

액체 이산화탄소 해양 고정화에 대한 수치적 연구

김 남 진, 천 원 기, 김 중 보*
제주대학교 에너지공학과, *인하대학교 기계공학과

Numerical Study on the Ocean Sequestration of Liquid CO₂

Nam-Jin Kim, Won-Gee Chun, Chong-Bo Kim*

Department of Nuclear & Energy Engineering, Cheju National University, Jeju 690-756, Korea

*Department of Mechanical Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

(Received November 29, 2005; revision received February 7, 2006)

ABSTRACT: The idea of carbon dioxide 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 carbon dioxide when liquid carbon dioxide is released at 1,000 m and 1,500 m in depth by fixed pipeline 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.

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

기 호 설 명

A : 이산화탄소 액적의 표면적 [m^2]
 B : 부력 [kg/sec^2]
 b : 액적군 반경 [m]
 C_D : 마찰계수
 C_m : 액적군 중심농도 [kg/m^3]
 C_o : 이산화탄소 액적의 표면농도 [kg/m^3]
 $\overline{C_w}$: 액적군 내 평균 농도 [kg/m^3]
 C_∞ : 해수의 이산화탄소 농도 [kg/m^3]
 D : 확산계수 [m^2/s]
 d_{CO_2} : 이산화탄소 액적의 지름 [m]

D_n : 분사노즐 직경 [m]
 d_{rel} : 분사지점에서 액적의 지름 [m]
 d_z : 깊이 z 에서 액적의 지름 [m]
 g : 중력가속도 [m/sec^2]
 k : 물질전달계수 [$W/m \cdot K$]
 M : 모멘트 [$kg \cdot m/sec$]
 M_{sw} : 해수의 분자량 [$kg/kmole$]
 P : 압력 [MPa]
 q_{rel} : 분사지점에서 체적유량 [m^3/sec]
 q_z : 깊이 z 에서 체적유량 [m^3/sec]
 R : 액적군 반경 [m]
 T : 온도 [K]
 U : 이산화탄소 부력속도 [m/sec]
 U_{sw} : 해수의 상승속도 [m/sec]
 V : 액적의 체적 [m^3]
 V_{CO_2} : 이산화탄소 몰체적 [$m^3/kmol$]

† Corresponding author

Tel.: +82-32-860-7313; fax: +82-32-868-1716

E-mail address: cbkim@inha.ac.kr

- \overline{W} : 액적군 상승속도 [m/sec]
- W_m : 액적군 중심속도 [m/sec]
- y : 분사지점에서의 수직거리 [m]
- z : 바다깊이 [m]

그리스 문자

- β : 해수 전환계수
- γ : 모멘텀 증폭계수
- λ_1, λ_2 : 속도에 따른 액적군 확장률
- μ_{sw} : 해수의 점성계수 [$N \cdot sec/m^2$]
- ν_{sw} : 해수의 동점성계수 [m^2/sec]
- ρ_a : 액적군 주변 해수밀도 [kg/m^3]
- ρ_{CO_2} : 이산화탄소의 밀도 [kg/m^3]
- ρ_{mix} : 액적군 내 평균 밀도 [kg/m^3]
- ρ_{ref} : 분사지점 주변 해수밀도 [kg/m^3]
- ρ_{sw} : 해수밀도 [kg/m^3]
- ρ_w : 액적군 내의 해수밀도 [kg/m^3]
- ρ_{wm} : 액적군 중심의 해수밀도 [kg/m^3]
- \emptyset : 해수의 무차원 상관계수

1. 서론

온실가스인 이산화탄소를 해양에 대량으로 처리하는 기술로는 고정된 수중 파이프라인 또는 움직이는 배에서 1,000~1,500 m의 중층심해로 분사시켜 용해키는 방법과 이산화탄소의 밀도가 해수의 밀도보다 크게 되는 3,000 m 이하의 심해저에 저장하는 방법이 있다. 심해저에 저장하는 방법은 파이프라인 설계의 어려움과 경제성 그리고 산성화로 인한 해양 생태계의 파괴를 가져올 수 있는 것으로 알려져 있지만 고정 파이프라인이나 움직이는 배를 이용하여 중층심해에 이산화탄소를 분사시켜 해수에 용해시키는 방법은 기술적, 경제적, 환경적인 측면에서 상대적으로 가능성이 높은 기술로 알려져 있다.⁽¹⁾ 그러나 중층심해에 분사된 이산화탄소가 빠르게 표면 위로 떠올라 대기 중으로 확산되어 버리면 아무런 의미가 없다. 따라서 분사된 이산화탄소 액적을 빨리 용해시킬 수 있는 분사방법, 분사위치, 분사깊이, 분사액적의 크기에 대한 연구가 필요하다.

