

심층 분사를 통한 해양 이산화탄소 격리 기술 소개

박영규^{1,*} · 최상화² · Katsumi Matsumoto³ · 이정석⁴ · 강성길⁵ · 황진환⁶

¹한국해양연구원 해양기후변화연구사업단, ²한국해양연구원 데이터운영팀,

³미네소타주립대학 지질/지구물리학과, ⁴(주)네오엔비즈 환경안전연구소,

⁵한국해양연구원 해양시스템안전연구소 해양오염방제사업단, ⁶동국대학교 사회환경시스템공학과

Review on Ocean Carbon Sequestration through Direct Injection

Young-Gyu Park^{1,*}, Sang-Hwa Choi², Katsumi Matsumoto³, Jung-Suk Lee⁴,
Seong-Gil Gang⁵ and Jin Hwa Hwang⁶

¹Ocean Climate Change Research Division, Korea Ocean Research and Development Institute, 1270 Sadong, Ansan, 426-744, Korea

²Data Management Section, Korea Ocean Research and Development Institute, 1270 Sadong, Ansan, 426-744, Korea

³Department of Geology and Geophysics, University of Minnesota, 310 Pillsbury Drive, SE Minneapolis, MN 55455, USA

⁴Institute of Environmental Protection and Safety, NeoEnBiz Co. Rm 913, Byeoksan Digital Valley II,
Gasandong 481-10, Geumcheongu, Seoul 153-783, Korea

⁵Maritime and Ocean Engineering Research Institute, KORDI, 171 Chang-dong, Yusung-gu, Daejeon 305-343, Korea

⁶Dept. Civil Environment System Engineering, Dongguk University, 3-26 Pil-Dong, Chung-Gu, Seoul, 100-715, Korea

요 약

해양은 인류가 산업활동을 통하여 방출한 이산화탄소를 대부분 흡수할 수 있으나 자연상태에서는 대기 중 이산화탄소가 해양으로 흡수되는 속도가 매우 느리기 때문에, 가시적인 대기중 온실가스농도저감을 위해서는 인공적으로 해양의 중심층으로 이산화탄소를 직접 분사시켜 해수에 용해시키는 방법을 사용할 수 있다. 화력발전소나 제철소 등 이산화탄소를 대량으로 발생시키는 곳에서 이를 직접 포집하여 선박으로 필리핀해나 일본 동쪽의 공해역으로 운송하여 중심층(수심 2,000~3,000 m)에 분사시킨다면 수 백년 이상 해양에 저장할 수 있다. 해수에 용해된 이산화탄소는 분사지역을 중심으로 해수의 pH를 감소시키는데, 환경변화가 매우 적은 심해에 적응한 생물들은 작은 환경의 변화에도 큰 영향을 받을 수 있기 때문에, CO₂ 분사를 시행하려면 이에 의한 생태영향평가를 수행해야 한다. 생태계에 나타나는 손실이 CO₂ 분사에 의한 이득보다 작을 경우에만 심층 분사를 통한 해양 이산화탄소 격리가 경제적인 측면에서 유효하다.

Abstract – The oceans could absorb almost all the anthropogenic carbon dioxide the mankind has been producing eventually, but in the nature the air-sea CO₂ exchange occurs very slowly and to lower the atmospheric CO₂ concentration substantially CO₂ must be injected to the interior of the ocean directly. If we inject CO₂ collected at the major CO₂ sources into the international waters in the Philippine Sea or east of Japan, we could store the CO₂ in the oceans effectively for a few hundred years. When CO₂ is dissolved into the water, pH drops. The creatures adapted to the deep oceans where environment is very stable could be affected by even a small change in pH significantly. If, therefore, we are to inject CO₂ into the oceans, we must assess the effect of CO₂ injection in the marine ecosystem beforehand. Only when the damage to the marine ecosystem is smaller than the benefit from the CO₂ injection, CO₂ injection is effective.

Keywords: Ocean CO₂ Sequestration(해양 CO₂ 격리), direct injection(직접분사), acidification(산성화)

1. 서 론

인류의 경제활동과 산업화에 따라 석탄, 석유와 같은 화석연료의 사용과 시멘트 수요의 증가로 매년 많은 양의 이산화탄소가 대

기로 방출되고 있고, 이런 현상이 지구온난화를 가속시키고 있음은 매우 잘 알려진 사실이다. IPCC(2001)에 의하면 서기 2100년에는 이산화탄소를 포함한 온실기체의 지구온난화에 의해서만 지구평균 기온이 약 1~6°C 가량 상승될 것으로 추정된다(Fig. 1). 지구온난화와 이의 영향에 대한 연구가 잘 되어 있는 미국의 경우, 지구기

*Corresponding author: ypark@kordi.re.kr

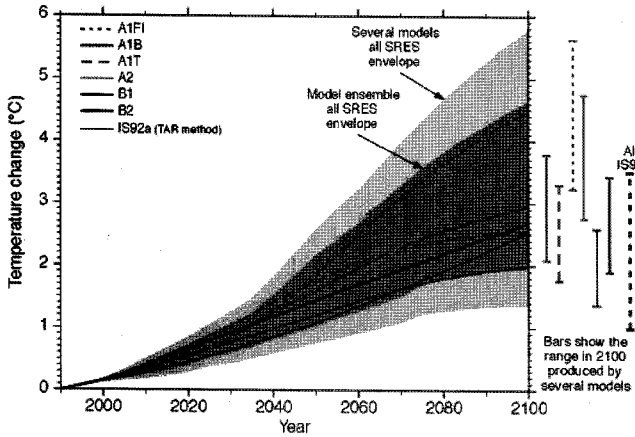


Fig. 1. Temperature change due to various global warming scenarios (From IPCC 2001).

