

지구온난화 저감을 위한 이산화탄소 하이드레이트 용해거동에 대한 수치적 연구

김 남 진¹⁾, 서 향 민²⁾, 천 원 기³⁾

Numerical Study on the Dissolution Behavior of CO₂ Hydrate for Global Warming Mitigation

Namjin Kim, Hyangmin Seo, Wongee Chun

Key words : Carbon dioxide(이산화탄소), Droplet(액적), Plume(액적군), Surface concentration(표면농도), Disposal(분사)

Abstract : The idea of CO₂ sequestration in the ocean is proposed to be an effective mitigation strategy to counteract potential global warming due to the greenhouse effect. Therefore, in the present study, calculations of the dissolution behavior of CO₂ hydrate when liquid carbon dioxide is released at 1,000 m and 1,500 m in depth are performed. The results show the liquid CO₂ injected in the ocean becomes CO₂ bubble at between 350 m and 500 m in depth, and the injection from a moving ship is a more effective method of dissolution than through a fixed pipeline. It so also noted that the ultimate plume generated from CO₂ bubbles repeats expansion and shrinking due to the peeling from a fixed pipeline.

1. 서 론

온실가스인 이산화탄소를 해양에 대량으로 처리하는 기술 중 고정 파이프라인이나 움직이는 배를 이용하여 중층심해에 이산화탄소를 분사시켜 해수에 용해시키는 방법이 현실성이 높은 기술로 알려져 있다. 그러나 중층심해에 분사된 이산화탄소가 빠르게 표면 위로 떠올라 대기 중으로 확산되어 버리면 아무런 의미가 없다. 따라서 분사된 이산화탄소 액적을 빨리 용해시킬 수 있는 방법에 대한 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 Clarion-clipperton 해역과 상대적으로 해수온도가 낮은 동해안의 중층심해에 고정된 파이프라인과 움직이는 배에서 액체 이산화탄소를 분사시킬 경우 해수의 온도와 분사방법에 따른 이산화탄소 액적의 용해거동을 비교 예측하고자 한다.

2. 이론적 고찰

움직이는 배에서 중층심해에 분사된 이산화탄소 액적은 부력에 의해서 상승하며 액적과 해수의 농도차에 의해서 용해가 이루어진다. 따라서 용해거동에 대한 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d(d_{CO_2})}{dz} = -\frac{2k(C_o - C_\infty)}{(U - U_{sw})\rho_{CO_2}}$$

$$-\frac{d_{CO_2}}{3\rho_{CO_2}} \frac{d(\rho_{CO_2})}{dz} \tag{1}$$

이산화탄소 액적은 해수와의 접촉면에 생성되는 하이드레이트 때문에 강체와 같은 유동을 하게 된다. 따라서 물질 전달 계수 k 를 유도하면

$$Sh = 1 + (Sc + 1/Re)^{1/3} 0.752 Re^{0.472} \tag{2}$$

$$k = 0.752 \frac{U^{0.472} D^{2/3}}{d_{CO_2}^{0.528} \nu_{s,w}^{0.139}} \tag{3}$$

이 되고, U 와 D 는 부력속도와 확산계수이다.

또한, 고정된 파이프라인에서 분사된 이산화탄소는

-
- 1) 제주대학교 에너지 공학과
E-mail : jnkim@cheju.ac.kr
Tel : (064)754-3643 Fax : (064)757-9276
 - 2) 제주대학교 에너지 공학과
E-mail : shoo5029@cheju.ac.kr
Tel : (064)754-3643 Fax : (064)757-9276
 - 3) 제주대학교 에너지 공학과
E-mail : wgchun@cheju.ac.kr
Tel : (064)754-3646 Fax : (064)757-9276

