

이산화탄소 해저 지질 구조 격리: 기술 현황과 제도 예비검토

홍기훈^{1*} · 박찬호² · 김한준¹
¹한국해양연구원, ²부산대학교 법학과

CO₂ Sequestration in Geological Structures in the Maritime Area: A Preliminary Review

Gi-Hoon Hong^{1*}, Chan-Ho Park², and Han-Joon Kim¹

¹Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan P.O. Box 29, Kyonggi 425-600, Republic of Korea
²College of Law, Pusan National University, 30 Jangjeon-dong, Geumjeong-gu, Busan 609-735, Republic of Korea

요 약

온실기체의 인위적 배출은 지구온난화를 유발하여 해수면 상승, 극 기상 등 전 세계에서 피해가 증가하고 있다. 특히, 지구온난화 기여도가 가장 높은 온실기체 중 이산화탄소(CO₂)는 주로 화석연료의 사용 과정에서 발생하는 폐기물이다. 대기 중의 이산화탄소의 농도 증가는 표층 해양을 산성화시켜 표층해양 생태계, 나아가서는 지구 전체 생태계에 악영향을 미치게 될 것으로 보인다. 이산화탄소 배출량을 줄이기 위해서 에너지 효율을 높이거나 대체 에너지를 이용하는 등의 완화 기술이 동원 되고 있다. 그러나 현재 세계 에너지 수요의 약 85%가 화석연료로 충당되고 있기 때문에, 화석연료 이외의 대체에너지원으로 급격히 전환한다면 세계 경제에 엄청난 충격이 올 것이다. 다행히도 최근 이산화탄소를 포집하여 지질구조에 격리하는 기술이 개발단계를 지나 실용화단계로 성숙하였다. 이 방안으로 단기간에 온실기체의 대기로의 배출량을 대규모로 줄일 수 있다(이상 2005년 런던협약 과학그룹회의록에서 발췌). 우리나라의 경우는 이산화탄소를 격리시킬 수 있는 장소는 육상면적이 작고 인구 밀도가 높아서 육상보다는 해양저 지질구조가 선호될 수밖에 없을 것으로 보인다. 해양 이용은 해양의 특성상 런던협약 등의 국제적인 규제를 받게 된다. 본고는 해저 지질 구조에 대한 이산화탄소의 격리 관련 기술 및 제도의 국제동향을 우리나라 입장에서 예비적으로 검토하였다.

Abstract – Anthropogenic emissions of greenhouse gases, particularly carbon dioxide(CO₂) which arises mainly as wastes from the fossil fuel burning processes, are causing global warming. The effects of global warming become increasingly felt all over the world including sea level rise and extreme weather. The more direct consequences of the elevated atmospheric CO₂ on the ocean is the acidification of the surface ocean which brings a far reaching adverse impact on the life at sea and probably on the whole ecosystem of the planet. Improvement in energy efficiency and use of alternative energy sources are being made to reduce CO₂ emissions. However, a rapid transition to alternatives seems unachievable within a few decades due to the constraints on the associated technology and socio-economic factors in the world, since fossil fuels make up approximately 85% of the world's commercial energy demands. It has now been recognized that capture and geological sequestration of CO₂ could significantly reduce its emissions from fossil fuel utilization and therefore provides the means to rapidly achieve large reductions in CO₂ emissions(excerpts from London Convention, LC/SG 28, 2005). In Korea, well-developed sedimentary basins are spread over the vast continental shelf and slope regions, whereas, the land is densely populated and limited in area. Consequently, the offshore area is preferred to the land for the sites for geological sequestration. The utilization of the offshore area, however, may be subject to international agreements including London Convention. In this paper, the recent trends in technologies and regulations for CO₂ capture and geological sequestration are described to encourage its applications in Korea.

Keywords: Carbon dioxide(CO₂)(이산화탄소, CO₂), Sequestration(격리), Sea(해양), Geological Structure(지질구조), London Convention(런던협약)

*Corresponding author: ghhong@kordi.re.kr

1. 배 경

우리는 아침에 천연가스를 이용하여 밥을 짓고, 휘발유나 경유로 움직이는 자동차를 타고 직장에 출근하고, 석유나 석탄을 원료로 하는 전기로 실내조명을 하고 냉방을 하며 냉장고에 식품을 신선하게 저장한다. 참고로 배기량 1,800cc 급 자동차는 1 km 주행하는 데 약 200 g의 이산화탄소를 배출한다(London Metro, 2005년, 5월 27일자, Albrecht [2001]). 이러한 에너지 사용 없이는 현대 문명 자체가 존재할 수 없다. 우리나라 전기 총생산은 1961년의 1,772,991 MWh에서 2004년의 327,180,369 MWh로 185배 이상 증가하였다. 2004년 현재 발전을 위해서 화석연료가 44.4%, 원자력이 40.0%, 수력이 0.9%, 기타 14.7%가 사용되고 있다(한국전력공사 <http://www.kepco.co.kr>), 즉 이산화탄소를 배출하는 발전이 거의 절반을 차지하고 있다. 우리나라의 총 이산화탄소 배출량은 2005년에는 506 백만 톤이 될 것으로 보고되고 있다. 이는 인구 일인당 평균 약 10톤의 이산화탄소를 배출하는 셈이다(산업자원부 자원정책과 통계 원용, <http://www.kepco.co.kr>). 전세계적으로 2002년 기준 총 이산화탄소 배출량은 25,575 백만 톤(6.9GtC)이고(http://cdiac.esd.ornl.gov/trends/emis/tre_glob.htm), 이 배출량을 일인당 배출량으로 환산하면 약 3.7 톤/년이다. 대기와 접하고 있는 해양은 대기에 배출된 이산화탄소의 약 절반가량을 흡수하고 있다. 이렇게 해양은 대기 중의 이산화탄소의 증가를 억제하여 그 동안 지구온난화를 완화하여 왔으나 이로 인하여 해수면 상승, 약기상의 증가로 인명, 경제적 손실이 증가하고 있고, 또한 표층해양이 산성화되고 있어 그 피해가 기시적으로 나타나고 있다. 인위적인 지구온난화의 가장 큰 요인은 온실기체의 배출이다.

일반적으로 원료물질을 사용하고 난 후 발생한 폐기물은 유해물질제거, 감량 등 처리공정을 거친 후 우리 주위 환경에 최종적으로 처분하게 된다. 폐기물을 처분하면 환경에 피해가 오게 되어 있다. 따라서 처분으로 인한 환경영향을 최소화하기 위한 폐기물관리 전략의 우선순위는 폐기물의 생산 방지, 생산지 재활용에 두고, 그 다음으로 원지 재활용, 유해성분의 파괴, 유해성분의 감축, 그리고 최종적으로 모든 방안이 소진된 후에 불가피하게 환경에 처분하는 순서이다. 즉 폐기물의 환경에 대한 처분의 수요를 줄이는 것이 폐기물관리의 기본전략이다. 환경에 대한 처분이란 이산화탄소의 경우는 대기로의 방출이다. 이산화탄소의 경우는 생물독성이 현저하지 않고 해양에 대한 지식이 부족으로 그간 처분에 따른 환경영향이 간과되어왔다.

1.1 이산화탄소에 관한 지구과학적 사실

이산화탄소는 지구 표면의 모든 생명과정에 포함되어 있고, 기후계에서도 중요한 역할을 하는 물질이다. 이산화탄소에 관한 사실 중 본 주제에 관련된 내용을 요약하면 다음과 같다. 산업혁명(약 1750년대) 이전에는 이산화탄소는 대기 중 함량이 280 ppmv 이었고, 그 이후로 증가하여 1959년에는 316 ppmv, 1999년 367 ppmv, 2004년 377 ppmv로 증가하고 있고 최근에는 매년 1.4 ppmv

증가하고 있다. 현재의 대기 중 이산화탄소 함량은 과거 42만년 혹은 과거 2천만년 동안에 존재하였던 것 보다 더 높은 수준으로 보고 있다. 화석 연료 연소로 인한 이산화탄소 배출량은 약 23 기가톤(Gt, 10⁹t)이다. 한편 이산화탄소는 산업혁명 이전에는 대기와 해양 간에 거의 평형을 이루고 있었고 실제로 해양은 작은 배출원이었다. 대기 중의 이산화탄소가 해양보다 더 많으면 해양으로 흡수된다. 해양은 현재 대기로 배출된 이산화탄소의 절반을 흡수하고 있다(Sabine et al.[2004]). 해양이 이산화탄소를 흡수하는 양은 해양순환과 해양의 탄산염화합 상태에 의하여 결정된다. 대기 이산화탄소가 증가하면, 해양으로 흡수되는 이산화탄소 량은, 해양의 탄산염계의 이산화탄소에 대한 완충용량이 감소하고, 표층수와 심층수간의 혼합률이 감소하기 때에, 줄어들게 된다.

