

CO₂ 해양처리를 위한 액적 거동 시뮬레이션 기초연구

정노택[†] · 강성길

한국해양연구원 해양시스템안전연구소 해양안전방제연구본부

Numerical Study of a Droplet Movement for the Ocean CO₂ Sequestration

Rho-Taek Jung[†] and Seong-Gil Kang

Marine Safety and Pollution Control Division, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, KORDI,
Jang-Dong, Yuseong-Gu, Daejeon 305-343, Korea

요 약

2004년 11월 러시아의 교토의정서 비준에 의하여 2005년 2월에 교토의정서의 발효를 앞두고 있다. 따라서 1차 감축대상국은 2008년부터 2012년까지 1990년 대비 각 국가당 설정된 GHG(Green House Gas) 배출량을 감축해야하는 상황에 처해 있다. 본 논문에서는 대기 중에 뿜어내는 GHG중 가장 많은 비율을 차지하는 CO₂를 심해에 친환경적으로 처리하는 기술로서 해양격리기술에 대해 소개한다. 본 해양격리기술은 4개의 주요단계로 구분할 수 있는데, 해양수송기술, 해양분사기술, 해양저장효율평가기술, 해양처리생태영향 평가기술등으로 나눌 수 있다. 본 논문에서는 CO₂의 해양 분출시에 초기희석율에 영향을 미치는 해양분사기술 중, 액포의 거동과 용해에 관한 기초 연구를 수행하였다. 특히 본 연구에서는 전산유체역학 기법(Computational Fluid Dynamics)을 통해 해수를 연속상(Continuous phase), 액적을 분산상(Disperse phase)으로 한 이상(Two-phase) 유체를 3차원 이동형 비구조 격자와 유한체적법을 이용하여 상 경계면이 거동하면서 거동에 따른 용해도의 변화를 추정하였다. 따라서, 본 연구는 액적의 거동과 용해도의 유체역학적 관계를 밝히는 데 기초적 자료가 될 것으로 판단된다.

Abstract – In the situation which Russia's ratification of the Kyoto protocol at February, 2004, ANNEX I nations must reduce GHG(Green House Gas) discharge rate from 2008 by 2012 to the reduction level at 1990. We introduce the CO₂ ocean sequestration that is one of promising method for getting the stable CO₂ concentration in the atmosphere. There are four categories : ocean transportation technique, ocean initial dissolution technique, ocean deep current evaluation technique, and ocean biological evaluation technique. In this paper, we carried out the fundamental numerical study on the ocean initial dissolution technique, when the Liquidized CO₂ is emitted at the deep ocean, It is very important to the dissolution rate of movable CO₂ interface because it is directly impact to the ocean organism. In order to investigate the relation of the interface movement and rate of the dissolution, we develop CFD(Computational Fluid Dynamics) code that was constructed by the finite volume method based on the unstructured mesh, and a droplet's boundary surface can move and one direction dissolution from disperse phase into continuous phase adopted as its physics be. This study clarifies hydrodynamic relation between solubility and movement of the droplet through the verification of the CFD code.

Keywords: CO₂ ocean sequestration(CO₂해양격리), Liquid-liquid two-phase flow(액체-액체간 이상유동흐름), 3D Moving Unstructured mesh(3차원 이동형 비구조격자)

1. 서 론

지구 온난화는 주로 인류가 산업 경제 활동을 통하여 대기중으로 방출하는 이산화탄소(CO₂)량의 증가에 의해 발생하는데, 20세

기 이후 산업화의 가속과 더불어 지구온난화의 강도도 증가하고 있다. 지구온난화에 대한 근본적인 대처방안은 대기로 방출되는 CO₂ 양을 줄이는 것이므로 선진국을 중심으로 다양한 CO₂ 저감 기술이 개발되고 있다. 여러 CO₂ 저감기술 중 큰 주목을 받고 있는 것의 하나가 특정 발생원으로부터 CO₂를 대량으로 포집하여

[†]Corresponding author: rtjung@kriso.re.kr

이산화탄소 저장용량이 매우 큰 해양이나 지중 석유자원 채취공간에 저장/격리/처리시키는 기술이다. 이는 미국, 일본, 노르웨이 등을 중심으로 연구 개발되고 있는데, 일본의 경우 화력발전소 등 CO₂를 대량으로 발생시키는 대규모 공업시설에서 이산화탄소를 포집/액화시켜 2,000~3,000 m 심해 등에 환경 친화적으로 영구적으로 격리시키고자 하는 연구개발을 지난 90년 중반부터 수행하고 있다. 일본 전체에서 연간 배출되는 약 12억 톤의 CO₂중 2007년부터 1년에 약 1,000만톤 정도(100만 kw 석탄 화력발전소의 2.5기에서 배출하는 CO₂ 양이며, 국가 전체발생량의 5%)를 심해에 격리시킨다는 목표하에 과거 5년간 약 700억원의 연구개발비를 투자한 바 있다. 이러한 해양처리기술은 'CO₂ 발생을 감축'하거나 'CO₂를 분리/포획'하거나 또는 '대체에너지 및 청정에너지'를 보급하고자 하는 일반적인 지구온난화 대응기술들이 갖는 약점들, 예를 들면, 교토의정서 등에서 요구하는 대량의 CO₂ 배출감축 요구를 가시적으로 짧은 기간내에 충족시키지 못하는 약점들을 보완해 줄 새로운 대안기술이라는 점에서 많은 관심을 끌고 있다 (Ribeiro & Henry 1995; Fujioka *et al.* 1997).

