

관내 이산화탄소 압력강하에 아르곤 불순물이 미치는 영향에 관한 실험적 연구

조맹익¹, 강성길¹, 허철^{2*}, 백종화¹
¹한국해양과학기술원 선박해양플랜트연구소 해양CCS연구단
²한국해양대학교 해양과학기술융합학과

Experimental Study on the Argon Impurity Effect in the Pressure Drop of CO₂ mixture flow

Meang-Ik Cho¹, Seong-Gil Kang¹, Cheol Huh^{2*}, Jong-Hwa Baek¹

¹Offshore CCS Research Unit, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Korea Institute of
Ocean Science and Technology

²Ocean Science & Technology School, Korea Maritime and Ocean University

요약 이산화탄소 포집 및 저장기술(Carbon Capture&Storage, CCS)은 대규모 배출원으로부터 이산화탄소를 포집하여 지중의 안전한 지질구조에 수천년 이상 안정적으로 저장하는 기술이다. 포집된 이산화탄소에는 필연적으로 불순물이 포함되어있으며, 특히 연소과정에 투입되는 공기를 구성하는 대표적인 물질들인 질소, 산소, 아르곤 등이 유입될 수 있다. 이러한 불순물들은 포집 이후의 전체 공정에 다양한 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 이산화탄소 혼합물의 관내유동에 다양한 불순물이 미치는 영향을 평가할 수 있는 실험 장치를 설계 및 제작하였으며 특히 이산화탄소 혼합물의 관내유동에 있어 아르곤 불순물이 미치는 영향을 평가하였다. 즉, 이산화탄소-아르곤 혼합물 2상유동의 압력강하와 유동양식을 실험적으로 분석하였으며, 이를 다양한 압력강하 모델 및 상관식과 비교하여 추후 이산화탄소 혼합물 관련 공정 설계 시 참고할 수 있는 기초 데이터를 제시하고자 하였다.

Abstract During the carbon-dioxide capture and storage(CCS) process, CO₂ is captured from large point source, and then injected and stored in stable geological structure for thousands and more years. Inside the captured CO₂ flow, various impurities, such as N₂, O₂, argon, etc, are included inevitably. These impurities affect on the CCS process on various aspects. In this study, we designed and built experimental facility to evaluate the various impurity effect on the CO₂ pipeline flow, and analyzed the effect of argon ratio and pressure variation on the pressure drop of CO₂ flow. By comparing experimental data with 4 kinds of pressure drop model, we figured out and recommended the Cicchitti's model since it showed most accurate result among compared models in this study.

Keywords : CCS, Carbon-Dioxide, Argon, Impurity, Pressure-Drop, Pipeline

1. 서론

지구온난화와 같은 기후변화 현상에 대응하기 위한 기술로 이산화탄소 포집 및 저장(Carbon-dioxide Capture and Storage, 이하 CCS) 기술이 주목받고 있다.

CCS는 발전소, 제철소 등 대규모 탄소배출원으로부터 이산화탄소를 포집한 이후, 지중의 안전한 지질구조에 수천 년이상 격리시키는 기술이다. 이러한 CCS 기술은 탄소제로 사회로 전환되기 전까지 석탄, 유가스 등의 화

본 연구는 2015년 해양수산부의 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 “CO₂ 해양지중저장 기술개발”의 연구 결과로 연구비 지원에 감사드립니다.

*Corresponding Author : Cheol Huh(Korea Maritime and Ocean Univ.)

Tel: +82-51-410-5247 email: cheolhuh@kmou.ac.kr

Received November 13, 2015

Revised December 2, 2015

Accepted December 4, 2015

Published December 31, 2015

석연료를 활용하는 다양한 산업을 지속가능케 하는 한편, 이산화탄소를 대규모로 감축할 수 있는 현실적인 기술로 떠오르고 있다. 이에 각국은 막대한 예산을 투자하여 기술개발에 매진하고 있으며, 유럽의 Sleipner[1], 북미의 Saskatchewan[2] 및 RCSP[3], 일본의 토마쿠마이[4] 등이 대표적인 대규모 CCS 프로젝트이다.

우리나라는 2009년 6억톤이상의 온실가스를 배출하였으며 배출량 증가속도는 2011년 기준 OECD국가 중 가장 높다[5]. 더불어 2015년 6월 기후변화협상회의에 제출한 우리나라 온실가스 감축목표(INDC)에는 2030년 기준, BAU 대비 37%의 대규모 감축목표가 제시된 바, 대규모 온실가스 감축 수단인 조기 확보가 매우 중요한 시점이라 할 수 있다.

