

중층심해에 분사된 액체 이산화탄소 하이드레이트 용해에 대한 연구

김남진, 박성식*, 서항민

Study on the Dissolution Behavior of Liquide CO₂ Hydrate Injected at the Intermediate Depth of the Ocean

Namjin Kim, Sungseek Park* and Hyangmin Seo

Abstract

Calculations for the dissolution behavior of liquid CO₂ droplets released in the East Sea and the Clipperton Clarion from a moving ship and a fixed pipeline have been carried out in order to estimate the CO₂ dissolution characteristics in the ocean. The results show that the injection of liquid CO₂ from a moving ship in a high temperature point is an effective method for dissolution. Also, it is noted that the ultimate plume generated from CO₂ bubbles repeats and shrinking due to the peeling from a fixed pipeline, and the presence of hydrate layer on a liquid CO₂ droplet acts as a resistant layer in dissolving liquid CO₂.

Key words

Carbon dioxide(이산화탄소), Droplet(액적), Plume(액적군), Surface concentration(표면농도), Disposal(분사)

(접수일 2008. 6. 3, 수정일 2008. 6. 15, 게재확정일 2008. 6. 19)

* 제주대학교 에너지 공학과

■ E-mail : pss5153@nate.com ■ Tel : (064)754-3643 ■ Fax : (064)757-9276

Nomenclature

A : Surface area of a CO₂ droplet [m²]

B : Buoyancy [kg/sec²]

b : Plume half width [m]

C_D : Drag coefficient

C_m : Centerline CO₂ concentration of plume [kg/m³]

C_o : Surface concentration with hydrate [kg/m³]

C_w : Average Concentration of CO₂ volume per unit plume volume [kg/m³]

C_∞ : Ambient CO₂ concentration of a droplet [kg/m³]

D : Diffusion coefficient [m²/s]

d_{CO_2} : Diameter of a CO₂ droplet [m]

D_n : Diameter of release port 경 [m]

d : Droplet diameter at release poin [m]

d_z : Droplet diameter at depth z 층 [m]

g : Gravitational acceleration [m/sec²]

- k : Mass transfer coefficient [W/m·K]
- M : Moment [kgm/sec]
- M_{sw} : Molecular weight of seawater [kg/kmole]
- P : Pressure [MPa]
- q : CO₂ volume flux at release depth [m³/sec]
- q_z : CO₂ volume flux at depth z [m³/sec]
- R : Radial distance from plume centerline [m]
- T : Temperature [K]
- U : Rising velocity of a CO₂ droplet [m/sec]
- U_{sw} : Velocity of the surrounding seawater [m/sec]
- V : Volume of a CO₂ droplet [m³]
- V_{CO_2} : Mole volume of a CO₂ droplet [m³/kmol]
- \overline{W} : Local mean plume velocity [m/sec]
- W_m : Centerline velocity of plume [m/sec]
- y : Distance from release point [m]
- z : Ocean depth [m]
- β : Entrainment coefficient
- γ : Momentum amplification factor
- λ_1, λ_2 : Spreading ratio
- μ_{sw} : Viscosity of seawater [Nsec/m²]
- ν_{sw} : Kinematic viscosity of seawater [m²/sec]
- ρ_a : Ambient CO₂ concentration of plume [kg/m³]
- ρ_{CO_2} : Density of local CO₂ [kg/m³]
- ρ_{mix} : Density of plume [kg/m³]
- ρ_{ref} : Ambient seawater density of release point [kg/m³]
- ρ_{sw} : Density of seawater [kg/m³]
- ρ_w : Local density of seawater within the plume [kg/m³]
- ρ_{wm} : Centerline density of seawater within the plume [kg/m³]
- Φ : Dimensionless association factor of seawater

1. 서론

온실가스인 이산화탄소를 해양에 대량으로 처리하는 기술 중 고정 파이프라인이나 움직이는 배를 이용하여 중층심해에 이산화탄소를 분사시켜 해수에 용해시키는 방법이 현실성이 높은 기술로 알려져 있다. 그러나 중층심해에 분사된 이산화

탄소가 빠르게 표면 위로 떠올라 대기 중으로 확산되어 버리면 아무런 의미가 없다. 따라서 분사된 이산화탄소 액적을 빨리 용해시킬 수 있는 방법에 대한 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 우리나라가 유엔국제해저기구(ISA)로부터 최종 단독광구로 확보한 하와이 동남방에서 2000km 떨어진 지점에 위치한 Clarion-clipperton 해역과 상대적으로 해수온도가 낮은 우리나라 동해안의 중층심해에 고정된 파이프라인과 움직이는 배에서 액체 이산화탄소를 분사시킬 경우 해수의 온도와 분사방법에 따른 이산화탄소 액적의 용해거동을 비교 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.

