

연구개발 최종보고서·요약서

I. 인쇄 규격

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

II. 편집 순서

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

III. 참고 사항

전자 조판 인쇄 시에는 이에 준한다.

IV. 편집 순서별 서식

유입조건
에 따른
압력변이
로 인한
하천횡단
구조물
하류
물받이공
및
바닥보호
공
설계인자
도출

최
종
보
고
서

2019

국
토
교
통
과
학
기
술
진
흥
원

유입조건에 따른 압력변이로 인한 하천횡단구조물 하류 물받이공 및 바닥보호공 설계인자 도출 최종보고서

2019. 1. 18 .

주관연구기관 / 홍익대학교 산학협력단
공동연구기관 / 한국건설기술연구원
공동연구기관 / 주식회사 지티이

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통부 장관(국토교통과학기술진흥원장) 귀하

‘유입조건에 따른 압력변이로 인한 하천횡단구조물 하류 물받이공 및 바닥보호공 설계인자 도출’
(연구개발 기간 : 2017. 6. 30 ~ 2018. 12. 31) 과제의 최종보고서 10부를 제출합니다.

2019. 1. 18.

주관연구기관명 : 홍익대학교 산학협력단 (대표자) 나 건



공동연구기관명 : 한국건설기술연구원 (대표자) 한 승 현



공동연구기관명 : 주식회사 지티이 (대표자) 김 태 원



주관연구기관책임자: 이 승 오

공동연구기관책임자: 박 문 형

공동연구기관책임자: 김 태 원

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	18CTAP-C133 019-02	해당 단계 연구 기간	2017.6.30 ~ 2018.12.31	단계구분	2/2 (해당단계)/(총단계)
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	기초원천			
연구과제명	대과제명	유입조건에 따른 압력변이로 인한 하천횡단구조물 하류 물받이공 및 바닥보호공 설계인자 도출			
	세부과제명	음압력구배 및 물받이공 진동으로 인한 하천횡단구조물 하류 설계인자 도출			
연구책임자	이 승 오	해당단계 참여연구원 수	총: 16 명 내부: 16 명 외부: 명	해당단계 연구비	정부:206,000 천원 민간:73,000 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계:279,000 천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 16 명 내부: 16 명 외부: 명	총 연구비	정부:370,000 천원 민간:130,000 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계:500,000 천원
연구기관명 및 소속 부서명	홍익대학교 산학협력단			참여기업명: (주) 지티이	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
공동연구	연구기관명: 한국건설기술 연구원 연구기관명: 주식회사 지티이			연구책임자: 박 문 형 연구책임자: 김 태 원	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	일반[□], 보안[]
-------------------------	----------------

9대 성과 등록·기탁번호

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

국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황

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

요약

- 하천횡단구조물 보 하류의 다양한 파괴원인을 검토하기 위하여 수리실험 및 수치해석을 통하여 설계인자를 도출하였음.
- 보 하류 물받이 및 바닥보호공의 설계인자 도출을 위하여 수리실험을 통하여 도수 발생 시 압력변동성을 검토 및 분석함.
- 실험을 통하여 획득한 입력자료는 구조물 수치해석을 통하여 최대·최소 주응력을 검토 및 분석하였고 휨 파괴의 한계조건을 검토함.
- 입지영상유속측정(PIV) 및 기포영상유속측정(BIV) 기법을 통하여 도수구간의 난류변동성을 검토 및 분석함.
- 압력변동성과 난류변동성간의 상관관계를 도출하였고, 구조물 피로 파괴의 한계조건을 검토함.
- 실험규모 및 실제규모 하천횡단구조물에 대한 흐름특성 분석함.
- 압력변이를 적절히 재현할 수 있는 난류모형 선정 및 자료 분석을 통한 수리적 특성 Data화

보고서 면수

146

< 국문 요약문 >

연구의 목적 및 내용	하천횡단구조물이 하천설계기준(2009)대로 설계되었음에도 불구하고, 하류부에서 물받이공 및 바닥보호공의 피해가 발생하여, 구조물 본체에 대한 안전성이 현저하게 낮아지고 있는 실정이다. 하천설계기준이 상류부의 수리특성을 반영하였다고 하나 하류부의 수리특성인 유속의 변동 성분 또는 압력의 변동성분까지 고려하고 있지는 않다. 현재 많은 선행연구에서 이러한 난류적 특성이 구조물에 미치는 영향에 대해 제시하고 있는 실정이며, 국내 하천에서의 피해 또한 이와 관련이 있다고 판단된다. 이에 본 연구에서는 난류성분 특히 압력의 변동성분이 물받이공과 바닥보호공에 미치는 영향을 정량적으로 분석하여, 하천 횡단구조물의 치수 안전성 증대에 기여하고자 한다. 물받이공과 바닥보호공에 미치는 압력의 변동성분 (pressure fluctuation) 영향을 분석하기 위해 크게 3가지로 연구내용을 분류하였다. 첫 번째는 압력의 변동으로 순간적인 음압구배(adversed pressure gradient)가 발생할 경우 바닥보호공의 사석 및 블록이 이탈하는 것이다. 이를 확인하기 위해 정밀한 압력 측정장치를 통해 압력변이를 측정하여, 사석의 이탈 가능성을 검토할 것이며, 최종적으로 이탈에 대한 한계조건을 도출할 것이다. 두 번째는 압력의 변동이 물받이공의 진동을 유발시켜 이를 지지하고 있는 지반에 다짐효과를 가져와 물받이공과 지반사이에 공극이 발생하는 경우이다. 이러한 공극으로 물받이공은 자중 및 물의 압력을 받게 되어, 결국 휨에 의한 파괴가 발생할 가능성이 있게 된다. 본 연구에서는 실험을 통하여 압력의 변동과 물받이공의 진동을 동시에 측정하여, 진동이 발생하지 않을 최소 두께를 제시할 것이다. 세 번째는 압력변이로 인한 물받이공의 진동이 피로파괴로 연결되는 경우이다. 이 현상 또한 수리실험을 통해 압력변이-피로파괴의 관계를 정량적으로 분석하여, 한계 조건을 제시할 것이다. 본 연구는 국내 보 및 낙차공에서 발생하는 다양한 Jet의 특성을 수리실험으로 재현해야 하며, 이를 위해 평면 Jet 분사기(plane Jet injector)를 고안/제작하여, 효율적인 수리실험을 수행할 것이다. 또한 3차원 수치해석을 통해 실제 스케일에 적용함으로써 연구결과의 활용도 및 적용성을 높이하고자 한다.				
연구개발성과	본 연구에서는 각 연구내용 별 한계조건을 정량적으로 제시하고자 한다. 실무에 적용성을 극대화 하기 위해 수치해석으로 이를 검증할 것이며, 간편한 계산 프로그램을 개발할 것이다. 바닥보호공의 파괴에 대한 조건은 흐름의 특성, 즉 상류부 수리특성 및 제반여건에 대한 한계조건을 제시할 것이며, 물받이공 진동에 대한 파괴에 대해서는 파괴되지 않을 최소 두께를 제시하여, 경제성 및 안전성 증진에 이바지 하고자 한다.				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	정부의 인증을 받은 하천설계기준 또는 하위 기술지침에 반영된다면 국토교통부, 지자체 등 하천시설물 공사 발주기관 및 설계사들이 과학적으로 증명된 횡단구조물의 물받이 및 바닥보호공에 대한 기술지침을 이용하여 건설산업의 해외시장 진출 가능성이 증대될 수 있으며, 전반적인 하천의 치수 안전도 향상에 이바지할 것으로 기대된다. 또한 정량적이고 정확한 한계조건 제시는 재난에 대한 선제적 대응을 일부 가능케 하여, 재난에 대한 사회적 불안 감소효과 및 쾌적한 하천환경 조성에 이바지 할 것으로 기대된다. 그리고 본연구가 세계 최초로 시도되는 연구이기 때문에, 관련분야의 선점효과가 있으며, 다양한 수공구조물 관련연구에 응용될 수 있을 것이라 판단된다.				
핵심어 (5개 이내)	압력변이	물받이공	바닥보호공	난류	진동

< SUMMARY >

Purpose & Contents	Even though river crossing structures have been designed according to the river design codes (KWRA, 2009), the apron and bed protection have been seriously damaged, and the main structure has became under the threat of collapse. Although the codes reflects the hydraulic characteristics of the upstream of structures, the turbulent fluctuations of the flow velocity and pressure in the downstream are not considered so far. In the recent literature, such significant effects on the structure have been studied, and it is presumed that damages in domestic cases are highly related to these characteristics. Therefore, this research aims to contribute to the enhancement of safety in river crossing structures with quantitatively analyzing the effect of turbulence, especially pressure fluctuations, on apron and bed protection. In order to analyze the effect of pressure fluctuation on the stilling basin and the bed protection structure, the research contents are classified into three major categories. The first is that when a momentary adverse pressure gradient occurs due to a pressure fluctuation, rip-rap and block of the bed protection structure are destroyed. By measuring the pressure fluctuation through a precise pressure measuring device, we will derive the cause of fail and limit condition of small dam structure. The second is that the pressure fluctuation causes the vibration of the stilling basin and affects the ground supporting it. In this case, in order to ensure the stability of the structure, a design standard for suppressing the vibration. In this study, structural analysis is carried out using the measured pressure fluctuation and the minimum thickness without vibration is presented. The third is that the vibration of the stilling basin caused by the pressure fluctuation leads to material failure. We will quantitatively analyze the cause of the fracture through hydraulic experiments and present the limit conditions. This study conducts various flow characteristics occurring in domestic small dam structure by hydraulic experiment which can measure pressure of small dam structure by changing flow rate and water level condition. In addition, the results from experiments will be applied to the prototype scale considering the scale effect through 3D numerical analysis to improve the utilization and applicability for various cases.				
Results	In this study, the quantitative critical conditions will be provided. To maximize the applicability in practice, we will develop the convenient calculation method after 3D numerical simulations for diverse cases. The detailed critical condition for the separation or failure of the bed protection will be presented according to the characteristics of flow, namely the upstream hydraulic characteristics and conditions. And critical conditions against the vibration destruction on apron will be provided using its minimum thickness. These three critical conditions will highly contribute to the improvement of economic benefit and safety.				
Expected Contribution	Using the technical guidelines for scientifically proven apron and bed protection, the construction and design companies of river facilities can be more likely to march into the global market when they will be reflected in the government-certified river design standards or sub-technical guidelines. It will not only improve overall flood safety, but will also partially enable preemptive response to flood-related disasters. This is expected to help reduce social anxiety about disasters and invokes an intimate river environments. Since this research is the first trial in the world, it has a preemption effect in related field and it can be applied to many studies on various hydraulic structures.				
Keywords	pressure fluctuation	apron	bed protection	turbulence	vibration

< Table of Contents >

1. Outline of this study	7
2. Development status Technology at domestic & overseas	12
3. Performances and Contents of Research	19
4. Level of Target Achievements and Contributions	135
5. Management of R&D achievements	137
6. Overseas Scientific Technology Information Collected in the R & D	138
7. Security Level of R & D Results	138
8. Registered Research facilities and Equipments	138
9. Implementation of Safety Measurement in Laboratories	138
10. Representative Research Results of R & D Project	140
11. Others	140
12. References	141

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	7
2. 국내외 기술 개발 현황	12
3. 연구수행내용 및 성과	19
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	135
5. 연구개발성과의 활용 계획	137
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	138
7. 연구개발성과의 보안등급	138
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	138
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	138
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	140
11. 기타 사항	140
12. 참고 문헌	141

제1장. 연구개발과제의 개요

가. 연구개발 목적

(1) 연구개발 배경

- 설계기준 및 선행연구에 따라 설계된 하천횡단구조물 하류 바닥 구조물 파괴
- 난류 및 압력 특성을 충분히 반영하지 못한 설계기준

□ 하천 횡단구조물(보, 낙차공 등)의 설치 현황 및 계획

- 국내 하천 횡단구조물(보, 낙차공 등)은 2009년 기준 약 20,000개가 설치되어 있음 (국토해양부, 2009).
- 2013년부터 시행 중인 「4대강 외 국가 및 지방하천 정비계획」에서 약 100여개의 횡단구조물에 대한 이설 및 개량 계획이 수립됨.

□ 하천 횡단구조물(보, 낙차공 등) 피해

- 4대강 살리기 사업에서 설치된 다기능보의 경우, 준공 이후 하류 바닥보호공 세굴에 대한 논란이 지속되고 있음 (2013, 감사원감사; 2014, 국무총리실 4대강사업조사평가위원회 등).
- 매년 중소하천의 횡단구조물 피해사례가 발생하고 있는 실정이며 물받이공 및 바닥보호공의 피해가 큰 비중을 차지하고 있음 (2017, 한국건설기술연구원).
- 현재의 하천설계기준에 의해 설계된 하천 횡단구조물 하류부 바닥구조물(물받이공(apron), 바닥보호공(bed protection))의 파괴는 기준에 의해 설계되었음에도 피해가 계속하여 발생함.



그림 1 하천횡단구조물 하류부 횡단구조물 파괴사례

□ 현행 설계기준의 문제점

- 1980년 “하천시설기준(하천편)” 제정 이후 보의 물받이 및 바닥보호공의 두께와 길이에 대한 기준은 Bligh 공식을 개정 없이 사용
- Bligh 공식은 침투에 대한 안전을 고려한 경험식으로, 이를 준수하여 설계하였음에도 불구하고 피해가 계속하여 발생함 → 현행 설계기준 개선 필요
- 국내 하천 실무자들은 물받이공과 바닥보호공 설계에 있어 구조물의 안전성 확보를 위해 외국 설계기준(USBR, USACE 등)을 인용하는 사례가 다수 있으며, 해당 설계기준 또한 압력변이를 고려하지 않음

□ 하천횡단구조물 설계기준의 검토 필요

- 하천횡단구조물 하류 바닥구조물에 대한 설계기준은 유량 및 유속을 바탕으로 제원에 대한 범위를 제시하고 있으며, 세부적이고 정량적인 수리학적 특성을 반영하고 있지 못하고 있는 실정임.
- 구조물 파괴에 대한 새로운 접근이 필요한 시점이며, 다양한 파괴원인 별 설계인자 도출이 필요함.

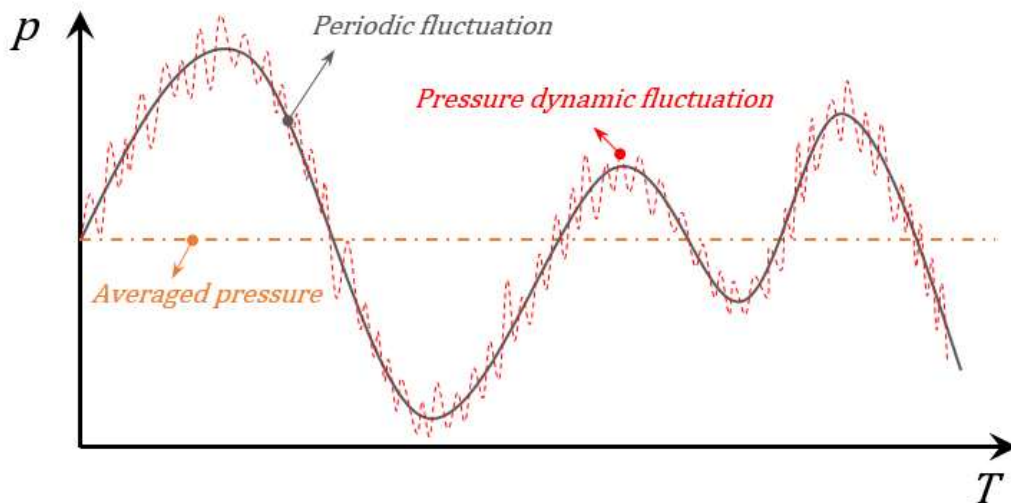


그림 2. 시간에 따른 압력의 변동 양상 및 정의

- 시간에 따른 압력의 변화를 살펴보면 그림 1과 같이 주기적으로 변화하는 압력(periodic pressure fluctuation)과 이 압력을 따라서 변화하지만 변동성이 큰 압력(Pressure dynamic fluctuation)으로 구분될 수 있음. 본 연구에서는 이 두 가지 압력의 변동성분을 압력변이(Pressure fluctuation)라고 정의하였음.

- 선행연구와 전문가를 포함한 다수의 연구진 회의에서 압력변이로 인한 구조물 파괴는 크게 세가지로 분류될 수 있을 것으로 판단함.

- 첫 번째는 바닥보호공을 형성하고 있는 사석 또는 블록에 압력변이의 음압구배(adverse pressure gradient, 또는 부압, 정수압 이하의 압력)가 작용할 경우, 중력과 반대방향의 힘을 받게 되며, 이로 인한 이탈이 발생할 가능성이 있음.
- 두 번째는 압력변이가 물받이공에 작용할 경우, 압력의 진동이 구조물의 진동을 유발하게 되며, 이는 다시 물받이공을 지탱하고 있는 지반의 진동으로 이어져 지반의 침하가 발생할 수 있음. 결국 물받이공과 지반 사이에 공간(gap)이 생성되며, 이 공간으로 인해 물받이공 자중 및 물의 하중을 지반이 받지 않기 때문에 물받이공에 큰 휨 변형이 걸리게 되며, 이로 인한

휨 파괴 가능성이 있음.

- 세 번째는 압력변이로 구조물이 진동하고, 지속적이고 일정강도 이상으로 진동한다면 피로에 의해 재료파괴 될 수 있음.

나. 연구개발의 필요성

- 구조물 하류측 수리적 특성을 충분히 반영하고 있지 않은 설계 기준에 대한 재고
- 압력변이(pressure fluctuation)를 이용한 실질적인 설계 인자 제시

- 하천횡단구조물 하류부 파괴에 대해 많은 연구가 진행되었으며, 다양한 원인이 제시됨.
- 최근에는 변화하는 압력(이하 압력변이, pressure fluctuations)가 구조물의 안전성에 매우 중요한 역할을 하는 것으로 나타남.(Sanchez et al.(1973), Bowers & Tsai(1969), Bowers & Toso(1988))
- 여수로 시스템의 안전성을 위한 다각적인 구조적 대응이 수행되고 있으며, 이로 인해 바닥에 작용하는 압력의 감소를 발생시킬 수 있지만, 압력변이로 인한 일시적인 동수압은 바닥보호공 등의 중량을 초과할 수 있어 파괴 위험이 있음(Fiorotto & Rinaldo, 2010).

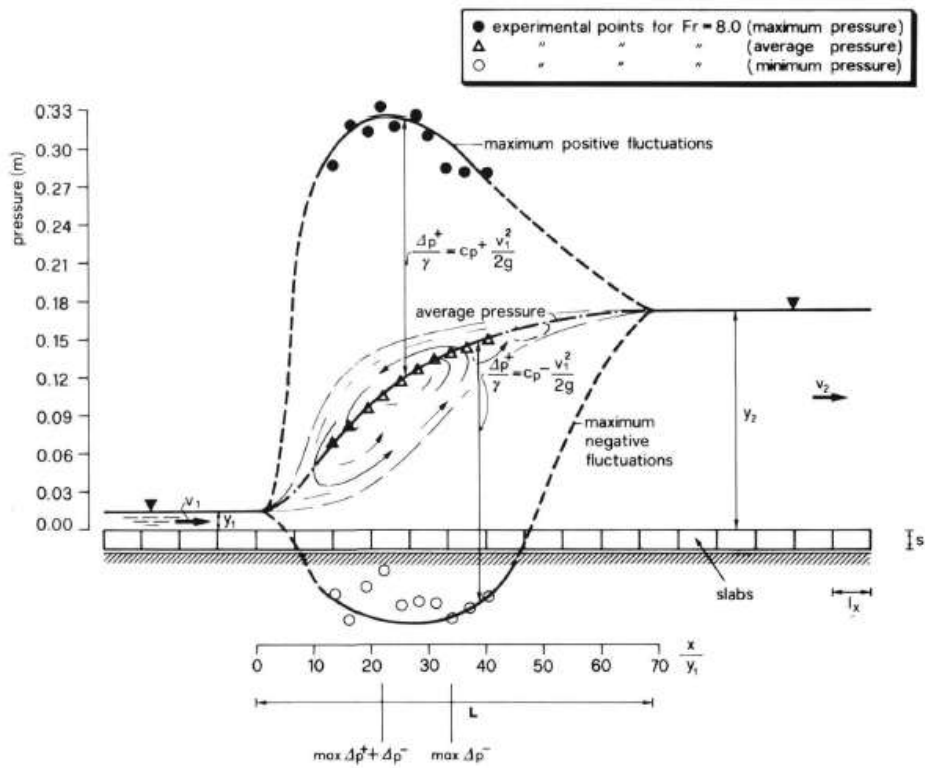


그림 3. 하천횡단구조물 하류부 도수현상시 발생하는 압력변이 분포도, $Fr=8.0$ 상태이며, 바닥(slab)에 양압과 음압이 지속적으로 작용한다. (Fiorotto & Rinaldo, 2010)

- 그림 3과 같이 하천횡단구조물 하류부에서 압력변이가 지속적으로 작용하기 때문에, 바닥은 미세하지만 지속적으로 진동하며, 이로 인한 구조물의 피로가 축적되어 파괴로 이어질 수 있음.
- 또한 압력변이로 인하여 구조물이 진동하고, 이 진동은 지반의 진동으로 이어져, 물받이공과 지반사이의 공간(gap)이 발생할 가능성이 있음. 이 공간으로 물받이공과 물의 하중으로 발생하는 휨을 물받이공이 받게 되면서 파괴 가능성이 높아질 수 있음.

- 바닥에 작용하는 부압*의 경우 바닥구조물에 작용되는 힘의 방향이 중력과 반대방향이기 때문에, 사석의 이탈 등 구조물 파괴의 직접적인 원인이 될 수 있음.
 - 그러나 국내의 설계기준은 상술한 바와 같이 이러한 난류적 특성에 기인한 수리적 특성을 전혀 고려하지 않았으며, 실험적인 연구 또한 정상상태(steady state)를 가정하기 때문에, 압력변이를 고려한 합리적인 설계가 이루어지고 있지 않은 실정임.
-
- 하천횡단구조물의 물받이와 바닥보호공의 안정에 대한 지속적인 연구가 수행되고 있지만 논란은 계속되고 있음. 그러나 이를 규명할만한 과학적인 성능기준이 부재한 실정임.
 - 국토교통부에서는 하천횡단구조물의 물받이와 바닥보호공에 대한 하천설계기준에 대한 문제점을 인식하고 이에 대한 개선안을 마련했음에도 불구하고, 해외 사례 조사 위주의 결과물에 그침.
 - 하천횡단구조물 하류부 바닥의 안전 및 안정을 도모할 수 있는 적절한 설계인자의 도출과 정량적인 기준이 새롭게 정립되어야 할 필요성이 있음.

※ 부압의 정의

- 본 연구에서 부압이란 정수압보다 낮은 압력이 나타나는 것을 의미함.

표 1. 부압의 정의

구 분	정 의
사전적 의미 (Negative Pressure)	대기의 압력보다 낮은 압력
유 체 (Buoyancy Pressure)	유체속의 물체에 작용하는 압력 (중력과 반대 방향)
본 연구 (Negative Pressure)	정수압보다 낮은 압력

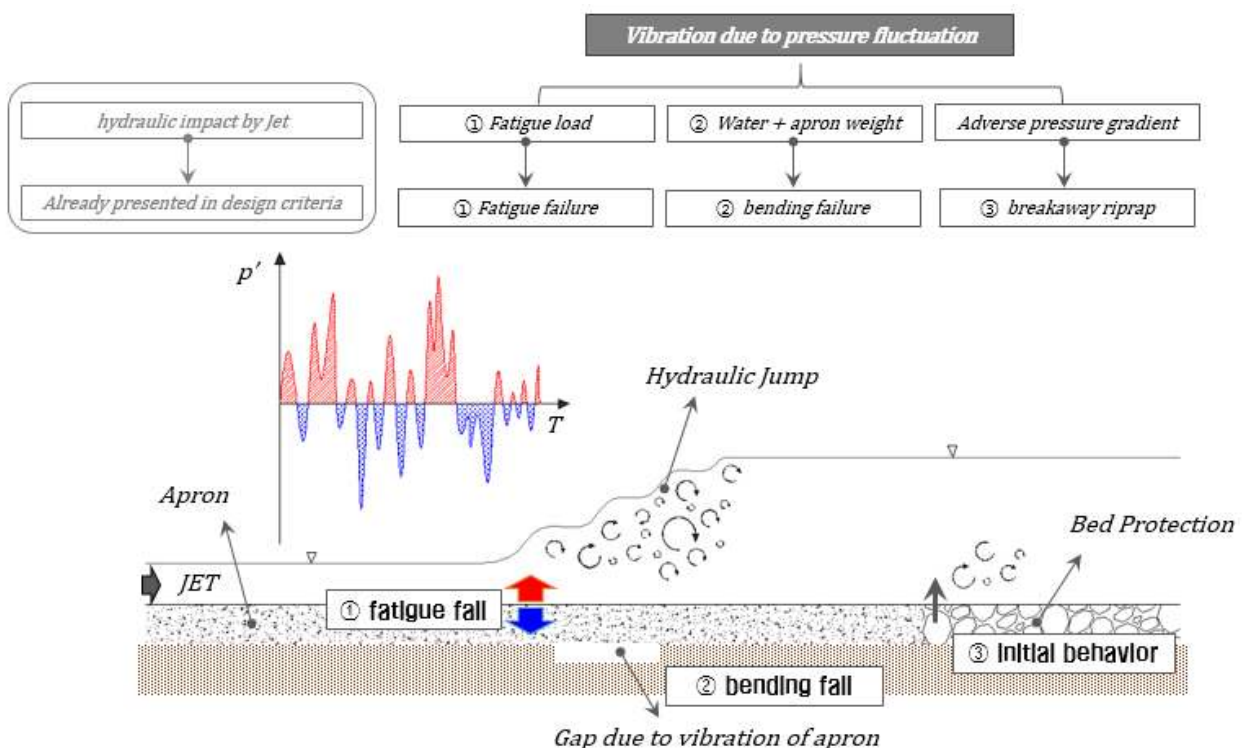


그림 4. 파괴 개념도

- 하천횡단구조물 하류 바닥구조물에 대한 설계기준은 유량 및 유속을 바탕으로 제원에 대한 범위를 제시하고 있는 상태이며, 세부적이고 정량적인 수리학적 특성을 반영하고 있지 못하고 있는 실정임.
- 구조물 파괴에 대한 새로운 접근이 필요한 시점이며, 이에 본 연구에서는 압력의 난류 성분(이하 압력변이)을 기반으로 구조물 파괴의 한계조건을 도출하고자 함.

다. 연구개발 범위

표 2 연차별 연구개발 범위

연차	연구목표
1차년도 (17.06.30~17.12.31)	◦ 압력변이로 인한 바닥구조물(사석 또는 블록) 불안정 조건에 관련된 인자 제시 ◦ 입자 및 기초영상유속측정 기법 등을 활용한 물받이공의 난류 및 외력 분석 ◦ 3차원 수치해석을 이용한 적용성 확장
2차년도 (18.01.01~18.12.31)	◦ 압력변이로 인한 물받이공 하부지반의 진동 조건 제시 ◦ 압력변이로 인한 물받이공 피로 파괴 조건 제시 ◦ 3D 수치해석을 이용한 다양한 흐름 모의를 통한 현장적용성 제고

제2장. 국내외 기술 개발 현황

가. 국내 기술개발 현황

(1) 물받이공 설계 기준

□ 하류측 물받이 길이 결정방법으로 블라이(Bligh)공식을 제시

- (블라이공식) 횡단구조물의 안전확보를 위해 1890년대 건설된 기존 댐(미국, 영국, 인도 등)의 설치사례로부터 결정된 경험식(Bligh, 1910)으로서, 물받이의 기능으로 제시된 하상세굴에 대한 고려보다는 침투에 대한 안전을 고려하고 있어 구조물의 안정 확보와 무관

□ 하류측 물받이 두께 결정방법

- 하천설계기준에 의하면 하류측 물받이의 두께는 다음의 식으로 결정됨

$$T = \frac{4(\Delta h - h_f)}{3(r - 1)} \quad (1)$$

여기서, T 는 물받이 두께(m), r 은 물받이 재료의 비중, Δh 는 상하류의 수위차(m), 그리고 h_f 는 손실수두(m)임.

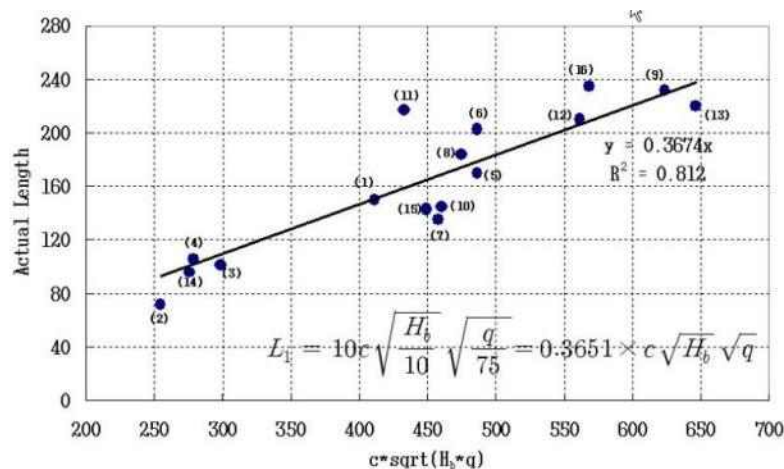


그림 5. 블라이 공식 결정 배경

(2) 흐름 가시화 실험관련 연구

□ 입자영상유속계(PIV) 관련 연구

- 류권규 등(2006)은 PIV를 이용하여 개수로 흐름에서 부유사의 속도를 측정
- 배재현 등(2011)은 어도설계에 적용하기 위해 PIV를 이용하여 은어의 유영력 측정

□ 입자영상유속계(PIV) 기법 소개

- PIV기법은 유체의 거동을 눈으로 볼 수 있게 하는 유동 가시화(flow visualization) 기술과 깊은 관련이 있으며 유체의 전달 현상(transport phenomena)을 눈에 보이도록 하는 기법임.
- 유체현상을 순간적으로 제시하고자하기 때문에 영상 혹은 공간적인 분포의 형태로 보여 지며, 따라서 광학적 특성의 이해가 가시화의 질을 결정함.
- 가시화는 일반적으로 정성적인 방식으로 고려되어왔으나, 영상측정의 정도가 향상되고 가시화 방안이 유동 인자의 특성을 적절히 반영할 경우 영상정보로부터 정량적인 결과를 도출할 수 있음.

- PIV기법은 이렇게 가시화된 유동장을 영상 또는 화상(사진이나 비디오 등)으로 만들어 속도 분포를 측정하는 기법임.

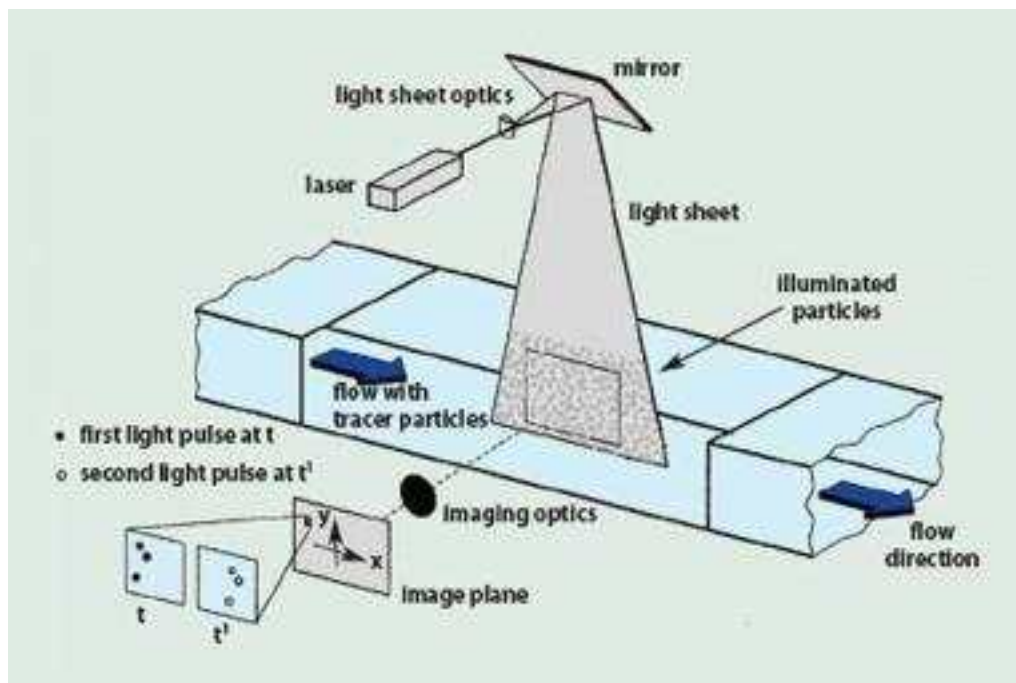


그림 6. PIV 측정 원리(www.photonics.com)

- PIV의 기본 원리를 그림 6으로 나타낼 수 있으며, 실험 수로에 유체의 비중과 상응하는 추적자 (tracer particle)를 주입하여 레이저광(laser sheet)을 조사하면, 추적자들이 빛을 받아 반짝이게 되고 이때 영상 입력장치(필름, CCD, 비디오 카메라)를 이용하여 영상으로 변환.
- 이후 시각 t 에서 한 장의 영상을 만들고, 바로 뒤 시각 $t' = t + \Delta t$ 에 또 하나의 영상을 만들어. 두 영상을 하나의 쌍으로 하여 분석하고, 영상 분석 기술(image processing)을 이용하여 한 입자 또는 여러 개의 입자가 영상 내에서 움직인 거리(영상 변위, ΔS_c)를 계산함.
- 영상 변위에 영상의 축척을 곱하면 입자 또는 입자군의 물리적 변위(ΔS)를 구할 수 있고, 이 물리 변위를 두 사진 사이의 시간간격으로 나누면 한 입자 또는 여러 개의 입자의 속도를 산출할 수 있음.

□ 다상흐름 측정 관련 연구

- 국내의 하천 및 해안의 다상흐름에 관한 실험적 연구는 부족한 실정으로서, 이는 수치적 연구에 비해 많이 뒤쳐져 있는 국내 실험적 수리학 연구의 상황과 관련이 있으며, 특히 다상흐름의 경우 기존 측정기법과 다른 개념의 연구가 필요하여 접근이 쉽지 않음.

□ 다상흐름 측정(BIV) 기법 소개

- BIV기법 역시 유동장 정보를 눈으로 볼 수 있게 하는 유동 가시화 기술의 하나로 유체의 이동현상을 이해하기 위한 효율적인 기법임.
- 다상흐름의 경우 물과 공기의 다상차에서오는 중간 경계(interface) 및 각 위상의 밀도 및 특성 차이로 인해 접촉식 혹은 영상측정에 있어 제약이 많아 유동가시화를 이용하여 유속을 측정하는

대표적인 기법인 PIV(particle image velocimetry)기법 또한 이러한 제약으로 인해 다상흐름 측정에 많은 문제점이 있음.

- 그림자기법을 기반으로 한 BIV기법 시 사용되는 광원을 측정 대상의 후면에서 노출시키는 방식으로 전면에서 비추는 광원에 빛 산란(light scattering) 혹은 포화(saturation)를 유발하는 다상의 경계차를 그림자형상으로 나타내는 기법임. (그림 7 참조)
- 그림 7은 BIV기법을 이용한 영상측정 기법의 개요도이며, 그림에서 D는 피사체 심도(depth of field)로서 카메라 조리개에 조절에 따른 선명한 영상이 측정되는 구간을 의미하며, S와 R은 피사체 심도의 시작지점 및 끝 지점을 나타냄.
- 피사체 심도는 원근 효과가 측정될 수 있는 화상 측정에서 피사체의 정확한 위치 정보를 얻기 위해 필요한 개념으로서 기포의 밀도에 따라 조절하며, 자세한 내용은 Ryu et al.(2005)에 제시되어 있음.
- BIV기법은 PIV기법과 달리 유체 내 추적자가 아닌 물과 공기의 위상경계면을 추적자로하여 기포흐름을 제시하며, 기포흐름에서 관성을 갖고 이동하는 경우에는 부력의 영향이 미미하여 흐름해석에 사용될 수 있으며 기포흐름의 시간에 따른 대상차의 예시를 그림 8에 제시하였음.