따라서, 심해(1000-2000 m)에 액화 CO₂(LCO₂)를 방출하는 것은 그린하우스 영향을 줄이기 위한 가장 경제적이면서 실행가능한 방법으로 알려져 있다(Nakashiki *et al.* 1995). 심해에서 방출되는 LCO₂는 주위의 해수를 동반하면서 작고 많은 액적방울이 퍼지면서 해수에 서서히 용해되리라고 예측된다. CO₂의 높은 농도는 밀도조류로서의 역할로, 그리고 유출된 CO₂는 같은 밀도를 가진 성층화된 레벨로, 수평방향으로 벗겨지면서 상승과 동시에 해수로 흘러서 녹아 들어간다. 고압용기내 실험에 의하면 수심 약 3,000미터를 기점으로 보다 깊은 곳에서 방출하게 되면 액화 CO₂(LCO₂: Liquid CO₂)는 가라 앉고, 보다 얇은 곳이면 상승한다고 알려져 있다(Peter *et al.* 1999). 또한 물리적 특성으로서 배출된 LCO₂의 표면에 하이드레이트(Hydrate)라고 하는 수화물의 막이 형성되어서 액포 LCO₂로부터 CO₂의 급격한 용해를 차단한다. 그러나 하이드레이트막에 대한 물질용해에 대한 평가는 실험실의

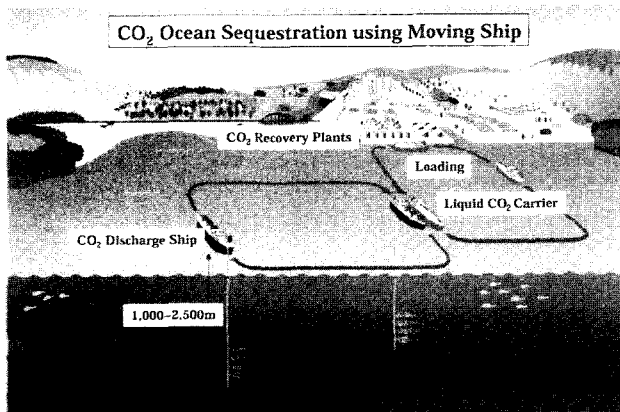


Fig. 1. The outline of the CO₂ Ocean Sequestration using Moving Ship (RITE: Research Institute of Innovative Technology for the Earth).

고압용기내에서 수행해야 함으로써 명확한 용해도 파악은 어려운 실정이다(Kato *et al.* 2000). 또한, 환경생물학적인 면에서 보면, 자연에 미치는 영향은 아주 적으면서 「얼마나 빠르게 해수에 용해시킬수 있는가」가 문제이다. 그러므로 국소적 저pH 영역의 발생을 피하기 위해 실 해역 작업에서 두 가지 LCO₂의 분사방법을 고려해 볼 수 있다. 첫번째는 작업선박의 속도를 늦추면서 노즐 분사 방식으로 단일 액적을 연속적으로 분사하여 층류유동을 형성하는 방법과 두번째는 작업선박의 예인속도를 약간 빠르게 내면서 노즐 분사 방식은 세밀한 액포 형태의 스프레이 분출식으로 난류 유동을 조성하는 것을 고려할 수 있겠다. 액적의 형태로 층류유동 또는 난류유동으로 구분 짓는 중요한 이유는 수직 방향으로 가능한 넓은 영역으로 퍼지게 유도하는 것이므로 중요한 결정 요소 중에 하나이다.

본 연구의 목적은 분산상(CO₂부분)에서 연속상(해수부분)으로 물질유동이 발생시에 해석가능한 이상류 전산유체프로그래밍개발이다. Front-Capturing Type으로 개발되어진 공기방울/액적의 시뮬레이션은 여러 연구자들에 의해서 연구되어졌다(Kanai and Miyata 1998, Tomiyama *et al.* 2002). 이상류의 경계면은 스칼라 함수법인 volume of fluid(VOF), marker-density function(MDF), VOF in micro cell와 level-set method등이 있다. Takagi *et al.*(1994)은 Front-tracking method를 단일 공기방울에 물체접합좌표계를 사용하였다. Front-tracking Method는 Front-Capturing Method보다 경계면의 위치계산의 정도는 좋아지나 격자의 심한변형은 수치오차 발생의 원인이된다. Tryggvason *et al.*(1998)은 직각 좌표계에서 움직이는 경계면 주위를 다시 조밀한 직각격자로 분해하는 Front-tracking Mesh를 개발했다.

본 논문에서는 심한곡률, Pinch-off, Coalescence 의 문제에 대응가능한 기법인 보다 유용성이 많은 MDF를 택하지 않고, Front-tracking Method로 택한 이유는 CO₂는 표면에서 해수로의 물질이동률이 높기 때문에 CO₂의 표면에 급격한 물질의 구배가 발생하게 된다. 그래서, 물질이송시 급격한 구배를 안정적으로 수치해석을 수행하기 위해서는 표면에 계산 격자를 조밀하게 분포시켜야 한다. 더욱이 본 논문에서는 Very Thin Layer(Jung, 2001)라고 하는 기법을 채택, 계산 격자를 더 조밀하게 분포시켰다. 이로써, 물질의 경계면을 수치적으로 잘 표현하게 된다. 같은 이유로 질량 경계층의 두께는 모멘텀 경계층의 두께 정도로 가정하였다.

