

연구개발 최종보고서·요약서

I. 인쇄 규격

1. 크기: A4 신판(가로 210mm * 세로 297mm)
2. 제본: 좌철
3. 용지
 - 가. 표지: 백상지(150g/m²)
 - 나. 내용: 백상지(80g/m²)
4. 인쇄 방법
 - 가. 표지: 바탕 백색, 활자 흑색
 - 나. 내용: 흑색 지정 활자

II. 편집 순서

1. 표지
2. 제출문
3. 보고서 요약서
4. 국문 요약문
5. 영문 요약문
6. 영문 목차
7. 본문 목차
8. 뒷면지

III. 참고 사항

전자 조판 인쇄 시에는 이에 준한다.

IV. 편집 순서별 서식

1. 표지

(옆면)

(앞면)

18CTAP-
C132929-
02

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

국토교통기술촉진사업 최종보고서

R&D / 18CTAP-C132929-02

보

하
류

하
도

세
굴
현
상

3
차
원

수
치
모
의

최
종
보
고
서

(건고덕
14p)

2019

국
토
교
통
과
학
기
술
진
흥
원

(건고덕
17p)

보 하류 하도 세굴 현상 3차원 수치모의 최종보고서

2019. 06. 07.

주관연구기관 / 연세대학교 산학협력단

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

2. 제출문

제 출 문

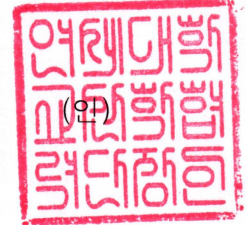
국토교통과학기술진흥원 귀하

‘보 하류 하도 세굴 현상 3차원 수치모의’ (연구개발 기간 : 2017. 06. 30 ~ 2019. 03. 30) 과제
의 최종보고서 10부를 제출합니다.

2019. 06. 07.

주관연구기관명 : 연세대학교 산학협력단

(이원용)



주관연구기관책임자: 최성욱

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

3. 보고서 요약서

보고서 요약서

과제 고유 번호	18CTAP-C132 929-02	해당 단계 연구 기간	2017.06.30 ~ 2019.03.30	단계구분	2/2
연구사업명	중사업명				
	세부사업명	국토교통기술촉진연구사업			
연구과제명	대과제명				
	세부과제명	보 하류 하도 세굴 현상 3차원 수치모의			
연구책임자	최성욱	해당단계 참여연구원 수	총: 11 명 내부: 11 명 외부: 0 명	해당단계 연구비	정부: 150,000 천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 150,000 천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 13 명 내부: 13 명 외부: 0 명	총 연구비	정부: 370,000 천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 370,000 천원
연구기관명 및 소속 부서명	연세대 학교 산학협력단				
국제공동연구					
위탁연구				연구책임자: 최 성 욱	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	해당 없음
-------------------------	-------

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설 · 장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록·기 탁 번호											

국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황

구입기관	연구시설 · 장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호

- ☐ 3차원 유동해석 모형 구축을 위한 난류모형 및 해석 알고리즘 조사
- ☐ 3차원 유동해석 모형을 구축 및 검증
- ☐ 구축된 모형을 활용 보 하류 유동 특성 파악
- ☐ 이상흐름 모형을 이용하여 세굴예측모형 개발
- ☐ 침강 및 붕괴 사례에 적용하여 모형의 적용성 검토
- ☐ 보 하류 세굴 현상 모의 및 검토
- ☐ 물받이 길이, 수문 개방, 하류 수심, 방류 유속등의 의한 세굴심 검토
- ☐ 모의 결과를 바탕으로 보 하류 하도 안정성 검토

보고서 면수

87

4. 국문 요약문

연구의 목적 및 내용	최근 하천 횡단 시설물 건설에 따른 시설물 하류부의 유사 공급이 차단되고 있으며, 4대강 사업 이후 16개 보 하류 하도에서 지속적인 세굴 문제가 발생하고 있다. 또한 보의 공학적 기능 이외에도 안전 문제에 대한 국민의 관심이 증대되고 있다. 이와 같은 국내 하천환경의 변화 및 대규모 보의 기능 및 안전성 문제가 대두되면서, 보 하류 하도의 세굴 현상을 예측하고 보의 안전과 하천의 안정성을 평가하여 대책을 제시할 수 있는 공학적 시뮬레이션 툴이 필요한 상황이다. 따라서 본 연구는 보 하류 하도에서 국부세굴 현상을 모의할 수 있는 3차원 수치모형의 개발을 목표로 한다. 세부 목표로는 보 하류 하도의 난류를 모의할 수 있는 3차원 유동해석 모형 및 세굴예측 모형 개발, 그리고 보 하류 하도 안정성 평가 기법 제시가 있다.				
	1차년도에는 보 하류 하도 세굴 현상 모의에 적합한 난류 모형을 제시하고, 유동해석 알고리즘을 정립, 유동해석 모형 개발을 수행하였다. 개발된 모형을 실험에 적용하여 검증하고, 보 하류 하도 유동에 대한 분석을 수행하였다. 2차년도에는 세굴예측 모형을 제시하고 유동 모형과 결합하여 통합모형 구축을 수행하였다. 개발된 모형을 이용하여 국부세굴을 예측하고 보의 안전성과 보 하류 하도의 안정성을 평가하는 기법을 제시하였다. 또한, 보에서 방류되는 유량에 따른 보 하류 하도의 안정성을 평가하여 보의 안전과 보 하류 하도의 안정에 대한 구조적/비구조적 대책을 제시하였다.				
연구개발성과	본 연구개발과제를 수행함으로써 발생하는 핵심성과는 보 하류 세굴예측 통합모형을 개발하고 하도 안정성 평가 기법을 제시하는 것이다. 세굴예측 통합모형은 3차원 유동해석 모형과 유사이송에 의한 세굴예측 모형을 결합한 것으로 보 하류 하도에서 발생하는 국부세굴을 정밀하게 예측할 수 있는 모형이다. 또한, 개발된 모형을 기반으로 보에서 방류되는 유량에 따른 국부세굴을 예측하고 보 하류 하도 안정성 평가 기법을 구축한다.				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	연구개발로 구축된 모형은 국부세굴 예측을 통해 보의 운영에 필수적인 기초자료를 제공하고, 개발된 안정성 평가 기법을 이용하여 유지·보수 지침을 작성하는데 활용될 수 있다. 또한, 하천시설물 설치 시 사전 유황분석을 수행하여 영향을 최소화하고, 하천개발 사업 이후의 안정 하도 유지방안 수립에 활용될 수 있다. 그리고 세굴예측 통합모형을 활용한 보 하류 하도 관리를 통해 하천의 홍수방어능력 증대를 이룰 수 있으며, 홍수기 보 하류 하도의 유사량 및 하상변동을 정밀하게 예측하여 효율적인 하천의 유사관리에 활용될 수 있다. 기술적 측면에서 정밀 수치모의를 통해 선진화된 보 관리 기술을 확보할 수 있으며, 돌발홍수 대비 보의 안전성 확보 및 보 운영에 있어 지속적인 유지·보수 지침을 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 경제적·산업적 측면에서는 하천개발에 따른 하천의 안정성 저하라는 이익 창출의 걸림돌을 미연에 방지하며, 하천시설물의 안전한 운영을 통해 경제적 피해를 예방할 수 있을 것으로 기대한다. 또한, 이상기후 및 돌발홍수로 인해 발생할 수 있는 피해에 선제 대응을 가능하게 하여 피해를 경감시킬 수 있을 것으로 기대한다. 사회적 측면에서는 보의 안전성을 증대시키고, 생태하천의 친수 기능을 유지함으로써 보에 대한 국민의 부정적인 인식을 개선할 수 있을 것으로 기대한다.				
핵심어 (5개 이내)	보	국부세굴	기후변화	유사이송	LES

〈 SUMMARY 〉

Purpose & Contents	Construction of hydraulic structures crossing the stream channel interrupts sediment supply in the downstream reach of the structure. It was reported that the 16 weirs, which were constructed during the 4 Major River Project in Korea, have caused scour problems in the downstream reach of the weirs. This problem increased concerns over the function and safety of the weirs. As increasing concerns over the stream environment and the function and safety of the weirs, an engineering tool, which is possible to simulate scours and to establish the management strategy, was required. The objective of this project is to develop a 3D numerical model that is able to simulate local scour at the downstream reach of the weir. The specific objectives include the development of a 3D flow model for simulating the turbulent flow and local scour and a technique for assessing the stream channel stability using developed models. In the first year, an appropriate turbulence model for computing local scour downstream of the weir is suggested. An algorithm for the hydrodynamic simulation is devised, and the numerical model is developed. The developed numerical model is applied to the field-scale case for the verification. In the second year, the integrated model is presented by combining the flow model with the scour prediction model. Using the integrated model, local scour downstream of the weir is predicted, and a methodology for evaluating the safety of the weir and stream channel stability is presented. The stability of the stream channel downstream of the weir is investigated for the various discharges, and structural and non-structural measures are suggested for the safety of the weir and the stability of the downstream channel.				
Results	Main outcomes from the present research project include the development of the 3D numerical model which is able to predict local scour downstream of the weir and the suggestion of a methodology which is able to evaluate channel stability using the developed numerical model. The integrated model, which is a combination of a 3D flow model and a sediment transport model, can predict local scour in the downstream of the weir precisely. Using the developed model, local scour downstream of the weir is predicted for the various discharges and an evaluation methodology for the stability of the downstream channel is established.				
Expected Contribution	Using the integrated model, local scour downstream of the weir can be predicted for the various discharges and the impact of scour on the channel stability in the downstream reach of the weir can be examined. The results from numerical simulations can be used to establish the management direction for the maintenance of the function of the weir. The numerical model can also be used before the construction stage to establish a plan for reducing the impact of hydraulic installations. It can be also used to find out the degree of impacts on the stream channel stability. In addition, the flood control ability can be improved and efficient sediment management is expected using the precise prediction of the sediment discharge and local scour in the downstream reach of the weir. In the technological aspect, the integrated model is expected to provide an advanced technique for predicting local scour downstream of the weir. The safety of the weir from flash floods would be enhanced, and the maintenance strategy of the weir would be upgraded. In the aspects of economy and industry, damages from the flood disaster can be decreased, while benefits from the operation of hydraulic installations can be increased. Moreover, the damages from flash floods due to the climate change can be reduced. In the social aspect, improved safety of hydraulic installations can also contribute to the maintenance of the amenity values of the stream and the improvement of negative opinion for the river works.				
Keywords	weir	local scour	climate change	sediment transport	large eddy simulation

< Contents >

Chapter 1. Research outline	1
1. Research background	1
2. Research needs	2
3. Research importance	3
4. Research objectives	4
5. Research creativity and innovation	5
Chapter 2. Investigation of previous researches	7
1. Previous researches in Korea	7
2. Previous researches abroad	7
3. Distinction from previous research	9
Chapter 3. Research content and outcome	12
1. Research system chart and schedule	12
2. Development of model for flow analysis	14
2.1 Flow equation	14
2.2 Algorithm	18
2.3 Boundary and initial conditions	21
2.4 Model application and validation	24
3. Integrated model for predicting scour	45
3.1 Two-phase flow equation	45
3.2 Model application and validation	53
4. Evaluation of stability of downstream channel of the weir	72
4.1 Evaluation technique	72
4.1 Evaluation of stability	73
Chapter 4. Objective achievement and expected contribution	76
Chapter 5. Applicability of the research outcome	77
Chapter 6. Newly known technology	78
Chapter 7. Security level of research outcome	79
Chapter 8. Registered equipment in the system	79
Chapter 9. Safety education in the laboratory	79
Chapter 10. Representative research performance	82
Chapter 11. The others	83
Chapter 12. References	83

〈 목 차 〉

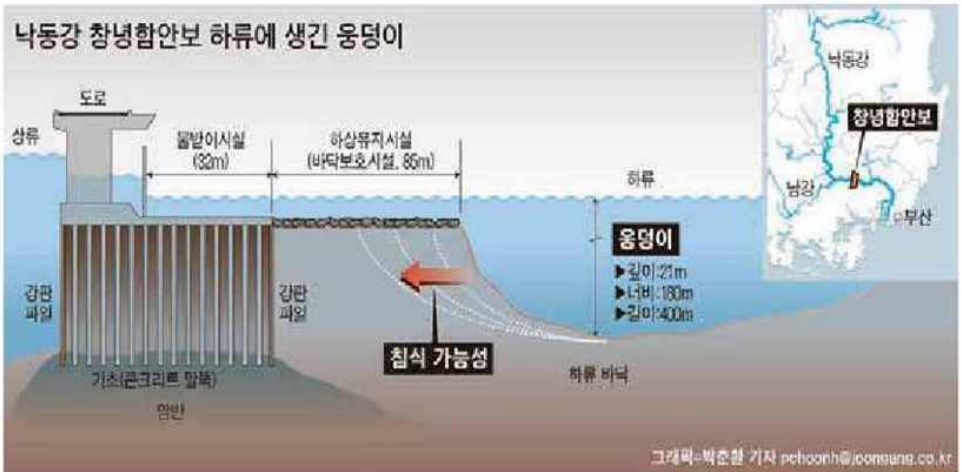
제1장. 연구개발과제의 개요	1
1. 연구개발의 배경	1
2. 연구개발의 필요성	2
3. 연구개발의 중요성	3
4. 연구개발의 목표	4
5. 연구개발의 창의성·혁신성 등	5
제2장. 국내외 기술 개발 현황	7
1. 국내 기술개발 현황	7
2. 국외 기술개발 현황	7
3. 기존 연구와의 차별성	9
제3장. 연구수행 내용 및 성과	12
1. 연구수행 체계도 및 일정	12
2. 유동해석 모형 구축	14
2.1 유동방정식	14
2.2 유동 해석 알고리즘	18
2.3 경계조건 및 초기조건	21
2.4 모형 적용 및 검증	24
3. 세굴예측 통합 모형 구축	45
3.1 이상 흐름 모형의 지배방정식	45
3.2 모형의 적용 및 검증	53
4. 보 하류 하도 안정성 평가	72
4.1 안정성 평가 기법	72
4.2 안정성 평가	73
제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	76
제5장. 연구개발성과의 활용 계획	77
제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	78
제7장. 연구개발성과의 보안등급	79
제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	79
제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	79
제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	82
제11장. 기타 사항	83
제12장. 참고 문헌	83

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발의 배경

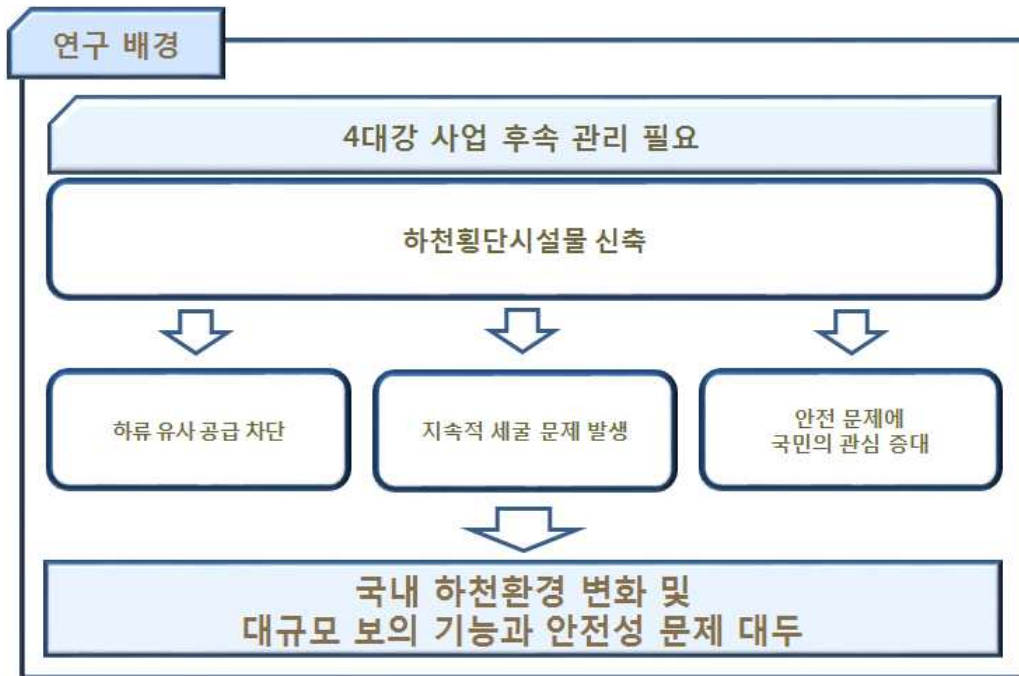
□ 4대강 보 세굴 발생 현황

- 2012년 낙동강 창녕함안보 하류 깊이 21 m, 길이 400 m, 폭 180 m 세굴 발생 (중앙일보)
- 2015년 낙동강 창녕함안보 홍수기에 바닥보호공 구간에서 200 m² 면적의 바위 구조물 유실, 9.3m 세굴 발생. 물받이공 아래 설치한 세굴방지공까지 포함 11,000 m² 유실, 최고 깊이 9.8m 세굴 (YTN)
- 2012년 낙동강 달성보 하류 깊이 10 m, 길이 300 m, 폭 150 m 세굴 발생 (오마이뉴스)
- 2012년 낙동강 칠곡보 하류 방향 40 ~ 300 m 사이에 심각한 세굴 발생 (오마이뉴스)
- 2012년 금강 공주보 상류 4개소, 하류 2개소에서 세굴 발생 (오마이뉴스)
- 2015년 금강 공주보 바닥보호공 일부 유실, 홍수기 집중 방류시 세굴 방지를 위해 보강공사 (노컷뉴스)
- 2014년 금강 백제보 하류 물받이공 부근 사석보호공 유실되면 세굴 발생 (오마이뉴스)
- 2013년 영산강 승촌보 하류 가동보의 정중앙 지점의 4곳에서 깊이 10.5 m에 달하는 세굴 발생 (광주드림)
- 2013년 영산강 승촌보 중앙의 하류 방향 20 ~ 30 m 지점에서 깊이 5 ~ 6 m 세굴 발생 (한겨레)

낙동강 창녕함안보 (중앙일보, 2012)	
낙동강 달성보 (오마이뉴스, 2012)	

□ 4대강 사업 후속 관리 필요

- 하천 횡단 시설물 신축에 따른 하류 유사 공급 차단
- 4대강 사업 이후 16개 보 하류 하도에서 지속적인 세굴 문제 발생
- 보의 공학적 기능 이외의 안전 문제에 대한 국민의 관심 증대



2. 연구개발의 필요성

□ 국내 하천환경의 변화

- 도시화 및 개발로 인하여 하천의 홍수량 증가와 침투유량 도달시간 감소. 이에 따른 하천의 홍수 소통 능력 증대 필요
- 기후변화에 따른 돌발홍수 발생빈도 증가 (기상청, 2009). 재난관리 측면에서 하천홍수 대비 필요
- 하천사업 및 하천개발로 인하여 하천 유사량 변화

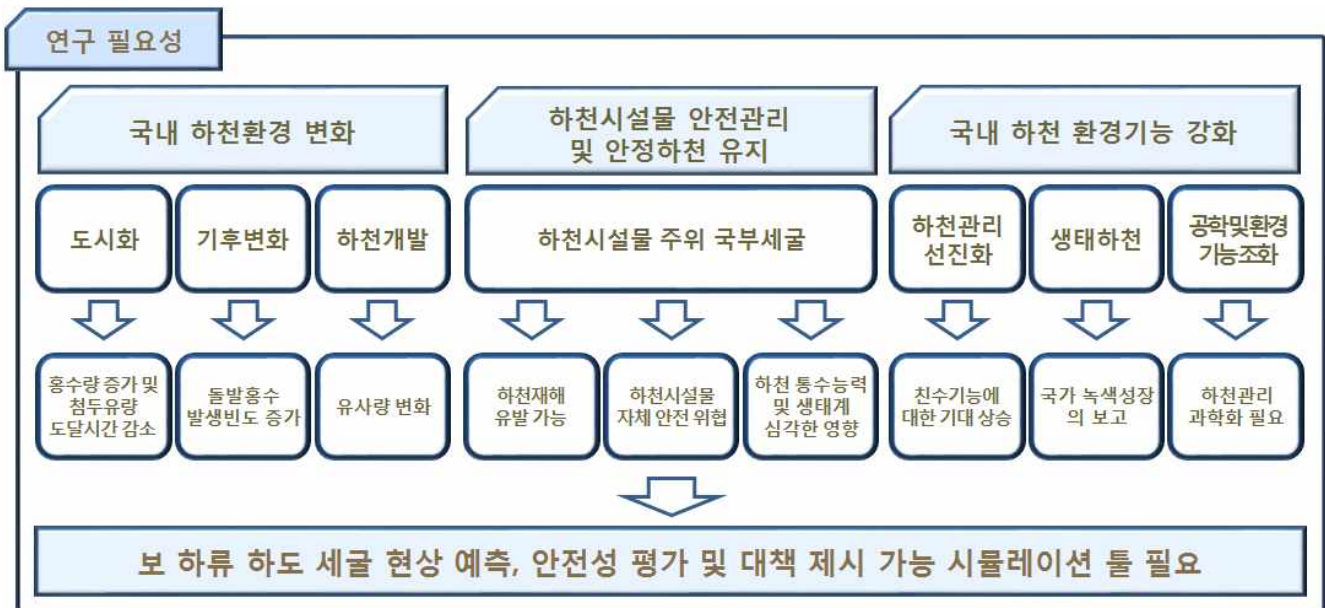
□ 하천시설물 안전관리 및 안정 하천 유지

- 하천시설물 하류의 과도한 세굴은 유동을 불안정하게 하여 홍수 시 하천재해 유발 가능
- 세굴이 지속해서 진행될 경우 하천시설물 자체의 안전을 위협
- 하도 세굴로 인한 하류 유사량 변화는 하천 하천의 통수능력과 생태계에 심각한 영향을 미침

□ 국내 하천의 환경 기능 강화

- 선진국으로 진입할수록 하천의 친수 기능에 대한 국민의 기대수준 높아짐
- 수자원으로서 생태하천은 국가 녹색성장의 보고
- 하천의 공학적 기능 및 환경 기능의 조화를 위하여 하천관리의 과학화 및 고도화 추진

▷ 이와 같은 국내 하천환경의 변화 및 대규모 보의 기능 및 안전성 문제가 대두. 보 하류 하도의 국부세굴 현상을 예측하고, 보의 안전과 하천의 안정성을 평가하여 대책을 제시할 수 있는 공학적 시뮬레이션 필요



3. 연구개발의 중요성

□ 홍수시 보의 안전 및 하천의 안정성 확보

- 국부세굴 예측을 통한 보의 안전성 평가 기법 필요
- 유사이송 및 하상변동 예측을 통한 보 하류 안정하도 유지
- 유사량 및 유황 변화에 따른 효율적인 보 운영 방안 필요

□ 돌발홍수 발생 및 홍수량 증가에 따른 하천의 치수능력 제고

- 보 하류 하도의 형태 (morphology)를 고려한 3차원 모형을 활용 보의 유지·관리
- 기후변화에 의한 이상 수문량 발생 시 보 하류 하도의 안정성 유지
- 하상변동 모의를 통한 보 하류 하도 침식/퇴적 구간 예측 및 세굴 방지 대책 수립

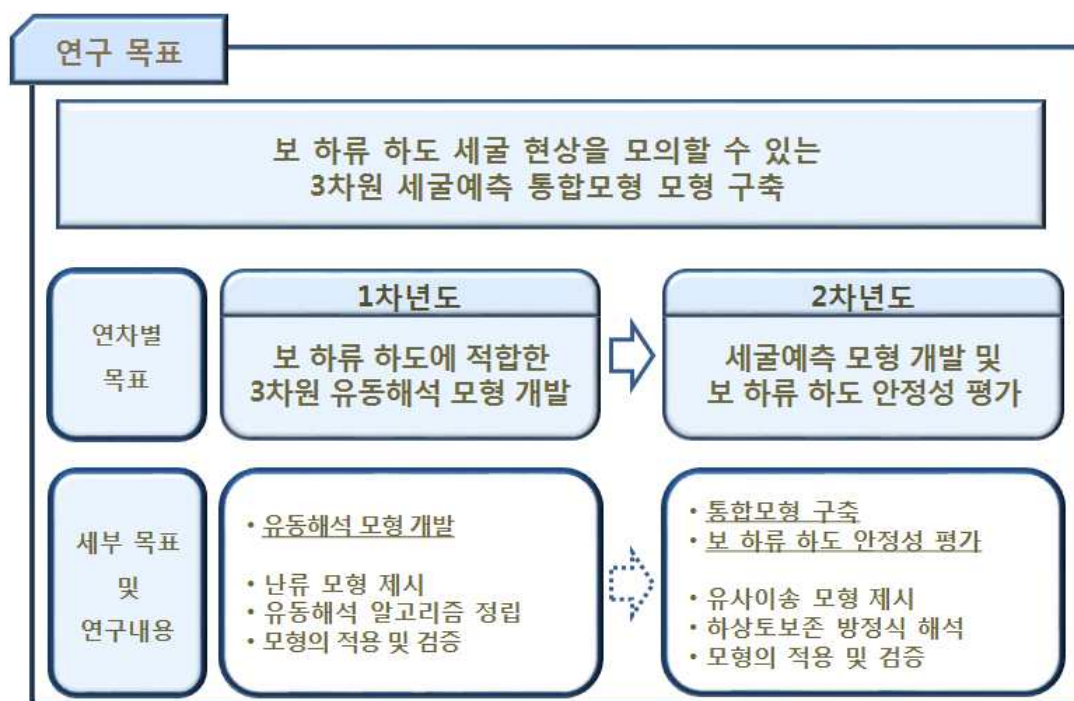
□ 하천환경 관리를 위한 보의 기능 유지

- 세굴 발생 최소화를 위한 방류 대책 제시
- 하류 세굴 억제를 위한 시설물 계획 제시
- 세굴 발생시 안정하도 유지방안 제시

4. 연구개발의 목표

4.1 연구개발의 최종목표

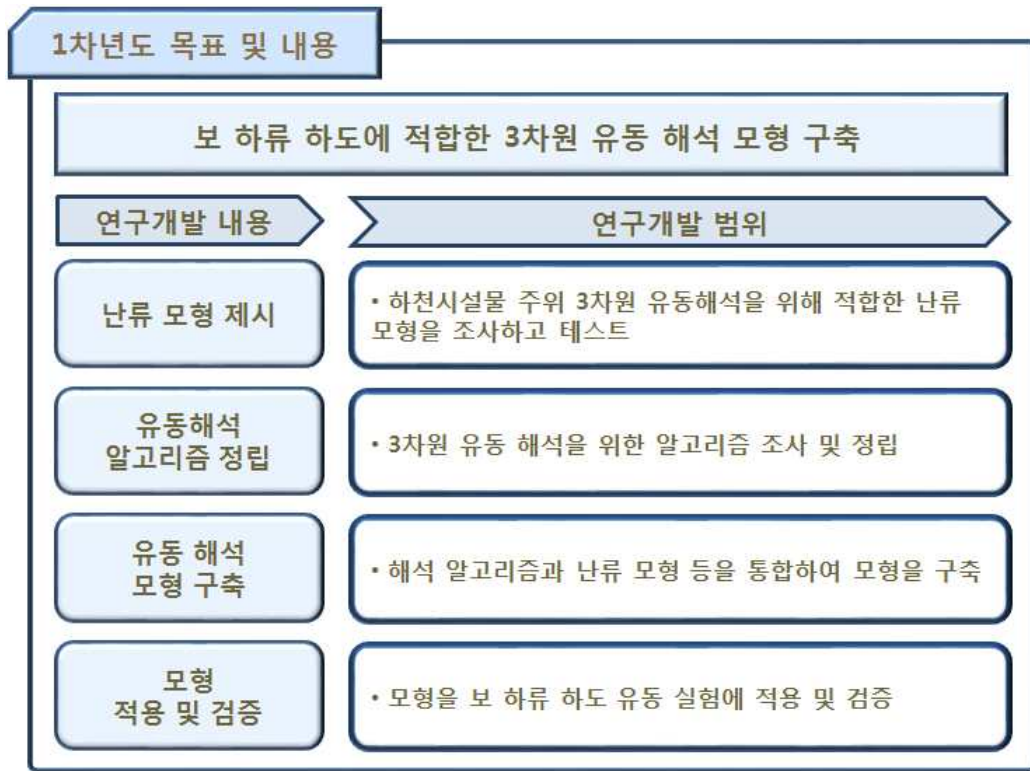
구분	내용
최종 목표	보 하류 하도 세굴 현상을 모의할 수 있는 3차원 세굴예측 통합모형 구축
세부 목표	- 보 하류 하도에 적합한 유동해석 모형 개발 - 3차원 세굴예측 모형 개발 - 보 하류 하도 안정성 평가 기법 제시



4.2 1차년도 연구개발 목표 및 내용

- ☐ 개발 목표
- 보 하류 하도에 적합한 3차원 유동해석 모형 개발

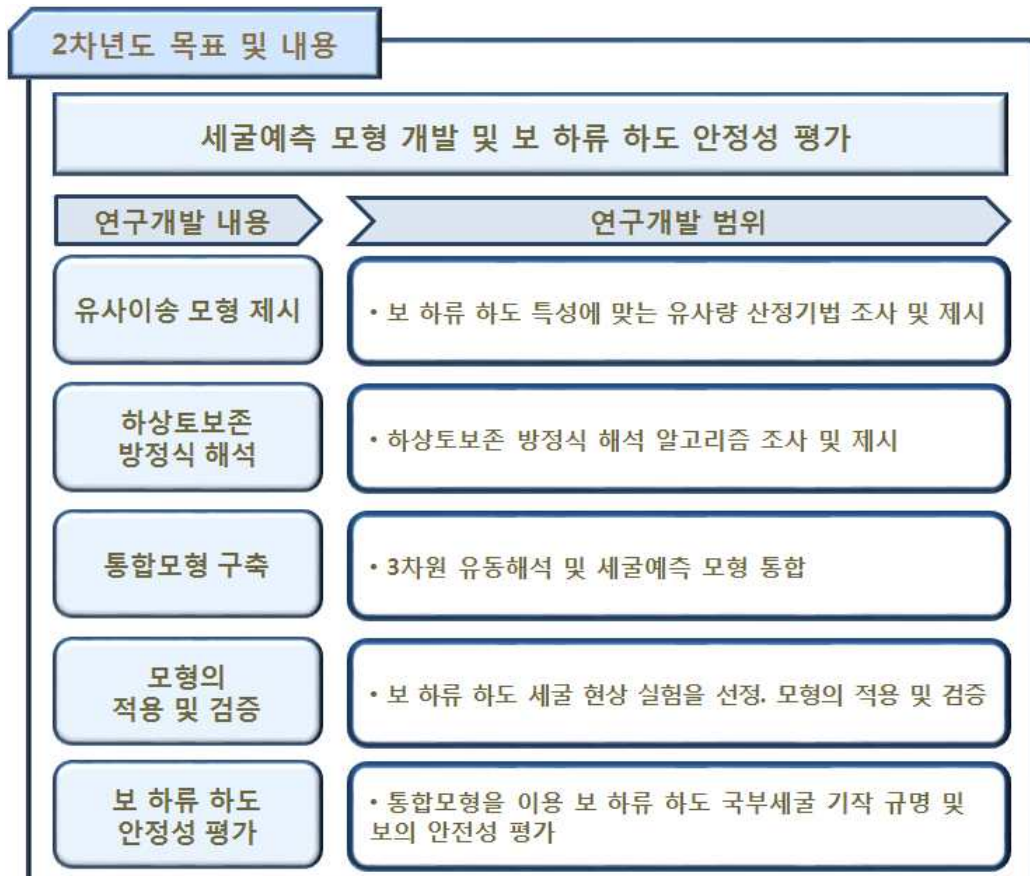
- ☐ 개발 내용 및 범위



4.3 2차년도 연구개발 목표 및 내용

- ☐ 개발 목표
- 세굴예측 모형 개발 및 보 하류 하도 안정성 평가

- ☐ 개발 내용 및 범위



5. 연구개발의 창의성 · 혁신성 등

□ 보 하류 세굴 직접 계산

- 하천에서 세굴을 계산하기 위해서는 난류 유동, 유사이송, 하상과의 상호작용을 정확히 모의해야 함
- 하천에서 보 하류 난류유동 계산을 위해서 가장 신뢰할 수 있는 방법인 LES 기법 도입 (Rodi et al., 2013)
- 과거 국내 대하천에 대해 기수립된 유사이송 공식 (Choi and Lee, 2015a; 2015b)과 하상변동 기법 (Choi and Joung, 2012)을 이용하여 하류 하도에서 발달하는 세굴공 예측

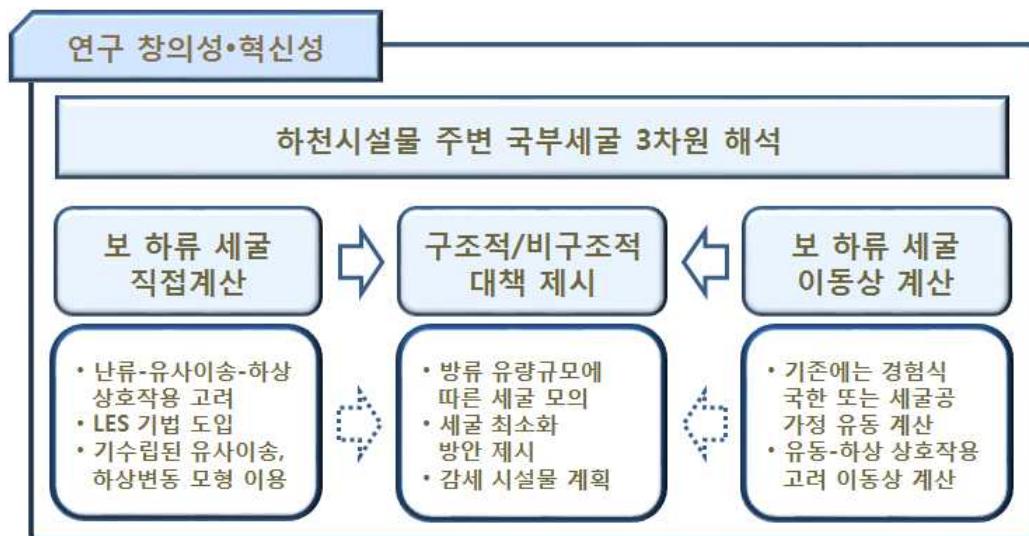
□ 보 하류 세굴 이동상 계산

- 기존에는 실내실험 등을 통한 세굴에 관한 경험식을 제시하는 연구가 대부분
- 근래 계산유체역학 (computational fluid dynamics)에 근거한 연구들도 세굴공을 가정하고 유동을 계산
- 본 연구에서 제안하는 방법은 유동과 하상의 상호작용을 고려하여 보 하류 하도의 세굴 직접 계산

□ 세굴에 대한 구조적 · 비구조적 대책 제시

- 보에서 방류되는 유량 규모에 따른 하류 하도 세굴 모의
- 방류 형태에 따른 하류 하도 세굴특성을 분석하여 세굴을 최소화하는 방안 제시
- 비구조적 방법의 대책 제시가 어려운 경우 하류 하도 감세 시설물 계획 제시

- 본 연구의 창의성 및 혁신성은 하천시설물 주변 국부세굴을 3차원으로 해석함으로써, 국부세굴에 대한 정교한 분석과 정확한 예측을 실현하고 대책을 제시하는 데 있음



제2장. 국내외 기술 개발 현황

1. 국내 기술개발 현황

- 김창성 등 (2010)은 수리실험을 통해 물반이공에서 발생하는 세굴 현상과 사석보호공의 포설두께에 따른 침하량을 분석. 필터가 없는 사석보호공 설치 시 무차원 침하량 산정식을 제시
- 여창건 등 (2011)은 수리실험을 통해 보 형상에 따른 하류부 세굴의 시간적 변화를 분석. 설계홍수지속기간을 반영한 세굴심에 대한 경험식 제시
- 여창건 (2010)은 수리실험과 Flow3D를 이용한 이동상 모의를 통해 세굴공 발달에 대한 경험식을 제시
- 한국건설기술연구원 (2013)은 수리실험과 Flow3D를 이용한 고정상 모의를 통해 보 하류 세굴 방지를 위한 감세구조물의 배치와 유형을 제안
- Moreno (2014)은 2차원 모형인 TELEMAC 2D를 이용한 이동상 모의를 통해 강정고령보의 운영 조건에 따른 보 하류 하도 세굴 현상을 예측

▷ 국내에서는 세굴 발달 현상에 대하여 실내실험이 상당히 제한적으로 수행됨

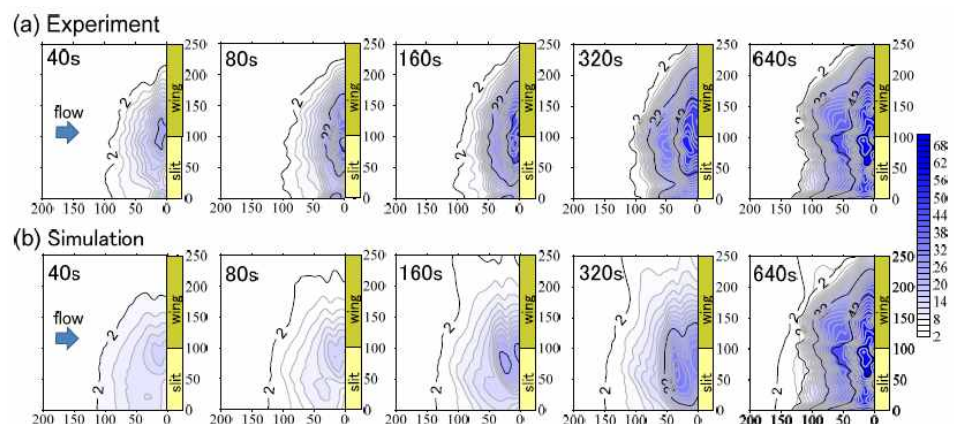
2. 국외 기술개발 현황

- Ota et al. (2016a)은 3차원 이동상 모의를 통해 보 주변에서 발생하는 세굴 현상을 성공적으로 모의
- Khosronejad et al. (2016)은 3차원 이동상 모의를 통해 밴드웨이 보 (bandway weir)의 적절한 설치 지침을 제시
- Ota et al. (2016b)은 3차원 이동상 모의를 통해 보 주변과 수문에서 발생하는 세굴의 발달 과정을 성공적으로 모의

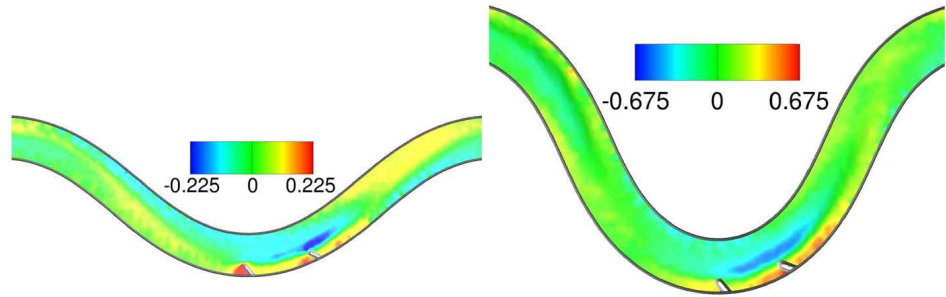
▷ 국외에서는 3차원 이동상 모의를 통해 수공구조물 주변에서 발생하는 세굴 현상을 매우 정확하게 예측하는 수준. 또한 3차원 모형을 이용 하천구조물의 설치 방법에 대한 지침 제공

▷ 국외의 현황과 비교해 볼 때, 국내에서는 범용성이 입증되지 않은 코드를 사용하여 제한적인 사례에서만 연구가 진행됨. 따라서 검증된 3차원 하상변동 모형을 이용 실제 보의 국부세굴 예측 연구가 필요