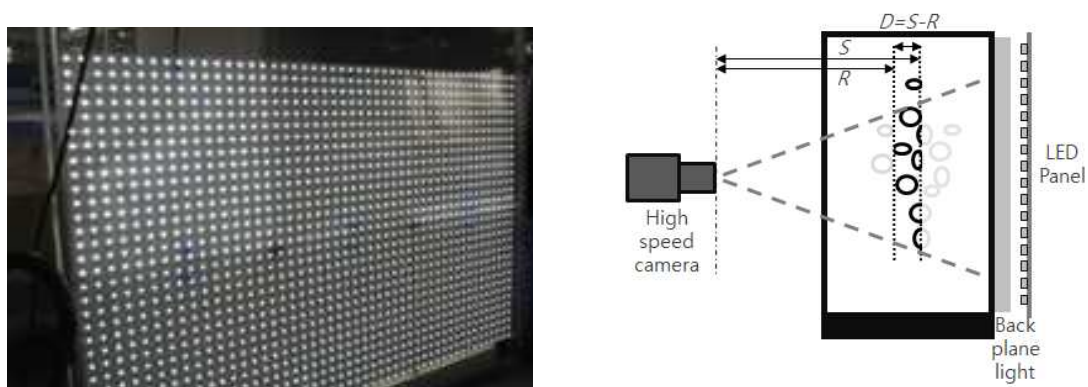


그림 7. LED회로판 및 BIV기법 기본개념

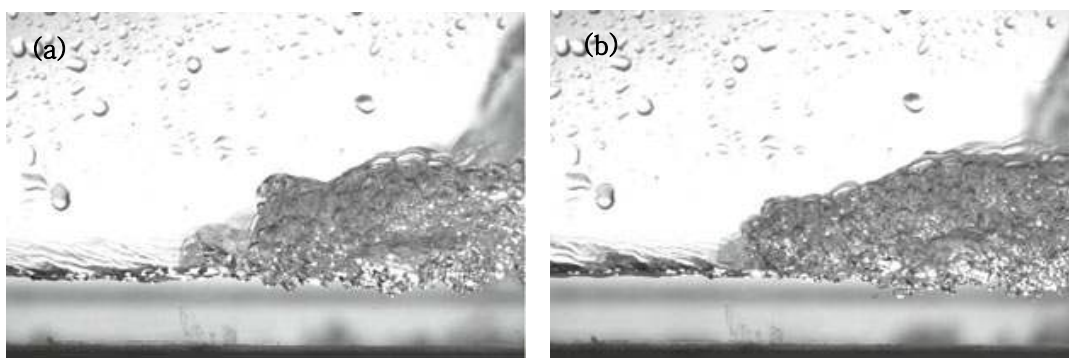


그림 8. BIV측정기법을 적용한 순간이미지 (Lin et al., 2012)

(3) 하천횡단구조물 하부 시설 등 설계 기준관련 연구

- 감세공에 대한 내용은 하천설계기준(수자원학회, 2009)에 제시되어 있지 않으며 국내의 경우 댐 설계기준을 중심으로 감세공 설계기준 수록

- 댐설계기준은 감세공의 형식을 플립버킷형 감세공, 정수지형 감세공, 잠수버킷형 감세공 3가지 형태로 분류

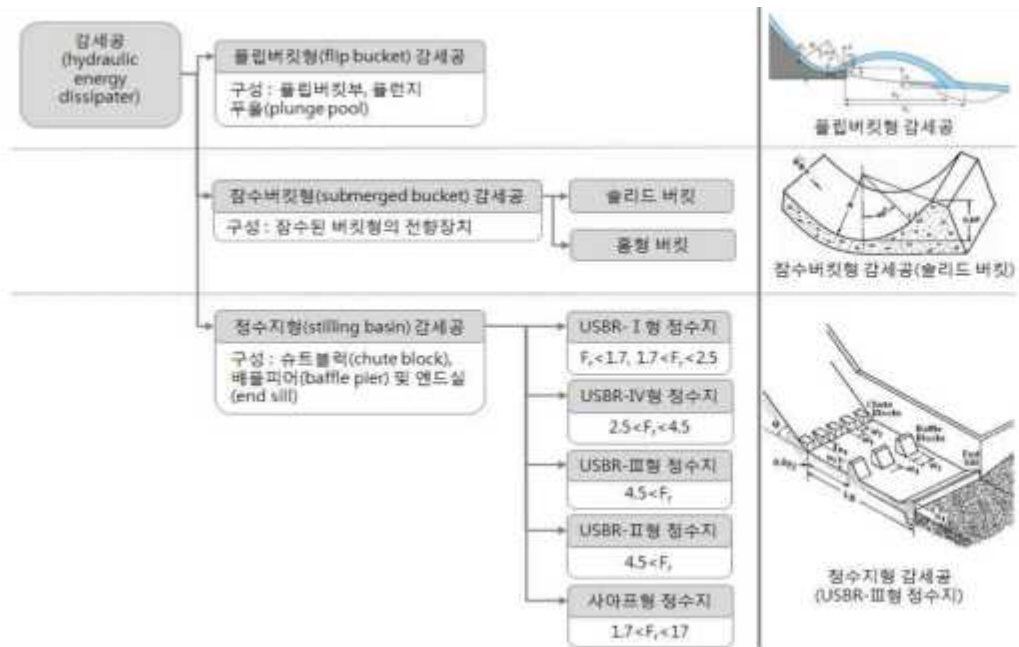


그림 9. 감세공의 분류

나. 국외 기술개발 현황

(1) 횡단구조물 설계기준

- (미국) 횡단 구조물의 설계, 보수보강 방안 등에 대해 기존 경험식 및 간략 계산식 위주로 기준 제시(USACE, 1987)하였으며, 실제 하천의 하류 바닥보호공 및 감세공의 유지관리를 위한 표준방안 제시(USACE, 2012)
- (미국) (ACI, American Concrete Institute) 일반적으로 감세공과 같은 수공구조물에서 발생하는 피해의 원인을 공동, 마모, 화학작용으로 분류하고, 관리 및 피해 시 수리방안에 대해 서술
 - 공동현상의 제어에 대한 서술에서 진동에 의해 발생하는 피로를 다루고 있으나 실제 댐의 사례에서 보고된 연구는 없고, 콘크리트와 에폭시/폴리머 재료에 대한 진동시험이 필요하다고 제안되어 있으며, 감세공 바닥, 벽, 출구에 대해 표준 실증시험이 개발됨.
- (일본) 1997년까지 블라이공식을 사용하였으나, 블라이 공식은 한계(침투파괴 방어의 목적으로서 월류수의 길이를 반영하지 못함)가 있어 월류수의 낙하길이를 간단하게 계산할 수 있는 Rand 공식으로 대체(國土交通省 1997)
- (유럽) 주운용 보(movable weir)에 대한 기준을 PIANC에서 제시하고 있으며, 구체적 기준은 미국의 내용을 차용(PIANCA, 2006)

(2) 흐름 가시화 실험관련 연구

- 입자영상유속계(PIV) 관련 연구
 - 2000년대 이전에는 개수로 흐름의 경계층 부근에서 발생하는 고유속 측정의 어려움으로 주로 유체 역학이나 혈관흐름 측정과 같은 의공학에서 주로 사용되어 왔으며, 2000년대에 개수로에 대한 적용이 본격화

- Adrian 등(2000)은 PIV를 이용하여 개수로 흐름에서 경계층 흐름을 측정하였으며, 고유구조(coherent structure)를 가지고 있음을 규명
- Kadota 등(2007)은 침수 조건의 군말쪽에 대한 측정을 통하여 원기둥 주변의 와구조 규명
- Sanjou와 Nezu (2009)는 다층 PIV(multi-layer PIV)를 이용하여 만곡수로 내측과 복단면 직선수로의 홍수터 제방에서 발생하는 이차흐름의 발생을 확인
- Herlina와 Jirka (2008)는 PIV와 LIF(laser-induced fluorescence)을 이용하여 유속장과 용존산소 농도를 동시에 측정
- Chang 등(2012)은 PIV와 BIV를 이용하여 정상도수($Fr=4.51\sim5.35$) 조건에서 물 영역과 물-기포 혼합영역의 속도를 측정 및 분석한 결과, 기포와 물영역의 속도비는 일정하였으며 횡단평균 유속분포 일반형을 제시
- Koca(2017)은 하상 재료에 따른 하상경계에 근접한 지점의 흐름특성을 파악하기 위해 하상 부근 유속과 난류 측정에 유리한 계측기인 VP와 PIV를 사용하여 실험을 수행하였으며, 하상재료별 간섭 지역의 범위를 제시

□ 다상흐름 측정 관련 연구

- 국외 다상흐름에 관한 실험적 연구는 기계공학분야에서 주로 이루어지고 있으며, 토목수리분야의 경우, 개수로에서 발생하는 기포연행, 도수, 쇄파의 기포분율에 관한 연구가 주로 수행되고 있음
- 관련 연구는 다상흐름의 기포분율(전체흐름 대비 기포 비율)에 대한 내용이 주를 이루고 있으며, 기포유속에 대한 연구는 측정기법 적용의 어려움으로 간헐적으로 발표되고 있음
- 영상기법을 활용한 다상흐름의 경우 광원 사용에 따른 다상 경계의 가시화에 집중되고 있으며 적절한 광원과 측정영역 크기에 대한 상관관계에 대한 연구에 대한 연구도 다수 소개되고 있으며, 광섬유의 경우 침단 접촉면의 변위 및 매질에 대한 반응을 활용한 연구가 소개되고 있음
- Beheshti 등(2013)은 계단형 여수로 실험을 통해 2침 전도계를 이용하여 물의 속도, 기포의 밀도, 속도, 개수를 측정하였으며, 난류강도는 분무거동과 기포유동의 중간단계에서 최대로 발생
- Ryu et al. (2005)는 처음으로 영상측정 그림자기법을 적용하여 다상흐름 측정을 수행하였으며 구조물 근처에서 breaking흐름을 분석
- Lin et al. (2012)은 도수흐름에서 기포흐름을 추적하여 복잡한 난류흐름 측정
- Song et al. (2013)은 사각형 수조에서 거동하는 흐름거동을 그림자기법을 적용하여 분석

(3) 하천횡단구조물 하부 시설 등 설계 기준관련 연구

□ 피로도 평가관련 연구

- Sobani와 Mehr (2014)은 극심한 압력변동은 상당한 양력을 발생시키고 바닥 슬래브의 부양, 재료의 피로, 공동의 발생으로 여수로와 감세공의 바닥에 손상을 야기하며, 지배적인 변동 빈도범위에서 에너지의 집중 때문에 구조물 진동 위험이 공동 현상의 위험을 증가시키기 때문에 감세공 설계 시 압력변동에 대한 고려가 필요함을 제안
- 피로강도는 일반적으로 주어진 횡수동안 반복적으로 지지될 수 있는 정적 강도의 비율로 정의되며, 고사이클 피로상태에서는 재료의 성능은 일반적으로 S-N 곡선에 의해 특성화됨. 넓은 콘크리트 평판의 피로강도와 관련해서는 교량의 슬래브를 대상으로 주로 수행

표 3. 피로수명 예측 선행연구

연구자	연도	피로수명 예측식	비고
Gylltoft	1983	$\log N = \left(\frac{1}{0.043}\right)\left(0.93 - \frac{P_s}{P}\right)$	콘크리트
Youn & Chang	1998	$\log\left(\frac{P}{P_s}\right) = -0.066 \log(N) + \log 1.4461$	철근콘크리트
Matsui 등	2001	$\log\left(\frac{P}{P_s}\right) = -0.07835 \log(N) + \log 1.52$	철근콘크리트
Klowak 등	2006	$N = 10 \exp\left(\sqrt[5]{\frac{1}{P/P_s} - 1}\right)$	hybrid CFRP/GFRP and steel strap design
El-Ragaby 등	2007	$\frac{P}{P_s} = 0.0034(\log N)^2 - 0.1187(\log N) + 1.0752$	FRP 콘크리트

여기서, P_s : 정적최대하중(kN), N : Number of cycles, P : the magnitude of the applied load

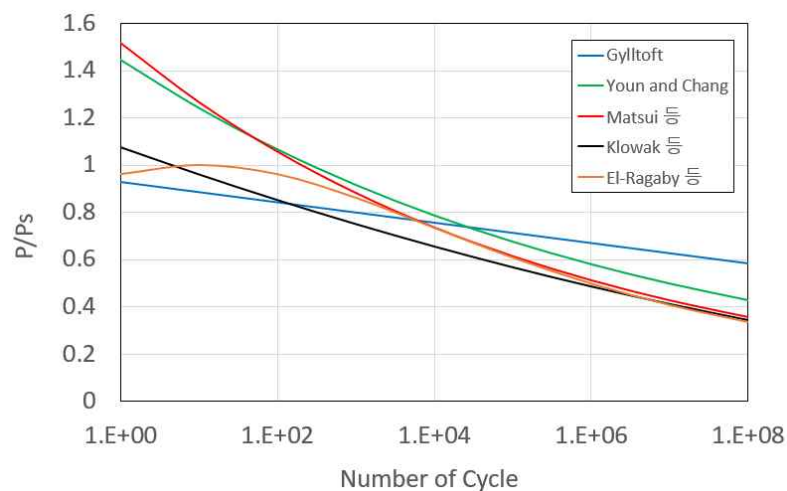


그림 10. 콘크리트 피로수명 관계

- Lopardo 등(2004)은 수문 하류에서 도수 발생 시 거대난류(macro-turbulent flow)에 의해 발생하는 진동하는 압력에 대해 통계적 분석을 수행하고, 이 흐름에 잠긴 콘크리트구조물 내 철근의 피로도를 평가하는 방법 개발

* 스트로할수(Strouhal Number)에 대한 프루드수, 무차원 수평길이(x/h_1)와의 관계를 정의

- Mohammadi 등(2016)은 연안 구조물에 대한 피로분석 방법에 대한 연구로서, 공간적 분석방식의 불확실성의 원인과 크기를 제시하고, 시간적 분석 수행 시 계산 작업량을 감소시키기 위한 새로운 방안을 제시

□ 설계인자관련 연구

- USACE (1987)는 물받이공에서 도수가 발생되도록 물받이공 길이와 표고를 결정하며, 설계인자로 월류량, 도수 전 수심 및 유속, 도수 후 수심 등을 이용
- Fiorotto와 Rinaldo(1992)는 도수 발생시 변동되는 압력을 측정하는 모형실험을 수행하였으며, 프루드수, 감세공의 바닥부를 구성하는 콘크리트 평판의 모양, 크기, 난류압력의 공간적 상관성구조를 고려한 감소요소, 재료의 단위중량, 압력계수를 이용한 두께공식을 제시

- Pothof(2011)은 자유수면에서 난류속도가 Fr(Froude) 수와 We(Weber) 수의 어떤 함수값보다 크면 기포가 발생된다는 것을 이론적으로 추정

다. 기술개발 성숙도

구분		연구 착수	연구 종료	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

☐ 연구 착수 - 실험 단계 (기술적 개념정립단계와 실험적 증명 단계의 혼합)

- 기존 하천 횡단구조물 하류부 바닥의 파괴에 대한 많은 연구가 있었으나, 본 연구에서 보고 있는 관점은 최근의 국제적인 연구 동향을 반영한 것이며, 여기에 최신의 기술을 접목한 특징이 있음. 이는 최초로 시도된다는 점에서 기술적인 정립단계인 동시에, 실험적으로 증명을 수행해야 하는 단계라고 판단됨.

☐ 연구 종료 - 실험실 성능평가 단계

- 1차 년도 종료시점과 2차 년도 연구 개시시점에서 실험실 수준의 검증 및 성능을 평가하는 단계에 도달할 것으로 판단됨.
- 다양한 현장 scale의 3차원 수치해석을 통해 현장적용 가능성을 파악할 예정이며, 이는 유사환경 시험단계에 해당된다고 판단됨.

제3장. 연구수행내용 및 성과

가. 연구개발 목표 및 내용

(1) 연구개발 목표

표 4 연구개발 목표

구분	내용
최종 목표	하천횡단구조물 하류부 하상 구조물 안전성 증대를 위한 정량적인 설계 기준 제시
세부 목표	☐ 압력변이의 음압구배로 인한 사석 및 블록의 이탈 조건 제시 (Track A) ☐ 압력변이로 인한 물받이공 손상파괴의 관계 도출 (Track B-1) ☐ 압력변이로 인한 물받이공 하부로 진동이 전달되지 않는 최적 두께 도출 (Track B-2) ☐ 3차원 수치해석을 이용한 적용성 확장

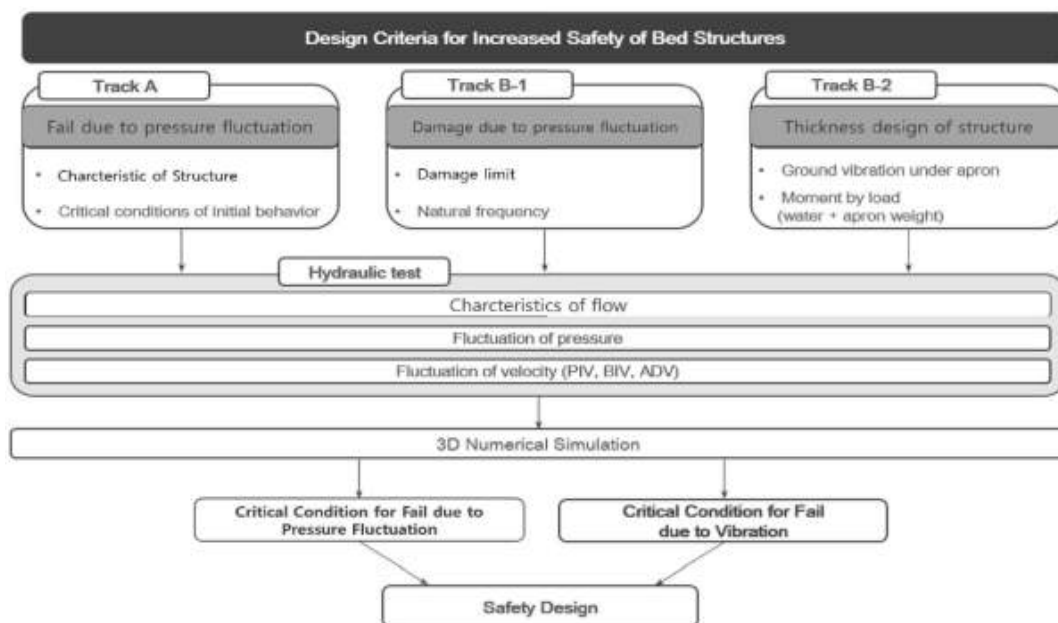


그림 11. 연구내용 요약

(2) 연구수행 내용 및 결과

(가) Task 1 : 음압력구배 및 물받이공 진동으로 인한 하천횡단구조물 하류 설계인자 도출

① 국내외 보 구조물 설계 기준과 선행 연구 조사 및 정리

- 국내 보 설계 기준에서 Bligh 공식을 사용하며 물받이공의 길이와 두께를 산정하는 기준을 제시하고 있음.
- 물받이공의 길이 공식은 간단하지만 하상토사의 특성을 이용한 Bligh 계수만으로 물받이공의 길이를 산정하고 기초를 견고한 암반에 설치하는 경우처럼 불투수지반인 경우 적용이 곤란함.
- 물받이공의 두께는 기본적으로 정수압 가정을 고려하여 산정하게 되지만 물받이공에서 발생하는 도수현상과 같은 흐름변화에 대한 고려를 하지 못하는 경험식임.
- 국외 설계기준도 마찬가지로 경험식과 정수압 가정을 통해 물받이공의 설계를 제안하고 있는 실정임.

표 5 물받이공 국·내외 기준

물받이공	길이	두께
한국 (하천설계기준)	$L = 0.6C\sqrt{H_a}$ 여기서, L : 물받이공 길이, H_a : 물받이 상단에서 보마루까지의 높이, C : Bligh계수로 하상토의 상태에 따라 4 ~18을 적용	$T = \frac{4 \cdot (\Delta h - h_L)}{3 \cdot (S_a - 1)}$ 여기서, T : 물받이공 두께, Δh : 상하류 수위차, h_L : 손실수두, S_a : 물받이공 구성재료의 비중
미국 (USACE)	$L_b = Kd_1F_1^{1.5}$ 여기서 K 는 물받이공 계수, L_b 는 물받이공 길이, d_1 는 유입 깊이, F_1 은 유입 Froude 수	-
일본 (MILT)	$\frac{W}{D} = 4.3(h_c/D)^{0.81}$ 여기서, W 는 물받이공의 길이, D 는 낙차 높이, h_c : 한계수심	$t = Fs \frac{U_{pm} - h_{1a}W_0}{\gamma_c - 9.8}$ 여기서, t 는 물받이공의 두께 (m), U_{pm} 은 작용 하는 양압력 중 최대값 (kN/m^2), h_{1a} 는 월류후 하류수심 (m), γ_c 는 콘크리트 단위중량($23.05 \sim$ $24.03 \text{ } kN/m^2$), W_0 는 물의 단위 중량 (9.8 kN/m^2), Fs 는 안전율 (일반적으로 4/3)
인도 (BIS)	물받이공의 형상과 Froude수에 따라 슬 래브의 적정 길이를 제안함.	최소 600 mm 이상으로 설계해야하며 uplift force을 고려해야함.

※ 물받이공 설계 영향인자 분석을 위한 Buckingham의 π 정리 적용

- Buckingham의 π 정리는 차원해석 방법 중 가장 잘 알려져 있고 대표적인 방법임.
- n 개의 물리량 $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ 사이의 물리적 관계를 나타내는 방정식은 식(2)와 같음.

$$f(A_1, A_2, A_3, \dots, A_n) = 0 \quad (2)$$

- 각 양의 차원을 구성하는 기본차원의 수를 m 이라고 하면 n 개의 물리량에서 m 개의 기본 차원을 소거해가면 $(n-m)$ 개의 수로 독립적인 무차원항을 만들 수 있으며, 이 무차원 항을 π 라고 함.

$$\phi(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_{n-m}) = 0 \quad (3)$$

- 물받이공 도수길이 및 물받이공 두께에 대하여 π -theorem을 적용하면 다음 표6과 같은 설계영향인자를 도출할 수 있음.

표 6 물받이 길이 및 두께의 영향인자 분석(π -theorem)

물리량(A) [dimension]	차원해석	π 항	π -theorem
g : 중력가속도 [LT^{-2}] h : 수심 [L] v : 유속 [LT^{-1}] ρ_w : 물의 밀도 [ML^{-3}] ρ_s : 구조물 재료 밀도 [ML^{-3}] p : 압력 [$ML^{-1}T^{-2}$]	L_j : 도수길이 [L]	$\pi_1 = L_j/h$ $\pi_2 = v/\sqrt{gh} (= F_r)$	$f(\frac{L_j}{h}, F_r) = 0$
	S : 두께 [L]	$\pi_1 = v^2/gS$ $\pi_2 = \rho_w/\rho_s$ $\pi_3 = p/\rho v^2$	$f(\frac{v^2}{gS}, \frac{\rho_w}{\rho_s}, \frac{p}{\rho v^2}) = 0$

- 물받이공 도수 길이는 수심과 Froude 수의 함수임을 알 수 있으며, 물받이공 두께는 유속, 중력가속도, 압력 및 밀도의 함수임을 확인하였음.

- 물받이공 길이와 두께 산정에 대한 선행연구를 조사하였음.
- 물받이공 길이는 도수길이에 따라 설계되며 기존의 연구들에서 도수길이는 Froude 수나 상하류의 수심에 대한 주요 인자를 분석하여 관련한 공식들을 정립하였음.

표 7 도수길이산정 공식들

여기서, L_j : 도수길이, h_1 : 상류 수심, h_2 : 하류수심, Fr_1 : 상류 Froude 수

공식	제안자(년도)
$L_j = 2.5(1.9h_2 - h_1)$	Pavolovski(1940)
$L_j = 6.9(h_2 - h_1)$	Peter(1955)
$L_j = \frac{8(10 + \sqrt{Fr_1})}{Fr_1} \cdot \frac{(h_2 - h_1)}{4h_1h_2}$	Ivadian(1955)
$\frac{L_j}{h_1} = 9.75(Fr_1 - 1)^{1.01}$	Silverster(1964)
$\frac{L_j}{h_1} = 5.08Fr_1 - 7.82$	Rajaratnam(1968)
$\frac{L_j}{h_1} = 6.29Fr_1 - 3.59$	Bretz(1987)
$\frac{L_j}{h_1} = 160 \tanh\left(\frac{Fr_1}{20}\right) - 1.2$	Hager 등(1990)
$\frac{L_j}{h_1} = 220 \tanh\left(\frac{Fr_1 - 1}{22}\right)$	Hager(1991)

- 물받이공 두께에 관한 연구에서는 물받이공 표면에 작용하는 순간압력변이에 따라 두께를 산정하는 연구들이 대부분이며 그 외 유속과 물받이공의 비중 등을 고려하여 계산식을 제시함.
- 물받이공 두께에 대한 영향인자 중 물받이공 폭과 길이, 형상에 따른 압력변이의 작용 특성은 실험을 통해 측정된 값을 주로 사용하고 있음.

표 8 물받이공 두께 산정 공식들 (γ_c : 콘크리트비중, γ : 물의 비중, V_1 : 물받이공에서 유속)

공식	제안자(년도)
$s = \frac{C_p' K \phi_1 \phi_2 V_1^2 \gamma}{2g(\gamma_c - \gamma)}$ 여기서, s=물받이공의 두께, K힘의 발생 빈도를 정의하는 계수 (일반적으로 3.09이면 발생확률이 99.8%), $C_p' = \sqrt{(p')^2} / \frac{V_1^2}{2g}$, p': 물받이공에서의 순간압력(실험값), ϕ_1, ϕ_2: 물받이공 폭과 길이에 따른 상관 계수(형상에 따라 실험값을 제시함.),	Hajdin(1982)
$s = \frac{C_p V_1^2 \gamma}{6g(\gamma_c - \gamma)}$ 여기서, $C_p = C_p^+ + C_p^-$, C_p^+: 물받이공에서의 최대압력, C_p^-: 물받이공에서의 최소압력	Toso(1988)

$s = \frac{V_1^2 \gamma 3.5 C_f'}{2g(\gamma_c - \gamma)}$ 여기서, $C_f'^2 = C_{fL}' C_{fB}'$, $C_{fL}' \cdot C_{fB}'$: 물받이공의 형상(길이와 폭)에 따라 작용하는 힘의 계수(형상에 따라 실험값을 제시함.)	Farhoudi(1991)
$s = \frac{V_1^2 \gamma \Omega (C_p^+ + C_p^-)}{2g(\gamma_c - \gamma)}$ 여기서, Ω: 물받이공의 형상(길이와 폭)에 따라 작용하는 부압의 계수(형상에 따라 실험값을 제시함.), C_p^+: 물받이공에서의 최대압력, C_p^-: 물받이공에서의 최소압력	Bellin(1995)
$s = C_d \gamma V_1^2 / (\gamma_c 2g)$ 여기서, C_d: 압력변이로 발생하는 모멘트로 인해 발생하는 물받이공의 부력을 나타내는 계수(Fr수에 따라 실험값을 제시함.)	Mauricio(2016)

- 바닥보호공 관련하여, 국내의 경우 Bligh 공식을 사용하며 국외의 경우 일본은 도수 발생 및 흐름 안정을 고려한 설계절차를 제시하며, 미국은 하류 공액수심을 고려하여 결정함.

표 9 고정보, 가동보 국내외 설계 기준

		하천설계기준해설	농업생산기반 정비사업 설계기준- 취입보	하천사방기술기준 (일본)	Hydraulic Design of Navigation Dam
고정 보	기능	유속을 약화시켜 하상의 세굴을 방지하고 보의 본체 및 물받이 보호	급류하천(5가지)과 환경사 하천으로 구분하여 도수 등을 감안한 설계절차 및 블록의 제원 결정 방법 제시	(구조) 유속을 약화시켜 유수를 조절하는 작용을 가지고 본체 등을 보호하는 것을 목적으로 하며, 원칙적으로 굴요성일 가지는 구조 (설계) 강성, 조도, 안정성, 흡출 등에 대해 설명	
	길이	블라이 공식 $L_2 = 0.66 C_f \sqrt{H_q} - L_1$ *f 는 안전율로서 고정보의 경우 1.0, 가동보의 경우 1.5 *만곡하천의 경우, 충분한 안전율을 고려			하류공액수심(d_b)의 4 ~ 27배 *두께 및 사석크기에 대한 식 제시
가동보		고정보와 같은 방법으로 설계하되 그 길이는 일반적으로 고정보의 물받이 및 바닥보호공 길이의 50 % 정도			

- 국내에 건설된 고정보의 경사도를 조사한 결과 국가하천의 경우 1:0.6 ~ 1:1.0의 범위로, 지방하천의 경우 1:0.6 ~ 1:1.7의 범위로 설계됨.
- 국내에 건설된 고정보의 단면 형상을 조사한 결과 국가하천의 경우 0gee형으로, 지방하천의 경우 Trapezoidal형으로 다수 설계됨.

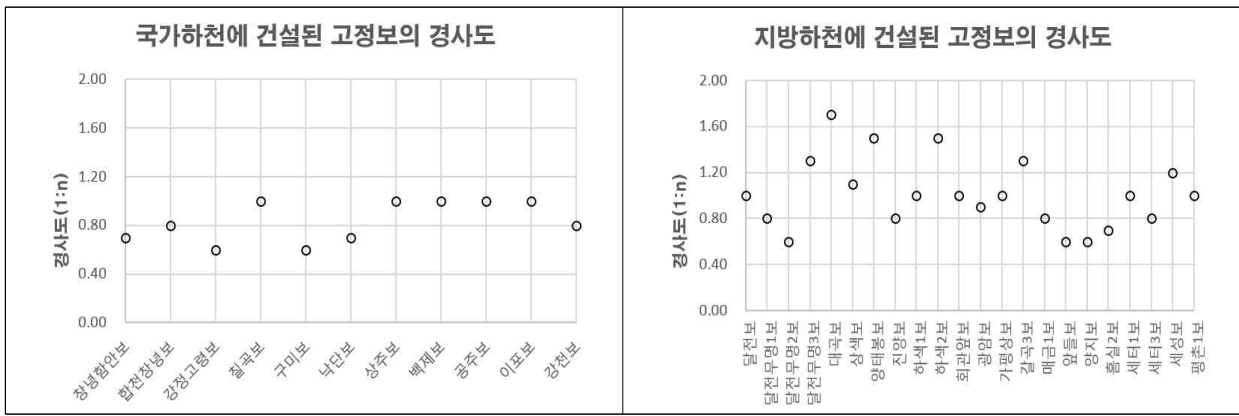


그림 12 고정보 설계 사례(경사도)

- ▷ 보 구조물 파괴 사례와 파괴원인을 분석한 연구들 사전 조사 수행
- 압력변이로 인한 보 구조물의 파괴는 1960년대 이후 파괴원인 사후분석 과정에서 발견되었고 정확한 원인 규명을 위해 최근까지 연구가 진행되고 있음.

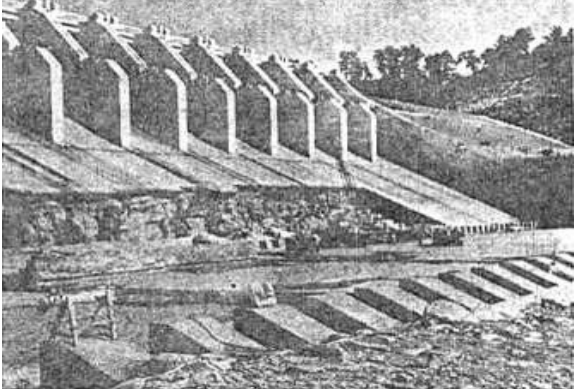
 멕시코 malpaso 댐 ◦ 1970년 규격 12m×12m×12m, 무게 720ton의 물받이공이 홍수로 인해 파괴가 발생 ◦ 물받이공에 발생한 파괴는 도수에 의한 압력변이가 원인인 것으로 밝혀짐.	 방글라데시 karnafuli 댐 ◦ 1961년 8월 13일 폭 180m, 길이 23m 규모의 댐에서 홍수로 인한 물받이공의 파괴가 발생 ◦ 피해의 원인으로는 누수에 의한 압력변동, 포장된 바닥판 슬래브에 발생한 양압력으로 분석함.
 미국 Oroville 댐(캘리포니아) ◦ 2017년 2월 7일 폭 55m, 길이 915m 규모의 Oroville 댐 여수로에서 홍수로 인한 파괴가 발생함. ◦ 피해원인으로는 여수로 바닥콘크리트에 공동 확대에 의하여 바닥판 슬래브에 발생한 양압력으로 분석함.	

그림 13 압력변이로 파괴된 보 구조물 대표사례

- 최근 연구를 보면 압력변이로 인한 구조물의 안정성을 분석하는 연구는 다양하게 연구되고 있으며 압력변이의 경향을 분석하는 기초연구가 주로 진행되고 있음. 최근 수행된 대표연구는 다음과 같음.
- Kazemi, F. et al. (2016)의 연구에서 Namrod 댐의 축소모형을 제작하고 물받이공 상부에 piezometer를 부착하여 동적 압력을 측정하였고 도수가 형성되면 유역 바닥에 균일하지 않은 분포 압력이 생기고 압력변동이 크게 발생함을 확인
- Marijana Damjanović et al. (2015)의 연구에서는 Beni Slimane Dam 대상으로 216~850 m³ /s의 유량조건에서 바닥면의 압력분포를 측정함.(압력센서는 압력을 전압으로 바꿔주는 센서임).

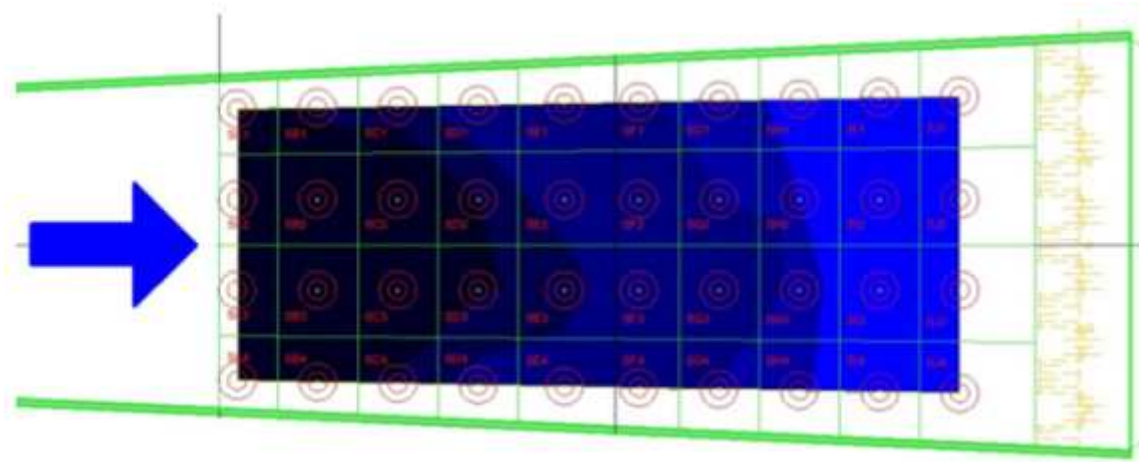


그림 14 물받이공 바닥면의 압력변이 분포 (Damjanović et al., 2015)

- González-Betancourt et al. (2016)는 압력변이로 인한 Uplift force의 원인이 물받이공 상하부의 압력차로 보고 실험연구를 수행함. 물받이공의 균열부와 joint를 통해 압력차가 생긴다고 분석함.

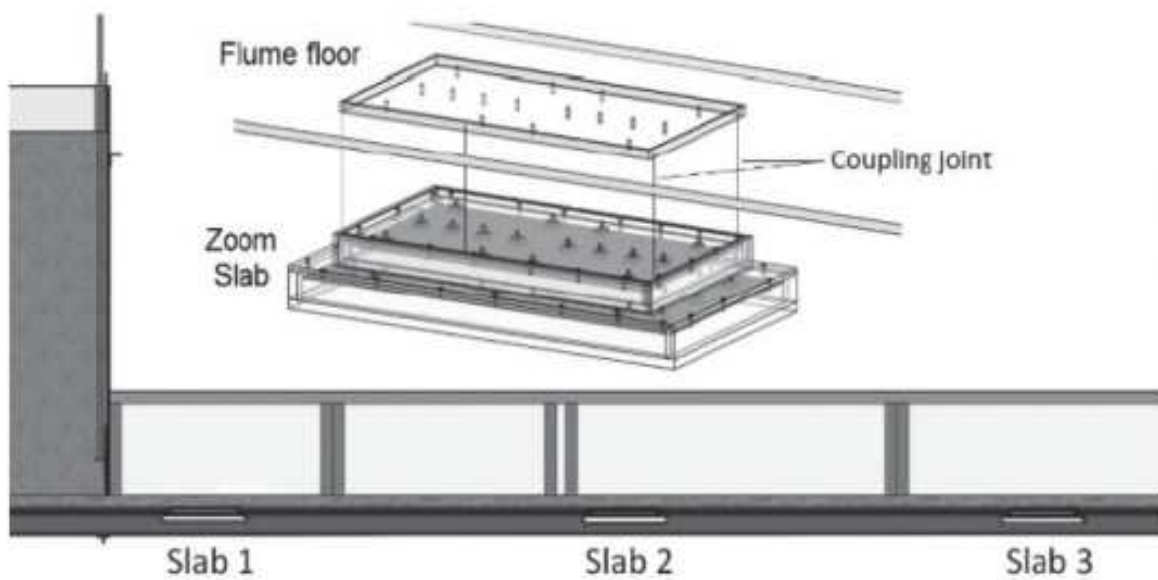


그림 15 상하부면의 압력변이를 고려하기 위한 물받이공 설계 도면 (González-Betancourt et al., 2016)

- 본 연구에서는 구조해석에 대한 접근으로 압력변이 측정값을 분석하는 원천기술 확보에 의의가 있음.

- 구조해석을 통해 보 구조물 설계 인자를 정량적으로 제시할 수 있을 것으로 기대

▷ 보 구조물의 파괴 유형 분류 및 파괴 메커니즘에 대한 연구 조사

- 보 구조물 파괴 유형은 5가지로 분류할 수 있으며 이번 연구에서 주로 수행하는 물받이공 구조물에 대한 파괴조건을 정리하여 연구방향과 범위를 설정하였음.

표 10 보 및 낙차공 파괴 원인별 유형 분류(한국건설기술연구원, 2006)

파괴 유형 분류		파괴 유형의 세부 분류		파괴 유형의 원인
A	제방과의 연결부 파괴	1	과대한 유속	과대한 홍수로 인한 유속 증가로 제방과 보, 낙차공 연결부 파괴
		2	만곡부 지점	만곡부 지점에 설치된 보, 낙차공과 제방 연결부 세굴 파괴
		3	하폭 감소지점	하폭 감소지점에 수중보 설치하여 통수단면적 저하로 제방과 연결부 세굴 파괴
		4	홍수시 제방월류	수리단면적 부족으로 홍수시 제방 월류 파괴되어 보, 낙차공 연결부 파괴
B	하상 세굴에 의한 파괴	1	상류 하상세굴	상류부의 하상이 세굴되어 본체, 물받이, 바닥보호공이 침하 등으로 파괴
		2	하류 하상세굴	하류부의 하상이 세굴되어 본체, 물받이, 바닥보호공이 침하 등으로 파괴
C	구조물 자체 불안정	1	본체 불안정	홍수량 증가로 보, 낙차공 본체 유실
		2	물받이	홍수량 증가로 보, 낙차공 물받이 유실
		3	바닥보호공	홍수량 증가로 보, 낙차공 바닥보호공 유실
D	파이핑	1	차수벽 길이 부족	보, 낙차공 본체 하부에 설치된 차수벽 길이 부족으로 파이핑 발생
		2	투수성이 큰 하상 재료	투수성이 큰 하상재료에 보, 낙차공이 설치되어 파이핑이 발생한 경우
E	상하류 하천 시설물 영향에 의한 파괴	1	교량 직하류부 유속 증가	교량 등의 하천구조물 직하류부에 보, 낙차공을 설치하여 교각 및 하상 토사 퇴적으로 인한 통수능 저하로 유속이 증가하여 연결부 세굴 파괴
		2	수위증가에 의한 월류 파괴	보, 낙차공 상하류부에 설치된 교량 등의 하천구조물에 의해 하천수위 상승으로 월류 발생, 보 및 낙차공 파괴로 연결부 파괴

- 위의 파괴 유형에서 이번 연구에서 중점적으로 살펴볼 것은 ‘구조물 자체 불안정’이며 구조물 자체 불안정을 발생하는 원인을 압력변이 인자와 관련시켜 조사를 수행함.
- 보 구조물의 일반적인 파괴 원인을 분석하여 구조물에 작용하는 압력변이로 발생하는 파괴 형태를 지난 50년간 수행된 연구들을 통해 분류하였음.
- 실험에서는 구조물 상부의 압력을 측정할 것이므로 4가지 형태의 파괴 현상에 대해 검토를 할 예정임.

표 11 구조물 압력변이 작용위치 별 파괴 형태

구조물 압력변이 작용위치	파괴 형태
구조물 상부	• Uplift force로 인한 파괴 • 구조물에 작용하는 모멘트 불균형으로 인한 파괴 • Cavitation 파괴 • 피로파괴
구조물 하부	• 구조물 지지지의 세굴로 인한 파괴 (지하수 흐름이나 Uplift pressure)
구조물간 틈	
구조물 하류	• 하류 하상의 침식

▷ 횡단구조물 파괴가능성 유형화

- (유형Ⅰ: 음압구배) 바닥보호공을 형성하고 있는 사석 또는 블록에 압력변이의 음압구배 (adverse pressure gradient, 또는 부압, 정수압 이하의 압력)가 작용할 경우, 중력과 반대방향의 힘을 받게 되며, 이로 인한 이탈이 발생할 가능성이 있음.
- (유형Ⅱ: 공간발생) 압력변이가 물받이공에 작용할 경우, 압력의 진동이 구조물의 진동을 유발하게 되며, 이는 다시 물받이공을 지탱하고 있는 지반의 진동으로 이어져 지반의 침하가 발생할 수 있음. 결국 물받이공과 지반 사이에 공간(gap)이 생성되며, 이 공간으로 인해 물받이공 자중 및 물의 하중을 지반이 받지 않기 때문에 물받이공에 큰 휨 변형이 걸리게 되며, 이로 인한 휨 파괴 가능성이 있음.
- (유형Ⅲ: 손상파괴) 압력변이로 구조물이 진동하고, 지속적이고 일정강도 이상으로 진동한다면 피로에 의해 파괴 될 수 있음.