액적군을 이루며 상승한다. 따라서 용해거동에 대한 지배방정식은 식(1)을 변형하여 액적군 중심에서의 농도와 속도로 표시하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{d(d_{CO_2})}{dz} = -\frac{2k(C_o - C_m)}{(U + W_m)\rho_{CO_2}} \quad (4)$$

$$-\frac{d_{CO_2}}{3\rho_{CO_2}} \frac{d(\rho_{CO_2})}{dz}$$

3. 계산결과 및 고찰

3.1 용해 깊이

본 연구에서는 해수의 깊이가 10m 변할 때마다 압력이 0.1MPa씩 변한다고 가정하였다.으며, 특정 온도와 압력 하에서 이산화탄소의 물성치는 미국 표준 연구소에서 제공하는 REFPROP 6.01 (1998)과 해수의 물성치는 콜롬비아 대학에서 제공하는 IRI/LDEO Climate Data Library의 데이터를 이용하였다. 특히 동해안의 바다깊이에 따른 해수의 온도는 한국지질연구원에서 실측한 결과를 사용하여 Fig. 1과 Fig. 2에 바다깊이에 따른 해수온도와 이산화탄소의 밀도변화를 나타내었다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 동해안의 경우 바다깊이 300 m이하에서는 온도변화가 거의 없었으며 Clarion-clipperton보다 온도가 낮은 특징을 보여주고 있다. 또한 동해안과 Clarion-clipperton 지역의 경우 각각 바다깊이 약 350 m와 500 m에서 이산화탄소가 액체에서 기체로 기화한다는 것을 Fig. 2에서 확인할 수 있다. 만약 동해안과 Clarion-clipperton 지역에 분사된 액체 이산화탄소가 350 m와 500 m 이하의 깊이에서 용해되지 않으면, 액체 이산화탄소가 기체로 기화되기 때문에 빠른 부력속도를 갖게 되어 대기로 환원될 가능성이 매우 높게 된다. 따라서 동해안과 Clarion-clipperton 지역에 분사된 액체 이산화탄소는 350 m와 500 m 깊이에 도달하기 전까지 해수에 완전히 용해시킬 수 있는 기술이 필요함을 알 수 있다.

3.2 이산화탄소 액적의 표면농도

액체 이산화탄소를 해양에 분사시킬 경우 이산화탄소 액적과 해수의 접촉면사이에서는 하이드레이트가 형성되는데, 이 하이드레이트가 존재하는 이산화탄소 액적의 표면농도와 하이드레이트가 존재하지 않는 이산화탄소의 표면농도 사이에는 큰 차이가 있다. 따라서 본 연구에서는 일본 동경공업대학에서 입수한 순수물에서 하이드레이트가 존재하는 이산화탄소 액적의 표면농도 실험결과를 이용하여 표면농도를 예측할 수 있는 다음과 같은 계산식을 유도하였다.

$$C_o = A + B \times P + C \times P^2 + \alpha \times T + \beta \times T^2 \quad (5)$$

$$A = -1.946 \times 10^4, B = 1.084, C = -6.508 \times 10^{-3}$$

$$\alpha = 135.163, \beta = -2.34 \times 10^{-1}$$

Fig. 3은 일본 동경공업대학에서 측정한 순수물에서 하이드레이트가 존재하는 이산화탄소 액적의 표면농도와 식(5)로 계산한 데이터를 비교하여 나타낸 것이다. 그리고 순수물에서의 표면농도 계산식인 식(5)와 Kim and Kim[2003]이 제안한 순수물과 해수의 표면농도 관계식

$$C_o(\text{seawater}) = 0.95 C_o(\text{pure water}) \quad (6)$$

을 이용하여 바다깊이에 따른 온도와 압력으로 이산화탄소 액적의 표면농도를 구하여 Fig. 4에 표시하였다.

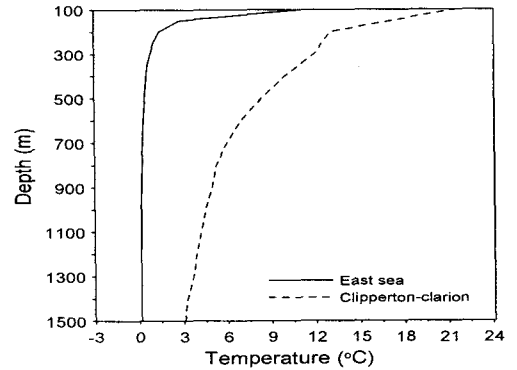


Fig. 1 Temperature distribution of liquid CO₂ along depth.