한편 MDF의 경우는 표면을 정의하기위해 스칼라 함수법을 사용하기 때문에 표면에서의 정밀도를 요하는 본 연구에는 적절하지 않다. 그래서 본 연구에서는 CO₂의 표면을 삼각형으로 만들어 표현하는 비구조 격자를 구성했다. 본 연구에 수행하는 이상류체는 공기-물 같은 밀도비가 큰 시뮬레이션이 아니기 때문에 심한곡률이나 pinch-off는 일어나지 않는 것으로 본다. 많은 수의 액적을 직접 시뮬레이션법으로 계산하는 것은 현재의 계산기 용량으로서는 무리가 따르기 때문에 우선 한 액적의 거동에 초점을 맞추었다. 또한, CO₂ Clathrate hydrate필름의 효과 또한 고려되지 않았다.

본 연구에서의 관심사항은 (1) 연속상을 움직이는 액적 경계의

움직임, (2) 액적경계를 통한 질량용해 문제로서 CFD 코드의 수치해석 방법을 소개하고, 실리콘-물의 이상유동에서 실험결과와 CFD코드의 검증을 거쳐, 액적표면거동이 용해율에 미치는 영향등을 수치적으로 해석하였다.

2. 수치해석

중력장 하에서 액적의 3차원적 거동을 파악하기 위하여 수치해석기법으로서 삼각추(Tetrahedron)와 삼각기둥(Prism)의 복합 비구조격자를 생성하여 액적 밖과 내부에 분포시켰다. Liquid-Liquid 이상류 하에서 연속상과 분산상이 존재하며, 분산상이 되는 액적은 부력을 받으며 상승을 시작하게 된다. 동시에 다른 두상의 접촉면도 움직이며, 해당 면에 격자의 상대속도를 포함시켜 질량보존법칙을 성립시킨다.

상승액적 시뮬레이션에서 액적의 위치는 운동방정식을 시간항에 따라 차분화 시킬때, 상승시 발생한 가속도를 배제함으로 항상 액적 부피의 중심은 격자의 중앙을 유지시키도록 하였다. 아래 식 (1)에 적분형 이상류 운동 방정식을 나타내었다.

$$\frac{d}{dt} \int \mathbf{u} dV + \int (\mathbf{u} - \mathbf{v}) \cdot \mathbf{n} dA = - \frac{1}{\gamma} \int p \mathbf{n} dA + \int \frac{1}{\gamma (Oh \cdot Re)^2} \mathbf{g} dV + \frac{1}{Re \gamma} \int [\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T] \cdot \mathbf{n} dA + \mathbf{a} \quad (1)$$

여기서, Re 는 액적의 기준속도를 기준으로 한 무차원수, γ 은 분산상과 연속상의 밀도비, θ 은 분산상과 연속상의 점성비이며, 표면장력과 중력가속도의 비인 Etvös 수와, 표면장력과 레이놀즈수의 비인 Ohnesorge 수로 구성되어 있다. 본 수치시뮬레이션에서는 기준속도를 바탕으로 한 Re 와 달리 액적의 상승속도를 기준으로 하는 무차원수 Rn 이 결과 값으로 나오게 된다.

연속상과 분산상의 경계인 액적 표면에서의 속도에 대한 경계조건은 아래와 같다. 식 (2)와 같이 가정하면, 식 (2)의 관계로부터 표면에서의 속도를 나타내는 식 (3)이 얻어진다.

$$\mu_d \left. \frac{\partial u_n}{\partial n} \right|_d = \mu_c \left. \frac{\partial u_n}{\partial n} \right|_c \quad \text{and} \quad \mu_d \left. \frac{\partial u_t}{\partial n} \right|_d = \mu_c \left. \frac{\partial u_t}{\partial n} \right|_c \quad (2)$$

여기서 첨자 c , d 는 연속상과 분산상을 의미하고, n 은 경계표면에서 표면 밖, 수직방향을 의미한다.

$$u_s = \frac{\theta \frac{u_d}{\Delta l_d} + \frac{u_c}{\Delta l_c}}{\theta \frac{1}{\Delta l_d} + \frac{1}{\Delta l_c}} \quad (3)$$

여기서, u_c 와 u_d 는 연속상과 분산상이 접해있는 면에서의 각상에서의 속도를 나타낸다. 그리고 Δl_c 와 Δl_d 는 접해있는 면에서 각상의 셀 중심까지의 거리를 나타낸다.

다른상이 접해 있는 면에서의 압력에 관한 경계조건은 식 (4)에 나타내었다.

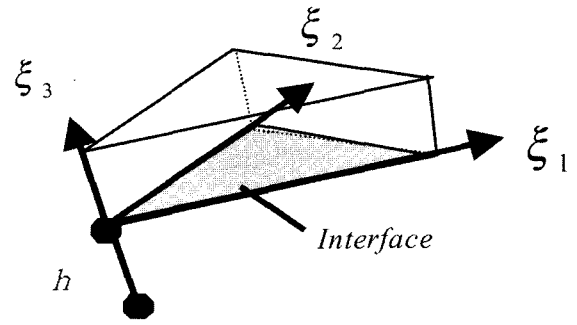


Fig. 2. Definitions related to moving grids.

$$p_d = p_c + \Delta p \quad \text{where,} \quad \Delta p = \frac{\kappa}{(Oh \cdot Re)^2} \quad (4)$$

여기서, Δp 는 경계면에서의 압력변동을 나타내며, 각 경계면에서의 곡률 κ 는 식(5)와 같이 나타낼수 있다.

$$\kappa = \nabla \cdot \mathbf{n} = \frac{1}{A} \int \mathbf{n} \cdot d\mathbf{l} \quad (5)$$

여기서, n 은 경계면에서의 단위 수직 벡터를 나타내며, $d\mathbf{l}$ 은 표면 삼각형의 변 벡터를 나타낸다.