20세기에 지구평균기온은 약 0.6°C 증가하였다. 눈과 빙하의 피복면적도 크게 감소하였다. 평균해수면도 약 15 cm 올라가고 해양 열함량도 증가하고 있다. 그 외 강수 유형, 구름피복, 극 기온 출현빈도수, 엘니뇨-남부진동현상, 온난삽화(episode) 기간의 출현 빈도와 기간, 극한 한발과 홍수의 강도와 빈도 등 극 기상이 모두 증가하고 있다(IPCC [2001]) 지구온난화는 또한 연안지역(육역과 해역)과 해양생태계에 큰 위협을 주고 있다. 연안지역의 피해로는 범람의 증가, 해안 침식 가속, 습지 손실, 해수 침투, 폭풍의 강도와 빈도 증가 등이다. 현재 전 세계 해양은 매일 25 백만 톤의 이산화탄소를 흡수하고 있다. 이렇게 많은 양의 이산화탄소가 해양에 녹으면 해수의 수소이온농도(pH)가 낮아지게 된다. 현재의 해양 표층의 pH는 산업혁명(1750-1850년)이전보다 0.1 단위 낮아져 있다. 즉 수소이온이 30% 증가한 것이다. 따라서 “현재 상태로” 이산화탄소를 배출하게 되면 2100년에는 대기 중의 이산화탄소 농도가 540~970 ppmv가 될 것으로 예상되고, 약 800 ppmv가 된다고 하면 표층해양의 용존무기탄소는 약 12% 증가하고, 탄산이온은 60% 감소하고 pH는 0.4~0.7 단위 감소하게 된다. 2050년경에는 이로 인한 산호, 조개 등 탄산칼슘 구조를 가진 생물들의 피해가 가시화될 것으로 예상된다. 특히 탄산염광물을 형성하는 해양식물의 일차생산성은 거의 절반정도 감소될 것이며(Feely et al.[2004]), 식물에서 시작하는 먹이연쇄에 물려있는 모든 해양생물에 큰 영향을 필연적으로 미치게 될 것이다. 최근에 밝혀진 표층해양의 산성화의 증거는 기후변화예측의 불확실성을 둘러싼 논쟁을 사실상 종결시켰다.

1.2 완화 방안

이러한 지구온난화로 인한 지구전반에 걸친 환경피해를 완화시키려는 노력이 여러 각도에서 진행 중이다. 그러나 현재 세계 상업적 에너지의 약 85%가 화석연료로 충당되고 있으므로, 석유, 천연가스, 석탄을 다른 에너지원으로 급속히 대체하는 것은 세계 경제에 매우 큰 충격을 주지 않고는 달성하기에는 어려울 것이다. 물론 에너지 효율을 높이고 대체 에너지를 이용하는 조치들은 배출을 줄이는 데 도움이 될 것이나 당장 효과적인 수단이 되기는 어려워 보인다.

한편 이산화탄소를 대기로 배출하지 않고 지구상 다른 곳으로 격리하는 방안(CO₂ Capture and Storage or Sequestration, CCS) 들이 꾸준히 개발되고 있다(IPCC, 2005). 개발된 방안 중에서 해양을 대상으로하는 방안은 심해에 이산화탄소를 격리시키는 방안과, 해저 지질구조에 격리시키는 방안이 개발되어왔다. 심해양은 이산화탄소를 격리시킬 수 있는 지상의 가장 큰 저장고이기는 하나 해양에 대한 직접적인 환경 영향 가능성 때문에 상업적 규모는 현재 고려되고 있지 않고 있고, 기술적 측면에서 보면 아직 연구단계이다(Bacastow et al.[1995]; Nakashiki [1997], IPCC, 2005). 현재로서는 환경피해가 거의 없는 가장 현실적이고 방안은 이산화탄소를 포집하여 지질구조에 격리(geological storage 혹은 geological sequestration)시키는 것으로 보인다.

이 사업은 특히 해양저의 지질구조를 이용하는 경우에는 필연적으로 국제적인 협력이 필요하다(Ametistova et al. 2004). 이에 대한 구체적인 국제적인 협의기구는 국제연합 기후변화협약(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)과 탄소격리 지도자포럼(Carbon Sequestration Leadership Forum, CSLF)이고 규제기구로는 폐기물 및 기타 물질의 투기로 인한 해양오염 방지 협약, 일명 런던협약 1972과 그 1996 의정서(Convention on the Prevention of Marine Pollution by Dumping of Wastes and Other Matter, 1972)와 국제연합해양법협약(United Nations Convention on the Law of the Sea, 1982 UNCLOS)이 있다. 이 중에서도 폐기물의 해양투기에 관한 국제 규범인 런던협약의 역할이 중요하고 현재 심도있게 이산화탄소의 해양저 지질 구조 격리에 대한 논의가 진행 중이다. UNCLOS는 투기 관련 국제규범을 준수할 것을 계약국에 요청하고 있으며 여기서의 국제규범이란 런던협약을 의미한다.

국제 규제 기구에서 논의한다는 사실은 이산화탄소의 해저 지질 구조 격리가 상당히 현실적인 기술로 등장하였음을 의미한다. 그러므로 현 시점에서 정부는 이산화탄소의 해저 지중격리를 위한 투자를 하기 전에 이러한 방안에 대한 국제적인 규범의 실행 타당성을 검토하고 후발주자로서 취할 전략을 수립하는 것이 현명할 것이다. 본 소고에서는 이산화탄소의 포집과 지질구조 격리에 대한 기술 현황을 정리하고, 국제 규범을 동향을 살펴 우리 입장을 정리하는 기본 자료를 구축하며, 우리입장에서 가용한 지질구조의 존재 여부에 대한 조망을 예비적으로 하고자 한다.

2. 이산화탄소 포집 및 지질구조에 대한 격리(CCS) 방안

2.1 이산화탄소 포집

포집대상이 되는 이산화탄소는 연소 후 배출가스(보일러, 히터, 터빈, 발전소, 가스처리공장, 화학공장)로써 이중 발전소에서 배출하는 이산화탄소는 세계적으로 총 이산화탄소 배출량의 1/3을 차지한다. 배기가스에 포함된 이산화탄소를 분리하는 기술이나 연소 전 이산화탄소 제거(precombustion decarbonization) 기술은 유전

에서 천연가스의 품질을 높이기 위해 불순물인 이산화탄소를 제거하는 데 이미 사용하고 있으며, 산소환경에서 연료를 연소하여 질소산화물의 발생을 막고 이산화탄소와 물을 생성하는 옥시퓨엘(oxyfuel) 연소에서의 이산화탄소 포집 기술도 일부는 실용화되어 있다. 따라서 이산화탄소 포집 기술은 현재에도 존재하는 기술이며 향후 더욱 개선될 것이다(www.cslforum.org). 우리나라에서도 과학기술부 지원으로 이산화탄소 저감 및 처리기술개발사업단이 관련기술을 개발하고 있고(http://www.cdrs.re.kr) 해양수산부 주관의 해양공간에 대한 격리방안도 추진되고있다. 포집한 이산화탄소를 수송하는 방안도 심도있게 검토되고 있다(예, Svensson et al. [2004]).

