

## 이산화탄소 해양 분사방법에 대한 비교연구

김남진 · 김종보\*<sup>†</sup>

인하대학교 기계기술공동연구소, \*인하대학교 기계공학과

## Comparative Study on the Ocean Disposal Methods of Carbon Dioxide

Nam-Jin Kim and Chong-Bo Kim\*<sup>†</sup>

Mechanical Engineering Research Institute, Inha University

\*Department of Mechanical Engineering, Inha University

### 요 약

이산화탄소를 해양에 대량으로 처리하는 기술이 지구온난화 현상을 완화시키는 기술의 하나로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 이산화탄소를 해수에 용해시키기 위해서 중층심해 1,000 m와 1,500 m 깊이에 분사된 액체 이산화탄소의 용해거동을 계산한 결과, 해저 약 500 m 깊이에서 이산화탄소는 액체에서 기체로 상변화를 일으키며, 이산화탄소와 해수의 접촉면에 생성되는 하이드레이트는 용해에 장애물로 작용하였다. 또한 움직이는 배에서 이산화탄소를 분사하는 방법이 고정파이프라인에서 분사하는 방법보다 용해에 더 효과적이었다.

**주요어:** 이산화탄소, 수화물, 해양분사, 용해거동, 용해도

**Abstract** — Carbon dioxide ocean disposal is one of the promising options to reduce carbon dioxide concentration in the atmosphere. So, 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 liquid carbon dioxide changes to carbon dioxide bubbles around 500 m in depth, and the hydrate acts as a resistant layer for the dissolution of liquid carbon dioxide. Also, the injection of liquid carbon dioxide from a moving ship is more effective than that from a fixed pipeline.

**Key words:** Carbon dioxide, Hydrate, Ocean disposal, Dissolution behavior, Solubility

### 1. 서 론

이산화탄소가 지구온난화의 주원인으로 밝혀지면서 대기 중 이산화탄소의 농도를 낮추기 위한 연구가 활발히 진행중이다. 특히 연소가스로부터 분리해낸 이산화탄소를 심해에 대량으로 처리하는 방법이 이산화탄소의 농도를 격감시키는 기술이라고 알려져 있다<sup>[1][2]</sup>. 이산화탄소를 해양에 처리하는 기술로는 움직이는 배(Fig. 1) 또

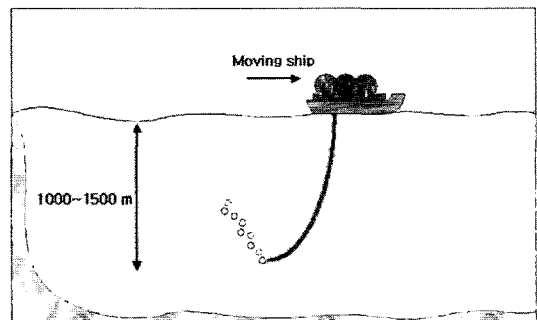


Fig. 1. CO<sub>2</sub> released from pipeline hanged from a moving ship.

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
Department of Mechanical Engineering, Inha University  
Tel: 032-860-7313  
E-mail: cbkim@inha.ac.kr

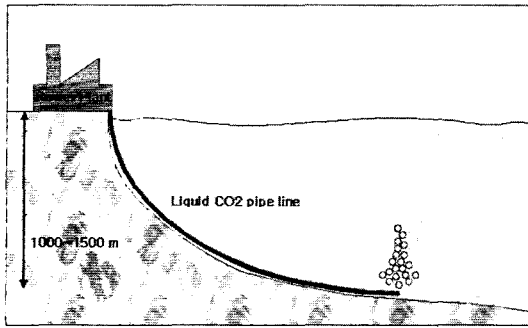


Fig. 2. CO<sub>2</sub> released from a fixed pipeline.

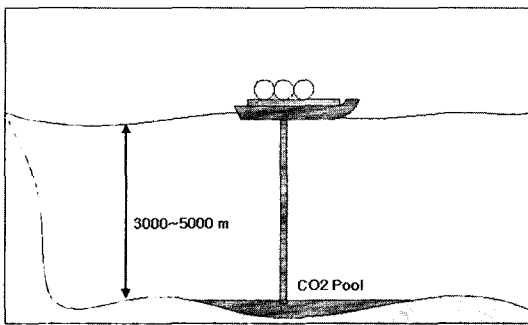


Fig. 3. Deep ocean storage of CO<sub>2</sub>.

는 고정된 파이프라인(Fig. 2)을 이용하여 1,000~1,500 m의 중층심해로 분사시켜 해수에 용해키는 방법과 이산화탄소의 밀도가 해수의 밀도보다 크게 되는 3,000 m 이하의 심해저에 저장하는 방법(Fig. 3)이 있다.