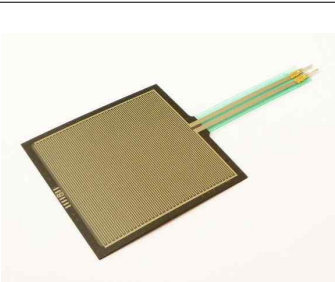


그림 16 구조물 압력변이 작용위치 별 파괴 사례 사진

▷ 압력계측이 가능한 장비들을 조사하여 압력변이 실험에 적합한 측정장비 선정

- 필름형, 반도체형, 차압계형, 간극수압계형, 압력전송기(pressure transmitter)형 등 다양한 압력계측을 위한 방법을 고민하였으며 그 중 이번 실험에 적합할 것으로 보이는 압력전송기형을 선택하였음.
- 위의 압력계측 방법에 따른 제품과 관련하여 국내 약 15개 이상의 업체의 제품들을 비교분석하여 적절한 계측기를 선정하였음.
- 압력측정 방식은 아날로그 방식이 정확도가 높고 장치가 간단하는 장점이 있지만 미세 압력을 측정하기 어렵다는 단점이 있어 디지털 방식을 선택하였으며 디지털 방식은 일반적으로 strain gage로 측정된 압력에 따른 전압분포를 통해 압력을 역산하는 방법으로 하게 됨.

표 12 압력계측기별 특징 비교

	제원	비고	사진
필름형	측정범위: 300 KPa 민감도: 약 300 Pa 가격: 약 5000 만원/대	• 높은 해상도로 간편하게 압력을 측정할 수 있고 측정범위를 원하는 데로 변형을 할 수 있음. • 높은 가격과 민감도가 높아 미세압력을 측정하는 데는 적합하지 못함.	
반도체형	측정범위: 0 ~ 9 KPa 민감도: 약 20 Pa 가격: 약 5 만원/대	• 가격이 저렴하여 장치를 구성하는 비용을 상대적으로 저렴하게 구축할 수 있음. • 방수처리와 잦은 고장이 발생되어 설치의 용이성이 떨어지는 경향이 있음.	
차압계형	측정범위: ± 3.5 , 5.5 KPa 민감도: 약 35, 55 Pa 가격: 약 90 만원/대	• 기기 자체에 방수는 안 되지만 호스를 이용하여 간접적으로 측정하기 때문에 사용 용이성이 있음. • 상대적 압력을 측정하는 것이기 때문에 비교하기 위한 압력의 보정에 대한 문제가 있음.	
간극수압계형	측정범위: 0 ~ 9 KPa 민감도: 약 10 Pa 가격: 약 80 만원/대	• 측정계중에 가장 민감한 편에 속하며 주로 해양의 파실험에 사용되는 압력계임. • 민감한 만큼 아주 작은 압력에도 쉽게 망가지며 수로 바닥에서 측정할시 약간의 오차가 발생하는 것으로 확인함.	

압력전송기형	측정범위: -1 ~ 6 KPa 민감도: 약 15 Pa 가격: 약 60 만원/대	• 산업에서 주로 쓰이는 센서이므로 방수와 충격 등에 강함. • 최근에 압력변이 연구에 사용한 이력이 있고 민감도와 측정범위가 이번 연구에 사용하기 적합한 것으로 판단함.	
--------	--	--	---

▷ 선정된 압력계측기기의 적용성 평가 및 자료처리 활용 방안에 대한 검토

- 본 연구에 사용할 압력계측기는 최근 파압과 압력변이를 측정하는데 사용된 이력이 있는 최신 장비임. (JOSÉ M. CARRILLO AND LUIS G. CASTILLO, 2014; Dimitris Stagonas et al., 2014; Shayan Barjastehmaleki, 2016; Arturo S. Leon and Ali Alnahit, 2016)
- 압력계의 압력범위는 기존의 연구를 통해 산정하였으며 최대·최소 압력은 -1 ~ 6 KPa, 압력 민감도는 15 Pa로 산정함.
- 본 장비는 실시간 데이터 표출과 너무 낮거나 높은 값들을 자체적으로 필터링하여 본 연구에서 원하고자 하는 데이터를 측정부터 추출까지 빠르게 수행할 수 있음.
- 압력계측기로 측정되는 자료는 계측기의 민감도에 따라 노이즈가 발생하므로 적절한 데이터 노이즈 처리를 통해 데이터 값을 처리해야함.
- 데이터 처리 방법은 기본적으로 데이터의 최대·최소값을 분석하며 처리과정에서 생기는 시간 딜레이 등을 고려하며 추계론적 분석방법으로 처리하게 됨.
- 분석된 압력변이 데이터는 FSI와 같은 구조 해석을 통해 원인분석을 수행하게 될 예정

② 수리실험을 통하여 물받이공(Apron)에 작용하는 압력변이(Pressure fluctuation)측정 및 분석을 통한 물받이공 설계인자 제시 (Track A)

㉞ 수리실험 개요

- 물받이공의 파괴원인을 규명하기 위해 본 연구에서는 물받이공에 작용하는 외력을 직접 측정하여 분석하고자함.

▷ 실험 수로 구축

- 물받이공에 작용하는 압력 변동성을 측정하기 위해 한국건설기술연구원 일산본원 하천실험동에 제작된 2차원 개수로에서 실험을 수행함.
- 실험수로는 직사각형 수로로 길이 10 m, 폭 0.3 m, 높이 0.45 m이며, 압력측정 구간(아크릴)을 제외한 구간에서 광학적 측정이 가능하도록 수로의 양면과 바닥면을 강화유리로 제작함.
- 실험수로는 순환식 수로로 펌프의 최대용량은 0.0063 m³/s 임.
- 하천횡단구조물인 사다리꼴형상(측면)의 보(Weir)가 상류 유입부로부터 2.5 m 하류에 설치되어 있음 (사다리꼴 윗변: 0.05 m, 사다리꼴 아랫변: 0.35 m, 사다리꼴 높이(H_s): 0.3 m, 전면 경사 1:1). (그림 18 참조)
- 압력변동성 측정을 위해 보 하류 수로바닥에 지름 5 mm크기의 원형 구멍 총 30개소 중 보 구조물 끝단(toe)으로부터 20개소는 2.5 cm 간격으로, 10개소는 5.0 cm 간격으로 천공함. (그림 18 참조)



그림 17 수리실험 수로시설: (a) 전체수로전경, (b) Weir 보를 포함한 측면도, (c) 도수조건 실험전경

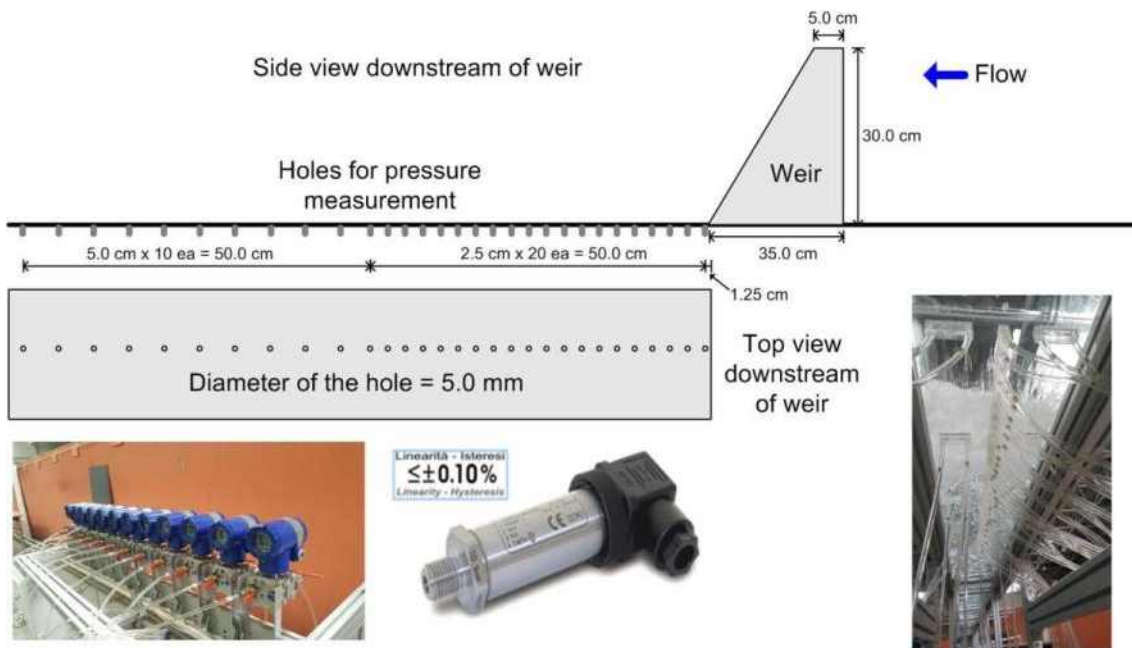


그림 18 수리실험 개요도

▷ 계측기기 검정 수행 (1: 압력전송기형 압력계 2: 펌프 유량계)

1) 압력전송기형 압력계

- 전압 방식 압력계(UNIK 5000)는 외부 충격에 쉽게 측정값이 변동될 수 있으므로 Calibration 작업 수행이 필수임.
- 전압 방식 압력계(UNIK 5000)는 정수압 상태에서 이론값과 측정값 비교를 통하여 압력계 검정을 수행함.
- Case 1 및 Case 2에 대하여 압력 측정값을 이론값과 비교한 결과 최대오차(Maximum Error)가 5% 이내로 발생함
- 전압 방식 압력계측기기가 정확한 압력 측정이 가능하다고 판단됨.

표 13 실험 조건 (압력전송기형 압력계)

Case	실험 공통 조건	실험 소개
1	물의 온도: 10℃ ($\rho = 999.7 \text{ kg/m}^3$) 압력계 측정 주기: 1000 Hz	작은 수조에서 고무관 길이에 따라 기준이 되는 수위로부터 수위를 변동하여 압력 측정 (그림 19 참조)
2	필터링 사용 유무: No Filter 중력가속도(g): 9.81 m/s^2 가정	실제 실험수조에서 기준이 되는 수위로부터 수위 변동 순서(A: 하강, B: 상승)에 따라 압력측정 (그림 20 참조)

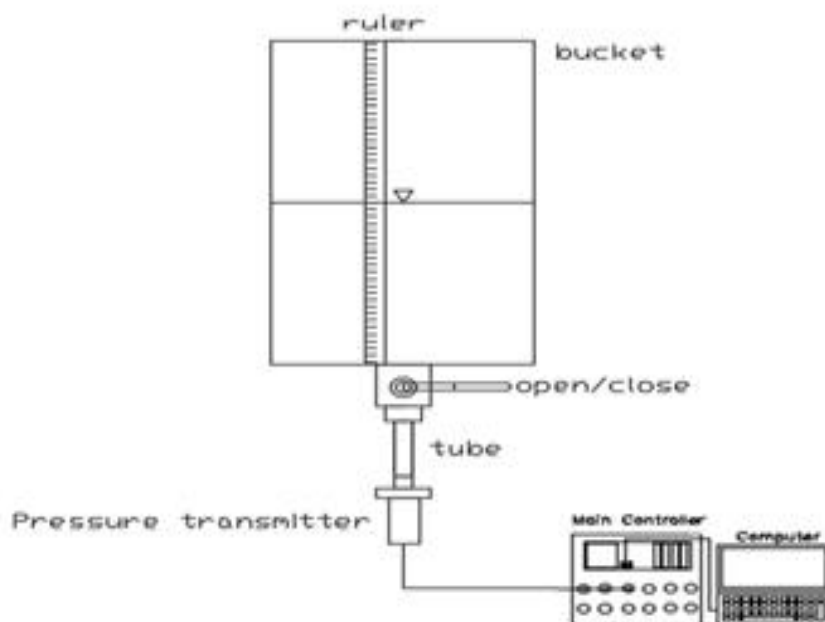


그림 19 계측기 검정실험 개요도 (Case 1)

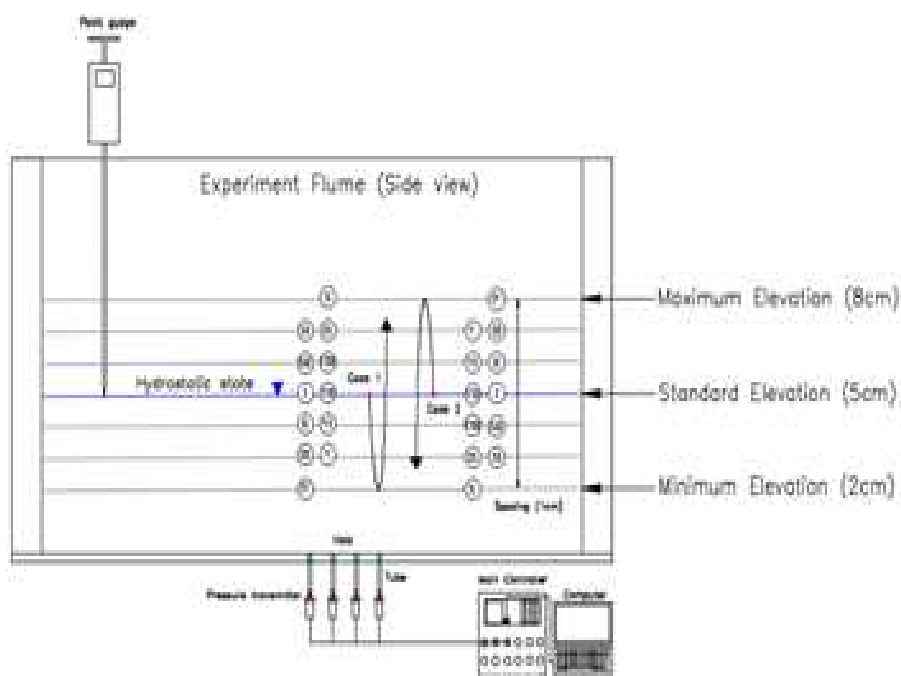


그림 20 계측기 검정실험 개요도 (Case 2)

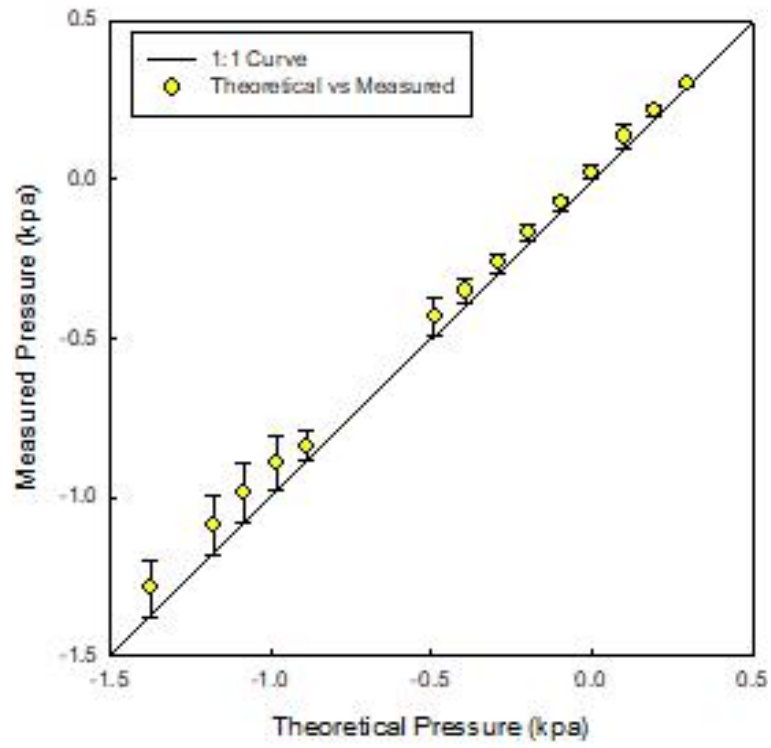


그림 21 압력계 검정결과 1대 1 곡선 (Case 1)

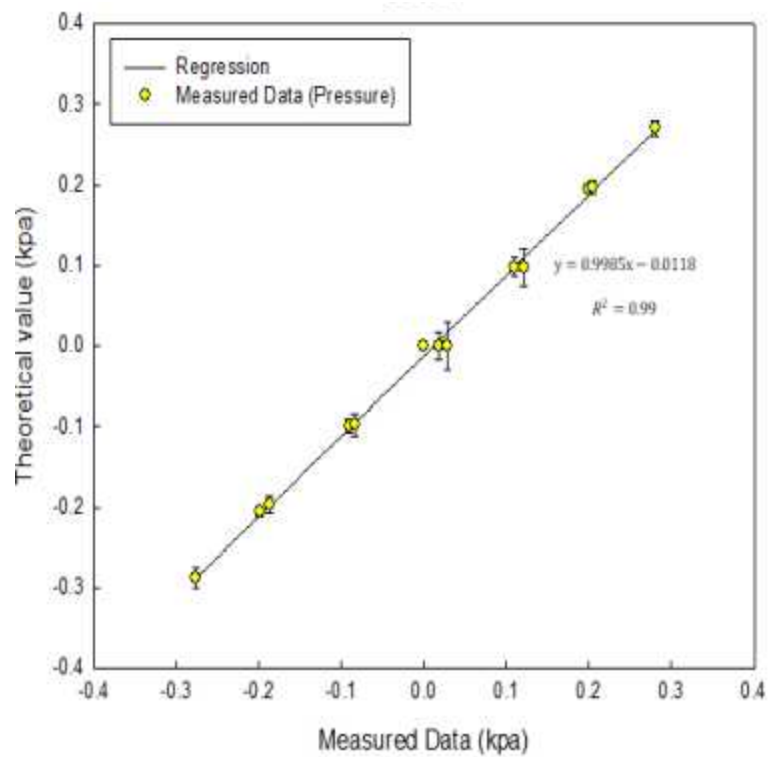


그림 22 압력계 검정결과 1대 1 곡선 (Case 2-A)

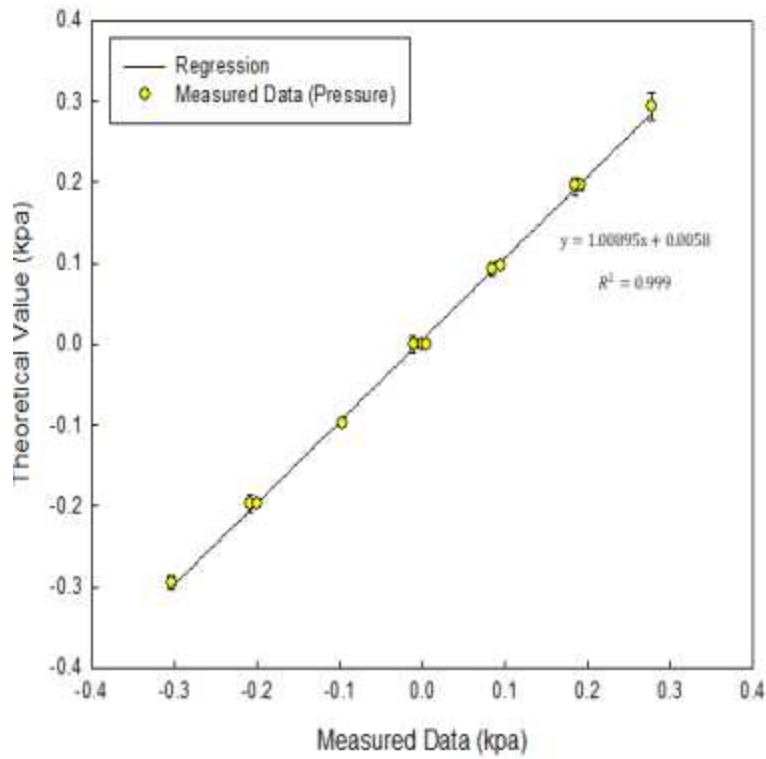


그림 23 압력계 검정결과 1대 1 곡선 (Case 2-B)

2) 펌프 유량계

- 펌프 유량계에서 측정되는 유량 값과 계산값 비교를 통하여 펌프 유량계 검증을 수행함.
- “Hydraulics of Broad-Crested Weirs with Varying Side Slopes”, Sargison et al.(2009) ASCE 에서 제시한 Weir 공식을 적용하여 월류고(Overtopping height)에 따른 유량 값을 도출함.
- Case 1 및 Case 2에 대하여 유량 측정값을 계산값과 비교한 결과 최대오차(Maximum Error)가 10% 이내로 발생함
- 유량검증을 통하여, 펌프 유량계 관측 값의 신뢰도를 확보함

표 14 실험 조건 (펌프 유량계)

	◦ 가정 사항 : 펌프 유량계로 측정된 유량 값은 참값으로 판단 ◦ 수로 단면적 : 2.195 m² ◦ 총 5가지 유량에 대하여 5회 반복측정을 수행함
	◦ 유량 조건 1) 0.0056 m³/s 2) 0.0042 m³/s 3) 0.0028 m³/s 4) 0.0014 m³/s 5) 0.0006 m³/s

표 15 Case 별 실험 소개 (펌프 유량계)

Case	실험 소개
1	스톱워치를 이용하여, 수로의 수위가 1 cm 증가하는데 소요되는 시간을 측정한 후, 수로 단면적을 이용하여 유량 산정함.
2	Weir 공식을 적용하여 월류고(Overtopping height)에 따른 유량을 산정함. ◦ Weir 공식 $Q = C_D b \sqrt{2gH_1^3}$ (where, $C_D (= 0.43 + 0.06 \sin[\pi(\epsilon - 0.55)] - 0.0396\theta + 0.0029)$: discharge coefficient, g : acceleration due to gravity, H_1 : upstream overflow total energy head, b : width of weir $\epsilon (= H_1/(H_1 + \omega))$: relative crest length, ω : weir length)

◦ Case 1 실험 결과

표 16 Case 1 실험 결과

펌프 유량계 (m ³ /s)	수위 상승 (m)	소요 시간 (sec)	평균 소요시간 (sec)	계산 유량 (m ³ /s)	오차 (%)
5.56×10^{-4}	0.01	43.98	40.14	5.47×10^{-4}	1.57
		45.23			
		38.02			
		40.84			
		41.56			
1.39×10^{-3}	0.01	17.59	15.23	1.44×10^{-3}	3.72
		18.51			
		15.69			
		14.4			
		15.62			
2.78×10^{-3}	0.02	14.34	17.31	2.54×10^{-3}	8.70
		13.36			
		18.15			
		17.35			
		16.43			
4.17×10^{-3}	0.04	24.14	21.10	4.16×10^{-3}	0.14
		23.43			
		19.56			
		21.01			
		20.41			
5.56×10^{-3}	0.04	17.95	15.56	5.64×10^{-3}	1.59
		17.32			
		15.78			
		15.2			
		15.69			

◦ Case 2 실험 결과

표 17 Case 2 실험 결과

펌프 유량계 (m ³ /s)	윅류고 (m)	유량계수 (C_d)	Weir 공식적용 유량 (m ³ /s)	오차 (%)
5.56×10^{-4}	0.012	0.3178	5.55×10^{-4}	0.08
1.39×10^{-3}	0.023	0.3303	1.53×10^{-3}	9.15
2.78×10^{-3}	0.034	0.3442	2.87×10^{-3}	3.25
4.17×10^{-3}	0.043	0.3543	4.19×10^{-3}	0.78
5.56×10^{-3}	0.051	0.3622	5.54×10^{-3}	0.21

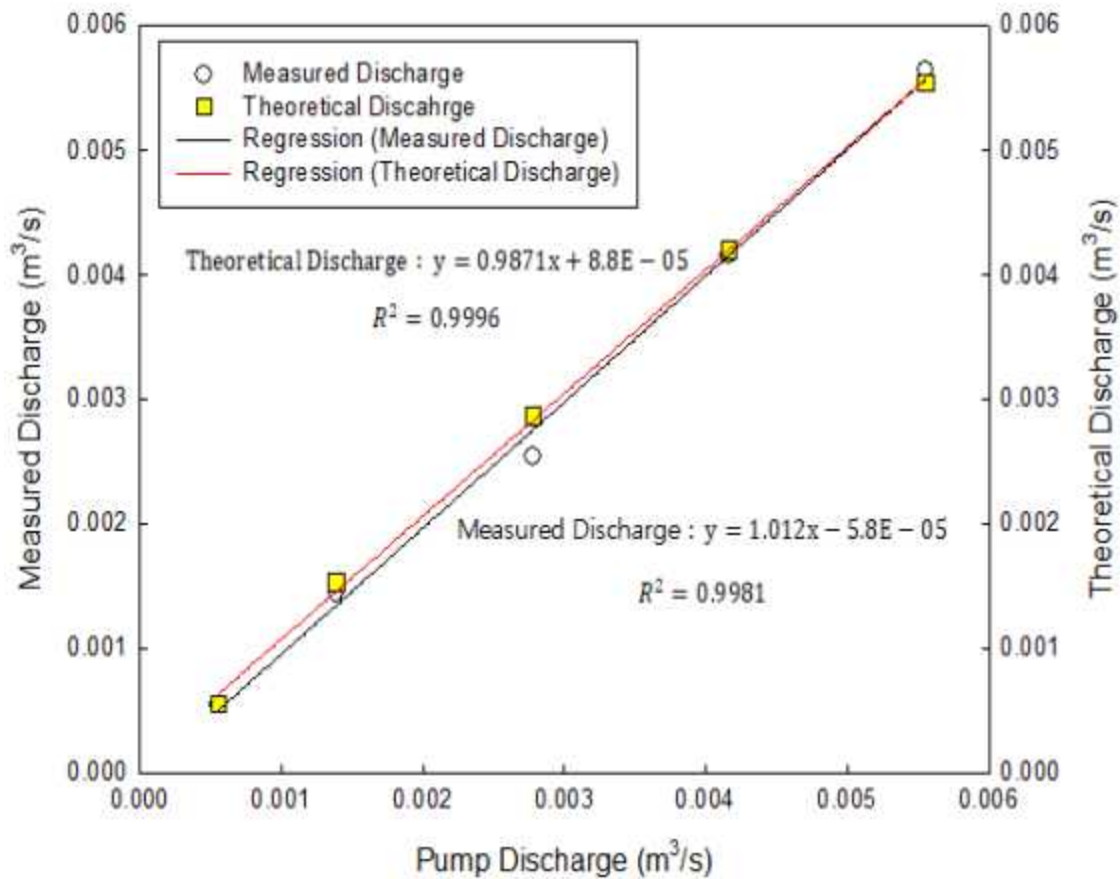


그림 24 유량계 검정결과 비교 (Case1 & Case2)

▷ 수리실험 조건

- 고정보 하류 물받이공의 흐름 및 압력 특성을 검토하기 위해 총 20 가지의 다양한 흐름조건이 검토됨.
- 중소하천 보의 높이 제원(국가하천시설 유지관리 종합정보시스템 구축, 국토해양부, 2010)을 참고하여 Froude 상사(similarity)를 적용하여 계획 홍수위를 실험 Scale로 Scale down을 수행하게 되면 상류수심(H_u)은 약 0.4 ~ 0.6 m 임
- 본 연구에서는 펌프유량계 최대 유량 시 상류수심(H_u)은 0.355 m로 계획 홍수위를 재현하는 한계 점이 존재하나, 다양한 도수흐름특성을 발생하도록 유량을 4가지 나누어 실험조건을 설정함. (표 20 참조)
- 총 4가지 유량조건이 검토되었으며, 도수(hydraulic jump)가 구조물 끝단을 기준으로 0.125 m 와 0.464 m 사이에서 발생하도록 하류단 수심(h_d)을 조절함.
- Froude 수의 범위는 $Fr = 5$ 와 $Fr = 9$ 사이로 도수(hydraulic jump) 형태는 안정 도수(stable

jump)임.

※ The Hydraulics of Open Channel Flow (Chanson, 1999)에 의하면 Froude 상사는 다음과 같음.
→ 실험수로의 보의 높이와 실제 중소하천 보의 높이의 길이(Length)비 적용

표 18 Froude 상사 법칙

Parameter	Unit	Scale ratio with	
		Froude law ^a	Froude law ^a (distorted model)
Geometric properties			
Length	m	L_r	X_r , Z_r
Area	m ²	L_r^2	–
Kinematic properties			
Velocity	m/s	$\sqrt{L_r}$	$\sqrt{Z_r}$
Discharge	m ³ /s	$L_r^{5/2}$	$Z_r^{3/2} L_r$
Time	s	$\sqrt{L_r}$	$X_r / \sqrt{Z_r}$
Dynamic properties			
Force	N	$\rho_r L_r^3$	–
Pressure	Pa	$\rho_r L_r$	$\rho_r Z_r$
Density	kg/m ³	ρ_r	ρ_r

※ 중소하천 보의 높이 제원 (만경강 수계 적용)

→ 평균 보 높이 값을 이용하여 계획 홍수량 시 수심을 Scale Down 하면 상류수심(H_U)은 약 0.47 m

표 19 중소하천 보의 제원 (만경강 수계)

하천명	구조물명	보 높이 (m)	계획 홍수량 시 수심 (m)
소양천	상삼하보	1.0	2.4
	해월보	2.0	2.2
	화심보	2.0	2.0
전주천	이정보	1.5	3.0
	신평보	2.2	2.8
	금학보	1.2	2.4
정읍천	사금보	1.5	3.0
	떡네보	1.0	3.0
	간내보	1.6	2.5
	시기보	2.4	2.4
평균		1.65	2.57

표 20 실험조건 (압력변동성)

Case	상류단 수심(h_u)	하류단 수심(h_d)	유량 (m^3/s)	Froude 수
1	0.355 m	0.0900 m	6.3×10^{-3}	8.6
2		0.0893 m		
3		0.0871 m		
4		0.0863 m		
5		0.0851 m		
6	0.347 m	0.0766 m	4.7×10^{-3}	7.3
7		0.0754 m		
8		0.0739 m		
9		0.0730 m		
10		0.0714 m		
11	0.338 m	0.0604 m	3.5×10^{-3}	6.6
12		0.0587 m		
13		0.0569 m		
14		0.0534 m		
15		0.0524 m		
16	0.327 m	0.0384 m	1.9×10^{-3}	5.2
17		0.0355 m		
18		0.0351 m		
19		0.0327 m		
20		0.0308 m		

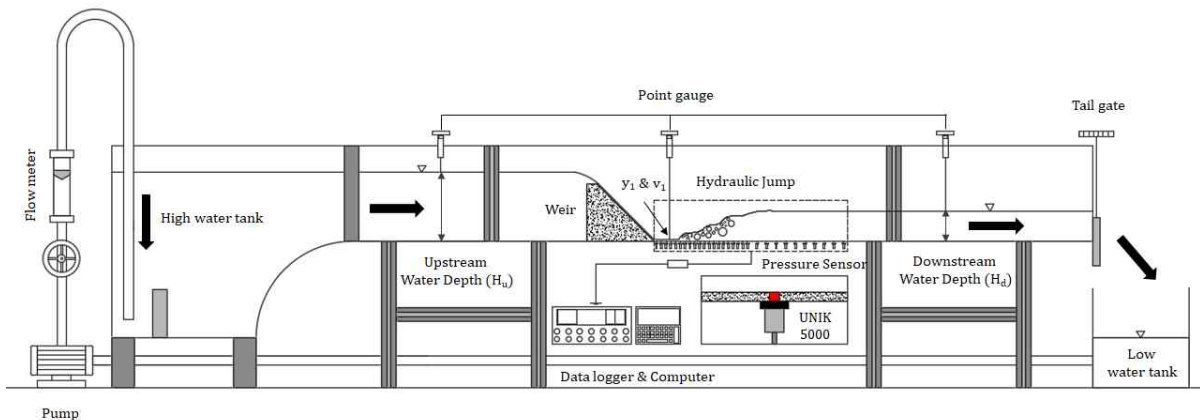


그림 25 압력변동성 검토 수리실험 개념도

▷ 수리실험 수행

- 상류유량은 유량조절 밸브를 사용하여 조절되었으며 보 상류에서 포인트 게이지를 활용하여 상류 수심(H_u)을 측정함.
- 보를 월류한 물은 보의 전면부 경사를 따라 빠르게 내려가며 하류에서 낮은 접근수심(y_1)과 강한 접근유속(v_1)의 흐름을 보이고 이후 하류단 수심(H_d) 조건에 따라 도수의 위치가 변화함.
- 하류단 수심은 하류수문으로부터 1.0 m 상류에서 포인트 게이지를 활용하여 측정함.
- 본 연구에서는 보 끝단과 바닥면을 원점으로 설정하여 분석을 수행함.

▷ 압력 측정 수행

- 보 하류의 흐름을 2차원으로 가정하고 수로의 중심을 따라 압력을 측정함.
- 압력계는 차압계 방식 압력계(Model: P603 series)와 전압 방식 압력계(Model: UNIK 5000) 2가지

종류를 사용함.

- 차압계 형식의 압력계는 0~40 MPa 범위의 측정이 가능하며, 정확도는 $\pm 0.075\%$ 이며, 전압 방식 압력계는 -2~5 KPa 범위의 측정이 가능하며, 정확도는 $\pm 0.04\%$ 임.
- 각 압력계와 수로바닥면에 천공된 구멍은 아크릴튜브를 이용하여 연결되었음.
- 그림 26은 두 가지의 압력계를 테스트한 비교검토결과이며, 전압 방식의 압력계가 바닥저면에 작용하는 미소한 압력변동을 더 정교하게 측정하는 것으로 판단됨.
- 압력측정은 도수흐름이 충분히 안정화된 이후 초당 100장의 취득률로 데이터를 취득하였으며 200 초간 측정을 수행함.

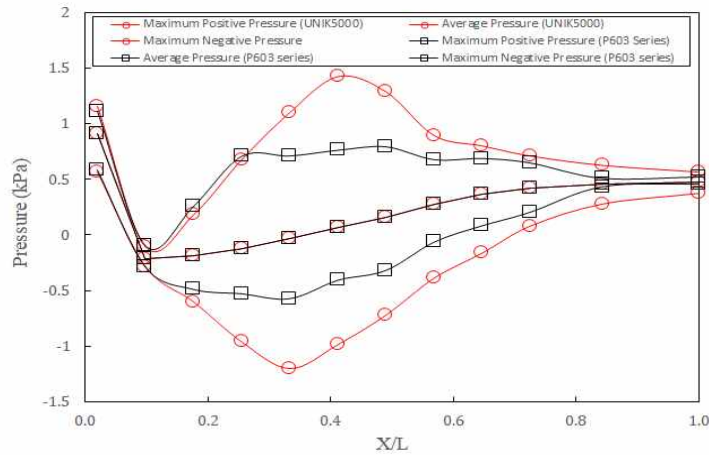


그림 26 차압형 압력계와 전압형 압력계 민감도 비교

표 21 차압형 압력계와 전압형 압력계 민감도 분석 결과

압력계	Maximum Positive Pressure Standard Deviation (kPa)	Maximum Negative Pressure Standard Deviation (kPa)
차압형 (P603 Series)	0.13	0.15
전압형 (UNIK 5000)	0.25	0.29

㉔ 자료 전처리 및 통계 분석

- 도수실험과 같이 변동성이 큰 실험 시 계측센서를 통하여 측정된 시계열 자료의 경우 이상치(Outlier)가 발생할 수 있음.
- 다양한 이상치(Outlier) 검정방법은 표 22에 제시하였으며 본 연구에서는 신뢰구간 개념을 사용하여 이상치를 제거하였음.

표 22 이상치(Outlier) 검정방법

이상치 검정방법	검정 방법
Grubbs and Beck방법 (1972)	◦ 표본자료가 정규분포를 이룬다는 가정하에 평균과 표준편차를 이용하여 상한치와 하한치를 계산하여 이상치를 판단함. ◦ 상한치, 하한치 계산: $X_H = \bar{x} + k_N S_x$ $X_L = \bar{x} - k_N S_x$ 여기서, $\bar{x}$, S_x 는 각각 표본자료의 평균과 표준편차

	이며, k_N은 표본크기와 유의수준에 따라 Grubbs and Beck에 의해 주어짐.
Interagency Advisory Committee on Water Data 방법 (IACWD,1982)	- 표본자료의 왜곡도계수를 사용하여 이상치 검정을 수행하며, 왜곡도계수가 0.4보다 크면 고이상치에 대한 검정, -0.4보다 작으면 저이상치에 대한 검정을 수행하고, 사이의 값을 같으면 두 가지 검정을 모두 수행함. - 왜곡도 계수(skewness) : $S_k = \sum_{i=1}^n \frac{[(X_i - \bar{X})/\sigma]^3}{n-1}$ 여기서, n은 총 표본수, $\bar{X}$는 데이터의 평균, X_i는 임의 데이터를 의미함. - 상한치, 하한치 계산: $y_H = \bar{y} + K_N S_y$ $y_L = \bar{y} - K_N S_y$ 여기서, $\bar{y}$, S_y는 각각 표본자료의 평균과 표준편차이며, K_N은 표본의 수에 따른 빈도계수
수정 z-score 방법 (1968)	- 표본자료의 평균과 표준편차로 표준화된 z-값을 이용하여 상·하 한계선을 초과하는 값을 확인하는 방법으로 중앙값 절대편차를 이용함. - z-score: $z_i = 0.675(x_i - x_{0.5})/MAD$ 여기서, MAD는 중앙값 절대편차이며, z_i가 3.5를 초과하는 자료는 이상치(outlier)로 간주함, MAD: $MAD = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i - x_{0.5}$ 여기서, $x_{0.5}$는 중앙값임.
Box-plot 방법	- 전체 자료를 25%Tr 사분위로 구분하는 방법으로 정렬된 자료계열을 중앙값, 외각 값으로 구분함. - 사분위수범위(Interquartile Ranges)를 이용하여 상한극한값(UF)과 하한극한값(LF)를 산정함. $UF = Q_3 + 1.5IQR$ $LF = Q_1 - 1.5IQR$ 여기서, Q_1은 일사분위수, Q_3는 삼사분위수이며, $IQR(= Q_3 - Q_1)$는 사분위수범위임.
Confidence interval 방법 (2001)	신뢰구간은 정규분포와 표준편차(standard deviation, σ)를 이용하여 표현함.

- 본 연구에서는 신뢰구간 $99.7\%(\mu \pm 3\sigma)$ 를 적용한 전처리과정을 통해서 약 5%의 자료를 이상치(Outlier)로 판단하여 제거 후 압력데이터의 분석을 수행함.
- 압력데이터 분포 및 분포의 형태를 파악하기 위하여 왜도(skewness)와 첨도(kurtosis)개념을 적용함.
- 데이터의 정규분포 여부를 판단하기 위하여 Anderson-Darling Equation(1954) 및 Kolmogorov-Smirnov Equation(1933)을 활용함.
- Anderson-Darling Equation (AD) :

$$-n - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (2i-1) [\ln F(X_i) + \ln(1-F(X_{n-i+1}))] \quad (4)$$

- Kolmogorov-Smirnov Equation :

$$P\text{-value} = \max\left(F(X_i) - \frac{i-1}{n}, \frac{i}{n} - F(X_i)\right) \quad (5)$$

여기서, n 은 총 표본수, X_i 는 임의 데이터, $F(X_i)$ 는 정규 분포의 누적분포함수를 의미하며, AD는 Anderson-Darling 공식의 통계량으로 AD값에 따라 P-value를 산정하는 식은 다음 표와 같음.

표 23 AD 값에 따른 P-value

Range	P-value
$0.6 < AD < 13$	$\exp(1.2937 - 5.709AD + 0.0186AD^2)$
$0.34 < AD < 0.6$	$\exp(0.9177 - 4.279AD - 1.38AD^2)$
$0.2 < AD < 0.34$	$1 - \exp(-8.318 + 42.796AD - 59.938AD^2)$
$AD < 0.2$	$1 - \exp(-13.436 + 101.14AD - 223.73AD^2)$

▷ 압력데이터 통계 분석

- 데이터 전처리를 수행한 압력데이터의 분포 및 특성을 검토하기 위하여, 도수 발생 전, 도수, 도수 끝난 후 구간으로 나누어 표준편차(Standard Deviation), 왜도(Skewness), 첨도(Kurtosis)와 Anderson-Darling 통계량(A^2) 및 Kolmogorov-Smirnov 공식을 이용하여 정규성 검정을 수행함.

