보안 과제( ), 일반 과제(○) / 공개(○), 비공개( ) / 발간등록번호( )

국토교통기술촉진연구사업 제3차 연도 최종보고서

R&D/17CTAP-C095650-03

극한 도심홍수 방어를 위한 최적 수리성능 대심도터널 (왕복 4차선 이상) 원천 설계 기술 개발

최종보고서

2018. 12. 25.

주관연구기관 / 한국건설기술연구원
공동연구기관 / 교토대학교 방재연구소
창원대학교 산학협력단

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

Ministry of Land Infrastructure and Transport R&D Report

제 출 문

국토교통과학기술진흥원 귀하

'극한 도심홍수 방어를 위한 최적 수리성능 대심도터널(왕복 4차선 이상) 원천설계기술 개발'(연구개발 기간 : 2015. 6.~2018. 12.) 과제의 최종보고서 10부를 제출합니다.

2018. 12. 25.

주관연구기관명 : 한국건설기술연구원 (대표자) 한 승 헌 (인)

공동연구기관명 : 교토대학교 방재연구소 (대표자) Tsuchida Hidehiro (인)

공동연구기관명 : 창원대학교 산학협력단 (대표자) 박 경 훈 (인)

주관연구기관책임자 : 이 동 섭
공동연구기관책임자 : Kawaike Kenji
공동연구기관책임자 : 류 시 완

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라
최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제고유번호</td><td>17CTAP-C095650-03</td><td>해당단계 연구기간</td><td>2017.4.26~ 2018.12.25.</td><td>단계구분</td><td>3/3</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구사업명</td><td>중사업명</td><td colspan="4">국토교통기술촉진연구사업</td></tr>
<tr><td>세부사업명</td><td colspan="4">글로벌기술협력분야</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구과제명</td><td>대과제명</td><td colspan="4">극한 도심홍수 방어를 위한 최적 수리성능 대심도터널
(왕복 4차선 이상) 원천 설계 기술 개발</td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="4">-</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구책임자</td><td rowspan="2">이동섭</td><td>해당단계 참여 연구원 수</td><td>총: 12명
내부: 5명
외부: 7명</td><td>해당단계 연구개발비</td><td>정부: 455,000천원
기업: 천원
정부 외: 천원
계: 455,000천원</td></tr>
<tr><td>총 연구기간 참여 연구원 수</td><td>총: 20명
내부: 7명
외부: 13명</td><td>총 연구개발비</td><td>정부: 839,000천원
기업: 천원
정부 외: 천원
계: 839,000천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및 소속 부서명</td><td colspan="3">한국건설기술연구원
복합재난대응연구단</td><td colspan="2">참여기업명 :</td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="3">상대국명 : 일본</td><td colspan="2">상대국 연구기관명 :
교토대학교 방재연구소</td></tr>
<tr><td>위탁연구</td><td colspan="3">연구기관명: University of Dundee</td><td colspan="2">연구책임자 : 박용성</td></tr>
</table>

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 갈음

요약

- 고효율 지하유입시설에 의한 대심도터널 최적 수리성능 확보
  - 안정 와류 유도 신형 유입구 설계기술
  - 수직갱 내부 질식(choking) 방지 및 공기 배출을 고려한 유입효율 개선
  - 수충부 충격량 저감 감세기술 개발 및 공동현상에 의한 구조물 파손 방지
- 대심도터널의 수리현상 및 침수피해 감소 효과에 대한 수치해석 기법
  - 1차원 이상류 흐름 모형 개발
  - 2차원 이상류 흐름 모형 개발
  - 지표수 수치모형 연계 및 침수피해 감소 효과 분석
- 흐름안정화를 통한 대심도터널 수리성능 개선
  - 대심도터널 내부 이상류 거동 메커니즘 구명
  - 이상류 거동 실험 검증을 통한 이상류 해석기법 개발
  - 대심도터널 수리성능 개선기법 및 공기거동 제어기법

보고서 면수

172 pages

요약문

연구의 목적 및 내용	본 연구과제는 수재해 예방 목적으로 현재 수도권 등에서 계획 중인 대심도터널의 수리학적 성능 개선을 위한 국내 원천 기술을 개발하고, 대심도터널 설계 시 이를 이용한 국내기술의 적용성 향상을 목적으로 함 • 수리모형실험을 이용한 유입구 형상에 따른 수직갱(drop shaft) 내부 흐름특성 분석으로 공기 배출 및 공기공동(air-core) 형상을 파악하고, 유입구 통수능력 증대 설계기술 적용을 통해 고용량, 고효율 신형 유입구 설계기술을 개발 - 선진 연구사례와 수리모형실험을 이용한 유입구 흐름능력 분석으로 신형 유입구 형상을 제안 - 유입구 형상에 따른 수직갱 내부 흐름특성과 공기공동 형상 분석(질식 방지 기술) - 수직갱 하단 접합부 감세기술 개발을 통한 충격량 감소 효과 분석(접합부 흐름 손실 최소화) • 대심도터널의 설계 및 운영을 위한 흐름 해석모형 개발 - 1차원, 2차원 대심도터널 이상류(two-phase flow) 흐름 모형 개발 - 검보정을 통한 대심도터널 이상류 흐름 모형의 정확도 개선 - 지표수 수치모형과 이상류 흐름 모형의 연계(테스트베드를 적용한 도심지 침수특성 고려) • 잔류공기 제어를 통한 터널계통 내 흐름 안정화 및 수리성능 개선 기술 개발 - 대심도터널 내부 공기거동 메커니즘 구명 및 이상류 거동에 대한 수리모형실험과 검증 - 터널 내부 잔류공기 포획 및 압축과정, 서지(surge)에 의한 수직갱 내부 공기 압축과정, 수직갱을 통한 압축공기의 분출(geysering) 현상 구명 - 공기배출구와 유입부 등, 터널계통 내부에서의 유동특성 평가를 통한 공기거동 제어 최적안 도출 - 터널계통의 규격, 배치에 따른 공기유동과 이상류 흐름 안정화를 통한 수리성능 개선기법 개발
연구개발성과	• 고효율 지하유입시설에 의한 대심도터널 최적 수리성능 확보 - 안정 와류 유도 신형 유입구 설계기술 - 수직갱 내부 질식방지 및 공기 배출을 고려한 유입효율 개선 - 흐름 손실 최소화 접합부 설계기술 • 대심도터널의 수리현상 및 침수피해 감소 효과에 대한 수치해석 기법 - 1차원 이상류 흐름 모형 개발 - 2차원 이상류 흐름 모형 개발 - 대심도터널 흐름 해석모형 및 지표수 수치모형 연계를 통한 침수피해 감소 효과 분석 • 흐름 안정화를 통한 대심도터널 수리성능 개선 - 대심도터널 내부 이상류 거동 메커니즘 구명 - 이상류 거동 실험 검증을 통한 이상류 해석기법 개발 - 대심도터널 수리성능 개선기법 및 공기거동 제어기법
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	• 국내 대심도터널 사업의 경우, 지하유입시설 설계에 관한 기반기술이 없어 미국과 일본 기술에 의존해 설계를 진행하고 있으며, 관련 국내기술 종속이 심화되고 있는 상황으로 본 연구를 통해 국내기술의 개선과 기술적 독립이 가능 • 대심도터널의 특성이 고려된 터널 설계/시공/유지관리 기술 개발로 침수피해 예방 및 관련 소요예산 절감 가능 • 대심도터널의 수리학적 설계를 위한 기술 개발 및 검증에는 많은 예산과 시간이 필요하며, 본 연구성과를 기초로 민간기업과 정부 등, 협업을 통한 기술 개발을 유도해 경제적 활성화 효과를 줄 수 있음 • 수재해 예방을 위한 대심도터널에 대한 국외투자가 늘어나고 있지만, 전 세계적으로 축적된 기술이 부족한 상태이며, 원천 기술의 개발이 필요함에 따라 본 연구를 통해 국가 차원의 기술적 성과 달성이 가능

국문핵심어 (5개 이내)	도심홍수	홍수방어	대심도터널	이상류	설계기술
영문핵심어 (5개 이내)	Urban inundation	Prevention of flooding	Great-depth tunnel	Two-phase flow	Design technique

〈 목 차 〉

제1장. 연구개발과제의 개요 ····· 5

1. 연구개발 목적 ····· 5

2. 연구개발의 필요성 ····· 5

3. 연구개발 범위 ····· 8

제2장. 연구수행내용 및 성과 ····· 12

1. 연구개발의 추진전략 및 방법 ····· 12

2. 연구개발 추진체계 ····· 13

3. 연구개발 추진 일정 ····· 14

4. 연구수행 내용 ····· 15

5. 연구개발 성과 ····· 164

6. 연구결과 ····· 169

제3장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 ····· 170

1. 목표 달성도 ····· 170

2. 관련 분야 기여도 ····· 171

제4장. 연구개발성과의 활용계획 ····· 172

1. 기술 실용화 및 사업화 추진 방안 ····· 172

2. 기술 실용화 및 사업화의 기대효과 ····· 173

붙임. 참고 문헌 ····· 174

<별첨> 주관연구기관의 자체평가 의견서

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

○ 본 연구과제의 최종목표는 도심지 수재해 예방을 위해 현재 수도권 등에서 계획 중인 대심도터널의 수리학적 성능 향상을 위한 국내 원천 설계기술 개발을 목표로 함(그림 1.1)

- 1세부과제 : 고효율 지하유입시설에 의한 대심도터널 최적 수리성능 확보 기술 개발
- 2세부과제 : 대심도터널의 수리현상과 침수피해 감소 효과에 대한 수치해석 기술 개발
- 3세부과제 : 대심도터널 내 흐름 안정화를 통한 수리성능 개선 기술 개발

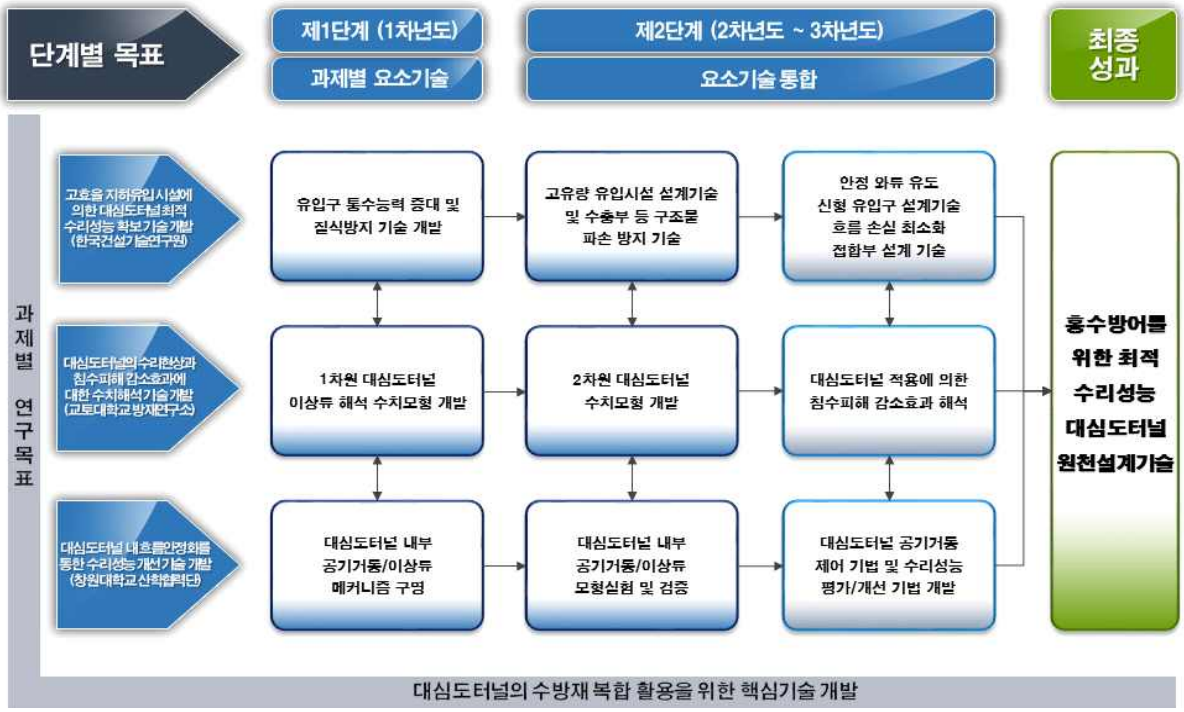


그림 1.1 연구과제 최종목표

2. 연구개발의 필요성

○ 최근 급격한 기후변화와 잦은 집중호우로 인해 지난 112년(1901~2012년)간 지구 평균 기온이 0.89℃ 상승(IPCC, 2014), 국내의 경우 시간당 30 mm 이상의 집중호우가 1980년대 60회에서 2011년 133회로 121% 증가(기상청, 2011)

○ 과거 홍수피해의 주요 원인은 하천 주변 범람과 제방 붕괴였으나, 최근에는 급격한 도시화로 인한 불투수 면적의 증가와 배수시설의 용량 부족으로 집중된 강우를 감당하지 못해 도심이 물에 잠기는 도심홍수(urban inundation)로 피해 양상이 변화

○ 1993~2003년 전국 상습 수해지구의 피해 발생원인 조사 결과, 하천범람에 의한 침수는 27%, 도심홍수는 73%로 대부분 도심홍수로 인한 피해가 발생(강상준과 이양주, 2011)

○ 서울시의 홍수 피해액이 1965~1980년 약 2,867억 원에서 1981~2010년 9,983억 원으로 약 3.5배 증가, 홍수 시 도시지역의 표면유출량 증가로 서울시 침수피해가 대형화(그림 1.2)

○ 건설교통 R&D 중장기계획(2013~2017년)에 따르면 건설교통 분야의 사회·경제적 요구(needs)에 대한 전문가 설문 조사 결과, 4가지 대분류 중 '재난 대비 및 안전 보장 사회 구현'을 위한 '수해의 예방 및 피해 최소화'가 가장 시급(그림 1.3)

그림 1.2 2010년 세종로 침수피해(좌), 2011년 사당역 침수피해(우)



그림 1.3 건설교통 분야 사회·경제적 요구(needs)에 따른 중요도(국토교통부, 2012)

- ‘지구온난화 및 기후변화에의 효과적 대응’도 높은 중요도를 나타내고 있으며, 기후변화로 인한 수재해 예방 및 도심지역 침수피해 최소화는 사회·경제적 요구의 중요도가 매우 높은 분야로 적극적인 대처가 필요
- 홍수방어용 대심도터널은 도심지역의 침수피해 저감 목적으로 지상저류시설 설치를 위한 공간 확보의 어려움을 극복할 수 있고, 기존 배수시설의 용량 증설 및 배수시스템 개선 시 발생하는 공간적 제약 등, 여러 사회적 문제를 해결할 방안으로 급부상
- 홍수방어용 대심도터널은 초기 홍수량을 분담해 홍수피해의 잠재적 위험성을 완화할 수 있고, 설계 방법에 따라 도시 미관을 증진할 수 있으므로 홍수피해 저감의 실용적인 방안으로 외국에서 활용 사례가 증가
- 2010년, 2011년 도심홍수 대책의 하나로 서울시 양천구 신월동에 신월빗물저류배수시설 건설을 추진하였으나, 실제로 적용/운영된 사례가 없어 관련 설계기술이 부족하고 대심도터널 설계에 대한 기반기술이 국내에 없어 대부분 미국과 일본 기술에 의존해 설계를 진행(국내기술 종속 심화)
- 대심도터널에 대한 기반기술 개발이 이루어지지 않을 경우, 향후 미국과 일본 등에 국내시장 또는 기술 잠식이 크게 우려되는 상황으로 대심도터널에 의한 홍수피해 감소 효과 분석 및 설계기술의 국내 개발 필요

○ 미국과 말레이시아의 경우, 홍수방어용 대심도터널과 지하저류시설을 활용한 재해관리 방안을 이미 활용하고 있으며, 최근 국내에서도 치수계획 수립 시 홍수방어용 대심도터널 및 지하저류시설 도입을 고려하고 있음

○ 일본의 경우, 도쿄 외곽에 홍수방어용 대심도터널이 건설되기 이전인 2000년에 발생한 160 mm/hr의 호우로 137 ha의 248가구가 침수되었지만, 건설 중이던 2004년의 199 mm/hr 호우에는 73 ha의 126가구, 건설 후인 2006년의 177 mm/hr 호우에는 33 ha의 85가구만이 침수된 것으로 나타나 홍수방어에 대한 대심도터널의 능력이 우수한 것으로 확인됨

○ 일반적으로 대심도터널은 홍수가 발생하기 전에 비어있는 상태로 존재하며, 터널 내 공기는 홍수의 유입에 의해 이동되어야 하지만, 급격한 유입 발생 시 물-공기 상호작용 때문에 문제가 발생할 수 있음

○ 급격한 유입 발생 시 공기 유입과 함께 터널 내 에어 포켓(air poket)이 형성되어 터널 내 흐름을 악화시킬 수 있으며(Martin, 1976; Zhou et al., 2002), 유입부 또는 공기배출구를 통한 갑작스런 방출은 분출(geysering) 현상을 유발(Wright et al., 2011)

○ 대심도터널의 구조적 특성으로 인해 홍수 시 흐름이 지하공간으로 급격하게 유입되며 유입흐름 내부에 기체가 공존, 공기 유입 및 처리에 관한 물-공기 이상류(two-phase flow)에 대한 제어기술 연구 필요

○ 이상류는 액체와 기체 간의 밀도, 점성 등의 물성치와 유입구의 형상 등 다양한 조건에 의해 흐름특성이 달라지고, 액체와 기체 간의 상호작용으로 인한 경계면에서의 형상 변화 및 전달 현상이 매우 복잡

○ 터널 내 복잡한 거동특성을 분석하기 위해 적용할 수 있는 대부분의 수치 모델은 단상(single-phase)유형 이며, 공기 이동을 고려하지 않고 물의 흐름만 고려함(Cunge and Wegner, 1964; Song et al., 1983; Politano et al., 2007).

○ 극히 제한적인 경우를 제외하면 지배방정식을 기반으로 한 수학적 해석으로는 이상류와 관련된 변수들의 정량화가 불가능하기에 이론적 해석과 더불어 실험적 연구의 병행이 필요

○ 지하공간 내 취약부(수직갱 하단, 터널 접합부 등) 안전 확보를 위한 설계방안 검토가 필요하며, 터널 내 도로를 구성하기 위한 취약부 안전 확보를 위해 관련 기준 검토 및 보완 필요

○ 서울 양천구, 경남 창원 등 도심홍수 피해가 잦거나 우려가 큰 지자체에서 지하공간을 활용한 홍수피해 저감 사업 계획을 추진하고 있어 향후 관련 기술수요가 크게 성장할 것으로 예상

○ 최근 발생한 도심홍수 및 침수의 대표적인 사례가 서울 및 수도권에 집중되어 있으며, 그 피해는 경제적인 문제뿐 아니라 국가 경쟁력 및 안보와도 밀접한 관련이 있으므로 정부 차원의 기술 개발과 연구비 투자, 인력양성이 필요

○ 대심도터널의 수리학적 핵심 설계기술을 확보함으로써 국내 건설회사와 설계회사의 해외 물관리 시장 진출의 기회를 넓힐 수 있음

○ 도심지 수재해 예방을 위한 국외투자가 늘어날 것으로 예상하며, 현재까지 전 세계적으로 축적된 기술이 부족한 대심도터널의 설계기술 개발을 목표로 하는 본 연구과제의 성과 달성을 위해 정부 차원의 지원과 관계 기관의 협조가 필요

3. 연구개발 범위

가. 고효율 지하유입시설에 의한 대심도터널 최적 수리성능 확보 기술 개발

- ○ 안정 와류 유도 신형 유입구 설계기술 개발 및 흐름손실 최소화 접합부 설계기술
- ○ 수리모형실험을 통한 유입구 흐름특성 파악 및 유입구 형상별 적용성 분석
- ○ 수직갱 내부 질식(choking)방지, 유입구 공기 배출, 낙차에너지 저감을 고려한 유입효율 개선
- ○ 유입구 형상에 따른 수직갱 내부 공기공동(air-core) 형상 및 공기 배출 효과 분석
- ○ 수충부 충격량 저감 및 공동현상에 의한 구조물 파손 방지 기술
- ○ 설계유량 최대 100 ㎥/s 범위에 대해 안전한 고용량 유입시설 설계기술

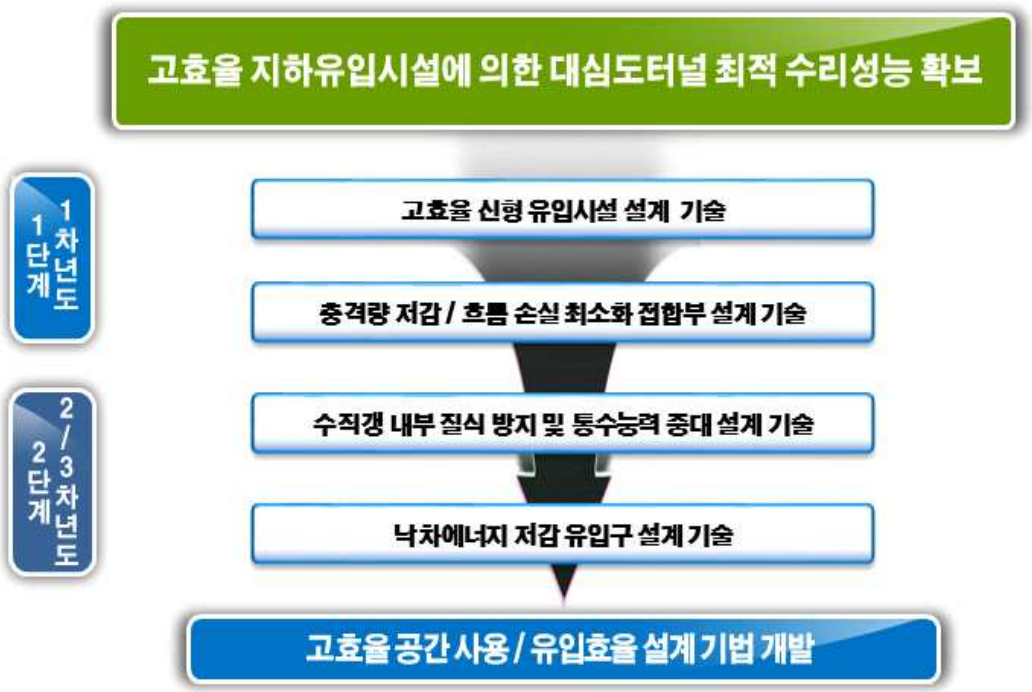


그림 1.4 1세부과제 연구개발 범위

(1) 연차별 연구개발 범위

표 1.1 1세부과제 연차별 연구목표 및 주요연구내용

연차	연구목표	주요연구내용
1차년도	• 고효율 지하유입시설에 의한 대심도터널 최적 수리성능 확보 · 유입구 공기 배출을 고려한 유입효율 개선 · 수직갱 내부 질식방지 기술	- 와류식 유입구(나선식, 접선식 등) 형상 및 적용성 분석 - 수리모형실험을 통한 유입구 흐름특성 파악 - 유입구 형상에 따른 수직갱 내부 공기공동(air-core) 형상 파악 - 유입구 형상에 따른 수직갱 내부 공기 배출 효과 분석
2차년도	• 고효율 지하유입시설에 의한 대심도터널 최적 수리성능 확보 · 고용량(100 ㎥/s) 유입시설에 대한 수리학적 설계기술 · 수충부 충격량 저감 설계기술	- 유입구 형상에 따른 유입효율 검토 및 평가 - 유입유량 변화에 따른 수직갱 하단 충격량 변화 분석 - 감세기술 적용에 따른 수충부 충격량 감소 효과 분석 - 충격량 최소화를 위한 구조물 및 부품 개발
3차년도	• 고효율 지하유입시설에 의한 대심도터널 최적 수리성능 확보 · 흐름 손실 최소화 접합부 설계기술 · 안정 와류 유도 신형 유입구 설계기술	- 기존 유입구 흐름특성 검토에 기반한 신규 안정 와류 유도 유입구 형상 제안(관련 설계기술 개발) - 고효율 공간사용/유입효율 유입구 설계기법 개발 - 흐름 손실 최소화를 위한 접합부 수리학적 특성 분석

나. 대심도터널의 수리현상과 침수피해 감소 효과에 대한 수치해석 기술 개발

○ 1차원, 2차원 대심도터널 이상류 흐름 해석모형 개발

○ 실험결과를 이용한 대심도터널 이상류 흐름 해석모형 정확도 개선

○ 지표수 수치모형 및 이상류 흐름 해석모형 연계

○ 대심도터널 적용에 의한 침수피해 감소 효과 분석(서울지역 1개 후보지 대상)

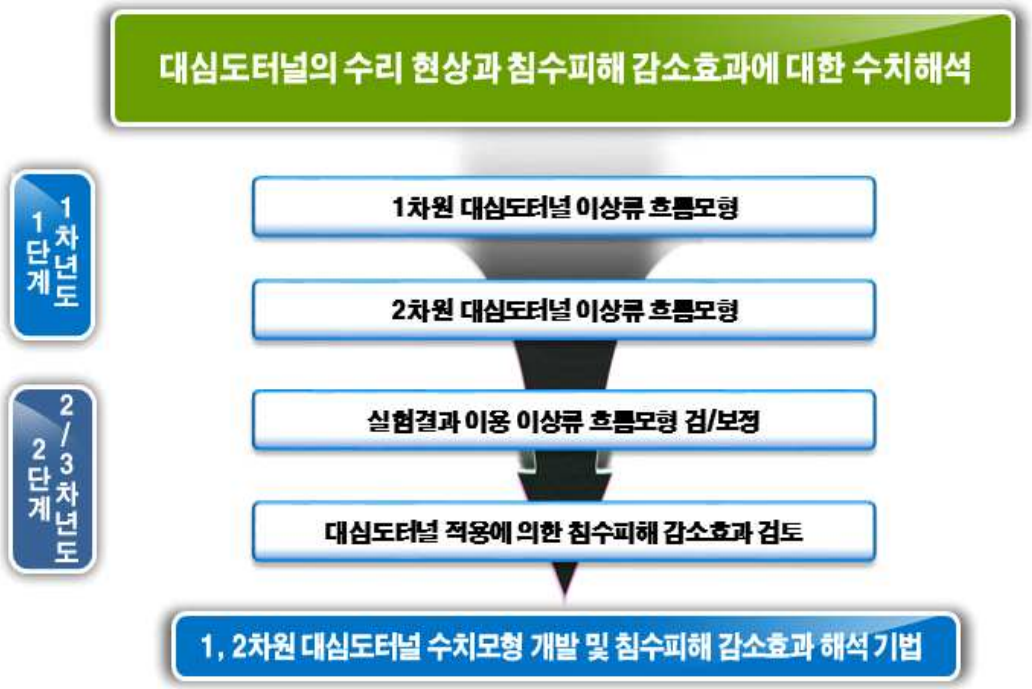


그림 1.5 2세부과제 연구개발 범위

(1) 연차별 연구개발 범위

표 1.2 2세부과제 연차별 연구목표 및 주요연구내용

연차	연구목표	주요연구내용
1차년도	• 대심도터널의 수리현상과 침수피해 감소 효과에 대한 수치해석 ·1차원 대심도터널 이상류 흐름 모형 개발 ·2차원 대심도터널 이상류 흐름 모형 개발(I)	- 관련 문헌 검토 - 1차원 이상류 흐름 모형 기본 코드 개발 - 2차원 이상류 흐름 모형 기본 코드 개발(I)
2차년도	• 대심도터널의 수리현상과 침수피해 감소 효과에 대한 수치해석 ·2차원 대심도터널 이상류 흐름 모형 개발(II) ·1차원, 2차원 이상류 흐름 모형 검보정 ·지표수 수치모형 및 이상류 흐름 모형 연계(I)	- 2차원 이상류 흐름 모형 기본 코드 개발(II) - 대심도터널 적용을 위한 후보지(서울 사당 또는 강남) 지형자료 구축 - 지표수 수치모형 및 이상류 흐름 모형 연계 코드 개발(I)
3차년도	• 대심도터널의 수리현상과 침수피해 감소 효과에 대한 수치해석 ·지표수 수치모형 및 이상류 흐름 모형 연계(II) ·대심도터널 적용에 의한 침수피해 감소 효과 검토	- 실험결과를 이용한 대심도터널 이상류 흐름 모형 검/보정 - 지표수 수치모형 및 이상류 흐름 모형 연계 코드 개발(II) - 대심도터널 적용에 의한 침수피해 감소 효과 검토(서울지역 후보지 대상) - 다양한 위치 조건 및 시설 규모에 대한 검토

다. 대심도터널 내 흐름 안정화를 통한 수리성능 개선 기술 개발

- ○ 대심도터널 내부 공기거동(포획 및 압축, 분출 등) 메커니즘 구명 및 해석모형 구성
- ○ 기존 수치모형을 이용한 공기거동 수치모의 및 수리모형실험
- ○ 이상류 거동 메커니즘 구명 및 이상류 해석기법 개발
- ○ 이상류 거동 수리실험을 통한 이상류 해석기법 검증
- ○ 공기거동 제어기법 개발 및 흐름 안정화를 통한 터널 수리성능 개선 기술 개발
- ○ 대심도터널 수리성능 평가 및 개선기법 개발

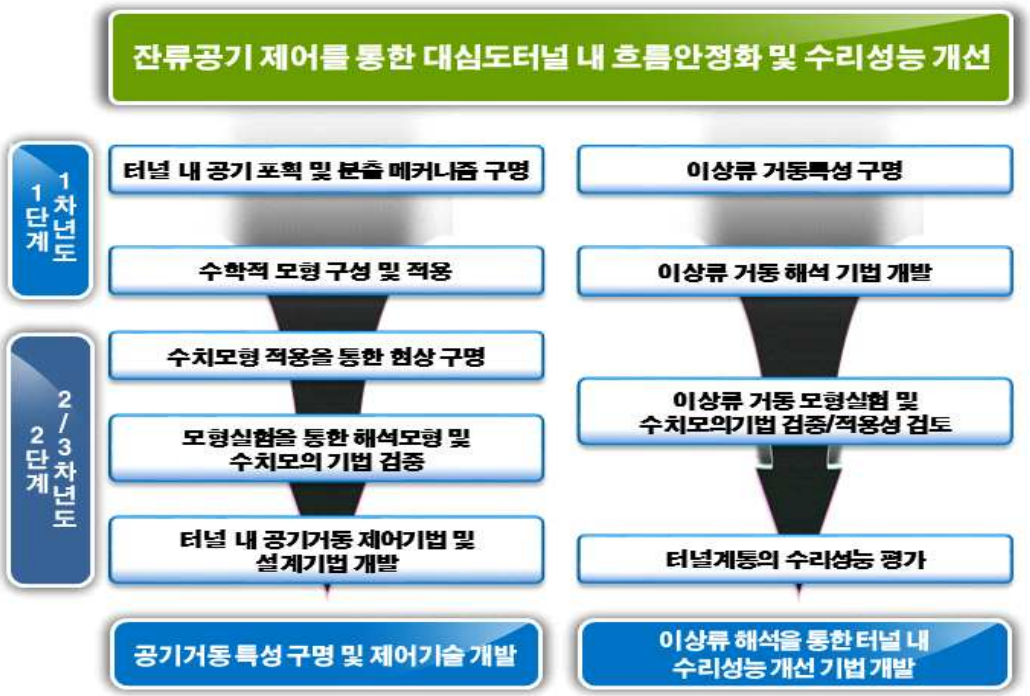


그림 1.6 3세부과제 연구개발 범위

(1) 연차별 연구개발 범위

표 1.3 3세부과제 연차별 연구목표 및 주요연구내용

연차	연구목표	주요연구내용
1차년도	• 흐름 안정화를 통한 대심도터널 수리성능 개선 기술 개발 · 대심도터널 내부 공기거동 메커니즘 구명 · 대심도터널 내부 공기거동 해석모형 구성 · 이상류 거동 메커니즘 구명 · 수치모형을 이용한 이상류 해석기법 개발	◦ 대심도터널 계통에서 발생하는 역사이펀(invert siphon) 메커니즘 구명 - 터널 내부 잔류공기 포획 및 압축과정 - 서지(surge)에 의한 수직갱 내부 공기 압축과정 ◦ 터널 내부 잔류공기와 유입수의 혼합 거동 메커니즘 구명 - 물-공기 이상류의 거동특성 구명 - 자유수면흐름 및 압력흐름 천이와 관로 조건과의 상관관계 분석 ◦ 터널 내 이상류 거동에 대한 수치모의 - 수층상부에 공기층이 완전히 분리되는 이층류와 압력흐름이 혼재하는 터널 내부 이상류 유동에 대한 수치모의기법 검토 - 이상류 거동에 대한 수치모형의 적용성 검토

표 1.4 3세부과제 연차별 연구목표 및 주요연구내용

연차	연구목표	주요연구내용
2차년도	• 흐름 안정화를 통한 대심도터널 수리성능 개선 기술 개발 · 대심도터널 내부 공기거동 수치모의 · 대심도터널 내부 공기거동 수리모형실험 · 이상류 거동 모형실험 및 검증	- 유입부와 수직갱, 분기시스템 등의 터널계통에서의 공기거동 현상에 대한 수리모형실험 - 유입부 및 수직갱을 포함하는 터널계통에서의 이상류 거동과 공기거동의 상호작용 구명 - 터널 내부 공기거동 해석을 위한 해석적 모형 및 수치모의 기법 검증 - 역사이펀 및 이상류 유동에 의한 공기 배출과 분출 현상 발생 등, 수치모형을 이용한 해석기법 도출
3차년도	• 흐름 안정화를 통한 대심도터널 수리성능 개선 기술 개발 · 대심도터널 내부 공기거동 제어기법 개발 · 터널계통 수리성능 평가기법 개발 · 흐름 안정화를 통한 터널 수리성능 개선기법 개발	- 공기배출구 및 유입부 배치 및 형태, 규격 등의 조건에 대한 터널계통 내부에서의 유동특성 평가를 통한 공기거동 제어기법 도출 - 터널계통의 선형 및 경사에 따른 부속시설 적정 설계기법 도출 - 터널계통 전반에 대한 이상류 및 공기거동을 종합적으로 고려한 수리학적 성능평가 기준 및 기법 도출 - 터널계통의 규격, 선형, 배치에 따른 공기 유동과 이상류 흐름의 안정화를 통한 수리성능 개선기법 개발

제2장. 연구수행내용 및 성과

1. 연구개발의 추진전략 및 방법

○ 본 연구과제는 대심도터널의 지하유입시설 설계기술과 수치해석 기술, 터널 내부 흐름 안정화 기술로 크게 세 분야로 구분

○ 주관연구기관인 한국건설기술연구원에서는 지하유입시설 설계기술에 관한 연구를 수행

- 수리모형실험을 이용해 유입구 형상에 따른 흐름특성을 분석하고, 유입효율을 개선하기 위한 신형 유입구 형상에 대한 설계기술을 개발
- 유입부 공기 배출을 고려한 고효율 유입구 설계기술 개발을 목적으로 수리모형실험을 이용해 수직갱 내부 공기공동 형상을 분석
- 수직갱-접합부의 구조적 안전성 확보를 위해 수직갱 하단부 감세기술을 개발하고 수리모형실험을 이용한 감세효과를 분석
- 위탁연구기관인 University of Dundee에서 흐름이 복잡한 대심도터널 유입구 및 접합부 흐름 계측기법에 관한 연구를 수행, 연속레이저를 이용한 PIV 계측기법을 적용하는 비접촉식 계측기법을 개발

○ 공동연구기관인 교토대학교 방재연구소에서는 대심도터널의 수치해석 기술에 관한 연구를 수행

- 대심도터널의 전체적인 시스템적 접근방법을 통해 유입부-터널-유출부 흐름에 대한 예측기술 개발과 대심도터널 적용에 의한 침수피해 감소 효과 예측기술 개발
- 1차원, 2차원 이상류 흐름 모형 개발과 대심도터널의 영향을 반영한 지표수 수치모형 개발
- 테스트베드 적용을 통해 대심도터널 설치 전후의 도심 범람 현상을 분석하고 침수피해 감소 효과를 정량화 할 수 있는 평가기법을 개발

○ 공동연구기관인 창원대학교 산학협력단에서는 대심도터널 내 흐름 안정화 기술에 관한 연구를 수행

- 터널 내 물과 공기의 이상류(two-phase flow) 거동 해석을 통해 터널계통의 흐름 안정화 기술을 개발
- 터널 내 수리성능 개선을 위한 효과적인 이상류 제어 방안 기법을 개발

2. 연구개발 추진체계

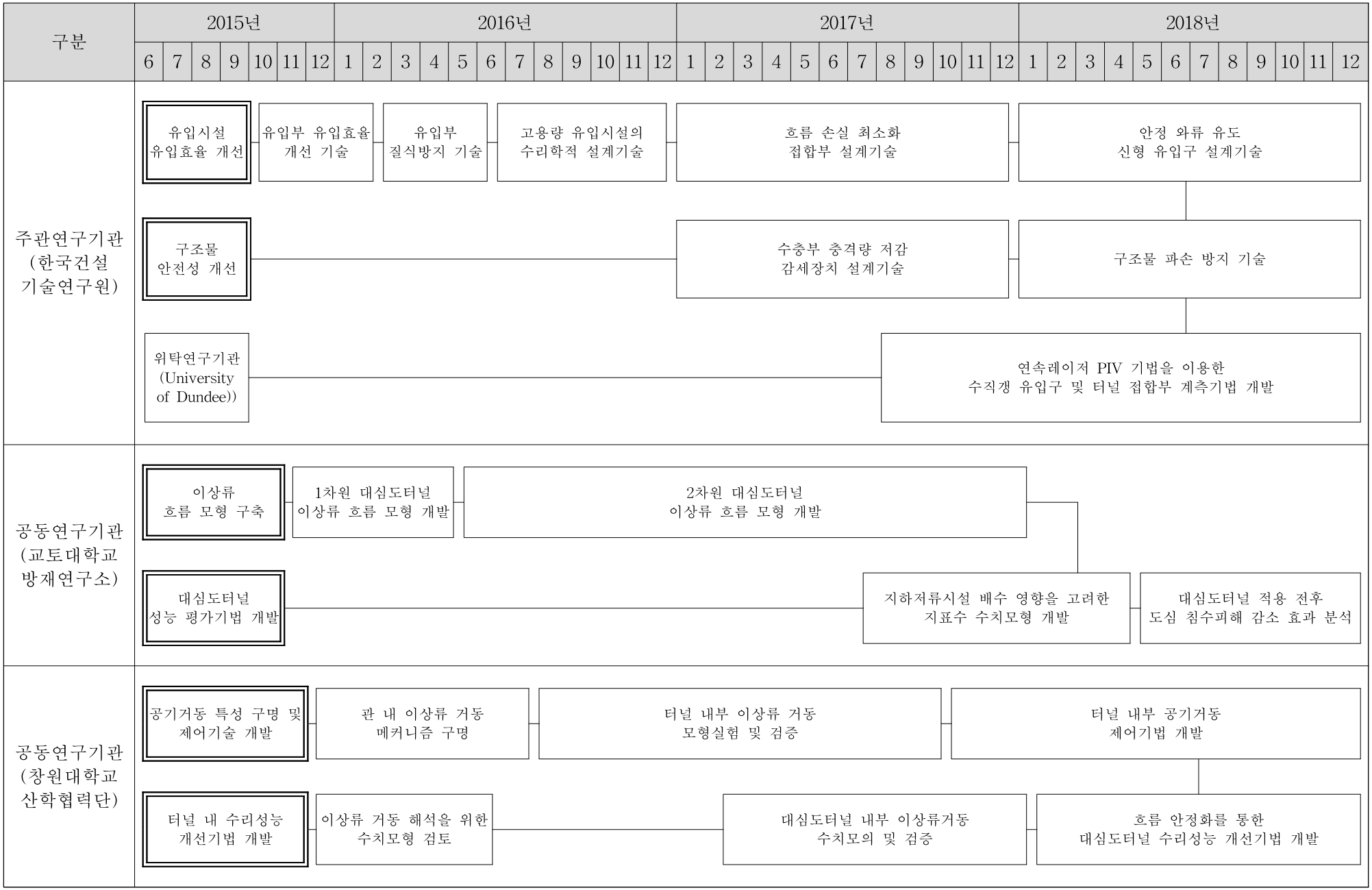
연구개발과제	
과제명	극한 도심 홍수방어를 위한 최적 수리 성능 대심도터널(왕복 4차선 이상) 원천설계기술 개발

총 참여연구원
주관연구책임자 이동섭 외 20명

기 관 별 참 여 현 황			
구 분	기관수	인원수	총인원 수
산 업 계			21
대 학	3	15	
국공립(연)	1	6	
출 연 (연)			
기 타			

주관연구기관	위탁연구기관	공동연구기관	공동연구기관
한국건설기술연구원	University of Dundee	교토대학교 방재연구소	창원대학교 산학협력단
참여연구원	**참여연구원**	**참여연구원**	**참여연구원**
주관연구책임자 이동섭 외 5명	위탁연구책임자 박용성	공동연구책임자 카와이케 켄지 외 3명	공동연구책임자 류시완 외 9명
책임급 1명, 원급 5명	책임급 1명	책임급 1명, 원급 3명	책임급 1명, 원급 9명
담당연구개발내용	**담당연구개발내용**	**담당연구개발내용**	**담당연구개발내용**
과제명: 고효율 지하유입시설에 의한 대심도터널 최적 수리성능 확보 기술 개발	과제명: 연속레이저 PIV 기법을 이용한 신형 다단식 나선 유입구 및 터널 접합부 계측 기법 개발	과제명: 대심도터널의 수리 현상과 침수피해 감소효과에 대한 수치해석 기술 개발	과제명: 흐름안정화를 통한 대심도터널 수리성능 개선 기술 개발
유입구 흐름특성 분석에 따른 신형 유입구 설계기술 개발과 흐름 손실 최소화를 통한 유입시설 유입효율 개선	대심도터널 수직갱과 터널 접합부에 대한 계측 기법 개발을 통해 신규 개발한 다단식 나선 유입구에 대한 계측 기법 개발	대심도터널 내 이상유체 해석과 침수피해 경감 평가를 위해 대심도터널의 흐름 및 배출 해석 모형의 기술 개발	터널 내 공기거동과 이상유체 흐름 분석을 통한 잔류공기 제어와 터널 내 흐름안정화 및 수리성능 개선

3. 연구개발 추진 일정


구분
2015년
2016년
2017년
2018년
6 7 8 9 10 11 12 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12
주관연구기관 (한국건설 기술연구원)
유입시설 유입효율 개선
유입부 유입효율 개선 기술
유입부 질식방지 기술
고용량 유입시설의 수리학적 설계기술
흐름 손실 최소화 접합부 설계기술
안정 와류 유도 신형 유입구 설계기술
구조물 안전성 개선
수충부 충격량 저감 감세장치 설계기술
구조물 파손 방지 기술
위탁연구기관 (University of Dundee))
연속레이저 PIV 기법을 이용한 수직갱 유입구 및 터널 접합부 계측기법 개발
공동연구기관 (교토대학교 방재연구소)
이상류 흐름 모형 구축
1차원 대심도터널 이상류 흐름 모형 개발
2차원 대심도터널 이상류 흐름 모형 개발
대심도터널 성능 평가기법 개발
지하저류시설 배수 영향을 고려한 지표수 수치모형 개발
대심도터널 적용 전후 도심 침수피해 감소 효과 분석
공동연구기관 (창원대학교 산학협력단)
공기거동 특성 구명 및 제어기술 개발
관 내 이상류 거동 메커니즘 구명
터널 내부 이상류 거동 모형실험 및 검증
터널 내부 공기거동 제어기법 개발
터널 내 수리성능 개선기법 개발
이상류 거동 해석을 위한 수치모형 검토
대심도터널 내부 이상류거동 수치모의 및 검증
흐름 안정화를 통한 대심도터널 수리성능 개선기법 개발

4. 연구수행 내용

가. 주관연구기관 - 한국건설기술연구원

(1) 지하유입시설의 기존 기술 검토

○ 지하유입시설은 초기 홍수량을 분담해 대심도터널(지하방수로)로 유입시키는 시설로 접근수로, 유입구, 수직갱으로 구분(그림 2.1.1)

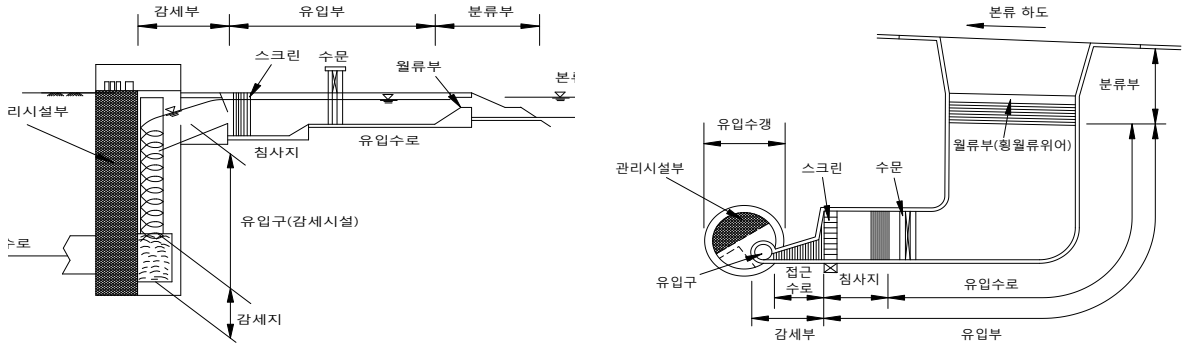


그림 2.1.1 지하유입시설의 측면도(좌)와 평면도(우)

○ 지하유입시설의 설계 및 설치 시 고려사항은 크게 다음과 같음

- 지하유입시설 계획 시 분담 홍수량 산정을 통해 유입유량을 검토한 때도 안전한 흐름 상태를 확보하기 위해 수리모형실험을 통해 유입유량을 확인
- 접근수로 내 수위가 본류 접근지점에서 분류에 영향을 주지 않도록 수위 설정에 대한 검토 필요
- 평면 형상은 평활한 형상으로 하고 사수역과 국부 흐름이 발생하지 않도록 함
- 지하방수로가 압력관 형식으로 될 때는 공기 혼입량을 최대한 줄이는 형태로 설계
- 접근수로에서 침사지 또는 스크린으로 인한 영향이 문제 될 때는 마찬가지로 수리모형실험을 통해 그 영향을 확인

○ 지하유입시설의 유입구 형상은 기본적으로 낙하식, 경사로식, 계단식이 있으며, 유입구 형상을 선택할 때는 토지이용의 제약, 흐름의 상황, 공기의 혼입, 에너지 감세효과, 수로 및 터널에 주는 영향 등을 종합적으로 판단해 결정(그림 2.1.2)

○ 표 2.1.1에는 유입구 형상에 따른 수리학적 특징과 구조적 특징을 정리하였으며, 본 연구에서는 기존 유입구 형상의 한계점을 극복하고 유입효율을 극대화할 수 있는 신형 유입구 형상을 개발하고자 함

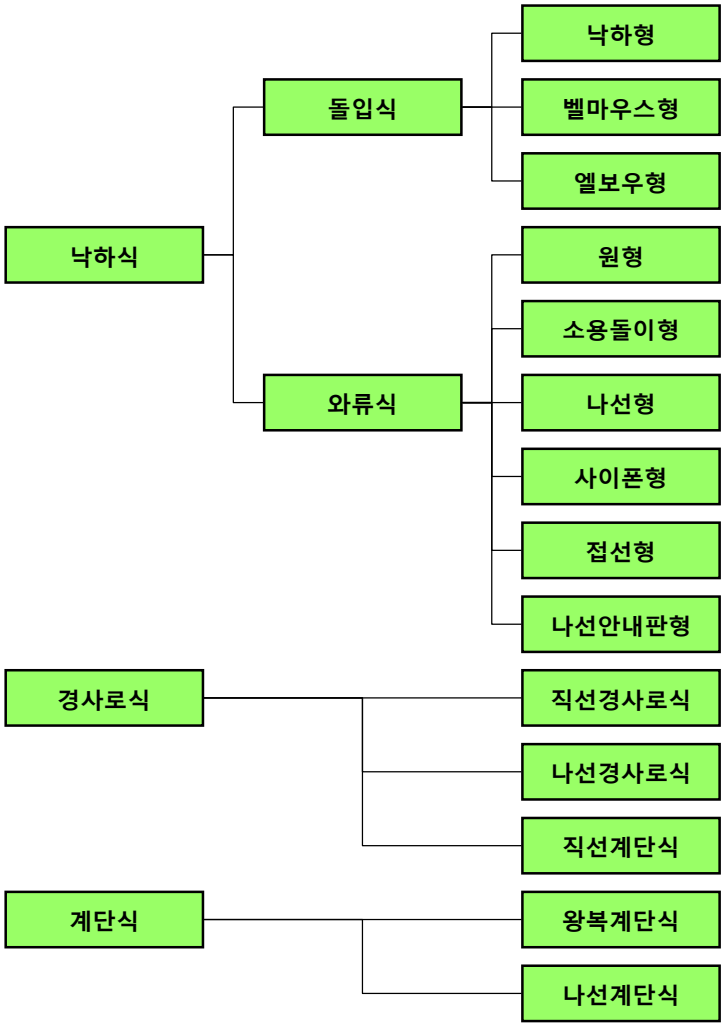


그림 2.1.2 유입구 형상에 따른 분류

표 2.1.1 유입구 형상에 따른 수리학적 특징과 구조적 특징(계속)

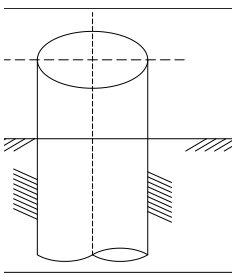
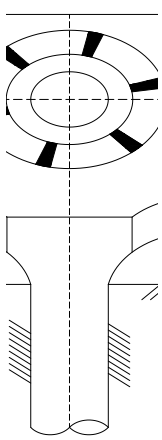
기본형상			시설형상	수리학적 특징	구조적 특징
낙하식	돌입식	낙하형		• 흐름 손실이 크며 흐름이 불안정 • 저유량 유입조건에 적합 • 공기 흡입 또는 질식 현상 발생 가능 • 수리학적 안정성이 요구되는 곳에는 적용성이 낮음	• 구조적으로 가장 단순
		벨마우스형		• 유입구 흐름이 방사형으로 수직갱으로 유입 • 계획 이상의 유입유량에 대해서는 낙하형과 동일하게 흐름이 불안정	

표 2.1.1 유입구 형상에 따른 수리학적 특징과 구조적 특징(계속)

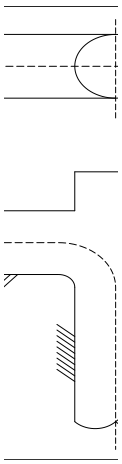
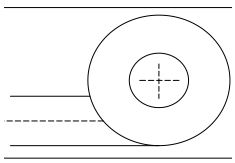
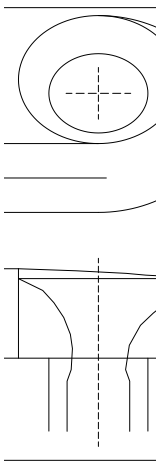
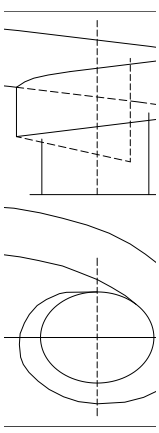
기본형상			시설형상	수리학적 특징	구조적 특징
낙하식	돌입식	엘보우형		• 공기 혼입이 많아 공기 분리 또는 배기시설을 별도로 고려하지 않으면 유입흐름이 불안정 • 유입관에서 공기의 배기 등에 의한 질식 현상 발생 가능	• 공기 분리시설, 배기시설 등 지하에 대규모 구조물이 필요 • 지상부 시설규모가 작은 편
낙하식	와류식	원형		• 안정된 와류에 의해, 고낙차, 고압력 유입조건까지 폭넓은 수리상태에 적용 가능 • 다른 나선식 형상보다 수직갱 내부 와류 유입속도가 느림 • 유량 변동에 대해 불안정한 흐름 형성	• 수직갱 상부에 큰 유입수로 시설이 필요 • 유입시설 구조 단순 • 변형 형태로 수로에 유입용 유도벽을 설치 가능
		소용돌이형		• 원형 유입구보다 유입부 수위가 낮음 • 안정된 와류에 의해, 고낙차, 고압력 유입조건까지 폭넓은 수리상태에 적용 가능	• 수직갱 상부에 큰 유입수로 시설이 필요 • 유입시설 구조 단순
		나선형		• 유입구 흐름을 사류로 유도할 경우 이용	• 복잡한 구조

표 2.1.1 유입구 형상에 따른 수리학적 특징과 구조적 특징(계속)

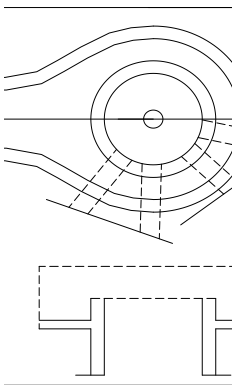
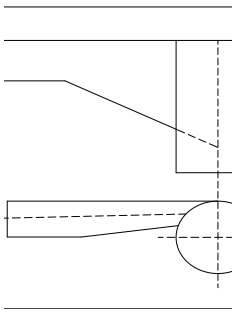
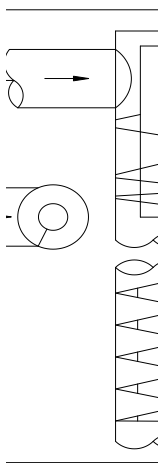
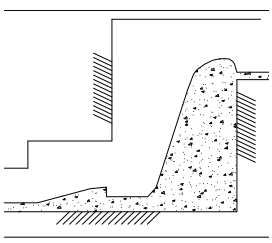
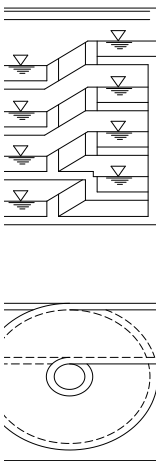
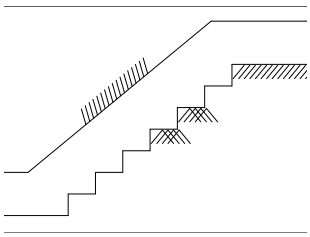
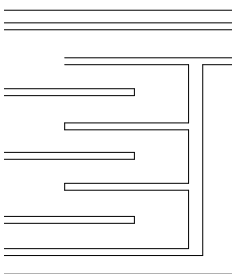
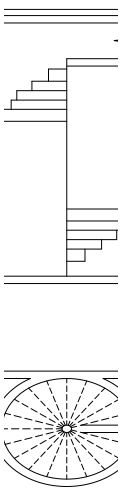
기본형상			시설형상	수리학적 특징	구조적 특징
낙하식	와류식	사이폰형		• 각 사이폰에서의 방류에 의해 와류를 발생	• 가장 복잡한 구조
		접선형		• 유입구 급축부에 고속류를 유도하는 형상으로, 수직갱 내부에 공기공동이 형성되어 혼입되는 공기의 배기가 가능 • 유입부 한계류 형성을 위한 유입구 내 난류 흐름은 수직갱 내부에 영향 없음 • 저유량 및 고유량 유입조건 모두 유입흐름이 안정적 • 수직갱 내부 고속 와류로 인해 지하방수로 합류 시 합류손실이 많음 • 접선부의 개구부를 조절해 와류강도 조절 가능	• 구조적으로 단순한 형식 • 수직갱 지름을 가장 작게 할 수 있음 • 유입수로 폭과 수직갱 상부의 구조물을 작게 할 수 있고, 유입시설 규모는 가장 작은 규모 • 유입시설로서 가장 경제적
		나선안내판형		• 나선식 형상에서 측벽으로 치우치는 흐름을 안내판을 이용해 안정적 수위를 유도 • 안내판을 따라 유출되며, 흐름의 감세, 공기의 배기가 효율적 • 공기 혼입이 적고 유입흐름이 안정적	• 구조적으로는 복잡한 형식 • 수직갱 하부에 특별한 시설을 설치할 필요 없음
경사로식		직선경사로식		• 댐의 여수로 등에 주로 적용	• 낙차부에서 흐름이 벽면에서 박리되지 않도록 경사를 반영 • 시공을 위해 큰 규모의 공간이 필요

표 2.1.1 유입구 형상에 따른 수리학적 특징과 구조적 특징

기본형상		시설형상	수리학적 특징	구조적 특징
경사로식	나선경사로식		• 나선안내판형 보다 경사로상의 흐름이 탁월	• 직선경사로식의 평면 규모를 축소하기 위해 고안된 형상 • 수로를 수직갱 벽에 설치하기 때문에 수직갱 구조가 복잡 • 나선안내판형 보다 시설 규모가 대규모
계단식	직선계단식		• 낙차를 단계적으로 처리하므로 총 낙차와 관계없이 각 단계의 감세효과에 의해 결정 • 각 단계에서 낙하에너지가 분산 • 유량 변화에 따라 감세효과 변동	• 각 단계마다 감세를 위한 공간적 이격이 필요하므로 평면 규모가 증가
	왕복계단식		• 낙차를 단계적으로 처리하므로 총 낙차와 관계없이 각 단계의 감세효과에 의해 결정 • 각 단계에서 낙하에너지가 분산 • 반환벽에서 감세가 발생해 유량변동에 대해 감세효과가 안정적	• 낙차를 계단으로 처리하고 반환해 직선식에 비해 수직갱 규모의 축소 가능 • 각 낙차에서 도수에 의한 감세가 발생하므로 도수를 위한 넓은 공간 필요 • 수직갱 내부에 계단을 설치해 시공이 복잡
	나선계단식		• 낙차를 단계적으로 처리하므로 총 낙차와 관계없이 각 단계의 감세효과에 의해 결정 • 각 단계에서 낙하에너지가 분산 • 유량 변화에 따라 감세효과 변동	• 직선수로식보다 시설 규모 축소 가능 • 나선계단을 설치할 필요가 있어 시공이 복잡 • 각 단계마다 감세시설을 설치하고 감세를 유도

○ 나선식 유입구는 흐름이 유입구 벽면을 따라 나선형으로 흐르는 수직 구조물로 벽면의 마찰을 이용해 흐름에너지를 소산시키는 것이 주요 특징

○ 기존 나선식 유입구에 대한 수리학적 조건은 다음의 세 가지를 포함

- 유입부 제원
- 낙차부 축을 따라 발달된 흐름의 수리학적 특성
- 공기연행 특성

○ 나선식 유입구에 대한 수리학적 조건을 갖는 기존 유입구 형상을 검토(그림 2.1.3)

○ 유입구 바닥면 경사는 일반적으로 유입수로의 경사와 동일하고 수로 바닥면에 대한 수두가 일정하므로 유사등류(pseudo-uniform) 흐름이 발생

○ 나선식 유입구의 수직갱은 자유 흐름을 가지는 구조물로 수직갱 중앙에 큰 공기공동(air-core) 형성이 필요

○ 공기공동은 수직갱 내부가 유입흐름에 의해 잠기는 것을 방지

○ 종경사형 나선식 유입구는 나선식 유입구의 바닥면에 종경사를 도입해 유입효율을 증가시키며, 수직갱으로 접근하는 유입부의 종경사로 인해 와류(vortex) 흐름 형성이 유리(그림 2.1.3a)

○ 종횡경사형 나선식 유입구는 종경사형 유입구에 횡경사를 도입해 유입구 내측 흐름 가속을 유도하고 유입효율을 증가(그림 2.1.3b)

○ 종횡경사형의 경우 종경사형보다 와류 흐름 형성에 유리하며, 유입효율이 증가하여 고유량 유입조건에서도 원활한 유량 배제가 가능

○ 다단식 유입구는 기존 접선식 유입구의 평평한 바닥 경사면에 계단형 유입구를 고안해 저유량 유입조건에서도 안정적인 와류 흐름 형성을 유도(그림 2.1.3c, 그림 2.1.3d)

○ 다단식 유입구는 흐름에너지 소산에 유리하고 나선식 유입구보다 시공 시 차지하는 공간이 작음

○ 최심 설정 나선식 유입구는 기존 나선식 유입구에서 최고 유속 발생 지점을 미리 분석해 최심선을 설정하고, 저유량 유입조건에서도 최속-최심선을 따라 흐름이 발생하도록 유도해 안정적인 와류 흐름을 형성(그림 2.1.3e)

○ 최심 설정 나선식 유입구의 내부 흐름은 접근수로에서 나선부를 통과하며 외측에서 내측으로 최대 유속이 발생하기 때문에 최대 유속 발생 유선을 따라 V형 또는 U형으로 최심선이 형성되도록 설계

(a) 종경사형 나선식 유입구

(b) 종횡경사형 나선식 유입구

(c) 3단형 다단식 유입구

(d) 5단형 다단식 유입구

(e) 최심 설정 나선식 유입구

그림 2.1.3 기존 나선식 유입구의 형상

(가) 지하유입시설의 이론적 배경

① 나선식 유입구

○ 나선식 유입구는 흐름이 유입구 벽면을 따라 나선형으로 흐르는 수직 구조물로 벽면의 마찰을 이용해 흐름에너지 소산에 용이함

○ 기존의 유입구와 비교하였을 때 흐름이 안정적이며 공기가 쉽게 배출됨

○ 지형학적, 지질학적 조건이 적당하다면 여수로식 급경사 낙차 구조물이나 일반적인 낙차 구조물보다 유리

○ 그림 2.14에 상류(subcritical) 유입흐름을 가지는 나선식 유입구의 일반 형태를 도시(Hager, 1999)

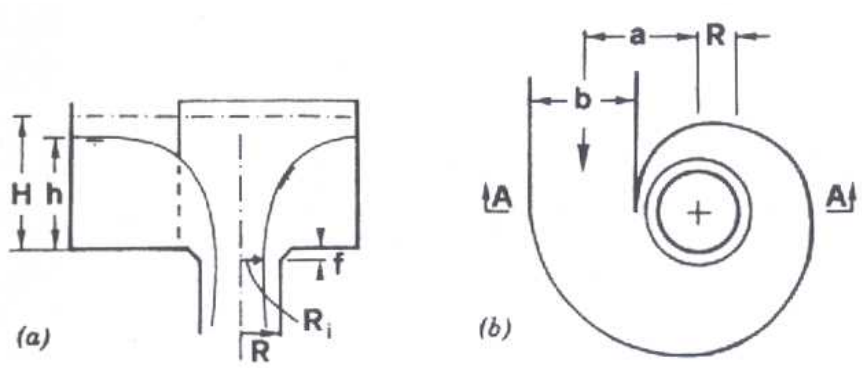


그림 2.1.4 나선식 유입구의 제원(Hager, 1999)

○ 그림 2.1.4에서 b는 접근수로의 폭, a는 수직갱 축과 접근수로 종방향 중심선 사이의 거리, R은 수직갱 반지름

○ 거의 평행하게 흐르는 개수로 흐름과 유사하게, 고정된 상류 수심에 대해서는 한계 흐름 조건에서 최대유량 발생

○ 유량은 상류 수두($H=h+V^2/2g$)에 대한 관계식으로 표현되며, 이때 V는 유입수로의 평균유속

$$Q=\frac{\pi R^2\sqrt{2g(h+f)}}{\sqrt{\frac{1}{\mu^2}-\left(\frac{\pi R^2}{bh}\right)}} \tag{2.1.1}$$

$$\mu=0.95-\chi \tag{2.1.2}$$

$$h=\frac{\pi aR}{b}\mu_0 \tag{2.1.3}$$

$$\mu_0=\frac{3}{2}\frac{1-\chi^2}{1-\chi^3}\frac{\mu}{\sqrt{1-\frac{\mu^2}{(1-\chi^2)^2}}} \tag{2.1.4}$$

○ g는 중력가속도, μ는 유량계수, μ_0는 보조 매개변수, $\chi=R_i/R$, R_i는 수직갱 내 형성된 공기공동의 반지름

○ 한계류가 형성되는 단면의 위치는 유입부 바닥으로부터 아래 방향으로 f만큼 떨어진 지점이며, 설계 조건에서 a, b, R이 주어진다면 위 관계식을 이용해 특정 흐름 조건에 대한 수위-유량 관계 계산이 가능

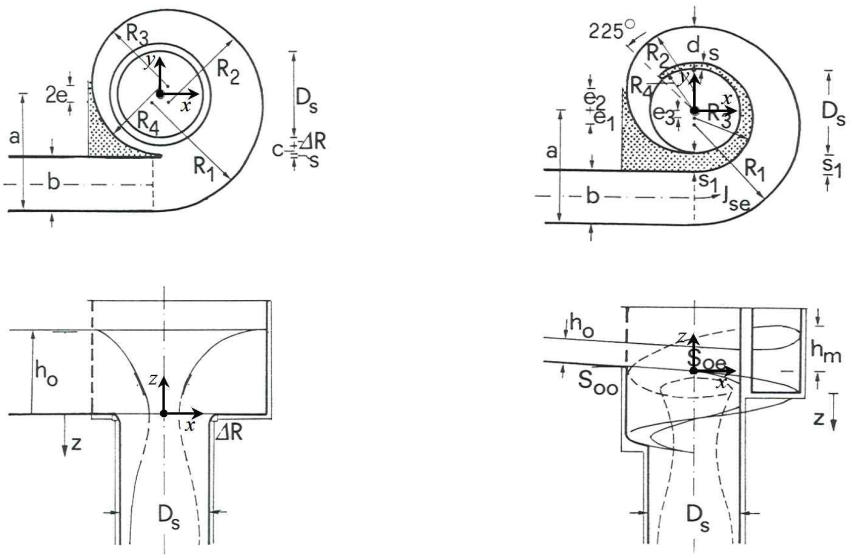
○ 나선식 유입구는 벽면 마찰을 이용해 흐름에너지를 소산시키는 것이 중요한 특징이며, 유입구를 통과한 물은 수직갱 벽면을 따라 에너지가 소산되면서 유입

○ 공기공동은 낙차부 중앙에 형성, 단순 낙차형 유입구보다 안정적인 흐름이 발생

○ 나선식 유입구는 5~10 m 이상의 고낙차에 적용 가능하며, 유입구에서의 흐름은 안정적인 상류($Fr_a < 0.7$) 또는 안정적인 사류($Fr_a > 1.5$)로 유입

○ Hager(1999)는 이러한 초기 연구에 근거하여 나선식 유입구의 기초 설계이론을 확정

○ 그림 2.1.5와 같이 접근수로는 폭 b, 바닥경사 S_a, 조도계수 n을 가지며 수직갱의 직경이 D_s라면 그림 2.1.5a는 상류 흐름에 적당한 Drioli(1969)의 나선식, 그림 2.1.5b는 사류 흐름에 적당한 Kellenberger(1988)의 종경사형으로 구분됨



(a) 나선식(Drioli, 1969)　　(b) 종경사형(Kellenberger, 1988)

그림 2.1.5 나선식 유입구의 구분

○ 그림 2.1.5a와 같은 나선식에서 a는 수직갱 중앙에서 유입부 외벽까지의 거리, c는 나선부의 최소폭, e는 편심, ΔR은 유입구와 수직갱 경계의 곡률반경, s는 유입구 내측벽의 두께, 이 경우 유입구의 주요제원은 다음과 같이 결정됨

$$a = R + \Delta R + b + c + s \tag{2.1.5}$$

$$e = \frac{1}{7}(b + s) \tag{2.1.6}$$

$$R_4 = R + \Delta R + c + e \tag{2.1.7}$$

$$R_1 = R_4 + 5e \tag{2.1.8}$$

$$R_2 = R_4 + 3e \tag{2.1.9}$$

$$R_3 = R_4 + e \tag{2.1.10}$$

$$0.8 < D_s/a < 1 \text{ and } \Delta R > D_s/6 \tag{2.1.11}$$

○ 2.1.5b와 같은 종경사형 주요제원 계산 방식은 다음과 같음

$$R_1 = (a+R+s+d)/2, \qquad e_1 = a - R_1 \tag{2.1.12}$$

$$R_2 = (2R+s+d)/2, \qquad e_2 = R+s+d-R_2 \tag{2.1.13}$$

$$R_3 = (a+R+s-b)/2, \qquad e_3 = a-b-R_3 \tag{2.1.14}$$

$$R_4 = R+s, \qquad s_1 = a-b-R \tag{2.1.15}$$

상기 식의 적용 범위는 다음과 같음

$$(R+s+d) \le a \le (3R+s) \tag{2.1.16}$$

$$0.8R \le b \le 2R \tag{2.1.17}$$

$$0.8R \le d \le 2R \tag{2.1.18}$$

○ 나선부의 흐름방향 경사 S_{oe}는 접근수로의 경사 S_{oo}보다 급해야 하는데, 약 10%~20% 정도의 경사가 적당하며 30% 경사가 한계

○ 유입구 접근 흐름이 상류 흐름으로 유입하는 경우, 유량과 접근 수심의 관계는 다음과 같음

$$h^* = \frac{aR}{b}, \qquad Q^* = \left(\frac{gaR^5}{b}\right)^{1/2} \tag{2.1.19}$$

$$\frac{Q}{Q^*} = \frac{\sqrt{2}\,h_a}{h^*} \tag{2.1.20}$$

○ 반경이 R인 수직갱에서 흐름 질식 현상이 발생하지 않는 최대유량, 즉 설계유량 Q_M은 다음과 같이 결정

$$Q_M = 4R^3\left(\frac{5g}{b}\right)^{1/2} \tag{2.1.21}$$

○ 유입구에서의 흐름이 사류인 경우, 수직갱에서 흐름 질식이 발생하지 않는 설계유량 Q_M은 다음과 같이 결정

$$Q_M = \left(g \left(\frac{D_s}{\eta} \right)^5 \right)^{1/2} \tag{2.1.22}$$

여기서 η는 안전계수로 4.25를 사용

○ 흐름이 상류인 경우, 나선부에서 점차 수위가 떨어지는 반면, 사류인 경우 나선부에서 충격파가 발생해 수면이 상승하고 최대 수면상승고 h_M은 다음과 같음

$$\frac{h_M}{R_1} = \left[\frac{\sqrt{2}\,Q}{(g b h_o R_1^3)^{1/2}} - \frac{1}{2} S_{oe} \right] (1.1 + 0.15 Fr_o) \tag{2.1.23}$$

$$\frac{\alpha_M}{Fr_a} = 75^\circ \left(\frac{h_o}{R_1} \right)^{1/2} \tag{2.1.24}$$

○ 물의 흐름은 매끄러운 벽면을 따라 회전운동을 하며 낙하하는데, 그 수평 수심은 낙하가 진행되며 점차 작아지다가 평행상태의 균일한 수심에 도달

○ 평형상태에 도달했을 때, 수심과 유속은 다음과 같음

$$V^* = \left(\frac{1}{n} \right)^{3/5} \left(\frac{Q}{\pi D_s} \right)^{2/5} \tag{2.1.25}$$

$$z^* = \frac{V^{*2}}{2g} = \frac{(1/n)^{6/5}}{2g} \left(\frac{Q}{\pi D_2} \right)^{4/5} \tag{2.1.26}$$

$$\left(\frac{V}{V^*} \right)^2 = \tanh \left(\frac{z}{z^*} \right) \tag{2.1.27}$$

○ V^*는 수직갱의 연직 길이 L_s가 한계길이($z_L = 3z^*$)보다 긴 경우 발생하는 등류속도

○ 이 경우 수직갱의 효율은 다음과 같음

$$\eta = \frac{H_a + L_s - H(z)}{H_a + L_s} \tag{2.1.28}$$

○ H_a는 유입부의 에너지수두, $H(z)$는 연직 위치, z는 에너지수두

○ 식 2.1.28은 흐름이 수직갱을 따라 흐르면서 소산되는 에너지의 전체 에너지에 대한 비율

○ 수직갱에 공급되어야 할 공기의 양 Q_a는 수직갱의 상대길이 L_s/D_s와 상대유량 q_s와 관련 있으며, 상대유량은 다음과 같이 정의

$$q_s = \frac{nQ}{\pi D_s^{8/3}} \qquad (2.1.29)$$

○ 공기의 양 Q_a는 유량의 약 41%가 적절, 공기 공급구 설계를 위한 공기 속도는 25 m/s를 기준으로 함

② 접선식 유입구

○ 접선식 유입구는 나선식 유입구보다 유량 배제효율이 떨어지고, 유입구에서 질식 발생 가능성이 다소 높다는 단점이 있지만 구조가 간단하여 시공이 간편

○ 상대적으로 차지하는 지하공간의 체적이 작아지므로 보다 경제적인 시설의 구축이 가능하다는 장점이 있어, 최근에 다시 주목받음

○ Jain and Ettema(1987)의 연구에 의하면, 접선식 유입구의 주요 변수는 그림 2.1.6과 같이 접근수로 폭 B, 경사각 β, 유입각 θ 또는 e, 수직갱 직경 D

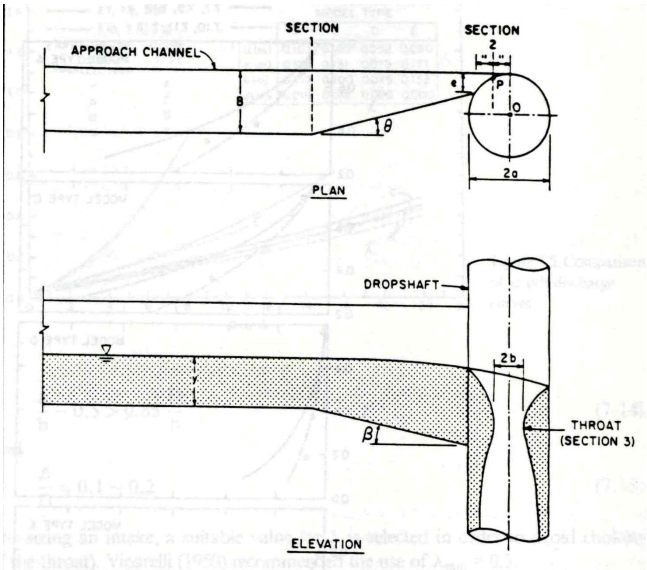


그림 2.16 접선식 유입구의 구조(Jain, 1987)

○ 유량이 작은 경우 그림 2.1.6의 section 1이 흐름 제어 구간으로 작동하며, 접근수로에서의 흐름과 유입구 내에서의 흐름은 각각 사류 흐름과 한계류 흐름으로 발생

○ 유량이 점차 커지면서 section 1은 잠기게 되고, section 2가 두 번째 흐름 제어 구간이 되며 전체 흐름을 지배

○ 접근수로와 유입구 내부의 흐름은 모두 상류 흐름이 되며, 접선식 유입구의 수직갱 접합부(junction)에서의 수심은 한계수심으로 변화

○ 이때 접합부에서 흐름의 비에너지 공식은 다음과 같음

$$E_j = \frac{3}{2}\left[\frac{\left(\frac{Q}{e}\right)^2}{g}\right]^{1/3} (\cos\beta)^{2/3} \qquad (2.1.30)$$

여기서 Q는 유량, e는 접합부 폭, β는 접합부 경사, g는 중력가속도

○ 접합부에서의 수두 손실을 무시할 수 있다면, E_j는 접근수로의 비에너지 대해 다음과 같은 무차원식으로 변형 가능

$$y_* + \frac{1}{2y_*^2} = E_* \tag{2.1.31}$$

$$y_* = y/y_c \tag{2.1.32}$$

$$E_* = \frac{3}{2}(B\cos\beta/e)^{2/3} - z_* \tag{2.1.33}$$

$$z_* = z/y_c \tag{2.1.34}$$

$$y_c = \sqrt[3]{(Q/B)^2/g} \tag{2.1.35}$$

y는 접근수로의 등류수심, z는 그림 2.1.6의 지점 P에서의 접근수로 바닥과 높이 차

○ $E_* > 3/2$이 되면 식 2.1.31은 물리적으로 두 가지 해를 가지며, 두 해 중 더 큰 해가 접근수로에서의 상류 흐름 조건에 대응

○ $E_* \leq 3/2$인 경우, section 1 구간이 흐름 제어 구간으로 작용하게 되며, 접근수로의 수심은 한계 수심에 도달

$$y_* = 1 \qquad \text{for} \quad E_* \leq \frac{3}{2} \tag{2.1.36}$$

○ 식 2.1.31과 식 2.1.36은 모두 Jain and Kennedy(1983) 연구에 바탕을 두고 있으며, 접선식 유입구에서의 수위-유량 관계 곡선과 실험자료를 그림 2.1.7에 나타냄

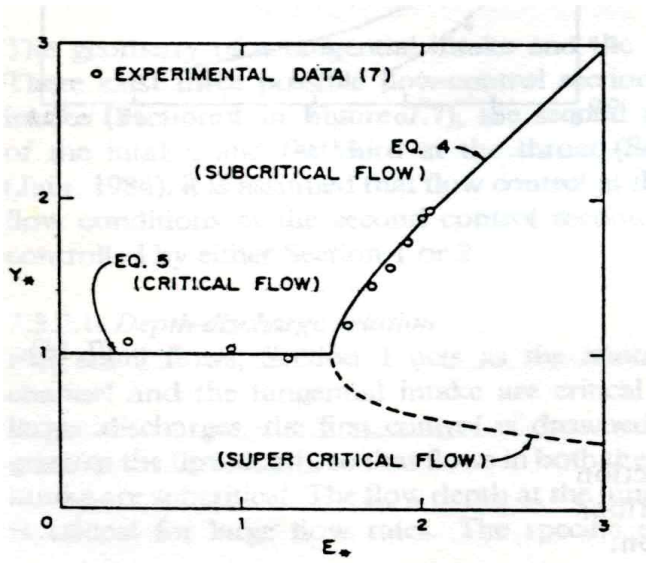


그림 3.7 접선식 유입구의 수위-유량 관계 곡선과 실험자료(Jain and Kennedy, 1983)

○ $E_* > 3/2$인 경우에 접근수로 수심이 e와 z가 줄어들면서 증가하는 것으로 나타났지만, 이 실험자료는 제원이 B = 22.9 cm, e = 7.3 cm, D = 29.2 cm, z = 28.5 cm, β = 27.5°, θ = 16.8°인 단일 모형에 대해 이루어졌기 때문에 이에 대한 보완 실험이 필요

○ 접선식 유입구에서 수직갱의 직경은 수직갱 입구의 최소 허용 공기공동 면적에 의해 결정

(2) 안전 와류 유도 신형 유입구 설계 기술 개발

(가) 나선식 유입구와 접선식 유입구의 흐름특성 분석

① 수리모형실험 및 분석 결과

○ 나선식 유입구, 접선식 유입구의 실험모형과 접근수로를 아크릴로 제작, 순환식 유량공급장치가 설치된 실험수로에 연결(그림 2.1.8, 그림 2.1.9)

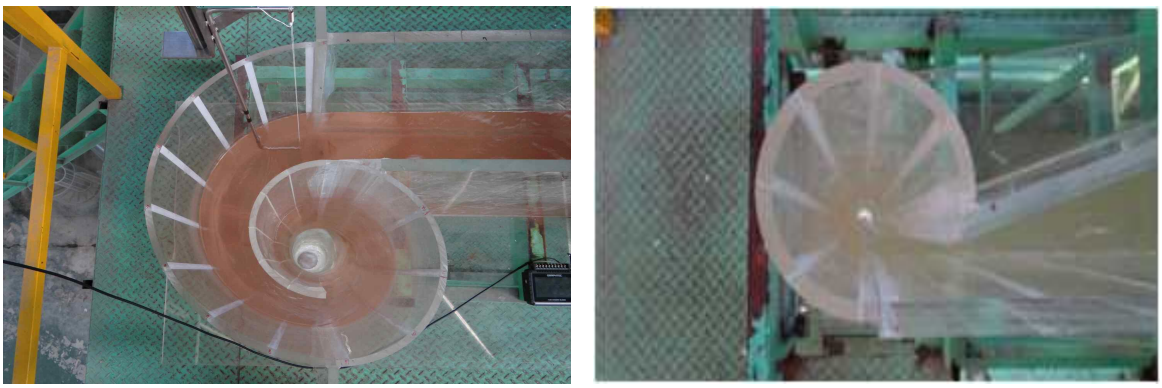
○ 유입구 형상 별 흐름특성을 파악하기 위해 용량식 파고계로 접근수로와 유입구 내 수위를 측정(그림 2.1.10)

○ 유입구 흐름특성 분석을 위해 유입유량 조건, 종횡방향 경사도, 유도벽 각도에 따른 수리실험조건 수립(표 2.1.2)



(a) 수로 전경 (b) 접근수로

그림 2.1.8 지하유입시설 수리실험장치



(a) 나선식 유입구 (b) 접선식 유입구

그림 2.1.9 유입구 실험모형



(a) 용량식 파고계



(b) 실험용 대차

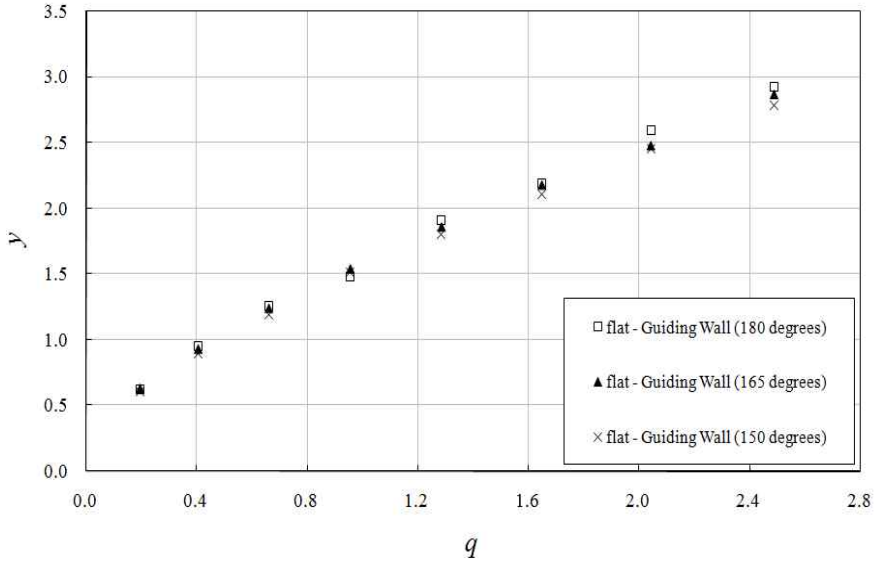
그림 2.1.10 실험 측정장비와 실험용 대차

표 2.1.2 실험조건

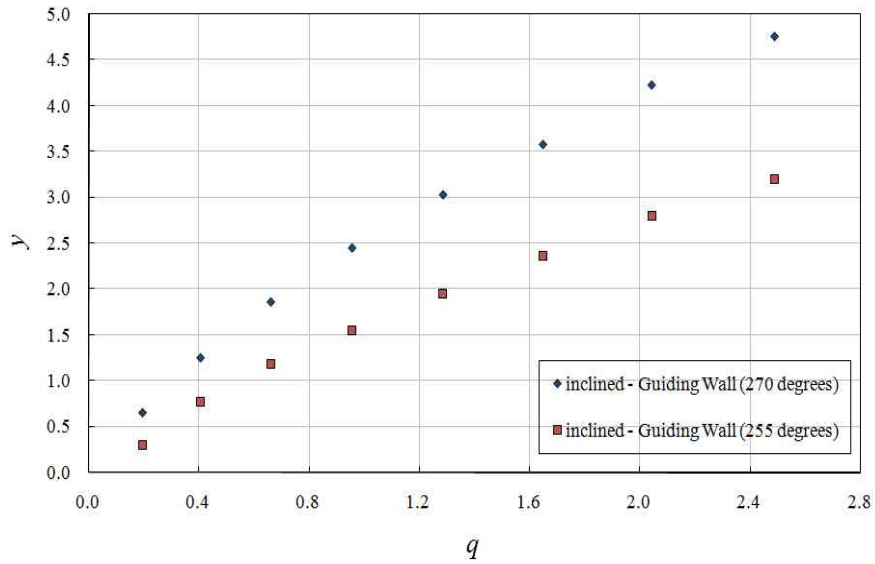
실험변수	실험조건		
	나선식 유입구		접선식 유입구
유입량(Q, m^3/s)	0.002 ~ 0.030		0.0013 ~ 0.0228
바닥경사(%)	종경사형	종횡경사형	27.50
	5.0, 7.5, 10.0, 12.5	5-5, 10-5	
유도벽 각도(°)	0, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270		유도벽 없음

