

[논문] 태양에너지  
*Solar Energy*  
Vol. 20, No. 2, 2000

## 중층심해에 분사된 액체 이산화탄소의 용해특성

김남진\*, 이재용\*, 서태범\*\*, 김종보\*\*

\* 인하대학교 대학원

\*\* 인하대학교 기계공학과

## Dissolution Characteristics of Liquid CO<sub>2</sub> Injected at the Intermediate Depth of the Ocean

N.J.Kim\*, J.Y.Lee\*, T.B.Seo\*\*, C.B.Kim\*\*

\* *Graduate School, In-ha University*

\*\* *Department of Mechanical Engineering, In-ha University*

### Abstract

Global warming induced by greenhouse gases such as carbon dioxide is a serious problem for mankind. 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, the solubility, the surface concentration, the droplet size and other factors of liquid carbon dioxide at various depths are calculated. The results show that liquid carbon dioxide changes to carbon dioxide bubble around 500 m in depth, and the droplet is completely dissolved below 500 m in depth if carbon dioxide droplet is released both at 1000 m in depth with the initial droplet diameter of 0.011 m or less and at 1500 m in depth with the diameter of 0.015 m or less. In addition, the hydrate film acts as a resistant layer for the dissolution of liquid carbon dioxide. The surface concentration of carbon dioxide droplet with the hydrate film is about 50% at 1500 m in depth and about 60% at 1000 m in depth of the carbon dioxide solubility. Also, the ambient carbon dioxide concentration in the plume is an another crucial parameter

for complete dissolution at the intermediate ocean depth, and the injection of liquid carbon dioxide from a moving ship is more effective than that from a fixed pipeline.

## 1. 서 론

산업의 발전으로 인한 대기중 이산화탄소 농도의 증가가 이상 기온 현상을 일으키는 지구 온난화의 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 대기중 이산화탄소의 농도를 감소시키기에 역부족인 반면, 해양에 대량으로 처리하는 방법이 이산화탄소의 농도를 격감시키는 기술이라고 알려져 있다.<sup>1,2)</sup> 이는 화석연료 사용시 배기가스에서 이산화탄소를 분리하여, 파이프라인을 통해 해양에 대량으로 처리하는 기술로써, 지구 온난화를 완화시키는 결정적인 방법이라고 제안된 이후, 이에 대한 활발한 연구가 진행되어 오고 있다. 해양에 처리하는 기술은 크게 2가지로 분류되는데 첫째는 중층심해 500 m 에서 1500 m 사이에 이산화탄소를 분사시켜 해수에 용해시키는 방법이고, 둘째는 이산화탄소의 밀도가 해수의 밀도보다 크게 되는 2500 m 이하의 심해저에 저장하는 방법이다.

이산화탄소를 해양에 처리함으로써 발생할 수 있는 생태계의 영향을 최소한으로 줄이면서 이 두 가지 방법을 발전시키기 위해서는 심해에서의 이산화탄소 거동을 정확히 예측하여야 한다. Sam<sup>3)</sup>은 이산화탄소 해양처리의 안정성에 관한 연구를 수행하였으며, Herzog 등<sup>4)</sup>은 해양 미생물에 미치는 영향을 실험으로 규명하였다.

Teng과 Yamasaki<sup>5)</sup>는 인공적으로 조성한 해수를 온도 278 K 에서 293 K, 압력 6.44 MPa 에서 29.49 MPa 까지 변화시키며 이산화탄소의 용해도에 대한 실험을 수행하였다. Nishikawa 등<sup>6)</sup>과 Hirai 등<sup>7,8)</sup>은 3000 m에 이산화탄소를 저장할 경우 발생하는 현상을 실험적으로 관찰하였으며, Aya 등<sup>9)</sup>과 Shindo 등<sup>10)</sup>은 순수물과 해수에서의 하이드레이트 막생성에 대한 연구를 수행하였다. 그리고 Teng 등<sup>11)</sup>은 해수면에서 1000 m 깊이까지의 이산화탄소 용해도와 물질 전달율을 예측하였으며, Loken 과 Austvik<sup>12)</sup>은 하이드레이트 막의 평형상태도를 실험적으로 제시하였다.

그러나 이산화탄소 액적의 용해거동에 대한 대부분의 계산은 해수가 아닌 순수물을 사용하였으며<sup>7,8)</sup> 이산화탄소 액적과 해수 사이에 생성되는 하이드레이트막을 고려하지 않은 액체 이산화탄소의 순수 용해도를 사용하였다.<sup>11)</sup> 또한 깊이에 따른 이산화탄소 액적의 밀도와 물의 밀도 그리고 염도가 일정하다고 가정하여 계산을 수행하였다.<sup>6,7,8,9,10,11)</sup> 따라서 본 연구에서는 우리 나라가 유엔으로부터 광물채취권을 부여받은 Clipperton - clarion 해역의 한지점인 서경 125.5°, 북위 20.5°의 실제조건을 고려하여 하이드레이트 막이 생성된 이산화탄소 액적의 표면농도를 구하여 깊이 1000 m와 1500 m에 분사된 이산화탄소 액적의 용해거동을 예측하고, 하이드레이트 막이 생성된 액적의 표면농도와 하이드레이트 막을 고려하지 않은 이산화탄소 용해도사이의 관계와 플럼(plume) 내의 해수에 녹아 있는 이산화탄소 농도와 용해거동사이의 관계를 예측하고자 하는 것이다.

## 2. 이산화탄소의 용해도 계산

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 되므로, 해수가 이산화탄소에 용해되는 과정은 무시하고 이산화탄소가 해수에 용해되는 일방향성만을 고려한다. 따라서 이산화탄소의 용해도 ( $C_s$ ) 는 다음과 같이 정의된다.

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

여기서  $n_{CO_2}$  는 해수에 용해되어 있는 이산화탄소의 몰수이고,  $V_{s,w}$  는 일정 온도와 압력하에서의 순수 해수의 부피이다. 그리고 액체 이산화탄소의 용해도는 몰분률로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$x_{CO_2} = C_s / (C_s + \rho_{s,w} / M_{s,w}) \quad (2)$$

따라서 용해도 ( $C_s$ ) 는 다음과 같다.

$$C_s = \frac{x_{CO_2} \rho_{s,w}}{(1 - x_{CO_2}) M_{s,w}} \quad (3)$$

여기서  $x_{CO_2}$  는 몰분률로써 이산화탄소의 용해도이고,  $\rho_{s,w}$  과  $M_{s,w}$  는 각각 해수의 밀도와 몰질량이다. 순수물에서의 이산화탄소 용해도는 헨리의 법칙을 변형하여 얻을 수 있다<sup>13)</sup>.

$$x_{CO_2}^w = f_{CO_2} / K_H \quad (4)$$

여기서  $x_{CO_2}^w$  는 순수물에서의 이산화탄소 용해도이고,  $f_{CO_2}$  와  $K_H$  는 일정 온도와 압력하에서

이산화탄소의 휴가시티(fugacity) 와 헨리상수이다. 해수에서 이산화탄소의 용해도는 염분의 영향을 받는데 이때 염분을 고려한 식은 다음과 같다<sup>13)</sup>.

$$\ln(x_{CO_2} / x_{CO_2}^w) = \alpha S\% \quad (5)$$

여기서  $\alpha$  는 salting-out 계수이고  $S\%$  는 염도이다. 식(4)과 (5)로부터,  $x_{CO_2}$  는 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$x_{CO_2} = \left( \frac{f_{CO_2}}{K_H} \right) e^{\alpha S\%} \quad (6)$$

여기서 헨리상수 ( $K_H$ ) 와 salting-out 계수 ( $\alpha$ ) 는 다음과 같다<sup>5)</sup>.

$$K_H = a + b \times P + c \times P^2 \quad (7)$$

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

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

$$c = 0.022$$

$$\alpha = 0.543 - 3.54 \times 10^{-3}T + 5.69 \times 10^{-6}T^2 \quad (8)$$

여기서  $K_H$  의 단위는 MPa,  $P$  는 MPa 그리고  $T$  는 켈빈 (Kelvin) 온도이다.

