

## 단일 액적의 Zig-Zag 운동 시뮬레이션

정 노 택\*<sup>1</sup>

### A LIQUID DROPLET SIMULATION ON ZIG-ZAG MOTION

Rho-Taek Jung \*<sup>1</sup>

*The motion of a rising liquid droplet is different that of a bubble motion. Treatment of liquid drops is more complex because internal motion must be considered. A 3D unstructured CFD code has been developed to solve incompressible N-S equation for the droplet simulation. This front-tracking consideration which the interface is tracked explicitly is very available to apply for not only exact interface topology but also the high schmidt number issue, such as CO<sub>2</sub> dissolution. This paper is forced on the zig-zag motion of the liquid droplet. The simulation shows that if the rising droplet is located at the corner of the zig-zag path, the velocity is low and shape of the droplet is more spherical shape, results in the less drag coefficient. Twin horse shoe vortexes behind the rising droplet are presented and the topology of the droplet is compared with an experimental result during one period of the path.*

**Key Words :** CO<sub>2</sub>해양격리(CO<sub>2</sub> Ocean Sequestration), 단일 액적(Single Droplet), 액적 시뮬레이션(Droplet Simulation), 좌우운동(Zig-Zag Motion)

#### 1. 서 론

산업혁명이후 대기중 CO<sub>2</sub>농도가 급격히 증가함에 따라 지구온난화를 초래하고 있다. 교토의정서의 발효이후 해당 국가에서는 주어진 할당량에 대한 감소대책을 추진하고 있다. 우리나라도 2005년도부터 CO<sub>2</sub>의 배출저감, 포획과 저장이라는 세 영역에서 국가 프로젝트가 추진되고 있다(CO<sub>2</sub> Capture and Storage). 특히 대규모 저장관점에서 본다면 지층구조를 이용 저장하는 방법과 심해양에 회석하는 두가지 방법이 있는데, 지층구조 저장에 관해서는 2006년 국제조약(London Convention)의 승인됨에 따라 지중저장이 국제적 합의를 얻게 되었다. 이에 따라 국내에서도 연구개발사업이 활발히 추진되고 있다. 한편 심해양을 이용한 CO<sub>2</sub>의 저장 기법은 아직 사회적 합의성 부족으로 사업까지는 도달하지 못하고 있다. 이것은 아직 심해연구의 부족에 기인한다고 본다. 따라서 아직

연구할 대상이 많다는 것을 암시한다. 본 연구를 통해서 전세계적으로 타당성 검토를 계속하고 있는 CO<sub>2</sub> 해양격리기술과 해양격리시 요구되는 단일 액적 거동 시뮬레이션에 관해 고찰하고자 한다.

#### 2. CO<sub>2</sub> 해양분사기술

선진국에서 연구되는 CO<sub>2</sub> 대량처리를 위한 격리기술에는 크게 해양격리와 지중격리가 있다. 해양격리 방식으로는 육상에서 CO<sub>2</sub>를 포집·액화시켜 심해에 특수선박을 이용하여 작은 CO<sub>2</sub> 액체 방울 상태로 분사하는 해중용해법[1]과 해상플랫폼으로 CO<sub>2</sub>를 이송해 와서 수직 파이프를 통하여 큰 방울 상태로 해저면으로 자유 낙하시키는 해저저류법[2]이 있다. 지중격리에는 고갈된 유가스전 또는 심부 대수층에 주입하는 방법과 난채굴 석탄층에 CO<sub>2</sub>를 주입하여 석탄층 내 메탄의 탈착을 촉진하고 CO<sub>2</sub>를 석탄표면에 흡착시키는 방법[3]등이 있다. 대규모의 유가스전을 보유한 미국의 경우 지중격리기술이 상대적으로 많은 연구가 진행되고 있다.