Fig. 3과 같이 심해저에 저장하는 방법은 장기간 격리시킬 수 있는 장점이 있지만 파이프라인 설계의 어려움과 경제성 그리고 산성화로 인한 해양 생태계의 파괴를 가져올 수 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 Fig. 1과 Fig. 2와 같이 중층심해에 분사하여 해수에 용해시키는 방법이 상대적으로 가능성이 높은 기술로 알려져 있기 때문에 이에 대한 연구가 진행 중에 있다<sup>[3]</sup>.

Sam<sup>[4]</sup>과 Herzog *et al.*<sup>[5]</sup>은 이산화탄소를 해양에 처리할 경우의 해양 생태계에 미치는 영향을 규명하였으며, Teng and Yamasaki<sup>[6]</sup>는 인공적으로 조성한 해수를 온도 278 K에서 293 K, 압력 6.44 MPa에서 29.49 MPa까지 변화시키며 이산화탄소의 용해도에 대한 실험을 수행하였다. Nishikawa *et al.*<sup>[7]</sup>과 Hirai *et al.*<sup>[8]</sup>은 수심 3,000 m에 이산화탄소를 저장할 경우 발생하는 현상을 실험적으로 관찰하였으며, Aya *et al.*<sup>[10]</sup>, Shindo *et al.*<sup>[11]</sup>, Kim *et al.*<sup>[12]</sup>은 순수물과 해수에서의 하이드레이트 생성에 대한 연구를 수행하였다. 그리고 Teng *et al.*<sup>[13]</sup>은 해수면

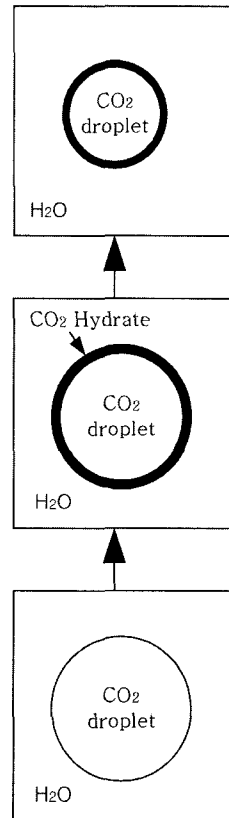


Fig. 4. Formation of CO<sub>2</sub> hydrate in water.

에서 1,000 m까지의 이산화탄소 용해도와 물질전달률을 예측하였으며, Loken and Austvik<sup>[14]</sup>은 하이드레이트 평형상태도를 실험적으로 제시하였다.

그러나 이산화탄소 액적의 용해거동에 대한 기존의 연구는 해수가 아닌 순수물을 사용하였으며<sup>[8][9]</sup>, Fig. 4와 같이 이산화탄소 액적과 해수 사이에 생성되는 하이드레이트를 고려하지 않은 액체 이산화탄소의 순수 용해도를 사용하였다<sup>[13]</sup>. 특히 바다깊이에 따른 이산화탄소와 해수의 밀도 그리고 염도가 일정하다고 가정하여 계산을 수행하였다<sup>[7][11][13]</sup>.

따라서 본 연구에서는 우리나라가 유엔으로부터 광물 채취권을 부여받은 Clarionclipperton 해역의 한 지점에 움직이는 배와 고정된 파이프라인을 이용하여 액체 이산화탄소를 분사시킬 경우의 용해거동을 예측하고자 한다.

## 2. 이론적 고찰

### 2-1. 액체 이산화탄소의 용해도

이산화탄소는 비극성 물질인 반면에 해수는 매우 강

한 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<sup>[14]</sup>.

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

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<sup>[6]</sup>.

$$K_H = A + B \times P + C \times P^2 \quad (6)$$

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

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

$$C = 0.022$$

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

### 2-2. 이산화탄소 액적군의 용해거동

2-2-1. 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.

$$\frac{d}{dt}(\rho_{CO_2} V) = -kA(C_o - C_\infty) \quad (8)$$

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

$$\frac{d}{dt}(d_{CO_2}) = \frac{2k(C_o - C_\infty)}{\rho_{CO_2}} \frac{d_{CO_2}}{3\rho_{CO_2}} \frac{d\rho_{CO_2}}{dt} \quad (10)$$

여기서,

$$\frac{d}{dt}(d_{CO_2}) = \frac{dd_{CO_2}}{dz} \cdot \frac{dz}{dt} = \frac{dd_{CO_2}}{dz}(U - U_s) \quad (11)$$

$$\frac{d}{dt}(\rho_{CO_2}) = \frac{d\rho_{CO_2}}{dz} \cdot \frac{dz}{dt} = \frac{d\rho_{CO_2}}{dz}(U - U_s) \quad (12)$$

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

$$\frac{d(d_{CO_2})}{dz} = \frac{2k(C_o - C_\infty)}{(U - U_s)\rho_{CO_2}} \frac{d_{CO_2}}{3\rho_{CO_2}} \frac{d(\rho_{CO_2})}{dz} \quad (13)$$

움직이는 배에서 분사할 경우 분사된 이산화탄소 액적은 흩어져 상승하기 때문에 단일 액적 분사모델과 같게 된다. 따라서 이산화탄소 액적의 표면농도가 해수에 녹아 있는 이산화탄소의 농도보다 크다( $C_o \gg C_\infty$ )라고 가정할 수 있고,  $U_s$ 는 0이 된다.