## 3. 이산화탄소 액적의 용해거동

이산화탄소 액적의 용해거동에 대한 지배방정식은 다음과 같다.

$$d(\rho_{CO_2} V) / dt = -kA(C_o - C_\infty) \quad (9)$$

여기서  $\rho_{CO_2}$  는 이산화탄소 액적의 밀도이고,

V와 A는 각각 이산화탄소 액적의 부피와 표면적이다. 그리고  $C_o$ 와  $C_\infty$ 는 이산화탄소 액적의 표면농도와 주변의 이산화탄소 농도이고,  $k$ 는 물질 전달 계수이다.

이산화탄소 액적은 해수와의 접촉면에 생성되는 하이드레이트 막 때문에 강체와 같은 유동을 한다.<sup>7,8,14)</sup> 따라서 물질 전달 계수  $k$ 는 다음식으로부터 유도할 수 있다<sup>15)</sup>.

$$Sh = 1 + (Sc + 1/Re)^{1/3} 0.752 Re^{0.472} \quad (10)$$

만약  $Sc \gg 1/Re$  라고 가정하면, 식(10)은 식(11)로 간략히 나타낼 수 있다.

$$Sh = 1 + 0.752 Re^{0.472} Sc^{1/3} \quad (11)$$

식(11)에서 우변의 첫 번째 항은 두 번째 항에 비해서 매우 작기 때문에 무시할 수 있다. 따라서 식(11)은 다음과 같다.

$$Sh = 0.752 Re^{0.472} Sc^{1/3} \quad (12)$$

식(12)에  $Sh = kd_{CO_2}/D$ ,  $Re = Ud_{CO_2}/\nu_{s,w}$  그리고  $Sc = \nu_{s,w}/D$ 를 대입하여 물질 전달 계수  $k$ 에 대해서 정리하면

$$k = 0.752 \frac{U^{0.472} D^{2/3}}{d_{CO_2}^{0.528} \nu_{s,w}^{0.139}} \quad (13)$$

이 된다. 여기서  $\nu_{s,w}$ 는 해수의 동점성계수,  $U$ 는 부력속도이고,  $D$ 는 확산계수이다. 그리고 부력속도  $U$ 는<sup>15)</sup>

$$U = \sqrt{\frac{4d_{CO_2}(\rho_{s,w} - \rho_{CO_2})g}{3C_D \rho_{s,w}}} \quad (14)$$

이고, 여기서  $C_D$ 와  $g$ 는 각각 마찰계수와 중력 가속도이다. 식(13)의 확산계수  $D$ 는 다음의 식으로 표현된다<sup>16)</sup>.

$$D = \frac{7.4 \times 10^{-8} (\phi M_{s,w})^{0.5} T}{\mu_{s,w} V_{CO_2}^{0.6}} \quad (15)$$

여기서  $\phi$ 는 해수의 무차원 상관 계수 (dimensionless association factor),  $M_{s,w}$ 는 해수의 분자량,  $T$ 는 켈빈온도,  $\mu_{s,w}$ 는 해수의 점성계수 그리고  $V_{CO_2}$ 는 끓는 온도에서의 이산화탄소 몰부피이다.

액체 이산화탄소를 중층심해에 분사시킬 경우 이산화탄소 액적은 부력에 의해서 떠오르게 된다. 만약 식(9)에서  $C_o \gg C_\infty$  라고 가정하면, 바다 깊이 ( $z$ )의 함수로 이산화탄소 액적의 지름변화율을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d(d_{CO_2})}{dz} = - \frac{2kC_o}{(U - U_s)\rho_{CO_2}} - \frac{d_{CO_2}}{3\rho_{CO_2}} \frac{d(\rho_{CO_2})}{dz} \quad (16)$$

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

#### 4. 계산결과

본 연구에서는 해수의 깊이가 10 m 변할 때마다 압력이 0.1 MPa 씩 변한다고 가정하였으며, 일정 온도와 압력하에서 이산화탄소의 밀도 ( $\rho_{CO_2}$ )와 휴가시티 ( $f_{CO_2}$ )는 미국 표준 연구소에서 제공하는 데이터 프로그램을 사용하였다<sup>17)</sup>.

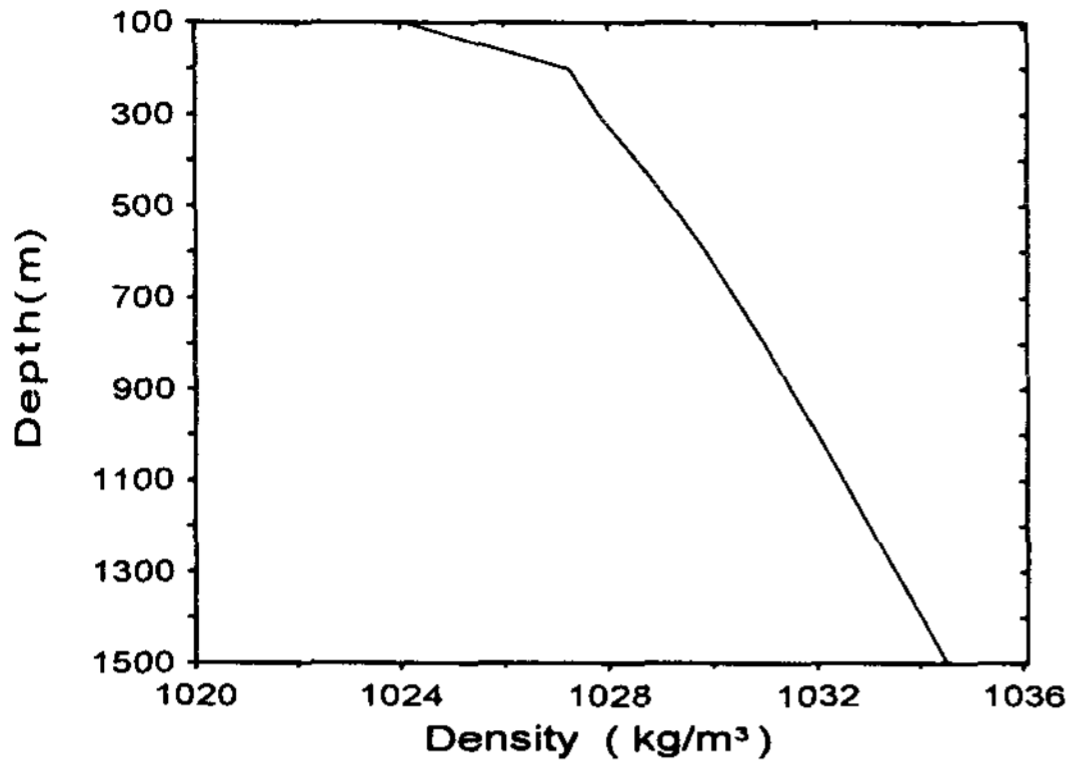


Fig. 1. Density distributions of seawater along depth.