CCS는 크게 포집(Capture), 수송(Transportation), 저장(Storage) 공정으로 이루어져 있다. 포집공정에서는 대규모 배출원에서 나오는 이산화탄소를 분리·정제하여 이산화탄소를 포집한다. 이렇게 포집된 이산화탄소에는 연소 및 포집과정에서 불가피하게 불순물이 유입될 수 있다. 대표적인 불순물로 연소과정의 부산물인 질소산화물, 황산화물 및 질소, 산소, 아르곤 등이 있으며, 포집과정의 흡수제인 아민 또는 암모니아 등이 유입될 수 있다. 관련하여 CCS 공정에서 불순물이 포함된 이산화탄소 혼합물 유동의 대표적인 조성 예를 Table. 1에 나타내었다. 이러한 불순물은 이산화탄소 혼합물의 밀도, 점도 등의 물성치를 변화시키며, 특히 Fig. 1에 나타난 바와 같이 기체-액체 경계조건을 변화시키기도 한다. 이러한 물성치 변화는 압축 시 필요한 에너지를 증가시키거나, 지중에 저장된 이산화탄소의 거동에 영향을 미칠 수도 있다. 따라서 이산화탄소 혼합물의 물성치를 정확히 예측함으로써 공정의 설계조건을 보다 정확하게 산출하고, 이를 바탕으로 설계 안정성 또한 향상시키는 것이 중요한 과제중의 하나라 할 수 있다. 관련된 국내 연구로 허

철[7] 등이 이산화탄소 혼합물을 대상으로 다양한 상태 방정식을 비교분석하고 혼합물의 이성분 매개변수 최적화를 시도한 바 있다.

CCS 공정의 경제성 및 안전성을 향상시키기 위해서는 상기 분석한 상태량 분석 외에도 이산화탄소 혼합물의 수송관 내 유동 예측 정확도 또한 높일 필요가 있다. 기존의 공정 시뮬레이션 해석 도구인 ASPEN HYSYS, OLGA, PIPEsim을 이용한 결과와 관내유동 상관식을 통해 예측한 이산화탄소 혼합물의 압력강하, 유동양식 등이 등의 해석 정확도를 실험결과와 비교함으로써, 이러한 해석 도구와 상관식을 이용한 공정설계 결과물의 신뢰성을 확인할 필요가 있다. 이와 관련된 기초 연구로 Petterson은 순수 이산화탄소의 관내유동을 모사하는 실험장치를 제작한 후, 고압의 이산화탄소를 파이프 내부로 주입하고 출구를 대기중으로 개방하였을 때, 내부의 온도 및 압력 변화를 관찰한 바 있다[8]. Koeijer는 관내 비정상상태 유동 압력강하 실험데이터를 Friedel 상관식 및 환상류 모델 상관식의 예측치와 비교·분석한 바 있다[9]. Cheng은 순수 이산화탄소의 관내 비등유동의 압력강하 및 유동양식 변화를 기존의 다양한 상관식과 비교하고 유동양식 기반의 새로운 상관식 및 유동양식 선도를 제시한 바 있다[10]. Grauso는 순수 이산화탄소 2상 유동의 압력강하 실험데이터를 획득하고 환상류 구간에서의 압력강하 상관식을 제시한 바 있다[11]. 이와 같이 순수 이산화탄소의 정상·비정상상태 유동에 대한 다양한 실험연구들이 진행된 바 있으나 불순물, 특히 아르곤

Table 1. CO₂ mixture composition ratio captured from CCS processes[6]

Composition (Mole%)	Oxy-combustion SPC 5C	Oxy-Fuel Combustion plants
CO ₂	70.92	76
H ₂ O	15.14	-
SO ₂	0.01	0.5
Ar	3.11	2.5
N ₂	8.34	15
O ₂	2.49	6
H ₂	0	-

