

이산화탄소 해양지중저장 처리를 위한 파이프라인 수송시스템의 열-유동 해석

허철* · 강성길* · 홍섭** · 최종수** · 백중화*

*한국해양연구원 해양시스템안전연구소 해양안전방제기술연구부

**한국해양연구원 해양시스템안전연구소 해양시스템연구부

Thermal-Hydraulic Analysis of Pipeline Transport System for Marine Geological Storage of Carbon Dioxide

CHEOL HUH*, SEONG-GIL KANG*, SUP HONG**, JONG-SU CHOI** AND JONG-HWA BAEK*

*Marine Safety & Pollution Response Research Department, Maritime & Ocean Engineering Research Institute, KORDI, Daejeon, Korea

**Ocean Engineering Research Department, Maritime & Ocean Engineering Research Institute, KORDI, Daejeon, Korea

KEY WORDS: Climate change 기후변화 Greenhouse gas 온실가스 Carbon dioxide 이산화탄소 Carbon dioxide capture and storage (CCS) 이산화탄소 포집 및 저장, Pipeline transport 파이프라인 이송

ABSTRACT: The concentration of atmospheric carbon dioxide (CO₂), which is one of the major greenhouse gases, continues to rise with the increase in fossil fuel consumption. In order to mitigate global warming, the amount of CO₂ discharge to the atmosphere must be reduced. Carbon dioxide capture and storage (CCS) technology is now regarded as one of the most promising options. To complete the carbon cycle in a CCS system, a huge amount of captured CO₂ from major point sources such as power plants should be transported for storage into the marine or ground geological structures. Since 2005, we have developed technologies for marine geological storage of CO₂, including possible storage site surveys and basic design of CO₂ transport and storage process. In this paper, the design parameters which will be useful to construct on-shore and off-shore CO₂ transport systems are deduced and analyzed. To carry out this parametric study, we suggested variations in the design parameters such as flow rate, diameter, temperature and pressure, based on a hypothetical scenario. We also studied the fluid flow behavior and thermal characteristics in a pipeline transport system.

1. 서 론

지구온난화는 산업혁명 이전에도 자연계에 있었던 현상이나 20세기 들어서 석탄·석유와 같은 화석연료 사용량의 증가와 급격한 삼림의 파괴 등으로 인해 그 속도가 빨라져 2001년 '기후변화에관한정부간패널(IPCC)'에서는 지난 120년 사이에 평균 기온이 0.6 °C 상승한 것으로 보고하였다(IPCC, 2005). 지구온난화 및 기후변화협약 대응기술로서 온실가스의 86.6%를 차지하는 이산화탄소(이하 'CO₂'로 약칭) 저감을 위한 대응기술은 크게 배출 억제 기술과 저장 기술로 나눌 수 있다.

CO₂ 배출 억제기술에는 CO₂ 발생자체를 줄이기 위한 기술로서 에너지 절약기술, 천연가스로의 연료전환기술, 신재생에너지(태양광, 풍력, 수력, 조력 등)나 원자력 등 비화석 연료로의 전환기술이 포함된다. CO₂ 저장기술은 특정 발생원으로부터 발생되는 CO₂의 대기 방출을 줄이거나 또는 대기 중의 CO₂를 줄이기 위한 제반 기술들이 포함되며, 발전소나 제철소와 같은 특정

발생원으로부터 CO₂를 분리 및 회수하여 이를 해양이나 지중에 저장하는 이산화탄소 포집 및 저장(Carbon dioxide capture and storage, 이하 'CCS'로 약칭) 기술 등과 같은 다양한 기술유형이 존재한다(IPCC, 2005). 신재생에너지 등과 같은 CO₂ 배출 억제 기술이 지구온난화를 억제하기 위한 최종적인 해결책이지만 아직 기술적 경제적 문제로 인하여 제한점이 존재하고, 화석에너지에 기반을 둔 수소에너지 산업구조로의 점진적 전환을 이루기 위해서도 CCS와 같은 대량의 CO₂를 저장 및 격리시키기 위한 기술의 개발이 시급한 실정이다.

'해저 지질구조 내 CO₂를 격리시키는 저장기술'(이하 'CO₂ 해양지중저장기술'로 약칭)은 기후변화 및 교토의정서상의 온실가스 감축요구에 대응하기 위하여 발전소 및 제철소 등 대규모 발생원에서부터 포집한 CO₂를 파이프라인이나 선박 등을 통해 수송하여 이를 해양의 퇴적층(유·가스전, 심부 대염수층, 석탄층 등)에 대규모로 수백수천년 이상 장기간 저장 및 관리하는 기술을 말한다(강성길과 허철, 2008). 이와 같은 CO₂ 해양지중저장 기술을 구현하기 위해서는 포집된 대량의 CO₂를 발생지부터 육상이나 해상의 저장지까지 안정적으로 이송하는 기술의 개발이 필요하다.