한편, 해양분사기술은 일본을 중심으로 연구되어 지고 있다. 일본의 해양격리사업은 지구환경산업연구기구(RITE,

접수일: 2006년 6월 4일, 수정일: 2009년 9월 2일,  
게재확정일: 2009년 9월 4일.

1 중신회원, 울산대학교 조선해양공학부

\* E-mail: rtjung@ulsan.ac.kr

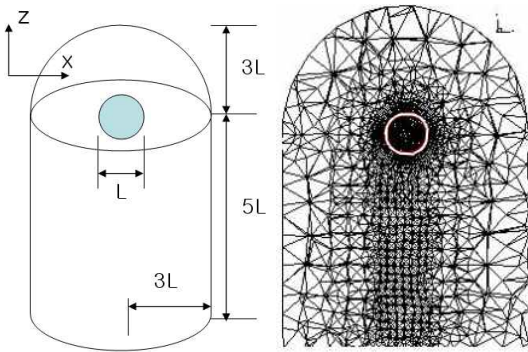


Fig. 1 Computational Domain(right: hybrid unstructured mesh)

Research Institute of Innovative Technology for the Earth)가 연구 수행하고 신에너지·산업기술종합개발기구(NEDO, New Energy and Industrial Technology Development Organization)의 예산지원으로 1997년부터 2002년까지 연구개발 1단계가 종료되었으며, 2단계도 2008년도에 종료되어 현재 3단계가 추진 중에 있다. 해중 분사기술의 연구개발현황을 구체적으로 요약 하면 발전소 및 제철소등 CO<sub>2</sub>의 발생원으로부터 분리·회수 단계를 거친 후 액화 저장되어진 CO<sub>2</sub>를 선박을 활용하여, 연안으로부터 수백 km 떨어진 지정 해역으로 운송해서 해양의 중·심층(2,000 m ~ 2,500 m)에 파이프를 통해 CO<sub>2</sub>를 방출 시켜 심해의 자연회색능력을 이용하여 친환경적으로 용해·회색시키는 방식이다. 산업혁명이후, 대기 중으로 배출되는 CO<sub>2</sub>양이 계속적으로 증가됨에 따라 해양 표층 생물등의 자연 적피해가 우려되는 것이 현실적 문제로 대두되었다. 본 해중 분사기술은 표층수를 거치지 않고(bypass) 심해에 자중 회색 능력을 이용하는 방법으로 대량의 CO<sub>2</sub>를 일정기간과 장소에 격리시킴으로서 대기의 CO<sub>2</sub>농도를 인위적으로 안정화 시킬 수 있다고 본다. 이 방법은 선박을 이동시키면서 방출한다고 하여 Moving Ship 방법라고도 부르며, 방출된 CO<sub>2</sub>는 직경 수 mm 정도의 액적이 되어 해류를 따라 흘러가면서 해수에 용해된다. 연구항목으로 1) 회색노즐 개발, 2) 방출파이프의 개발, 3) Moving Ship의 진행방향 결정기술, 4) 방출해역에서의 CO<sub>2</sub>의 회색, 거동 시뮬레이션을 위한 모델 개발, 5) 방출된 CO<sub>2</sub>의 모니터링 기술, 6) 심해저 생물영향평가와 경제성 및 안전성평가 등이 있다.

일본에서의 해중분사기술 관련 연구개발 최종목표는, 일본의 연간 CO<sub>2</sub> 총배출량인 약 12억톤중 화력발전소 2.5기에서 방출하는 1,000만톤의 CO<sub>2</sub>를 해양에 처리할 수 있는 제반 기술 및 시설개발을 하는 것이다. 해양처리를 위하여 CO<sub>2</sub> 운송 선 2척, CO<sub>2</sub> 방출선 2척을 동시에 운용할 계획이며, CO<sub>2</sub> 방류선으로부터 수심 2,000 ~ 2,500 m에 액적상태로 방출되는 CO<sub>2</sub>는 커튼 형상을 이룰 것이다. 초기 분사농도는 대략 6만

