을 장려하기 위한 국가기본계획이 수립된 이후 폐수 처리 관련 법률을 시행하고 폐수 재이용을 적극적으로 추진하고 있다. 특히 도시 수처리 및 폐수 처리 회사를 설립해 식수와 생활 용수가 부족했던 농업 및 산업 분야에 사용되고 있다.

3) 시장 동향

| 시장 규모 및 전망

수질에 대한 글로벌 환경의 관심과 환경 규제의 강화로 ZLD 시스템의 세계 시장 규모는 2022년 66억9300만 달러에서 연평균 8.2 %의 성장세로 2027년 99억700만 달러로 증가할 것으로 전망된다. 특히 이중 전기 투석법을 비롯한 자원 회수를 위한 결정화 기술에 대한 시장의 비중이 가장 클 것으로 보고되었다.

표 1 ZLD 시스템의 세계 시장 규모와 전망

(단위 : 백만 달러)

구분	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	CAGR(%)
Pre-Treatment	1,741.0	1,892.5	2,057.0	2,221.4	2,405.4	2,612.0	2,844.1	3,099.6	8.5
Filtration	1,740.6	1,882.0	2,034.7	2,185.5	2,354.1	2,542.8	2,754.2	2,985.9	8.0
EV / Crystallization	2,224.3	2,405.5	2,601.3	2,794.8	3,011.0	3,253.0	3,524.2	3,821.5	8.0
계	5,705.9	6,180.0	6,693.0	7,201.7	8,407.8	8,407.8	9,122.4	9,907.0	8.2

출처 : MarketsandMarkets, 'Zero_Liquid_Discharge_Systems - GLOBAL FORECAST TO 2027', 2022.

분야별로 살펴보면, 전 세계적으로 발전소 등 에너지 및 전력 분야에서 냉각으로 발생하는 폐수의 재활용을 위한 ZLD 시스템이 가장 많이 활용되고 있으며, 최근에는 석유 화학 공정, 금속 및 광업, 반도체 및 전자 산업 분야에서 주로 활용되고 있다. 그리고 멤브레인 방식과 같은 소규모 시스템의 경우 일반 중소기업 중심의 섬유, 제약,

펄프 및 제지 영역으로 확장되고 있다.

특히 국내에서는 농식품 분야를 중심으로 친환경 식품, 수출 지향형 식품, 맞춤 특화 식품, 기능성 식품 등에 집중적으로 ZLD 시스템이 도입될 것으로 기대되며, 2030년까지 213억 달러에 이를 것으로 예상된다.

표 2 ZLD 시스템의 국내 시장 규모 및 전망

(단위 : 백만 달러)

구분	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	CAGR(%)
에너지 및 발전	61.1	66.8	73.1	79.4	86.5	94.5	103.5	113.5	9.2
화학 및 석유 화학	34.4	37.5	40.9	44.3	48.1	52.4	57.3	62.6	8.9
식품 및 음료	20.0	21.9	23.9	26.0	28.3	30.9	33.8	37.0	9.1
섬유	22.0	23.9	26.1	28.2	30.6	33.4	36.4	39.8	8.8
제약	16.9	18.5	20.3	22.0	24.0	26.2	28.7	31.5	9.2
반도체 및 전자	11.2	12.2	13.3	14.3	15.5	16.8	18.3	19.9	8.5
기타	12.0	13.1	14.2	15.4	16.7	18.1	19.8	21.6	8.7
계	177.7	193.9	211.7	229.6	249.7	272.3	297.7	325.9	9.0

출처 : MarketsandMarkets, 'Zero_Liquid_Discharge_Systems - GLOBAL FORECAST TO 2027', 2022.

