

# 지구온난화 저감을 위한 이산화탄소 하이드레이트 용해거동에 대한 수치적 연구

김남진\*, 서항민, 천원기

## Numerical Study on the Dissolution Behavior of CO<sub>2</sub> Hydrate for Global Warming Mitigation

Namjin Kim, Hyangmin Seo, Wongee Chun

**Abstract** The idea of CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> hydrate when liquid carbon dioxide is released at 1,000m and 1,500m in depth are performed. The results show the liquid CO<sub>2</sub> injected in the ocean becomes CO<sub>2</sub> bubble at between 350 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 CO<sub>2</sub> 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)

\* 제주대학교 에너지 공학과

□E-mail : Jnkim@cheju.ac.kr □Tel : (064) 754-3643 □Fax : (064) 757-9276

### Nomenclature

*A* : Surface area of a CO<sub>2</sub> droplet [m<sup>2</sup>]  
*B* : Buoyancy [kg/sec<sup>2</sup>]  
*b* : Plume half width [m]  
*C<sub>D</sub>* : Drag coefficient  
*C<sub>m</sub>* : Centerline CO<sub>2</sub> concentration of plume [kg/m<sup>3</sup>]  
*C<sub>0</sub>* : Surface concentration with hydrate [kg/m<sup>3</sup>]  
*C<sub>w</sub>* : Average Concentration of CO<sub>2</sub> volume per unit plume volume [kg/m<sup>3</sup>]  
*C<sub>∞</sub>* : Ambient CO<sub>2</sub> concentration of a droplet [kg/m<sup>3</sup>]  
*D* : Diffusion coefficient [m<sup>2</sup>/s]  
*d<sub>CO<sub>2</sub></sub>* : Diameter of a CO<sub>2</sub> droplet [m]  
*D<sub>r</sub>* : Diameter of release port [m]  
*d* : Droplet diameter at release poin [m]  
*d<sub>z</sub>* : Droplet diameter at depth z [m]

*g* : Gravitational acceleration [m/sec<sup>2</sup>]  
*k* : Mass transfer coefficient [W/m·K]  
*M* : Moment [kg·m/sec]  
*M<sub>sw</sub>* : Molecular weight of seawater [kg/kmole]  
*P* : Pressure [MPa]  
*q* : CO<sub>2</sub> volume flux at release depth [m<sup>3</sup>/sec]  
*q<sub>z</sub>* : CO<sub>2</sub> volume flux at depth z [m<sup>3</sup>/sec]  
*R* : Radial distance from plume centerline [m]  
*T* : Temperature [K]  
*U* : Rising velocity of a CO<sub>2</sub> droplet [m/sec]  
*U<sub>sw</sub>* : Velocity of the surrounding seawater [m/sec]  
*V* : Volume of a CO<sub>2</sub> droplet [m<sup>3</sup>]  
*V<sub>CO<sub>2</sub></sub>* : Mole volume of a CO<sub>2</sub> droplet [m<sup>3</sup>/kmol]  
 *$\bar{W}$*  : Local mean plume velocity [m/sec]  
*W<sub>m</sub>* : Centerline velocity of plume [m/sec]  
*y* : Distance from release point [m]  
*z* : Ocean depth [m]

- $\beta$  : Entrainment coefficient
- $\gamma$  : Momentum amplification factor
- $\lambda_1, \lambda_2$  : Spreading ratio
- $\mu_{sw}$  : Viscosity of seawater [N sec/m<sup>2</sup>]
- $\nu_{sw}$  : Kinematic viscosity of seawater [m<sup>2</sup>/sec]
- $\rho_a$  : Ambient CO<sub>2</sub> concentration of plume [kg/m<sup>3</sup>]
- $\rho_{CO_2}$  : Density of local CO<sub>2</sub> [kg/m<sup>3</sup>]
- $\rho_{mix}$  : Density of plume [kg/m<sup>3</sup>]
- $\rho_{ref}$  : Ambient seawater density of release point [kg/m<sup>3</sup>]
- $\rho_{sw}$  : Density of seawater [kg/m<sup>3</sup>]
- $\rho_w$  : Local density of seawater within the plume [kg/m<sup>3</sup>]
- $\rho_{wm}$  : Centerline density of seawater within the plume [kg/m<sup>3</sup>]
- $\Phi$  : Dimensionless association factor of seawater

## 1. 서론

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 3,000m 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. 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. 따라서 본 연구에서는 동해안의 중층심해에 고정된 파이프라인과 움직이는 배에서 액체 이산화탄소를 분사시킬 경우 해수의 온도와 분사방법에 따른 이산화탄소 액적의 용해거동을 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.