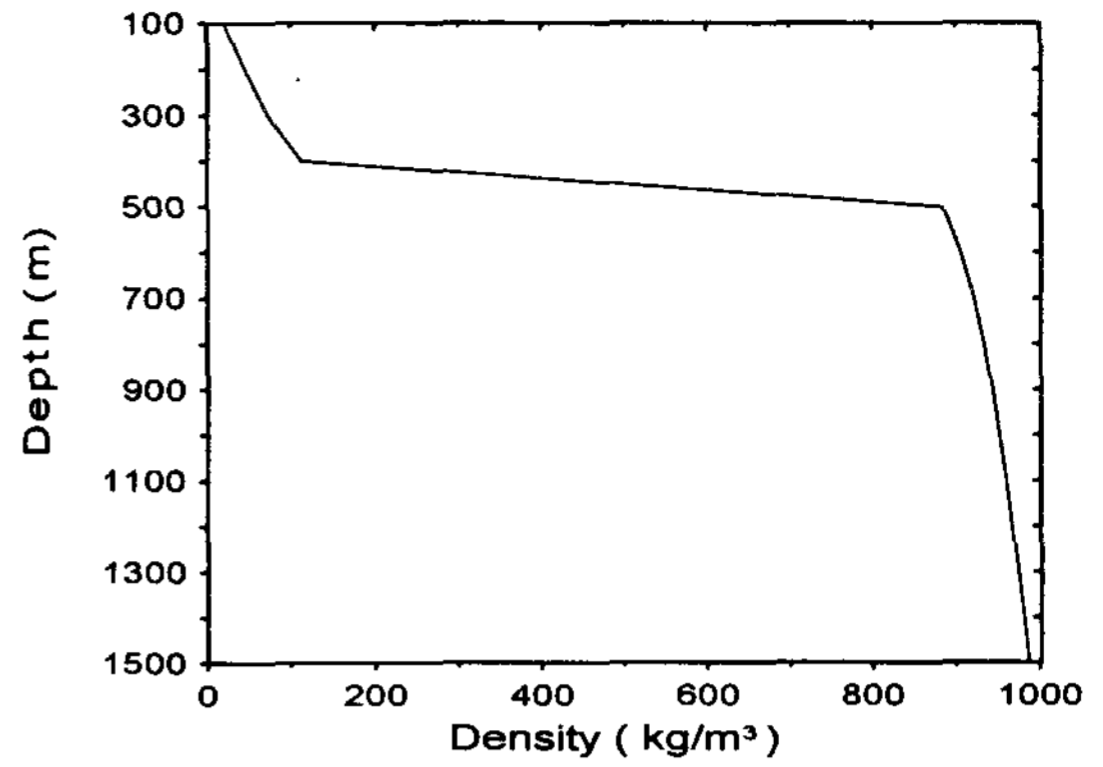


Fig. 4. Density distributions of liquid CO<sub>2</sub> along depth.

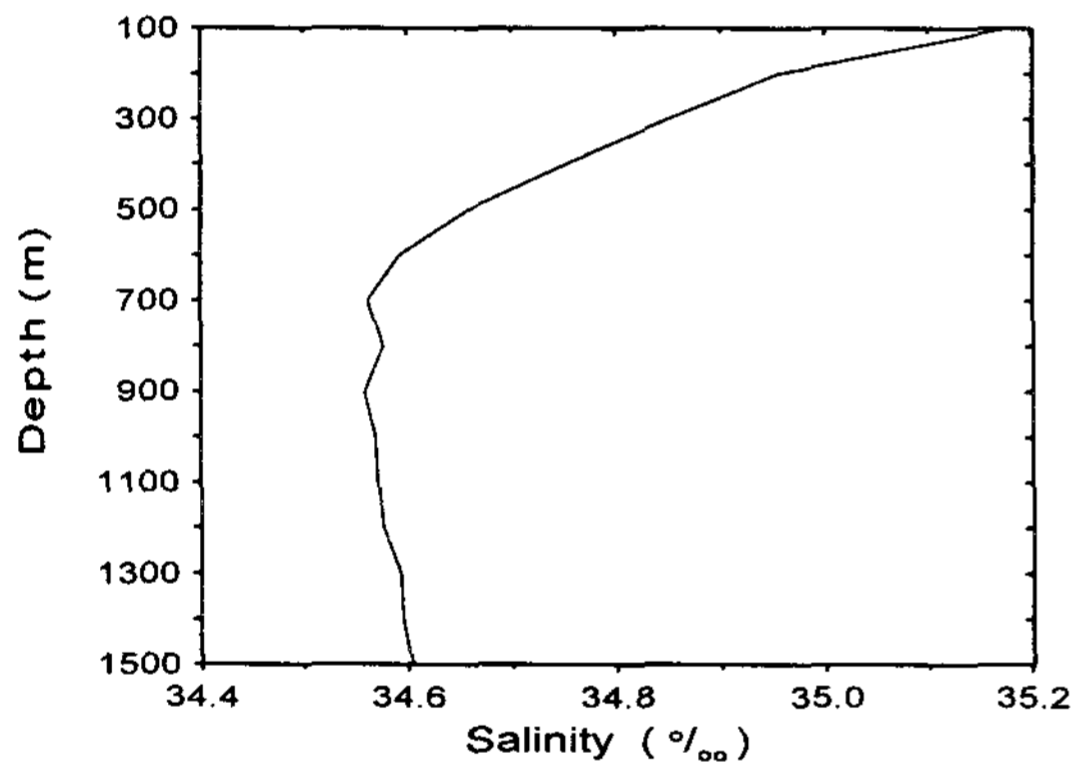


Fig. 2. Salinity distributions of seawater along depth.

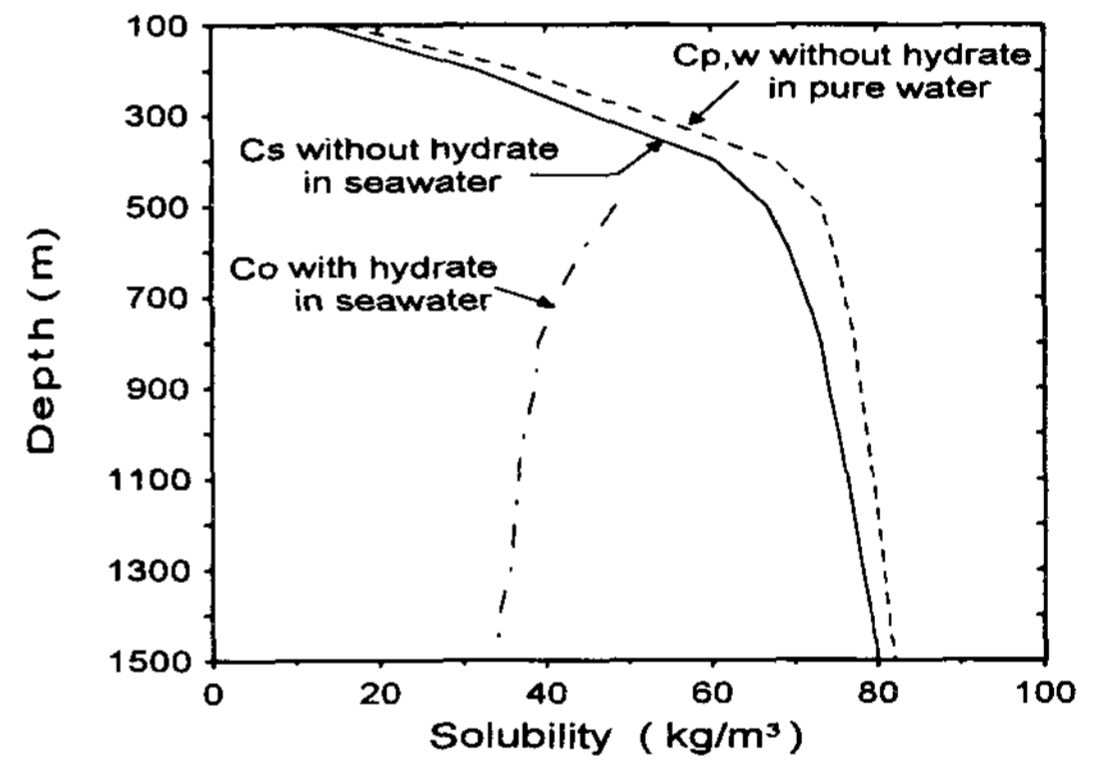


Fig. 5. Solubility distributions of liquid CO<sub>2</sub> along depth.

