

고정 파이프라인에서 분사된 액체 이산화탄소 용해특성 연구

김 남 진, 김 중 보**

인하대학교 기계기술공동연구소, *인하대학교 기계공학과

Study on the Dissolution Characteristics of Liquid CO₂ Released by Fixed Pipeline

Nam-Jin Kim, Chong-Bo Kim**

Mechanical Engineering Research Institute, Inha University, Incheon 402-751, Korea

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

(Received July 15, 2004; revision received August 17, 2004)

ABSTRACT: The use of fossil fuels like coal, oil and natural gases around the world causes an increase of the carbon dioxide content in the atmosphere. In order to reduce the concentration of the greenhouse gas, 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 that carbon dioxide droplets change to carbon dioxide bubbles in gas phase around 500 m in depth, and the droplets are completely dissolved below 500 m in depth if the liquid carbon dioxide is released both at 1,000 m in depth with the initial diameter of 0.007 m or less and at 1,500 m in depth with the diameter of 0.011 m or less.

Key words: Carbon dioxide(이산화탄소), Plume(액적군), Surface concentration(표면농도), Solubility(용해도), Dissolution(용해)

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]

$C_{p,w}$: 순수물에서의 용해도 [$kg/m^3, kmol/m^3$]
 C_s : 해수에서의 용해도 [$kg/m^3, kmol/m^3$]
 $\overline{C_w}$: 액적군내 평균농도 [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]
 f_{CO_2} : 이산화탄소 퓨가시티 [MPa]
 g : 중력가속도 [m/sec^2]
 k : 물질전달계수 [$W/m \cdot K$]

† Corresponding author

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

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

K_H	: 헨리상수 [MPa]
M	: 모멘트 [kg·m/sec]
$M_{s,w}$: 해수의 분자량 [kg/kmole]
n_{CO_2}	: 이산화탄소 몰수 [kmol]
P	: 압력 [MPa]
q_{rel}	: 분사지점에서 체적유량 [m^3/sec]
q_z	: 깊이 z 에서 체적유량 [m^3/sec]
R	: 액적군 반경 [m]
S	: 염분 [%]
T	: 온도 [K]
U	: 이산화탄소 부력속도 [m/sec]
V	: 액적의 체적 [m^3]
V_{CO_2}	: 이산화탄소 몰체적 [$m^3/kmol$]
\bar{W}	: 액적군 상승속도 [m/sec]
W_m	: 액적군 중심속도 [m/sec]
x_{CO_2}	: 해수에서 이산화탄소의 몰분율
$x_{CO_2}^w$: 순수물에서 이산화탄소의 몰분율
y	: 분사지점에서의 수직거리 [m]
z	: 바다깊이 [m]

그리스 문자

α	: Salting-out 계수
β	: 해수 전환계수
γ	: 모멘텀 증폭계수
λ_1, λ_2	: 속도에 따른 액적군 확장률
$\mu_{s,w}$: 해수의 점성계수 [$N \cdot sec/m^2$]
$\nu_{s,w}$: 해수의 동점성계수 [m^2/sec]
ρ_a	: 액적군 주변 해수밀도 [kg/m^3]
ρ_{CO_2}	: 이산화탄소의 밀도 [kg/m^3]
ρ_{mix}	: 액적군내 평균밀도 [kg/m^3]
ρ_{ref}	: 분사지점 주변 해수밀도 [kg/m^3]
$\rho_{s,w}$: 해수밀도 [kg/m^3]
ρ_w	: 액적군 내의 해수밀도 [kg/m^3]
\emptyset	: 해수의 무차원 상관계수

1. 서 론

산업의 발전으로 인한 대기중 이산화탄소 농도의 증가가 이상기온현상을 일으키는 지구온난화

의 원인으로 밝혀지면서, 대기중 이산화탄소의 농도를 감소시키기 위한 많은 연구가 진행되어 오고 있다. 현재 진행중인 연구로는 크게 화석연료 연소시 발생하는 이산화탄소를 배기가스로부터 분리해내는 분리기술과 분리된 이산화탄소를 재활용 또는 제거하는 처리기술로 나눌 수 있다. 이들 중 분리·회수된 이산화탄소를 화학처리하여 재활용하려는 기술만으로 대기 중 이산화탄소의 농도를 감소시키기에 역부족인 반면, 해양에 대량으로 처리하는 방법이 이산화탄소의 농도를 격감시키는 기술이라고 알려져 있다.⁽¹⁾

이산화탄소를 해양에 처리하는 기술로는 1,000~1,500 m의 중층심해에 파이프라인을 고정시켜 놓고 액체 이산화탄소를 분사시켜 해수에 용해시키는 방법, 움직이는 배에 부착된 파이프라인을 이용하여 중층심해로 분사시켜 용해시키는 방법, 이산화탄소의 밀도가 해수의 밀도보다 크게 되는 3,000 m 이하의 심해저에 저장하는 방법 등이 있으나 기술상의 어려움으로 아직까지는 초보적인 연구단계라고 할 수 있다.