또한 이산화탄소 액적은 해수와의 접촉면에 생성되는 하이드레이트 때문에 강체와 같은 유동을 한다<sup>[18][9][16]</sup>. 따라서 물질전달계수(k), 부력속도(U), 확산계수(D)는 각각 다음의 식으로 구하게 된다<sup>[17][18]</sup>.

$$k = 0.752 \frac{U^{0.472} D^{2/3}}{d_{CO_2}^{0.528} \nu_{s,w}^{0.139}} \quad (14)$$

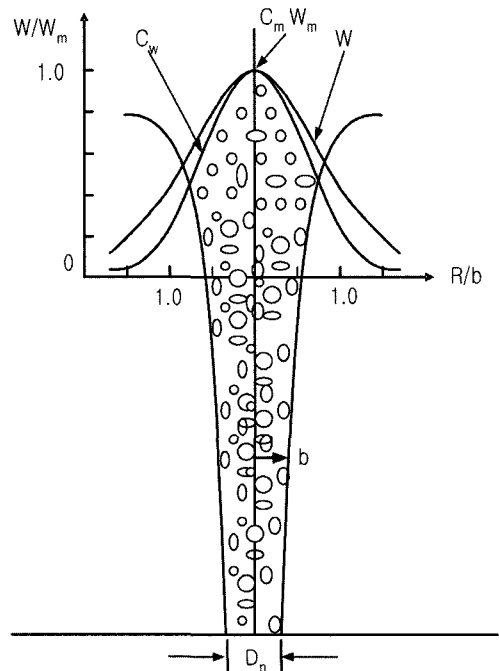


Fig. 5. Schematic of a plume.

$$U = \sqrt{\frac{4d_{CO_2}(\rho_{s,w} - \rho_{CO_2})g}{3C_D \rho_{s,w}}} \quad (15)$$

$$D = \frac{7.4 \times 10^{-8} (\Phi M_{s,w})^{0.5} T}{\mu_{s,w} V_{CO_2}^{0.6}} \quad (16)$$

2-2-2. 고정된 파이프라인에서 분사된 이산화탄소 액적군의 용해거동

고정된 파이프라인에서 분사할 경우 분사된 이산화탄소는 Fig. 5와 같이 액적군을 이루며 상승하게 된다. 따라서 식(13)을 수정하여 액적군 중심에서의 최대농도와 속도로 표시하면 다음과 같다<sup>[19]</sup>.

$$\frac{d(d_{CO_2})}{dz} = \frac{2k(C_o - C_m)}{(U + W_m)\rho_{CO_2}} - \frac{d_{CO_2}}{3\rho_{CO_2}} \frac{d(\rho_{CO_2})}{dz} \quad (17)$$

바다깊이에 따른 이산화탄소의 체적유량은

$$q_z = q_{rel} \left( \frac{dz}{d_{rel}/\rho_{CO_2}} \right)^3 = \int_R 2\pi C_w (U + W) R dR \quad (18)$$

이고, 액적군 임의의 위치에서 속도와 농도는

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

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

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

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

유체의 체적유량은

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

이고, 액적군 내로 유입되는 물의 전환속도는

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

이 되므로

$$\begin{aligned} \frac{dQ}{dy} &= 2\pi b W_c = 2\pi \beta b W_m \\ \frac{d}{dy} (W_m b^2) &= 2 \beta b W_m \end{aligned} \quad (24)$$

가 성립한다. 또한 액적군에 작용하는 유일한 외력이 부력이라고 가정하면 운동량방정식은<sup>[20]</sup>

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

이 되고

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

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

을 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

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

가 되고, 식(28)에서

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

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

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

이고, 액적군의 반경은 다음과 같다.

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

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

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

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

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

### 3. 계산결과 및 고찰

본 연구에서는 해수의 깊이가 10 m 변할 때마다 압력이 0.1 MPa씩 변한다고 가정하였다. 또한 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 사용하였다. 그리고 이들 데이터를 이용하여 Fig. 6에 바다깊이에 따른 온도와 압력으로 환산한 이산화탄소의 밀도를 나타내었다.