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

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

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

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.

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

우변의 Sc는 1/Re보다 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

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

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

이 된다. 여기서 부력속도 U 와 확산계수 D 는 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 지배방정식은 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

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

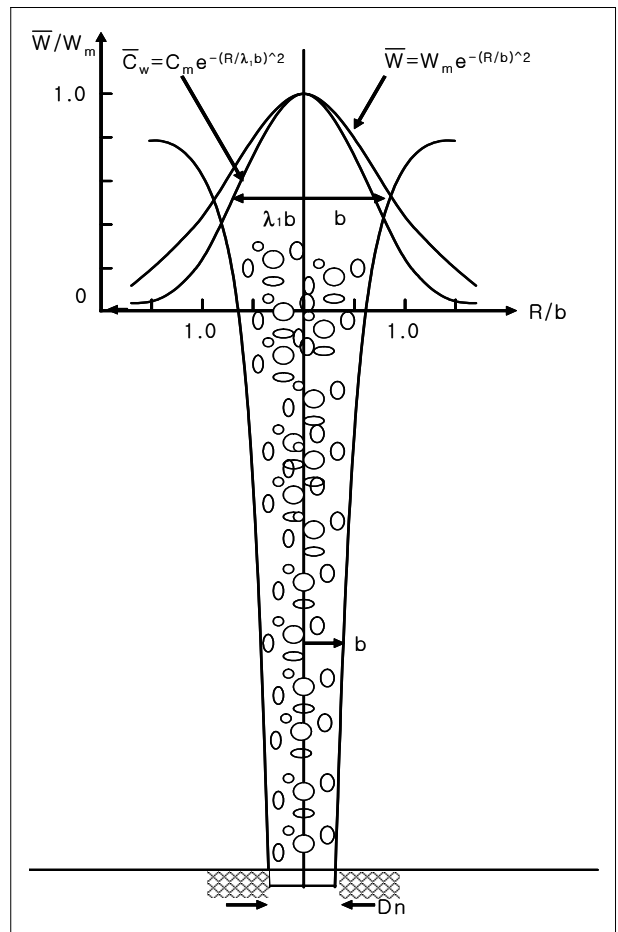


Fig. 1 Schematic of a plume.

이고, 액적군 내로 유입되는 물의 전환속도는

$$W_e = \beta W_m \quad (20)$$

$$\frac{dQ}{dy} = 2\pi b W_e = 2\pi\beta b W_m$$

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

가 성립한다. 또한 액적군에 작용하는 유일한 외력이 부력이라고 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

$$\rho_a = \rho_w - \Delta\rho_{wm} e^{-R^2/(\lambda_2 b)^2} \quad (23)$$

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

를 식 (22)에 대입하면

$$\frac{d}{dy}(b^2 W_m^2) = \frac{2gb^2}{\gamma} \left(C_m \lambda_1^2 \frac{\rho_w - \rho_{CO_2}}{\rho_{ref}} - \lambda_2^2 \frac{\Delta\rho_{wm}}{\rho_{ref}} \right) \quad (25)$$

이 된다. 따라서 식 (21)에서

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

$$\frac{db}{dy} = \beta - \frac{b}{2W_m} \frac{dW_m}{dy} \quad (26)$$

가 되고, 식 (25)에서

$$2W_m b^2 \frac{dW_m}{dy} + 2b W_m^2 \frac{db}{dy} =$$

$$\frac{2gb^2}{\gamma} \left(C_m \lambda_1^2 \frac{\rho_w - \rho_{CO_2}}{\rho_{ref}} - \lambda_2^2 \frac{\Delta\rho_{wm}}{\rho_{ref}} \right) \quad (27)$$

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

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

이고, 액적군의 반경은 다음과 같다.