그리고, 액적의 상승에 따라 3차원 적으로 그 경계표면이 변화가 일어나는데 그 표현을 식 (6)의 "spine function"을 이용하였다.

$$z = h(x, y, t) \quad (6)$$

h 함수는 곡부 좌표계(ξ_1, ξ_2, ξ_3)를 바탕으로 움직이며, 시간 t 에 따라 변화하는 스칼라량이다. 본 연구에서는 ξ_3 의 방향을 액적의 중심으로부터 원주방향을 가리킨다(Fig. 2). 그러므로, 운동학

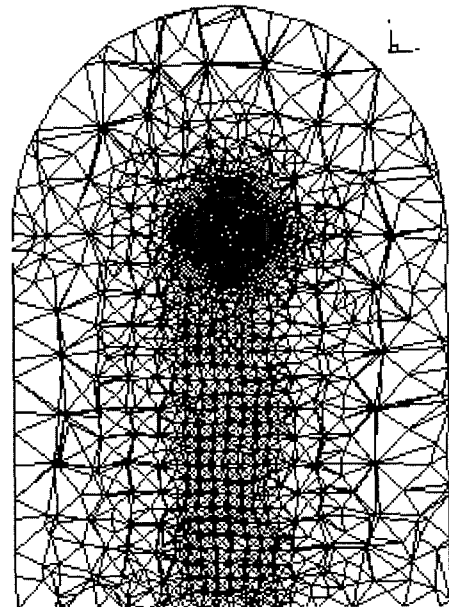


Fig. 3. Three-dimensional hybrid unstructured mesh (Meshes in the droplet are omitted for simple view. The number of the triangle prism is 11800, and tetrahedron is 60447, respectively).

Table 1. Indicated non-dimensional time pointed A through I in the case I

Point(CASE I)	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Non-dimensional time(T)	12.8(T-P)	14.0	15.0	15.8	17.2(T-P)	18.4	19.2	19.8	20.4(T-P)

적 조건은 식 (7) 같은 조건을 만족시킨다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{J} \left(U_3 \frac{\partial h}{\partial \xi_3} - U_1 \frac{\partial h}{\partial \xi_1} - U_2 \frac{\partial h}{\partial \xi_2} \right) \quad (7)$$

where $U_i \frac{\partial \xi_i}{\partial x_i} u_i$

여기서, J는 야코비안이며, u_i 는 유체의 속도이다.

계산격자의 구성은 Fig. 3에서 보여지듯이 삼각뿔과 삼각기둥으로 구성되어 있으며, 삼각기둥은 표면에 가깝게 둘러싸여 있으며 연속상쪽으로는 15층으로, 분산상쪽으로는 10층이 분포되어 있어, 액적은 삼각기둥의 원주방향을 따라 움직이게 된다. 그 외의 유체장은 삼각뿔로 구성되어 있다. 총 격자 수는 삼각기둥이 11800개, 삼각뿔이 60447로 구성되어 있으며, 격자생성 상용프로그램인 ICEM-CFD를 이용하여 액적의 내부와 외부를 모두 구성하였다.

3. 결과 및 토론

액적의 유동을 파악하기 위하여 유사 액체인 실리콘을 분산상으로, 물을 연속상으로 두고, 세개의 다른 레이놀즈수를 바탕으로 시뮬레이션을 수행하였고, 가장 높은 레이놀즈수에 대해서는 수조 실험을 통하여 시뮬레이션 결과와 비교 검증하였다.

액적의 지름이 0.00826 m, 기준 상승속도를 0.1 m/s로 하여 기준 레이놀즈수를 826두고, 실리콘-물에 대한 밀도비와 점성비는 0.76과 0.494이다. 그리고, Etvös 수는 2.82이며, Ohnesorge 수는 0.0015의 값을 가진다. 무차원시간 5T까지는 액적이 계속상승하다가 T=12.8에서 액적 속도의 진동이 발생된다(Fig. 3). 상승중 액적은 주로 타원형을 유지하고 있으며, 평균 변형율(단축/장축)은 0.7을 유지하며, 액적의 평균상승속도는 0.15 m/s로 상승속도를 기준으로 한 레이놀즈 Rn의 값은 1322이며, 그리고 Strouhal수(St=d0/U·T)는 0.09로 나타났다.

Fig. 4의 (a)에는 zig-zag 왕복 운동을 구체적으로 확인하기 위하여 9개의 점으로 표시 하였으며, 그 점과 무차원 시간의 관계는 다음과 같다. 점 A, E, 그리고 I는 turning point(T-P)를 의미한다.

Fig. 4의 (b)는 x-z평면과 y-z평면의 액적의 궤적을 나타내며, sinusoidal 적으로 상승한다는 것을 유추할 수 있다. Fig. 4의 (c)는 변형율을 시간축상에 나타낸것으로서 T=11이후에 반복되는 경향을 나타낸다.