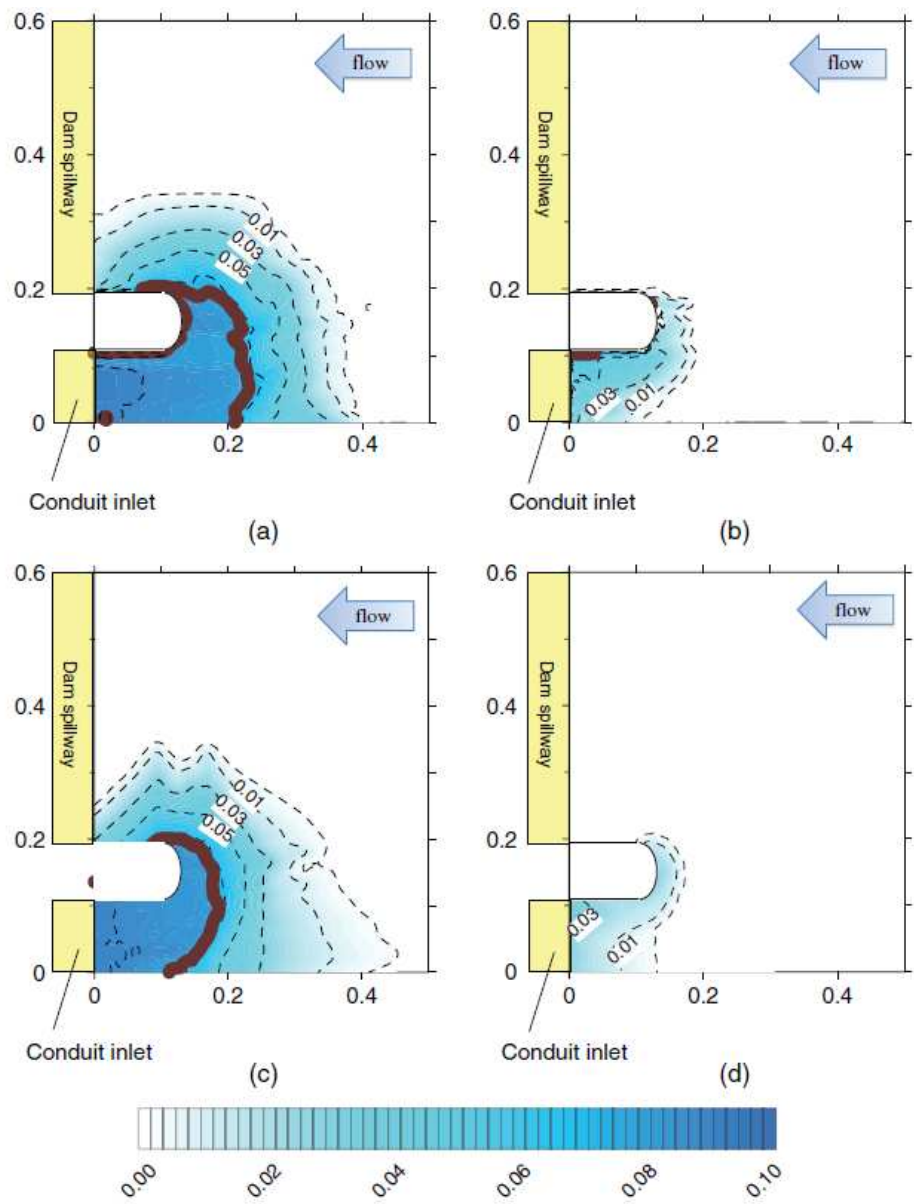
보 상류에서 발생하는 국부세굴 실험 및 수치모의 (Ota et al., 2016a)



수공구조물의 설치에 따른 하상변동 수치모의 (Khosronejad et al., 2016)



보 수문에서 발생하는 국부세굴 실험 및 수치모의 (Ota et al., 2016b)



3. 기존 연구와의 차별성

□ 세굴예측 모형의 필요성

- 기존 국부세굴 예측은 거의 경험식에 의존함
- 최대세굴심 공식은 시간에 따른 변동성을 무시하고 세굴심을 과대산정하는 경향이 있기 때문에 예측 결과를 토대로 시설물 설계 및 운영 시 비경제적임
- 복잡한 지형조건에서 최대세굴심 예측 불가

▷ 정확한 세굴심 예측을 위한 이동상 모의 필요

□ 이동상 계산의 어려움

- 흐름에 의해 세굴공 발생시 세굴공이 다시 흐름에 영향을 주기 때문에 이동상 모의에서 흐름과 하상의 상호 작용 반드시 고려해야 함
- 불규칙적인 난류에 의한 유사 입장의 운동이 대부분임
- 변형된 하상과 유사 입자의 거동에 의해 난류 생성 및 소산

▷ 방대한 계산량으로 개별 입자의 거동 추적 불가

▷ 하상변동은 장기간에 걸쳐 발생하기 때문에 큰 계산비용 요구

▷ 난류를 적절히 반영할 수 있고, 합리적인 계산 비용의 모형 필요

□ 이동상 계산 기법

- 하상토 보존 방정식 (Exner' s equation) 해석
- 이산요소법 (discrete element method)
- 이상흐름해석 (two-phase flow) 모형

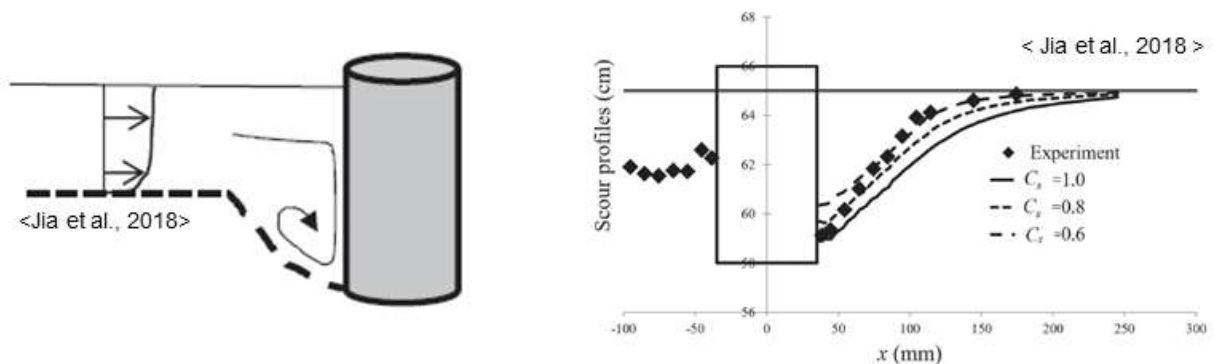
▷ 본 연구과제에서는 이동상 계산 기법으로 이상흐름해석 모형을 해석하였음

□ 최신 이동상 모의 연구 사례 (하상토 보존 방정식 해석)

- 3차원 교각주위 국부세굴 연구 (Jia et al., 2018)
- 하상토 보존방정식을 해석. 유사량 공식으로 경험식 사용
- 교각주위 흐름 매우 복잡. 평균흐름만으로 유사량 예측 불가

▷ 난류 영향 반영을 위해 많은 가정과 ad-hoc에 의존함

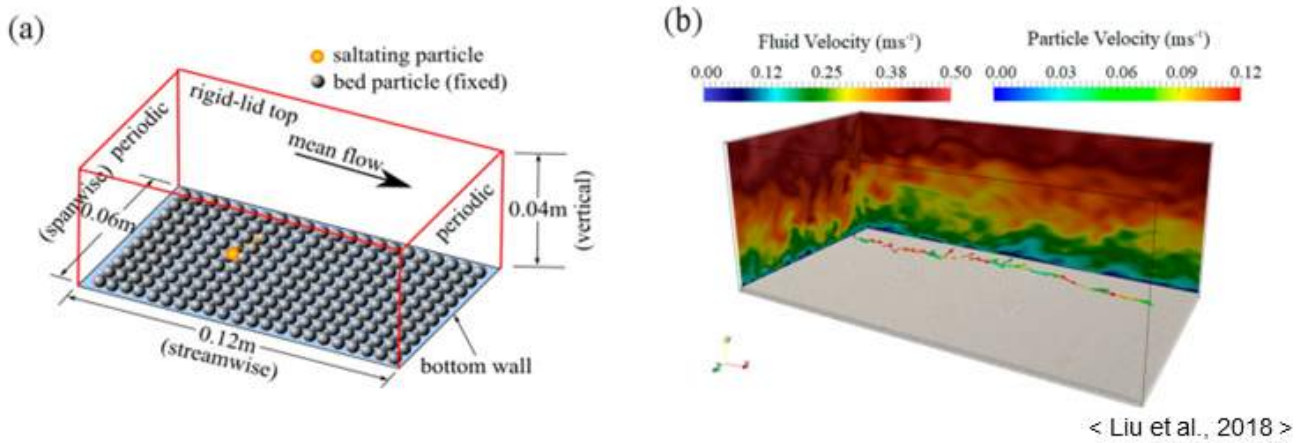
▷ 적용 대상이 달라질 경우 예측 결과 불확실. 적용성이 떨어짐



□ 최신 이동상 모의 연구 사례 (이산요소법)

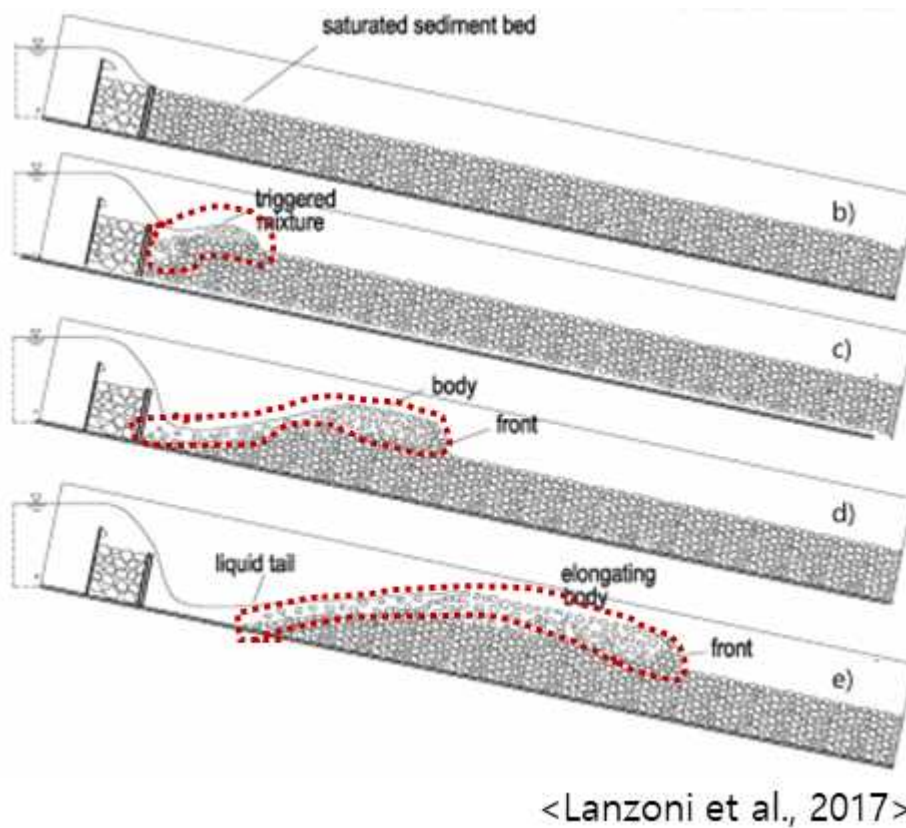
- 입자 도약 현상 연구 (Liu et al., 2018)
- 개별 입자 거동 모의 (Lagrangian 기반)
- 입자 해석 시간 격자 $\ll$ 유동 해석 시간 격자. (예) $10^{-6} \ll 10^{-4}$

▷ 계산량이 방대하고, 개별입자 거동 예측은 가능하나 실제 세굴 현상 모의는 어려움



□ 이상흐름해석 모형

- 입자상과 유체상의 경계면에서 입자를 유동상으로 가정

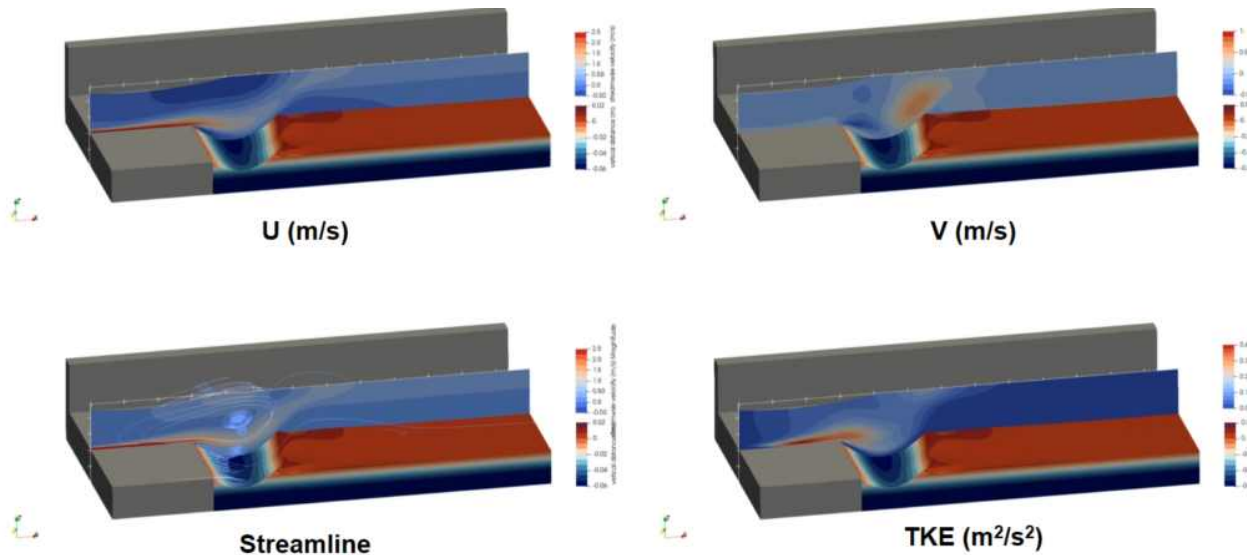


- 입자상 해석 시간 격자 ≍ 유동상 해석 시간 격자. 합리적인 계산비용
- 운동량방정식에서 항력에 관한 항을 공유하여 흐름-하상 상호작용 반영

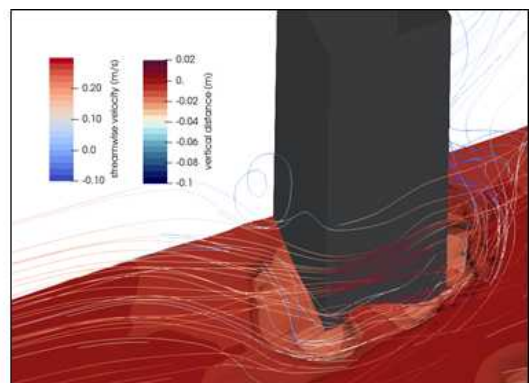
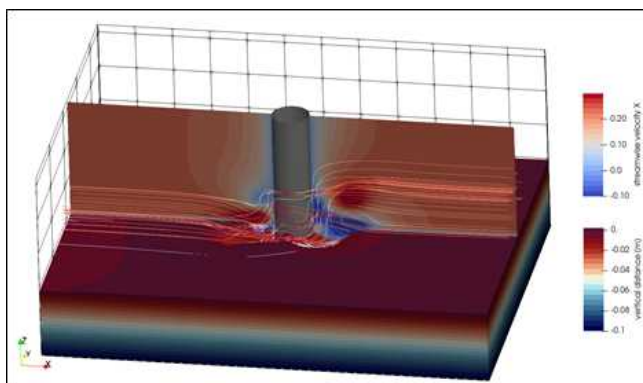
Fluid-Particle interaction

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho^e \alpha u_i^e}{\partial t} + \frac{\partial \rho^e \alpha u_i^e u_j^e}{\partial x_j} = & -\alpha \frac{\partial p}{\partial x_i} + \alpha f_i - \frac{\partial \bar{p}^e}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}^e}{x_j} + \alpha \rho^e g_i + \boxed{\alpha \beta K (u_i^b - u_i^e)} - \boxed{S_{US} \beta K \nu_t^b \frac{\partial \alpha}{\partial x_i}} \\ \frac{\partial \rho^b \beta u_i^b}{\partial t} + \frac{\partial \rho^b \beta u_i^b u_j^b}{\partial x_j} = & -\beta \frac{\partial p}{\partial x_i} + \beta f_i + \frac{\partial \tau_{ij}^b}{x_j} + \beta \rho^b g_i - \boxed{\alpha \beta K (u_i^b - u_i^e)} - \boxed{S_{US} \beta K \nu_t^b \frac{\partial \alpha}{\partial x_i}} \end{aligned}$$

- 하상변화에 따른 유선, 운동량, 난류량 등의 유동 변화 반영



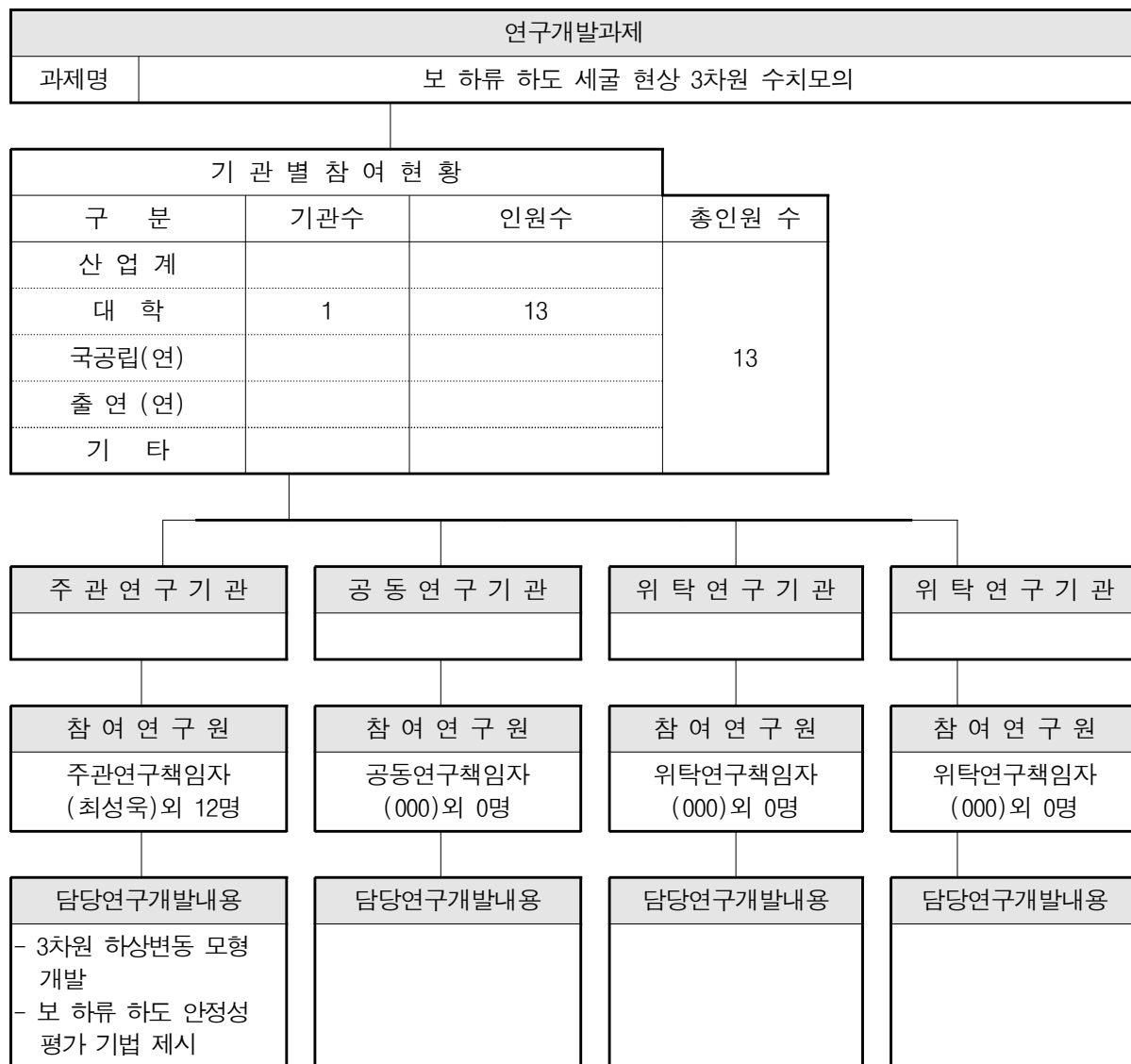
- 보 하류 하도 이외의 하천시설물 주변 흐름에 적용가능. 적용성 우수. (예) 교각부, 교대부, 만곡흐름 수제 등



제3장. 연구수행 내용 및 성과

1. 연구수행 체계도 및 일정

(1) 연구수행 체계도



(2) 연구수행 추진 일정

구분	연구과제명 (연구 수행기관)	관련 성과목표/지표			세부추진내용 (연구수행 Activity)	1차년도						2차년도																
		핵심 성과	단위 성과	질적 성과지표		6 월	7 월	8 월	9 월	10 월	11 월	12 월	1 월	2 월	3 월	4 월	5 월	6 월	7 월	8 월	9 월	10 월	11 월	12 월	1 월	2 월	3 월	
총괄	보 하류 하도 세굴 3차원 수치모의																											
주관	연세대학교	보 하류 세굴 예측 통합 모형	유 동 해 석 모 형 구 축	난류 모형 조사	난류 모형 문헌 조사 및 모형 제시																							
				유동해석 알고리즘 조사	유동해석 알고리즘 문헌 조사 및 알고리즘 정립																							
				유동해석 모형 개발	유동해석 모형 개발																							
				모형 적용 및 검증	개발된 모형을 실험에 적용 및 검증																							
		세 굴 예 측 모 형 구 축	유사이송 모형 제시	유사이송 모형 문헌 조사 및 시험																								
			하상토보존 방정식 해석	하상토보존 방정식 해석 알고리즘 조사 및 수치모의																								
			통합모형 구축	유동해석 모형과 세굴예측 모형 통합																								
			모형 적용 및 검증	개발된 모형을 실험에 적용 및 검증																								
		보 하류 하도 안정 성 평가 기법	안정 성 평가 기법 제시	실제 보 또는 보와 유사한 환경에 적용	수치모의 수행																							
				보 하류 하도 안정성 평가	보 하류 하도 세굴 기작 규명 및 안정성 평가 기법 제시																							
				세굴 최소화 및 안정하도 유지 방안 제시	안정하도 유지 방안을 위한 사례 연구 수행 및 대책 제시																							

2. 유동해석 모형 구축

2.1 유동방정식

비압축성 유동을 다루는 지배방정식은 다음의 연속방정식과 운동량방정식이다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.1)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + g_i \quad (2.2)$$

여기서 u_i 는 x_i 방향으로의 순간 속도 (instantaneous velocity), p 는 순간 압력 (instantaneous pressure), ρ 는 물의 밀도, ν 는 물의 동점성 계수 (kinematic viscosity), g_i 는 중력의 x_i 방향 성분이다. 위의 운동량방정식과 연속방정식을 해석하는 기법으로는 시간 평균시킨 레이놀즈 방정식을 이용하는 RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) 모형, 모델링 과정 없이 직접 해석하는 직접수치모의 (DNS, direct numerical simulation), 그리고 와의 규모에 따라 RANS 모형과 같이 통계적 접근을 하거나, DNS와 같이 직접 해석하는 방법을 이용하는 큰 와 수치모의 (LES, large eddy simulation) 모형 등이 있다. 본 연구에서는 보 하류 흐름을 정밀하게 모의하기 위하여 RANS 및 큰 와 수치모의 방법을 검토하였으며, 보 하류 세굴 현상 모의를 위해서는 적용성이 용이한 RANS 모형을 검토하였다.

2.1.1 RANS 모형

RANS 모형의 지배방정식은 위의 식(2.1)과 식(2.2)를 시간평균 (temporal averaging) 또는 레이놀즈 분할 (Reynolds decomposition) 하여 얻을 수 있다. 시간 평균을 하게 되면 지배방정식에서 유속의 변동 성분은 제거되고 평균 속도에 관한 식을 다음과 같이 나타낸다.

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i} = 0 \quad (2.3)$$

$$\rho \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial t} + \rho \langle u_i \rangle \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_j} = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \rho \nu \frac{\partial^2 \langle u_i \rangle}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2.4)$$

여기서 $\langle \rangle$ 는 임의 성분에 대한 시간 평균된 값을 의미하며, τ_{ij} 는 시간 평균하면서 생성된 레이놀즈 응력 (Reynolds stress)으로, Boussinesq 와점성 개념 (eddy-viscosity concept)을 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\tau_{ij} = - \rho \langle u'_i u'_j \rangle = \rho \nu_t \langle S_{ij} \rangle - \frac{2}{3} \delta_{ij} \quad (2.5)$$

여기서 ν_t 는 난류 점성계수 (turbulent viscosity), $\langle S_{ij} \rangle$ 는 시간 평균 유속의 변형률 텐서

(time-averaged strain rate tensor), k 는 난류운동에너지 (turbulent kinetic energy), δ_{ij} 는 Kronecker delta이다. 일반적으로 RANS 모형은 와점성계수 ν_t 를 추정하여 레이놀즈 응력을 계산하는 방법에 관한 것이며, 혼합거리 (mixing length) 모형, 표준 $k-\varepsilon$ 모형, 비선형 (non-linear) $k-\varepsilon$ 모형, $k-\omega$ 모형, $k-\omega$ SST 모형 등이 있다.

(1) 표준 $k-\varepsilon$ 모형

- 난류 점성계수:
$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.6)$$

- k 방정식:
$$\frac{\partial k}{\partial t} + \langle u_i \rangle \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + P_k - \varepsilon \quad (2.7)$$

- ε 방정식:
$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \langle u_i \rangle \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \varepsilon) \quad (2.8)$$

- 모형 상수

C_μ	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	σ_k	σ_ε
0.09	1.44	1.92	1.00	1.30

(2) $k-\omega$ SST 모형

$k-\omega$ SST 모형은 $k-\varepsilon$ 모형과 $k-\omega$ 모형을 결합한 모형이다. $k-\omega$ SST 모형은 각 모형의 장점을 이용하여 벽 근처 흐름에 대해서는 $k-\omega$ 모형을 활용하고, 벽 경계면에서 떨어진 자유전단 흐름 (free shear flow)에서는 $k-\varepsilon$ 모형을 활용한다.

- 난류 점성계수:
$$\nu_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, F_2 S)} \quad (2.9)$$

- k 방정식:
$$\frac{\partial k}{\partial t} + \langle u_i \rangle \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\sigma_k \nu_t \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + P_k - \beta^* k \omega \quad (2.10)$$

- ω 방정식:
$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \langle u_i \rangle \frac{\partial \omega}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\sigma_\omega \nu_t \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right) + \alpha S^2 - \beta \omega^2 + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (2.11)$$

$k-\omega$ SST 모형의 모형 상수는 다음과 같다 (Menter, 1993).

$$P_k = \min\left(\nu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), 10\beta^* k\omega\right)$$

$$F_1 = \tanh\left(\left(\min\left(\max\left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega d}, \frac{500\nu}{d^2 \omega}\right), \frac{4\rho\sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} d^2}\right)\right)^4\right)$$

$$F_2 = \tanh\left(\left(\max\left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega d}, \frac{500\nu}{d^2 \omega}\right)\right)^2\right)$$

$$CD_{k\omega} = \max\left(2\rho\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-20}\right)$$

$$\phi = F_1 \phi_1 + (1 - F_1) \phi_2$$

a_1	β^*	α_1	β_1	σ_{k1}
0.31	0.09	5/9	0.075	0.85
$\sigma_{\omega 1}$	α_2	β_2	σ_{k2}	$\sigma_{\omega 2}$
0.65	0.44	0.0828	1.00	0.856

2.1.2 LES 모형

LES 방법은 공간 평균 (spatial averaging) 또는 필터링 (filtering)에 의하여 일정 격자 크기보다 작은 유동의 공간 변동 성분이 제거된 유동 방정식을 이용한다. 유동에 관한 지배방정식인 식(2.1)과 (2.2)을 공간 평균하게 되면 다음과 같은 LES의 지배방정식을 얻을 수 있다.

$$\overline{\frac{\partial u_i}{\partial x_i}} = 0 \quad (2.12)$$

$$\rho \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \rho \overline{u_j} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} = - \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{\tau_{ij}} + \tau_{ij}^{SGS}) \quad (2.13)$$

여기서 $(\overline{})$ 는 임의의 성분에 대한 공간 평균된 값을 의미하며, $\overline{\tau_{ij}} (= \rho \nu \partial \overline{u_i} / \partial x_j)$ 는 점성과 관련된 여과된 응력 텐서, $\tau_{ij}^{SGS} (= \rho (\overline{u_i u_j} - \overline{u_i} \overline{u_j}))$ 은 잔여 응력 텐서 (subgrid-scale stress tensor)이다. 잔여 응력 텐서는 필터 크기 이하의 작은 규모의 난류 운동을 나타내며, 비등방성 성분에 대하여 Boussinesq 와점성 개념을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_{ij}^{SGS} = \rho (\overline{u_i u_j} - \overline{u_i} \overline{u_j}) = 2 \rho \nu_t \overline{S_{ij}} + \frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{kk}^{SGS} \quad (2.14)$$

여기서 $\langle S_{ij} \rangle$ 는 여과된 유속의 변형률 텐서 (filtered strain rate tensor)이다. RANS 모형과 마찬가지로 LES 모형은 ν_t 를 모델링하는 방법을 말하며, Smagorinsky 모형 (Smagorinsky, 1963), dynamic Smagorinsky 모형 (Germano et al., 1991), WALE 모형 (Nicoud and Ducros, 1999) 등이 있다.

(1) WALE 모형 (LES)

Nicoud and Ducros (1999)는 여과된 유속의 경사 ($g_{ij} = \partial \overline{u_i} / \partial x_j$)를 이용하여 난류 점성계수를 추정하는 방법을 제안하였으며, 그 식은 다음과 같다.

$$\nu_t = (C_w \overline{\Delta})^2 \frac{|(G_{ij}^a)|^{6/2}}{(\overline{S_{ij}} \overline{S_{ij}})^{5/2} |(G_{ij}^a)|^{5/2}} \quad (2.15)$$

여기서 C_w 는 WALE 모형 상수로 본 연구에서는 0.325를 사용하였다. $\overline{\Delta}$ 는 필터의 폭, G_{ij}^a 는 G_{ij} ($= 1/2(g_{ik}g_{kj} + g_{jk}g_{ki})$)의 traceless part이다.

2.2 유동 해석 알고리즘

2.2.1 압력-유속 해석 알고리즘

그림 2.1은 SIMPLE 알고리즘과 PISO 알고리즘을 설명하기 위한 격자망을 나타내었다. 다만, 예시는 2차원 엇갈린 격자계에 대한 것이고, 본 연구개발과제에서 채택한 격자계는 3차원 비정렬격자계 (unstructured grid)임을 밝힌다. 표 2.1과 표 2.2는 압력-유속 상관관계를 해석하는 알고리즘을 나열한 것이다. 표 2.1은 SIMPLE 알고리즘 (Patankar and Spalding, 1972)을 2차원의 형태로 간략하게 나타낸 것이다. 정상류 해석에서 주로 사용되는 SIMPLE 알고리즘은 기본적으로 예측-수정 단계를 거쳐 압력장을 계산한다. 예측 단계에서는 가정한 압력장 p^* 를 이용하여 예측 단계의 유속장을 구한다. 예측 단계에서 계산된 유속장은 연속방정식을 만족하지 않으며, 수정 단계를 거쳐 유속이 연속방정식을 만족하도록 수정한다. LES 기법에서는 유속-압력 상관관계를 해석하기 위해서 주로 PISO 알고리즘을 사용한다. PISO 알고리즘은 이산화된 운동량방정식을 연속방정식에 대입하여 압력 수정항을 계산한다. PISO 알고리즘은 SIMPLE 알고리즘에서 압력 항에 대한 수정항을 한 번 더 계산하는 과정이 포함된 방법이며, 다음 표 2.2에 PISO 알고리즘을 2차원의 형태로 간략하게 나타내었다.

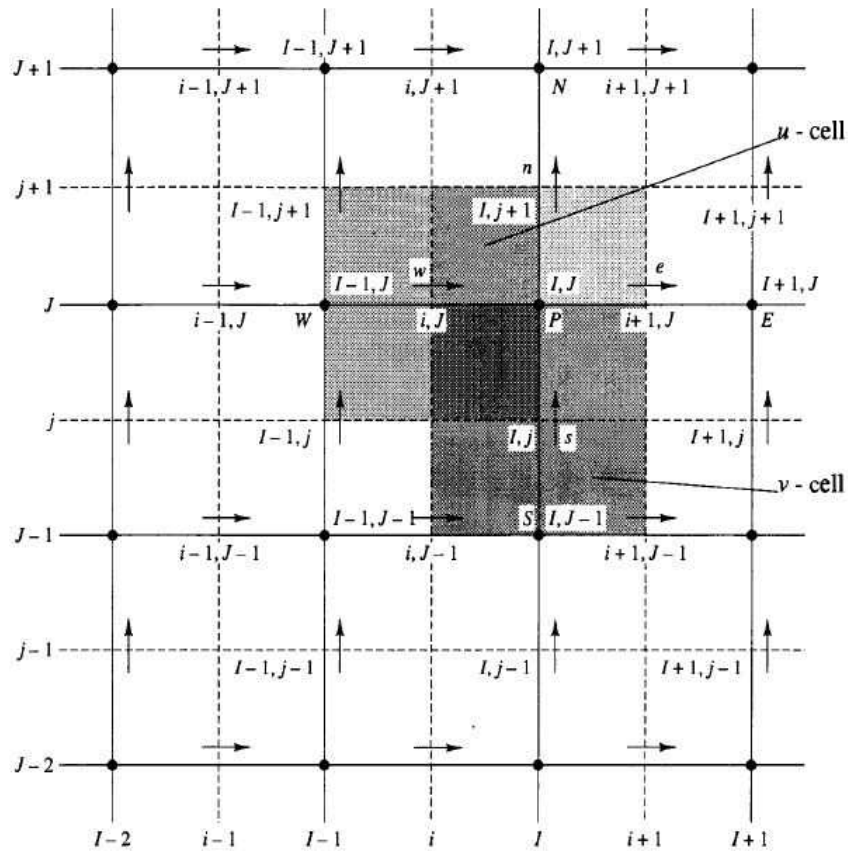


그림 2.1. 격자망 예시 (2차원)

(1) SIMPLE 알고리즘

표 2.1. SIMPLE 알고리즘 (Patankar and Spalding, 1972)

SIMPLE 알고리즘 (2차원 예시)

[모의 시작] 초기값 가정: p^* , u^* , v^* , ϕ^* (스칼라)

[1단계] 이산화된 운동량 방정식 계산: u^* , v^*

$$a_{i,j}u_{i,j}^* = \sum a_{nb}u_{nb}^* + (p_{I-1,J}^* - p_{I,J}^*)A_{i,j} + b_{i,j}$$
$$a_{I,j}v_{I,j}^* = \sum a_{nb}v_{nb}^* + (p_{I,J-1}^* - p_{I,J}^*)A_{I,j} + b_{I,j}$$

[2단계] 수정 압력항 계산: p'

$$a_{I,J}p'_{I,J} = a_{I-1,J}p'_{I-1,J} + a_{I+1,J}p'_{I+1,J} + a_{I,J-1}p'_{I,J-1} + a_{I,J+1}p'_{I,J+1} + b'_{I,J}$$

[3단계] 압력-유속 계산: p , u , v

$$p_{I,J} = p_{I,J}^* + p'_{I,J}$$
$$u_{i,j} = u_{i,j}^* + d_{i,j}(p'_{I-1,J} - p'_{I,J})$$
$$v_{I,j} = v_{I,j}^* + d_{I,j}(p'_{I,J-1} - p'_{I,J})$$
$$p^* = p$$
$$u^* = u$$
$$v^* = v$$

[4단계] 스칼라 값 계산: ϕ

$$a_{I,J}\phi_{I,J} = a_{I-1,J}\phi_{I-1,J} + a_{I+1,J}\phi_{I+1,J} + a_{I,J-1}\phi_{I,J-1} + a_{I,J+1}\phi_{I,J+1}$$

[5단계] 수렴 확인

수렴성 확인: 모의 종료 또는 1단계부터 반복계산

(2) PISO 알고리즘

표 2.2. PISO 알고리즘 (Versteeg and Malalasekera, 2007)

PISO 알고리즘 (2차원 예시)

[모의 시작] 초기값 가정: p^* , u^* , v^* , ϕ^* (스칼라)

[1단계] 이산화된 운동량 방정식 계산: u^* , v^*

$$\begin{aligned}a_{i,j}u_{i,j}^* &= \sum a_{nb}u_{nb}^* + (p_{I-1,J}^* - p_{I,J}^*)A_{I,J} + b_{i,j} \\a_{I,j}v_{i,j}^* &= \sum a_{nb}v_{nb}^* + (p_{i,J-1}^* - p_{i,J}^*)A_{I,J} + b_{I,j}\end{aligned}$$

[2단계] 첫 번째 수정 압력항 계산: p'

$$a_{I,J}p'_{I,J} = a_{I-1,J}p'_{I-1,J} + a_{I+1,J}p'_{I+1,J} + a_{I,J-1}p'_{I,J-1} + a_{I,J+1}p'_{I,J+1} + b'_{I,J}$$

[3단계] 첫 번째 압력-유속 계산: p^* , u^* , v^*

$$\begin{aligned}p_{I,J} &= p_{I,J}^* + p'_{I,J} \\u_{i,j} &= u_{i,j}^* + d_{i,j}(p'_{I-1,J} - p'_{I,J}) \\v_{I,j} &= v_{I,j}^* + d_{I,j}(p'_{I,J-1} - p'_{I,J}) \\p^* &= p \\u^* &= u \\v^* &= v\end{aligned}$$

[4단계] 두 번째 수정 압력항 계산: p''

$$a_{I,J}p''_{I,J} = a_{I-1,J}p''_{I-1,J} + a_{I+1,J}p''_{I+1,J} + a_{I,J-1}p''_{I,J-1} + a_{I,J+1}p''_{I,J+1} + b'_{I,J}$$

[5단계] 두 번째 압력-유속 계산: p^{***} , u^{***} , v^{***}

$$\begin{aligned}p_{I,J}^{***} &= p_{I,J}^* + p'_{I,J} + p''_{I,J} \\u_{i,j}^{***} &= u_{i,j}^* + d_{i,j}(p'_{I-1,J} - p'_{I,J}) + \frac{\sum a_{nb}(u_{nb}^{**} - u_{nb}^*)}{a_{i,j}} + d_{i,j}(p''_{I-1,J} - p''_{I,J}) \\v_{I,j}^{***} &= v_{I,j}^* + d_{I,j}(p'_{I,J-1} - p'_{I,J}) + \frac{\sum a_{nb}(v_{nb}^{**} - v_{nb}^*)}{a_{I,j}} + d_{I,j}(p''_{I,J-1} - p''_{I,J})\end{aligned}$$

[6단계] 스칼라 값 계산: ϕ

$$a_{I,J}\phi_{I,J} = a_{I-1,J}\phi_{I-1,J} + a_{I+1,J}\phi_{I+1,J} + a_{I,J-1}\phi_{I,J-1} + a_{I,J+1}\phi_{I,J+1}$$

[7단계] 수렴 확인

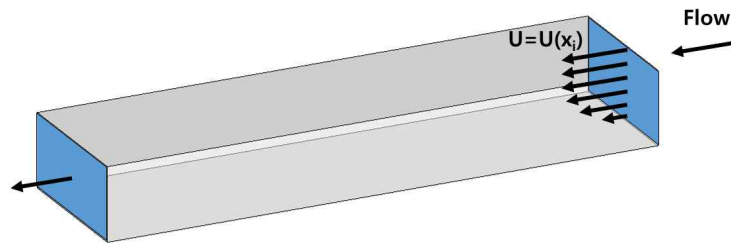
수렴성 확인: 모의 종료 또는 1단계부터 반복계산

2.3 경계조건 및 초기조건

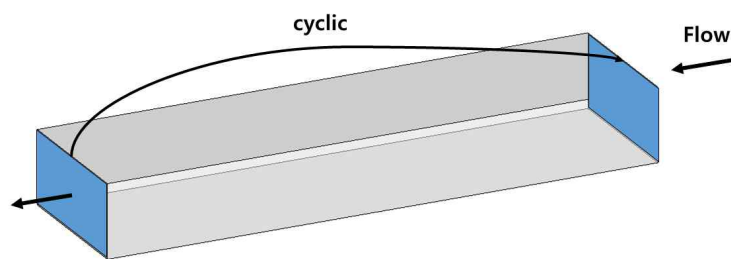
개수로 흐름을 해석하기 위해서는 계산 영역을 정하고, 계산 영역의 물리적 경계면에서 지배방정식의 해석을 위하여 적절한 경계조건을 고려해야 한다. 또한, 정확한 모의 결과를 얻기 위해서는 물리적으로 적절한 초기조건을 가지고 모의를 수행해야 한다.