#### 3-1. 액체 이산화탄소의 용해도

식(2)에 식(3)을 대입하여 구한 순수물에서의 용해도와 식(2)에 식(5)를 대입하여 구한 해수에서의 용해도를 바다 깊이로 표시하여 Fig. 7에 나타내었다. 그럼에서 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 100 m와 500 m 사이의 해수에 대한 이산화탄소의 용해도가 미터당 평균 0.1349 kg/m<sup>3</sup>, 500 m와 1,500 m

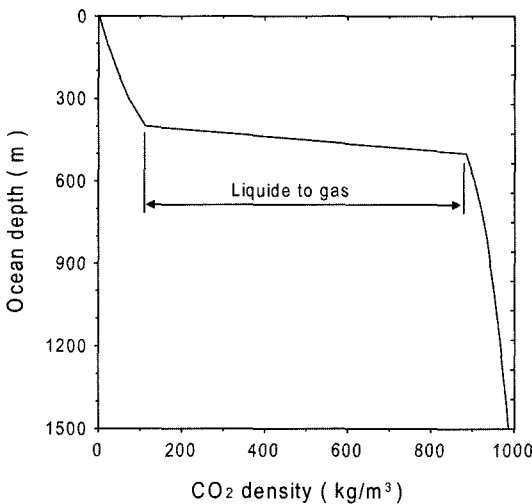


Fig. 6. Density distributions of liquid CO<sub>2</sub> along depth.

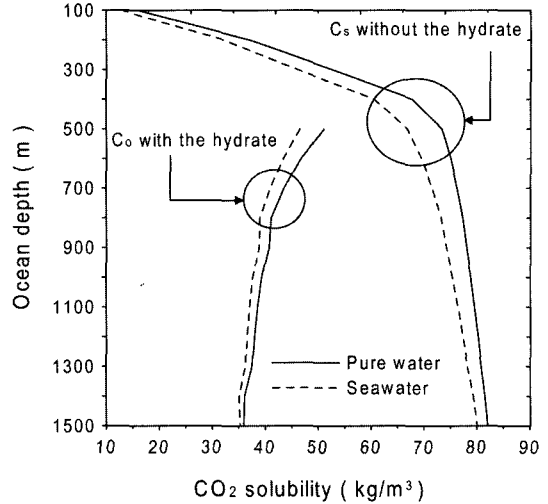


Fig. 7. Solubility distributions of liquid CO<sub>2</sub> without the hydrate along depth.

사이에서는 미터당 평균 0.0132 kg/m<sup>3</sup>의 변화를 보이고 있다. 그리고 Fig. 6에서 이산화탄소의 밀도가 400 m와 500 m 사이에서 크게 변한다는 것을 종합해 보면 바다 깊이가 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 밀도차가 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 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<sup>[35][11]</sup>. 따라서 본 연구에서는 일본 동경공업대학에서 입수한 순수물에서 하이드레이트가 존재하는 이산화탄소 액적의 표면농도 실험결과를 이용하여 표면농도를 예측할 수 있는 다음과 같은 계산식을 유도하였다<sup>[9]</sup>.

$$C_0 = A + B \times P + C \times P^2 + \alpha \times T + \beta \times T^2 \quad (38)$$

$$A = -1.946 \times 10^4, B = 1.083844, C = -6.5077 \times 10^{-3}$$

$$\alpha = 135.1632, \beta = -2.34 \times 10^{-1}$$

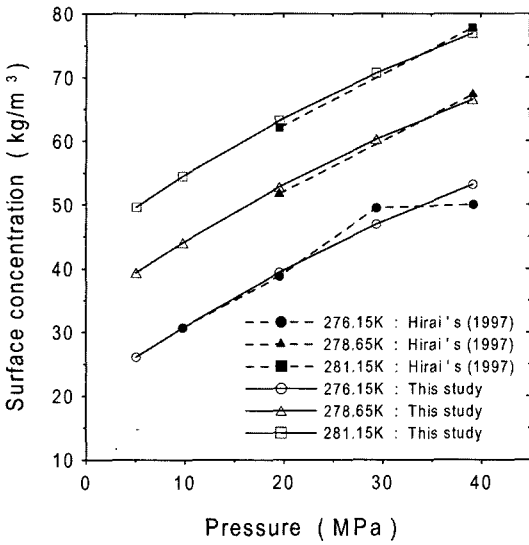


Fig. 8. Surface concentration of a CO<sub>2</sub> droplet with the hydrate in pure water.

Fig. 8은 일본 동경공업대학에서 측정한 순수물에서 하이드레이트가 존재하는 이산화탄소 액적의 표면농도와 식(38)로 계산한 데이터를 비교하여 나타낸 것이다. 그리고 순수물에서의 표면농도 계산식인 식(38)과 순수물과 해수의 용해도 관계식인 식(37)을 이용하여 수심에 따른 온도와 압력으로 이산화탄소 액적의 표면농도를 구하여 Fig. 7에 표시하였다.

