

중층심해에 분사된 액체 이산화탄소 용해 예측모델 개발

김 남 진, 김 종 보**

인하대학교 기계기술공동연구소, *인하대학교 기계공학과

Simulation Model for Dissolution of Liquid CO₂ Discharged at Intermediate Depth of Ocean

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 12, 2003; revision received July 29, 2003)

ABSTRACT: Carbon dioxide ocean disposal is one of the promising options to reduce carbon dioxide concentration in the atmosphere because the ocean has vast capacity for carbon dioxide sequestration. However, the dissolution rate of liquid carbon dioxide in seawater must be known in advance in order to estimate the amount of carbon dioxide sequestration in the ocean. Therefore, in the present study, calculations of the solubility, the surface concentration and the dissolution behavior of carbon dioxide when liquid carbon dioxide is released at 1,000 m and 1,500 m in depth are performed. The results show that the droplet is completely dissolved below 500 m in depth if the carbon dioxide droplet is released both at 1,000 m in depth with the initial droplet diameter of 0.011 m or less and at 1,500 m in depth with the diameter of 0.016 or less. Also, the surface concentration of carbon dioxide droplet with the hydrate film is about 50% of carbon dioxide solubility at 1,500 m in depth and about 60% of carbon dioxide solubility at 1,000 m in depth.

Key words: Global warming(지구온난화), Carbon dioxide(이산화탄소), Surface concentration(표면농도), Solubility(용해도), Salinity(염분)

기 호 설 명

A : 이산화탄소 액적의 표면적 [m^2]
 C_D : 마찰계수
 C_o : 이산화탄소 액적의 표면농도 [kg/m^3]
 $C_{p,s}$: 순수물에서의 용해도 [$kg/m^3, kmol/m^3$]
 C_s : 해수에서의 용해도 [$kg/m^3, kmol/m^3$]
 C_∞ : 주변농도 [kg/m^3]

D : 확산계수 [m^2/s]
 d_{CO_2} : 이산화탄소 액적의 지름 [m]
 f_{CO_2} : 이산화탄소 퓨가시티 [MPa]
 g : 중력가속도 [m/s]
 k : 물질전달계수 [$W/m \cdot K$]
 K_H : 헨리상수 [MPa]
 $M_{s,w}$: 해수의 분자량 [$kg/kmol$]
 n_{CO_2} : 이산화탄소 몰수 [$kmol$]
 P : 압력 [MPa]
 S : 염분 [%]
 T : 온도 [K]

† Corresponding author

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

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

- U : 이산화탄소 부력속도 [m/s]
- U_s : 해수의 상승속도 [m/s]
- V : 액적의 체적 [m^3]
- V_{CO_2} : 이산화탄소 몰체적 [$m^3/kmol$]
- $V_{s,w}$: 해수의 몰체적 [$m^3/kmol$]
- x_{CO_2} : 해수에서 이산화탄소의 몰분율
- $x_{CO_2}^w$: 순수물에서 이산화탄소의 몰분율

그리스 문자

- α : Salting-out 계수
- β : 하이드레이트 막효과
- \emptyset : 해수의 무차원 상관계수
- $\mu_{s,w}$: 해수의 점성계수 [$N \cdot s/m^2$]
- $\nu_{s,w}$: 해수의 동점성계수 [m^2/s]
- ρ_{CO_2} : 이산화탄소의 밀도 [kg/m^3]
- $\rho_{s,w}$: 해수의 밀도 [kg/m^3]

1. 서 론

지구온난화의 원인으로 밝혀진 이산화탄소를 감소시키기 위한 연구는 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.^(1,2)

이산화탄소를 해양에 처리하는 기술로는 Fig. 1과 같이 고정된 수중 파이프라인을 통하여 1,000~1,500 m의 중층심해에 분사시켜 해수에 용해시키는 방법, Fig. 2와 같이 움직이는 배에서 중층심해로 분사시켜 용해시키는 방법, Fig. 3과 같이 이산화탄소의 밀도가 해수의 밀도보다 크게 되는 3,000 m 이하의 심해저에 저장하는 방법이 있다. 이때 Fig. 1과 같이 수중 파이프라인을 이용하여 액체 이산화탄소를 중층심해에 방출하는 방법은 기술적으로는 가능하나 바닷물이 산성화되어 해양 생태계에 악영향을 미치고, Fig. 3과 같이 심