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

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

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

여기서

$$\frac{d}{dt}(d_{CO_2}) = \frac{dd_{CO_2}}{dz} \cdot \frac{dz}{dt} = \frac{dd_{CO_2}}{dz} (U - U_s) \quad (4)$$

$$\frac{d}{dt}(\rho_{CO_2}) = \frac{d\rho_{CO_2}}{dz} \cdot \frac{dz}{dt} = \frac{d\rho_{CO_2}}{dz} (U - U_s) \quad (5)$$

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 물질 전달 계수  $k$ 는 다음 식으로부터 유도할 수 있다.

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

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

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

우변 첫 번째 항은 두 번째 항에 비해서 매우 작기 때문에 무시할 수 있다. 따라서 다음 식으로 정리할 수 있다.

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

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

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

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

이 된다. 여기서 부력속도 U와 확산계수 D는 다음의 식으로 표현된다.

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

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

또한, 고정된 파이프라인에서 분사된 이산화탄소는 Fig 1과 같이 액적군을 이루며 상승한다. 따라서 용해거동에 대한 지배 방정식은 식(6)을 변형하여 액적군 중심에서의 농도와 속도로 표시할 수 있다.

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

이고, 바다깊이에 따른 이산화탄소의 체적유량은

$$q_z = q_{rel} \left( \frac{dz}{d_{rel}} \right)_{CO_2}^3 = \int_R 2\pi \bar{C}_w (U + \bar{W}) R dR \quad (15)$$

이고, 액적군 임의의 위치에서 속도와 농도는

$$\bar{W} = W_m e^{(-R^2/b^2)} \quad (16)$$

$$\bar{C}_w = C_m e^{(-R^2/(\lambda_1 b^2))} \quad (17)$$

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

$$C_m = \frac{\frac{q_z}{\pi b^2 \lambda_1}}{W_m \frac{1}{1 + \lambda_1^2} + U} \quad (18)$$

유체의 체적유량은

$$Q = \int_0^\infty (1 - \bar{C}_w) 2\pi \bar{W} R dR \\ \approx \int_0^\infty 2\pi \bar{W} R dR = \pi W_m b^2 \quad (19)$$

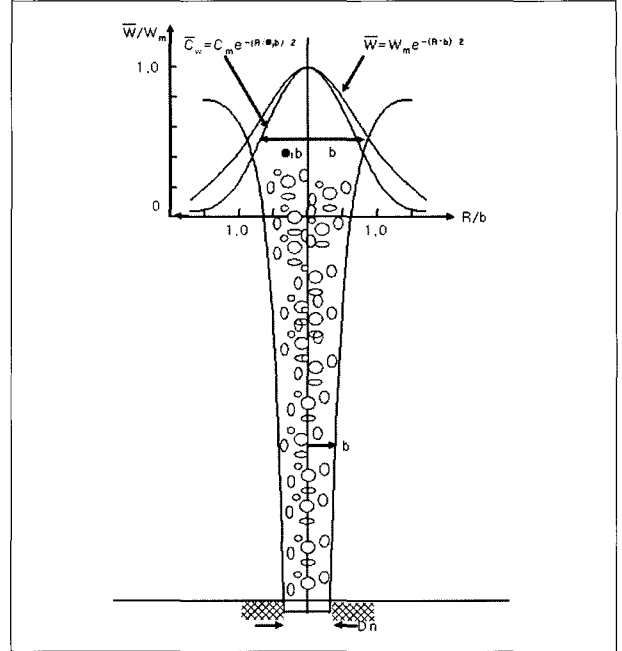


Fig.1 Schematic of a plume.

