

R&D /
18CTAP-C129886-02

실시간 변이 모델(RTTM)을 이용한 동토 자원이송망 원격 진단 기술 개발 최종보고서

2019. 04.

주관연구기관 / 성균관대학교

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통부장관 귀하

'실시간 변이 모델(RTTM)을 이용한 동토 자원이송망 원격 진단 기술 개발'(연구개발 기간 : 2017. 04. 01 ~ 2018. 12. 31) 과제의 최종보고서를 제출합니다.

2019. 03. 25.

주관연구기관명 : 성균관대학교 산학협력단 (대표자) 추 현 승 (인)
협동연구기관명 : (대표자) (인)
참여기관명 : (대표자) (인)



주관연구기관책임자: 김 성 민

협동연구기관책임자:

참여기관책임자:

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	18CTAP-C129886-02	해당 단계 연구 기간	2018.01.01. - 2018.12.31	단계구분	(2)/ (2)
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명				
연구과제명	대과제명	동토 자원이송망 진단 및 보수 보강 기술			
	세부과제명	실시간 변이 모델(RTTM)을 이용한 동토 자원이송망 원격 진단 기술 개발			
연구책임자	김성민	해당단계 참여 연구원 수	총: 7명 내부: 7명 외부: 명	해당단계 연구개발비	정부:196,000천원 기업: 천원 정부 외: 천원 계:196,000천원
		총 연구기간 참여 연구원 수	총: 7명 내부: 7명 외부: 명	총 연구개발비	정부:370,000천원 기업: 천원 정부 외: 천원 계:370,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	성균관대학교 산학협력단			참여기업명	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	
요약				보고서 면수	

- 동토 자원이송망을 모사한 실험실 수준으로 다상 유동 실험 장치를 설계 및 제작하여 공기 오일을 이용한 이상 유동 실험을 수행하였음 수집된 데이터와 타 논문의 데이터를 활용하여 슬러그 역학 모델 및 무차원화된 유동양식지도 개발하였음.
- 상용 CFD 프로그램인 ANSYS Fluent를 이용하여 관내 슬러그 유동의 분석이 가능한 수치해석기법을 개발함. 수치해석 결과를 통해 실험에서 측정하기 어려운 채널 단면의 기공률 그리고 유체의 속도 벡터 등을 확인하여 실험 결과와 비교하고 본 연구에서 개발된 역학 모델을 개선하였음.
- 개발된 슬러그 유동 역학모델과 슬러그 외 다른 유동양식에 대한 기존 상관식들 그리고 무차원화된 유동양식지도를 통합하여 다상 유동 예측프로그램을 개발함. 이 프로그램은 관내 위치에 따른 유동양식과 그에 따른 압력, 온도, 기공률의 변화를 예측함.
- 본 연구에서 개발된 관 내부 압력 및 유동양식을 예측하는 프로그램을 바탕으로 파이프라인 내부 슬러그 발생 가능 지역을 계산하고 작동 조건의 조절을 통한 슬러그 유동 회피 방안을 제시하는 실시간 원격 진단 프로그램을 개발함.

〈 국문요약문 〉

연구의 목적 및 내용	- 본 연구에서 개발한 슬러그 유동 역학모델을 기반으로 1) 다상유동 예측 프로그램을 개발하고 실시간 변이 모델(Real Time Transient Model, RTTM)을 이용하여 원격 모니터링 할 수 있는 알고리즘을 개발한 뒤 이를 기반으로 슬러그 유동 회피 방안을 제시하는 2) 실시간 원격 진단 프로그램을 개발하고자 함				
연구개발성과	- 다상유동 예측 프로그램 - 실시간 원격 진단 프로그램				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	- 전 세계적으로 협소한 자원이송망 내부 유동 시뮬레이션 시장을 개척할 수 있는 기반 기술로 미래 시장 점유율 확보를 위한 기반 확보 - 본 연구과제에서 개발하려는 진단 프로그램은 OLGA에 준하는 신뢰성 확보와 국산화를 통한 국내 관련 기업의 경제적 부담 절감 가능 - 기술 개발을 통해 국내 및 해외 자원이송망 프로젝트에 참여 - 선진국 대비 동토 자원이송망 분야 기술 격차 감소를 통한 국제 기술력 향상 - 실시간 원격 진단을 통한 누수사고의 예측 및 예방으로 막대한 경제적 손실 및 자연파괴 방지				
핵심어 (5개 이내)	슬러그 유동	역학모델	실시간 변이 모델	진단알고리즘	자원이송망

＜ SUMMARY ＞

Purpose & Contents	Development of 1) multi-phase flow simulation program based on the new mechanistic model for slug flows, and 2) development of real-time remote diagnosis program to monitoring the occurrence of slug flow regime in the entire pipeline system using Real Time Transient Model(RTTM)				
Results	Multi-phase flow simulation program Real-time remote diagnosis program				
Expected Contribution	Increasing future market share securing basic technology in the field of multi-phase flow simulation of oil-gas pipeline. Cost reduction on domestic businesses with the new multi-phase flow simulation program Leak prediction and prevention using the real-time remote diagnosis program				
Keywords	Slug flow	Mechanistic model	Real Time Transient Model	Diagnostic algorithm	Pipeline

< Contents >

Chapter 1 : Research Development Project Overview	11
1.1 Purpose of Research Development	11
1.2 The Need of Research Development	11
1.3 Research Development Scope	14
 Chater 2 : Domestic and International Status	17
2.1 Domestic Status	17
2.2 International Status	19
 Chapter 3 : Research Performance and Achievements	24
3.1 Research Methods and Contents	24
3.2 Research Performance	53
 Chapter 4 : Goal Achievement and Contribution to Relevant Areas	72
4.1 Goal Achievement	72
4.2 Contributions in Related Fields	80
 Chapter 5 : Utilization of Research and Development Performance	81
5.1 Securing Future Source Technology	81
5.2 A Study on Commercialization	81
5.3 Technology Demand	81
5.4 Utilization Fields and Application Techniques	81
 Chapter 6 : Overseas Science and Technology Information	83
6.1 The Collection of Pressure Drop Data, Slug Flow Experiment Data, Predictive Correlations and Mechanistic Models	83
6.2 Flow Regime Map and Multiphase Flow Experiment Data	83
6.3 Effects of the Diameter and Properties of Operating Fluids on the Flow Patterns	84
6.4 In-Pipe Multiphase Flow Regime Map	85
6.5 Multi-phase Flow Friction Pressure Drop in Pipe	85
 Chapter 7 : Security Grade of Research Development Achievements	86
Chapter 8 : Status of Research Facilities and Equipment	87
Chapter 9 : Implementation of Safety Measures in Laboratories	88
9.1 Training	88
9.2 Health Examination	88
9.3 Additional Safety Management Details of Laboratory	88
 Chapter 10 : Typical Performance of Research and Development Project	89
Chapter 11 : Miscellaneous	91
Chapter 12 : References	92

〈 목 차 〉

제 1 장 연구개발과제의 개요	11
제 1 절 연구개발 목적	11
제 2 절 연구개발의 필요성	11
제 3 절 연구개발 범위	14
 제 2 장 국내외 기술 개발 현황	17
제 1 절 국내 현황	17
제 2 절 국외 현황	19
 제 3 장 연구 수행 내용 및 성과	24
제 1 절 연구수행 방법 및 내용	24
제 2 절 연구수행 성과	53
 제 4 장 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	72
제 1 절 목표 달성도	72
제 2 절 관련 분야 기여도	80
 제 5 장 연구개발성과의 활용 계획	81
제 1 절 미래 원천기술 확보	81
제 2 절 실용화 제품화 방안	81
제 3 절 기술수요처	81
제 4 절 활용분야 및 활용방안 기술	81
 제 6 장 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	83
제 1 절 압력강하 및 슬러그 유동 실험데이터, 예측 상관식 및 유동역학 모델 수집 ..	83
제 2 절 유동양식지도 및 유동양식 실험데이터 수집	83
제 3 절 직경 및 작동유체의 물성치가 유동양식에 미치는 영향	84
제 4 절 관내 다상 유동양식 지도	85
제 5 절 관내 다상 유동 마찰압력강하	85
 제 7 장 연구개발성과의 보안등급	86
제 8 장 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황	87
제 9 장 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	88
제 1 절 교육 훈련	88
제 2 절 건강검진	88
제 3 절 본 연구실의 추가 안전관리 내용	88
 제 10 장 연구개발과제의 대표적 연구 실적	89
제 11 장 기타 사항	91
제 12 장 참고 문헌	92

〈 그림 목 차 〉

그림 1.1 전 세계 에너지 현황	12
그림 1.2 파이프 결함 원인 및 상용 다상 유동 프로그램(OLGA)	13
그림 1.3 파이프라인 원격 진단 프로그램 연구 개발 흐름도	16
그림 2.1 수평(좌) 및 30° 경사각(우)을 갖는 관내 유동양식 지도	17
그림 2.2 슬러그 유동 도식(좌) 및 실험데이터와 유동양식지도 비교(우)	17
그림 2.3 다채널 유도초음파 검사시스템	18
그림 2.4 한국가스공사의 인텔리전트 피그	18
그림 2.5 OLGA를 이용한 Ramp-up 시뮬레이션	19
그림 2.6 슬러그 유동 도식(좌) 및 기체 겹보기 속도에 따른 기공률(우)	20
그림 2.7 경사유동에서의 기포도식(좌) 및 경사각에 따른 기체, 액체의 속도(우)	20
그림 2.8 UltraScan® Duo	21
그림 2.9 보잉사 스캔 이글	21
그림 2.10 E-RTTM(Extended Real-Time Transient Model)	22
그림 2.11 LedaFlow(왼쪽)와 OLGA(오른쪽) 프로그램	22
그림 3.1 다상 유동 실험 장치	24
그림 3.2 다상 유동 실험 장치 개략도	25
그림 3.3 관경 2cm, 4cm의 테스터 섹션	25
그림 3.4 압력 측정 탭(좌), 온도 측정 탭(우)	26
그림 3.5 공기-오일 Mixer	26
그림 3.6 열식 질량유량계(좌), 오발타입 기어식 유량 센서(우)	26
그림 3.7 오일 탱크	27
그림 3.8 기어식 펌프(좌), 진공 펌프(우)	27
그림 3.9 공기와 오일의 겹보기 속도에 따른 마찰 압력강하 변동	30
그림 3.10 기포 유동 예시	31
그림 3.11 플러그 유동 예시	31
그림 3.12 성층 유동 예시	31
그림 3.13 파형 유동 예시	32
그림 3.14 슬러그 유동 예시	32
그림 3.15 환형 유동 예시	32
그림 3.16 분산 유동 예시	32
그림 3.17 분산 기포 유동 예시	32
그림 3.18 개발한 다상 유동 맵과 기존 데이터 비교	37
그림 3.19 슬러그 이상유동 가시화 데이터 (a) $J_f=0.4$ m/s, (b) $J_f=0.8$ m/s	39
그림 3.20 슬러그 이상 유동 압력강하 데이터	39
그림 3.21 슬러그 단위 셀과 슬러그 유동의 역학 인자들	40
그림 3.22 슬러그 역학모델 개발 과정	41

그림 3.23 슬러그 역학모델로 예측한 압력강하	42
그림 3.24 슬러그 유동 영역별 액체 속도, 길이, 압력구배 비교	42
그림 3.25 기존 역학모델과 본 연구에서 개발된 역학모델의 예측 정확도 비교	43
그림 3.26 기존 슬러그 역학모델	43
그림 3.27 3차원 수치해석 모델의 채널 형상	44
그림 3.28 관측 구간 내 측정 지점	45
그림 3.29 수치해석 모델의 단면 격자 시스템	45
그림 3.30 공기와 오일의 유량이 각각 24.1 LPM과 20.9 LPM일 경우, 시간에 따른 슬러그 유동 형태 변화:(a) 실험, (b) 수치해석	46
그림 3.31 공기와 오일의 유량이 각각 28.7 LPM과 9.48 LPM일 경우, 기포의 꼬리 부분과 머리 부분:(a) 실험, (b) 수치해석	47
그림 3.32 공기와 오일의 유량이 각각 70.4 LPM과 9.48 LPM일 경우, 기포의 꼬리 부분과 머리 부분:(a) 실험, (b) 수치해석	47
그림 3.33 공기와 오일의 유량이 각각 24.1 LPM과 20.9 LPM일 경우, 유체의 속도 벡터:(a) 기포의 꼬리 부분과 (b) 기포의 머리 부분	48
그림 3.34 공기와 오일의 유량이 각각 28.5 LPM, 6.51 LPM일 경우(좌)와 53.8 LPM, 6.51 LPM일 경우(우), 시간에 따른 (a) 실험에서의 압력강하, (b) 수치해석에서의 압력강하, 그리고 (c) 기포 분율 변화	49
그림 3.35 실험과 수치해석 결과의 유량별 슬러그 진동수 비교	50
그림 3.36 실험과 수치해석 결과의 기포 길이 분포 비교	50
그림 3.37 실험과 수치해석 결과의 평균 압력강하 비교	51
그림 3.38 공기와 오일의 유량이 각각 24.1 LPM과 20.9 LPM일 경우, 거리에 따른 채널 내 압력 변화	51
그림 3.39 그림 3.39 공기와 오일의 유량이 각각 25.8 LPM과 31.0 LPM일 경우(위)와 47.8 LPM과 31.0 LPM일 경우(아래), 거리에 따른 속도, 압력, 기포 분율, 그리고 난류 점성	52
그림 3.40 다상 유동 예측 프로그램 개발과정	53
그림 3.41 압력 강하 계산 방법	54
그림 3.42 다상 유동 예측 프로그램 입력 조건	64
그림 3.43 위치 별 예측값	64
그림 3.44 다양한 유동조건이 예측	65
그림 3.45 작동 조건에 따른 예상 슬러그 발생 구간	66
그림 3.46 관내 내압 및 유동장 예측 알고리즘 개발	67
그림 3.47 실시간 원격 진단 프로그램 구성도	67
그림 3.48 실시간 원격 진단 프로그램의 작동원리 및 결함 감지 기능	68
그림 3.49 원격 진단 프로그램을 통해 예측한 관내 유동양식 및 슬러그 발생 여부 확인	68
그림 3.50 예상 작동조건을 기준으로 슬러그 발생 회피 작동 조건 제시	69
그림 3.51 최적 센싱 위치 제시 및 정확한 압력강하 예측	70
그림 3.52 관내 결함 발생 시 경고 및 결함 발생 구간 제시	71

그림 4.1 개발한 다상 유동 맵과 기존 데이터 비교	72
그림 4.2 슬러그 역학모델로 예측한 압력강하	72
그림 4.3 2cm관 유동양식 별 압력구배	74
그림 4.4 4cm관 유동양식 별 압력구배	74
그림 4.5 타 논문 실험 데이터 유동양식 별 압력구배	75
그림 4.6 본 연구에서 개발한 유동양식지도 및 본 연구의 실험 데이터	77
그림 4.7 프로그램 맵과 실험 데이터	78
그림 6.1 관 직경에 따른 유동양식 천이선, Kong et al.(2018)(좌), Taitel & Dukler(1976)(우)	84
그림 6.2 오일의 점도에 따른 유동양식 변화(100 cp(좌), 32 cp(우))	84
그림 6.3 유동양식지도 Mandhane 등(1974)(좌), Spedding 등(2005)(우)	85

〈 표 목 차 〉

표 3.1 작동 조건에 따른 유동양식 분포	28
표 3.2 유동 데이터 작동 조건	33
표 3.3 유동양식에 따른 실험 데이터와 이전 유동지도와의 비교 #1	34
표 3.4 유동양식에 따른 실험 데이터와 이전 유동지도와의 비교 #2	35
표 3.5 개발된 유동양식 지도	38
표 3.6 기존 압력강하 상관식	55
표 3.7 본 연구에서 실험을 통해 측정한 압력강하 데이터와 상관식으로 예측한 값과의 비교	57
표 3.8 타 논문의 압력강하 데이터와 상관식으로 예측한 값과의 비교	61
표 4.1 압력강하 오차	73
표 4.2 OLGA 기준 유동양식 정의	75
표 4.3 OLGA의 유동양식 예측 1	76
표 4.4 다상 유동 예측 프로그램의 유동양식 예측 1	76
표 4.5 OLGA의 유동양식 예측 2	77
표 4.6 타 논문 실험 데이터와 프로그램 비교	79

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

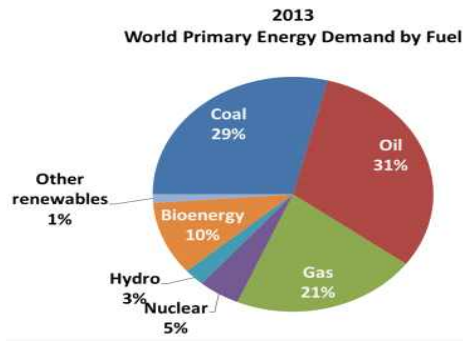
가. 연구 개발 목적

- 1) 파이프라인 결함의 주요 원인으로 파악되는 슬러그 유동(Slug flow)은 관내 내압의 불균일성으로 인해 파이프 부식 및 파손의 직접적인 원인이 되며 역압력의 발생으로 인해 플랜트 설비 고장 및 유지비용 향상 등의 영향을 가져오므로 플랜트 파이프라인 설계 시 필수적으로 고려할 사항임
- 2) 관내 슬러그 유동 예측 모델은 관련 연구가 매우 부족한 상황이며 국내 정유 관련 기관들은 “OLGA” (Schlumberger사)와 같은 해외 다상 유체유동 예측 프로그램을 구입하여 사용하는 실정임. 하지만 이런 프로그램 역시 슬러그 유동 부분에 대한 해석 모델은 정확도가 떨어져 슬러그 유동 해석 모델에 대한 원천기술을 확보하고자 함
- 3) 동토 배관의 응력 또는 변형률 기반 배관 건전성 평가 방식은 다상유동에서의 기능하중에 대한 고려가 충분하지 않음
 - * 기능하중 : 자중, 열팽창, 내부압력 등 환경인자가 작용하지 않는 이상 조건에서 수반되는 하중
- 4) 종래의 배관 결함 진단 방안들은 손상 형태 및 정도에 따라 교체, 보수 등을 사후에 판단함
- 5) 이에 본 연구에서 파이프라인 일정 구간마다 설치된 소수의 온도, 압력 센서의 정보를 실시간으로 받아들여 전체 파이프라인 내부 압력 및 유동장을 예측하는 알고리즘을 개발하고 이를 바탕으로 파이프라인 구간별 압력, 온도 조절을 통해 슬러그 유동 회피 방안을 제시하는 실시간 원격 진단 프로그램의 원천 기술을 확보, 이를 실험실 단위, 수치해석 모델, 상용화된 프로그램에서 검증하고자 함

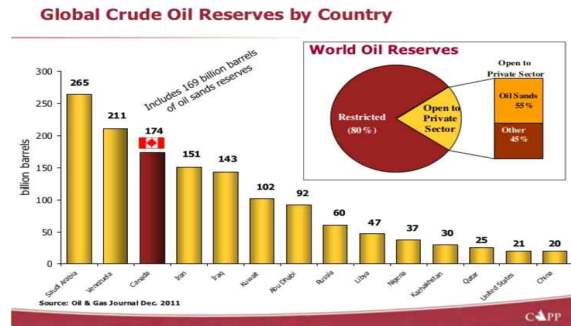
2. 연구개발의 필요성

가. 전 세계적인 자원개발 경쟁에 능동적인 대응

- 1) 세계적으로 급증하고 있는 에너지 수요가 향후 25년간 현재의 두 배까지 증가할 것이고 그 중 화석연료 기반의 에너지에 의존하는 경향이 지속될 것으로 전망됨
 - * 2016년 IEA(International Energy Agency)의 전 세계 에너지 동향 보고에 의하면 총 에너지 생산량의 82.14%(약 11,500 Mtoe)가 화석연료(원유, 석탄, 천연가스) 기반의 에너지로 파악됨
 - * 2013년 EIA(Energy Information Administration)의 자료에 따르면 2030년에도 세계 에너지 사용량의 80%가 화석연료에 의존할 것으로 예측됨
- 2) 최근 육상 및 근해의 자원매장량이 고갈됨에 따라 동토, 심해, 극지 등 작업환경이 열악한 지역이나 미개발 지역의 자원 개발에 투자가 집중되고 있음
 - * 전 세계 미개발 석유·가스 자원량의 22%가 극한지에 매장(약 4,120억 BOE)되어 있으며, 탐사·시추기술의 발달과 맞물려 많은 투자가 집중되고 있음
 - * 극한지 에너지 개발의 경제성 확보를 위해 자원이송망 유지비용의 최소화가 필요



출처:IEA(International Energy Agency), 2013



출처:Oil & Gas Journal Dec. 2010

■ 그림 1.1 전 세계 에너지 현황 ■

나. 자원이송망 사업의 시장경쟁력 확보

- 1) 주요 에너지 수송원인 파이프라인은 초기 설치비용은 높지만 자원의 대량 수송이 가능하고 타 수송 방식에 비해 친환경적이며 운용이 용이하다는 장점이 있어 오일, 가스 등 자원이송망으로 널리 사용되고 있음

* 오일·가스 수송 파이프라인은 향후 많은 수요가 전망되며, Oil&Gas Journal 2015에 따르면 2015년 전 세계적으로 41,739 마일(약 67,172km)의 파이프라인이 건설될 것으로 추정됨

* CEPA(Canadian Energy Pipeline Association)는 2015년 캐나다에 신설된 운송용 파이프라인의 길이가 12만km에 달하고 110억 달러의 GDP창출 효과가 있었다고 조사함

- 2) 동토 에너지 개발의 경쟁력 확보를 위해 수송인프라 기술의 국산화가 필요

* 동토 자원이송망 시장경쟁력 강화를 위해 파이프라인 진단 및 관리 기술 개발 필요

* 극한 환경조건인 동토지역의 파이프라인 건설 기술 개발을 위해 국토교통과학기술진흥원 산하 플랜트연구사업의 일환으로 동토 파이프라인 연구단이 설립됨. 동토 파이프라인 연구단은 파이프라인 설계, 자재, 시공, 유지관리와 관련한 핵심 기반 기술을 확보하기 위해 협동연구를 수행하고 있음

다. 자원이송망에 대한 진단 및 관리 기술 개발 필요

- 1) 2015년 한해 미국 내 116억 달러 규모의 원유수송관(약 11,000km)이 새로 만들어 졌고 이에 대한 연간 운용 및 보수비용은 11억 달러이며 이중 상당한 비용이 보수에 사용되었음

* IHS이코노믹스의 2016년 조사에 따르면 원유 수송관의 O&M(operation and maintenance) 비용이 \$ 136,000/mile로 건설 비용(\$ 1,551,000/mile)의 10% 수준

- 2) 2016년 PHMSA(Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration)의 자료에 의하면 미국 내 파이프 결함의 주요원인은 장비고장, 부식 그리고 기기 자체의 오작동으로 보고됨

- 3) 파이프라인 관련사고 중 부식에 의한 영향이 전체 사고의 25%에 달하며 부식을 견디기 위한 많은 연구가 진행됨. 반면 내입과 온도 등의 관내 유동 특성에 대한 예측이나 유동안정성에 관한 연구는 부진한 상황

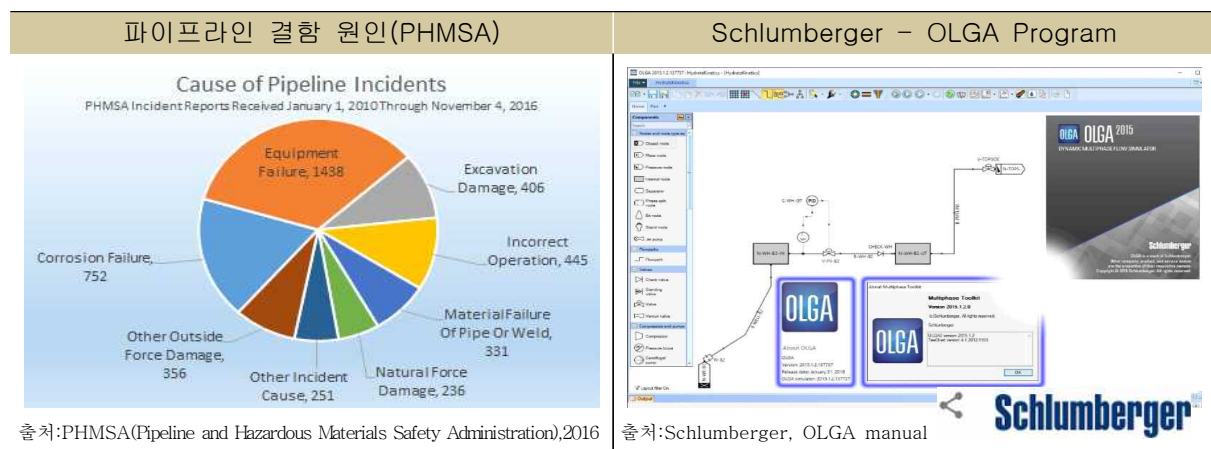
- 4) 파이프라인의 장비고장, 부식 그리고 기기 오작동 등의 주요 원인인 관내 슬러그 유동(Slug flow) 예측 모델의 개발이 필요함

* 파이프 내부 슬러그 유동 발생 시 관내에서 기상과 액상이 강하게 섞이면서 파이프 내부 부식 및 침식이 가속화되고 높은 역압력으로 인한 파이프라인 장비의 고장 발생률을 높임

* 파이프 내부 슬러그 유동의 발생은 파이프 막힘 현상 및 유동안정성 감소, 파이프 내압의 불균일성 증가, 파이프 피로도 증가 및 파손의 주원인이 되므로 정확한 유동 특성 예측이 필요함

* 관내 슬러그 유동은 그 불안정성 때문에 유동 특성을 예측하기가 매우 힘들며 현재 상용 프로그램에서 사용되는 슬러그 유동의 역학모델 역시 특정 범위의 작동조건에서 매우 큰 오차를 보임. 따라서 넓은 범위의 작동조건에서 슬러그 유동의 특성을 정확히 예측할 수 있는 새로운 역학모델의 개발이 필요함

5) 파이프라인 관내 다상유동에 관한 국내 예측 프로그램들은 개발이 부진한 상황으로 국내 정유 관련 기관들은 Schlumberger사의 OLGA와 같은 다상 유동 시뮬레이터를 구입하여 사용 중



■ 그림 1.2 파이프 결함 원인 및 상용 다상 유동 시뮬레이터(OLGA) ■

6) 현재 구축된 자원이송망은 관내 유동 문제가 발생해도 그 징후를 파악하기 힘들고 결함 발생 후엔 막대한 보수비용이 소모됨. 따라서 관내 다상 유동의 유동 특성 및 내압을 실시간으로 예측하여 결함 발생 가능 구간을 진단할 수 있는 알고리즘 개발이 필요함

7) 극한지(-40℃~20℃, 2000km이상) 자원이송망의 경우 열악한 조건으로 인해 파이프자체의 직접적인 진단에 어려움이 있으므로 원격으로 결함을 예측하고 진단할 수 있는 프로그램이 필요함

8) 현재 가장 보편적으로 사용되는 파이프라인 안전관리 방식은 비파괴검사로 초음파 검사, 방사선 투과, 와전류 탐상 등이 사용됨. 이러한 방식은 공통적으로 센서가 위치하는 지점만을 검사하는 방식이기 때문에 그 기술적 한계가 명확함

9) 현재 여러 자원이송망에서 사용 중인 전자식 모니터링 장비가 누수를 감지하지 못해 큰 피해를 초래하고 있음.

* 2016년 신설된 총 길이 1,825km인 Dakota Access Pipeline에서 기름이 누출 되는 사건이 발생하였으나 진단 프로그램이 파이프 누수를 진단하지 못하였고 그 원인은 파이프라인 내 유체 유동의 급격한 변화가 결함 판단 알고리즘에 혼란을 주었기 때문이라고 밝혀짐

10) 국내에서는 다상의 유체가 흐르는 배관 내 유동양식 및 특성의 변화에 대한 연구가 활발히 이루어지지 않고 있으며, 파이프의 환경이 크고 또 파이프 내에 흐르는 유체 종류가 많을수록 관련 연구가 적음. 따라서 해당 기술을 이용한 국내 시장의 규모 역시 매우 작으며, 원천 기술의 부재로 인해 원유 이송 파이프라인과 같은 자원이송망

구축 산업에의 기술 수출도 어려운 실정임

- 11) 본 연구에서 개발할 진단 프로그램은 원격, 무단수 진단 방식으로 일정 거리마다 설치된 소수의 센서로부터 얻은 압력과 온도 정보만으로 전체 파이프 내부 유동양식 및 내압 예측이 가능하며 이를 이용하여 슬러그 유동 회피 방안을 제시함
- 12) 본 연구과제에서 개발하려는 극한지 파이프라인 내 유동 진단 프로그램은 국내에서 필요로 하는 다상유동 관련 제반 기술 마련에 큰 기여를 할 것으로 기대되며 향후 원유 이송 라인 사업에 국내 기업이 참여할 수 있는 기반이 될 것임

3. 연구개발 범위

가. 연구개발 적용기술

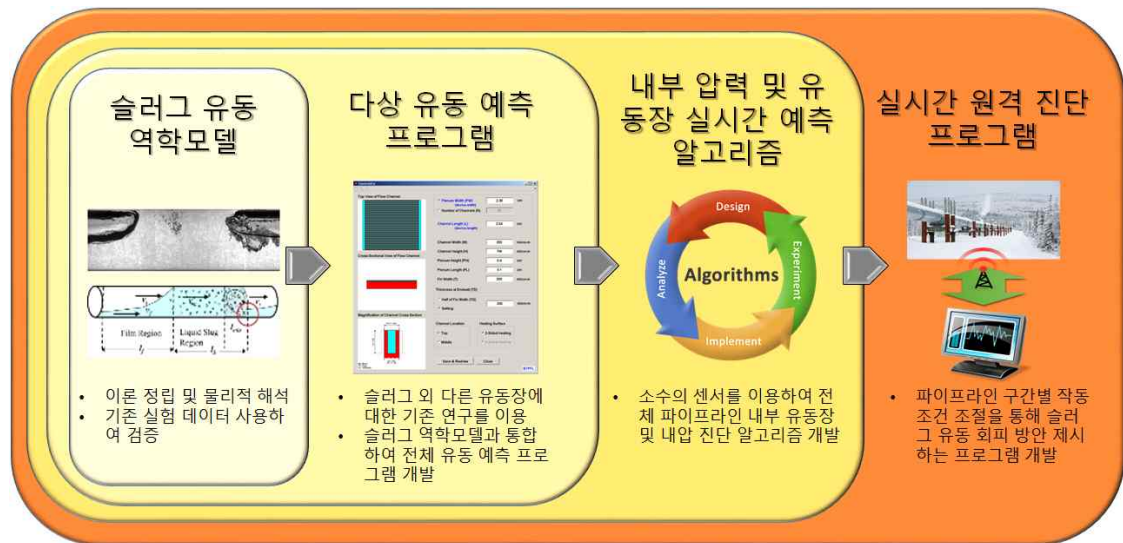
- 1) 유동방향을 따라 압력강하 및 유동 특성을 역학모델(mechanistic model)을 통해 예측하고 해당 위치에서 유동양식지도(flow regime map)를 이용하여 슬러그 유동을 포함한 유동양식을 예측하는 원리를 적용
- 2) 슬러그 유동에 대한 기존의 주요 역학모델들은 특정 작동조건에서 예측 정확도가 낮기 때문에 새로운 슬러그 유동 역학모델의 개발이 필요함. 슬러그 유동에 대한 이론 정립 및 물리적 해석을 통해 개선된 슬러그 유동 역학 모델을 개발하고 실제 실험을 통해 주요 성능인자를 연구하고 개발된 슬러그 유동 역학모델의 완성도를 검증함
- 3) 본 과제의 최종 목표인 실시간 원격 진단 프로그램은 슬러그 유동에 대한 물리적 해석 및 이론 정립을 통해 넓은 범위의 작동조건에서 다상유동의 특성을 정확히 예측할 수 있을 것으로 기대됨. 또한 제안 기술은 소수의 압력 및 온도 센서 등 비교적 간단한 설비만으로 전체 파이프구간 내부 압력 및 유동장을 예측하여 결함 발생 가능 구간을 판단할 수 있어 직접 진단이 힘든 동토 자원이송망에 적합한 진단 방식임

나. 연구범위 및 연구 수행 방법

연구 범위	연구 수행 방법	구체적인 내용
■ 파이프 내부 슬러그 다상 유동에 대한 역학 모델 및 수치해석 기법 개발하고 이를 이용하여 파이프 전 구간에 대한 다상 유동 예측 프로그램 개발	■ 동토 파이프 내부 다상 유동을 모사할 수 있는 실험 장치를 실험실 수준으로 구비하고 이를 통하여 다양한 작동 조건에 대한 다상 유동 실험 데이터를 수집하고 분석함	■ 기체-액체 다상 유동 실험 장치를 실험실 수준으로 구비하였고, 이를 이용하여 공기-오일 다상 유동 실험을 수행하였음. 반복적인 실험을 통하여 다양한 작동 조건의 다상 유동 데이터를 수집하고 유동 가시화 데이터를 분석하여 무차원화된 다상 유동양식지도를 개발함 또한 슬러그 유동 역학 모델을 개발하였으며 다상 유동 수치해석을 통해 역학 모델을 개선하였음 기존 다상 유동 모델들과 본 연구에서 습득한 실험 데이터, 슬러그 역학 모델, 수치해석 기법을 이용하여 전체 다상 유동 예측 프로그램을 개발함
■ 실시간 원격 진단을 통한 파이프라인 내부 슬러그 발생구간 예측과 슬러그 유동 회피 방안을 제시하는 진단 프로그램 개발	■ 다상 유동 예측 프로그램을 통해 슬러그 발생 인자에 대해서 분석하였고, 슬러그 발생 지점에 대한 실험 데이터와 프로그램을 비교하였음 또한 슬러그 발생 위치에 대한 예측 오차를 최소화 하는 알고리즘을 개발함	■ 개발된 다상 유동 예측 프로그램을 기반으로 여러 가지 작동 조건에 대한 파이프라인 내부 압력 강하와 슬러그 발생 구간을 확인한 뒤, 슬러그 발생여부에 영향을 끼치는 인자에 대해서 분석하였음 분석한 인자들을 토대로 주어진 예상 작동 조건에서 발생한 슬러그 유동을 회피할 수 있는 새로운 작동 조건을 제시하는 알고리즘을 개발함 다상 유동 예측 프로그램으로 예측한 예상 슬러그 발생 구간과 실험을 통해 관측한 실제 슬러그 발생 구간을 비교하여 슬러그 발생 구간에 대한 예측 성능을 보완하였음 또한 압력강하 및 슬러그 발생 구간 예측 오차를 최소화 하는 최적의 센싱 위치를 제시하는 알고리즘을 개발함 실험 데이터로 보완된 슬러그 유동 발생 구간 예측 방법과 최적위치의 센서로 부터 수집한 실시간 압력, 온도를 통해 더 정확한 유동 양식 및 압력강하를 예측하는 프로그램을 개발함

다. 연구개발 최종 목표

- 1) 본 연구는 동토 자원이송망의 원활한 자원운송과 내부 유동안정성 확보를 위하여 파이프 결함의 주원인인 슬러그 유동에 대한 역학 해석 모델을 개발하고 실시간 변이 모델(Real Time Transient Model, RTTM)을 이용하여 전체 파이프라인 유동장 및 내압 변화를 원격으로 모니터링 할 수 있는 실시간 진단 알고리즘 그리고 파이프 관내 슬러그 유동 발생을 억제하거나 발생 구간을 제한할 수 있도록 새로운 유동 조건을 제시하는 원격 진단 프로그램 개발을 목표로 함



■ 그림 1.3 파이프라인 원격 진단 프로그램 연구 개발 흐름도 ■

- ① 슬러그 다상 유동 역학해석 모델 개발
- ② 관내 유동장 및 내압 예측이 가능한 다상 유동 예측 프로그램 개발
- ③ 파이프라인 내부 압력 및 유동장 예측 알고리즘 개발
- ④ 파이프라인 구간별 결함 발생 지점 예측 및 슬러그 유동 회피 방안을 제시하는 실시간 원격 진단 프로그램 개발

라. 연구개발 최종 성과물

1) 다상 유동 예측 프로그램

- 실험실 수준의 다상 유동 실험 장비를 구축하고 슬러그 유동에 관한 실험 데이터를 수집하여 슬러그 유동 역학 모델을 개발함
- 상용 유체 해석 프로그램을 이용하여 슬러그 유동에 대한 수치해석 모델을 개발하고 그 해석결과를 실제 데이터와 비교하여 수치해석 모델의 정확성을 검증함
- 슬러그 유동에 대한 수치해석 모델을 이용하여 실험으로 확인할 수 없는 주요 인자들을 검증하고 슬러그 유동 역학 모델을 개선함
- 본 연구에서 수행한 실험 데이터와 타 논문에서 수집한 이상 유동 실험 데이터를 이용하여 무차원화된 유동양식지도를 개발함
- 본 과제에서 개발한 슬러그 유동 역학 모델과 이상 유동양식지도를 이용하여 관내 이상 유동의 압력 및 유동양식 예측이 가능한 통합 다상 유동 예측 프로그램을 개발함
- 본 과제에서 개발할 다상 유동 예측 프로그램과 OLGA와 같은 상용 다상 유체 시뮬레이터의 예측 결과들을 실제 파이프라인 유동 데이터와 비교하여 다상 유동 예측 프로그램의 완성도를 검증함

2) 실시간 원격 진단 프로그램

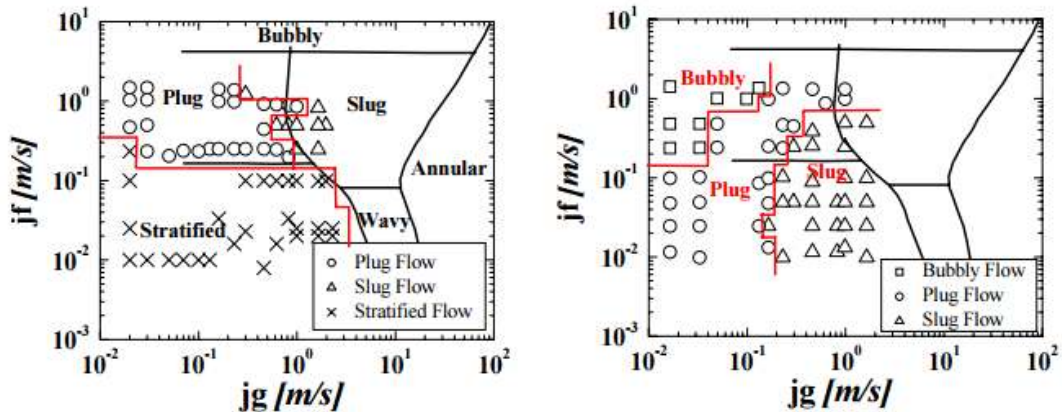
- 파이프라인 일정 구간마다 온도, 압력 센서를 설치하여 소수의 센서만으로 전체 파이프라인에 대한 내부 압력 및 유동장을 실시간 예측할 수 있는 알고리즘을 개발함
- 본 과제에서 개발된 내부 압력 및 유동장을 예측하는 알고리즘을 바탕으로 전체 파이프라인 중 슬러그 발생 가능 구간을 판단하고 파이프라인 구간별 작동조건의 조절을 통해 슬러그 유동 회피 방안을 제시하는 실시간 원격 진단 프로그램을 개발

