

## 중탄산이온 농축해수의 해양방류에 따른 DIC 거동 특성

권성민\* · † 김강민 · 이종우\*\*

\*한국해양대학교 토목공학과 대학원, † (주)항도엔지니어링, \*\*한국해양대학교 건설공학과 교수

### Characteristics of DIC(Dissolved Inorganic Carbon) Behavior On Sea Water with Bicarbonate Discharge

*Sung-Min Kwon\* · † Kang-Min Kim · Joong-Woo Lee\*\**

*\*Graduate school of Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea*

*† Hangdo Engineering Co., Ltd., Seoul, 08378, Korea*

*\*\*Graduate school of Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea*

**요 약** : 기후변화는 더 이상 피할 수 없는 매우 중요한 문제다. 온실가스 중 큰 비중을 차지하는 이산화탄소 배출을 억제하거나 제거하기 위한 많은 연구들이 진행되고 있다. 최근에는 CCS 중 하나인 지중저장(underground storage)의 대안으로 해양에 이산화탄소를 저장하는 기술인 AWL(Accelerated Weathering of Limestone)을 이용한 해양저장(ocean storage)에 대한 연구가 진행되고 있다. AWL은 이산화탄소를 중탄산이온 형태의 농축수로 만들어 해양에 방류하여 회석·저장시키는 방법으로, 대기 중 재방출이 거의 발생하지 않고 배출된 농축수는 해양의 알칼리도를 높여 해양산성화를 방지할 수 있는 장점이 있다. 금회 연구는 AWL에 의한 방법 중 중탄산이온 농축수의 해양방류 시 이산화탄소 등을 포함하는 용존 무기탄소(DIC, Dissolved Inorganic Carbon)의 거동특성을 파악하기 위한 목적으로 수행하였다. 연구대상 해역은 충분한 수심과 작업효율성이 확보되는 울릉도 부근으로 설정하였으며, 거동특성을 파악하기 위하여 표층방류(surface discharge)와 수중방류(submerged discharge)에 의한 물질확산을 계산할 수 있는 CORMIX모형을 채택하였다. 실험결과, 방류 시점으로부터의 회석률을 고려했을 때, 표층방류 시 나리오가 농축수 방류에 가장 적합한 방식이라고 사료된다.

**핵심용어** : 기후변화, 이산화탄소, CCS, 지중저장, 해양저장, AWL, CORMIX모형, 표층방류, 수중방류

## 1. 서 론

### 1.1 연구 배경 및 목적

기후변화는 더 이상 피할 수 없는 매우 중요한 문제가 되고 있으며, 온실가스 중 그 양이 가장 많아 지구 온난화에 막대한 영향을 미치는 것으로 알려진 가스는 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)로, 우리나라는 1960년부터 현재까지의 이산화탄소 배출 최상위 국가에 해당된다.

금회 연구에서는 연료 연소 또는 산업 공정에서 발생하는 이산화탄소를 포집하거나, 선박이나 파이프라인을 통해 이산화탄소를, 고갈된 석유 및 가스층이나 심해 염분층 등의 지중 저장소에 포집시키는 방법CCS 방법 중 지중저장에 대한 개선안으로 대두되고 있는 AWL(Accelerated Weathering of Limestone) 기술을 근거하여, 이산화탄소를 농축시킨 중탄산(bicarbonate)이온 농축수(해수)의 해양저장(ocean storage)에 대한 영향을 검토하였다.

특히, 우리나라 동해역 중 장시간 방류가 가능하고 충분한 수심이 확보되는 울릉도 전면해역을 대상으로 표층방류(surface discharge)와 수중방류(submerged discharge)에 대한 수치모의를 수행하였다.

### 1.2 연구 방법

먼저, 연구배경에 따라 목적을 명확히 하기 위하여 이산화탄소를 농축시킨 중탄산이온 해수에 대한 특성 등을 포함한 이론적 연구를 수행하고, 이를 근거하여 수질인자(water quality parameter)를 결정하기로 한다.

이어서, 전술한 울릉도 전면해역에 대한 해양물리, 해양수질 등에 대한 제 조건을 파악하고, 이를 고려한 해석이 가능한 방법을 결정하였다. 최종적으로 결정된 방법, 해역, 수질인자에 대한 농도 변화 등을 포함한 거동특성을 파악하기 위한 여러 조건 등을 설정하고 이를 고려하여 설정된 실험안에 대한 수치모의를 수행하였다.

† 교신저자 : 종신회원, kikami72@gmail.com

\* 정회원, sobors@naver.com

\*\* 종신회원, jwlee@kmou.ac.kr

### 1.3 연구 동향

국내에서는 과학기술정보통신부 주도하에 설립된 한국이산화탄소포집 및 처리 연구개발센터(KCRC; Korea Carbon Capture & Sequestration R&D Center)에서 국가 온실가스 감축 계획 일정에 따라 2016년까지 국가 CCS 종합 계획안이 마련될 예정이며, 이 계획안에 대규모 해양 저장 실증 프로젝트 내용이 담길 예정이다.