Teng and Yamasaki⁽²⁾는 인공적으로 조성한 해수를 온도 278 K에서 293 K, 압력 6.44 MPa에서 29.49 MPa까지 변화시키며 이산화탄소의 용해도에 대한 실험을 수행하였다. Hirai et al.⁽³⁾은 3,000 m에 이산화탄소를 저장할 경우 발생하는 현상을 실험적으로 관찰하였으며, Aya et al.⁽⁴⁾는 순수물과 해수에서의 하이드레이트 생성에 대한 연구를 수행하였다. 그리고 Teng et al.⁽⁵⁾은 해수면에서 1,000 m까지의 이산화탄소 용해도와 물질 전달률을 예측하였으며, Kim et al.⁽⁶⁾은 단일액적의 용해거동을 계산하였다. 또한 Lee et al.⁽⁷⁾은 천연가스 하이드레이트를 채취한 공간에 이산화탄소를 저장하는 실험을 수행하였다.

그러나 이산화탄소 용해거동에 대한 기존의 계산은 해수가 아닌 순수물을 사용하였으며, 이산화탄소 액적의 표면에 생성되는 하이드레이트를 고려하지 않은 액체 이산화탄소의 순수 용해도를 사용하였다. 또한, 깊이에 따른 이산화탄소의 밀도와 해수의 밀도, 그리고 염도가 일정하다고 가정하여 계산을 수행하였다. 따라서 본 연구에서는 우리 나라가 유엔으로부터 광물 채취권을 부여받은 Clarion-clipperton 해역의 한 지점인 서경 125.5°, 북위 20.5°의 실제조건을 고려하여 하이드레이트가 생성된 이산화탄소 액적의 표면농

도를 구하여 중층심해에 파이프라인을 고정시켜 놓고 액체 이산화탄소를 분사시킬 경우의 용해거동을 예측하고자 한다.

2. 이론적 고찰

2.1 액체 이산화탄소의 용해도

이산화탄소는 비극성 물질인 반면에 해수는 매우 강한 극성 물질이기 때문에 이산화탄소가 해수에 용해되는 과정이 해수가 이산화탄소에 용해되는 과정보다 훨씬 큰 용해도를 갖게 된다. 본 연구에서는 해수가 이산화탄소에 용해되는 과정은 무시하고, 이산화탄소가 해수에 용해되는 일방향성만을 고려한다. 따라서 액체 이산화탄소의 용해도는 몰분율로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$x_{CO_2} = \frac{C_s}{(C_s + \rho_{s,w}/M_{s,w})} \quad (1)$$

$$C_s = \frac{x_{CO_2} \rho_{s,w}}{(1 - x_{CO_2}) M_{s,w}} \quad (2)$$

그리고 순수물에서는 헨리의 법칙을 변형하면

$$x_{CO_2}^w = \frac{f_{CO_2}}{K_H} \quad (3)$$

가 되고, 염분을 고려할 경우 다음과 같다.⁽⁸⁾

$$\ln\left(\frac{x_{CO_2}}{x_{CO_2}^w}\right) = \alpha S\% \quad (4)$$

식(3)을 식(4)에 대입하여 정리하면

$$x_{CO_2} = \left(\frac{f_{CO_2}}{K_H}\right) e^{\alpha S\%} \quad (5)$$

로 된다. 여기서 헨리상수와 salting-out 계수는 다음과 같다.⁽²⁾

$$K_H = A + B \times P + C \times P^2$$

$$A = 5.20 \times 10^3 - 39.2T + 0.075T^2$$

$$B = -103 + 0.708T - 1.20 \times 10^{-3}T^2$$

$$C = 0.022 \quad (6)$$

$$\alpha = 0.543 - 3.54 \times 10^{-3}T + 5.69 \times 10^{-6}T^2 \quad (7)$$

따라서 순수물에서의 액체 이산화탄소 용해도는 식(2)에 식(3)을, 해수에서의 용해도는 식(2)에 식(5)를 대입하여 구하게 된다.

