

상온 상압의 이산화탄소 저장용 탱크를 위한 예냉과정의 비선형 모델링 및 비례-적분 제어 적용

임유경 · 이석구 · 단승규 · 고민수* · 이종민†

서울대학교 화학생명공학부
 151-742 서울특별시 관악구 관악로 1
 *(주)삼성중공업
 656-710 경상남도 거제시 장평3로 80
 (2014년 3월 10일 접수, 2014년 4월 9일 수정본 접수, 2014년 4월 12일 채택)

Nonlinear Modeling and Application of PI Control on Pre-cooling Session of a Carbon Dioxide Storage Tank at Normal Temperature and Pressure

Yu Kyung Lim, Seok Goo Lee, Seungkyu Dan, Min Su Ko* and Jong Min Lee†

School of Chemical & Biological Engineering, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 151-742, Korea
 *Samsung Heavy Industries, 80 Jangpyeong 3-ro, Geoje-si, Gyeongnam 656-710, Korea
 (Received 10 March 2014; Received in revised form 9 April 2014; accepted 12 April 2014)

요 약

이산화탄소(CO₂) 포집 및 지중저장을 위한 CO₂ 수송선용 저장탱크는 액체 CO₂와 직접적으로 접촉할 경우 발생할 수 있는 물리적/열적 탱크 손상을 방지하기 위해 화물 선적 단계 이전에 예냉과정을 거쳐야 한다. 본 연구에서는 예냉을 위해 주입되는 저온 CO₂ 기체의 탱크 유입량을 계산하기 위해 CO₂ 저장탱크 예냉과정의 수학적 모델 식을 제안하였다. 또한 비례-적분(proportional-integral: PI) 제어를 통해 공정을 제어하는 동적 모사 결과를 제시하였다. 이 때 제어 변수를 탱크 내 온도 또는 압력으로 선택한 두 가지 사례를 모사하였으며 그러한 결정이 CO₂ 저장탱크의 예냉과정에 미치는 영향을 해석하였다. 결과적으로 예냉과정의 PI제어에는 탱크 내 온도를 제어하는 것보다 압력을 제어하는 우회적인 방식을 택할 때 수학적 모델의 비선형성과 특이점 발생으로 인한 불안정성을 피할 수 있으므로 더 안정된 결과가 도출됨을 보였다.

Abstract – Storage tanks of Carbon dioxide (CO₂) carriers utilized for the purpose of carbon capture and storage (CCS) into subsea strata have to undergo a pre-cooling session before beginning to load cryogenic liquid cargos in order to prevent physical and thermal deterioration of tanks which may result from cryogenic CO₂ contacting tank walls directly. In this study we propose dynamic model to calculate the tank inflow of CO₂ gas injected for precooling process and its dynamic simulation results under proportional-integral control algorithm. We selected two cases in which each of them had one controlled variable (CV) as either the tank pressure or the tank temperature and discussed the results of that decision-making on the pre-cooling process. As a result we demonstrated that the controlling instability arising from nonlinearity and singularity of the mathematical model could be avoided by choosing tank pressure as CV instead of tank temperature.

Key words: CCS, CO₂ Carrier, CO₂ Storage Tank, Pre-cooling

1. 서 론

CO₂ 수송선은 CO₂의 포집 및 저장공정(carbon capture and storage: CCS)에 필요한 수송수단 중 하나이다. 포집된 CO₂가 압축 및 액화

된 이후의 단계는 대부분 수송선 상에서 이루어지므로 수송선은 초저온 액체 CO₂를 수송선 상의 탱크에 저장하여 목적지로 운반하고 해상의 하역플랫폼까지 전달하게 된다[1]. 선박에서는 액체 CO₂의 선적, 저장 및 하역이 독립적인 순서대로 이루어진다. 그러나 CO₂ 수송선이 상용화 단계까지 접어들지 않았기 때문에 선박을 이용한 CO₂의 수송과정의 많은 부분에서 적절한 모델식이나 제어 알고리즘이 구축되지 않은 상태이다. 일반적으로 CCS에 소요되는 비용 중 가장 큰 비율을 차지하는 내역을 75~80% 비중의 포집 및 압축 공정으로 간주하므로[2,3] 나머지 20~25% 가량의 비용은 수송 및 저장에

†To whom correspondence should be addressed.

E-mail: jongmin@snu.ac.kr

*이 논문은 서울대학교 윤인섭 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

소요된다고 볼 수 있다. 하지만 선박 수송의 경우 전체 과정에 대한 연구가 부족하여 신뢰도 높은 비용 예측을 하기 쉽지 않고 CO₂ 수송선의 경제성의 입증이 어렵다. 따라서 CO₂ 수송선의 상용화를 앞당길 수 있도록 탱크 주입, 운송 및 지중 저장 등 전 과정에 대한 연구를 통하여 CO₂ 선박 수송에 필요한 에너지 및 자원의 양을 예측하고 소요되는 시간을 단축시킬 정보를 얻어서 효율을 개선할 필요가 있다.