해저에 저장하는 방법은 파이프라인 설계의 어려움과 경제성 그리고 산성화로 인한 해양 생태계의 파괴를 가져올 수 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 Fig. 2와 같이 선박을 이용하여 액체 이산화탄소를 분사할 경우 이산화탄소는 단일 액적으로 폭넓은 지역으로 산란되며 부력에 의해 상승하고, 이산화탄소 액적과 해수의 농도차에 의해서 용해가 이루어진다. 따라서 기술적, 경제적, 환

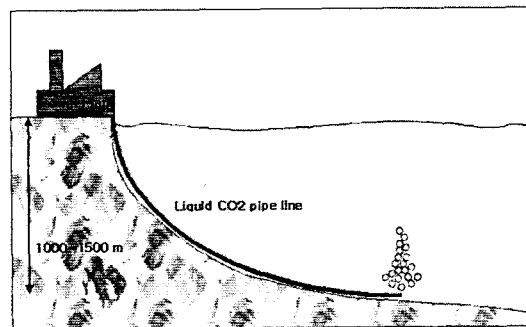


Fig. 1 CO₂ released from a fixed pipe outlet.

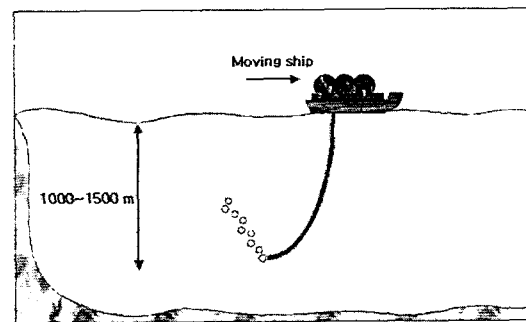


Fig. 2 CO₂ released from pipe outlet hanged from a moving ship.

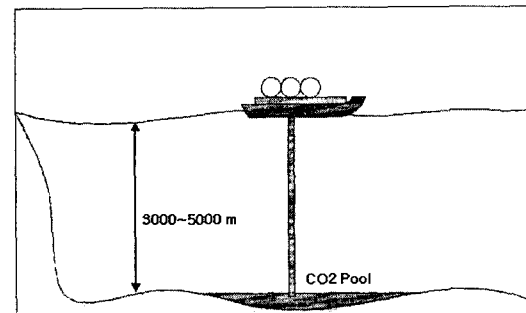


Fig. 3 Deep ocean storage of CO₂.

경적 측면에서 가장 가능성이 높은 기술로 알려져 있다.⁽³⁾ 그러나 중층심해에 분사된 이산화탄소가 빠른 시간에 표면 위로 떠올라 대기 중으로 확산되어 버리면 기술적으로 아무런 의미가 없다. 따라서 분사 깊이가 깊어지면 깊어질수록 이산화탄소 처리 측면에서는 유리하나 경제적, 기술적으로는 어려운 점이 대두된다. 또한 Fig. 4와 같이 임의의 깊이 이하에서 액체 이산화탄소를 분사할 경우 해수와 접촉하는 이산화탄소 액적의 표면에 얇은 얼음과 같은 하이드레이트가 생성되어 용해에 장애물로 작용할 수 있다. 따라서 위와 같은 조건을 고려하여 적절한 분사 깊이 또는 분사 액적의 크기를 선택해야 할 것이다.

Sam⁽⁴⁾은 이산화탄소 해양처리의 안정성에 관한 연구를 수행하였으며, Herzog et al.⁽⁵⁾은 해양 미생물에 미치는 영향을 실험으로 규명하였다. Teng and Yamasaki⁽⁶⁾는 인공적으로 조성한 해수를 온도 278 K에서 293 K, 압력 6.44 MPa에서

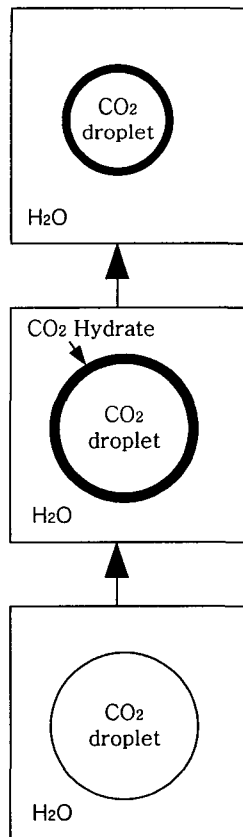


Fig. 4 Formation of CO₂ hydrate in water.