I 경쟁 현황

미국의 경우 담수 부족, 폐수 처리 비용 증가, 환경 보호에 대한 대중의 인식 고도 등으로 ZLD 시스템의 도입이 강력히 추진되고 있으며, 아쿠아테크놀로지(Aquatech Technology), 새본워터테크놀로지(Safbon Water Technology) 등과 같은 해수 담수화 기술을 보유하고 있는 기업을 중심으로 시장이 확대되고 있다. 특히 해안가에 위치한 산업 단지의 경우 바닥재와 비산재 이송수, 배연 수는 제거 시스템에서 배출되는 폐수에 대해서는 ZLD를 우선적으로 적용하도록 관련 법규가 개정되었으며, 탈염 처리 시설의 농축수 처리도 해수 담수화 시설을 기반으로 해상으로 방류하는 방식이 적용되고 있다. 또한 삼코테크놀로지(Samco Technology), 엔콘증발기(Encon Evaporators) 등은 낙하막 염수 농축기, 고형물 폐기물 처리, 생물학적 처리, 강제 순환 결정화기, 수평 분무막 증발기 및 멤브레인 예비 농축기 등의 기술이 포함된 하이브리드형 ZLD 시스템에 대한 상용화를 성공시킨 바 있다.

중국의 경우 석탄을 많이 사용하는 지역 발전소의 특징상 ZLD

가 해결책으로 부각될 수 밖에 없으며, 이에 베이징칭닝(Beijing Jingneng), 중국화전(China Huadian), 화녕파워 (Huaneng Power) 등의 수요자를 대상으로 엔엔워터(ENN Water), 맥원환경기술(Mcwong Environment Technology)과 같은 기술력을 가진 중소기업, 스타트업이 실증을 진행하고 있다.

인도의 경우 또한 프라즈인더스트리(Praj Industries), 이온익스체인지(Ion Exchange)과 같은 기업을 중심으로 ZLD 시스템에 대한 연구가 진행되고 있으며, 주요 수요처인 타타철강(TaTa Steel)의 경우 ZLD 시스템을 통해 슬러지로부터 고부가가치 희소 자원을 추출해 연간 1억 달러의 수익을 창출하고 있다.

4) 분석자 인사이트

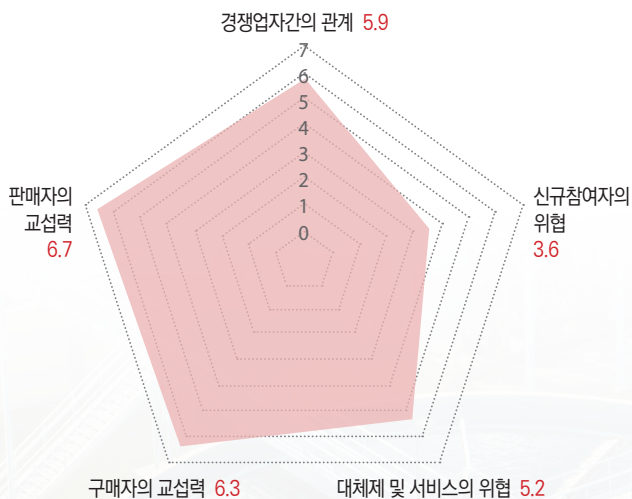
최근 수질 오염 방지와 물의 재사용에 대한 관심이 증대하면서 ZLD 시스템의 적용은 전세계적으로 증가하고 있지만, 여전히 설치 비용이 높고 에너지 사용량이 많아 경제적 타당성이 나오지 않는 문

제점을 안고 있다. 이에 폐수에서 리튬 및 탄산칼슘 등과 같은 가치 있는 자원을 결정화해 추출 후 재활용하는 연구와 더불어 시스템 운영에 필요한 에너지 및 온실 가스를 CCUS 시스템 등과 연계함으로써 해당 기술이 가지는 문제점을 극복하고자 하는 연구와 노력이 지속되고 있다. 특히 멤브레인 기술의 발전을 통한 고순도 정화 기술, 에너지 효율 향상을 위해 적용되는 열병합 발전 기술, 모듈화를 통한 시스템의 소형화 기술 등이 지속적으로 연구되고 있으며, 활용 기업 역시 재활용을 통한 신규 비즈니스 모델 수립에 열을 올리고 있는 실정이다.