교신저자 허철: 대전광역시 유성구 장동 신성로104

042-889-0437 chuh@moeri.re.kr

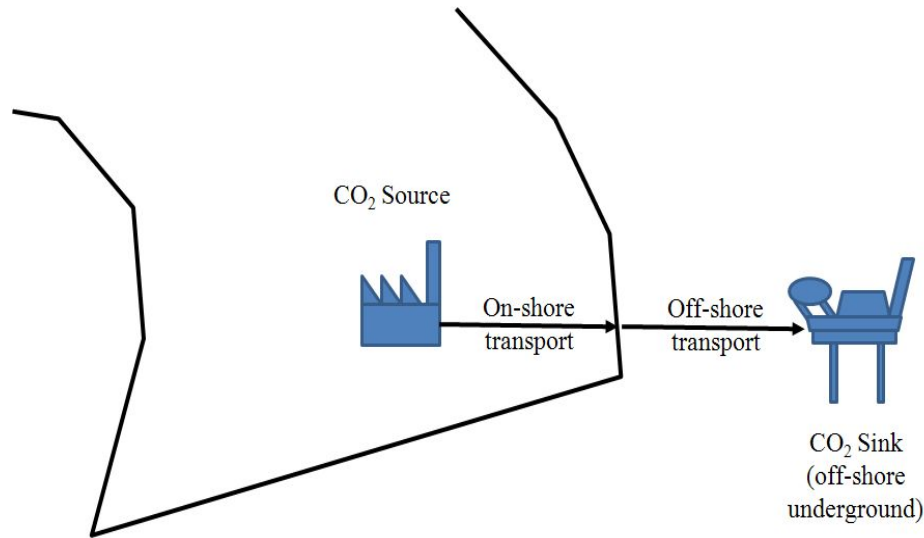


Fig. 1 Hypothetical scenario for CO₂ transport from the source to sink

본 논문에서는 대량의 CO₂를 육상 또는 해양 퇴적층의 저장지로 이송하기 위한 수송시스템 개발 시 필요한 설계인자를 도출하고, 다양한 조건 하에서 설계인자의 민감도 분석을 실시하였다. 먼저 가상의 시나리오를 세워 적절한 설계인자의 범위를 조사하였으며, 이에 근거하여 설계인자 및 외부 조건의 변화에 따른 이송시스템의 성능을 분석하였다. 이송시스템의 성능을 분석하기 위한 도구로서 유체 유동 설계 기준으로 압력강하와 열 시스템 설계 기준으로 열손실(또는 열교환량)을 선정하였다. 즉, 대량의 CO₂ 파이프라인 수송시스템 설계 시 중요한 성능인자인 압력강하와 열전달 등을 설계인자인 입구 CO₂의 열역학적 상태, 수송 파이프라인 환경, 총괄 열전달 특성 등을 변화시켜가며 계산을 수행하였으며 이는 통해 파이프라인 수송시스템의 설계 기반을 마련하고자 하였다. 또한, 상기 연구결과에 근거하여 CO₂ 해양지중저장 처리를 위한 육상 및 해상 이송공정의 설계의 출발점을 제시하였다.

2. 수송시스템 설계인자

2.1 CO₂ 수송시스템 가상 시나리오

화석에너지에 기반을 둔 산업시설에 있어 주요 대규모 CO₂ 발생지는 화력발전소나 제철소에 해당한다. 우리나라를 포함하여 대부분의 경우 이와 같은 대규모 CO₂ 발생지는 육상 또는 해양에 근접한 내륙에 위치하여 있다. 따라서 발전소나 제철소 등에서 포집 및 회수된 CO₂는 Fig. 1에 도시한 바와 같은 가상의 CO₂ 수송시스템에 의하여 발생지로부터 저장지까지 이송될 수 있다.

일반적으로 대량의 CO₂를 저장할 수 있는 저장 후보지는 생산중이거나 고갈된 유·가스전(Oil and gas reservoir), 심부 염대수층(Deep saline aquifer) 그리고 메탄을 함유한 석탄층(Coalbed methane) 등이다(IPCC, 2005). 우리나라의 경우 이와

같은 육상공간이 절대적으로 부족하므로 일본, 노르웨이 등과 마찬가지로 ‘해양퇴적층’을 대상으로 한 해양지중이 유일한 저장후보지이다(강성길과 허철, 2008). 따라서 가상 CO₂ 수송시스템 시나리오는 Fig. 1에 도시한 바와 같이 육상 이송구간과 해양 이송구간의 조합으로 구성된다 할 수 있다(홍섭 등, 2008).

2.2 수송시스템 설계인자

Fig. 1에 도시한 바와 같은 가상의 CO₂ 수송시스템을 설계 하는데 있어 본 논문에서는 연구 범위를 파이프라인을 이용한 수송시스템으로 제한하였다. 파이프라인을 이용한 대규모 CO₂ 수송시스템의 가장 중요한 설계인자는 온도, 압력 그리고 열역학적 상태량 등과 같은 이송 대상 유체인 CO₂와 직접적으로 관련된 변수, 수송시스템의 기하학적 변수 그리고 환경적 변수로 구분할 수 있다. 직접적 CO₂ 변수로는 온도, 압력 그리고 유량 등이 있다. 온도와 압력은 이송될 CO₂의 열역학적 상태를 나타내며, 이의 변화에 따라 Fig. 2에 도시한 바와 같이 기상, 액상, 초임계 상태 등으로 구분할 수 있다. 또한, 동일한 열역학적 상태에서도 온도 및 압력의 변화에 따라 Fig. 3과 Fig. 4와 같이 밀도와 점성계수 등과 같은 상태량들이 급격히 변화한다. 따라서 CO₂ 파이프라인 수송시스템의 설계에 있어 적절한 온도와 압력을 선정하는 것이 매우 중요함을 유추할 수 있다.