29.49 MPa까지 변화시키며 이산화탄소의 용해도에 대한 실험을 수행하였다. Nishikawa et al.⁽⁷⁾과 Hirai et al.^(8,9)은 3,000 m에 이산화탄소를 저장할 경우 발생하는 현상을 실험적으로 관찰하였으며, Aya et al.⁽¹⁰⁾과 Shindo et al.⁽¹¹⁾은 순수물과 해수에서의 하이드레이트 생성에 대한 연구를 수행하였다. 그리고 Teng et al.⁽¹²⁾은 해수면에서 1,000 m까지의 이산화탄소 용해도와 물질전달률을 예측하였으며, Loken and Austvik⁽¹³⁾은 하이드레이트 평형상태도를 실험적으로 제시하였다.

그러나 이산화탄소 액적의 용해거동에 대한 기존의 계산은 해수가 아닌 순수물을 사용하였으며,^(8,9) 이산화탄소 액적과 해수 사이에 생성되는 하이드레이트를 고려하지 않은 액체 이산화탄소의 순수 용해도를 사용하였다.⁽¹²⁾ 또한, 깊이에 따른 이산화탄소의 밀도와 해수의 밀도, 그리고 염도가 일정하다고 가정하여 계산을 수행하였다.^(7,8,9,10,11,12) 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 표면농도를 구하여 깊이 1,000 m와 1,500 m에 분사된 이산화탄소의 용해거동을 예측하고, 염분과 하이드레이트가 이산화탄소 용해에 미치는 영향을 알아보려고 한다.

2. 이론적 고찰

2.1 액체 이산화탄소의 용해도

이산화탄소는 비극성 물질인 반면에 해수는 매우 강한 극성 물질로 서로 다른 성질을 가지고 있다. 따라서 이산화탄소가 해수에 용해되는 과정이 해수가 이산화탄소에 용해되는 과정보다 훨씬 큰 용해도를 갖게 된다. 따라서 본 연구에서는 해수가 이산화탄소에 용해되는 과정은 무시하고, 이산화탄소가 해수에 용해되는 일방향성만을 고려한다. 따라서 이산화탄소의 용해도(C_s)는 다음과 같이 정의된다.

$$C_s \equiv \frac{n_{CO_2}}{V_{s,w}} \quad (1)$$

여기서 n_{CO_2} 는 다음과 같다.

$$n_{CO_2} = \frac{\rho_{CO_2} \Delta V_{CO_2}}{M_{CO_2}} \quad (2)$$

식(2)를 식(1)에 대입하면 용해도는

$$C_s \equiv \frac{\rho_{CO_2} \Delta V_{CO_2}}{M_{CO_2} V_{s,w}} \quad (3)$$

로 표현된다. 또한 액체 이산화탄소의 용해도는
 몰분율로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$x_{CO_2} = \frac{C_s}{(C_s + \rho_{s,w}/M_{s,w})} \quad (4)$$

따라서 용해도는 다음과 같다.

$$C_s = \frac{x_{CO_2} \rho_{s,w}}{(1 - x_{CO_2}) M_{s,w}} \quad (5)$$

그리고 순수물에서의 이산화탄소 용해도는 헨리의 법칙을 변형하면⁽¹⁴⁾

$$x_{CO_2}^w = \frac{f_{CO_2}}{K_H} \quad (6)$$

가 되고, 염분을 고려할 경우 다음과 같다.⁽¹⁴⁾

$$\ln\left(\frac{x_{CO_2}}{x_{CO_2}^w}\right) = \alpha S\% \quad (7)$$

식(6)과 식(7)로부터, x_{CO_2} 는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$x_{CO_2} = \left(\frac{f_{CO_2}}{K_H}\right) e^{\alpha S\%} \quad (8)$$

여기서 헨리상수(K_H)와 salting-out 계수(α)는 다음과 같다.⁽⁶⁾

$$\begin{aligned} K_H &= A + B \times P + C \times P^2 \quad (9) \\ A &= 5.20 \times 10^3 - 39.2T + 0.075T^2 \\ B &= -103 + 0.708T - 1.20 \times 10^{-3}T^2 \\ C &= 0.022 \end{aligned}$$

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

따라서 순수물에서의 액체 이산화탄소 용해도는 식(5)에 식(6)을, 해수에서의 용해도는 식(5)에 식(8)을 대입하여 구하게 된다.