표 24 구간별(도수 발생 전, 도수, 도수발생 후) 압력데이터 통계분석 결과

Section	Standard Deviation	Skewness (Range)	Kurtosis (Range)	Normalist Test (P-value)	
Ante-Hydraulic Jump	0.01 ~ 0.04	> 0 (0-0.3)	> 0 (0.4-0.7)	AD*	0.005
				KS**	0.010
Hydraulic Jump	0.08 ~ 0.30	> 0 (0-0.1)	< 0 (-0.2-0)	AD	0.005
				KS	0.010
Post-Hydraulic Jump	0.01 ~ 0.02	< 0 (-0.3-0)	> 0 (0.1-0.5)	AD	0.005
				KS	0.010

*AD : Anderson-Darling 통계량(A^2)을 이용하여 산정한 P-value

** KS : Kolmogorov-Smirnov 공식을 이용하여 산정한 P-value

- 세 구간 모두 P-value가 0.05 미만으로 정규분포를 따르지 않은 것으로 확인됨.
- 도수 구간에서는 표준 편차가 다른 구간에 비하여 크고 침도 값이 음수 값을 가진다는 것을 통하여 압력변동성이 크다는 것을 확인함.

㉔ 실험결과 및 분석

▷ 도수 특성 분석

- 상·하류 수심비에 따라 발생하는 다양한 도수 특성을 확인함.
- 도수형태는 Froude 수가 5.2에서 8.6으로 안정도수(Stable Jump)이며, Case 별 도수 발생위치 및 도수길이를 검토함.
- 도수길이는 초고속 카메라(Model : Phantom Lab110 12G Mono Camera, 1028×1024 해상도, 초당 500 Hz)로 촬영된 이미지를 이용하여 산정함. (그림 27 참조)
- 도수 발생위치는 초고속 카메라로 촬영된 이미지를 활용하여 기존 도수발생위치 선정방법을 적용하여 선정함.

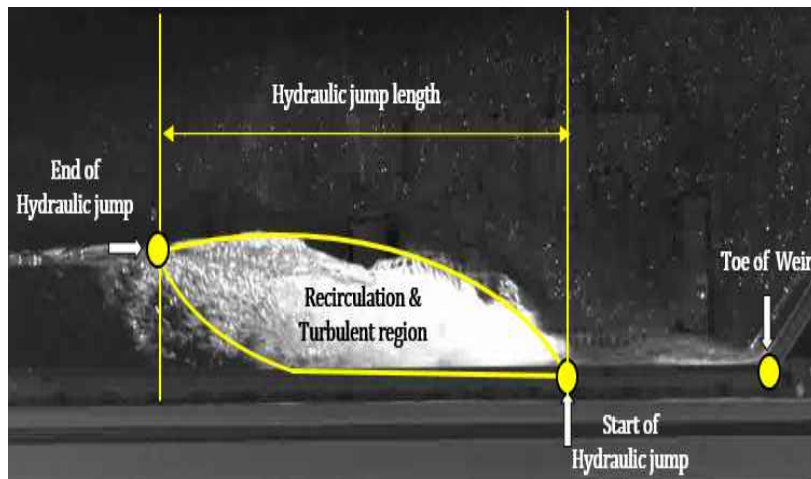


그림 27 도수길이 산정 개념도

▷ 도수 발생 위치 (location of hydraulic jump)

- 도수발생위치를 선정하기 위해서는 유량 및 수면형을 알고 있어야 한다는 전제조건이 있음. (Handbook of Hydraulics, Brater et al., 1976).
- 그림과 같이 공액수심(a' , b' , c')과 하류수심의 연장선이 교차하는 점을 도수발생 위치로 선정함.
- 상·하류수심비가 증가할수록 구조물 근처에서 도수가 발생하는 것을 확인함. (그림 28 참조)
- 보 구조물 끝단으로부터 도수발생지점까지의 거리를 구조물 높이($H_w = 0.3$ m constant)로 무차원화 함.

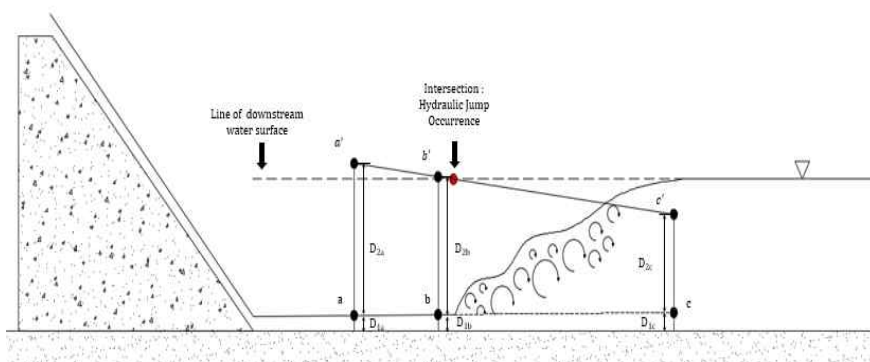


그림 28 도수 발생위치 선정 개념도

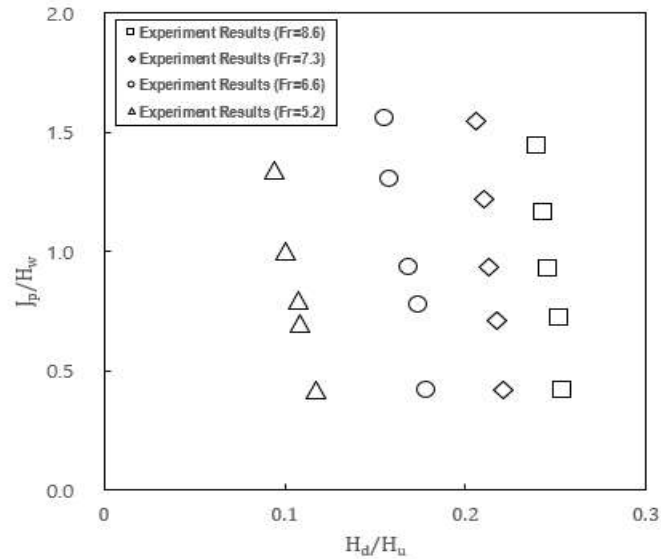


그림 29 상·하류 수심비에 따른 무차원화된
도수발생위치 비교

▷ 도수 길이(hydraulic jump length)

- 선행연구 도수길이 산정 식과 본 실험으로 산정한 도수길이는 비교적 일치하는 것을 확인함.
- Froude 수가 증가함에 따라, 도수길이도 선형적으로 증가하는 것을 확인함.
- 반면, 동일 Froude 수에서 상하류 수심비가 증가할수록 도수길이는 선형적으로 감소하는 것을 확인함.
- 이는 도수 발생으로 인한 에너지 손실(Energy Loss)은 Froude 수가 증가함에 따라 증가하며, 동일 Froude 수에서는 상·하류 수심비가 증가함에 따라 에너지 손실이 감소하기 때문이라고 판단됨.

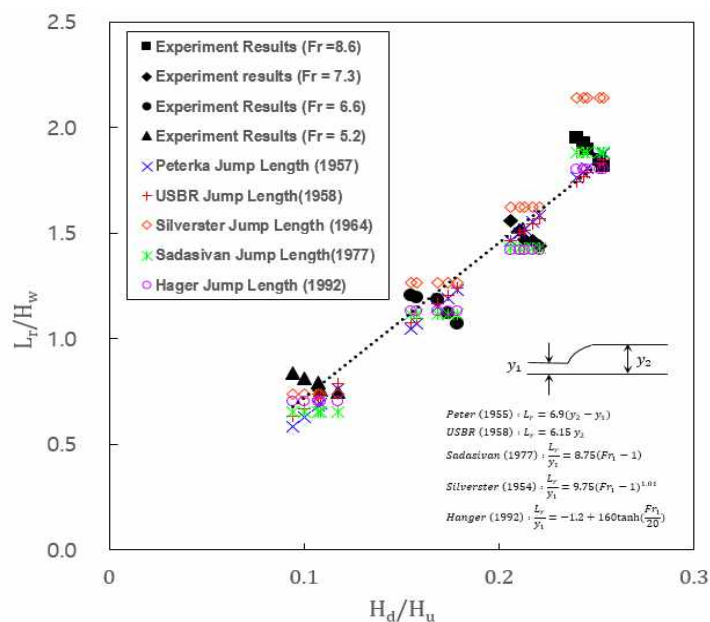


그림 30 상·하류 수심비에 따른 무차원화된 도수길이 비교

▷ 압력 변동성 분석

- 각 Case에 대하여 압력 측정점 별 평균 압력 및 최대 양압력, 최대 음압력을 무차원화 하여 압력계

수를 나타냄.

- $C_p' \left(= \frac{P/\gamma}{V_1^2/2g} \right)$ 는 압력수두를 속도수두로 무차원화 시킨 압력계수이며, X/L 은 구조물 끝단(toe)으로부터 거리를 최종 압력 측정 거리로 무차원화 시킨 상대길이를 의미하며, P1, P2, P3는 각각 도수발생위치, 최대 음압력(maximum negative pressure) 발생 위치, 최대양압력(maximum positive pressure) 발생 위치를 표시하였음. (그림 31 ~ 50 참조)
- 상·하류 수심비 및 Froude 수가 증가함에 따라 최대 양압력 및 최대 음압력의 크기가 증가하는 것을 확인하였으며, 압력변동성(P') 역시 증가하는 것을 확인함.
- Froude 수가 증가함에 따라, 무차원화 된 최대 양압력 과 최대 음압력의 발생위치는 선형적으로 감소하다가 Froude 수 7.3 이상에서 도수 발생 시작위치를 기준으로 최대 양압력은 도수길이의 30% 지점, 최대 음압력은 도수길이의 20% 지점에서 수렴하는 특징을 보임.

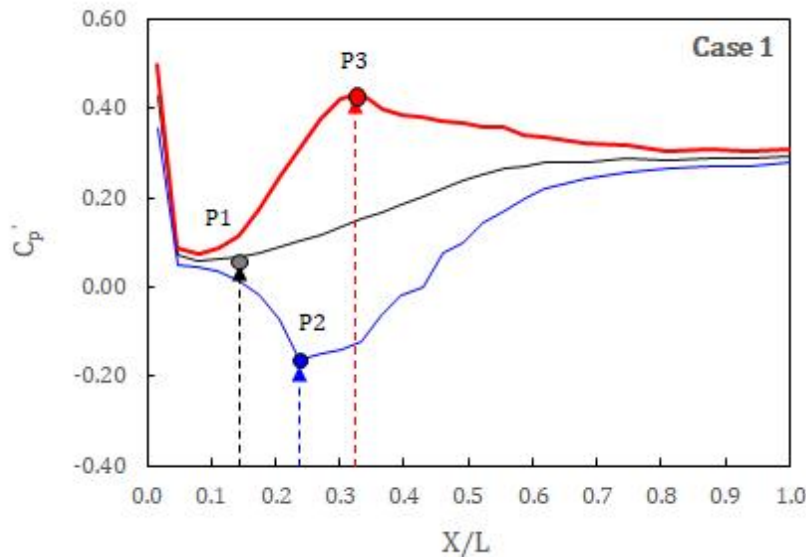


그림 31 Case 1 거리별 압력계수 비교
(P1: 도수발생위치, P2: 최대 음압력, P3: 최대 양압력)

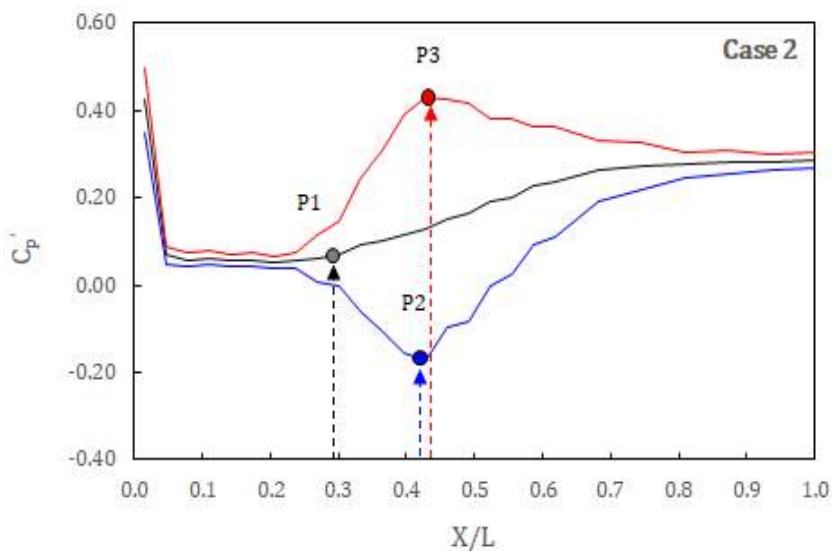


그림 32 Case 2 거리별 압력계수 비교
(P1: 도수발생위치, P2: 최대 음압력, P3: 최대 양압력)

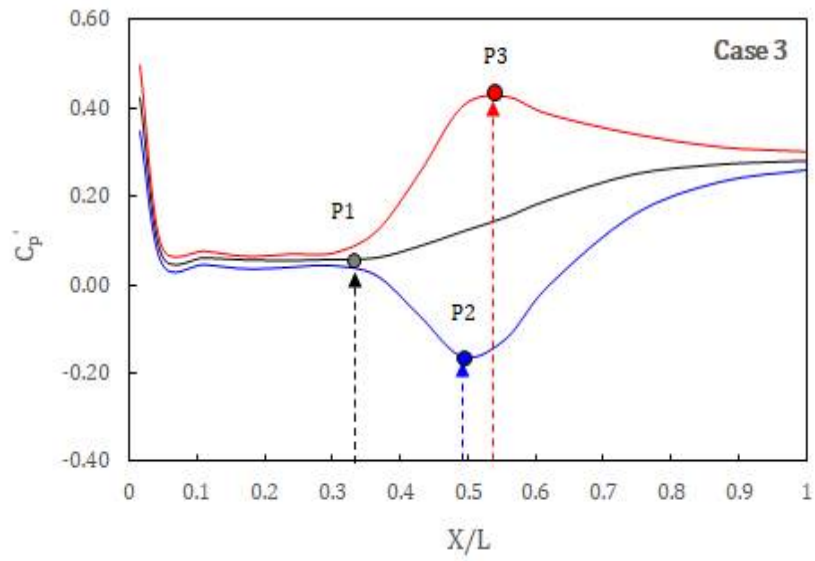


그림 33 Case 3 거리별 압력계수 비교
(P1: 도수발생위치, P2: 최대 음압력, P3: 최대 양압력)

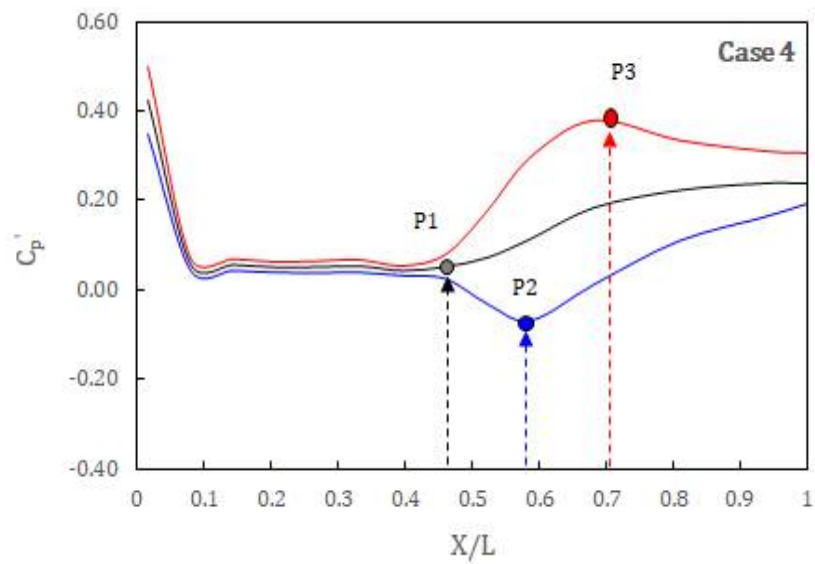


그림 34 Case 4 거리별 압력계수 비교
(P1: 도수발생위치, P2: 최대 음압력, P3: 최대 양압력)

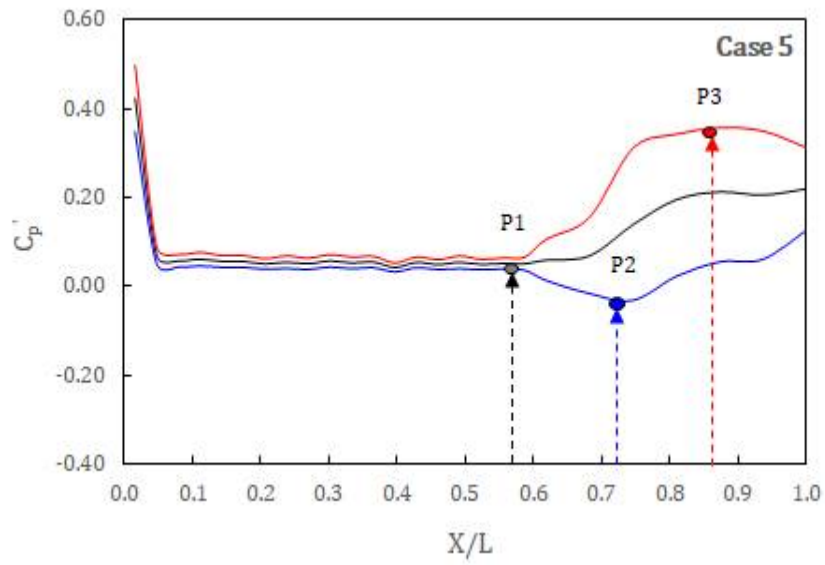


그림 35 Case 5 거리별 압력계수 비교
(P1: 도수발생위치, P2: 최대 음압력, P3: 최대 양압력)

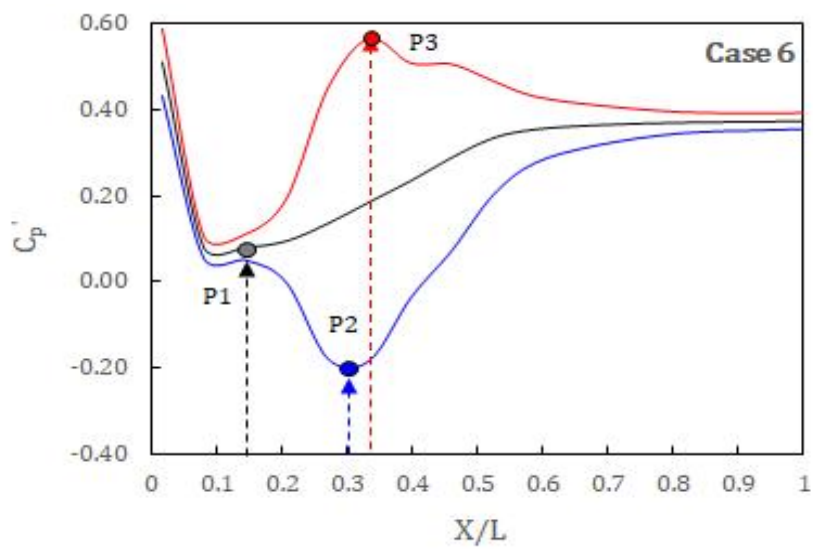


그림 36 Case 6 거리별 압력계수 비교
(P1: 도수발생위치, P2: 최대 음압력, P3: 최대 양압력)

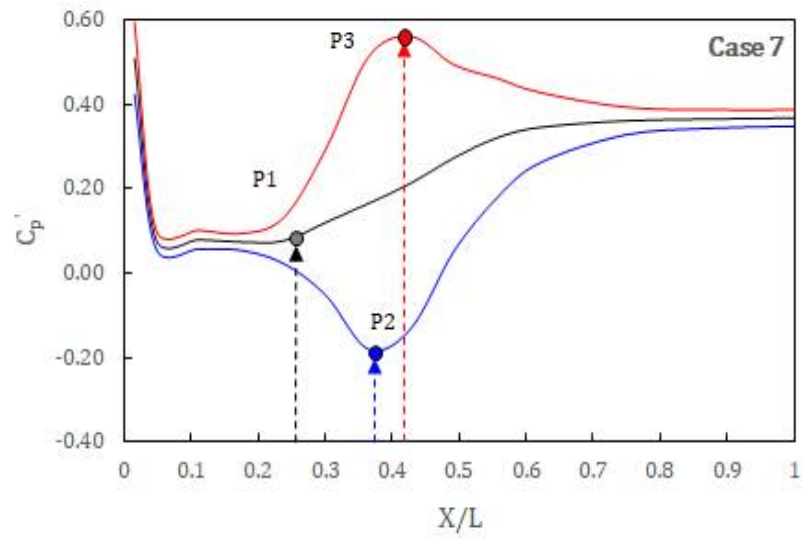


그림 37 Case 7 거리별 압력계수 비교
(P1: 도수발생위치, P2: 최대 음압력, P3: 최대 양압력)

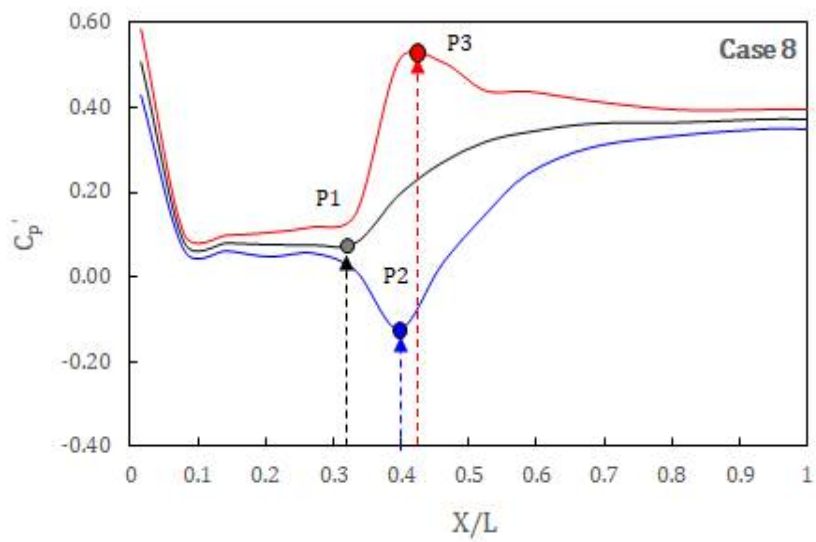


그림 38 Case 8 거리별 압력계수 비교
(P1: 도수발생위치, P2: 최대 음압력, P3: 최대 양압력)

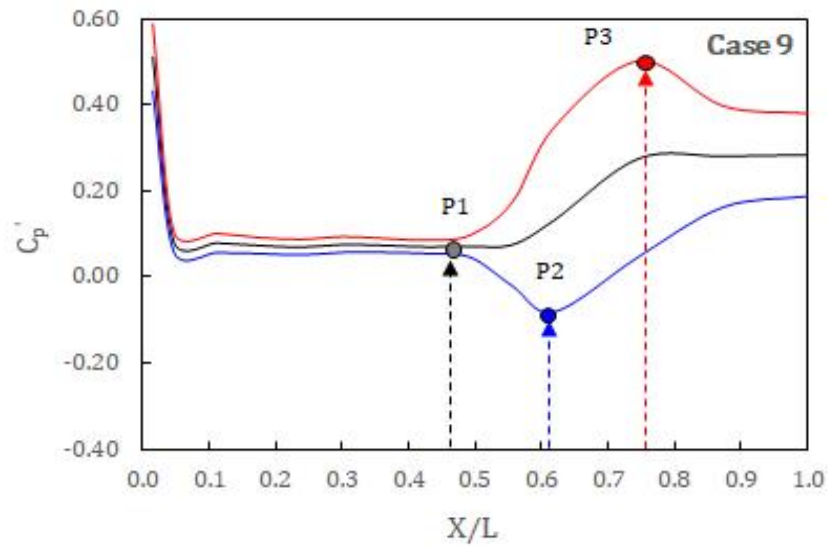


그림 39 Case 9 거리별 압력계수 비교
(P1: 도수발생위치, P2: 최대 음압력, P3: 최대 양압력)

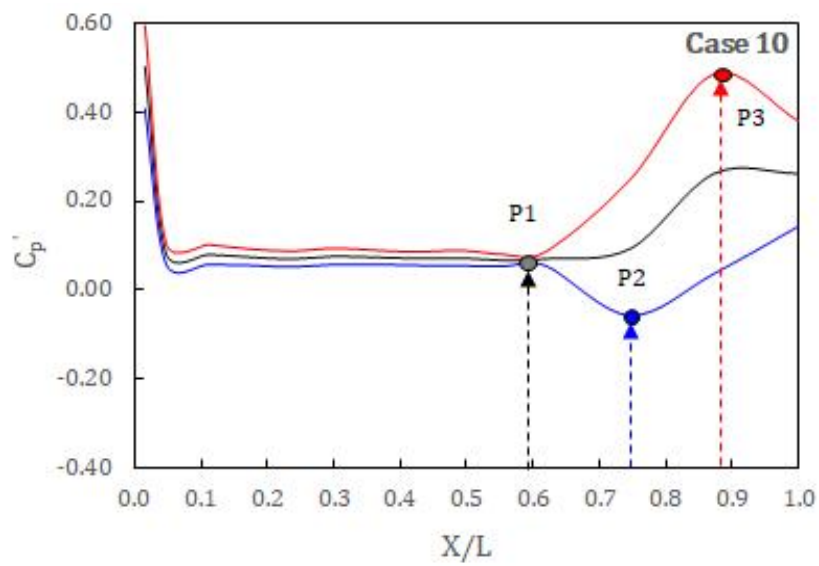


그림 40 Case 10 거리별 압력계수 비교
(P1: 도수발생위치, P2: 최대 음압력, P3: 최대 양압력)

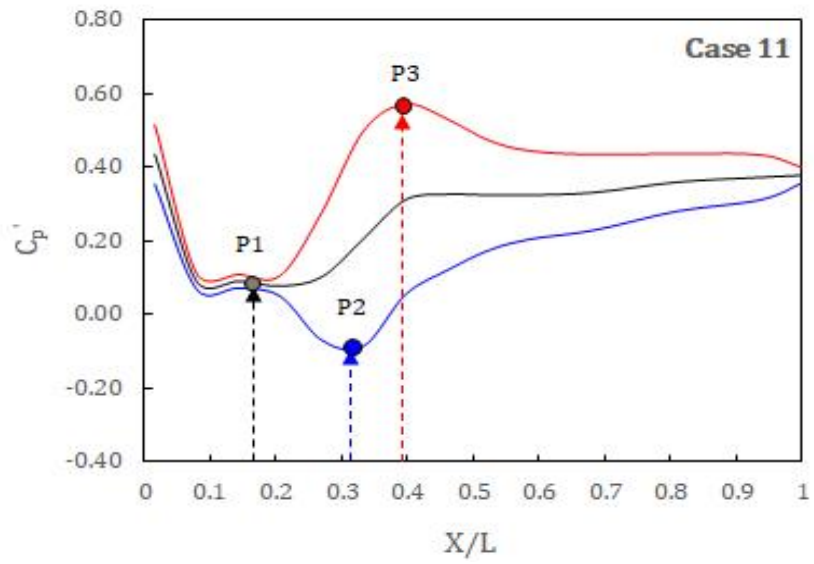


그림 41 Case 11 거리별 압력계수 비교
(P1: 도수발생위치, P2: 최대 음압력, P3: 최대 양압력)

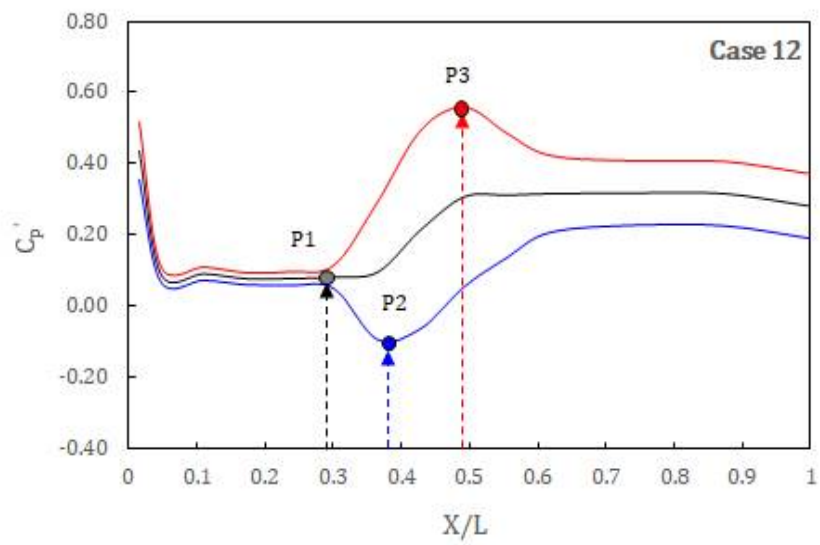


그림 42 Case 12 거리별 압력계수 비교
(P1: 도수발생위치, P2: 최대 음압력, P3: 최대 양압력)

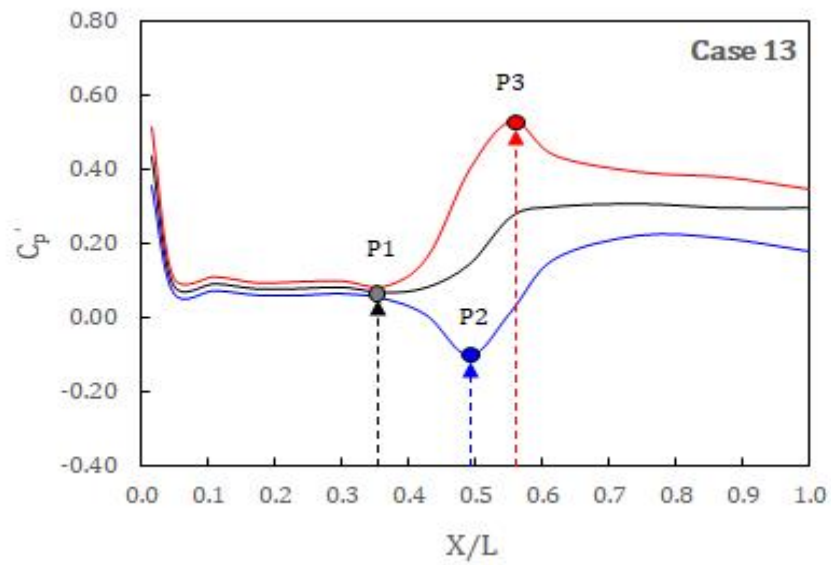


그림 43 Case 13 거리별 압력계수 비교
(P1: 도수발생위치, P2: 최대 음압력, P3: 최대 양압력)

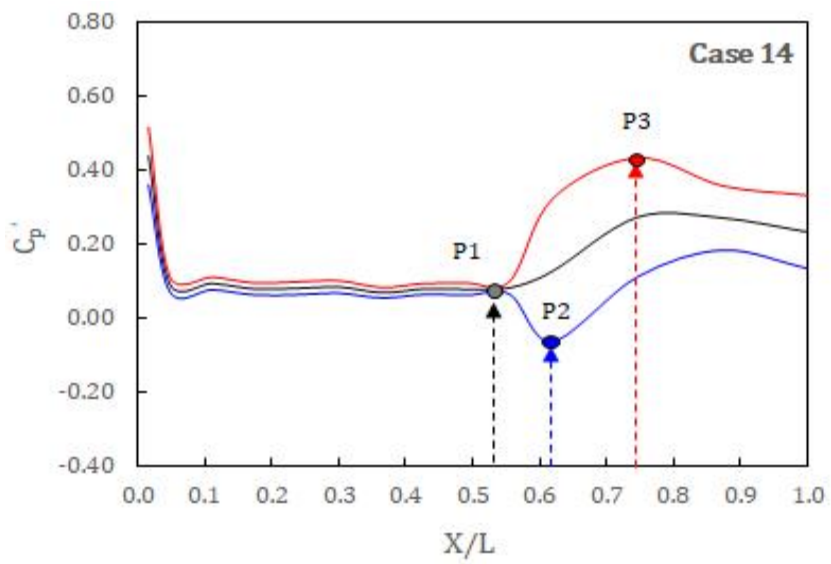


그림 44 Case 14 거리별 압력계수 비교
(P1: 도수발생위치, P2: 최대 음압력, P3: 최대 양압력)

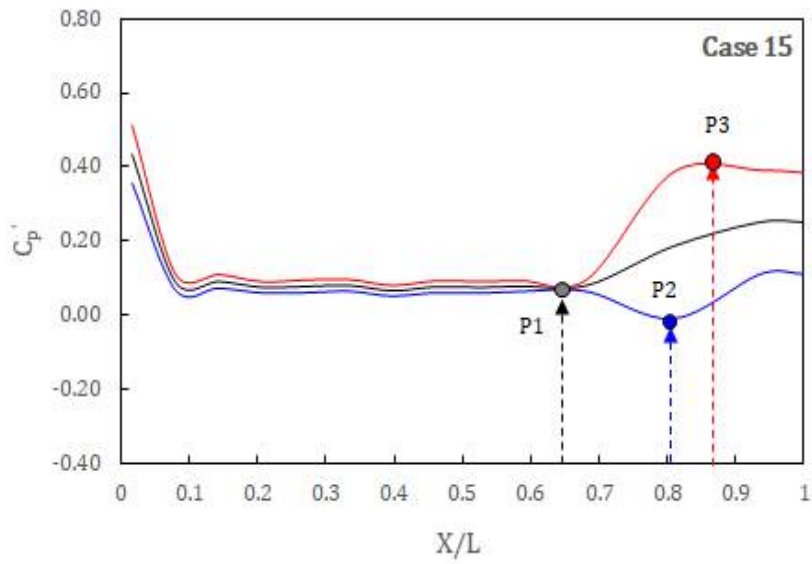


그림 45 Case 15 거리별 압력계수 비교
(P1: 도수발생위치, P2: 최대 음압력, P3: 최대 양압력)

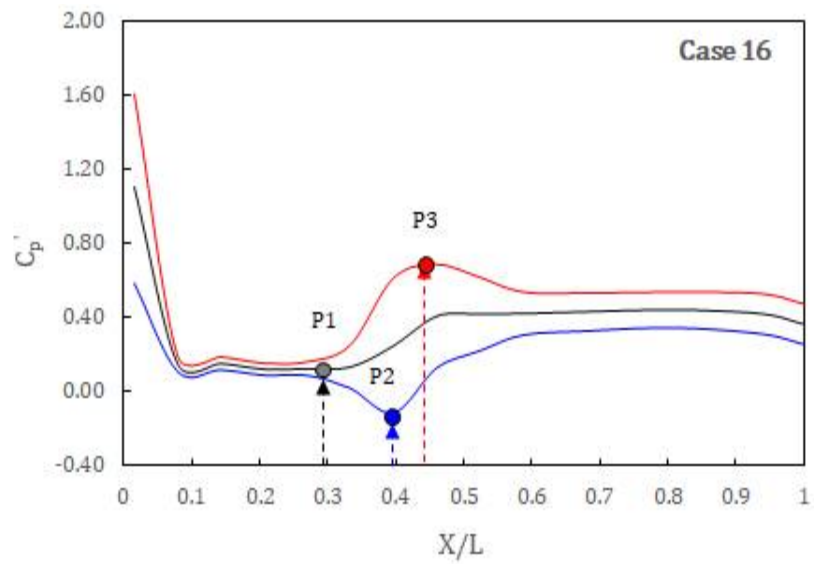


그림 46 Case 16 거리별 압력계수 비교
(P1: 도수발생위치, P2: 최대 음압력, P3: 최대 양압력)

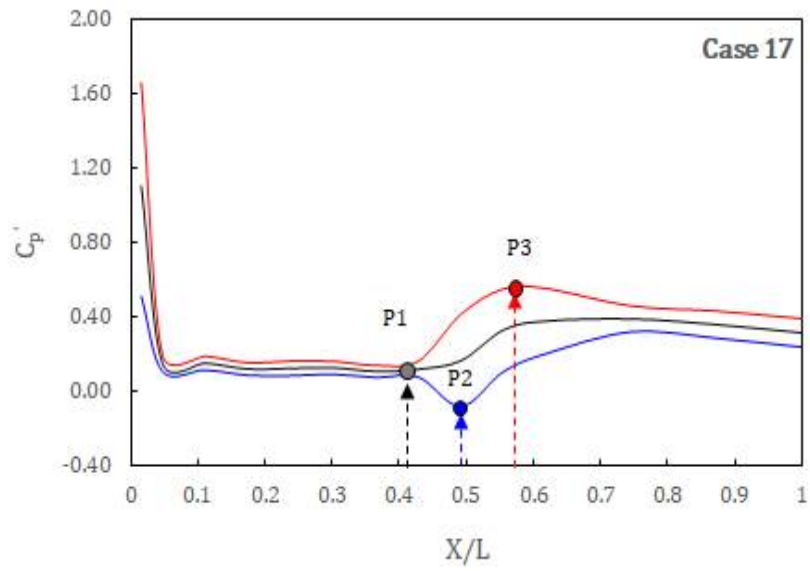


그림 47 Case 17 거리별 압력계수 비교
(P1: 도수발생위치, P2: 최대 음압력, P3: 최대 양압력)

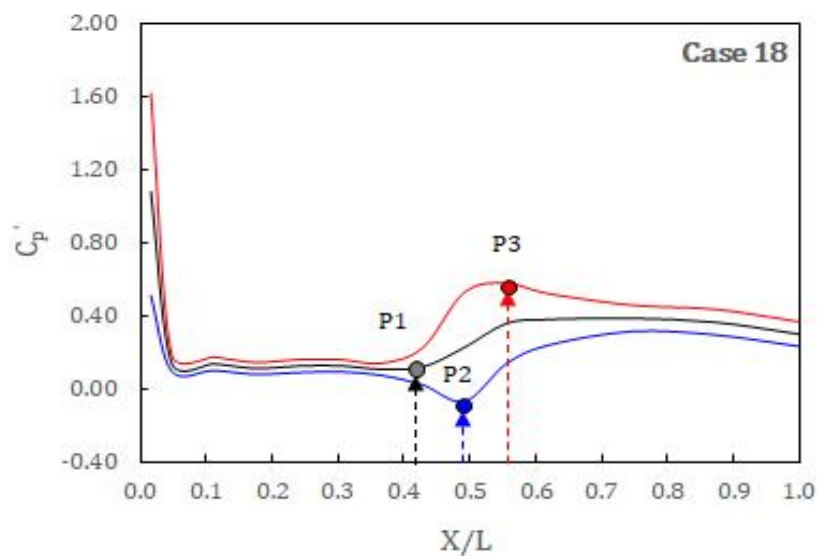


그림 48 Case 18 거리별 압력계수 비교
(P1: 도수발생위치, P2: 최대 음압력, P3: 최대 양압력)

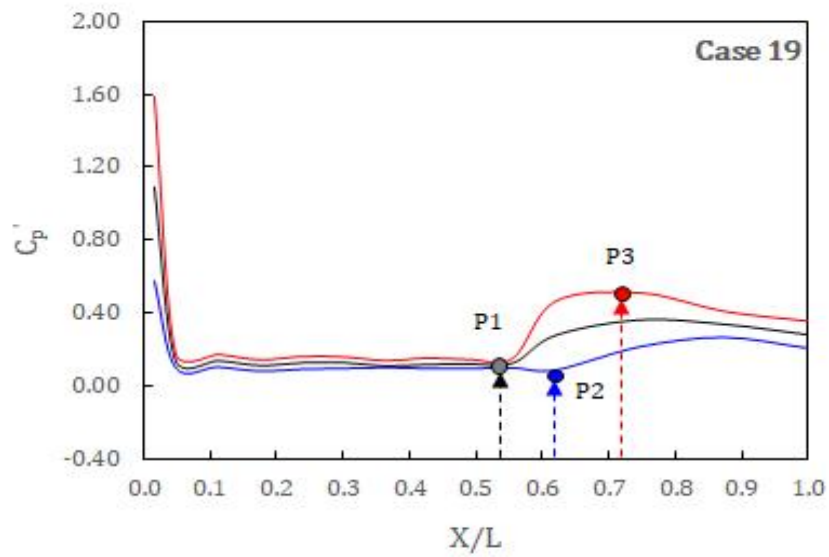


그림 49 Case 19 거리별 압력계수 비교
(P1: 도수발생위치, P2: 최대 음압력, P3: 최대 양압력)

