

DIWS장치를 활용한 배연가스 중 CO₂ 처리 특성 평가

정형진* · 정재억** · 정용준****

*부산가톨릭대학교 사회안전시스템학과/(주)한국이엔지

** (주)한국이엔지

***부산가톨릭대학교 소방방재학과

CO₂ Removal Properties of Flue Gas with DIWS

Hyung-Jin Jung* · Jae-Ouk Jung** · Yong-Jun Jung****

*Social safety system engineering, Catholic University of Pusan/Hankoog eng.

**Hankoog eng.

***Department of Fire&Disaster Prevention, Catholic University of Pusan

(Received : 19 February 2026, Revised : 27 February 2026, Accepted : 27 February 2026)

요약

폐플라스틱과 2차 전지 폐기물 열분해 공정에서 발생하는 CO₂를 마이크로버블 기술을 활용한 DIWS(Dip Injection Wet Scrubber)시스템으로 광물탄산화(CCU)하는 기술적 타당성을 평가하였다. 벤츄리(Venturi) 2단과 아토마이저(Atomizer) 1단을 조합한 시스템에서 용존 산소 농도가 가장 높고 탄산 제거율이 87.8%에 달해 기-액 접촉 효율이 최대화되었다. 단계별 CO₂포집 효율에서 1차 처리의 경우 6~9 vol%의 유입 CO₂ 가스가 1~2 vol%로 유출되어 75.0~83.3%의 포집율이었고, 2차 연속처리를 하면 최대 100% 제거할 수 있었다. DIWS시스템에 NaOH 약품을 주입한 혼성 공정으로도 충분히 광물자원화가 가능한 대안 공정임을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : Atomizer, CO₂광물자원화, DIWS, NaOH

Abstract

The technical feasibility with a microbubble generating technology-based DIWS (Dip Injection Wet Scrubber) system on the carbonization of CO₂ generated from the pyrolysis process of waste plastics and secondary battery waste was examined. In the case of combining a two-stage Venturi and a single-stage Atomizer, the concentration of dissolved oxygen was the highest and the carbon dioxide removal rate reached 87.8%, maximizing gas-liquid contact efficiency. In terms of CO₂ capture efficiency by stage, 6~9 vol% of the inflow CO₂ gas was discharged in to 1~2 vol% from the primary treatment, resulting in a capture rate of 75.0~83.3%. In the case of secondary continuous treatment, up to 100% removal was obtained. The DIWS and NaOH hybrid process can be sufficiently applied as an alternative process for the mineral resource recovery.

Key words : Atomizer, CCU, DIWS, NaOH

1. 서론

DIWS(Dip Injection Wet Scrubber)는 수중에서 미세기포를 생성시키는 장치로서 오염물질과의 반응을 통해 정화 공기를

분리·배출함에 따라 탈취, 산업 유해가스 처리 및 바이오가스 회수 공정 등 환경 분야에서 광범위하게 응용할 수 있다(Jung and Jung 2020; Jung and Jung 2021).

폐플라스틱의 열분해는 원료를 무산소나 저산소 환경에서

*To whom correspondence should be addressed.

Department of Fire and Disaster Prevention, Catholic University of Pusan

E-mail : yjjung@cup.ac.kr

• Hyung-Jin Jung Social safety system engineering, Catholic University of Pusan(jinnnie82@naver.com)

• Jae-Ouk Jung Hankoog eng.,/Chief Executive Officer(kimjungp@naver.com)

• Yong-Jun Jung Department of Fire and Disaster Prevention, Catholic University of Pusan/Professor(yjjung@cup.ac.kr)



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

가열할 때 진행되는 흡열반응에서 탄소와 탄소 고리로 연결된 유기 화학 물질이 환원 환경에서 분해되어 기체 또는 액체로 증발 또는 용융되고, 분해되지 않은 물질은 고형물로 남게 되는데, 분해된 기체를 정제하여 바이오가스 등으로 사용하고, 생성된 액체를 정제한 것이 바로 열분해유(Jang et al., 2024)이며, 이런 반응의 연속된 과정에서 다량의 CO₂가 발생한다.