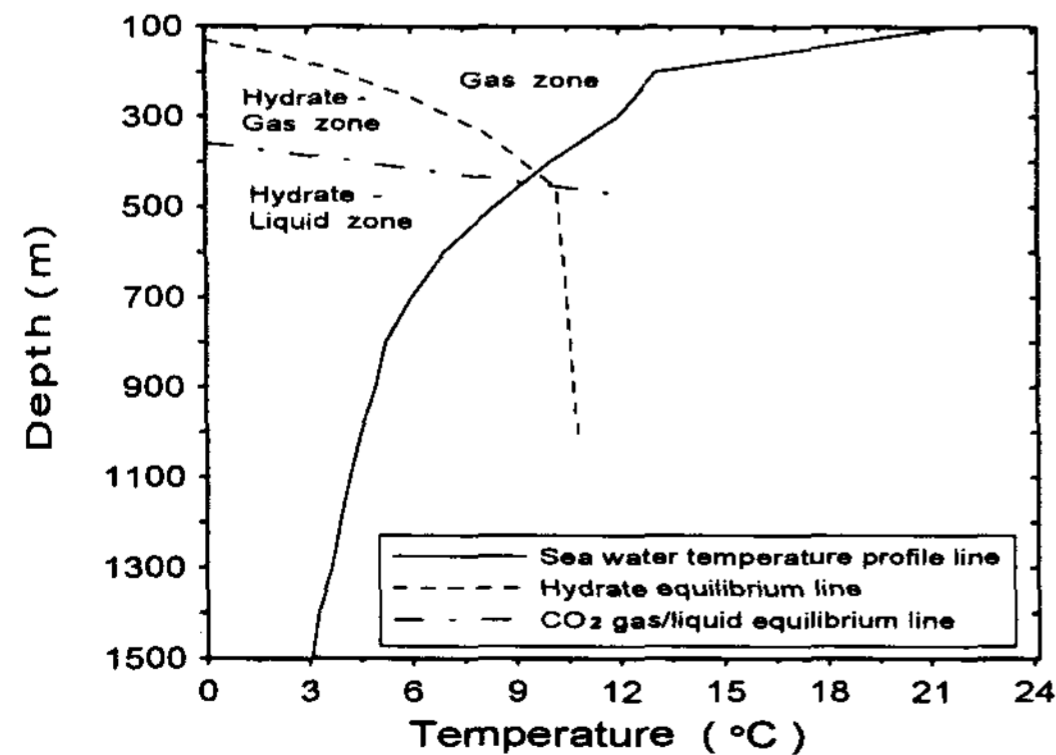


Fig. 3. Temperature distributions of sea-water along depth.

그리고 서경 125.5°, 북위 20.5°에 위치한 Clipperton-clarion 해역의 밀도, 온도, 동점성계수 및 염도는 콜롬비아 대학에서 제공하는 데이터를 이용하였다<sup>18)</sup>. 그림 1과 2는 Clipperton-clarion 해역의 밀도와 염도를, 그림 3은 해수온도와 Loken 과 Austvik<sup>12)</sup>이 제시한 이산화탄소의 평형상태값을 적용하여 도시한 그림이다. 그리고 그림 4는 바다깊이에 따른 온도와 압력으로 환산한 이산화탄소의 밀도를 나타낸 것이다.

#### 4.1 액체 이산화탄소의 용해도

그림 5는 식(4)와 식(6)을 이용하여 해수와순수

물에서의 이산화탄소 용해도를 바다깊이로 표시한 것이다. 그림에 나타나듯이 해수에서의 용해도는 순수물에서의 용해도 보다 낮음을 알 수 있다. 따라서 순수물에서 실험적으로 구한 용해도를 식(17)의 식으로 환산하여 해수에 적용할 수가 있다.

$$C_s = 0.928 C_{p,w} \quad (17)$$

여기서  $C_s$  는 해수에서의 이산화탄소 용해도이고,  $C_{p,w}$  는 순수물에서의 이산화탄소 용해도이다. 그림에서 100 m 와 500 m 사이의 해수에 대한 이산화탄소의 용해도가 미터당 평균  $0.1349 \text{ kg/m}^3$ , 500 m 와 1500 m 사이에서는 미터당 평균  $0.0132 \text{ kg/m}^3$ 의 변화를 나타내고 있다. 또한 그림 3에서 이산화탄소의 평형상태도와 그림 4에서 이산화탄소의 밀도가 400 m 와 500 m 사이에서 크게 변한다는 것을 종합해 보면 바다깊이 약 450 m 에서 이산화탄소가 액체에서 기체로 기화한다는 것을 알 수 있다. 만약 액체 이산화탄소가 500 m 이하의 깊이에서 용해되지 않으면, 500 m 이상에서는 이산화탄소와 해수의 밀도차가 크기 때문에 빠른 부력속도를 갖게되어 대기로 환원될 가능성이 높다. 따라서 분사된 액체 이산화탄소가 500 m 깊이에 도달하기 전까지 해수에 완전히 용해시킬 수 있는 기술이 필요하다.

#### 4.2 이산화탄소 액적의 표면농도

이산화탄소를 해양에 용해시킬 경우 이산화탄소 액적과 해수의 접촉면에서는 하이드레이트 막이 형성되는데, 이 하이드레이트 막으로 인하여 이산화탄소 액적의 표면농도( $C_0$ )와 하이드레이트 막이 존재하지 않는 순수 이산화탄소의 용해도( $C_s$ ) 사이에는 큰 차이가 있다. 그러나 이산화탄소 액적의 용해거동을 예측하는 연구에서 액적에 생성되는 하이드레이트 막을 고려하지 않고 계산을 수행하여왔다.<sup>11)</sup> 따라서 본 연구에서는 일본

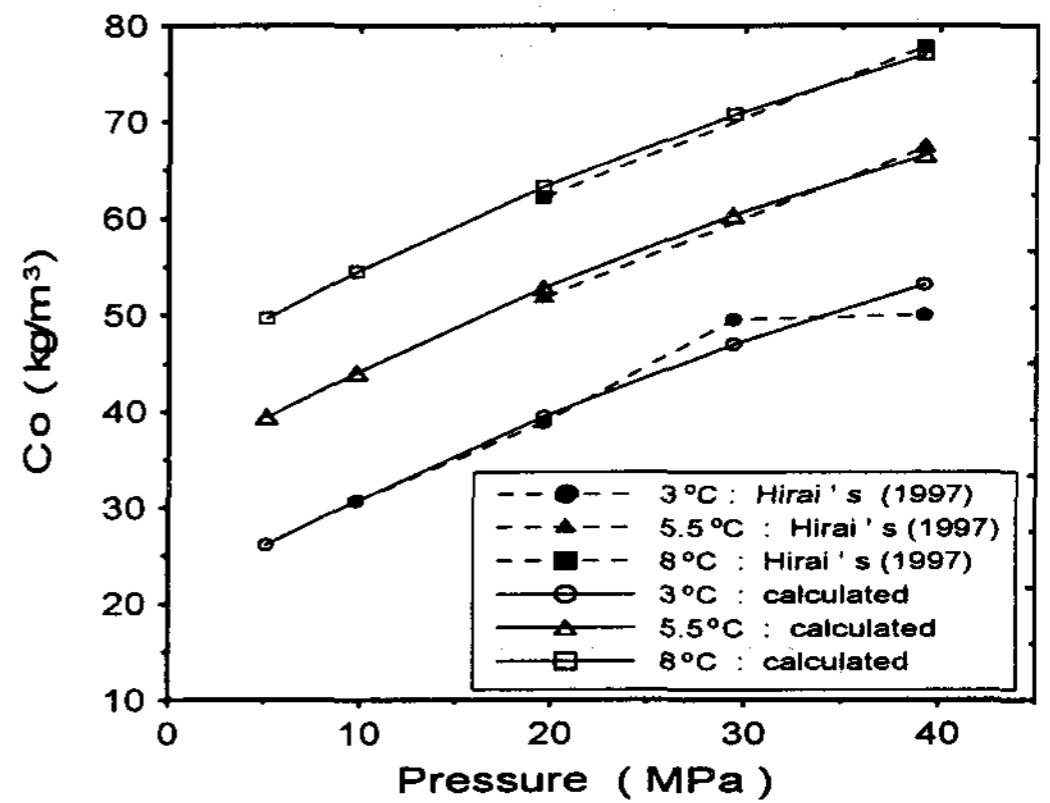


Fig. 6. Comparison of the experimental and calculated data on surface concentration.

