

19CTA
P-C143
545-02

보안 과제(), 일반 과제(☒) / 공개(☒), 비공개()발간등록번호()
기초원천 사업 제2차연도 최종보고서

R&D / 19CTAP-C143545-02

극한홍수
대응
다기능보
안정성
강화를
위한
초고속
흐름(5 m
/s 이상)
에서의
바닥전단
응력
첨단계측
및
제트세굴
방지 원천
기술 개발

최
종
보
고
서

2020

국
토
교
통
과
학
기
술
진
흥
원
국
토
교
통
부

극한홍수 대응 다기능보 안정성 강화를 위한 초고속 흐름(5 m/s 이상)에서의 바닥전단응력 첨단계측 및 제트세굴 방지 원천 기술 개발 최종보고서

2020. 02. 20.

주관연구기관 / 인제대학교

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통부(국토과학기술진흥원) 귀하

'극한홍수 대응 대기능보 안정성 강화를 위한 초고속 흐름(5 m/s 이상)에서의 바닥전단응력 첨단
계측 및 제트세굴 방지 원천 기술 개발'(연구개발 기간 : 2018.04. ~ 2019.12.) 과제의 최종보고
서 5부를 제출합니다.

2020 . 02 . 20 .

주관연구기관명 : 인제대학교 산학협력단 (대표자) 송 한 정 (인)



주관연구기관책임자: 박재현

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	19CTAP-C1 43545-02	해당 단계 연구 기간	2019.01.01. - 2019.12.31. (12개월)	단계구분	2/2
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	기초원천			
연구과제명	대과제명	극한홍수 대응 다기능보 안정성 강화를 위한 초고속 흐름(5 m/s 이상)에서의 바닥전단응력 첨단계측 및 제트세굴 방지 원천 기술 개발			
	세부과제명	극한홍수 대응 다기능보 안정성 강화를 위한 초고속 흐름(5 m/s 이상)에서의 바닥전단응력 첨단계측 및 제트세굴 방지 원천 기술 개발			
연구책임자	박 재 현	해당단계 참여연구원 수	총: 11명 내부: 명 외부: 명	해당단계 연구비	정부: 220,000 천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 220,000 천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 13명 내부: 명 외부: 명	총 연구비	정부: 370,000 천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 370,000 천원
연구기관명 및 소속 부서명	인제대학교 산학협력단			참여기업명	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	

※ 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											

국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

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

요약

- 최종 목표는 극한홍수 대비 다기능보 안정성 강화를 위한 제트세굴 방지 원천 기술개발에 있으며, 이를 위해 초고속 실험수로, 첨단계측기기, 초고속 수리구조 해석 프로그램 및 제트세굴 수리특성을 고려한 하상보호구조물을 개발함
- 초고속(5 m/s 이상) 흐름에서의 수리특성 분석을 위해 오리피스 타입 초고속 실험수로 및 첨단계측기기(3D 바닥 응력 계측기, 초고속입자영상유속계(ULTRA-PIV))를 개발함
- 수리특성 데이터를 수리실험으로 직접 측정하고 개발한 초고속 수리구조 해석 프로그램을 이용해 수리실험 데이터와 비교 분석함
- 제트세굴 수리특성을 고려한 하상보호구조물을 제안하고 수리실험으로 검증함

보고서 면수 94

〈 요약 〉

연구의 목적 및 내용	초고속흐름 계측장치 개발, 적용, 검증				
연구개발성과	수리실험을 통한 하상보호구조물 안정성/환경성 평가 결과, 기술 활용 지침				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	제트세굴 수리특성을 고려한 하상보호구조물 활용 수리실험을 통한 연직방향 가속도에 의한 하상입자 재부상 메커니즘 이론 수립				
핵심어 (5개 이내)	다기능보	제트세굴	초고속입자영상 유속계	고속 유사수로	유사 재부상

〈 SUMMARY 〉

Purpose & Contents	Development of protection measure against jet scouring using direct measurement of velocity field and bottom shear stress under high-speed conditions (5 m/s) for the purpose of enhanced stability of multi-multifunctional weirs under extreme flooding events				
Results	Results of stability / environmental evaluation of bed protection structure, technical application guidance				
Expected Contribution	- Utilization of bed protection structure considering jet scouring characteristics - Establishment of bed particle re-lifting mechanism theory by vertical acceleration by hydraulic experiment				
Keywords	Multi-Functional Weir	Jet Scouring	UTLRA-PIV	high speed sediment channel	sediment resuspension

< Table of Contents >

1. Outline of this study	6
2. State of the art review	10
3. Contents and results of this study	12
4. Attainment of goal and contribution to related area	84
5. Plan for practical use of results	88
6. Overseas scientific/technical informations obtained in studying	88
7. Security class of results	88
8. Facilities and equipment registered to the NTFS	89
9. Record of safety procedures fulfilled in studying	89
10. Representative results of this study	89
11. And others	89
12. References	89

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	6
2. 국내외 기술 개발 현황	10
3. 연구수행내용 및 성과	12
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	84
5. 연구개발성과의 활용 계획	88
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	88
7. 연구개발성과의 보안등급	88
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	89
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	89
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	89
11. 기타 사항	89
12. 참고 문헌	89

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 개요

- 최종 목표는 극한홍수 대비 다기능보 안정성 강화를 위한 제트세굴 방지 원천 기술개발에 있으며, 이를 위해 초고속 실험수로 및 첨단계측기기를 개발하여 수리구조 흐름을 분석하고, 제트세굴 수리특성을 고려한 하상보호구조물을 개발 및 검토
 - 오리피스 타입 초고속 실험수로 및 첨단계측기기 개발 완료
 - 세굴보호 및 감세에 관한 연구가 미비하므로 관련 연구된 사례 조사
 - 초고속흐름구조 재현(고정상 초고속 실험 수로 개발 및 실험)
 - 3D 바닥 응력 계측기 개발 완료
 - 초고속입자영상유속계(ULTRA-PIV) 개발 완료
 - 초고속수로에서의 이동상실험을 통한 보 하류 제트세굴 현상 규명
 - 이동상 초고속 실험수로 개발
 - 초고속 수리구조 해석프로그램 개발
 - 유속별, 이동상 입자별 제트세굴 수리특성 분석
 - 제트세굴의 연직방향 부압 제어 및 대규모 침식 방지 기술 개발
 - 수리실험을 통한 연직방향 가속도에 의한 하상입자재부상 메커니즘의 이론 수립
 - 제트세굴 수리특성을 고려한 하상보호구조물 개발

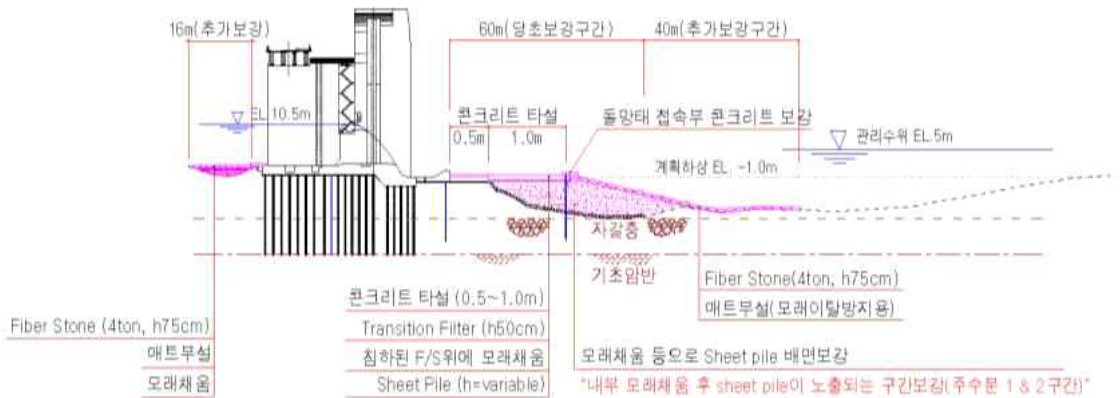
1	아이디어 도출	· 선행연구, 선진사례 벤치 마킹 · 목표성능(성능기준)설정	
2	장치개발	· 초고속 흐름구조 측정 장치 개발(U-PIV, 3D 바닥 응력 장치 등) · 이동상 초고속 흐름구조 재현 장치 개발 · 초고속 수리구조 해석프로그램 개발 · 개발 장치들의 검보정	1차년도
3	이론정립	· 다양한 조건(유속, 수위, 유사입경 등)에 대한 수리실험 수행 · 보하류부 세굴 특성 메커니즘 이론 수립	1,2차년도
4	실내실험	· 연직방향 부압 제어시설 제안 · 제안 방법에 대한 성능 실험	
5	특허 출원 및 등록	· 초고속 흐름구조 측정 장비 특허 출원 · 초고속 흐름구조 해석 프로그램 특허 출원	2차년도
6	추가 R&D	· 실물모형을 이용한 현장실험 · 최적안 도출	향후과제



[그림 1.1]연구개발 흐름도

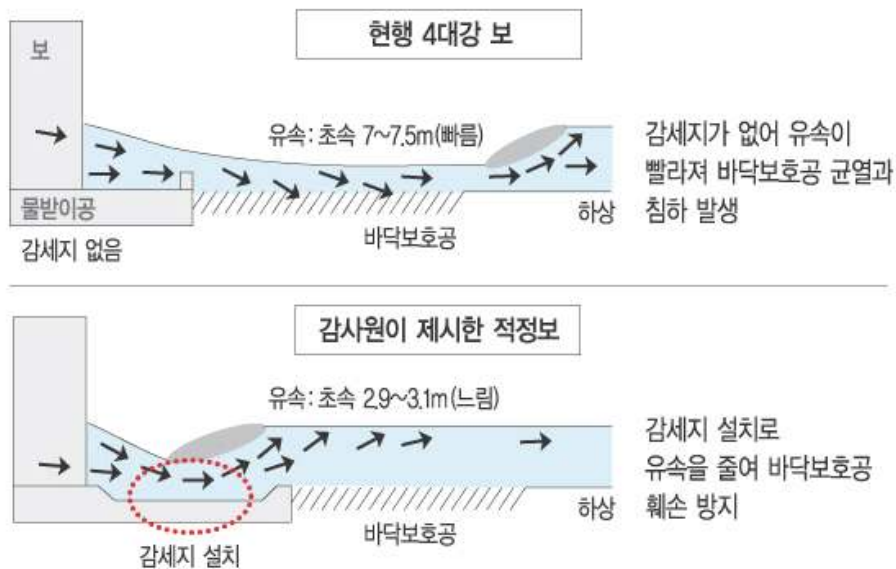
2. 연구개발의 필요성

- 4대강 살리기 사업 16개 다기능 보 가운데 15개 다기능 보 상·하류에 크고 작은 세굴이 발생하였으나, 하천설계기준에는 보 하류부 감세공에 대한 기준이 미흡하여 바닥보호공 과대 설계 및 준공 이후에도 지속적 보완 필요
- 4대강 사업 후 계속적으로 제기되고 있는 보 하류부 세굴 및 하상안정성(보호공) 문제에 대한 근본적인 대책이 마련되지 못한 상태로 준 실규모 수리모형실험을 통한 근본적인 원인 분석 및 장기 대책 마련 필요



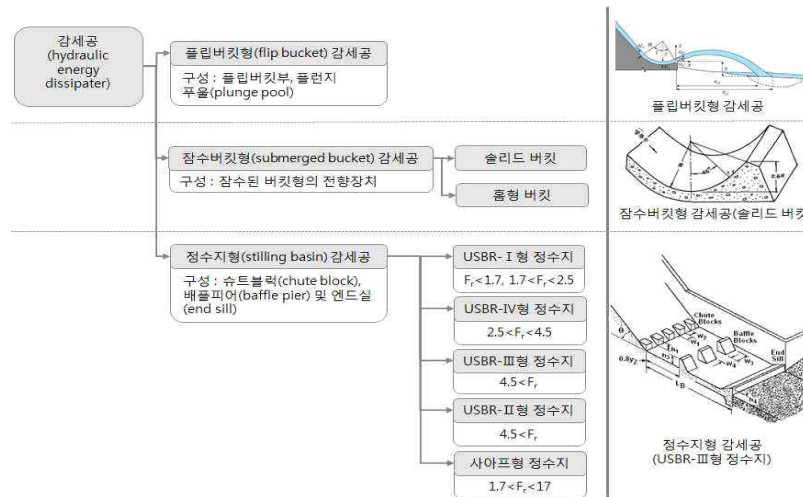
[그림 2.1] 낙동강 합천창녕보 바닥보호공 피해 사례(국토해양부, 2012)

- 댐 규모의 대형 보인데도 소규모 보기준의 설계를 적용하여 바닥보호공 유실 및 각종 부실들이 발생했으며, 감사원에서는 4대강 보가 설계부터 잘못됐다고 지적



[그림 2.2] 현행 4대강 보 구조와 감사원이 제시한 적정보 (감사원, 2013)

- 국내 감세공은 댐 설계기준을 중심으로 감세공 설계기준이 수록되어 있으며 댐설계기준(한국수자원학회, 2011)에서 감세공의 형식을 플립버킷형 감세공, 잠수버킷형 감세공, 정수지형 감세공으로 3가지 형태 분류를 하여 제시하고 있음



[그림 2.3] 감세공의 분류 (한국수자원 학회, 2011),
(한국건설기술연구원, 2013)

- 2009년 전체 하천 횡단 구조물은 총 약 20,753개로서 하상유지공과 보가 각각 4,010개와 16,733개 (국토해양부, 2009)

[표 2.1] 횡단구조물 설치현황

구분		계	하상유지공	보	기타
개소수		20,753	4,010 (19.32%)	16,733 (80.63%)	10 (0.05%)
비율	하천당 개소수	5.42	1.05	4.37	0.00
	단위길이당 개소소수	0.70	0.13	0.56	0.00

출처 : 전국 하천횡단 구조물 설치현황 및 어도 실태조사 보고서 (국토해양부, 2009)

- 더욱이, 최근 이상기후에 따른 홍수의 위험으로부터 치수적 안정성을 확보하기 위하여 치수안정성을 고려한 생태기능 복원기술이 요구되고 있음
- 중소하천에선 매년 하천횡단구조물 유실 피해 발생



11년 9월 남한강 하상유지공 유실
(출처 :녹색연합)



12년 9월 원주천 반곡보 유실
(출처:원주녹색연합)

[그림 2.4] 중소하천 횡단구조물 피해사례

○ 하천횡단구조물 하류부 흐름특성 분석의 필요성

- 하천횡단구조물로 인한 하천에서의 유사이송 및 하상변동에 관한 연구방법으로는 현장측정을 통한 분석, 수리모형 실험 그리고 수치모형 실험이 있다. 하지만, 하천횡단구조물 하류부의 난류 흐름에 대한 분석, 정량화된 외력 특성 분석 등에 대한 연구가 부족한 상황이다.
- 이에 본 연구에서는 횡단구조물 하류부의 안정성 확보를 위해 구조물 하류의 복잡한 흐름양상(난류흐름, 세트세굴 등)을 파악하여 세굴 및 피해 원인을 규명하고, 구조물의 정량적인 성능 기준을 제시하고자 한다.

3. 연구개발 범위

- 본 연구에서는 오리피스 타입 초고속 실험수로 및 첨단계측기기 개발하여 수리실험을 통해 초고속 흐름구조를 해석하고(TRL, 3단계)
- 실험 결과를 바탕으로 세트세굴 수리특성을 고려한 하상보호구조물 개발하고자 함(TRL, 4단계)

[표 3.1] 연구개발 단계

구분		1차년도	2차년도	단계별 설명	
기초연구 단계	TRL 1	☐	☐	TRL 1	이론적 연구단계
	TRL 2	☐	☐	TRL 2	기술적 개념정립 단계
실험 단계	TRL 3	☒	☐	TRL 3	실험적 증명 단계
	TRL 4	☐	☒	TRL 4	실험실 성능평가 단계
시작품 단계	TRL 5	☐	☐	TRL 5	유사환경 시험 단계
	TRL 6	☐	☐	TRL 6	유사환경 기술시험 단계
실용화 단계	TRL 7	☐	☐	TRL 7	실제환경 시작품 데모 단계
	TRL 8	☐	☐	TRL 8	시제품 설치 및 성능시험 단계
사업화 단계	TRL 9	☐	☐	TRL 9	현장적용/사업화 단계

○ 오리피스 타입 초고속 실험수로 및 첨단계측기기 및 분석기법 개발

- 기존 연구방법의 경우 고유속에서 측정되는 수리적 특성을 측정하기가 쉽지 않다. 특히 소류력을 계측하기 위해 기초가 되는 유속의 경우, 대부분이 입수형 계측장치를 사용하게 된다. 이러한 경우 그유체의 흐름조건을 변칙적으로 변화시키는 상황을 초래한다. 특히 수심, 유속 등의 변화로 사류흐름이 상류흐름으로 변하거나, 강한 난류가 발생하는 등 원하는 수리조건과 다른 흐름형상을 발생시키기 때문에 일관성 있는 계측이 어려워 질 수 있다. 그러나 본 연구를 통해 개발되는 PIV 및 고속류 수리특성에 대한 분석 프로그램의 일부에 속하는 영상분석을 기반으로 하는 데이터 분석을 진행 할 경우, 유체의 흐름영역 외에서 수리특성을 계측하기 때문에 유체의 흐름에 영향을 끼치지 않을 뿐만 아니라 기존 계측기기에 뒤처지지 않는 정확도 확보할 수 있음
- 개수로에서 소류력은 정상 등류의 경우, 수로 내 수체에 작용하는 중력과 수로 바닥 및 측면에 작용하는 마찰력이 평형하다는 가정하에 바닥의 평균전단응력, 즉 소류력을 산정하게 된다. 이러한 이론적 특성을 고려하면 Reynolds stress는 소류력과 동일하다고 볼 수 있으므로 본 연구에서는 PIV를 이용하여 Reynolds stress를 직접 측정하고 이를 바닥면의 소류력으로 대체함
- 개발된 장치와 분석기법을 통해 산정된 Reynolds stress와 소류력을 직접 측정하는 장치의 검증 을 통해 바닥에서 발생하는 소류력을 검증할 수 있음

제2장. 국내외 기술 개발 현황

1. 국내 현황(국내 보 설계기준현황)

- 국내의 경우, 대규모 다기능 보에 대한 설계는 기존에 이루어지지 않으므로 인해 세굴보호 및 감세에 관한 기술은 국외 연구를 그대로 차용하였으며 개발기술은 상대적으로 낮은 수준임
- 감세공의 분류 중 하천설계기준(한국수자원학회, 2009)은 하상유지시설의 형식, 하류수위차, 하도상황 등의 하류하도의 특성을 고려하여 수평물받이형, 경사물받이형으로 구분하고 있다. 여기서, 물받이 길이 설계는 블라이(Bligh) 공식(Khosla et al, 1954) 또는 건설부 국립건설시험소(1991)에 제안한 공식과 물받이 두께 산정공식을 제안하고 있음
- 하천설계 기준은 인위적으로 도수 및 하류수심 상승을 유도하는 감세구조물인 배플피어(Baffle pier)나 엔드실(End sill)의 설계기준은 수록되어 있지 않음
- 하천설계기준의 물받이는 “월류에 의한 보 및 낙차공 주변의 세굴을 방지하기 위하여 보 및 낙차공 본체 상·하류에 철근콘크리트 구조로 설치한다”로 정의되어 있음
- 하천설계기준(한국수자원학회, 2009)은 “보 및 낙차공을 월류하는 흐름에 의해 보 및 낙차공 본체의 상·하류 하상은 심한 침식작용을 받게 되는데 이러한 침식작용으로부터 구조물을 보호하기 위해 물받이를 설치한다”로 설명하고 있으며 물받이는 “철근콘크리트 구조로 하는 것을 원칙으로 하지만 사석을 활용한 여울형상, 돌붙임형상을 고려할 수 있다”고 제시함
- 하지만 물받이 길이를 결정하는 블라이(Bligh) 공식(Khosla et al, 1954)은 침투를 고려한 것이고 건설부 국립건설시험소 공식(국립건설시험소, 1991)은 세굴규모를 결정한 식으로 흐름 감세영향을 고려하지 못한 식임
- 하천설계기준은 “상류측 물받이는 보 및 낙차공 상류에 소용돌이가 일어나 상판의 세굴 위험이 있을 경우 등을 위해 설치한다. 하지만 보의 높이가 2~3 m 정도이고 상류측에 퇴사가 예상되는 곳에서는 설치하지 않아도 된다. 일반적으로 상류측 물받이의 길이는 3~5 m 정도로 한다.”로 설명하고 있음
- 4대강 살리기 사업의 5 m 이상의 중규모 보 구조물에 적용하는데 적합성 검토가 반드시 필요
- 물받이의 파괴와 하상세굴은 물받이 길이의 부족으로 인해서 발생하는 경우가 많으며 물받이 길이는 흐름감세영향과 하류수위의 영향을 받음
- 4대강 보의 경우 보의 높이가 하천설계기준보다 높으며 하류수위 조건이 다양하여 설계기준에 제시된 식의 적용범위를 벗어남을 알 수 있음
- 4대강에 설치된 대형 횡단구조물들은 보 설계 기준으로 건설하였다. 댐 건설 기준이 아니기 때문에 바닥 세굴 피해가 크다. 현재 바닥보호공을 강화하는 방향으로 보수가 진행되고 있다. 하지만 계속해서 세굴이 발생하고 있어 구조물 안전에 위협이 되고 있음
- 보 하류의 하상안정성을 유지하기 위해서는 감세공, 보하류 세굴규모 및 바닥보호공 등 다양한 연구가 필요하지만 국내의 연구는 세굴규모와 바닥보호공에 대한 연구만 일부 진행되었고, 최근 4대강 다기능 보 설치 후 한국건설기술연구원(2013)에서 보하류부 세굴방지를 위한 Multi-baffle Energy Dissipator 개발 연구, 첨단기술 기반의 하천 계측 및 운영기술 개발 연구단(1세부, 대하천 친환경 시설물 및 하도 유지관리 기술 개발)에서 다기능 보 하류 세굴 등에 관한 연구 등이 수행됨

2. 국외 현황 (국외 보하류 세굴평가)

- 보 하류에서 발생하는 세굴현상은 낙차 구조물을 통과하는 흐름이 낙하하면서 발생하는 낙하류(plunging jet)에 의해 발생한다. 낙차공을 통과하는 흐름은 자유 월류낙하(free overfall)하는 형태를 보이며 낙하류로 인해 하류부 바닥에 복잡한 흐름형태를 보이게 된다.
- 미국은 횡단 구조물의 설계, 보수 보강 방안 등에 대해 기존 경험식 및 간략 계산식 위주로 기준 제시(USACE, 2008)하였으며, 실제 하천의 하류 바닥보호공 및 감세공의 유지관리를 위한 표준방안 제시(USACE, 2013)
- 일본은 1990년대 초반까지는 국내 설계기준과 동일하게 횡단 구조물에 대한 경험식 위주로 기준

을 제시하였으나, 1997년 수리적 특성을 반영하도록 개정(國土交通省, 2008)

- 유럽에서는 주운용 보(movable weir)에 대한 기준을 PIANC에서 제시하고 있으며, 구체적 기준은 미국의 내용을 차용(PIANCA, 2006)
- 복잡한 흐름특성에 기인해 발생하는 낙차공 하류부 세굴에 대한 연구는 Schokiltsh(1932), Veronese(1937), Zimmerman과 Maniak(1967), Bormann과 Julien(1991), Fahlbusch(1994), Hoffmans(1998), Federal Highway Administration(FHWA,2001), Construction Industry Research and Information Association(CIRIA, 2002) 등에 의해서 이루어졌다.

제3장. 연구수행내용 및 성과

1. 초고속 흐름 구조 재현(초고속 실험 수로 개발 및 실험)

1.1 실험 수로 개발 과정

국내의 실험수로들은 대부분 고유속(5 m/s)을 구현하기 힘들며, 일부 고유속을 재현하는 수로의 경우 대부분 경사형 수로로 제작 되어있다. 연구진은 2013년부터 2018년까지 물관리연구사업 연구를 통해 1차, 2차, 3차 총 3개의 실험 수로를 개발하였으며, 유량 약 $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 이상, 유속 약 4 m/s 이상을 구현할 수 있는 실험 수로를 개발하였다. 개발한 경험 및 노하우를 바탕으로 극한 홍수 시의 초고속흐름구조를 재현할 수 있는 초고속(5 m/s 이상) 실험 수로를 개발하고자 한다.

[그림 1.1]은 개발했던 1차 실험 수로 이다. 1차 실험 수로는 호안블록의 수리적 안정성 평가방법을 개발하기 위한 모델로 가변경사형으로 제작 하였다. 수로폭 0.3 m, 수로수심 0.3 m, 수로길이 5.0 m 이며 스테인리스로 제작하였다. 최대 유속은 경사를 있을 때 3.5 m/s 까지 구현 가능하며, 경사가 없는 수평일 때 2.8 m/s 까지 구현 가능하다. 유속 3.0 m/s 이상 고유속에서 흐름이 안정화 되지 않는 단점을 가지고 있었다.



[그림 1.1] 1차 실험 수로

[그림 1.2]는 2차 실험 수로이다. 2차 실험 수로는 1차 실험수로의 단점인 고유속 흐름 안정화를 위해 개발되었으며, 1차 고속수로와 동일한 가변경사형이다. 수로폭 0.3 m, 수로수심 0.3 m, 수로길이 5.0 m 이며 수로 내 흐름을 관찰하기 위해 아크릴로 제작하였다. 최대 유속은 경사가 있을 때 5.0 m/s 까지 구현 가능하며, 경사가 없는 수평일 때 3.5 m/s 까지 구현 가능하다. 그러나 2차 고속수로 또한 고유속에서 흐름이 안정화 되지 않으며 경사가 없는 수평일 때 수로 하류단에서 상류로 전이되는 도수가 발생하는 단점을 가지고 있었다.



[그림 1.2] 2차 실험 수로

[그림 1.3]은 3차 실험 수로이다. 3차 실험 수로는 1차 실험 수로, 2차 실험 수로와 달리 가변 경사형이 아닌 경사 없는 수평 즉, 무경사 형태로 개발하였다. 수로폭 0.3 m, 수로수심 0.3 m, 수로길이 10.0 m 이며 외부는 스틸로 내부 수로는 아크릴로 제작하였다. 수로의 도입부에 정류탱크와 수위조절수문을 설치하여 수위조절이 가능하도록 하였으며, 고유속에서의 흐름안정화를 위해 수로 길이를 5.0 m에서 10.0 m 로 늘렸다. 3차 고속수로에서 구현 가능한 최대 유량 약 0.3 m³/s 이상, 유속 약 4 m/s 이상 구현 가능하다.



[그림 1.3] 3차 고속수로

1차, 2차, 3차 총 3개의 실험 수로의 각각 제원은 아래 [표 1.1]과 같다.

[표 1.1] 1차, 2차, 3차 실험 수로 제원

항목		1차 실험 수로	2차 실험 수로	3차 실험 수로
실험 수로 폭(m)		0.3	0.3	0.3
실험 수로 수심(m)		0.3	0.3	0.3
실험 수로 길이(m)		5.0	5.0	10.0
공급 최대유량(m ³ /s)		0.15	0.15	0.30
구현 최대유속(m/s)	최대경사 시	3.5	5.0	—
	무경사 시	2.8	3.5	4.0
비고		가변경사형	가변경사형	무경사형

1.2 초고속 실험수로 개발 및 제원

하천 횡단구조물의 피해는 다양한 수리적 특성에 의해서 발생한다. 특히 극한 홍수 시에 고유속에 의한 피해가 크다. 이러한 흐름을 재현하기 위해서 유속이 매우 높은 수로에서의 실험이 필수적이다. 본 연구에서는 다양한 수리 현상 및 고유속을 재현할 수 있고, 고유속 흐름에서 발생하는 수리현상(수위, 유속, 소류력 등)을 측정할 수 있는 초고속 실험 수로를 개발 하였다.

국내외 실험 수로들은 대부분 고유속(5 m/s)을 구현하기 힘들며, 일부 고유속 재현하는 수로의 경우는 대부분 경사형 수로이다. 본 연구에서는 유량 약 0.5 m³/s 이상, 유속 약 4 m/s 이상을 구현할 수 있는 수로를 개발한 경험과 노하우를 바탕으로 제트세굴을 구현하기 위해 오리피스 형태의 무경사 고유속(5 m/s) 수로를 개발하였다. [그림 1.4]은 개발 완료된 초고속 실험 수로이며 [표 1.2]은 수로의 제원이다.



[그림 1.4] 초고속 실험 수로

[표 1.2]초고속 실험 수로 제원

항목	초고속 실험수로
실험 수로 최대 폭	0.3 m
실험 수로 최대 수심	0.3 m
실험 수로 길이	10.0 m
공급 최대유량	0.3 m ³ /s
구현 최대유속	6.0 m/s

수로 내 수체에 작용하는 중력과 수로 바닥 및 측면에 작용하는 마찰력의 평형을 고려함으로써 바닥전단응력을 산정하는 식은 아래와 같다.

$$\tau_w = \gamma R_h S_f \quad (\text{식 1.1})$$

위의 식에서 $\gamma = \rho g$ 는 물의 비중이고 $R_h = A/P_w$ 는 수리반경, S_f 는 동수경사이다.

$$V = \frac{R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}}}{n} \quad (\text{식 1.2})$$

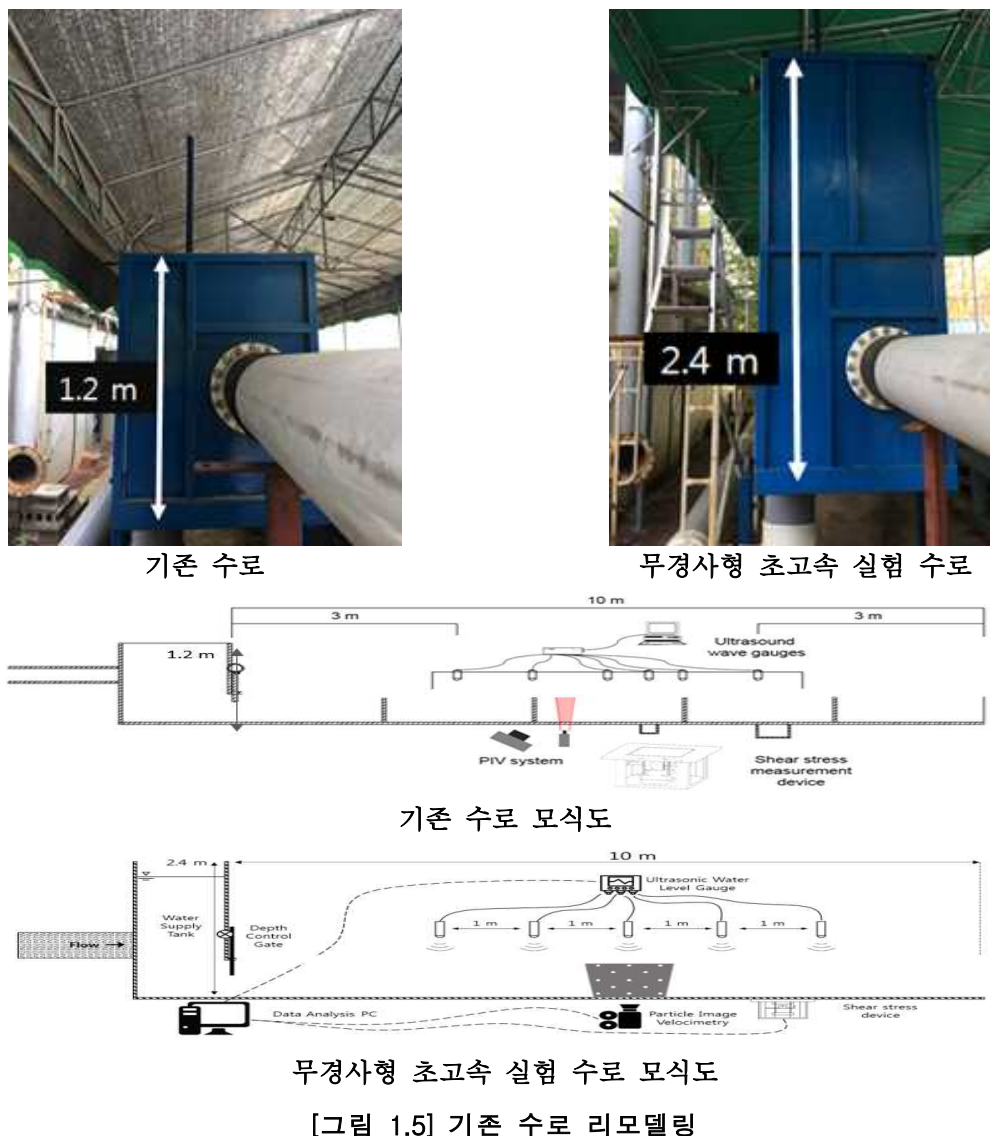
위의 식은 Manning's Equation 이며 V 는 평균유속, R 은 수리반경, n 은 조도계수, S 는 동수경사이다. 무경사의 수로에서는 중력항을 배제 할 수 있으므로 Manning's Equation의 경사항(S)을 [식 1.1] 경사항으로 대체하여 최종적으로 바닥전단응력을 산정하는 식은 [식 1.3] 과 같다.

$$\tau_w = \frac{\rho n^2 V^2}{R^{\frac{1}{3}}} \quad (\text{식 1.3})$$

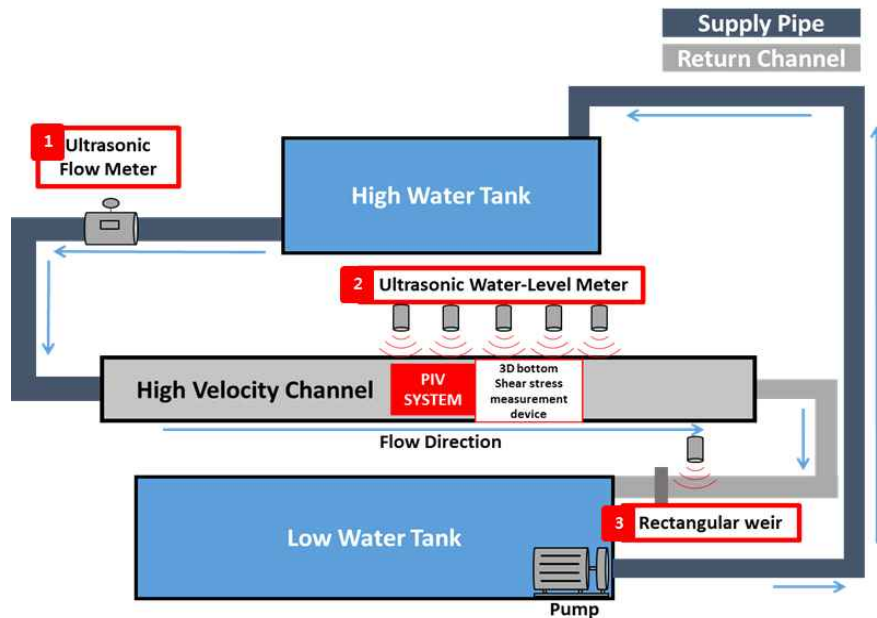
[식 1.3]을 통해 바닥전단응력을 산정할 수 있으며, 본 연구의 실험 수로를 무경사형으로 설계한 가장 큰 이유이다.

바닥전단응력을 간접적으로 경험식을 통해 산정하는 여러 방법은 2.2절에 기술하였다.

Torricelli의 정리의 오리피스 이론 유속은 $V = \sqrt{2gh}$ 이지만 실제의 경우 오리피스 주위의 마찰, 내부마찰 및 유속의 증감 등에 의하여 에너지 손실(유속 감소)가 발생하였다. 따라서 기존 수로의 수조 높이 1.2 m 에서 2.4 m 로 설계하였으며 [그림 1.5]는 기존 수로 리모델링한 모습이다.



[그림 1.6]는 현재 인제대학교에 구축된 실험 시스템의 계략도이다. 저수조, 고수조, 유입수로, 공급 유량조절 수문, 무경사형 초고속 실험 수로 내 수위조절용 수문, 회귀수로, 사각웨어로 구성되어 있다. 고수조로부터 유입된 유량은 무경사형 초고속 실험 수로를 통과하여 저수조로 유입되며 펌프를 이용하여 고수조로 유입되는 순환식 구조이다. 개발한 무경사형 초고속 실험 수로 도입부에 정류탱크와 수문을 설치하여서 수위를 조절할 수 있다. 고수조에서 무경사형 초고속 실험 수로로 유입되는 유량을 초음파 유량계로 실시간 유량을 측정하고 무경사형 초고속 실험 수로 위에 1 m 간격으로 초음파 수위계를 설치하여 실시간으로 수로 수심을 측정한다. 무경사형 초고속 실험 수로를 통과한 유량을 회귀수로 내 사각웨어에 설치된 초음파 수위계가 월류 수심을 측정하여 실시간 유량을 산정한다.



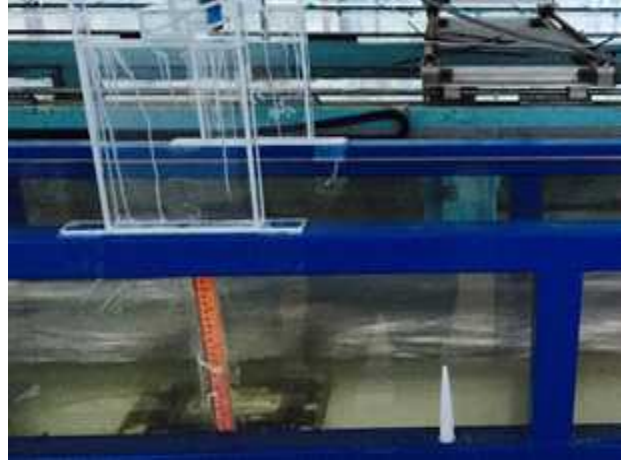
[그림 1.6] 수리 실험 시스템 계략도

구축된 수리 실험 시스템에 수리특성 측정장치는 다음과 같다. 고수조에서 공급된 유량은 공급관에 부착된 초음파 유량계(Ulsoflow 309S)를 통하여 측정되며 초음파 유량계의 측정정도는 $\pm 1.0\%$ 이다.



[그림 1.7] 초음파 유량계

초음파 수위계는 3D 바닥 응력 계측기 설치 지점을 기준으로 1.0 m 간격으로 설치하였다. 개수로의 흐름특성상 수로의 모든 수리량(수심, 유속, 유량, 경심 등)이 일정하지 않고 변하는 흐름이므로 초음파 수위계를 통해 수로 수심을 실시간으로 측정하고자 설치하였다. 수로 수심을 실시간 측정하며, 초음파수위계(LT-100) 측정정도는 $\pm 0.25\%$ 이다.