② 나선식 유입구의 바닥경사 및 유도벽 각도의 영향분석

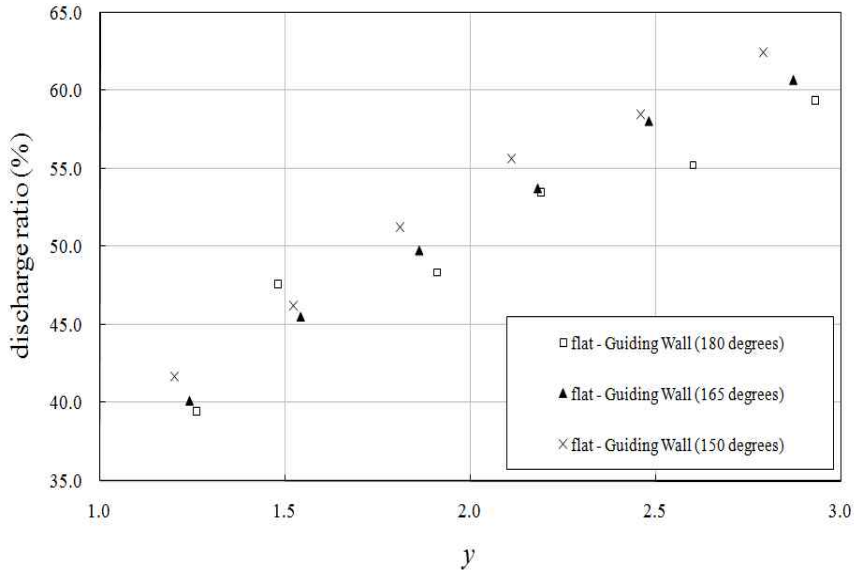
- 유입구 수위가 감소할수록 유입효율이 감소하고, 유입구 수위가 증가할수록 유입효율이 증가(그림 2.1.11)
- 유도벽 설치 각도가 감소함에 따라 유입효율 증가
- 나선식 유입구(flat type)의 경우, 현 실험 조건에서는 효과가 미비
- 종경사형 나선식 유입구(inclined type)는 유입구에서 바닥이 유입구 외벽을 따라 일정한 경사를 가지고 하강하게 되므로 유입구 입구에서부터 사류 흐름을 형성하고, 유입구 내부에서는 안정적인 사류 흐름을 유지
- 유도벽 각도가 클수록 유도벽에 의한 효과로 유입효율이 감소하고 유량별 수위변화폭이 증가(그림 2.1.12~2.1.15)
- 종횡경사형 유입구는 종경사와 유입가능 면적이 유사하지만, 횡경사의 도입으로 종경사보다 유량변화에 따른 수위변화폭이 감소(그림 2.1.16, 그림 2.1.17)
- 종경사형 유입구의 경우, 유입유량이 증가할수록 수위 변화는 증가하지만, 종경사의 증가에 따른 유입효율은 유사하며, 유도벽 각도가 270°인 경우 유입가능 면적의 급격한 감소로 인해 유입효율이 감소(그림 2.1.18)
- 유도벽의 각도가 270°일 경우를 제외하면, 종횡경사형 나선식 유입구는 종경사형 유입구보다 유입유량 증가에 따른 수위 증가폭 감소하며 유입효율이 개선됨(그림 2.1.18)
- 종경사형의 경우, 종경사 10%에서 유입효율이 가장 높은 것으로 확인되었으며, 종횡경사의 경우, 종경사 10%, 횡경사 5%에서 유입효율이 가장 높은 것으로 나타남(그림 2.1.18)



(a) 수위-유량관계(flat type)

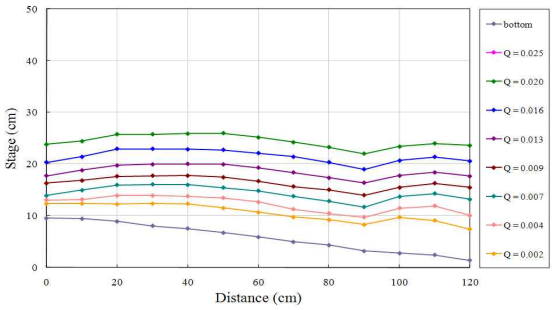


(b) 수위-유량관계(inclined type, 5%)

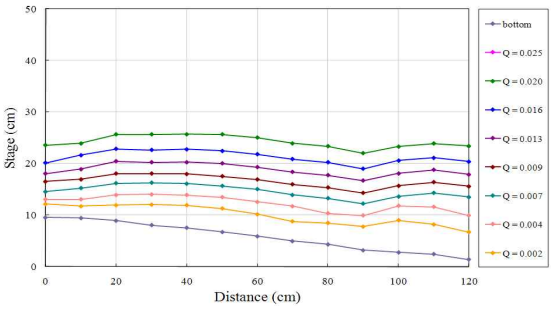


(c) 유입효율 비교

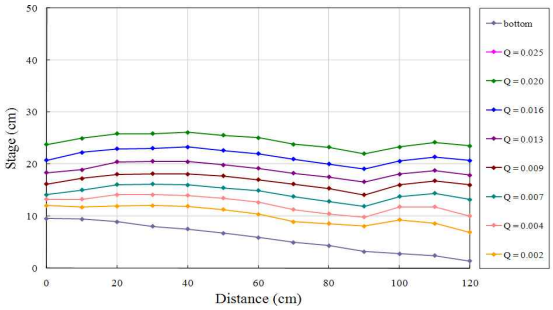
그림 2.1.11 유도벽 각도에 따른 수위-유량관계 및 유입효율



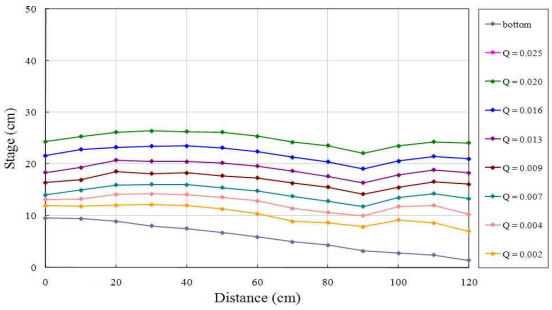
(a) 유도벽 각도 = 0°



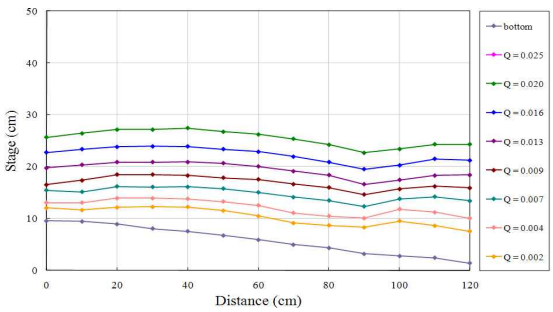
(b) 유도벽 각도 = 30°



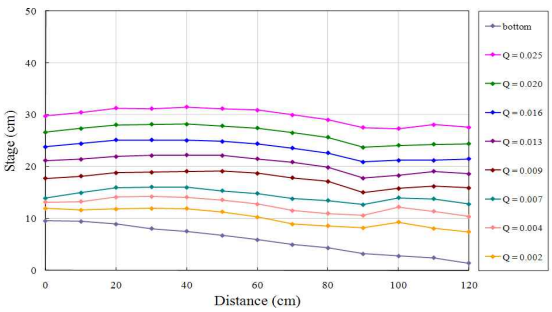
(c) 유도벽 각도 = 60°



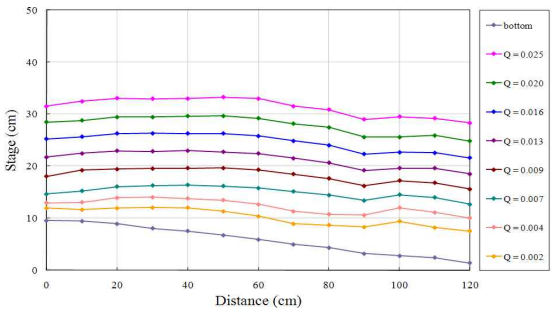
(d) 유도벽 각도 = 90°



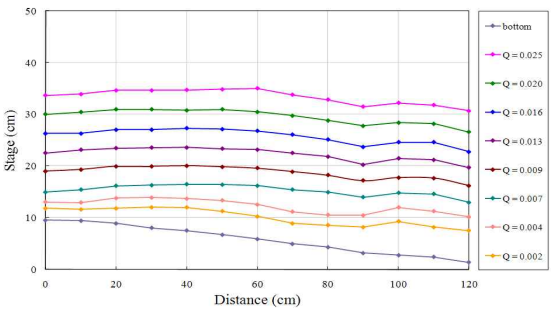
(e) 유도벽 각도 = 120°



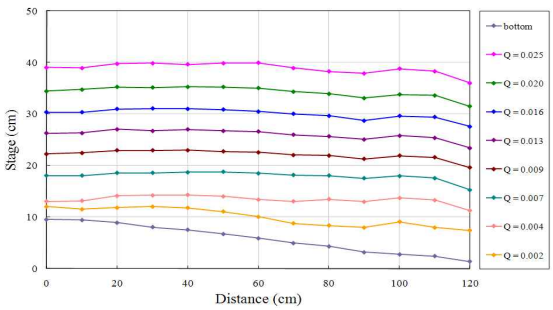
(f) 유도벽 각도 = 150°



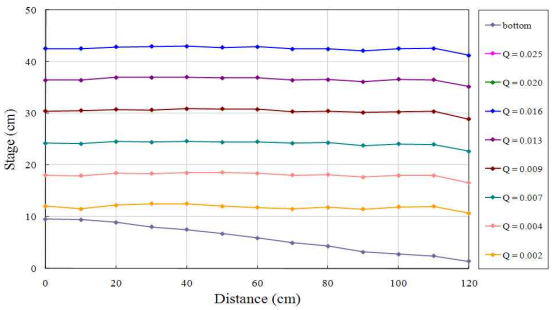
(g) 유도벽 각도 = 180°



(h) 유도벽 각도 = 210°

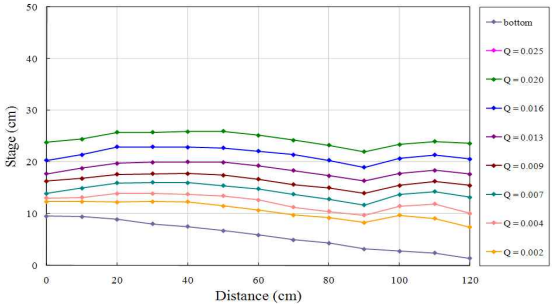


(i) 유도벽 각도 = 240°

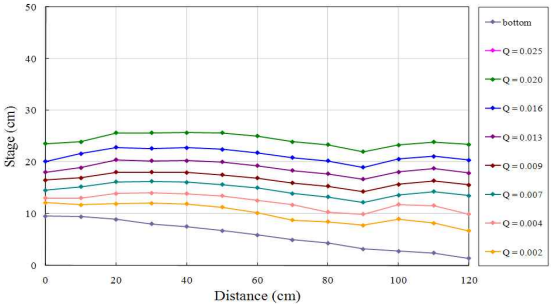


(j) 유도벽 각도 = 270°

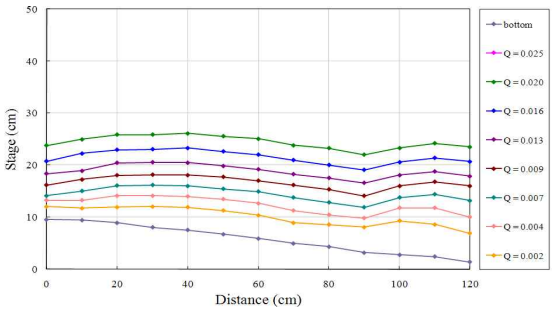
그림 2.1.12 종경사형(경사도= 5%) 유입구 수위 변화



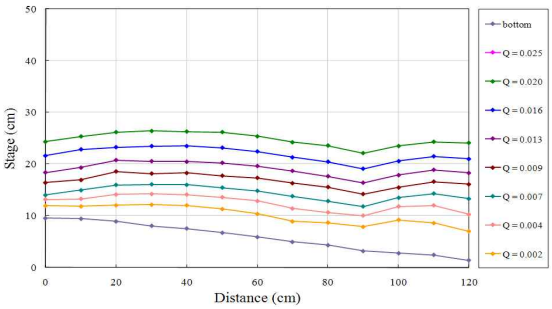
(a) 유도벽 각도 = 0°



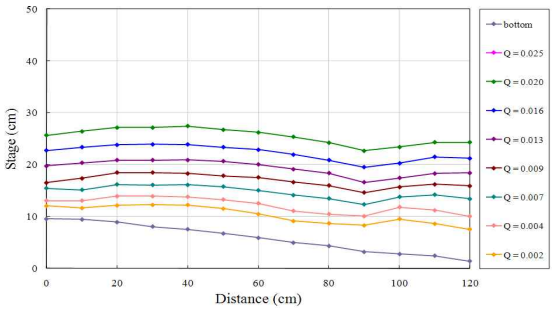
(b) 유도벽 각도 = 30°



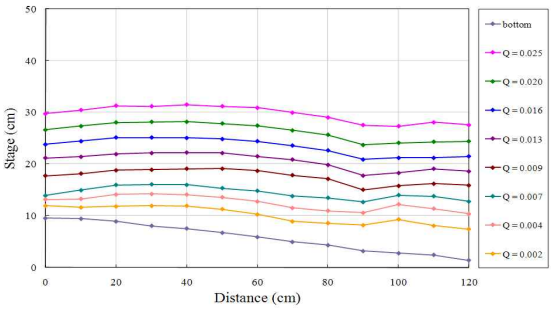
(c) 유도벽 각도 = 60°



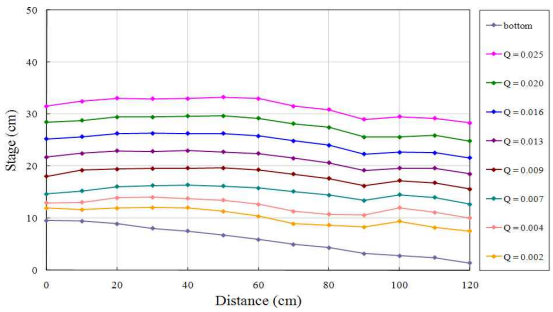
(d) 유도벽 각도 = 90°



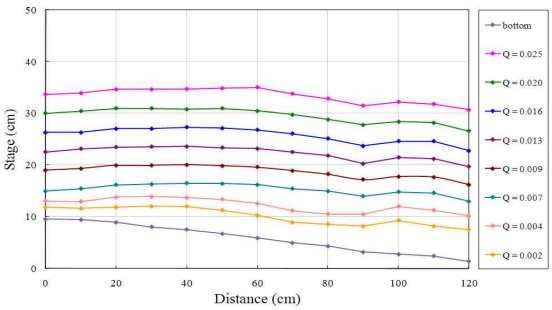
(e) 유도벽 각도 = 120°



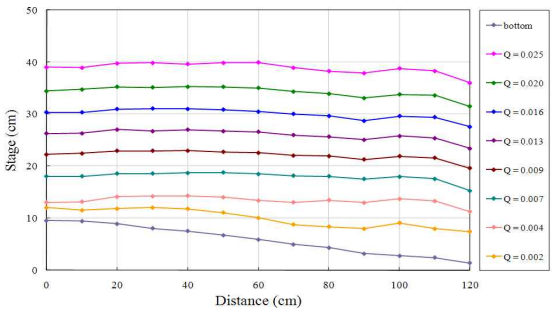
(f) 유도벽 각도 = 150°



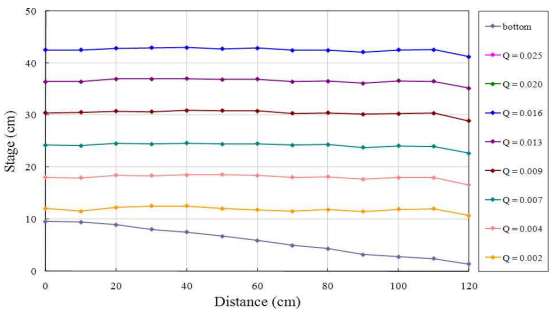
(g) 유도벽 각도 = 180°



(h) 유도벽 각도 = 210°

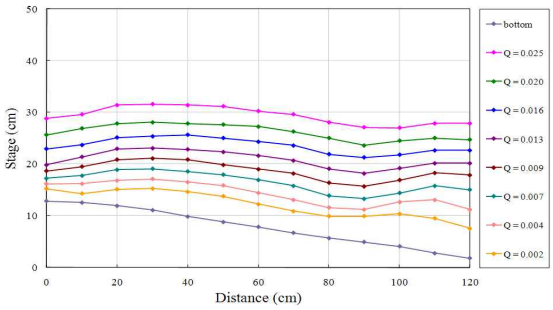


(i) 유도벽 각도 = 240°

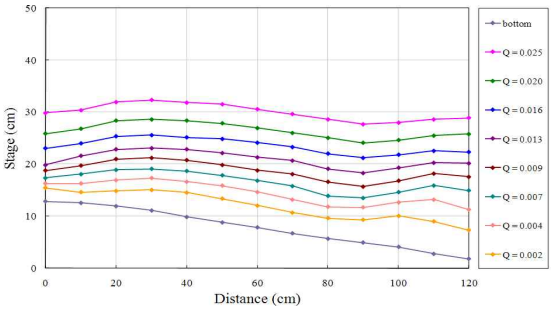


(j) 유도벽 각도 = 270°

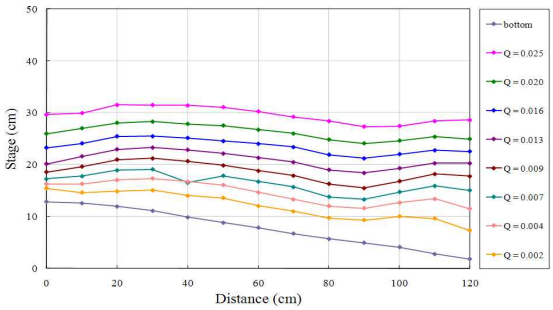
그림 2.1.13 종경사형(경사도= 7.5%) 유입구 수위 변화



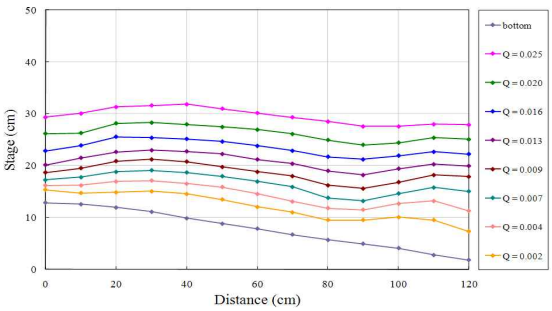
(a) 유도벽 각도 = 0°



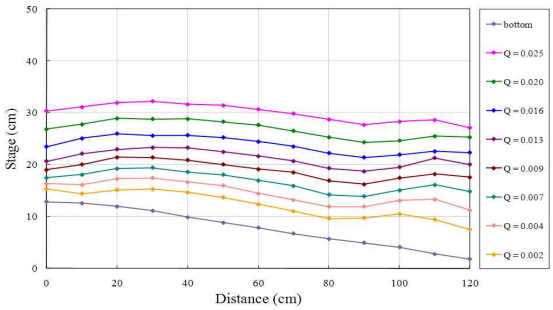
(b) 유도벽 각도 = 30°



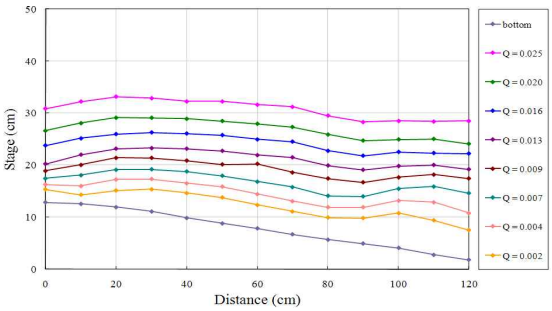
(c) 유도벽 각도 = 60°



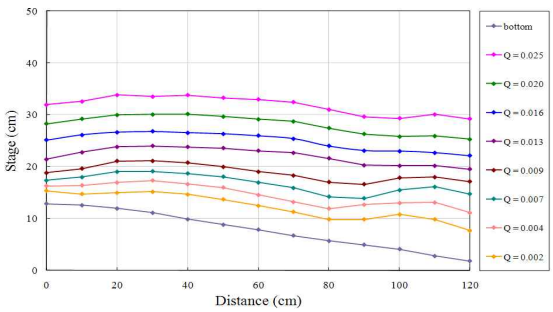
(d) 유도벽 각도 = 90°



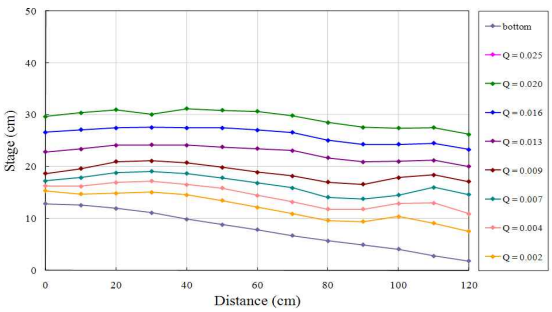
(e) 유도벽 각도 = 120°



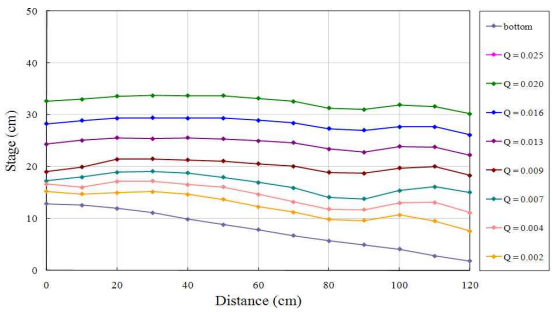
(f) 유도벽 각도 = 150°



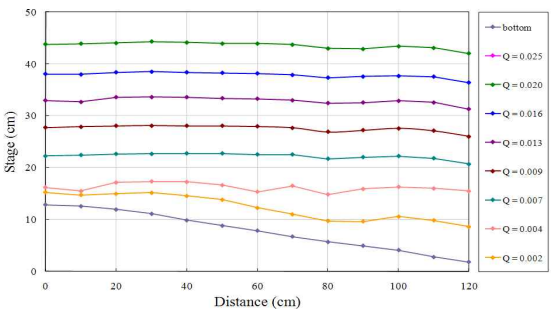
(g) 유도벽 각도 = 180°



(h) 유도벽 각도 = 210°

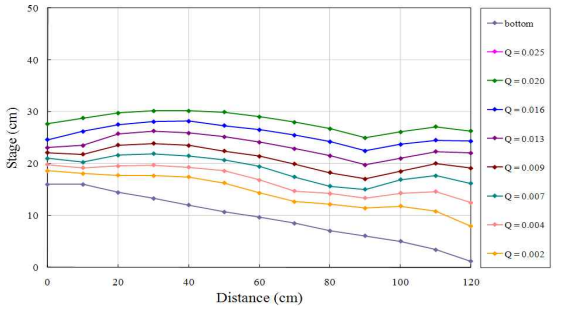


(i) 유도벽 각도 = 240°

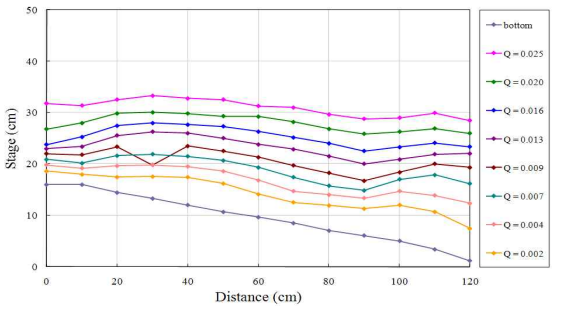


(j) 유도벽 각도 = 270°

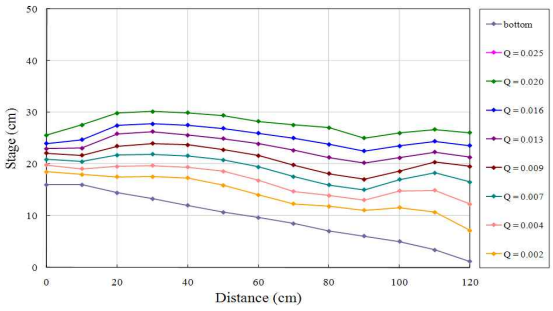
그림 2.1.14 종경사형(경사도= 10%) 유입구 수위 변화



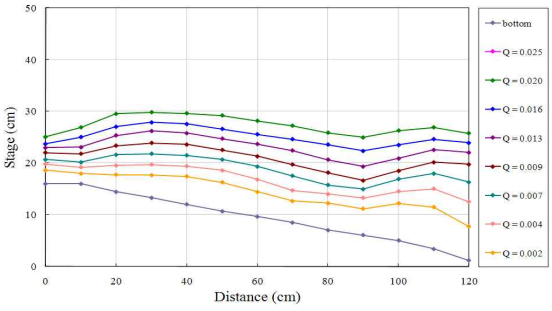
(a) 유도벽 각도 = 0°



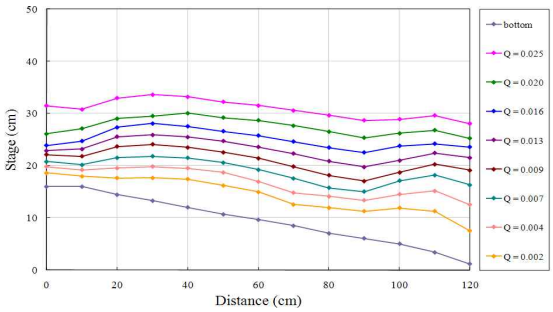
(b) 유도벽 각도 = 30°



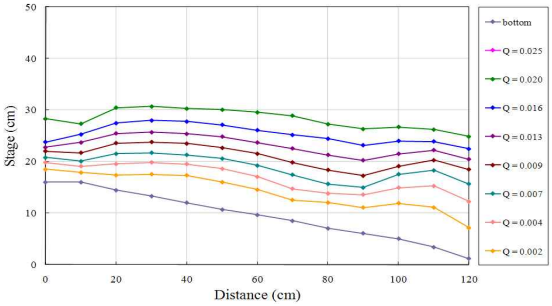
(c) 유도벽 각도 = 60°



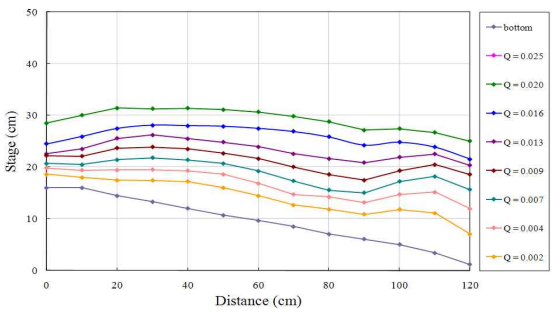
(d) 유도벽 각도 = 90°



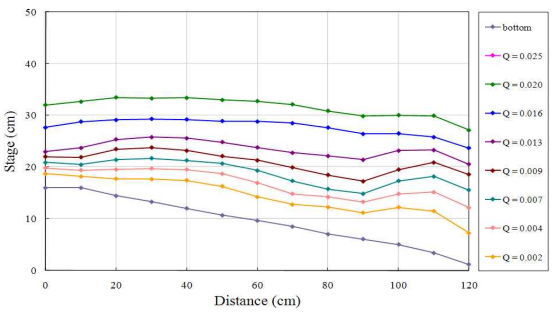
(e) 유도벽 각도 = 120°



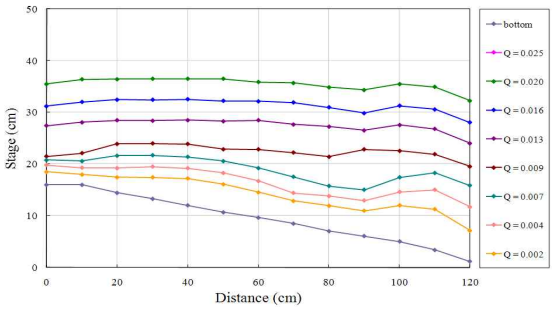
(f) 유도벽 각도 = 150°



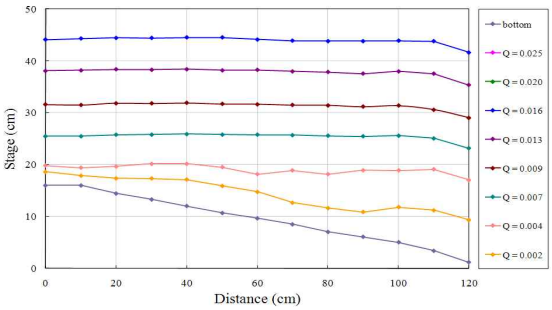
(g) 유도벽 각도 = 180°



(h) 유도벽 각도 = 210°

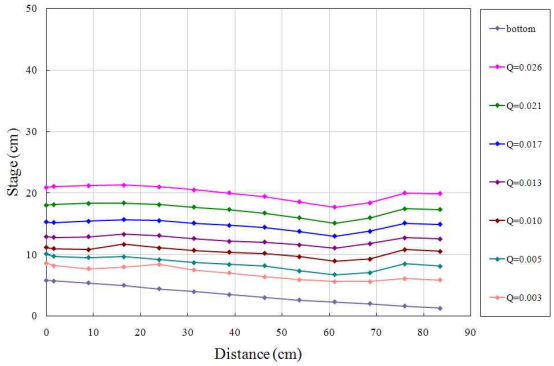


(i) 유도벽 각도 = 240°

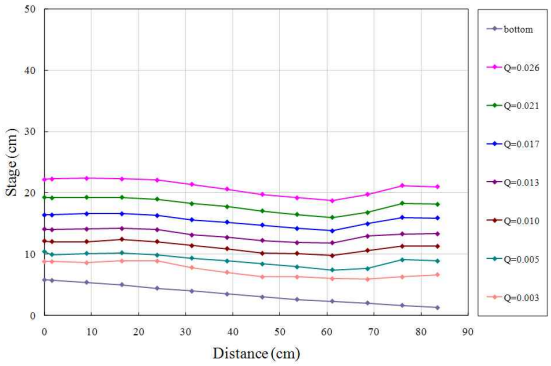


(j) 유도벽 각도 = 270°

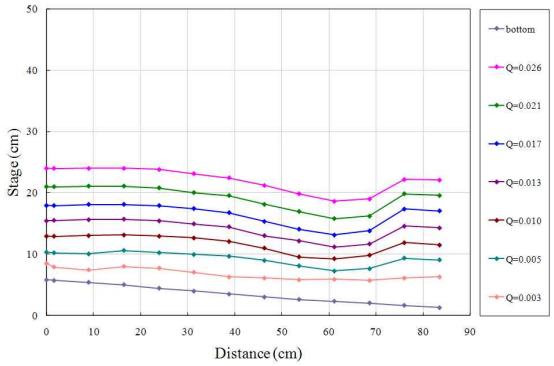
그림 2.1.15 종경사형(경사도= 12.5%) 유입구 수위 변화



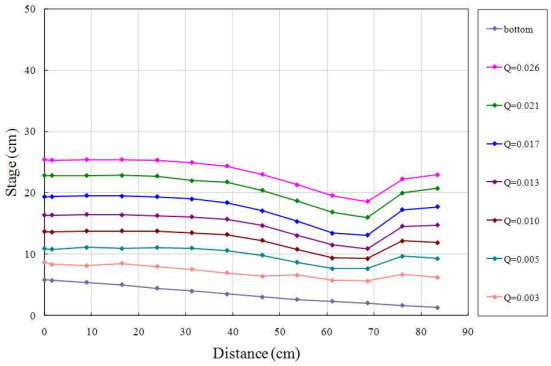
(a) 유도벽 각도 = 0°



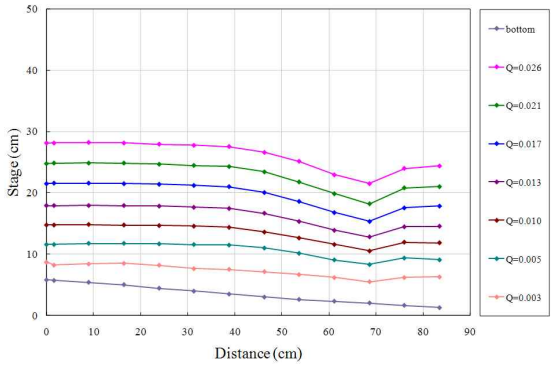
(b) 유도벽 각도 = 30°



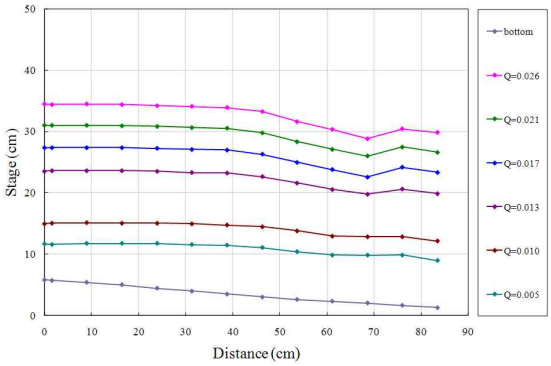
(c) 유도벽 각도 = 90°



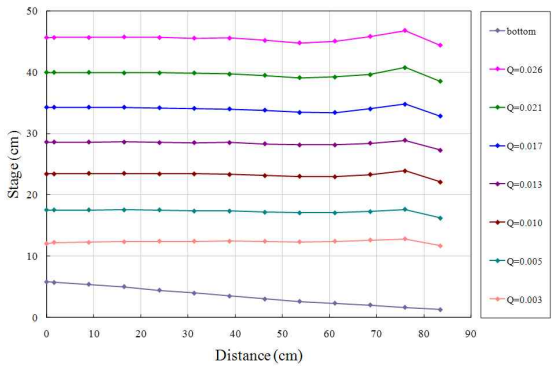
(d) 유도벽 각도 = 120°



(e) 유도벽 각도 = 180°

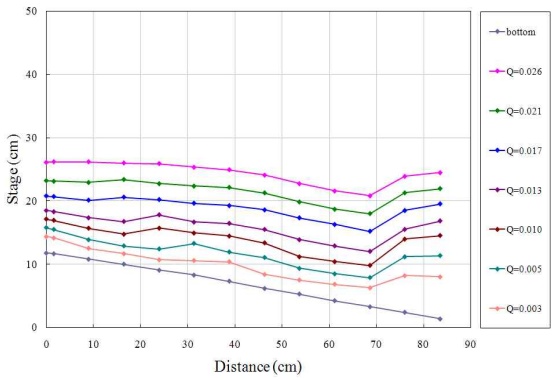


(f) 유도벽 각도 = 210°

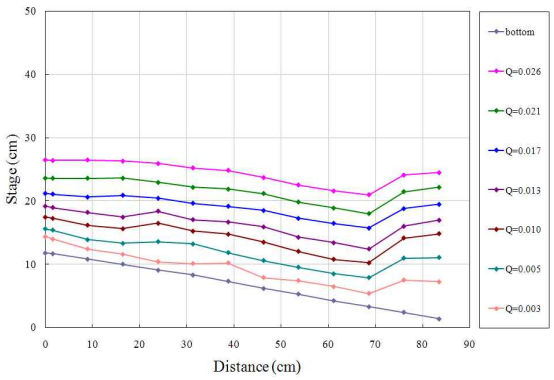


(g) 유도벽 각도 = 270°

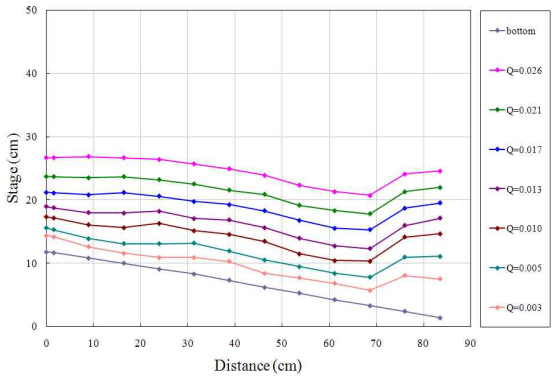
그림 2.1.16 종횡경사형(5%-5%) 유입구 수위 변화



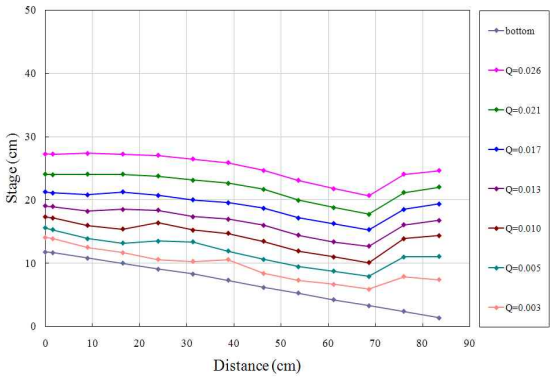
(a) 유도벽 각도 = 0°



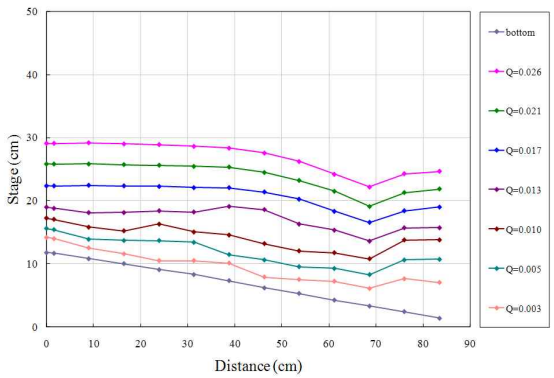
(b) 유도벽 각도 = 30°



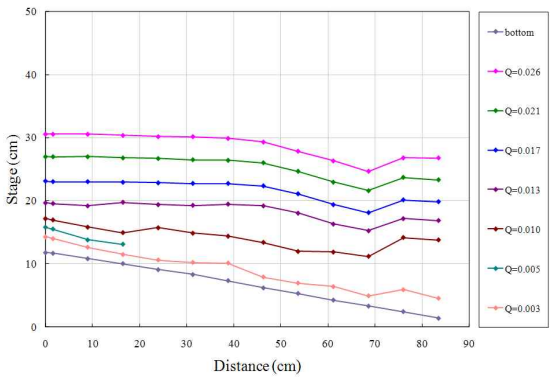
(c) 유도벽 각도 = 90°



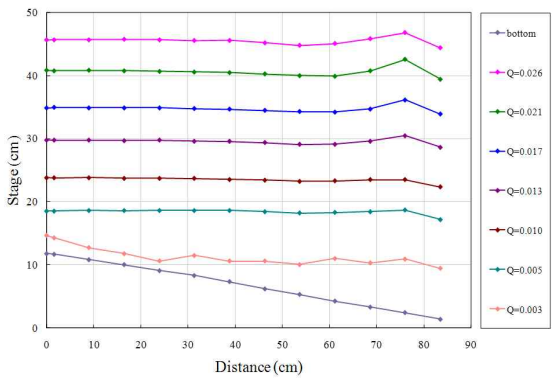
(d) 유도벽 각도 = 120°



(e) 유도벽 각도 = 180°

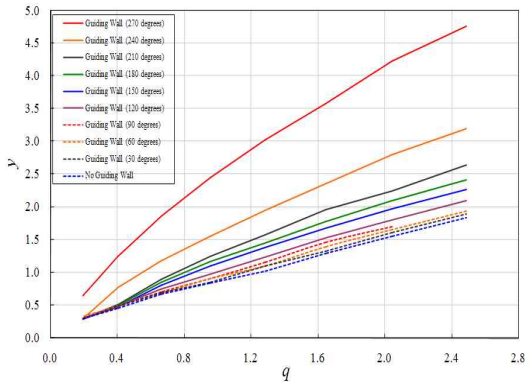


(f) 유도벽 각도 = 210°

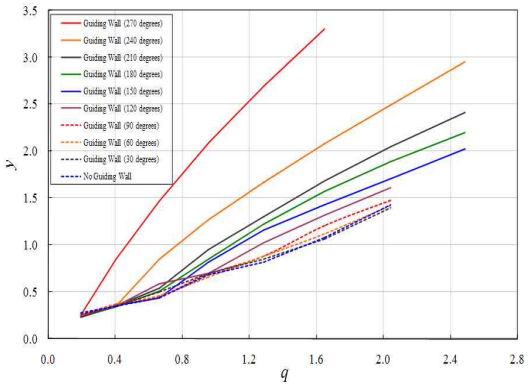


(g) 유도벽 각도 = 270°

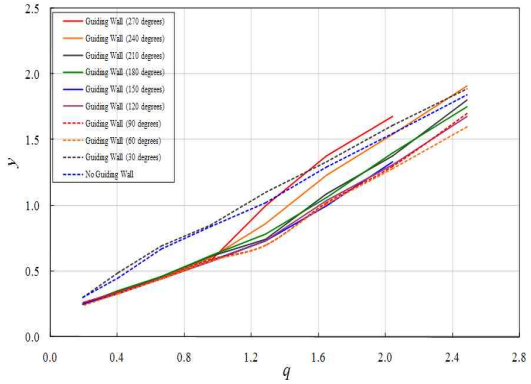
그림 2.1.17 종횡경사형(10%-5%) 유입구 수위 변화



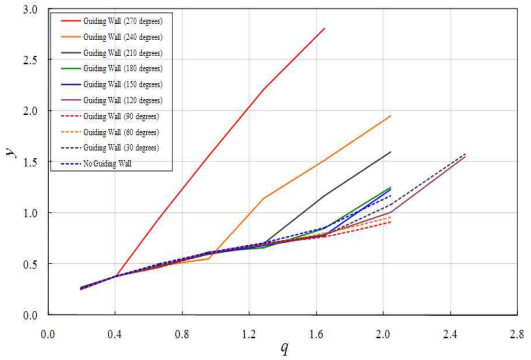
(a) 종경사형 경사도 = 5%



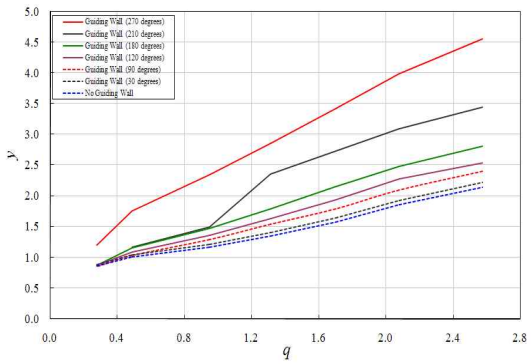
(b) 종경사형 경사도 = 7.5%



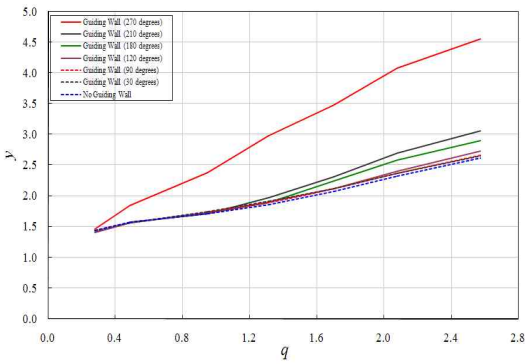
(c) 종경사형 경사도 = 10%



(d) 종경사형 12.5%



(e) 종횡경사형 5%-5%

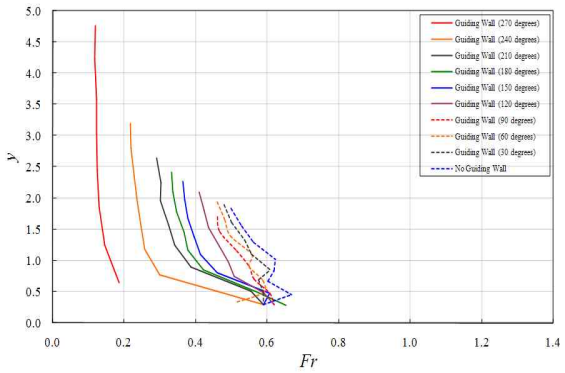


(f) 종횡경사형 10%-5%

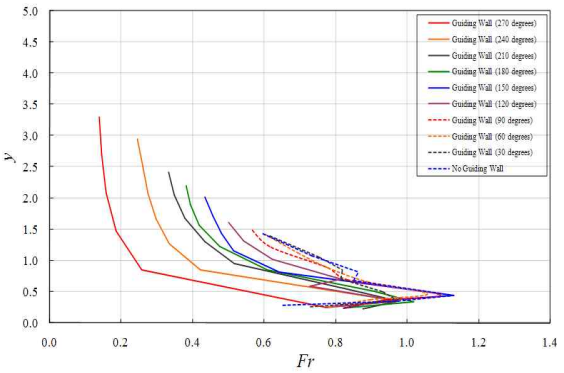
그림 2.1.18 나선식 유입구의 수위-유량 관계 비교

③ 나선식 유입구의 설계 인자 검토

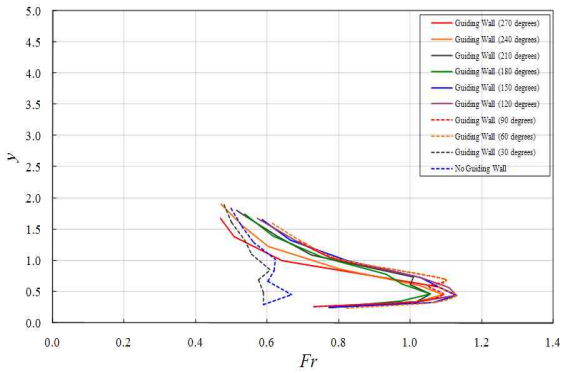
- 종경사형 나선식 유입구에서 상류와 사류 흐름 특성을 비교하기 위해 유입구 형상에 대한 무차원 수위값(y)과 프루드수(Fr)의 관계를 검토(그림 2.1.19)
- 종경사 10% 일 때, 수위 변동량이 최소가 되며 유입효율이 극대화(그림 2.1.20)
- 최대 유입유량에서 유도벽의 증감과 수위 변동량은 관계가 있으며, 종경사 10% 일 때 가장 안정적인 유입효율이 나타남(그림 2.1.21)
- 종횡경사형 구조물에서는 개수로 흐름과 마찬가지로 유입구 내부에서 흐름이 안정적으로 상류에서 사류로 변화됨에 따라 유입구 내부에서의 수표면이 개수로 흐름의 M2 곡선과 유사한 형태로 형성될 것으로 예측 가능(그림 2.1.22)



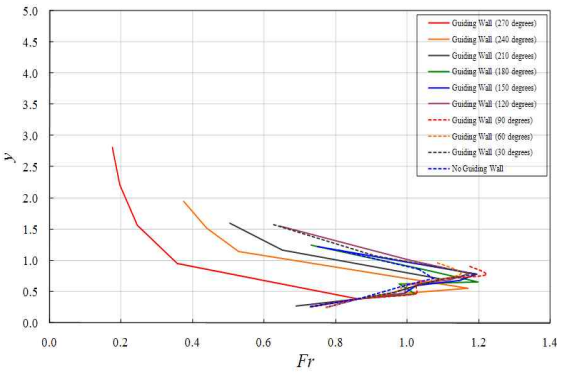
(a) 종경사 = 5%



(b) 종경사 = 7.5%

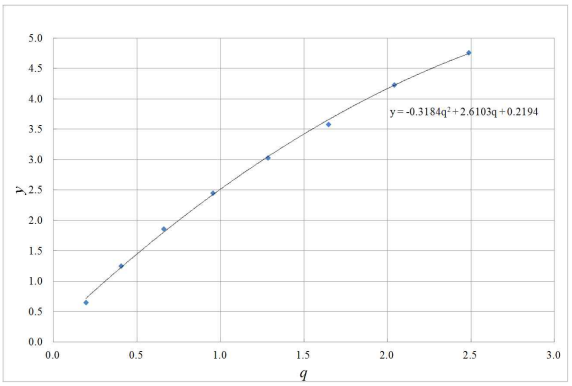


(c) 종경사 = 10%

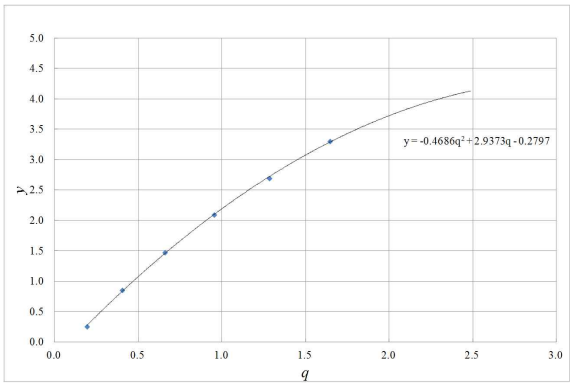


(d) 종경사 = 12.5%

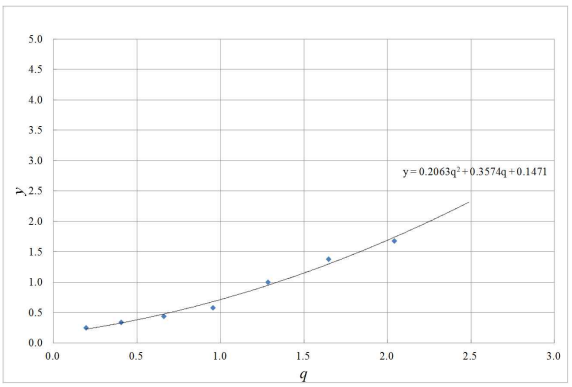
그림 2.1.19 종경사형 나선식 유입구 수위-프루드수 관계 비교



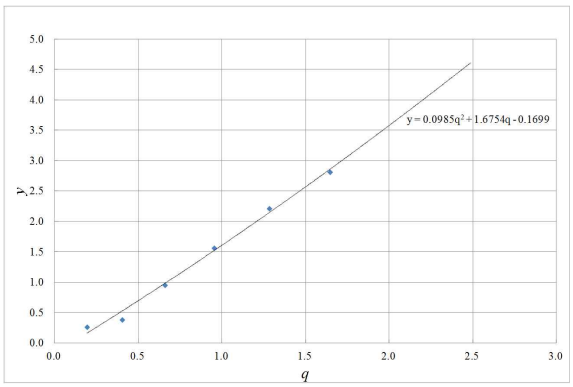
(a) 종경사도 = 5%



(b) 종경사도 = 7.5%

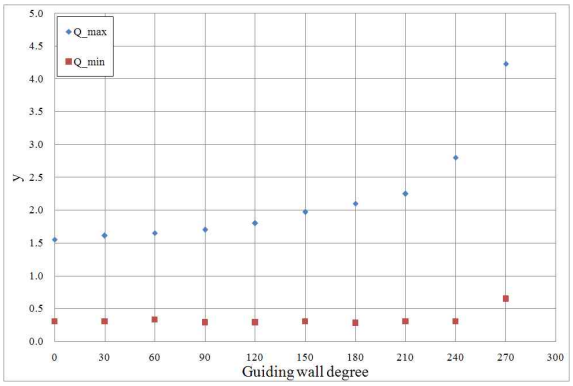


(c) 종경사도 = 10%

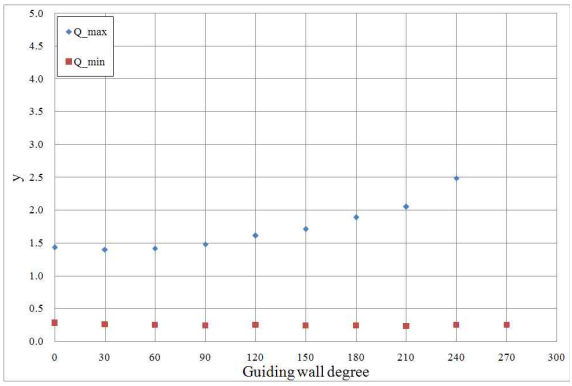


(d) 종경사도 = 12.5%

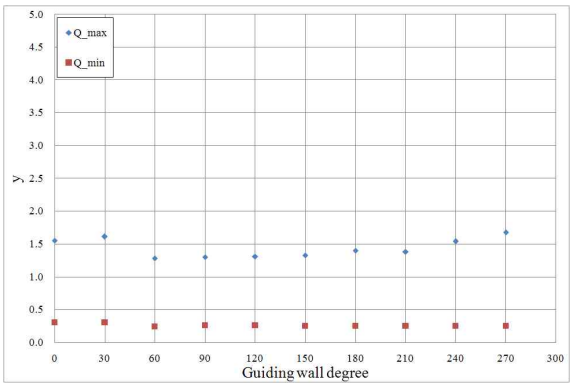
그림 2.1.20 종경사형 유입구 수위-유량관계 곡선



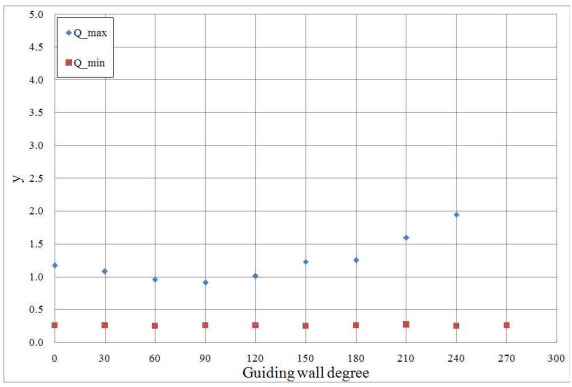
(a) 종경사도 = 5%



(b) 종경사도 = 7.5%

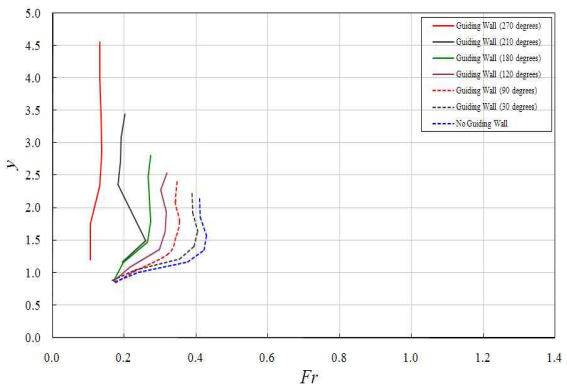


(c) 종경사도 = 10%

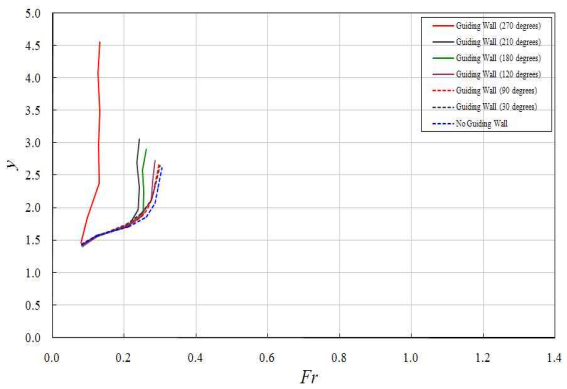


(d) 종경사도 = 12.5%

그림 2.1.21 종경사형 유입구의 유도벽 각도-수위관계 비교



(a) 종횡경사도 = 5%-5%

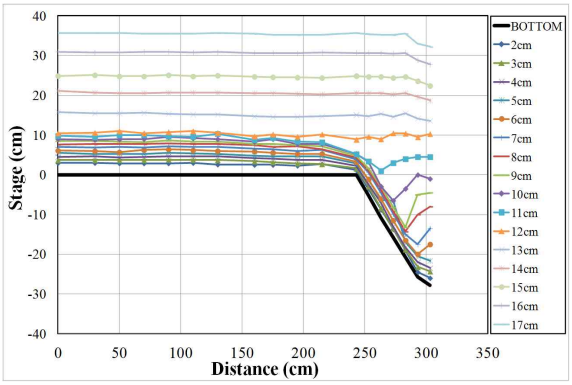


(b) 종횡경사도 = 10%-5%

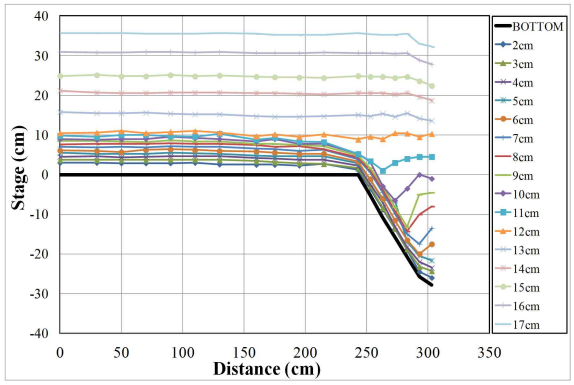
그림 2.1.22 종횡경사형 나선식 유입구 수위-프루드수 관계 비교

④ 접선식 유입구의 흐름특성 분석

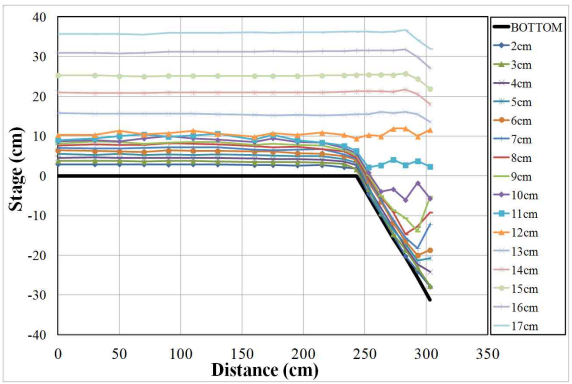
- 접선식 유입구의 경우, 저유량 유입조건에서 유입구 급축부로 인해 통수면적이 감소하면서 유입구 내 수위가 상승(그림 2.1.23)
- 유입유량이 증가할수록 유입구 내 수위 상승 구간이 길어지다 유입유량 0.0143 m^3/s 이상에서 접근수로와 유입구의 수위가 안정적으로 형성
- 실험에 사용된 접선식 유입구 모형의 경우, 유입유량 0.0143 m^3/s부터 유입구 내부 안정적인 흐름이 형성되고, 저유량 유입조건에서는 유입구 급축부로 인해 유입효율이 감소하는 것으로 확인



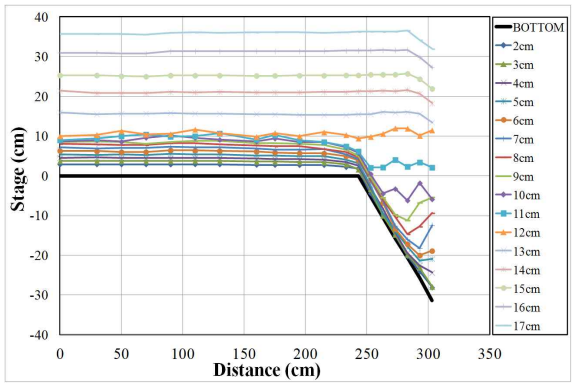
(a) 우안외벽



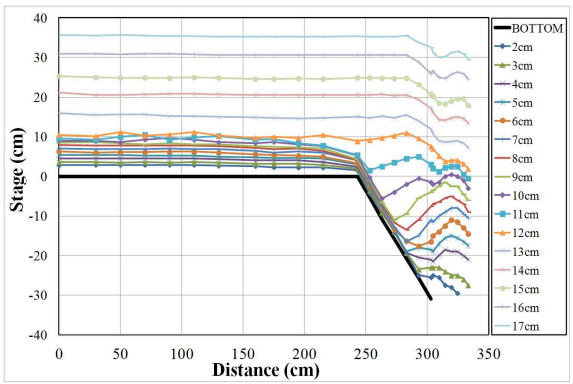
(b) 우안



(c) 중심



(d) 좌안



(e) 좌안외벽

그림 2.2.23 접선식 유입구 수위 변화

(나) 다단식 유입구의 흐름특성 분석

○ 나선식 유입구와 접선식 유입부의 경우, 저유량 유입조건에서 유입구 유입흐름이 수직갱의 벽면을 타고 흐르지 못해 흐름에너지가 소산되지 않은 채 낙하

○ 저유량 유입조건에서 흐름에너지 소산 문제를 개선하기 위해 바닥 경사와 바닥고가 다른 계단 형상의 구조를 접선식 유입구 바닥면에 적용한 다단식 유입구를 개발(그림 2.1.24)

○ 각 단은 우안에서부터 첫 번째 단이 접선식 유입구와 동일한 27.50°, 두 번째 단이 22.78°, 마지막 세 번째 단은 17.71°의 바닥 경사를 반영

○ 다단식 유입구의 각 단의 바닥고는 최대 12.9 cm의 차이가 있어 설계유량에서는 단의 높이와 상관없이 접선식 유입구와 유사한 흐름특성을 가지게 되지만 저유량에서는 좌안의 바닥고가 가장 낮은 단으로 흐름이 형성되어 유입구에서 안정적인 흐름을 유도할 수 있어 수직갱 내부에서 흐름에너지 소산이 유리

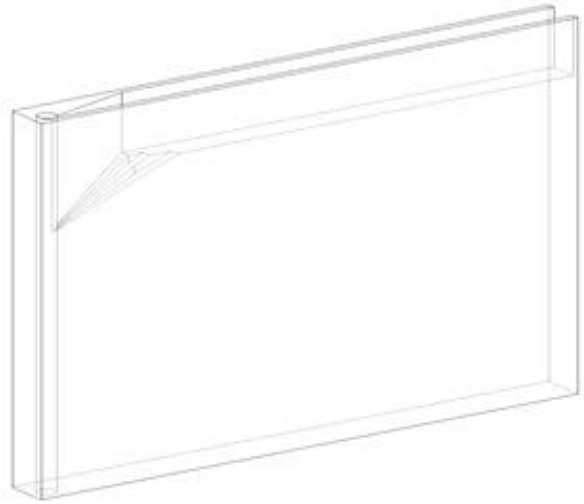


그림 2.2.24 다단식 유입구

① 수리모형실험 및 분석 결과

○ 저유량 유입조건에서 좌안의 가장 낮은 단으로 흐름이 유도되어 안정적인 유입흐름을 형성(그림 2.2.25)

○ 접선식 유입구와 동일하게 유입유량이 증가하면서 급축부 통수면적이 줄어들어 유입구 수위가 상승하였지만, 고유량 유입조건에서 접선식 유입구의 접근수로 수위보다는 많이 감소(그림 2.2.23, 그림 2.2.25)

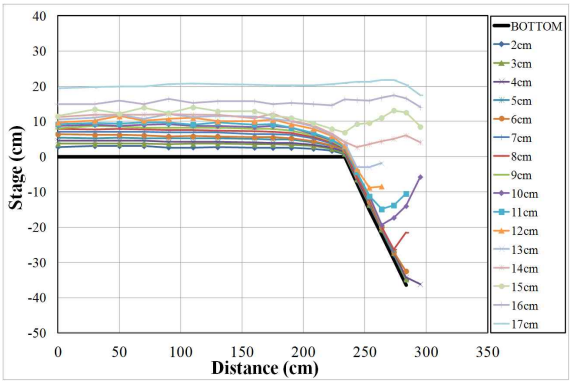
○ 경사부 수위 상승 구간이 접선식 유입구보다 짧아져 수직갱으로 유도되는 유입흐름이 안정적으로 유입

② 설계 인자 검토

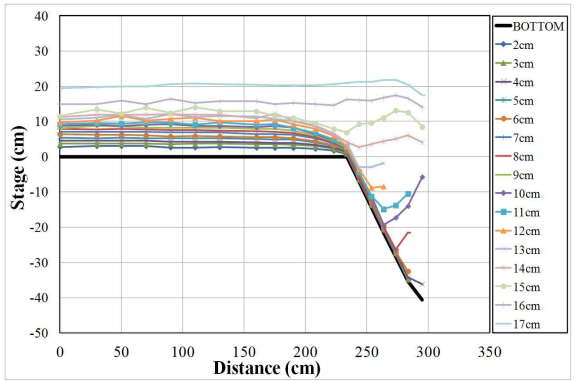
○ 다단식 유입구는 유입구와 수직갱의 벽면 마찰을 이용해 흐름에너지를 소산시키고 수직갱 내부 공기공동을 형성해 안정적인 흐름을 유도하는 유입구 모형으로, 나선식유입구와 접선식 유입구와 동일하게 안정적인 상류($Fr_a < 0.7$) 또는 안정적인 사류($Fr_a > 1.5$) 흐름이 유입되어야 함

○ 접선식 유입구를 대표 비교군으로 선택해 다단식 유입구의 상류와 사류 흐름특성을 비교하고자 유입구 설계 조건에 따른 무차원 수위(y)와 프루드수(Fr)의 관계를 분석(그림 2.2.26)

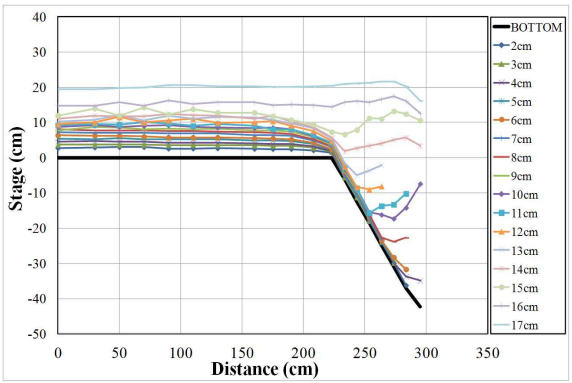
○ 접선식 유입구와 다단식 유입구 모두 유입구 내 상류 흐름이 형성되었으며, 접선식 유입구보다 다단식 유입구의 수위 변화 폭이 작고 유입흐름이 안정적임



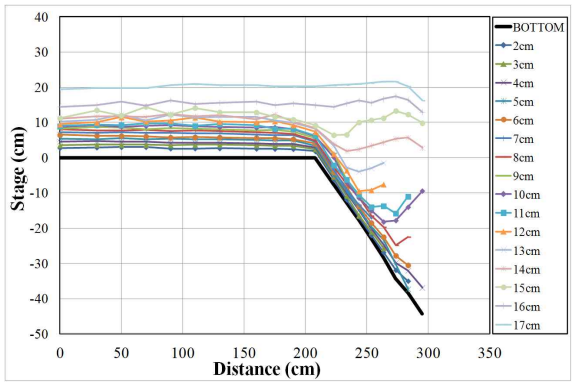
(a) 우안외벽



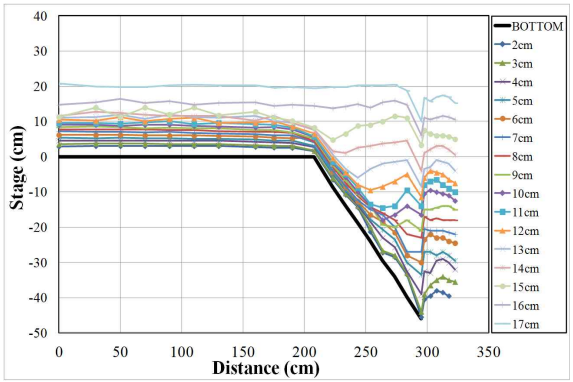
(b) 우안



(c) 중심



(d) 좌안



(e) 좌안외벽

그림 2.2.25 다단식 유입구 수위 변화

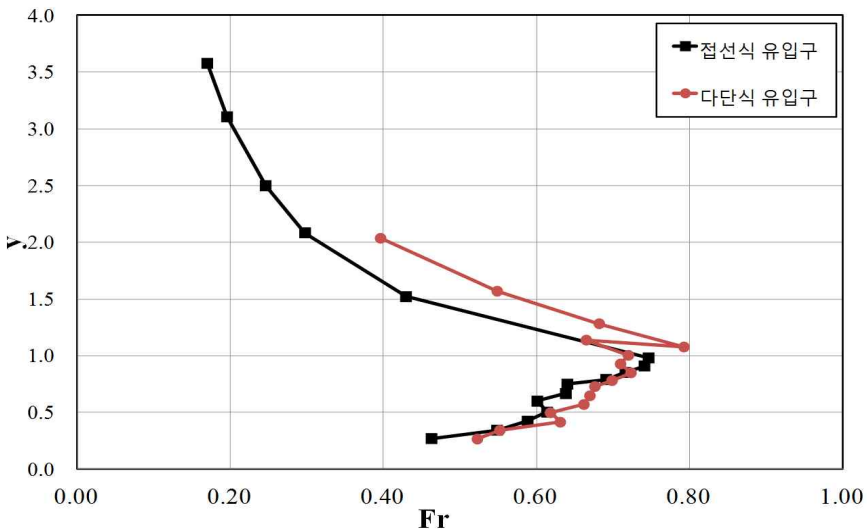


그림 2.2.26 접선식 유입구와 다단식 유입구의 흐름특성 비교

(다) 다단식 나선 신형 유입구 형상 개발

○ 나선식 유입구와 접선식 유입구, 다단식 유입구의 흐름특성 분석을 통해 유입구 형상별 장단점 및 개선사항을 반영한 신형 유입구 설계기술 개발(그림 2.1.27)

○ 유입구 와류 흐름을 유도해 수직갱 내 공기공동(air-core)을 형성하고 공기 배출을 원활하게 하는 나선식 유입구의 장점과 유입구 바닥면에 계단식 다단 구조를 도입해 저유량 조건에서의 유입효율을 개선한 다단식 유입구의 장점을 반영한 다단식 나선 유입구를 개발하고 특허출원(2016. 4. 4.) 및 특허등록(2016. 11. 7.)(그림 2.1.28)

① 다단식 나선 유입구 흐름특성 분석

○ 유입유량 변화에 따른 유입부 수위 변화 측정 후 흐름특성 분석

○ 그림 2.1.29와 같이 접근수로와 낙차부 구간에서 유입유량 조건(표 2.1.3)에 따라 일정 간격 수위를 측정하였으며, 그림 2.1.30에 유입유량에 따른 수위 측정결과를 도시

○ 다단식 나선 유입구의 유입부 흐름특성 분석 결과, 저유량 유입조건에서 고유량 유입조건까지 접근수로와 유입구 전체구간에서 큰 수위 변동 없이 안정적인 유입 흐름을 유지

○ 유입구 와류 흐름 형성 및 유출 효과 분석 결과, 도수(hydraulic jump)로 인한 흐름 정체 현상이 나타나지 않았으며, 모든 유입유량 조건에서 안정된 와류 흐름이 유도되어 수직갱 내부 적정한 공기공동 형상을 유지

○ 수직갱 내부 적정한 공기공동 형상을 유지하며 낙하 흐름을 안정적으로 유도하는 것을 확인하였으나, 유입유량이 증가함에 따라 접근수로와 유입구 수위가 증가

○ 기존 유입구 형상(나선식, 접선식, 다단식)보다 유입부 구간에서 안정적인 유입 흐름을 형성하지만, 유입유량이 증가함에 따라 유입부 수위가 증가하는 것으로 보아 유입구 설계조건(유입구 폭, 경사 등)에 따라 유입효율이 변동됨

○ 기존 나선식 유입구보다 유입구 폭 감소

○ 기존 접선식과 다단식 유입구보다 유입구 폭 증가 및 경사 감소

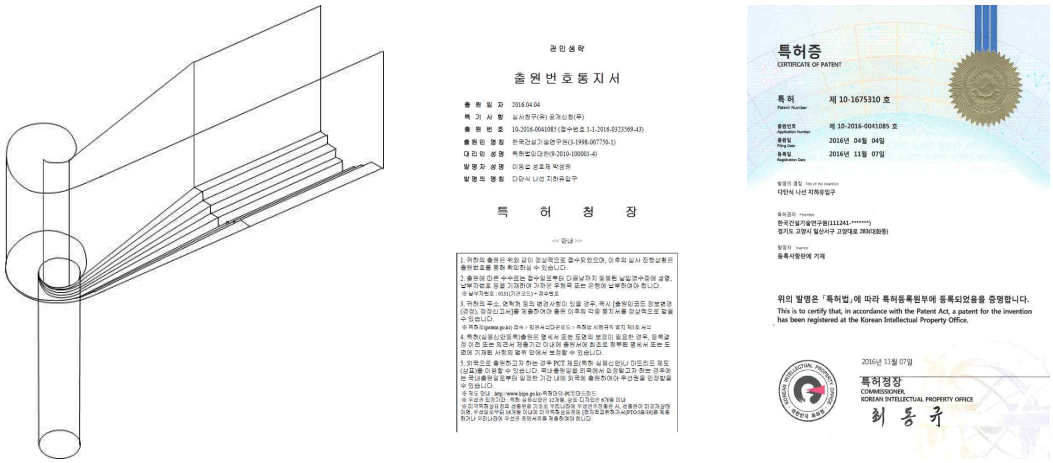
○ 다단식 나선 유입구를 지하유입시설에 적용하기 위해서는 지하방수로 설계 단계에서 목표 설계 유량과 유입부 설계 수위를 결정한 후, 수리모형실험 및 수치해석을 통한 수직갱 직경 검토가 필요

표 2.1.3 다단식 나선 유입구 유입유량 실험조건

유량공급 수조 위어고(m)	유입유량(㎥/s)	비고
0.05	0.0040	저유량
0.07	0.0065	↑
0.09	0.0094	↕
0.11	0.0127	↓
0.13	0.0163	고유량



그림 2.1.27 다단식 나선 유입구



(a) 모식도 (b) 특허출원 (c) 특허등록

그림 2.1.28 다단식 나선 유입구 특허출원 및 특허등록

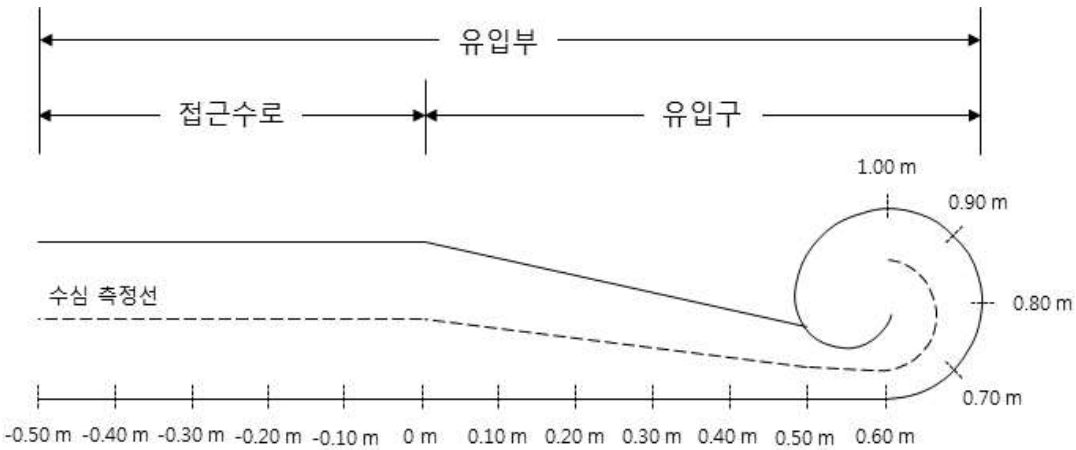


그림 2.1.29 다단식 나선 유입구 수위 측정 구간

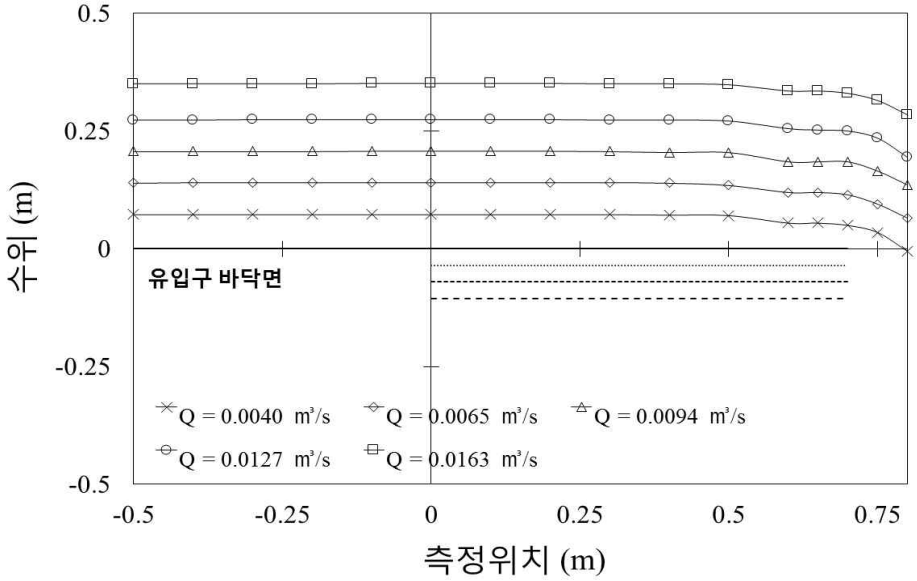


그림2.1.30 다단식 나선 유입구 수위 측정결과

② 유입구 형상 별 유입효율 비교

- 새롭게 제안된 다단식 나선 유입구의 유입효율 개선 효과를 확인하기 위해 기존 유입구 형상인 나선식 유입구와 접선식 유입구, 다단식 유입구의 흐름특성 비교
- 나선부 구조 및 다단식 구조를 도입한 와류 흐름 유도로 나선식 유입구보다 유입효율이 개선되었지만, 접근수로 구간에서 수위가 상승하며 접근수로 유입효율은 감소(그림 2.1.31)
- 접선식 유입구의 경우, 고유량 유입조건에서 유입부 흐름을 상류($Fr<1$)에서 사류($Fr>1$)로 변화시키는 유입구 고유 기능을 상실하였지만, 다단식 나선 유입구에서는 전체 유입유량 조건에서 유입구 기능을 안정적으로 유지(그림 2.1.32)
- 다단식 나선 유입구의 경우, 저유량 유입조건에서 유입구 정체현상으로 유입효율이 감소되었던 접선식 유입구와 다단식 유입구보다 전체적인 유입효율을 안정적으로 유지(그림 2.1.32, 그림 2.1.33)
- 다단식 나선 유입구의 유입효율 개선 확인 결과, 기존 유입구 형상보다 접근수로 수위가 안정적이며, 수직갱 내부 질식(choking) 현상에 대한 위험성 감소

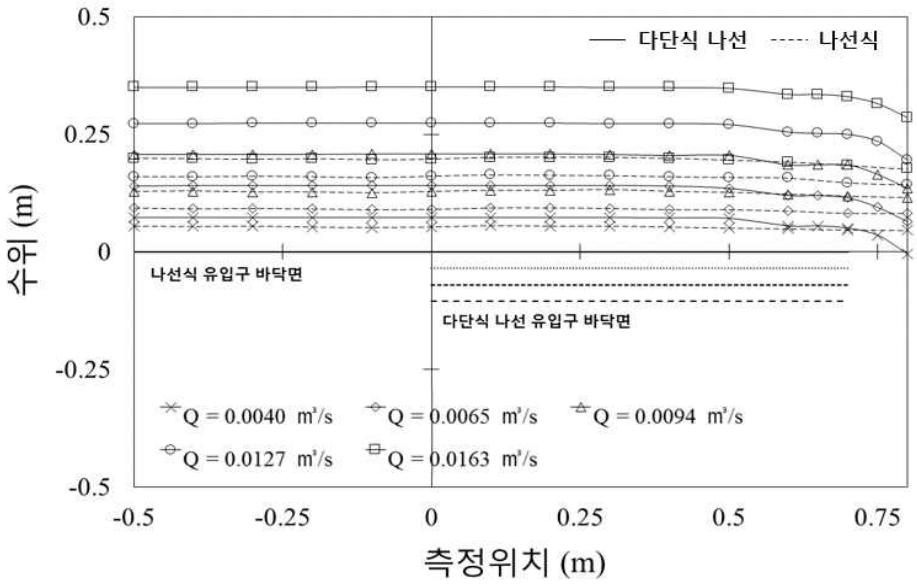


그림 2.1.31 나선식 유입구과 다단식 나선 유입구의 수위 변화 비교

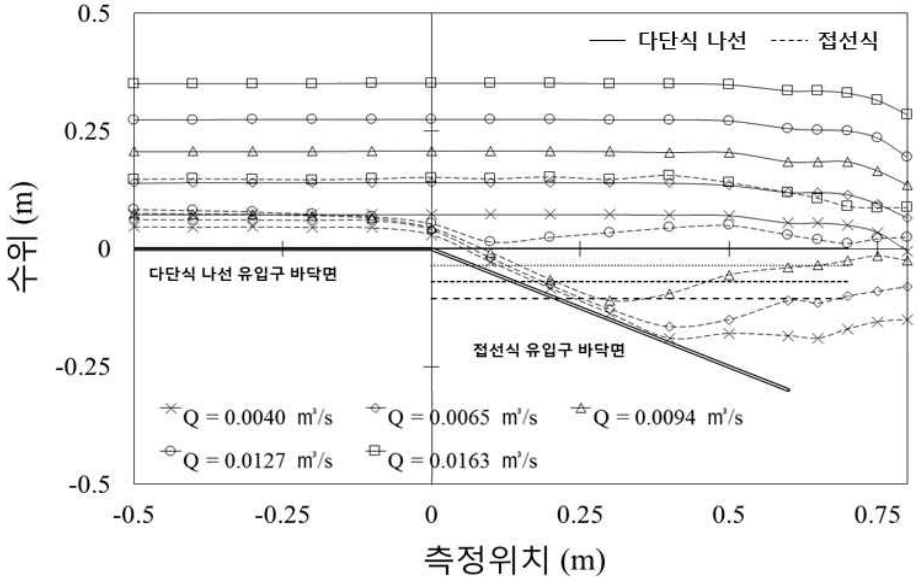


그림 2.1.32 접선식 유입구과 다단식 나선 유입구의 수위 변화 비교

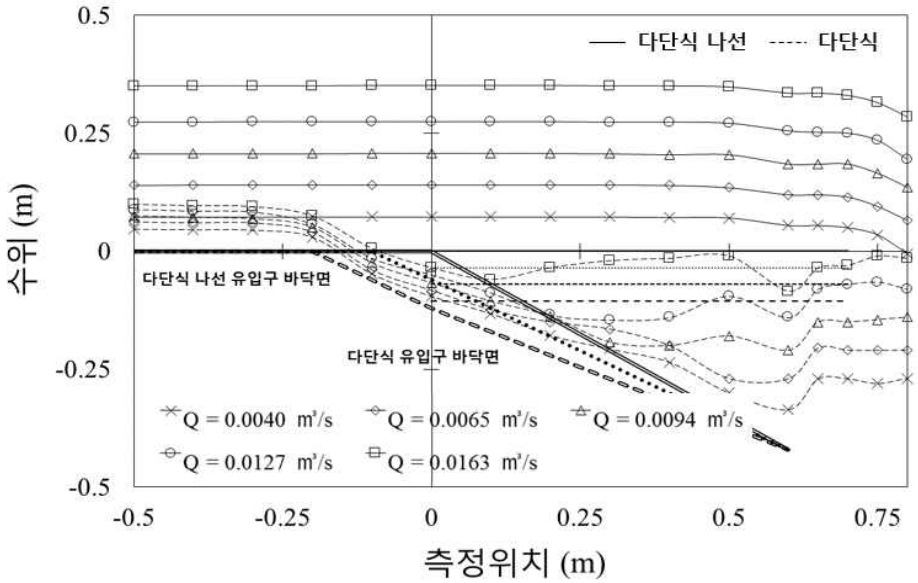
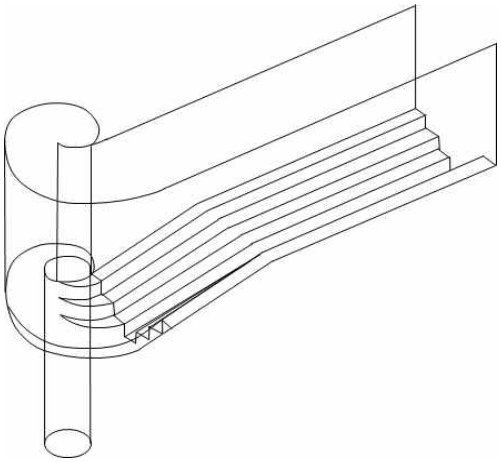
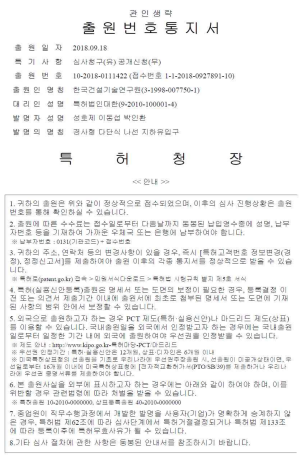


그림 2.1.33 다단식 유입구과 다단식 나선 유입구의 수위 변화 비교

(라) 다단식 나선 유입구 유입부 수위 상승률 저감을 위한 유입구 바닥면 경사 도입

- ○ 유입구 바닥면 경사 도입으로 유입효율이 크게 증가한 접선식 유입구의 장점을 반영해 다단식 나선 유입구 바닥면에 경사를 도입
- ○ 유입구 바닥면에 경사를 도입함으로써 유입구 내 유입흐름을 가속시켜 유입효율을 증가시키고, 유입구 내 수위 감소 유도
- ○ 경사형 다단식 나선 유입구에 관한 기술 개발 및 특허출원 완료(그림 2.1.34)
- ○ 개선 효과 확인 및 기술 적용을 위해서는 향후 수리모형실험 및 수치해석적 방법을 이용한 성능 검증 필요





출원번호통지서

출원일자 2018.09.18
특기사항 심사청구(유) 공개신청(무)
출원번호 10-2018-0111422 (접수번호 1-1-2018-0927891-10)
출원인 명칭 한국건설기술연구원(3-1998-007750-1)
대리인 성명 특허법인대한(9-2010-100001-4)
발명자 성명 성호제 이동섭 박인환
발명의 명칭 경사형 다단식 나선 지하유입구

특 허 청 장

<< 안내 >>

1. 귀하의 출원은 위와 같이 정상적으로 접수되었으며, 이후의 심사 진행상황은 출원번호를 통해 확인하실 수 있습니다.
2. 출원에 따른 수수료는 접수일로부터 다음날까지 납입영수증에 성명, 납부자번호 등을 기재하여 가까운 우체국 또는 은행에 납부하여야 합니다.
※ 납부번호 : 015(기관코드)+접수번호
3. 주권의 주소, 연락처 등의 변경사항이 있을 경우, 즉시 [특허고객번호 정보변경(경정), 정정신고서]를 제출하여야 출원 이후의 각종 통지서를 정상적으로 받을 수 있습니다.
※ 특허로(patent.go.kr) 접속 > 민원서식다운로드 > 특허로 사항고객 별지 제1호 서식
4. 특허(실용신안등록)출원은 명세서 또는 도면의 보정이 필요한 경우, 등록결정 이전 또는 이견서 제출기간 이내에 출원서에 최초로 첨부된 명세서 또는 도면의 기재된 사항의 범위 안에서 보정할 수 있습니다.
5. 외국으로 출원하고자 하는 경우 PCT 제도(특허·실용신안)나 마드리드 제도(상표)를 이용할 수 있습니다. 국내출원일을 외국에서 인정받고자 하는 경우에는 국내출원일로부터 일정한 기간 내에 외국에 출원하여야 우선권을 인정받을 수 있습니다.
※ 제도 안내 : http://www.kipo.go.kr>특허>PCT/마드리드
※ 무료 도움기관 : 특허·실용신안은 1236번, 상표·디자인은 4378번 이내
※ 고객특허사랑출원의 신출원은 우편으로 우선심사와 무선통신주간출원 시, 선출원이 이중개설되어, 우선일로부터 18개월 이내에 미국특허상표청이 [지하국제특허 서](PTO/SB/30)를 자동하거나 우리나라와 우리의 출원서류를 자동전송이 됩니다.
6. 본 출원사실을 외부에 표시하고자 하는 경우에는 아래와 같이 하여야 하며, 이를 위반할 경우 관련법령에 따라 처벌을 받을 수 있습니다.
※ 특허출원 10-2016-0000000, 상표등록출원 40-2016-0000000
7. 종업원이 직무수행과정에서 개발한 발명을 사용자(기업)가 명확하게 승계하지 않은 경우, 특허법 제62조에 따라 심사단계에서 특허거절결정되거나 특허법 제133조에 따라 등록이후에 특허무효사유가 될 수 있습니다.
8.기타 심사 절차에 관한 사항은 동봉된 안내서를 참조하시기 바랍니다.

