

20CTAP-C1
51982-02

보안 과제(), 일반 과제(○) / 공개(○), 비공개() 발간등록번호(11-B552989-000384-14)
국토교통기술촉진연구사업 제2차 연도 최종보고서

R&D / 20CTAP-C151982-02

실제 산사태 예측을 위한 토석류 해석 Boussinesq 방정식 수치모형 개발 및 검증 최종보고서

2021

국토교통과학기술진흥원
주최
부

실제 산사태 예측을 위한 토석류 해석 Boussinesq 방정식 수치모형 개발 및 검증 최종보고서

2021. 02. 10.

주관연구기관 / 세종대학교 산학협력단
공동연구기관 / 한국농어촌공사 농어촌연구원

국토교통부
(전문기관) 국토교통과학기술진흥원



제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

‘실제 산사태 예측을 위한 토석류 해석 Boussinesq 방정식 수치모형 개발 및 검증’(연구개발 기간 : 2019. 04. ~ 2020. 12.) 과제의 최종보고서 2부를 제출합니다.

2021 . 02 . 10 .

주관연구기관명 : 세종대학교 산학협력단 (대표자) 이 수 용

공동연구기관명 : 한국농어촌공사 농어촌연구원 (대표자) 유 전 용

주관연구기관책임자: 이 창 훈

공동연구기관책임자: 정 재 상

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	20CTAP-C 151982-02	해당 단계 연구 기간	2020. 01.01 ~2020.12.31	단계구분	2/2
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	국토교통기술혁신연구			
연구과제명	대과제명	실제 산사태 예측을 위한 토석류 해석 Boussinesq 방정식 수치모형 개발 및 검증			
	세부과제명	주관과제명 : 분산성 비선형 토석류 해석 수치모형 개발 공동과제명 : 토석류 거동특성 분석 수리모형실험 수행			
연구책임자	이 창 훈	해당단계 참여연구원 수	총: 15명 내부: 15명 외부: 0명	해당단계 연구비	정부: 206,000 천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 206,000 천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 16명 내부: 16명 외부: 0명	총 연구비	정부: 370,000 천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 370,000 천원
연구기관명 및 소속 부서명	세종대학교 산학협력단			참여기업명	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
공동연구	연구기관명: 한국농어촌공사 농어촌연구원			연구책임자: 정 재 상	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	
-------------------------	--

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						C-202 0-038 581/ C-202 0-038 582					

국가과학기술중합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황

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

요약

본 연구에서 실제 산사태 예측을 위한 토석류 해석 Boussinesq 방정식 수치모형 개발 및 검증을 수행함. 주관기관에서 수치모형 개발과 검증을 하고, 공동연구기관에서 수리모형실험을 수행하고, 자료를 공개함. 주관기관의 연구성과로서 먼저 수치모형의 지배방정식으로 바닥과 수면의 좌표 즉, (b,s) 좌표를 사용하여 분산항을 고려한 Boussinesq 방정식과 분산상을 무시한 천수방정식을 각각 개발함. 수치해석 방법으로 유한체적법을 사용하여 wet/dry의 불연속성을 극복하여 안정적인 수치모형을 개발함. 수치해를 해석해와 모형실험과 비교한 결과 쓰나미와 같이 모든 영역

보고서 면수

118

에 유체가 있는 경우에는 분산항이 커서 Boussinesq 방정식이 천수방정식에 비해서 정확한 결과를 보임. 산사태와 같이 wet/dry의 불연속성이 있는 경우 분산항이 미미할 정도로 작아서 Boussinesq 방정식이 천수방정식에 비해서 더 정확하지 않고 오히려 수치적으로 불안정한 결과를 보임. 더 나아가 바닥의 침식을 고려한 수치모형을 개발하여 모형실험자료와 실제 우면산 산사태에 적용하여 수치모형의 정확성과 실제 산사태의 적용성을 검증함. 공동기관의 연구성으로 경사면에서 토석 댐을 갑자기 열어 토석의 전파와 퇴적된 토석의 높이를 시간별로 공간적으로 관측하고, 하류에서 토석의 작용력을 관측함. 더 나아가 바닥의 침식을 고려한 토석류의 수리모형실험도 수행함. 본 연구의 성과로 국내에서도 실제 산사태를 수치적으로 정확히 모의하는 수치모형을 보유하게 되어 산사태로 인한 피해를 예측하고 이에 대비하는 기술이 확보됨.

국문 요약문

연구의 목적 및 내용	○ 분산성 비선형 토석류 해석 수치모형 개발 - 선행연구 사례 조사 및 모형의 목표 성능 제시 - Boussinesq 방정식을 기반으로 토석류의 해석 지배방정식 유도 - 수치해석 소스 코드 작성 및 수치모형 구축 - 수치해석 수행 및 수리모형실험 결과와 비교를 통해 1차원 및 2차원 해석 결과 검증 - 과거 실제 산사태 사례 재현 ○ 토석류 거동특성 분석 수리모형실험 수행 및 Data 공개 - 국토교통과학기술진흥원에서 구축한 “대형 수리모형 실험시설” 가변 경사수로 활용(30 m(L) × 1.0 m(B) × 1.5 m(H)) - 지형경사, 토사물성치(비중, 입도분포, 함수율 등), 바닥마찰 등에 따른 표고 변화, 토석류 전파속도, 유출시 작용력, 유출형상 등 계측 - 토석류 실험을 위한 장치 제작 및 수리모형실험 조건 설정 - 토석류 거동특성 분석을 위한 수리모형실험 수행 - 실험 데이터 분석, 최종검증 및 시스템 업로드 - 토석류 실험 가이드라인 작성				
연구개발성과	○ Boussinesq 방정식 기반의 토석류 해석 수치모형 - (목적) 토석류 전파 및 피해범위 예측을 위한 정밀한 수치모형 개발 - Boussinesq 방정식 기반의 모형 구축을 위한 지배방정식 - 수치해석 소스 코드 - 실험데이터와 비교를 통한 수치해석 모델 검증 - 과거 발생한 토석류 사례에 대한 수치모델 재현 ○ 토석류 실험 Raw Data - (목적) 대규모 토석류의 정밀한 실내 실험을 통해 신뢰성 있는 토석류 실험 데이터 생산 및 공유 - (실험조건) 지형경사, 토사 물성치(비중, 입도분포, 함수율 등), 바닥 마찰 등을 변화시킴 - (계측방법) 초음파 사면측정기, 고속 카메라, 압력계 등을 활용하여 지점별 수위 변화 시계열, 토석류 이동속도, 유출시 작용력, 유출 형상 및 범위 등 계측 - (공유방안) 최종 데이터는 국토교통과학기술진흥원 그리드시스템에 업로드하여 일반 연구자 및 기술자에 공개 ○ 토석류 실험 가이드라인 - (목적) 실험방법 표준화를 통해 다양한 기관에서 수행한 실험결과의 신뢰성 확보 - 처음 토석류를 발생시키기 위한 게이트 형식 및 운영 방안, 실험을 통해 계측할 수 있는 항목 및 계측 방법, 계측시 유의사항 등 기술				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	○ 분산성 비선형 토석류 해석 수치모형 개발 - 본 과제에서 제시하는 Boussinesq 방정식 기반의 비선형 토석류 해석 수치모형은 비정수압 모델로서 토석류의 전파 및 유출범위 등 피해범위의 보다 정확한 예측에 활용 - 본 모형에서 제안하는 토석류 유동 분석을 위한 지배방정식은 향후 다른 연구자들이 개선된 수치해석 기법을 활용하여 보다 향상된 모형을 구축하는데 기초자료로 활용 - 국내 설계회사 등 기업이 해외 방재분야의 컨설팅 등 관련 사업 진출 시 토석류 피해범위 예측을 위한 기술자료로 활용 ○ 토석류 거동특성 분석 수리모형실험 수행 및 Data 공개 - 수리모형실험 결과는 국토교통과학기술진흥원의 실험시설 공유시스템인 그리드시스템에 업로드하여 관련 분야의 모든 연구자 및 기술자들이 활용할 수 있도록 공개 - 수리모형실험 결과는 토석류 해석을 위한 수치해석 모델 개발을 위한 검증자료와 설계기준 제·개정을 위한 기초자료로 활용 - 토석류 실험 가이드라인은 실험기법의 표준화를 통해 서로 다른 연구기관에서 수행한 실험의 신뢰성 향상에 기여				
핵심어 (5개 이내)	토석류	Boussinesq 방정식	수치해석	수리모형실험	데이터 공유

< SUMMARY >

Purpose & Contents	○ Develop dispersive and nonlinear numerical model to analyze debris flow - Survey previous research works and suggest target capacity of developed model - Derive Boussinesq equations to analyze debris flow - Write source code and develop numerical model - Compare numerical results to physical experimental data in one- and two-dimensional cases and verify accuracy of developed models - Simulate previous landslide events using developed numerical models ○ Conduct physical experiments to analyze debris flow and open data publicly - Use movable sloping flume (30 m(L) × 1.0 m(B) × 1.5 m(H)) of the Grand Hydraulic Experiment Facilities by the support of KAIA - Measure surface elevations, transport velocity, impact force, runoff shape by varying bottom slope, debris characteristics (density, composition, water content, etc.) - Make experimental facilities for debris flow and design experimental conditions - Conduct physical experiments to analyze debris flow - Analyze and verify experimental data and upload system - Write guideline for debris flow experiment
Results	○ Develop dispersive and nonlinear numerical model to analyze debris flow - (purpose) Develop numerical model to accurately predict debris movement and damaged locations - Boussinesq equations to analyze debris flow - Source code to analyze debris flow - Verification of numerical model by comparing with physical experimental data - Reproduction of previous landslide events using numerical models ○ Raw data of physical experiment of debris flow - (purpose) collect and share trustable experimental data by conducting detailed indoor experiments in various conditions - (experimental condition) vary bottom slopes, debris characteristics (density, composition, water content, etc.) and bottom frictions - (measurement) measure surface elevations, transport velocity, impact force, runoff shape etc. using supersonic waves, high-speed camera, pressure gauge - (open publicly) open data to researchers and engineers by uploading final data in the KAIA grid system ○ Experiment Guideline for debris flow - (purpose) Gain trust for physical experimental data by standardize experimental methods - Describe gate type and operation method for starting debris flow, list of measurement items, measurement method, and notes in measurement
Expected Contribution	○ Develop dispersive and nonlinear numerical model to analyze debris flow - The model can be used in accurately predicting debris transport and map - The developed governing equations can be used to help others develop advanced model for the debris flow prediction - The developed model can be used for engineering companies to expand projects oversea in the area of disaster prevention ○ Conduct physical experiments to analyze debris flow and open data publicly - Open experimental data to researchers and engineers by uploading data in KAIA experimental facility sharing system - Experimental data can be used in comparing with numerical results to verify numerical model's accuracy and also in debris flow engineering works - The experimental guide after standardization can help other experiments' quality
Keywords	debris flow Boussinesq equations numerical analysis physical experiment data share

< Contents >

1. Research and Development Overview	1
2. Domestic and Overseas Technology Development Status	5
3. Implementation and Results of Research and Development	9
4. Achievement of Research Objectives and Contribution of Related Areas	108
5. Future Plans of Research and Development Results	110
6. International Scientific and Technical Informations Collected During Research Processes	110
7. Security Grade of Research Results	110
8. Research Facilities and Equipment Status Registered in National Science Technology and Information System	110
9. Safeguards Carried-out of Laboratory According to Research Procedure	111
10. Main Results of Research and Development	114
11. Others	115
12. References	116

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	1
2. 국내외 기술 개발 현황	5
3. 연구수행내용 및 성과	9
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	108
5. 연구개발성과의 활용 계획	110
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	110
7. 연구개발성과의 보안등급	110
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	110
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	111
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	114
11. 기타 사항	115
12. 참고 문헌	116

1. 연구개발 목적

– 토석류 해석 Boussinesq 방정식 수치모형 개발

- 현재 본 연구진이 파랑 해석 Boussinesq 방정식 수치모형을 개발하여 기술력이 확보되었다.
- 실제 산사태 예측이 가능하면서 토석류의 거동을 정확히 모의할 수 있는 “분산성 비선형 수치모형인 Boussinesq 방정식의 개발”이 세계적으로 요구되었다.
- 1차년도에 지배방정식 유도, 1차원 수치모형 개발 및 검증을 수행하고 2차년도에 2차원 수치모형 개발 및 검증을 수행한다.

– 토석류 거동특성 분석 대규모 수리모형실험 수행 및 Data 공개

- 현재 국내에서는 길이 30 m 규모의 대규모 실험시설을 이용한 토석류 실험이 수행된 사례가 없었다.
- 토석류 관련분야 기술력이 취약하므로 “대규모 토석류 수리모형실험 수행”과 관련 연구자들과의 연구 교류 및 기술력 향상이 필요하다.
- 1차년도에 실험시설 셋팅, 계측장비 구매, 예비실험 수행 등을 수행하고 2차년도에 본 실험을 수행하는 것으로 계획한다.

2. 연구개발의 필요성

○ 연구개발의 배경

- 매년 산사태에 의한 토석류 발생으로 피해가 발생하고 있다. 2010년부터 2018년까지 총 2,107 ha의 피해가 발생하였으며, 복구비로 총 4,128억원(연평균 459억원)이 소요되었다(그림 1 참조).
- 특히 2011년 7월 우면산 주위에서 산사태가 발생하여 18명이 사망하는 등 큰 피해 발생하였다.



그림 1. 산사태 피해 및 복구비 현황(출처: e-나라지표)

- 필리핀에서 2003년 San Ricardo town에서 토석류에 의해 154명의 사망자가 발생했으며, 2006년 Guinsaugon 산사태로 1200명 이상, Bicol 지역에서 태풍 내습에 따른 산사태로 1200명 이상의 사망자가 발생하는 등 1999년부터 2018년까지 20년간 총 3,052명의 사망자가 발생하였다.
- 국내뿐만 아니라 세계적으로도 산사태 발생에 따른 토석류 피해가 빈번하게 발생하고 있으나 아직 토석류 거동에 대한 물리적인 특성을 규명하고, 실험 등을 통한 면밀한 검토가 안 되었다.
- 토석류는 집중호우 시 토사 내 함수량의 증가로 인해 또는 지진, 화산 발생 시 지각 변동으로 인해 사면의 저항력이 약화되어 발생한다. 토석류 이동 시 토석 내 석임이 발생하고, 토석이 유입되면서 하류로 갈수록 토석량이 증가하고, 수평면에 이르러 퇴적한다. 이러한 토석류의 3차원적인 물리 현상을 정확히 규명하면서 넓은 공간을 해석할 수 기술이 요구된다.

- 토석류 해석기법은 토석을 단일체로 해석하는 기법, 물과 토석의 혼합체로 해석하는 기법, 물과 토석과 공기를 각각 해석하는 기법 등으로 나눌 수 있는데 실제 산사태 해석에는 단일체 해석이 현실적으로 가능하다.
- 단일체 해석기법으로 Saint-Venant 식이 전체 토석류 해석 기법의 85%를 차지한다 (Yavari-Ramshe과 Ataie-Ashtiani, 2016). 이 식은 토석의 두께(H) 대비 길이(l)의 비가 아주 클 때($l/H > 20$) 정확성이 보장된다. 토석의 두께 대비 길이의 비가 크지 않은 경우(즉, $l/H < 20$), 분산성(즉, 다른 주기 성분이 다른 속도로 전파함)이 발생하고, 속도가 바닥에서부터 표면까지 다르게 분포하여 기존 산사태 해석기법의 개선이 절실히 필요하다(그림 2 참조).

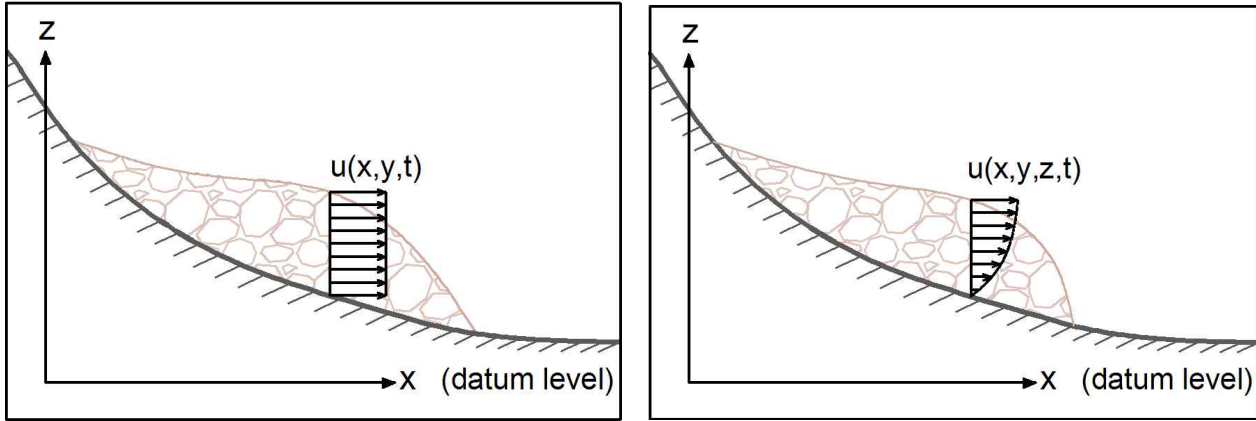


그림 2. 토석류 해석 Saint-Venant 식(왼쪽 그림)과 Boussinesq 방정식(오른쪽 그림)의 유속 분포

- 파랑해석 기법으로 파랑의 분산성과 속도의 불균일성을 고려한 Boussinesq 방정식이 일찍이 개발되어 풍파 및 쓰나미 해석에 활용되고 있음. 광역의 실제 산사태 예측이 가능한 토석류의 정밀 해석 Boussinesq 방정식이 필요함을 최근 국제 논문에서 여러 연구자들이 주장하였다(Denlinger와 Iverson, 2004; Castro-Orgaz 등, 2014; Yavari-Ramshe과 Ataie-Ashtiani, 2016).

○ 연구개발의 필요성

- 기초원천기술개발의 창의성

- 본 연구에서 토석류의 3차원(x, y, z) 현상을 고려하고, 광역에 적용 가능한 Boussinesq 방정식 수치모형을 개발하고, 수리모형실험을 통해 검증한다.

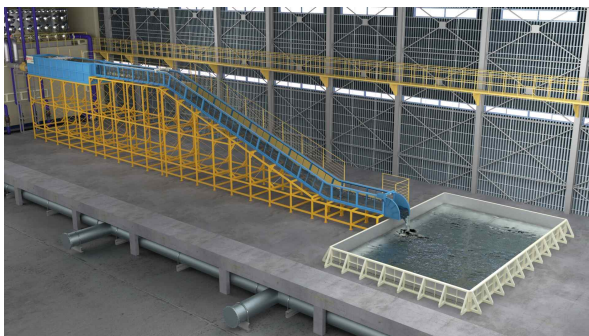
<수치모형 구축>

- 류상훈 등(2011)이 개별요소법을 이용하여 토석류의 충격력을 계산하였다.
- 김성덕 등(2012)은 지형경사에 따른 토석류 거동에 대해 Saint-Venant 방정식 기반의 수치모형을 이용하여 유량, 유동심, 토사체적 농도 등을 조사하였다. 또한, 김승은 등(2013)은 Saint-Venant 방정식 기반의 수치모형인 FLO-2D 모형을 실제 토석류 사례인 우면산 산사태에 적용하여 2차원 모형의 정확성을 검증하였다.
- Denlinger와 Iverson(2004)은 토석류에서 수직방향 가속도가 중력가속도만큼 클 수 있음을 밝혀 수평 유속이 수직방향으로 균일하지 않음을 고려한 수치모형이 필요함을 주장하였다.
- Castro-Orgaz 등(2014)과 Yavari-Ramshe과 Ataie-Ashtiani(2016)은 토석류의 정확한 해석을 위해 Boussinesq 방정식의 개발이 필요함을 주장하였다.
- 본 연구에서 기존의 Saint-Venant 방정식 기반의 수치모형을 향상시켜 유속의 분산성, 수직방향의 불균일성, 비선형성을 고려한 Boussinesq 방정식 기반의 토석류 해석 수치모형을 개발하였다.
- 본 연구팀은 자체 기술력으로 Saint-Venant 방정식 기반의 토석류 해석 수치모형의 개발이 완료되었으며, 토석류 해석 Boussinesq 방정식의 유도가 완료된 상태이다.
- 본 연구팀은 파랑 해석 Boussinesq 방정식과 관련한 연구를 20년 동안 수행하면서 SCI 논문 4편과 국내 논문 9편을 게재하였다. 특히 해안공학의 상위 5% 내에 드는 Coastal Engineering (impact factor : 4.119)에 2편의 논문을 게재하여 국제적으로 앞선 기술을 보유하고 있다.

- ▣ 세계적으로 Boussinesq 방정식 기반의 토석류 해석 수치모형이 개발된 사례는 없기 때문에 본 연구가 성공할 경우 토석류 수치해석과 관련하여 세계적인 기술력 향상에 큰 도움이 될 것이다.

<수리모형실험>

- ▣ 김기환 등(2008)이 국내에서 처음으로 수로 실험을 통해 토석류에 대한 모형실험을 수행하는 등 의미 있는 성과를 도출하였으나, 수로의 길이 60cm 가량인 소규모 실험이었다.
- ▣ 김영일과 백중철(2010)은 전체 길이 8m의 실험수로를 이용하고 경사각도를 조절하여 토석류에 대한 실험을 수행하였으며, 토석류의 함수비, 경사각 등에 따른 흐름특성을 규명하였다.
- ▣ 손신혜와 백중철(2013)은 길이 약 820m의 실험유역에서 실규모 실험을 수행하여, 토석류의 수위와 수직 응력, 연행작용 등을 규명하는 큰 성과를 도출하였으나, 실규모 실험의 한계로 다양한 조건에서는 실험을 수행하지 못하였다.
- ▣ 미국 USGS에서는 1994년부터 현재까지 90m 길이(경사 31도)의 대형 급경사 실험수로를 이용하여 수많은 토석류 흐름 실험을 수행하였으며, 이를 통해 토석류의 흐름특성에 대한 원천적인 이론 규명과 수치해석 모델 구축에 큰 역할을 수행하였다(Iverson 등, 2010). 그러나, 미국 USGS에서는 수로의 경사각 조절이 불가능하여, 31도의 고정된 경사에서만 실험이 수행되었다.
- ▣ 본 연구에서 국토교통과학기술진흥원이 국토교통연구인프라사업의 일환으로 건설한 “대형 수리모형 실험시설”의 길이 30m 고정식 급경사수로를 이용하여 토석류 흐름특성에 관한 연구를 수행하려 한다(그림 3 참조).
- ▣ 기존의 국내에서 수행한 실험에 비해 수로의 길이가 길기 때문에 토석류의 수위, 전파 속도, 충격력, 유출 형상 등에 대해 보다 정밀한 실험이 가능하다.
- ▣ 미국 USGS 수로와는 달리 경사각 조절이 가능하기 때문에 보다 다양한 조건에서 양질의 토석류 관련 실험 Data 수집이 가능하다.
- ▣ 본 실험을 통한 Raw Data는 국토교통인프라운영원의 Data 공유 시스템(그리드시스템)을 통해 모두 공개할 예정으로 향후 후속연구나 응용연구 수행 및 수치해석모델 검증을 위한 Data로 활용이 가능하다.



<실험수로 조감도>



<구축된 고정식 급경사수로>

그림 3. 수리모형실험을 위한 고정식 급경사수로

- 시의성 및 중요성

- ▣ 현재까지 국내에서 토석류와 관련하여 매우 많은 연구가 수행되었으며, 수많은 의미 있는 연구 결과들이 도출되었다.
- ▣ 국내에서 수행된 대부분의 토석류 관련 연구들은 해외에서 주로 수행된 기초연구 결과를 이용한 응용연구(토석류 피해 발생예측, 위험지도 작성, 토석류 방지 구조물 개발 등)가 대부분이다.
- ▣ 따라서, 국내에서도 토석류와 관련하여 자체적인 기초연구를 수행하여, 국내 여건에 맞는 토석류의 특성과 관련된 기술력 축적이 시급한 실정이다.
- ▣ 본 연구를 통해 개발되는 Boussinesq 방정식 기반의 토석류 해석 수치모형은 실제 지형에서 토석류의 유동 특성과 피해범위를 예측하는데 매우 유용한 툴로 활용될 수 있다.
- ▣ 특히, 본 연구를 통해 도출된 토석류 관련 수리모형실험 데이터들이 기 수행된 다양한 토석류 관련 응용연구들의 기초자료로 다시 활용될 경우 기존에 수행된 연구들의 예측정확도 등 성과를 향상시키는데 큰 역할을 할 것으로 판단된다.
- ▣ 지구온난화에 따른 기후변화 등으로 우리나라뿐만 아니라 세계적으로 산사태 및 토석류에 의한

피해가 매년 크게 발생하고 있다.

- ▣ 본 연구를 통한 결과는 국내 토석류 관련 기술력(토석류 피해범위 예측) 향상과 더불어 **본 기술을 활용한 국내 설계회사의 해외 기술 컨설팅 등 사업 진출**에도 큰 도움이 될 것이다.

- 정부 국정과제와의 부합성

- ▣ 본 제안연구는 토석류의 거동특성에 대해 수치해석 및 수리모형실험을 통해 연구하는 기초연구로서 연구의 목적은 토석류에 의한 재해 피해 최소화에 있다.
- ▣ 따라서, 본 제안연구는 **현 정부의 100대 국정과제** 중 “내 삶을 책임지는 국가” 전략 1: 모두가 누리는 포용적 복지국가 46번 “**서민이 안심하고 사는 주거환경 조성**”과 부합하며 또한 전략 3 : 국민안전과 생명을 지키는 안심사회 55번 “**안전사고 예방 및 재난 안전관리의 국가책임체제 구축**”과 56번 “**통합적 재난관리체계 구축 및 현장 즉시대응 역량 강화**”와 부합된다.

3. 연구개발 범위

- 분산성 비선형 토석류 해석 수치모형 개발

- ▣ 선행연구 사례 조사 및 모형의 목표 성능 제시
- ▣ Boussinesq 방정식을 기반으로 토석류의 해석 지배방정식 유도
- ▣ 수치해석 소스 코드 작성 및 수치모형 구축
- ▣ 수치해석 수행 및 수리모형실험 결과와 비교를 통해 1차원 및 2차원 해석 결과 검증
- ▣ 과거 실제 산사태 사례 재현

- 토석류 거동특성 분석 수리모형실험 수행 및 Data 공개

- ▣ 국토교통과학기술진흥원에서 구축한 “대형 수리모형 실험시설” 고정식 급경사수로 활용(30 m(L) × 1.5 m(B) × 1.5 m(H))
 - ▣ 토사물성치(비중, 입도분포, 함수율 등), 바닥마찰 등에 따른 표고 변화, 바닥 지형의 침식, 토석류 전파속도, 유출시 작용력, 유출형상 등 계측
 - ▣ 토석류 실험을 위한 장치 제작 및 수리모형실험 조건 설정
 - ▣ 토석류 거동특성 분석을 위한 수리모형실험 수행
 - ▣ 실험 데이터 분석, 최종검증 및 시스템 업로드
 - ▣ 토석류 실험 가이드라인 작성
-

제2장. 국내외 기술 개발 현황

○ 국내 토석류 관련 연구 현황

- 2010년 이전의 연구들은 토석류 연구보다는 토질역학적 관점에서 산사태 발생원인(직선활동, 원호활동파괴)과 산사태에 의한 낙석 방지 구조물 등에 관한 연구들이 주로 수행되었다.
- 강릉원주대학교에서 2008-2012년에 수행된 “산지하천도로 호우피해방지를 위한 수층부 및 토석류 방재설계 선진화 기술개발”에서는 세부과제에서 길이 8 m의 실험수로를 이용한 토석류 기초실험과 길이 820 m 실험유역에서 실규모 실험을 수행하여 토석류의 유동특성에 대한 심도 깊은 연구를 수행하였다. 또한, 실험결과를 활용하여 천수방정식에 기초한 선형의 토석류 해석 수치해석 모델을 개발하였으나 1차원 모형이다.
- 한국건설기술연구원에서 2011-2012년에 수행한 “산사태 및 토석류 발생 유형별 피해저감 전략 수립 연구”는 토석류의 물리적 거동 특성보다는 토석류 피해를 저감하기 위한 국가 정책방향 설정에 관한 결과를 제시하였다.
- 강릉원주대학교에서 2012-2015년에 수행한 “사면붕괴의 토석류 전이 매커니즘 확인” 연구에서는 토질역학적 분석을 통해 산사태가 발생한 이후 토석류로 전이되는 매커니즘에 대해 연구를 수행하였다.

표 1. 국내에서 수행된 토석류 관련 연구현황

년도	사업명	전문기관	연구비 (백만원)	과제명	연구기관
2003 -2004	건설기술연구사업	KAIA	536	산사태 발생 예측 및 피해저감기술	강원대학교
2005 -2008	국토교통기술지역특성화사업	KAIA	8,310	낙석 및 산사태 방지를 위한 차세대 신기술 개발	상지대학교
2008 -2012	국토교통기술촉진연구사업	KAIA	9,646	산지하천도로 호우피해방지를 위한 수층부 및 토석류 방재설계 선진화 기술개발	강릉원주대학교
2010	-	산림청	482	토석류 발생특성과 피해규모 예측기법 개발	국립산림과학원
2011 -2012	국토교통기술촉진연구사업	KAIA	200	산사태 및 토석류 발생 유형별 피해저감 전략 수립 연구	한국건설기술연구원
2012 -2015	지역대학우수과 학자지원사업	한국연구재단	150	사면붕괴의 토석류 전이 매커니즘 확인	강릉원주대학교
2014 -2017	신진연구지원	한국연구재단	142	산사면 및 도심 급경사면에서의 선제적 재해 예방을 위한 토석류 유동해석 수치모형 개발	인천대학교
2018 -2019	국토교통기술촉진연구사업	KAIA	341	기계학습 및 분광기법이 적용된 토석류 거동특성을 고려한 증강현실 기반 최적 방재시설 설계기술 개발	한국과학기술원
2018 -2019	지역대학우수과 학자지원사업	한국연구재단	87	실제지형에서의 토석류 유동모형 개발을 통한 토석류 저감 수공구조물의 안정성 평가	충북대학교

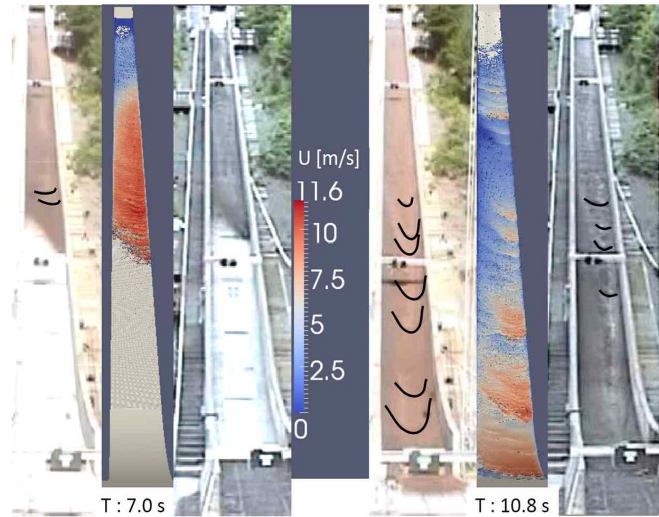
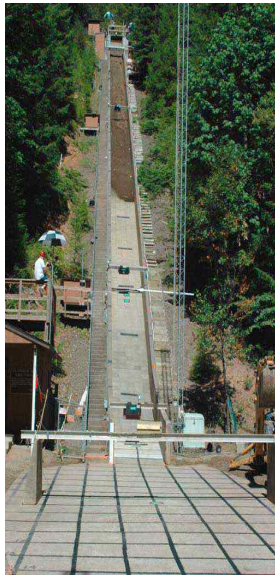
- 인천대학교에서 2014-2017년에 수행한 “산사면 및 도심 급경사면에서의 선제적 재해 예방을 위한 토석류 유동해석 수치모형 개발”에서는 Saint-Venant 방정식 기반의 토석류 수치해석 모델을 개발하여 제시하였다.
- 한국과학기술원의 2018-2019년에 수행한 “기계학습 및 분광기법이 적용된 토석류 거동특성을 고려한 증강현실 기반 최적 방재시설 설계기술 개발” 연구는 현재 진행 중인 연구로 확률론적 방법

과 AI를 이용하여 토석류 거동특성을 예측하는 기법을 개발하는 과제이다.

- 이승수와 황규관(2017)과 이승수 등(2017)은 3차원 전산유체 모델인 OpenFOAM을 이용하여 실제 토석류 발생사례에 대해 수치해석을 수행하였으나, 소스가 공개된 OpenFOAM은 해외 기술로 개발된 모형이라는 한계가 있다.
- 이광우 등(2016)은 3차원 유한요소해석모델인 ABAQUS(Ver. 6.13)를 이용하여 토석류의 전파, 유출 후 퇴적형상뿐만 아니라 지반침식 및 연행작용까지 고려하여 해석하였으나, 본 모델 역시 해외 기술로 개발된 모형이다.

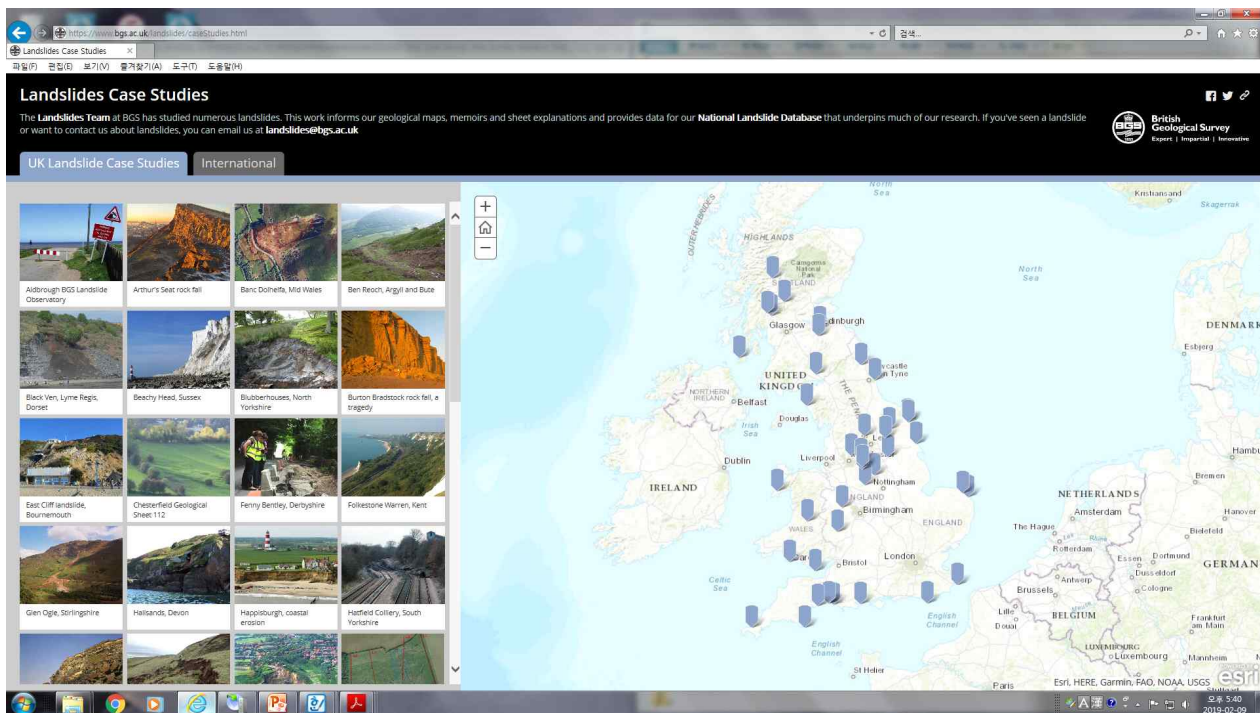
○ 국외 토석류 관련 연구 현황

- Takahashi et al.(1992)은 수리모형실험을 수행하여 토석류의 전파특성과 유출후 퇴적형상, 두께 등을 관측하였으며, Saint-Venant 방정식에 기반한 선형의 토석류 해석 수치모형을 개발하였다.
 - Iverson(1997)은 USGS의 95 m 길이의 대형 경사수로를 이용하여 토석류 수리모형실험을 수행하였으며, 이를 통해 토석류의 수위, 전파속도, 유출 후 퇴적형상 등에 대한 다양한 실험데이터를 제시하였다.
 - Major(1997)와 Major and Iverson(1999)은 USGS의 95 m 길이의 대형경사수로를 이용하여 토석류 유출 후 퇴적형상에 대해 집중적으로 실험을 수행하여 연구하였다.
 - Rickenmann et al.(2003)은 5 m 길이의 실험수로를 이용한 모형실험 및 현장 관측을 통해 토석류의 연행 및 침식작용에 대해 연구를 수행하였다.
 - Medina et al.(2008)은 천수방정식에 기반한 2차원 유한체적법 수치해석 모델을 이용하여 이베리아 반도 북동부에서 발생한 토석류를 모의하였으며, 수치해석 결과는 현장 관측자료와 대체로 일치하는 결과를 보인다.
 - Iverson et al.(2010)은 1994-2004년 USGS의 95 m 길이의 대형경사수로에서 수행된 실험 결과를 바탕으로 토석류의 두께, 압력, 유출부 퇴적형상 등에 대해 의미 있는 실험 데이터를 제시하였다.
 - Castro-Orgaz et al.(2014)은 비선형 효과와 비정수압의 고려가 가능한 Boussinesq 방정식 기반의 토석류 모델의 토석류 적용 가능성에 대해 세계 최초로 제시하였으나, 실제 적용가능한 모델 개발은 하지 못하였다.
 - Iverson and Ouyang(2015)은 토석류의 연행작용을 해석한 과거 다양한 수치해석 연구들의 관련 방정식들을 정리하였으며, 앞으로 해결해야 할 과제들을 제시하였다.
 - von Boetticher et al.(2016)은 3차원 오픈코드인 OpenFOAM을 이용하여 수치해석을 수행하였으며, 실험 결과와 비교를 통해 수치모델의 타당성을 검증하였다.
-



<USGS의 토석류 실험수로에 수행한 토석류 실험 사진(Iverson et al., 2010)>

<OpenFOAM을 이용한 수치해석 결과와 USGS 실험수로의 실험 결과 비교 (Boetticher et al., 2015)>



<영국 BGS의 토석류 case study 홈페이지>

그림 4. 토석류 관련 해외 연구 사례

○ 해외 선진국의 산사태 연구 내용

표 2. 해외 선진국의 산사태 연구 기관 및 내용

국가명	기관명	연구기간	주요 연구내용
미국	미국지질조사국 (USGS)	1990~	· 모형실험을 통한 토석류의 거동특성 분석 · 산사태 예측기법 및 예측체계 확립 · 실시간 산사태 모니터링 연구 · 대규모 모형실험을 통한 다양한 방재시스템 성능 검증
캐나다	캐나다지질조사국 (GSC)	1994~	· 지질재해 및 지질환경(GHEG) 프로그램
일본	방재과학기술연구소 (NIED)	1963~	· 종합방재, 설해방재 관련 연구
	방재연구소 (DPRI)	1951~	· 종합방재, 지반재해, 수재해 연구
영국	영국지질조사국 (BGS)	2007~	· 국가 산사태 데이터베이스 구축 · 산사태 예측을 위한 수치해석 모델 개발 · 현장조사를 통한 산사태 사례 연구

○ 토석류 분야의 현재 국내 기술력

- 산림청에서는 산사태 정보시스템을 구축하여 산사태 예측정보, 산사태 위험지도 등의 정보를 제공하는 등 산사태와 관련된 응용 및 실용화 연구에서는 해외 선진국과 비교해서 크게 뒤처지지 않는 수준이다.
- 반면, 산사태 또는 토석류와 관련된 실험은 비교적 소규모로만 수행되었으며, 토석류를 모의할 수 있는 수치해석 모델 역시 현재는 천수방정식이나 Saint-Venant 방정식에 기반한 선형 2차원 모델을 자체 기술력으로 제작할 수 있는 수준이다.
- 특히 토석류와 관련된 실험 연구에서는 1990년부터 USGS에서 대규모 토석류 실험을 수행한 미국(수리실험 최고 기술력 보유국)에 비해 약 30년이 뒤쳐진 상황이며, 토석류와 관련된 수치해석 연구의 경우 토석류 수치모델 개발 능력에 있어서는 2015년 3차원 모델을 개발하여 운영하는 EU(수치해석 최고 기술력 보유국)에 비해 약 20년이 뒤진 상황이다.

표 3. 토석류 분야의 현재 국내 기술력 및 과제 완료시 기대 기술개발 수준

기술내용	현재 기술수준			과제 완료시 기술수준		
	기술 수준 (%)	기술 격차 (년)	비고	기술 수준 (%)	기술 격차 (년)	비고
토석류 실험을 통한 기초 이론 정립	20	30	도입	50	15	성숙
토석류 수치해석 기술	40	20	도입	70	10	성숙

제3장. 연구수행내용 및 성과

1. 토석류 수치해석모델 개발

▣ 토석류의 이론적 기반 및 수치해석 기법에 대한 기존연구 사례 등 조사

기존의 토석류 해석 이론과 수치해석 기법을 조사 분석하여 본 연구에서 추구하는 이론 및 수치해의 타당성, 정확성을 확인하고, 개선 사항을 발견하였다.

▣ Boussinesq 방정식 기반의 토석류 거동 해석을 위한 지배방정식 유도 : 바닥의 침식 무시

x 축을 바닥 아래 수평면에 두고, 토석의 바닥과 표면의 수직 좌표를 각각 b 와 s 로 두고, 토석의 높이를 $h(=s-b)$ 로 두었다(그림 5 참조). 토석류에 적용되는 무차원 연속방정식 (1)과 바닥에서의 운동학적 경계조건식 (2), 표면에서의 운동학적 경계조건식 (3), 표면에서의 동역학적 경계조건식 (4)는 다음과 같다.

$$\mu^2 \nabla^2 \phi + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0, \quad b \leq z \leq s \quad (1)$$

$$\mu^2 \nabla \phi \cdot \nabla b - \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0, \quad z = b \quad (2)$$

$$\mu^2 \left(\frac{\partial s}{\partial t} + \epsilon \nabla \phi \cdot \nabla s \right) - \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0, \quad z = s \quad (3)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \alpha \phi + \frac{s}{\epsilon} + \frac{F}{\epsilon} + \frac{\epsilon}{2} \left[(\nabla \phi)^2 + \frac{1}{\mu^2} \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)^2 \right] = 0, \quad z = s \quad (4)$$

위 식에서 ϕ 는 속도포텐셜이고, $\nabla (= (\partial/\partial x, \partial/\partial y))$ 는 수평미분연산자이고, $\mu(=h_0/l_0)$ 는 분산성 매개변수이고, $\epsilon(=a/h_0)$ 는 비선형성 매개변수이고, α 와 $f(=\nabla_3 F)$ 는 각각 바닥마찰과 토석의 내부마찰에 의한 에너지감쇠계수로 다음과 같이 표현할 수 있다(Paik, 2015).

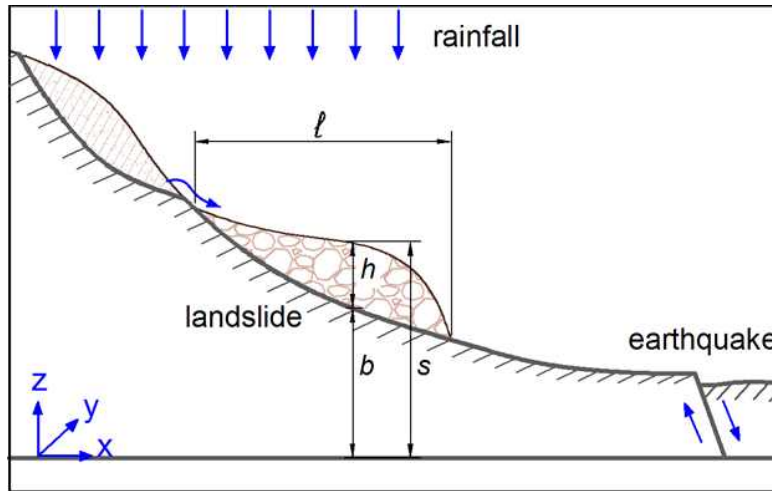


그림 5. 토석류 해석 개념도: 바닥의 침식 무시

$$\alpha = \frac{gn^2|v|}{(s-b)^{4/3}} \quad (5)$$

$$f = \mu \cos [\tan^{-1}(\nabla b)] = \mu \cos \theta \quad (6)$$

속도포텐셜을 다음과 같이 멱급수로 표현하였다.

$$\phi(x, y, z, t) = \sum_{n=0}^{\infty} [z - b(x, y)]^n \phi_n(x, y, t) \quad (7)$$

식 (7)을 바닥경계조건식 (2)에 대입하고, $n = 0, 1, 2, \dots$ 에 정리하면 다음 관계식을 얻을 수 있다.

$$\phi = \phi_0 + \mu^2 \left[(z-b) \nabla b \cdot \nabla \phi_0 - \frac{(z-b)^2}{2} \nabla^2 \phi_0 \right] + O(\mu^4) \quad (8)$$

식 (1)을 수직 방향으로 적분하면 다음과 같이 연속방정식을 구할 수 있다.

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \nabla \cdot [(s-b) \bar{v}] = 0 \quad (9)$$

위 식에서 $\bar{v}$ 는 수직 방향으로 평균한 수평 방향 유속으로 다음과 같다.

$$\bar{v} = \frac{1}{(s-b)} \int_b^s v \, dz \quad (10)$$

식 (8)을 표면에서의 동역학적 경계조건식 (4)에 대입하고, ∇ 을 취하면 다음과 같이 운동방정식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + (\bar{v} \cdot \nabla) \bar{v} + g \nabla s + \alpha \bar{v} + gf + \frac{(s-b)}{2} \left[\nabla \left(\nabla b \cdot \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} \right) - \nabla b \left(\nabla \cdot \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} \right) \right] \\ - \frac{(s-b)^2}{3} \nabla \left(\nabla \cdot \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} \right) - (s-b) \nabla (s-b) \left(\nabla \cdot \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} \right) = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

식 (11)에서 분산항을 무시하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + (\bar{v} \cdot \nabla) \bar{v} + g \nabla s + \alpha \bar{v} + gf = 0 \quad (12)$$

식 (9), (12)가 토석류를 모의하는 천수방정식이고 Saint-Venant 식과 동일함. 식 (9), (12)이 토석류를 모의하는 Peregrine(1967) 유형의 Boussinesq 방정식임. 이 식은 천해에서는 분산성 매개변수 $\mu (= h_0/l_0)$ 가 작은 천해에서 비교적 정확하지만, 그 값이 1에 가깝게 큰 심해에서 정확성이 떨어지는 한계가 있다. 심해에서도 정확성을 확보하기 위해 다음 과정을 거침. 선형 비분산성 운동방정식은 다음과 같다.

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \alpha \right) \bar{v} = -g \nabla s + O(\epsilon, \mu^2) \quad (13)$$

식 (12)를 이용하면 다음 관계식을 얻을 수 있다.

$$-\gamma \left\{ \nabla \left[\nabla b \cdot \left(\frac{\partial}{\partial t} + \alpha \right) \bar{v} \right] + \nabla [\nabla b \cdot (g \nabla s)] \right\} = O(\epsilon, \mu) \quad (14)$$

$$-\gamma \left\{ \nabla b \left[\nabla \cdot \left(\frac{\partial}{\partial t} + \alpha \right) \bar{v} \right] + \nabla b [\nabla \cdot (g \nabla s)] \right\} = O(\epsilon, \mu) \quad (15)$$

$$-\gamma \left\{ \nabla \left[\nabla \cdot \left(\frac{\partial}{\partial t} + \alpha \right) \bar{v} \right] + \nabla [\nabla \cdot (g \nabla s)] \right\} = O(\epsilon, \mu) \quad (16)$$

식 (14), (15), (16)을 운동방정식 (11)에 대입하면 다음과 같은 확장형 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \alpha \bar{v} + g \nabla s + gf + \bar{v} \cdot \nabla \bar{v} + \left(\frac{1}{2} + \gamma \right) (s-b) \left\{ \nabla \left[\nabla b \left(\frac{\partial}{\partial t} + \alpha \right) \bar{v} \right] + \nabla b \left[\nabla \cdot \left(\frac{\partial}{\partial t} + \alpha \right) \bar{v} \right] \right\} \\ - \left(\frac{1}{3} + \gamma \right) (s-b)^2 \nabla \left[\nabla \cdot \left(\frac{\partial}{\partial t} + \alpha \right) \bar{v} \right] + \gamma g \{ (s-b) [\nabla (\nabla b \cdot \nabla s) + \nabla b \nabla^2 s] - (s-b)^2 \nabla (\nabla^2 s) \} = 0 \end{aligned} \quad (17)$$

위 식에서 $\gamma (= 1/15)$ 는 Boussinesq 방정식의 적용성을 심해까지 확장하기 위해 사용된 매개변수이다

(Madsen and Sorensen, 1992). 식 (9),(17)이 토석류를 모의하면서 심해까지 정확성이 확보되는 (b,s) 좌표의 확장형 Boussinesq 방정식이다. 이 식을 통상적인 (h,ζ) 좌표의 확장형 Boussinesq 방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \nabla \cdot [(h + \zeta)\bar{v}] = 0 \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \alpha \bar{v} + g \nabla \zeta + gf + \bar{v} \cdot \nabla \bar{v} + \frac{h^2}{6} \nabla \left[\nabla \cdot \left(\frac{\partial}{\partial t} + \alpha \right) \bar{v} \right] \\ - \left(\frac{1}{2} + \gamma \right) h \nabla \left\{ \nabla \cdot \left[h \left(\frac{\partial}{\partial t} + \alpha \right) \bar{v} \right] \right\} - \gamma gh \nabla [\nabla \cdot (h \nabla \zeta)] = 0 \end{aligned} \quad (19)$$

여기서 h 는 평균수심이고, ζ 는 평균수면을 기준으로 한 수면변위이다.

▣ 수평 1차원 천수방정식 수치모형 개발

Hybrid 유한체적 유한차분법을 사용하여 지배방정식의 시간미분항을 차분하였다. 유한체적법으로는 이류항을 차분하기 위하여 근사적인 Riemann solver를 사용하였다. 천수방정식 (9),(12)를 수평 1차원 보존형 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F(U)}{\partial x} = H(U) \quad (20)$$

위 식에서

$$U = \begin{bmatrix} s - b \\ (s - b)u \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$F(U) = \begin{bmatrix} (s - b)u \\ (s - b)u^2 + \frac{1}{2}g(s - b)^2 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$H(U) = \begin{bmatrix} 0 \\ g(s - b) \left(S_o - \mu \cos \theta - \frac{n^2 u |u|}{(s - b)^{4/3}} \right) \end{bmatrix} \quad (23)$$

식 (20)의 시간미분항을 분리법(splitting method)을 사용하여 차분하였다. 첫 번째 단계에서 식 (20)의 $H(U)$ 를 제외하여 다음과 같이 차분하였다.

$$U_i^p = U_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} [F_{i+1/2} - F_{i-1/2}] \quad (24)$$

위 식에서 n 은 현재의 시간 단계를 의미하고, p 는 미래의 $(n+1)$ 번째 시간 단계를 의미함. 첫 번째 단계에서 연속방정식으로부터 토석 표면의 수직 좌표 s^{n+1} 을 구함. 두 번째 단계에서 식 (20)의 $\partial F(U)/\partial x$ 를 제외하여 다음과 같이 차분하였다.

$$\frac{dU}{dt} = H(U^p) \quad (25)$$

식 (20)의 운동방정식에서 $P = (s - b)u$ 를 정의하면 식 (25)를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{dP}{dt} = g(s^p - b) \left(S_o - \mu \cos \theta - \frac{n^2 P |P|}{(s^p - b)^{10/3}} \right) \quad (26)$$

마찰항으로 인한 수치적인 불안정성을 해결하기 위해 음해법을 사용하여 식 (26)을 다음과 같이 차분

하였다(Nickovic et al., 2010; Paik, 2015).

$$\frac{P^{n+1} - P^p}{\Delta t} = E^p - F^p P^{n+1} \quad (27)$$

위 식에서

$$E^p = g(s^p - b)(S_o - \mu \cos \theta) \quad (28)$$

$$F^p = \frac{gn^2 |P^p|}{(s^p - b)^{7/3}} \quad (29)$$

두 번째 단계에서의 식 (25)-(29)에서 p 는 현재의 n 번째 시간 단계를 의미한다.

식 (20)의 공간미분항을 차분하기 위해서 TVD(즉, Total Variation Diminishing) 형태의 WAF(즉, Weighted Average Flux) 방법을 사용하였다. 식 (20)에 있는 이류항인 F 의 i 지점과 $i+1$ 지점 사이의 값을 다음과 같이 계산하였다.

$$F_{i+1/2} = \frac{1}{2}(F_i + F_{i+1}) - \frac{1}{2} \sum_{k=1}^2 \text{sign}(c^k) A_{i+1/2}^k \Delta F_{i+1/2}^k \quad (30)$$

여기서 $c^{(k)} (= S^{(k)} \Delta t / \Delta x)$ 는 파속 $S^{(k)}$ 과 관련된 Courant 수이고, $\Delta F_{i+1/2}^k$ 는 i 지점과 $i+1$ 지점 사이의 flux jump로 다음과 같이 구하였다.

$$\Delta F_{i+1/2}^k = F_{i+1/2}^{k+1} - F_{i+1/2}^k \quad (31)$$

또한 $A_{i+1/2}^k$ 는 WAF limiter 함수로 다음과 같이 표현하였다.

$$A_{i+1/2}^k = 1 - (1 - |c_k|) B(r^{(k)}) \quad (32)$$

여기서 $r^{(k)}$ 는 격자점 간의 차이 대비 풍상기법 사용 시 격자점 간의 차이의 비로서 다음과 같이 표현하였다.

$$r^{(k)} = \begin{cases} \frac{q_i^n - q_{i-1}^n}{q_{i+1}^n - q_i^n}, & c_k > 0 \\ \frac{q_{i+2}^n - q_{i+1}^n}{q_{i+1}^n - q_i^n}, & c_k < 0 \end{cases} \quad (33)$$

위 식에서 $q (= s - b)$ 는 토석의 높이이다. 또한 $B(r^{(k)})$ 는 limiter 함수로서 다음과 같이 van Leer limiter 함수를 사용하였다(Toro, 2001).

$$B(r) = \frac{2r}{1+r} \quad (34)$$

또한 flux 항 $F_{i+1/2}$ 를 표현하는 방법으로 다음과 같이 HLL approximate Riemann solver를 사용하였다.

$$F_{i+1/2}^{HLL} = \begin{cases} F_L, & \text{if } 0 \leq S_L \\ \frac{S_R F_L - S_L F_R + S_R F_L (U_R - U_L)}{S_R - S_L}, & \text{if } S_L \leq 0 \leq S_R \\ F_R, & \text{if } S_R \leq 0 \end{cases} \quad (35)$$

여기서 S_L , S_R 은 각각 왼쪽, 오른쪽 격자점에서의 파속 추정치(wave speed estimate)로 다음과 같이 표현하였다.

$$S_L = u_L - a_L q_L \quad (36)$$

$$S_R = u_R + a_R q_R \quad (37)$$

여기서 a_L , a_R 는 각각 왼쪽, 오른쪽 격자점에서의 파속(wave celerity)으로 다음과 같이 표현하였다.

$$a_K = \sqrt{g(s_K - b_K)}, \quad (K = L, R) \quad (38)$$

또한, q_L , q_R 을 다음과 같이 표현하였다.

$$q_K = \begin{cases} \sqrt{\frac{(h_* + h_K) h_*}{2 h_K^2}}, & \text{if } h_* > h_K \\ 1, & \text{if } h_* \leq h_K \end{cases} \quad (K = L, R) \quad (39)$$

여기서

$$h_* = \frac{\left[\frac{(h_L + a_K)}{2} + \frac{(u_L - u_K)}{4} \right]^2}{g} \quad (40)$$

토석이 있는 구간과 토석이 없는 구간의 경계, 즉 wet/dry bed 조건에서 S_L , S_R 을 다음과 같이 표현하였다.

$$S_L = \begin{cases} u_R - 2a_R, & \text{if } (h_L = 0, h_R > 0) \\ u_L - a_L, & \text{if } (h_L > 0, h_R = 0) \end{cases} \quad (41)$$

$$S_R = \begin{cases} u_L + 2a_L, & \text{if } (h_L > 0, h_R = 0) \\ u_R + a_R, & \text{if } (h_L = 0, h_R > 0) \end{cases} \quad (42)$$

본 연구에서 사용하는 수치해석기법이 양해법으로 표현되기 때문에 수치적인 안정성을 확보하기 위해 Courant 수의 상한값을 정할 필요가 있다. Courant 수를 정하는 데 있어서 토석류의 속도 u 뿐만 아니라 마찰에 의한 소위 마찰속도 u_f 를 포함할 필요가 있다. 따라서, Courant 수를 다음과 같이 표현하였다(Paik, 2015).

$$CFL = [\max(|u|, u_f) + c] \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (43)$$

여기서 파속 c 와 마찰속도 u_f 는 다음과 같이 표현하였다.

$$c = \sqrt{g(s - b)} \quad (44)$$

$$u_f = \sqrt{g(s-b) \left[\frac{n^2 u^2}{(s-b)^{4/3}} + \mu \cos \theta \right]} \quad (45)$$

따라서, 수치해석을 하는 각 경우에 수치적인 안정성이 확보되는 Courant 수(즉, CFL)을 정한 후 격자간격을 다음과 같이 정하였다.

$$\Delta t = CFL \frac{\Delta x}{\max(|u|, u_f) + c} \quad (46)$$

▣ 수평 1차원 확장형 Boussinesq 방정식 수치모형 개발

Hybrid 유한체적 유한차분법을 사용하여 지배방정식의 시간미분항을 차분하였다. 유한체적법으로는 이류항을 차분하기 위하여 근사적인 Riemann solver를 사용하였다. 확장형 Boussinesq 방정식 (9),(17)을 수평 1차원 보존형 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F(U)}{\partial x} = H(U) \quad (47)$$

위 식에서

$$U = \begin{bmatrix} s \\ U^* \end{bmatrix} \quad (48)$$

$$F(U) = \begin{bmatrix} (s-b)u \\ (s-b)u^2 + \frac{1}{2}g(s-b)^2 \end{bmatrix} \quad (49)$$

$$H(U) = \begin{bmatrix} 0 \\ g(s-b) \left(S_o - \mu \cos \theta - \frac{n^2 u |u|}{(s-b)^{4/3}} \right) + \psi \end{bmatrix} \quad (50)$$

$$U^* = (s-b)u + \left(\frac{1}{2} + \gamma \right) (s-b)^2 b_{xx} u + 2 \left(\frac{1}{2} + \gamma \right) (s-b)^2 b_x u_x - \left(\frac{1}{3} + \gamma \right) (s-b)^3 u_{xx} \quad (51)$$

$$\begin{aligned} \psi = & -2 \left(\frac{1}{2} + \gamma \right) b_{xx} (s-b)u [(s-b)u]_x - 4 \left(\frac{1}{2} + \gamma \right) b_x (s-b)u_x [(s-b)u]_x \\ & + 3 \left(\frac{1}{3} + \gamma \right) (s-b)^2 u_{xx} [(s-b)u]_x - \left(\frac{1}{2} + \gamma \right) \alpha (s-b)^2 (b_{xx} u + 2b_x u_x) \\ & + \left(\frac{1}{3} + \gamma \right) \alpha (s-b)^3 u_{xx} - \gamma g (s-b)^2 (b_{xx} s_x + 2b_x s_{xx}) + \gamma g (s-b)^3 s_{xxx} \end{aligned} \quad (52)$$

식 (47)의 시간미분항을 3차의 Runge-Kutta 방법을 사용하여 다음과 같이 차분하였다(Dutykh et al., 2011).

$$1 \text{ 단계: } U_i^{n,1} = U_i^n \quad (53)$$

$$2 \text{ 단계: } U_i^{n,2} = U_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (F_{i+1/2}^{n,1} - F_{i-1/2}^{n,1}) + \Delta t H_i^{n,1} \quad (54)$$

$$3 \text{ 단계: } U_i^{n,3} = U_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left[\frac{1}{4} (F_{i+1/2}^{n,1} - F_{i-1/2}^{n,1}) + \frac{1}{4} (F_{i+1/2}^{n,2} - F_{i-1/2}^{n,2}) \right] + \Delta t \left(\frac{1}{4} H_i^{n,1} + \frac{1}{4} H_i^{n,2} \right) \quad (55)$$

$$\begin{aligned} \text{최종단계: } U_i^{n+1} = & U_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left[\frac{1}{6} (F_{i+1/2}^{n,1} - F_{i-1/2}^{n,1}) + \frac{1}{6} (F_{i+1/2}^{n,2} - F_{i-1/2}^{n,2}) + \frac{2}{3} (F_{i+1/2}^{n,3} - F_{i-1/2}^{n,3}) \right] \\ & + \Delta t \left(\frac{1}{6} H_i^{n,1} + \frac{1}{6} H_i^{n,2} + \frac{2}{3} H_i^{n,3} \right) \end{aligned} \quad (56)$$

식 (47)의 공간미분항을 차분하기 위해서 천수방정식에서 사용한 방법(즉, 식 (30)부터 식 (46)의 과정)을 사용하였다. 즉, TVD(즉, Total Variation Diminishing) 형태의 WAF(즉, weighted average flux) 방법을 사용하였다.