2.2 이산화탄소 액적군의 용해거동

고정된 파이프라인에서 분사된 이산화탄소는 Fig. 1과 같이 액적군을 이루며 상승한다. 따라서 용해거동에 대한 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt}(\rho_{CO_2} V) = -kA(C_o - \bar{C}_w) \quad (8)$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{1}{6} \pi d_{CO_2}^3 \rho_{CO_2}\right) = -\pi d_{CO_2}^2 k(C_o - \bar{C}_w) \quad (9)$$

$$\frac{d}{dt}(d_{CO_2}) = -\frac{2k(C_o - \bar{C}_w)}{\rho_{CO_2}} - \frac{d_{CO_2}}{3\rho_{CO_2}} \cdot \frac{d\rho_{CO_2}}{dt} \quad (10)$$

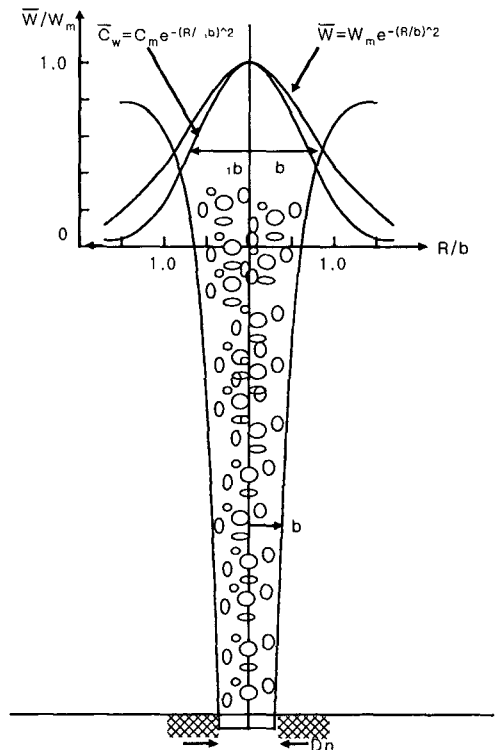


Fig. 1 Schematic of a plume.

여기서

$$\frac{d}{dt}(d_{CO_2}) = \frac{dd_{CO_2}}{dz} \cdot \frac{dz}{dt} = \frac{dd_{CO_2}}{dz}(U + \bar{W}) \quad (11)$$

$$\frac{d}{dt}(\rho_{CO_2}) = \frac{d\rho_{CO_2}}{dz} \cdot \frac{dz}{dt} = \frac{d\rho_{CO_2}}{dz}(U + \bar{W}) \quad (12)$$

이므로, 이산화탄소 액적의 지름변화율을 바다 깊이의 함수로 나타내면 다음 식과 같다.

$$\frac{d(d_{CO_2})}{dz} = -\frac{2k(C_o - \bar{C}_w)}{(U + \bar{W})\rho_{CO_2}} - \frac{d_{CO_2}}{3\rho_{CO_2}} \frac{d(\rho_{CO_2})}{dz} \quad (13)$$

또한 액적군 중심에서의 농도와 속도로 표시하면

$$\frac{d(d_{CO_2})}{dz} = -\frac{2k(C_o - C_m)}{(U + W_m)\rho_{CO_2}} - \frac{d_{CO_2}}{3\rho_{CO_2}} \frac{d(\rho_{CO_2})}{dz} \quad (14)$$

이고, 해수와의 접촉면에 하이드레이트가 생성된 이산화탄소 액적은 강체와 같은 유동을 한다. 따라서 물질전달계수, 부력속도, 확산계수는^(9,10)

$$k = 0.752 \frac{U^{0.472} D^{2/3}}{d_{CO_2}^{0.528} \nu_{s,w}^{0.139}} \quad (15)$$

$$U = \sqrt{\frac{4d_{CO_2}(\rho_{s,w} - \rho_{CO_2})g}{3C_D \rho_{s,w}}} \quad (16)$$

$$D = \frac{7.4 \times 10^{-8} (\Phi M_{s,w})^{0.5} T}{\mu_{s,w} V_{CO_2}^{0.6}} \quad (17)$$

로 구할 수 있다. 또한 바다깊이에 따른 이산화탄소의 체적유량은

$$q_z = q_{rel} \left(\frac{d_z}{d_{rel}} \right)_{CO_2}^3 = \int_R 2\pi \bar{C}_w (U + \bar{W}) R dR \quad (18)$$