그림 2.1.34 경사형 다단식 나선 유입구

(3) 공기공동 형상 분석을 통한 수직갱 내부 질식 방지 및 유입효율 개선

○ 새롭게 제안된 다단식 나선 유입구의 유입효율 개선 효과를 정량적으로 산정하기 위해 수직갱 내부 공기공동 형상 변화를 계측하고 공기 배출 효과를 분석

○ 낙차부 및 수직갱 내부 흐름 주변의 구조물로 인해 직접계측이 어려운 공기공동의 형상을 측정하기 위한 새로운 계측기법 개발 필요

(가) 수직갱 내부 공기공동 형상 측정을 위한 계측기법 개발

① 아누이노를 이용한 전기전도도(electric conductivity) 측정기법 개발 및 검토

○ 전기전도도의 경우, 매질이 물과 공기로 서로 변화될 때 매우 높은 민감도를 가지며 신호값이 급격하게 변화함에 따라 이를 이용한 공기공동 계측기법을 개발

○ 전기전도도를 이용한 계측기법의 적용성 확인 및 결과 검증을 위해 예비실험을 수행한 결과, 수직갱 내부 벽면의 수벽을 통과해 공기 흐름으로 변화될 때 급격한 신호값 감소로 수벽 두께 측정 가능(그림 2.1.35)

○ 실험관측자가 직접 계측부를 수직갱 내부로 진입시켜야 하며, 실험관측자의 주관적인 판단에 따라 측정 두께 오차가 발생할 가능성이 커 자동화 시스템을 구축

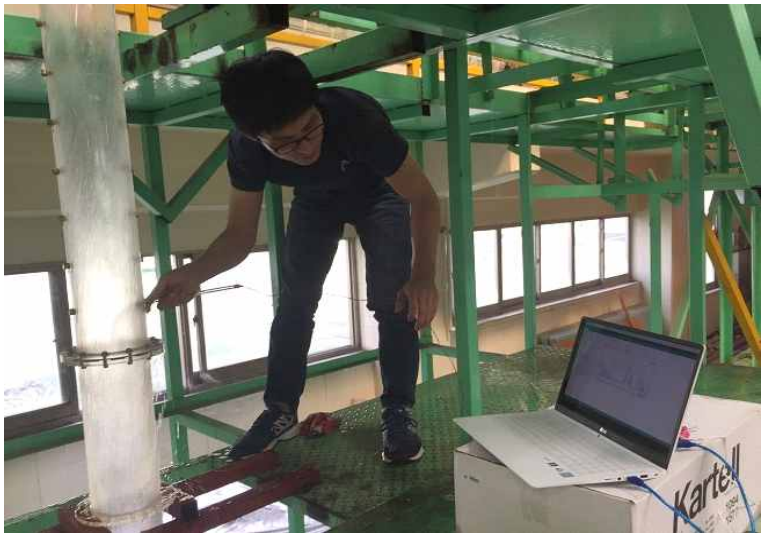


그림 2.1.35 마이크로컨트롤러(아두이노) 기법을 이용한 공기공동 계측 시스템

② 전기전도도를 이용한 수직갱 내부 공기공동 자동 측정 시스템 개발

○ 계측부의 전기전도도(아날로그) 신호를 디지털 신호로 변환하여 전진, 후진이 가능한 구동부 제어를 위한 시스템 구축(그림 2.1.36)

○ 구동부 제어 속도는 최소 초당 1 mm 이동하도록 설정할 수 있으며, 구동부 이동 시작 후 물 흐름에서 공기 흐름으로 변화되어 신호값이 급격하게 감소하는 순간 구동부가 정지하고 이동거리가 자동으로 계산됨

○ 신호값 변화에 대한 민감도를 설정할 수 있으며, 기초실험을 통해 매질이 바뀌는 순간 신속하게 정지하는 것을 확인

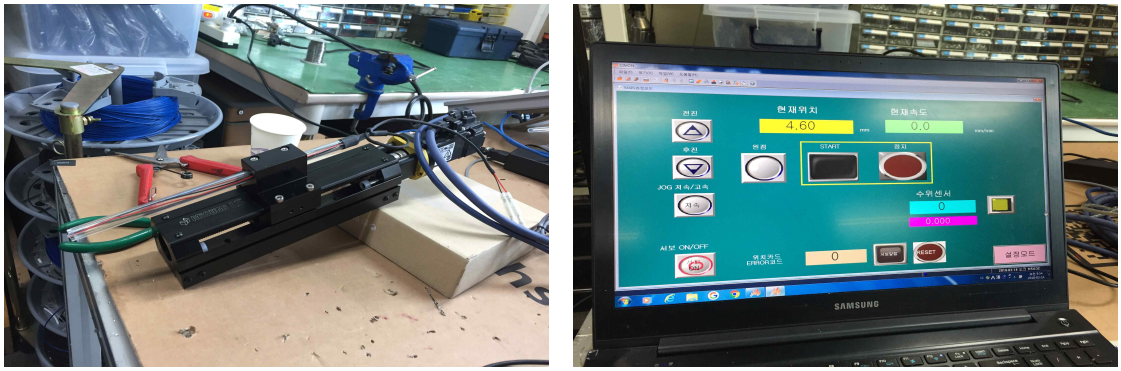


그림 2.1.36 공기공동 자동 측정 시스템 센서 및 구동부(좌)와 제어화면(우)

③ 공기공동 형상 측정기구 제작

○ 낙차부에서 발생하는 공기공동의 경우, 수직갱과 달리 유입구 벽면에 자동 측정 시스템을 사용하기 위한 계측 구멍 시공이 유입흐름에 큰 영향을 줄 수 있어 새로운 공기공동 측정기구를 개발(그림 2.1.37)

○ 5 mm 단위로 색상 표기를 한 계측침을 측정봉 하단에 부착하고 유입구 상부로 진입시켜 영상 촬영 후 5 mm 단위의 색상 표기를 기반으로 수벽 두께를 추출



그림 2.1.37 공기공동 형상 측정기구(좌) 및 측정 모습(우)

(나) 공기공동 계측 방법

○ 유입구 낙차부 내 공기공동 형상은 측정기구(그림 2.1.37)를 이용해 계측하였으며, 수직갱 내부 공기공동 형상은 전기전도도를 이용한 자동 측정 시스템(그림 2.1.36)을 이용해 계측

○ 낙차부와 수직갱이 만나는 접합점을 기준점으로 낙차부 방향 상단 0.3 m 구간과 수직갱 방향 하단 0.24 m 구간에 대해 총 0.54 m 구간을 0.06 m 간격으로 계측(그림 2.1.38)

○ 다단식 나선 유입구와 함께 비교군으로 접선식 유입구를 선택해 유입유량 변화에 따른 수직갱 내부 공기공동 형상 변화를 측정

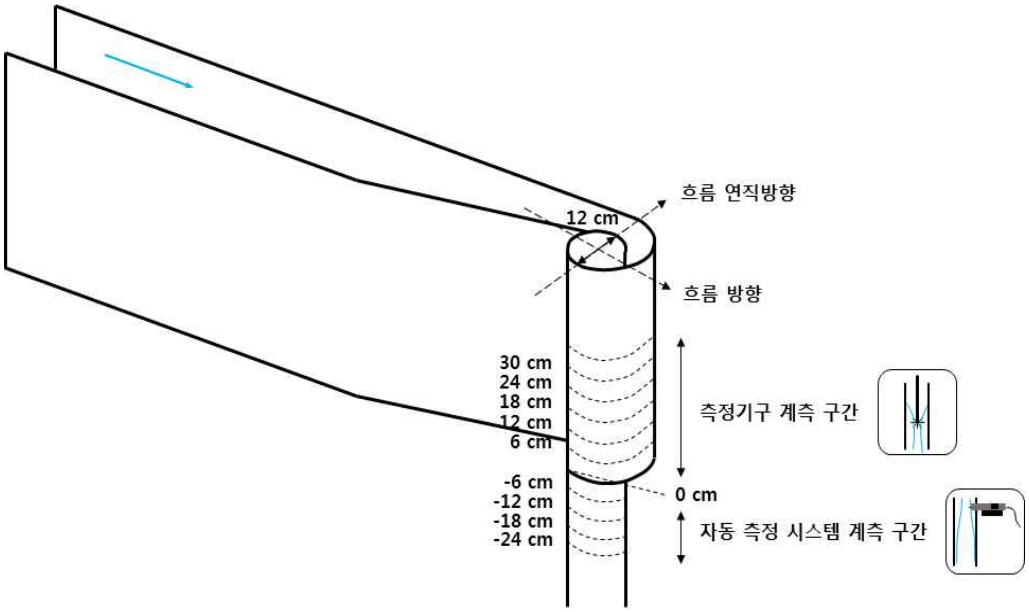


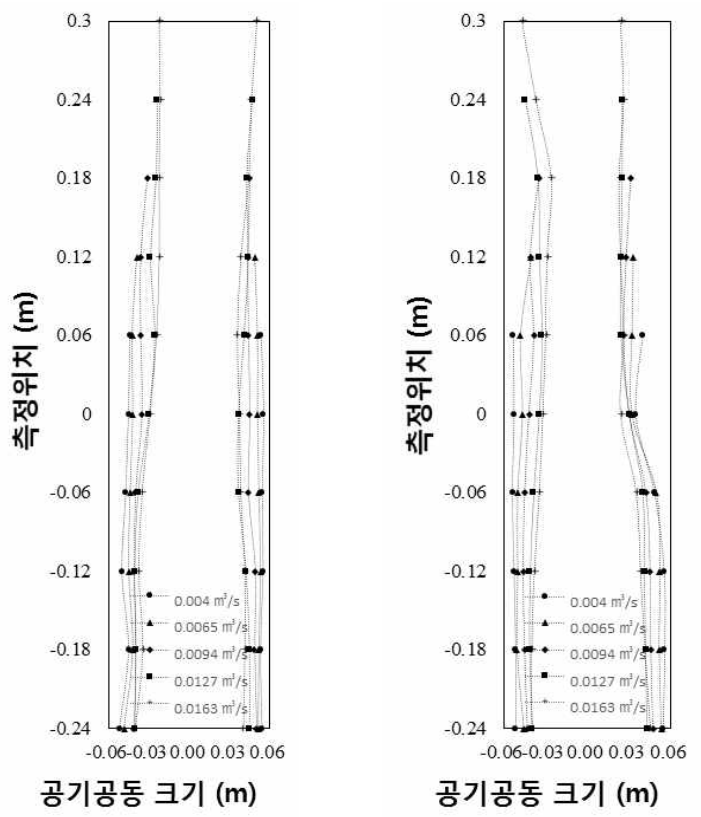
그림 2.1.38 공기공동 계측 구간 및 계측 지점

(다) 공기공동 형상 측정결과

○ 전체적으로 유입유량이 증가할수록 수직갱 내부 공기공동 형상의 크기가 점차 작아지면서 공기 배출 효과가 감소(그림 2.1.39, 그림 2.1.40)

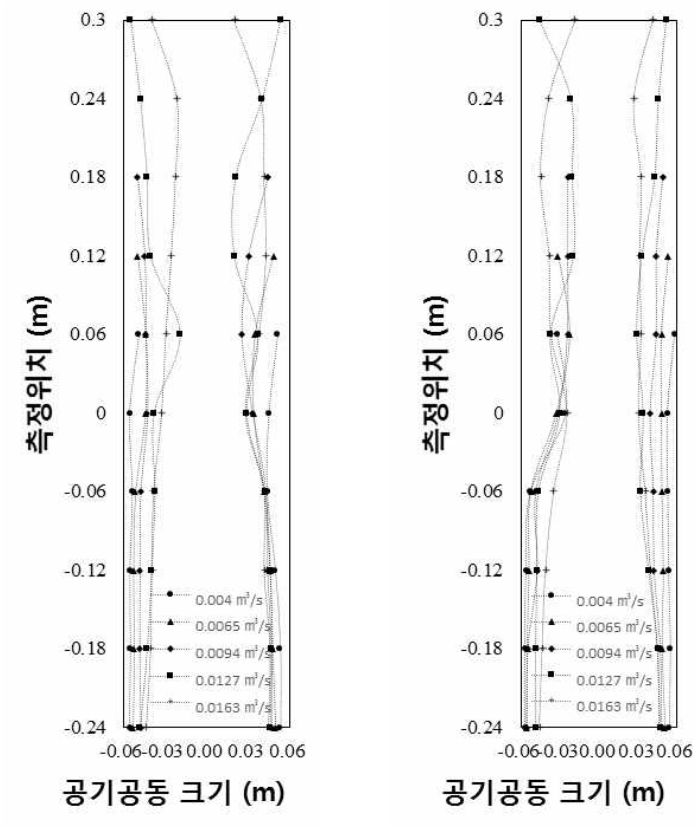
○ 흐름 방향이 자유 낙하 흐름으로 변화하는 낙차부-수직갱 접합부에서 흐름 집중 현상이 발생하고 공기공동 형상의 크기가 가장 작게 나타남

- 유입흐름이 자유 낙하 흐름으로 변화하는 낙차부-수직갱 접합부 구간(0 m~0.6 m 구간)의 질식 발생 위험성 높음



(a) 흐름방향 단면 (b) 흐름방향 연직단면

그림 2.1.39 수직갱 연직 방향의 공기공동 형상 변화 - 접선식 유입구



(a) 흐름방향 단면 (b) 흐름방향 연직단면

그림 2.1.40 수직갱 연직 방향의 공기공동 형상 변화 - 다단식 나선 유입구

○ 유입유량 변화에 따른 다단식 나선 유입구와 접선식 유입구의 공기공동 형상 변화를 비교할 수 있도록 그림 2.1.41에 나타내었으며, 동일한 유입유량 조건에서 다단식 나선 유입구의 공기공동 형상이 접선식 유입구의 공기공동 형상보다 크게 계측됨

○ 다단식 나선 유입구의 공기 배출 개선 효과를 확인하기 위해 유입유량에 따른 공기공동 형상의 최소 단면적 크기와 발생 위치, 수직갱 단면적 대비 비율을 분석(표 2.1.4)

○ 접선식 유입구는 수직갱 상단 0.12 m~0.18 m 지점에서 공기공동 형상의 최소 단면적이 발생하였으며, 다단식 나선 유입구에서는 수직갱 상단 0 m~0.6 m 지점에서 공기공동 형상의 최소 단면적이 발생

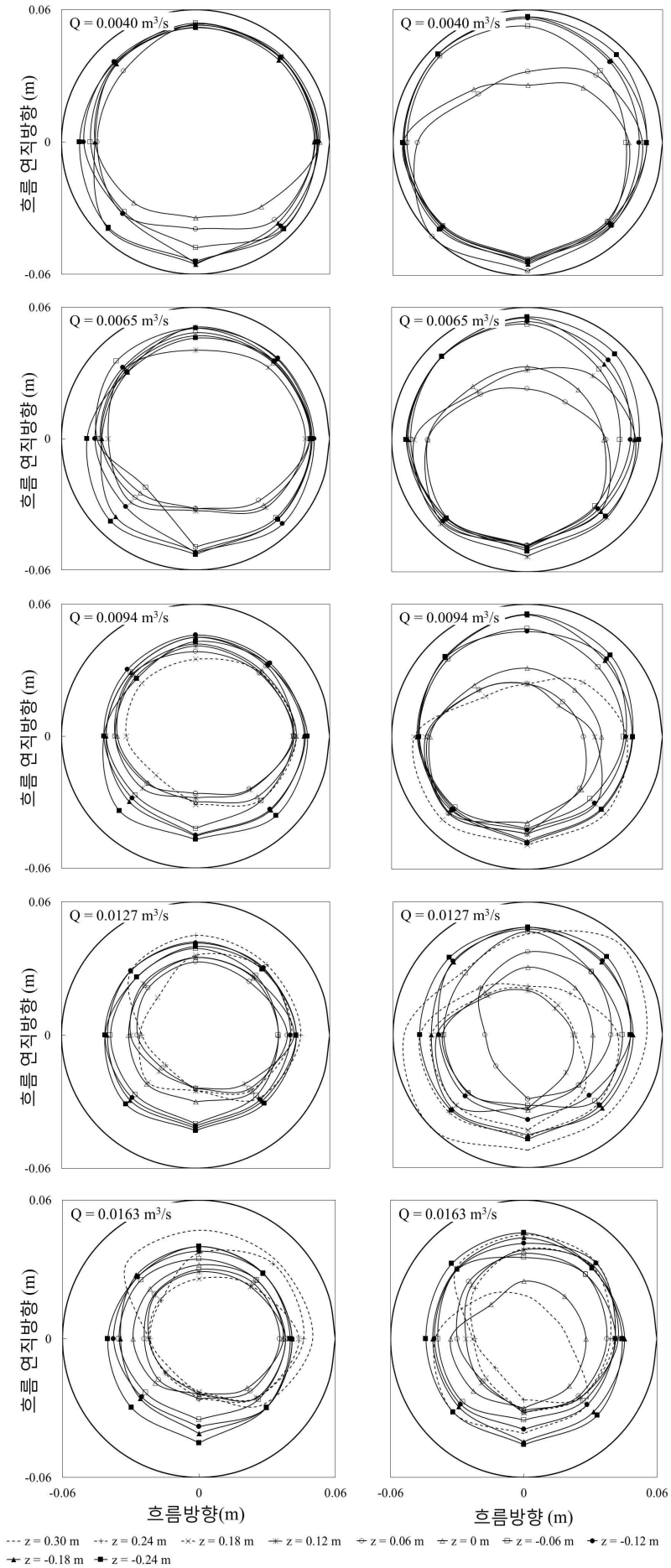
○ Jain과 Ettema(1987)는 지하유입시설 질식 방지를 위해서 수직갱 내부에서 발생하는 공기공동의 단면적은 수직갱 단면적을 기준으로 최소 25% 이상 되어야 한다고 제시하였으며, 이를 근거로 유입구 성능 평가를 위한 접선식 유입구와 다단식 나선 유입구의 전체 공기공동 형상의 크기(A_a)를 수직갱 단면적(A_d)의 비율로 표기(그림 2.1.42)

- 다단식 나선 유입구는 모든 유입유량 조건에서 수직갱 단면적 대비 전체 공기공동 형상 단면적의 비율이 25%를 초과하며 안정적인 유입효율 유지
- 접선식 유입구의 경우, 최대 유입유량 조건 0.0163 ㎥/s에서 수직갱 단면적 대비 공기공동 형상 단면적의 비율이 25% 미만으로 감소하며 유입효율이 감소

○ 수직갱 단면적 대비 공기공동 최소 단면적(A_{am})의 비율을 분석한 결과, 고유량 유입조건에서 다단식 나선 유입구의 유입효율이 접선식 유입구보다 10% 개선됨(그림 2.1.43)

○ 수직갱 내부 공기공동 형상 크기의 평균 단면적(A_{aa})을 비교한 결과, 다단식 나선 유입구의 유입효율이 접선식 유입구에 비해 최대 22.8% 개선되었으며, 모든

유입유량 조건에서 접선식 유입구보다 높은 유입효율을 나타냄(그림 2.1.44)

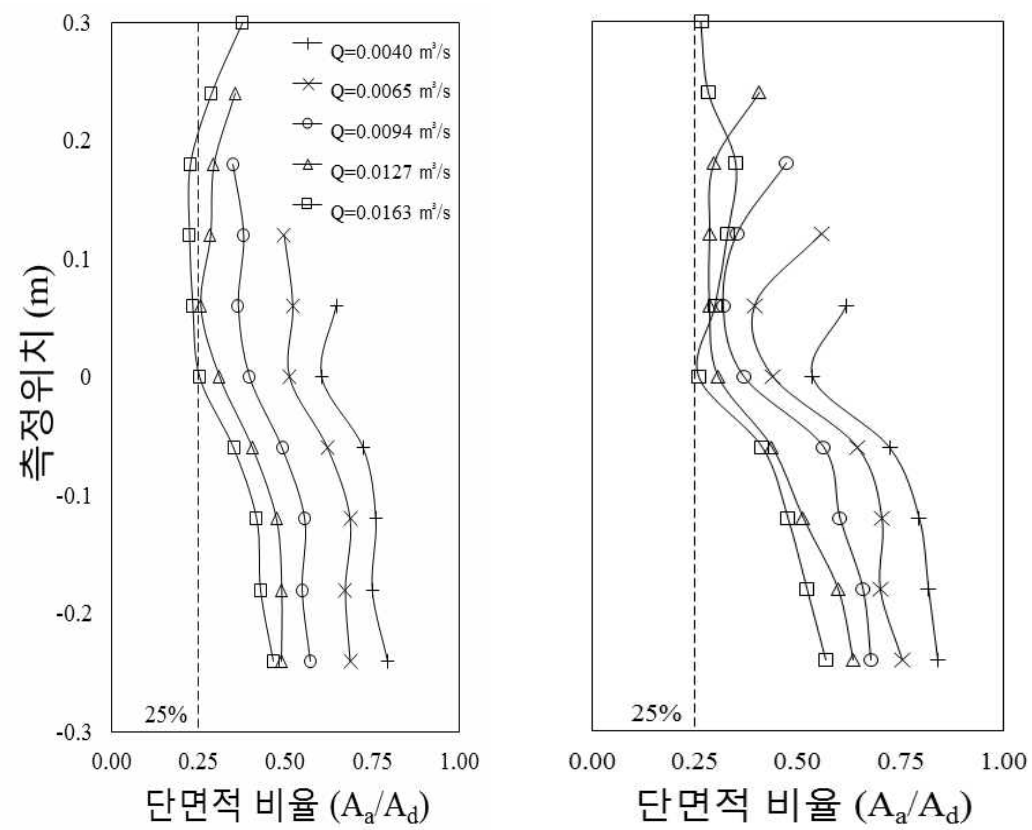


(a) 접선식 유입구 (b) 다단식 나선 유입구

그림 2.1.41 유입유량에 따른 공기공동 형상 변화

표 2.1.4 접선식 유입구와 다단식 나선 유입구의 공기공동 최소 단면적

유입유량(㎥/s)	공기공동	접선식 유입구	다단식 나선 유입구
0.0040	발생위치(m)	0	0
	최소 단면적(㎡)	0.0069	0.0061
	수직갱 단면적 대비 비율(%)	**61**	**54**
0.0065	발생위치(m)	0.12	0.06
	최소 단면적(㎡)	0.0056	0.0045
	수직갱 단면적 대비 비율(%)	**50**	**40**
0.0094	발생위치(m)	0.18	0.06
	최소 단면적(㎡)	0.0039	0.0036
	수직갱 단면적 대비 비율(%)	**35**	**32**
0.0127	발생위치(m)	0.06	0.06
	최소 단면적(㎡)	0.0029	0.0032
	수직갱 단면적 대비 비율(%)	**26**	**28**
0.0163	발생위치(m)	0.12	0
	최소 단면적(㎡)	0.0025	0.0030
	수직갱 단면적 대비 비율(%)	**22**	**26**



(a) 접선식 유입구 (b) 다단식 나선 유입구

그림 2.1.42 측정위치에 따른 공기공동 형상 단면적과 수직갱 단면적의 비율(A_a/A_d)

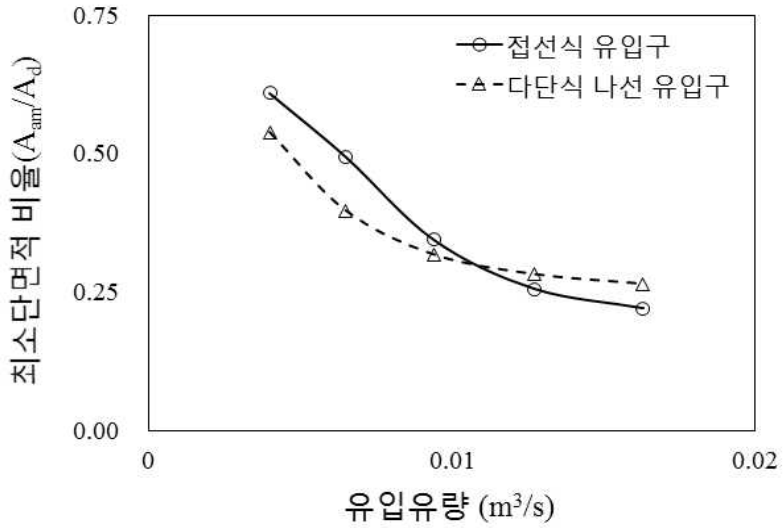


그림 2.1.43 수직갱 단면적 대비 공기공동 최소 단면적 비율(A_{am}/A_d)

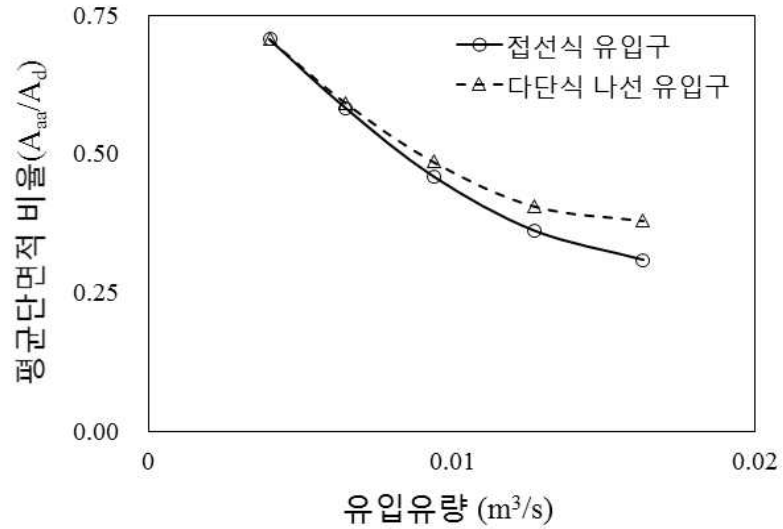


그림 2.1.44 수직갱 단면적 대비 공기공동 평균 단면적 비율(A_{aa}/A_d)

(라) 다단식 나선 유입구의 성능평가

○ 다단식 나선 유입구의 유입부 흐름특성과 수직갱 내부 공기공동 형상 분석 결과, 설계조건에 따라 설계유량의 한계가 존재하지만, 유입부 접근 수위의 큰 변동 없이 안정된 유입흐름이 유도되고 유입유량이 증가할수록 낙차부 정체현상으로 인해 발생하는 수직갱 내부 질식 현상이 나타나지 않음

- 목표 설계유량 범위 안에서 기존 유입구 형상보다 안정적이고 높은 효율의 성능 보유

○ 목표로 한 설계유량 이상의 유량이 유입될 경우, 유입부 수위가 지속적으로 상승해 지하유입시설이 범람할 수 있는 위험이 있기 때문에 다단식 나선 유입구의 현장적용을 위해서는 목표 설계유량 산정과 그에 따른 유입구 설계조건(수직갱 직경, 낙차부 폭 등)의 결정이 매우 중요

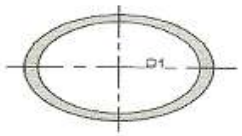
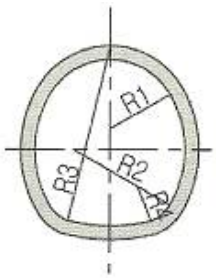
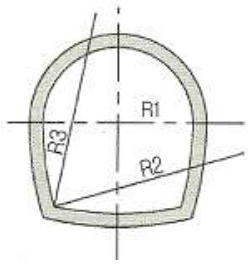
○ 낙차부 바닥면에 경사를 도입해 유입효율을 개선한 접선식 유입구의 장점을 적용해 다단식 나선 유입구의 목표 설계유량 범위의 확장이 가능하며, 보다 안정적인 고유량 유입구 형상 및 지하유입시설의 설계기술 개발이 가능(경사형 다단식 나선 유입구)

(4) 터널 설계기준 및 수직갱 하단 접합부를 반영한 실험모형 제작

○ 터널 설계기준 반영 검토

- 실제 현장 조건 반영을 통한 적용성 확보를 위해 터널 설계 관련 문헌 조사
- 터널 단면 형상은 표 2.1.5와 같이 크게 원형, 난형, 마제형, 3가지 형상으로 구분되며, 그중 난형과 마제형 터널이 배수용으로 주로 사용
- 난형과 마제형 터널 반영 검토 결과, 실험모형 제작에 있어 원형 아크릴관을 사용하여 제작하기 용이한 난형을 선정하였으며, 난형의 표준단면형은 그림 2.1.45와 같으며 편평률에 따라 터널 형상을 중심각을 따라 조정하는 방법과 R2/R1의 비율로 조정하는 2가지 방법이 있음
- 난형 터널 형상의 대표적인 판정 기준으로 1심원과 3심원 터널이 있으며, 도로설계기준(2016)에 수록된 표준단면형과 원형을 비교한 결과, 원형 아크릴관 적용성이 뛰어난 1심원을 선정하여 터널 제작에 반영(그림 2.1.46, 그림 2.1.47)

표 2.1.5 터널 단면 형상(도로설계편람 제6편 - 터널, 2010)

구분	원형	난형	마제형
단 면			
특 징	비배수 터널에 많이 적용	배수형 터널에 많이 적용 (비배수형 적용 시 형상 조정)	배수형 터널에 많이 적용

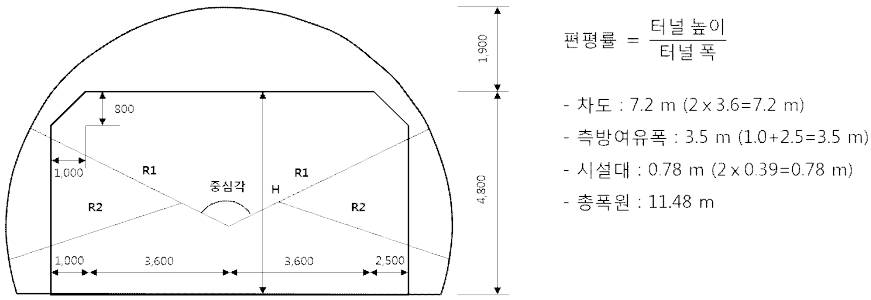
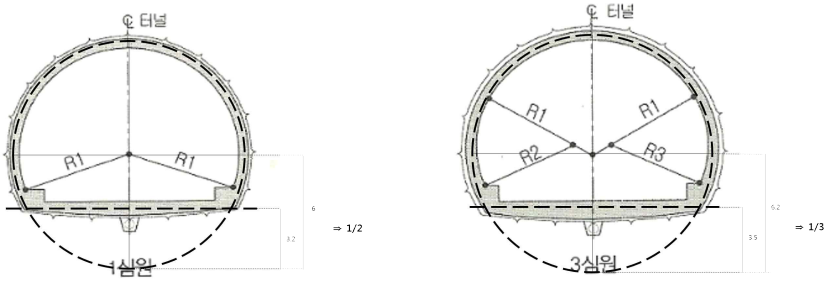
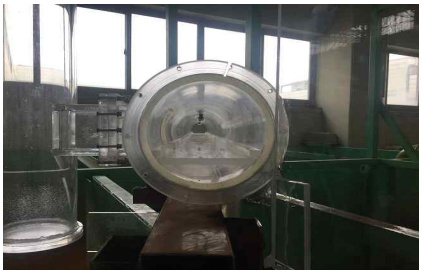


그림 2.1.45 난형 터널 표준단면형



(a) 1심원 (b) 3심원

그림 2.1.46 대심도터널 실험모형 단면의 선정


(a) 터널 설계기준 반영 (b) 터널 내 지장물 반영 (c) 수직갱 하단 접합부 반영

그림 2.1.47 터널 설계기준 및 접합부 형상 반영 대심도터널 유입부 실험장치

(5) 수직갱 하단부 구조적 안전성 확보를 위한 감세장치 개발 및 에너지 저감효과 분석

(가) 수직갱 하단부 수충격 감세를 위한 감세장치 개발

○ 대심도터널의 수직갱 내부 흐름은 수직 방향의 자유낙하 흐름으로 큰 흐름 에너지를 가지고 있으며, 유수의 흐름과 위치 변화에 따라 수직갱 하부에서 발생하는 위치 및 운동에너지가 하부 구조물과 배수용 터널로 연결되는 접합부에 큰 충격을 주게 되고 구조적 불안전성을 야기(그림 2.1.48)

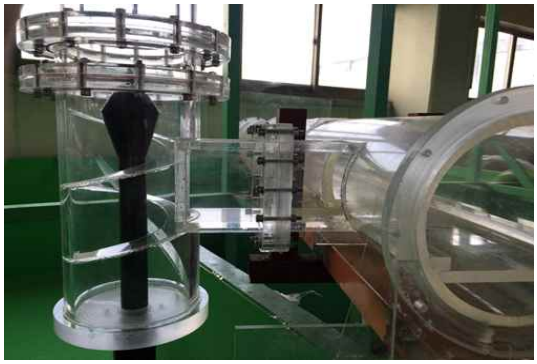
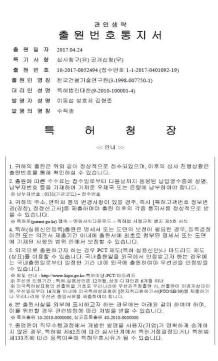



그림 2.1.48 수직갱 하단부 흐름 형상

○ 수직갱 하단부-터널 접합부의 구조적 손상을 방지하기 위해 충격량 및 흐름에너지 저감을 위한 감세장치(나선형-화살촉 타입 감세장치)를 개발하고 등허출원(2017. 4. 24.) 및 특허등록(2018. 4. 5.)(그림 2.1.49)

○ 나선형-화살촉 타입 감세장치는 감세부와 유도부로 구성되어 있으며, 감세부는 화살촉 형태로 제작되어 수직갱 하단부에 설치하고, 유도부는 나선형 유도벽으로 수직갱 하단부 벽체에 설치

○ 화살촉 감세부에서 1차적으로 에너지가 감세된 흐름을 나선형 유도부에서 배수터널로 유출 유도



출원번호 10-2017-0052494
출원일자 2017.04.24
특 허 청 장

특허증
CERTIFICATE OF PATENT
특허 제 10-1847994 호
출원번호 제 10-2017-0052494 호
출원일 2017년 04월 24일
등록일 2018년 04월 05일
발명의 명칭 기재
위의 발명은 「특허법」에 따라 특허등록원부에 등록되었음을 증명합니다.
This is to certify that, in accordance with the Patent Act, a patent for the invention has been registered at the Korean Intellectual Property Office.
2018년 04월 05일
특허청장
COMMISSIONER,
KOREAN INTELLECTUAL PROPERTY OFFICE
특허청
Korean Intellectual Property Office

그림 2.1.49 수직갱 하단부 감세장치

(나) PIV 계측기법을 이용한 감세장치 에너지 저감효과 분석 방법 개발

○ 수직갱 하단부-터널 접합부의 복잡한 흐름 특성과 벽체로 막혀있어 내부 접근이 어려운 구조적 특성으로 인해 micro ADV 등과 같은 직접계측 장비를 이용한 흐름 측정 불가능

○ 빛을 이용해 간접계측이 가능한 연속레이저 PIV 기법을 적용, 수직갱 하단부-터널 접합부에 적용 가능한 간접계측 기법을 개발(위탁연구기관)하고 감세장치의 감세효과를 분석

- 위탁연구기관(University of Dundee)의 연구수행 내용 참고

○ PIV 분석을 위해서는 레이저 및 카메라가 필요하며, 수체 내 입자(particle)의 움직임을 가시화하기 위해 532 nm의 광원을 10 W의 출력으로 표출할 수 있는 연속형 레이저와 초당 최대 2000 프레임 촬영이 가능한 고속카메라(FastCam Mini UX100)를 사용(그림 2.1.50)

○ 수체 내 입자는 40 μm의 silver coated hollow glass sphere를 사용해 입자의 움직임을 가시화



그림 2.1.50 PIV 계측을 위한 고출력 레이저(좌) 및 고속카메라(우)

(다) 감세장치의 감세효과 분석을 위한 배수터널 흐름특성 분석

○ PIV 기법을 적용한 수직갱 하단부-터널 접합부의 간접계측 기법을 따라 흐름에너지 분석을 위한 배수터널 구간 내 레이저 sheet 구간을 선택 후 초당 1000~2000 프레임의 입자 거동 레이저 영상을 촬영(그림 2.1.51)

○ 총 3가지 유입유량(표 2.1.6) 및 감세장치 높이 변화(그림 2.1.52)에 따른 배수터널 내 흐름특성(수심, 유속) 분석

○ 감세장치 설치 전후의 흐름에너지를 비교하기 위해 수직갱 통과 후 좌우로 분기되는 배수터널 두 곳에 대한 흐름특성을 분석(그림 2.1.53)

○ 레이저 영상의 분석은 open-source software인 OpenPIV를 이용(Taylor et al., 2010)하였으며, 촬영 영상을 시간 평균해 그림 2.1.54와 같이 촬영 영역 내 평균 유속장을 분석

표 2.1.6 감세장치 감세효과 분석 실험의 유입유량 조건

유량공급 수조 위어고(m)	유입유량(m^3/s)
0.05	0.0040
0.07	0.0065
0.09	0.0094
0.11	0.0127



그림 2.1.51 수직갱 하단부 감세장치 효과 분석을 위한 레이저 영상 촬영

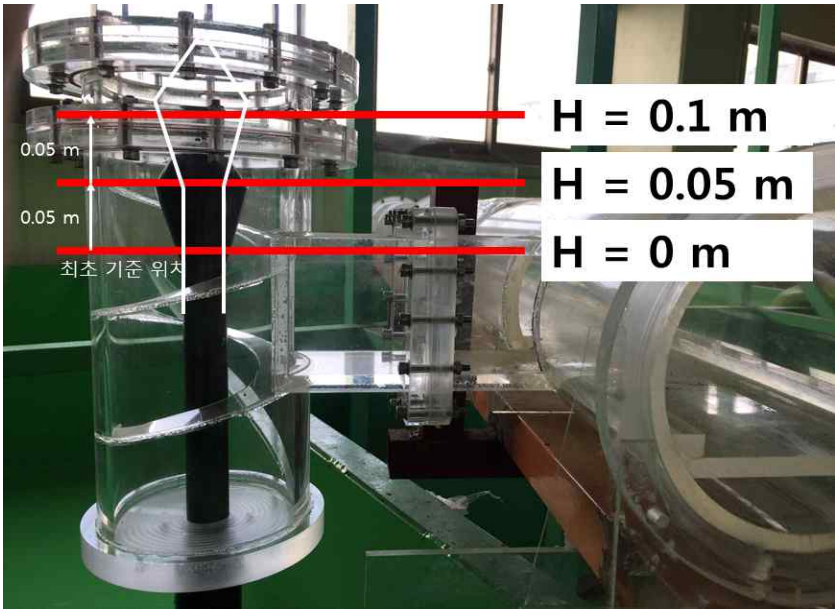


그림 2.1.52 감세장치 높이 변화 위치

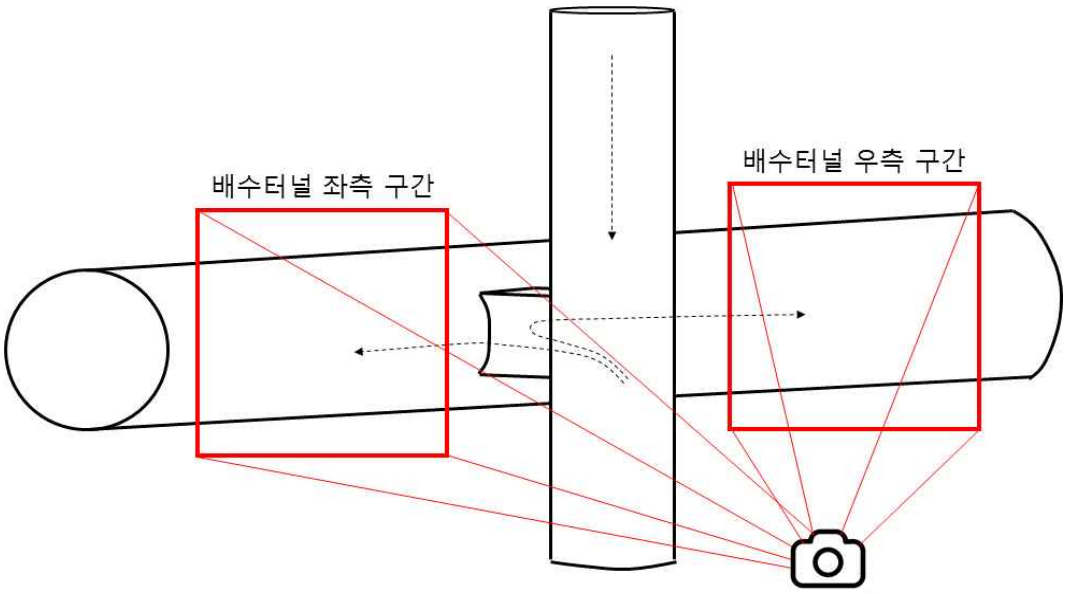


그림 2.1.53 배수터널 내 흐름특성 분석 구간

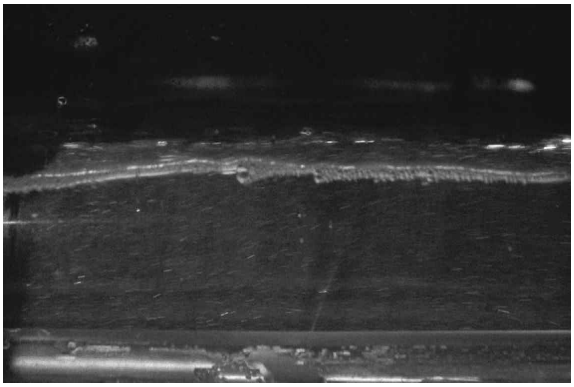
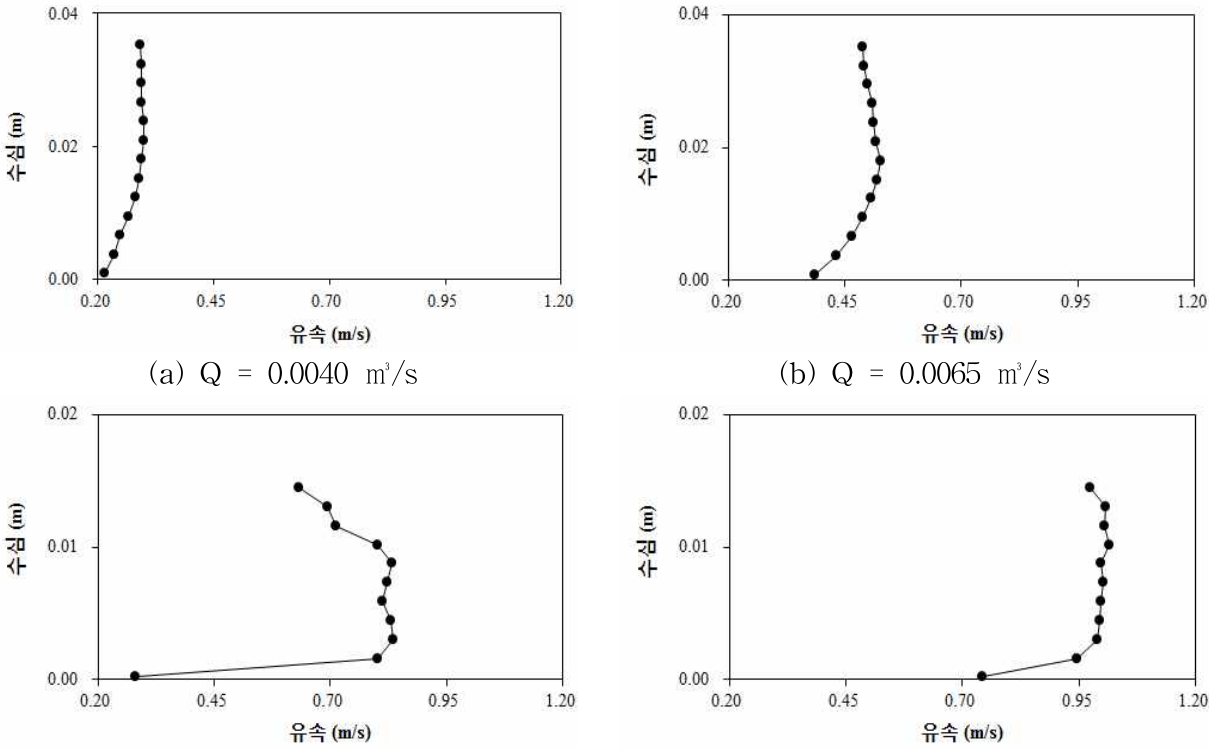


그림 2.1.54 배수터널 입자 거동 레이저 영상 및 PIV 분석

○ PIV 분석결과로부터 추출한 유속을 공간 평균해 배수터널 내 유속의 연직분포를 검토하였으며, 사전 예비실험으로 수행된 배수터널 좌측 구간의 분석결과, 수심평균 유속은 0.26~0.98 m/s로 나타남(그림 2.1.55)

○ 사전 예비실험의 실험조건은 다음과 같음

- 유입유량 조건은 표 2.1.6과 동일
- 감세장치 설치 후 최초 기준 위치(H = 0 m)



(a) Q = 0.0040 ㎥/s (b) Q = 0.0065 ㎥/s

(c) Q = 0.0094 ㎥/s (d) Q = 0.0127 ㎥/s

그림 2.1.55 유입유량 별 배수터널 좌측 구간 내 유속의 연직분포

(라) 감세장치의 흐름에너지 감세효과 분석

○ 베르누이 방정식을 이용한 에너지 수두 검토를 통해 감세장치 설치 전후의 흐름에너지 계산 및 감세효과를 분석(그림 2.1.56)

- 수직갱 상부 유입유량이 0.004 ㎥/s인 경우, 접근수로의 평균수심은 0.141 m, 평균유속은 0.142 m/s로 베르누이 방정식(식 2.1.37)을 이용해 계산된 총 수두는 2.901 m

$$h_i + \frac{{v_i}^2}{2g} + z_i = h_o + \frac{{v_o}^2}{2g} + z_o + E_L \qquad (2.1.37)$$

여기서, h_i는 유입 수위(m), v_i는 유입 유속(m/s), z_i는 유입부 연직위치(m), h_o는 유출 수위(m), v_o는 유출 유속(m/s), z_o는 유출부 연직위치(m), g는 중력가속도, E_L은 손실수두(m)

- 사전 예비실험으로 측정한 배수터널 좌측 구간의 평균수심과 연직 평균유속으로 계산한 총 수두는 0.073 m로 총 손실수두는 2.828 m
- 계산된 총 손실수두에서 수직갱 낙차로 인한 위치수두(E_z) 2.75 m를 제외하면 수직갱의 벽면 마찰과 배수터널 접합부에서 발생하는 손실수두(E_d)는 0.078 m
- 감세장치 설치 전 총 손실수두 계산 결과와 비교하면 감세장치에 의한 에너지 감세효과를 정략적으로 분석 가능

○ 감세장치 적용에 따른 감세효과 변화를 분석하기 위해 그림 2.1.52와 같이 감세장치의 높이를 배수터널 연결통로 상부를 기준으로 H = 0 m, 0.05 m, 0.1 m로 상승시키며 배수터널 내 수심과 유속을 측정(표 2.1.7)

○ 유입유량 및 감세장치 높이 설정에 따른 배수터널 내 수심과 유속측정 결과를 기초로 손실수두(E_d)를 계산한 결과, 감세장치의 위치가 H = 0 m에 위치할 때 터널 내 흐름에너지 감소효과가 가장 크게 나타남(그림 2.1.57, 표 2.1.8)

○ 감세장치의 위치가 배수터널 연결통로 상부보다 높아질수록 손실수두가 감소하고 흐름에너지 감소효과가 낮아짐

○ 본 연구에서 개발된 감세장치의 감세효과 검증 결과, 감세장치 적용 후 약 평균 20%의 흐름에너지 감소효과를 확인하였으며, 고유량 유입조건에서 감세효과가 급감하는 것을 확인

- 고유량 유입조건에서 감세장치 적용 시 배수터널의 배수효율 변화를 함께 검토할 필요가 있음

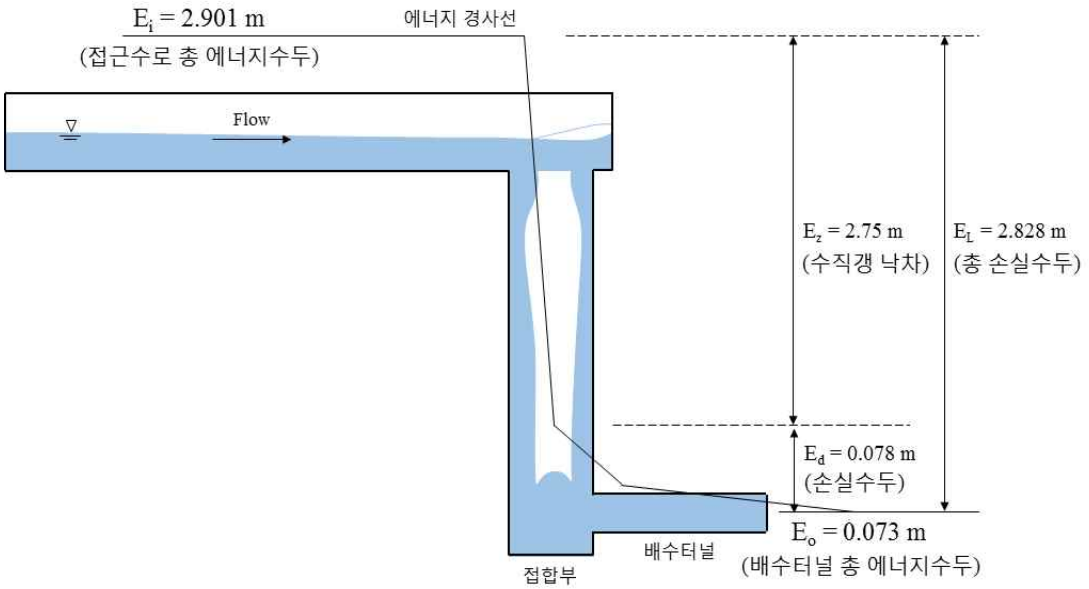


그림 2.1.56 수직갱 상부 및 하단부 에너지 수두의 변화 - 유입유량 0.004 ㎥/s

표 2.1.7 감세장치 감세효과 분석을 위한 수심 및 유속측정 결과

유입유량(㎥/s)	감세장치 높이(m)	좌측		우측	
		수심(m)	유속(m/s)	수심(m)	유속(m/s)
0.0040	미적용	0.042	0.67	0.028	0.80
	0.00	0.045	0.26	0.028	0.63
	0.05	0.058	0.38	0.025	0.68
	0.10	0.056	0.33	0.030	0.62
0.0065	미적용	0.052	0.59	0.038	0.80
	0.00	0.051	0.48	0.034	0.76
	0.05	0.064	0.56	0.033	0.84
	0.10	0.061	0.71	0.034	0.86
0.0094	미적용	0.034	0.90	0.037	1.13
	0.00	0.030	0.76	0.036	0.99
	0.05	0.043	1.09	0.036	0.98
	0.10	0.037	1.14	0.036	1.07
0.0127	미적용	0.036	0.41	0.042	1.18
	0.00	0.035	0.98	0.040	1.03
	0.05	0.044	1.14	0.040	1.07
	0.10	0.044	1.21	0.043	1.11

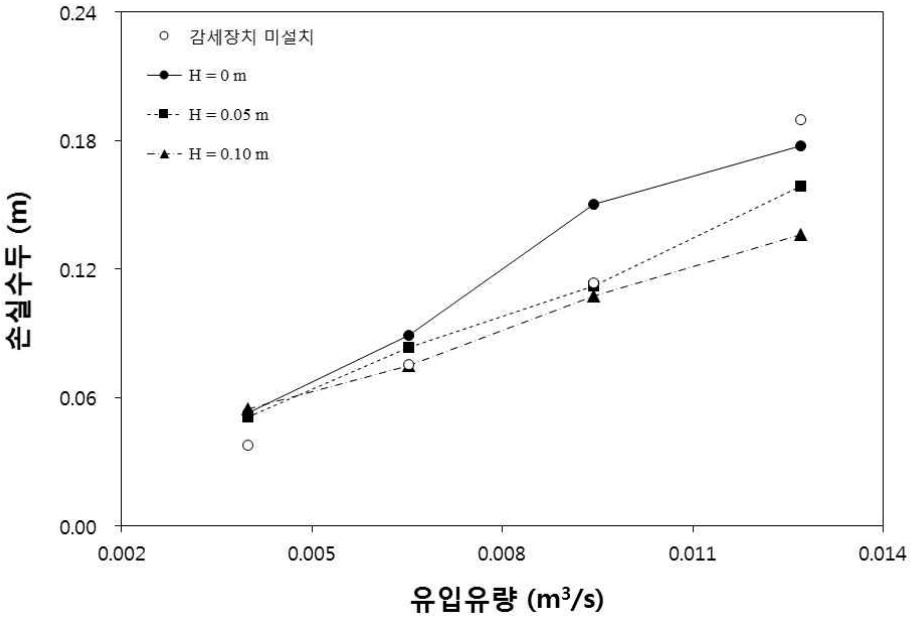


그림 2.1.57 유입유량과 감세장치 높이에 따른 손실수두(E_d)

표 2.1.8 유입유량과 감세장치 높이에 따른 에너지 저감효과

에너지 저감효과		유입유량(㎥/s)			
		0.0040	0.0065	0.0094	0.0127
손실수두(m)	H = 0 m	41%	18%	33%	-7%
	H = 0.05 m	35%	10%	-1%	-16%
	H = 0.10 m	45%	-1%	-5%	-28%

(6) 3차원 수치해석을 이용한 실험결과 검증

- ○ 다단식 나선 유입구 형상에 대한 3차원 수치해석으로 유입부 흐름특성과 수직갱 내부 공기공동 형상을 분석하고 수리모형실험 결과와 비교
- ○ 3차원 유체해석 모형 중 수리 분야에서 활용되고 있는 모형의 지배방정식은 3D RANS(Reynolds Averaged Navier Stokes) 방정식을 이용하고, 난류모형으로 $k-\epsilon$, 레이놀즈 응력, LES(Large Eddy Simulation) 등을 이용
- ○ 수리 분야에 적용하기 위해서는 자유수면 모의에 대한 정확도가 중요하며, 일반적인 범용 유체해석 모형에서는 자유수면 모의를 위해 다층유동을 해석하고 경계면 모의의 정확도를 높이기 위해 VOF(Volume of Fluid) 기법을 적용
- ○ 법용 유체해석 모형 중 자유수면을 가지는 개수로 흐름과 정상 및 비정상 흐름 해석, 층류 및 난류 해석, 압축성 및 비압축성 유체 계산이 가능한 FLOW-3D 모형을 선택하고 수치해석을 수행
- ○ 본 연구에서 사용하고 있는 지하유입시설 수리실험장치 전체와 다단식 나선 유입구 형상을 수치모형으로 구성하였으며, 유입유량 0.0127 ㎥/s 조건에 대해 수직갱 하단부 감세장치 반영 전후에 대한 수치해석 수행(그림 2.1.58, 그림 2.1.59)

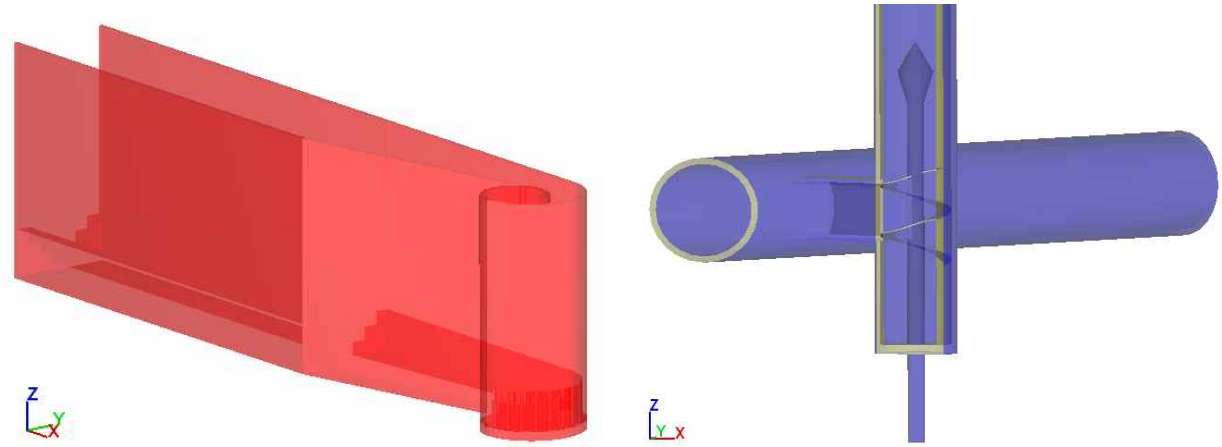


그림 2.1.58 다단식 나선 유입구(좌)와 수직갱 하단부 감세장치(우)의 모형 제작

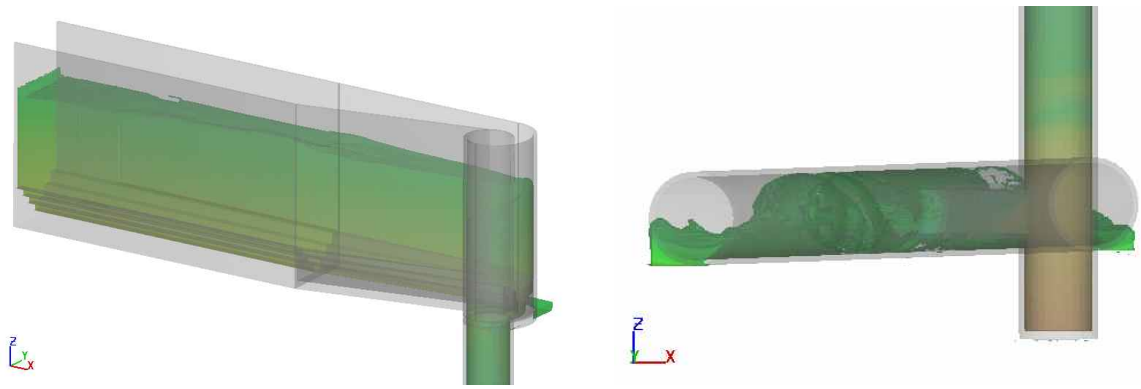


그림 2.1.59 다단식 나선 유입구(좌)와 수직갱 하단부(우)의 수치해석 적용

(가) 모의조건 설정

○ 유입부 경계조건은 실험결과와 동일한 유입유량과 수위 조건을 설정하였으며, 유출부 경계조건은 완전 유출로 설정

○ 계단 형상과 곡선부가 있는 복잡한 구간은 정확한 해석을 위해 0.005 m 크기의 정육면제 격자로 구성하였으며, 직선부 또는 흐름 현상이 간단한 유입부 구간은 0.02 m 크기의 정육면제 격자로 구성(그림 2.1.60)

○ 초기 유입유량과 유입수위 조건을 설정하고 해석을 수행하기 때문에 초기 안정화 구간을 10초로 결정, 총 20초 동안의 해석을 수행

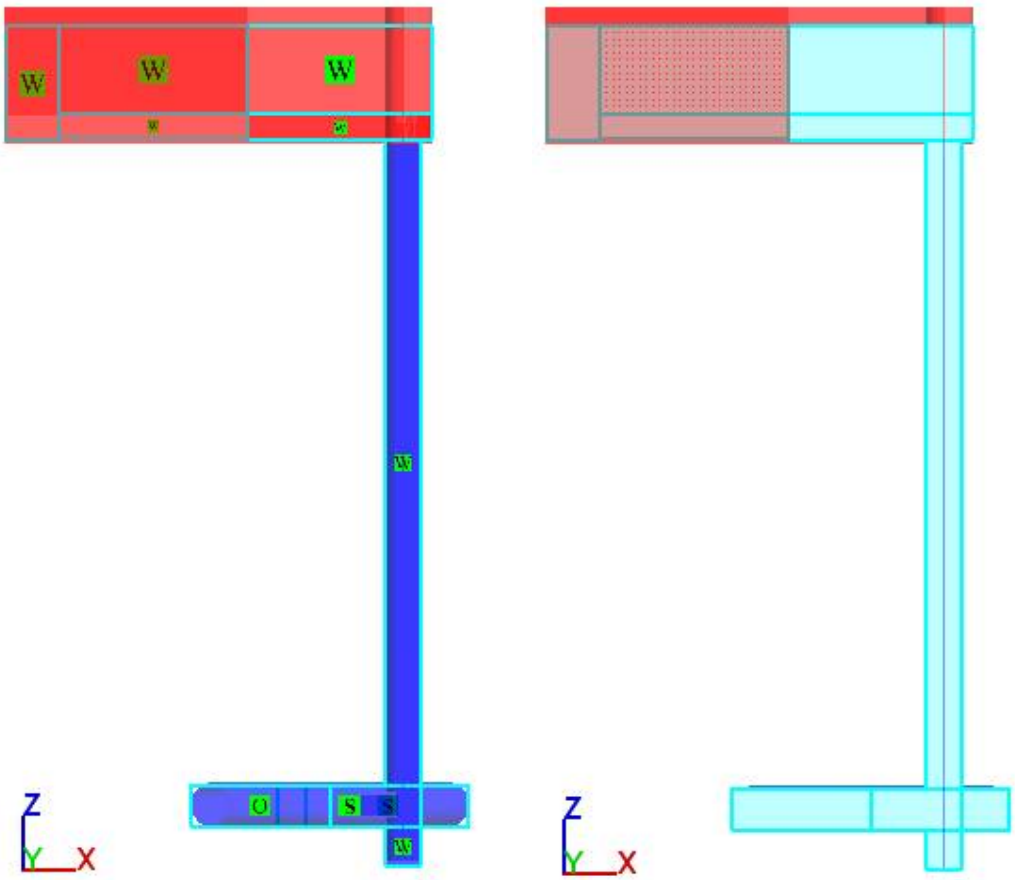


그림 2.1.260 수치해석을 위한 경계조건(좌) 및 격자 구성(우)

(나) 수치해석 결과 분석

○ 유입부 수위 변화와 수직갱 내부 공기공동 형상의 크기를 수리모형실험 측정결과와 비교

○ 수리모형실험 결과와 동일하게 유입부에서 큰 수위 변동 없이 안정된 흐름을 유지하며 흐름이 유입되는 것을 확인하였으며, 수직갱 내부 공기공동 형상과 크기, 발생 위치가 수리모형실험과 유사하게 재현

① 유입부 흐름특성 분석

○ 유입부 흐름특성 분석을 위해 수치해석 결과에서 유입부 수위를 추출해 실험 측정값과 비교한 결과, 실험 측정값과 수치해석 모형의 결과값이 동일하게 나타남(그림 2.1.61)

○ 유입구 낙차부 구간의 수위값이 수리모형실험의 측정값과 차이가 있는 것으로 나타나지만, 분석결과 최대 오차 ± 4% 이내로 유사한 결과를 나타내 수리모형실험 결과의 검증방안으로 도입 가능

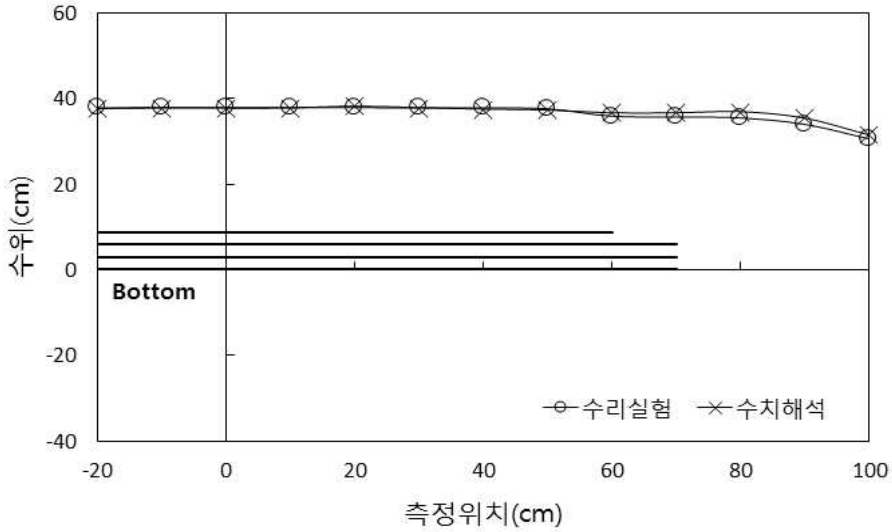
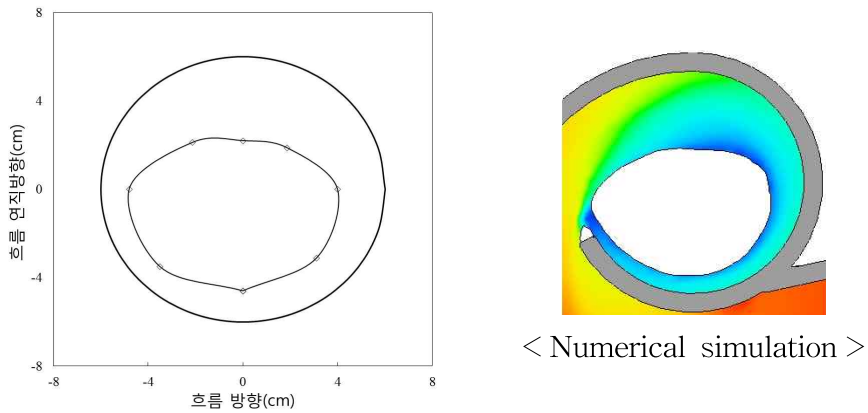


그림 2.1.61 수치해석과 수리모형실험의 유입부 수위 비교 - 유입유량 0.0127 ㎥/s

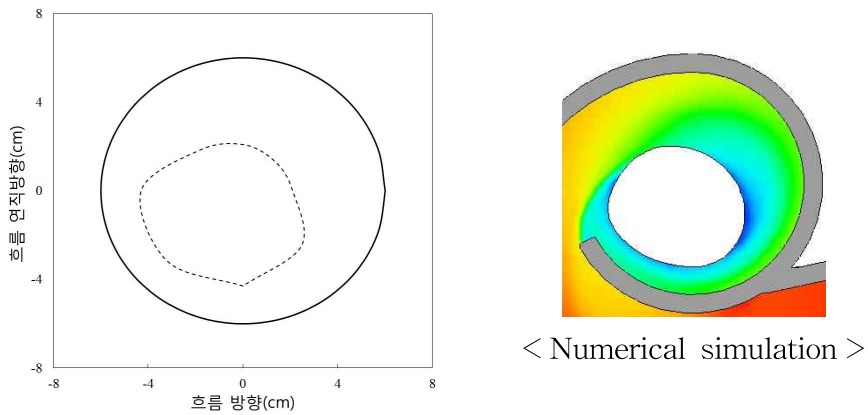
② 수직갱 내부 공기공동 형상 분석

- ○ 수리모형실험을 통해 측정한 다단식 나선 유입구의 수직갱 내부 공기공동 형상과 3차원 수치해석을 통해 분석한 수직갱 내부 공기공동 형상을 비교
- ○ 수리모형실험 결과의 정확도 및 신뢰성을 높이기 위해 3차원 수치해석 결과와 비교하였으며, 계측구간별 형성되는 공기공동의 형상이 유사하게 나타남(그림 2.1.62)
- ○ 계측구간 z = 0.06 m의 경우, 공기공동 형성 위치가 상이하지만 수리모형실험 중 와류 형태로 회전하며 낙하하는 흐름의 회전력에 의해 공기공동의 위치가 일부 변동되는 것을 확인



< Numerical simulation >

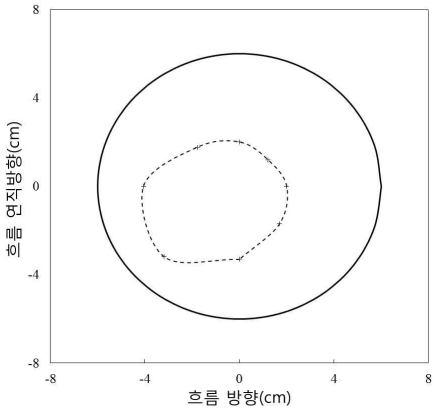
(a) z = 0.24 m

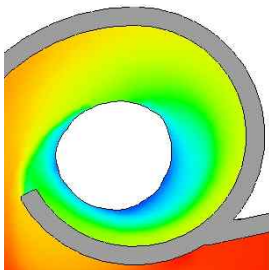


< Numerical simulation >

(b) z = 0.18m

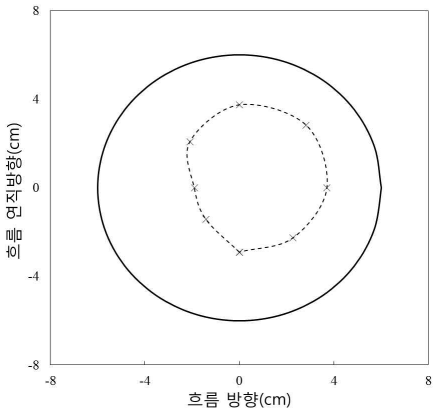
그림 2.1.62 계측구간에 따른 수직갱 내부 공기공동 형상 비교(계속)

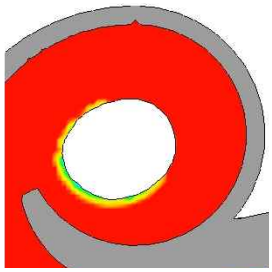




< Numerical simulation >

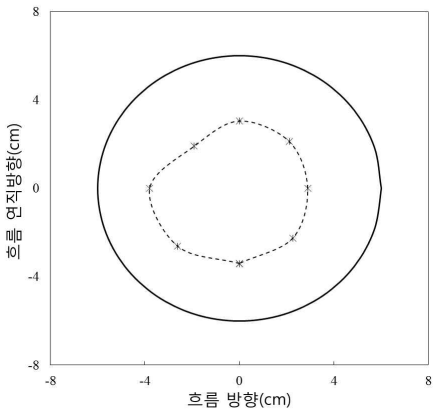
(c) z = 0.12 m

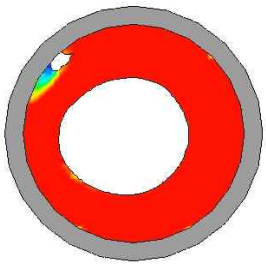




< Numerical simulation >

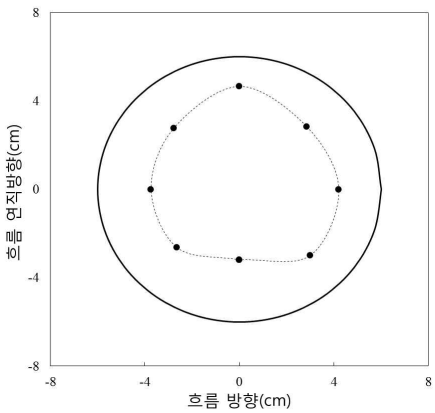
(d) z = 0.06 m

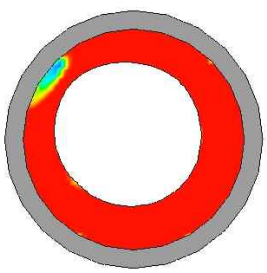




< Numerical simulation >

(e) z = 0 m

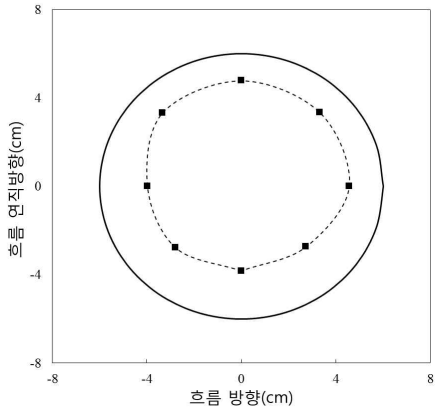


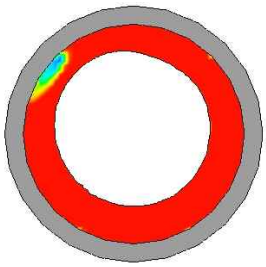


< Numerical simulation >

(f) z = -0.06 m

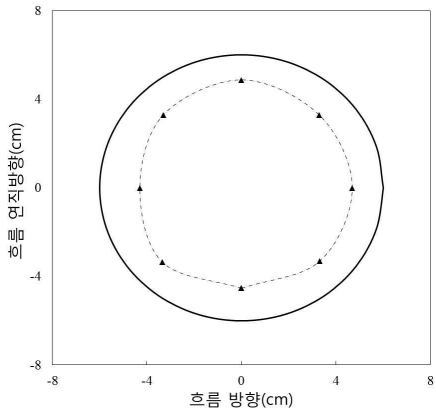
그림 2.1.62 계측구간에 따른 수직갱 내부 공기공동 형상 비교(계속)

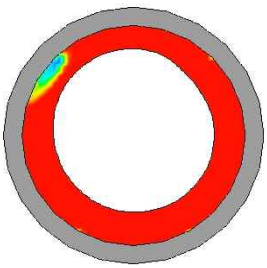




< Numerical simulation >

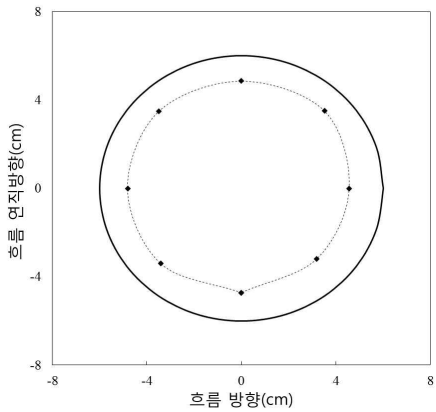
(g) z = -0.12 m

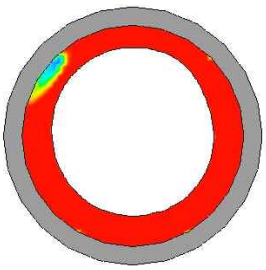




< Numerical simulation >

(h) z = -0.18 m





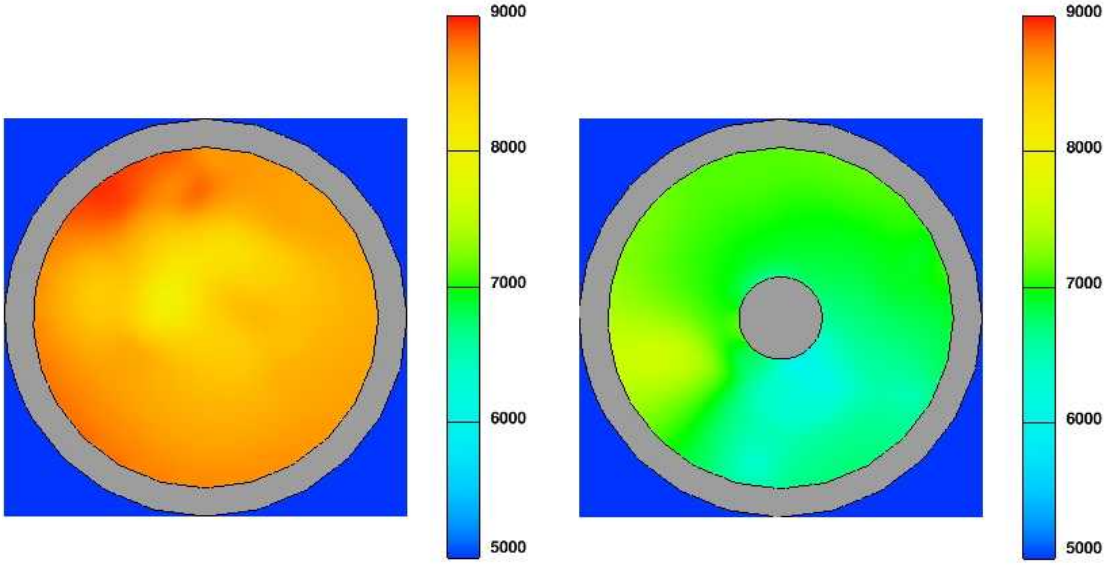
< Numerical simulation >

(i) z = -0.24 m

그림 2.1.62 계측구간에 따른 수직갱 내부 공기공동 형상 비교

③ 수직갱 하단부 압력변화 검토

- ❍ 수직갱 하단부 감세장치로 인한 수충격량 감소효과를 검토하기 위해 수치모형 구성 시 수직갱 하단부와 터널 접합부, 감세장치를 모두 구현
- ❍ 현재 유입유량 조건 0.0127 ㎥/s에 대해서만 검토하였지만, 그림 2.1.63과 같이 수직갱 하단부에 감세장치가 도입됨으로 인해 바닥면에서 받는 압력이 최대 약 20% 이상 감소
- ❍ 수직갱 하단부 감세장치의 흐름에너지 저감효과 분석 실험과 동일하게 약 20%의 감세효과를 나타내었으며, 수리모형실험과 수치해석적 결과를 기초로 본 연구에서 개발된 '수직갱 나선식-화살촉 타입 감세장치'의 성능을 검증