제2장. 국내외 기술 개발 현황

1. 국내 현황

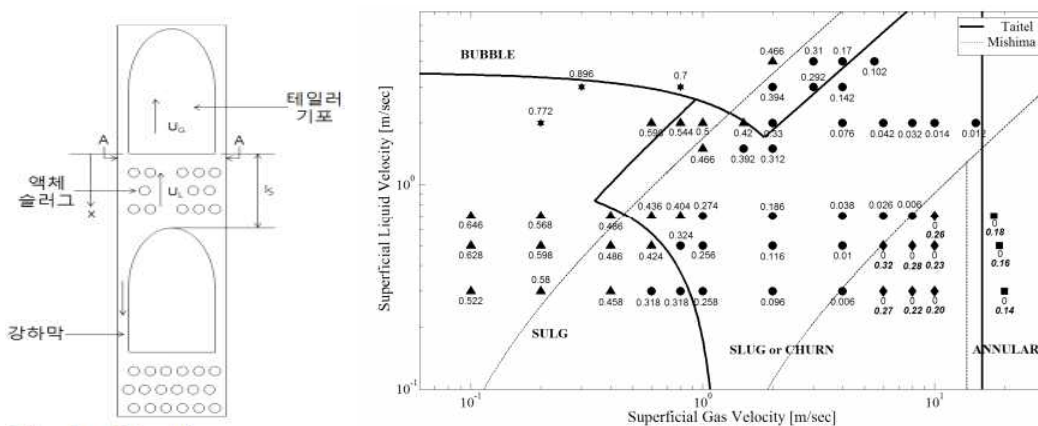
가. 관내 다상 유동 연구 현황

- 1) 곽남이 등(2007)은 수평, 수직 유동의 유동양식은 경사관 유동에 비하여 비교적 많이 연구되었으나 특정 각도 범위의 경사관 유동에 관한 연구는 다소 제한적이라는 점에 근거하여 경사각도가 이상 유동의 유동양식경계에 미치는 영향을 실험적으로 분석하였음. 0~90° 범위에서 내경 1 in, 길이 2 m의 아크릴 파이프 내부의 물-공기 이상 유동을 관찰하여 유동양식 천이에 대한 데이터와 경사각도별 유동양식 지도를 개선했



■ 그림 2.1 수평(좌) 및 30° 경사각(우)을 갖는 관내 유동양식 지도 ■

- 2) 이바로 등(2013)은 수직 채널 내 다상 유체의 슬러그 유동을 포함한 각 유동영역 및 천이 발생 지점의 유동 특성 파악을 위한 기초연구를 수행하였음. 30 mm의 내경을 갖는 수직관의 수직 상향류 공기-물 이상 유동 영역을 판별하였으며 실험 데이터를 Taitel 및 Ishii의 유동양식지도와 비교하였음

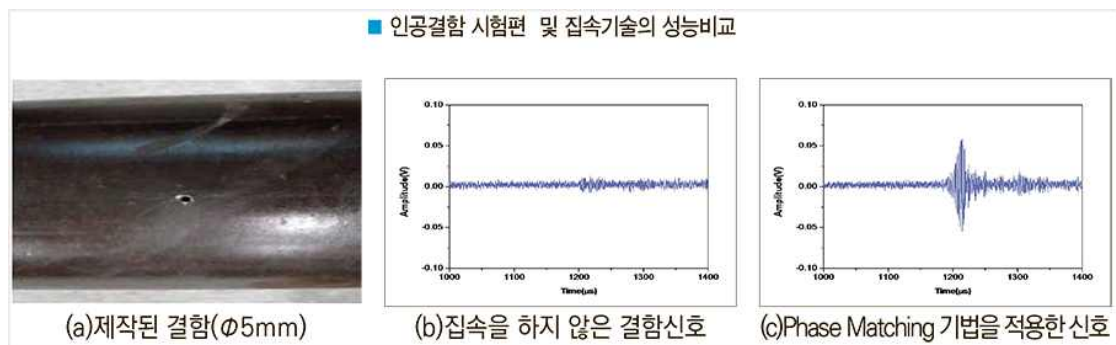


■ 그림 2.2 슬러그 유동 도식(좌) 및 실험데이터와 유동양식지도 비교(우) ■

- 3) 슬러그 유동 역학모델에 관한 국내 연구는 기초 수준에 머물러 있으며 실험을 통해 이상 유동 조건 하 유동양식 및 유동특성의 변화를 조사하여 해외의 연구 자료와 비교, 분석하는 정도에 머물러 있음. 새로운 슬러그 유동 역학해석 모델의 개발이 필요함

나. 파이프라인 진단 기술 사용 현황

- 1) 현재 파이프라인에 대한 진단 방식은 비파괴 검사를 이용한 방식이 가장 많이 사용되고 있음. 주요 비파괴 검사 방법인 초음파 검사, 방사선 투과 검사, 와전류 탐상 검사, 자속누설 탐상 등은 공통적으로 센서가 위치하고 있는 지점만을 검사하는 방식이고 배관 전체를 탐상하기에는 시간 및 예산의 제약이 따름. 최근에는 유도초음파 검사방법이 도입되는 중이지만 수십 미터 구간을 한꺼번에 진단하기 때문에 정확한 결함 위치 도출이 어려워 결함탐지 신뢰도가 떨어지는 기술적 한계를 갖고 있음
- 2) 가스안전공사에서는 이러한 기술적 한계를 극복하기 위해 다채널 유도초음파 검사시스템 (KGS-MUGIS : Multi-channel Ultrasonic Guidedwaves Inspection System) 기술 개발을 추진 중이며 현장 적용 시험을 실시 한 후, 곧 상용화를 목표로 하고 있음. 이 제품은 외국보다 정밀하고 독창적인 검사방법이며 유도 초음파 장비 중 세계 최초 그리고 세계 최고 수준의 사양임 2016년 이후 ‘다채널 유도초음파를 이용한 배관결함 탐지 기술’이 현장에 적용되면 배관의 안전성을 확인하는 핵심기술로서 자리매김할 수 있을 것으로 기대됨 하지만 이 기술은 결함이 생겨난 이후에 측정이 가능하며 송유관 내의 결함을 측정하기 위해서는 송유관 내 기름을 모두 비운 채로 측정해야 한다는 문제점이 있음



■ 그림 2.3 다채널 유도초음파 검사시스템 ■

출처 : 가스안전공사, 2015

- 3) 한국가스공사는 최근 ‘판브러시를 채용한 마그네타이저 탑재 인텔리전트 피그 이용 배관결함 탐상기술’에 대해 신기술 인증서를 받음. 이는 검사 로봇이 가스나 석유의 공급 중단 없이도 배관 내부 유체의 흐름을 따라 주행하면서 배관에 대한 진단을 실시간으로 수행함



■ 그림 2.4 한국가스공사의 인텔리전트 피그 ■

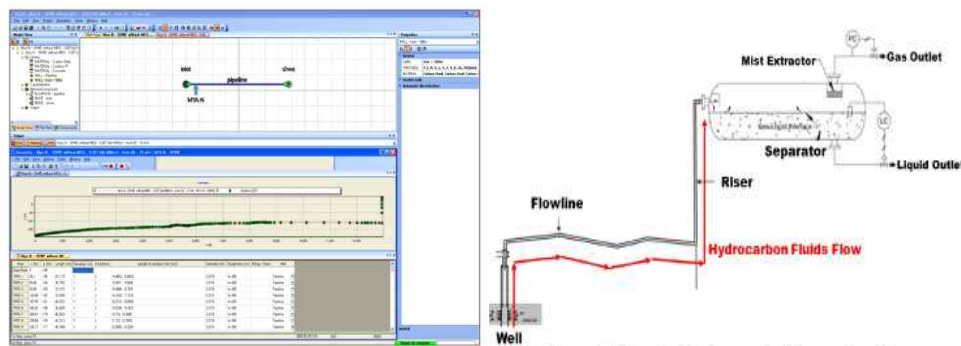
출처 : 한국가스공사, 2014

- 4) 상기 기술과 같이 배관 내 피그(pig)를 집어넣는 진단 방식은 파이프 결함이 발생한 이후에나 진단이 가능하다는 단점이 있음. 또한 피그가 파이프 내부를 지나가며 탐사를 하는 방식이기 때문에 피그가 이동하는 부분은 실시간으로 데이터를 받아볼 수 있지만 관내 전체에 대한 진단을 내리기까지 상당한 시간이 소요됨

다. 관내 유동 분석 프로그램 개발 및 사용 현황

- 1) 현대중공업 산업기술연구소는 2011년 해저 가스 유전의 슬러깅 현상을 예측하기 위해 OLGA 프로그램을 사용하여 연구를 진행한 바 있음. Ramp-up 과정에서 일어나는 슬러깅 현상의 예측을 위해 중간경유 유량을 기준으로 7가지 케이스의 Ramp-up 운전조건을 설정하여 분석함. 그 결과 120 MMSCFD의 유량에서 15분간 중간 경유를 수행하는 것이 가장 양호함을 도출함

* Ramp-up : 유전에서 원유 및 가스 생산량을 저유량에서 고유량으로 증가시키는 운전방식



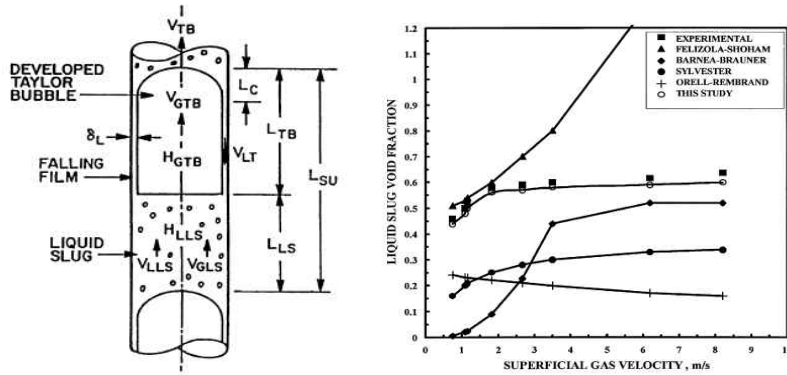
■ 그림 2.5 OLGA를 이용한 Ramp-up 시뮬레이션 ■

- 2) 해외에서는 관내 다상 유동의 역학모델, 유동양식 및 유동 특성의 변화에 대한 활발한 연구에 기초하여 심해 유전 개발, 극한지 자원 이송, 신재생 에너지 개발, 열교환장치 등 여러 산업에 적용되고 있는 반면 국내에서는 해당 기술에 대한 기초 연구와 산업에의 투자가 미흡한 실정임

2. 국외 현황

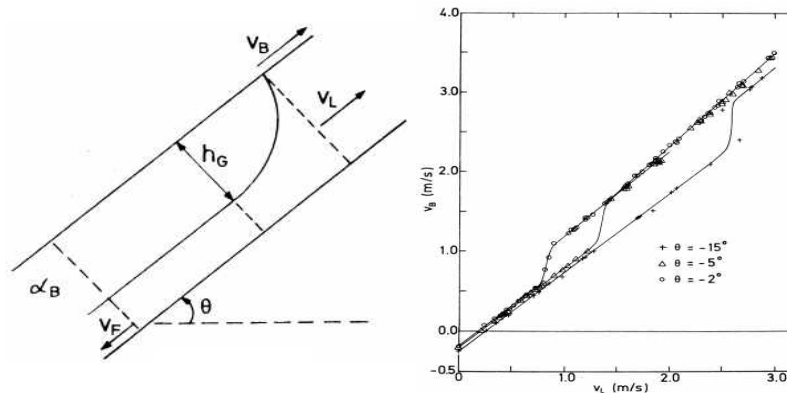
가. 관내 다상 유동 연구 현황

- 1) Zhang 등(2003)은 슬러그 유동에서의 액상 정체(liquid hold-up)현상 및 슬러그 유동에서 분산 유동(dispersed flow)으로의 천이영역에 대한 역학모델을 개발한바 있음. 유체 경계면에서 작용하는 전단응력과 운동량 교환(momentum exchange) 효과를 고려하여 압력강하를 계산하였으며, 액상 정체에 대한 모델 개발을 위해서 선행연구로부터 슬러그 길이(slug length), 마찰 인자(friction factor), 슬러그 속도(slug transitional length) 등의 값을 도출해냄. 역학모델의 정확성을 TUFFP에서 얻은 실험값과 비교한 결과 대부분 높은 일치율을 보였으나 경사각 변화에 따른 압력구배의 변화를 반영하지 못함을 밝힘
- 2) Ghassan & Ali (2000)는 수직 및 경사관에서의 슬러그 유동 역학모델을 개발하였음. 압력구배, 액상정체 등에 경사각의 변화를 반영하여 계산하였고 개발된 역학모델을 TUFFP의 실험데이터와 비교 하였으며 기존 12개의 역학모델과의 오차율 비교를 통해 예측 정확성과 우수성을 증명하였음



■ 그림 2.6 슬러그 유동 도식(좌) 및 기체 겉보기 속도에 따른 기공률(우) ■

3) Bendiksen(1986)은 Taitel 등이 개발한 기존의 이상 유체유동모델에 액체방울에 대한 연속방정식과 모멘텀 방정식을 추가하여 보다 정확한 이상 유동 양상 예측을 위한 역학모델을 개발함. 실험을 통해 관의 경사각 변화가 액체의 레이놀즈 수, 프라우드 수 및 관경 등에 미치는 영향을 조사하였으며 해당 역학모델 및 실험을 이용하여 OLGA 코드를 개발 및 검증함



■ 그림 2.7 경사유동에서의 기포도식(좌) 및 경사각에 따른 기체, 액체의 속도(우) ■

4) 현재까지 개발된 약 12개의 주요 역학모델들은 서로 다른 가정에 의해 제한된 조건만을 반영하거나 비교적 큰 오차율(Barnea-Brauner 모델=기공률에 대해 95.5%, Orell-Rembrand 모델=기공률에 대해 61.4% 등)을 보이므로, 파이프라인의 사용 조건에 따른 정확한 역학모델의 정립 필요

나. 파이프라인 진단 기술 사용 현황

1) UltraScan® Duo는 석유 및 가스 산업계 최초로 GE Healthcare에서 개발 한 ‘위상배열 초음파 검사기술’ (Phased Array Ultrasonic Technology)을 적용한 진단 장비라는 점에서 큰 의미를 가짐. 기존의 초음파 진단 장비들은 한 번에 하나의 단면만을 촬영할 수 있는 반면에 이 제품은 여러 각도를 동시에 촬영이 가능해 3차원적인 진단이 가능하며 어느 곳에 결함이 있는지 보다 더 짧고, 정확하게 진단이 가능함. 하지만 정확도가 높은 반면 동시에 파이프라인 전체의 정보를 얻을 수 없고 파이프라인 내부의 모든 곳을 검사하기 위해서는 어느 정도 시간이 소요됨. 또한 사전에 결함의 예측 및 예방이 불가능하고 결함이 생긴 이후에 측정할 수 있다는 기술적 한계점이 있음



■ 그림 2.8 UltraScan® Duo ■

출처 : GE, 2007

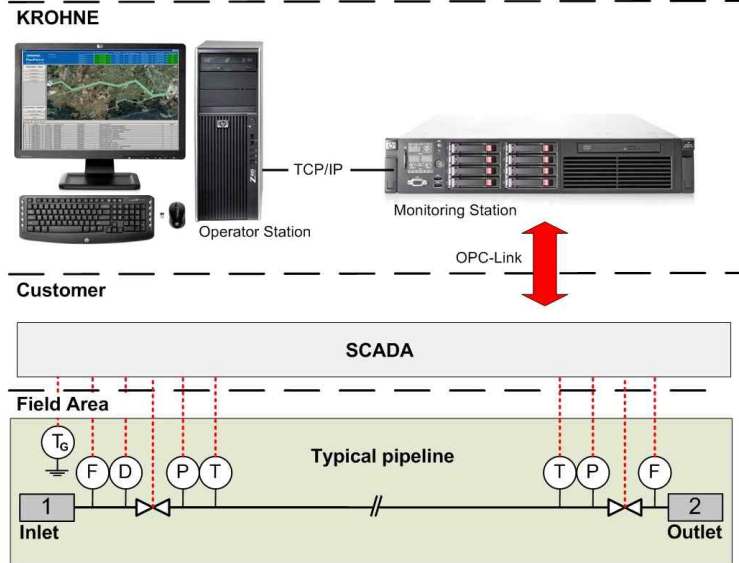
- 2) 영국 에너지 회사 British Petroleum (BP)은 드론 덕분에 1년 내내 미국 알래스카의 송유관을 점검할 수 있게 됨. BP는 지난해 가을 알래스카 북부에 있는 유전 지역인 프루도만에서 드론 시험 비행을 했고 드론은 송유관을 따라 날아가며 파손 위험이 있는지 여부를 정밀하게 살핌. 이전까지는 겨울이 찾아왔을 때 프루도만 송유관을 점검하는데 어려움이 많았지만 이제 드론을 이용해 겨울에도 송유관을 살펴볼 수 있게 됨. 드론을 사용한 진단 방법은 실시간 원격이란 점에서 편하다는 장점이 있지만 결함이 생긴 이후에 발견할 수 있고 송유관의 외적 파손만을 진단하기 때문에 파이프라인 내부 부식과 같은 결함은 찾지 못하는 문제점이 있음. 또한, 사용할 수 있는 시간이 정해져있기 때문에 길이가 긴 송유관의 결함을 측정하는 데에서는 기술적 한계를 가짐



■ 그림 2.9 보잉사 스캔 이글 ■

출처 : BOEING, 2009

- 3) 미국 TechSci의 보고서에 따르면 음파나 압력감지 기술을 사용하는 일반적인 누출감지시스템과 달리 광섬유를 이용한 감지나 실시간 변이 감지 모델(RTTM)과 같은 신기술을 적용한 시스템이 파이프라인 운영자들 사이에서 각광 받고 있음. 실시간 변이 모델은 에너지, 질량, 운동량 보존 법칙을 기반으로 파이프라인 내부의 누출 여부를 감지하기 위해 유체의 흐름을 수학적으로 계산하여 예측하는 방식임. 본 연구에서 개발하려는 진단 프로그램과 유사하게 압력을 실시간으로 예측할 수 있지만 누출을 사전에 방지할 수 없다는 문제점이 있음

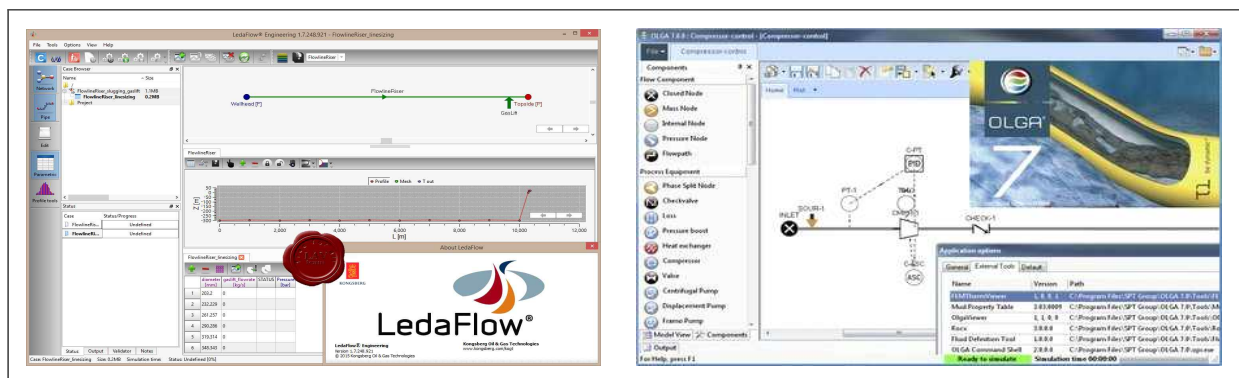


■ 그림 2.10 E-RTTM(Extended Real-Time Transient Model) ■

출처 : Pipeline & Gas Journal, 2014

다. 관내 유동 분석 프로그램 개발 및 사용 현황

- 1) 세계 최대 유전서비스(유전추정·자원관리) 업체 중 하나인 Schlumberger 사의 OLGA 시뮬레이터는 다상(오일, 천연가스, 물) 유체의 이송을 위한 모델링 툴임. 주로 비정상(transient) 유동의 거동에 대한 해석을 다루며, 특히 다상유동에서의 가장 큰 과제 중 하나인 슬러그 유동의 예측과 해석에 선도적인 프로그램임을 인정받고 있음. Pipesim은 같은 회사의 프로그램으로 정상(steady) 유동에 대한 전문적인 해석을 다룸. 노르웨이 Kongsberg사의 LedaFlow는 OLGA의 경쟁 시뮬레이터로서 OLGA 및 Pipesim의 기능을 똑같이 구현함. 세 제품 모두 SINTEF 다상 유동 연구소의 TILDA 데이터베이스에 기초를 두고 있으며 12,000개 이상의 데이터 포인트를 확보하고 있음. 상기 제시한 프로그램들은 현재 해당분야에서 가장 높은 권위를 가지지만, 슬러그 유동의 특정 구간 내 지표의 오차율은 매우 높아 개선의 여지가 있음



■ 그림 2.11 LedaFlow(왼쪽)와 OLGA(오른쪽) 프로그램 ■

- 2) DESCRAMBLE(Drilling in dEep, Super-CRitical AMBient of continental Europe)는 EU에서 주관하여 2015년 1월부터 진행되고 있으며 차세대 재생에너지로서 지열과 초임계 유체의 생산적 활용을 목적으로 이탈리아 라르데렐로 지역의 지각을 약 3.5 km 까지 파내려가는 대형프로젝트임. 이 프로젝트에 설계 및 안전성 평가를 위해 Kongsberg사의 LedaFlow 프로그램이 사용되었으며 374 ℃의 초임계 물의 유동특성을 예측하였음

-
- 3) Total 사는 DONG Energy 및 SSE와 제휴를 맺고 1 tc의 천연가스가 매장돼있는 Laggan-Tormore 지역의 개발을 시작하였음. 5개의 유전과 가스플랜트는 143 km의 파이프 라인으로 연결돼있으며 관 내부로 MEG(monoethylene glycol)을 흘려주어 수화물의 형성을 방지하는 기술을 사용하며 따라서 관 내부는 다상유동 특성을 보이게 됨. Total사는 수화물 방지 모델링 및 관내 유동특성을 예측하기 위해 OLGA와 LedaFlow를 모두 사용하였음
- 4) Shtokman 가스전은 세계 최대 미개발 가스전 중의 하나로서 가스 콘덴세이트의 가채 매장량이 3억7천만 톤에 이르지만 북극해상에서 560 km 지점 해상에 위치하고 가스 매장량이 수심 340 m에 부존하고 있어 기술적으로 개발에 큰 제약이 따름. 이에 Gazprom, Total, Statoil 사들은 OLGA 프로그램을 사용하여 최대 및 최저 허용 유량, 온도, 압력, 수화물 발생 등의 특성을 조사한바 있음
-

제3장. 연구 수행 내용 및 성과

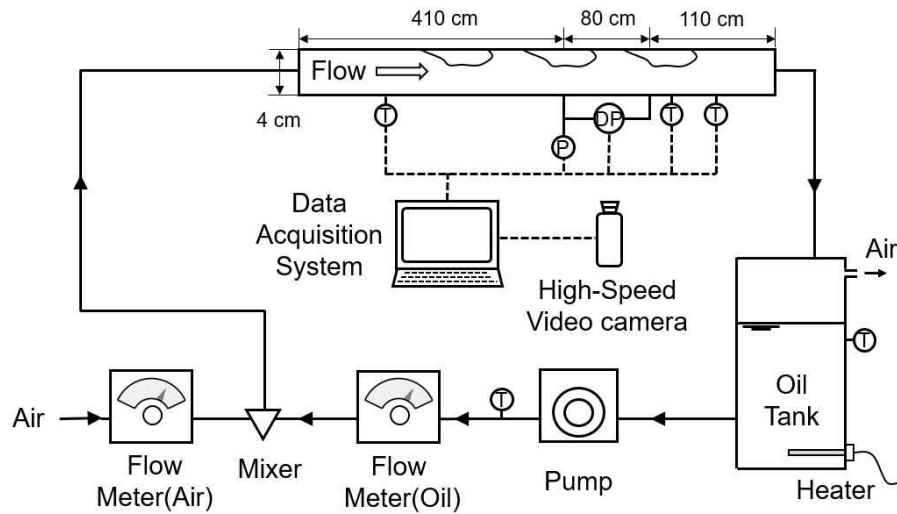
1. 연구수행 방법 및 내용

가. 이상 유동 실험 수행

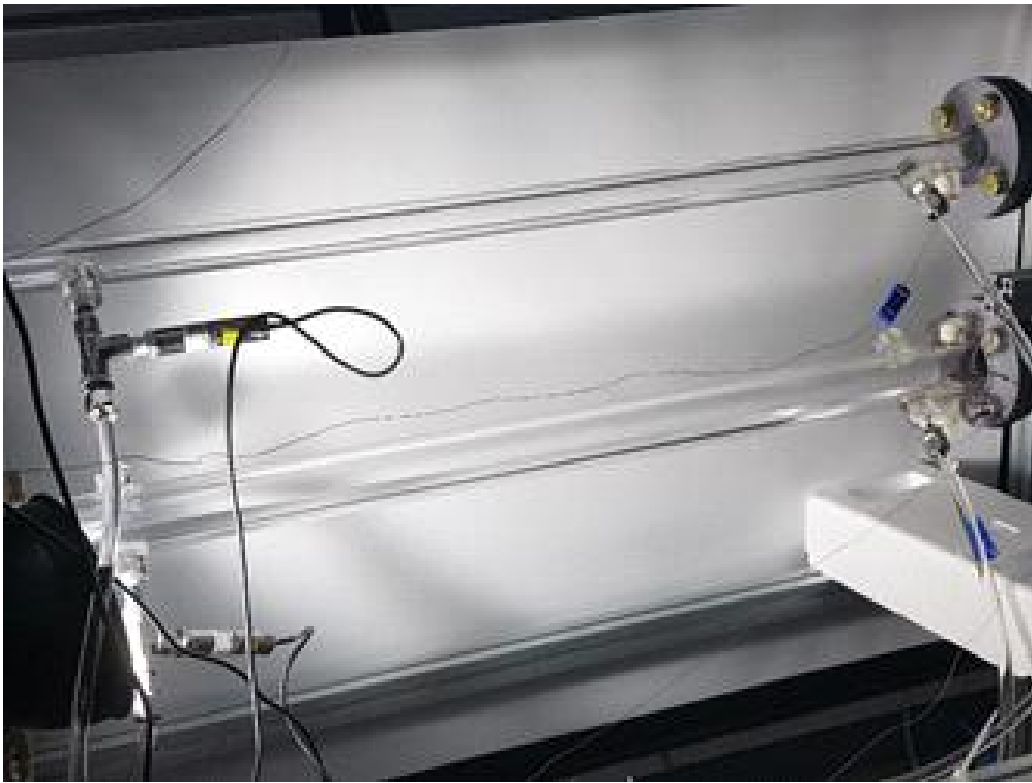
- 1) 실험실 수준으로 동토 자원이송망을 모사한 다상 유동 실험 장치를 설계 및 제작하였음. 관경 2 cm, 4 cm, 길이 6 m 길이의 시험 루프(Test loop)를 제작하였고, 동토 자원이송망을 통해 운송되는 오일과 비슷한 물성치(밀도, 점도)를 갖는 2가지의 오일(경유, 중유)을 시험 루프의 작동유체로 선정하였음. 내부 작동 온도 25~45℃ 및 압력 1~3 bar하에서 실험을 수행하였음



■ 그림 3.1 다상 유동 실험 장치 ■



■ 그림 3.2 다상 유동 실험 장치 개략도 ■



■ 그림 3.3 관경 2cm, 4cm의 테스트 섹션 ■

- 2) 충분히 발달된 유동에서의 차압을 측정하기 위하여 시험부 입구로부터 100D 길이인 4 m 이후에서 아크릴관에 0.8 m 간격으로 압력탭(그림 3.4(좌))을 내었음. 차압 트랜스듀서를 이용하여 두 압력탭 사이에서의 차압을 1000 Hz의 샘플링 속도(Sampling rate)로 측정하였음. 오일의 온도를 측정하기 위하여 그림 3.4(우)와 같은 탭을 낸 후, 열전대선을 삽입하였음. 유동양식을 관찰하기 위하여 시험관의 재질을 투명 아크릴로 하였고, 두 압력탭 사이에 나타나는 유동양식을 초고속 카메라를 통해 관찰하였음. 공기와 오일을 고르게 섞기 위하여 Mixer의 공기유입부 쪽에 다공성 막을 삽입하였음(그림 3.5) 공기의 유량을 측정하기 위하여 열식 질량유량계(그림 3.6(좌))를 사용하였고, 오일의 유량을 측정하기 위하여 기계식 유량계(그림 3.5(우))를 사용하였음. 오일 탱크(그림 3.7) 내 공기의 유출량을 조절하여 내압을 조절하였음 기계식 펌프(그림 3.8(좌))를 사용하여 오일을 순환시켰으며, 한번 실험이 수행되고 난 뒤에는 진공 펌프(그림 3.8(우))를

이용하여 오일 내에 섞여있는 공기를 제거하였음

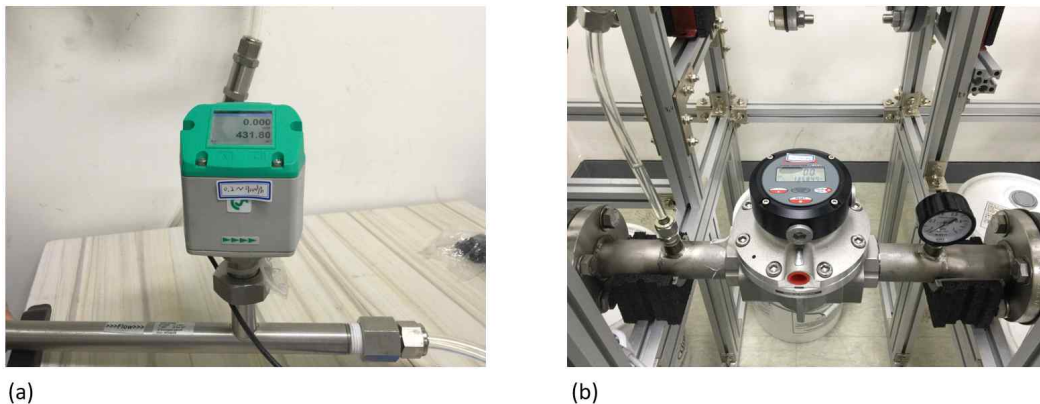
- 3) 실험은 오일을 순환시켜 관 안의 모든 공기를 제거한 후에 실시하였다. 펌프의 회전 속도를 고정하여 오일의 유량을 고정한 후 믹서 이전의 공기 쪽 밸브를 조절하여 공기의 유량을 조절하며 유동양식을 관찰하였음 이후 오일의 유량을 변화시켜가며 실험을 반복함



■ 그림 3.4 압력 측정 탭(좌), 온도 측정 탭(우) ■



■ 3.5 공기-오일 Mixer ■



■ 그림 3.6 열식 질량유량계(좌), 오벌타입 기어식 유량 센서(우) ■



■ 그림 3.7 오일 탱크 ■



(a)



(b)

■ 그림 3.8 기어식 펌프(좌), 진공 펌프(우) ■

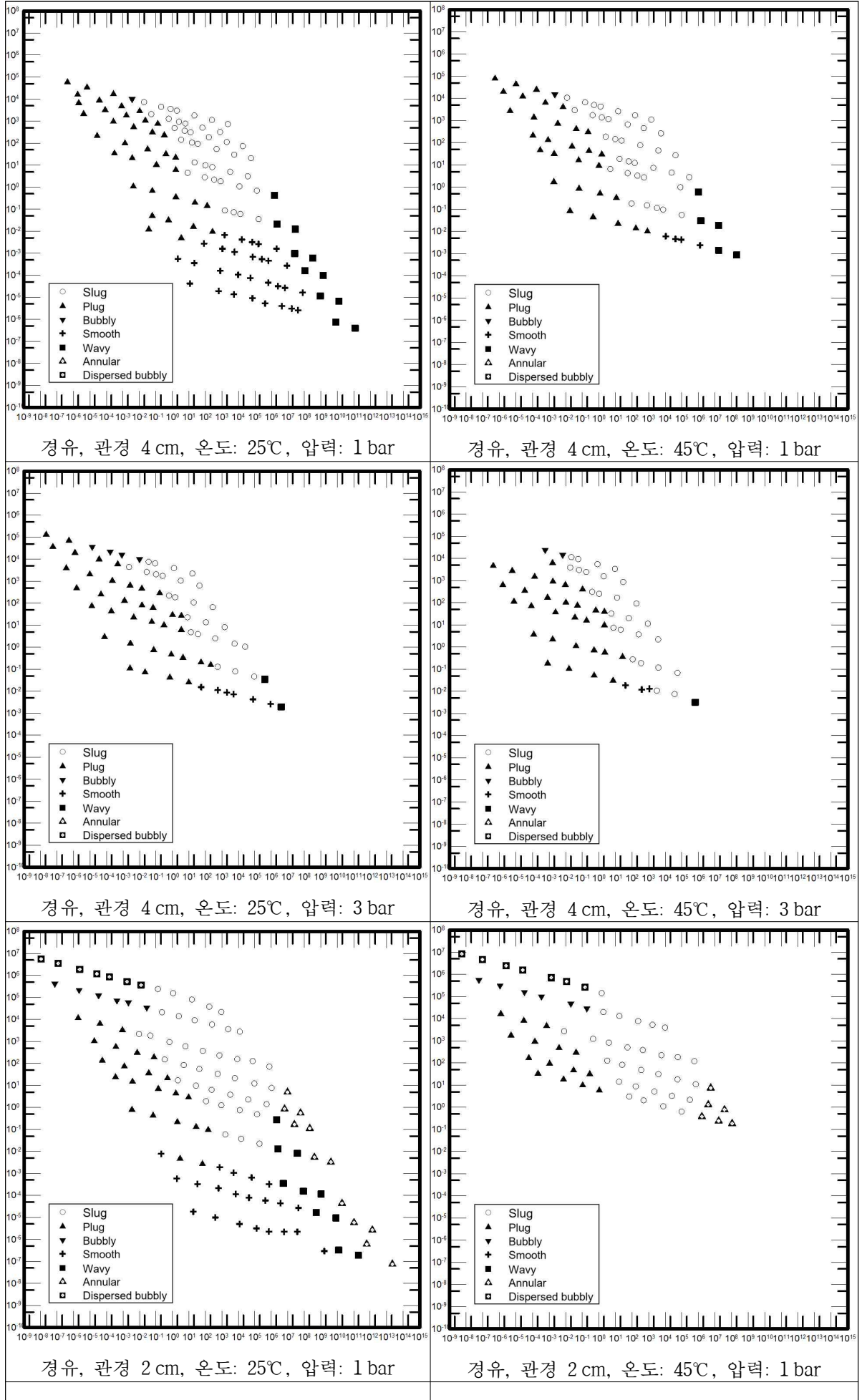
4) 본 실험을 통해 총 747data의 실험 데이터가 수집되었고, 수집된 데이터의 작동 조건은 다음과 같음

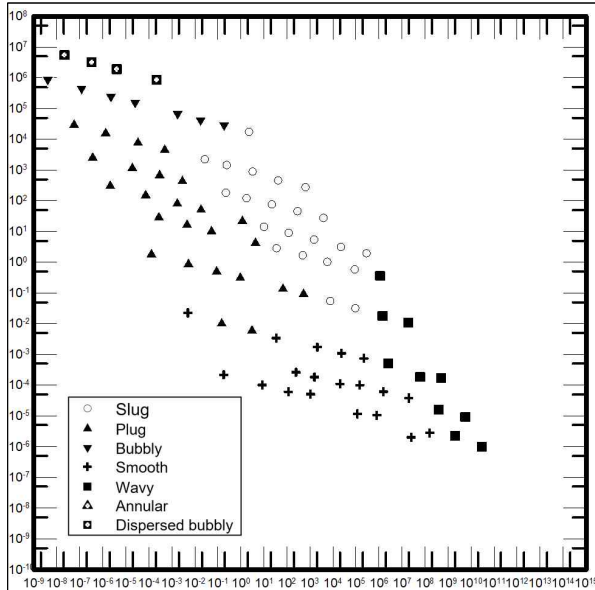
- ① 관 직경 : 2 cm, 4 cm
- ② 오일 밀도 : 878, 970 kg/m³ (경유, 중유)
- ③ 오일 점성 : 0.0363, 0.345 Pas (25℃, 45℃)
- ④ 오일 표면장력 : 0.0268, 0.0211 N/m (25℃, 45℃)
- ⑤ 기체 밀도 : 1.116~4.1014 kg/m³
- ⑥ 기체 점성 : 0.0000184~0.0000195 Pa s

5) 표 3.1은 작동유체, 온도 및 압력에 따른 유동양식 분포를 나타낸 것이다. 그래프의 x축 좌표와 y축 좌표는 다음과 같음

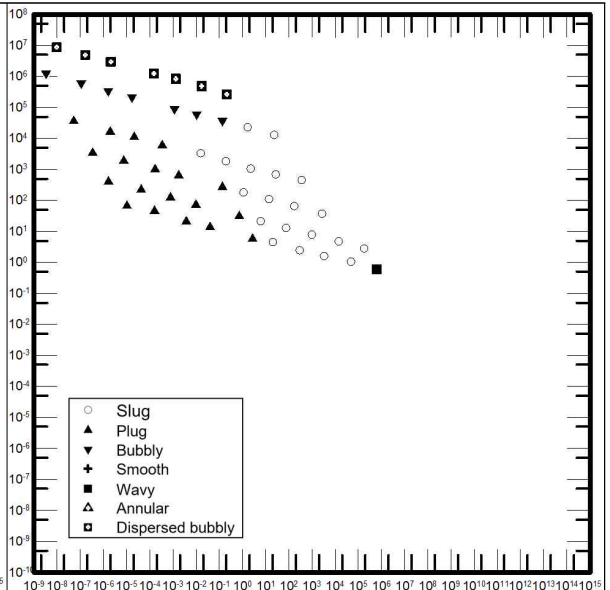
$$\begin{aligned} \text{x 축: } & [We_{SG} \quad Re_{SG} \quad Fr_{SG} \quad \beta_G^{1.5}]^{0.5} / Re_{SL}^{0.8} [d/0.026]^{1/3} \\ \text{y 축: } & [We_{SL} \quad Re_{SL} \quad Fr_{SL} \quad \beta_L^{1.5}]^{0.5} \end{aligned}$$