액적의 상승시 zig-zag 왕복운동의 한 주기가 되는 T=12.8(point A)부터 T=20.4(point I)까지의 경향을 살펴보면 turning-point 인 A, E, I에서의 특징은 상승속도가 최대이면서, 변형율이 최소를 가르킨다. 그 의미는 zig-zag 왕복운동 중 turning-point에서는 높은 항력을 받는 타원형의 액적이 보다 낮은 항력의 원형으로 변화함

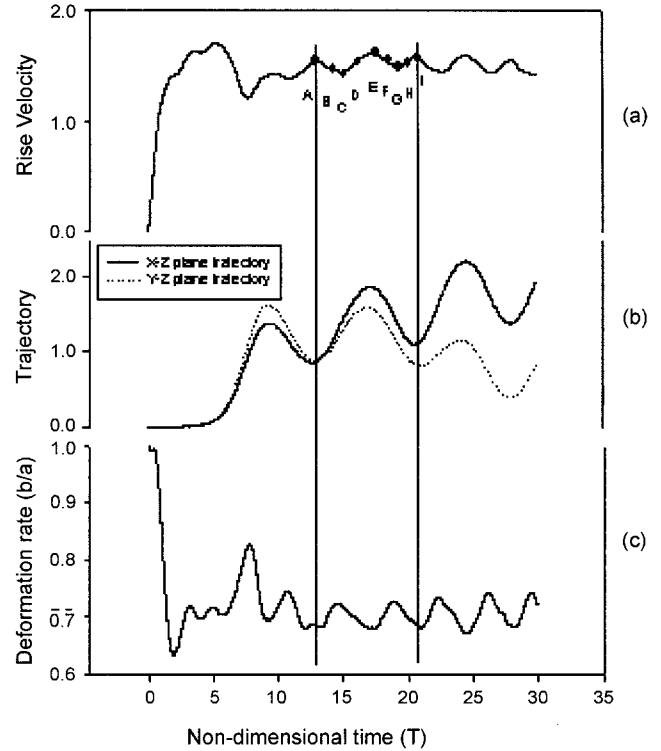


Fig. 4. Variation of rise velocity (a), droplet path in x-z and y-z plane (b), aspect ratio (c). (Point A indicates 12.8T, B is 14.0T, C is 15.0T, D is 15.8T, E is 17.2T, F is 18.4T, G is 19.2T, H is 19.8T, and I is 20.4 for one zigzag motion). The Rn and Oh are 1322 and 0.0015.

에 따라 상승속도가 빨라지게 된다. 따라서, 타원형의 액적은 큰 후류 와도로 인하여 속도가 느려지며, 원형의 액적은 작은 후류 와도로 인해 상승속도에 영향을 미치지게 된다. 또한 후류 평행하지 않는 압력의 변화가 zig-zag 왕복운동의 원인이 된다.

실리콘-물에서 실리콘 액적을 방출한 실험과 같은 물성 조건에서 수치적으로 해석한 결과를 보여준다(Fig. 5). 그러나 수치 해석 상에서의 액적은 구 형태에서 출발하기 때문에 실험상의 노즐 분출 시 따르는 초기 가속도효과는 엄밀히 다루지는 않고 있다. 실험장치의 개요는 Imamura & Katayama (1999)에 자세히 나와 있으며, 여기서는 액적의 zig-zag 한 주기에 관한 snapshot만을 해당 시간 대 별로 비교하였다. 촬영시선과 수치해석 시선이 반드시 같다고는 할 수 없으나 최대한 zig-zag의 면을 확보한 상태에서 촬영 또는 해석결과를 비교하였다. 실험과 해석에서 보이듯이 액적은 zig-zag 로 상승이동하며 가로 폭은 약 1 cm, zig-zag 수직 폭은 약 10 cm로 거의 동일하며, 액포의 형상도 진행방향으로는 편평한 면이, 그리고 후류는 약간 각진 면이 보인다. 실험과 수치해석 시 Reynolds number는 각각 1,476과 1,322이었다.

X-Y평면상에 액적의 궤적을 Fig. 6에 나타내었는데, 확실한 zig-

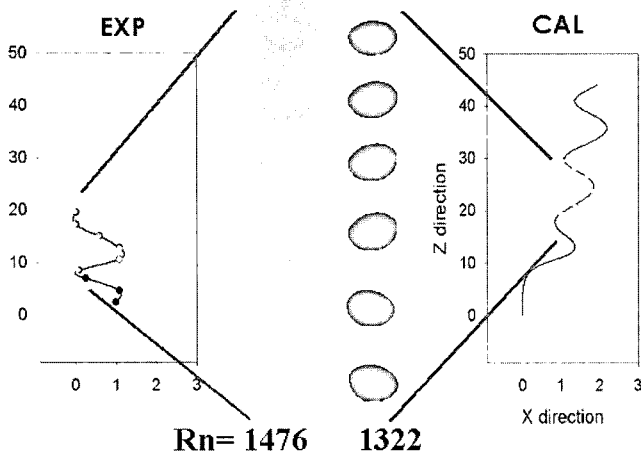


Fig. 5. Comparison of droplet deformation experiments and present simulations in silicon-water system: T is a period of path. Photo by Imamura and Katayama (1999).