(a) 감세장치 적용 전 압력 분포 (b) 감세장치 적용 후 압력 분포

그림 2.1.63 수직갱 하단부 감세장치 적용에 따른 압력 분포 변화

나. 위탁연구기관 - University of Dundee

(1) 연속레이저 PIV 기법을 이용한 유입구 및 터널 접합부 계측기법 개발

(가) 유입구 흐름 계측기법 개발

- ❍ 수직갱의 유입구에서는 정상파(standing wave) 발생 및 병목현상에 의한 수위 상승을 고려할 필요가 있으며, 공기공동(air-core) 계측 외에 수벽을 타고 흐르는 유속에 대한 계측이 필요
- ❍ 수직갱 내부로 유입된 유체는 유입구 형상으로 인해 수직갱의 벽면을 따라 수벽을 형성하며 하단부로 흐르기 때문에 계측장비의 설치로 인한 흐름 계측이 어려운 조건을 갖고 있음
- ❍ 본 연구에서는 연속레이저 PIV 기법을 이용해 수직갱 벽면을 타고 흐르는 유체의 흐름을 측정하기 위한 기법을 개발하고자 함
- ❍ 그림 2.1.64는 수직갱 내부 흐름 계측을 위한 레이저 및 카메라의 배치를 보여주며, 수직갱 단면이 촬영가능하도록 레이저 sheet를 수직갱의 측면에 배치, 카메라는 수직갱 상부에 설치
- ❍ 그림 2.1.65는 카메라의 ISO를 변경하며 수벽을 타고 흐르는 유체의 레이저 영상을 촬영한 결과이며, 레이저영상 촬영 결과 수표면의 반사와 물결로 인해 수직갱 내부 단면의 흐름 계측을 위한 레이저영상 촬영은 어려운 것으로 나타남
- ❍ 수표면과 물방울로 인한 레이저 산란에 의한 레이저영상 촬영 결과를 개선하기 위해 532 nm의 초록색 빛을 내는 레이저 광원과 입자가 발하는 파장대를 달리할 필요가 있음



그림 2.1.64 유입구 흐름 계측을 위한 레이저 및 디지털 카메라 배치

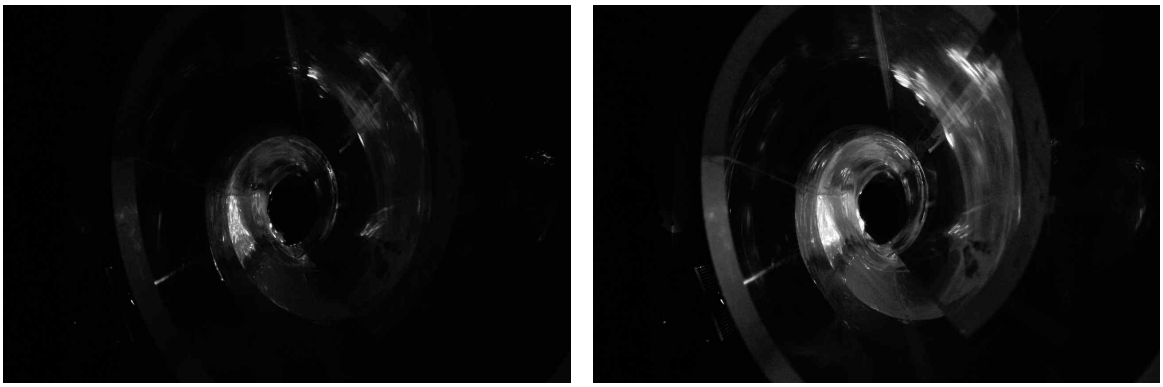


그림 2.1.65 유입구 흐름 계측을 위한 레이저영상 촬영 결과

○ 초록색 광원에 대해 600~700 nm 파장대의 붉은 가시광선을 나타내는 입자(Fluorescent Polymer Particle, FPP)를 주입할 필요가 있으며, 카메라 렌즈에 붉은색 필터를 장착하여 촬영 단면의 입자 거동을 촬영할 수 있는 방법 도출(그림 2.1.66)

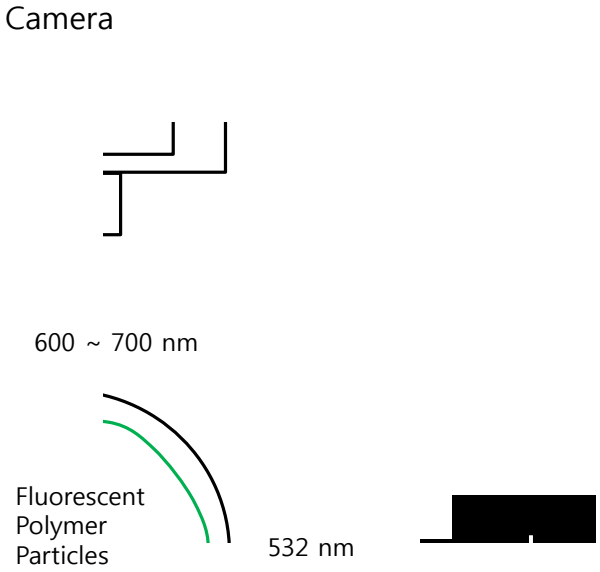


그림 2.1.66 PIV 계측기법을 이용한 유입구 흐름 계측 개선방안

(나) 터널 접합부 흐름 계측기법 개발

○ 수직갱 하단부의 복잡한 흐름특성 및 구조물의 영향으로 직접계측이 어렵기 때문에 PIV 분석기법을 이용한 간접계측 방법을 이용해 흐름에너지 감세효과 분석 방법을 제시

○ 터널 접합부는 수직갱 및 배수터널 구조물의 복잡한 연결로 인해 레이저영상 촬영을 위한 레이저 sheet 배치에 제한이 있기 때문에 레이저 및 카메라의 배치가 가능한 터널 연결부와 배수터널을 촬영 영역으로 선정

○ 그림 2.1.67은 터널 접합부의 흐름 분석을 위한 레이저영상 촬영 개요를 보여주며, 각각 터널 연결부와 배수터널의 단면 촬영을 위한 레이저 sheet 배치 개념도를 나타냄

○ 연결부의 레이저영상 촬영 결과, 감세장치 유도부를 지나며 발생하는 물거품으로 인해 레이저영상에서 입자가 적절히 가시화되지 않았으며, 접합부를 지나 유출되는 배수터널부에서는 흐름이 안정화되며 레이저영상 촬영이 가능한 것으로 확인



그림 2.1.67 PIV 계측을 위한 접합부 레이저 sheet 위치 및 카메라 촬영 영역

○ 그림 2..1.68과 그림 2.1.69는 레이저영상 촬영 실험사진을 보여주며, 각각 접합부와 배수터널의 레이저영상 촬영 장면을 보여줌

○ 레이저를 이용한 입자가시화 검토 결과, 터널 접합부에 설치한 감세장치의 에너지 감세효과를 검토하기 위해서 접합부보다 배수터널을 촬영구간으로 선택하는 것이 적합할 것으로 판단됨

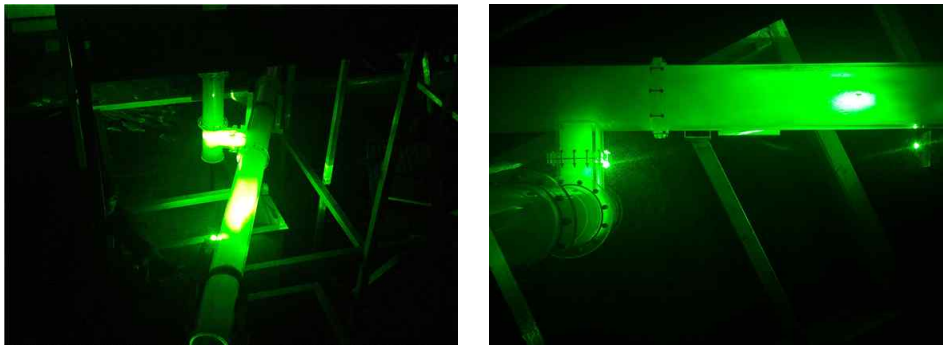


그림 2.1.68 수직갱 하단 접합부 흐름 분석을 위한 레이저영상 촬영



그림 2.1.69 수직갱 하단 배수터널 흐름 분석을 위한 레이저영상 촬영

○ 배수터널에서 계측한 수리량으로부터 감세장치의 에너지 감세효과를 분석하기 위해 유입수로의 에너지와 배수터널부의 에너지를 베르누이 공식을 이용하여 다음식과 같이 계산(그림 2.1.70)

$$E_i = E_o + E_L \tag{2.1.38}$$

$$\left(z+h+\frac{v^2}{2g}\right)_i = 2\left(z+h+\frac{v^2}{2g}\right)_o + E_L \tag{2.1.39}$$

$$E_L = E_s + E_d \tag{2.1.40}$$

○ 식 2.1.38의 좌항은 상부의 유입흐름이 갖는 에너지이고, 우항은 배수터널의 양쪽에서 계산된 에너지를 나타내며, 에너지손실(E_L)은 수직갱의 고저 차이 등 구조물에 의해 발생하는 에너지손실(E_z)과 수직갱의 벽면마찰과 배수터널의 분기에서 발생되는 에너지손실(E_1), 그리고 감세장치에 의해 발생하는 에너지손실(E_2)의 합(E_d)으로 구성

○ 감세장치에 의한 에너지손실을 구분하는 것은 수직갱 하단부 감세장치 설치 전후의 하단부 에너지손실을 비교해 확인 가능

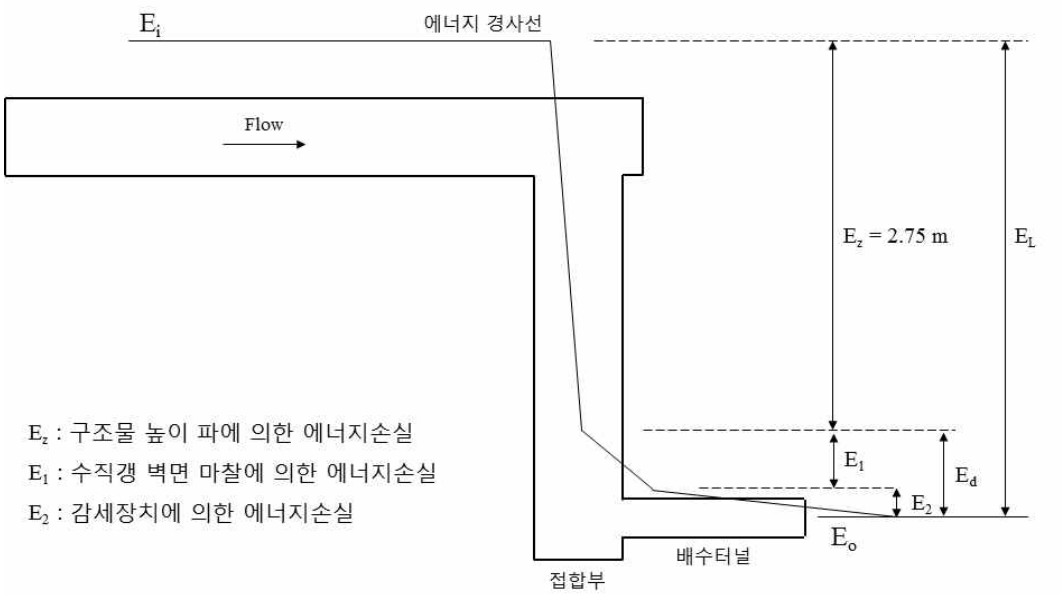


그림 2.1.70 수직갱 하단부 에너지 감세효과 검토를 위한 에너지 경사선 변화 개념도

(다) 배수터널 흐름 분석을 위한 PIV 분석기법 개발

- ❍ 배수터널 레이저영상의 PIV 분석을 위해 Python 과 Jupyter 프로그램을 사용한 이미지 분석 코드 개발
- ❍ 이미지 로드(load) 후 입자 인식을 위한 이미지 변환 처리, 불필요한 부분을 제거하는 마스킹(masking) 작업 코드 개발(표 2.1.9, 그림 2.1.71)

표 2.1.9 이미지 로드 및 변환, 마스킹 코드

```
1 # Display multiple images
2 im_names = ["11", "21", "31", "41", "51"]
3 im_list =
  [f'./PIV_left/arrow_basic/C001H001S00010000{name}.jpg' for name in im_names]
4 case_names = ["0.004 CMS", "0.006 CMS", "0.009 CMS", "0.013 CMS", "0.016 CMS"]
5
6 # Load images and store in list [phase, RFP, CFP, YFP]
7 ims = [skimage.io.imread(im_name) for im_name in im_list]
8
9 # Display images
10 plots = [bebi103.viz.imshow(im,
11                             plot_height=250,
12                             title=name,
13
        interpixel_distance=interpixel_distance,
14                             length_units='pixels')
15                 for name, im in zip(case_names, ims)]
16
17 # Link axes for zooming
18 for i in [1, 2, 3]:
19     plots[i].x_range = plots[0].x_range
20     plots[i].y_range = plots[0].y_range
21
22 bokeh.io.show(bokeh.layouts.gridplot(plots, ncols=2))
```

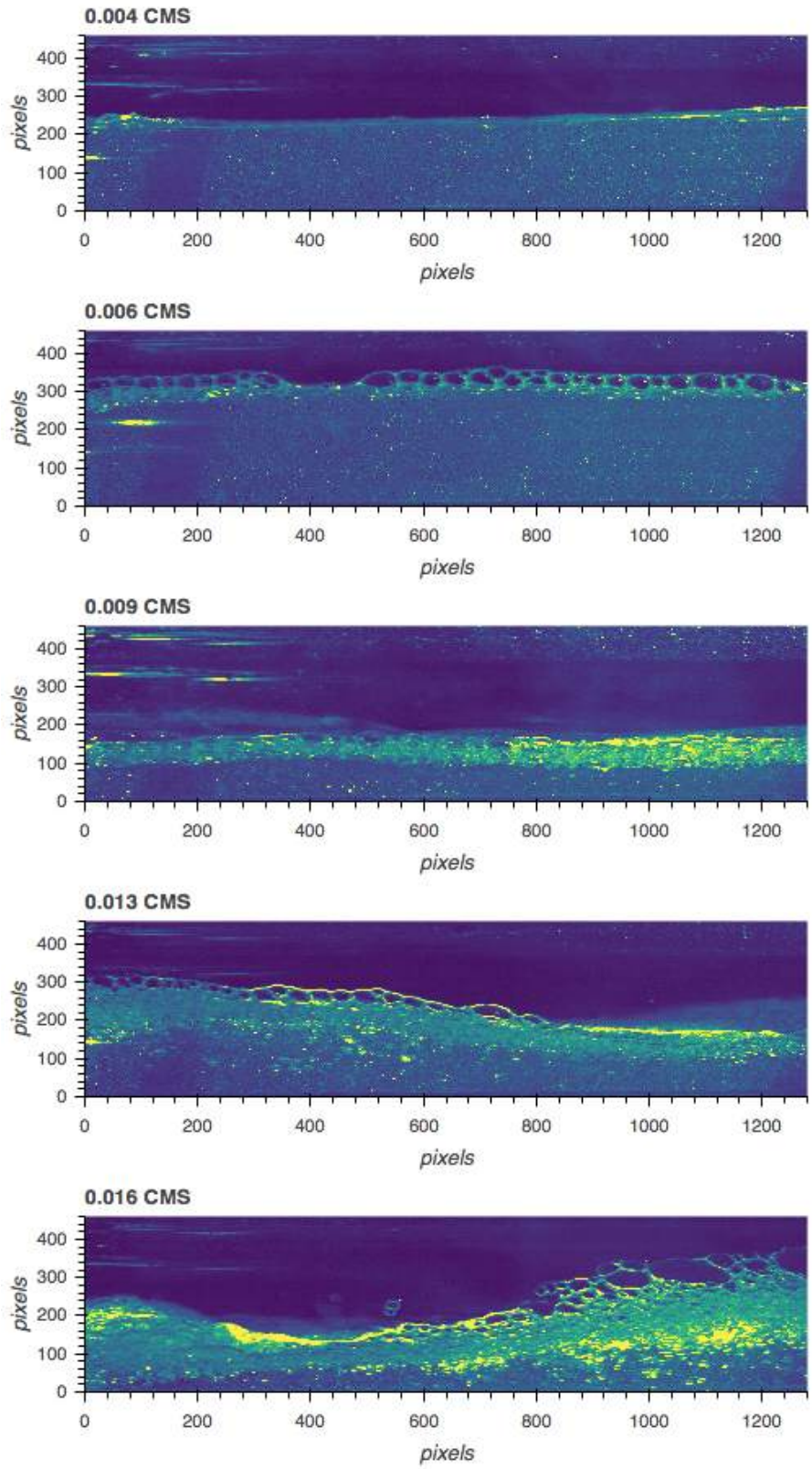


그림 2.1.71 레이저영상 흐름 분석을 위한 이미지 로드 및 변환, 마스킹 처리 결과

○ 유속 추출을 위한 PIV 분석 코드 개발

- 2장의 이미지 상에서 입자 거동을 분석 후 유속을 추출하기 위해 '확장 검색 영역 방법(extended search area method)'을 사용하였으며, '상호상관 알고리즘(cross-correlation algorithm)'을 적용
- 인접한 두 이미지 사이에서 이미지 정보를 이루고 있는 픽셀(pixel)의 겹침(overlap)과 시간 차이(dt)를 이용, 입자 거동의 교차 상관관계를 추출하고 유속으로 변환(표 2.1.10, 그림 2.1.72)

표 2.1.10 이미지 로드 및 변환, 마스킹 코드

```
1 # Computation workhorse
2 import numpy as np
3
4 # Plotting tools
5 import matplotlib.pyplot as plt
6
7 # OpenPIV packages
8 import openpiv.tools
9 import openpiv.process
10 import openpiv.scaling
11 import openpiv.validation
12 import openpiv.filters
13
14 # Load a pair of images
15 frame_a = openpiv.tools.imread('./PIV_left/arrow_basic/C001H001S0001000011.jpg' )
16 frame_b = openpiv.tools.imread('./PIV_left/arrow_basic/C001H001S0001000012.jpg' )
17
18 # Define the region of interest
19 frame_a = frame_a[800-500:800-40:,:]
20 frame_b = frame_b[800-500:800-40:,:]
21
22 # Main PIV analysis. Note that the datatype is int32
23 u, v, sig2noise =
    openpiv.process.extended_search_area_piv(frame_a.astype(np.int32), frame_b.astype(np.int32),
    window_size=36, overlap=0, dt=0.001, search_area_size=64, sig2noise_method='peak2peak' )
24
25 # Calculate the coordinate of the centre of interrogation zones.
26 x, y = openpiv.process.get_coordinates(image_size=frame_a.shape, window_size=36, overlap=0 )
27
28 # Basic filtering based on the signal-to-noise ratio
29 u, v, mask = openpiv.validation.sig2noise_val( u, v, sig2noise, threshold = 1.5 )
30
31 # Save the result
32 openpiv.tools.save(x, y, u, v, mask, 'exp1_001.txt' )
33
34 # Plot the result
35 fig, ax = plt.subplots(figsize=(10,10))
36 ax.imshow(frame_a)
37 q = ax.quiver(x,np.max(y)-y,u,v, units='x')
38 #qk = ax.quiverkey(q, 0.9, 0.9, 10, r'$10\frac{pixels}{s}$', labelpos='E', coordinates='figure')
40 plt.savefig("figure00.png")
```

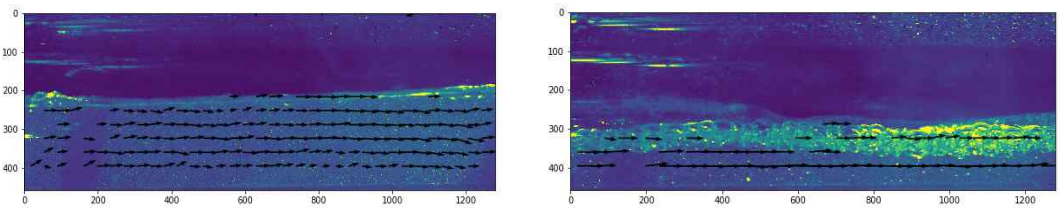


그림 2.1.72 PIV 분석 코드를 이용한 유속 추출 결과

다. 공동연구기관 - 교토대학교 방재연구소

(1) 1차원 이상류 흐름 모형 개발

(가) 이상류 흐름 모형의 개념

○ 대심도터널 지하유입시설로 유입되는 유량에 따른 관 내 공기의 배출 상황을 고려시, 유입부과 터널 관수로의 연결부, 관수로 내에서의 공기거동을 각각 재현하기 위해 물과 공기의 흐름을 구분해 해석

○ 유동 흐름으로 인해 혼합되는 공기와 흐름 내부 기포는 고려하지 않음

(나) 수치해석 모델의 구성

○ 첫 번째는 관수로 내 흐름 해석이며, 관 내의 공기압을 고려한 관수로 흐름과 만관시 압력 흐름을 고려하기 위해 연속방정식, 운동량 방정식을 이용해 계산

○ 두 번째로는 부피와 질량의 관계식과 상태방정식을 이용해 관수로 내 공기압 및 공기 밀도를 계산

○ 세 번째로는 연속방정식을 이용해 수직 유입부 내 체적 및 수위를 계산

○ 네 번째로는 상태방정식을 이용해 수직 유입부 내 공기압 및 공기 밀도를 계산

○ 다섯 번째로는 공기의 운동량 방정식을 이용해 수직 유입부와 관수로 접합부에서의 공기 이동량을 계산

○ 마지막으로 공기의 운동량 방정식에 기초해 공기 배출 단면에서의 축소 효과를 고려한 외부로의 공기 배출을 계산(그림 2.2.1)

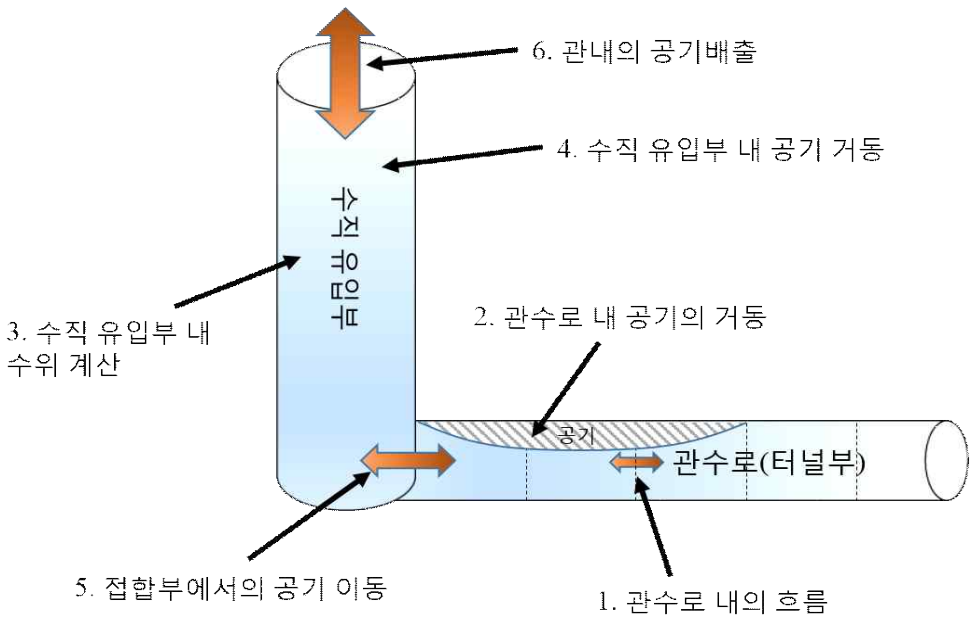


그림 2.2.1 1차원 이상류 흐름 모형의 구성도

① 지배방정식

- 1차원 연속방정식과 운동량 방정식에서 시간차를 이용한 Leap-Frog 해석 방식으로 관수로 내의 수위 및 유량을 계산하며, 만관 시에는 Slot-Model(Chaudhry, 1979)을 이용해 만수위에 따른 압력 수두를 계산

- 관련 지배방정식은 다음과 같음

<유동 연속방정식>

$$\frac{\partial A_w}{\partial t}+\frac{\partial Q_w}{\partial x}=0 \qquad (2.2.1)$$

<유동 운동량 방정식>

$$\frac{\partial Q_w}{\partial t}+\frac{\partial U_w Q_w}{\partial x}=-gA_w\frac{\partial}{\partial x}(h\cos\theta+Z_b+\frac{P_a}{\rho_w})-\frac{S_w\tau_w}{\rho_w}-f\frac{|U_w|Q_w}{2\Delta x} \qquad (2.2.2)$$

여기서, Q_w는 물의 유량(㎥/s), U_w는 물의 속도(m/s), A_w는 물의 단면적(㎡), ρ_w는 물의 밀도(kg/㎥), h는 수심(m), P_a는 공기의 압력(N/㎡), S_w는 윤변(m), τ_w는 물의 벽면 전단응력(kg · m/s^2/m^2), g는 중력가속도(m/s^2)

- 수직 유입부 및 관 내 공기의 밀도는 부피와 질량의 관계식에 의해 계산
- 전 시간 step의 질량과 현 시간 step의 부피를 이용해 현 시간 step의 밀도를 구하게 되고, 여기서 산정한 밀도와 현 시간 step의 부피를 이용해 현 시간 step의 질량을 계산
- 상태방정식에 의해 공기압이 결정되며, 관련 지배방정식은 다음과 같음

<공기 밀도>

$$\rho_a=\frac{M_a}{V_a} \qquad (2.2.3)$$

<공기압>

$$P_a=P_0(\frac{\rho_a}{\rho_0})^{\gamma} \qquad (2.2.4)$$

여기서, ρ_a는 공기의 밀도(kg/㎥), M_a는 공기의 질량(kg), V_a는 공기의 체적(㎥), P_a는 공기의 압력(N/㎡), P_0는 표준상태에서 공기의 압력(N/㎡), ρ_0는 표준상태에서 공기의 밀도(kg/㎥), γ는 비열비

- 수직 유입부 내 수위는 연속방정식과 유입부 내 집계된 총 유량을 이용해 계산, 관련 지배방정식은 다음과 같음

<유입부 내 연속방정식>

$$\frac{\partial h_w A_w}{\partial t}=\sum_{j=1}^{M}Q_{wj} \qquad (2.2.5)$$

여기서, A_w는 물의 단면적(㎡), h는 수심(m), $M_{,j}$는 하나의 수직 유입부에 연결된 관로의 수 및 번호, Q_{wj}는 수직 유입부 내 총 유량(㎥/s)

- 수직 유입부와 관수로의 접합부에 대한 공기량 계산은 비정상 운동량 방정식에서 차분된 식을 이용해 접속부에서의 공기 이동 속도를 계산하며, 이 속도 변수를 이용해 접합부 내 공기의 질량 유량을 계산
- 벽면 마찰 및 국소 손실은 무시되며, 관련 지배방정식은 다음과 같음

<공기 운동량 방정식>

$$\frac{\partial w_a}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{w_a^2}{2}+\frac{\gamma}{\gamma-1}\frac{P_a}{\rho_a}\right)=0 \tag{2.2.6}$$

<공기 질량 유량 계산식>

(수직 유입부에서 관수로로 유입 시)

$$m=C\rho_t w_a A_p \tag{2.2.7}$$

(관수로에서 수직 유입부로 유출 시)

$$m=C\rho_p w_a A_p \tag{2.2.8}$$

여기서, w_a는 공기의 속도(m/s), m는 질량 유량(kg/s), ρ_t는 수직 유입부 내 공기 밀도(kg/㎥), ρ_p는 관수로 내 공기 밀도(kg/㎥), A_p는 관수로 내 공기덩어리의 총 단면적(㎡)

- 유입부에서 대기로의 공기 배출 혹은 대기에서 유입되는 질량 유량은 공기의 운동량 방정식을 기초로 계산, 관련 지배방정식은 다음과 같음

<공기 질량 유량 계산식>

(대기로의 공기 유출 시)

$$\frac{\gamma}{\gamma-1}\frac{P_t}{\rho_a}=\frac{w_0^2}{2}+\frac{\gamma}{\gamma-1}\frac{P_0}{\rho_0} \tag{2.2.9}$$

(대기로부터 공기 유입 시)

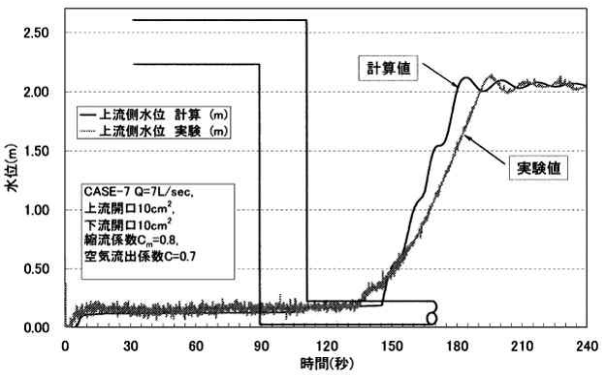
$$\frac{w_t^2}{2}\frac{\gamma}{\gamma-1}\frac{P_t}{\rho_a}=\frac{\gamma}{\gamma-1}\frac{P_0}{\rho_0} \tag{2.2.10}$$

$$m = C_m \rho_0 w_0 A_t \qquad (2.2.11)$$
$$= C_m A_t \rho_0 \sqrt{\frac{2}{\gamma-1}} \sqrt{\gamma \frac{P_0}{\rho_0}} \sqrt{(\frac{P_t}{P_0})^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1}$$

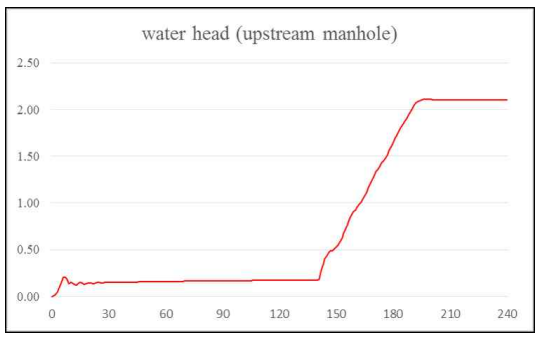
여기서, w_0는 외부로 유출 시 공기의 속도, w_t는 외부로 유입 시 공기의 속도, P_t는 수직 유입부 내 공기 압력, A_t는 공기 배출을 위한 유입구 면적, C_m는 수축계수

(다) 수치해석 결과

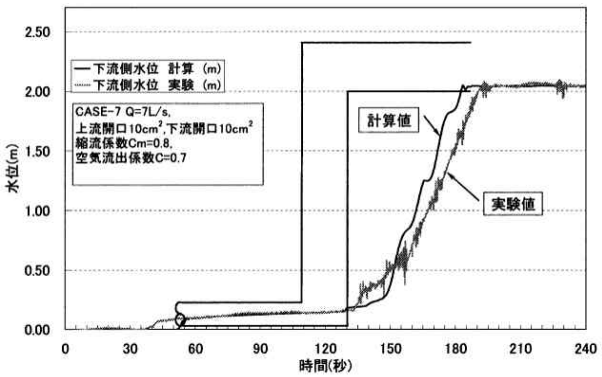
- ○ 지하유입시설 내 공기가 수직 유입부를 통해 유출 및 출입하는 현상에 대해 수치해석을 수행
- ○ 2003년 퍼시픽컨설턴트(일본)에서 발표한 대심도터널의 유입시설 형상 검토 및 터널 내 발생하는 비정상적이며 복잡한 수리현상을 재현한 논문을 참고해 수치모형 해석 결과를 비교
- ○ 지하유입시설의 수위 해석결과, 퍼시픽컨설턴트의 자료와 일치하는 양상을 보이지만, 공기압과 공기분출량 부분에서 일부 일치하지 않는 구간을 확인(그림 2.2.2~2.2.4)
- ○ 터널 내 공기거동이 전체 시스템에 미치는 영향을 파악할 수 있지만, 개발된 1차원 이상류 흐름 모형의 정밀도를 확보하기 위해 1세부와 3세부 과제의 실험결과와 연계한 모형 검증 및 보정 필요



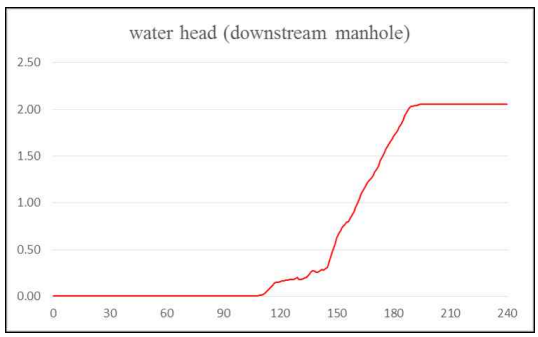
(a) 상류 측 기존 연구



(b) 상류 측 모형 결과

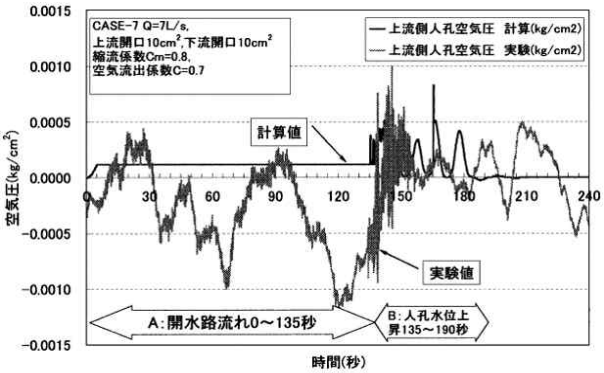


(c) 하류 측 기존 연구

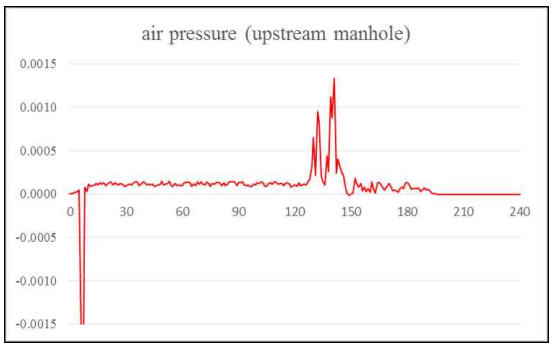


(d) 하류 측 모형 결과

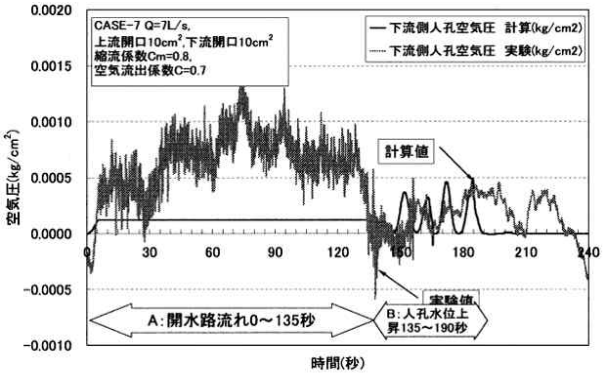
그림 2.2.2 상·하류 측 유입부 내부 수위 변화 비교



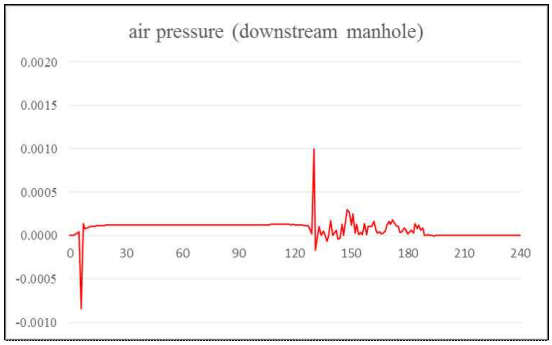
(a) 상류 측 기존 연구



(b) 상류 측 모형 결과

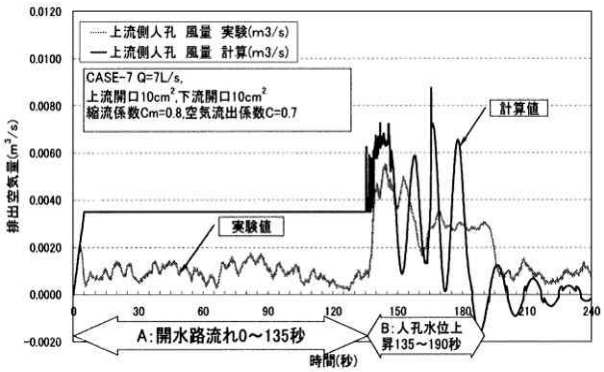


(c) 하류 측 기존 연구

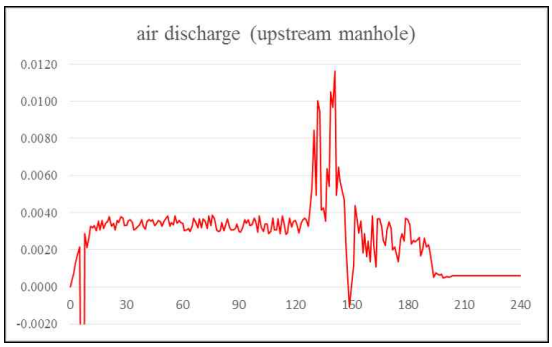


(d) 하류 측 모형 결과

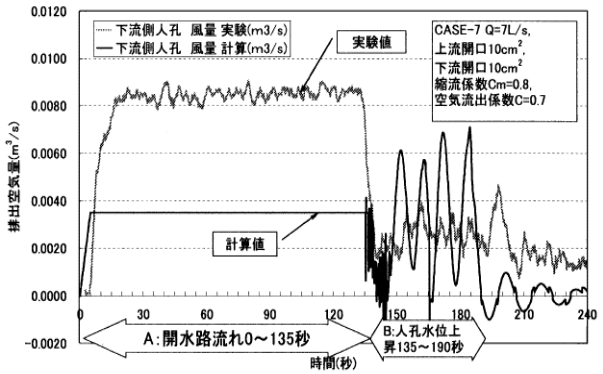
그림 2.2.3 상·하류 측 유입부 내부 공기압 변화 비교



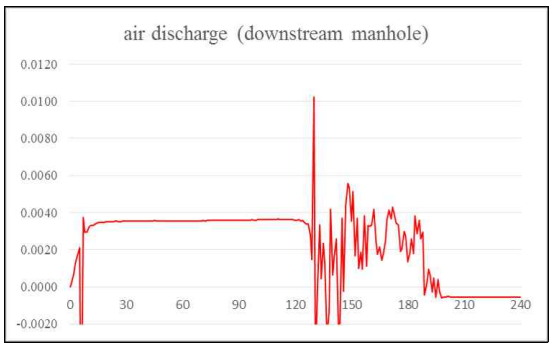
(a) 상류 측 기존 연구



(b) 상류 측 모형 결과



(c) 하류 측 기존 연구



(d) 하류 측 모형 결과

그림 2.2.4 상·하류 측 유입부 내부 공기분출량 변화 비교

(라) 공동연구기관 실험결과 연계를 통한 수치해석 모형의 검증

○ 창원대학교에서 수행한 실내 실험결과와 1차원 이상류 해석모형의 해석 결과를 비교

○ 직경 0.08 m, 길이 7.1 m의 관(터널)과 관 중간 지점에 직경 0.04 m, 높이 1.3 m의 수직관이 연결된 실험장치를 이용(그림 2.3.39)

○ 상류단이 연결된 고수조 수위(유입유량)와 관 내 초기수심을 조합해 총 8 CASE의 실험을 수행(표 2.2.1)

○ 고수조 수위를 일정하게 유지한 상태에서 관 내 물을 유입한 후, 관 내 중간 지점에서 0.2835 m 상류 지점(H1)과 0.2835 하류 지점(H2), 수직관의 0.1 m 높이 지점(V1)에서 압력 수두를 측정(그림 2.2.5)

표 2.2.1 관 내 압력 수두 측정을 위한 실험 수행 조건(창원대학교)

CASE	고수조 수위(m)	관 내 초기수심(m)
1-1	1.1	0.00
1-2	1.1	0.02
1-3	1.1	0.04
1-4	1.1	0.06
2-1	0.8	0.00
2-2	0.8	0.02
2-3	0.8	0.04
2-4	0.8	0.06

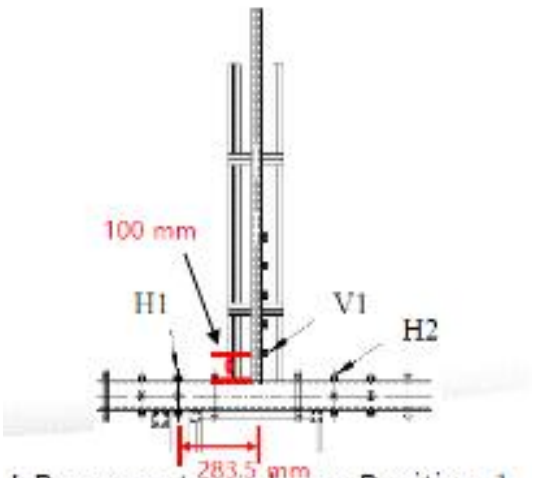
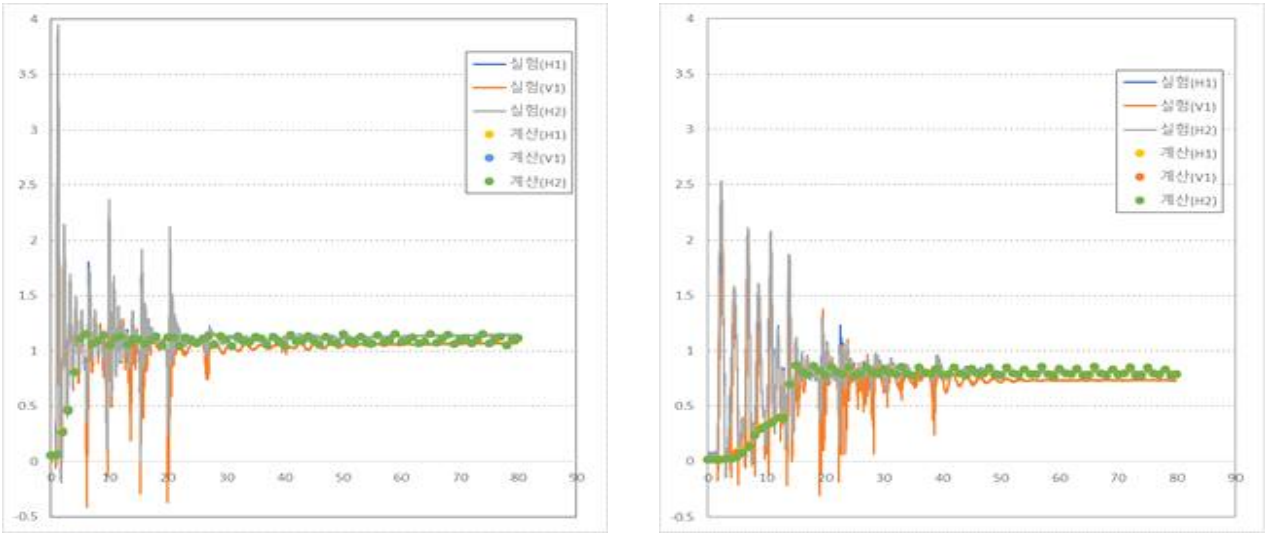


그림 2.2.5 압력 수두 계측 지점(창원대학교)

○ 1차원 이상류 수치해석 모형의 신뢰성 검증을 위해 관 내 압력 수두를 분석한 창원대학교 수리실험 결과와 1차원 모형 해석 결과를 비교한 결과, 압력 수두가 시간에 따라 점차적으로 증가해 20~30초 이후에는 실험결과와 거의 동일한 해석 결과를 나타냄(그림 2.2.6)

○ 실험결과에서 초기 압력 수두가 크게 진동하지만, 1차원 모형에서는 초기 압력 수두의 큰 진동 변화를 재현할 수 없는 것으로 확인(그림 2.2.6)



(a) Case 1-4 (b) Case 2-2

그림 2.2.6 관 내 압력 수두 실험결과와 1차원 이상류 모형의 해석 결과 비교

(2) 2차원 이상류 흐름 모형 개발

(가) 2차원 이상류 흐름 모형의 개념 및 한계점

- ○ 대심도터널 지하유입시설로 유입되는 유량에 따른 관 내 공기의 배출 상황을 고려 시, 유입부과 터널 관수로의 연결부, 관수로 내에서의 공기거동을 각각 재현하기 위해 물과 공기의 흐름을 구분해 해석
- ○ 유동 흐름으로 인해 혼합되는 공기와 흐름 내부 기포는 고려하지 않음
- ○ 이상류 흐름은 한 시스템 안에서 개수로 흐름과 압력 흐름이 동시에 일어나는 상태로 기본적으로 관 내의 2차원 천수방정식과 1차원 급류방정식을 이용해 계산하며, 계산된 압력 분포가 실제와는 다르게 나타나는 문제점이 있음
- ○ 수직관 내 공기 이동에 따른 공기분출 현상을 해석하는 모형은 현재 극소수 존재하며 정확도가 높지 않음

(나) 2차원 이상류 흐름 모형의 구성 및 계산 방법

- ○ 현재 이상류 흐름 수치해석에서 널리 이용되고 있는 Navier-Stokes 방정식을 이용해 2차원 모형을 구축하였으며, Navier-Stokes 방정식은 이상류 흐름이 가지는 흐름 특성을 가장 잘 표현할 수 있는 장점이 있음
- ○ 물의 거동은 연직 2차원 연속방정식과 운동방정식을 이용해 계산하며, 공기의 거동은 1차원 이상류 흐름 모형과 동일한 해석방법을 사용
- ○ 난류모형은 k-ε 모델을 사용하였으며, 수면의 변화는 Donor-Accepter 방식을 이용한 VOF 방법을 이용
- ○ 이상류 흐름이 접하는 부분을 계산하는 방법의 하나인 Front Tracking 기법을 이용해 2차원 이상류 흐름 모형을 구축하였으며, 물-공기와 같이 서로 섞이지 않는 이상류 흐름을 계산하는 경우에 중요한 표면장력 항을 포함
- ○ Navier-Stokes 방정식의 계산은 이류와 확산항만을 이용해 각 지점에서의 속도를 계산한 후, 이를 이용해 필요한 압력을 SOR 방법으로 계산하고 계산된 속도항과 압력을 합쳐 각 지점의 실제 속도를 계산(그림 2.2.7)

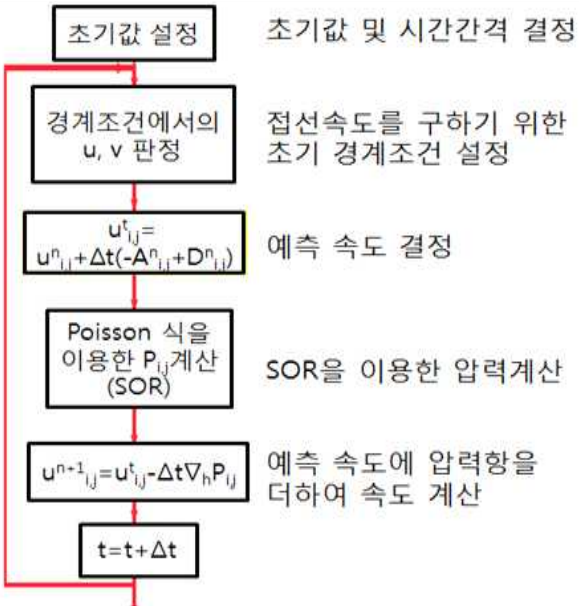


그림 2.2.7 2차원 이상류 흐름 모형의 해석 과정

① Front Tracking

- ❍ 물과 공기가 만나는 지점의 계산을 지배방정식을 이용해 바로 계산하지 않고, 다른 두 유체가 만나는 면의 이류항을 계산하는 많은 방법이 제안됨(표 2.2.2)
- ❍ 해석의 용이성 및 알고리즘의 단순성, 수치모형에서의 수면 변화의 재현도 등을 고려해 Front Tracking 방법을 선택하고, 본 연구에서 개발 중인 2차원 이상류 흐름 모형에 적용
- ❍ Front Tracking 방법은 서로 다른 두 유체가 만나는 부분을 이동시켜 각 지점에서의 밀도를 재구축하는 방법으로, 밀도를 방정식을 이용해 바로 이류시키는 방법과는 다르게 경계를 이동시킨 후 밀도장을 만드는 과정을 거침(그림 2.2.8)

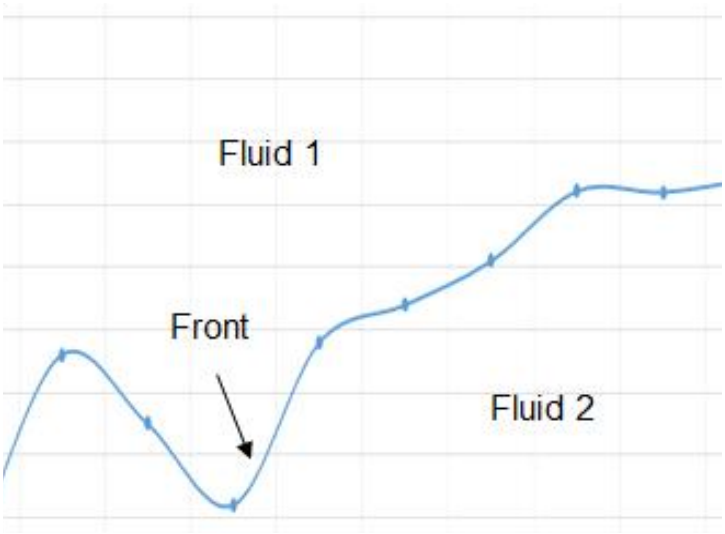


그림 2.2.8 서로 다른 두 유체가 만나는 경계(Front)의 의미

표 2.2.2 이상류 수면해석 방법의 종류

종류	VOF Method (Volume-of-Fluid)	Front Tracking	높이 측정법	좌표변환법	입자법
방법	유체의 각 격자에서 유체의 비율을 표현하고 이를 이류시켜 수면의 이동을 표현	Marker point를 이용해 그 움직임으로 수면의 이동을 표현	기준면에서의 높이 H로 수면을 표현해 H를 이류시키는 것으로 수면을 변형	자유수면에 접촉해 곡선좌표를 생성하고 운동방정식을 해석, 곡선좌표를 변화시키는 것으로 수면 형상을 변화	유체를 입자로 치환하여 입자의 운동을 계산
장점	알고리즘이 단순해, 물 덩어리의 분리, 합체 등이 큰 수면 변형 해석에 이용 가능	수면의 움직임을 간편하게 추적하는 것이 가능	알고리즘이 간단해 코딩이 용이	수면 형상을 조밀하게 표현 가능해 정밀도가 높은 해석 가능	다른 수면해석법에서는 취급하지 못하는 상세한 거동 해석이 원리적으로 가능
단점	자유수면의 형상이 계단상이 되기 때문에 정밀도 높은 수면 형상 변동 예측이 불가능	복잡한 현상 적용 시 주의 필요	기준면에서 볼 때 수면이 두 개 이상 나타나는 경우 해석이 불가능	자유수면이 불연속적인 경우나 변형이 큰 경우 계산이 불안정	자유수면을 명확히 정의하는 것이 어려움

❍ Front의 이동

- Front를 이동시키기 위해서는 초기격자(고정격자)의 속도, 밀도 및 표면장력항을 보간해 도출하여야 하며, 이를 위해 먼저 Front 지점과 가장 가까운 고정격자를 그림 2.2.9와 같이 판단해야 함
- 가까운 지점의 값을 이용해 Front 값을 보간하는 여러 가지 방법 중, 이중선형보간법인 식 2.2.12를 이용해 계산(그림 2.2.10)
- 본 연구에서 이용한 엇갈림 격자(staggered grid)에서는 고정격자에서 주어지는 값이 서로 다르기 때문에 각 지점에서의 속도를 구하기 위해 각 요소를 각자 계산
- 고정격자에서 front 지점의 속도를 계산하게 되면 front 지점은 이 속도로 이동을 하기 시작하며 간단한 1차원 외연적분을 이용하여 식 2.2.13과 같이 새로운 Front의 위치를 구할 수 있음

$$\phi_f^l = w_{i,j}^l \phi_{i,j} + w_{i,j+1}^l \phi_{i,j+1} + w_{i+1,j}^l \phi_{i+1,j} + w_{i+1,j+1}^l \phi_{i+1,j+1} \quad (2.2.12)$$

$$x_f^{n+1} = x_f^n + \Delta t u_f^n \quad (2.2.13)$$

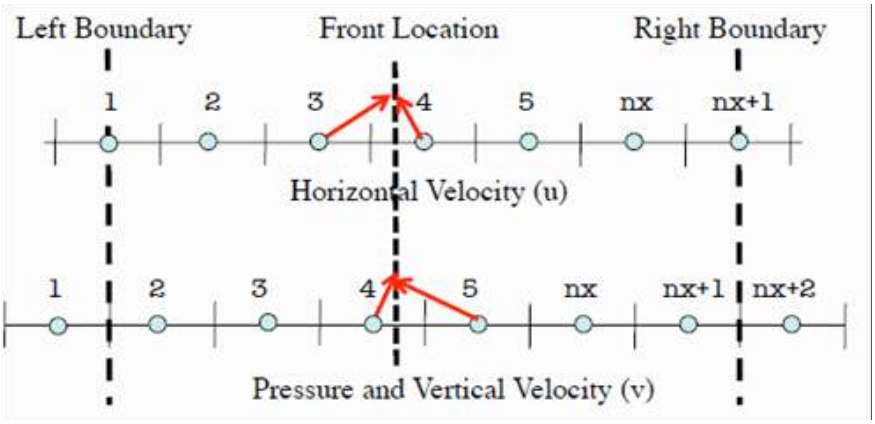


그림 2.2.9 Front 지점과 가까운 고정격자를 찾는 방법

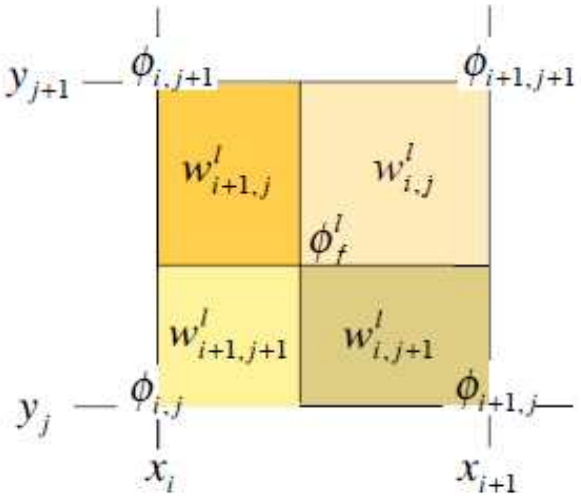


그림 2.2.10 영역가중법을 이용한 이중선형보간법

○ 초기밀도의 구축과 재구축

- 주어진 위치에서의 물과 공기가 만나는 점의 밀도를 구하기 위해 어떤 유체 1의 H는 1, 다른 유체(or 공기)의 H는 0으로 정의되는 Heaviside 방정식의 항을 이용하며, 이를 이용하면 공기와 물이 만나는 점의 밀도는 식 2.2.14과 같이 정의
- 그림 2.2.11과 같은 경우, 경계면을 따라 발산정리에 의한 적분 형식으로 생각해 볼 수 있으며, 등고선 S는 세 부분의 합(ρ_1로 둘러싸인 부분, ρ_2로 둘러싸인 부분, 경계면으로 둘러싸인 부분)을 나타냄
- 경계면으로 둘러싸인 부분이 아닌 경우 그 값은 0이 되므로 식 2.2.15와 같이 계산

$$\rho = \rho_1 H + (1-H)\rho_2 \tag{2.2.14}$$

$$\int_V \nabla \rho dv = \int_{S_I} \triangle \rho n ds \tag{2.2.15}$$

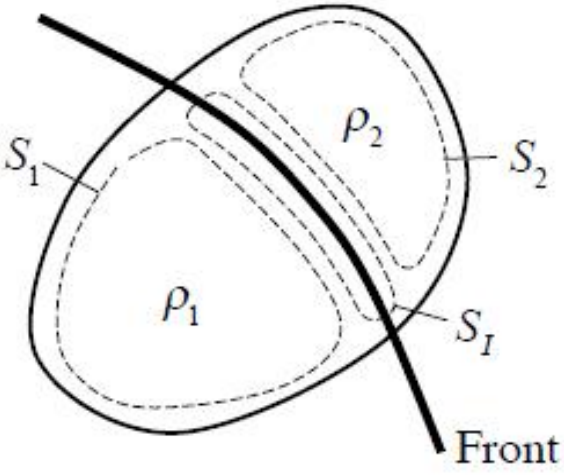


그림 2.2.11 물과 공기가 만나는 경우

- 식 2.2.15를 이용해 밀도 값을 알고 있는 지점의 밀도를 계산할 수 있으며, 본 연구와 같은 2차원 엇갈림 격자로의 변화도의 분포는 x 변화도 $(i-1/2,\ j)$에서 유효하며 $(i-1,\ j)$에서의 밀도는 다음 식 2.2.16을 이용해 계산

$$\rho_{i,j} = \rho_{i-1,j} + \triangle x(\frac{\partial \rho}{\partial x})_{i-1/2,j} \qquad (2.2.16)$$

- 위 계산을 반복해 전 지점에서의 밀도를 구축할 수 있으나, 이러한 계산은 경계면 부근의 지점에서만 수행되며 경계면에서 먼 지점에서는 변하지 않음
- Front 지점의 속도가 변화하며 움직이면서 Front 내 지점들 사이의 거리도 변화하게 되며, 거리가 너무 멀어질 경우는 계산값의 신뢰성이 떨어지고 너무 가까울 경우는 무의미한 계산이 될 수 있음
- 새로운 지점사이의 거리가 너무 크게 되면 중간 지점에 점을 새로 추가하고, 이 거리가 설정해 놓은 값보다 작게 되면 그 지점의 값을 삭제해 다음 지점과 계산을 수행
- 설정한 최소값과 최대값 사이에 새로운 지점이 존재하게 될 경우는 그대로 그 값을 사용하며, 이러한 방법을 이용할 경우 Front 지점은 지점의 추가 또는 삭제 현황에 따라 계산 시간이 변동됨
- 그림 2.2.12는 Front 지점의 재구축 과정을 나타냄

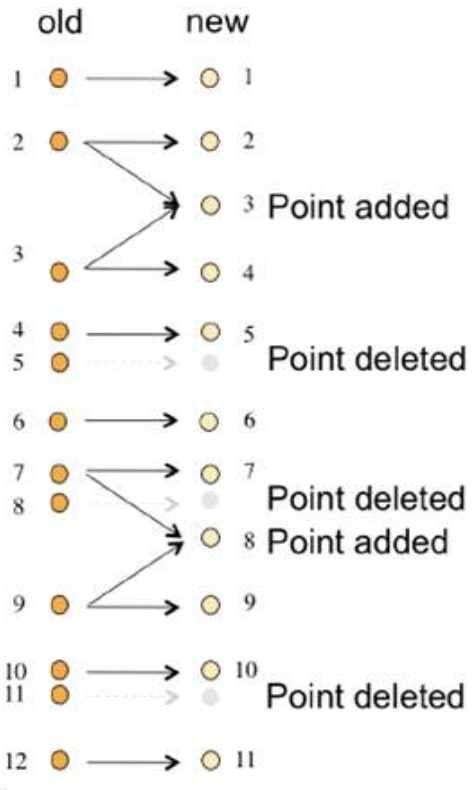


그림 2.2.12 Front 지점의 재구축 과정

② 표면장력 항의 고려

- 물과 공기와 같이 서로 섞이지 않는 이상류 흐름에서는 표면장력 항을 고려하는 것이 중요하며, 표면장력은 경계면에서만 작용하며 단위 면적당 힘을 2차원 흐름으로 표현하면 식 2.2.17과 같음
- 고정좌표에서 단위체적힘을 계산하기 위해서는 경계면 부분의 총 힘을 알아야하며, 각 경계면 지점에서의 힘을 계산하면 밀도 구축과 같은 방법으로 식 2.2.18을 이용해 좌표에 맞출 수 있음
- 고정좌표에서의 힘을 구하고 Navier-Stokes 방정식에 더해주면 경계면을 제외한 곳의 표면장력은 0이므로 식 2.2.19와 같은 단일한 힘으로 나타남

$$\kappa n = \frac{\partial t}{\partial s} \tag{2.2.17}$$

$$(f_\sigma)_{i,j} = \sum \frac{\delta f_\sigma^l w_{i,j}^l}{\triangle x \triangle y} \tag{2.2.18}$$

$$\sigma \kappa n \delta(n) \tag{2.2.19}$$

③ 다른 점성의 고려

- 물과 공기의 점성은 서로 다르므로 점성응력을 계산할 경우, 탄성변형을 고려해야 하며, 이를 고려한 운동방정식은 식 2.2.20과 같고, 유한체적법에서의 점성 항은 식 2.2.21과 같이 표현됨

○ 경계면을 따라 점성 플럭스를 각 지점에서의 시간에 대해 근사 적분해 2차 중앙차분을 이용한 속도항을 이용하면 식 2.2.22와과 같은 방정식을 이용해 점성값을 구할 수 있음

$$\rho\frac{\partial u}{\partial t}+\rho\nabla uu=-\nabla p+\rho g+\nabla\cdot\mu(\nabla u+\nabla^{T}u)+f \tag{2.2.20}$$

$$D=\frac{1}{V}\int_{V}\nabla\cdot\mu(\nabla u+\nabla^{T}u)=\frac{1}{V}\oint_{S}\mu(\nabla u+\nabla^{T}u)\cdot nds \tag{2.2.21}$$

$$\begin{aligned}(D_x)^n_{i+1/2,j}=&\\ &\frac{1}{\triangle x}\left\{2\mu^n_{i+1,j}\left(\frac{u^n_{i+3/2,j}-u^n_{i+1/2,j}}{\triangle x}\right)-2\mu^n_{i,j}\left(\frac{u^n_{i+1/2,j}-u^n_{i-1/2,j}}{\triangle x}\right)\right\}\\ &+\frac{1}{\triangle y}\left\{\mu^n_{i+1/2,j+1/2}\left(\frac{u^n_{i+1/2,j+1}-u^n_{i+1/2,j}}{\triangle y}+\frac{v^n_{i+1,j+1/2}-v^n_{i,j+1/2}}{\triangle x}\right)\right\}\\ &-\mu^n_{i+1/2,j-1/2}\left(\frac{u^n_{i+1/2,j}-u^n_{i+1/2,j-1}}{\triangle y}+\frac{v^n_{i+1,j-1/2}-v^n_{i,j-1/2}}{\triangle x}\right)\end{aligned} \tag{2.2.22}$$

④ Essentially Non-oscillation Scheme (ENO)

○ 중앙차분을 이용해 이류를 계산한 경우, 점성 확산의 부재로 인해 계산 결과가 불안정해지는 경향이 있으며, 점성이 작아지면서 이 확산을 안정시키기 위해 더 작은 시간 간격을 필요하게 됨

○ 점성이 작아지면서 그 값이 정확하지 않게 되어 중앙차분법은 높은 레이놀즈수의 흐름에는 적합하지 않은 방법이며, 이를 해결하기 위해 유속과 격자의 크기에만 영향을 받고 좀 더 안정적으로 작은 점성 흐름에서의 이류를 계산할 수 있는 Runge-Kutta/ENO를 적용

○ ENO 방법에서 중요한 것은 진동이 일어나지 않게 하기 위한 인접한 격자의 기울기의 제한을 두고, 이 기울기를 이용해 밀도를 구축하는 것으로, 그림 2.2.13과 같이 인접한 두 격자 사이의 평균값을 연결한 좌·우의 기울기를 계산한 후 두 값 중 작은 기울기를 하류 플럭스로 선택해 계산하는 방법

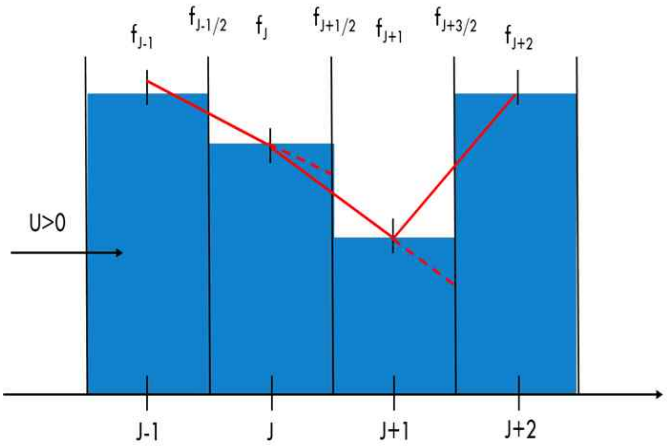


그림 2.2.13 ENO 보간 방법

(다) 모형의 검증

○ 모형의 검증을 위해서는 수치해석의 결과값과 수리실험의 결과값을 이용해 비교하는 것이 타당하나, 이번의 경우 동일한 형태의 수리실험과 수치해석을 수행할 수 없는 한계점으로 인해 학술적 논문 결과의 이론적 계산 결과와 비교·검증 과정을 수행

① Lid Driven Cavity

○ Lid Driven Cavity는 새로운 Navier-Stokes code나 알고리즘을 완성하였을 경우, 간단하게 이용할 수 있는 방법으로, 새로운 수치해석 모형을 비교할 때 널리 이용(Ghia et al., 1982)

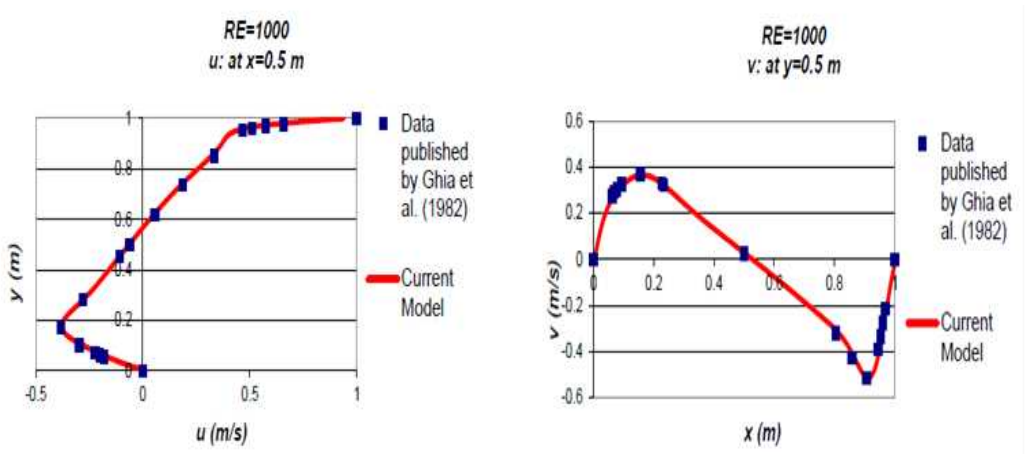
○ 단위 폭을 가지는 직사각형관에서의 흐름으로 가정, $t=0$에서 위쪽 벽은 오른쪽으로 단위속도 1.0 m/s로 이동을 시작하며, 다른 세 벽은 고정된 벽으로 가정

○ 밀도는 1.0 kg/m^{3}이고 점성은 0.001 kg/m·s, 레이놀즈수는 1000으로 가정하며 중력은 무시

○ 격자는 128 × 128이며, 시간 간격은 5×10^{-4} s

○ $x=0.5$ m일 때의 속도 u, $y=0.5$ m 일 때의 속도 v에서 수치해석 결과와 비교(그림 2.2.14)

○ 그림 2.2.14에서 볼 수 있듯이 Ghia et al.(1982)의 실험결과와 본 연구를 통해 개발된 2차원 이상류 흐름 모형의 해석 결과가 일치하는 것을 확인



(a) $x=0.5$ m에서의 속도 u의 비교 (b) $y=0.5$ m에서의 속도 v의 비교

그림 2.2.14 2차원 이상류 흐름 모형의 결과값 비교(Lid Driven Cavity)

② Poiseuille Flow

○ Poiseuille Flow란 평행한 두 평판 사이의 2차원 점성류를 의미하며, 2차원 Navier-Stokes 방정식을 이용해 해답을 구할 수 있음

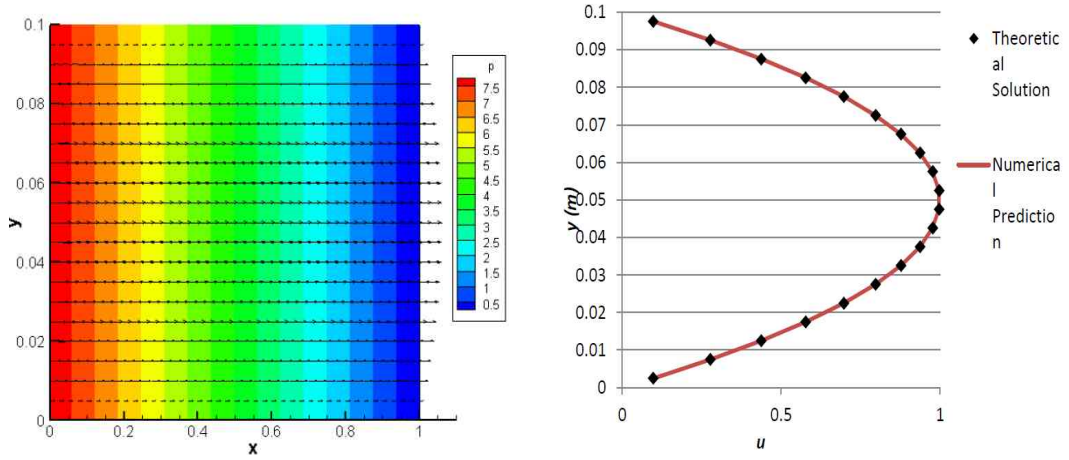
○ 속도 유입이나 압력 유입을 초기조건으로 설정해 계산할 수 있으며, 속도 유입을 이용하는 경우 포물선 형태로 유입이 일어나며 압력 저하가 계산되어 수치적 해석과 비교 가능

○ 압력 유입의 경우, 유입부와 출구부의 압력을 설정해 속도분포형을 계산할 수 있으며, 속도 유입을 초기조건으로 설정해 최고속도 1.0 m/s의 포물선 속도분포형을 유입해 압력의 변화를 비교

○ 점성은 0.001 kg/m·s, 밀도는 1.0 kg/m^{3}으로 설정하고, 1.0 m × 0.1 m의 영역에서 0.001 s의 시간 간격으로 정류상태가 될 때까지 수치해석을 수행

○ 압력분포결과는 그림 2.2.15a와 같으며, 압력 경사는 7.97 pa/m로 나타나 이론적으로 계산한 압력 경사 약 8 pa/m와 0.375%의 차이를 나타냄

○ 그림 2.2.15b는 유출구에서의 속도분포 결과를 비교한 것으로 속도 벡터의 값은 평판과 수평하게 포물선의 형태를 보여주는 것을 확인할 수 있으며, 이론적으로 계산한 결과와 일치하는 것을 확인



(a) 속도 분포와 압력 분포 결과 (b) 유출구에서의 속도분포형 비교

그림 2.2.15 2차원 이상류 흐름 모형의 결과값 비교(Poiseuille Flow)

③ Couette Flow

○ 하단의 평판을 고정시켜 놓고 상단의 평판을 움직이는 형태의 흐름을 Coutte flow라고 하며, 흐름은 상단의 움직임에 따라 흘러가는 양상을 가지고 있음

○ 평판은 $t=0+$에서 오른쪽으로 1.0 m/s로 움직이기 시작하며, 유입구에서는 압력 경사를 가지지 않지만, 속도에 의해 압력 경사가 나타남

○ 점성, 밀도 및 전체 영역은 Poiseuille Flow 경우와 동일하게 설정해 정류상태가 될 때까지 해석 수행

○ 같은 조건에서의 Navier-Stokes 방정식을 이용해 속도분포형을 이론적으로 계산하면 식 2.2.23과 같이 선형적으로 나타남

○ 수치해석 결과 수직방향 속도분포형이 선형적으로 나타남을 알 수 있고, 이론식과 잘 일치하는 것을 확인(그림 2.2.16)

$$u=\frac{u_{wall}}{D}y;\quad v=0 \tag{2.2.23}$$

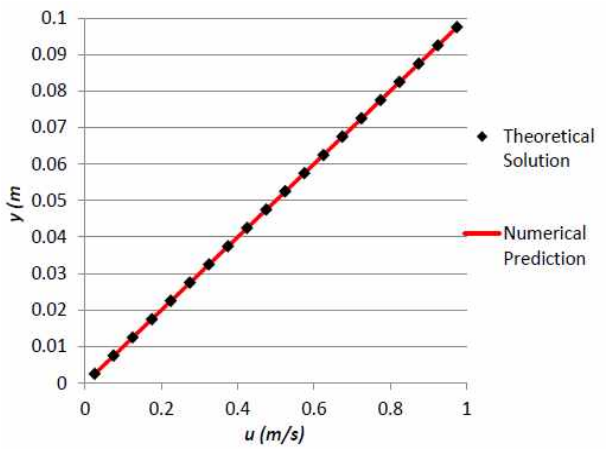


그림 2.2.16 유출구의 속도분포형 비교

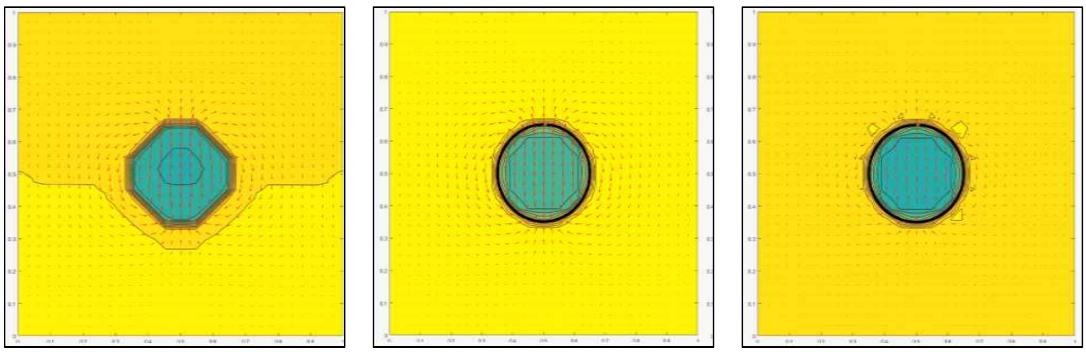
(라) 모형 해석 결과

① 표면장력 항을 고려한 수치해석 결과의 비교

- ○ 단순한 형상의 맨홀에서 Navier-Stokes 방적식을 이용한 2차원 이상류 흐름 모형의 해석 결과를 비교
- ○ 외력은 중력만 작용하며 두 유체 사이의 밀도는 두 배의 차이를 가지고, 점성은 같다고 가정
- ○ 그림 2.2.17은 직접 계산 방법과 Font Tracking 방법, 표면장력 항을 고려한 결과의 차이를 나타내었으며, 각 격자의 유속벡터를 도시
- ○ 직접 계산의 경우, 경계면에서의 이류항의 계산이 포함되어 있지 않아 시간이 지나갈수록 두 경계면이 서로 합쳐지는 경향을 보이며, Font Tracking을 이용한 경우에는 경계면의 변화를 잘 나타냄
- ○ 표면장력 항을 고려하지 않을 경우, 이동함에 따라 원형을 점점 잃어 가다 벽과 같은 장애물에 부딪히는 경우 확산됨
- ○ 표면장력 항을 고려한 경우, 이동하는 때도 원형을 잘 유지하며 벽과 같은 장애물과 부딪히면 어느 정도 탄력을 가지고 튕겨 나오는 것을 확인

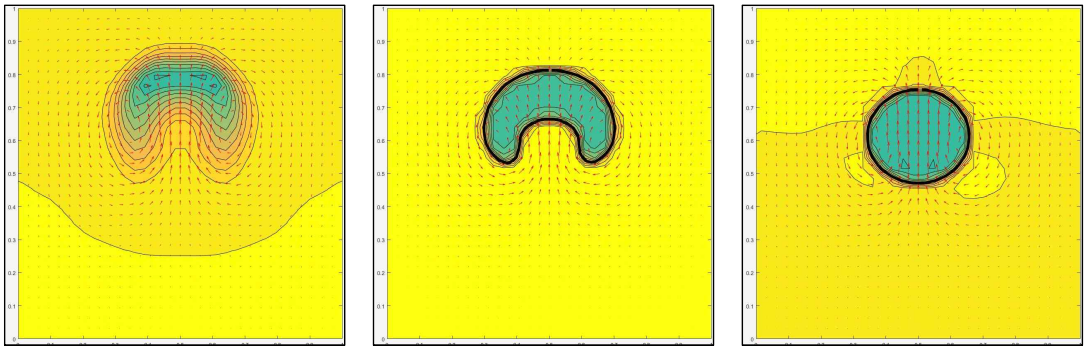
② 다른 점성 및 ENO scheme을 고려한 수치해석 결과의 비교

- ○ 수평·수직관을 포함한 L자형 관에서 Navier-Stokes 방정식을 이용한 모형 해석 결과를 비교
- ○ 수직관은 0.5 m × 2.0 m, 수평관은 3.0 m × 0.4 m
- ○ 하류단에서 상류단으로 유속이 발생하고, 외력은 중력만 작용한다고 가정하였으며, 밀도와 점성은 물과 공기의 실제 특성값을 이용해 계산
- ○ ENO를 적용한 결과와 적용하지 않은 결과와 각 격자에서의 유속벡터를 그림 2.2.18에 나타냄
- ○ ENO를 적용하지 않은 경우, 경계면이 아닌 부분에서도 광범위하게 계산됨
- ○ ENO를 적용할 경우, 경계면에서의 수치 차이를 이용해 벡터 및 밀도의 변화를 계산하기 때문에 벡터가 상대적으로 크게 나타나 보이지만, 전체 영역에서의 경계면, 즉, 물과 공기 사이에서의 밀도, 점성 차이에 의해 계산되는 값이 다른 영역보다 압도적으로 크게 나타나기 때문에 상대적으로 크게 나타나 보임
- ○ ENO의 경우, 수직관과 수평관이 만나는 부분에서 큰 와류가 생겨 거동에 제한을 받고 있다는 것을 알 수 있으며, 이상류 흐름 모형의 경우 공기의 거동을 예측하고 분석하는 데 그 목적이 있어 ENO를 적용하는 경우 경계면 주위에서의 변동을 잘 보여주기 때문에 신뢰성 있는 해석 결과 도출이 가능



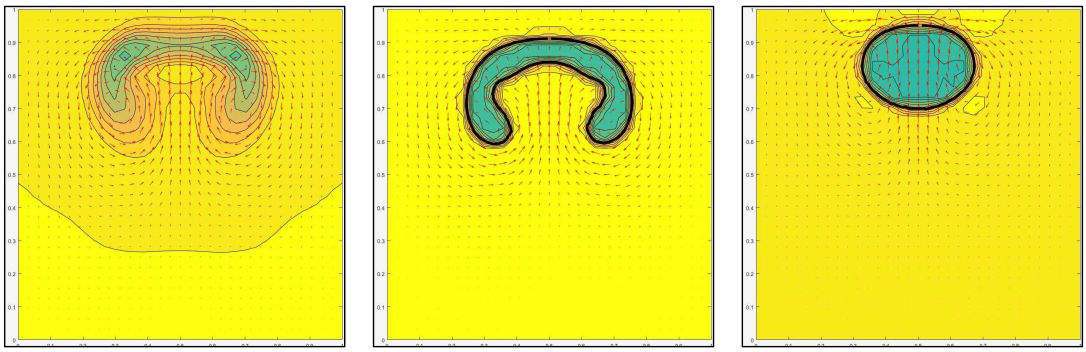
(a) 직접 계산 (b) Front Tracking (c) 표면장력 항 고려

[time step = 0 s]



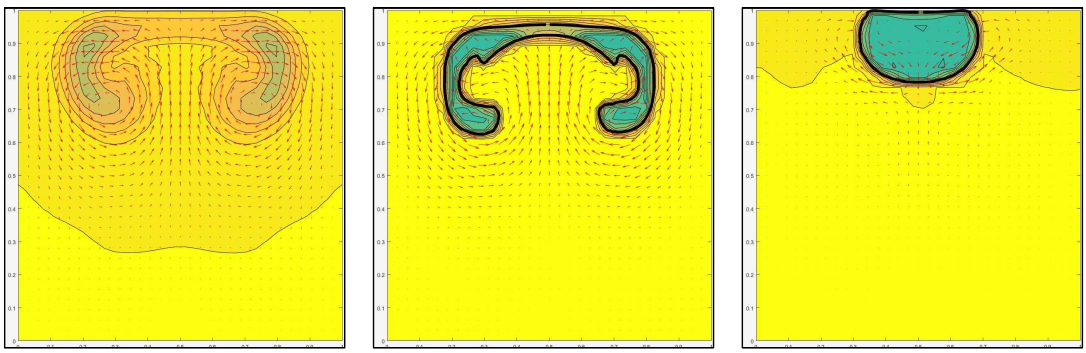
(a) 직접 계산 (b) Front Tracking (c) 표면장력 항 고려

[time step = 10 s]