▣ 수평 1차원 수치모형 검증: 바닥 침식 무시

- 바닥 침식이 발생하지 않는 경우 수평 1차원 수치모형 검증 1: 댐 개방 후 물의 전파 실험 (Schoklitsch, 1917)에서 수면의 공간분포 비교

수심이 7.4cm 인 댐을 갑자기 열었을 때 댐 밖의 건조한 바닥의 영역으로 물이 전파하는 현상을 천수방정식과 Boussinesq 방정식을 사용하여 수치 모의하였다. 계산영역은 18m이고, 댐의 벽은 $x = 10\text{m}$ 지점에 존재한다. Manning의 바닥조도계수를 $n = 0.01\text{m}^{-1/3}\text{s}$ 로 두고, 격자간격을 $\Delta x = 2.5\text{cm}$ 로 두고, 시간단계 Δt 를 정하기 위해 CFL=0.1로 두었다. 댐 개방 후 $t = 3.75\text{s}$, 9.40s 시간에 수면의 공간분포를 측정하여 수치실험결과와 수리모형실험자료를 그림 6에 비교하였다. 댐의 바깥에는 물이 없는 건조한 곳이 존재하고 물이 있는 젖은 곳과의 경계에 wet/dry의 불연속이 발생하였다. 천수방정식과 Boussinesq 방정식의 두 결과는 거의 일치하고 또한 실험자료와도 유사하게 나왔다. 이는 천수방정식과 Boussinesq 방정식이 wet/dry의 수치적인 불연속을 잘 극복하였고, Boussinesq 방정식에서 고려한 분산항의 효과는 미미함을 의미한다.

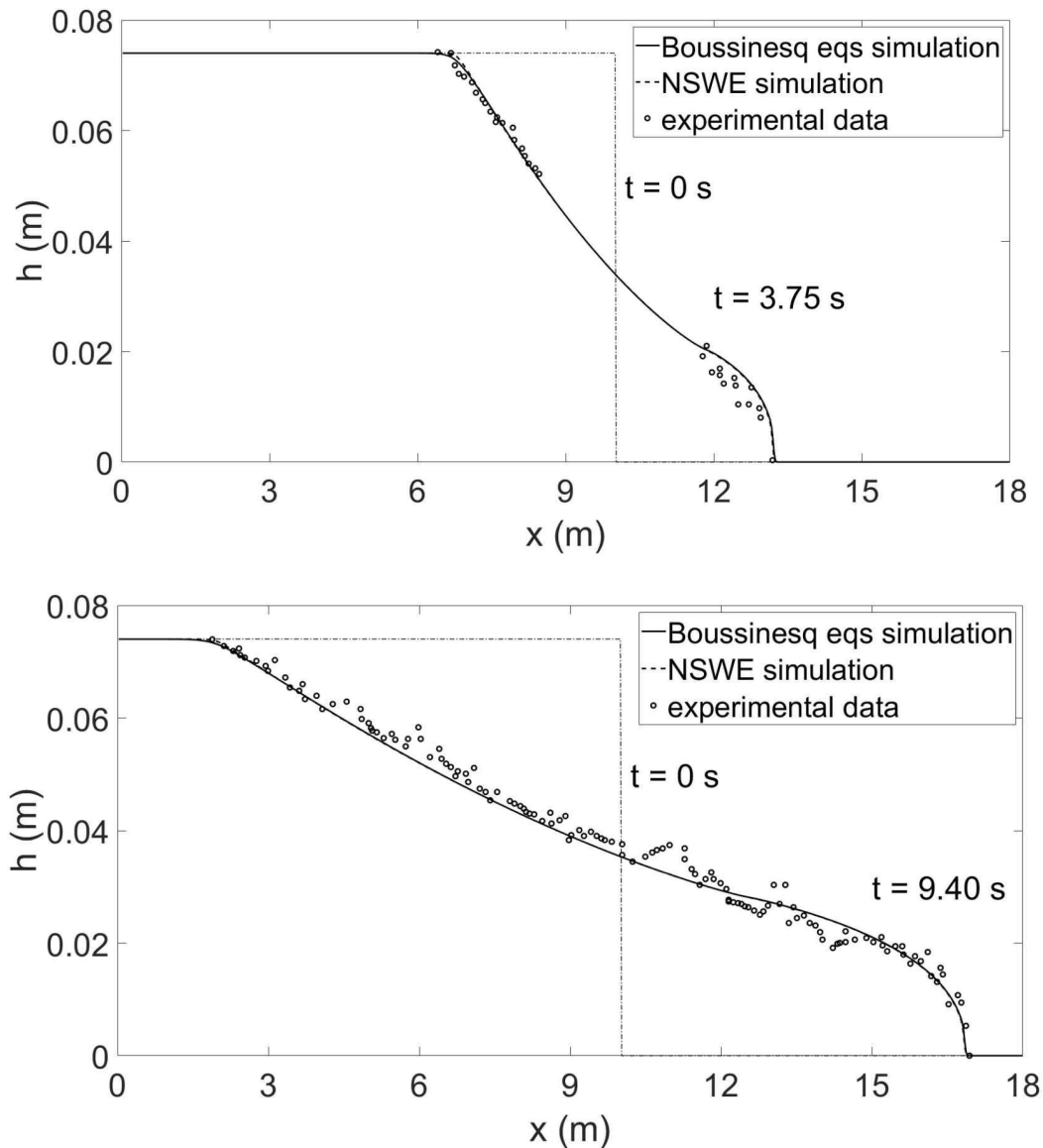


그림 6. 댐 개방 후 수면 공간분포의 수치실험자료와 모형실험자료(Schoklitsch, 1917)의 비교.

- 바닥 침식이 발생하지 않는 경우 수평 1차원 수치모형 검증 2: 댐 개방 후 물의 전파 실험(Feizi Khankandi et al., 2012)에서 수면의 시계열 비교

수심이 40cm 인 댐을 갑자기 열었을 때 댐 밖의 건조한 바닥의 영역으로 물이 전파하는 현상을 천수 방정식과 Boussinesq 방정식을 사용하여 수치 모의하였다. 계산영역은 12.8m이고, 댐의 벽은 $x = 3.5\text{m}$ 지점에 존재한다(그림 7 참조). Manning의 바닥조도계수를 $n = 0.01\text{m}^{-1/3}\text{s}$ 로 두고, 격자간격을 $\Delta x = 0.05\text{m}$ 로 두고, 시간단계 Δt 를 정하기 위해 CFL=0.9로 두었다. 댐의 안쪽의 2개 지점과 댐의 바깥쪽 4개 지점에 수면의 시계열을 측정하여 수치실험결과와 수리모형실험자료를 그림 8에 비교하였다. 댐의 바깥에는 물이 없는 건조한 곳이 존재하고 물이 있는 젖은 곳과의 경계에 wet/dry의 불연속이 발생하였다. 천수방정식과 Boussinesq 방정식의 두 결과는 거의 일치하고 또한 실험자료와도 유사하게 나왔다. 이는 천수방정식과 Boussinesq 방정식이 wet/dry의 수치적인 불연속을 잘 극복하였고, Boussinesq 방정식에서 고려한 분산항의 효과는 미미함을 의미한다.

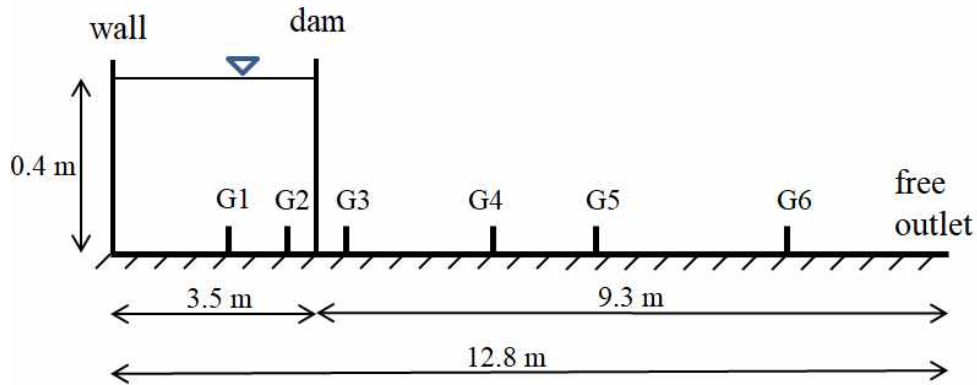
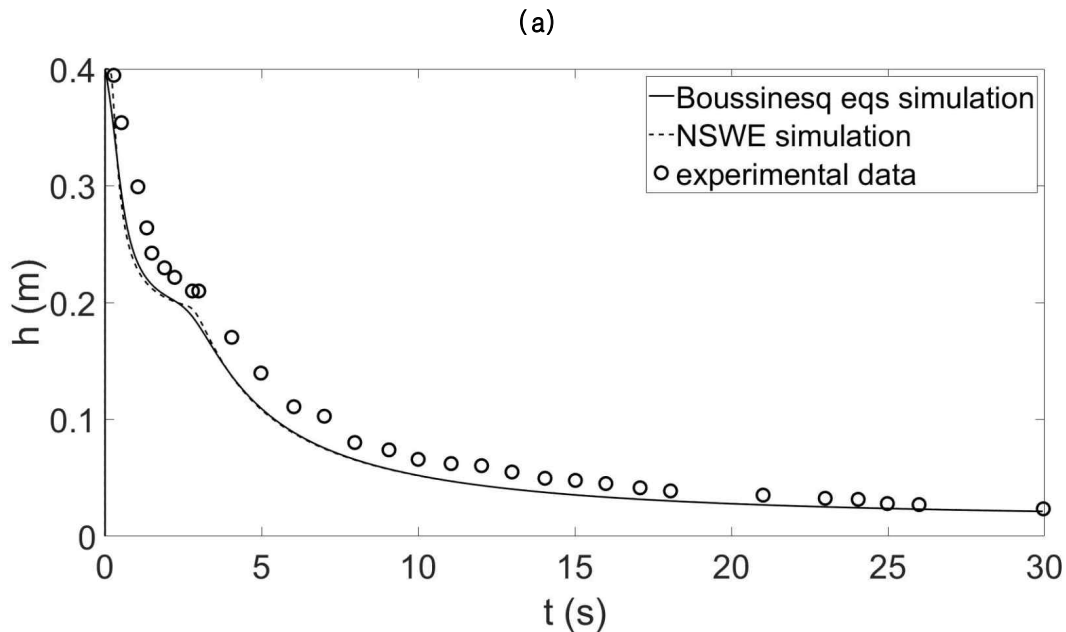
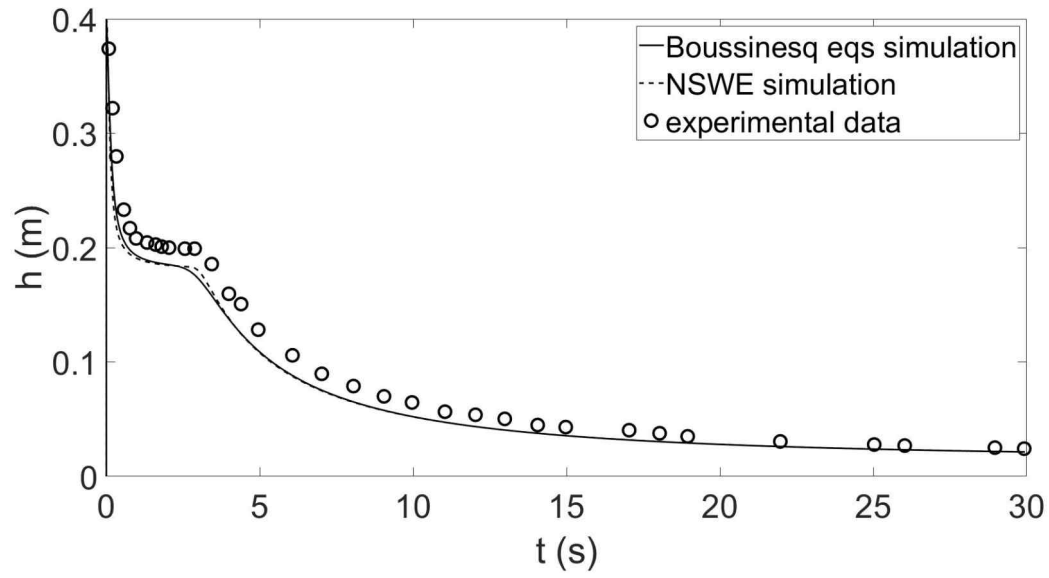


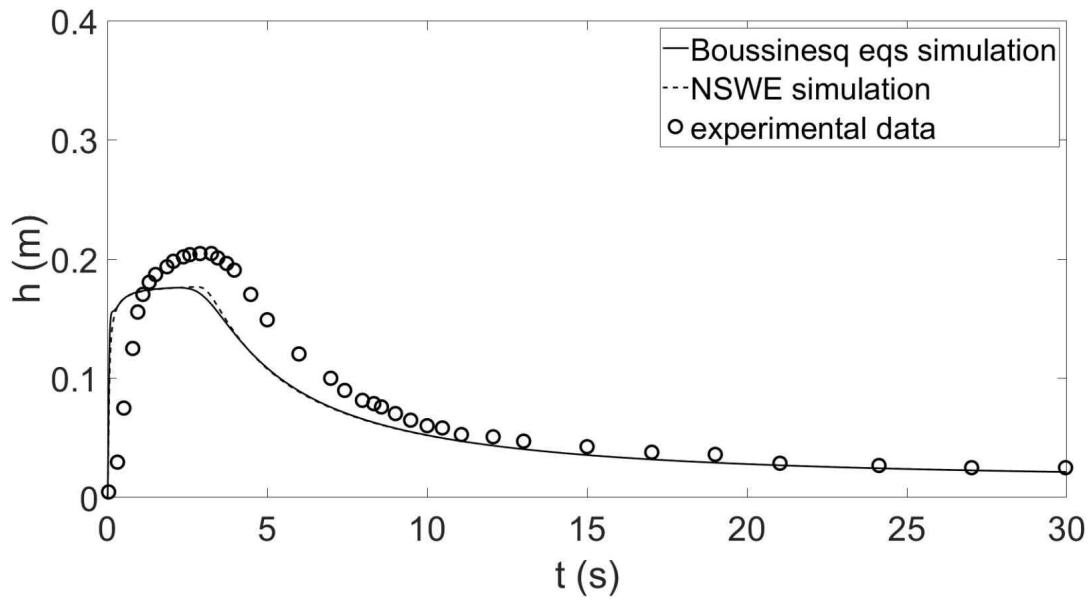
그림 7. 댐 개방 후 수면 시계열 분석을 위한 실험 영역 (Feizi Khankandi et al., 2012).



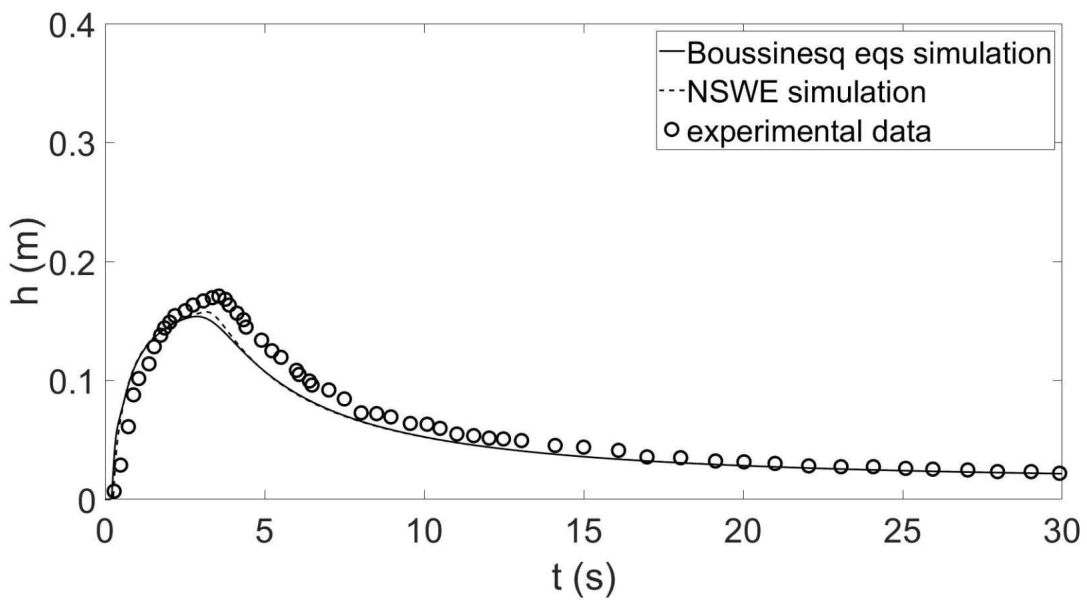
(b)



(c)



(d)



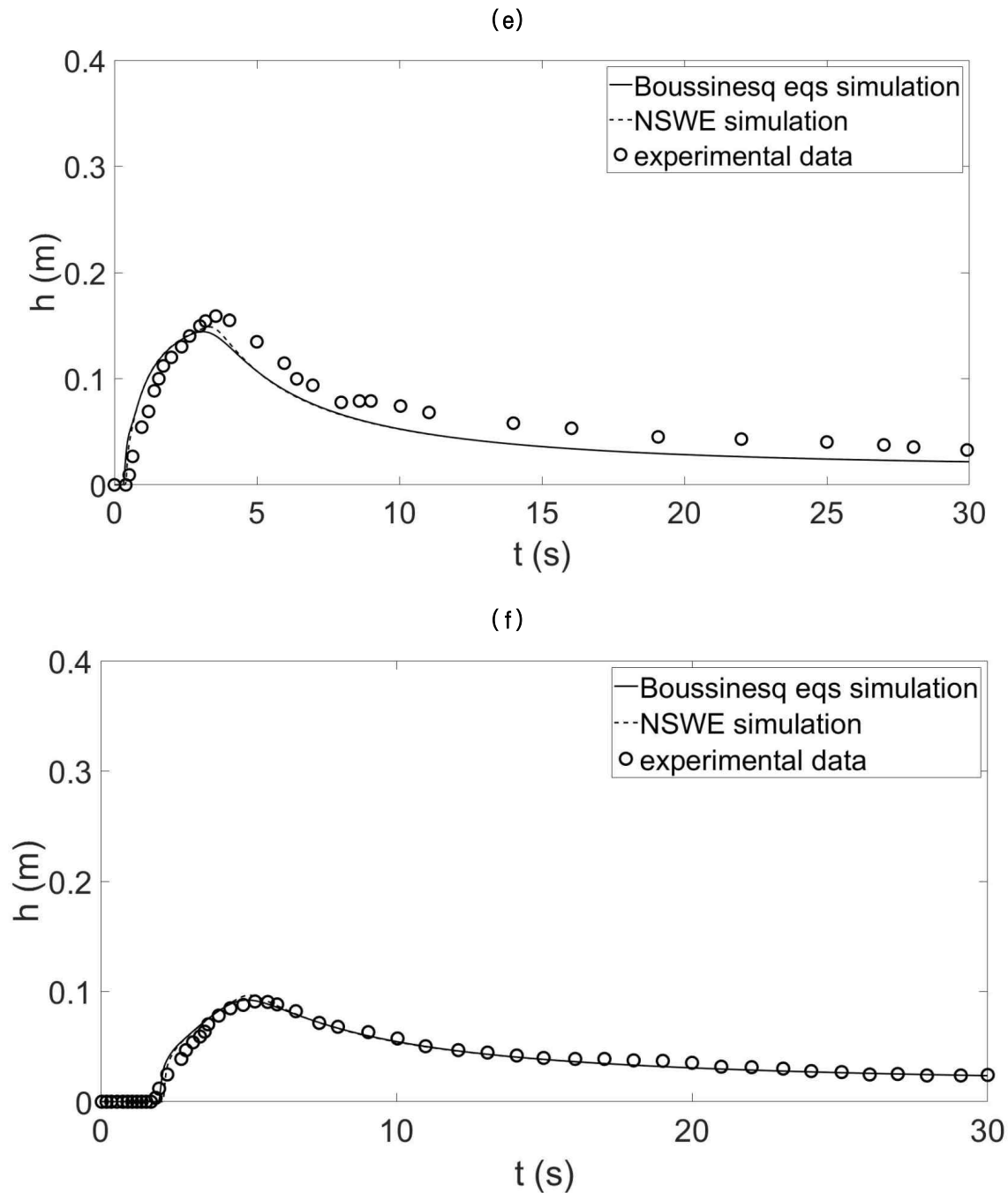


그림 8. 댐 개방 후 수면 시계열의 수치실험자료와 모형실험자료(Feizi Khankandi et al., 2012)
 비교: (a) Gauge 1, (b) Gauge 2, (c) Gauge 3, (d) Gauge 4, (e) Gauge 5, (f) Gauge 6.

- 바닥 침식이 발생하지 않는 경우 수평 1차원 수치모형 검증 3: 댐 개방 후 물의 전파 실험(Do Carmo et al., 1993)에서 수면의 시계열 비교

수심이 9.9cm인 댐을 갑자기 열었을 때 댐 밖의 수심이 5.1cm의 영역으로 물이 전파하는 현상을 천수방정식과 Boussinesq 방정식을 사용하여 수치 모의하였다. 계산영역은 7.5m이고, 댐의 벽은 계산 영역의 가운데 있다(그림 9 참조). Manning의 바닥조도계수를 $n = 0.026 m^{-1/3} s$ 로 두고, 격자간격을 $\Delta x = 0.01m$ 로 두고, 시간단계 Δt 를 정하기 위해 CFL=0.25로 두었다. 댐의 안쪽의 1개 지점과 댐의 바깥쪽 3개 지점에 수면의 시계열을 측정하여 수치실험결과와 수리모형실험자료를 그림 10에 비교하였다. 전 계산영역에 물이 있어서 wet/dry의 수치적인 불연속이 발생하지 않았다. 댐 안에 위치한 Gauge 1에서 천수방정식과 Boussinesq 방정식이 거의 일치하지만 댐 밖에 위치한 Gauge 2,3,4에서 Boussinesq 방정식은 분산항의 영향으로 수면이 요동치는 현상을 잘 재현하지만 천수방정식은 분산항이 없어서 이를 재현하지 못하였다. 따라서, 분산항은 물이 존재하는 구간 즉, wet zone에 그 효과가 있지만 물이 없는 dry zone에서는 거의 없음을 알 수 있다. 산사태 발생 시 토석류는 wet zone에

서 dry zone으로 전파하기 때문에 Boussinesq 방정식이 천수방정식에 비해서 정확하다고 볼 수 없다.

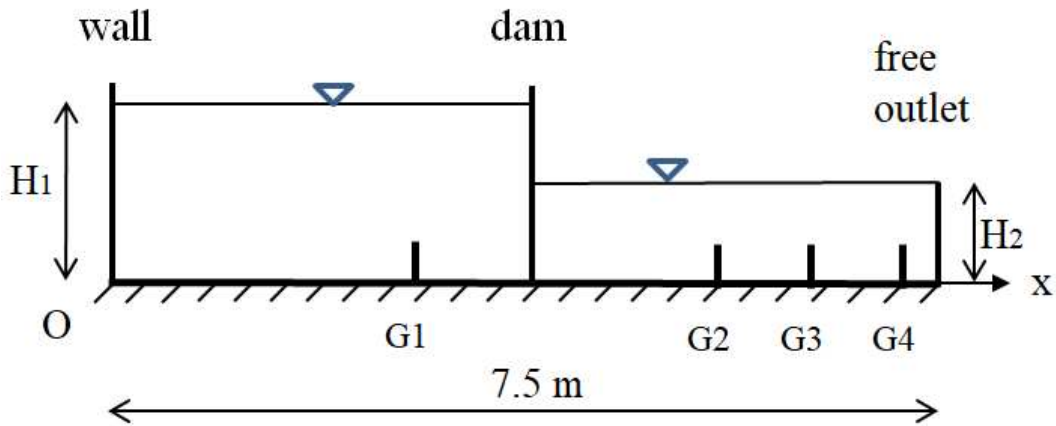


그림 9. 댐 개방 후 수면의 시계열 분석을 위한 실험 영역 (Do Carmo et al., 1993).

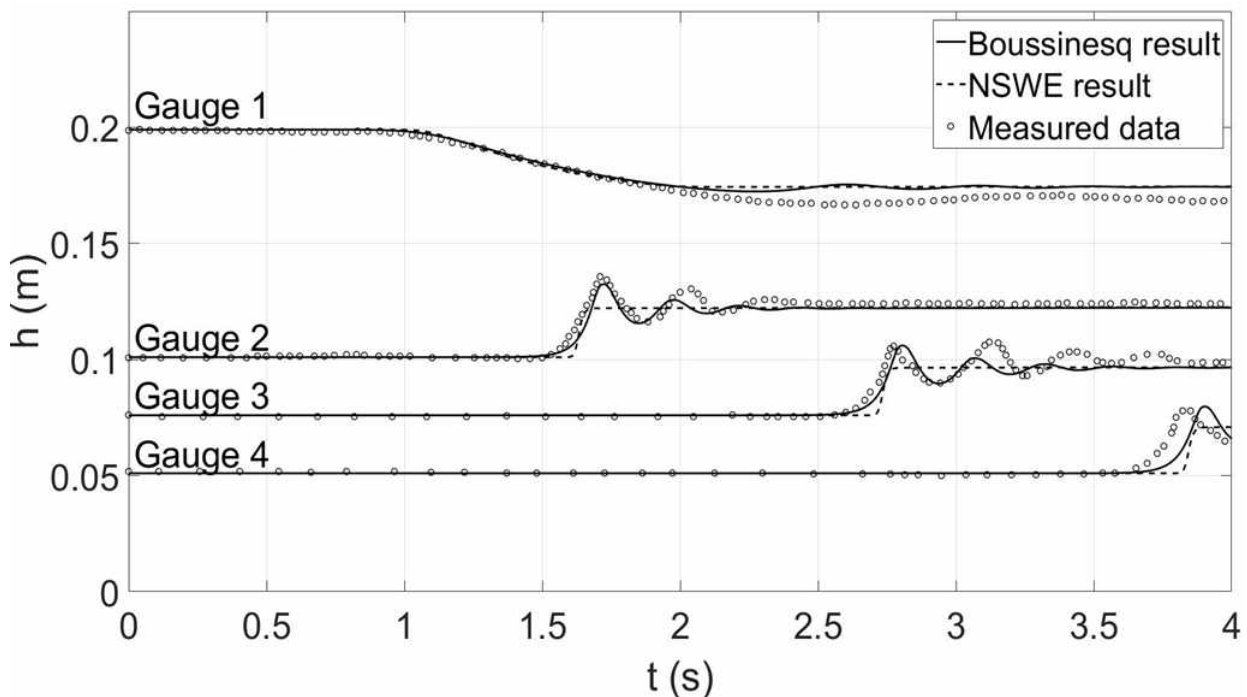


그림 10. 댐 개방 후 수면 시계열의 수치실험자료와 모형실험자료(Do Carmo et al., 1993)의 비교

- 바닥 침식이 발생하지 않는 경우 수평 1차원 수치모형 검증 4: USGS의 산사태 재현 토석류 실험 (Iverson, 2010)에서 토석 높이 시계열 비교 (바닥 침식 미발생)

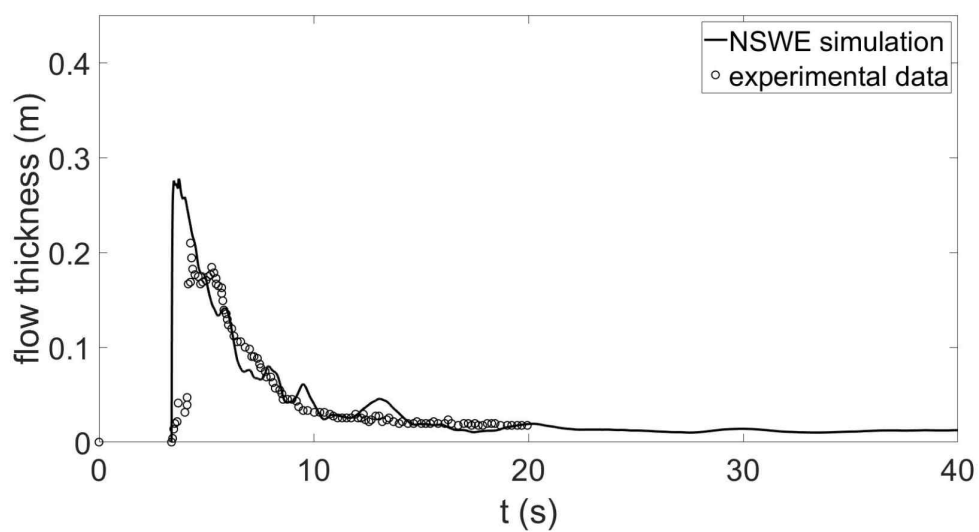
미국 USGS(Iverson et al., 2010) 연구팀은 31°의 급경사면에서 부피가 $9.4m^3$ 인 토석의 댐을 갑자기 열어 산사태를 발생시켜 토석이 아래로 흘러내리고 2.4°의 완경사면에서 퇴적되는 현상을 모형실험으로 재현하였다(그림 11 참조). 그들은 댐에서 32m, 66m, 90m 떨어진 3개 지점(즉, Gauge 1,2,3)에 토석 높이의 시계열을 측정하였다. 경사면의 길이는 95m이고, 경사면의 폭이 31° 경사면에서 2m이고 2.4° 경사면에서 4m이고, 경사면의 좌우 벽 높이가 1.2m이다. 본 연구에서 천수방정식을 사용하여 이러한 토석의 전파와 퇴적 현상을 수치 모의하였다. 토석의 밀도를 $\rho_s = 2100kg/m^3$ 로 두고, Manning의 바닥조도계수를 $n = 0.026m^{-1/3}s$ 로 두고, 토석의 내부마찰계수는 $\mu = 0.12$ 로 두고, 격자 간격을 $\Delta x = 0.1m$ 로 두고, 시간단계 Δt 를 정하기 위해 CFL=0.9로 두었다. 모형실험에서는 토석이 2m 폭의 급경사면에서 4m 폭의 완경사면으로 전파하는 수평 2차원 현상을 재현하였지만 본 연구의

수치실험에서는 수평 1차원 현상을 재현하였다. Gauge 1, 2, 3에 토석 높이의 시계열을 측정하여 수치실험결과와 모형실험자료를 그림 12에 비교하였다. 댐의 바깥에는 토석이 없는 건조한 곳이 존재하고 토석이 있는 곳과의 경계에 wet/dry의 불연속이 발생하였다. 31° 경사면에 위치한 Gauge 1, 2에서는 천수방정식 결과와 모형실험자료가 비교적 일치하였다. 하지만 2.4° 경사면에 위치한 Gauge 3에서는 천수방정식 결과가 모형실험자료에 비해 두 배 더 크게 나왔다. 이는 2.4° 경사면에서 폭이 4m로 확장되었는데 수치실험에서 폭을 2m로 두어 폭의 확장에 따른 토석 높이의 강하 현상을 재현하지 못한 것으로 판단된다. 수평 2차원 수치실험을 수행하면 Gauge 3에서도 수치실험결과가 모형실험자료와 유사하게 나올 것으로 판단된다.



그림 11. 토석 댐 개방 후 토석 높이의 시계열 분석을 위한 모형실험 수조 (Iverson et al., 2010).

(a)



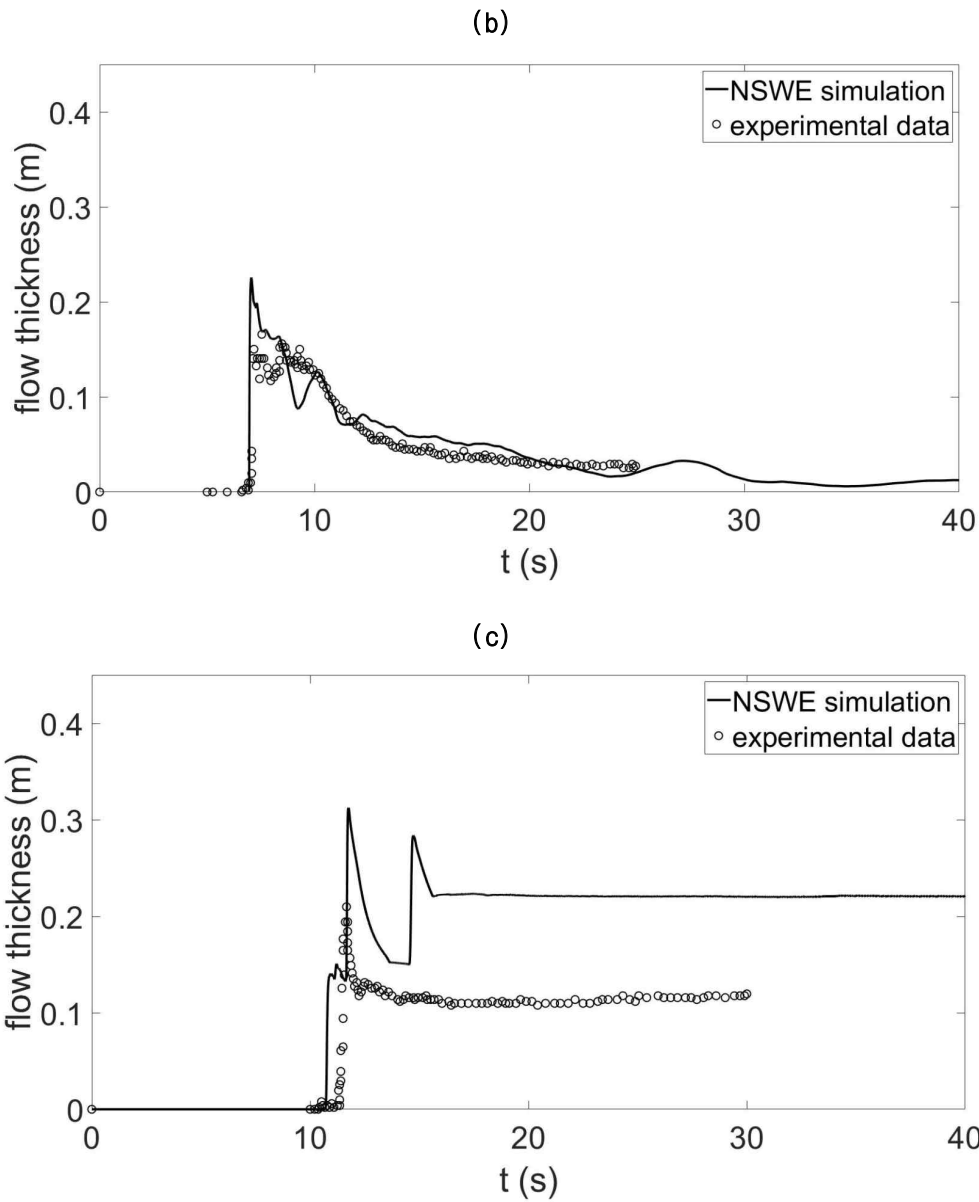


그림 12. 토석 댐 개방 후 토석 높이 시계열의 수치실험자료와 모형실험자료(Iverson et al., 2010)
비교: (a) Gauge 1, (b) Gauge 2, (c) Gauge 3.

- 바닥 침식이 발생하지 않는 경우 수평 1차원 수치모형 검증 5: 대기 중 산사태와 수중 산사태에 토석 높이 시계열 비교

대기 중 산사태 발생 시 중력가속도가 $g_0 = 9.81 \text{ m/s}^2$ 임. 수중 산사태 발생 시 물속에서 부력을 받기 때문에 중력가속도가 $g_1 = g_0(\rho_s - \rho_w)/\rho_s$ 로 감소한다. 여기서 ρ_s 와 ρ_w 는 각각 토석의 밀도와 물의 밀도를 의미한다. 본 연구에서 45° 경사면에서 $0.65 \text{ m} \times 0.65 \text{ m}$ 의 삼각형 안에 있는 토석이 갑자기 흘러내리고 수평 길이 1.5 m 지점에 있는 수평면에서 퇴적하는 현상을 천수방정식을 사용하여 수치적으로 재현하였다(그림 13 참조). 총 3가지 경우에 실험을 수행하였다. 첫째, 모든 영역이 해상에 있는 경우, 둘째, 모든 영역이 해저에 있는 경우, 셋째, 댐 안은 해상에 있지만 하류의 $x = 0.75 \text{ m}$ 지점에서부터 해저에 있는 경우이다. Manning의 바닥조도계수를 $n = 0.034 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$ 로 두고, 토석의 내부마찰계수는 $\mu = 0.08$ 로 두고, 격자간격을 $\Delta x = 0.01 \text{ m}$ 로 두고, 시간단계 Δt 를 정하기 위해 $\text{CFL} = 0.9$ 로 두었다. 토석의 밀도를 $\rho_s = 2100 \text{ kg/m}^3$, $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$ 로 두어 수중에서 중력가속도가 $g_1 = 0.52g_0$ 로 대기 중에 비해서 52%로 작아진다. 그림 14에 해상 산사태, 해저 산사태, 해상 및 해저 산사태 발생 후 $t = 0.4$ 초 경과 시 토석의 수위를 비교하였다. 대기 중 산사태의 경우 0.4 초 경과 시 토석이 수평면에 많이 쌓여 있다(그림 14(a) 참조). 반면에 수중 산사태의 경우 가속도가 대기 중에 비해 52% 밖에 되지 않아 토석이 수평면에 조금 쌓여 있다(그림 14(b) 참조). 대기 중에 산사태가 발생한 후 토석이 수중을 통과할 때 가속도가 감소하여 수평면에서 중간 정도의 부피로 토석이 쌓여 있다(그림

14(c) 참조).

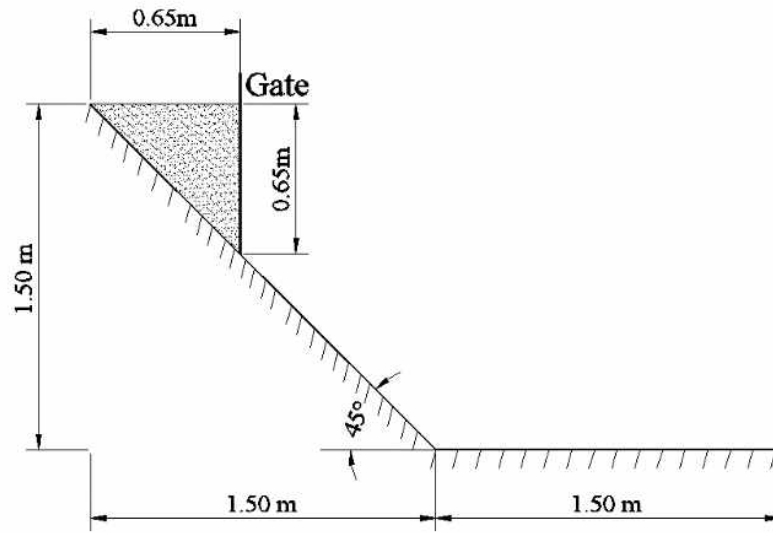
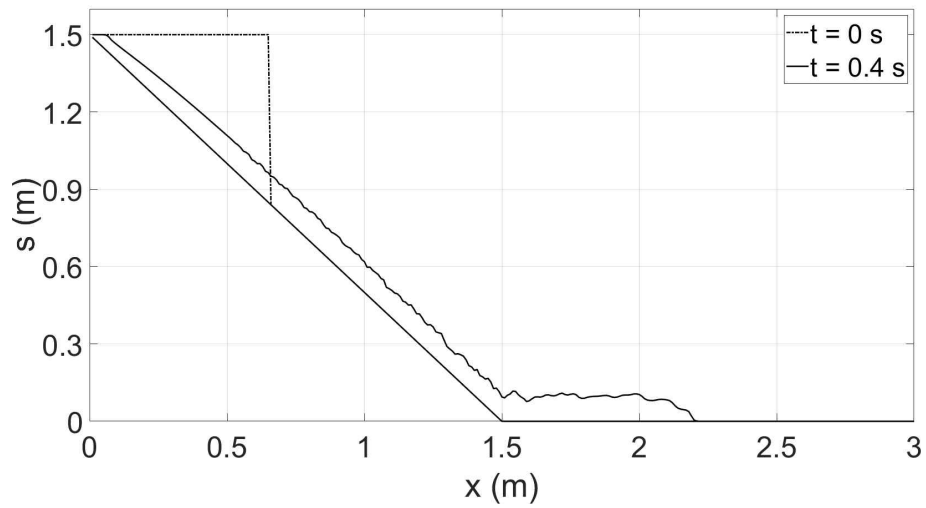
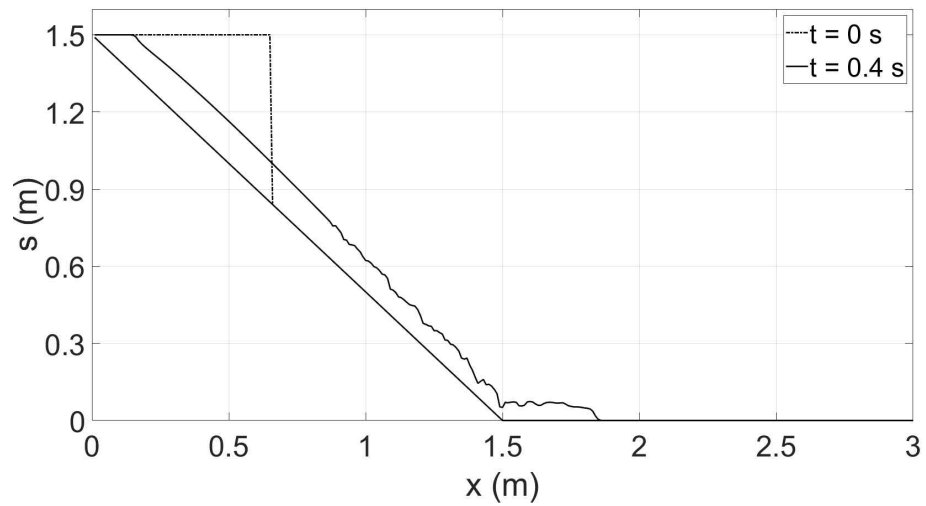


그림 13. 대기 중 산사태와 수중 산사태 비교를 위한 실험 영역

(a)



(b)



(c)

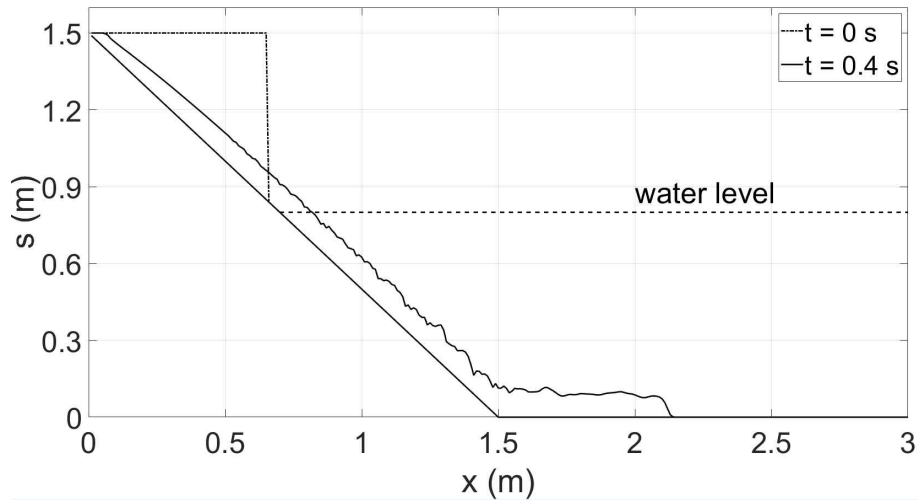


그림 14. 토석 댐 개방 후 토석 높이 시계열: (a) 대기 중 산사태 발생 시, (b) 수중 산사태 발생 시, (c) 대기 중 산사태와 수중 산사태 동시 발생 시

- 바닥 침식이 발생하지 않는 경우 수평 1차원 수치모형 검증 6: 농어촌연구원의 산사태 재현 토석류 실험에서 토석 높이 시계열 비교

본 연구의 공동연구팀인 농어촌연구원에서 24° 의 경사면에서 부피가 $1.68m^3$ 인 토석의 댐을 갑자기 열어 산사태를 발생시켜 토석이 아래로 흘러내리고 수평면에서 퇴적되는 현상을 모형 실험으로 재현하였다(그림 15, 16 참조). 경사면의 길이는 11.41m이고, 경사면의 폭이 1.5m이고 좌우 벽 높이가 1m이다. 경사면에서 총 4개 지점에서 토사 높이의 시계열을 측정하였다. gage 1, 2, 3, 4는 댐의 입구에서 1.93m, 4.21m, 7.21m, 10.20m 떨어진 지점에 있다. 총 16가지 실험 조건 중에 침식이 발생하지 않는 경우가 8가지(즉, Case01~08)이고, 침식이 발생하는 경우는 8가지(즉, Case09~16)이다. 표 4에 침식이 발생하지 않은 총 8가지 경우의 실험 조건과 수치실험조건(즉, 내부마찰계수)을 제시하였다. 토사는 모래만 있는 경우가 3가지이고(즉, Case 1, 2, 8), 모래와 자갈이 섞여 있는 경우가 5가지(즉, Case 3, 4, 5, 6, 7)이다. 모래와 자갈이 섞여 있는 경우에도 중량비를 다르게 하였고, 또한, 중량함수량도 다르게 두었다.

본 연구에서 천수방정식을 사용하여 이러한 토석의 전파와 퇴적 현상을 수치 모의하였다. 토석의 밀도를 $\rho_s = 2350kg/m^3$ 로 두고, Manning의 바닥조도계수를 $n = 0.018m^{-1/3}s$ 로 두고, 격자간격을 $\Delta x = 0.01m$ 로 두었다. 댐에서 1.93m, 4.21m, 7.21m, 10.20m 떨어진 4개 지점(즉, Gauge 1, 2, 3, 4)에 토석 높이의 시계열을 측정하여 수치실험결과와 모형실험자료를 그림 17~24에 비교하였다. 모든 경우에 관측점에서 토석 높이의 최대치가 발생하는 시간을 수치실험이 잘 재현하였다. 댐에 가까운 지점에 있는 Gauge 1, 2에서 모형실험자료를 보면 토석 높이의 최대치가 발생한 후 토석의 높이가 서서히 감소하지 않고 잠시 지체하여 두 번째, 세 번째, 네 번째 등의 첨두값이 존재하였다. 이는 실제 토석은 균일한 재료로 구성되어 있지 않고, 물, 자갈, 모래 등이 섞인 복합체여서 이러한 지체 현상이 발생한 것으로 판단된다. 이러한 현상으로 인하여 댐에서 먼 지점에 있는 Gauge 3, 4에서 토석 높이의 수치실험결과가 모형실험자료에 비해서 작게 나왔다. Gauge 3, 4에서도 모형실험자료를 보면 토석 높이의 최대치가 발생한 후 토석 높이가 서서히 감소하지 않고 잠시 지체하여 두 번째, 세 번째, 네 번째 등의 첨두값이 존재하였다.

Case05의 경우 Gauge 1, 2, 3에서 토사가 퇴적하였고 수치모형에서도 이를 잘 재현하였다(그림 21 참조). Case05의 경우 중량함수비(22.7%)가 아주 작아서 내부마찰계수($\mu=0.6$)가 커서 토사가 하류로 흘러내리지 않고 퇴적된 것으로 판단된다. 수치실험 결과도 이러한 퇴적 현상을 잘 재현하였다.

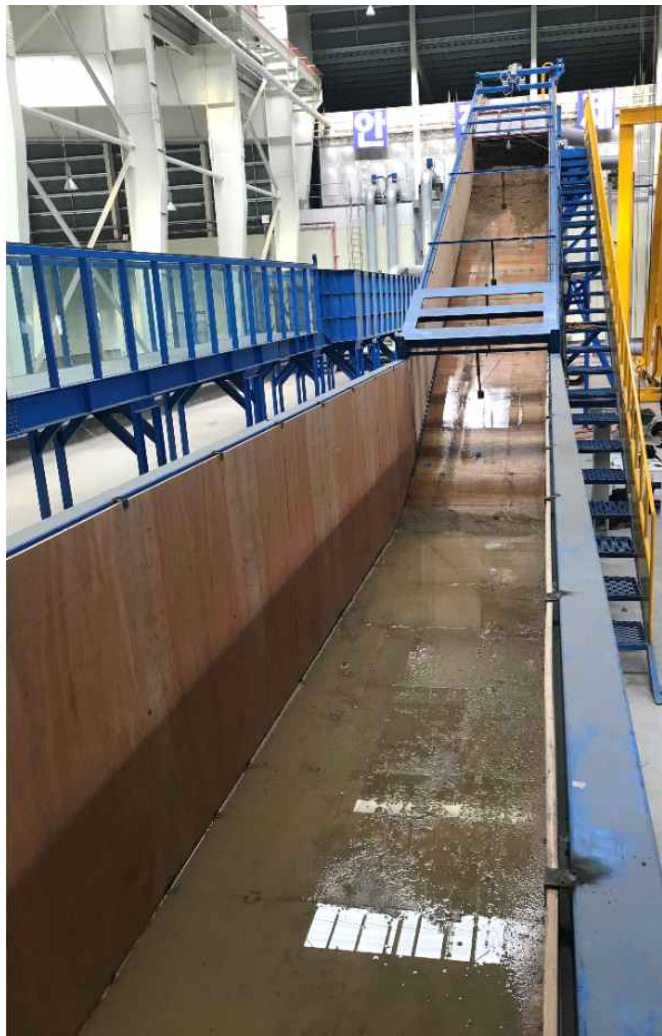


그림 15. 농어촌연구원에서 토석 댐 개방 후 토석 높이의 시계열 분석을 위한 모형실험 수조

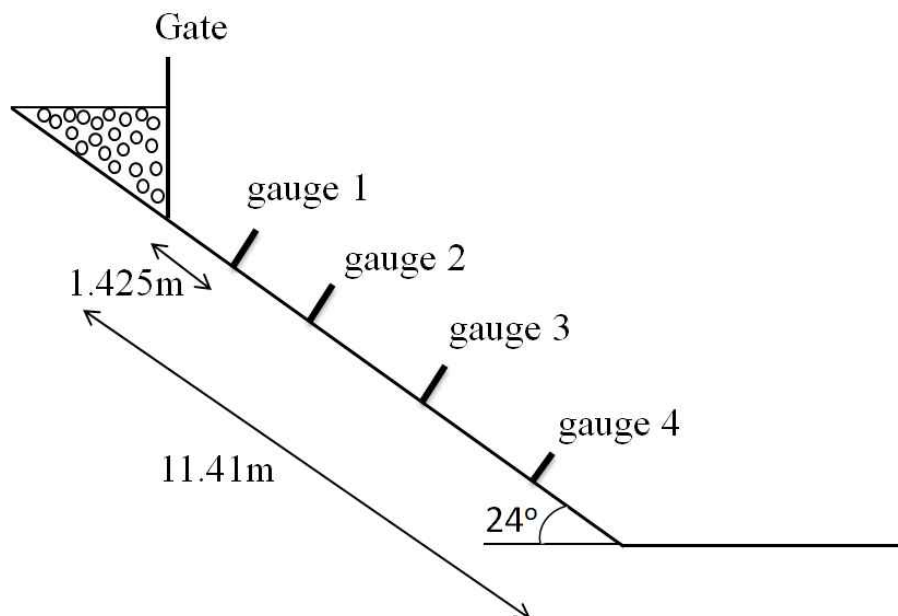
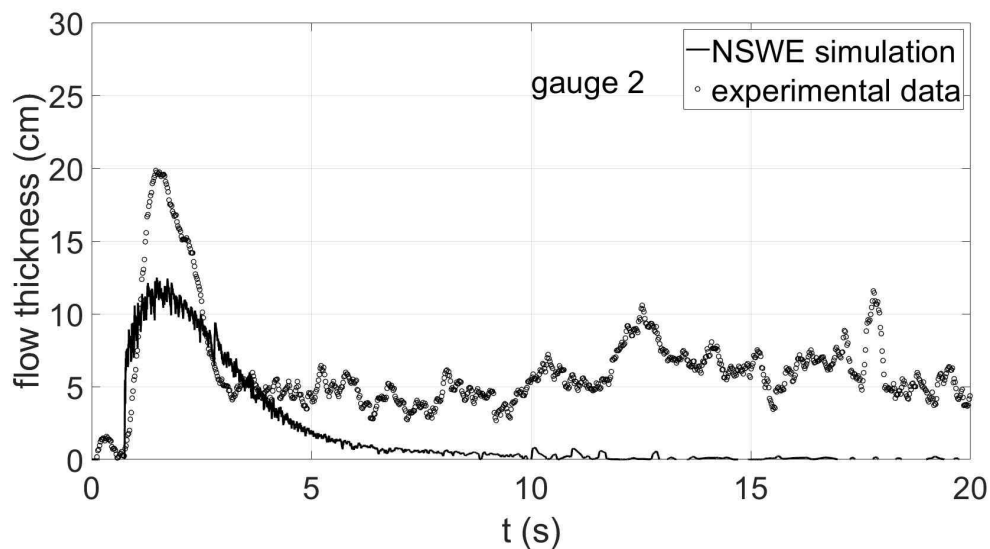
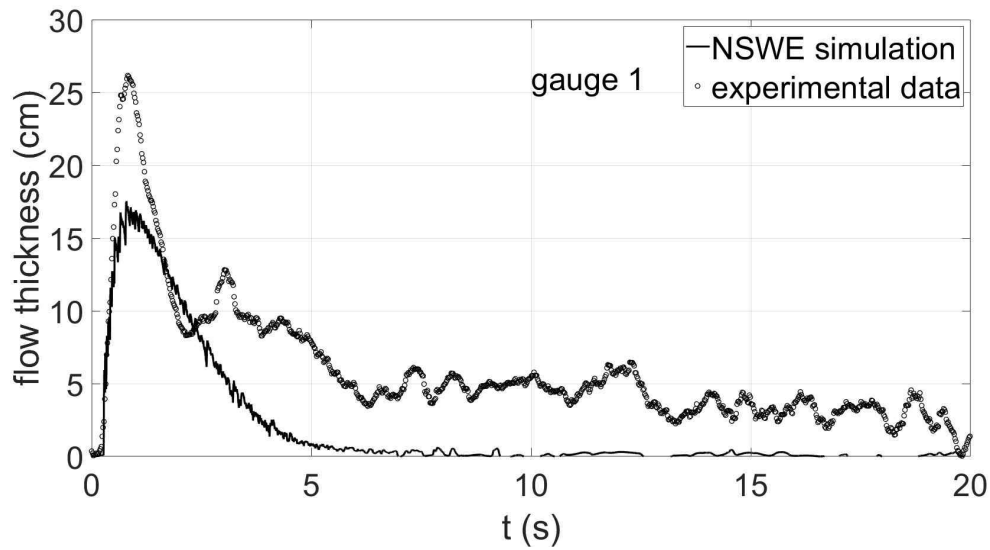


그림 16. 농어촌연구원에서 수행한 토석류 발생장치 및 표고계 위치도 (바닥 침식 미발생)

표 4. 농어촌연구원 토석류 실험 조건과 수치실험 조건 (바닥 침식 미발생)

구 분	Case01	Case02	Case03	Case04
토사	모래	모래	모래+자갈	모래+자갈
토사 총 체적	1.6845 m ³	1.6845 m ³	1.6845 m ³	1.6845 m ³
토사 총 중량 (건조상태)	2.274 tonf	2.274 tonf	2.346 tonf 모래 : 2.205 tonf 자갈 : 0.140 tonf	2.346 tonf 모래 : 2.205 tonf 자갈 : 0.140 tonf
물의 총 중량	0.684 tonf	0.852 tonf	0.729 tonf	0.788 tonf
중량함수비	30.08%	37.45%	31.07%	33.60%
내부마찰계수(μ)	0.325	0.300	0.300	0.300

구 분	Case05	Case06	Case07	Case08
토사	모래+자갈	모래+자갈	모래+자갈	모래
토사 총 체적	1.6845 m ³	1.6845 m ³	1.6845 m ³	1.6845 m ³
토사 총 중량 (건조상태)	2.435 tonf 모래 : 2.014 tonf 자갈 : 0.421 tonf	2.435 tonf 모래 : 2.014 tonf 자갈 : 0.421 tonf	2.435 tonf 모래 : 2.014 tonf 자갈 : 0.421 tonf	2.274 tonf
물의 총 중량	0.552 tonf	0.687 tonf	0.730 tonf	1.072tonf
중량함수비	22.7%	28.2%	30.0%	47.1%
내부마찰계수(μ)	0.600	0.300	0.250	0.200



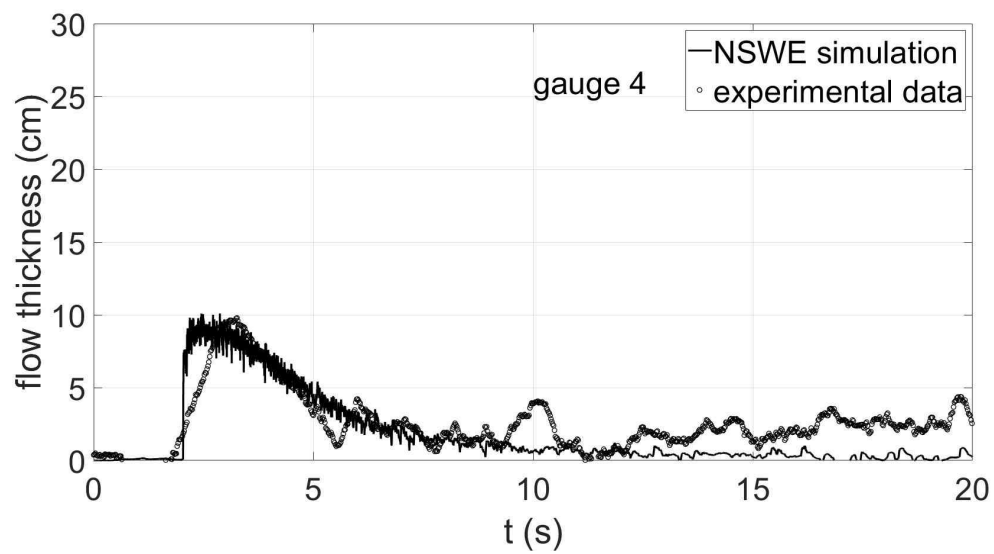
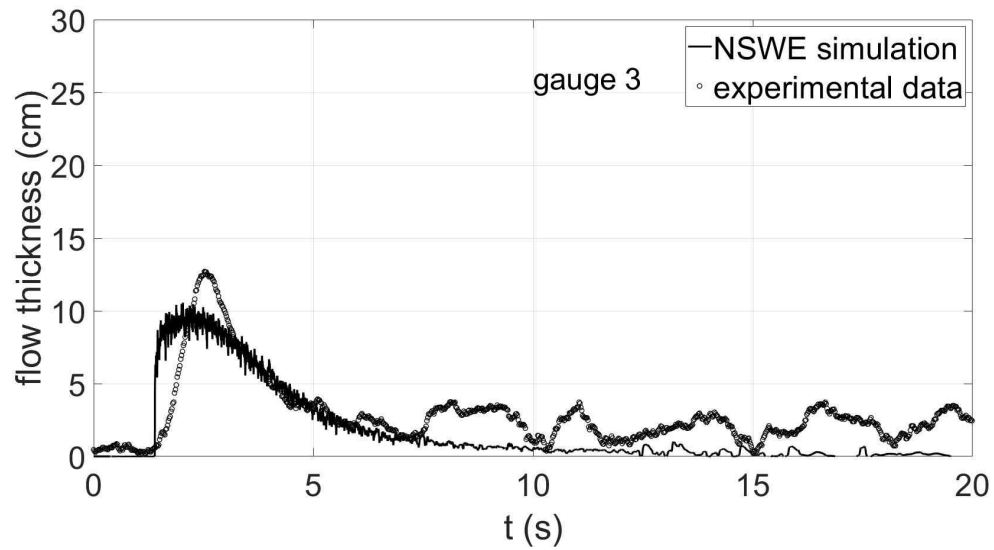
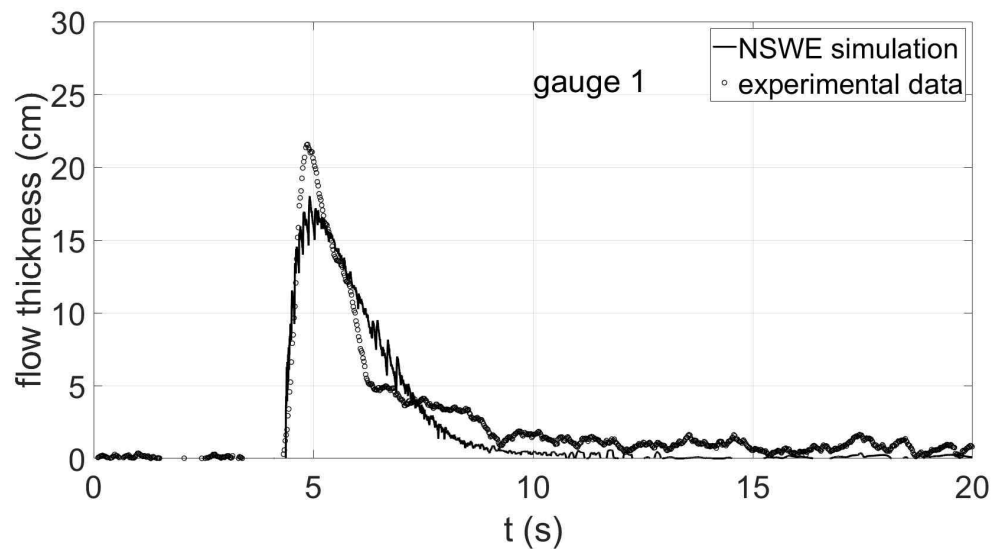


그림 17. 토석 댐 개방 후 토석 높이 시계열의 수치실험자료와 모형실험자료(농어촌 연구원) 비교:
Case 01.