본 논문에서는 제철소 등에서 포집된 CO₂를 파이프라인 수송시스템의 공급원(CO₂ source in Fig. 1)으로, 동해-1 가스전을 CO₂ 저장지(CO₂ sink in Fig. 1)로 선정하였으며 이에 따라 Table 1과 같이 파이프라인 수송시스템 입구조건에 해당하는 온도 및 압력 범위를 설정하였다. Table 1에 제시된 온도와 압력의 범위는 배출원(Stack 등)에서 포집된 CO₂의 상태가 아니라, 포집된 CO₂를 압축스테이션을 거쳐 가압 및 냉각한 후의 상태를 나타낸다.

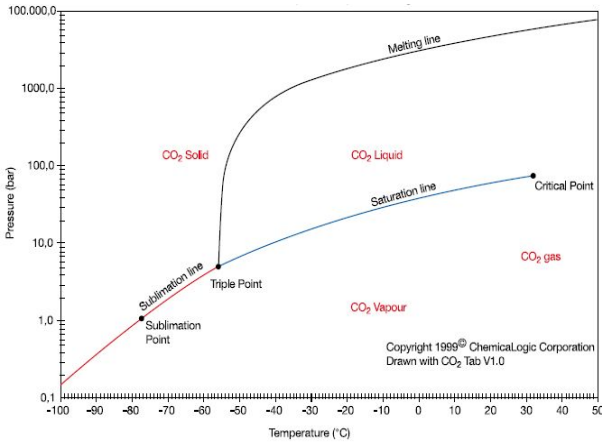


Fig. 2 Temperature-pressure phase diagram for CO₂ (IPCC, 2005)

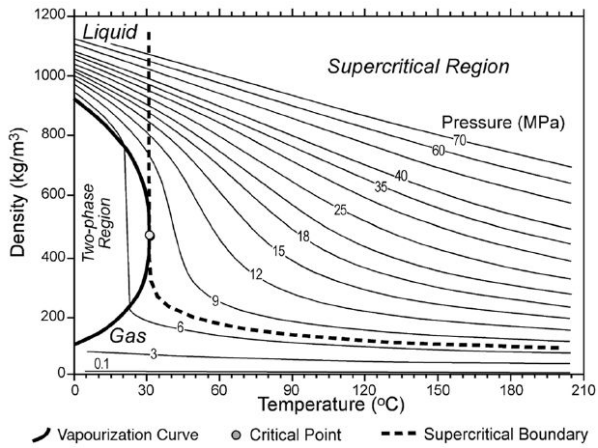


Fig. 3 Variation of CO₂ density as a function of temperature and pressure (Bachu, 2003)

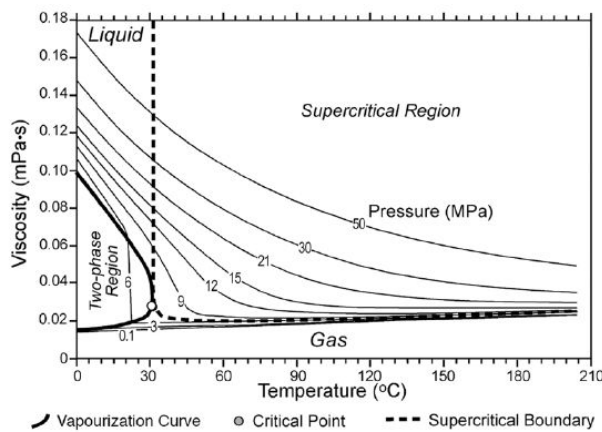


Fig. 4 Variation of CO₂ viscosity as a function of temperature and pressure (Bachu, 2003)

Table 1 Range of design parameters based on hypothetical scenario

Design parameters	Variation range
Inlet temperature (°C)	25~100
Inlet pressure (bar)	50~200
Mass flow rate (ton/day)	1000~5000
Pipeline diameter (m)	0.1~1.0
Pipeline length (km)	100

대량의 CO₂ 파이프라인 수송시스템 설계 방법은 다음과 같다. CO₂ 파이프라인 수송시스템의 성능 인자인 압력강하와 열전달량을 수송시스템 설계 인자인 입구 CO₂ 온도, 압력, 유량, 파이프라인 환경 등에 따라 계산하고, 그 결과를 다시 CO₂ 수송시스템의 입구 조건이 되는 CO₂ 압축스테이션 설계에 이용한다. 즉, 파이프라인 수송시스템의 계산결과를 반영하여 압축스테이션의 출구 조건을 변경함으로써 압축스테이션의 운전 조건을 설계하게 된다. 이와 같이 파이프라인 수송시스템 설계와 압축스테이션의 설계를 상호 연동시켜 피드백(Feedback) 계산과정을 이용하여 CO₂ 파이프라인 수송시스템을 설계하는 것이다. 본 논문에서는 이중 파이프라인 수송시스템의 설계 인자를 변화시켜가며 성능인자를 계산하였다. 이와 같은 과정을 통하여 실제 대량의 CO₂ 파이프라인 수송시스템 설계 시 최적의 설계가 수행될 수 있도록 하였다. 즉, 본 논문의 선행계산을 이용하여 최소의 압력강하와 열손실 조건을 적용함으로써 파이프라인 수송시스템의 설계 온도와 압력 그리고 환경 등이 도출 가능할 것이다.