이고, 액적군 임의의 위치에서 속도와 농도는

$$\bar{W} = W_m e^{(-R^2/b^2)} \quad (19)$$

$$\bar{C}_w = C_m e^{(-R^2/(\lambda_1 b^2))} \quad (20)$$

로 구할 수 있으므로, 식(19)과 식(20)을 식(18)에 대입하여 액적군 중심에서의 최대농도를 구하면

$$C_m = \frac{\frac{q_z}{\pi b^2 \lambda_1}}{W_m \frac{1}{1 + \lambda_1^2} + U} \quad (21)$$

이 된다. 유체의 체적유량은

$$Q = \int_0^\infty (1 - \bar{C}_w) 2\pi \bar{W} R dR \approx \int_0^\infty 2\pi \bar{W} R dR = \pi W_m b^2 \quad (22)$$

이고, 액적군 내로 유입되는 물의 전환속도는

$$W_e = \beta W_m \quad (23)$$

이 되므로

$$\frac{dQ}{dy} = 2\pi b W_e = 2\pi \beta b W_m \quad (24)$$

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

가 성립한다. 또한 액적군에 작용하는 유일한 외력이 부력이라고 가정하면 운동량방정식은⁽¹¹⁾

$$\frac{dM}{dy} = B_y = \frac{d}{dy} \int_0^\infty 2\pi \gamma \bar{W}^2 \rho_{ref} R dR = \int_0^\infty 2\pi g (\rho_a - \rho_{mix}) R dR \quad (25)$$

이 되고

$$\rho_a = \rho_w - \Delta \rho_{w,m} e^{-R^2/(\lambda_2 b)^2} \quad (26)$$

$$\rho_{mix} = \bar{C}_w \rho_{CO_2} + (1 - \bar{C}_w) \rho_w \quad (27)$$

를 식(24)에 대입하면 다음과 같이 정리된다.

$$\frac{d}{dy}(b^2 W_m^2) = \frac{2gb^2}{\gamma} \left(C_m \lambda_1^2 \frac{\rho_w - \rho_{CO_2}}{\rho_{ref}} - \lambda_2^2 \frac{\Delta\rho_{w,m}}{\rho_{ref}} \right) \quad (28)$$

따라서 식(24)에서

$$\begin{aligned} \frac{d}{dy}(W_m) b^2 + 2bW_m \frac{db}{dy} &= 2\beta b W_m \\ \frac{db}{dy} &= \beta - \frac{b}{2W_m} \frac{dW_m}{dy} \end{aligned} \quad (29)$$

가 되고, 식(28)에서

$$\begin{aligned} 2W_m b^2 \frac{dW_m}{dy} + 2bW_m^2 \frac{db}{dy} &= \\ \frac{2gb^2}{\gamma} \left(C_m \lambda_1^2 \frac{\rho_w - \rho_{CO_2}}{\rho_{ref}} - \lambda_2^2 \frac{\Delta\rho_{w,m}}{\rho_{ref}} \right) & \end{aligned} \quad (30)$$

가 된다. 식(30)에 식(29)를 대입하여 액적군 중심에서 깊이에 따른 최대속도를 구하면

$$\begin{aligned} \frac{dW_m}{dz} &= -\frac{2g}{\gamma W_m} \left(C_m \lambda_1^2 \frac{\rho_w - \rho_{CO_2}}{\rho_{ref}} - \lambda_2^2 \frac{\Delta\rho_{w,m}}{\rho_{ref}} \right) + \frac{2\beta W_m}{b} \end{aligned} \quad (31)$$

이고, 액적군의 반경은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{db}{dz} &= -2\beta \\ &+ \frac{gb}{\gamma W_m^2} \left(C_m \lambda_1^2 \frac{\rho_w - \rho_{CO_2}}{\rho_{ref}} - \lambda_2^2 \frac{\Delta\rho_{w,m}}{\rho_{ref}} \right) \end{aligned} \quad (32)$$

만약 식(32)의 우변에서

$$C_m \lambda_1^2 \frac{\rho_w - \rho_{CO_2}}{\rho_{ref}} < \lambda_2^2 \frac{\Delta\rho_{w,m}}{\rho_{ref}} \quad (33)$$