실례로 미국의 코카콜라(CocaCola)는 2015년부터 전 세계에 위치한 10 개 공장에서 ZLD 시스템을 운용중이며, 전체 폐수 배출량의 90 %인 1,000만 갤런 이상의 폐수 배출량을 줄여 환경 보호에 기여하고, 동시에 이러한 폐수에서 결정화 방식을 통해 추출된 설탕 역시 재활용해 음료 생산에 적용시킴으로써 공장당 연간 100만 달러 이상의 절감 효과를 기대하고 있다. 또한 삼성전자 및 TSMC, 인텔(Intel), 마이크론 기술(Micron Technology) 등 반도체 생산을 주 업종으로 진행하는 기업 역시 ZLD 시스템을 통해 폐수 활용 기술과 더불어 고부가가치 금속을 추출하는 기술을 적용하면서 연간 1천만 달러의 이상의 비용을 절감하고 있다고 보고된 바 있다.

ZLD 시스템과 관련된 기업의 사업 전략 방향을 포터의 5 Force 분석 기법을 적용해 <그림 2>와 같이 주요 경쟁력을 정리하였다.

그림 2 완효성 비료의 주요 경쟁력 분석



① 폐수 정화 및 희소 자원 회수

최근 휴대폰을 포함한 모바일 장치, 전기 자동차, 전기 자전거 등 배터리가 필수로 요구되는 다양한 산업군의 폭발적인 성장에 의한

리튬 이온 배터리 수요의 급증으로 현재 우리나라는 리튬 이차 전지 시장을 선도하고 있다. 특히 전지의 특성을 향상시키기 위해서는 수 세 공정을 통한 리튬 제어 공정이 필수적인데 이때 발생하는 리튬 수 세액은 리튬 이온이 용액 내에 400~5,000 ppm이 포함되어 있는 것으로 알려져 있다. 하지만 일부 기업에서 실시되고 있는 리튬 재활용 공정은 인산리튬 형태로 회수되는 공정이기때 인산의 가격이 비싸고, 폐액 내에 잔류하는 소량의 인 성분으로 인해 폐액 방류 시 부영양화가 야기될 가능성이 높다. 이에 최근 ZLD 시스템에서 적용되는 증발법, 침전 및 용매 추출 기술, 이온체 흡착, 멤브레인 기술 등을 활용해 결정화 후 회수하는 방식이 지속적으로 연구되고 있으며, 이러한 시스템의 적용은 ZLD 시스템의 공정 상용화에 큰 도움이 될 수 있을 것으로 판단된다.

② ZLD 시스템의 경제성 확보

산업, 경제의 성장 및 도시화로 하·폐수 용량이 증가하면서 수질 오염도 증가하고 있으며, 최근의 기후 변화로 국내에서도 가뭄과 같은 자연 재해가 매년 발생하고 있어 수자원의 중요성에 대한 접근이 보다 세부적으로 논의될 필요가 있다. 이에 이미 사용한 물도 적절하게 처리해 재사용함으로써 원활한 자원의 순환을 만들 수 있는 ZLD 시스템의 경우 오·폐수로부터의 수질 오염을 방지하는 현존하는 최고 솔루션이라 할 수 있다. 하지만 무방류 시스템을 운영하기 위해서는 많은 에너지가 소요되어지며, 특히 보통 증발 압축기는 원수 1 톤당 20~25 kWh의 에너지를 소모하고, 결정화기에서는 염분 농도와 점도가 높은 고농도 농축수 1 톤당 52~66 kWh 정도의 많은 에너지를 사용하며, 막대한 설비 비용으로 물의 활용에 비해 경제성이 떨어져 쉽사리 적용시키기에 많은 경제적 문제점을 안고 있다. 이를 위한 대안으로 국립지질과학원 및 SK에코플랜트, 포스코 등과 같은 대기업과 출연(연)을 중심으로 리튬, 황산나트륨, 가성소다 등 희소 자원에 대한 회수 방식에 대한 지속적인 연구 및 상용화가 진행되고 있으며, 최근 낙동강 유역 및 광양만권 등에서는 경제성을 확보한 실증 시설이 검토 및 구축 중에 있어 미래지향적으로는 중소 규모의 현장 맞춤형 확산 방안 마련 및 저가의 시스템 적용에 대한 정책적인 지원이 함께 이루어져야 할 것으로 판단된다. [ASTI](#)