Teng et al.⁽²⁾은 해수면에서 1,000 m까지의 이산화탄소 용해도와 물질전달률을 예측하였으며, Hirai et al.⁽³⁾은 용해와 저장을 동시에 이용하는 새로운

기술을 제시하였다. Aya et al.⁽⁴⁾는 순수물과 해수에서의 하이드레이트 생성에 대한 연구를 수행하였으며, Kim and Kim⁽⁵⁾은 해수에서 단일액적의 용해거동을 계산하였다.

본 연구에서는 난류지역인 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

2.1 움직이는 배에서 분사된 이산화탄소 액적의 용해거동

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

$$\frac{d}{dt}(\rho_{CO_2} V) = -kA(C_o - C_\infty) \tag{1}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{6} \pi d^3_{CO_2} \rho_{CO_2} \right) = -\pi d^2_{CO_2} k(C_o - C_\infty) \tag{2}$$

$$\frac{d}{dt}(d_{CO_2}) = -\frac{2k(C_o - C_\infty)}{\rho_{CO_2}} - \frac{d_{CO_2}}{3\rho_{CO_2}} \cdot \frac{d\rho_{CO_2}}{dt} \tag{3}$$

여기서

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(d_{CO_2}) &= \frac{dd_{CO_2}}{dz} \cdot \frac{dz}{dt} \\ &= \frac{dd_{CO_2}}{dz} (U + U_{sw}) \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(\rho_{CO_2}) &= \frac{d\rho_{CO_2}}{dz} \cdot \frac{dz}{dt} \\ &= \frac{d\rho_{CO_2}}{dz} (U + U_{sw}) \end{aligned} \tag{5}$$

이 되므로, 이산화탄소 액적의 지름변화율을 바다 깊이(z)의 함수로 나타낼 수 있다.

$$\frac{d(d_{CO_2})}{dz} = - \frac{2k(C_o - C_\infty)}{(U + U_{sw})\rho_{CO_2}} - \frac{d_{CO_2}}{3\rho_{CO_2}} \frac{d(\rho_{CO_2})}{dz} \quad (6)$$

이산화탄소 액적은 해수와의 접촉면에 생성되는 하이드레이트 때문에 강체와 같은 유동을 하게 된다. 따라서 물질전달계수 k 는 다음의 식으로부터 유도할 수 있다.^(6,7)

$$Sh = 1 + (Sc + 1/Re)^{1/3} 0.752 Re^{0.472} \quad (7)$$

우변의 Sc 는 $1/Re$ 보다 크기 때문에 다음 식으로 간략히 나타낼 수 있다.

$$Sh = 1 + 0.752 Re^{0.472} Sc^{1/3} \quad (8)$$

우변의 첫번째 항은 두번째 항에 비해서 매우 작기 때문에 무시할 수 있다. 따라서 다음 식으로 정리할 수 있다.

$$Sh = 0.752 Re^{0.472} Sc^{1/3} \quad (9)$$

$Re = Ud_{CO_2}/\nu_{sw}$ 와 $Sc = \nu_{sw}/D$ 를 대입하여 물질전달계수 k 로 정리하면

$$\frac{k d_{CO_2}}{D} = 0.752 \left(\frac{U d_{CO_2}}{\nu_{sw}} \right)^{0.472} \left(\frac{\nu_{sw}}{D} \right)^{1/3} \quad (10)$$

$$k = 0.752 \frac{U^{0.472} D^{2/3}}{d_{CO_2}^{0.528} \nu_{sw}^{0.139}} \quad (11)$$

이 된다. 여기서 부력속도 U 와 확산계수 D 는 다음의 식으로 표현된다.

$$U = \sqrt{\frac{4d_{CO_2}(\rho_{sw} - \rho_{CO_2})g}{3C_D \rho_{sw}}} \quad (12)$$

$$D = \frac{7.4 \times 10^{-8} (\Phi M_{sw})^{0.5} T}{\mu_{sw} V_{CO_2}^{0.6}} \quad (13)$$