(a) 직접 계산 (b) Front Tracking (c) 표면장력 항 고려

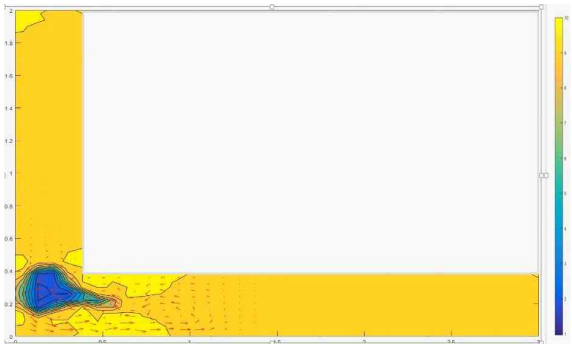
[time step = 20 s]



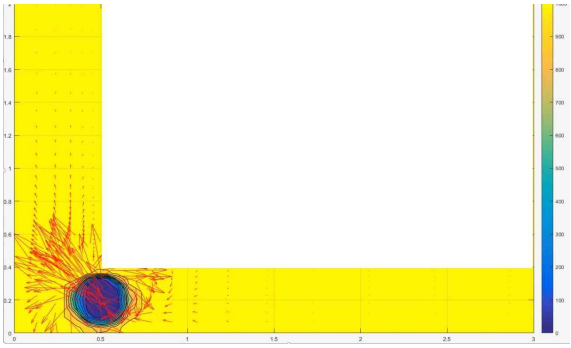
(a) 직접 계산 (b) Front Tracking (c) 표면장력 항 고려

[time step = 30 s]

그림 2.2.17 Front Tracking과 표면장력 항을 고려한 해석 결과의 비교

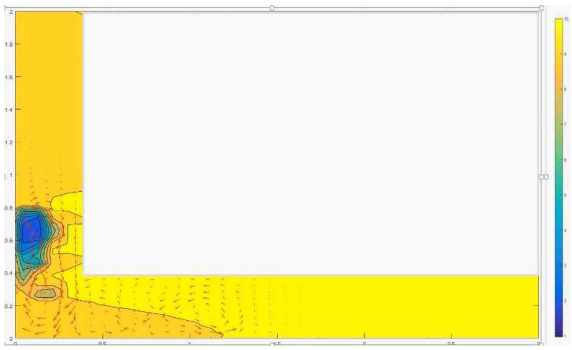


(a) 점성만을 고려한 경우

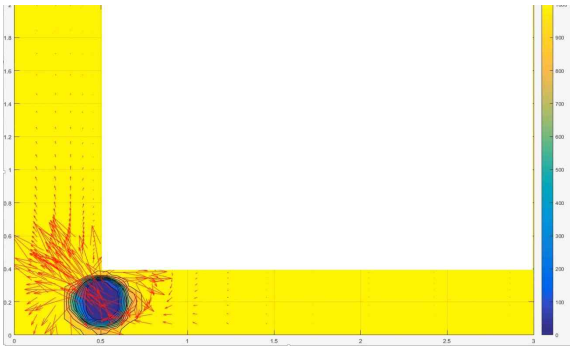


(b) ENO scheme을 적용한 경우

[time step = 40 s]



(a) 점성만을 고려한 경우

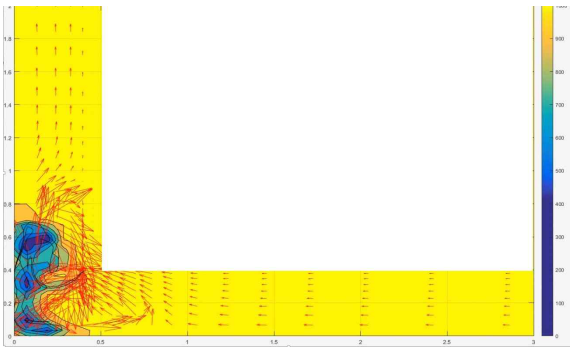


(b) ENO scheme을 적용한 경우

[time step = 100 s]



(a) 점성만을 고려한 경우

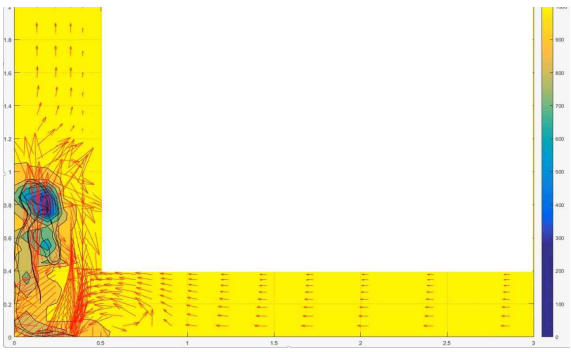


(b) ENO scheme을 적용한 경우

[time step = 160 s]



(a) 점성만을 고려한 경우



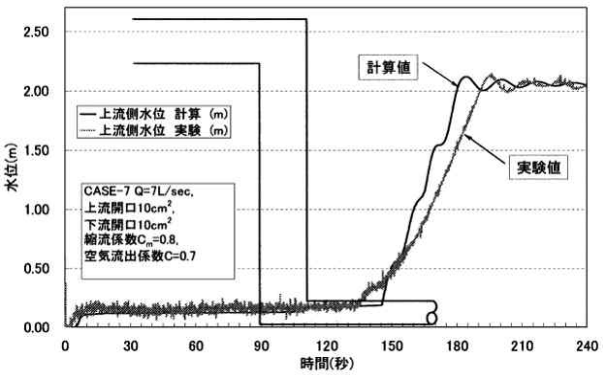
(b) ENO scheme을 적용한 경우

[time step = 220 s]

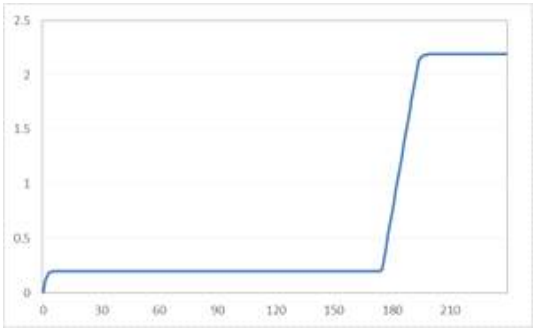
그림 2.2.18 다른 점성 및 ENO scheme을 고려한 해석 결과의 비교

③ 1차원 이상류 흐름 모형 해석 결과와의 비교

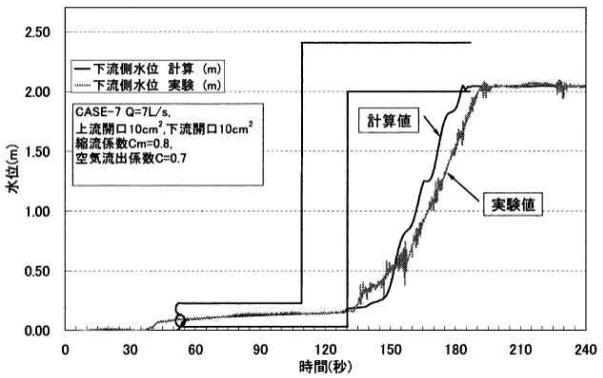
- 1차원 이상류 흐름 모형과 동일하게 퍼시픽컨설턴트(2003) 논문의 실내 실험을 2차원 이상류 흐름 모형으로 재현하고 결과값을 비교
- 수면 변동을 고려한 연직 2차원 해석으로 관 내의 물의 거동 해석이 가능하며, 물의 거동 해석 결과를 기초로 관 내 공기 압력에 대해서도 해석 가능
- 2차원 이상류 흐름 모형 해석 결과, 수심 변화와 공기압 변화의 정성적인 경향을 유사하게 재현하였지만, 정확도는 1차원 이상류 흐름 모형보다 낮게 나타남
- 연직 2차원 이상류 흐름 모형의 경우, 관로의 원형 단면 형상을 고려할 수 없기 때문에 실제 물리현상과 차이가 발생하는 것으로 보이며, 1차원 이상류 흐름 모형과 비교해 이상류 흐름 해석에 우위성을 가진다고 볼 수 없음
- 2차원 해석의 경우, 1차원 해석과 비교해 해석시간이 상당히 오래 소요되기 때문에 실무에서 범람해석과 연계해 이용하는 것은 실용적이지 않다고 판단됨



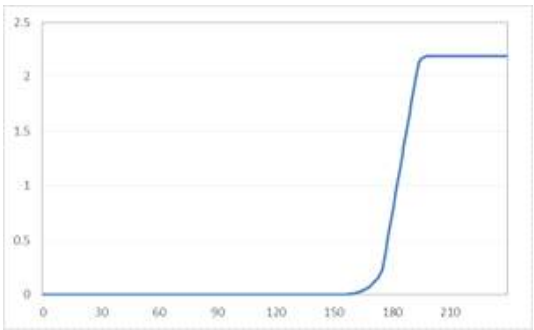
(a) 상류 측 기존 연구



(b) 상류 측 모형 결과

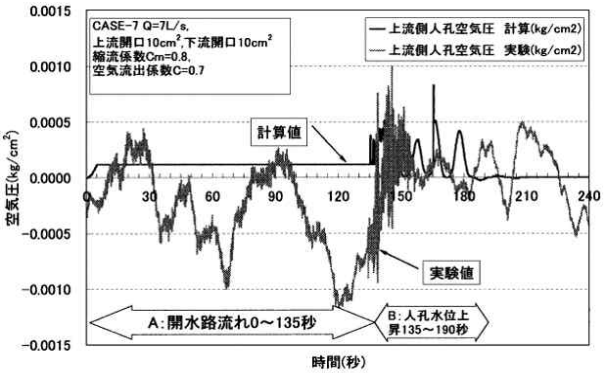


(c) 하류 측 기존 연구

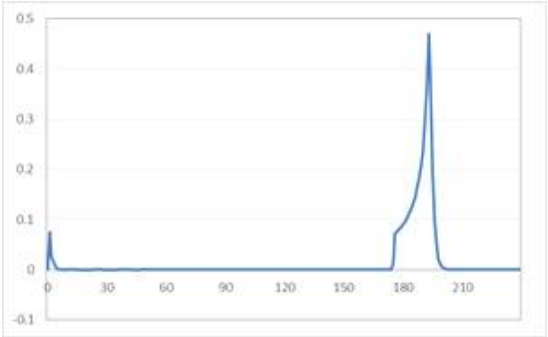


(d) 하류 측 모형 결과

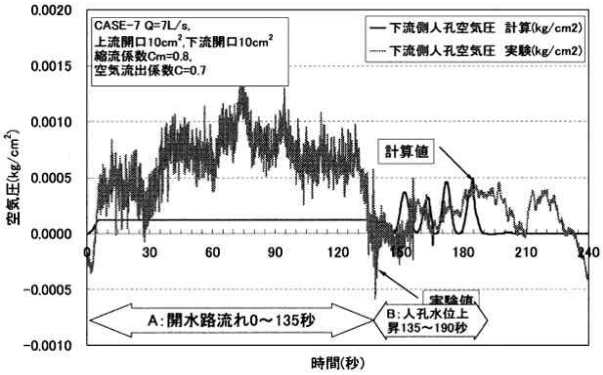
그림 2.2.19 상·하류 측 유입부 내부 수위 변화 비교



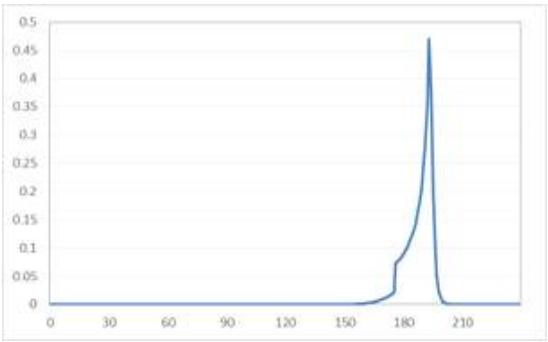
(a) 상류 측 기존 연구



(b) 상류 측 모형 결과

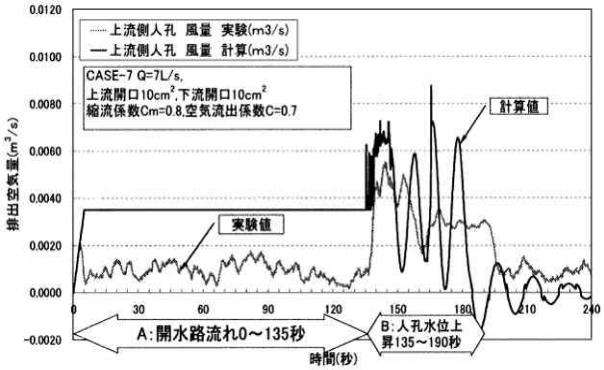


(c) 하류 측 기존 연구



(d) 하류 측 모형 결과

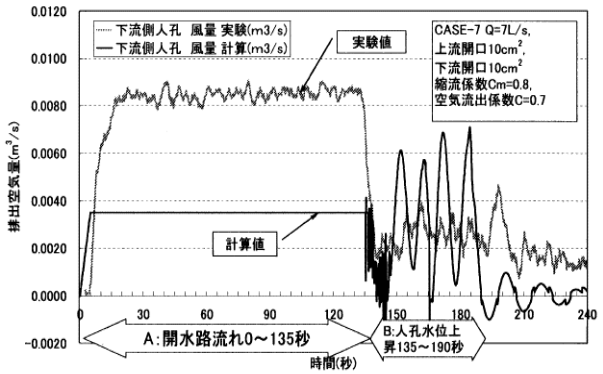
그림 2.2.20 상·하류 측 유입부 내부 공기압 변화 비교



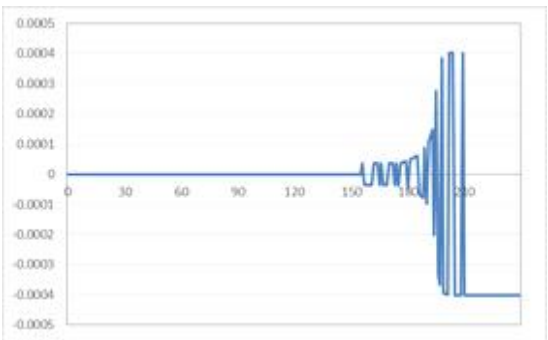
(a) 상류 측 기존 연구



(b) 상류 측 모형 결과



(c) 하류 측 기존 연구



(d) 하류 측 모형 결과

그림 2.2.21 상·하류 측 유입부 내부 공기분출량 변화 비교

(3) 대심도터널의 수리현상과 침수피해 감소 효과 분석을 위한 지표수 수치모형 개발

(가) 지표수 수치모형의 개념

○ 도시지역 범람 해석을 위한 지표수 수치모형을 개발하고 대심도터널 적용 전후의 도시지역 침수피해 감소 효과 분석에 대한 적용성을 검토하기 위해 하수관거에 지하유입시설을 연결

○ 하수도 내 빗물의 일정 부분을 횡 위어 구조물을 통해 지하유입시설로 물의 흐름을 우회시켜 지하저류시설(대심도터널)에 임시 저류하는 방식을 선택(그림 2.2.22)

○ 지표수 수치모형과 지하유입시설의 흐름 해석을 연계한 시스템으로부터 대심도터널 적용 전후의 침수피해 감소 효과를 분석하고 관련 평가기법을 개발

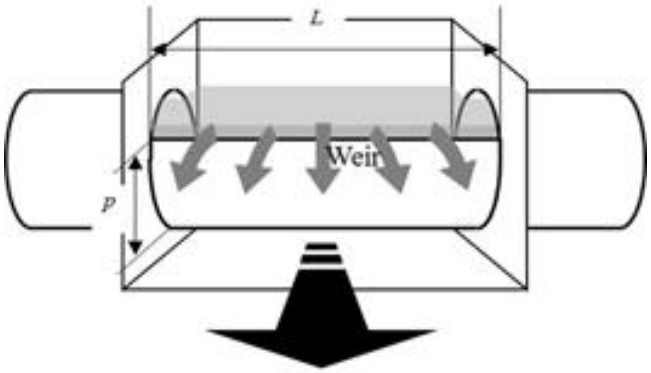


그림 2.2.22 하수관거에 연결된 횡 위어를 통한 지하유입시설 반영

(나) 지표수 수치모형의 적용

○ 도시지역의 침수피해를 재현하기 위해, 2차원 지표수 수치모형과 하수관거와 지하유입시설 사이의 우수 배수 과정을 추가로 고려한 지표수 해석모형을 개발

○ 과거 침수피해가 발생한 오사카의 나카하마 지역을 대상으로 지하유입시설과 지하저류시설 설치에 따른 도시지역의 침수피해 감소 효과 분석

○ 대상 지역의 전체적인 지형 형상은 서쪽에서 동쪽을 향해 기울어져 있으며, 남쪽으로 18.1 ㎞에 걸쳐 하수관거 네트워크가 형성

○ 기존의 지표수 수치모형을 이용한 수치해석을 통해 최대 홍수가 발생했을 때 하수관의 배수통수능이 가장 낮은 세 개의 구간(A: 저지대, B: 나카하마 지역의 중간 지점, C: 나카하마 지역의 상류부)을 선별하고 지하저류시설 설치 구간으로 선정(그림 2.2.23)

○ 지하저류시설의 크기는 실제 나카하마 지역에 설치된 지하저류시설 중 가장 큰 용량인 50,000 ㎥로 결정하고, 계산 시간에 따라 저류 용량을 초과하게 되면 기능을 상실하는 것으로 가정

○ 횡 위어 크기에 따른 월류 유량 관계식을 이용해 지하저류시설로 흘러 들어가는 빗물의 유입량을 계산

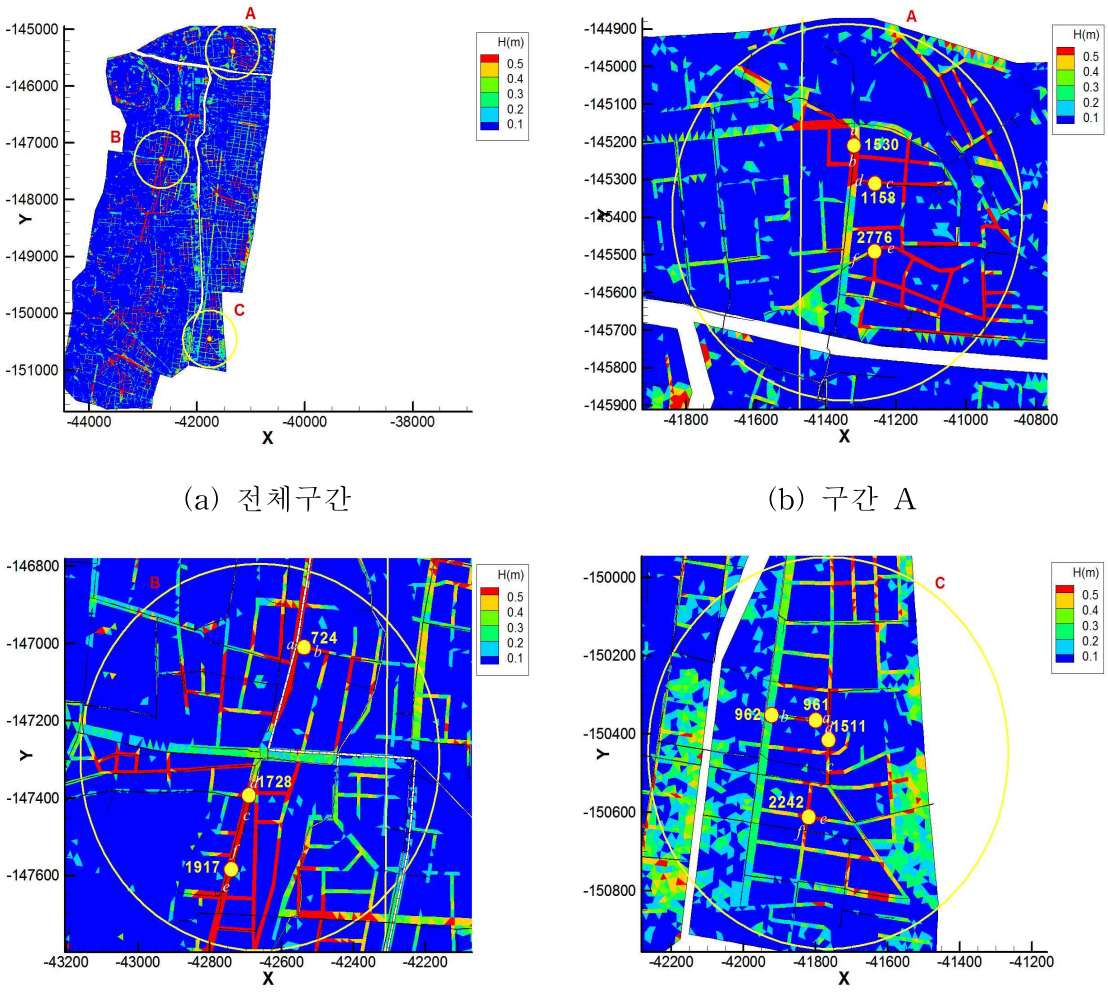
○ 계산 영역은 총 3,026개의 하수관거, 2,903개의 맨홀, 그리고 4개의 펌프 시설로 이루어져 있으며(그림 2.2.24), 지상부는 GID 프로그램을 이용해 비구조 격자로 생성하고 빌딩 및 도로 영역으로 각각 구분

○ 강우조건

- 지하저류시설의 효과는 최대 강우강도가 같더라도 강우의 분포형태에 따라 다를 것으로 판단
- 최대 강우강도 발생 분포를 전방, 중앙, 후방으로 나누어 우량 분포도를 구성
- 설계 강우확률빈도(10년)보다 큰 50년 빈도의 강우를 계산에 적용
- 2011년 나카하마 지역에 기록된 자료를 근거로 강우 지속시간은 3시간으로 설정
- 일본 토목연구소 AMEDAS 강우량 예측 프로그램을 통해 총 강우량은 168 mm로 산정(그림 2.2.25)

○ 세 개의 다른 강우강도 분포 조건과 함께 각 하수관거의 관경에 의해 정해진 위어의 폭과 길이에 일정한 비율의 변화를 주어 여러 조건에 따른 지하저류시설 효과를 검토(표 2.2.3)

○ 하수관거와 위어 조건은 실제 오사카 모리구치시에 설치된 지하저류시설의 설계 도면에 사용된 하수관거와 그 관경에 따른 횡 위어 크기 비율을 참고



(a) 전체구간 (b) 구간 A

(c) 구간 B (d) 구간 C

그림 2.2.23 대상 지역 내 지하저류시설 설치 구간

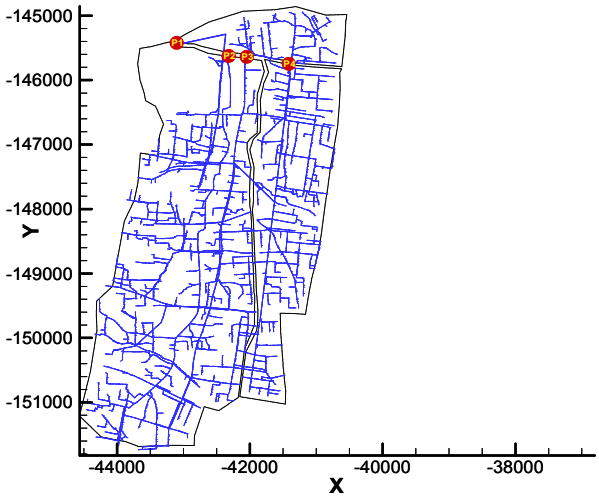
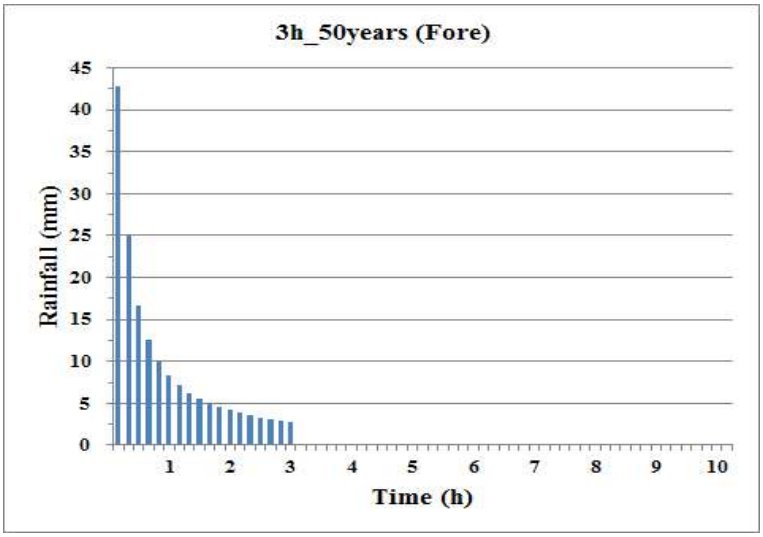


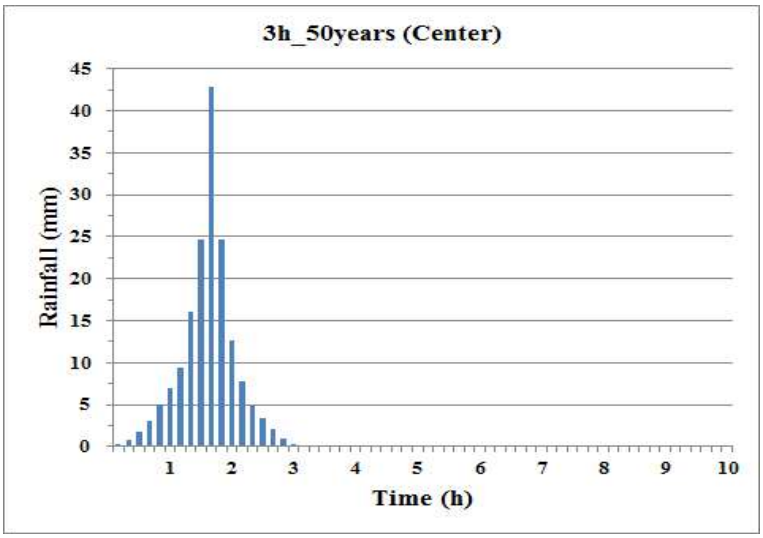
그림 2.2.24 대상 지역의 하수관거 네트워크 및 펌프 시설

표 2.2.3 강우 형태 및 횡 위어 크기 조건

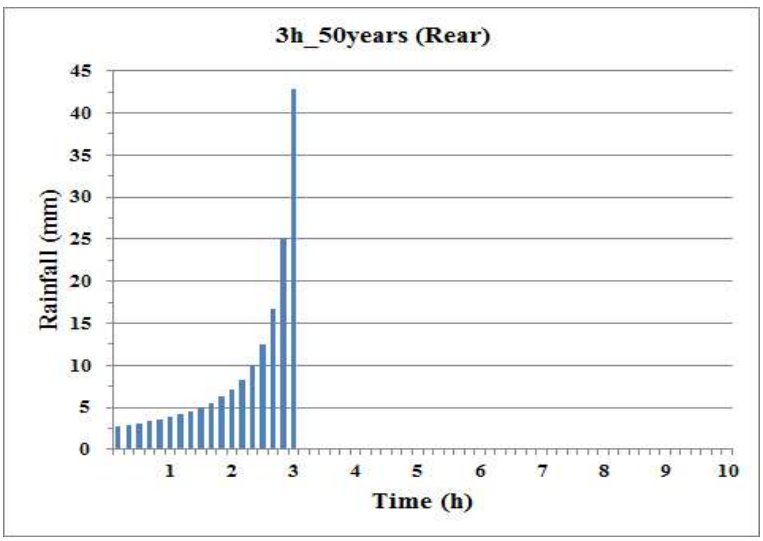
대상 구간	강우형태	설치 위치	하수관경(m)	위어길이(m)	위어 폭(m)	용량(㎥)
A	전방 중앙 후방	b	1	4.09	0.86	50,000
					0.65	
					0.45	
					0.25	
				2.05	0.86	
					0.65	
					0.45	
					0.25	
B		d	0.9	3.68	0.78	
					0.59	
					0.41	
					0.23	
				1.84	0.78	
					0.59	
					0.41	
					0.23	
C		b	1.35	5.52	1.17	
					0.88	
					0.61	
					0.34	
				2.76	1.17	
					0.88	
					0.61	
					0.34	



(a) 전방분포



(b) 중앙분포



(c) 후방분포

그림 2.2.25 적용대상 구역의 최대 강우강도 분포도

(다) 강우 형태 및 횡 위어 크기에 따른 침수피해 감소 효과 분석

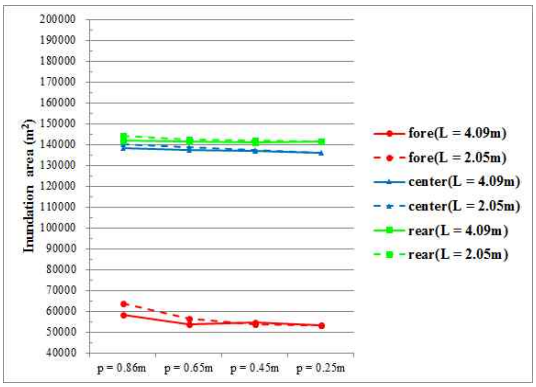
○ 10 cm 이상의 침수심을 나타내는 면적을 고려했을 경우, 전반적으로 후방 집중강우를 적용했을 때 가장 큰 침수면적이 발생, 전방 집중강우 형태에서는 상대적으로 원활한 배수가 이루어짐

○ 최대 강우강도 발생 시점이 빠른 경우, 이른 시간 내 지하저류시설로 유량이 유입되기 때문에 하수관 네트워크 내 배수통수능이 원활하게 진행

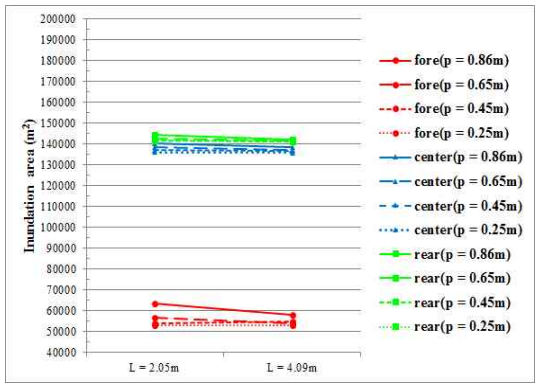
○ 위어의 폭이 낮거나 길이가 증가할수록 유량이 지하저류시설로 유입되는 시간이 단축되고 그 양이 증가하므로 이는 침수피해 면적 감소에 영향을 미치는 것으로 보임

○ 위어의 조건을 변화시킴으로써 어느 정도 침수피해가 발생하는 면적을 줄일 수 있지만, 전체적으로 보았을 때 침수피해 감소 효과에 미치는 영향은 다소 크지 않음

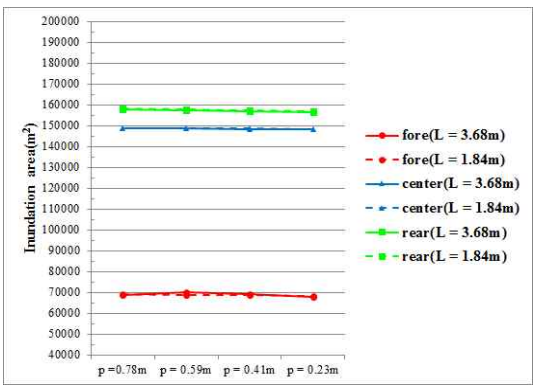
○ 구간 C에서 지하저류시설 설치로 인한 침수 경감 효과가 가장 큰 것으로 나타났으며, 이는 하수관 네트워크의 통수능력이 다른 구역에 비해 활발하다는 것을 의미하며 저류조 내로 유량유입이 원활히 이루어지고 있는 것으로 판단(그림 2.2.26)



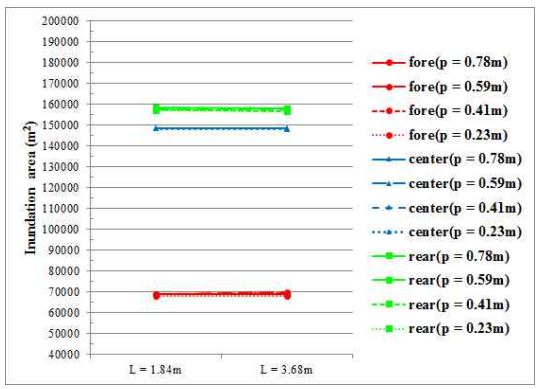
(a) 구간 A, 위어 폭 변화



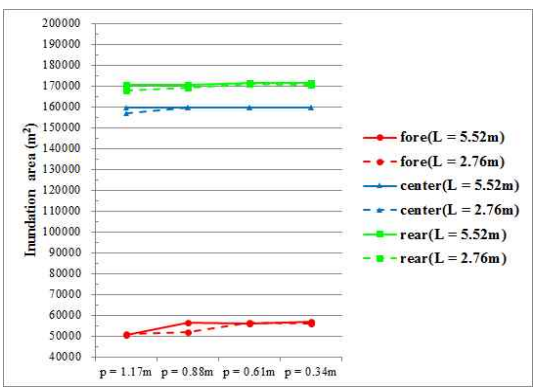
(b) 구간 A, 위어 길이 변화



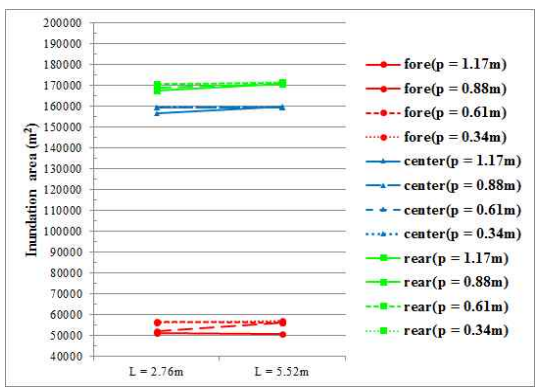
(c) 구간 B, 위어 폭 변화



(d) 구간 B, 위어 길이 변화



(e) 구간 C, 위어 폭 변화



(f) 구간 C, 위어 길이 변화

그림 2.2.26 위어 제원 변화에 따른 침수피해 면적 감소 효과

(라) 지하저류시설의 위치 변화 및 저류용량에 따른 침수피해 감소 효과 분석

○ 지하저류시설 설치 시, 같은 하수관거라고 해도 상류부 및 하류부와 같이 설치 위치 변화에 따라 침수피해 감소 효과가 다를 것으로 예상됨

○ 지하저류시설 설치를 위해 각 구역에 3개의 하수관거를 선택하고 하수관거 상·하류부에 각각의 지하저류시설을 설치해 구역별 총 6개의 지하저류시설을 설치하고 각 구역의 침수피해 감소 효과를 분석

○ 후방 집중강우가 침수피해에 큰 영향을 미치는 것으로 확인하였으며, 강우 형태를 후방 집중강우로 선정(표 2.2.4)

○ 각 구간별 총 4개의 저류용량을 고려(표 2.2.5)

표 2.2.4 지하저류조 위치 변화에 따른 조건

대상 구간	강우형태	설치 위치	하수관경(m)	위어길이(m)	위어 폭(m)	용량(㎥)
A	후방	a_up	1	4.09	0.86	50,000
		b_down				
		c_up	1.2	4.91	1.04	
		d_down				
		e_up	0.7	2.86	0.60	
		f_down				
B		a_up	1.52	6.22	1.31	
		b_down				
		c_up	0.9	3.68	0.78	
		d_down				
		e_up	0.83	3.40	0.72	
		f_down				
C		a_up	1.35	5.52	1.17	
		b_down				
		c_up	1	4.09	0.86	
		d_down				
		e_up	0.8	3.27	0.63	
		f_down				

표 2.2.5 지하저류시설 저류용량 변화 조건

대상 구간	강우형태	설치 위치	용량(㎥)	하수관경(m)	위어길이(m)	위어 폭(m)
A	후방	b	case1(5,000)	1	4.09	0.86
			case2(10,000)			
			case3(15,000)			
			case4(20,000)			
B		d	case1(5,000)	0.9	3.68	0.78
			case2(10,000)			
			case3(13,000)			
			case4(15,000)			
C		b	case1(30,000)	1.35	5.52	1.17
			case2(40,000)			
			case3(50,000)			
			case4(60,000)			

○ 구간 A에서 b 지점의 하수관경이 상대적으로 작더라도 가장 큰 침수피해 감소 효과를 나타내었으며, 횡 위어의 조건과 관계없이 하수관 내 흐름의 통수능력이 지하저류시설 유량 유입 효과에 큰 영향을 줌(그림 2.2.27)

○ 구간 B의 경우, 전반적으로 불안정한 하수관거 내 흐름으로 지하저류시설을 설치했음에도 불구하고 침수피해 감소 효과가 미비(그림 2.2.27)

○ 구간 C의 경우, 다른 구간 A와 구간 B보다 임의의 위치에 설치된 지하저류시설에 의한 침수피해 감소 효과가 뛰어난 것으로 나타났으며, 이 구역에서의 하수관 네트워크 통수능력이 다른 구역에 비해 월등한 것으로 확인(그림 2.2.27)

○ 전체적으로 지하저류시설의 위치가 하수관거의 상류부보다 하류부에 설치되었을 때 침수피해가 크게 감소(그림 2.2.27)

○ 구간 A에서 저류용량 case 1~case 3의 경우, 최대 침수면적 발생 시점에서의 침수면적을 줄일 수 있으나, 지하저류시설의 작은 저류용량으로 인해 단시간 내 그 기능을 상실(그림 2.2.28)

○ case 4는 계산이 끝날 때까지 지하저류시설이 그 기능을 유지하면서 침수피해를 줄일 수 있는 것으로 나타나지만, 최대 침수면적이 발생한 시점의 효과는 case 1의 용량으로도 충분히 제 기능을 발휘할 수 있는 것으로 확인됨(그림 2.2.28)

○ 구간 B의 경우에는 저류용량이 증가하더라도 침수피해 감소 효과에 큰 영향을 미치지 않음(그림 2.2.28)

○ 구간 C에서도 최대 침수면적 발생 시 case 1의 용량으로도 충분히 대응할 수 있는 것으로 확인되며, 전체적인 침수면적 감소에 관해서는 저류용량이 증가함에 따라 더 큰 감소 효과를 나타냄(그림 2.2.28)

(마) 지하저류시설 설치에 따른 침수피해액 감소 효과 분석

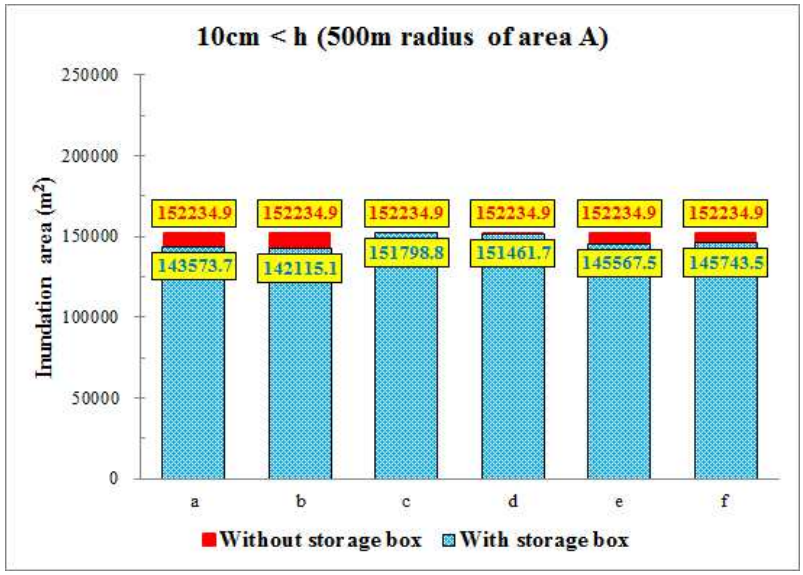
- ○ 각 구간 A, B, C 내에서 지하저류시설의 적절한 설치 위치를 결정하기 위해서는 침수피해액 산정에 따른 시설 평가 과정이 필요
- ○ 침수피해 비용은 수치모형의 해당 영역에서 계산된 침수심과 지역에 따른 단위 면적당 피해액(표 2.2.6) 및 침수 깊이에 따른 주택 자산피해 비율계수(표 2.2.7)를 고려
- ○ 구간 A의 경우, 1 cm 이상 50 cm 미만의 침수 영역이 약 90%를 차지하고, 50 cm 이상 1 m 미만의 침수 영역이 나머지를 차지
- ○ 구간 B의 경우, 1 cm 이상 50 cm 미만의 침수 영역이 약 88%를 차지하고, 50 cm 이상 1 m 미만의 침수 영역이 11%, 1 m 이상 2 m 미만의 침수 영역이 나머지를 차지
- ○ 구간 C의 경우, 1 cm 이상 50 cm 미만의 침수 영역이 97%로 거의 대부분을 차지하고 있으며, 50 cm 이상 1 m 미만의 침수 영역이 나머지를 차지
- ○ 구간 A에서 침수 피해액은 총 2,257,485,000 엔(￥)으로 평가되었으며, 지하저류시설을 b 위치에 설치한 경우에는 약 255,258,000 엔(￥)의 피해액을 줄일 수 있는 것으로 확인(그림 2.2.29)
- ○ 구간 B에서 침수 피해액은 총 2,466,030,000 엔(￥)으로 평가되었으며, 침수피해가 가장 큰 것으로 확인(그림 2.2.29)
- ○ 지하저류시설을 d 위치에 설치한 경우, 약 91,206,000 엔(￥)의 피해액을 줄일 수 있지만, 구간 A와 구간 C 보다 피해액의 감소비율이 적은 것으로 확인(그림 2.2.12)
- ○ 구간 C에서 침수 피해액은 총 2,046,573,000 엔(￥)으로 다른 구역에 비해 비교적 작은 피해액이 산정됨(그림 2.2.29)
- ○ 지하저류시설을 b 위치에 설치했을 때 약 255,473,000 엔(￥)의 피해액을 줄일 수 있는 것으로 판단되며, 이는 다른 지역과 비교했을 때 가장 큰 피해액 감소비율(그림 2.2.29)
- ○ 지하저류시설은 제한된 범위 내에서 발생하는 침수피해를 줄이는데 효과적이지만, 넓은 범위의 침수피해 감소 효과에는 크게 영향을 미치지 못하는 것으로 확인됨

표 2.2.6 지역에 따른 단위 면적당 피해액

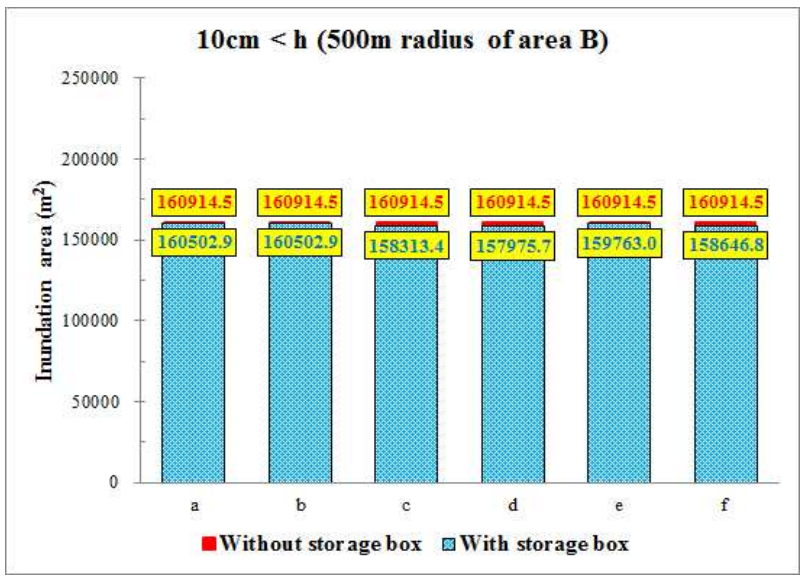
지표	기본 값	지역	금액
주택 자산	1 ㎥ 당 금액 (1,000엔/㎡)	도쿄	220.6 (1,000 yen/㎡)
		오사카	158.3 (1,000 yen/㎡)
		나고야	165.8 (1,000 yen/㎡)

표 2.2.7 침수심에 따른 주택 자산피해 비율계수

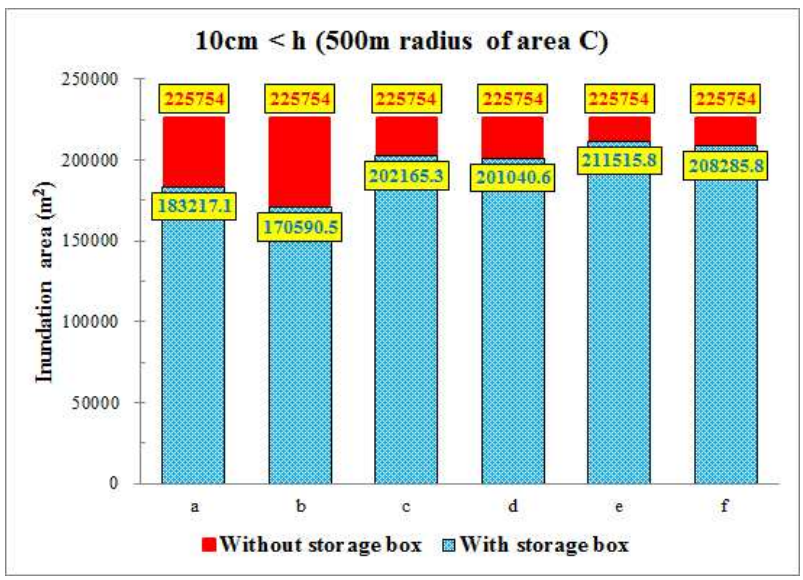
지표	지표 경사	마루 밑	마루 위				
			< 50 ㎝	50-99 ㎝	100-199 ㎝	200-299 ㎝	300 ㎝ <
주택 자산	1/1000보다 작은	0.032	0.092	0.119	0.266	0.580	0.834
	1/1000-1/500	0.044	0.126	0.176	0.343	0.647	0.870
	1/500보다 큰	0.050	0.144	0.205	0.382	0.681	0.888



(a) 구간 A

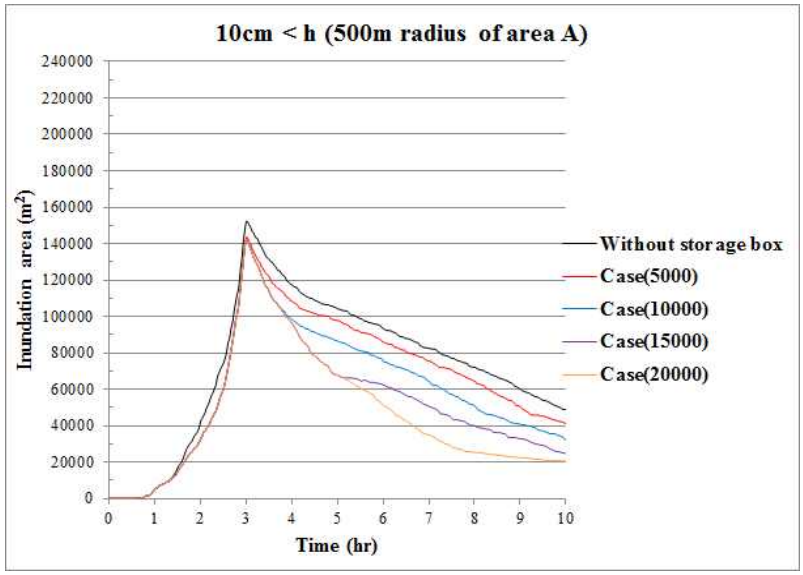


(b) 구간 B

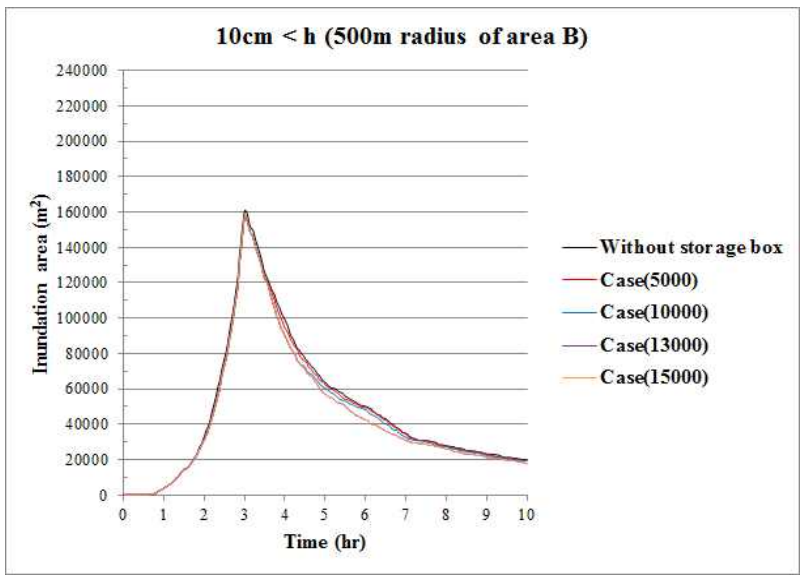


(c) 구간 C

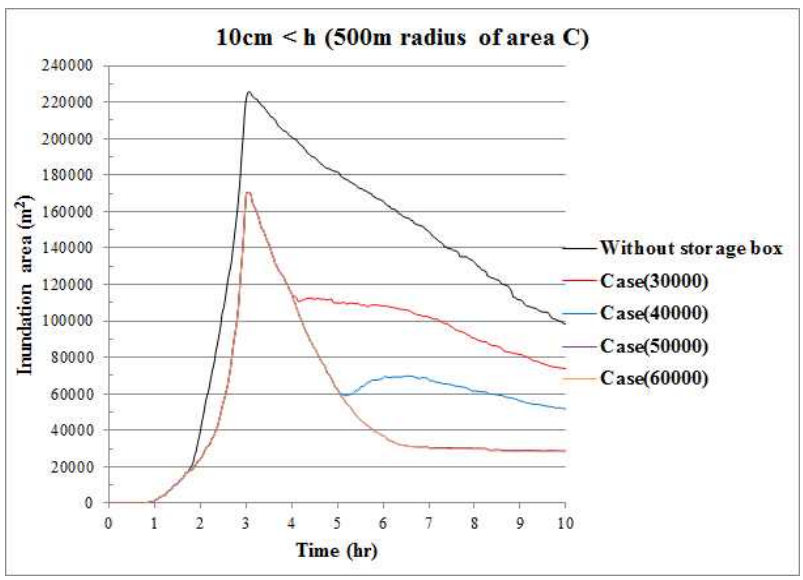
그림 2.2.27 지하저류시설 설치 위치에 따른 침수피해 면적 감소 효과



(a) 구간 A

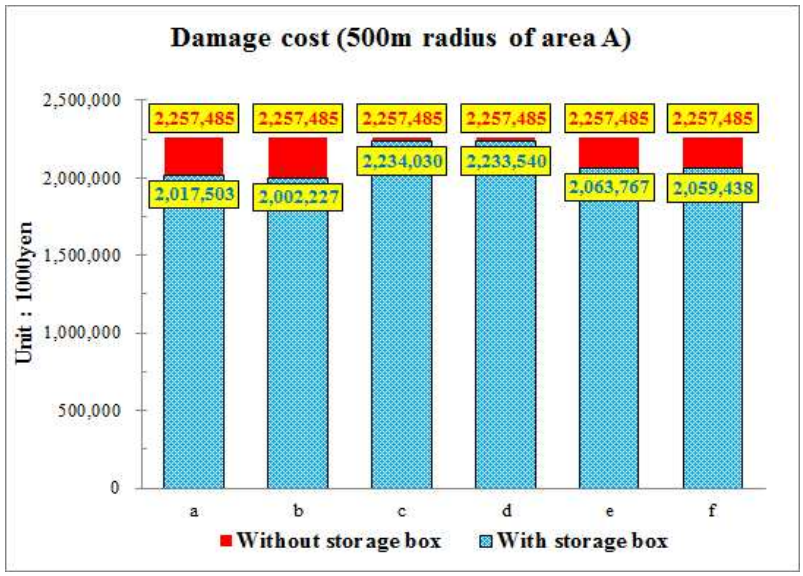


(b) 구간 B

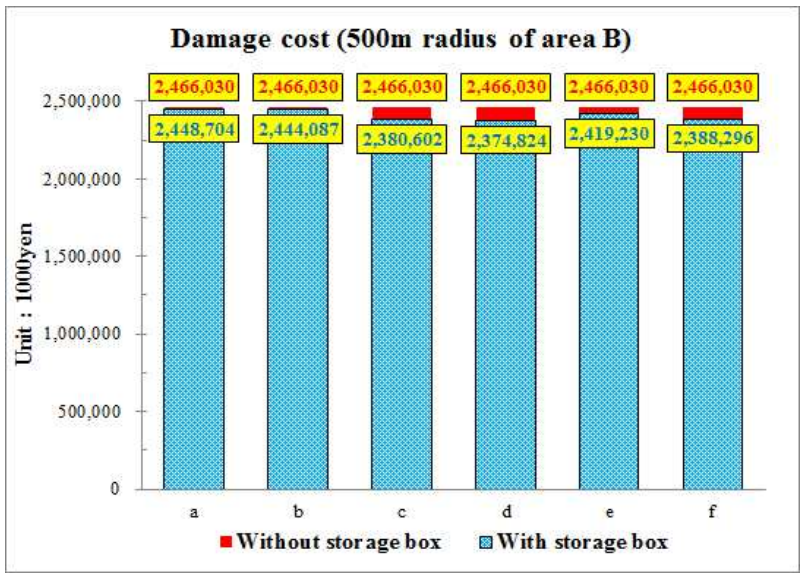


(c) 구간 C

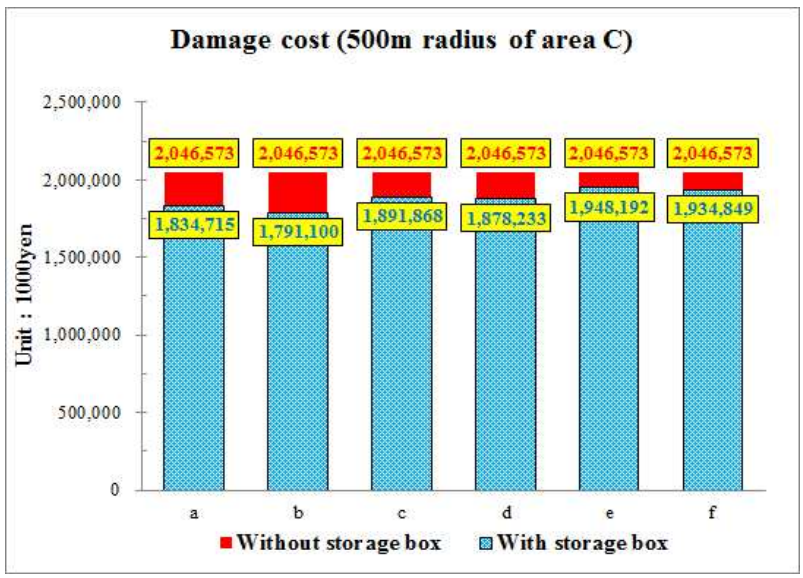
그림 2.2.28 지하저류시설의 저류용량 변화에 따른 침수피해 면적 감소 효과



(a) 구간 A



(b) 구간 B



(c) 구간 C

그림 2.2.29 지하저류시설 설치에 따른 침수 피해액 감소 효과

(4) 지표수 수치모형의 고도화

○ 지하저류시설을 반영한 도시지역 범람 해석모형의 개선사항 검토

○ 기존 지표수 수치모형은 지표수가 하수도로 유입될 때, 지하저류시설로 바로 유입되는 과정을 고려하였으나, 개선된 모형에서는 하수도에서 지하저류시설로 유입될 때, 지하유입시설의 역할을 하는 작은 수로를 반영하고 그 적용성을 검증

○ 지하유입시설과 지하저류시설을 반영한 도시지역의 범람해석을 위해 2차원 지표수 수치모형과 1차원 이상류 흐름 모형을 연계하고, 하수관거와 지하저류시설 사이의 수로(지하유입시설)를 추가로 고려한 1차원 이상류 흐름 연계 지표수 수치모형 개발

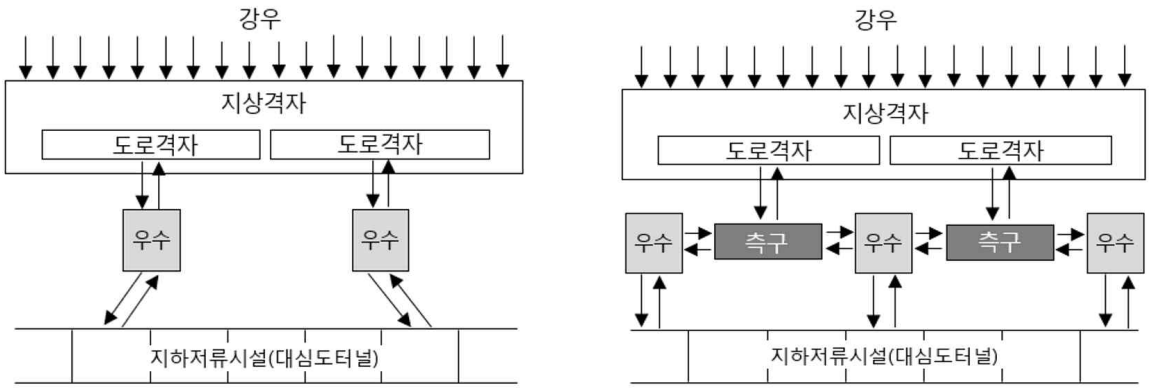
(가) 1차원 이상류 흐름 연계 지표수 수치모형 개발

○ 평면 2차원 모형과, 1차원 모형을 연계

○ 평면 2차원 해석에서는 비구조격자를 사용해 도시지역 내 범람을 해석

○ 1차원 해석에서는 slot 모형을 사용해 하수도 및 지하저류시설 네트워크 해석

○ 지표수가 지하저류시설로 들어가는 과정에서 하수도 역할을 하는 측구에서 지하저류시설로 유입되는 작은 수로(지하유입시설)를 고려해 모형 개선(그림 2.2.30)



(a) 기존 모형의 배수과정 (b) 개선 모형의 배수과정

그림 2.2.30 지표수 수치모형의 배수과정 개선

(나) 개선 모형 적용을 위한 대상 지역 선정

○ 대상 지역 : 일본 코치시 미카즈키 지구(그림 2.2.31)

○ 면적 : 1.94 ㎢

○ 2014년 8월 3일 홍수피해 발생

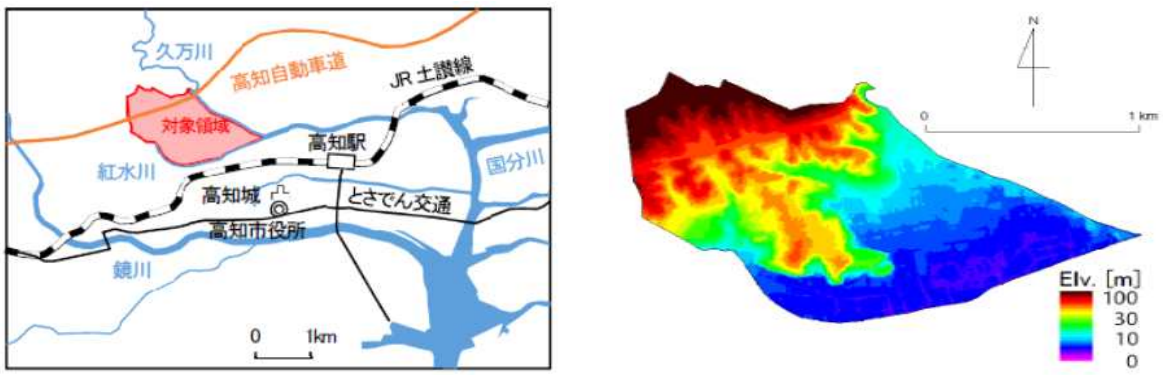


그림 2.2.31 대상 지역의 위치(좌) 및 지표수 수치모형 적용(우)

(다) 개선 모형의 도시지역 범람 해석결과

○ 대상 지역 내 총 11곳의 침수지역에서 실측 침수심과 해석결과를 비교

○ Case 4에서 실제 계측 자료와 가장 유사한 결과값을 나타내었으며, 전체적으로 작은 오차 범위에서 실제 침수지역에서 계측값과 비슷한 결과를 도출(표 2.2.8)

○ 기존 모형의 계산 결과와 개선 모형의 해석결과를 비교한 결과, 피크 타임(peak time)의 범람 수량에서 차이가 나타나며, 피크 때 수위 값이 비슷한 결과를 나타내므로 지하유입시설 역할의 작은 수로를 반영하지 않는 기존 모형도 도시지역 범람 해석에 사용 가능

표 2.2.8 실측 침수심과 개선 모형 해석에 의한 침수심 결과 비교 (단위 : m)

구분	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Point 7	Point 8	Point 9	Point 10	Point 11	실측값과 해석값의 평균
실측값	0.40	0.80	0.55	0.70	0.38	0.28	0.50	0.65	0.60	0.45	1.12	-
Case 1	0.690	0.928	0.667	0.662	0.661	0.288	0.551	0.647	0.918	0.458	1.199	0.120
Case 2	0.672	0.908	0.647	0.644	0.644	0.272	0.537	0.636	0.910	0.450	1.192	0.113
Case 3	0.661	0.894	0.633	0.633	0.633	0.260	0.528	0.629	0.906	0.446	1.188	0.110
Case 4	0.633	0.862	0.601	0.605	0.605	0.22	0.509	0.616	0.897	0.437	1.180	0.102
Case 5	0.625	0.853	0.593	0.597	0.597	0.224	0.499	0.606	0.893	0.434	1.178	0.101
Case 6	0.598	0.820	0.561	0.570	0.570	0.196	0.477	0.588	0.886	0.427	1.172	0.098
Case 7	0.569	0.783	0.524	0.541	0.542	0.168	0.458	0.572	0.879	0.420	1.167	0.102

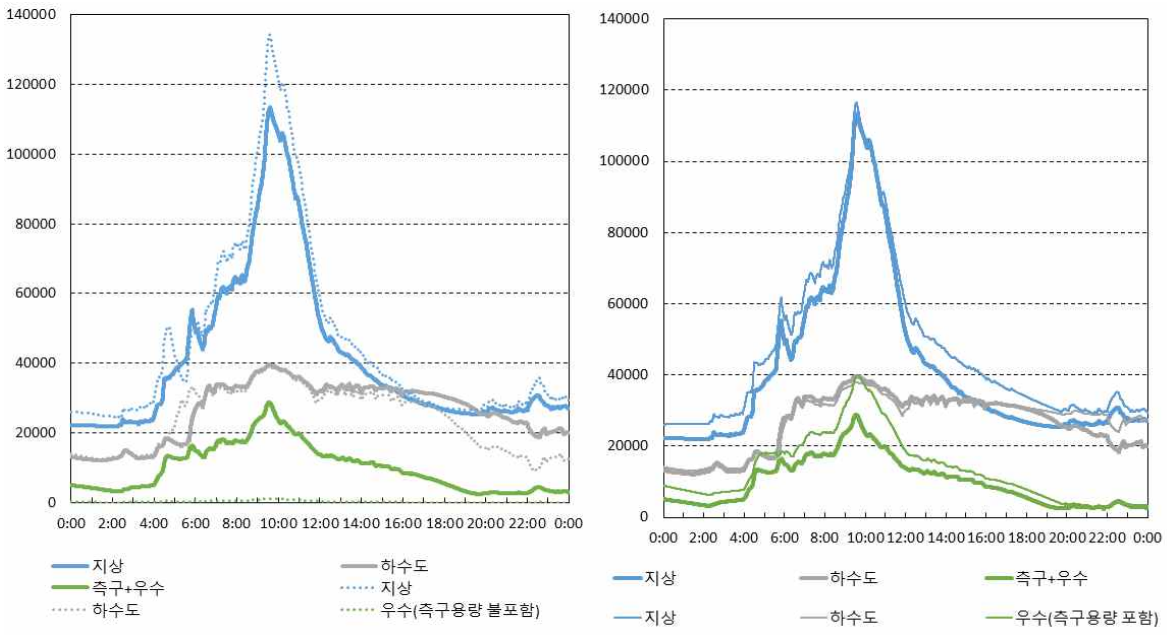


그림 2.2.32 실측 침수심과 해석에 의한 침수심 결과 비교

(5) 도시지역 침수피해 감소 효과에 대한 평가기법 개발

○ 도시지역 내수범람에 의한 침수피해를 감소하기 위한 여러 방안 중 지하저류시설의 효과를 평가

○ 지표수의 침수심과 침수피해액을 평가 지표로 사용

(가) 침수피해 감소 효과 분석을 위한 대상 지역 선정

○ 일본 오사카시 나카하마를 대상 지역으로 선정 후 지표수 수치모형 반영(그림 2.2.33, 그림 2.2.34)

○ 토지이용에 따라 건물과 지표면을 고려해 저류용량을 가정(표 2.2.9)

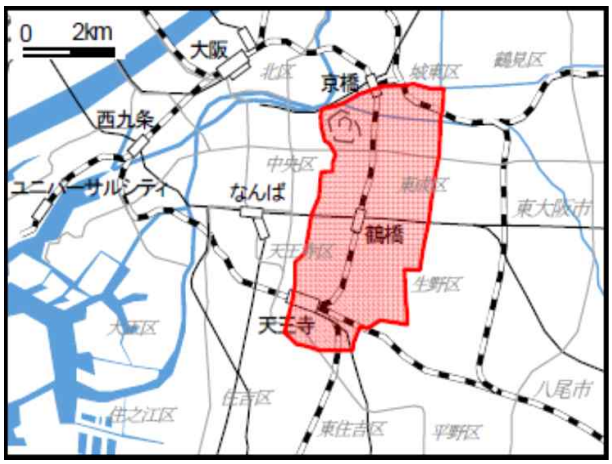


그림 2.2.33 침수피해 감소 효과 분석을 위한 대상 지역 선정

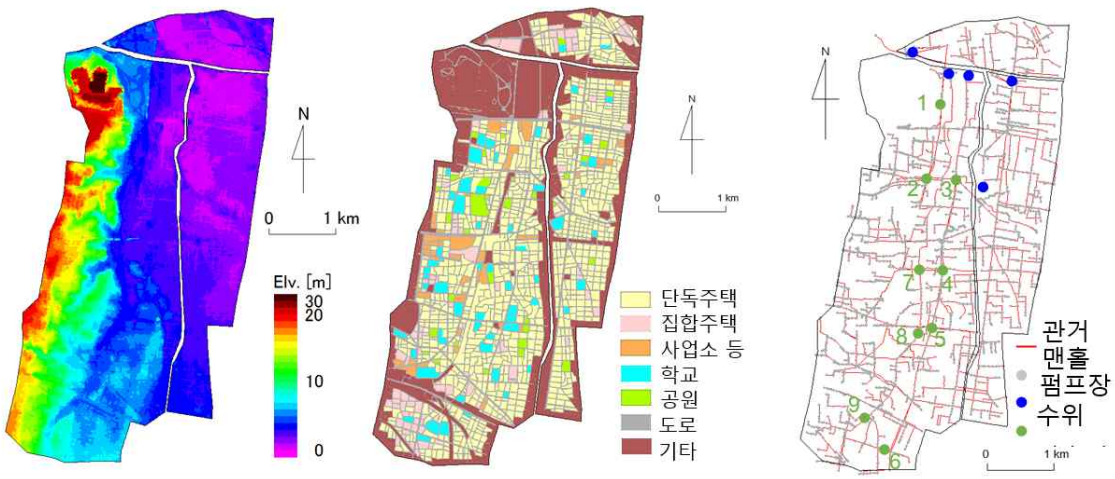


그림 2.2.34 도시지역 침수피해 감소 효과 평가를 위한 모형 구성

표 2.2.9 토지이용에 따른 지하유입시설 격자별 저장용량(단위: ㎥)

구분	Case 0	Case 1	Case 2
단독주택	0	87,309	436,543
공동주택	0	29,577	29,577
사업소 등	0	0	0
학교	0	72,253	72,253
공원	0	42,042	42,042
전체	0	231,181	580,415

(나) 침수심과 침수피해액에 따른 침수피해 감소 효과

○ 지하저류시설 고려 시 지표수 침수심이 감소해 침수피해가 감소(그림 2.2.35)

○ 지하저류시설에 빗물을 저류했기 때문에 하수도로 유입되는 수량의 감소하면서 침수피해도 감소

○ 지하저류시설 반영 전후 범람 수량은 큰 차이가 없음(그림 2.2.36)

○ 침수피해액의 경우, 지하저류시설을 고려한 경우 감소 효과가 크게 나타남(그림 2.2.36)

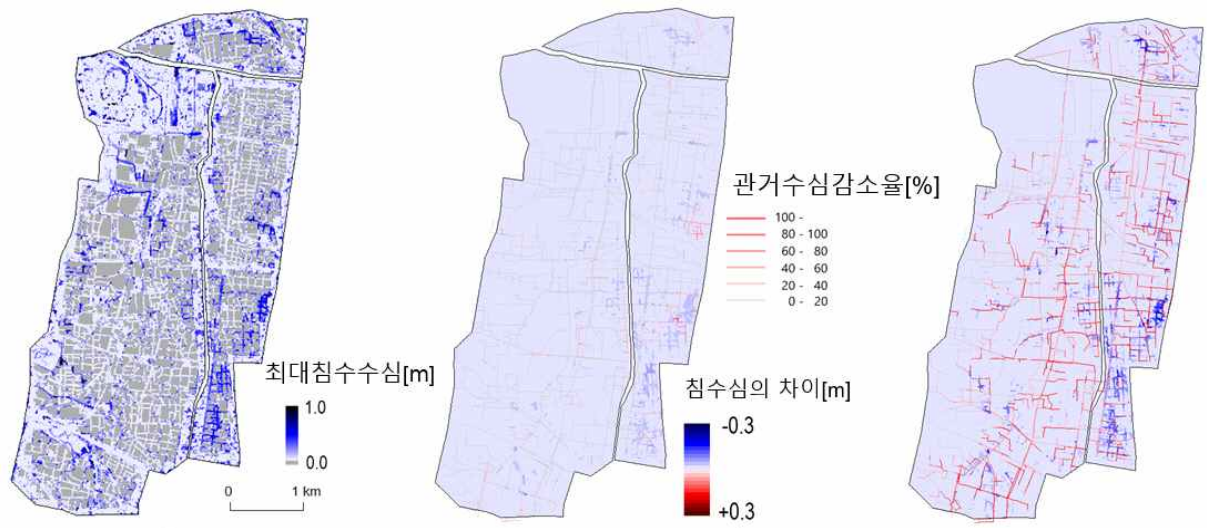


그림 2.2.35 침수심을 기준으로 한 침수피해 감소 효과 평가

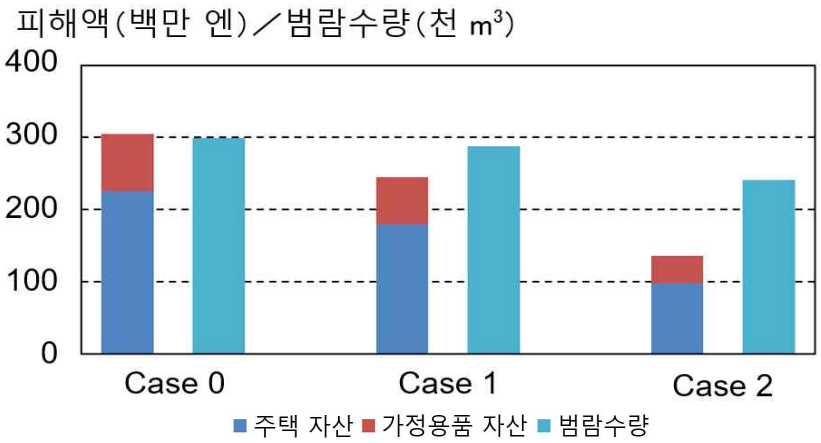


그림 2.2.36 침수피해액을 지표로 한 침수피해 감소 효과 평가

라. 공동연구기관 - 창원대학교 산학협력단

(1) 흐름안정화를 통한 터널 수리성능 개선기법 개발

(가) 이상류 거동특성에 대한 문헌 조사

○ 기체와 액체가 함께 섞여 흐르는 이상 유동에서는 상 경계면 형상이 계속 변하고, 각 상 내부의 유동이 별도로 이루어지므로 기체-액체 이상 유동은 유체역학적 측면에서 기체-고체 또는 고체-액체 이상 유동보다 좀 더 복잡(이상용 등, 1993)

○ 이상 흐름의 거동은 다양한 요소들로 인해 흐름에 영향을 받으며, 특히 관의 재질적 특성인 조도, 수로의 형상 및 직경, 액체의 점성, 온도, 밀도 등의 요소에 따른 영향이 커, 터널 내 발생하는 이상 흐름은 복잡한 수리학적 현상이 나타남

○ 기존 연구자들에 의한 흐름 형태의 분류는 대체로 유사하지만 좀 더 세분화시켜 구분할 수가 있으며, 일반적으로 환상흐름(annular flow), 슬러그흐름(slug flow), 기포흐름(bubbly flow), 플러그흐름(plug flow), 성층흐름(stratified flow), 파형흐름(wavy flow), 분무흐름(dispersed flow) 등, 7가지로 분류(Weisman, 1983)(그림 2.3.1)

○ 환상흐름(annular flow)은 기체가 갖는 체적흐름(volume flux)이 액체의 것보다 상대적으로 크기 때문에 액체는 관 벽에 붙고 기체는 관 중심부를 관통하는 흐름

○ 슬러그흐름(slug flow)은 형태가 플러그흐름과 비슷하지만 기체의 체적흐름이 플러그보다 커서 생기는 흐름으로 액체와 기체의 경계파의 진폭이 커 기포를 동반한 파가 주기적으로 관의 상단에 붙으며 흐르는 흐름

○ 기포흐름(bubbly flow)은 부력으로 인해 크기가 상대적으로 큰 기포들은 관의 상단에서 분포하여 흐르고 그보다 작은 기포들은 아래에서 흐르는 형태를 가진 흐름으로써, 질량흐름(mass flux)을 감소시키면 기포들이 합쳐져 플러그흐름이 됨

○ 성층흐름(stratified flow)은 기체와 액체의 체적흐름이 모두 느릴 때 보이는 흐름이며 실제로 재현성이 떨어지는 흐름

○ 파형흐름(wavy flow)은 성층흐름 기체의 체적흐름을 일부 증가시켰을 때 액체와 기체의 경계면에 파가 생성되는 흐름

○ 분무흐름(dispersed flow)은 액체의 체적흐름이 상대적으로 기체의 체적흐름보다 크거나 액체와 기체의 체적흐름이 모두 큰 경우에 발생하는 흐름이며, 크기가 작은 기포들이 관 단면적 전체에 걸쳐 나타나는 흐름

○ 이상 흐름은 주로 석유화학 및 제철과 같은 분야에서 많은 연구가 수행되었으며, 많은 연구자들이 수직관 및 수평관 내 유동 형상에 대한 실험을 실시(Baker, 1954; Mandhane et al., 1974; Taitel and Dukler, 1976; Wallis, 1969; Weisman, 1983)

○ 많은 연구자들이 흐름구분도 작성에 사용한 값들은 대부분 체적흐름(volume flux)과 질량흐름(mass flux), 운동량흐름(momentum flux), 또는 이와 유사한 값을 이용하였으나, Christopher(2005)는 보편적으로 하나의 상을 갖는 흐름에서 유체의 특성뿐 아니라, 수로의 거칠기, 수로와 유입 부분의 형태 등과 같이 여러 조건이 흐름에 영향을 주기 때문에, 여러 상이 섞여 흐르는 흐름에서는 하나의 상이 흐를 때보다 더 많은 조건을 고려해야 하며 흐름 거동의 보편화가 쉽지 않다고 주장

○ Mandhane et al.(1974)과 Christopher(2005)가 제안한 흐름구분도에서는 수온 25℃, 1기압에서 관의 직경 1.25 cm, 2.5 cm, 5 cm, 30 cm에 따른 흐름 구분경계선이 다른 것을 확인할 수 있으며, 기체 및 액체의 체적흐름 크기에 따른 흐름 형태의 분류를 나타냄(그림 2.3.2)

○ 흐름 형태 분류에 있어, 처음에는 육안 또는 고속카메라로 얻어진 사진을 이용해 분류하였으나 투명한 관이 아닐 경우 판단할 수 없다는 취약점이 있으며, 관의 단편적인 부분에 대해서만 판별할 수 있다는 점과 관의 형태에서 비롯되는 왜곡이 발생하는 단점이 있음

○ 이후 많은 연구자는 흐름 형태를 판별하기 위해 여러 방법을 모색하였고, 전기전도도를 이용한 측정법, 정압 측정법, X선 감쇠법, 압력강하 측정법, 초음파를 이용한 측정법 등이 있음

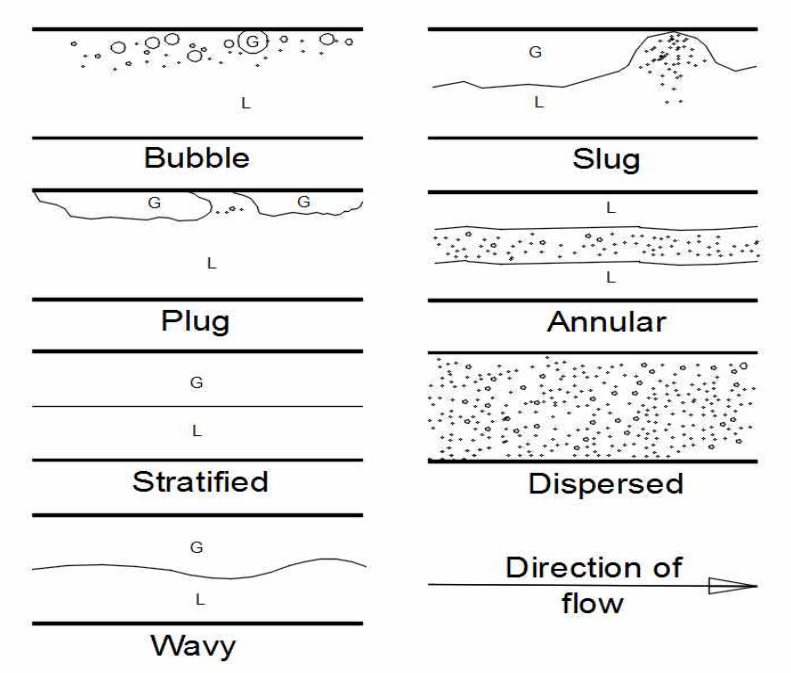


그림 2.3.1 수평관(1 cm)에서의 물/공기 혼합흐름 양상(Weisman, 1983)

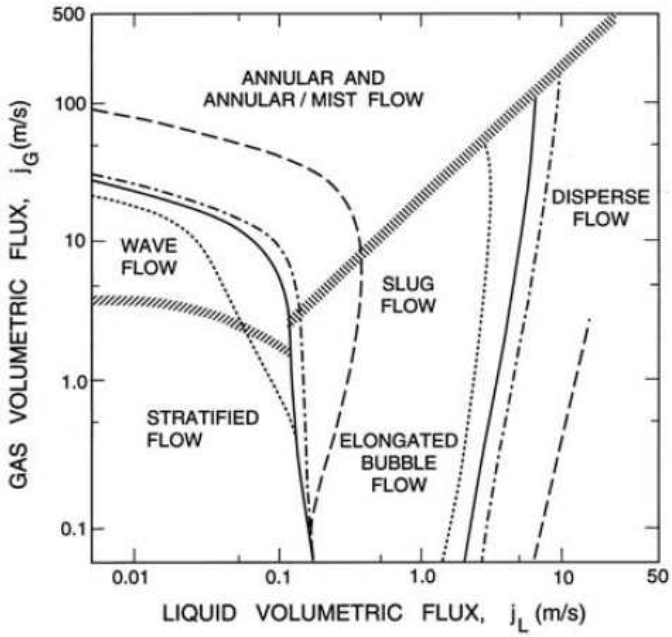


그림 2.3.2 다양한 파이프 직경에 대한 유동영역 경계의 변화: 1.25 cm(점선), 2.5 cm(실선), 5 cm(쇄선), 30c m(파선) (Mandhane et al., 1974; Christopher, 2005)

(나) 대심도터널 내부 이상류거동 모형실험 및 검증

① 실험장치 및 방법

○ 실험에 사용된 장치는 크게 시험관, 유량공급시설, 공기공급시설, 이상 흐름 감지기, 멀티미터가 있으며, 유량공급시설과 공기공급시설을 통해 관내에서 물과 기포가 연속적으로 흐르는 순환구조로 제작, 각 흐름에서의 기포 거동을 알아보기 위해 이상 흐름 감지기와 카메라를 이용해 실험 수행

○ 이상 흐름 감지기를 통해 얻은 신호는 데이터 분석을 위해 멀티미터를 통해 컴퓨터에 저장되며, 제작한 실험장치의 설계 도면과 실험장치는 그림 2.3.3과 그림 2.3.4와 같음

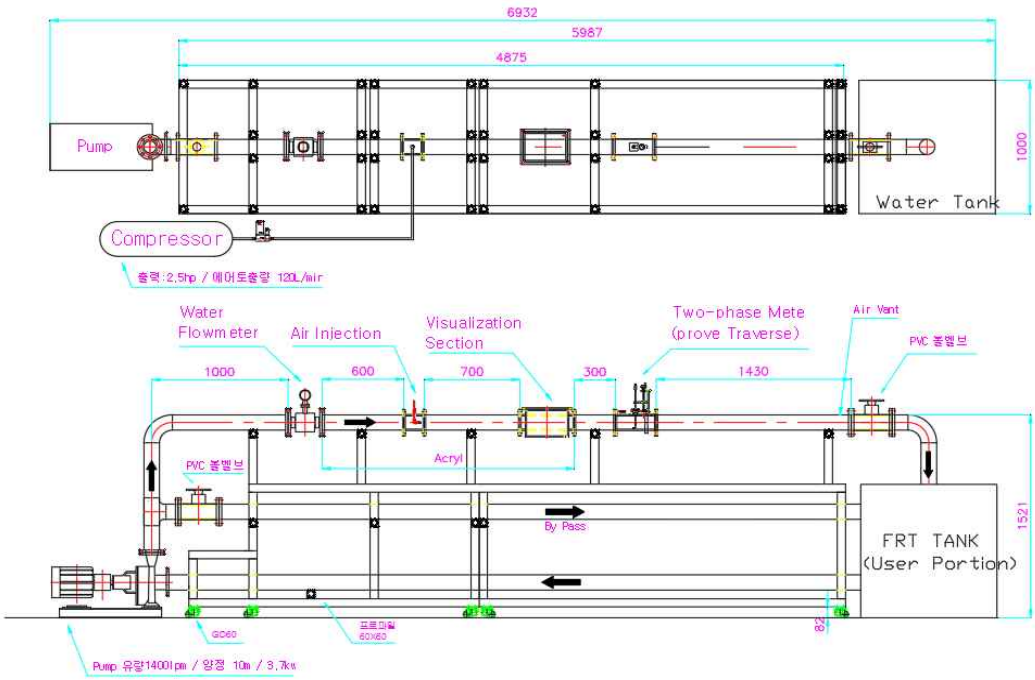


그림 2.3.3 이상류 거동 실험장치 설계 도면



그림 2.3.4 이상류 거동 실험장치

○ 시험관은 투명아크릴과 PVC로 제작되었으며, 관의 직경은 100 mm, 전체 수평 길이는 5.31 m이고 아크릴로 제작된 관은 총 7개로 필요에 따라 분리해 목적에 맞게 변경 가능하도록 제작