해외에서는 현재 유럽연합의 연구비를 활용하여 노르웨이, 영국, 네덜란드 등 연구기관과 대학이 공동으로 이산화탄소 거동 및 누출감지를 위한 모니터링·모델링 기법을 개발하고 있다.

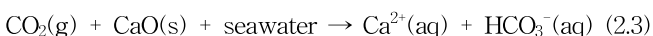
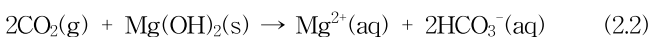
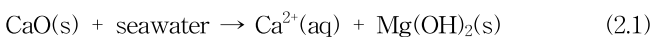
2000년대 초반 CCS 방법 중 지중저장의 대안으로 석회석 중화반응(neutralization)을 이용하여 CO<sub>2</sub>를 해양에 저장하는 AWL 기술이 처음 제안되었으며, 이는 육상의 석회석을 이용하여 CO<sub>2</sub>와 해수의 중화반응을 가속시켜 해양에 중탄산 이온 형태로 방류하는 AWL 기술로 개선되어 제안되었다.

## 2. 중탄산이온 해수

### 2.1 중화반응 특성

전술한 바와 같이, 각종 발전소, 제철소 등의 점오염원에서 배출되는 이산화탄소를 포집하고 이를 해수와 알칼리성(alkaline) 물질을 이용하여 중탄산이온(중탄산염; CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) 농축수로 변환시켜 해양에 방류·회석·저장하게 된다.

이 때 이용하는 알칼리성 물질은 산화칼슘(CaO)으로, 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 중화반응을 통하여 해수 중 용존 무기탄소(DIC; Dissolved Inorganic Carbon; CO<sub>2</sub>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>)의 농도를 극대화시켜 중탄산이온 농축수로 제조된다.



### 2.2 수질인자 선정

해수의 pH 조건에서 탄산염의 90% 이상이 CO<sub>2</sub>(aq)가 아닌 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 형태로 존재한다. 이온 형태로 존재하게 되므로 대기 중으로의 방출 등에 안정적이며, 최근에 문제가 되는 해양의 산성화를 완화시킬 수 있을 것으로 기대된다.

금회 연구에서는 에너지 공학 연구그룹에서 진행하기 어려운 해양저장 시 영향 및 효율 등을 검토하기 위하여 CO<sub>2</sub>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>의 총합(sum)인 용존 무기탄소(DIC)를 수질인자로 선정하였다.

## 3. 대상 해역

### 3.1 연구대상 해역

동해의 특성에 따라 중탄산이온 농축수의 지속적인 해양방류가 가능하고 방류된 농축수가 해중에 회석·저장될 수 있는 조건에 만족하는 해역을 울릉도 해역 전면으로 선정하였다.

울릉도 전면 해역은 충분한 수심이 확보되고 비상시 근거리 에 피항지를 제공하는 등 입지적으로 충분한 조건을 갖춘 곳이다. 따라서, 금회 연구에서는 수심 1,000m가 확보되는 울릉도 전면해역을 연구대상 해역으로 선정하였으며, 해역에 대한 해양물리, 해양화학(수질) 등의 특성을 동계와 하계에 대하여 Table 1에 정리하였다.

Table 1 Summary of ocean conditions

Class.	Summer		Winter	
	Surface	Bottom	Surface	Bottom
Wind (m/s)	2.5	-	2.7	-
Current(m/s)	0.4	Calibra.	0.3	Calibra.
Temper.(°C)	8.0	7.6	7.9	7.5
Salinity(psu)	23.0	5.0	18.0	1.0

Data : Annual Climatological Report(2016), Fisheries Research & Development Institute(2016)

## 4. CORMIX 모델

CORMIX모델은 연속적인 점 오염원 배출로 인한 근역(NRF; Near Field Region) 혼합특성을 해석하는 프로그램이다. 주로 발전소 냉각수, 담수화 시설, 굴착장치 브라인, 도시하수 등과 같은 다양한 배출 유형에 적용가능하며, 강 하구, 심해, 하천, 성층화된 저수지 등 광범위한 주변 조건에 적용할 수 있다.

특히, 방류시스템(discharge system) 최적설계를 위한 도수관(feeder pipe), 확산관(diffuser), 방류구(port) 등의 상세해석을 위한 민감도분석(sensitivity analysis)이 가능하다.

CORMIX 모델은 배출수의 유출궤도, 모양, 회석 등을 예측 및 시각화할 수 있고 밀도류의 거동 양상을 예측할 수 있다. 또한 정상상태, 비정상상태의 조석과 조류에 적용가능하다는 특징을 가진다. 자세한 CORMIX모델의 설명은 김강민 등(2000)에 수록되어 있다.

