

이산화탄소 해양격리 심해주입시스템의 초기설계

최종수* · 홍섭* · 김형우* · 여태경*

*한국해양연구원 해양시스템기술연구본부

Preliminary Design of a Deep-sea Injection System for Carbon Dioxide Ocean Sequestration

JONG-SU CHOI*, SUP HONG*, HYUNG-WOO KIM* AND TAE-KYEONG YEU*

**Ocean Engineering Research Department, KORDI, Daejeon, Korea*

KEY WORDS: CCS(Carbon Capture and Storage) 이산화탄소 포집 및 저장, Carbon dioxide ocean sequestration 이산화탄소 해양격리, Deep-sea injection system 심해주입시스템, Mid depth type 중층회석식, Lake type 저류저장식, Concept design 개념설계, Static structural analysis 정적구조해석

ABSTRACT: The preliminary design of a deep-sea injection system for carbon dioxide ocean sequestration is performed. Common functional requirements for a deep-sea injection system of mid-depth type and lake type are determined. Liquid transport system, liquid storage system and liquid injection system are conceptually determined for the functional requirements. For liquid injection system, the control of flow rate and temperature of liquid CO₂ in the injection pipe is needed in the view of internal flow. The function of depressing VIV(Vortex Induced Vibration) is also required in the view of dynamic stability of the injection pipe. A case study is performed for CO₂ sequestration capacity of 10 million tons per year. In this study, the total number of injection ships, the flow rate of liquid CO₂ and the configuration of a injection pipe are designed. The static structural analysis of the injection pipe is also performed. Finally the preliminary design of a deep-sea injection system is proposed.

1. 서 론

지구 온난화의 원인이 되는 온실가스를 규제하여 세계적인 기상변화를 막기 위한 국제협약인 교토의정서가 2005년 2월 16일 공식 발효되었다. 우리나라는 2000년 기준으로 대표적인 온실가스인 이산화탄소(CO₂)를 세계에서 아홉 번째로 많이 배출한다. 우리나라는 1단계(2008년~2012년)에서는 온실가스 감축 의무국이 아니지만, 2단계(2013년~2017년)에서는 감축 의무국에 포함될 가능성이 매우 높다(두산세계대백과사전, 2006). 이에 따른 산업 및 경제피해를 최소화하기 위한 대응기술의 확보가 시급하다.

최근 기후변화협약 대응기술로서 CO₂ 포집 및 저장(Carbon Capture and Storage, CCS)기술이 전세계적으로 기후 변화의 핵심분야로 부각되고 있다. CO₂의 포집과 육상내 이송기술은 실용화되어 있으나, CO₂를 저장할 수 있는 육상 공간자원이 빈약한 우리나라로서는 일본과 함께 '해양'을 매개로 한 CO₂ 저장 방안이 유력하며 관련분야 연구개발이 필요하다. 또한, 국내에서 실용화 가능한 친환경적인 CO₂ 해양처리기술을 개발함으로써 2013년 이후 닥쳐올 CO₂ 재난에 대비하고 CO₂ 관련 블루오

션(Blue Ocean)인 친환경산업의 기반을 확보하기 위해 CO₂ 해양격리관련 기술개발이 시급히 필요하다(강성길, 2006).

이산화탄소 해양격리는 '해저지중저장식', '저류저장식', '중층회석식'의 크게 3가지 방식으로 분류된다. 해저지중저장식은 북해유전지역에서 사용되고 있는 실용화된 방식으로 대수층, 유전·가스전, 석탄층 등의 해저퇴적층에 이산화탄소를 장기간 저장하는 방식이다. 저류저장식은 일정 수심 이상에서는 액체 CO₂가 주변 해수보다 밀도가 높아 액화 CO₂가 가라앉는 특성을 이용하여 해저면에 저장하는 방식이다. 중층 회석식은 저류저장식보다 액상 CO₂가 주변해수와 밀도가 유사한 수심에서 해수중에 액상 CO₂를 끌고루 분사하여 CO₂를 처리하는 방식이다(홍섭, 2006).