CO₂ 파이프라인 수송시스템의 기하학적 변수로는 파이프라인의 내경, 이송구간의 길이 그리고 이송구간의 지형으로 인한 파이프라인의 위상(Topology) 등이 있다. 본 논문의 연구대상으로 Fig. 1에 도시된 가상 CO₂ 파이프라인 수송시스템의 이송구간의 길이는 육상과 해상 각각 100km로 가정하였으며, 포집지와 저장지 사이 이송구간중 지형의 변화로 인한 기하학적인 위상차는 고려하지 않고 수평관 수송시스템으로 가정하였다. 본 논문에서는 파이프라인 수송시스템의 환경을 선정하기 위한 압력강하, 열전달 계산 그리고 CO₂의 열역학적 상태가 이에 미치는 영향을 검토하였다.

외부의 환경적 변수로는 수송시스템 외부의 유체 물성, 온도 분포, 유동 조건 등이 있다. 외부 유체는 육상 이송구간의 경우 공기, 해양 이송구간의 경우 해수로 구분되며, 육상 이송구간에서 파이프라인을 지표에 노출시켜 설치할 것인지, 지하에 매립할 것인지, 해양 이송구간의 경우, 해수의 유동속도와 깊이에 따른 해수의 온도변화 등이 외부 환경조건이 된다. 이와 같이 육상 이송구간과 해양 이송구간은 서로 상이한 외부 환경조건이 존재하므로 대량의 CO₂ 수송시스템 설계에 있어 이와 같은 차이점을 고려하여야 한다. 이러한 환경적 조건의 변화는 파이프라인 수송관 내 CO₂의 열전달 특성에 영향을 미치며 이는 파이프라인 수송시스템의 총괄 열전달 계수로 표현된다.

3. 파이프라인 수송시스템 압력강하 수치계산

Fig. 1과 같은 가상 파이프라인 수송시스템 내 CO₂ 유동의 압력강하와 열전달 특성을 분석하기 위해서는 작동유체인 CO₂의 열역학적 상태를 알아야 한다. 이와 같은 계산을 수행하기 위해 Aspen plus ver. 2006(Aspen Plus, 2006)과 Peng-Robinson 상태 방정식(Equation of state; Peng and Robinson, 1976)을 이용하였다.

파이프라인 수송시스템 내 단상유동 압력강하는 Darcy의 법칙과 Moody의 마찰계수(White, 1994)를 이용하여 계산하였다.

$$\Delta P_f = \frac{0.5\rho f_f L V^2}{d} \quad (1)$$

여기서 하첨자 f 는 마찰을 의미하며, ρ 는 밀도, f 는 마찰계수, L 은 이송구간의 길이, V 는 유동의 속도 그리고 d 는 파이프라인 수송시스템의 관 내경을 나타낸다.

파이프라인 수송시스템 내 이상 유동(Two-phase flow) 구간에서는 Beggs-Brill 상관식(Beggs and Brill, 1973)을 이용하여 계산하였다. 기상과 액상의 유체가 동시에 흐르는 이상유동의 압력강하는 Mokhatab et al.(2006) 등과 같이 기상과 액상의 길보기 속도(Superficial velocity) 등을 이용하여 이상유동의 유동양식(Flow regime)을 판별하고, 각각의 유동양식에 적합한 관계식을 이용하여 계산을 수행하였다. 이때, 이상유동의 압력강하는 허첼과 김무환(2006) 등과 같이 마찰에 의한 압력강하, 가속속에 의한 압력강하 그리고 중력에 의한 압력강하로 구분하여 계산한다.

파이프라인 수송시스템의 기하학적 변수들을 결정하기 위하여 입구에서의 CO₂ 온도와 압력을 고정하고 유량과 수송관 내경을 변화시켜 가며 압력강하 계산을 수행하였다. 즉, 파이프라인 수송시스템의 입구 CO₂ 상태를 고정하고 유량에 따른 필요 관경을 도출하기 위한 계산결과를 Fig. 5에 도시하였다. 압력강하 계산 수행 시 CO₂의 열역학적 상태는 수송관 내 CO₂와 외부와의 열전달로 인한 온도 변화는 고려하지 않고 압력강하로 인한 상태방정식에 의한 상태변화만 계산하였다. 계산 조건은 Table 2에 도시한 바와 같다.