온실가스 중에서 절대적으로 많은 양을 차지하는 CO₂의 처분 방법은 주로 포집과 저장(CCS, Carbon Capture & Storage) 및 전환(CCU, Carbon Capture & Utilization)으로 구분한다. CCS 기술은 대용량의 CO₂ 처리가 가능하도록 포집하여 주로 지층에 저장하는 방법이고, CCU 기술은 CO₂를 유용한 자원으로 활용하여 부가가치가 높은 다른 탄소화합물로 전환하는 연구로써 CO₂ 저감 효과를 표준화해야 하는 문제를 가지고 있다.

다양한 산업 현장에서 대량으로 배출되는 CO₂를 포집하여 폐기물처럼 지하나 바다 밑에 저장하는 CCS 기술에 집중하여 연구가 진행되어 왔으나, 최근에는 이를 자원화하는 CCU기술이 각광을 받고 있는데, CCU 기술은 CO₂를 폐기물이 아닌 유용한 자원으로 활용하여 부가가치가 높은 다른 탄소화합물(value-added chemicals)로 전환하는 연구로써, 온실가스의 감축을 통한 지구온난화 예방과 함께, 대기 중의 CO₂를 탄소원으로 사용하고 또한 사용 후에는 다시 CO₂의 형태로 대기 중으로 배출하므로 지속 가능한 탄소원의 재활용이란 측면과 아울러 전환 후 고부가가치 탄소화합물의 생성에 따른 추가적인 이익까지도 기대할 수 있어서 그 가능성이 서서히 인정되고 있다(Choi et al., 2012).

다양한 CO₂ 활용 기술 중 광물화 기술은 화학반응을 이용하여 CO₂를 고체 무기물 탄산염으로 전환하는 방법(Jeong et al., 2018)으로 자연에 존재하는 규산염암 등에 포함된 마그네슘 산화물, 칼슘산화물과 같은 알칼리 또는 알칼리 토금속 산화물을 CO₂와 화학적으로 반응하여 MgCO₃, CaCO₃ 등을 생성하게 한다(Lee and Bae, 2018). 세계적으로 탄소중립 목표 선언과 함께 탄소 규제가 강화됨에 따라 다양한 기술로 CO₂를 저감하기 위해 노력중이고, 국내는 기초 연구와 파일럿 수준으로 시장 진입을 위해 기술개발 중이다(Jung and Kim, 2022).

탄소광물화 기술은 배출원에서 포집된 CO₂를 자연산 광물 또는 산업체에서 배출되는 무기계 산업부산물과 반응시켜 새로운 광물로 합성시키는 기술(Ryu and Choi, 2017)로, 천연 광물을 원료로 활용하는 것은 경제성에 문제가 있으나, 화력 발전소의 부산물인 석탄재를 원료로 이용할 경우 산업부산물의 처리, 온실가스배출 저감 및 새로운 산업용 원료 생산 등의 복합적인 효과를 기대할 수 있어서 어느 정도의 경제성을 기대할 수 있는 것으로 알려져 있다(Han et al., 2011).

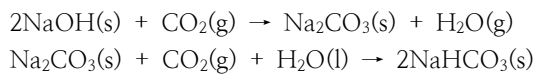
이에 따라, 본 연구에서는 생활폐기물에서 발생하는 페플라 스틱과 2차 전지 폐기물에서 발생하는 합성수지류들을 열분해하여 오일로 회수하고, 회수되지 않은 일부의 유증기를 소각할 때 발생하는 CO₂를 대상으로 DIWS 장치와 NaOH 약품의 혼성 공정을 활용한 시스템의 제거 특성을 평가하였다.