○ 시험관은 크게 공기 주입구간, 가시화 구간, 트래버스 구간 등이 있으며, 가시화 구간은 챔버(chamber)를 설치해 영상의 왜곡을 최소화하였으며, 트래버스 구간은 이상 흐름 감지기의 탐침(probe)을 이송하기 위해 관에 부착(그림 2.3.5)

○ 우회관(by-pass)관과 조절기(inverter)를 통해 유량을 제어하고, 유량과 공기량은 각 관에 전자유량계를 설치해 측정하였으며, 우회관과 조절기를 통해 변경되는 유량을 전자유량계(KTM-800)를 통해 확인하고 흐름조건을 설정(표 2.3.1)

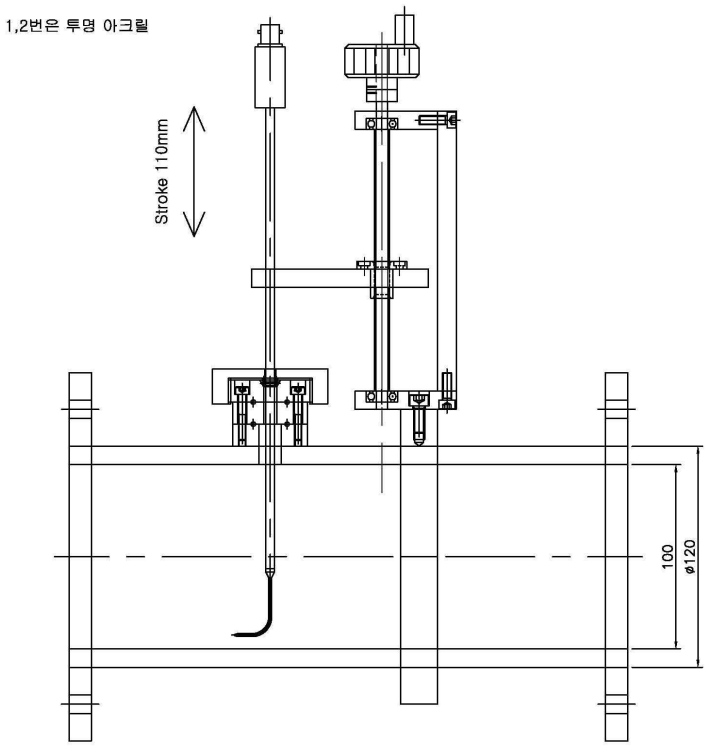


그림 2.3.5 트래버스(traverse) 장치 설계

표 2.3.1 유량계 제원

KTM-800	
Measuring range	0.1~10 m/s
Flow velocity	0.3~10 m/s
Accuracy	±0.5 % F.S (0.3~10 m/s)
	±1.0 % F.S (0.01~0.3 m/s)
Fluid temperature	-10~70 ℃
Ambient temperature	-10~60 ℃
Power supply	AC 85~250 V (50~60 Hz)
	DC 24 V (option)
Output	Analog : DC 4~20 mA
	Pulse : DC 8~30 V

○ 유량공급시설은 수조와 펌프를 이용한 순환식 시스템이며, 공기압축기(compressor)를 통해 공기를 관으로 주입해 실험을 수행

○ 안정적인 유량공급을 위해 용량이 400 Liter인 두 개의 수조를 병렬로 연결하고, 펌프는 최대 출력이 1750 rpm인 WILO사의 PSV-1080B를 사용하였으며 공기압축기는 UDT-2525를 사용(표 2.3.2, 표 2.3.3)

○ 이상 흐름 감지기는 KANOMAX사의 two-phase flow signal processor system 7931을 사용하였으며, 측정 가능 시간은 약 1/1000초

○ 멀티미터는 Keithley사의 Series 3700A System Switch/Multimeter를 사용해 이상 흐름 감지기의 amp와 연결하고 아날로그(analog) 신호를 디지털 신호로 변환해 샘플링 속도(sampling rate)와 측정시간 등을 조정하는 데 사용

○ 실험조건은 공기량을 0.005~0.045 m^3/min까지 0.010 m^3/min 간격으로, 유량은 0.5~1.5 m^3/min까지 0.2 m^3/min 간격으로 총 30개의 케이스로 구성

○ 각 케이스에서 유량은 W1~6으로, 공기량은 A1~5로 표현하였으며, 흐름 조건은 유량-공기량 순으로 나타냄(표 2.3.4)

표 2.3.2 펌프 제원

PSV-1080B	
Motor power(HP)	5
Revolution(rpm)	1750
Type	Centrifugal
Pressure(kg/cm^3)	8
Head(m)	10
Frequency(Hz)	60

표 2.3.3 공기압축기 제원

UDT-2525	
Motor power(HP)	2.5
Capacity(Liter/min)	120
Tank capacity(Liter)	25
Pressure(kg/cm^3)	8

표 2.3.4 흐름 조건에 따른 실험 케이스(Case)

Water flow rates(m^3/min)	Case	Air flow rates(m^3/min)	Case
0.5	W1	0.005	A1
0.7	W2	0.015	A2
0.9	W3	0.025	A3
1.1	W4	0.035	A4
1.3	W5	0.045	A5
1.5	W6		

○ 탐침의 위치 조건은 관의 최상단으로부터 5 mm 떨어진 지점을 시작으로 연직 아래 방향으로 3 mm씩 이격시켜 총 8지점에서 측정하였으며, 여기서 y는 관의 최상부에서 관의 하부 방향으로의 거리를 나타냄(그림 2.3.6)

○ 제시된 8지점 외에 하단 방향으로 측정을 더 하였으나 y/D=0.17을 초과한 후에는 미미하거나 기포가 감지되지 않아 배제

○ 시험관 수평 끝단에서 관 내경의 약 35.5D가 되는 지점에 탐침을 위치시키고, 트래버스를 이용하여 탐침의 연직 위치를 조절해 측정하였으며, 각 케이스의 측정시간은 30초, 자료의 측정속도(sampling rates)는 초당 1,000개를 측정해 한 케이스 당 30,000개의 자료를 통해 각 흐름을 분석

○ 시간에 따른 전압의 값으로 획득된 원자료(raw data)는 FFT(fast fourier transform) 필터링을 통해 보정하고(그림 2.3.7a, 그림 2.3.7b), 전압값들은 기울기의 부호에 따라서 직사각 형태로 변환해 기포와 물로써 신호를 이원화(binarization)(그림 2.3.7c, 그림 2.3.7d)

○ 관내 측정 위치에 따른 기포분율(void fraction) 값으로 나타내고(그림 2.3.7e), 기포 길이별 빈도수를 도수분포표(histogram) 형태로 나타내어(그림 2.3.7f) 기포의 흐름 거동을 분석

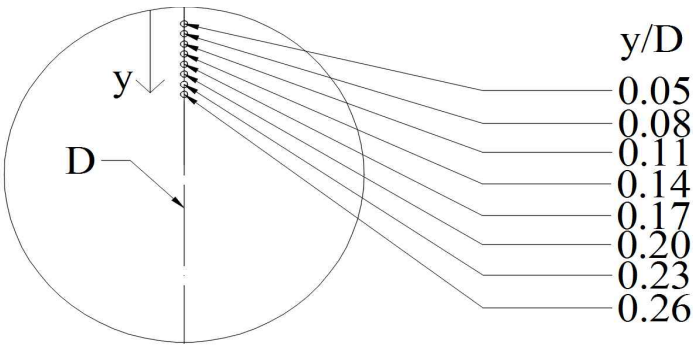


그림 2.3.6 관 내 측정지점

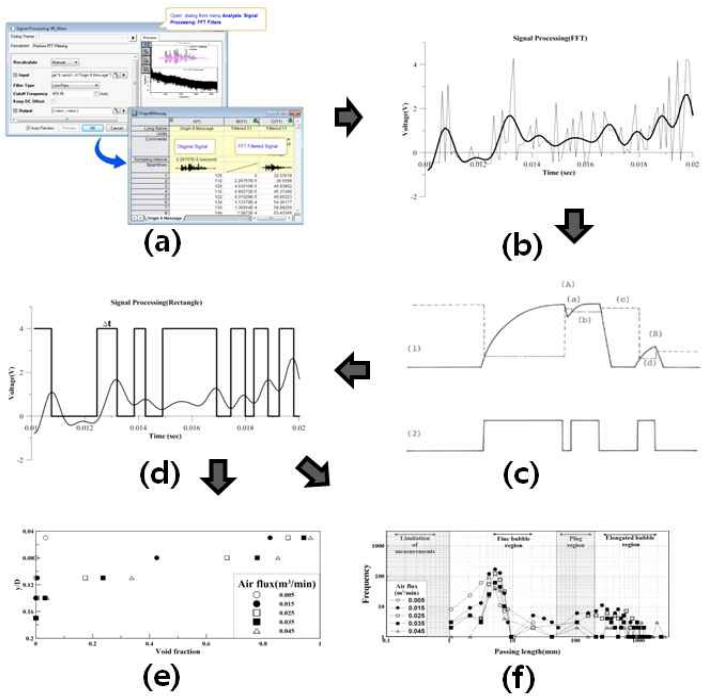
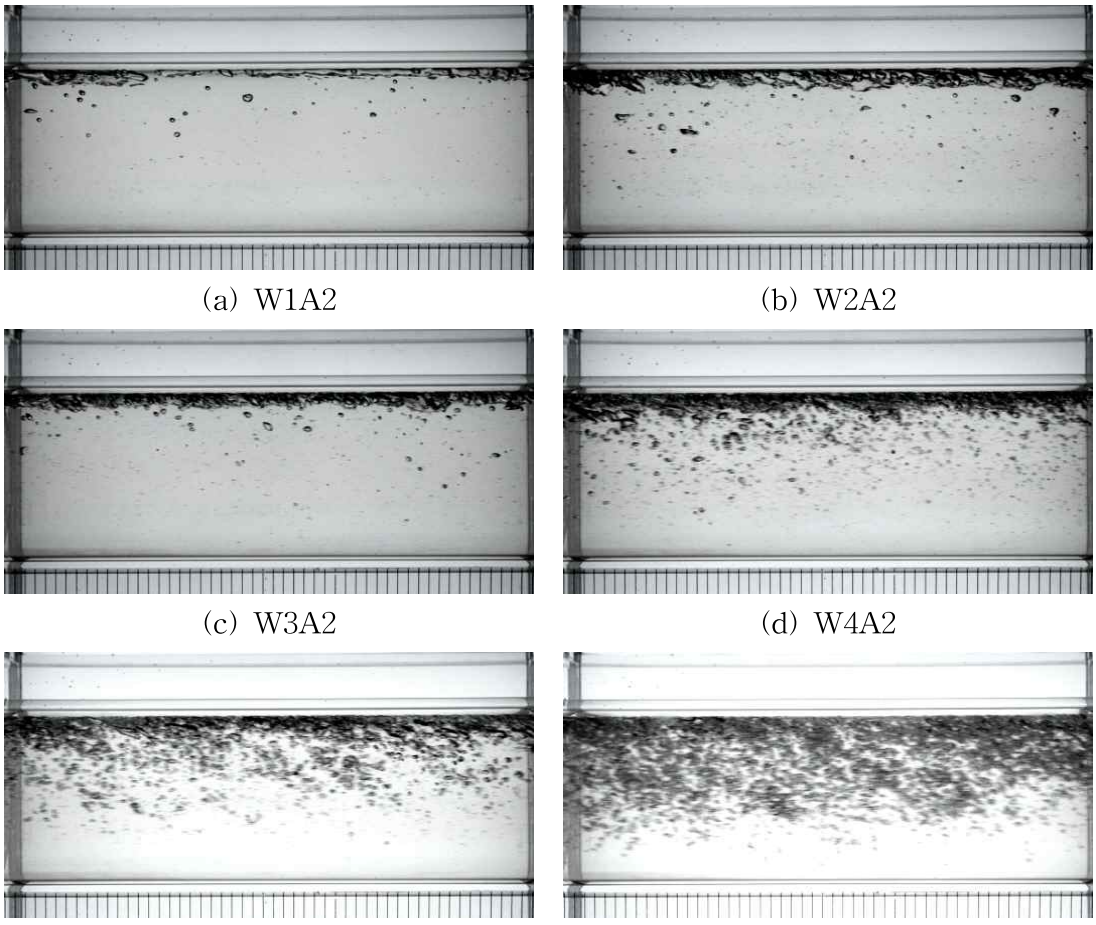


그림 2.3.7 데이터 처리과정

② 영상을 통한 흐름 조건 양상 분석

- ❍ 그림 2.3.8에서 그림 2.3.11은 각 흐름 조건에서 얻어낸 기포 흐름 영상이며, 주입되는 공기량이 같을 때 유량의 증가에 따라서 흐름 형태가 어떻게 변화하는지를 나타냄
- ❍ 각 영상들은 이상 흐름 감지탐침을 사용한 실험과 동시에 촬영
- ❍ 기포들이 관 상부에서 집중적으로 흐르는 형태에서 유량이 증가함에 따라 관 전체에 걸쳐 기포가 분포해 흐르는 것을 확인, W1～W4까지는 관의 상단에서 가늘고 길게 이어진 형태로 흐르는 확장기포가 주를 이루는 흐름을 보이고, 전반적인 기포의 직경이 W5와 W6의 흐름에 비해 꽤 큰 기포들이 관측
- ❍ W4에서부터는 점차 관의 중심 부근에서도 크기가 작은 기포들이 흐르는 것이 관측되었으며, 이는 확장기포 흐름에서 분무흐름로 변하는 것으로 판단됨
- ❍ 유량을 고정하고 공기량을 증가시켰을 때, W1～W4는 관 상부에 흘러가는 가늘고 긴 기포들의 두께가 증가, W5와 W6는 관 전체에 흐르는 기포의 양이 증가



(a) W1A2 (b) W2A2

(c) W3A2 (d) W4A2

(e) W5A2 (f) W6A2

그림 2.3.8 흐름 조건에 따른 기포 흐름 양상(A2)



(a) W1A3



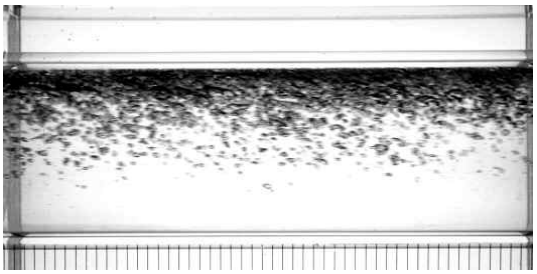
(b) W2A3



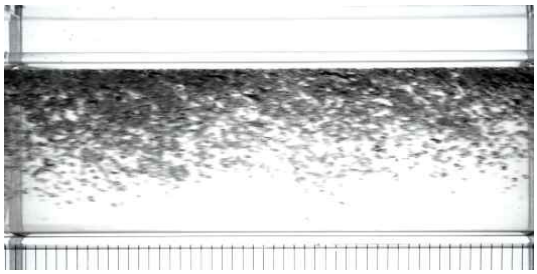
(c) W3A3



(d) W4A3



(e) W5A3



(f) W6A3

그림 2.3.9 흐름 조건에 따른 기포 흐름 양상(A3)



(a) W1A4



(b) W2A4



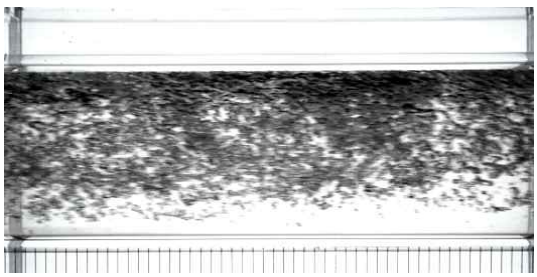
(c) W3A4



(d) W4A4

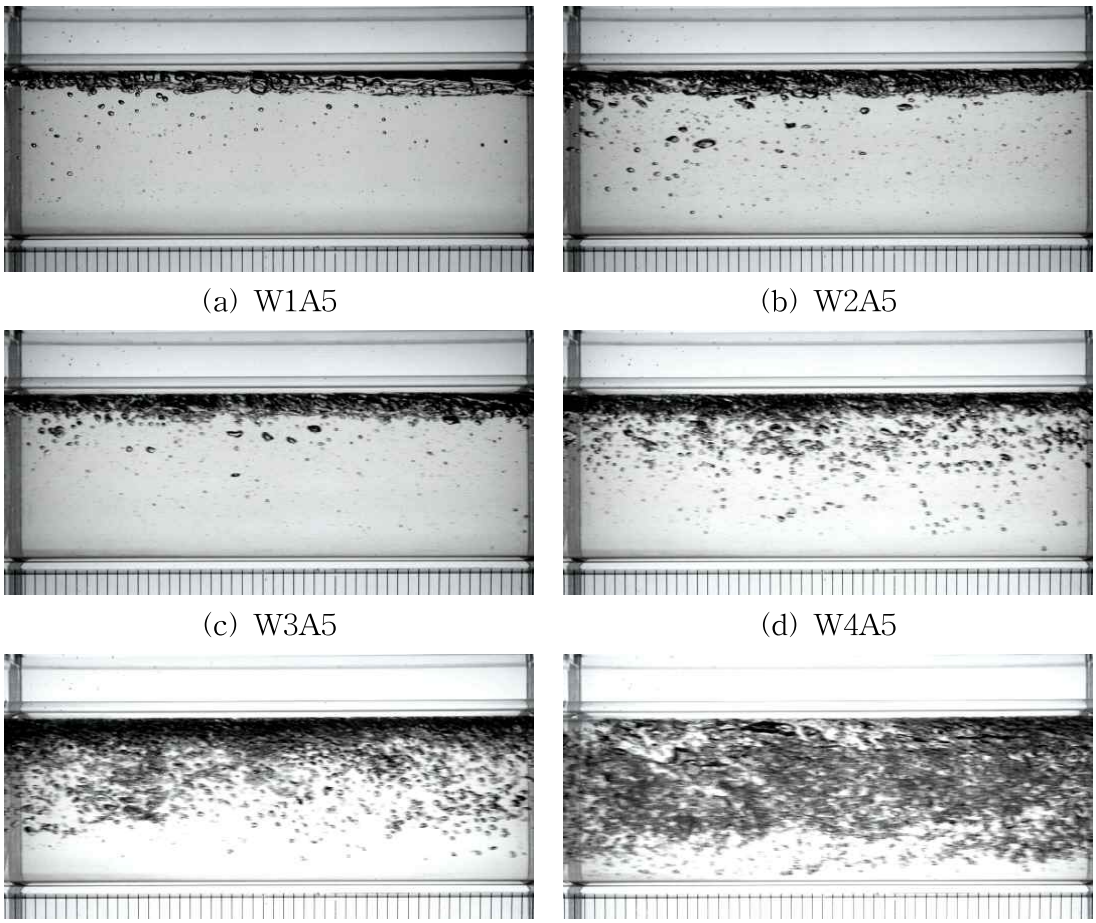


(e) W5A4



(f) W6A4

그림 2.3.10 흐름 조건에 따른 기포 흐름 양상(A4)



(a) W1A5 (b) W2A5

(c) W3A5 (d) W4A5

(e) W5A5 (f) W6A5

그림 2.3.11 흐름 조건에 따른 기포 흐름 양상(A5)

③ 위치에 따른 기포분율

○ 미소지점에서의 기포분율은 총 측정시간 중 기포가 지나간 시간으로써, 위치에 따른 기포분율 값들은 식 2.3.1과 같이 계산

$$T_{void} = T_{air}/T \qquad (2.3.1)$$

여기서, T_{void}는 기포분율, T_{air}는 총 측정시간 중 기포가 차지한 시간(s), T는 총 측정시간(s)

○ 그림 2.3.12a~그림 2.3.12f는 각 흐름 조건에 따른 유량에서 이상 흐름 감지탐침이 측정지점(y/D : 0.05~0.17)에 위치하였을 때, 공기량에 따라 30초간 측정된 자료들의 기포분율

○ 전반적으로 유량의 증가에 따라 측정지점에서 갖게 되는 기포분율은 낮아지게 되며, 관의 하부로 갈수록 작아지는 것으로 나타남

○ y/D=0.05와 0.08은 그 아래의 값보다 높은 값을 갖는 데 비해 유량의 증가에 따라서 상부와 하부 사이의 기포분율에 격차가 점차 감소하는 것으로 나타남

○ 그림 2.3.12a~그림 2.3.12d를 그림 2.3.9a~그림 2.3.9d와 비교하였을 때, 유량 W1에서 W4까지는 관의 상단 부근에서의 흐름은 주로 물과 공기가 경계면을 일부 갖고 흐르는 것으로 나타나지만 유량이 W4에서 W6으로 증가할수록 관 상부에서의 흐름은 계층화된 흐름의 영향이 적어지는 것으로 나타남

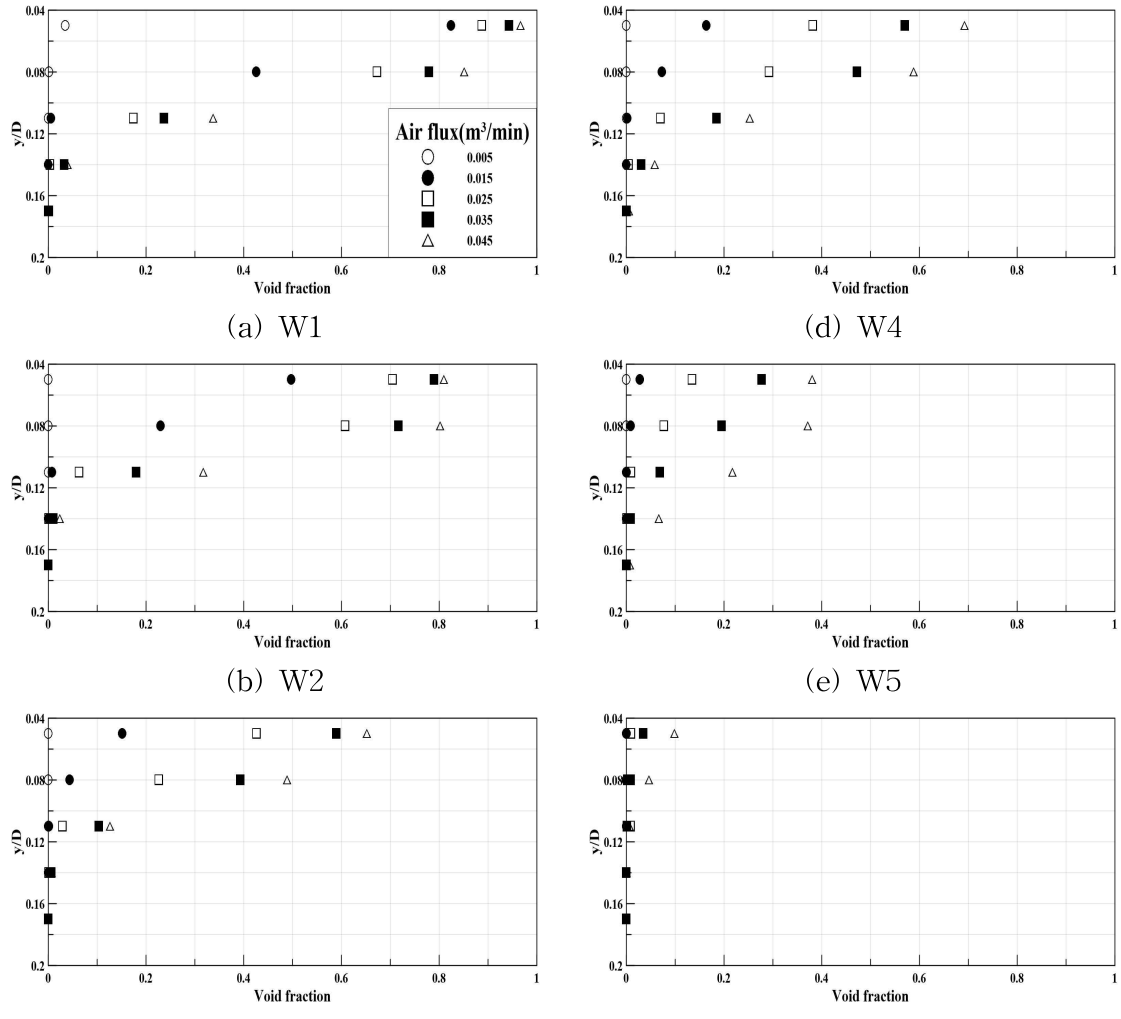
○ y/D=0.11에서의 기포분율을 미루어 보았을 때, W1～W3은 흐름 내에 일정한 파를 가진 것으로 판단되고, 그 파로 인해 변하는 경계면의 깊이가 기포분율에 영향을 주는 것으로 보임

○ 그림 2.3.13에 보이는 확장기포가 이동함에 따라 두께가 점차 커지는 모습을 통해 이를 뒷받침할 수 있음

○ 이러한 현상은 W1～W3에서 유량의 증가에 따라 빨라지는 유속에 비해 공기량은 상대적으로 적어지게 되므로 파의 영향은 줄어들고 그에 따라 y/D=0.11에서 얻어지는 기포분율은 작아지는 것으로 나타남

○ 유량 W4에서의 흐름인 그림 2.3.12d의 경우 y/D=0.11에서 기포분율이 W3에 비해 큰 값을 보이는데, 이는 빨라진 유속에 따른 관성력의 영향으로 인해 전체적인 기포의 흐름이 일부 아래로 치우쳐 흐르는 것으로 판단되며, 그림 2.3.12e에서는 y/D=0.11에서 기포분율이 일부 있으나, 공기량이 상대적으로 큰 A5의 경우를 제외하고는 빠른 유량으로 인해 기포들이 깨지는 형태가 되어 측정된 기포분율이 작거나 없는 것으로 판단됨

○ 그림 2.3.12f에서는 거의 모든 측정값이 10% 미만의 값이 나왔으며, 이는 흐름 형태가 분무흐름으로 변하여 기포의 크기가 작고 관 전체에 흩어진 흐름이기 때문에 낮은 유량에서의 관 상부 기포흐름처럼 집중적으로 흐르지 않기 때문으로 판단

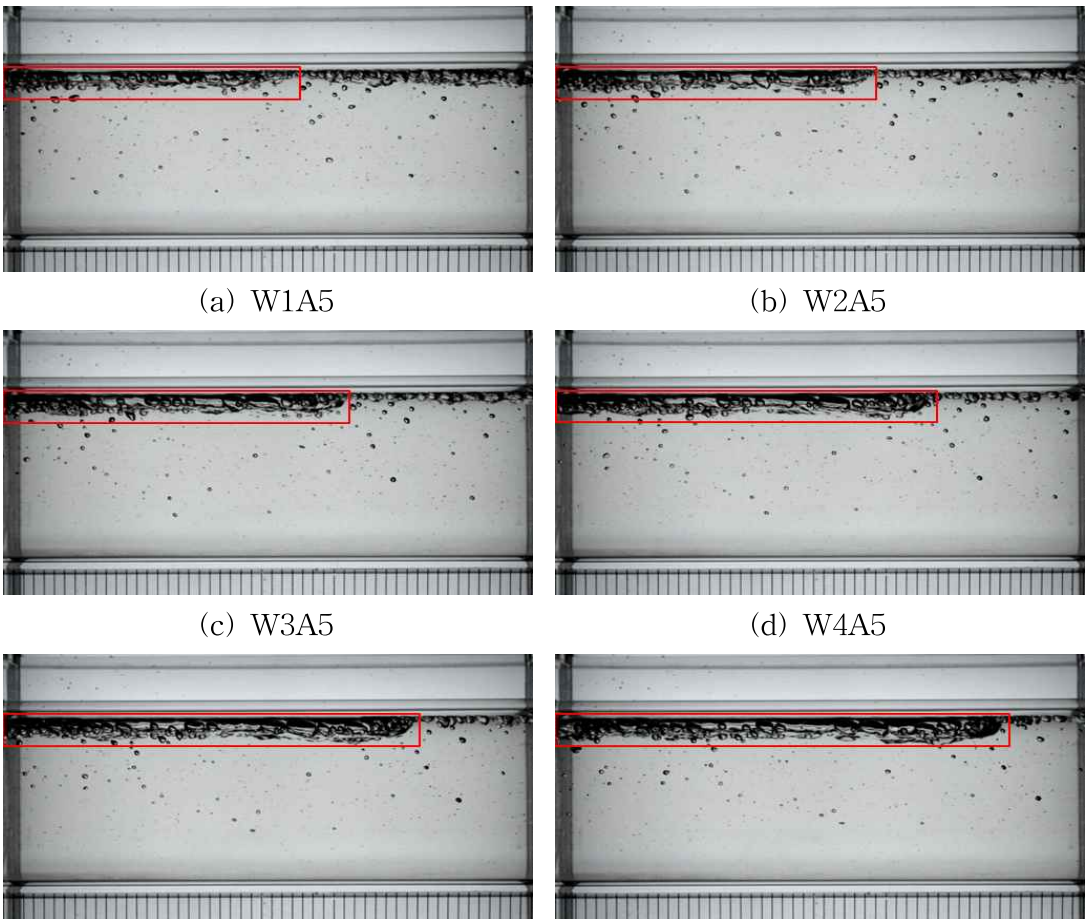


(a) W1 (d) W4

(b) W2 (e) W5

(c) W3 (f) W6

그림 2.3.12 y/D에 대한 기포분율(Void Fraction)



(a) W1A5 (b) W2A5

(c) W3A5 (d) W4A5

(e) W5A5 (f) W6A5

그림 2.3.13 A 긴 기포(elongated bubble)의 두께 변화(W1A5)

④ 관 내 측정지점에 따른 기포 통과 길이별 빈도수

○ 그림 2.3.14a~그림 2.3.14f는 각 흐름조건에 따른 유량에서 이상 흐름 감지탐침이 측정지점(y/D : 0.05~0.17)에 위치하였을 때 얻어진 값을 이용해 구해진 기포통과길이(Passing length)에 따른 빈도수를 표현한 것이며, 기포통과길이는 식 2.3.2와 같이 계산

$$L_p = T_p \times V_e \qquad (2.3.2)$$

여기서, L_p는 기포통과길이(m), T_p는 기포통과시간(s), V_e는 유량에 따라 구해지는 단면평균유속(m/s)

○ 기포통과시간은 시험관 내에서 흐르는 기포가 연속적으로 이상 흐름 감지탐침에 감지된 샘플링 시간(sampling time)을 의미하며, 각 유량에 따라 구해지는 단면평균유속을 곱해 기포통과길이를 구하고, 관 내 평균유속과 기포의 이동속도가 같다고 가정하면 기포통과길이는 기포의 흐름방향 길이를 의미

○ 그림 2.3.14a~그림 2.3.14f는 각 측정지점에서의 기포크기에 따른 출현빈도를 뜻하는 것으로, 본 실험의 유량조건에 따른 단면평균유속은 표 2.3.5에 나타나 있으며, 최소 기포 측정시간인 1/1000초를 곱하여 각 유량에서 측정 가능한 최소 통과길이를 계산

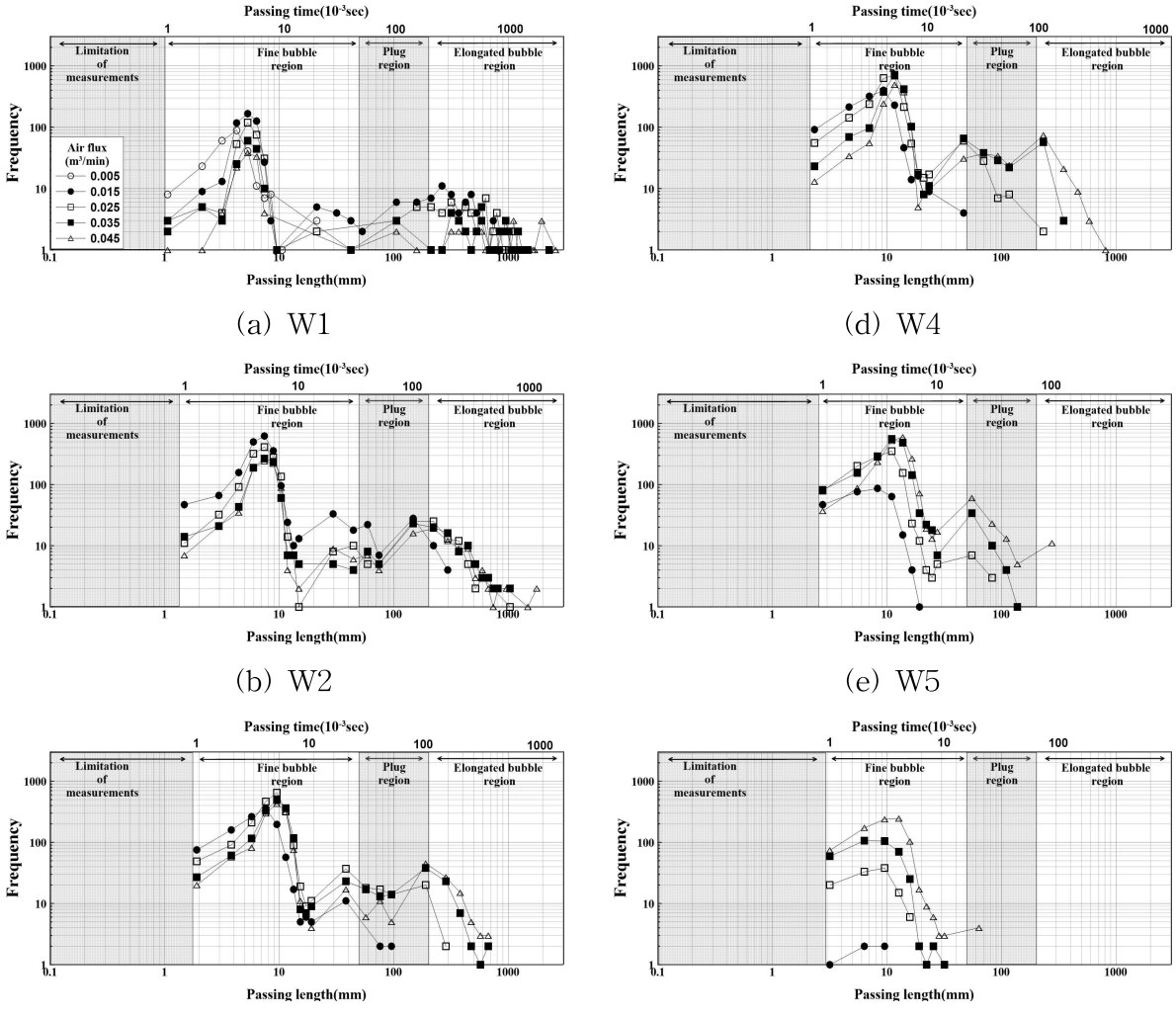
○ 각 흐름에서 얻어진 최소 통과길이 미만의 값들을 측정할 수 없는 구역(Limitation of measurements)으로 그래프 내에 표시하였으며, 부력의 영향을 고려하지 않을 정도로 작은 규모를 갖는 보편적인 미립부유물과 유사한 거동을 하는 기포로 가정하고, 기포의 흐름 방향 길이 규모를 척도로써 사용하여 수평관 내 물-공기 이상 흐름의 형태를 분류할 수 있는 정량적 기준으로 사용

○ 관 직경의 2배인 200 mm를 이상의 통과길이 구역을 확장기포구역(elongated bubble region)으로 분류하고, 관 직경의 1/2에서 2배 사이인 50~200 mm 내에 포함되는 통과길이 구역을 플러그구역(plug region)으로 분류하였으며, 그보다 작은 통과길이를 갖는 것을 보통기포구역(fine bubble region)으로 표현

○ 일반적으로 길이 규모는 난류 흐름의 특성을 나타내고 이는 관 직경에 상응하는 것으로 알려져 있음

○ 수평관 내에서의 길이 규모는 수평 방향의 길이를 무한으로 보기 때문에 적용하지 않고, 연직 방향의 길이를 통해 산정하며 이를 고려하여 본 실험에서는 내경의 배수를 채택하였으며, 물-공기 두 상의 경계면의 파형 거동과 밀도의 차 등을 고려하여 흐름특성길이의 1/2배와 2배를 기포, 플러그, 확장기포 등을 분류하는 기준으로 설정

○ 이렇게 4가지 형태로 분류된 구역은 그래프 내에 음영으로 표시되어 있으며, 상단에는 기포의 통과시간을 표시하고 각 기호들은 그 흐름에 주입된 공기량을 의미



(a) W1 (d) W4

(b) W2 (e) W5

(c) W3 (f) W6

그림 2.3.14 통과길이와 발생빈도에 따른 공기 유동체계의 분포 (y/D=0.05)

표 2.3.5 유량조건에 따른 단면평균유속

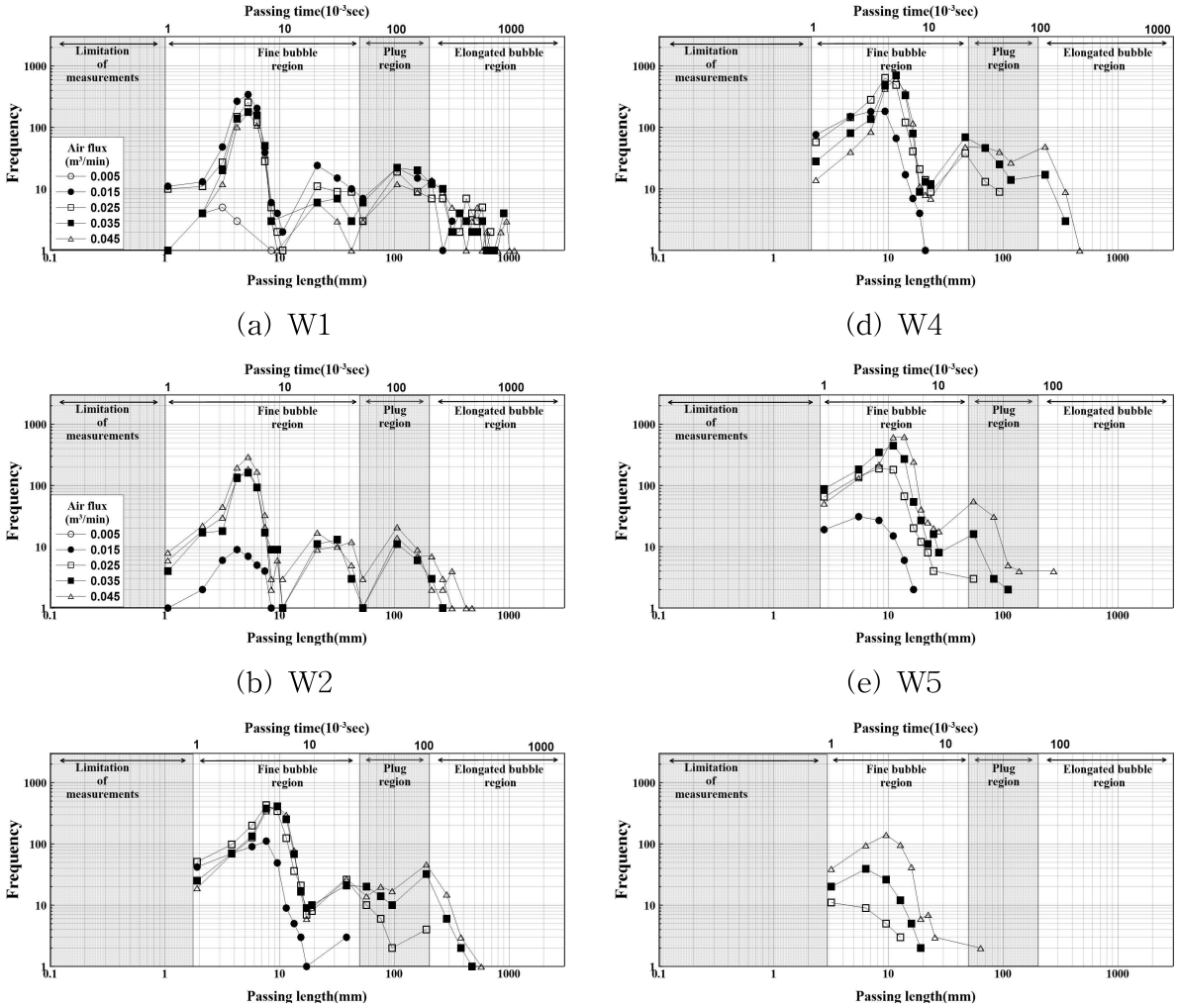
Water flow rates (m^3/min)	Water velocity (m/sec)	Sampling rates (sec)	Length (mm)
0.5	1.06	0.001	1.06
0.7	1.484	0.001	1.484
0.9	1.908	0.001	1.908
1.1	2.332	0.001	2.332
1.3	2.756	0.001	2.756
1.5	3.18	0.001	3.18

i. 측정지점에 따른 기포통과길이별 빈도수(y/D=0.05)

- 그림 2.3.14a~그림 2.3.14f는 각 흐름 조건에서 y/D=0.05에서 흐르는 기포들에 대한 통과길이에 따른 출현 횟수를 보여주는 것이며, 각 흐름 조건에서 출현하는 기포크기의 분포 양상과 흐름을 형성하는 주요 기포의 흐름 형태를 확인할 수 있음
- 그림 2.3.14a에서는 확장기포구역에 존재하는 빈도가 거의 모든 공기량에서 많은 것을 알 수 있으며, 최대 기포통과길이는 2 m 이상의 크기를 갖는 것을 확인
- 여기서 길이의 규모가 2 m인 기포 하나가 차지하는 시간적인 비율은 가장 높은 빈도수를 가지는 크기가 5 mm인 기포가 400회의 발생빈도를 가지는 것과 같으므로 최대 기포통과길이가 최빈 기포통과길이보다 월등히 크다면, 그 흐름에서 주를 이루는 기포는 최대 통과길이를 갖는 기포로 보는 것이 적합
- 그림 2.3.14a와 그림 2.3.14b에서의 이상흐름은 확장기포가 주가 되며, 유량이 증가함에 따라 최대 기포통과길이는 감소하고 플러그구역에서 탐지되는 빈도가 일부 증가
- 그림 2.3.14c와 그림 2.3.14d에서는 최대 통과길이가 꽤 감소하는 반면 플러그구역의 빈도와 최빈 통과길이의 빈도 및 길이가 증가하였으며, 이상흐름 거동은 플러그 및 그보다 작은 기포들이 주로 흐르는 흐름인 것을 확인
- 그림 2.3.14e는 최대 기포통과 길이가 주로 플러그에서 발생한 것을 알 수 있으며, 그림 2.3.14f는 대부분 플러그보다 작은 크기의 통과길이를 갖는 기포만이 측정
- 그림 2.3.14a~그림 2.3.14f는 전반적으로 유량의 증가에 따라 각 흐름에서의 최대 기포통과길이는 감소하고, 최빈 기포통과길이는 길어지게 되는 것이 확인되었으며, 이러한 현상이 나타나는 원인은 유속의 증가에 따라 물과 기포의 속도 차가 발생하고 이로 인해 기포와 물의 경계면에서 마찰이 증가하기 때문으로 판단
- 결과적으로 유량의 증가에 따라 확장기포는 플러그 단위의 길이로 나누어지고, 플러그는 그보다 크기가 작은 기포들로 나눠지는 분리 현상이 일어나 기포통과길이가 감소하는 경향이 나타남

ii. 측정지점에 따른 기포통과길이별 빈도수(y/D=0.08)

- 그림 2.3.15a～그림 2.3.15f의 전반적인 양상은 그림 3.94와 매우 유사한 형태를 보이나, 최대 기포길이와 빈도에서 그 차이가 나타나며, 이는 W1～W3과 같은 낮은 유량에서는 확장기포 및 플러그 기포의 두께에 대한 영향과 물과 공기의 임계면을 따라 발생하는 파로 인해 나타난 것으로 판단
- 이상 흐름 감지탐침의 위치가 파의 이동 또는 플러그의 두께 변화 폭 내에 위치하게 되면 그림 2.3.15a와 그림 2.3.15b에서 보이는 것처럼 기체에 노출되는 시간이 상대적으로 위쪽에 위치하였을 때에 더 길어지게 되며, 반대로 아래로 갈수록 더 짧아지게 되어 y/D=0.05와 0.08에서의 최대 통과길이는 y/D=0.05일 때보다 y/D=0.08에서 작은 값으로 나타남
- 그림 2.3.15a와 그림 2.3.15b는 그림 2.3.14a와 그림 2.3.14b와 비교하였을 때 대체로 최대 통과길이가 감소하였으며, 최빈 기포길이 및 그 주위의 빈도수가 증가하고, 플러그영역에 들어가는 통과길이 값들의 빈도 또한 일부 증가
- 그림 2.3.15c～그림 2.3.15e에서의 양상 또한 y/D=0.05에서의 분포와 비슷한 형태를 보였으나, 전체적으로 각 공기량에 따른 최대 통과길이가 감소하였으며, 특히 공기량이 낮은 케이스에서의 빈도가 감소한 반면, 그림 2.3.15f에서는 각 공기량에서 최빈 통과길이와 빈도수가 크게 감소하였고, W6A2 이하의 흐름 조건에서는 기포가 감지되지 않음



(a) W1 (d) W4

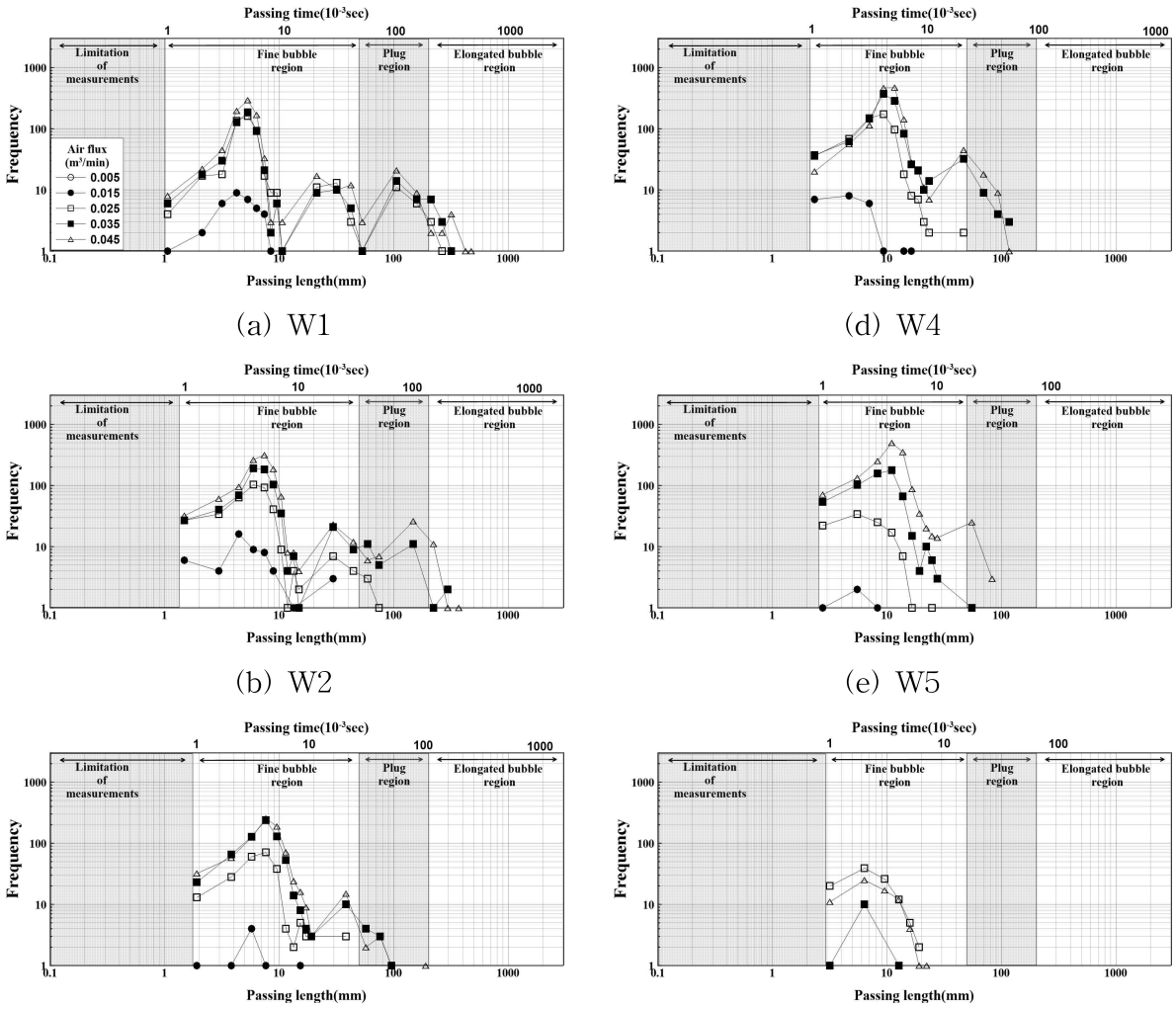
(b) W2 (e) W5

(c) W3 (f) W6

그림 2.3.15 통과길이와 발생빈도에 따른 공기 유동체계의 분포(y/D=0.08)

iii. 측정지점에 따른 기포통과길이별 빈도수(y/D=0.11)

- 그림 2.3.16a～그림 2.3.16f는 모든 유량에서의 측정된 최대 기포길이가 y/D=0.08에 비해 현저히 감소하였으며, 이는 앞서 다루었던 그림 2.3.15a～그림 2.3.15f의 위치에 따른 기포분율에서도 같은 경향을 보임
- 그림 2.3.16a와 그림 2.3.16b는 최대 빈도와 최대 통과길이가 감소하였으나 공기량이 높은 일부 흐름에서는 확장기포구역 내에 존재하는 기포들이 몇몇 남아 있고, 비록 y/D=0.08보다는 빈도가 감소하였으나 여전히 플러그구역에서도 발생하는 기포가 일부 있음
- 그림 2.3.16c～그림 2.3.16e까지의 흐름은 일부 플러그를 포함하고 있으나, 공기량이 A4 이상에서만 일부 나타나고 그 외에는 보통 기포 흐름이 되었으며, 그림 2.3.16f에서는 모든 통과길이의 빈도값들이 40 이하가 되었고 W6A2에서는 기포가 측정되지 않음
- 결론적으로 y/D=0.11에서 측정된 각 흐름에서의 기포 양상은 W1에서 W2와 같은 낮은 유량의 흐름에서는 앞서 언급한 파가 영향을 미치기 때문에 플러그 및 확장기포구역에서 일정량 그 값이 측정되나, 그 이상의 유량에서는 빨라진 유속으로 인해서 점차 그 영향을 상실하는 것으로 판단



(a) W1 (d) W4

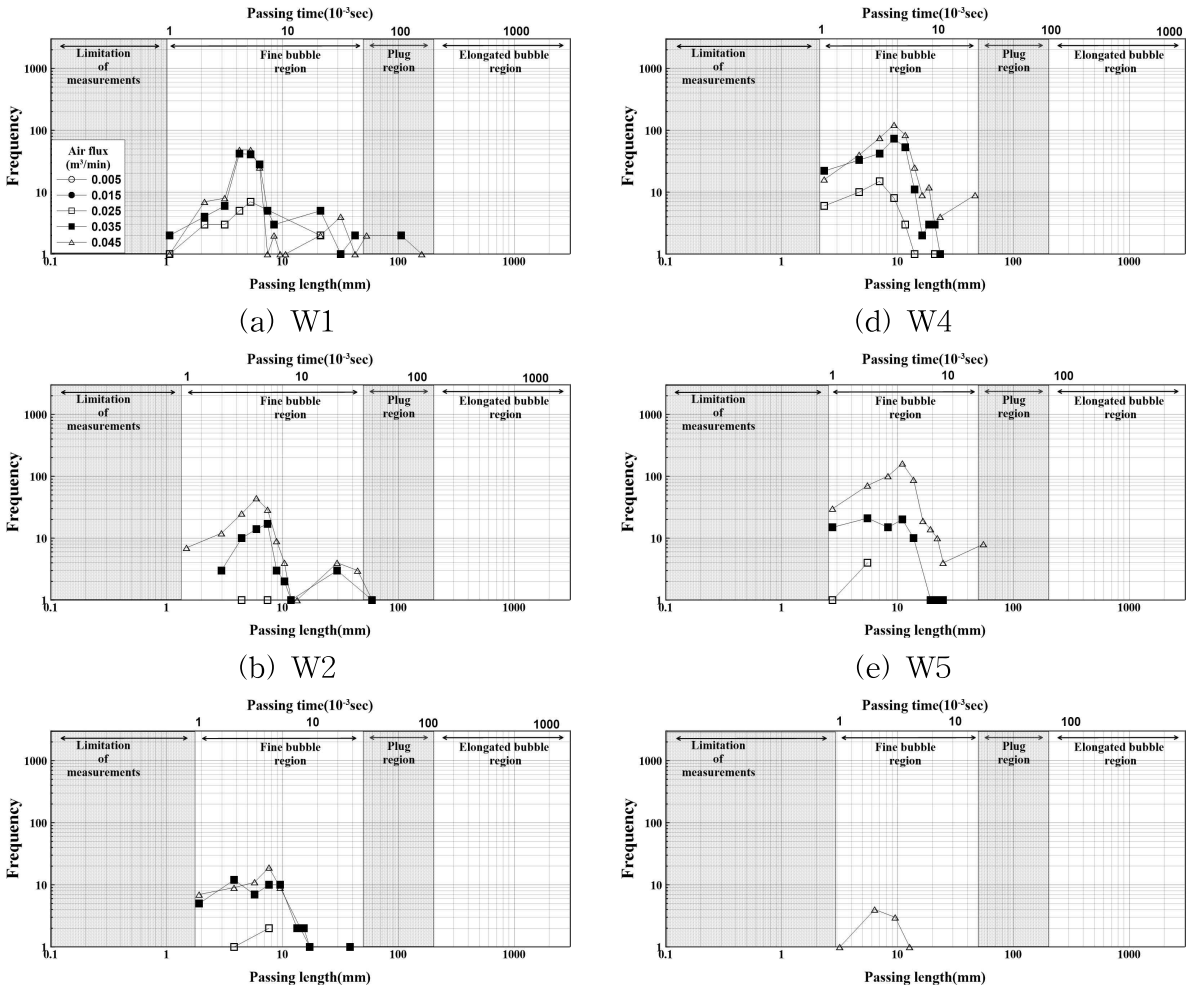
(b) W2 (e) W5

(c) W3 (f) W6

그림 2.3.16 통과길이와 발생빈도에 따른 공기 유동체계의 분포(y/D=0.11)

iv. 측정지점에 따른 기포통과길이별 빈도수(y/D=0.14)

- 그림 2.3.17a~그림 2.3.17f는 기포통과길이별 빈도수와 최대 기포통과길이 모두 크게 감소하는 것으로 나타났으며, 모든 유량 내에 공기량 A2를 주입하였을 때 측정된 기포는 전혀 없었으며, W1A3과 W4A3를 제외하면 주입된 공기량이 A3일 때 측정된 통과길이에 따른 빈도는 4개 이하의 값을 갖는 것으로 확인
- 공기량이 A2 이하의 값을 주입하였을 시 낮은 유량에서는 부력으로 인하여 관의 상부로 떠오르고, 높은 유량에서는 빨라진 유속으로 인해 측정 불가능한 크기로 나누어지거나 관의 상부에서의 기포의 흐름과 같이 기포가 집중되지 않아 측정된 기포가 적은 것으로 판단
- 흐름조건 W1A3~W1A5의 경우에는 물-공기 경계파의 영향이 y/D=0.14까지 일부 나타났으며, W4A3에서는 일부 기포들이 유속으로 인해 물-공기 경계면에서 발생한 마찰의 영향이 W5와 W6에 비해 상대적으로 작아 기포 일부가 탐침을 관통해 측정되었으며, 주입된 공기량이 A4 이상일 때에는 유량의 증가에 따라 측정된 기포들의 빈도와 통과길이가 감소
- 유량 W1~W3의 경우에는 경계파의 영향으로 추정되며, 유량 W4 이상에서는 유속이 증가함에 따라 관내의 기포들이 부력보다 관성력의 영향을 더 받아 상부에 집중되지 못하고, 상부에서 흐르더라도 물과 공기의 마찰로 인하여 기포들은 서로 합성하지 못해 확장기포 또는 플러그 두께변화의 영향이 적어 측정된 통과길이별 빈도수는 낮아지는 것으로 나타남



(a) W1 (d) W4

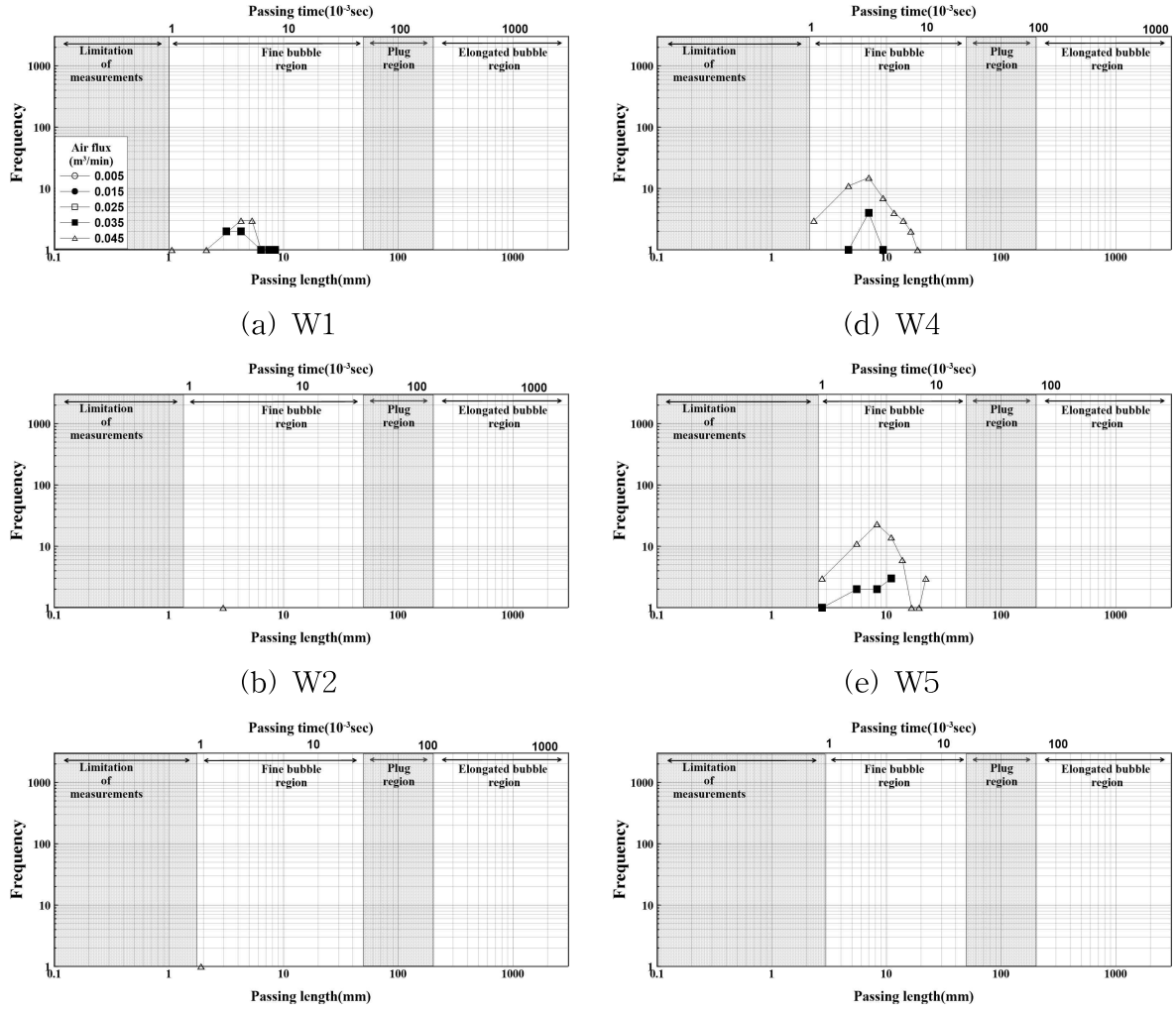
(b) W2 (e) W5

(c) W3 (f) W6

그림 2.3.17 통과 길이와 발생빈도에 따른 공기 유동체계의 분포(y/D=0.14)

v. 측정지점에 따른 기포통과길이별 빈도수(y/D=0.17)

- 관내 측정지점 y/D=0.17에서의 통과길이별 빈도수는 그림 2.3.18a～그림 2.3.18f에서 보이는 바와 같이, 주입되는 공기량과 관계없이 확장기포 및 플러그의 영향이 없는 것으로 판단되며, 그림 2.3.18a에서 나타난 공기량 A4와 A5에서의 빈도는 3개 이하로 극히 낮기 때문에 그림 2.3.18b와 그림 2.3.18c와 같이 무시할 수 있는 것으로 판단
- 반면 그림 2.3.18d～그림 2.3.18e는 공기량 A4와 A5가 주입되었을 때 측정된 빈도가 일부 존재하고, 빨라진 유속에 따라 관성력의 영향이 상당 부분 발생하여 측정된 것으로 판단
- 관의 상부에서 중심으로 갈수록 기포들이 관의 상부처럼 집중되지 않으며, 기포가 이상 흐름 감지탐침을 관통할 확률은 낮아지고 기포의 크기가 작을수록 부력의 영향을 더욱 적게 받아 고유속에서는 관의 상부로 올라가지 않고 그대로 직진하는 경향을 보임



(a) W1 (d) W4

(b) W2 (e) W5

(c) W3 (f) W6

그림 2.3.18 통과 길이와 발생빈도에 따른 공기 유동체계의 분포(y/D=0.17)

⑤ 물-공기 비율에 따른 분석

- 그림 2.3.15a~그림 2.3.15f에서 도시된 흐름 조건에 따른 기포통과길이 및 발생빈도 측정결과를 통해 공기량-유량 비에 따라 기포 종류별 발생확률을 총 측정시간인 30초간 각 흐름에서 기포, 플러그 그리고 확장기포가 점유했던 시간을 비율로써 표현(표 2.3.6)
- 각 흐름 조건을 공기량을 물의 유량으로 나눈 값인 A/W 비의 크기에 따라 총 측정시간 동안 일반기포, 플러그, 확장기포가 관의 상부인 y/D=0.05에서 흐른 시간적인 비율을 나타냄
- A/W 비가 증가함에 따라 최초로 보통기포가 발생한 A/W 비는 0.010%이며, 그 이후 플러그의 발생은 A/W 비 0.017% 부근에서 발생하였으며, 확장기포의 발생은 0.021%에서부터 나타나기 시작
- A/W 비가 증가함에 따라 흐름 형태는 기포흐름에서 기포와 플러그가 함께 섞여 흐르는 형태가 되고, 그보다 공기량이 증가하게 되면 확장기포가 발생하게 되며, 이때 확장기포의 점유비율이 증가함에 따라 기포와 플러그의 점유비율은 감소

표 2.3.6 공기/물 비에 따른 각 흐름 발생확률(측정시간 30 s)

Case(W-A)	A/W ratio(%)	Bubble(%)	Plug(%)	Elongated(%)
W6-A1	0.003	0	0	0
W5-A1	0.004	0	0	0
W4-A1	0.005	0	0	0
W3-A1	0.006	0	0	0
W2-A1	0.007	0	0	0
W1-A1	0.010	3.510	0	0
W6-A2	0.010	0.037	0	0
W5-A2	0.012	2.730	0	0
W4-A2	0.014	16.450	0	0
W6-A3	0.017	0.967	0	0
W3-A2	0.017	14.797	0.600	0
W5-A3	0.019	12.873	0.767	0
W2-A2	0.021	33.773	13.433	7.667
W4-A3	0.023	34.453	5.067	0.667
W6-A4	0.023	3.460	0	0
W5-A4	0.027	24.617	3.967	0
W3-A3	0.028	31.983	13.067	1.000
W6-A5	0.030	9.680	0.267	0.000
W1-A2	0.030	8.937	5.333	74.167
W4-A4	0.032	34.550	11.333	20.500
W5-A5	0.035	28.450	8.867	3.667
W2-A3	0.036	23.070	9.833	44.833
W3-A4	0.039	26.407	18.433	21.167
W4-A5	0.041	24.487	12.233	44.833
W1-A3	0.050	5.160	3.500	84.833
W2-A4	0.050	14.990	9.567	63.333
W3-A5	0.050	22.157	17.900	34.167
W2-A5	0.064	14.823	6.933	66.833
W1-A4	0.070	2.650	1.000	94.000
W1-A5	0.090	1.863	1.167	96.500

○ 그림 2.3.19는 A/W 비에 따른 각 유량에서의 기포분율을 나타낸 것으로, 유량 W5와 W6의 분포를 살펴보면 동일하거나 유사한 A/W 비에서의 기포분율이 다른 유량의 값들보다 낮으며, 특히 W5보다 W6의 기포분율이 작은 것으로 나타남

○ 유량 W5와 W6은 증가된 유량으로 인해 유속이 너무 빨라져 흐름 형태가 분무 흐름으로 변화해 이에 상응하지 않으며, 흐름 형태가 같은 경우에는 A/W 비를 통해 정량적인 유형별 기포 발생 기준으로 이용할 수 있으나, 흐름 형태가 달라지거나 흐름이 바뀌는 과도기적인 흐름에 대해서는 일부 제약을 받음

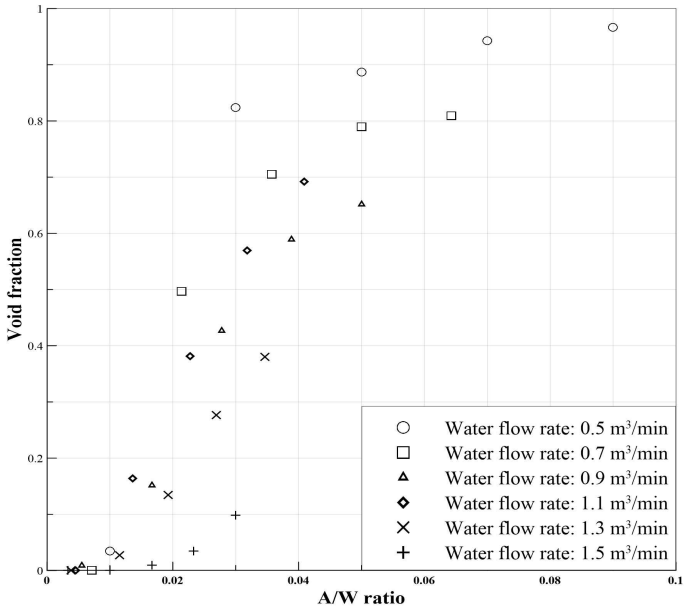


그림 2.3.19 공기/물 비에 따른 기포분율(y/D=0.05)

(다) 이상류 거동 해석을 위한 수치모형 및 기법 검토

① 하수관망 해석모형

○ 하수관망의 침수해석을 구체적으로 모의할 수 있는 분포형 하수관망 해석용 소프트웨어는 XP-SWMM, MOUSE, InfoWorks로 구분(표 2.3.7)

○ XP-SWMM은 미국 환경보호국(Environmental Protection Agency)에서 개발해 범용화된 WMM(Storm Water Management Model) 모형을 기반으로 하며 하수관망의 설계, 수질

○ 모의 등 컨설팅에 활용할 수 있도록 상품화된 것으로 국내에서 사용자층이 많은 편이며 주로 유출해석 측면의 활용성에 장점이 있음

○ MOUSE(Modeling of Urban Sewer)의 장점은 침수해석을 위한 하수관망 구축 기능이 탁월해 하수관망뿐 아니라 펌프 시설, 저류조, 자연 개수로 지형까지 구체적으로 구축 가능하며, 특히 자연 개수로 지형 구축이 가능

○ 한강홍수통제소에서 홍수예보에 직접 활용되고 있는 동력학적 1차원 수리모형인 DWOPER(Dynamic Wave Operational Model)모형으로 산출한 하천 홍수위 모의 값을 MOUSE에 모형에 연계·활용함으로써 하천 수위 변동에 따른 정량적 침수해석 가능

○ 덴마크 DHI(Danish Hydraulic Institute)사가 개발한 MOUSE(Modeling of Urban Sewer)는 유럽 중심의 하수관거 연구자들의 연구결과들을 모듈화한 것으로 주로 하수관거 내 자정작용, 퇴적토 거동 등의 오염물질 거동의 해석 기능에서 장점이 있음

○ MOUSE는 캐나다 Edmonton에서의 SCADA 시스템과 연계된 구축 사례(Steven, 2001)와 같이 하수관망 관리시스템용으로 구축된 여러 도시 사례들이 보고됨

○ InfoWorks는 세계적으로 가장 저명한 수리 분야 연구기관인 영국의 HR Wallingford 사가 개발한 것으로서, 국내에서는 잘 알려지지 않았지만 수리 수문 분야의 오래된 연구자료 및 노하우를 바탕으로 구축되어 있으며 일본이나 유럽에서 주로 사용

표 2.3.7 분포형 하수관망 수치모형의 특성 비교

구분 \ 모형	XP-SWMM	MOUSE	InfoWorks
개발자	미국 EPA, XP-Software LTD	덴마크 Danish Hydraulic Institute	영국 HR Wallingford LTD
강우-유출모델	-강우손실모델 -비선형저류법	-강우손실모델 -시간면적8법 -비선형저류법	-강우손실모델 -유출계수모델 -이중선형저류법
관거 내 수리모델	-Saint Venant법 -가우스-자이델법, 음해법 -운동파모델 -비선형저류법	-Saint venant법 -아봇트 6점법 음해법 -확산파모델 -운동파모델	-Saint venant법 -프라이스맨 4점법, 음해법
실시간 제어기능	있음	있음	있음
모델의 재현도	보통	높음	높음
국내 연구사례	많음	적음	없음

② 2차원 지하공간 침수해석 모형

i. TUFLOW

- TUFLOW는 유한차분법을 이용한 2차원 모형으로 독립모형이 아닌 XP-SWMM 모형의 내부 2차원 모형으로 구성되며, 사류, 위어, 교량, 암거 등을 모두 고려할 수 있어 유역침수해석에 널리 활용
- TUFLOW 모형에서는 수평면에서 2차원 천수방정식을 X 및 Y 방향의 연속방정식과 운동량 방정식의 편미분에 의해 다음과 같이 표현

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t}+\frac{\partial (Hu)}{\partial x}+\frac{\partial (Hv)}{\partial y}=0 \tag{2.3.3}$$

$$\begin{aligned} F_x = & \frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}-c_f v+g\frac{\partial \zeta}{\partial x} \\ & +gu\left(\frac{n^2}{H^{4/3}}+\frac{f_1}{2g\partial x}\right)\sqrt{u^2+v^2} \\ & -\mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right)+\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} \end{aligned} \tag{2.3.4}$$

$$F_y = \frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} - c_f u + g\frac{\partial \zeta}{\partial y} + gv\left(\frac{n^2}{H^{4/3}} + \frac{f_1}{2g\partial y}\right)\sqrt{u^2+v^2} - \mu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) + \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y} \quad (2.3.5)$$

여기서 ζ는 수면 높이(Elevation), u, v는 수심 평균된 X, Y 방향 유속 인자, H는 수심, t는 시간, x, y는 X, Y 방향으로의 거리, cf는 코리올리 계수(Coriolis force coefficient), n은 매닝계수, f_1은 에너지손실계수, μ는 수평 방향 운동량확산 계수, p는 대기압, ρ는 물의 밀도, F_x, F_y는 X, Y 방향으로의 각종 외력의 합

ii. FLUMEN

- 하도의 침수 범람 해석 및 도심지 침수해석모형으로 실무에서 널리 사용되고 있는 FLUMEN은 홍수범람에 의한 충격파를 모의하기에 적합한 Roe의 FDS(Flux Difference Scheme)를 사용하고 있으며, 이는 수치해의 진동을 크게 완화
- FDS는 원래 Euler 방정식에 적용되었으며 쌍곡선형 천수방정식에도 적용이 가능
- 충격파나 점성 흐름 계산에 기존의 방법들과 비교하여 뛰어난 모의 결과 제공
- FLUMEN은 수심 적분 된 천수방정식을 해석하는 프로그램으로써, 방정식의 보존형태는 다음과 같으며, 도수현상과 같이 흐름이 불연속적으로 변화하는 흐름에도 적용 가능

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} + S = 0 \quad (2.3.6)$$

여기서 x와 y는 수평방향, t는 시간, U=(h, p, q)T, h는 수심, p와 q는 각각 x, y방향의 단위폭당 유량

x, y방향의 플럭스 벡터 및 소스벡터는 다음과 같음

$$E = \begin{pmatrix} p \\ \frac{p^2}{h} + \frac{g}{2}h^2 \\ \frac{pq}{h} \end{pmatrix}, G = \begin{pmatrix} q \\ \frac{pq}{h} \\ \frac{q^2}{h} + \frac{g}{2}h^2 \end{pmatrix}, S = \begin{pmatrix} 0 \\ gh\frac{\partial z_b}{\partial x} + \frac{\tau_{bx}}{\rho} \\ \frac{\partial z_b}{\partial y} + \frac{\tau_{by}}{\rho} \end{pmatrix} \quad (2.3.7)$$

여기서 g는 중력가속도, ρ는 유체의 밀도, z_b는 하상고, τ_b는 바닥전단응력

③ 3차원 지하공간 침수해석 모형

i. CFX

- CFX는 ANSYS사에서 개발한 유체 해석기구로 CFX는 비구조체 사면체 격자(Unstructures tetrahedral mesh)를 생성하며, Mesh Import를 통하여 육면체 격자(Hexahedral mesh)도 해석에 사용할 수 있는 프로그램
- CFX는 복잡한 형상 주위의 층류 및 난류 유동과 열전달 문제를 해석하기 위해 개발된 범용 프로그램
- 비 직교 경계 접합격자(Non Orthogonal Body Fitted Grid)를 사용해 일반적인 압축성 층류 및 난류 유동장 해석 가능

ii. FLOW-3D

- FLOW-3D는 미국 Flow Science, Inc.에서 개발한 3차원 범용 전산유체역학코드
- 해석방법은 기본적으로 비정상 유동 상태이며, 연속방정식, 3차원 운동량 보전방정식(Navier-Stokes equation) 및 에너지 방정식을 사용해 해석
- 자유표면 해석을 위하여 VOF(Volume of Fluid) 방정식이 사용

iii. FLUENT

- FLUENT는 유한체적법(FVM)을 이용하여 복잡한 형상의 열전달 문제와 유체유동 문제를 해석하는 범용코드
- 압축성 비압축성 문제, 정상상태 또는 비정상상태, 비점성, 층류, 난류 운동, Newtonian, non-Newtonian 운동, 복사열 전달, 전도와 대류의 복합적 열전달 문제, cavitation 현상 등 유체역학 전반에 걸친 문제 해석 가능

표 2.3.8 지하시설 침수 모의 3차원 수치모형 비교

구 분	FLOW-3D	FLUENT	CFX
수치해석	FDM/FVM	FEM	FVM
격자체계	Rectangular Grid Multi-block	Unstructured Mesh(Ver. 5)	Unstructured Multi-block Mesh
지형형성	내장 모델러, CAD interface	내장 모델러, CAD interface	내장 모델러, CAD interface
해석영역	FAVOR 기법에 의해 유동장 및 비유동장 모두에 격자 형성 (obstacle이 mesh 영역에 존재함으로써 격자 자동생성)	Obstacle 정의에 따라 grid modeler를 사용하여 격자 생성 (격자형식에 따라 사용자가 GAMBIT에서 격자를 생성)	Finite Element Technique
응용성	General all in one model (문제에 따른 모듈 분리 없음)	General Model (Newtonian fluid, Non-Newtonian fluid, free-surface 문제 등에 따라 모듈 분리)	Multi-phase 유동, combustion, free-surface 등은 통합, radiation은 모듈 분리
전치리	빠른 전처리를 통한 문제구성	격자 생성에 상당 시간 소요	격자 생성에 상당 시간 소요
자유수면	매우 정확 (VOF 최초개발)	VOF 사용 (경계조건 적용방법이 달라 자유수면 해석이 부정확)	VOF 사용 (경계조건 적용방법이 달라 자유수면 해석이 부정확)
화학반응	passive reaction	generalized reaction	generalized reaction

(라) 대심도터널 내부 이상류거동 수치모의 및 검증

① 이상류 거동 해석기법

○ 우수관망에서 흐름 해석은 가장 복잡한 수리학의 문제 중 하나이며 관망 내의 흐름은 자유수면과 만수관(full pipe) 흐름 사이에서 불안정하고 변동이 심함

○ 하수거는 자유수면 흐름과 중력 흐름을 기본으로 설계되었지만, 가압 흐름(pressurized flow)이 발생할 수도 있으며, 만수관 가압 흐름(pressurized full pipe flow)은 하수관이 설계상태 이하(under design)일 때 발생하고, 범람은 설계 재현 기간(return period)을 초과하는 경우 발생

○ 이러한 상태에서 파랑(wave)은 관을 가득 채우면서 하류에서 상류 단부를 향해 이동하게 되고, 생성된 압력 상승은 다양한 시스템 손상을 유발하며, 배수시스템의 역류와 압력 변화의 원인이 됨

○ 양해법과 음해법을 기반으로 하는 많은 수치 기법들이 하수관과 빗물계에서 부정류를 모의하기 위해 개발되었지만, 모델의 대부분은 많은 제약이 존재(Fread, 1993)

○ 우수관망에서 두 가지 특성은 유동천이(flow transition)의 수치 설명(numerical description)에 문제를 일으켰으며, 관수로 내 자유수면에서 가압 흐름까지의 천이 모형화(modeling transient)를 위해 Preissmann and Cunge(1961)와 이후 Cunge and Wegner(1964)는 slot 개념 제시

○ Abbott and Verwey(1970)는 우수관망 내 흐름을 모형화하기 위해 이 방법을 사용하였고, 이후 slot 기법은 관망 내 천이 흐름에 가장 널리 사용되는 수치 기법의 하나가 됨

○ slot 기법의 개념은 파이프의 상단에 가상의 좁은 열린 slot을 추가하여 개수로 흐름(open channel flow)처럼 가압 흐름(pressurized flow)을 작용하게 함

$$c = \sqrt{g\frac{A_p}{B_s}} \tag{2.3.8}$$

여기서, g는 중력가속도(m/s), A_p는 파이프의 단면적(m^2), B_s는 slot의 폭(m), c는 파의 속도(m/s)

○ 식 2.3.8에 따르면, slot의 폭 B_s는 흐름의 가압 부분(pressurized portion) 내 추정되는 속도(assumed celerity) c에 일치시키기 위해 크기를 조정할 수 있음

○ Slot 개념을 활용하면 하수거 시스템을 통하는 단일유형 흐름처럼 자유 수면 흐름처럼 해석할 수 있는 이점이 있고, 파이프에 압력을 가할 때 압력 수두(pressure head)를 정량화하기 쉬움

○ 지표수(surface flow)의 경우, slot은 효과가 없고 평상시처럼 개수로 흐름 방정식이 적용되고, slot 기법을 모델링하는 경우 Saint-Venant 연속방정식과 운동량 방정식을 지배방정식으로 사용

○ 일반적으로 slot 개념을 사용한 두 가지 다른 모의 방법이 사용되는데 컴퓨터 컴파일러 언어를 사용한 FORTRAN과 MOUSE 모델

○ 편미분방정식(partial differential equations)에 대한 일반적인 해석해는 없지만 특성곡선법(method of characteristics, MOC)은 간단하고 물리적 기반을 가지기 때문에 관거 내 천이 흐름 해석에 가장 널리 사용되는 방법(Chaudhary, 1978; Wylie and Streeter, 1993)

○ 첫 번째 모델은 MOC에 의해 특정 전미분방정식(particular total differential equations)으로 변환된 한 쌍의 Saint-Venant 편미분방정식을 사용

○ 두 번째인 MOUSE 모델에서는 부정류의 계산을 수행하며, 자유수면 흐름(free surface flow)의 기본적인 1차원 Saint-Venant 연속방정식의 유한 차분 수치해석법(finite difference numerical solution)을 사용

○ 연속방정식과 운동량보존방정식의 수직 통합형(vertically integrated) 풀이로 부정류의 계산(computation of unsteady flow)을 수행하고, 이때 물은 비압축성(incompressible), 균질성(homogenous)이며, 하상 경사(bottom slope)는 작고, 파장(wave lengths)은 수심(water depth)과 비교하였을 때 크고, 흐름은 특별한 경우가 아닌 한 임계치 이하(sub-critical)인 것을 기본 가정으로 함

○ MOUSE 모델은 모든 상황에서 부드럽고 안정적인 천이(transition)를 보장하기 위해 다른 slot 모델처럼 동일한 기본적인 알고리즘 내에서 자유수면과 가압 흐름을 묘사

○ Courant 안정 조건은 시간 간격에 대한 제약조건을 제시하여 slot 개념을 이용하는 경우 큰 전파 속도(wave celerity)에 상응하는 미세 시간 간격과 매우 작은 slot 폭이 요구되는 반면 수위 내 마찰 수두 손실로 인하여 생긴 현저한 수위 차로 매우 큰 slot 폭을 생성할 수도 있음

② Preissmann 슬롯 방법

○ 근본적인 문제는 꽉 찬 파이프 안에 존재하는 가압 흐름(pressurized flow)에 꽉 차지 않은 개방 통로나 파이프 안에 존재하는 것과 같은 자유표면 흐름으로부터의 전환을 제대로 표현하는 방정식이 아직 개발되지 않음

○ 가압 흐름은 각각 간헐적으로 존재할 수 있는데, 예를 들어 강우 동안 초과하는 폭풍 파이프(storm pipe)에서, 또는 영구적으로, 예를 들어 펌프 시스템 또는 사이펀(siphon)에서 가능하다. 가압 흐름을 가장하기 위해 파이프의 윗부분에 모조 슬롯(pseudo-slot)의 도입이 Preissmann(1961)에 의해 최초로 제기