온이 2.5°C 증가할 경우 연간 약 616억 달러의 피해손실이 예상되며, 10°C 증가할 경우에는 무려 3,337억 달러의 피해손실이 예상된다(Cline, 1992). 만약 대기 이산화탄소 농도가 2배 증가한다면, 전세계 총 농업생산량은 약 7.0% 가량 감소할 것이다(Cline, 1992). 병하의 감소나 식물의 조기 개화, 산호의 백화, 해양의 산성화, 혹서, 나비의 고지대로의 이동 등 다양한 현상이 지구온난화의 결과로 추정되고 있다(Kerr, 2007).

지구온난화에 따른 피해를 줄이기 위해 선진 각국은 “교토 의정서” 등의 기후협약을 통해 세계 각국의 이산화탄소 방출량을 통제하려고 시도하고 있다. 2005년 2월 발효된 “교토 의정서”를 통해 일본, 유럽연합들은 2012년까지 이산화탄소 방출량을 1990년 기준으로 평균 5.6%를 감축하기로 잠정 합의했고, 온실가스 배출량 세계 10위이며, 배출증가속도가 OECD 1위인 우리나라는 2013년 이후 온실가스 감축의무국으로 지정될 가능성이 높다. 교토 의정서가 실행될 경우, 중공업 중심의 산업구조를 갖는 우리나라는 경제발전이 막대한 타격을 입게 될 것이기 때문에 우리나라도 CO₂ 배출 저감압력에 능동적으로 대응하여야 한다.

기후변화협약 대응을 위한 기술개발의 중요성이 증대되고 있는 가운데 최근 해양을 매개로 한 CO₂ 저장에 관한 관심이 증가하고 있다. 발전소 등과 같은 대규모 CO₂ 발생원에서 포집된 CO₂를 해양 심층부(분사법), 해저면(저류법)에 주입하거나, 해양이나 육상의 퇴적층내(예: 대수층, 가스/석유채굴공 등)에 저장하는 이산화탄소 포집 및 저장(carbon dioxide capture and storage, CCS)하는 방안이 그 대표적인 예이다 (IPCC, 2005; 정 등, 2005). 퇴적층을 활용하는 지중저장(육상 및 해양)의 경우 미국, 캐나다, 노르웨이, 호주 등 선진국에서는 실용화 단계에 진입한 반면, CO₂ 해양 분사나 저류의 경우 아직 환경위해성에 대한 불확실성에 관한 연구개발 단계에 머무르고 있기에 특히 이에 관한 많은 해양환경공학적 연구가 강력히 요구되고 있다(강성길, 2006, 이 등, 2006). 특히 육상공간이 부족한 우리나라는 일본과 마찬가지로 해양을 매개로 한 CO₂ 저장방안(해양지중저장, 해양분사/저류 등)에 대한 집중적인 연구가 요구되며, 이와 관련된 연구개발이 해양수산부 연구사업의 일환

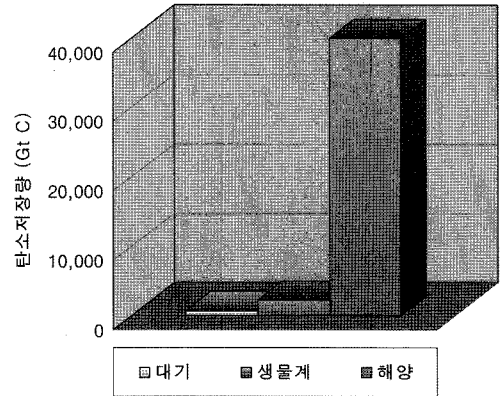


Fig. 2. The total amount of CO₂ in the biosphere, atmosphere and oceans.

으로 현재 국내에서 추진되고 있다(강, 2006).

해양내 심층부나 해저면에 CO₂를 직접 주입하여 처리하는 방안은 CO₂의 전지구적 순환 양상과 해양의 막대한 CO₂ 흡수능력을 감안한 처리방법이다. 현재 바다에는 대기에 비해 약 50 배 정도 많은 양의 CO₂가 녹아 있고(Fig. 2) 더욱 더 많은 양의 CO₂가 녹아 들어 갈 수 있다. 인류가 산업활동을 통하여 방출하는 CO₂의 약 1/3 가량은 이미 해양으로 녹아 들어가고 있다. 나머지 CO₂도 바다로 녹아 들어갈 것이나, 자연상태에서는 천년 이상의 긴 시간이 걸릴 것이다. 해양심층순환을 따라 표층에서 해양의 심층으로 유입된 물질이 다시 표층에 도달하기까지는 해양심층순환의 특성으로 약 천년 정도 걸리는 것으로 알려져 있기 때문에, 해양 심층으로 CO₂가 흡수되는 속도를 인위적으로 증가시킨다면, 해양을 유용한 온실가스 저장장소로 사용할 수 있다. 이런 이유로 온실가스를 발생원에서 포집하여 심층에 방류시켜 바닷물에 녹여 저장하는 방법이 1970년대 후반부터(Marchetti, 1977) 연구되어 왔다.