2. 연구방법

2.1 대상 공정 개요

연구 시설은 다년간의 열분해 기술에 기반하여 페플라 스틱과 리튬이온배터리 리사이클링 등 폐자원을 자원화하기 위한 안전하고 친환경적인 실제 처리 시스템을 대상으로 하고 있다. 대상 사업장은 폐배터리와 배터리 제조 공정의 스크랩에서 발생한 블랙매스를 고순도로 회수하고, 폐배터리를 파쇄한 후 500°C의 무산소 조건에서 열분해하여 고순도 블랙매스를 회수하며, 페플라 스틱 액화 기반 압력제어식 열분해로 페플라 스틱에서 열분해유를 연속 생산하고 있다. 하지만, 일련의 단위 연소과정에서 발생하는 혼합가스 중의 다량의 CO₂를 처리하기 위한 포집 설비 기술의 확보에 지속적인 노력이 필요한 상황에 있다.

본 공정에서는 대상 시설에서 발생하는 CO₂를 광물화하기 위해 35% NaOH를 사용하였고, 이때 적용된 NaOH와 CO₂의 화학 반응식은 NaOH와 CO₂의 양에 따라 NaOH가 충분할 때와 CO₂가 충분할 때로 구분하여 다음과 같이 진행된다. NaOH는 CO₂를 효과적으로 포집하여 보통 95% 이상의 흡수율을 나타낸다(Shim et al., 2016).



2.2 연구 시설

본 연구는 다양한 성상의 폐기물 열분해를 통한 오일 회수와 회수되지 않은 일부의 유증기를 소각할 때 발생하는 CO₂를

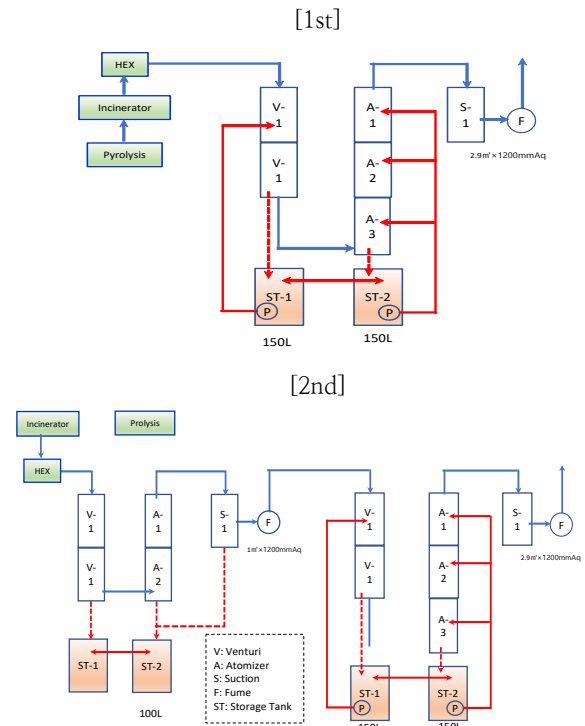


Fig. 1. Diagram of CO₂ treatment flow with DIWS system(1st and 2nd).

포집하기 위한 DIWS 장치를 Fig. 1에 제시한 바와 같이 1차와 2차로 구성하여 시스템의 도입 가능성과 처리 성능 및 최적의 시스템 구성을 비교·평가하였다.

열분해 공정 이후 소각처리 시설에서 배출되는 다량의 CO₂를 포집하는 과정으로 구성하였다. 1차 DIWS시스템은 벤츄리를 2단으로 구성하고, 아토마이저를 3단으로 구성하였으며, NaOH 약품 탱크의 저장 용량은 150L로 설치하였다. 2차 DIWS 시스템은 1차 DIWS 시스템 전반부에 벤츄리 2단, 아토마이저 2단 및 NaOH 약품 탱크의 저장 용량을 100L로 설치하였다. DIWS시스템의 주요 공정인 벤츄리와 아토마이저를 독립적으로 운영하면서 각각의 처리 성능을 비교·평가하였다.

2.3 DIWS 시설 및 분석

본체는 3.2W×4.5L×5H, Atomizer와 Venturi는 1 m³/min으로 운전되도록 DIWS시스템을 설치하였고, 링브로워의 배출 압력은 1,200 mmAq, 흡입압력은 1,100 mmAq로 가동하여 최대 풍량이 2.9 m³/min가 되도록 구성하였다. 항습·함진 CO₂를 송풍기의 흡입 압력을 활용하여 수증기로 유도하고, 수증에서 CO₂를 특수 설계된 세립분산 장치를 통해 60m/sec 이상 고속으로 분사하여 CO₂를 방해판과 강제로 직각 충돌시켜 수증에서 세립·분산되도록 하여 일정한 방향으로 선회류를 형성시키면서 배출하는 방식으로 운전하였다.