(1) 유입부 경계조건

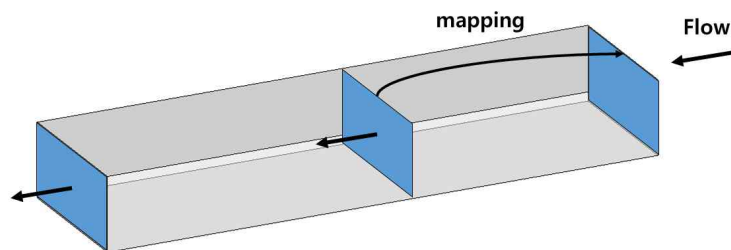
유입 경계조건으로는 단면에 일정 유속을 주는 방법, 그림 2.2(a)와 같이 유출부의 값을 유입부에서 다시 사용하는 Cyclic 경계조건, 그림 2.2(b)와 같이 유입부로부터 하류단으로 일정 거리 떨어진 지점의 값을 유입부로 다시 가져오는 Mapping 경계조건 등이 있다. 적용 대상이 간단하여 유입부와 유출부의 지형적 차이가 없어서 주기적 조건을 만족할 경우 Cyclic 경계조건을 활용하여 흐름 발달에 필요한 계산 영역을 줄여 계산 비용을 저감할 수 있다. 그러나 일반적으로 하천의 지형은 매우 복잡하므로 주기적 조건을 만족시키기 어렵다. 이러한 경우 그림 2.3(c)와 같이 Precursor 영역을 만들고, Mapping 경계조건을 활용하여 계산 영역을 줄이며 발달된 흐름을 확보할 수 있다. 이외에도 평균유속에 합성 난류량 (synthetic turbulence)을 더해 사용하는 방법과 미리 수행한 모의 결과를 유입부에 시계열 자료로 넣는 방법이 있다. 본 연구과제에서는 유입부 경계조건으로 일정 유속을 주는 방법, Cyclic 경계조건, Mapping 경계조건 등을 고려하였다.



(a) 일정유속 경계조건



(b) Cyclic 경계조건



(c) Mapping 경계조건

그림 2.2. 유입부 경계조건

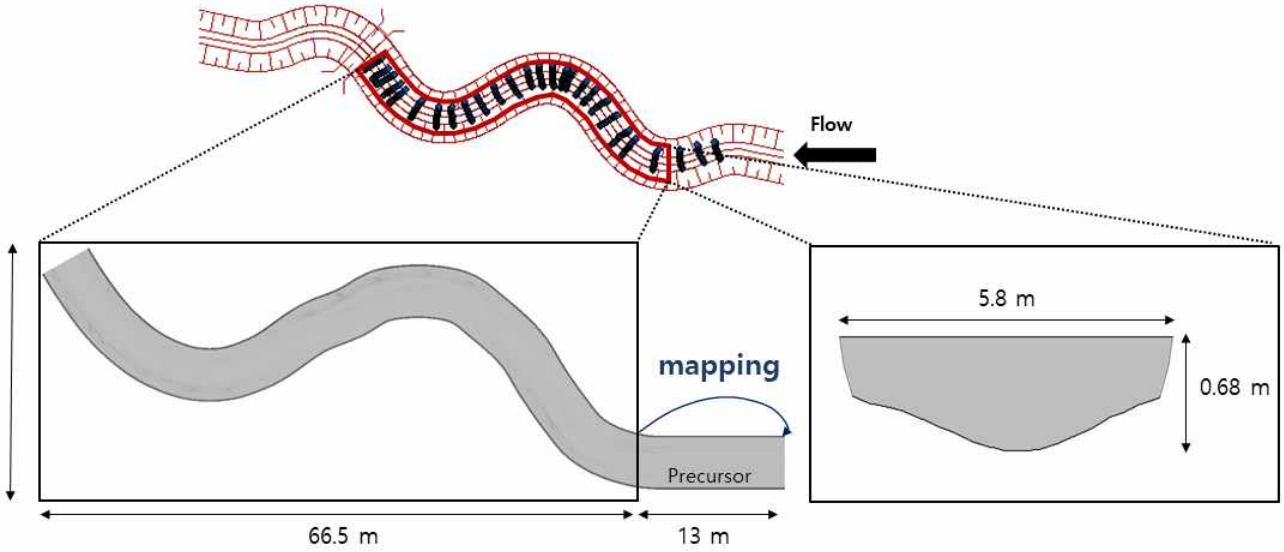


그림 2.3. Mapping 경계조건을 활용한 precursor 계산 영역 예시

(2) 유출부 경계조건

부정류 (unsteady flow)의 유출부 경계조건으로는 다음과 같은 부정류 1차원 이송방정식 (unsteady 1D convection equation)이 사용된다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + U_{conv} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.16)$$

여기서 U_{conv} 는 이송 유속 (convective velocity)이고, 만약 이송이 지배적인 흐름이라면 시간에 대한 변화량인 첫 번째 항을 생략할 수 있으며, 다음과 같은 식을 사용할 수 있다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.17)$$

흐름이 정류 (steady flow)인 경우도 마찬가지로 식(2.16)에서 시간에 대한 변화량인 첫 번째 항을 생략하고 식(2.17)과 같이 사용할 수 있다.

(3) 벽 경계조건 (wall boundary condition)

벽면에서의 경계조건은 비활동 조건 (no-slip condition)이나 벽 함수 (wall function)을 이용할 수 있다. 비활동 조건은 벽면에서의 모든 유속 성분을 0으로 설정하는 방법이다. 벽 함수는 다음과 같은 식을 사용하여, 벽으로부터의 거리에 따른 유속값을 지정하는 방법이다.

$$y^+ = u^+ + \frac{1}{E} \left[e^{\kappa u^+} - 1 - \kappa u^+ - \frac{1}{2}(\kappa u^+)^2 - \frac{1}{6}(\kappa u^+)^3 \right] \quad (2.18)$$

여기서 y^+ 는 무차원 거리, u^+ 는 무차원 유속, $\kappa (= 0.41)$ 는 von Karman 상수, $E (= 9.0)$ 는 조도에 관한 계수이다. 일반적인 벽함수는 벽으로부터의 거리에 따라 점성저층 영역 (viscous sublayer region)과 로그 영역 (log-law region)을 구분하여 유속을 산정한다. 그러나 식(2.18)을 이용하게 되면, 벽함수가 적용되는 첫 번째 격자의 벽으로부터의 거리가 어디인지 중요하지 않다. 즉, 식(2.18)은 점성저층 영역과 로그 영역을 모두 포함하기 때문에, 하나의 식만을 이용하여 벽 경계면에서 전단속도를 산정할 수 있다.

(4) 자유수면 경계조건

자유수면을 처리하는 방법으로는 크게 수면변동이 크지 않다고 가정하는 Rigid lid 방법과 자유수면을 직접 추적하는 방법으로 나뉜다. Rigid lid 가정은 자유수면을 변동이 없는 평평한 면으로 가정하여 마찰이 없는 벽처럼 다루는 방법이다. 즉, 수면에 수직 방향인 성분은 0이 되고, 평행한 성분은 대칭 경계조건 (symmetry boundary condition)을 적용하는 것이다. Stoesser et al. (2010)은 프루드 수가 크지 않은 경우 자유수면의 변화가 수심의 5% 이내로 매우 작다고 밝혔다. 따라서 일반적인 하천 흐름은 홍수시를 제외하고 Rigid lid 가정을 사용하는데에는 큰 문제가 없다. 최근에 자유수면을 추적하는 방법으로는 Level Set과 Volume of Fluid 방법을 많이 사용한다. Level Set의 경우 수면변동에 관한 방정식을 계산하여 자유수면의 경계면을 찾아내는 방법이며, Volume of Fluid 방법은 유체의 체적비에 관한 방정식을 계산하여 물과 공기의 비율을 계산하여 자유수면을 계산한다. Volume of Fluid 방법이 간편하고 정확도가 높아 대다수의 상용 프로그램에서 사용되고 있다. 본 모형에서도 Volume of Fluid 방법을 사용하였다.

(5) 초기조건

RANS 모형의 경우 포텐셜 흐름 (potential flow)의 유속과 압력값을 계산하여 초기값으로 사용하였다. LES 모형의 경우 초기값으로 RANS 모형의 유속과 압력 등의 계산 결과를 이용하였다. 조밀한 격자에서 LES를 계산할 경우, 성긴 격자에서 미리 계산을 수행하여 안정된 계산 결과를 얻고 이를 초기값으로 사용하였다.

2.4 모형 적용 및 검증

2.4.1 직사각형 개수로 흐름

(1) 적용 대상 및 모의 조건

구축된 모형을 Nezu and Rodi (1985)의 매끄러운 하상의 폭-수심비가 2인 직사각형 개수로 흐름에 적용하여, 난류모형 및 유입부 경계조건을 검토하였다. 적용 대상의 실험 조건 및 수로 제원은 표 2.3과 같다. 표 2.5와 같이 유입부 경계조건은 Cyclic 조건과 Mapping 조건을 검토하였고, 난류모형은 $k-\omega$ SST (RANS), WALE (LES) 모형을 사용하였다. 그림 2.4와 같이 격자는 수로 중앙에서 벽 근처로 가면서 조밀해지도록 구성하여, 벽면에서 작은 격자 크기를 확보하여 벽면의 유동을 정확히 예측할 수 있게 하였다. 모의 조건에 대한 자세한 내용은 표 2.4에 정리하였다. 그림 2.5와 같이 일정 시간 동안 흐름을 발달시킨 후, 이후 시계열 자료를 평균 흐름 및 난류 통계량 등의 산정을 위해 사용하였다.

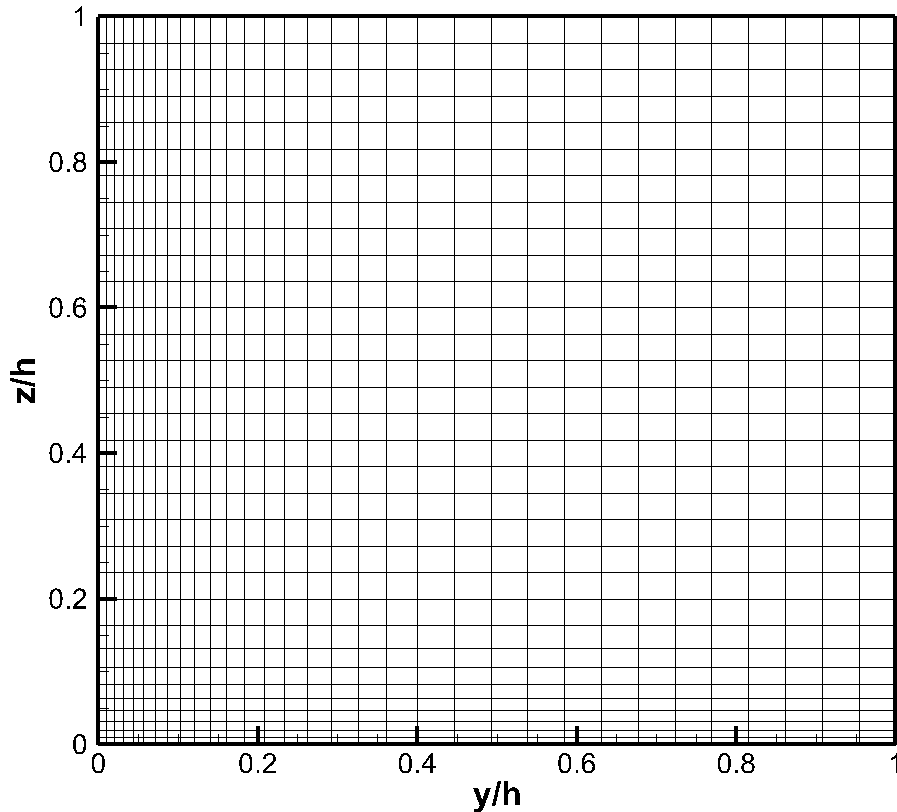


그림 2.4. 비등방성 격자 구성

표 2.3. 실험 조건 및 수로 제원

Case	H (m)	B (m)	B/H	U_b (m/s)	$U_{\max}$ (m/s)	Re	S_o
Nezu and Rodi (1985)	0.1	0.2	2	0.387	0.46	7.70×10^4	0.0006

표 2.4. 모의 조건

Case	난류 모형	격자 개수			격자 크기			Δt (s)
		n_x	n_y	n_z	Δx^+	Δy^+	Δz^+	
A	$k-\omega$ SST (RANS)	80	64	32	112	8	8	0.0125
B	WALE (LES)	80	64	32	112	8	8	0.0125
C	WALE (LES)	80	64	32	112	8	8	0.0125

표 2.5. 경계조건 및 초기조건

Case	유입부	유출부	벽면	자유수면	초기조건
A	Cyclic 조건	무경사	비활동	Rigid lid	포텐셜 흐름
B	Cyclic 조건	무경사	비활동	Rigid lid	Case A 결과
C	Mapping 조건	무경사	비활동	Rigid lid	Case A 결과

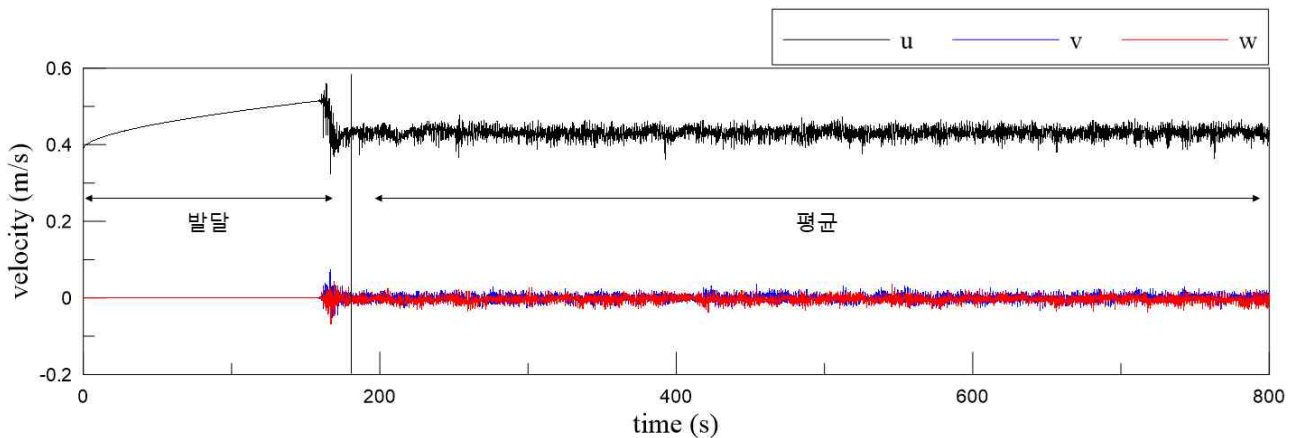
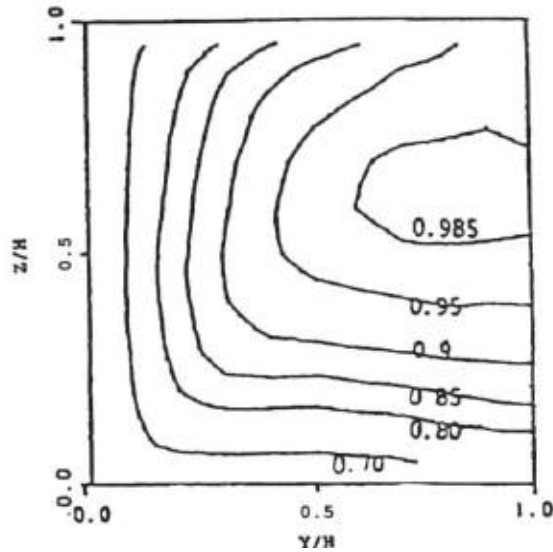


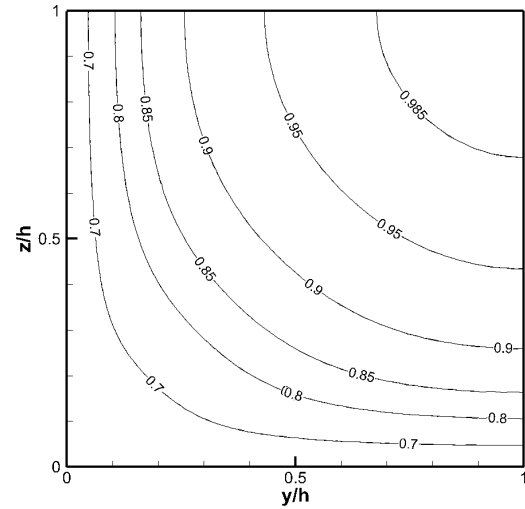
그림 2.5. 시간에 따른 유속의 발달 예시

(2) 주흐름방향 평균유속

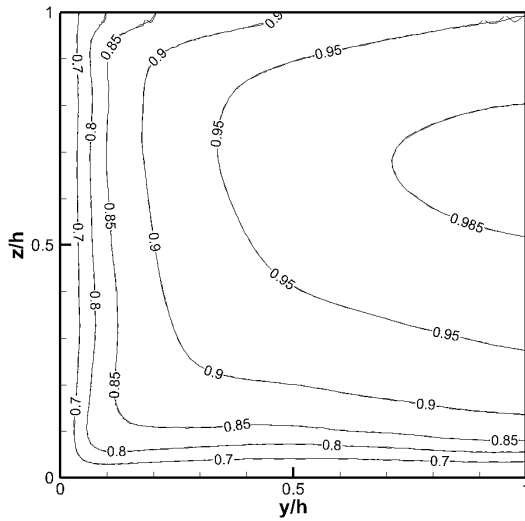
그림 2.6은 난류모형의 적용결과 중 주흐름방향 유속분포를 도시한 것이다. 모의 결과를 검토하기 위하여 Nezu and Rodi (1985)의 실험수로 측정 결과와 같이 도시하였다. y 와 z 는 수심으로 나누었고 유속은 각각 수로 내 최대 유속으로 나누어 무차원화 하였다. $k-\omega$ SST 모형은 수로 중앙 자유수면에서 최대유속이 발생하는 것을 볼 수 있다. 그러나 실험자료와 WALE 모형에서는 최대유속점이 자유수면의 아래로 하강하는 현상 (velocity dip)이 발생하는 것을 볼 수 있다. WALE 모형은 $z = 0.7h$ 에서 유속 최대점이 발생하며 이는 Nezu and Rodi (1985)의 실험결과 $z = 0.63h$ 와 잘 맞는다. 그림 2.6(c)와 (d)를 비교해보면 Cyclic 조건과 Mapping 조건 모두 주흐름방향 평균유속을 거의 유사하게 모의하는 것을 볼 수 있다. WALE 모형과 $k-\omega$ SST 모형 모두 벽면과 바닥을 따라 고르게 분포하는 주흐름방향 평균유속 분포의 양상은 잘 모의하나, 모서리 부분에서 유속이 감소하는 현상은 WALE 모형이 $k-\omega$ SST 모형에 비해 더 잘 예측하는 것을 볼 수 있다.



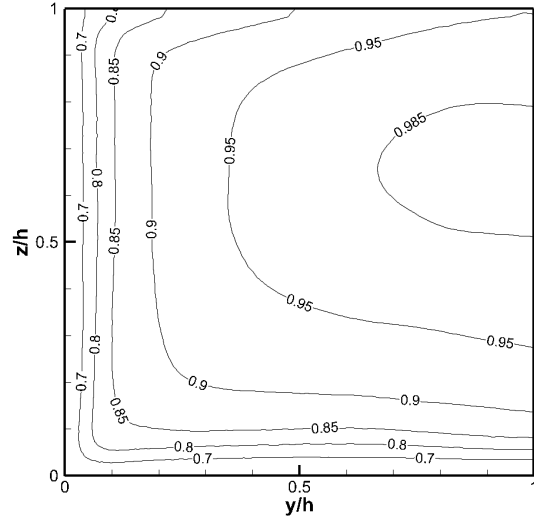
(a) 실험결과
(Nezu and Rodi, 1985)



(b) $k-\omega$ SST (Case A)



(c) WALE (Case B)



(d) WALE (Case C)

그림 2.6. 주흐름방향 평균유속 분포 ($U/U_{\max}$)

(3) 이차류

그림 2.7은 난류모형의 적용결과 중 이차류 유속분포를 도시한 것이다. 벡터의 크기는 주흐름방향 최대유속으로 나누어 무차원화 하였다. $k-\omega$ SST 모형의 결과는 등방성 모형으로 난류의 비등방성에 의해 발생하는 이차류를 정상적으로 모의하지 못하기 때문에 결과를 제시하지 않았다. 그림 2.7(a)와 비교해보면 WALE 모형이 자유수면의 와와 바닥의 와를 비교적 잘 재현하는 것을 볼 수 있다. 와의 위치와 크기, 방향이 거의 일치하며 이차류의 최대 크기는 주흐름방향 최대유속의 약 2%로 Nezu and Rodi (1985)의 실험결과와도 일치한다. 또한, 측벽과 자유수면의 접합부에서 작은 크기의 내부이차류를 볼 수 있다. 이 내부이차류는 주흐름방향 최대유속의 1% 정도의 크기로 산정되었고, 약 $y^+ = z^+ = 100$ 정도의 와의 크기를 가지는 것으로 확인되었다. 이는 협폭수로에서 나타나는 이차류의 특성이다. 그러나 실험결과에서는 이러한 내부이차류가 존재하지 않는데, 이것은 레이놀즈가 큰 흐름인데 비해 측정장비의 정밀도가 충분하지 않기 때문으로 보인다.

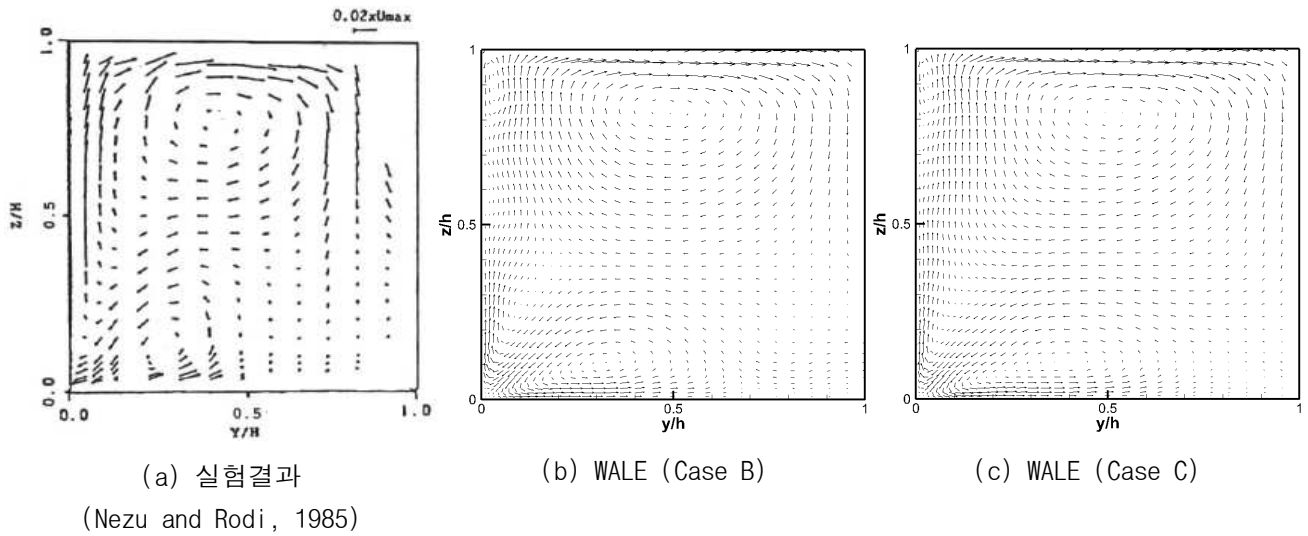


그림 2.7. 이차류 벡터 분포

(3) 주흐름방향 난류강도

그림 2.8은 주흐름방향 난류강도의 분포도이다. 난류강도는 전단속도로 무차원화 하였다. 수치모의 결과는 Nezu and Rodi (1985)의 실험결과의 분포 양상과 대체로 비슷한 경향을 보인다. 그러나 수로 중앙에서는 실험 결과에 비해 다소 작게 모의하였고, 수로 벽면에서는 다소 크게 모의하였다. 난류강도의 분포를 살펴 보면 바닥벽과 측벽 그리고 자유수면에서 큰 값을 가지는 것을 볼 수 있다. 이는 벽과 자유수면의 경계에서 난류운동에너지의 재분배 현상을 나타낸다. 또한 주흐름방향 난류강도는 $z = 0.7h$ 인 수로 중앙에서 최소값을 가지는데, Nezu and Nakagawa (1993)는 이를 최대유속점 침강 현상에 의한 것으로 설명하고 있다.

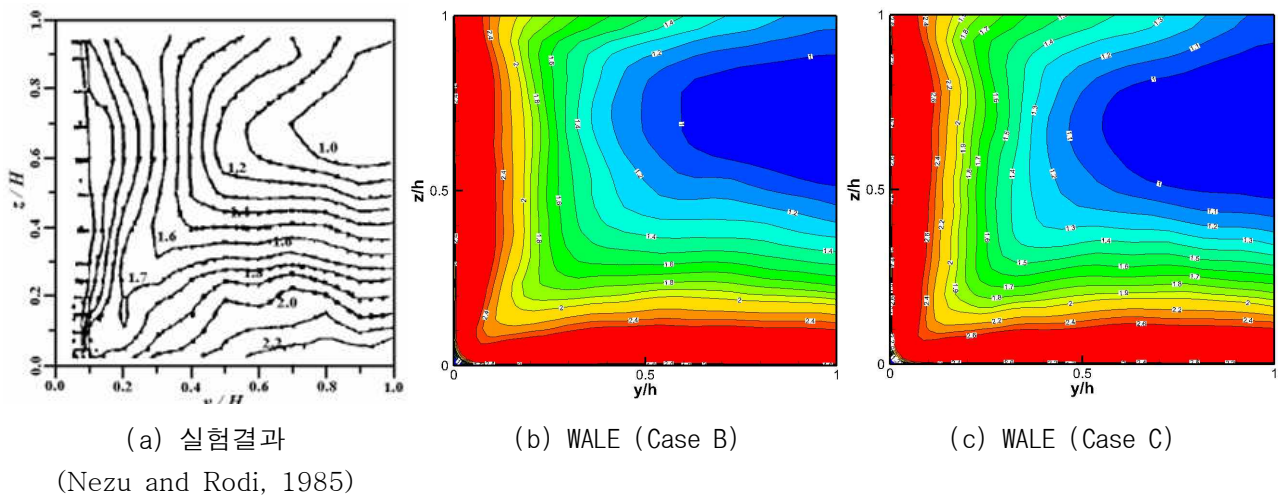


그림 2.8. 주흐름방향 난류강도 분포

(4) 난류운동에너지

그림 2.9는 주흐름방향 난류운동에너지 (m^2/s^2)의 분포도이다. 모의 결과 모두 벽면 근처에서 큰 값을 가지고 벽에서 멀어지면서 값이 감소하는 것을 보인다. 그러나 난류운동에너지 최소점은 $k-\omega$ SST 모형은 수로중앙 자유수면에서, WALE 모형은 자유수면 아래에서 발생하는 것으로 모의한다. 이는 주흐름방향 평균 유속의 최대유속 침강 현상에 의한 것으로 이를 모의하지 못하는 $k-\omega$ SST 모형이 WALE 모형과 차이를 보이게 된다.

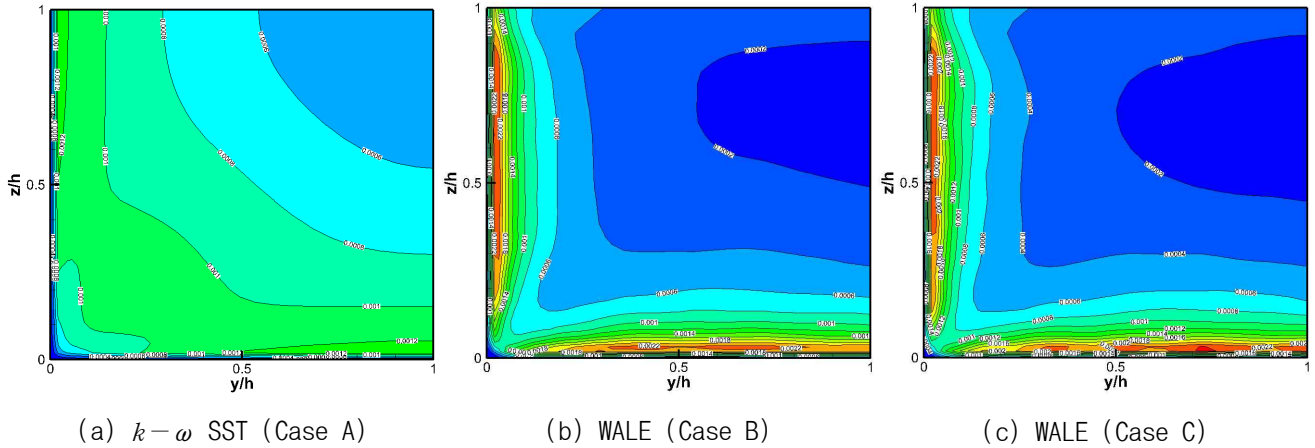


그림 2.9. 난류운동에너지 분포

(5) 레이놀즈 응력

그림 2.10은 주흐름방향과 연직방향 레이놀즈 응력의 분포도이다. 레이놀즈 응력은 전단속도의 제곱으로 무차원화 하였다. 레이놀즈 응력은 바닥에서 최대값을 가지고 점점 감소하다가 자유수면 아래에서는 음의 값을 가진다. 이러한 분포를 난류 와점성 개념과 연관지으면 레이놀즈 응력과 주흐름방향 유속의 속도경사와의 관계를 생각해볼 수 있다. 즉, 레이놀즈 응력은 속도경사와 비례하게 되는데, 바닥부근에서는 연직방향으로 유속이 급격히 증가하다가 최대유속점이 발생하는 지점에서 속도경사가 음의 부호로 바뀌고 다시 자유수면에 가까워지면서 유속이 감소하는 것을 볼 수 있다.

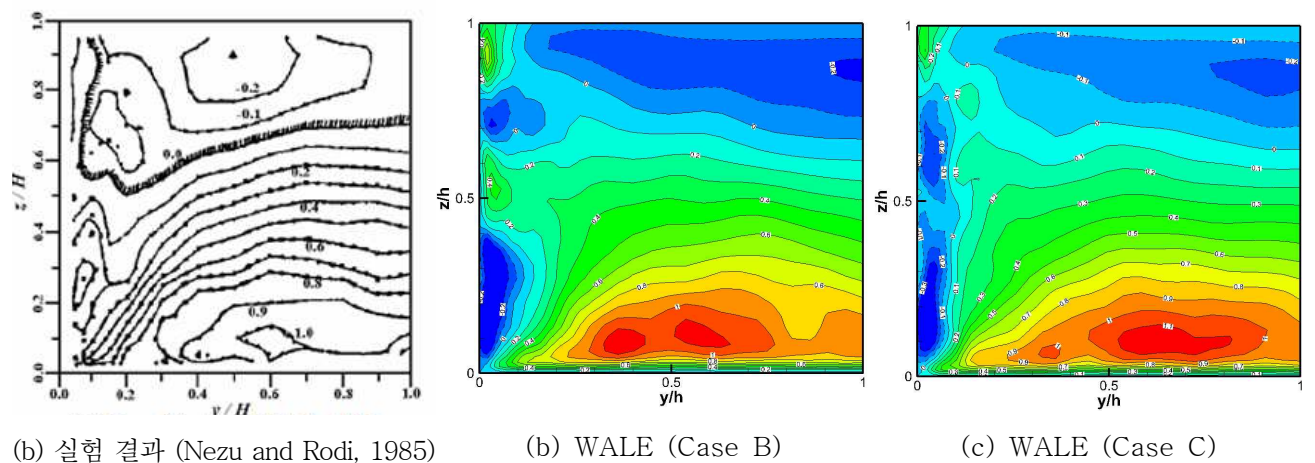


그림 2.10. 레이놀즈 응력 분포

2.4.2 장애물이 있는 개수로 흐름

(1) 적용 대상 및 모의 조건

구축된 모형을 Kara et al. (2015)의 측면에 교대가 돌출되어 있는 개수로 흐름에 적용하여, 자유수면 경계조건에 대하여 검토하였다. 자유수면 경계조건으로는 Rigid lid와 VOF 방법을 적용하였다. VOF 방법을 사용할 경우, 유출부에서에서 대기압 조건을 주어 상류단에 영향을 주지 않도록 하였으며, 동시에 위어를 설치하여 하류단 수위를 조절하였다. 시범모의를 통해 위어의 높이를 조절해가며 실험에서의 수위와 일치 시킨 후에 본 모의를 수행하였다.

모의 조건은 폭 0.3 m의 수심 0.038 m의 폭-수심비가 약 8인 광폭 조건에 폭의 1/3가량을 차지하는 교대가 돌출되어 있는 수로이다. Kara et al.의 실험 조건 및 수로 제원은 표 2.6에 자세히 나열하였다. 기존 연구에 의하면 프루드 수가 작은 경우, Rigid lid 경계조건은 합리적이며, 충분히 정확한 결과를 도출해 낼 수 있다. 그러나, 교대, 교각, 수제나 보 등의 수공구조물이 있는 경우, 구조물 주변에서 국부적인 수면 변동이 발생하며, 이는 모의 결과의 정확도에 악화시킨다. 마찬가지로 수공구조물 주변에서 발생하는 국부 세굴은 수면형의 변화를 발생시킬 수 있으며, 이는 다시 세굴 메커니즘에 반영되기 때문에 자유수면을 정확히 모의하는 것은 중요하다.

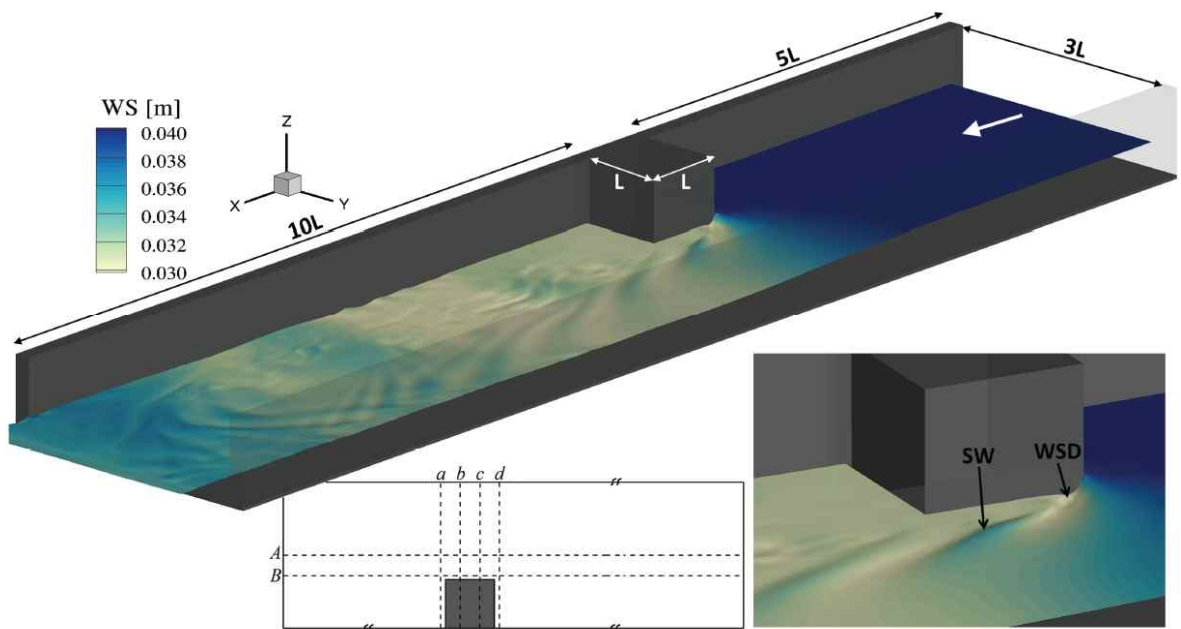
모의 영역은 그림 2.11과 같이 Kara et al.과 유사하게 설정하였으며, 격자는 Rigid lid 경계조건과 VOF 기법을 사용할 경우 조밀한 경우와 성긴 경우를 포함해서 표 2.7과 같이 총 4가지 구성하였다. 그림 2.11(b)와 같이 교대 주변의 격자는 더 조밀하게 구성하였다. 경계조건 및 초기조건은 표 2.8과 같다.

표 2.6. 실험 조건 및 수로 제원 (Kara et al., 2015)

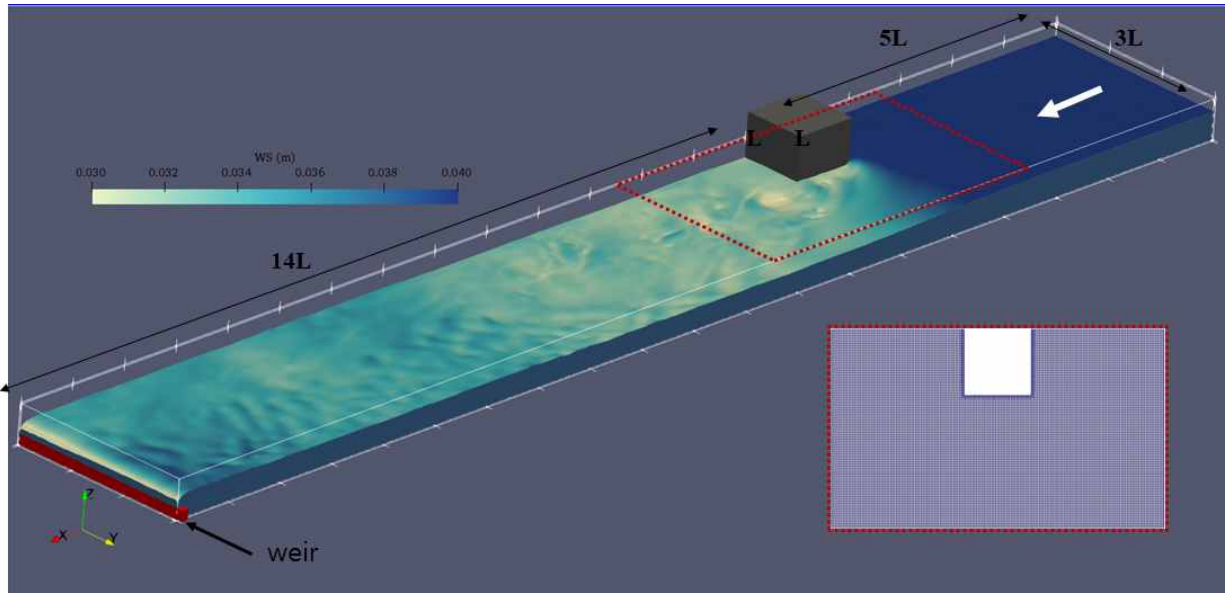
H (m)	B (m)	B/H	Q (m ³ /s)	U_b (m/s)	u_* (m/s)	Re ($=4U_bR_h/\nu$)	Fr ($=U_b/\sqrt{gH}$)	S_o
0.038	0.3	7.9	2.6×10^3	0.20	0.012	2.72×10^4	0.37	1/2000

표 2.7. 모의 조건 및 격자 해상도

Case	자유수면	격자 개수				격자 크기			Δt (s)
		해상도	n_x	n_y	n_z	Δx^+	Δy^+	Δz^+	
A	Rigid lid	coarse	256	48	20	76	76	18	0.0125
B	Rigid lid	fine	512	96	40	38	38	7	0.0125
H	VOF	coarse	256	48	32	76	76	18	0.0125
I	VOF	fine	512	96	64	38	38	7	



(a) 모의 영역 및 자유수면형 (Kara et al., 2015)



(b) 모의 영역 및 격자 구성 (본 연구과제)

그림 2.11. 모의 영역 및 자유수면형

표 2.8. 경계조건 및 초기조건

Case	유입부	유출부	벽면	자유수면	초기조건
A	일정 유속	무경사	비활동	Rigid lid	$k-\omega$ SST (RANS) 모의 결과
B	일정 유속	무경사	비활동	Rigid lid	Case A 결과
H	일정 유속	무경사	비활동	VOF	Case A 결과
I	일정 유속	무경사	비활동	VOF	Case A 결과

(2) 자유수면형

그림 2.12은 자유수면의 위치를 종방향으로 도시한 것이다. 측면도 A는 수로의 중앙에서의 자유수면형 분포이고, 측면도 B는 교대 바로 인접한 거리에서의 자유수면형 분포이다. 측면도 A와 B의 위치는 그림 2.11(a)에 표시되어 있다. Rigid lid의 수면형은 점선으로 나타내었으며, 성긴 격자와 조밀한 격자의 모의 결과를 Kara et al.의 실험과 비교하였다. 비교 결과 VOF 기법의 결과가 실제 자유수면형과 거의 일치하는 것을 확인하였다. 또한, 성긴 격자와 조밀한 격자의 모의 결과가 유사함을 보여주므로, 격자에 따른 결과의 개선이 충분히 이루어진 것으로 확인되었다.