육상에서 포집된 CO₂를 해양에 격리하기 위해서는 앞서 설명한 3가지 격리방식에 대해 공통적으로 육상내 수송, 항만의 임시저장, 해상 수송, 해상 임시저장, 해저 및 해중으로 이송 등 모두 5단계를 거치게 된다. 이중 마지막 2단계인 해상 임시저장, 심해의 해저 및 해중으로 이송을 담당하는 시스템을 '이산화탄소(CO₂) 심해주입시스템'이라 부르도록 한다.

본 연구에서는 3가지 CO₂ 해양격리 방식 중 이미 실용화되어 있는 해저지중저장식 보다 친환경적인 기술개발을 위해 체계적인 연구개발이 필요한 '저류저장식'이나 '중층회석식'에 대한 심해주입시스템의 초기설계내용을 소개하도록 한다.

두 가지 CO₂ 해양격리 방식의 설계요구조건을 분석하여 공통 설계인자를 도출하고 개념설계를 수행하였다. 심해주입시스템의 정적 안정성의 측면에서 사례연구를 수행하였다. 이러한 사례연구를 통해 주요 설계변수값을 결정하여 초기설계를 수행하였다.

2. 심해주입시스템의 개념설계

2.1 중층회석식 (Mid-depth type)

수심 1500m ~ 2500m의 해수 중에서는 액화 이산화탄소의 밀도가 해수와 비슷하다. 이러한 성질을 이용하여 해수중의 CO₂ 농도의 증가가 일정수준 이하로 유지되도록 액화 CO₂를 분사 회석시킨다. 또한, 성층구조의 해역에서의 해수의 흐름이 해수면으로 상승할 때까지 걸리는 시간은 수백년 내지 수천년에 달한다. 이러한 해역의 해수 중에 액체 CO₂를 고르게 분사하여 회석시키면 CO₂ 농도가 높아진 해수가 수면으로 상승하여 대기와 접하기 이전에 상당부분 자연생태계에 의한 처리가 될 것이며, 그 일부가 해수면으로 상승하여 대기로 방출되더라도 그 시점이 수백 내지 수천년이 걸리므로 그 사이에는 기술적인 진보로 다른 처리방법이 개발될 것으로 확실한다(Fig. 1참조).

이러한 중층 회석식 CO₂ 격리를 위한 심해주입시스템의 기능요구조건은 다음과 같다.

- 액화 CO₂를 하역하여 임시 저장함
- 액화 CO₂를 적정 수심의 해수 중으로 강제 주입함
- 해수 중 CO₂ 분사장치가 일정속도로 이동함

2.2 저류저장식 (Lake type)

액상의 CO₂는 압력에 따라 밀도가 높아진다. 이러한 밀도변화는 해수의 압력에 따른 밀도보다 민감하다. 특히, 수심 3000m의 액화 CO₂는 그 주변 해수보다 밀도가 높다. 이러한 지역에 액상 CO₂를 분사하면, 액상 CO₂는 주변보다 밀도가 높아 가라앉게 되고 해수면 가까이 내려갈수록 주변 해수에 대한 밀도차는 점점 더 커져서 해수면까지 더 빠른 속도로 가라앉게 된다. 해수면에 가라앉은 액상 CO₂는 호수(lake)와 같은 균집체를 형성하게 된다. 이러한 균집체는 주변 해수와의 상호작용으로 그 상부는 수화물(hydrate)상태가 되어 전체가 안정화된 상태로 유지되게 된다(Fig. 1참조).

이러한 저류저장식 이산화탄소 격리를 위한 심해주입시스템의 기능요구조건은 다음과 같다.

- 액화 CO₂를 하역하여 임시 저장함.
- 액화 CO₂를 설계 수심 이하로 강제 주입함
- 주입된 액상 CO₂가 해저위치에 도달 저장되도록 해상주입시스템 위치를 제어함

따라서 본 저류저장식의 심해주입시스템은 CO₂ 분사장치의 이동기능이 없다는 것을 제외하고는 중층회석식과 개념적으로 동일하다.