Table 1은 1차와 2차 DIWS 장치로 유입되는 CO₂ 기체의 유량, 중량, 온도 및 출구 온도를 구분하여 정리하였다.

시료의 화학적 조성과 광물학적 특성을 규명하기 위해 시료를 10μm 내외로 분쇄한 후, XRD(X-ray Diffraction) 분석을 위해 Philips, Netherlands, X'Pert MPD, PANalytical X'Pert³ Powder를 사용하였다. XRD 정량분석으로 시료 내 주요 구성 광물상을 평가하여, 분쇄 특성과 밀접한 관련이 있는 광물학적 특성을 규명하고자 하였다.

Table 1. Operating condition for main treatment process

Parameter	Process		
	1 st DIWS	2 nd DIWS	
Inlet	Flow(m ³ /min)	1.0	0.323
	Weight(kg/min)	1.29	0.417
	Temp.(°C)	20	18
Outlet	Temp.(°C)	20	20

Table 2. O₂ variation and H₂CO₃ removal using a unit treatment of DIWS system

Process	Average O ₂ conc.(mg/L)		Average pH	H ₂ CO ₃ removal eff.(%)
	Inlet	Outlet		
Ventury(2stages)	13.8	15.4	11.0	38.1
Ventury(2stages)+ Atomizer(1stage)	14.5	20.6	11.0	87.8
Ventury(2stages)+ Atomizer(2stages)	17.0	20.3	11.0	80.6
Ventury(2stages)+ Atomizer(3stages)	16.0	18.1	11.0	58.3
Atomizer(3stages)	14.6	18.4	11.0	60.0

또한, DIWS 시스템이 다량의 CO₂를 포집할 수 있는 공정으로 확인한 후, 제철소의 산업폐기물과 해수담수화 공정의 폐액으로부터 유가 금속을 추출하여 광물자원화 기술로의 적용 가능성도 평가하였다.

3. 연구 결과

3.1 DIWS 단위 장치의 CO₂ 처리 성능 평가

DIWS 시스템의 주요 구성 장치인 벤츄리와 아토마이저 장치의 개별 조합에 따른 배연가스중의 CO₂제거 실험을 독립적으로 수행하였고, Table 2는 벤츄리와 아토마이저의 단위 조합에 따른 유입과 유출 가스의 평균 산소 농도, pH 및 탄산가스의 제거율을 정리한 것이다.

벤츄리 2단만으로 운전하였을 때 유입과 유출 산소의 농도 차이는 1.6 mg/L이었고, 탄산의 제거율은 38.1%였다. 벤츄리 2단과 아토마이저 1단으로 구성하였을 때 산소 농도가 가장 높은 20.6 mg/L가 되었고, 농도 차이도 가장 큰 6.1 mg/L이었으며, 탄산 제거율 또한 가장 높은 87.8%를 나타냈다. 벤츄리 2단에서 아토마이저를 추가하거나, 아토마이저만 운전하더라도 기대보다 높은 산소 농도 증가 및 탄산 제거율이 높지 않은 것으로 나타나, 아토마이저의 역할이 중요한데, DIWS 시스템에서는 벤츄리 2단과 아토마이저 1단이 최적의 조합으로 판단할 수 있었다.