Fig. 5에 도시한 바와 같이 파이프라인 수송시스템의 내경이 유량에 비해 작으면 압력강하가 커지게 되고 일정 압력강하 이상에서는 초킹 현상에 의하여 임계유동 상태가 되고 충분한 유량이 흐르지 못하는 현상이 발생하게 된다. Fig. 5의 작은 관경에서 압력강하가 표시되지 않은 영역이 임계유동 영역에 해당한다. 따라서 이송시스템의 안정적 운전을 위해서는 충분한 관경의 확보가 중요하다. 그러나 관경이 지나치게 커질 경우 수송시스템의 초기 투자비 및 유지관리비가 많이 소모되므로 적절한 관경의 선택이 매우 중요하다.

수송시스템에서 이송하고자 하는 CO₂의 유량이 결정되면 관경과 압력강하의 상관관계로부터 최적의 관경 설계 값이 도출될 수 있음을 Fig. 5로부터 알 수 있다.

Table 2 Range of design parameters for calculation of pressure drop : effect of mass flow rate and pipeline diameter

Design parameters	Variation range
Inlet temperature (°C)	30
Inlet pressure (bar)	100
Mass flow rate (ton/day)	1000~5000
Pipeline diameter (m)	0.1~1.0

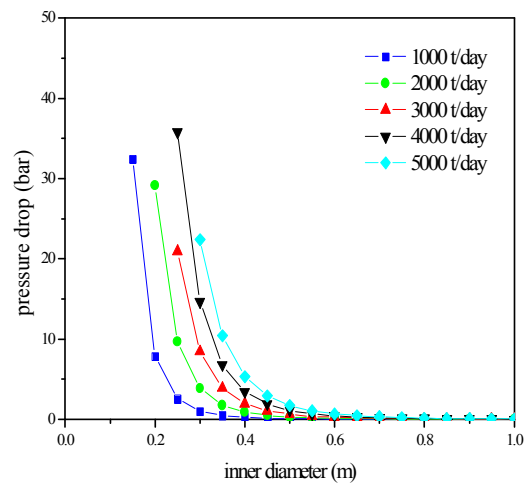


Fig. 5 Pressure drop of CO₂ as a function of flow rate and diameter

일정 유량에서 임계유동 영역을 지나 관경이 커질수록 압력강하가 감소함을 알 수 있고, 관경의 변화에 따른 압력강하의 변화율을 고려하면 특정 영역에서 최적의 관경이 도출될 수 있다. 즉, Fig. 5에 도시한 바와 같이 2000t/day의 CO₂를 이송하고자 하는 경우, 0.2m 미만의 관경에서는 임계유동 현상이 발생하고, 0.4m 이상의 관경에서는 관경의 증가에 따른 압력강하의 감소가 미미함을 알 수 있다. 따라서 대략 0.3m 내외의 관경이 설계 값으로 적절함을 알 수 있다.

파이프라인 수송시스템의 온도, 압력 변수들을 결정하기 위하여 유량과 수송관 내경을 고정하고 입구에서의 CO₂ 온도와 압력을 변화시켜 가며 압력강하 계산을 수행하였다. 계산 조건은 Table 3에 도시한 바와 같다.

온도와 압력은 이송될 CO₂의 열역학적 상태를 나타내며, 이의 변화에 따라 CO₂는 기상, 액상 그리고 초임계 상태로 구분된다. Fig. 6은 온도와 압력의 변화에 따른 압력강하 계산 결과를 보여주며, 그림에 보이지 않은 입구조건은 낮은 입구 압력으로 인하여 이송관 내 압력강하를 극복하지 못하여 수송시스템이 원활히 운전되지 못하는 영역임을 의미한다. Table 3에 제시된 바와 같이 수송시스템의 설계 변수들이 결정되면, CO₂가 이송되기 위해서는 최소 70bar 이상의 입구압력이 요구된다.

Table 3 Range of design parameters for calculation of pressure drop : effect of temperature and pressure

Design parameters	Variation range
Inlet temperature (°C)	25~100
Inlet pressure (bar)	50~200
Mass flow rate (ton/day)	5000
Pipeline diameter (m)	0.3

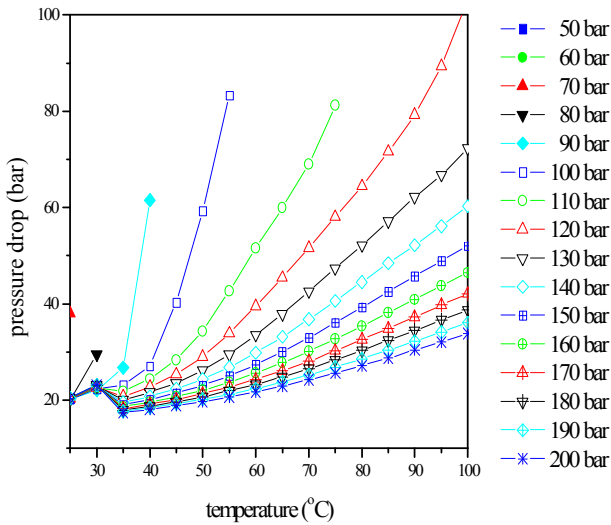


Fig. 6 Pressure drop of CO₂ as a function of inlet temperature and inlet pressure

이를 Fig. 2의 상태선도와 비교하여 살펴보면 주어진 수송시스템의 유량과 관경에서 CO₂는 기상으로 이송될 수 없음을 알 수 있다. 즉, 기상에서는 밀도가 낮아 주어진 수송시스템의 관경이 유량에 비해 매우 작고, 이는 유동의 유속이 커지고, 압력강하 또한 상승함을 의미한다. 이로부터 적절한 수송시스템 설계를 위해서는 기학적 변수들과 온도, 압력에 따른 CO₂의 열역학적 상태를 동시에 고려해야 함을 알 수 있다.