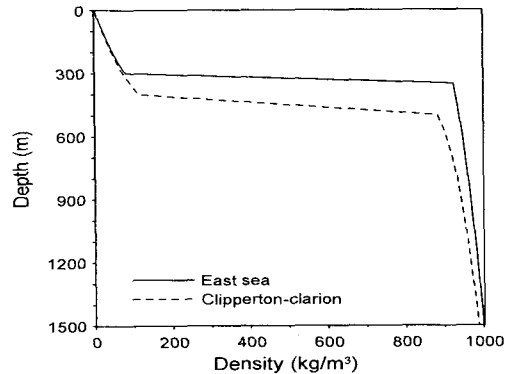


Fig. 2 Density distribution of liquid CO₂ along depth.

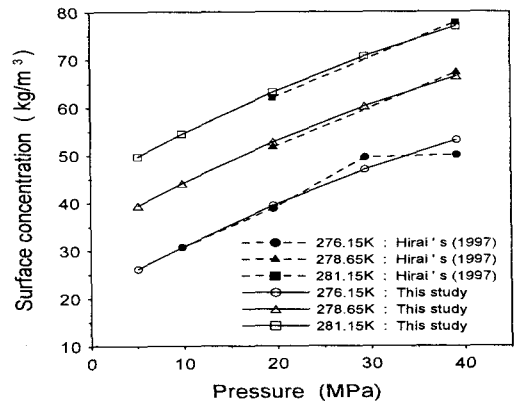


Fig. 3 Surface concentration of a CO₂ droplet with the hydrate in pure water.

그림에서 볼 수 있듯이 해수의 온도가 높은 Clarion-clipperton 지역이 동해안보다 표면농도가 높게 나타났다. 또한, 동해안의 경우 바다깊이가 깊어질수록 이산화탄소 표면농도가 증가하지만 Clarion-clipperton 지역은 오히려 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 동해안의 경우 300 m이하의 바다깊이에서는 온도가 변하지 않기 때문에 이산화탄소의 표면농도가 온도보다는 압력의 영향

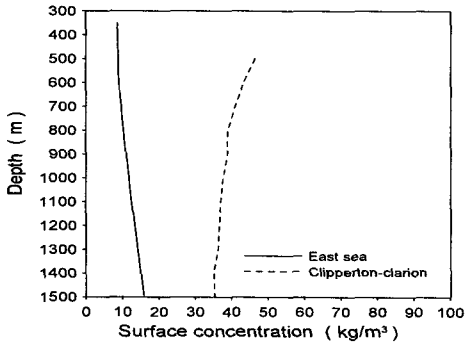


Fig. 4 Surface concentration of a CO₂ droplet with the hydrate along depth in seawater.

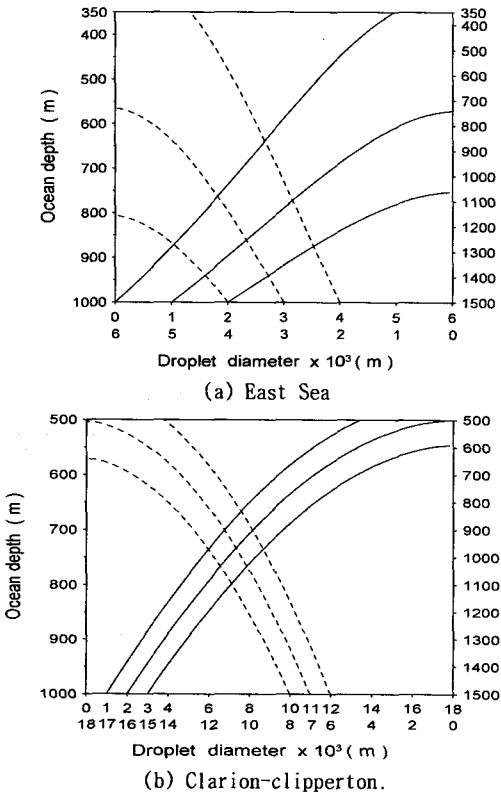
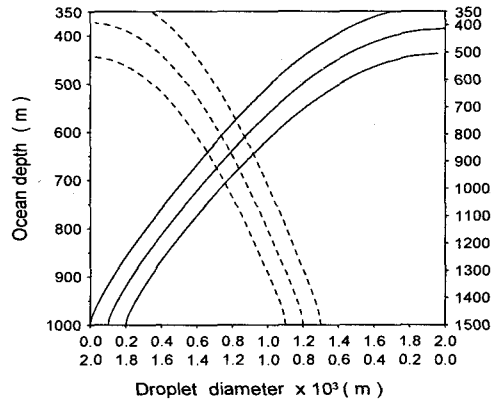


Fig. 5 Dissolution behavior of the CO₂ droplets with the hydrate released from a moving ship.