2.2 고정된 파이프라인에서 분사된 이산화탄소 액적군의 용해거동

고정된 파이프라인에서 분사된 이산화탄소는

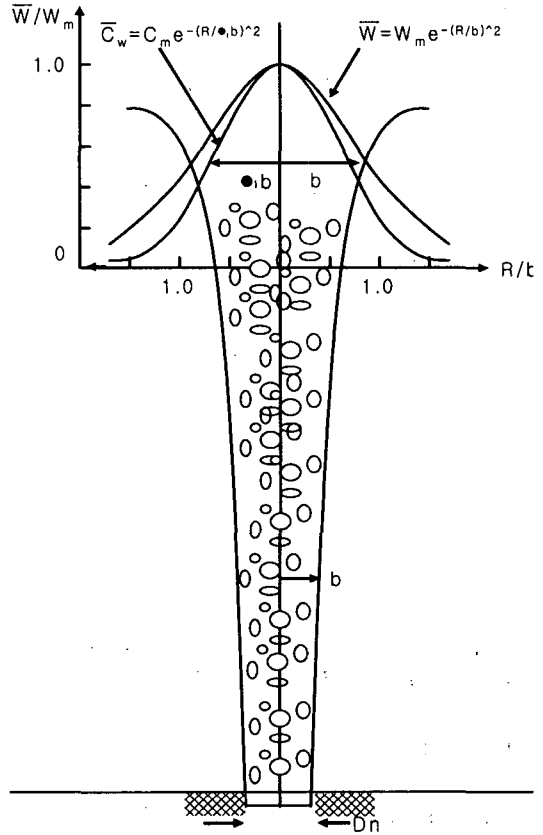


Fig. 1 Schematic of a plume.

Fig.1과 같이 액적군을 이루며 상승한다. 따라서 용해거동에 대한 지배방정식은 식(6)을 변형하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{d(d_{CO_2})}{dz} = - \frac{2k(C_o - \bar{C}_w)}{(U + \bar{W})\rho_{CO_2}} - \frac{d_{CO_2}}{3\rho_{CO_2}} \frac{d(\rho_{CO_2})}{dz} \quad (14)$$

또한 액적군 중심에서의 농도와 속도로 표시하면

$$\frac{d(d_{CO_2})}{dz} = - \frac{2k(C_o - C_m)}{(U + W_m)\rho_{CO_2}} - \frac{d_{CO_2}}{3\rho_{CO_2}} \frac{d(\rho_{CO_2})}{dz} \quad (15)$$

이고, 바다깊이에 따른 이산화탄소의 체적유량은

$$q_z = q_{rel} \left(\frac{d_z}{d_{rel}} \right)^3 \quad (16)$$

$$= \int_R 2\pi \bar{C}_w (U + \bar{W}) R dR$$

이고, 액적군 임의의 위치에서 속도와 농도는

$$\bar{W} = W_m e^{(-R^2/b^2)} \quad (17)$$

$$\bar{C}_w = C_m e^{(-R^2/(\lambda_1 b^2))} \quad (18)$$

이 된다. 따라서 액적군 중심에서의 최대농도는 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$C_m = \frac{\frac{q_z}{\pi b^2 \lambda_1}}{W_m \frac{1}{1 + \lambda_1^2} + U} \quad (19)$$

유체의 체적유량은

$$Q = \int_0^\infty (1 - \bar{C}_w) 2\pi \bar{W} R dR \quad (20)$$

$$\approx \int_0^\infty 2\pi \bar{W} R dR = \pi W_m b^2$$

이고, 액적군 내로 유입되는 물의 전환속도는

$$W_e = \beta W_m \quad (21)$$

$$\frac{dQ}{dy} = 2\pi b W_e = 2\pi \beta b W_m \quad (22)$$

$$\frac{d}{dy} (W_m b^2) = 2\beta b W_m$$

가 성립한다. 또한 액적군에 작용하는 유일한 외력이 부력이라고 가정하면 운동량방정식은⁽⁸⁾

$$\frac{dM}{dy} = B_y, \quad (23)$$

$$\frac{d}{dy} \int_0^\infty 2\pi \gamma \bar{W}^2 \rho_{ref} R dR = \int_0^\infty 2\pi g (\rho_a - \rho_{mix}) R dR$$