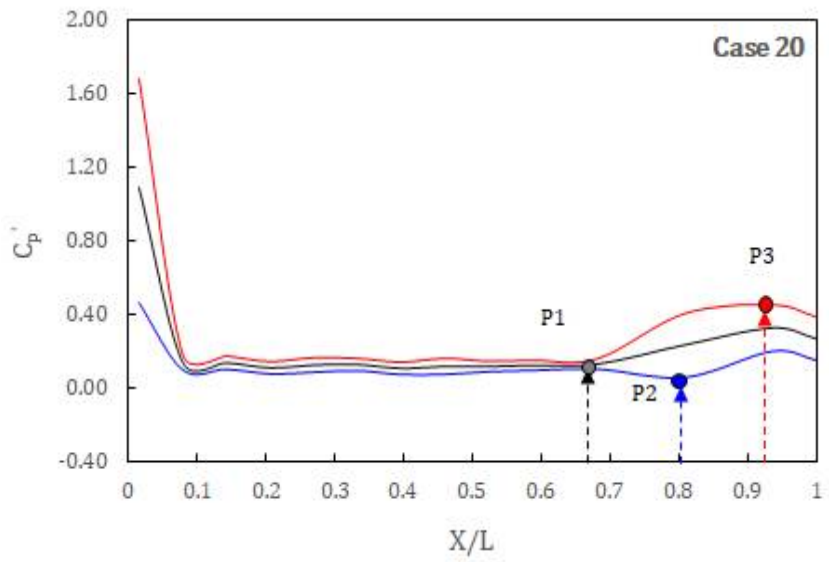


그림 50 Case 20 거리별 압력계수 비교
(P1: 도수발생위치, P2: 최대 음압력, P3: 최대 양압력)

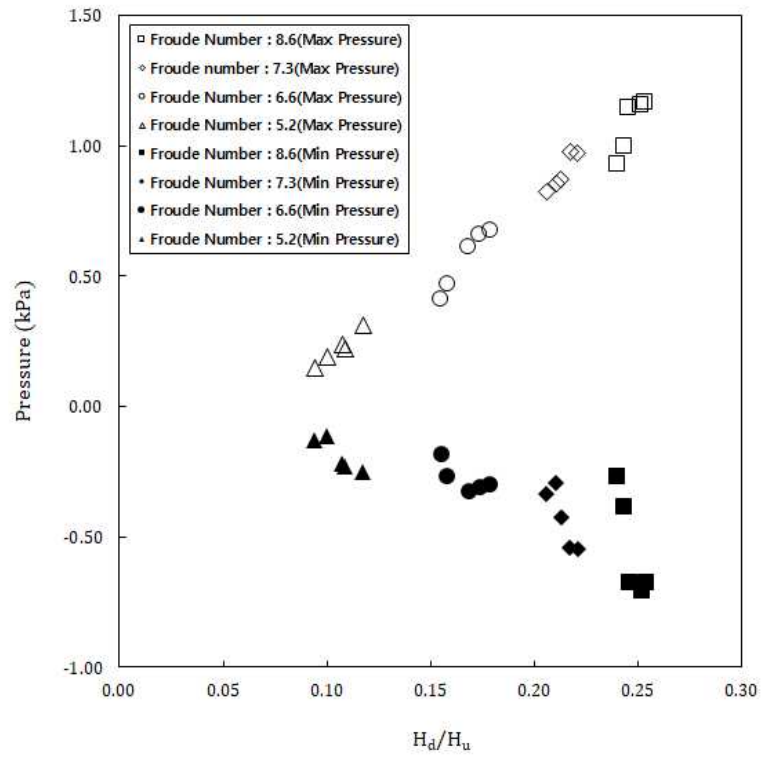


그림 51 상·하류 수심비에 따른 최대 양압력과 최대 음압력

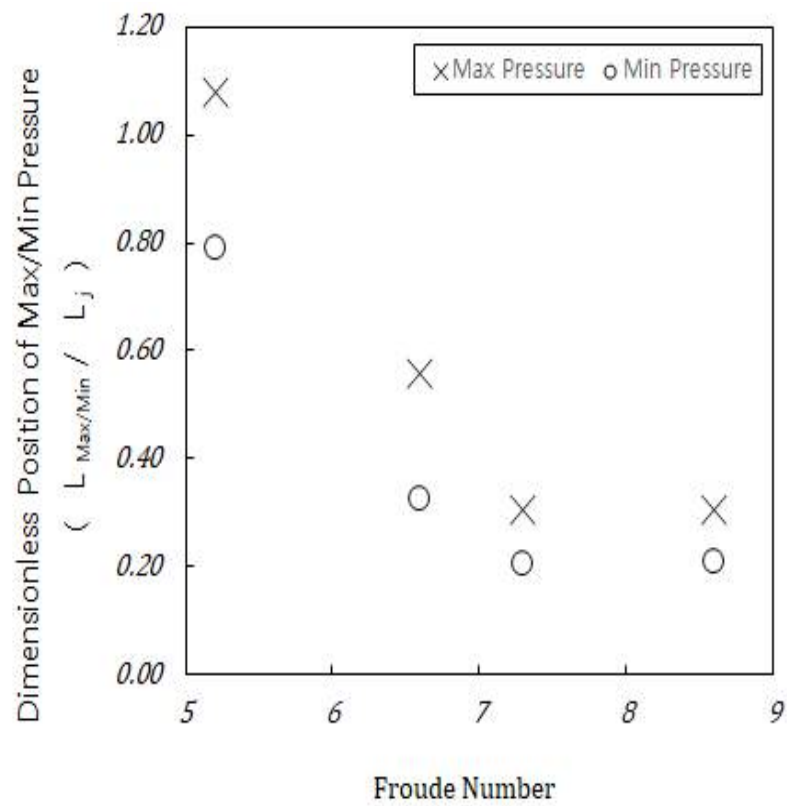


그림 52 Froude 수에 따른 최대양압력과 최대음압력 발생위치

▷ 물받이공 설계인자 도출

1) Fluctuation Ratio

- Fluctuation Ratio는 평균 압력에 대한 최대 양압력 및 최대 음압력의 비로 표현 할 수 있으며, 상·하류 수심비가 증가하게 되면 Fluctuation Ratio도 증가하는 것을 확인함.
- 그림 53은 상·하류 수심 비에 따른 Fluctuation Ratio를 나타내며, 상·하류 수심 비를 알면 도수구간 내 평균 압력대비 최대발생가능 압력 값을 도출할 수 있음.
- 상·하류 수심비가 0.25일 때 최대 압력은 평균압력의 약 10배에 해당되는 것으로 확인함.
- 본 연구결과를 통하여 다음 표25과 같이 상·하류 수심 비에 따라 압력변동비의 범위를 제시하였으며, 이를 통하여 향후 물받이 두께산정 시 설계인자로 활용될 수 있을 것으로 사료됨.

표 25 Maximum Positive/Negative Fluctuation Ratio 범위 제시

H_d/H_u	Fluctuation Ratio	
	Maximum Positive	Maximum Negative
Range : 0.1 ~ 0.25	0.5 ~ 9.0	0.5 ~ 6.5

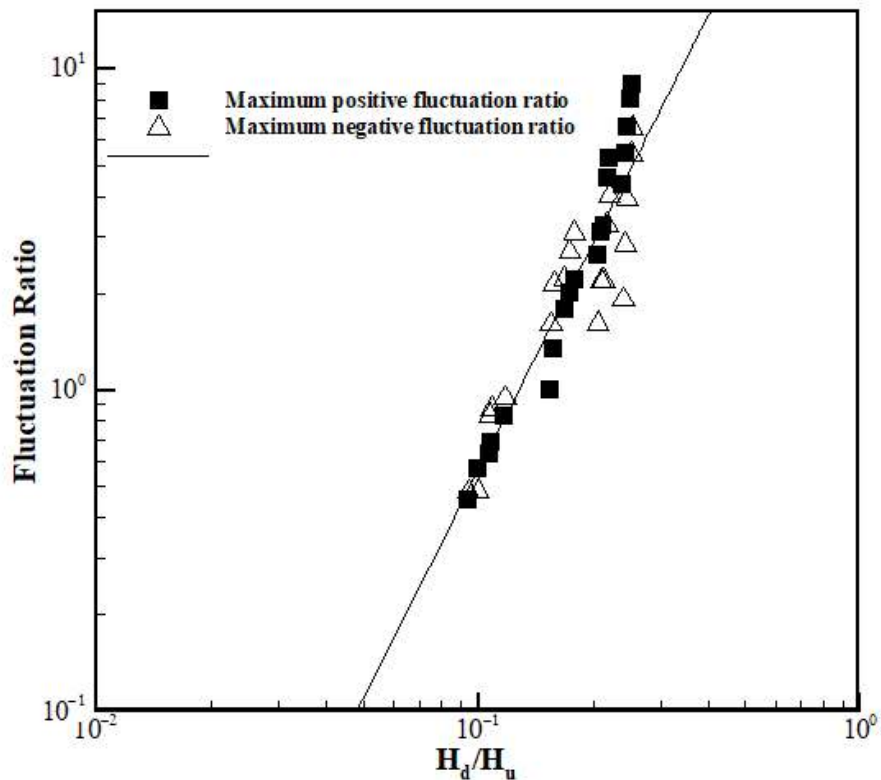


그림 53 상·하류 수심비에 따른 Fluctuation Ratio

2) Fluctuation Width Ratio

- Fluctuation Width Ratio는 도수발생으로 인한 압력의 변동 폭을 평균압력으로 나눈 비를 의미하며, Froude 수가 증가하게 되면 Fluctuation Width Ratio도 증가하는 것을 확인함.
- 그림 54은 Froude 수에 따른 Fluctuation Width Ratio를 나타내며, 현재 도수 상태를 확인할 수 있다면, 평균압력 대비 최대 양압력과 최대 음압력 사이의 변동 폭을 확인할 수 있으며 다음 식6과 같이 회귀곡선(Regression Curve)을 도출하였음.

$$C_{FWR} = 0.0026 \times Fr^{3.85} \quad (6)$$

여기서, C_{FWR} 은 Fluctuation Width Ratio, Fr 은 프루드 수를 의미함.

- 도수형태별 압력변동 폭의 비를 표 26와 같이 제시하였으며, 향후 압력변동 폭의 비를 고려한 물 받아 설계인자를 도출 할 수 있을 것으로 판단됨.

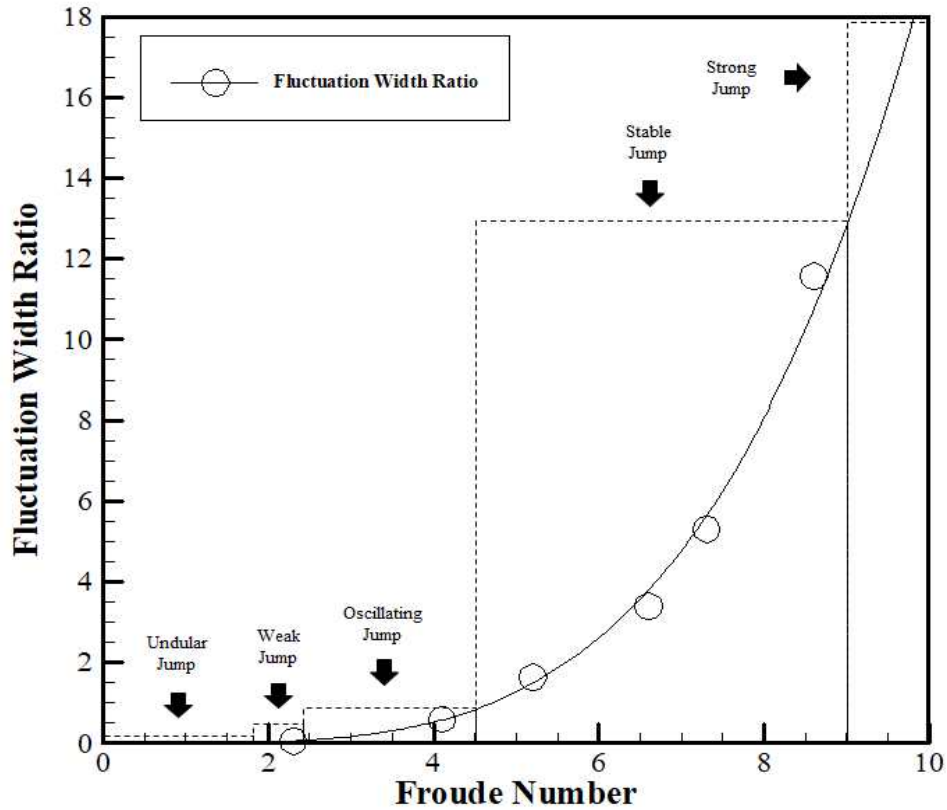


그림 54 Froude 수에 따른 Fluctuation Width Ratio (Pressure)

표 26 도수형태에 따른 Fluctuation Width Ratio(C_{FWR})

Type of Hydraulic Jump	Fluctuation Width Ratio
Undular Jump ($1 < Fr < 1.7$)	$0.003 < C_{FWR} < 0.02$
Weak Jump ($1.7 < Fr < 2.5$)	$0.02 < C_{FWR} < 0.09$
Oscillating Jump ($2.5 < Fr < 4.5$)	$0.09 < C_{FWR} < 0.86$
Stable Jump ($4.5 < Fr < 9$)	$0.86 < C_{FWR} < 12.4$
Strong Jump ($Fr > 9$)	$C_{FWR} > 12.4$

③ 수리실험을 통하여 사석(Riprap)에 작용하는 항력측정 및 분석을 통한 바닥보호공 설계인자 제시

㉞ 수리실험 개요

- 사석 이탈 원인을 규명하기 위해 본 연구에서는 사석에 작용하는 외력을 직접 측정하여 분석하고자함.

▷ 실험 수로 구축

- 바닥보호공 내 사석에 작용하는 외력을 측정하기 위해 한국건설기술연구원 일산본원 하천실험동에 제작된 2차원 개수로에서 실험을 수행함.
- 실험수로는 직사각형 가변수로로 길이 6.5 m, 폭 0.8 m, 높이 0.3 m, 최대 경사각 30도이며 외력 측정 구간(아크릴)을 제외한 구간에서 광학적 측정이 가능하도록 수로의 양면과 바닥면을 강화유리로 제작함.
- 높이 0.2 m의 물받이공을 재현하기 위하여 아크릴을 이용하였음.
- 실험수로는 순환식 수로로 펌프의 최대용량은 $0.15 \text{ m}^3/\text{s}$ 임.
- 사석에 작용하는 외력을 측정하기 위하여 1축 분력계(Nissho, LMC-1541-1000N-S01)를 사용함.
- 1축 분력계로 측정 가능한 힘은 최대 $\pm 1000\text{N}$ 으로 강한 흐름에 의한 구조물 파괴 실험에 적합하며, 분해능은 50 Hz를 갖고, $\pm 0.1\%$ 의 정확도를 갖고 있음.
- 본 실험에 사용된 사석은 호박돌(비중 : 1.8 ~ 2.0)로 입경은 10 ~ 15 cm 이며, 무게는 약 2kg으로 실험수로에 균일하게 포설하였음.



그림 55 분력계 실험수로 구축

▷ 수리실험 조건

- 바닥보호공 내 사석에 작용하는 외력을 검토하기 위해 총 5 가지 유량조건이 검토됨.
- 도수 발생 후 바닥보호공의 흐름은 상류(Subcritical)상태로 Froude 수의 범위는 0.35와 0.68 사이임.

표 27 실험 조건 (분력계)

Case	Discharge (m ³ /s)	Downstream Water Depth (m)
1	0.004	0.017
2	0.009	0.027
3	0.021	0.043
4	0.031	0.049
5	0.052	0.068

▷ 수리실험 수행

- 상류유량은 유량조절 밸브를 사용하여 조절되었으며 바닥보호공 상류에서 포인트 게이지를 활용하여 접근수심을 측정함.
- 하류단 수심은 하류수문으로부터 1.0 m 상류에서 포인트 게이지를 활용하여 측정함.
- 흐름으로 인한 사석에 작용하는 외력을 측정 지점은 물받이공과 바닥보호공의 접합부임.
- 1차원 분력계의 외력자료는 초당 100개의 취득률로 120초간 실험을 수행하였음.

㊤ 실험결과 및 분석

- 사석에 작용하는 외력(Drag Force)에 대한 표준편차(σ)는 압력변동(0.1 ~ 0.3)에 비하여 작으며, 첨도(Kurtosis)가 양의 값을 보임으로써, 변동성이 작은 것을 확인 할 수 있음.

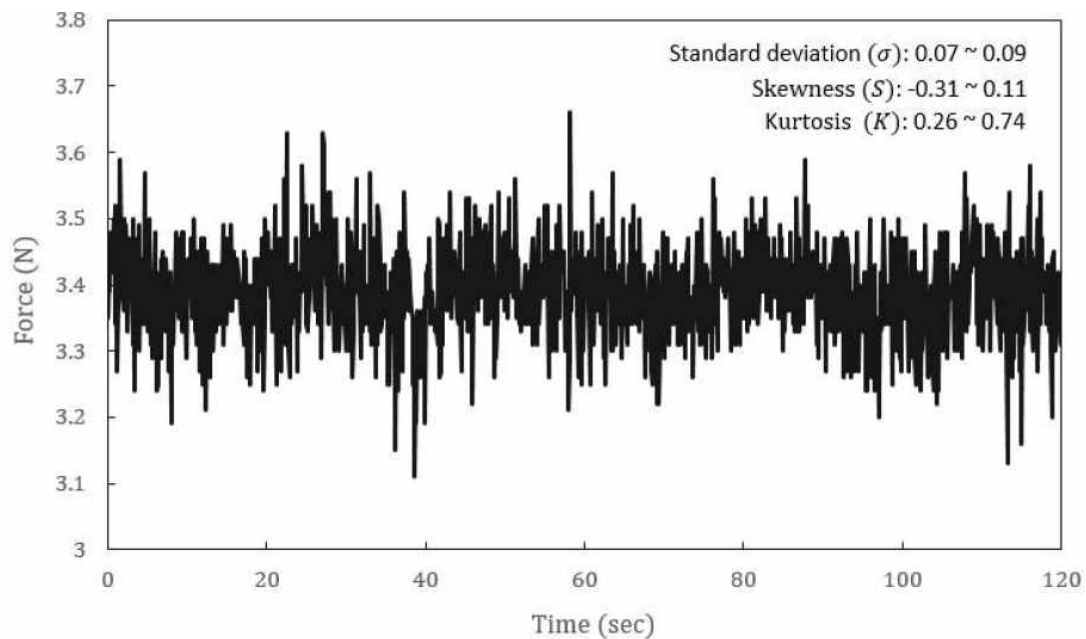


그림 56 시간에 따른 외력(Drag Force) 측정 데이터

- Case 별 최소, 최대 외력(Drag Force)를 검토한 결과, 일정구간까지는 유량이 증가함에 따라 사석에 작용하는 외력은 증가하나, 일정구간이 지나면 외력이 일정해지는 것을 확인함.
- 그림 57은 Froude 수 별 사석에 작용하는 외력 변동 폭을 평균 외력으로 나눈 비를 의미하며, 흐름방향으로 작용하는 외력의 변동 폭은 사석이탈에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 사료됨.
- 향후 사석이탈 조건을 도출하기 위하여, 흐름방향이 아닌 z방향의 변동성 검토가 필요하며, 추가적으로 사석의 위치별 외력의 변화검토가 필요함.

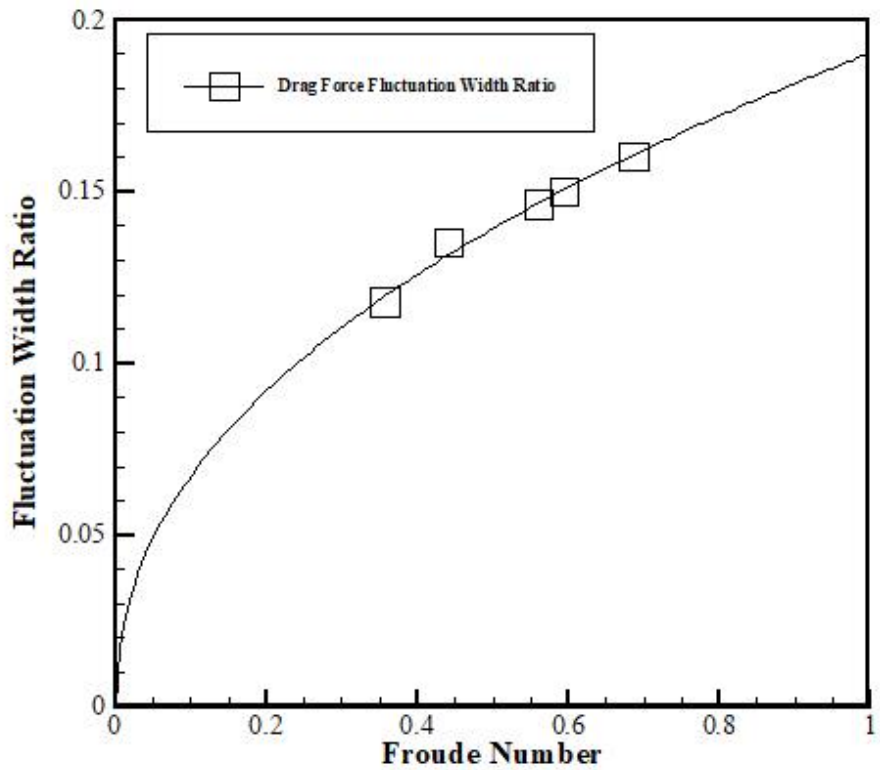


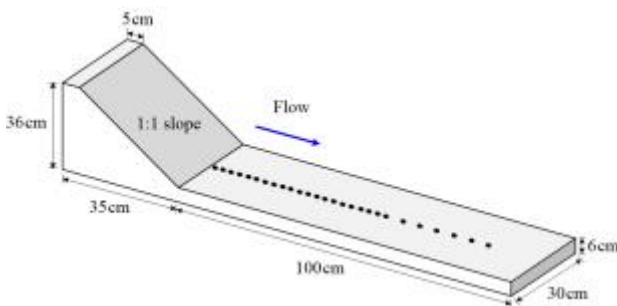
그림 57 Froude 수에 따른 Fluctuation Width Ratio (Drag Force)

④ 3차원 구조해석을 통하여 물받이공(Apron)에서의 압력변이로 인한 물받이공 하부로 진동이 전달되지 않는 최적 두께 도출 (Track B-2)

㉞ 수치모의 개요

▷ 물받이공의 유한요소모델 구성

- 방류 시 물받이공에 작용하는 압력변이를 측정 및 분석하기 위해 수리 실험을 수행함.
- 실험과 동일한 조건으로 물받이공의 구조해석을 수행하기 위해 수리 실험 시 사용한 실험체와 동일한 스케일의 물받이공을 유한요소모델로 구성함.
- 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용해 유한요소모델을 구성하였으며 그림 58은 물받이공 실험체의 개요도와 유한요소모델을 나타냄.
- 유한요소모델은 실험체와 동일하게 밑변 0.35m, 윗변 0.05m, 높이 0.36m, 폭 0.3m를 갖는 사다리꼴 위어와 길이 10m, 폭 0.3m, 높이 0.06m의 수로로 구성됨.



(a) 실험체 개요도



(b) 유한요소모델

그림 58 물받이공의 실험체 개요도 및 유한요소모델

- 위어와 수로는 8절점 3차원 솔리드요소(C3D9R)를 사용하여 모델링했으며, 총 12,580개의 요소로 구성됨.

- 수리모형 실험의 종방향 압력계 위치와 유한요소모델의 노드 위치가 일치하도록 모델의 메쉬를 형성함.
- 물받이공의 재료물성은 실제 실험 시 사용한 모형 수로의 재료인 아크릴(PMMA)의 물성치를 사용함.
- 표 28은 구조해석 시 적용한 아크릴의 기계적 물성치를 나타냄.

표 28 아크릴 물성치

	Density [t/mm ³]	Elastic modulus [MPa]	Poisson' s ratio [mm/mm]
Polymethyl methacrylate (PMMA)	1.18×10^{-9}	3,100	0.4

▷ 구조해석의 경계조건

- 수로구조물 종방향 경계면: 종방향(x) 자유도를 0으로 구속($u_x = 0$)하고, 횡방향(y)과 연직방향(z)의 자유도는 구속시키지 않음($t_y = t_z = 0$).
- 수로구조물 측면 경계면: 횡방향(y) 자유도를 0으로 구속($u_x = 0$)하고, 종방향(x)과 연직방향(z)의 자유도는 구속시키지 않음($t_x = t_z = 0$).
- 수로구조물 바닥 경계면: 횡방향(y)과 연직방향(z)의 자유도를 0으로 구속($u_y = u_z = 0$)하고, 종방향(x)의 자유도는 구속시키지 않음($t_x = 0$).
- 그림 59는 수로구조물의 경계조건을 보여줌.

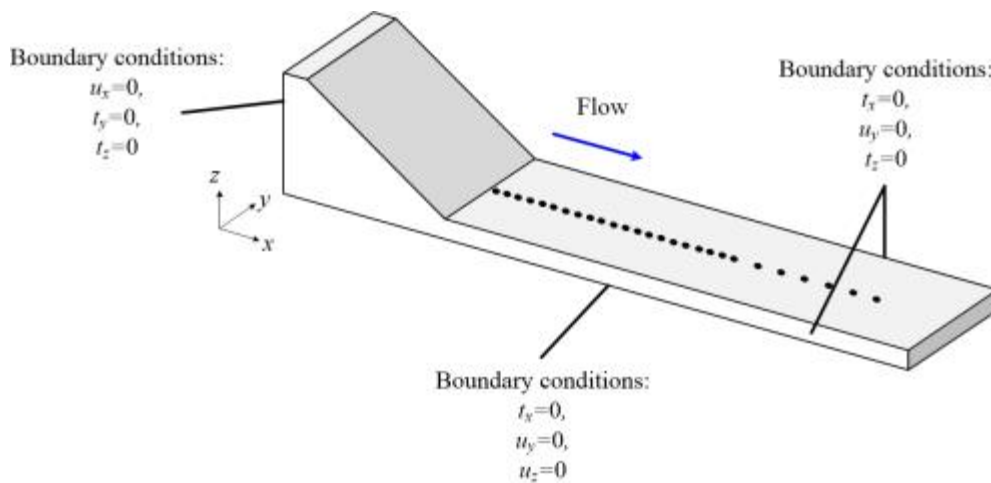


그림 59 수로구조물의 경계조건

▷ 구조해석의 하중조건

- 수리 실험 시 수로모형의 특정 구간마다 일정한 간격으로 총 26개의 압력계측장치를 설치하여 방류 시 수로표면에 작용하는 위치별 수압의 시간이력을 측정함.
- 수로 시작점으로부터 1.25 cm 떨어진 지점부터 압력계를 설치했고 1번에서 20번 압력계까지는 2.5 cm 간격으로, 21번에서 26번 압력계까지는 5.0 cm 간격으로 설치함.
- 그림 60은 1, 4, 7, 10, 13, 16, 19, 22, 26번 압력계에서 측정된 물받이공 바닥면 수압의 시간이력을 나타냄.
- 수리모형 실험의 종방향 압력계 위치와 동일한 위치에 있는 유한요소모델 노드에 실험에서 측정된 압력의 시간이력을 하중조건으로 적용함.

- 각 압력계들의 사이에 위치한 유한요소모델의 노드에는 보간법(interpolation)을 이용해 계산된 압력의 시간이력을 하중조건으로 적용함.
- 수로모형 실험 시 수로 시작점으로부터 78.75 cm 떨어진 위치(26번 압력계)까지 압력을 측정함.
- 78.75 cm 이상 떨어져 있는 노드에는 정수압 상태에 도달한 26번 압력계의 압력 데이터를 하중조건으로 적용함.

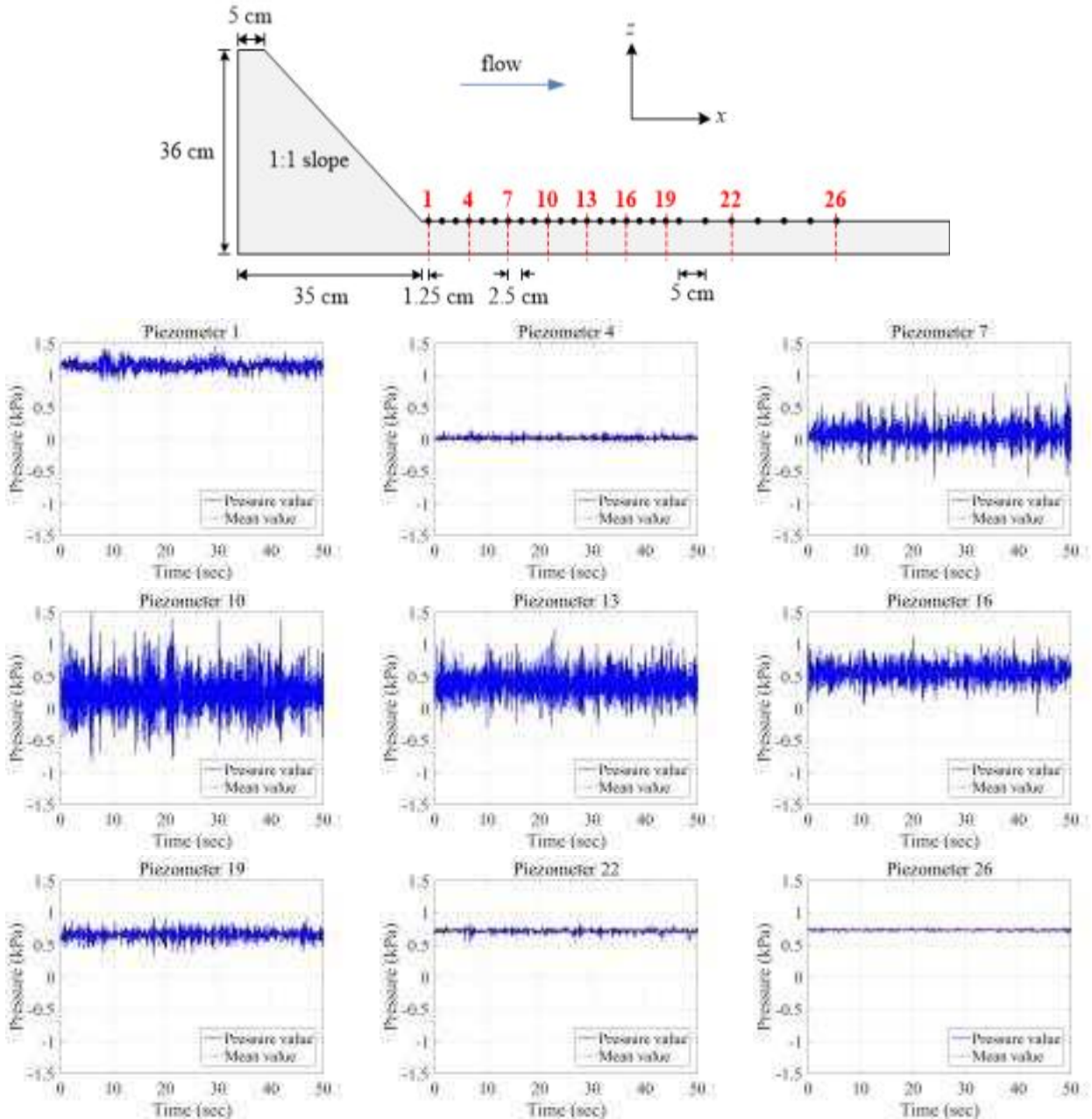


그림 60 방류 시 물받이공 바닥면 수압의 시간이력

㉔ 물받이공의 구조해석

- 다양한 방류조건으로 방류 시 물받이공의 응력상태를 평가하기 위해 하천횡단 보 구조물의 3차원 구조해석을 수행함.
- 수로모형 실험과 동일한 조건으로 해석을 수행하기 위해 그림 61의 구조해석 흐름도와 같이 실험으로부터 얻은 물받이공 바닥면 압력의 시간이력을 적용함.
- 수로모형 실험에서 다양한 방류조건에 따른 수로 표면의 압력변동을 측정하기 위해 표 29와 같이 유량과 도수 발생 위치를 변경하며 총 20여 차례의 실험을 수행함.

- 유량 변화에 따른 수로표면의 응력을 평가하기 위해 Case 1, 6, 11, 16에 대해 구조해석을 수행했으며, 도수 발생 위치에 따른 표면의 응력을 평가하기 위해 Case 1, 2, 3, 4, 5에 대해 구조해석을 수행함.

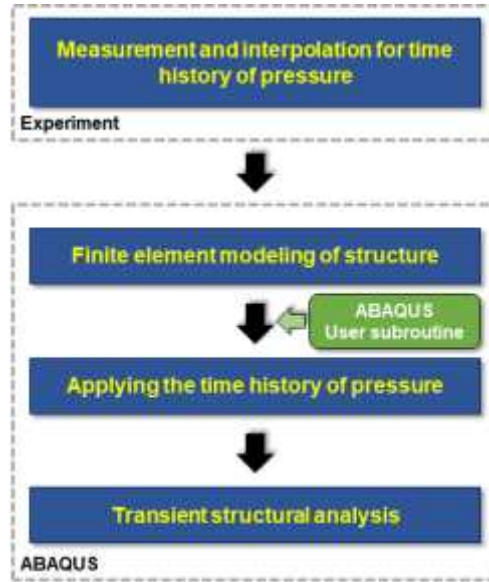


그림 61 구조해석 흐름도

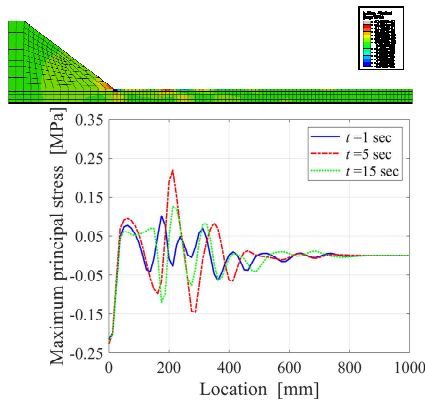
표 29 실험 개요

Case	유량 (m ³ /h)	하류수위 (mm)	도수 발생 위치 (mm)
1	22.8	900	125
2	22.8	893	216
3	22.8	871	279
4	22.8	863	350
5	22.8	851	433
6	17.0	766	125
7	17.0	754	214
8	17.0	730	365
9	17.0	714	464
10	17.0	739	280
11	12.7	604	125
12	12.7	587	233
13	12.7	569	280
14	12.7	534	391
15	12.7	524	467
16	6.84	384	125
17	6.84	355	210
18	6.84	351	239
19	6.84	327	300
20	6.84	308	403

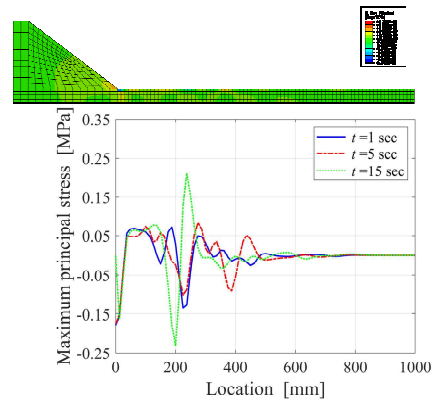
㊤ 유량 변화에 따른 물받이공의 구조해석 결과 (도수 발생 위치, $x_{hj} = 125\text{ mm}$)

▷ 수로 표면의 최대주응력(σ_1)

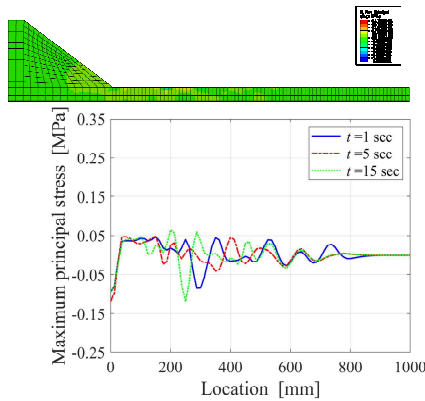
- 그림 62은 유량 변화에 따른 수로 위치 별 최대주응력(σ_1) 분포를 나타냄.
- 유량이 증가할수록 최대주응력의 변동이 발생하는 부분이 수로의 시작점에 가까워지는 경향을 보임.
- 이를 통해 유량이 증가할수록 수압의 변동이 수로의 시작점에 가까운 지점에서 발생하는 것을 알 수 있음.
- 그림 63는 유량 변화에 따른 압력계 위치 별 최대주응력의 시간이력을 나타냄.
- 낙차가 발생하는 1번 압력계 위치에서 최대주응력이 압축방향으로 발생하며 유량이 증가할수록 그 크기가 증가하는 경향을 보임.
- 도수 발생 위치($x_{hj} = 125\text{ mm}$)에 인접한 5번 압력계 위치에서 음압으로 인한 인장력이 발생하는 것을 알 수 있음.



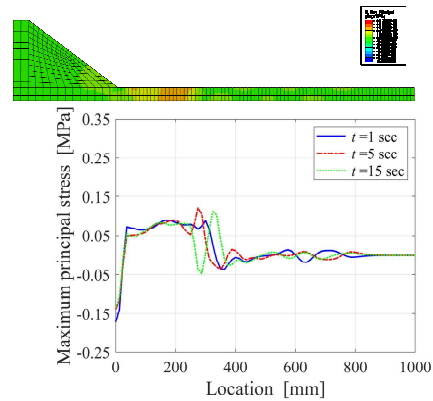
(a) $Q = 22.8\text{ m}^3/\text{h}$ (Case 1)



(b) $Q = 17.0\text{ m}^3/\text{h}$ (Case 6)



(c) $Q = 12.7\text{ m}^3/\text{h}$ (Case 11)



(d) $Q = 6.84\text{ m}^3/\text{h}$ (Case 16)

그림 62 유량에 변화에 따른 수로 위치 별 최대주응력(σ_1)

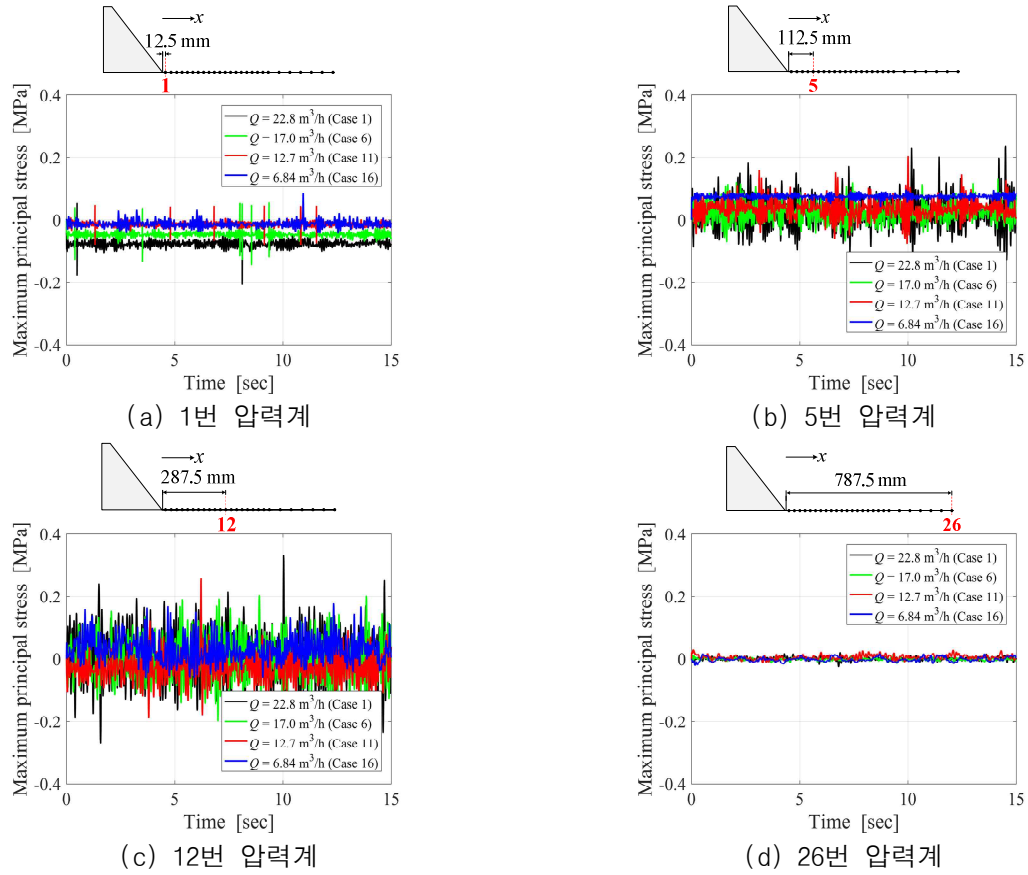


그림 63 유량 변화에 따른 압력계 위치 별 최대주응력(σ_1)의 시간이력

- 그림 64는 유량 변화에 따른 수로 표면 최대주응력의 최댓값으로, 유량이 증가할수록 수로 구조물 표면의 최대주응력이 증가하는 경향을 보임.
- 최대주응력이 큰 값을 보인다는 것은 수로 표면에 발생하는 음압이 크게 발생하는 것으로 유량이 증가할수록 음압으로 인한 수로의 손상이 발생할 확률이 증가한다는 것을 알 수 있음.