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

만약 식 (29)의 우변에서

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

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

$$\frac{d}{dy} \int_0^\infty 2\pi \bar{W} (\rho_{ref} - \rho_w) R dR =$$

$$2\pi b \beta W_m (\rho_{ref} - \rho_a) \quad (32)$$

가 성립하고, 식 (16), 식 (21), 식 (23)을 대입하여 정리하면 다음과 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

동해안의 바다깊이에 따른 해수의 온도는 한국지질연구원에서 실측한 결과를 사용하여 Fig. 2와 Fig. 3에 바다깊이에 따른 해수온도와 이산화탄소의 밀도변화를 나타내었다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 동해안의 경우 바다깊이 300m이하에서는 온도변

화가 거의 없었으며 Clarion-clipperton보다 온도가 낮은 특징을 보여주고 있다. 또한 동해안과 Clarion-clipperton 지역의 경우 각각 바다깊이 약 350m와 500m에서 이산화탄소가 액체에서 기체로 기화한다는 것을 Fig. 3에서 확인할 수 있다. 만약 동해안과 Clarion-clipperton 지역에 분사된 액체 이산화탄소가 350m와 500m 이하의 깊이에서 용해되지 않으면, 액체 이산화탄소가 기체로 기화되기 때문에 빠른 부력속도를 갖게 되어 대기 중으로 환원될 가능성이 매우 높게 된다. 따라서 동해안과 Clarion-clipperton 지역에 분사된 액체 이산화탄소는 350m와 500m 깊이에 도달하기 전까지 해수에 완전히 용해시킬 수 있는 기술이 필요함을 알 수 있다.

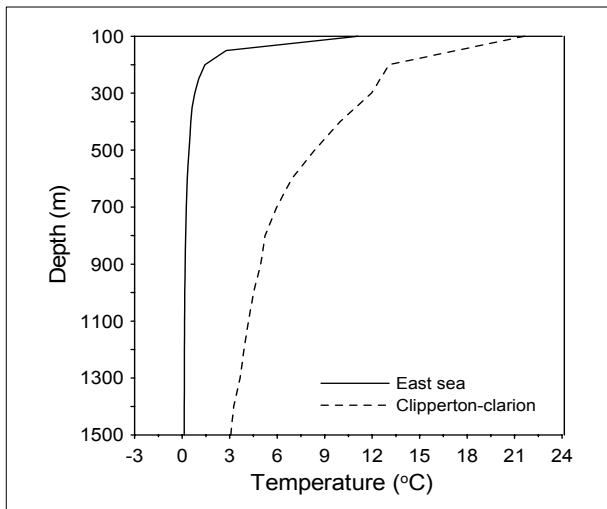


Fig. 2 Temperature distribution of liquid CO₂ along depth.

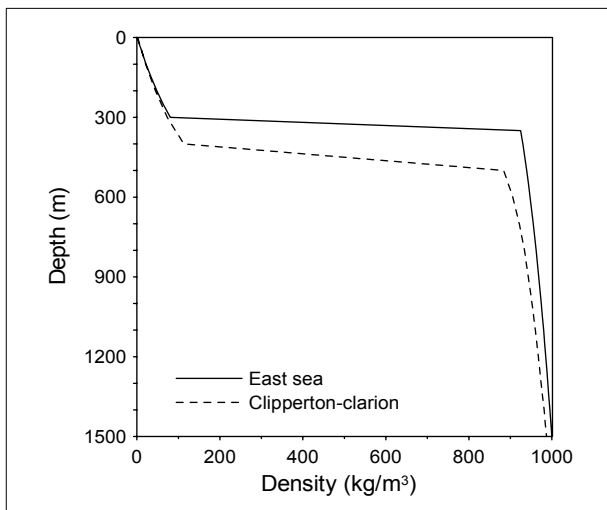


Fig. 3 Density distribution of liquid CO₂ along depth.