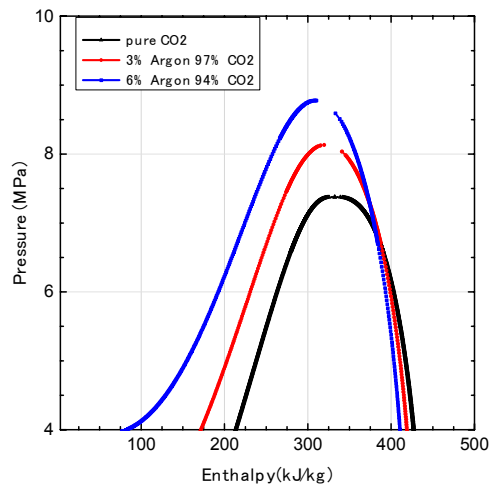


Fig. 1. Pressure-Enthalpy diagram of CO₂-Argon mixture with varying composition

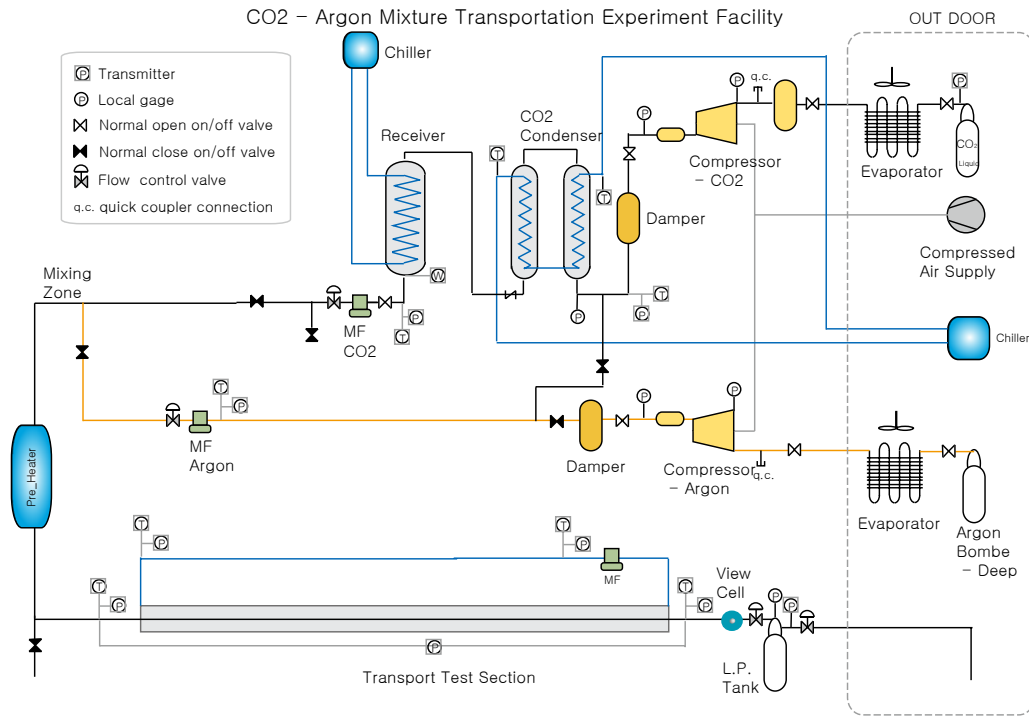


Fig. 2. Schematic diagram of CO₂-Argon mixture flow experimental facility

이 포함된 이산화탄소 혼합물 유동에 관한 데이터는 거의 전무한 실정이다.

본 연구에서는 이산화탄소 혼합물 유동의 압력강하에 아르곤 불순물의 조성 및 운전 압력이 미치는 영향을 살펴보고 이를 기존의 다양한 압력강하 상관식과 비교해보고자 하였다.

Table 2. Test condition

Test condition	Set Point
Pressure(Bar)	58, 64, 72, 80
Temperature(°C)	16
Total Flow rate(kg/hr)	17.2
Argon ratio(% weight)	1.43~16.4
%weight at 58 bar	1.43~5.08
%weight at 64 bar	2.70~9.56
%weight at 72 bar	5.29~13.8
%weight at 80 bar	7.66~16.4

2. 실험장치 및 조건

2.1 실험조건

본 연구에서는 연 100만톤의 이산화탄소 혼합물이 파

이프라인으로 수송될 경우를 가정하여 모의실험을 수행하였다. 상온의 120 bar 조건의 이산화탄소가 8인치 관 내부를 흐를 경우 이때의 레이놀즈 수는 약 1.38×10^6 이고 질량유속은 $405 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 이다. 본 연구에서 사용된 시험부의 내경은 3.8608 mm이며 이를 활용하여 레이놀즈 수를 상사할 경우 요구되는 유량은 1.46 ton/hr으로 이는 실험실 규모의 실험에서 구현하기 어려운 조건이다. 따라서 본 연구에서는 질량유량을 연간 백만톤 수송의 조건과 유사하게 맞추어질 수 있는 한, 실제 조건을 상사하고자 노력하였다. Table. 2에 본 실험연구의 대표적 조건인 온도, 유량, 압력, 아르곤 조성비를 나타내었다. 압력은 58~80 bar 사이의 총 4개의 조건에서 실험하였으며 유량은 상기 언급된 질량유속과 시험부 관 내경을 고려하여 17.2 kg/hr로 유지하였다. 아르곤 조성비는 질량기준 1.43~16.4%로 조절하였으며 이를 위해 이산화탄소 및 아르곤 주입관의 미터링 밸브를 수동 조작함으로써 조절하였다.

2.2 실험장치

본 연구에서 사용된 실험장치의 개략도를 Fig. 2에 나

타내었다. 본 연구에 사용된 작동유체는 이산화탄소 및 아르곤이며 두 유체모두 액체 상태로 개별 압력용기에 담겨 공급되었다. 압력용기 내부의 딥튜브(Deep tube)를 통해 공급되는 개별 유체는 대기온 증발기를 거쳐 기체 상태로 가압 부스터(DLE모델, Maximator社)에 수송된다. 각각의 부스터로부터 가압 후, 토출되는 유체 중, 아르곤은 기체상태로 유량계(RHM015, Rheonik社)에 공급되어 유량이 계측된 후, 미터링 밸브를 지나 혼합부로 이송되어 추후 이산화탄소와 혼합되었다. 이산화탄소의 경우 부스터에서 토출된 이후, 냉각을 거쳐 액체 상태로 유량계(CMF010, MicroMotion社)에 공급되었다. 유량이 계측된 후의 이산화탄소는 미터링 밸브를 지나 혼합부에 공급되어 이산화탄소와 아르곤이 혼합된 상태로 시험부 입구의 Pre-Heater로 전달되었다. 전달된 이산화탄소 혼합물은 상기 실험조건에 명시된 온도조건으로 냉각 또는 가열된 후 시험부로 공급되었다. 시험부로 공급되는 혼합물의 조성비는 각 유체가 통과하는 미터링 밸브를 통해 조절되었으며 시험부 압력은 상기 미터링 밸브 및 각 부스터의 토출압을 조절함으로써 실험조건에 맞게 조절하였다. 시험부는 내경 3.8608 mm, 길이 6 m의 SUS 튜브이며 입구와 출구에 PT100Ω 온도센서와 절대압력계(요코가와 EJX310) 및 차압계(요코가와 EJX110)가 설치되어 시험부 입·출구의 온도, 압력, 차압을 계측하였다. 시험부 외부는 두께 80mm이상의 발포 고무보온재를 이용하여 단열하였다. 시험부 후단에는 시험부와 내경이 동일한 가시창을 설치하여 유동패턴을 가시화할 수 있도록 하였다. 이후, 이산화탄소 혼합물은 12 리터의 저장저장조에 일정한 압력으로 저장된 후, 대기로 배출되었다. 실험 중 계측된 데이터는 NI社의 cDAQ를 통해 PC에 파일로 저장되었다. 실험 시 계측 평균값이 4분 동안 측정값의 1% 이내에서 벗어나지 않을 경우에 정상상태에 도달한 것으로 판단하였다. 실험결과 데이터 Reduction 시 필요한 물성치는 NIST REFPROP[12]을 이용하여 획득하였다. 실험에 사용된 계측장치들의 정확도는 Table. 3에 정리하였다.