이 되고

$$\rho_a = \rho_w - \Delta \rho_{wm} e^{-R^2/(\lambda_2 b^2)} \quad (24)$$

$$\rho_{mix} = \bar{C}_w \rho_{CO_2} + (1 - \bar{C}_w) \rho_w \quad (25)$$

를 식(23)에 대입하면

$$\frac{d}{dy} (b^2 W_m^2) = \frac{2gb^2}{\gamma} \left(C_m \lambda_1^2 \frac{\rho_w - \rho_{CO_2}}{\rho_{ref}} - \lambda_2^2 \frac{\Delta \rho_{wm}}{\rho_{ref}} \right) \quad (26)$$

이 된다. 따라서 식(22)에서

$$\frac{d}{dy} (W_m) b^2 + 2b W_m \frac{db}{dy} = 2\beta b W_m \quad (27)$$

$$\frac{db}{dy} = \beta - \frac{b}{2W_m} \frac{dW_m}{dy}$$

가 되고, 식(26)에서

$$W_m b^2 \frac{dW_m}{dy} + b W_m^2 \frac{db}{dy} = \frac{gb^2}{\gamma} \left(C_m \lambda_1^2 \frac{\rho_w - \rho_{CO_2}}{\rho_{ref}} - \lambda_2^2 \frac{\Delta \rho_{wm}}{\rho_{ref}} \right) \quad (28)$$

가 된다. 식(28)에 식(27)을 대입하여 액적군 중심에서 깊이에 따른 최대속도를 구하면

$$\frac{dW_m}{dz} = \frac{2g}{\gamma W_m} \left(C_m \lambda_1^2 \frac{\rho_w - \rho_{CO_2}}{\rho_{ref}} - \lambda_2^2 \frac{\Delta \rho_{wm}}{\rho_{ref}} \right) + \frac{2\beta W_m}{b} \quad (29)$$

이고, 액적군의 반경은 다음과 같다.

$$\frac{db}{dz} = 2\beta - \frac{gb}{\gamma W_m^2} \left(C_m \lambda_1^2 \frac{\rho_w - \rho_{CO_2}}{\rho_{ref}} - \lambda_2^2 \frac{\Delta \rho_{w,m}}{\rho_{ref}} \right) \quad (30)$$

만약 식(30)의 우변에서

$$C_m \lambda_1^2 \frac{\rho_w - \rho_{CO_2}}{\rho_{ref}} < \lambda_2^2 \frac{\Delta \rho_{w,m}}{\rho_{ref}} \quad (31)$$

이 발생할 경우 액적군 내의 해수가 액적군 주변으로 떨어져 나가는 필링현상이 발생하게 된다. 또한 액적군 주변의 해수 밀도차로 인한 부력은

$$B_w = \int_0^\infty 2\pi(\rho_{ref} - \rho_w)RdR \quad (32)$$

이 되므로

$$\frac{d}{dy} \int_0^\infty 2\pi \bar{W}(\rho_{ref} - \rho_w)RdR = 2\pi b\beta W_m(\rho_{ref} - \rho_a) \quad (33)$$

가 성립하고, 식(17), 식(22), 식(24)를 대입하여 정리하면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d}{dz} \Delta\rho_{wm} = -\frac{1 + \lambda_2^2}{\lambda_2^2} \frac{d\rho_a}{dz} - \frac{2\beta\Delta\rho_{wm}}{b} \quad (34)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 용해깊이

본 연구에서는 해수의 깊이가 10 m 변할 때마다 압력이 0.1 MPa씩 변한다고 가정하였으며, 특정 온도와 압력 하에서 이산화탄소의 물성치는 미

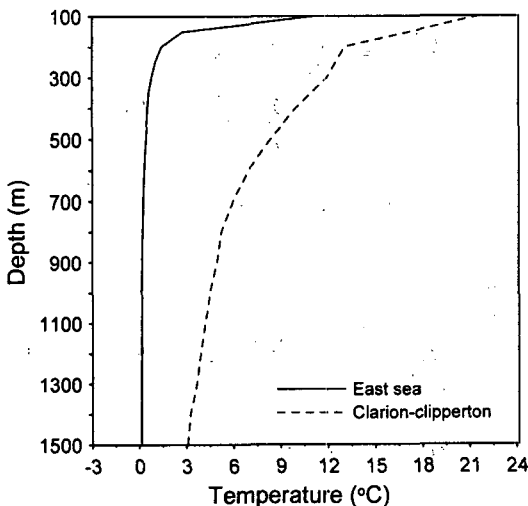


Fig. 2 Temperature distribution of liquid CO₂ along depth.