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 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.

$$C_o = A + B \times P + C \times P^2 + \alpha \times T + \beta \times T^2 \quad (34)$$

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

$$\alpha = 135.163, \beta = -2.34 \times 10^{-1}$$

Fig. 4는 일본 동경공업대학에서 측정된 순수물에서 하이드레이트가 존재하는 이산화탄소 액적의 표면농도와 식 (34)로 계산한 데이터를 비교하여 나타낸 것이다. 그리고 순수물에서의 표면농도 계산식인 식 (34)와 Kim and Kim[2003]이 제안한 순수물과 해수의 표면농도 관계식

$$C_o(\text{seawater}) = 0.95 C_o(\text{pure water}) \quad (35)$$

을 이용하여 바다깊이에 따른 온도와 압력으로 이산화탄소 액적의 표면농도를 구하여 Fig. 5에 표시하였다. 그림에서

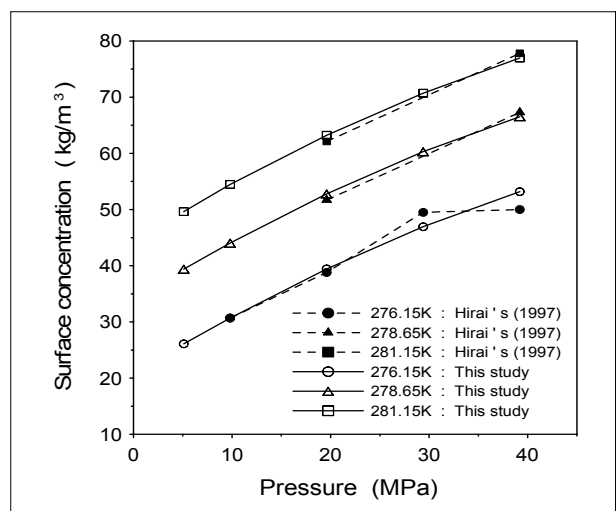


Fig. 4 Surface concentration of a CO₂ droplet with the hydrate in pure water.

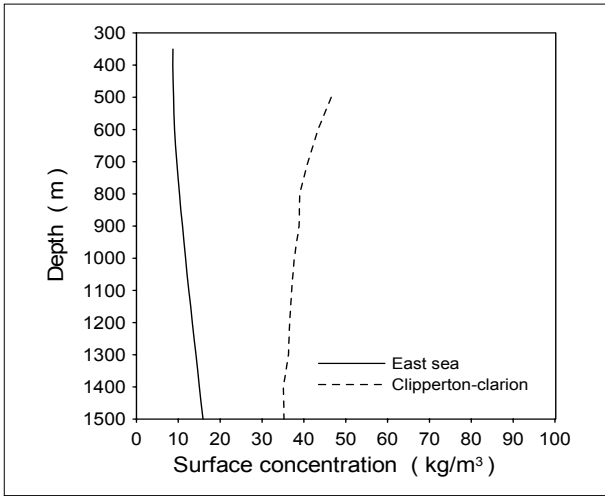


Fig. 5 Surface concentration of a CO₂ droplet with the hydrate along dept in seawater.

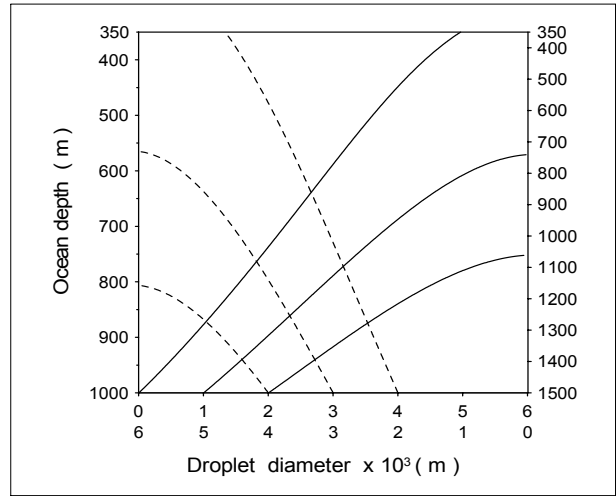
볼 수 있듯이 해수의 온도가 높은 Clarion-clipperton 지역이 동해안보다 표면농도가 높게 나타났다. 또한, 동해안의 경우 바다깊이가 깊어질수록 이산화탄소 표면농도가 증가하지만 Clarion-clipperton 지역은 오히려 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 동해안의 경우 300m이하의 바다깊이에서는 온도가 변하지 않기 때문에 이산화탄소의 표면농도가 온도보다는 압력의 영향을 더 받기 때문인 것으로 사료된다.