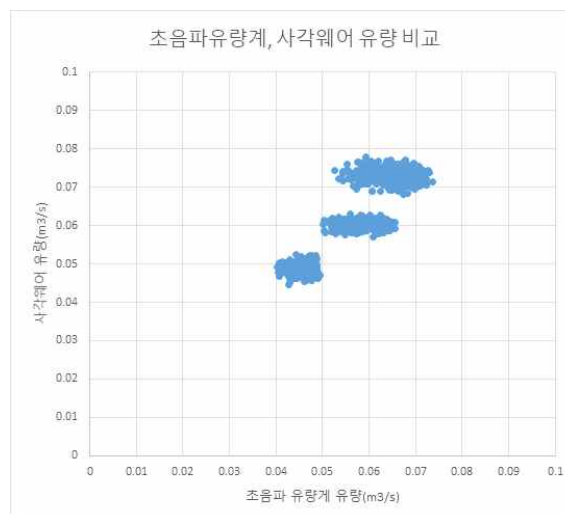
[그림 1.8] 수로 상단에 설치된 초음파 수위계 전경

무경사형 초고속 실험 수로를 통과한 유량을 회귀수로 내에 설치된 사각웨어에 초음파 수위계로 월류 수심을 측정하여 실시간 유량을 산정하며, 초음파수위계(LT-100) 측정정도는 $\pm 0.25\%$ 이다.



[그림 1.9] 사각웨어 상단에 설치된 초음파 수위계 전경

[그림 1.10] 초음파 유량계 측정 유량과 사각웨어를 통해 산정한 유량 비교이다. 초음파 유량계는 고수조에서 공급되는 유량을 측정하고 사각웨어 유량은 회귀수로내에 설치되어 있어 약 6%의 오차율을 보인다.

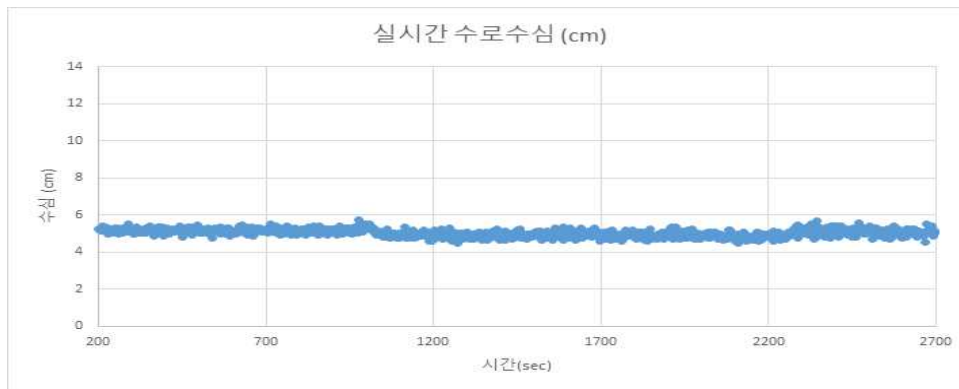


[그림 1.10] 초음파유량계, 사각웨어 유량비교

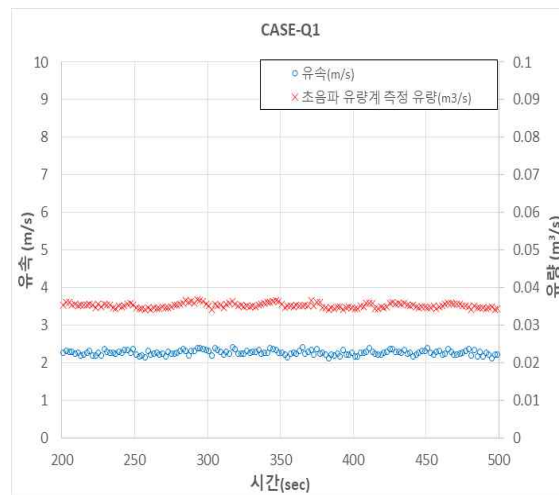
1.3 수리 실험을 통한 초고속 실험 수로 유속 검증

구축된 실험 시스템을 바탕으로 무경사형 초고속 실험수로에서 5 m/s 이상의 유속이 구현 가능한지 실험을 진행하였다. 고수조에서 공급된 유량은 공급관에 부착된 초음파 유량계(Ulsoflow 309S)를 통하여 실시간 유량을 측정하고, 회귀수로 내에 설치된 사각웨어에 초음파 수위계로 월류 수심을 측정하여 실시간으로 산정한 유량을 비교 하였다. 그때 동시간으로 3D 바닥 응력계측기 설치지점에 설치된 수로 내 실시간 수심은 [그림 1.11]과 같다.

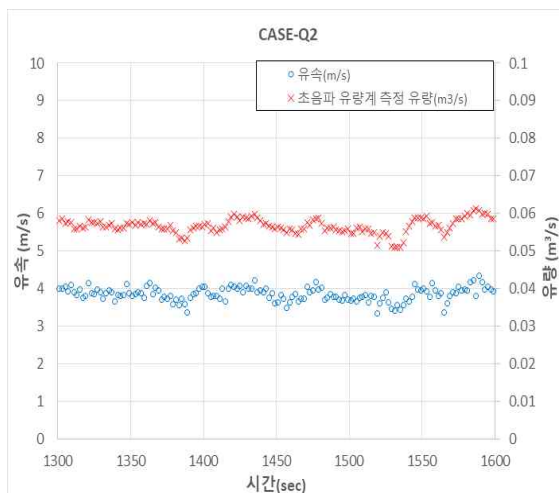
실시간 수심으로 산정한 유수단면적과 실시간 유량으로 유속을 구한 결과 [그림 1.12], [그림 1.13], [그림 1.14]과 같으며 [그림 1.15]는 실험 전경이다.



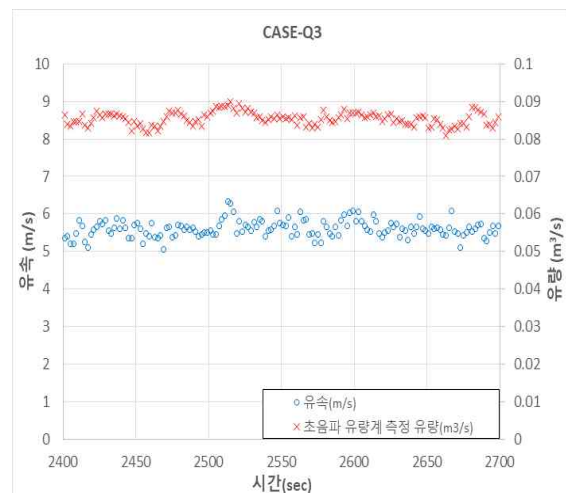
[그림 1.11] 무경사형 초고속 실험 수로 내 실시간 측정 수심



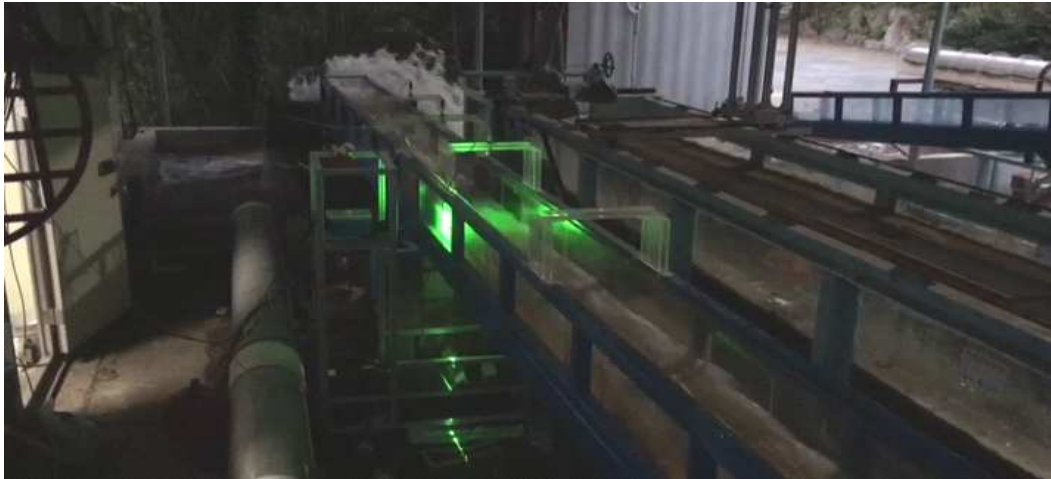
[그림 1.12] CASE-Q1 유량 유속 측정 data



[그림 1.13] CASE-Q2 유량 유속 측정 data



[그림 1.14] CASE-Q2 유량 유속 측정 data



[그림 1.15] 실험 전경

[표 1.3] 는 공급 유량 CASE별 수리특성 측정장치로 측정된 실시간데이터를 분석한 결과이다. [그림 1.11]에서 수로내 흐름이 안정화 되었다고 판단되는 CASE-Q1 측정 데이터 평균 결과 평균 수로 수심은 0.052 m, 평균 유량 0.035 m³/s, 평균 유속 2.269 m/s. CASE-Q2 측정 데이터 평균 결과 평균 수로수심은 0.049 m, 평균 유량 0.057 ml/s, 평균 유속 3.860 m/s. CASE-Q3 측정 데이터 평균 결과 평균 수로수심은 0.051 m, 평균 유량 0.085 m³/s, 평균 유속 5.606 m/s. 로 나타났다. 측정 실험 결과 안정적으로 5 m/s 이상의 유속이 구현 가능하였다. 따라서 제트세굴을 구현하기 위해 오리피스 형태의 무경사 고유속(5m/s) 수로를 개발 완료 하였다.

[표 1.3] 유량 CASE별 수리특성 측정장치 측정 결과

CASE Name	평균 유량 (m ³ /s)	평균 유속 (m/s)	수로 평균 수심 (m)	수심 (표준편차)	유량 (표준편차)	유속 (표준편차)
CASE-Q1	0.035	2.269	0.052	0.001	0.001	0.064
CASE-Q2	0.057	3.860	0.049	0.001	0.002	0.178
CASE-Q3	0.085	5.606	0.051	0.002	0.002	0.224

2. 3D 바닥 응력 계측기 개발

횡단구조물 하류부의 세굴 및 피해는 x, y 방향의 외력으로만 발생하는 것이 아니라 z 방향의 양 압력 또는 부압력등 압력 변화에 의해 발생하는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 약 3 m/s 이상 유속에 대한 x, y 방향 전단응력계측기를 개발한 경험 및 노하우를 바탕으로 x, y 2방향의 바닥전단응력과 z 방향의 압력을 측정할 수 있는 3D 바닥응력 계측기를 개발하였다.

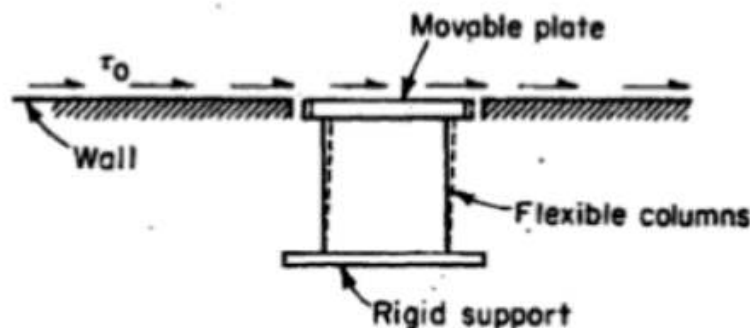
먼저 하상의 바닥에서 발생하는 바닥전단응력을 측정하는 방법은 장치를 이용해 직접 측정하는 방법과 유속을 측정하여 기 연구된 이론식을 이용하여 간접 측정하는 방법이 있다.

2.1 직접측정방법

바닥전단응력을 직접 측정하는데 3가지 방법이 있다. 과거에 개발된 2가지 방법은 Shear meter 또는 Shear balance 와 Preston tube를 사용하는 방법(Graf, Walter, 1984)이며, 본 연구진에서 개발되어진 이차원 소류력 측정장치가 있다.

2.1.1 Shear Meter

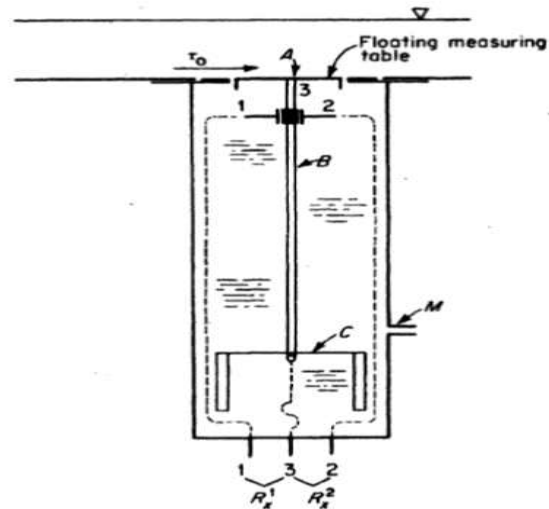
Shear meter의 원리는 1961년 Vennard에 의해서 고안되었다. 이동판을 탄성봉과 강성지지대에 연결하여 바닥에 설치하여 직접 전단응력을 측정하는 방법이다. [그림 2.1]과 같이 이동판은 흐름에 의해 생성된 전단응력에 의해 움직이고, 이러한 움직임은 변위계에서 적절한 보정작업 후 전단응력의 크기로 나타내어진다.



[그림 2.1] Vennard가 고안한 Shear meter

(Walter, 1998)

1962년 Strauss에 의해 개발된 Shear meter는 Vennard의 것보다 넓은 0.015 m^2 이상의 면적의 전단응력을 측정할 수 있으며, 부상이동판은 균형을 이룬 상태로 바닥에 설치한다. 유체의 이동은 부상이동판의 움직임을 야기시키며 그 크기를 전자적으로 기록한다. 그러나 Strauss에 의해 개발된 Shear meter는 흐름방향을 알고 있을 때 사용이 가능하다는 단점을 가지고 있었으며 Strauss는 1964년에 새로운 Shear meter를 개발한다. 이것은[그림 2.2]와 같이 정상류와 비정상류 모두에서 사용가능하며 ‘점’전단응력측정을 가능하게 하였다. 부상이동판에 부착된 변형축의 변화는 오직 전단응력에 의존하며 이런 변화는 전자적 저항으로 측정된다. 이 장치는 적절한 보정 후 정상류와 비정상류에서의 난류 전단력 변화를 보여주지만 흐름의 방향을 나타내지는 않는다. 모든 Shear meter의 단점은 미완성된 기계적 문제와 측정기기 주변의 흐름방해가 있다.



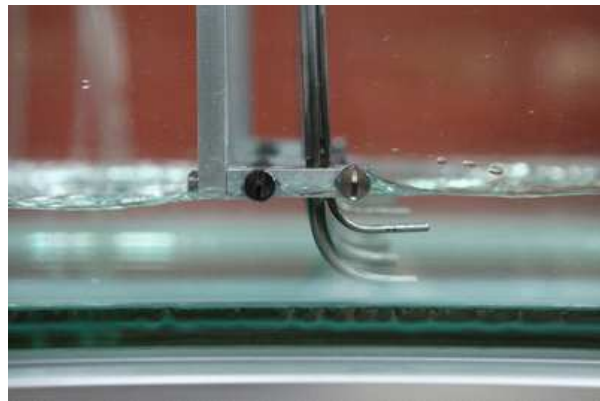
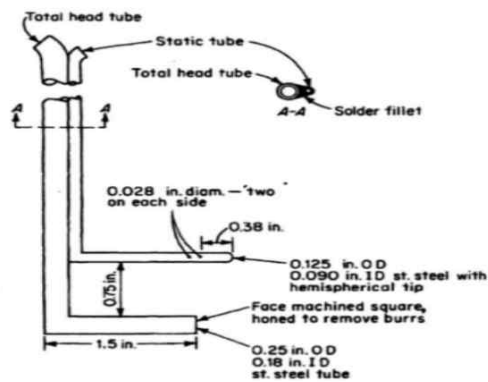
[그림 2.2] Strauss가 개발한 Shear meter

(Walter, 1998)

이 때, A: 부상이동관 (10 cm²); B: 변형 축; C: 막; M: 유체 출구; 1, 2, 3, R_x^1 , R_x^2 : 전자 장치 연결부

2.1.2 Preston Tube

Preston tube의 기술은 간접적인 전단력 측정 및 계산을 직접측정이 가능하게 만들었다. Ippen 등은 1962년 아래 그림의 장치를 사용하여 사다리꼴 직선 수로에서의 바닥면 전단응력 분포를 측정하였다.



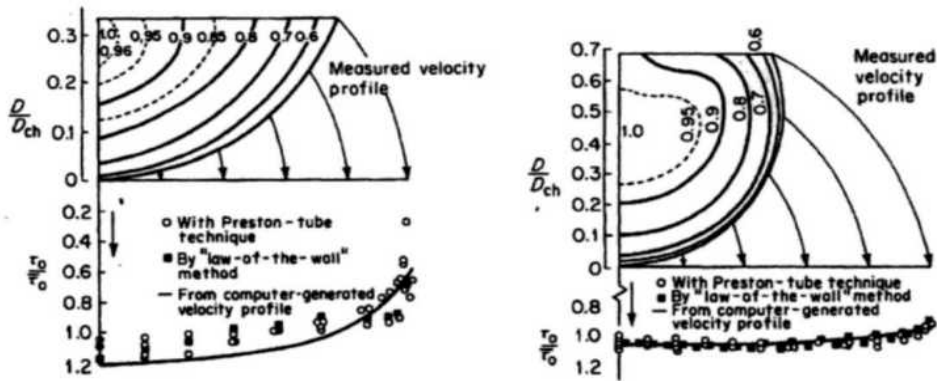
[그림 2.3] Ippen에 개발된 Preston Tube [그림 2.4] The Preston tube measuring bed

(Walter, 1998)

shear stresses (이두한 등, 2017)

유사한 기술을 이용하여 Reploge등은 1966년에 원형 개수로에서의 전단응력을 직접 측정하였다. 그 결과 전단응력분포는 수심과 원형수로지름의 비 D/D_{ch} 에 의존하고 있다는 것을 밝혔다. 전형적인 결과는 [그림 2.5]와 같으며, 최대 소류력은 수로의 중심선 부근에서 발생하며, 최소 소류력은 수면 부근에서 발생하는 것을 볼 수 있다.

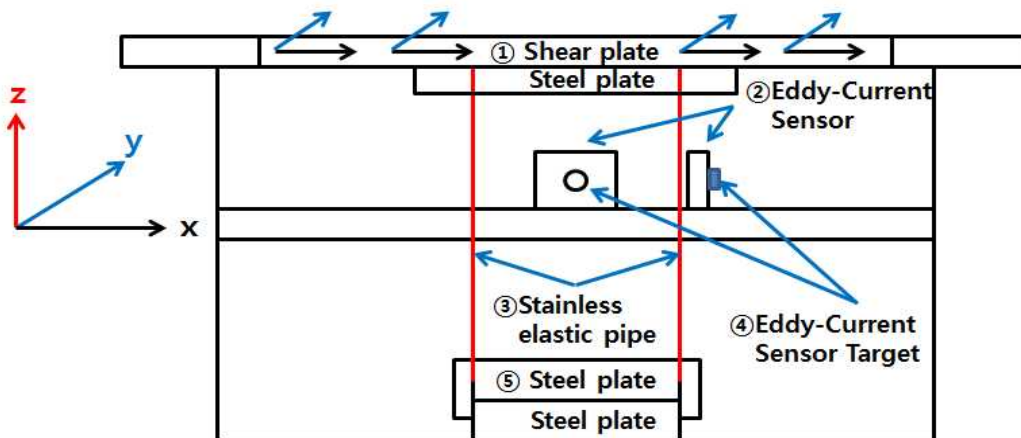
국내에서도 [그림 2.4]와 같이 프레스톤튜브를 이용하여 바닥전단응력을 측정하는 연구가 진행되었다.



[그림 2.5] 원형수로에서 직 · 간접적으로 측정 한 전단응력 분포
(Walter, 1998)

2.1.3 이차원 소류력 측정장치

본 연구진에서 개발했던 이차원 소류력 측정장치는 전단판을 스테인리스봉으로 연결하여 통수 시 스테인리스봉의 휨 정도를 Eddy -current sensor로 측정하여 바닥면에서 작용하는 소류력을 직접 측정한다. 이차원 소류력 측정장치의 경우 기존 소류력 공식과 비교해서 $\pm 10\%$ 의(2.0 ~ 3.0 m/s의 유속 기준) 오차율을 보이고 있다.



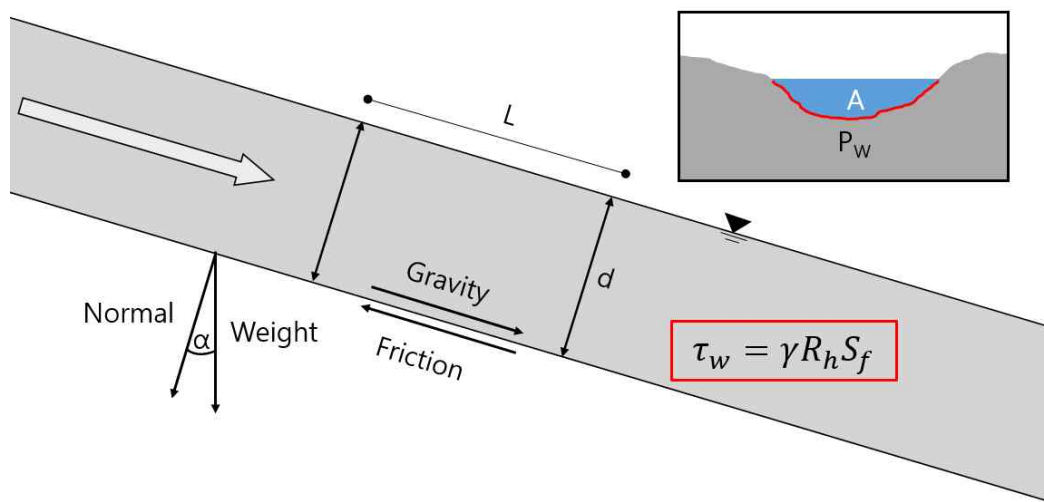
[그림 2.6] 이차원 소류력 측정장치

2.2 간접측정방법

바닥전단응력을 간접적으로 측정하는 방법은 유속을 측정하여 기 연구된 이론식을 이용하여 평가하는 방법이다. 간접측정방법에 이용되는 이론식은 일반적으로 구간평균법(Reach-Averaged Method), 레이놀즈응력산정법(Reynolds Stress Method), 난류운동에너지법(Turbulent Kinetic Energy)등의 방법이 있다.

2.2.1 Reach-Averaged Method

하천시설물 설계, 시공 및 관리에 있어서 바닥전단응력은 매우 중요하다. 예를 들어, 호안 등 시설물의 허용소류력을 계산하거나, 하천의 유사량을 예측하는 데 있어서 바닥전단응력이 기준으로 쓰인다. 정상 등류의 경우, [그림 2.7]에 나타낸 바와 같이 수로 내 수체에 작용하는 중력과 수로 바닥 및 측면에 작용하는 마찰력의 평형을 고려함으로써 바닥전단응력을 산정할 수 있다.



[그림 2.7] 구간평균 바닥전단응력 산정방법

[그림 2.7]에서, 수로와 평행하게 작용하는 수체 무게의 분력 및 바닥 마찰력의 평형은 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$\rho g A L \sin \alpha = \tau_w P_w L \quad (\text{식 2.1})$$

위의 식에서 ρ 는 물의 밀도, g 는 중력가속도, A 는 수로내 수체의 흐름방향 단면적, L 은 유역평균을 적용하는 구간의 거리, α 는 수로의 경사각도, τ_w 는 구간 내 평균 바닥전단응력, P_w 는 윤변이다. [식 2.1]을 τ_w 에 관하여 풀면,

$$\tau_w = \rho g \frac{A}{P_w} \sin \alpha \quad (\text{식 2.2})$$

수로의 경사가 작을 경우, $\sin \alpha \approx \tan \alpha = S_f$ 이므로,

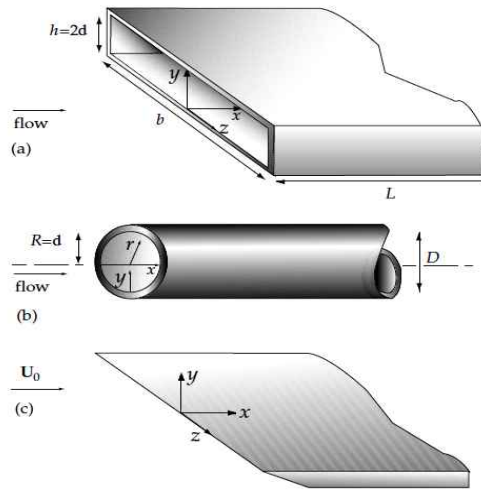
$$\tau_w = \gamma R_h S_f \quad (\text{식 2.3})$$

위의 식에서 $\gamma = \rho g$ 는 물의 비중이고 $R_h = A/P_w$ 는 수리반경이다.

[식 2.3]은 구간 내 평균 바닥전단응력을 간단하게 산정하는데 유용하지만, 유역 내 하상특성이 균일하지 않거나 부등류 및 부정류에 적용할 수 없다는 단점이 있다.

2.2.2 Reynolds Stress Method

수로 내 국부적인 바닥전단력을 정확하게 측정하고 산정하기 위해서는 먼저 경계층 흐름에 관한 이해가 필요하다. [그림 2.8]는 경계층 흐름의 예이다.

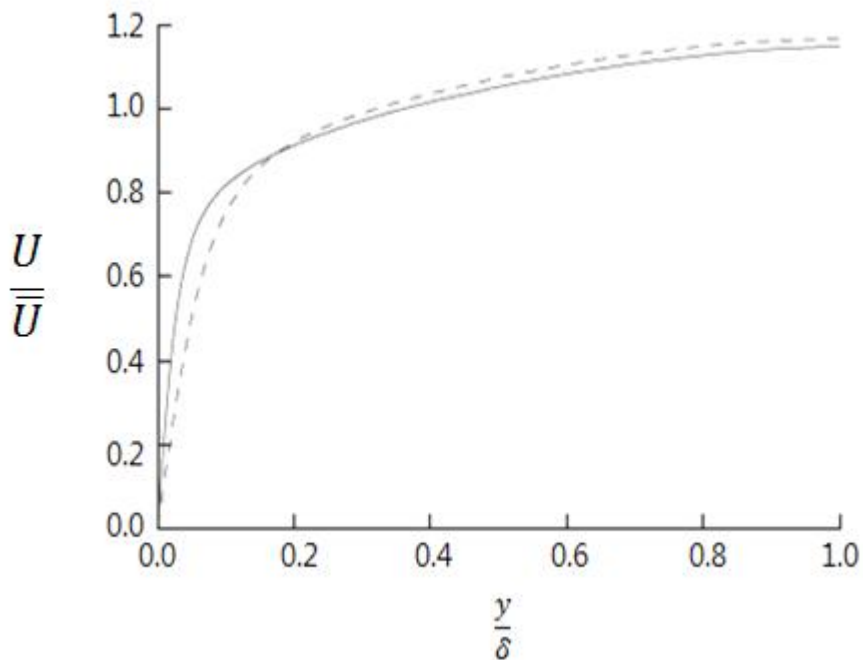


[그림 2.8] 경계층 흐름의 예

난류흐름의 경우, 레이놀즈 분해법에 따라 유속을 앙상블 평균값과 난류로 다음과 같이 분리한다.

$$\begin{aligned} u &= \bar{u} + u', \\ v &= \bar{v} + v', \\ w &= \bar{w} + w' \end{aligned} \quad (\text{식 2.4})$$

위에서, u, v, w 는 각각 흐름방향, 연직방향, 횡방향 유속이고, $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$ 는 평균, 그리고 u', v', w' 는 각각 흐름방향, 연직방향, 횡방향 난류량이다. 경계층 흐름에서 흐름방향 평균유속의 연직분포는 [그림 2.9]에 나타낸 바와 같다.



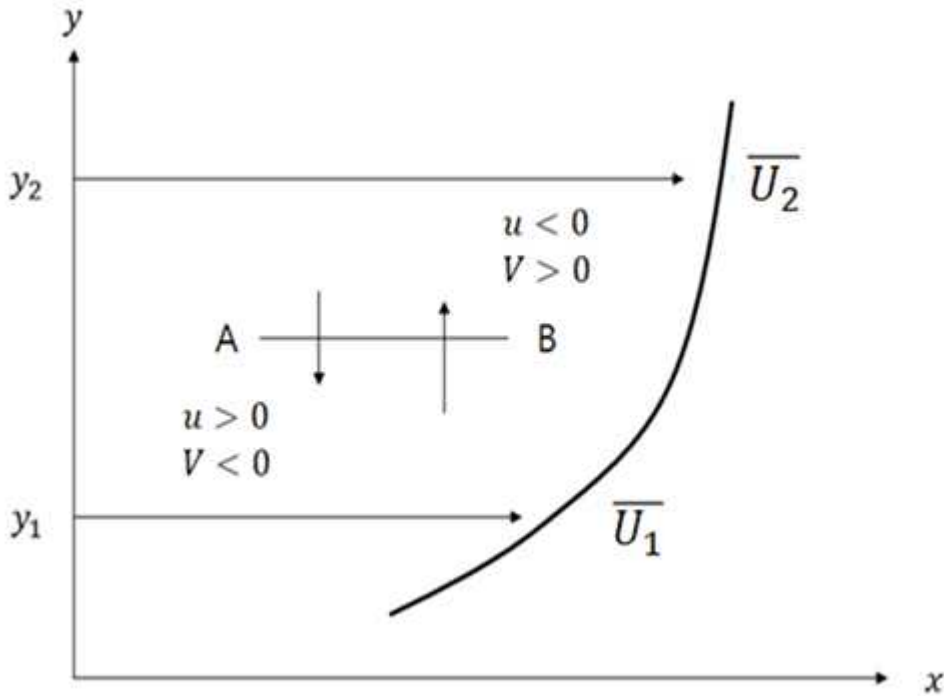
[그림 2.9] 경계층 흐름에서 흐름방향 평균유속의 연직분포

여기서, 시간 t 를 긴 시간으로 잡으면

$$\bar{u} = \frac{1}{t} \int_0^t u dt, \bar{v} = \frac{1}{t} \int_0^t v dt, \bar{w} = \frac{1}{t} \int_0^t w dt \quad (\text{식 2.5})$$

그리고 u, v, w 의 시간 평균값은 0이 된다.

다음 그림과 같이 유체속의 임의 점에서 x 축과 평행한 미소면적 AB 를 통과하는 유체의 y 방향의 속도는 $v = \bar{v}$, $v = \bar{v} + v'$ 이지만 유체 흐름이 X 방향이므로 $\bar{v} = 0$ 이 되어 $v = v'$ 가 된다. 따라서 AB 를 통과하는 유체의 운동량에 대한 시간 평균값은 다음과 같다.



[그림 2.10] 난류의 혼란작용

$$\frac{1}{t} \int_0^t \rho v u dt = \frac{\rho}{t} \int_0^t v (\bar{U} + u) dt = \frac{\rho \bar{U}}{t} \int_0^t v dt + \frac{\rho}{t} \int_0^t u v dt = \rho \overline{uv} \quad (\text{식 2.6})$$

식의 운동량이 미소면적 AB 의 상하로 작용하게 되며, 이를 레이놀즈 응력(Reynolds stress)이라 한다. 운동량의 변화는 운동방정식에서 관성항에 대응하므로 레이놀즈 응력 τ_t 는 다음과 같이 표시한다.

$$\tau_t = -\overline{\rho uv} \quad (\text{식 2.7})$$

따라서, 벽면의 영향을 고려한 전체의 전단응력은 다음과 같이 된다.

$$\tau = \mu \frac{dU}{dY} - \overline{\rho uv} \quad (\text{식 2.8})$$

그러나 벽에서 떨어진 곳은 제1항이 제2항에 비하여 매우 적으므로 전단응력은 레이놀즈 응력만으로 표시된다,

$$\tau = -\overline{\rho uv} = \eta \frac{dU}{dY} \quad (\text{식 2.9})$$

여기서, η 은 와점성계수(eddy viscosity)이다.

위의 [그림2.10]에서 보이는 바와 같이, 흐름방향유속은 바닥 근처 즉 $y=0$ 인 부근의 경계층에서 급격한 변화를 보이고, 경계층 외에서는 바닥으로부터의 거리에 따라 완만하게 증가함을 알 수 있다. 특히 이러한 경향은 유속이 빠를 때, 즉 레이놀즈 수가 클 때 더 두드러지고, 이에 [그림 2.9]에 레이놀즈 수가 큰 경우를 실선으로, 레이놀즈 수가 작은 경우를 점선으로 표시하여 비교하였다.

전단응력의 연직방향 분포를 구하기 위하여 흐름방향 평균운동량방정식을 고려해본다.

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \nu \frac{d^2 \bar{U}}{dy^2} - \frac{d\bar{uv}}{dy} \quad (\text{식 2.10})$$

위에서 ν 는 동점성계수이고, [식 2.10]은 정상 등류상태에서 가속도항은 모두 0이고, 압력차에 의한 힘 (우변 첫번 째 항)과 전단력 (우변 두번 째, 세번 째 항)이 균형을 이루고 있음을 말한다. 그런데, [식 2.10]에서 압력차에 의한 힘은 x 만의 함수이고, 나머지 전단력 항들은 y 만의 함수이므로,

$$\frac{dp_0}{dx} = \frac{d\tau}{dy} = \text{const.} \quad (\text{식 2.11})$$

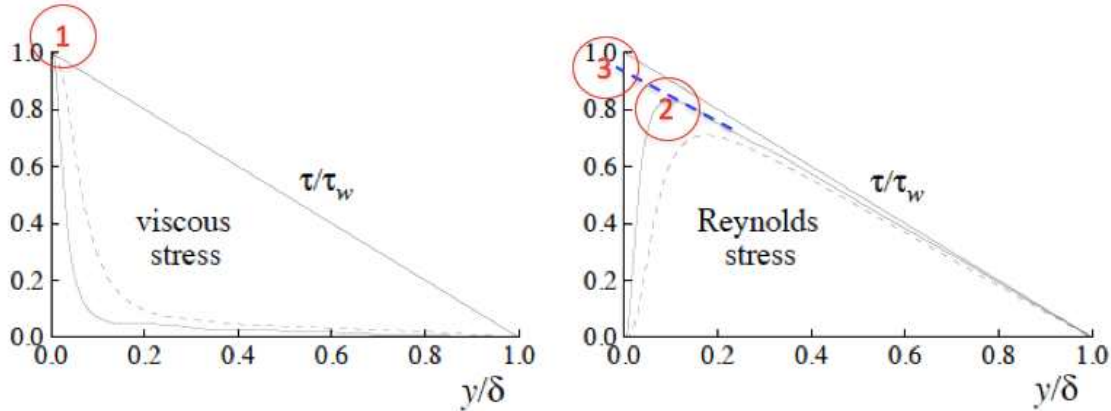
이다. [식 2.11]에서 $p_0 = \overline{p(x, 0, 0)}$ 이고,

$$\tau = \tau(y) = \rho \nu \frac{d\bar{U}}{dy} - \rho \bar{uv} \quad (\text{식 2.12})$$

은 전단응력이다. [식 2.11]에서 전단응력은 바닥에서의 거리와 선형관계를 가지는 것을 알 수 있고, 그 값이 바닥에서 최대값, 자유수면 (개수로일 경우) 또는 관 중앙 (관수로일 경우)에서 0이어야 하므로, 다음과 같이 표현할 수 있다.

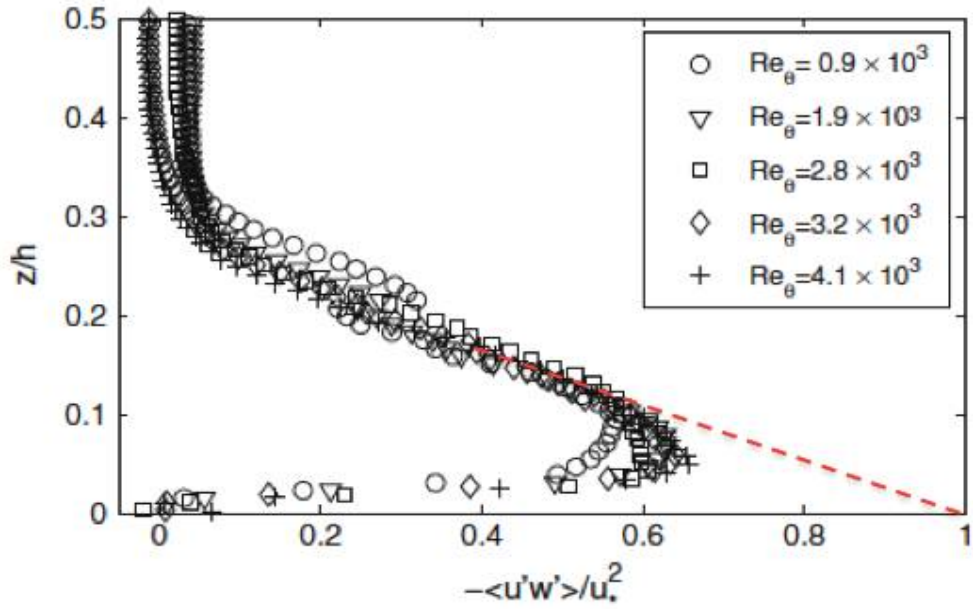
$$\tau(y) = \tau_w \left(1 - \frac{y}{\delta}\right) \quad (\text{식 2.13})$$

위의 식에서 δ 는 수심 (개수로일 경우) 또는 관의 반경 (관수로일 경우)이다. 한편, [식 2.12]에 나타난 전단응력의 두 성분 가운데, 첫 번째 항인 점성응력항의 경우, 유속경사에 비례하므로 바닥에서 최대값을 갖고 경계층 밖에서 급격히 감소한다. 한편 두 번째 항인 레이놀즈 응력은 경계층 내에서 급격히 증가하여 바닥 근처를 제외하고는 점성응력을 압도하는 것이 특징이다. 이와 같은 두 가지 전단응력의 연직분포를 아래의 그림에 도시하였다.



[그림 2.11] 바닥으로부터 거리에 따른 전단응력의 연직분포

바닥전단력 τ_w 는 [그림 2.11]의 1번으로 도시한 지점의 값에 해당하는데, 원칙상 바닥근처에서 유속경사를 정확히 측정하여 점성응력을 계산해야 하고, 이는 실질적으로는 매우 어려운 일이다. 특히 유속이 커질수록 경계층이 작아지고, 유속경사가 커지기 때문에 그 측정이 더욱 어려워진다. 그래서 일반적으로는 레이놀즈응력의 연직분포를 구하여 그 최대값으로 바닥전단력을 산정하거나 [그림 2.11]의 2번, 또는 레이놀즈 응력의 선형구간을 외삽하여 바닥과 만나는 지점으로 산정하는 방법 [그림 2.11]의 3번이 흔히 쓰인다. Tinoco와 Cowen (2013)은 개수로에서 정상등류하의 난류유속장을 정밀하게 측정하여 레이놀즈응력의 분포를 구하고 [그림 2.11]의 3번 방법을 이용하여 바닥전단응력을 산정한 바 있다 [그림 2.12].



[그림 2.12] 레이놀즈응력 분포를 이용한 바닥전단력 산정법 (Tinoco 와 Cowen, 2013)

2.2.3 Turbulent Kinetic Energy

난류가 가지고 있는 에너지로서 속도변동의 운동에너지를 말하며 난류운동에서 순간속도 u 의 변동속도 성분이 시간평균속도 $\bar{u}$ 를 기준으로 하여 불규칙하게 나타난다. 순간속도 u 는 시간평균속도 $\bar{u}$ 와 변동속도 성분 u' 의 합으로 나타난다.

$$u = \bar{u} + u' \quad (\text{식 2.16})$$

유동이 정상상태이므로 평균속도 $\bar{u}$ 는 시간에 따라 변하지 않는다.

$$TKE = \frac{1}{2} \rho (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (\text{식 2.17})$$

TKE와 전단응력과의 관계는 다음과 같다.

$$\tau_o = C_1 TKE \quad (\text{식 2.18})$$

여기서, τ_o 는 바닥전단응력, C_1 상수, ρ 는 물의 질량 밀도, u' , v' , w' 은 각각의 방향의 속도변동이다.