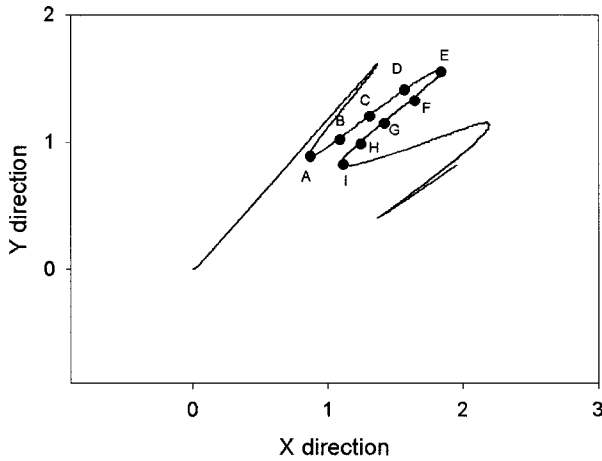


Fig. 6. A droplet trajectory on X-Y plane (starting from 0,0). The alphabet letter on the line shows the same meaning of the description in Fig. 3 and Table 1. Rn is about 1322 and Oh=0.0015.

zag 궤적을 보인다.

두 번째 경우로는 첫 번째의 경우와 같은 물성에 Reynolds 수만 낮은 경우에 시뮬레이션 결과를 제시한다. 액적의 지름이 0.005 m에 기준속도는 0.1 m/s로 기준 Reynolds 수는 500일 경우에 실리콘 액적은 어떤 거동을 보이는 지 알아보도록 한다. 밀도비와 점성비는 0.76과 0.494로 동일하며, Etvös 수는 1.03이며, Ohnesorge 수는 0.00187의 값을 가진다. 계산결과 평균 상승속도는 약 1.03 m/s로서 상승속도에 따른 Reynolds 수는 약 650임을 알 수 있다. 먼저 Fig. 6를 보면 높은 Reynolds 수에서는 zig-zag 양상을 보이나 약 650 정도의 낮은 경우(Fig. 7)는 Helical과 zig-zag 궤적이 동시에 존재 한다는 것을 알 수 있다. Table 2에 보이는 바와 같이 9개의

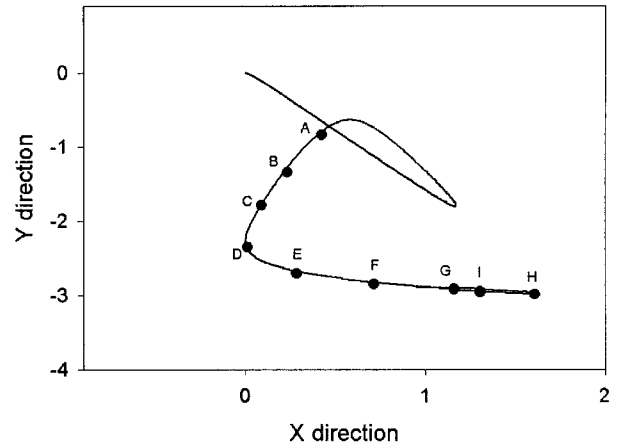


Fig. 7. A droplet trajectory on X-Y plane (starting from 0,0). (A indicates 17.4T, B is 18.6T, C is 20.0T, D is 21.6T, E is 23.0T, F is 24.0T, G is 25.4T, H is 26.8T, and I is 28.0T for helical motion). Rn is about 650 and Oh=0.00187.

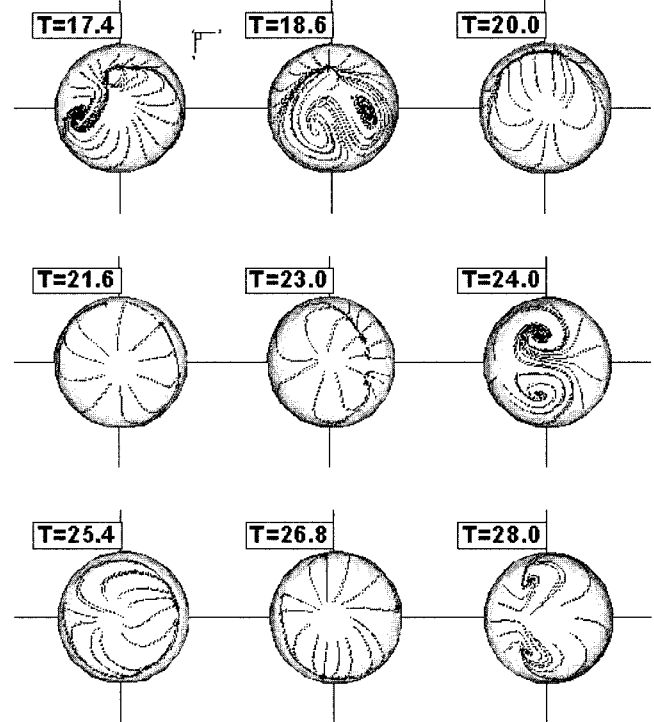


Fig. 8. Evolution of the interface streamlines on the droplet (view-point is from minus z). Rn is about 650 and Oh=0.00187. This figure flows from up-left to down-right with time T, also alphabetical list from A to I.(17.4T indicates A, 18.6T is B, 20.0T is C, 21.6T is D, 23.0T is E, 24.0T is F, 25.4T is G, 26.8T is H, and 28.0T is I).