해양에 CO₂를 방류할 경우 고려해야 할 중요한 두 가지 요소는 대기로 재방출되는 양, 즉 저장효율과, pH 변화에 의한 환경 및 생태계 영향이다(이 등, 2006). 미국, 노르웨이 일본이 하와이 근처 해역에서 소규모 실험실 실험을 통하여 저장효율과 환경영향에 대한 기본 자료를 얻고자 하였으나 Greenpeace의 반대로 무산된 적이 있다. 따라서 CO₂해양 방류에 대한 모든 연구는 수치모델결과나 실험실 내에서 수행된 실험을 기초로 수행되고 있다. 여기에서는 먼저 CO₂해양분사 기술에 대하여 소개하고, 유럽연합과 IEA가 GOSAC(Global Ocean Storage of Anthropogenic Carbon: 인류에 의한 이산화탄소 대양저장) 사업과 OCMIP-2에서 수행한 해양 순환투기 모델링 결과를 통하여 저장효율과 영향에 대하여 고찰한다. 그 후 한국 주변해역에서도 CO₂ 투기가 가능한지 파악하였다.

2. 해양 CO₂ 분사의 특징과 영향

2.1 해양 내 탄소 순환

해양에 존재하는 탄소는 다양한 물리과정과 생물과정을 통해 해

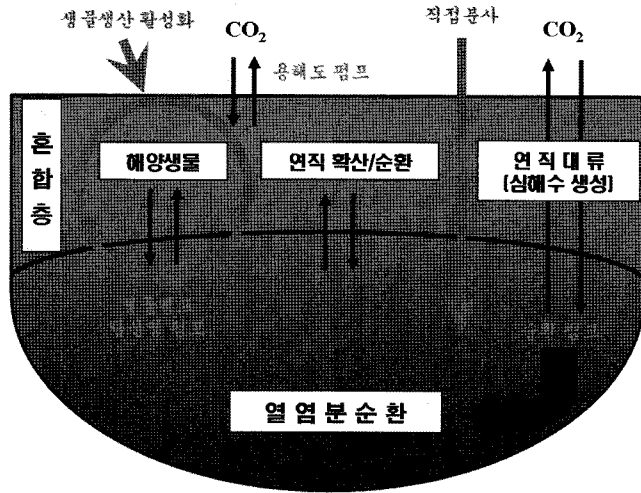


Fig. 3. A conceptual diagram of CO₂ cycle in the oceans.

양 내에서 순환한다(Fig. 3). 대기에 존재하는 이산화탄소가 해양으로 유입되는 해양-대기 이산화탄소 교환량은 해양 표면에서의 기체교환 속도와 해양-대기 간 이산화탄소 농도 차이에 의해 결정되며, 해양의 이산화탄소 농도는 해수의 물리적 특성인 수온과 염분, 화학적 특성인 총탄소량과 알칼리도, 생물적 특성인 광합성과 호흡량 그리고 역학적 특성인 해양대순환에 의해 복합적으로 결정된다. 해양에 존재하는 다량의 탄소는 해양 내 탄소 순환을 통해 심해와 퇴적물 등으로 이동함으로써 대기로부터 장기간 격리된다.

표층 해수의 이산화탄소 용해도는 순수하게 해수의 수온, 염분과 같은 물리적 요인에 의해 결정된다. 따라서 해수의 이산화탄소 용해도는 대기 이산화탄소 농도와 총탄소량 등 해수의 탄소화학 관련 요인에 변화가 없더라도 표층 수온의 변화에 의해 변하게 되며, 해수의 이산화탄소 용해도가 변화함에 따라 새로운 해양-대기 이산화탄소 교환이 생겨나게 되는데 이를 “용해도 펌프(solubility pump)”라 한다. 계절적 혹은 지역적으로 표층해수의 수온 강하가 일어나는 해역에서 낮은 수온으로 인해 이산화탄소 용해도가 증가해 표층 해수에 더 많은 이산화탄소를 포함하게 된다. 저온의 표층 해수는 밀도증가로 인해 침강하여 심해수를 생성하게 되는데, 이러한 연직대류에 의한 심해수 생성을 통해 대기와 접하는 표층 해수로부터 이산화탄소가 심해로 격리되는 과정을 “순환 펌프(dynamic pump)”라 한다. 심해로 격리된 이산화탄소는 심해수의 해양순환을 따라, 해양대순환의 경우 수백 년 후에 해양심층순환의 끝에 해양의 표층으로 다시 돌아와 대기 중으로 재방출 된다.

표층 해수에 녹아있는 이산화탄소는 해양생물의 광합성과 같은 일차생산에 의해 유기물의 형태로 전환되어 해수로부터 제거되어 해수의 이산화탄소 농도를 낮추게 되는데 이를 “생물 펌프(biological pump)”라 한다. 생산된 유기물은 표층 해양 내에서 미생물에 의해 분해되어 무기탄소의 형태로 표층 해수에 다시 공급되거나, 표층 해양 내에서 채 분해되지 못하고 심해로 떨어져 표층 해양으로부터 제거되기도 한다. 심해로 제거된 유기탄소는 심해의 미생물 활동을 통해 무기탄소로 분해되거나 분해되지 않은 유기물의 형태로

심해퇴적물로 퇴적되기도 한다. 심해퇴적물로 제거된 탄소는 상당히 긴 지질학적 시간동안 전지구 탄소 순환에 관여하지 않게 된다. 생물펌프를 활성화 시킴으로써, 해양의 이산화탄소 흡수량을 늘이고자 하는 연구가 시도되었다. 표층해수의 영양염이 풍부하지만 철(iron) 부족이 생물생산을 제한하는 요소로 작용하는 해역에서 표층해수에 철 시비(iron fertilization)를 통해 표층 해양의 일차생산이 크게 높아지는 것을 확인했으며, 일차생산 증가와 함께 해수의 이산화탄소 감소가 확인되었다(Watson *et al.*, 1994). 그러나 생산된 유기물이 심해로 제거되는 비율에 따라 이산화탄소 제거 효율이 달라진다. 생물펌프 중 탄산염 생체 골격을 생산하는 생물에 의해 분해가 쉬운 생물조각이 아니라 심해에 탄산염 퇴적물로 장기간 퇴적될 수 있는 탄산염 골격이 생물생산에 의해 심해로 제거되는 과정을 “탄산염 펌프(carbonate pump)”라 한다.