2.2.4 Law of Wall

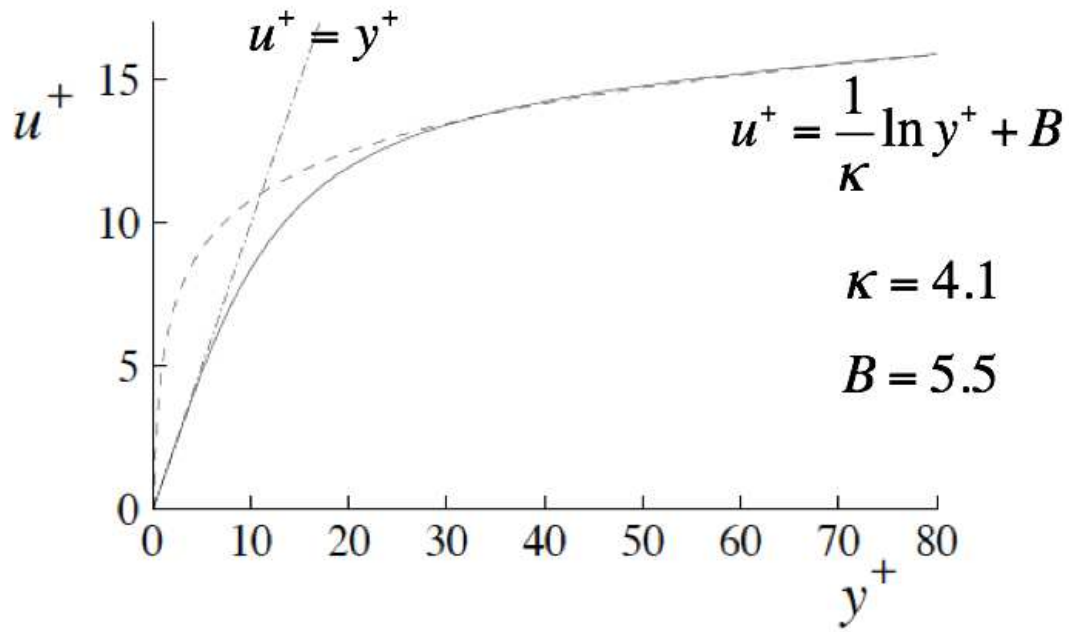
한편 평균유속의 연직분포를 활용하여 바닥전단력을 산정하는 방법도 있다. 이를 위하여 먼저 전단속도를 정의하면, 다음과 같다.

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (\text{식 2.19})$$

바닥근처의 흐름방향 평균유속과 연직좌표를 전단속도를 이용하여 무차원화 하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

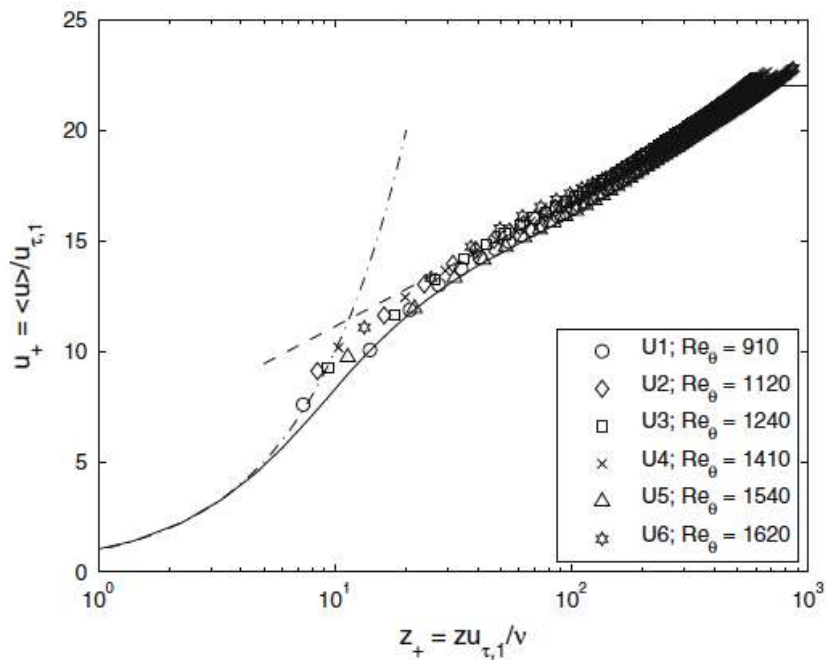
$$u^+ = \frac{\bar{U}}{u_\tau}, \quad y^+ = \frac{u_\tau y}{\nu} \quad (\text{식 2.20})$$

위의 [식 2.20]에 정의된 항들은 벽법칙 (Law of the Wall)을 따르는데, 아래의 그림에 도시하여 설명하였다.



[그림 2.13] 벽법칙

[그림 2.13]에서 볼 수 있는 바와 같이 u^+ 와 y^+ 는 y^+ 가 작을 때 선형관계를 따르고, 점차 로그관계를 갖게 되는 것을 알 수 있다. 실제 바닥전단력을 산정할 때는 평균유속의 연직분포를 구한 후, 그 결과와 로그분포의 벽법칙을 비교하여 전단속도를 구하는 방법을 쓴다. [그림 2.14]에 Pujara와 Liu (2014)가 앞에서 설명한 방법을 사용하는 예를 나타냈다.

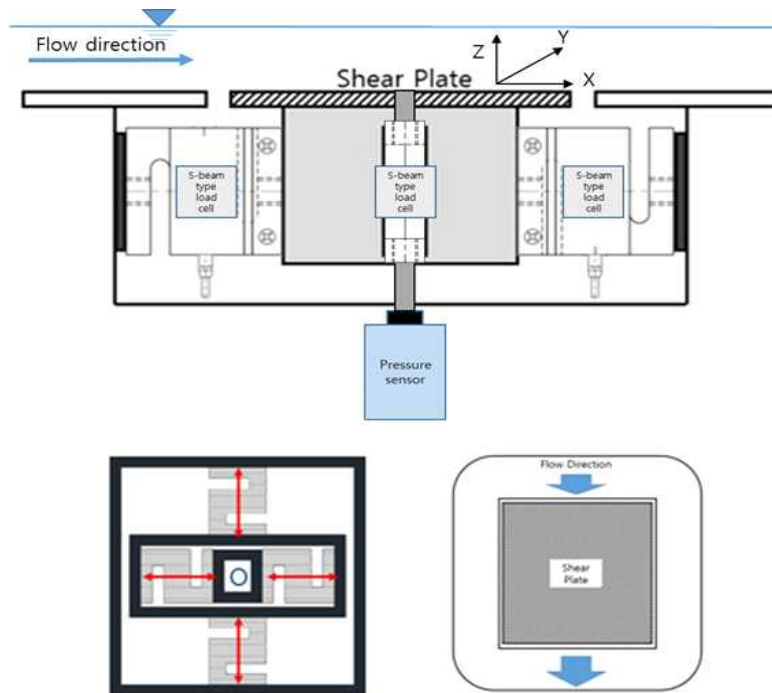


[그림 2.14] 벽법칙을 이용한 바닥전단력 산정 (Pujara 와 Liu, 2014)

2.3 3D 바닥 응력 계측기 개발

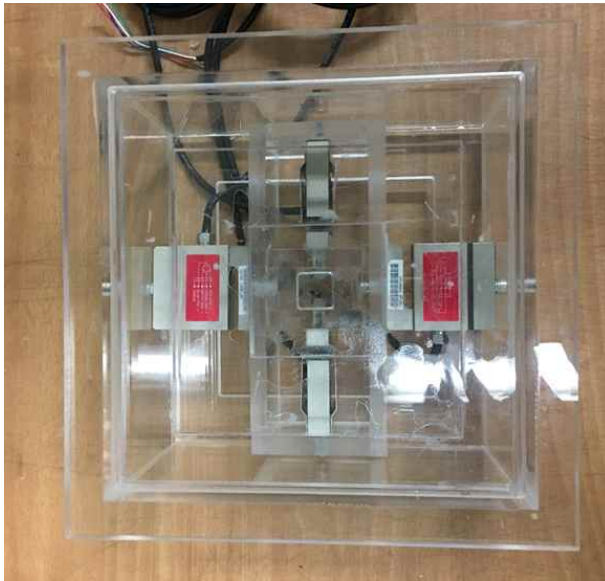
2.3.1 3D 바닥 응력 계측기 구성

고속흐름으로 인해 횡단 구조물 하류부에서 세굴 및 피해가 발생한다. 피해는 X, Y 방향의 외력과 Z방향의 ±압력이 발생하게 된다. 기존에 개발했던 이차원 소류력 측정장치는 탄성봉의 휨정도를 Eddy-current sensor로 측정하여 X, Y 방향의 바닥전단응력을 환산하는데 탄성봉의 두께에 따라 측정되는 값이 달라지며, 고속흐름 조건에서 측정 적용성이 떨어지는 단점이 있다. 따라서 고속흐름에서 안정적으로 하상 바닥에서 발생하는 X, Y 방향의 바닥전단응력과 Z방향의 ±압력 직접 측정하는 계측기를 개발하였다. 개발한 3D 바닥응력 계측기는 측정장치 보호를 위한 아크릴 하우징, X,Y 1방향 당 인장압축 로드셀 2개 총4개의 로드셀, 아크릴 전단판, 아크릴 전단판 중앙에 Z방향의 압력을 측정하는 압력계로 구성하였다. [그림 2.15]은 3D 바닥 응력 계측기 모식도이다. 무경사형 초고속 실험 수로가 아크릴로 제작되어 있어 같은 조도계수를 가지는 아크릴로 전단판을 제작하였으며, 전단판에 가해지는 유수의 힘을 로드셀이 X,Y 방향의 힘을 측정하고 압력계가 Z방향의 압력을 측정하는 원리이다. 3D 바닥 응력 계측기는 특허 출원하였으며, 특허명은 정밀 소류력 측정장치(10-2018-0061203) 이다.



[그림 2.15] 3D 바닥 응력 계측기 모식도

개발된 3D 바닥 응력 계측기는 [그림 2.16]와 같다. 계측기에 사용된 로드셀 제원은 [그림 2.17]과 같다.



[그림 2.16] 3D 바닥 응력 계측기

Model DBBP Series S-Beam 로드셀 (20kg~5t)

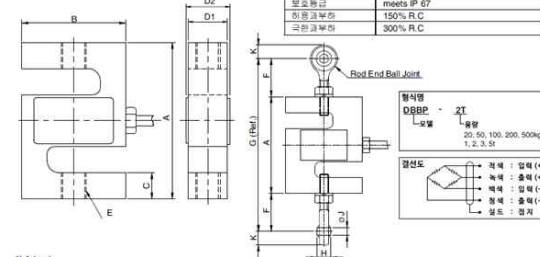


편향되며 고정밀도 (1/3000 이상)의 장점으로 국내에 설치되는 호이스케일 및 각종 시험기에 폭넓게 사용됩니다.

- 고정밀도 합금강 사용
- 무전해 니켈도금
- 방습재 봉입 처리

사양

도명	DBBP
정격중량 (R.C.)	20, 50, 100, 200, 500kg
정격출력 (R.O.)	1, 2, 3, 5ton
정격출력 (R.O.)	3.0mV/V ± 0.5%
비교정밀	± 0.05% R.O.
최소검정치소	± 0.02% R.O.
반복성	± 0.02% R.O.
크리프	± 0.05% in 20min
온도보상	± 1% R.O.
온도보상범위	-10 ~ 70°C
저온보상범위	-20 ~ 80°C
충격의 온도보상	± 0.02% LOAD/10°C
정밀의 온도보상	± 0.02% R.O./10°C
임피던스	350 Ohms ± 5 Ohms
출력저항	350 Ohms ± 5 Ohms
동전저항	2000 MOhms at 50V DC
인가전압	3 ~ 12V (Recommended: 15V (Maximum))
연결케이블	0.5mm x 3m (22AWG x 4C)
보호층	meets IP 67
허용과부하	150% R.C.
국문교부하	300% R.C.



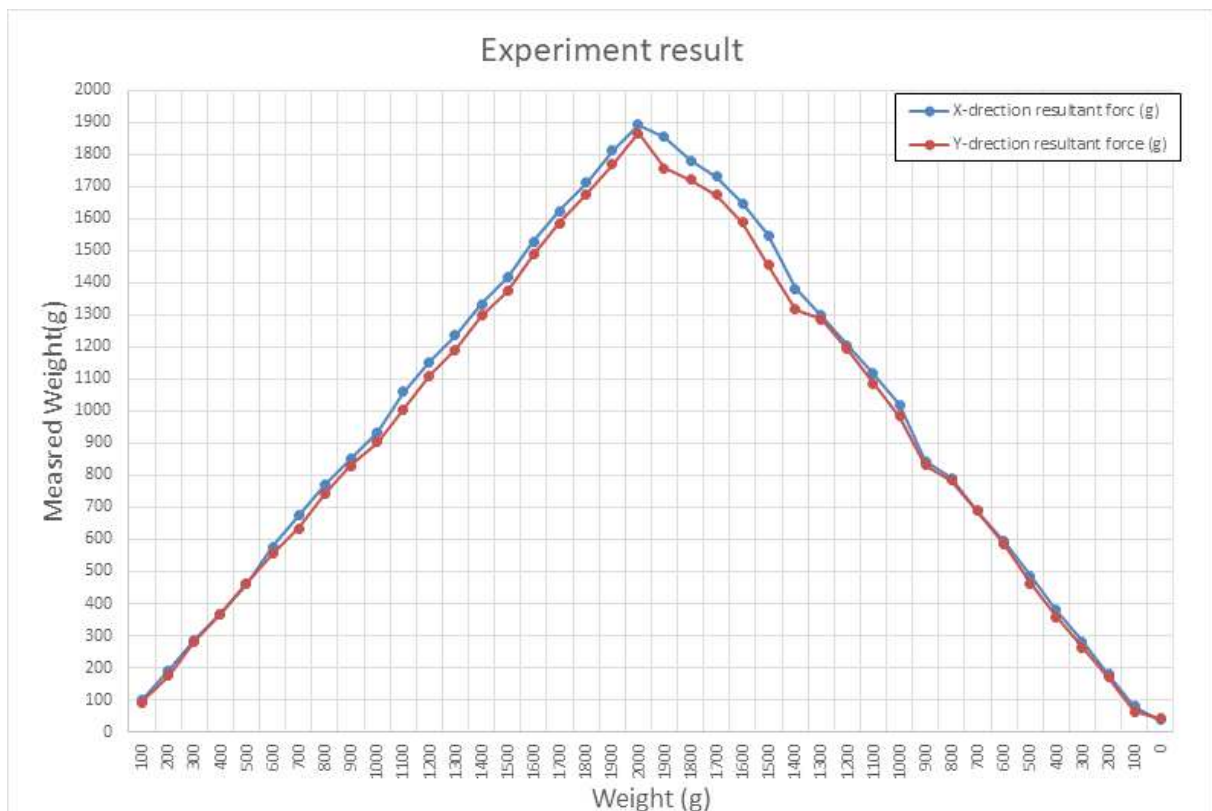
[그림 2.17] 사용된 로드셀 제원
(최대중량 20kg)

2.3.2 3D 바닥 응력 계측기 실내 검증

개발한 3D 바닥 응력 계측기를 무경사형 초고속 실험 수로에 적용 하기 전 로드셀 보정 실험을 진행하였다. 무게 추를 0 g 부터 100 g 씩 증가시켜 2000 g 까지 측정 후 100 g 씩 감소시켜 0g 까지 측정하였다. [그림 2.18]는 실내 실험한 모습이며, [그림 2.19]는 실내 실험 결과이다.



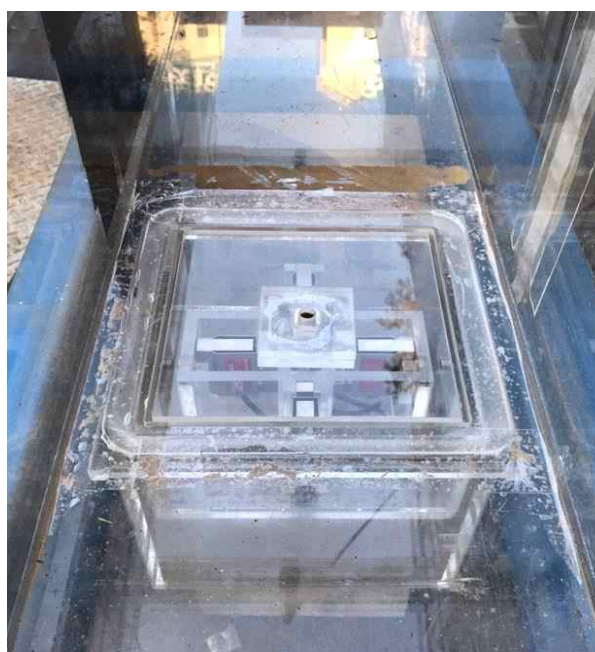
[그림 2.18] 힘의 평형 실험 장치를 이용한 3D 바닥 응력 계측기
x, y 방향 로드셀 보정 실험



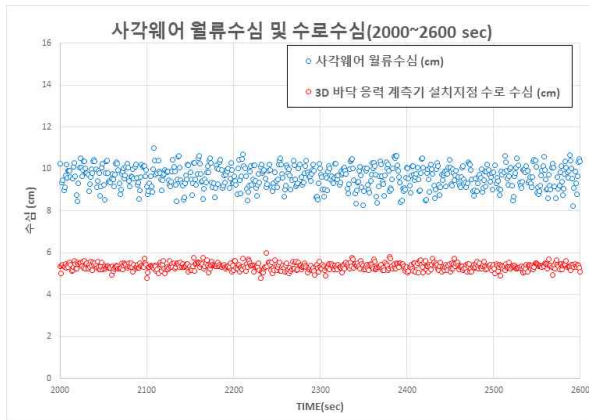
[그림 2.19] 실험 결과

2.3.3 초고속 실험 수로에 3D 바닥 응력 계측기 설치 후 실험

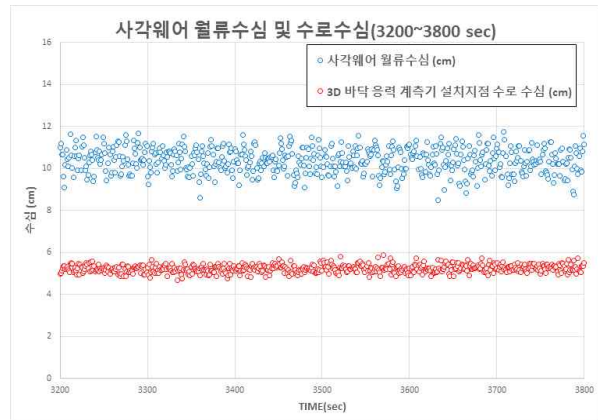
실내 실험 후 [그림 2.20]과 같이 3D 바닥 응력 계측기를 무경사형 초고속 실험 수로에 적용하여 검증 수리 실험을 진행하였다. 모든 계측기기는 동시에 수로 내 수리특성을 측정하며 실험 시작부터 종료까지 실시간으로 측정이 된다. 따라서 수로 내 수심과 공급 유량이 안정화된 측정 데이터 구간을 선정하여 분석 하였다. 유량 CASE-T1, CASE-T2의 초음파 수위계로 측정한 사각웨이 월류 수심, 수로내 수심은 [그림 2.21]과 같다.



[그림 2.20] 무경사형 초고속 실험 수로에
설치된 3D 바닥 응력 계측기



CASE-T1



CASE-T2

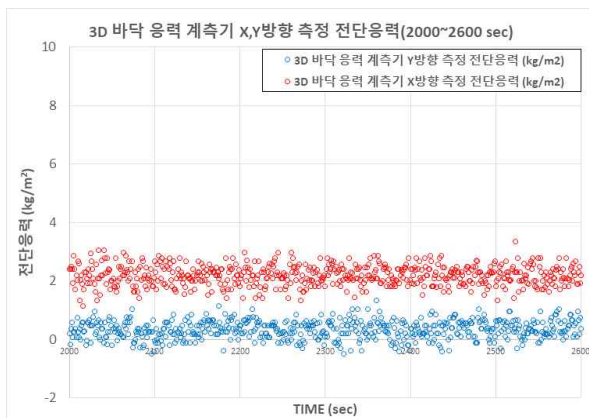
[그림 2.21] 유량 case에 따른 사각웨이 및 수로 초음파 수위계 측정데이터

[표 2.1]은 실험 CASE-T1, CASE-T2의 초음파 수위계 측정데이터 10분 평균 결과이다.

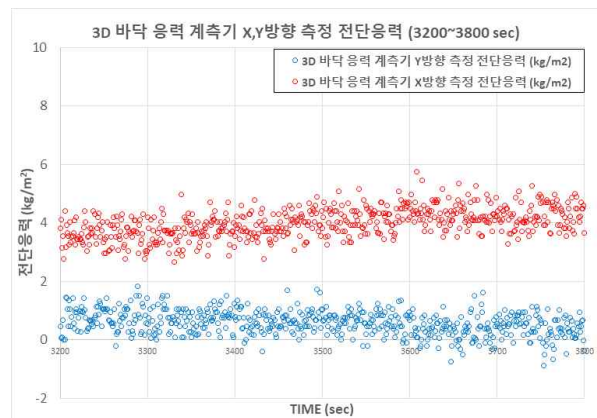
[표 2.1] 초음파 수위계 10분 평균 결과

CASE Name	사각웨이 월류수심 (m)	사각웨이 월류수심 (표준편차)	수로 수심 (m)	수로 수심 (표준편차)	유량 (m ³ /s)	유량 (표준편차)
CASE-T1	0.095	0.009	0.053	0.002	0.058	0.008
CASE-T2	0.103	0.007	0.052	0.002	0.066	0.007

[그림 2.22]은 동시간대 3D 바닥 응력 계측기가 측정한 x,y방향 CASE-T1, CASE-T2 측정데이터이며 [그림 2.23]은 z방향 CASE-T1, CASE-T2 측정된 압력이다. [표 2.2]는 실험 CASE CASE-T1, CASE-T2의 3D 바닥 응력 계측기 10분 평균 측정 결과이다.

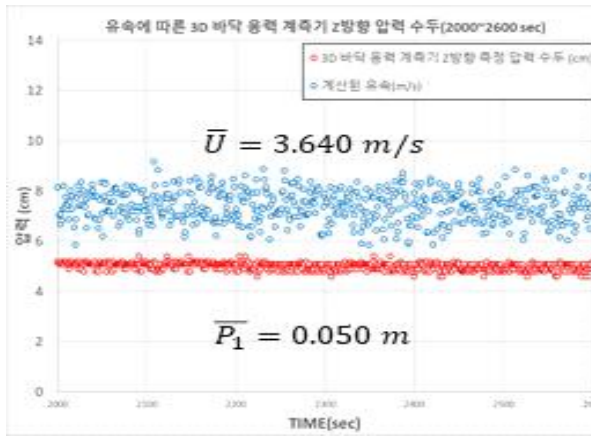


CASE-T1

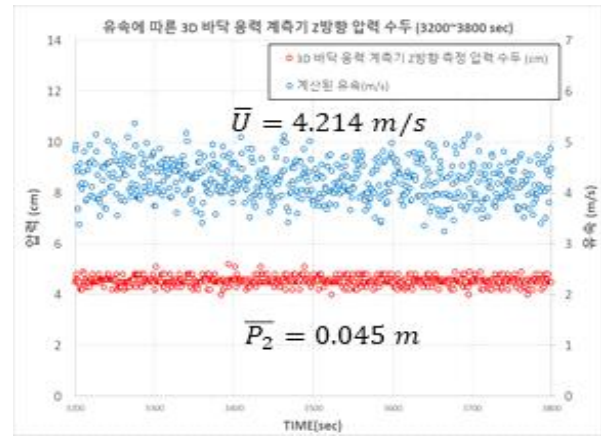


CASE-T2

[그림 2.22] 유량 case에 따른 3D 바닥 응력 계측기를 이용한 x,y방향 전단응력 측정데이터



CASE-T1



CASE-T2

[그림 2.23] 유량 case에 따른 3D 바닥 응력 예측기를 이용한 z방향 측정데이터

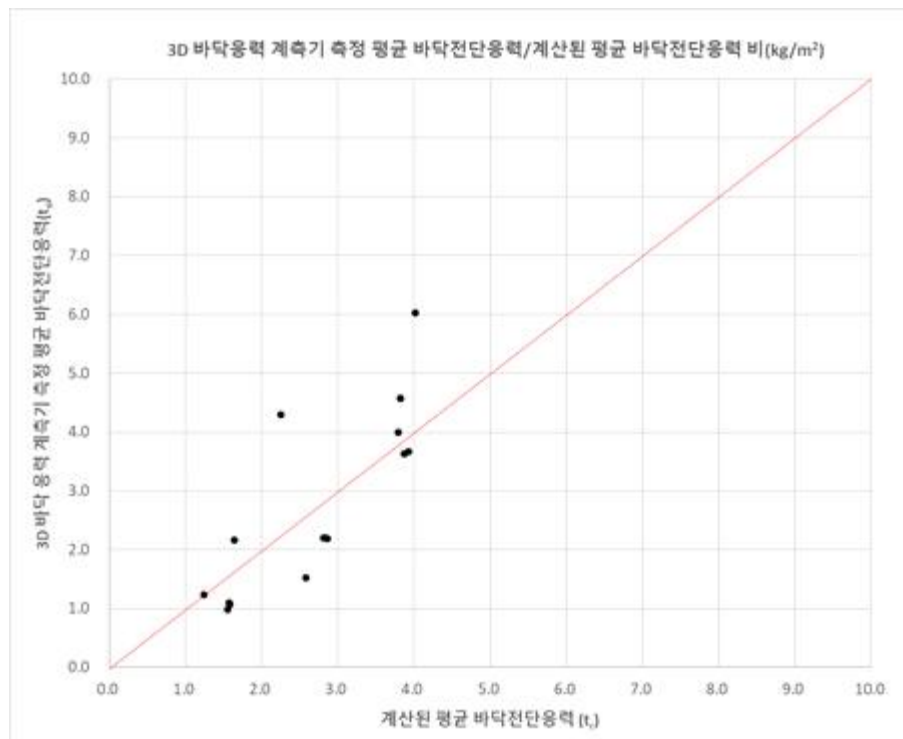
[표 2.2] 3D 바닥 응력 예측기 10분 평균 측정 결과

CASE Name	흐름 수직 방향 합력 (kgf/m ²)	흐름 방향 합력 τ_o (kgf/m ²)	유속 (m/s)	계산된 평균전단응력 τ_c (kgf/m ²)	τ_o/τ_c
CASE-T1	0.339	2.194	3.640	2.812	0.780
CASE-T2	0.586	3.999	4.214	3.790	1.055

수로 내 측정된 유속과 아크릴 조도계수 0.0085로 구간평균 바닥전단응력 경험식인 $\tau = \gamma RI$ 을 통해 산정한 바닥전단응력 τ_c 와 개발한 3D 바닥 응력 예측기로 측정한 흐름방향의 τ_o 를 비교 분석한 결과는 [표 2.3]과 같으며 측정된 τ_o 와 계산된 τ_c 의 비는 [그림 2.23]와 같다.

[표 2.3] 3D 바닥 응력 예측기

측정 평균 유속 (m/s)	측정 평균 바닥전단응력 τ_o (kgf/m ²)	계산된 평균 바닥전단응력 τ_c (kgf/m ²)	τ_o/τ_c
2.955	0.989	1.557	0.635
2.967	1.101	1.571	0.701
2.976	1.075	1.580	0.681
3.018	2.167	1.636	1.325
3.453	1.521	2.584	0.588
3.539	4.294	2.252	1.907
3.640	2.194	2.812	0.780
3.652	2.197	2.831	0.776
3.673	2.191	2.864	0.765
4.214	3.999	3.790	1.055
4.256	3.628	3.870	0.938
4.284	3.669	3.925	0.935
4.317	6.027	4.011	1.503
4.370	4.570	3.820	1.196

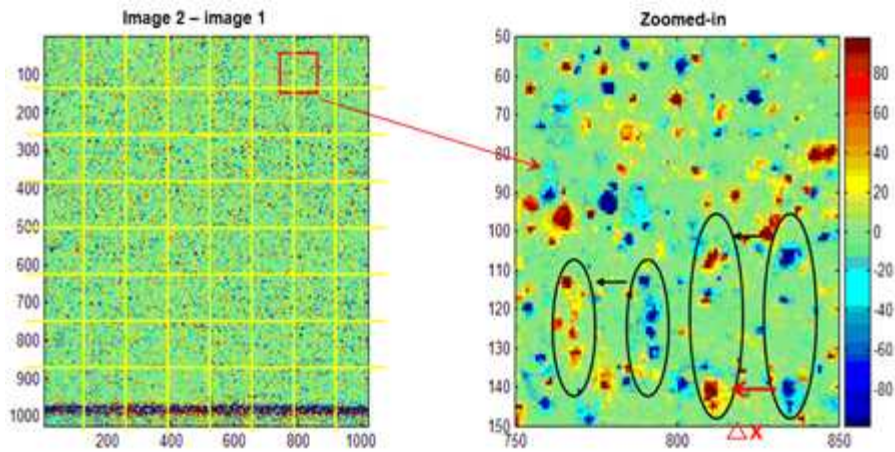


[그림 2.23] τ_o/τ_c 비

개발된 3D 바닥 응력 예측기는 x,y,z 방향으로 실시간으로 값을 측정하고 있으며 보다 많은 실험으로 비교 검증할 필요가 있다고 판단되며 정밀 소류력 측정장치 (10-2018-0061203) 로 특허출원 하였다.

3. 초고속입자영상유속계(ULTRA-PIV) 개발

3.1 PIV의 원리

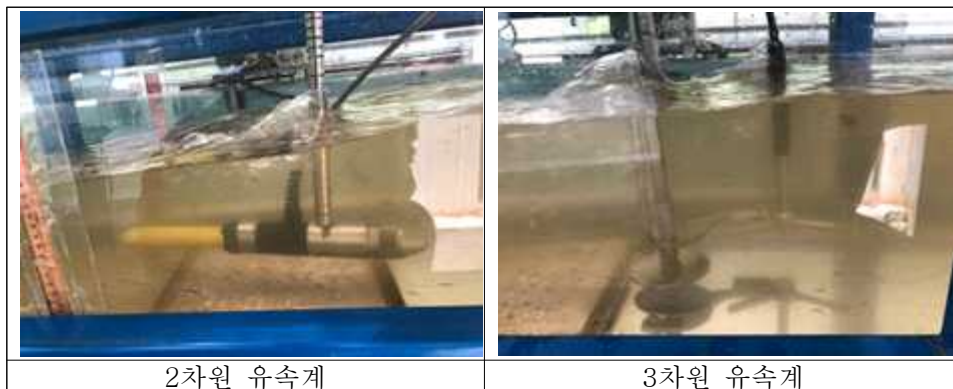


[그림 3.1] PIV 기본 원리

PIV의 기본 원리는 [그림 3.1]과 같이 주어진 시간간격(Δt)동안 유체와 함께 움직인 미세한 입자들의 변위정보를 카메라와 같은 영상입력장치를 이용하여 화상데이터로 저장한 후, 디지털 화상처리기법을 이용하여 입자변위를 계측하고 시간간격(Δt)로 나누어줌으로써 속도를 추출하는 것이다.

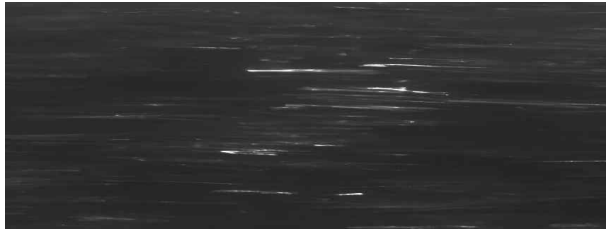
3.2 ULTRA-PIV 필요성

본 연구에서 PIV를 사용하는 가장 큰 이유는 고속흐름에서 유속을 측정하기 위함도 있지만, 연구의 목적에 맞게 5 m/s 이상의 유속을 발생시킬 경우, 수로를 제외한 측정장치를 유체 내에 설치하게 되면 유속의 교란뿐만 아니라 측정장치의 파손까지 발생하게 된다. 때문에 흐름에 방해되지 않는 유속 측정을 위해 레이저 시트와 입자를 이용한 유속 산정기법인 PIV를 이용하여 유속을 측정할 필요가 있다. [그림 3.2]는 고유속에서 유속 측정장치를 고속수로내 설치하였을 때 측정장치 하류부에서 교란이 발생되고 있는 장면이다.

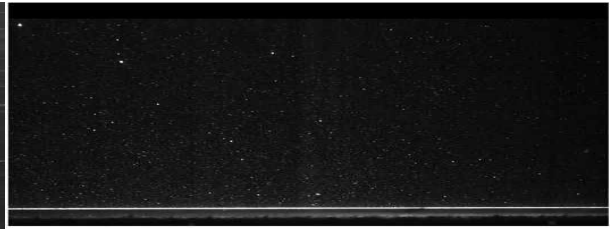


[그림 3.2] 고속수로 내 유속 측정장치 설치시 흐름 교란

또한 기존 보유한 고속 카메라로 고유속에서 500 FPS 촬영 시 [그림 3.3]과 같이 잔상이 발생하며 이 잔상을 이용한 유속측정도 가능하지만 빛의 강도 및 길이에 대한 추가적인 분석기법을 필요로 한다.

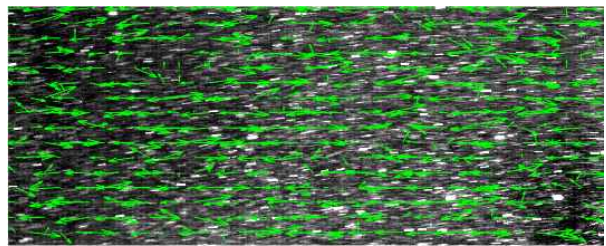
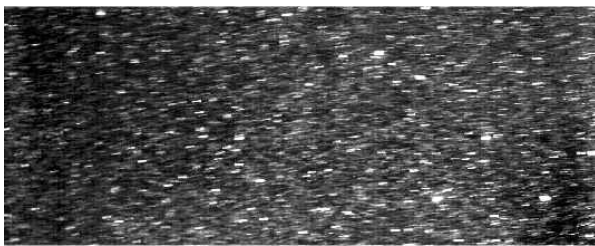


[그림 3.3] 500 fps 촬영 영상



[그림 3.4] 5000 fps 촬영 영상

잔상을 효과적으로 제거하는 방법으로 간단하게 [그림 3.4]과 같이 FPS를 증가시키기는 방법이 있다. FPS를 증가시키기 위해서는 성능이 좋은 초고속카메라가 구매하거나 카메라의 해상도를 반으로 줄이면 FPS는 2배로 증가하게 된다. 따라서 최대 160,000 FPS 까지 촬영가능한 Mini UX50 고속 카메라를 구입하였다. 그 결과 잔상 저감 효과로 효과적인 분석이 가능하게 되었다.



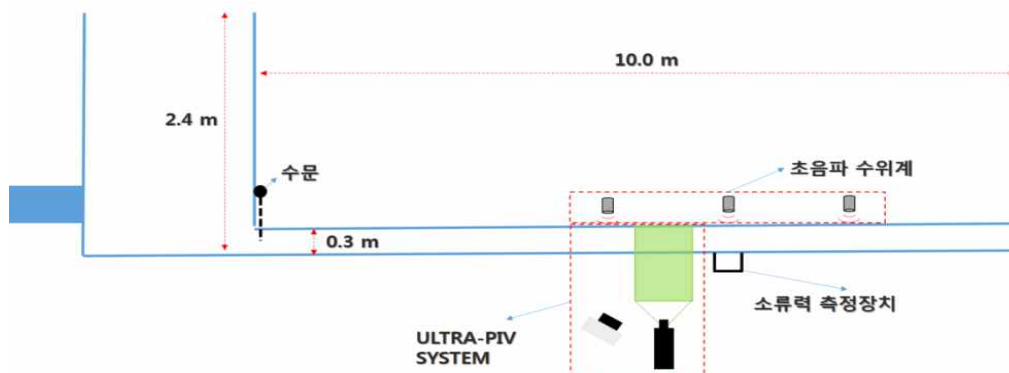
[그림 3.5] openpiv를 이용한 영상 분석(1000 FPS)

[그림 3.5]과 같이 기존에 보유한 고속카메라와 레이저를 이용하여 openpiv를 통해 분석을 시도하였으나, 자체적인 필터링을 이용하기에는 필터의 효과가 미비하였기 때문에 본 연구에서는 ULTRA-PIV 코드를 제작하였다.

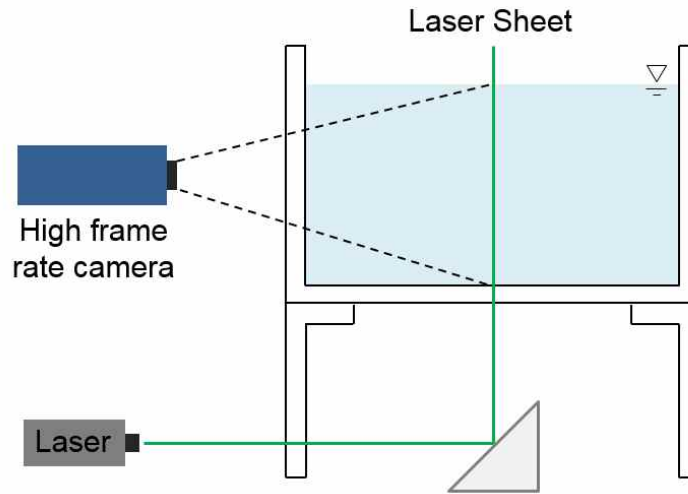
3.3 ULTRA-PIV 구성

본 연구에서는 유속이 5m/s 이상이고, 유사가 있는 흐름에서 안정적으로 유속장을 정밀하게 측정할 수 있는 계측장비를 개발하였다. 일반적인 PIV 시스템에서 요구되는 복잡한 동기화 장치를 제거하고, 연속된 광원 및 초고속 카메라 시스템을 이용하여 성능은 근본적으로 제고하고 사용하기에는 간단한 새로운 초고속 PIV 시스템을 구축하였다.

또한 비교란성 유속 측정장치이기 때문에 3D 바닥 응력 계측기 측정에 방해가 되지 않는 점을 이용하여 3D 바닥 응력 계측기 앞쪽에 위치를 선정하여 측정하였다. [그림 3.6], [그림 3.7]은 초고속입자영상유속계 설치 위치 및 모식도 이다.



[그림 3.6] 초고속입자영상유속계 설치 위치 및 모식도



[그림 3.7] 초고속입자영상유속계 설치 위치 및 모식도

전체적인 구성은 PIV에 있어서 필수적인 레이저 포인터와 초고속 카메라, 레이저 시트의 각도를 바꿔줄 레이저 거울(Laser, High frame rate camera, laser mirror)만을 이용하여 구성되어있다. [그림 3.8]은 초고속입자영상유속계 설치 전경이다.