이고, 액적군 내로 유입되는 물의 전환속도는

$$W_e = \beta W_m$$

$$\frac{dQ}{dy} = 2\pi b W_e = 2\pi \beta b W_m \quad (20)$$

$$\frac{d}{dy} (W_m b^2) = 2\beta b W_m \quad (21)$$

가 성립한다. 또한 액적군에 작용하는 유일한 외력이 부력이 라고 가정하면 운동량방정식은

$$\frac{dM}{dy} = B_y$$

$$\frac{d}{dy} \int_0^\infty 2\pi \gamma \bar{W}^2 \rho_{ref} R dR = \int_0^\infty 2\pi g (\rho_a - \rho_{mix}) R dR \quad (22)$$

이 되고

$$\rho_a = \rho_w - \Delta \rho_{wm} e^{-R^2/(\lambda_1 b)^2} \quad (23)$$

$$\rho_{mix} = \bar{C}_w \rho_{CO_2} + (1 - \bar{C}_w) \rho_w \quad (24)$$

를 식(22)에 대입하면

$$\frac{d}{dy} (b^2 W_m^2) = \frac{2gb^2}{\gamma} \left( C_m \lambda_1^2 \frac{\rho_w - \rho_{CO_2}}{\rho_{ref}} - \lambda_1^2 \frac{\Delta \rho_{wm}}{\rho_{ref}} \right) \quad (25)$$

이 된다. 따라서 식(21)에서

$$\begin{aligned} \frac{d}{dy} (W_m) b^2 + 2b W_m \frac{db}{dy} &= 2\beta b W_m \\ \frac{db}{dy} &= \beta - \frac{b}{2W_m} \frac{dW_m}{dy} \end{aligned} \quad (26)$$

가 되고, 식(25)에서

$$\begin{aligned} 2W_m b^2 \frac{dW_m}{dy} + 2b W_m^2 \frac{db}{dy} &= \\ \frac{2gb^2}{\gamma} \left( C_m \lambda_1^2 \frac{\rho_w - \rho_{CO_2}}{\rho_{ref}} - \lambda_2^2 \frac{\Delta\rho_{wm}}{\rho_{ref}} \right) \end{aligned} \quad (27)$$

가 된다. 식(27)에 식(26)을 대입하여 액적군 중심에서 깊이  
에 따른 최대속도를 구하면

$$\begin{aligned} \frac{dW_m}{dz} &= -\frac{2g}{\gamma W_m} \left( C_m \lambda_1^2 \frac{\rho_w - \rho_{CO_2}}{\rho_{ref}} \right. \\ &\quad \left. - \lambda_2^2 \frac{\Delta\rho_{wm}}{\rho_{ref}} \right) + \frac{2\beta W_m}{b} \end{aligned} \quad (28)$$

이고, 액적군의 반경은 다음과 같다.

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

만약 식(29)의 우변에서

$$C_m \lambda_1^2 \frac{\rho_w - \rho_{CO_2}}{\rho_{ref}} < \lambda_2^2 \frac{\Delta\rho_{wm}}{\rho_{ref}} \quad (30)$$

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

$$B_w = \int_0^\infty 2\pi(\rho_{ref} - \rho_w) R dR \quad (31)$$

이 되므로

$$\begin{aligned} \frac{d}{dy} \int_0^\infty 2\pi \bar{W} (\rho_{ref} - \rho_w) R dR &= \\ 2\pi b \beta W_m (\rho_{ref} - \rho_a) \end{aligned} \quad (32)$$

가 성립하고, 식(16), 식(21), 식(23)를 대입하여 정리하면 다  
음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d}{dz} \Delta\rho_{wm} = -\frac{1 + \lambda_2^2}{\lambda_2^2} \frac{d\rho_a}{dz} + \frac{2\beta \Delta\rho_{wm}}{b} \quad (33)$$