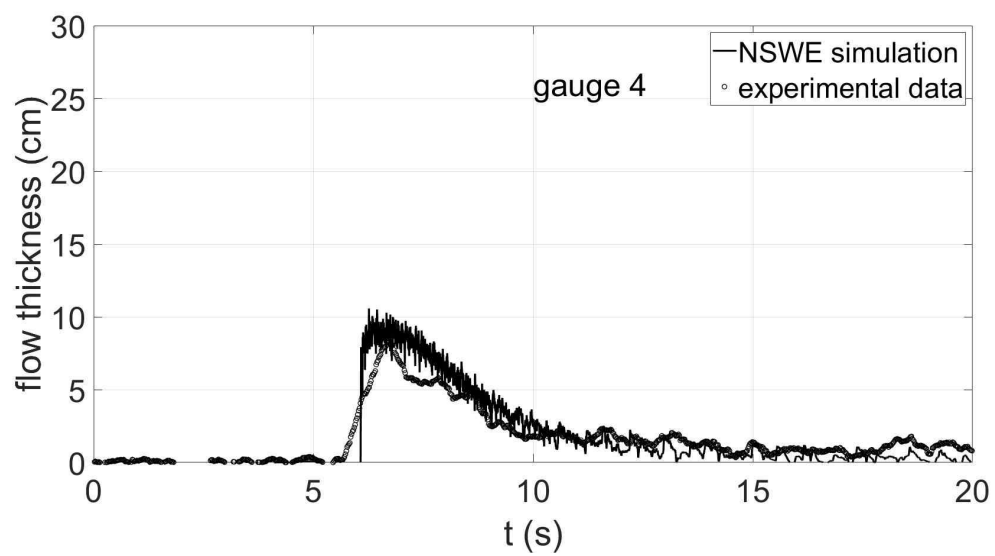
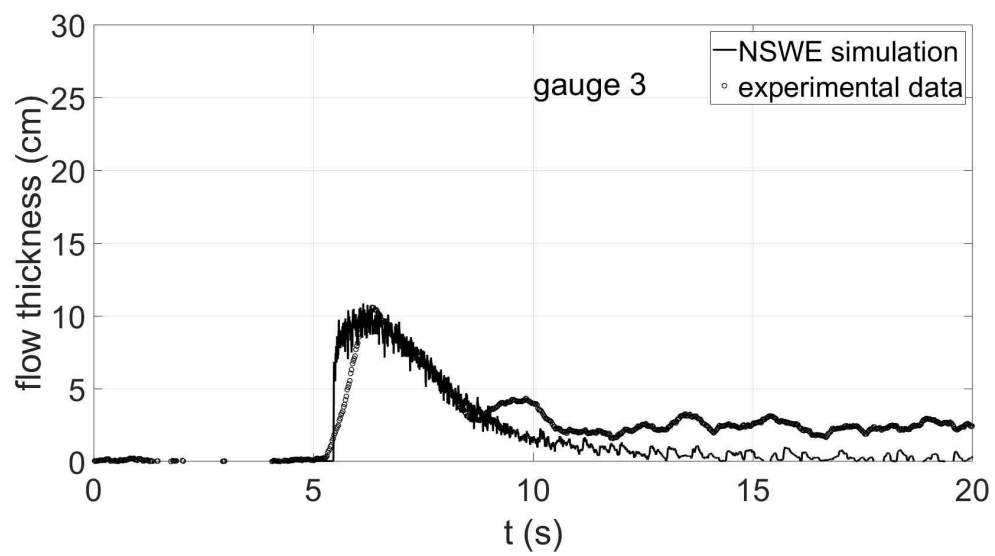
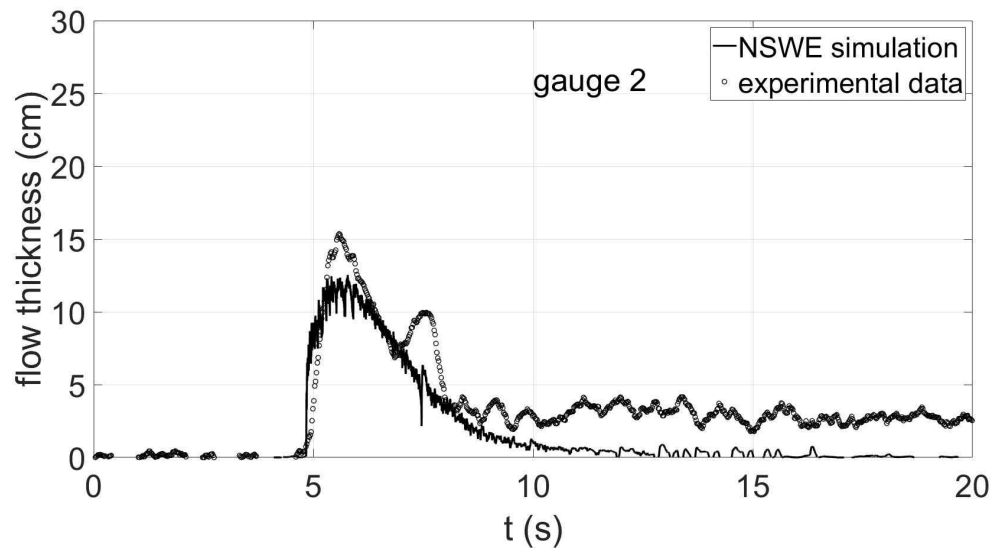
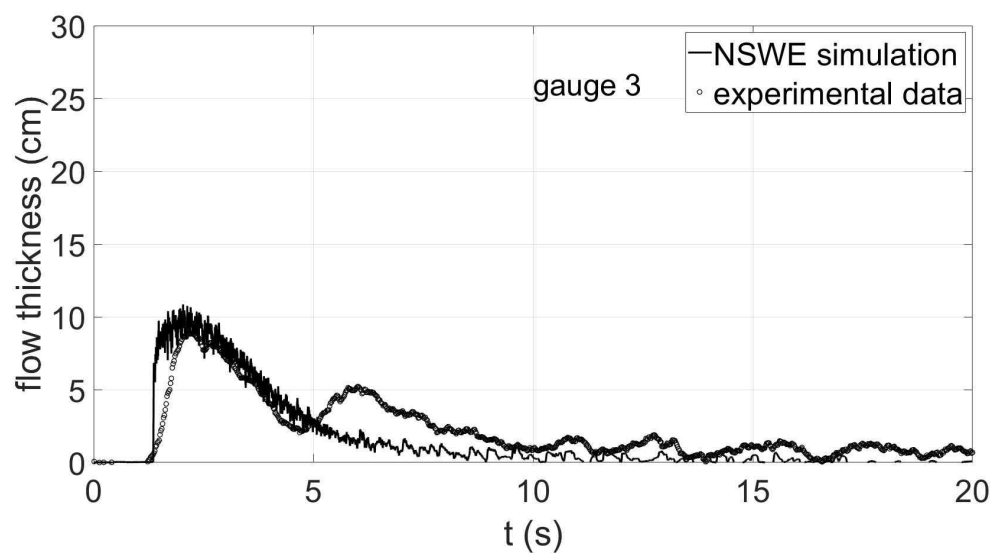
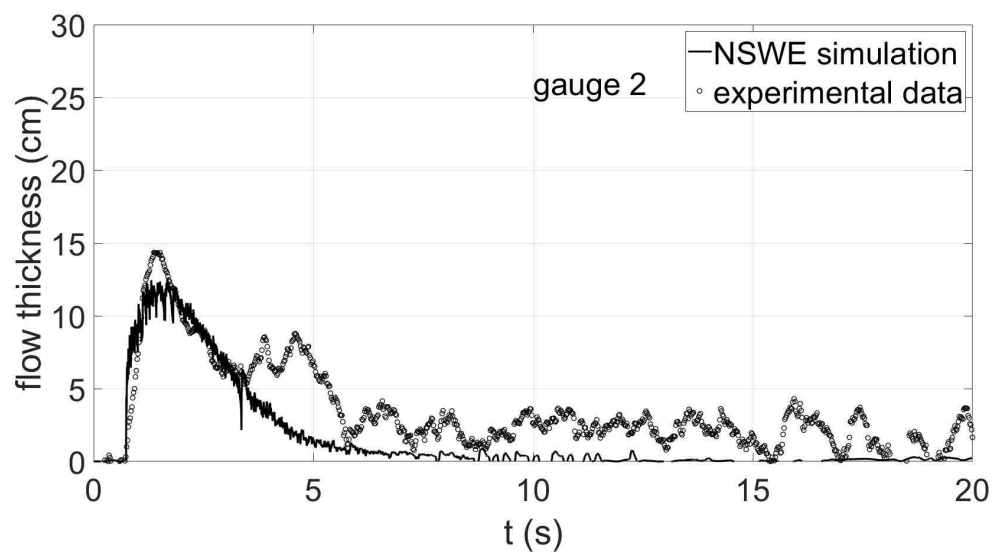
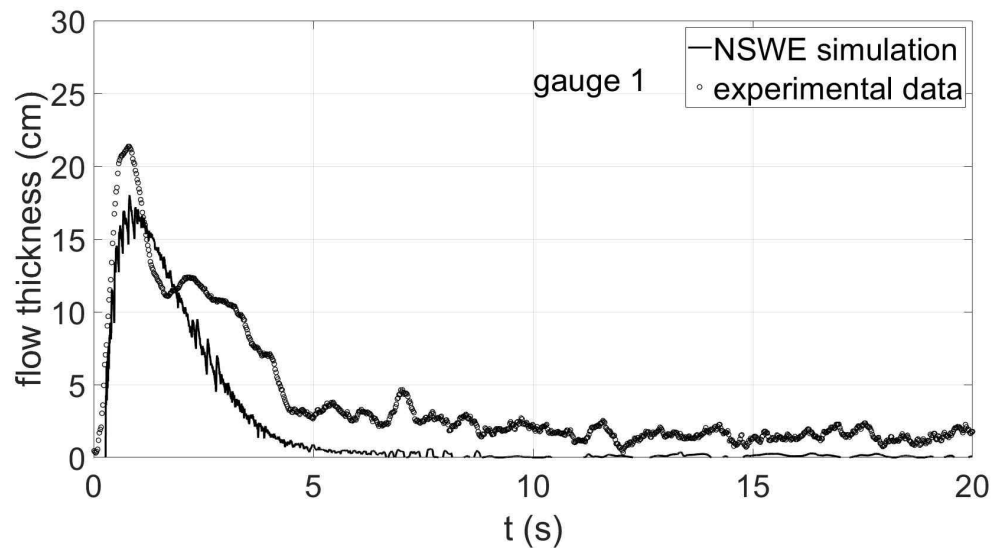


그림 18. 토석 댐 개방 후 토석 높이 시계열의 수치실험자료와 모형실험자료(농어촌 연구원) 비교:
Case 02.



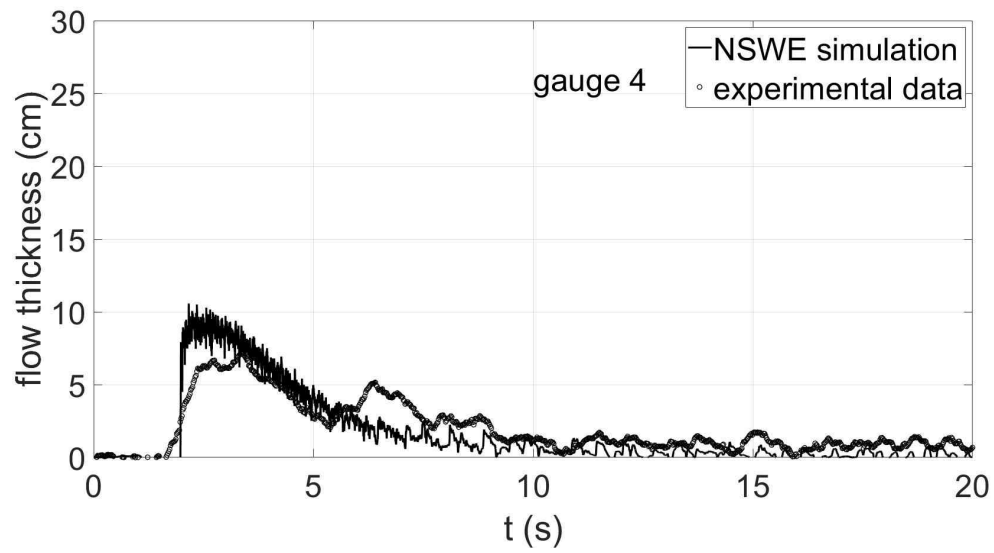
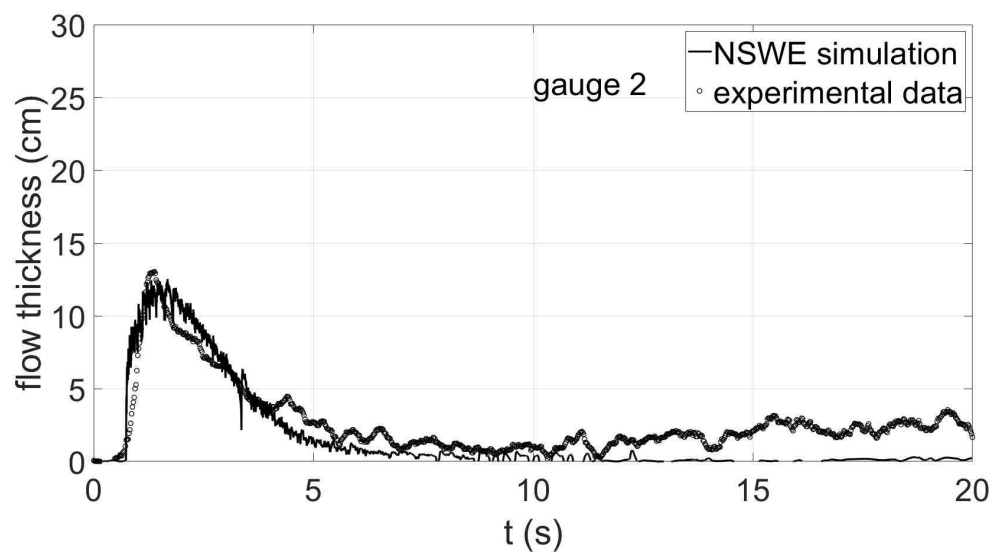
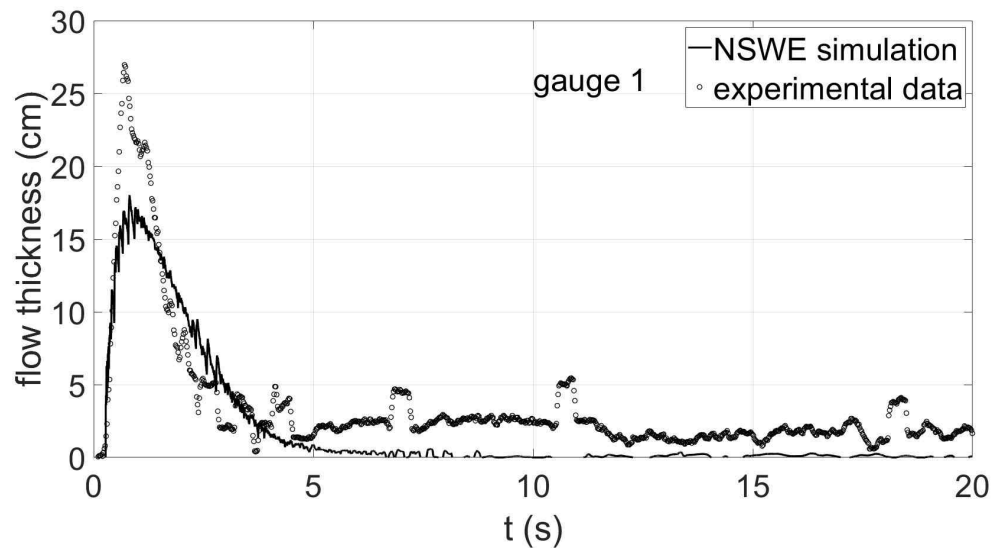


그림 19. 토석 댐 개방 후 토석 높이 시계열의 수치실험자료와 모형실험자료(농어촌 연구원) 비교:
Case 03.



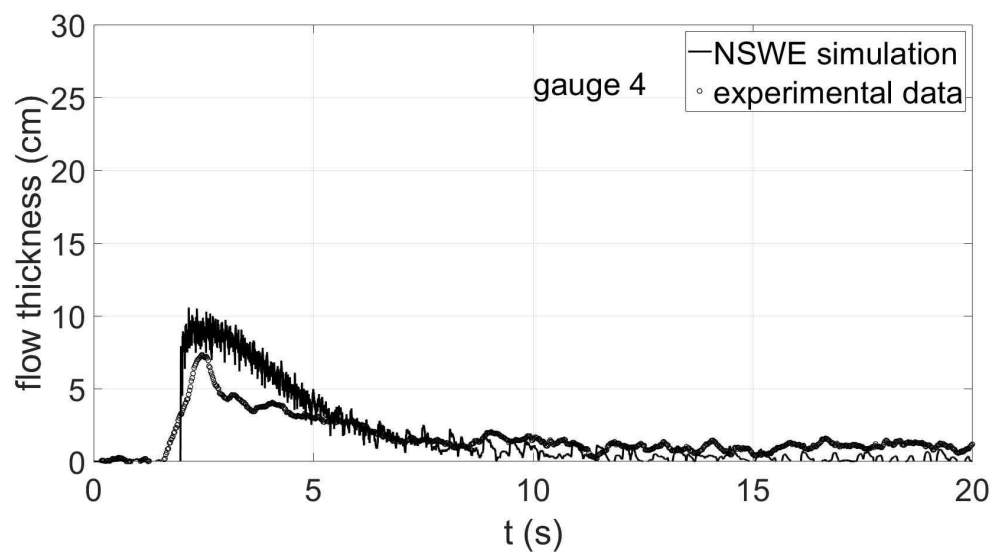
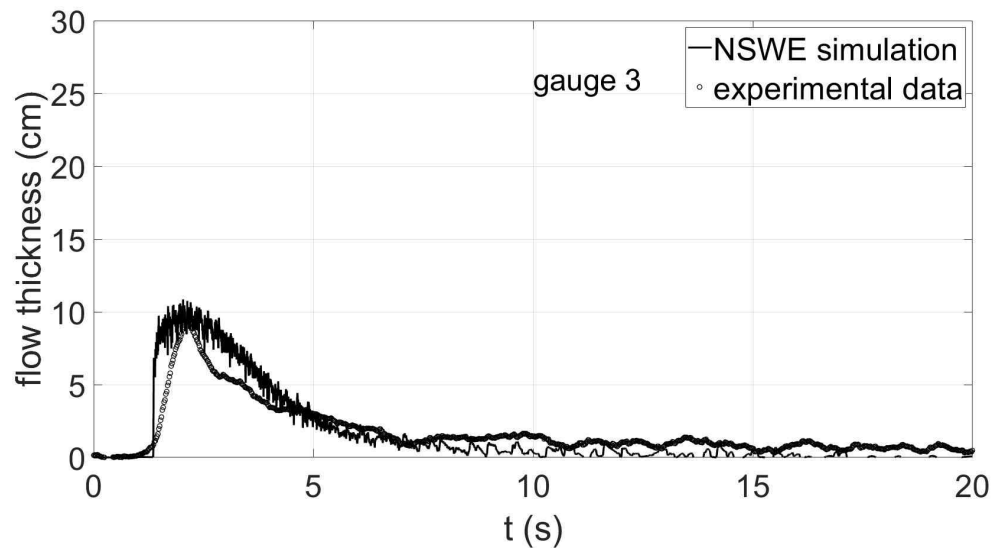
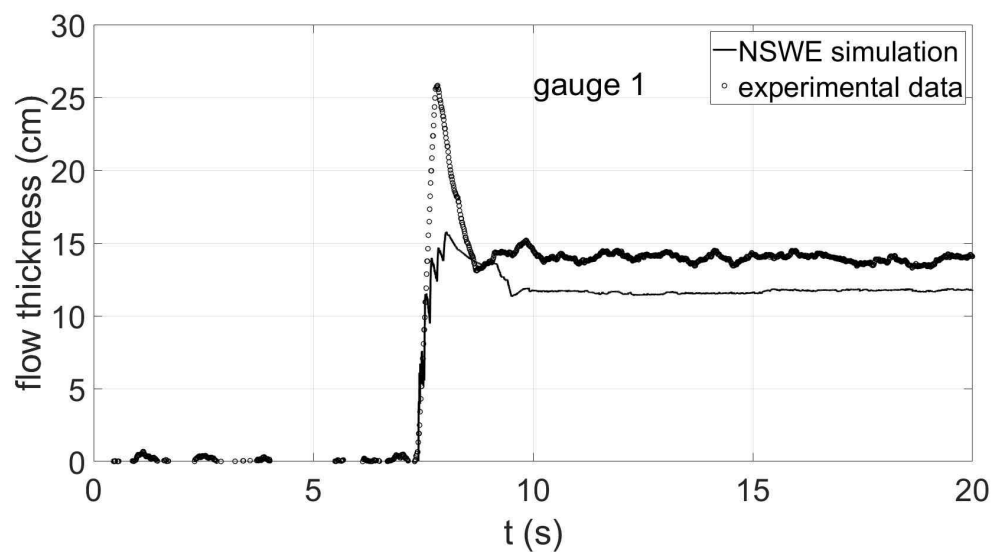


그림 20. 토석 댐 개방 후 토석 높이 시계열의 수치실험자료와 모형실험자료(농어촌 연구원) 비교:
Case 04.



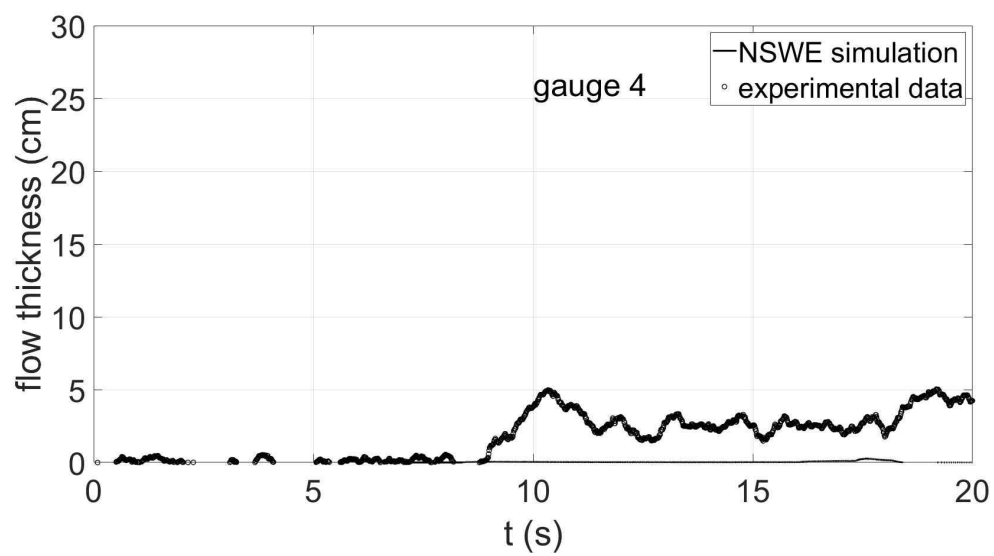
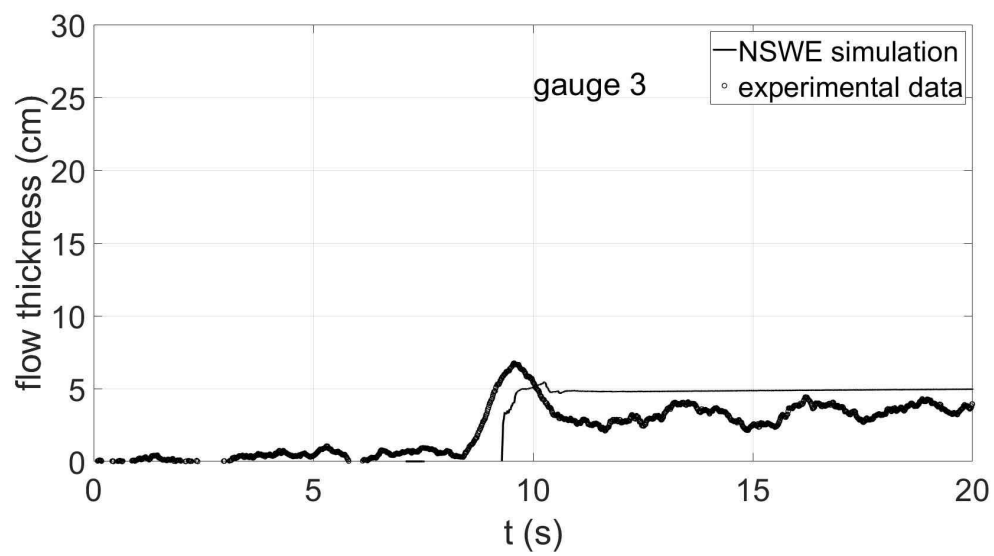
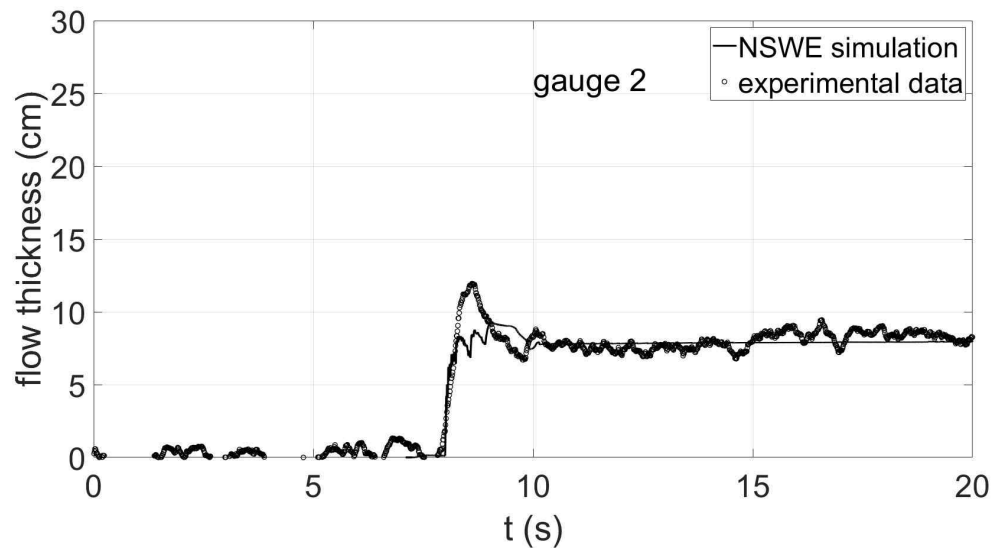
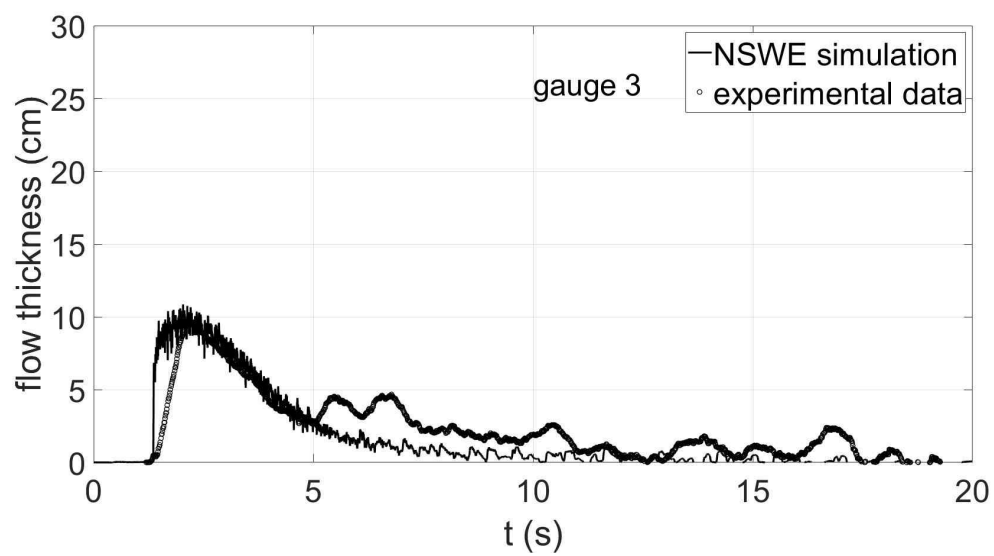
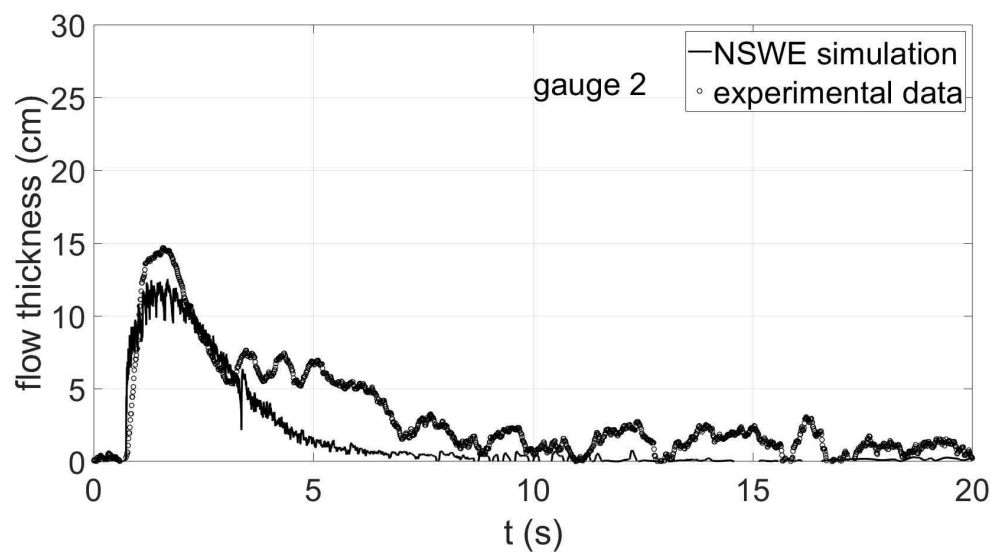
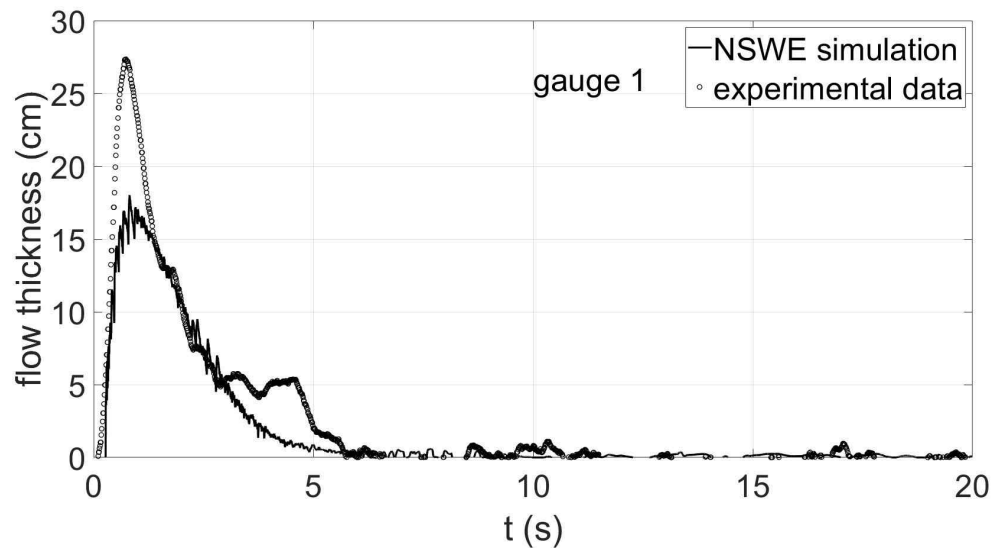


그림 21. 토석 댐 개방 후 토석 높이 시계열의 수치실험자료와 모형실험자료(농어촌 연구원) 비교:
Case 05.



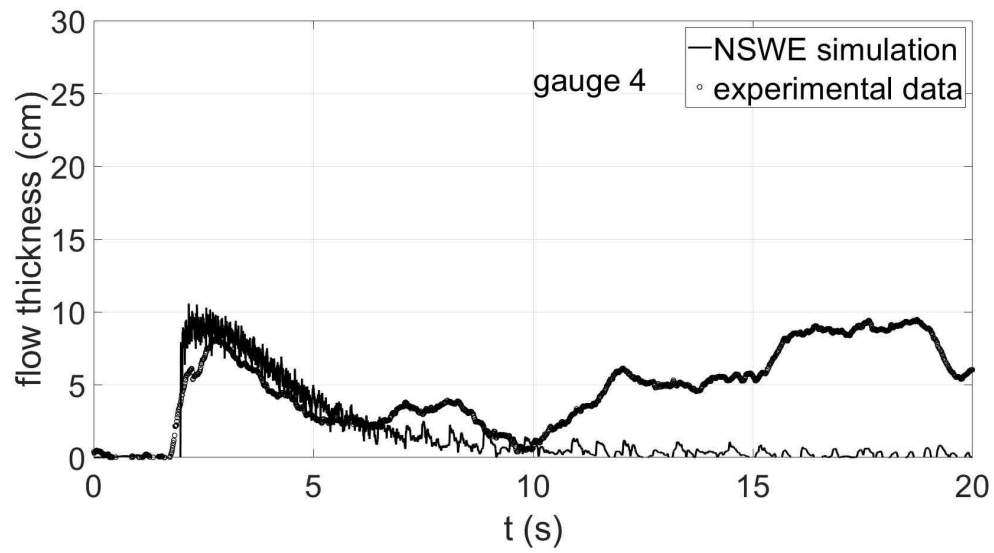
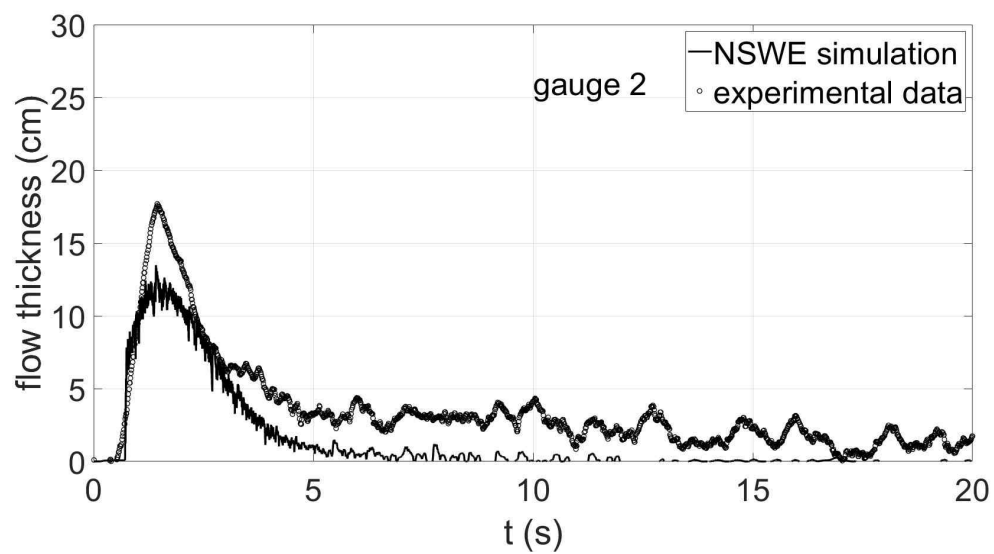
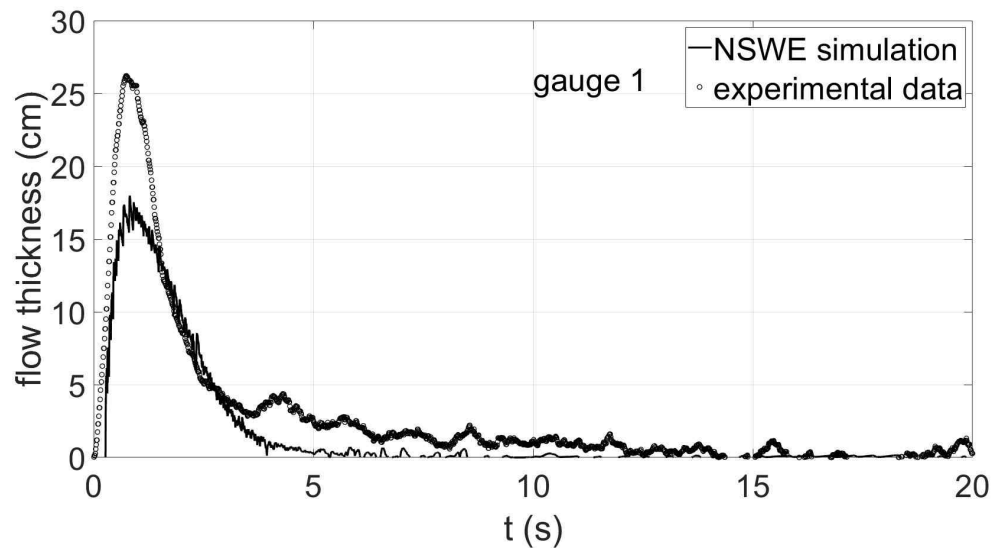


그림 22. 토석 댐 개방 후 토석 높이 시계열의 수치실험자료와 모형실험자료(농어촌 연구원) 비교:
Case 06.



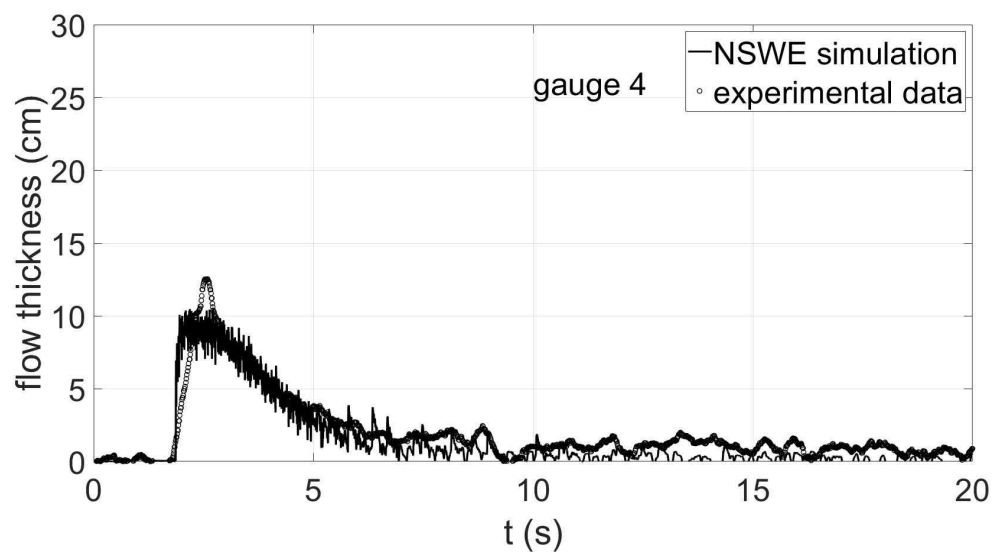
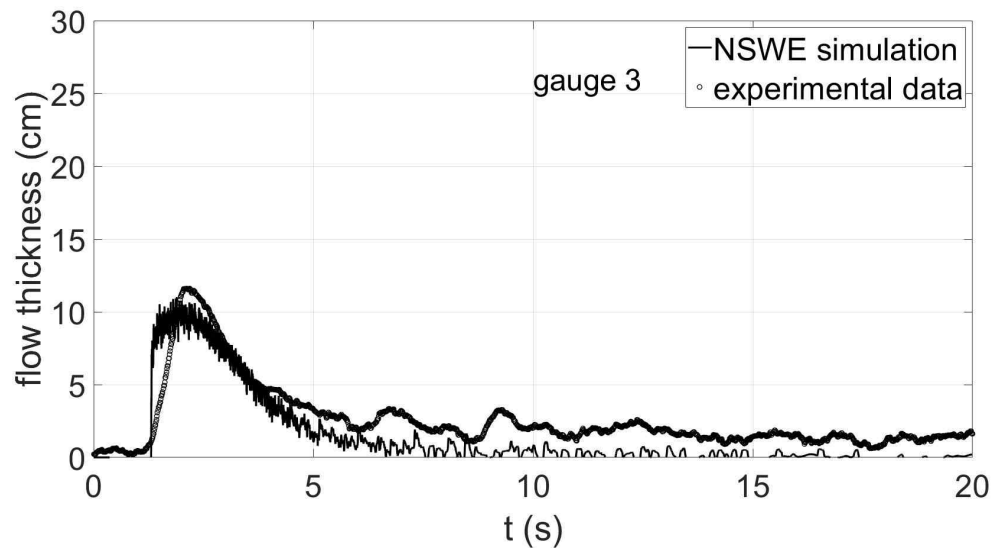
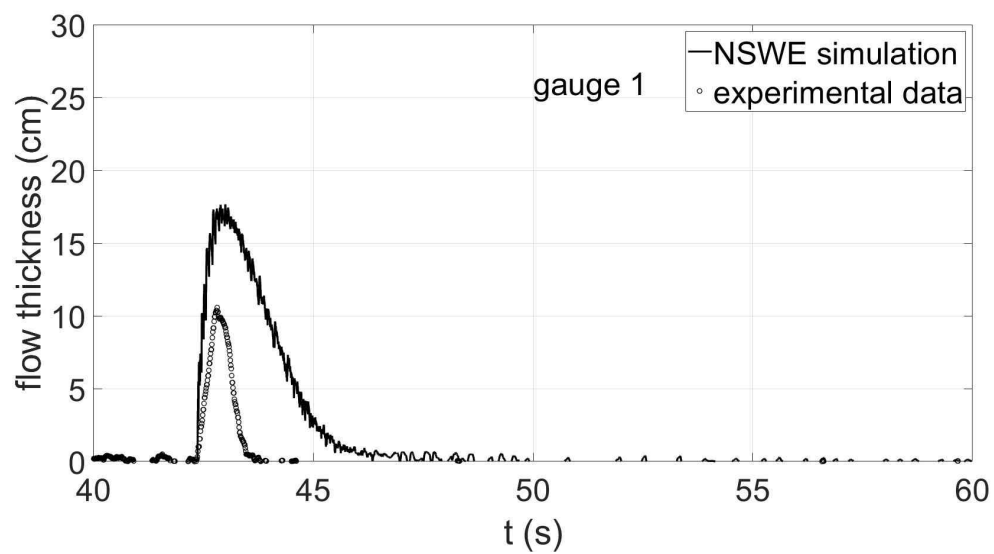


그림 23. 토석 댐 개방 후 토석 높이 시계열의 수치실험자료와 모형실험자료(농어촌 연구원) 비교:
Case 07.



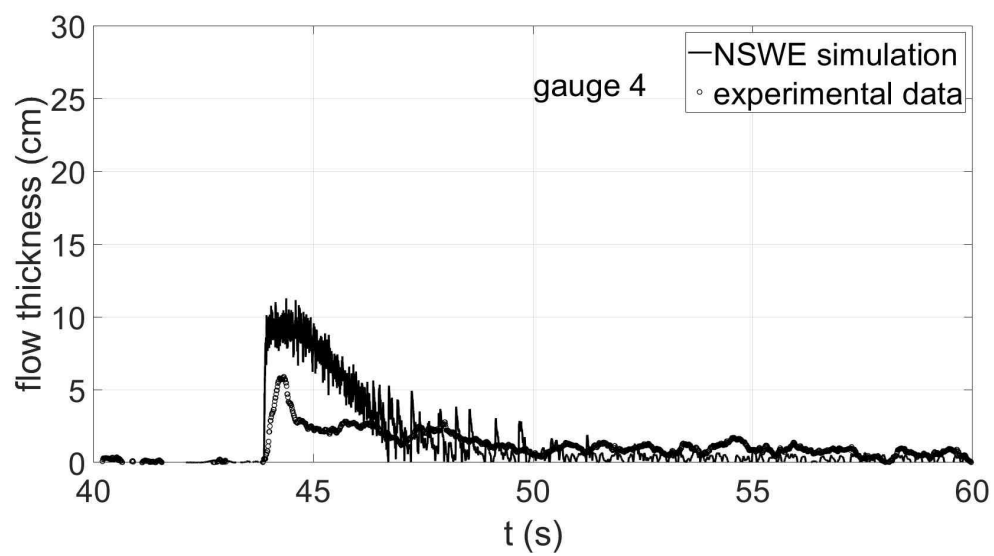
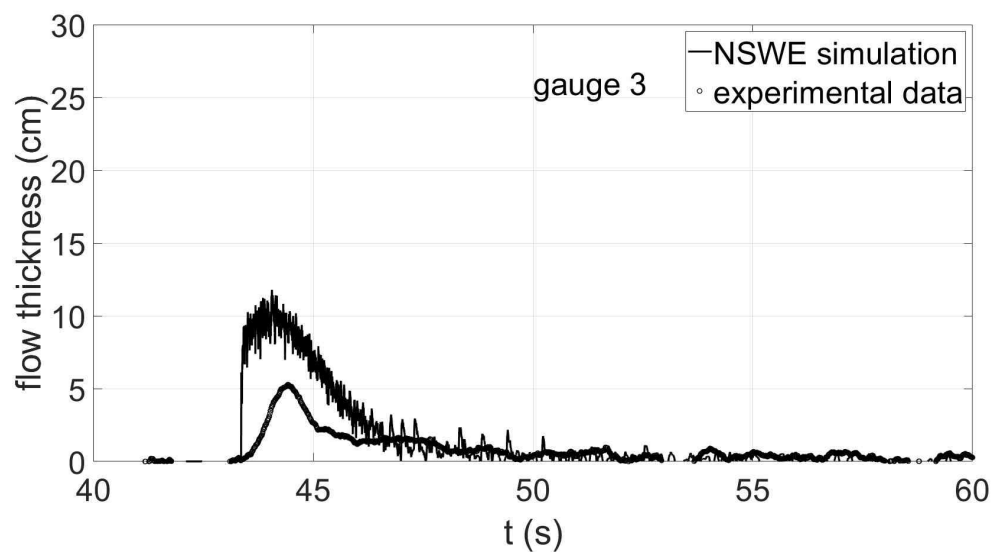
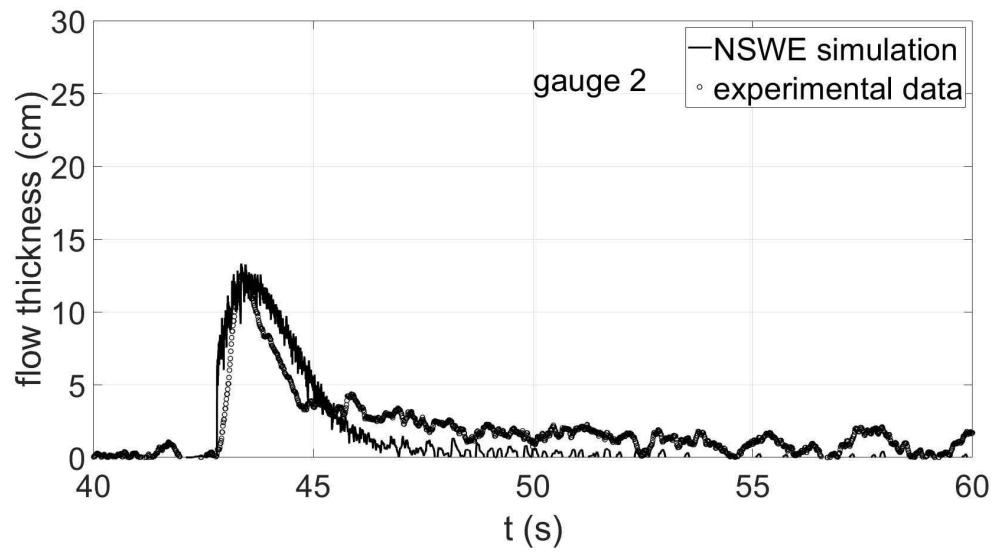


그림 24. 토석 댐 개방 후 토석 높이 시계열의 수치실험자료와 모형실험자료(농어촌 연구원) 비교:
Case 08.

▣ 바닥의 침식을 고려하여 천수방정식 기반의 토석류 거동 해석 지배방정식 유도

x 축을 바닥 아래 수평면에 두고, 토석의 바닥과 표면의 수직 좌표를 각각 b 와 s 로 두고, 토석의 높이를 $h(=s-b)$ 로 두었다(그림 25 참조).

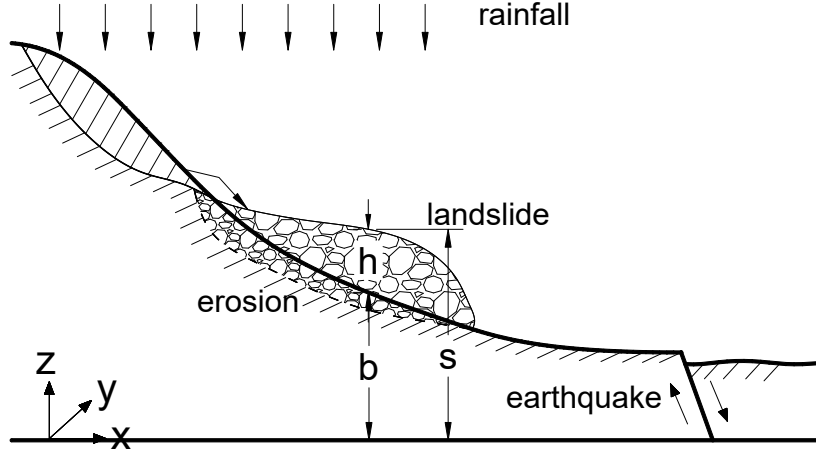


그림 25. 토석류 해석 개념도: 바닥의 침식 고려

바닥의 침식이 발생하면 바닥의 수직 좌표의 시간변화를 $\partial b/\partial t$ 가 존재한다. 토석류에 적용되는 연속 방정식 (57), 표면에서의 경계조건식 (58), 바닥에서의 경계조건식 (59)는 다음과 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (57)$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} + u \frac{\partial s}{\partial x} + v \frac{\partial s}{\partial y} - w = 0, \quad z = s \quad (58)$$

$$\frac{\partial b}{\partial t} + u \frac{\partial b}{\partial x} + v \frac{\partial b}{\partial y} - w = -E, \quad z = b \quad (59)$$

여기서 E 는 바닥의 침식률로서 단위 면적당 침식된 체적의 시간변화율이고(Gray, 2001; Le and Pitman, 2010) 다음의 관계가 있다(Chen and Zhang, 2015; D'Aniello et al., 2015; Ouyang et al., 2015).

$$E = -\frac{\partial b}{\partial t} \quad (60)$$

연속방정식 (57)을 수직 방향으로 적분하고, 경계조건식 (58),(59)와 바닥 침식률식 (60)을 이용하면 적분된 연속방정식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}[(s-b)u] + \frac{\partial}{\partial y}[(s-b)v] = 0 \quad (61)$$

x 축 방향의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) \quad (62)$$

여기서 압력은 정수압으로 $p = \rho g(s-z)$ 이다. 식 (62)에 $u(\partial u/\partial x + \partial v/\partial y + \partial w/\partial z)$ 를 더하고, 수직 방향으로 적분을 취하고, 경계조건식 (58),(59)를 사용하면 x 축 방향의 적분된 운동방정식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{\partial[(s-b)u]}{\partial t} + \frac{\partial[(s-b)u^2]}{\partial x} + \frac{\partial[(s-b)uv]}{\partial y} + \frac{1}{2}g\frac{\partial[(s-b)^2]}{\partial x} = g(s-b)(S_{ox} - S_{fx}) \quad (63)$$

여기서 S_{fx} 는 마찰항으로 다음과 같이 표현할 수 있다(Voellmy, 1955).

$$S_{fx} = \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{C_z^2 (s-b)} + \mu \cos(\theta_x) \quad (64)$$

마찬가지로 y 축 방향의 적분된 운동방정식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial[(s-b)v]}{\partial t} + \frac{\partial[(s-b)uv]}{\partial x} + \frac{\partial[(s-b)v^2]}{\partial y} + \frac{1}{2}g\frac{\partial[(s-b)^2]}{\partial y} = g(s-b)(S_{oy} - S_{fy}) \quad (65)$$

식 (61),(63),(65)가 바닥의 침식을 고려한 천수방정식이다. 바닥의 침식을 $\partial b/\partial t$ 를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial b}{\partial t} = \frac{\tau_b \cos(\theta) - \tau_c}{\rho \sqrt{u^2 + v^2}} \quad (66)$$

여기서 ρ 는 토석의 밀도이고, $\theta(= \tan^{-1} \nabla b)$ 는 바닥의 경사각이고, τ_b 와 τ_c 는 각각 총 전단응력과 한계 전단응력으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\tau_b = \rho g \left[(s-b)^2 \cos \theta \tan \phi + \left(\frac{u}{C_z} \right)^2 \right] \quad (67)$$

$$\tau_c = c + \rho g (s-b)(1-\lambda) \tan \phi_b \cos^2 \theta \quad (68)$$

여기서 ϕ 는 토석의 내부마찰각이고, C_z 는 Chezy의 바닥 조도계수이고, λ 는 투수압비(즉, 건조한 경우 $\lambda=0$ 이고, 물로 꽉 찬 경우 $\lambda=1$ 임)이고, c 와 ϕ_b 는 각각 바닥 재료의 소성 응력과 내부마찰각이고, θ 는 바닥의 경사각으로 다음과 같이 대각선 방향의 경사각으로 정하였다.

$$\tan \theta = \frac{b_{i+1,j+1} - b_{i,j}}{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}} \quad (69)$$

▣ 수평 2차원 천수방정식 수치모형 개발

Hybrid 유한체적 유한차분법을 사용하여 지배방정식의 시간미분항을 차분하였다. 유한체적법으로는 이류항을 차분하기 위하여 근사적인 Riemann solver를 사용하였다. 천수방정식 (61),(63),(65)를 수평 2차원 보존형 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F(U)}{\partial x} + \frac{\partial G(U)}{\partial y} = H(U) \quad (70)$$

여기서

$$U = \begin{bmatrix} s \\ (s-b)u \\ (s-b)v \\ b \end{bmatrix} \quad (71)$$

$$F(U) = \begin{bmatrix} (s-b)u \\ (s-b)u^2 + \frac{1}{2}g(s-b)^2 \\ (s-b)uv \\ 0 \end{bmatrix} \quad (72)$$

$$G(U) = \begin{bmatrix} (s-b)v \\ (s-b)uv \\ (s-b)v^2 + \frac{1}{2}g(s-b)^2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (73)$$

$$H(U) = \begin{bmatrix} 0 \\ g(s-b)(S_{ox} - S_{fx}) \\ g(s-b)(S_{oy} - S_{fy}) \\ \frac{\tau_b \cos(\theta) - \tau_c}{\rho \sqrt{u^2 + v^2}} \end{bmatrix} \quad (74)$$

식 (70)의 시간미분항을 분리법(splitting method)을 사용하여 차분함. 첫 번째 단계에서 식 (70)의 $H(U)$ 를 제외하여 다음과 같이 차분함.

$$U_{i,j}^p = U_{i,j}^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} [F_{i+1/2,j} - F_{i-1/2,j}] - \frac{\Delta t}{\Delta y} [G_{i,j+1/2} - G_{i,j-1/2}] \quad (75)$$

위 식에서 n 은 현재의 시간 단계를 의미하고, p 는 미래의 $(n+1)$ 번째 시간 단계를 의미함. 첫 번째 단계에서 연속방정식으로부터 토석의 수위 s^{n+1} 를 구함. 두 번째 단계에서 식 (70)의 $\partial F(U)/\partial x$ 와 $\partial G(U)/\partial y$ 를 제외하여 다음과 같이 차분함.

$$\frac{\partial U_{i,j}}{\partial t} = H(U_{i,j}^p) \quad (76)$$

두 번째 단계에서 $U_{i,j}^{n+1}$ 를 구하기 위해 수평 1차원 천수방정식을 수치해석법 즉, 식 (24)–(46)의 과정과 동일하게 implicit 방법을 사용함. 두 번째 단계에서 p 는 n 번째 시간 단계를 의미함.

▣ 바닥의 침식이 발생한 경우 수리모형실험자료와 비교하여 수치모형 검증

- 바닥의 침식이 발생한 경우 수평 1차원 수치모형 검증 1: 댐 개방 후 바닥의 침식이 발생한 실험 (Spinewine and Zech, 2007)에서 수면과 바닥의 공간분포 비교

수심이 35cm인 댐을 갑자기 열었을 때 댐 밖의 건조한 바닥의 영역으로 물이 전파하고 바닥의 침식이 발생하는 현상을 천수방정식을 사용하여 수치 모의하였다. 계산영역은 6m이고, 댐의 벽은 계산영역의 가운데 위치한다. 바닥의 재료의 밀도는 $\rho_s = 1580 \text{ kg/m}^3$ 이고, 공극율이 0.42이고, Chezy의 바닥의 조도계수는 $C_z = 16 \text{ m}^{1/2} \text{ s}^{-1}$ 이고, 투수압비는 $\lambda = 0.6$ 이고, 소성응력은 $c = 0 \text{ Pa}$ 이고, 바닥재료의 내부마찰각은 $\phi_b = 4^\circ$ 이고, 격자간격을 $\Delta x = 0.025 \text{ m}$ 로 두고, 시간단계 Δt 를 정하기 위해 CFL=0.5로 두었다. 댐 개방 후 $t = 0.5 \text{ s}$, 1.0 s , 1.5 s 시간에 수면과 바닥의 공간분포를 측정하였다. 그림 26에 본 연구에서 수행한 수치실험결과와 D'Aniello et al.(2015)의 수치실험결과와 모형실험자료를 함께 비교하였다. 본 연구의 수치실험결과가 바닥의 침식을 잘 재현할뿐만 아니라 D'Aniello et al.의 수치실험결과보다 수면과 바닥의 침식을 더 정확히 재현하였다.