## 5. 실험 시나리오

### 5.1 방류조건

연구대상 해역으로 선정한 울릉도 전면 해역의 수심은 1,000m로, 중탄산이온 농축수(해수)의 방출형태는 선박에 의하여 표층에 방류하는 경우(Case OS), 수중에 방류하는 경우(Case OM)로, 방류수심은 표층으로부터 2.0m, 300.0m로 역류 방지용 확산관 형태를 가지는 것으로 설정하였다.

방류수인 중탄산이온 농축수의 농도는 자연상태의 해수인 24.94mg/L를 기준하여 5배, 10배, 50배, 100배로 설정하고, 방류 속도는 맹준호 등(2013)의 자료를 토대로 하여 0.5m/s와 1.0m/s를 적용하였다.

### 5.2 해역조건

연구대상 해역의 물리·화학적 조건은 Table 1에 제시한 바와 같이 동계와 하계에 대하여 풍속, 유속, 수온, 염도 등을 고려하여 적용하였다.

## 6. 실험 결과

각 시나리오는 동·하계로 나누어서 실험을 수행하였으며, 중탄산이온 농축도와 방류속도에 따라 DIC 농도의 변화, 희석률, NFR(근역혼합거리) 등의 거동 특성을 파악하여 Fig 1,2에 도식화하고 Table 2,3에 정리하였다.

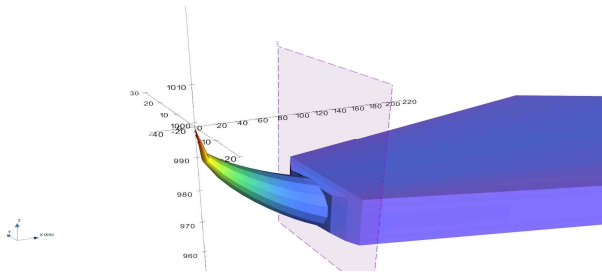


Fig 1. Case OS

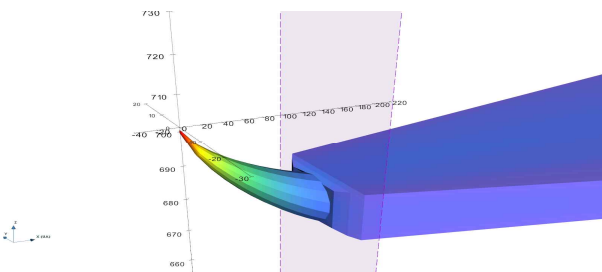


Fig 2. Case OM

Table 2 Summary of Case OS Result

Case OS	Summer		Winter	
	0.5m/s	1.0m/s	0.5m/s	1.0m/s
Dist. to NFR (m)	136.54	139.60	177.37	182.66
Dil. at NFR	440.8	350.7	536.7	428.6
Time to NFR(sec)	301.6	298.11	513.03	508.46
Diffusion Range(m)	1310	1330	1020	1040

Table 3 Summary of Case OM Result

Case OM	Summer		Winter	
	0.5m/s	1.0m/s	0.5m/s	1.0m/s
Dist. to NFR (m)	145.04	147.56	109.56	188.01
Dil. at NFR	368.6	295.4	318.3	358.5
Time to NFR(sec)	336.34	327.70	314.42	535.6
Diffusion Range(m)	1250	1280	960	990

## 7. 결론 및 제언

방류농축수의 플룸 거동은 방류지점, 계절, 방류속도와 관계 없이 음적 부력운동을 갖고 저면으로 이동하며, 주변수와 접촉을 넓히는 양상을 띤다. 또한 실험 안에 따른 가중농도(excess con.)는 변하지만, 소멸계수(decay coe.)에 따른 영향은 미미하게 나타났다.

수중방류 시나리오는 표층방류에 비해 초기혼합구역이 길어지는 등 주변수와의 접촉이 길어지면서, 희석률이 줄어드는 것으로 나타났다. 즉, 표층방류가 더욱 큰 희석률을 보여 가장 효과적인 방식으로 모의되었다.

## 참고 문헌

- [1] 기상연보(2016), 기상청
- [2] 김강민(2000), 도시하수의 해양방류 및 근역혼합특성 분석, 한국항만학회, 제14호제2권, pp. 241-249.
- [3] 동해수산연구소(2016), 국립수산과학원
- [4] 맹준호, 김태윤, 서동환, 서재인, 손민호, 강태순(2013), 발전소 냉각수 배출에 따른 해양환경 영향예측 및 최소화방안 연구, 한국환경정책평가연구원
- [5] 이정현, 박미선, 주지선, 길준우(2017), 알칼리성폐기물과 해수를 이용한 이산화탄소 포집 및 해양저장, 대한환경공학회 제39권4호, pp. 149-154.
- [6] AGHG(2015), Review of Offshore Monitoring for CCS Projects. p. 15
- [7] IEA(International Energy Agency) website.
- [8] Kheshgi, H. S.(1995), "sequestering atmospheric carbon dioxide by increasing ocean alkalinity," Energy, 20, pp. 915-922.
- [9] Statoil website