### 3. 계산결과 및 고찰

#### 3.1 용해 깊이

본 연구에서는 해수의 깊이가 10m 변할 때마다 압력이  
0.1MPa씩 변한다고 가정하였으며, 특정 온도와 압력 하에서  
이산화탄소의 물성치는 미국 표준 연구소에서 제공하는  
REFPROP 6.01 (1998)과 동해안의 바다깊이에 따른 해수의  
온도는 한국지질연구원에서 실측한 결과를 사용하여 Fig.2와  
Fig. 3에 바다깊이에 따른 해수온도와 이산화탄소의 밀도변화  
를 나타내었다. Fig.2에서 볼 수 있듯이 동해안의 경우 바다깊  
이 300 m이하에서는 온도변화가 거의 없었다. 또한 동해안의  
경우 바다깊이 약 350 m에서 이산화탄소가 액체에서 기체로  
기화한다는 것을 Fig.3에서 확인할 수 있다. 만약 동해안에 분  
사된 액체 이산화탄소가 350 m 이하의 깊이에서 용해되지 않  
으면, 액체 이산화탄소가 기체로 기화되기 때문에 빠른 부력속  
도를 갖게 되어 대기로 환원될 가능성이 매우 높게 된다. 따라  
서 동해안에 분사된 액체 이산화탄소는 350 m 깊이에 도달하  
기 전까지 해수에 완전히 용해시킬 수 있는 기술이 필요함을  
알 수 있다.

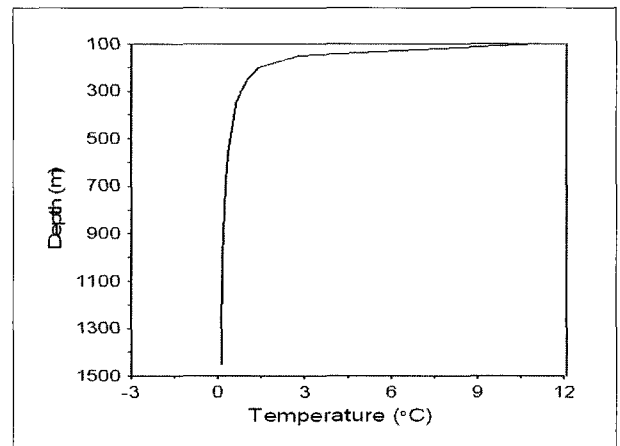


Fig.2 Temperature distribution of liquid CO<sub>2</sub> along depth.

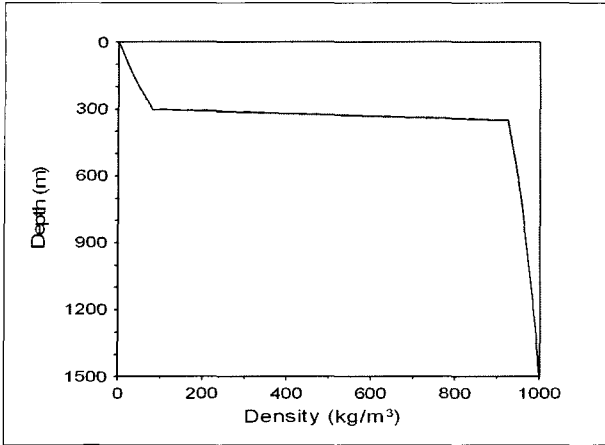


Fig.3 Density distribution of liquid CO<sub>2</sub> along depth.

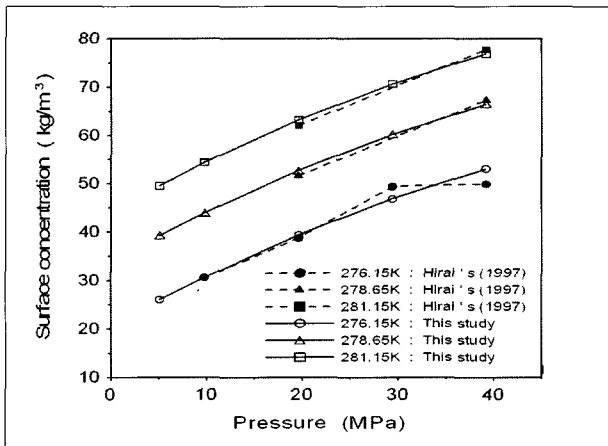


Fig.4 Surface concentration of a CO<sub>2</sub> droplet with the hydrate in pure water.