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

$$B_w = \int_0^\infty 2\pi(\rho_{ref} - \rho_w) R dR \quad (34)$$

이 되므로

$$\begin{aligned} \frac{d}{dy} \int_0^\infty 2\pi \bar{W}(\rho_{ref} - \rho_w) R dR &= \\ 2\pi b \beta W_m (\rho_{ref} - \rho_a) & \end{aligned} \quad (35)$$

가 성립하고, 식(19), 식(24), 식(26)을 대입하여 정리하면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d}{dz} \Delta\rho_{w,m} = -\frac{1+\lambda_2^2}{\lambda_2^2} \frac{d\rho_a}{dz} + \frac{2\beta \Delta\rho_{w,m}}{b} \quad (36)$$

3. 계산결과 및 고찰

본 연구에서는 해수의 깊이가 10m 변할 때마다 압력이 0.1 MPa씩 변한다고 가정하였으며, 특정 온도와 압력 하에서 이산화탄소의 물성치는 미국 표준 연구소에서 제공하는 REFPROP 6.01 (1998)과 해수의 밀도, 온도, 동점성계수 및 염도는 콜롬비아 대학에서 제공하는 IRI/LDEO Climate Data Library의 데이터를 이용하여 Fig. 2에 바다깊이에 따른 온도와 압력으로 환산한 이산화탄소의 밀도를 나타내었다.

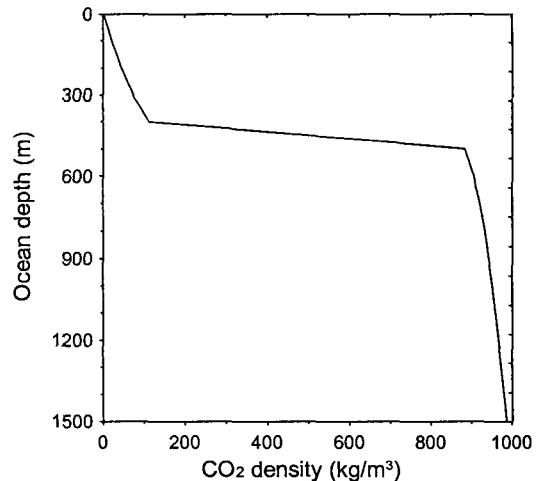


Fig. 2 Density distributions of liquid CO₂ along depth.

3.1 액체 이산화탄소의 용해도

식(3)에 식(6)을 대입하여 구한 순수물에서의 용해도와 식(5)에 식(6)과 식(7)을 대입하여 구한 해수에서의 용해도를 바다깊이로 표시하여 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 해수에서의 용해도는 순수물에서의 용해도보다 낮음을 알 수 있고, 그 관계는 다음 식과 같다.

$$C_s = 0.95 C_{p,w} \quad (500 \leq z \leq 1500) \quad (37)$$

또한 그림에서 100 m와 500 m 사이의 해수에 대한 이산화탄소의 용해도가 미터당 평균 0.1349 kg/m³, 500 m와 1,500 m 사이에서는 미터당 평균 0.0132 kg/m³의 변화를 보이고 있다. 그리고 Fig. 2에서 이산화탄소의 밀도가 400 m와 500 m 사이에서 크게 변한다는 것을 종합해 보면 바다깊이 약 500 m에서 이산화탄소가 액체에서 기체로 기화한다는 것을 짐작할 수 있다. 만약 액체 이산화탄소가 500 m 이하의 깊이에서 용해되지 않으면, 500 m 이상에서는 이산화탄소와 해수의 밀도 차이가 크기 때문에 빠른 부력속도를 갖게 되어 해수에 용해되기 전에 대기로 환원될 가능성이 높아진다. 따라서 분사된 액체 이산화탄소가 500 m 깊이에 도달하기 전까지 해수에 완전히 용해시킬 수 있는 기술이 필요함을 알 수 있다.

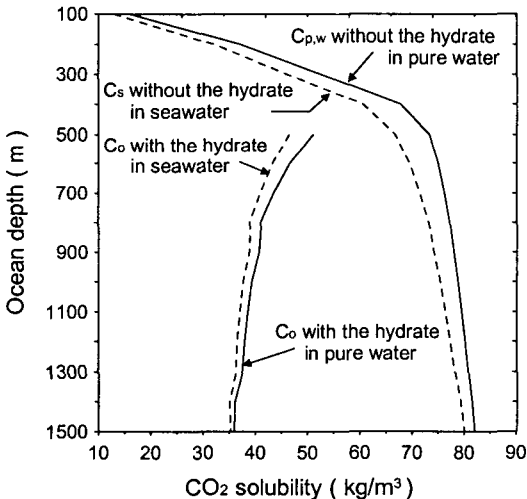


Fig. 3 Solubility distributions of liquid CO₂ without the hydrate along depth.