순차적이면서 임의의 시점에서 정하였고, 점 A-F까지는 Helical 궤적을 점 F-I까지는 zig-zag 궤적의 양상을 가지며, 이때 액적의

Table 2. Indicated non-dimensional time pointed A through I in the case II

Point(CASE II)	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Non-dimensional time(T)	17.4	18.6	20.0	21.6(Heli)	23.0	24.0	25.4	26.8(T-P)	28.0

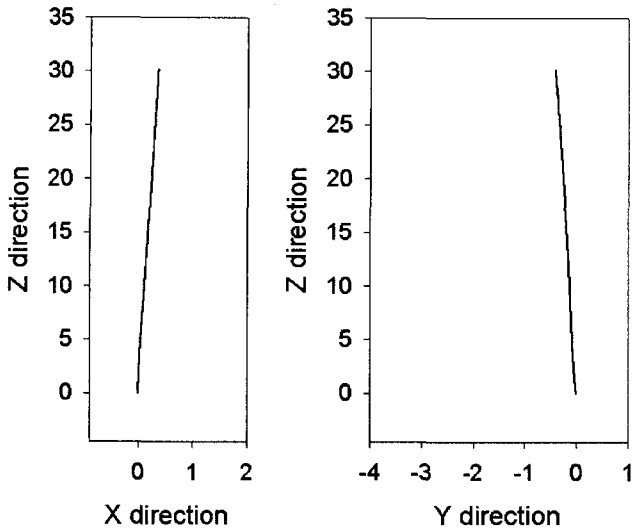


Fig. 9. A droplet trajectory on X-Z (a) on the Y-Z(b) plane when Rn is about 280.

레이크 변화에 따라 Fig. 8과 같이 액적 후면의 interface stream-line이 후류에 의해서 확연히 차이가 난다. 점 A($T=17.4$)와 점 B($T=18.6$)의 경우에는 방향이 반대인 두개의 vortex의 크기가 불균일하다. 따라서 후류 vortex가 동일하지 않기 때문에 Helical 레이직이 일어난다. 그러나 zig-zag 움직임 중에 있는 점 F($T=24.0$)와 점 I($T=28.0$)는 twin-vortex가 진행방향으로 양측에 균일하게 stream-line이 그려지는 것을 알 수 있다. 그러므로, Reynolds수 650 정도이면 액적이 zig-zag와 helical적인 움직임이 동시에 발생함을 알 수 있다.

마지막으로, 저 Reynolds수 일 때 액적의 거동에 대해서도 수치 해석을 실시했다. 액적의 지름은 0.0027 m 이며, 기준 상승속도는 0.1 m/s 이므로 Reynolds 수는 270이며, 해석결과는 Fig. 9에서 보듯이 steady 상태로 액적의 요동이 없이 서서히 상승하는 것을 알 수 있다.

끝으로, 액적의 3차원 움직임으로 인해서 분산상에서 연속상으

로 용해되는 용해도의 변화를 Fig. 9에 나타내었다. 용해방향은 분산상에서 연속상으로의 one-direction만 일어나고 그 반대의 경우는 배제한다. 앞서 다른 세 Reynolds 수의 경우에 액적의 거동을 파악하였다. 그 양상으로는 zig-zag, helical, rectilinear로 구분할 수 있겠다. Fig. 10에서는 Ohnesorge 수의 변화에 따라 액적 전체 용해도에 어느정도 영향을 미치는가에 대한 그래프이다. Ohnesorge 수가 높아진다는 것은 표면장력의 효과가 줄어든다는 것이며, 동시에 액적 표면의 변형이 커져서 더욱 용해도가 증가하게 된다. 반대로 Ohnesorge 수가 적어진다는 것은 Fig. 10에서 알 수 있듯이 Clift(1978)의 고체구에 대한 경험식에 가까워진다는 것을 알 수 있다. 그러므로, 표면의 움직임에 따라 용해도는 그렇지 않을 때보다 약 5%-10%정도의 높은 값을 가지며, 특히 해양에 방출되는 CO_2 액적으로 인해 용해도를 추산할 때에는 CO_2 액적 표면의 움직임을 면밀히 파악하여 보다 정확한 용해도 추정

4. 결 론

교토의정서 등에서 요구하는 대량의 CO_2 배출감축 요구를 가시적으로 짧은 기간내에 충족시키지 못하는 약점들을 보완해 줄 새로운 대안기술이라는 점에서 본 해양격리기술은 국제적으로 관심을 보이고 있다. 그러나, CO_2 해양격리에 관한 국제법적, 사회적 수용여부를 두고 많은 논란이 있다. 특히 2002년도의 노르웨이 서쪽 100 km 외해에서 미국, 일본, 노르웨이, 캐나다, 스위스 5개국의 국제 실증 실험 연기가 이를 말해주고 있다. 현재 국제적 수용여부를 IPCC에서 검토중이며 2005년도 9월달에 발표될 해양격리에 관한 특별보고서에 관심이 집중되어 있다(IPCC-22, 2004).