2.1 이산화탄소의 지질구조 격리

이산화탄소를 격리시킬 수 있는 지질구조는 심부대수층, 고갈 유가스전, 심부석탄층 등이다. 최근 Chemical Geology의 특집호로 이산화탄소격리에 대한 지화학적 측면이 다루어졌다(Oelkers and Schott [2005]). 격리하는 방법은 주로 이산화탄소를 염용액으로 채워져있는 대수층(brine filled aquifer)이나 빈 유전층(depleted oil field reservoir)에 주입하면, 이산화탄소는 그 지질구조에 (i) 유체역학적(hydrodynamic)으로, (ii) 용해(solubility), 그리고 (iii) 광물적으로 끌어들여(mineral trapping)되어 저장된다. 유체역학적인 트랩은 이산화탄소를 기체나 초임계유체 형태로 투과성이 낮은 덮개암(cap rock) 아래에 저장하는 것이다. 용해도 트랩은 염 수용액이나 석유를 포함한 유체에 이산화탄소를 용해시켜 붙잡아 두는 것이다. 광물트랩은 탄산염광물의 침전을 만들거나 석탄에 흡착시키는 등 고상으로 이산화탄소를 결합시키는 것이다. 이중 용해도 트랩이 가장 많이 이산화탄소를 잡아둘 수 있는 것으로 평가되고 있으나(Oelkers and Schott [2005]), 지역적으로 염수의 화학조성, 압력 등 조건에 따라 다를 수 있을 것이다. 또한 주입된 이산화탄소는 공존하는 고체와 반응할 수 있다. 예를 들면 이산화탄소를 석탄층에 주입하면, 석탄층은 많은 경우에 메탄이 흡착되어 있는데, 이산화탄소가 석탄에 흡착된 메탄을 유리시키고 대신 흡착되기 때문에, 유리된 메탄을 회수하여 사용할 수도 있다. 따라서 석탄층에 이산화탄소를 주입하는 방법은 일거양득이 될 수 있다. 광물적 트랩은 탄산염 광물의 형성으로 이산화탄소를 격리하는 것으로 비탄산염 광물, 주로 규산염 광물로부터 금속 양이온 용해와 탄산염 광물의 형성이다. 이산화탄소를 지질구조에 저장하는 장점은 매우 크다. 지중에 주입된 이산화탄소는 대기로부터 매우 긴 시간동안 격리된다. 현재 지구상에서 확인된 심부 염용액으로 채워진 퇴적구조와 채광 후 비워진 탄화수소 지층(reservoir)은, 현재와 같은 양으로 연간 이산화탄소가 배출된다고 가정하면, 거의 일천년 동안의 배출량을 격리시킬 수 있을 만큼 충분히 크다. 즉, 지구온난화를 단기적으로 완화시킬 수 있는 방안이 될 수 있다.

2.2 지질구조 격리의 환경 불확실성

지질구조에 격리된 이산화탄소는 수백만 년 동안 안전하게 대

기나 해양으로부터 격리될 것으로 판단되나, 사업 시행시 지질구조에 격리된 이산화탄소 중 일부는 그 저장고에서 누출되어서 해양 및 대기로 배출될 가능성은 희박하지만 존재할 수 있다. 이는 모든 사업에서 반드시 감안하여야 하는 부분이다. 이러한 누출은 이산화탄소 주입으로 인한 산성의 고이산화탄소유체 때문에 덮개암이 용해됨으로써 더 가속될 수도 있다. 또한 주입구 주변에 2차 광물이 침전되어 지질 구조의 투수성(permeability)을 감소시켜 추가적으로 이산화탄소 주입을 어렵게 만들 수도 있다. 이러한 환경 불확실성을 감소시키는 제도적인 장치가 마련이 되고 있다(4장 참조).

2.3 이산화탄소 포집 및 해저 지질 구조 격리 사례

천연가스로부터 포집한 이산화탄소를 지질 구조에 격리시킨 최초의 사례는 1990년에 시작된 슬라이프너 북해 유전(Sleipner North Sea licence)의 스테트오일(Statoil)과 그 합작사들이다. 1990년 북해 서부 슬라이프너(Sleipner West offshore gas-condensate field) 천연가스유전을 개발해온 스테트오일은 작은 규모의 기획팀을 구성하여 천연가스에 약 9% 포함된 이산화탄소 - 제거하지 않은 채로는 시장에 판매할 수 없음 - 를 포집하여 외해에서 제거하는 사업을 구상하였다. 제거되어야 할 이산화탄소는 약 1백만 톤으로 당시 노르웨이 이산화탄소 총 배출량의 3%에 해당하는 큰 양이었다. 당시 노르웨이 의회에서 기후변화와 국가 탄소세(1991년에 도입되었고 현재는 이산화탄소 1 톤당 약 미화 40불임)가 논의되고 있음에 자극을 받아서, 포집한 이산화탄소를 슬라이프너가 개발한 해저 심부유전에 위치한 염대수층(saline aquifer)에 주입하여 격리시키는 방안을 제안하게 되었다. 현장실험 결과 그 방안은 가능한 것으로 판명되었다.

1996년 스테트오일사는 외해 이산화탄소 포집 설비와 세계 최초의 해저면 800 m 하부에 있는 염대수층인 우치라 층(Utsira formation)에 대한 이산화탄소 격리 사업을 시작하였다. 1996년부터

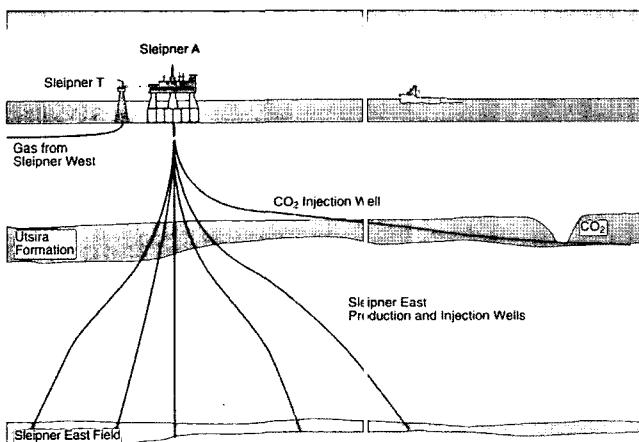


Fig. 1. 이산화탄소 분리 및 주입 단면도(도면은 실제 축척이 아니며, 해양의 깊이는 약 800 m이고 우치라(Utsira) 층은 해저면 하 약 800 m에 위치함(스테트오일 제공, LC.2/Circ.439).

2004년까지 매년 1백만 CO₂ 톤을 주입하고 있고, 최대 22 G CO₂ 톤을 격리시킬 수 있는 것으로 평가되고 있다(Portier and Rochelle [2005]) 슬라이프너 티 플랫폼(Sleipner T platform)에서 사용된 이산화탄소 포집 공정은 표준 아민(MDEA) 공정이다. 이 대규모 공정을 육지로부터 250 km 떨어진 북해 중앙부에 위치한 해상 플랫폼에 설치할 수 있게 작게 제작하는 것은 상당히 어려운 일이었다. 이산화탄소를 주입하고 격리하는 사업은 포집된 이산화탄소를 대기 중에 배출하는 경우보다 80백만 불의 설비가 더 필요하였다.

3. 각국의 동향

3.1 미국

미국은 2002년 대통령이 향후 10년 동안 미국에서 배출되는 온실가스를 18% 감축하는 목표를 선언하였다. 이 목표를 달성하기 위해서는 에너지 효율 개선, 저탄소 연료 사용 증가, 그리고 온실가스의 포집, 격리, 완화의 3가지 방안을 추진하고 있다(Carbon Sequestration, National Energy Technology Laboratory, <http://www.netl.doe.gov>). 미국 에너지부의 탄소격리프로그램(Carbon Sequestration Program)은 지질 구조에 영구적으로 이산화탄소를 격리하기 위한 기술 개발을 2012년까지 완료할 계획을 수립하고 있다. 기술 개발에는 경제성, 안전성, 안정성, 영구성, 대중 수용성, 현장 시범사업 등을 포함하고 있다. 기술개발이 완료된 후 2012년부터는 상업적 규모로 지중 저장을 실시한다는 계획이다(Klara et al.[2003]). 그리고 제도적인 장치도 활발히 검토하고 있다(예, Bergman et al.[1997]; Heinrich[2002]).

3.2 영국

2003년 초에 영국 정부는 향후 50년에 걸쳐서 이산화탄소 배출량을 현재(2003년)의 수준에서 60%를 감축한다는 에너지 백서를 발간하였다. 즉 배출량을 2000년도의 550 백만 톤에서 2050년에는 240 백만 톤으로 감축하려는 것이 목표이다(Parliamentary Office of Science and Technology POSTNOTE 238, March 2005). CCS 방법은 원자력 발전이 상당부분을 차지한다고 하면 약 12%, 원자력발전이 수용되지 않을 경우에는 약 50%를 충당하여야 할 것으로 전망하고 있다. 그리고 전 세계적으로도 CCS방안이 전기 생산에서 발생하는 이산화탄소 배출량의 약 40% 이상을 격리시켜 줄 수 있을 것으로 전망하고 있다.