본 연구는 이 중 선적 단계의 초반에 진행되는 CO₂ 탱크를 예냉하는 단계에 초점을 맞추고 있다. 예냉과정은 선적 전에 탱크의 온도를 액체 CO₂ 화물의 온도와 가까운 정도로 미리 낮추어 초저온의 화물과 저장탱크가 직접 접촉할 경우 발생할 수 있는 물리적/열적 손상을 예방하고 boil-off gas(BOG) 발생을 억제하는 것이 목적이다. CO₂ 탱크를 예냉하려면 냉각 팽창(cooling expansion)을 거친 초저온 CO₂ 기체를 탱크에 주입하는 방식을 사용하게 되는데 예냉과정에 필요한 주입 시간이 길어질수록 액체 CO₂의 탱크 선적 시간 또한 길어지게 된다. 따라서 적합한 모델 식을 구성하여 예냉과정에 필요한 기체 CO₂ 주입량 및 소요 시간을 계산하고 간단한 비례-적분(Proportional-Integral: PI) 제어를 적용하여 탱크 내 온도와 압력의 동적 변화를 관찰한다.

CO₂ 저장 탱크에 대한 동적 모델링 연구 사례는 희소하지만 유사한 시스템인 LNG 저장 탱크의 경우에는 보통 BOG 발생속도 계산이나 롤오버(rollover) 현상에 관한 연구를 찾아볼 수 있다. Lee[4]는 LNG 탱크 내부의 sloshing에 의한 모델링과 압력의 동적 변화를 연속방정식을 이용해 모델링하고 CFD를 이용해 모델을 수치 해석하였고, Shin[5]는 주어진 온도 조건에 따라 BOG 발생계수를 보정하여 LNG 탱크 내부 압력의 시간에 따른 미분방정식을 제시하였다. Dimopoulos[6]의 연구 또한 수송 중 탱크 내 LNG의 BOG 발생속도를 계산하는 내용이지만 탱크의 온도 변화가 압력 변화와 같이 미분방정식에 포함되어 있는 점이 차별화된다. 단 이 연구에서 사용한 탱크의 온도 변화에 대한 식은 이론적으로 구성된 것은 아니며 LNG 탱크의 온도 변화에 대한 실험 데이터를 기반으로 얻어진 실험식이라는 한계가 있다. 본 연구와 보다 유사한 방향성은 Kim[7]이나 Heestand[8]의 연구에서 찾을 수 있는데 LNG 탱크의 rollover 현상을 모델링할 때 탱크를 N개의 층으로 분할하고 각 층마다 LNG 구성성분별 질량과 엔탈피 변화에 대한 2개의 미분방정식을 구성하여 수치 적분하였다.

PI제어를 사용하는 이유는 LNG 선박 등 대량의 초저온 액체 화물을 수송하는 선박에서 사용되는 가장 보편적인 제어 알고리즘이기 때문이다. Shin과 Lee[9]는 LNG 선박상의 BOG 재액화에 사용되는 열 교환기를 에너지 수지식 시스템으로 재구성하여 PI제어를 적용하였다. 주목할만한 점은 해당 공정에서는 팽창기(expander) 출구 온도를 제어하는 과정에서 세 개의 구동기(actuator)들을 조작하게 되는데 일반적인 PI제어로는 이러한 SIMO(single-input multi-output) 시스템을 다룰 수 없어 설정값(setpoint)의 크기에 따라서 구동기를 고르는 방식으로 문제를 해결한 점이다. 이는 선상에서 일반적으로 사용되는 제어가 PI제어임에도 단순한 PI제어보다는 그것을 수정한 제어방식을 적용해야 하는 공정이 존재할 수 있음을 보여주는 사례이다. 예냉과정의 PI제어 또한 2개 이상의 제약조건(constraint)나 설정값이 존재할 때에는 탱크 내 온도의 제어로 시스템의 안정성을 확보할 수 없는 경우가 발생한다.

결론적으로 본 연구의 목표는 2개 이상의 상태변수들에 대한 동적

변화를 관찰할 수 있는 모델을 CO₂ 저장탱크의 예냉과정에 대하여 구성하고 PI제어를 적용하여 탱크 온도를 조절하는 과정을 보이는 것이다. 탱크 초기조건이 상온/상압인 경우 예냉과정에 따른 탱크 내 온도 및 압력변화의 모델식을 질량 수지식과 에너지 수지식을 이용해 2개의 비선형 미분방정식으로 이루어진 시스템으로 정의하되 MATLAB의 Simulink로 PI제어를 덧붙여 예냉과정의 동적 변화를 모사한다. 본래대로의 시스템의 제어는 탱크 온도를 원하는 설정값에 맞추는 것을 목표로 한다. 그러나 제시된 수학적 모델식에 내재된 특이점(singularity)의 존재로 인하여 제어 변수를 탱크 온도로 삼을 경우 조작 변수의 해를 얻지 못할 위험성이 있으므로 이러한 경우 대신 탱크 압력을 제어 변수로 설정하여 문제를 우회하는 방식을 주어진 시스템 제어에 대한 하나의 대안으로 제시한다.