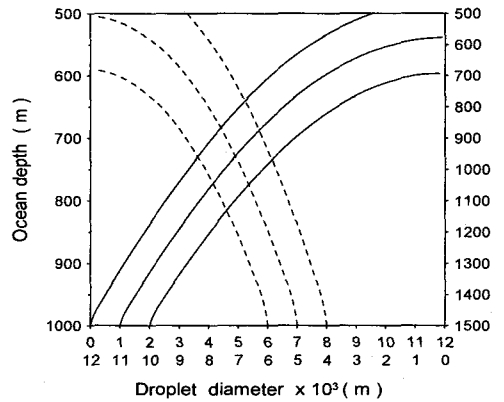
을 더 받기 때문인 것으로 사료된다.

3.3 이산화탄소 액적의 용해거동

이산화탄소의 분사량을 500 MW급 화력발전소에서 배출하는 이산화탄소의 양 133 kg/s를 기준으로 하였으며, 그 분사깊이는 1,000 m와 1,500 m로 하였다. 또한 분사노출



(a) East Sea



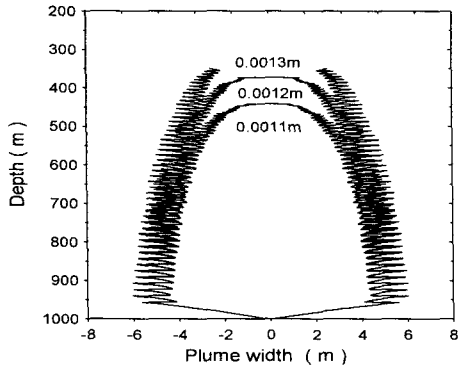
(b) Clarion-clipperton.

Fig. 6 Dissolution behavior of the CO₂ droplets with the hydrate from a fixed pipeline.

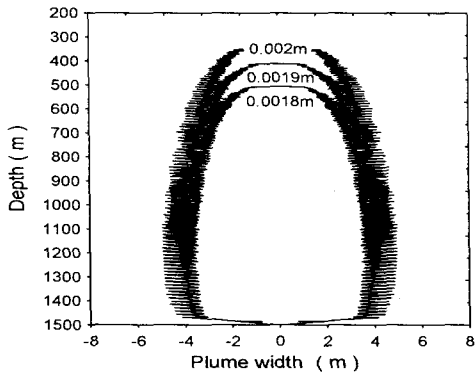
의 직경을 0.1 m로 고정하였으며 액체 이산화탄소는 서로 합체되지 않으면서 작은 크기의 액적으로 쪼개질 수 있는 구조라고 가정하였다. 또한 초기값으로 $\beta=0.1$, $\lambda_1=0.8$, $\lambda_2=1.25$, $\gamma=1.0$ 을 사용하였다.

3.3.1 움직이는 배에서 분사된 이산화탄소 액적의 용해거동

Fig. 5는 동해안과 Clarion-clipperton 지역에서 움직이는 배를 이용하여 바다깊이 1,000 m와 1,500 m에서 액체 이산화탄소를 분사시킬 경우의 용해거동을 나타낸 그림이다. 동해안의 경우 Fig. 5(a)에서 볼 수 있듯이 액적의 초기 지름이 1,000 m와 1,500 m에서 각각 0.003 m와 0.005 m 이하일 경우 350 m 이하의 바다깊이에서 해수에 완전히 용해되었다. 또한 Clarion-clipperton 지역의 경우 Fig. 5(b)에 표시한 것처럼 액적의 초기 지름이 각각 0.011 m와 0.016 m 이하일 경우 500 m 이하의 깊이에서 완전히 해수에 용해되었다. 따라서 이산화탄소를 해양에 용해시키기 위해서는 분사되는 액적의 초기 지름이 중요함을 알 수 있고, 동해안보다 해수온도가 높은 Clarion-clipperton 지역이 용해에 유리함을 알 수 있다.