Table 3. Accuracy of sensors in experimental apparatus

Sensing instrument	Accuracy
CO2 mass flow meter	±0.14 % reading
Argon mass flow meter	±1.0 % reading
Inlet Pressure(Abs)	±0.064 bar
Differential Pressure	±0.2 kPa

3. 실험결과 및 토의

본 연구에서는 이산화탄소-아르곤 혼합물 2상유동의 압력강하 실험데이터를 획득하고 이를 기존의 연구결과와 비교하여 기존 관내 2상유동 압력강하 모델들의 적용성을 분석해보고자 한다.

다양한 모델 중, 먼저 균질유동 압력강하 모델은 다음과 같이 정의된다.

$$-\frac{dP_f}{dz} = \frac{f_{TP}G^2}{2D\rho_{HM}} \quad (1)$$

상기 식에서 $-(dP_f/dz)$ 는 마찰압력강하 기울기를 나타내며, G 와 D 는 각각 질량유속과 내경을, f_{TP} 는 2상유동 마찰압력강하 계수를 나타낸다. ρ_{TH} 는 균질유동 밀도를 나타내며 다음과 같이 정의된다.

$$\rho_{HM} = 1 / \left(\frac{x}{\rho_G} + \frac{1-x}{\rho_L} \right) \quad (2)$$

ρ_G 와 ρ_L 는 각각 기체상과 액체상의 밀도를 의미하며 x 는 건도를 나타낸다. 마찰압력강하계수 f_{TP} 는 난류유동 구간($2000 < Re_{TP} < 100,000$)에서 다음과 같이 정의된다.

$$f_{TP} = \frac{0.3164}{Re_{TP}^{1/4}} \quad (3)$$

Re_{TP} 는 2상유동 레이놀즈 수를 나타내며 다음과 같이 정의된다.

$$Re_{TP} = \frac{GD}{\mu_{TP}} \quad (4)$$

위 식에서 μ_{TP} 는 2상유동 점도를 나타내며, 이를 정의하는 다양한 모델이 Table. 4 와 같이 제안된 바 있다.

다음으로 2상유동 압력강하 모델 중, 대표적인 상관

Table 4. Viscosity model for homogeneous flow model

Viscosity model	Reference
$\mu_{TP} = \mu_L$	Owen[13]
$\mu_{TP} = x\mu_G + (1-x)\mu_L$	Cicchitti[14]
$\mu_{TP} = \beta\mu_G + (1-\beta)(1+2.5\beta)\mu_L$ $\beta = \text{Volumetric quality}$	Beattie& Whalley[15]

식의 하나인 Friedel[16] 모델을 아래와 같이 정리하였다.

Friedel 모델과 같은 분리유동 모델은 아래의 2상유동 마찰손실배수(2 phase multiplier, Φ^2)를 바탕으로 하며 이는 2상유동의 압력강하 대비 단일액체상 유동 압력강하의 비율을 나타낸다.

$$\Phi_{LO}^2 = \frac{(dP/dz)_{TP}}{(dP/dz)_L} \quad (5)$$

Friedel은 아래 식과 같이 보정계수를 나타내었다.

$$\Phi_{LO}^2 = C_{F1} + \frac{3.24C_{F2}}{Fr^{0.0045} We^{0.035}} \quad (6)$$

$$C_{F1} = (1-x)^2 + X^2 \left(\frac{\rho_L}{\rho_G} \right) \left(\frac{f_{GO}}{f_{LO}} \right) \quad (7)$$

$$C_{F2} = x^{0.78} (1-x)^{0.24} \left(\frac{\rho_L}{\rho_G} \right)^{0.91} \times \left(\frac{\mu_G}{\mu_L} \right)^{0.19} \left(1 - \frac{\mu_G}{\mu_L} \right)^{0.7} \quad (8)$$

위 식에서 Fr은 프라우드 수, We는 웨버 수를 나타내며 f_{GO} 와 f_{LO} 는 전체유량이 각각 기체 또는 액체일 경우의 관내유체 마찰계수(Friction factor)를 나타낸다.