분의 1로 약 17 ppm으로 설정되어 있으며, Moving Ship이 100 km사방의 해역을 왕래하면서 운항하며, 두께 1,000 m의 해수에 균일하게 CO<sub>2</sub>를 회색했다고 하면, 그 해역의 CO<sub>2</sub> 농도 상승분은 발전소 1기당 0.4 ppm로 2.5기분의 CO<sub>2</sub>를 방류 하면 1 ppm이 증가하게 된다. 해양의 중·심층에는 현재 약 100 ppm의 CO<sub>2</sub>가 존재하는데, 결과적으로 Moving Ship방식은 해양환경의 CO<sub>2</sub> 농도를 약 1%정도 올리게 된다. 일본에서는 위와 같이 수심 2000 m 이상의 심해에 CO<sub>2</sub>를 배출하기 위해 요구되는 제반 세부적인 기술적 사항들을 연구 중에 있다.

우리나라의 경우는 한국해양연구원에서 2004년도에 관련사업을 기획한 바 있다[4].

### 3. CO<sub>2</sub> 해양처리에서 CFD의 응용

CO<sub>2</sub> 해양처리는 심해에 CO<sub>2</sub>의 회색능력 및 확산범위를 예측하는 기술로서, 실제 대규모 실험실 시험이 불가능한 상태이다. 제 3절에서도 언급했듯이 미량의 CO<sub>2</sub>를 실험실에서 실험하는 것조차 어려운 상황이다. 따라서 실험실 스케일로 실험 검증하고, 전산유체역학의 기술을 최대한 활용할 필요가 있다.

CO<sub>2</sub> 해양처리에 적용되고 있는 전산유체역학 연구로서는 크게 3분류로 나눌 수 있다. 첫째는 전지구 심해 물리/생물 모델링에 의한 장기간 심해 탄소 순환연구이며, 둘째는 CO<sub>2</sub> 해양처리로 기인되는 심해영역의 물리적 생물학적 연구이며, 셋째로서는 체적을 가지는 액적 및 하이드레이드로부터 주위로 회색되는 양을 추정하는 모델연구등이 필요한 요소기술이라고 판단된다. 따라서 연구해당 영역으로 보면 작게는 cm단위에서부터 크게는 수천 km의 지구규모의 크기까지의 영역이 모두 포함한다고 할 수 있다. 불행히도 아직 심해에 대한 연구는 초보단계에 있어 많은 실험적 자료를 가지고 있지 못하기 때문에 한계가 있을 것으로 예상된다. 그럼에도 불구하고, 심해 물리, 심해 화학적 지식과 소규모 실험을 통하여 CFD(Computational Fluid Dynamics)의 도움으로 현상을 예측할 필요가 있다.

본 논문에서는 위 세가지 요소중에서 세 번째 마이크로 스케일에서 액적이 상승하면서 표면 내외부의 유체력을 받아 표면장력 효과에 따른 액적 표면의 변동, 3차원 상승속도의 주기성, 후류와도 양상등, 단일액적 상승에 따른 기초적인 연구를 수행하였다.

### 4. 비구조 격자를 이용한 단일 액적의 거동

중력장 하에서 액적의 3차원적 거동을 파악하기 위하여 수치해석기법으로서 삼각추(Tetrahedron)와 삼각기둥(Prism)의 복

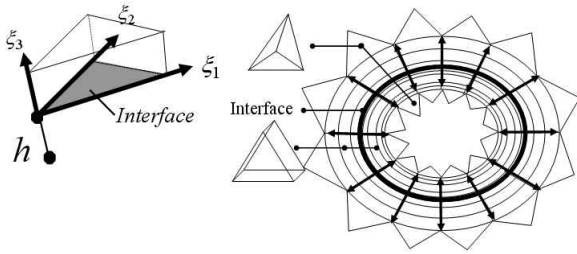


Fig. 2 Moving unstructured mesh for interface movement

합 비구조격자를 생성하여 액적 밖과 내부에 분포시켰다(Fig. 1). 상의 경계에는 삼각기둥의 층(layer)이 존재하며, 그 이외는 삼각추를 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. 격자생성은 ICEM-CFD 상용소프트웨어를 이용했으며, 본 논문은 Jung 등[5]이 개발한 비구조 3차원 코드를 이용하였다.