■ 표 3.1 작동 조건에 따른 유동양식 분포 ■

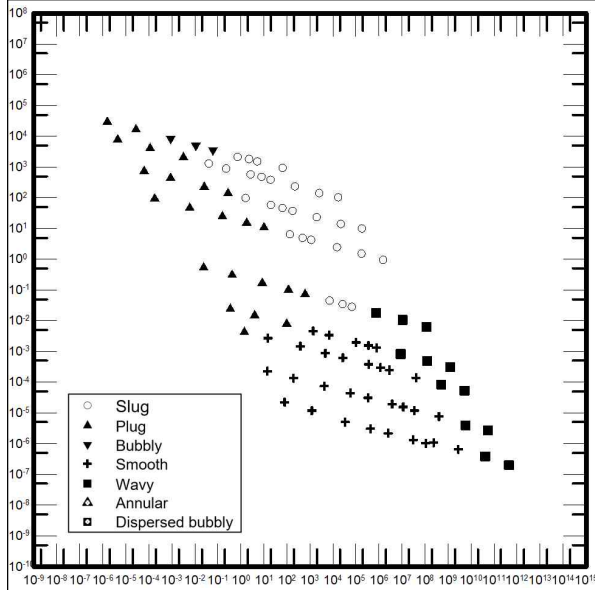




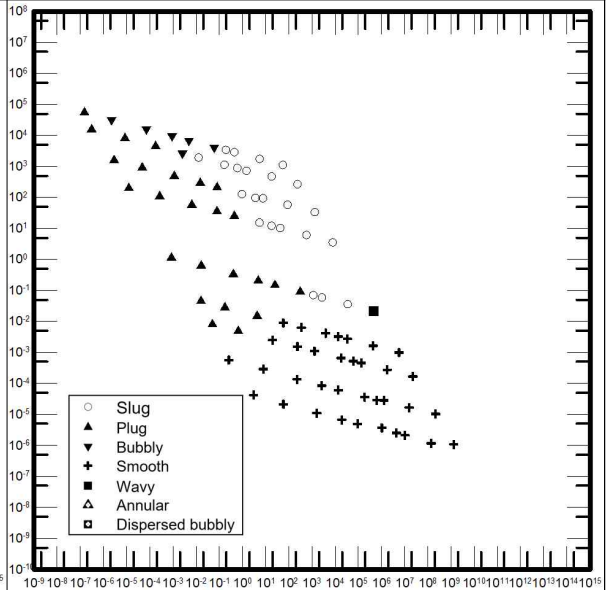
경유, 관경 2 cm, 온도: 25°C, 압력: 3 bar



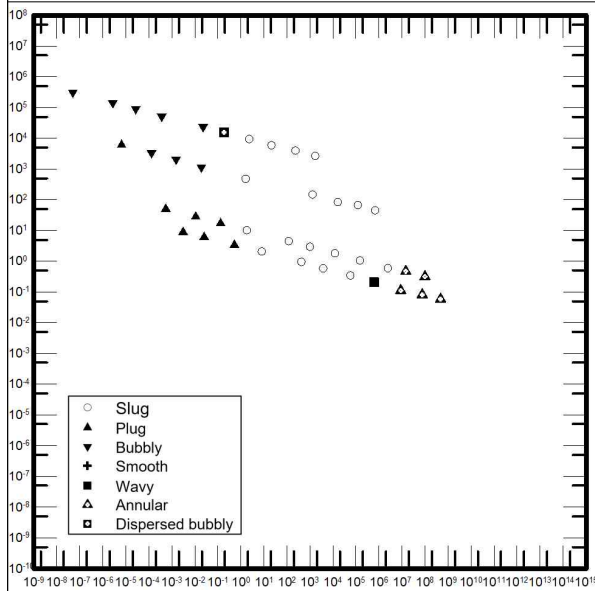
경유, 관경 2 cm, 온도: 45°C, 압력: 3 bar



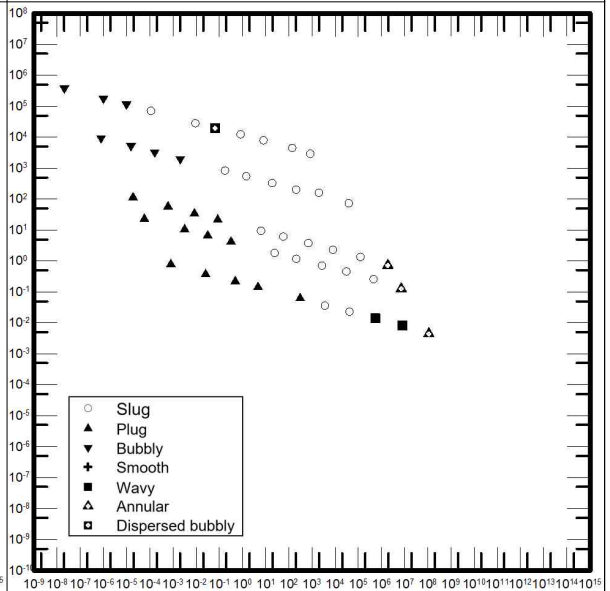
중유, 관경 4 cm, 온도: 25°C, 압력: 1 bar



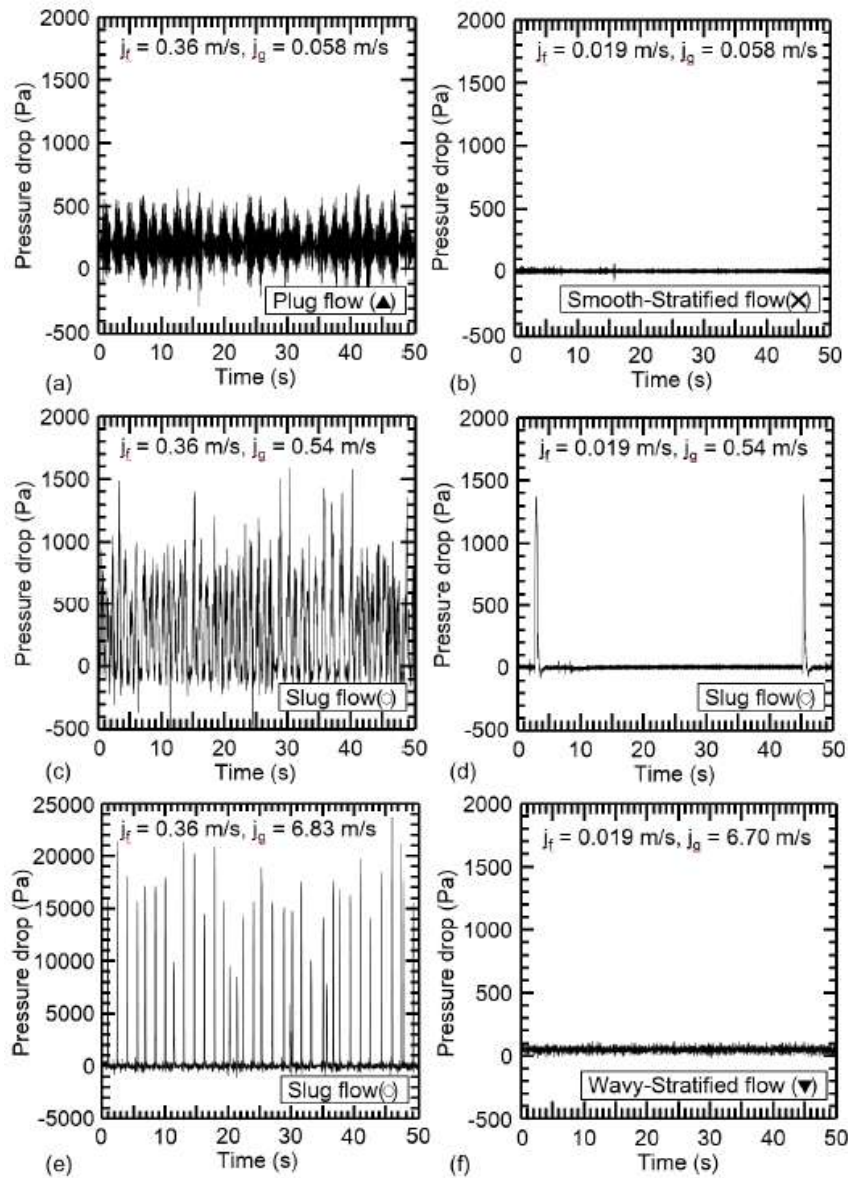
중유, 관경 4 cm, 온도: 25°C, 압력: 3 bar



중유, 관경 2 cm, 온도: 25°C, 압력: 1 bar



중유, 관경 2 cm, 온도: 25°C, 압력: 3 bar



■ 그림 3.9 공기와 오일의 겹보기 속도에 따른 마찰 압력강하 변동 ■

6) 그림 3.9는 본 실험을 통해 얻은 데이터를 바탕으로 공기와 오일의 겹보기 속도에 따른 마찰 압력강하 변동을 나타낸 것임. 그림 3.9(a), (c)에서 플러그 유동과 슬러그 유동이 나타날 때, 마찰 압력강하가 진동하였고, 공기의 겹보기 속도가 커질수록 슬러그류가 되면서 마찰 압력강하의 진폭이 커짐을 확인하였음. 그림 3.9(c), (e)에서 공기의 겹보기 속도가 커질수록 마찰 압력강하의 진폭이 커짐을 확인하였는데 이는 공기와 오일의 큰 속도 차이로 인해 경계면에서의 전단응력이 증가하여 큰 압력 변동이 발생한 것으로 판단됨. 그림 3.9(b), (d), (f)에서 성층 유동과 파형 유동이 나타날 때, 마찰 압력강하의 진동이 거의 없는 반면에 슬러그 유동이 나타날 때, 일시적으로 큰 진폭의 마찰 압력강하가 나타남. 이를 통해 공기와 오일이 간헐적으로 큰 교란을 일으킬 때 큰 진폭의 마찰 압력강하가 생기는 것을 알 수 있음. 그림 3.9(c), (d)를 비교하였을 때, 오일의 겹보기 속도가 증가함에 따라 마찰 압력강하의 진폭은 대체로 비슷하나 주기가 매우 짧아짐을 확인하였음. 이는 오일의 겹보기 속도가 증가할수록 수력도약(Hydraulic jump)이 기포의 후단부로 이동했기 때문인 것으로 판단됨. 그림 3.9(c), (e)를 비교하였을 때, 공기의 겹보기 속도가 증가함에 따라 마찰 압력강하의 진폭이 매우 커짐을 확인하였음. 이에 따라 슬러그 유동이 흐를 때, 마찰 압력강하의 진폭에는 공기의 겹보기

속도가, 마찰 압력강하의 주기에는 오일의 겔보기 속도가 큰 영향을 미치는 것으로 판단됨

나. 이상 유동 무차원 맵 개발

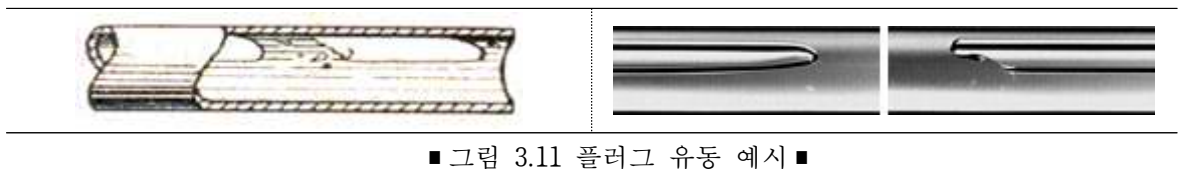
1) 수평 관 내 유동양식의 분류

- Alves는 내경이 1인치인 수평 원관에서 유동양식을 관찰하였고, 유동양식을 기포유동(Bubble flow), 플러그 유동(Plug flow), 성층유동(Stratified flow), 파형유동(Wavy flow), 슬러그 유동(Slug flow), 환형유동(Annular flow), 그리고 분산유동(Dispersed/Spray flow)로 구분하였음. 본 과제에서는 이 유동양식들 외에 분산기포유동(Dispersed bubble flow)을 함께 정의하였으며 각 유동양식의 정의는 다음과 같음

- ① 기포유동 : 관의 상부에 분포한 기포들이 액체와 거의 같은 속도로 흘러가는 유동양식으로 기체유량이 낮을 때 발생하는 유동



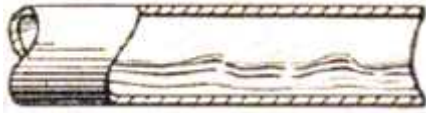
- ② 플러그 유동 : 기포유동에서 기체유량이 증가하면서 발달하는 유동양식으로, 기포들이 합쳐지면서 긴 기포들이 관의 상부를 따라 이동하고 그 사이에 액체 플러그가 형성되는 유동



- ③ 성층유동 : 액체 유량과 기체 유량이 모두 낮을 때 형성되는 유동양식으로, 관의 상부에는 기체가 흘러가고 관의 하부에는 액체가 흘러가며, 기체와 액체의 경계면에 파형이 거의 형성되지 않는 것이 특징인 유동



- ④ 파형유동 : 성층유동과 같이 관의 상부에는 기체가 흘러가고 관의 하부에는 액체가 흘러가지만, 상대적으로 높아진 기체유량으로 인해 기체와 액체의 경계면에 파형이 존재하는 유동



■ 그림 3.13 파형 유동 예시 ■

- ⑤ 슬러그 유동 : 슬러그 유동은 플러그 유동 또는 파형유동으로부터 주로 발달된 플러그 유동으로부터 발달 시에는 긴 기포가 형성되어 기포의 하단에서 와류로 인한 미세 기포 이탈이 나타나는 유동을 슬러그 유동으로 정의하며, 파형유동으로부터 발달 시에는 큰 파형이 관의 상부에 닿으며, 많은 미세 기포를 포함하는 액체 슬러그와 액체의 평균 속도보다 큰 속도로 흘러가는 기체로 구성된 유동으로 정의함



■ 그림 3.14 슬러그 유동 예시 ■

- ⑥ 환형유동 : 높은 기체유량에서 형성되는 유동양식으로, 액체가 관의 외벽을 모두 둘러싸면서 액막을 형성하여 흘러가고, 기체는 관의 중심에서 흐르는 유동



■ 그림 3.15 환형 유동 예시 ■

- ⑦ 분산유동 : 매우 높은 기체 유량에서 형성되는 유동양식으로, 거의 모든 액체가 액적의 형태로 기체에 동반되어 흘러가는 유동



■ 그림 3.16 분산 유동 예시 ■

- ⑧ 분산기포유동 : 기체유량이 낮고 액체유량이 매우 높을 때 발생하며, 작은 기포가 관 전체에 분포하여 액체와 거의 같은 속도로 흘러가는 유동



■ 그림 3.17 분산 기포 유동 예시 ■

2) 수집된 데이터

- 본 과제에서는 가스-오일 혼합물의 다양한 유동 조건에 적용할 수 있는 유동양식지도의 제작을 위해 본 과제의 실험 결과를 포함한 18개의 출처(총 1,956data)에서 데이터를 수집하였음 수집된 데이터의 범위는 다음과 같음

- ① 관 직경 : 20~78 mm ($20 \text{ mm} \leq D \leq 78 \text{ mm}$)
- ② 오일 밀도 : 722~970 kg/m³
- ③ 오일 점성 : 0.0013~5 Pa s (1.3 ~ 5000 cP)
- ④ 오일 표면장력 : 0.017~0.031 N/m
- ⑤ 기체 밀도 : 1.1~10.1 kg/m³
- ⑥ 기체 점성 : 17~27 η Pa s
- ⑦ 압력 범위 : 1 ~ 9 bar

> 타 연구결과 수집

Kokal, An experimental study of two phase flow in inclined pipes, (1987)

Lu, Experimental and computational study of two-phase slug flow, (2015)

Abdulkadir 등, Experimental study of the hydrodynamic behaviour of slug flow in a horizontal pipe, (2016)

Viana, Liquid entrainment in gas at high-pressures, (2017)

Meng, Low liquid loading gas-liquid two-phase flow in near-horizontal pipes, (1999)

Brito 등, Effect of medium oil viscosity on two-phase oil-gas flow behavior in horizontal pipes, (2013)

Al-safran, An experimental and theoretical investigation of slug flow characteristics in the valley of a hilly terrain pipeline, (2003)

Chen 등, Gas-liquid stratified-wavy flow in horizontal pipelines, (1997)

Mattar, Slug flow uphill in an inclined pipe, (1973)

Aziz 등, Some observations on the motion of elongated bubbles in horizontal pipes, (1974)

Farsetti 등, Experimental investigation of high viscosity oil-air intermittent flow, (2014)

Zhao 등, High viscosity effects on characteristics of oil and gas two-phase flow, (2013)

Zhao 등, Slug frequency in high viscosity liquid and gas flow in horizontal pipes, (2013)

Chupin, An experiment investigation of multiphase gas-liquid pipe flow at low liquid loading, (2003)

Soldati, Identification of two phase flow regimes via diffusional analysis of experimental time series, (1996)

Yi-ping, Gas-liquid interfacial friction factor for the transition from stratified to slug flow, (2008)

Minami, Liquid holdup in wet-gas pipelines, (1987)

3) 기존의 유동양식 지도와 비교

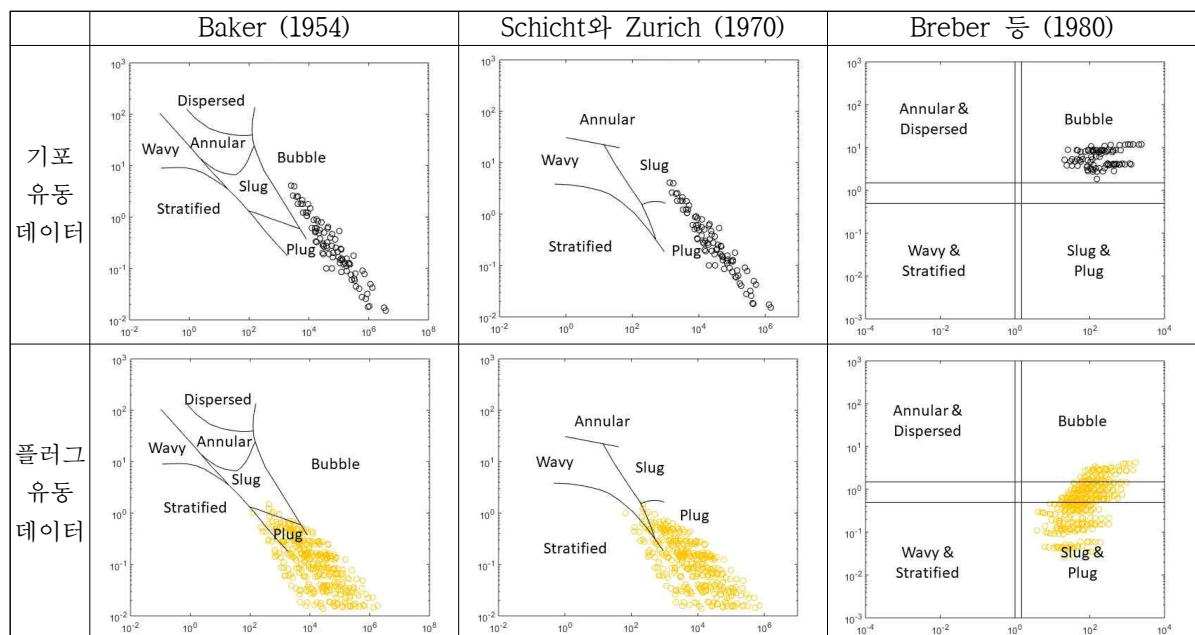
- 본 연구에서는 기존의 유동양식 지도의 예측 성능을 확인하기 위해 수집된 데이터와 비교를 하였음 다음의 표는 이전 유동양식지도를 정리한 것임

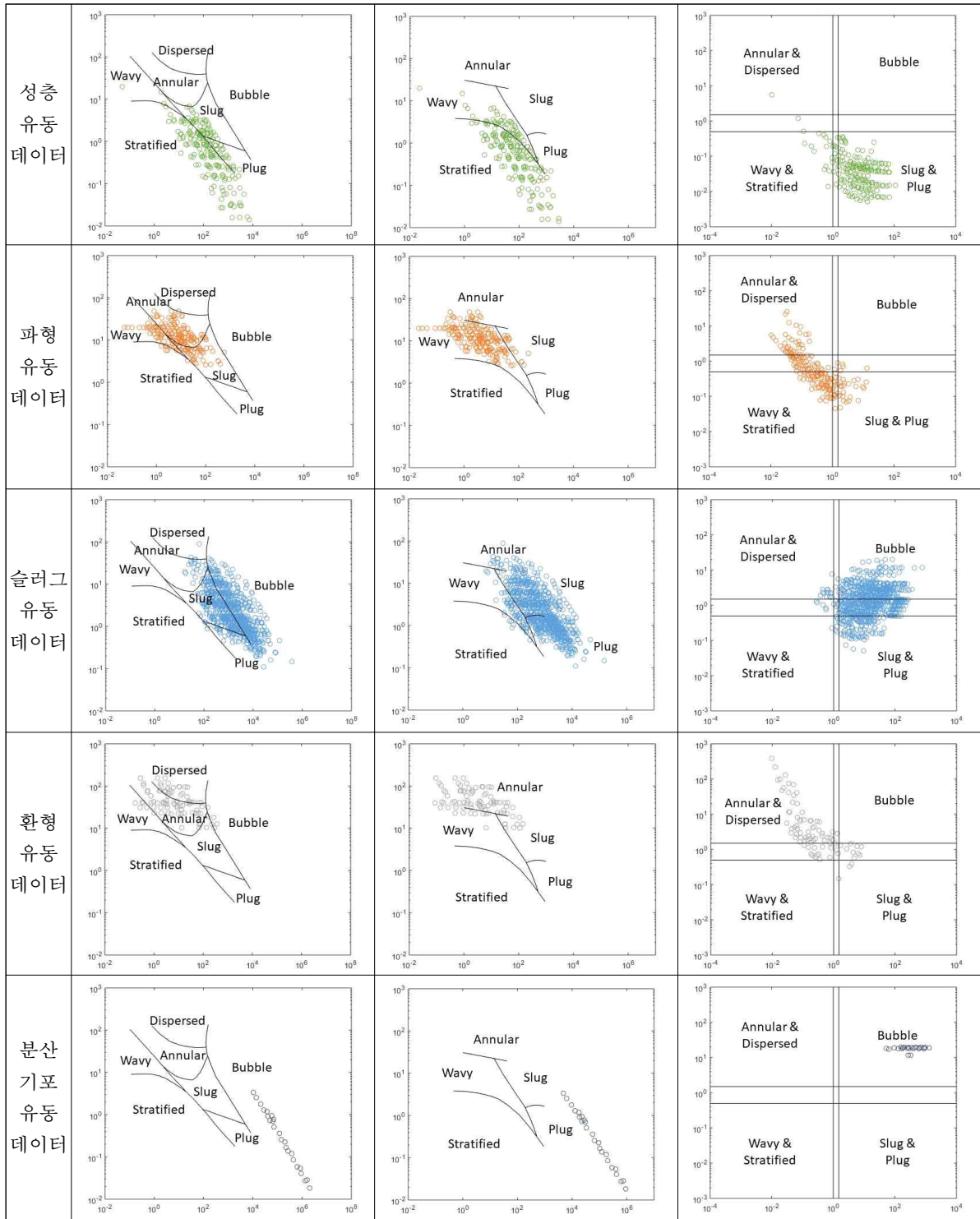
■ 표 3.2 유동 데이터 작동 조건 ■

저자	유동조건	유동양식분류
Baker (1954)	작동유체 : 가스-오일 관 직경 : 102.26~257.45 mm 기체 질량유속 : 19.8~284.8 kg/m ² s 액체 질량유속 : 3.13~309.9 kg/m ² s 기체 밀도 : 41.97~69.04 kg/m ³	기포유동, 플러그 유동, 슬러그 유동, 성층유동, 파형유동, 환형유동, 분산유동

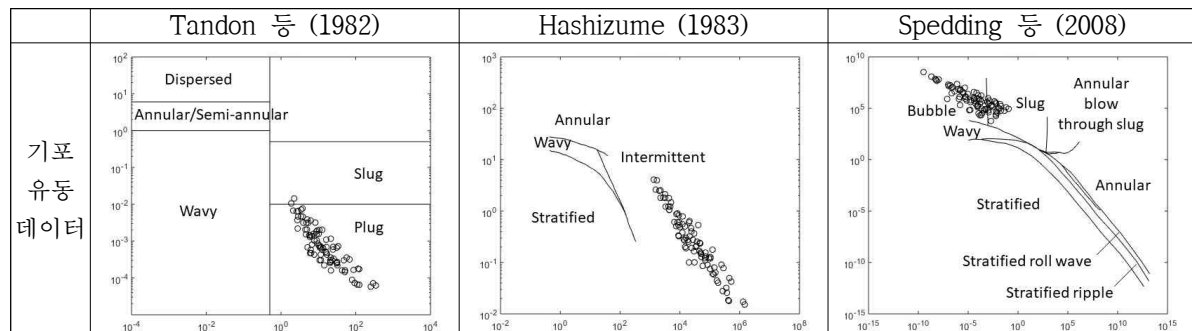
	액체 밀도 : 612.31~782.47 kg/m ³ 기체 점성 : 0.000014~0.0000145 Pas 액체 점성 : 0.000557~0.00063 Pas 표면장력 : 0.015~0.018 N/m	
Schicht와 Zurich (1970)	작동유체 : 공기-물 관 직경 : 96 mm	성층유동, 플러그 유동, 슬러그 유동, 파형유동, 환형유동
Breber 등 (1980)	작동유체 : Steam, n-Pentane, R11, R12, R113 관 직경 : 4.8~50.8 mm	기포유동, 플러그/슬러그 유동, 성층/파형 유동,
Tandon 등 (1982)	작동유체 : R12, R113 관 직경 : 4.8~15.9mm	플러그 유동, 슬러그 유동, 파형유동, 환형/반환형유동, 분산유동
Hashizume (1983)	작동유체 : R12, R22 관 직경 : 10 mm 질량유속 : 88.4~354 kg/m ² s 포화온도 : 20, 39, 50℃	간헐유동, 성층유동, 파형유동, 환형유동
Spedding 등 (2008)	작동유체 : 공기-물, 공기-물/글리세린 혼합물, 공기-오일 관 직경 : 25.2~93.5 mm	기포유동, 슬러그 유동, 성층유동, 파형유동, 환형유동, 환형/분산유동

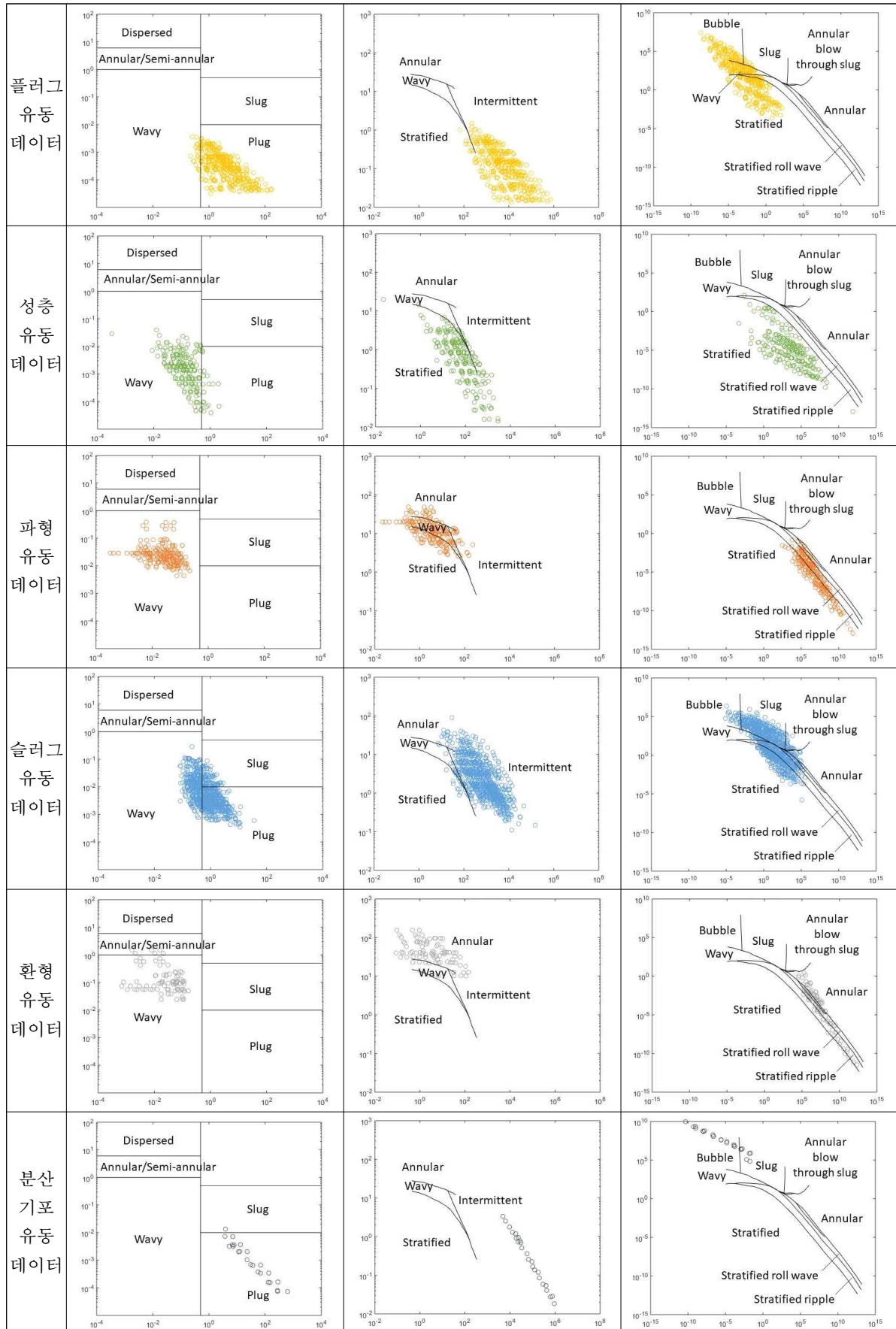
■ 표 3.3 유동양식에 따른 실험 데이터와 이전 유동지도와의 비교 #1 ■





■ 표 3.4 유동양식에 따른 실험 데이터와 이전 유동지도와의 비교 #2 ■





- ① Baker (1954)의 유동양식지도는 플러그 유동과 기포유동에 대해 좋은 예측 성능을 보이지만, 성층유동, 파형유동, 슬러그 유동의 데이터를 잘못 예측하고 있음
- ② Schicht와 Zurich (1970)의 유동지도는 파형유동과 환형유동의 데이터를 잘 예측하지만, 그 외의 데이터에 대해 좋지 않은 예측 성능을 보임

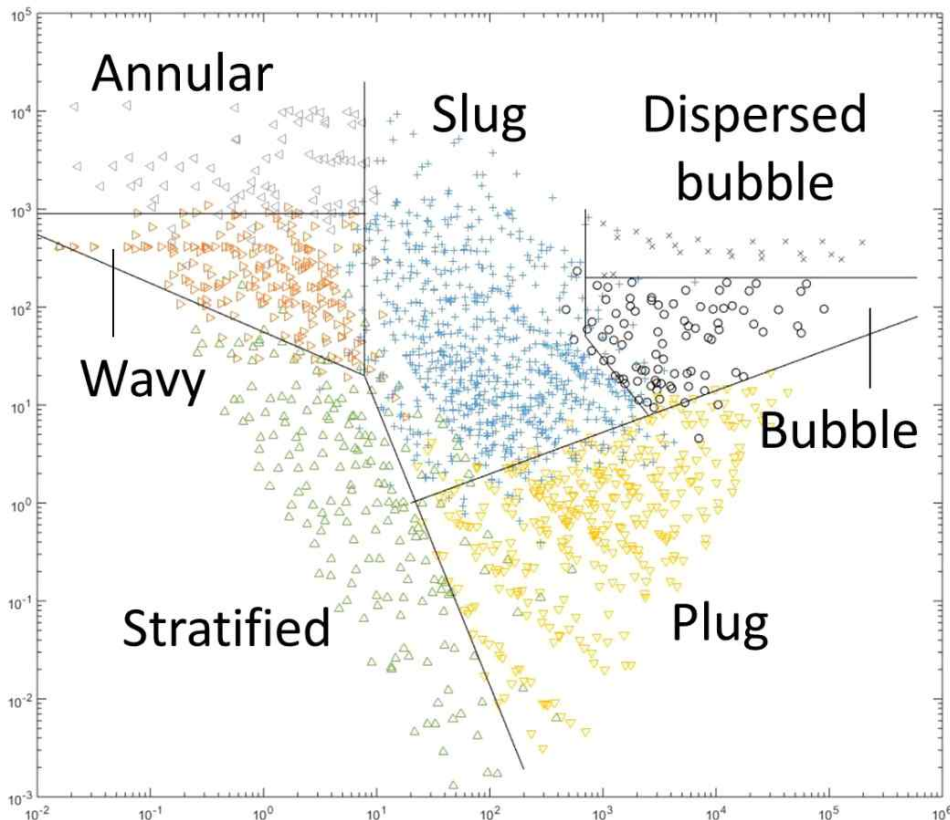
- ③ Breber 등 (1980)의 유동양식지도는 기포유동의 데이터에 대해서만 좋은 예측 성능을 보이고, 그 외의 유동양식에 대해서는 좋지 않은 예측성능을 보임
- ④ Tandon 등 (1982)의 유동양식지도는 플러그 유동과 파형유동의 데이터에 대해 좋은 예측 성능을 보이지만, 그 외의 유동양식 데이터에 대해서는 잘못된 예측을 제공함
- ⑤ Hashizume (1983)의 유동양식지도는 성층유동, 파형유동, 환형유동의 데이터에 대해 좋은 예측을 보이나, 플러그 유동, 슬러그 유동, 기포유동, 분산기포유동이 모두 간헐 유동으로 예측하는 문제점이 있음
- ⑥ Spedding 등 (2008)의 유동양식지도는 성층유동과 파형유동 데이터에 대해 좋은 예측 성능을 보이지만, 플러그 유동, 슬러그 유동, 환형유동 데이터에 대해 안 좋은 예측을 보임

4) 새로운 유동양식지도 개발

- 새로운 유동양식지도의 제작을 위해 기존 유동양식지도의 좌표축으로부터 주요 인자를 선별하였고, 각 축을 다음과 같이 설정하였음

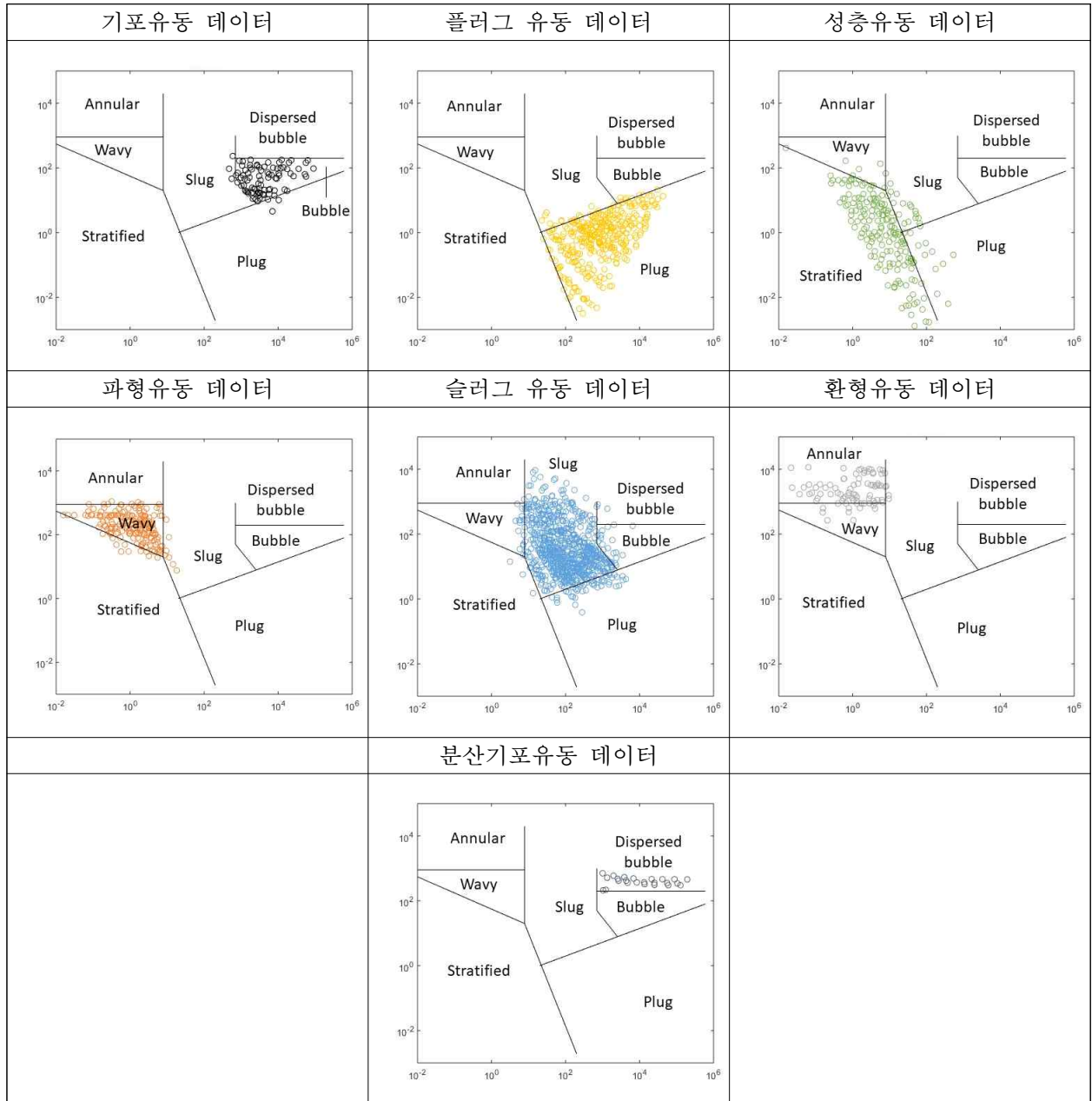
$$\begin{aligned}
 - x \text{ 축} &: \left(\frac{1-x}{x} \right) \left(\frac{\rho_f}{\rho_w} \right)^{-0.17} \left(\frac{\rho_g}{\rho_A} \right)^{0.5} \left(\frac{\mu_f}{\mu_w} \right)^{-0.2} \left(\frac{\mu_g}{\mu_A} \right)^{-0.2} \left(\frac{\sigma}{\sigma_w} \right)^{-0.25} \\
 - y \text{ 축} &: \frac{(j_g + j_f)^2}{gD} \left(\frac{\rho_g}{\rho_A} \right)^{0.5} \left(\frac{\mu_f}{\mu_w} \right)^{0.2} \left(\frac{\mu_g}{\mu_A} \right)
 \end{aligned}$$

- 본 과제에서 제작된 유동양식지도와 각 데이터를 비교하면 다음과 같으며 본 연구에서 수집한 이상 유동 유동양식 실험 데이터뿐만 아니라 기존 이상 유동 유동양식 데이터에 대해 모두 좋은 예측 성능을 보임



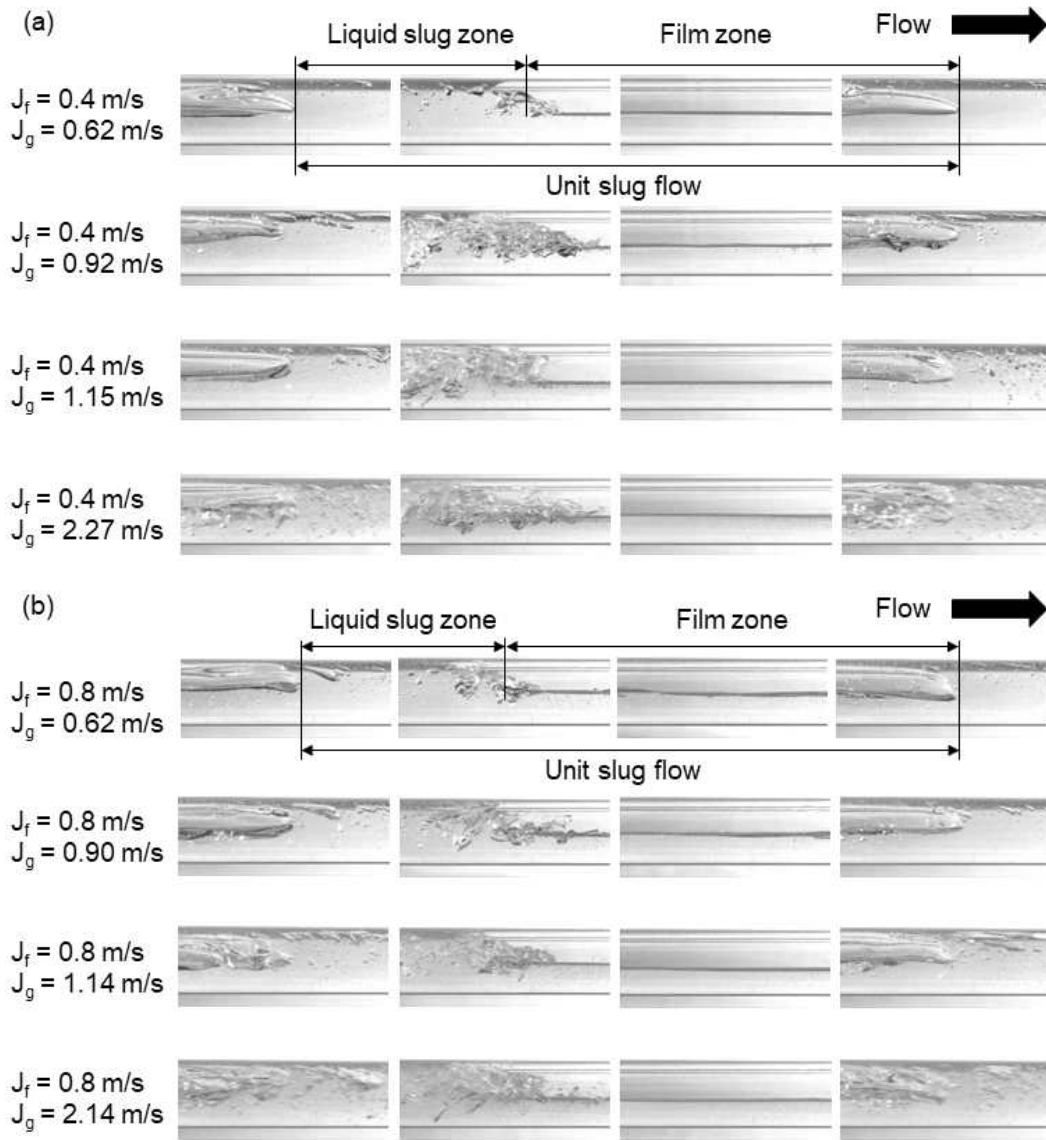
■ 그림 3.18 개발한 다상 유동 맵과 기존 데이터 비교 ■

■ 표 3.5 개발된 유동양식 지도 ■

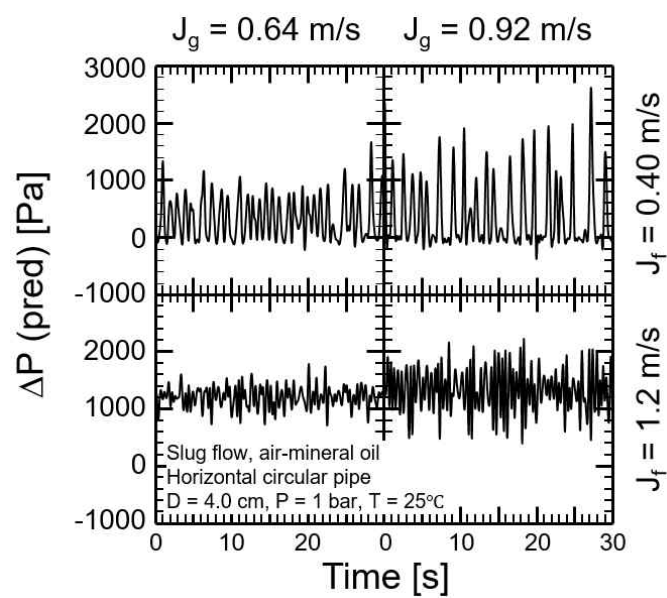


다. 슬러그 유동 역학 모델 개발

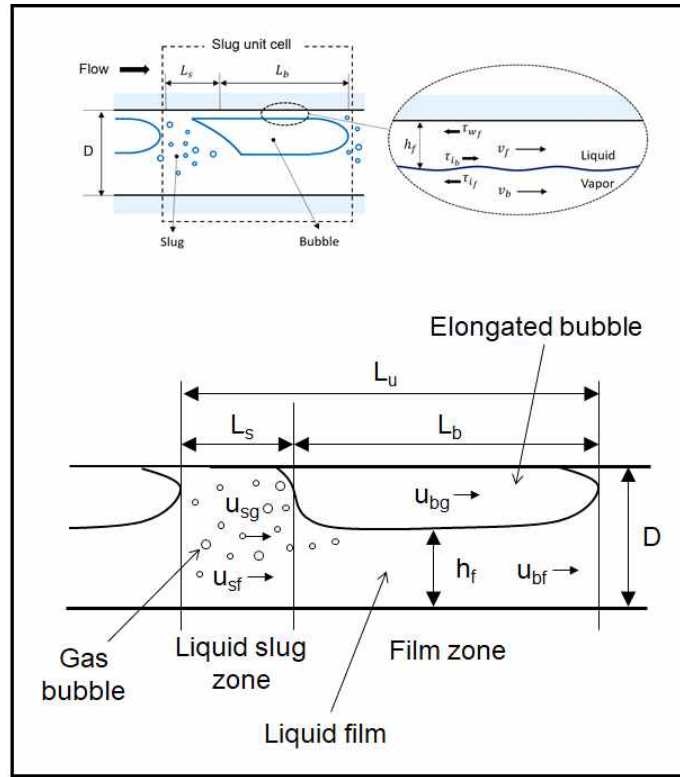
- 1) 이상 유동 실험을 통해 수집한 슬러그 유동 가시화 데이터(그림 3.19)와 실시간 압력 강하 데이터(그림 3.20)를 분석하여 슬러그 유동을 버블 영역(film zone)과 액체 슬러그 영역(liquid slug zone)으로 나누고 각 영역에서 발생하는 마찰 압력강하 인자를 분석하였음