따라서 본 연구에서 제시하는 해수에서 하이드레이트가 존재하는 이산화탄소 액적의 표면농도를 구하는 방법을 사용하면 고난도의 실험을 수행하지 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 분사 노즐의 직경을 0.1 m로 고정하였으며 액체 이산화탄소는 서로 합체되지 않으면서 작은 크기의 액적으로 쪼개질 수 있는 구조로 되어 있다고 가정하였다. 또한 초기 값으로  $\beta=0.1$ ,  $\lambda_1=0.8$ ,  $\lambda_2=1.25$ ,  $\gamma=1.0$ 을 사용하였다.<sup>[20][21]</sup>

바다깊이 1,000 m와 1,500 m에서 움직이는 배와 고정된 파이프라인에서 분사된 이산화탄소의 용해거동을 계산하여 Fig. 9와 Fig. 10에 표시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 움직이는 배의 경우 1,000 m와 1,500 m의 경우 각각 0.011 m와 0.016 m의 초기 액적지름을 가져야 500 m 이하에서 완전히 용해가 되었고, 고정 파이프라인

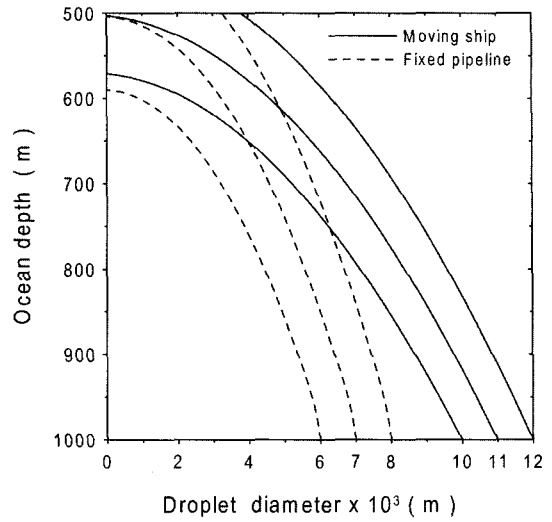


Fig. 9. Dissolution behavior of the CO<sub>2</sub> droplets with the hydrate released at 1,000 m in depth.

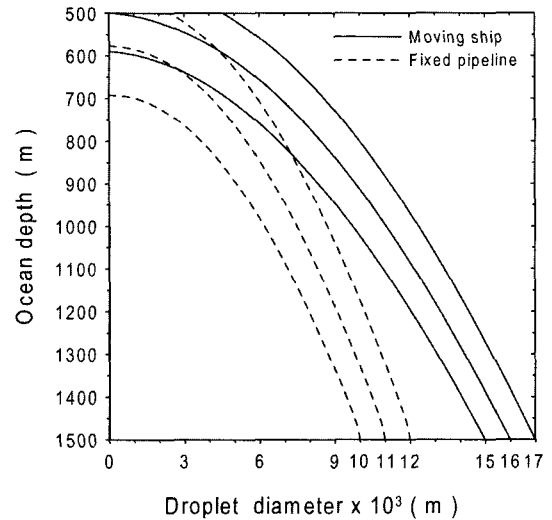


Fig. 10. Dissolution behavior of the CO<sub>2</sub> droplets with the hydrate released at 1,500 m in depth.

의 경우 각각 0.007 m와 0.011 m의 초기 액적지름으로 만들어 주어야 완전히 용해된다. 따라서 이산화탄소를 해양에 처리하는 기술로는 고정 파이프라인을 이용하는 방법보다는 움직이는 배에서 분사하는 방법이 용해거동 측면에서 유리함을 알 수 있다.

또한 움직이는 배에서 분사된 이산화탄소 액적은 산란되어 흩어지지만, 고정된 파이프라인에서 분사된 이산화탄소는 액적군을 이루며, 액적군 내의 밀도와 주변의 밀도차로 인하여 발생하는 필링의 영향으로 수축·팽창

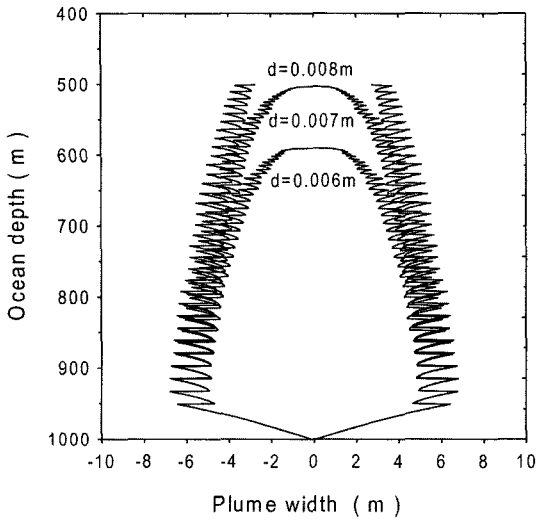


Fig. 11. Plume width (2b) on the CO<sub>2</sub> droplets released at 1,000 m in depth by a fixed pipeline.