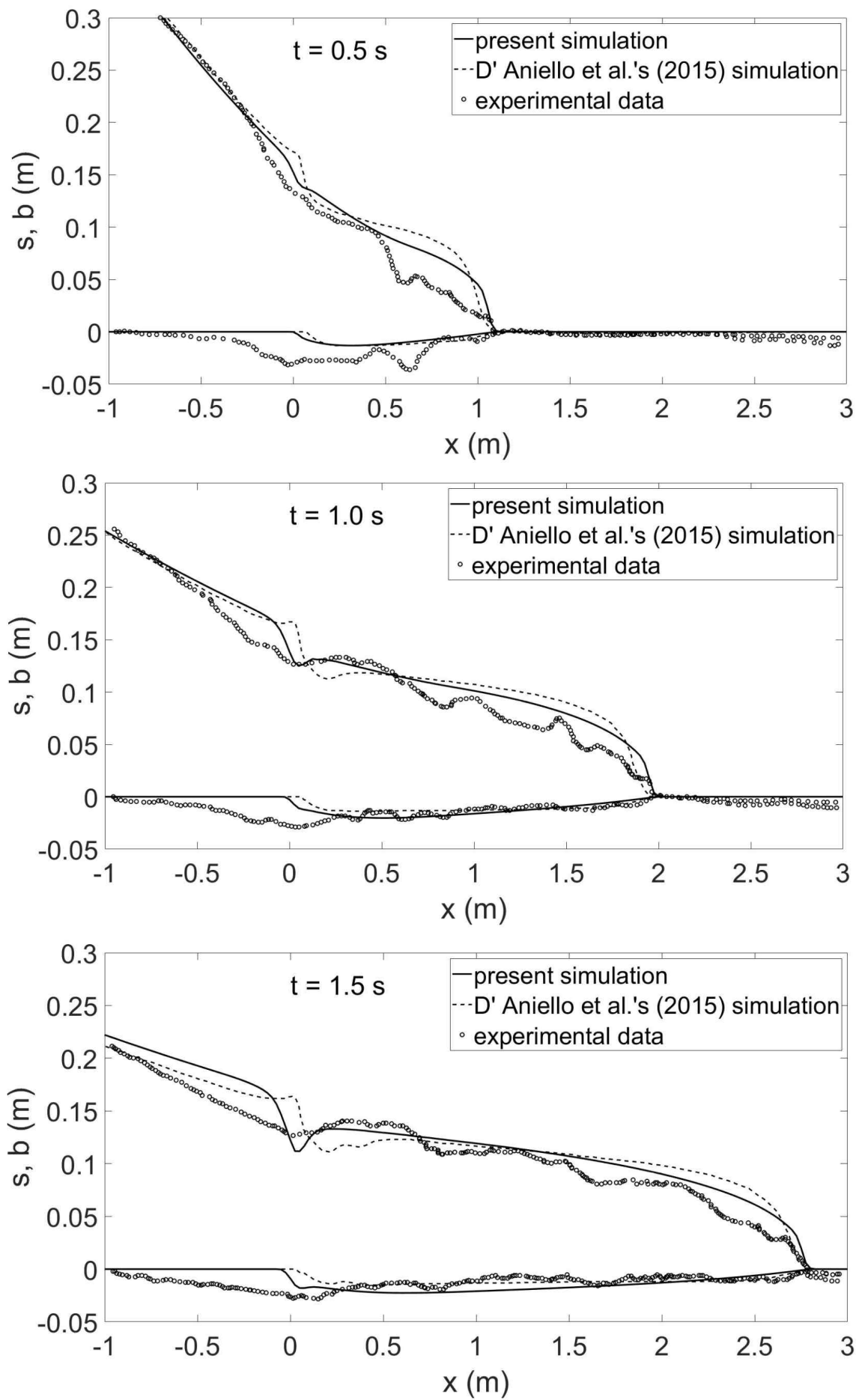


그림 26. 댐 개방 후 수면 및 바닥의 공간분포의 수치실험자료와 모형실험자료(D Aniello et al., 2015)의 비교

- 바닥의 침식이 발생한 경우 수평 1차원 수치모형 검증 2: USGS의 산사태 재현 토석류 실험 (Iverson et al., 2010)에서 토석 높이 시계열 비교

미국 USGS(Iverson et al., 2010) 연구팀은 31° 의 급경사면에서 부피가 $6m^3$ 인 토석 댐을 갑자기 열어 산사태를 발생시켜 토석이 아래로 흘러내리고, 6m~53m 떨어진 지점에 있는 토석(두께: 12cm, 함수비: 0.25)이 침식되고, 2.4° 의 완경사면에서 퇴적되는 현상을 모형실험으로 재현하였다(그림 11 참조). 그들은 댐에서 32m, 66m 떨어진 2개 지점(즉, Gauge 1, 2)에 토석 높이의 시계열을 측정하였다(그림 27 참조). 경사면의 길이는 95m이고, 경사면의 폭이 31° 경사면에서 2m이고 2.4° 경사면에서 4m이고, 경사면의 좌우 벽 높이가 1.2m이다. 본 연구에서 천수방정식을 사용하여 이러한 토석의 전파와 바닥의 세굴과 퇴적 현상을 수치 모의하였다. 토석의 밀도는 $\rho_s = 2700 kg/m^3$ 이고, Chezy의 바닥조도계수는 $C_z = 20 m^{1/2} s^{-1}$ 이고, 토석의 내부마찰각은 $\phi = 15^\circ$ 이고, 공극율이 0.4이고, 함수비는 $\theta = 0.25$ 이고, 투수압비는 $\lambda = 0.65$ 이고, 바닥의 조도계수는 $C_z = 20 m^{1/2} s^{-1}$ 이고, 바닥재료의 내부마찰각은 $\phi_b = 40^\circ$ 이고, 바닥재료의 소성응력은 $c = 0 Pa$ 이고, 격자간격을 $\Delta x = 0.025m$ 로 두고, 시간단계 Δt 를 정하기 위해 $CFL = 0.5$ 로 두었다.

댐에서 32m와 66m 떨어진 지점(즉, Gauge 1, 2)에 토석 높이의 시계열을 측정하였다. 그림 28에 본 연구에서 수행한 수치실험결과와 Ouyang et al.(2015)의 수치실험결과와 모형실험자료를 함께 비교하였다. Gauge 1 지점에서 토석 높이가 초기에 12cm이었지만 토석류가 도달한 후 바닥 침식이 발생하여 12cm 이하로 작아진 것을 볼 수 있다. 본 수치해석 결과도 이러한 침식을 잘 재현하였다. Gauge 2에서 토석 높이가 초기에 0cm이었지만 토석류가 도달한 후 오히려 퇴적이 발생하여 약 5cm로 증가한 것을 볼 수 있다. 본 연구의 수치실험결과가 Ouyang et al.의 수치실험결과보다 토석 높이를 더 정확히 재현하였다. 특히 본 연구 결과가 토석 높이의 최대값이 발생하는 시간을 정확히 재현하였다.

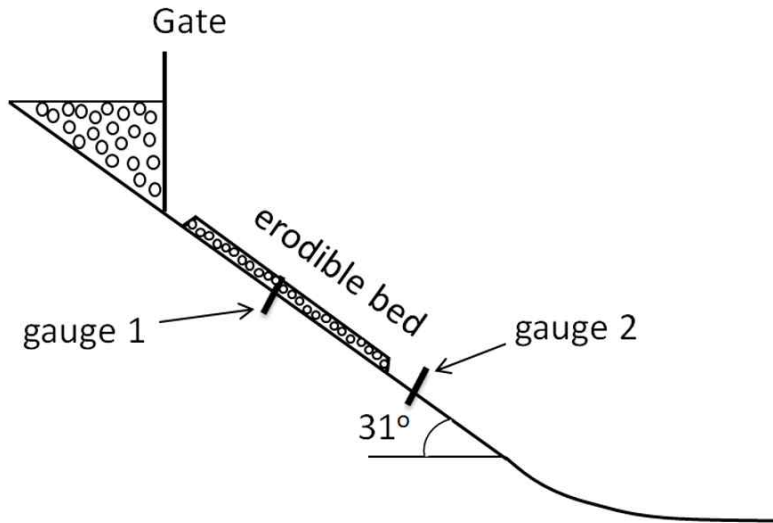


그림 27. USGS의 산사태 재현 토석류 실험 단면도 (바닥 침식 발생) (Iverson et al., 2010)

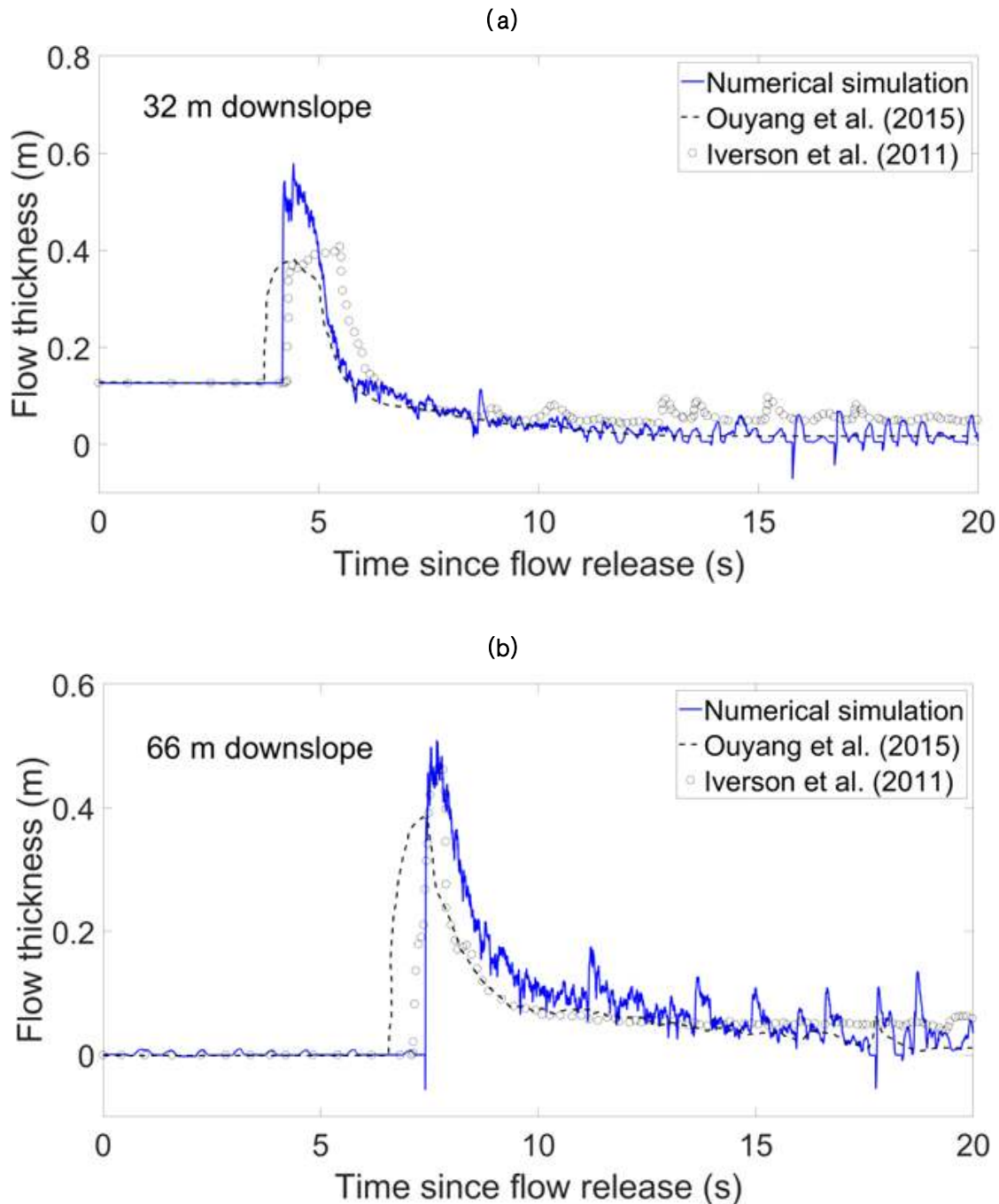


그림 28. 토석 댐 개방 후 바닥의 침식이 발생한 경우 토석 높이 시계열의 수치실험자료와 모형실험자료(Iverson et al., 2010) 비교: (a) Gauge 1, (b) Gauge 2.

- 바닥 침식이 발생한 경우 수평 1차원 수치모형 검증 3: 농어촌연구원의 산사태 재현 토석류 실험에서 토석 높이 시계열 비교

본 연구의 공동연구팀인 농어촌연구원에서 24° 의 경사면에서 부피가 $1.68m^3$ 인 토석의 댐을 갑자기 열어 산사태를 발생시켜 토석이 아래로 흘러내리고 수평면에서 퇴적되는 현상을 모형 실험으로 재현하였다(그림 15,16 참조). 경사면의 길이는 11.41m이고, 경사면의 폭이 1.5m이고 좌우 벽 높이가 1m이다. 경사면에서 총 4개 지점에서 토사 높이의 시계열을 측정하였다. gage 1, 2, 3, 4는 댐의 입구에서 1.93m, 4.21m, 7.21m, 10.20m 떨어진 지점에 있다. 총 16가지 실험 조건 중에 침식이 발생하지 않는 경우가 8가지(즉, Case01~08)이고, 침식이 발생하는 경우는 8가지(즉, Case09~16)이다. 표 5에 침식이 발생하지 않은 총 8가지 경우의 실험 조건과 수치실험조건(즉, 내부마찰계수와 투수압비)을 제시하였다. 토사가 모래만 있는 경우(즉, Case09~13,16)와 모래와 자갈이 섞여 있는 경우(즉, Case14,15)로 구분하였다. 또한 바닥 토사가 모래만 있는 경우(즉, Case09~14,16)와 모래와 자갈이 섞여 있는 경우(즉, Case15)로 구분하였다. 바닥 토사의 위치를 하류 수평면에서 시작하여 경사면에 둔 경우(즉, Case09,10)와 하류 수평면에서 2m 떨어진 지점에서 시작하여 경사면에서 둔 경

우(즉, Case11~16)로 구분하였다. 또한, 바닥 토사의 높이를 0.1m로 둔 경우(즉, Case09)와 0.05m로 둔 경우(즉, Case10~16)로 구분하였다(그림 29 참조). 또한, 각 경우에 토사의 함수비와 바닥 토사의 함수비도 다르게 두었다.

본 연구에서 Case12~14의 경우에 천수방정식을 사용하여 이러한 토석의 전파, 침식, 퇴적 현상을 수치 모의하였다. 토석의 밀도를 $\rho_s = 2350 \text{ kg/m}^3$ 로 두고, Manning의 바닥조도계수를 $n = 0.018 \text{ m}^{-1/3}$ 로 두고, 격자간격을 $\Delta x = 0.01 \text{ m}$ 로 두었다. 댐에서 1.93m, 4.21m, 7.21m, 10.20m 떨어진 4개 지점(즉, Gauge 1,2,3,4)에 토석 높이의 시계열을 측정하여 수치실험결과와 모형실험자료를 그림 30~33에 비교하였다. 모든 경우에 관측점에서 토석 높이의 최대치가 발생하는 시간을 수치실험이 잘 재현하였다. 대체로 토사의 침식이 상류에 더 많이 발생하였다. 토사의 침식이 발생하는 경우 침식이 발생하지 않는 경우에 비해 수치모형의 정확도가 떨어졌다. 이는 하류에 전파하는 토사와 바닥 토사 간의 역학적인 현상이 아주 복잡하기 때문에 발생하는 현상으로 판단된다.

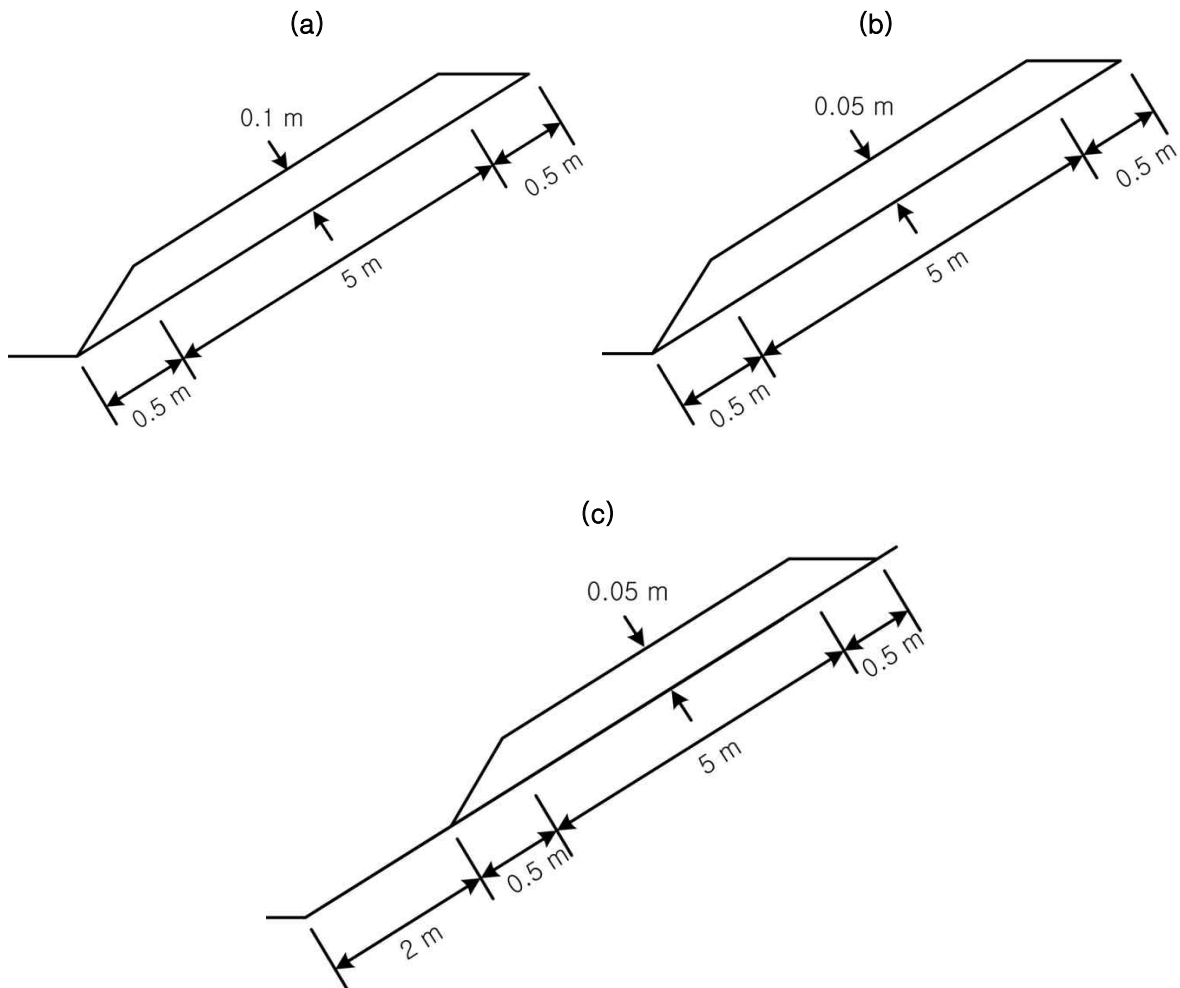


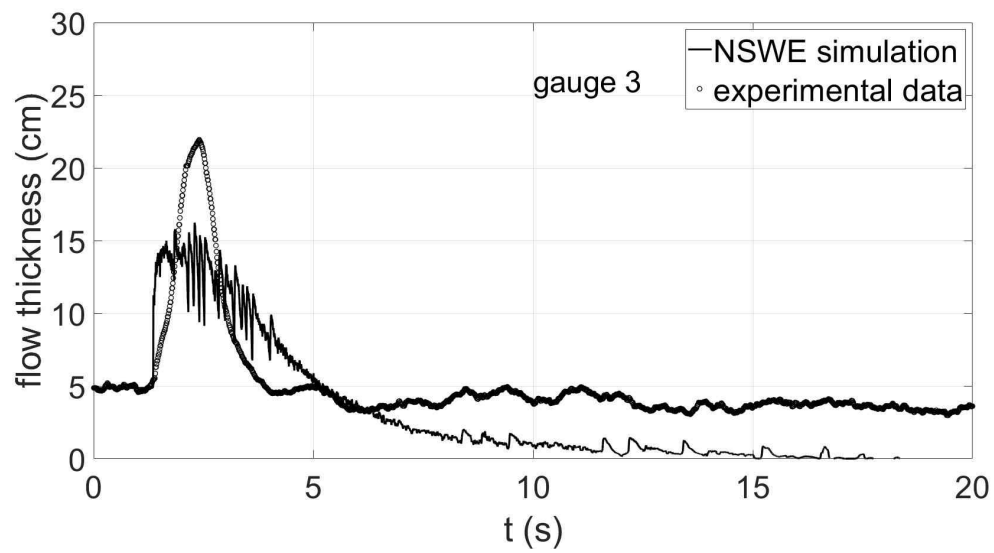
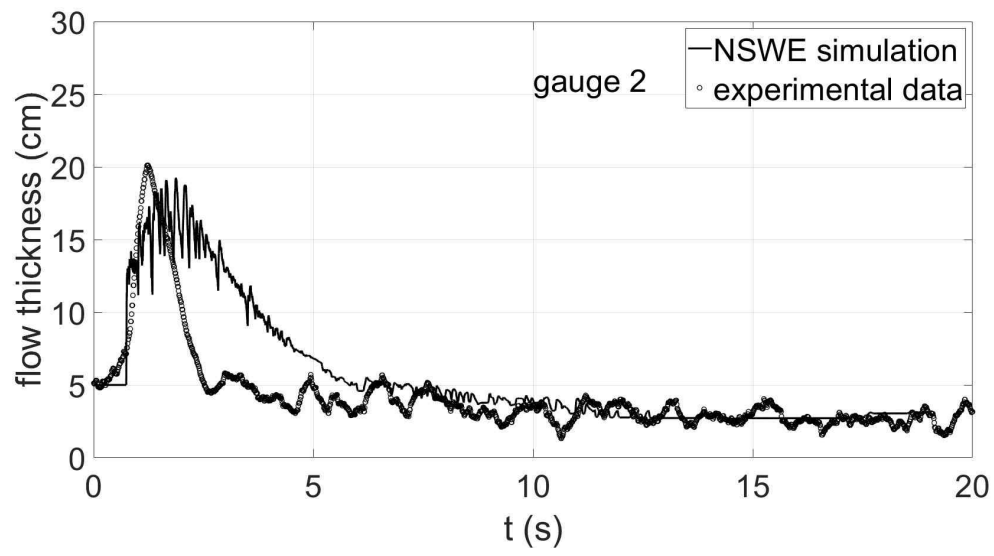
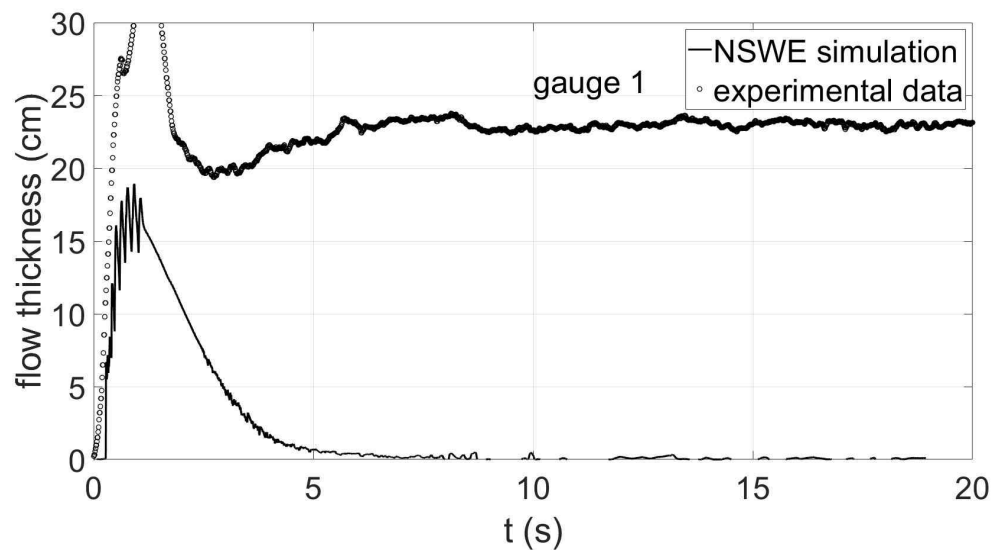
그림 29. 농어촌연구원에서 수행한 토석류 실험에서 바닥 토사 위치도 (바닥 침식 발생):

(a) Case09, (b) Case10, (c) Case11~16.

표 5. 농어촌연구원 토석류 실험 조건과 수치실험 조건 (바닥 침식 발생)

구 분	Case09	Case10	Case11	Case12
토사	모래	모래	모래	모래
토사 체적	1.6845 m³	1.6845 m³	1.6845 m³	1.6845 m³
토사 중량 (건조상태)	2.2741 tonf	2.2741 tonf	2.2741 tonf	2.2741 tonf
토사 내 물의 중량	0.9548 tonf	0.9133 tonf	0.9346 tonf	0.8245 tonf
중량 중량함수비	41.99%	40.16%	41.10%	36.26%
바닥 토사	모래	모래	모래	모래
바닥 토사 위치	경사로 하부 5 m	경사로 하부 5 m	경사로 중앙 5 m	경사로 중앙 5 m
바닥 토사 중량 (건조상태)	1.0125 tonf	0.5063 tonf	0.5063 tonf	0.5063 tonf
바닥 토사 내 물의 중량	0.2625 tonf	0.062 tonf	0.108 tonf	0.095 tonf
바닥 토사 중량함수비	25.9%	17.58%	21.33%	18.8%
내부마찰계수(μ)	–	–	–	0.300
투수압비(λ)	–	–	–	0.5

구 분	Case13	Case14	Case15	Case16
토사	모래	모래+자갈	모래+자갈	모래
토사 체적	1.6845 m³	1.6845 m³	1.6845 m³	0.421 m³
토사 중량 (건조상태)	2.2741 tonf	2.5603 tonf 모래 : 1.999 tonf 자갈 : 0.562 tonf	2.5085 tonf 모래 : 2.049 tonf 자갈 : 0.459 tonf	0.568 tonf
토사 내 물의 중량	0.8639 tonf	0.8043 tonf	0.6065 tonf	0.206 tonf
토사 중량함수비	38.0%	31.4%	24.2%	48.9%
바닥 토사	모래	모래	모래+자갈	–
바닥 토사 위치	경사로 중앙 5 m	경사로 중앙 5 m	경사로 중앙 5 m	–
바닥 토사 중량 (건조상태)	0.5063 tonf	0.5063 tonf	0.5063 tonf 모래 : 0.456 tonf 자갈 : 0.103 tonf	–
바닥 토사 내 물의 중량	0.092 tonf	0.0705 tonf	0.1566 tonf	–
바닥 토사 중량 함수비	18.17%	13.92%	28.02%	–
내부마찰계수(μ)	0.325	0.300	0.150	
투수압비(λ)	0.7	0.5	0.5	



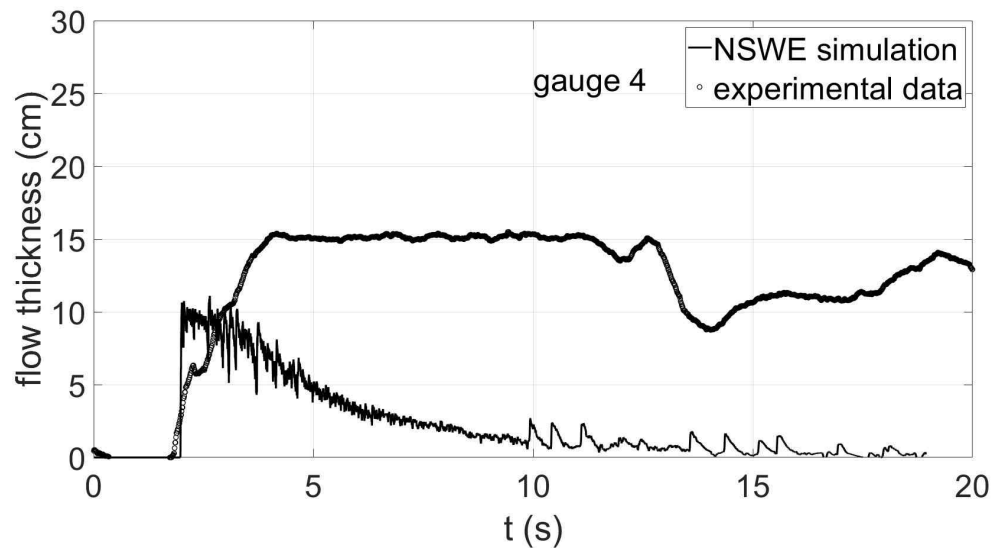
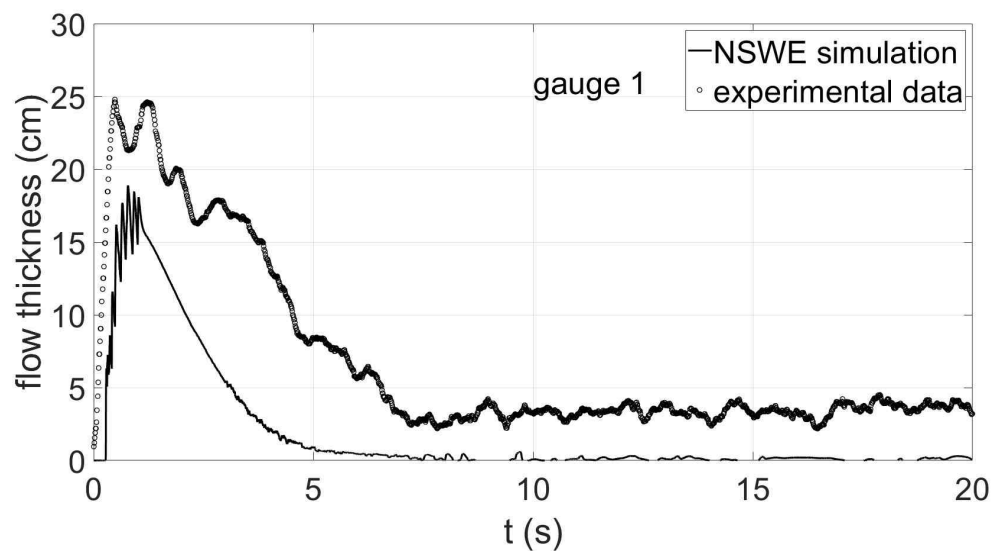


그림 30. 토석 댐 개방 후 토석 높이 시계열의 수치실험자료와 모형실험자료(농어촌 연구원) 비교:
Case 12.



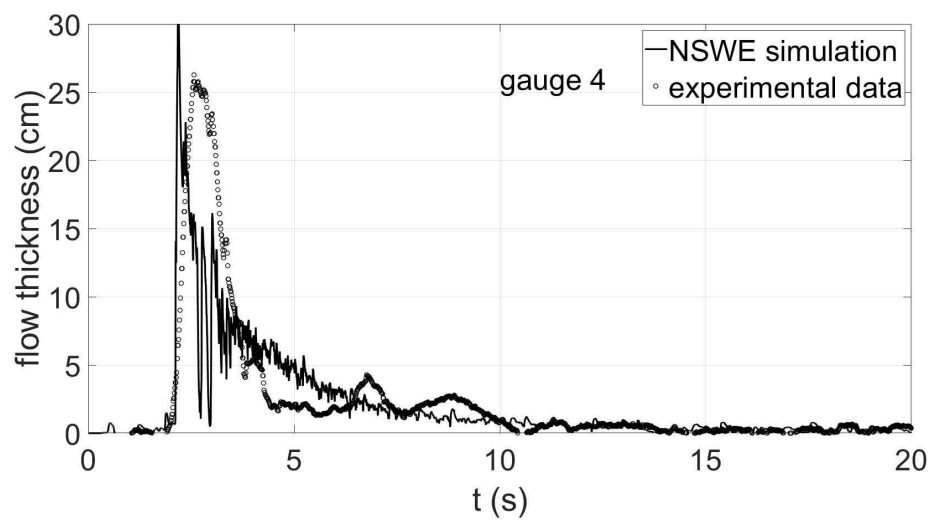
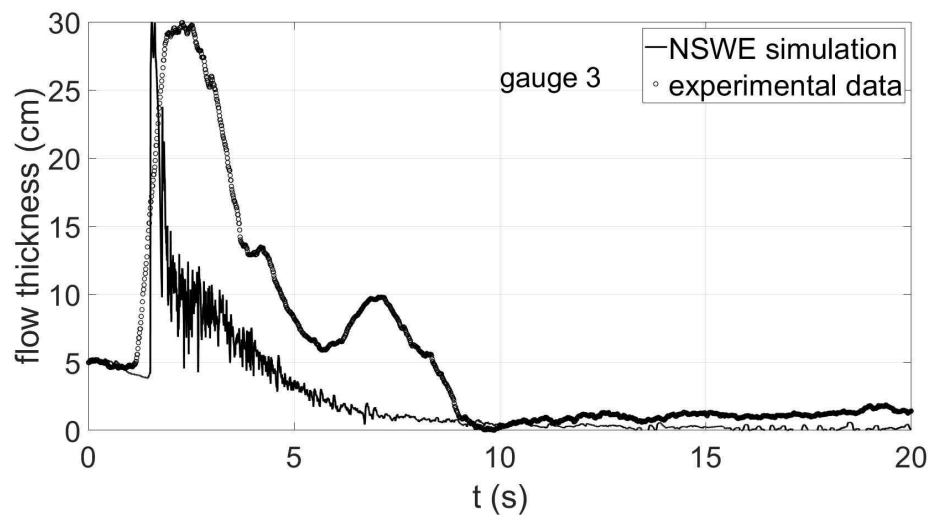
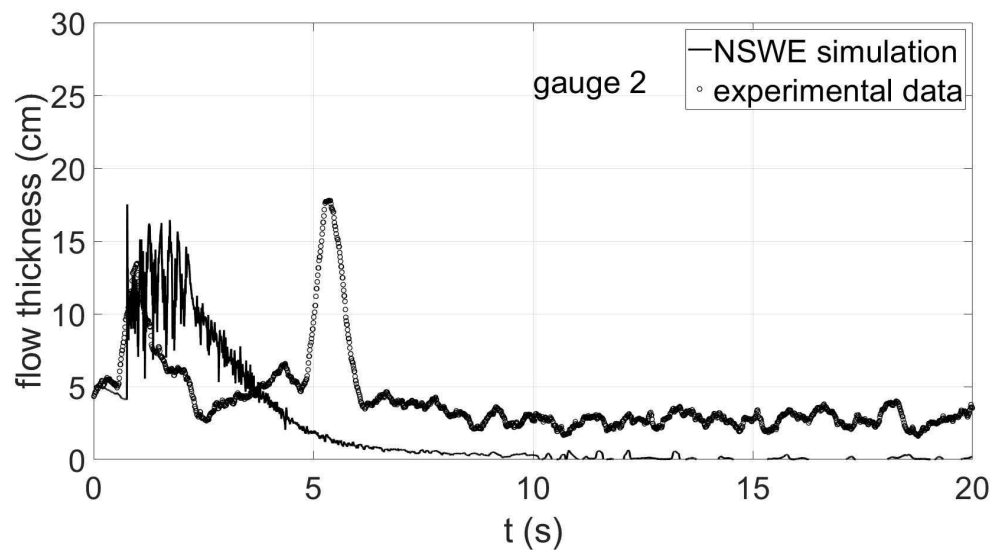
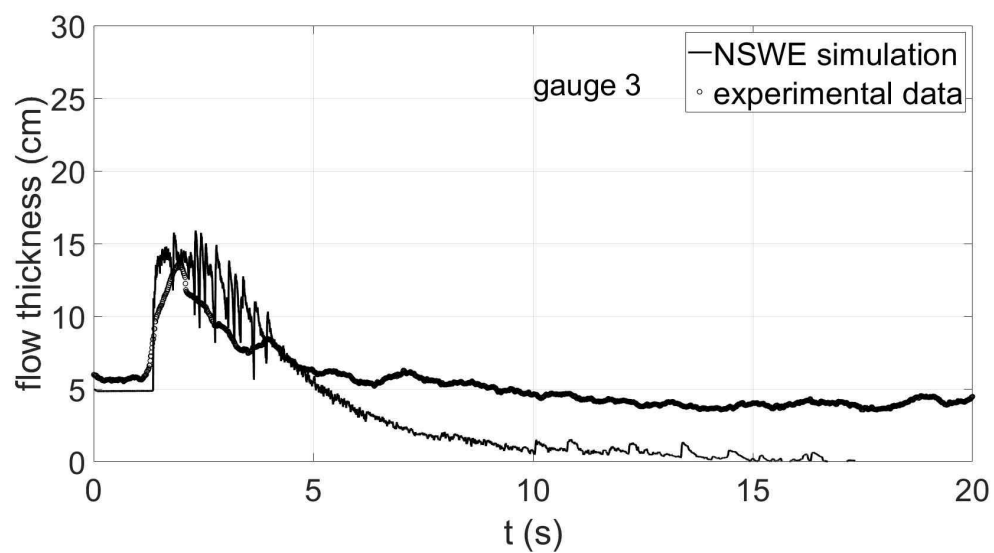
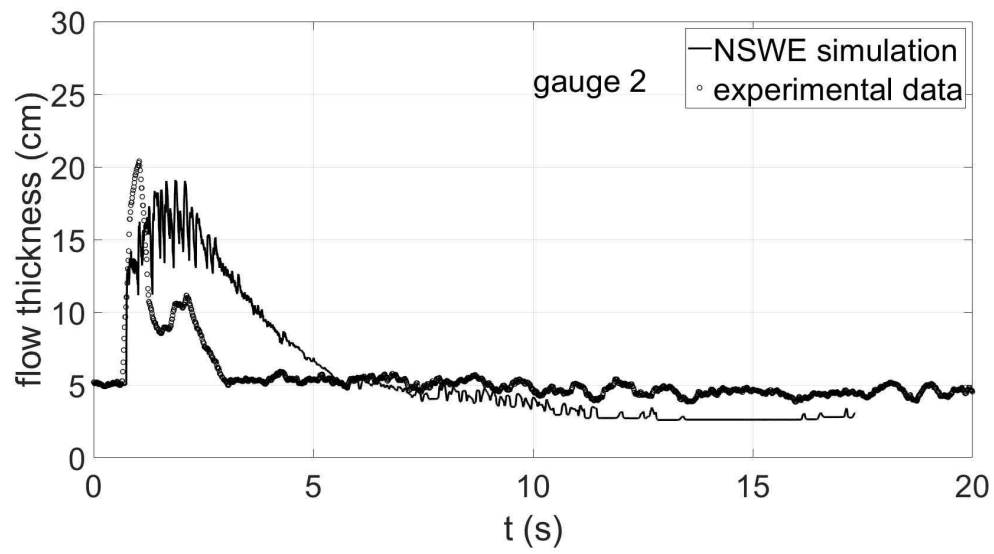
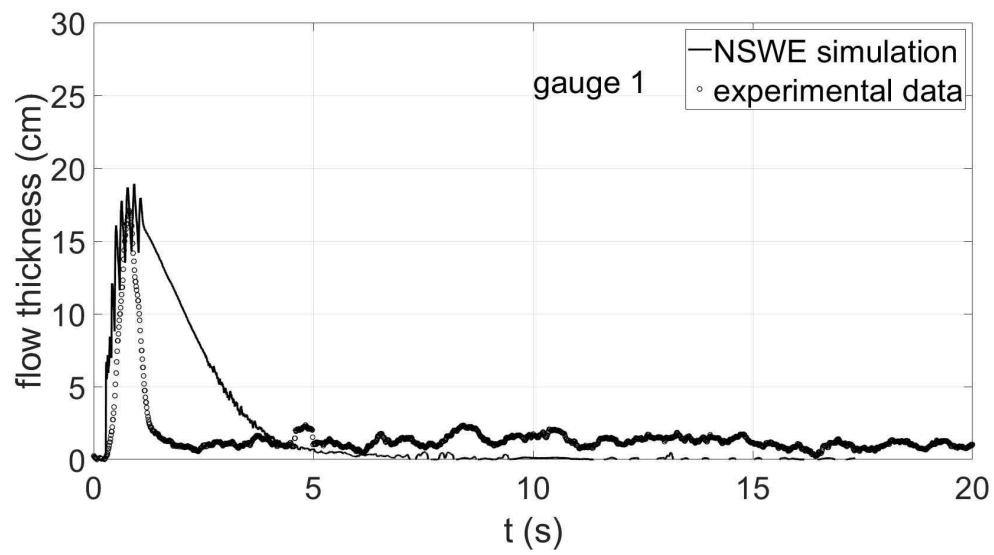


그림 31. 토석 댐 개방 후 토석 높이 시계열의 수치실험자료와 모형실험자료(농어촌 연구원) 비교:
Case 13.



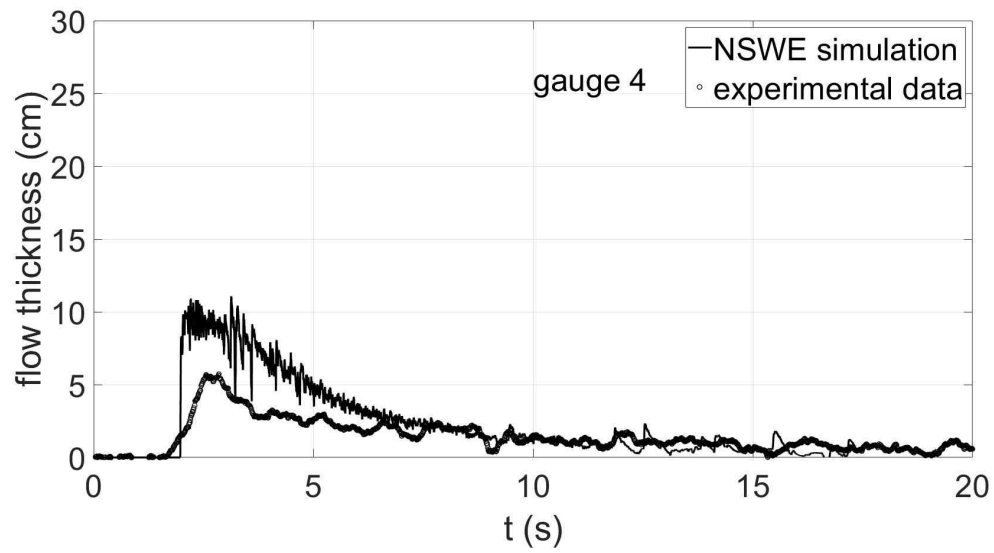
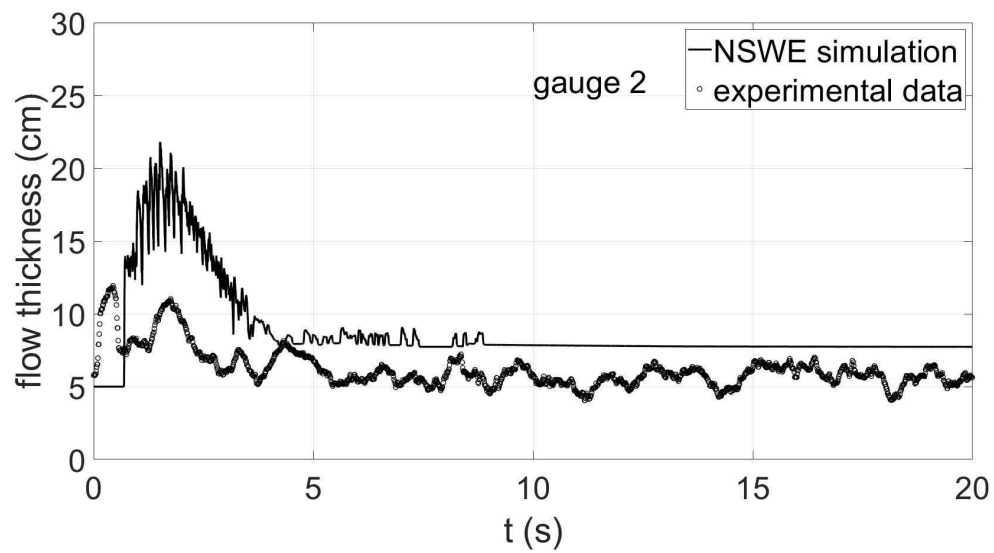
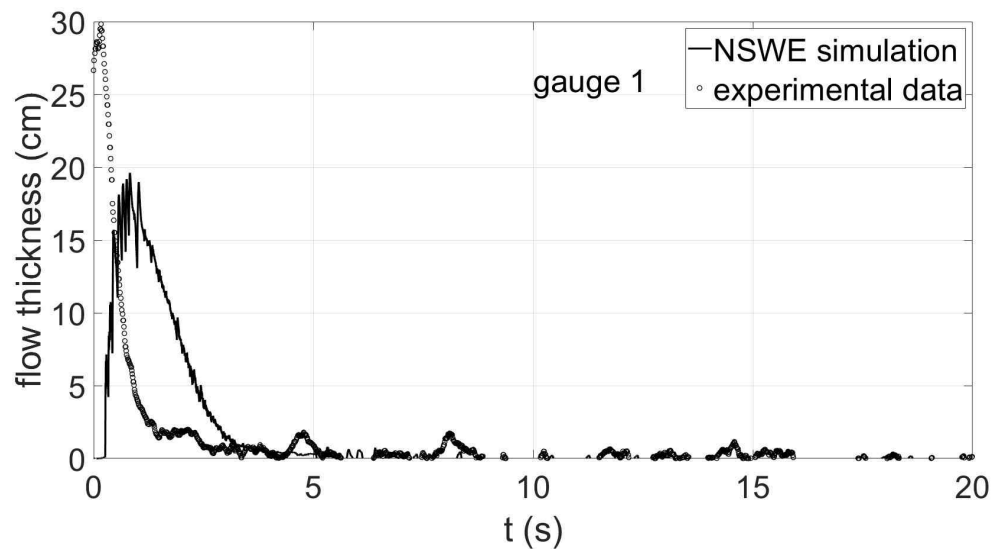


그림 32. 토석 댐 개방 후 토석 높이 시계열의 수치실험자료와 모형실험자료(농어촌 연구원) 비교:
Case 14.



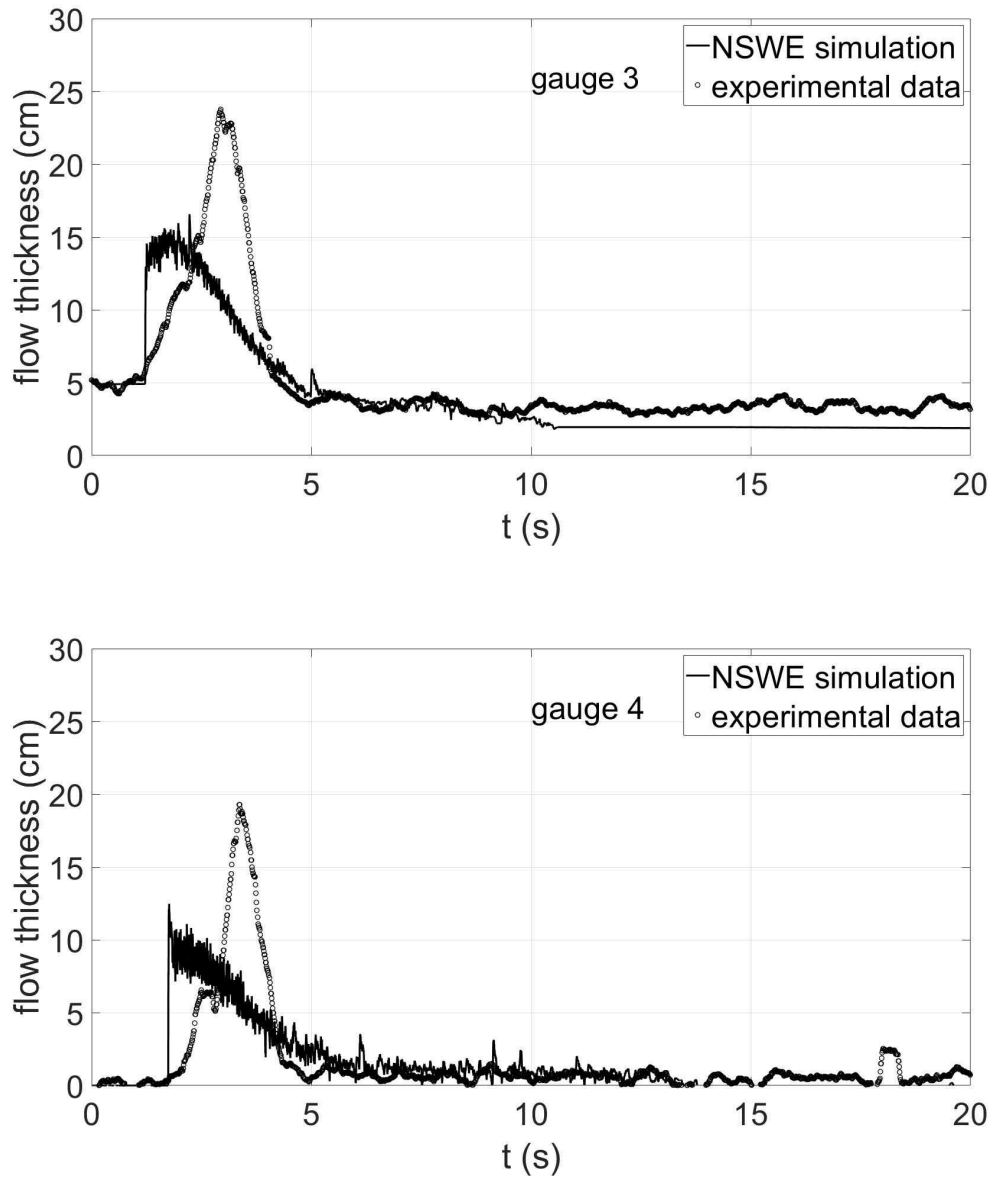


그림 33. 토석 댐 개방 후 토석 높이 시계열의 수치실험자료와 모형실험자료(농어촌 연구원) 비교:
Case 15.

▣ 개발된 비선형 2차원 수치모형의 실제 적용성 검증 : 우면산 산사태 수치 모의

2011년 6월 27일 폭우로 인하여 서울 소재 우면산의 4개 지역(래미안 아파트, 신동아아파트, 전원 마을, 형촌마을)에서 산사태가 발생하여 18명의 사망자가 발생하고 여러 곳에서 토석이 쌓여 큰 피해를 입었다(한국지반공학회, 2011)(그림 34 참조). 이 산사태로 20개의 하천영역에서 33개의 토석류가 발생하였다(Jeong et al., 2015). 산사태 발생 지역의 고도는 75m~300m이고, 최대 경사각은 40°이다. 그 당시 폭우는 최대강우강도가 112.5 mm/h이었고, 16시간 동안 총 강우량이 306.5 mm이었다. 토석은 자갈, 모래, 실트, 식생 등으로 복합적으로 구성되어 있다. 본 연구에서는 신동아아파트에서 발생한 산사태를 수치 모의하였다. 신동아아파트 산사태 발생 지역은 그림 35에서 W3에 위치하고, 침식이 특히 심하게 발생하였다. 토석의 밀도는 $\rho_s = 2020 \text{ kg/m}^3$ 이고, 토석의 공극율은 0.4이고, 토석의 내부마찰각은 $\phi = 5.71^\circ$ 이고, Chezy의 바닥조도계수는 $C_z = 12 \text{ m}^{1/2} \text{ s}^{-1}$ 이고, 바닥의 투수압비는 $\lambda = 0.7$ 이고, 토석의 내부마찰각은 $\phi = 5.71^\circ$ 임. 격자간격을 $\Delta x = \Delta y = 5 \text{ m}$ 로 두고, 시간단계 Δt 를 정하기 위해 CFL=0.5로 두었다.

산사태 발생 시 토석의 체적은 105 m^3 이었으나 하류에 퇴적된 토석의 체적은 23904 m^3 로 200배 이상으로 증가하였다. 이는 바닥의 침식이 엄청나게 발생하였음을 의미한다. 그림 36에 산사태 발생 후

시간의 경과에 따른 토석 높이의 공간분포를 도시하였다. 산사태 발생 시에는 고도 250m 지점에서 $105m^3$ 체적의 토석이 흐르기 시작하였다(그림 36(a) 참조). 폭우로 인하여 토석에 많은 양의 물이 유입되면서 바닥의 저항력이 약해져서 경사각 30° , 고도 100m~250m인 곳에서 바닥의 침식이 발생하기 시작하였다. 산사태 발생 후 $t=100s \sim 200s$ 경과 시 토석 높이가 최대 3m까지 증가하였고, 신동아 아파트까지 도달하였다(그림 36(b),(c) 참조). 산사태 발생 후 $t=300s$ 경과 시 경사각 15° , 고도 80~100m인 곳에서 토석의 속도가 느려지고, 중곡에는 고도 75m에 위치한 도로까지 토석이 쌓였다(그림 36(d) 참조). 그림 37에 산사태 발생 후 $t=300s$ 경과 시 바닥 침식 깊이의 공간분포를 도시하였다. 급경사의 상류에서는 바닥이 최대 3m로 침식하였고, 완경사의 하류에서는 0.5m 침식하였다. 수치해석으로 재현한 토석의 퇴적량은 $20233m^3$ 로 관측치인 $23904m^3$ 에 비해서 15% 오차로 비교적 정확한 값이다. 그림 38에 산사태 발생 후 시간의 경과에 따른 토석의 공간분포를 위성사진에 도시하였다. 수치해석에서 보이는 토석이 위치한 곳과 위성사진에서 보이는 바닥의 침식이 발생한 곳이 거의 일치함을 볼 수 있다.