■ 그림 3.19 슬러그 이상 유동 가시화 데이터 (a) $J_f = 0.4 \text{ m/s}$, (b) $J_f = 0.8 \text{ m/s}$ ■



■ 그림 3.20 슬러그 이상 유동 압력강하 데이터 ■



■ 그림 3.21 슬러그 단위 셀과 슬러그 유동의 역학 인자들 ■

- 2) 슬러그 이상 유동 가시화 데이터를 분석하여 버블 영역과 액체 슬러그 영역의 길이 (L_b , L_s) 그리고 긴 버블(elongated bubble)의 속도(U_b)를 측정하였고 이를 예측하기 위해 각 상의 겉보기 속도(J), 점도(μ), 중력가속도(g), 관의 지름(D)을 이용하여 새로운 무차원화된 상관식을 개발하였음
- 3) 각 영역의 길이와 버블의 속도 상관식 및 기존 마찰 압력강하 인자(Shah & London)에 대한 연구를 이용하여 슬러그 유동을 구성하는 버블 영역과 액체 슬러그 영역 각각에서 발생하는 마찰 압력강하를 구하고 전체 유닛 슬러그 유동에 대한 압력강하 모델을 개발하였음 이후 본 연구에서 수집한 압력강하 데이터 및 기존 연구 자료에서 수집한 압력강하 데이터와 비교분석하여 모델을 개선하였음

실험 상관식

1) 버블 길이(L_b)에 대한 상관식 개발

$$J_f^* = \frac{J_f}{\sqrt{gD \left(1 - \left(\frac{\rho_g}{\rho_f}\right)\right)}} \quad J_g^* = \frac{J_g}{\sqrt{gD \left(1 - \left(\frac{\rho_g}{\rho_f}\right)\right)}}$$

$$L_b = e^{4.426} \times J_f^{*-0.9} \times J_g^{*1.0527} \left(\frac{\mu_g}{\mu_f}\right)^{0.2113} \times D$$

2) 버블 속도(u_{bg}), 액체 슬러그의 기포 속도(u_{sg})에 대한 상관식 개발

① $0.3 < J_g < 2$
 $0.35 < J_f < 2$

$$\left(\frac{\mu_f}{\mu_w} < 100\right) \quad u_{bg} = 1.2 \times (J_f + J_g) + 0.542\sqrt{(gD)}$$

$$u_{sg} = 1.2 \times (J_f + J_g)$$

$$\left(\frac{\mu_f}{\mu_w} \geq 100\right) \quad u_{bg} = 2 \times (J_f + J_g)$$

$$u_{sg} = 2 \times (J_f + J_g)$$

② $J_g < 0.3$ or $2 < J_g$
 $J_f < 0.35$ or $2 < J_f$

$$u_{bg} = 1.2 \times (J_f + J_g) + 0.542\sqrt{(gD)}$$

$$u_{sg} = 1.2 \times (J_f + J_g)$$

J : Superficial velocity (volume/area), μ : viscosity

마찰 압력 인자

$$\tau_k = \frac{1}{2} f_k \rho_k u_k^2$$

$$\left(\frac{\mu_f}{\mu_w} < 100\right) \quad e = 0.0005$$

$$f_k = \frac{83.04}{Re_k} \quad \frac{1}{\sqrt{f_k}} = -1.8 \log \left(\left(\frac{e}{3.7} \right)^{1.11} + 6.9/Re_k \right)$$

$$\left(\frac{\mu_f}{\mu_w} \geq 100\right) \quad e = 0.0005$$

$$f_k = \frac{64}{Re_k} \quad \frac{1}{\sqrt{f_k}} = -1.8 \log \left(\left(\frac{e}{3.7} \right)^{1.11} + 6.9/Re_k \right)$$

Critical Re = 2,000 for bubble region, 1000 for liquid slug

τ : shear stress, f : friction factor, μ : viscosity
F.M. White, Fluid mechanics, 7th ed, McGraw-Hill, New York, 2011

질량 보존

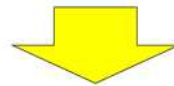
$$J_f = u_{bf} \alpha_{bf} \frac{L_b}{L_u} + u_{sf} \alpha_{sf} \frac{L_s}{L_u}$$

$$J_g = u_{bg} \alpha_{bg} \frac{L_b}{L_u} + u_{sg} \alpha_{sg} \frac{L_g}{L_u}$$

$$u_m = u_{bf} \alpha_{bf} + u_{bg} \alpha_{bg} = u_{sf} \alpha_{sf} + u_{sg} \alpha_{sg}$$

$$\alpha_{bf} + \alpha_{bg} = \alpha_{sf} + \alpha_{sg} = 1$$

α : liquid holdup, u_m : mixture velocity



슬러그 역학 모델

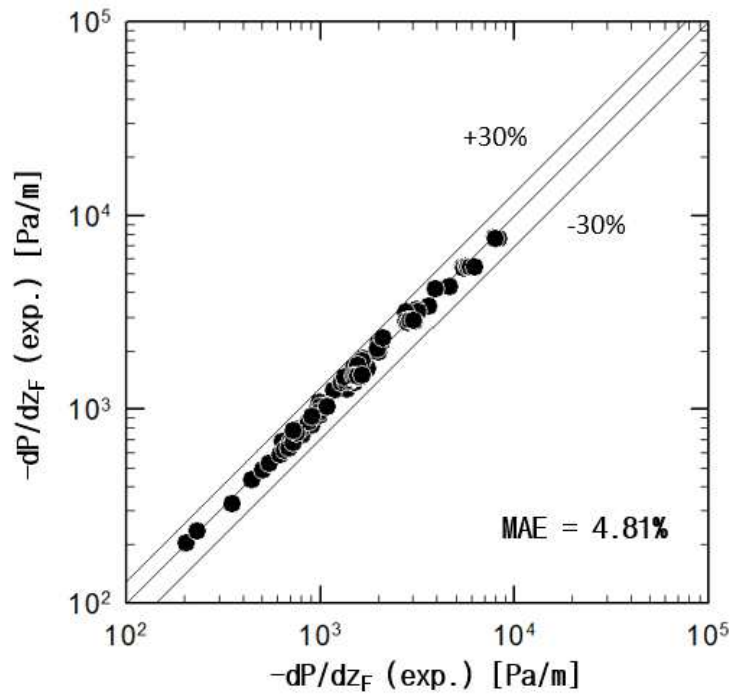
> 버블 영역(film zone)과 액체 슬러그 영역(liquid slug zone)의 단위 길이당 압력강하

$$-\left(\frac{dp}{dz}\right)_{film\ zone} = \tau_{bf} \frac{S_{bf}}{A_{bf}} + \tau_{bg} \frac{S_{bg}}{A_{bg}} \quad -\left(\frac{dp}{dz}\right)_{liquid\ slug\ zone} = \tau_{sf} \frac{S_{sf}}{A}$$

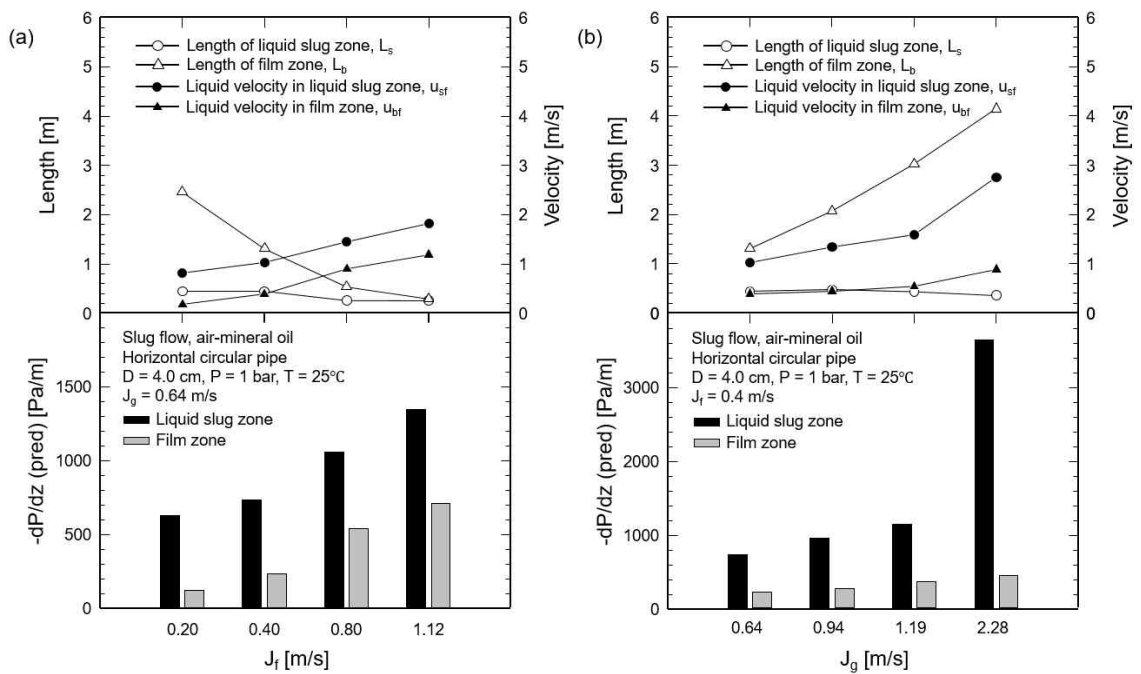
> 슬러그 유동의 단위 길이당 압력강하

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{unit\ slug} = \left(\frac{L_b}{L_u}\right) \left(\frac{dp}{dz}\right)_{film\ zone} + \left(\frac{L_s}{L_u}\right) \left(\frac{dp}{dz}\right)_{liquid\ slug\ zone}$$

■ 그림 3.22 슬러그 역학모델 개발 과정 ■

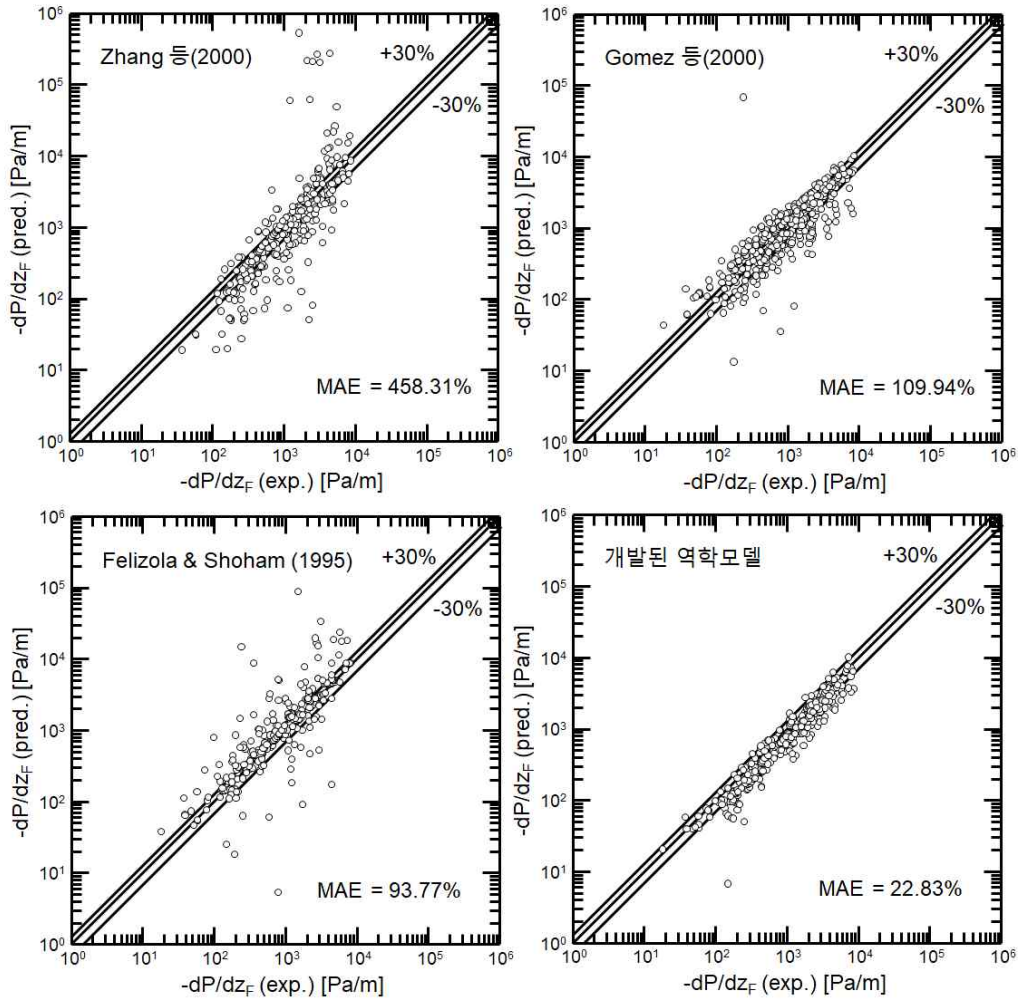


■ 그림 3.23 슬러그 역학모델로 예측한 압력강하 ■

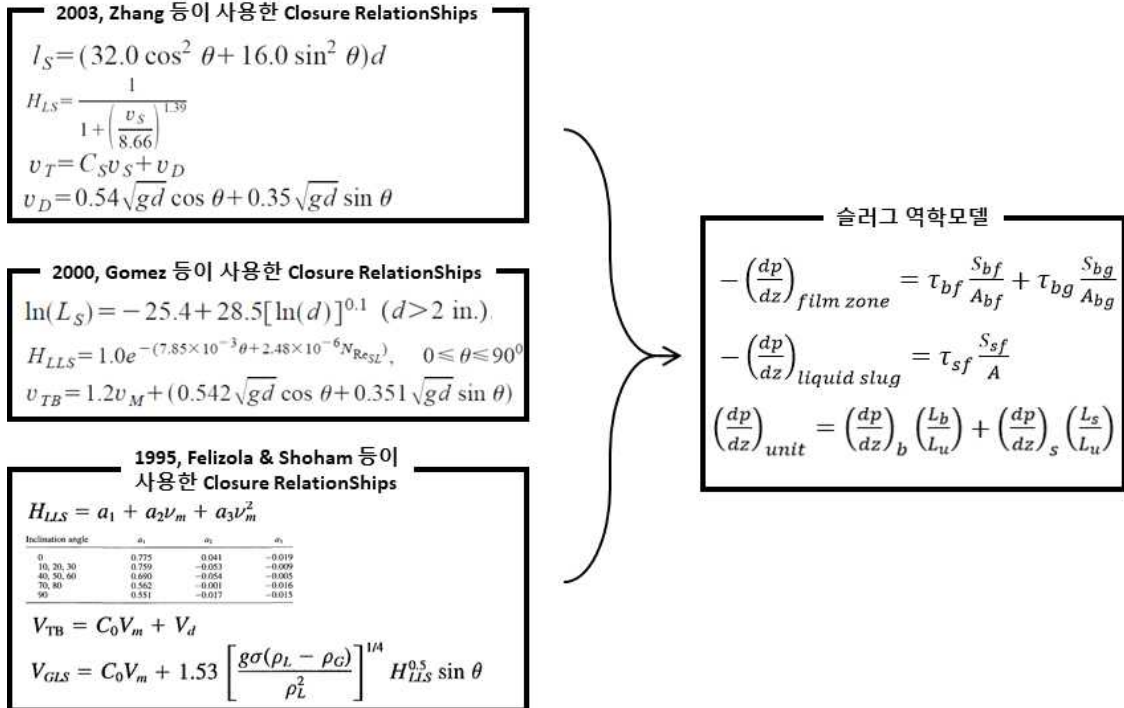


■ 그림 3.24 슬러그 유동 영역별 액체 속도, 길이, 압력구배 비교 ■

- 4) 그림 3.23은 본 연구에서 개발한 슬러그 유동 역학모델로 예측한 압력구배 데이터를 실험값과 비교한 그래프로 5% 미만의 오차율을 보이고 있음 그림 3.24는 슬러그 유동의 영역별 길이와 오일 속도를 계산하고 이에 대한 영역별 압력구배를 분석한 자료임
- 5) 본 연구에서 개발한 슬러그 유동 역학모델을 이용하여 기존 연구 자료에서 수집된 슬러그 유동 압력강하 데이터들과 비교한 결과 이전 역학 모델들에 비해 본 연구에서 개발한 슬러그 역학 모델이 더 높은 예측률을 보여주었음



■ 그림 3.25 기존 역학모델과 본 연구에서 개발된 역학모델의 예측 정확도 비교 ■

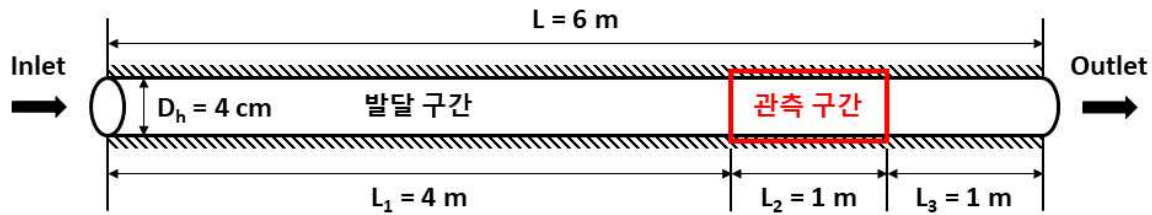


■ 그림 3.26 기존 슬러그 역학모델 ■

라. 슬러그 유동에 관한 수치해석기법 개발 및 슬러그 역학 모델 보완

1) 수치해석 모델의 형상 및 격자 시스템

- 상용 CFD 프로그램인 ANSYS FLUENT를 이용하여 공기-오일 슬러그 유동 해석을 위한 3차원 수치해석 모델을 개발함
- 수치해석 모델의 형상은 수평 원형 채널로 시험 부와 같은 수치인 6 m의 길이와 4 cm의 지름을 가지며, 채널 벽면은 단열 조건으로 외부와의 열교환은 없음
- 실험과 같은 조건을 모사하기 위해 초기 조건은 채널을 모두 오일로 채워둔 채로 공기와 오일을 채널 왼쪽의 입구에서 흘러주도록 설정함



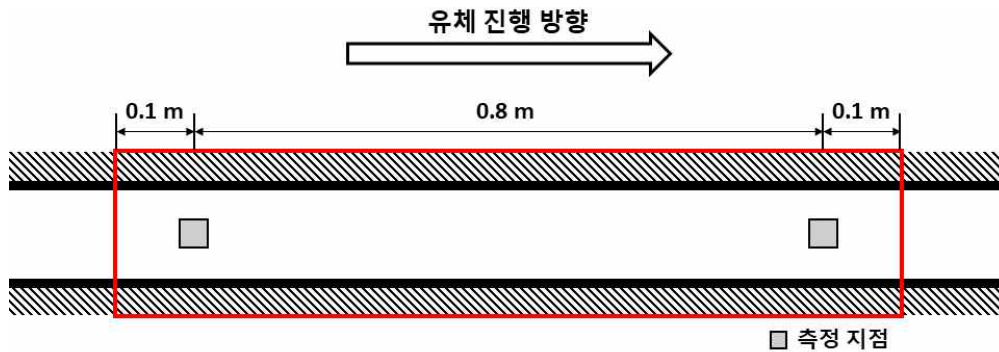
■ 그림 3.27 3차원 수치해석 모델의 채널 형상 ■

- 수치해석 모델에서의 측정 지점은 실험에서 압력 센서가 위치한 두 지점과 같고, 그 위치는 각각 입구에서부터 4.1 m, 4.9 m 떨어진 지점으로 두 측정 지점 사이의 거리는 0.8 m
- 측정 지점의 단면에서는 유체의 압력 데이터를 실시간으로 얻을 수 있으며, 실험에서 측정하기 힘든 기포 분율(Void fraction)과 유체의 속도를 추가로 확인할 수 있음
- 해당 연구에서는 공기와 오일 모두 비압축성 유체로 가정하여 ANSYS FLUENT의 VOF(Volume of Fluid) 모델을 사용하였고, 이에 따른 연속 방정식과 운동량 보존 방정식은 아래와 같음

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_n \rho_n) + \nabla \cdot (\alpha_n \rho_n \vec{u}_n) = 0$$

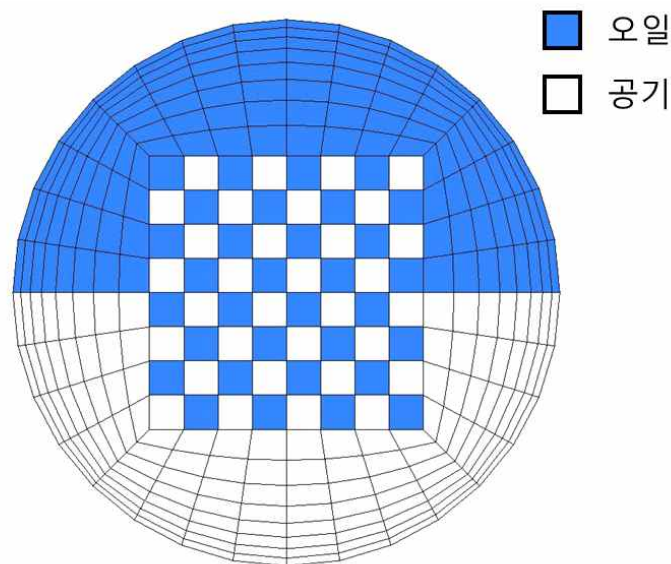
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{u}) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla P + \nabla \cdot (\tau_{ij}) + \rho \vec{g} + \vec{F}_s$$

- 이때 t 는 시간, α 는 기포 분율, ρ 는 밀도, $\vec{u}$ 는 속도, P 는 압력, τ_{ij} 는 응력 텐서, $\vec{g}$ 는 중력 가속도, $\vec{F}_s$ 는 표면장력에 의한 단위 체적당 힘, 그리고 n 은 계산 셀(Computational cell) 내 유체의 상(Phase)으로 $n = 1$ 인 경우에는 공기를, $n = 2$ 인 경우에는 오일을 나타냄



■ 그림 3.28 관측 구간 내 측정 지점 ■

- 실험에 사용된 믹서를 구현하기 위하여 입구의 중심부에서는 공기와 오일이 모자이크 형태로 엇갈리게 유입되도록 설정하고, 입구의 외각 부분은 위와 아래 두 영역으로 분리하여 위에서는 무거운 오일이 아래에서는 가벼운 공기가 유입되도록 함으로써 공기와 오일의 혼합물이 밀도차에 의하여 짧은 시간 내에 잘 섞이도록 함
- 격자 시스템의 외곽 부분은 채널 내벽에 가까울수록 격자 사이의 거리를 가깝게 하여 벽 근처에서 생기는 급격한 압력 및 속도 변화를 정확하게 예측할 수 있도록 격자를 구성함
- 격자 개수가 다른 3종류의 격자 시스템을 이용하여 채널 내의 압력강하를 비교하는 것으로 격자 수렴성 검사를 수행함



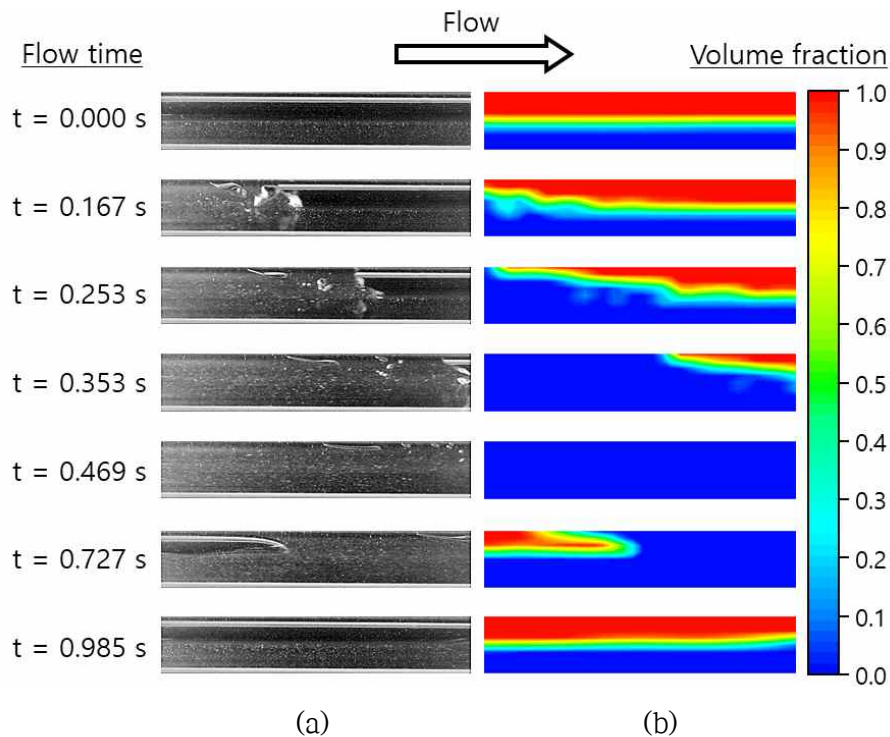
■ 그림 3.29 수치해석 모델의 단면 격자 시스템 ■

2) 수치해석 기법

- 개발된 수치해석 모델은 채널 길이 방향에 대하여 수직 아래 방향으로 중력 가속도를 고려하였으며, ANSYS의 FLUENT의 Pressure-Based Solver를 과도 상태에서 사용함
- 다상 유동 모델로는 Explicit VOF 모델을 사용하였으며, Implicit Body Force를 고려하는 것으로 솔루션을 보완함
- 점성 모델은 충분히 느린 유체의 속도를 고려하여 층류 모델을 사용하였고, Pressure-Velocity Coupling을 위하여 과도 상태 계산 효율을 향상할 수 있는 PISO(Pressure Implicit with Splitting of Operators) 해석 기법을 사용함

3) 슬러그 유동 형태 비교

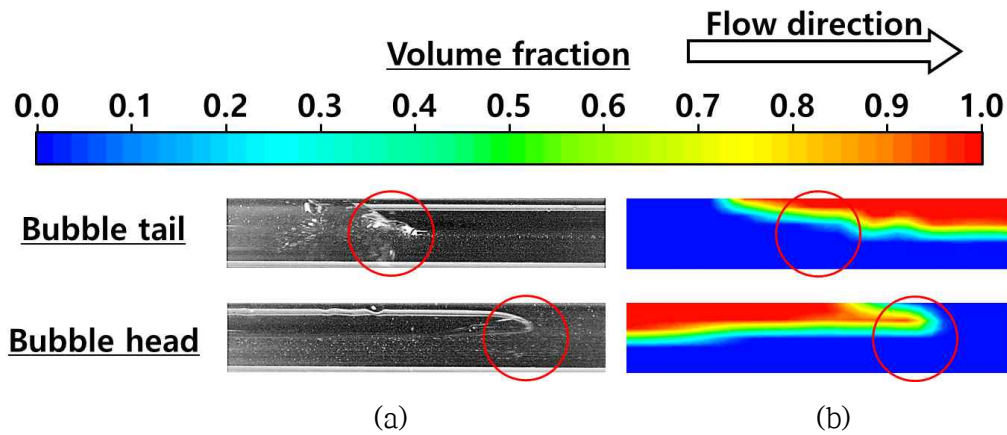
- 액체 슬러그가 지나가는 동안의 슬러그 유동 형태를 실험의 가시화 데이터와 수치해석 결과를 이용하여 비교함
- 그림 3.30(a)에서 액체 슬러그 앞부분은 수력 도약(Hydraulic jump)으로 인하여 길이가 짧은 기포의 꼬리 부분(Bubble tail)이 형성되고, 액체 슬러그 뒷부분은 공기의 빠른 속도로 인하여 얇은 두께를 갖는 기포의 머리 부분(Bubble head)이 형성됨
- 수력 도약이란, 높은 운동 에너지를 갖는 빠른 속도의 유체가 느린 속도를 갖는 유체의 영역에 들어가게 되면 본래 가지고 있던 운동 에너지가 위치 에너지로 전환되면서 상승하게 되는 현상으로, 액체 슬러그 앞부분이 상승하여 기포의 꼬리 부분이 형성됨
- 그림 3.30(b)는 수치해석 결과로 부피 분율이 1인 빨간색 영역은 완전한 기체 상태인 공기 상을 의미하고 부피 분율이 0인 파란색 영역은 완전한 액체 상태인 오일 상을 의미함
- 수치해석 결과의 액체 슬러그의 형태 및 이동 속도는 실험의 가시화 데이터와 매우 흡사한 것을 확인할 수 있음



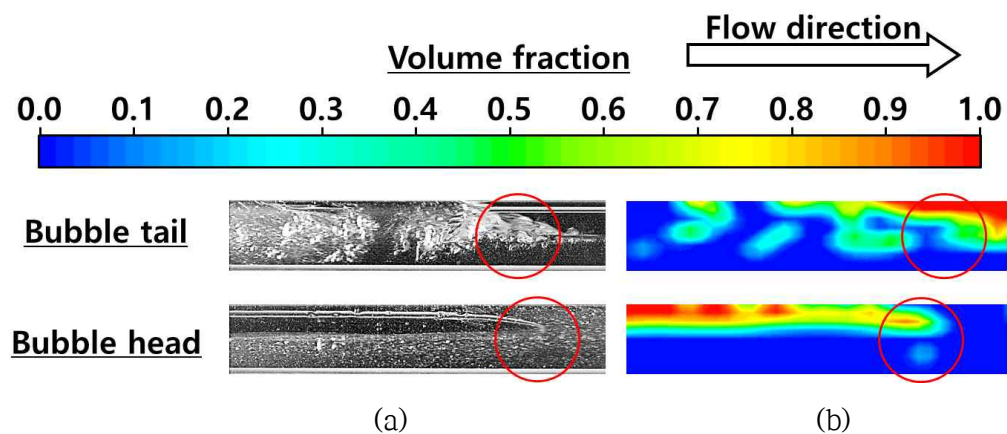
■ 그림 3.30 공기와 오일의 유량이 각각 24.1 LPM과 20.9 LPM일 경우, 시간에 따른 슬러그 유동 형태 변화:(a) 실험, (b) 수치해석 ■

4) 공기 유량에 따른 슬러그 유동 형태 변화

- 오일의 유량이 같을 경우, 공기의 유량이 증가하였을 때 기포의 꼬리 부분과 머리 부분의 형상 변화를 가시화 데이터와 수치해석 결과를 통하여 확인함
- 공기의 유량이 높으면 기포의 꼬리 부분에는 매끄럽지 않은 공기-오일 경계면이 형성되고 액체 슬러그 내부에 기포들이 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 기포의 머리 부분은 기체의 빠른 속도로 인하여 기포의 두께가 더 얇게 나타남



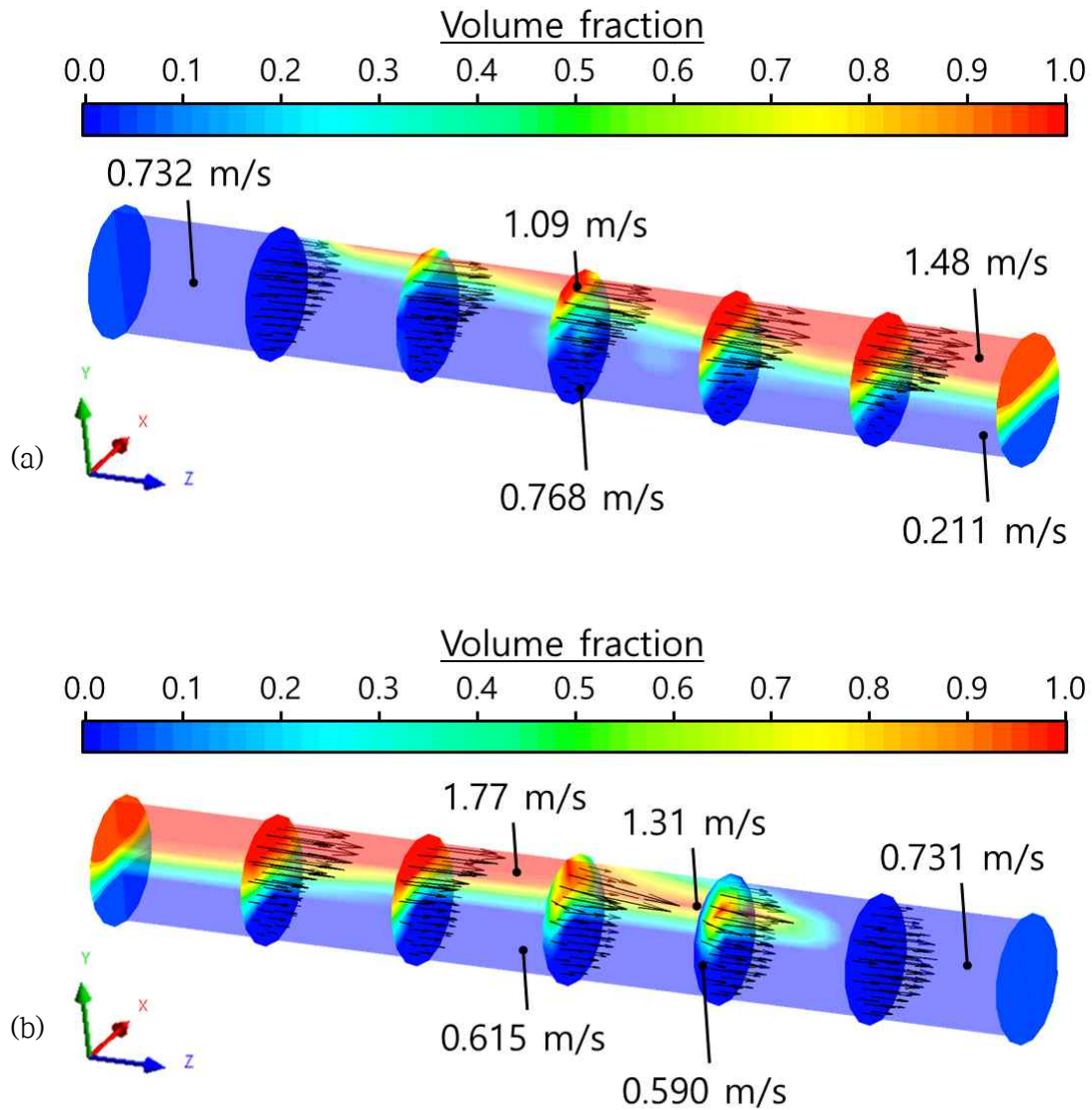
■ 그림 3.31 공기와 오일의 유량이 각각 28.7 LPM과 9.48 LPM일 경우, 기포의 꼬리 부분과 머리 부분:(a) 실험, (b) 수치해석 ■



■ 그림 3.32 공기와 오일의 유량이 각각 70.4 LPM과 9.48 LPM일 경우, 기포의 꼬리 부분과 머리 부분:(a) 실험, (b) 수치해석 ■

5) 슬러그 유동 내 속도장

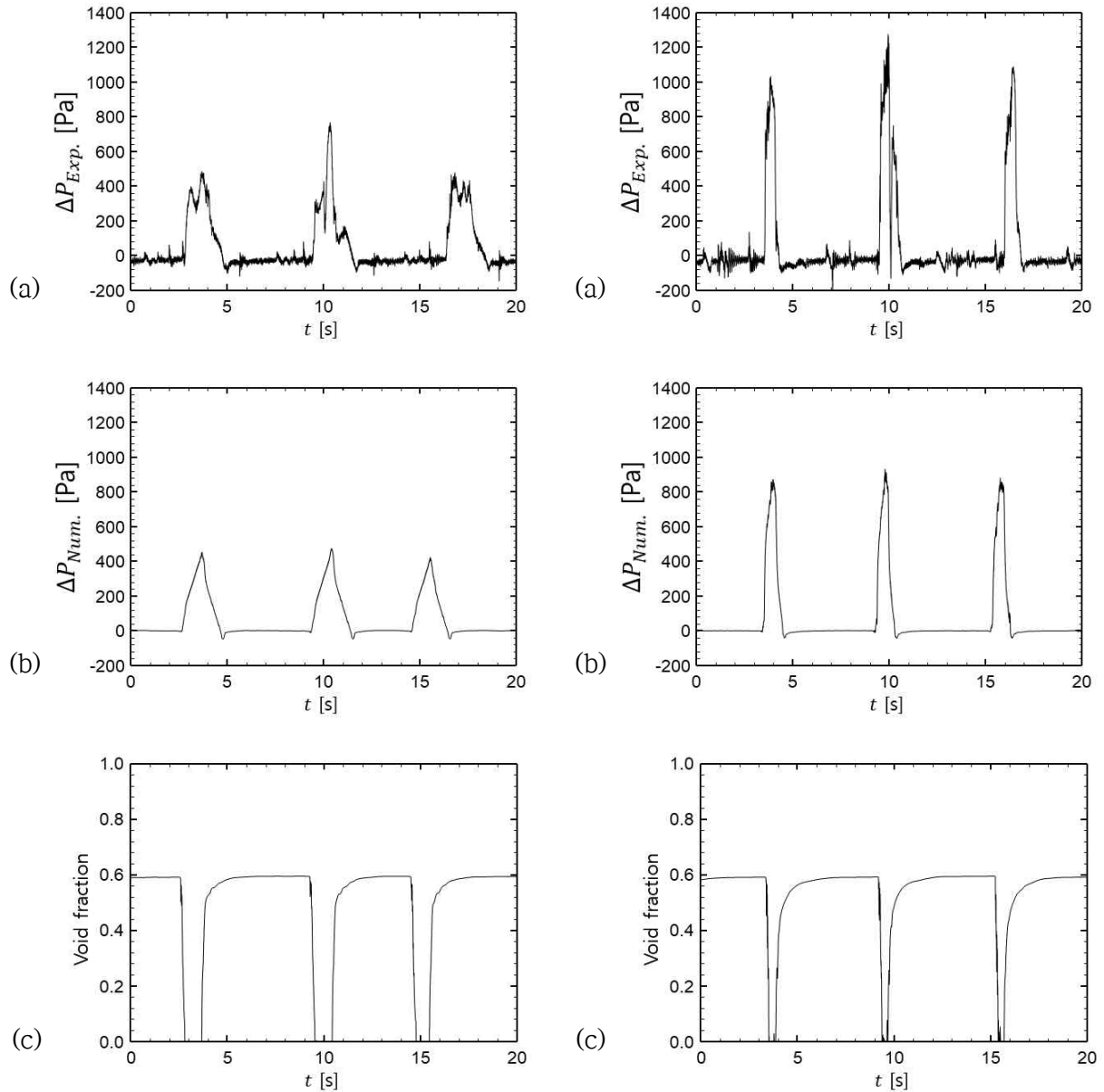
- 기포의 꼬리와 머리 부분의 속도 벡터를 기포 분율과 같이 나타내 슬러그 유동 발생 시에 유체의 평균 속도 값을 여러 위치에서 정량적으로 비교함
- 기포의 꼬리와 머리 부분 모두 기포의 속도가 가장 빠르고 액체 필름 속도가 가장 느리게 나타났으며 액체 슬러그는 그 중간의 속도를 가짐
- 그림 3.33(a)에서 액체 슬러그는 뒤따라오는 기포에 의하여 가속된 이후에 매우 느린 속도의 액체 필름과 만나는 것을 알 수 있는데, 이는 다른 문헌에서 제안한 슬러그 유동 현상의 메커니즘과 일치하며 앞서 언급했던 수력 도약이 발생하는 과정을 확인할 수 있음
- 그림 3.33(b)에서 기포의 속도는 1.77 m/s에서 1.31 m/s로 액체 슬러그에 침투한 이후 감소하지만, 액체 슬러그는 기포에 의하여 가속되어 0.73 m/s로 뒤따라오는 액체 필름보다 더 빨라짐