3.3 캐나다

캐나다의 교토 의정서 목표는 온실가스(GHG) 배출을 2008-2012년까지 1990년의 6%를 감축하는 것이다. 이 목표를 달성하기 위하여 여러 가지 방안들이 추진되고 있다. 그러나 앞으로 10년 동안 여전히 석탄 발전소가 가동되어야 한다면 상당한 감축을 이행하기 위한 유일한 방안은 지중 저장으로 보고 있다. 바람직한 지질구조는 깊이가 지하 800 m 이상이어서 이산화탄소가 초임계로 존재할 수 있으며 공극이 많은 투수성 저장고가 치밀한 덮

개암으로 덮여있는 있어야한다. 이렇게 초임계 상태를 유지하면 기체나 액체 이산화탄소 보다는 작은 면적에 많은 이산화탄소를 저장할 수 있기 때문이다(Shafeen et al.[2004]). 서부 캐나다의 한 곳의 염대수층의 저장용량은 100 Gt CO₂ 인 것으로 추정하고 있다(Bachu and Adams[2003]).

3.4 호주

호주의 온실기체 목록을 보면 1999년 기준으로 순 배출량은 458.2 백만 톤 CO₂이고 이중 56.7%인 259.8 백만 톤이 점원(발전소)에서 배출된다. 이 점원에서 배출되는 이산화탄소가 격리의 대상이 된다. 호주 대륙에서는 최근 조사결과 매년 총배출량의 약 1/4인 100-115백만톤의 이산화탄소를 지하 지질구조에 저장할 수 있고, 환경적으로 지속가능한 구조(Environmentally Sustainable Sites for CO₂ injection, ESSCI)를 65개를 규명하였다(AUSGEO News, 2003, Issue 69).

3.5 일본

일본은 1991년 이전부터 이산화탄소를 대기로부터 격리하는 방안에 대한 연구개발사업을 진행하여왔고 여기에는 해양에 대한 저장방안도 포함하고 있다(Handa and Ohsumi[1995]). 여기서는 본 논설의 주제에 맞추어 지질구조에 대한 격리사례를 소개한다. 지구 를 위한 혁신기술연구소(Research Institute of Innovative Technology for the Earth, RITE) 중심으로 이산화탄소 완화방안을 강구하고 있다. 지중격리 시범사업으로 Minami-Nagaoka 석유가스전에 한 개의 주입공을 설치하여 2003년 7월부터 2005년 1월까지 총 10,400 톤 이산화탄소를 지하 1100 m에 위치한 60-m 두께의 사암층(Haizume Formation) 중 12 m 두께의 투수대에 주입하였다. 그리고 3개의 관측공을 설치하여 주입한 이산화탄소의 거동을 감시하였다. 2004년 10월23일 진도 6.8 규모의지진이 Niigata지역을 강타하였으나 이로 인한 이산화탄소 누출은 일어나지 않았다(Yamagata [2005]). 이 곳에서의 이산화탄소 최대저장량은 23.3 mol CO₂/kg H₂O이고 이중 광물저장(mineral storage)는 21.3 mol CO₂/kg H₂O로서 90%를 차지한다(Zwingmann et al.[2005]). 일본정부의 목표는 700억 CO₂ 톤을 지중격리하는 것이고 이는 2001년 일본의 총 이산화탄소 배출량의 50배에 해당된다.

4. 이산화탄소 해저 지질구조 격리에 대한 국제 및 국내 제도 예비 검토

이산화탄소의 지질 격리 사안을 직접적으로 다루는 단일 국제 조약이나 국가법은 아직 없다. 그 이유는 이 사안이 새로운 것이고 또한 국제적으로 그간 우선순위에 속하는 문제는 아니었다. 그럼에도 불구하고 여러 국제협약들이 서문에서 언급한 바와 같이 이 사안과 연관된다. 그중에서도 해저 지질 구조에 대한 이산화탄소 격리 사업에 중요한 역할을 하게 되는 런던 협약을 중심으로 살펴보고자 한다.

4.1 폐기물 해양 투기 규제 제도 발달사

해양오염에 대한 국제적인 관심은 대형 해난사고인 1967년의 Torrey Canyon 사고나 1978년의 Amoco Cadiz 사고와 같은 대형 유조선의 기름 유출사건이나 1977년 북해에서의 Ekofisk, 1979년 멕시코만에서의 Ixtoc 사고 등 대륙붕에서의 분출사고등과 같은 재난을 계기로 등장하였다. 특히 1989년 알래스카 연안에서 Exxon Valdez호의 좌초로 인해 약 26만4천 배럴의 원유가 유출되어 국제사회에 충격을 준 바 있다. 그러나 해양오염은 이러한 선박사고로 인한 오염뿐만 아니라 육지로부터의 오염, 대기로부터의 오염, 해저탐사 및 개발로 인한 오염, 심해저개발로 인한 오염, 폐기물의 투하로 인한 오염 등 여러 가지 근원이 있다(Salmon[1989]). 이러한 오염원 중에서 폐기물의 투기로 인한 오염은 1960년대까지만 해도 국제적인 관심을 받지 못했으며, 폐기물의 해양투기는 상대적으로 저렴하고 간편한 폐기물 처리 방법이었다. 그러나 각국의 산업화에 따라 발생한 핵폐기물, 폐기된 군사장비, 준설물질, 산업폐기물 등의 해양투기로 인한 해양오염이 심각하게 되어 이에 대한 국제적인 규제조치가 취해지게 되었다.

폐기물 투기에 대한 국제적 규제는 1958년에 개최된 제1차 유엔해양법회의에서 논의되었으나 규제 대상이 핵폐기물에만 국한되어 매우 한정적인 성격을 띠었다. 즉, 1958년 공해에 관한 협약(Convention on the High Seas, Geneva, 29 April 1958, 450 UNTS 11)은 제25조 제1항에서 모든 국가들로 하여금 국제기구가 제정한 기준과 규칙을 고려하여 핵폐기물의 투기로 인한 해양오염을 방지할 조치를 취하도록 요구하고 있다. 그 후 규제대상은 핵폐기물뿐만 아니라 모든 유해·위험물질까지로 확대되었는데, 투기에 관한 최초의 보편 조약인 런던 협약(Convention on the Prevention of Marine Pollution by Dumping of Wastes and Other Matter, 26 UST 2403, TIAS 8165; 1046 UNTS 120; 11 ILM 293)은 폐기물을 세 가지 범주로 구분하고 다루고 있다. 한편 유럽의 12개국 1972년에 유럽지역에서 투기를 규제하기 위한 지역협약을 체결한 이후, 여타 지역에서도 지역협정을 통해 해양투기를 규제하고 있다(Johnston[1981]). 그리고 1982년 유엔해양법협약(UN Convention on the Law of the Sea, 1982)은 규제기준과 같은 기술적인 내용은 직접 규정하지 않고, 국제규범을 준용 하도록 하고 있고, 투기로 인한 해양오염을 방지, 감소, 통제하기 위하여 국내법령을 제정하고 집행하는 등 국가들의 일반적인 권리와 의무에 대해서만 규정하고 있다. 이하에서는 1972년 런던 협약과 1996년 개정의정서를 상술하고 이산화탄소를 해저 지질구조에 저장하는 것이 가능한가 여부를 검토한다.