2.2 이산화탄소 액적의 용해거동

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

$$\frac{d}{dt}(\rho_{CO_2} V) = -kA(C_0 - C_\infty) \quad (11)$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{1}{6} \pi d_{CO_2}^3 \rho_{CO_2}\right) = -\pi d_{CO_2}^2 k(C_0 - C_\infty) \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(d_{CO_2}) &= -\frac{2k(C_0 - C_\infty)}{\rho_{CO_2}} \\ &\quad - \frac{d_{CO_2}}{3\rho_{CO_2}} \cdot \frac{d\rho_{CO_2}}{dt} \end{aligned} \quad (13)$$

여기서,

$$\frac{d}{dt}(d_{CO_2}) = \frac{dd_{CO_2}}{dz} \cdot \frac{dz}{dt} = \frac{dd_{CO_2}}{dz}(U - U_s) \quad (14)$$

$$\frac{d}{dt}(\rho_{CO_2}) = \frac{d\rho_{CO_2}}{dz} \cdot \frac{dz}{dt} = \frac{d\rho_{CO_2}}{dz}(U - U_s) \quad (15)$$

만약 이산화탄소 액적의 표면농도가 해수에 녹아 있는 이산화탄소의 농도보다 크다($C_0 \gg C_\infty$)고 가정하면, 이산화탄소 액적의 지름변화율을 바다 깊이(z)의 함수로 나타낼 수 있다.⁽⁹⁾

$$\begin{aligned} \frac{d(d_{CO_2})}{dz} &= -\frac{2kC_0}{(U - U_s)\rho_{CO_2}} \\ &\quad - \frac{d_{CO_2}}{3\rho_{CO_2}} \frac{d(\rho_{CO_2})}{dz} \end{aligned} \quad (16)$$

여기서 U_s 는 이산화탄소 액적들로 인하여 발생하는 해수의 상승속도로, 본 연구와 같이 단일 액적모델에서는 U_s 가 0이 된다.

또한 이산화탄소 액적은 해수와 의 접촉면에 생성되는 하이드레이트 때문에 강체와 같은 유동을 한다.^(8,9,15) 따라서 물질전달계수 k 는 다음 식으로부터 유도할 수 있다.⁽¹⁶⁾

$$Sh = 1 + \left(Sc + \frac{1}{Re} \right)^{1/3} 0.752 Re^{0.472} \quad (17)$$

만약 $Sc \gg 1/Re$ 라고 가정하면

$$Sh = 1 + 0.752 Re^{0.472} Sc^{1/3} \quad (18)$$

로 간략히 나타낼 수 있고, 우변의 첫번째 항은 두번째 항에 비해서 매우 작기 때문에

$$Sh = 0.752 Re^{0.472} Sc^{1/3} \quad (19)$$

로 다시 정리된다. 물질전달계수 k 를 구하기 위해서 $Sh = kd_{CO_2}/D$, $Re = Ud_{CO_2}/\nu_{s,w}$, $Sc = \nu_{s,w}/D$ 를 대입하면 다음과 같이 정리된다.

$$k = 0.752 \frac{U^{0.472} D^{2/3}}{d_{CO_2}^{0.528} \nu_{s,w}^{0.139}} \quad (20)$$

여기서 부력속도 U 와 확산계수 D 는 각각 다음의 식으로 구하게 된다.^(16,17)

$$U = \sqrt{\frac{4d_{CO_2}(\rho_{s,w} - \rho_{CO_2})g}{3C_D \rho_{s,w}}} \quad (21)$$

$$D = \frac{7.4 \times 10^{-8} (\Phi M_{s,w})^{0.5} T}{\mu_{s,w} V_{CO_2}^{0.6}} \quad (22)$$

3. 계산결과 및 고찰

본 연구에서는 해수의 깊이가 10m 변할 때마다 압력이 0.1 MPa씩 변한다고 가정하였으며, 특정 온도와 압력 하에서 이산화탄소의 밀도(ρ_{CO_2})와 휴가시티(f_{CO_2})는 미국 표준 연구소에서 제공하는 데이터 프로그램을 사용하였다.⁽¹⁸⁾ 그리고 Clarion-clipperton 해역의 밀도, 온도, 동점성계수 및 염도는 콜롬비아 대학에서 제공하는 데이터를 이용하였으며,⁽¹⁹⁾ Fig. 5에 Clarion-clipperton 해역의 깊이에 따른 온도와 압력으로 환산한 이산화탄소의 밀도를 나타내었다.