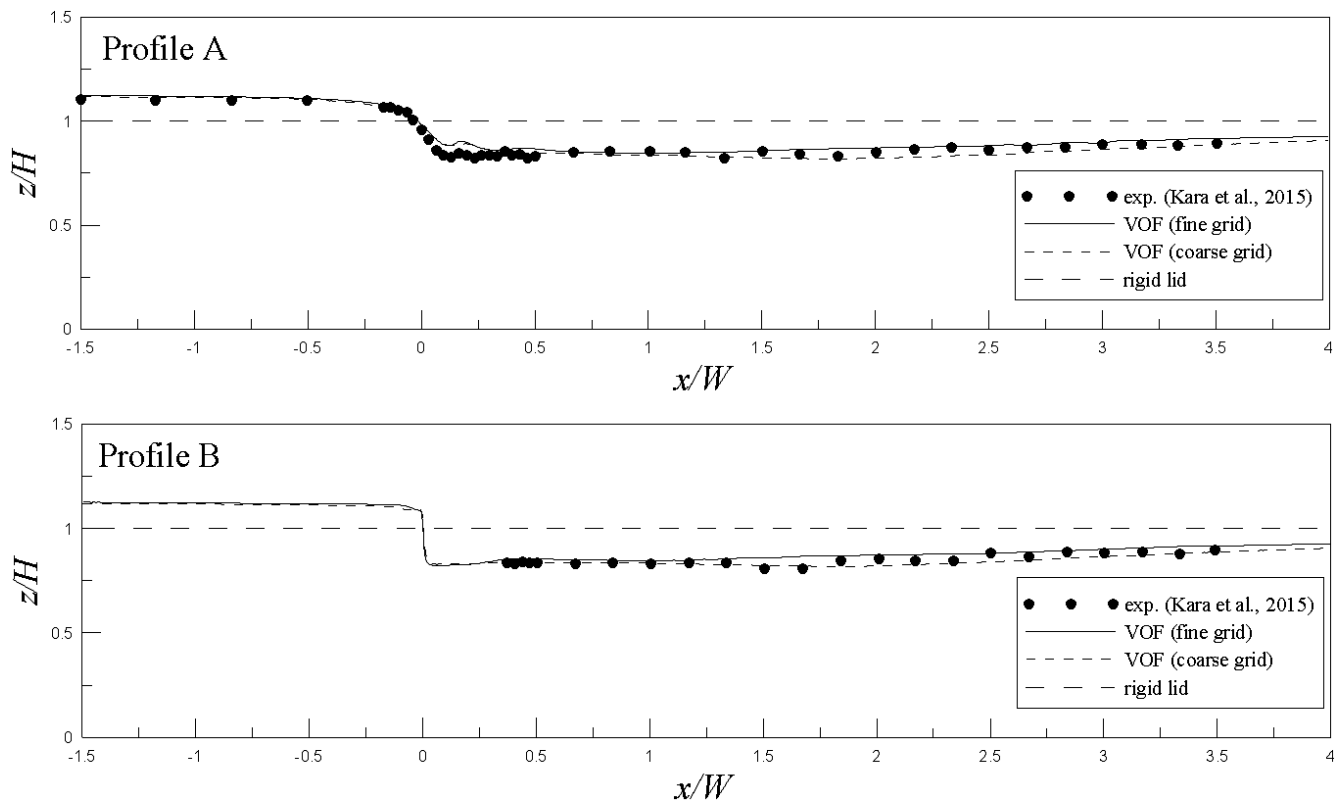


그림 2.12. 자유수면형 측면도

(3) 주흐름방향 평균유속

그림 2.13은 바닥 근처에서의 주흐름방향 평균유속을 도시한 것이다. 그림 2.13(a)는 Kara et al.의 자유수면형을 고려한 큰 와 수치모의 결과이며, 2.13(c)는 Rigid lid 가정을 이용한 큰 와 수치모의 결과이다. 이에 대응하여 본 연구 과제에서 수행한 모의 결과는 각각 그림 2.13(b)와 2.13(d)이다. Kara et al.과의 차이는 자유수면형을 모의하는 방법으로, Level set을 사용하였지만 본 연구에서는 VOF를 사용하였다. 자유수면형의 고려여부와 상관없이 교대에 의한 단면 축소 때문에 교대 인근에서의 유속은 급하게 증가한다. 그러나 Kara et al.의 모의결과와 유사하게 자유수면형을 고려하였을 때, 교대 구조물 인근에서 수위 하강으로 인한 유속 증가가 Rigid lid 가정에 의한 결과보다 두드러지게 나타났다.

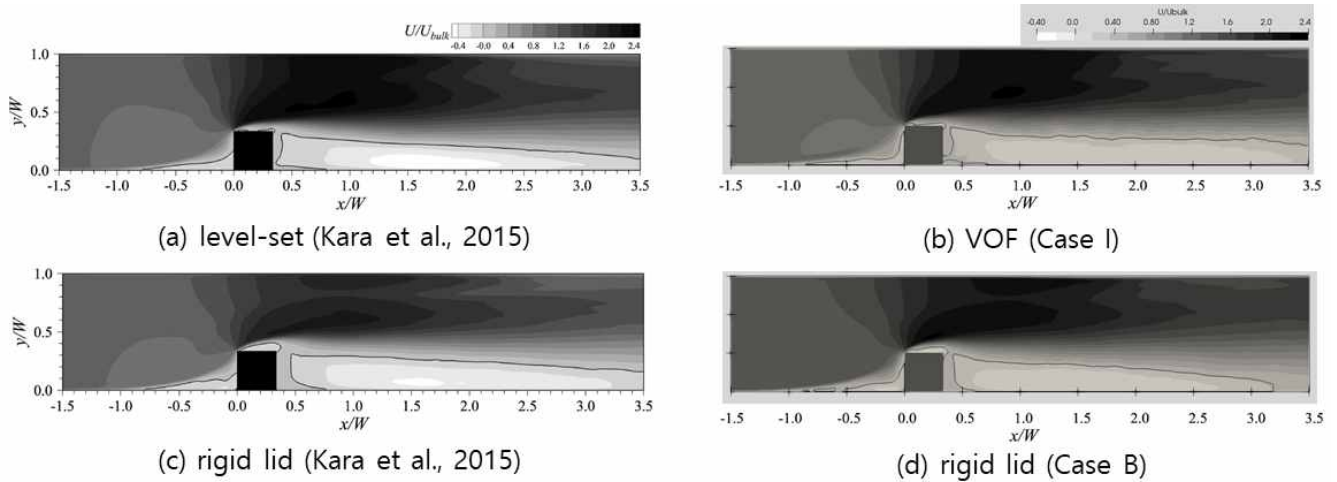


그림 2.13. 바닥근처에서의 주흐름방향 평균유속 ($z/h = 0.1$)

(4) 횡방향 평균유속

그림 2.14는 바닥 근처에서 횡방향 평균유속 분포를 도시한 것이다. 본 연구과제의 모의 결과는 Kara et al.의 모의 결과와 비슷한 경향을 보여준다. 즉, Rigid lid 가정을 이용할 경우 횡방향으로의 운동량 전파가 과대 산정하는 것을 보여준다. 교대 상류에서 교대에 의하여 수면상승이 발생하여야 하지만 Rigid lid 가정을 사용할 경우 수면상승을 억제하기 때문에 이에 대응하는 운동량이 횡방향으로 전해지는 결과를 야기한다.

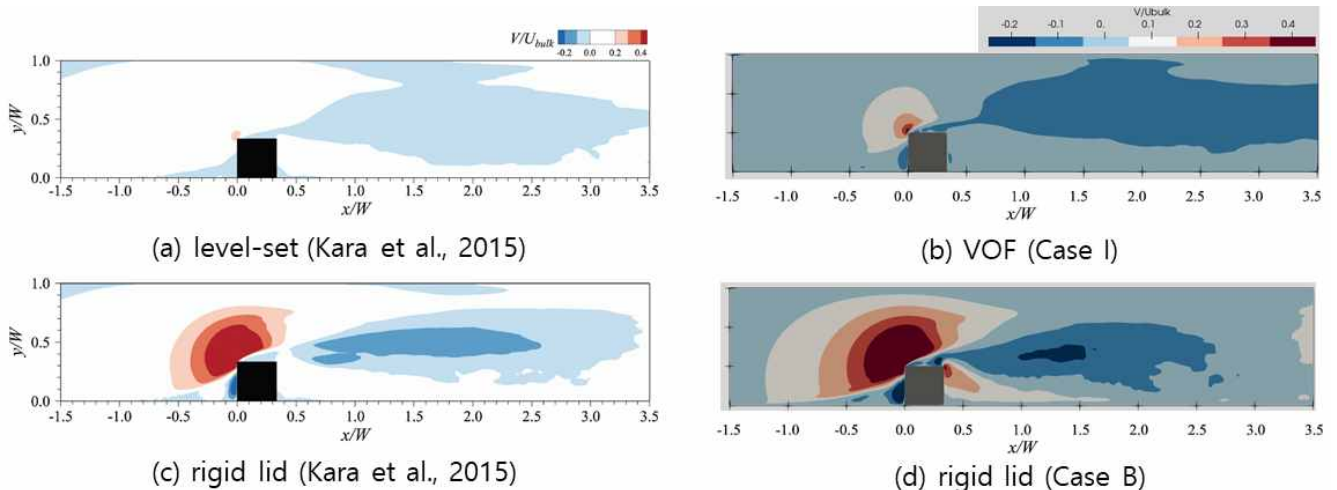


그림 2.14. 바닥근처에서의 횡방향 평균유속 ($z/h = 0.1$)

(5) 난류운동에너지

그림 2.15은 바닥 근처에서 난류운동에너지를 나타낸 것이다. Kara et al.의 모의 결과와 유사하게 자유수면을 고려한 경우가 Rigid lid 가정의 경우보다 난류운동에너지가 가장 크게 나타나는 지점이 구조물에 더 근접하게 나타나는 것을 확인하였다. 또한, 자유수면을 고려한 경우에는 난류운동에너지가 좁은 모양으로 집중되는 것을 볼 수 있고, Rigid lid 가정을 할 경우 폭방향으로 더 빠르게 퍼져나가는 것을 확인할 수 있다.

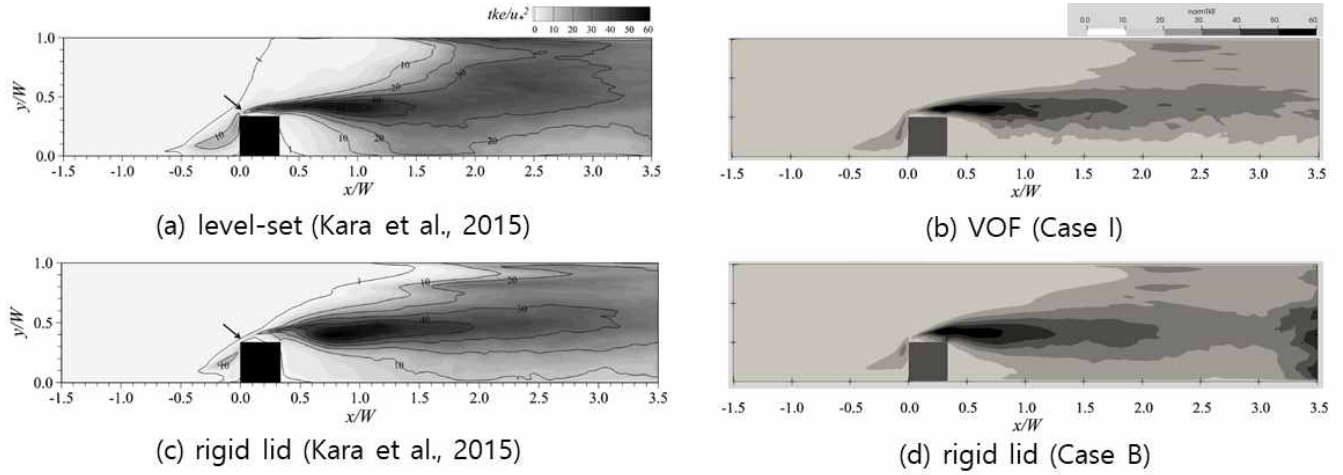


그림 2.15. 바닥 근처에서의 난류운동에너지 ($z/h = 0.1$)

2.4.3 보 하류 흐름

(1) 적용 대상 및 모의 조건

구축된 모형을 Guan et al. (2014)의 실내실험에 적용하여 보 하류 흐름 특성을 분석하였다. Guan et al.의 실험 조건 및 수로 제원은 표 2.9와 같다. 모형의 적용 대상은 하류수위가 충분히 접근수위와 비슷하여 그림 2.16과와 같이 표면 제트류가 형성되는 조건이다. 평탄한 하상에 보를 설치하고 일정 시간동안 물을 유하하여 그림 2.17의 측면도와 평면도에서 보이듯이 보 하류에 세굴이 발생하였다. 흐름 모의는 평평한 하상에 보가 있는 경우와, 보로 인하여 세굴이 발생한 지형을 대상으로 하였다.

난류 모형으로는 WALE 모형 (LES)을 사용하였다. 유입부 경계조건은 일정한 유속을 주었으며, 자유수면은 Rigid lid 조건을 사용하였다. 그림 2.18과 같이 계산 영역은 보 상류 10m부터 보 하류 5m까지이며, 보 구조물 근처에서 계산 격자를 조밀하게 구성함으로써 모의 정확도를 높였다. 각 모의 대상당 3가지 다른 해상도의 격자를 구성하여 격자 크기에 대한 모의 결과를 검토하였다. 격자 구성 및 계산 조건에 대한 자세한 사항은 표 2.10에 정리하였다.

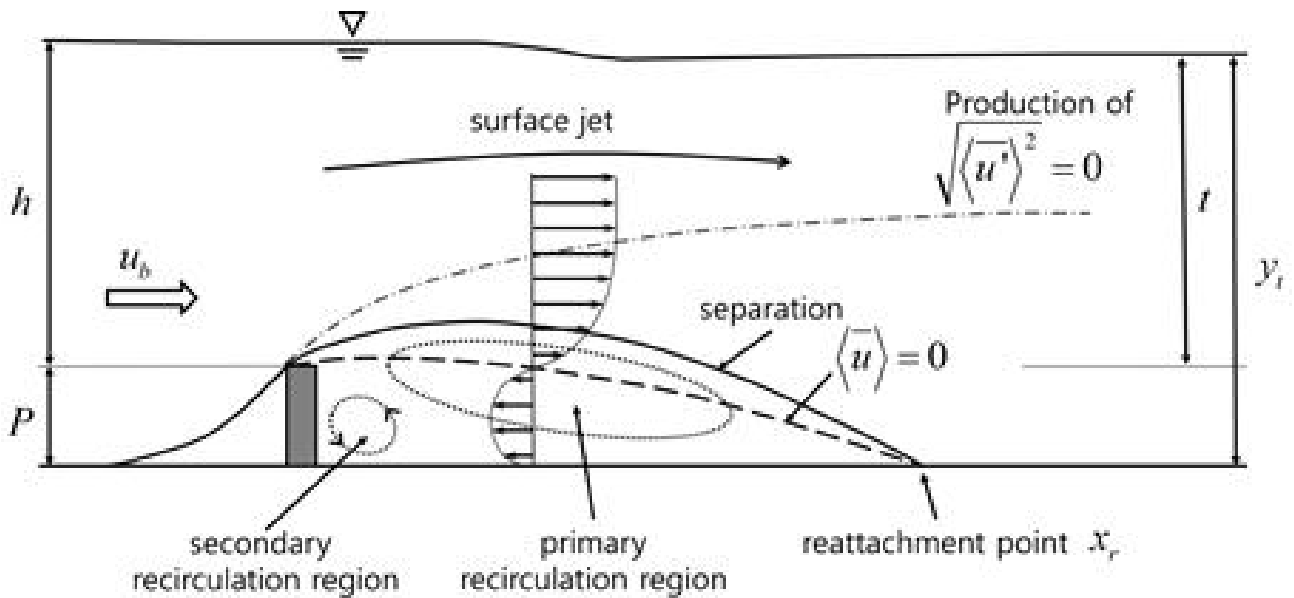


그림 2.16. 수중보를 지나는 표면제트류 개요도

표 2.9. 실험 조건 및 수로 제원 (Guan et al. 2014)

y_t (m)	P (m)	h (m)	b (m)	u_b (m/s)	u_* (m/s)	Re ($u_b h / \nu$)	Fr ($u / \sqrt{gh}$)	d_{50} (mm)	u_{*c} (m/s)
0.15	0.04	0.15	0.44	0.296	0.014	4.44×10^4	0.24	0.85	0.021

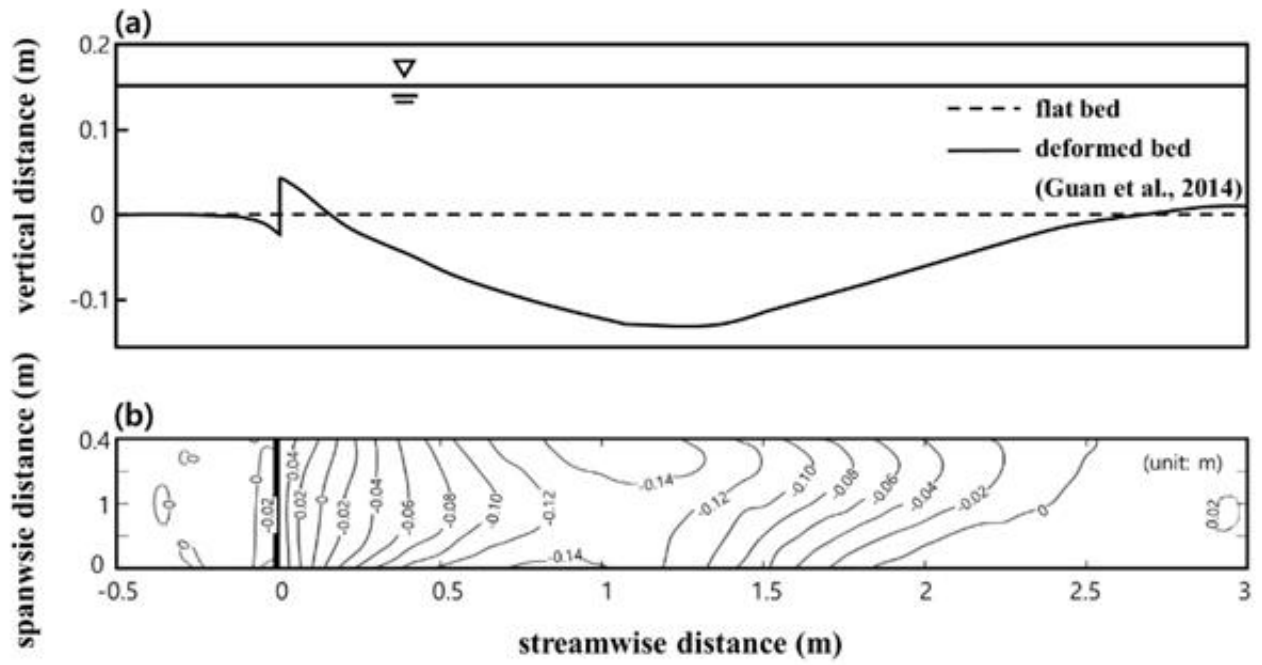


그림 2.17. 세굴발달 전후의 하상고: (a) 측면도, (b) 평면도

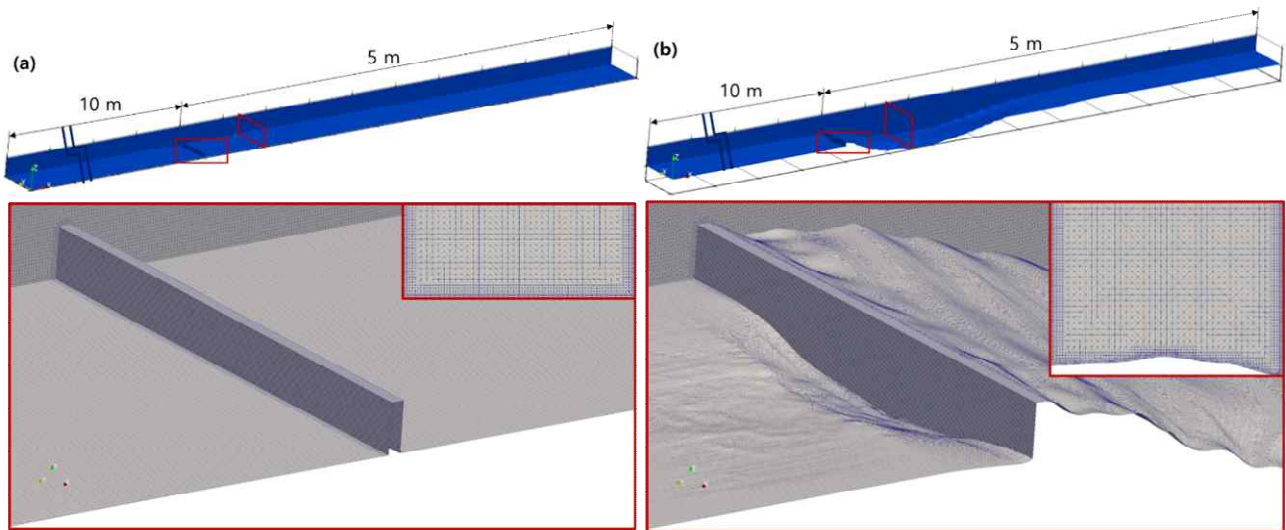


그림 2.18. 계산 영역 및 격자 구성: (a) 평탄하상 (b) 세굴발생하상

표 2.10 계산 격자 및 모의 시간

Case		평탄하상 (Case FB)			세굴발생하상 (DB)		
격자 해상도		Coarse	Inter -mediate	Fine	Coarse	Inter -mediate	Fine
총 격자 수 ($\times 10^6$)		1.7	10.7	25.8	1.8	11.4	27.2
격자 크기 Δ ($\times 10^{-3}$ m)	최소	5	2.5	0.625	5	2.5	0.625
	최대	10	5	5	10	5	5
Δ^+ (near wall)		18	9	4	20	11	4
Δt ($\times 10^{-3}$ s)		5	2.5	0.625	5	2.5	0.625
모의 시간 ($t_e = h/u_*$)	발달	13	11	8	12	10	9
	평균	35	30	26	50	42	25

(2) 평균 흐름

그림 2.11은 평균유속 벡터의 분포를 수로 중앙에서 종단면을 도시한 것이다. Guan et al.의 실험에서 제시된 유속벡터와 함께 도시하였다. 평균유속 벡터의 분포를 살펴보면 보로 인한 단면축소로 흐름이 가속하고, 보의 정상 부분에서부터 박리흐름 (separated flows)이 발달하는 것을 볼 수 있다. 또한, 박리흐름을 따라 재순환 흐름이 형성되며 이어서 재부착지점 (reattachment point)이 나타난다. Guan et al.의 실험에서 박리된 흐름이 재부착하는 지점에서 최대세굴심이 발생한 것을 확인할 수 있다.

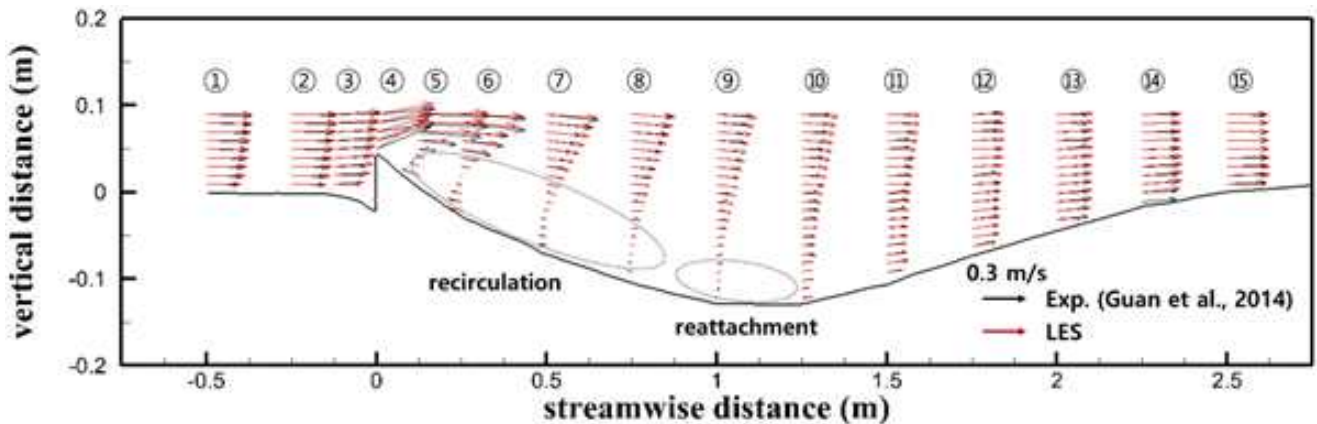


그림 2.11. 평균유속 벡터 분포 (종단면)

격자 해상도가 적절하게 구성되었는지 확인하기 위해서 그림 2.11의 1번~15번까지의 주흐름방향 평균유속의 연직방향 분포를 도시하였다. 격자 해상도가 다른 3가지 LES 계산 결과를 실험 결과와 비교하고 검토하였다. 모의 결과와 실험 결과의 상대오차를 산정한 결과 성긴 격자의 경우 21.1%, 중간 격자의 경우 16.4%, 조밀한 격자의 경우 6.2%로, 조밀한 격자에서 충분한 정확도를 보여주는 것을 확인하였다. 따라서 조밀한 격자에서의 결과를 가지고 보 하류 흐름 특성을 분석하였다. 그림 2.13은 주흐름방향 평균유속과 유선을 함께 도시한 것이다. 보의 모서리에서부터 박리흐름이 발생하여 강한 재순환 영역이 형성되는 것을 볼 수 있다. 또한, 보로 인하여 세굴이 발생할 경우 재순환 영역이 최대 세굴심 근처까지 확장되는 것을 확인하였다. 그리고 바닥면에서 세굴공을 기준으로 상류방향으로 역류하는 흐름이 나타나는 것 볼 수 있다. 이러한 역방향 흐름은 세굴공의 하상토를 보 직하류로 이송하는 역할을 한다.

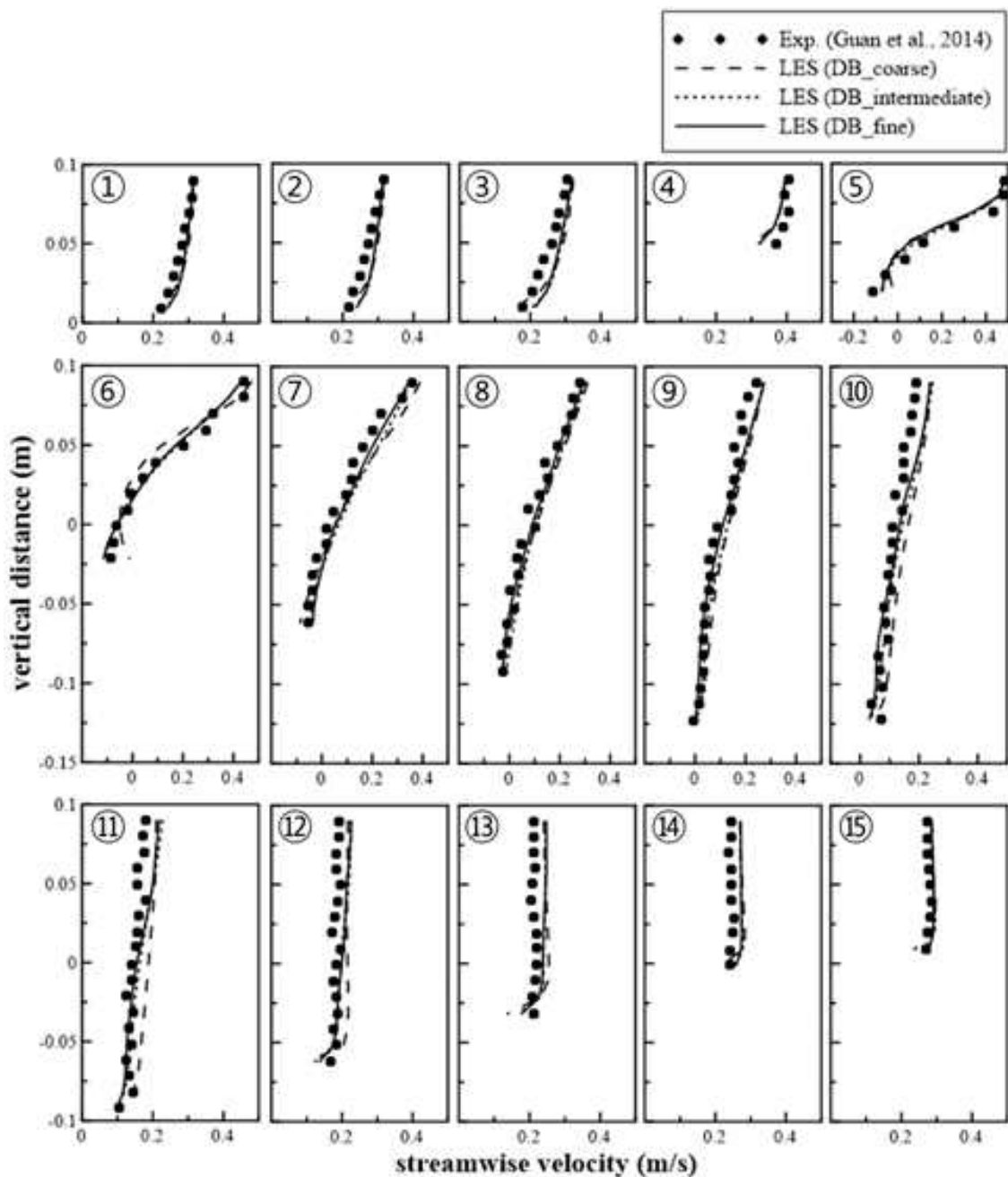


그림 2.12. 주흐름방향 평균유속의 연직방향 분포

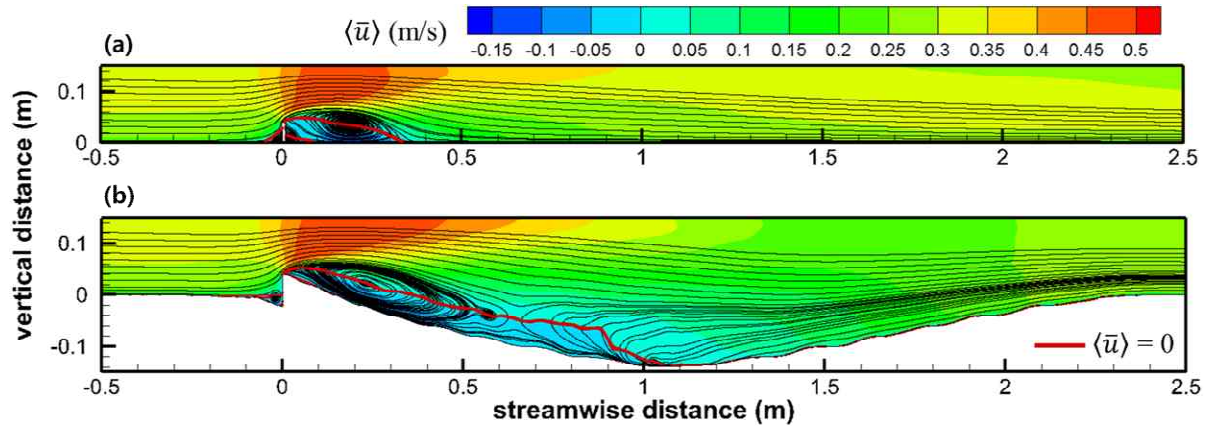


그림 2.13. 주흐름방향 평균유속과 유선: (a) 평탄하상 (b) 세굴발생하상

그림 2.14는 연직방향 평균유속과 유선을 함께 도시한 것이다. 보로 인하여 재순환 영역이 생기고 끝단에서 강한 하강류가 발생한다. 이러한 흐름은 바닥을 휩쓸게 되면서 세굴을 야기할 수 있다. 세굴발달 전에는 보 직하류의 강한 하강류가 두드러지는 것을 볼 수 있는데, 세굴이 발생하면 깊은 수심으로 인하여 하강류가 약해지게 되는 것을 볼 수 있다. 최대 세굴심이 발생한 지점에서는 하강류가 거의 나타나지 않는다.

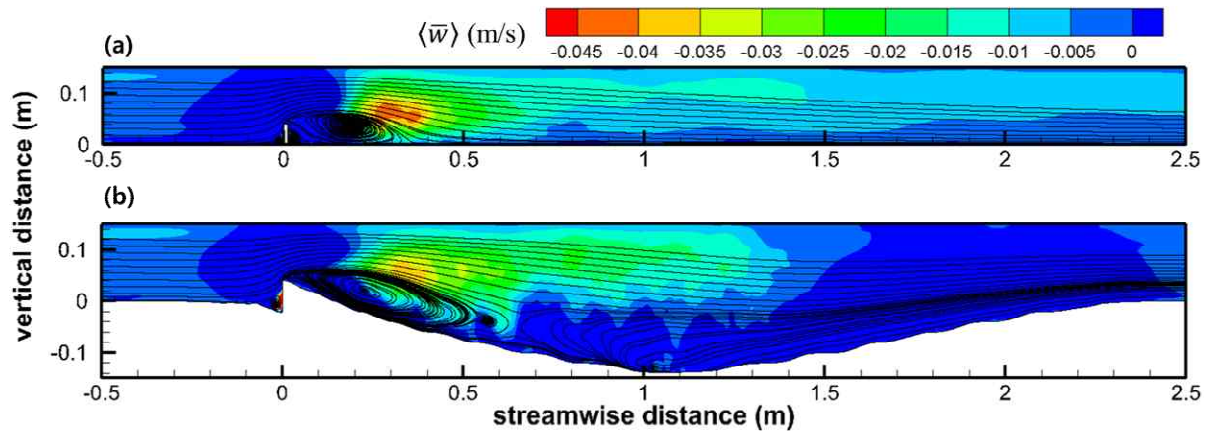


그림 2.14. 연직방향 평균유속과 유선: (a) 평탄하상 (b) 세굴발생하상

(3) 평균운동에너지, 난류운동에너지, 레이놀즈 응력

그림 2.15는 평균흐름의 에너지를 나타내는 것이다. 보 설치로 인하여 단면 축소가 일어나고, 보를 지날 때 종방향으로, 보 직하류에서 연직방향으로 평균운동에너지의 경사가 큼을 볼 수 있다. 이는 난류운동에너지의 생성과도 연관이 있다. 세굴이 발생한 경우 연직방향 평균운동에너지의 경사가 큰 구간이 더 확장된다. 이것은 즉, 난류운동에너지의 생성이 더 증대됨을 의미한다. 이러한 양상은 그림 2.16의 난류운동에너지에서 다시 확인할 수 있다. 난류운동에너지는 유동의 변동성분과 관련이 있으며, 보로 인하여 변동성이 증가하였지만, 보 직하류 하상에서 변동성분을 억제한다. 보 직하류 하상에서 변동성분은 세굴을 야기하며, 세굴이 발생하면 벽면으로부터 멀어지게 되므로 더욱더 자유롭게 난류는 발달하게 된다. 그림 2.17은 레이놀즈 응력으로, 유속경사와 유속의 변동성분과 관련이 있다. 상당부분의 유속의 경사가 보 직하류에서 종방향으로 길게 나타나며 이러한 현상은 강한 레이놀즈 응력이 나타나는 것으로 재확인되었다.

