

액화이산화탄소 유적의 수직 상승속도에 미치는 표면장력 변화의 영향에 대한 수치연구

조운태¹ · 송무석^{2,†}

¹피엔에스, ²홍익대학교 조선해양공학과

Numerical Investigation on the Effect of Surface Tension Change of Liquefied CO₂ Droplets on their Ascending Speed

Yoon-Tae Cho¹ and Museok Song^{2,†}

¹P&S, Samjeong BLDG 635-7 Yeoksam-Dong Gangnam-Gu, Seoul 135-080, Korea

²Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Hongik University, Jochiwon, Chung-Nam 339-701, Korea

요 약

이산화탄소를 해양에 격리시키기 위하여 액화된 이산화탄소(LCO₂, Liquefied Carbon Dioxide)를 노즐을 통하여 깊은 수심의 해양에 분사시키고 이때 발생하는 LCO₂ 유적이 수직 이동을 하면서 해수 중에 희석되는 방법이 고려되고 있다. 이때 논의의 초점은 LCO₂ 유적이 희석될 수 있는 충분한 시간이 주어지야 한다는 효율성의 관점과 특정 수심에 너무 오래 머물지 않게 하여 그 유역의 CO₂ 농도가 너무 높아지지 않게 하여야 한다는 생물학적 안정성의 문제가 된다. 이들 두 가지 논점에서 공통되는 변수는 주어진 조건에서 LCO₂ 유적의 수직 이동의 속도가 된다. 본 연구는 LCO₂ 유적이 LCO₂와 해수의 물성뿐 아니라, LCO₂와 해수의 경계면에 존재하거나 생성되게 되는 수화물(Hydrate) 등의 영향으로 부분적으로 변하는 표면장력에 의하여 그 수직 거동이 크게 달라지는 문제를 수치해석적으로 관찰한 것이다. 축대칭 2유체 유동을 묘사할 수 있는 경계면추적법(Front Tracking Method)을 바탕으로 간단한 표면장력 모델을 도입하여 경계면의 위치에 따라 변하는 표면장력의 영향을 고려하여 LCO₂ 유적의 상승속도를 관찰하였다. 유적의 주위를 흐르는 유동에 의하여 유적의 후방으로 쏠린 경계면 오염물은 유적의 경계면이 유연한 벽면과 같은 역할을 하게 만들고, 이에 따라 유적의 변형과 상승속도는 달라짐을 관찰하였다.

Abstract – CO₂ ocean sequestration is being considered as a way to earn a frame of time to change other industrial life pattern to overcome the global warming crisis. The method is to dilute the captured CO₂ into ocean by ejecting the liquefied CO₂ through nozzles. The main issue of such method is the effectiveness and safety, and in both problems the rising speed of those LCO₂ droplet is the key parameter. In this paper, the rising speed of LCO₂ droplets is numerically studied including the effect of the surfactant which can be residing along the density interface of the droplets. A front tracking method with a simple surface tension model is developed and the rising speed of the droplets is carefully investigated with varying the various parameters. It is demonstrated that the variable surface tension can change the deformation of the droplet, the flow near the interface, and the rising speed.

Keywords: CO₂ Ocean Sequestration(이산화탄소 해양격리), Two-Liquid system(2유체 유동), Surfactant(경계면오염물), LCO₂ Droplet(액화이산화탄소유적), 경계면추적법(Front Tracking Method), 표면장력(Surface Tension)

[†]Corresponding author: msong@hongik.ac.kr

1. 서 론

지구온난화의 원인으로 인식되고 있는 이산화탄소의 대기 중 농도를 줄이기 위하여 다양한 기술적, 사회적 노력이 경주되고 있다. 궁극적으로 이산화탄소의 발생을 억제하는 생산 및 소비 활동이 바람직하나, 현재의 상황에서 대기 중으로 방출될 수밖에 없는 이산화탄소는 채집되고 응축되어 따로 격리할 필요가 있다. 이렇게 분리된 액화이산화탄소를 해양에 투기하여 자연스럽게 해수에 흡수되게 하려는 노력이 시도되고 있는 바, 해양이 소화할 수 있는 이산화탄소의 총량을 고려하면 충분히 설득력이 있는 방법이긴 하지만 해양생태계에 미치는 영향이나 방출된 이산화 탄소의 대기 중으로의 재진입 등 이해되고 확인 되어야 할 점이 많다(정노락 등[2005]).