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 용해도 사이에는 큰 차이가 있다. 그러나 기존의 이산화탄소 액적의 용해거동을 예측하는 연구에서는 액적에 생성되는 하이드레이트를 고려하지 않고 계산을 수행하여 왔다.^(3,5,11) 따라서 본 연구에서는 일본 동경공업대학에서 입수한 순수물에서 하이드레이트가 존재하는 이산화탄소 액적의 표면농도 실험결과를 이용하여 표면농도를 예측할 수 있는 다음과 같은 계산식을 유도하였다.

$$C_o = A + B \times P + C \times P^2 + \alpha \times T + \beta \times T^2 \quad (38)$$

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

$$B = 1.083844$$

$$C = -6.5077 \times 10^{-3}$$

$$\alpha = 135.1632$$

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

Fig. 4는 일본 동경공업대학에서 측정된 순수물에서 하이드레이트가 존재하는 이산화탄소 액적

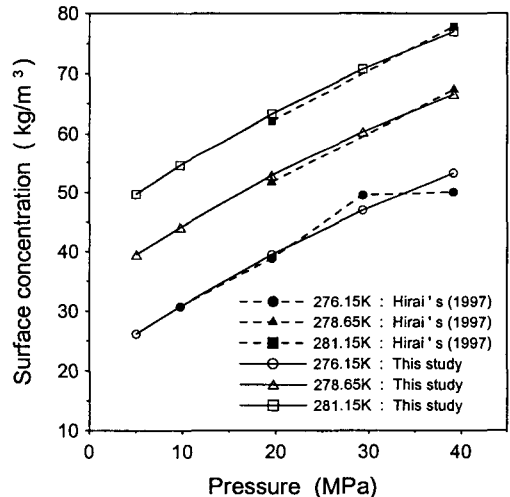


Fig. 4 Surface concentration of a CO₂ droplet with the hydrate in pure water.

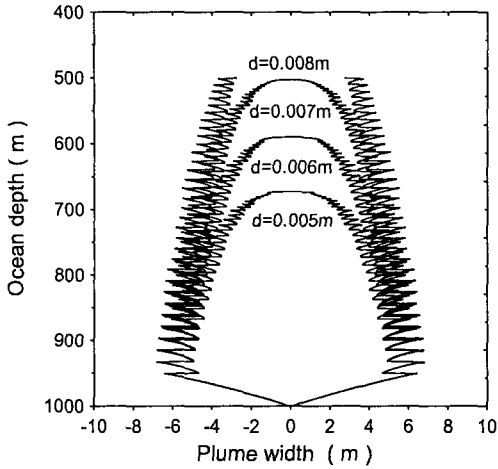


Fig. 5 Plume width (2b) on the CO₂ droplets released at 1,000 m in depth.

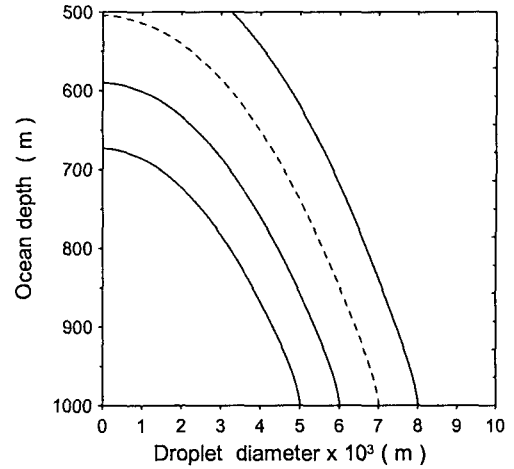


Fig. 7 Dissolution behavior of the CO₂ droplets with the hydrate released at 1,000 m in depth.

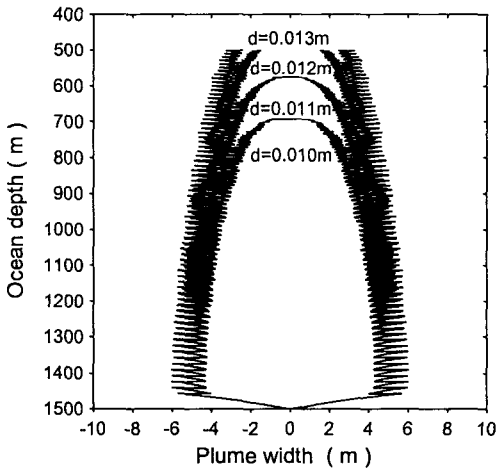


Fig. 6 Plume width (2b) on the CO₂ droplets released at 1,500 m in depth.