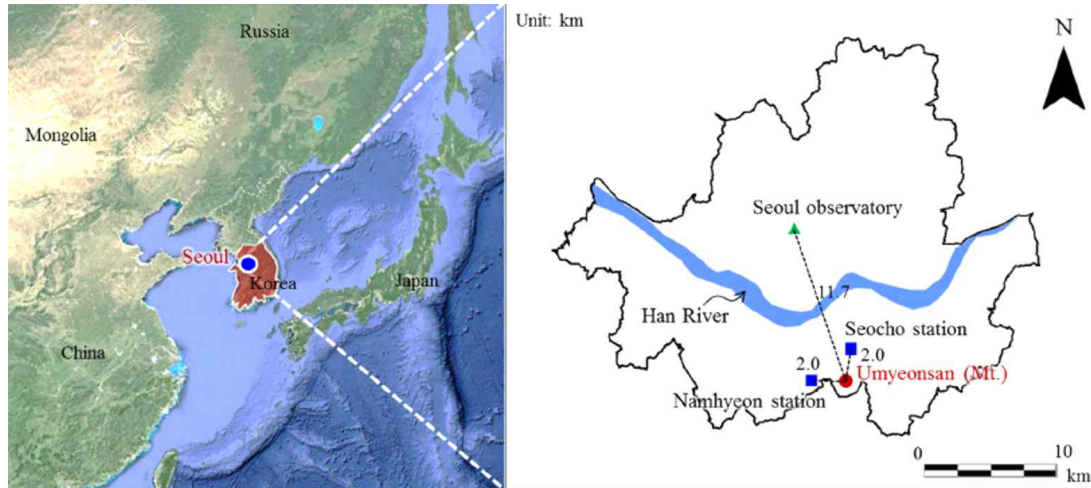


그림 34. 우면산 위치도

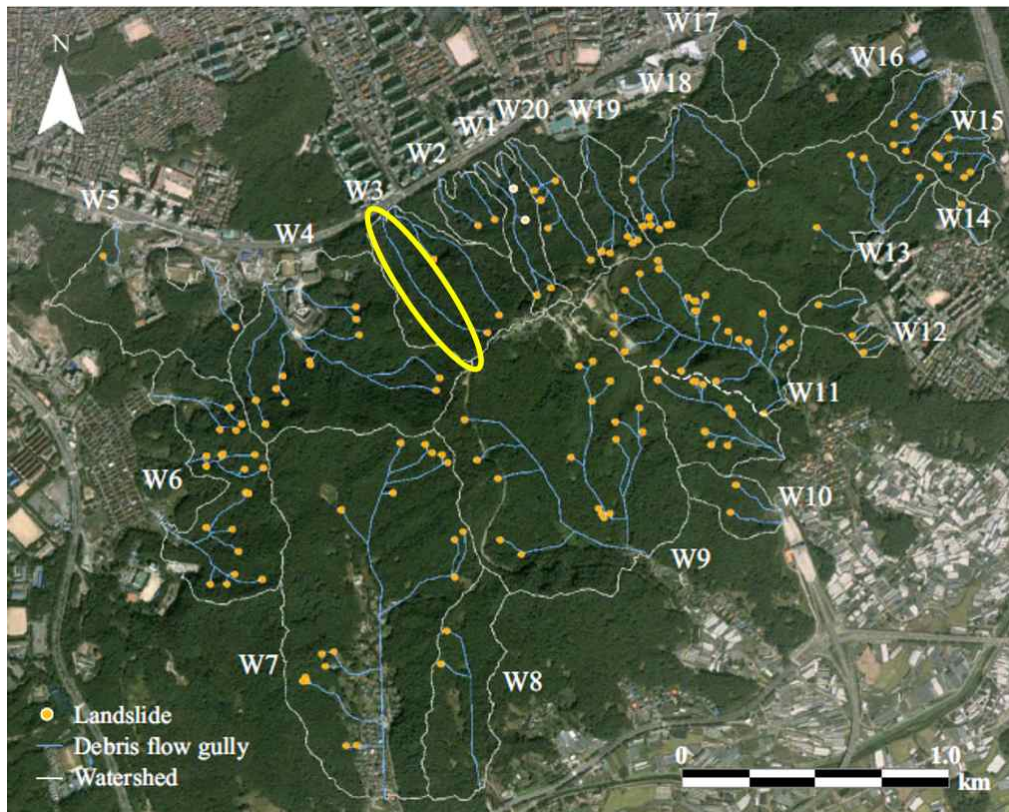
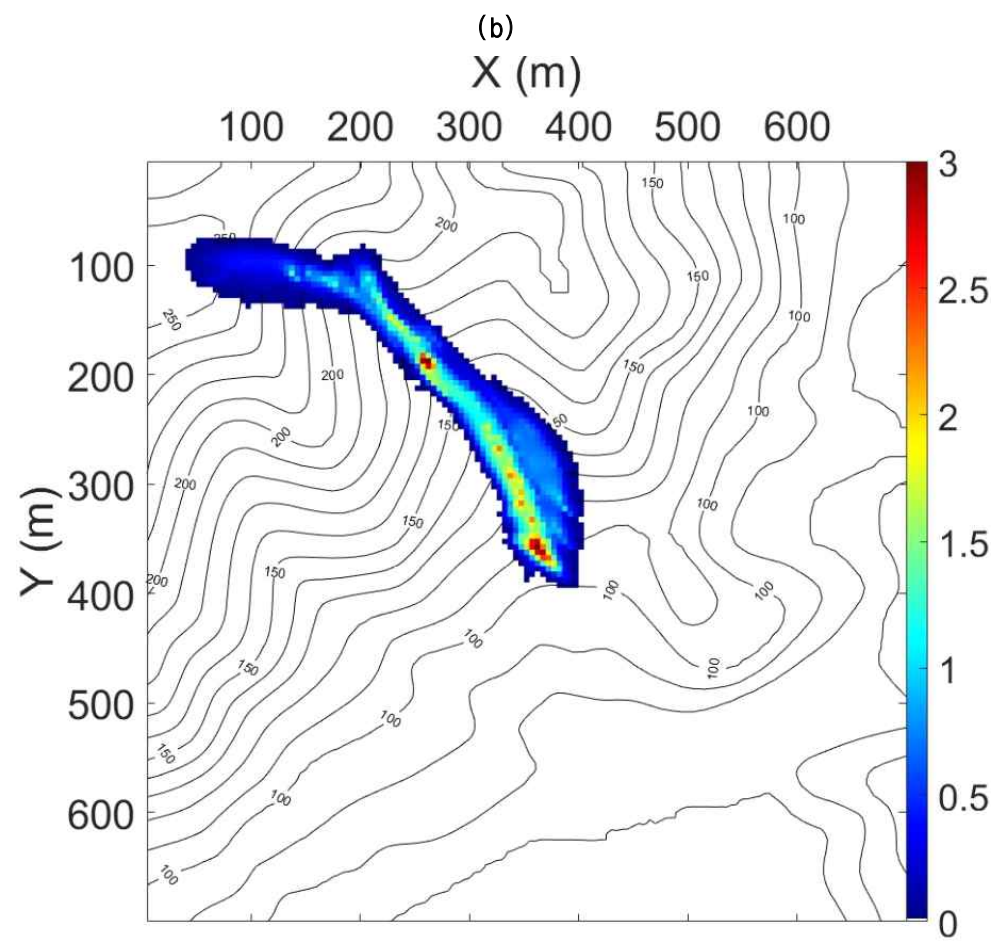
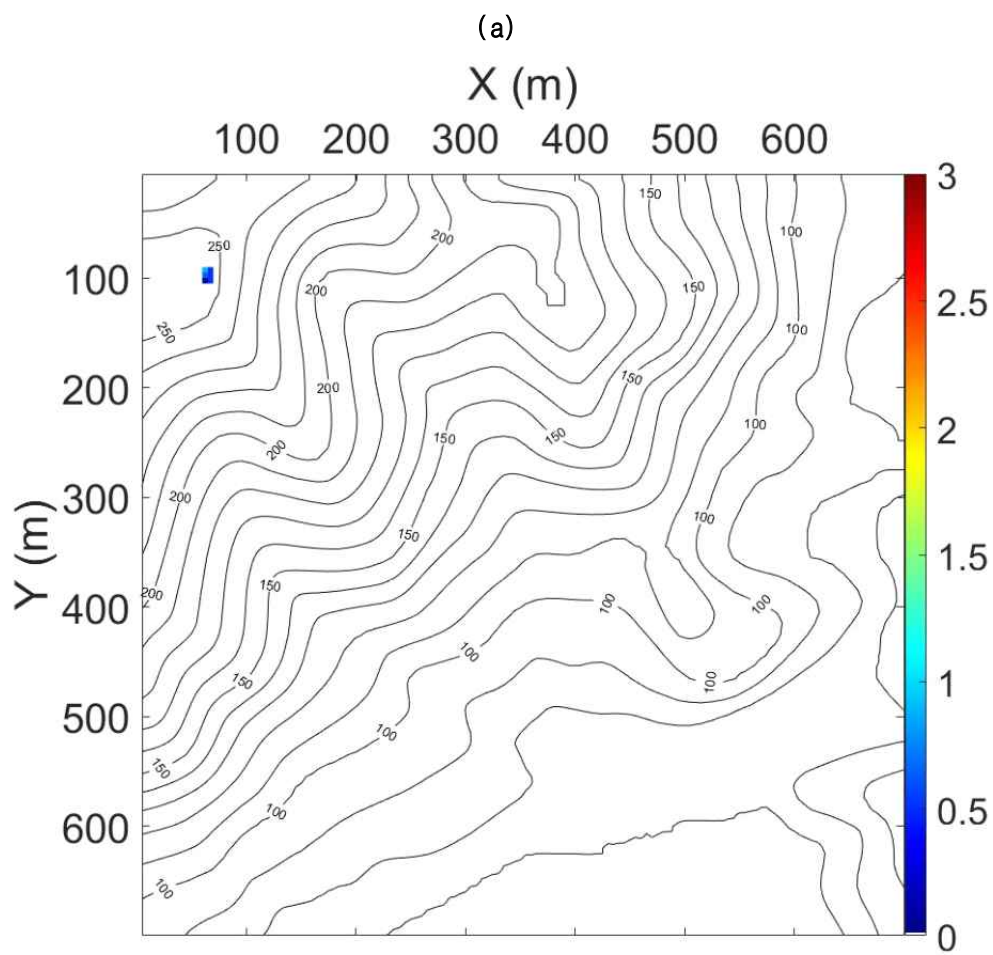


그림 35. 우면산 신동아아파트 산사태 발생 위치도(Jeong et al., 2015): W3에 위치함



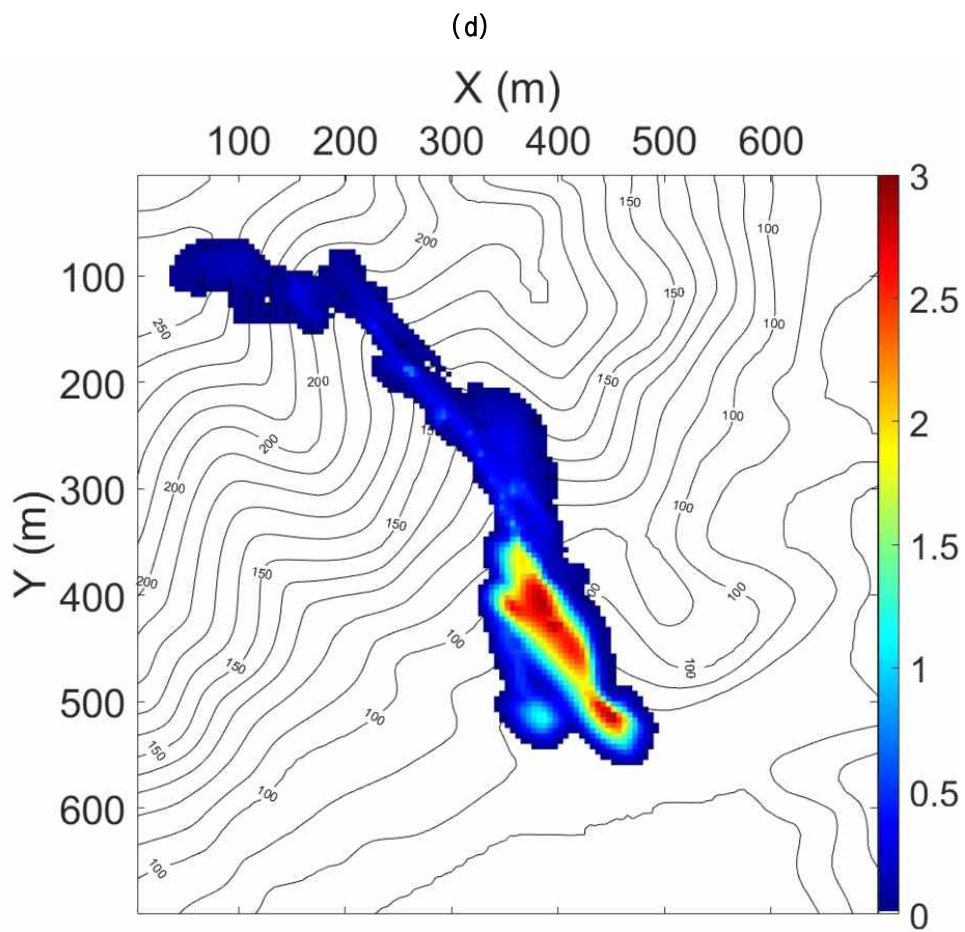
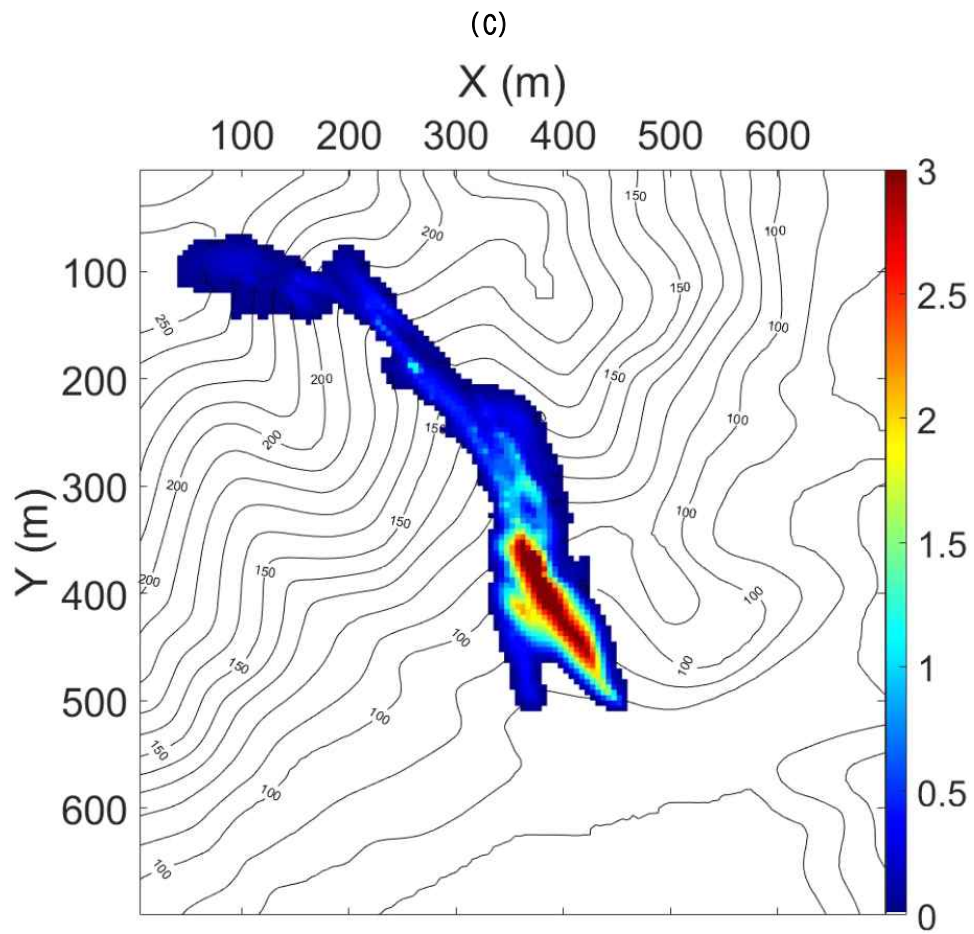


그림 36. 우면산 신동아아파트 산사태 수치 모의로 재현한 토석 높이의 공간분포: (a) $t = 0s$,
(b) $t = 100s$, (c) $t = 200s$, (d) $t = 300s$.

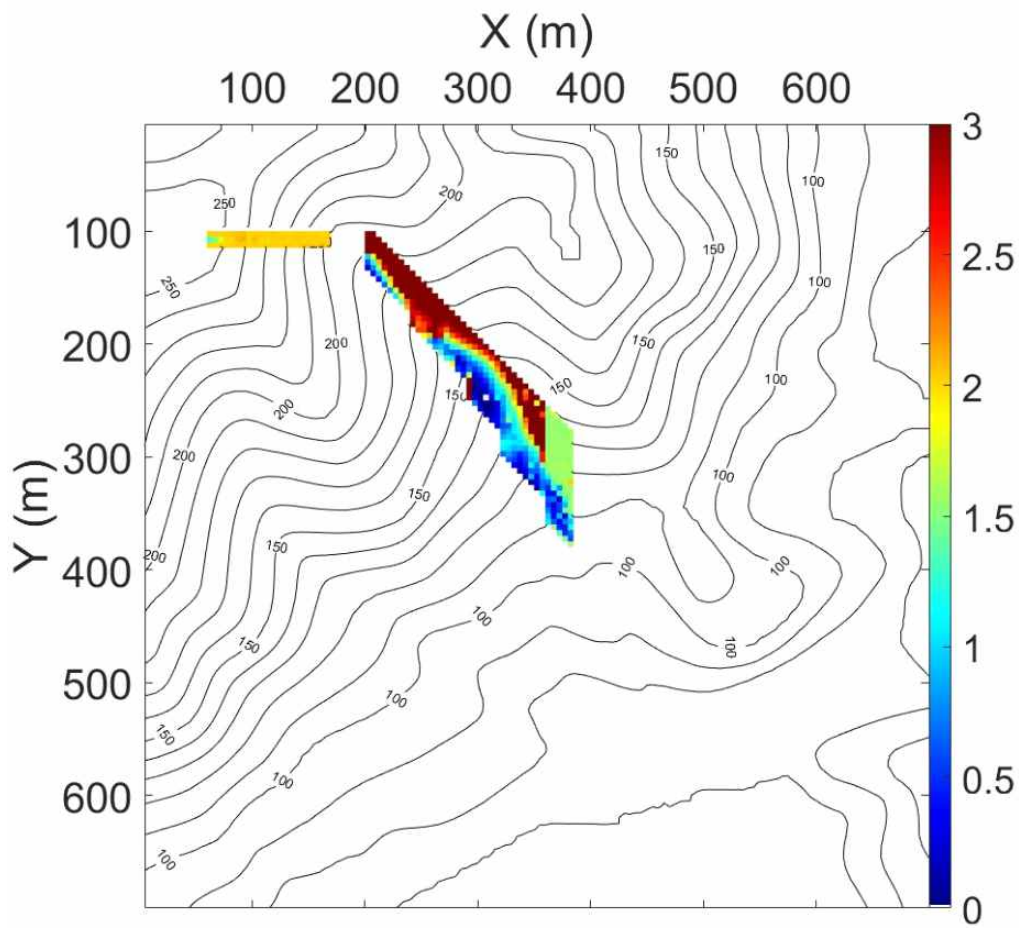
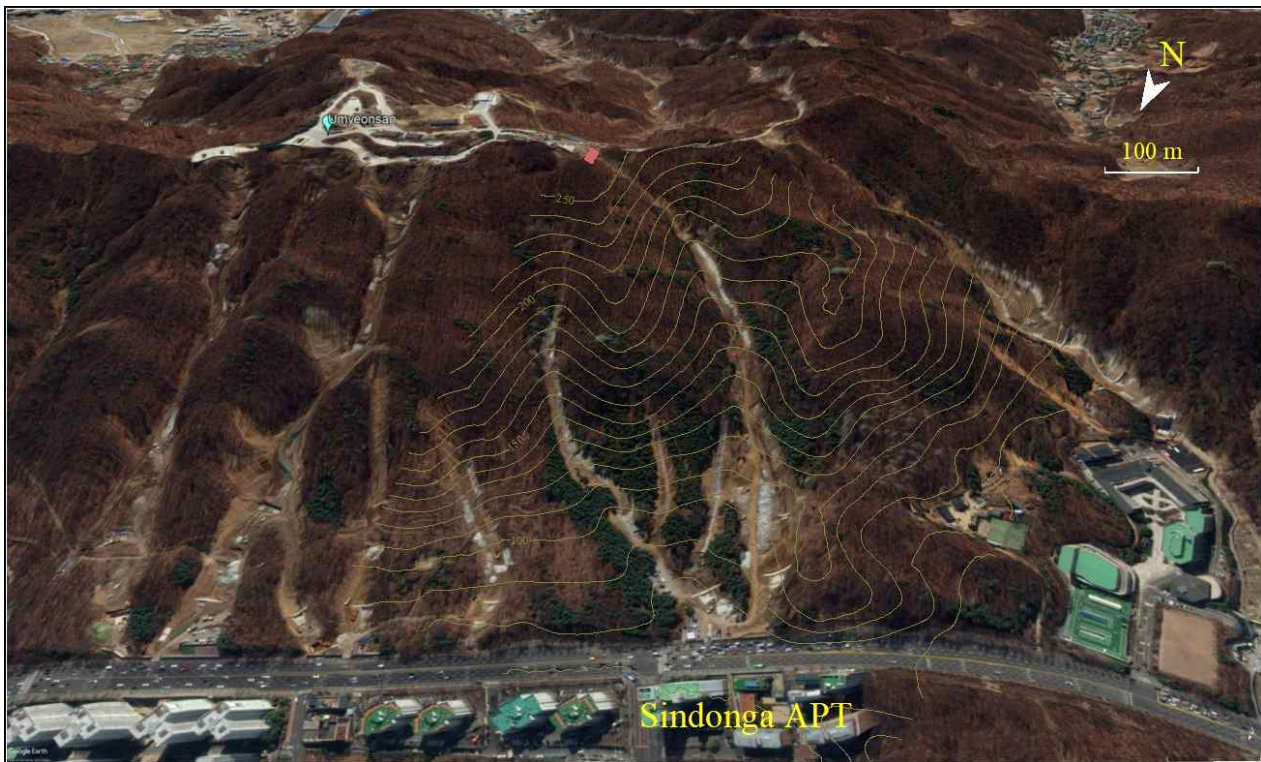


그림 37. 우면산 신동아아파트 산사태 수치 모의로 재현한 바닥의 침식 깊이 공간분포($t = 300s$).

(a)



(b)



(c)



(d)



그림 38. 우면산 신동아아파트 산사태 수치 모의로 재현한 토석의 공간분포 (배경: Google 지도):

(a) $t = 0s$, (b) $t = 100s$, (c) $t = 200s$, (d) $t = 300s$ (Google earth, 2012).

2. 토석류 수리모형실험

1) 실험 방법

- 토석류 수리모형실험은 경사 수로 상부에 토석을 저장할 수 있는 장치에 토석과 물을 혼합하여 설치하고 토석류를 순간적으로 발생시킬 수 있는 장치를 사용하여 토석류를 발생시킨다.
- 토석류가 발생하여 하부로 전파할 때, 토석류 표고계를 이용하여 지점별 토석류 표고 시계열을 측정하며, 급경사수로 하단에는 토석류 작용력 측정장치를 활용하여 토석류의 충격력을 측정한다.
- 토석류의 전파 형상은 1초당 100 프레임 이상 촬영이 가능한 초고속 카메라를 이용하여 촬영하며, 촬영한 영상을 분석하여 토석류 전파속도를 구한다.
- 토석류 흐름이 완료된 이후에는 토석류의 퇴적형상을 사면측정기 또는 3차원 지형스캐너를 이용하여 측정한다.
- 토석류 수리모형실험 순서도는 그림 39와 같다.

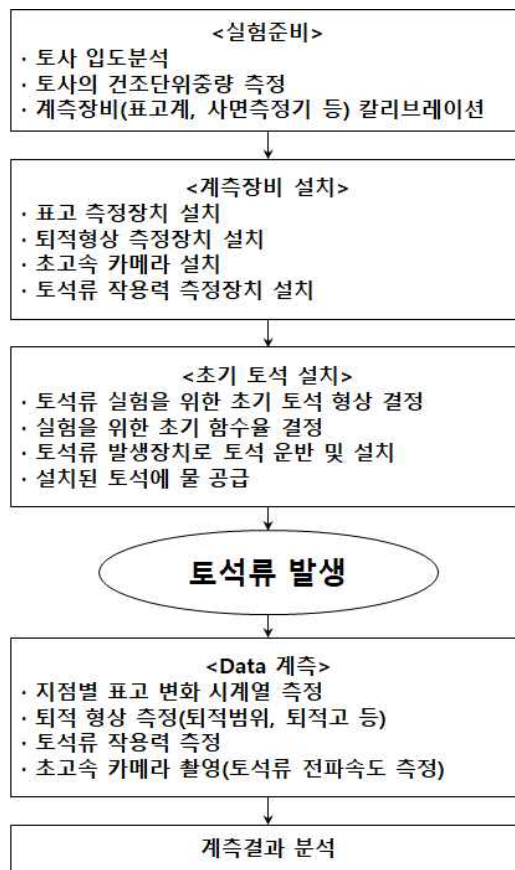


그림 39. 토석류 수리모형실험 순서도

2) 실험 수로 구성

- 토석류 실험은 한국농어촌공사 농어촌연구원 국제융합수리시험센터에 위치하고 있는 급경사수로를 활용하여 수행하였다.
- 급경사수로의 제원은 다음과 같다.
 - 폭 : 1.5 m, 높이 : 1.5 m
 - 수로 경사부 경사 : 24도
 - 수로 바닥 재질 : 목재(철재 수로에 합판으로 피복)

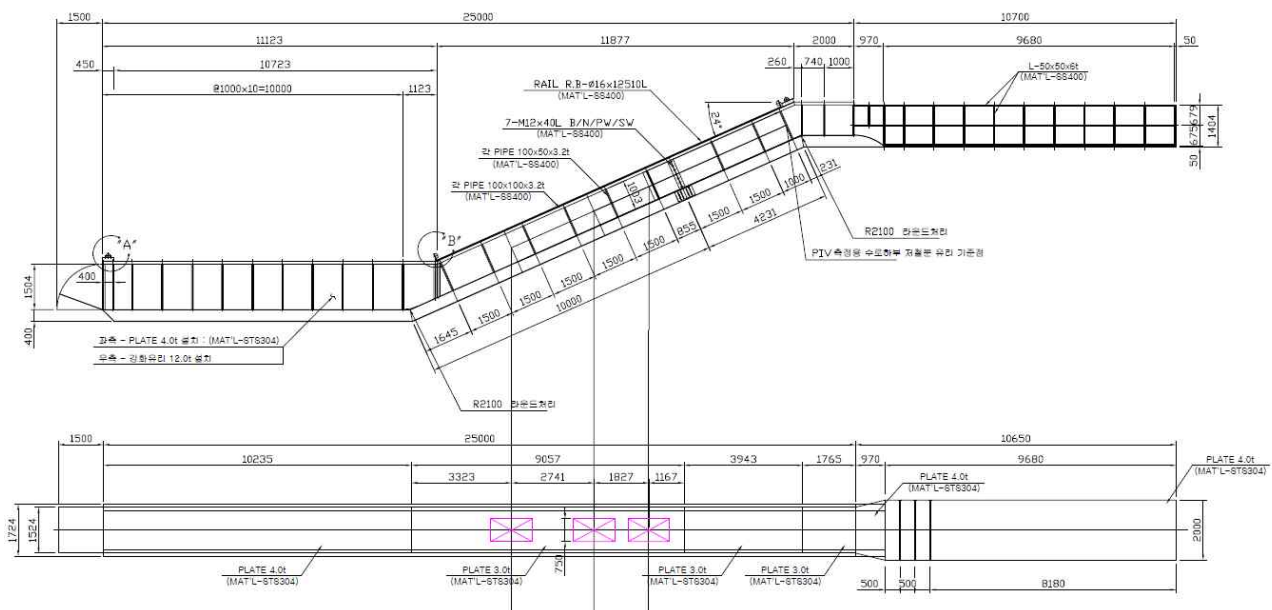


그림 40. 급경사수로 측면 및 평면도



그림 41. 급경사 수로 사진

- 급경사 수로에서 토석류 발생장치의 위치와 표고 계측장치의 위치는 그림 27과 같음.

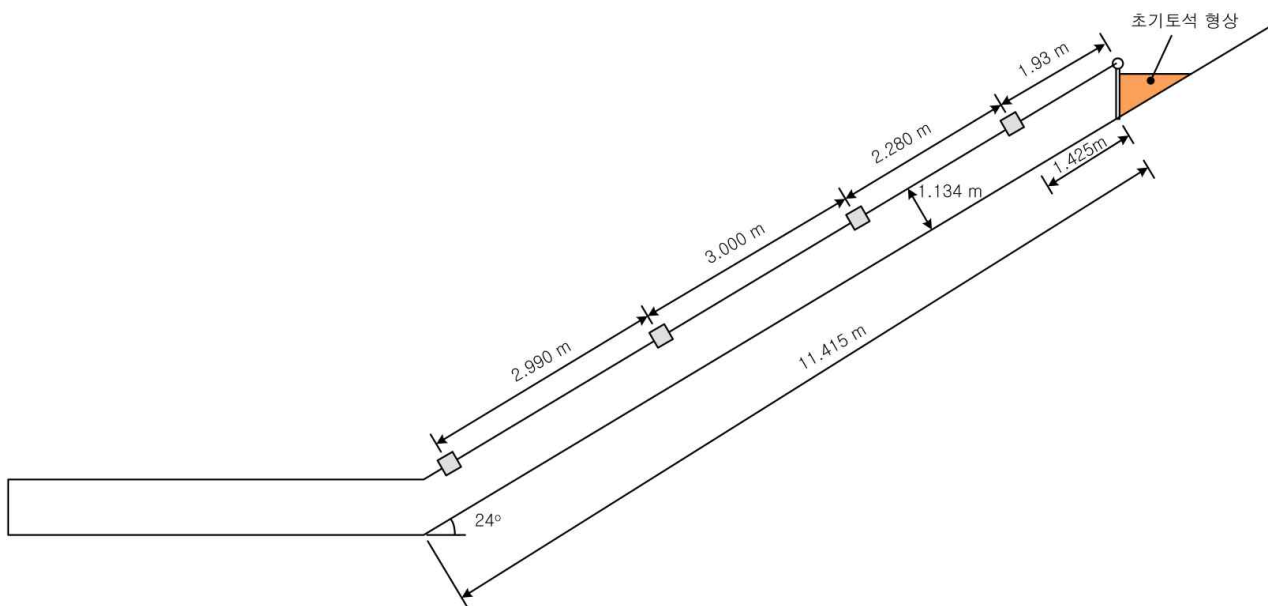


그림 42. 토석류 발생장치 및 표고계 위치도

- 토석류 실험 수행을 위한 토석류 유도장치 제작
 - ▣ (과업명) 토석류 유도장치 제작
 - ▣ (과업목적) “국제융합수리시험센터”에 기 설치된 고정식 개수로 내에서 급격한 토석류 발생을 위한 자동제어 Gate 설치

▣ 과업내용

구 분	구 성	비 고
토석류 발생 유도장치 제작	·토석류 발생 Gate 제작 : 폭 1.5 m, 높이 1.0 m ·토석류 Gate 개폐 장치 - 전자식이나 기타장치를 이용한 Gate 개폐 장치 - Gate 배후의 토석과 물 혼합물의 하중을지지 ·Gate 가동을 위한 전기 인입	도면 참조

▣ 검수조서

검 · 인 수 조 서

1. 연구과제명 : 실제 산사태 예측을 위한 토석류 해석 Boussinesq 방정식 수치모형 개발
및 검증

2. 계약내용

가. 계약과업명 : 토석류 유도장치 제작용역

나. 제 약 자 : 와텍스

다. 계 약 금 액 : 4,895,000원(부가세 포함)

라. 계약체결일 : 2019년 8월 27일

마. 계 약 기 간 : 2019년 8월 27일부터 2019년 9월 26일

3. 성과품 내용검토

가. 납품일자 : 2019년 9월 26일

나. 과업검토 내용

파업지시내용	연구성과 내용	확인자 의견
○토석류 발생 유도장치 제작	○토석류 발생 Gate 제작 : 폭 1.5 m, 높이 1.0 m ○토석류 Gate 개폐 장치 - 전자식이나 기타장치를 이용한 Gate 개폐 장치 - Gate 배후의 토석과 물 혼합물의 하중을 지지 ○Gate 가동을 위한 전기 인입	- 적정함

다. 성과품 수량

계약 내역(과업내용)			성과품(납품) 내역			비고
품 명	규 격	수 량	품 명	규 격	수 량	
토석류 발생 유도장치	폭 1.5 m, 높이 1 m	1식	토석류 발생 유도장치	폭 1.5 m, 높이 1 m	1식	

라. 기타(계약서 및 과업내용서 중 나, 다 이외의 사항 이행여부)

: 없음

4. 용역 성과품에 대한 검수자 종합의견

: 토석류 발생 유도장치는 계약된 내용대로 충실히 수행하여 제작되었음.

위와 같이 검 · 인수함

2019년 10월 2일

성과품 검수자 : 소속 연구기획실 통일농업연구부 권오승 

성과품 확인자 : 소속 지역기반연구실 수석연구원 장정현 



그림 43. 토석류 유도장치

- 실험시설 셋팅(토석류 보호수로 제작)
 - (과업명) 토석류 실험을 위한 보호수로 제작
 - (과업목적) 산사태 실험 시 기존의 고정식 급경사 수로 측면 및 바닥 관측 유리 등 시설 훼손을 방지하기 위한 보호 수로 제작 및 설치
 - 과업내용

구 분	구 성	비 고
토석류 보호수로 제작	·보호수로 - 규격 : 폭 1.5m, 높이 1m, 길이 26m	도면 참조

검 · 인 수 조 서

1. 연구과제명 : 실제 산사태 예측을 위한 토석류 해석 Boussinesq 방정식 수치모형 개발
및 검증

2. 계약내용

- 가. 계약과업명 : 토석류 실험을 위한 보호수로 제작
- 나. 제 약 자 : CS SOFT
- 다. 제 약 금 액 : 4,790,000원(부가세 포함)
- 라. 계약체결일 : 2019년 8월 8일
- 마. 제 약 기 간 : 2019년 8월 8일부터 2019년 9월 8일

3. 성과품 내용검토

- 가. 납품일자 : 2019년 9월 6일
- 나. 과업검토 내용

과업지시내용	연구성과 내용	확인자 의견
○ 토석류 보호수로 제작	○ 보호수로 - 규격 : 폭 1.5m, 높이 1m, 길이 26m	- 적정함

다. 성과품 수량

계약 내역(과업내용)			성과품(납품) 내역			비고
품 명	규 격	수 량	품 명	규 격	수 량	
토석류 보호수로	폭 1.5m 높이 1m 길이 26m	1식	토석류 보호수로	폭 1.5m 높이 1m 길이 26m	1식	

라. 기타(계약서 및 과업내용서 중 나, 다 이외의 사항 이행여부)
: 없음

4. 용역 성과품에 대한 검수자 종합의견

: 토석류 보호수로는 계약된 내용대로 충실히 수행하여 작성되었음.

2019년 9월 10일

성과품 검수자 : 소속 연구기획실 통일농업연구부 권오승

성과품 확인자 : 소속 지역기반연구실 수석연구원 장정렬

성과품 인수자 : 소속 지역기반연구실 주임연구원 정재상 (인)

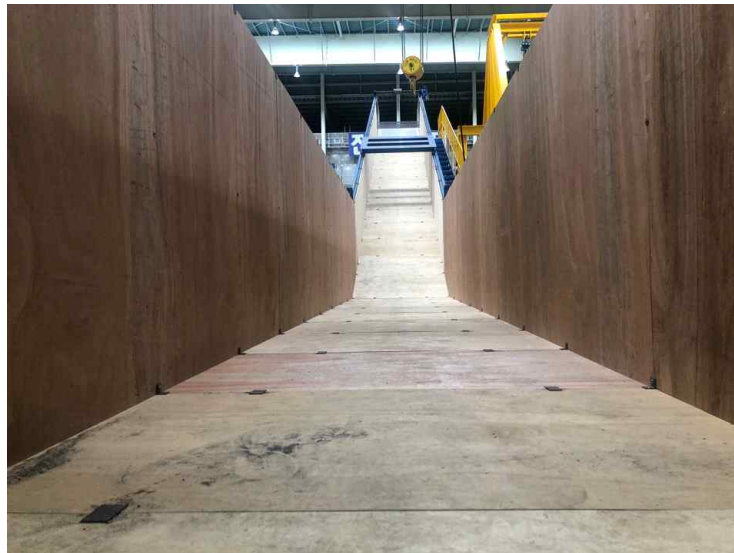


그림 44. 토석류 보호수로

- 실험시설 셋팅(토석류 수로 안전난간 보강)

- (과 업 명) 토석류 실험 급경사수로 안전난간 보강
- (과업목적) 실험자의 안전사고 방지를 위해 급경사수로 측면 안전난간 보강
- 과업내용

구 분	구 성	비 고
토석류 실험 급경사수로 안전난간 보강	·안전난간 보강 - 안전난간 하부에 1.2T 철판 설치(높이 40 cm) ·사다리 제작 설치 - 실험자의 급경사수로 진입을 위한 사다리 제작 ·토사 운반용 SUS Tank 제작 - 규격 : 1.5T×500mm×500mm×500mm	도면 참조

검 · 인 수 조 서

1. 연구과제명 : 실제 산사태 예측을 위한 토석류 해석 Boussinesq 방정식 수치모형 개발 및 검증

2. 계약내용

가. 계약과업명 : 토석류 실험 급경사수로 안전난간 보강

나. 계 약 자 : ~~화텍스~~ 한솔이엔텍

다. 계 약 금 액 : 3,500,000원(부가세 포함)

라. 계약체결일 : 2019년 10월 17일

마. 계 약 기 간 : 2019년 10월 27일부터 2019년 10월 27일

3. 성과품 내용검토

가. 납품일자 : 2019년 10월 27일

나. 과업검토 내용

과업지시내용	연구성과 내용	확인자 의견
• 토석류 실험 급경사수로 안전난간 보강	- 안전난간 보강 - 안전난간 하부에 1.2T 철판 설치(높이 40 cm) - 사다리 제작 설치 - 급경사수로 진입을 위한 사다리 제작 - 토사 운반용 SUS Tank 제작 - 규격 : 1.5T×500mm×500mm×500mm	- 적정함

다. 성과품 수량

계약 내역(과업내용)			성과품(납품) 내역			비고
품 명	규 격	수 량	품 명	규 격	수 량	
안전난간 보강	1.2T, 높이 40cm	1식	안전난간 보강	1.2T, 높이 40cm	1식	

라. 기타(계약서 및 과업내용서 중 나, 다 이외의 사항 이행여부)

: 없음

4. 용역 성과품에 대한 검수자 종합의견

: 토석류 발생 유도장치는 계약된 내용대로 충실히 수행하여 제작되었음.

위와 같이 검 · 인수함

2019년 11월 8일

성과품 검수자 : 권 오 승 (인)
 성과품 확인자 : 장 정 권 (인)
 성과품 인수자 : 정 재 상 (인)

3) 사용 계측장비

- 표고계(4채널)

□ 모델명 : □ 제 조 사 : (주)와텍스

□ 레이저 센서 : 4기 (100 Hz)

□ 증폭 및 출력앰프 : 4채널

□ 검수조서

검 · 인 수 조 서

1. 연구과제명 : 실제 산사태 예측을 위한 토석류 해석 Boussinesq 방정식 수치모형 개발 및 검증

2. 계약내용

가. 계약과업명 : 토석류 표고측정시스템 제작

나. 계 약 자 : (주)정연시스템

다. 계 약 금 액 : 4,950,000원(부가세 포함)

라. 계약체결일 : 2019년 12월 3일

마. 계 약 기 간 : 2019년 12월 3일부터 2019년 12월 14일

3. 성과품 내용검토

가. 납품일자 : 2019년 12월 13일

나. 과업검토 내용

과업지시내용	연구성과 내용	확인자 의견
○ 토석류 표고 변화 시계열 계측 시스템	○ 레이저 센서 : 4기 (100Hz) ○ 증폭 및 출력앰프 : 4채널 1기 ○ 측정 시스템 : 1기	- 적정함

다. 성과품 수량

계약 내역(과업내용)			성과품(납품) 내역			비고
품 명	규 격	수 량	품 명	규 격	수 량	
레이저 센서	100 Hz	4기	레이저 센서	100	4기	
증폭 및 출력앰프	4채널	1기	증폭 및 출력앰프	4채널	1기	
측정시스템		1식	측정시스템		1식	

라. 기타(계약서 및 과업내용서 중 나, 다 이외의 사항 이행여부)

: 없음

4. 용역 성과품에 대한 검수자 종합의견

: 토석류 발생 유도장치는 계약된 내용대로 충실히 수행하여 제작되었음.

위와 같이 검 · 인수함

2019년 12월 23일

성과품 검수자: 권 오 승
성과품 확인자: 강 정 연
성과품 인수자: 정 재 상



그림 45. 4 채널 표고계

- 초고속 카메라

- ▣ 모델명 : DSC-RX100M5A ▣ 제조사 : Sony
- ▣ 픽셀 수 : 약 20.1메가픽셀
- ▣ 렌즈유형 : ZEISS Vario-Sonnar T* 렌즈, 광학 줌 2.9X
- ▣ 디지털 줌 : 약 11X
- ▣ HFR 녹화 : 최대 1000 fps
- ▣ 초고속카메라 구매 계약이행각서

계 약 이 행 각 서			
1. 품	명	초고속 카메라	
2. 규 격 및 수 량		소니 DSC-RX100M5A 및 액세서리	
3. 계 약 금 액		금 일백칠만팔천원정(W 1,078,000)	
4. 계 약 보 증 금		금 구만팔천원정(W 98,000)	
5. 납 품 기 한		2019. 11.19.	검사요청기한 2019. 11. 22.
6. 납 품 장 소		연구원 지정장소	
7. 지 체 상 금 율		지체1일에 대하여 계약(정산)금액의 1,000분의 1.5	
8. 기 타 : ◦ 계약보증금은 국가를 당사자로하는계약에관한법률시행령 제50조⑥항3호에 의거 납부면제 ◦ 국가를 당사자로하는 계약에관한법률시행규칙 제49조④항에 의한 계약보증금 지급각서를 본각서로 갈음하여 첨부생략 ◦ 대금은 김.인수 완료후 성과품에 의거 정산			
위의 물품을 공급함에 있어서 귀 공사의 물품구매 계약일반조건, 동 특수조건, 표준 사양서 및 본인이 제출한 견적서, 내역서 등 모든 조건이 계약의 일부가 됨을 인정하고 국가를 당사자로 하는 계약에 관한 법률시행령 제 51조에 의한 귀책사유가 발생한 경우 계약보증금을 무위 반납하겠음을 확약하고 이행각서를 제출합니다. 2019. 11. 15. 주 소 : 서울특별시 용산구 청파로 74, 본관동 광장층 A-48호(한강로3가, 전자랜드) 상 호 : 제이엔디지탈 586-46-00346 대 표 자 : 조 대 근 (인) 제이엔디지탈 조대근 사업자등록번호 : 586-46-00346 (서울시 용산구 청파로74 광장층 A48호) 계좌번호 : 국민은행 015401계좌번호 04-80249830 대행업 한국농어촌공사 농어촌연구원장 귀 하			



그림 46. 초고속 카메라(Sony DSC-RX100M5A)

- 사면측정기

- ▣ 모델명 : LPS36 ▣ 제조사 : Leuze electronics
- ▣ 감지거리 : x-축 600 mm / z-축 800 mm

- ▣ 광원 레이저 : 적색
- ▣ 레이저 등급 : 2M, IEC/EN 60825-1:20007
- ▣ 측정시간 : 10ms
- ▣ 측정범위 : 200 ~ 800 mm
- ▣ 인터페이스 : 이더넷
- ▣ x-축 분해능 : 0.2-0.6 mm
- ▣ z-축 분해능 : 0.1-0.9 mm

그림 47. LPS36(사면측정기)

- 3D 지형스캐너

- 모델명 : □ 제조사 : Leica
- 측정 속도 : 최대 1,000,000이상 / 초당
- 측정거리 : 최대 40m (피사체 반사율 35%)
- 측정정확도 : 100m거리에서 6mm이하
- 측정각도 (Angle) 정확도 : 수평/수직 모두 8"이하
- 측정 가능 범위 : Field-of-view, 360°(H) x 270°(V)
- 3차원 좌표(X, Y, Z) 반사 강도(Intensity) 취득 가능

그림 48. 3차원 지형스캐너

4) 실험 조건

- 토석류 발생 전 초기 토석 형상

- ▣ 폭 : 1.5 m
- ▣ 길이 : 2.246 m
- ▣ 토석의 총 체적 : 1.6845 m³
- ▣ 높이 : 1.0 m
- ▣ 바닥경사 : 20°

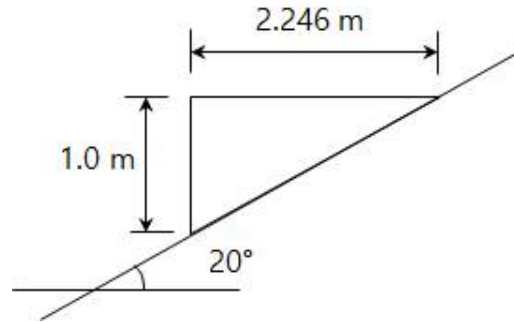


그림 49. 토석 초기 형상

- 실험사(sand)의 입도분석(체가름 시험) 결과

구분	1차 시험		2차 시험	
체입경(mm)	토사중량(g)	백분율(%)	토사중량(g)	백분율(%)
0.075	12	1.3	5	0.5
0.106	9	1.0	5	0.5
0.250	60	6.5	49	4.8
0.425	219	23.7	205	19.9
0.850	300	32.4	416	40.4
2.000	197	21.3	221	21.5
4.750	107	11.6	108	10.5
9.500	21	2.3	21	2.0

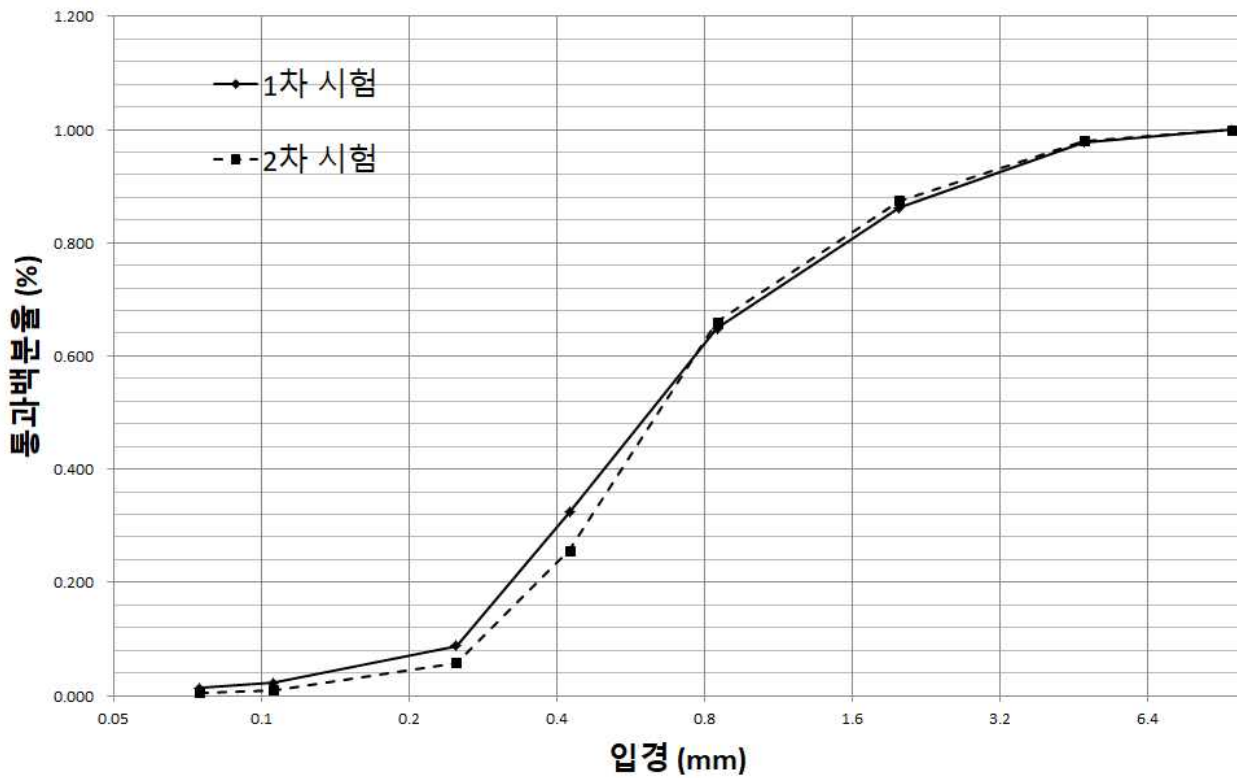


그림 50. 실험사(sand)의 입경누가곡선

- ▣ D_{50} (평균) : 0.669 mm
- ▣ 실험사(sand)의 건조단위중량 : 1.35 tonf/m³
- ▣ 실험사(sand)의 내부마찰각 : 34°
- ▣ 자갈의 건조단위중량 : 1.404 tonf/m³
- ▣ 자갈의 공극률 : 49%

– 실험 조건

표 6. 농어촌연구원 토석류 실험 조건

구 분	Case01	Case02	Case03	Case04
토사	모래	모래	모래+자갈	모래+자갈
토사 총 체적	1.6845 m ³	1.6845 m ³	1.6845 m ³	1.6845 m ³
토사 총 중량 (건조상태)	2.274 tonf	2.274 tonf	2.346 tonf 모래 : 2.205 tonf 자갈 : 0.140 tonf	2.346 tonf 모래 : 2.205 tonf 자갈 : 0.140 tonf
물의 총 중량	0.684 tonf	0.852 tonf	0.729 tonf	0.788 tonf
중량함수비	30.08%	37.45%	31.07%	33.60%

구 분	Case05	Case06	Case07	Case08
토사	모래+자갈	모래+자갈	모래+자갈	모래
토사 총 체적	1.6845 m ³	1.6845 m ³	1.6845 m ³	1.6845 m ³
토사 총 중량 (건조상태)	2.435 tonf 모래 : 2.014 tonf 자갈 : 0.421 tonf	2.435 tonf 모래 : 2.014 tonf 자갈 : 0.421 tonf	2.435 tonf 모래 : 2.014 tonf 자갈 : 0.421 tonf	2.274 tonf
물의 총 중량	0.552 tonf	0.687 tonf	0.730 tonf	1.072tonf
중량함수비	22.7%	28.2%	30.0%	47.1%

구 분	Case09	Case10	Case11	Case12
토사	모래	모래	모래	모래
토사 체적	1.6845 m ³	1.6845 m ³	1.6845 m ³	1.6845 m ³
토사 중량 (건조상태)	2.2741 tonf	2.2741 tonf	2.2741 tonf	2.2741 tonf
토사 내 물의 중량	0.9548 tonf	0.9133 tonf	0.9346 tonf	0.8245 tonf
중량 중량함수비	41.99%	40.16%	41.10%	36.26%
바닥 토사	모래	모래	모래	모래
바닥 토사 위치	경사로 하부 5 m	경사로 하부 5 m	경사로 중앙 5 m	경사로 중앙 5 m
바닥 토사 중량 (건조상태)	1.0125 tonf	0.5063 tonf	0.5063 tonf	0.5063 tonf
바닥 토사 내 물의 중량	0.2625 tonf	0.062 tonf	0.108 tonf	0.095 tonf
바닥 토사 중량함수비	25.9%	17.58%	21.33%	18.8%

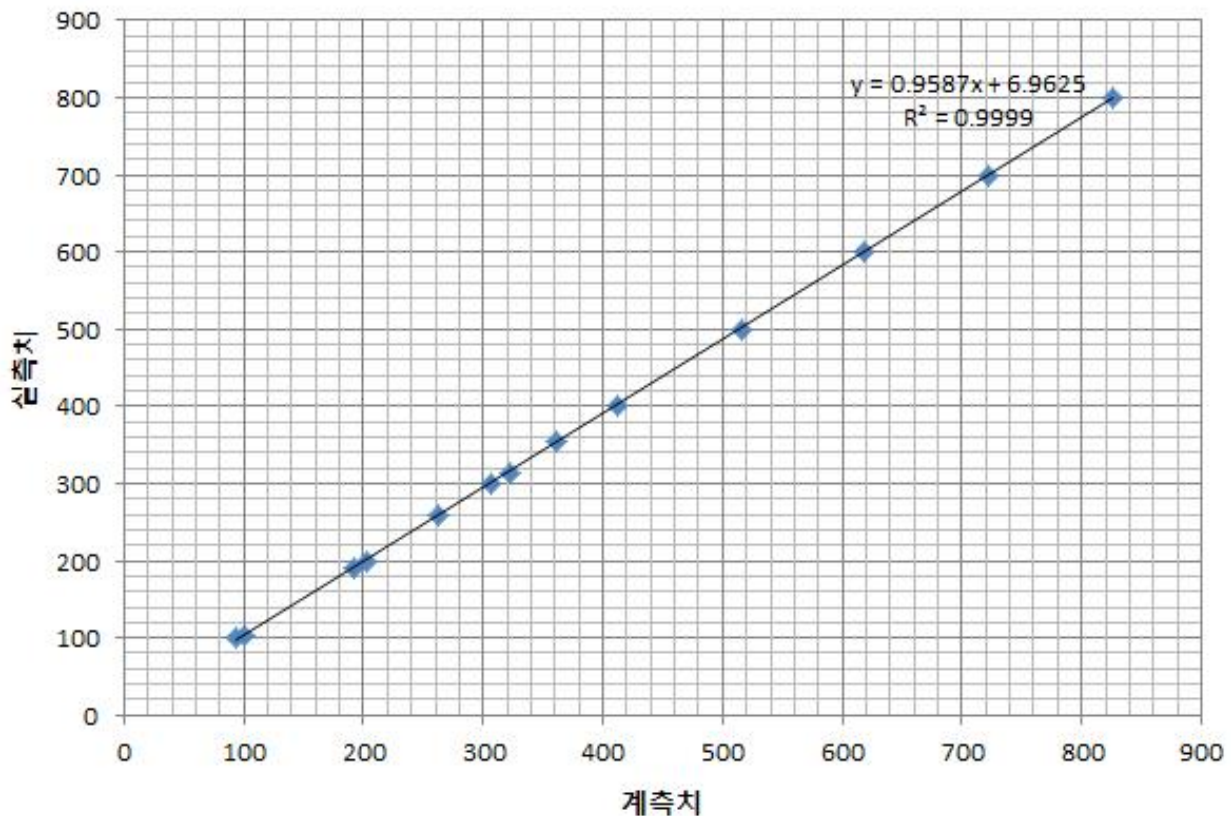
구 분	Case13	Case14	Case15	Case16
토사	모래	모래+자갈	모래+자갈	모래
토사 체적	1.6845 m³	1.6845 m³	1.6845 m³	0.421 m³
토사 중량 (건조상태)	2.2741 tonf	2.5603 tonf 모래 : 1.999 tonf 자갈 : 0.562 tonf	2.5085 tonf 모래 : 2.049 tonf 자갈 : 0.459 tonf	0.568 tonf
토사 내 물의 중량	0.8639 tonf	0.8043 tonf	0.6065 tonf	0.206 tonf
토사 중량함수비	38.0%	31.4%	24.2%	48.9%
바닥 토사	모래	모래	모래+자갈	-
바닥 토사 위치	경사로 중앙 5 m	경사로 중앙 5 m	경사로 중앙 5 m	-
바닥 토사 중량 (건조상태)	0.5063 tonf	0.5063 tonf	0.5063 tonf 모래 : 0.456 tonf 자갈 : 0.103 tonf	-
바닥 토사 내 물의 중량	0.092 tonf	0.0705 tonf	0.1566 tonf	-
바닥 토사 중량 함수비	18.17%	13.92%	28.02%	-

5) 토석류 전파 표고 시계열

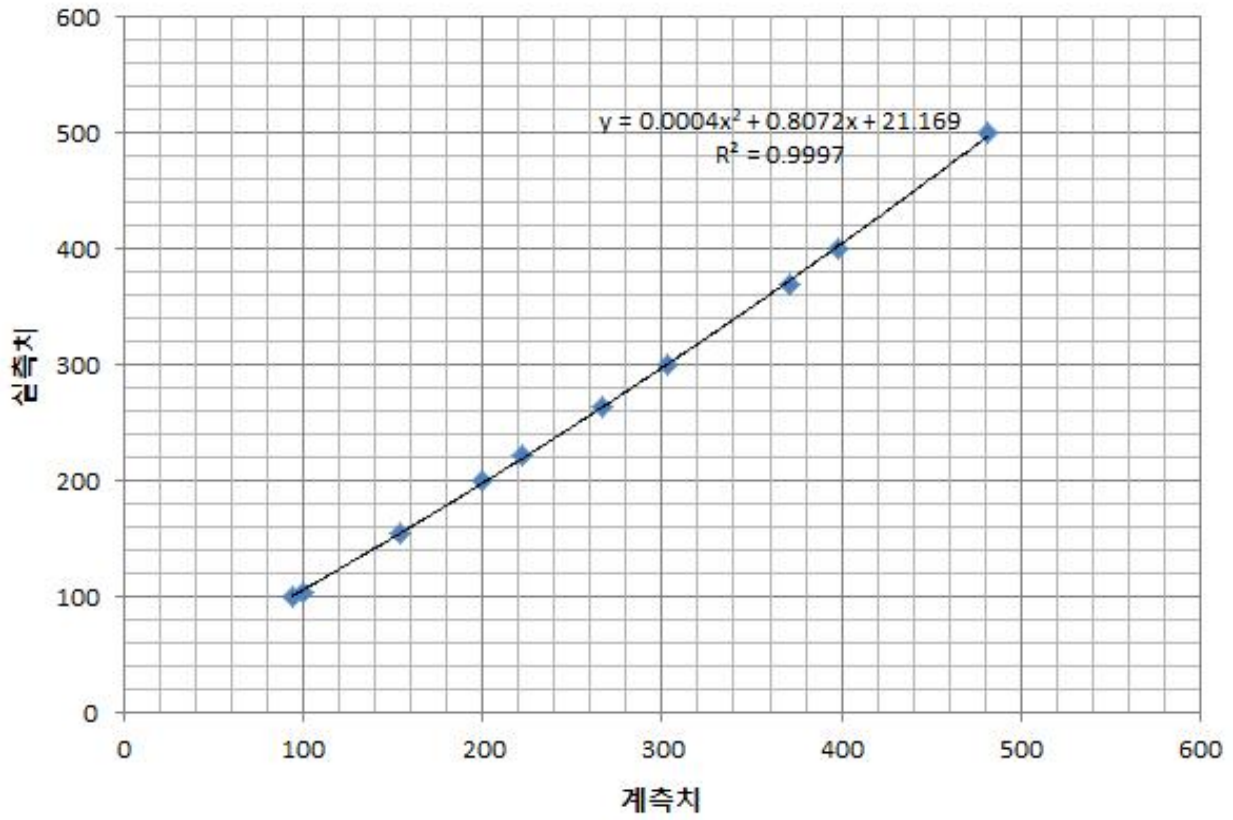
- 표고 측정장치 Calibration Test

▣ 표고계 계측 한계 : 표고계 #1, #4 : 800 cm, 표고계 #2, #3 : 500 cm

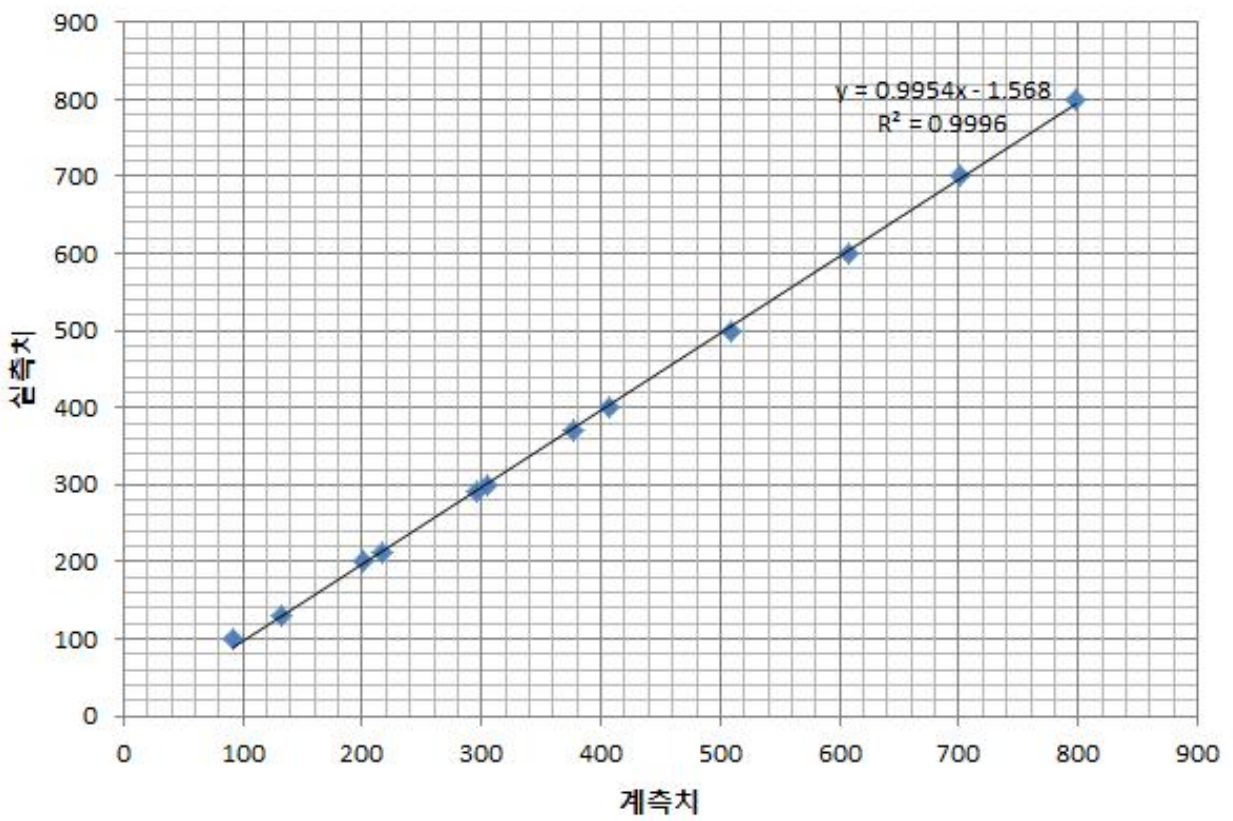
(a) 표고계 #1



(b) 표고계 #2



(c) 표고계 #3



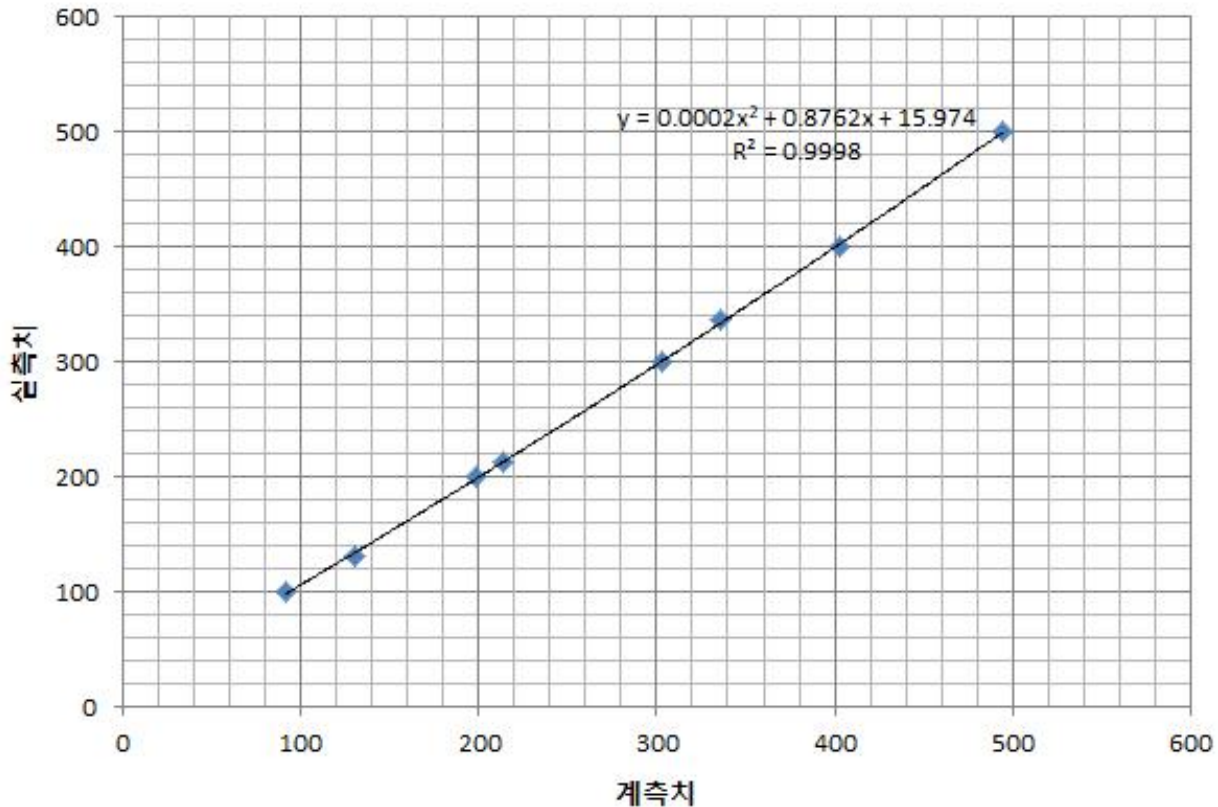


그림 51. 4채널 표고계 Calibration test 결과.