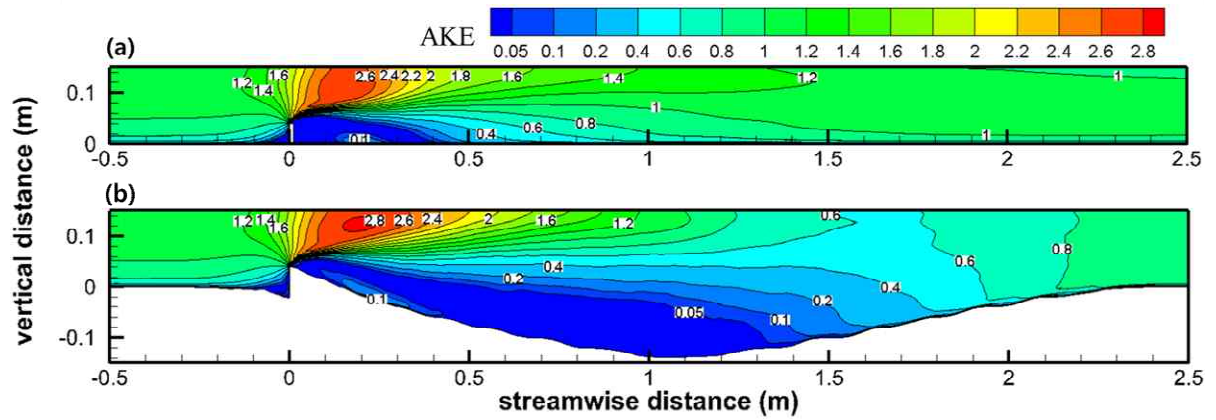


그림 2.15. 평균 운동에너지: (a) 평탄하상; (b) 세굴발생하상

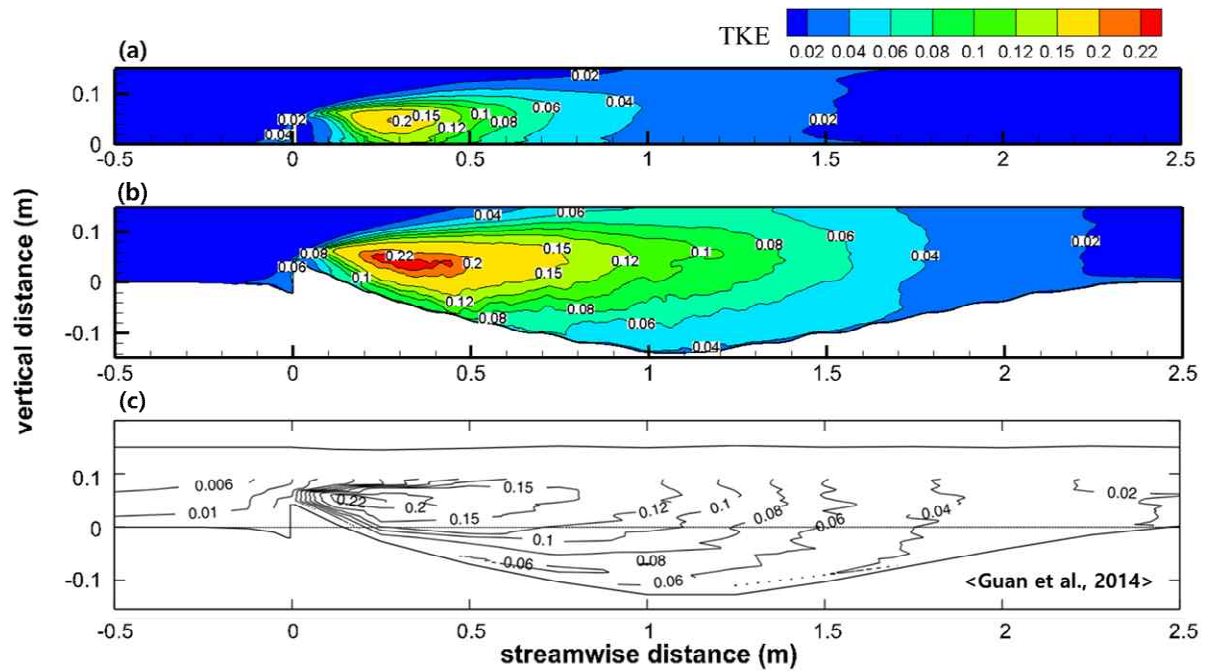


그림 2.16. 난류 운동에너지: (a) 평탄하상 (LES); (b) 세굴발생하상 (LES); (c) 세굴발생하상 (Guan et al., 2014)

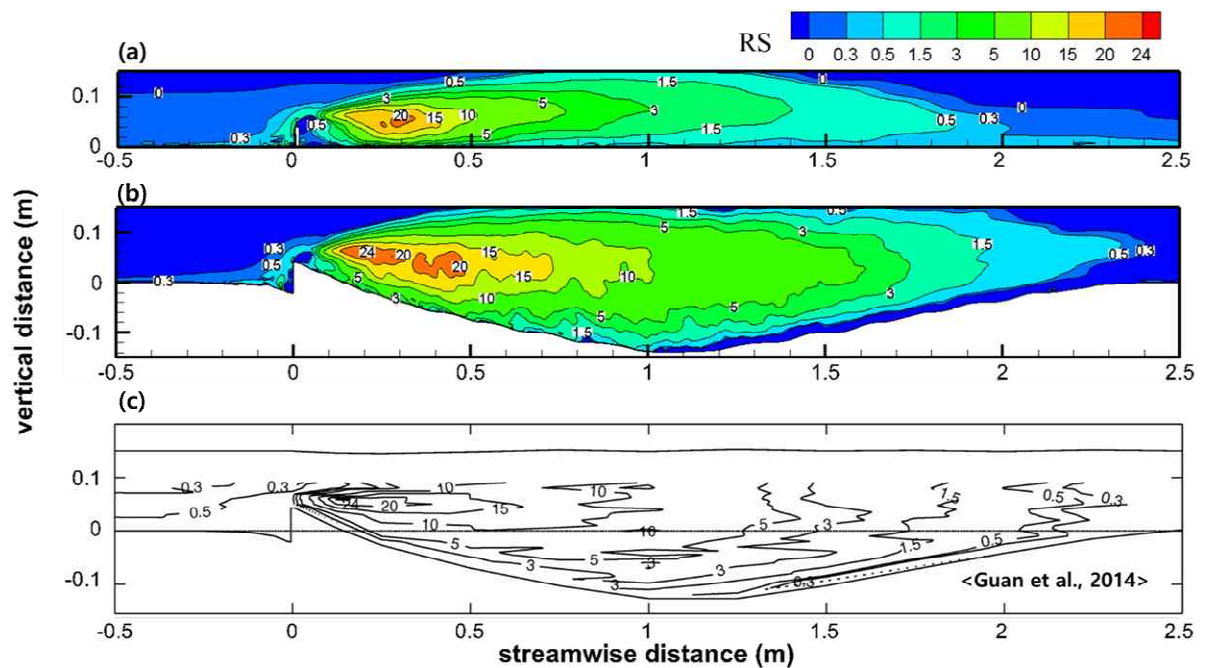


그림 2.17. 레이놀즈 응력 분포: (a) 평탄하상 (LES); (b) 세굴발생하상 (LES); (c) 세굴발생하상 (실험)

(4) 순간 유속장

그림 2.18은 임의 순간의 보 하류 난류 조직 구조를 나타낸 것이다. 보를 넘어가면서 rolling하는 큰 스케일의 난류 구조가 형성되며 기울어진 난류 조직 구조로서 발달하기도 하며, 바닥을 향해 쓸기도 한다. 하상이 평평한 경우 이러한 난류 조직 구조의 대부분은 바닥을 쓸면서 강한 난류 에너지를 바닥면에 전달하게 된다. 세굴이 발달하게 되면서 기울어진 난류 조직 구조의 발달이 두드러지게 나타난다. 보로 인하여 발생한 큰 규모의 난류 조직 구조는 더 이상 바닥에 직접적인 영향을 미치지 못하며, 수면을 향해 사선 방향으로 발달해 나아가며 소산한다.

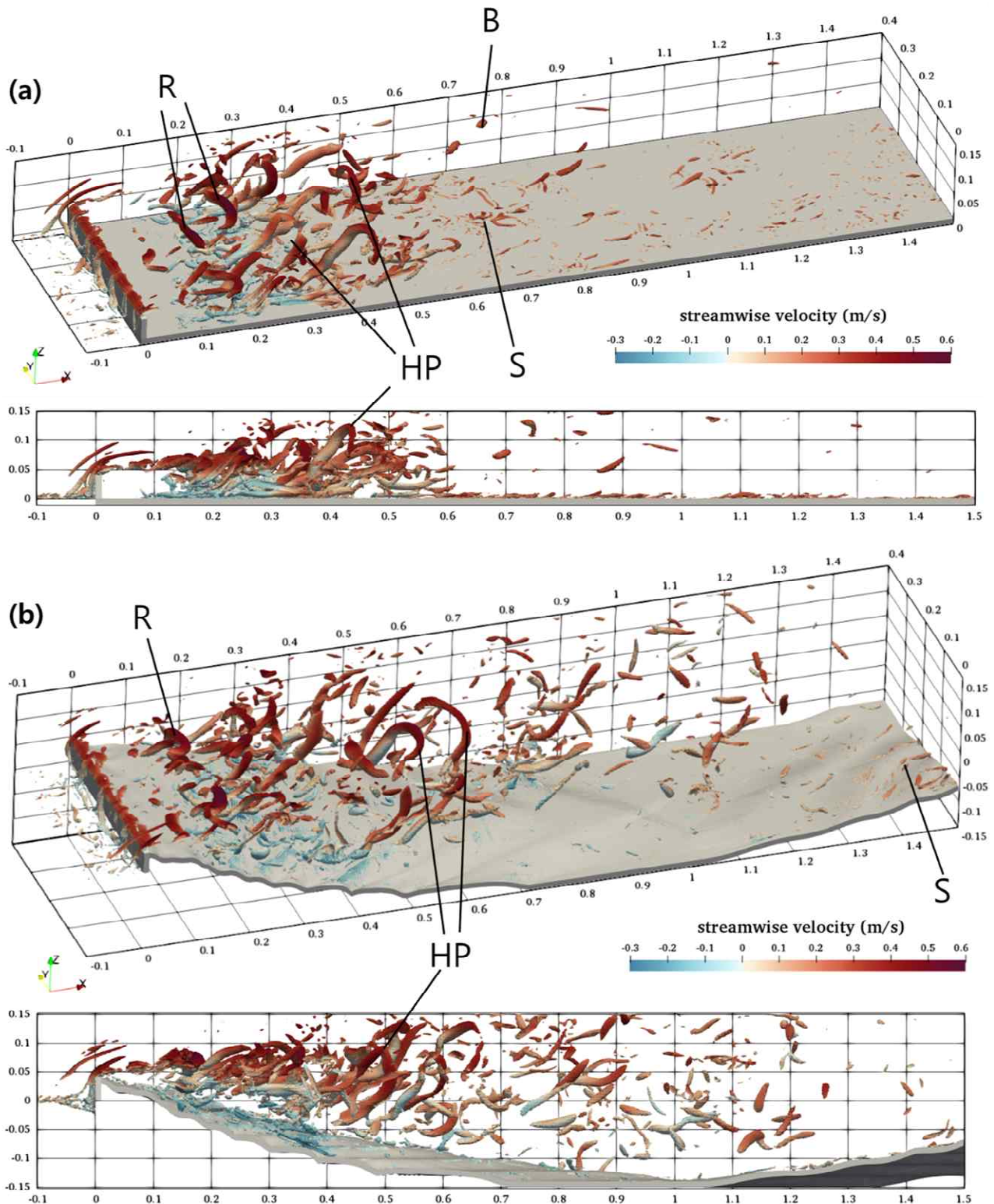


그림 2.18. 임의 시간에서의 순간 흐름 구조: (a) 평탄하상; (b) 세굴발생하상

수면방향으로 기울어지고 기다란 형태의 난류 구조는 그림 2.19와 그림 2.20에서 다시 확인할 수 있다. 그림 2.19의 순간 와류의 크기 분포를 살펴보면 평탄하상의 경우 대부분이 바닥을 쓸며 나아가는 것을 확인할 수 있으며, 세굴발생하상의 경우 바닥에서 수면까지 대각선 방향으로 발달하는 것을 확인할 수 있다.

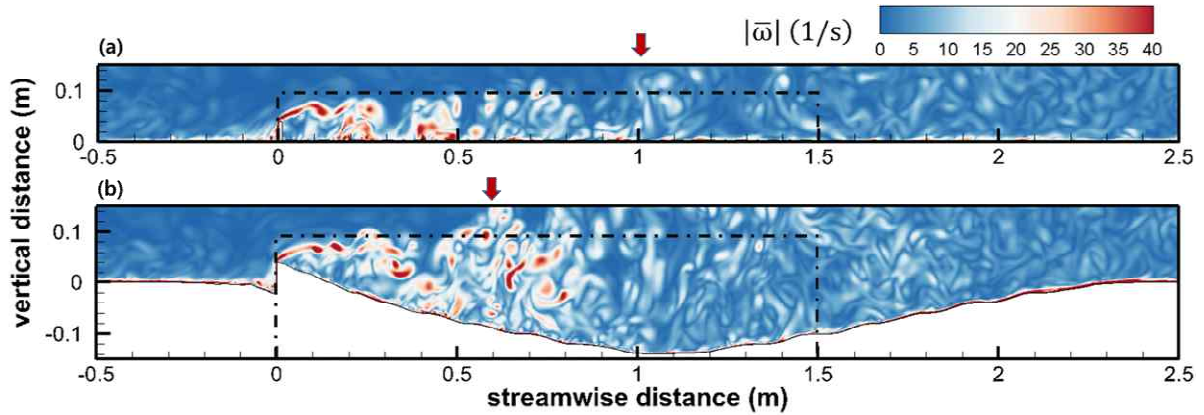


그림 2.19. 순간 와류의 크기 분포: (a) 평탄하상; (b) 세굴발생하상

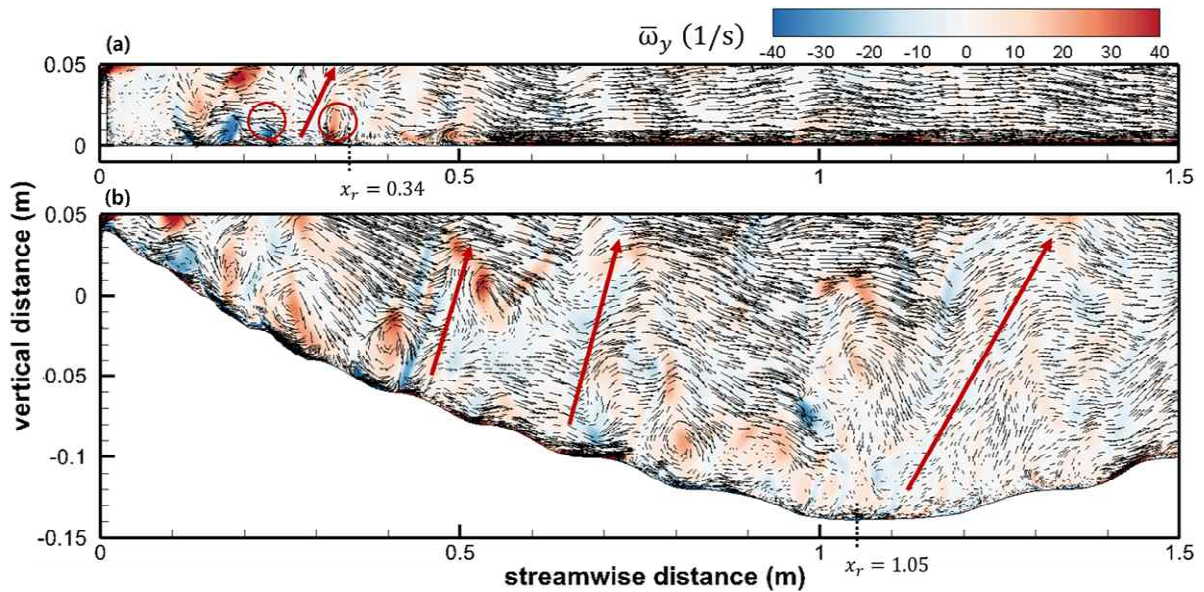


그림 2.20. 순간 유속 분포: (a) 평탄하상; (b) 세굴발생하상

그림 2.21은 바닥면에서 벽과 평행한 순간 유속벡터 분포를 도시하였다. 그림 (a)는 평탄하상의 경우이고, 그림 (b)는 세굴발생하상의 경우이다. 평탄하상의 경우 재부착지점의 강한 splats 현상을 확인할 수 있으며, 그 하류 방향으로 anti-splats가 발생하며 이어서 steaks 구조가 나타난다. 반면 세굴발생하상의 경우 재부착지점에서는 뚜렷한 splats 현상이 나타나지 않음을 볼 수 있다.

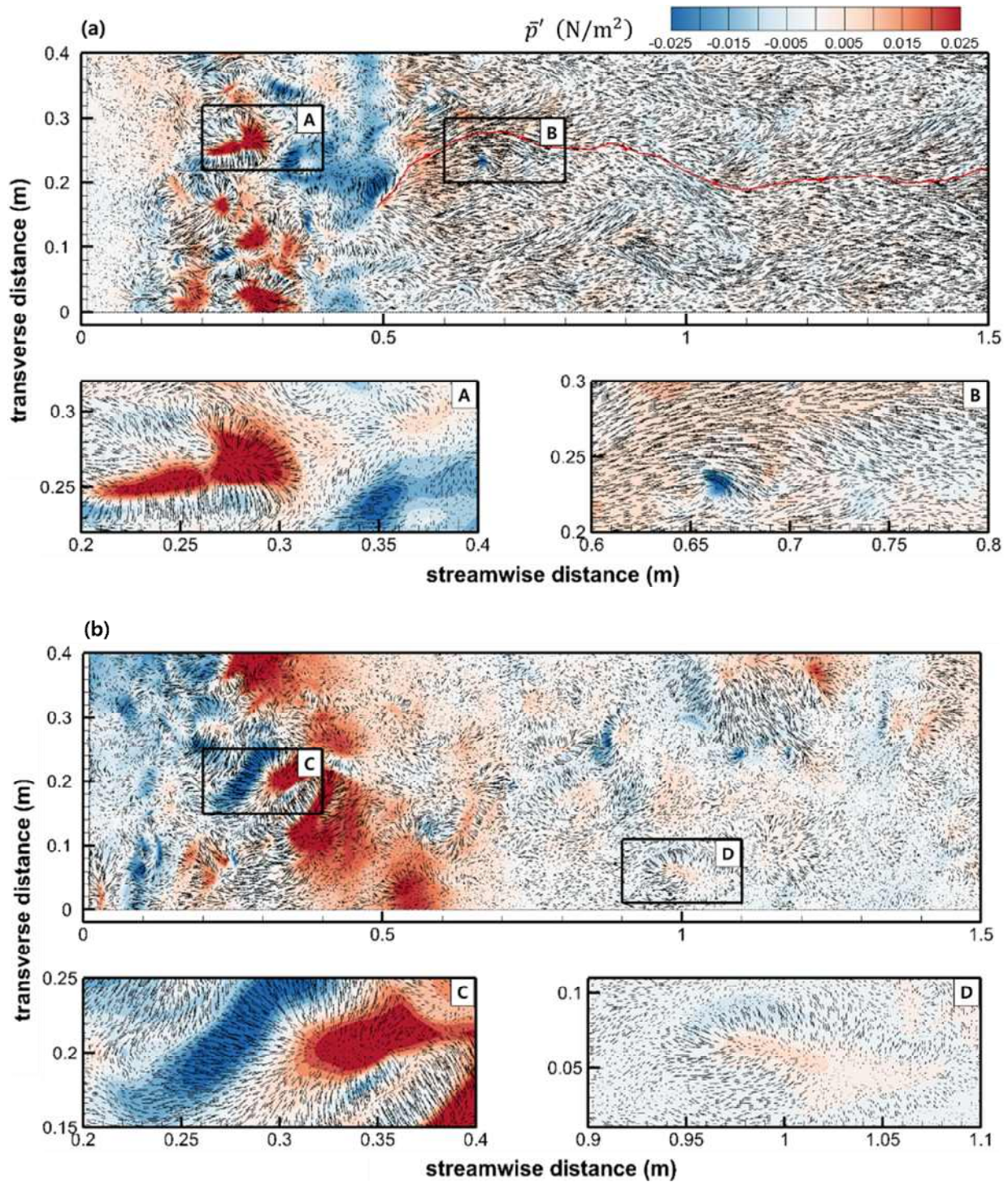


그림 2.21. 바닥 근처에서의 벽과 평행한 순간 유속 벡터 분포 (a) 평탄하상; (b) 세굴발생하상

바닥 근처에서 쓸기 (sweeps)와 분출 (ejection) 현상의 빈도와 강도를 확인하기 위하여 uw 사분면 기법을 수행하였다. 그림 2.22 와 같이 흐름의 방향에 따라 쓸기와 분출 현상의 정의를 다르게 해야 한다. 그림 2.23 을 살펴보면 평탄하상의 경우 재부착지점 근처에서 매우 강한 (레이놀즈 응력의 100 배 이상) 쓸기와 분출 현상이 발생한다. 또한 강한 (레이놀즈 응력의 30 배 이상) 쓸기와 분출 현상은 보 하류 1 m 까지 발생하는데 이는 직접적으로 세굴이 발생한 영역과 일치한다. 반면에 세굴발생하상의 경우 재부착지점에서 강한 쓸기와 분출 현상이 나타나지 않음을 확인할 수 있다.

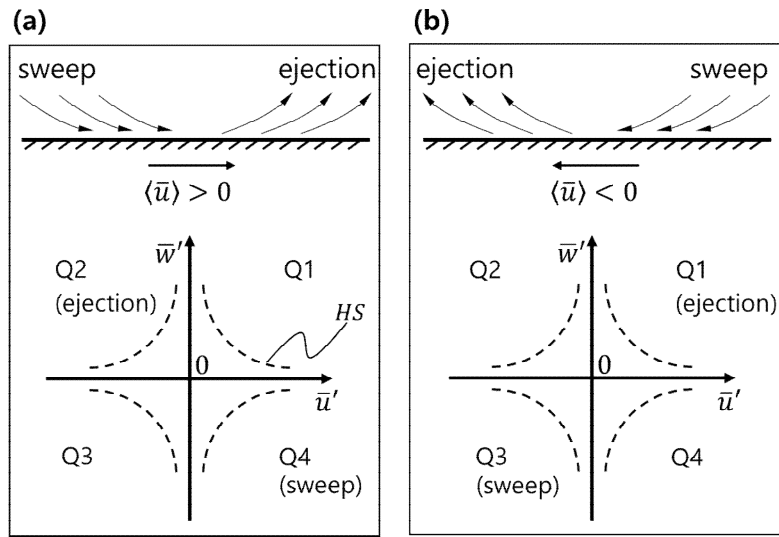


그림 2.22. 흐름 방향에 따른 uw 사분면 기법의 모식도:
(a) forward flow; (b) backward flow

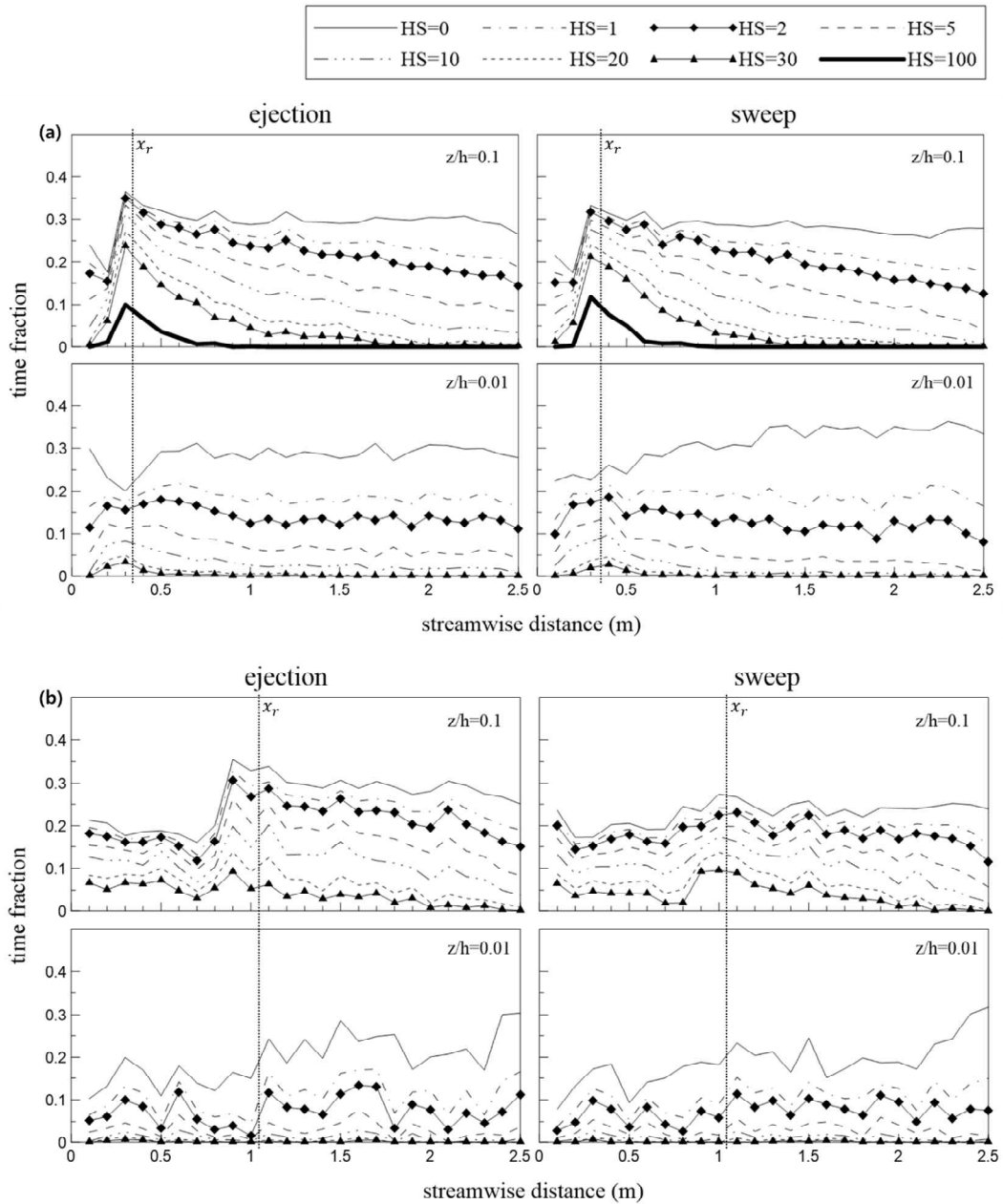


그림 2.23. 분출과 쓸기 현상의 상대적 발생 빈도 분포 ($z/h = 0.01, 0.1$):
(a) 평탄하상; (b) 세굴발생하상

두 가지 하상 각각의 재부착지점에서, 바닥근처의 분출 및 쓸기 현상이 레이놀즈 응력에 기여하는 비율을 도시하였다. 가로축의 hole size가 의미하는 바는 발생한 현상이 평균 레이놀즈 응력보다 어느 정도 강한 현상인지를 나타내는 것이다. 즉, 평균 레이놀즈 응력이 약하더라도 순간적으로 큰 변동성분에 의하여 큰 전단응력이 발생할 수 있음을 의미한다. 평탄하상의 경우 재부착지점에서 분출현상에 비해 쓸기현상이 더 많이 레이놀즈 응력에 기여하며, 세굴발생하상의 경우에도 마찬가지로 쓸기현상이 더 많이 기여한다. 그러나 평탄하상의 경우 hole size가 30 이상인 쓸기와 분출 현상이 레이놀즈 응력에 기여하며, 세굴 발생의 원인이 될 수 있음을 보여준다.

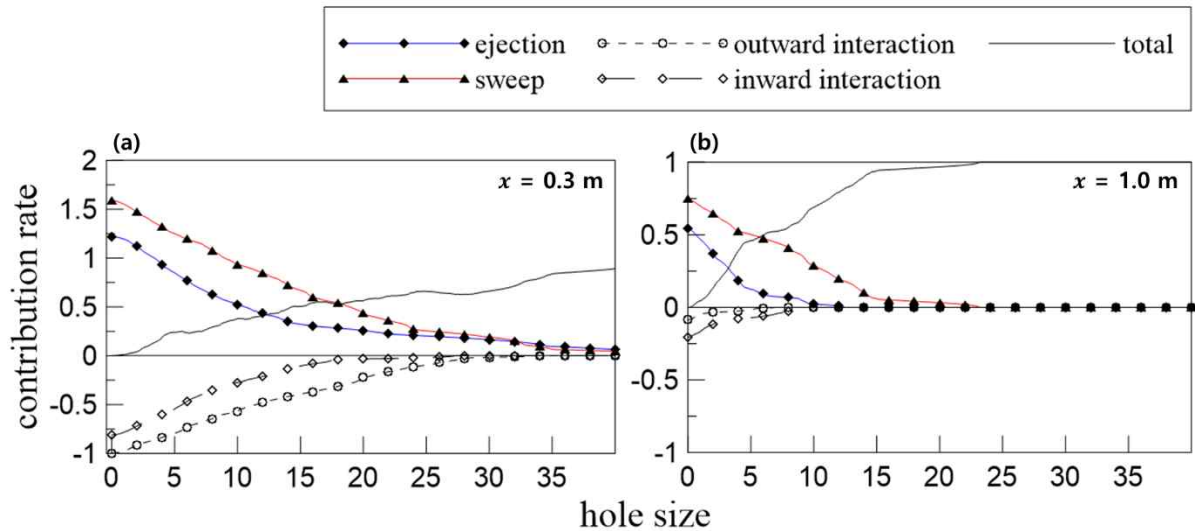


그림 2.24. 바닥 근처에서 조직구조의 레이놀즈 응력 기여율 분포:
(a) 평탄하상; (b) 세굴발생하상

3. 세굴예측 통합 모형 구축

3.1 이상 흐름 모형 (two-phase flow model)의 지배방정식

입자와 유체에 관한 지배방정식은 다음과 같은 연속방정식과 운동량방정식으로 구성된다.

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\partial \alpha u_i^a}{\partial x_i} = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial t} + \frac{\partial \beta u_i^b}{\partial x_i} = 0 \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial \rho^a \alpha u_i^a}{\partial t} + \frac{\partial \rho^a \alpha u_i^a u_j^a}{\partial x_j} = -\alpha \frac{\partial p}{\partial x_i} + \alpha f_i - \frac{\partial \tilde{p}^a}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}^a}{x_j} + \alpha \rho^a g_i + \alpha \beta K(u_i^b - u_i^a) - S_{US} \beta K \nu_t^b \frac{\partial \alpha}{\partial x_i} \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial \rho^b \beta u_i^b}{\partial t} + \frac{\partial \rho^b \beta u_i^b u_j^b}{\partial x_j} = -\beta \frac{\partial p}{\partial x_i} + \beta f_i + \frac{\partial \tau_{ij}^b}{x_j} + \beta \rho^b g_i - \alpha \beta K(u_i^b - u_i^a) - S_{US} \beta K \nu_t^b \frac{\partial \alpha}{\partial x_i} \quad (3.4)$$

여기서 α 는 입자의 체적비, $\beta (=1-\alpha)$ 는 유체의 체적비, t 는 시간, x_i 는 위치 ($i = 1, 2, 3$), u_i^a 는 x_i 방향으로의 입자의 속도, u_i^b 는 x_i 방향으로의 유체의 속도, ρ^a , ρ^b 는 각각 입자와 유체의 밀도, f_i 는 외력, g_i 는 중력, $\tilde{p}^a$, τ_{ij}^a 는 각각 입자에 가해지는 수직응력 (normal stress)과 전단응력 (shear stress)이다. K 는 항력에 관한 매개변수, $S_{US} (=1/\sigma_c)$ 는 Schmidt수의 역수, ν_t^b 는 유체의 난류 점성계수 (turbulent viscosity), $\tau_{ij}^b (=r_{ij}^b + R_{ij}^{bt})$ 는 유체의 가해지는 응력으로 큰 크기의 레이놀즈 응력과 입자 크기의 응력이 포함된다. 운동량방정식의 우변 마지막 두 개의 항 ($\alpha \beta K(u_i^b - u_i^a)$, $S_{US} \beta K \nu_t^b \frac{\partial \alpha}{\partial x_i}$)은 입자 항력에 의하여 유체와 입자의 운동량 상호작용을 나타낸다. 이중 첫 번째는 유체와 입자의 상대속도에 의한 발생하는 항력을 의미하고, 두 번째 항은 유체 난류 부유항 (fluid turbulent suspension)을 의미한다. 항력에 관한 매개변수는 Schiller and Naumann (1933)이 제시한 다음의 식을 이용하여 산정한다.

$$K = 0.75 C_d \frac{\rho^b}{d_{eff}} \|u^b - u^a\| \beta^{-h_{Exp}} \quad (3.5)$$

여기서 C_d 는 항력계수 (drag coefficient), $d_{eff} (= \psi d)$ 는 입자의 유효 직경 (effective particle diameter)으로 입장의 모양과 크기로서 결정된다. 여기서 ψ 는 형상계수 (shape factor), d 는 입자의 직경이다. $\beta^{-h_{Exp}}$ 는 방해 함수 (hindrance function)로 입자의 체적비가 증가에 따른 항력의 증가를 나타낸다. 방해 함수의 계수 h_{Exp} 는 입자 레이놀즈 수 (particle Reynolds number)에 의해 결정된다 (Di Felice, 1994). 일반적으로 2.65를 사용하며, 입자 레이놀즈 수가 300보다 크거나 1보다 작을 경우 2에 가까운 값을 사용한다. 항력계수 C_d 다음의 식을 이용하여 산정한다.

$$C_d = \begin{cases} \frac{24}{Re_p}(1 + 0.15Re_p^{0.687}), & Re_p \leq 1000 \\ 0.44, & Re_p > 1000 \end{cases} \quad (3.6)$$

여기서 $Re_p (= \beta \|u^b - u^a\| d_{eff}/\nu^b)$ 는 입자 레이놀즈 수 (particle Reynolds number)이다. ν^b 는 유체의 동점성계수이다.

3.1.1 유체 전단응력 (fluid phase shear stress)

유체에 가해지는 응력은 점성에 의한 응력과 입자 크기의 규모 (grain-scale)에서 입자-유체의 상호작용에 의해 발생하는 추가 응력을 포함하며, 큰 규모 (large-scale)의 레이놀즈 응력 (R_{ij}^{bt} , Reynolds stress)과 입자 규모의 응력 (r_{ij}^b , grain-scale stress)의 합으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\tau_{ij}^b = R_{ij}^{bt} + r_{ij}^b = \rho^b \beta [2\nu_{Eff}^b S_{ij}^b - \frac{2}{3} k \delta_{ij}] \quad (3.7)$$

여기서 $\nu_{Eff}^b (= \nu_t^b + \nu^{mix})$ 는 유체 점성계수 (fluid effective viscosity)이다. ν_t^b 는 유체의 난류 점성계수, ν^{mix} 는 혼합 점성계수 (mixture viscosity)로 입자의 체적비에 따른 유체 점성계수의 변화를 반영한다. S_{ij}^b 는 유체의 변형률 텐서의 편향 부분으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_{ij}^b = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i^b}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j^b}{\partial x_i} \right) - \frac{1}{3} \frac{\partial u_k^b}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (3.8)$$

여기서 δ_{ij} 는 Kronecker delta이다. 레이놀즈 응력 텐서 R_{ij}^{bt} 와 점성 응력 텐서 r_{ij}^b 는 와점성개념에 의하여 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{ij}^{bt} = \rho^b \beta [2\nu_t^b S_{ij}^b - \frac{2}{3} k \delta_{ij}] \quad (3.9)$$

$$r_{ij}^b = 2\rho^b \beta \nu^{mix} S_{ij}^b \quad (3.10)$$

(1) 혼합 점성계수 모형

혼합 점성계수는 입자의 체적비에 따라 표 3.1과 같은 방식으로 산정할 수 있다.

표 3.1. 입자의 체적비에 따른 혼합 점성계수 산정식

조건	산정식	비고
pure fluid	$\frac{\nu^{mix}}{\nu^b} = 1$	
very dilute ($\alpha < 0.01$)	$\frac{\nu^{mix}}{\nu^b} = 1 + 2.5\alpha$	Einstein (1906)
very dense	$\frac{\nu^{mix}}{\nu^b} = (1 - \frac{\alpha}{\alpha_{\max}})^{-n},$ $n = 2\alpha_{\max}$	Krieger and Dougherty (1959)
low to high concentration	$\frac{\nu^{mix}}{\nu^b} = 1 + 2.5\alpha(1 - \frac{\alpha}{\alpha_{\max}})^{-1}$	Boyer et al. (2011) = Einstein' s model + Krieger and Dugherty' model

(2) $k-\epsilon$ 난류모형

유체의 난류 점성계수 ν_t^b 는 $k-\epsilon$ 난류모형에 의해 다음과 같이 산정한다.

$$\nu_t^b = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (3.11)$$

여기서 C_μ ($=0.09$)는 경험 상수이고, 난류운동에너지 k 와 난류운동에너지의 소산률 ϵ 은 각각 다음의 식으로부터 계산된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + u_j^b \frac{\partial k}{\partial x_j} = & \frac{R_{ij}^{bt}}{\rho^b} \frac{\partial u_i^b}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} [(\nu^b + \frac{\nu_t^b}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_j}] - \epsilon \\ & - \frac{2K(1-t_{mf})\alpha k}{\rho^b} - \frac{S_{US}}{\beta} \nu_t^b \frac{\partial \alpha}{\partial x_j} (\frac{\rho^a}{\rho^b} - 1) g_j \end{aligned} \quad (3.12)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + u_j^b \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = & C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} \frac{R_{ij}^{bt}}{\rho^b} \frac{\partial u_i^f}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} [(\nu^b + \frac{\nu_t^b}{\sigma_\epsilon}) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}] - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} \\ & - C_{3\epsilon} \frac{\epsilon}{k} \frac{2K(1-t_{mf})\alpha k}{\rho^b} - C_{4\epsilon} S_{US} \frac{\epsilon}{k\beta} \nu_t^b \frac{\partial \alpha}{\partial x_j} (\frac{\rho^a}{\rho^b} - 1) g_j \end{aligned} \quad (3.13)$$

$k-\epsilon$ 모형의 계수는 표 3.2에 상세히 정리하였다. 위의 식에서, 우변의 네 번째 항은 입자 항력에 의한 난류가 감쇄되는 효과를 의미하고 마지막 항은 입자 성층화에 의한 난류 감쇄 효과를 나타내는 항이다. 입자 항력을 나타내는 항에서 t_{mf} 는 유체와 입자 각각의 변동속도를 연결시켜주는 매개변수로서, 스토크스 (Stokes) 수 St 에 의해 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$t_{mf} = e^{-B \cdot St} \quad (3.14)$$

이겨서 B 경험 상수이고, 스토크스 수는 입자의 반응속도 t_p ($\rho^a/(\beta K)$ 와 와 (eddy)의 특성시간 t_l ($=k/(6\varepsilon)$)의 비로 다음과 같이 정의된다.

$$St = \frac{t_p}{t_l} \quad (3.15)$$

표 3.2. $k-\varepsilon$ 모형의 계수

계수	C_μ	$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	$C_{3\varepsilon}$	$C_{4\varepsilon}$	σ_k	σ_ε	S_{US}	K	t_{mf}	B
값	0.09	1.44	1.92	1.2	0 또는 1	1.0	1.3	1.0	식(3.5)	식(3.12)	0.2~0.3

(3) $k-\omega$ 난류모형

$k-\varepsilon$ 모형과 유사하게 유체의 난류 점성계수 ν_t^b 는 $k-\omega$ 난류모형에 의해 다음과 같이 계산된다. $k-\omega$ 류모형에서 사용하는 모형 계수는 표 3.3에 정리하였다.

$$\nu_t^b = \frac{k}{\omega} \quad (3.16)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + u_j^b \frac{\partial k}{\partial x_j} = & R_{ij}^{bt} \frac{\partial u_i^b}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(v^b + \frac{v_t^b}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \\ & - C_\mu k \omega - \frac{2K(1-t_{mf})\alpha k}{\rho^b} - \frac{S_{US}}{\beta} \nu_t^b \frac{\partial \alpha}{\partial x_j} \left(\frac{\rho^a}{\rho^b} - 1 \right) g_j \end{aligned} \quad (3.17)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \omega}{\partial t} + u_j^b \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = & C_{1\omega} \frac{\omega}{k} R_{ij}^{bt} \frac{\partial u_i^b}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(v^b + \frac{v_t^b}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] - C_{2\omega} \omega^2 \\ & - C_{3\omega} \frac{2K(1-t_{mf})\alpha \omega}{\rho^b} - C_{4\omega} S_{US} \frac{\omega}{k\beta} \nu_t^b \frac{\partial \alpha}{\partial x_j} \left(\frac{\rho^a}{\rho^b} - 1 \right) g_j \end{aligned} \quad (3.18)$$

표 3.3. $k-\omega$ 모형의 상수

계수	C_μ	$C_{1\omega}$	$C_{2\omega}$	$C_{3\omega}$	$C_{4\omega}$	σ_k	σ_ε	S_{US}	K	t_{mf}	B
값	0.09	0.556	0.075	0.35	0 또는 1	2.0	2.0	1.0	식(3.5)	식(3.12)	0.2~0.3

3.1.2 입자 응력 (particle-phase stress)

입자에 작용하는 힘은 입자 응력 텐서의 대각행렬인 입자 압력 ($\tilde{p}_a$)과 비대각행렬인 입자 전단응력 ($\tilde{\tau}_{ij}^a$)로 구성된다. 입자 압력은 입자 충돌에 의한 압력 (p^a , collisional pressure)과 영구접지압력 (p^{ff} , permanent contact pressure)으로 구분되며 다음의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tilde{p}^a = p^{ff} + p^a \quad (3.19)$$

우변의 첫 번째 항은 입자상이 체적비가 증가하여 충분히 밀집하게 되면 값이 증가하며, 최대 메움 (maximum packing limit) 상태가 될 때 최댓값이 된다. 따라서 입자상의 체적비가 증가할수록 접지 압력에 의하여 입자상의 유동성이 감소하여 준정적 (quasi-static) 상태가 된다. 입자의 영구접지압력은 다음의 식으로 계산된다.

$$p^{ff} = \begin{cases} 0, & a < a_{\min}^{Fric} \\ Fric \frac{(a - a_{\min}^{Fric})^{\eta_0}}{(a_{\max} - a)^{\eta_1}}, & a \geq a_{\min}^{Fric} \end{cases}, \quad (3.20)$$

영구접지압력을 계산하는데 사용한 계수는 표 3.4에 나타내었다. 일반적으로 구형 입자에 대해서 최소체적비는 0.57, 최대체적비는 0.635로 알려져 있으며, 체적비에 따른 영구접지압력은 그림 3.1과 같이 기하급수적으로 증가하게 되며, 이로 인하여 입자의 유동성이 감소한다.