논의의 초점은 LCO₂유적이 희석될 수 있는 충분한 시간이 주어지야 한다는 효율성의 관점과 특정 수심에 너무 오래 머물면서 그 유적의 CO₂ 농도를 너무 크지 않게 하여야 한다는 생물학적 안정성의 문제이다. 유적의 상승속도가 너무 빠르면 이산화탄소가 해수에 완전히 용해되기 전에 대기로 노출되게 되고, 반대로 너무 느리면 특정수심에서 희석이 이루어져 CO₂의 농도가 생물학적으로 허용할 수 있는 수준을 넘게 되는 위험이 있을 수 있다. 결국 두가지 조건을 적절하게 만족시킬 수 있는 상승속도를 가지는 유적을 생성시키는 것이 중요한데, 이를 위하여 주어진 조건에서 LCO₂ 유적의 상승속도를 정확하게 예측하는 것이 필요하다.

한편 유적의 상승속도는 두 유체의 물성뿐 아니라 두 유체의 경계면에 존재하는 오염물의 정도에 따라 달라질 수 있다(조운태, 송무석[2004]). 실제로 LCO₂ 유적의 표면에는 수화물(Hydrate Film)이 쉽게 생성되고 또 해수 중에 부유하는 여러 오염물질이 부착하게 된다. 본 연구는 이러한 변하는 표면장력의 특성이 LCO₂ 유적의 상승속도에 어떠한 영향을 미치는 지에 대하여 수치해석적인 방법을 이용하여 관찰하였다. 수치해석은 축대칭 2유체 유동을 묘사할 수 있는 경계면추적법(Font Tracking Method)를 바탕으로 간단한 표면장력 모델을 도입하여 수행하였다.

2. 정식화 및 수치해법

전 유동장에 대해 사용된 지배방정식은 아래의 축대칭 좌표계에서 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식이다.

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x_r} (r \rho u_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x_z} (r \rho u_z) = 0 \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho u_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho u_r^2) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho u_r u_z) = \\ - \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial r} (2\mu \frac{\partial u_r}{\partial r}) + 2\mu \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} (\mu (\frac{\partial u_r}{\partial z} - \frac{\partial u_z}{\partial r})) + f_r \end{aligned} \tag{2}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_z) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho u_r u_z) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho u_z^2) =$$

$$- \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial r} (\mu (\frac{\partial u_r}{\partial r} - \frac{\partial u_z}{\partial z})) + \frac{\partial}{\partial z} (2\mu \frac{\partial u_z}{\partial z}) - \rho g + f_z \tag{3}$$

위의 식에서 f 는 표면장력을 질량력으로 처리한 항으로, Dirac Delta함수를 이용하여 경계면에서만 작용하도록 계산한다.

두 유체간의 질량교환을 허용하지 않고 각각의 물적 특성이 변하지 않는다고 가정하면 아래와 같은 상태방정식을 생각할 수 있다.

$$D\rho/Dt = 0; D\mu/Dt = 0 \tag{4}$$

결국 연속 방정식은 다음과 같이 간단해진다.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r u_r) + \frac{\partial}{\partial z} (u_z) = 0 \tag{5}$$

이를 운동량 방정식에 대입하면 압력에 대한 Poisson 방정식을 얻을 수 있고 이를 유한차분법의 하나인 프로젝션 방법(Projection method, Peyret and Taylor[1986])을 이용하면 속도와 압력을 구할 수 있다.

유적의 경계면에 존재하는 오염물질의 양은 보존되어야 하므로 오염물질의 양, Γ 에 대하여 보존식을 만족하여야 한다.

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial t} + \nabla_s \cdot (u \Gamma) = 0 \tag{6}$$

유동장이 구해지면 위의 식을 이용하여 경계면에서 오염물의 양을 새로운 시간에서 계산하고, 구해지는 오염물의 양은 표면장력의 크기를 계산하는데 이용된다. 표면장력, σ 의 크기는 아래의 Fig. 1과 같이 간단한 선형의 관계를 가정하였다. 표면장력의 최대, 최소 그리고 변화율 β 는 두 유체의 물에 따라 달라지는 값이다.