3.3 이산화탄소 액적의 용해거동

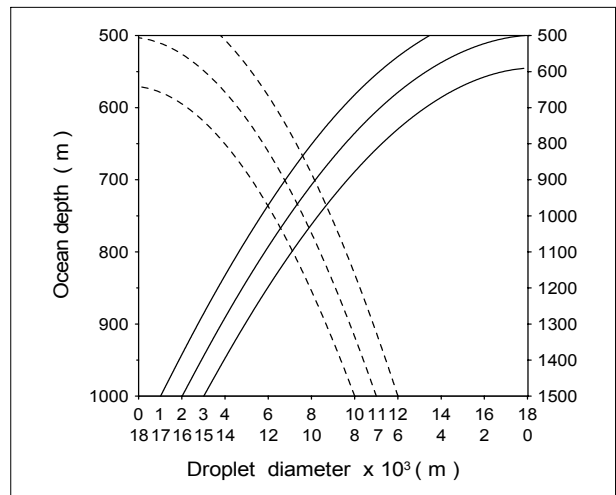
이산화탄소의 분사량은 동일하게 500MW급 화력발전소에서 배출하는 이산화탄소의 양 133kg/s를 기준으로 하였으며, 그 분사깊이는 1,000m와 1,500m로 하였다. 또한 분사노즐의 직경을 0.1m로 고정하였으며 액체 이산화탄소는 서로 합체되지 않으면서 작은 크기의 액적으로 쪼개질 수 있는 구조라고 가정하였다. 또한 초기값으로 $\beta=0.1$, $\lambda_1=0.8$, $\lambda_2=1.25$, $\gamma=1.0$ 을 사용하였다.

3.3.1 움직이는 배에서 분사된 이산화탄소 액적의 용해 거동

Fig. 6은 동해안과 Clarion-clipperton 지역에서 움직이는 배를 이용하여 바다깊이 1,000m와 1,500m에서 액체 이산화탄소를 분사시킬 경우의 용해거동을 나타낸 그림이다. 동해안의 경우 Fig. 6(a)에서 볼 수 있듯이 액적의 초기



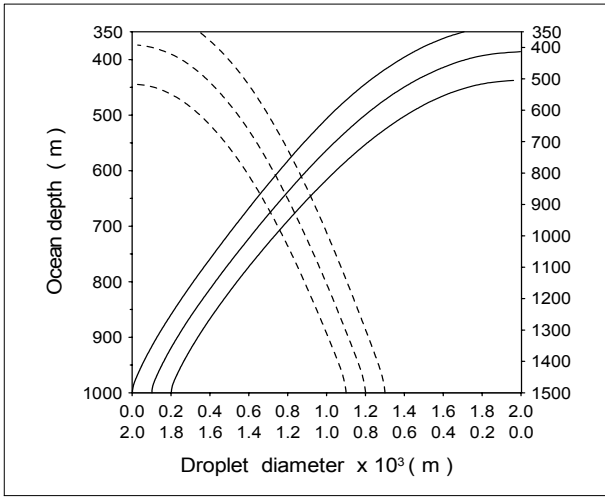
(a) East Sea



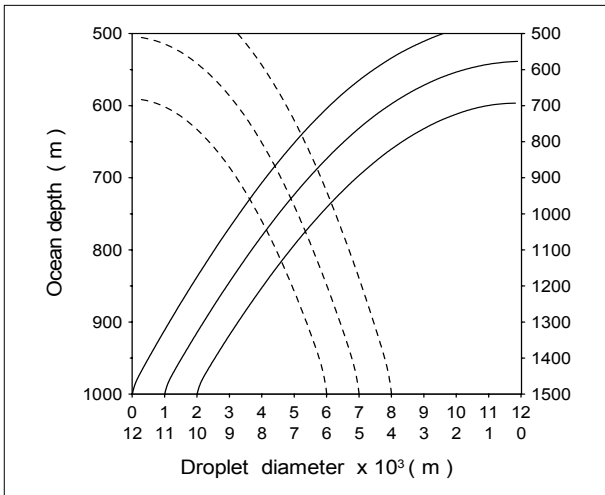
(b) Clarion-clipperton

Fig. 6 Dissolution behavior of the CO₂ droplets with the hydrate released from a moving ship.