4.2 1972년 런던 협약

4.2.1 의의

1972년 10월 런던에서 개최된 폐기물의 해양투기협약에 관한 정부간회의에서 폐기물 기타 물질의 투기에 의한 해양오염의 방지에 관한 협약(런던 협약)이 체결되어 1975년 8월 30일 발효하여 2005년 6월 현재 한국 등 81개국이 가입하고 있다. 전문과 22개

조문 및 3개 부속서로 이루어진 런던 협약은 체약국으로 하여금 모든 해양오염원을 효과적으로 규제하고 폐기물 및 기타 물질의 투기에 의한 해양오염을 방지하는 것을 그 주요 목적으로 한다. 여기에서 투기라 함은 선박·항공기·플랫폼 또는 그 밖의 인공해양구조물로부터 폐기물이나 기타 물질의 고의적인 해상폐기, 선박·항공기·플랫폼 또는 그 밖의 인공해양구조물의 고의적인 해상폐기를 의미한다(제3조 1(a)). 다만 선박 등의 통상적인 운용에 수반되는 폐기물 등의 해상폐기와 폐기가 아닌 다른 목적을 위한 물질의 배치는 투기에 해당하지 않는다(제3조 1(b)). 그리하여 선박의 정상적인 운용과정에서 발생하는 폐기물과 해저광물개발에서 발생하는 폐기물의 처분은 런던 협약의 규제 대상이 아니다.

4.2.2 해양투기 규제대상 및 방식

런던 협약은 투기 규제대상 폐기물을 세 가지 범주로 구분하여 다루고 있다. 첫째 범주에 속하는 것은 소위 블랙리스트(black list)로 구분된 유기할로겐화합물, 수은, 카드뮴, 유류, 플라스틱 및 방사성 폐기물 등 부속서 1에 규정된 물질로서 해양투기가 금지된다(제4조 1(a)). 두 번째 범주에 속하는 것은 다소 독성이 덜한 물질로서 비소, 베릴륨, 크롬, 구리 납, 니켈, 바나듐, 아연 및 이들의 화합물과 유기실리콘 화합물, 살충제 등 부속서 2에 규정된 물질이다. 이 물질은 소위 그레이 리스트(grey list)로 구분되며 사전에 특별허가를 받지 않으면 투기가 허용되지 않는다(제4조 1(b)). 그리고 블랙리스트나 그레이 리스트에 속하지 않는 모든 폐기물이 세 번째 범주에 속하는데, 사전에 일반적인 허가를 받은 경우에만 투기가 허용된다(제4조 1(c)).

4.2.3 협약의 문제점과 개선

런던 협약은 집행에 있어 다소간 분명하지 못한 점이 있었으나, 이 문제는 일반적인 관습법 규칙에 의해 규율된다고 할 것이다. 즉, 연안국이 자국의 영해나 배타적 경제수역에서 불법적으로 폐기물을 투기하는 선박과 필요한 허가를 받지 않고 투기의 목적으로 연안국에서 출항하려는 선박에 대해 필요한 조치를 취할 수 있다. 그러나 공해상에서의 집행권은 전적으로 기국에 있다고 해야 할 것이다.

런던 협약은 발효후 여러 차례 개정을 거쳐 투기가 금지되는 폐기물을 추가하거나 규제방식을 엄격히 하고 있다. 가장 중요한 변화는 1993년의 협약 개정을 통해서 이루어졌는데, 산업폐기물 및 하수오니의 해상소각을 금지하고, 투기허용심의 대상 물질을 6가지로 예외적으로 인정하고, 해상투기가 금지되는 방사성 폐기물을 모든 종류의 것으로 범위를 확대하였다. 그럼에도 불구하고 1990년 이래 런던 협약당사국들은 협약을 근본적으로 개정할 필요성을 공감하여, 1996년에 예방적 접근방법을 바탕으로 한 의정서를 채택함으로써 협약을 전면적으로 개정하였다. 의정서는 런던 협약을 완전히 고쳐 쓴 실질적인 새로운 협약으로 볼 수 있다.

4.3 1996년 의정서

4.3.1 의의

1996년 의정서는 몇 가지 예외적인 물질을 제외한 모든 물질의 투기를 금지하고, 해상소각을 완전히 금지하며 투기나 소각을 위

한 폐기물의 수출을 금지하는 등 런던 협약에 비해 투기를 엄격히 규제하고 있다. 그리고 투기의 범위도 런던 협약보다 더 넓게 정의하고 있는데, 선박·항공기·플랫폼 또는 그 밖의 인공해양구조물로부터 폐기물이나 기타 물질의 해저 및 그 지하에의 저장과 고의적인 처분 목적의 플랫폼 또는 그 밖의 인공해양구조물의 현장 유기 혹은 적재행위(abandonment or toppling at site)를 해양투기에 추가하고 있다. 그리하여 본 의정서 하에서는 폐기물을 해양에 처분하는 것뿐만 아니라 해저나 그 지하에 저장하는 행위도 해양투기의 범주에 해당하고, 플랫폼이나 인공해양구조물을 현장에 방치하는 행위도 해양투기에 해당되어 규제대상이 된다. 의정서는 런던 협약의 15개 당사국을 포함하여 26개국에 비준한 때로부터 30일후에 발효하게 되는데(의정서 제25조), 2005년 6월 현재 22개국에 비준하였다. 의정서가 발효하는 경우에 이를 비준한 런던 협약 당사국들 간에는 이 의정서가 런던 협약을 대체하게 된다(제23조).

4.3.2 의정서의 주요 내용

의정서는 당사국들이 준수할 일반적 의무로서 예방적 접근방법과 오염자 부담원칙을 규정하고 있다. 즉, 폐기물 등의 투입과 그 결과 사이에 인과관계를 입증할 결정적인 증거가 없더라도 해양 환경에 유입된 폐기물 등이 해를 야기한다고 믿을만한 사유가 있을 경우에는 당사국들은 폐기물의 투기로부터 환경을 보호하기 위해 적절한 예방조치를 취해야 한다(제3조 1). 그리고 해양투기나 해상소각을 허가 받은 자가 오염방지 및 규제활동에 필요한 비용을 부담하도록 하는 관행을 증진하도록 하고 있다(제3조 2). 또한 당사국은 피해나 피해 가능성이 다른 환경으로 직접 혹은 간접적으로 이전되거나 다른 형태의 오염으로 변형되지 않도록 조치를 취하여야 한다(제3조 3).

해양투기의 규제와 관련하여 의정서는 런던협약 1972의 부속서 1(11)에 열거한 물질의 목록을 승계하여 부속서 1에 열거된 준설물질, 하수오니, 생선폐기물 등 7가지 폐기물을 제외한 모든 폐기물의 해양투기를 금지하고 있다(제4조 1.1). 투기가 허용되는 폐기물인 경우에도 선박 및 플랫폼 혹은 그 밖의 해상인공구조물과 강철, 철, 콘크리트 및 이와 유사한 무해물질로 된 대형 구조물은 부유 파편을 야기하거나 해양오염을 유발할 수 있는 물질을 최대한으로 제거하고 투기되는 물질이 어업이나 항해에 심각한 장애를 주지 않는 경우에 투기를 심의할 수 있도록 엄격히 제한하고 있다(부속서 1.2).

런던 협약이 초기에는 투기가 금지된 폐기물을 규정하고 그 이외의 폐기물의 투기는 허용하는 방식을 취하였으나, 1993년 개정을 통하여 모든 산업폐기물의 해양투기를 금지하고 예외적으로 일부 폐기물의 투기만 허용하고 있는 데, 의정서가 모든 물질의 해양투기를 원칙적으로 금지하고 의정서에 규정된 일부 폐기물의 투기만을 허용하는 방식을 취하여 런던협약과 내용상으로는 거의 같다. 그리고 투기가 허용되는 경우에도 허가를 받도록 하고 있으며, 환경적으로 보다 바람직한 대안이 있으면 해양투기를 피하도록 특별한 주의를 기울이도록 하고 있다(제4조 1.2). 1996의정서는 체

약국의 의무사항, 준수 기구, 폐기물 평가체제, 분쟁 조정을 구체적으로 명문화하여 강화되었으나 기술적으로는 런던협약에 이미 포함된 내용이다.

4.3.3 전망

1996년 의정서는 이와 같이 런던 협약보다는 해양투기를 더 엄격하게 규제하고 있다. 그리고 당사국의 국내기관이 투기를 허가하는 경우에는 부속서 2에 규정된 폐기물에 대한 평가체제 절차에 따르도록 하고 있다. 이러한 평가를 통하여 투기 예정 물질이 투기가 가능한가의 여부를 판단하게 함으로써 궁극적으로 폐기물의 해양투기를 점차 감소시키는 역할을 할 것으로 기대된다.