새로운 오염물의 양이 구해지면 구간에 따라 아래의 식에서 표면장력의 크기를 구한다.

$$\begin{aligned} \Gamma \leq \Gamma_1 & \quad \sigma = \sigma_{\min} \\ \Gamma < \Gamma < \Gamma_2 & \quad \sigma = \sigma_{\max} - \beta \Gamma \\ \Gamma \geq \Gamma_2 & \quad \sigma = \sigma_{\max} \end{aligned} \tag{7}$$

본 유동에서 의미를 가지는 무차원수는 두 유체의 밀도비와 점도비, 그리고 유효점도의 크기를 의미하는 Morton 수($M = g \mu_c^4 \Delta \rho / \rho_c \sigma^3$)와 유적의 상대적인 크기를 나타내는 Eotvos 수($E_o = g \Delta \rho d^2 / \sigma_c$)

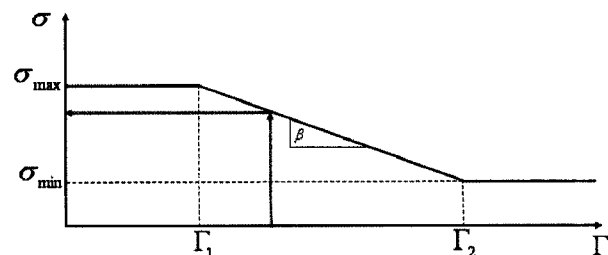


Fig. 1. Relation between the amount of surfactant and surface tension.

가 있다.

경계면추적법은 경계면 격자를 따로 설정하여 유동에 따라 경계면의 위치를 이동시키고, 구해진 경계면 정보에 대해 상태방정식을 이용하여 밀도와 점도를 구하는 방법이다. 자세한 내용은 Unverdi et al.[1992]을 참조하면 된다.

3. 계산결과 및 토론

Fig. 2와 같은 유동장에 대해 계산을 수행하였다. 좌측의 축은 회전 중심축이고 오른쪽 수직선은 가능하면 멀리 떨어지게 잡아 야 하는 유동의 바깥 경계이고 미끄럼경계조건을 이용한다. 유동

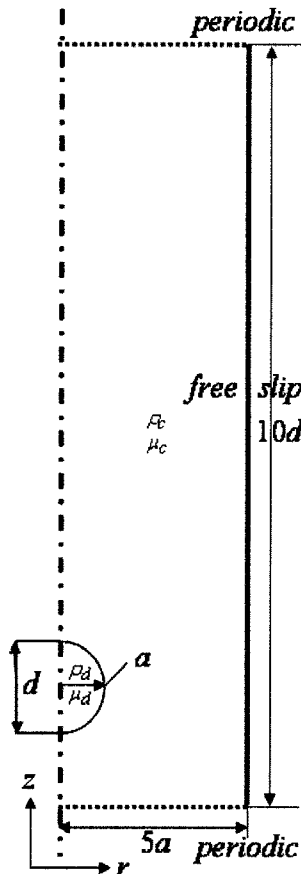


Fig. 2. Schematic view of the flow field.

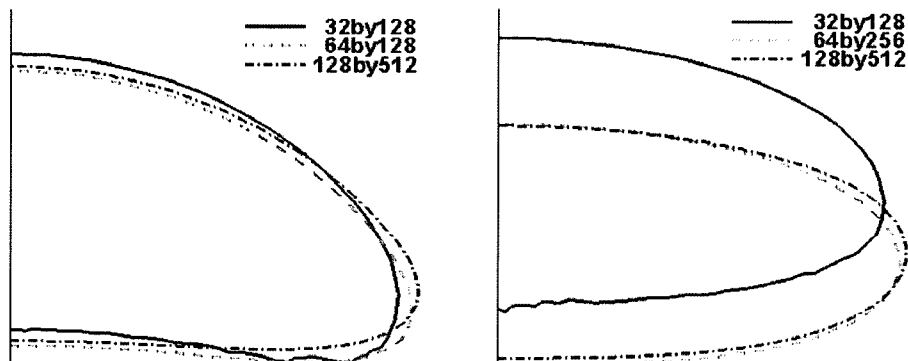


Fig. 3. Grid dependency at T=0.5(left) and 1.0(right).

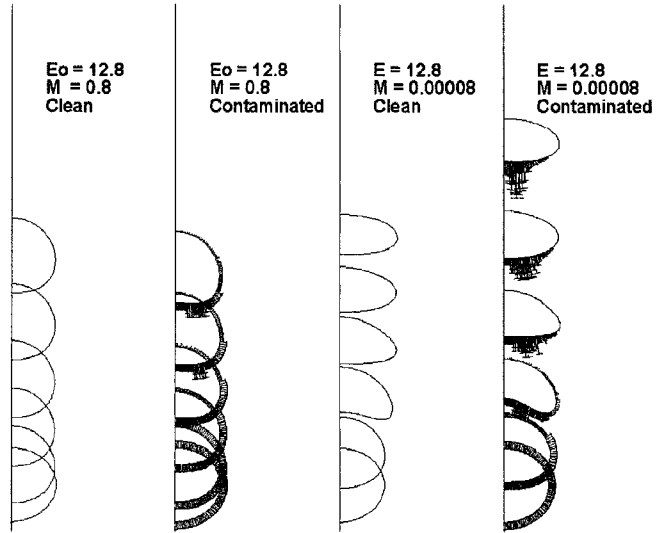


Fig. 4. Shape and position of the front for clean and contaminated droplets with viscosity variation.