– 토석류 전파 표고 시계열 계측 결과

- ▣ Case01은 실험사가 모래로만 구성되어 있고, 함수비는 30.08%인 경우임
- ▣ 토석류 발생지점에 가까울수록 초기 토석류 표고가 높게 계측됨
- ▣ 토석류 발생지점에 가장 가까운 gage#1에서 최대 표고는 262 mm로 계측됨

- ▣ Case02는 실험사가 모래로만 구성되어 있고, 함수비는 37.45%인 경우임
- ▣ 함수비가 Case01보다 높아 토석류 발생 이후 토석류 표고가 빠르게 감소함

- ▣ Case03는 실험사가 모래와 자갈로 구성되어 있고, 함수비는 31.01%인 경우임
- ▣ 자갈이 일부 함유되어 있기는 하지만 자갈이 차지하는 비중이 6%로 낮아 Case02와 유사한 흐름 특성을 보임

- ▣ Case04는 실험사가 모래와 자갈로 구성되어 있고, 함수비는 33.6%인 경우임
- ▣ 전반적으로 흐름 특성은 Case01과 유사함

- ▣ Case05는 실험사가 모래와 자갈로 구성되어 있고, 함수비는 22.65%인 경우임
- ▣ 자갈이 전체 실험사에서 차지하는 비중이 17.3%임
- ▣ 함수비가 낮기 때문에 소성체의 특성을 보여 토석류 최대표고가 나타난 이후에도 일정한 표고를 유지함
- ▣ 이는 함수비가 낮기 때문에 사면에 토석이 퇴적되어 아래로 전파하지 않기 때문인 것으로 파악됨

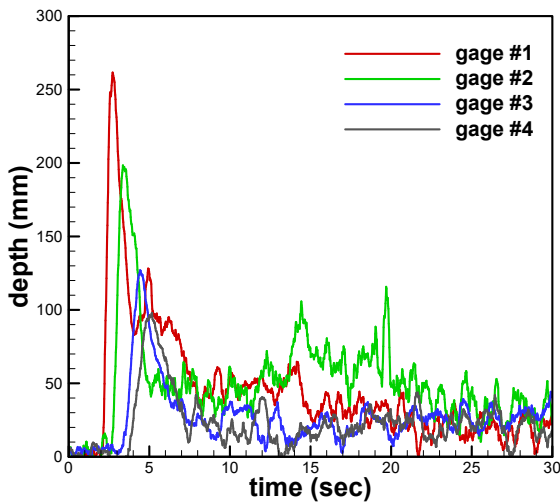
- ▣ Case06은 실험사가 모래와 자갈로 구성되어 있고, 함수비는 28.2%인 경우임
- ▣ 함수비가 Case05보다 높아 토석류 표고가 최고점에 다다른 이후 빠르게 감소함
- ▣ 급경사수로 경사수로가 끝나는 지점 근처에 위치한 gage#4에서는 토석류 발생 10초 이후부터 표

고가 상승함

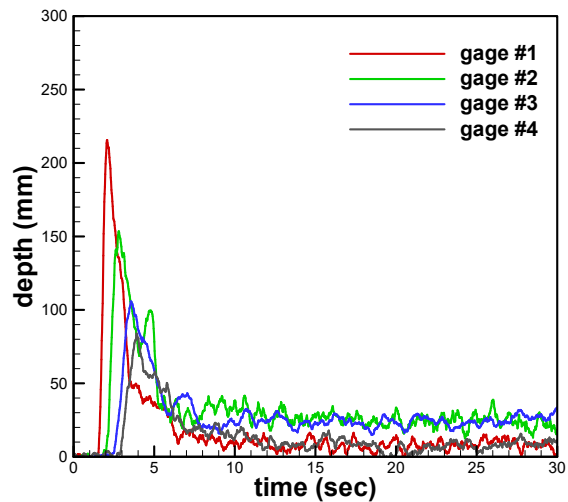
- 함수비가 28.2%로 높지만 여전히 소성체의 성질을 가지므로 사면의 경사가 변하는 구간(경사로 하단)에 퇴적이 발생하였기 때문에 이와 같은 결과가 나타남
- Case07은 실험사가 모래와 자갈로 구성되어 있고, 함수비는 30.0%인 경우임
- 함수비가 30%로 함수비가 비슷한 Case01, Case04와 유사한 흐름을 보임
- 특이한 점은 gage#4에서 최대표고가 gage#3보다 높게 측정됨
- Case08은 실험사가 모래로 구성되어 있고, 함수비는 47.1%인 경우임
- 본 실험에서 Gage#1은 토석류 발생 장치(Gate)에 너무 가까이 위치해 Data 측정이 제대로 이루어지지 않음
- 함수율이 47.1%로 매우 높으며, 실험사가 모래로만 구성된 Case01 및 Case02보다 토석류 두께가 비교적 낮게 측정됨
- Case01 및 Case02와 비교했을 때, 토석류 두께는 함수율에 반비례하는 경향을 보이며, 이는 위 그림틀 통해 알 수 있음
- 함수율이 높은수록 토석류의 유체 특성이 강하게 나타나 흐름의 깊이가 비교적 얇게 형성되는 것으로 판단됨
- Case09는 토석류 발생시 바닥지형의 침식영향을 검토하기 위해 경사수로 하단에 두께 0.1 m, 길이 6.0 m의 모래로 구성된 지형을 형성하였음
- Case09의 표고변화 시계열 그림에서 주황색은 초기 바닥지형의 원지반을 나타냄
- 실험결과 Case09의 실험조건에서는 침식보다는 주로 퇴적이 발생하는 것으로 검토됨
- 바닥지형의 두께가 0.1 m로 비교적 높고, 경사수로 최하단에 위치하여 토석류 흐름에 방해를 주는 요인으로 작용하여 퇴적이 발생하는 것으로 나타남
- Case10은 Case09와 거의 동일하나 모래로 구성된 바닥지형의 두께가 0.05 m임
- Gage#3은 실험도중 발생한 토석류의 영향으로 측정이 이루어지지 않음
- Case10도 Case09와 마찬가지로 경사수로 최하단에 모래로 이루어진 바닥지형이 존재하여, 주로 퇴적이 발생하는 것으로 나타남
- Case10은 Gage#1, 2에서의 퇴적고는 Case09에 비해 비교적 낮으나 Gage#4에서 퇴적두께는 약 100 mm로 비교적 높게 측정됨
- Case12는 모래로 구성된 바닥지형이 경사수로 중앙부에 위치한 경우이며, 세부적인 위치 및 형상은 위 그림과 같음
- 실험 결과 Gage#2 및 #3 위치에서 약 20~30 mm의 침식이 발생하는 것으로 검토되었으며, 경사수로와 수평수로가 만나는 지점 근처인 Gage#4에서는 약 70 mm의 퇴적이 발생하는 것으로 나타남
- Gage#1은 토석류 발생장치(Gate)에 가까이 위치하여 유의미한 data가 측정되지 않음
- 토석류의 최대 흐름 두께는 Gage#2에 비해 Gage#3 및 #4의 경우에도 크게 낮지 않게 나타났으며, 이는 침식된 토석이 앞서 형성된 토석류에 포함되었기 때문인 것으로 판단됨
- Case13은 Case12와 같은 지형조건에서 실험을 수행함
- Case13의 함수율은 38.0%로 Case12의 36.26%로 약간 높음
- Case12와 유사하게 Gage#2 및 #3 위치에서 약 30~40 mm의 침식이 발생하는 것으로 나타남
- 토석류의 최대 두께는 Gage#1, #3 및 #4에서 약 250 mm로 비슷하게 나타났으나, Gage#2에서는 약 130 mm로 비교적 낮게 나타남
- 이는 토석류 발생시 2차원적인 영향(수평방향의 흐름 영향)에 의한 것으로 판단됨

- Case14는 Case12 및 13과 같은 지형조건이나, 토석류를 발생시키는 재료를 모래+자갈로 구성하였으며, 침식을 검토하는 경사수로의 지반은 모래로 구성함
- 토석류의 함수율이 31.4%로 비교적 낮아 침식 두께가 약 10 mm로 작게 나타남
- Case15는 Case14와 같은 지형조건이며, 토석류를 발생시키는 재료와 침식 실험을 위한 바닥지형 모두 모래+자갈을 적용함
- 토석류의 함수비가 24.2%로 비교적 낮으나, 지반을 구성하는 토사의 함수율은 28.02%로 비교적 높음
- 실험결과 Gage#3 위치에서 약 20 mm의 침식이 나타남

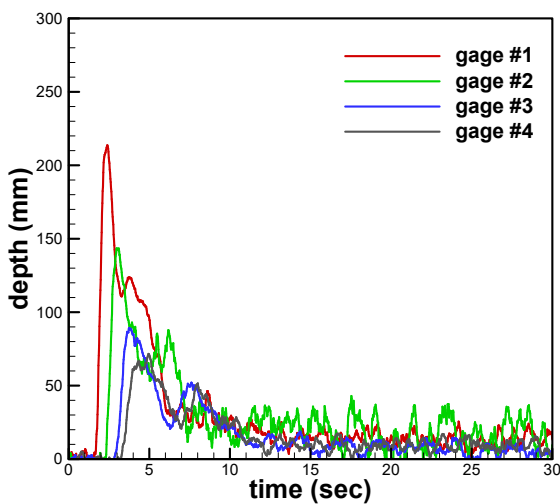
(a) Case 01



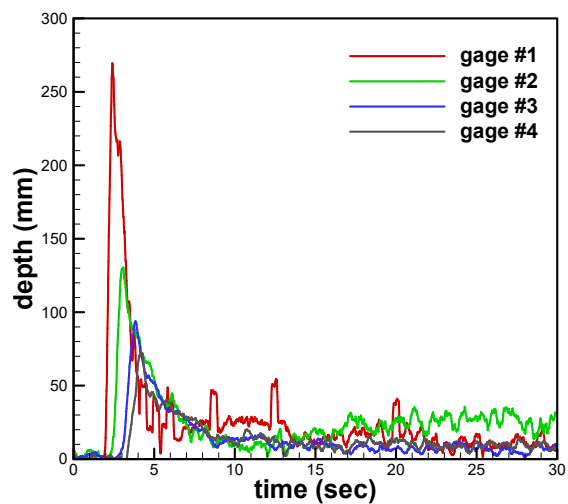
(b) Case 02



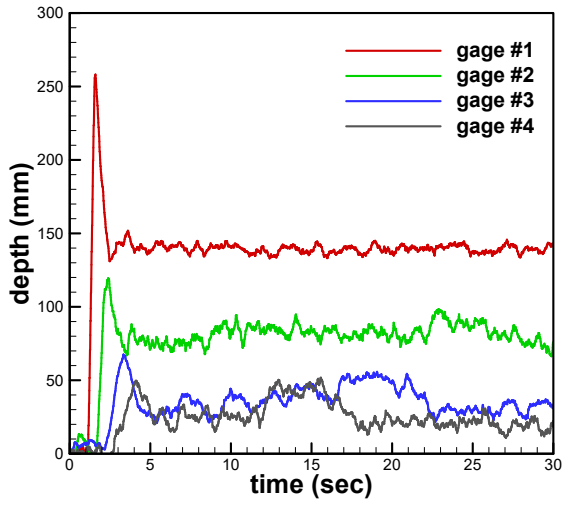
(c) Case 03



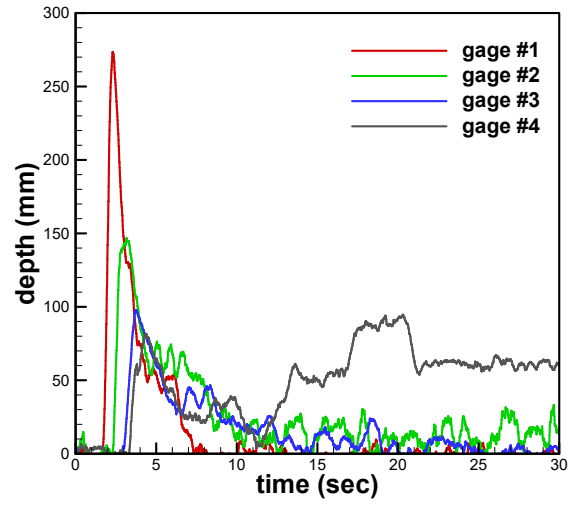
(d) Case 04



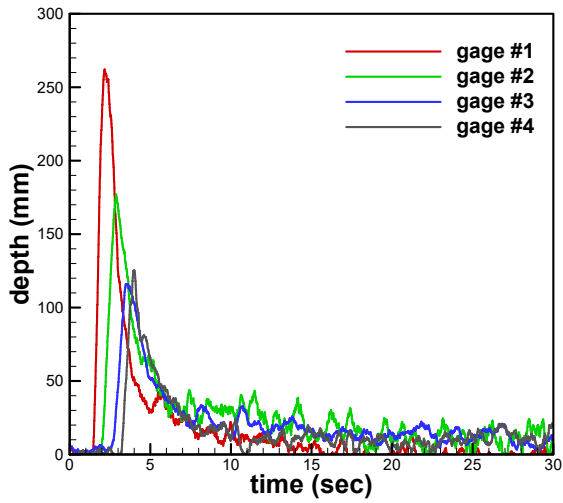
(e) Case 05



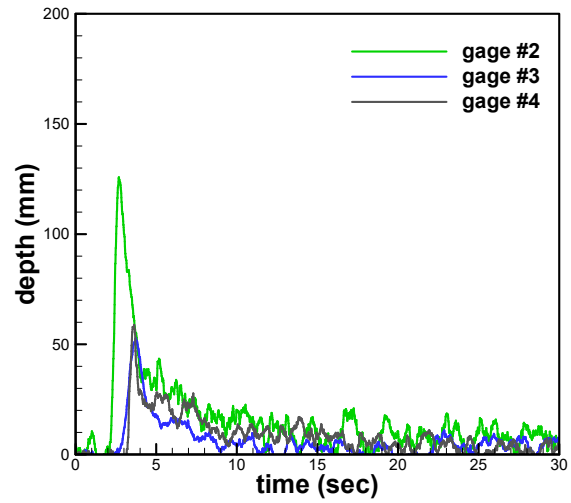
(f) Case 06



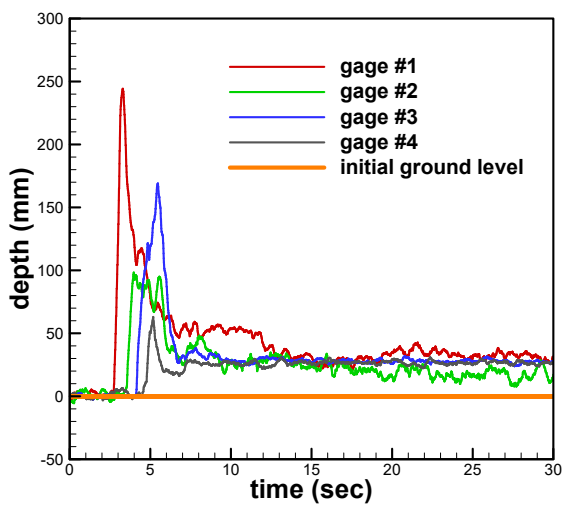
(g) Case 07



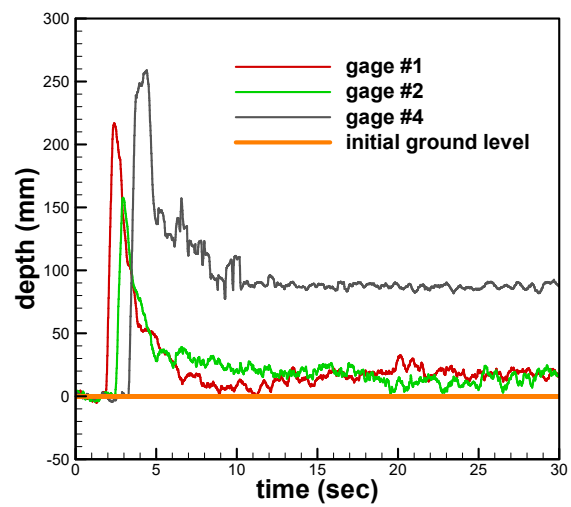
(h) Case 08



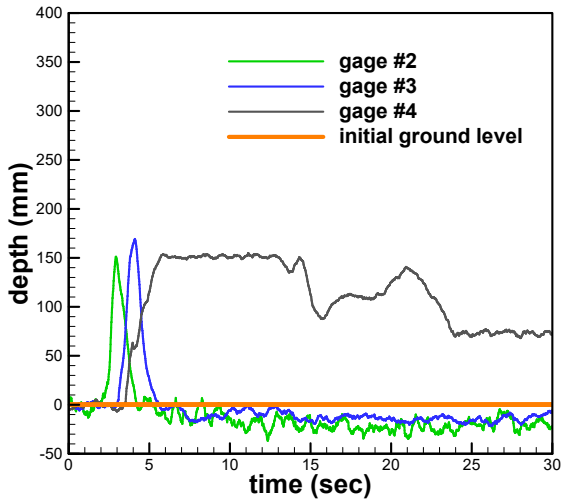
(i) Case 09



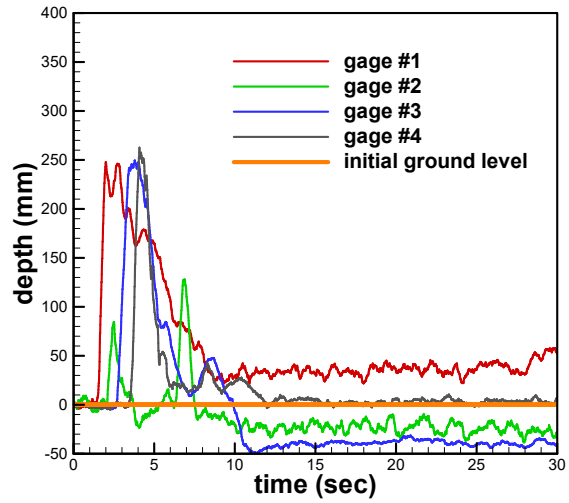
(j) Case 10



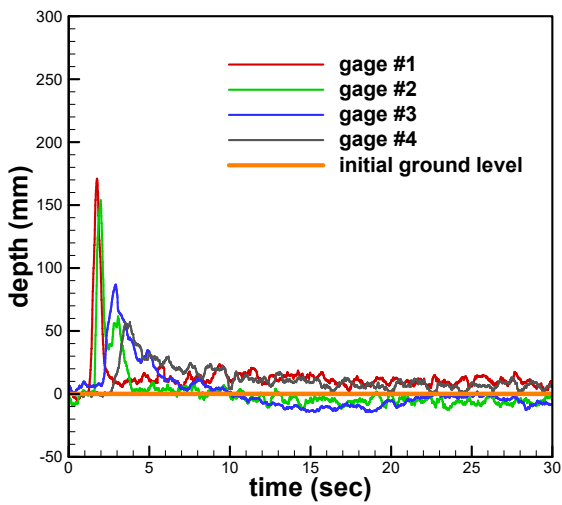
(k) Case 12



(l) Case 13



(m) Case 14



(n) Case 15

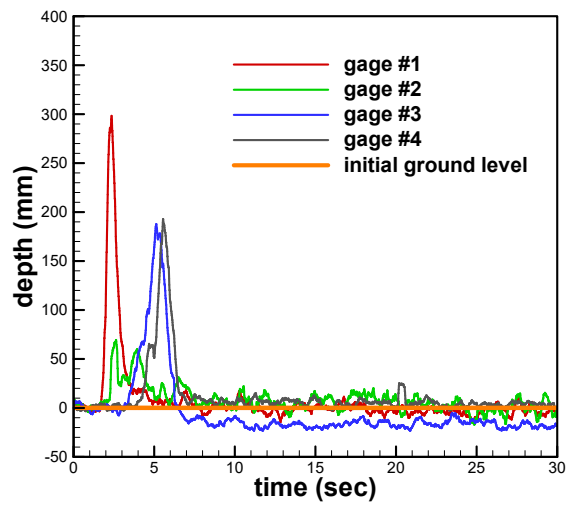


그림 52. 토석류 표고변화 시계열.

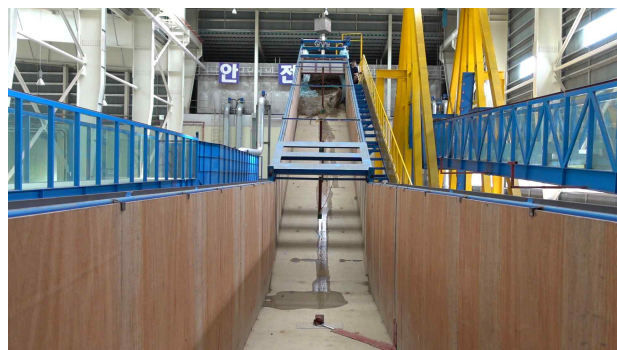
6) 토석류 전파 속도

- 토석류 전파속도를 초고속 카메라를 이용하여 계측함
- 수로 바닥에 일정 간격으로 눈금을 매기고, 초고속 카메라를 활용하여 발생한 토석류가 눈금을 지나가는 시간을 확인함으로써 전파속도를 측정
- Case04에 대한 초고속카메라 촬영 결과(100 fps)는 다음과 같음

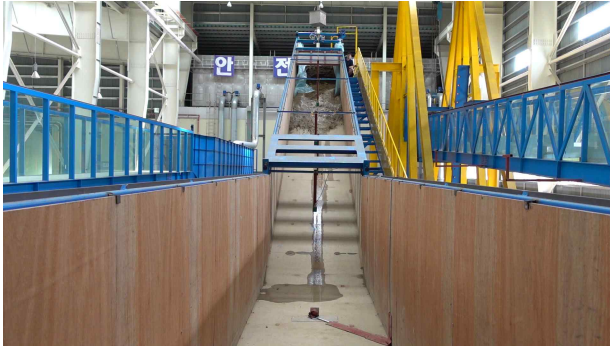
(t=0.00 s)



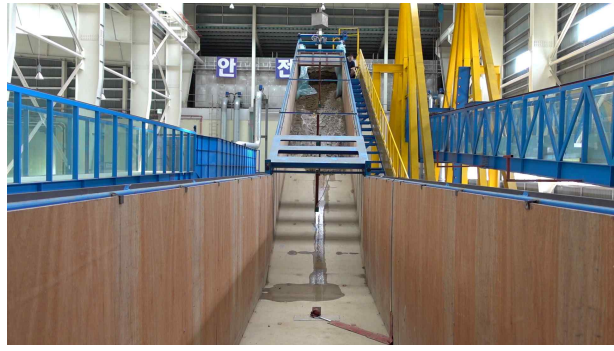
(t=1.00 s)



(t=1.35 s)



(t=1.70 s)



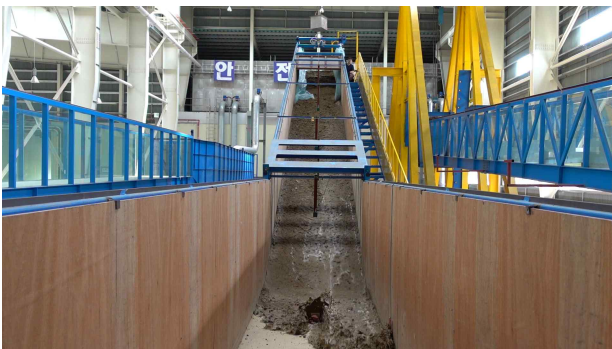
(t=1.98 s)



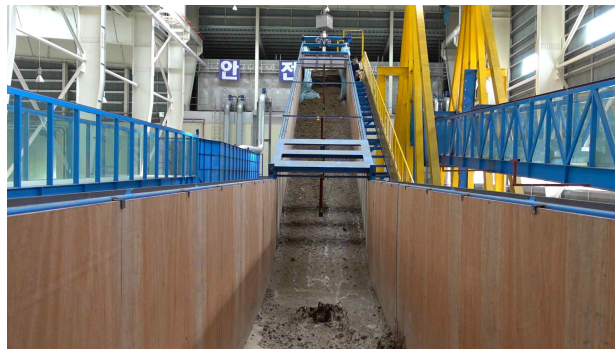
(t=2.25 s)



(t=3.35 s)



(t=3.57 s)



(t=5.95 s)

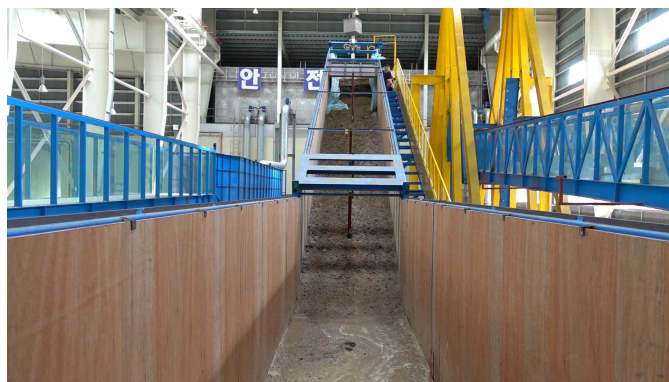
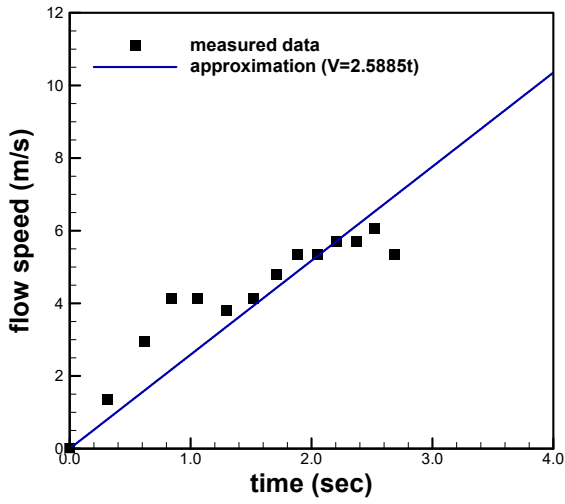


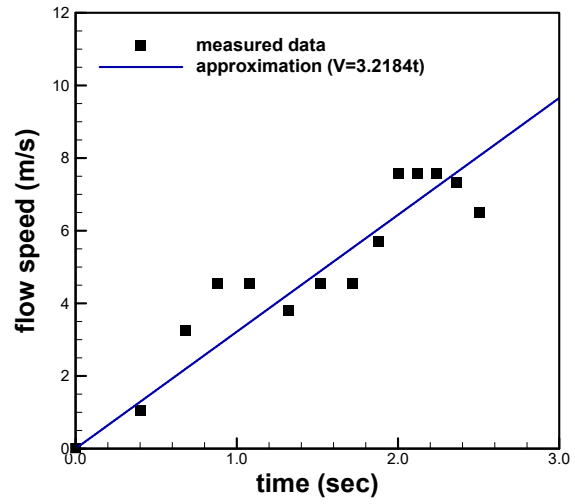
그림 53. 시간에 따른 토석류 전파 형상(Case04)

- 토석류 전파속도 측정 결과는 다음과 같음

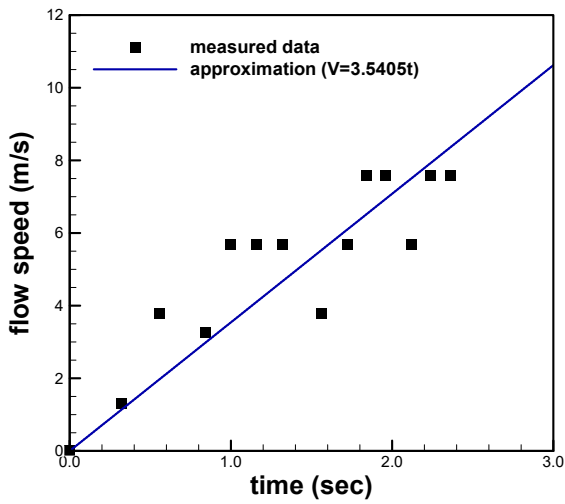
(a) Case 01



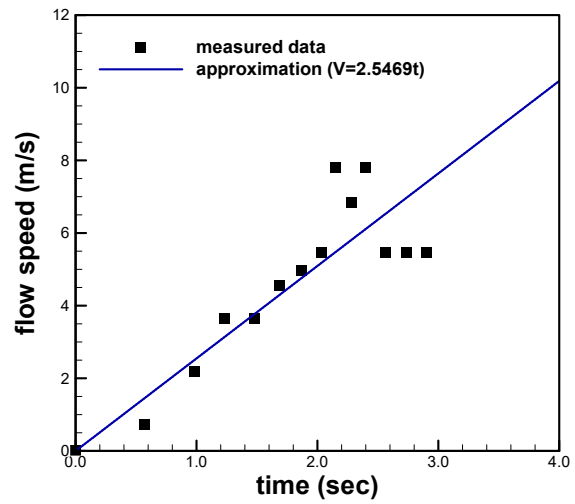
(b) Case 03



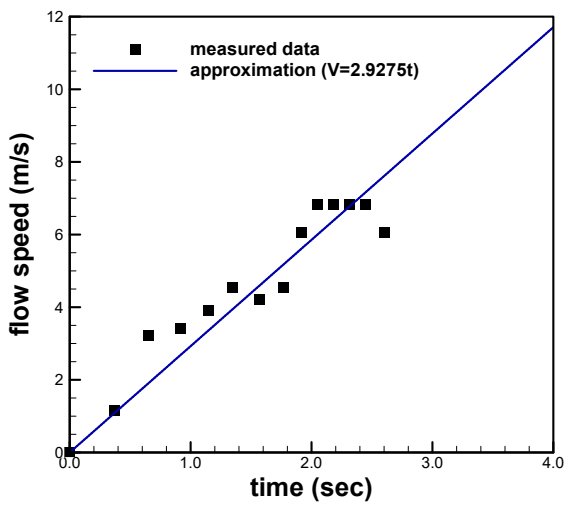
(c) Case 04



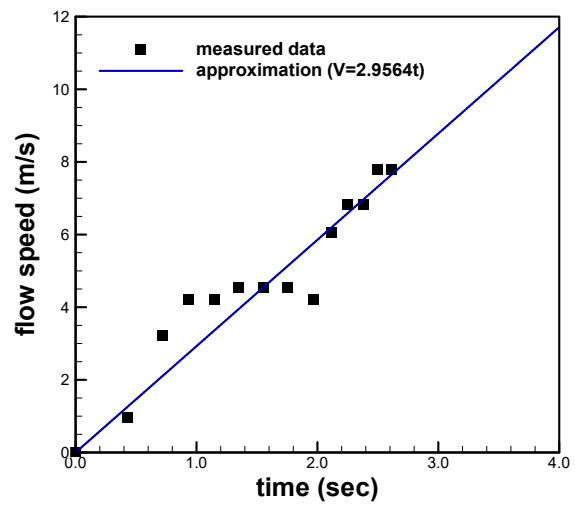
(d) Case 05



(e) Case 06



(f) Case 07



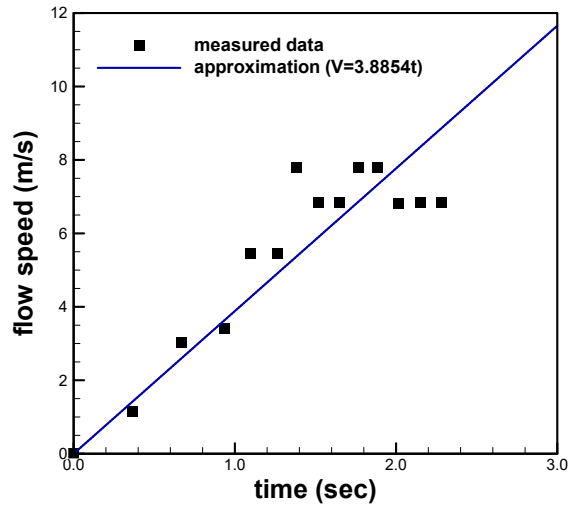


그림 54. 토석류 전파속도 계측 결과

- ▣ 토석류는 전파속도가 시간이 지남에 따라 빨라지는 가속운동을 하는 것으로 나타남
- ▣ 토석류의 전파 가속도(a)는 dV/dt 를 계산하여 구할 수 있음
- ▣ 함수비가 높은수록 토석류의 전파 가속도는 크게 나타남
- ▣ 실험을 통해 토석류의 함수비와 전파 가속도와의 관계식을 다음과 같이 도출함

$$a = 0.0858 w_{ratio} + 0.5399$$

(77)

여기서, a 는 전파 가속도, w_{ratio} 는 토석류의 함수비를 뜻함

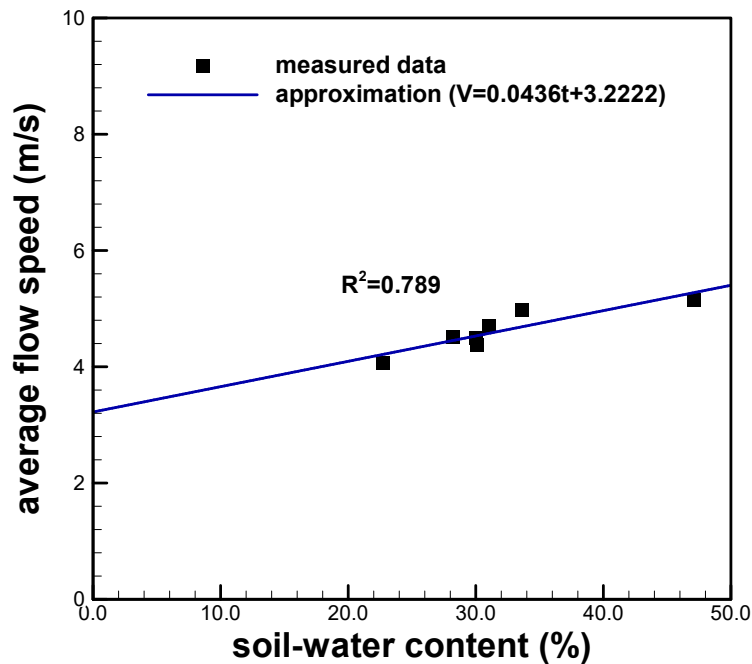


그림 55. 토석류 전파 시 함수비와 가속도의 관계

7) 토석류 퇴적 형상

- 토석류의 퇴적형상은 포인트게이지, 3D 지형스캐너 및 레이저 사면측정기를 이용하여 계측함
- 3D 지형스캐너는 2mm 해상도로 실험수로 내 지형 변화를 계측함
- Case01 ~ 08의 초기 지형은 수로 내 설치물이 없는 경우로 모두 동일함
- Case 02에 대한 토석류 퇴적형상은 아래 그림과 같음

- Case 02의 경우 함수율이 37.45%로 비교적 높아 수로 경사가 끝나는 지점에서 최대 퇴적 깊이가 140mm로 예측됨
- Case 04의 경우 함수율 33.6%이며, 최대 퇴적고는 111mm로 예측되었으며, Case02와 마찬가지로 수로의 경사가 끝나는 부분에 주로 퇴적이 발생함
- Case 05의 경우 함수율 22.7%로 비교적 낮아 토석류가 하류 약 3.5m 지점까지만 전파하였으며, 경사가 완만해지는 경계($y=0$)에서 최대 퇴적고 117.69mm로 예측됨
- Case 05의 경우에도 경사부가 끝나는 지점에서 퇴적이 주로 발생함
- Case 06 함수율 28.2%로 토석류가 하류로 길게 전파하였으며, 최대 퇴적고는 284.88mm로 예측됨
- 경사부에는 거의 토사가 남아 있지 않음
- Case 07은 함수율 30.0%로 Case 07보다 함수율이 약간 높으나 전반적으로 Case 06과 유사한 퇴적형상을 보임
- Case 07 역시 경사부에는 토사가 거의 남아 있지 않음
- Case 07은 $x=2.5\text{m}$ 보다 상류 구역에서 예측이 원활하게 이루어지지 못했음
- Case 08은 함수율 41.7%이며, 토석류가 모래로만 구성된 조건으로 하류측 5m 지점까지 전파하였으며, 경사수로 상류측 $x=4\text{m}$ 이상인 지점에서는 거의 퇴적되지 않음
- Case10은 하류측 5 m 구간에 0.05m 두께의 모래 지형이 형성되어 있는 경우로 경사가 끝나는 지점 ($x=-0.80\text{m}$) 하단에 약 250mm 깊이의 퇴적이 발생함
- 경사부 상류측 $x=0\sim 1.0\text{m}$ 구간의 상부($y=1.1$)에서 약 50mm의 침식 구간이 일부 존재함
- Case10의 경우에도 $x=2.0\text{m}$ 상류 지점에서 예측이 원활하게 이루어지지 않음
- Case11은 경사부 최 하류측에서 2.0m 상류로 떨어진 지점부터 6.0 m 구간에 두께 0.05m의 모래지형이 존재하는 경우로 토석류의 함수비는 41.1%이며, 지반의 함수비는 21.33%인 경우임
- $x=4.0\text{m}$ 보다 상류에서는 주로 침식이 발생하며, $x=4.0\text{m}$ 보다 하류에서는 퇴적이 주로 발생함
- 최대 퇴적고는 경사가 끝나는 지점에서 약 1.6m 상류측에서 약 220mm 두께가 나타남
- Case12의 지형은 Case11과 동일함
- 토석류의 함수비는 36.26%이며, 지반의 함수비는 18.8%임
- 함수비가 Case11보다 전반적으로 낮아 침식 및 퇴적 경향은 Case11과 유사하나 침식은 Case11보다 작게 발생하나, 퇴적고(최대 퇴적고 약 280mm)는 Case11보다 높음
- Case13에서 토석류의 함수비는 38.0%이며, 지반의 함수비는 18.17%임
- Case13은 Case12보다 함수비가 비교적 높아 토석류가 보다 길게 전파함
- Case14의 토석류는 모래+자갈로 이루어져 있음
- 토석류의 함수비는 31.4%이며, 지반의 함수비는 13.92%임
- 전반적으로 자갈이 포함되어 토석류가 넓게 전파하였으나, 함수비가 낮아 침식은 크게 발생하지 않음
- Case15의 토석류는 모래+자갈로 이루어져 있으며, 지반 역시 모래+자갈로 이루어짐

- 토석류의 함수비는 24.2%이며, 지반의 함수비는 28.02%임
- 지반의 함수비가 비교적 높아 경사면에서 침식이 크게 발생하였음
- 초기 지반의 형상 때문에 수로 하부 ($y < 0.75\text{m}$)에서 침식이 크게 발생하였음

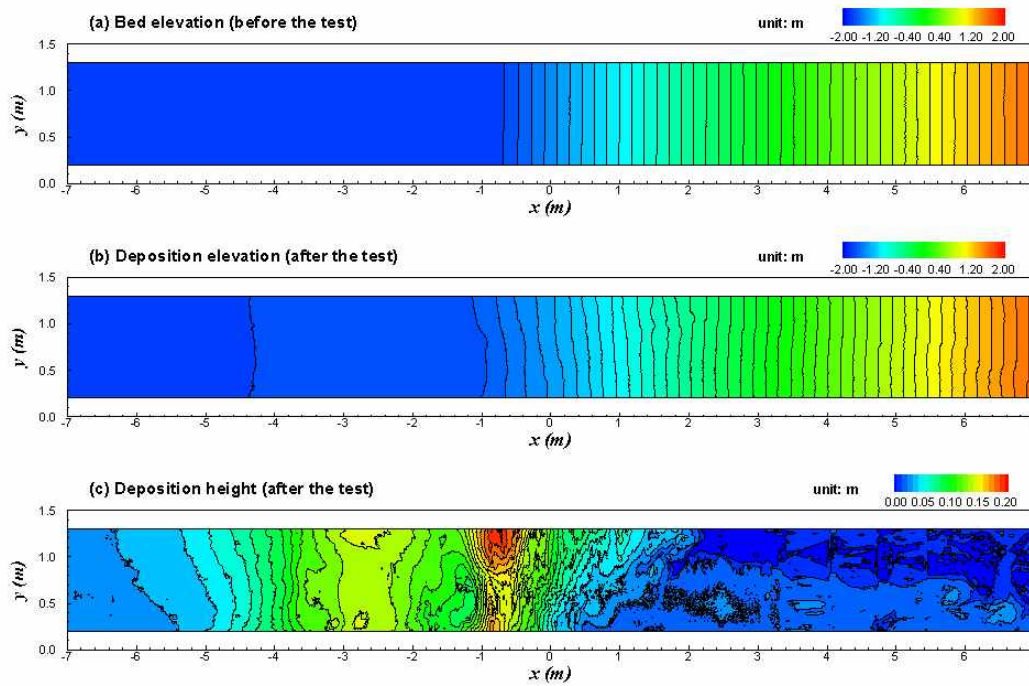


그림 56. 실험 전·후의 각 지점별 표고((a), (b)) 및 침식·퇴적 두께(c), Case01

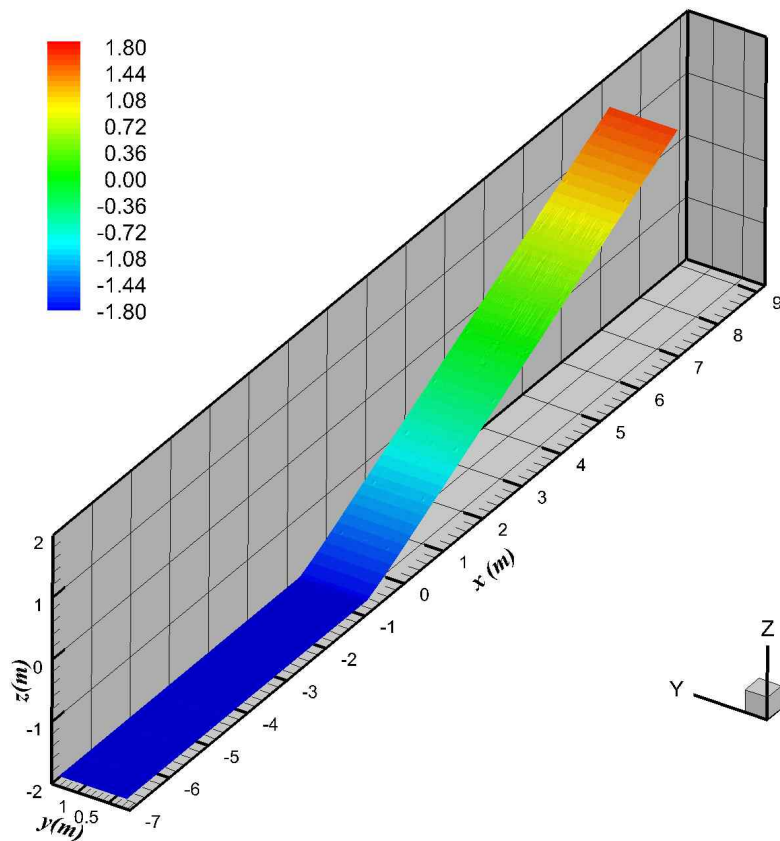


그림 57. 실험 전 수로 형상(Case01 ~ 08)

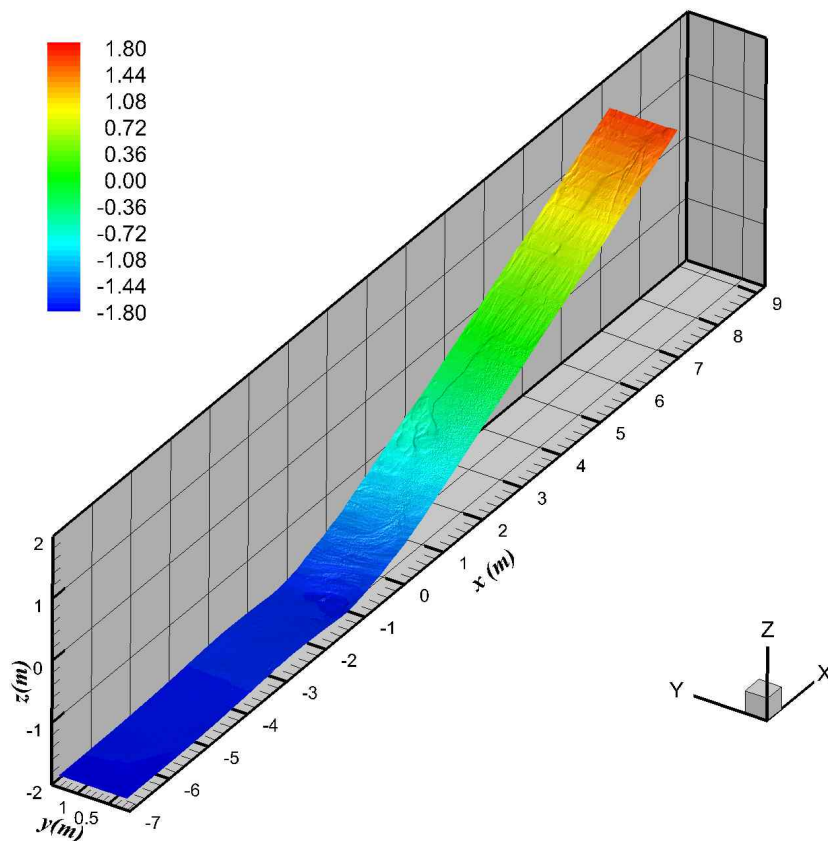


그림 58. 실험 후 퇴적 형상(Case01)

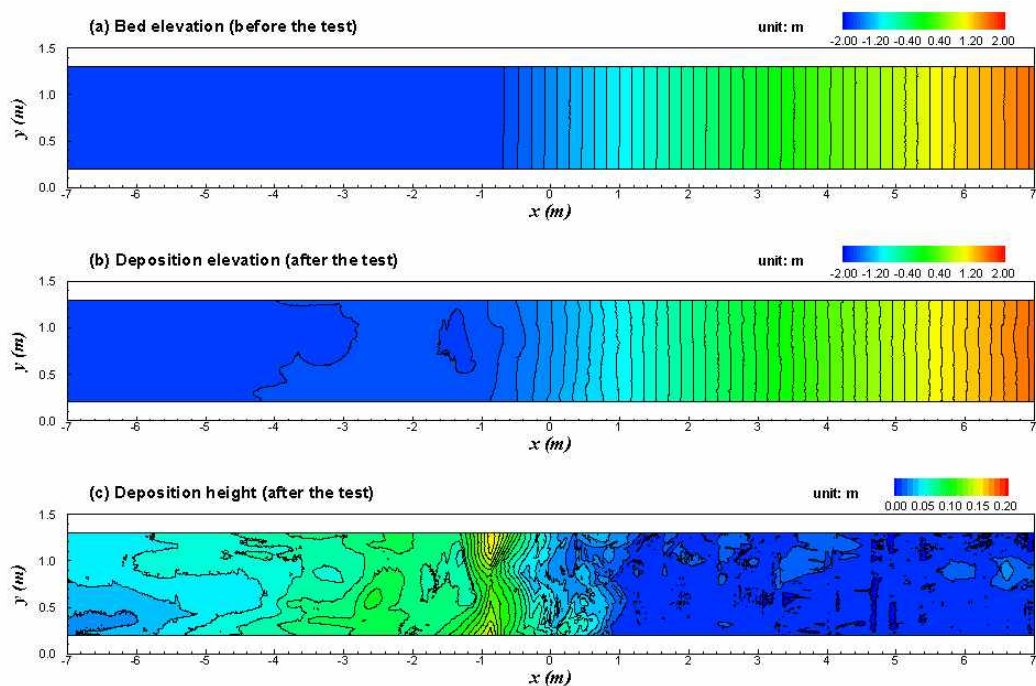


그림 59. 실험 전·후의 각 지점별 표고((a), (b)) 및 침식·퇴적 두께(c), Case02

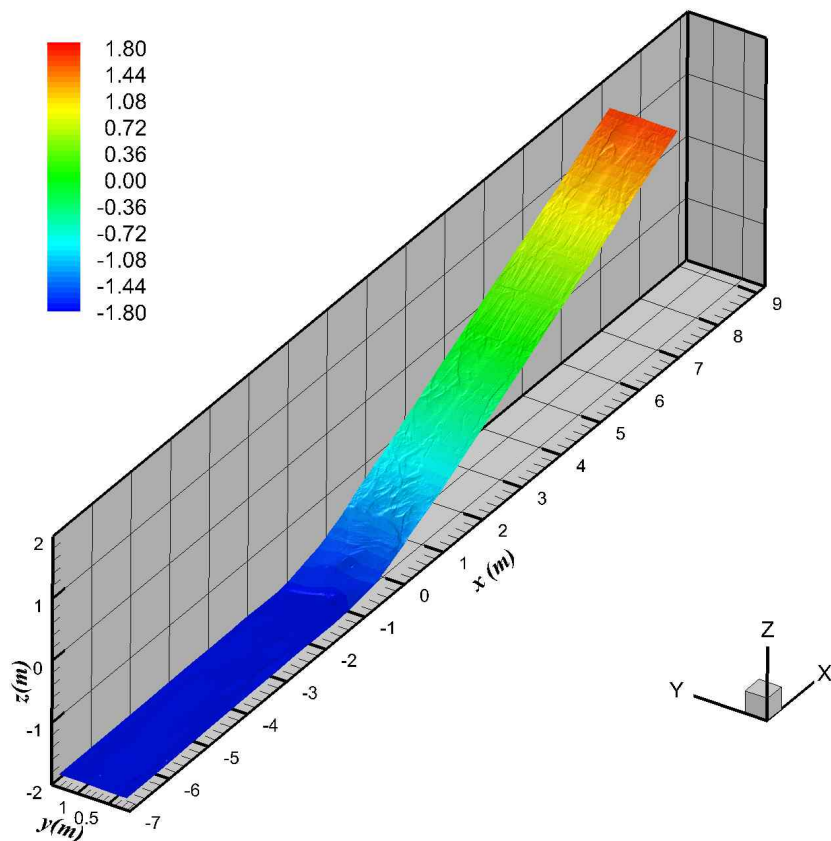


그림 60. 실험 후 퇴적 형상(Case02)

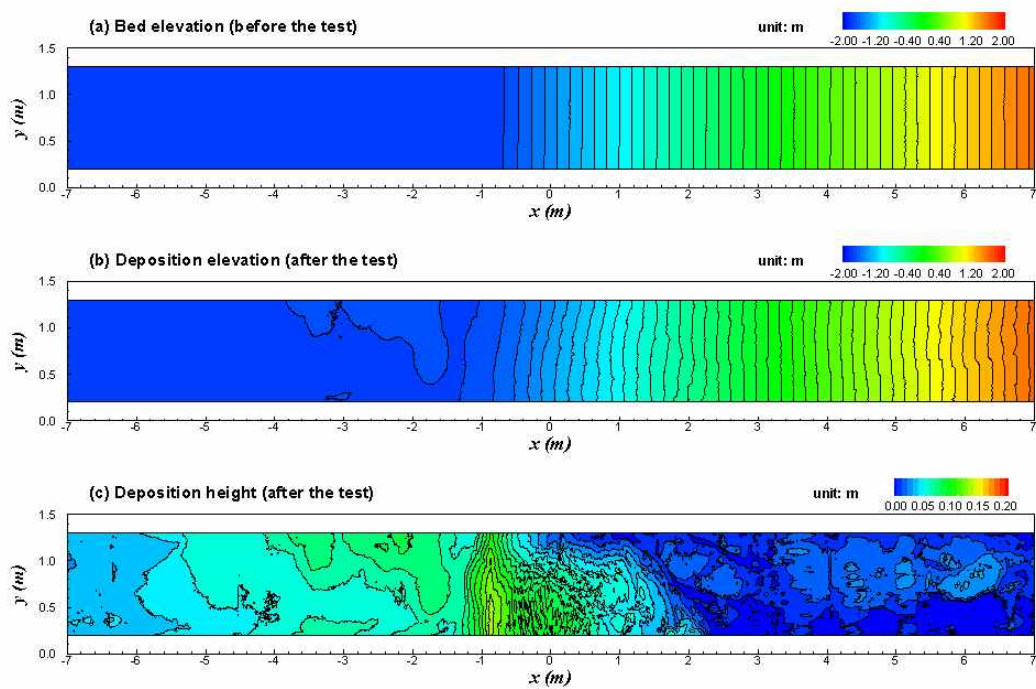


그림 61. 실험 전·후의 각 지점별 표고((a), (b)) 및 침식·퇴적 두께(c), Case04

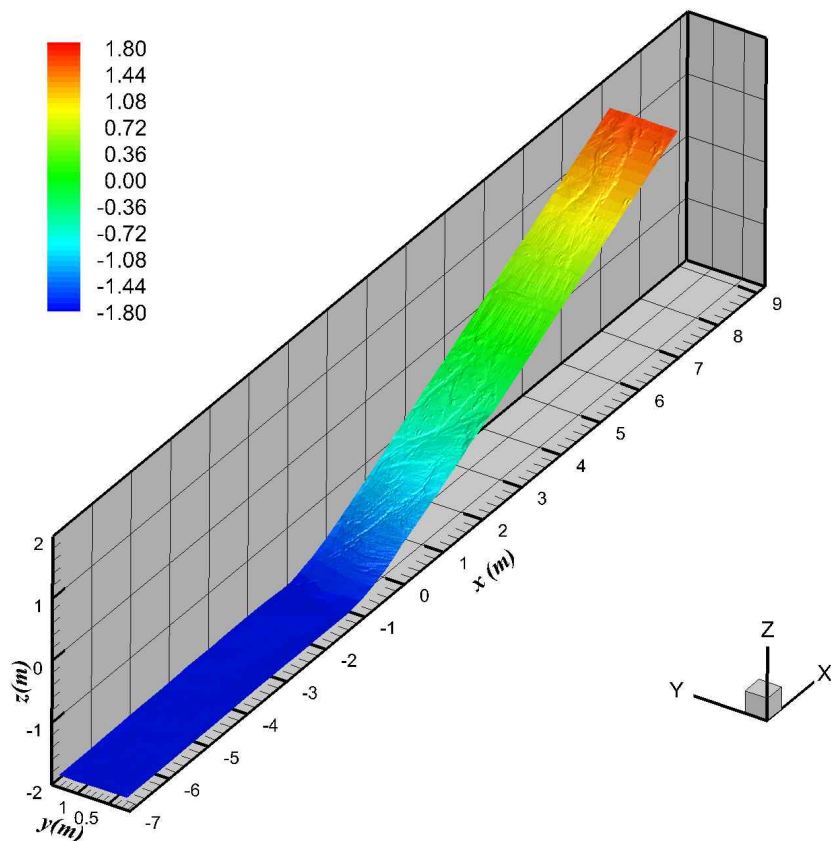


그림 62. 실험 후 퇴적 형상(Case04)

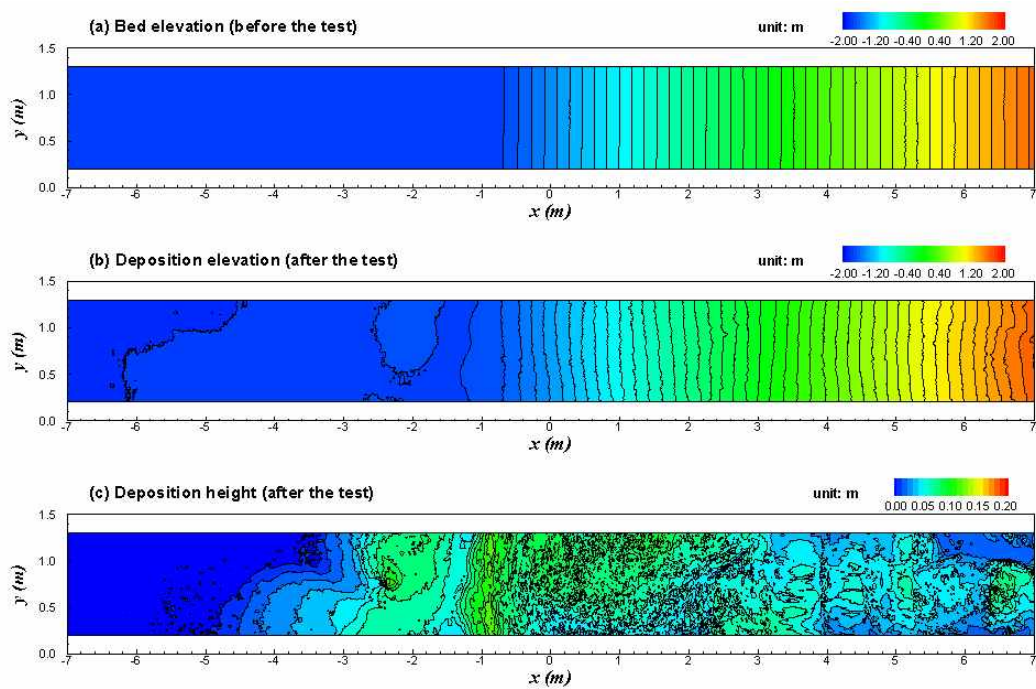


그림 63. 실험 전·후의 각 지점별 표고((a), (b)) 및 침식·퇴적 두께(c), Case05

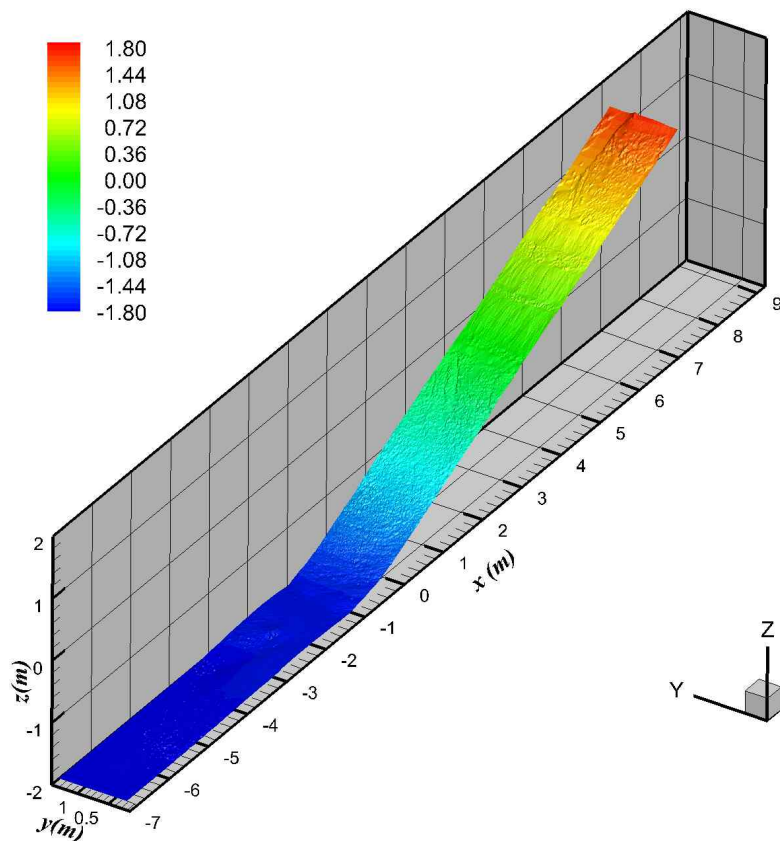


그림 64. 실험 후 퇴적 형상(Case05)

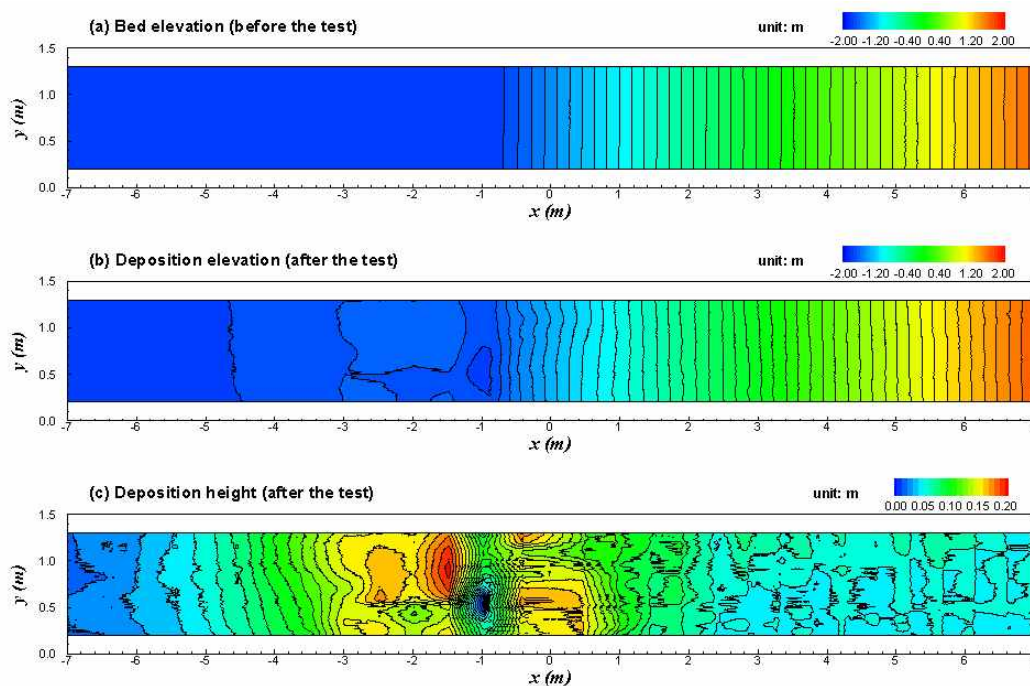


그림 65. 실험 전·후의 각 지점별 표고((a), (b)) 및 침식·퇴적 두께(c), Case06

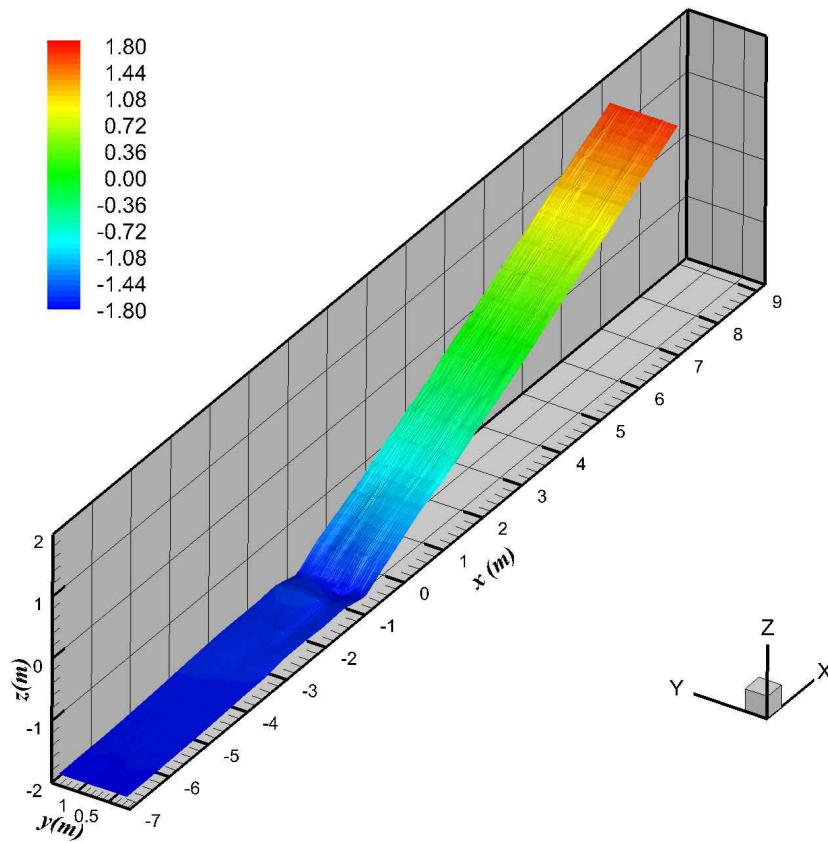


그림 66. 실험 후 퇴적 형상(Case06)