■ 그림 3.33 공기와 오일의 유량이 각각 24.1 LPM과 20.9 LPM일 경우, 유체의 속도 벡터:(a) 기포의 꼬리 부분과 (b) 기포의 머리 부분 ■

6) 시간에 따른 채널 내 압력강하

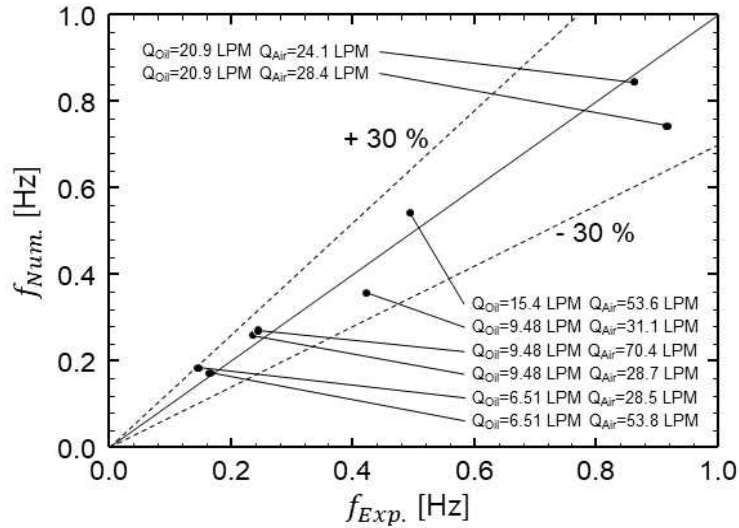
- 유량이 다른 두 경우 모두 수치해석에서 나타나는 압력강하가 급격하게 발생하는 구간과 구간별 진폭의 최댓값은 실험 결과와 매우 비슷함
- 압력강하 값이 급격하게 증가하는 구간에서 기포 분율이 매우 작은 값으로 감소하는데, 이는 액체 슬러그가 지나가는 것을 의미하며, 이후 기포의 머리 부분이 지나가는 것으로 기포 분율이 올라가고 압력강하 값은 감소함
- 공기의 유량이 높을 때는 공기의 유량이 낮을 때에 비하여 급격한 압력강하가 발생하는 순간의 진폭이 더 크고, 기체의 속도가 빨라서 급격한 압력강하가 발생하는 동안의 시간이 짧아짐



■ 그림 3.34 공기와 오일의 유량이 각각 28.5 LPM, 6.51 LPM일 경우(좌)와 53.8 LPM, 6.51 LPM일 경우(우), 시간에 따른 (a) 실험에서의 압력강하, (b) 수치해석에서의 압력강하, 그리고 (c) 기포 분율 변화 ■

7) 유량별 슬러그 진동수

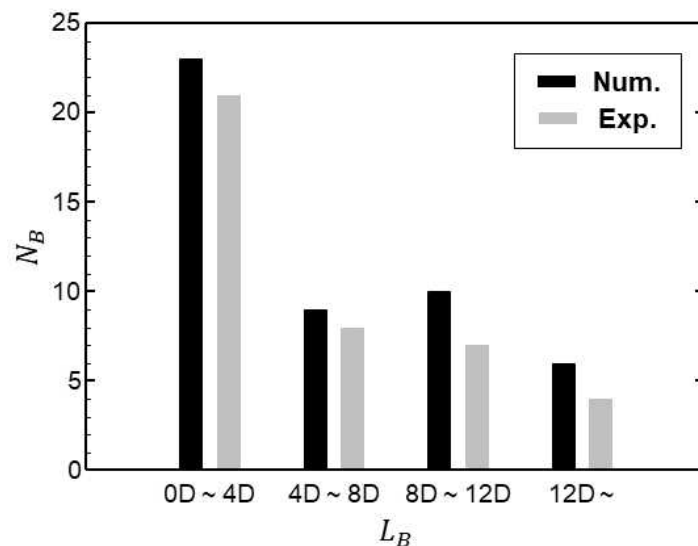
- 수치해석 결과를 이용하여 계산한 슬러그 진동수(주어진 시간 동안 특정 지점을 지나가는 액체 슬러그의 수)를 실험의 가시화 데이터를 이용하여 계산한 슬러그 진동수와 비교함
- $f_{Exp.}$ 는 실험에서의 슬러그 진동수, f_{Num} 는 수치해석에서의 슬러그 진동수, 그리고 Q_{Oil} 과 Q_{Air} 는 각각 오일과 공기의 유량을 나타냄
- 실험 데이터와 수치해석 결과의 슬러그 진동수는 $\pm 30\%$ 이내에서 잘 일치하였고, 두 경우 모두 오일의 유량이 증가할수록 슬러그 진동수가 높아졌으며, 공기의 유량은 오일의 유량에 비하여 슬러그 진동수에 큰 영향을 미치지 않는 것을 확인함



■ 그림 3.35 실험과 수치해석 결과의 유량별 슬러그 진동수 비교 ■

8) 기포 길이별 기포 개수

- 수치해석 결과와 실험의 가시화 데이터를 기반으로 일정 시간(30초) 동안 지나간 기포의 개수를 기포의 길이 범위에 따라 나타내어 비교함
- L_B 는 기포의 길이를 나타내며 N_B 는 일정 시간 동안 지나간 기포의 개수를 나타냄
- 기포의 길이는 기포의 속도와 주기를 곱하여 계산하였고, D 는 채널의 직경으로 기포의 길이는 직경의 배수로 나타냄
- 수치해석에서 구한 기포 개수는 실험에서 구한 기포 개수보다 약간 크지만, 전체적으로 감소하는 경향은 비슷하고 $4D$ 이상에서 급격하게 줄어드는 것도 잘 예측됨
- 오일의 유량이 낮을수록 기포의 길이는 길어지고 슬러그 진동수는 감소하기 때문에 지나가는 기포의 개수는 감소함

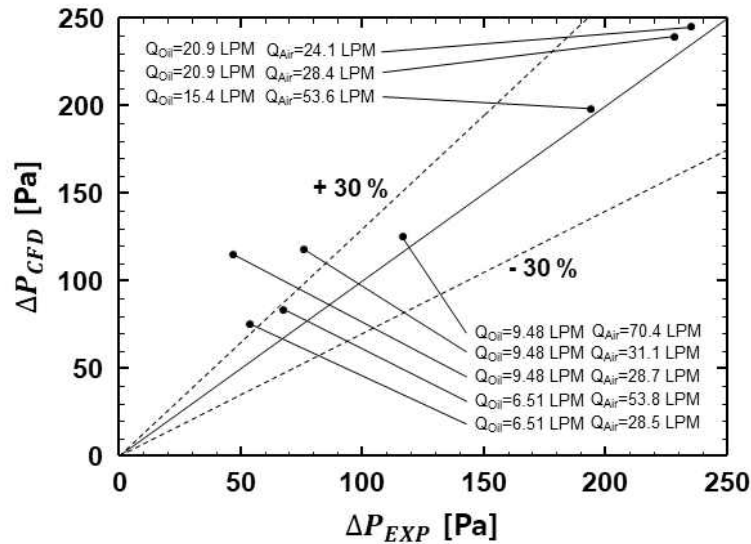


■ 그림 3.36 실험과 수치해석 결과의 기포 길이 분포 비교 ■

9) 유량별 채널 내 압력강하

- 수치해석 결과를 바탕으로 시간에 대한 평균 압력강하를 실험 데이터와 비교함
- 결과는 두 가지 유량 조건을 제외하면 $\pm 30\%$ 이내에서 잘 들어맞았고, 오일의 유량이 높을수록 압력강하가 증가함

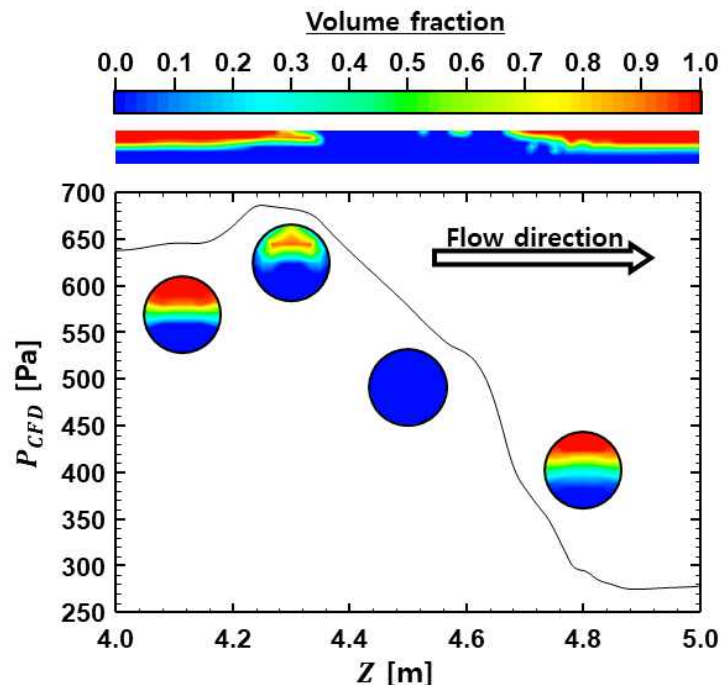
- 압력 센서의 측정 오차로 인하여 대개 압력강하가 낮은 구간이 압력강하가 높은 구간보다 오차가 큼



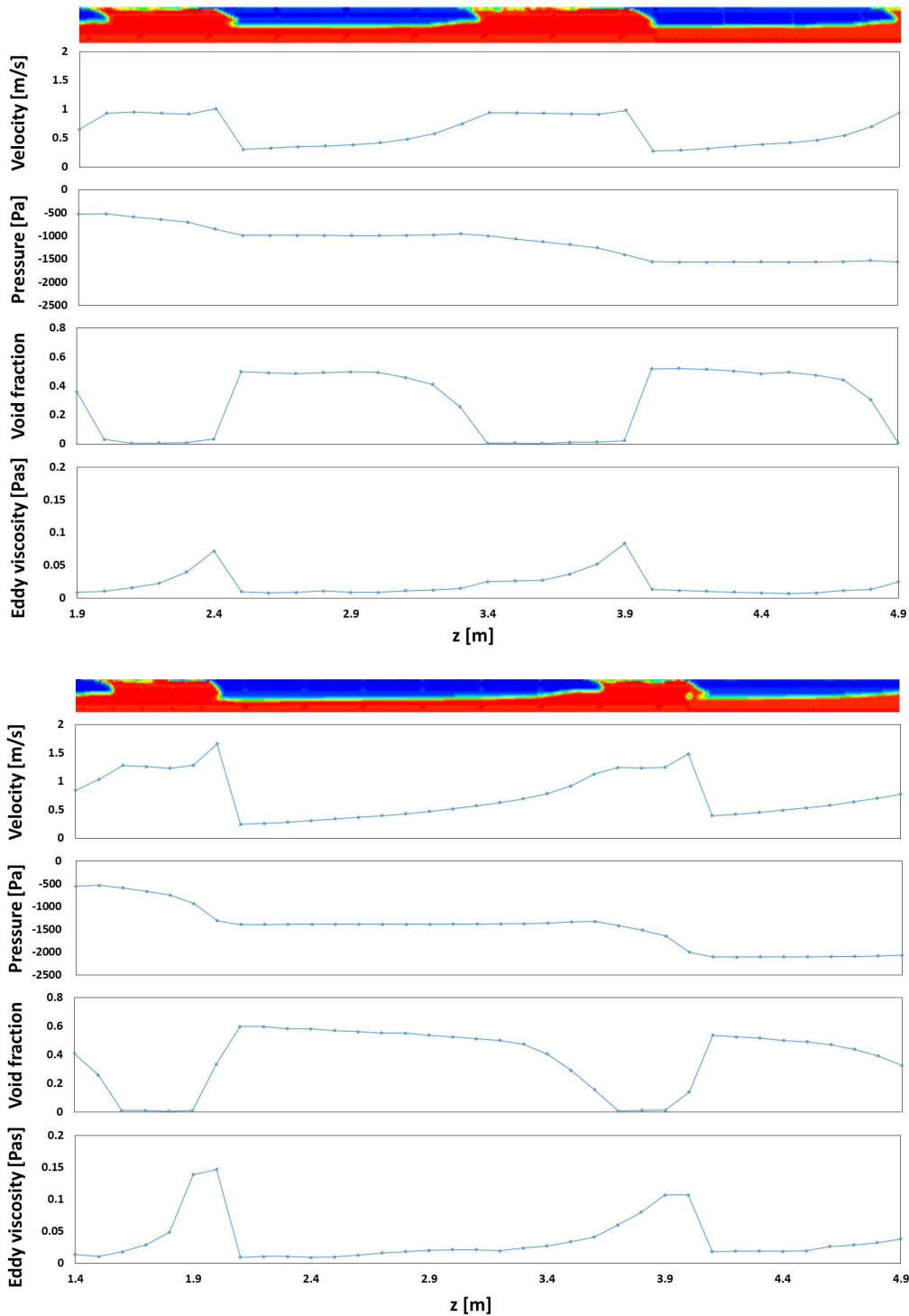
■ 그림 3.37 실험과 수치해석 결과의 평균 압력강하 비교 ■

10) 거리에 따른 채널 내 압력강하

- 액체 슬러그 구간에서 수치해석 결과를 이용, 거리에 따른 채널 내 압력을 확인함
- 액체 슬러그 뒤쪽의 기포 머리 부분이 액체 슬러그로 침투하면서 압력이 상승하게 되고, 액체 슬러그가 나타난 이후부터는 관내 마찰 압력강하로 인하여 압력이 계속 감소함
- 기포의 꼬리 부분에 흐르는 액체 슬러그는 앞쪽의 느린 액체 필름을 만나면서 액체 필름을 가속 시킴과 동시에 운동 에너지가 위치 에너지로 전환되는데, 이때 발생하는 에너지 손실 때문에 압력강하가 더 급격하게 발생함



■ 그림 3.38 공기와 오일의 유량이 각각 24.1 LPM과 20.9 LPM일 경우, 거리에 따른 채널 내 압력 변화 ■



■ 그림 3.39 공기와 오일의 유량이 각각 25.8 LPM과 31.0 LPM일 경우(위)와 47.8 LPM과 31.0 LPM일 경우(아래), 거리에 따른 속도, 압력, 기포 분율, 그리고 난류 점성 ■

- 추가로 거리에 따른 수치해석 결과를 압력뿐만이 아닌 액체 슬러그의 속도, 기포 분율, 그리고 난류 점성을 공기의 유량이 다를 경우에 비교함
- 유체의 속도 벡터 그림에서 확인했듯이 액체 영역에서는 기포의 꼬리 부분에 있는 앞쪽의 액체 슬러그 속도가 가장 빠르고 액체 필름 부분에서 속도는 급격하게 감소함
- 액체 슬러그가 지나가는 구간에서 압력강하가 급격하게 발생하고, 공기의 유량이 큰 경우에 압력강하 값이 더 큰 것을 확인할 수 있음
- 슬러그 진동수 비교 그래프에서 확인했듯이 공기의 유량이 달라도 슬러그 진동수에는 크게 영향이 없어 액체 슬러그 사이의 거리는 비슷하지만, 기포의 길이가 길어지고 액체 슬

러그의 길이가 짧아짐

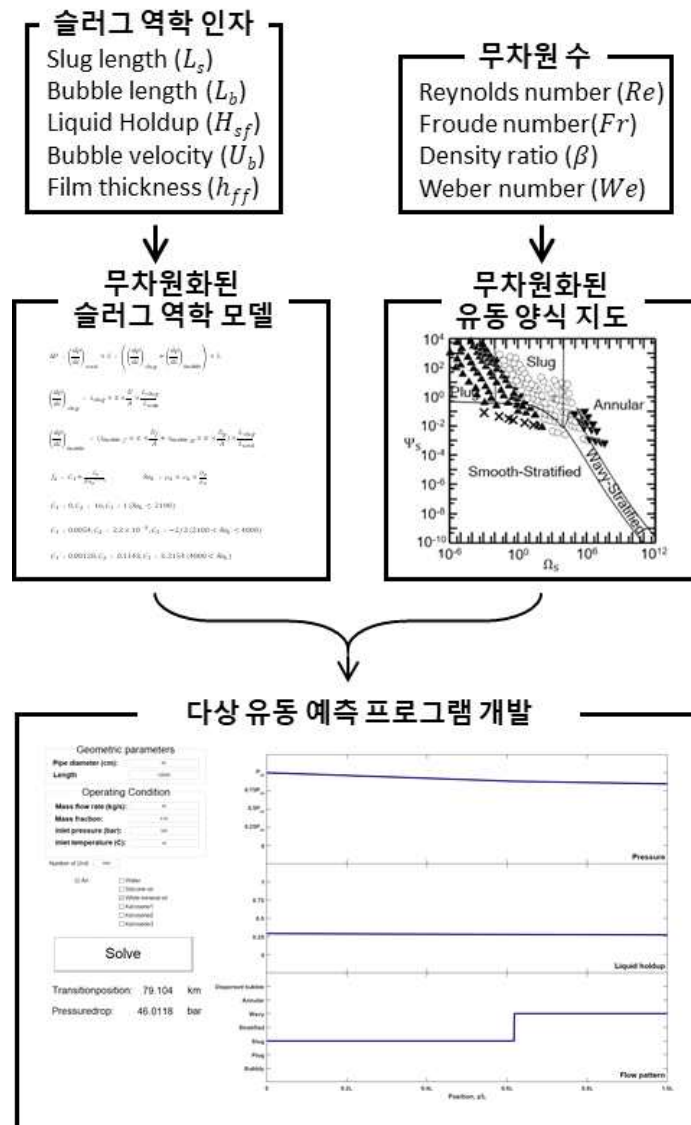
- 난류 점성의 최댓값은 공기의 유량이 큰 경우가 유량이 낮은 경우에 비하여 약 2배 정도 크게 나타난 것으로 보아 난류 점성은 공기의 유량에 비례하는 값을 알 수 있음
- 해당 과제에서 개발된 수치해석 모델을 이용하여 슬러그 유동의 메커니즘을 확인할 수 있었고, 공기와 오일의 속도비, 벽면에서의 전단 응력과 같은 슬러그 역학 인자들의 정량적 수치를 얻어냄으로써 슬러그 역학 모델을 보완함

2. 연구수행 성과

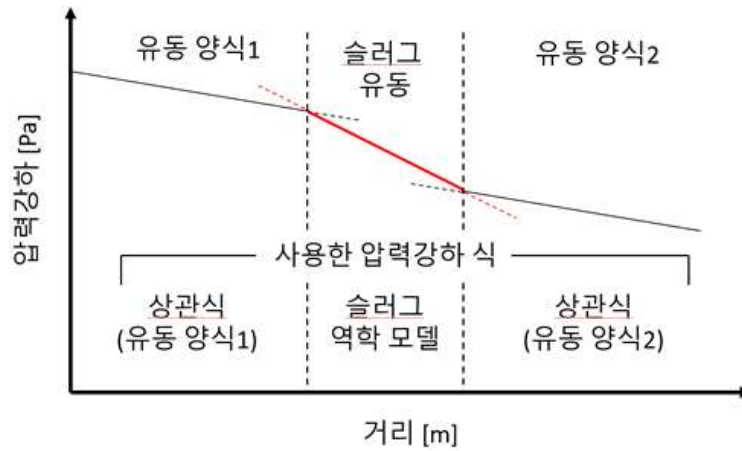
가. 다상 유동 예측 프로그램 개발

1) 다상 유동 예측 프로그램 개발 과정

- 본 연구에서 개발된 슬러그 역학 모델과 무차원화된 다상 유동 맵을 이용하여 다상 유동 예측 프로그램을 개발하였음
- 슬러그 유동 이외의 유동양식에 대한 압력강하를 예측하기 위해 본 연구실 실험데이터와 외부 데이터를 이용하여 여러 압력강하 구배 상관식들을 검증하였고, 가장 정확도가 높은 압력강하 상관식을 프로그램에 반영하였음



■ 그림 3.40 다상 유동 예측 프로그램 개발과정 ■



■ 그림 3.41 압력 강하 계산 방법 ■

- 유동양식이 슬러그 유동일 경우, 개발된 역학모델을 이용하고, 그 외의 유동일 경우, 기존 압력강하 상관식들을 이용해 압력 강하를 예측하였음(그림 3.41)
- 개발된 다상 유동 예측 프로그램을 통해 예측한 압력 강하 및 위치별 유동양식을 범용성 있는 상용 프로그램(OLGA)이 예측한 값과 비교하여 검증하였음

기존 마찰압력구배 상관식 검증 과정

: 본 과제에서는 가스-오일 혼합물의 다양한 유동 조건에서의 마찰 압력강하를 예측하기 위해 본 과제의 실험결과를 포함한 13개의 출처(총 1,330data)에서 데이터를 수집하였음 수집한 데이터의 범위는 다음과 같음

- ① 관 직경 : 20~95.25 mm ($20 \text{ mm} \leq D \leq 95.25 \text{ mm}$)
- ② 오일 밀도 : 722~970 kg/m³
- ③ 오일 점성 : 0.00092~ 6.2145 Pas (0.92 ~ 6214.5 cP)
- ④ 오일 표면장력 : 0.0231~0.037 N/m
- ⑤ 기체 밀도 : 0.00302~50.6 kg/m³
- ⑥ 기체 점성 : 0.0000104~0.00002 Pas

> 타 연구결과 수집

Gokcal et al., Effects of high oil viscosity on oil/gas flow behavior in horizontal pipes, (2008)
 Nicholson et al., Intermittent two phase flow in horizontal pipes: predictive models, (1978)
 Ching Yu, Horizontal flow of air-oil mixtures in the elongated bubble flow pattern, (1972)
 Louis Mattar, Slug flow uphill in an inclined pipe, (1973)
 Aziz et al., Some observations on the motion of elongated bubbles in horizontal pipes, (1974)
 Smith et al., Investigation of horizontal two-phase gas-liquid pipe flow using high viscosity oil: comparison with experiments using low viscosity oil and simulations, (2011)
 Zhao et al., Investigation and prediction of slug flow characteristics in highly viscous liquid and gas flows in horizontal pipes, (2015)
 Mukherjee Hemanta, An experimental study of inclined two-phase flow, (1979)
 Sunil L. Kokal, An experimental study of two phase flow in inclined pipes, (1987)
 Andrew Robert William Hall, Multiphase flow of oil, water and gas in horizontal pipes, (1992)
 Andritsos et al., Effect of liquid viscosity on the stratified-slug transition in horizontal pipe flow, (1989)

Gael Chupin, An experimental investigation of multiphase gas-liquid pipe flow at low liquid loading, (2003)

Chen et al., Gas-liquid stratified-wavy flow in horizontal pipelines, (1997)

기존 마찰압력구배 상관식과의 비교

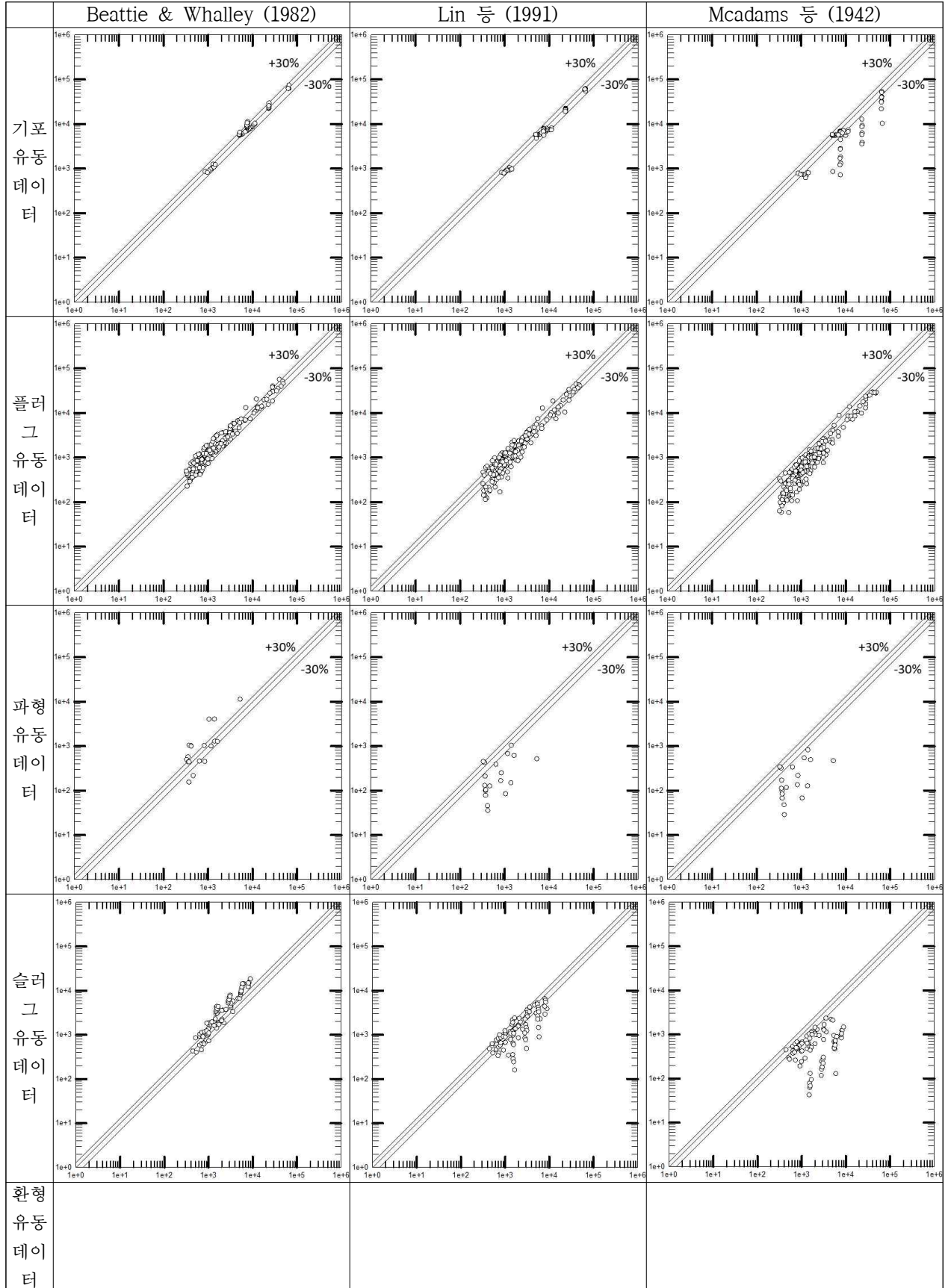
: 본 연구에서는 기존의 마찰압력구배 상관식의 예측 성능을 확인하기 위해 수집된 데이터와 비교를 하였음. 다음의 표는 이전 마찰압력구배 상관식을 정리한 것임

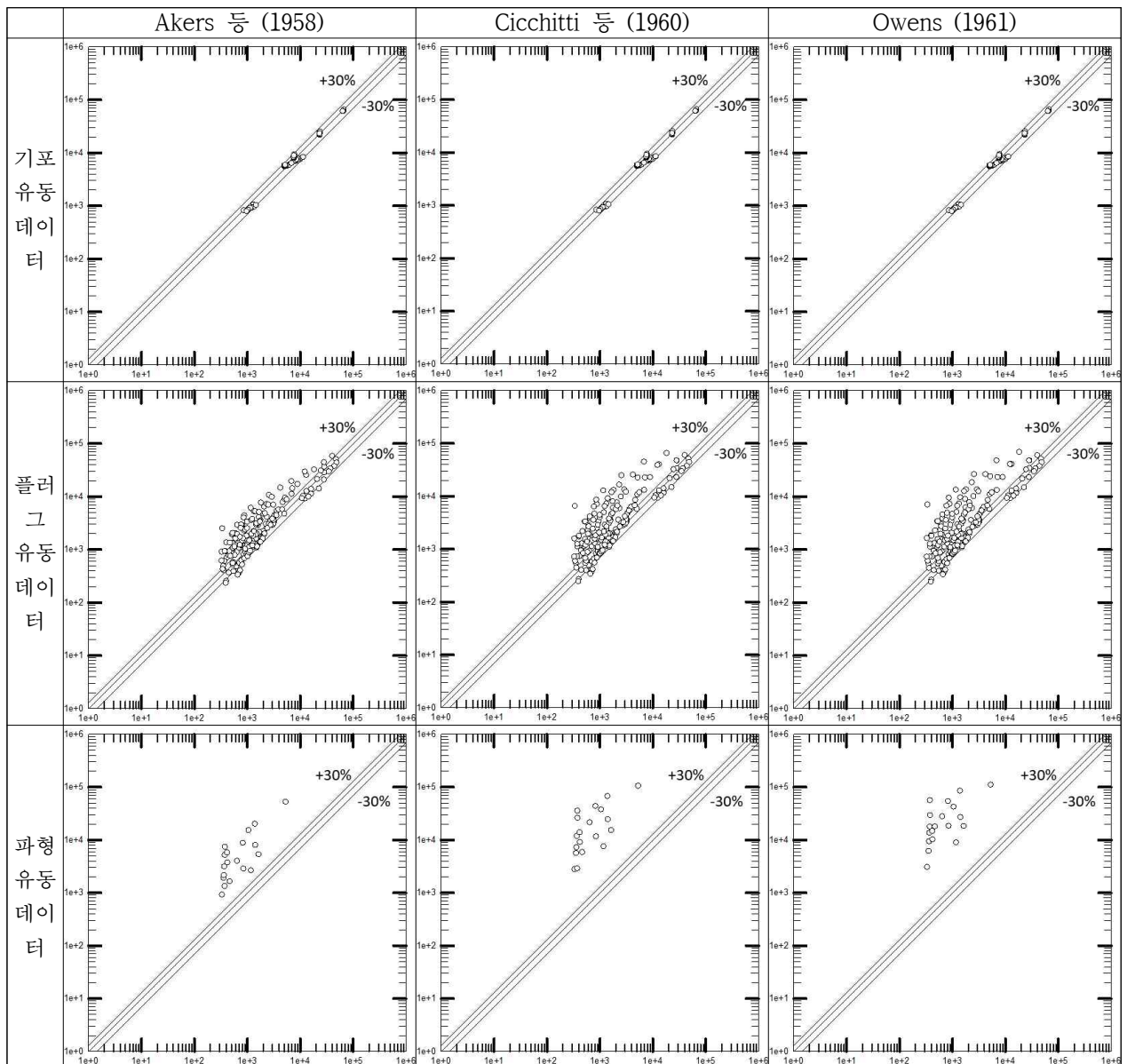
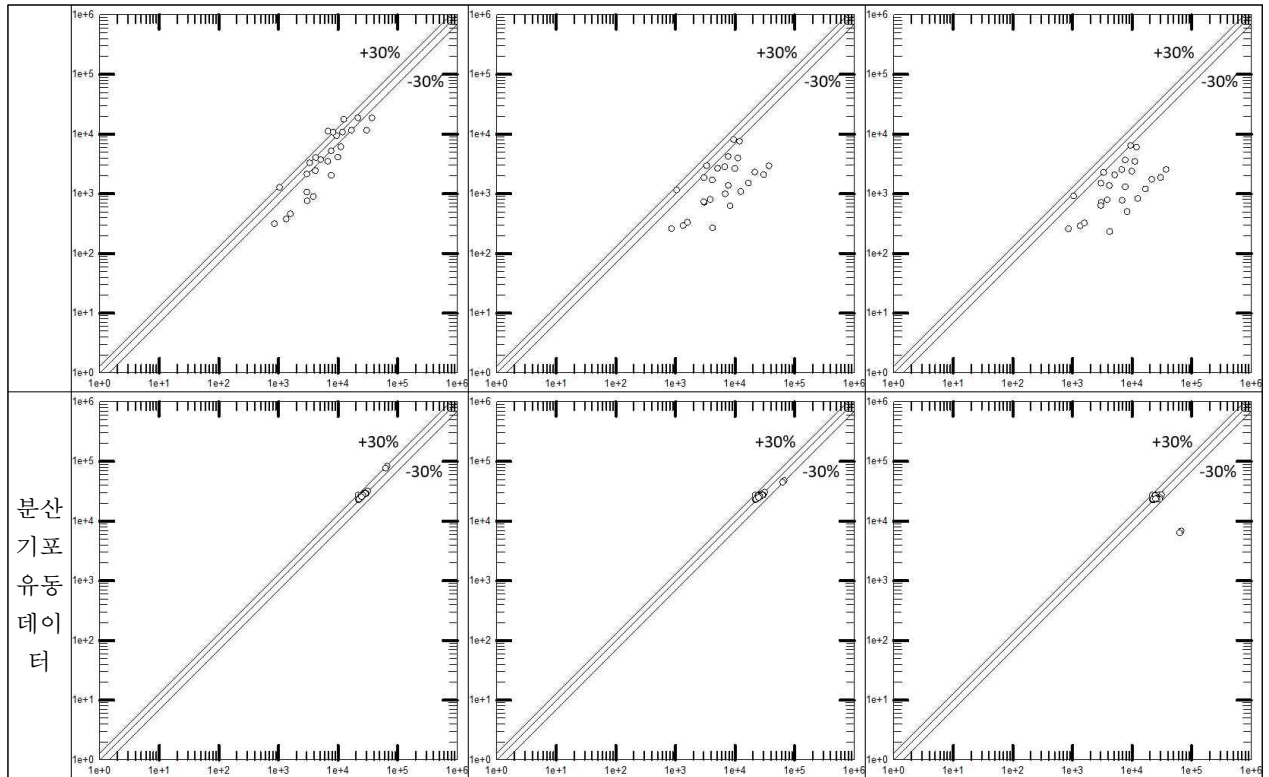
■ 표 3.6 기존 압력강하 상관식 ■

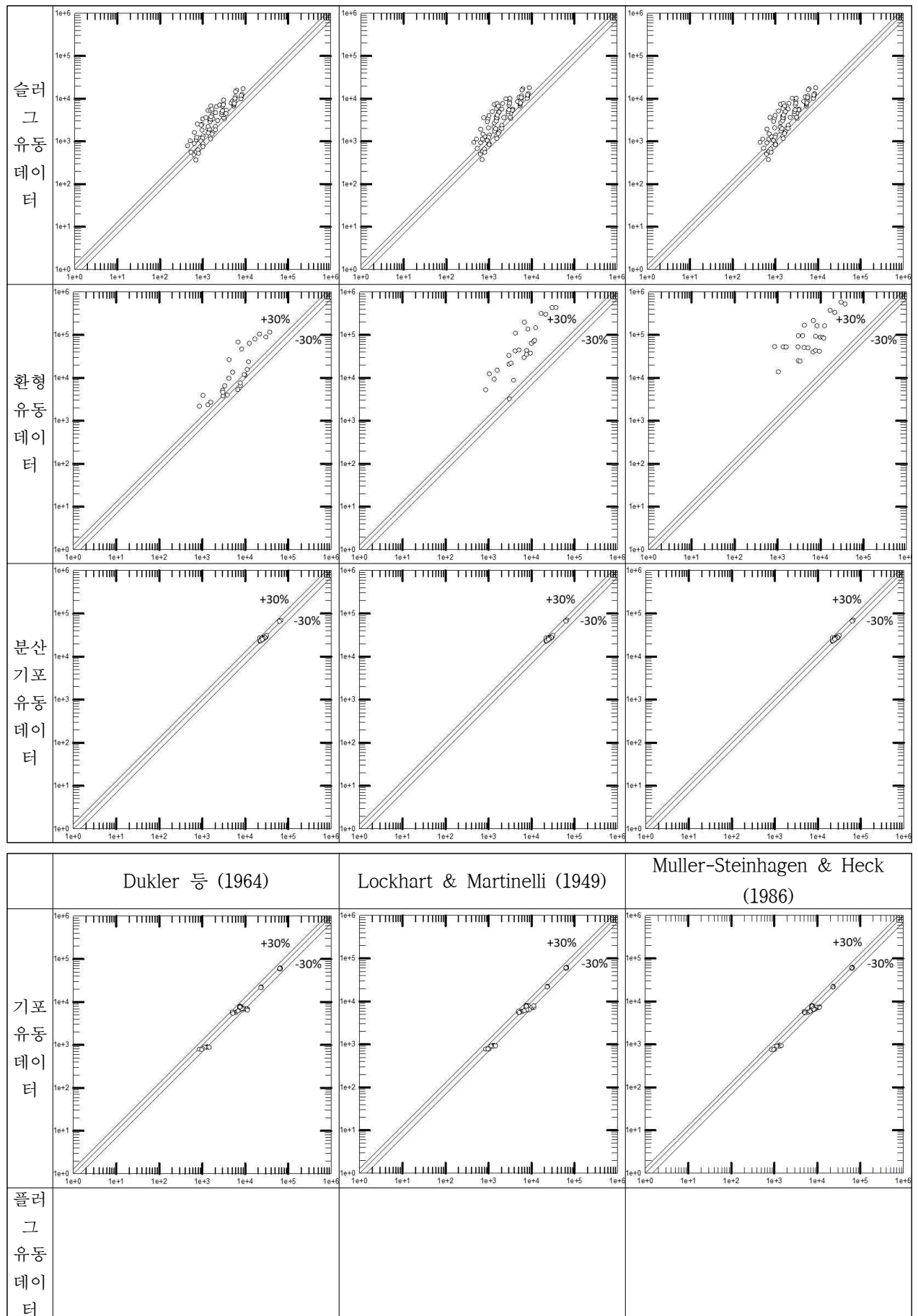
	저자	압력강하 식	비고
Homogeneous Equilibrium Model(HEM)	Beattie & Whalley (1982)	$-\left(\frac{dP}{dz}\right)_F = \frac{2f_{tp}\bar{\rho}u^2}{D_h} = \frac{2f_{tp}v_f G^2}{D_h} \left(1 + x \frac{v_{fg}}{v_f}\right)$ $Re_{tp} = GD_h/\mu_{tp}$ $f_{tp} = 16 Re_{tp}^{-1} \text{ for } Re_{tp} < 2000,$ $f_{tp} = 0.079 Re_{tp}^{-0.25} \text{ for } 2000 \leq Re_{tp} < 20,000$ and $f_{tp} = 0.046 Re_{tp}^{-0.2} \text{ for } Re_{tp} \geq 20,000.$ $\mu_{tp} = \omega\mu_g + (1 - \omega)(1 + 2.5\omega)\mu_f$ $\omega = \frac{xv_g}{v_f + xv_{fg}}$	
	Lin 등 (1991)	$-\left(\frac{dP}{dz}\right)_F = \frac{2f_{tp}\bar{\rho}u^2}{D_h} = \frac{2f_{tp}v_f G^2}{D_h} \left(1 + x \frac{v_{fg}}{v_f}\right)$ $Re_{tp} = GD_h/\mu_{tp}$ $f_{tp} = 16 Re_{tp}^{-1} \text{ for } Re_{tp} < 2000,$ $f_{tp} = 0.079 Re_{tp}^{-0.25} \text{ for } 2000 \leq Re_{tp} < 20,000$ and $f_{tp} = 0.046 Re_{tp}^{-0.2} \text{ for } Re_{tp} \geq 20,000.$ $\mu_{tp} = \frac{\mu_f \mu_g}{\mu_g + x^{1.4}(\mu_f - \mu_g)}$	
	McAdams 등 (1942)	$-\left(\frac{dP}{dz}\right)_F = \frac{2f_{tp}\bar{\rho}u^2}{D_h} = \frac{2f_{tp}v_f G^2}{D_h} \left(1 + x \frac{v_{fg}}{v_f}\right)$ $Re_{tp} = GD_h/\mu_{tp}$ $f_{tp} = 16 Re_{tp}^{-1} \text{ for } Re_{tp} < 2000,$ $f_{tp} = 0.079 Re_{tp}^{-0.25} \text{ for } 2000 \leq Re_{tp} < 20,000$ and $f_{tp} = 0.046 Re_{tp}^{-0.2} \text{ for } Re_{tp} \geq 20,000.$ $\frac{1}{\mu_{tp}} = \frac{x}{\mu_g} + \frac{1-x}{\mu_f}$	
	Akers 등 (1958)	$-\left(\frac{dP}{dz}\right)_F = \frac{2f_{tp}\bar{\rho}u^2}{D_h} = \frac{2f_{tp}v_f G^2}{D_h} \left(1 + x \frac{v_{fg}}{v_f}\right)$ $Re_{tp} = GD_h/\mu_{tp}$ $f_{tp} = 16 Re_{tp}^{-1} \text{ for } Re_{tp} < 2000,$ $f_{tp} = 0.079 Re_{tp}^{-0.25} \text{ for } 2000 \leq Re_{tp} < 20,000$ and $f_{tp} = 0.046 Re_{tp}^{-0.2} \text{ for } Re_{tp} \geq 20,000.$ $\mu_{tp} = \frac{\mu_f}{\left[(1-x) + x\left(\frac{v_g}{v_f}\right)^{0.5}\right]}$	
	Cicchitti 등 (1960)	$\mu_{tp} = x\mu_g + (1 - x)\mu_f$	