표 3.4. 영구접지압력의 계수

계수	$a_{\min}^{Fric}$	$a_{\max}$	$Fric$	η_0	η_1
값	0.57	0.635	0.05	3	5

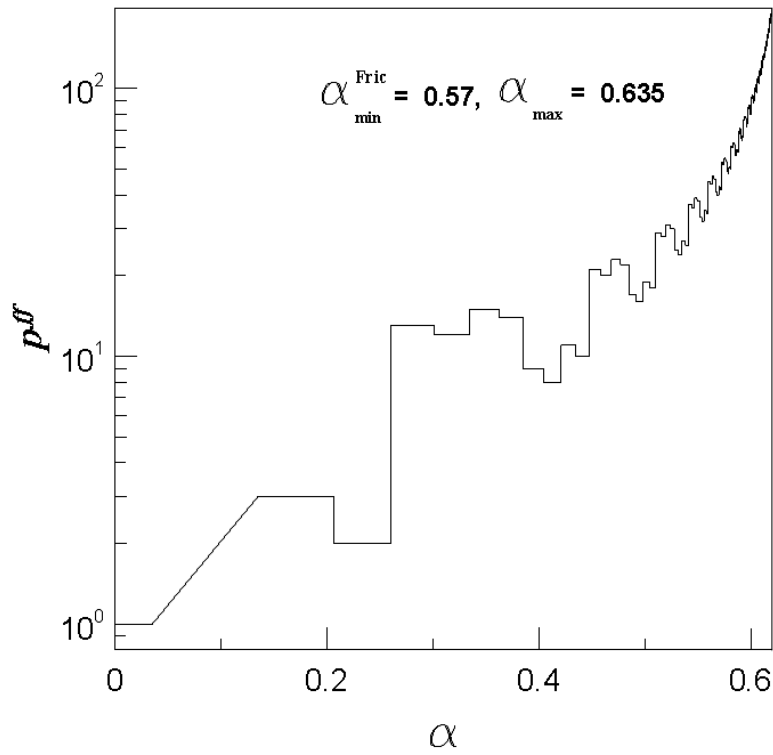


그림 3.1. 체적비에 따른 영구접지압력

입자 충돌에 의한 압력과 입자 전단응력을 해석하는 방법은 크게 2가지로 나뉜다. 첫 번째는 과립유동의 운동학 이론 (kinetic theory)을 이용하는 방법이고, 두 번째는 유변학적 성질 (rheological characteristics)을 이용하는 방법이다. 본 연구 과제에서는 유변학적 성질을 이용하여 유사의 이송을 계산하여 하상변동을 모의하였다.

(2) 과립유동 유변학 (dense granular flow rheology)

과립유동 유변학은 GDRmidi (2004)에 의해 제안되었으며, 입자의 유동을 적절히 해석할 수 있음을 보여왔다. 입자 주변의 유체에서 기인한 총 입자 압력을 산정하고, 다음과 같이 동마찰계수 (dynamic friction coefficient) 개념을 이용하여 총 전단응력을 구한다.

$$\tilde{\tau}_{ij}^a = \mu(I) \tilde{p}^a \frac{S_{ij}^a}{\sqrt{2S_{ij}^a \cdot S_{ij}^a}} \quad (3.21)$$

여기서 $\mu(I)$ 는 동마찰계수, S_{ij}^a 는 입자상의 속도 변형률이다. $\tilde{p}^a$ 는 식(3.19)을 이용하여 계산하며, 입자 충돌에 의한 압력 p^a 과 동마찰계수 $\mu(I)$ 는 점성 영역 (viscous regime)과 입자 관성 영역 (grain inertia regime)에서 각각 다음과 표 3.5와 같이 산정한다.

표 3.5. 점성 영역과 입자 관성 영역에서의 동마찰계수 산정식

구분	점성 영역	입자 관성 영역
Viscous and inertia number, I_v and I	$I_v = \ \nabla u^a\ \nu^b / (\rho^b \tilde{p}^a)$	$I = \ \nabla u^a\ d \sqrt{\rho^a / \tilde{p}^a}$
Dynamic friction coefficient, μ	$\mu_s + \frac{\mu_2 - \mu_s}{I_0 / I_v + 1}$	$\mu(I) = \mu_s + \frac{\mu_2 - \mu_s}{I_0 / I + 1}$
Volume fraction of particle phase, α	$\alpha(I_v) = \frac{\alpha_{\max}}{1 + B_\phi I_v^{1/2}}$	$\alpha(I) = \frac{\alpha_{\max}}{1 + B_\phi I}$
Collisional pressure, p^a	$p^a = (\frac{B_\phi \alpha}{\alpha_{\max} - \alpha})^2 \nu^b \ S^a\ $	$p^a = (\frac{B_\phi \alpha}{\alpha_{\max} - \alpha})^2 \rho^a d^2 \ S^a\ $

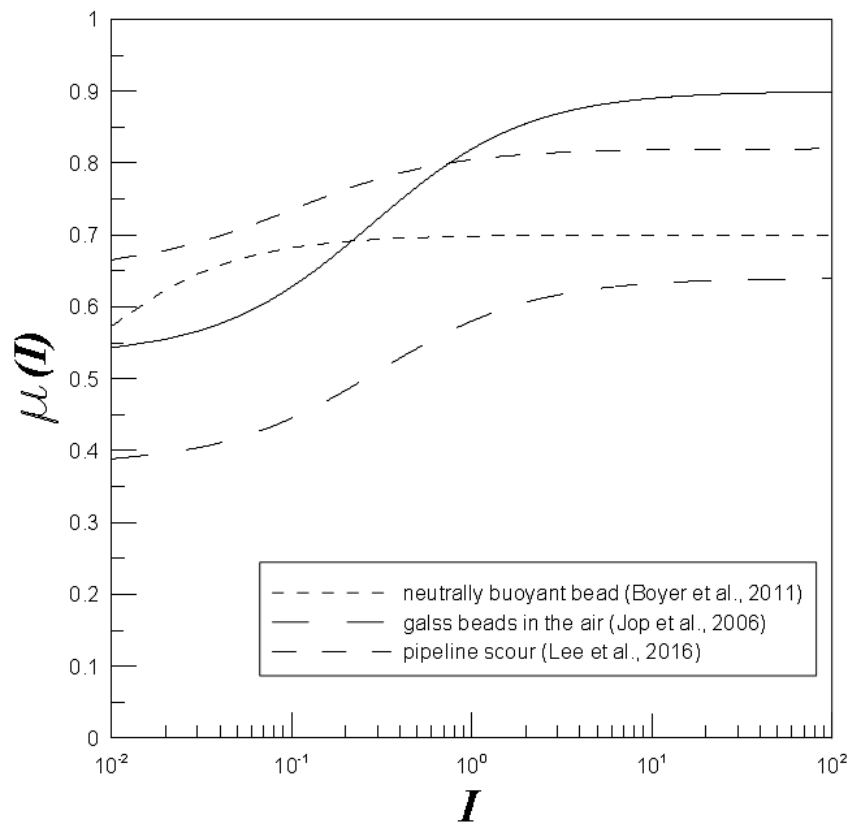


그림 3.2. 조절인자에 따른 동마찰계수

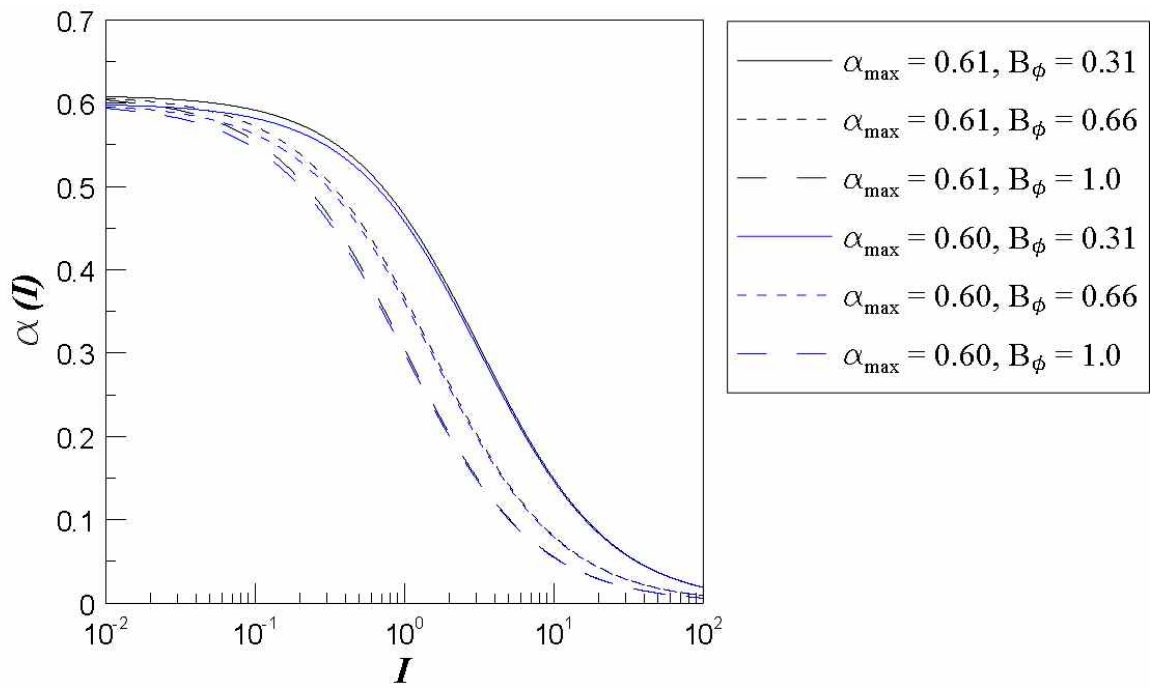


그림 3.3 조절인자에 따른 체적비 변화

3.2 모형의 적용 및 검증

3.2.1 입자 침강 및 퇴적 (sedimentation)

(1) 적용 대상 및 모의 조건

본 장에서는 정수상태의 입자의 침강 및 퇴적 현상을 연직방향으로 1차원 모의를 수행하고 결과의 타당성을 검토하였다. 입자는 입자 체적에 의해 침강하며 항력과 균형을 이루게 되면 일정한 속도를 유지하면서 침강한다. 퇴적된 입자층은 상층부에 쌓이는 입자층에 의하여 압력을 받게 되는데, 이로 인하여 체적비가 증가하여 최대체적비에 근사하게 된다. 표 3.6의 매우 조밀한 모래부터 매우 굵은 모래까지 다섯 종류의 입자 크기에 대하여 침강 및 퇴적 현상을 모의하고 검토하였다. 모의의 사용한 격자와 초기조건은 그림 3.4와 같다. 격자는 0.125 mm로 구성하였으며, 바닥에서의 체적비를 최대로 수면에서 체적비를 최소로 입자 분포의 초기조건을 설정하였다.

표 3.6. 모의 조건

Case	Particle size d (mm)	Size range (mm)	Aggregate name
A	0.1	0.0625 ~ 0.125	very fine sand
B	0.2	0.125 ~ 0.25	fine sand
C	0.4	0.25 ~ 0.5	medium sand
D	0.8	0.5 ~ 1.0	coarse sand
E	1.6	1.0 ~ 2.0	very coarse sand

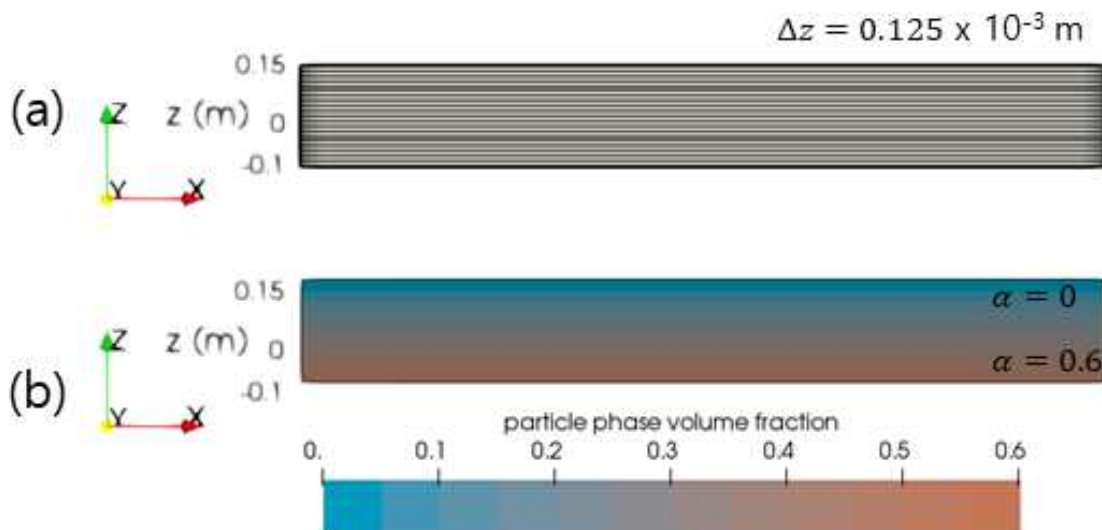


그림 3.4. 모의 조건: (a) 격자 구성; (b) 초기조건

(2) 모의 결과

시간에 따른 체적비 분포를 보면, 초기에는 입자의 침강이 두드러지다가 점차 느려지는 것을 확인할 수 있다. 이는 입자상의 체적비가 증가할수록 항력 또한 증가하여 침강속도가 느려지기 때문이다. 입자상의 체적비에 따른 속도의 변화는 그림 3.5에서 확인할 수 있다. 매우 조밀한 모래 입자 (Case A)의 시간에 따른 체적비 분포 변화를 그림 3.6에 도시하였다. 그림에서 t_e 는 침강 및 퇴적이 완전히 끝났을 때의 시간을 나타낸다. 상층 부분 ($z > 0$ m)에서의 시간에 따른 체적비 감소가 확연히 나타나며, $z = 0$ m 근처에서 침강속도가 둔화하는 것을 확인할 수 있다.

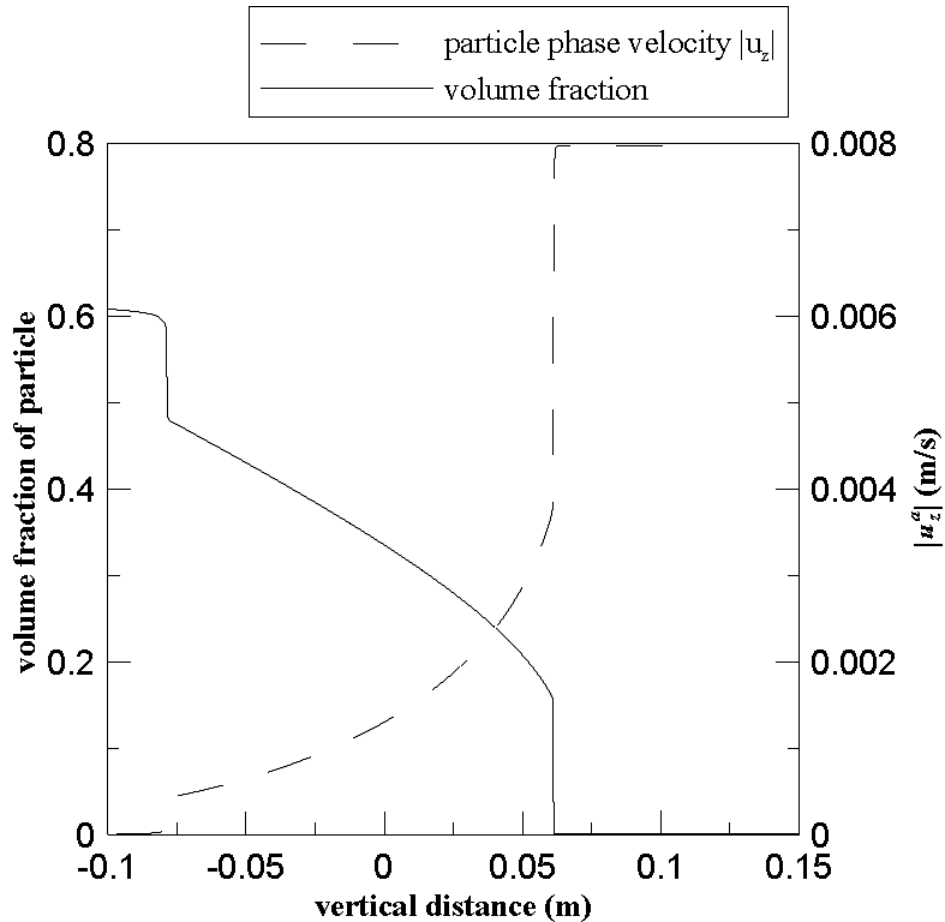


그림 3.5. 입자상의 체적비와 속도의 연직 분포

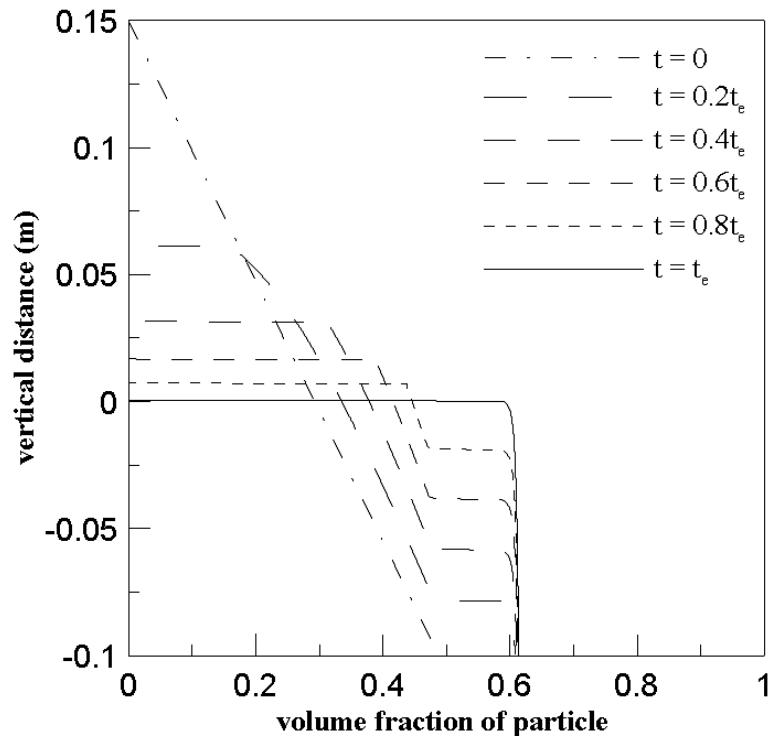


그림 3.6. 시간에 따른 체적비 분포 변화 (Case A)

침강 및 퇴적 현상의 경계면을 추정하기 위하여 체적비가 매우 작은 값 ($\alpha = 0.01$)과 한계치에 근사한 값 ($\alpha = 0.61$)의 시간 변화에 따른 연직방향 위치를 그림 3.7과 같이 추적하였다. 즉, $\alpha = 0.01$ 값을 가지는 위치는 모래 입자가 침강한 위치를 뜻하며, $\alpha = 0.61$ 값을 가지는 위치는 퇴적 현상이 진행되는 위치를 의미한다. 입자 크기에 따른 침강 및 퇴적이 완료되는 시점을 표 3.7과 그림 3.8에 나타내었다. 비교를 위해 자유 침강 속도 (free fall velocity) 함께 나타내었으며, 이는 식(3.22)을 통해 계산하였다.

$$v_f = \sqrt{\frac{4gd}{3C_d} \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right)} \quad (3.22)$$

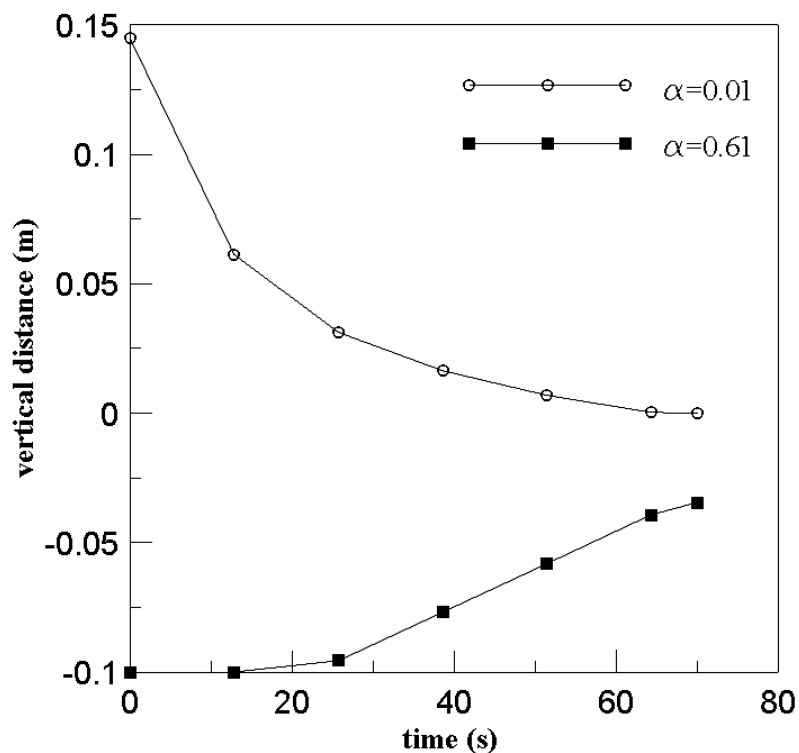


그림 3.7. 시간에 따른 침강 및 퇴적 (Case A)

표 3.7. 입자 크기에 따른 자유 침강 속도 및 퇴적 시간 모의 결과

Case	v_f (m/s)	t_e (s)
A	0.0079	64.3
B	0.0247	17.0
C	0.0612	5.5
D	0.1259	2.6
E	0.2346	1.4

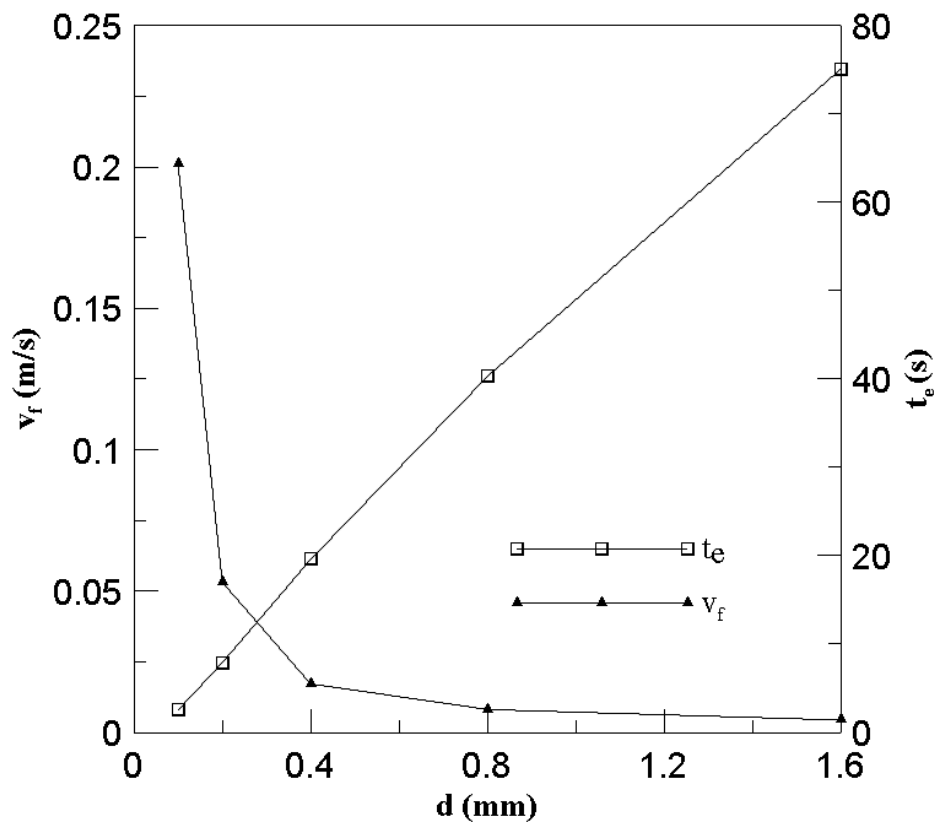


그림 3.8. 입자 크기에 따른 자유 침강 속도와 퇴적 시간의 변화

3.2.2 붕괴 (collapse)

(1) 적용 대상 및 모의 조건

본 장에서는 입자를 쌓아놓은 후 붕괴되는 현상을 2차원으로 모의하고 모형의 적용성을 검토하였다. 붕괴할 때 초기에는 속도가 가파르게 증가하다가 점차적으로 둔해지게 된다. 그러다가 마찰력에 의한 힘의 평형이 이루어지는 시점에서 입자상은 정지하여 준정적 상태 (quasi-static state)가 된다. 모의 대상은 Lajeunesse et al. (2005)의 실험으로 표 3.8의 성질을 가지고 있는 입자를 사용하였다. 입자를 그림 3.9와 같이 직육면체 모양으로 수로 벽면에 쌓아두고 붕괴되는 현상을 포착하였다. 붕괴 현상에 대해 입자상의 높이와 폭이 다른 세 가지 경우 (표 3.9 참조)에 대해서 모의를 수행하였다. 붕괴 과정에서 입자상의 속도가 가장 빠른 시점을 τ_c 로 정의하고, $t = 0.5\tau_c, \tau_c, 2\tau_c, 3\tau_c$ 일 때의 입자상의 분포와 속도에 대하여 실험 및 Lee et al. (2015)의 모의 결과와 비교하고 모형을 검증하였다.

표 3.8. 입자의 물성치

Case	ρ_d	d	θ_r	θ_a	θ_s	θ_w
Lajeunesse et al. (2005)	2500 kg/m ³	1.15 mm	22±0.5 °	27.4±0.5 °	24.8±0.2 °	11±0.3 °

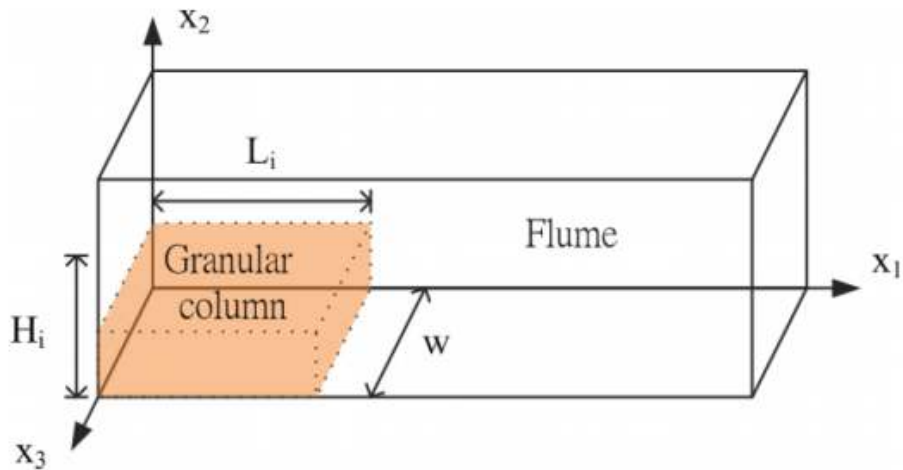


그림 3.9. 초기 조건 및 계산 영역

표 3.9. 모의 조건

Case	H_i (m)	L_i (m)
A	0.0612	0.102
B	0.1344	0.056
C	0.1650	0.010

(2) 모의 결과

그림 3.9 ~ 3.11은 시간 경과에 따른 입자상의 체적비와 속도를 도시한 것이다. 각 그림의 (a)와 (b)는 Lee et al.의 모의 결과이며, (c)는 Lajeunesse et al.의 실험 결과이다. 본 연구의 모의 결과는 (d)와 (e)에 나타내었다. 그림의 가장 윗 줄은 초기상태를 의미하고, 아래로 내려갈수록 붕괴가 진행되는 것을 나타낸다. 마지막 단계에서는 붕괴가 완료되고 입자는 준정적 상태에 이르게 된다. 모의 결과를 Lee et al.의 모의 결과와 Lajeunesse et al.의 실험 결과와 비교하였을 때, 입자상의 붕괴 속도와 준정적 상태에 이르렀을 때 안식각 등을 적절히 모의하는 것을 확인하였다.

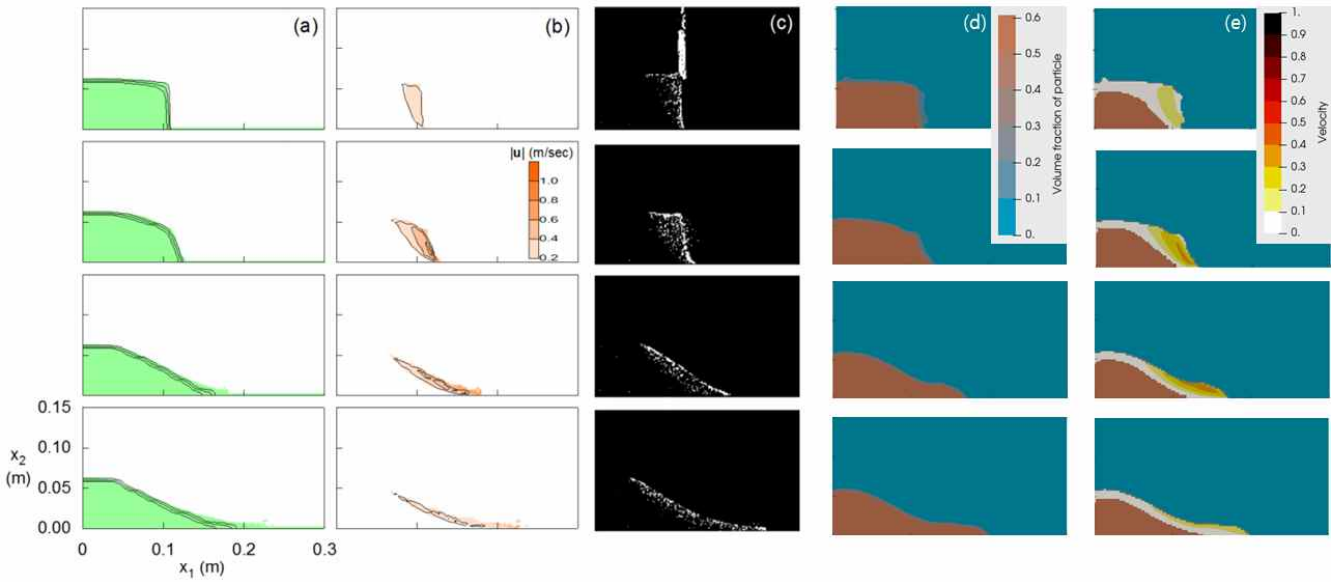


그림 3.9. Case A ($H_i = 0.0612$ m, $L_i = 0.102$ m): (a) 체적비 (Lee et al., 2015); (b) 입자 속도 (Lee et al., 2015); (c) 가시화실험 (Lajeunesse et al., 2005); (d) 체적비 (본 연구); (e) 입자 속도 (본 연구)

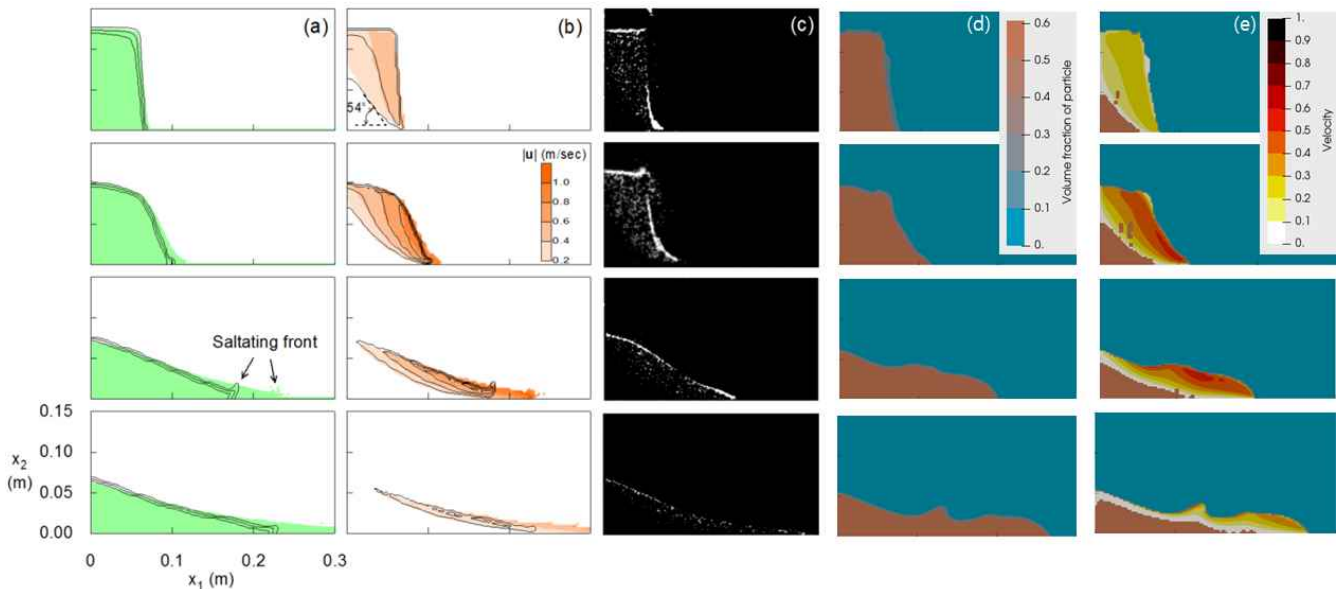


그림 3.10. Case B ($H_i = 0.1650$ m, $L_i = 0.010$ m): (a) 체적비 (Lee et al., 2015); (b) 입자 속도 (Lee et al., 2015); (c) 가시화실험 (Lajeunesse et al., 2005); (d) 체적비 (본 연구); (e) 입자 속도 (본 연구)

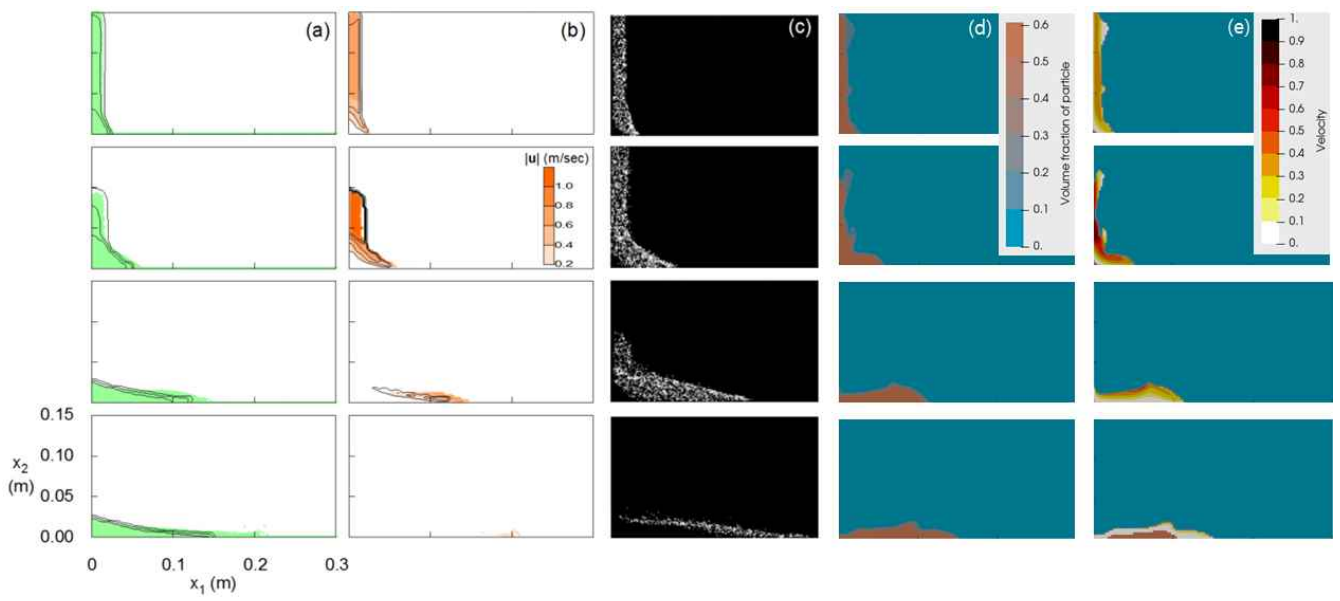


그림 3.11. Case C ($H_i = 0.1344$ m, $L_i = 0.056$ m): (a) 체적비 (Lee et al., 2015); (b) 입자 속도 (Lee et al., 2015); (c) 가시화실험 (Lajeunesse et al., 2005); (d) 체적비 (본 연구); (e) 입자 속도 (본 연구)

3.2.3 보 하류 국부세굴 (local scour)

(1) 적용 대상

본 장에서는 구축된 통합 모형을 이용하여 보 하류 국부세굴을 모의하고 모형의 적용성을 검토하였다. 모의 대상은 Dey and Sarkar (2008)의 실내 실험으로 수문 (sluice gate) 열리면 바닥면에서 제트류가 분출되기 때문에 하류단에 세굴이 발생하는 경우이다. 그림 3.12은 보 하류 국부세굴에 대한 개요도이며, 주요 변수들이 나타나 있다. Dey and Sarkar의 실험 중에서 Run 4a를 모형의 적용 대상으로 선정하였으며, 수로 제원 및 실험 조건은 다음 표 3.10과 같다.

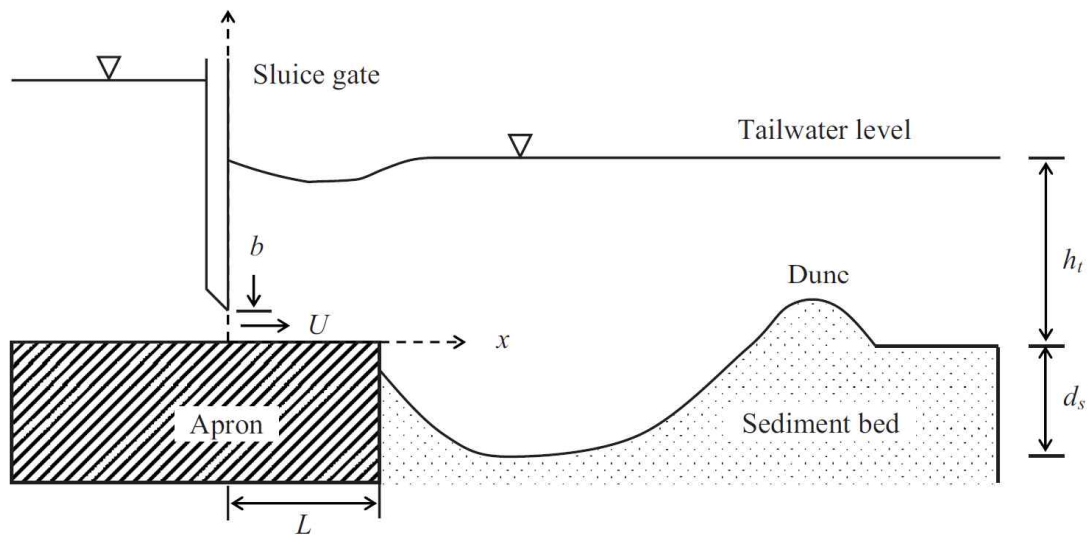


그림 3.12. 보 하류 국부 세굴 개요도 (Dey and Sarkar, 2008)

표 3.10. 수로 제원 및 실험 조건

Case	Apron length	Sluice opening	Issuing jet velocity	Tailwater depth	Submergence factor	Jet Froude number	Scour depth
	L (m)	b (mm)	U (m/s)	h_t (m)	S	F	d_{se} (m)
Dey and Sarkar (2008) - Run 4a	0.5	12.5	1.435	0.141	1.12	4.09	0.062

표 3.11. 하상재료의 물성치

Particle size d_{50} (mm)	Specific weight σ_g	Repose angle ϕ (°)	Standard deviation σ_g	Critical shear stress τ_c (Pa)
0.8	2.65	30	4.09	0.4

(2) 모의 조건

수문 직하류에서는 그림 3.13과 같이 δ_w 의 수위하강이 L_e 만큼의 범위에 걸쳐 발생한다. 수문 하류에서 발생하는 수위하강은 흐름에도 영향을 주기 때문에 모형을 적용할 때 적절히 고려해야 한다. 수위하강에 관해서 Ead and Rajaratnam (2002)가 제시한 다음의 식을 사용하였다.

$$\eta = y_t/b_0 \quad (3.23)$$

$$\theta = \eta - \sqrt{\eta^2 - 2[(\eta - 1)/\eta]F_0^2} \quad (3.24)$$

$$\theta = \delta_w/b_0 \quad (3.25)$$

여기서 b_0 는 수문 높이, y_t 는 하류단 수심, η 는 수문 높이와 하류단 수심의 비, θ 는 수문에서의 하강비, F_0 ($U_0/\sqrt{gb_0}$)는 제트 프루드 수이다. 수위하강의 범위와 관련된 와의 길이 (L_e)는 Ead and Rajaratnam (2002)에 의해 다음의 식으로부터 계산할 수 있다.

$$\eta_f = \frac{2}{\sqrt{3}}\sqrt{1 + 2F_0^2}\cos(\phi/3) \quad (3.26)$$

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{4(1 + 2F_0^2 - 2\epsilon F_0^2)^3/27 - (2F_0^2)^3}}{-(2F_0^2)}\right) \quad (3.27)$$

$$\frac{L_e}{b_0} = 6\eta_f + 4.0(\eta - \eta_f) \quad (3.28)$$

위의 식들로부터 계산된 값은 표 3.12에 나타내었다. 수위하강은 0.018 m가 발생하였고, 그 범위는 대략 0.61 m까지이다. 이를 그림 3.14와 같이 계산 격자상에 고려하였다.