4.4 해저지질구조에 이산화탄소의 격리

4.4.1 의의

현재 국제사회는 지구온난화를 방지하기 위한 노력을 경주하고 있는데, 온난화로 인한 피해를 막기 위해서는 금세기 동안 이산화탄소 등 온난화물 야기하는 온실기체의 배출을 75~85% 감축해야 한다는 견해도 있다. 각국은 온실기체 감축 노력의 일환으로 이산화탄소를 해양에 격리하여 기후변화를 완화시키는 방법을 강구하고 있다. 1992년 기후변화에 관한 기본 협약(UNFCCC)은 제4.1 조에서 이산화탄소의 처리장으로 해양을 적극적으로 개발할 것을 장려하고 있다. 그러나 폐기물의 해양투기를 금지하고 있는 런던 협약이 이산화탄소의 해양 배출을 허용하느냐에 논란의 여지가 있다. 1999년부터 제21차 런던 협약 당사국회의에서 이산화탄소의 해양처분을 논의하였으나 이것이 산업 폐기물로 간주되는지에 관해 합의할 수 없었기 때문이었다. 그리하여 과학 그룹에서 이 분야의 관련 연구에 대해 계속해서 주시하기로 했다. 해양에 이산화탄소를 격리하는 방법은 여러 가지가 있으나 여기서는 현재 실제 적용 단계에 와 있는 해저지질 구조에 격리하는 방식에 한정하여 국내외법상 가능성을 검토하고자 한다.

4.4.2 런던 협약상 가능성

런던 협약은 부속서 1에 열거된 폐기물이나 기타 물질의 투기를 금지하고 있는데, 이산화탄소가 여기에 해당되는가 하는 문제가 있다. 부속서 1의 11에서는 제조 또는 공정과정에서 발생한 폐기물인 산업폐기물의 투기를 금지하고 있는데, 예외적으로 준설물질, 하수오니, 생선폐기물 또는 산업적 생선가공과정에서 발생한 유기물, 일부 선박·플랫폼 또는 그 밖의 해상인공구조물, 화학적 성분이 해양에 방출될 가능성이 없는 비오염 불활성 지질물질의 투기는 허용된다. 이 규정으로 볼 때 논란의 여지는 있으나 이산화탄소는 산업폐기물의 범주에 속하여 해양투기가 금지되는 폐기물로 분류될 수 있다.

그러나 투기가 금지되는 영역인 해양(sea)은 국가의 내수를 제외한 모든 수역(marine waters)이라고 규정되어 있다(런던 협약 제3조 3). 그리하여 여기서의 해양은 물속(water column)을 의미하므로 해저의 지하에 있는 지질 구조에 이산화탄소를 격리하여 저장하는 것은 런던 협약이 규제하는 해양투기의 범주에 들지 않는

다고 할 것이다.

4.4.3 1996년 의정서상 가능성

1996년 의정서는 투기가 허용되는 일부 폐기물을 제외한 모든 폐기물의 해양투기를 금지하고 있다. 이산화탄소는 투기가 허용되는 폐기물의 범주에 속하지 않기 때문에 해양투기가 금지된다. 더욱이 의정서는 투기의 범위를 런던 협약보다 광범위하게 인정하여 선박·항공기·플랫폼·기타 인공해양구조물로부터 폐기물 및 기타 물질의 해저 및 그 지하에의 저장을 투기로 간주한다(의정서 제1조 4.1). 그리하여 이산화탄소를 지질 구조에 격리하는 것은 1996년 의정서상 금지되는 행위로 봐야 할 것이다. 한편 이산화탄소의 지질구조에의 격리를 연안으로부터 파이프라인을 통해서 수행하더라도 파이프라인은 인공해양구조물의 범주에 속하기 때문에 허용되지 않는 것으로 볼 것이다. 이산화탄소의 지질 구조에의 격리를 가능하게 하기 위해서는 의정서의 개정이 수반되어야 할 것이다.

4.4.4 국내 해양오염방지법상 가능성

한국의 해양오염방지법은 선박과 해양시설등으로부터의 폐기물의 해양투기를 규율하고 있다. 해양오염방지법 제16조는 누구든지 해양에서 선박으로부터 폐기물을 배출하여서는 아니 된다고 규정하여 폐기물의 배출장소를 구체적으로 명시하지 않고 있어 이산화탄소를 해저의 지하에 격리하는 것이 이에 해당되는가 여부가 명확하지 않다. 이산화탄소가 폐기물의 범주에 해당한다고 해석할 경우에 이를 해양에 있는 선박에서 배출하는 행위는 금지된다고 할 것이다. 한편 제34조는 해양시설물등으로부터 폐기물을 해양에 배출하는 행위를 하여서는 아니 된다고 규정하고 있는데, 여기에서 해양에 해저의 지하를 포함하지 않는다고 좁게 해석하면 이산화탄소를 해양시설물등으로부터 해저의 지하에 격리하는 것은 가능하다고 하겠다.

5. 런던 협약의 최근 동향

2004년 11월 제26차 런던협약(LC) 당사국회의에서 영국은 (i) 런던 협약과 의정서의 이산화탄소격리예따른 해양환경에 대한 일관적 입장 수립, (ii) 런던협약과 의정서가 이산화탄소격리 실행에서 UNFCCC와 CSLF와의 파트너십 구축 필요 여부, (iii) 필요하다면, 환경위험성을 총체적으로 평가하는 관점에서 협약과 의정서의 목적에 일치하는 분명한 법적제도하에서 이산화탄소 격리를 규제할 필요를 제기하였다(LC26/6/1). 영국은 대기중 이산화탄소의 증가가 이제는 기온 상승, 해수면 상승, 폭풍의 증가뿐만 아니라 표층해양을 산성화시키게 되어 해양생태계에 악영향이 커지는 사실을 주지하고 이를 완화시키기 위한 대기 중 이산화탄소 함량을 안정시키기 위한 조치들이 교토의정서와 다른 국제 협약이나 합의에서 이미 시행되고 있음을 회의에 상기시켰다. 이러한 조치들에는 에너지 효율을 높이는 방안, 화석연료 의존도 축소뿐만 아니라 이산화탄소포집하여 지질구조에 격리하는 새로운 기술도 포함됨을 지적하였다. 각각의 방안별로 전세계 해양의 산성도 감소와

기후변화의 피해와 관련하여 잠재적 위험과 장점을 심의하여야 할 것이라고 주장하였다. 이산화탄소의 해저 지질구조 격리에 대한 검토는 영국을 비롯한 여러 나라 정부와 산업계, 국제연합 기후변화협약, OECD, OSPAR 협약과 탄소격리각료포럼 등 국제무대에서 기술적인 측면과 영향 평가 사업을 진행 중임을 또한 보고하였다. 즉 기술적 타당성은 완료된 상태로서 본격적인 사업을 시행하기 전에 제도적인 준비를 하는 단계에 와있다(Ametisova et al. [2004]).