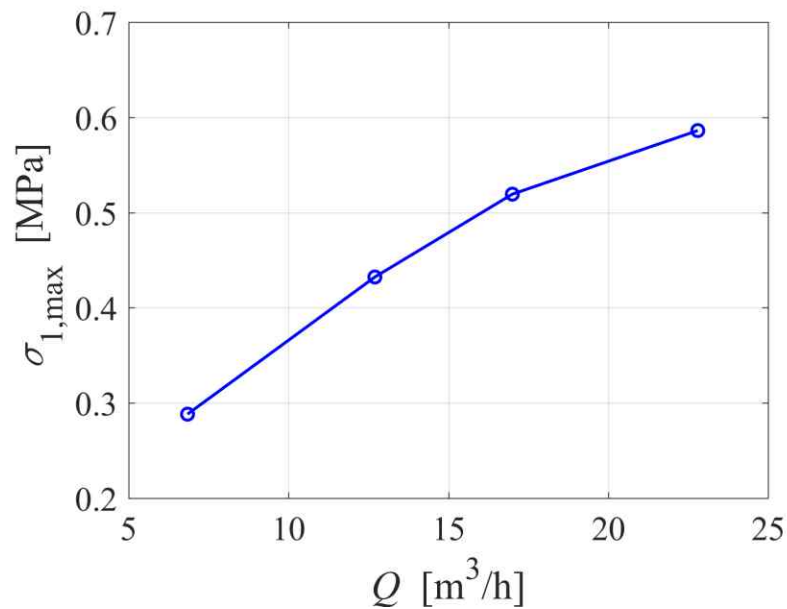
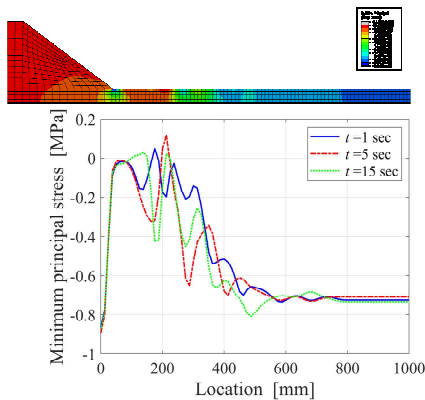


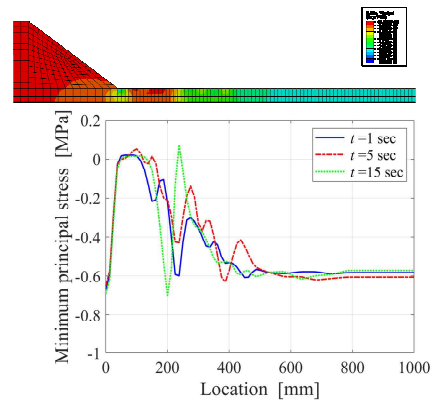
그림 64 유량 변화에 따른 수로 표면 최대주응력의 최댓값($\sigma_{1,max}$)

▷ 수로 표면의 최소주응력(σ_3)

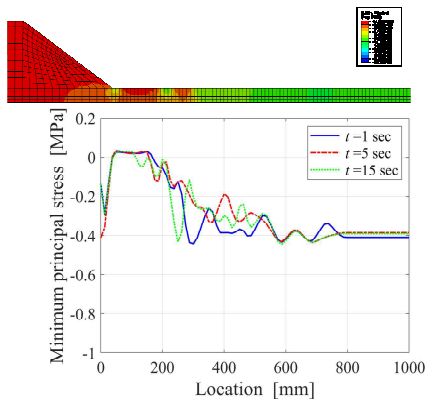
- 그림 65는 유량 변화에 따른 수로 표면의 최소주응력(σ_3) 분포를 나타냄.
- 최대주응력과 유사하게 유량이 증가할수록 수압의 변동이 수로의 시작점에 가까운 지점에서 발생하는 것을 알 수 있음.
- 각 Case들은 수로의 약 750mm 지점 이후로 정수압 상태가 되며, 유량이 증가할수록 정수압 상태일 때의 응력이 압축방향으로 증가하는 경향을 보임.
- 그림 66은 유량 변화에 따른 압력계 위치 별 수로 표면 최소주응력의 시간이력을 나타냄.
- 도수 발생 위치($x_{hj} = 125\text{ mm}$)에 인접한 5번 압력계 위치에서 음압으로 인해 최소주응력이 인장방향으로 증가하여 0에 가까운 값을 보임.
- 정수압 상태에 도달한 26번 압력계 위치에서 유량이 증가할수록 압축응력이 증가하는 경향을 보임.
- 그림 67은 유량 변화에 따른 수로 표면 최소주응력의 절대최댓값으로, 유량이 증가할수록 수로 구조물 표면의 최소주응력이 증가하는 경향을 보임.
- 이는 유량이 증가할수록 수로 구조물 표면의 압축응력이 커짐을 의미함.



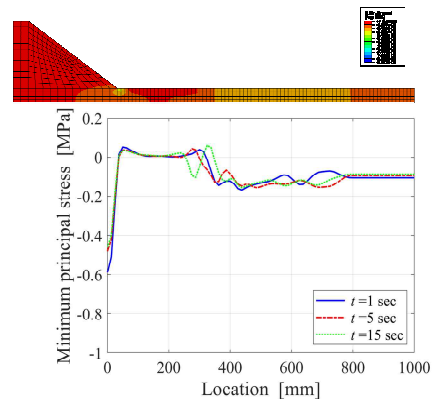
(a) $Q = 22.8\text{ m}^3/\text{h}$ (Case 1)



(b) $Q = 17.0\text{ m}^3/\text{h}$ (Case 6)



(c) $Q = 12.7\text{ m}^3/\text{h}$ (Case 11)



(d) $Q = 6.84\text{ m}^3/\text{h}$ (Case 16)

그림 65 유량 변화에 따른 수로 표면의 최소주응력(σ_3)

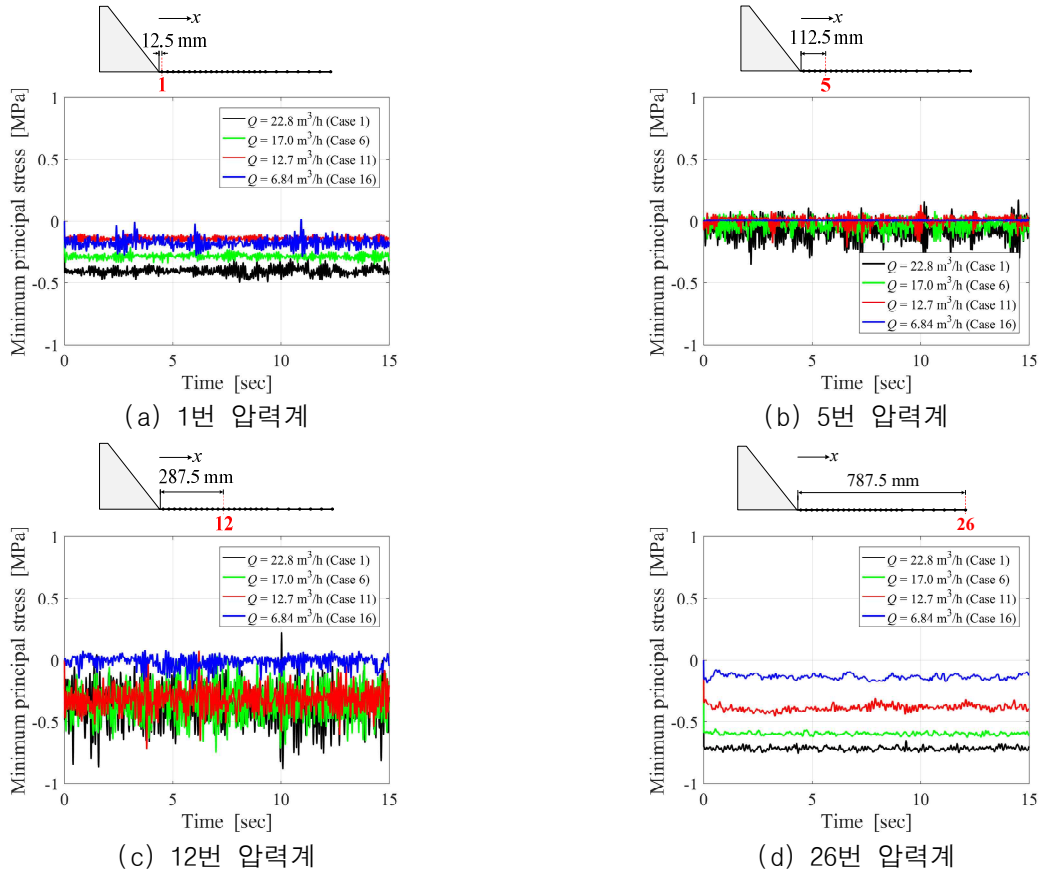


그림 66 유량 변화에 따른 압력계 위치 별 최소주응력(σ_3)의 시간이력

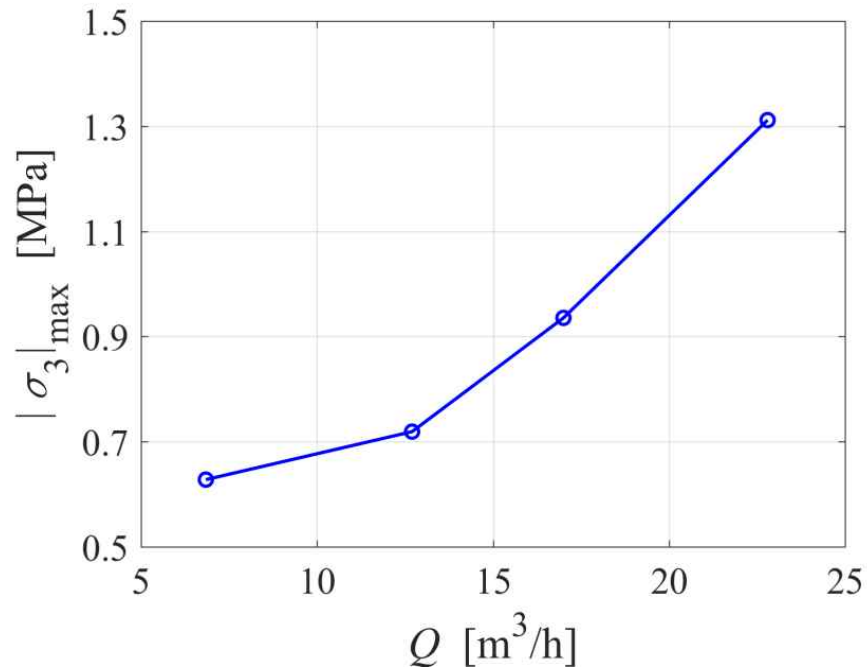
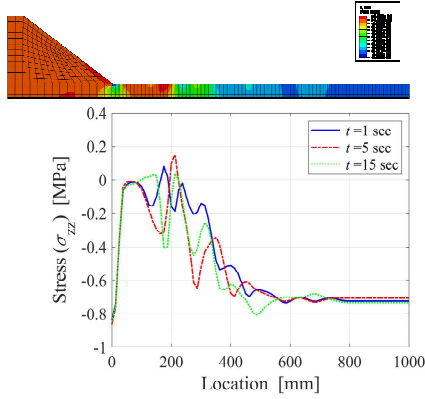


그림 67 유량 변화에 따른 수로 표면 최소주응력의 절대최댓값($|\sigma_3|_{\max}$)

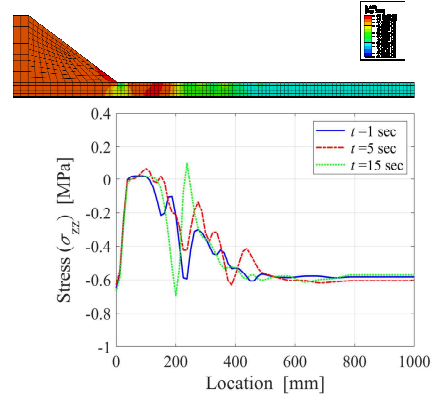
▷ 수로 표면의 연직방향 응력(σ_{zz})

- 그림 68은 유량 변화에 따른 수로 표면의 연직방향 응력(σ_3) 분포를 나타내며 최소주응력(σ_1)과 매우 유사한 분포를 보임.
- 이를 통해 수로 표면의 응력은 압축응력이 지배적이라는 것을 알 수 있음.

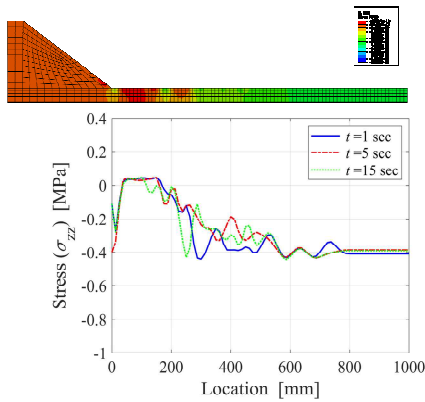
- 그림 69는 유량 변화에 따른 압력계 위치 별 연직방향 응력의 시간이력을 나타냄.
- 최소주응력과 유사하게 도수 발생 위치($x_{hj} = 125\text{ mm}$)에 인접한 5번 압력계 위치에서 음압으로 인해 최소주응력이 인장방향으로 증가하여 0에 가까운 값을 보이고, 정수압 상태에 도달한 26번 압력계 위치에서 유량이 증가할수록 압축응력이 증가하는 경향을 보임.
- 그림 70은 유량 변화에 따른 수로 표면 연직방향 응력의 절대최댓값으로, 유량이 증가할수록 수로 구조물 표면의 연직방향 응력이 압축방향으로 증가하는 경향을 보임



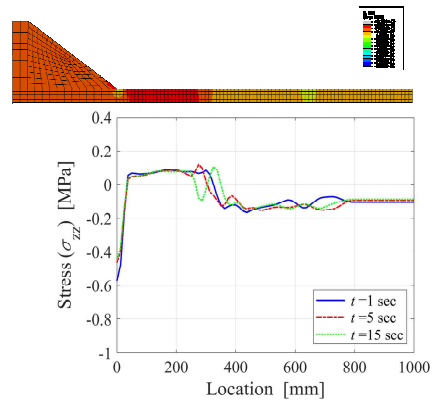
(a) $Q = 22.8\text{ m}^3/\text{h}$ (Case 1)



(b) $Q = 17.0\text{ m}^3/\text{h}$ (Case 6)



(c) $Q = 12.7\text{ m}^3/\text{h}$ (Case 11)



(d) $Q = 6.84\text{ m}^3/\text{h}$ (Case 16)

그림 68 유량에 변화에 따른 수로 표면의 연직방향 응력(σ_{zz})

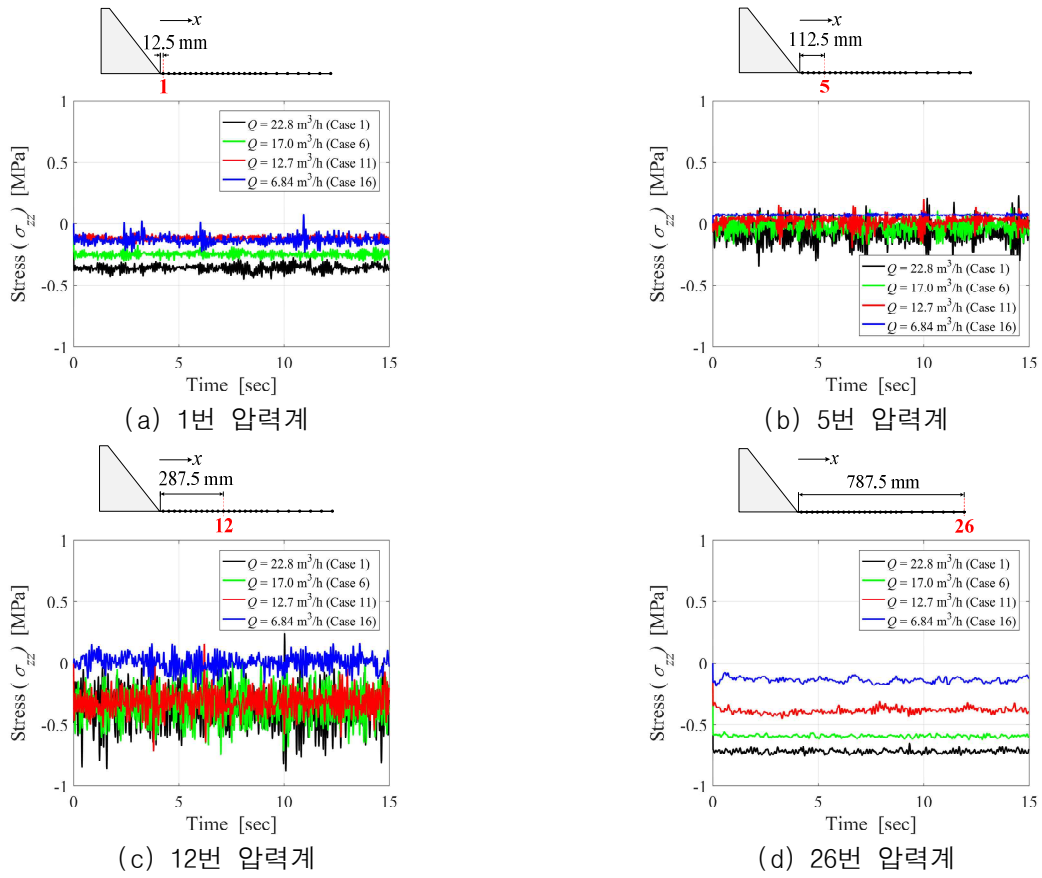


그림 69 유량 변화에 따른 압력계 위치 별 연직방향 응력(σ_{zz})의 시간이력

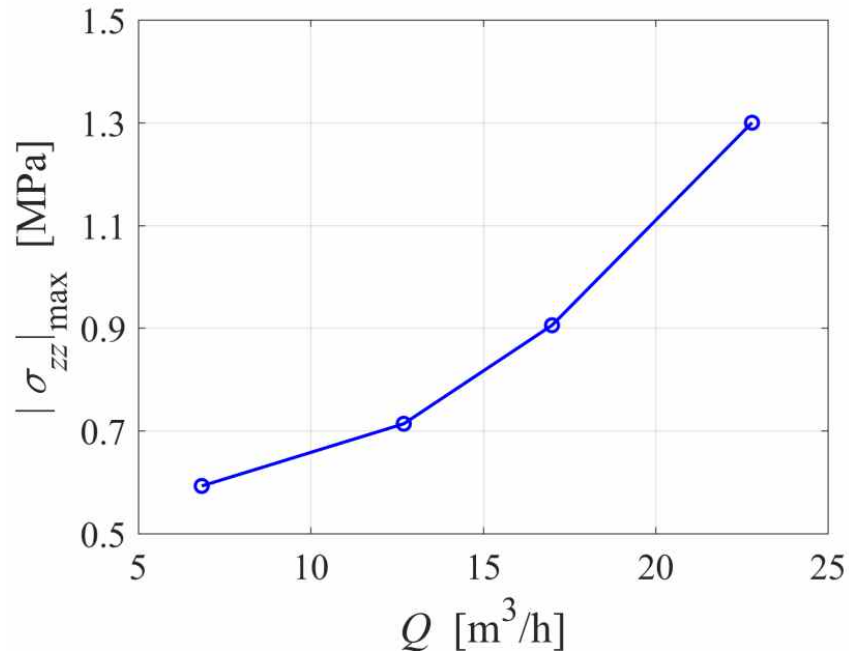
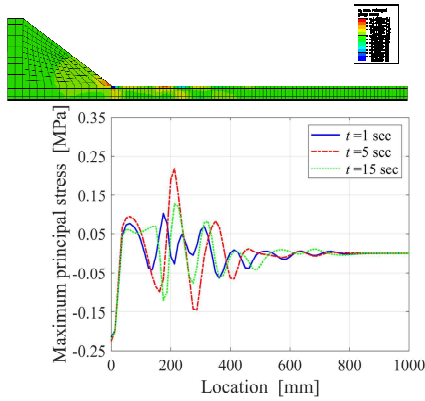


그림 70 유량 변화에 따른 수로 표면 연직방향 응력의 절대최댓값 ($|\sigma_{zz}|_{\text{max}}$)

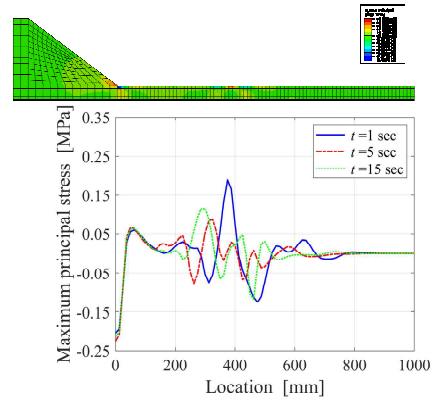
㉔ 도수 발생 위치(x_{hj}) 변화에 따른 물받이공의 구조해석 결과 (유량, $Q = 125 \text{ m}^3/\text{h}$)

▷ 수로 표면의 최대주응력(σ_1)

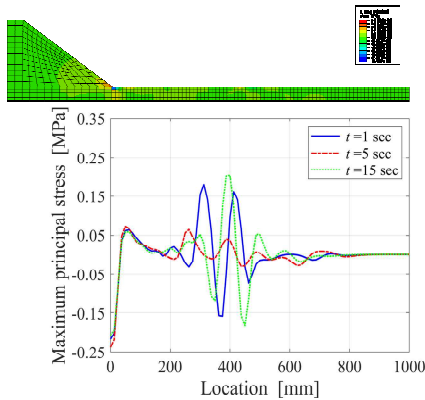
- 그림 71은 도수 발생 위치 변화에 따른 수로 표면의 최대주응력을 보여줌.
- 수로의 시작점을 기준으로 도수 발생 위치가 멀어질수록 최대주응력이 인장방향으로 크게 증가함.
- 이는 도수 발생 위치가 멀어질수록 수로 시작점으로부터 먼 위치에서 음압이 크게 발생함.
- 도수 발생 위치가 433mm 일 경우(Case 5), 다른 Case에 비해 음압(인장응력)의 크기가 비교적 작음.



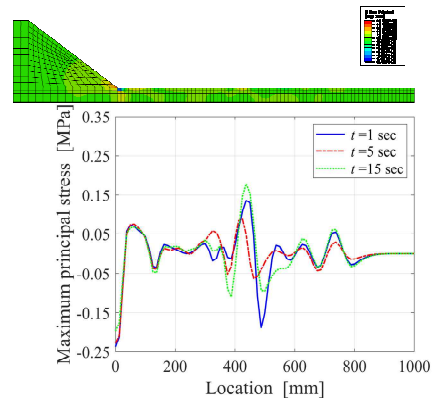
(a) $x_{hj} = 125 \text{ mm}$ (Case 1)



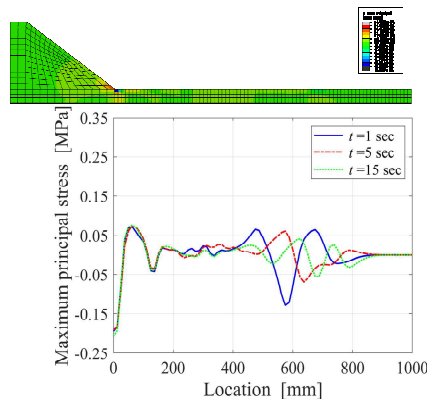
(b) $x_{hj} = 216 \text{ mm}$ (Case 2)



(c) $x_{hj} = 279 \text{ mm}$ (Case 3)



(d) $x_{hj} = 350 \text{ mm}$ (Case 4)



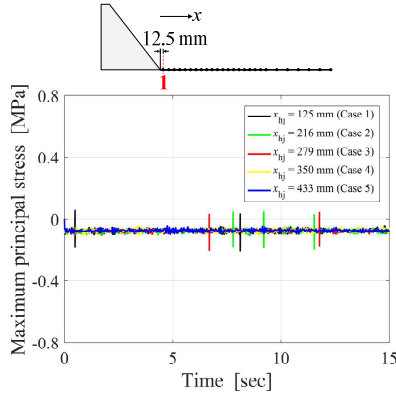
(e) $x_{hj} = 433 \text{ mm}$ (Case 5)

그림 71 도수 발생 위치 변화에 따른 수로 표면의 최대주응력(σ_1)

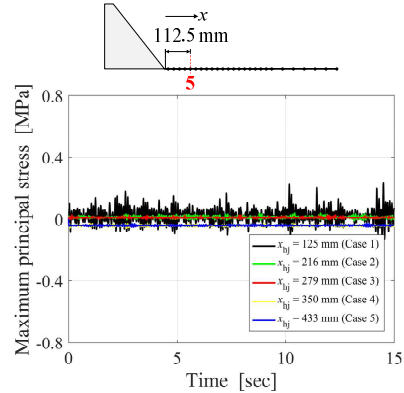
- 그림 72는 도수 발생 위치 변화에 따른 압력계 위치 별 최대주응력을 나타냄.
- 유량이 $125 \text{ m}^3/\text{h}$ 로 동일하기 때문에 수로 시작점에 인접한 1번 압력계 위치에서의 최대주응력

은 도수 발생 위치 변화와 무관함.

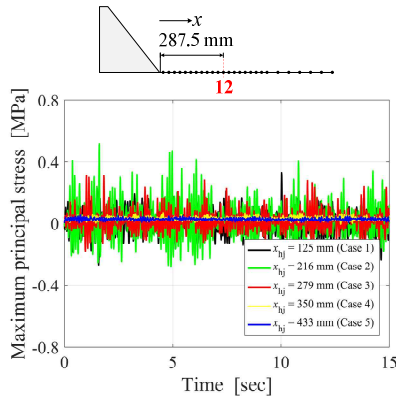
- 최대주응력이 인장방향으로 증가하는 위치가 도수 발생 위치에 따라 다름.
- 이를 통해 도수 발생 위치 변화에 따라 음압이 크게 발생하는 위치가 변함을 알 수 있음.



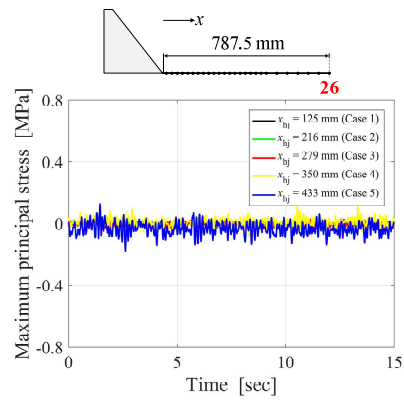
(a) 1번 압력계



(b) 5번 압력계



(c) 12번 압력계



(d) 26번 압력계

그림 72 도수 발생 위치 변화에 따른 압력계 위치 별 최대주응력의 시간이력(σ_1)

- 그림 73는 도수 발생 위치 변화에 따른 수로 표면의 최대 주응력을 보여줌.
- 도수 발생 위치가 수로시작점으로부터 멀어질수록 최대주응력이 감소하는 경향을 보임.
- 이는 도수 발생 위치가 멀어질수록 방류 시 발생하는 음압의 크기가 작아짐을 의미함.

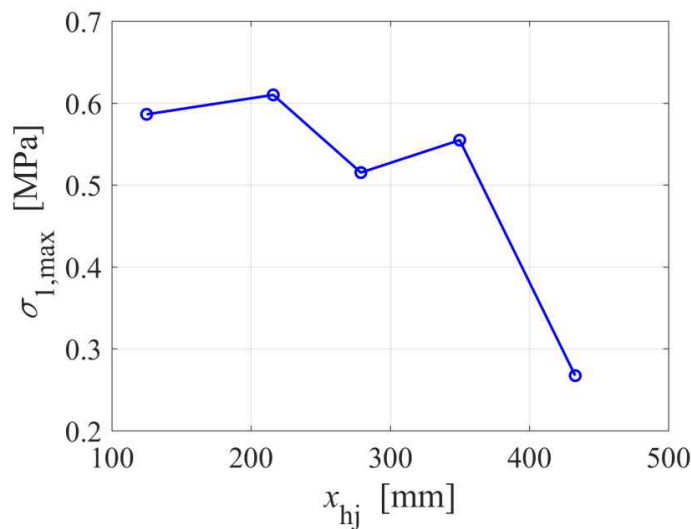
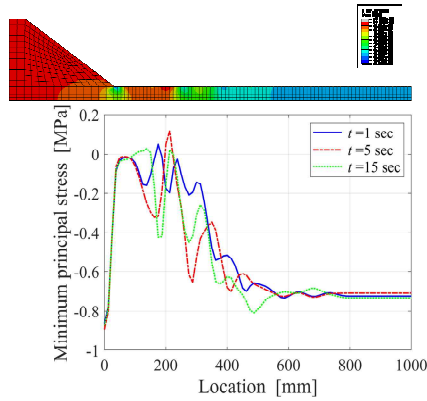


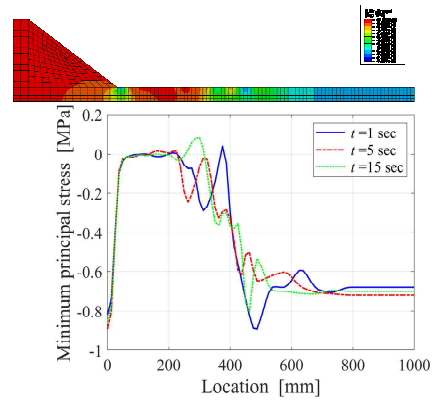
그림 73 도수 발생 위치 변화에 따른 수로 표면의 최대주응력($\sigma_{1,max}$)

▷ 수로 표면의 최소주응력(σ_3)

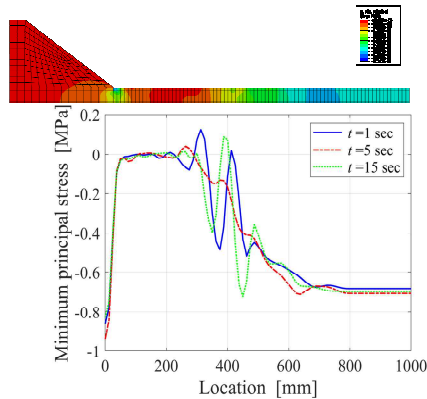
- 그림 74는 도수 발생 위치 변화에 따른 수로 표면의 최소주응력 분포를 보여줌.
- 최대주응력 분포와 유사하게 수로의 시작점을 기준으로 도수 발생 위치가 멀어질수록 최소주응력이 인장방향으로 크게 증가함.
- 도수 발생 위치가 멀어질수록 최소주응력이 0에 근접한 값을 갖는 구간이 길어짐
- 이는 도수 발생 위치가 멀어질수록 음압이 작용하는 구간이 길어짐을 의미함.



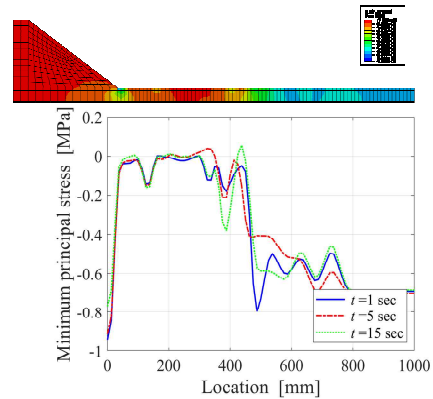
(a) $x_{hj} = 125$ mm (Case 1)



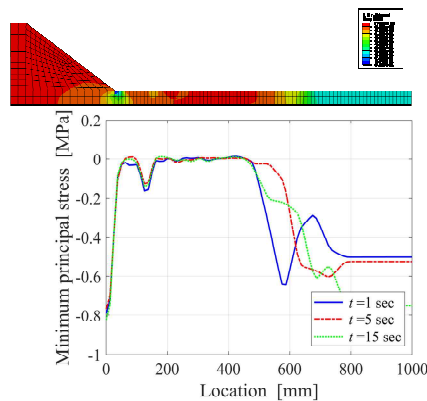
(b) $x_{hj} = 216$ mm (Case 2)



(c) $x_{hj} = 279$ mm (Case 3)



(d) $x_{hj} = 350$ mm (Case 4)



(e) $x_{hj} = 433$ mm (Case 5)

그림 74 도수 발생 위치 변화에 따른 수로 표면의 최소주응력(σ_3)

- 그림 75는 도수 발생 위치 변화에 따른 압력계 위치 별 최소주응력의 시간이력을 나타냄.
- 수로의 낙차 시작점인 1번 압력계 위치에서의 최소주응력 시간이력이 도수 발생 위치 변화와 무관함.

- 이를 통해 낙차 시의 압축응력은 도수 발생 위치 변화에도 크게 변하지 않으며 유량이 지배적인 역할을 한다는 것을 알 수 있음.
- 도수 발생 위치가 350mm, 433mm일 경우(Case 4와 5), 26번 압력계 위치에서 최소주응력의 변동이 비교적 큰 폭으로 나타남.
- 이는 도수 발생 위치가 멀어질수록 정수압 상태에 도달하는 위치가 수로 시작점으로부터 멀어짐을 의미함.

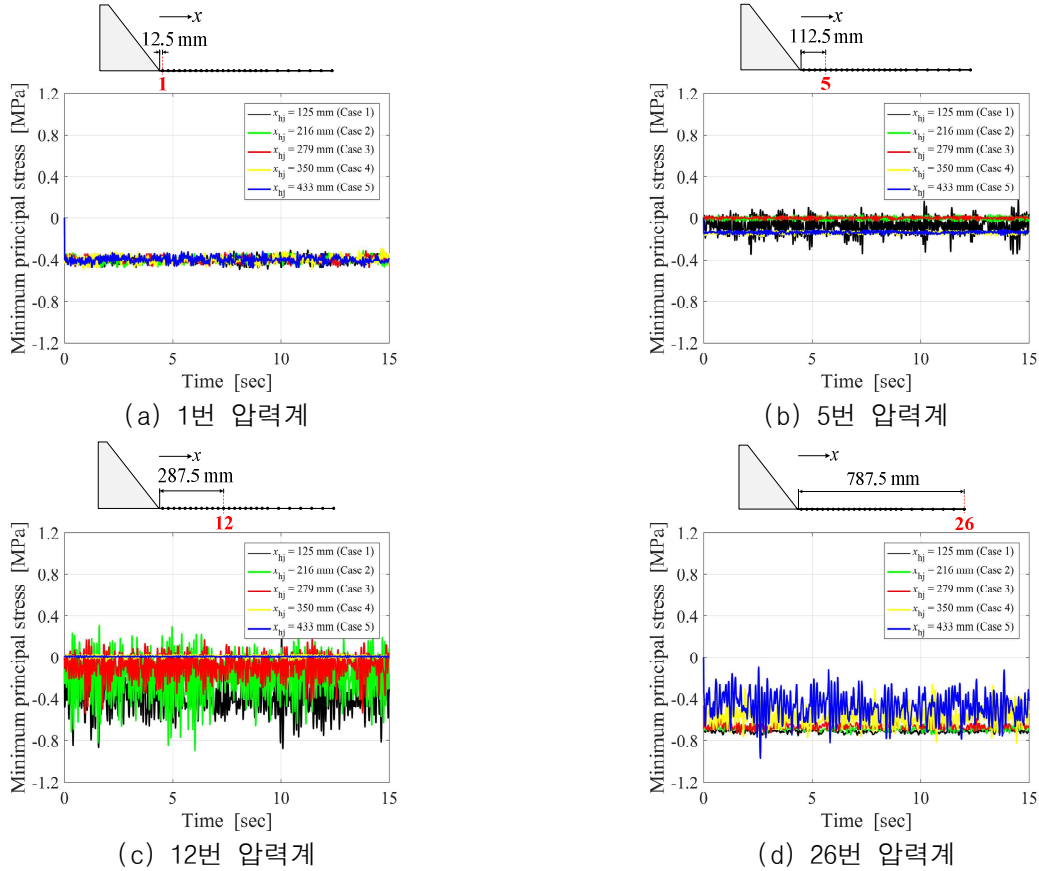


그림 75 도수 발생 위치 변화에 따른 압력계 위치 별 최소주응력의 시간이력(σ_3)

- 그림 76은 도수 발생 위치 변화에 따른 수로 표면 최소주응력의 절대최댓값을 보여줌.
- 도수 발생 위치가 멀어질수록 최소주응력의 절대최댓값이 감소하는 경향을 보임.
- 이는 도수 발생 위치가 멀어질수록 수로 표면에 작용하는 전체적인 압축응력이 작아짐을 의미함.

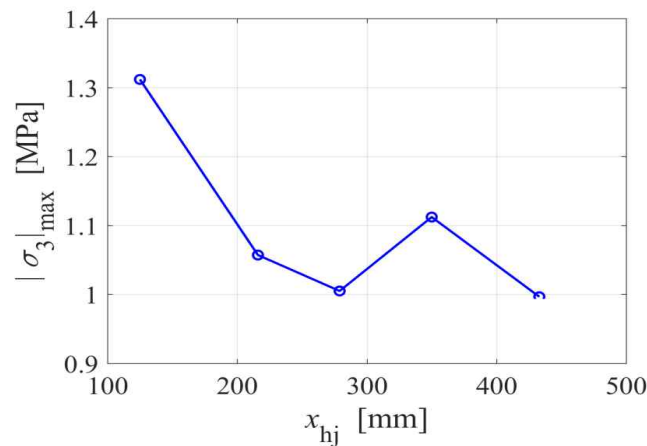
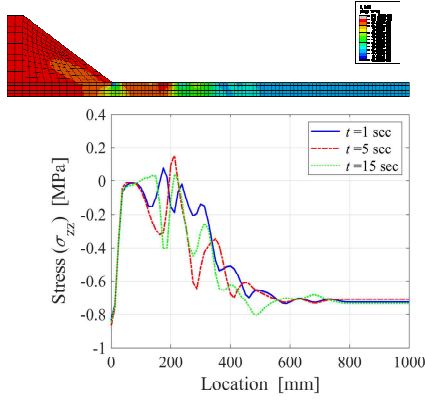


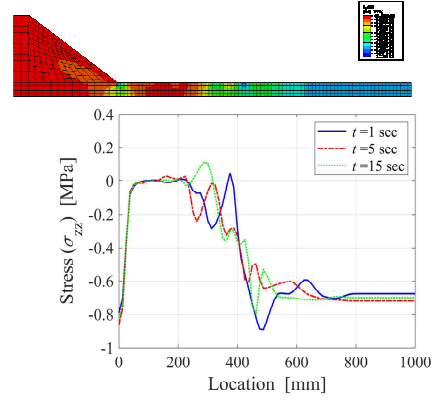
그림 76 도수 발생 위치 변화에 따른 수로 표면 최소주응력의 절대최댓값($|\sigma_3|_{\max}$)

▷ 수로 표면의 연직방향 응력(σ_{zz})

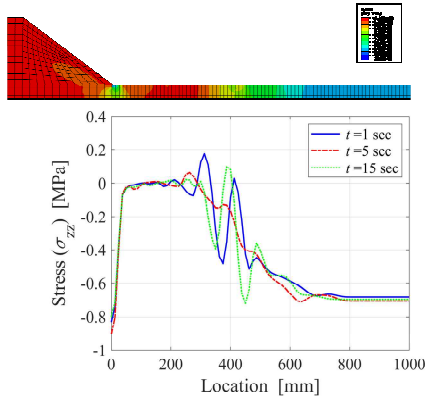
- 그림 77, 78, 79는 각각 도수 발생 위치 변화에 따른 수로 표면의 연직방향 응력 분포, 압력계 위치 별 연직방향 응력의 시간이력, 수로 표면 연직방향 응력의 절대최댓값을 나타냄.
- 각 결과들은 최소주응력 결과와 매우 유사한 분포와 크기를 보임.
- 이를 통해 압축응력이 수로 표면의 지배적인 응력임을 알 수 있음.