3.1 액체 이산화탄소의 용해도

식(5)에 식(6)을 대입하여 구한 순수물에서의 용해도와 식(5)에 식(8)을 대입하여 구한 해수에서의 용해도를 바다 깊이로 표시하여 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 해수에서의 용해도는 순수물에서의 용해도보다 낮음을 알 수 있고, 그 관계는 다음 식과 같다.

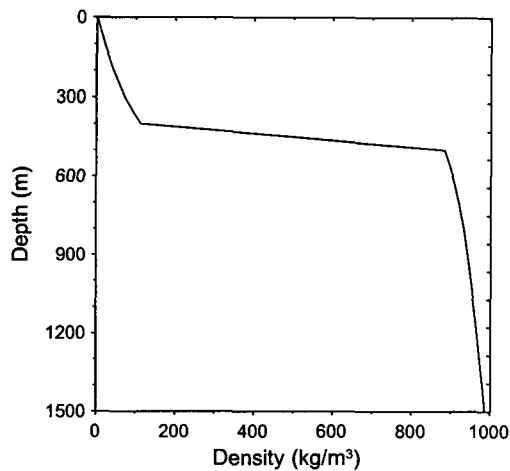


Fig. 5 Density distributions of liquid CO₂ along depth.

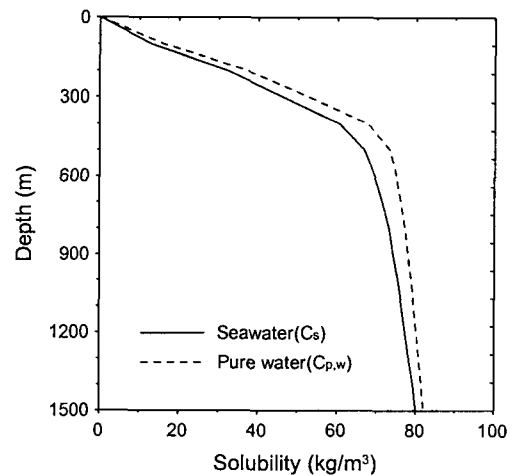


Fig. 6 Solubility distributions of liquid CO₂ without the hydrate along depth.

$$C_s = 0.93 C_{p,w} \quad (0 \leq Z \leq 1500) \quad (23)$$

$$C_s = 0.95 C_{p,w} \quad (500 \leq Z \leq 1500) \quad (24)$$

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. 5에서 이산화탄소의 밀도가 400 m와 500 m 사이에서 크게 변한다는 것을 종합해 보면 바다 깊이 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.

3.2 이산화탄소 액적의 표면농도

액체 이산화탄소를 해양에 분사시킬 경우 이산화탄소 액적과 해수의 접촉면에서는 하이드레이트가 형성되는데, 이 하이드레이트가 존재하는 이산화탄소 액적의 표면농도(C_o)와 하이드레이트가 존재하지 않는 이산화탄소의 용해도(C_s) 사이에는 큰 차이가 있다.^(6,9) 그러나 기존의 이산화탄소

액적의 용해거동을 예측하는 연구에서는 액적에 생성되는 하이드레이트를 고려하지 않고 계산을 수행하여 왔다.⁽¹²⁾ 따라서 본 연구에서는 일본 동경공업대학에서 입수한 순수물에서 하이드레이트가 존재하는 이산화탄소 액적의 표면농도 실험결과와 상용프로그램 Engineering Equation Solver, Ver. 4.734(1998)를 이용하여 표면농도를 예측할 수 있는 다음과 같은 계산식을 구하였다.

$$C_o = A + B \times P + C \times P^2 + \alpha \times T + \beta \times T^2 \quad (25)$$

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

$$B = 1.083844$$

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

$$\alpha = 135.1632$$

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

Fig. 7은 일본 동경공업대학에서 측정된 순수물에서 하이드레이트가 존재하는 이산화탄소 액적의 표면농도와 식(25)로 계산한 데이터를 비교하여 나타낸 것이다. 그리고 순수물에서의 표면농도 계산식인 식(25)와 순수물과 해수의 용해도 관계식인 식(24)를 이용하여 Clarion-clipperton 해역의 깊이에 따른 온도와 압력으로 이산화탄소 액적의 표면농도를 구하여 Fig. 8에 표시하였다.