(a) 1,000 m



(b) 1,500 m

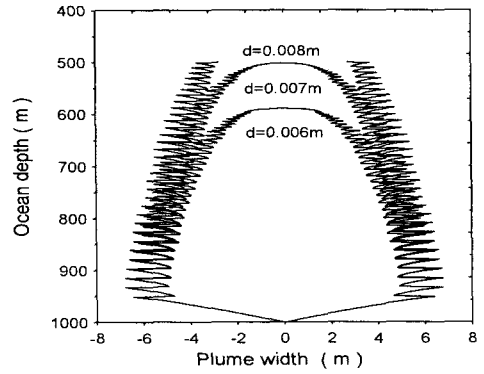
Fig. 7 Plume width (2b) on the CO₂ droplets released from a fixed pipeline in the East Sea

3.3.2 고정된 파이프라인에서 분사된 이산화탄소 액적군의 용해거동

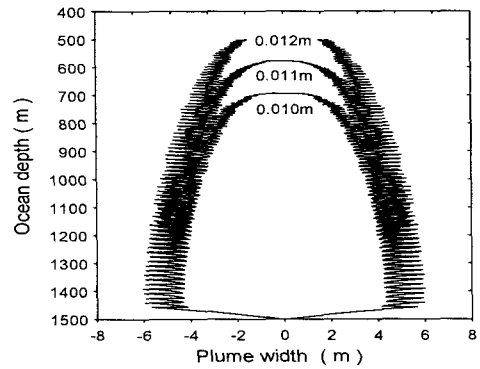
고정된 파이프라인을 이용하여 바다깊이 1,000 m와 1,500 m에서 분사된 이산화탄소 액적군의 용해거동을 Fig. 7에 표시하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 동해안의 경우 분사액적의 초기 지름을 1,000 m와 1,500 m에서 각각 0.0012 m와 0.0019 m 이하일 경우 350 m 이하의 깊이에서 완전히 해수에 용해되었고, Clarion-clipperton 지역의 경우 각각 0.007 m와 0.011 m 이하일 경우 500 m 이하의 깊이에서 완전히 해수에 용해되었다. 또한 Fig. 7과 Fig. 8에서 볼 수 있듯이 액적군 내의 밀도와 주변의 밀도차로 인하여 발생하는 필링의 영향으로 수축팽창을 반복하고 있음을 알 수 있다. 따라서 움직이는 배에서 분사하는 경우와 같이 파이프라인에서 분사할 경우도 해수의 온도가 높은 Clarion-clipperton 지역이 용해에 유리하였으며, Fig. 5와 Fig. 6을 비교하면 파이프라인에서 분사하는 방법보다는 움직이는 배에서 분사하는 방법이 이산화탄소 용해에 더 효과적이라는 사실을 알 수 있다.

4. 결 론

동해안과 Clarion-clipperton 지역의 경우 바다깊이 350 m와 500 m에서 이산화탄소는 액체에서 기체로 기화되므로 350 m와 500 m 이하의 깊이에서 해수에 완전히 용해



(a) 1,000 m



(b) 1,500 m

Fig. 8 Plume width (2b) on the CO₂ droplets released from a fixed pipeline in Clarion-clipperton.

시키는 기술이 필요함을 알 수 있었다. 또한, 액적군은 밀도차 때문에 발생하는 필링의 영향으로 수축과 팽창을 반복함을 확인하였고, 파이프라인보다는 움직이는 배에서 분사하는 방법이 이산화탄소 용해에 더 효과적임을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Clift, R., Grace, J. R. and Weber, M. E., 1978, Bubbles, Drops and Particles, Academic Press, pp. 97-125.
2. Hirai, S., Tabe, Y., Tanaka, G., and Okazaki, K., 1998, Advanced CO₂ Ocean Dissolution Technology for Longer Term Sequestration with Minimum Biological Impacts, 4th Int. Conf. on Greenhouse Gas Control Technologies, Interlaker, Switzerland.
3. Kim, N. J. and Kim, C. B., 2003, Simulation model for dissolution of liquid CO₂ discharged at intermediate depth of ocean, Korea Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 15, No. 9, pp. 718-726.
4. Liro, C. R., Adams, E. E. and Herzog, H. J., 1991, Modeling the Release of CO₂ in the Deep Ocean, MIT-EL 91-002.