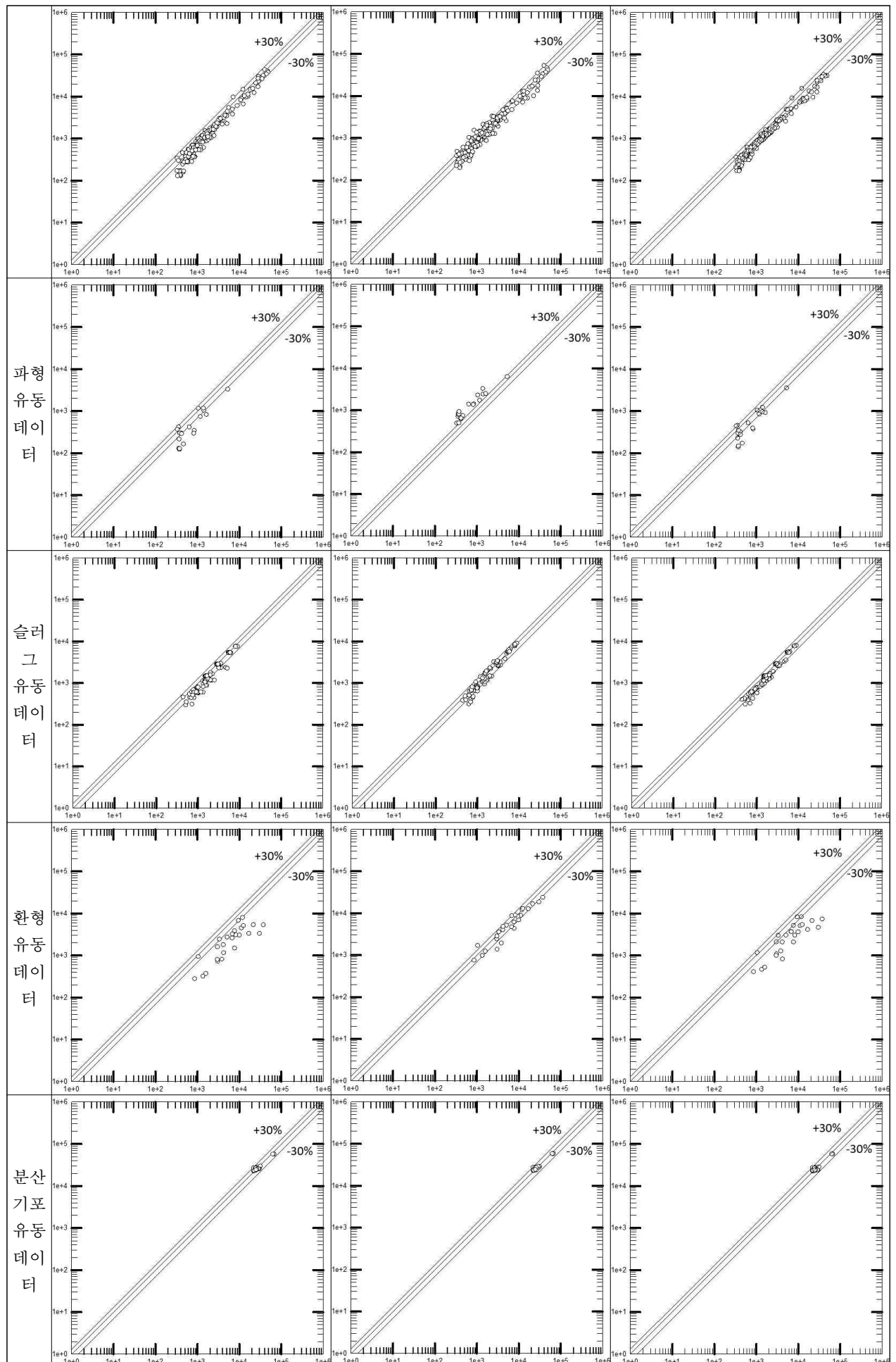
		$-\left(\frac{dP}{dz}\right)_F = \frac{2f_{tp}\bar{\rho}u^2}{D_h} = \frac{2f_{tp}v_f G^2}{D_h} \left(1 + x \frac{v_{fg}}{v_f}\right)$ $Re_{tp} = GD_h/\mu_{tp}$ $f_{tp} = 16 Re_{tp}^{-1} \text{ for } Re_{tp} < 2000,$ $f_{tp} = 0.079 Re_{tp}^{-0.25} \text{ for } 2000 \leq Re_{tp} < 20,000$ and $f_{tp} = 0.046 Re_{tp}^{-0.2} \text{ for } Re_{tp} \geq 20,000.$	
	Owens (1961)	$-\left(\frac{dP}{dz}\right)_F = \frac{2f_{tp}\bar{\rho}u^2}{D_h} = \frac{2f_{tp}v_f G^2}{D_h} \left(1 + x \frac{v_{fg}}{v_f}\right)$ $Re_{tp} = GD_h/\mu_{tp}$ $f_{tp} = 16 Re_{tp}^{-1} \text{ for } Re_{tp} < 2000,$ $f_{tp} = 0.079 Re_{tp}^{-0.25} \text{ for } 2000 \leq Re_{tp} < 20,000$ and $f_{tp} = 0.046 Re_{tp}^{-0.2} \text{ for } Re_{tp} \geq 20,000.$ $\mu_{tp} = \mu_f$	
	Dukler 등 (1964)	$-\left(\frac{dP}{dz}\right)_F = \frac{2f_{tp}\bar{\rho}u^2}{D_h} = \frac{2f_{tp}v_f G^2}{D_h} \left(1 + x \frac{v_{fg}}{v_f}\right)$ $Re_{tp} = GD_h/\mu_{tp}$ $f_{tp} = 16 Re_{tp}^{-1} \text{ for } Re_{tp} < 2000,$ $f_{tp} = 0.079 Re_{tp}^{-0.25} \text{ for } 2000 \leq Re_{tp} < 20,000$ and $f_{tp} = 0.046 Re_{tp}^{-0.2} \text{ for } Re_{tp} \geq 20,000.$ $\mu_{tp} = \frac{xv_g\mu_g + (1-x)v_f\mu_f}{xv_g + (1-x)v_f}$	
Separated Flow Model(SFM)	Lockhart & Martinelli (1949)	$\left(\frac{dp}{dz}\right)_F = \left(\frac{dp}{dz}\right)_f \phi_f^2, \phi_f^2 = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2}, X^2 = \frac{(dp/dz)_f}{(dp/dz)_g}$ $C_{vv} = 5, C_{tv} = 10, C_{vt} = 12, C_{tt} = 20$ $-\left(\frac{dP}{dz}\right)_g = \frac{2f_g v_g G^2 x^2}{D_h} - \left(\frac{dP}{dz}\right)_f = \frac{2f_f v_f G^2 (1-x)^2}{D_h}$ $f_k = 16 Re_k^{-1} \text{ for } Re_k < 2000,$ $f_k = 0.079 Re_k^{-0.25} \text{ for } 2000 \leq Re_k < 20,000$ and $f_k = 0.046 Re_k^{-0.2} \text{ for } Re_k \geq 20,000,$ where $Re_k = Re_f = \frac{G(1-x)D_h}{\mu_f} \text{ for liquid}$ and $Re_k = Re_g = \frac{Gx D_h}{\mu_g} \text{ for vapor.}$	관경 1.49 mm - 25.83 mm, 인 단열 원관 내에 탄화수소등의 기체와 물, 오일등의 액체의 이상 유동 마찰 압력강하 데이터를 기반으로 함.
	Muller-Steinhagen & Heck (1986)	$\left(\frac{dp}{dz}\right)_F = \left\{ \left(\frac{dp}{dz}\right)_{fo} + 2 \left[\left(\frac{dp}{dz}\right)_{go} - \left(\frac{dp}{dz}\right)_{fo} \right] x \right\} (1-x)^{1/3} + \left(\frac{dp}{dz}\right)_{go} x^3$	관경 4 mm - 392 mm 인 관내에 공기, 탄화수소등의 기체와 물, 냉매등의 액체의 이상 유동 마찰 압력강하 데이터를 기반으로 함.

■ 표 3.7 본 연구에서 실험을 통해 측정한 압력강하 데이터와
상관식으로 예측한 값과의 비교 ■

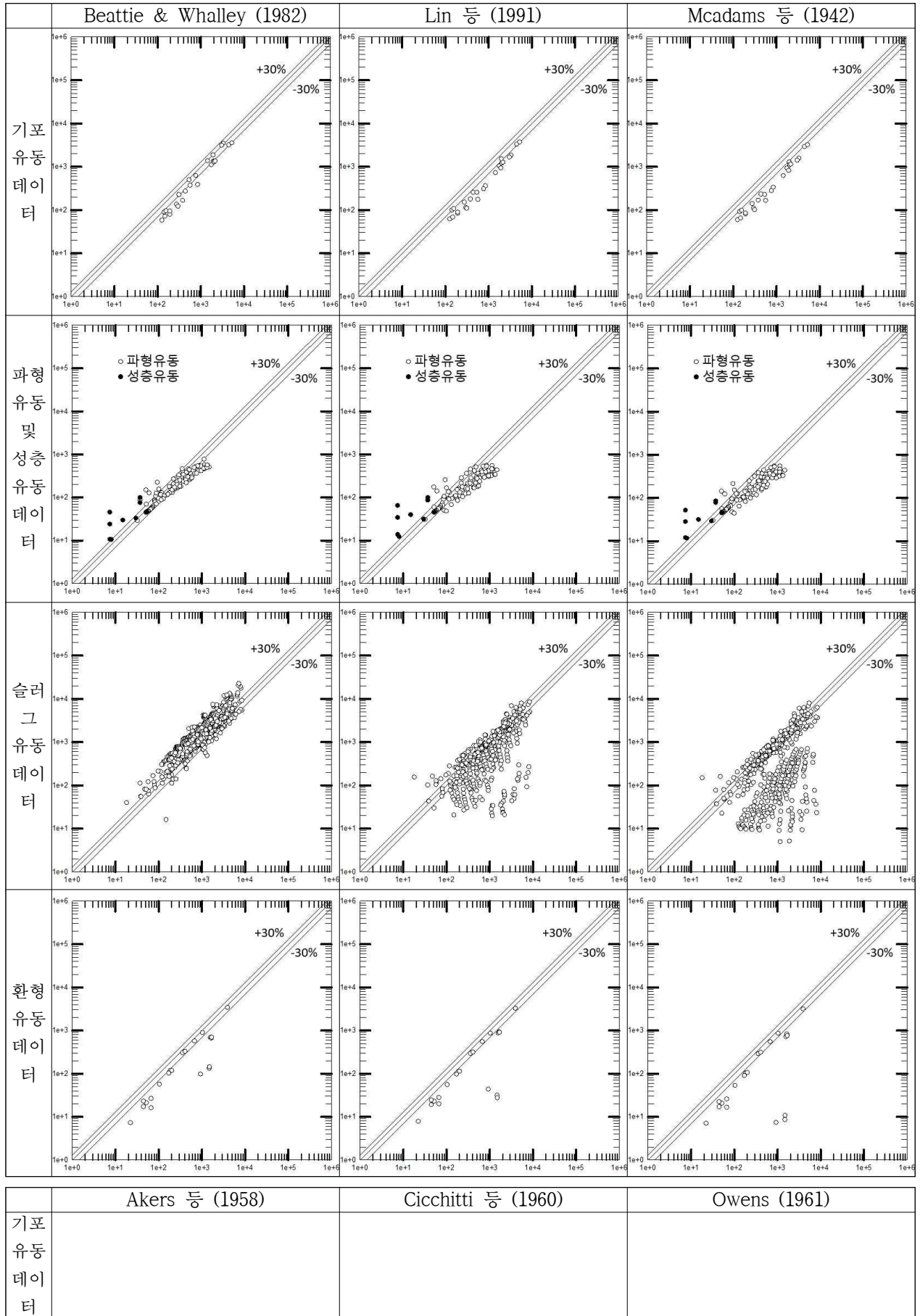


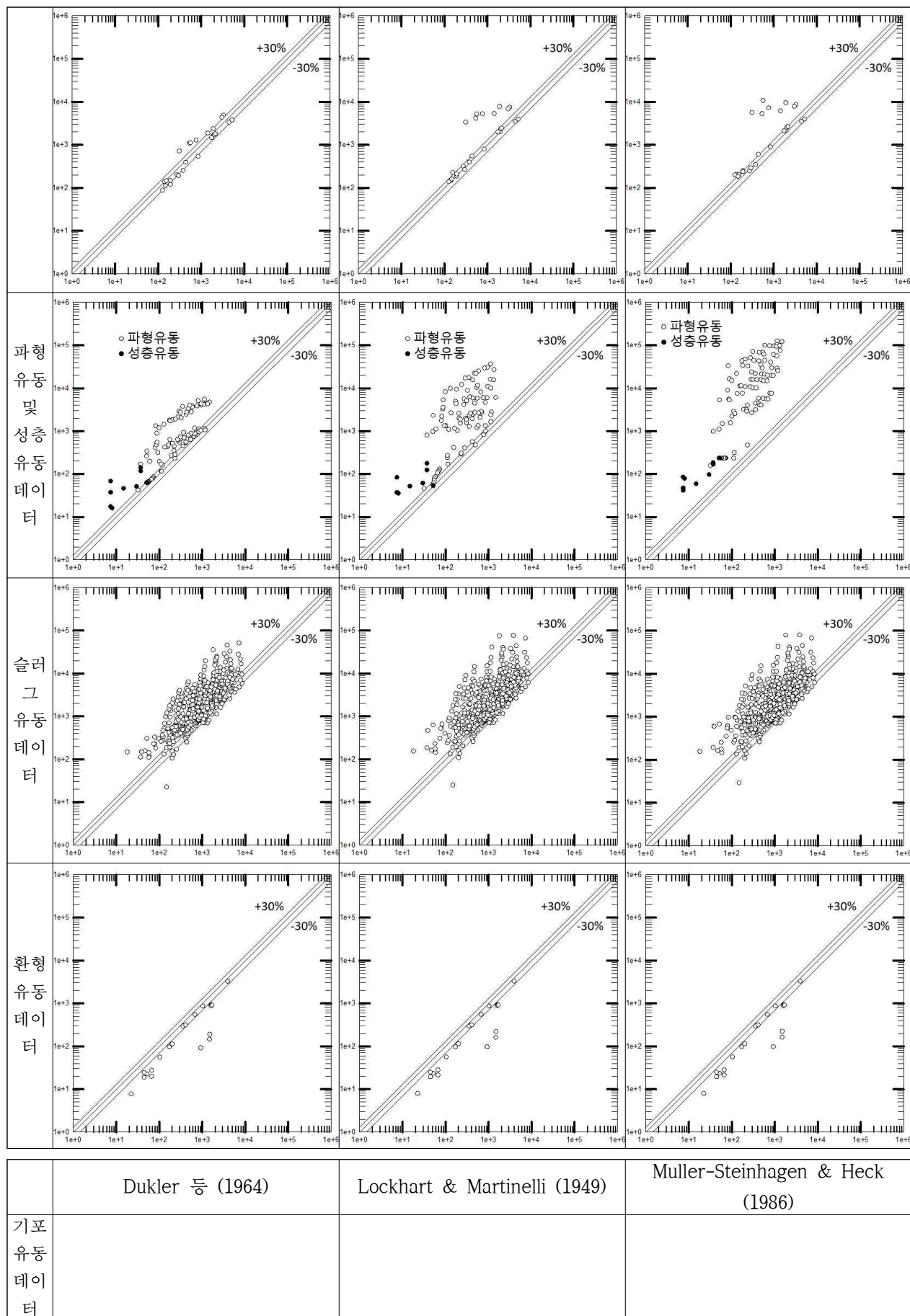


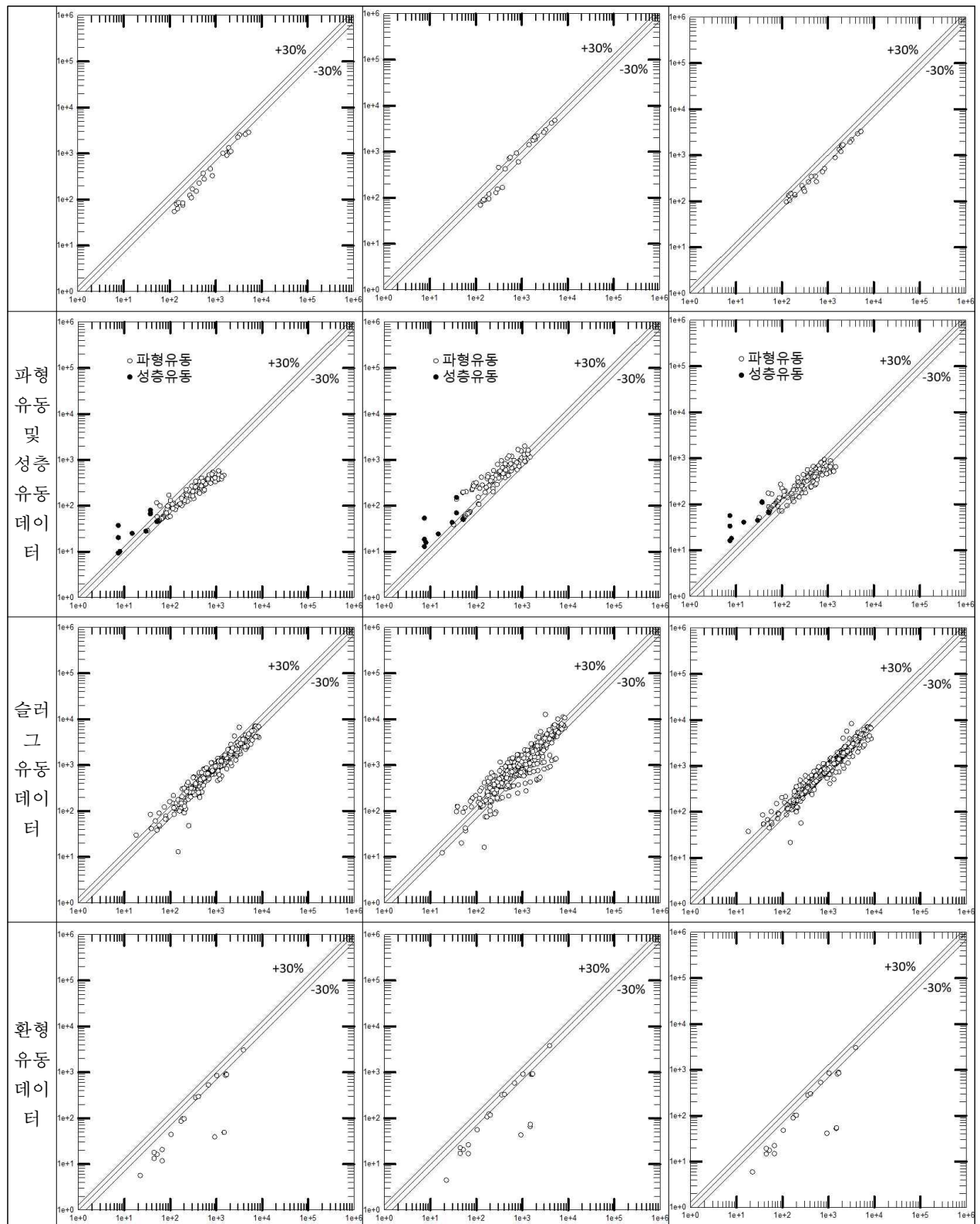




■ 표 3.8 타 논문의 압력강하 데이터와 상관식으로 예측한 값과의 비교 ■







- 본 연구에서 수행한 이상 유동 실험뿐만 아니라 타 논문의 실험데이터를 수집하였음. 수집한 본 연구과제 실험데이터와 타 논문의 실험데이터를 이용하여 기존의 마찰 압력구배 상관식을 검증하였음
- Muller-Steinhagen & Heck (1986)이 제안한 마찰 압력구배 상관식은 본 연구과제 실험데이터와 타 논문의 실험데이터에서 모두 성층유동, 파형유동, 플러그 유동, 슬러그 유동에서의 마찰 압력구배를 잘 예측하였음. 반면, 환형유동, 기포유동이 흐를 경우, Lockhart & Martinelli (1949)이 제안한 마찰 압력구배 상관식이 실험값을 더 잘 예측하였으므로 다상 유동 예측 프로그램은 이 두 상관식과 본 연구에서 개발한 슬러그 역학

모델을 이용하여 압력강하를 계산하도록 하였음
2) 다상 유동 예측 프로그램

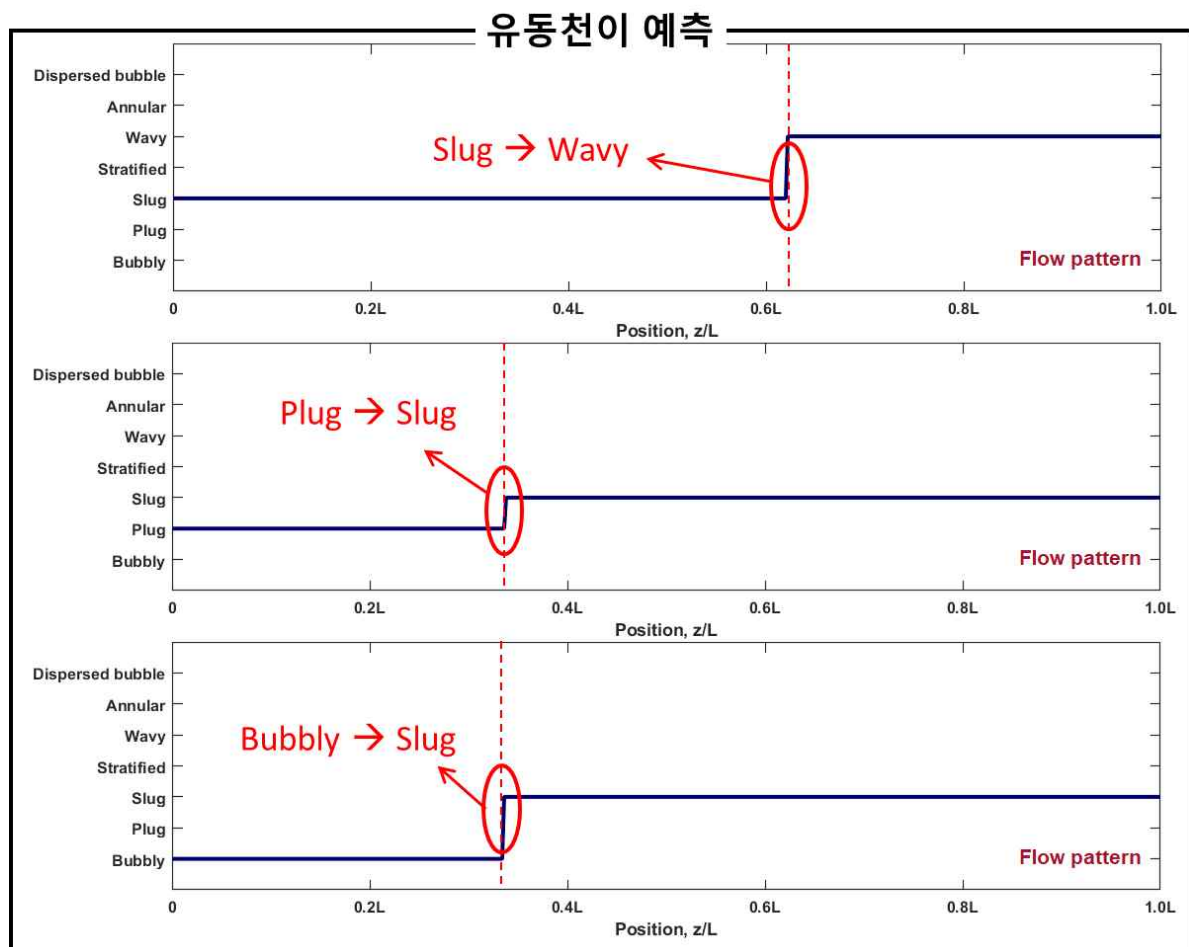
조건 입력

Geometric parameters	
Pipe diameter (cm):	2
Length (m):	7.5
Pipe thickness (mm):	30

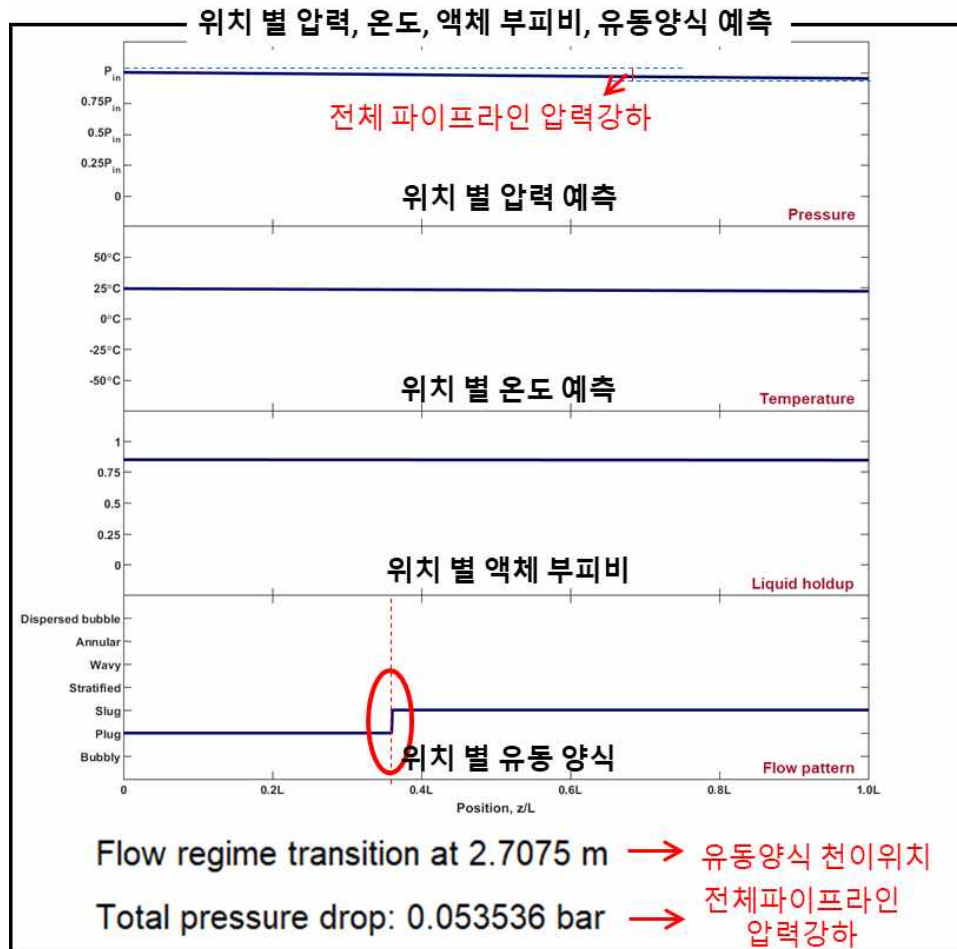
Operating Condition	
Mass flow rate (kg/s):	0.05705
Mass fraction:	0.00225
Inlet pressure (bar):	1.06
Inlet temperature (°C):	24
Ambient temperature (°C):	10
Convection heat transfer coefficient (W/m ² -K):	5
Pipe thermal conductivity (W/m-K):	50

Gas Phase	Liquid Phase
Air	☐ Silicone oil KF-96-200cs ☐ Silicone oil KF-96-350cs ☐ Silicone oil KF-96-500cs ☐ Silicone oil KF-96-1000cs ☒ White mineral oil FMO-85 ☐ White mineral oil FMO-200 ☐ White mineral oil FMO-350 ☐ White mineral oil FMO-500 ☐ Kerosene

■ 그림 3.42 다상 유동 예측 프로그램 입력 조건 ■



■ 그림 3.43 위치별 예측값 ■

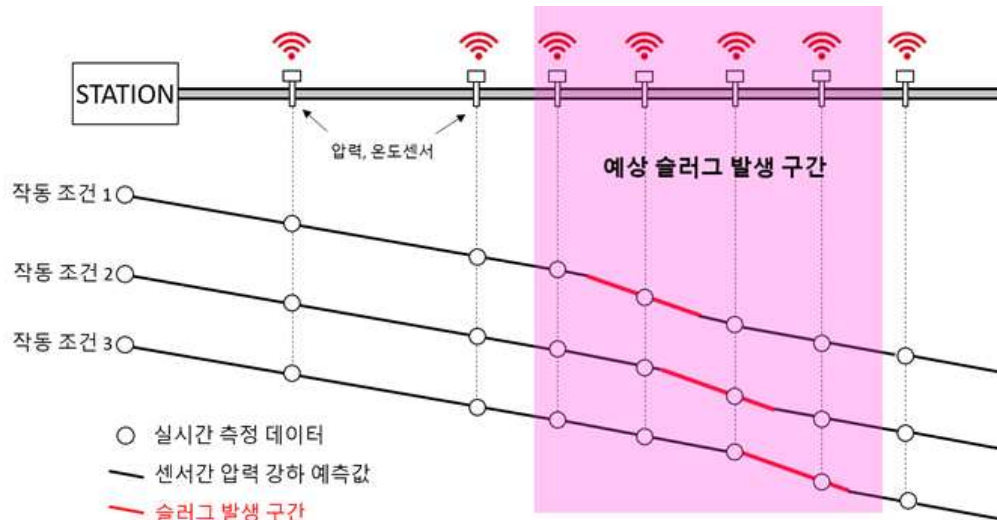


■ 그림 3.44 다양한 유동천이 예측 ■

- 개발된 다상 유동 예측 프로그램은 입력값으로 기하학적 설계조건(파이프라인 직경, 길이)과 작동 조건(질량유량, 건도, 입구 온도 및 압력) 그리고 작동 유체(물성치)를 선택함
- 초기 입구조건에서부터 거리에 따른 절대 압력 변화, 액체부피비(Liquid Holdup), 유동양식을 예측해 주고 전체 파이프라인 내에서 유동양식이 변하는 천이지점을 예측할 수 있음

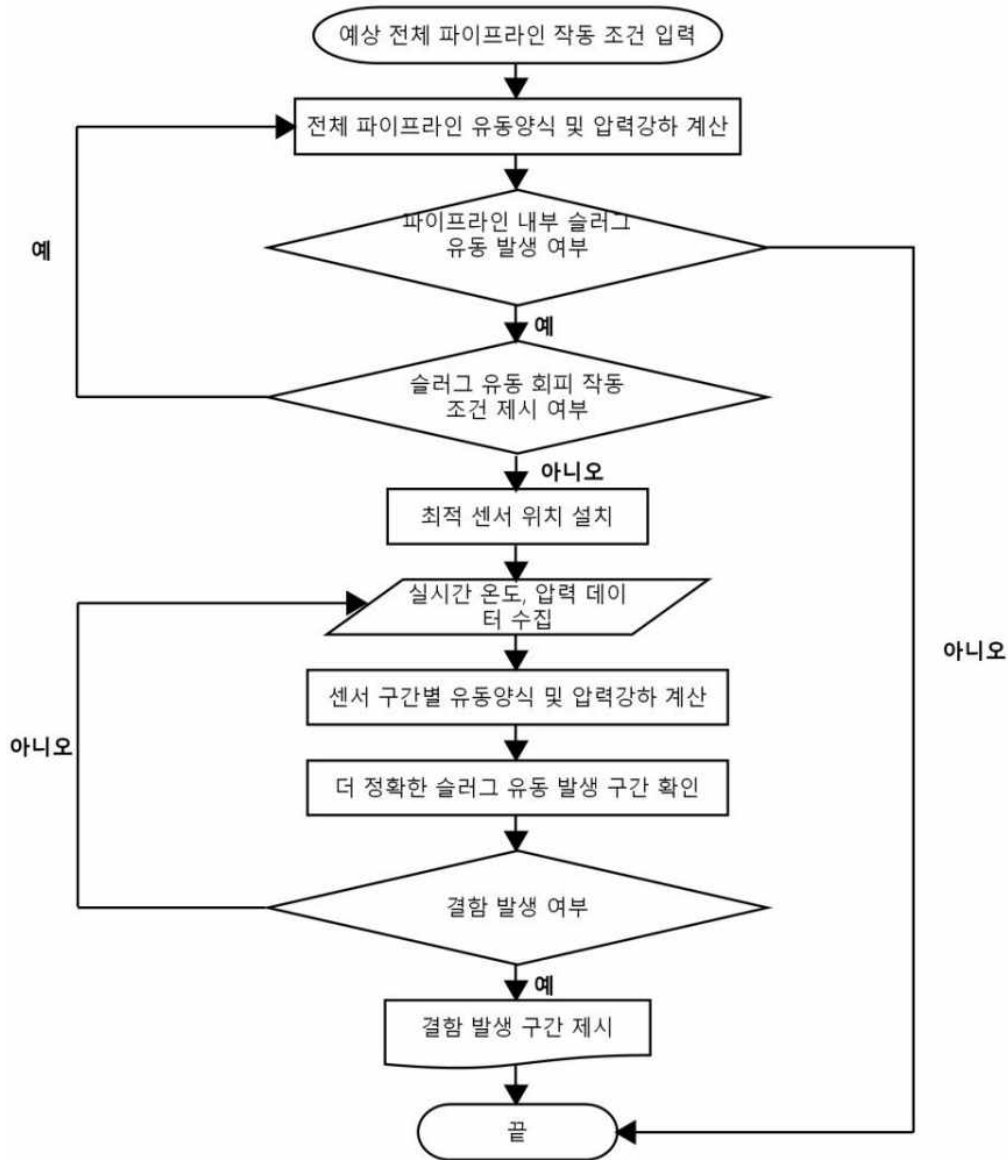
나. 원격 진단 프로그램 개발

- 1) 관내 내압 및 유동장 예측 알고리즘 개발

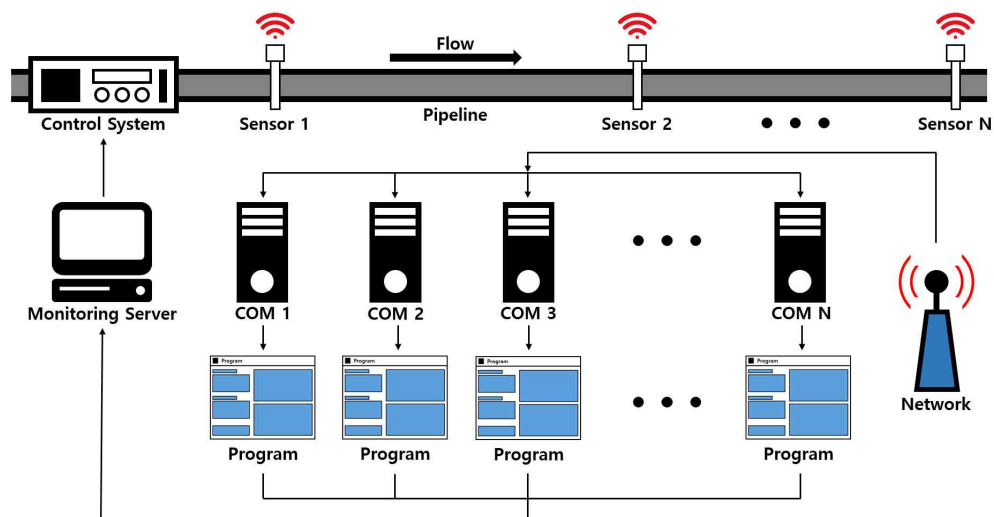


■ 그림 3.45 작동 조건에 따른 예상 슬러그 발생 구간 ■

- 전체 파이프라인의 예상 작동 조건들과 본 과제에서 개발한 다상 유동 예측 프로그램을 통해 전체 파이프라인의 압력강하 및 유동양식을 확인하고 발생할 수 있는 예상 슬러그 발생 구간을 파악하는 알고리즘을 개발함
- 예상 슬러그 발생 구간과 허용 압력 강하 오차값을 이용하여 최적의 센싱 위치를 제시하는 알고리즘 개발
- 파이프라인의 입구 조건과 각각의 센서에서 실시간으로 수집되는 압력, 온도 데이터를 이용하여 더 정확한 슬러그 발생지점을 파악하고 이를 통해 관내 슬러그 유동을 회피할 수 있는 파이프라인 입구 조건을 제시하는 알고리즘 개발
- 실시간으로 관내 압력, 온도를 확인하여 파이프 내부 결함으로 인한 비정상적인 압력, 온도를 즉각적으로 탐지하여 결함 구간을 알려주는 알고리즘 개발