2.3 심해주입시스템의 개념설계

중층회석식과 저류저장식의 심해주입시스템에 공통적으로 요구되는 각 기능요구조건을 바탕으로 각각의 설계변수를 결정하도록 한다. 이러한 설계변수를 결정할 때 Fig. 2의 이산화탄소 온도-압력에 따른 상(phase)변화 그래프를 참고하였다(Science Experiment Encyclopedia, 2006).

- 방류선 하역시스템 : 액상으로 이송하는 것이 가장 효과적이다. 액화된 CO₂는 단열 호스 등을 통해 수송선에서 방류선으로 하역이 용이하다.
- 저장시스템 : 삼중점(triple point: -57°C, 5bar) 근처의 액상으로 저장하는 것이 경제적이다.
- 해중 주입시스템 : 액상을 유지하면서 최종적으로 1~3°C사이의 온도와 150~300bar에 해당하는 압력의 주변 해수로 주입한다. 주입관으로 명명되는 배관을 통해 주입하는 것이 효과적이다.

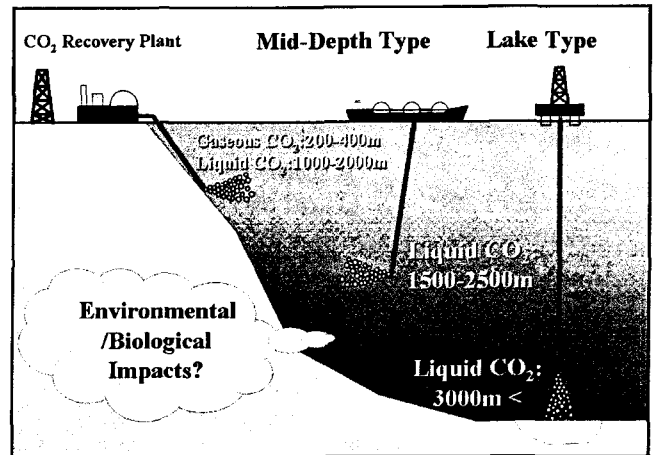


Fig. 1 Mid-depth type (Ship type) and lake type CO₂ ocean sequestration

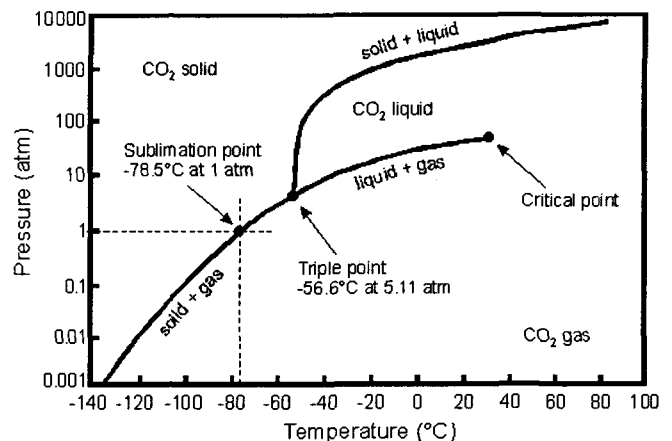


Fig. 2 Pressure -Temperature phase diagram for CO₂

해중 주입관 내부에서 수화물이 형성되지 않도록 내부유동의 최종 온도와 분출 유량이 제어되어야 한다. 이것을 위해 주입관 끝단에서의 온도와 압력이 제어되어야 한다. 따라서 삼중점 근

처의 액상으로 저장된 CO₂로부터 단열과 추가적인 가열 또는 냉각을 통한 온도제어가 필요하다. 또한, 유량의 제어를 위한 압력조절 장치가 필요하다.

주입관의 구조적인 측면에서 안정성이 보장되어야 한다. 이때 라이저에 상대적으로 작용하는 조류에 의한 유체동역학적인 항력(Drag)과 와유기진동(Vortex Induced Vibration, VIV)의 영향을 최소화하기 위한 외부장치가 필요하다. 라이저의 재질과 두께의 경우 정적하중과 동유체력을 포함한 동적하중을 고려하여 결정되어야 한다.