3.2 1차 DIWS 장치의 CO₂ 처리

Fig. 2에 1차 DIWS 장치로 유입 및 유출되는 CO₂ 가스의 포집율을 표시하였다. 장치 유입부에서 CO₂ 가스의 부피 비율은 6~9 vol%였고, 유출구에서는 1~2 vol%로 측정되어 포집율은 75.0~83.3%로 나타났다. 알칼리 화합물 중 범용적이고 CO₂ 흡수효율이 매우 우수한 NaOH 용액으로 선박 배기가스에서 배출하는 CO₂를 64.1 vol%로 흡수하고(Lee et al., 2024), 이후 변환된 화합물(NaHCO₃ 및 Na₂CO₃)과 산화칼슘을 혼합하여 2차 반응-즉, 재배열반응(Metathesis Reaction)을 유도하여 물에 대한 용해도가 매우 낮고, 더욱 안정화된 고형입자 물질(CaCO₃)로 전화하여 고-액분리장치로 용이하게 분리하고, 흡수용액은 회수하여 재사용하는 기술에 대한 연구 결과와 비교하더라도 DIWS 시스템의 CO₂ 포집율이 높은 것으로 판단된다.

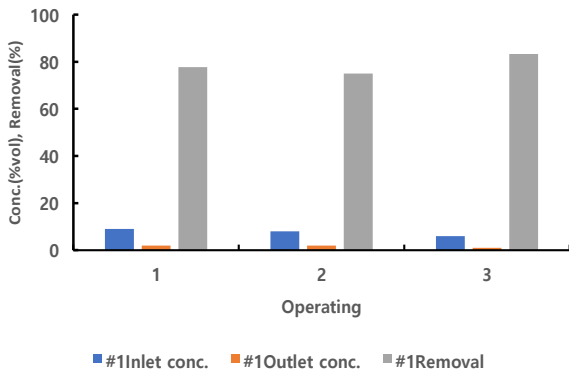


Fig. 2. CO₂ removal properties of DIWS with single stage.

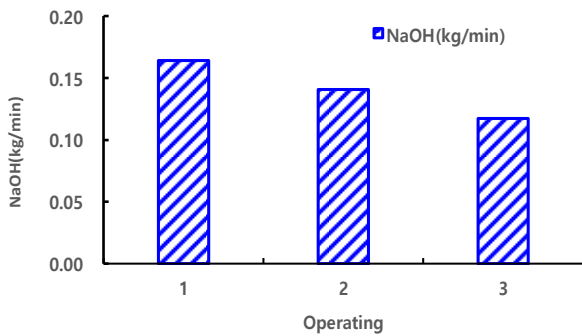


Fig. 3. Required NaOH for single stage.

Na₂CO₃로 광물화하는데 필요한 NaOH의 소요량을 Fig. 3에 표시하였다. 0.117~0.164 kg/min의 약품이 필요하였고, 평균 0.141 kg/min로 산정되었는데, 이때 생성되는 Na₂CO₃의 예상 생성량은 0.25~0.34 kg/min로 산정되었다.

3.3 2차 DIWS 장치의 CO₂ 처리

2차 DIWS 시스템을 사용한 배연가스중의 CO₂제거 실험을 3회 연속 수행한 결과 Fig. 4와 같이 1번 장치의 유입구 농도는 10 vol%에서 유출구 농도는 1 vol%가 되어 90%의 포집 효율을 나타냈다.

계속된 2번 장치에서는 Fig. 5에서와 같이 완전히 제거되어 100%를 포집하여 제거하였다. 배연가스 중에 포함되어 있는 CO₂농도는 평균 7~15 vol% 정도로 추정되며 배기되는 가스량이 많아서 CO₂를 분리해서 처리하는 방안은 경제적

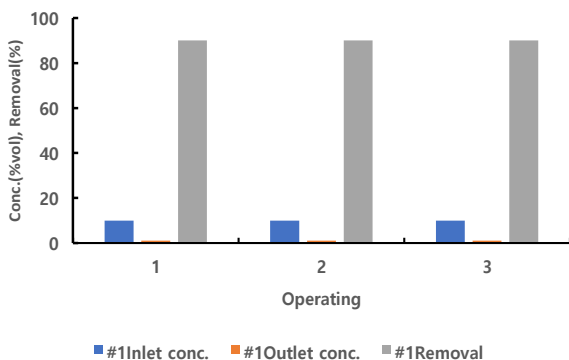


Fig. 4. CO₂ removal properties of DIWS with double stages.