동경공업대학 이산화탄소 연구실에서 입수한 순수물에서 하이드레이트 막이 존재하는 이산화탄소 액적의 표면농도 데이터와 상용프로그램 Engineering Equation Solver, Ver. 4.734 (1998)를 이용하여 전 범위의 온도와 압력에서 오차범위가 2.0 % 이내인 표면농도를 예측할 수 있는 계산식을 구하였다.

그림 6은 일본 동경공업대학에서 측정한 순수물에서 하이드레이트가 존재하는 이산화탄소 액적의 표면농도와 계산식으로 얻은 데이터를 비교하여 나타낸 것이다. 그리고 순수물에서의 표면농도 계산식과 식(17)을 이용하여 Clipperton-clarion 해역의 깊이에 따른 온도와 압력조건으로 이산화탄소 액적의 표면농도를 구하여 Fig. 5에 표시하였다. 따라서 본 연구에서 제시하는 해수에서 하이드레이트 막이 존재하는 이산화탄소 액적의 표면농도를 구하는 방법을 사용하면 고난도의 실험을 수행하지 않고도 해수와 접촉하며 하이드레이트 막이 생성된 이산화탄소의 표면농도를 구할 수 있다.

#### 4.3 이산화탄소 액적의 용해거동

그림 7은 1000 m 깊이에서 액체 이산화탄소를 분사시킬 경우, 액적의 초기 지름을 0.01 m

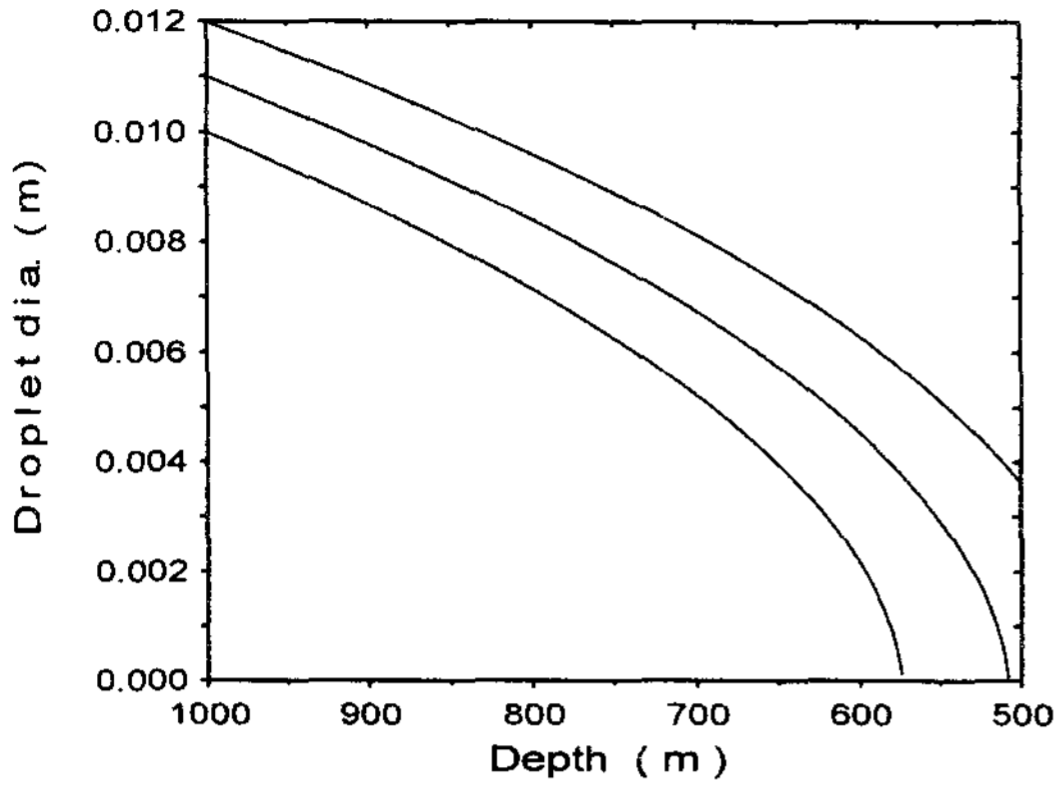


Fig. 7. Dissolution behavior of CO<sub>2</sub> droplet with hydrate film released at 1000 m in depth.

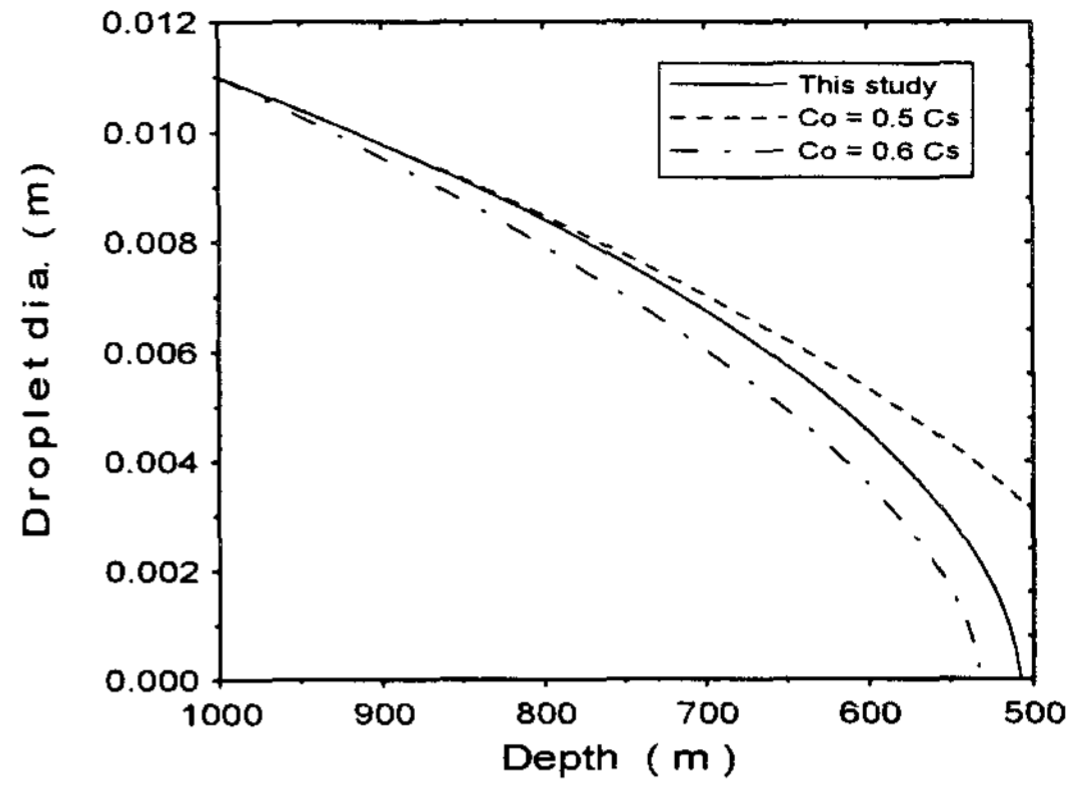


Fig. 9. Effect of the hydrate film on dissolution behavior released at 1000 m in depth