3. 사례 연구를 통한 초기설계

본 연구는 국내 배출량의 2%에 해당하는 연간 1000만톤의 이산화탄소를 수심 2000m 이상의 심해에 환경 친화적으로 처리하는 심해주입시스템의 개발을 위한 초기설계이다.

육상에서 대상해역까지의 이송거리, 수송선의 운항능력, 적하역 소요시간, 방류조건, 국내 조선소의 설계와 시공기술력 등을 종합적으로 고려한 결과 방류선단의 규모는 적재용량 3만톤인 6척인 것으로 조사되었다(이춘주, 2006). 이러한 기준으로 방류선 1척당 처리용량과 주입관의 초기설계를 다음과 같이 수행하였다. (Ozaki, 1997)

- 연간 처리용량 : 10,000,000 ton/year
- 1척당 연간 처리용량 : 1,667 ton/year
- 연간 작업일 : 250 day/year
- 1일 처리용량 : 6,667 ton/day
- 주입관 희망 유동속도 : 3 m/s 이하
- **선정된 주입관 : 8인치, 내경 203 mm (Sch. 40, 두께 8.2)**
- 주입관의 재질 : 고장력 탄소강
- 예상 평균 관내유속 : 2.4 m/s

선정된 주입관의 두께가 적절할지를 판단하기 위해 처리 수심은 중층회석식은 2000m로 저류저장식은 3000m로 가정하여 최대 정적하중을 산출하였다.

- 전체무게
= (파이프밀도-해수밀도) x 중력가속도 x 단면적 x 주입관길이
- 최대응력(방류선 연결부) = 전체무게 / 단면적
- 최대응력 = (파이프밀도-해수밀도) x 중력가속도 x 주입관길이
- 파이프밀도 (고장력 탄소강) : 7900 kg/m³
- 해수밀도 : 1024 kg/m³
- 중층회석식의 최대응력(2000 m) : 134 MPa
- 저류저장식의 최대응력(3000 m) : 201 MPa

정적하중을 낮추기 위한 부력재는 길이방향으로의 배치설계에 따라 차이가 있으나, 전체길이에 대해 30% 정도에 균등 분포 시킨다고 가정한다. 부력재는 비중이 0.5이고 전체 부력이 파이프 수중무게의 50%로 둔다. 이에 따른 8인치(Sch. 40)의 부력재 사양은 다음과 같다.

- 부력재 내경(파이프 외경) : 219 mm
- 부력재 외경 : 453 mm
- 부력재 포함 정적하중 (2000 m) : 67 MPa
- 부력재 포함 정적하중 (3000 m) : 100 MPa

주입관 내 최대 응력은 정적하중에 의한 정적 응력에 해수 중 주입관의 동적 거동에 의한 동적 응력이 합쳐져 발생한다. 파랑 중 해상플랫폼 동요에 의한 축진동 및 횡진동, 주변 해수의 상대흐름에 의한 와유기진동 등이 CO₂ 주입관의 동적거동 성분이다(홍섭, 2006). 이러한 연구는 추후 과제로 남겨둔다.

동적하중을 포함한 최대하중이 정적하중의 2배라고 가정하면 길이 3000 m 주입관의 최대하중이 200 MPa이 된다. 주입관의 재질이 고장력 탄소강이므로 인장강도가 490 MPa이다. 따라서 2.45 배의 안전율을 가지는 설계가 된다.

Fig. 3은 이산화탄소 심해주입시스템의 개념설계와 사례 연구를 통한 결과를 종합하여 나타낸 저류저장식 시스템의 초기설계 그림이다. Ship type의 방류선을 선정하였으며, 데릭(Derrick) 타워를 통해 주입관을 설치하고 회수한다. 관내유동을 조절하기 위한 유량조절장치와 온도조절장치를 설치하였다. 안정성의 확보를 위해 부력재와 대표적인 VIV 억제장치인 헬리컬 스파이럴(helical spiral)을 설계하였다.