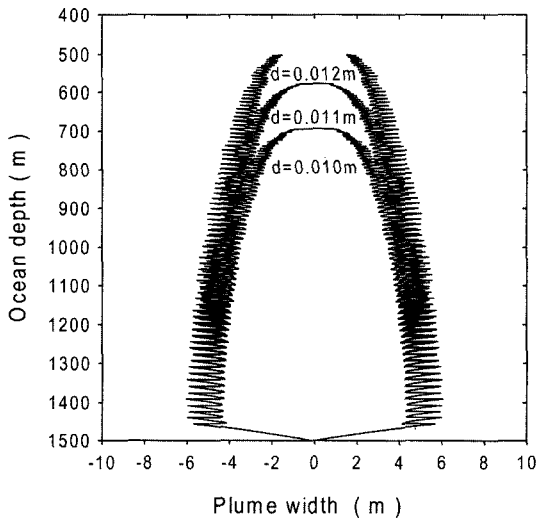


Fig. 12. Plume width (2b) on the CO<sub>2</sub> droplets released at 1,500 m in depth by a fixed pipeline.

을 반복하고 있음을 Fig. 11과 Fig. 12에서 확인하였다. 그리고 초기 이산화탄소 액적의 지름과 전체 분사량을 고정해 놓고 분사노즐의 수를 증가시키며 용해거동을 계산하여 Fig. 13과 Fig. 14에 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.

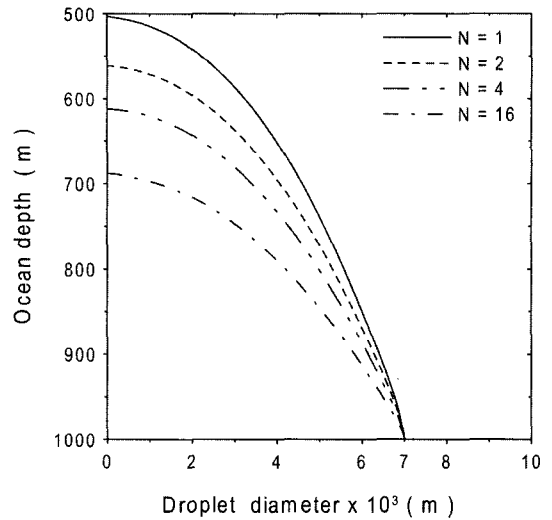


Fig. 13. Effect of number of nozzles on the CO<sub>2</sub> droplets released at 1,000 m in depth by a fixed pipeline.

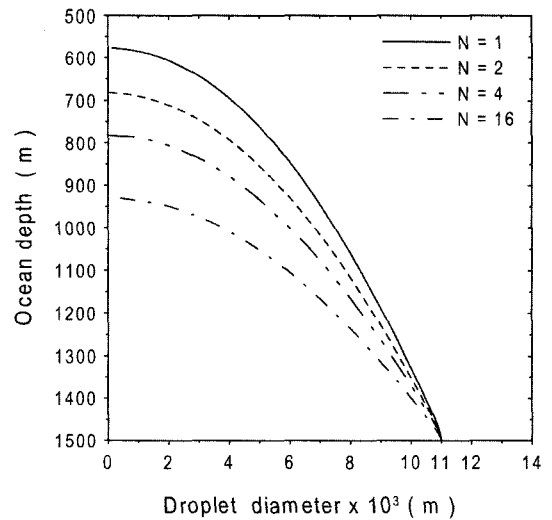


Fig. 14. Effect of number of nozzles on the CO<sub>2</sub> droplets released at 1,500 m in depth by a fixed pipeline.

### 3-4. 하이드레이트 영향평가

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

$$C_o = \varepsilon C_s \tag{39}$$

여기서  $\varepsilon$ 은 하이드레이트 효과를 나타내는 계수로 Hirai

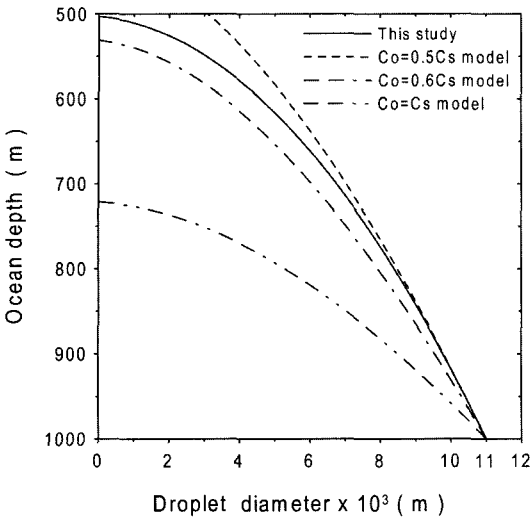


Fig. 15. Effect of hydrate on CO<sub>2</sub> dissolution behavior released at 1,000 m in depth by a moving ship.

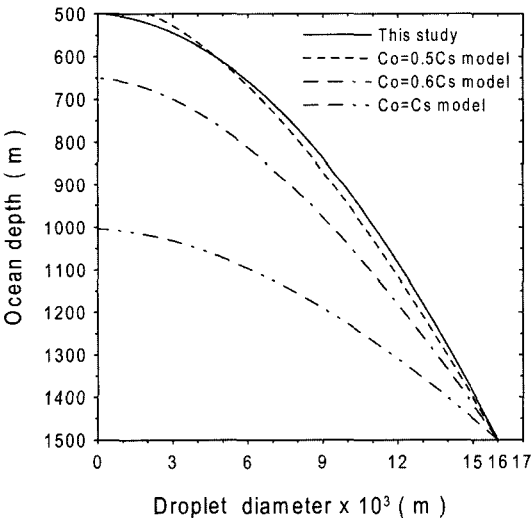


Fig. 16. Effect of hydrate on CO<sub>2</sub> dissolution behavior released at 1,500 m in depth by a moving ship.