손실이 클 것으로 예상되므로 CO₂농도가 낮은 경우에는 광물화하여 처리하는 것이 가장 바람직할 것으로 판단된다. NaOH를 사용하여 NaCO₃나 NaHCO₃로 변환시켜서 재사용하거나 Ca를 비롯한 치환촉매를 사용하여 NaOH를 재생시켜 재사용하는 방안을 검토할 필요성이 있다. 고농도 CO₂가 발생하는 발전소나 연소 배기가스 내 CO₂를 광물화를 통해 대량으로 탄산염 형태로 고속전환하고, 용액 내 남아있는 CO₂ 및 무기탄소원과 광물화 반응을 통해 80~90%이상의 CO₂ 감축 효과를 기대할 수 있다.

대안 공정으로 NaOH 약품을 상온상압에서 마이크로버블 기술과 융합하는 DIWS 시스템을 적용함으로써 중화반응을 통해 CO₂를 100% 포집 및 제거하였고, 본 연구에서와 같이 금속산화물을 포함하고 있는 대상 처리화학물의 성상에 따라 CO₂와 반응이 가능한 금속산화물을 많이 함유하고 있는 광물과 CO₂를 반응·고정시킬 경우 안정된 탄산염 형태로 전산화되는 CO₂광물화를 기대할 수 있을 것으로 판단하였다.

Na₂CO₃로 광물화하는데 필요한 NaOH의 소요량을 Fig. 6에 표시하였다. 0.058 kg/min의 약품이 필요하였고, 이때 생성되는 Na₂CO₃의 예상 생성량은 0.121 kg/min로 산정되었다.

Fig. 7은 실제 처리장을 대상으로 DIWS 시스템을 운전한 이후의 시료들을 대상으로 XRD 분석을 수행한 결과이다. CCU 실험 이후 장치 내부에서 굼어낸 시료의 주요 구성 성분은 Na₂CO₃로 나타났고, 거품에서는 Na₂CO₃·H₂O로 판단할 수 있다.

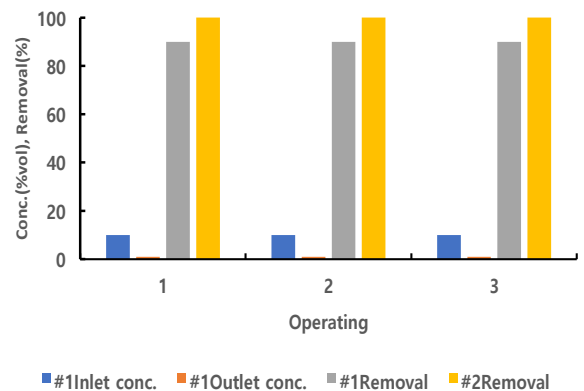


Fig. 5. Concentration and removal efficiency by each stages of DIWS.

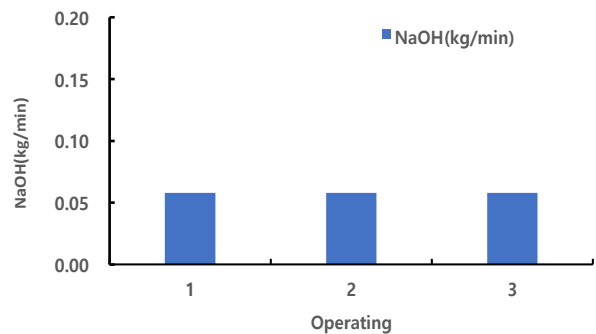


Fig. 6. Required NaOH for double stages.