상기 모델들을 실험데이터와 비교하기 앞서, 먼저 압력조건에 따른 압력강하 실험데이터를 Fig. 3의 그래프

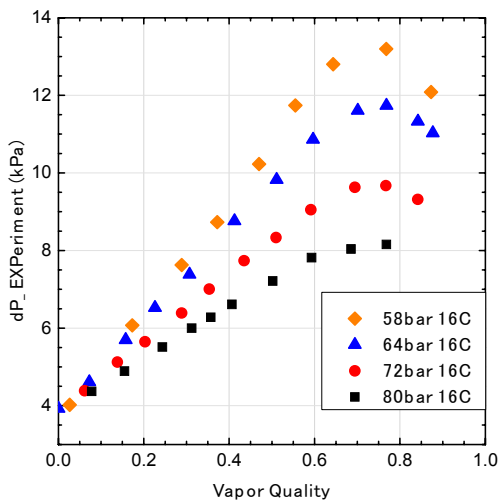


Fig. 3. Pressure drop data of CO₂-Argon mixture adiabatic flow experiment

에 도시하였다. 참고로 x축의 건도는 기체상의 무게비율로써, 실험 조건상의 아르곤 비율이 증가할수록 증가하였다. 그래프에 나타나듯이 낮은 압력조건일 수록 압력강하가 높은 값을 보이는 추세가 나타났다. 이의 주된 원인으로 압력변화에 따른 기체상의 비체적 및 점도 변화를 생각해 볼 수 있다. Fig. 4에 실험조건에서의 비체적 변화를 나타내었다. 도시된 바와 같이 압력이 낮을수록 기체상의 비체적이 증가하는 경향이 나타나며 이로 인해, 동일한 질량유속 대비 유체이동 속도가 높아짐에 따라, 압력강하가 커지는 것으로 사료된다. 이를 정량적으로 비교할 경우 80 bar 조건일 때보다 58 bar 조건에서