2.2 해양 CO₂ 분사의 개념

해양의 CO₂ 저장능력은 매우 커 인류가 산업 경제활동을 통하여 방출하는 모든 CO₂(연간 약 8 Gt-C)를 흡수할 능력이 있다. 하지만 자연계에서는 해양-대기 이산화탄소 교환이 매우 천천히 일어나 연간 약 3 Gt-C 정도만을 흡수한다. 화력발전소 등 주요 이산화탄소 발생원에서 이산화탄소를 직접 포집하여 액화시킨 후 해양의 중심층(1,000~3,000 m)에 직접 분사하여 해수에 녹여 해양-대기 이산화탄소교환을 가속화 시키는 것이 해양 CO₂ 분사의 기본적인 개념이다. 심해와 바로 접한 지역에서는 육지에서 바다로 설치된 관을 이용하여 이산화탄소를 분사할 수 있고, 심해와 바로 접해있지 않은 경우에는 선박을 이용하여 심해로 이동 한 후 관을 통하여 분사한다(Fig. 4). 해수에 용해된 이산화탄소는 해수를 따라 이동하다가 표층에 이르면 대기로 방출되기 때문에 해양분사로는 영구적으로 CO₂를 격리시킬 수 없다. 심층해양순환의 특성상 천년 정도가 지나면 분사된 CO₂의 대부분이 대기로 방출되는데 방출되는 정도는 최초 주입한 위치에 따라 다르게 나타난다. 해양에서

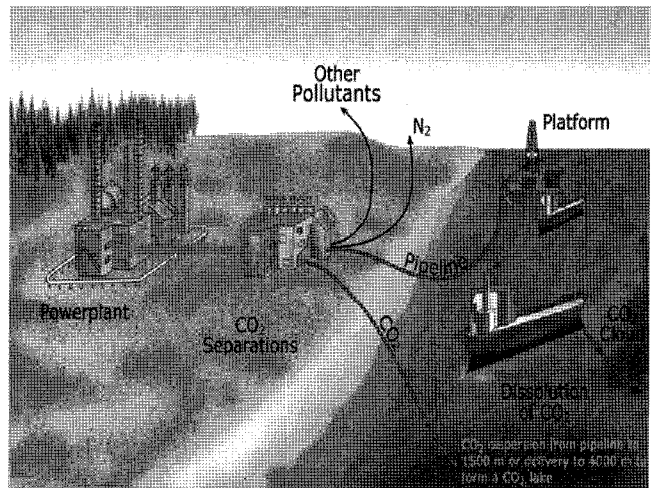


Fig. 4. A schematic of ocean CO₂ sequestration (adopted from <http://enews.lbl.gov/Science-Articles/Archive/sea-carb-bish.html>).

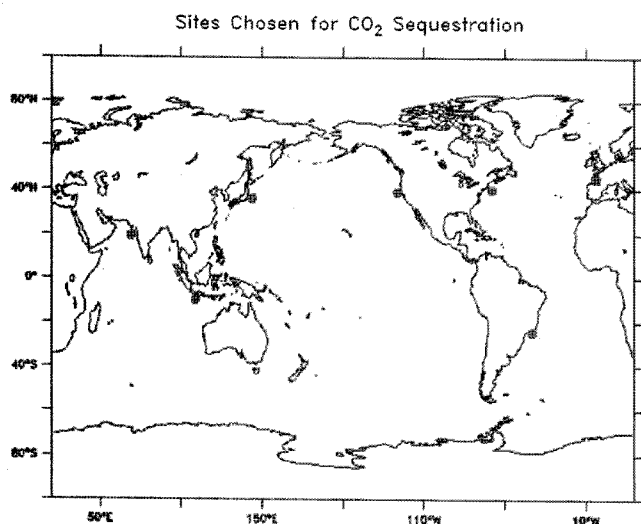


Fig. 5. A map of the seven cities, which are Bombay, Jakarta, Tokyo, San Francisco, New York, Rio de Janeiro, and Bay of Biscay from the left to the right in the figure, chosen for ocean CO₂ sequestration numerical modeling. (adopted from Aumont and Orr, 1999).

이산화탄소 주입에 의해 나타나는 가장 큰 영향은 pH의 감소이다. 환경변화가 매우 적은 심해에 사는 생물은 조그만 변화에도 민감하게 반응할 수 있기 때문에 pH변화에 대한 생물의 반응은 CO₂ 분사에 앞서 반드시 파악되어야 한다(이 등, 2006). CO₂ 포집시 황이나 질소 산화물, 중금속, 유기화합물 등이 함께 포집될 가능성이 매우 높기 때문에 이런 물질도 해양으로 유입될 수 있다(Johnston and Santillo, 2002). 주입된 CO₂가 재방출되는 정도와 환경변화피악에 필요한 CO₂의 거동 특성은 다음에 설명하는 3차원 해양순환모형에 해양이산화탄소화학과정이 결합된 모델(해양생지화학모델)을 이용하여 연구했다.