[그림 3.8] 초고속입자영상유속계 설치 전경

개발된 초고속입자영상유속계는 일반적인 PIV에 비해 5 m/s이상의 고유속에서 분석을 진행하기 위해서 초당 5000 frame 이상을 촬영할 수 있는 초고속 카메라를 이용하여 영상을 촬영하고, 야외에서 실험을 진행하기 때문에 강한 watt의 레이저로 유속장을 형성하여 PIV를 기법을 통해 유속을 측정한다. 초고속입자영상유속계에 구성된 카메라는 [그림 3.9]이며 제원은 [표 3.1]이다. 레이저는 [그림 3.10]이며 제원은 [표 3.2]이다.



[그림 3.9] Mini UX50 초고속카메라



[그림 3.10] RayPower 2000 레이저

[표 3.1] 카메라 제원

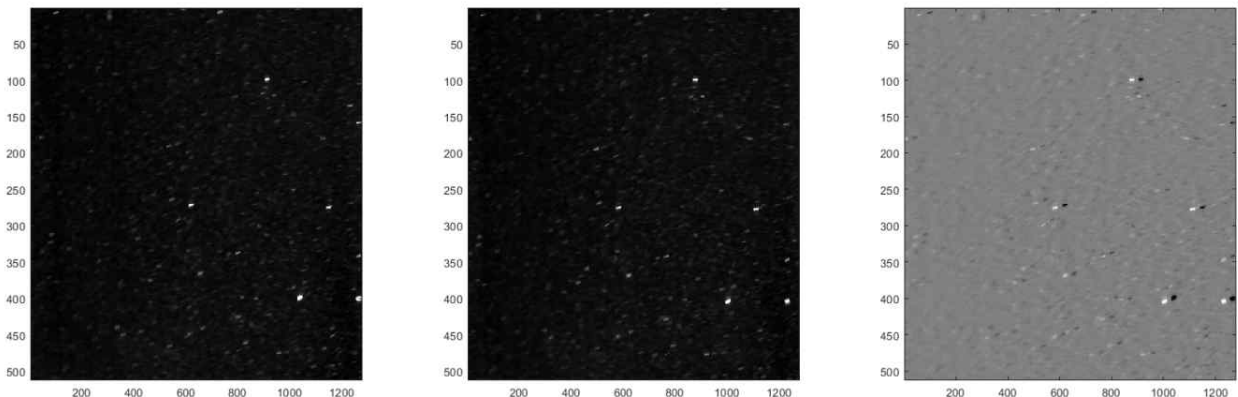
Camera Performance Specifications	Mini UX50
Full Frame Performance	2000 fps 1280 X 1024 pixels
Maximum Frame Rate	Type 160K: 160,000 fps (1280 X 8 pixels)
Minimum Exposure	Global electronic shutter 3.9us (1.01us at maximum frame rates)
Dynamic range ADC	12-bit monochrome
Memory capacity Options	16GB : 8,734 frames at full resolution
Memory Partitions	Up to 64 memory segments
ISO 12232 Ssat Sensitivity	ISO 10,000 monochrome
Lens Mount	F-mount (G-type lens compatible) and C-mount provided
Camera Mountings	4 x 1/4 - 20 UNC(base ant top), 4 x M5(base)
Camera Body	120 (H) x 120 (W) x 93 (D) mm 1.5 kg
AC Power (with supplied adapter)	100 to 240V, 50 to 60Hz

[표 3.2] 레이저 제원

Model name	RayPower 2000
Model number	9080 X 0552
Output power	2000 mW
Laser class	4
Power stability	< 10%
Wavelength	532 nm
M2 factor	< 2
Beam divergence, full angle	< 1.2 mrad
Beam diameter (at output)	~ 2 mm
Power supply	100~240 VAC, 3 A max, 50~60 Hz
TTL modulation frequency, maximum	10 kHz
Operating temperature	10°C ~ 35°C
Dimensions laser head	214 mm (L) x 88 mm (W) x 74 mm (H)
Weight laser head	1.6 kg
Dimensions power supply	277 mm (L) x 145 mm (W) x 106 mm (H)
Weight power supply	2.6 kg

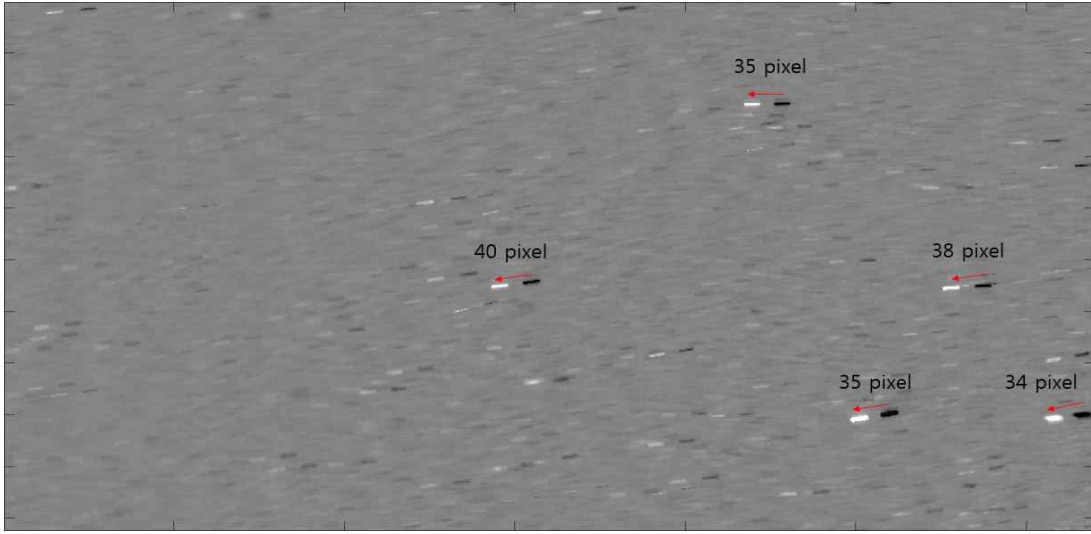
3.4 ULTRA-PIV 분석

[그림 3.11]은 초고속에서 PIV 분석을 위해 개발한 코드의 분석 결과이다. 먼저 좌측부터 보면 초당 1000 Frame을 촬영하는 카메라를 기준으로 1013번째 촬영된 Frame의 입자 위치이고, 중앙의 사진은 1014번째 촬영된 Frame에서 입자들의 위치이다. 육안으로 구분하기 힘들지만 좌측과 중앙의 사진을 겹친 후 색도간 연산을 통해 (우측이미지-좌측이미지)의 결과를 보면 우측 이미지와 같은 결과를 얻을 수 있다. 우측 결과물은 1013번째 Frame에서 입자위치가 1 Frame 동안 이동한 입자의 위치를 얻을 수 있다. 또한 이동한 입자의 거리를 시간단위로 환산하게 되면 유속을 산정할 수 있다.



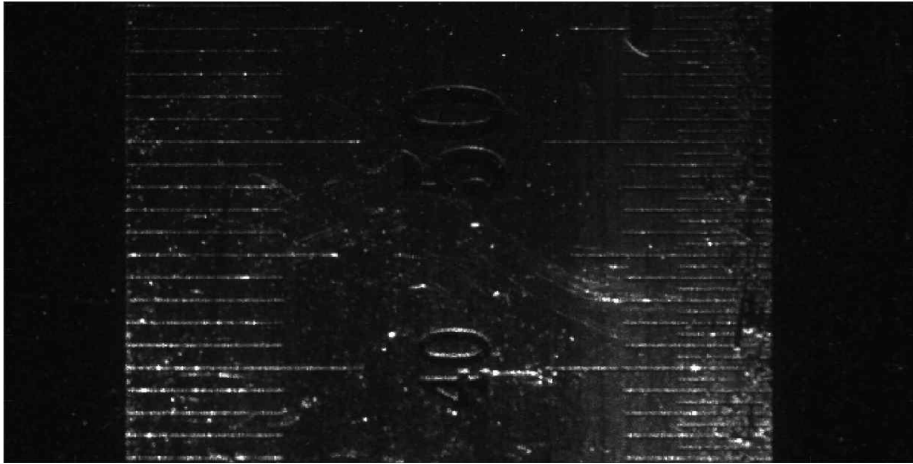
[그림 3.11] Matlab code를 이용한 영상 분석(1000 FPS)

좌측(1/1000 s, image1), 중앙(좌측 기준 1/1000 s 이후, image2), 우측(image1->image2)



[그림 3.12] Matlab code를 이용한 입자 이동 산정

유속을 산정하는 방법은 [그림 3.12]와 같이 1 Frame 동안 이동한 입자의 거리를 먼저 Pixel 단위로 산출한다.



[그림 3.13] mm per pixel scale

다음 같은 조건(해상도 및 촬영 위치 등)에서 정밀한 자를 촬영하여 mm단위와 pixel단위의 보정을 한다. 본 실험에서는 10 mm = 70 pixel 의 결과로 환산 계수는 0.143로 산출되었다.

환산계수를 산출한 후 마지막으로 시간 단위를 이용하여 산정하게 되면, 본 연구에서 개발한 Matlab code의 전체적인 개념정리는 마무리된다. [그림 3.11]부터 [그림 3.13]까지 유속을 산정하면 아래와 같다.

$$pixel \times \text{환산계수} (mm/pixel) \times \frac{1}{\frac{1}{1000}s} \times \frac{1m}{1000mm} \quad (\text{식 3.1})$$

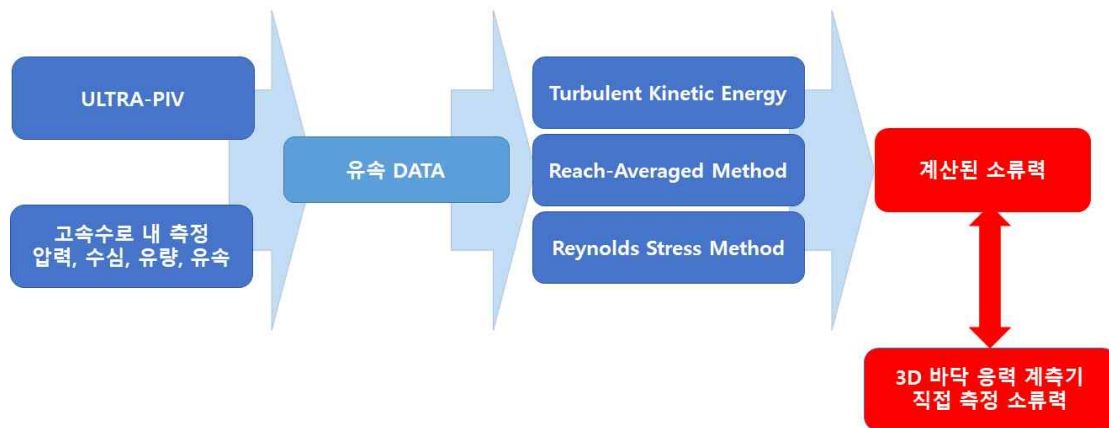
최종적으로 환산된 결과는 약 5.01 ~ 5.72 m/s의 유속이 산정되었다.

이러한 결과는 1 Frame에서 발생한 개념적인 결과이고, 이상치 제거, 노이즈 필터링, 조도, 채도 등의 다양한 필터링을 통해 정밀한 분석이 가능하다. 등록된 S/W 명칭은 5 m/s 이상의 초고유속의 최적화 Ultra-piv(울트라피아이브이) 해석 프로그램 (C-2018-034924) 이다.

4. 초고속 수리구조 해석 프로그램 개발

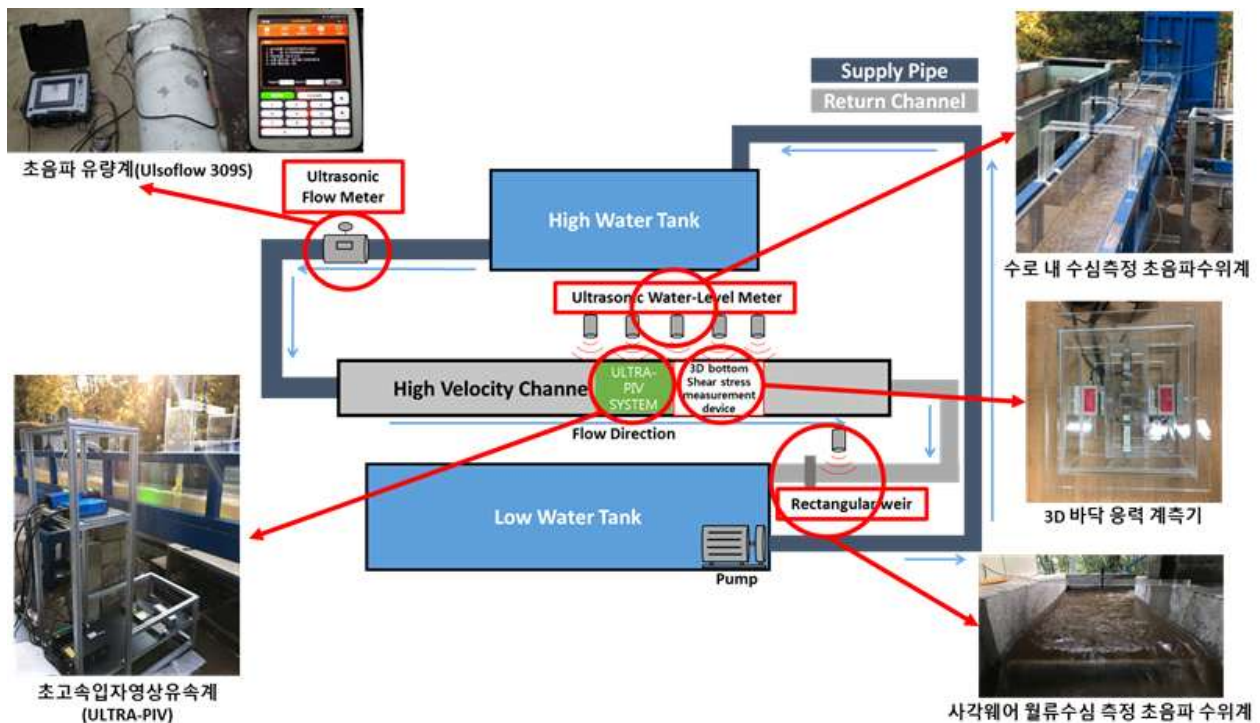
4.1 초고속 수리구조 해석 프로그램

1차년도에 개발된 초고속 실험 수로에서 초고속입자영상유속계(ULTRA-PIV)로 측정된 영상을 정확하게 분석하고, 수위계, 유량계 및 3D 바닥 응력 계측기와 연계하여 실시간으로 데이터를 취득 및 분석할 수 있는 종합적인 수리구조 해석 프로그램 개발하였다. S/W 명칭은 초고속 수리 구조 해석 프로그램 (C-2019-032754) 이다.



[그림 4.1] 프로그램의 구성

인제대학교에 구축된 초고속 실험 시스템은 [그림 4.2]와 같다. 초음파 유량계의 측정 유량, 초음파 수위계의 측정 수로 수심 및 사각웨어 월류수심, 초고속입자영상유속계의 측정 유속, 3D 바닥 응력계측기로 측정된 바닥전단응력 값을 비교 분석 가능하도록 하였다.



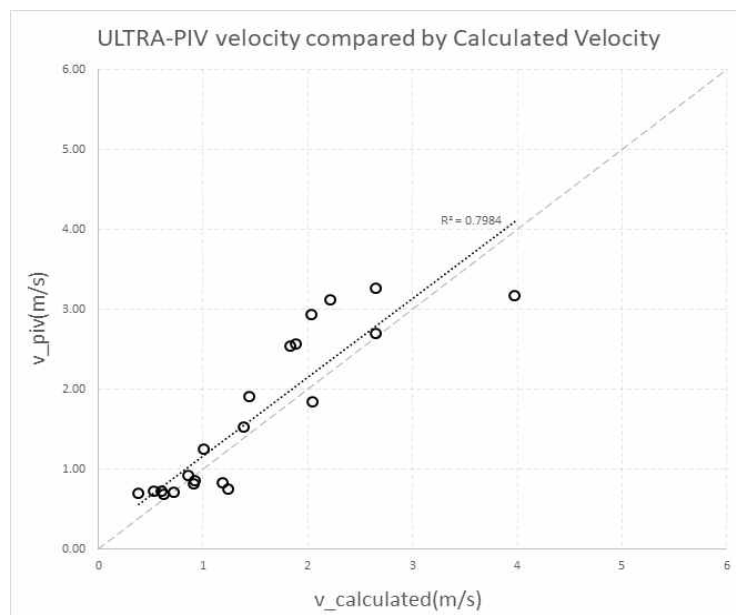
[그림 4.2] 초고속 실험 시스템

초고속입자영상유속계(ULTRA-PIV)로 촬영한 영상을 초고속 수리구조 해석 프로그램으로 해석하면 Vector Diagram, 흐름방향(U) 유속, 흐름연직방향(V) 유속, 흐름방향 난류항(u'), 흐름연직방향 난류항(v')이 분석된다.

분석된 흐름방향 난류항(u'), 흐름연직방향 난류항(v')의 곱이 Reynolds stress 이다. 두 난류항의 곱은 바닥 근처에서 최대값을 찍고 다시 감소하게 되는데 최대점을 간접적으로 바닥전단응력이라 유추 할 수 있다. 따라서 3D 바닥 응력 계측기를 사용하여 직접 측정한 바닥전단응력과 초고속 수리구조 해석 프로그램으로 분석한 Reynolds stress 와 비교 가능하다.

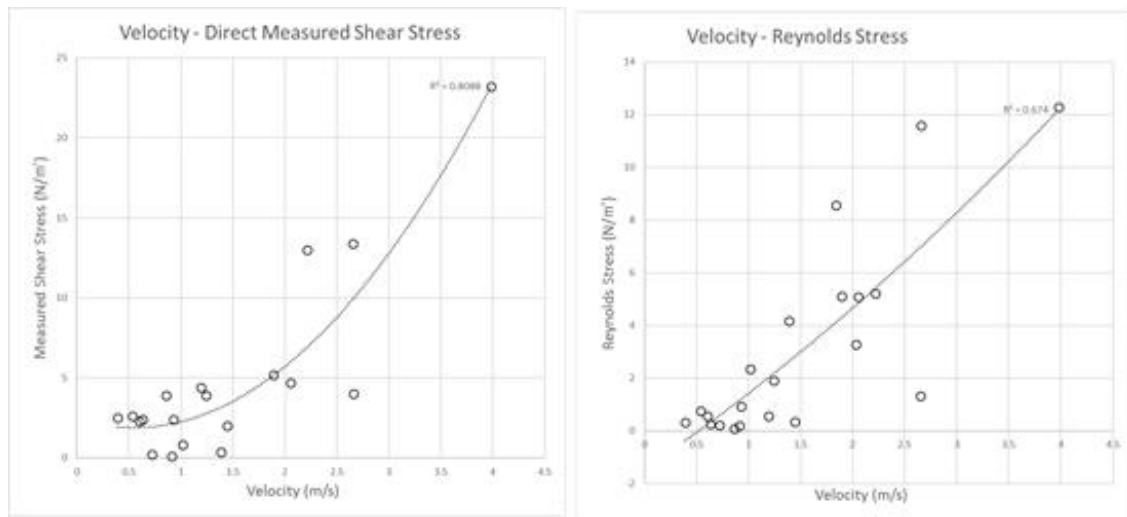
4.2 초고속 수리구조 해석 프로그램 결과와 이론 비교

[그림 4.3]은 PIV 기법을 이용하여 산출된 유속과 공급 유량과 유하면적과의 관계를 통해 산출된 유속과 비교한 결과이다. 비교 결과 유사한 결과를 나타내며 단면 평균 유속에 비해 ULTRA-PIV에 의한 평균유속이 다소 높게 산출되는 결과를 보였다.

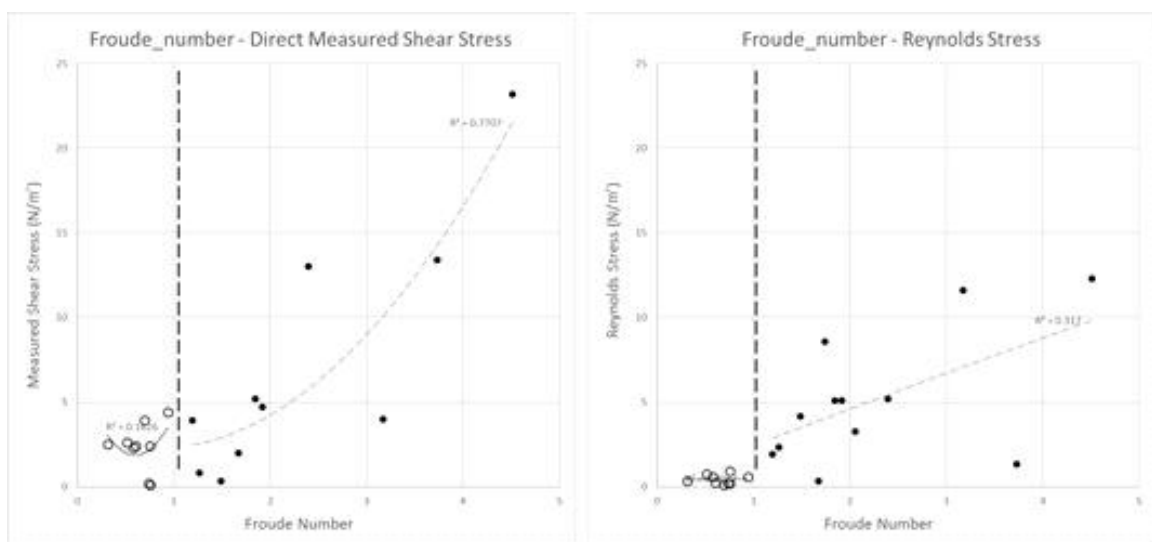


[그림 4.3] 계산된 유속과 PIV측정 유속 비교

ULTRA-PIV를 통해 산출된 유속과 공급 유량과 유하면적과의 관계를 통해 산출된 유속과 비교한 결과에서 추가적으로 $Fr = 1$ 을 기준으로 상류와 하류 구간을 나누어 비교하였다. $Fr < 1$ 의 상류 흐름에서는 다소 데이터가 집약되어 있는 것으로 보이지만, 단면 평균 유속과 PIV에 의해 산정된 Laser Sheet의 범위에 해당하는 평균유속은 다소 차이가 있는 결과를 보였다. $Fr > 1$ 의 하류 조건에서는 상류조건에 비해 2가지 유속이 유사한 경향을 보이며 PIV결과가 다소 높게 산정되는 결과를 나타냈다.



[그림 4.4] 속도에 따른 전단 응력(측정된 전단응력(좌), PIV에 의한 레이놀즈 응력(우))



[그림 4.5] Froude Number에 따른 전단 응력(측정된 전단응력(좌), PIV에 의한 레이놀즈 응력(우))

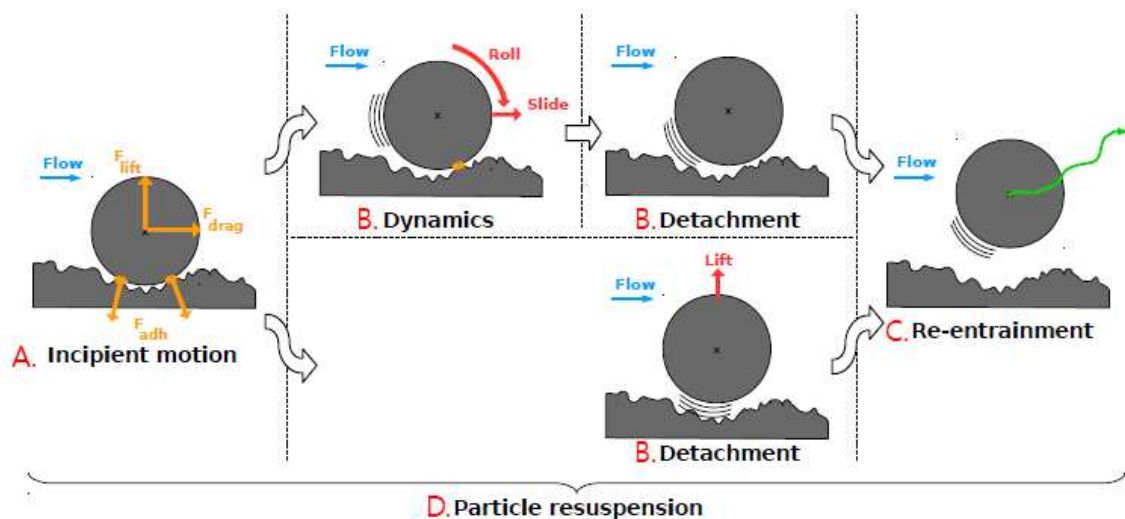
본 연구에서 개발된 3D 바닥 응력 계측기와 PIV 기법을 이용하여 Reynolds stress를 산정하여 두가지 요소에 대해 비교하였다. 유속에 따른 3D 바닥 응력 계측기의 측정 결과 경우 장치의 측정 값과 PIV에 의해 산정된 값은 다소 차이가 있는 것을 볼 수 있다. 측정장치의 경우 R^2 값이 다소 높은 결과를 보였다. Reynolds stress의 경우 R^2 값은 측정장치에 비해 낮지만 난류성분에 의해 이상치가 발생하는 것을 제외하면 더 선형에 가까운 결과를 나타낸다.

5. 유속별, 이동상 입자별 제트세굴 수리특성 분석

5.1 입자 재부상 메커니즘의 이론적 배경

하상에서 다양한 부유가 발생한다. 이에 따라 부유 입자와 관련된 용어가 변하므로 부유 메커니즘에 대한 혼란을 야기한다. 이러한 혼동을 피하기 위해 국외의 경우 주요 개념을 다음같이 정의하고 있다.

1. 고착/부하/부착 입자는 특정 위치에서 표면과 접촉하는 입자에 해당(움직이지 않음)
2. 정의부착된 입자는 표면과 접촉하지만 움직일 수 있음(따라서 점착 입자를 포함)
3. 분리된 입자는 표면과의 접촉이 끊어진 부착입자의 경우
4. 점착력은 입자와 표면 사이의 접촉력을 말함
5. 응집력은 입자 사이의 접촉력을 지정

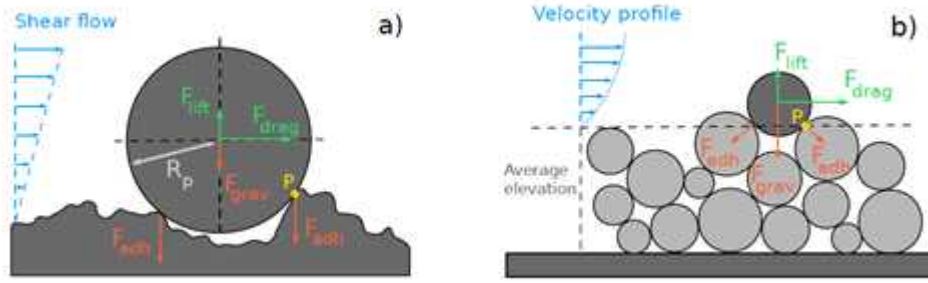


[그림 5.1] 입자 재부유에 대한 형태와 용어에 대한 모식도 (Particle resuspension from complex surfaces: current knowledge and limitations, 2018)

이러한 기본적인 개념과는 별도로, 입자 부유 특성과 관련하여 다음[그림 5.1]과 같은 용어가 사용된다.

- A. 입자초기운동은 점착력과 움직이는 힘 사이의 균형의 파열로 입자가 고착되는 움직임을 일으킴. 고착입자의 이탈은 표면(부착된 입자)이나 흐름(분리된 입자)에서 그 움직임을 유발
- B. 입자 이동은 실제로 표면에서 분리될 때까지 부착된 입자의 움직임과 관련 있음
- C. 입자 재침전은 분리가 끝난 후, 즉 벽 근처 영역에서 입자가 움직이는 것을 말함
- D. 입자 재 서스펜션(particle resuspension)은 세 가지 현상(즉, 분리, 이동, 재침입) 모두를 포괄하는 총칭

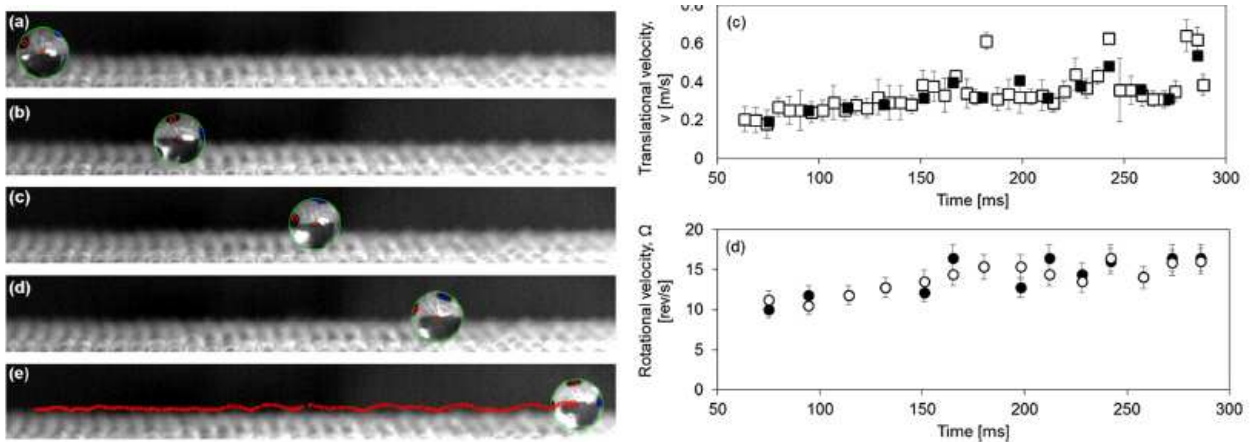
이러한 정의를 통해 부착된 입자와 분리된 입자를 구별할 수 있으며 입자 재서스펜션 (즉, 초기 운동, 이동 및 재침입)에서 3 가지 메커니즘을 명확하게 구분할 수 있도록 정의하고 있다.



[그림 5.2] 유체 흐름이 입자에 작용하는 주요 힘, 표면에 달라 붙는 입자에 작용하는 힘 a) 입자가 매끈한 표면의 작용, b) 입자가 다중 구체로 붙어 있는 경우 (Particle resuspension from complex surfaces: current knowledge and limitations, 2018)

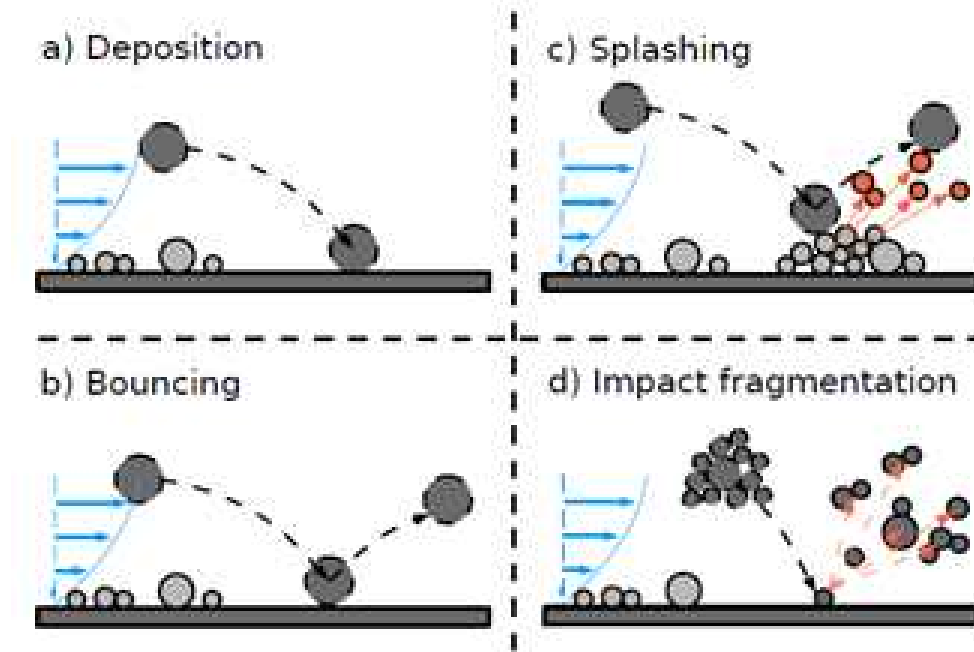
롤링과 슬라이딩 모션을 구별하는 것이 실험적으로 쉬운 일이 아니므로 실제로 두 메커니즘의 상대적 중요성을 추정하는 것이 중요하다. 이러한 구별은 입자 표면의 마커와 결합된 이미지 처리 기술을 사용하여 가능하다. 이러한 이유로, 넓은 범위의 입자 크기에 대해 롤링, 슬라이딩 운동을 하는 입자의 비율을 추출하기 위해 이러한 기술을 사용하여 국외에서는 실험을 수행하였다.

기관에서 유리 비드(7:00 0:35 mm 직경 2:00 0:1 mm)의 인큐베이터 운동 실험 사진은 [그림 5.3]과 같다.



[그림 5.3] (왼쪽) 동작 중 촬영된 스냅샷: 적색 및 블러드 원은 이미지 처리에 사용된 마크의 중심을 나타냄 (e)에 있는 빨간색 십자가는 비드 센터의 궤적을 나타냄 (오른쪽) 이러한 스냅샷에서 추출한 변환 및 회전 속도에 해당함 (Particle resuspension from complex surfaces: current knowledge and limitations, 2018)

염분 입자가 표면에 충격을 준 후 발생 가능한 다양한 결과는 [그림 5.4]와 같다.



[그림 5.4] 염분 입자가 표면에 충격을 준 후 발생 가능한 다양한 결과를 보여주는 모식도 (Particle resuspension from complex surfaces: current knowledge and limitations, 2018)

5.2 유리구슬 실험

1차년도에 개발된 초고속 실험 수로, 3D 바닥 응력 계측기 및 초고속입자영상유속계 (ULTRA-PIV)를 이용하여 다양한 유속, 하상입자 입경 특성별 수리 실험을 통해 정량, 정성적 수리특성 분석하였다.

하상 주 재료인 모래의 비중은 약 2.4~2.6 이다. 유속별, 이동상 입자별 제트세굴 수리특성 분석을 위해 모래와 유사한 비중을 가진 유리구슬을 통해 세굴 실험을 진행하였다. 유리구슬 비중은 약 2.4~2.7 이며, 직경 1 mm, 5 mm, 10 mm 각 입자별 실험을 진행하였다. 직경별 유리구슬의 입자의 무게를 측정한 후 초고속 실험 수로에 유리구슬을 설치하였다. 실험은 1차년도에 개발된 초고속 실험 수로에서 수문 14 cm 개방, 공급 유량을 점차적으로 증가시켜 연속적으로 실험을 진행하였다.

초고속 실험 수로 내 유리구슬 설치 전 유리구슬의 무게를 측정하였다. 직경 1 mm 유리구슬 1개 무게 0.005 g, 10개 무게 0.058 g 이다. 측정하는 저울의 최소 측정무게가 1×10^{-3} g이다. 따라서 유리구슬 1개의 무게는 약 0.0058 g 으로 나타났다. 아래 [그림 5.5]은 측정 결과이다.



직경 1mm



1개 무게



10개 무게

[그림 5.5] 직경 1 mm 유리구슬



실험 전

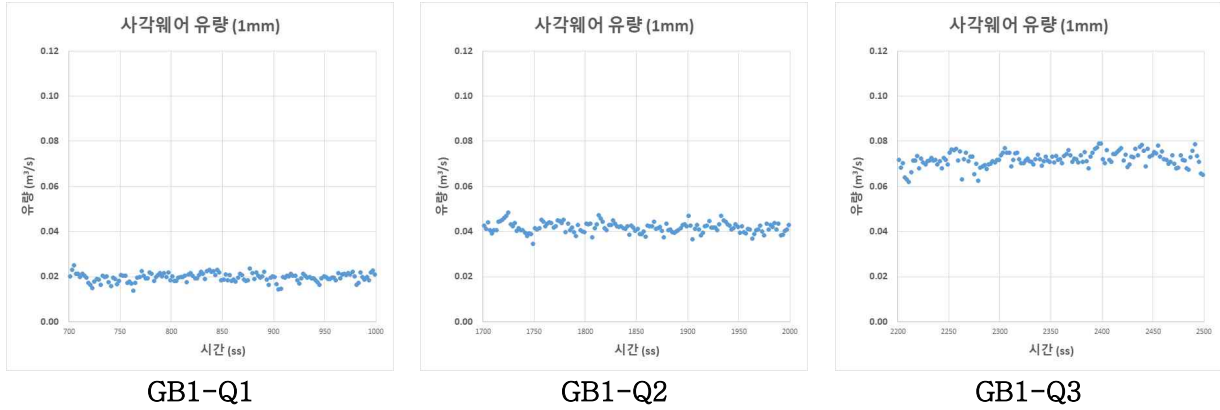


실험 후

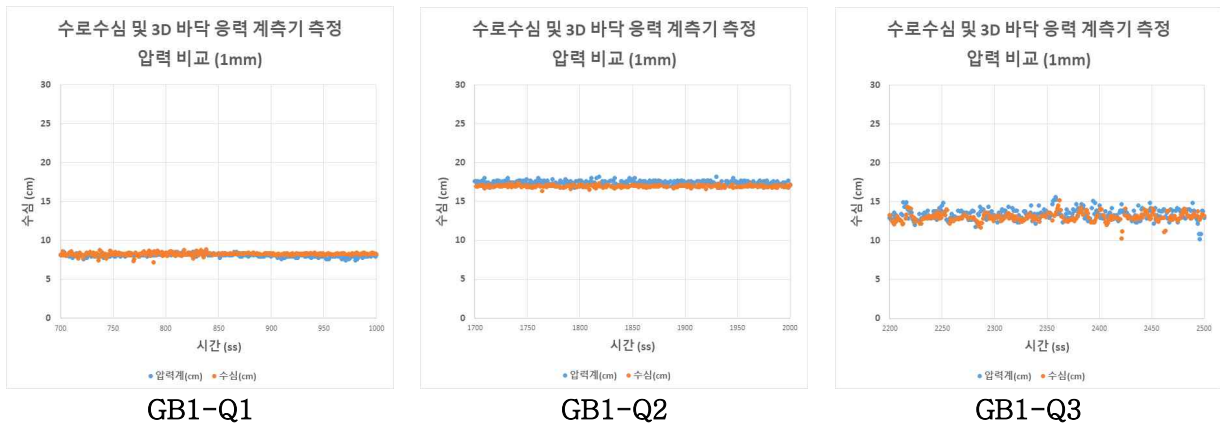
[그림 5.6] 직경 1 mm 유리구슬 실험 전후

[그림 5.6]는 직경 1 mm 유리구슬의 실험 전, 실험 후 결과 사진이다. 수로 내 흐르는 물의 방향은 위에서 아래 방향이며 유수에 의해 직경 1 mm 유리구슬은 모두 유실되었다.