2. 공정 소개

액체 CO₂ 저장 탱크의 온도는 저온의 CO₂ 기체가 주입되면서 냉각된다. 이 때 기체의 주입량이 누적될수록 탱크의 압력이 상승하게 된다. Fig. 1은 저장 탱크를 간략화한 모식도이다. 탱크에 기체를 주입하는 입구(inlet)와 배기(purge stream)를 위한 출구(outlet)가 있다. 탱크 내부에서는 연속 회분 반응기(continuous stirred tank reactor: CSTR)와 마찬가지로 즉각적인 혼합(mixing)이 이루어진다고 가정한다. 따라서 탱크 내부의 기체 물성은 탱크 내부의 모든 위치에서 동일하게 유지되며 출구의 온도는 탱크 내부의 온도와 동일하다. 또한 CO₂ 기체가 탱크 안에 주입된 후 액체로 응결되는 비율은 무시할 수 있는 양으로 가정하여 전체 탱크 및 공정을 단상 시스템(single-phase system)으로 간주한다.

탱크 내부의 질량 수지식과 에너지 수지식의 미분 방정식은 질량 보존과 에너지 보존 법칙에 의해 각각 식 (1), (2)로 정의된다. Q_w 는 온도 차에 의해 외부환경에서 탱크 안으로 향하는 열량의 유입속도이다. 식 (4)는 탱크 벽이 가지는 전체 열전도 저항을 단열재의 열전도계수 및 두께 k , L 로 나타내고 있는데 전체 열전도 저항을 구할 때 철강으로 이루어진 탱크 벽의 열전도 저항은 단열재에 비해 무시할 수 있는 수준이므로 고려하지 않는다. 또한 CO₂ 기체가 이상기체 상태방정식을 따른다고 가정한다. 시스템에 사용되는 CO₂ 기체의 압축인자(compressibility factor) Z 가 $T=243.15$ K, $P=700$ kPa에서 0.9396, $T=293.15$ K, $P=101.3$ kPa에서 0.9917의 1에 가까운 값을 가질 뿐 아니라, 다른 상태방정식을 고려할 경우 반복계산법을 모델에 추가하는 어려움이 발생하기 때문이다. 마지막으로 질량 수지식의 개수를 1개로 유지하기 위해 초기에 탱크 내부에 존재하는 물질의 물성은 상온

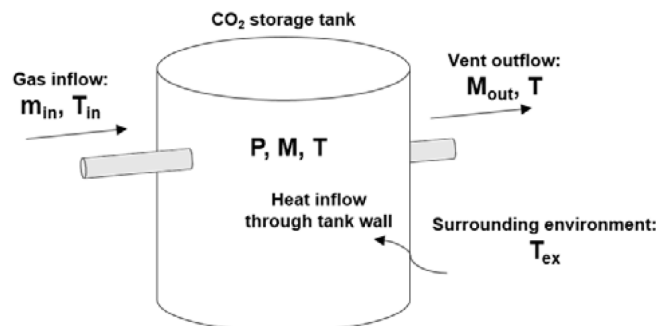


Fig. 1. Schematic diagram of CO₂ storage tank with inlet and outlet.

상압의 CO₂와 동일한 것으로 간주한다.

$$\frac{dM}{dt} = m_{in} - m_{out} \quad (1)$$

$$\frac{dE}{dt} = e_{in} - e_{out} + Q_w \quad (2)$$

$$e_{in} - e_{out} = C_p(m_{in}T_{in} - m_{out}T) \quad (3)$$

$$Q_w = \frac{kA}{L}(T - T_{ex}) \quad (4)$$

$$PV = \frac{M}{M_g}RT \quad (5)$$

$$\frac{dE}{dt} = \frac{d}{dt}(MC_pT) = C_p \frac{d}{dt}(MT) \quad (6)$$

이상기체 상태방정식을 M과 MT에 대하여 정리하고 그 결과를 시간 t에 대해 미분하여 얻은 $\frac{dM}{dt}$ 와 $\frac{d(MT)}{dt}$ 을 다시 P와 T에 대한 항으로 정리한다.

$$M = \frac{PVM_g}{RT}, MT = \frac{PVM_g}{R} \quad (7)$$

$$\frac{dM}{dt} = \frac{VM_g}{R} \frac{d(P)}{dt} = \frac{VM_g}{R} \left(\frac{1}{T} \frac{dP}{dt} - \frac{P}{T^2} \frac{dT}{dt} \right) \quad (8)$$

$$\frac{d}{dt}(MT) = \frac{VM_g}{R} \frac{dP}{dt} \quad (9)$$

P와 T를 합친 상태변수 벡터 $Y \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$ 를 지정하고 식 (8), (9)를 식 (1), (2)에 대입한 후 Y의 미분 형식에 맞춰 식 (11)로 정리한다. 식 (11)을 살펴보면 \dot{y}_2 우변 항의 분모에 y_1 가 위치하므로 y_1 가 nonzero 조건을 만족하지 못하는 경우 수학적으로 모델식의 해를 얻지 못함을 알 수 있다. 그러나 $P=y_1$ 가 현실적인 값을 가지도록 하려면 가용영역(feasible region)을 더욱 좁게 잡아 $\{y_1 \in \mathbb{R}; y_1 > 0\}$ 을 만족하도록 해야 한다.