2.3 CO₂ 저장 효율과 영향

3차원 해양생지화학모형에 이산화탄소를 DIC(dissolved inorganic carbon, 용존무기탄소) 형태로 주입시켜, 해양을 이용한 온실가스 저감에 대한 모델링 연구가 GOSAC와 OCMIP의 주도하에 수행되었다(Aumont and Orr, 1999). 이 실험에서 7개 대도시(미스케이 만, 뉴욕, 리오데자네이로, 샌프란시스코, 동경, 자카르타, 뭍뻬이; Fig. 5) 근처 해역의 800 m, 1,500 m, 3,000 m 층에 1년에 0.1 Pg-C을 서기 2000년부터 100년 동안 주입했을 경우 이산화탄소의 확산과 이동을 모사하였다. 이 양은 인류가 대기로 방출하는 총 이산화탄소량의 약 2%에 불과하나 1 GW 정도의 전력을 생산하는 석탄화력 발전소 50기, 혹은 천연가스발전소 100기에서 배출하는 이산화탄소의 양과 동일하다. 이 모델링 결과 중 한국에서 가까운 동경을 대상으로 수행한 실험 결과를 고찰하였다. Matsumoto and Mignone (2005)에 의하면 동경근처 해역 1,500 m에 주입된 CO₂는 해수의 순환과 확산에 따라 수평, 수직 방향으로 퍼져나간다(Fig. 6). 이 해역의 주된 수평방향흐름은 북동방향이기 때문에 DIC의 농도가 가장 높은 지역은 북동쪽으로 이동한다. 해류에 의해 수평방향으로

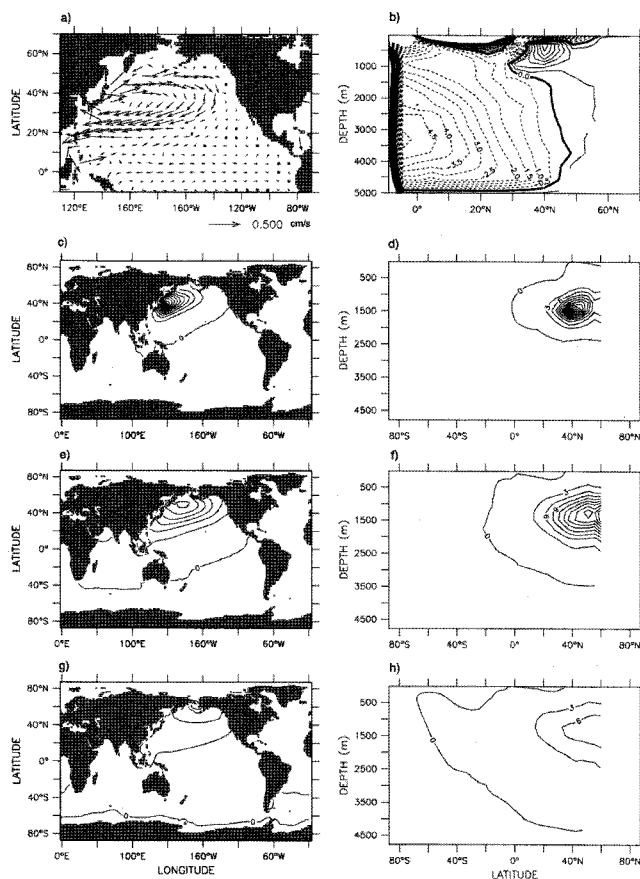


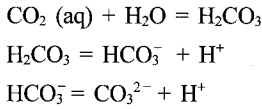
Fig. 6. Evolution of carbon injected near Tokyo at 1500 m (adopted from Matsumoto and Mignone (2005)). Circulation is shown for the North Pacific: (a) annually averaged horizontal velocity field at 1500 m; (b) annually averaged overturning stream function in Sv ($10^6 \text{ m}^3/\text{s}$). In (b), solid lines represent clockwise circulation, and dashed lines indicate the opposite. Injected DIC is shown for the globe: horizontal maps (c, e, g) show vertically integrated inventories and meridional sections (d, f, and h) show zonally-averaged concentrations. Panels (c) through (h) represent three time slices: year 2050 (c, d); year 2130 (e, f); and year 2250 (g, h). Map contours are spaced $6 \mu \text{ moles}/\text{m}^2$ apart. Section contour spacing is $3 \mu \text{ mol}/\text{kg}$.

이동하면서, 이 지역에 나타나는 상향 수직흐름 때문에 DIC 농도가 최대인 지점은 알아지게 된다. 주입된 CO₂가 표층에 이르면 대기로 재방출되어 저장효율을 낮추게 된다. 3,000 m 층에는 흐름이 약하고 주입된 CO₂가 이 깊이에서 표층까지 떠오르는데 더 오랜 시간이 걸리기 때문에 높은 저장효율을 보이나, 800 m 층에 주입된 CO₂는 더 짧은 시간에 재방출된다. 따라서 심층에 주입하면 효율이 올라가게 된다. 태평양의 심층은 대서양에 비하여 대기의 영향을 적게 받기 때문에 대서양보다 높은 효율을 보이나(Aumont et al., 2001), 해양은 영구적인 격리지가 아니기 때문에 수 백년이 지나면 분사된 CO₂의 절반 이상이 대기로 방출된다.

2.4 CO₂ 분사에 의한 해양환경변화(pH변화)

대기중 CO₂ 농도가 증가하면 바다로 녹아 들어 가는 CO₂의 양

이 증가하여 해수의 용존 CO₂ 농도가 증가하는데, 해수로 유입된 CO₂는 가수분해(hydrolysis) 과정에 의하여 중탄산염과 탄산염 그리고 수소이온을 생성하게 된다.