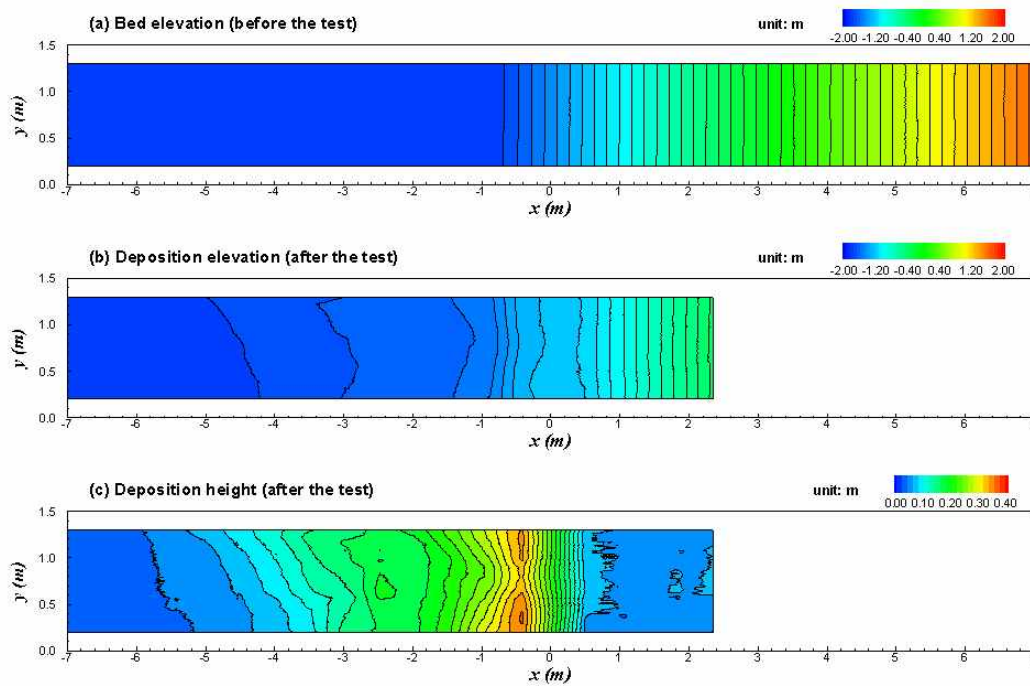


그림 67. 실험 전·후의 각 지점별 표고((a), (b)) 및 침식·퇴적 두께(c), Case07

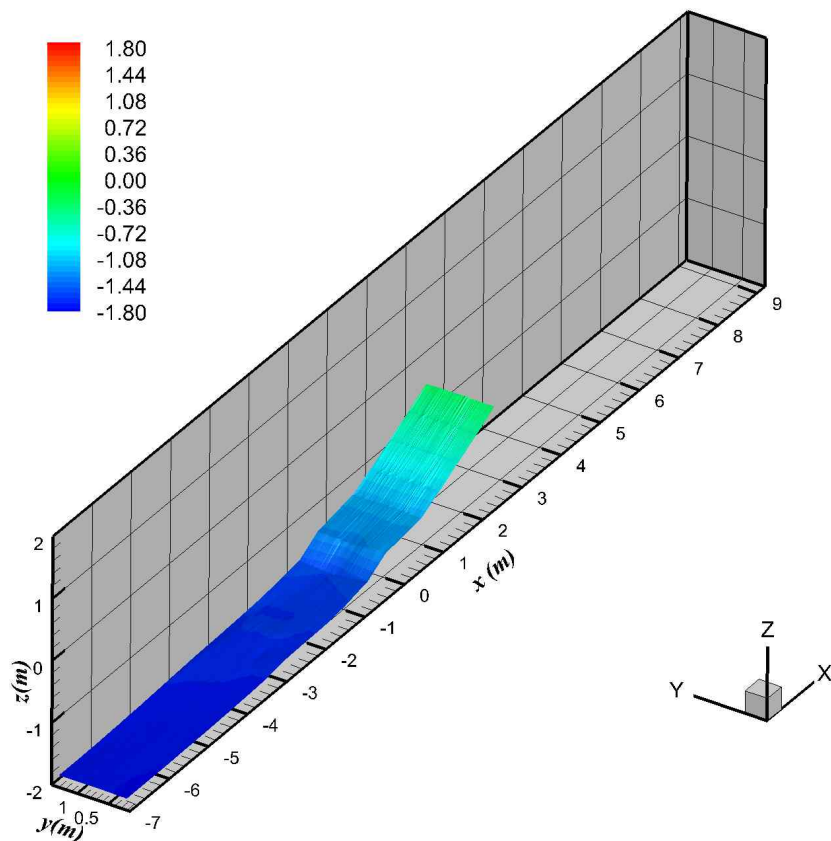


그림 68. 실험 후 퇴적 형상(Case07)

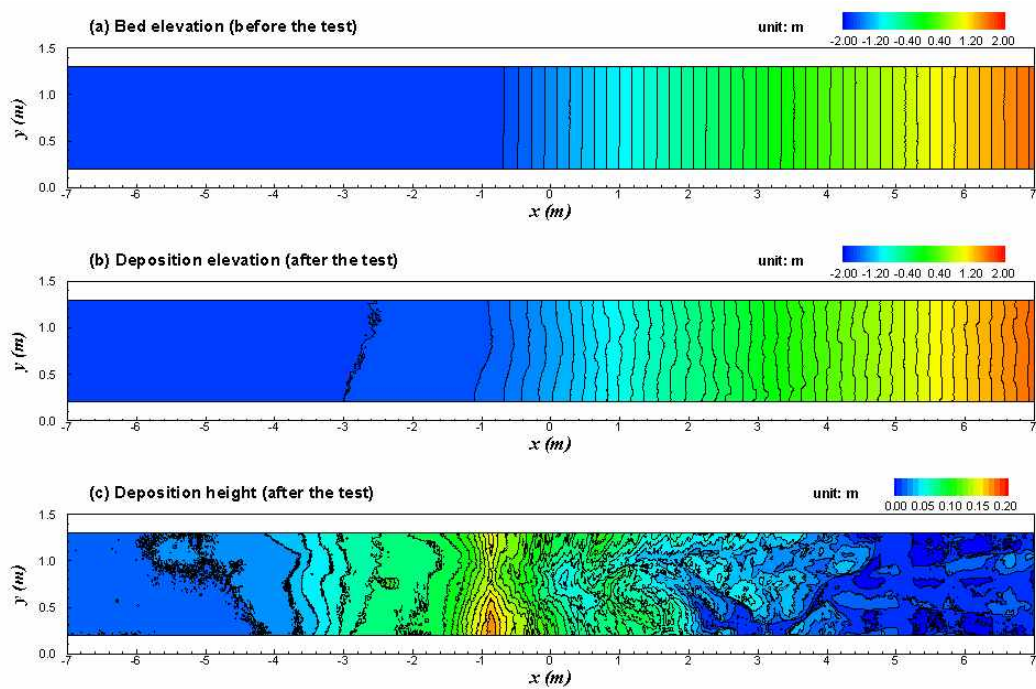


그림 69. 실험 전·후의 각 지점별 표고((a), (b)) 및 침식·퇴적 두께(c), Case08

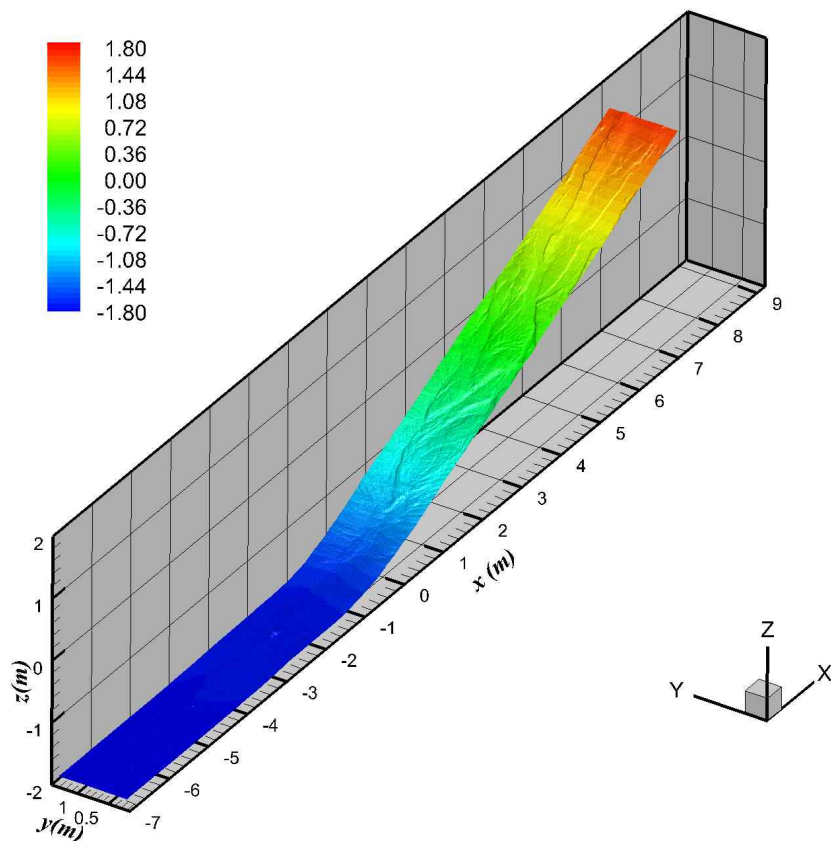


그림 70. 실험 후 퇴적 형상(Case08)

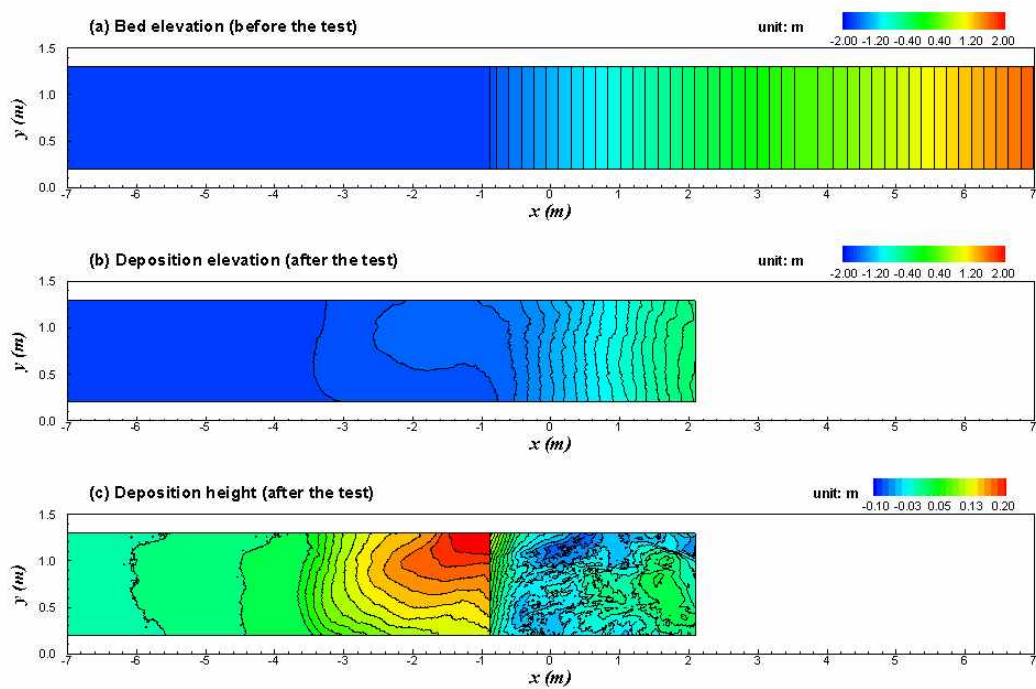
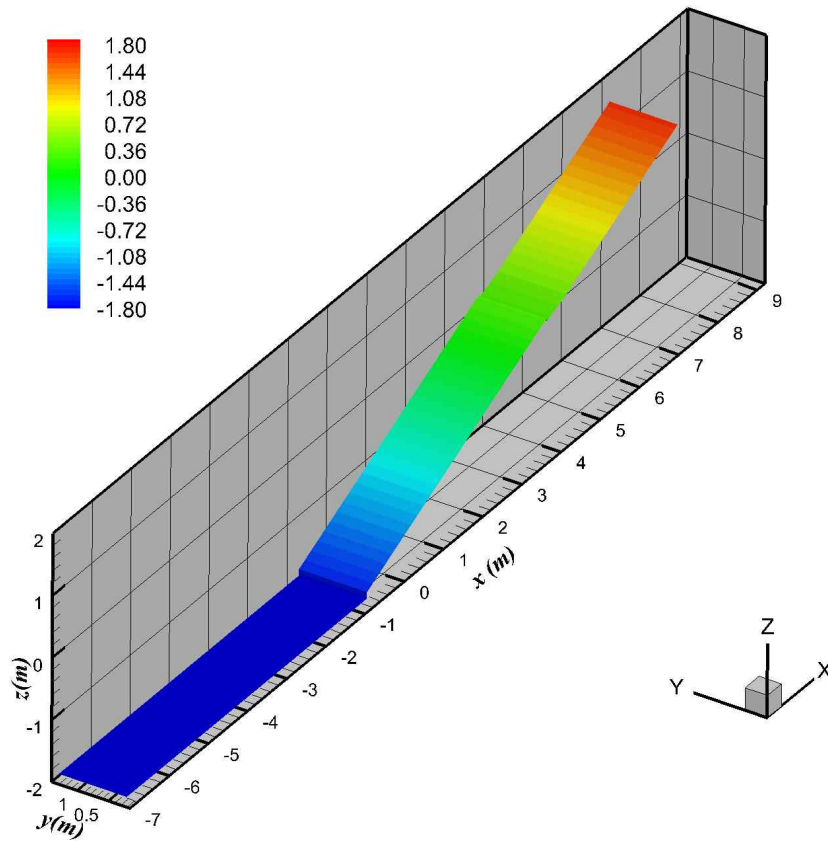


그림 71. 실험 전·후의 각 지점별 표고((a), (b)) 및 침식·퇴적 두께(c), Case10

(a) 실험 전 지형 형상, Case10



(b) 실험 후 지형 형상, Case10

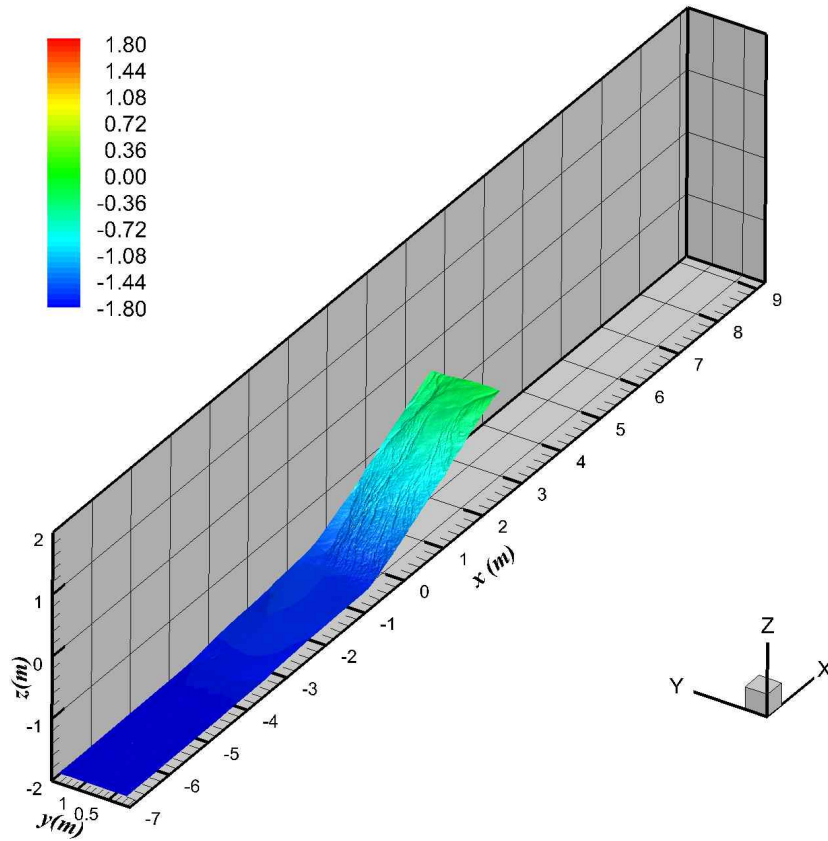


그림 72. 실험 전·후 지형 형상(Case10)

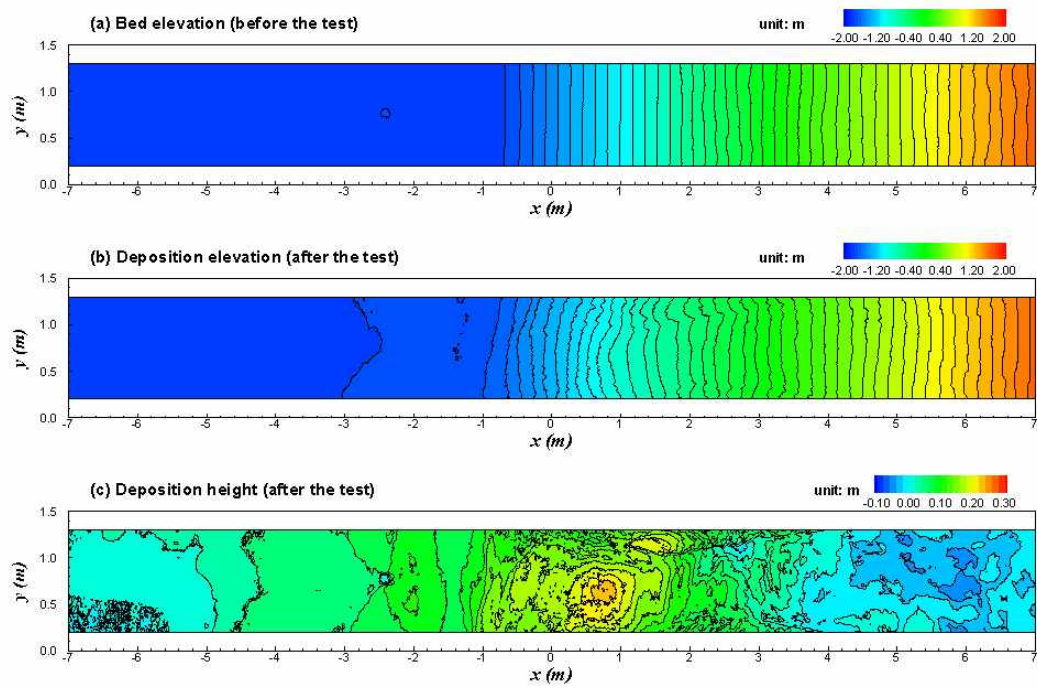
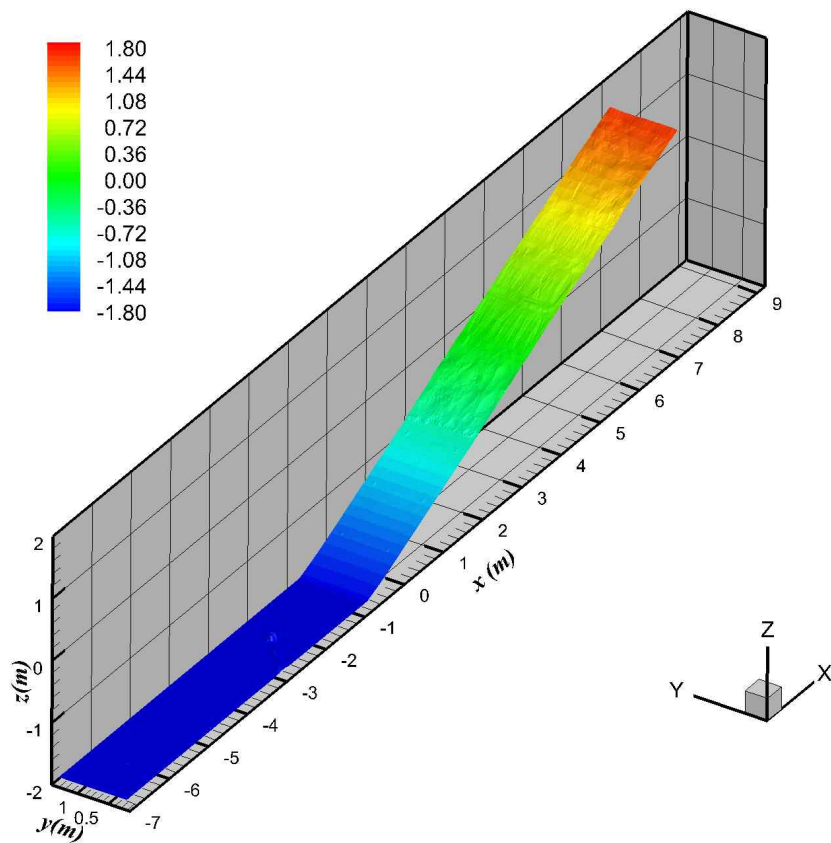


그림 73. 실험 전·후의 각 지점별 표고((a), (b)) 및 침식·퇴적 두께(c), Case11

(a) 실험 전 지형 형상, Case11



(b) 실험 후 지형 형상, Case11

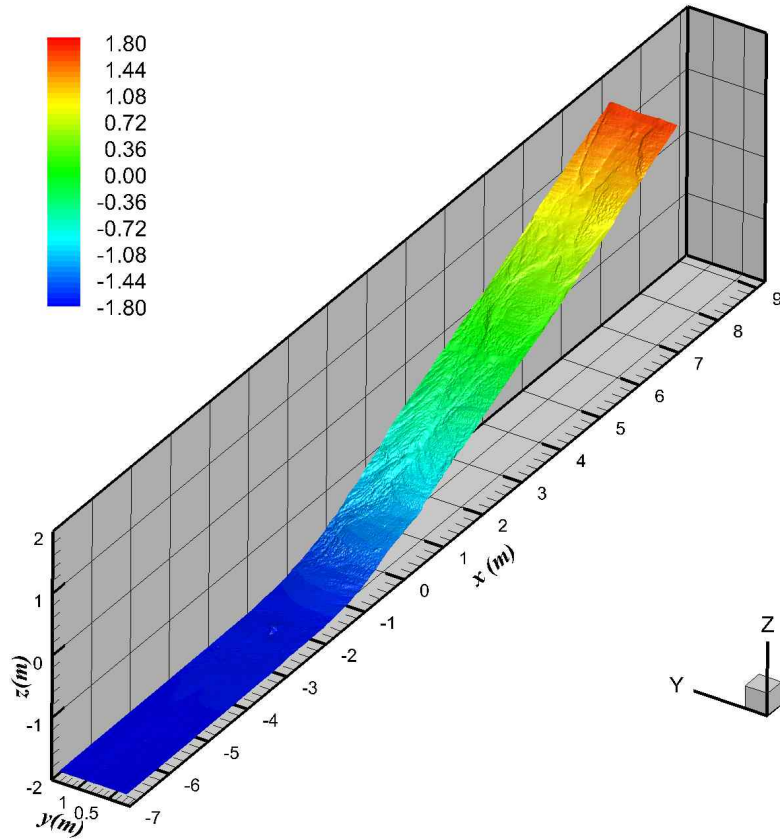


그림 74. 실험 전·후 지형 형상(Case11)

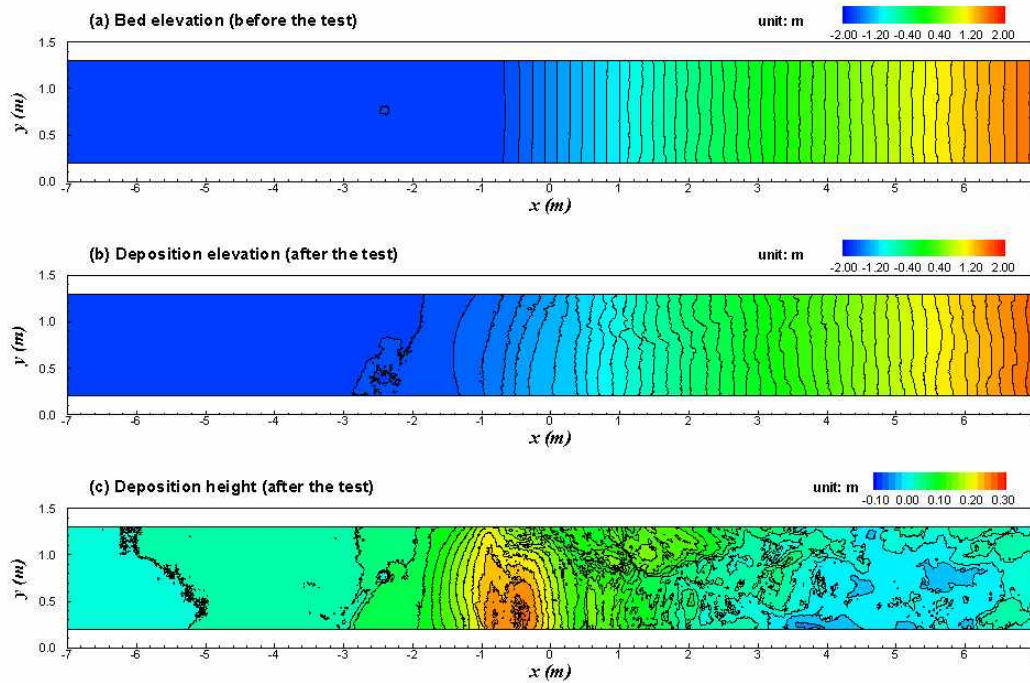
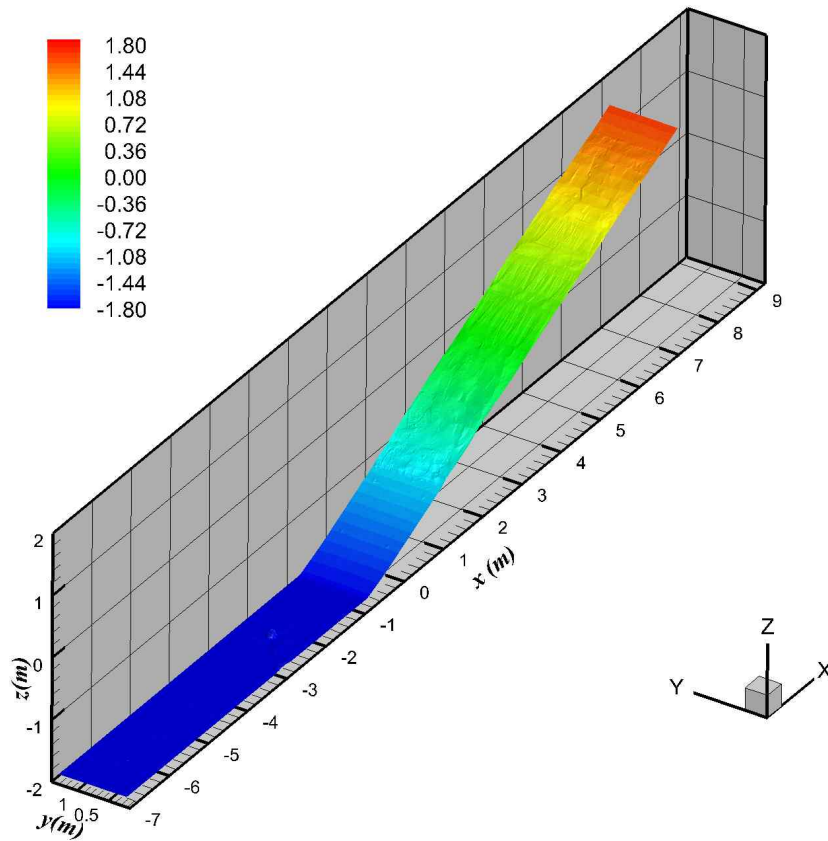


그림 75. 실험 전·후의 각 지점별 표고((a), (b)) 및 침식·퇴적 두께(c), Case12

(a) 실험 전 지형 형상, Case12



(b) 실험 후 지형 형상, Case12

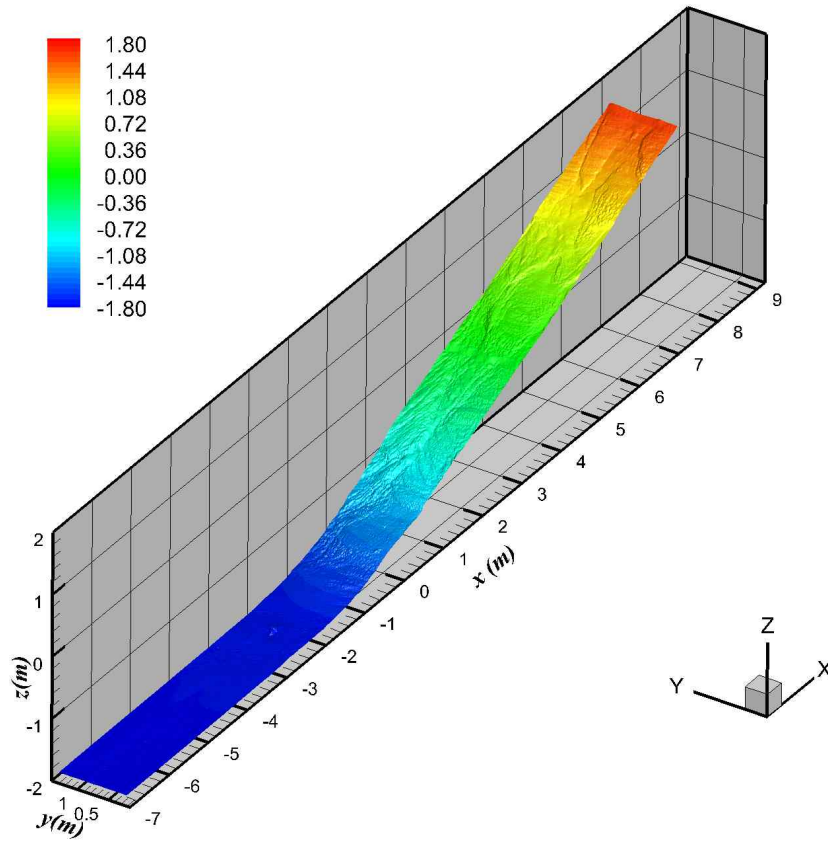


그림 76. 실험 전·후 지형 형상(Case12)

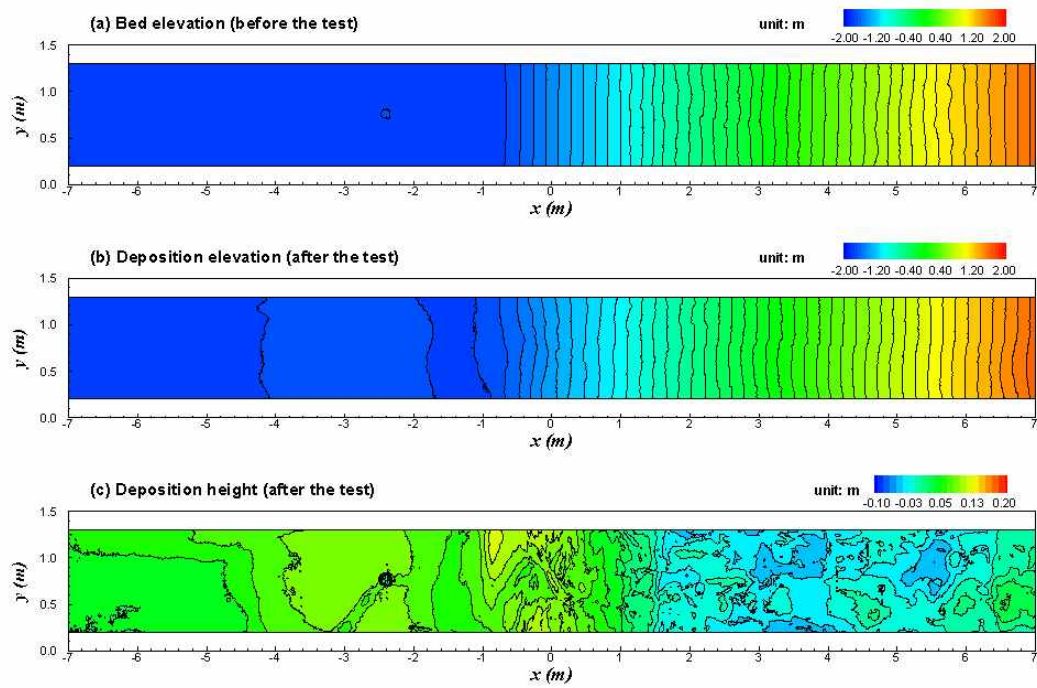
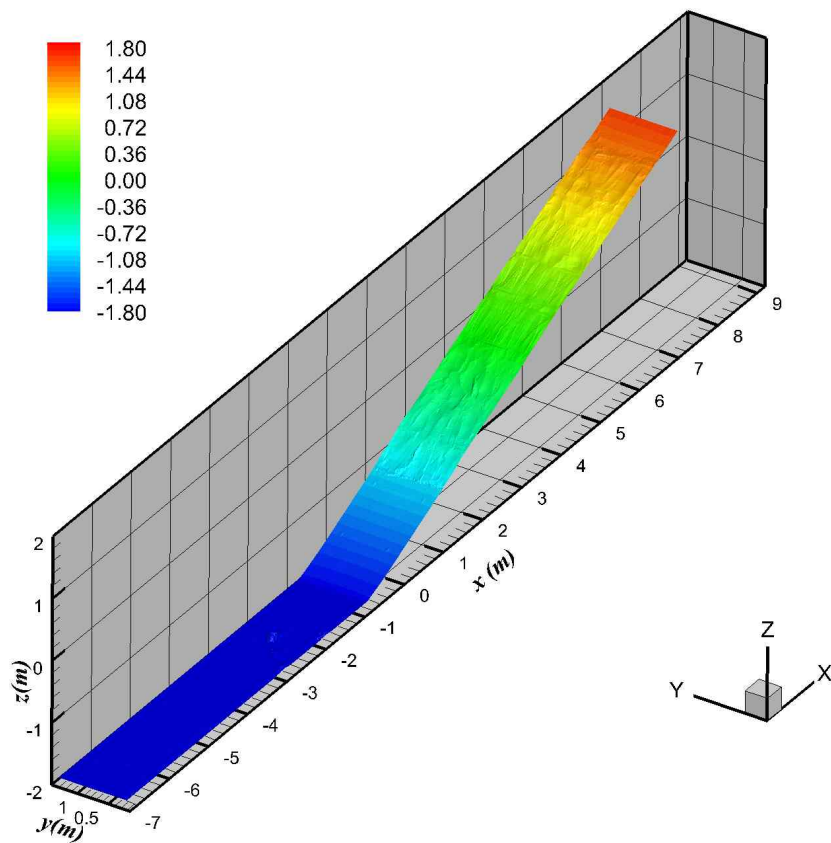


그림 77. 실험 전·후의 각 지점별 표고((a), (b)) 및 침식·퇴적 두께(c), Case13

(a) 실험 전 지형 형상, Case13



(b) 실험 후 지형 형상, Case13

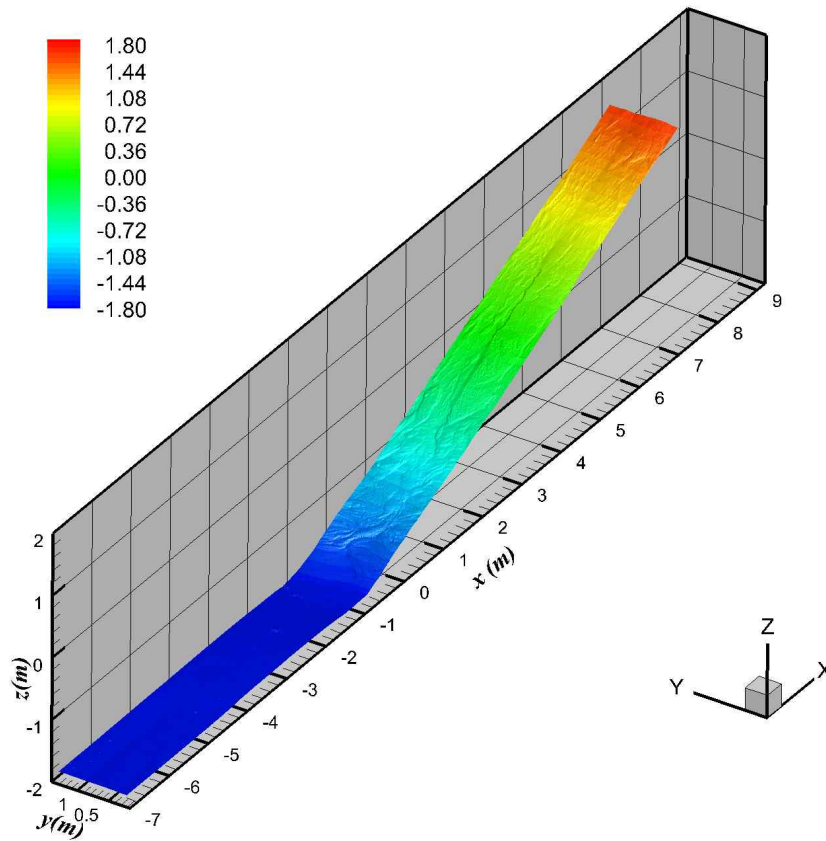


그림 78. 실험 전·후 지형 형상(Case13)

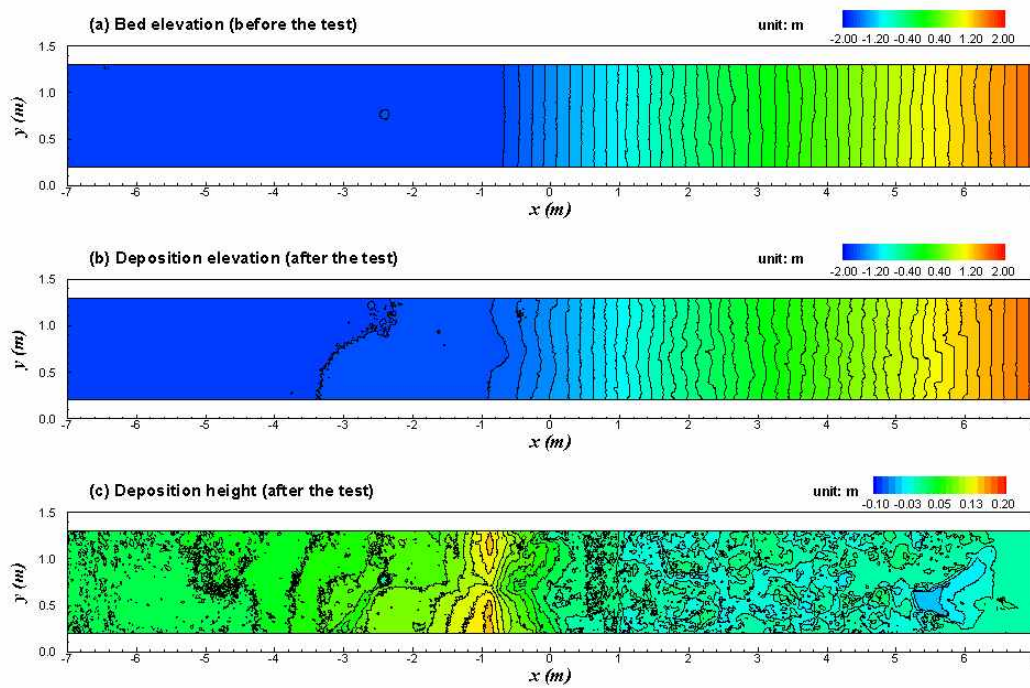
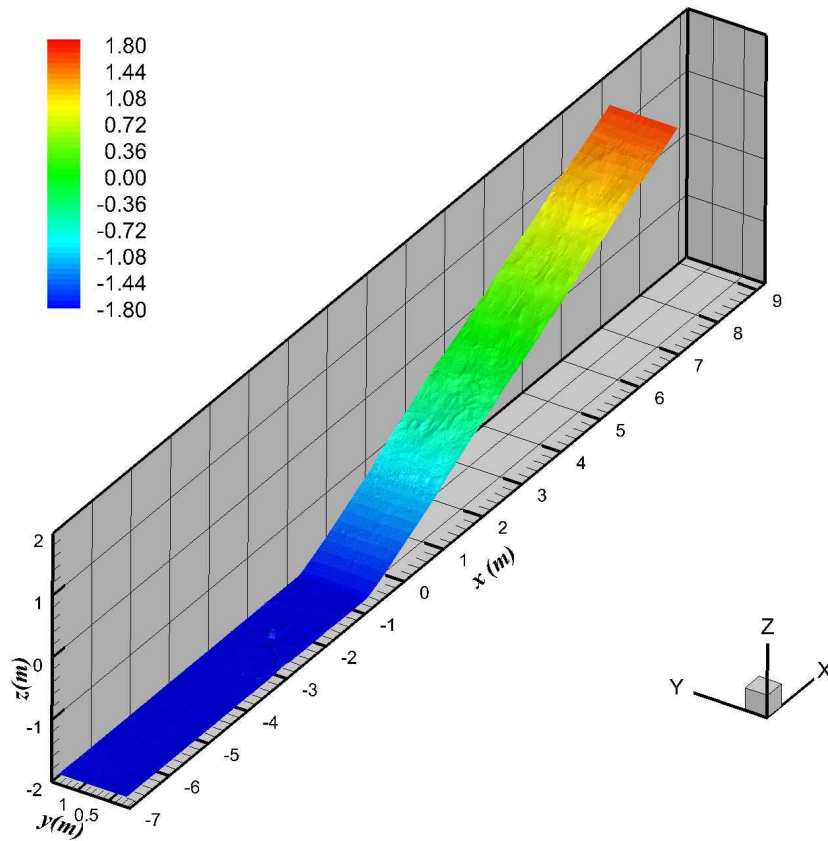


그림 79. 실험 전·후의 각 지점별 표고((a), (b)) 및 침식·퇴적 두께(c), Case14

(a) 실험 전 지형 형상, Case14



(b) 실험 후 지형 형상, Case14

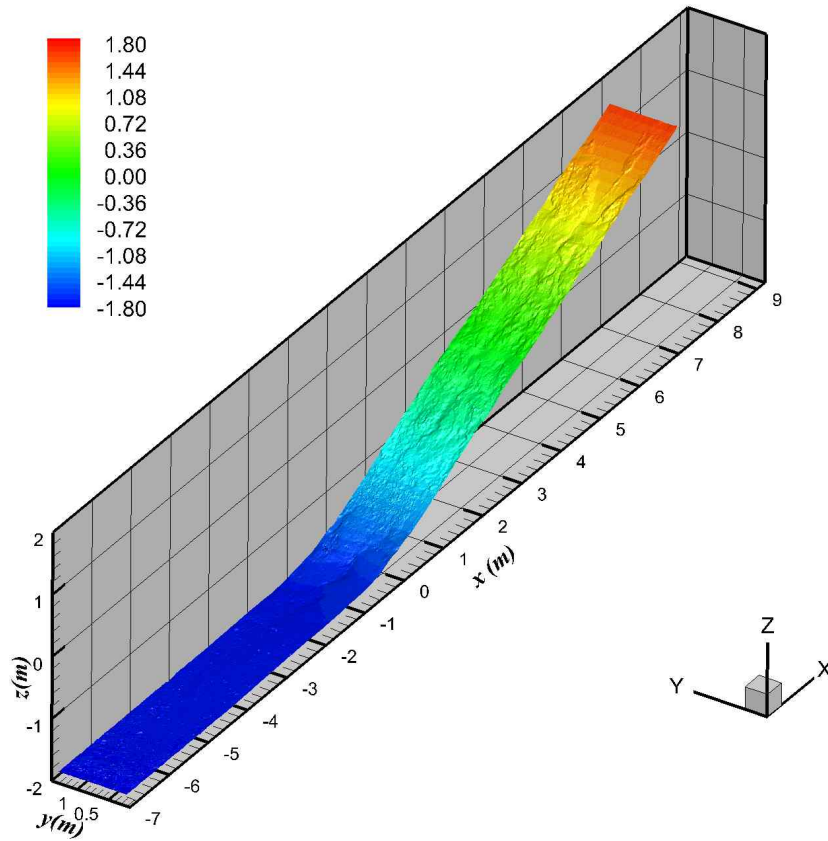


그림 80. 실험 전·후 지형 형상(Case14)

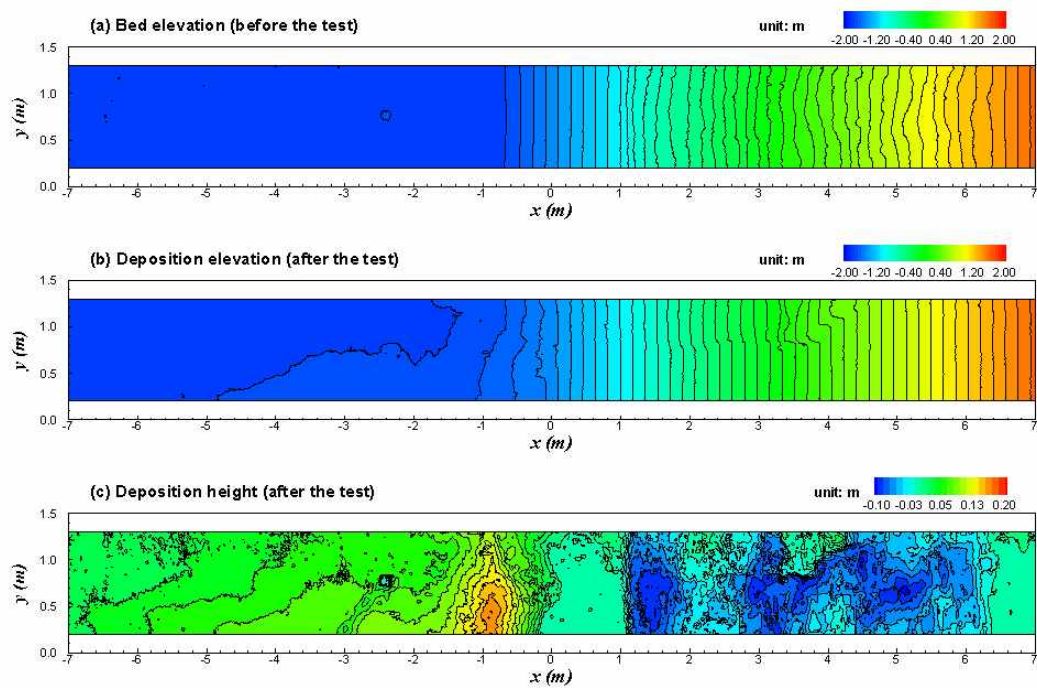
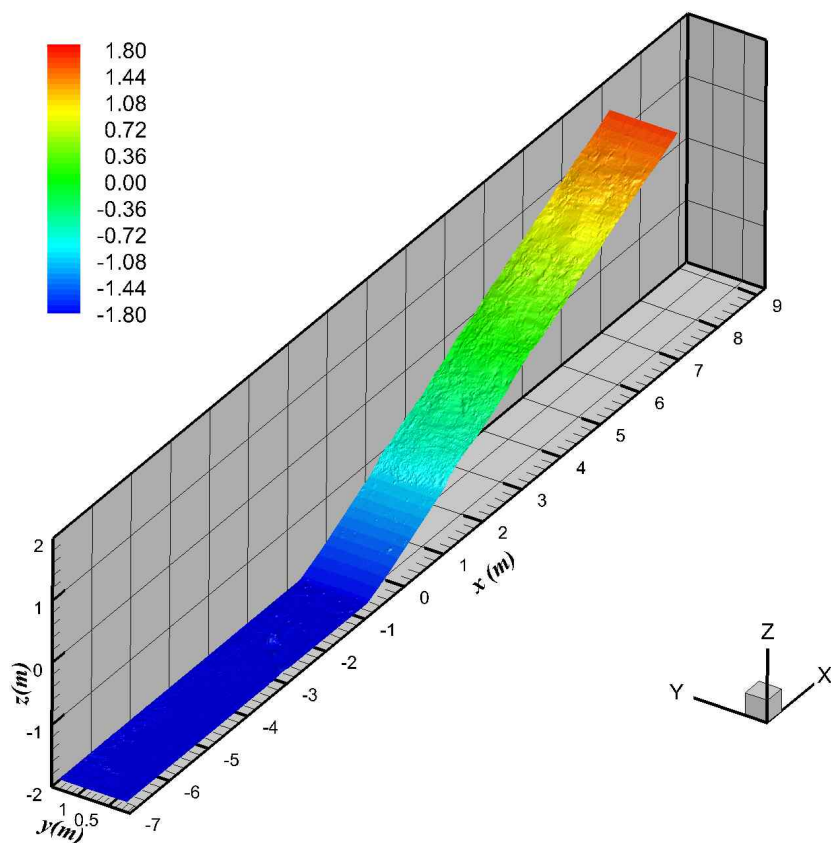


그림 81. 실험 전·후의 각 지점별 표고((a), (b)) 및 침식·퇴적 두께(c), Case15

(a) 실험 전 지형 형상, Case15



(b) 실험 후 지형 형상, Case15

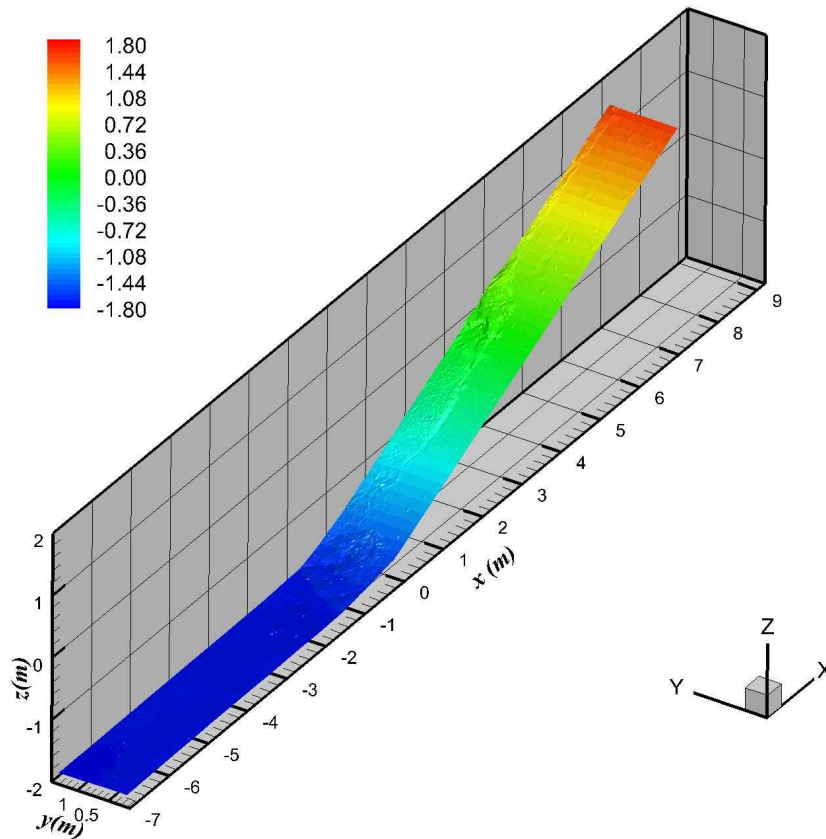


그림 82. 실험 전·후 지형 형상(Case15)

8) 토석류 작용력

- 토석류가 발생하여 건물이나 다양한 구조물에 작용하는 충격력을 확인하기 위해 토석류의 작용력을 측정하였음
- 토석류의 작용력 측정장치는 토석류가 발생하였을 때 충격력을 받기 위한 사각형 패널과 여기에 연결된 로드셀로 구성된다.
- 전면 패널의 크기는 10 cm × 10 cm 이며, 로드셀의 계측한계는 0~200 kgf 이다.