CO₂의 임계점(73.9bar, 31.1°C) 근처에서 수송시스템은 낮은 압력강하를 보이며 임계온도를 지나면서 압력강하가 작아지다 커지는 경향을 보인다. 이러한 압력강하와 입구 온도의 비례관계는 낮은 압력에서 더 큰 비례상수를 보임을 Fig. 6으로부터 알 수 있다. 이는 Fig. 3에 도시된 바와 같이 낮은 압력에서 온도에 따른 밀도의 변화는 높은 압력조건에 비해 더 급격한 경향을 보임에 기인한 것이다.

그러나 파이프라인 수송시스템의 낮은 압력강하(즉, 부스터 가압장치의 작은 동력)를 유지하기 위하여 입구 압력을 무한히 높일 수는 없다. 압력이 커질수록 파이프라인 수송시스템의 설계압력이 증가하여 초기 설치비가 급격히 증가하기 때문이다. 따라서 적절한 온도, 압력에 따른 CO₂의 열역학적 상태 결정이 수송시스템 설계에 매우 중요한 변수이다.

Table 4 Overall heat transfer coefficient of various environmental conditions

No.	Design parameters	Heat transfer coefficient (W/m ² K)
1	Air velocity 0.1m/s	0.848
2	Air velocity 1.0m/s	1.409
3	Water velocity 0.1m/s	1.843
4	Water velocity 5.0m/s	1.849
5	1 m under ground (dry)	0.727
6	1 m under ground (wet)	1.209
Air (on-shore)/ Seawater (off-shore) temperature (°C)		5 (Cold air, Deep sea) 25 (Warm air, Surface sea)

4. 파이프라인 수송시스템 열전달 수치계산

파이프라인 수송시스템 내 유동 중인 CO₂는 관내 유체 온도와 외부의 온도차로 인하여 열손실 또는 열 이득과 같은 열전달을 수반한다. 수송시스템이 육상에 설치 될 것인지, 해양에 설치 될 것인지에 따라 수송시스템 외부의 온도분포, 외부 유동조건 등과 같은 외부 환경조건이 달라지며, 이는 파이프라인 수송관 내 CO₂의 열전달 특성에 영향을 미쳐, 최종적으로 파이프라인 수송시스템의 운전성능에 영향을 미친다.

CO₂와 외부와의 열전달 성능(즉, 파이프라인 수송시스템의 열적 거동 특성)은 총괄 열전달계수로 표현된다. 정상상태 유동에서 CO₂와 외부와의 열전달량은 식 (2)와 같이 표현된다 (Incropera and De witt, 1990).

$$Q = UA \frac{(T_i - T_\infty) - (T_o - T_\infty)}{\ln \frac{T_i - T_\infty}{T_o - T_\infty}} \tag{2}$$

여기서 하첨자 *i*는 입구조건, *o*는 출구조건, ∞는 외부 환경조건을 의미한다. 그리고 *Q*는 총 열전달량, *U*는 총괄 열전달계수, *A*는 열전달 면적 그리고 *T*는 온도를 나타낸다.

총괄 열전달 특성은 식 (3)과 같이 파이프라인 내 CO₂의 대류 열전달, 파이프라인 자체의 전도 열전달, 절연체의 전도 열전달, 외부 유체의 전도 및 대류 열전달의 함수로 표현될 수 있다. 이때, 육상 이송구간은 토양의 전도 열전달과 대류 열전달을 포함하며, 해양 이송구간은 해수의 대류 열전달을 포함한다.

$$U = f(h_{CO_2}, k_{pipe}, k_{insulation}, k_{soil}, h_{air\ or\ seawater}) \tag{3}$$

여기서 *h*는 대류 열전달계수, *k*는 전도 열전도도를 나타낸다. 본 논문에서는 연구 범위를 일정 외부 온도 조건으로 제한하고, Table 4와 같이 환경조건 변화에 따라 계산된 총괄 열전달계수를 이용하여 파이프라인 수송시스템 열전달 계산결과를 수행하였다.

또한 수송관 시스템의 열전도도는 HYSYS(Aspen HYSYS, 2006)의 수치, 수송관 내측 CO₂의 대류 열전달계수는 Dittus-Boelter 관계식(Incropera and De witt, 1990)을 이용하여 계산하였다.