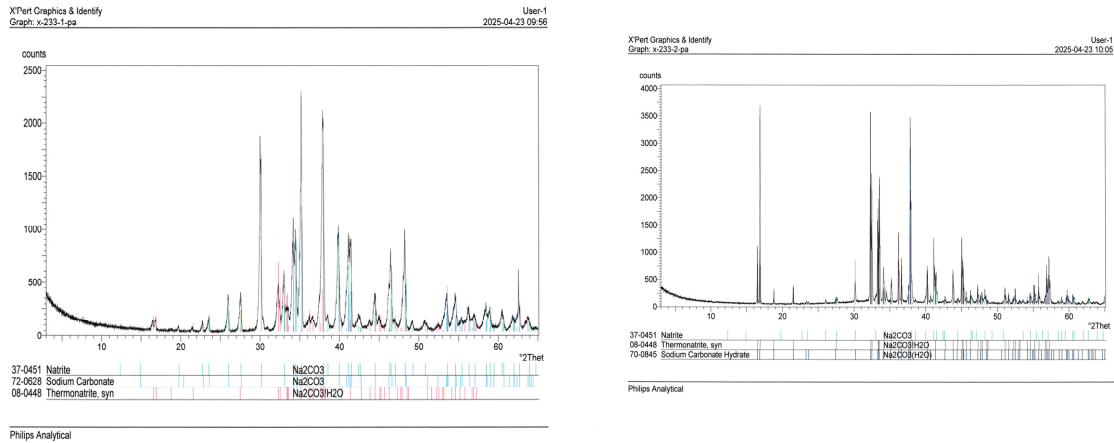


Fig. 7. Comparison of XRD analysis of CCU.

Table 3. Analysis of sample from CCU test

Sample No.	Mineral	Composition (%)	Note
1	Sjogrenite	88.6	Fe2O3
	Calcite	11.4	
	Halite	-	
2	Brucite	91.8	Mg(OH)2
	Aragonite	7.8	
	Calcite	0.5	
	Halite	-	
3	Gypsum	BLQ	SiO2
	Halite		
	Uncertain		

3.4 DIWS 시스템의 광물자원화 활용

Table 3은 이상에서 살펴본 바와 같이 DIWS 장치의 우수한 CO₂ 포집율을 활용한다면 광물자원화 기술로 응용할 수 있는지를 검토한 분석 결과이다.

1번 시료는 제철소의 니켈강에서 니켈을 추출하고 폐기되는 페로니켈 슬래그와 해수담수화 공정에서 발생하는 폐액으로부터 마그네슘 이온을 수산화마그네슘으로 추출한 경우이다. 마그네슘과 철을 포함한 희귀한 탄산염 광물로 화학식이 Mg₆Fe₂(OH)₁₆CO₃·4H₂O의 쇼그레나이트가 88.6%로 주를 이루었고, 2번 시료에서는 화학식이 Mg(OH)₂의 천연 광물인 브루사이트가 91.8%로 주를 이루었다.

이처럼 마이크로버블 발생 장치를 활용한 DIWS 시스템은 NaOH를 적절히 사용할 때 산업 현장의 개별 단위 공정의 배가스로부터 CO₂를 흡수하는 흡수제로 사용함으로써 충분히 광물자원화를 위한 대안 기술로 적용할 수 있을 것으로 판단하였다.

4. 결론

페플라스틱과 2차 전지 폐기물에서 발생하는 합성수지류들을 열분해하여 오일로 회수하고, 회수되지 않은 일부의

유증기를 소각할 때 다량으로 발생하는 CO₂ 배출 공정을 대상으로 미세기포가 발생하는 DIWS 시스템을 이용하여 처리한 평가 결과는 다음과 같다.

- 1) 배기가스 중에 포함되어있는 CO₂의 농도는 평균 7~15 vol%정도로 추정되며 배기되는 가스량이 많아서 CO₂를 분리해서 처리하는 방안은 많은 경제적인 손실이 예상됨에 따라 CO₂ 농도가 낮은 경우에는 광물화하여 처리하는 것이 가장 바람직하다고 판단된다.
- 2) 벤츄리 2단과 아토마이저 1단으로 구성하였을 때 DIWS 시스템내의 산소 농도가 가장 높은 20.6 mg/L가 되었고, 농도 차이도 가장 큰 6.1 mg/L이었으며, 탄산 제거율 또한 가장 높은 87.8%를 나타냈다.
- 3) 1차 DIWS 장치로 유입 및 유출되는 CO₂ 가스는 장치 유입부에서 부피 비율은 6~9 vol%였고, 유출구에서는 1~2 vol%로 측정되어 포집율은 75.0~83.3%로 나타났다.
- 4) 2차 DIWS 시스템을 사용한 배연가스중의 CO₂제거는 1번 장치의 유입구 농도는 10 vol%에서 유출구 농도는 1 vol%가 되어 90%의 포집 효율을 나타냈지만, 연속된 2번 장치로 활용할 경우 100%를 포집하여 제거하였다.
- 5) CO₂ 포집율이 우수한 DIWS 시스템의 마이크로버블을 활용할 때 제철소와 해수담수화 폐기물에서 발생하는 금속으로부터 88.6%의 쇼그레나이트 또는 91.8%의 브루사이트를 검출하여 충분히 광물자원화를 위한 대안 기술로 활용할 수 있을 것으로 판단하였다.