지름이 1,000m와 1,500m에서 각각 0.003m와 0.005m 이하일 경우 350m 이하의 바다깊이에서 해수에 완전히 용해되었다. 또한 Clarion-clipperton 지역의 경우 Fig. 6(b)에 표시한 것처럼 액적의 초기 지름이 각각 0.011m와 0.016m 이하일 경우 500m 이하의 깊이에서 완전히 해수에 용해되었다. 따라서 이산화탄소를 해양에 용해시키기 위해서는 분사되는 액적의 초기 지름이 중요함을 알 수 있고, 동해안보다 해수온도가 높은 Clarion-clipperton 지역이 용해에 유리함을 알 수 있다.



(a) East Sea

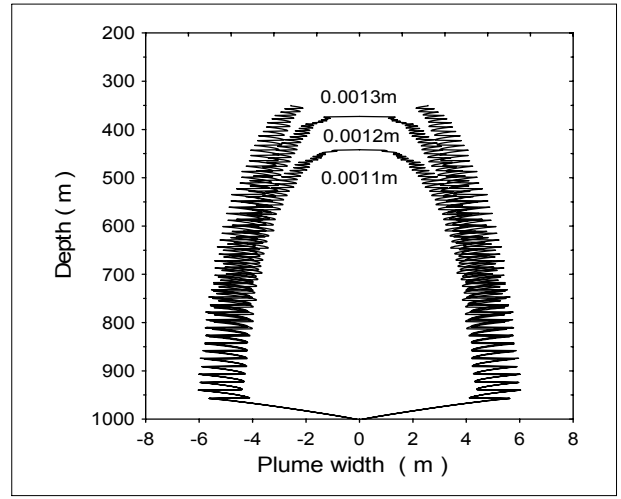


(b) Clarion-clipperton

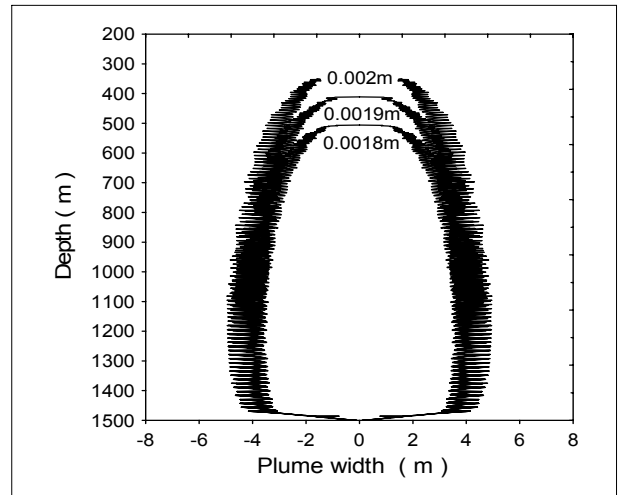
Fig. 7 Dissolution behavior of the CO₂ droplets with the hydrate from a fixed pipeline.

3.3.2 고정된 파이프라인에서 분사된 이산화탄소 액적군의 용해거동

고정된 파이프라인을 이용하여 바다깊이 1,000m와 1,500m에서 분사된 이산화탄소 액적군의 용해거동을 Fig. 8에 표시하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 동해안의 경우 분사액적의 초기 지름을 1,000m와 1,500m에서 각각 0.0012m와 0.0019m 이하일 경우 350m 이하의 깊이에서 완전히 해수에 용해되었고, Clarion-clipperton 지역의 경우 각각 0.007m와 0.011m 이하일 경우 500m 이하의 깊이에서 완전히 해수에 용해되었다. 또한 Fig. 8과 Fig. 9에서 볼 수 있듯이 액적군 내의 밀도