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

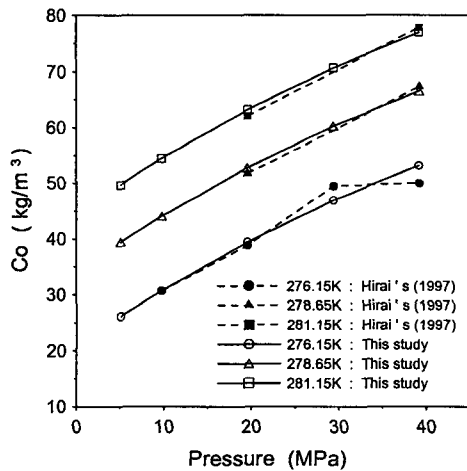


Fig. 7 Surface concentration of a CO₂ droplet with the hydrate in pure water.

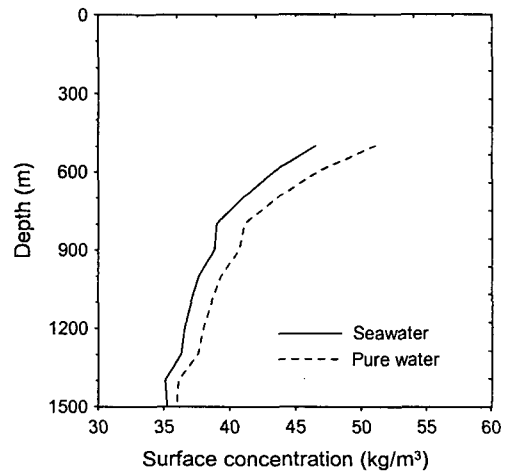


Fig. 8 Surface concentration of a CO₂ droplet with the hydrate.

행하지 않고도 하이드레이트가 생성된 이산화탄소 액적의 표면농도를 구할 수 있다.

3.3 이산화탄소 액적의 용해거동

식(16)을 이용하여 이산화탄소 액적의 초기지름을 0.01 m에서 0.012 m로 변화시키며 1,000 m 깊이의 해수와 순수물에 분사시킬 경우 500 m 깊이까지 떠오르며 변하는 액적의 지름변화를 Fig. 9에

나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 순수물과 해수에서 모두 이산화탄소 액적의 초기지름이 0.011 m 이하일 경우 500 m 이하의 깊이에서 완전히 해수에 용해되었으나, 0.012 m 이상의 액적에서는 완전한 용해가 일어나지 않았다.

이산화탄소 액적의 초기지름을 0.015 m에서 0.017 m까지 변화시키며 1,500 m 깊이에 분사된 액체 이산화탄소의 용해거동을 계산한 결과를 Fig. 10에 표시하였다. 순수물과 해수에서 액적의 초기

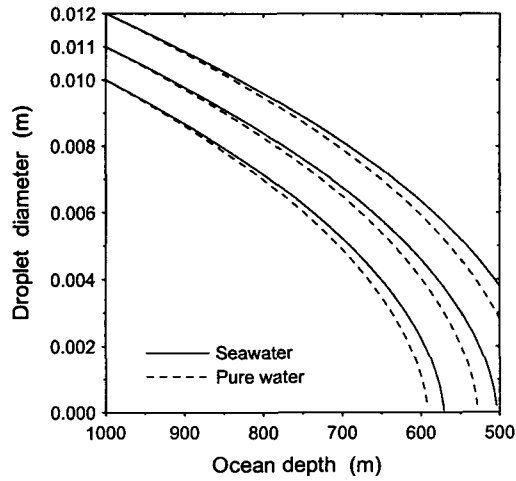


Fig. 9 Dissolution behavior of a CO₂ droplet with the hydrate released at 1,000 m in depth.