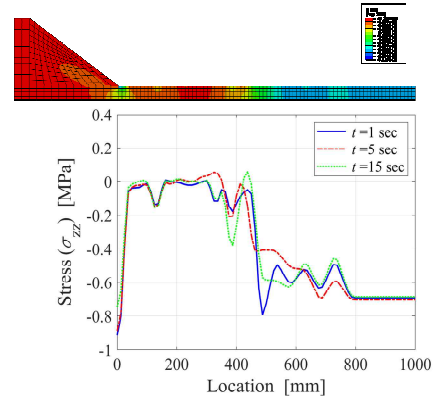
(a) $x_{hj} = 125$ mm (Case 1)



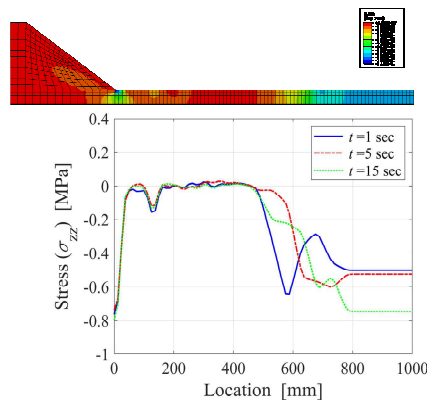
(b) $x_{hj} = 216$ mm (Case 2)



(c) $x_{hj} = 279$ mm (Case 3)



(d) $x_{hj} = 350$ mm (Case 4)



(e) $x_{hj} = 433$ mm (Case 5)

그림 77 도수 발생 위치 변화에 따른 수로 표면의 연직방향 응력(σ_{zz})

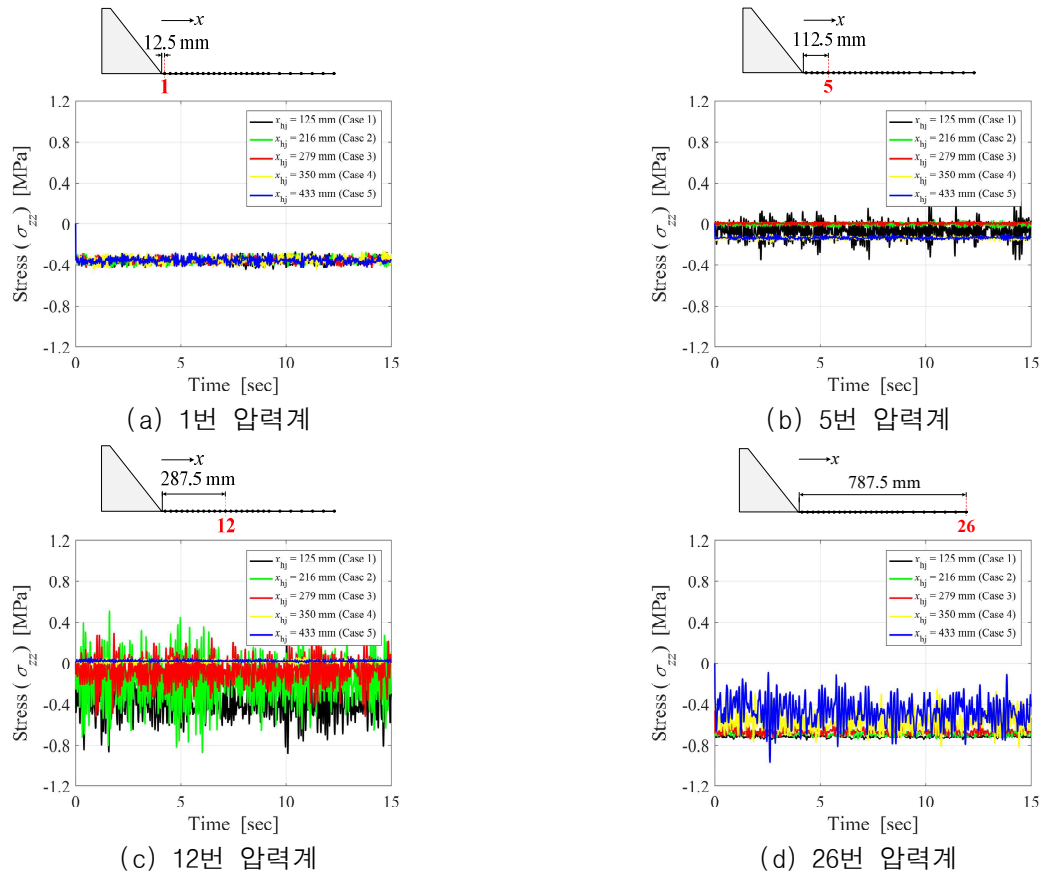


그림 78 도수 발생 위치 변화에 따른 압력계 위치 별 연직방향 응력의 시간이력(σ_{zz})

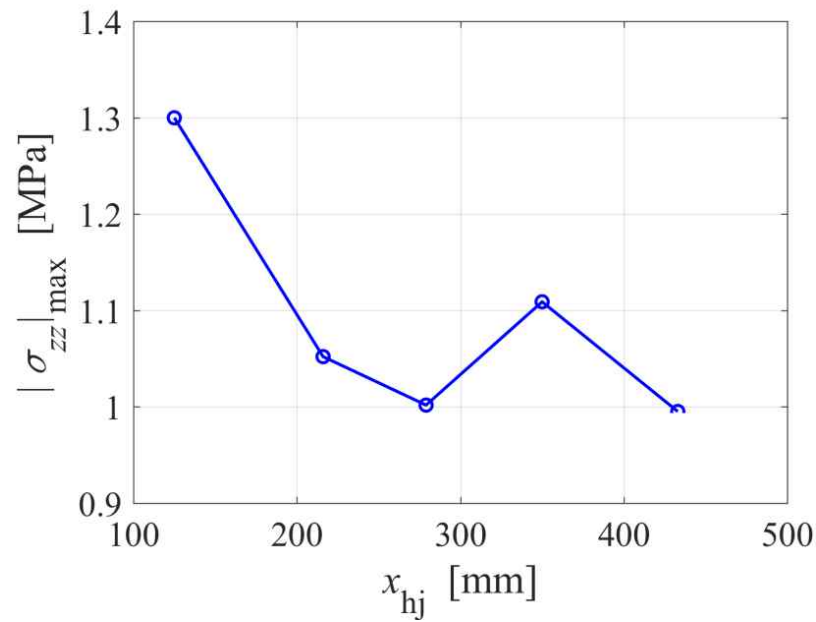
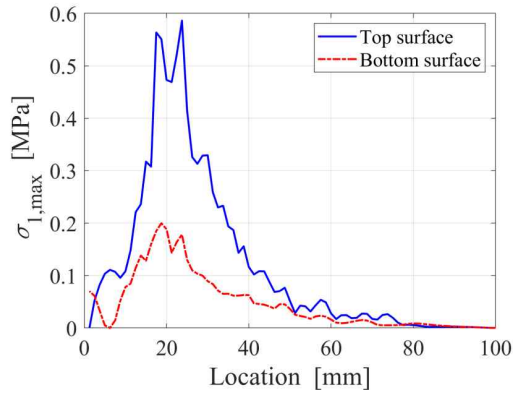


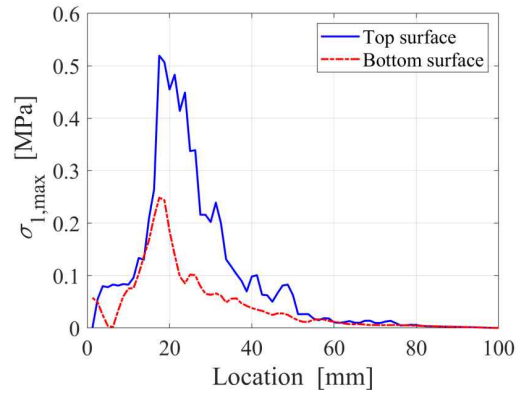
그림 79 도수 발생 위치 변화에 따른 수로 표면 연직방향 응력의 절대최댓값($|\sigma_{zz}|_{\max}$)

▷ 수로 표면과 바닥면의 최대주응력(σ_1) 비교

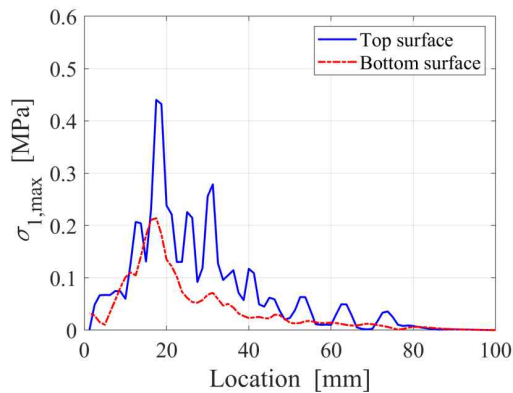
- 그림 80은 유량 변화에 따른 수로 표면과 바닥면의 최대주응력(σ_1)을 나타냄.
- 유량이 증가할수록 수로 표면의 최대주응력이 증가하는 경향을 보이지만 수로 바닥면의 최대주응력은 유량과 관계없이 유사함.
- 최대주응력은 물받이공 표면보다 바닥면에서 작음.
- 이는 음압으로 인한 인장력이 물받이공 표면보다 바닥면에서 작음을 의미함.
- 표 30은 유량 변화에 따른 표면에서의 최대주응력과 수로의 시작점을 기준으로 최대주응력의 최댓값이 발생하는 위치 및 시간을 나타냄.



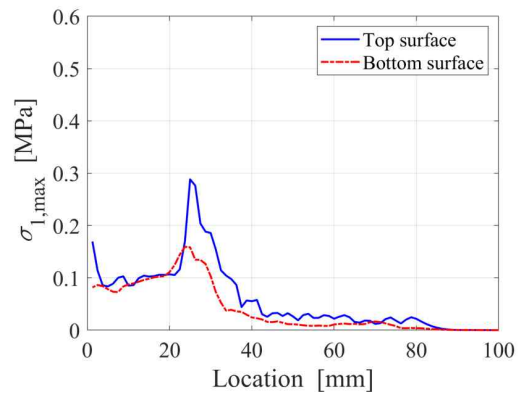
(a) $Q = 22.8 \text{ m}^3/\text{h}$ (Case 1)



(b) $Q = 17.0 \text{ m}^3/\text{h}$ (Case 6)



(c) $Q = 12.7 \text{ m}^3/\text{h}$ (Case 11)



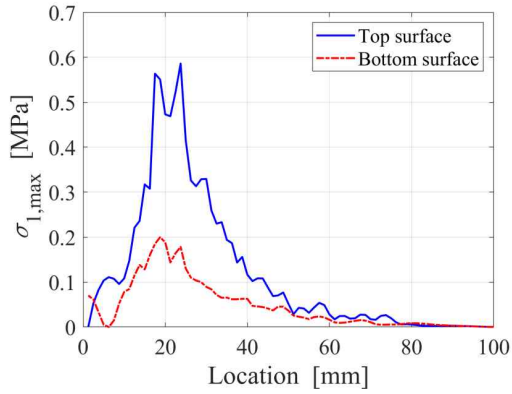
(d) $Q = 6.84 \text{ m}^3/\text{h}$ (Case 16)

그림 80 유량 변화에 따른 수로 표면과 바닥면의 최대주응력(σ_1)

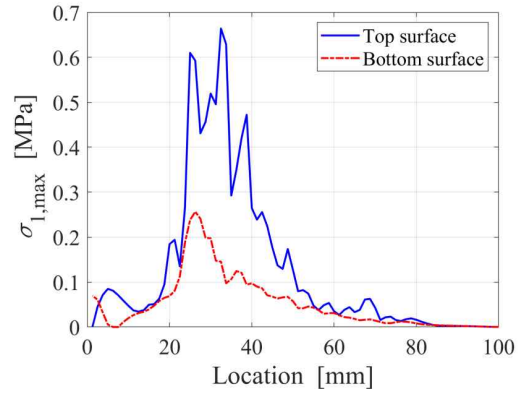
표 30 유량 변화에 따른 최대주응력의 최댓값, 발생 위치와 시간

유량	최대주응력의 최댓값 (MPa)	위치 (mm)	시간 (초)
$Q = 22.8 \text{ m}^3/\text{h}$ (Case 1)	0.5862	23.75	6.04
$Q = 17.0 \text{ m}^3/\text{h}$ (Case 6)	0.5194	68.00	2.33
$Q = 12.7 \text{ m}^3/\text{h}$ (Case 11)	0.4402	68.00	15.89
$Q = 6.84 \text{ m}^3/\text{h}$ (Case 16)	0.2883	62.00	4.61

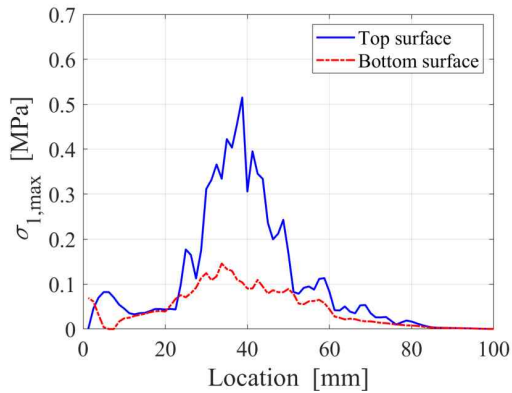
- 그림 81은 유량이 $Q = 22.8 \text{ m}^3/\text{h}$ 로 동일한 경우, 도수 발생 위치 변화에 따른 수로 표면과 바닥면의 최대주응력(σ_1)을 나타냄.
- 도수 발생 위치가 수로 시작점으로부터 멀어질수록 수로 표면에서의 최대주응력이 감소하는 경향을 보이지만 수로 바닥면의 최대주응력은 도수 발생 위치와 관계없이 유사함.
- 유량 변화에 따른 결과와 유사하게 최대주응력은 물받이공 표면보다 바닥면에서 작음.
- 이는 음압으로 인한 인장력이 물받이공 표면보다 바닥면에서 작음을 의미함.
- 표 31는 도수 발생 위치 변화에 따른 표면에서의 최대주응력과 수로의 시작점을 기준으로 최대주응력의 최댓값이 발생하는 위치 및 시간을 나타냄.



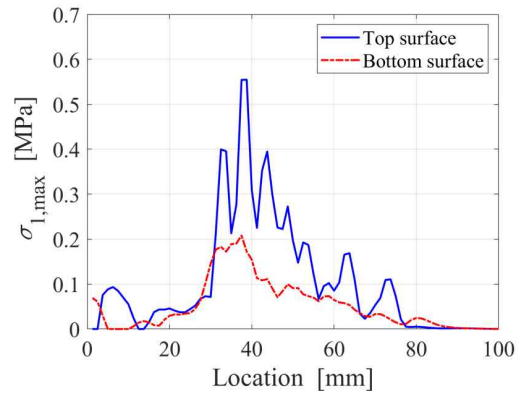
(a) $x_{hj} = 125 \text{ mm}$ (Case 1)



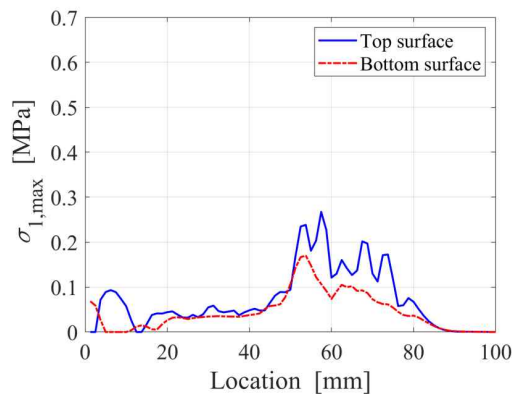
(b) $x_{hj} = 216 \text{ mm}$ (Case 2)



(c) $x_{hj} = 279 \text{ mm}$ (Case 3)



(d) $x_{hj} = 350 \text{ mm}$ (Case 4)



(e) $x_{hj} = 433 \text{ mm}$ (Case 5)

그림 81 도수 발생 위치 변화에 따른 수로 표면과 바닥면의 최대주응력(σ_1)

표 31 도수 발생 위치 변화에 따른 최대주응력의 최댓값, 발생 위치와 시간

도수 발생 위치	최대주응력의 최댓값 (MPa)	위치 (mm)	시간 (초)
$x_{hj} = 125 \text{ mm}$ (Case 1)	0.5862	23.75	6.04
$x_{hj} = 216 \text{ mm}$ (Case 2)	0.6640	32.50	15.19
$x_{hj} = 279 \text{ mm}$ (Case 3)	0.5151	38.75	8.30
$x_{hj} = 350 \text{ mm}$ (Case 4)	0.5547	38.75	12.77
$x_{hj} = 433 \text{ mm}$ (Case 5)	0.2672	57.50	1.50

▷ 물받이공 깊이에 따른 최대주응력(σ_1)의 비교를 통한 최적 두께 산정

- 그림 82는 유량 변화에 따라 물받이공 표면에서 최대주응력의 최댓값이 발생하는 위치와 시간(표 30 참고)에서의 깊이 별 최대주응력을 나타냄.
- 그림 83은 도수 발생 위치 변화에 따라 물받이공 표면에서 최대주응력의 최댓값이 발생하는 위치와 시간(표 31 참고)에서의 깊이 별 최대주응력을 나타냄.
- 수로 표면에서 바닥면으로 갈수록 최대주응력이 감소하는 경향을 보이며 최대주응력의 감소율이 감소함.
- 이러한 다양한 방류조건으로 방류 시 물받이공의 응력상태를 구조해석을 통하여 평가하였으며 깊이방향으로 최대주응력의 감소율이 감소하는 것을 확인함.
- 이번 연구에서는 다양한 방류조건에 따른 물받이공의 응력상태를 구조해석을 통하여 평가하였으며 깊이 방향으로 최대주응력의 감소율이 감소하는 것을 확인함.
- 이 실험모형에서는 다양한 방류조건에 따른 물받이공 최대주응력의 감소율이 0에 가까워지기 때문에 실험모형의 바닥에서는 음압으로 인한 진동이 충분히 감소한다고 평가할 수 있음.
- 따라서 추후 다양한 방류조건에 따른 최대주응력의 감소율뿐만 아니라 다양한 설계조건들을 이용하여 물받이공의 최적두께 산정을 검토할 수 있음.

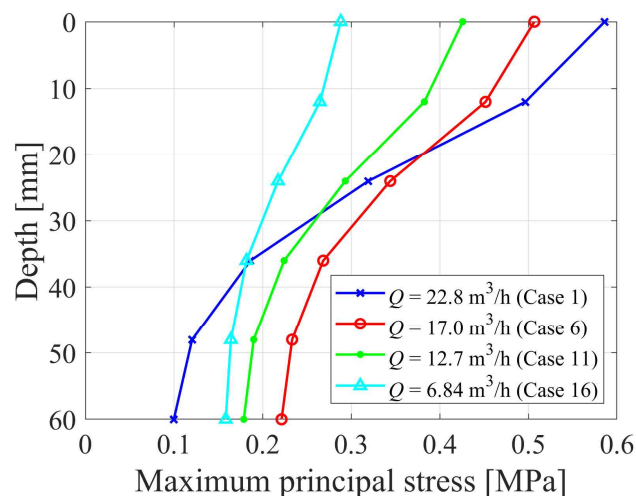


그림 82 유량의 변화에 따른 물받이공 깊이 별 최대주응력(σ_1)

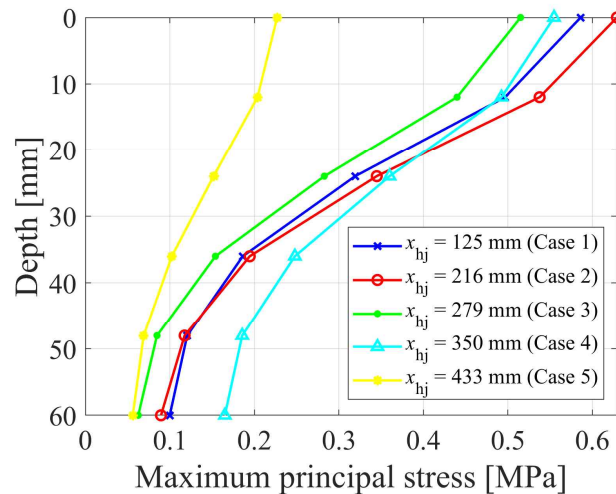


그림 83 도수 발생 위치 변화에 따른 물받이공 깊이 별 최대주응력(σ_1)

(나) Task 2 : 압력변이로 인한 하천횡단구조물 하류 물받이공 피로파괴 설계 인자 도출

① 영상측정기법을 활용하여 압력변이로 인한 물받이공 손상파괴의 관계 도출 (Track B-1)

㉠ 실험 개요

- 보 구조물 중 물받이공은 도수를 유발시키고 유수의 에너지를 완화시키기 위한 목적으로 설치함
- 도수흐름 구간에서는 다량의 기포를 연행하고 강한 난류성분으로 수면이 강하게 요동치는 흐름 특성을 보임.
- 난류흐름 특성은 물받이공 저면에 지속적인 외력이 작용함으로써 구조물의 안정성에 영향을 줄 수 있음.
- 본 연구에서는 하천횡단구조물 고정보 하류에서 도수발생에 따른 수리특성을 검토하고 물받이공 및 바닥보호공 영역에 작용하는 압력과의 상관관계를 분석하기 위하여 실내수리실험을 수행함.
- 그러나 난류흐름 특성으로 인하여 수위 및 유속 측정 시 기존의 측정방법인 포인트 게이지 또는 초음파 수위계를 활용한 수위측정, 전자식 및 초음파 유속계를 활용한 유속측정과 같은 접촉식 측정방법으로 수리특성을 계측하기에는 한계가 있음.
- 따라서 비접촉 측정방법인 영상측정기법을 활용하여 도수구간을 포함한 보 하류의 수위 및 유속성분 값을 취득함.

▷ 실험 수행

- 상류유량은 유량조절 밸브를 사용하여 조절되었으며 보 상류에서 포인트 게이지를 활용하여 수위(d_3)를 측정함.
- 보를 넘어온 물은 보의 전면부 경사를 따라 빠르게 내려가며 하류에서 낮은 접근수심(d_1)과 강한 접근유속(u_a)의 흐름을 보이고 이후 하류단 수위(d_2) 조건에 따라 도수의 위치가 변화함.
- 하류단 수위는 하류수문으로부터 1.0 m 상류에서 포인트 게이지를 활용하여 측정함.
- 본 연구에서는 보 끝단과 바닥면을 원점으로 설정하여 분석을 수행함.

▷ 실험 조건

- 횡단구조물 Weir보 하류의 물받이공 및 바닥보호공 구간에서 발생하는 도수흐름 및 압력을 검

토하기 위해 하류수위와 유량을 조절하여 총 20 cases 조건에 대하여 수리실험을 수행함.

- 4가지의 유량조건과 하류단 수문을 조절하여 5가지의 도수발생 시작지점($\bar{x}_1$)이 조절되었으며, 각 유량조건마다 도수발생 시작위치는 최대한 일치하도록 함.
- 실험에서 도수흐름에 대한 Fr수는 0~10에 해당하였으며 이때 Reynolds수는 $0 < Re < 10^6$ 의 범위에서 실험이 수행됨.
- 영상측정기법을 활용한 수위측정(W)은 case 1~10에 대하여 측정을 수행함.
- 유동장 측정은 도수구간에서 BIV기법(B)을 활용하여 case 1~10, 기포영역을 제외한 구간에서는 PIV기법(P)을 활용하여 case 1~20에 대하여 측정을 수행하였으며, 표 32에 수리실험 조건 및 측정데이터에 대한 결과를 제시함.

표 32 수리실험 조건 (PIV & BIV)

case	discharge (m ³ /s)	d ₁ (m)	d ₂ (m)	d ₃ (m)	u _a (m/s)	Fr	Re	$\bar{x}_1$ (m)	Measurement		
									W	P	B
1	0.0063	0.01	0.0900	0.355	1.95	6.00	21,000	0.125	o	o	o
2			0.0893					0.216	o	o	o
3			0.0871					0.279	o	o	o
4			0.0863					0.350	o	o	o
5			0.0851					0.433	o	o	o
6	0.0047	0.009	0.0766	0.347	1.65	5.41	15,667	0.125	o	o	o
7			0.0754					0.214	o	o	o
8			0.0739					0.280	o	o	o
9			0.0730					0.365	o	o	o
10			0.0714					0.434	o	o	o
11	0.0056	0.01	0.0835	0.351	1.838	5.82	18,667	0.125	x	o	x
12			0.0815					0.215	x	o	x
13			0.0805					0.280	x	o	x
14			0.0790					0.365	x	o	x
15			0.0775					0.433	x	o	x
16	0.0041	0.009	0.0705	0.342	1.515	5.09	13,667	0.125	x	o	x
17			0.0675					0.215	x	o	x
18			0.0635					0.280	x	o	x
19			0.0615					0.365	x	o	x
20			0.0600					0.433	x	o	x

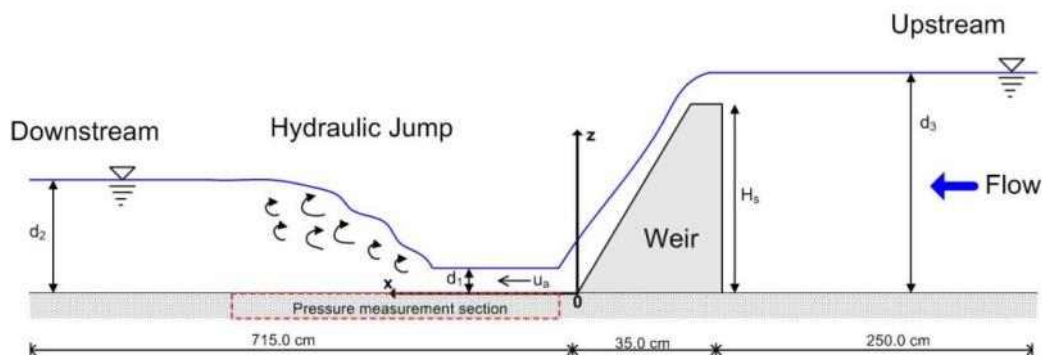


그림 84 실험 개요도 (PIV & BIV)

▷ 압력 측정 수행

- 압력계는 차압계 방식 압력계(Model: P603 serie)와 전압 방식 압력계(Model: UNIK 5000) 2가지 종류를 사용함.
- 차압계 형식의 압력계는 0~40 MPa 범위의 측정이 가능하며, 정확도는 $\pm 0.075\%$ 이며, 전압 방식 압력계는 -2~5 KPa 범위의 측정이 가능하며, 정확도는 $\pm 0.04\%$ 임.
- 각 압력계와 수로바닥면에 천공된 구멍은 아크릴튜브를 이용하여 연결되었음.
- 두 가지의 압력계가 테스트되었지만 비교검토결과 전압 방식의 압력계가 바닥저면에 작용하는 미소한 압력변동을 더 정교하게 측정하는 것으로 판단되어 유성분과의 상관관계를 분석하는데 전압 방식의 압력계 데이터를 활용함.
- 압력측정은 도수흐름이 충분히 안정화된 이후 초당 100장의 취득률로 데이터를 취득하였으며 200초간 측정을 수행함.

▷ 수위 및 유속측정 수행

(수위)

- 수위측정을 위해 그림자기법(Shadowgraphy)을 적용한 영상측정기법이 적용되어 순간 (Instantaneous)수위 값을 얻음 (그림 85참조).
- 각 순간에 촬영된 화상을 Digitalizing하여 모든 픽셀의 밝기를 수치화하여 이를 기반으로 수위 값을 획득함.
- 화상에서 수위를 측정하는 기준은 화상 전체의 평균밝기와 유체구간의 수면과 기포의 밝기를 상대적으로 확인하여 수위 값을 취득함.
- 식 (7)과 같이 수면 위 공간의 색 밝기가 평균보다 큰 경우를 수위로 결정하였으며 실험 case 별로 화상의 특성을 고려한 계수를 반영하여 수위 값을 취득함.

$$I(x, y = \eta) > \alpha \overline{I(x, y > \eta)} \quad (7)$$

여기서, I 는 색 밝기, x 는 흐름방향 좌표, y 는 연직방향 좌표, η 는 수위이다.

- 그림 85는 도수구간에서의 촬영된 이미지와 그림자기법을 적용하여 추출되는 수위를 도시하였으며, 그림자기법을 이용하여 측정된 이미지에서 기포영역 및 수면 이외의 영역이 구분되어지며 위에 제시된 방법을 적용하여 각 픽셀에서 얻은 수위분포를 결정함.
- 도수구간에서 수면변동이 심하게 발생하고 있음에도 불구하고 복잡한 수면형상을 잘 추적하고 있음을 확인할 수 있음.

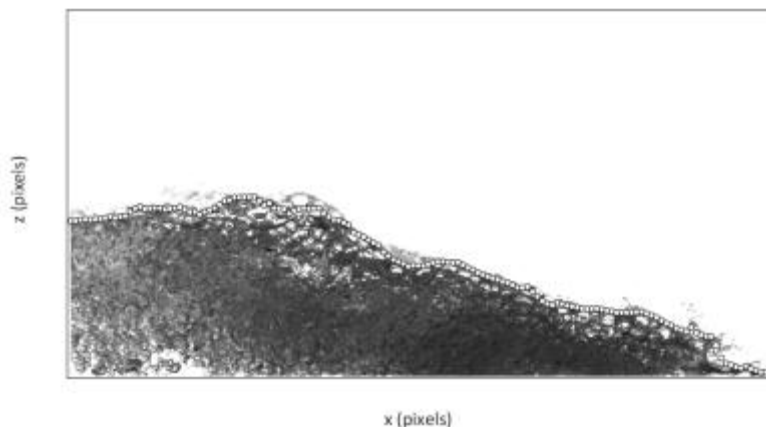


그림 85 도수구간의 순간영상 및 그림자기법으로 획득한 수위

(유속)

- 횡단구조물 Weir보 하류의 복잡한 도수흐름 구간의 난류 유동장을 취득하기 위해 비접촉식 방법인 영상측정기법을 적용하였으며 기포가 포함된 다상흐름 대한 유동장 측정을 위해 PIV(Particle image velocimetry)와 BIV(Bubble image velocimetry) 기법을 활용하여 본 연구에 적용함.
- 도수 발생 시 기포를 포함하지 않는 유체영역은 PIV기법을 적용하였으며 기포를 연행하는 구간에서는 빛의 산란 굴절 및 반사 매질의 차이 등으로 그림자기법을 기반으로 한 레이저를 사용하지 않는 BIV기법을 활용하여 측정을 수행함 (그림 86 참조).

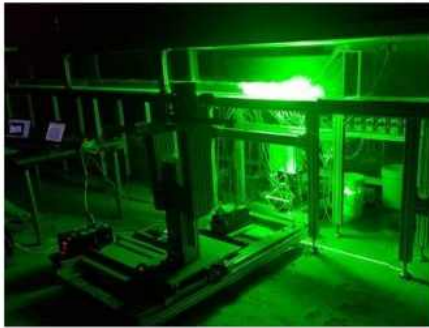
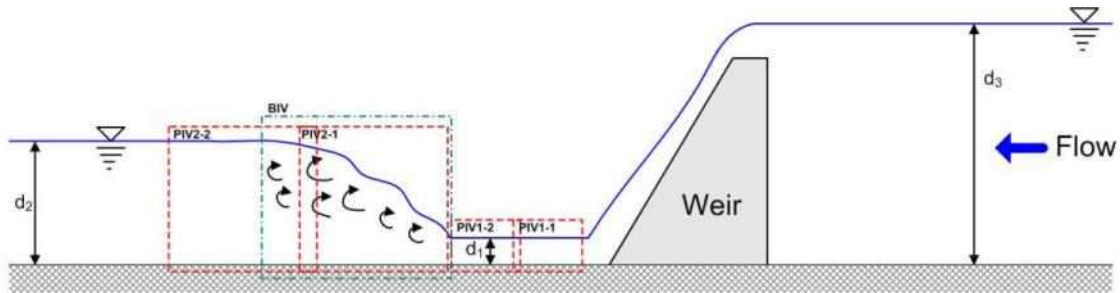


그림 86 영상측정기법을 활용한 수위 및 유속측정; (a) PIV 및 BIV기법이 적용된 측정구간, (b) PIV기법을 활용한 유동측정 장면, (c) 그림자기법 및 BIV을 활용한 유동 및 수위측정 장면

- PIV 측정을 위한 도구로는 초고속카메라와 입자 그리고 입자를 가시화시키기 위한 레이저로 구성되며, 초고속카메라는 1028x1024 픽셀의 해상도와 8비트의 분해능을 가지고 있음.
- 본 연구에서 사용된 초고속카메라는 초당 최대 8,000장의 영상을 취득할 수 있지만 도수흐름 특성을 고려하여 500~1000 fps로 초당 50장의 취득률로 카메라에 내장된 있는 메모리의 용량을 고려하여 총 2000장을 측정함.
- PIV측정 구간은 기포흐름이 없는 접근흐름 영역(PIV-1)과 도수구간과 하류영역(PIV-2)으로 구분하여 영상을 촬영하였고 또한 각 영역을 한 화상으로 촬영하기에는 한계가 있어 다시 두 개의 구간으로 나누어 촬영하였으며 영역간의 연속성을 확보하기 위해 일정구간을 겹치도록 하여 촬영을 수행함 (그림 86 참조).
- 초고속카메라는 트래버스 위에 고정시켰으며 수로와 평행한 조건에서 좌우로 움직이며 해당영역을 촬영함.
- 유동장을 측정하기 위해 비중 1.02, 직경 40 μm 의 입자를 사용하였으며 저유속 구간인 보 상류부에서 입자를 물에 희석시켜 주입하였고 카메라로 촬영된 영상을 확인하여 입자의 양을 조절하며, 이후 입자들은 순환되어 완전히 물에 섞인 조건이 형성됨.
- 입자를 가시화시키기 위한 레이저는 최대 출력이 8.0W이며 연속형 레이저(continuous laser)로 그 사용성이 용이함.
- 레이저는 수로 아래에서 광원을 투과시켜 수로의 중심을 따라 2차원 연직방향 면광이 형성되도

록 하여 입자를 가시화 시킴.

- 물과 공기로 이루어진 도수구간의 다상기포흐름에서 유동장을 획득하기 위해서는 그림자기법을 바탕으로 한 BIV기법을 적용하여 유동장을 측정함.
- BIV기법은 유체 내 입자의 거동을 연속하여 촬영하고 유속을 취득하는 PIV기법과 달리 측정대상을 가시화하여 연속 촬영하여 유속성분을 취득하는 기법으로 측정대상을 가시화시키기 위해 LED 칩을 패널에 등 간격으로 배열하여 도수구간의 기포흐름을 가시화함.
- 면광은 측정대상의 후면에서 노출시켰으며 도수구간에 균등한 공급을 위하여 LED패널 앞에 흰색 불투명아크릴을 추가함 (그림 86 참조).
- 카메라의 조리개를 조절하여 기포흐름이 선명하게 보이는 심도를 설정하고 기포의 그림자를 연속으로 촬영하여 유속장을 취득함.
- 초고속카메라를 이용하여 초당 50장의 취득률로 영상을 취득하였으며 총 2000장의 영상을 이용하여 분석을 수행하였고, BIV측정구간은 도수발생구간으로 설정하였으며 카메라의 이동이 없는 조건임.

㉔ 실험결과 및 분석

- 수리실험결과는 수위분포와 유속분포를 제시하였으며 압력변동성(P)과의 상관관계를 분석하였음
- ※ 수리실험에서 흐름방향은 좌측에서 우측으로 흐름이 발생하였지만 x축에 맞게 보 끝단인 원점을 기준으로 방향을 회전하여 분석을 실시함.

▷ 수위분포 분석

- 본 연구에서는 하천횡단구조물 하류에 도수가 발생하는 경우 도수구간의 수위(η)분포를 측정하여 그 특성을 분석함.
- 도수구간은 난류에너지가 크게 발생하여 변동성이 상당히 큰 흐름거동이 나타나며 이로 인해 수위변동의 진폭도 크게 발생하는 구간이므로 도수구간의 정확한 순간 수위측정에 한계가 있음.
- 이러한 문제를 극복하기 위해 앞서 제시된 바와 같이 그림자기법을 적용하여 순간수위분포를 획득하였고 그 결과를 분석하였음.
- 수위측정은 case1~10의 실험조건에 대하여 측정하였으며 수위분포 및 변동성을 분석하였고 대표 결과를 제시함.
- 그림 87은 순간수위와 순간수위 값으로부터 얻은 평균수위 분포를 도시하였으며 case 6에 해당함. (그래프에서 회색 점은 각 영상으로부터 획득된 순간수위 분포를 나타내며 회색 원은 시간평균된 수위분포임)
- 도수구간에서 순간수위분포는 크게 변화하는 것으로 나타났으며 도수 전 구간에 걸쳐 변동성이 심하게 발생하는 것을 확인할 수 있음.
- 시간평균 수위를 기준으로 약 0.004 m의 진폭을 가지는 것으로 나타났으며 도수구간 끝부분에서 시간평균수위는 하류수위에 수렴하는 것으로 나타났지만 변동성 성분은 도수구간과 큰 차이를 보이지 않았으며, 이는 도수구간에서 큰 난류에너지로 인한 수위변동성이 측정구간 내에서는 하류로 이동하면서 안정화가 되지 않음을 의미함.