대기중 CO₂의 농도 증가로 인하여 현재 해양의 pH는 산업혁명 이전보다 평균 0.1 정도 낮은 것으로 추정되고 있으며, 지금의 연간 CO₂ 배출량이 그대로 유지된다고 가정한 IPCC의 IS92a 시나리오(business-as-usual scenario)의 예측에 따르면 대기 CO₂가 790 ppm이 되는 2100년에는 해수의 pH가 0.3~0.4 정도 감소할 것으로 추정된다(IPCC, 2001; Orr *et al.*, 2005). 해양에 CO₂를 분사한다면 대기의 CO₂ 농도가 낮아지기 때문에 표층해양의 pH변화는 줄어들게 된다. 하지만 CO₂가 분사된 해역의 pH는 큰 폭으로 증가하게 된다. 저해상도 순환모델에서는 분사점에서 pH변화를 정확하게 평가할 수는 없으나, Drange *et al.*(2001)의 고해상도 모델 결과에 따르면 0.1×10⁶ Pg-C/yr로 분사한 실험에서 분사지점에서 pH가 1이 상 감소하였다. 분사점의 크기가 4도×4도인 Matsumoto and Mignone(2005)의 모델에서 분사가 진행되는 동안 분사점의 pH는 약 0.7 정도 감소하였다(Fig. 7). 어느 정도의 pH변화가 생물에게 치명적인 영향을 미칠지는 정확하게 알려져 있지 않으나, 이 정도의 변화는 pH변화가 생물에 미치는 영향을 연구할 때 일반적으로 사용하는 값보다 크다(Knutzen, 1981; Auerbach *et al.*, 1997; Seibel and Walsh, 2001; Shirayama *et al.*, 2004). 분사점에서 멀어지면 pH 변화폭은 급격하게 줄어들는데 분사점을 중심으로 상하로 수 백 m를 벗어나면 pH감소가 0.02 이하로 줄어들었다(Fig. 7). 분사가 중지된 지 200년 정도가 지나면 pH감소량은 0.02 이하가 되었다. CO₂

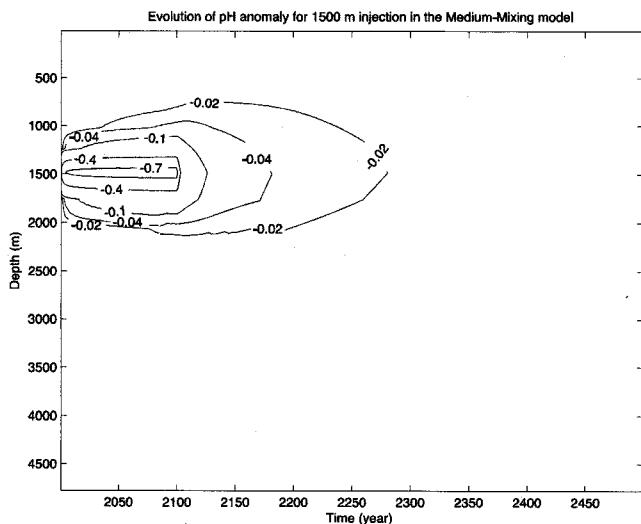


Fig. 7. Evolution of the negative pH anomaly for the 1500 m injection at the site of injection (i.e., 37.8°N, 144.4°E).(adopted from Matsumoto and Mignone (2005)).

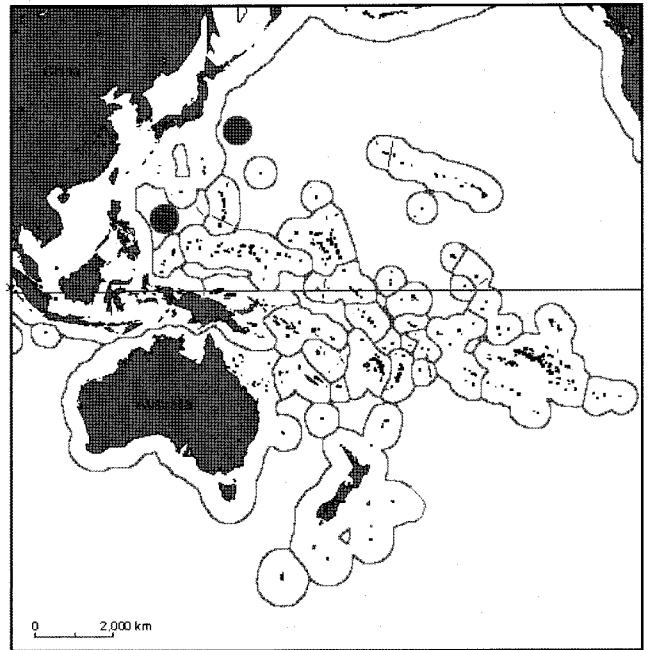


Fig. 8. A map of international water in the Pacific. The two red circles represent the areas of possible CO₂ injection.

를 해수 중으로 분사한다면 생물에 위해를 미치게 되고 그 정도는 분사점에 가까울수록 크게 된다.

2.5 한반도 주변 해역을 이용한 이산화탄소 투기

동해도 수심이 3,000 m 이상인 해역이 존재하여 심층으로 이산화탄소의 직접주입은 가능하나 동해의 심층순환은 체류시간이 약 100년 정도로 추정되기 때문에 3,000 m에 주입하더라도 대부분이 100년 이내에 대기로 재방출 되기 때문에 동해는 CO₂의 저장소로 사용될 수 없다.