$$Y = \begin{bmatrix} P(t) \\ T(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\dot{Y} = \begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R}{C_p VM_g} \left\{ -\frac{kA}{L}(y_2 - T_{ex}) + m_{in}C_pT_{in} - m_{out}C_p y_2 \right\} \\ \frac{y_2}{y_1} \cdot \dot{y}_1 - \frac{R}{VM_g y_1} y_2^2 (m_{in} - m_{out}) \end{bmatrix} \quad (11)$$

CO₂ 기체를 이용한 예냉과정의 실험 데이터가 존재하지 않는 관계로 동일한 공정 운전 조건에서 공정 시뮬레이터인 Aspen HYSYS 7.3을 이용한 동적 모사 결과와 식 (11)을 MATLAB에서 모사한 결과를 비교하는 방식으로 앞서 제시한 수학적 모델을 검증한다. Fig. 2의 (a)는 시간에 따른 탱크 온도 T의 변화를 보여주며 (b)는 탱크 압력 P의 변화를 보여준다. T의 경우 공정 시뮬레이터와 수학적 모델 간 차이가 크지 않고 변화율이 유사한 것을 확인할 수 있다. P의 경우에도 대체적으로 공정 시뮬레이터와 수학적 모델의 모사 결과가 유사한 경향성을 따르지만 650~700 kPa의 압력 범위 이상으로 P가 상승하면 두 결과 간 불일치의 정도가 점차 커지게 된다. 이는 수학적 모델에서는 m_{out} 을 고정된 값으로 지정한 후 모사를 진행하는 것이 가능한 반면 공정 시뮬레이터의 동적 모사 과정은 밸브의 열린 비율을 고정할 수는 있어도 배기 흐름의 유량을 고정하지는 않기 때문이다. 따라서 10 bar 이상의 조건에서 본 모델을 사용할 경우 공정 시뮬레이터와 비교하였을 때 P의 오차율이 상당할 수 있음을 염두에 두어야 한다.

3. 제어구조 제안 및 해석

시스템을 제어하는 목적은 조작변수인 입구의 CO₂ 기체의 유입속도 m_{in} 의 값을 변화시켜 탱크 온도 T를 원하는 값으로 끌어내리는 것이다. 이 때 m_{in} 의 값이 클수록 냉각효과가 크지만 동시에 탱크 압력 P의 상승속도도 높아지는데 탱크 안에서 P가 특정 값 이상으로 상승하는 것은 원하는 바가 아니다. 그리하여 조작변수의 값에도 한계를 적용시킬 필요가 발생하므로 결과적으로 m_{in} 으로 하여금 $0 \leq m_{in} \leq 30$ [ton/hr] 조건을 만족하도록 한다. 따라서 예냉과정의 제어 시스템은 T에 대한 1개의 설정값과 2개의 제약조건을 가지게 된다. 본 논문의 목적은 PI제어를 예냉과정 시스템에 적용할 경우 제어 변

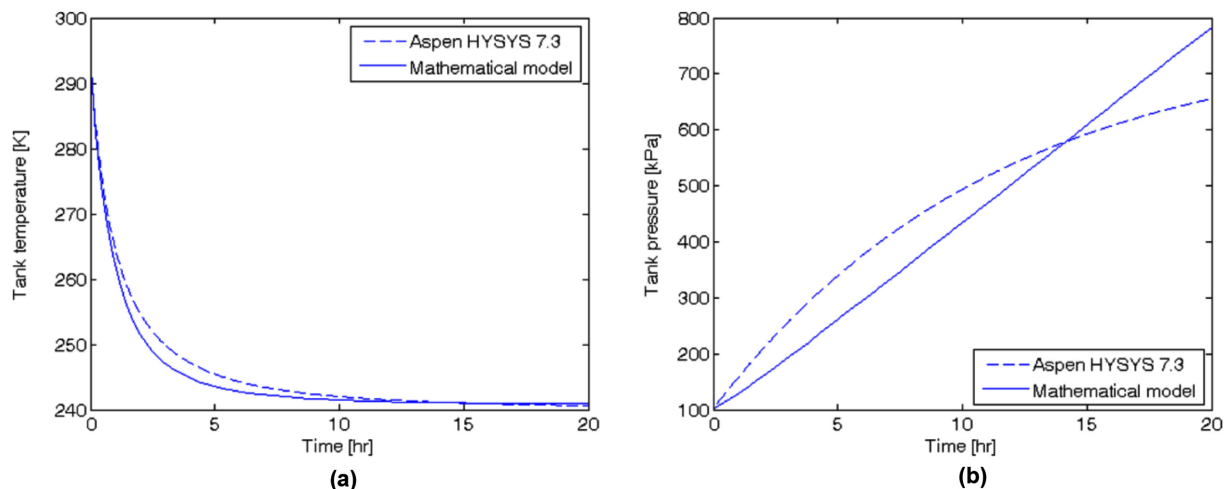


Fig. 2. Comparison of the simulation results of the Aspen HYSYS 7.3 (m_{in} =20 ton/hr, valve opening percentage = 50%) and the mathematical model using MATLAB (m_{in} =20 ton/hr, m_{out} =10 ton/hr); all other operational conditions are given in Table 1. (a) Tank temperature (b) Tank pressure.