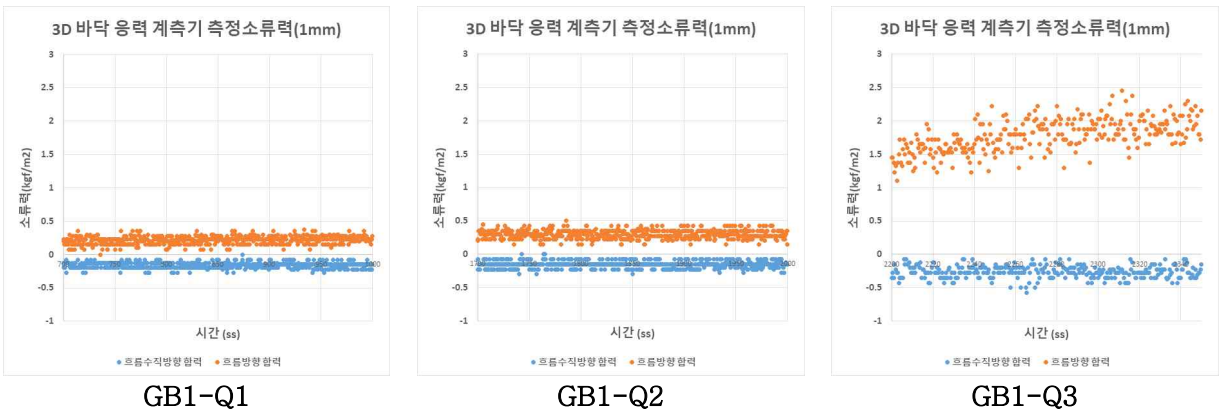
[그림 5.7], [그림 5.8], [그림 5.9]는 개발된 초고속 실험 수로, 3D 바닥 응력 계측기 및 초고속입자영상유속계(ULTRA-PIV)를 이용하여 유량 CASE별 측정한 사각웨어 측정 유량, 수로수심, 3D 바닥 응력 계측기 Z방향 압력 및 측정 소류력 데이터 그래프이다.



[그림 5.7] 직경 1 mm 유리구슬 유량 case 에 따른 사각웨이 유량 측정 데이터



[그림 5.8] 직경 1 mm 유리구슬 유량 case 에 따른 수로수심 및 3D 바닥 응력 계측기 압력 수두 측정 데이터



[그림 5.9] 직경 1 mm 유리구슬 유량 case 에 따른 3D 바닥 응력 계측기 유수 흐름수직방향 및 흐름방향 측정 데이터

[표 5.1] 는 수리특성 측정장치로 측정된 실시간데이터 분석 결과이다. [그림 5.7]에서 수로내 흐름이 안정화 되었다고 판단되는 유량 CASE GB1-Q1의 측정 데이터 평균 결과 평균 유량 $0.014 \text{ m}^3/\text{s}$, 평균 유속 0.612 m/s . 3D 바닥응력 계측기 측정 평균 바닥전단응력 0.251 kgf/m^2 , 유량 CASE GB1-Q2의 측정 데이터 평균 결과 평균 유량 $0.040 \text{ m}^3/\text{s}$, 평균 유속 0.818 m/s . 3D 바닥응력 계측기 측정 평균 바닥전단응력 0.276 kgf/m^2 , 유량 CASE GB1-Q3의 측정 데이터 평균 결과 평균 유량 $0.057 \text{ m}^3/\text{s}$, 평균 유속 1.298 m/s . 3D 바닥응력 계측기 측정 평균 바닥전단 응력 1.787 kgf/m^2 로 나타났다. 직경 1mm 유리구슬은 실험 초반부 유량 $0.014 \text{ m}^3/\text{s}$ 부터 세굴 되기 시작하여 실험 중반부에 유량 $0.040 \text{ m}^3/\text{s}$ 모두 소실되었다.

[표 5.1] 직경 1mm 유리구슬 수리특성 데이터 분석 결과

CASE Name	평균 유량 (m ³ /s)	평균 유속 (m/s)	Fr 수	측정 평균 바닥전단응력 (kgf/m ²)
GB1-Q1	0.014	0.612	0.707	0.251
GB1-Q2	0.040	0.818	0.659	0.276
GB1-Q3	0.057	1.298	1.197	1.707

초고속 실험 수로 내 유리구슬 설치 전 유리구슬의 무게를 측정하였다. 직경 5 mm 유리구슬 1개 무게 0.169 g, 10개 무게 1.702 g 이다. 유리구슬 개별 오차가 존재하며 직경 5 mm 유리구슬 1개의 무게는 약 0.170 g 으로 나타났다. 아래 [그림 5.10]은 측정 결과이다.



직경 5mm



1개 무게



10개 무게

[그림 5.10] 직경 5 mm 유리구슬



실험 전

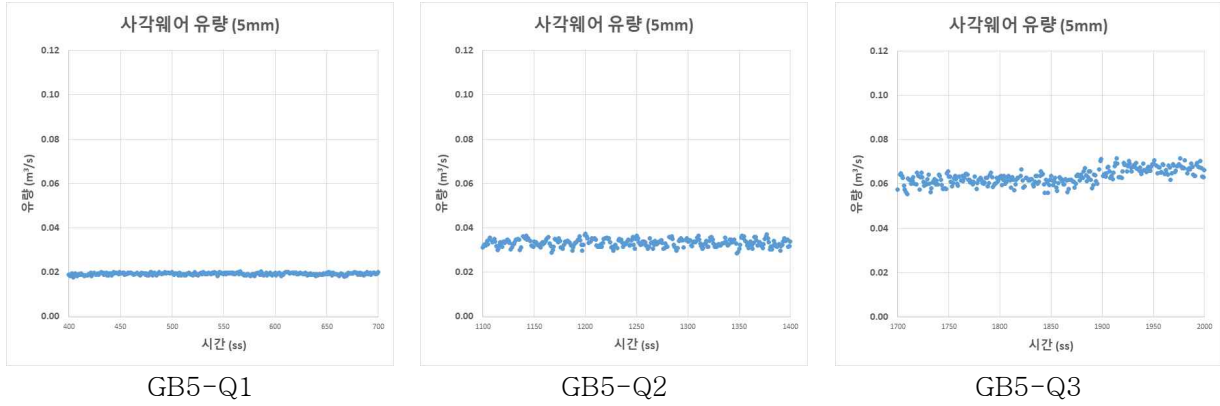


실험 후

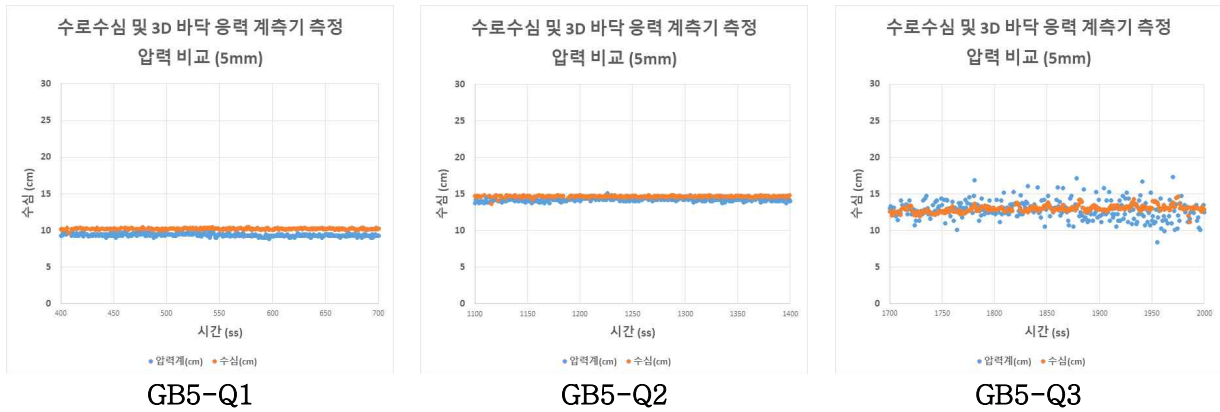
[그림 5.11] 직경 5 mm 유리구슬 실험 전후

[그림 5.11]는 직경 5 mm 유리구슬의 실험 전, 실험 후 결과 사진이다. 수로 내 흐르는 물의 방향은 위에서 아래 방향이며 유수에 의해 직경 5 mm 유리구슬은 모두 유실되었다.

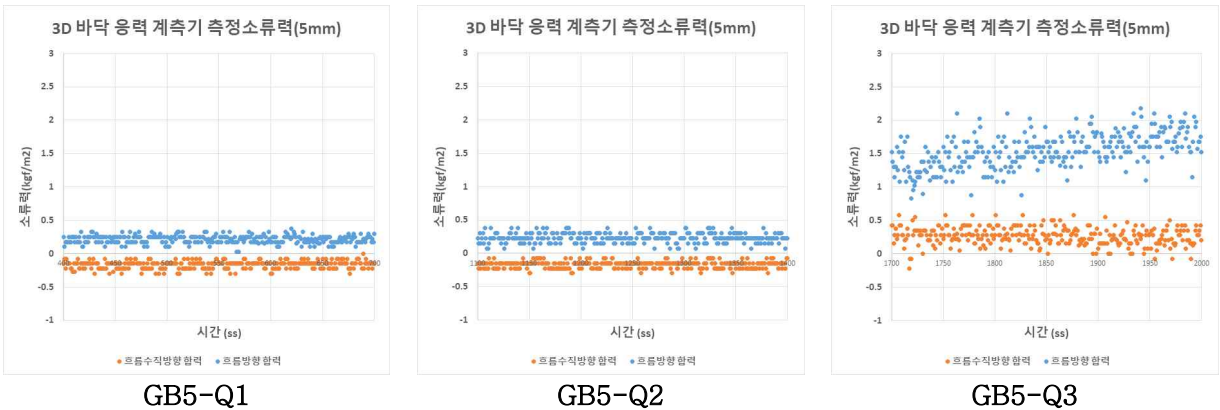
[그림 5.12], [그림 5.13], [그림 5.14]는 개발된 초고속 실험 수로, 3D 바닥 응력 계측기 및 초고속입자영상유속계(ULTRA-PIV)를 이용하여 실시간으로 측정한 사각웨어 측정 유량, 수로수심, 3D 바닥 응력 계측기 Z방향 압력 및 측정 소류력 데이터 그래프이다.



[그림 5.12] 직경 5 mm 유리구슬 유량 case 에 따른 사각웨어 유량 측정 데이터



[그림 5.13] 직경 5 mm 유리구슬 유량 case 에 따른 수로수심 및 3D 바닥 응력 계측기 압력 수두 측정 데이터



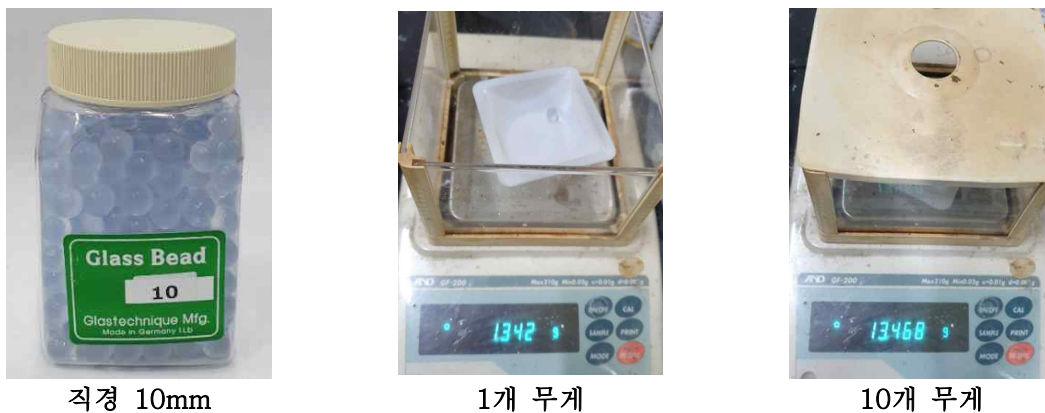
[그림 5.14] 직경 5 mm 유리구슬 유량 case 에 따른 3D 바닥 응력 계측기 유수 흐름수직방향 및 흐름방향 측정 데이터

[표 5.2] 는 수리특성 측정장치로 측정된 실시간데이터 분석 결과이다. [그림 5.12]에서 수로내 흐름이 안정화 되었다고 판단되는 유량 CASE GB1-Q1의 측정 데이터 평균 결과 평균 유량 $0.018 \text{ m}^3/\text{s}$, 평균 유속 0.655 m/s . 3D 바닥응력 계측기 측정 평균 바닥전단응력 0.273 kgf/m^2 , 유량 CASE GB1-Q2의 측정 데이터 평균 결과 평균 유량 $0.032 \text{ m}^3/\text{s}$, 평균 유속 0.776 m/s . 3D 바닥응력 계측기 측정 평균 바닥전단응력 0.289 kgf/m^2 , 유량 CASE GB1-Q3 측정 데이터 평균 결과 평균 유량 $0.062 \text{ m}^3/\text{s}$, 평균 유속 1.618 m/s . 3D 바닥응력 계측기 측정 평균 바닥전단 응력 1.392 kgf/m^2 로 나타났다. 직경 5mm 유리구슬은 실험 중반부 유량 $0.032 \text{ m}^3/\text{s}$ 부터 세굴 되기 시작하여 실험 후반부 유량 $0.062 \text{ m}^3/\text{s}$ 에서 모두 소실되었다.

[표 5.2] 직경 5 mm 유리구슬 수리특성 데이터 분석 결과

CASE Name	평균 유량 (m ³ /s)	평균 유속 (m/s)	Fr 수	측정 평균 바닥전단응력 (kgf/m ²)
GB5-Q1	0.018	0.655	0.676	0.273
GB5-Q2	0.032	0.776	0.664	0.289
GB5-Q3	0.062	1.618	1.446	1.392

초고속 실험 수로 내 유리구슬 설치 전 유리구슬의 무게를 측정하였다. 직경 10 mm 유리구슬 1개 무게 1.342 g, 10개 무게 13.468 g 이다. 유리구슬 개별 오차가 존재하며 직경 10 mm 유리구슬 1개의 무게는 약 1.346 g 으로 나타났다. 아래 [그림 5.15]은 측정 결과이다.



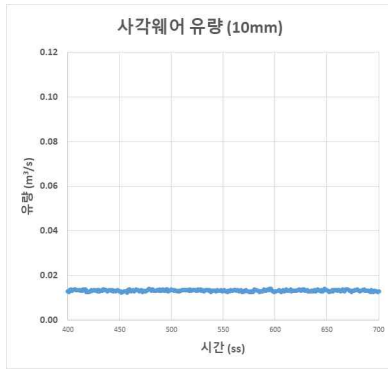
[그림 5.15] 직경 10 mm 유리구슬



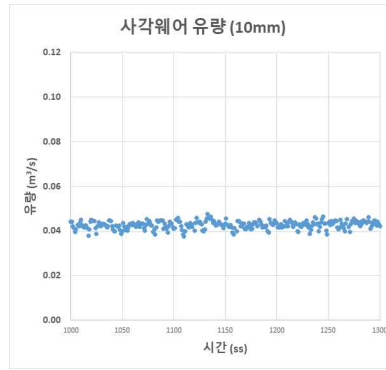
[그림 5.16] 직경 10 mm 유리구슬 실험 전후

[그림 5.16]는 직경 10 mm 유리구슬의 실험 전, 실험 후 결과 사진이다. 수로 내 흐르는 물의 방향은 위에서 아래 방향이며 유수에 의해 직경 10 mm 유리구슬은 모두 유실되었다.

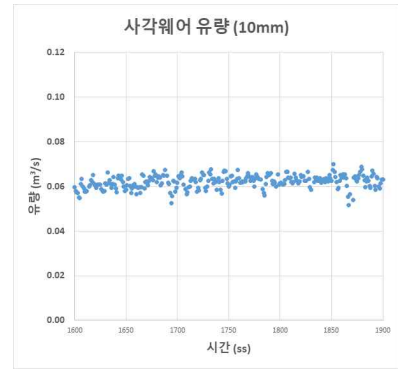
[그림 5.17], [그림 5.18], [그림 5.19]는 개발된 초고속 실험 수로, 3D 바닥 응력 계측기 및 초고속입자영상유속계(ULTRA-PIV)를 이용하여 실시간으로 측정한 사각웨어 측정 유량, 수로수심, 3D 바닥 응력 계측기 Z방향 압력 및 측정 소류력 데이터 그래프이다.



GB10-Q1

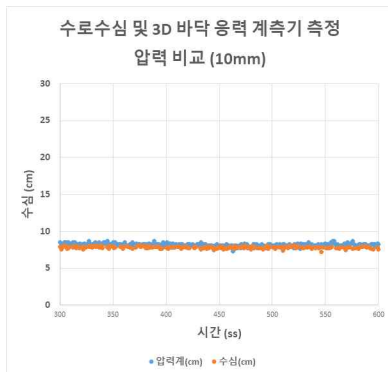


GB10-Q2

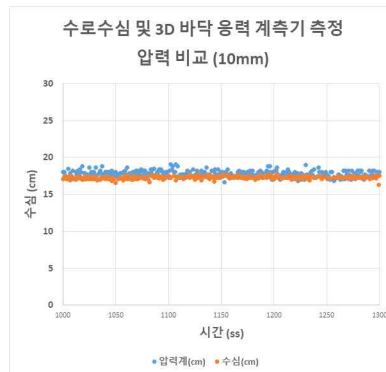


GB10-Q3

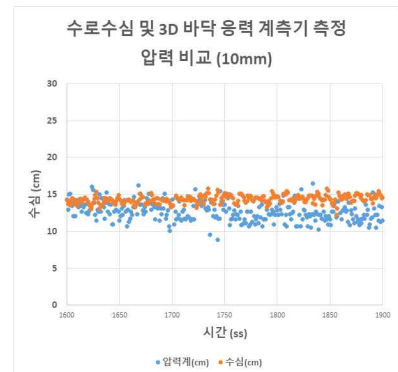
[그림 5.17] 직경 10 mm 유리구슬 유량 case 에 따른 사각웨이 유량 측정 데이터



GB10-Q1

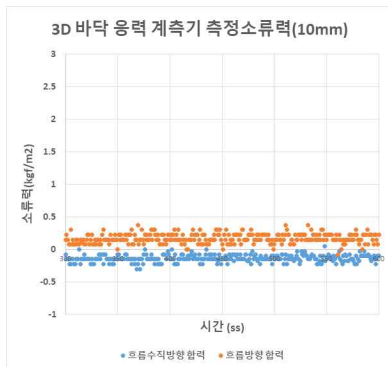


GB10-Q2

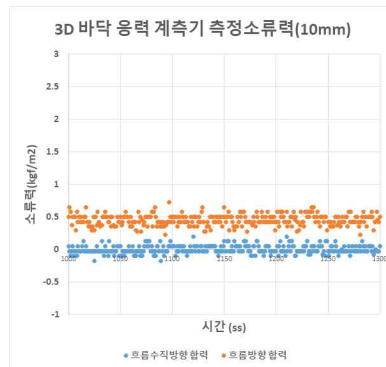


GB10-Q3

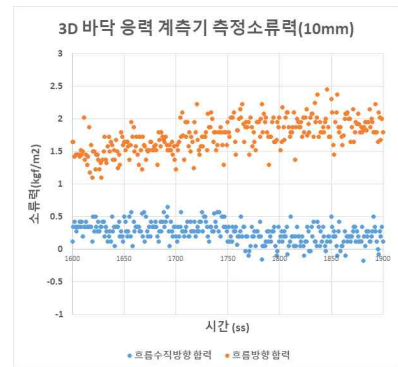
[그림 5.18] 직경 10 mm 유리구슬 유량 case 에 따른 수로수심 및 3D 바닥 응력 계측기 압력 수두 측정 데이터



GB10-Q1



GB10-Q2



GB10-Q3

[그림 5.19] 직경 10 mm 유리구슬 유량 case 에 따른 실시간 3D 바닥 응력 계측기 유수 흐름수직방향 및 흐름방향 측정 데이터

[표 5.3] 는 수리특성 측정장치로 측정된 실시간데이터 분석 결과이다. [그림 5.17]에서 수로내 흐름이 안정화 되었다고 판단되는 유량 CASE GB10-Q1의 측정 데이터 평균 결과 평균 유량 $0.013 \text{ m}^3/\text{s}$, 평균 유속 0.693 m/s . 3D 바닥응력 계측기 측정 평균 바닥전단응력 0.213 kgf/m^2 , 유량 CASE GB10-Q2의 측정 데이터 평균 결과 평균 유량 $0.042 \text{ m}^3/\text{s}$, 평균 유속 0.824 m/s . 3D 바닥응력 계측기 측정 평균 바닥전단응력 0.451 kgf/m^2 , 유량 CASE GB10-Q3의 측정 데이터 평균 결과 평균 유량 $0.060 \text{ m}^3/\text{s}$, 평균 유속 1.341 m/s . 3D 바닥응력 계측기 측정 평균 바닥 전단응력 1.757 kgf/m^2 로 나타났다. 직경 10mm 유리구슬은 실험 중반부 유량 $0.042 \text{ m}^3/\text{s}$ 부터 세굴되기 시작하여 실험 후반부 유량 $0.060 \text{ m}^3/\text{s}$ 에서 모두 소실되었다.

[표 5.3] 직경 10mm 유리구슬 수리특성 데이터 분석 결과

CASE Name	평균 유량 (m ³ /s)	평균 유속 (m/s)	Fr 수	측정 평균 바닥전단응력 (kgf/m ²)
GB10-Q1	0.013	0.693	0.616	0.213
GB10-Q2	0.042	0.824	0.636	0.451
GB10-Q3	0.060	1.341	1.106	1.758

5.3 쇠구슬 실험

유리구슬은 모두 세굴되어 유리구슬에 비해 비중 및 무게가 높은 쇠구슬로 대체하여 실험을 진행하였다. 쇠구슬의 직경은 5 mm, 10 mm 이며 유리구슬 실험과 동일하게 1차년도에 개발된 초고속 실험 수로에서 수문 14 cm 개방, 공급 유량을 점차적으로 증가시켜 연속적으로 실험을 진행하였다.

초고속 실험 수로 내 유리구슬 설치 전 쇠구슬의 무게를 측정하였다. 직경 5 mm 쇠구슬 1개 무게 0.510g, 10개 무게 5.090 g 이다. 쇠구슬 개별 오차가 존재하며 직경 5 mm 쇠구슬 1개의 무게는 약 0.509 g 으로 나타났다. 아래 [그림 5.20]은 측정 결과이다.



직경 5mm



1개 무게



10개 무게

[그림 5.20] 직경 5 mm 쇠구슬



실험 전

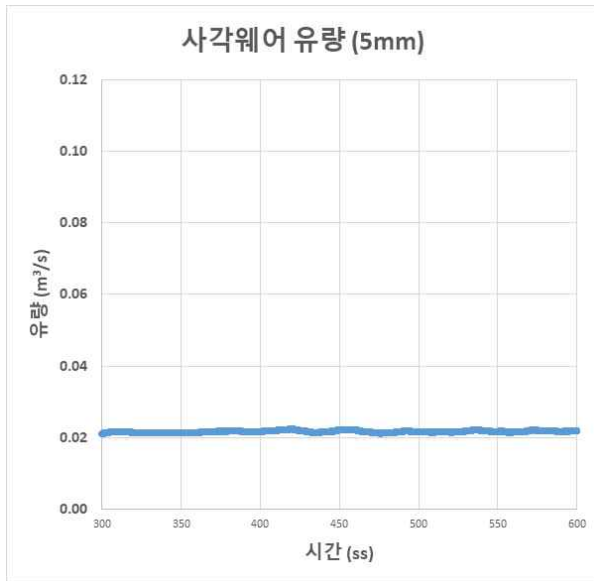


실험 후

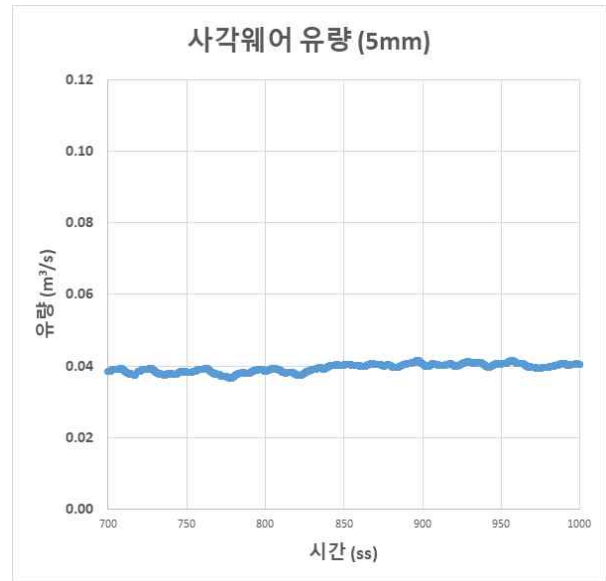
[그림 5.21] 직경 5 mm 쇠구슬 실험 전후

[그림 5.21]는 직경 5 mm 쇠구슬의 실험 전, 실험 후 결과 사진이다. 수로 내 흐르는 물의 방향은 위에서 아래 방향이며 유수에 의해 직경 5 mm 쇠구슬은 모두 유실되었다.

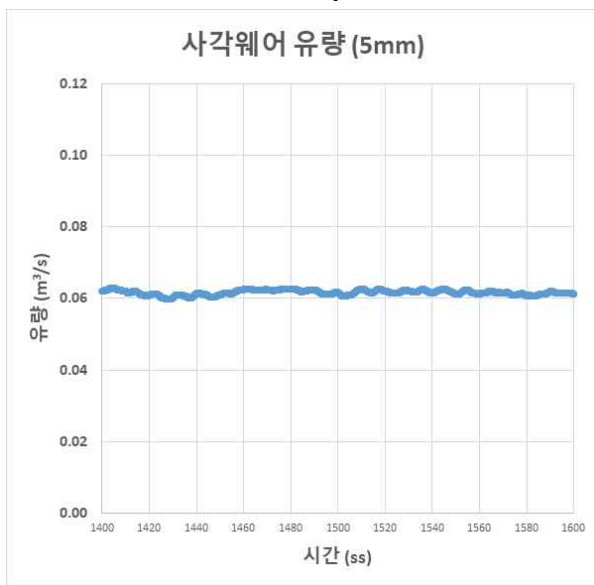
[그림 5.22], [그림 5.23], [그림 5.24] 는 개발된 초고속 실험 수로, 3D 바닥 응력 계측기 및 초고속입자영상유속계(ULTRA-PIV)를 이용하여 실시간으로 측정한 사각웨어 측정 유량, 수로수심, 3D 바닥 응력 계측기 Z방향 압력 및 측정 소류력의 데이터 그래프이다.



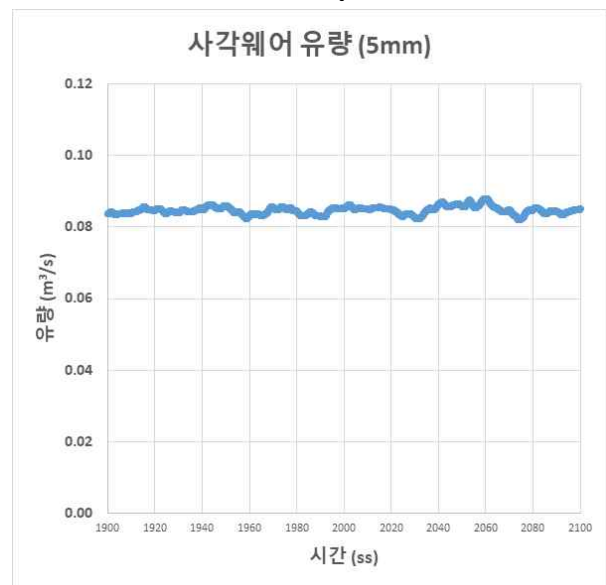
SB5-Q1



SB5-Q2

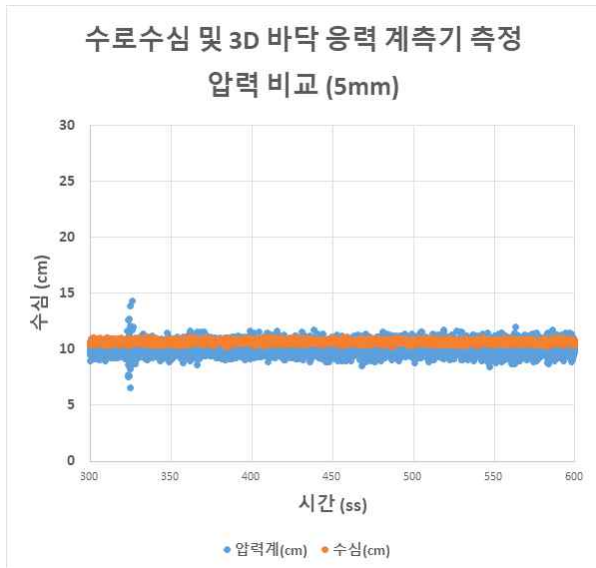


SB5-Q3

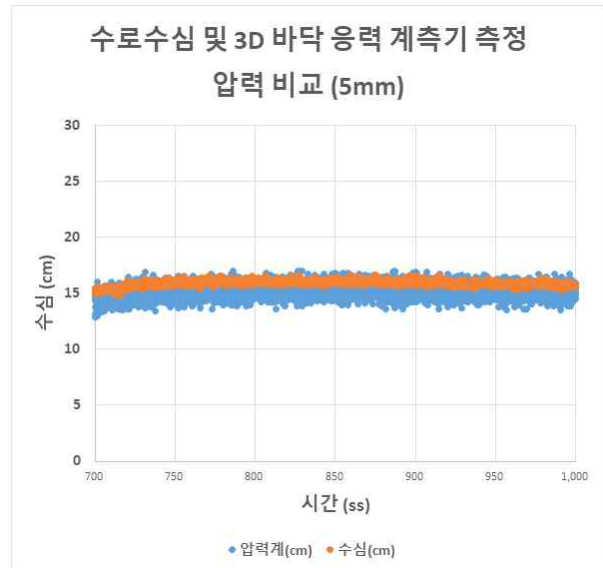


SB5-Q4

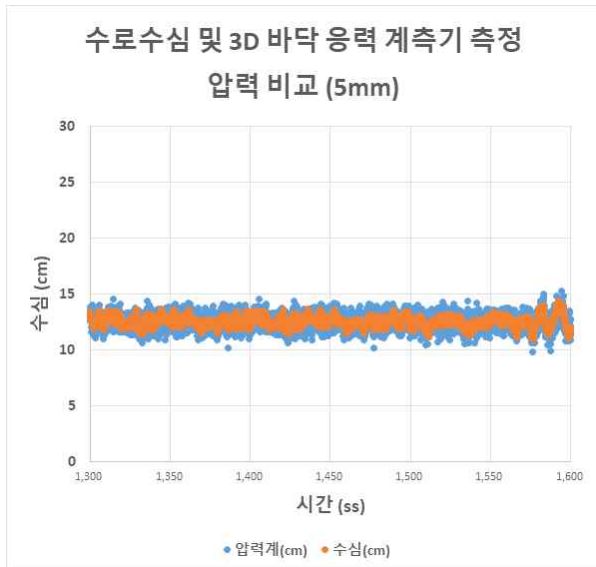
[그림 5.22] 직경 5 mm 쇠구슬 유량 case 에 따른 사각웨어 유량 측정 데이터



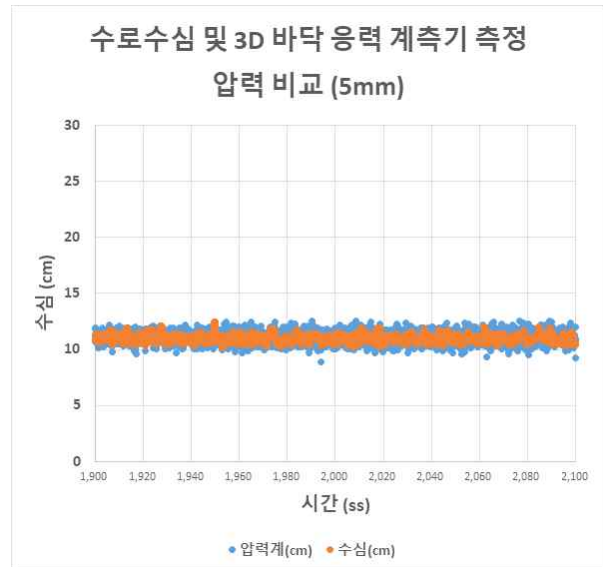
SB5-Q1



SB5-Q2

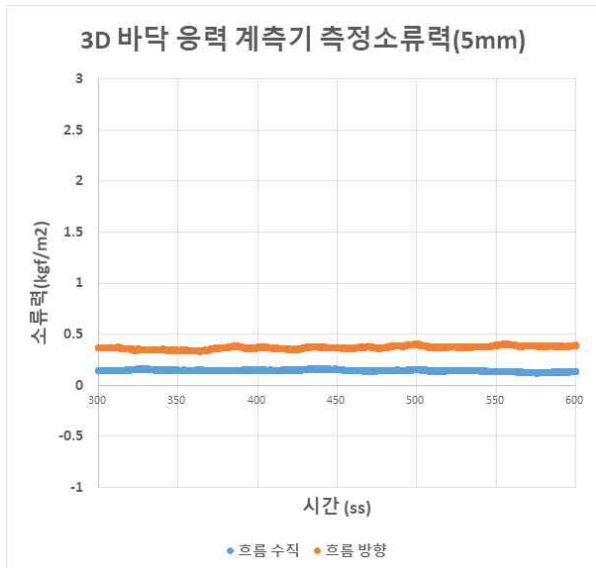


SB5-Q3

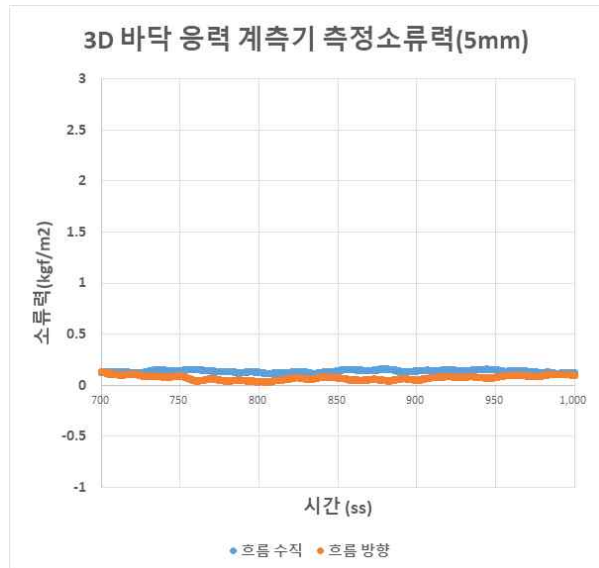


SB5-Q4

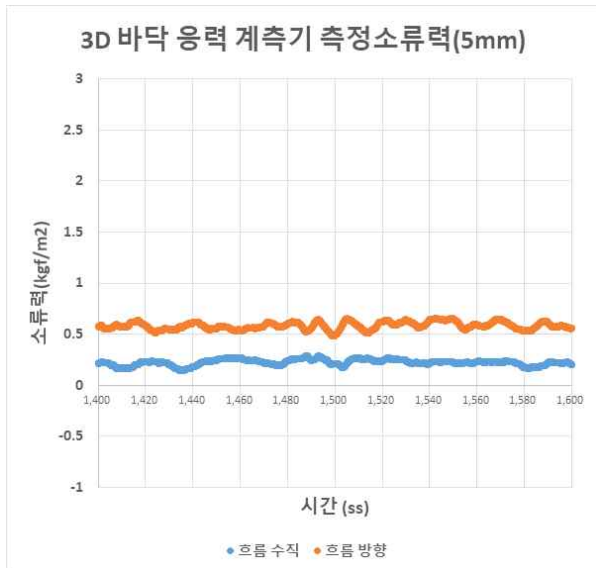
[그림 5.23] 직경 5 mm 쇠구슬 유량 case 에 따른 수로수심 및 3D 바닥 응력 계측기 압력 수두 측정 데이터



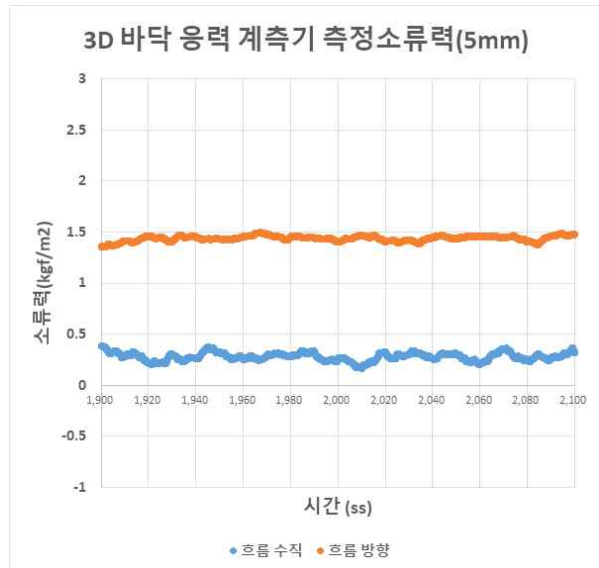
SB5-Q1



SB5-Q2



SB5-Q3



SB5-Q4

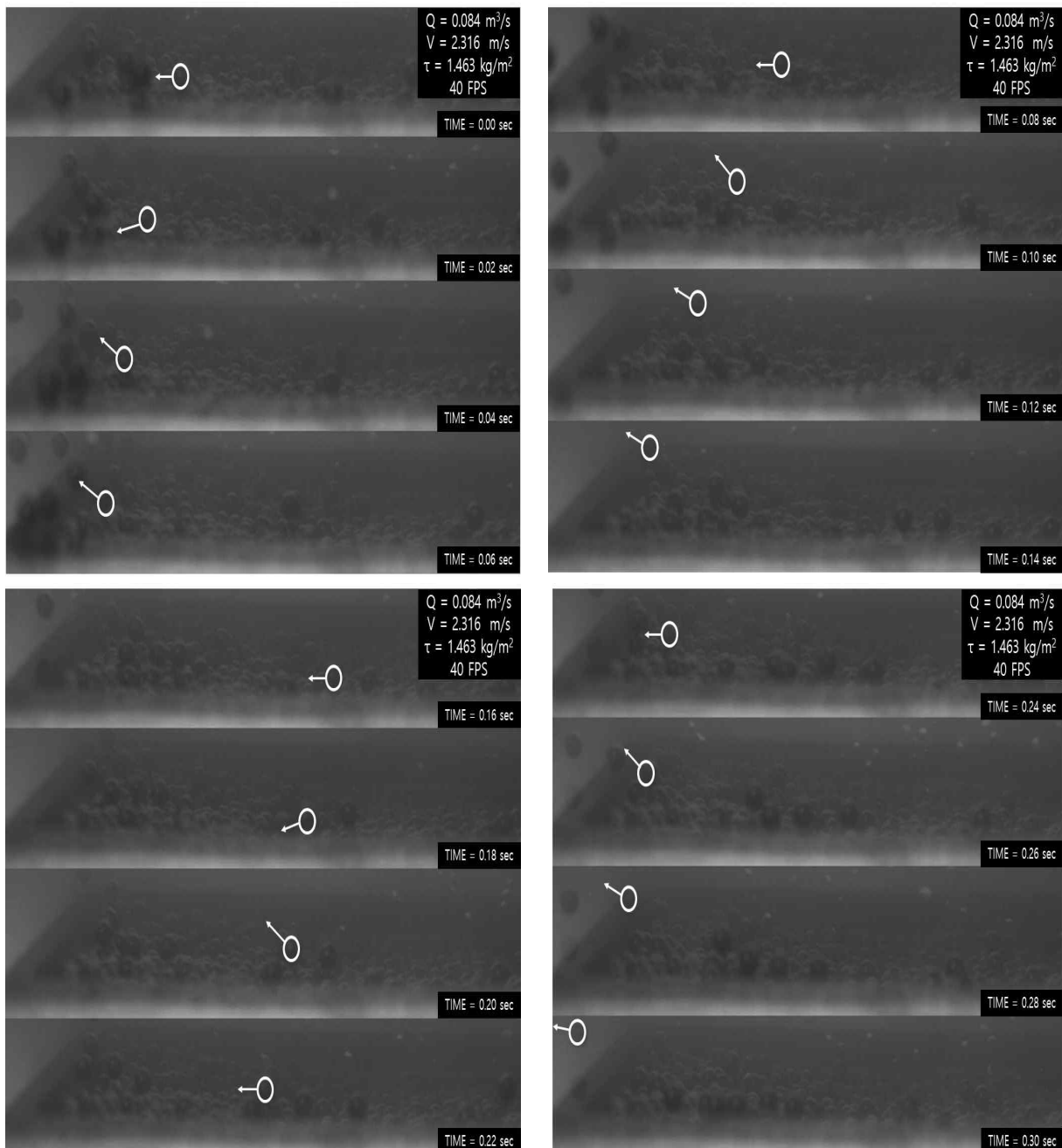
[그림 5.24] 직경 5 mm 쇠구슬 유량 case 에 따른 3D 바닥 응력 계측기 유수 흐름수직방향 및 흐름방향 측정 데이터