26차 당사국회의는 이러한 영국이 제기한 문제를 검토하고 차기회의(2006년)에서는 분명한 입장을 세울 수 있도록 법적, 과학적 및 기술적인 사안들을 회기중에 작업반을 구성하여 활동하도록 하였다(LC26/15 6.29-6.48). 법적인 측면으로는 (i) 2004년 12월까지 각국 정부에 법률적인 견해를 묻는 설문서 내용을 보다 분명하게 하고, (ii) 지질 격리 방안의 실제적 기술을 준비하고(예, 어떤 지질 구조, 이산화탄소 수송과 주입의 방법, 이산화탄소의 근원 등), 그리고 주요 용어의 정의를 제공하여 이들 기술에 대한 공통적인 이해를 바탕으로 법률적인 문제가 논의될 수 있도록 하도록 결의하였다. (iii) 각 당사국들의 법률적인 견해를 분석하여 일치하는 부분을 규명하고, 일치하지 않는 부분을 재 논의하기로 하고, 과학적 측면은 과학그룹회의(2005년 5월)에서 논의하도록 요청하였다. 다른 국제 조약과 런던협약간의 관계를 검토하기 위해 사무국은 런던협약이 이산화탄소 격리에 대한 논의를 하고 있음을 관련 국제 조약이나 협정에 통보하여 상대 기구들의 의견을 수집하고, 당사국들은 이산화탄소 격리에 관련된 해양 보호 사안들을 효과적으로 집행하도록 자국 내의 관련 정부 부처와 협력할 것을 결의하였다. 2005년 5월 제28차 과학그룹회의에서는 이산화탄소 해저 지중 저장에 대하여 다음과 같이 결론을 내렸다. (i) 이산화탄소 지중 저장은 기술적으로 타당하며, 기존 기술을 사용함. 해저심부의 저장고의 용량은 매우 크나, 지역별로 용량, 적정성, 수용성이 다를 것임. (ii) 이산화탄소의 대기 중 함량증가는 표층 해양의 산성화를 비롯한 지구 전반적으로 악영향을 미침. (iii) 천연적으로도 지중에 이산화탄소는 수백만년이상 격리되어있음. 이산화탄소 격리에 대한 경험은 추가적으로 안정성에 대한 신뢰를 높여줄 수 있을 것으로 보임. (iv) 저장/격리 장소를 평가하는 지침서가 필요할 것이며, 적자인 경우 누출의 위험은 매우 적을 것임. (v) 누출의 잠재적인 영향은 현재 거의 알려져 있지 않으나 지역 입지별로 다를 것으로 보임. (vi) 수송, 주입시의 누출에 대하여서 조치 기술들이 이미 존재함. (vii) 격리과정동안 이산화탄소를 모니터링하는 기술은 수립되어 있음. 그러나 특정 장소별로 적용방법은 다를 수 있음. (viii) 기존의 위험도평가방법이 이산화탄소 해저 지중 격리에도 적용될 수 있음. (ix) 해양환경에 대한 영향을 평가하는 기술 중 부족분은 추가적으로 개발될 필요가 있음. 또한 과학그룹은 정부간기후변화패널(IPCC)이 이산화탄소 포집과 저장에 관한 보고서(Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage)를 곧 발간할 예정으로 있으므로 이를 추후 검토하여 참조할 것을 결의하였다.

6. 우리나라 해역에서의 이산화탄소 지질 격리 구조의 존재 가능성

우리나라는 삼면이 바다로 둘러싸여 있으며 퇴적층이 잘 발달된 대륙붕이 넓게 분포하고 있다. 1964년 이후 지난 40년간 우리나라에서는 주변 대륙붕을 7 개의 광구로 나누어 제한적이지만 유전을 찾기 위해 많은 노력을 기울여 왔다. 그 결과 동해의 6 광구인 울산 앞 바다 동남쪽 58 km 해상에서 가스전을 찾아서 현재 상업생산하고 있다. 우리나라의 경우 6광구에서 확인된 가스전은 규모가 작지만 채굴깊이가 1000 m 이상이며 구조적 트랩으로 분류된다. 더욱이 인근에 비슷한 구조를 갖는 여러 개의 가스전이 더 존재하는 것으로 확인되었다. 6 광구가 위치하는 동해의 한반도 주변부는 후열도분지(back-arc basin)로 분류되지만 생성과정과 구조는 비활성 대륙주변부(passive continental margin)의 특징을 보인다. 이러한 지역에서는 지각의 리프팅과 분리라는 지구조 운동의 결과로서 석유가 집적되기 쉬운 구조 및 층서 트랩이 많이 존재한다. 특히, 10 km 이상의 두께를 갖는 퇴적층이 존재하는 6 광구는 초기-중기 마이오세 동안 동해의 열림과 관련하여 단층활동 수반한 지각의 리프팅과 퇴적물의 하중에 의한 침강으로 이루어졌으며 후기 마이오세에 압축운동을 받아서 구조가 변형되었다. 6 광구에서 가스가 존재하는 층은 사암층이며 이 사암층은 압축력을 받은 후 침식되고 그 위에 치밀한 혈암층이 덮개암의 구실을 하므로 이산화탄소의 격리에 유망할 것으로 사료된다.

황해에는 대표적인 퇴적분지로서 중부의 군산분지와 남부의 흑산분지가 있다. 군산분지는 백악기 내지 고생대층을 기반으로 하여 제 3기 내지 제 4기에 걸쳐 형성되었다(진명식 외, 1991). 군산분지는 상이한 여러 작은 분지들로 구성되어 있으며 퇴적층은 하성-호성 환경의 제3기 퇴적층이 우세하다. 군산분지에서는 팔레오세-에오세 동안 침강이 있었으며 울리고세-마이오세에는 분지의 교란 및 기반용기가 있었다(오진용외[1997]). 흑산분지는 페름기-삼첩기의 천해 석회암층 등을 기반으로 후기 백악기-에오세의 호상 퇴적물을 포함하여 그 위에 마이오세-현세의 쇄설성 퇴적물이 쌓여 있다(Wang [1992]). 이들 서해상의 퇴적구조는 그 단면에서 리프팅에 따른 단층활동과 침강에 의해 형성되었음을 볼 수 있다.

남해에는 제주분지가 대표적인 퇴적분지인데 동쪽의 경계가 북동-남서 방향의 타이완-신지 습곡대(Taiwan-Sinzi folded zone; Emery et al.[1969])인 사실에서 알 수 있듯이 구조적 변형을 상당히 받았다. 분지의 기반은 중생대의 암석으로 추정되고 있으며 분지의 북서부와 남동부에는 각각 정단층과 역단층을 수반한 습곡 변형된 고 제 3기 지층이 발달하여 있으며 그 위에는 마이오세 층이 부정합으로 피복한다. 제주분지는 류큐 호상열도에서 태평양판의 섭입과 관련하여 백악기-팔레오세의 리프팅에 의한 인장 구조 운동으로 형성되었으며 퇴적층의 두께는 약 12 km이다.

이상에서 살펴 본 바와 같이, 우리나라의 주변에는 신생대에서 지각의 리프팅과 관련하여 퇴적분지가 형성되어 두꺼운 퇴적물이

충진하고 있다. 현재까지의 연구결과 이들 분지들은 압축력을 받아서 배사구조가 확인된 경우도 상당히 많으며 치밀한 덮개암까지 존재하고 있어서 이산화탄소를 격리하기에 알맞은 환경을 제공할 것으로 기대된다. 하지만 한반도 주변분지에 대해 체계적이고 종합적인 탐사가 이루어지지 않았으므로 이산화탄소의 격리를 위해서는 분지의 구조와 층서를 구명하기 위한 노력이 필요하다.

7. 결 론

지구온난화로 인한 육상 및 해양 환경의 변화는 매우 심각하다. 우리나라는 국토가 비교적 작고, 직접적인 관할 해역도 크지 않아서 일반인들에게는 남해안에 최근 수십 년간 지속적으로 강수량이 증가하고, 사과 재배지가 복상하고 겨울이 따뜻해져 가고 있는 정도로만 미약하게 지구온난화가 감지되고 있을 것이다. 그러나 세계 교역 대국으로서의 다른 나라의 생산에 의존하는 경제체계를 가진 우리나라 입장에서 눈을 서쪽으로 돌려보면 그 변화의 크기를 짐작하기에 용이하다. 지구온난화로 고산지대의 빙하가 녹고 있음을 누구나 알고 있다. 양자강, 황하, 메콩 강, 인더스, 갠지스 등 아시아의 강 들은 히말라야 빙하 녹은 물이 기본 유량의 60%를 차지하고 있다. 최근 빙하가 녹는 양이 증가하여 유역이 범람하는 홍수피해가 증가하고 있다. 히말라야 수계의 대하천들은 이미 40년 전에 비하여서는 유량이 20%가량 증가하였다. 그리고 토사 이동량의 증가는 댐의 유용성을 빠르게 잠식하게 된다. 그리고 2050년이 되면 빙하의 소실로 유량이 감소할 것으로 예측된다. 그러므로 2100년경에는 기존 하천 유역의 오아시스들이 사라지고, 물 부족, 식량부족 사태가 연달아 발생할 것으로 예측된다(News Week, 2005년 6월6일자). 또한 해양표면의 산성화로 수산생물의 피해가 현저해질 것이다. 50년 이내에 닥쳐올 이러한 미증유의 재난에서 우리나라도 예외일 수는 없게 될 것이다.