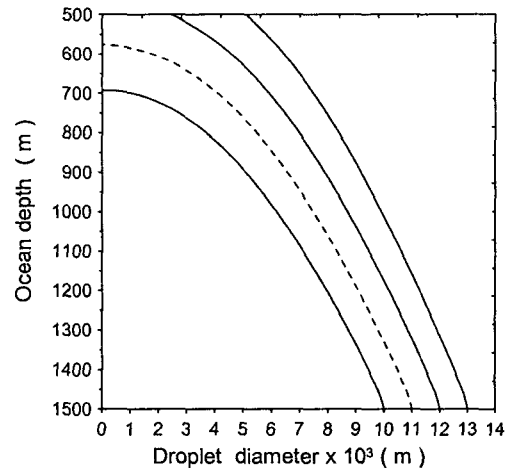


Fig. 8 Dissolution behavior of the CO₂ droplets with the hydrate released at 1,500 m in depth.

의 표면농도와 식(38)로 계산한 데이터를 비교하여 나타낸 것이다. 그리고 순수물에서의 표면농도 계산식인 식(38)와 순수물과 해수의 용해도 관계식인 식(37)를 이용하여 바다깊이에 따른 온도와 압력으로 이산화탄소 액적의 표면농도를 구하여 Fig. 3에 표시하였다.

따라서 본 연구에서 제시하는 해수에서 하이드레이트가 존재하는 이산화탄소 액적의 표면농도를 구하는 방법을 사용하면 고난도의 실험을 수

행하지 않고도 하이드레이트가 생성된 이산화탄소 액적의 표면농도를 구할 수 있다.

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 고정

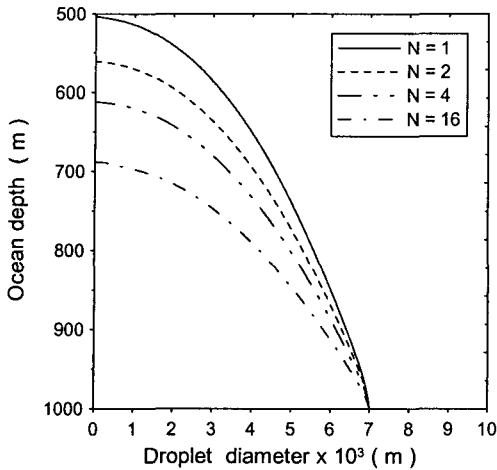


Fig. 9 Effect of number of nozzles on the CO₂ droplets released at 1,000 m in depth.

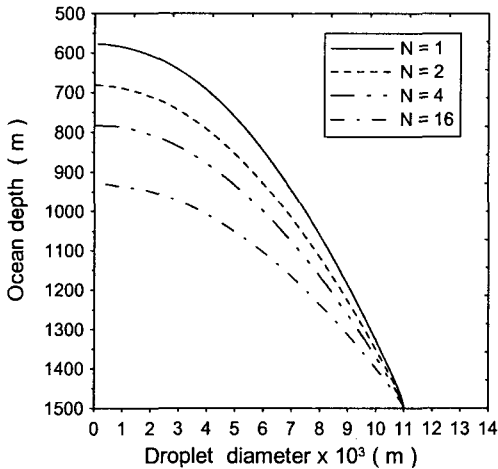


Fig. 10 Effect of number of nozzles on the CO₂ droplets released at 1,500 m in depth.

하였으며 액체 이산화탄소는 서로 합체되지 않으면서 작은 크기의 액적으로 쪼개질 수 있는 구조로 되어 있다고 가정하였다. 또한 초기값으로 $\beta = 0.1$, $\lambda_1 = 0.8$, $\lambda_2 = 1.25$, $\gamma = 1.0$ 을 사용하였다.⁽¹²⁾

바다깊이 1,000 m와 1,500 m에서 분사되는 이산화탄소 액적군의 모양을 Fig. 5와 Fig. 6에 표시하였고, 초기 분사 액적지름에 따라 그 용해거동을 계산하여 Fig. 7과 Fig. 8에 표시하였다. Fig. 5와 Fig. 6에서 볼 수 있듯이 액적군 내의 밀도와 주변의 밀도차로 인하여 발생하는 필링의 영향으로

수축·팽창을 반복하고, Fig. 7과 Fig. 8에서 볼 수 있듯이 바다깊이 1,000 m와 1,500 m에서 분사시각각 0.007 m와 0.011 m의 초기 액적지름으로 만들어 주어야 500 m 이하에서 완전히 용해가 이루어짐을 알 수 있었다.