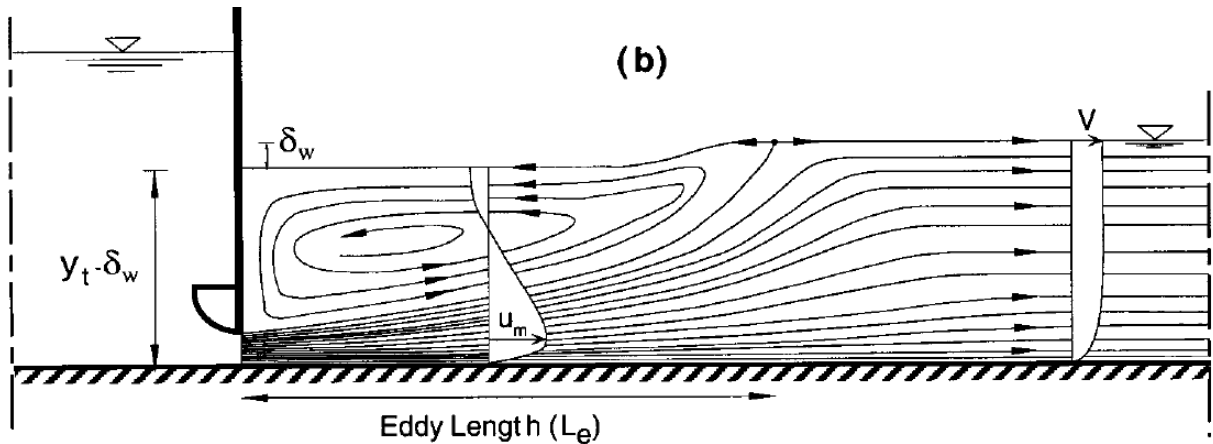


그림 3.13. 와의 길이와 수위 하강에 대한 개요도 (Ead and Rajaratnam, 2002)

표 3.12 수문 직하류에서의 수위 하강

Case	η	θ	δ_w (m)	ϕ	ϵ	η_f	L_e (m)
Dey and Sarkar (2008) - Run 4a	11.28	1.45	0.0181	1.385	0	1.94	0.61

계산 영역 및 격자는 그림 3.14에 나타내었다. 계산 격자는 하상변동이 예상되는 지점에서 조밀하게 구성하였으며, 수면과 가장 밑바닥에 갈수록 성기게 구성하였다. 격자 크기에 대한 자세한 내용은 표 3.13에 나타내었다.

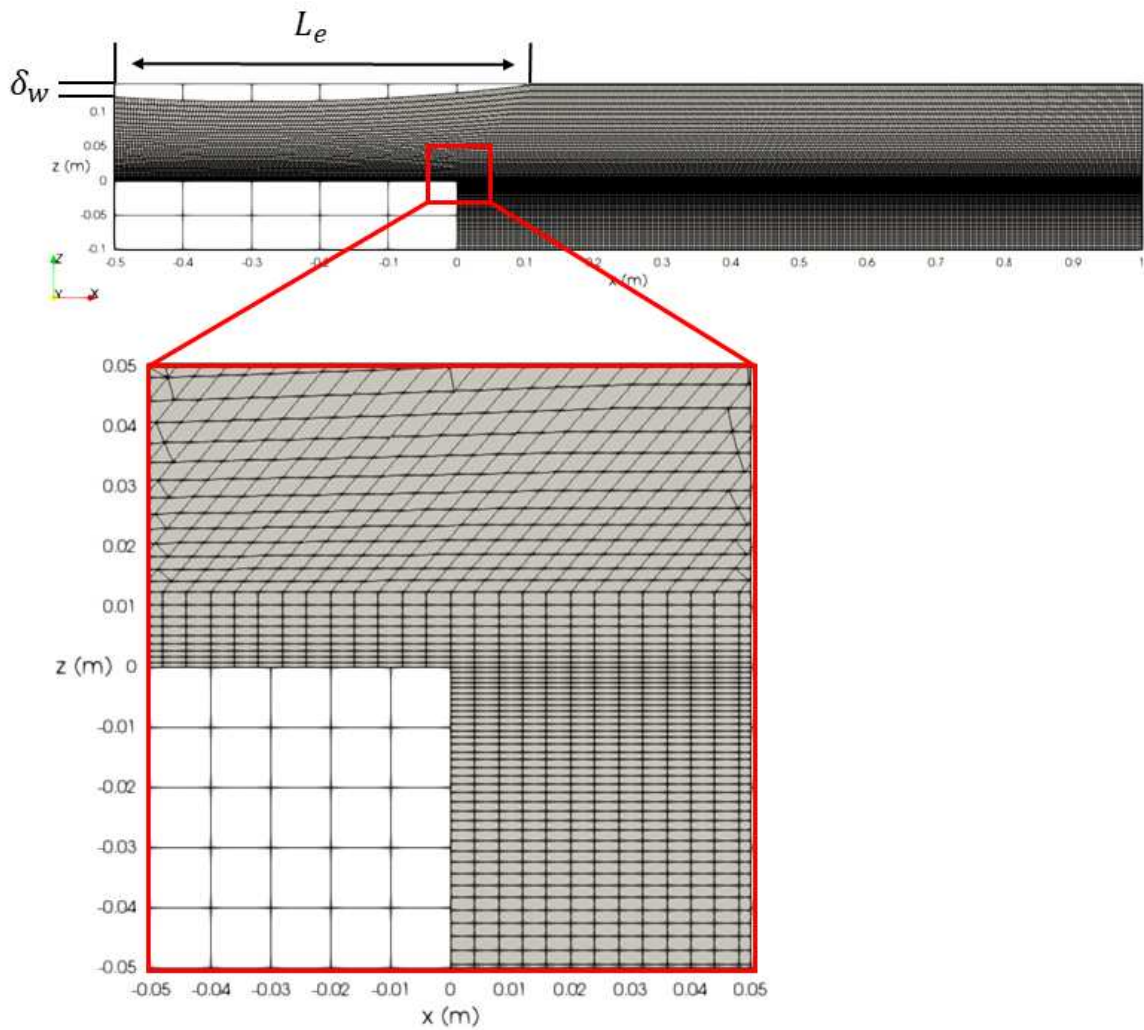


그림 3.14. 계산 격자 구성

표 3.13. 격자 해상도

Case	종방향	횡방향	수문 근처 ($z = b$)	하상/물 경계면 ($z = 0$)	가장 바닥 ($z = -0.1$)	자유수면 ($z = h_t$)	총 격자수
	Δx (m)	Δy (m)	Δz_1 (m)	Δz_2 (m)	Δz_3 (m)	Δz_4 (m)	
2D	0.004	-	0.004	0.0008	0.002	0.010	25,625
3D	0.004	0.004	0.004	0.0008	0.002	0.010	3,843,750

난류모형은 $k-\varepsilon$ 모형을 사용하였으며, 난류 및 하상변동 모형에서 사용된 모형 상수는 표 3.14에 나열하였다. 수문에서 유입되는 유속은 그림 3.15와 같이 연직방향의 분포와 횡방향의 분포를 고려하였다. 2차원의 경우 식(3.29)의 형태로 유입유속을 적용하였고, 3차원의 경우 식(3.30)의 멱함수의 형태를 추가로 반영하여 횡방향으로도 유속을 달리 적용하였다. 즉, 3차원의 경우 식(3.31)을 유입 유속 분포로 사용하였다.

$$\frac{U(z)}{U_b} = 1.48 \left(\frac{z}{z_{1/2}} \right)^{1/7} \left[1 - \operatorname{erf} \left\{ 0.68 \frac{z}{z_{1/2}} \right\} \right] \quad (3.29)$$

$$\frac{U(y)}{U_b} = \left(\frac{y}{w/2} \right)^{1/7} \quad (3.30)$$

$$\frac{U(y,z)}{U_b} = 1.48 \left(\frac{y}{w/2} \right)^{1/7} \left(\frac{z}{z_{1/2}} \right)^{1/7} \left[1 - \operatorname{erf} \left\{ 0.68 \frac{z}{z_{1/2}} \right\} \right] \quad (3.31)$$

여기서 U_b 는 평균유속, w 는 폭, y 는 횡방향 거리, z 는 연직방향 거리, erf 는 에러 함수 (error function)이다.

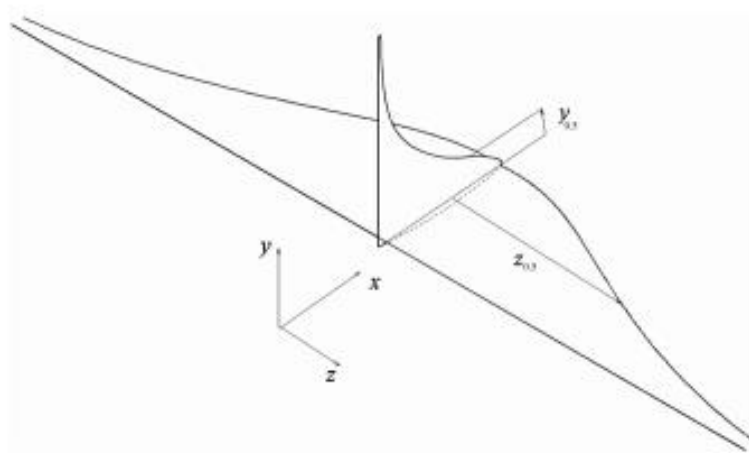


그림 3.15. 벽 제트류 유속 분포

표 3.14. 모의에 사용된 모형 상수

μ_s	μ_2	I_o	B_ϕ	$C_{3\varepsilon}$	S_{US}	B
0.58	0.82	0.10	0.31	1.6	2	0.25

(3) 모의 결과

표 3.14 보 하류 2차원 세굴 모의 결과 (주흐름방향 유속)

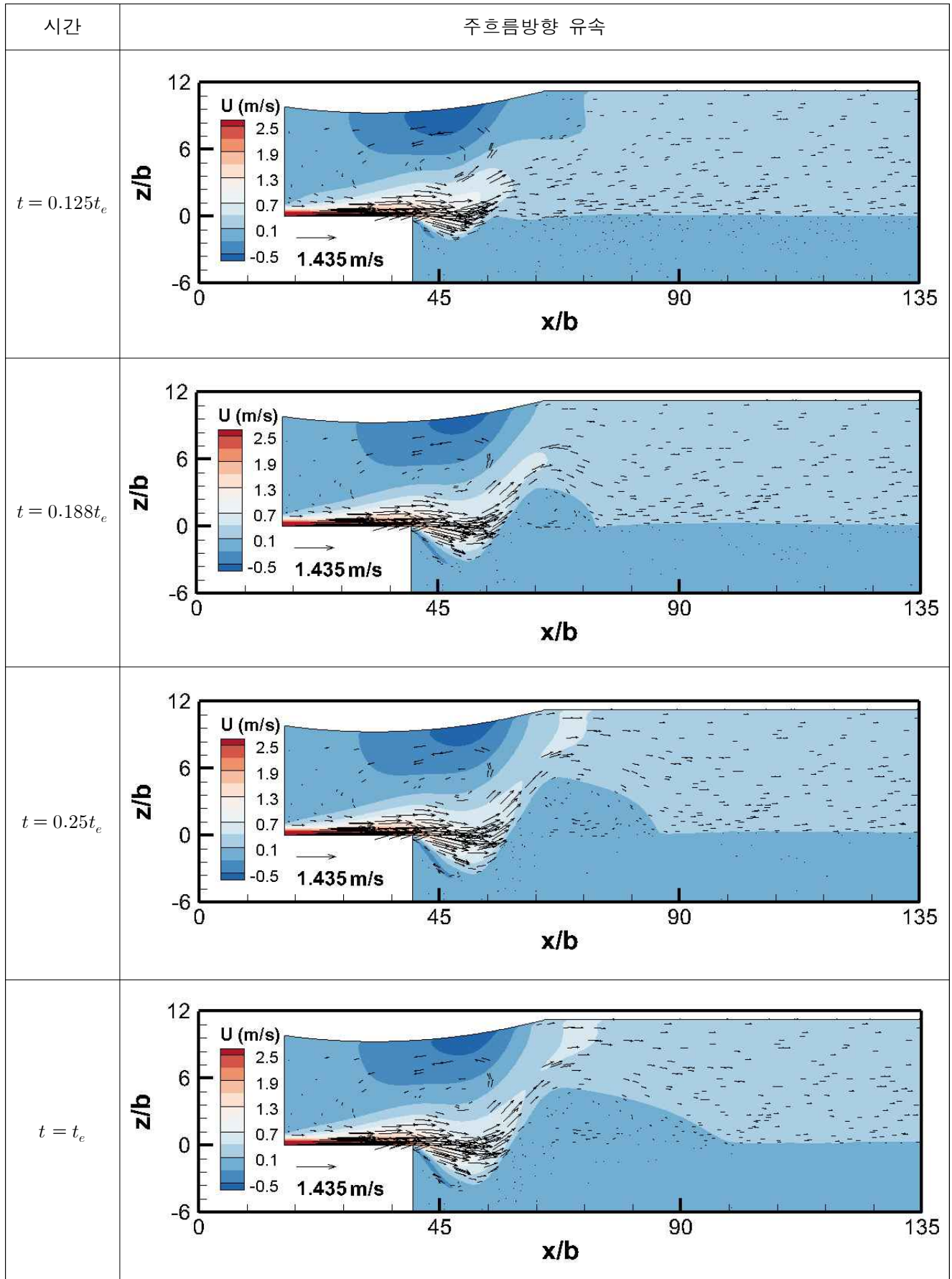


표 3.15. 보 하류 2차원 세굴 모의 결과 (연직방향 유속)

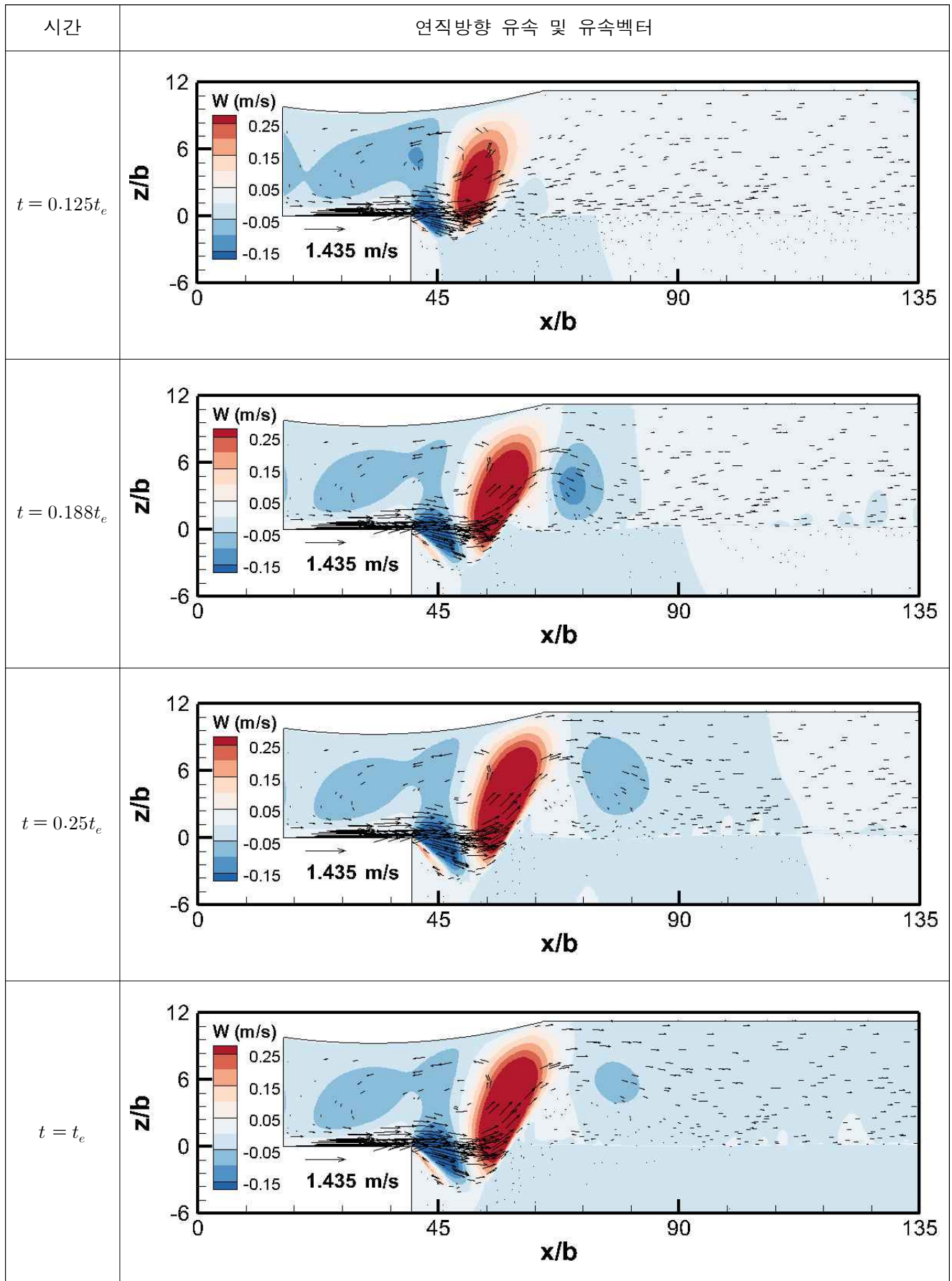


표 3.16. 보 하류 2차원 세굴 모의 결과 (난류운동에너지)

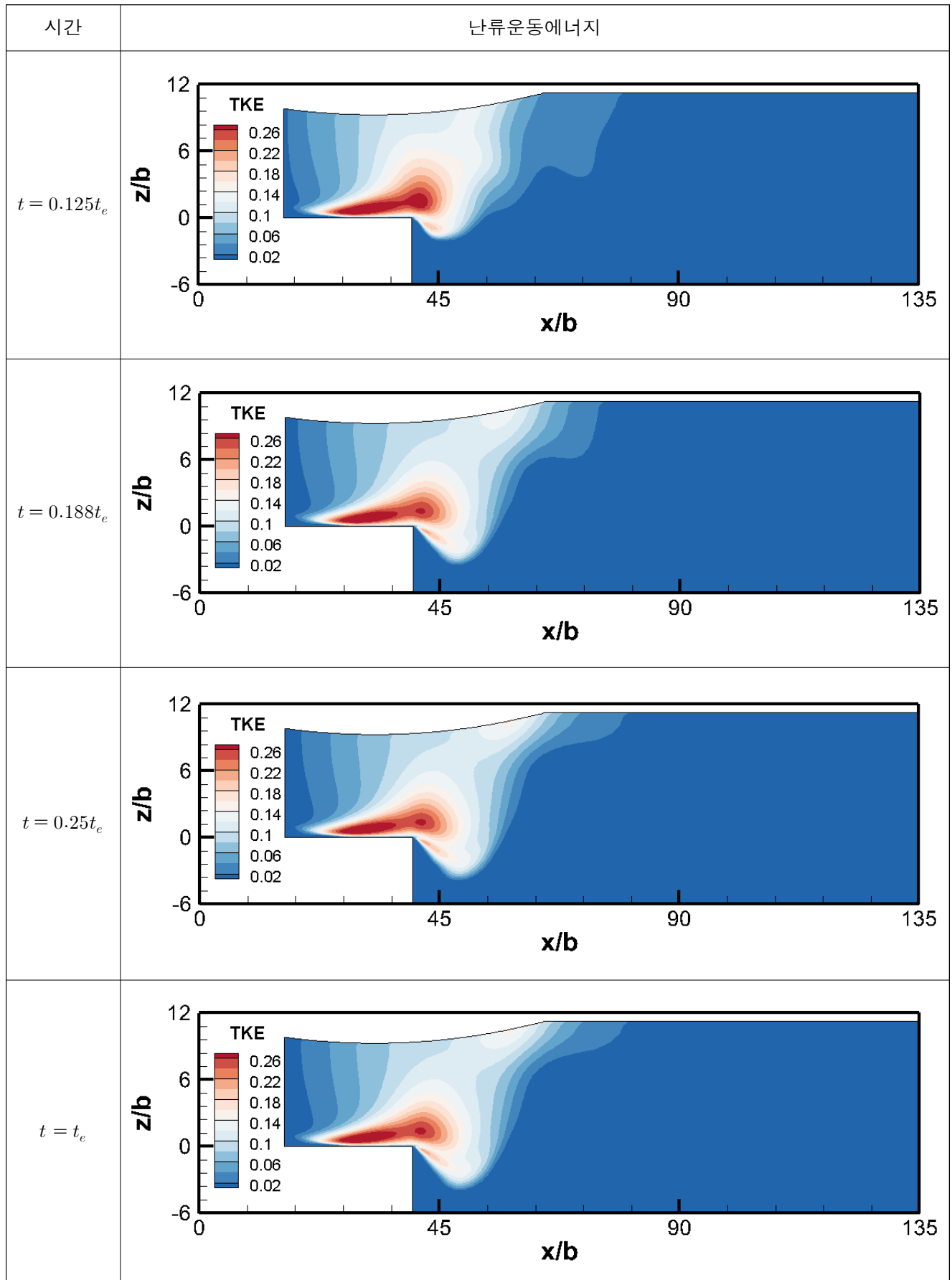
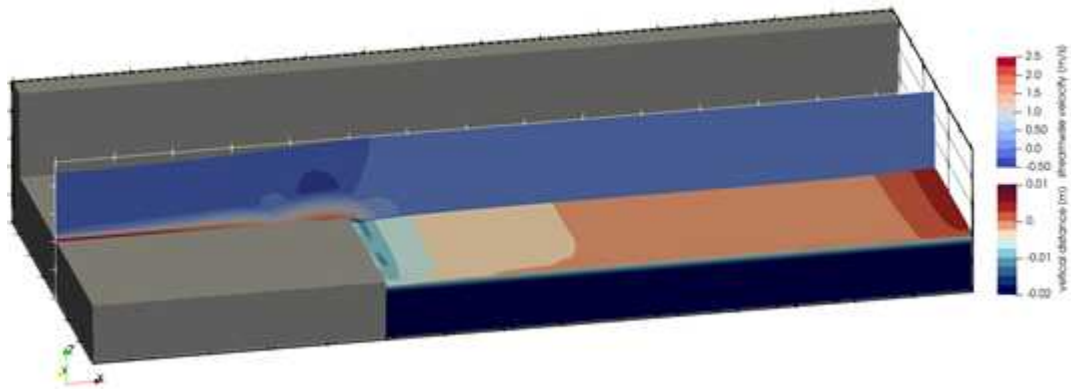
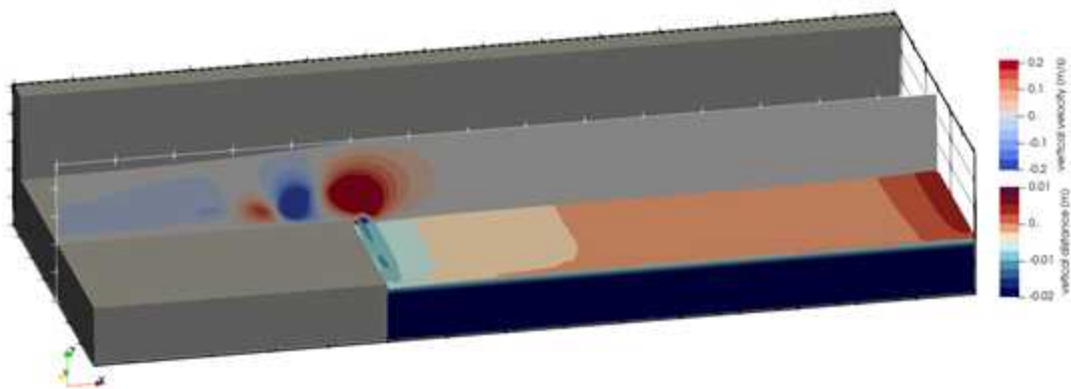


표 3.17. 보 하류 3차원 세굴 모의 결과 ($t = 0.2t_e$)

(a) 주흐름방향 평균유속 (m/s)



(b) 연직방향 평균유속 (m/s)



(c) 난류운동에너지 (m^2/s^2)

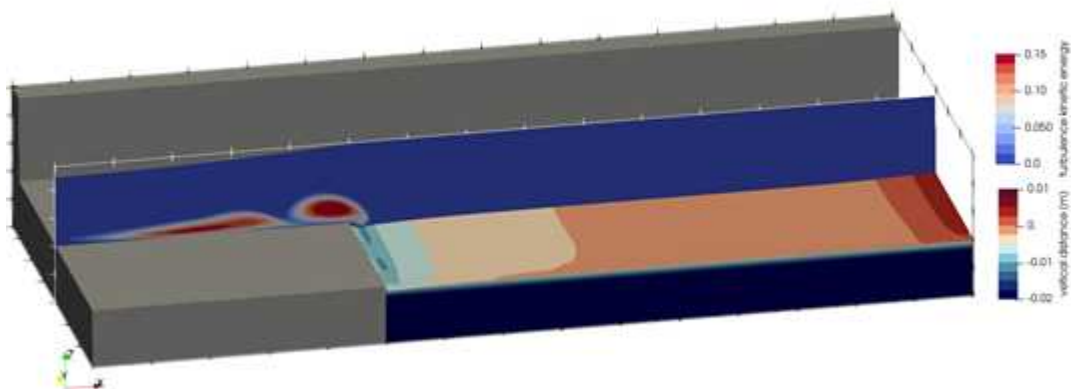
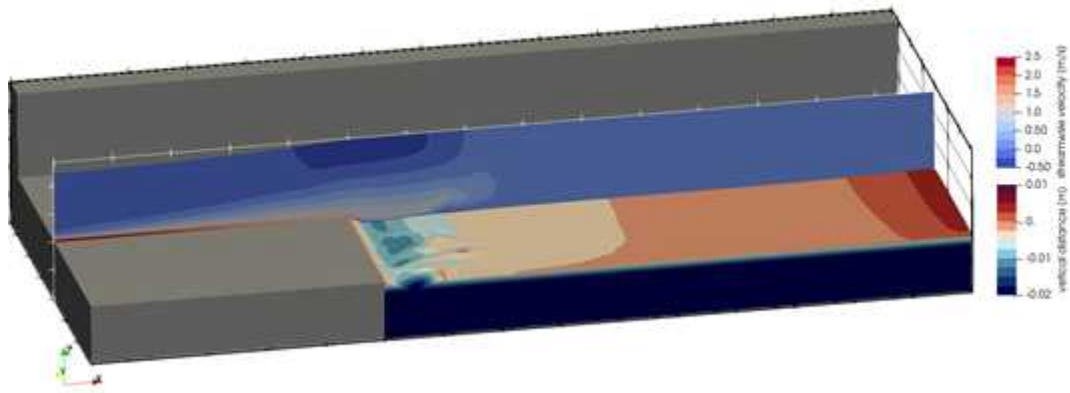
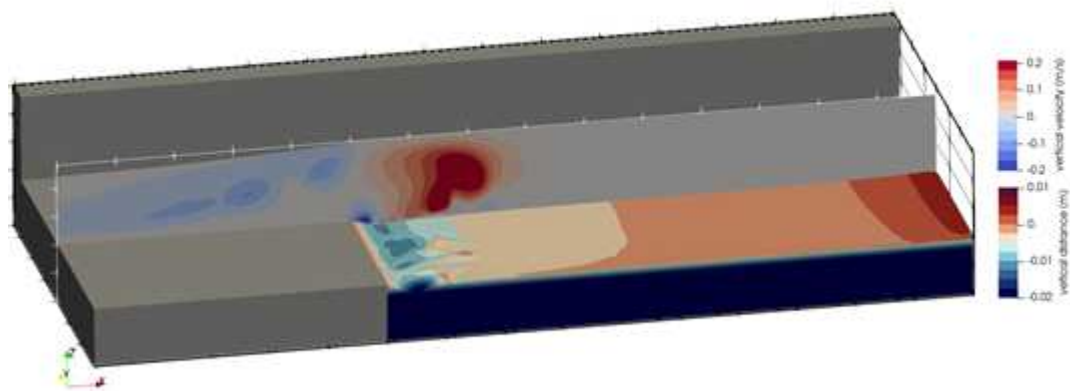


표 3.18 보 하류 3차원 세굴 모의 결과 ($t = 0.4t_e$)

(a) 주흐름방향 평균유속 (m/s)



(b) 연직방향 평균유속 (m/s)



(c) 난류운동에너지 (m^2/s^2)

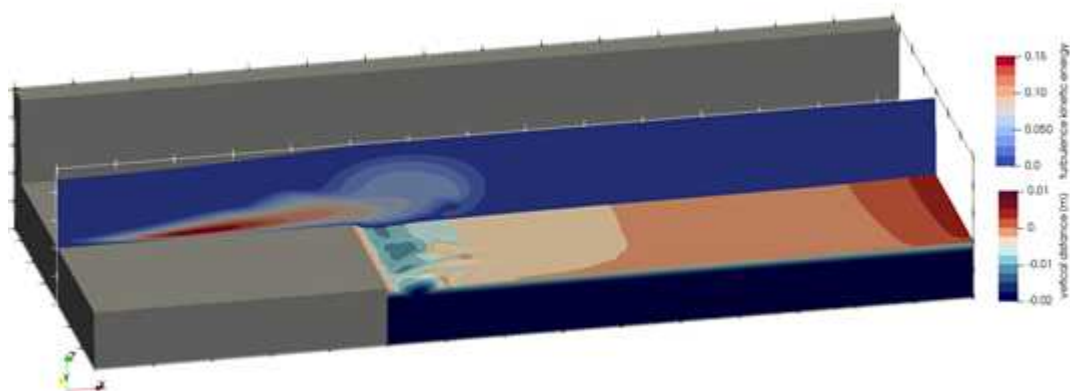
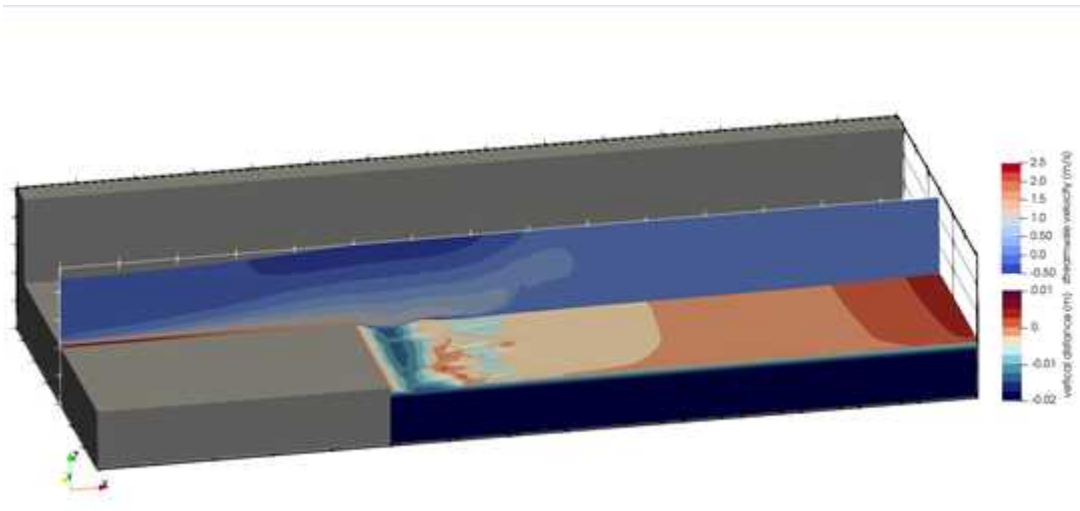
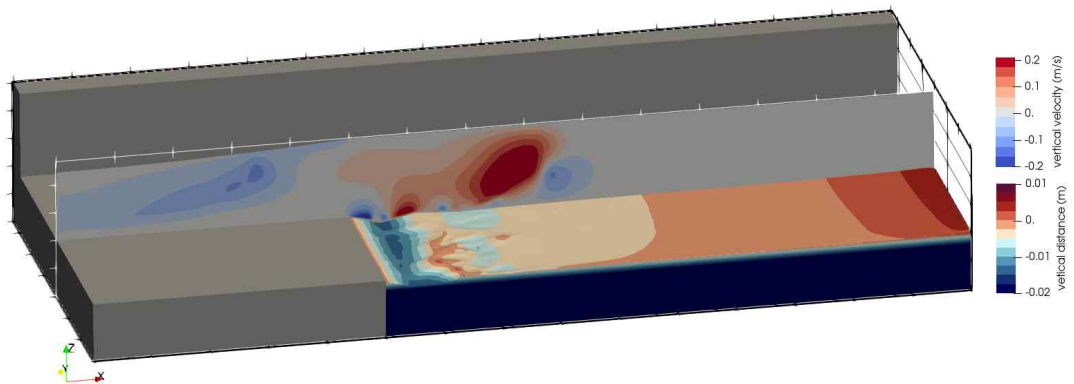


표 3.19. 보 하류 3차원 세굴 모의 결과 (Case C, $t = 0.6t_e$)

(a) 주흐름방향 평균유속 (m/s)



(b) 연직방향 평균유속 (m/s)



(c) 난류운동에너지 (m^2/s^2)

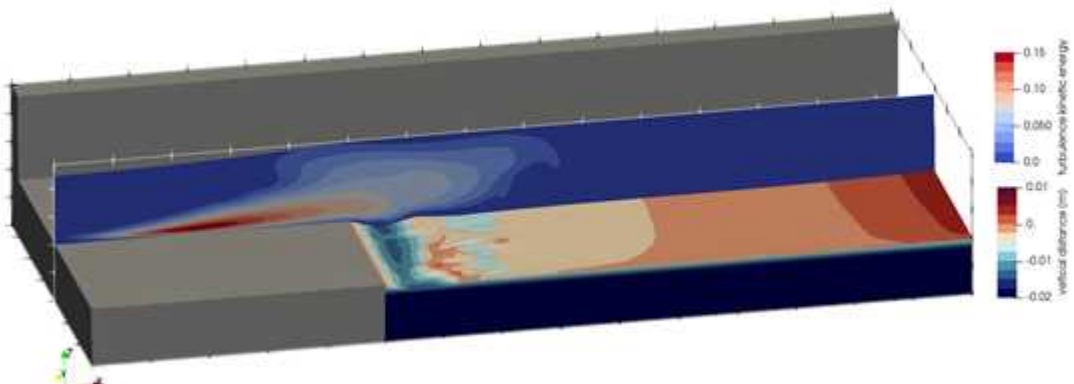
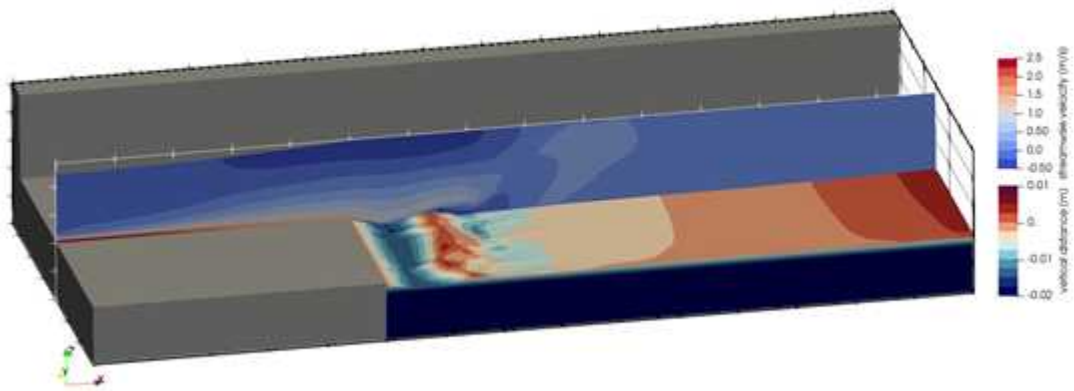
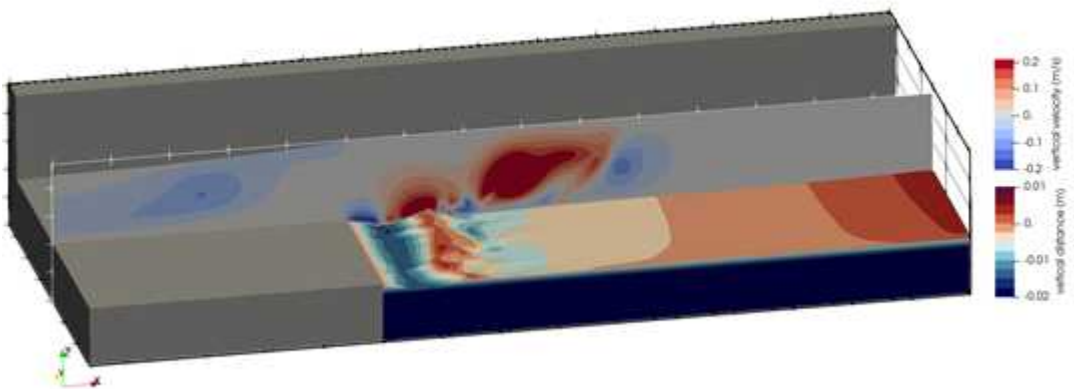


표 3.20. 보 하류 3차원 세굴 모의 결과 ($t = 0.8t_e$)

(a) 주흐름방향 평균유속 (m/s)



(b) 연직방향 평균유속 (m/s)



(c) 난류운동에너지 (m^2/s^2)

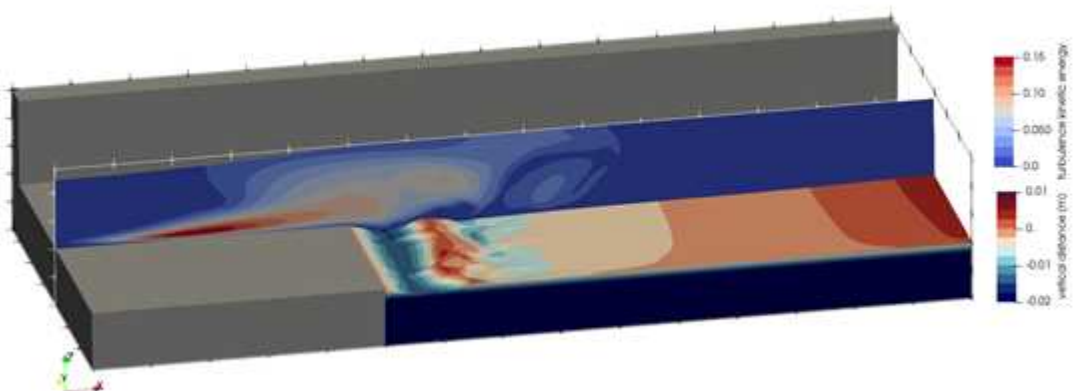
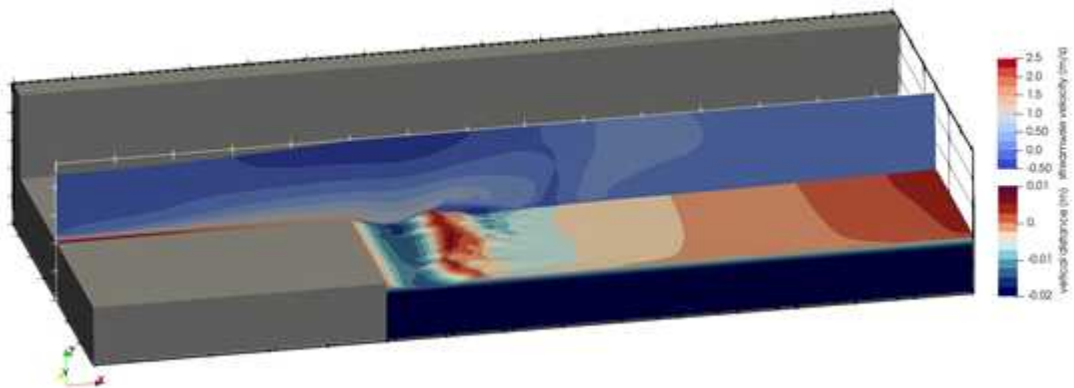
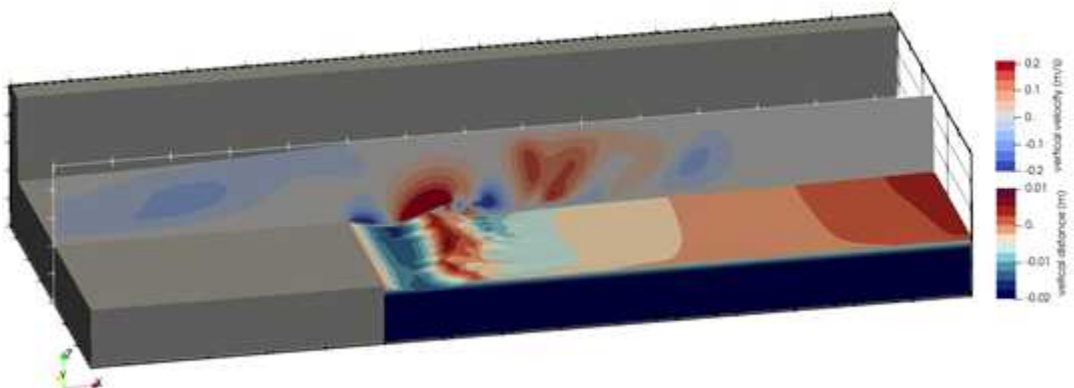