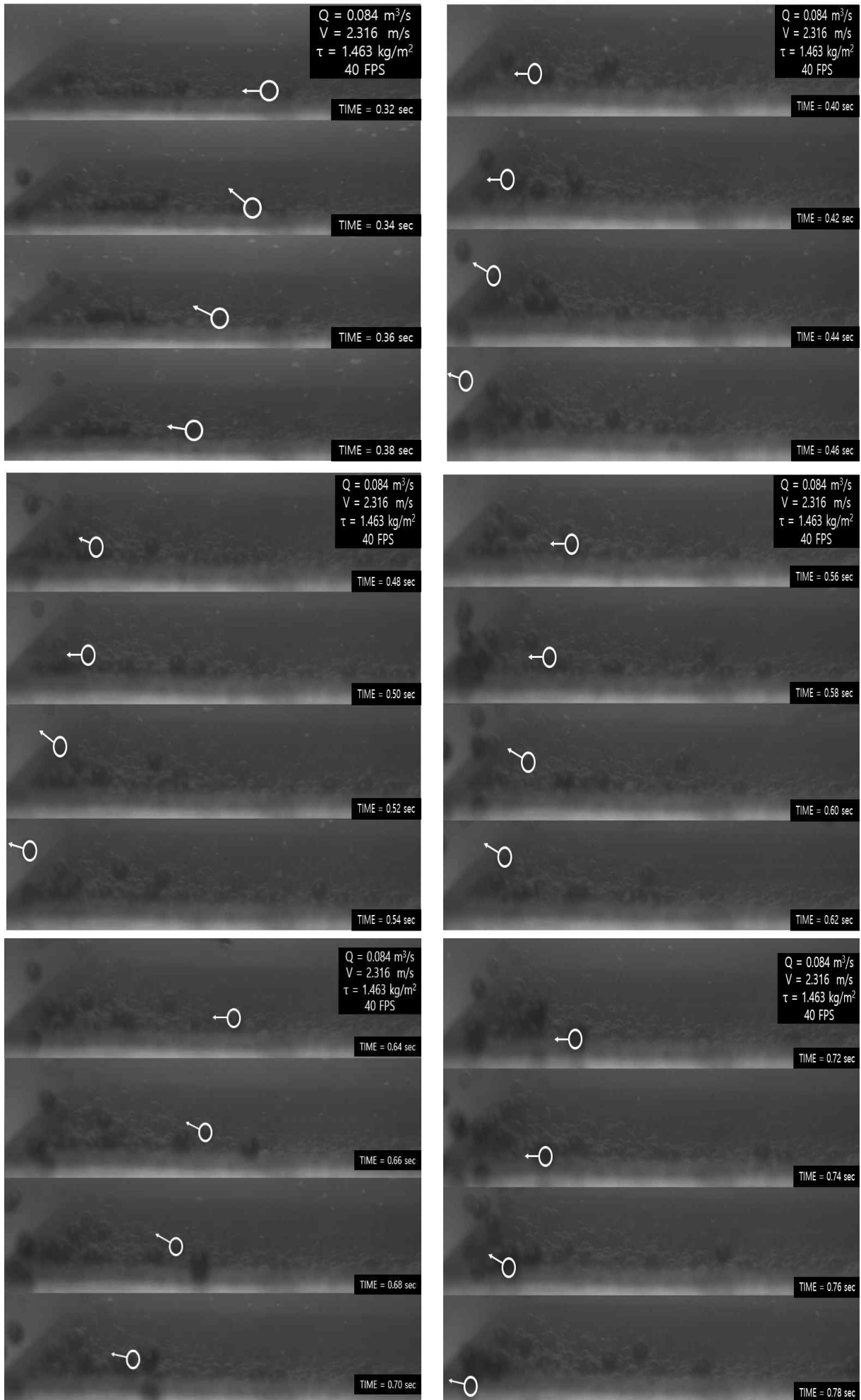
[표 5.4] 는 수리특성 측정장치로 측정된 실시간데이터 분석 결과이다. [그림 5.22]에서 수로내 흐름이 안정화 되었다고 판단되는 유량 CASE SB5-Q1의 측정 데이터 평균 결과 평균 유량 $0.021 \text{ m}^3/\text{s}$, 평균 유속 1.471 m/s . 3D 바닥응력 계측기 측정 평균 바닥전단응력 0.395 kgf/m^2 , 유량 CASE SB5-Q2의 측정 데이터 평균 결과 평균 유량 $0.038 \text{ m}^3/\text{s}$, 평균 유속 1.785 m/s . 3D 바닥응력 계측기 측정 평균 바닥전단응력 0.156 kgf/m^2 , 유량 CASE SB5-Q3의 측정 데이터 평균 결과 평균 유량 $0.063 \text{ m}^3/\text{s}$, 평균 유속 2.098 m/s . 3D 바닥응력 계측기측정 평균 바닥전단응력 0.719 kgf/m^2 , 유량 CASE SB5-Q4의 측정 데이터 평균 결과 평균 유량 $0.084 \text{ m}^3/\text{s}$, 평균 유속 2.316 m/s . 3D 바닥응력 계측기측정 평균 바닥전단응력 1.463 kgf/m^2 로 나타났다. 직경 5 mm 쇠구슬은 실험 후반부 유량 $0.084 \text{ m}^3/\text{s}$ 모두 소실되었다.

[표 5.4] 직경 5 mm 쇠구슬 수리특성 데이터 분석 결과

CASE Name	평균 유량 (m ³ /s)	평균 유속 (m/s)	Fr 수	측정 평균 바닥전단응력 (kgf/m ²)
SB5-Q1	0.021	1.471	1.826	0.395
SB5-Q2	0.038	1.785	1.918	0.156
SB5-Q3	0.063	2.098	2.117	0.719
SB5-Q4	0.084	2.316	2.118	1.463

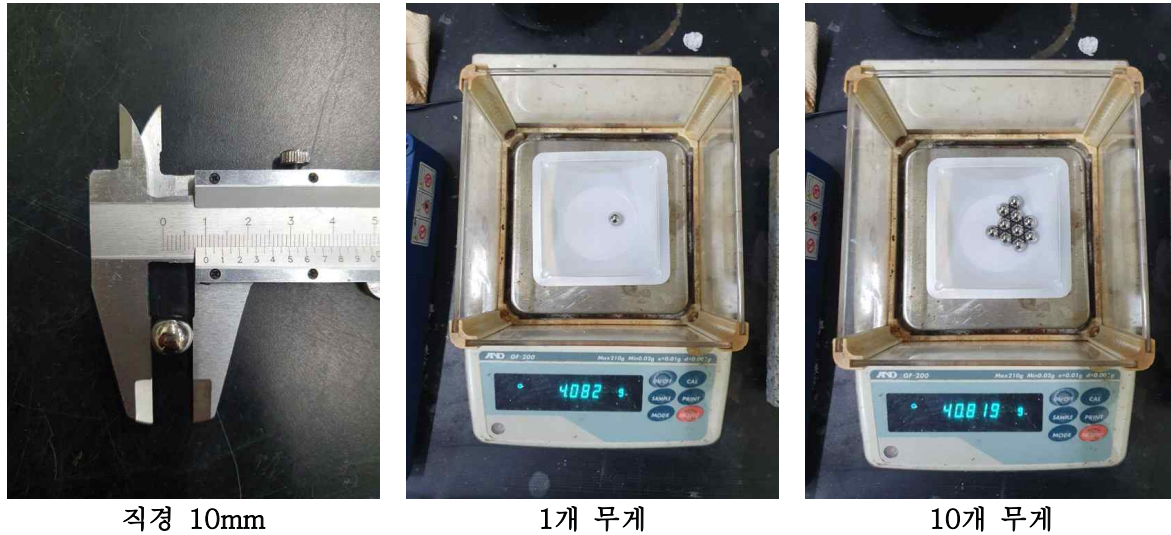
아래의 [그림 5.25]은 5 mm 쇠구슬 유실되기 시작한 평균 유량 0.084 m³/s, 평균 유속 2.316 m/s. 3D 바닥응력 계측기측정 평균 바닥전단응력 1.463 kg/m² 일때 초고속카메라로 2000 FPS 촬영한 모습이다. 사진 간격은 40 FPS로 0.02초 사이에 발생하는 모습이다.





[그림 5.25] 초고속카메라로 촬영한 5 mm 쇠구슬 유실 (2000fps)

초고속 실험 수로 내 유리구슬 설치 전 쇠구슬의 무게를 측정하였다. 직경 10 mm 쇠구슬 1개 무게 4.082 g, 10개 무게 40.819 g 이다. 쇠구슬 개별 오차가 존재하며 직경 10 mm 쇠구슬 1개의 무게는 약 4.082 g 으로 나타났다. 아래 [그림 5.26]은 측정 결과이다.



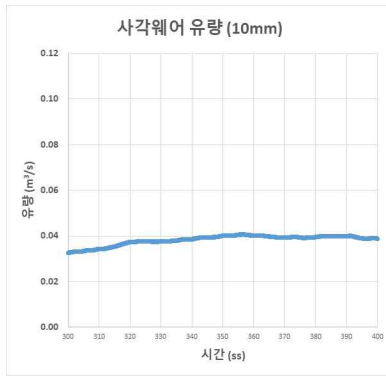
[그림 5.26] 직경 10 mm 쇠구슬



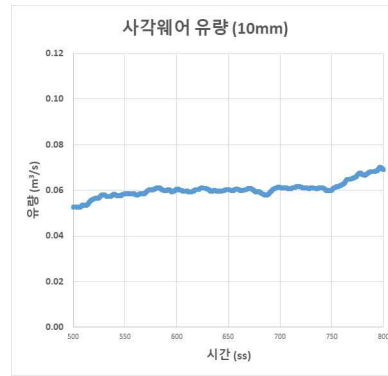
[그림 5.27] 직경 10 mm 쇠구슬 실험 전후

[그림 5.27]는 직경 10 mm 쇠구슬의 실험 전, 실험 후 결과 사진이다. 수로 내 흐르는 물의 방향은 위에서 아래 방향이며 유수에 의해 직경 10 mm 쇠구슬은 모두 유실되었다.

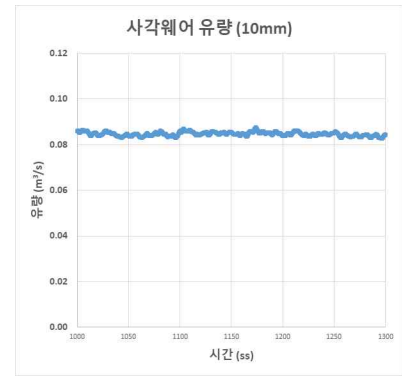
[그림 5.28], [그림 5.29], [그림 5.30] 개발된 초고속 실험 수로, 3D 바닥 응력 계측기 및 초고속입자영상유속계(ULTRA-PIV)를 이용하여 실시간으로 측정한 사각웨어 측정 유량, 수로수심, 3D 바닥 응력 계측기 Z방향 압력 및 측정 소류력 데이터 그래프이다.



SB10-Q1

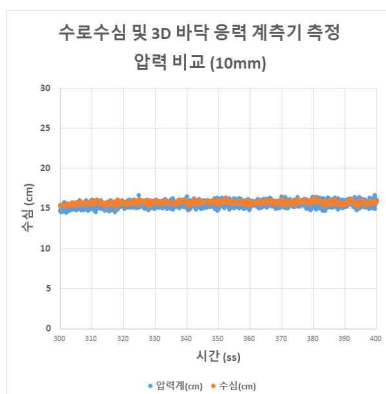


SB10-Q2

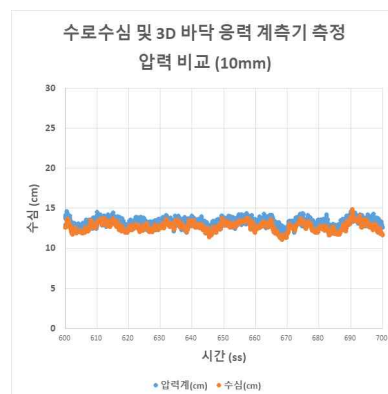


SB10-Q3

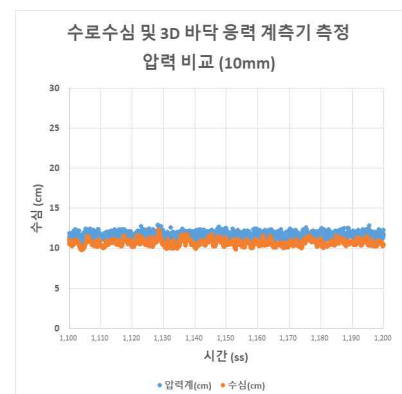
[그림 5.28] 직경 10 mm 쇠구슬 유량 case 에 따른 사각웨어 측정 유량 측정 데이터



SB10-Q1

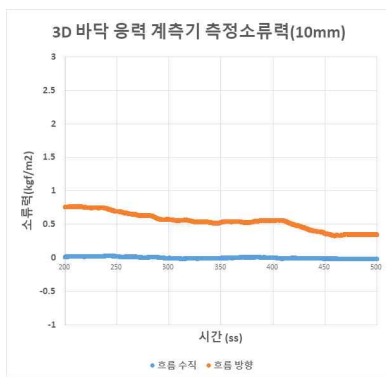


SB10-Q2

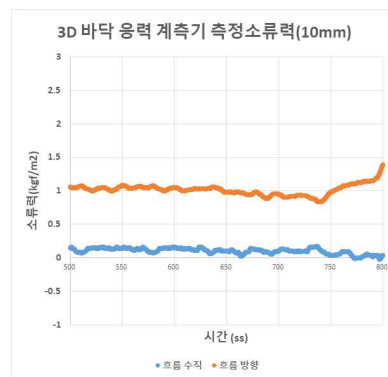


SB10-Q3

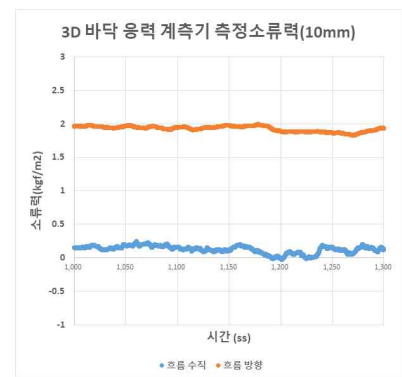
[그림 5.29] 직경 10 mm 쇠구슬 유량 case 에 따른 수로수심 및 3D 바닥 응력 계측기 압력 수두 측정 데이터



SB10-Q1



SB10-Q2



SB10-Q3

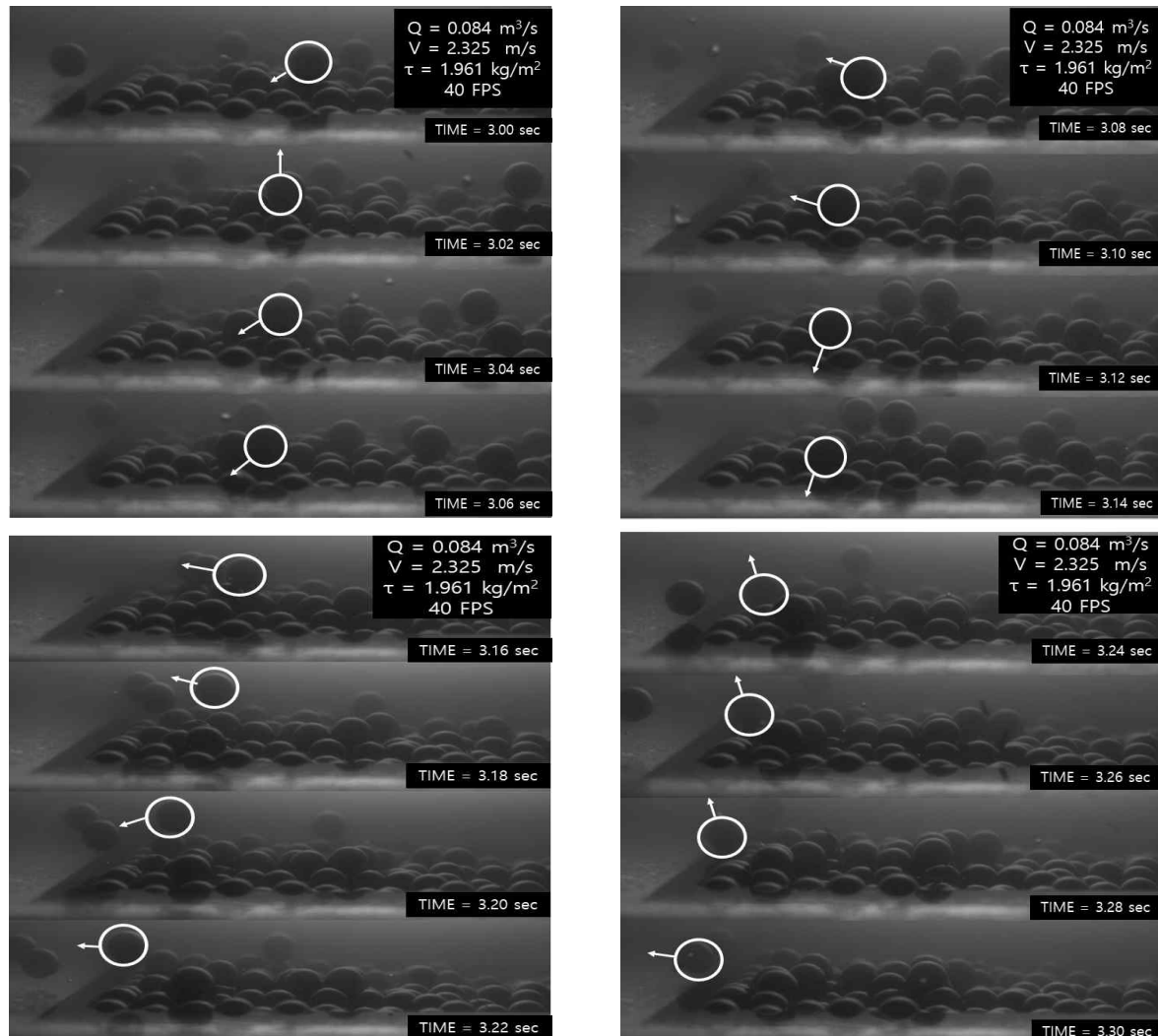
[그림 5.30] 직경 10 mm 쇠구슬 유량 case 에 따른 3D 바닥 응력 계측기 유수 흐름수직방향 및 흐름방향 측정 데이터

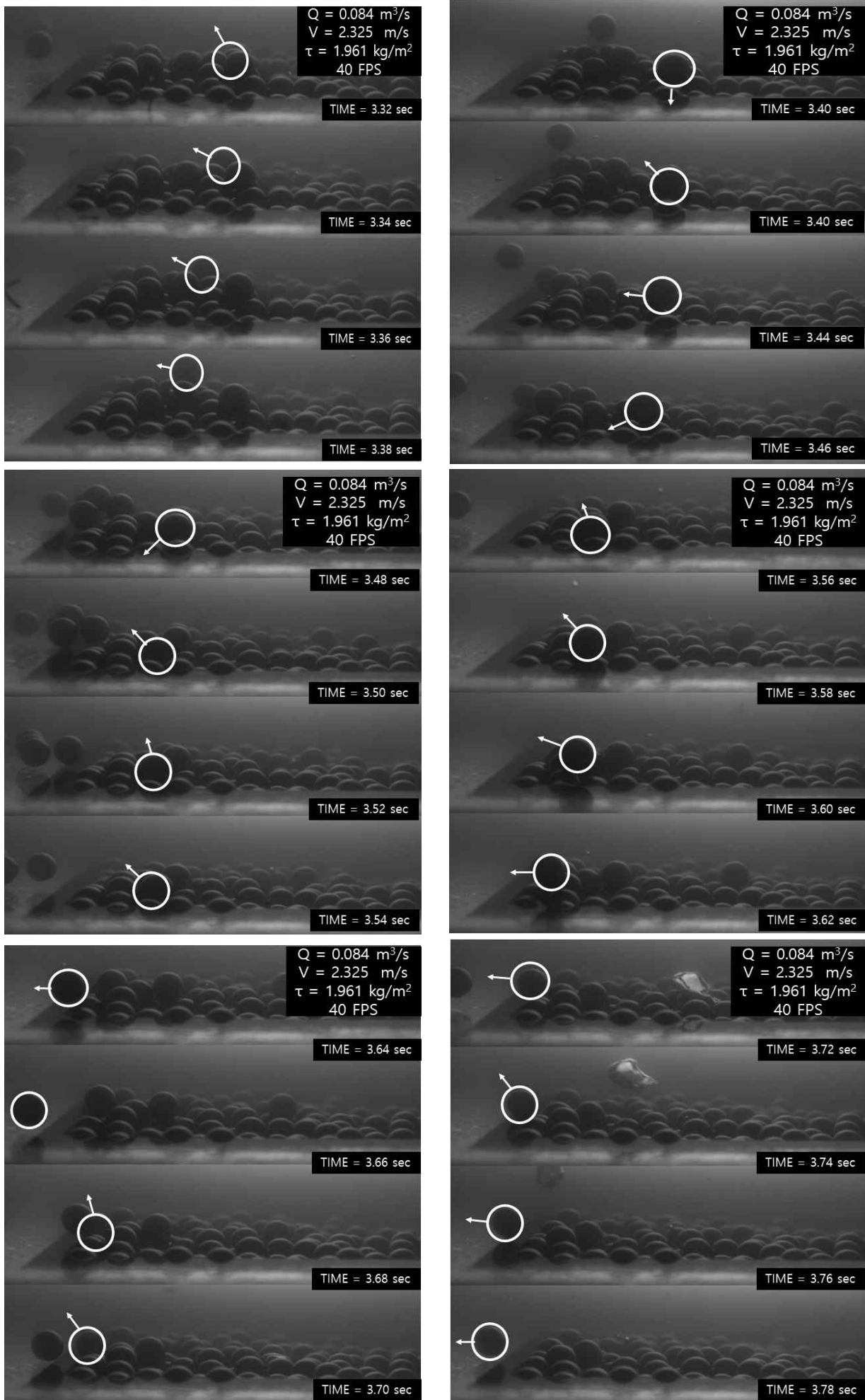
[표 5.5] 는 수리특성 측정장치로 측정된 실시간데이터 분석 결과이다. [그림 1.8]에서 수로내 흐름이 안정화 되었다고 판단되는 유량 CASE SB10-Q1의 측정 데이터 평균 결과 평균 유량 $0.036 \text{ m}^3/\text{s}$, 평균 유속 1.456 m/s . 3D 바닥응력 계측기 측정 평균 바닥전단응력 0.555 kgf/m^2 , 유량 CASE SB10-Q2의 측정 데이터 평균 결과 평균 유량 $0.060 \text{ m}^3/\text{s}$, 평균 유속 1.793 m/s . 3D 바닥응력 계측기 측정 평균 바닥전단응력 0.936 kgf/m^2 , 유량 CASE SB10-Q3의 측정 데이터 평균 결과 평균 유량 $0.084 \text{ m}^3/\text{s}$, 평균 유속 2.325 m/s . 3D 바닥응력 계측기측정 평균 바닥전단응력 1.931 kgf/m^2 나타났다. 직경 10 mm 쇠구슬은 실험 후반부 유량 $0.084 \text{ m}^3/\text{s}$ 모두 소실되었다.

[표 5.5] 직경 10 mm 쇠구슬 수리특성 데이터 분석 결과

CASE Name	평균 유량 (m^3/s)	평균 유속 (m/s)	Fr 수	측정 평균 바닥전단응력 (kgf/m^2)
SB10-Q1	0.036	1.456	1.626	0.555
SB10-Q2	0.060	1.793	1.720	0.936
SB10-Q3	0.084	2.325	2.136	1.931

아래의 [그림 5.31]은 10mm 쇠구슬 유실되기 시작한 평균 유량 $0.084 \text{ m}^3/\text{s}$, 평균 유속 2.325 m/s . 3D 바닥응력 계측기측정 평균 바닥전단응력 1.931 kgf/m^2 일때 초고속카메라로 2000 FPS 촬영한 모습이다. 사진 간격은 40 FPS로 0.02초 사이에 발생하는 모습이다.





[그림 5.31] 초고속카메라로 촬영한 10 mm 쇠구슬 유실 (2000fps)

고속수로 내 유량, 유속의 조건을 최대한 동일하게 구현하여 실험한 결과 유리구슬에 비해 쇠구슬이 약 5배가량 무게가 높음에도 불구하고 모두 유실되었다.

[표 5.6]은 유속별, 입자별 수리특성 데이터 전체 CASE 분석 결과이다. 수로 내 흐름 조건이 상류일 때 대부분의 유리구슬은 제자리를 이탈하여 소실되었으며 무게가 무거운 쇠구슬은 수로 내 흐름 조건이 사류일 때 이탈하기 시작하였다.

[표 5.6] 유리구슬 및 쇠구슬 실험결과 전체표

CASE Name	평균 유량 (m ³ /s)	평균 유속 (m/s)	Fr 수	측정 평균 바닥전단응력 (kgf/m ²)
GB1-Q1	0.014	0.612	0.707	0.251
GB1-Q2	0.040	0.818	0.659	0.276
GB1-Q3	0.057	1.298	1.197	1.707
GB5-Q1	0.018	0.655	0.676	0.273
GB5-Q2	0.032	0.776	0.664	0.289
GB5-Q3	0.062	1.618	1.446	1.392
GB10-Q1	0.013	0.693	0.616	0.213
GB10-Q2	0.042	0.824	0.636	0.451
GB10-Q3	0.060	1.341	1.106	1.758
SB5-Q1	0.021	1.471	1.826	0.395
SB5-Q2	0.038	1.785	1.918	0.156
SB5-Q3	0.063	2.098	2.117	0.719
SB5-Q4	0.084	2.316	2.118	1.463
SB10-Q1	0.036	1.456	1.626	0.555
SB10-Q2	0.060	1.793	1.720	0.936
SB10-Q3	0.084	2.325	2.136	1.931

6. 수리실험을 통한 연직방향 가속도에 의한 하상입자재부상 메커니즘

6.1 하상입자재부상 메커니즘

본 연구에서는 수평방향 유속과 바닥전단력 만을 유사이동의 기준으로 삼던 기존의 패러다임의 한계를 인식하고, 보 하류의 유속장을 정밀하게 측정 및 분석하여 연직방향 가속도가 입자재부상 및 유사이동에 미치는 영향을 이론으로 정립하고자 한다.

전통적으로 수리학적 모델링을 행할 때, 수체 내 유사의 이동이 시작하는지 여부는 흔히 바닥전단응력과 유효중량의 비인 Shields 매개변수에 의해 결정하였다. 여기서 Shields 매개변수는 다음과 같이 정의된다 (Sumer와 Fredsoe 2002 참조).

$$\theta = \frac{\tau}{(\rho_s - \rho)gD} \quad (1)$$

위에서, θ 는 Shields 매개변수, τ 는 바닥전단응력, ρ_s 는 유사입자의 밀도, ρ 는 물의 밀도, g 는 중력가속도, 그리고 D 는 유사입자의 직경이다. Shields 매개변수 θ 가 임계치 이상이면, 유사에 이동하기 시작하는 것으로 보고, 임계치 이하이면 유사이동이 시작되지 않은 것으로 보았다는 것이다.



[그림 6.1] 해안 쇄파에 의해 발생한 강력한 부압으로 해안유사가 부상하는 모습

그러나, 흐름의 가속도가 무시할 수 없을 만큼 큰 경우, 예컨대 홍수파가 통과할 때나 또는 보 주변의 흐름에서 연직방향 동적 압력에 의해 유사에 흐름에 유입되는 것을 흔히 볼 수 있다. [그림 6.1]에 극단적인 예를 표시하였다.

위의 그림은 파가 해안선 근처에서 부서져 쇄파를 형성하고 그에 의한 흐름이 처오름높이까지 도달한 후, 다시 중력에 의해 되돌아오다가, 해안선으로 다가오는 다른 파와 만나 순간적으로 흐름 방향이 연직방향을 이루었을 때의 모습이다. 이때 식 (1)로 계산한 Shields 매개변수는 0에 가깝겠으나, 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 상당한 양의 유사에 부상되었고, 이후 흐름에 유입되어 이

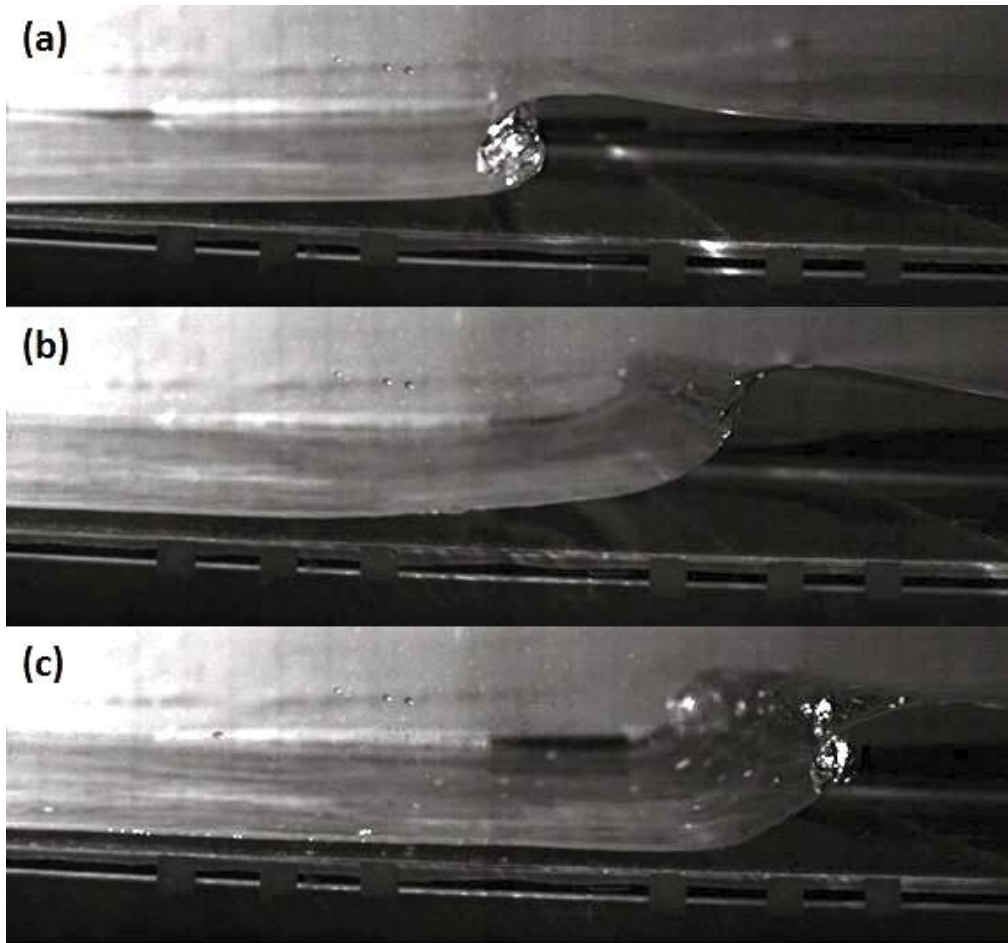
송됨을 알 수 있다.

위의 예에서 알 수 있듯이, 유사입자의 부상 메커니즘을 설명함에 있어서 연직방향 가속도, 즉 연직방향 동수경사가 매우 중요하다. 실제로 Sumer 등 (2011)은 Shields 매개변수를 다음과 같이 정의한 바 있다.

$$\theta = \frac{\tau}{(\rho_s - \rho)gD - \frac{\gamma}{\gamma}(-\frac{\partial p}{\partial z})} \quad (2)$$

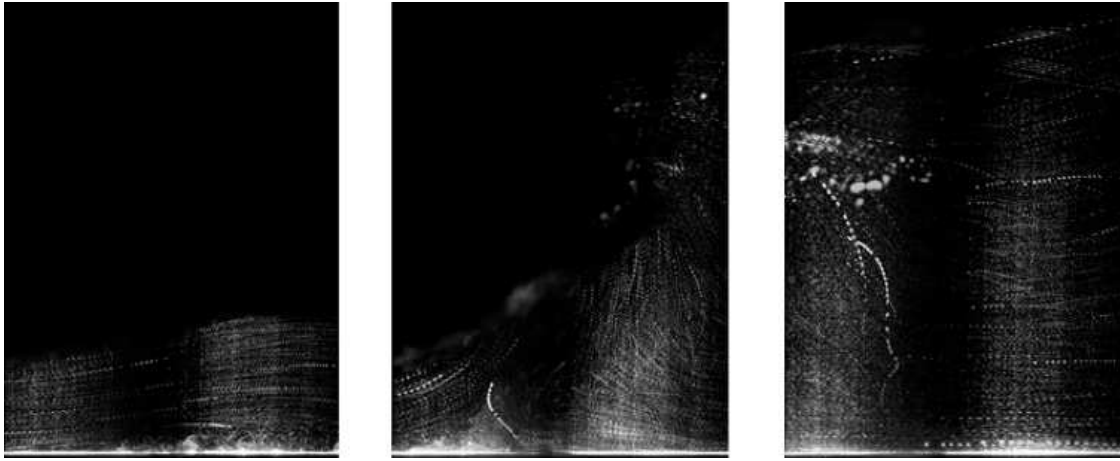
식 (2)에서 p 는 동수압력이고 z 는 연직방향 좌표축이다. 동수경사에 의한 연직방향의 힘이 중력과 반대방향을 향하면, 식 (2)의 분모에서 두 번째 항이 음수가 되고, 분모가 작아지며 Shields 매개변수가 증가한다. 즉 (1)의 식을 기준으로 전단응력이 임계치에 도달하지 않은 경우에도 연직방향 동수경사에 의한 힘이 충분히 크면, 입자가 부상할 수 있다는 것이다.

한편, Park과 Liu (2019)는 [그림 6.1]에서의 현상을 체계적으로 연구하기 위하여 세 개의 고립파를 연속적으로 발생시켜 해안선 근처에서 쇄파를 형성하는 실험을 실시하였다. 아래의 [그림 6.2]는 세 개의 고립파가 각각 부서지는 순간을 촬영한 것이다.



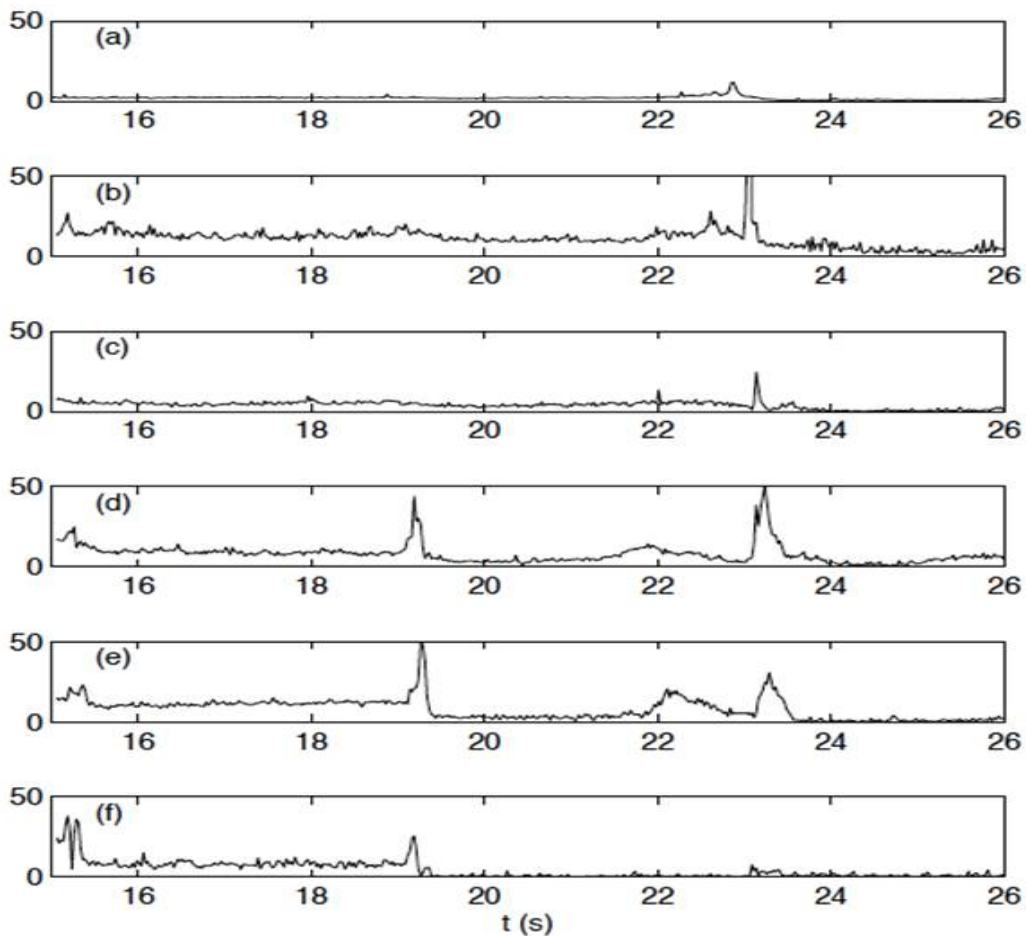
[그림 6.2] Park과 Liu (2019)의 실험에서 세 개의 고립파가 쇄파하는 순간

이 실험에서 첫 번째 쇄파가 후퇴하기 전에 두 번째 쇄파가 도달하여 두 흐름이 합해져서 다시 육지방향으로 흐름이 형성되고, 이 흐름이 후퇴하며, 세 번째 쇄파와 만날 때 강력한 연직방향 가속도가 형성되어 입자들이 흐름으로 유입되는 것을 관찰할 수 있었다.