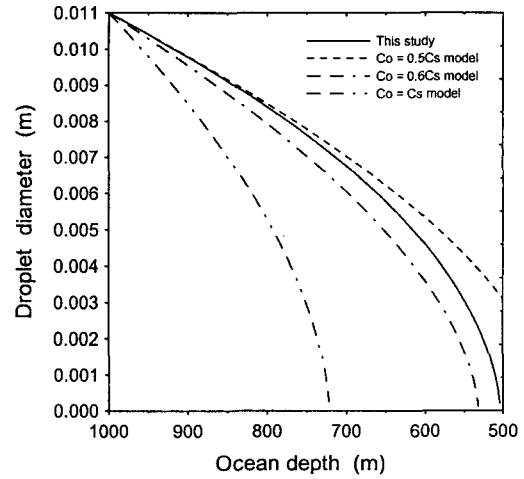


Fig. 11 Effect of hydrate on CO₂ dissolution behavior released at 1,000 m in depth.

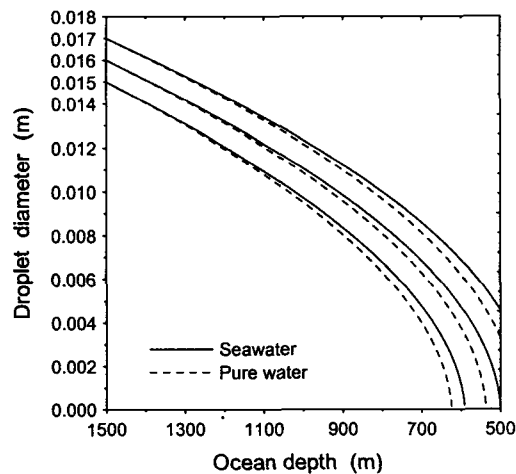


Fig. 10 Dissolution behavior of a CO₂ droplet with the hydrate released at 1,500 m in depth.

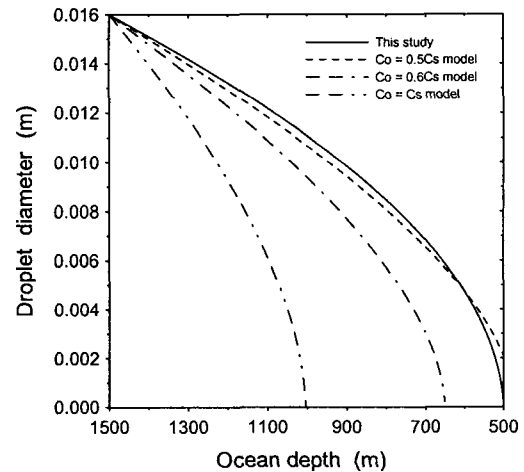


Fig. 12 Effect of hydrate on CO₂ dissolution behavior released at 1,500 m in depth.

지름이 0.016 m 이하일 경우 500 m 이하의 깊이에서 완전히 용해되었으나, 0.017 m 이상의 액적은 완전히 용해되지 않았다. 따라서 이산화탄소를 해양에 용해시키기 위해서는 분사되는 액적의 초기지름이 매우 중요함을 알 수 있다. 또한 해수보다는 순수물에서 용해가 빨리 일어났으나, 그 초기 액적지름에는 크게 영향을 미치지 못하는 것을 알 수 있었다.

3.4 하이드레이트 영향평가

하이드레이트가 형성된 이산화탄소 액적의 표면농도와 하이드레이트가 존재하지 않는 액체 이산화탄소의 용해도는 다음과 같은 관계가 있다.

$$C_o = \beta C_s \quad (26)$$

여기서 β 는 하이드레이트 효과를 나타내는 계수로 Hirai 등은 β 값이 0.5라고 제시하였다.⁽⁸⁾ 그러나 본 연구의 결과인 Fig. 11과 Fig. 12에 나타난 것과 같이 1,500 m에서는 β 가 0.5일 때 잘 일치하고 있으나, 1,000 m의 경우는 β 값이 0.6일 경우가 더 합리적이라고 할 수 있다.

4. 결 론

1,000 m와 1,500 m에 액체 이산화탄소를 분사시킬 경우 순수물과 해수에서의 이산화탄소 용해 거동을 계산한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 바다 깊이 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) 해수와 순수물에서의 액체 이산화탄소 용해도 차이를 관계식으로 구할 수 있었다.