표준연구소에서 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 결과로 Fig. 2와 Fig. 3에 바다깊이에 따른 해수온도와 이산화탄소의 밀도변화를 나타내었다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 동해안의 경우 바다깊이 300 m 이하에서는 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. 3에서 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 이산

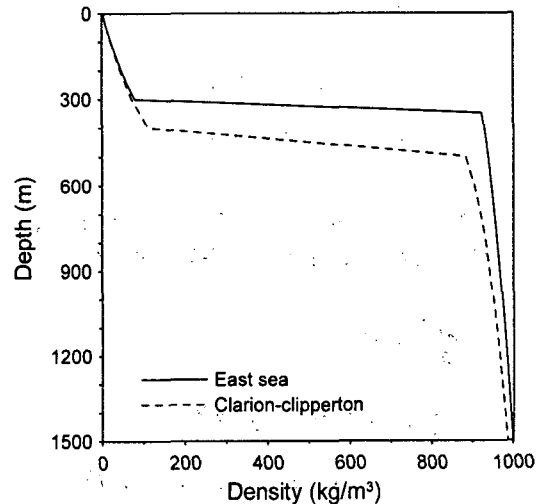


Fig. 3 Density distribution of liquid CO₂ along depth.

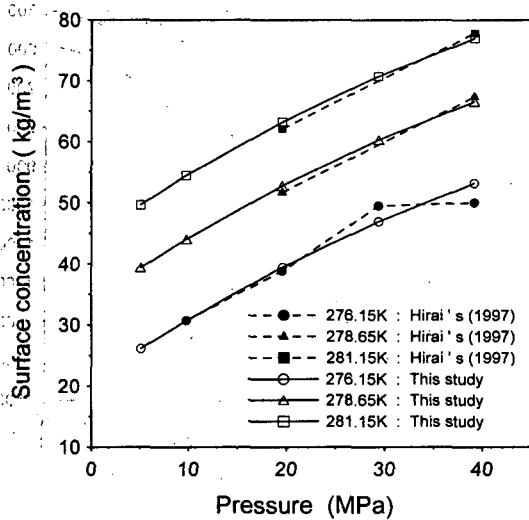


Fig. 4 Surface concentration of a CO₂ droplet with the hydrate in pure water.

화탄소 액적과 해수의 접촉면 사이에서는 하이드레이트가 형성되는데, 이 하이드레이트가 존재하는 이산화탄소 액적의 표면농도와 하이드레이트가 존재하지 않는 이산화탄소의 표면농도 사이에는 큰 차이가 있다. 따라서 본 연구에서는 일본 동경공업대학의 순수물에서 하이드레이트가 존재하는 이산화탄소 액적의 표면농도 실험결과를 이용하여 표면농도를 예측할 수 있는 다음과 같은 계산식을 유도하였다.

$$C_o = A + B \times P + C \times P^2 + \alpha \times T + \beta \times T^2 \quad (35)$$

$$A = -1.946 \times 10^4$$

$$B = 1.084$$

$$C = -6.508 \times 10^{-3}$$

$$\alpha = 135.163$$

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

Fig. 4는 일본 동경공업대학에서 측정된 순수물에서 하이드레이트가 존재하는 이산화탄소 액적의 표면농도와 식(35)로 계산한 데이터를 비교하여 나타낸 것이다. 그리고 순수물에서의 표면농도 계산식인 식(35)와 Kim and Kim⁽⁵⁾이 제안한 순수물과 해수의 표면농도 관계식을 이용하여 바다깊이에 따른 온도와 압력으로 이산화탄소 액적의 표면농도를 구하여 Fig. 5에 표시하였다.

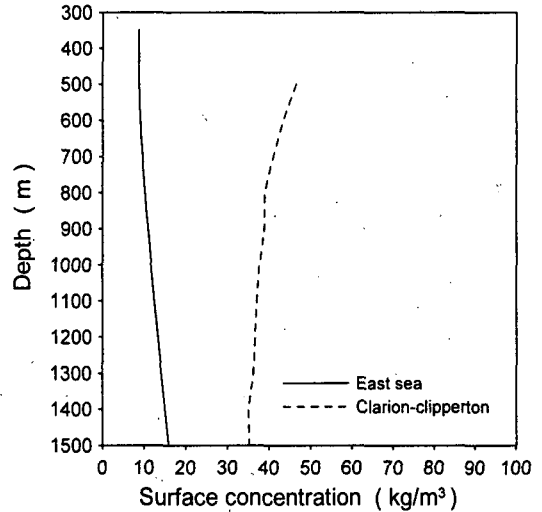


Fig. 5 Surface concentration of a CO₂ droplet with the hydrate along dept in seawater.