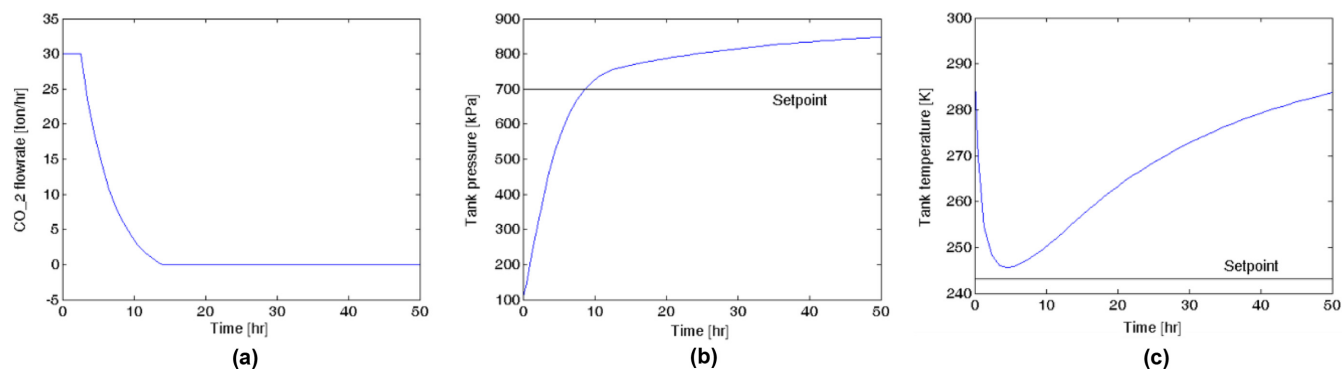


Fig. 5. Control of the tank pressure to 700 kPa with the output purge rate of 0 ton/hr (a) CO₂ flowrate (b) Tank pressure (c) Tank temperature.

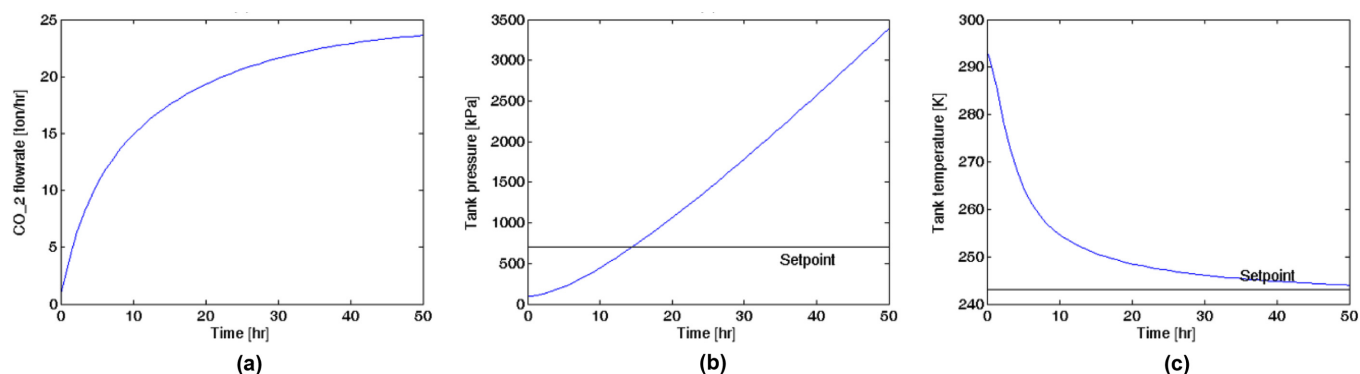


Fig. 6. Control of the tank temperature to 243.15 K with output purge rate of 0 ton/hr (a) CO₂ flowrate (b) Tank pressure (c) Tank temperature.