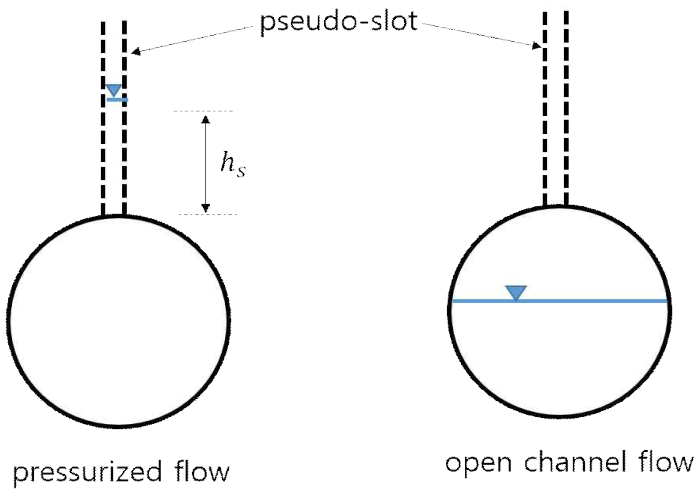


그림 2.3.20 가압 흐름과 개수로 흐름

○ 슬롯의 폭은 자유 표면파의 속도(free surface wave celerity)에 대한 방정식을 사용해, 흐름의 가압 부분에서 가정된 속도에 의해 설계될 수 있음

$$c = \sqrt{g\frac{A_{pipe}}{T_{slot}}} \tag{2.3.9}$$

여기서, A_{pipe}는 파이프의 단면적(m²), T_{slot}은 Preissmann 슬롯의 너비(m)

○ 구멍 앞쪽의 위치와 대신 사용된 보수적인 충격 캡처링 방법(conservative shock-capturing method)을 추적할 필요는 없으며, Preissmann 슬롯 모델은 파이프의 단면적을 완전히 닫지 않은 구멍과 수치분산(numerical diffusion) 없이 점진적인 흐름의 체제 전환을 가장할 수 있음

$$\overrightarrow{U_t} + \overrightarrow{F_x} = \vec{S} \tag{2.3.10}$$

$$\vec{U} = \begin{bmatrix} A \\ Q \end{bmatrix},\ \vec{S} = \begin{bmatrix} 0 \\ gA(S_0 - S_f) \end{bmatrix} \text{ and if } A < A_{\pi pe},\quad \vec{F} = \begin{bmatrix} Q \\ \frac{Q^2}{A} + gAh_c \end{bmatrix}$$

$$else,\quad \vec{F} = \begin{bmatrix} Q \\ \frac{Q^2}{A} + gA(h_c + h_s) \end{bmatrix} \tag{2.3.11}$$

○ 관의 상부에 slot을 가지는 하수관 내의 Saint-Venant 운동량보존방정식과 연속방정식은 다음과 같이 주어짐

$$\frac{1}{g}\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{V}{g}\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} - S_0 + S_f = 0 \tag{2.3.12}$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + V\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{c^2}{g}\frac{\partial V}{\partial x} = 0 \tag{2.3.13}$$

$$S_f = \frac{n^2 |V| V}{R'^{\frac{4}{3}}\left\{1 + \frac{B_S}{A_P'}(h - D')\right\}} \tag{2.3.14}$$

$$c = \sqrt{g\left\{\frac{A_P' + B_S(h - D')}{B_S}\right\}} \tag{2.3.15}$$

여기서, h는 흐름 깊이(m), V는 흐름 속도(m/s), c는 압력파의 전파 속도(m/s), A_p는 관의 단면적(m²), S_0는 관 경사, S_f는 에너지경사, g는 중력가속도(m/s), x는 거리좌표(m), t는 시간(s), A_p'는 slot을 고려하지 않은 관의 단면적(m²), D'는 slot을 고려하지 않은 관의 깊이(m), R'는 slot을 고려하지 않은 동수반경, B_s는 slot의 폭(m), n은 매닝계수

○ 파이프 상단에 pseudo 슬롯 모델을 적용함으로써, 개수로 흐름 방정식은 흐름의 상태는 자유수면 흐름 또는 가압 흐름인지 따지지 않고 전체 파이프 시스템을 위해 사용될 수 있으나, 작은 시간 단계는 실제 파이프 시스템의 재료 특성이 사용될 때 폭우에서 신속하게 유입하여 압축률을 고려하기 위해 사용되어야 한다는 단점 등이 있음

○ Preissmann 슬롯 모델은 단순히 이상 유동을 분석하기 위해 선택되고 수정하였으며, 마찬가지로, 기초방정식과 분석 방법은 자유수면 가압 흐름의 공존과 어떤 상황에 대한 부정류의 현상에 의해 달라지므로 인터페이스의 비정상적인 전파가 반드시 고려되어야 하며, Saint-Venant 방정식 또는 개수로 흐름의 지속성과 운동량 균형 방정식은 보존형 벡터 방정식으로 기술될 수 있음

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial t}+\frac{\partial F(\vec{U})}{\partial x}=S(\vec{U}) \qquad (2.3.16)$$

$$\vec{U}=\begin{bmatrix}A\\Q\end{bmatrix} \qquad F(\vec{U})=\begin{bmatrix}Q\\\frac{Q^2}{A}+gI\end{bmatrix} \qquad S(\vec{U})=\begin{bmatrix}0\\gA(S_0-S_f)\end{bmatrix} \qquad (2.3.17)$$

여기서, A는 수로의 단면적(m^2), Q는 유량(m^3/s), g는 중력가속도(m/s), I는 단면의 초기 관성모멘트, S_0는 파이프의 경사, S_f는 Manning 방정식을 사용하여 평가된 마찰 경사, R_h는 경심

$$S_f=\frac{(nQ)^2}{A^2Rh^{4/3}} \qquad (2.3.18)$$

○ Saint-Venant 방정식은 부정류, 질량과 운동량 방정식에 개수로의 흐름에서만 적용되며, 임의의 수로 횡단면에서 기본적인 전파속도 c_w는 다음과 같음

$$c_w=V\pm\sqrt{\frac{gA}{T}} \qquad (2.3.19)$$

여기서, V는 유속(m/s), T는 수로의 상단 폭(m)

○ 이 흐름 방정식은 가압 흐름 도착 전에 하수구에서 발생하는 부정류, 가압 흐름을 설명하는데 적용 가능하며, Cunge와 Wegner은 파이프 상단의 가상 슬롯을 소개

○ 훨씬 더 큰 가압 유량 표면파 민첩함이 달성되도록 슬롯의 폭은 선택될 수 있고 동일한 집합의 방정식은 유수체계 전이를 해결하기 위해 적용될 수 있으며, 폭은 좁게 유지되어야 하며, 연속방정식의 효과는 크지 않음

○ 가장 큰 장점은 다른 흐름 체제 영역이 인터페이스 추적 모델과는 반대로 동일한 집합의 방정식과 함께 해결된다는 것이지만, Preissmann 슬롯 방법의 단점은 수위나 압력이 하강할 때 파이프 정부 아래로 떨어질 수 있지만, 그 위치에서 배출점은 없음

○ 실험 이후, 시스템은 완전히 가압이 되자마자 자유표면 흐름 영역으로 되돌아오지 않으며, 어떤 상황에서도 모델의 완전한 실행은 배출이 허용되는 곳에서 별개의 위치에서만 공기 방출이 필요

③ 핵심 이론 및 적용사례 검토

○ 관 내 물-기체 이상류 해석을 위한 수치모형 개발의 주요 이론 및 개념을 확립하기 위해 기존 국내외 유관 문헌을 분석하고, 몇 건의 문헌 중 모형 개발에 유용하다고 판단되는 아래 논문 내용을 요약

○ Kerger 등(2011)은 'A fast universal solver for 1D continuous and discontinuous steady flows in rivers and pipes' 연구에서 하천, 파이프, 수리구조물 등의 넓은 공간적 범위를 아우르는 1차원 정상류 해석모형을 개발

○ 가압 흐름의 경우 일반적으로 연속방정식과 폐관 내의 운동방정식으로부터 유도된 수격 방정식으로 기술하며, 1차원 Saint-Venant 방정식에 폐관 상부에 가상의 슬롯을 더한 Preissmann slot 모델을 사용하면 가압 흐름을 계산할 수 있음

○ 물이 관 단면을 꽉 채운 후부터는 개념적인 자유수면 흐름으로 전환되며, 중력파의 속도인 $c=\sqrt{gA/T_s}$의 파속으로 이동하고 슬롯의 폭(T_s)은 중력파의 속도와 수격 파속(a)이 같다는 식에 의해서 $T_s=gA/a^2$으로 얻어지게 되며, a는 무한히 긴 굳은 관의 경우 일반적으로 500~1,414 m/s의 범위를 가지고, 따라서 T_s는 보통 10^{-4}에서 10^{-9} m의 폭으로 부여

○ 그림 2.3.21은 자유수면 흐름, 가압 흐름 및 대기압보다 낮은 압력을 받는 가압 흐름 등 다양한 흐름 조건에 따른 Preissmann slot의 적용 형태를 요약한 것으로, 관이 물로 꽉 채워지기 이전까지(가로축인 무차원 수심과 세로축의 흐름 면적이 1이 될 때까지) 자유수면을 가지는 개수로 흐름으로 간주

○ 물이 더 채워지게 되면 좁은 폭(T_s)을 가지는 슬롯 내부에 물이 차게 되어, 슬롯 내의 수심은 급상승하지만, 면적은 서서히 증가하는 점선 영역의 흐름 상태를 유지

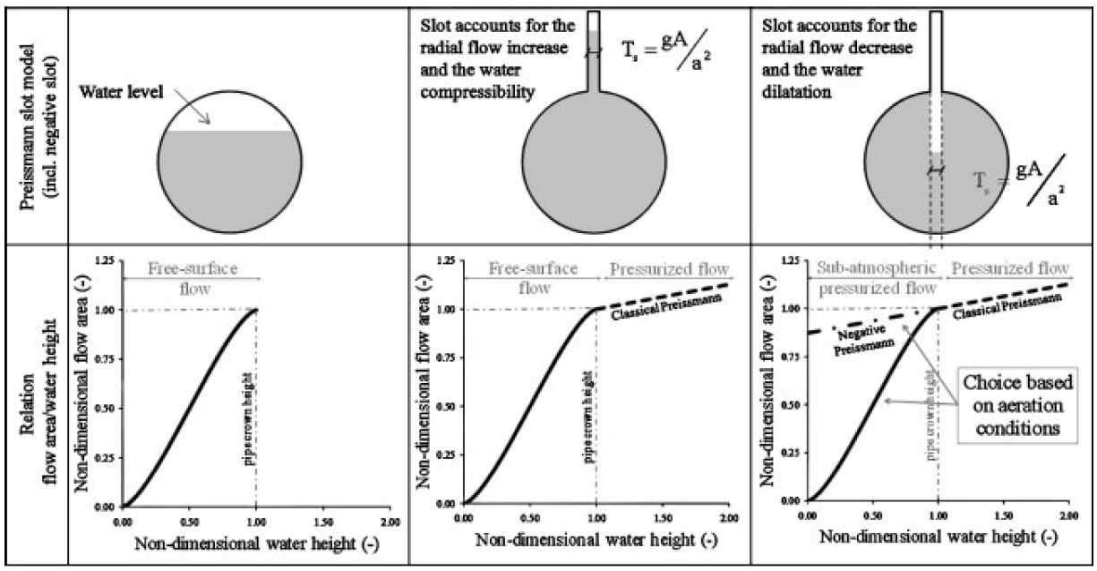


그림 2.3.21 다양한 흐름 조건에 따른 Preissmann slot 기법의 적용(Kerger et al., 2011)
(좌 : 자유수면 흐름, 중: 가압 흐름, 우: 대기압보다 낮은 압력을 받는 가압 흐름)

④ 가압흐름 해석을 위한 수학적 모형 개발

○ Preissmann slot 방법은 만관된 관수로의 상부에 가상의 슬롯(튜브)이 직립되어 있다고 가정하여 개수로 흐름 해석기법으로 관수로 흐름을 모사하는 기법으로 관의 배수용적을 초과하는 유량이 유입되는 경우 가상의 슬롯까지 흐름이 차오르게 되며, 이 경우 그림 2.3.22와 같이 공간 영역을 구분하기 위한 h_p, h_s, b_s 등의 변수가 필요

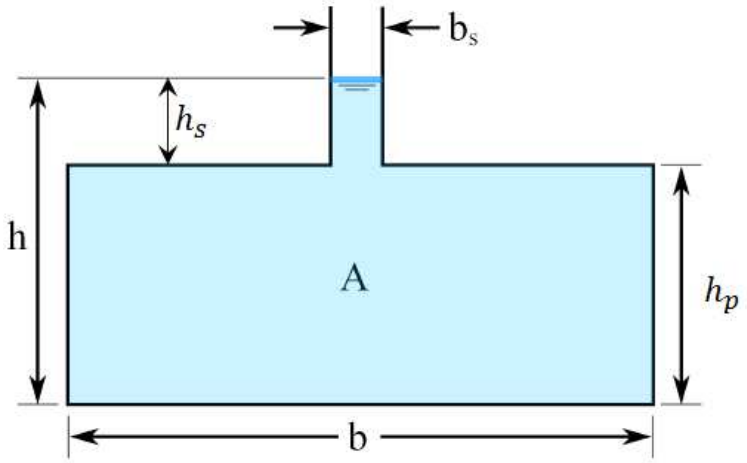


그림 2.3.22 가압 흐름 모의를 위한 변수

○ 슬롯에서의 물의 전파 속도를 수격작용(water hammer)에 의한 전달속도(C_{WH})와 동일하다고 가정하면 다음 식이 성립

$$c = \sqrt{gh_s} = \sqrt{g\frac{A}{b_s}} = c_{WH} \qquad (2.3.20)$$

$$\therefore b_s = \frac{gA}{c_{WH}^2}$$

○ 관의 규격에 해당하는 A는 기지값이고, 수격작용에 의한 전달속도(C_{WH})는 매개변수로 간주하면 위 식으로 b_s의 개략적인 값을 산정할 수 있음

○ 가압 흐름(pressurized flow)을 해석하기 위한 지배방정식은 수심을 $h = h_p + h_s$로 치환하여 구성되며, 이 경우 h_p는 상수이므로 편미분값이 0이 되어 최종적으로 그림 2.3.23과 같은 연속방정식과 운동량 방정식을 사용

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u\frac{\partial h}{\partial x} + h\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial h}{\partial y} + h\frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} = -g\frac{\partial (H+h)}{\partial x} + \nu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) - \frac{gn^2\sqrt{u^2+v^2}}{h^{4/3}}u$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} = -g\frac{\partial (H+h)}{\partial y} + \nu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) - \frac{gn^2\sqrt{u^2+v^2}}{h^{4/3}}v$$

$$h = h_p + h_s$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial h_s}{\partial t}$$

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{\partial h_s}{\partial x}$$

$$\frac{\partial h}{\partial y} = \frac{\partial h_s}{\partial y}$$

$$\frac{\partial h_s}{\partial t} + u\frac{\partial h_s}{\partial x} + (h_p + h_s)\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial h_s}{\partial y} + (h_p + h_s)\frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} = -g\frac{\partial (H+h_s)}{\partial x} + \nu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) - \frac{gn^2\sqrt{u^2+v^2}}{(h_p+h_s)^{4/3}}u$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} = -g\frac{\partial (H+h_s)}{\partial y} + \nu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) - \frac{gn^2\sqrt{u^2+v^2}}{(h_p+h_s)^{4/3}}v$$

그림 2.3.23 가압 흐름 해석을 위한 지배방정식의 수정

⑤ 개발 모형의 적용

○ 그림 2.3.24와 같이 관 높이를 초과한 물이 흐르는 경우 잉여유량은 슬롯에 채워지게 되어 가압 흐름 조건을 유지한 채 하류로 방류되며, 가상의 직사각형 단면 수로를 대상으로 앞서 소개한 개발 모형을 적용

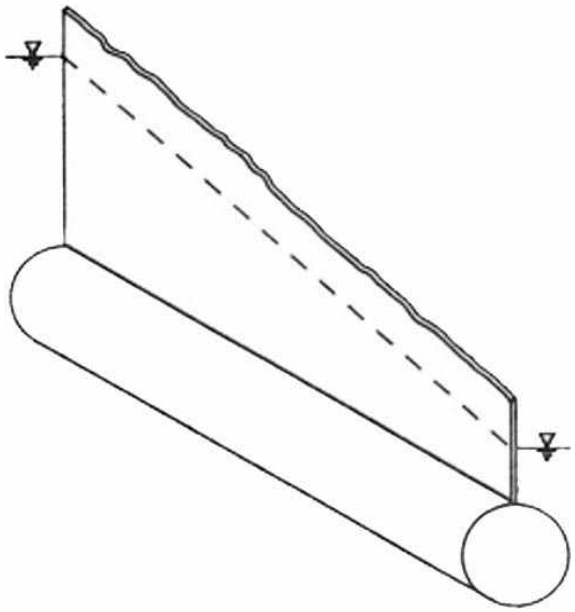


그림 2.3.24 Preissman의 슬롯 모델 개념도

○ 개발한 가압 흐름 해석 수치모형의 적용을 위해 그림 2.3.25와 같이 길이 100 m, 폭 2 m, 경사도 1/100의 직사각형 수로를 제작하고, 관 높이는 1 m로 설정

○ x=0 지점에서 유량 10 m^3/s가 유입되고 x=100 m 지점에서 수심 2 m를 유지하는 상류단 유속, 하류단 수위 경계조건을 부여

○ Δx=0.4 m, Δy=0.2 m로 공간 영역을 이산화하여 2,761개의 절점과 2,500개의 사각망을 가지는 유한요소망을 구성하고, 모의 시간 간격은 Δt=0.1 s로 설정해 Cr 수는 0.65로 1 이하가 되도록 하였으며, 마찰이 작은 매끈한 관 벽면 조건을 할당하기 위해 조도계수는 0.015로 함

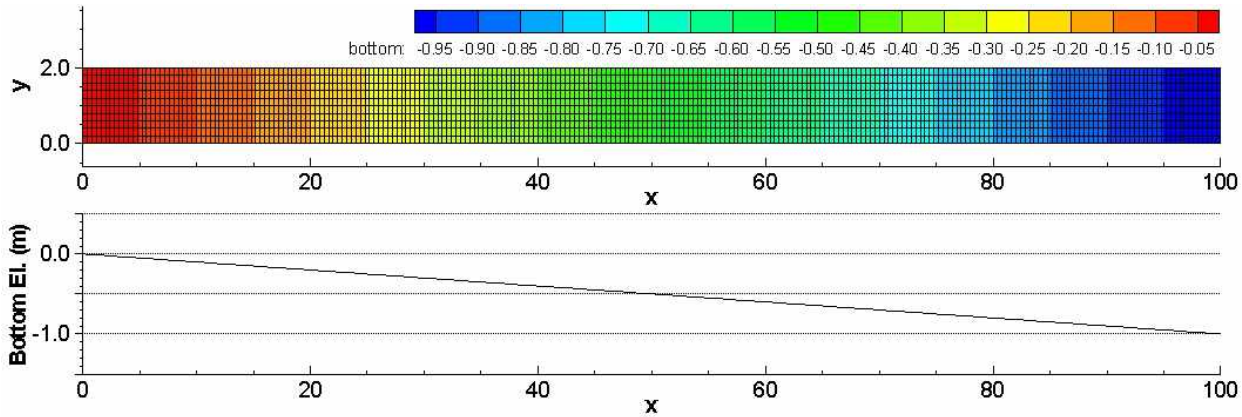


그림 2.3.25 개발 모형 적용을 위한 지형 및 격자 구성

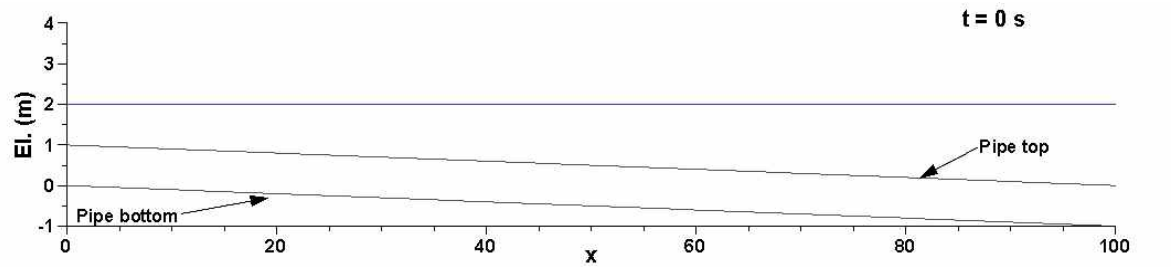
○ 그림 2.3.26은 상기 조건을 가지는 수로에서 시간에 따른 슬롯 내 수면 변화를 도시한 것으로 직사각형 단면 수로의 바닥(pipe bottom)과 관 높이 1 m에 의한 상부면 (pipe top)이 표시되어 있고, 모의 시작 이후 하류 경계단에 흐름이 전파되기 전인 12 s까지 4 s 간격으로 수면 변화를 나타내었으며, 만관된 이후 슬롯을 통해 물이 전달되는 가압 흐름 현상이 올바르게 모의되고 있음을 확인할 수 있음

○ 그림 2.3.26의 수면을 가지는 순간 슬롯 내부의 정수압 분포를 계산해 그림 2.3.27에 나타내었으며, 모의하는 흐름은 폭 방향으로는 흐름 특성 변화가 없는 전형적인 1차원 흐름 형태이므로 횡방향으로는 동일한 압력 분포를 보임

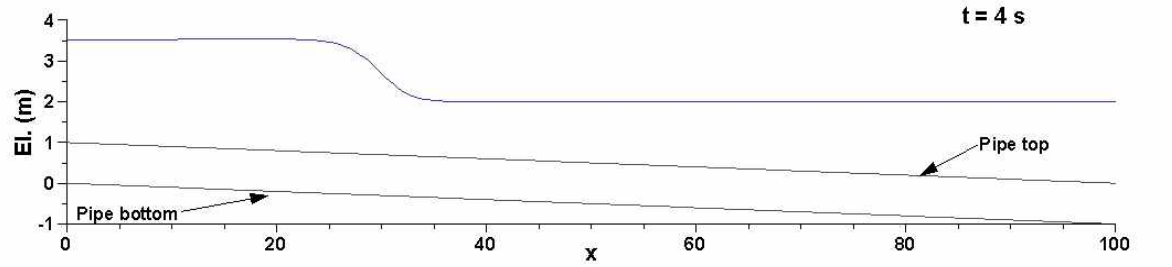
○ 그림 2.3.27은 슬롯 바닥으로부터 연직 방향으로 측정된 수면과 물의 밀도 및 중력가속도의 곱을 구하여 계산된 등압력도로 그림 2.3.26d와 같이 x=80 m 부근의 선단부에서 슬롯 내 수면이 가장 높이 차올라 압력도 가장 크게 나타남

○ 그림 2.3.27은 앞서 언급한 경계조건을 가지는 단파 흐름이 하류단에 도달한 후 반사파가 상류로 전달되어 개수로 형태의 흐름과 가압 흐름이 공존할 때의 수면 형상과 흐름 영역 구분을 수록

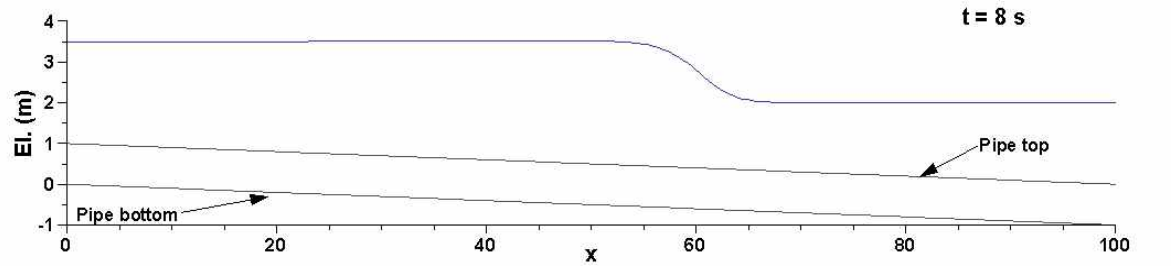
○ t=56 s에서 x=46 m 부근을 경계로 우측 붉은색으로 표시된 가압 흐름과 좌측 파란색으로 구분된 개수로 흐름이 나타나고 있으며, 이후 파가 상류 방향으로 더욱 이동하여 그림 2.3.28b와 같이 t=70 s에서 x=38 m 단면을 경계로 우측 붉은색으로 표시된 가압 흐름과 좌측 파란색으로 구분된 개수로 흐름이 동시에 발생하고 있으며, 개발한 수치모형이 이 현상을 적절하게 모의하고 있음을 확인할 수 있음



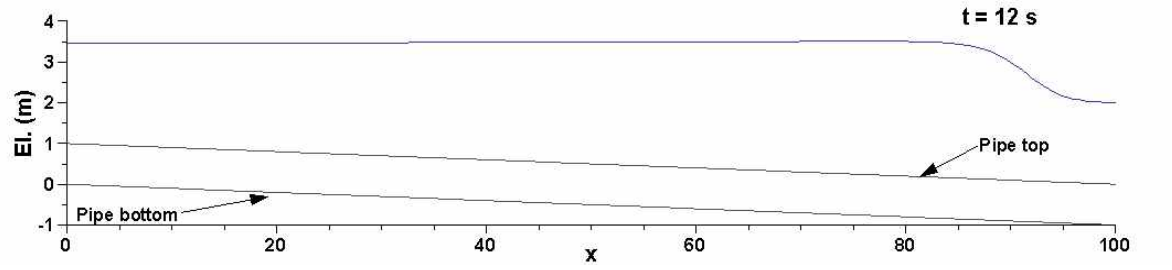
(a) t = 0 s



(b) t = 4.0 s

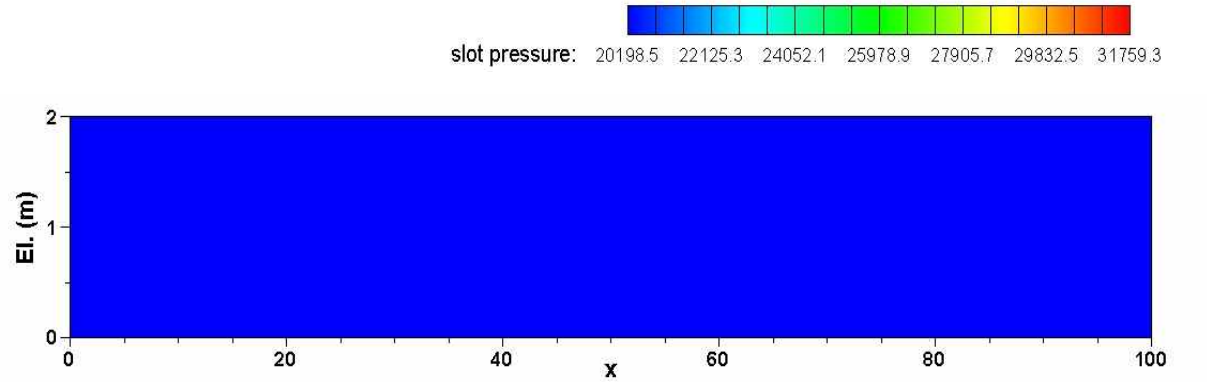


(c) t = 8.0 s

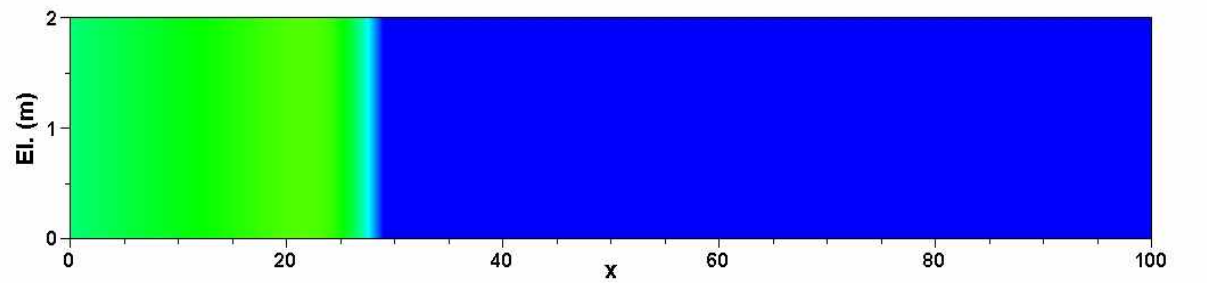


(d) t = 12.0 s

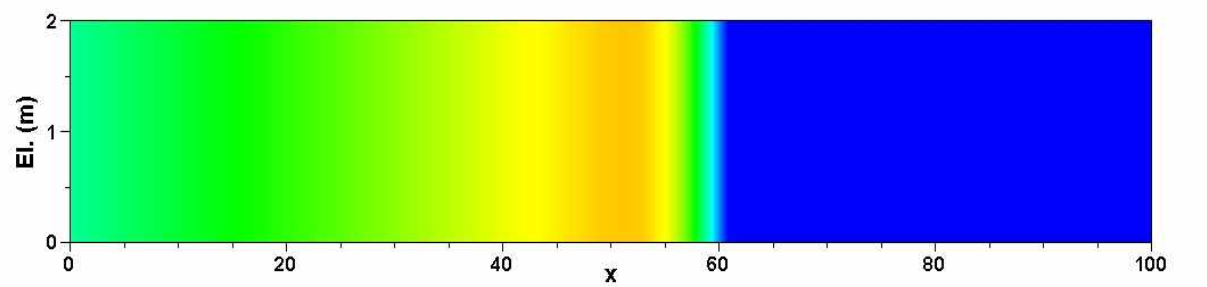
그림 2.3.26 시간에 따른 슬롯 내 수면 변화



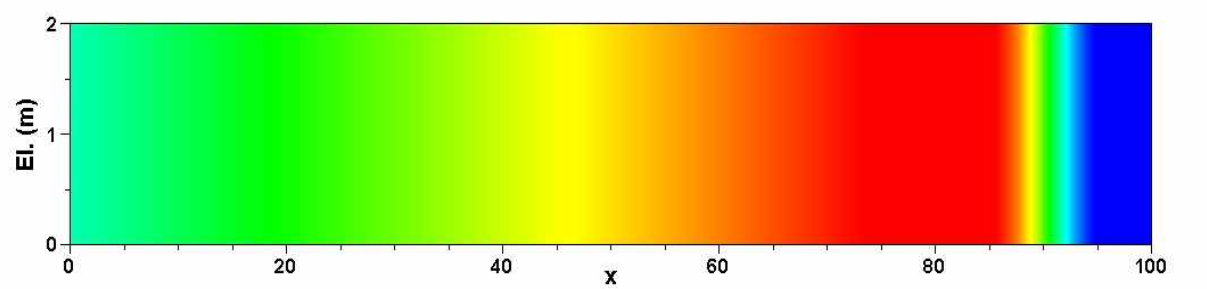
(a) t = 0 s



(b) t = 4.0 s

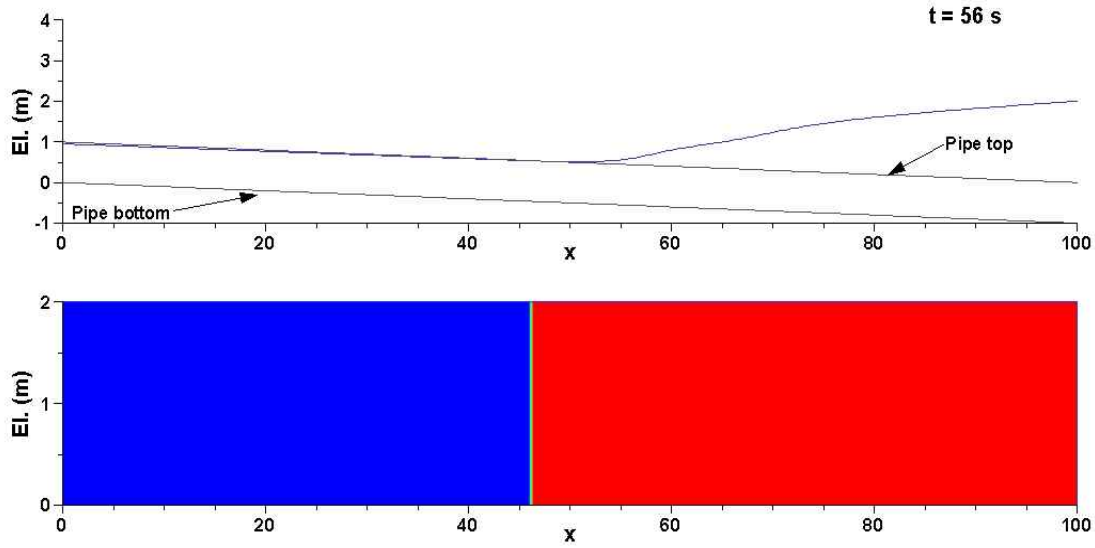


(c) t = 8.0 s

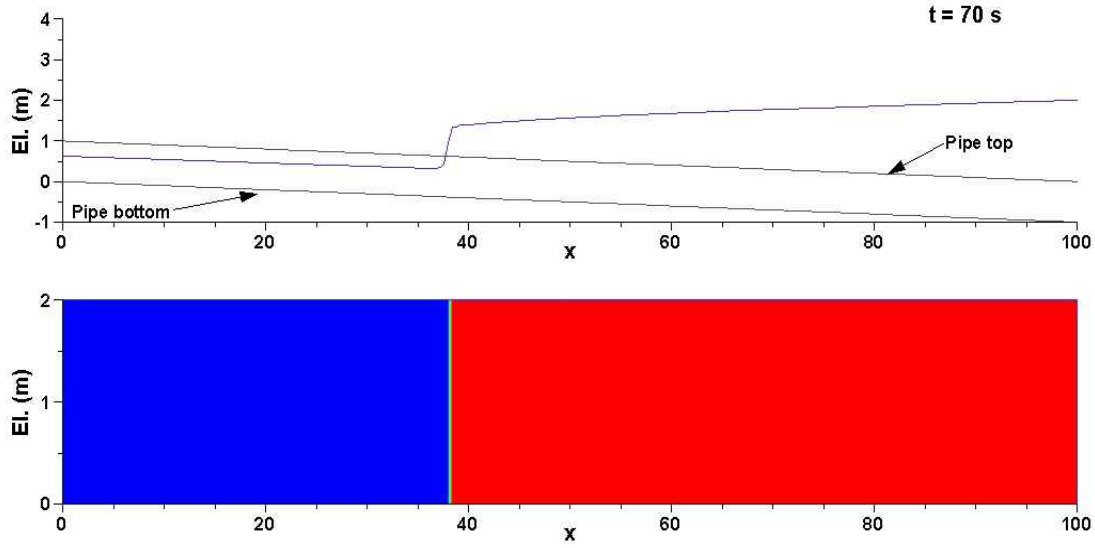


(d) t = 12.0 s

그림 2.3.27 슬롯 내 압력 분포(단위: N/m^2)



(a) t = 56.0 s



(b) t = 70.0 s

그림 2.3.28 개수로 흐름과 가압 흐름 공존 시 공간적 수면 분포

(2) 터널계통 수리성능 평가기법 개발

(가) 대심도터널 내부 유속분포 및 이상류 거동 모형실험

○ 본 연구에서는 PTV 기법을 적용해 수평관 내 유속분포를 측정하고, 기 수행된 전기전도계를 이용한 수평관 내 기포 측정결과를 이용해 기포의 통과길이(passing length)에 따른 빈도수 및 공기-물의 비에 따른 기포분율(void fraction)에 대한 분석을 실시

○ 대심도터널 내부에서의 이상류 거동 특성을 구명하기 위한 공기 유입량과 흐름 조건에 따른 수평관 내에서의 물-공기 이상류 거동특성을 실험적으로 구명함으로써 대심도터널 내 이상류 거동 예측 및 제어를 위한 기초자료를 제공

① 실험장치

○ 실험장치는 길이가 약 7 m이며 PVC와 투명아크릴 재질의 내경 100 mm 원형관을 사용, 유량공급시설과 영상촬영을 위한 가시화 구간 및 이상 흐름 측정기(two-phase flow meter)를 이용한 기포 측정구간으로 분류

○ 유량공급시설은 원활한 유량공급을 위해 병렬로 연결된 2개의 수조(400 L)와 펌프(WILO PSV-1080B, 1750 rpm)를 사용하고, 공기압축기(Air compressor)를 이용해 실험장치 내 공기를 주입하였으며, 공급되는 물과 공기 유량을 측정하기 위한 각각의 전자유량계를 설치

○ 관을 통과하는 물과 공기의 유량은 조절장치 및 우회관을 통해 제어하였으며, 가시화 구간에는 DSLR 카메라(Nikon D3300)와 Micro Lens(NIKKOR 60mm f2.8G)를 사용해 영상을 촬영

○ 투명아크릴로 제작한 사각형 상자(chamber)를 관에 부착하고 물을 채워서 영상촬영에서 시각적 왜곡을 최소화하였고, 기포 측정구간에는 전기전도계의 일종인 이상 흐름 측정기(KANOMAX two-phase flow signal processor system 7931)을 사용하였으며, 탐침의 미세한 연직 이동 및 정확한 위치조정을 위해 수동이송장치를 설치하고, 측정된 전기신호는 신호 증폭기 및 A/D 변환기를 거쳐 디지털 자료로 컴퓨터에 저장

○ 기포 측정시스템의 최대 시간분해능은 1/1000초

② 실험방법 및 조건

○ PTV는 유체 중에 추적입자(tracer particle)를 투입한 후 레이저 광선을 흐름 중에 비추면 입자가 레이저 광선을 반사하게 되는데, 본 연구에서는 추적입자 대신 관내의 기포를 추적입자로 하여 PTV 기법을 적용

○ 반사된 빛을 카메라를 이용해 촬영하고, 영상에 기록된 입자의 궤적을 통해 구해진 변위를 노출 시간으로 나누어 유속을 구할 수 있음

○ PTV는 연속된 프레임에서 입자의 미세한 움직임을 포착해 입자의 궤적을 추적하는 기법으로 촬영된 영상은 각 프레임으로 분리하고 이미지 개선 및 이진화(binarization)해 입자의 변위를 추적하고 속도를 계산

○ 유동장의 국소속도는 어느 한 점을 통과하는 추적입자가 미소 시간 간격 동안 이동한 미소 직선거리 및 방향을 이용해 구할 수 있음

○ $\Delta x/\Delta t$를 실제의 유동 속도에 근사시키려면 이동 변위가 충분히 작아야 하므로 입자가 그리는 궤적은 직선성 등간격성이 보장되어야 하며, 각 흐름 조건별 유속값 중 유의수준 0.05를 기준으로 이상값(outlier)을 제거

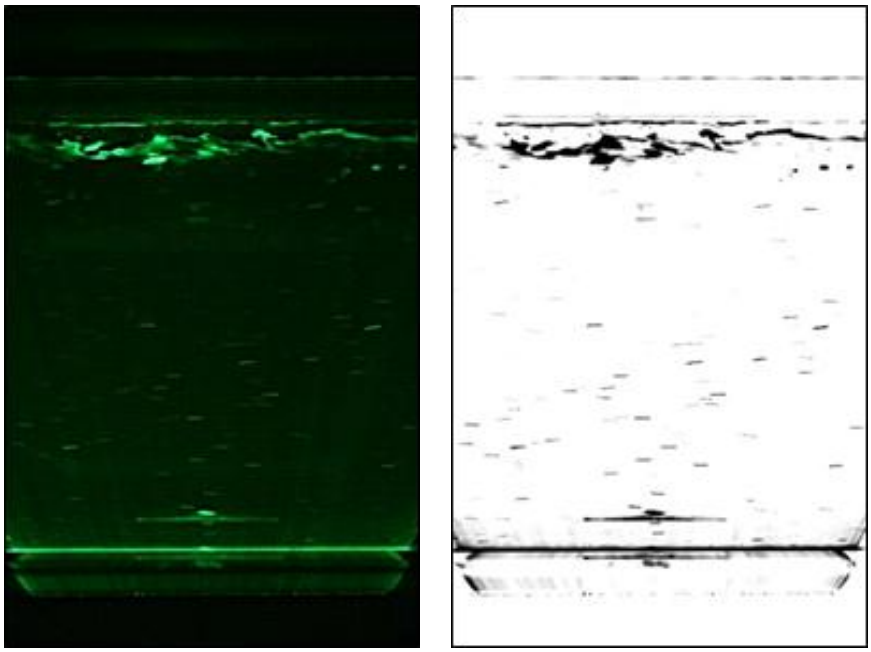
○ 실험조건은 물과 공기의 유량을 기준으로 선정하였으며, 공기와 물의 유량 조건은 표 2.3.9에 제시된 바와 같음

○ 상온 1기압 조건에서 물공급량(Water Flux)과 공기공급량(Air Flux)은 각각 500~1500 L/min과 5~45 L/min의 범위에서 실험조건을 설정하였으며, 이상류 측정기를 이용한 기포 측정은 트래버스를 이용해 전기전도계 탐침의 위치를 연직 이동시키면서 측정

○ 각 조건별 측정시간은 30초이며, 자료의 측정속도(sampling rates)는 1,000 Hz이며, 기포는 부력으로 인해 관 상부로 떠오르려는 특성이 있으므로, 흐름 내 기포가 주로 분포하는 관 상부에서의 기체 유동을 파악할 수 있도록 측정지점을 선정

○ 관의 상단을 기준으로 하단 방향으로 5 mm 이격된 위치를 시점으로 아래로 3 mm 간격으로 총 8개의 지점에서 측정을 수행하였으며, 그림 2.3.30은 수평관 내 난류 흐름 및 구분 기호를 나타낸 것이며, 여기서 y는 관의 상부에서 아래 방향으로의 거리이고, r은 관의 중심부터의 거리, D는 관 직경을 나타냄

○ 이상흐름측정기로 측정된 값은 통해 공기와 물의 occurrence 를 구분하기 위해 후처리가 필요며, 원자료(raw data)에 대한 FFT(fast fourier transform)필터링을 통하여 보정하고, 얻어진 신호들을 기울기의 부호에 따라서 직사각 형태로 변환하여 공기와 물에 해당하는 신호로 이진화(binarization)하여 관내 측정위치에 따른 기포분율(void fraction)과 기포 길이별 빈도수를 계산하여 기포의 흐름거동을 분석



(a) original (b) improved & binarized

그림 2.3.29 PTV를 위한 이미지 변환

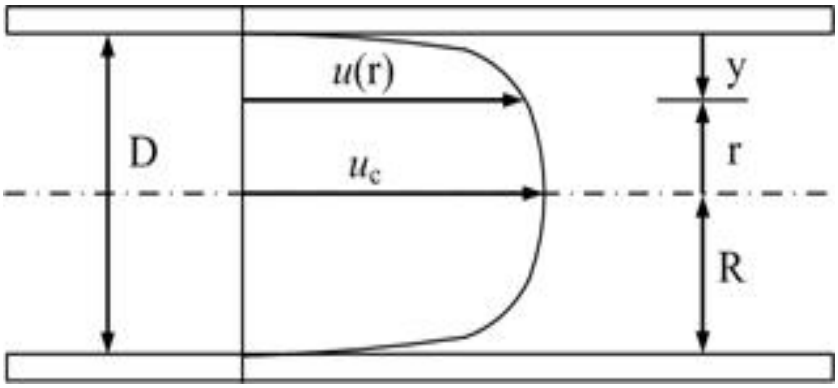


그림 2.3.30 수평관 내 난류 흐름 및 구분 기호

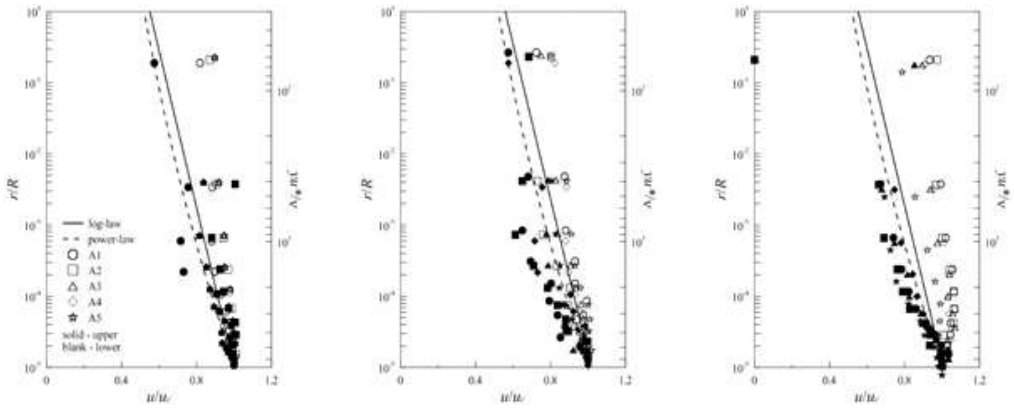
표 2.3.9 실험조건

Case	Water flux (l/min)	Case	Air flux (l/min)
W1	500	A1	5
W2	700	A2	15
W3	900	A3	25
W4	1100	A4	35
W5	1300	A5	45
W6	1500	-	-

③ 실험 결과 및 분석

i. 수평관 내 유속분포(Velocity Profile)

- 그림 2.3.31은 흐름 조건에 따른 수평관 내 유속분포 결과를 나타낸 것이며, 관 중심을 기준으로 상부(upper)와 하부(lower)로 구분하고, 대수법칙(log-law)과 지수법칙(power-law)를 기준으로 유량(Water Flux, WF) 및 공기량(Air Flux, AF) 조건에 따른 유속을 나타냄
- 가로축은 관 중심에서의 기포 속도(u_c)로 무차원화한 각 지점에서의 기포 속도(u)이며, 세로축은 관의 반지름(R)으로 무차원화한 관 중심으로부터의 거리(r)
- solid와 blank는 각각 상부와 하부에서의 유속을 의미하며, 표 2.3.10은 상·하부로 구분하여 대수법칙에 의한 유속과 실험에 의한 유속에 대한 RMSE(Root Mean Squqre Error) 값을 비교
- WF 500 L/min일 때, 관의 중심부에서는 대수법칙과 지수법칙에 따른 유속과 유사한 값을 보이지만 관 벽면과 가까운 곳에서는 더욱 빠른 것으로 나타났으며, WF 700 L/min의 경우 관의 상부에서는 대수법칙과 지수법칙에 의한 유속보다 작고, 하부의 경우 유사한 것으로 나타남
- WF가 증가함에 따라 상부의 유속은 감소하고 하부는 증가하는 경향을 보였으며, WF가 증가함에 따라 AF에 따른 유속분포 차이가 감소
- 이러한 분포는 기포가 부력에 의해 관 상부에 주로 존재하기 때문으로 판단되며, 실험 결과 일반적인 관 내의 유속분포와 같이 관 중심을 기준으로 대칭 형태가 아닌 비대칭적인 유속분포를 나타내며, 이는 수평관 내의 흐름이 단일 유체(water)가 아닌 물과 공기의 상호작용으로 인한 이상류 흐름의 영향인 것으로 판단



(a) W1 (500 l/min) (b) W2 (700 l/min) (c) W3 (900 l/min)

(d) W4 (1,100 l/min) (e) W5 (1,300 l/min) (f) W6 (1,500 l/min)

그림 2.3.31 흐름 조건별 수평관 내 유속분포

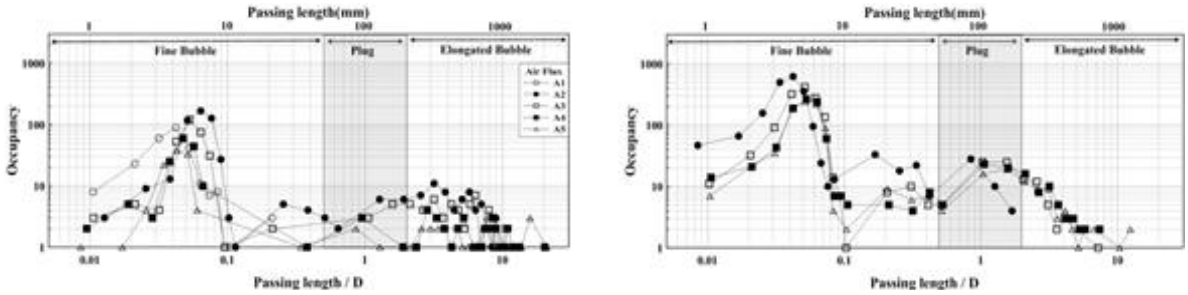
표 2.3.10 흐름 조건별 대수법칙과 유속에 대한 RMSE값 비교

구분		A1	A2	A3	A4	A5
W1	Upper	0.064	0.081	0.033	0.042	0.032
	Lower	0.040	0.067	0.068	0.117	0.125
W2	Upper	0.121	0.114	0.069	0.063	0.032
	Lower	0.047	0.035	0.027	0.041	0.058
W3	Upper	0.068	0.089	0.060	0.032	0.069
	Lower	0.131	0.122	0.111	0.114	0.057
W4	Upper	0.076	0.099	0.052	0.026	0.062
	Lower	0.072	0.201	0.072	0.106	0.077
W5	Upper	0.055	0.056	0.095	0.093	0.052
	Lower	0.076	0.065	0.085	0.092	0.112
W6	Upper	0.053	0.047	0.084	0.064	0.035
	Lower	0.116	0.109	0.102	0.099	0.071

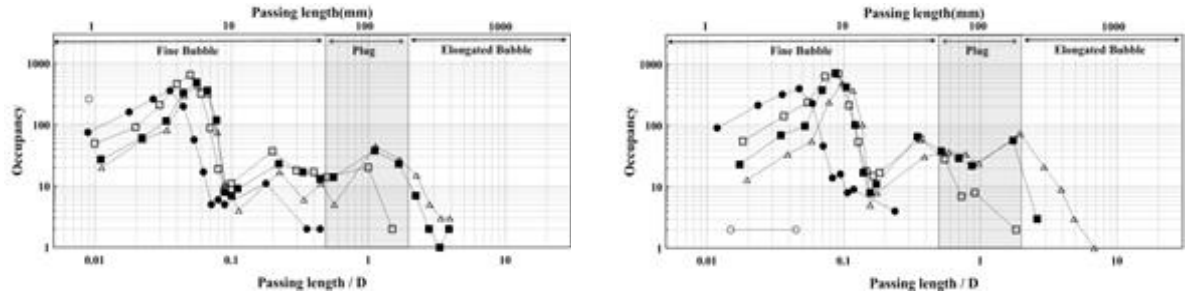
ii. 기포통과길이를 이용한 흐름 분류(Passing Length)

- 이상류 흐름에 대한 특성 파악을 위해 전기전도계를 이용해 관 상부의 연직 위치별 기포의 이동을 측정하고, 기포통과길이에 따른 흐름을 분류
- 그림 2.3.32는 흐름 조건별 r/R=0.9 지점에서 기포의 통과길이(passing length)에 따른 측정 빈도수 및 흐름 분류를 나타낸 것으로, 여기서 통과길이는 흐름 내 기포가 탐침을 통과하는데 소요되는 통과시간(passing time)과 앞선 PTV 실험을 통해 산정된 유속을 이용해 구했으며, 통과시간은 30초 동안 1,000 Hz로 측정된 전기전도도 측정값에서 기포가 연속적으로 나타나는 발생 횟수(occurrence)를 통해 산정
- 측정에 이용된 전기전도계의 최대응답속도 (1 ms)와 통과 시간를 고려하여 WF에 따른 측정이 불가능한 미소 기포는 분석에서 제외
- 본 연구에서는 기포의 흐름 방향 길이 규모를 기준으로 관 내 공기-물 이상류 흐름의 양상을 구분할 수 있는 정량적 기준으로 관 직경의 배수를 적용
- 관 직경(D)의 0.5~2배에 해당하는 통과길이 영역을 플러그 영역(plug region), 관 직경의 2배를 초과하는 통과길이 영역은 관 상부에서 가늘고 길게 이어진 액체와 분명하게 구분되는 경계를 가지고 흐르는 공기층을 의미하는 확장기포영역(elongated bubble region)으로 구분하였으며, 관 직경의 0.5배 이하의 길이는 기포영역으로 구분
- 가로축은 관 직경에 대해 무차원화한 기포통과길이이며, 세로축은 해당 길이의 기포가 발생한 빈도를 나타낸 것임
- 그림 2.3.32a는 WF 500 l/min 조건에서 기포, 플러그, 확장기포가 모두 존재하는 것을 확인할 수 있으며, 기포 영역에서의 최빈 통과길이는 약 6 mm로 흐름 내에 주로 분포하는 기포의 길이 방향 크기는 약 6 mm 내외에 이른다고 판단할 수 있고, AF 조건에 따라서 최대 약 1 m 정도의 길이를 가지는 기포 흐름도 발생함을 확인
- 그림 2.3.32a~그림 2.3.32f의 비교를 통해 WF 증가에 따른 흐름 내 공기 유동 양상의 변화를 확인

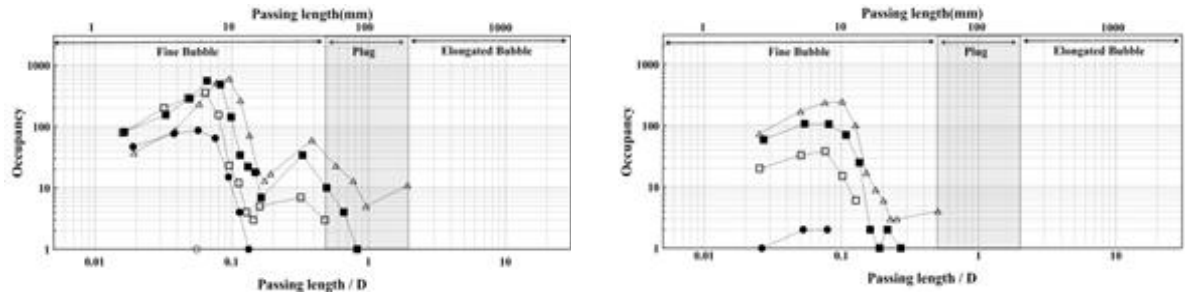
- 그림 2.3.32a～그림 2.3.32d에서는 기포, 플러그, 확장기포가 모두 발생하고 있으나, WF 1300 l/min에서는 기포와 플러그만 발생하고 확장기포는 거의 발생하지 않으며 WF 1500 l/min에서는 확장기포와 플러그가 발생하지 않고 단지 기포만 발생하는 것을 확인
- 이러한 WF 증가에 따른 기포 길이 규모의 변화는 두 매질의 물리적 특성 차에 의한 동역학적 거동으로 판단
- 관 내 WF 및 이동속도 증가는 수체 내 상향부력을 가지는 플러그 또는 확장기포와의 속도 차이 및 경계면 마찰을 증가시키고, 이에 따라 확장기포는 수체와의 경계면 파고가 커지면서 여러 개의 플러그로 분리되며 플러그는 체적이 작은 여러 개의 기포로 잘게 나누어지는 현상이 발생
- 따라서 WF가 증가함에 따라 확장기포는 플러그로, 플러그는 기포로 규모가 작아지는 양상을 보이는 것으로 파악
- 각 WF 조건에서의 기포 영역 내 최빈 통과길이를 비교해보면, 앞서 수체 내 공기 유동의 길이 규모가 작아지는 경향과 상반되는 양상을 확인할 수 있으며, 그림 2.3.32a에서 최빈 통과길이는 약 6 mm이지만 WF가 증가함에 따라 최빈 통과길이가 점차 증가해 그림 2.3.32f에서는 10 mm를 초과
- WF 변화에 대한 최빈 통과길이 증가 양상은 수체 흐름율 증가에 따른 기포 표면마찰력 증가로 기포 형상이 원형에서 흐름 방향으로 긴 타원형으로 변화하면서 발생한 결과로 추정
- 동일한 WF 조건에서 AF를 증가시키면 통과길이가 증가하는 경향을 보이고, 그림 2.3.32a～그림 2.3.32f의 모든 WF 조건에서 AF가 증가할수록 플러그 또는 확장기포 영역에서 측정된 통과길이가 길어지고 발생빈도가 높아지는 것을 확인
- 이러한 현상은 증가된 AF로 공기의 체적흐름율(volume flux)이 높아지면서 단위면적당 통과체적이 증가하기 때문으로 판단되며, 본 연구에서 수행된 실험조건 범위에서는 AF의 변화보다는 WF의 변화가 공기 유동 양상에 더 큰 영향을 미치는 것을 확인
- 그림 2.3.33은 특정 공기량 조건(AF 45 L/min)에서 WF 변화에 따른 흐름 양상을 보여주고 있으며 WF가 증가함에 따라 공기 유동 길이 규모가 작아져 확장기포, 플러그, 기포가 같이 발생하는 흐름에서 점차 기포가 주를 이루는 양상으로 변화함을 확인
- 공기유동의 공간적 분포 또한 WF가 증가함에 따라 점차 관 단면 전체로 확대되어 분무 흐름으로 바뀌는 것을 확인할 수 있으며, 이러한 흐름 양상의 변화는 그림 2.3.33을 통해 파악된 결과와 일치
- 분무 흐름은 수체의 흐름율이 크고 유속이 빠르며 상대적으로 크기가 작은 기포가 흐름 내에 널리 분포하는 특성을 가지는데, 제시된 순간 영상을 통해 관 내에 널리 분포한 기포들을 시각적으로 충분히 확인 가능
- 관의 최상단부에서 공기와 물의 공급 유량에 따른 통과길이별 발생빈도를 보여주고 있으며, 이를 통해 각 흐름 조건에서 발생하는 기포 크기의 분포와 흐름을 구성하는 주요한 공기 흐름 형태와 흐름 양상을 파악
- 실험조건에 따라 흐름에 분포하는 기포의 크기 분포와 각 기포 크기별 발생빈도를 통해 주요한 기포의 규모와 그를 통한 공기 유동의 양상을 가늠할 수 있음



(a) W1 (500 l/min) (b) W2 (700 l/min)



(c) W3 (900 l/min) (d) W4 (1,100 l/min)

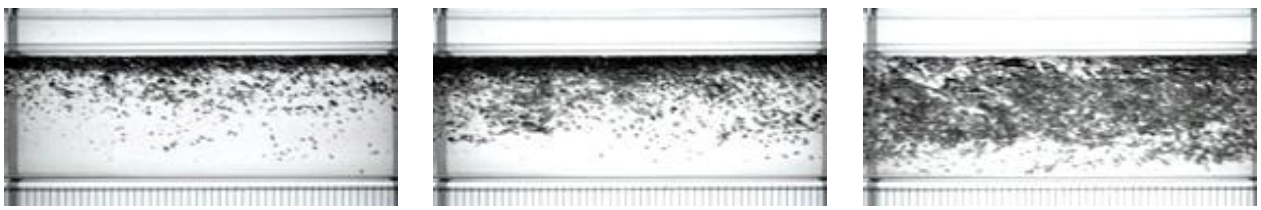


(e) W5 (1,300 l/min) (f) W6 (1,500 l/min)

그림 2.3.32 기포통과길이에 따른 측정빈도 및 흐름 분류



(a) W1 (500 l/min) (b) W2 (700 l/min) (c) W3 (900 l/min)



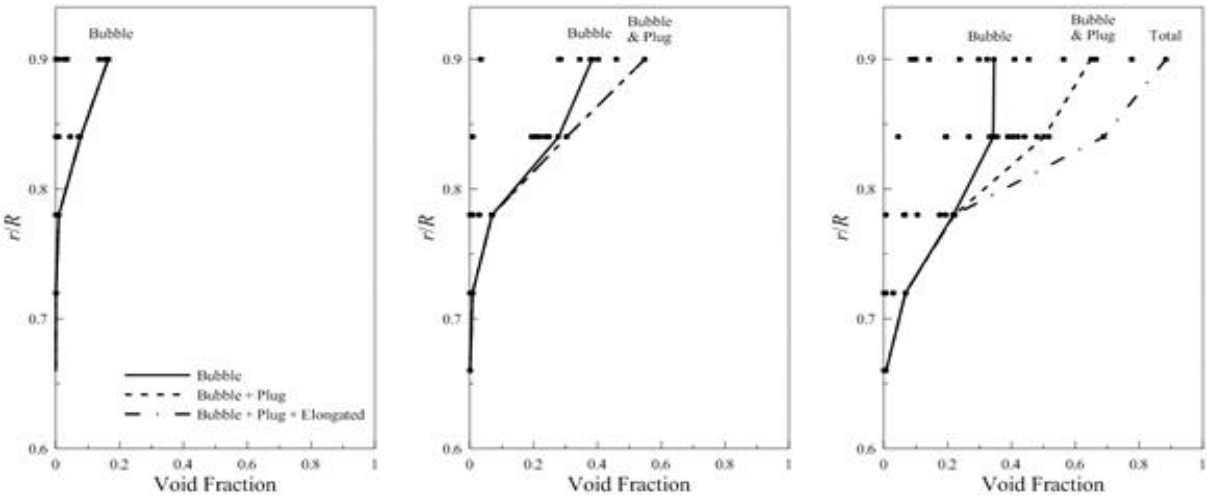
(d) W4 (1,100 l/min) (e) W5 (1,300 l/min) (f) W6 (1,500 l/min)

그림 2.3.33 유량 변화에 따른 흐름 패턴(A5-series: 45 l/min)

iii. 공기 - 물 비에 따른 기포분율

- 그림 2.3.34는 전체 실험조건에 대하여 측정 지점별 AF-WF 비에 따른 기포, 플러그, 확장기포의 기포분율(30초의 측정시간 중 각 종류의 공기 유동이 점유한 시간 비율, Void Fraction-VF)을 나타낸 것이며, 흐름 분류에 따른 각 지점별 최대 기포분율을 기준으로 범위를 구분

- 특정 지점에서의 기포분율은 총 측정시간에 대한 기포통과시간으로 산정
- 그림 2.3.34는 AF/WF가 0.0038~0.09 범위인 전체 실험조건을 5개의 그룹으로 구분해 지점별 기포 흐름을 분류하였으며, 실선은 기포, 점선은 기포 및 플러그, 1점 쇄선은 전체(기포, 플러그, 확장기포) 기포분율을 나타냄
- AF/WF<0.02의 경우 기포분율(VF)이 0.2 미만으로 적은 양의 기포 흐름만 존재
- 0.02≤AF/WF<0.03의 경우 관 최상부에서 기포 흐름과 플러그흐름이 존재
- 0.03≤AF/WF<0.04의 경우 r/R=0.84에서 기포 흐름과 플러그흐름, 확장기포흐름이 존재
- 그림 2.3.34c, 그림 2.3.34d의 경우 유사한 패턴을 나타내지만, 플러그흐름 및 확장기포흐름이 증가하고, AF/WF가 커짐에 따라 공간적으로 더 멀리 확장
- 그림 2.3.34e와 같이 0.05≤AF/WF<0.09의 경우 확장기포가 더 증가
- 특정 조건들에서 일부 다른 경향을 보이지만, 전반적으로 AF/WF 비에 따라 기포, 플러그, 확장기포 흐름 발생을 구분하는 정량적 기준을 찾을 수 있을 것으로 판단



(a) AF / WF < 0.02 (b) 0.02 ≤ AF / WF < 0.03 (c) 0.03 ≤ AF / WF < 0.04

(d) 0.04 ≤ AF / WF < 0.05 (e) 0.05 ≤ AF / WF < 0.09

그림 2.3.34 공기-물 비에 따른 각 기포유형별 기포분율

(3) 대심도터널 내부 공기거동 제어기법 개발

(가) 유입부와 수직관 등의 터널계통에서의 이상류 거동 모형실험

① 터널 내 이상류 거동의 이론적 배경

i. 관 내 공기의 형성(air pocket)

- 일반적으로 공기는 주변 액체보다 밀도가 낮아 공기의 부력으로 인해 기울기가 상승하며, 액체가 위로 기울어진 파이프를 통해 흐르는 경우, 공기와 액체는 모두 파이프의 기울기 위로 동일한 방향으로 흐르게 됨(그림 2.3.35)
- 하지만 하향 경사 파이프에 물이 흐를 때 공기 이동은 어느 방향으로든 흐를 수 있음
- 기울기가 비교적 작고 액체가 충분히 높은 속도로 흐르는 경우, 액체는 경사 위로 공기가 이동하는 것을 방지할 수 있고 공기를 아래 방향으로 밀어냄
- 수직관은 대게 터널의 환기 수단으로 설계되며, 공기가 환기됨에 따라 수직관의 압력이 초과한 상태에 있는 경우 물이 수두의 높이까지 유지되며, 포획된 공기가 수직관으로 들어감에 따라 상승하는 공기의 운동량은 액체를 상당한 거리까지 들어 올릴 수 있음
- 공기의 부력에 의해 이동되는 공기와 액체의 수직 이상 흐름은 공기가 수직관을 통해 방출됨에 따라 확립되며, 터널의 크기 및 환기되는 공기의 양에 따라, 수직 이상 흐름 상황은 터널 내 압력을 훨씬 초과하여 물을 들어 올릴 수 있음

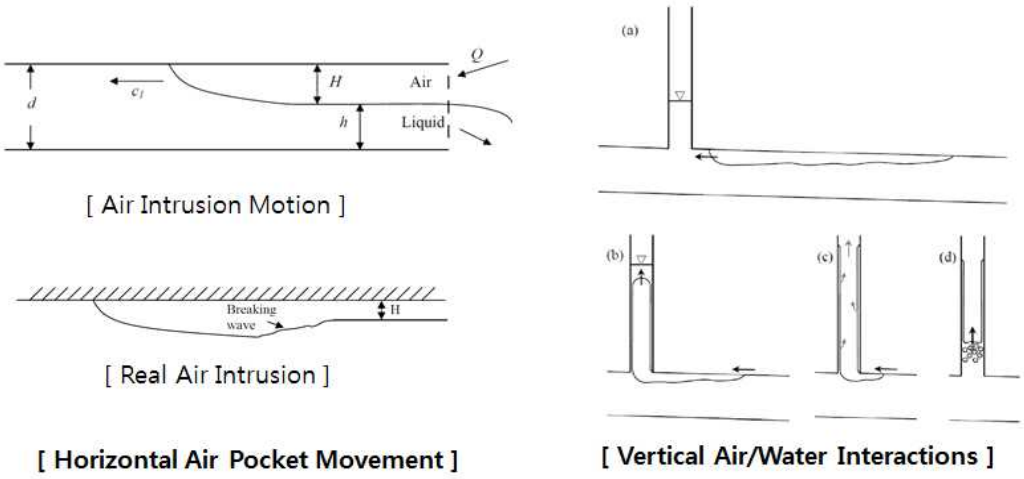


그림 2.3.35 관 내 공기의 형성

ii. 이상류 거동 관련 기존 연구

- Lewis(2011)는 수직관을 포함하는 실험을 통해 수직관 내 최대압력을 결정하는데 가장 영향을 미치는 변수를 확인하고, 그 결과를 단순화된 수치 모델과 비교
- 수직관의 최대압력은 수직관의 특성(지름)보다 주요시스템의 특성(유입유량, 초기수위)의 영향을 받음(그림 2.3.36)
- Choi et al.(2016)은 geyser 발생의 영향 인자를 도출하기 위해 공기를 고려한 1차원 수치 모델을 개발하고, 갇힌 공기의 압력에 대한 민감도 분석을 수행하였으며, 관의 직경비와 유입유량이 주요 인자로 도출됨
- 공기의 압축은 다양한 영향 인자의 복합적인 작용으로 인해 발현되기 때문에 다인자 분석을 수행하였으며, 관경비가 증가하면서 압력이 증가하고 초기수위 85%에서 발생 압력의 최대치가 나타남(그림 2.3.37)

- Jing Cong et al.(2017)은 수직관과 일정한 수두에 연결된 수평관으로 구성된 단순 배수 시스템의 물리적 모델에 대한 실험을 수행하였으며, 공기 포켓이 수평관으로 방출될 때 비디오 및 고속 카메라로 수평관 및 수직관의 에어 포켓 궤도를 측정하고, 압력은 수평관 끝부분과 수직관 하단에서 측정(그림 2.3.38)
- 외부의 압력 수두가 없으면 물이 채워진 수직관에서의 에어 포켓의 이동은 슬러그흐름과 유사하고, 자유표면에 대한 공기의 상승 속도는 거의 일정해 Taylor의 기포 속도에 가까우며 geyser는 관찰되지 않음
- 외부 압력 수두가 수평관에 적용될 때 커다란 수직관의 직경과 작은 공기량의 경우, 수직관의 에어 포켓 상승은 Taylor의 기포 속도와 유사하며 정수압과 동일하고, geyser는 관찰되지 않음
- 수직관의 직경이 작고 공기량이 큰 경우 공기 압착으로 인해 수직관에서의 공기 포켓 이동은 Taylor와 매우 다르며, 에어 포켓 압력은 정수압 값보다 상당히 높아지고, 공기와 물의 급속한 가속과 수직관 상단에서의 공기-물 혼합물의 geyser가 발생

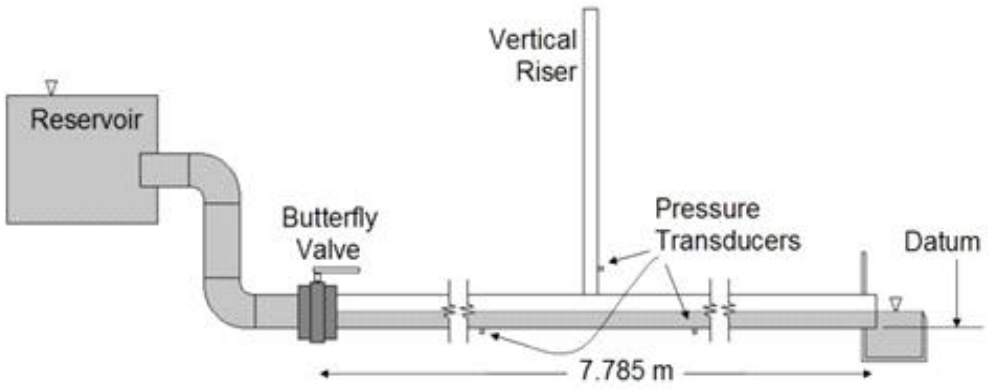
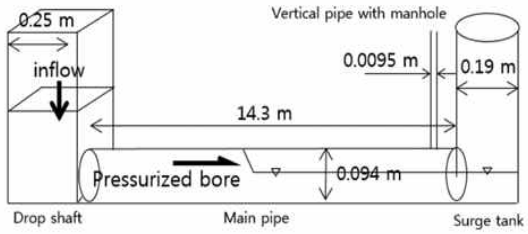


그림 2.3.36 Inertial Surge Caused by Air Release(Lewis, 2011)

(Vasconcelos, 2005)

Table 1. Non-dimensional parameters for SA of air pressure

Parameter	Range
d/D	0.08~0.13
$\frac{Q_{in}}{\sqrt{gD^5}}$	0.3~0.5
h_0/D	0.75~0.90
S_0	-0.003~0.002
h_d/D	0.02~2.10



Variable	Values
Initial Depth	0.076 m (80% of pipe diameter)
Diameter	0.094 m
Riser Diameter	9.5 mm
Inflow	$3.1 \times 10^{-3}\ m^3/s$ (18.6 LPM)

그림 2.3.37 대규모 우수관수로 내 공기의 압력을 고려한 수치해석 및 Geyser에 대한 영향 인자 도출(Choi et al., 2016)

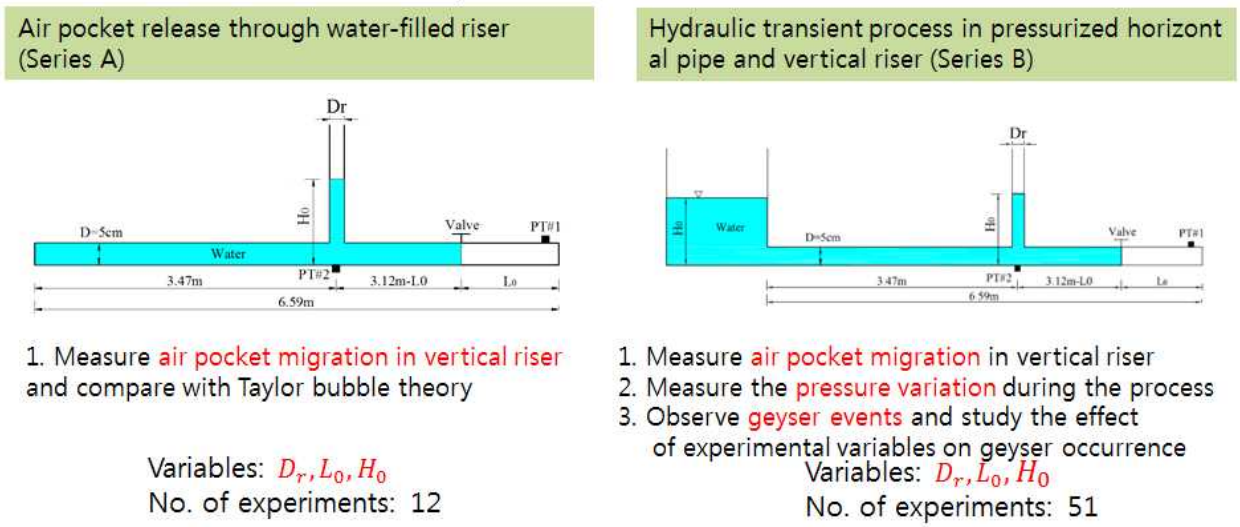


그림 2.3.38 Geyser Formation by Release of Entrapped Air from Horizontal Pipe into Vertical Shaft(Jing Cong et al., 2017)

② 실험장치 및 방법

i. 실험장치

- 본 연구에서는 대심도터널 내부에서의 잔류공기 비율에 따른 공기 배제 양상을 구명하기 위해 터널을 모형화한 관에서 실험적 연구를 수행
- 직경 80 ㎜, 길이 7.1 m의 투명 아크릴관으로 제작된 수평관 내부에 일정한 수두를 가지는 물을 공급하여 관 내 잔류공기가 수직관을 통해 배출되는 현상을 재현
- 수직관의 길이는 1.3 m이며, 직경은 40 mm
- 압력센서(GE-UNIK_5000, 범위 : 0~1 bar, 주파수 : 3.5 kHz, 정확도 : ± 0.1 %)를 이용해 수평관 내 압력 변화 및 압축된 공기가 수직관을 통해 배출될 때 최대압력을 살펴보았으며, 그리고 수평관 내 격자 구조판을 설치하여 관 내 공기거동 개선 효과에 대한 연구를 수행
- 수평 파이프를 1 m 길이로 분할하고 압력 게이지의 설치 위치를 실험조건에 따라 변경하였으며, 압력 게이지는 각 섹션의 세 지점(상단, 하단, 측면)에 설치

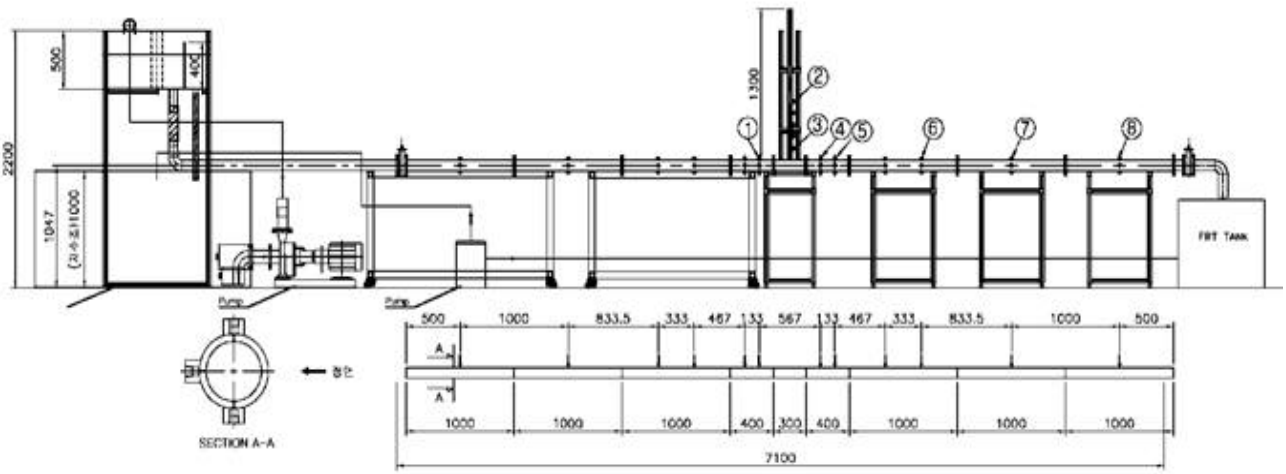


그림 2.3.39 실험장치 전경

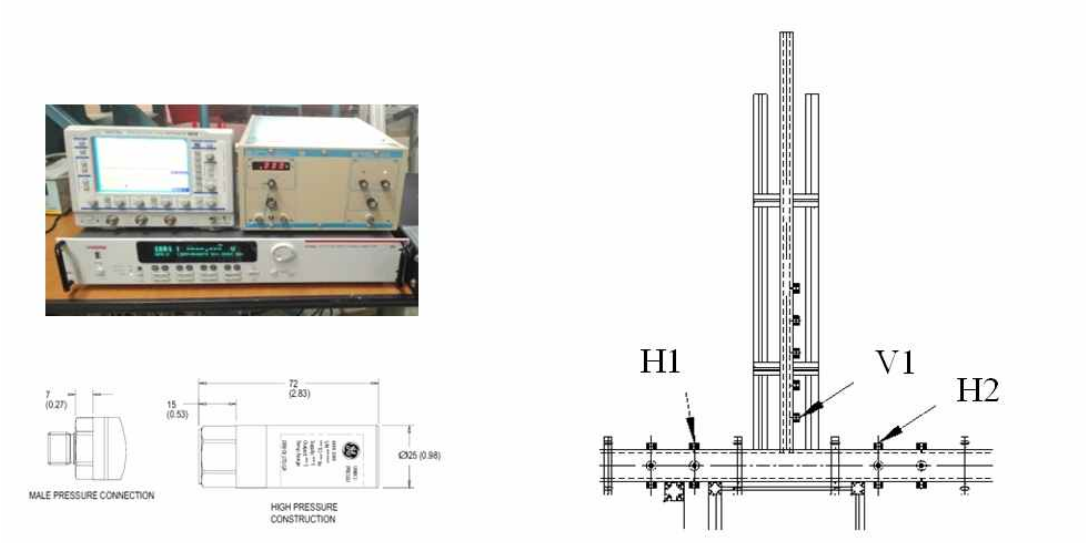


그림 2.3.40 압력센서 및 설치 위치

표 2.3.11 실험장치 제원

Experimental Setup	
Horizontal pipe	L= 7.1 m, D=0.08 m
Vertical shaft	L=1.3 m, D=0.04 m
Pressure transducers (GE UNIK 5000)	Range: 0~1 bar
	Accuracy: 0.1 % FS
	Frequency: 3500 Hz

ii. 실험방법

- 유입부와 수직관(drop shaft)을 포함하는 터널계통에서의 공기거동 현상에 대한 모형실험을 통해 유입수에 의한 터널 내부 잔류공기 포획 및 압축과정과 수직관을 통한 압축공기의 부상 및 분출(geysering) 현상을 구명하고 격자 구조판을 설치하여 관 내 공기거동 개선 효과에 대한 연구를 수행
- 관 내 많은 양의 유량이 유입될 때 발생할 수 있는 공기의 포획으로 인한 압력 상승을 저감하기 위해 구조적 방법을 적용
- 관 내에 격자 구조판 설치를 통해 흐름 패턴을 변화시키고 그에 따른 공기거동 및 압력 변화를 측정
- 격자 구조판은 상하부로 구분하여 초기 유입되는 유체의 흐름은 방해하지 않기 위해 하부는 비어있는 형태를 하고, 상부는 기포의 크기를 작게 변화시킬 수 있게 격자 형태로 구성
- 실험조건은 관 직경에 대해 초기수심 비에 따라 0, 25, 50, 75 %(수평관의 바닥에서 물이 채워진 높이, 10, 20, 40, 60 mm)의 4가지 조건으로 수행하였으며, 고수조의 수위 차에 의한 잔류공기의 영향을 조사하기 위한 실험(Series 1, 2)과 격자 구조판에 의한 관 내 공기거동 개선 효과에 대한 실험(Series 3)으로 나누어 실시
- 관 내 많은 양의 유량이 유입될 때 발생할 수 있는 공기의 포획으로 인한 압력 상승을 저감하기 위해 구조적 방법을 적용
- 관 내에 격자 구조판 설치를 통해 흐름 패턴을 변화시키고 그에 따른 공기거동 및 압력 변화를 측정

- 격자 구조판은 상하부로 구분하여 초기 유입되는 유체의 흐름은 방해하지 않기 위해 하부는 비어있는 형태를 하고, 상부는 기포의 크기를 작게 변화시킬 수 있게 격자 형태로 구성
- 격자공간은, 중심영역에 형성되어 사각형 형상을 가지는 제1 격자공간 및 상기 통로부와 맞닿는 영역에 형성되어 곡선이 포함된 형상을 가지는 제2 격자공간으로 구성됨
- 격자공간은 수평 프레임(그림 2.3.41a의 1)과 수직 프레임(그림 2.3.41a의 2)이 교차 배열됨으로 형성되는데, 이러한 교차 배열은 수평 프레임과 수직 프레임이 직교하는 형태이며, 중심영역에는 사각형 형상을 가지는 제1격자공간(그림 2.3.41a의 3)과 통로부 상부와 맞닿는 부분에 형성되는 제2격자공간(그림 2.3.41a의 4)이 형성됨
- 격자 구조판은 유체의 흐름으로 인하여 발생한 공기)와 잔류하는 물로 인하여 형성된 물-공기의 계면을 가지는 이상류를 미세기포로 변화시켜 유입 초기의 최대 압력을 감소시키는 역할을 하며, 이는 물-공기로 형성되는 커다란 유체가 격자 구조물을 통과하면서 작은형태의 기포로 변화되기 때문임
- 격자 구조판의 높이는 통로부 높이(그림 2.3.41b의 D)의 절반이하로 형성되며, 격자 구조판의 높이가 통로부 높이의 절반 이상으로 형성되는 경우, 아래쪽에 흐르는 유체의 흐름을 방해할 수 있으며, 통로부 아래쪽에 흐르는 유체의 흐름에 미치는 영향을 최소화하면서 미세 기포로의 분해가 극대화되도록 격자 구조판의 높이를 통로부 높이를 절반 이하로 형성함
- 실험은 격자 구조판의 높이를 통로부 높이의 절반으로 실시하였으며, 앞선 수평관 내 이상류거동 실험에서 대부분의 기포는 터널 내 상부 0.15D 이내에 존재하는 것으로 제시되었으며, 이를 고려하여 향후 터널 내 통수능과 압력저감 효과의 증대를 위해 격자 구조판의 높이를 0.15D 이내까지 축소한 연구가 필요할 것으로 판단됨
- 터널 내부로 유입되는 유입수에 포함된 쓰레기 및 토사 등으로 인해 격자 구조판의 효과가 저감될 가능성이 있음
- 격자 구조판 자체적으로는 유입되는 쓰레기 및 토사를 차단하는 효과가 없으며, 이를 위한 대안으로 홍수 발생 시 유입부가 있는 육상에서 스크린을 통해 쓰레기를 차단하여 터널 내부로 유입을 최소화하고, 유입부와 수평터널의 연결부 혹은 수평터널의 하부에 침사지를 설치하여 토사를 배출해야 필요가 있음