4.1 이산화

상승액적 시뮬레이션에서 액적의 위치를 항시 중앙에 위치시키고자 Lagrangian view를 적용하였다. 따라서 운동방정식을 시간항에 따라 차분화 시킬때, 분산상과 연속상의 밀도차이에 의해 발생하는 액적의 평균상승속도를 모든 유동장의 크기에서 배제함으로 해서 액적 부피의 중심은 계산 영역의 초기 위치를 유지 하게 된다. 아래 식 (1)에 적분형 이상류 운동방정식을 나타내었으며, 위의 Lagrangian view의 효과는 식 (1)의 제일 마지막 항 **a** 로 표현했다. 분산상과 연속상의 질량 및 운동량보존식은 따로 풀지 않으며, 통합된 식 (1)만으로 풀고, 상간의 경계조건은 식 (2-5)에 나타내었다. 속도와 압력을 풀기 위하여 속도-압력 동시반복방법(velocity-pressure simultaneous iteration)을 적용하였다.

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

여기서, Re는 액적의 기준속도를 기준으로 한 무차원수,  $\gamma$ 은 분산상과 연속상의 밀도비,  $\theta$ 은 분산상과 연속상의 점성비이며, 표면장력과 증력가속도의 비인 Etvös 수와, 표면장력과 레이놀즈수의 비인 Ohnesorge 수로 구성되어 있다. 본 수치시물

레이션에서는 기준속도를 바탕으로 한 Re와 달리 액적의 상승속도를 기준으로 하는 무차원수 Rn이 결과 값으로 나오게 된다. 계산 초기 분산상에 작용하는 상승속도는  $-(\rho_d - \rho_c)g/\rho_d$  성분에서 시간을 곱함으로써 기인한다. 여기서 첨자 d, c는 분산상 연속상을 나타내며, g는 증력가속도 이다.

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. 대류항과 점성항의 해석시 요구되는 cell의 면에 필요한 경계조건은 아래와 같다.

$$\mu_d \frac{\partial u_n}{\partial n} \Big|_d = \mu_c \frac{\partial u_n}{\partial n} \Big|_c, \mu_d \frac{\partial u_t}{\partial n} \Big|_d = \mu_c \frac{\partial u_t}{\partial n} \Big|_c \quad (2)$$

여기서 첨자 c, d는 연속상과 분산상을 의미하고, n은 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 각 상에서의 속도를 나타낸다. 그리고  $\Delta l_c$ 와  $\Delta l_d$ 는 접해있는 면에서 각상의 셀 중심까지의 거리를 나타낸다.

압력은 cell의 중심에서 계산 된다. 다른상이 접해 있는 면에서의 압력에 관한 경계조건은 식 (4)에 나타내었다.

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

여기서,  $\Delta p$ 는 경계면에서의 압력변동을 나타내며, 각 경계면에서의 곡률 $\kappa$ 는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서, n은 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" h를 이용하였다.

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

h 함수는 국부 좌표계( $\xi_1, \xi_2, \xi_3$ )를 바탕으로 움직이며, 시간 t에 따라 변화하는 스칼라량이다. 본 연구에서는  $\xi_3$ 의 방향을 액적의 중심으로부터 원주방향을 가리킨다(Fig. 2). 그러므로, 운동학적 조건은 식 (7) 같은 조건을 만족시킨다.