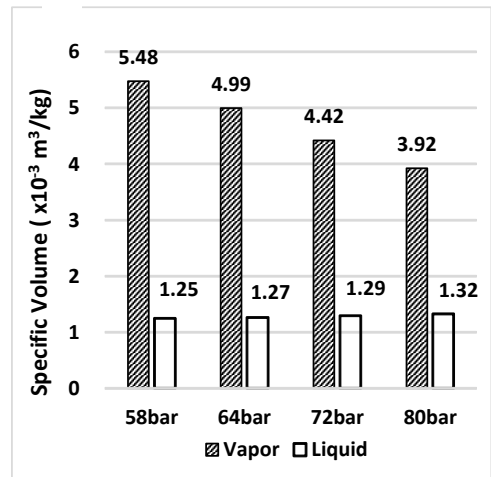


Fig. 4. Specific volume variation of CO₂-Argon mixture in test conditions

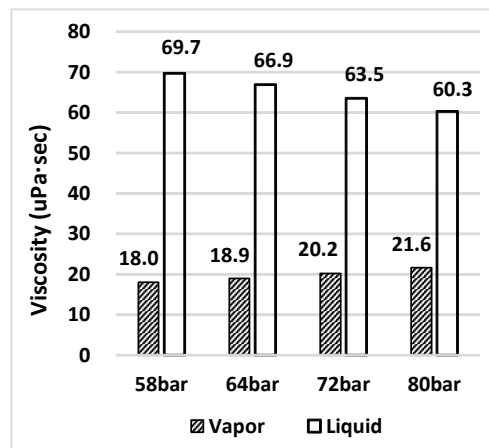


Fig. 5. Viscosity variation of CO₂-Argon mixture in test conditions

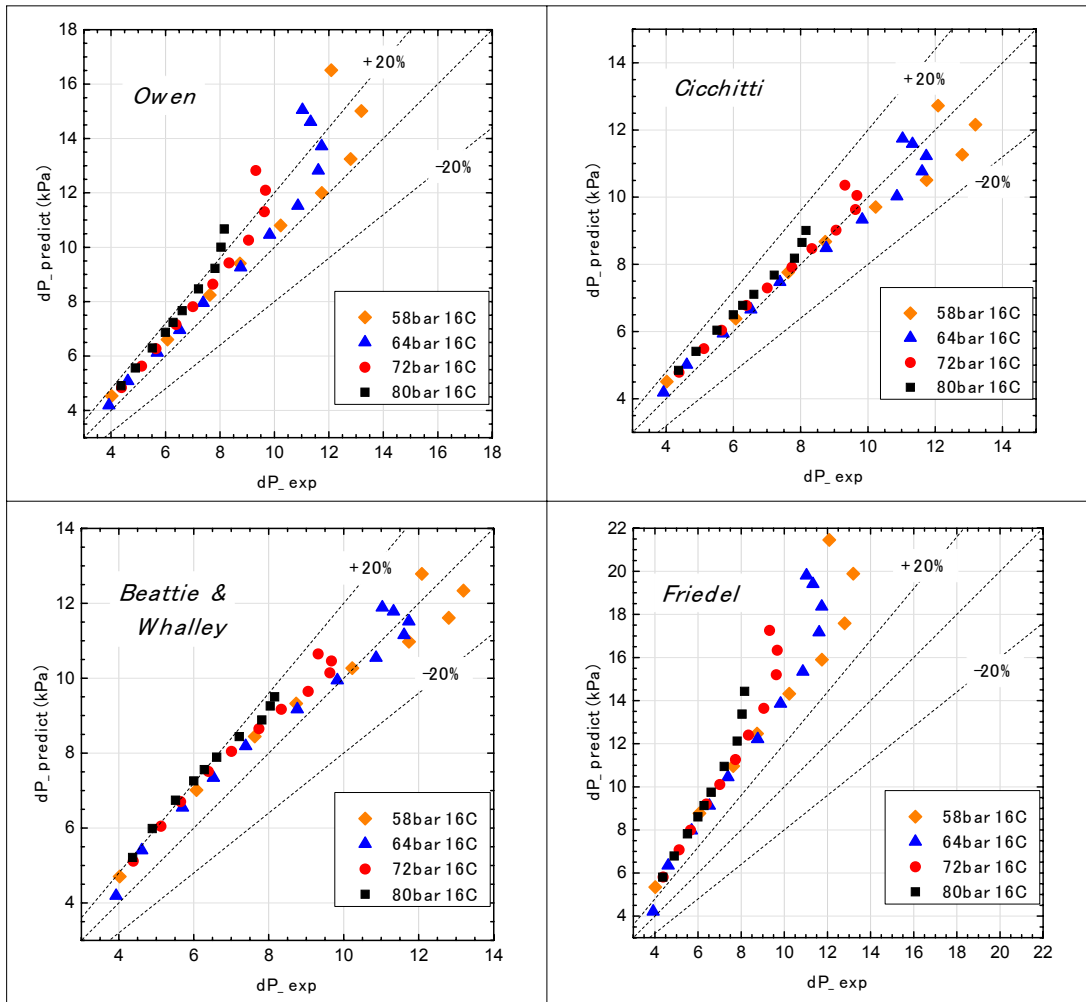


Fig. 6. Comparison of experimental data of adiabatic pressure drop of CO₂-Argon mixture flow with predicted pressure drop values by various models

비체적 값이 39.9 % 높았다. 반면에 액체상 비체적의 경우 최대 3.8 %의 차이를 보여 큰 차이가 없는 경향을 보여주었다. 앞서 언급한 비체적 외에 점도 또한 압력강하에 영향을 미치는 주요한 요인이며, Fig. 5에 각 압력 조건에서의 점도를 비교하여 나타내었다. 액체상의 경우 80 bar 대비 58 bar에서 점도가 15.7 % 높아졌으며, 반대로 기체상의 점도는 80 bar 대비 58 bar에서 16.6 % 감소하였다. 이러한 개별 상의 점도 증감 추이는 2상유동의 건도가 변함에 따라 반영되는 비율이 달라질 것으로 예상된다.

상기 Fig. 3에 도시한 압력강하 실험 결과를 앞서 언급한 다양한 모델들과 비교하여 Fig. 6에 나타내었다. 그

래프에서 알 수 있듯이 정확도가 가장 높은 모델은 Cicchitti 모델이었으며 그 다음으로 Beattie & Whalley, Owen, Friedel 순이었다. 개별 모델의 정확도를 MAPE(Maximum Absolute Percentage Error)로 검증해 보았으며 식은 아래와 같다.

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum \left[\frac{\Delta P_{pred} - \Delta P_{exp}}{\Delta P_{exp}} \times 100 \right] \quad (9)$$

MAPE 식을 이용한 검증결과 Cicchitti 모델은 6.1 %, Beattie & Whalley 모델은 11.8 %, Owen 모델은 14.2 %의 정확도를 보였으며 Friedel 상관식은 47.7 %의 정

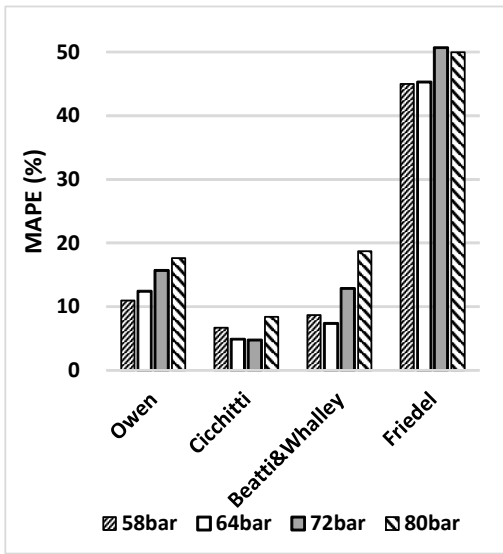


Fig. 7. Comparison of MAPE variation trend with different test pressure condition

확도를 보였다. 서론에서 언급한 Grauso의 순수 이산화탄소 압력강하 연구결과에서도 Friedel 상관식은 MAPE 기준 47.4 %의 정확도를 보였으며, 본 연구에서 수행한 이산화탄소-아르곤 혼합물 2상유동 압력강하 예측 결과 (MAPE)와 유사한 결과를 보인 것으로 사료된다. 압력 조건 변화에 따른 MAPE 정확도 변화를 Fig. 7에 나타내었다. 압력변화 추이와 일치하는 경향성은 보이지 않았으나, Owen 모델 및 Friedel 상관식의 경우 대체적으로 압력이 높을수록 MAPE 값이 증가하는 경향을 보였다.