(a) 1,000 m

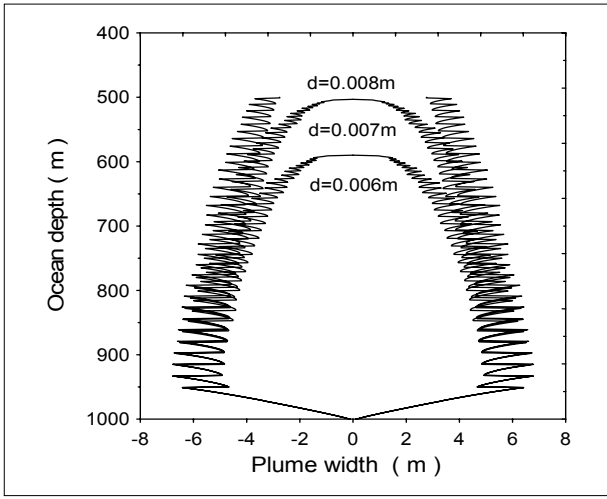


(b) 1,500 m

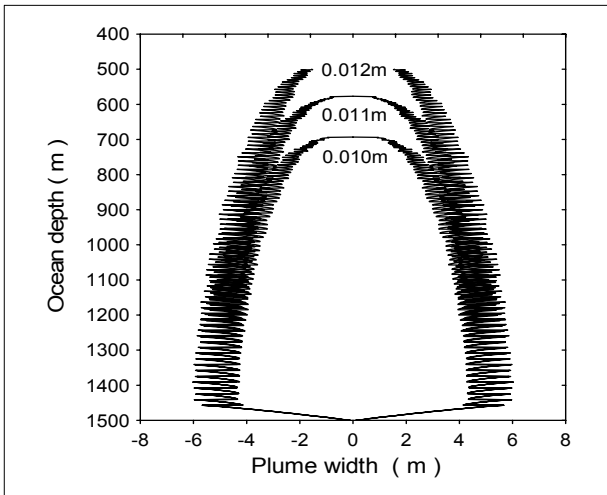
Fig. 8 Plume width (2b) on the CO₂ droplets released from a fixed pipeline in the East Sea

와 주변의 밀도차로 인하여 발생하는 필링의 영향으로 수축 팽창을 반복하고 있음을 알 수 있다. 따라서 움직이는 배에서 분사하는 경우와 같이 파이프라인에서 분사할 경우도 해수의 온도가 높은 Clarion-clipperton 지역이 용해에 유리하였으며, Fig. 6과 Fig. 7을 비교하면 파이프라인에서 분사하는 방법보다는 움직이는 배에서 분사하는 방법이 이산화탄소 용해에 더 효과적이란 사실을 알 수 있다.

그리고 초기 이산화탄소 액적의 지름과 전체 분사량을 고정해 놓고 분사노즐의 수를 증가시키며 용해거동을 계산하여 Fig. 10에 표시하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 노즐수가 많을



(a) 1,000 m



(b) 1,500 m

Fig. 9 Plume width (2b) on the CO₂ droplets released from a fixed pipeline in Clarion-clipperton.

수목 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.

3.3.3 하이드레이트 영향평가

하이드레이트가 형성된 이산화탄소 액적의 표면농도와 하이드레이트가 존재하지 않는 액체 이산화탄소의 용해도는 Fig. 11에 나타난 것과 같이 1,500m에서는 50%, 1,000m의 경우는 60%라고 할 수 있다.

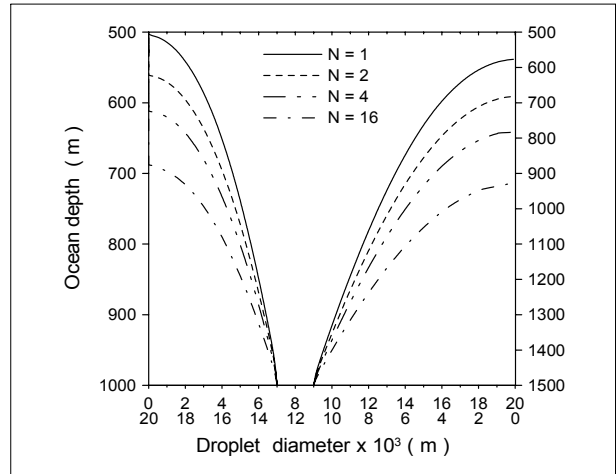


Fig. 10 Effect of number of nozzles on CO₂ droplets released from a fixed pipeline.