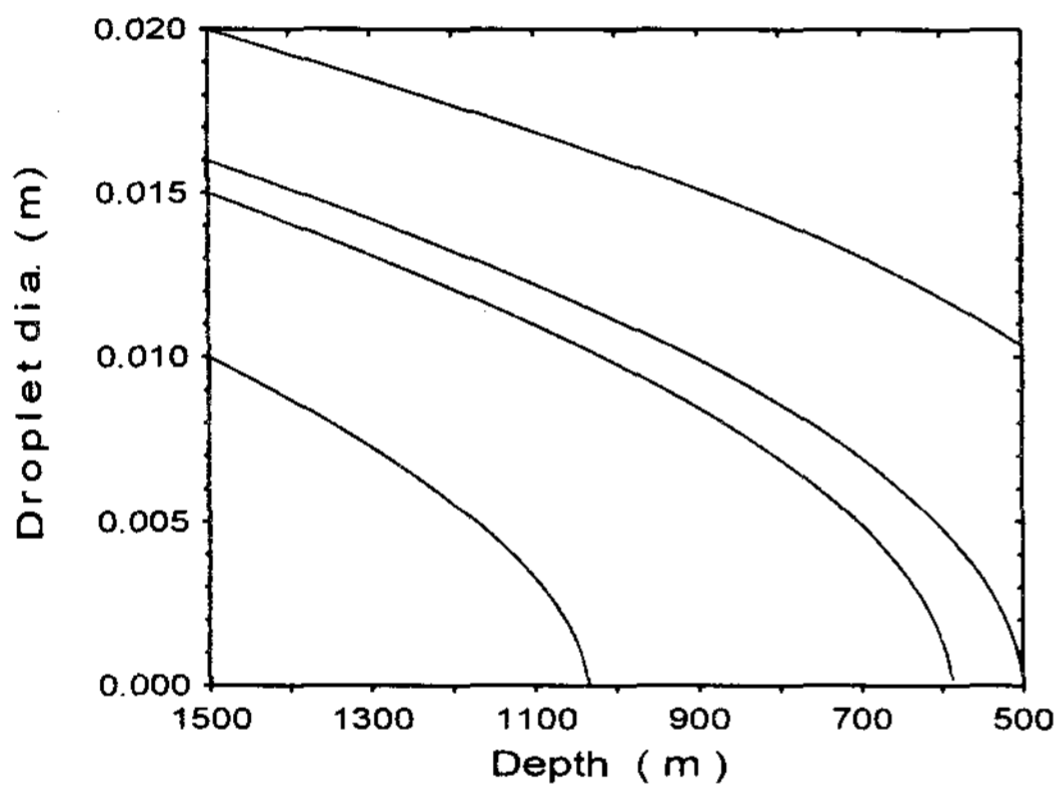


Fig. 8. Dissolution behavior of CO<sub>2</sub> droplet with hydrate film released at 1500 m in depth

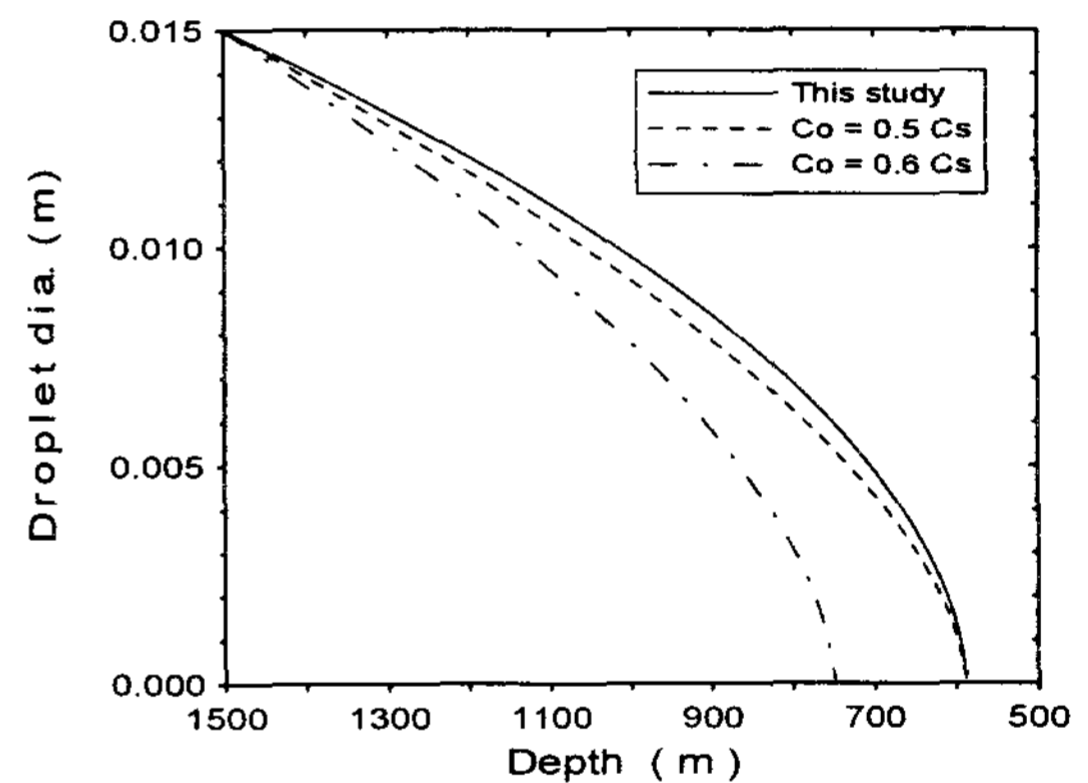


Fig. 10. Effect of the hydrate film on dissolution behavior released at 1500 m in depth

에서 0.012 m 로 변화시키며 500 m 깊이까지 계산한 결과이다. 이산화탄소 액적의 초기 지름이 0.011 m 이하일 경우 500 m 이하의 깊이에서 완전히 해수에 용해되었으나, 0.012 m 이상의 액적에서는 완전한 용해가 일어나지 않았다. 그림 8 은 이산화탄소 액적의 초기 지름을 0.01 m 에서 0.020 m 로 변화시키며 1500 m 깊이에 분사된 액체 이산화탄소의 용해거동을 계산한 결과로, 액적의 초기 지름이 0.015 m 이하일 경우 500 m 이하의 깊이에서 완전히 용해되었으나, 0.016 m 이상의 액적은 완전히 용해되지 않았다. 따라서 이산화탄소를 해양에 용해시키기 위해서는 분사

되는 액적의 초기 지름이 매우 중요함을 알 수 있다.

#### 4.4 표면농도와 용해도의 관계

이산화탄소 액적의 표면농도와 용해도 사이에는 다음과 같은 관계가 있다.

$$C_o = \beta C_s \quad (18)$$

여기서  $\beta$  는 하이드레이트 막 효과를 나타내는 계수이고, Hirai 등<sup>7)</sup>은  $\beta$  값이 0.5 라고 제시하였으나, 그림 9와 10에 나타난 것과 같이 1500 m