Table 4에서 외부 환경조건 1(No. 1 in Table 4)은 지상에 노출된 수송관 외부로 공기가 0.1m/s의 유속으로 흐를 때의 총괄 열전달계수이며, 환경조건 2는 공기의 유속이 1.0m/s일 때, 환경조건 3은 해양에서 해수에 노출된 수송관 외부로 해수가 0.1m/s의 유속으로 흐를 때, 환경조건 4는 해수의 유속이 5.0m/s일 때, 환경조건 5는 육상에서 지하 1m 깊이의 건조한 토양에 매설된 경우, 환경조건 6은 젖은 토양에 매설된 경우 각각의 총괄 열전달계수이다. 이때, 수송관의 외부는 1cm 두께의 우레탄으로 단열되어 있다고 가정하였다. 정리하면 환경조건 1, 2, 5, 6은 파이프라인 수송시스템의 육상구간을 나타내며, 환경조건 3, 4는 해상구간을 나타낸다. 파이프라인 수송시스템의 일정 외부 온도 조건으로 여름철과 같은 더운 공기 그리고 표면 해수층에서는 25°C의 외기 조건을, 겨울철과 같은 추운 공기 그리고 해저층에서는 5°C의 외기 조건을 이용하여 열전달을 계산하였다.

파이프라인 수송시스템과 외부와의 열전달 계산 수행 시 수송관 입구에서 CO₂의 열역학적 상태는 온도 50°C, 압력 120bar의 초임계상태를 가정하였다. 수송관의 직경은 Table 5에 도시한 바와 같이 0.3m 조건을 이용하였다. 이와 같은 조건 하에서 고온 외기 조건의 계산결과는 Fig. 7에, 저온 외기 조건의 계산결과는 Fig. 8에 각각 도시하였다.

Table 5 Design parameters for calculation of heat transfer

Design parameters	Calculation condition
Inlet temperature (°C)	50
Inlet pressure (bar)	120
Pipeline diameter (m)	0.3

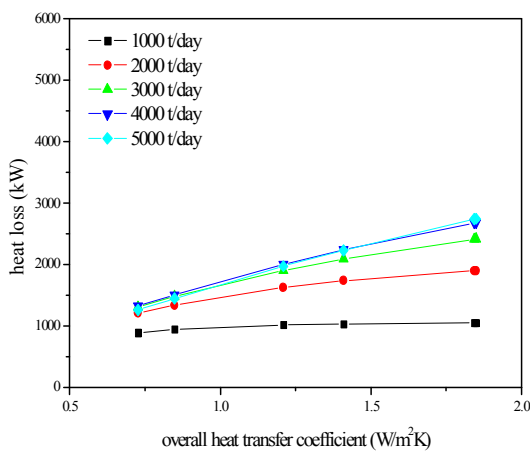


Fig. 7 Heat transfer of CO₂ in warm air or surface sea water temperature condition

겨울철과 해저층의 파이프라인 수송관 내의 CO₂가 여름철과 표면 해수층의 파이프라인 수송관 내의 CO₂의 보다 대략 2배 내외의 열을 더 외부로 손실함을 계산결과로부터 알 수 있다. 총괄 열전달계수 증가에 따른 CO₂ 파이프라인 수송시스템의 열손실량 증가를 또한, 겨울철과 해저층에서 여름철과 표면 해수층보다 더 크게 나타난다. 이러한 경향은 이송하고자 하는 CO₂의 양이 증가할수록 더 커진다. 이는 외부 저온 열침의 온도가 낮아질수록 그리고 열을 전달할 수 있는 능력의 척도인 열전달계수가 증가할수록 외부로의 열전달량이 증가함에 기인한 것이다. 또한, 유량의 증가로 인하여 파이프라인 수송시스템 내 CO₂의 열용량이 증가할수록 외부와의 열적 평형에 다다르기 전에 더 많은 열량이 외부로 유출 될 수 있음을 의미한다. Fig. 7과 Fig. 8에 도시된 바와 같이 총괄 열전달계수 1.8W/m²K 내외에서 CO₂ 이송량의 증가에 따른 해양 파이프라인 수송시스템의 열손실량은 표면 해수층에서 해저층으로 설치 위치가 변경됨에 따라 2.6배에서 3.2배로 증가한다. 또한 동일 이송량에서 설치 위치의 변경에 따라 열손실량은 최대 1.9배까지 증가할 수 있다. 따라서 이송하고자 하는 CO₂의 온도, 압력, 유량 뿐 아니라 여름철과 겨울철 그리고 표면 해수층과 해저층 등 파이프라인 수송시스템의 외부 환경 조건 변화를 고려한 열적 설계가 이루어져야 한다.