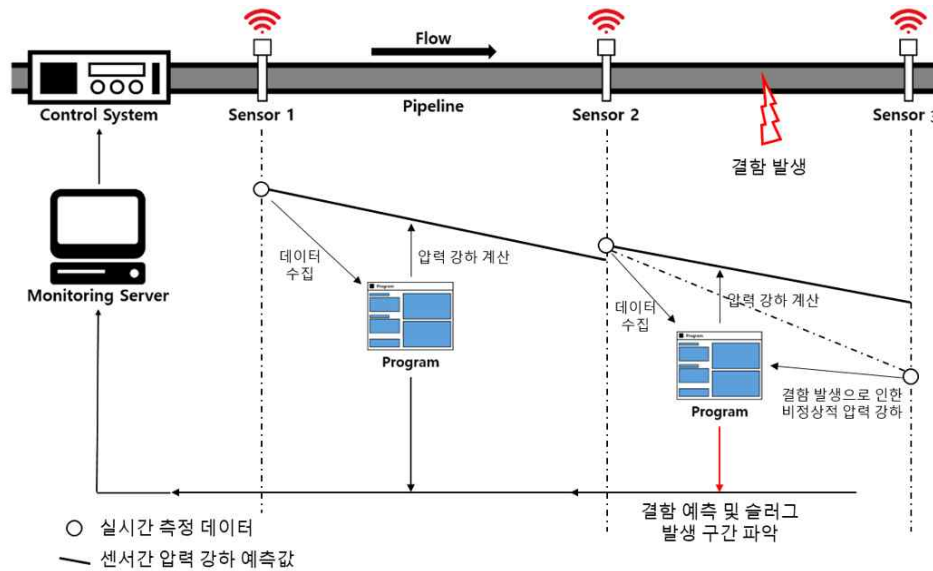
■ 그림 3.46 관내 내압 및 유동장 예측 알고리즘 개발 ■



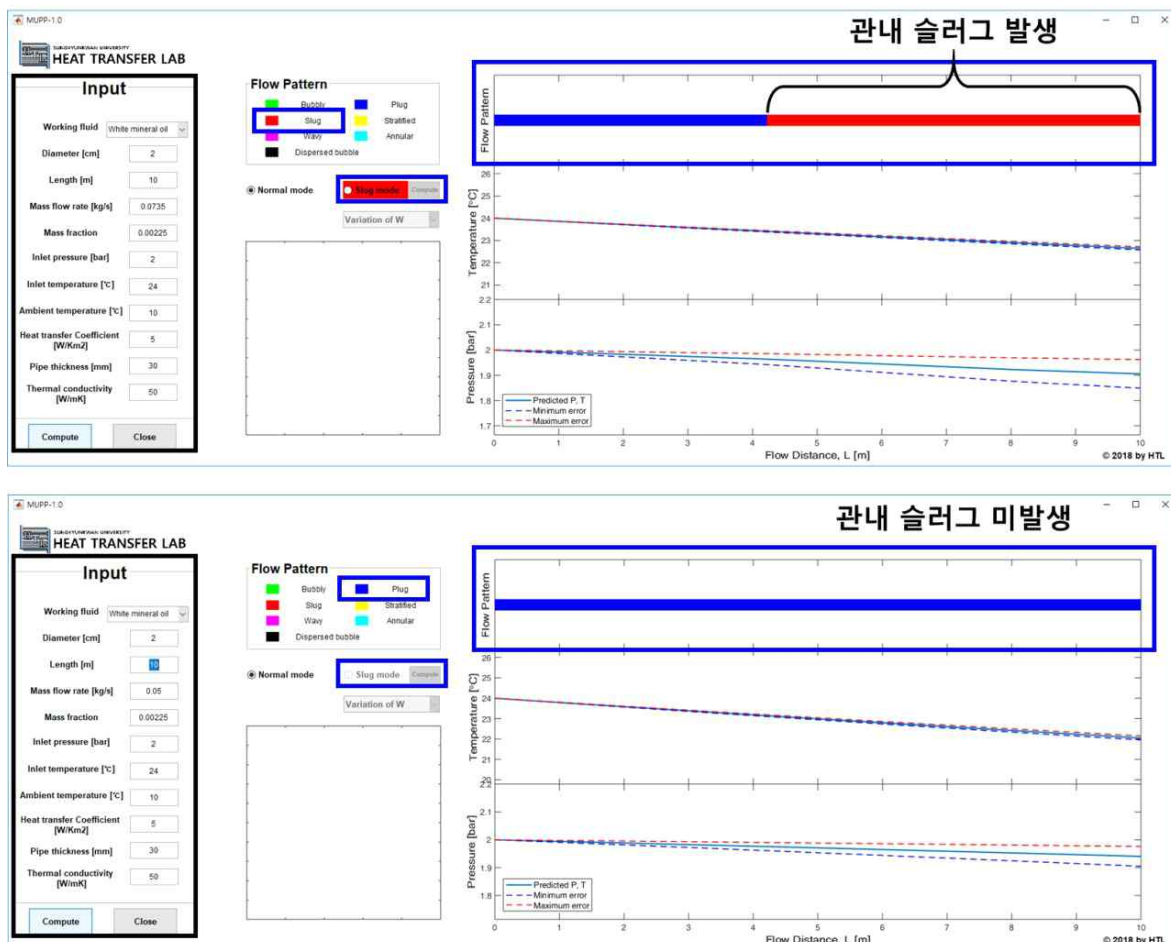
■ 그림 3.47 실시간 원격 진단 프로그램 구성도 ■

- 작동 조건에 맞는 전체 파이프라인의 압력강하 및 유동양식을 확인하고 예상 슬러그 발생 구간을 파악한 뒤 최적의 센싱 위치를 제시함

- 설치된 센서에서 각 위치에서의 압력, 온도를 실시간으로 수집한 뒤, 다상 유동 예측 프로그램을 통해 센서 구간별로 압력강하 및 유동양식을 다시 계산함
- 각 센서에서 실시간으로 수집한 압력, 온도 데이터를 통해 더 정확한 슬러그 발생 구간을 예측할 수 있으며, 작동 조건을 바꾸어도 실시간으로 슬러그 발생 구간의 변화를 확인할 수 있음
- 실시간으로 센서에서 수집한 압력, 온도의 비정상적 변화를 감지하여 즉각적으로 결함이 발생한 구간을 파악할 수 있음

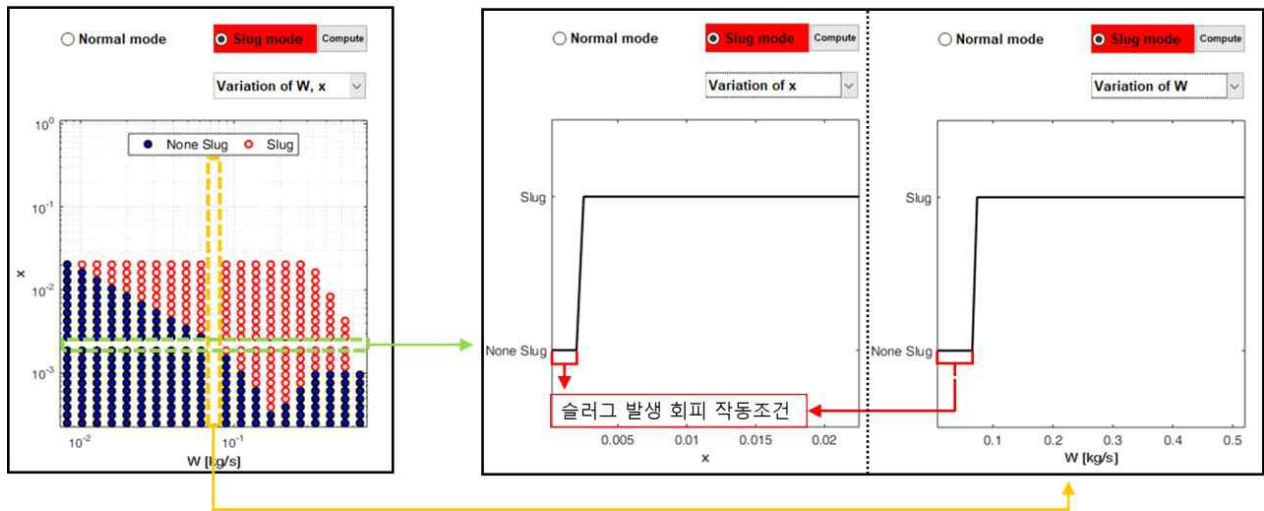


■ 그림 3.48 실시간 원격 진단 프로그램의 작동원리 및 결함 감지 기능 ■
2) 실시간 원격 진단 프로그램 개발



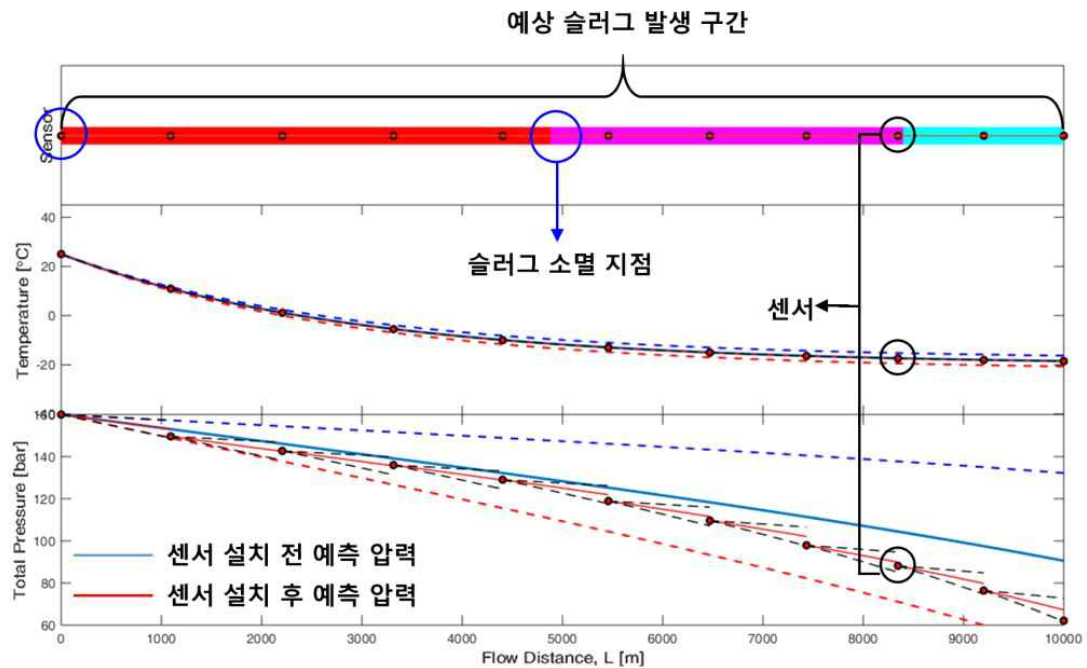
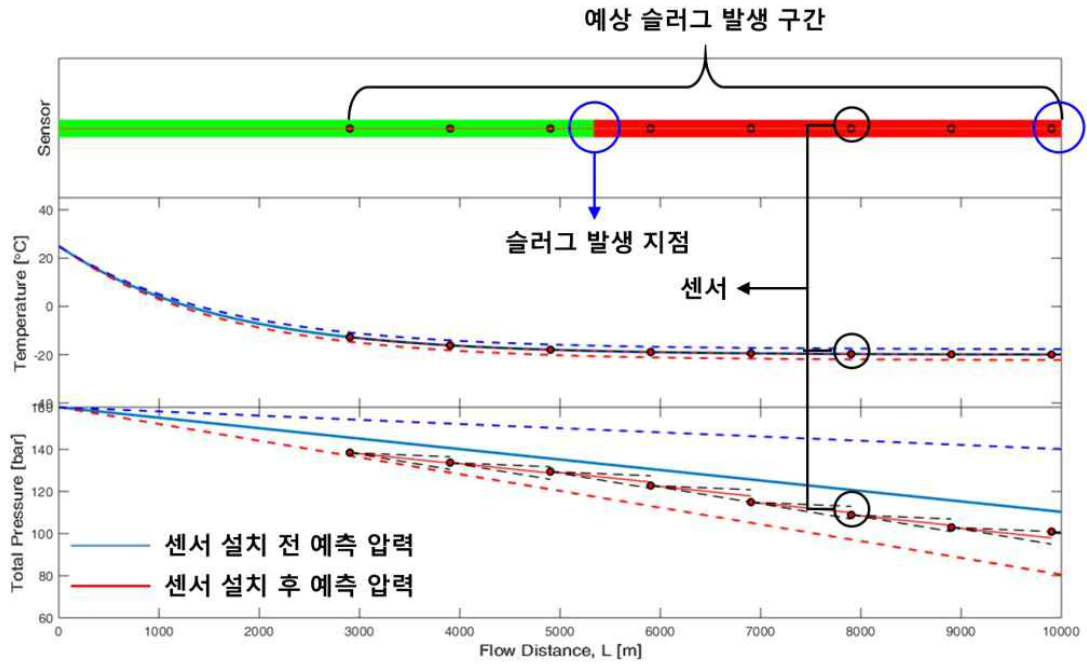
■ 그림 3.49 원격 진단 프로그램을 통해 예측한 관내 유동양식 및 슬러그 발생 여부 확인 ■

- 전체 파이프라인의 예상 작동 조건을 본 과제에서 개발한 다상 유동 예측 프로그램에 입력하면 전체 파이프라인의 압력강하 및 유동양식을 계산한 뒤, 파이프라인 내부 슬러그 발생영역 유무를 확인함. 전체 파이프라인 내부에 슬러그가 발생하지 않으면 알고리즘은 종료되며, 슬러그가 발생하면 슬러그 발생 구간을 파악함



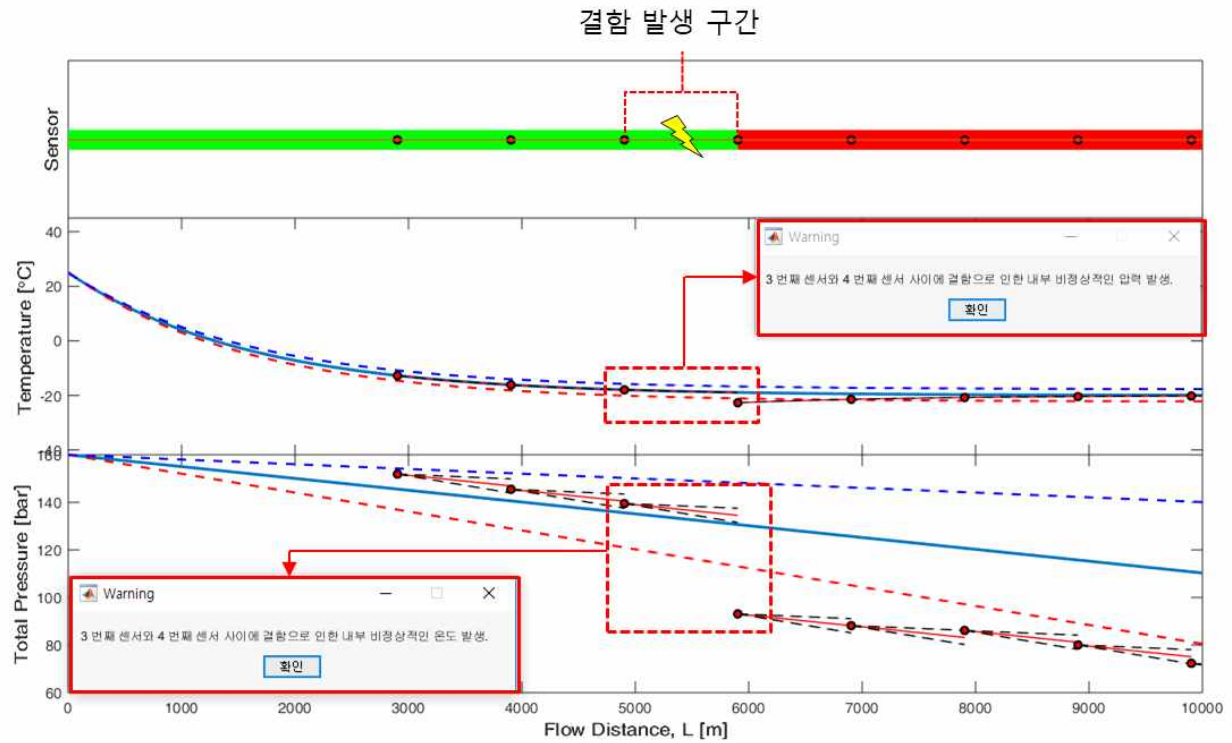
■ 그림 3.50 예상 작동조건을 기준으로 슬러그 발생 회피 작동 조건 제시 ■

- 전체 파이프라인의 예상 작동 조건의 질량 유량 또는 건도를 일정 범위 내에서 각각 변화를 주어 파이프라인 압력강하 및 유동양식을 새로 계산하여 파이프라인 운영에서 슬러그 발생을 회피할 수 있는 작동 조건을 제시함
- 슬러그 유동 발생이 불가피할 시 예상 슬러그 유동 구간에 센서를 설치하여 슬러그 유동을 확인하고 실시간으로 데이터를 수집하여 슬러그 유동 때문에 발생하는 결함을 탐지함



■ 그림 3.51 최적 센싱 위치 제시 및 정확한 압력강하 예측 ■

- 파악한 슬러그 발생 및 소멸 지점을 기준으로 슬러그가 발생할 수 있는 구간을 예측하여 예상 슬러그 발생 구간을 파악함
- 파이프라인 입구와 출구의 압력강하의 5%에 해당하는 압력강하 허용오차를 기준으로 예상 슬러그 발생 구간에 설치할 센서의 개수와 최적의 센싱 위치를 제시함.
- 제시한 최적 센싱 위치에 설치된 센서로부터 실시간으로 압력 및 온도를 수집하고, 각각의 센서 위치에서 수집한 압력 및 온도를 바탕으로 다상 유동 예측 프로그램을 통해 더 정확한 압력강하 및 유동양식을 센서 구간별로 계산함



■ 그림 3.52 관내 결함 발생 시 경고 및 결함 발생 구간 제시 ■

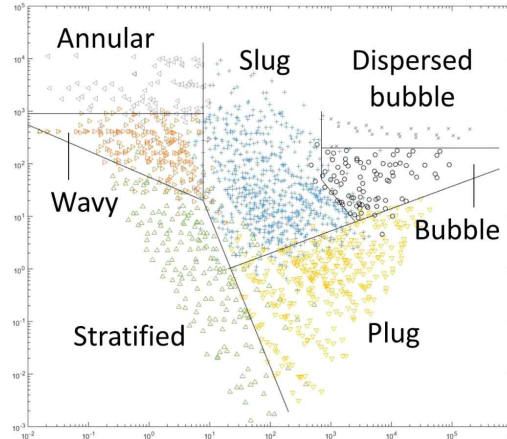
- 설치된 센서로부터 실시간으로 압력 및 온도를 확인하여 파이프라인 내부 비정상적인 압력, 온도를 탐지할 시 즉각적으로 결함 구간을 알려줌

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

가. 무차원화된 다상유동지도 개발

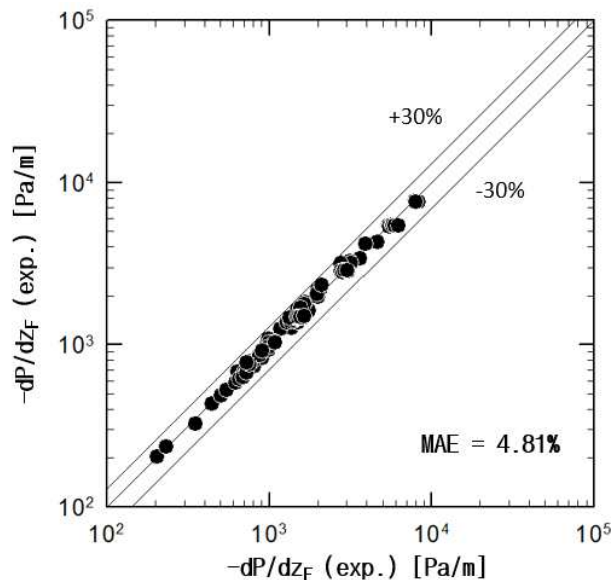
- 1) 새로운 유동양식지도의 제작을 위해 기존 유동양식지도의 좌표축으로부터 주요 인자를 선별하여 새로운 무차원수를 개발하고 이를 이용하여 새로운 무차원화된 다상 유동양식 지도를 개발하였으며 본 연구의 실험 데이터뿐만 아니라 기존 데이터의 유동양식들 모두 매우 잘 구분하는 것을 확인하였음



■ 그림 4.1 개발한 다상 유동 맵과 기존 데이터 비교 ■

나. 슬러그 유동 적합 역학모델 개발

- 1) 이상 유동 실험을 통해 수집한 슬러그 유동 가시화 데이터를 분석하여 슬러그 유동을 버블 영역(film zone)과 액체 슬러그 영역(liquid slug zone)으로 나누고 각 영역에서 발생하는 마찰 압력강하 인자를 분석하여 버블 영역과 액체 슬러그 영역의 길이 및 긴 버블(elongated bubble)의 속도에 대한 상관식을 개발함
- 2) 개발된 실험 상관식 및 기존 마찰 압력강하 인자에 대한 연구를 이용하여 슬러그 유동에 대한 압력강하 모델을 개발하였음
- 3) 본 연구에서 개발된 슬러그 역학모델은 실험에서 측정한 슬러그 유동 압력강하 값을 4.81% 오차율로 예측하는 정확도를 보임



■ 그림 4.2 슬러그 역학모델로 예측한 압력강하 ■

다. 다상 유동 예측프로그램 개발

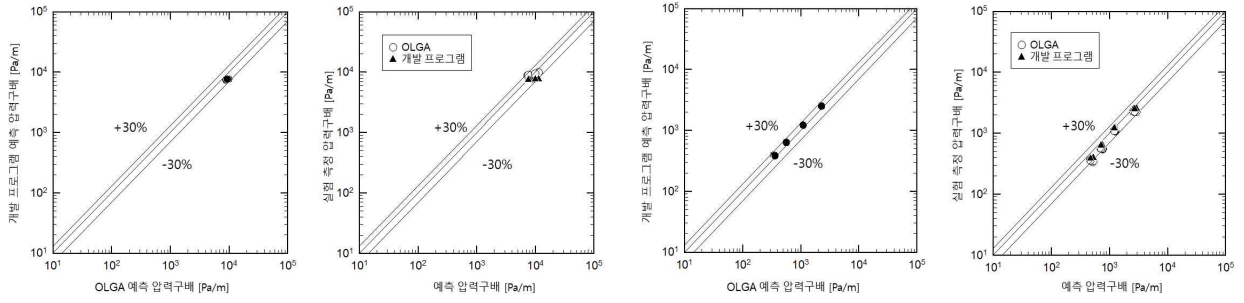
- 1) 자체 개발한 슬러그 유동 역학모델과 기존 다른 유동 영역의 압력 강하 예측 모델들 그리고 다상 유동 맵을 이용하여 다상 유동 예측 프로그램을 개발함
- 2) 다양한 조건에서의 추가 실험과 외부 실험 데이터를 이용하여 무차원화된 다상 유동 맵을 개발하였고 다상 유동 예측 프로그램을 개선함
- 3) 상용 프로그램을 이용하여 본 연구에서 수집한 데이터와 타 논문 실험 데이터를 분석함

#. 1 압력강하 예측 검증

■ 표 4.1 압력구배 오차 ■

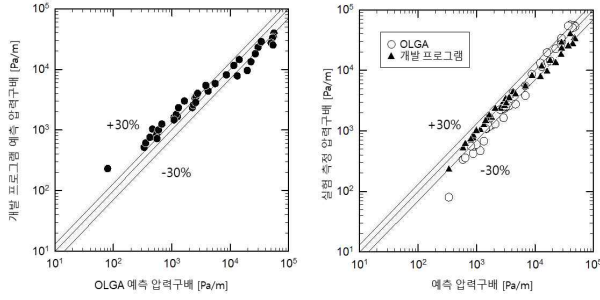
		유동양식	데이터 수	압력구배 오차 (%)	
				OLGA	개발 프로그램
실험실 실험 데이터	2cm 수평관	Annular	12	49.6	28.9
		Slug	54	25.6	14.3
		Stratified	3	23.1	28.2
		Bubble	13	50.3	12.4
		합계	69	32.9	16.7
	4cm 수평관	Annular	-	-	-
		Slug	40	22.3	11.8
		Stratified	1	69.8	22.6
		Bubble	1	35.6	28.1
		합계	42	23.7	12.4
타논문 실험 데이터	5.08cm 수평관	Annular	14	29.0	10.1
		Slug	21	33.0	39.3
		Stratified	6	88.3	119.4
		Bubble	9	59.4	46.8
		합계	50	42.9	42.5

- 상용 프로그램 중 하나인 OLGA와 본 연구에서 개발한 다상 유동 예측 프로그램으로 압력구배를 예측한 결과가 표 4.1에 정리되어 있음
- 실험실 데이터 중 관경 2cm 수평관의 경우 Annular, Slug, Stratified 세 가지 유동양식에 대해 압력구배를 분석하였음 OLGA를 이용하여 압력구배를 계산한 경우 실험값과의 오차가 32.92%로 나왔으나 본 연구에서 개발한 다상 유동 예측 프로그램은 실제 압력값과의 오차율이 16.7%로 OLGA보다 더 나은 예측성능을 가짐
- 실험실 데이터 중 관경 4cm 수평관의 경우 다상 유동 예측 프로그램으로 예측한 압력구배는 실험값과의 오차율이 12.4%이고 OLGA로 예측한 압력구배 값은 실험에서 측정한 압력구배와의 오차율이 23.7%로 본 연구에서 개발한 다상 유동 예측 프로그램이 실제 압력을 더 잘 예측함을 확인할 수 있음
- 마지막은 타 논문 실험 데이터를 OLGA와 본 연구에서 개발한 다상 유동 예측 프로그램으로 압력구배를 예측한 결과임 두 경우 모두 stratified 유동의 압력구배 예측 오차율이 높았으며 전체 압력구배 예측 오차율은 OLGA가 42.9%, 본 프로그램은 42.5%로 본 연구에서 개발한 다상 유동 예측 프로그램이 OLGA 수준과 비슷하게 압력구배를 예측한다는 것을 확인할 수 있음



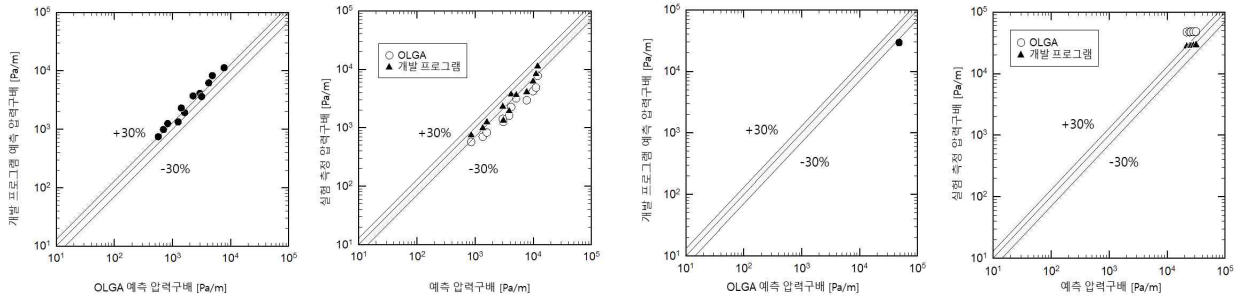
(1) Bubble 압력구배

(2) Plug 압력구배



(3) Slug 압력구배

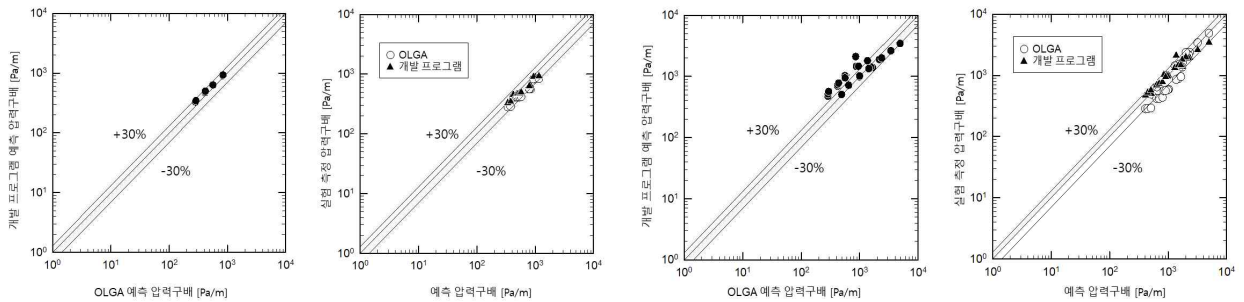
(4) Wavy 압력구배



(5) Annular 압력구배

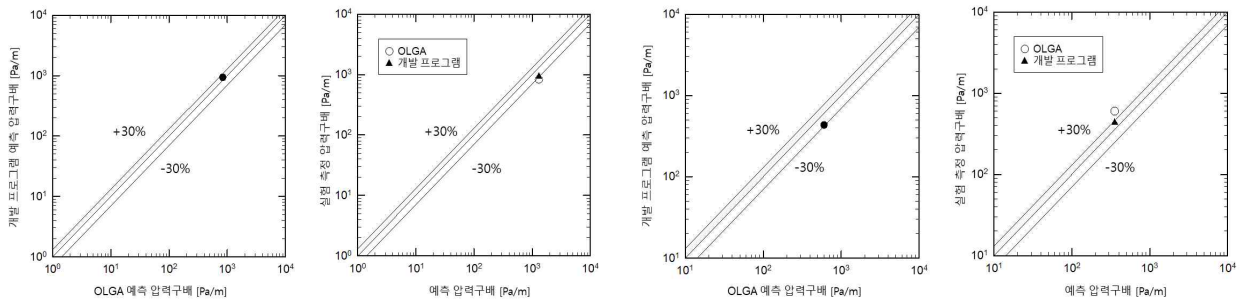
(6) Dispersed bubble 압력구배

■ 그림 4.3 2cm관 유동양식 별 압력구배 ■



(1) Plug 압력구배

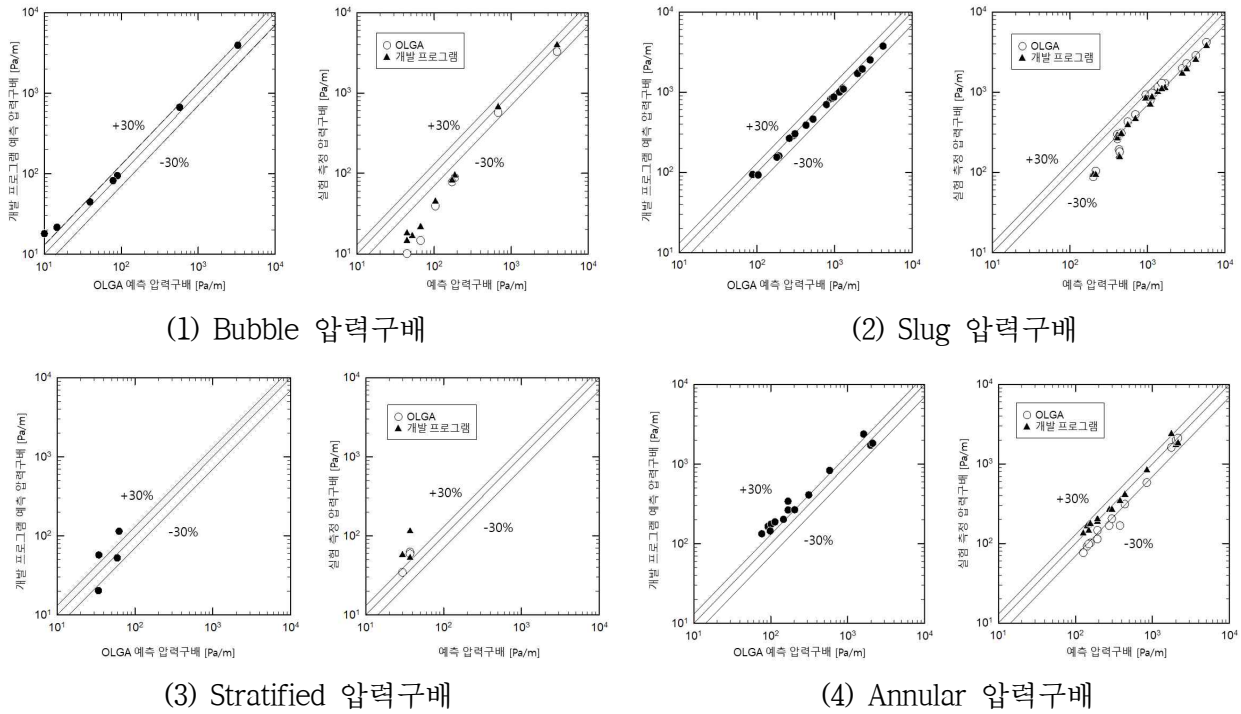
(2) Slug 압력구배



(3) Bubble 압력구배

(4) Wavy 압력구배

■ 그림 4.4 4cm관 유동양식 별 압력구배 ■



■ 그림 4.5 타 논문 실험 데이터 유동양식 별 압력구배 ■

- 그림 4.5는 각 유동양식 별로 타 논문의 실험에서 측정한 압력구배와 다상 유동 예측 프로그램이 예측한 압력구배 그리고 OLGA가 예측한 압력구배를 비교한 그래프임
- 각 유동양식 별로 좌측 그래프는 다상 유동 예측 프로그램의 예측값과 OLGA의 예측값을 비교한 그래프이고 우측 그래프는 다상 유동 예측 프로그램과 OLGA가 예측한 압력구배를 실제 측정된 압력구배와 비교한 그래프임
- 대부분의 유동양식에서 본 연구에서 개발한 다상 유동 예측 프로그램이 OLGA보다 더 정확하게 압력구배를 예측한다는 것을 확인할 수 있음

#. 2 유동양식 예측 검증

■ 표 4.2 OLGA 기준 유동양식 정의 ■

OLGA 기준 유동양식	실험실 기준 유동양식
Annular	Annular
Slug	Slug
	Plug
Stratified	Stratified
	Wavy
Bubble	Bubbly
	Dispersed Bubble

■ 표 4.3 OLGA의 유동양식 예측 1 ■

본 연구의 실험 데이터		OLGA 유동양식 예측	
직경 2cm관, 24℃, 1bar 일 때			
유동양식	데이터 수	예측된 유동양식이 일치하는 데이터 수	정확도 (%)
Bubble	13	7	54
Slug	61	54	88.5
Stratified	31	20	64.5
Annular	12	0	0
합	117	합	69.2
직경 4cm관, 24℃, 1bar 일 때			
유동양식	데이터 수	예측된 유동양식이 일치하는 데이터 수	정확도 (%)
Bubble	1	0	0
Slug	77	71	92.2%
Stratified	36	27	75.0
합	114	합	86.0
총 OLGA 정확도		77.6%	

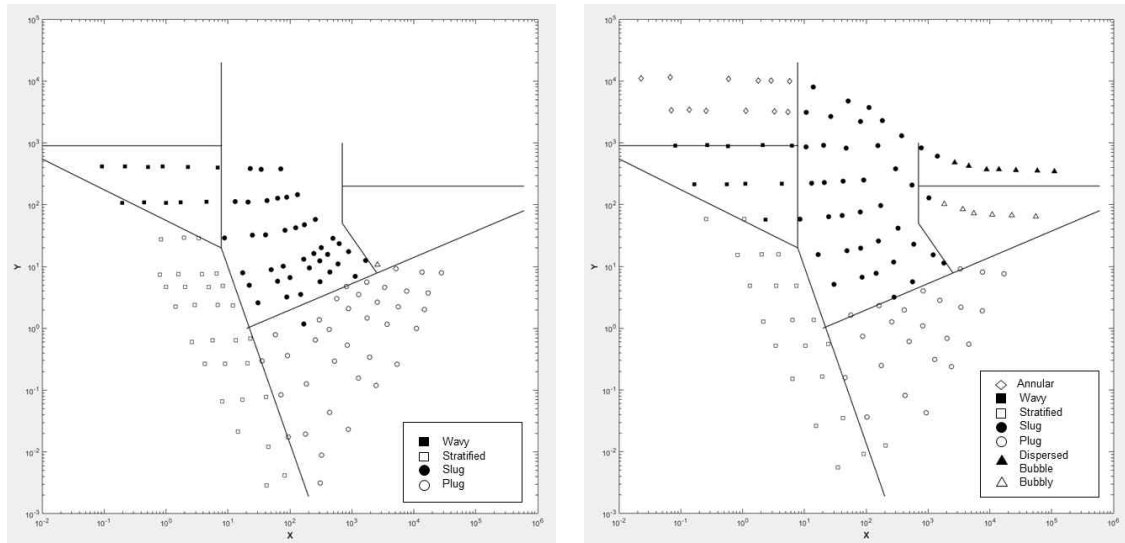
- 상용 프로그램 OLGA는 총 네 가지 유동양식으로 이상 유동을 분류하며 그 분류방식은 표 4.2에 정리되어 있음
- 직경 2cm관에서 수행한 이상 유동 실험 데이터를 분석한 결과 Bubble, Slug, Stratified, Annular 총 네 가지 유동양식이 관찰되었으며, OLGA를 이용하여 예측한 유동양식은 실제 측정된 유동양식과의 일치율이 69.2%로 계산됨
- 직경 4cm관에서 수행한 이상 유동 실험 데이터를 분석한 결과 Bubble, Slug, Stratified 총 세 가지 유동양식이 관찰되었으며, OLGA를 이용하여 예측한 유동양식은 실제 측정된 유동양식과의 일치율이 86.0%로 측정되었으므로 총 유동양식 예측 정확도는 77.6%임

■ 표 4.4 다상 유동 예측 프로그램의 유동양식 예측 1 ■

실험실 실험 데이터		개발 프로그램 유동양식 예측	
직경 2cm관, 24℃, 1bar 일 때			
유동양식	데이터 수	예측된 유동양식이 일치하는 데이터 수	정확도 (%)
Bubble	13	13	100
Slug	61	58	95.1
Stratified	31	30	96.8
Annular	12	12	100
합계	117	합계	97.5
직경 4cm관, 24℃, 1bar 일 때			
유동양식	데이터 수	예측된 유동양식이 일치하는 데이터 수	정확도 (%)
Bubble	1	1	100
Slug	77	77	100
Stratified	36	36	100
합계	114	합계	100
총 프로그램 정확도		98.75%	

- 직경 2cm관에서 수행된 실험 데이터를 분석한 결과, 본 연구에서 개발한 프로그램을 이용하여 예측한 유동양식은 실제 측정된 유동양식과의 일치율이 97.5%로 계산됨
- 직경 4cm관에서 수행된 실험 데이터를 분석한 결과, 본 연구에서 개발한 프로그램을 이용하여 예측한 유동양식은 실제 측정된 유동양식과의 일치율이 100%로 측정되었으므로 개발된 프로그램의 총 유동양식 예측 정확도는 98.75%임 이는 OLGA보다 유동양식 예측

정확도가 매우 높다는 것을 의미함



(1) 직경 2cm 관 실험 데이터

(2) 직경 4cm 관 실험 데이터

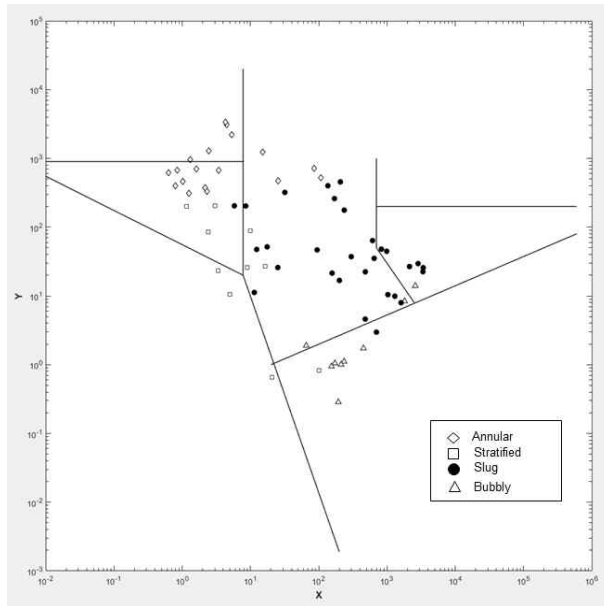
■ 그림 4.6 본 연구에서 개발한 유동양식지도 및 본 연구의 실험 데이터 ■

- 그림 4.6 은 본 연구에서 개발한 무차원화된 유동양식 지도에 다상 유동 예측 프로그램으로 예측한 유동양식을 표시한 그림으로 매우 일치하는 것을 확인할 수 있음

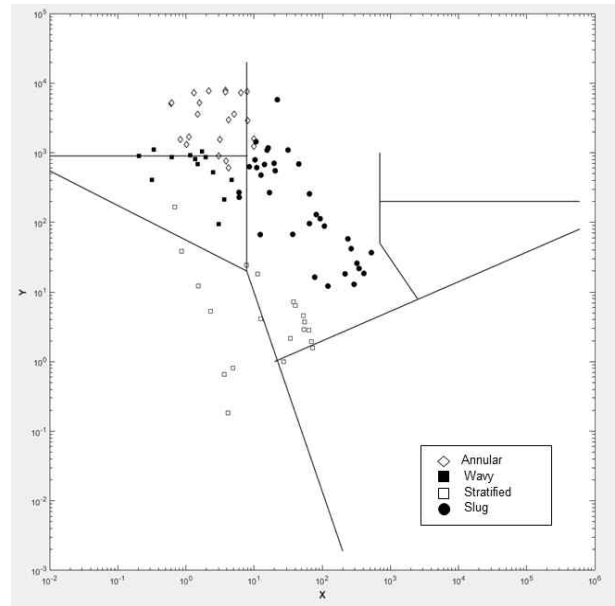
■ 표 4.5 OLGA의 유동양식 예측 2 ■

타 논문 실험 데이터		OLGA 유동양식 예측	
Mukherjee (1979)			
유동양식	데이터 수	예측된 유동양식이 일치하는 데이터 수	정확도 (%)
Bubble	9	0	0
Slug	29	24	82.8
Stratified	10	9	90
Annular	18	0	0
합	66	합	50
Majeed (1996)			
유동양식	데이터 수	예측된 유동양식이 일치하는 데이터 수	정확도 (%)
Slug	33	30	90.9
Stratified	20	20	100
Wavy	13	13	100
Annular	22	0	0
합	88	합	71.6
Minami (1987)			
유동양식	데이터 수	예측된 유동양식이 일치하는 데이터 수	정확도 (%)
Stratified	57	46	80.7
Chen et al. (1997)			
유동양식	데이터 수	예측된 유동양식이 일치하는 데이터 수	정확도 (%)
Wavy	47	47	100
총 OLGA 정확도		75.6%	