아래 Fig. 8은 각 압력조건에서 건도 약 0.5 조건의 관내 유동을 가시화한 사진이다. 대체적으로 압력이 증가할수록 액적 크기가 감소하고 관 하단부의 액체층 두께 또한 감소하는 경향을 보였다. 다만 80 bar 조건의 경우, 다른 압력조건과 달리 하단부의 액체층 내부에 기포가 관찰되지 않았으며 얇은 액체 환상류가 흐르는 것으로 관찰되었다. 이는 유동내부 액체상의 상당 비율이 관벽의 액체층으로부터 분리되어, 액적형태로 유동하는 것에 기인하는 것이라고 사료된다. 대체적으로 압력이 높을수록 액체층 두께가 감소하는 것은 유동이 보다 잘 혼합되어(Well mixed) 흐르는 것을 나타내는 것으로 판단되며, 따라서 압력이 높아질수록 균질 유동 모델의 정확도가 높아질 것으로 판단된다. 더불어 본 연구의 모든 압력조건에서 관의 상단부에도 액적이 상당수 분포하는 것

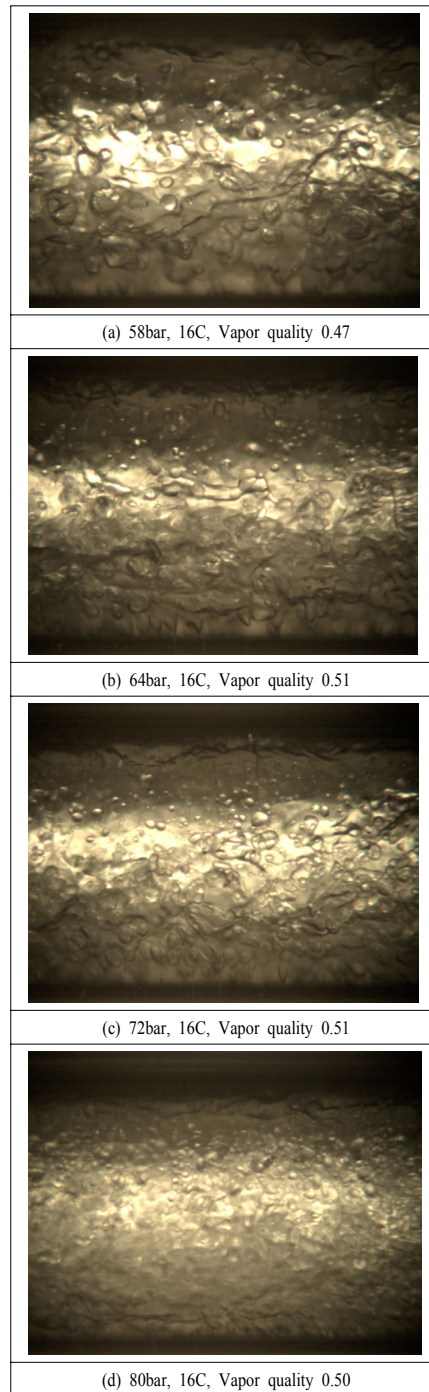


Fig. 8. Images acquired from flow visualization

으로 관찰되는 바, 이 또한 액체상 및 기체상이 혼합되어 흐르는, 즉 균질유동에 가까운 유동양식을 보여주는 것으로 판단된다. 따라서 앞서 언급한 압력강하 모델 정확

도 비교 시, 균질유동 모델이 상대적으로 높은 정확도를 나타내는 것을 뒷받침하는 결과가 가시화에서 관측된 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 이산화탄소-아르곤 혼합물 2상유동의 압력강하 데이터를 획득하고 이를 바탕으로 기존 문헌의 다양한 압력강하 모델 및 상관식과 비교하여 보았다.

- (1) 본 연구에서 비교한 다양한 모델들 중 Cicchitti 모델의 정확도가 가장 높았으며, Friedel 상관식의 경우 가장 낮은 정확도를 보였다.
- (2) 가시화 결과, 압력이 높을수록 관 하부의 액체층 두께 및 액적 크기가 감소하였으며, 압력이 높을수록 기체-액체 상이 보다 잘 혼합되어 흐르는 모습이 관찰되었다.
- (3) 본문에 제시된 압력강하 모델들 중, 균질 유동 기반의 모델이 상대적으로 높은 정확도를 보였으며 균질유동에 가까운 유동양식을 보인 가시화 결과가 이를 뒷받침하는 것으로 사료된다.

이상의 연구결과를 바탕으로 추후 보다 다양한 온도-압력 조건에서 실험을 실시하여 유동양식 선도, 기-액 속도비 등의 데이터를 획득함으로써 본 연구를 확장해 나가고자 한다.