$$C_o(\text{seawater}) = 0.95 C_o(\text{pure water}) \quad (36)$$

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 m 이하의 바다깊이에서는 온도가 변하지 않기 때문에 이산화탄소의 표면농도가 온도보다는 압력의 영향을 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 분사노즐의 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.^(9,10)

3.3.1 움직이는 배에서 분사된 이산화탄소 액적의 용해거동

Fig. 6은 동해안과 Clarion-clipperton 지역에서

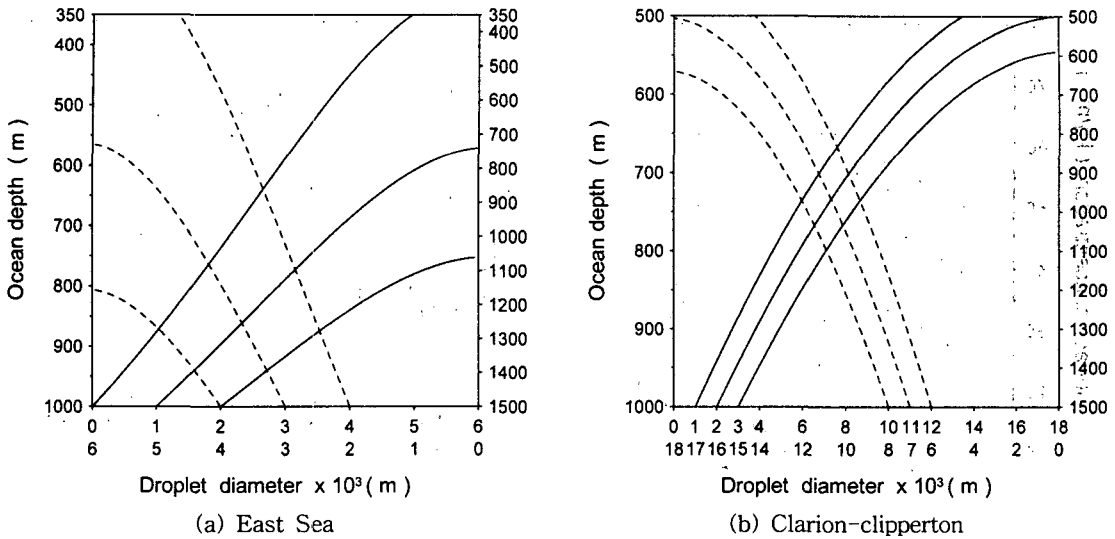


Fig. 6 Dissolution behavior of the CO₂ droplets with the hydrate released from a moving ship.

움직이는 배를 이용하여 바다깊이 1,000 m와 1,500 m에서 액체 이산화탄소를 분사시킬 경우의 용해 거동을 나타낸 그림이다. 동해안의 경우 Fig. 6(a)에서 볼 수 있듯이 액체의 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. 6(b)에 표시한 것처럼 액체의 초기 지름이 각각 0.011 m와 0.016 m 이하일 경우 500 m 이하의

깊이에서 완전히 해수에 용해되었다. 따라서 이산화탄소를 해양에 용해시키기 위해서는 분사되는 액체의 초기 지름이 중요함을 알 수 있고, 동해안보다 해수온도가 높은 Clarion-clipperton 지역이 용해에 유리함을 알 수 있다.