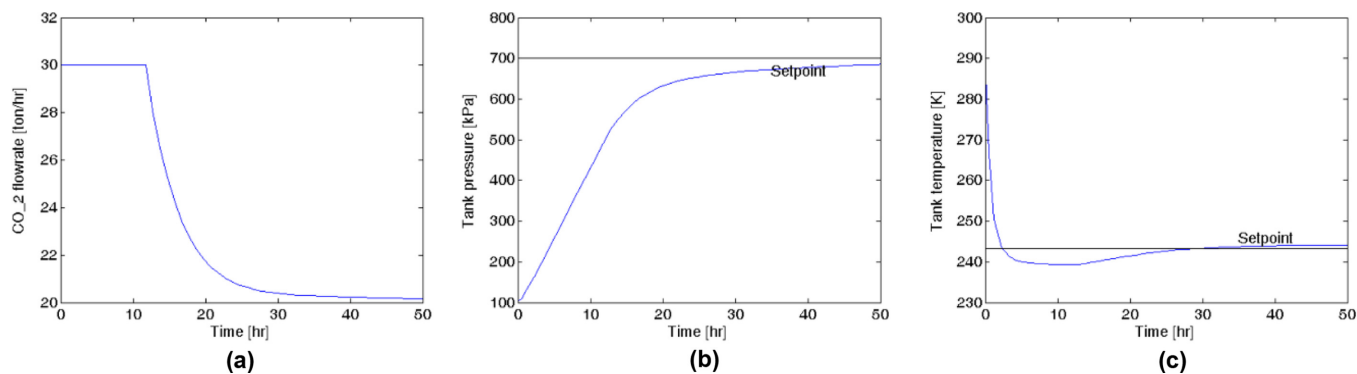


Fig. 7. Control of the tank pressure to 700 kPa with output purge rate of 20 ton/hr (a) CO₂ flowrate (b) Tank pressure (c) Tank temperature.

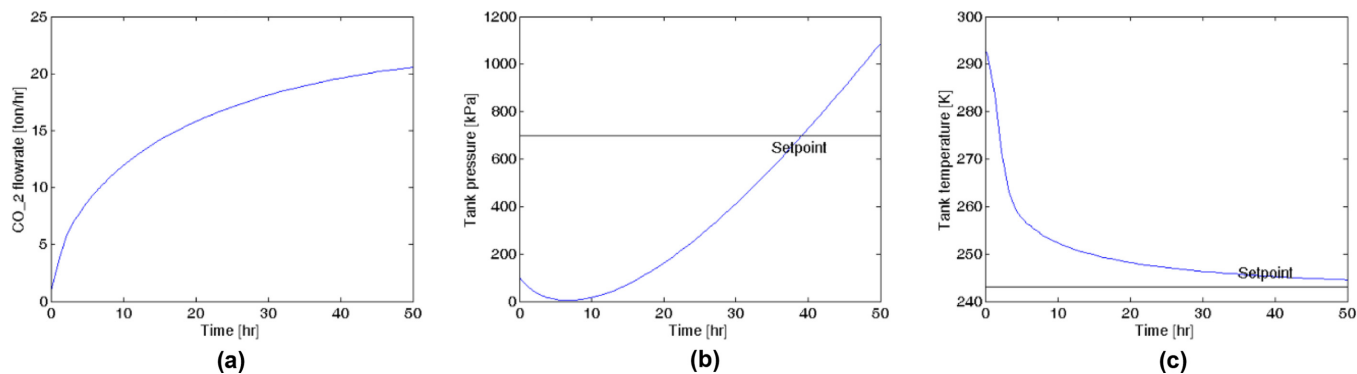


Fig. 8. Control of the tank temperature to 243.15 K with output purge rate of 10 ton/hr (a) CO₂ flowrate (b) Tank pressure (c) Tank temperature.

Table 1. Physical parameters of the CO₂ storage tank

Variable	Description	Value
k	Heat conductivity of tank wall insulation (polyurethane spray) [kJ/m/hr/K]	0.1080
A	Outer surface area of tank with volume of 13,000 m ³ [m ²]	2.6731*10 ³
L	Thickness of tank wall insulation [m]	0.0500
C _p	Specific heat capacity of CO ₂ at temperature of 225.15 K [kJ/ton/K]	735.0
T _{in}	Mass inflow temperature [K]	225.15
T ₀	Initial temperature inside tank [K]	293.15
T _{ex}	Outer environmental temperature [K]	293.15
P ₀	Initial pressure inside tank [kPa]	1.0133*10 ²
R	Ideal gas constant [kJ/kmole/K]	8.3145
M _g	Molar weight of CO ₂ [ton/kmole]	44.01*10 ⁻³
V	Tank volume [m ³]	1.300*10 ⁴

10 ton/hr이 되었다. 공정 모사에 사용된 계수들의 설명과 값은 Table 1을 참조한다.

4. 결과 토의

Fig. 5의 경우 m_{in} 의 초기값이 최대값인 30 ton/hr로 시작하며 P가 설정값 이상으로 상승하면 m_{in} 이 최소값인 0 ton/hr로 수렴한다. 탱크에 저온의 CO₂ 기체 주입이 중단되면 동시에 T가 상승하게 되는데 식 (5)에 따라 P가 설정값 이상으로 지속적으로 상승한다. 이와 같이 T의 상승과 P의 상승이 상호작용하면 반대로 m_{in} 은 0 ton/hr 이상의 값을 가지기 어렵다. 이 경우 탱크의 예냉이라는 원래의 목적에 부합하지 않는 결과가 발생한다.