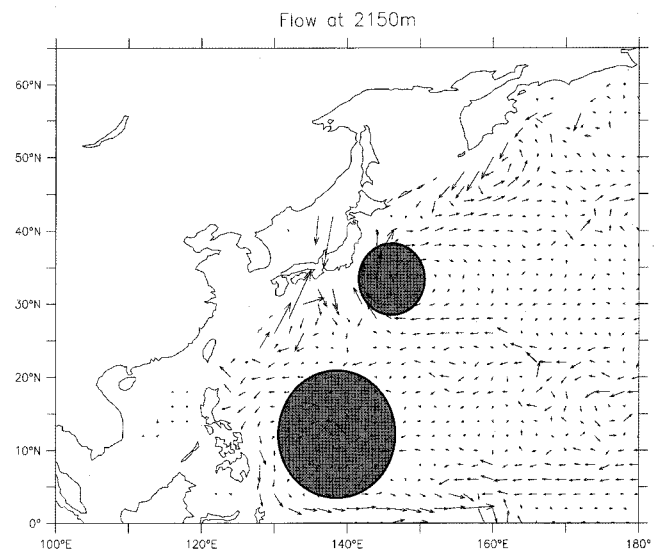


Fig. 9. Circulation at 2150 m in the northwest Pacific from a global ocean circulation model of 1° by 1° horizontal resolution.

태평양과 직접 접한 일본처럼 육상에서 판을 통하여 심해로 CO₂를 분사시킬 수는 없지만, 선박을 이용한다면 일본 앞쪽이나 필리핀 근처 공해(Fig. 8)에 CO₂를 분사시킬 수 있다. 분사된 CO₂는 해류를 따라 움직이기 때문에 두 지역의 해류 구조를 알면 분사된 CO₂의 이동경로를 추정할 수 있다. Fig. 9에 2,000 m 층에서 북태평양의 해류를 나타내었다. 북위 20도 지역부터 북위 40도 사이에는 시계방향의 순환이 존재하여 일본 근처에서는 북동쪽 흐름이 우세하게 나타난다. 따라서 일본 앞 쪽 공해 2,000 m 층에 분사된 CO₂는 Matsumoto and Mignone(2005) 등이 보여준 것과 유사하게 이 흐름을 따라 북동쪽으로 이동하며 퍼져나갈 것이다. 필리핀 근처 공해에 주입된 CO₂는 이 해역에 있는 반시계 방향 흐름의 영향을 받게 되는데, 이 해역의 주된 흐름인 대륙사면을 따르는 남향류를 따라 적도로 이동한 후 적도와 평행한 동쪽으로 이동하다가 동경 160도 부근에서 적도를 가로질러 남반구로 이동하게 되리라 예상된다. 하지만 북위 20도에서 40도 사이에 일본을 따라 흐르는 북동향류의 영향으로 일본연안을 따른 이동도 생길 것이기 때문에 태평양의 서안을 따르는 띠 형태를 보일 것으로 생각된다. 북태평양과 인도양의 연결통로와도 인접해 있기 때문에 인도양으로도 유입되는 양도 증가하게 되어 북태평양에 남아있는 양은 적어지게 된다. 인도양의 저장효율이 태평양의 저장효율보다 낮다는 점을 감안할 때, 필리핀 근처에 투기하면 일본 앞에 투하한 것보다 저장 효율이 낮아질 가능성이 있으나 아직 정량적으로 평가된 자료는 없다.

3. 결 론

해양의 중심층(1,000~3,000 m)에 CO₂를 직접 분사함으로써 CO₂를 수 백 년간 효율적으로 격리시켜 지구온난화 정도를 완화시킬 수 있는데 저장효율은 수심이 깊은 곳에 분사할 수록 커진다. 수치모델에서는 그 효율을 평가하기가 수월하지만, 실제로 분사가 이루어졌을 경우, 분사된 CO₂가 흐름과 확산에 의해 매우 광범위하게 퍼져나가기 때문에 효율을 정확히 평가하기는 매우 어려울 것으로 알려져 있다 (Matsumoto and Mignone, 2005).

식물 플랑크톤도 광합성을 통하여 CO₂를 흡수하기 때문에, 인이나 질소 계열 영양염은 풍부하나 철분이 부족하여 일차생산력이 낮은 해역에 철분을 공급하여 일차생산력을 증가시켜 대기 이산화탄소를 제거하는 방법도 연구되고 있다. 해양표층에서 입자형태로 고정된 입자형태의 탄소 중 20%이하 만이 심부로 가라앉기 때문에 CO₂ 분사가 생물을 이용하는 것 보다 훨씬 효율적이다.

분사된 CO₂는 pH를 감소시키기 때문에 해양생태계에 영향을 줄 수 있는데 그 정도는 분사점에 가까워 질수록 커진다. 분사에 의한 pH변화는 생산력 증가에 의한 변화보다 훨씬 크게 나타난다. 변화가 매우 적은 심해에 적응한 생물들은 작은 변화에도 큰 영향을 받을 수 있기 때문에, CO₂ 분사를 시행하려면 이에 의한 생태영향 평가를 수행해야 한다. 생태계에 나타나는 손실이 CO₂ 분사에 의한 이득보다 작을 경우에만 CO₂ 분사가 효율적일 것이다. 폐기물 및 기타물질의 투기에 의한 해양오염 방지에 관한 국제협약인 런던

협약에서는 CO₂의 해저저장은 2007년 2월 10일 부로 허용하나, CO₂해수중 분사는 아직 금지하고 있어, 이 협약의 변경도 CO₂ 해양투기에 앞서 해결되어야 할 과제이다.