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

(4) 액체 이산화탄소를 바다 깊이 1,000 m와 1,500 m에 분사시킬 경우, 초기액적의 지름을 각각 0.011 m 이하, 그리고 0.016 m 이하로 분사시켜야 500 m 이하에서 완전히 용해되었다. 그러므로 이산화탄

소를 해양에 완전히 용해시키기 위해서는 분사되는 액적의 초기지름이 매우 중요함을 확인하였다.

(5) 해수보다는 순수물에서의 용해가 빠르게 진행되었으나, 그 차이가 미미하여 분사액적의 초기지름에는 영향을 주지 못함을 알 수 있었다.

(6) 하이드레이트가 존재하는 이산화탄소 액적의 표면농도는 하이드레이트가 존재하지 않는 액체 이산화탄소의 용해도와 비교하여 1,000 m와 1,500 m에서 각각 60%와 50% 정도 낮음을 확인하였다. 따라서 이산화탄소 액적과 해수의 접촉면에 생성되는 하이드레이트가 이산화탄소 용해에 장애물로 작용함을 확인하였다.

후 기

이 논문은 과학기술부 지원으로 수행하는 21세기 프론티어 사업(이산화탄소 저감 및 처리 기술 개발)의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Marchetti, C., 1977, On geoengineering and CO₂ problem, *Climate Change*, Vol. 1, pp. 59-68.
2. Steinberg, M., Cheng, H. C. and Horn, F., 1984, A systems study for removal, recovery and disposal of carbon dioxide from fossil fuel power plants in U.S., Informal Report BNL 35666, Brookhaven National Laboratory, Long Island, N. Y., U.S., pp. 42-58.
3. 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.
4. Sam, H., 1997, Safety of the underground disposal of carbon dioxide, *Energy Convers. Mgmt.*, Vol. 38, Suppl., pp. s241-s245.
5. Herzog, H. J., Adams, A. A., Auerbach, A. and Caulfield, J., 1996, Environmental impacts of ocean disposal of CO₂, *Energy Convers. Mgmt.*, Vol. 37, No. 6-8, pp. 999-1005.
6. 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.
7. Nishikawa, N., Ishibashita, M., Ohta, H., Akutsu, N., Tajika, M., Sugitani, T., Hirao-ka, R., Kimuro, H. and Moritoki, M., 1995, Stability of liquid CO₂ spheres covered with clathrate film when exposed to environment simulating the deep sea, *Energy Convers. Mgmt.*, Vol. 36, pp. 489-492.
 8. 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.
 9. Hirai, S., Okazaki, K., Tabe, Y., Hijikata, K. and Mori, Y., 1997, Dissolution rate of liquid CO₂ in pressurized water flows and the effect of clathrate film, *Energy Convers. Mgmt.*, Vol. 22, No. 2-3, pp. 285-293.
 10. 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.
 11. Shindo, Y., Fujikoka, Y., Yanagishita, Y., Hakuta, T. and Komiyama, H., 1995, Formation of stability of CO₂ hydrate, *Direct Ocean Disposal of Carbon Dioxide*, Terrapub, Tokyo, Japan, pp. 217-223.
 12. 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.
 13. Loken, K. P. and Austvik, T., 1993, Deposition of Carbon Dioxide on the Seabed in the Form of Hydrates, PART II, *Energy Convers. Mgmt.*, Vol. 34, No. 9-11, pp. 1081-1087.
 14. King, M. B., 1969, *Phase Equilibrium in Mixtures*, Pergamon Press, London.
 15. Mori, Y. H. and Mochizuki, T., 1998, Dissolution of liquid CO₂ into water at high pressures: a search for the mechanism of dissolution being retarded through hydrate-film formation, *Energy Convers. Mgmt.*, Vol. 39, No. 7, pp. 569-578.
 16. Clift, R., Grace, J. R. and Weber, M. E., 1978, *Bubbles, Drops and Particles*, Academic Press, pp. 97-125.
 17. Wilke, C. R. and Chang, P., 1995, Correlation of diffusion coefficient in dilute solutions, *A. I. Ch. J.*, Vol. 1, pp. 264-270.
 18. National Institute of Standards and Technology Database 23: REFPROP 6.01, 1998.
 19. IRI/LDEO Climate Data Library, 1999, Columbia University.