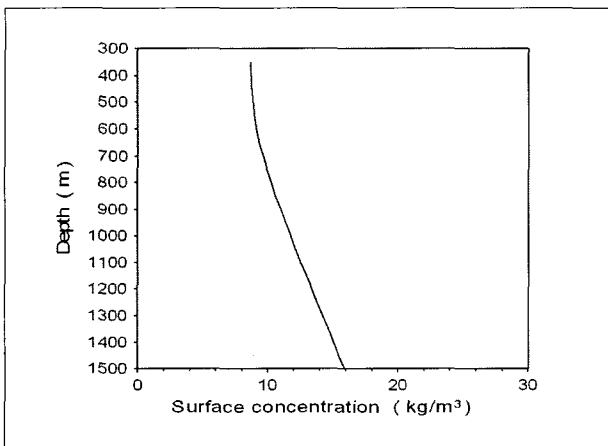


Fig.5 Surface concentration of a CO<sub>2</sub> droplet with the hydrate along depth in seawater.

### 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.

$$C_o = A + B \times P + C \times P^2 + \alpha \times T + \beta \times T^2$$

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

$$\alpha = 135.163, \beta = -2.34 \times 10^{-1} \quad (34)$$

Fig.4는 일본 동경공업대학에서 측정된 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.5에 표시하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 동해안의 경우 바다깊이가 깊어질수록 이산화탄소 표면농도가 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 동해안의 경우 300 m이하의 바다깊이에서는 온도가 변하지 않기 때문에 이산화탄소의 표면농도가 온도보다는 압력의 영향을 더 받기 때문인 것으로 사료된다.

### 3.3 이산화탄소 액적의 용해거동

이산화탄소의 분사량을 500MW급 화력발전소에서 배출하는 이산화탄소의 양 133kg/s를 기준으로 하였으며, 그 분사깊이는 1,000m와 1,500m로 하였다. 또한 분사노즐의 직경을 0.1m로 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 사용하

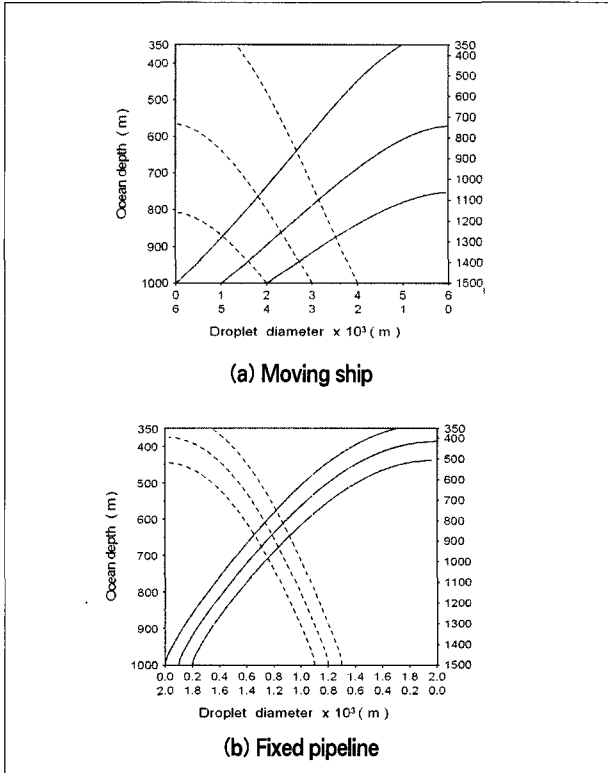


Fig.6 Dissolution behavior of the CO<sub>2</sub> droplets with the hydrate in the East Sea