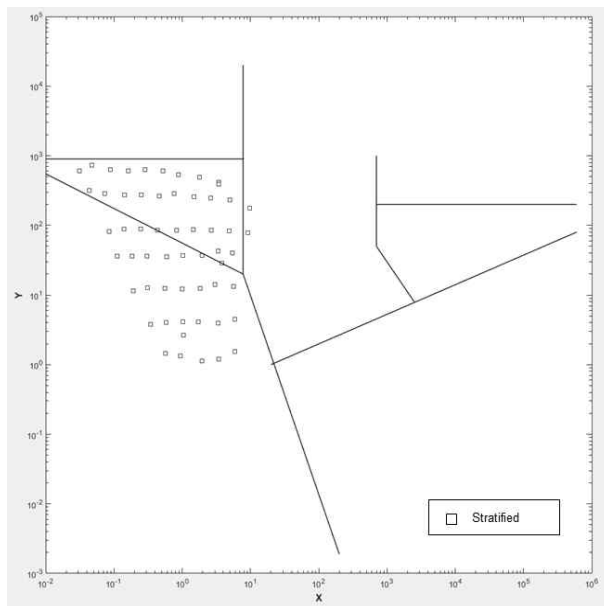
- OLGA를 이용하여 타 실험 논문을 해석해 본 결과 Slug와 Stratified, Wavy는 비교적 정확히 예측하며 네 개의 실험 논문의 총 예측 정확도는 **75.6%**임



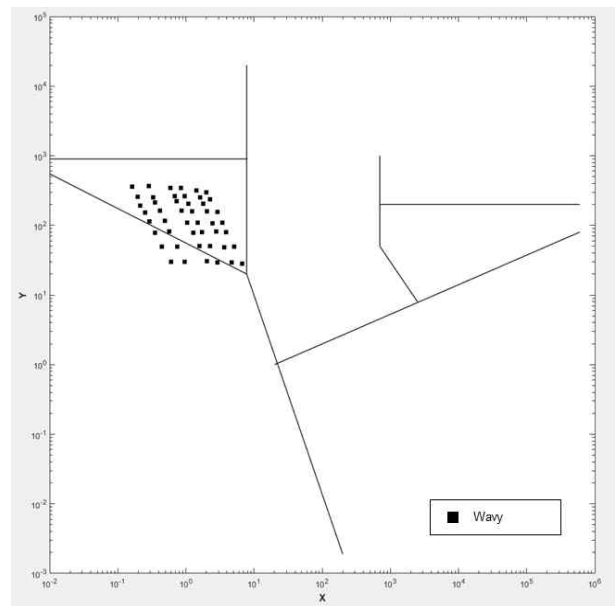
(1) Mukherjee (1979) 데이터



(2) Majeed (1996) 데이터



(3) Minami (1987) 데이터



(4) Chen et al. (1997) 데이터

■ 그림 4.7 프로그램 맵과 실험 데이터 ■

■ 표 4.6 타 논문 실험 데이터와 프로그램 비교 ■

타 논문 실험 데이터		프로그램 유동양식 예측	
Mukherjee (1979)			
유동양식	데이터 수	예측된 유동양식이 일치하는 데이터 수	정확도 (%)
Bubble	9	1	11.1
Slug	29	22	75.9
Stratified	10	6	60
Annular	18	5	27.8
합계	66	합	51.5
Majeed (1996)			
유동양식	데이터 수	예측된 유동양식이 일치하는 데이터 수	정확도 (%)
Slug	33	31	93.9
Stratified	20	9	45
Wavy	13	11	84.6
Annular	22	18	81.8
합계	88	합	78.4
Minami (1987)			
유동양식	데이터 수	예측된 유동양식이 일치하는 데이터 수	정확도 (%)
Stratified	57	55	96.5
Chen et al. (1997)			
유동양식	데이터 수	예측된 유동양식이 일치하는 데이터 수	정확도 (%)
Wavy	47	47	100
총 프로그램 정확도		81.6%	

- 개발된 프로그램으로 타 논문 실험 데이터의 유동양식을 예측한 결과가 그림 4.7에 나타나 있음
- 타 논문 실험 데이터를 프로그램으로 해석한 결과는 표 4.6에 정리되어 있으며, 네 개의 타 논문 실험 데이터를 분석한 프로그램 예측 정확도는 81.6%로 OLGA보다 유동 양식 예측 정확도가 뛰어나다는 것을 알 수 있음

라. 개발된 다상 유동 예측프로그램을 이용한 실시간 원격 진단 알고리즘 개발 및 검증

- 1) 전체 파이프라인 작동 조건들을 이용하여 파이프라인 전 구간의 압력강하 및 유동양식을 확인하고 발생할 수 있는 예상 슬러그 발생 구간을 파악하는 기능을 개발함
- 2) 전체 파이프라인에서 예상 슬러그 발생 구간을 특정하고 이에 대한 최적 센싱 위치를 제시하는 기능을 개발함
- 3) 초기 입구 유량과 기공율 그리고 실시간으로 수집되는 센서 위치마다의 압력, 온도 데이터를 이용하여 더 정확한 슬러그 발생 지점을 파악하고 이를 통해 파이프라인 운영에서 슬러그 발생을 회피할 수 있는 작동 조건을 제시하는 알고리즘을 개발함

마. 실시간 원격 진단 프로그램을 개발

- 1) 개발된 알고리즘을 적용하여 사용자가 파이프라인 전체의 내압 및 유동양식을 원격으로 실시간 모니터링 가능한 프로그램을 개발함
- 2) 작동 조건을 바꿀 경우 유동양식 및 압력 강하의 변화를 즉각적으로 계산하고, 슬러그 발생을 확인하며 슬러그가 발생했을 경우 슬러그 유동을 회피할 수 있는 작동 조건을 제시하는 기능을 개발함
- 3) 파이프내부 비정상적 압력, 온도의 변화를 감지하여 내부 결함 발생 시 이를 즉각적

으로 탐지하고 결함 구간을 파악할 수 있는 기능을 개발함

- 4) 본 프로그램은 실제 환경 조건을 고려하기 위해 유체 물성치, 유량, 압력, 온도뿐만 아니라 외부 온도와 관의 두께 및 열전도를 포함한 대부분의 주요 인자들을 고려하여 유체 유동을 예측함
- 5) 본 프로그램은 실험실 수준의 조건에서 그 정확도를 검증받은 상태로 TRL 4단계의 기술 수준임, 프로그램의 실용화를 위해선 큰 관경의 파이프를 이용한 추가적인 실험을 수행하고 현장에서 측정된 데이터를 수집하여 더 넓은 조건에서 유체 유동을 예측할 수 있는 역학 모델과 유동 양식 지도를 만드는 것이 필요함(TRL 5 & TRL 6) 그리고 이를 바탕으로 기 개발된 프로그램의 지속적인 개선을 통해 실제 동토 자원이송망에서 사용될 수 있는 다상 유동예측 프로그램 개발이 가능함(TRL 7 & TRL 8)

2. 관련 분야 기여도

- 다상유동 중 특히 슬러그 다상유동은 국내뿐만이 아니라 해외에서도 정확한 모델이 개발되어있지 않음 이에 본 연구팀은 본 과제에서 수행한 이상 유동 실험 결과를 이용하여 슬러그 유동의 물리적 해석을 통해 관내 높은 예측 정확도를 가진 슬러그 유동 역학모델을 개발하였으며, 이는 기존 예측 방식보다 더 정확하게 슬러그 유동 실험 데이터를 예측하는 것으로 확인되었음 본 연구팀은 개발된 슬러그 유동 역학 모델을 이용하여 해외 업체가 독식하고 있는 다상 유동 예측 프로그램을 자체 개발하고자 하였으며 본 과제를 통해 자원이송망 파이프라인 설계를 돕는 유동 예측 프로그램과 실시간 원격 진단 프로그램을 개발하였음

가. 기술적 측면

- 1) 실시간 원격 진단 기술을 통한 동토 자원이송망 및 관련 장비의 유지관리 능력 향상으로 동토 자원이송망의 안전성 향상이 기대됨
- 2) 자원이송망 내부 유동 마찰 감소를 통한 파이프 내부 부식 및 침식을 억제할 수 있을 것으로 기대됨
- 3) 선진국 대비 동토 자원이송망 분야 기술 격차 감소를 통한 국제 기술력 향상이 기대됨

나. 경제적 · 산업적 측면

- 1) 본 연구과제에서 개발하려는 진단 프로그램은 TRL 4단계의 기초단계 프로그램으로 본 연구의 유동조건 범위에서 해외의 상용 프로그램보다 더 뛰어난 예측 성능을 보임
- 2) 따라서, 본 과제에서 개발된 프로그램은 전 세계적으로 불모지인 자원이송망 내부 유동 시뮬레이션 시장을 개척할 수 있는 기반 기술이며, 미래 시장 점유율 확보를 위한 단초를 제공할 것으로 기대됨
- 2) 향후 지속적인 개발을 통해 넓은 범위의 작동조건에서 해외에서 개발된 상용 다상유동 프로그램에 준하는 신뢰성을 확보하고, 국산화를 통해 국내 관련기업의 경제적 부담을 절감시킬 것으로 기대됨

다. 사회적 측면

- 1) 원천 진단 알고리즘에 대한 특허 확보 및 기술 이전을 통해 국내 관련 분야의 R&D 활성화에 기여할 수 있을 것으로 기대됨
- 2) 실시간 원격 진단 프로그램을 통해 자원이송망의 사고를 예측 및 예방함으로써 인명 피해 및 자연파괴를 방지할 것으로 기대됨

제5장. 연구개발성과의 활용계획

1. 미래 원천기술 확보

- 가. 관내 슬러그 유동의 특성 데이터베이스 구축
- 나. 슬러그 다상유동의 역학모델 (Mechanistic Model)을 개발 및 활용하여 슬러그 유동으로 인한 자원이송망의 손상을 예방 및 진단하는 기초 기술 확보

2. 실용화 · 제품화 방안

- 가. 다상 유동 진단을 위한 슬러그 유동 역학모델과 진단 알고리즘이 적용된 GUI 기반 다상 유동 예측 및 자원이송망 기초 설계 프로그램 제작
- 나. 본 기초설계 프로그램은 GUI 기반으로 프로그램을 제작하였기 때문에, 향후 지속적인 개발이 이루어지면 솔루션 보급 사업 및 컨설팅 추진을 통해 상용화가 가능할 것으로 판단됨
- 다. 본 과제에서 개발한 프로그램은 동토 자원이송망 원격 진단을 위한 유체 유동예측 프로그램으로 실험실 수준의 조건에서 예측 성능을 확인한 TRL 4 단계의 기초 연구임. 향후 본 과제에서 개발된 프로그램을 기반으로 실제 환경 조건에서 해외 상용 프로그램에 준하는 성능을 보이는 프로그램으로 개선(TRL 7 또는 TRL 8)한다면 동토 자원이송망 관련 기술이 미흡한 국내 다상 유동 시뮬레이션 분야의 사업성 및 경쟁성을 갖추는 자원이 될 것으로 기대됨
- 라. 이를 위해선 지속적이고 장기적인 실험이 선행되어야 함. 더 큰 직경(관경 20 cm ~ 80 cm)에서의 이상유동 실험 데이터와 실제 현장에서 측정된 데이터들을 수집하여 본 과제에서 개발한 역학 모델 및 유동 양식 지도를 개선하면 프로그램의 작동 범위와 예측 정확도를 높일 수 있음

3. 기술수요처

- 가. 본 연구 과제를 통해 개발된 동토 자원이송망 내부 유동 예측 및 진단 기술은 다음과 같은 기업에서 기술 수요가 있을 것으로 예상됨
 - : 자원이송망 설계 또는 운용 기업 (동토 자원이송망 연구단, Rockwell Automation)
 - : 관내 유동 시뮬레이션 S/W 기업 (다쏘, ANSYS, Schlumberger, Schneider Electric)
 - : 시추 관련 산업 기업 (해양수산부, 한국 석유공사)
 - : 연구 기관 (한국건설기술연구원)
- 나. 본 연구에서 개발된 유체 유동예측 프로그램은 TRL 4단계의 소프트웨어로 이상유동의 압력강하 및 유동양식 변화 등을 예측하는 기능을 가지고 있음. 본 프로그램은 실험실에서 구현 가능한 환경 조건하에서 실제 상용 프로그램보다 더 높은 정확도로 유체 유동을 예측한다는 것을 확인하였음. 이는 고성능 컴퓨터 냉각, 항공기 전자장비 냉각, 레이더 장비 냉각, 전기 자동차 열설계 등 작은 관경에서 이상유동이 발생하는 다양한 산업분야에서도 활용이 가능한 프로그램이라는 것을 의미함. 이에 실험실 수준에서도 실제 환경 구현이 가능한 산업분야와의 협업을 통해 TRL 8단계의 프로그램 개발 연구 과제 수행이 가능할 것으로 예상됨

4. 활용분야 및 활용방안 기술

-
- 가. 본 과제에서 개발된 프로그램은 TRL 4단계의 기초 설계프로그램으로 개발된 유동조건 범위에서 기존 상용 프로그램보다 뛰어난 예측 성능을 보임.
- 나. 본 과제에서 개발된 프로그램의 지속적인 개선을 통해 적용 가능한 작동범위를 확대하면 실제 자원이송망에 사용가능할 것으로 보임.
- 다. 향후 개선된 프로그램을 통해 국내 및 해외 자원이송망 프로젝트에 경쟁력을 갖고 참여할 수 있을 것으로 기대됨.
- 라. 확장된 적용가능 작동범위에 따라 자원이송망을 비롯한 일반 파이프라인의 유동 예측이나 접근이 어려운 해양에너지산업 분야의 파이프라인 유지 및 보수 분야에도 활용가능할 것으로 기대됨.

- ① 현재 국·내외 각종 배관 및 파이프라인의 결함 여부의 진단은 사후에 결함을 비파괴 검사 혹은 직접 탐상하여 이루어짐 이러한 결함 진단 방식을 사용하면 상당한 유지보수 비용이 지출되며, 극한지와 같은 환경에서는 파이프 전 구간에 대한 접근이 어렵다는 문제가 있음 본 과제에서 개발된 진단 알고리즘 기반의 진단 프로그램은 결함 발생 가능성이 가장 높은 부분을 예측하여 제시함으로써 사전 진단이 가능하므로 파이프라인의 보수비용을 절감할 수 있음. 간단한 센서 배치 작업 이후 원격으로 측정이 가능하기 때문에 환경적 제약이 기존의 진단 기법에 비해 적을 뿐만 아니라 파이프 내부 압력, 온도의 비정상적 변화를 실시간으로 진단 가능하므로 관내 결함 발생을 즉각적으로 탐지하고 결함 구간을 특정할 수 있음
- ② 본 과제에서 개발된 프로그램을 전 세계적으로 가장 범용성있고 국내 관련 회사, 연구소, 학계에서도 많이 사용하는 OLGA 시뮬레이터에 준하는 수준으로 넓은 작동 범위에 적용 가능하도록 향후 개발한다면, 차세대 주요 기술로 활용 가능할 것으로 판단되며, 원천 기술의 국산화를 통해 기존에 비해 저렴한 비용으로 제공되어 관련 산업 및 연구에 큰 기여를 할 것으로 기대됨
- ③ 본 연구에서 개발한 원격 진단 프로그램의 기초 기술을 활용하면 슬러그 유동의 발생 구간을 예측하고 회피함으로써 파이프 내부 부식 및 침식을 효과적으로 방지할 수 있을 것으로 기대됨. 또한 향후 지속적인 개발을 통해, 적용 가능한 작동유체의 종류를 확장하여 다양한 형태의 다상유동 이송망에 대해 활용할 수 있을 것으로 기대됨
-

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

1. 압력강하 및 슬러그 유동 실험데이터, 예측 상관식 및 유동역학 모델 수집

가. 압력강하 실험 데이터베이스 구축

- 본 과제를 비롯한 총 13개의 출처로부터 1330개의 실험데이터를 수집하였으며, 구축된 데이터베이스의 적용 범위는 다음과 같음

- ① 관 직경 : 20~95.25 mm ($20 \text{ mm} \leq D \leq 95.25 \text{ mm}$)
- ② 오일 밀도 : 722~970 kg/m³
- ③ 오일 점성 : 0.00092~ 6.2145 Pas (0.92 ~ 6214.5 cP)
- ④ 오일 표면장력 : 0.0231~0.037 N/m
- ⑤ 기체 밀도 : 0.00302~50.6 kg/m³
- ⑥ 기체 점성 : 0.0000104~0.00002 Pas

나. 압력강하 예측을 위한 역학모델 및 상관식 수집- 기존에 발표된 이상유동 압력강하 예측을 위한 7개의 Homogeneous Equilibrium Model의 혼합점성모델, 4개의 실험상관식을 수집함

다. 유동양식 별 주요인자 예측 상관식 수집

- 유동양식에 따라 역학모델이 상이하기때문에, 각 유동양식 역학모델별로 주요인자 예측 상관식을 수집함.
- 슬러그 유동의 역학모델에 대해 9개의 액체부피비 예측상관식, 5개의 슬러그 길이 예측 상관식, 5개의 기포길이 예측 상관식을 수집함.
- 성층 및 파형유동의 역학모델에 대해 14개의 경계면 마찰계수 예측 상관식을 수집함.
- 환형유동의 역학모델에 대해 3개의 경계면 마찰계수 예측 상관식을 수집함.

2. 유동양식지도 및 유동양식 실험데이터 수집

가. 유동양식 실험 데이터베이스 구축

- 본 과제를 비롯한 총 18개의 출처로부터 1956개의 실험데이터를 수집하였으며, 구축된 데이터베이스의 적용 범위는 다음과 같음

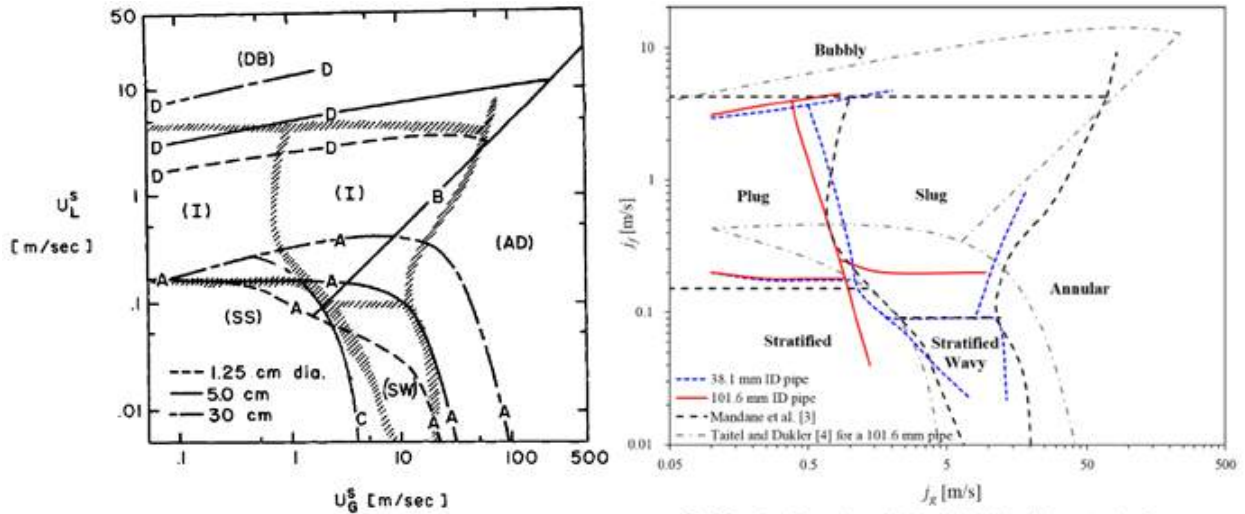
- ① 관 직경 ; 20~78 mm ($20 \text{ mm} \leq D \leq 78 \text{ mm}$)
- ② 오일 밀도 : 722~970 kg/m³
- ③ 오일 점성 : 0.0013~5 Pa s (1.3 ~ 5000 cP)
- ④ 오일 표면장력 : 0.017~0.031 N/m
- ⑤ 기체 밀도 : 1.1~10.1 kg/m³
- ⑥ 기체 점성 : 17~27 η Pa s

나. 유동양식지도 수집

- 15개의 기존의 유동양식을 수집하고 이를 구축된 유동양식 데이터베이스와 비교함.

3. 직경 및 작동유체의 물성치가 유동양식에 미치는 영향

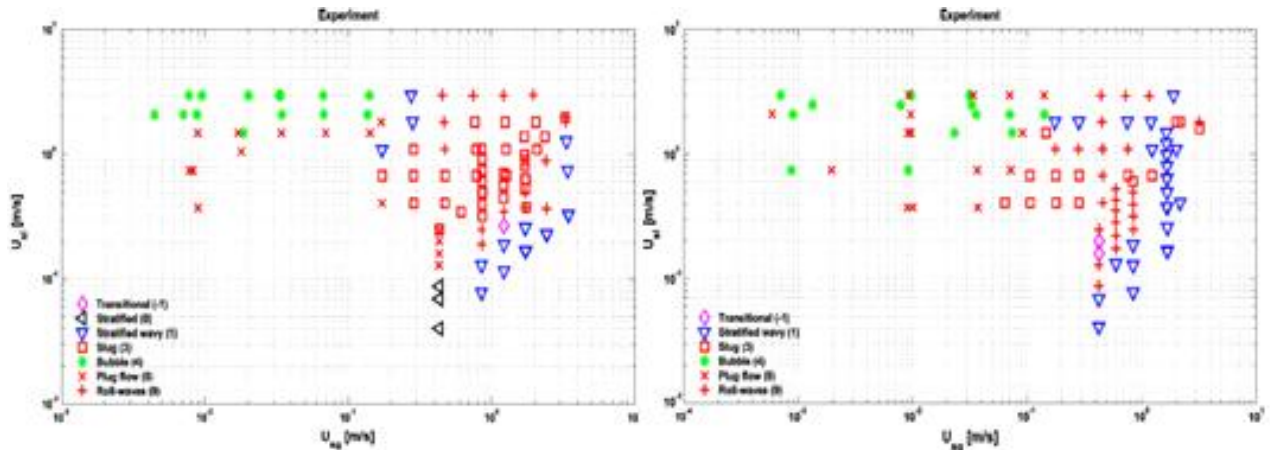
가. 관 직경이 유동양식에 미치는 영향



■ 그림 6.1 관 직경에 따른 유동양식 천이선, Taitel & Dukler(1976)(좌), Kong et al.(2018)(우) ■

- Taitel & Dukler(1976)와 Kong et al.(2018)은 관 직경이 유동양식의 천이선에 미치는 영향에 대하여 연구하였음. 관 직경이 변함에 따라 플러그 유동과 슬러그 유동 사이의 천이선과 성층유동과 파형유동 사이의 천이선이 달라짐을 확인할 수 있음. 이를 통해 본 연구 과제에서도 실험을 통해 서로 다른 직경에 대한 유동양식 실험데이터를 얻은 후, 이를 다상 유동양식 지도의 개발에 활용해야함을 인식하였음

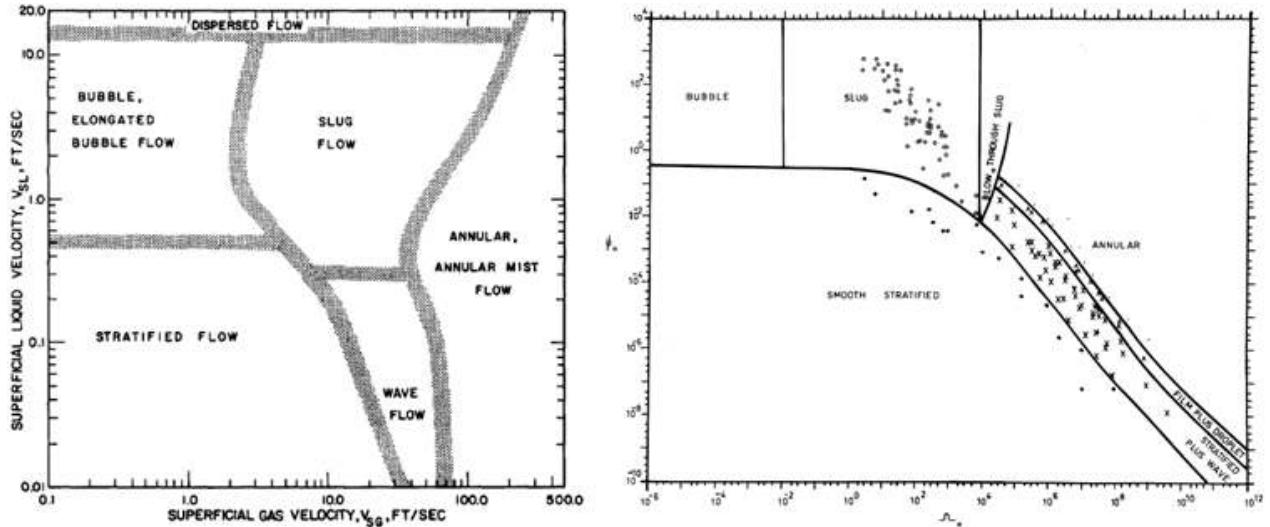
나. 오일의 점도, 공기의 밀도가 유동양식에 미치는 영향



■ 그림 6.2 오일의 점도에 따른 유동양식 변화(100 cp(좌), 32 cp(우)) ■

- Khaledi 등(2014)은 오일의 점도와 공기의 밀도에 따른 유동양식 변화를 나타내었음. 동일한 겉보기 속도일 때, 오일의 점도가 증가함에 따라, 공기의 밀도가 감소함에 따라 일부 파형유동이 슬러그 유동으로 나타남을 확인할 수 있음. 이를 통해 본 연구과제에서도 실험을 통해 다양한 오일의 점도 및 공기의 밀도에 대한 유동양식 실험데이터를 얻은 후, 이를 다상 유동양식 지도의 개발에 활용해야함을 인식하였음.

4. 관내 다상 유동양식 지도



■ 그림 6.3 유동양식지도 Mandhane 등(1974)(좌), Spedding 등(2005)(우) ■

- Mandhane 등(1974)은 직경 12.7-165.1 mm인 원관 내에 0.8-50.46 kg/m³의 밀도를 가진 기체와 0.3-90 cp의 점도를 가진 액체의 이상 유동양식의 데이터를 수집하였고, 총 5935개의 실험 데이터를 기반으로한 유동양식 지도를 제안하였음. 지도를 본 연구과제를 수행하면서 관찰했던 유동양식과 비교한 결과 성층유동과 파형유동을 잘 예측한 반면 플러그 유동과 슬러그 유동 사이의 천이 지점을 다르게 예측하였음. 이는 Mandhane 등(1974)의 유동양식 지도에 사용된 변수가 무차원화되지 않아 오일의 점도가 유동양식에 미치는 영향이 반영되지 않았기 때문으로 판단하였음. 이를 통해 무차원화된 유동양식 지도의 필요성을 인식하였음

- Spedding 등(2005)은 직경 25.9, 50.1 mm의 직경에 대해 공기-물 및 공기-오일 이상 유동양식에 대하여 실험을 진행하였고, 직경 19-779.2 mm인 원관에서 공기, 이산화탄소, 탄화수소 등의 기체와 2-116.4 cp의 점도를 가진 액체의 이상 유동양식의 데이터를 수집하여 무차원화 된 유동양식 지도를 제안하였음. 본 연구과제를 수행하면서 관찰했던 유동양식이 Spedding 등(2005)이 제안한 유동양식 지도를 통해 예측한 유동양식과 대체로 일치함을 확인하였고, 이는 지도의 무차원화된 좌표변수가 다양한 오일의 점도와 관 직경에 따라 나타나는 유동양식 특성을 잘 반영하였기 때문으로 판단하였음. 하지만 일부 파형유동 데이터를 환형유동으로 예측하였는데, 이를 통해 두 유동양식을 구분할 수 있는 유동양식 지도가 필요한 것으로 판단됨

5. 관내 다상 유동 마찰압력강하

- Lockhart와 Martinelli(1949)는 분리유동모델(Separated Flow Model)을 제안하였고, 단상에서의 압력구배에 이상 유동 계수(Two-Phase Multiplier)를 곱하여 이상 유동 마찰 압력강하를 예측할 수 있는 상관식을 개발하였음. Muller-Steinhagen과 Heck(1953)은 공기, 아르곤, 질소 등의 기체와 물, 냉매 및 오일 등의 액체의 이상 유동 마찰 압력강하에 대한 실험 데이터를 수집하였고, 단상에서의 마찰 압력구배와 유동 건도를 이용한 상관식을 제안하였음. 두 마찰 압력구배 상관식을 본 연구과제를 수행하면서 얻은 압력강하 실험값과 비교한 결과 두 상관식 모두 일부 슬러그 유동의 마찰 압력구배를 잘 예측하지 못하였고, 이를 통해 슬러그 유동 역학모델의 필요성을 인식하였음.

제7장. 연구개발성과의 보안등급

보안등급 분류	보안	일반
		√
결정 사유	「국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정」 제24조의4제1항에 근거함	

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

구입 기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입 가격 (천원)	구입처 (전화번호)	비고 (설치 장소)	NTIS장비 등록 번호

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

1. 교육 훈련

가. 개요

- 1) [연구실안전환경조성에 관한 법률]에 따라 안전교육은 월 1시간 이상 또는 6개월에 6시간 이상 실시하도록 규정되어 온라인 교육을 의무적으로 받고 있으며 대학원 신입생은 별도로 2시간 오프라인 교육을 받고 있다.

나. 교육대상

- 1) 학부생, 대학원생, 연구원, 소속 연구원, 외부연구기관 등

다. 교육 이수과정

- 1) 강의 목록 : 연구실안전, 연구실안전 수칙 및 사고 시 행동요령, 화학안전, 화학사고 시 대응요령, 가스 안전, 사고사례

2. 건강검진

- 가. 건강검진은 학교보건법에 의거 본교 건강센터에서 주관하며 매년 학부생 및 대학원생을 대상으로 건강검진을 실시되고 있음.

3. 본 연구실의 추가 안전관리 내용

- 가. 본연구실은 화재에 대비하기 위해 소화기를 비치해 두었으며 실험복, 보호장갑, 보호안경 등을 구비함으로써 안전사고에 대비하고 있다.
-

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

구분 번호 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/ 기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
논문	매크로채널 내 공기-오일 파형유동의 액체부피비와 경계면 전단응력에 관한 실험적 연구	성균관 대학교 산학협 력단	주저 자	대한기계학 회 논문집 B권		2018.8	단독	일반학술지
논문	매크로 채널 내 단열 공기-오일 이상 유동의 슬러그 유동 특성에 관한 수치해석적 연구	성균관 대학교 산학협 력단	주저 자	대한기계학 회 논문집 B권		2018.10	단독	일반학술지
논문	수평 원관 내 공기-오일 이상 유동양식과 마찰 압력강하에 관한 실험적 연구	성균관 대학교 산학협 력단	주저 자	KSFM(한국 유체기계학 회 논문집)		2018.10	단독	일반학술지
논문	수평 원관 내 공기-오일 플러그 유동의 역학 모델 개발	성균관 대학교 산학협 력단	주저 자	KSFM(한국 유체기계학 회 논문집)		2018.12	단독	일반학술지
논문	Experimental Investigation of Flow and Pressure Drop Characteristics of Air-Oil Slug Flow in a Horizontal Tube	성균관 대학교 산학협 력단	주저 자	Journal of Petroleum Science and Engineerin g	2.382	심사중	단독	SCI(E)
논문	Flow Characteristics of a Solid-Liquid Non-Newtonian Fluid for Directional Drilling	성균관 대학교 산학협 력단	주저 자	Journal of Nanoscienc e and Nanotechn ology	1.354	심사중	중복	SCI(E)
논문	Two-Dimensiona l Two-Fluid Model for Air-Oil Wavy Flow in Horizontal Tube	성균관 대학교 산학협 력단	주저 자	Journal of Mechanical Science and Technology	1.194	심사중	단독	SCI(E)
논문	Numerical Study on Cooling Performance of Hybrid Micro-Channel/ Micro-Jet-Impin gement Heat Sink	성균관 대학교 산학협 력단	주저 자	Journal of Mechanical Science and Technology	1.194	심사중	단독	SCI(E)
논문	Experimental Investigation of Thermal Performance of Phase Change Material Based Cylindrical Heat Sink for Electronics Cooling	성균관 대학교 산학협 력단	주저 자			투고예정	단독	SCI(E)

	논문	Two-Phase Flow Regimes in Mini/Micro-Channels - Part 2: Development of Generalized Flow Regime Map	성균관대학교 산학협력단	주저자			투고예정	단독	SCI(E)
	논문	Numerical Investigation of Air-Oil Intermittent Flow in Horizontal Tube	성균관대학교 산학협력단	주저자			투고예정	단독	SCI(E)
	특허	유체 혼합 장치	성균관대학교 산학협력단	발명자	대한민국		2018.03.28. (출원일)	단독	등록 진행중
	특허	기체-오일 분리기	성균관대학교 산학협력단	발명자	대한민국		2018.06.01 (출원일)	단독	등록 진행중
	특허	스태틱 믹서	성균관대학교 산학협력단	발명자	대한민국		2018.07.31 (출원일)	단독	등록 진행중
	특허	개도 상태를 확인할 수 있는 게이트 밸브	성균관대학교 산학협력단	발명자	대한민국		2018.07.31 (출원일)	단독	등록 진행중
	특허	방열기	성균관대학교 산학협력단	발명자	대한민국		2018.09.05 (출원일)	단독	등록 진행중
	프로그램	Multiphase Simulator (다상유동 시뮬레이터)	성균관대학교 산학협력단	발명자	대한민국		2018.12.21	단독	
	프로그램	Multi-Phase flow prediction programe (다상유동 예측 프로그램)	성균관대학교 산학협력단	발명자	대한민국		2018.12.21	단독	

제11장. 기타 사항

1. 양적 성과 목표달성 계획

1) SCI(E)급 학술지 게재

- 성과목표 4건/ 달성성과 1건(게재 승인), 3건(심사중)은 과제종료 후 1차년도(2019)에 심사완료 후 학술지 게재를 목표로 함, 추가 3건(투고예정)은 과제종료 후 1차년도 상반기 투고 예정, 과제종료 후 1차년도에 1건 이상 게재를 목표로 함

번호	구분 (논문/특허/ 기타)	논문명/특허명/기타	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일
1	논문	Two-Dimensional Two-Fluid Model for Air-Oil Wavy Flow in Horizontal Tube	주저자	Journal of Mechanical Science and Technology	1.194	게재 승인 (accepted for publication)
2	논문	Experimental Investigation of Flow and Pressure Drop Characteristics of Air-Oil Slug Flow in a Horizontal Tube	주저자	Journal of Petroleum Science and Engineering	2.382	심사중
3	논문	Flow Characteristics of a Solid-Liquid Non-Newtonian Fluid for Directional Drilling	주저자	Journal of Nanoscience and Nanotechnology	1.354	심사중 (minor revision)
4	논문	Numerical Study on Cooling Performance of Hybrid Micro-Channel/Micro-Jet-Impingement Heat Sink	주저자	Journal of Mechanical Science and Technology	1.194	심사중 (major revision)
5	논문	Experimental Investigation of Thermal Performance of Phase Change Material Based Cylindrical Heat Sink for Electronics Cooling	주저자			투고예정
6	논문	Two-Phase Flow Regimes in Mini/Micro-Channels - Part 2: Development of Generalized Flow Regime Map	주저자			투고예정
7	논문	Numerical Investigation of Air-Oil Intermittent Flow in Horizontal Tube	주저자			투고예정

2) 특허 등록

- 성과목표 1건/ 달성성과 0건 : 특허 출원 5건 모두 등록 진행 중, 과제종료 후 1차년도(2019)에 1건 이상 등록완료를 목표로 함

2. 후속 연구 수행

- 1) 후속 연구 수행 시 본 연구에서 검증한 직경 2~7.8cm, 압력 1~3bar, 온도 25~45도 뿐만 아니라 최종환경과 유사한 상태에서 사용가능한 유동 예측 프로그램을 개발하기 위해 더 큰 직경(20~80cm)의 파이프와 높은 압력조건 및 극한의 온도 조건 등을 고려한 추가적인 실험이 필요하며 또한 실제 현장에서 측정된 데이터를 수집해 본 연구의 진행 방향과 같이 역학 모델 개발 및 유동 양식 지도를 개발하면 프로그램의 개선이 가능함.
- 2) 본 프로그램은 실험실 수준의 조건에서 실제 상용화된 프로그램보다 높은 정확도를 보였음. 따라서 더 넓은 환경조건에서의 실험 데이터가 수집된다면 본 과제에서 수행한 연구과정을 통해 기존 상용화된 프로그램 보다 향상된 다상 유동 예측 프로그램의 국산화가 가능할 것으로 예상됨

제12장. 참고 문헌

- Kokal, An experimental study of two phase flow in inclined pipes, (1987)
 - Lu, Experimental and computational study of two-phase slug flow, (2015)
 - Abdul-Majeed, Liquid holdup in horizontal two-phase gas-liquid flow, (1996)
 - Abdulkadir 등, Experimental study of the hydrodynamic behavior of slug flow in a horizontal pipe, (2016)
 - Viana, Liquid entrainment in gas at high-pressures, (2017)
 - Meng, Low liquid loading gas-liquid two-phase flow in near-horizontal pipes, (1999)
 - Brito 등, Effect of medium oil viscosity on two-phase oil-gas flow behavior in horizontal pipes, (2013)
 - Al-safran, An experimental and theoretical investigation of slug flow characteristics in the valley of a hilly-terrain pipeline, (2003)
 - Chen 등, Gas-liquid stratified-wavy flow in horizontal pipelines, (1997)
 - Mattar, Slug flow uphill in an inclined pipe, (1973)
 - Aziz 등, Some observations on the motion of elongated bubbles in horizontal pipes, (1974)
 - Farsetti 등, Experimental investigation of high viscosity oil-air intermittent flow, (2014)
 - Zhao 등, Slug frequency in high viscosity liquid and gas flow in horizontal pipes, (2013)
 - Chupin, An experiment investigation of multiphase gas-liquid pipe flow at low liquid loading, (2003)
 - Soldati 등, Identification of two phase flow regimes via diffusional analysis of experimental time series, (1996)
 - Yi-ping 등, Gas-liquid interfacial friction factor for the transition from stratified to slug flow, (2008)
 - Minami와 Brill, Liquid holdup in wet-gas pipelines, (1987)
 - Taitel and Dukler A Model for Predicting Flow Regime Transitions in Horizontal and Near Horizontal Gas-Liquid Flow, (1976)
 - Kong 등 Effects of pipe size on horizontal two-phase flow: Flow regimes, pressure drop, two-phase flow parameters, and drift-flux analysis, (2018)
 - Khaledi 등, Investigation of two-phase flow pattern, liquid holdup and pressure drop in viscous oil-gas flow, (2014)
 - Mandhane 등, A Flow Pattern Map for Gas-Liquid Flow in Horizontal Pipes, (1974)
 - Spedding 등, Three Phase Oil-Water-Gas Horizontal Co-Current Flow I. Experimental and Regime Map, (2005)
 - Lockhart and Martinelli, Proposed Correlation of Data for Isothermal Two-Phase, Two-Component Flow in Pipes, (1949)
 - Muller-Steinhagen and Heck, A Simple Friction Pressure Drop Correlation for Two-Phase Flow in Pipes, (1986)
 - Mukherjee, An experimental study of inclined two-phase flow, (1979)
-

주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통촉진사업의 연구보고서입니다.
2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구개발성과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.