장의 상부와 하부는 주기경계조건(Periodic Boundary Condition)을 이용하였다. 유동장 계산에 사용된 격자는 대칭축 근처에서 조밀하게 분포되게 하여 유적과 근처의 유동을 세밀하게 파악할 수 있도록 하였다.

유동장의 크기를 결정하기 위하여 다양한 수치실험을 수행하였다. 바깥 경계는 유적의 초기 반경의 5배되는 길이에 놓일 경우 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있었고, 유동장의 길이는 초기 직경의 10배를 택하여 계산 하였다. 격자의 수는 Fig. 3에 보인 바와 같이 64×256의 경우 적절함을 파악하였다.

Fig. 4는 E_o 를 12.8로 고정하고 유효점도를 변화시키며 오염물의 영향을 살펴본 계산 결과이다. 현재 다양한 조건에 대하여 엄밀한 검토가 이루어지지 못한 상태이지만 바깥유체의 점도가 작은 경우 다소 느리게 상승함을 확인할 수 있다. 경계면에 오염물이 존재하는 경우 그렇지 않은 경우와 비교하여 유적의 변형이 다소 달리 나타남도 확인할 수 있다. 또한 외부의 점도가 작은 경우, 오히려 경계면 오염물이 존재할 경우 상승속도가 더 크게 나타나는데, 이는 압력저항의 감소가 마찰저항의 증가를 극복한 것으로 추측된다. 더욱 체계적인 해석이 요구되는 상황이지만, 오염물의

유무가 상승속도에 큰 영향을 미치는 것으로 판단되며, 이는 유동장 크기의 변화와 표면장력 모델의 개선을 통하여 확인이 필요하다고 사료된다.

4. 결 론

경계면 추적법을 이용한 유한차분법을 이용하여 경계면 오염물질이 유적의 거동에 미치는 영향을 수치적으로 살펴보았다. 유적의 거동은 점도, 밀도와 같은 물적 특성과 유적의 크기에 따라 변화한다. 밀도가 다른 두 액체를 구분짓는 밀도 경계면에 오염물질이 존재할 경우 경계면 오염물질은 유적의 변형을 감소시키고 유적의 후방 근처에서 경계면 오염물질의 집중으로 인해 후방 근처의 경계면 거동은 고체구와 비슷한 경향을 보인다. 밀도 경계면이 오염된 경우 마찰저항이 증가하고 결과적으로 유적의 상승속도는 감소한다. 유적의 직경이 상대적으로 큰 경우 또는 외부 액체의 점도가 작은 경우에는 변형이 크게 기대되는데 경계면 오염물질의 존재는 유적의 변형을 억제하고 결과적으로 형상저항을 줄여 줌으로써 마찰저항 증가를 극복하여 오히려 상승속도가 증가하게 된다. 이상의 결론은 보다 체계적인 검토를 통하여 규명되어야 할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 2007학년도 홍익대학교 학술연구진흥비와 해양수산부지원의 “CO₂ 해양처리기술개발연구” 사업에 의하여 지원되었으며, 홍익대학교 교수연구년기간(2006-2007)중 연구되었음.

참고문헌

- [1] 조운태, 송부석, 2004, “2액체 시스템에서 오염물질이 유적 거동에 미치는 영향”, 한국해양환경공학회 추계학술대회 논문집.
- [2] 정노택, 강성길, 강창구, 박용찬, 윤치호, 2005, “CO₂ 해양처리방안 비교연구”, 한국해양환경공학회지, 8권 3호, 111-115.
- [3] Roger Peyret, Thomas D. Taylor, 1986, *Computational Methods for Fluid Flow*. Springer-Verlag New york.
- [4] Unverdi, O. and Tryggvason, G., 1992, “A front-tracking method for viscous, incompressible, multi-fluid flows”, J. Comp. Phys. 100(1).

2008년 7월 2일 원고접수

2008년 8월 5일 수정본 채택