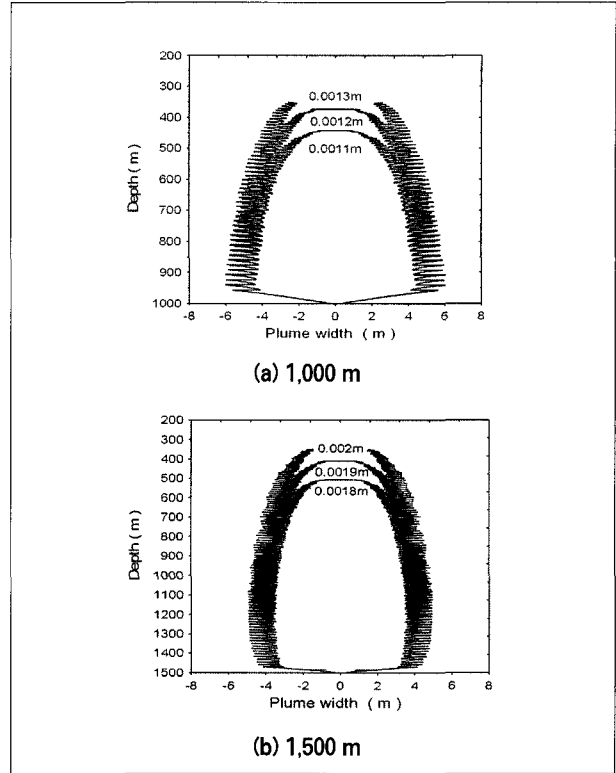


Fig.7 Plume width (2b) on the CO<sub>2</sub> droplets released from a fixed pipeline in the East Sea

였다.

### 3.3.1 움직이는 배에서 분사된 이산화탄소 액적의 용해거동

Fig.6은 동해안지역에서 움직이는 배를 이용하여 바다깊이 1,000 m와 1,500 m에서 액체 이산화탄소를 분사시킬 경우의 용해거동을 나타낸 그림이다. 동해안의 경우 Fig.6(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. 따라서 이산화탄소를 해양에 용해시키기 위해서는 분사되는 액적의 초기 지름이 중요함을 알 수 있다.

### 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 표시 하였다. 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 용해되었다. 또한 Fig.7에서 볼 수 있듯이 액적군 내의 밀도와 주변의 밀도차로 인하여 발생하는 필링의 영향으로 수축·팽창을 반복하고 있음을 알 수 있다. 따라서 Fig.6과 Fig.7을 비교해보면 고정된 파이프라인에서 분사하는 방법보다는 움직이는 배에서 분사하는 방법이 이산화탄소 용해에 더 효과적이란 사실을 알 수 있다.

## 4. 결 론

동해안지역의 경우 바다깊이 350 m에서 이산화탄소는 액체에서 기체로 기화되므로 350 m 이하의 깊이에서 해수에 완전히 용해시키는 기술이 필요함을 알 수 있었다. 또한, 액적군은 밀도차 때문에 발생하는 필링의 영향으로 수축과 팽창을 반복

함을 확인하였고, 파이프라인보다는 움직이는 배에서 분사하는 방법이 이산화탄소 용해에 더 효과적임을 알 수 있었다.

## 후기

이 논문은 2006년도 정부재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2006-003-D00050).

---

### Reference

---

- (1) Fujioka, Y., Ozaki, M., Takeuchi, K., Shindo, Y. and Herzog, H.J., 1997, Cost comparison in various CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> in the ocean and its effect on CO<sub>2</sub> dissolution, *Energy Convers. Mgmt.*, Vol.37, No.6-8, pp.1029-1038.
- (3) Hirai, S., Tabe, Y., Tanaka, G., and Okazaki, K., 1998, Advanced CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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) Wilke, C.R. and Chang, P., 1955, 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 CO<sub>2</sub> 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.

**김 남 진**



1993년 인하대학교 기계공학과 공학사  
1995년 인하대학교 기계공학과 공학석사  
2003년 인하대학교 기계공학과 공학박사

현재 : 제주대학교 기계·에너지·시스템공학부 전임강사  
(E-mail ; jnkim@cheju.ac.kr)

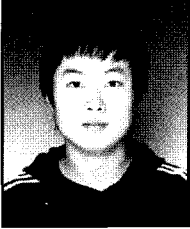
**천 원 기**



1981년 한양대학교 원자력공학과 공학사  
1984년 미국 Univ. of Utah 대학 공학석사  
1986년 미국 Univ. of Utah 대학 공학박사

현재 : 제주대학교 기계·에너지·시스템공학부 교수  
(E-mail ; wgchun@cheju.ac.kr)

**서 향 민**



2001년 제주대학교 기계에너지시스템공학부 입학

현재 : 제주대학교 에너지공학과 3학년  
(E-mail ; shoo5029@cheju.ac.kr)