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

여기서, J는 야코비안이며,  $u_j$ 는 유체의 속도이다. 경계면이 이동함으로써 그 주위를 둘러싸고 있는 삼각기둥영역내에 있는 점(node)만 원주방향으로 움직이게 된다. 본 논문에서 다루고 있는 대상이 적은 분산상/연속상의 밀도비가 적다. 따라서, 액적 표면의 움직임이 공기방울 보다 격렬하지 않기 때문에 Fig. 2에 원주방향의 화살표로 나타낸 것처럼 액적의 경계면을 중심으로 삼각기둥영역(prism region)에서만 격자를 매 time step당 재생성(mesh regeneration) 하게 된다.

4.2 계산결과

계산격자의 구성은 Fig. 1와 Fig. 2에서 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 상용프로그램을 이용하여 액적의 내부와 외부를 모두 구성하였다.

CO<sub>2</sub>액적의 유동을 파악하기 위하여 CO<sub>2</sub>를 분산상으로, 물을 연속상으로 두고, 레이놀즈수를 바탕으로 시뮬레이션을 수행하였다. 액적 시뮬레이션에서 다루고 있는 레이놀즈수는 두 가지이며, 4-1절에서 언급한 바와 같이 초기 파라미터로서의 레이놀즈수는 기준상승속도를 바탕으로( $UL/\nu$ )로 하지만 액적의 상승속도( $U_R$ )가 발생하면 이를 기준으로 하는  $U_R L/\nu$ 가 적합하다. 따라서 결과값으로 쓰이는 레이놀즈 수는 후자가 된다.

액적의 지름이 0.826cm, 기준 상승속도를 0.1 m/s로 하여 기준 레이놀즈수를 826두고, CO<sub>2</sub>-물에 대한 밀도비와 점성비는 0.76과 0.494으로 상정하였다. 그리고, Etvös 수는 2.82이며, Ohnesorge 수는 0.0015의 값을 가진다. 무차원시간 5T까지는 액적이 계속 상승하다가 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( $St = d0/U \cdot T$ )는 0.09로 나타났다.

Fig. 3의 (a)에는 zig-zag왕복 운동을 구체적으로 확인하기

위하여 9개의 점으로 표시 하였으며, 그 점과 무차원 시간의 관계는 Table 1에 나타내었다. 점 A, E, 그리고 I는 turning point(T-P)를 의미한다.

Fig. 3의 (b)는 x-z평면과 y-z평면의 액적의 궤적을 나타내며, sinusoidal 적으로 상승한다는 것을 유추할 수 있다. Fig. 4의 (c)는 액적표면의 변형율(중심에서 최소거리/최대거리)을 시간축상에 나타낸 것 으로서 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 최소가 됨을 알 수 있다. 그 의미는 zig-zag 왕복운동 중 turning-point에서는 높은 항력을 받는 타원형의 액적이 보다 낮은 항력의 원형으로 변화함에 따라 상승속도가 빨라지게 된다. 따라서, 타원형의 액적은 큰 후류 와도로 인하여 속도가 느려지며, 원형의 액적은 작은 후류 와도로 인해 상승속도에 영향을 미치게 된다. 후류에 비평형의 압력 변화가 zig-zag 왕복운동의 원인이 된다. Fig. 2의 (d)그림은 액적 표면상의 최대 와도를 표현한 것이다. 그림에서 나타내듯이 turning point에서 와도의 강도가 가장 작음을 알 수 있다. 즉, turning point에서 상승속도가 큰이유중에 하나가 액적 후 표면에서 와도의 강도가 가장 작기 때문이다. 반면 속도가 가장 작은 지점 즉, turning point의 사이영역에서는 와도의 세기가 가장 크다는 것을 알 수 있다.

zig-zag현상으로 기인하는 twin vortex가 Fig. 4에 잘 나타내고 있다. TP점 T=12.8에서 T= 17.2까지 zig-zag의 반주기와 방향이 전환되어 전진하는 T=18.4에 대하여 상승액적과 vortex를 x-y 평면상에 나타내었다. Fig. 5표는 액적의 x-y 평면상에 진행방향을 나타내고 있다. 오른쪽 속도장에서도 zig-zag움직임에 따라 쌍으로 속도 vortex가 따르고 있음을 알 수 있다.