또한 초기 이산화탄소 액적의 지름과 전체 분사량을 고정해 놓고 분사노즐의 수를 증가시키며 용해거동을 계산하여 Fig. 9와 Fig. 10에 표시하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 노즐수가 많을수록 빨리 용해되는 것을 알 수 있으나 분사노즐의 수가 증가한 만큼 용해깊이가 비례적으로 줄어들지는 않았다. 따라서 분사노즐의 수를 증가시키는 것보다는 초기 분사액적의 지름을 작게 만드는 것이 용해에 더 효과적임을 알 수 있다.

4. 결 론

고정 파이프라인을 이용하여 중층심해에 액체 이산화탄소를 분사시킬 경우 이산화탄소 용해특성을 계산한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 바다깊이 500 m에서 이산화탄소는 액체에서 기체로 기화한다는 것을 알 수 있었다. 따라서 기체로 기화할 경우 빠르게 상승하여 대기로 환원되므로 500 m 이하의 깊이에서 해수에 완전히 용해시키는 기술이 필요함을 알 수 있었다.

(2) 해수에서의 액체 이산화탄소 용해도는 순수물의 95%임을 알 수 있었다.

(3) 하이드레이트가 생성된 액적의 표면농도를 예측할 수 있는 실험식을 구함으로써 고압·저온의 고난도 실험을 수행하지 않고도 표면농도를 예측할 수 있게 되었다.

(4) 액적군은 밀도차 때문에 발생하는 필링의 영향으로 수축과 팽창을 반복함을 알 수 있다.

(5) 액체 이산화탄소를 바다깊이 1,000 m와 1,500 m에 분사시킬 경우, 초기 액적의 지름을 각각 0.007 m 이하와 0.011 m 이하로 분사시켜야 500 m 이하에서 완전히 용해됨을 알았다.

(6) 분사노즐의 수를 증가시키는 것보다 초기 액적의 지름을 작게 만드는 것이 용해에 더 효과적임을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 2003학년도 인하대학교의 지원에 의

하여 연구되었음(INHA-30163).

참고문헌

1. Marchetti, C., 1977, On geoengineering and CO₂ problem, *Climate Change*, Vol. 1, pp. 59-68.
2. Teng, H. and Yamasaki, A., 1998, Solubility of liquid CO₂ in synthetic seawater at temperatures from 278 K to 293 K and pressures from 6.44 MPa to 29.49 MPa, and densities of the corresponding aqueous solution, *J. Chem. Eng. Data*, Vol. 43, pp. 2-5.
3. Hirai, S., Okazaki, K., Araki, Yazawa, H., Ito, H. and Hijikata, K., 1996, Transport phenomena of liquid CO₂ in pressurized water flow with clathrate-hydrate at the interface, *Energy Convers. Mgmt.*, Vol. 36, No. 6-8, pp. 489-492.
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. 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.
6. 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.
7. Lee, H, Seo, Y. T. and Kim, D. Y., 2003, Replacement of methane hydrate by CO₂: 13C NMR study for studing a limit to the degree of subdtitution., 7th Int. Conf. on carbon dioxide utilization, pp. 95-96.
8. King, M. B., 1969, *Phase Equilibrium in Mixtures*, Pergamon Press, London.
9. Clift, R., Grace, J. R. and Weber, M. E., 1978, *Bubbles, Drops and Particles*, Academic Press, pp. 97-125.
10. Wilke, C. R. and Chang, P., 1995, Correlation of diffusion coefficient in dilute solutions, *A. I. Ch. J.*, Vol. 1, pp. 264-270.
11. Liro, C. R., Adams, E. E. and Herzog, H. J., 1991, Modeling the Release of CO₂ in the Deep Ocean, MIT-EL 91-002.
12. Liro, C. R., Adams, E. E. and Herzog, H. J., 1991, Modeling the Release of CO₂ in the Deep Ocean, MIT-EL 91-002.