3.3.2 고정된 파이프라인에서 분사된 이산화탄소 액적군의 용해거동

고정된 파이프라인을 이용하여 바다깊이 1,000

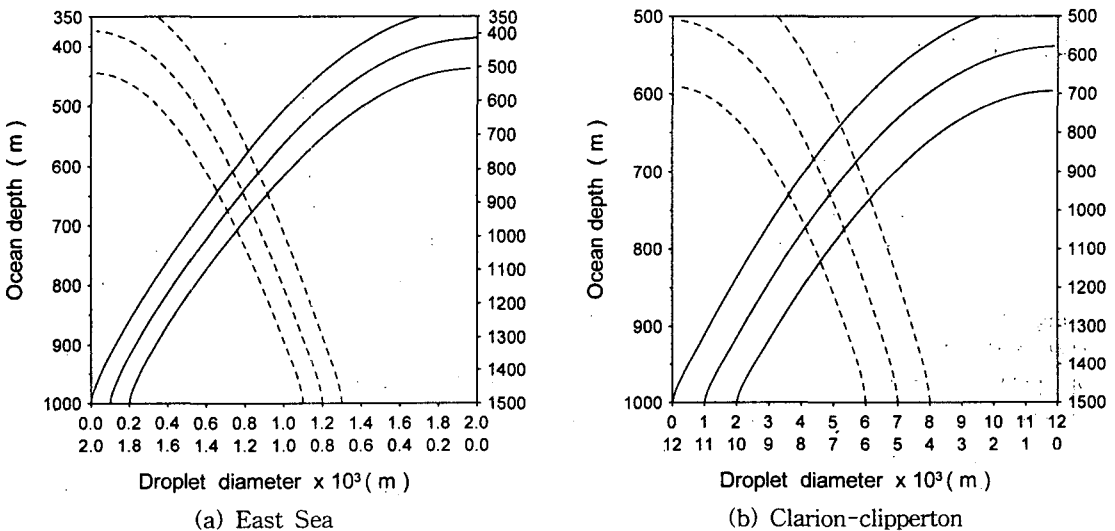


Fig. 7 Dissolution behavior of the CO₂ droplets with the hydrate from a fixed pipeline.

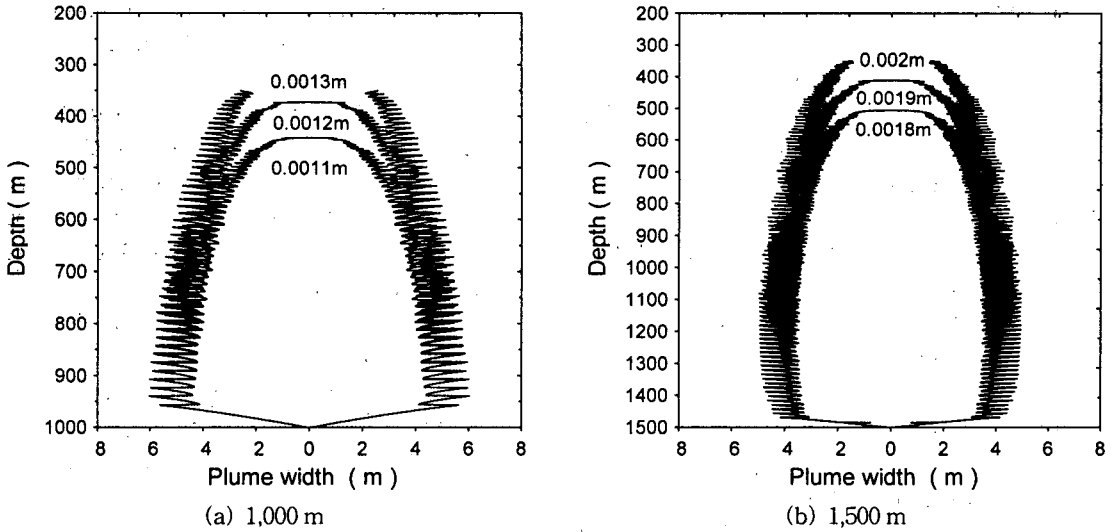


Fig. 8 Plume width (2b) on the CO₂ droplets released from a fixed pipeline in the East Sea.