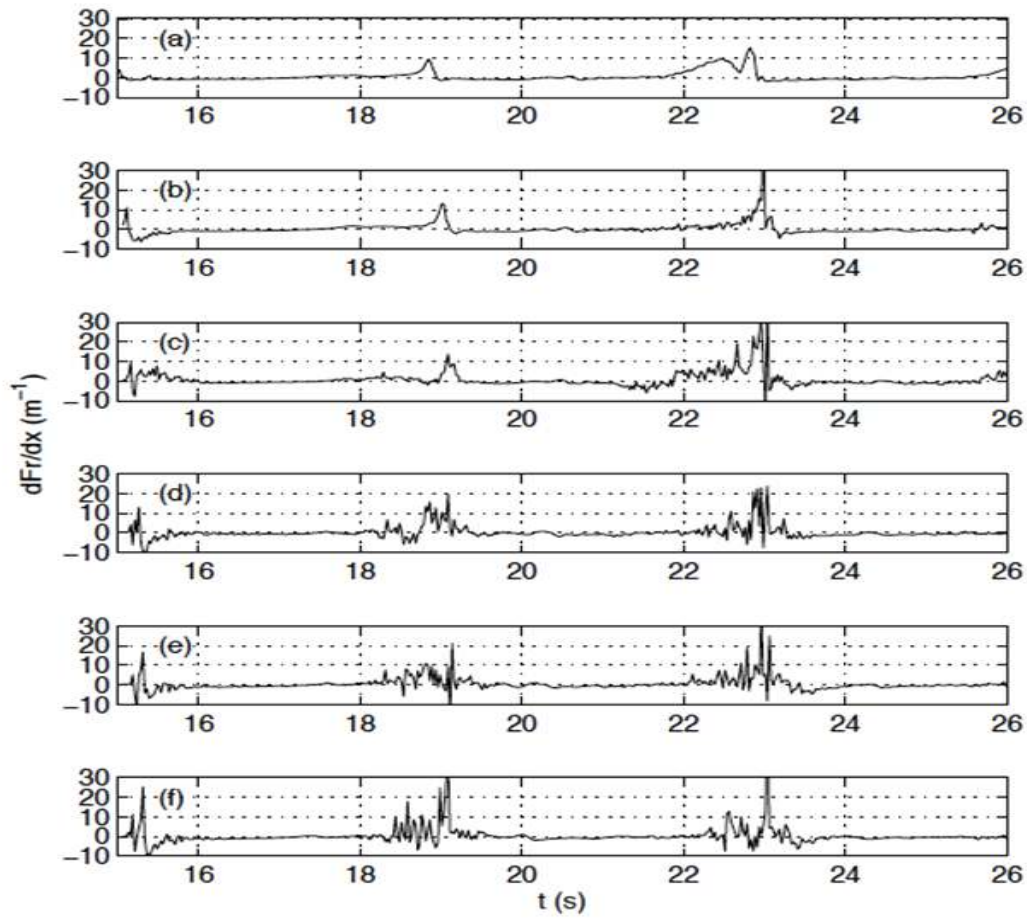


[그림 6.3] Park과 Liu (2019)의 실험에서 첫 번째 및 두 번째 쇄파가 합쳐져 경사면을 따라 흘러내리는 흐름이 세 번째 쇄파와 만나 강력한 연직방향 가속도를 형성하는 순간이다. 입자들이 연직방향으로 부상하는 모습이 잘 표현되어 있다.

Park과 Liu (2019)는 이러한 실험결과를 바탕으로, Froude수의 흐름방향 경사가 쇄파 및 유사 부상의 기준으로 쓰일 수 있다고 주장하였다. [그림 6.4]는 여러 지점에서 측정한 수심 및 유속을 기반으로 계산한 Froude수의 흐름방향 경사이고, [그림 6.5]는 같은 지점들에서 측정한 부유사의 양이다. [그림 6.4]와 [그림 6.5]를 비교하면, 두 수치가 매우 높은 상관관계를 보이는 것을 볼 수 있다.



[그림 6.4] 여러 지점에서 측정한 Froude수의 흐름방향 경사의 시계열 자료. (a)에서 (f)로 갈수록 해안선에서 멀어진다.

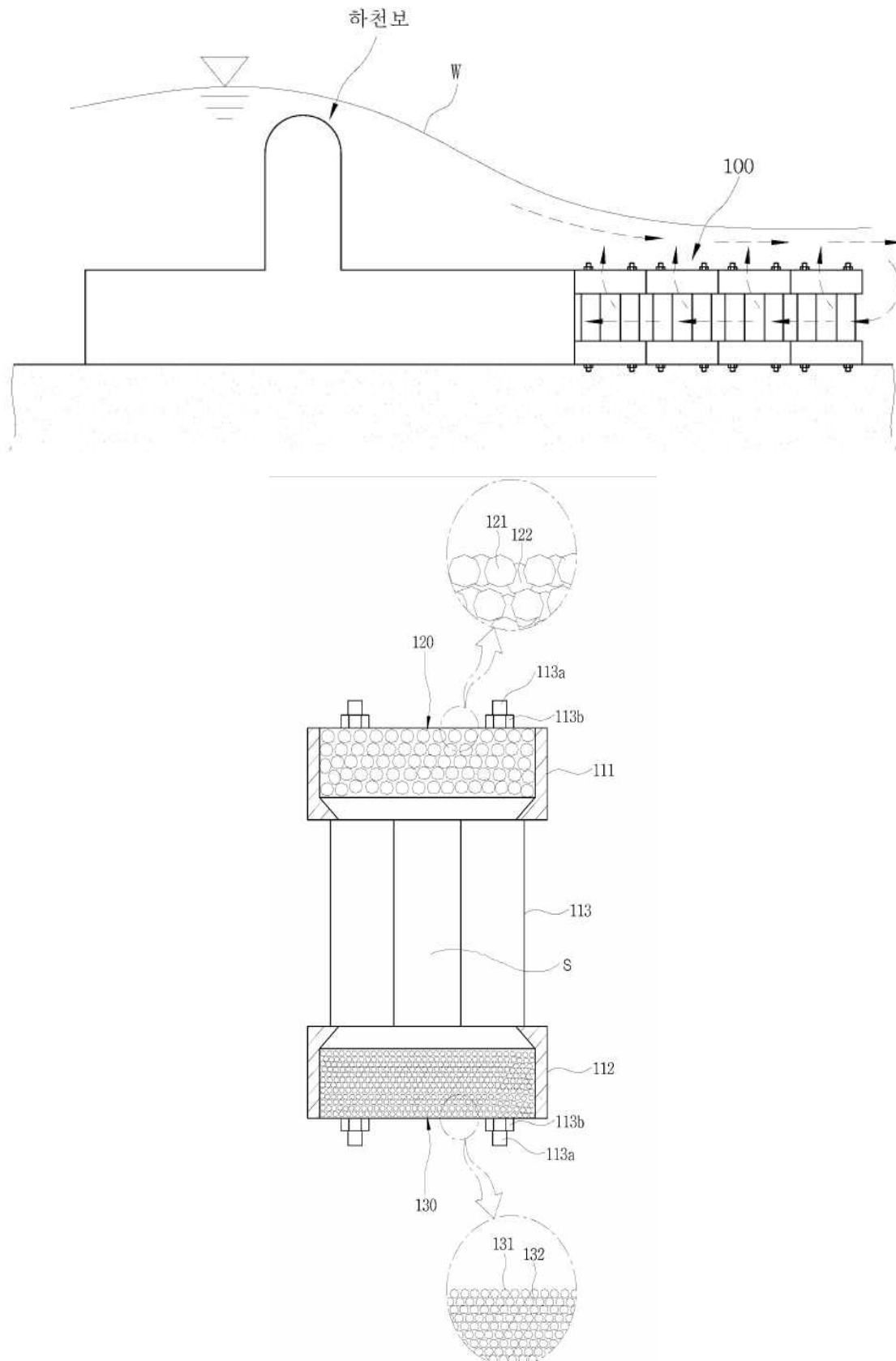


[그림 6.5] 앞의 [그림 6.4]와 같은 지저에서 측정한 부유사 농도. 그림 4와 유사한 경향성을 보이는 것이 중요한 특징이다.

이와 같은 기존연구를 통하여 본 바와 같이, 가속도가 큰 비정상류 흐름에 있어서 입자의 부상
에 연직방향 가속도가 미치는 영향이 매우 크다는 것을 알 수 있으며, 고유속 제트흐름에도 이와
같은 현상이 발생함을 실험실 실험으로 규명하는 것이 본 연구의 주된 목적 중 하나이다.

6.2 제트세굴 수리특성을 고려한 하상보호구조물 실험적 평가

본 연구에서는 제트세굴을 구현하기 위해 개발된 초고속 실험 수로, 3D 바닥 응력 계측기, 초고속입자 영상유속계(Ultra-PIV)를 이용하여 초고속 흐름구조(5 m/s 이상)에 안전한 하상보호구조물을 제안하고자한다. 따라서 보 하류부 제트세굴 수리특성을 고려한 하상보호구조물을 제작하였다. [그림6.6]은 제트세굴 수리특성을 고려한 하상보호구조물 모식도 이다.



[그림 6.6] 제트세굴 수리특성을 고려한 하상보호구조물 모식도

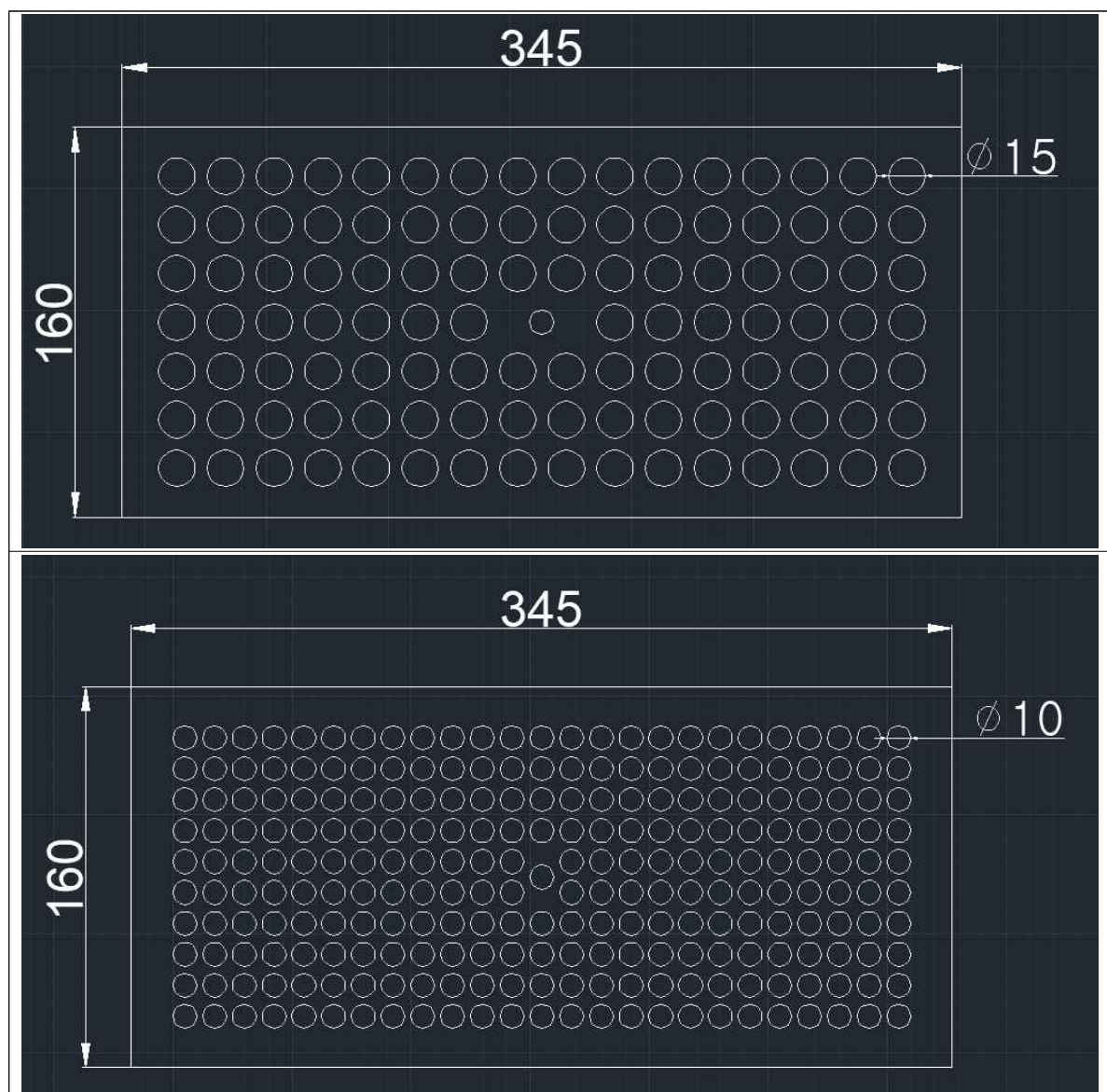
보 하류부에는 고속 흐름의 유속, ±압력등으로 흡출력 발생하게 된다. 이러한 외력으로 인해 하상재료가 유실되고 결국 구조물의 안정성을 위협하게 된다. 따라서 양력, 음압력을 감쇄하는 시설이 필요하다. 2중 다공성 판으로 구성된 제트세굴 수리특성을 고려한 하상보호구조물을 개발하였다.

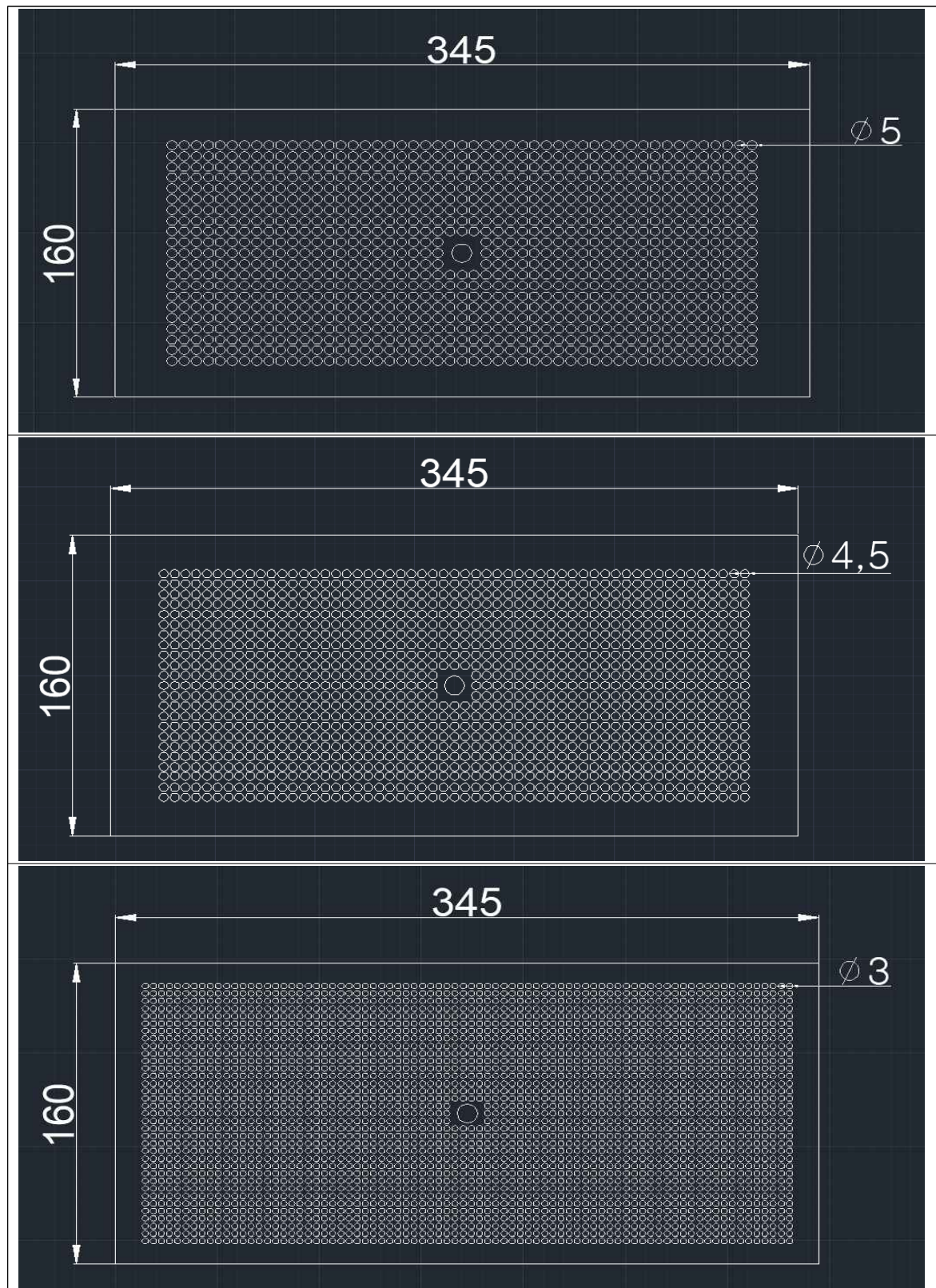
하상은 대부분 모래, 자갈로 이루어져 있다. 이러한 하상재료의 공극률을 반영하여 다공성 구멍 총 개수 면적 대비 판의 전체면적을 약 35%로 해서 총 5개의 다공판을 제작하였다. 아래의 [표 6.1]과 같다.

[표 6.1] 다공판 제원

판 총면적 (mm ²)	다공판 구멍 반지름 (mm)	다공판 구멍 면적 (mm ²)	다공판 구멍 총면적 (mm ²)	다공판 구멍 총 개수	다공판 구멍 총 면적/판 총 면적
55,200	7.50	176.72	19439.20	110	0.35
	5.00	78.54	19477.92	248	0.35
	2.50	19.63	20017.50	1020	0.36
	2.25	15.90	19965.69	1256	0.36
	1.50	7.07	19697.22	2788	0.36

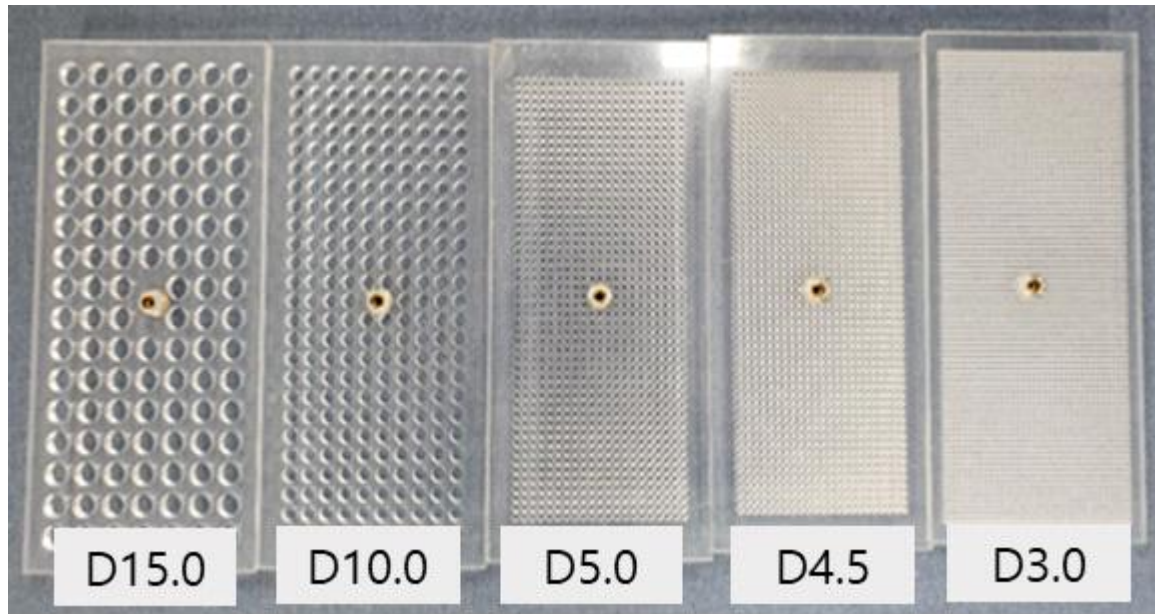
설계 도면은 [그림 6.7]와 같다.





[그림 6.7] 다공판 설계 도면

설계 도면대로 제작한 제트세굴 수리특성을 고려한 하상보호구조물 다공판 및 다공판의 명칭은 [그림 6.8]과 같다.



[그림 6.8] 제작된 다공판 및 다공판 명칭

6.3 제트세굴 수리특성을 고려한 하상보호구조물

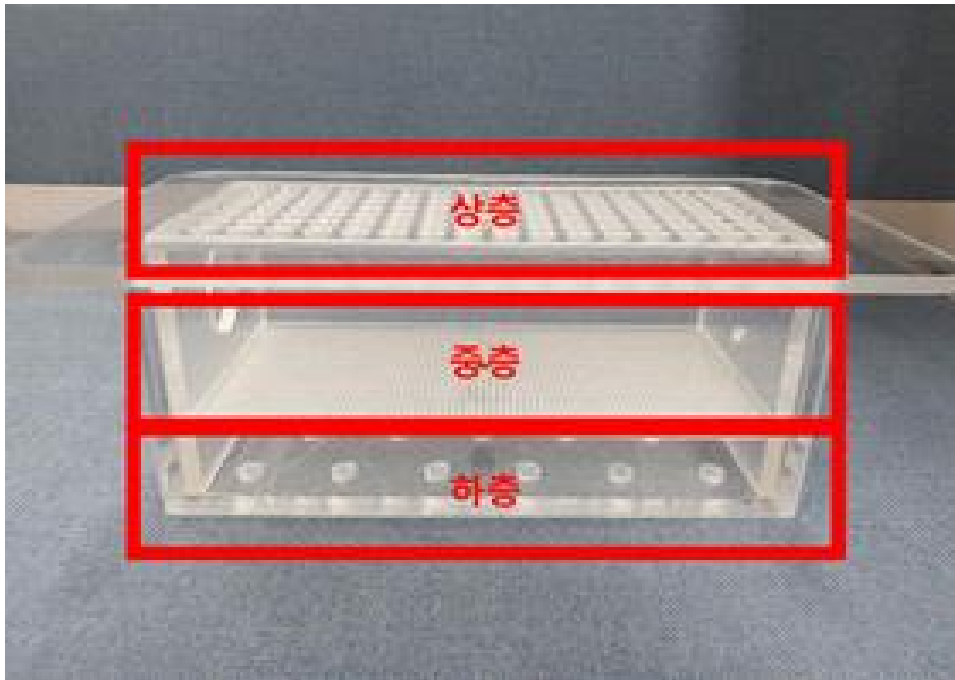
보, 댐, 제방 등과 같은 구조물이 하천을 가로질러 설치된 경우, 보 구조물의 하류에서는 수류에 의해 하상이 파이게 되는 세굴현상이 발생하게 된다. 이러한 세굴을 방지하기 위해 일반적으로 보 구조물의 하류에는 사석이나 블록 등을 하상에 포설하여 바닥보호공을 형성한다.

사석, 블록 등을 이용하여 하상에 바닥보호공을 설치하게 되면, 하상의 상면이 보호되어 하상의 세굴이 방지되지만, 바닥보호공의 끝단 즉, 하류단에서부터는 하상의 지반 노출되어 수류의 흐름에 의해 지반 노출부분에서 하상의 세굴이 발생하는 경우가 많다. 보 하류에서 고속 흐름을 갖는 수류에 의해 하상이 급격히 세굴되면서 하상재료가 유실되는 문제를 최소화한 보 하류 하상재료 유실 방지용 하상 보호장치이다.

제트세굴 수리특성을 고려한 하상보호구조물은 보 하류의 하상에 다수개가 열을 지어 매트릭스 형태로 설치되도록 한 하상 보호장치로서, 하상에 위치하는 형태로 설치되며 상단부와 하단부를 연결하는 복수의 기둥에 의해 상단부와 하단부 중간에 이격공간을 구비하여, 하상 보호장치가 연결되어 이루어진 매트릭스가 끝나는 하류단 인근에서 하천의 본류 중 일부가 회전하면서 정체하려는 경향을 갖지 않고 상기 이격공간을 통해 상류측으로 흐르도록 유도하는 지지본체와 상기 지지본체의 상단부에 설치되어 상측에서는 보를 통과한 하천의 본류가 흐르도록 안내하며, 상기 지지본체의 이격공간을 통해 상류측으로 흐르는 물이 상승하여 본류에 합류하도록 허용하되, 물의 상승속도를 감속시켜주는 다수의 투수용 공극을 구비한 댐퍼블록과 상기 지지본체의 하단부에 설치되어 하상을 덮으면서 하상재료가 상승하지 않도록 차단하는 필터블록을 포함하는 것을 그 기술적 구성상의 특징으로 한다.

이를 바탕으로 제작된 다공판을 [그림 6.9]와 같이 조립하고 조립된 하상보호구조물을 [그림 6.10]과 같이 초고속 실험수로 내에 설치하였다.. 조립된 하상보호장치에 층별로 압력계를 설치 모식도는 [그림 6.11]와 같으며 수리실험을 통해 압력변화를 관찰 하였다.

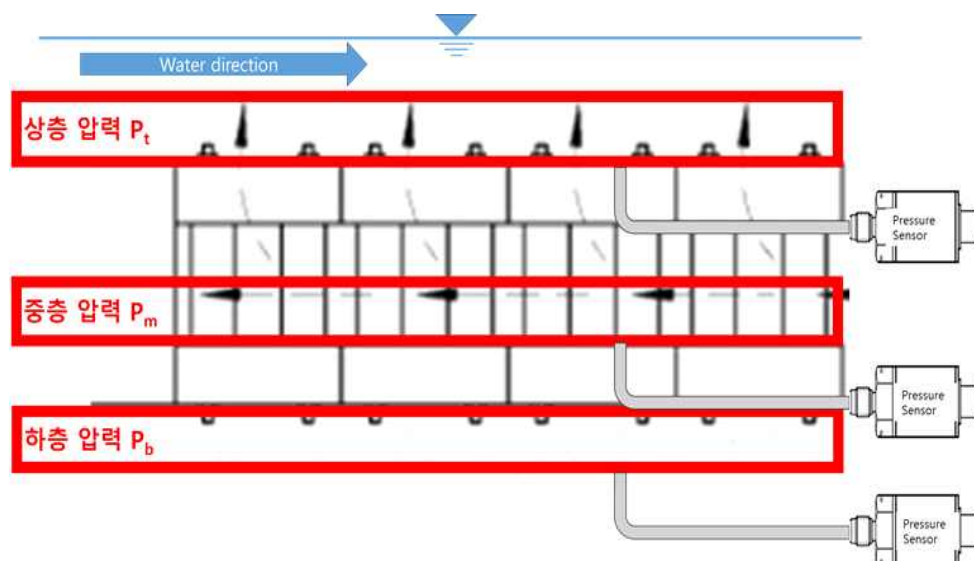
실험 케이스의 명칭의 예는 다음과 같다. UD4.5-MD3.0-VC-Q1에서 UD4.5는 [그림 6.9]에 상층 부분(U)에 직경 4.5 mm 다공판(D4.5)이 설치된 것이며, MD3.0는 중층 부분(M)에 직경 3.0 mm 다공판(D3.0)이 설치되어 조립된 하상보호구조물을 뜻한다. VC는 밸브 닫힘, VO는 밸브 열림이며, Q는 유량케이스 조건이다.



[그림 6.9] 조립된 하상보호장치



[그림 6.10] 초고속 실험 수로내 설치된 하상보호장치



[그림 6.11] 하상 보호장치 층별 압력계 설치 모식도

6.4 제트세굴 수리특성을 고려한 하상보호구조물 실험 결과

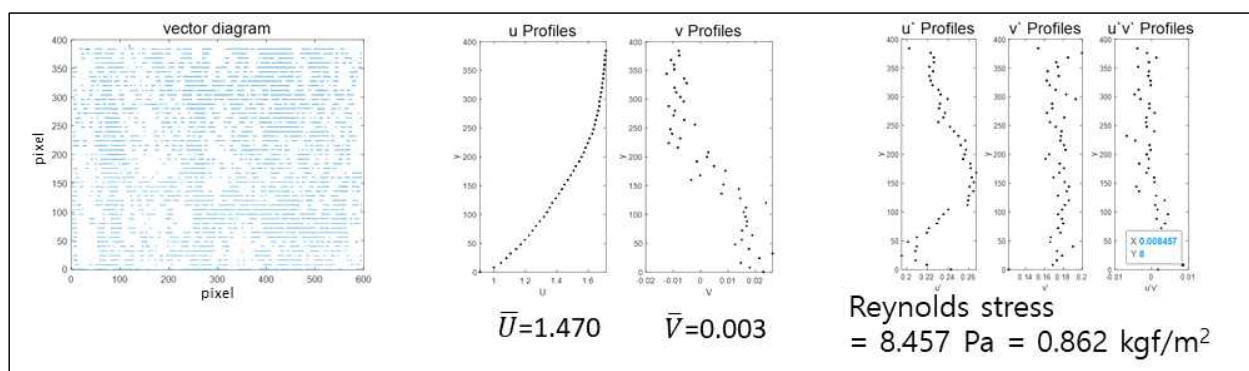
하상보호구조물은 6.3 에서 언급했듯이 다수개가 열을 지어 매트릭스 형태로 설치되도록 하여야 한다. 이 경우 강한 유속 지역과 약한 유속 지역의 수리적 특성 변화로 고유속에 따른 압력변화가 큰 곳으로 작은 지역의 물이 움직이게 된다. 하지만 고속수로 내에 다수개를 설치하기 힘들어 압력변화에 따른 하부 물 움직임을 원활하게 하기 위해 수조, 배관 및 밸브를 설치하였다. 배관에 설치된 밸브를 열고 닫으며 다양한 수리조건에서 수리실험을 통해 하상보호장치의 검증실험을 진행하였다. 또한 층별로 압력계를 설치하여 압력변화를 관찰 하였다.

[표 6.2]은 실험 CASE UD4.5-MD3.0-VC-Q1의 수리실험 결과이다. 배관 밸브 닫힌 상태에서 초고속 실험 수로 내 하상보호구조물 상층 4.5 mm, 중층 3.0 mm 를 설치하고 유량 조건 0.026 m³/s 일 때 3D 바닥응력 계측기, 초고속입자영상유속계(ULTRA-PIV), 압력계 등 수리특성 측정 장치들로 측정한 결과이다.

[표 6.2] CASE UD4.5-MD3.0-VC-Q1의 수리실험 결과

CASE Name	UD4.5-MD3.0-VC-Q1
배관 밸브	닫힘
유량(m ³ /s)	0.026
PIV 유속 (m/s)	1.470
측정 소류력 (kgf/m ²)	0.766
Reach-averaged method (kgf/m ²)	0.762
Reynolds stress (kgf/m ²)	0.862
상층 압력 (kPa)	1.137
중층 압력 (kPa)	1.168
하층 압력 (kPa)	1.166
중층 압력에 대한 상층 압력의 백분율 (%)	2.7

[그림 6.12]는 동일 시간 대 초고속 수리 구조 해석 프로그램으로 분석한 결과이다. 분석결과 평균 유속은 1.470 m/s 로 나타났으며 Reynolds stress는 0.862 kgf/m² 으로 나타났다.



[그림 6.12] 초고속 수리 구조 해석 프로그램 분석 결과 (UD4.5-MD3.0-VC-Q1)

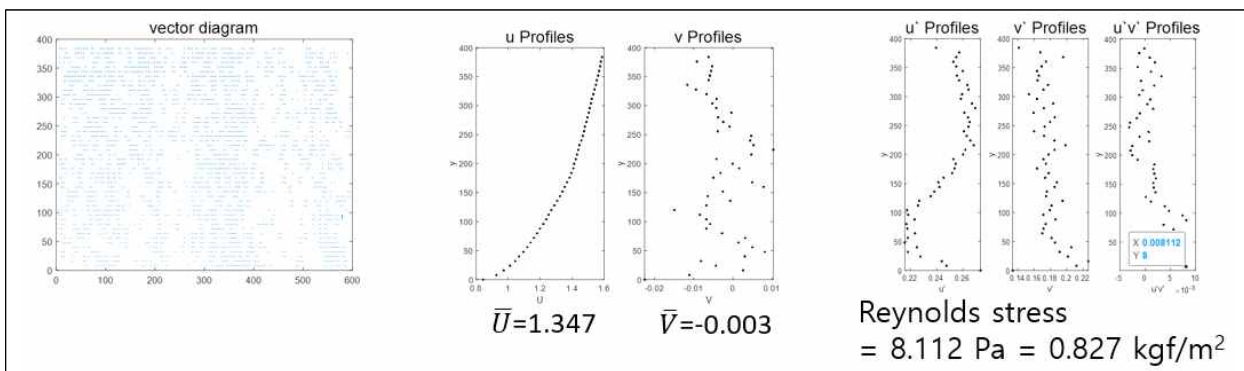
Reach averaged method로 계산되어진 소류력은 0.762 kgf/m^2 , 3D 바닥 응력 계측기로 측정된 측정 소류력은 0.766 kgf/m^2 이다. 중층압력에 대한 상층압력의 백분율은 2.7 % 이다.

[표 6.3]은 실험 CASE UD4.5-MD3.0-VO-Q1의 수리실험 결과이다. 초고속 실험 수로 내 하상보호구조물 상층 4.5 mm, 중층 3.0 mm 를 설치하고 배관 밸브 열린 상태에서 유량 조건 $0.029 \text{ m}^3/\text{s}$ 일 때 3D 바닥응력 계측기, 초고속입자영상유속계, 압력계 등 수리특성 측정 장치들로 측정한 결과이다.

[표 6.3] CASE UD4.5-MD3.0-VO-Q1의 수리실험 결과

CASE Name	UD4.5-MD3.0-VO-Q1
배관 밸브	열림
유량(m^3/s)	0.029
PIV 유속 (m/s)	1.347
측정 소류력 (kgf/m^2)	0.920
Reach-averaged method (kgf/m^2)	0.640
Reynolds stress (kgf/m^2)	0.827
상층 압력 (kPa)	1.069
중층 압력 (kPa)	1.158
하층 압력 (kPa)	1.153
중층 압력에 대한 상층 압력의 백분율 (%)	8.3

[그림 6.13]는 초고속 수리 구조 해석 프로그램으로 분석한 결과이다. 분석결과 평균 유속은 1.347 m/s 로 나타났으며 Reynolds stress는 0.827 kgf/m^2 으로 나타났다.



[그림 6.13] 초고속 수리 구조 해석 프로그램 분석 결과 (UD4.5-MD3.0-VO-Q1)

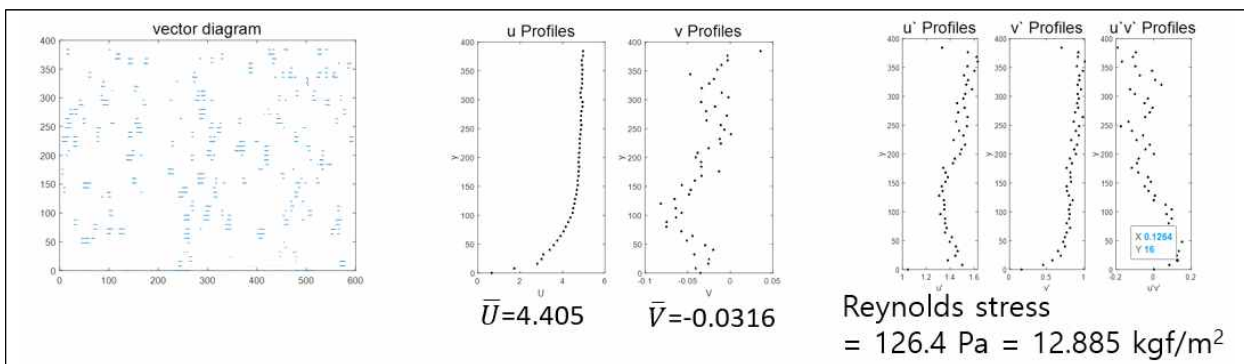
Reach averaged method로 계산되어진 소류력은 0.640 kgf/m^2 , 3D 바닥 응력 계측기로 측정된 측정 소류력은 0.920 kgf/m^2 이다. 중층압력에 대한 상층압력의 백분율은 8.3 % 이다.

[표 6.4]은 실험 CASE UD4.5-MD3.0-VC-Q2의 수리실험 결과이다. 초고속 실험 수로 내 하상보호구조물 상층 4.5 mm, 중층 3.0 mm 를 설치하고 배관 밸브 닫힌 상태에서 유량 조건 0.087 m³/s 일 때 3D 바닥응력 계측기, 초고속입자영상유속계, 압력계 등 수리특성 측정 장치들로 측정한 결과이다.

[표 6.4] CASE UD4.5-MD3.0-VC-Q2의 수리실험 결과

CASE Name	UD4.5-MD3.0-VC-Q2
배관 밸브	닫힘
유량(m ³ /s)	0.087
PIV 유속 (m/s)	4.405
측정 소류력 (kgf/m ²)	1.873
Reach-averaged method (kgf/m ²)	7.181
Reynolds stress (kgf/m ²)	12.885
상층 압력 (kPa)	0.824
중층 압력 (kPa)	0.888
하층 압력 (kPa)	0.884
중층 압력에 대한 상층 압력의 백분율 (%)	7.8

[그림 6.14]는 초고속 수리 구조 해석 프로그램으로 분석한 결과이다. 분석결과 평균 유속은 4.405 m/s 로 나타났으며 Reynolds stress는 12.885 kgf/m² 으로 나타났다.



[그림 6.14] 초고속 수리 구조 해석 프로그램 분석 결과 (UD4.5-MD3.0-VC-Q2)

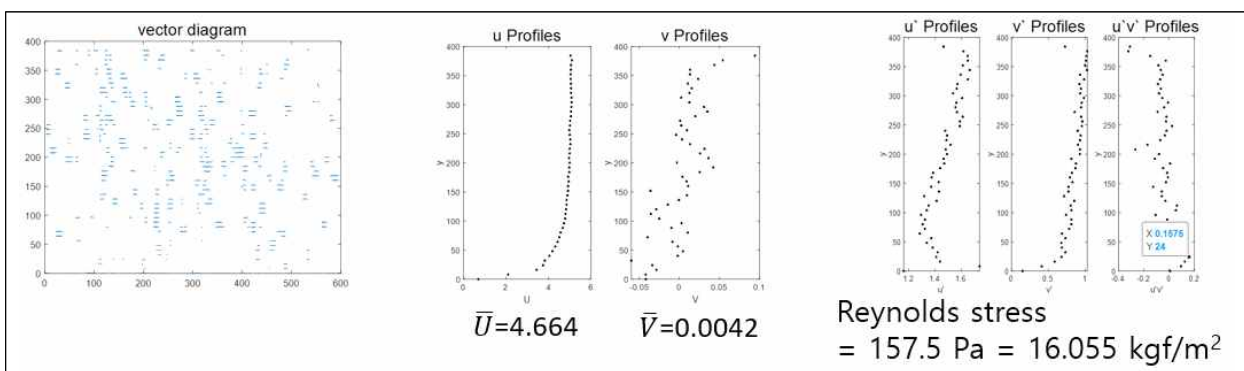
Reach averaged method로 계산되어진 소류력은 7.181 kgf/m², 3D 바닥 응력 계측기로 측정된 측정 소류력은 1.873 kgf/m² 이다. 상층압력과 중층압력 비는 7.8 % 이다.