동해에도 수심이 3,000 m 이상인 해역이 존재하나, 순환의 주기가 100년 이하로 매우 짧아 분사된 CO₂의 저장효율이 매우 낮아 동해를 이용한 CO₂ 분사는 아무런 경제적 이득이 없다. 하지만 선박을 이용한다면 대서양이나 인도양보다 저장효율이 높은 것으로 평가되는 북서태평양의 공해에 CO₂를 분사할 수 있다.

사 사

본 글을 심사해 주신 심사위원과 편집위원께 감사 드립니다. 본 연구는 해양수산부 연구개발사업 “CO₂ 해양처리기술개발사업”과 환경부 차세대핵심환경기술개발사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] 강성길, 2006, 기후변화 대응을 위한 이산화탄소 해양처리기술개발, 한국화학공학회지 NICE, 24(5), 424-432.
- [2] 이정석, 이규태, 김찬국, 박건호, 이종현, 박영규, 강성길, 2006, “해수중 용존 CO₂ 농도 증가가 해양생물 및 해양생태계에 미치는 영향: 국내외 사례 연구”, 한국해양환경공학회지, 9(4), 243-252.
- [3] 정노택, 강성길, 강창구, 박용찬, 윤치호, 2005, “CO₂ 해양처리방안 비교연구”, 한국해양환경공학회지, 8(3), 111-115.
- [4] Auerbach, D. I., Caulfield, J. A., Adams E. E. and Herzog, H. J. 1997, “Impacts of ocean CO₂ disposal on marine life: I. A toxicological assessment integrating constant-concentration laboratory assay data with variable-concentration field exposure”, Environ. Modeling Assessment, 2, 333-343.
- [5] Aumont, O. and J. Orr, 1999, “Injection-HOWTO”. Internal OCMP Report, LSCE/CEA Saclay, Gif-sur-Yvette, 17 pp.
- [6] Aumont, O., J. Orr, A. Yool, K. Plattner, F. Joos, E. Maier-Rainer, M.-F. Weirig, R. Schlitzer, K. Caldeira, M. E. Wickett and R. Matear, 2001, “Efficiency of purposeful CO₂ injection in the deep ocean: Comparison of seven ocean models”, In IGBP: Open Science Conference 2001, Amsterdam.
- [7] Cline, W. R., 1992, “Global Warming: the Economic Stakes”, Institute for Internations Economics, Washington DC, 103pp.
- [8] Drange, H., G. Alendal and O. M. Johannssen, 2001, “Ocean release of fossil fuel CO₂: A case study”, Geophys. Res. Lett, 28, 2637-2640.
- [9] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2001, “Climate Chagne 2001: The Scientific bases”, Cambridge University Press, Cambridge, U.K. 944pp.
- [10] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2005, “IPCC Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage”, Cambridge University Press, New York, 431 pp.
- [11] Johnston, P. and D. Santillo, 2002, “Carbon Capture and Sequen-

- tration: Potential Environmental Impacts”, In Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Working Group III: Mitigation of Climate Change, Workshop on Carbon Dioxide Capture and Storage Proceedings, 95-110, 178pp.
- [12] Kerr, R. D., 2007, “Global warming is changing the world”, *Science*, 316, 188-190.
- [13] Knutzen, J. 1981, “Effects of decreased pH on marine organisms”, *Mar. Pollut. Bull.*, 12, 25-29.
- [14] Marchetti, C., 1977, “On geoengineering and the CO₂ problem”, *Climate Change*, 1, 59-68.
- [15] Matsumoto, K and B. Mignone, 2005, “Model simulation of carbon sequestration in the North-west Pacific by direct infection”, *J. of Oceanography*, 61, 747-760.
- [16] Orr, J. C., O. Aumont, A. Yool, K. Plattner, F. Joos, E. Maier-Reimer, M.-F. Weirig, R. Schlitzer, K. Caldeira, M. Wickert, and R. Matear, 2001, “Ocean CO₂ sequestration efficiency from 3-D ocean model comparison, in Greenhouse Gas Control Technologies”, Proceedings of the 5th Inter. Conf. on Green-house Gas Control Technologies, edited by D. Williams, B. Durie, P. McMullan, C. Paulson, and A. Smith, CSIRO, Collingwood, Australia, 469-474.
- [17] Orr, J.C., Fabry, V. J., Aumont, O. A., 2005, “Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms”, *Science*, 437, 681-686.
- [18] Seibel, B. A. and P. J. Walsh, 2001, Potential impacts of CO₂ injection on deep-sea biota, *Science*, 294, 319-320.
- [19] Shirayama, Y., H. Kurihara, H. Thornton, To. Yamamoto, M. Ohta, K. Okita and S. Shimode, 2004, “Impacts on ocean life in a high-CO₂ world”, In Program of the Symposium on the Ocean in a High-CO₂ World, The Scientific Committee on Oceanic Research, Paris.
- [20] Watson, A. J., C. S. Law, K. A. Van Scoy, F. J. Millero, W. Yao, G.E. Friederich, M. I. Liddicoat, R. H. Wanninkhof, R. T. Barber, and K. H. Coale, 1994. “Minimal effect of iron fertilization on sea-surface carbon dioxide concentrations”, *Nature*, 371, 143-145.

2006년 12월 12일 원고접수

2007년 5월 7일 수정본 채택