5. 결 론

본 논문에서는 대량의 CO₂ 파이프라인 수송시스템 설계 시 중요한 성능인자인 압력강하와 열전달 등을 설계인자인 입구 CO₂의 열역학적 상태, 유량, 수송 파이프라인 관경, 총괄 열전달 특성 등을 변화시켜가며 계산을 수행하였으며 이를 통해 파이프라인 수송시스템의 설계 기반을 마련하고자 하였다. 즉, 파이프라인 수송시스템의 설계 인자가 성능인자에 미치는 영향을 분석함으로써 실제 대량의 CO₂ 파이프라인 수송시스템 설계 시 최적의 설계가 수행될 수 있도록 하였다. 즉, 본 논문의 선행계산

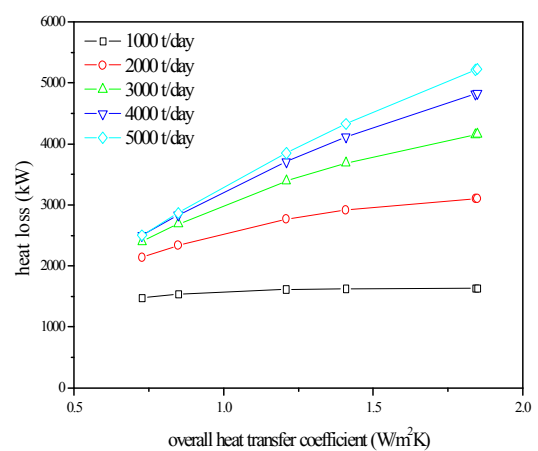


Fig. 8 Heat transfer of CO₂ in cold air or deep sea water temperature condition

을 이용하여 최소의 압력강하와 열손실 조건을 적용함으로써 파이프라인 수송시스템의 설계 온도와 압력 그리고 관경 등이 도출 가능할 것이다. 또한, 상기 연구결과에 근거하여 CO₂ 해양지중저장 처리를 위한 육상 및 해상 파이프라인 이송공정 설계의 출발점을 제시하고자 하였으며, 이를 다음과 같이 정리할 수 있다.

(1) 육상 이송구간과 해양 이송구간은 서로 상이한 외부 환경 조건이 존재하므로 대량의 CO₂ 수송시스템 설계에 있어 이와 같은 차이점을 고려하여야 한다. 즉, 수송시스템이 육상에 설치될 것인지, 해양에 설치될 것인지에 따라 수송시스템에서 외부로의 열전달 조건이 변화하며, 이는 최종적으로 파이프라인 수송시스템의 운전성능에 영향을 미친다.

(2) 육상 및 해상 파이프라인 수송시스템의 중요한 설계인자로 CO₂의 열역학적 상태, 수송시스템의 기하학적 변수 그리고 환경적 변수를 제시하였다.

(3) 수송시스템의 안정적 운전을 위해서 CO₂의 유량, 관경, 압력강하 그리고 임계유동의 상관관계를 제시하였다. 또한, 설계 기준으로 환경의 변화에 따른 압력강하의 변화율을 이용하였다.

(4) 수송시스템 설계 시 CO₂의 열역학적 상태, 유량, 관경 등의 상관관계를 보였다. 또한, 임계점 진후에서는 밀도의 변화에 따른 압력강하의 증감 경향을 규명하였다.

(5) 이송하고자 하는 CO₂의 온도, 압력, 유량 뿐 아니라 여름철과 겨울철 그리고 표면 해수층과 해저층 등 파이프라인 수송시스템의 외부 환경 조건 변화를 고려한 열적 설계가 이루어져야 한다.

후 기

본 연구는 국토해양부의 지원으로 수행되고 있는 “CO₂ 해양처리기술개발”사업의 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

강성길, 허철 (2008). “해저 지질구조내 CO₂ 저장기술의 연구

개발 동향 및 향후 국내 실용화 방안”, 한국해양환경공학회지, 제11권, 제1호, pp 24-34.

허철, 김무환 (2006). “수평 사각 마이크로채널 내에서의 2상 유동 압력강하”, Transaction of the KSME B, Vol 30, No 11, pp 1035-1042.

홍섭, 허철, 최종수, 이종갑, 백종화, 문일성 (2008). “이산화탄소 해양지중격리 공정 사례연구”, 한국해양공학회 2008년도 추계학술대회 논문집, pp 275-278.

Aspen Plus (2006), Aspen Technology Inc., Cambridge, MA, USA.

Aspen HYSYS (2006), Aspen Technology Inc., Cambridge, MA, USA.

Bachu, S. (2003). “Screening and Ranking Sedimentary Basins for Sequestration of CO₂ in Geological Media in Response to Climate Change”, Environmental Geology, Vol 44, pp 277-289.

Beggs, H.D. and Brill, J.P. (1973). “A Study of Two-phase Flow in Inclined Pipe”, Trans. AIME, pp 606-617.

Incropera, F.P. and De Witt, D.P. (1990). Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 3rd ed., John Wiley & Sons, New York.

IPCC (2005). IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Cambridge University Press (<http://www.ipcc.ch>).

Mokhatab, S., Poe, W.A. and Speight, J.G. (2006). Handbook of Natural Gas Transmission and Processing, Elsevier, Gulf Professional Publishing.

Peng, D.Y. and Robinson, D.B. (1976). “A New Two-constant Equation of State”, Ind. Eng. Chem. Fund., Vol 15, pp 59-64.

White, F. (1994). Fluid Mechanics, 3rd ed., McGraw-Hill, New York.

2008년 10월 2일 원고 접수

2008년 11월 27일 최종 수정본 채택