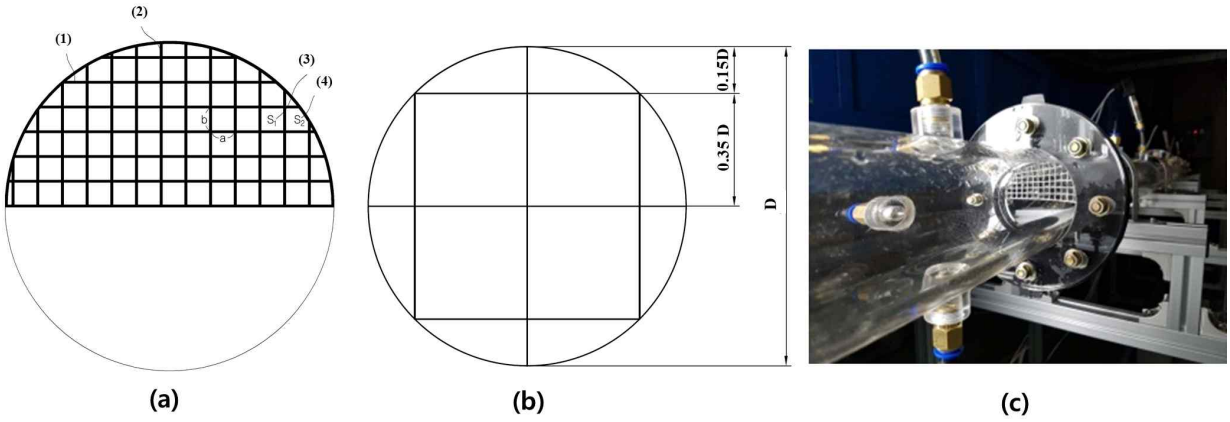


그림 2.3.41 격자 구조판 제작 및 설치

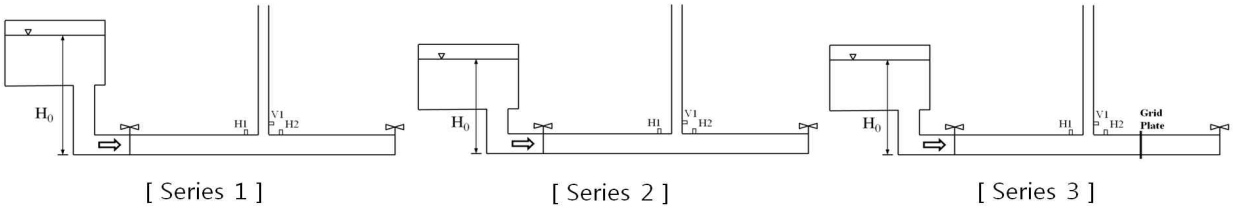


그림 2.3.42 실험조건

표 2.3.12 실험조건

	Reservoir Elevation H_0 (m)	Initial Depth(%)	Grid Plate
Series 1	1.1	0, 25, 50, 75	X
Series 2	0.8	0, 25, 50, 75	X
Series 3	0.8	0, 25, 50, 75	O

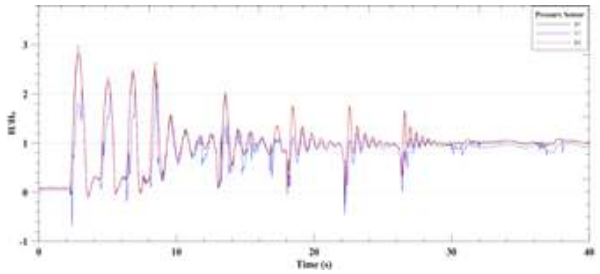
③ 실험결과

i. Series 1

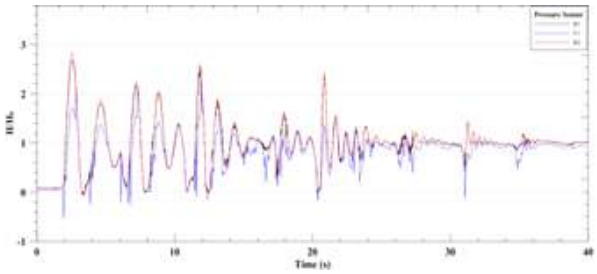
- 관 직경에 대해 초기수심 비에 따라 0, 25, 50, 75 %(수평관의 바닥에서 물이 채워진 높이, 10, 20, 40, 60 mm)의 4가지 조건으로 수행하였으며 관 내 초기수심에 따른 압력 변화를 나타냄(그림 2.3.43)
- H1, V1, H3은 3개의 압력 센서로 측정 한 값으로, 수평관과 고수조의 수두 차이를 고려해 무차원화
- 4가지의 초기수심 조건에서 전체적으로 최대압력은 유입 초기에 발생하고, 최대압력은 초기 수심과 함께 증가하는 것으로 나타남
- 유입 초기에 큰 에어 포켓이 빠져나가 수두 차의 두 배보다 큰 압력을 발생시키는 것으로 나타났으며, 유입 시작 10초 후, 수평관 내의 압력은 점차 감소하고 비교적 작은 기포가 빠져나갔으며, 40초 이내 모든 기포가 빠져나와 안정화됨
- 수평관에 유입되는 유량으로 인해 압축되었던 잔류공기가 빠져나갈 때 관 내 초기수심에 따른 최대압력이 나타남(그림 2.3.44)
- 관 내 초기수심이 증가함에 따라 수평관의 최대압력이 증가하였으나, 반대로 수직관의 최고 압력은 감소하는 것으로 나타남
- 수평관의 공기는 초기 유입 시 유입수에 의해 수직관의 오른쪽에 포획되어 압축 및 배출되었으며, 이때 압축된 공기와 물이 폭발적으로 분출되는 geysering 현상이 발생

ii. Series 2

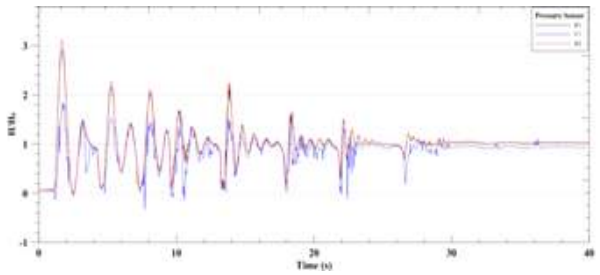
- 두 번째 실험은 고수조의 높이를 조절해 수두차를 0.8 m로 낮추었으며, 나머지 조건은 4개의 초기수심에 대해 동일하고 압력은 3개 지점에서 측정
- H0가 감소함에 따라, 수평 및 수직관의 최고 압력은 감소하는 것으로 나타났으며, 또한, 초기수심이 증가함에 따라 최대압력은 수평관(H1, H2)에서 증가하고 수직관(V1)에서 감소하는 것으로 나타남
- 최대압력의 감소는 H0 차이보다 작은 것으로 나타났으며, 초기수심이 작으면 H0의 영향이 큰 것으로 나타남



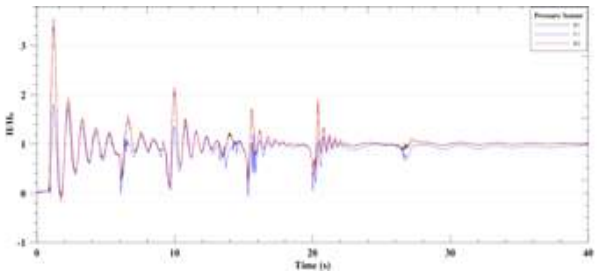
(a) Initial Depth 0%



(b) Initial Depth 25%



(c) Initial Depth 50%



(d) Initial Depth 75%

그림 2.3.43 관 내 초기수심에 따른 압력 변화

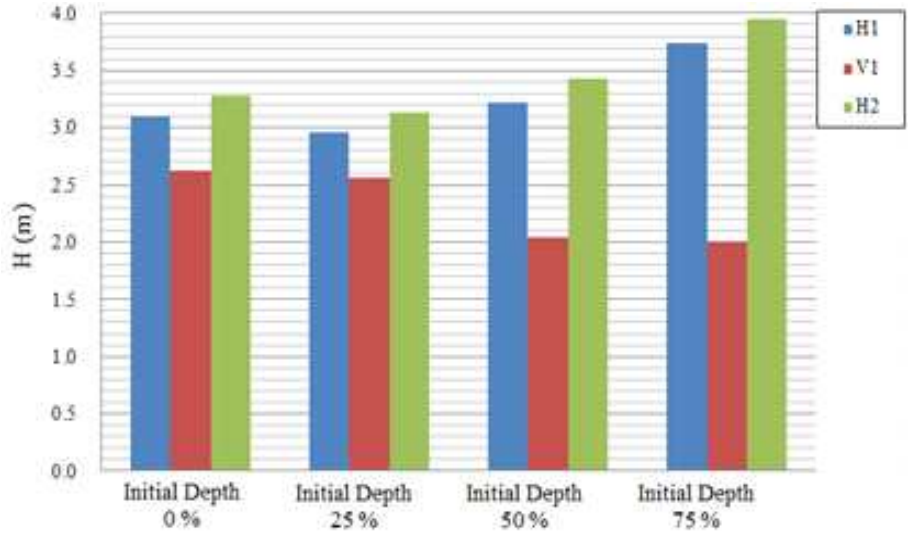
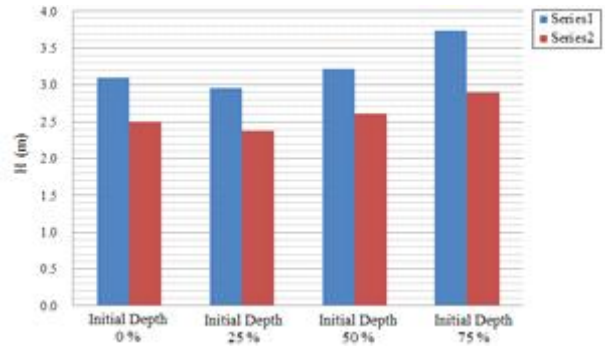


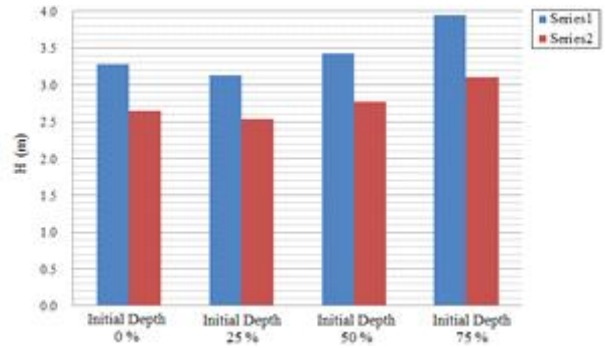
그림 2.3.44 관 내 초기수심에 따른 최대압력

표 2.3.13 측정 위치별 관 내 초기수심에 따른 최대압력

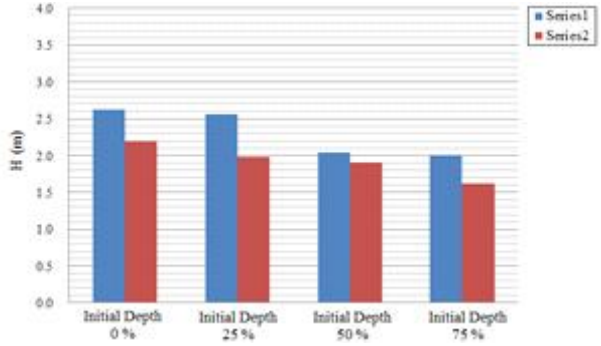
	Initial Depth 0%	Initial Depth 25%	Initial Depth 50%	Initial Depth 75%
H1	3.099	2.954	3.215	3.739
V1	2.625	2.560	2.043	2.007
H2	3.275	3.133	3.429	3.951



(a) H1



(b) H2



(c) V1

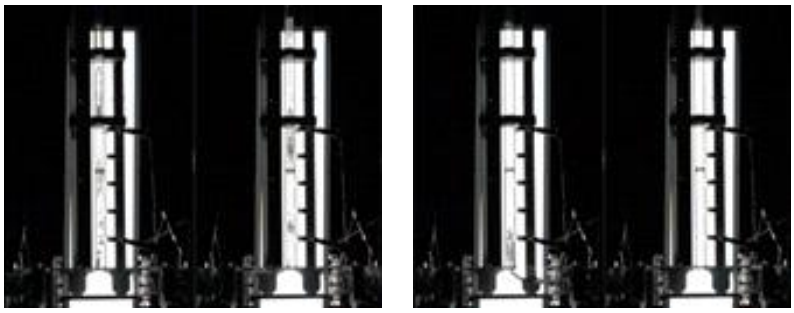
그림 2.3.45 측정 위치별 관 내 초기수심에 따른 최대압력 변화

iii. Series 3

- 관 내 다량의 유량이 유입될 시 발생할 수 있는 공기포획으로 인한 압력 상승을 저감하기 위해 구조적 방법을 적용
- 관 내 격자 구조판 설치를 통해 흐름 패턴을 변화시켜 관 내에서 발생하는 흐름 및 압력 변화를 측정
- 그림 2.3.46은 유량이 유입될 때 격자 구조판의 설치 유·무에 따른 수직관을 포함한 구간의 흐름 형태를 나타낸 것이며, 그림 2.3.46a, 그림 2.3.46b는 동일한 흐름을 보이지만, 그림 2.3.46c에서 좌측은 유입수가 계속 유입되는 반면, 우측은 격자 구조판에 의해 Air Pocket이 Bubble로 변하여 흐름 반대 방향으로 이동하는 것으로 나타남
- 물-공기 계면이 격자 구조판을 통과할 때 작은 기포로 변화
- 그림 2.3.47은 초기수심 0%에서 격자 구조판의 유·무에 따른 v1 압력의 변화를 나타낸 것으로 격자 구조판 설치 전에는 H0의 두 배가 넘는 최대압력이 발생하였으나 격자 구조판 설치로 인해 감소하는 것으로 나타남
- 초기에 배출되는 높은 압력의 공기 포켓은 격자 구조판을 통과함에 따라 작은 기포로 바뀌고, 나뉘어 배출
- 측정 위치별 격자 구조판에 의한 최대압력의 변화를 그림 2.3.48에 도시
- 수평관의 경우 최대압력은 초기수심 0%에서 감소했지만, 대부분의 경우 격자 구조판의 영향이 적은 것으로 나타남
- 수직관의 경우 초기수심이 50% 이하일 때, 최대압력이 감소하는 것으로 나타남(초기수심 25%의 경우 특이점)



(a) 0.425 s (b) 0.925 s (c) 1.425 s



(d) 1.925 s (e) 2.425 s

그림 2.3.46 공기 배출에 따른 geysering 현상(좌: 격자판 미부착, 우: 격자판 부착)

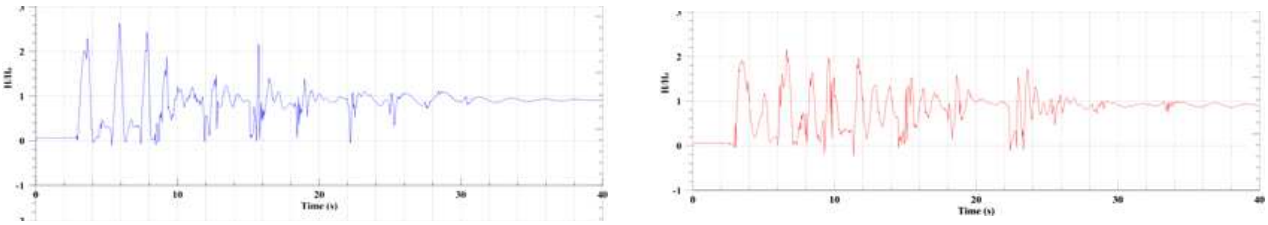
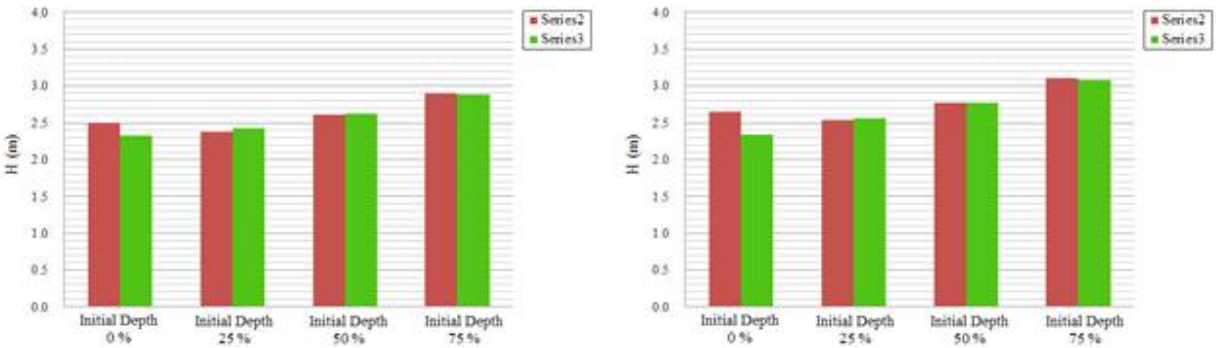
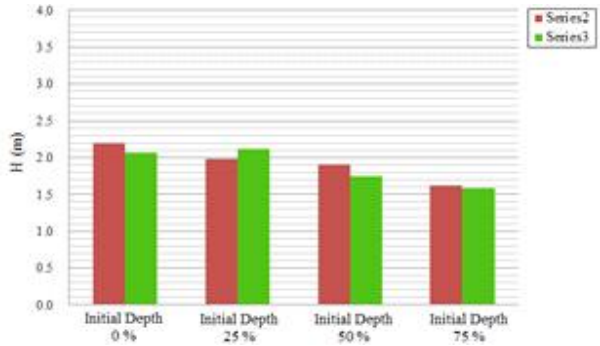


그림 2.3.47 격자판 설치에 따른 수직관 내 압력 변화



(a) H1 (b) H2



(c) V1

그림 2.3.48 격자판 설치에 따른 위치별 최대압력

(나) 유입부와 수직갱 등의 터널계통에서 이상류거동 수치모의

① 이상류거동 관련 기존 연구 분석

○ 국외 이상류 모의 사례로는 우선 Lun, Calay, Holdo가 1996년에 수행한 모의가 있으며, 상용 프로그램인 FIDAP를 이용해 두 개의 유입부가 통합되는 과정에서의 기체 및 유체 흐름 거동을 분석, 슬러그 흐름으로 변화되는 과정에서 초기 파형 형태가 중요함을 분석하였으며, 합류 부분과 기체 및 유체 경계면에서의 정교한 격자 생성이 필요함을 주장

○ Anglart와 Nylund는 1996년에 FLOW3D를 이용해 관에서의 이상류 모의 중 기체 분포를 예상하는 연구를 수행, 핵발전소에서 사용되는 연료봉에서의 이상류 흐름 연구를 수행, 특히 6개 연료관에서의 기포 흐름 모의를 진행해 실험값과 비교

○ Bonizzi와 Issa는 2003년에 수평관에서의 이상류 플러그 흐름을 개발한 수치 모형을 이용해 기체 기포가 액체 슬러그에 유입됨으로써 발생하는 효과를 모의, 수평관 외에도 일부 기울어진 관에서의 기포 이동을 실험 결과와 비교해 개발된 모형의 정확성을 검증

○ Taha와 Cui는 2006년에 수직관에서의 이상류 흐름을 CFD로 모의하였으며, FLUENT의 VOF 기법을 이용해 수직관 슬러그 흐름을 구현, 액체상에서 Taylor bubble의 상승이 표현되었으며, 기포는 앞부분은 실린더 형태이며 꼬리는 변동하는 모양으로 모의되었으며, 기포의 형태는 액체의 점성과 표면장력에 의해 변화하는 것을 확인(그림 2.3.49)

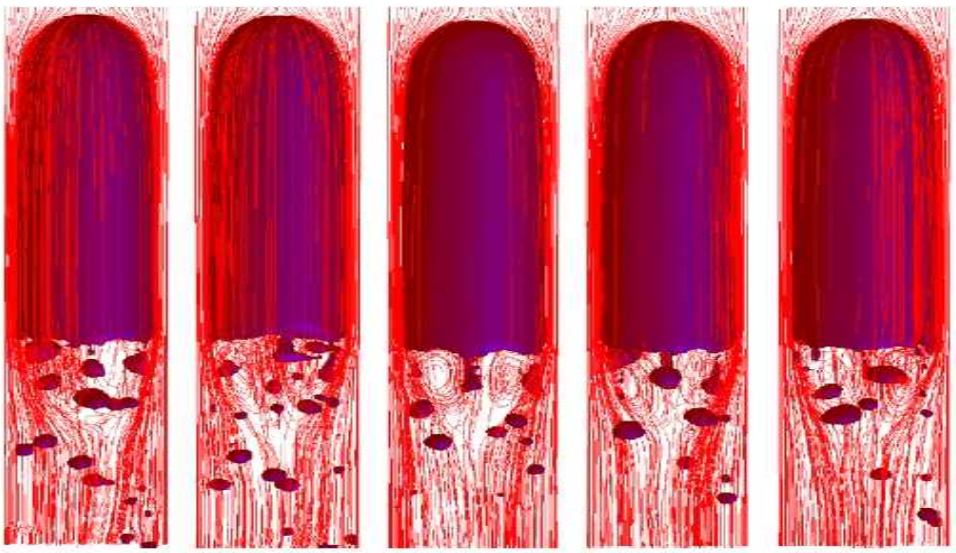


그림 2.3.49 Taha와 Cui가 모의한 Taylor bubble과 후류 유동 형태

○ Bannari 등은 2008년에 OpenFOAM을 이용해 수직관에서의 기포 기둥을 모의, 이상류 모의를 통해 수직 기포 흐름을 구현하되 작은 기포가 아닌 큰 기포 기둥을 구현하였고, 기포 크기에 따른 상승효과 및 실험자료와의 비교를 수행

○ Thaker와 Banerjee는 2013년에 OpenFOAM을 이용해 수평관에서의 3차원 기체-액체 이상류 흐름의 형태 변화, 경계면 특성, 국부 인자들을 분석, 플러그 및 슬러그 흐름의 형태 변화를 구현,. Volume of Fluid 방식으로 이상류 경계면이 시간 및 공간 변화에 따라서 이동하는 것을 모의하였으며, 이러한 경계면이 유속장에 미치는 영향과 성층 흐름이 슬러그 흐름으로 변화하는 양상을 연구(그림 2.3.50)

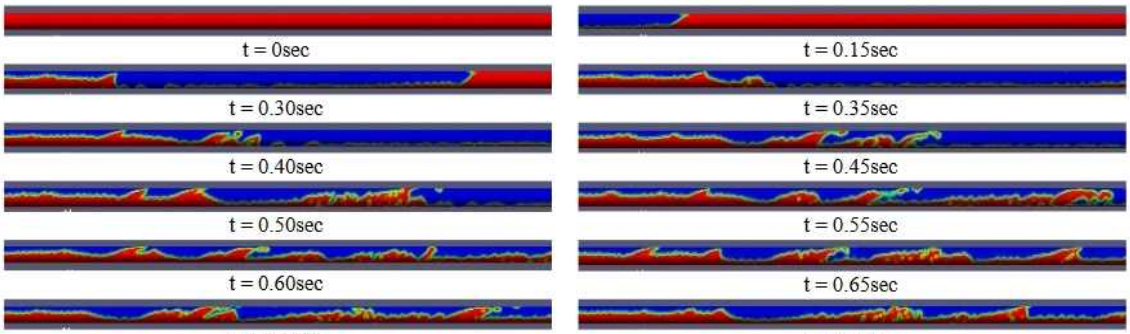


그림 2.3.50 Thaker와 Banerjee가 모의한 플러그 및 슬러그 형태

○ Shuard 등은 2016년에 OpenFOAM의 라이브러리인 interFoam을 이용해 다양한 기체/유체 비율 및 기울기가 고려된 상황을 모의하고 기존 연구와 비교해 모델의 적용성을 확인, 격자의 개수에 따라서 분무 흐름 및 거품 흐름(froth)의 모의가 영향을 받아 해당 형태에서는 세밀한 격자가 필요함을 주장하고 액체 잔류 및 압력 저하의 정확한 모의를 구현(그림 2.3.51)



그림 2.3.51 Shuard 등이 모의한 각 이상류 형태

○ Deendarlianto 등은 2016년에 수평관에서의 이상류 흐름을 모의하기 위해 FLUENT의 VOF 기법을 이용하였고, 이를 고속촬영을 이용한 실험값과 비교해 이상류 플러그 흐름을 구현, 기체 슬러그 길이가 유체 슬러그 길이보다 크다는 것을 확인하였으며, 기체/유체 경계면의 발생을 분석(그림 2.3.52)

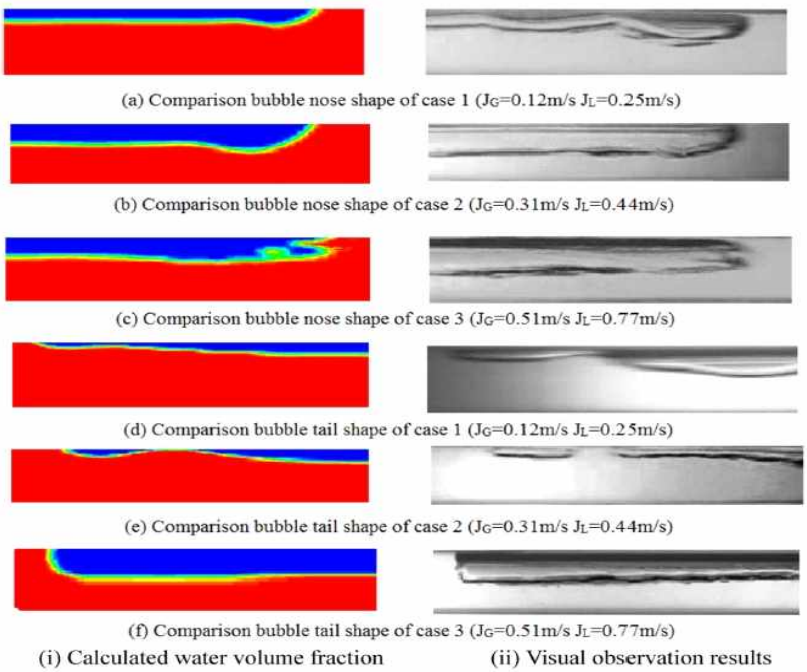


그림 2.3.52 Deendarlianto 등이 플러그 흐름 실험과 모의형태를 비교한 그림

② 이상류 모의 가능 상용 3차원 모형 비교

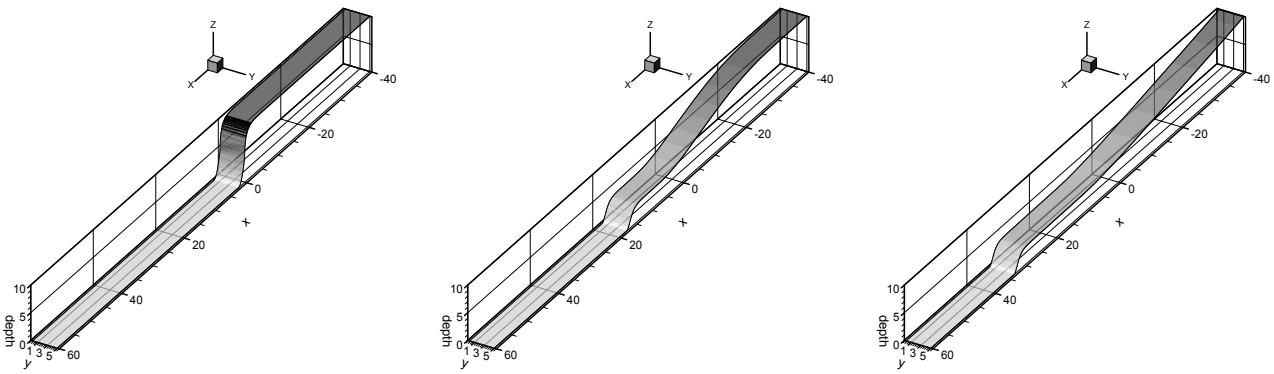
- 대심도터널 내부에서의 공기 및 공기-물 혼합류 거동을 효과적으로 모의할 수 있는 적합모형의 선정을 위해 국내외에서 널리 이용되는 3차원 상용모형에 대해 비교정리(표 2.3.14)
- 국내에서 가장 많이 사용되고 있는 범용 프로그램은 FLOW3D, FLUENT, OpenFOAM이 있으며 이 모형들은 자유수면을 모의함에 있어 VOF(Volume of Fluid) 방식을 적용
- VOF(Volume of Fluid) 방식은 자유수면을 모의하는 방식으로 1981년 Nichols와 Hirt가 개발하였으며, 표면의 위치를 특정하는 방식, 계산 격자 내를 이동하는 계면으로 표면을 추적하는 알고리즘, 표면에서의 경계조건을 적용하는 3가지 성분으로 구성
- 이 중 FLOW3D와 FLUENT는 상용 프로그램으로 사용 시 해당 회사에 라이선스 비용을 내고 구입하면서 자체개발 GUI 이용, 매뉴얼 등의 지원이 가능
- FLUENT는 80년대 Fluent 사에서 개발한 범용 전산유체역학 소프트웨어로 조선, 중공업, 반도체, 항공우주, 플랜트 등 다양한 산업 분야의 열/유동 문제를 해결하기 위한 상업 프로그램으로 개발
- FLUENT는 자동화된 Parameter 산정을 통하여 최적 설계 및 시스템 해석에 장점이 있음
- FLOW3D는 1980년대 Flow Science Inc.에서 개발한 범용 전산유체역학 프로그램으로 자유표면 해석 및 공기와 액체의 경계면 표현에 강점을 지니고 있음
- FLUENT와 비교하여 FLOW3D는 Euler 격자를 사용하고 FAVOR(Fractional Area/Volume Obstacle Representation) 방식을 적용하고 있기 때문에 격자 생성을 고려할 경우 적용성이 우수하나 FLUENT는 기존 학술연구에 더 많이 사용되어 참고할 수 있는 기존 연구자료에서 우수
- OpenFOAM은 Open Field Operation and Manipulation으로 1990년대 초 영국의 Imperial College에서 개발이 시작되어 유체해석 프로그램 작성을 위한 라이브러리로 개발
- OpenFOAM의 경우 대표적인 open-source 모형으로 코드 수정이 자유롭다는 장점이 있으며, 기존에는 Linux 버전만 있었으나 최근 Window 버전이 출시되었고, 상용 버전과 비상용 버전으로 나누게 되어 사용자가 필요한 모형을 사용할 수 있음, 비상용 버전의 경우 라이선스 비용이 발생하지 않고 범용 프로그램보다 문제에 최적화되고 사용이 단순, 그러나 자체적인 GUI가 없고 텍스트 위주의 프로그래밍을 도입하고 외부 연결 GUI가 필요하므로 사용자의 숙련도가 요구됨

표 2.3.14 공기 및 공기-물 혼합류 거동을 모의할 수 있는 3차원 상용모형

프로그램	회사	난류모형	이상류 기법	적용 범위
FLOW-3D	Flow Science	k-e 모형 RNG, LES	VOF (Volume of Fluid)	난류 흐름, 압축성 및 비압축성 유체 흐름, 열 및 질량 이송 모의
FLUENT	Ansys Inc.	k-e 모형 RNG, RSM	VOF (Volume of Fluid)	
FLOTRAN	Swanson Analytic System Inc.	k-e 모형	-	
STAR-CCM	Computational Dynamics LTD	k-e 모형 RNG, 저 레이놀즈 모형	VOF (Volume of Fluid)	
OPENFOAM	ESI- OPENCFD	k-e 모형 RNG, LES	VOF (Volume of Fluid)	

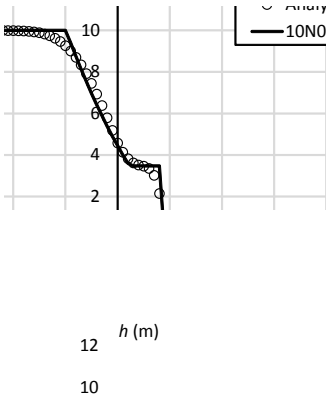
③ 이상류거동 수치모의 결과

- 대심도터널 내부에 순간적으로 유입되는 홍수파의 이동을 해석하는 성능을 테스트하기 위해 초기조건을 불연속 수면으로 부여해 충격파의 전파문제를 흐름 해석모형을 통해 재현하고 해석해와 비교하여 모의 성능을 점검(그림 2.3.53)
- 유동 흐름 해석 수치 모형은 주어진 지형자료와 초기/경계조건 아래에서 유체의 이동에 따른 시공간적 유속 및 수십 등의 수리학적 흐름특성을 예측하는 데 이용되므로 흐름 해석모형의 적용성을 검증하기 위해서 바닥의 급변성, 내부 구조물의 반영 등 복잡한 지형조건 아래에서 해의 안정성과 정확성을 테스트하였음. 호주 UNSW 대학 수리실험실에서 제작한 모의영역 내부에 다수의 건물이 존재하고 요철이 심한 도심지 지형을 그대로 재현한 실험 수로에 수치모형을 적용하여 흐름 해석모형의 적용성을 평가(그림 2.3.54)



(a) t =0.1 s (b) t =2.0 s (c) t =4.0 s

그림 2.3.53 흐름 해석모형의 수심 변화

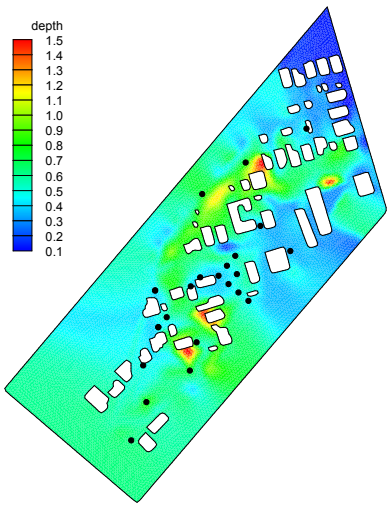


(a) 수심 (상: t=1.0 s; 하: t=3.0 s)　　(b) 유속 (상: t=1.0 s; 하: t=3.0 s)

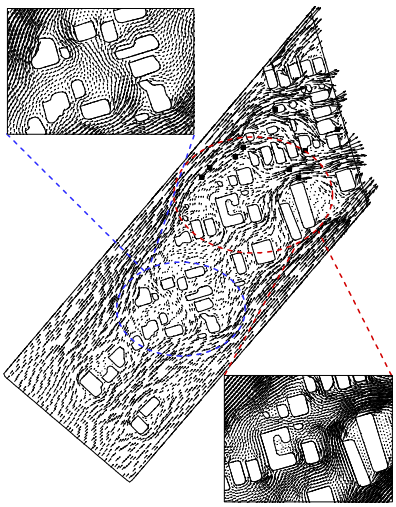
그림 2.3.54 흐름 해석모형 해석해와 비교



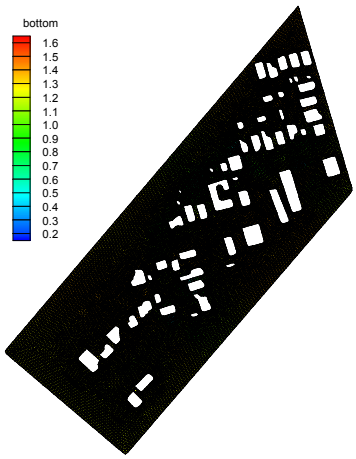
(a) 수리실험 모형



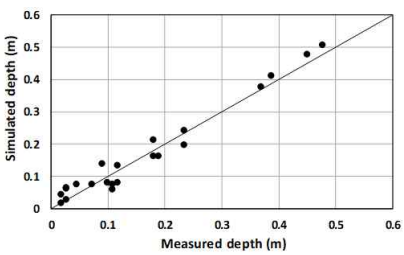
(a) 등수심도 및 비교점



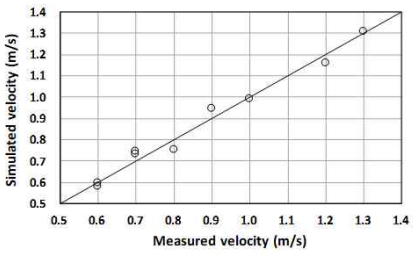
(a) 유속벡터



(d) 유한요소망



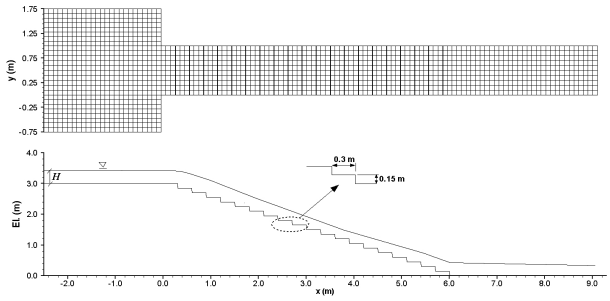
(e) 수심 비교



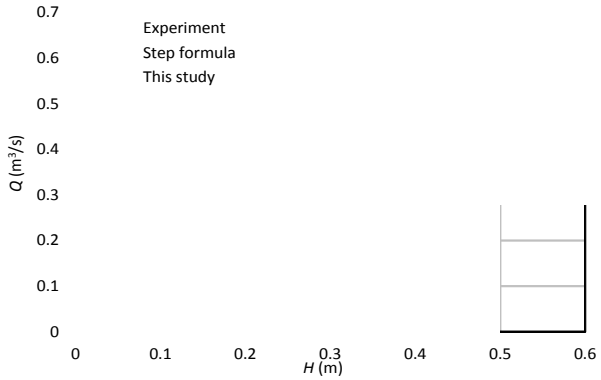
(f) 유속비교

그림 2.3.55 복잡한 지형에서의 침수 모의 성능 점검

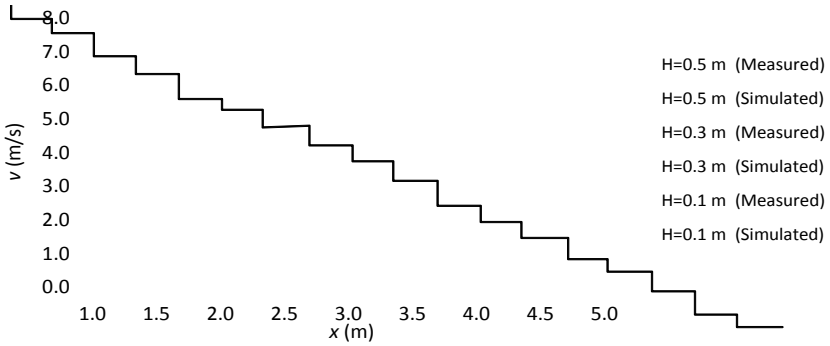
○ 도심지 우수배제 능력 증대를 위해 대심도터널이 설치된 경우, 지면에 내린 우수는 유입구로 모여든 후 수직갱을 거쳐 대심도 터널로 유입, 이 과정에서 유입구의 우수는 수직갱을 통과하면서 중력에 의해 급격하게 흐르는 흐름 특성을 보이므로 흐름 해석 수치 모형이 이를 적절하게 모의하는지 점검하는 것이 중요하므로, 연속 계단을 흐르는 흐름 해석 문제를 고려해 수리실험 결과와 비교(그림 2.3.56)



(a) 단층 계단 지형 정보와 유한요소망



(b) 모의 결과의 검증



(c) 수리실험결과와의 유속비교

그림 2.3.56 중력 유하 흐름 수치 모의

○ 흐름 해석모형의 범용 적용 절차를 정립해 모형의 설치, 요소망의 구성, 결과의 후처리 및 표출, GIS와의 연계(그림 2.3.57)

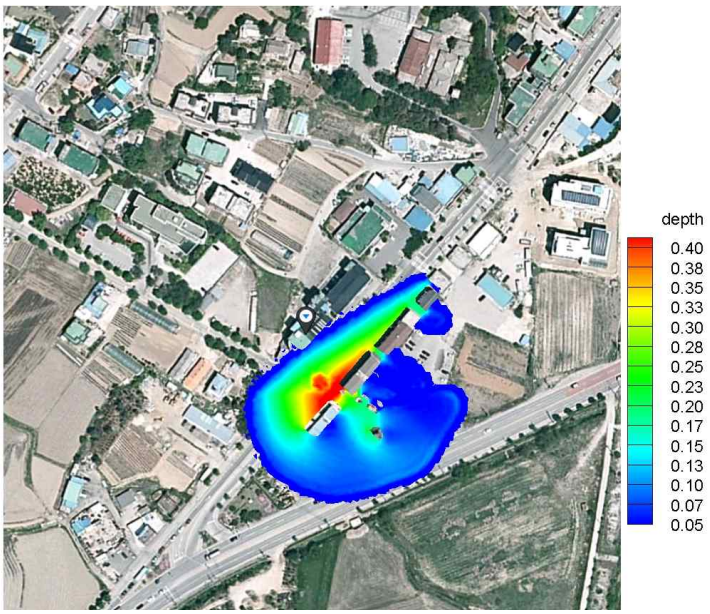
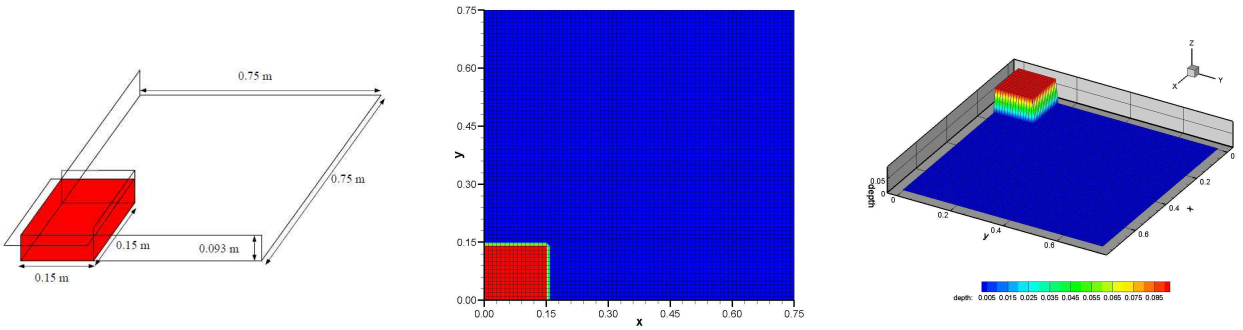


그림 2.3.57 그래픽 처리를 통한 침수 진행 양상 확인

○ 기존에 개발된 2차원 천수흐름 해석모형을 확장해 연직 방향 가속도를 포함한 비정수압 흐름 해석이 가능하도록 모형을 개선, 또한 개수로와 관수로 해석이 동시에 가능하도록 Preissmann slot 알고리즘을 모형에 반영해 3차원 가압 흐름 해석모형으로 확장

○ 모의영역 내 관망, 개수로, 건물, 도심지면 등이 동시에 존재하는 경우의 침수 및 월류 양상, 가압 흐름 해석 등을 종합적으로 수행하기 위해, 모의영역에 특성 물성치를 부여해 권역을 구분하는 방법을 적용(그림 2.3.58)



(a) 실험 수로 제원 (b) 요소망 구성 및 물성치 부여 (c) Benjamin flow 초기조건

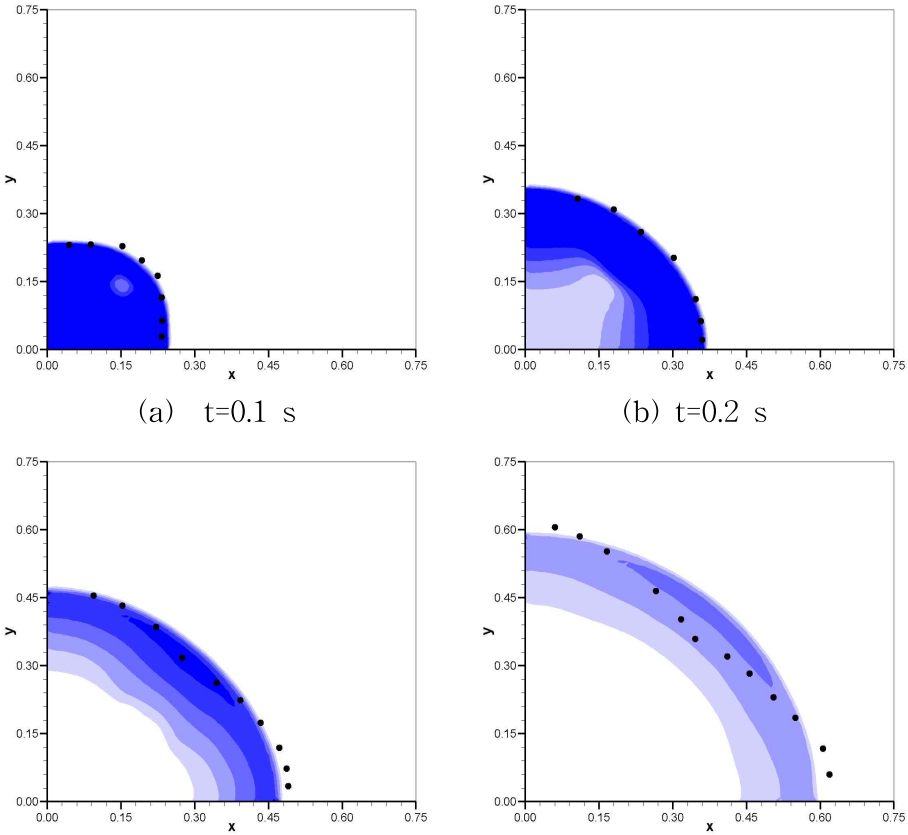
그림 2.3.58 가압 흐름과 개수로 흐름이 공존하는 문제 모의

○ 개발한 3차원 가압류 해석 모형의 적용성을 테스트하기 위해 교토대 하천 시스템 공학 및 관리 연구실에서 수행한 benjamin flow 수리실험자료를 이용

○ 만관 수로에 해당하는 터널이 좌측 하단에 존재하며, 터널 내부에 가득 차 있는 물이 관수로를 통해 물이 방류되어 사각형 영역으로 전파되어 가는 가압 흐름과 개수로 흐름이 공존

○ 교토대에서는 영상분석 기술을 이용해 시간별 선단부 위치를 측정한 바 있으므로, 본 연구에서는 3차원 가압 흐름 해석모형을 적용한 결과와 교토대 영상분석 결과를 비교해 가압 흐름 해석모형의 적용성을 분석

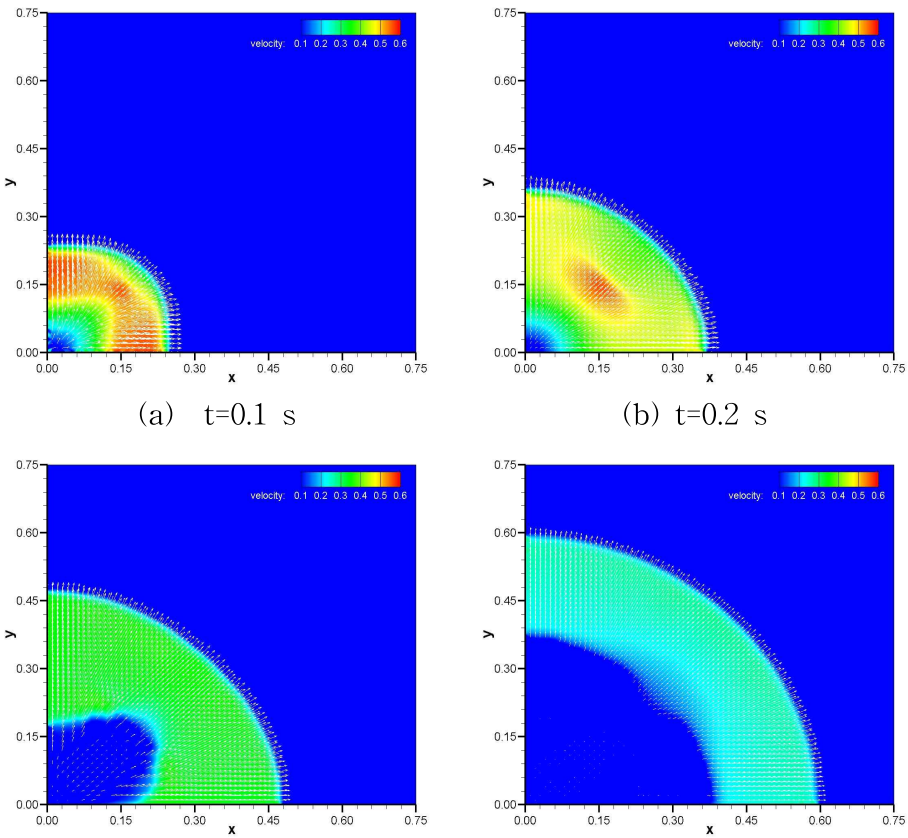
○ 사분원 외측 방향으로 퍼져 나가는 흐름 모의 결과가 수치 진동 없이 매끄럽게 도출되었으며, 시간에 따른 선단부 위치는 수리실험 결과와 매우 근사(그림 2.3.59, 그림 2.3.60)



(a) t=0.1 s (b) t=0.2 s

(c) Bt=0.3 s (d) t=0.4 s

그림 2.3.59 Benjamin flow 실험 결과와 선단부 위치 비교



(a) t=0.1 s (b) t=0.2 s

(c) Bt=0.3 s (d) t=0.4 s

그림 2.3.60 Benjamin flow 실험 결과 유속장

5. 연구개발 성과

가. 1st International Symposium on Urban Flood Management(국제심포지엄) 개최

- ○ 일정 : 2018년 6월 25일(월)~26일(화)
- ○ 장소 : 일본 교토대학교 방재연구소 시라하마해양관측소
- ○ 주최 : 한국건설기술연구원, 교토대학교 방재연구소, 창원대학교 산학협력단
- ○ 후원 : 국토교통과학기술진흥원, 한국수자원학회, 일본자연재해학회



- ○ 총 33명의 국내외 도심홍수 분야 전문가 참석
  - 한국 13명, 일본 18명, 영국 1명, 에티오피아 1명
- ○ 4개의 발표 세션 진행, 총 21건의 국내외 연구자 연구성과 발표
- ○ 도심홍수 연구 관련 국제 교류 및 연구자 네트워 형성









나. 국내외 논문

차년도	번호	논문명	학술지명	주저자명	권, 호	국명	발행기관	SCI 여부 (SCI/비SCI)	게재일	등록 번호
1	1	Field Application Studies of the Effect of an Underground Storage Chamber using an Urban Inundation Model	Journal of Flood Risk Management	고동우	11(S2)	미국	Wiley	SCI	2017. 5.	1753-318X
2	2	준3차원 동수역학 모형의 입력변수가 충격파 전파에 미치는 영향	한국안전학회지	이동섭	32(2)	대한민국	한국안전학회	비SCI	2017. 4.	2383-9953
	3	Hydrodynamic Modeling of Air-water 2-phase Flow in Urban Sewer System: Turbulence Modelling of Stratified Flows	DPRI Annuals	한종수	60(B)	일본	DPRI	비SCI	2017. 9.	0386-412X
	4	The Impact of Water-intake for a Tributary on the Flow and Saline Intrusion in the Lower Han River	KSCE Journal of Civil Engineering	류시완 (교신저자)	21(5)	대한민국	대한토목학회	SCI(E)	2016. 11.	1976-3808
3	5	90도 각도를 갖는분기관에서 모형실험결과를 이용한 손실계수 경험식 산정	대한토목학회 논문집	박인환	37(6)	대한민국	한국안전학회	비SCI	2017. 12.	2287-934X
	6	수리모형실험을 이용한 지하유입시설 유입구 형상에 따른 수리학적 특성 분석	한국안전학회지	성호제	33(4)	대한민국	한국안전학회	비SCI	2018. 8.	2383-9953
	7	수리실험을 이용한 접선식 유입구와 다단식 나선 유입구의 흐름 특성 분석	한국수자원학회 논문집	성호제	52(3)	대한민국	한국수자원학회	비SCI	2019. 3.	2287-6138
	8	접선식 유입구와 다단식 나선 유입구의 공기 배출 효과에 관한 실험적 연구	한국수자원학회 논문집	성호제	52(3)	대한민국	한국수자원학회	비SCI	2019. 3.	2287-6138

차년도	번호	논문명	학술지명	주저자명	권, 호	국명	발행기관	SCI 여부 (SCI/비SCI)	게재일	등록 번호
3	9	Numerical Computation of Rapid Flow Over Steep Terrain using Total Acceleration Method	Journal of Coastal Research	이동섭	SI(85)	미국	Coastal Education and Research Foundation	SCI(E)	2018. 2.	1551-5036
	10	Effects of the Bottom Slope and Guiding Wall Length on the Performance of a Vortex Drop Inlet	Water Science and Technology	이동섭	78(6)	영국	IWA	SCI(E)	2018. 10.	1996-9732
	11	Modeling of Stormwater Drainage/Overflow Processes Considering Ditches and their Related Structures	Journal of Natural Disaster Science	Kawaike Kenji	39(2)	일본	Japan Society for Natural Disaster Science	비SCI	2018. 12.	2434-6705
	12	Numerical Assessment of On-Site Storage Facilities to Mitigate Pluvial Inundation Damage in Urban Area	Journal of Natural Disaster Science	Kawaike Kenji	39(2)	일본	Japan Society for Natural Disaster Science	비SCI	2018. 12.	2434-6705
	13	Experimental Investigation on the Velocity Structure and its Effect on the Flow Patterns of Air-Water Two-phase Flow in a Horizontal Pipe	KSCE Journal of Civil Engineering	이경수	22(9)	대한민국	대한토목학회	SCI(E)	2018. 9.	1976-3808
	14	잔류공기조건에 따른 관 내 유동의 압력변화에 관한 실험적 연구	한국수자원학회 논문집	이경수	-	대한민국	한국수자원학회	비SCI	심사중	2287-6138

다. 국내외 학술발표

차년도	번호	발표명	학술회의명	발표자	발표일	장소	국명
1	1	유입유량 변화에 따른 수직갱 유입구 수위변화 및 공기공동 형상 분석	2016 한국방재학회 학술발표대회	성호제	2016. 2.	성균관대학교	대한민국
	2	2차원 흐름모형을 이용한 배출구 형식에 따른 지하공간 침수해석	2016 한국방재학회 학술발표대회	서용재	2016. 2.	성균관대학교	대한민국
	3	수평관 내 이상류 거동 특성에 대한 실험적 연구	2016 한국방재학회 학술발표대회	이경수	2016. 2.	성균관대학교	대한민국
2	4	다양한 흐름조건에 대한 원형관로 손실계수의 산정	2016년 한국산학기술학회 추계학술대회	박성원	2016. 12.	교토대학교	일본
	5	수리실험 및 수치해석을 통한 수직갱 내부 공기공동 형성에 관한 연구	2016년 한국산학기술학회 추계학술대회	성호제	2016. 12.	메종글래드 제주	대한민국
	6	전기전도계를 이용한 관 내 이상류 거동에 대한 실험적 연구	2016년 한국수자원학회 학술발표회	이경수	2016. 5.	한국수자원공사 K-water연구원	대한민국
	7	관 내 흐름조건에 따른 기포거동에 관한 실험적 연구	KSCE 2016 CONVENTION	조한일	2016. 10.	제주국제컨벤션센터	대한민국
3	8	지하방수로 유입구 형상에 따른 유입흐름 특성에 관한 실험적 연구	2017 한국안전학회 추계학술대회	이동섭	2017. 11.	현대호텔 경주	대한민국
	9	유입유량 변화에 따른 수직갱 하단 압력 분포 검토	2018 한국방재학회 학술발표대회	성호제	2018. 2.	서울과학기술대학교	대한민국
	10	Experimental study of flow characteristics in storm water drainage tunnel	8th International Symposium on Environmental Hydraulics	성호제	2018. 6.	University of Notre Dame	미국
	11	관 내 잔류공기 비율에 따른 공기 배제능에 실험적 연구	2018 한국산학기술학회 춘계학술대회	이경수	2018. 5.	한국기술교육대학교	대한민국
	12	격자 구조판이 설치된 관 내 공기거동에 관한 실험적 연구	2018 한국산학기술학회 춘계학술대회	이경수	2018. 5.	한국기술교육대학교	대한민국

라. 특허출원 및 등록

차년도	번호	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원			등록		
				출원인	출원일	출원번호	등록인	등록일	등록번호
1	1	다단식 나선 지하유입구	대한민국	성호제	2016. 4.	10-2016-0041085			
2	2	다단식 나선 지하유입구	대한민국				성호제	2016. 11.	10-1675310
	3	수직갱 나선형-화살촉 타입 감세장치(수직갱)	대한민국	이동섭	2017. 4.	10-2017-0052494			
3	4	수직갱 나선형-화살촉 타입 감세장치(수직갱)	대한민국				이동섭	2018. 4.	10-1847994
	5	경사형 다단식 나선 지하유입구	대한민국	성호제	2018. 9.	10-2018-0111422			
	6	수직갱 내 기포방지격자와 플립(flip)형 화살촉 감세장치(개선형 수직갱)	대한민국	이동섭	2018. 11.	10-2018-0137026			
	7	터널 내 공기 제어 시스템	대한민국	이경수	2018. 12.	10-2018-0159096			

마. 기타 성과

차년도	번호	구분	성과명	게재지/등록번호/제작업체	성과등록일
2	1	학술기사	“극한 도심홍수 방어를 위한 최적 수리성능 대심도터널(왕복 4차선 이상) 원천설계기술 개발” 연구 소개	물과미래 (한국수자원학회)	2016. 8.
3	2	학술기사	고효율 지하유입시설에 의한 대심도터널 최적 수리성능 확보기술 개발	물과미래 (한국수자원학회)	2017. 12.
	3	소프트웨어	모터를 이용한 수위레벨 측정	C-2017-034485	2017. 12.
	4	소프트웨어	전기도통 및 초음파센서를 이용한 수벽 두께 측정	C-2017-034484	2017. 12.
	5	시제품	다단식 나선 지하유입구	물샘열둘	2016. 3.
	6	시제품	수직갱 나선형-화살촉 타입 감세장치	물샘열둘	2017. 9.
	7	학술기사	대심도터널 내부 공기거동 및 이상류 수리실험	물과미래 (한국수자원학회)	2017. 12.
	8	학술기사	관 내부 잔류공기 제어를 통한 흐름안정화 및 수리성능 개선방안 연구	물과미래 (한국수자원학회)	2018. 12.

6. 연구결과

○ 본 연구에서는 도심지 수재해 예방 목적의 대심도터널의 수리학적 성능을 분석하고, 성능 개선 목적의 국내 원천설계기술을 개발해 향후 대심도터널 설계 시 국내기술의 종속 현상을 방어하고 대심도터널 효과 예측 및 시설 평가기법을 활용, 국내 대심도터널 분야의 효율적 설계 기반을 마련

○ 연구성과 홍보와 국외전문가 기술교류를 위해 국제심포지엄 개최 및 국내외 논문 게재 등, 지속적인 기술 검증 및 연구성과의 객관성을 확보하고, SCI(E) 논문 5건(초과달성), 비SCI 논문 9건, 학술발표 12건, 학술기사 4건(초과달성), 특허출원 5건, 특허등록 2건, S/W 등록 2건, 시제품 제작 2건의 연구성과를 도출해 정량적 성과목표를 모두 달성

○ 1세부 연구기관인 한국건설기술연구원에서는 '고효율 지하유입시설에 의한 대심도터널 최적 수리성능 확보기술 개발'을 목표로 고용량, 고효율의 신형 지하유입구 설계기술 개발과 수직갱 질식 방지를 위한 공기 배출 효과 분석, 수직갱 하단부 충격량 및 흐름에너지 감세를 통한 구조적 안전성 개선 목적의 감세장치를 개발해 대심도터널의 기존 지하유입시설 대비 유입효율 및 구조적 안전성을 개선하고 국내 설계기술 개발에 기여

- 신형 유입구 형상 개발로 기존 유입구 형상 대비 최대 유입유량 28% 증가(기존 0.0127 m^3/s → 개선 0.0163 m^3/s), 실제 대심도터널에 적용되고 있는 최소 직경(4 m)을 반영해 상사를 고려할 경우, 유입유량 100 m^3/s 초과달성(81.5 m^3/s → 104.6 m^3/s)
- 신형 유입구의 수직갱 내부 공기공동 형상 크기 증가로 공기 배출 및 유입효율 10% 이상 개선
- 수직갱 하단부 감세장치 적용 후, 수직갱 하부 흐름에너지 평균 약 20% 감세 및 발생 압력 최대 20% 감소
- 지하유입시설 설계기술 관련 특허출원 4건, 등록 2건

○ 2세부 연구기관인 교토대학교 방재연구소에서는 대심도터널의 성능 분석 및 예측이 가능한 1차원, 2차원 물-공기 이상류 흐름 해석모형을 개발하였으며, 지하저류시설과 지하유입시설의 흐름 해석을 반영한 지표수 수치모형을 개발해 대심도터널 성능평가 및 예측 분야의 국내외 기술선도 기반을 마련

- 1차원, 2차원 이상류 흐름 해석모형 개발 및 실험결과 비교를 통한 오차율 10% 이내 정확도 확인
- 지하저류시설과 지하유입시설 흐름 해석(1차원)을 연계한 지표수 수치모형(2차원) 개발 및 실제 침수지역의 실측 자료와 비교, 기존 모형 대비 오차율 10% 이내로 개선
- 대심도터널의 효과 분석 및 침수피해 감소 효과 평가기법을 개발
- 이상류 흐름 모형 및 지표수 수치모형 개발 관련 SCI 논문 1건, 비SCI 논문 3건 게재

○ 3세부 연구기관인 창원대학교 산학협력단에서는 터널 내부 물-공기 유입조건에 따른 이상류 거동 양상을 분석하고, 수직갱 분출 현상을 저감하기 위한 이상류 제어기법을 개발하고 터널 계통의 수리성능 개선 및 평가기법 개발을 통해 대심도터널 내 수리성능 개선에 기여

- 공기량-유량 비에 따른 기포, 플러그, 확장기포의 기포분율(Void Fraction)을 산정하고, 흐름 분류에 따른 지점별 최대 기포분율을 기준으로 흐름 양상의 범위를 구분, 공기량-유량 비가 0.05보다 큰 경우, 주로 확장기포 또는 이층류 흐름 발생
- 유입 초기 잔류공기비율이 증가함에 따라 수평관 내 최고 압력이 감소하였으며, 수직관 내 최고 압력은 증가(분출 위험), 관 내에 격자 구조판 설치를 통해 공기거동을 제어하고 유입 초기에 발생하는 최대압력을 저감
- 물-공기 이상류 유입조건에 따른 흐름 양상 구분의 정량적 기준을 제안하고, 터널계통 내 공기제어를 통한 수리성능 개선을 위한 평가 항목(유속분포, 기포분율, 기포통과길이)을 제시

제3장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

구분	성과목표	최종성능목표	목표치	전체항목에서 차지하는 비중(%)	개발목표 달성도(%)			달성도 평가 방법
					1차년도	2차년도	3차년도	
(1세부)고효율 지하유입시설에 의한 대심도터널 최적 수리성능 확보기술 개발	안정 와류 유도 신형 유입구 형상 개발	유입유량	100 m^3/s	12	70	90	100	· 유입구 형식별 안정적 유입흐름 유지가 가능한 최대 유입 유량 범위 분석 · 신형 지하유입구 특허출원 및 특허등록
		유입효율	기존 대비 10% 개선	12	20	70	100	· 유입구 형식별 유입구 내 수위 변화 분석 · 수직갱 내부 공기공동 형상 계측 및 공기 배출 효과 분석 · 신형 지하유입구 특허출원 및 특허등록
	접합부 흐름 손실 및 충격량 저감 설계기술	흐름에너지 및 압력 저감	기존 대비 10% 이상 감소	10	-	70	100	· 수직갱 하단부 흐름에너지 감세 및 압력 감소 분석 · 감세장치 특허출원 및 특허등록
(2세부)대심도터널의 수리현상과 침수피해 감소 효과에 대한 수치해석 기술 개발	1차원 이상류 흐름 해석모형 개발	수치모형의 정확도	오차율 10% 이내	10	90	100	-	· 대심도터널 실험결과와 모형 해석결과를 비교 · 국내외 논문 게재
	2차원 이상류 흐름 해석모형 개발	수치모형의 정확도	오차율 10% 이내	10	15	90	100	· 대심도터널 실험결과와 모형 해석결과를 비교 · 국내외 논문 게재
	이상류 흐름 모형 및 지표수 수치모형 연계	수치모형의 정확도	오차율 10% 이내	13	-	40	100	· 침수해석 대상 지역 내 실측 자료와 해석결과를 비교 · 국내외 논문 게재
(3세부)흐름안정화를 통한 대심도터널 수리성능 개선 기술 개발	공기거동 특성 구명 및 이상류 제어기법 개발	동일규격 대비 흐름 안정률	10% 개선	13	70	100		· 터널 내 물-공기 이상류 유입조건에 따른 공기거동 분석 · 공기거동 제어를 위한 관 내 격자판 특허출원
	터널계통 수리성능 평가기법 개발	수리성능 평가 항목 수	3항목 이상	10	-	70	100	· 관 내 유속분포 및 기포 거동특성 분석 · 유속분포와 기포분율, 기포 크기에 따른 관 내 수리성능 평가기법 개발
	터널계통 내 수리성능 개선	동일규격 대비 수리성능 개선	10% 이상	10	-	50	100	· 공기거동 흐름 양상 분석 및 분류기준 도출 · 기포 비율 변화에 따른 수리성능 개선 방안 개발 · 동일규격 대비 기포 발생 비율 개선

2. 관련 분야 기여도

○ 전 세계적인 기후변화로 인한 극한 강우와 집중 폭우의 증가로 도심지 침수피해가 점차 증가하고 있으며, 이러한 도심의 수재해 예방을 위한 홍수조절시설로 지하공간을 활용한 대심도터널의 활용 사례가 증가

○ 최근 국내에서도 집중 폭우로 인한 도심지 침수피해를 예방하고자 대심도터널을 활용한 수방 대책으로 신월빗물저류배수시설과 광화문대심도배수터널, 서초구대심도저류배수시설 등 대심도터널의 활용을 적극적으로 고려하고 있지만, 국내 관련 설계 및 시공기술이 없어 미국과 일본 등 국외기술에 의존

○ 본 연구에서는 국내 연구개발을 통해 대심도터널 지하유입시설의 최대 유입유량 및 유입효율을 개선하고 터널 내 공기거동 제어를 통한 배수 성능을 개선하였으며, 대심도터널의 적용 및 운영 사례가 많은 일본과 협업해 대심도터널의 성능평가 및 침수피해 감소 효과를 평가할 수 있는 수치해석 모형을 개발하는 등, 국내 대심도터널 관련 기술의 종속 현상을 방지하고 국내외 관련 설계기술을 선도하기 위한 국가적 차원의 기술적 기반을 마련

○ 세부별 달성 목표와 달성도, 연구성과 달성 후 국내기술 수준에 대한 기여도를 요약

구분	성과목표	최종성능목표	연구개발 후 관련 분야 기여도
고효율 지하유입시설에 의한 대심도터널 최적 수리성능 확보기술 개발	안정 와류 유도 신형 유입구 형상 개발	고용량 지하유입시설 개발 (최대 유입유량 100 m^3/s 이상)	기술자립
		고효율 지하유입시설 개발 (유입효율 10% 개선)	기술자립
	접합부 흐름 손실 및 충격량 저감 설계기술	흐름에너지 및 압력 저감 감세장치 개발 (기존 대비 10% 이상 저감)	기술자립
대심도터널의 수리현상과 침수피해 감소 효과에 대한 수치해석 기술 개발	1차원 이상류 흐름 해석모형 개발	수치모형 정확도 개선 (오차율 10% 이내)	기술선도
	2차원 이상류 흐름 해석모형 개발	수치모형 정확도 개선 (오차율 10% 이내)	기술선도
	이상류 흐름 모형 및 지표수 수치모형 연계	수치모형 정확도 개선 (오차율 10% 이내)	기술선도
흐름안정화를 통한 대심도터널 수리성능 개선 기술 개발	공기거동 특성 구명 및 이상류 제어기법 개발	동일규격 대비 흐름 안정률 개선 (최대 10% 개선)	기술자립
	터널계통 수리성능 평가기법 개발	수리성능 평가 항목 개발 (3항목 이상)	기술자립
	터널계통 내 수리성능 개선	동일규격 대비 수리성능 개선 (10% 이상)	기술자립

제4장. 연구개발성과의 활용계획

1. 기술 실용화 및 사업화 추진 방안

○ 지하공간을 활용한 대심도터널의 경우, 도심지 수재해 예방을 위한 기반시설로 활용성이 높아지고 있지만, 국내 설계 및 시공을 통한 활용 사례가 적고 최근 홍수 발생빈도가 다시 감소하여 관련 기술에 관한 관심이 (현재) 저조

○ 미래 시장성과 급변하는 기후변화 추세를 고려, 본 연구과제에서 개발된 기술 성과를 지속적으로 홍보하고 국내시장의 상황을 주시하면서 기술 실용화를 위한 연구책임자 중심의 관련 기업 검토 및 기술이전 의사를 확인 중

○ 2011년 대심도터널을 활용한 서울시의 빗물저류배수시설 건설사업 투자계획이 발표되었으나, 현재까지 신원빗물저류배수시설을 제외하고는 구체적인 사업계획이 수립되지 않았으며, 최근 들어 광화문대심도배수터널과 사당빗물저류배수시설에 대한 사업 필요성이 대두되면서 향후 국내 대심도터널의 설계/시공 분야에 적용 가능한 국내 원천설계기술의 보급이 필요

대심도터널 건설사업명	투자계획(백만원)					
	2011년	2012년	2013년	2014년	2015년	계
신월빗물저류배수시설		12,100	10,000	21,100	106,864	150,064
사당빗물저류배수시설		7,700	8,700	12,000	10,000	68,400
광화문대심도배수터널			33,000			33,000
관악산저류조		20,650				20,650

※ 도시수해안전망 종합개선대책(서울시, 2011)

○ 지하방수로 및 대심도터널 설계/시공 업체(수성엔지니어링 등)에 설계기술 및 연구성과 자료를 제공하고 관련 기술 관심 유도 및 기술 실용화 방안에 대한 협의를 계획 중이며, 대심도터널뿐 아니라 중소규모의 지하저류시설과 우/하수관, 맨홀 등, 실용적 분야의 기술 실용화 확장을 위한 관련 기업도 동시에 검토 중

○ 본 연구성과의 적용을 통한 국내 기반기술 활성화를 위해서는 기술이전 희망 기업과 함께 실규모 수준의 설계 검증 및 기술 실용화를 위한 사전 기술 검증 과정이 필요하며, 서울시 등에서 추진하는 대심도터널의 계획/설계 단계에서부터 국토교통과학기술진흥원과 협력을 통한 기술 적용 및 보급 방안에 대한 구체적 계획 수립이 필요

- 모형실험을 이용한 기술 검증은 설계조건 변화를 다양하게 반영할 수 없는 물질적/시간적 한계를 가지기에, 수치모형을 활용한 설계조건 변화에 따른 성능 분석을 통해 설계 및 기술 검증 수행
- 실제 설계조건 검증을 위한 수치해석모형의 사전기술 검증 과정에 본 연구에서 수행된 지하유입구 및 감세 장치 모형실험 자료를 기초로 활용

○ 모형실험 결과로부터 지하유입구 및 감세 장치의 최대 효율 설계 범위와 실험을 수행하며 습득한 실무자의 과학적, 경험적 설계 지식(know-how)을 기술이전 희망 업체와 적극 공유

- 지하유입구 설계·시공의 경우, 나선식 유입구에서는 종경사 10°, 유도벽 각도가 120° 이하 범위에서 최대 성능을 가지며, 접선식 유입구에서는 저유량 유입조건에서 와류 흐름 유도 효과가 감소해 다단식 유입구로 개선

- 시설 규모가 동일할 경우, 저유량 유입조건에서는 적용 가능한 바닥경사의 범위가 넓지만, 고유량 유입조건에서는 바닥경사 조건이 한정적, 목표 설계 유량 및 시설 규모에 따라 바닥경사 설계 범위를 도출 가능
- 접선식 유입구와 다단식 유입구의 경우, 유입 흐름이 강한 사류 흐름으로 유입되어 흐름 제어가 쉽지 않기 때문에, 상류 흐름 유입을 위해 유입구 바닥면 경사를 없애고, 와류 유도 효과 개선을 위해 흐름 가속을 위한 계단형 다단식 구조를 도입(다단식 나선 유입구), 수리실험을 통한 다단식 구조의 수직 깊이는 유입구 폭의 40%~50%가 적당
- 감세 장치의 화살촉 하단부 연직 높이가 터널 접합부의 상부 벽체와 가까울수록 감세효과가 크게 나타났으며, 감세효과 향상을 위해 나선식 유도벽의 설치 경로가 터널 접합부를 지나지 않도록 설계

○ 한국건설기술연구원의 KICT Zine, 대한토목학회의 학회지, 한국수자원학회의 물과미래 등, 기술기사 게재로 대심도터널 지하유입구의 유입효율 개선 기술과 터널 내 공기거동 예측 및 수리성능 평가 방안, 대심도터널 성능 예측 및 피해 감소 효과 분석 모형에 대한 지속적인 기술홍보를 진행하고 기술이전 및 관심 업체를 검토

○ 한국건설기술연구원 내부 실용화 목표 자체사업 지원(2019. 2. 지원, 심사중)을 통한 설계기술 검증 및 추가 연구 방안 마련 시도

- 유입유량별 유입구 및 감세부 설계 안정성 확보방안 보완
- 안정적 홍수량 배수를 위한 유입시설-감세부-터널부 연계 설계 방안 보완
- 홍수방어용 고효율 대심도터널에 관한 설계가이드 보완
- 실제 대심도터널의 규모적 특성으로 인한 실규모 검증의 한계를 보완하고자 소규모 지하저류시설의 현장적용(관련 업체 확인 및 기술이전)을 통한 성능 검토

○ 설계 및 기술 검증 과정에서 본 연구의 실험결과를 기초로 수치모형 적용성을 확인한 후, 수치모형을 이용해 유입구 크기와 형상 제원, 감세 장치의 배치, 터널부 접합부 형상 등, 설계조건에 따른 성능 변화를 분석, 효율적 설계조건을 도출

- 대심도터널 및 지하저류시설 분야의 기술이전 희망 업체 확인 후 실제 현상 시공상의 문제점과 개선 부분에 대한 자문을 수행하고 가능할 경우 해당 부분을 보완할 계획

2. 기술 실용화 및 사업화의 기대효과

○ 대심도터널 설계/시공 시 국외기술 수입에 따른 로열티 등 소요예산 절감 가능

- 대심도터널 설계/시공 관련 국내 원천설계기술의 개발과 기술이전을 통한 국내 적용성 확장으로 국외기술에 대한 로열티로 지급하는 국비 유출을 최소 50억~100억 절감 가능

○ 2015년 대심도터널 설계/시공 분야의 국내기술 수준은 미국과 일본 등, 선진국 대비 60% 수준으로 본 연구성과의 기술 실용화 및 사업화를 통해 선진국 대비 80%~90%의 기술 수준 달성 가능

붙임. 참고 문헌

1. 강상준, 이양주. 2011. 천사의 선택을 위한 장마철 홍수대책. 경기연구원, 이슈&진단, 2011(6), pp. 1-24.
2. 국토교통부. 2012. 건설교통 R&D 중장기계획(2013~2017).
3. 국토교통부. 2012. 도로설계편람.
4. 국토교통부. 2016. 도로설계기준.
5. 기상청. 2011. 한국기후변화백서.
6. Anglart, H., and Nylund, O. 1996. CFD application to prediction of void distribution in two-phase bubbly flows in rod bundles. Nuclear Engineering and Design, 163(1-2), pp. 81-98.
7. Abbott, M. B., and Verwey A. 1970. Four Point Method of Characteristics. J. Hydrulics Div. ASCE. 96, pp. 2549-2564.
8. Baker, O. 1953. Design of pipelines for simultaneous Flow of oil and gas. Proc., Fall Meeting of the Petroleum Branch of AIME., Society of Petroleum Engineers, Dallas, Texas, 323-G, pp.1-16.
9. Bannari, R., and Selma, B. 2008. Three-dimensional mathematical modeling of dispersed two-phase flow using class method of population balance in bubble columns. Computers & chemical engineering, 32(12), pp. 3224-3237.
10. Bonizzi, M., and Issa, R. I. 2003. A model for simulating gas bubble entrainment in two-phase horizontal slug flow. International journal of multiphase flow, 29(11), pp. 1685-1717.
11. Chaudhry, M. H. 1979. Applied hydraulic transients. New York, Van Nostrand Reinhold Co.
12. Choi, S., and Lee, S. 2016. The Numerical Simulation Considering Air Pressure and the Influence Factor Analysis of Geyser in a Stormwater Tunnel with Large Diameter. Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. 16, No. 2, pp. 133-139.
13. Christopher E. 2005. Fundamentals of multiphase flows. California Institute of Technology. Cambridge University, pp. 163-169.
14. Cong, J., Chan, S. N., and Lee, J. H. 2017. Geyser formation by release of entrapped air from horizontal pipe into vertical shaft. Journal of Hydraulic Engineering, 143(9), pp. 04017039-1-13.
15. Cunge, J. A., and Wegner, M. 964. Integration numerique des equations d'ecoulement de Barre de St. Venant par un schema implicite de differences finies. Application au cas d'une galerie tantot en charge tantot a surface libre. La Houille Blanche, 1, pp. 33 - 39.
16. Drioli, C. 1947. Su un particolare tipo di imbocco per pozzidi scarico. L'Energia Elettrica, Vol. 24, No. 10, pp. 447-452.
17. Ghia, U., Ghia, K. N., and Shin, C. T. 1982. High-Re solutions for incompressible flow using the Navier-Stokes equations and a multigrid method. Journal of computational physics, 48(3), pp. 387-411.
18. Hager, W. H. 1999. Wastewater Hydraulics. Springer, Berlin, New York, USA.
19. Hamam, M. A., and McCorquodale, J. A. 1985. Transient conditions in the transition from gravity to surcharged sewer flow. Can. J. Civ. Eng.. 9, pp. 189-196.
20. IPCC. 2014. Climate change 2014. Synthesis Report.

21. Jain, S. C., and Ettema, R. 1987. Swirling flow problems at intakes - Vortex-flow intakes. IAHR Hydraulic Structures Design Manual, Balkema, Rotterdam, Netherlands, pp. 125-137.

22. Jain, S. C., and Kennedy, J. F. 1983. Vortex-flow drop structures for the Milwaukee Metropolitan Sewerage District inline storage system. IIHR Report (Iowa Institute of Hydraulic Research).

23. Kellenberger, M. 1988. Wirbelfallschächte in der Kanalisationstechnik. Zürich. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETHZ, Nr. 98

24. Lewis, J. W. 2011. A Physical Investigation of Air/Water Interactions Leading to Geyser Events in Rapid Filling Pipelines. Ph.D. disertation, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, USA, pp. 109-133.

25. Li, J., and McCorquodale, A. 1999. Modeling Mixed Flow in Storm Sewers. J. Hydr. Eng., 125(11), pp. 1170 - 1180.

26. Lun, I., Calay, R. K., and Holdo, A. E. 1996. Modelling two-phase flows using CFD. Applied Energy, 53(3), pp. 299-314.

27. Mandhane, J. M., Gregory, G. A., and Aziz, K. A. 1974. A flow pattern map for gas-liquid flow in horiziontal pipes. Int. J. Multiphase flow, 1, pp. 537-553.

28. Martin, C. S. 1976. Entrapped Air in Pipelines. Proc. Second Int. Conf. on Pressure Surges London, UK.

29. Politano, M., Oodgard, A. J., and Klecan, W. 2007. Case Study: Numerical Evaluation of Hydraulic Transients in a Combined Sewer Overflow Tunnel System. J. Hydr. Engrg., 133(10), pp. 1103-1110.

30. Preissmann, A., and Cunge J. A. 1961. Calcul des intumescences sur machines électroniques, Proc. 9th Congress IAHR, Dubrovnik, pp. 656 - 664.

31. Song, C. S. S., Cardle, J. A., and Leung, K. S. 1983. Transient Mixed-flow Models for Storm Sewers. J. Hydr. Engrg., 109(11), pp. 1487 - 1504.

32. Taylor, Z. J., Gurka, R., Kopp, G. A., and Liberzon, A. 2010. Long-duration time-resolved PIV to study unsteady aerodynamics. IEEE Trans. Instrum. Meas., 59, pp. 3262-3269.

33. Thaker, J. P., and Banerjee, J. 2013. CFD simulation of two-phase flow phenomena in horizontal pipelines using openfoam. In Proc. 40th Nat. Conf. on Fluid Mech. & Fluid Power.

34. Vasconcelos, J. G., and Wright, S. J. 2006. Mechanisms for Air pocket Entrapment in Stormwater Storage Tunnels Proc. ASCE EWRI World Environmental and Water Resources Congress Paper 40856-14275, Omaha, NE.

35. Wallis, G. B. 1969. One-dimensional two-phase flow, McGraw-Hill, New York, N.Y., pp. 288-302.

36. Weisman, J. 1983. Two-phase flow patterns. Handbook of fluids in motion, N.P. Cheremisinoff, and R. Gupta(Eds.), Ann Arbor Science Publishers, Ann Arbor MI, pp. 409-425.

37. Wright, S. J., Lewis, J. W., and Vasconcelos, J. G. 2011. Geysering in Rapidly Filling Storm-Water Tunnels J. Hydr. Engrg. , 137(1), pp. 112-115.

38. Wylie, E. B., and Streeter, V. L. 1993. Fluid transient in systems. Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall.

39. Zhou, F., Hicks, F. E., and Steffler, P. M. 2002. Transient Flow in a Rapidly Filling Horizontal Pipe Containing Trapped Air. J. Hydr. Engrg., 128(6), pp. 625 - 634.

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.

2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.

3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.