표 3.21. 보 하류 3차원 세굴 모의 결과 (Case C, $t = t_e$)

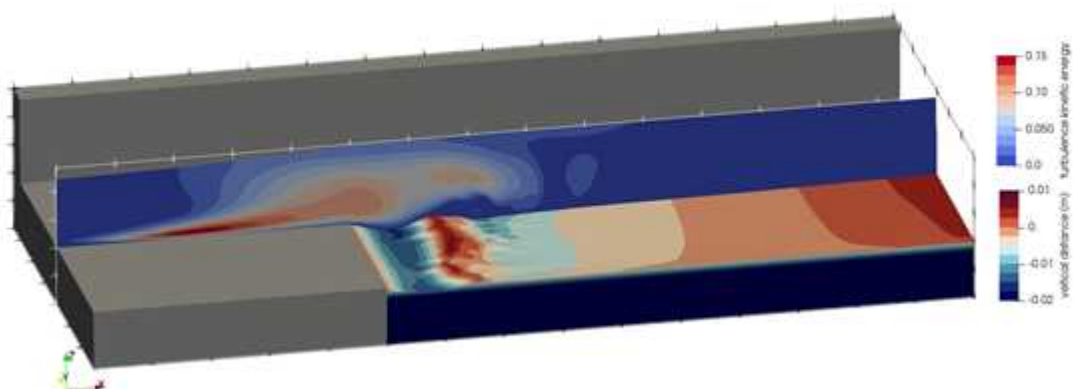
(a) 주흐름방향 평균유속 (m/s)



(b) 연직방향 평균유속 (m/s)



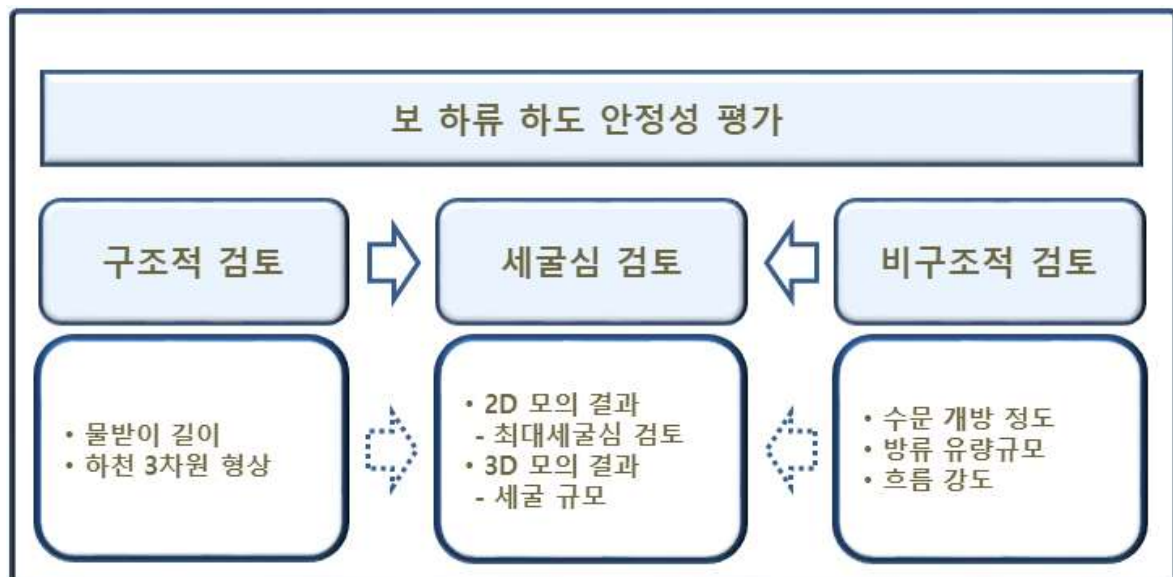
(c) 난류운동에너지 (m^2/s^2)



4. 보 하류 하도 안정성 평가

4.1 안정성 평가기법

보 하류 하도의 안정성을 평가하기 위해서 구조적 또는 비구조적 검토를 해야 한다. 보 설계 시에는 물받이 및 하류 하도의 3차원적 형상을 고려하여 세굴을 예측해야 한다. 보 설치 이후 보의 운영방안에 따라 하류 하도의 안정성을 검토해야 한다. 세굴 발생 주요 인자로는 물받이공 길이, 수문개방, 방류 유속, 하류 수심 등이 있다. 따라서 이러한 변수들에 의한 최대세굴심 변화를 검토해보고, 하류 하도 안정성을 평가할 수 있다. 이외에도 여러 가지 중요한 국부세굴 매개변수들이 있으며, 개발된 모형을 적극 활용하여 수리조건 및 운영방안에 따른 체계적인 평가를 수행할 수 있다.



4.2 안정성 평가 (예시)

보 하류 하도 안정성 평가를 위하여 물받이공 길이, 수문 개방, 방류 유속, 하류 수심에 따른 국부세굴 현상을 모의하고 최대세굴심을 산정하였다. 모의 결과를 바탕으로 보 하류 하도의 안정성 평가를 수행하였다.

표 4.2. 보 개방 시나리오

구분		Case	물받이공 길이 L (m)	수문개방 b (mm)	방류 유속 U (m/s)	하류 수심 h_t (m)
구조적 검토	(Case A) 물받이공 길이 0.3 ~ 0.7 m	A03	0.3	12.5	1.435	0.141
		A04	0.4	12.5	1.435	0.141
		A06	0.6	12.5	1.435	0.141
		A07	0.7	12.5	1.435	0.141
비구조적 검토	(Case B) 수문 개방 정도 7.5 ~ 17.5 mm	B75	0.5	7.5	1.435	0.141
		B100	0.5	10.0	1.435	0.141
		B150	0.5	15.0	1.435	0.141
		B175	0.5	17.5	1.435	0.141
	(Case U) 방류 유속 0.8 ~ 2.0 m/s	U08	0.5	12.5	0.800	0.141
		U11	0.5	12.5	1.100	0.141
		U17	0.5	12.5	1.70	0.141
		U20	0.5	12.5	2.000	0.141
	(Case H) 하류 수심 0.10 ~ 0.18 m	H10	0.5	12.5	1.435	0.100
		H12	0.5	12.5	1.435	0.120
		H16	0.5	12.5	1.435	0.160
		H18	0.5	12.5	1.435	0.180

표 4.3 보 개방 시나리오에 따른 흐름 조건 및 최대세굴심 모의 결과

Case	L (m)	b (mm)	U (m/s)	h_t (m)	h_j (m)	S	F_0	η	θ	δ_w	ϕ	ε	η_f	L_e (m)	d_{se} (m)
4a	0.5	12.5	1.435	0.141	0.066	1.12	4.10	11.28	1.45	0.0181	1.385	0	1.94	0.61	0.028
(Case A) 물받이공 길이 0.3 ~ 0.7 m															
A03	0.3	12.5	1.435	0.141	0.066	1.12	4.10	11.28	1.45	0.0181	1.385	0	1.94	0.61	0.056
A04	0.4	12.5	1.435	0.141	0.066	1.12	4.10	11.28	1.45	0.0181	1.385	0	1.94	0.61	0.037
A06	0.6	12.5	1.435	0.141	0.066	1.12	4.10	11.28	1.45	0.0181	1.385	0	1.94	0.61	0.025
A07	0.7	12.5	1.435	0.141	0.066	1.12	4.10	11.28	1.45	0.0181	1.385	0	1.94	0.61	0.020
(Case B) 수문 개방 정도 7.5 ~ 17.5 mm															
B75	0.5	7.5	1.435	0.141	0.052	1.69	5.29	18.80	1.47	0.0110	1.539	0	2.60	0.60	0.021
B100	0.5	10.0	1.435	0.141	0.060	1.35	4.58	14.10	1.46	0.0146	1.489	0	2.19	0.61	0.026
B150	0.5	15.0	1.435	0.141	0.072	0.95	3.74	9.40	1.44	0.0216	1.16	0	1.79	0.62	0.032
B175	0.5	17.5	1.435	0.141	0.077	0.82	3.46	8.06	1.43	0.0250	0.671	0	1.73	0.62	0.034
(Case U) 방류 유속 0.8 ~ 2.0 m/s															
U08	0.5	12.5	0.8	0.141	0.035	3.07	2.28	11.28	0.43	0.0054	1.568	0	4.46	0.68	0.017
U11	0.5	12.5	1.1	0.141	0.050	1.84	3.14	11.28	0.83	0.0103	1.548	0	2.80	0.63	0.024
U17	0.5	12.5	1.7	0.141	0.080	0.77	4.85	11.28	2.10	0.0262	0.322	0	1.69	0.61	0.035
U20	0.5	12.5	2.0	0.141	0.095	0.49	5.71	11.28	3.05	0.0381	-0.89	0	1.34	0.60	0.045
(Case H) 하류 수심 0.10 ~ 0.18 m															
H10	0.5	12.5	1.4	0.100	0.066	1.12	4.10	8.00	2.12	0.0265	1.384	0	1.94	0.45	0.0234
H12	0.5	12.5	1.4	0.120	0.066	1.12	4.10	9.60	1.72	0.0215	1.384	0	1.94	0.53	0.0253
H16	0.5	12.5	1.4	0.160	0.066	1.12	4.10	12.80	1.27	0.0159	1.384	0	1.94	0.69	0.030
H18	0.5	12.5	1.4	0.180	0.066	1.12	4.10	14.40	1.13	0.0141	1.384	0	1.94	0.77	0.031

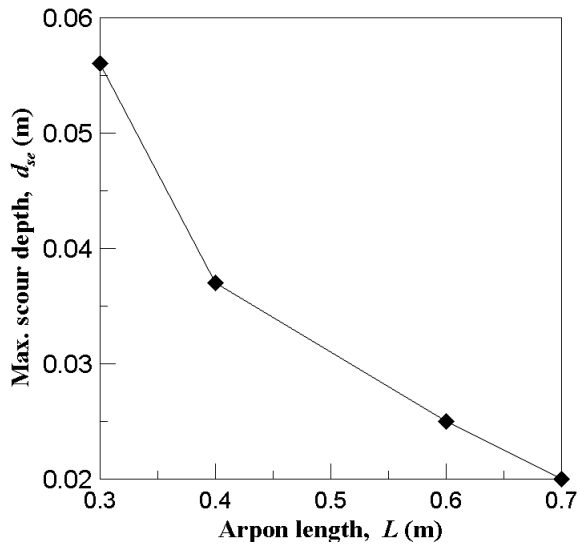


그림 4.1. 물받이공 길이에 따른 최대세굴심

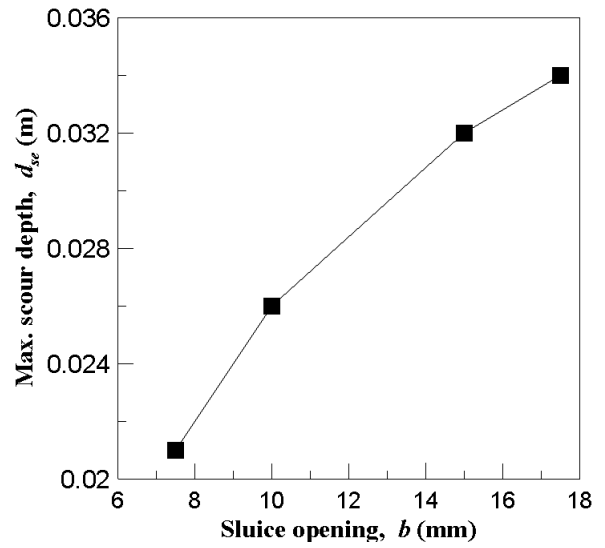


그림 4.2. 수문 개방 정도에 따른 최대세굴심

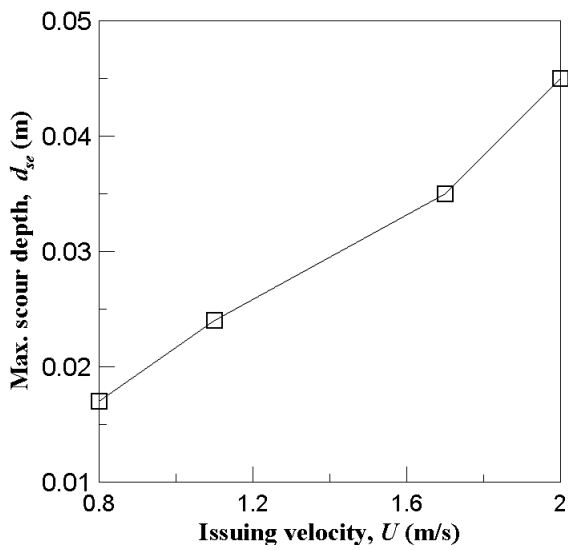


그림 4.3. 방류 유속에 따른 최대세굴심

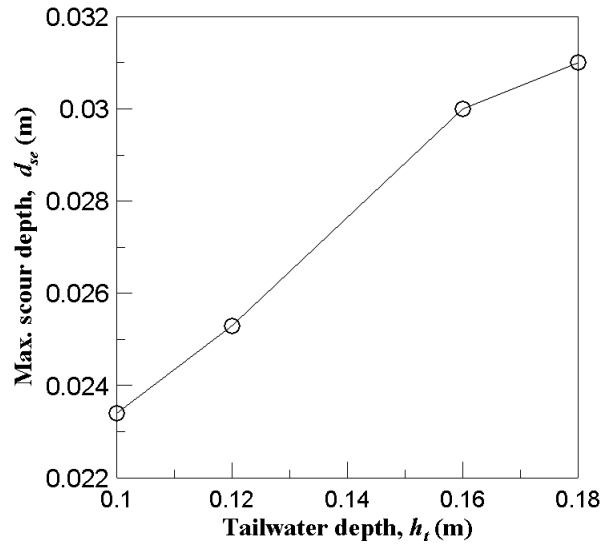


그림 4.4. 하류 수심에 따른 최대세굴심

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

번호	세부연구목표		달성내용	달성도 (%)
1	유동해석 모형 개발	난류 모형 조사	모형 제시	100
2		유동해석 알고리즘 조사	알고리즘 제시	100
3		유동 해석 모형 개발	모형 개발	100
4		모형 적용 및 검증 (2건)	적용 및 검증 (3건)	100
5	세굴예측 모형 개발	유사이송 모형 제시	기법 제시	100
6		하상토 보존 방정식 해석	수치모의	100
7		통합모형 구축	모형 구축	100
8		통합모형의 적용 및 검증 (2건)	적용 및 검증 (2건)	100
9	안전성 평가 기법 제시	실제 보에 적용	수치모의 수행	100
10		보 하류 하도 안정성 평가	안정성 평가	100
12		세굴 최소화 및 안정하도 유지 방안 제시	대책 제시	100
13	SCI(E)급 학술지 게재 (3건)		SCI(E)급 학술지 3건 심사중	100
14	일반학술지 게재 (4건)			0

2. 관련 분야 기여도

- ☐ 보 하류 세굴 관련 연구과제 조사 결과 지금까지 연구는 범용성이 확인되지 않은 코드를 이용하거나 경험식을 통한 세굴심 예측이 대부분이었다. 실제 보를 대상으로 세굴 현상을 분석하거나 난류와 하상과의 상호작용을 고려한 연구는 많이 부족한 상황이다.
- ☐ 지금까지 세굴 관련 수치모의 해석은 RANS 모형이 주를 이루고 있다. RANS 모형을 기반으로 한 세굴 예측 모형은 세굴 현상의 대략적인 위치와 경향성을 파악할 수는 있지만 보다 정확한 예측은 불가능하다. 본 연구에서는 고정밀 3차원 LES 모형을 이용하여 보 주위의 흐름을 정확하게 모의하고 세굴 현상을 예측하였다.
- ☐ 본 연구에서는 3차원 LES 모형을 기반으로 한 통합 모형을 이용하여 보 주변 난류 흐름과 관련된 물리 현상을 규명하였다. 세굴 현상에 영향을 주는 인자들을 설정하여 모의 시나리오를 세우고 모의를 통해 보 하류 하도 안정성을 평가하였다.
- ☐ 이와 같이 본 연구에서는 보 하류 하도 세굴 현상을 정확하게 예측 가능한 모형을 구축하였으며, 세굴 현상의 주요 인자들을 정립하여 향후 보 관련 연구에 있어 선진적 원천기술을 제공할 수 있다. 또한, 이를 이용하여 보의 운영 및 유지·보수 가이드라인 제공에 활용 가능할 것으로 사료 된다.

제5장. 연구개발성과의 활용계획

- 본 연구에서는 고정확도 3차원 난류 유동해석을 수행하였으며, 보 하류 세굴 현상을 발생시키는 인자에 대해서 분석하였다. 난류의 조직구조와 Bursting 현상으로 특정 지을 수 있으며, 이러한 연구 성과를 기반으로 향후 세굴 현상에 효율적으로 저항하는 세굴보호공의 구조적 형상을 제시하여 설계 기술 발전에 도움이 될 수 있을 것이다.
- 본 연구과제에서 구축한 통합세굴예측 모형을 여울, 징검다리, 생태 탐방로, 돌무더기, 헛대 등의 환경, 생태 및 친수시설 등의 적용하여 하천 관리에 도움이 될 수 있을 것이다.
- 본 연구에서 개발된 통합 모형은 보 주변의 흐름과 세굴 현상을 정확하게 예측할 수 있는 장점이 있다. 개발된 모형을 이용하여 하천에 설치된 보의 문제 유무를 파악할 수 있으며, 새로운 보의 설계가 하천에 미칠 영향을 사전에 분석하고 검토할 수 있다. 이 모형을 이용한다면 보 관리 및 운영 관리 기술의 수준이 높아질 것이며, 보의 이수 및 치수의 기능이 극대화 될 것이다.
- 본 연구의 개발된 모형은 흐름 및 세굴을 예측하여 보 운영 관리의 기초자료를 구축하는 데에 활용할 수 있다. 이를 이용해 보의 유지·보수 가이드라인 제시할 수 있다. 개발된 모형은 보뿐만 아니라 모든 하천시설물 주변의 흐름과 하상변동을 정확하게 모의할 수 있다. 하여, 이와 관련된 분야에 있는 엔지니어링 회사, 국가기관 또는 연구소 등에서 다양한 목적으로 활용 가능할 것으로 예상된다.

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

(1) LES 모델링 기법 관련 연구

- Smagorinsky 모형 (Smagorinsky, 1963)
- Dynamic Smagorinsky 모형 (Germano et al., 1991; Lilly, 1992)
- Wall-Adapting Local Eddy-viscosity (WALE) 모형 (Nicoud and Ducros, 1999)
- Scale-Similarity Model (SSM) (Bardina et al., 1980)
- Dynamic Mixed Model (DMM) (Zang et al., 1993)

(2) LES 기법을 적용한 관련 분야 연구

- 직사각형 개수로에 적용, 평균흐름 및 난류량 분석 연구 (Shi et al., 1999; Broglia et al., 2003; Hinterberger et al., 2008; Sterling et al., 2008)
- 복단면 개수로에 적용, 평균흐름 및 난류량 분석 연구 (Thomas and Williams, 1995a; Cater and Williams, 2008; Kara et al., 2012; Xie et al., 2013)
- 사다리꼴 복단면 개수로에 적용, 평균흐름 및 난류량 분석 연구 (Thomas and Williams, 1995b)
- 거친 하상의 난류 구조 흐름 연구 (Stoesser et al., 2003; Bomminayuni and Stoesser, 2011)
- 만곡 흐름 특성 연구 (van Balen et al., 2010a & 2010b; Constantinescu et al., 2011a & 2012a)
- 침수식생된 개수로 흐름 특성 연구 (Cui and Neary, 2008; Okamoto and Nezu, 2010)
- 자연형 하도에서 고해상도 LES 기법 적용 및 흐름 특성 연구 (Kang et al., 2011)
- 하천의 합류부에서 발생하는 흐름 특성 연구 (Constantinescu et al., 2011b & 2012b)
- 교각부 흐름 특성 연구 (Kirkil et al., 2006; Kirkil, 2007; Kirkil and Constantinescu, 2009)
- 댐 붕괴 수치모의 연구 (Larocque et al., 2013)

(3) 이상흐름해석을 이용한 유사이송 연구

- 초기 제거비가 입자상 붕괴에 미치는 영향 (Rondon et al., 2011)
- 입자상 붕괴 모의 연구 (Lee et al., 2015)
- 입자상 붕괴 실험 (Lajeunesse and Homsy, 2005)
- 모형 정립 및 적용성에 관한 연구 (Chauchat et al., 2017)
- Pipeline 세굴 현상 모의 연구 (Lee et al., 2016)

(4) 수중제트류 흐름 및 세굴 현상에 관한 실험 연구

- 수중제트류에 의한 물받이공 하류 세굴 실험 (Dey and Sarkar, 2006; Dey and Sarkar, 2008)
- 수중제트류에 의한 수면형 관련 연구 (Ead and Rajaratnam, 2002)
- 수중제트류의 유속분포 관련 연구 (Mahmoudi and Fleck, 2017)

제7장. 연구개발성과의 보안등급

보안등급 분류	보안	일반
		○
결정 사유	보안 등급으로 분류될 사유가 없음	

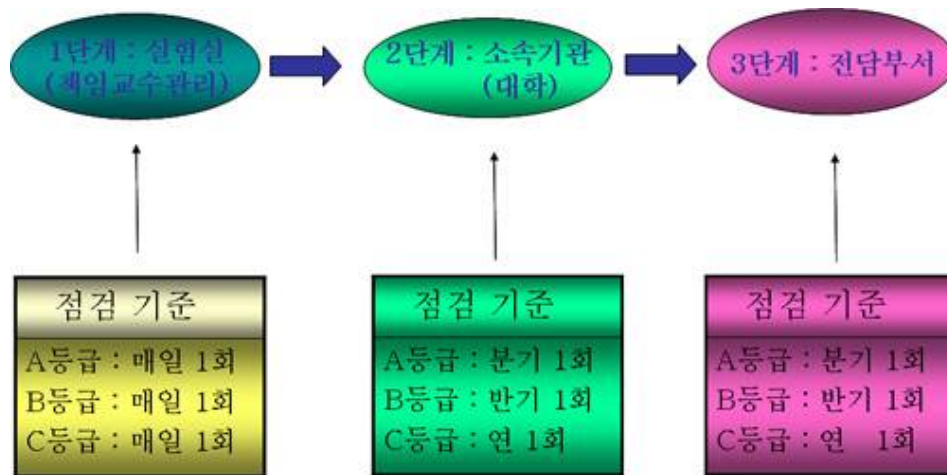
제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

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

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

○ 연구실 안점 점검 체계 및 실시

1) 실험실 안전 점검 체계



※ 위험등급별로 환경안전점검을 단계별로 체계화하여 관리

※ 관리위험등급의 지정

- A 등급: 가연성가스, 인화성 시약, 유해화학물질, 다량의 폐액배출, 독극물, 생물 및 동물, 방사성 동위원소, 위험성이 높은 기계장비가 설치된 실험실
- B 등급: 일반시약, 소규모 인화성 시약, 불연성가스, 소량의 폐수발생실험실
- C 등급: 이화학실험을 수행하지 않는 전기, 설계, 컴퓨터 관련 실험실

2) 실험실 정밀안전진단 실시

- 대상: 연구개발활동에 유해화학물질 관리법 제2조 7호에 따른 유해화학물질을 취급하는 연구실, 산업안전보건법 제39조에 따른 유해인자를 취급하는 연구실, 과학기술부령이 정하는 독성가스를 취급하는 연구실 (우리대학은 실험실관리등급 A, B급에 해당하는 실험실)

- 실시: 2년마다 1회 실시하여 교육과학기술부에 보고

○ 교육 훈련

- 1) 개요: 실험실의 안전을 확보하고 종사자의 건강을 보호하여 실험 및 연구활동에 기여하고, 또한 연구실 안전환경조성에 관한 법률에 의거하여 실험실의 환경안전교육이 의무화됨에 따라 이공계열 대학원생 및 관련자 전원은 환경안전교육을 의무적으로 수강
- 2) 교육대상: 교수, 대학원생, 실험조교, 전문직원, 소속연구원, 실험참여 학부생 및 업체직원 등
- 3) 단계별 교육 이수과정:
 - 1단계: 공통이수과목 (등록실험실전체)
 - 2단계: 특수실험실
- 4) 교육구분
 - 정기교육: 방학기간 중 2회 출석 수업 실시
 - 비정기 임시교육:
 - o 대상: 새로운 실험과정의 신설시, 연구소의 신설시, 교육 미 이수자(신입 대학원생, 전담 직원, 연구원, 업체직원, 유해물질 취급자 등)
 - o 방법: 사이버 교육 환경안전교육 등 (홈페이지 개설 동영상교육), 자료/유인물, 외부 온라인상, 외부강사, 전문교육기관의뢰 등
 - 특별교육: 해당기관에서 자체 또는 외부의 전문기관에 의뢰하여 위탁교육 실시

○ 보험 가입 현황

보 험 명	보 상 내 용	대 상	주관부서
재산종합보험 (종합패키지 보험)	재산종합위험담보: 2조 5천 6백억원 (신체배상책임보험 특별약관포함)	피보험자	설비안전팀
	대인대물일괄: 20억원-사고당	전체	“
	제3자 치료비 보상: 1천만원/인당, 8천만원/사고당	제3자 보상	“
	학생교내외치료비: 1천5백만원/인당, 8천만원/사고당	학생	“
학생단체 상해보험	상해사망, 후유장해: 2억원 의사상자 상해위험: 1억원 상해, 후유정도에 따른 보상: 약관보상 연구활동종사자보험 포함 (특별약관)	학부생, 대학원생	학생복지처
교직원 단체안심보험	사망, 후유장해, 질병사망 : 1억원/인 의료비지원 - 암치료비: 1천만원/인당 - 입원의료비지원: 3천만원/인당 - 상해의료실비: 2백만원/인당	교직원	인사팀

○ 추가 이행

1) 실험종사자 건강검진 및 보험 추가가입	1. 건강검진 (특수실험실) 2. 상해보험추가가입검토 (특수실험실)
2) 실험실 공기질 관리, 환기	유해물질농도 측정관리, 환기대책수립
3) 실험실 환경개선공사	노후 실험실 개선공사 시행
4) 특수위험 실험실에 별도의 소화설비 설치	위험성이 큰 실험실에 별도의 특수소화 설비를 설치하여 사고 확산을 예방
5) 유기용매 보관시설 설치 및 액체질소 통합관리	1. 보관창고를 설치하여 통합관리 2. 액체질소를 시약센터에서 통합관리
6) 실험실 환경안전지침 작성	보완작성
7) 고압가스 안전관리	안전시설 설치
8) 안전보호장비 시설 보완	안전보호장비와 안전표지 설치

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/ 기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	논문	Characteristics of mean flow and turbulence statistics of the surface jet over a submerged weir	연세대 학교	주관	Advances in Water Resources	3.51	(심사 중)	단독	SCI
2	논문	Comparison of environmental flows from a habitat suitability perspective: A case study in the Naeseong-cheon Stream in Korea	연세대 학교	주관	Ecohydrology	2.76	(심사 중)	단독	SCI
3	논문	Ecological evaluation of weir removal based on physical habitat simulations for macroinvertebrate community	연세대 학교	주관	Ecological Engineering	3.02	(심사 중)	단독	SCI

제11장. 기타 사항

제12장. 참고 문헌

- 기상청 (2009). 기후변화와 수문기상. 기상기술정책, 2(2).
- 김창성, 강준구, 여흥구, & 여운광. (2010). 연직낙차공 하류부 사석보호공 침하량 산정식에 관한 실험 연구. 한국수자원학회논문집, 43(5), 433-443.
- 여창건 (2010). 경사 및 계단형 보 하류부 세굴 예측. 석사학위 논문, 홍익대학교.
- 여창건, 이승오, 윤세의, & 송재우. (2011). 보 형상 변화에 따른 하류부 세굴의 시간적 변화. 대한토목학회논문집 B, 31(4B), 353-360.
- 한국건설기술연구원 (2013). 보하류부 세굴방지를 위한 Multi-baffle Energy Dissipator 개발.
- Moreno C. S. (2014). 낙동강 강정고령보 주변에서의 유사이동 및 하천지형 변화의 수치 모의, 석사학위 논문, 서울대학교.
- Bardina, J., Ferziger, J. H., and Reynolds, W. C. (1980). Improved subgrid-scale models for large-eddy simulation. In *American Institute of Aeronautics and Astronautics, Fluid and Plasma Dynamics Conference*, 13th, Snowmass, Colo., July 14-16, 1980, 10 p. (Vol. 1).
- Bomminayuni, S. and Stoesser, T. (2011). Turbulence statistics in an open-channel flow over a rough bed. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(11), 1347-1358.
- Boyer, F., Guazzelli, É., & Pouliquen, O. (2011). Unifying suspension and granular rheology. *Physical Review Letters*, 107(18), 188301.
- Brogia, R., Pascarelli, A., and Piomelli, U. (2003). Large-eddy simulations of ducts with a free surface. *Journal of Fluid Mechanics*, 484, 223-25.
- Chauchat, J., Cheng, Z., Nagel, T., Bonamy, C., & Hsu, T. J. (2017). SedFoam-2.0: a 3-D two-phase flow numerical model for sediment transport. *Geoscientific Model Development*, 10(12).
- Choi, S. U., and Joung, Y. (2012). Numerical prediction of morphological change of straight trapezoidal open-channel. *Journal of Hydro-environment Research*, 6(2), 111-118.
- Choi, S. U., and Lee, J. (2015a). Assessment of total sediment load in rivers using lateral distribution method. *Journal of Hydro-environment Research*, 9(3), 381-387.
- Choi, S. U., and Lee, J. (2015b). Prediction of Total Sediment Load in Sand-Bed Rivers in Korea Using Lateral Distribution Method. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 51(1), 214-225.
- Constantinescu, G., Koken, M., and Zeng, J. (2011a). The structure of turbulent flow in an open channel bend of strong curvature with deformed bed: Insight provided by detached eddy simulation. *Water Resources Research*, 47(5).
- Constantinescu, G., Miyawaki, S., Rhoads, B., and Sukhodolov, A. (2012b). Numerical analysis of the effect of momentum ratio on the dynamics and sediment-entrainment capacity of coherent flow structures at a stream confluence. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* (2003-2012), 117(F4).
- Cui, J. and Neary, V. S. (2008). LES study of turbulent flows with submerged vegetation. *Journal of Hydraulic Research*, 46(3), 307-316.

- Dey, S., & Sarkar, A. (2006). Scour downstream of an apron due to submerged horizontal jets. *Journal of hydraulic engineering*, 132(3), 246–257.
- Dey, S., & Sarkar, A. (2008). Characteristics of submerged jets in evolving scour hole downstream of an apron. *Journal of engineering mechanics*, 134(11), 927–936.
- Di Felice, R. (1994). The voidage function for fluid-particle interaction systems. *International Journal of Multiphase Flow*, 20(1), 153–159.
- Ead, S. A., & Rajaratnam, N. (2002). Plane turbulent wall jets in shallow tailwater. *Journal of engineering mechanics*, 128(2), 143–155.
- Einstein, A. (1906). Eine neue bestimmung der moleküldimensionen. *Annalen der Physik*, 324(2), 289–306.
- Germano, M., Piomelli, U., Moin, P., & Cabot, W. H. (1991). A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model. *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, 3(7), 1760–1765.
- Guan, D., Melville, B. W., & Friedrich, H. (2014). Flow patterns and turbulence structures in a scour hole downstream of a submerged weir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(1), 68–76.
- Hinterberger, C., Fröhlich, J., and Rodi, W. (2008). 2D and 3D turbulent fluctuations in open channel flow with $Re_{\tau} = 590$ studied by large eddy simulation. *Flow, Turbulence and Combustion*, 80(2), 225–253.
- Jia, Y., Altinakar, M., and Guney, M. S. (2018). Three-dimensional numerical simulations of local scouring around bridge piers. *Journal of Hydraulic Research*, 56(3), 351–366.
- Kang, S., Lightbody, A., Hill, C., and Sotiropoulos, F. (2011). High-resolution numerical simulation of turbulence in natural waterways. *Advances in Water Resources*, 34(1), 98–113.
- Kara, S., Kara, M. C., Stoesser, T., & Sturm, T. W. (2015). Free-surface versus rigid-lid LES computations for bridge-abutment flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 141(9), 04015019.
- Kara, S., Stoesser, T., and Sturm, T. W. (2012). Turbulence statistics in compound channels with deep and shallow overbank flows. *Journal of Hydraulic Research*, 50(5), 482–493.
- Krieger, I. M., & Dougherty, T. J. (1959). A mechanism for non-Newtonian flow in suspensions of rigid spheres. *Transactions of the Society of Rheology*, 3(1), 137–152.
- Khosronejad, A., Diplas, P., and Sotiropoulos, F. (2016). Simulation-based optimization of in-stream structures design: bendway weirs. *Environmental Fluid Mechanics*, 1–31.
- Lajeunesse, E., Monnier, J. B., & Homsy, G. M. (2005). Granular slumping on a horizontal surface. *Physics of fluids*, 17(10), 103302.
- Lanzoni, S., Gregoretti, C., & Stancanelli, L. M. (2017). Coarse-grained debris flow dynamics on erodible beds. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 122(3), 592–614.
- Lee, C. H., Huang, Z., & Chiew, Y. M. (2015). A three-dimensional continuum model incorporating static and kinetic effects for granular flows with applications to collapse of a two-dimensional granular column. *Physics of Fluids*, 27(11), 113303.
- Lee, C. H., Low, Y. M., & Chiew, Y. M. (2016). Multi-dimensional rheology-based two-phase model for sediment transport and applications to sheet flow and pipeline scour. *Physics of Fluids*, 28(5), 053305.

- Lilly, D. K., (1992). A proposed modification of the Germano subgrid-scale closure method, *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics (1989-1993)*, 4(3), 633-635.
- Liu, D., Liu, X., and Fu, X. (2018). LES-DEM simulations of sediment saltation in a rough-wall turbulent boundary layer. *Journal of Hydraulic Research*, 1-12.
- Mahmoudi, M., & Fleck, B. A. (2016). Experimental measurement of the velocity field of round wall jet in counterflow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 143(1), 04016076.
- Menter, F. L. O. R. I. A. N. R. (1993, July). Zonal two equation kw turbulence models for aerodynamic flows. *In 23rd fluid dynamics, plasmadynamics, and lasers conference*, 2906.
- MiDi, G. D. R. (2004). On dense granular flows. *The European Physical Journal E*, 14(4), 341-365.
- Nezu, I. Rodi 1985 Experimental study on secondary currents in open channel flows. *In Proc of 21st IAHR Congress*, 2, 115-119.
- Nezu, I., & Nakagawa, H. (1993). *Turbulence in open-channel flows*, IAHR monograph series. AA Balkema, Rotterdam, 1-281.
- Nicoud, F., & Ducros, F. (1999). Subgrid-scale stress modelling based on the square of the velocity gradient tensor. *Flow, Turbulence and Combustion*, 62(3), 183-200.
- Okamoto, T. A. and Nezu, I. (2010). Large eddy simulation of 3-D flow structure and mass transport in open-channel flows with submerged vegetations. *Journal of Hydro-environment Research*, 4(3), 185-197.
- Ota, K., Sato, T., and Nakagawa, H. (2016a). 3D numerical model of sediment transport considering transition from bed-load motion to suspension-application to a scour upstream of a cross-river structure-. *Journal of JSCE*, 4(1), 173-180.
- Ota, K., Sato, T., Nakagawa, H., and Kawaike, K. (2016b). Three-Dimensional Simulation of Local Scour around a Weir-Type Structure: Hybrid Euler-Lagrange Model for Bed-Material Load. *Journal of Hydraulic Engineering*, 04016096.
- Rodi, W., Constantinescu, G., and Stoesser, T. (2013). *Large-eddy simulation in hydraulics*. CRC Press.
- Rondon, L., Pouliquen, O., & Aussillous, P. (2011). Granular collapse in a fluid: role of the initial volume fraction. *Physics of Fluids*, 23(7), 073301.
- Schiller, L. (1933). Über die grundlegenden Berechnungen bei der Schwerkraftaufbereitung. *Z. Vereines Deutscher Inge.*, 77, 318-321.
- Shi, J., Thomas, T. G., and Williams, J. J. R. (1999). Large-eddy simulation of flow in a rectangular open channel. *Journal of Hydraulic Research*, 37(3), 345-361.
- Smagorinsky, J. (1963). General circulation experiments with the primitive equations: I. The basic experiment. *Monthly weather review*, 91(3), 99-164.
- Sterling, M., Beaman, F., Morvan, H., and Wright, N. (2008). Bed-shear stress characteristics of a simple, prismatic, rectangular channel. *Journal of Engineering Mechanics*, 134(12), 1085-1094.

- Stoesser, T., Fröhlich, J., and Rodi, W. (2003). Identification of coherent flow structures in open channel flow over rough bed using large eddy simulation. *Proceedings of 30th IAHR Thessaloniki*, Greece.
- Thomas, T. G. and Williams, J. J. R. (1995a). Large eddy simulation of turbulent flow in an asymmetric compound open channel. *Journal of Hydraulic Research*, 33(1), 27-41.
- Thomas, T. G. and Williams, J. J. R. (1995b). Large Eddy Simulation of a symmetric trapezoidal channel at a Reynolds number of 430,000. *Journal of Hydraulic Research*, 33(6), 825-842.
- van Balen, W., Blanckaert, K., and Uijttewaalt, W. S. J. (2010a). Analysis of the role of turbulence in curved open-channel flow at different water depths by means of experiments, LES and RANS. *Journal of Turbulence*, 11, 1-34.
- van Balen, W., Uijttewaalt, W. S. J., and Blanckaert, K. (2010b). Large-eddy simulation of a curved open-channel flow over topography. *Physics of Fluids*, 22(7), 075108.
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*. Pearson education.
- Verhoff, A. (1963). *The two-dimensional, turbulent wall jet with and without an external free stream (No. 626)*. Princeton Univ NJ.
- Xie, Z., Lin, B., and Falconer, R. A. (2013). Large-eddy simulation of the turbulent structure in compound open-channel flows. *Advances in Water Resources*, 53, 66-75.
- Zang, Y., Street, R. L., and Koseff, J. R. (1993). A dynamic mixed subgrid-scale model and its application to turbulent recirculating flows. *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics (1989-1993)*, 5(12), 3186-3196.

9. 뒷면지

주 의

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