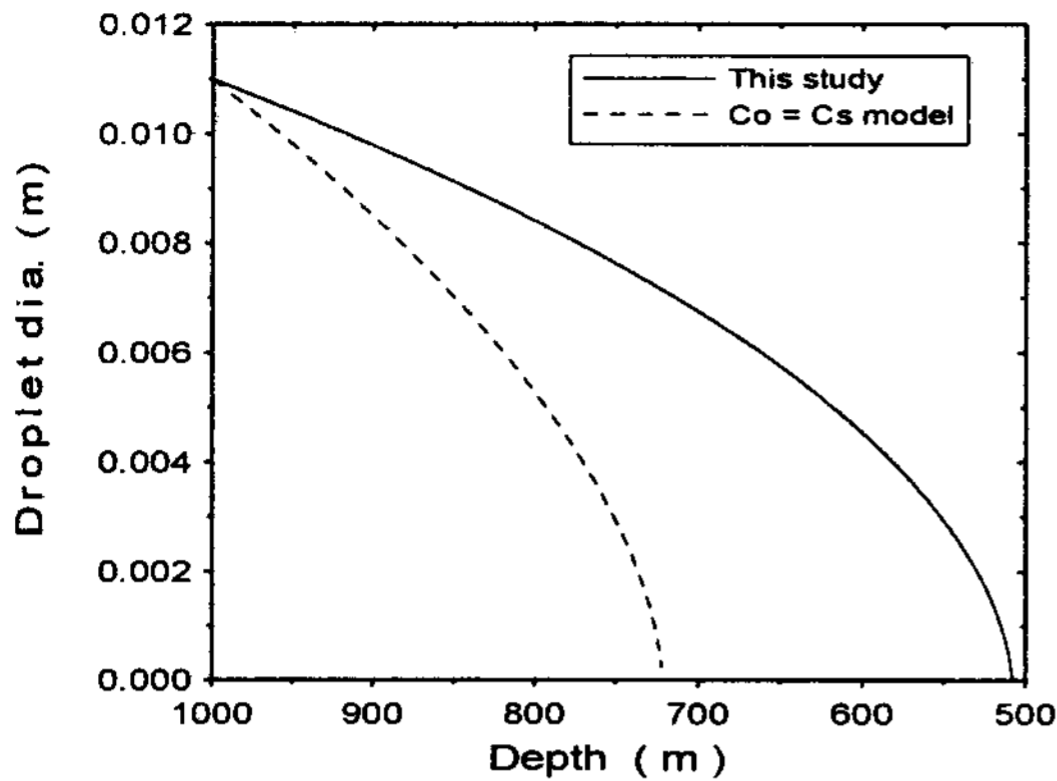


Fig. 11. Effect of hydrate film on CO<sub>2</sub> dissolution behavior released at 1000 m in depth

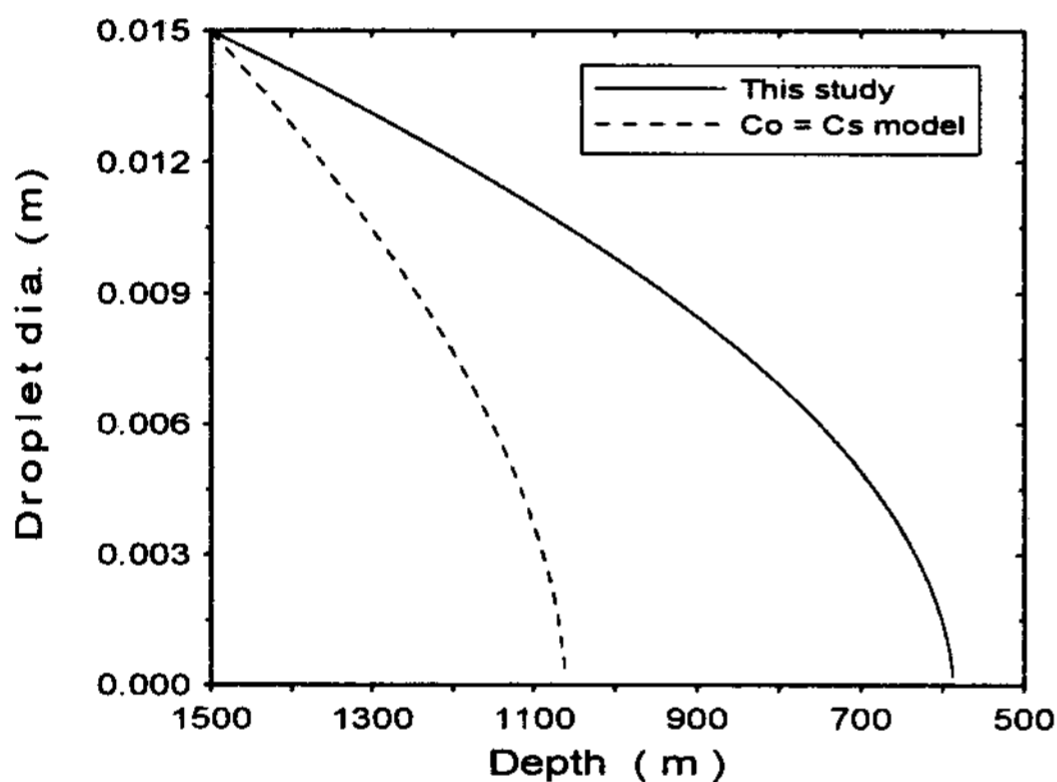


Fig. 12. Effect of hydrate film on CO<sub>2</sub> dissolution behavior released at 1500 m in depth

에서는  $\beta$ 가 0.5 일 때 잘 일치하고 있으나, 1000m 의 경우는  $\beta$  값이 0.6 일 경우가 더 합리적이라고 할 수 있다.

그림 11과 12는 이산화탄소 액적과 해수의 접촉면에서 생성되는 하이드레이트 막의 영향을 고려하지 않을 경우와 고려할 경우의 용해거동을 비교한 그림이다. 그림에서 하이드레이트 막은 이산화탄소 용해에 장애물로 작용하고 있다는 것을 알 수 있다.

#### 4.5 용해거동과 주변농도 ( $C_{\infty}$ ) 와의 관계

액체 이산화탄소를 해양에 분사할 때 플럼을

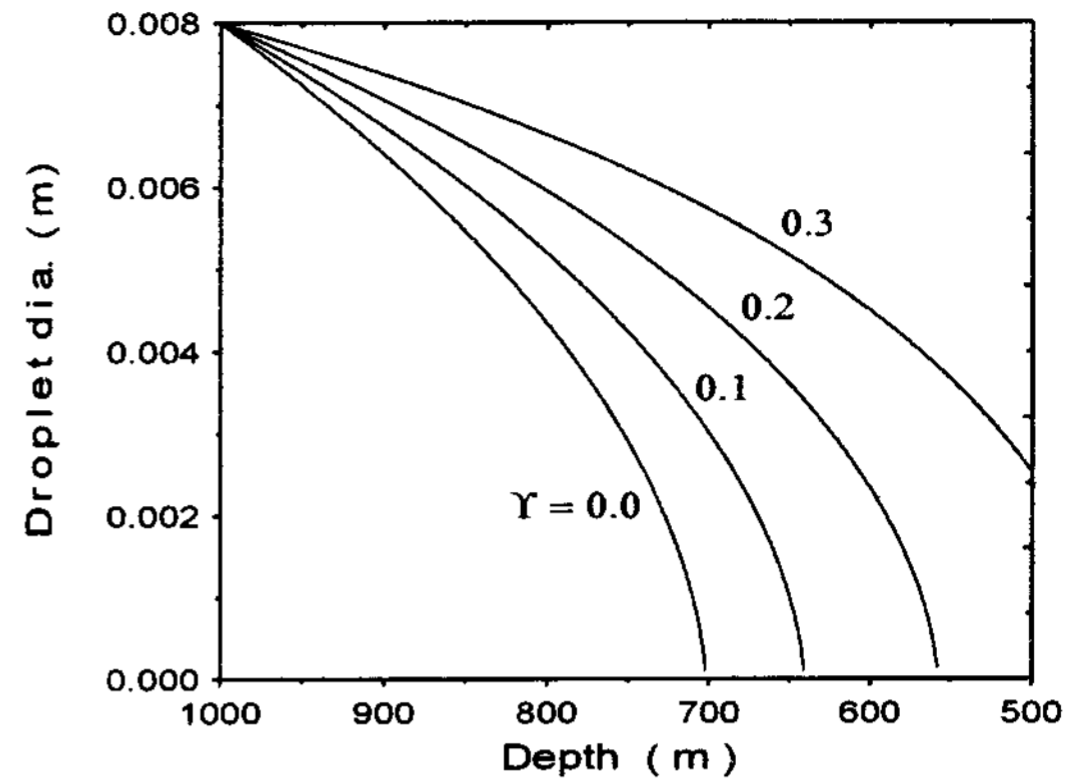


Fig. 13. Effect of the ambient CO<sub>2</sub> concentration on the dissolution behavior of CO<sub>2</sub> released at 1000 m in depth.