CO<sub>2</sub>-물 계에서 CO<sub>2</sub> 액적을 방출한 실험과 같은 물성 조건(물과 실리콘계)에서 액적의 변형모양(shape deformation)을 비교하기 위하여 실험[6]과 본 계산의 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 여기서, 수치 해석상에서의 액적은 구 형태에서 출발하기 때문에 실험상의 노즐 분출 시 따르는 초기 가속도효과는 엄밀히 다루지는 않고 있다. 액적의 zig-zag 한 주기에 관한 snapshot만을 해당 시간 대 별로 비교하였다. 촬영시선과 수치 해석 시선이 반드시 같다고 할 수 없으나 최대한 zig-zag의 면을 확보한 상태에서 촬영 또는 해석결과로 가로 폭은 약 1

Table 1 Indicated non-dimensional time point A to I

|   | A     | B    | C    | D    | E     | F    | G    | H    | I     |
|---|-------|------|------|------|-------|------|------|------|-------|
| T | 12.8* | 14.0 | 15.0 | 15.8 | 17.2* | 18.4 | 19.2 | 19.8 | 20.4* |

\* Turning Point

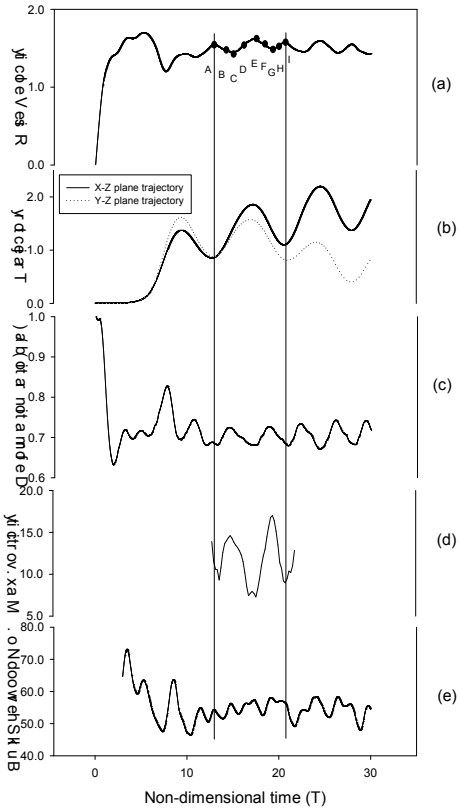


Fig. 3 Variation of rise velocity (a), droplet path in x-z and y-z plane (b), aspect ratio (c), Total maximum vorticity (d), and bulk Sherwood number (e). (A indicates 12.8T, B is 14.0T, C is 15.0T, D is 15.8T, E is 17.2T, F is 17.2T, G is 18.4T, H is 19.2T, and I is 19.8T for 1 zigzagging motion). The Reynolds number is about 1322 and the Ohnesorge number is 0.0015

cm, zig-zag 수직 폭은 약 10 cm로 거의 동일하다는 것을 알 수 있다. 진행방향으로는 편평한 면이, 그리고 후류는 약간 각진 면이 보인다. 또한 turning point에서의 진행방향을 잘 나타내 주고 있다. Fig. 6에서는 Fig. 3(d)에서 보이는 와도의 강도를 시간적으로 설명해주고 있으며, hybrid mesh 상에서 horse shoe vortex가 분리되고 있는 형상이 비교적 잘 표현되어 있다.