상온상압에서 마이크로버블기술과 NaOH를 사용하여 Na₂CO₃ 또는 NaHCO₃로 변환시켜서 재사용하거나 나아가 Ca을 비롯한 치환 촉매를 사용하여 NaOH를 재생시켜 재사용하는 방안은 충분히 가능성이 있는 대안 공정으로 판단할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2025년도 부산가톨릭대학교 교내연구과제비에 의하여 연구되었습니다.

References

- Choi, JA, Chang, TS, Kim, BS (2012) Recent development of carbon dioxide conversion technology. *Clean Tech.*, 18(3), 229–249. [DOI <https://doi.org/10.7464/ksct.2012.18.3.229>]
- Han, KW, Rhee, CH, Chun, HD (2011). Feasibility of mineral carbonation technology as a CO₂ storage measure considering domestic industrial environment. *Kor. Chem. Eng. Res.*, 49(2), 137–150. [DOI <https://doi.org/10.9713/kcer.2011.49.2.137>]
- Jang, JY, Youn, SH, Lee, JS, Jung, SH (2024) Crude oil extraction technology from organic waste resources: A review. *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, 46(6), 335–347. [DOI <https://doi.org/10.4491/KSEE.2024.46.6.335>]
- Jeong, CJ, Song, HW, Hong, BU, Choi, CS (2018). A study of carbon dioxide reduction through the liquid accelerated carbonation using coal ash. *J. of the Kor. Soc. for Env. Tech.*, 19(1), 1–9. [DOI <http://dx.doi.org/10.26511/JKSET.19.1.1>]
- Jung, ET, Kim, JY (2022). Greenhouse gas emission reduction and economic benefit evaluation of carbon mineralization technology using CFBC ash. *Resources Recycling*, 31(3), 40–52. [DOI <https://doi.org/10.7844/kirr.2022.31.3.40>]
- Jung, JO, Jung, YJ(2020). Treatment of exhaust pollutants from a lime kiln of paper-mill with micro-bubble system. *J. of Env. Sci. Int.*, 29(11), 1025–1032.[DOI <http://doi.org/10.5322/JESI.2020.29.11.1025>]
- Jung, JO, Jung, YJ(2021). Biogas treatment from wastewater treatment plant by micro-bubble generation system with neutralization chemicals. *J. Wet. Res.*, 23(1), 54–59. [DOI <http://doi.org/10.17663/JWR.2021.23.1.54>]
- Lee, KG, Bae, SJ (2018). Carbonation of circulating fluidized bed combustion fly ash with hybrid reaction. *J. of the Kor. Ceramic Soc.*, 55(2), 160–165. [DOI <https://doi.org/10.4191/kcers.2018.55.2.07>]
- Ryu, KW, Choi, SH (2017). The mineral carbonation using steelmaking reduction slag. *Econ. Environ. Geol.*, 50(1), 27–34. [DOI <http://dx.doi.org/10.9719/EEG.2017.50.1.27>]
- Shim, JG, Lee, DW, Lee, JH, Kwak, NS (2016). Experimental study on capture of carbon dioxide and production of sodium bicarbonate from sodium hydroxide. *Environ. Eng. Res.*, 21(3), 297–303. [DOI <http://dx.doi.org/10.4491/eer.2016.042>]