References

- [1] O. Eiken, P. Ringrose, C. Hermanrud, B. Nazarian, T. Torp, L. Hoier, "Lessons Learned from 14 years of CCS operation", *Energy Procedia*, pp. 5541-5548, Vol. 4, 2011.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2011.02.541>
- [2] M. Mitrovic, A. Malone, "Carbon Capture and Storage Demonstration Projects in Canada", *Energy Procedia*, pp. 5685-5691, Vol. 4, 2011.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2011.02.562>
- [3] B. Dressel, D. Deel, T. Rodosta, S. Plasynski, J. Litynski, L. Myer, "CCS Activities Being Performed by the US DOE", *International J. Environment Research & Public Health*, pp. 300-320, Vol. 8, 2011.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/ijerph8020300>
- [4] H. Suzuki, A. Sahzabi, Y. Sugai, H. Yousefi, K. Sasaki, "Economical Considerations on CCS System for geological Uncertainty and Injection Failure", *International J. Energy Economics and Policy*, pp. 772-784, Vol. 4, 2014.
- [5] Greenhouse Gas Inventory & Research Center of Korea. 2009 National Greenhouse Gas Report. 2011. Available From: <http://www.gir.go.kr>
- [6] B. Metz, O. Davidson, H. Coninck, M. Loos, L. Meyer, *Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage*. IPCC, Cambridge Univ Press, 2005.
- [7] C. Huh, S. G. Kang, M. I. Cho, "Impact of Sulfur Dioxide Impurity on Process Design of CO₂ Offshore Geological Storage: Evaluation of Physical Property Models and Optimization of Binary Parameter", *J. Korean Society for Marine Environmental Engineering*, pp. 187-197, Vol. 13, 2010.
- [8] J. Pettersen, G. Koeijer, A. Hafner, "Construction of a CO₂ Pipeline test rig for R&D and Operator training", *Greenhouse Gas Technology-8*. 2006.
- [9] S. Munkejord, J. Jakobsen, J. Austegard, M. Molnvik, "Thermo-and Fluid-dynamical Modelling of two Phase Multi-Component Carbon Dioxide Mixtures", *International Journal of Greenhouse Gas Control*, pp. 589-596, Vol. 4, 2010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijggc.2010.02.003>
- [10] L. Cheng, G. Ribatski, J. Quiben, J. Thome, "New Prediction Method for CO₂ Evaporation inside Tubes", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, pp. 111-124, Vol. 51, 2008.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.04.002>
- [11] S. Grauso, R. Mastrullo, A. Mauro, G. Vanoli, "Two-phase adiabatic Pressure Gradients for R410a and CO₂ in a Macro Channel", *Experimental Thermal and Fluid Science*, pp. 79-87, Vol. 52, 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.exthermflusci.2013.08.024>
- [12] NIST, *NIST Reference Fluids Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP 9.0*, 2010.
- [13] W. Owens, "Two-phase Pressure Gradient", *International Development in Heat Transfer, Part II ASME*, New York, 1961.
- [14] A. Cicchitti, C. Lombardi, M. Silvestri, G. Soldaini, R. Zavalluilli, "Two-phase Cooling Experiments-Pressure Drop, Heat Transfer, and Burnout Measurement", *Energia Nuclear*, pp. 407-425, Vol. 7, 1960.
- [15] D. Beattie, P. Whalley, "A Simple Two-phase Flow Frictional Pressure Drop Calculation Method", *International Journal of Multiphase Flow*, pp. 83-87, Vol. 8, 1982.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0301-9322\(82\)90009-X](http://dx.doi.org/10.1016/0301-9322(82)90009-X)
- [16] L. Friedel, "Improved Friction Drop Correlations for Horizontal and Vertical Two Phase Pipe Flow", *European Two-phase Flow Group Meeting, Paper E2*, 1979.

조 맹 익(Meang-Ik Cho)

[정회원]



- 2005년 8월 : 포스텍 기계공학과 (공학사)
- 2007년 6월 : 포스텍 기계공학과 (공학석사)
- 2007년 7월 : (주) 한라공조
- 2008년 12월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소

<관심분야>

이산화탄소 포집 및 저장, 열전달, 이상유동

백 종 화(Jong-Hwa Baek)

[정회원]



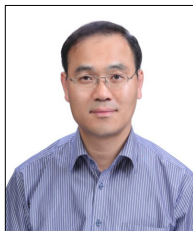
- 2006년 2월 : 단국대학교 기계공학과 (공학사)
- 2008년 2월 : 단국대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2008년 5월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소

<관심분야>

이산화탄소 포집 및 저장

강 성 길(Seong-Gil Kang)

[정회원]



- 1991년 2월 : 서울대 해양학과(이학사)
- 1993년 2월 : 서울대 대학원 해양학과 (이학석사)
- 2000년 8월 : 서울대 대학원 해양학과 (이학박사)
- 2000년 9월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 책임연구원

<관심분야>

해양환경평가 및 관리, 해양 CCS, 유류오염 대비 및 대응

허 철(Cheol Huh)

[정회원]



- 1995년 2월 : 경희대 원자력공학과(공학사)
- 1997년 1월 : 포스텍 기계공학과 (공학석사)
- 1997년 1월 : 삼성 엔지니어링
- 2006년 2월 : 포스텍 기계공학과 (공학박사)
- 2008년 6월 : 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 책임연구원

- 2014년 10월 ~ 현재 : 한국해양대학교 해양과학기술융합학과 교수

<관심분야>

해양 CCS(Carbon Capture and Storage), 해양플랜트 공정 해석 및 열유체 해석, 다상유동 및 상변화 열전달