Fig. 6의 경우 반대로 m_{in} 이 0 ton/hr에서 시작해 증가한다. 이것은 탱크 내에서 T를 낮출 여지가 계속 남아있다는 의미이며 실제로 T는 시간이 흐를수록 지속적으로 낮아진다. 그로 인해 T를 제어변수로 지정하면 탱크의 예냉과정의 본 목적에 맞는 결과가 나오는 것처럼 보이지만 시간이 흐를수록 m_{in} 이 증가하고 P이 지속적으로 상승하는 반면 T를 낮추는 효율성은 떨어지는 것을 관찰할 수 있다. 온도를 낮추는 원동력을 제공하는 식 (11)의 \dot{y}_2 함수 우변의 2번째 항의 분모에 $P=y_1$ 가 포함되어 있어서 P가 증가할수록 $\lim_{P \rightarrow \infty} \dot{y}_2=0$ 가 된다. 따라서 T를 제어변수로 지정하면 탱크 온도를 설정값에 가깝도록 낮출 수 있으나 안정시간(settling time)이 길고 50K 가량 온도를 낮추는 과정에서 압력이 35배 이상 상승하는 비효율적인 공정이 만들어짐을 알 수 있다. 따라서 시스템의 물질의 양을 결정하는 요인이 m_{in} 뿐일 경우에는 효율적으로 예냉을 할 수 없다. m_{out} 이 ton/hr보다 클 경우 시스템은 과도하게 축적된 압력을 줄이는 동시에 더 많은 양의 저온 CO₂ 기체를 받아들여지게 되어 예냉과정이 보다 효율적으로 이루어진다.

Fig. 7을 보면 m_{in} 이 Fig. 5와 마찬가지로 최대값인 30 ton/hr로 시작한다. 그러나 이후에 0 ton/hr으로 수렴하지 않고 m_{out} 과 유사한 값인 20 ton/hr에 가까워진다. 동시에 누적된 압력은 밖으로 배기되므로 P가 설정값인 700 kPa를 넘지 않는다. T 또한 4시간 이후에 최저점에 도달하고 그 이후 작은 폭으로 상승하지만 -243K 밑으로 계속 유지되며 Fig. 5와 같은 냉각효과의 손실이 없다.

Fig. 8은 Fig. 6과 유사한 진행 양상을 보이나 역시 배기 흐름이 존재함으로써 탱크 압력의 부담이 큰 폭으로 줄어들음을 확인할 수 있다.

P는 7 시간이 지난 시점에서 최저점에 도달한 이후 지속적으로 상승하지만 그 속도가 68% 이상 늦춰지고 있다. 주목할 점은 다른 사례들과 달리 Fig. 8의 (b)는 단조 증가함수가 아니며, 최저점에서의 P는 0 kPa에 가깝다는 것이다. 따라서 m_{out} 의 값을 10ton/hr 이상으로 할 경우 어느 한 시점에서 압력이 0kPa에 도달하는 순간이 있고 그러한 경우 본 연구의 모델인 식 (11)에 따라 \dot{y}_2 우변 항의 분모인 P가 0 kPa이 되므로 미분방정식의 적분 해를 더 이상 구할 수 없다. P가 1000 kPa 이상으로 상승하므로 m_{out} 의 값이 10 ton/hr 보다 더 커야 함에도 불구하고 이러한 모델식의 특이점 발생 때문에 m_{out} 의 값을 Fig. 7의 경우만큼 증가시키지 못한다.

공정의 제어변수를 P로 정할 경우와 T로 정할 경우를 비교할 때 가장 큰 차이를 불러일으키는 요소는 m_{in} 의 초기값이다. 전자의 경우에는 m_{in} 의 초기값이 최대값을 가지다가 점차 줄어드는 반면, 후자에서는 m_{in} 의 초기값이 0ton/hr부터 시작한다. 그로 인하여 전자의 경우에는 P가 초반부터 빠르게 증가하는 반면, 후자의 경우에는 P가 초반에는 느리게 상승하지만 시간이 지날수록 그 상승속도가 증가한다. 이러한 양상은 m_{out} 이 증가할수록 두드러지며 Fig. 8의 (b)에서는 P가 오히려 감소하다가 증가하는 형태를 띤다. 따라서 $m_{out}=c$, ($c \geq \hat{m}_{out} > 0$, $\argmin \{\dot{y}_1(c)=0\} = \hat{m}_{out}$) 일 경우 제어 변수를 T로 지정하면 $\dot{y}_1(c)=0$ 가 되는 시간 t^* 가 존재함을 알 수 있고, 그로 인해 함수 P에 최소값이 발생하게 되는데 만약 $\forall t, \min P \leq 0$ [kPa]이 되는 경우에는 공정의 제어가 불가능해진다.

5. 결 론

CO₂ 수송선에 사용되는 화물용 탱크는 액화상태의 CO₂를 선적하기 전 기체상태의 이산화탄소를 탱크에 주입하는 방식의 예냉과정을 거쳐야 한다. 본 연구는 탱크의 질량 수지식과 에너지 수지식을 정리하였고 그 모사 결과를 상용화된 공정 시뮬레이터인 Aspen HYSYS 7.3의 모사 결과와 비교하였으며 PI제어로 공정을 제어하는 과정을 보였다. 또한 제어변수를 탱크 내 압력 또는 온도로 정하는 두 가지 사례를 시뮬레이션하였고 조작변수인 m_{in} 의 범위를 0~30 ton/hr 사이로 한정시켜도 시스템의 온도가 목표한 값에 도달하는 것을 확인하였다. 예냉과정의 효율성 제고를 위해 배기 흐름의 유출속도 m_{out} 을 양수의 값으로 설정할 때 더 좋은 결과를 나타내었으나 그 경우, 공정의 제어변수가 탱크 내 온도 T일 때는 주어진 모델에서 안정한 결과를 보여주지 못하는 현상이 발생하였다.