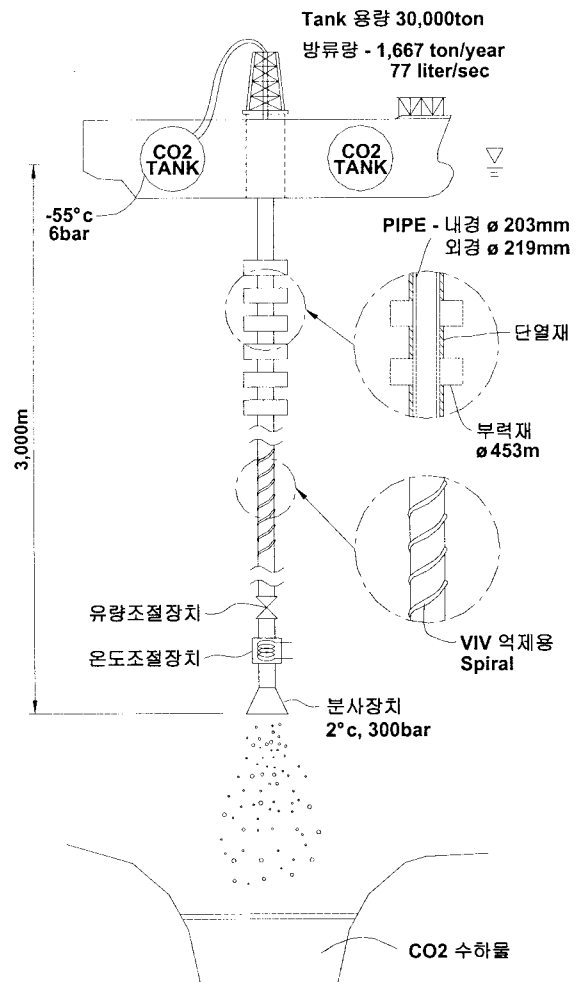


Fig. 3 Schematic drawing of the preliminary design of a deep-sea injection system (lake type) for CO₂ ocean sequestration.

4. 정리 및 토의

본 논문에서는 이산화탄소 심해주입시스템의 초기설계를 수행하였다. 중층회석식과 저류저장식의 CO₂ 심해주입시스템의 공통 기능 요구사항을 정립하고 각 기능의 수행에 적합하도록 설계를 수행하였다. 사례연구로서 연간 1000만 톤의 처리용량을 확보하기 위한 CO₂ 심해주입시스템의 주요 변수의 값을 결정하였다. 이러한 사항을 종합하여 초기설계를 완성하였다.

추후 파랑 중 해상플랜트의 동요에 의한 주입관의 축진동 및 횡진동, 조류와 주입관 운동에 의한 와유기진동 등의 조건 하에서 주입관의 구조안전성 해석에 대한 연구가 필요하다. 또한, 관내 유동해석팀과의 협의를 통한 주입관내 액화 CO₂의 유량과 온도 제어장치의 설치위치와 중량에 대한 설계 검증이 필요하다.

후 기

본 연구는 해양수산부의 지원으로 수행되고 있는 "CO₂ 해양 처리기술개발"사업의 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 강성길 (2006). "CO₂ 해양처리기술개발사업", 홍보자료, 해양수산부.
- 두산그룹 (2006). 두산세계백과사전 엔사이버, "www.encyber.com", 교토의정서.
- 이춘주 (2006). "CO₂ 수송기술의 개념연구", 2006년도 중간발표회. 한국해양연구원 내부자료.
- 홍 섭 (2005). "CO₂ 심해주입기술 개발", 2005년도 중간발표회. 한국해양연구원 내부자료.
- 홍 섭, 최종수, 김형우, 여태경 (2006). "이산화탄소(CO₂) 심해 주입기술 분석", 2006년도 한국해양과학기술협의회 공동학술대회, pp 2578.
- Science Experiment Encyclopedia (2006), "<http://www.juliantrubin.com/encyclopedia/chemistry/carbondioxide.html>".
- Ozaki, M., Fujioka, Y., Takeuchi, K., Sonoda, K., Tsukamoto, O. (1997). "Length of vertical pipes for deep-ocean sequestration of CO₂ in rough seas", Energy, Vol 22, No 2/3, Elsevier Science Ltd., pp 230-231.

2006년 10월 20일 원고 접수

2000년 10월 20일 최종 수정본 채택