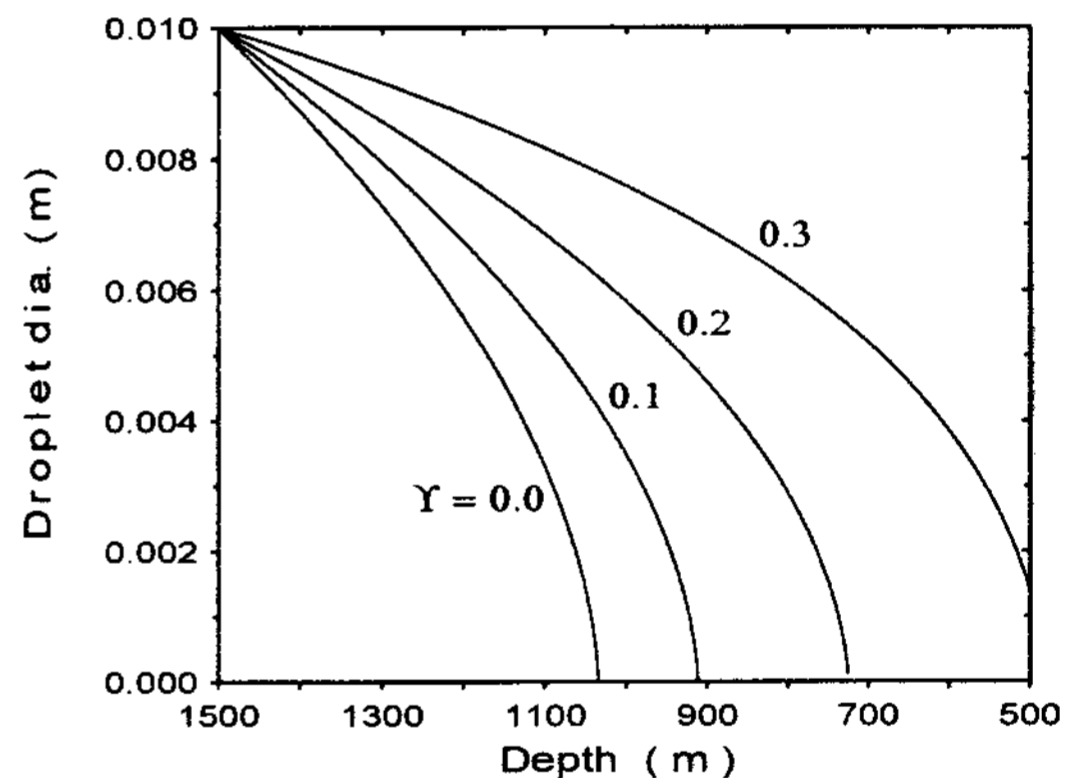


Fig. 14. Effect of the ambient CO<sub>2</sub> concentration on the dissolution behavior of CO<sub>2</sub> released at 1500 m in depth.

형성하며 떠오르게 되는데 플럼내의 해수에 녹아 있는 이산화탄소의 농도는 다음과 같은 관계가 있다.

$$C_{\infty} = \gamma C_s \quad (19)$$

여기서  $\gamma$  는 주변농도의 영향을 나타내는 계수이다. 그림 13과 14에 나타난 것과 같이 주변농도는 이산화탄소 액적의 용해에 큰 영향을 주고 있다. 이것은 플럼내 해수에 녹아 있는 이산화탄소



의 농도가 또 하나의 중요한 인자라는 것을 의미한다. 따라서 이산화탄소 액적 주변의 해수에 녹아 있는 이산화탄소 농도를 줄이기 위하여 고정 파이프에서 이산화탄소를 분사하는 것보다 움직이는 배에 파이프를 설치하여 분사시키는 방법이 용해에 효과적이라고 하겠다.

## 5. 결 론

Clipperton-clarion 해역의 한 지점인 서경 125.5°, 북위 20.5° 에서 바다깊이 1000 m 와 1500 m 에 액체 이산화탄소를 분사시킬 경우 이산화탄소의 용해특성을 계산한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 바다깊이 약 500 m에서 이산화탄소는 액체에서 기체로 기화한다는 것을 알 수 있었다. 따라서 액체 이산화탄소를 500 m 이하의 깊이에서 해수에 완전히 용해시키는 기술이 필요하다고 하겠다.
- 2) 하이드레이트 막이 생성된 액적의 표면농도를 2.0 % 이내의 오차범위에서 예측할 수 있었다.
- 3) 액체 이산화탄소를 바다깊이 1000 m와 1500 m 에 분사시킬 경우, 초기 액적의 지름을 각각 0.011 m 이하 그리고 0.015 m 이하로 분사시켜야 500 m 이하에서 완전히 용해되었다. 그러므로 이산화탄소를 해양에 완전히 용해시키기 위해서는 분사되는 액적의 초기 지름이 매우 중요함을 확인하였다.
- 4) 하이드레이트 막이 존재하는 이산화탄소 액적의 표면농도는 순수 이산화탄소의 용해도와 비교하여 1500 m 에서는 50%, 1000 m 에서는 60% 정도 낮음을 확인하였다.
- 5) 이산화탄소 액적과 해수의 접촉면에 생성되는 하이드레이트 막이 이산화탄소 용해에 장애물로 작용함을 확인하였다.
- 6) 플럼내의 해수에 녹아있는 이산화탄소 농도가 이산화탄소를 해양에 용해시키기 위한 또 다른 중요 인자임을 확인하였다.
- 7) 고정 파이프에서 이산화탄소를 분사하는 것보다 움직이는 배에 파이프를 설치하여 분사시키는 방법이 용해에 더 효과적임을 확인하였다.

## 참 고 문 헌

1. Marchetti, C., "On eoengineering and CO<sub>2</sub> Problem", *Climate Change*. Vol. 1, 1977, pp. 59~68
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. 1984, pp. 42~58
3. Sam H., "Safety of the Under-ground Disposal of Carbon Dioxide", *Energy Convers. Mgmt*, Vol. 38, Suppl., 1997, pp. s241~s245
4. Herzog, H. J., Adams, A. A., Auerbach, A., Caulfield, J., "Environmental Impacts of Ocean Disposal of CO<sub>2</sub>", *Energy Convers. Mgmt*, Vol. 37, No. 6~8, 1996, pp. 999~1005
5. Teng, H. and Yamasaki, A., "Solubility of Liquid CO<sub>2</sub> in Synthetic Sea Water 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, 1998, pp. 2~5

6. 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*, Vol. 36, 1995, pp. 489~492
7. 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*, Vol. 36, No. 6~8, 1996, pp. 489~492
8. Hirai, S., Okazaki, K., Tabe, Y., Hijikata, K. and Mori, Y., "Dissolution Rate of Liquid CO<sub>2</sub> in Pressurized Water Flows and the Effect of Clathrate Film", *Energy Convers. Mgmt*, Vol. 22, No. 2~3, 1997, pp. 285~293
9. Aya, I., Yamane, K. and Yamada, N., "Stability of Clathrate-Hydrate of Carbon Dioxide in Highly Pressurized Water", *ASME HTD* Vol. 215, 1992, pp. 17~22
10. 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, 1995, pp. 217~23
11. 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*, Vol. 37, No. 6~8, 1996, pp. 1029~1038
12. Loken, K. P. and Austvik, T., the Form of Hydrates, PART II", "Deposition of CO<sub>2</sub> on the SeaBed in *Energy Convers. Mgmt*, Vol. 34, No. 9~11, 1993, pp. 1081~1087
13. King, M. B., "Phase Equilibrium in Mixtures", Pergamon Press, London, 1969.
14. 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*, Vol. 39, No. 7, 1998, pp. 569~578
15. Clift R., Grace, J. R. and Weber, M. E., "Bubbles, Drops and Particles", Academic Press, 1978, pp. 97~125
16. Wilke, C. R. and P. Chang, "Correlation of Diffusion Coefficient in Dilute Solutions". *A. I. Ch. J.* Vol. 1, 1995, pp. 264~270
17. National Institute of Standards and Technology Database 23 : REFPROP 6.01, 1998.
18. IRI/LDEO Climate Data Library, Columbia Univ., 1999.