공정의 목표가 시스템의 온도를 낮추는 것이기 때문에 일반적으로는 제어변수와 설정값을 탱크 내 온도로 설정하는 것을 고려하게 된다. 그러나 이 논문에서 유도한 것처럼 모델이 비선형이기 때문에 원하는 제어가 안정하게 이루어지지 않는 경우 탱크 내 다른 상태 변수를 제어하는 간접적인 방식으로 목표에 도달하는 것도 대안이 될 수 있다. 본 연구에서는 기본적 PI제어를 통해 목적을 달성하였지만 배기흐름을 고정된 채 공정을 모사해야 하는 등 한계점 또한 확인할 수 있었다. 궁극적으로는 주입흐름과 배기흐름의 동시조작 및 탱크 온도 변화율에 제약조건을 거는 것을 고려한 제어알고리즘을 적용해야 하므로 기본적 PID제어뿐 아니라 모델예측제어(model predictive control: MPC)와 같은 공정제어기법을 사용할 필요가 있다. 그리하여 목적함수 최적화를 도입하여 예냉속도를 제어할 수 있는 환경에서 예냉과정을 통해 도달하고자 하는 탱크 운전조건을 최단 시간 내에 달성하는 방법에 대한 내용은 후속 연구에서 다루고자 한다.

감 사

본 연구는 지식경제 기술혁신사업 중 CO₂ 수송선 화물탱크/Gas Dome 설계/생산 및 하역시스템기술 개발 사업과 (주)삼성중공업의 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다(과제번호: 0458-20130040).

Nomenclatures

A	: Area of tank wall [m ²]
C _p	: Specific heat capacity of CO ₂ at T=225.15K [kJ/ton/K]
M	: Mass of substance inside tank [ton]
M _g	: Molecular weight of CO ₂ [ton/kmole]
E	: Amount of heat inside tank [kJ]
L	: Thickness of tank insulation [m]
P	: Tank pressure [kPa]
Q _w	: External heat transfer rate through tank wall [kJ/hr]
R	: Gas constant [kJ/kmole/K]
T	: Tank temperature [K]
T _{in}	: Temperature of CO ₂ gas inflow stream [K]
T _{ex}	: Temperature of surroundings [K]
V	: Tank volume [m ³]
c	: Constant of m _{out}
e _{in}	: Heat inflow rate into tank [kJ/hr]
e _{out}	: Heat outflow rate from tank [kJ/hr]
k	: Heat conductivity of tank insulation material [kJ/m/hr/K]
m _{in}	: CO ₂ inflow rate into tank [ton/hr]
m _{out}	: CO ₂ outflow rate from tank [ton/hr]
t	: Time [hr]

References

1. Benson, S. M. and F. M. O. Jr., "Carbon Dioxide Capture and Storage," *MRS Bulletin*, **33**(4), 303-305(2008).
2. Feron, P. H. M. and Hendriks, C. A., "CO₂ Capture Process Principles and Costs," *Oil & Gas Science and Technology - Rev. IFP*, **60**(3), 451-459(2005).
3. Jung, J., Lim, Y., Jeong, Y. S., Lee, U., Yang, S. Y. and Han, C. H., "CO₂ Capture Process Using Aqueous Monoethanolamine (MEA): Reduction of Solvent Regeneration Energy by Flue Gas Splitting," *Korean Chem. Eng. Res.*, **49**(6), 764-768(2011).
4. Lee, D. H., Kim, M. H., Kwon, S. H., Kim, J. W. and Lee, Y. B., "A Parametric Sensitivity Study on LNG Tank Sloshing Loads by Numerical Simulations," *Ocean Engineering*, **34**(1), 3-9(2007).
5. Shin, M. W., Shin, D., Choi, S. H. and Yoon, E. S., "Optimal Operation of the Boil-off Gas Compression Process Using a Boil-off Rate Model for LNG Storage Tanks," *Korean J. Chem. Eng.*, **25**(1), 7-12(2008).
6. Dimopoulos, G. G. and Frangopoulos, C. A., "A Dynamical Model for Liquefied Natural Gas Evaporation during Marine Transportation," *International Journal of Thermodynamics*, **11**(3), 123-131(2008).
7. Kim, H. S., Shin, M. W. and Yoon, E. S., "Optimization of Operating Procedure of LNG Storage Facilities Using Rigorous BOR Model," 17th World Congress of the International Federation of Automatic Control, July, Seoul(2008).
8. Heestand, J. and Shipman, C. W., "A Predictive Model for Rollover in Stratified LNG Tanks," *AIChE J.*, **29**(2) 199-207(1983).
9. Shin, Y. and Lee, Y. P., "Design of a Boil-off Natural Gas Reliquefaction Control System for LNG Carriers," *Applied Energy*, **86**(1), 37-44(2009).