유엔 기후변화협약과 해양오염방지를 관리하는 유엔해양법협약과 런던협약 1972와 1996 의정서는 모두 예방원칙을 채택하고 있다. 전자는 지구온난화를 방지하기 위하여 입증되지 않은 방안이라도 채택하도록 권장하고 있고, 후자는 오염을 어느 한 환경에서 다른 환경으로 이동시키거나, 해양환경에 악영향을 미치지 않음이 입증되지 않더라도 해양에 처분을 하지 않는 원칙을 채택하고 있다. 이 두 협약의 충돌 가능성을 검토하고 조화를 이룰 수 있는 방안이 국제적으로 모색되고 있다. 즉 관련기술의 실용화가 임박하여 있기 때문이다. 우리나라도 이산화탄소 배출량이 현재 세계에서 9위로서 이산화탄소 배출량 감소 압력을 피할 수는 없을 것이다. 현재 진행되는 에너지 절약 및 대체에너지를 발굴하는 소극적인 방안들에 추가하여, 이산화탄소의 해저 지질구조 격리라는 적극적인 방안을 본격적으로 검토하여야 할 것이다. 현재 우리나라에서도 해양수산부 주관 연구개발사업으로 해양지중저장을 포함한 이산화탄소처리기술개발사업이 추진중이다(정노락외 [2005]). 소극적인 방안은 국민 모두에게 부담을 지우는 방안이고, 적극적인 방안은 경제 발전에 지장을 주지 않고 신기술로서 문제를 간단하게

해결하는 방안이다. 우리나라 입장에서 이산화탄소의 해저 지질 구조 격리 방안은 단시간 내에 이산화탄소 배출에 따른 국내외의 정치적인 부담을 해결할 수 있는 혁신적인 방안으로 사료된다. 일반적으로 폐기물 최종 처분에 따른 환경 문제는 기존의 기술에만 근거한 정책으로는 근본적인 문제를 해결할 수 없는 경우가 대부분이다. 신기술의 개발과 적용이 많은 사람들에게 부담을 주지 않고 문제를 정면 돌파하는 가장 바람직한 방법임은 역사가 잘 말해주고 있다. 이산화탄소 문제도 예외는 아니다. 추후 이에 대한 구체적인 검토를 하여야 할 것이다.

사 사

두 분 익명의 심사위원들의 건설적인 의견에 감사드립니다. 본 연구는 한국해양연구원(BSPM28200-1706-4, PE9200)과 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] 오진용, 박관순, 박근필. 1997, 한국 대륙주변부의 퇴적분지 명칭. 지질학회지 33, 148-159.
- [2] 정노락, 강성길, 강창구, 박용찬, 윤치호. 2005. CO₂ 해양처리 방안 연구. 한국해양환경공학회지 8, 111-115.
- [3] 진명식, 이진수, 김성재. 1991, 한국 서해 대륙붕 제 2광구의 해저심부에서 채취한 시추코아인 함자연동 현무암의 K-Ar 전 암석 연령과 지구조적 의의. 지질학회지 27, 212-221.
- [4] Aya, I., Kojima, R., Yamane, K., Shiozaki, K., Prewer, P. G. and Peltzer, E. T. III. 2004, "In situ experiments of cold CO₂ release in mid-depth", Energy 29, 1499-1509.
- [5] Albrecht, J., 2001, "Tradable CO₂ permits for cars and trucks", J. Cleaner Production 9, 179-189.
- [6] Ametisova, L., Twidell, J. and Briden, J., 2004, "The sequestration switch: removing industrial CO₂ by direct ocean absorption", The Science of the Total Environment 289, 213-223.
- [7] Bacastow, R., Cole, K.H., Dewey, R.K. and Stegen, G.R., 1995, "Effectiveness of CO₂ sequestration in the oceans considering location and depth", Energy Conversion and Management 36, 555-558.
- [8] Bachu, S. and Adams, J.J., 2003, "Sequestration of CO₂ in geological media in response to climate change: capacity of deep saline aquifers to sequester CO₂ in solution", Energy Conversion and Management 44, 3151-3175.
- [9] Bergman, P., Kane, R. and Kildow, J., 1997, "United States policy for mitigating global climate change", Waste Management 17, 309-314.
- [10] Emery, K.O., Hayashi, Y., Hilde, T.W.C., Kobayashi, K., Koo, J. H., Meng, C.Y., Niino, H., Osterhagen, J.H., Reynolds, L.M., Wageman, J.M., Wang, C.S., Yang, S.J. 1969, "Geological structure and some water characteristics of the East China Sea and Yellow Sea", Committee for co-ordination of joint prospecting for min-

- eral resources in Asian offshore areas(CCOP) Tech. Bull. 2, 3-43.
- [11] Feely, R.A., Sabine, C.L., Kee, K., Berelson, W., Kleypas, J., Fabry, V.J. and Millero, F.J., 2004, "Impact of anthropogenic CO₂ on the CaCO₃ system in the oceans", *Science* 305, 362-366.
- [12] Handa, N. Ohsumi, T., 1995, Direct ocean disposal of carbon dioxide. Terrapub. Tokyo. 274p.
- [13] Heinrich, J., 2002, Legal implications of CO₂ Ocean Storage. Working Paper. Laboratory for Energy and the Environment, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139-4307.
- [14] IPCC. 2001, Climate Change 2001: The Scientific Basis, Summary for Policy Makers, Third Assessment of Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change, <http://www.ipcc.ch/pub/un/syren/spm.pdf>
- [15] IPCC. 2005, IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Summary for Policy Makers as approved by the 8th Session of IPCC Working Group III, September 25th, Montreal, Canada. 25p.
- [14] Johnston, D.M.(ed). 1981, The Environmental Law of the Sea, International Union, Gland, Switzerland: International Union for Conservation of Nature and Natural Resources. pp. 225-228.
- [16] Klara, S.M., Srivastava, R.D. and McIlvried, H.G., 2003, "Integrated collaborative technology development program for CO₂ sequestration in geologic formations-United States", Department of Energy R&D. *Energy Conversion and Management* 44, 2699-2712.
- [17] Nakashiki, N., 1997, "Lake-type storage concepts for CO₂ disposal option", *Waste Management* 17, 361-367.
- [18] Oelkers, E. H. and Schott, J., 2004, "Geochemical aspects of CO₂ sequestration", *Chemical Geology* 217, 183-186.
- [19] Portier, S., Rochelle, C., 2005, Modelling CO₂ solubility in pure water and NaCl-type waters from 0 to 300°C and from 1 to 300 bar application to the Utsira Formation at Sleipner. *Chemical Geology*, 187-199.
- [20] Sabine, C.L., Feely, R.A., Gruber, N., Key, R.M., Bullister, J.L., Wanninkhof, R., Wong, C.S., Wallace, D.W.R., Tilbrook, B., Millero, F.J., Peng, T.-H., Kozyr, A., Ono, T. and Rios, A.F., 2004, "The Oceanic sink for anthropogenic CO₂", *Science* 305, 367-371.
- [21] Salmon, J.J.A., 1989, Marine Environment, Protection and Preservation. In Bernhardt, R.(ed.), *Encyclopedia of Public International Law*, Instalment 11, p. 200.
- [22] Shafeen, A., Croiset, E., Douglas, P.L., Chatzis, I., 2004, "CO₂ sequestration in Ontario, Canada. Part I: storage evaluation of potential reservoirs", *Energy Conversion and Management* 45, 2645-2659.
- [23] Shafeen, A., Croiset, E., Douglas, P.L., Chatzis, I., 2004, "CO₂ sequestration in Ontario, Canada. Part II: cost estimation", *Energy Conversion and Management* 45, 3207-3217.
- [24] Svensson, R., Odenberger, M., Johnsson, F. and Stromberg, L., 2004, "Transportation systems for CO₂-application to carbon capture and storage", *Energy Conversion and Management* 45, 2243-2353.
- [25] Statoil. 2002. Underground CO₂ storage for a better climate. (www.statoil.com).
- [26] Wang, K.D., 1992, Division and correlation of early Tertiary strata in South Yellow Sea Basin. Proc. 2nd Korea-China Int'l Symp. 9-15.
- [27] Yamagata H., 2005, Carbon Capture and Storage Activities in JAPAN. Ministry of Economy, Trade and Industry, Japan.
- [28] Zwingmann, N., Mito, S., Sorai, M., Ohsumi, T., 2005, Preinjection characterisation and evaluation of CO₂ sequestration potential in the Haizume Formation, Niigata Basin, Japan. *Oil & Gas Science and Technology-Rev. IFP*, 60, 249-258.

2005년 7월 11일 원고접수

2005년 11월 4일 수정본 채택