### 5. 결론

교토의정서 등에서 요구하는 대량의 CO<sub>2</sub> 배출감축 요구를 가시적으로 짧은 기간내에 충족시키지 못하는 약점들을 보완해 줄 새로운 대안기술이라는 점에서 본 해양격리기술은 국제적으로 관심을 보이고 있다. 그러나, CO<sub>2</sub> 해양처리에 관한 국제법적, 사회적 수용여부를 두고 많은 논란이 있다. 그럼에도 불구하고, CCS(CO<sub>2</sub> Capture & Storage)의 관점에서 CO<sub>2</sub> 해양처리방법은 지속적으로 연구되어지고 있다.

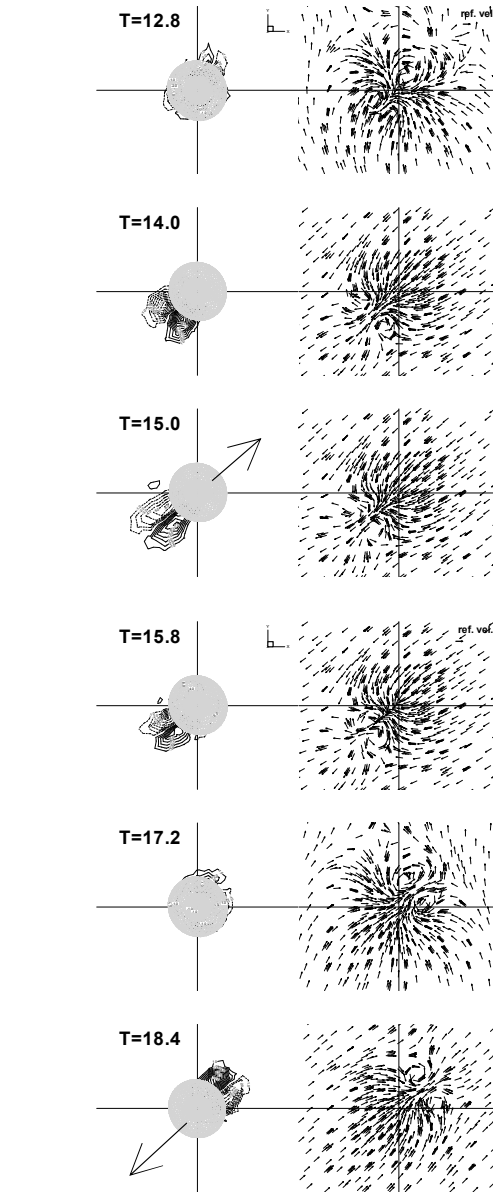


Fig. 4 Evolution of vorticity distribution and velocity field in x-y plane 1 unit downstream of the droplet(non-dimensional time T=12.8~18.4)

도 불구하고, CCS(CO<sub>2</sub> Capture & Storage)의 관점에서 CO<sub>2</sub> 해양처리방법은 지속적으로 연구되어지고 있다.

CO<sub>2</sub>가 심해양에 파이프를 통하여 방출 시 약 0.1 ton/sec의 많은 양이 분사되게 된다. 이때 주위 유체와 밀도차이가 크지 않은 한 개의 액적을 상정하고 전산유체기법을 이용하여 액적표면의 상승 중 형태변화를 시뮬레이션 했다. 상승속도를 기준으로 한 레이놀즈 수가 결과값으로 나오게 되는데 액적

| Experiments<br><i>Re</i> ≈ 1479 | Period | Simulations<br><i>Re</i> ≈ 1322 |
|---------------------------------|--------|---------------------------------|
|                                 | 2T/9   |                                 |
|                                 | 4T/9   |                                 |
|                                 | 6T/9   |                                 |
|                                 | 7T/9   |                                 |
|                                 | 8T/9   |                                 |
|                                 | T      |                                 |

Fig. 5 Comparison of droplet deformation experiments and present simulations in silicon-water system[6]

의 변형을 실험시의 모양과 비교해 보았다. 액적거동의 세가지의 양태 중 zig-zag, helical, rectilinear로 크게 구분 되는데 본 연구에서는 크게 Reynold수에 영향을 받는 zig-zag에 대해 마이크로 스케일의 표면 진동과 궤적변위를 알아보는데 CFD의 구체적 정보가 유용한 것으로 판단된다. 즉, TP(Tuning Point)에서 액적은 구에 가깝게 되어, 유체저항이 가장 적으며, 따라서 상승속도가 최대가 된다. 계속해서 TP 중간영역을 거치면서 액적은 변형이 커져, 상승속도가 줄어든다. 따라서 액적은 상승속도의 진동을 일으키며, zig-zag 모션에 들어간다. 이에 따른 현상으로 vortex나 vorticity를 통하여 확인 할 수 있었다. 또한 액적 거동에 따라 연속상의 용해도에 변화를 끼친다는 것을 Bulk Sherwood의 변동으로 확인하였다.

그러나, 실제적으로 CO<sub>2</sub>를 해양에 격리시에는 하이드레이드라고 하는 샤벳트형의 결정이 Liquid-CO<sub>2</sub> 액포 주위에 형성되기 때문에 이 영향으로 용해도의 변화가 발생한다. 따라서 CO<sub>2</sub> 액적 하이드레이드로 인한 용해도 연구가 진행되어야 한다.

### 후 기

본 연구는 울산대학교 조선해양공학부 세계 일류화 사업(SOTOP)의 부분 지원으로 이루어 졌음.

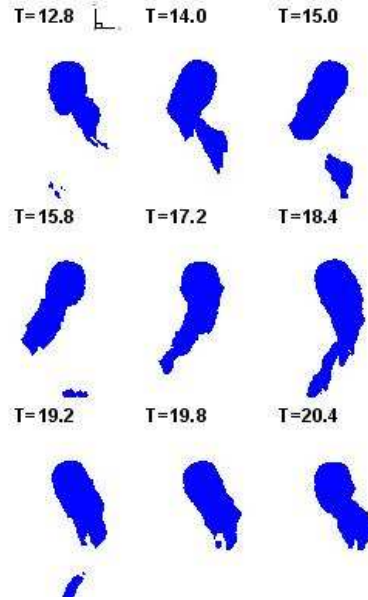


Fig. 6 Evolution of vorticity contour (its value is 2.0) in one zigzagging period path

### 참고문헌

- [1] 2003, Murai, S., Ohsumi, T., Nishibori, F. and Ozaki, M., "The Second Phase of Japanese R&D Program for CO<sub>2</sub> Ocean Sequestration," *Greenhouse Gas Control Technologies*, Vol.I, Elsevier Science Ltd., pp.733-738.
- [2] 2003, Aya, I., Kojima, R., Yamane, K., Brewer, P.G. and Peltzer, E.T., "In Situ Experiments of Cold CO<sub>2</sub> Release in Mid-Depth," "The Second Phase of Japanese R&D Program for CO<sub>2</sub> Ocean Sequestration," *Greenhouse Gas Control Technologies*, Vol.I, Elsevier Science Ltd., pp.739-744.
- [3] 2002, John, "Overview of CO<sub>2</sub> Emission Sources, Potential, Transport and Geographical Distribution of Storage Possibilities," *The Proceedings of Workshop on Carbon Dioxide Capture and Storage*, Regina, Canada, 18-21, Nov.
- [4] 2004, 강성길, 정노택 외, "CO<sub>2</sub> 가스 해양격리시스템 연구개발 타당성 기획연구," 해양수산부.
- [5] 2005, Jung, R.-T. and Sato, T., "Numerical simulation of high Schmidt number flow over a droplet by using moving unstructured mesh," *Journal of Computational Physics*, 203, pp.221-249.
- [6] 2005, 정노택 외, "CO<sub>2</sub>해양처리를 위한 액적 거동 시뮬레이션 기초연구," *한국해양환경공학회지*, Vol.8, pp.39-45.