(a) 정면



(b) 측면

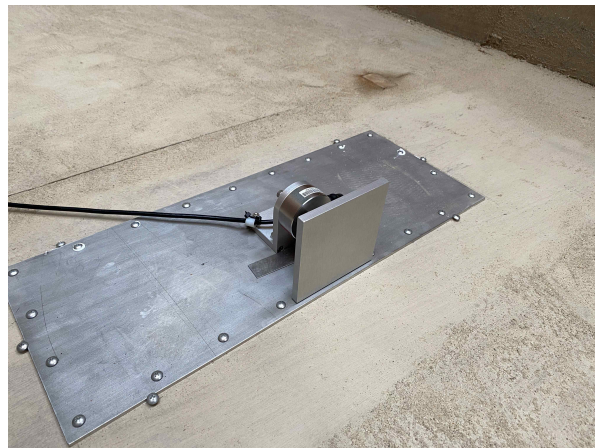


그림 83. 토석류 작용력 측정장치

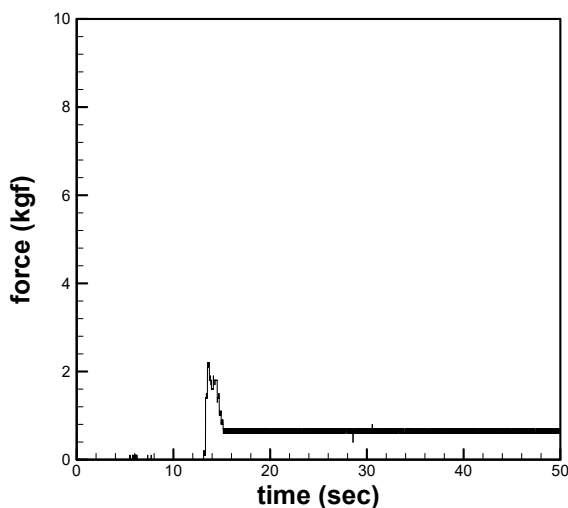
- 토석류의 작용력 측정결과

- 함수비가 22.65%인 경우(Case05) 토석류의 최대 작용력은 2.26kgf로 측정되었으며, 면적당 하

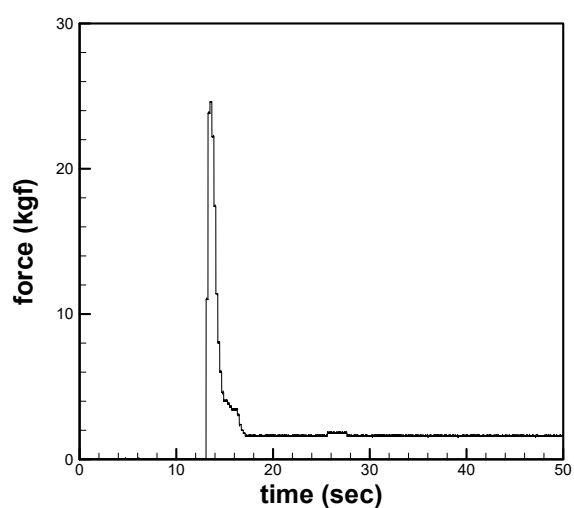
중(압력)으로 환산하면 2216.38N/m^2 임

- 함수비가 30.0%인 경우(Case07) 토석류의 최대 작용력은 24.65kgf 로 측정되었으며, 면적당 하중(압력)으로 환산하면 24174.26N/m^2 임
- 함수비가 클수록 토석류의 유동성도 커지며, 이에 따라 전파속도 및 작용력도 증가하는 것으로 나타났다.
- Case08은 함수비가 47.1%로 Case07에 비해 매우 높으나 Case07은 토석류가 모래+자갈로 구성되어 있고, Case08은 모래로만 구성되어 있어 작용력은 Case07보다 낮게 나타남
- Case09는 경사수로 최하단에 약 5.0m 길이, 0.1m 두께의 모래지형이 있는 경우임
- 높은 모래지반의 영향으로 토석류가 하류로 길게 전파하지 못하여 최대 토석류 작용력이 0.4kgf 로 낮게 나타남
- Case10의 기본적인 수로구성은 Case09와 동일하나 원지반의 모래지형 두께가 0.05m임
- Case10은 원지반의 두께가 Case09보다 작아 토석류가 하류로 길게 전파하였으며, 최대 작용력은 약 15kgf 로 예측됨
- Case11의 경우 모래 지형이 경사부 수로 최하단 상류측 2.0m 지점부터 두께 0.05m, 길이 6.0m 규모로 존재함
- 토석류의 최대 작용력은 약 8.0kgf 로 예측됨
- Case12의 수로 구성은 Case11과 동일함
- 토석류의 최대 작용력은 약 11kgf 로 나타남
- Case13의 경우 토석류의 최대 작용력은 약 12.8kgf 로 나타남
- 토석류 작용력 측정을 위한 로드셀 주변으로 퇴적이 거의 발생하지 않아 15초 이후에도 잔류 토압이 작용하지 않음
- Case14는 토석류 재료 구성이 모래+자갈로 이루어진 경우이며, 최대 토석류 작용력은 약 10.4kgf 로 예측됨
- Case15는 토석류 재료 구성과 지반의 구성 모두 모래+자갈로 이루어진 경우이며, 최대 토석류 작용력은 약 7.0kgf 로 예측됨
- 토석류의 함수비가 24.2%로 비교적 낮아 작용력이 비교적 크지 않게 나타남

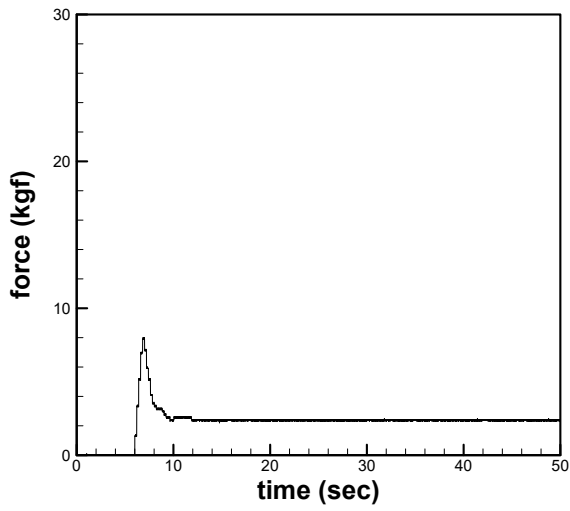
(a) Case 05



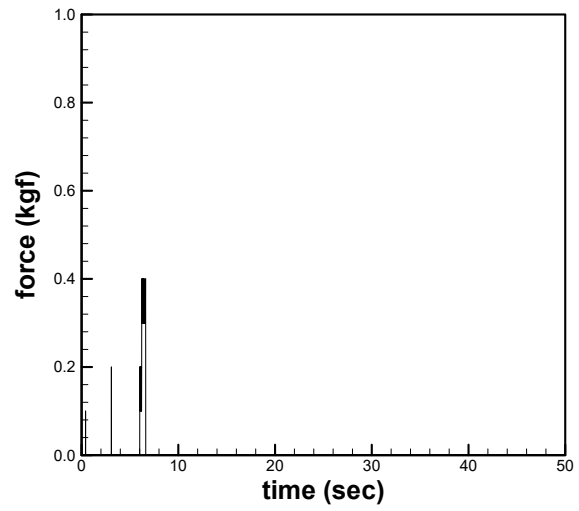
(b) Case 07



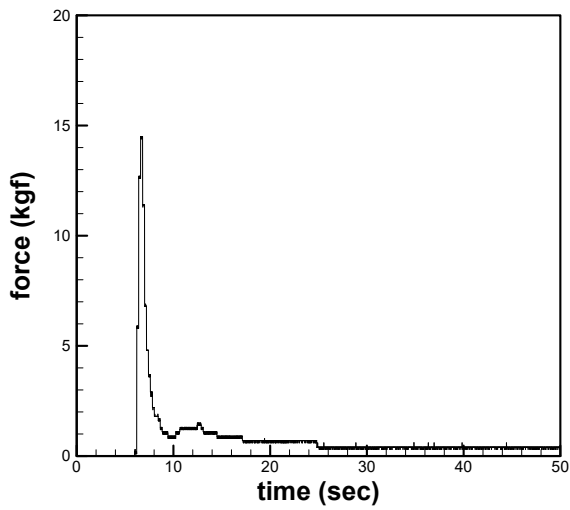
(c) Case 08



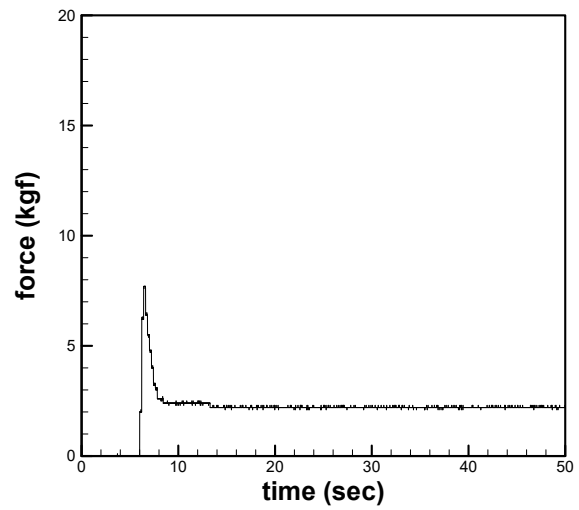
(d) Case 09



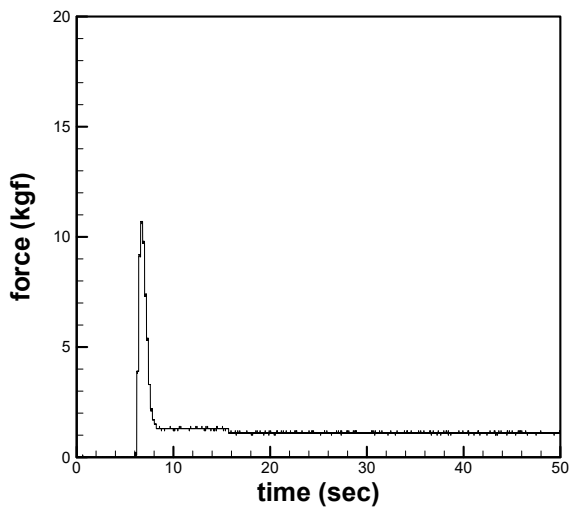
(e) Case 10



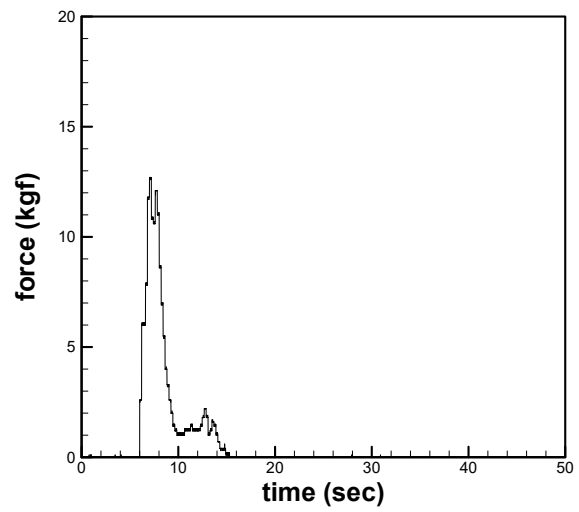
(f) Case 11



(g) Case 12



(h) Case 13



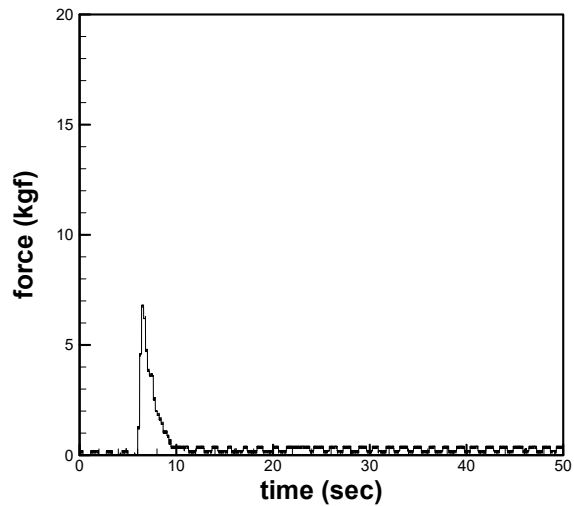
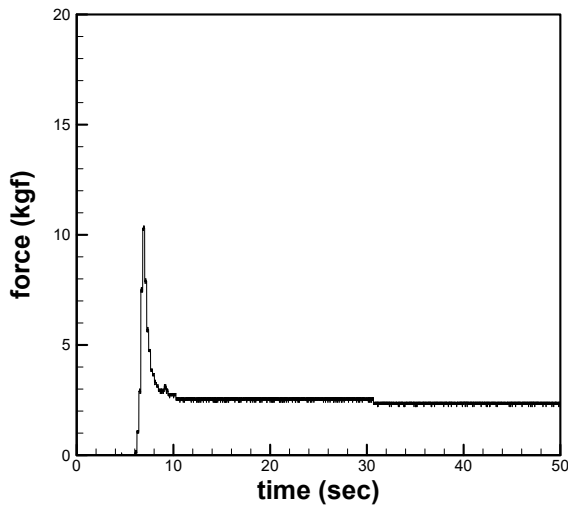


그림 84. 토석류 작용력 시계열

9) 실험 데이터 공개

- 본 연구에서 수행한 모든 실험 결과는 국토교통과학기술진흥원 K-WIZ 시스템 및 국토교통연구원 프라운영원 데이터중계 게시판에 업로드 하여 타 연구자들이 본 실험의 데이터를 활용할 수 있도록 함
- 본 연구에서 공개하는 실험 데이터 및 표준 형식은 다음과 같음

데이터 명	데이터 형식	비고
표고 시계열	t(sec), z(mm)	표고계 측정자료
퇴적형상	x(cm), y(cm), z(mm)	사면측정기, 3D 지형스캐너 측정자료
토석류 작용력	t(sec), f(kgf)	로드셀 측정자료
토석류 전파속도	x(cm), v(m/s)	
토석류 실험 영상	mp4	드론 촬영영상, 초고속카메라 촬영영상

그림 85. 국토교통과학기술진흥원 K-WIZ 홈페이지

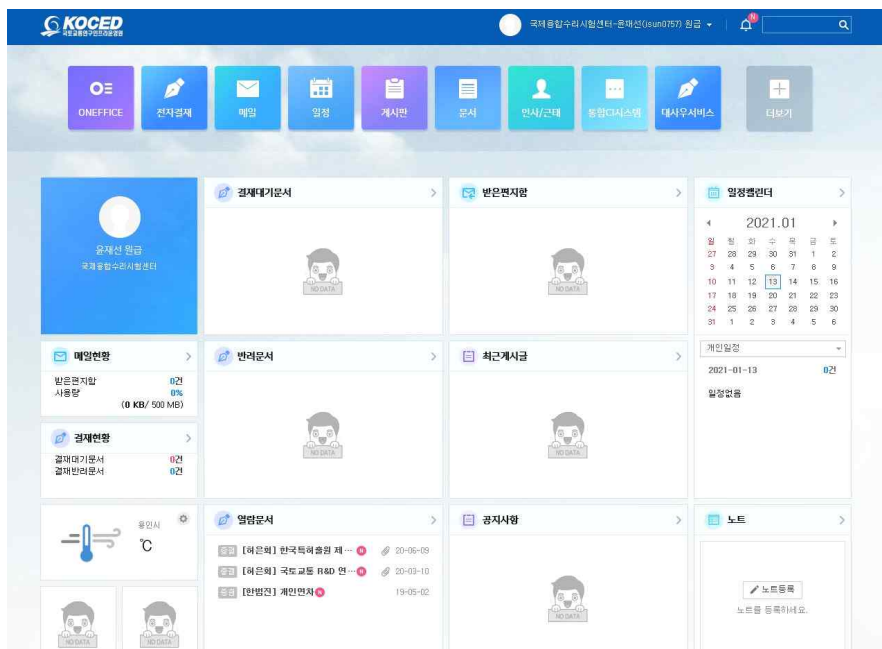


그림 86. 국토교통연구인프라운영원 CI 시스템

▶ 실험개요

의뢰기관정보

기관정보조회

업제명	한국농어촌연구원		
주소	경기 안산시 상록구 해안로 870 (사동) 농어촌연구원		
의뢰자	성명	윤재선	TEL 031-400-1875
	E-Mail	jsun0757@ekr.or.kr	FAX 02--

실험정보

실험명	산사태 예측을 위한 토석류 해석 Boussinesq 방정식 수치모델 개발 및 검증		
프로젝트번호	Z1-HM-PJ-0001		
실험센터 고유관리번호			
실험제 종류	산사태 예측을 위한 토석류 해석 Boussinesq 방정식 수치모델 개발 및 검증		
실험제 개수	0		
계약기간 (예정)	시작일	2019-04-15	종료일 2020-12-31
	계약기간	449 일	
실험기간 (예정)	시작일	2019-04-15	종료일 2020-12-31
	실험기간	449 일 (*실험기간 초기값은 총 실험기간에서 특, 일을 제외한 일 수 임)	
실험책임자	성명	정재상	TEL 031-400-1878
	E-Mail	tfingon@ekr.or.kr	FAX 031-400-1897

그림 87. 국토교통연구인프라운영원 CI 시스템 실험데이터 업로드

10) 토석류 실험 가이드라인

- 토석류 실험 가이드라인 검토회의(2020년 12월 8일)
 - ▣ 참석자 : 송현구 센터장, 정재상, 전택기, 윤재선, 장은철, 이병욱, 김민규
 - ▣ 검토내용 : 토석류 실험 가이드라인(안)의 오류사항, 보완내용 등



그림 88. 검토회 사진

- 토석류 실험 가이드라인 농어촌연구원 자체 표준 등록(2020.12.28.)

IHR-001

토석류 실험 절차서

2020. 12



한국농어촌공사
농어촌연구원

작성자	검토자	검토자	센터장
정재상 김재상	윤재선	전택기	송현구

그림 89. 등록 절차서

1. 개 요

▣ 목적

본 절차서는 토석류 실험 수행을 위한 일반적인 절차와 적절한 계측장비의 사양 등을 제공함으로써 실험의 불확실성을 최소화하고, 명확한 프로세스에 따른 실험 결과의 신뢰성 및 일관성을 확보하는데 그 목적이 있다.

▣ 적용범위 및 대상

본 절차서는 급경사수로를 이용한 수리실험을 수행함에 있어 토석류의 발생과 그 흐름을 계측하고, 퇴적 형상 측정, 전파속도 측정, 작용력 측정에 적용한다.

2. 용어의 정의

- ▣ 토석류 : 액체 상태에 가까운 특성을 보이는 흙, 자갈, 물의 혼합체의 흐름
- ▣ 토석류 표고 시계열 : 토석류가 발생하였을 때 한 지점에서 시간의 흐름에 따른 토석류 표고의 변화
- ▣ 퇴적 형상 : 토석류의 흐름이 완료된 이후 퇴적된 토석류의 범위 및 지점별 표고
- ▣ 전파속도 : 토석류가 발생하였을 때 토석류 선단부의 이동 속도
- ▣ 작용력 : 토석류가 발생하여 구조물 등에 부딪칠 때 작용하는 힘
- ▣ 급경사수로 : 토석류 실험을 위한 수로로써 토석류 발생장치를 갖추고 있고, 경사가 10도 이상인 직사각형 단면의 수로
- ▣ 토석류 발생장치 : 토석류를 발생시키기 위한 장치로써, 물과 흙, 자갈 등이 혼합된 혼합체를 가둘 수 있는 수문, 수문을 순간적으로 열수 있는 개폐 장치, 물과 흙, 자갈 등이 혼합된 혼합체의 무게를 측정할 수 있는 측정 장치, 물 공급 장치 등으로 구성
- ▣ 표고 측정장치 : 토석류 발생 시 토석류 표고 변화 시계열을 측정할 수 있는 장치
- ▣ 사면측정기 : 토석류의 퇴적 형상을 측정하기 위한 장치로써 단면의 퇴적 높이를 측정
- ▣ 3차원 지형스캐너 : 토석류 퇴적 형상을 측정하기 위한 장치로써 주변 지형 표면의 3차원 좌표를 획득할 수 있는 장비
- ▣ 토석류 작용력 측정장치 : 작용력 측정을 위한 판넬과 로드셀로 구성된 장치로 토석류의 순간적인 작용력을 측정할 수 있는 장치
- ▣ 초고속 카메라 : 초당 최소 100 프레임 이상의 촬영이 가능한 카메라

3. 계측장비 요구조건

▣ 표고 측정장치

- 데이터 독취 : 1초당 100개 이상의 데이터를 취득
- 계측범위 : 실험수로 바닥 ~ 토석류 최대 표고

▣ 사면측정기

- 계측범위 : 실험수로 바닥 ~ 토석류 퇴적 최대 높이
- 계측간격 : 2.0 cm 이내

▣ 3차원 지형스캐너

- 계측범위 : 급경사 수로 상단까지 지형 스캔이 가능한 범위
- 해상도 : 2.0 cm 이내

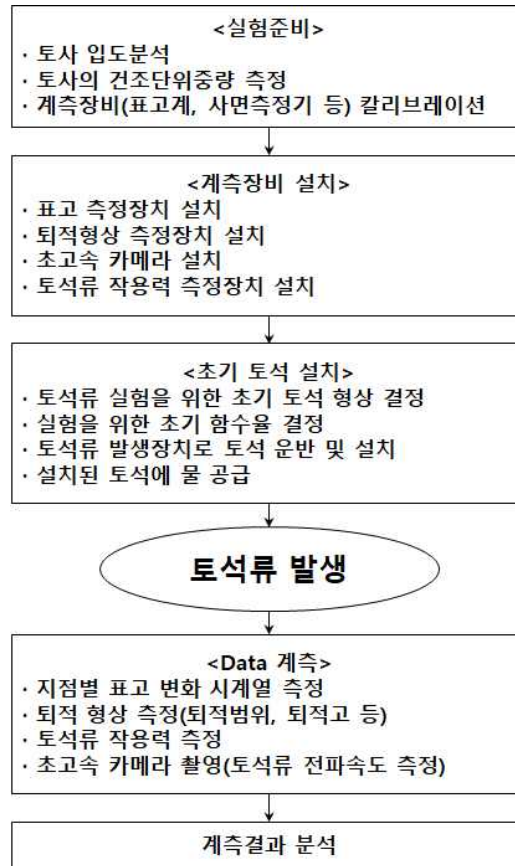
▣ 토석류 작용력 측정장치

- 데이터 독취 : 1초당 100개 이상의 데이터를 취득
- 계측범위 : 0 ~ 100 kN/m², 본 계측범위는 급경사수로 높이 8 m, 24도 경사에 대한 기준으로 수로의 높이와 경사가 본 제원을 초과할 경우 계측범위를 더욱 높게 설정하여야 함

▣ 초고속 카메라

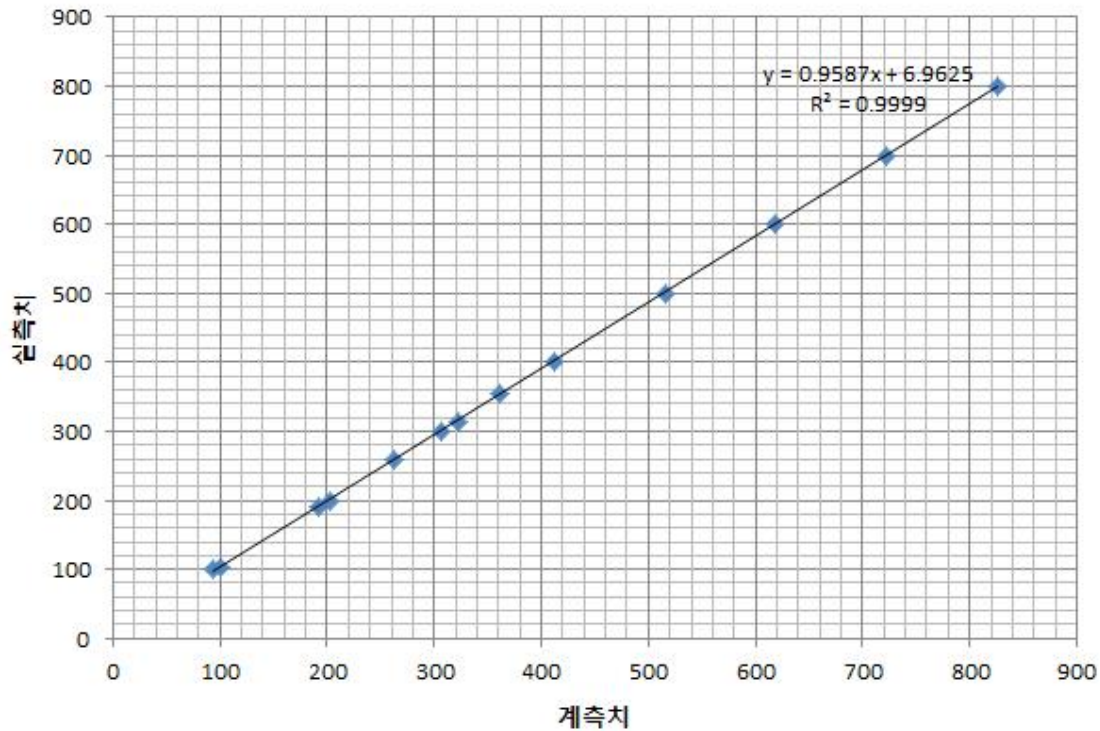
- 셔터 스피드 : 1초당 100 프레임 이상 촬영
- 촬영시간 한도 : 1초당 100 프레임 이상 셔터 스피드 조건에서 최소 5분 이상 촬영 가능

4. 토석류 실험 절차



▣ 실험 준비

- 토사의 입도분석 : KS F 2302 흙이 입도 시험방법에 의거하여 토사의 입도를 분석
- 토사의 건조단위중량 측정 : 건조기를 활용하여 토사를 완전히 건조시킨 후 토사의 중량과 체적을 측정하여 건조단위중량을 계산
- 토사의 공극률 측정
- 계측장비 캘리브레이션
 - 가. 표고계, 사면측정기 등의 계측값과 실제값의 차이를 검토
 - 나. 일정 거리에서 계측기의 계측값을 확인하고, 실제 거리를 버니어캘리퍼스 등을 이용하여 측정 및 이를 반복
 - 다. 계측기의 계측값(x축)과 실측값(y축)을 이용하여 그래프를 그리고 관계식을 도출



[계측장비 칼리브레이션 예(표고 측정장치)]

▣ 계측장비 설치

· 표고 측정장치 설치

- 가. 먼저 표고 시계열을 계측할 위치를 결정
- 나. 결정된 위치에 표고 측정장치를 설치

· 퇴적형상 측정장치 설치 : 토석류의 최대 전파길이에 해당하는 영역까지 측정이 가능한 위치(급경사 수로 하류측)에 설치, 3차원 지형스캐너를 이용할 경우 좌표의 기준이 되는 원점을 3차원 지형스캐너의 측정 가능 범위내에 실험에 영향을 주지 않는 범위에서 미리 설치하여야 함

· 초고속 카메라 설치 : 급경사 수로 전체를 담을 수 있는 거리에 초고속 카메라 설치

· 토석류 작용력 측정장치 설치

- 가. 토석류의 작용력을 측정할 위치를 결정
- 나. 결정된 위치에 측정 패널이 급경사수로 측을 향하도록 토석류 작용력 측정장치 설치

▣ 초기 토석 설치

· 토석류 실험을 위한 초기토석 형상 결정 : 토석류 발생이 용이한 초기 토석 형상 선정(체적, 중량 등)



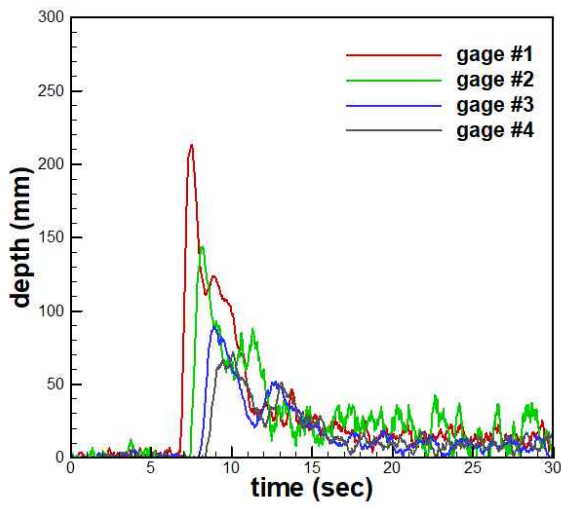
[초기 토석 형상 예]

· 실험을 위한 초기 함수율 결정 : 일반적으로 20도 이상 경사에서 함수율이 20% 이상일 때 토석류 발생

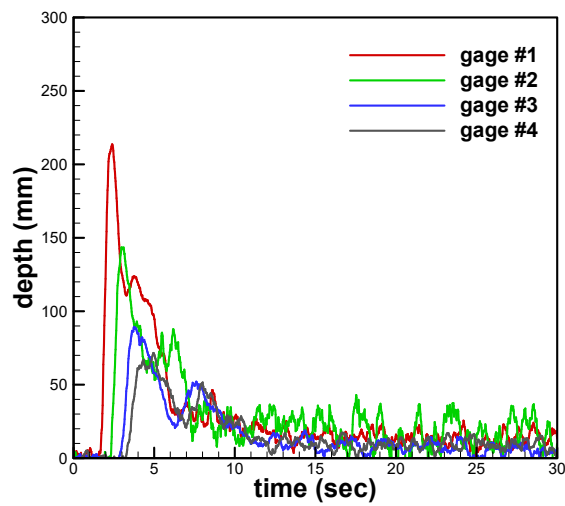
· 토석류 발생장치로 토석 운반 및 설치

- 가. 계획된 형상대로 정확히 토석을 운반 및 설치
- 나. 최대한 토석의 구성 재료가 균질하도록 설치

-
- 설치된 토석에 물 공급
 - 가. 토석에 물을 공급할 때 공급된 물의 양을 정확히 계측하여야 함
 - 나. 공급관로를 통해 공급할 경우에는 공급관로에 유량계 설치
 - 다. 일정 부피의 Box를 이용할 경우 Box 내 물의 체적을 정확히 파악
 - ▣ 토석류 발생 : 토석류 발생장치를 이용하여 순간적으로 토석류 재현
 - 토석류 발생을 위해 수문은 0.5초 이내에 개방되어야 함
 - ▣ Data 계측
 - 지점별 표고변화 시계열 측정
 - 가. 토석류의 순간적인 표고 변화를 계측할 수 있도록 최소 1초당 100회 이상의 계측이 가능한 장비 활용
 - 나. 토석류가 전파한 후 상류측 잔류 토사의 이동을 충분히 계측할 수 있도록 최소 100초 이상 계측
 - 퇴적형상 측정: 실험이 완료된 이후 어느 정도 토석이 건조된 이후 지점별 퇴적고를 측정
 - 가. 퇴적형상은 사면측정기, 포인트게이지 또는 3차원 지형스캐너를 이용하여 계측
 - 나. 사면측정기 및 포인트게이지를 이용하여 측정할 경우, 퇴적형상의 면밀한 파악을 위해 수평 방향으로 10 cm 이내의 간격으로 Data 취득
 - 다. 3차원 지형스캐너를 이용할 경우 토석에 수분이 많은 경우에는 계측이 되지 않으므로 충분히 건조를 시킨 후 계측
 - 토석류 작용력의 측정
 - 가. 순간적인 토석류의 충격력을 측정할 수 있도록 최소 1초당 100회 이상의 Data 취득이 가능한 측정기 활용
 - 나. 초기 계측장비의 0점을 확인한 이후 계측 시작
 - 초고속 카메라 촬영
 - 가. 토석류가 발생하기 이전부터 촬영 시작
 - 나. 1초당 100 프레임 이상의 조건으로 토석류 발생 상황 촬영
 - 다. 초고속 카메라는 토석류 흐름이 방해되지 않도록 급경사수로 상부에 별도의 거치대를 제작하여 설치
 - ▣ 계측결과 분석
 - 지점별 표고변화 시계열 측정
 - 가. 발생시점을 알기 위해 초고속 카메라를 이용한 영상을 활용하고, 이를 이용하여 실 계측된 시계열 Data 보정
 - 나. 표고계 칼리브레이션을 통해 검토했던 관계식을 활용하여 실제 표고 변화 시계열 취득
-



(a) 보정 전

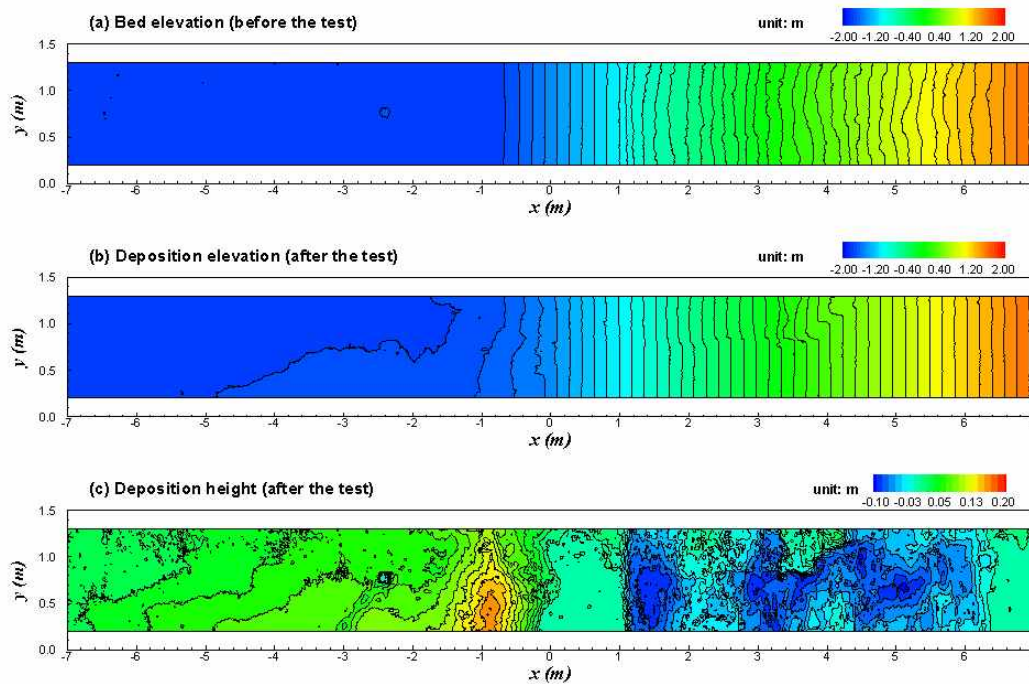


(b) 보정 후

[보정 전·후 토석류 표고 시계열 데이터]

· 퇴적형상 측정

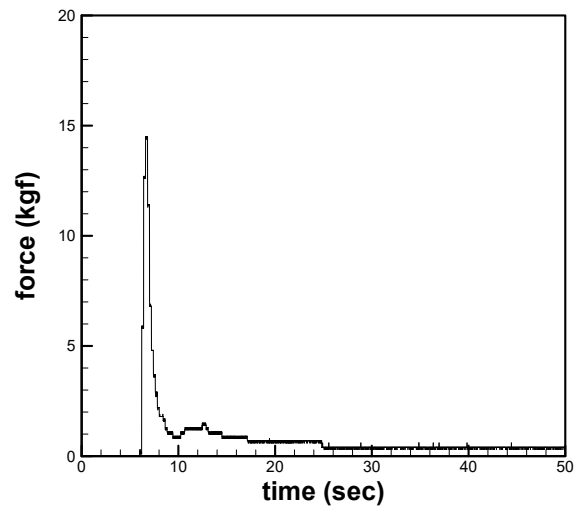
- 가. 3차원 지형 스캐너나 사면측정기를 이용하여 실험 수행 전 현재 상태를 먼저 측정
- 나. 실험전 측정된 Data와의 차를 계산하여 지점별 퇴적고 계산



[토석류 퇴적 전·후 표고((a), (b)) 및 토석류 퇴적 두께((c)) 측정 결과(사례)]

· 토석류 작용력의 측정

- 가. 발생시점을 알기 위해 초고속 카메라를 이용한 영상을 활용
- 나. 토석류 작용력 측정장치(로드셀)의 캘리브레이션을 통해 검토했던 관계식을 활용하여 실제 작용력 변화 시계열 취득



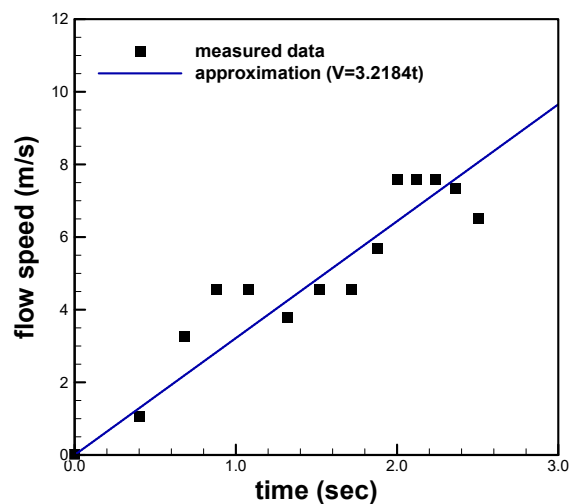
[토석류 작용력 측정 결과(사례)]

· 토석류 전파속도 분석

가. 초고속 카메라를 활용한 영상을 분석하여 각 프레임 당 이동거리를 파악

나. 한 프레임의 시간 간격과 이동거리를 활용하여 토석류 전파속도 계산

다. 경사수로의 특정 지점을 통과하고, 그 다음 지점을 통과하는 시간과 각 지점 사이의 거리를 활용하여 구간별 전파속도 분석



[토석류 전파속도 분석(사례)]

5. 보고서 작성

▣ 토석류 실험 보고서에는 다음 사항을 포함

- 토석의 초기형상, 토사의 밀도, 공극률, 내부마찰각, 입도곡선, 건조단위중량 등 토사의 물성치
- 토석류 실험수로 제원
- 실험에 사용한 계측장비의 모델명, 제작사, 최대허용오차
- 표고 변화 측정 위치, 분석범위(분석 시작 시간과 분석 기간), 분석방법
- 퇴적형상 측정 위치, 측정 간격(해상도)
- 초고속카메라 설치 위치, 초당 프레임 수
- 토석류 작용력 측정장치 설치 위치, 규모(크기)
- 각 실험 결과 그래프

6. 토석류 수치해석 절차

1) 지배방정식

최종보고서 9-14 페이지 내용 수록

2) 관련 자료 수집

- 토사의 물성치 : 토석류 유발 토사 및 경사면 구성 토사의 내부마찰각, 밀도 및 단위중량, 공극률, 함수비, 입도 등
- 지형조건 : 3차원 지형자료(x, y, z 정보)

3) 초기조건 및 경계조건 설정

- 토석류 발생시 토석의 체적, 초기 토석의 형상 등 결정
- 토석류 유출부 지형재현 범위, 경사부 토사(erodable bed)의 두께 결정
- Courant number 등 검토를 통해 안정적 수치해 도출을 위한 격자 및 시간 간격 결정
- 토석류 초기형상, 함수율 등 수치해석 Case 결정

4) 수치해석을 위한 지형 격자망 등 입력자료 작성

- 유한체적 격자망 작성 : AutoCad 등 소프트웨어를 이용하여 격자망 입력자료 작성
- 토석초기 형상 등 초기조건 입력

5) 수치해석 수행

- 각 Case에 해당하는 수치해석 수행
- 도출된 수치해석 결과 검토, 수치해석 결과가 안정적이지 않을 경우 “2) 초기조건 설정”으로 다시 돌아감

6) 후처리 및 결과 분석

- 후처리 항목 : 지점별 토석류 두께(표고 변화) 시계열(x, z data), 각 시간별 토석류 전파 형상(x, y, z data), 토석류 유출 형상(x, y, z data)
- 2차원 및 3차원 그래프 소프트웨어를 이용하여 수치해석 결과 시각화

7) 보고서 작성

- 토사의 물성치 : 토사의 밀도, 공극률, 내부마찰각, 입도곡선, 건조단위중량 등
 - 지배방정식 : 수치해석 모델의 지배방정식 설명
 - 수치해석 기법 : 수치해석 모델에 적용된 수치해석 기법(유한체적법, 유한차분법, 유한요소법 등 편미분방정식 풀이 기법, 침식 및 퇴적 처리 기법, 경계면 처리 기법, 불연속 흐름 처리 기법 등) 설명
 - 수치해석 지형조건 : 지형 등고선도, 경사부 토사 두께 등
 - 수치해석 초기조건 및 경계조건 : 토석의 초기형상, 계산 시간 간격 및 격자 간격, 수치 경계면 처리 기법,
 - 수치해석 결과 : 지점별 토석류 두께(표고 변화) 시계열, 각 시간별 토석류 전파 형상, 토석류 유출형상, 건축물 등 구조물에 작용하는 하중 등
-

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

본 연구의 최종목표는 “실제 산사태 예측을 위한 토석류 해석 Boussinesq 방정식 수치모형 개발 및 검증”이다. 구체적인 최종목표는 다음과 같다.

- 분산성 비선형 토석류 해석 수치모형 개발
 - Boussinesq 방정식 기반의 토석류 해석 지배방정식 유도
 - Boussinesq 방정식 기반의 3차원효과를 고려한 토석류 해석 수치모형 개발
 - 기존의 비선형 모델 대비 평균 10% 이상 정확도 향상
- 토석류 거동특성 분석 수치모형실험 수행 및 Data 공개
 - 바닥 경사각, 토석류의 함수비, 토석류 구성재료, 바닥 마찰 효과 검토
 - 토석류의 지점별 표고 시계열, 이동속도, 유출부 토석류 작용력, 유출 형상 관측
 - 모든 실험데이터는 국토교통과학기술진흥원의 데이터 공유시스템(그리드 시스템)을 통해 공개

가. 1차년도 연구 달성도

(1) 1차년도 정량적 성과지표 달성도

연차별 성과 목표	성과지표	측정방법	목표치	달성치	달성도
- Boussinesq 기반 1차원 분산성 비 선형 수치모형 구 축	국내외 학술지 게재 논문 건수	논문 게재 건수	SCI 논문 1편 / 비SCI 논문 1편	SCI 논문 0편 / 비SCI 논문 2편	달성
	국내외 지적재산권 확보 건수	소프트웨어 등록 건수	1건	2차년도에 1건 등록	달성
- 토석류 특성 실험 을 위한 시설 구 축 및 예비실험 수행	국내외 학술 발표 논문 건수	학술 발표 건수	0편	2편	추가 달성

(2) 1차년도 정성적 성과지표 달성도

구분	연구목표	주요 연구내용	달성도
주관-세종대	Boussinesq 기반 1차원 분산성 비선형 수치모형 구축	- 지배방정식 유도 - 수치해석 모형 코드 - 수치해석 모형 검증	달성
공동-농어촌연구원	토석류 특성 실험을 위한 시설 구축 및 예비실험 수행	- 계측장비 구매 - 시설셋팅 외주용역 발주 - 시설셋팅 완료 - 예비실험 수행	달성

나. 2차년도 연구 달성도

(1) 2차년도 정량적 성과지표 달성도

연차별 성과 목표	성과지표	측정방법	목표치	달성치	달성도
- Boussinesq 기반 1차원 분산성 비 선형 수치모형 구 축	국내외 학술지 게재 논문 건수	논문 게재 건수	SCI 논문 2편 / 비SCI 논문 1편	SCI 논문 2편 / 비SCI 논문 1편	달성
	국내외 지적재산권 확보 건수	소프트웨어 등록 건수	1건	1건	달성
- 토석류 특성 실험 을 위한 시설 구 축 및 예비실험 수행	국내외 학술 발표 논문 건수	학술 발표 건수	0편	2편	추가 달성

(2) 2차년도 정성적 성과지표 달성도

구분	연구목표	주요 연구내용	달성도
주관-세종대	2차원 비선형 수치모형 구축	- 지배방정식 유도 - 수치해석 모형 코드 - 수치해석 모형 검증 - 실제 산사태 사례 모의	달성
공동-농어촌연구원	토석류 수리모형실험 수행	- 본 실험 수행 - 실험 data 공유	달성
	토석류 실험 가이드라인 작성	- 가이드라인 작성 및 기고서 제출	달성

<연구 종료 후 논문발표 계획>

- 바닥의 침식을 고려한 사면사태 해석 모형의 정확성과 적용성 검증 주제로 Computers and Geotechnics(impact factor : 3.818)에 투고 계획
- wet/dry 구역과 wet/wet 구역에서 Boussinesq 방정식과 천수방정식의 정확성 비교 주제로 Journal of Geophysical Research: Earth Surface(impact factor: 3.56)에 투고 계획

2. 관련 분야 기여도

- 국내 원천기술 확보로 기술경쟁력이 향상되어 산사태 예측기술의 세계화에 기여함
- 최근 폭우에 의한 산사태가 국내뿐만 아니라 세계적으로 많이 발생하였는데 본 기술을 활용하여 산사태 예측과 예방에 기여함
- 바닥의 침식을 고려한 산사태 수치모형 개발과 수리모형을 수행하여 산사태 연구를 세계적으로 선도할 것으로 판단됨

제5장. 연구개발성과의 활용계획

- Boussinesq 방정식 기반의 토석류 수치해석 모형
- 본 연구에서 제시하는 Boussinesq 방정식 기반의 토석류 해석 수치모형은 분산성 비선형 모델로, 토석류의 전파 및 유출범위 등 피해범위의 보다 정확한 예측을 위해 활용이 가능함
- 본 수치모형에서 제안하는 토석류 유동 분석을 위한 지배방정식은 향후 다른 연구자들이 개선된 수치해석 기법을 활용하여 보다 향상된 모형을 구축하는데 기초자료로 활용될 수 있음
- 국내 설계회사 등 기업이 해외 방재분야의 컨설팅 등 관련 사업 진출 시 토석류 피해범위 예측을 위한 기술자료로 활용이 가능함
- 연구과제 종료 이후에도 개발한 산사태 수치해석 모델의 시연회 및 기술세미나를 개최할 계획이며, 전문가의 의견 수렴 등을 통해 모델 개선
- 본 연구를 통해 개발한 산사태 해석 수치해석 모델은 오픈소스로 공개하여 해당 분야 전문가들이 활용 및 업그레이드할 수 있도록 함
- 토석류 유동 특성 수리모형실험
- 수리모형실험 결과는 국토교통과학기술진흥원의 실험시설 공유시스템인 그리드시스템에 업로드 하여 관련 분야의 모든 연구자 및 기술자들이 활용할 수 있도록 공개할 계획임
- 토석류 유동 특성에 대한 수리모형실험 결과는 토석류 해석 수치모형의 검증자료로 활용이 가능하며, 실험을 통해 제시되는 토석류의 작용력이나 유출 형상(범위)은 관련분야의 설계기준 제·개정을 위한 기초자료로 활용이 가능함
- 본 제안연구를 통해 제시될 토석류 실험 가이드라인은 실험기법의 표준화를 통해 서로 다른 연구기관에서 실험을 수행해도 거의 동일한 조건의 실험이 가능하도록 함으로써 국내 토석류 관련 실험의 신뢰성 향상에 큰 기여를 할 것으로 판단됨
- 2021년 이후 수행될 「건설분야 성능기반 표준실험절차 개발」 연구에 본 연구에서 제안하는 토석류 실험 가이드라인을 포함시키고 업그레이드 하여 새로운 단체표준으로 채택되도록 추진

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

제7장. 연구개발성과의 보안등급

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황

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

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

1. 한국농어촌공사 농어촌연구원

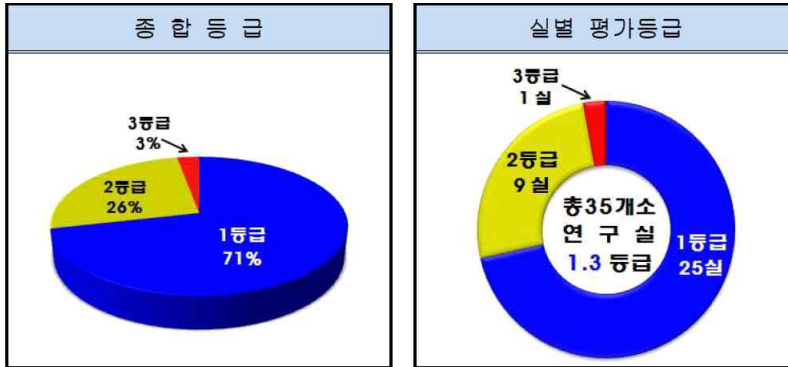
1) 2019년 연구실 안전환경 정기검사 및 위험성평가

- 평가일시 : 2019년 7월
- 안전점검 기관 : 한국산업안전관리원
- 평가결과 : 1.3등급

■ 연구실 등급 결과표

단위 : 연구(실험)실수

등 급	연구(실험)실 등급					평균 등급
	1등급	2등급	3등급	4등급	5등급	
2019년	25	9	1	-	-	1.3



- 부적합 내용 조치

6.6 위험성평가 감소대책 수립 및 실행																
분류		파괴수리시험연구 ☒ 화학물질 ☐				작성 일자			2019 년 07월 28 일							
구분	유해위험요인 파악			관련근거	현재 위험성	감소대책		개선후 위험성		감소대책의 실행		확인 일자	확인자	비고		
	분류	원인	유해위험요인	법규/노출기준 등		NO	세부내용	빈도	강도	위험성	담당자				개선 요구일	개선 완료일
1	7. 관리적 요인	7.5 안전보건요지	안전보건요지(호이스트-여달린물질) 미부착	산업안전보건법 시행규칙 제7조, 12조 연구실 안전점검 및 경보인종조도에 관한 지침 (과학기술정보통신부 고시 제2018-31호)	9	28.7.5	위험성이 존재하는 장소 에 안전보건표지(금지/ 경고/지시/안내)를 부착 하여 연구활동종사자가 해당작업 시 위험성을 인지할 수 있도록 해야 함	1	4	4	김민준	2019. 08. 30	2019. 10. 22	2019. 10. 23	장영철	

6.7 위험성평가 감소대책 수립 및 실행																
분류		금속제어 ☒ 화학물질 ☐			작성 일자			2019 년 07월 28 일								
연구 구분	유해위험요인 파악			관련근거	현재 위험성	감소대책		개선후 위험성		감소대책의 실행			확인 일자	확인자	비고	
	분류	원인	유해위험요인			NO	세부내용	빈도	강도	위험성	담당자	개선 요구일				개선 완료일
1	8.작업 환경요인	6.3 공간 및 이동통로	본진반 앞 기가재 배치 등으로 간극 상행 시 신속대처에 어려움	산업안전보건기준에 관한 규칙 제310조 연구실 안전점검 및 정 밀안전진단에 관한 지침 (과학기술정보통신부 고 시 제2018-31호)	9	23.6.3	본진반 앞 적치물에 대 해 이동조치 및 정리정 돈을 실시하여 간극 상 행 발생 시 신속대처가 가능하도록 유지/관리 하여야 함	1	3	3	김민준	2019. 08. 30	2019. 10. 22	2019. 10. 23	장영철	

6.8 위험성평가 감소대책 수립 및 실행															
분 류		새만금수리종합시험연구 ■			화학물질 □		작성 일자			2019 년 07월 28 일					
구 분	유해위험요인 파악			관련근거	현재 위험성	감소대책		개선후 위험성		감소대책의 실행		확인 일자	확인자	비고	
	분류	원인	유해위험요인			NO	세부내용	빈도	강도	위험성	담당자				개선 요구일
1	1. 기계적 요인	1.3 기계(설비)의 낙하, 비례, 전락, 붕괴, 전도위험 부분	케이블 리드배 변형 및 훼손	산업안전보건기준에 관한 규칙 제134조	9	24.1.3	케이블 리드배는 균열, 변형 및 축연의 이상마모가 없도록 유지 관리하여야 함	1	4	4	김민규	2019. 08. 30	2019. 10. 22	2019. 10. 23	김민규
2	1. 기계적 요인	1.5 넘어짐(미끄러짐, 걸림, 찢김)	연구실 통로 상 장애물 등으로 넘어짐 발생 위험	산업안전기준에 관한 규칙 제3조	9	24.1.5	경로 넘어짐 등의 위험이 없도록 연구실 바닥을 항상 안전하고 청결한 상태로 유지/관리하여 쾌적한 연구활동 환경을 조성해야 함	1	4	4	김민규	2019. 08. 30	2019. 10. 22	2019. 10. 23	김민규

6.9 위험성평가 감소대책 수립 및 실행															
분 류		대형수리모형실험시설 ■ 화학물질 □			작성 일자			2019 년 07월 28 일							
구 분	유해위험요인 파악			관련근거	현재 위험성	감소대책		개선후 위험성		감소대책의 실행		확인 일자	확인자	비고	
	분류	원인	유해위험요인			NO	세부내용	빈도	강도	위험성	담당자				개선 요구일
1	1. 기계적 요인	1.1 협착위험 부분 (관입, 기압)	제1,2,3 펌프실 펌프 모터 구동부 안전덮개 미설치	1. 산업안전보건기준에 관한 규칙 제87조 2. 연구실 안전점검 및 정밀안전조치에 관한 지침	9	25.1.1	기계기구의 원동기·회전축·기어·롤러·플라이휠·벨트 및 체인 등에 덮개·울타리 및 간싯다리 등을 설치하여 끼임, 당림 등에 예방	1	4	4	김민규	2019. 08. 30	2019. 10. 22	2019. 10. 23	김민규
2	7. 관리적 요인	7.3 작업안전수칙	현장 센터리 크레인 등 연구 기계·기구별 작동 매뉴얼 및 작업 안전수칙 미제시	1. 산업안전보건기준에 관한 규칙 제89조 2. 연구실 안전점검 및 정밀안전조치에 관한 지침	9	25.7.3.1	연구실 내 취급하는 기계·기구별 작동 매뉴얼 및 작업안전수칙을 제시하여 오조작으로 인한 안전사고 예방	1	4	4	김민규	2019. 08. 30	2019. 10. 22	2019. 10. 23	김민규
3	7. 관리적 요인	7.3 작업안전수칙	제1,2,3 펌프실 크레인 등 연구 기계·기구별 작동 매뉴얼 및 작업 안전수칙 미제시	1. 산업안전보건기준에 관한 규칙 제89조 2. 연구실 안전점검 및 정밀안전조치에 관한 지침	9	25.7.3.2	연구실 내 취급하는 기계·기구별 작동 매뉴얼 및 작업안전수칙을 제시하여 오조작으로 인한 안전사고 예방	1	4	4	김민규	2019. 08. 30	2019. 10. 22	2019. 10. 23	김민규
4	7. 관리적 요인	7.5 안전보건표지	고정식 수직사다리 개입으로 관계자 외 출입으로 인한 물어짐 위험	산업안전보건기준에 관한 규칙 제20조	9	25.7.5.1	고정식 수직사다리에 시간초차 또는 관계자의 출입을 제한하는 경고표지 부착으로 연구실 안전성 확보	1	4	4	김민규	2019. 08. 30	2019. 10. 22	2019. 10. 23	김민규
5	7. 관리적 요인	7.5 안전보건표지	현장 안전보건표지 (크레인, 매달린물질경고) 미부착	1. 산업안전보건기준에 관한 규칙 제7조 2. 연구실 안전점검 및 정밀안전조치에 관한 지침	9	25.7.5.2	위험성이 존재하는 장소에 안전보건표지(금지/경고/지시/안내)를 부착하여 연구활동중사자가 해당작업 시 위험성을 인지할 수 있도록 해야 함	1	4	4	김민규	2019. 08. 30	2019. 10. 22	2019. 10. 23	김민규
6	7. 관리적 요인	7.5 안전보건표지	제1펌프실 안전보건표지 (크레인, 매달린물질경고) 미부착	1. 산업안전보건기준에 관한 규칙 제7조 2. 연구실 안전점검 및 정밀안전조치에 관한 지침	9	25.7.5.3	위험성이 존재하는 장소에 안전보건표지(금지/경고/지시/안내)를 부착하여 연구활동중사자가 해당작업 시 위험성을 인지할 수 있도록 해야 함	1	4	4	김민규	2019. 08. 30	2019. 10. 22	2019. 10. 23	김민규

2) 2020년 연구실 안전환경 정기검사 및 위험성평가

- 평가일시 : 2020년 6월
- 안전점검 기관 : 한국산업안전관리원
- 평가결과 : 1.3등급

■ 연구실 등급 결과표

단위: 연구(실험)실수

등 급	연구실 등급					평균 등급
	1등급	2등급	3등급	4등급	5등급	
2020년	24	11	-	-	-	1.3



3) 산업안전 및 보건교육 실시

- 1차 : 2019년 8월 27일(화) 14:00-16:00 / 농어촌연구원 2층 대회의실
 - 2차 : 2019년 9월 25일(수) 14:00-16:00 / 농어촌연구원 2층 대회의실
 - 3차 : 2019년 10월 24일(목) 14:00-16:00 / 농어촌연구원 2층 대회의실
 - 4차 : 2019년 12월 30일(월) 14:00-16:00 / 농어촌연구원 2층 대회의실
 - 5차 : 2020년 1월 21일(화) 14:00-16:00 / 농어촌연구원 2층 대회의실
 - 6차 : 2020년 2월 24일(월) 14:00-16:00 / 농어촌연구원 2층 대회의실
 - 7차 : 2020년 3월 27일(금) 14:00-16:00 / 농어촌연구원 2층 대회의실
 - 8차 : 2020년 4월 24일(금) 13:30-15:30 / 농어촌연구원 2층 대회의실
 - 9차 : 2020년 5월 26일(화) 14:00-17:00 / 농어촌연구원 2층 대회의실
 - 10차 : 2020년 6월 22일(월) 14:00-17:00 / 농어촌연구원 2층 대회의실
 - 11차 : 2020년 7월 28일(화) 14:00-17:00 / 농어촌연구원 2층 대회의실
 - 12차 : 2020년 8월 25일(화) 09:00-11:00 / 농어촌연구원 2층 대회의실
 - 13차 : 2020년 9월 25일(금) 10:00-12:00 / 농어촌연구원 2층 대회의실
 - 14차 : 2020년 10월 28일(수) 10:00-12:00 / 농어촌연구원 2층 대회의실
-

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	(b,s) 좌표로 표현된 천수방정식에 유한체적법을 사용하여 해상 및 해저 산사태 수치모의	세종대	주저 자, 교신 저자	한국해안해 양공학회논 문집		2019.08	단독사사	KCI
2	논문	낮은 마운드 높이에 높은 상치구조물을 갖는 경사식 호안(LMHW 호안)의 월파량에 대한 실험적 연구	농어촌 연구원	주저 자, 교신 저자	한국해안해 양공학회논 문집		2019.12	단독사사	KCI
3	논문	반무한방파제 전면과 후면에서 회절파의 공간적인 변화	농어촌 연구원 세종대,	주저 자, 교신 저자	한국해안해 양공학회논 문집		2020.08	단독사사	KCI
4	논문	Variation of wave forces along a semi-infinite breakwater due to wave diffraction	농어촌 연구원 세종대,	주저 자, 교신 저자	J. Waterway, Port, Coas. and Ocean Eng.	1.710	심사중	단독사사	SCI
5	논문	Equation for ship wave crests in a current in the entire range of water depths	농어촌 연구원, 세종대	주저 자, 교신 저자	Coastal Eng.	4.119	심사중	중복사사	SCI
6	소프트 웨어	비침식성 토양에서의 산사태 모의 수치모형	세종대	주개 발자	한국저작권 협회		2020.11		
7	소프트 웨어	침식성 토양에서의 산사태 모의 수치모형	세종대	주개 발자	한국저작권 협회		2020.11		
8	학술발 표논문	Simulation of wave overtopping on a porous breakwater using extended Boussinesq equations	세종대	주저 자, 교신 저자	Coastal Structures Conferenc e 2019		2019.09	단독사사	

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)
9	학술발 표논문	(b,s)좌표로 표현된 천수방정식에 Runge-Kutta 방법을 사용하여 산사태 수치모의	세종대	주저 자, 교신 저자	한국해안해 양공학회 학술발표논 문집		2019.10	단독사사	
10	학술발 표논문	(b,s)좌표의 천수방정식에 유한체적법을 사용하여 침식을 재현하는 해상 및 해저 산사태 수치모의	세종대	주저 자, 교신 저자	한국해양과 학기술협의 회공동학술 대회		2020.07	단독사사	
11	학술발 표논문	천수방정식과 확장형 Boussinesq 방정식을 사용한 해저 사면사태 및 쓰나미 모형	세종대	주저 자, 교신 저자	한국해안해 양공학회 학술발표논 문집		2020.11	단독사사	

제11장. 기타 사항

- 김기환, 이동형, 김대희, 이승호 (2008). 토석류 흐름 상태 특성 파악을 위한 모형실험 연구. 한국지반환경공학회 논문집, 9(5), 83-89.
- 김성덕, 윤일로, 오세욱, 이호진, 배우석 (2012). 비탈면 경사 변화에 따른 토석류 거동의 수치모의. 한국지반환경공학회논문집, 13(6), 59-66.
- 김승은, 백중철, 김경석 (2013). FL0-2D 모형을 이용한 우면산 토석류 유동 수치모의. 대한토목학회 논문집, 33(3), 965-974.
- 김영일, 백중철 (2010). 사각형 수로에서 토석류 흐름 수리모형 실험. 대한토목학회 정기학술대회, 279-282.
- 류상훈, 이용수, 정재형 (2011). 토석류 모형실험과 수치해석 결과 비교. 한국지반환경공학회 추계학술대회, 77-81.
- 손신혜, 백중철 (2013). 토석류 거동 분석을 위한 실제규모 실험 연구. 대한토목학회 정기학술대회, 2279-2281.
- 이광우, 박현도, 정상삼 (2016). 지반 침식 및 연행작용을 고려한 토석류 해석 모델 제안, 한국지반공학회논문집, 32(10), 17-29.
- 이승수, 황규관 (2017). 비선형 점성유체의 다상유동 모형을 이용한 토석류 전산해석, 한국전산유체공학회지, 22(1), 95-102.
- 이승수, 환규관, 이원호 (2017). 토석류 확산 전산해석에 의한 위험지역과 대응방안 분석, 한국전산유체공학회지, 22(4), 10-19.
- 한국지반공학회 (2011). 우면산 산사태 원인조사 및 복구대책수립 용역 최종보고서.
- Castro-Orgaz, O., Hutter, K., Giraldez, J.V., Hager, W.H. (2014). Nonhydrostatic granular flow over 3-D terrain: New Boussinesq-type gravity waves? *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 120, 1-28.
- Chen, H.X., Zhang, L.M. (2015). EDDA 1.0: Integrated simulation of debris flow erosion, deposition and property changes, *Geosci. Model Dev.*, 8, 829-844.
<https://doi.org/10.5194/gmd-8-829-2015>.
- D' Aniello, A., Cozzolino, L., Cimorelli, L., Della Morte, R., Pianese, D. (2015). A numerical model for the simulation of debris flow triggering, propagation and arrest, *Nat. Hazards*, 75, 1403-1433. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1389-8>
- Denlinger, R.P., Iverson, R.M. (2004). Granular avalanches across irregular three-dimensional terrain: 1. Theory and Computation, *Journal of Geophysical Research*, 109, F01014.
- Do Carmo, J.S.A., Santos, F.J.S., Almeida, A.B. (1993). Numerical solution of the generalized Serre equations with the MacCormack finite-difference scheme, *Int. J. Numer. Methods Fluids* 16, 725-738. <https://doi.org/10.1002/fld.1650160805>.
- Dutykh, D., Katsaounis, T., Mitsotakis, D. (2011). Finite volume schemes for dispersive wave propagation and runup, *J. Comput. Phys.* 230, 3035-3061.
<https://doi.org/10.1016/j.jcp.2011.01.003>
- Feizi Khankandi, A., Tahershamsi, A., Soares-Frazão, S. (2012). Experimental investigation of reservoir geometry effect on dam-break flow, *J. Hydraul. Res.*, 50, 376-387.
<https://doi.org/10.1080/00221686.2012.690974>.
- Gray, J.M.N.T. (2001). Granular flow in partially filled slowly rotating drums, *J. Fluid Mech.*, 441, 1-29. <https://doi.org/10.1017/S0022112001004736>.
- Iverson, R.M. (1997). The physics of debris flow, *Reviews of Geophysics*, 35(3), 245-296.
- Iverson, R.M., Logan, M., LaHusen, R.G., Berti, M. (2010). The perfect debris flow? Aggregated results from 28 large-scale experiments, *Journal of Geophysical Research*, 115, F03005.
- Iverson, R.M., Ouyang, C. (2015). Entrainment of bed material by Earth-surface mass flows: Review and reformulation of depth-integrated theory, *Reviews of Geophysics*, 53, 27-58.

-
- Jeong, S., Kim, Y., Lee, J.K., Kim, J. (2015). The 27 July 2011 debris flows at Umyeonsan, Seoul, Korea, *Landslides*, 12, 799-813. <https://doi.org/10.1007/s10346-015-0595-0>.
- Le, L., Pitman, E.B. (2010). A model for granular flows over an erodible surface, *SIAM J. Appl. Math.*, 70, 1407-1427.
- Madsen, P.A., Sorensen, O.R. (1992). A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics. Part 2: A slowly varying bathymetry, *Coastal Engineering*, 18, 183-204.
- Major, J.J. (1997). Depositional processes in large-scale debris-flow experiments, *The Journal of Geology*, 105, 345-366.
- Major, J.J., Iverson, R.M. (1999). Debris-flow deposition: Effects of pore-fluid pressure and friction concentrated at flow margins, *GSA Bulletin*, 111(10), 1424-1434.
- Medina, V., Hürlimann, M., Bateman, A. (2008). Application of FLAT Model, a 2D finite volume code, to debris flows in the northeastern part of the Iberian Peninsula, *Landslides*, 5, 127-142.
- Nickovic, S., Pejanovic, G., Djurdjevic, V., Roskar, J., Vujadinovic, M. (2010). HYPROP hydrology surface-runoff prognostic model: HYDROLOGY PROGNOSTIC MODEL, *Water Resour. Res.*, 46. <https://doi.org/10.1029/2010WR009195>
- Ouyang, C., He, S., Tang, C. (2015). Numerical analysis of dynamics of debris flow over erodible beds in Wenchuan earthquake-induced area, *Eng. Geol.*, 194, 62-72. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.07.012>
- Paik, J. (2015). A high resolution finite volume model for 1D debris flow, *J. Hydro-Environ. Res.*, 9, 145-155. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2014.03.001>
- Peregrine, D.H. (1967). Long waves on beach, *J. Fluid Mechanics*, 27, 815-827.
- Rickenmann, D., Weber, D., Stepanov, B. (2003). Erosion by debris flows in field and laboratory experiments, *Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment*, Rickenmann & Chen(eds), 883-894.
- Schoklitsch, A. (1917). über Dambruchwellen, *Sitzungsberichten der Königl. Akademie der Wissenschaften*, 126, 1489-1514.
- Spinewine, B., Zech, Y. (2007). Small-scale laboratory dam-break waves on movable beds, *J. Hydraul. Res.*, 45, 73-86. <https://doi.org/10.1080/00221686.2007.9521834>.
- Takahashi, T., Nakagawa, H., Harada, T., Yamashiki, Y. (1992). Routing Debris Flows with Particle Segregation, *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(11), 1490-1507.
- Toro, E.F. (2001). *Shock-capturing methods for free-surface shallow flows*, John Wiley & Sons, LTD.
- von Boetticher, A., Turowski, J.M., McArdeil, B.W., Rickenmann, D., Kirchner, J.W. (2016). DebrisInterMixing-2.3: a finite volume solver for three-dimensional debris-flow simulations with two calibration parameters - Part 1: Model description, *Geoscientific Model Development*, 9, 2909-2923.
- Yavari-Ramshe, S., Ataie-Ashtiani, B. (2016). Numerical modeling of subaerial and submarine landslide-generated tsunami waves-recent advances and future challenges, *Landslides*, 13(6), 1325-1368.
-

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.