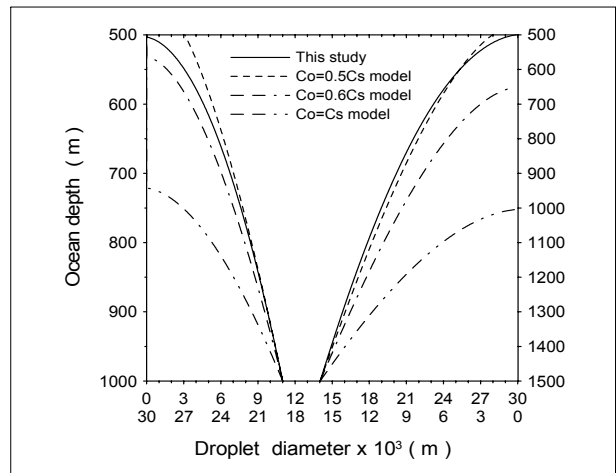


Fig. 11 Effect of hydrate layer on CO₂ dissolution behavior released from a moving ship.

4. 결론

동해안과 Clarion-clipperton 지역의 경우 바다깊이 350m와 500m에서 이산화탄소는 액체에서 기체로 기화되므로 350m와 500m 이하의 깊이에서 해수에 완전히 용해시키는 기술이 필요함을 알 수 있었다. 또한, 액적군은 밀도차 때문에 발생하는 필링의 영향으로 수축과 팽창을 반복함을 확인하였고, 파이프라인보다는 움직이는 배에서 분사하는 방법이 이산화탄소 용해에 더 효과적임을 알 수 있었다. 또한 초기 액적의 크기가 용해에 매우 중요함을 알 수 있었고 하이드레이트 효과는 50-60% 정도의 영향을 주었다.

References

- [1] Clift, R., Grace, J. R. and Weber, M. E., 1978, Bubbles, Drops and Particles, Academic Press, pp. 97-125.
- [2] Hirai, S., Tabe, Y., Tanaka, G., and Okazaki, K., 1998, Advanced CO₂ Ocean Dissolution Technology for Longer Term Sequestration with Minimum Biological Impacts, 4th Int. Conf. on Greenhouse Gas Control Technologies, Interlaker, Switzerland.
- [3] 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.
- [4] Liro, C. R., Adams, E. E. and Herzog, H. J., 1991, Modeling the Release of CO₂ in the Deep Ocean, MIT-EL 91-002.
- [5] Mori, Y. H. and Mochizuki, T., 1998, "Dis -solution of Liquid carbon dioxide 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.
- [6] Nishikawa N., Ishibashita, M., Ohta, H., Aku -tsu, N., Tajika, M., Sugitani, T., Hiraoka, R., Kimuro, H. and Moritoki, M., 1995, "Stability of Liquid carbon dioxide Spheres Covered with Clathrate Film When Exposed to Environment Simulating the Deep Sea", Energy Convers. Mgmt, Vol. 36, pp. 489-492.
- [7] Hirai, S., Okazaki, K., Tabe, Y., Hijikata, K. and Mori, Y., 1997, "Dissolution Rate of Liquid carbon dioxide in Pressurized Water Flows and the Effect of Clathrate Film", Energy Convers. Mgmt, Vol. 22, No. 2-3, pp. 285-293.

김 남 진



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

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

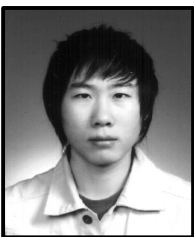
서 향 민



2008년 제주대학교 에너지공학과 공학사

현재 제주대학교 에너지공학과 에너지화학공학전공 석사 1학년
 (E-mail : shoo5029@cheju.ac.kr)

박 성 식



2008년 제주대학교 에너지공학과 공학사

현재 제주대학교 에너지공학과 에너지화학공학전공 석사 1학년
 (E-mail : pss5153@nate.com)