[표 6.5]은 실험 CASE UD4.5-MD3.0-VO-Q2의 수리실험 결과이다. 초고속 실험 수로 내 하상보호구조물 상층 4.5 mm, 중층 3.0 mm 를 설치하고 배관 밸브 열린 상태에서 유량 조건 0.089 m³/s 일 때 3D 바닥응력 계측기, 초고속입자영상유속계(ULTRA-PIV), 압력계 등 수리특성 측정 장치들로 측정한 결과이다.

[표 6.5] CASE UD4.5-MD3.0-VO-Q2의 수리실험 결과

CASE Name	UD4.5-MD3.0-VO-Q2
배관 밸브	열림
유량(m ³ /s)	0.089
PIV 유속 (m/s)	4.664
측정 소류력 (kgf/m ²)	2.050
Reach-averaged method (kgf/m ²)	8.051
Reynolds stress (kgf/m ²)	16.055
상층 압력 (kPa)	0.806
중층 압력 (kPa)	0.871
하층 압력 (kPa)	0.873
중층 압력에 대한 상층 압력의 백분율 (%)	8.1

[그림 6.15]는 초고속 수리 구조 해석 프로그램으로 분석한 결과이다. 분석결과 평균 유속은 4.664 m/s 로 나타났으며 Reynolds stress는 16.055 kgf/m² 으로 나타났다.



[그림 6.15] 초고속 수리 구조 해석 프로그램 분석 결과 (UD4.5-MD3.0-VO-Q2)

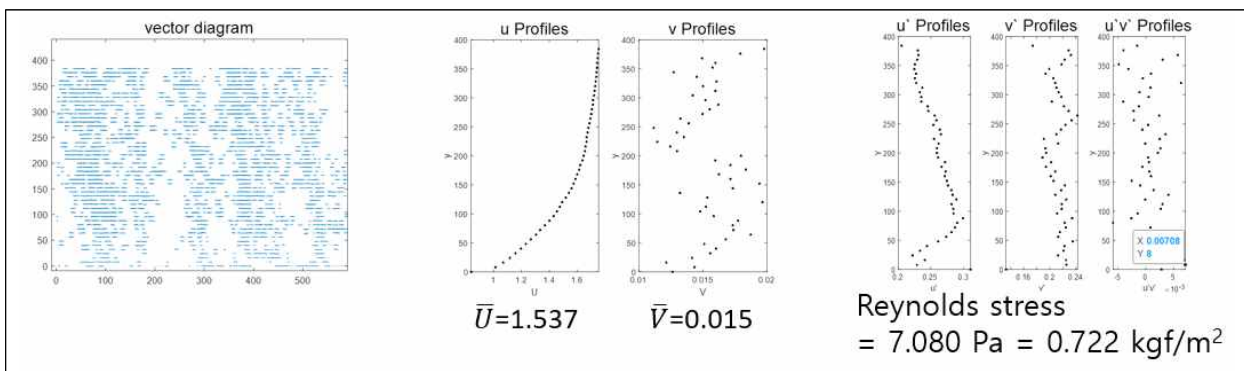
Reach averaged method로 계산되어진 소류력은 8.051 kgf/m², 3D 바닥 응력 계측기로 측정된 측정 소류력은 2.050 kgf/m² 이다. 상층압력과 중층압력 비는 8.1 % 이다.

[표 6.6]은 실험 CASE UD15.0-MD3.0-VC-Q1의 수리실험 결과이다. 초고속 실험 수로 내 하상보호구조물 상층 15.0 mm, 중층 3.0 mm 를 설치하고 배관 밸브 닫힌 상태에서 유량 조건 0.026 m³/s 일 때 3D 바닥응력 계측기, 초고속입자영상유속계(ULTRA-PIV), 압력계 등 수리특성 측정 장치들로 측정한 결과이다.

[표 6.6] CASE UD15.0-MD3.0-VC-Q1의 수리실험 결과

CASE Name	UD15.0-MD3.0-VC-Q1
배관 밸브	닫힘
유량(m ³ /s)	0.026
PIV 유속 (m/s)	1.537
측정 소류력 (kgf/m ²)	0.564
Reach-averaged method (kgf/m ²)	0.893
Reynolds stress (kgf/m ²)	0.722
상층 압력 (kPa)	1.000
중층 압력 (kPa)	1.058
하층 압력 (kPa)	1.049
중층 압력에 대한 상층 압력의 백분율 (%)	5.8

[그림 6.16]는 초고속 수리 구조 해석 프로그램으로 분석한 결과이다. 분석결과 평균 유속은 1.537 m/s 로 나타났으며 Reynolds stress는 0.722 kgf/m² 으로 나타났다.



[그림 6.16] 초고속 수리 구조 해석 프로그램 분석 결과 (U1D5.0-MD3.0-VC-Q1)

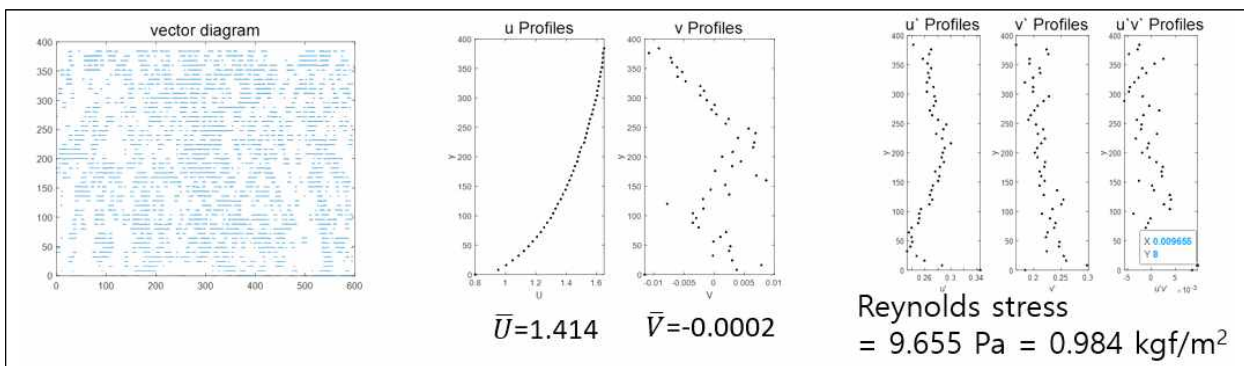
Reach averaged method로 계산되어진 소류력은 0.893 kgf/m², 3D 바닥 응력 계측기로 측정된 측정 소류력은 0.564 kgf/m² 이다. 상층압력과 중층압력 비는 5.8 % 이다.

[표 6.7]는 실험 CASE UD15.0-MD3.0-VO-Q1의 수리실험 결과이다. 초고속 실험 수로 내 하상보호구조물 상층 15.0 mm, 중층 3.0 mm 를 설치하고 배관 밸브 열린 상태에서 유량 조건 0.026 m³/s 일 때 3D 바닥응력 계측기, 초고속입자영상유속계(ULTRA-PIV), 압력계 등 수리특성 측정 장치들로 측정한 결과이다.

[표 6.7] CASE UD15.0-MD3.0-VO-Q1의 수리실험 결과

CASE Name	UD15.0-MD3.0-VO-Q1
배관 밸브	열림
유량(m ³ /s)	0.026
PIV 유속 (m/s)	1.414
측정 소류력 (kgf/m ²)	0.492
Reach-averaged method (kgf/m ²)	0.707
Reynolds stress (kgf/m ²)	0.984
상층 압력 (kPa)	1.073
중층 압력 (kPa)	1.121
하층 압력 (kPa)	1.108
중층 압력에 대한 상층 압력의 백분율 (%)	4.4

[그림 6.17]는 초고속 수리 구조 해석 프로그램으로 분석한 결과이다. 분석결과 평균 유속은 1.414 m/s 로 나타났으며 Reynolds stress는 0.984 kgf/m² 으로 나타났다.



[그림 6.17] 초고속 수리 구조 해석 프로그램 분석 결과 (UD15.0-MD3.0-VO-Q1)

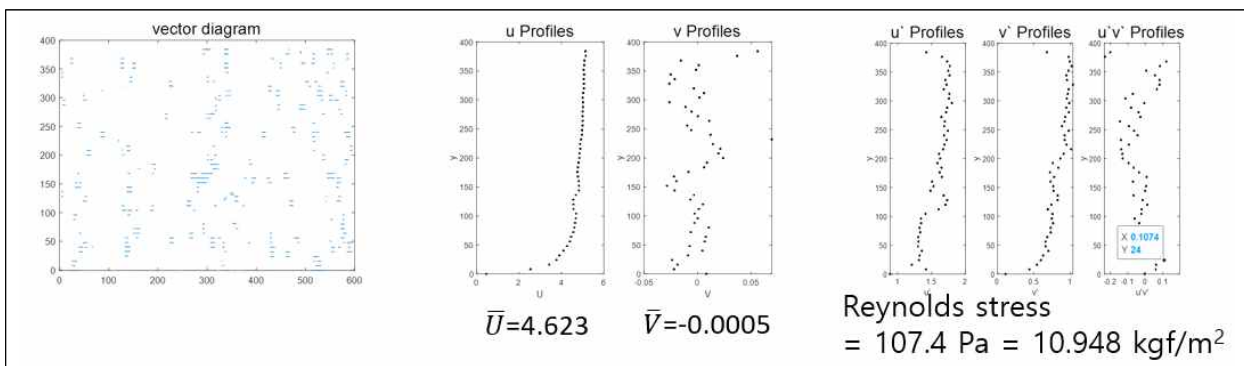
Reach averaged method로 계산되어진 소류력은 0.707 kgf/m², 3D 바닥 응력 계측기로 측정된 측정 소류력은 0.492 kgf/m² 이다. 상층압력과 중층압력 비는 4.4 % 이다.

[표 6.8]는 실험 CASE UD15.0-MD3.0-VC-Q2의 수리실험 결과이다. 초고속 실험 수로 내 하상보호구조물 상층 15.0 mm, 중층 3.0 mm 를 설치하고 배관 밸브 닫힌 상태에서 유량 조건 0.089 m³/s 일 때 3D 바닥응력 계측기, 초고속입자영상유속계(ULTRA-PIV), 압력계 등 수리특성 측정 장치들로 측정한 결과이다.

[표 6.8] CASE UD15.0-MD3.0-VC-Q2의 수리실험 결과

CASE Name	UD15.0-MD3.0-VC-Q2
배관 밸브	닫힘
유량(m ³ /s)	0.089
PIV 유속 (m/s)	4.623
측정 소류력 (kgf/m ²)	2.574
Reach-averaged method (kgf/m ²)	7.943
Reynolds stress (kgf/m ²)	10.948
상층 압력 (kPa)	0.841
중층 압력 (kPa)	0.743
하층 압력 (kPa)	0.739
중층 압력에 대한 상층 압력의 백분율 (%)	-12.3

[그림 6.18]는 초고속 수리 구조 해석 프로그램으로 분석한 결과이다. 분석결과 평균 유속은 4.623 m/s 로 나타났으며 Reynolds stress는 10.948 kgf/m² 으로 나타났다.



[그림 6.18] 초고속 수리 구조 해석 프로그램 분석 결과 (UD15.0-MD3.0-VC-Q2)

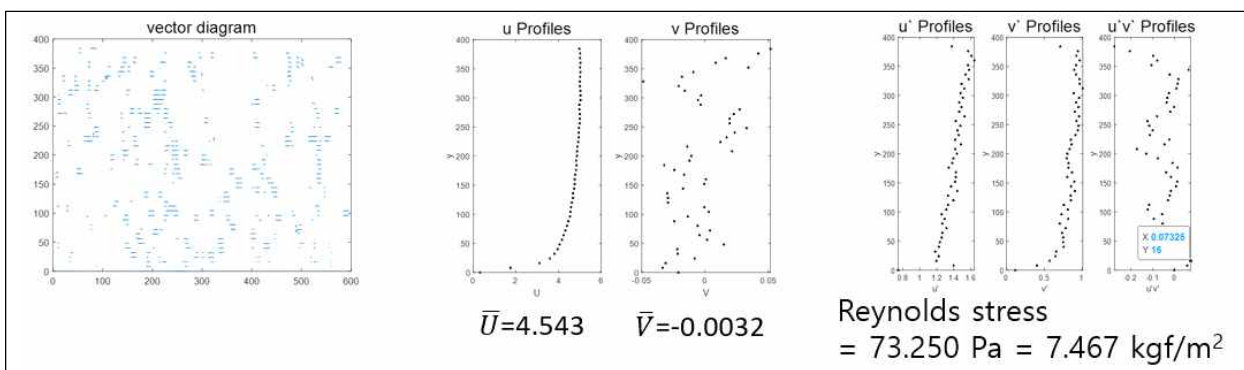
Reach averaged method로 계산되어진 소류력은 7.943 kgf/m², 3D 바닥 응력 계측기로 측정된 측정 소류력은 1.604 kgf/m² 이다. 상층압력과 중층압력 비는 -12.3 % 이다.

[표 6.9]는 실험 CASE UD15.0-MD3.0-VO-Q2의 수리실험 결과이다. 초고속 실험 수로 내 하상보호구조물 상층 15.0 mm, 중층 3.0 mm 를 설치하고 배관 밸브 열린 상태에서 유량 조건 0.087 m³/s 일 때 3D 바닥응력 계측기, 초고속입자영상유속계(ULTRA-PIV), 압력계 등 수리특성 측정 장치들로 측정한 결과이다.

[표 6.9] CASE U1D5.0-MD3.0-VO-Q2의 수리실험 결과

CASE Name	UD15.0-MD3.0-VO-Q2
배관 밸브	열림
유량(m ³ /s)	0.087
PIV 유속 (m/s)	4.543
측정 소류력 (kgf/m ²)	3.215
Reach-averaged method (kgf/m ²)	7.671
Reynolds stress (kgf/m ²)	7.467
상층 압력 (kPa)	0.857
중층 압력 (kPa)	0.717
하층 압력 (kPa)	0.710
중층 압력에 대한 상층 압력의 백분율 (%)	-16.3

[그림 6.19]는 초고속 수리 구조 해석 프로그램으로 분석한 결과이다. 분석결과 평균 유속은 4.543 m/s 로 나타났으며 Reynolds stress는 7.467 kgf/m² 으로 나타났다.



[그림 6.19] 초고속 수리 구조 해석 프로그램 분석 결과 (UD15.0-MD3.0-VO-Q2)

Reach averaged method로 계산되어진 소류력은 7.671 kgf/m², 3D 바닥 응력 계측기로 측정된 측정 소류력은 1.793 kgf/m² 이다. 상층압력과 중층압력 비는 -16.3 % 이다.

고유속(4 m/s 이상) 수리조건에서 다공판 상층을 바뀌가며 실험한 전체 결과는 [표 6.10]과 같다.

하상보호구조물(다공판)의 효과를 분석하기에 앞서 고유속(4 m/s 이상), 매끈한 아크릴에서의 소류력을 측정하였다. 실험 결과 3D 바닥응력 계측기로 직접 측정한 소류력은 3.099 kgf/m², 측정된 유속을 통해 계산된 Reach-averaged method 값은 3.298 kgf/m², 초고속 수리구조 해석 프로그램을 통해 산정된 Reynolds stress는 2.952 kgf/m² 로 산정되었다. 측정 소류력 및 계산 소류력은 유사하게 나타났다(측정소류력 대비 ±10%).

매끈한 아크릴판의 측정 소류력 데이터 기준으로 3D 바닥 응력 계측기로 직접 측정한 소류력은 매끈한 아크릴판 측정 소류력 데이터와 유사하거나 낮았다(-34 ~ 8 %). 측정된 유속을 통해 계산된 Reach-averaged method 값은 매끈한 아크릴판 Reach-averaged method 데이터와 유사하거나 높은 것으로 분석되었다(-11 ~ 26 %). 초고속 수리구조 해석 프로그램을 통해 산정된 Reynolds stress 값은 매끈한 아크릴판 Reynolds stress 데이터에 비해 상당히 높은 것으로 분석되었다(207 ~ 544 %).

수로 바닥에서 직접 측정하는 3D 바닥 응력계측기는 안정적으로 일정한 바닥 전단응력을 측정하는 반면 간접적으로 계산 되어지는 Reach-averaged method 와 Reynolds stress 값은 다공판의 설치로 인해 발생된 강한 난류의 영향을 받는 것으로 분석되었다.

[표 6.10] 고유속 실험 결과 전체 비교

Case Name	밸브	유량 (m ³ /s)	PIV 유속 (m/s)	측정 소류력 (kgf/m ²)	Reach-averaged method (kgf/m ²)	Reynolds stress (kgf/m ²)
매끈한 아크릴	열림	0.088	4.201	3.099	3.298	2.952
UD15.0-MD3.0-VO-Q2	열림	0.087	4.543	3.215	3.849	7.467
UD15.0-MD3.0-VC-Q2	닫힘	0.089	4.623	2.574	3.985	10.948
UD15.0-MD3.0-VO-Q3	열림	0.089	4.31	2.963	3.456	14.427
UD15.0-MD3.0-VC-Q3	닫힘	0.088	4.088	3.284	3.049	4.145
UD15.0-MD3.0-VO-Q4	열림	0.091	4.723	2.072	4.142	10.209
UD15.0-MD3.0-VC-Q4	닫힘	0.096	4.737	2.197	4.158	19.533
UD10.0-MD3.0-VO-Q2	열림	0.093	4.61	3.110	3.962	6.114
UD5.0-MD3.0-VO-Q2	열림	0.092	4.38	2.924	3.557	7.068
UD4.5-MD3.0-VO-Q2	열림	0.089	4.664	2.050	4.039	16.055
UD4.5-MD3.0-VC-Q2	닫힘	0.087	4.405	1.873	3.603	12.885
UD4.5-MD3.0-VO-Q3	열림	0.090	3.95	3.359	2.922	8.961

[6.11]은 배관 벨브가 열린 CASE의 상층, 중층의 압력 변화는 [표6.11]과 같다.

분석결과 상층의 다공성 구멍 직경이 클 경우 상층부 압력이 중층부로 전달되어 중층에서 측정되는 압력이 증폭되었으며, 상층의 다공성 구멍 직경이 작을 경우 상층부에서 중층부로 전달 압력이 감소하여 중층에서 측정되는 압력이 감소하였다.

상층과 중층의 다공성 구멍의 직경을 적절한 사이즈로 조절하면 상층부의 압력이 중층부로 전달되는 것을 막을 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 제시한 하상보호구조물은 압력에 의해 하상에서 흡출되는 유사를 막을 수 있는 것으로 판단된다. 추후 상, 중층의 다공성판 개구 직경의 상대적 차이에 따른 압력 감소효율에 관한 연구가 추가연구로 수행될 필요가 있다고 판단된다.

[표 6.11] 벨브 열린 CASE의 상층, 중층의 압력 변화

CASE Name	PIV 유속 (m/s)	상층 압력 변화	중층 압력 변화
UD4.5-MD3.0-VO-Q1	1.374	-15.887	-6.812
UD4.5-MD3.0-VO-Q2	4.664	-14.882	-8.254
UD15.0-MD3.0-VO-Q1	1.414	-14.991	-10.097
UD15.0-MD3.0-VO-Q2	4.533	-7.790	-22.066

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

- 초고속 흐름구조 재현 수로, 3D 바닥 응력 계측기, 초고속 입자 영상 유속계(ULTRA-PIV)등의 실험 장비 및 장치들을 개발, 검증, 안정화 시키는데 많은 시간이 걸렸다.
- 총 연구기간동안 국내 논문 4건이 목표 였으나, 실험 결과가 좋고 과제 유형에 맞게 좋은 성과를 내기 위해 결과 내용을 국제 학술지에 게재 하려다보니 다소 성과가 늦게 나오고 있다.

핵심성과	단위성과	성과지표	성과점검기준				가중치	달성도
			목표치	달성치	측정방법	검증방법		
극한홍수 대비 대 기능보 안정성 강 화를 위한 보 하 류 초고속 흐름구 조(5 m/s 이상)와 바닥전단응력 실 측 및 제트세굴 방지 원천 기술 개발	오리피스 타입 초고속 실험수로 및 침단 계측기 개발	초고속흐름 구조 재현 (고정상 초 고속 실험 수로 개발 및 실험)	5 m/s 이 상	5.6 m/s 이상 구현가능	계측실험	동영상 증빙	25.0	<u>25.0</u>
		3D 바닥 응력 계측 기 개발	장치개발	개발완료	계측실험	동영상 증빙	12.5	12.5
		초고속입자 영상유속계 (ULTRA-PI V) 개발	장치개발	개발완료	계측실험	동영상 증빙	12.5	12.5
	초고속수로에서의 이 동상실험을 통한 보 하류 제트세굴 현상 규명	초고속 수 리구조 해 석프로그램 개발	소프트웨 어 등록	소프트웨 어 등록 완료	연구단 자체평가	평가점수	10	10
		유속별, 이 동상 입자 별 제트세 굴 수리특 성 분석	80점	93점	연구단 자체평가	평가점수	15	15
	제트세굴의 연직방향 부압 제어 및 대 규모 침식 방지 기술 개발	수리실험을 통한 연직 방향 가속 도에 의한 하상입자재 부상 메카 니즘의 이 론 수립	80점	92점	연구단 자체평가	평가점수	25	25
계							100	<u>100</u>

성과지표	목표치	달성치	가중치	달성도
특허출원	1	1	40	40
학술지 논문 게재	4	0(4)	40	
S/W 등록	2	2	20	20
계			100	

- 추가 성과

특허등록 1건 - 이중 다공성 판 구조를 갖는 보 하류 하상재료 유실 방지용 하상 보호장치 (10-2020589)

학술회의 발표 1건- 김민규, 박재현, 김영도, 박용성(2019.10.18.), S-Beam형 로드셀을 이용한 3차원 바닥 응력 계측기 개발, 대한토목학회

인력양성 1건- 이재경(석사), 2019.02.15., An Experimental Study on the Development and Verification of Three-Dimensional Tractive Force Measuring Device Using IoT-Based Arduino,

- 현재 논문 투고 및 심사 진행 상황

1. KSCE 투고중

KSCE Journal of Civil Engineering
Development of IoT-enabled sensor for three-dimensional measurement of tractive force
 --Manuscript Draft--

Manuscript Number:	KSCE-D-19-02311	
Full Title:	Development of IoT-enabled sensor for three-dimensional measurement of tractive force	
Article Type:	Research Paper	
Corresponding Author:	Jaehyeon Park, Ph.D. Inje University Gimhae, Gyeongnam KOREA, REPUBLIC OF	
Corresponding Author Secondary Information:		
Corresponding Author's Institution:	Inje University	
Corresponding Author's Secondary Institution:		
First Author:	Jae Gyeong Lee, M.Eng.	
First Author Secondary Information:		
Order of Authors:	Jae Gyeong Lee, M.Eng.	
	Min Gyu Kim, Ph.D Student	
	Jaehyeon Park, Ph.D.	
Order of Authors Secondary Information:		
Funding Information:	Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement (19CTAP-C143545-02)	Not applicable
Abstract:	Recently, IoT (Internet of Things) and information and communication technologies such as big data and others due to fourth industrial revolution have become more accessible to individuals. Thus, a three-dimensional tractive force measuring sensor using IoT-based instrument was developed to enhance measurement convenience and to monitor real-time through data communication rather than existing tractive force measuring devices. To verify the measuring devices developed in this study, we compared three-dimensional tractive force measuring devices using an arduino and three-dimensional tractive force measuring devices using data logger. By analyzing the hydraulic characteristics in the high speed channel, the tractive force was calculated using a theoretical formula (Reach-overaged method, TKE method, Reynolds stress method). Based on this, we compared the tractive force using arduino and the tractive force using data logger. Experimental results show that the measurement using arduino is highly sensitive but it is lower than the data logger in terms of precision. Each measured tractive force was similar to the calculated tractive force when the roughness coefficient of acrylic was 0.012 in the Reach-averaged method.	
Author Comments:	Development of IoT-enabled sensor for three-dimensional measurement of tractive force	

2. Journal of Hydraulic Research 수정 후 게재가



3-d shear plate for bottom shear stress using s-beam type load cell

Journal:	Journal of Hydraulic Research
Manuscript ID:	TJHR-2019-0254
Manuscript Type:	Research paper
Date Submitted by the Author:	12-Nov-2019
Complete List of Authors:	Kim, Min Gyu; Inje University Jung, Dong Gyu; Inje University Park, Jae Hyeon; Inje University Kim, Young Do; Inje University Park, Yong Sung; Seoul National University
Keywords:	river maintenance, bottom shear stress, roughness, high-speed channel, shear plate
JHR Keywords:	High-Reynolds-number turbulence < Turbulent flows, Open channel flow turbulence < Turbulent flows, Experimental facilities < Instrumentation, measurements and experimental methods, Instrumentation, measurements and experimental methods

3. Environmental Fluid Mechanics (EFMC) 투고중

EFMC-D-19-00198 - Submission Confirmation



Environmental Fluid Mechanics (EFMC) <em@editorialmanager.com>

2019-11-22 오전 12:25

받는 사람: Min Gyu Kim

You are being carbon copied ("cc'd") on an e-mail "To" "Young Do Kim" ydkim@inje.ac.kr

CC: "Dong Gyu Jung" jdonggue@naver.com, "Min Gyu Kim" yunhan629@naver.com, "Gwang Soo Kim" gwangsoo5180@naver.com, "Yong Sung Park" dryspark@snu.ac.kr, "Jae Hyeon Park" jh-park@inje.ac.kr

Dear Prof. Kim,

Thank you for submitting your manuscript, Estimation of Bottom Shear Stress by Particle Image Velocimetry Measurement at High-speed Flow Conditions, to Environmental Fluid Mechanics.

The submission id is: EFMC-D-19-00198

Please refer to this number in any future correspondence.

During the review process, you can keep track of the status of your manuscript by accessing the Editorial Manager Website.

Your username is: *****

If you forgot your password, you can click the 'Send Login Details' link on the EM Login page at <https://www.editorialmanager.com/efmc/>

Should you require any further assistance please feel free to e-mail the Editorial Office by clicking on "Contact Us" in the menu bar at the top of the screen.

With kind regards,
Springer Journals Editorial Office
Environmental Fluid Mechanics

Now that your article will undergo the editorial and peer review process, it is the right time to think about publishing your article as open access. With open access your article will become freely available to anyone worldwide and you will easily comply with open access mandates. Springer's open access offering for this journal is called Open Choice (find more information on www.springer.com/openchoice). Once your article is accepted, you will be offered the option to publish through open access. So you might want to talk to your institution and funder now to see how payment could be organized; for an overview of available open access funding please go to www.springer.com/oafunding. Although for now you don't have to do anything, we would like to let you know about your upcoming options.

4. MDPI-Fluids 투고중

[Fluids] Manuscript ID: fluids-645006 - Revision Request before Peer Review



Steven Xu <steven.xu@mdpi.com>

2019-11-04 오전 11:52

받는 사람: Yong Sung Park 참조: Jae Hyeon Park; Young Do Kim; Min Gyu Kim; Yong Sung Park; Fluids Editorial Office

Dear Dr. Park,

Thank you very much for submitting the following manuscript:

Manuscript ID: fluids-645006

Type of manuscript: Review

Title: Review on methods of bed shear stress estimation

Authors: Jae Hyeon Park, Young Do Kim, Min Gyu Kim, Yong Sung Park *

Received: 1 November 2019

E-mails: jh-park@inje.ac.kr, ydkim@inje.ac.kr, yunhan629@naver.com,
dryspark@snu.ac.kr

https://susy.mdpi.com/user/manuscripts/review_info/29f96c3de9003ea2bfd386341733a1e9

We have sent your manuscript to our academic editor to check its suitability for peer review. Please see the following comments from the academic editor:

If it is to be a Review of..., then many more references are needed and more discussions. Furthermore, the analysis should not be limited to 2-dimensional or specific cases. They should also discuss the advances made on the no-slip boundary conditions in the last few decades.

In order to ensure a smooth peer review, we hope you could address these comments first.

If possible, we would be glad to receive your modified manuscript within 5 days. Once you have modified your manuscript, you may resubmit it at:

<https://susy.mdpi.com/user/manuscripts/resubmit/29f96c3de9003ea2bfd386341733a1e9>

Please note that your manuscript will receive a new submission date after resubmission.

2. 관련 분야 기여도

(1) 공공적 성과

- 안정한 하천 구조물 설계 가이드라인을 통한 설계 비용 절감

(2) 기술적 성과

- 관련 구조물(하천 횡단 구조물)의 안정성 평가를 위한 적정 성능 기준 제시
- 횡단구조물 하류 바닥 안정 장치 개발과 구조물 안정성 확보 가능

(3) 학술적 성과

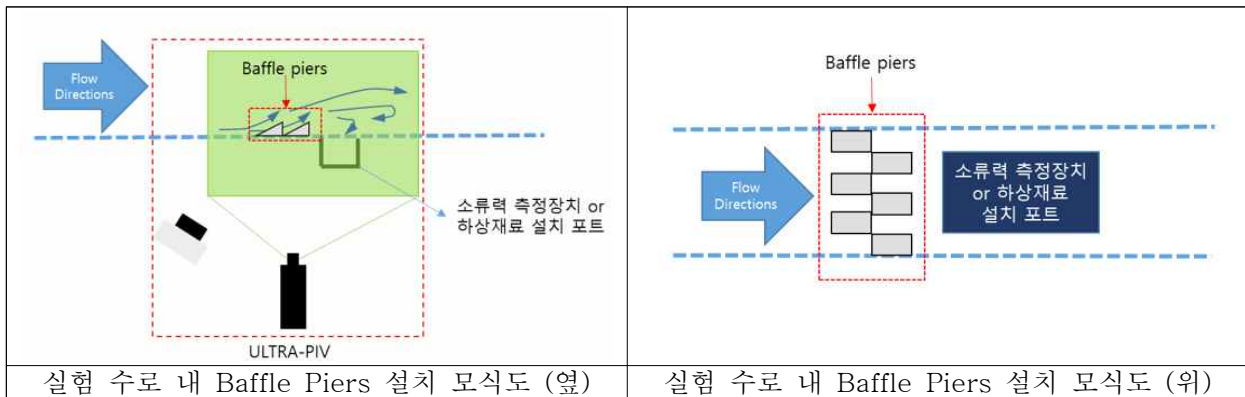
- 고유속 흐름 특성분석 및 3차원 바닥 전단응력 평가

(4) 경제적 성과

- 안정한 하천 구조물 설계 가이드라인 마련
- 공법의 한계 소류력 평가를 통한 적정 적용 공법 선정 가능
- 개발된 소류력계 국가관측항목에 추가 활용 가능

제5장. 연구개발성과의 활용계획

- 정부 및 지자체가 주도하는 하천사업 전반에 활용
- 호안공법, 하천 구조물 수리적 안정성을 검증할 수 있는 검인증제도 활용
- 개발된 소류력계 국가관측항목에 추가 활용 가능
- 초고속 실험 수로, 3D 바닥 응력 계측기, 초고속입자영상유속계(ULTRA-PIV)를 활용하여 하천 구조물 수리적 안정성 평가 지표 도출 및 설계에 대한 가이드라인 제시
- 본 연구로 구축된 초고속 실험 시스템(초고속 실험 수로, 3D 바닥 응력 계측기, 초고속입자영상 유속계(ULTRA-PIV))을 활용하여 과제 종료 이후에도 관련 연구분야(슈트블록, 배플피어, 엔드실 등)의 연구를 계속 진행할 예정



제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

- 해당사항 없음

제7장. 연구개발성과의 보안등급

- 해당사항 없음

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

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

○ 해당사항 없음

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

○ 해당사항 없음

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)
	특허 출원	정밀 소류력 측정장치	인제대학교 산학협력단	발명가	대한민국		2018.05.29		
	특허 등록	이중 다공성 판 구조를 갖는 보호 하류 하상재료 유실 방지용 하상 보호장치	인제대학교 산학협력단	발명가	대한민국		2019.09.04		
	S/W	5 m/s 이상의 초고유속의 최적화 Ultra-piv (울트라피아이브 이) 해석 프로그램	인제대학교 산학협력단	발명가	한국저작권위원회		2018.10.19		
	S/W	초고속 수리 구조 해석 프로그램	인제대학교 산학협력단	발명가	한국저작권위원회		2019.11.08		

제11장. 기타 사항

○ 해당사항 없음

제12장. 참고 문헌

4대강사업조사평가위원회(2014), 4대강사업 조사평가 보고서

국토해양부, 한국수자원학회 (2009), 하천설계기준·해설

국토교통부(2004), 하천제방 관련 선진기술 개발 최종보고서

국토교통부(2009), 전국 하천횡단 구조물 설치현황 및 어도 실태조사 보고서

국토교통부(2017), 보와 하상유지공의 안정성 확보를 위한 물받이와 바닥보호공의 성능평가 기법에

국토교통부(2018), 첨단기술 기반 하천 운영 및 관리 선진화 최종보고서

국토교통부(2016), 하천 하상유지시설

국토교통부(2019), 호안공법의 수리적 안정성 평가 매뉴얼

우효섭, 김원, 지운(2015), “하천수리학”, 청문각.

이문옥, 허재영, 최한기, 김기홍, 윤종성(2010). “수리학” 형설

한국건설기술연구원(2013), 보하류부 세굴방지를 위한 Multi-baffle Energy Dissipator 개발

조재안 (2014) “Study on Hydraulic Stability for Distribution of Secondary Flow and Tractive Force in Compound Channel” Thesis for Master Degree

이두한, 김명환, 김원, 서일원 (2017), “프레스톤튜브를 이용한 복단면 하도의 하상전단응력 측정 및 분석”, Ecology and Resilient Infrastructure 4(4), pp., 207-215

國土交通省(2008). 河川砂防技術基準.

ASTM D7276-06, “Standard Guide for Analysis and Interpretation of Test Data for Articulating Concrete Block (ACB) Revetment Systems in Open Channel Flow”

ASTM D7277-08, “Standard Test Method for Performance Testing of Articulating Concrete Block(ACB) Revetment Systems for Hydraulic Stability in Open Channel Flow”

Abdul Karim Barbhuiya and Subhsish Dey (2004). “Turbulent flow measurement by the ADV in the vicinity of a rectangular cross-section cylinder placed at a channel sidewall”. J.Flow Measurement and Instrumentation, Elsevier, 15(2004)221-237.

Babaeyan-Koopaei K, Ervine Da, Carling PA, Cao Z. (2002). Velocity and turbulence measurements for two overbank flow events in River Severn. J. Hydraul. Div., ASCE 128(10):891-900.

Babak L. A., Manocher F. M., Mahmud S. B., and Arash J. (2009). “Boundary shear stresses in smooth shannels” J. Food, Agriculture & Environment, WFL, Vol.8(1):343-347.2010.

Barnes M. P., Baldock T. E. (2007). Direct Bed Shear Stress Measurements in Laboratory Swash. Journal of Coastal Research. pp. 641-645.

Barnes, M. P., Donoghue, T. O., Alsina, J. M., Baldock, T. E. (2009). Direct bed shear stress measurements in bore-driven swash. Coastal Engineering. 56. pp. 853-867

Chang, Howard H. (1939). Fluvial Processes in river engineering. Canada: John Wiley & Son, Inc.0-471-63139-6.

Duan, J. G. (2009). Mean Flow and turbulence around a laboratory spur dike. J. Hydraul. Div. 135(10):803-811.

Dyer, K.R., (1986). Coastal and Estuarine Sediment Dynamice, Vol. xv. Wiley, Chichester, pp. 342.

-
- Dean, R. G., Dalrymple, R. A. (1991). WATER WAVE MECHANICS FOR ENGINEERS AND SCIENTISTS. World Scientific. pp. 401-402.
- Ghosh, S. N., and Roy, N. (1970). "Boundary shear distribution in open channel flow". J. Hydraul. Div., ASCE96 (4), 947-994.
- Guo J. and Julien P. J. (2005). "Shear stress in smooth rectangular open-channel flow". J. Hydraul., Div., ASCE131:1 (30), 30-37.
- Goldberg, H. D., Breuer, K. S., Schmidt, M. A. (1994). A Silicon Wafer-Bonding Technology for Microfabricated Shear-Stress Sensors with Backside Contacts. Department of Electrical Engineering and Computer Science. 0-9640024-0-X.
- Jae Hyeon Park, Young Do Kim, Yong Sung Park, Jae An Jo, Kimchhun Kang (2016), "Direct measurement of bottom shear stress under high-velocity flow conditions", Flow Measurement and Instrumentation, 50, pp. 121-127
- Jae Hyeon Park, Young Do Kim, Yong Sung Park, Dong Gyu Jung (2019), "Direct measurement of bed shear stress using adjustable shear plate over a wide range of Froude numbers", Flow Measurement and Instrumentation, 65, pp. 122-127
- Junke, G., Pierre, Y. J. (2005). Shear Stress in Smooth Rectangular Open-Channel Flows. J. Hydraul. Div., ASCE. 131:1(30) 0733-9429.
- Kimchhun Kang. (2014) "A Study on Shear Stress Distribution in a High-Speed Rectangular Channel" Thesis for Master Degree
- Knight, D. W., Demetriou, J. D., and Homed, M. E. (1984). "Boundary shear in smooth rectangular channel". J. Hydraul. Div., ASCE (110)4, 405-422.
- Kartha, V. C., and Leutheusser, H. J. (1970). "Distribution of tractive force in open channel". J. Hydraul. Div., ASCE 96(7), 1469-1483.
- Walter Hans Graf (1998). "HYDRAULICS OF SEDIMENT TRANSPORT", Water Resources Publications, LLC, pp.108~112.
- Wilcock, P. R. (1996). Estimating local bed shear stress from velocity observations. Water Resources Research. Vol. 32, No. 11, pp. 3361-3366.
- N.D. Pope, J. Widdows, and M.D. Brinsley (2006). "Estimate of bed shear stress using the turbulent kinetic energy approach-A comparison of annular flume and field data". J. Continental Shelf Research, Elsevier, 26(2006). 959-970.
- Richard W. Johnson. (1998). THE HANDBOOK OF FLUID DYNAMICS. US: CRC Press LLC. 3-540-64612-4(Preston(1954)equation, pp. 19-33.
- Schlichting, Herman. (1979). Boundary-Layer Theory. 7Ed. J. Kestin, Trans. US, New York, NY:McGraw-Hill, Inc. 0-07-055334-3.
- Seelam, J. K., Guard, P. A., Baldock, T. E. (2011). Measurement and modeling of bed shear stress under solitary waves. Coastal Engineering. 58. pp. 937-947.
- Takashi Yoshino, Yuji Suzuki and Nobuhide Kasagi. (2001). Assessment of the wall
-

shear stress measurement with arrayed micro hot-film sensors in a turbulent channel flow. Proc. 2nd Int. Symp. on Turbulence and Shear Flow Phenomena. Vol. 2. pp. 153-158.

Tinoco, R. O., Cowen, E. A. (2013). The direct and indirect measurement of boundary stress and drag on individual and complex arrays of elements. DeFrees Hydraulics Laboratory. DOI. 10.1007/s00348-013-1509-3.

U.S. Army Corps of Engineers (2008). Detection and evaluation of scour protection for navigation dams, ERDC/CHL TR-08-14, Washington, DC.

U.S. Army Corps of Engineers (2013). Hydraulic design of navigation dams, Washington, DC.

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.