등은  $\epsilon$ 값이 0.5라고 제시하였다<sup>[8]</sup>. 그러나 본 연구의 결과인 Fig. 15와 Fig. 16에 나타난 것과 같이 1,500 m에서는  $\epsilon$ 가 0.5일 때 잘 일치하고 있으나, 1,000 m의 경우는 0.6일 경우가 더 합리적이라고 할 수 있다.

#### 4. 결 론

움직이는 배와 고정파이프라인을 이용하여 중층심해에 액체 이산화탄소를 분사시킬 경우 이산화탄소 용해

특성을 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) 500 m 이하의 바다깊이에서 해수의 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) 1,000 m와 1,500 m에서 초기 액적지름을 움직이는 배의 경우 0.011 m와 0.016 m, 고정 파이프라인의 경우 0.007 m와 0.011 m로 만들어 주어야 500 m 이하에서 완전히 용해되므로 고정 파이프라인을 이용하는 방법보다는 움직이는 배에서 분사하는 방법이 용해측면에서 유리함을 알 수 있었다.
- (5) 액적군은 밀도차 때문에 발생하는 필링의 영향으로 수축과 팽창을 반복함을 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 알 수 있다.

#### 후 기

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

#### 기호설명

- A : CO<sub>2</sub> 액적의 표면적[m<sup>2</sup>]
- B : 부력[kg/sec<sup>2</sup>]
- b : 액적군 반경[m]
- C<sub>D</sub> : 마찰계수
- C<sub>m</sub> : 액적군 중심농도[kg/m<sup>3</sup>]
- C<sub>o</sub> : CO<sub>2</sub> 액적의 표면농도[kg/m<sup>3</sup>]
- C<sub>s</sub> : CO<sub>2</sub> 용해도[kg/m<sup>3</sup>, kmol/m<sup>3</sup>]
- C<sub>w</sub> : 액적군내 평균 CO<sub>2</sub> 농도[kg/m<sup>3</sup>]
- C<sub>∞</sub> : 주변농도[kg/m<sup>3</sup>]
- D : 확산계수[m<sup>2</sup>/s]
- D<sub>n</sub> : 분사노즐 직경[m]
- d<sub>co<sub>2</sub></sub> : CO<sub>2</sub> 액적의 지름[m]



- $d_{rel}$  : 분사지점에서 액적의 지름[m]
- $d_z$  : 깊이  $z$ 에서 액적의 지름[m]
- $f_{CO_2}$  : CO<sub>2</sub> 푸가시티[MPa]
- $g$  : 중력가속도[m/sec<sup>2</sup>]
- $k$  : 물질전달계수[W/m · K]
- $K_{Hl}$  : 헨리상수[MPa]
- $M$  : 모멘트[kg · m/sec]
- $M_{s,w}$  : 해수의 분자량[kg/kmol]
- $n_{CO_2}$  : CO<sub>2</sub> 몰수[kmol]
- $P$  : 압력[MPa]
- $q_z$  : 깊이  $z$ 에서 체적유량[m<sup>3</sup>/sec]
- $q_{rel}$  : 분사지점에서 체적유량[m<sup>3</sup>/sec]
- $R$  : 액적군 반경 [m]
- $S$  : 염분 [%]
- $T$  : 온도[K]
- $U$  : CO<sub>2</sub> 부력속도[m/sec]
- $V$  : 액적의 체적 [m<sup>3</sup>]
- $V_{CO_2}$  : CO<sub>2</sub> 몰체적[m<sup>3</sup>/kmol]
- $W$  : 액적군 상승속도[m/sec]
- $W_m$  : 액적군 중심속도[m/sec]
- $x_{CO_2}$  : 해수에서 CO<sub>2</sub>의 몰분율
- $x_{CO_2}^w$  : 순수물에서 CO<sub>2</sub>의 몰분율
- $y$  : 분사지점에서의 거리[m]
- $z$  : 바다깊이[m]