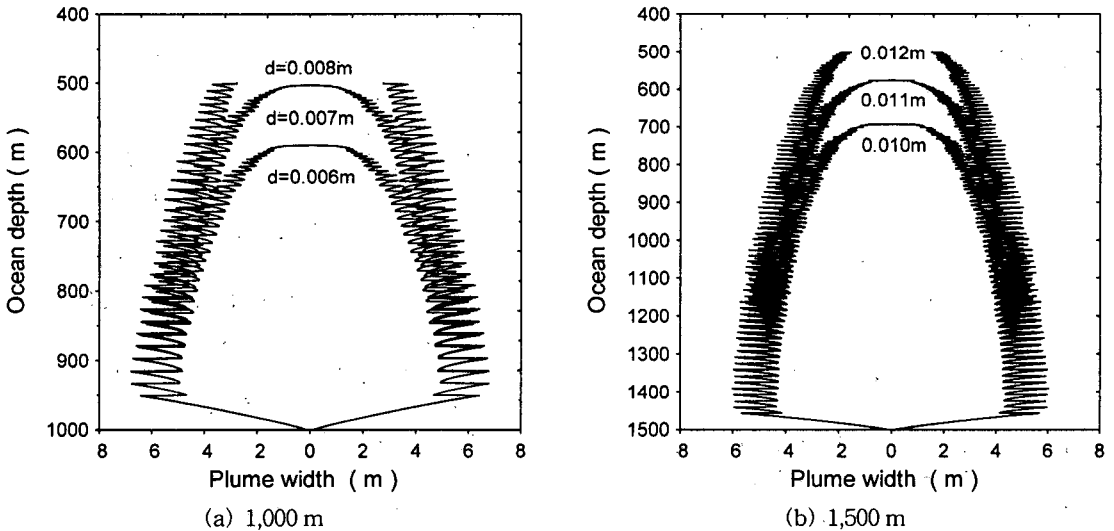


Fig. 9 Plume width (2b) on the CO₂ droplets released from a fixed pipeline in Clarion-clipperton.

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. 8과 Fig. 9에서 볼 수 있듯이 액적군 내의 밀도와 주

변의 밀도차로 인하여 발생하는 필링의 영향으로 수축·팽창을 반복하고 있음을 알 수 있다. 따라서 움직이는 배에서 분사하는 경우와 같이 파이프라인에서 분사할 경우도 해수의 온도가 높은 Clarion-clipperton 지역이 용해에 유리하였으며, Fig. 6과 Fig. 7을 비교하면 파이프라인에서 분사하는 방법보다는 움직이는 배에서 분사하는 방법이 이산화탄소 용해에 더 효과적이란 사실을 알 수 있다.

4. 결 론

(1) 동해안과 Clarion-clipperton 지역의 경우. 바다깊이 350 m와 500 m에서 이산화탄소는 액체에서 기체로 기화되므로 350 m와 500 m 이하의 깊이에서 해수에 완전히 용해시키는 기술이 필요함을 알 수 있었다.

(2) 동해안에서 움직이는 배를 이용하여 분사할 경우 액적의 초기 지름이 1,000 m와 1,500 m에서 각각 0.003 m와 0.005 m 이하, 고정 파이프라인 분사시 0.0012 m와 0.0019 m 이하일 경우 350 m 이하의 깊이에서 완전히 용해되었다.

(3) Clarion-clipperton 지역에서 움직이는 배를 이용할 경우 액적의 초기 지름을 1,000 m와 1,500 m에서 각각 0.011 m와 0.016 m 이하, 고정 파이프라인 분사시 0.007 m와 0.011 m 이하일 경우 500 m 이하의 깊이에서 완전히 용해되었다.

(4) 액적군은 밀도차 때문에 발생하는 필링의 영향으로 수축과 팽창을 반복함을 확인하였다.

(5) 파이프라인보다는 움직이는 배에서 분사하는 방법이 이산화탄소 용해에 더 효과적임을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 2004학년도 인하대학교 박사 후 연구과정 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. Fujioka, Y., Ozaki, M., Takeuchi, K., Shindo, Y. and Herzog, H. J., 1997, Cost comparison in various CO₂ ocean disposal option, *Energy Convers. Mgmt.*, Vol. 38, pp. s273-s277.
2. Teng, H., Masutani, S. M., Kinoshita, C. M. and Nohous, G. C., 1996, Solubility of CO₂ in the ocean and its effect on CO₂ dissolution, *Energy Convers. Mgmt.*, Vol. 37, No. 6-8, pp. 1029-1038.
3. 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.
4. Aya, I., Yamane, K. and Yamada, N., 1992, Stability of clathrate-hydrate of carbon dioxide in highly pressurized water, *ASME HTD*, Vol. 215, pp. 17-22.
5. 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.
6. Clift, R., Grace, J. R. and Weber, M. E., 1978, *Bubbles, Drops and Particles*, Academic Press, pp. 97-125.
7. Wilké, C. R. and Chang, P., 1995, Correlation of diffusion coefficient in dilute solutions, *A. I. Ch. J.*, Vol. 1, pp. 264-270.
8. Liro, C. R., Adams, E. E. and Herzog, H. J., 1991, Modeling the Release of CO₂ in the Deep Ocean, MIT-EL 91-002.
9. Milgram, J. H., 1983, Mean flow in round bubble plumes, *J. of Fluid Mechanics*, Vol. 133, pp. 345-376.
10. Rayyan, F. M., 1974, Hydrodynamics of bubble plumes incorporating gas transfer in stratified impoundments, Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin.