



CO₂ 해양격리를 위한 CFD의 응용연구

정 노 택*¹

CFD APPLICATIONS FOR THE CO₂ OCEAN SEQUESTRATION

R.T. Jung*¹

Global warming issues due to the CO₂(Carbon Dioxide) become increasing since the Industrial Revolution. After the Kyoto protocol at 1997, nations which have the prearranged quota drives their national project for the reduction of CO₂. Korean Government start to the related big projects in the view of three concepts which have consist of the CO₂ exhaust reduction on land, CO₂ capture and CO₂ storage. Furthermore, the storage method putting into depleted region underground is accepted by the London Convention while the ocean diluted method discharging the liquid CO₂ into the deep ocean using the long pipe which is towed by the surface vessel is underway for the research steps which means that there are many potentials for the R&Ds that need for the breakthrough. In this paper, the role and example of the Computational Fluid Dynamics for the feasibility study of the CO₂ ocean sequestration is mentioned.

Key Words : CO₂해양격리(CO₂ Ocean Sequestration), 액적 시뮬레이션(Droplet Simulation)

1. 서 론

산업혁명이후 대기중 CO₂농도가 급격히 증가함에 따라 지구온난화를 초래하고 있다. 교토의정서의 발효이후 해당 국가에서는 주어진 할당량에 대한 감소대책을 추진하고 있다 우리나라도 2005년도부터 CO₂의 배출저감, 포획과 저장이라는 세 영역에서 국가 프로젝트가 추진되고 있다. 특히 대규모 저장관점에서 지층구조를 이용 저장하는 방법과 심해양에 희석하는 두가지 방법이 있다. 지층구조 저장에 관해서는 2006년 국제조약(London Convention)의 승인을 득함으로서 국내에서도 연구개발사업이 활발히 추진되고 있다. 한편 심해양을 이용한 CO₂의 저장은 사회적 합의성 부족으로 사업까지는 도달하지 못하고 있다. 이것은 아직 연구할 대상이 많다는 것을 암시한다. 전세계적으로 타당성 검토를 계속하고 있는 CO₂ 해양격리에 관한 연구분야에 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics)의 역할 및 사례에 대하여 고찰하고자 한다.

2. CO₂ 격리기술 분류

선진국에서 연구되는 CO₂ 대량처리를 위한 격리기술에는 크게 해양격리와 지중격리가 있다. 해양격리 방식으로는 육상에서 CO₂를 포집·액화시켜 심해에 특수선박을 이용하여 작은 CO₂ 액체 방울 상태로 분사하는 해중용해법[1]과 해상플랫폼으로 CO₂를 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 CO₂를 주입하여 석탄층 내 메탄의 탈착을 촉진하고 CO₂를 석탄표면에 흡착시키는 방법[3]등이 있다. 대규모의 유가스전을 보유한 미국의 경우 지중격리기술이 상대적으로 많은 연구가 진행되고 있다. 계속해서 각 격리기술에 대해 구체적으로 기술한다.

2.1 해양분사기술

일본의 해양격리사업은 지구환경산업연구기구(RITE, Research Institute of Innovative Technology for the Earth)가 연구수행하고 신에너지·산업기술종합개발기구(NEDO, New Energy and Industrial Technology Development Organization)의 예산지원으로 1997년부터 2002년까지 연구개발 1단계가 종료되었으며, 2단계도 2008년도에 종료되어 현재 3단계 기획단계에 있다. 해중 분사기술의 연구개발현황을 구체적으로 요약하면 발전소

¹ 종신회원, 울산대학교 조선해양공학부

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



및 제철소등 CO₂의 발생원으로부터 분리·회수 단계를 거친 후 액화 저장되어진 CO₂를 선박을 활용하여, 연안으로부터 수백 km 떨어진 지정 해역으로 운송해서 해양의 중·심층(2,000m ~ 2,500m)에 파이프를 통해 CO₂를 방출시켜 심해의 자연회석능력을 이용하여 친환경적으로 용해·회석시키는 방식이다. 산업혁명이후, 대기 중으로 배출되는 CO₂양이 계속적으로 증가됨에 따라 해양 표층 생물들의 자연적피해가 우려되는 것이 현실적 문제로 대두되었다. 본 해중분사기술은 표층수를 거치지 않고(bypass) 심해에 자중 회석능력을 이용하는 방법으로 대량의 CO₂를 일정기간과 장소에 격리시킴으로서 대기의 CO₂농도를 인위적으로 안정화 시킬 수 있다고 본다. 이 방법은 선박을 이동시키면서 방출한다고 하여 Moving Ship 방법이라고도 부르며, 방출된 CO₂는 직경 수 mm 정도의 액적이 되어 해류를 따라 흘러가면서 해수에 용해된다 연구항목으로 1) 회석노즐 개발, 2) 방출파이프의 개발, 3) Moving Ship의 진행방향 결정기술, 4) 방출해역에서의 CO₂의 회석, 거동 시뮬레이션에 의한 모델 개발, 5) 방출된 CO₂의 모니터링 기술, 6) 심해저 생물영향평가와 경제성 및 안전성평가 등이 있다.

일본에서의 해중분사기술 관련 연구개발 최종목표는 일본의 연간 CO₂ 총배출량인 약 12억톤중 화력발전소 2.5기에서 방출하는 1,000만톤의 CO₂를 해양에 처리할 수 있는 제반 기술 및 시설개발을 하는 것이다. 해양처리를 위하여 CO₂ 운송선 2척, CO₂ 방출선 2척을 동시에 운용할 계획이며, CO₂ 방류선으로부터 수심 2,000 ~ 2,500 m에 액적상태로 방출되는 CO₂는 커튼 형상을 이룰 것이다. 초기 분사농도는 대략 6만분의 1로 약 17ppm으로 설정되어 있으며, Moving Ship이 100 km사방의 해역을 왕래하면서 운항하며, 두께 1,000 m의 해수에 균일하게 CO₂를 회석했다고 하면, 그 해역의 CO₂ 농도 상승분은 발전소 1기당 0.4 ppm로 2.5기분의 CO₂를 방류하면 1 ppm이 증가하게 된다. 해양의 중·심층에는 현재 약 100 ppm의 CO₂가 존재하는데, 결과적으로 Moving Ship방식은 해양환경의 CO₂ 농도를 약 1%정도 올리게 된다. 일본에서는 위와 같이 수심 2000 m 이상의 심해에 CO₂를 배출하기 위해 요구되는 제반 세부적인 기술적 사항들을 연구 중에 있다.

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

2.2 해양저류법

CO₂ 해양저류법은 일본 국토교통성(MLIT)로부터 위탁을 받아 수행중인 프로젝트로서 COSMOS(CO₂ Sending Method for Ocean Storage)가 있는데, 본 연구는 일본 해사기술연구소(NMRI)의 아야 이주오박사가 주도하고 있다. 일본에서 추진하고 있는 CO₂ 심해 저류법은 대기로부터의 해양격리기간이 1,000년 이상이 된다는 장점이 있다. 그러나 처리수심의 깊이

때문에 기술과 비용, 아울러 특정해역의 해저에 CO₂ 액포를 쌓아두어야 하기 때문에 그 지역의 환경문제가 이슈화 될 수 있다는 단점이 있다.

먼저 화력발전소 등으로부터 분리 회수된 CO₂를 탱크선으로 운송할 때에는 탱크 압력을 가능한 한 저압으로 유지하기 위해 -55℃ 정도의 저온액체로서 운송된다. 이와 같은 저온 CO₂를 심해 500m의 해중에 방출될 때의 온도는 -35℃ 이하로 되나 열팽창계수가 물의 열배 이상인 CO₂는 이 심도에서 해수보다 충분히 무겁게 된다. 따라서 방출 CO₂ 액포의 크기를 한계치(약 1m)보다 크게 하면 해수로부터 수열에도 관계하지 않고, 해수와 같은 온도의 CO₂가 해수와 같은 밀도가 되는 심도(약 2,700m)를 넘어 저류 가능한 3,500m 수심까지 자유낙하 하게 된다. 저온 CO₂의 물성을 이용한 새로운 CO₂ 투입법으로 미국, 노르웨이 연구팀과 공동 연구 중에 있다.

해양저류법의 향후 개발전망으로서는 1) 저온 CO₂ 큰 액포를 안정적으로 방출하는 것이 가능한 능동형 방출노즐의 개발, 2) 저류 장소로부터의 CO₂ 용해, 감시용으로서 사용되는 고신뢰성, 고 내압 PH 센서의 개발, 3) 얼음과 하이드레이트 막에 둘러싸여진 저온 CO₂ 대액포의 해중 다이내믹스의 해명, 4) 심해해저의 해저분지에 저류된 CO₂의 안정성과 하이드레이트막의 용해성 평가, 5) 저류 장소 주위의 CO₂에 대한 심해생물의 내성평가, 6) 개발된 능동형 방출노즐의 실험실 검증실험 등이 있다.

2.3 해저 지중격리기술

지중격리 방안 가운데 해양과 관련된 격리처리로는 고갈 유가스전, 심부대수층과 심해저 메탄하이드레이트층 등이 있다. 먼저 고갈 유가스전은 이미 장기간 동안 가압된 유체를 저장하는 능력을 검증 받은 상태이기 때문에 단시간에 실현 가능성이 가장 큰 방법이다. 일반적으로 유전의 경우 1, 2차 회수를 통해 매장량의 30~40% 가량을 회수할 수 있으며 이산화탄소를 주입하여 추가적으로 10~15% 정도를 회수할 수 있게 된다. 이를 오일회수증진법(Enhanced Oil Recovery)이라 하며 오일을 회수하고 이산화탄소를 주입하는 일석 이조의 효과를 얻을 수 있다. 대표적인 사례로서 노르웨이 Stat Oil의 북해 Sleipner West Field로 여기서 생산된 천연가스로서 이산화탄소를 분리하여 가스층 상부 Utsira 대수층에 매년 100만톤씩 주입하고 있다[5]. 대수층을 활용하기 위한 기술은 유가스전과 크게 차이가 없으나 대수층이 존재하는 구조에 대한 특성규명 작업과 함께 격리대수층을 결정하는 정밀탐사기술개발이 선행되어야 한다.

최근 미래 에너지 자원으로 떠오르고 있는 메탄하이드레이트가 부존되어 있는 심해저 천부 퇴적층 또한 해저 지중격리 방안의 하나이다. 수심 약 300 m 이상 해저에 존재하는

천부 퇴적층은 낮은 온도와 높은 압력으로 인해 하이드레이트가 형성될 수 있다. 이런 이유로 전 세계적으로 메탄 하이드레이트가 널리 분포하고 있는 것으로 보고되고 있으며 이 지층에 이산화탄소를 주입할 경우 주입된 이산화탄소는 공극수와 결합하여 CO₂ 하이드레이트를 형성하고 메탄은 해리된다[6]. 지구 표면온도 상승으로 인한 자연적인 퇴적층의 온도가 상승하면 메탄이 해리될 수 있으며 이는 CO₂와 마찬가지로 지구온난화의 원인이 되므로 심해저 퇴적층에 CO₂를 격리하고 메탄을 자원으로 생산하는 기술은 환경적인 측면이나 자원확보 측면에서 많은 연구가 수행되어야 한다.

3. CO₂ 해양처리에 관한 국제법적, 사회적 수용여부

CO₂ 해양격리의 기술적, 환경적, 경제적 타당성 여부와 함께 해양격리에 대한 법적 문제에 있어 정합성의 논리를 만들어 나가는 것도 중요한 이슈중의 하나이다. 아직까지 CO₂ 해양처리에 관한 국제법적 허용 논의가 이뤄지지 않았기 때문이다. 이로 인해 현재 일부 관련된 마찰이 발생되기도 한다. 사례로, 지난 2002년 7-8월경에 노르웨이 서쪽 약 100 km 외해 북해에서 미국, 일본, 노르웨이, 캐나다, 스위스 5개국이 공동으로 추진 예정이었던 공동 실험역 CO₂ 해양처리실험이 노르웨이의 환경정의 실험허가 취소결정으로 인해 중지되었던 사건이 발생되었다. 국제적으로 아직까지 CO₂ 해양격리가 완전한 기술로 인지되지 못하고 있고 또한 그린피스 등의 환경단체와 노르웨이 환경성이 환경영향유무를 평가할 자료 부족등의 사유로 현장실험을 반대하였기 때문이다. 이후 2002년 11월 기후변동에관한정부간판인(IPCC)의 결정에 의해 2005년에 탄소고정 및 저류에 관한 특별보고서가 작성되었는데 CO₂ 해양격리의 법적 정합성에 관한 심도 있는 논의가 수행되었다.

한편 CO₂지중처리는 2006년도 후반에 LC(London Convention)에 의해서 법적 효력을 갖추게 되었다.

4. CO₂ 해양처리에서 CFD의 응용

CO₂ 해양처리는 심해에 CO₂의 회석능력 및 확산범위를 예측하는 기술로서, 실제 대규모 실험역 실험이 불가능한 상태이다. 제 3절에서도 언급했듯이 미량의 CO₂를 실험역에서 실험하는 것조차 어려운 상황이다. 따라서 실험실 스케일로서 실험 검증하고, 전산유체역학의 기술을 최대한 활용할 필요가 있다.

CO₂ 해양처리에 적용되고 있는 전산유체학적 연구로서는 크게 3분류로 나눌 수 있다. 첫째는 전지구 심해 물리/생물 모델링에 의한 장기간 심해 탄소 순환연구이며, 둘째는 CO₂ 해양처리로 기인되는 심해영역의 물리적 생물학적 연구이며,

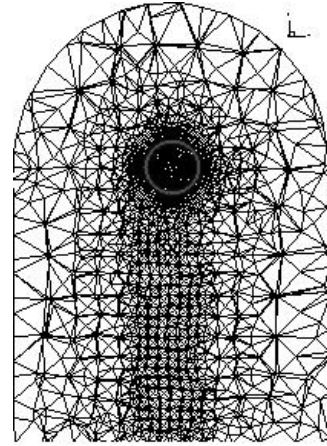


Fig. 1 Three-dimensional hybrid unstructured mesh

셋째로서는 체적을 가지는 액적 및 하이드레이드로부터 주위로 회석되는 양을 추정하는 모델연구등이 필요한 요소기술이라고 판단된다. 따라서 연구해당 영역으로 보면 작게는 cm단위에서부터 크게는 수천km의 지구규모의 크기까지의 영역이 모두 포함된다고 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 CDF의 도움으로 현상을 예측할 필요가 있다.

본 논문에서는 위 세가지 요소중에서 세 번째 마이크로 스케일에서 액적이 상승하면서 유체력을 받아 표면의 변동에 따라서 상승정도를 파악하는 기초적인 연구를 수행하였다.

5. 비구조 격자를 이용한 단일 액적의 거동

중력장 하에서 액적의 3차원적 거동을 파악하기 위하여 수치해석기법으로서 삼각축(Tetrahedron)과 삼각기둥(Prism)의 복합 비구조격자를 생성하여 액적 밖과 내부에 분포시켰다(Fig. 1) 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.

5.1 이산화

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



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

$$= -\frac{1}{\gamma} \int p \mathbf{n} dA + \int \frac{1}{\gamma} \frac{Eo}{(OhRe)^2} \mathbf{g} dV + \frac{1}{Re} \frac{\theta}{\gamma} \int [\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T] \cdot \mathbf{n} dA + \mathbf{a}$$

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 수치시물레이션에서는 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.

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

여기서 첨자 c, d 는 연속상과 분산상을 의미하고, n 은 경계 표면에서 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.

$$p_d = p_c + \Delta p \quad (4)$$

$$\Delta p = \frac{\kappa}{(Oh \cdot Re)^2}$$

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, \mathbf{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 국부 좌표계(ξ_1, ξ_2, ξ_3)를 바탕으로 움직이며, 시간 t 에 따라 변화하는 스칼라량이다. 본 연구에서는 z 의 방향을 액적의 중심으로부터 원주방향을 가리킨다. 그러므로, 운동학적 조건은 식 (7) 같은 조건을 만족시킨다.

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

$$U_i = \frac{\partial \xi_j}{\partial x_i} u_j$$

여기서, J 는 야코비안이며, u_j 는 유체의 속도이다.

5.2 계산결과

계산격자의 구성은 Fig. 2에서 보여지듯이 삼각뿔과 삼각기둥으로 구성되어 있으며 삼각기둥은 표면에 가깝게 둘러쌓여 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 ICFM-CFD를 이용하여 액적의 내부와 외부를 모두 구성하였다.

액적의 유동을 파악하기 위하여 유사 액체인 실리콘을 분산상으로, 물을 연속상으로 두고, 레이놀즈수를 바탕으로 시물레이션을 수행하였다.

액적의 지름이 0.826cm, 기준 상승속도를 0.1m/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. 2). 상승중 액적은 주로 타원형을 유지하고 있으며, 평균 변형율(단축/장축)은 0.7을 유지하며, 액적의 평균상승속도는 0.15m/s로 상승속도를 기준으로 한 레이놀즈 Rn 의 값은 1322

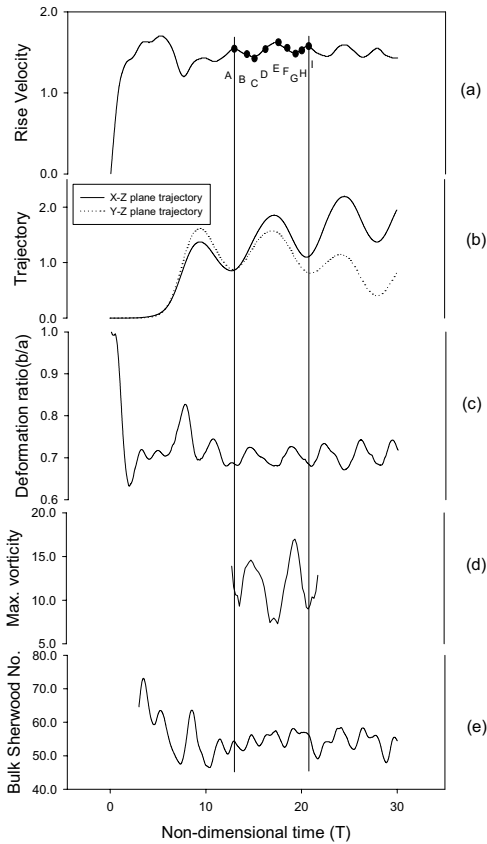


Fig. 2 Variation of rise velocity (a), droplet path in x-z and y-z plane (b), aspect ratio (c), Total maximum vorticity (d), and bulk Sherwood number (e). (A indicates 12.8T, B is 14.0T, C is 15.0T, D is 15.8T, E is 17.2T, F is 17.2T, G is 18.4T, H is 19.2T, and I is 19.8T for 1 zigzagging motion). The Reynolds number is about 1322 and the Ohnesorge number is 0.0015

이며, 그리고 Strouhal수($St = d0/U \cdot T$)는 0.09로 나타났다.

Fig 2의 (a)에는 zig-zag 왕복 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. 2의 (b)는 x-z평면과 y-z평면의 액적의 궤적을 나타내며, sinusoidal 적으로 상승한다는 것을 유추할 수 있다. Fig. 3의 (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 최소가 됨을 알 수 있다. 그 의미는 zig-zag 왕복운동 중 turning-point에서는 높은 항력을 받는 타원형의 액적이 보

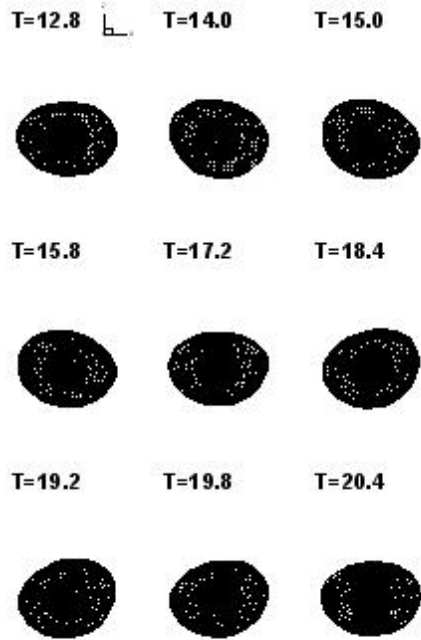


Fig. 3 Evolution of the shape deformation of a droplet within one period of a path

다 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. 또한 후류 평행하지 않는 압력의 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 강도가 가장 크다는 것을 알 수 있다.

실리콘-물에서 실리콘 액적을 방출한 실험과 같은 물성 조건에서 수치적으로 해석한 결과를 보여준다[7]. 여기서, 수치 해석상에서의 액적은 구 형태에서 출발하기 때문에 실험상의 노즐 분출 시 따르는 초기 가속도효과는 엄밀히 다루지는 않고

Table 1 Indicated non-dimensional time point A to I * Turning Point

	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*

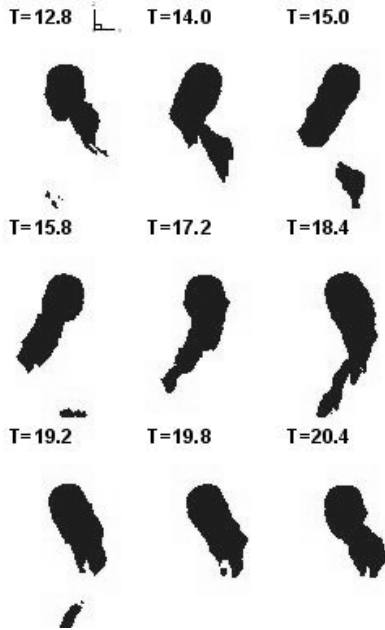


Fig. 4 Evolution of vorticity contour (its value is 2.0) in one zigzagging period path

있다. 액적의 zig-zag 한 주기에 관한 snapshot만을 해당 시간대 별로 비교하였다. 촬영시선과 수치해석 시선이 반드시 같다고는 할 수 없으나 최대한 zig-zag 의 면을 확보한 상태에서 촬영 또는 해석결과로 가로 폭은 약 1cm, zig-zag 수직 폭은 약 10cm로 거의 동일하다는 것을 알 수 있다. Fig 3은 Table 1상의 1 주기 액적 상승 궤적내의 시간적 액적 표면 형상을 나타내고 있으며, 진행방향으로는 편평한 면이, 그리고 후류는 약간 각진 면이 보인다. 또한 turning point에서의 진행방향을 잘 나타내 주고 있다. Fig 3에서는 Fig. 2(d)에서 보이는 와도의 강도를 시간적으로 설명해주고 있으며, hybrid mesh 상에서 horse vortex가 분리되고 있는 형상을 잘 표현해주고 있다.

6. 결 론

교토의정서 등에서 요구하는 대량의 CO₂ 배출감축 요구를 가지적으로 짧은 기간내에 충족시키지 못하는 약점들을 보완해 줄 새로운 대안기술이라는 점에서 본 해양격리기술은 국제적으로 관심을 보이고 있다. 그러나, CO₂ 해양처리에 관한 국제법적, 사회적 수용여부를 두고 많은 논란이 있다. 특히 2002년도의 노르웨이 서쪽 100km 외해에서 미국, 일본, 노르웨이, 캐나다, 스위스 5개국의 국제 실증 실험 연기가 이를 말해주고 있다. 현재 CO₂ 대규모 격리방법의 수용은 IPCC에서 “지중격리”가 우선 법제화 되었으나 심해양 CO₂격리는

2005년도 해양격리에 관한 특별보고서(IPCC) 이후 연구가 RP 속 진행중이다.

본 논문은 CO₂가 심해양에 파이프를 통하여 방출 될 경우, 그 확산영역을 추정하기위한 기초적인 액적 수치시물레이션을 수행하였다. 본 논문에서는 유사 이상류인 실리콘물의 경우에 실리콘 액적의 거동에 관한 연구와 이 거동이 연속상의 용해도에 변화를 끼친다는 것을 와도의 강도로서 수치해석적으로 확인하였다. 거동에는 세가지의 양태가 있는데 zig-zag, helical, rectilinear로 크게 Reynold수에 영향을 받는 Zig-zag에 대해 CFD로 해석하였다.

그러나, 실제적으로 CO₂를 해양에 격리시에는 하이드레이드라고 하는 사벳트형의 결정이 Liquid-CO₂ 액포 주위에 형성되기 때문에 이 영향으로 용해도의 변화가 발생한다. 따라서 CO₂ 액적 하이드레이드로 인한 용해도연구가 진행되어야 한다.

참고문헌

- [1] 2003, Murai, S., Ohsumi, T., Nishibori, F. and Ozaki, M., "The Second Phase of Japanese R&D Program for CO₂ 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 CO₂ Release in Mid-Depth," "The Second Phase of Japanese R&D Program for CO₂ Ocean Sequestration," *Greenhouse Gas Control Technologies*, Vol.I, Elsevier Science Ltd., pp.739-744.
- [3] 2002, John, "Overview of CO₂ 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, “CO₂ 가스 해양격리시스템 연구개발 타당성 기획연구,” 해양수산부.
- [5] 2002, Olav, K., "Geological storage, including costs and risks, in saline aquifers," *the Proceedings of Workshop on Carbon Dioxide Capture and Storage*, Regina, Canada, 18-21 Nov.
- [6] 1997, Koide, H., Shindo, Y., Tazaki, Y., Iijima, M., Ito, K., Kimura, N. and Omata, K., "Deep sub-seabed disposal of CO₂ The most protective storage," *Energy Conversions and Management*, Vol.38, pp.253-258.
- [7] 2005, 정노택 외, “CO₂해양처리를 위한 액적 거동 시물레이션 기초연구,” *한국해양환경공학회지*, Vol.8, pp.39-45.