본 논문은 CO_2 가 심해양에 파이프를 통하여 방출 될 경우, 그 확산영역을 추정하기위한 기초적인 수치시뮬레이션을 수행하였다. 본 논문에서는 유사 이상류인 실리콘-물의 경우에 실리콘 액적의 거동에 관한 연구와 이 거동이 연속상의 용해도에 변화를 끼친다는

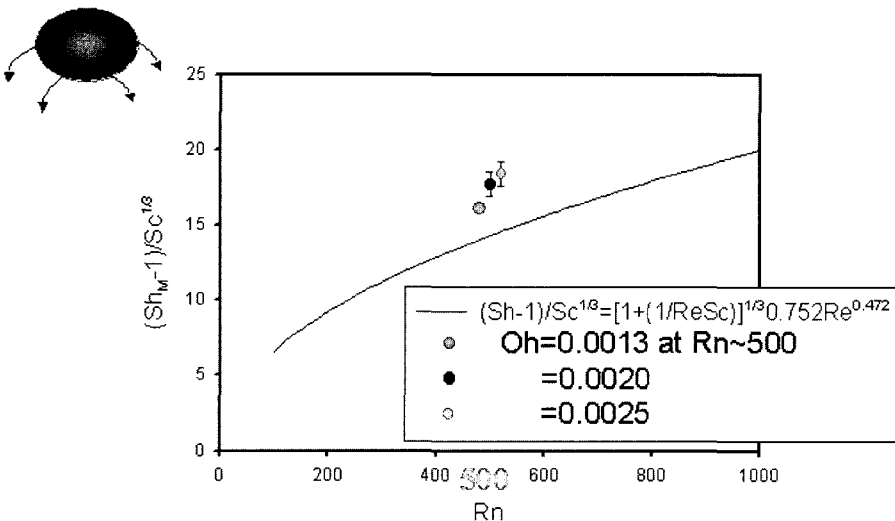


Fig. 10. Comparison of mass concentration rates between an empirical equation (Clift, 1978) and simulation results shown by solid circle for $Oh=0.0013$, 0.0020 , and 0.0025 , respectively. The case of $Oh=0.0020$ and 0.0025 has error bar caused by deformation and oscillation of droplet surface.

것을 수치해석적으로 확인하였다. 거동에는 세가지의 양태가 있는데 zig-zag, helical, rectilinear로 크게 Reynold수에 영향을 받는다.

그러나, 실제적으로 CO₂를 해양에 격리시에는 Hydrate(Brewer *et al.* 2003)라고 하는 샤프트형의 결정이 Liquid-CO₂ 액포 주위에 쌓여 지기 때문에 이 영향으로 용해도의 변화가 발생한다. 따라서 보다 정확한 용해도를 알기 위해서는 Hydrate을 인한 용해도 추정의 연구가 진행되어야 한다.

참고문헌

- [1] Ribeiro, J. and Henry, B. 1995, "Carbon Dioxide Disposal and Storage Technologies", Institute for Prospective Technological Studies, Joint Research Centre, European Commission.
- [2] Fujioka, Y., Ozaki, M., Takeuchi, K., Shindo, Y. and Herzog, H. J. 1997, "Cost comparison on various CO₂ ocean disposal options", *Energy Convers. Mgmt*, 38 (suppl.), S273-S277.
- [3] Nakashiki, N., Ohsumi, T. and Katano, N. 1995, "Technical View on CO₂ Transportation onto the Deep Ocean Floor and Dispersion at Intermediate Depths", N. Handa, and T. Ohsumi, eds., *Direct Ocean Disposal of Carbon Dioxide*, pp. 183-193.
- [4] Peter, G. B., Gernot, F., Edward, T. P. and Franklin, M. O. J. 1999, "Direct Experiments on the Ocean Disposal of Fossil Fuel CO₂", *Science*, Vol. 284, pp. 943-945.
- [5] Kato, M., Iida T. and Mori, Y. H., 2000, "Drop Formation Behaviour of a Hydrate-Forming Liquid in a Water Stream", *J. Fluid Mech.* Vol. 414, pp. 367-378.
- [6] Kanai, A. and Miyata, H., 1998, "Numerical Simulation of Bubbles in a Boundary Layer by Marker-Density-Function", *Proc. 3rd Intern. Conf. on Multiphase Flow*, Lion, France.
- [7] Tomiyama, A., Nakahara, Y. and Abe, S. 2002, "An Interface Tracking Method Based on Volume Tracking in Embedded Micro Cells", *Proc. ASME FEDSM2002*, 31147, Montreal, Canada.
- [8] Takagi, S., Prosperetti, A. and Matsumoto, Y. 1994, "Drag Coefficient of a gas Bubble in an Asymmetric Shear Flow", *Physics of Fluids*, 6, 3186-3188.
- [9] Tryggvason, G., Bunner, B., Esmaeeli, A. and Mortazavi, S. 1998, "Direct Numerical Simulations of Dispersed Flows", *Proc. 3rd Intern. Conf. on Multiphase Flow*, Lion, France.
- [10] Jung, R.-T., 2001, "Direct Numerical Simulation of High Schmidt Number Flow about a Droplet by using Moving Unstructured Mesh", *Dissertation Thesis*, University of Tokyo.
- [11] Imamura, K. and Katayama, T. 1999, "Study of Droplet Interface Movement and Dissolution in Liquid-Liquid Two-Phase Flow", *Undergraduate thesis*, Dept. of Environmental and Ocean Engineering, University of Tokyo.
- [12] Clift, R., Grace, J. R. and Weber, M. E. 1978, "Bubbles, Drops and Particles", *Academic Press*.
- [13] IPCC-22, 2004, *Earth Negotiation Bulletin*, <http://www.iisd.ca/climate/ipcc22>, Vol. 12 No. 248.
- [14] Brewer, P. G., Peltzer, E. T., Rehder, G. and Dunk, R. 2003, "Advances in Deep-Ocean CO₂ Sequestration Experiments", *Greenhouse Gas Control Technologies*, Vol II, Elsevier Science Ltd. pp. 1667-1670.

2005년 1월 11일 원고접수

2005년 1월 21일 수정본 채택