**그리스 문자**

- $\alpha$  : Salting-out 계수
- $\beta$  : 해수 전환계수
- $\gamma$  : 모멘텀 증폭계수
- $\epsilon$  : 하이드레이트 효과
- $\lambda_1$  : U에서 농도의 확장율
- $\lambda_2$  : U에서 액적군 중심에서의  $\Delta P_w$ 의 확장율
- $\mu_{s,w}$  : 해수의 점성계수[N · sec/m<sup>2</sup>]
- $\nu_{s,w}$  : 해수의 동점성계수[m<sup>2</sup>/sec]
- $\rho_a$  : 액적군 주변 해수밀도[kg/m<sup>3</sup>]
- $\rho_{CO_2}$  : 이산화탄소의 밀도[kg/m<sup>3</sup>]
- $\rho_{mix}$  : 액적군내 평균밀도[kg/m<sup>3</sup>]
- $\rho_{ref}$  : 분사지점 주변 해수밀도[kg/m<sup>3</sup>]
- $\rho_{s,w}$  : 해수밀도[kg/m<sup>3</sup>]
- $\rho_w$  : 액적군 내의 해수밀도[kg/m<sup>3</sup>]
- $\Phi$  : 해수의 무차원 상관계수

**참고문헌**

1. Marchetti, C.: "On geoengineering and CO<sub>2</sub> problem, climate change", 1, 59 (1977).

2. Steinberg, M., Cheng, H.C. and Horn, F.: "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., 42-58 (1984).

3. Fujioka, Y., Ozaki, M., Takeuchi, K., Shindo, Y. and Herzog, H.J.: "Cost comparison in various CO<sub>2</sub> ocean disposal option", Energy Convers. Mgmt., 38, s273 (1997).

4. Sam, H.: "Safety of the underground disposal of carbon dioxide", Energy Convers. Mgmt., 38, s241 (1997).

5. Herzog, H.J., Adams, A.A., Auerbach, A. and Caulfield, J.: "Environmental impacts of ocean disposal of CO<sub>2</sub>", Energy Convers. Mgmt., 37(6-8), 999 (1996).

6. Teng, H. and Yamasaki, A.: "Solubility of liquid CO<sub>2</sub> 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, 43, 2 (1998).

7. Nishikawa, N., Ishibashita, M., Ohta, H., Akutsu, N., Tajika, M., Sugitani, T., Hiraoka, R., Kimuro, H. and Moritoki, M.: "Stability of liquid CO<sub>2</sub> spheres covered with clathrate film when exposed to environment simulating the deep sea", Energy Convers. Mgmt., 36, 489 (1995).

8. Hirai, S., Okazaki, K., Araki, Yazawa, H., Ito, H. and Hijikata, K.: "Transport phenomena of liquid CO<sub>2</sub> in pressurized water flow with clathrate-hydrate at the interface", Energy Convers. Mgmt., 36(6-8), 489 (1996).

9. Hirai, S., Okazaki, K., Tabe, Y., Hijikata, K. and Mori, Y.: "Dissolution rate of li-iquid CO<sub>2</sub> in pressurized water flows and the effect of clathrate film", Energy Convers. Mgmt., 22(2-3), 285 (1997).

10. Aya, I., Yamane, K. and Yamada, N.: "Stability of clathrate-hydrate of carbon di-oxide in highly pressurized water", ASME HTD, 215, 17 (1992).

11. Shindo, Y., Fujikoka, Y., Yanagishita, Y., Hakuta, T. and Komiyama, H.: "Formation of stability of CO<sub>2</sub> hydrate, direct ocean disposal of carbon dioxide", Terrapub, Tokyo, Japan, 217 (1995).

12. Kim, N.J., Lee, J.Y., Hur, B.G., Seo, T.B. and Kim, C.B.: "Dissolution characteristics of liquid carbon dioxide injected at the intermediate depth of the ocean", KSME Int, J., 14(11), 1276 (2000).

13. Teng, H., Masutani, S.M., Kinoshita, C.M. and Nohous, G.C.: "Solubility of CO<sub>2</sub> in the ocean and its effect on CO<sub>2</sub> dissolution", Energy Convers. Mgmt.,

- 37(6-8), 1029 (1996).
14. Loken, K.P. and Austvik, T.: "Deposition of carbon dioxide on the seabed in the form of hydrates, part II", *Energy Convers. Mgmt.*, 34(9-11), 1081 (1993).
  15. King, M.B.: "Phase equilibrium in mixtures", Pergamon Press, London 1969).
  16. Mori, Y.H. and Mochizuki, T.: "Dissolution of liquid CO<sub>2</sub> into water at high pressures: a search for the mechanism of dissolution being retarded through hydrate-film formation", *Energy Convers. Mgmt.*, 39(7), 569 (1998).
  17. Clift, R., Grace, J.R. and Weber, M.E.: "Bubbles, drops and particles", Academic Press, 97 (1978).
  18. Wilke, C.R. and Chang, P.: "Correlation of diffusion coefficient in dilute solutions", *A. I. Ch. J.*, 1, 264 (1995).
  19. Morton, B.R., Taylor, G.I. and Turner, J.S.: "Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources", *Proceedings of the Royal Society*, A234, 1 (1956).
  20. Rayyan, F.M.: "Hydrodynamics of bubble plumes incorporating gas transfer in stratified impoundments", Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin (1974).
  21. Milgram, J.H.: "Mean flow in round bubble plumes", *J. of Fluid Mechanics*, 133, 345 (1983).