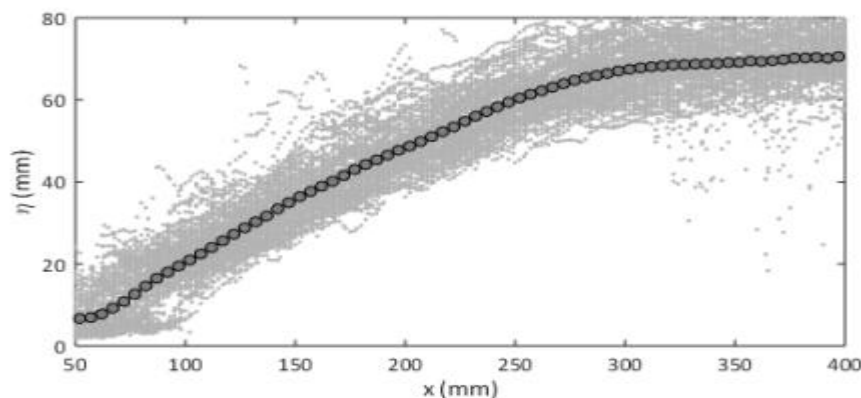


그림 87 순간수위와 시간평균수위 (case6)

- 영상측정 그림자기법을 활용한 case6~9에 해당하는 시간평균 수위분포를 그림 88에 도시하였으며 이는 압력계측이 수행된 지점과 일치함.
- 평균수위분포와 함께 각 지점에서의 수위변동성에 대한 평균제곱근오차(root mean square error, RMSE)를 같이 제시함.
- $(x-x_1)/d_1=0$ 에서부터 증가하기 시작한 수위는 흐름방향을 따라 점점 증가하고 하류수위에 상응하는 수위에 수렴해가는 것으로 나타남.
- Case6의 경우, $(x-x_1)/d_1=30.0$ 까지 수위가 증가하다가 서서히 일정한 값을 보였으며 하류수위가 감소할수록 도수전면부에서 나타나는 급경사구간의 길이가 감소하는 것으로 나타남.
- 수리실험에서는 상·하류 수심비가 감소하면서 도수전면부의 경사는 감소하였지만 도수구간의 길이는 점점 증가하는 특성을 보임.
- 도수구간에서는 수위변동이 격렬하게 발생하며 하류로 이동할수록 점점 약화됨.
- 본 실험에서 수위에 대한 영상측정은 도수구간에 한정하여 측정을 수행하여 대부분 유사한 크기의 수위변동성을 보였음.
- 그러나 하류수위가 감소하면서 수위변동성이 조금 감소하는 것으로 나타났지만 그 크기는 크지 않는 것으로 보임.
- 도수구간에서 발생하는 수위변동은 하천횡단구조물 하류의 물받이공 또는 바닥보호공에 작용하는 힘과 관계가 있을 것으로 판단되며 이에 대한 통계적 분석은 추후 제시하였음.

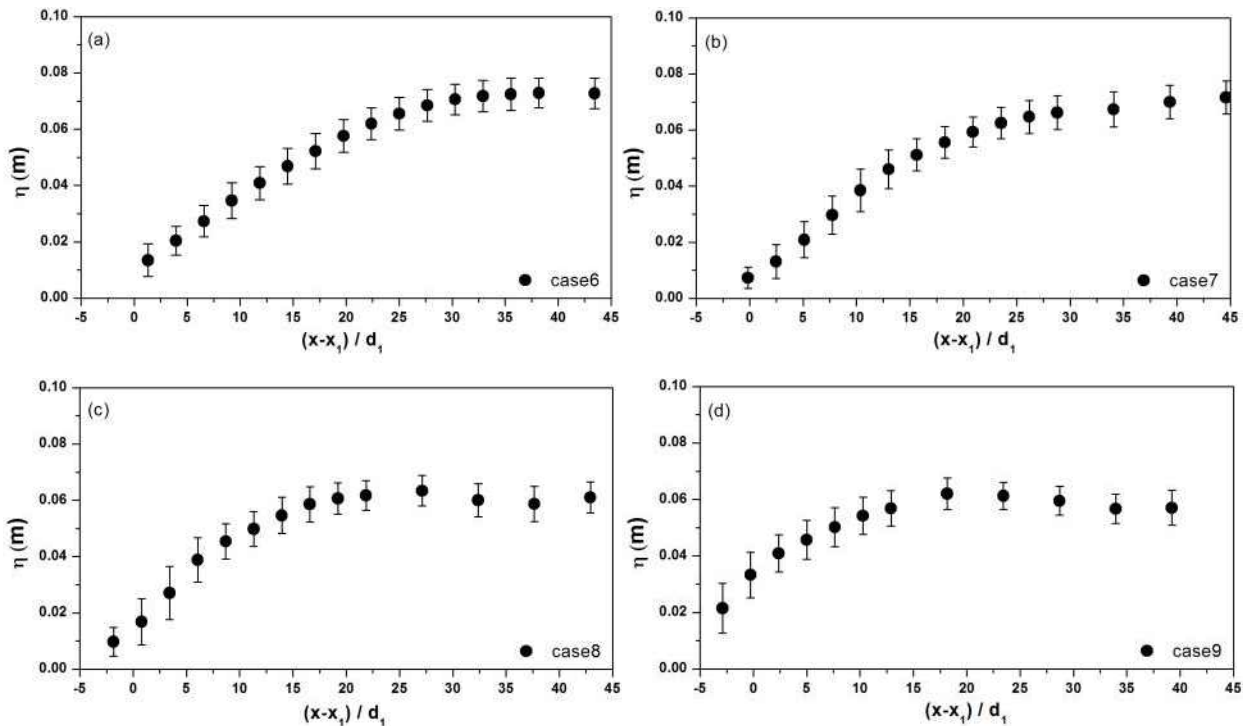


그림 88 시간평균 수위분포 (case6~case9)

- 도수구간에서 수위변동은 유사한 크기를 갖는 것으로 나타났으며, 그림 89는 case1~10의 데이터를 활용하여 도수구간의 수위변동을 도시함.
- 도수시작 위치 $(x-x_1)/d_1=0$ 이전에는 수위변동이 아주 미미하게 발생하였으나 도수가 시작되면서 수위변동성이 급격하게 증가하고 도수구간에서는 $\eta_{rms}/d_1=0.065$ 정도의 평균값을 보임.
- 전반적으로 수위변동의 크기는 도수구간 내에서 유사한 값을 보이는 것을 확인할 수 있음.
- 그림 90에서는 압력계로 측정된 무차원 압력변동이 도시되었는데 수위변동분포와 다른 경향을 보임
- 압력변동은 도수시작지점부터 증가하기 시작하였고 $(x-x_1)/d_1=10.0$ 에서 약 0.1의 최대값을 보였으며 이후 서서히 감소하는 경향을 보임
- 이는 수위에 영향 이외에 속도수두와 관련된 인자들이 복합적으로 작용한 것을 판단됨

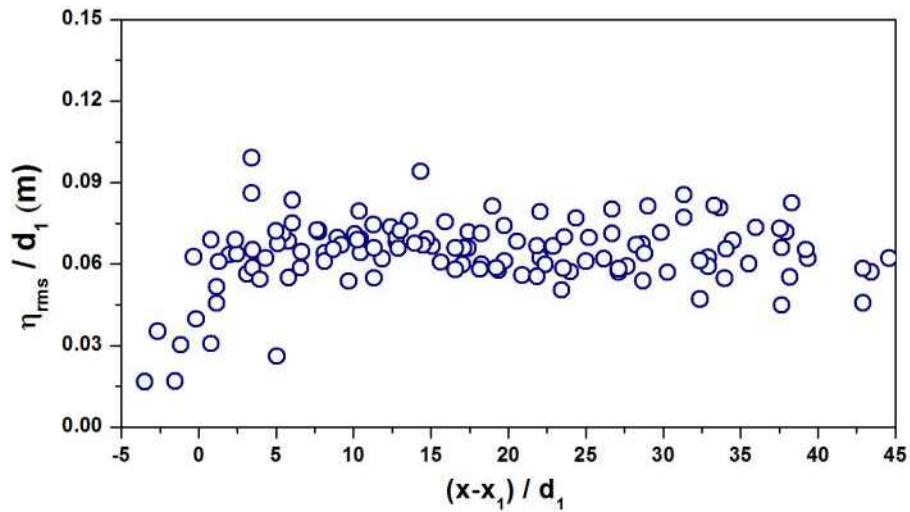


그림 89 수위변동 분포

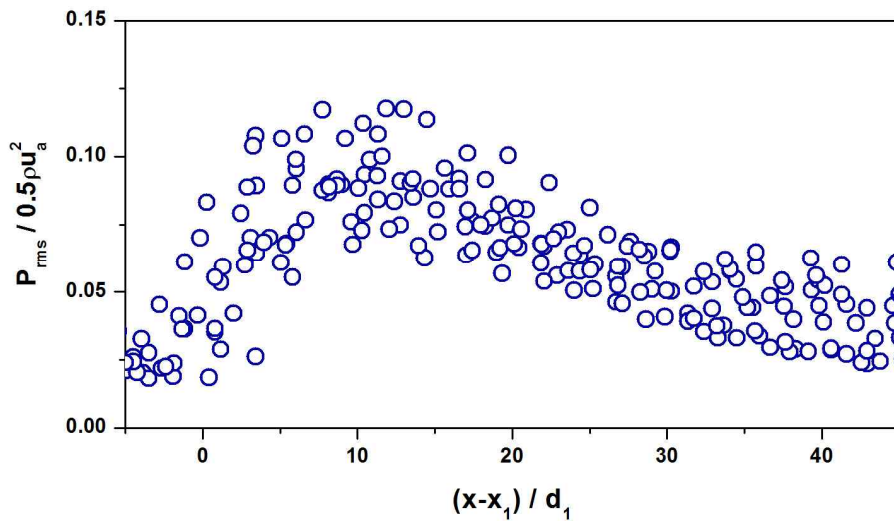


그림 90 압력변동 분포

- 수리실험에서 도수의 위치는 상하류 방향으로 그 위치가 시간에 따라 변화함.
- 그림 91는 case6에 해당하는 시간에 따른 도수시작 위치에 대한 시계열 변화를 분석하였음.
- 도수시작 위치는 시간에 따라 불규칙하게 변화하였고 일정크기의 진동 폭을 나타내었음.
- 그림 92에는 case6~10에 해당하는 조건에서 도수시작 위치에 대한 평균제곱근오차를 계산하여 도시함.
- 결과를 보면 도수시작 위치의 변동은 하류수위가 낮아질수록 상대적으로 크고 하류심이 높은 경우 상대적으로 작은 것으로 나타남 (도수의 전면부 거동은 하류심이 낮은 경우 상대적으로 불안정하다는 것을 알 수 있음).
- Case10의 경우 약 0.003 m의 RMSE값을 보였으며 이는 도수구간이 시간에 따라 상·하류로 이동하는 것을 의미하며 이로 인해 물받이공 및 바닥보호공에 작용하는 압력도 시간에 따라 변화하고 있음을 나타냄.
- 도수구간의 어느 한 지점에서 압력계를 사용하여 압력을 측정하는 경우 도수구간의 강한 난류 성분으로 인한 변동성, 전기적 신호에 의한 변동 추가적으로 도수구간의 상·하류 진동으로 인한 변동성이 포함될 것으로 판단됨.

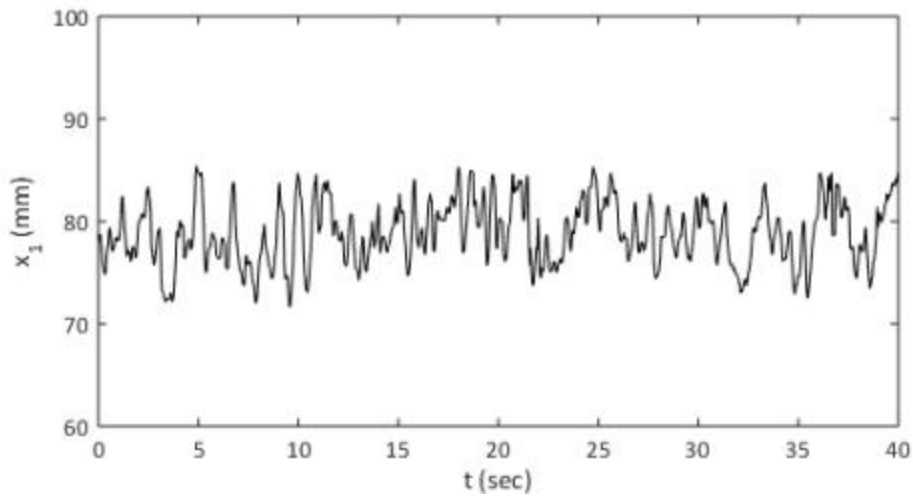


그림 91 도수시작 위치 시계열분포(case6)

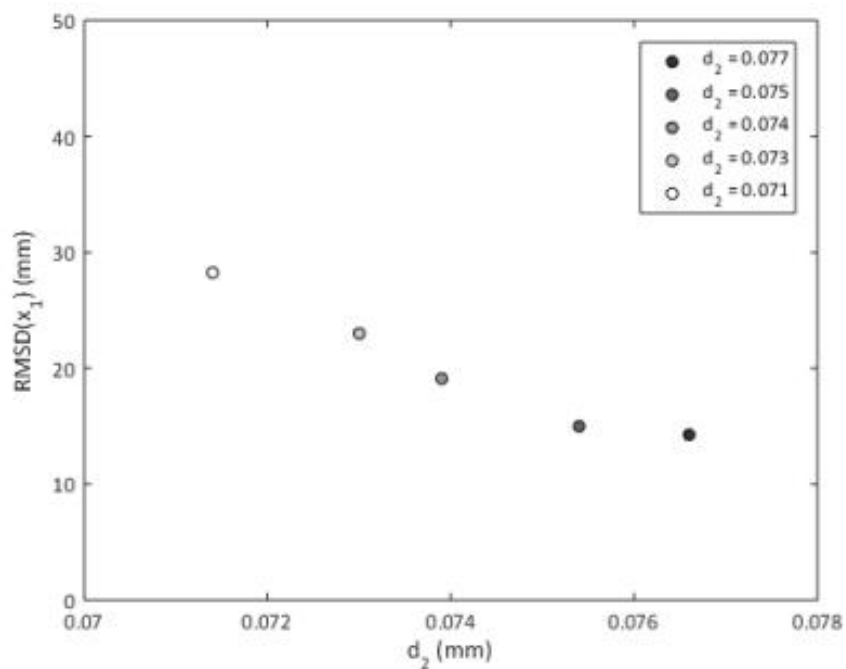


그림 92 도수시작 위치에 대한 RMSE

▷ 도수구간 및 하류부 흐름특성분석

- 도수구간 및 하류에서 PIV기법을 활용하여 유동장을 측정함.
- 유속벡터 산정을 위해서는 MATLAB의 PIVlab을 사용하였으며, 가우시안 분포 필터를 이용하여 이상치를 처리함.
- 또한 정확도를 향상시키기 위해 수위를 추적하여 흐름 외의 구간(수면 위)에서 빛의 산란으로 인하여 발생하는 유속벡터를 제거함(그림 93 참조).
- 이를 통해 압력변동성과의 상관성과도 크게 관련이 있는 것을 확인함.

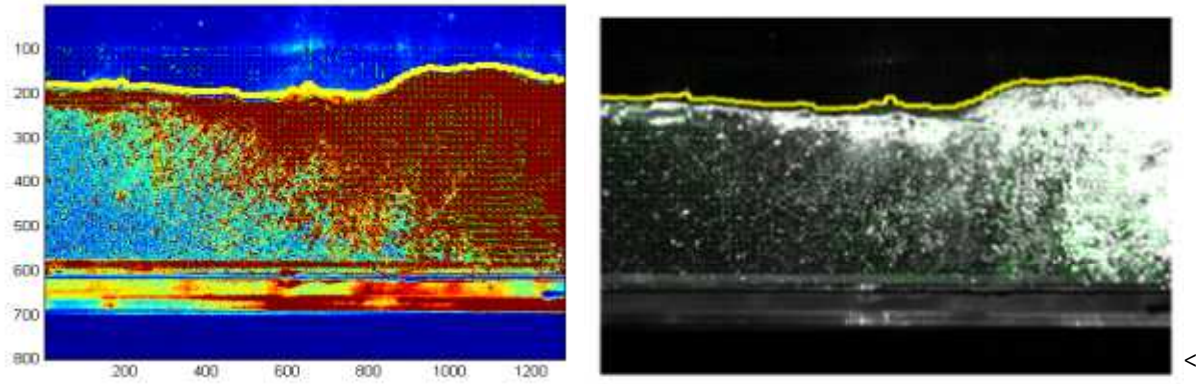


그림 93 PIV기법을 활용한 유동장 측정; 보정전(좌), 보정후(우)

- 대표적으로 case1의 유속자료를 가시화했을 때, 도수의 바닥부분에서 높은 유속이 발생하고 도수구간에서 와 발생을 확인하였으며 PIV 및 BIV 기법으로 도수구간을 측정이 가능
- 전체적으로 수평방향 난류강도가 더 높으며, 특히 바닥부분에서 수평방향 난류강도가 지배적
- 수평방향 난류강도는 강한 접근유속의 영향으로 인해 도수시작부분에서 가장 높으며, 바닥에 가까울수록 난류강도는 증가
- 수직방향 난류강도는 도수구간의 중심부에서 크게 나타났으며, 이는 수위변동에 직접적인 영향을 미치는 것으로 판단됨.
- 압력 측정 결과와 비교해봤을 때, 압력변동에 영향을 크게 미치는 인자는 수평유속일 것으로 판단됨.
- 도수 직하류의 유속은 수평유속이 주로 발생하며 하류로 갈수록 수심방향으로 균일한 경향
- 수평방향, 수직방향의 난류강도 모두 하류로 갈수록 감소하는 경향

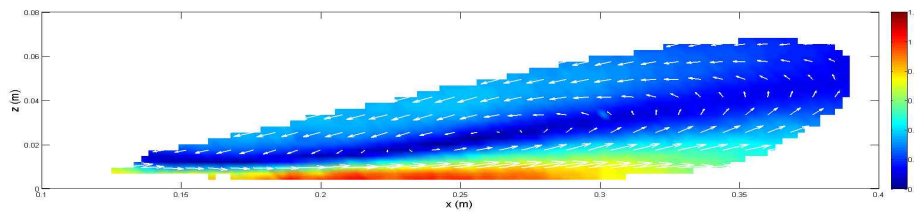


그림 94 유속벡터와 유속($\sqrt{u^2 + w^2}$)

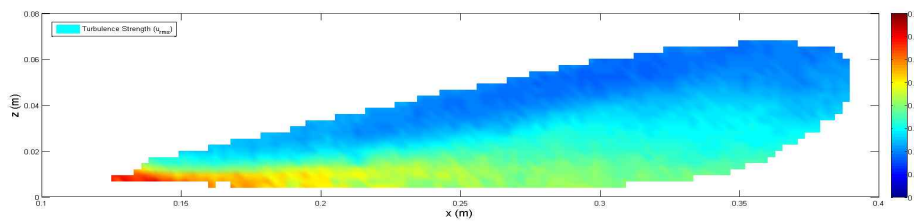


그림 95 수평방향 난류강도

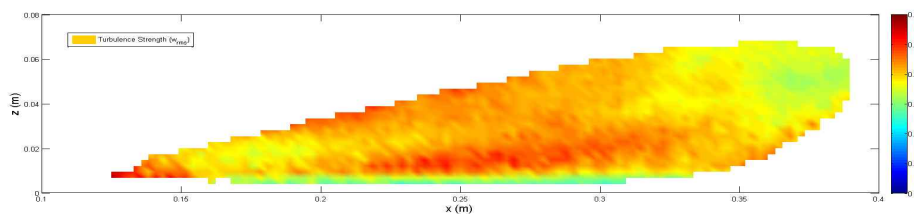


그림 96 수직방향 난류강도

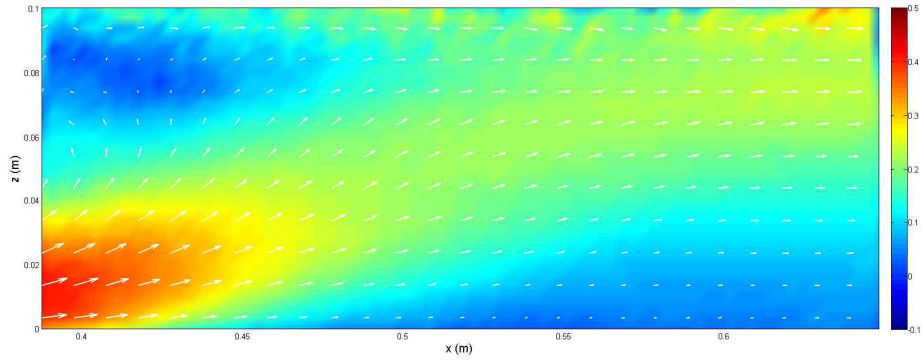


그림 97 유속벡터와 유속($\sqrt{u^2 + w^2}$)

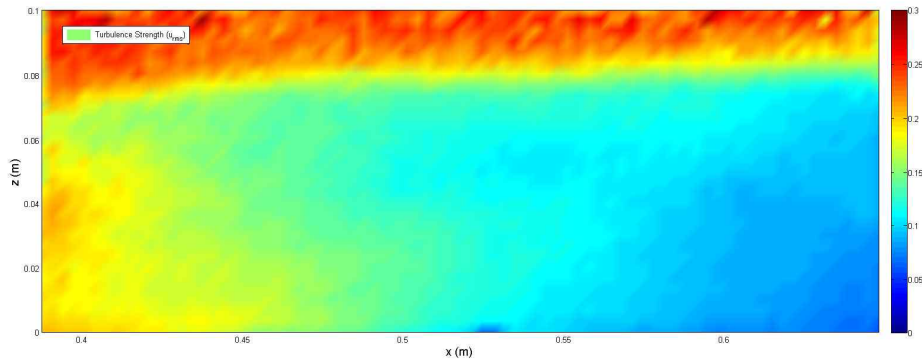


그림 98 수평방향 난류강도

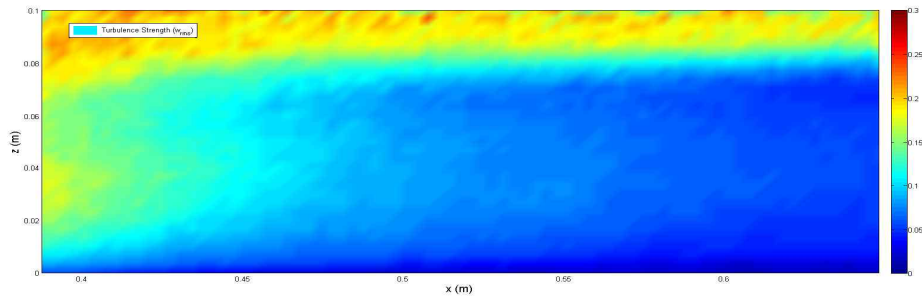


그림 99 수직방향 난류강도

- 그림 100는 바닥근처($z \approx 0.167\text{mm}$)에서의 x방향 시간평균유속을 도시함
- 그림 100(a)를 보면 $(x-x_1)/d_1=10.0$ 근처에서 유속 값이 하류로 이동하면서 점점 감소하는 경향을 나타내고 있고, $(x-x_1)/d_1=30.0$ 을 지나면서 유속 값이 약 $u/u_a=0.035$ 로 매우 작은 유속이 바닥근처에서 발생하는 것으로 나타남.
- $(x-x_1)/d_1 < 30.0$ 구간에서는 바닥근처의 유속이 상대적으로 빠르게 발생하는 것으로 나타났는데, 이는 도수구간에서 기포를 포함한 롤러(roller)가 발생하고 바닥근처에서 강한 흐름이 유발되어 하류로 이동할수록 안정화되어 점점 감소하는 것으로 판단됨.
- 한 개의 대표유량에 대하여 하류심이 변화하였지만 전반적으로 유사한 경향을 보임.
- Case6~15(그림 100(b)~(c) 참조)의 결과에서 바닥근처의 유속은 case1~5에 제시된 경향과 유사하게 나타났지만 하류심이 낮아지는 경우 도수구간을 지나 음의 유속 값이 발생하는 것으로 나타남.
- Case16~20에서는 $(x-x_1)/d_1 > 10.0$ 구간에서 음의 유속분포를 보였고 $(x-x_1)/d_1=40.0$ 을 지나면서 유속이 다시 증가하는 양상을 보임.
- 도수구간을 포함한 하류영역에서는 여전히 복잡한 흐름양상을 보이는 것으로 나타났으며 전반적으로 도수구간을 지나면서 유속이 급격히 감소하며 안정화되는 경향을 보임.
- 하류수심 또는 유입유량이 감소하는 경우 다소 일관되지 않은 흐름특성을 보였다.

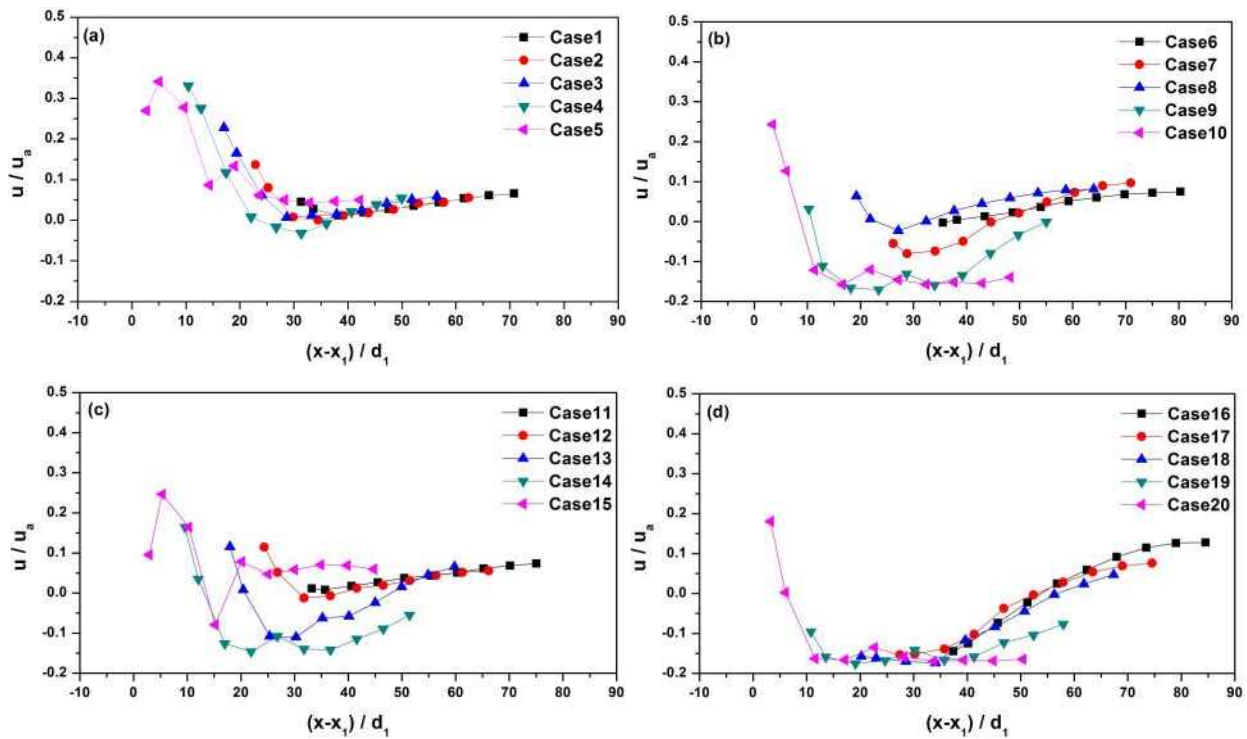


그림 100 PIV기법을 활용한 유동장 측정; 보정전(좌), 보정후(우)

- 그림 101은 바닥근처에서의 수직방향(z) 시간평균 유속분포(w)를 도시함.
- 도수구간 및 하류구간에서 수직방향 유속은 매우 작고 일정한 값을 보이는 것으로 나타남.
- 도수구간에서는 롤러(roller)흐름이 발생하고 와류가 형성되어 수직방향 유속성분이 발생하지만 바닥근처에서는 흐름방향의 유속이 지배적이므로 수직방향 유속은 무시할 정도로 매우 작은 값을 보임.
- 하류구간에서도 수직방향 흐름은 거의 없는 것으로 나타나 도수구간의 롤러영역을 제외하고 흐름방향 유속성분이 지배적인 것으로 확인됨.

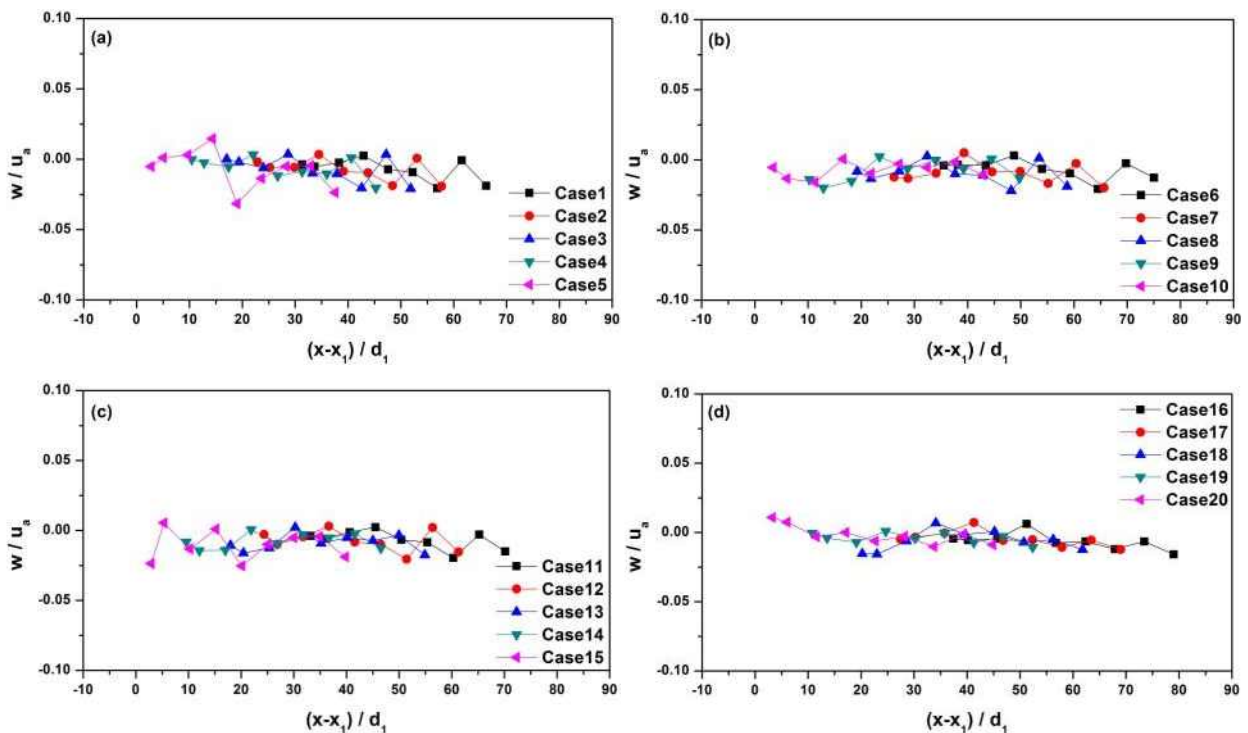


그림 101 바닥근처에서의 평균유속($\bar{w}$) 분포

- 본 연구에서는 횡단구조물 하류의 물받이공 또는 바닥보호공에서 발생하는 압력 변동성과 유

속성분과의 관계를 검토하고자하는 것이 첫 번째 목적임.

- 압력 변동성은 속도수두에 의한 운동에너지 성분에 영향을 받으며 이는 난류성분과 밀접한 관계가 있을 것으로 판단됨.
- 그림 102에는 바닥근처에서 발생하는 흐름방향 난류강도($\overline{u'u'}$)를 도시함.
- 바닥근처에서의 난류성분은 모래하천에서 모래의 이동에 크게 영향을 미칠 뿐만 아니라 예상치 못한 흐름이 발생하는 경우에는 바닥보호공의 안정성과 연관이 있을 수 있음.
- 난류강도는 $(x-x_1)/d_1=10.0$ 정도에서 급격히 감소하는 것으로 나타났으며 $(x-x_1)/d_1=40.0$ 이후에는 바닥근처에서의 난류강도가 매우 작아지고, 상류유량 및 하류수위 변화와 관계없이 유사한 경향을 보이는 것으로 나타남.
- 도수구간의 바닥근처에서는 흐름방향유속이 매우 빠르게 나타나지만 롤러에 의한 와류발생 등 매우 복잡한 흐름이 발생하여 난류성분의 흐름을 증가시키고 이는 바닥근처의 경계에까지 영향을 주는 것으로 판단됨.
- 도수발생에 의해 난류에너지가 소산되면서 바닥근처의 난류강도도 감소하였고 도수구간 이후에서는 매우 작은 값을 보임.

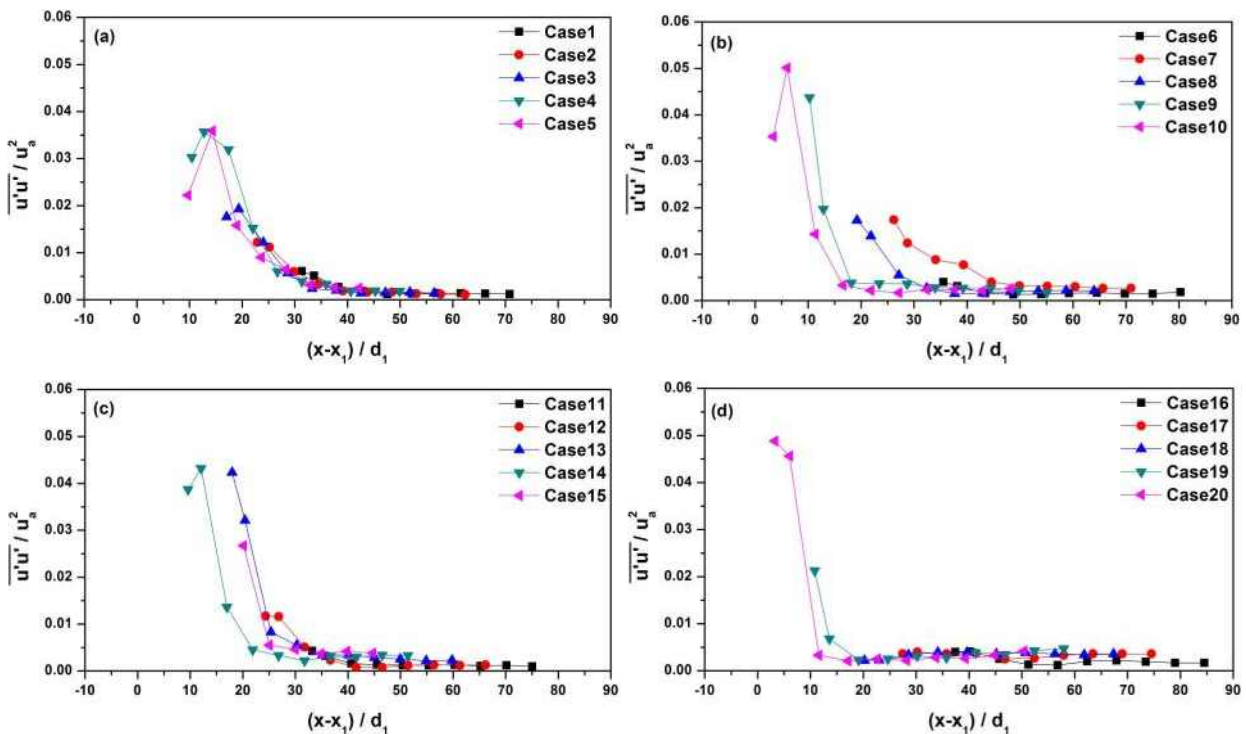


그림 102 바닥근처에서의 난류강도($\overline{u'u'}$) 분포

- 그림 103에서는 수직방향 난류강도($\overline{w'w'}$)를 도시함.
- 수평방향 난류강도와 유사하게 $(x-x_1)/d_1=10.0$ 지점 이후에 감소하는 경향을 보임.
- $(x-x_1)/d_1=30.0$ 을 지나면서 수직방향 난류강도는 무시할 정도로 작은 값을 나타냄.
- 도수구간에서는 강한 와류에 의한 와(eddy)성분이 하류로 전파되고 이러한 복잡한 흐름이 수직방향 난류강도에 영향을 미친 것으로 판단됨.
- 도수구간에서는 앞서 제시된 수평방향 난류강도 뿐만 아니라 수직방향 난류강도도 도수흐름과 밀접한 관계가 있는 것으로 나타났으며 물받이공의 재료파괴 및 바닥보호공 사석의 안정성과 관계가 있는 바닥에 작용하는 압력변동성과의 정량적인 검토가 필요함.

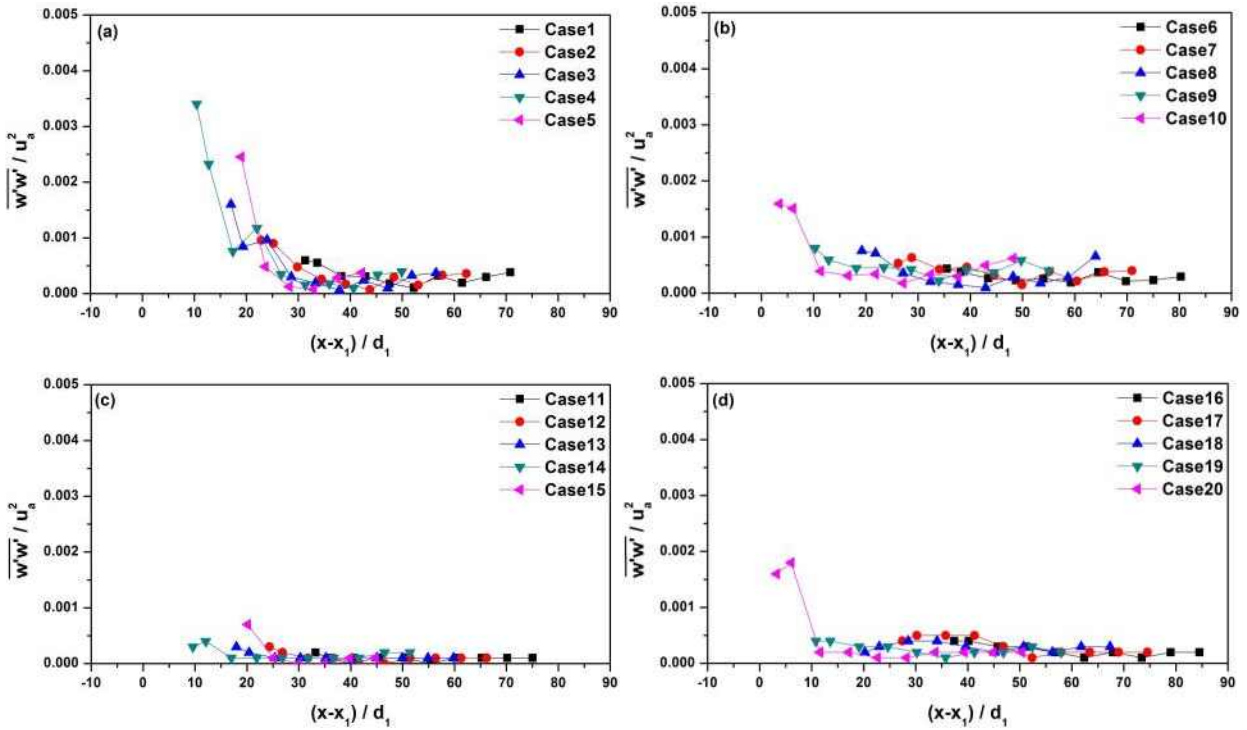


그림 103 바닥근처에서의 난류강도($\overline{w'w'}$) 분포

- 바닥근처에서의 유속성분에 대한 검토결과 흐름방향 평균유속은 일정한 경향을 보이지 않았으며 수직방향 유속성분은 도수구간 및 하류구간에서 매우 작은 흐름을 보임.
- 그러나 난류강도는 도수구간 $(x-x_1)/d_1=10.0$ 에서 가장 큰 값을 보였으며 이후 서서히 감소하여 $(x-x_1)/d_1=30.0\sim40.0$ 지점 이후에는 일정한 값을 보임.
- 본 연구의 PIV기법으로는 $(x-x_1)/d_1<10.0$ 영역에서 측정조건의 한계로 바닥근처의 유속성분을 획득하지 못하였으나 하천횡단구조물의 안정성에 영향을 줄 수 있는 영역은 도수영역으로 이에 대한 검토가 필수적임.
- 본 연구에서는 각 지점의 유속성분을 수심방향으로 평균하여 값을 이용하여 검토를 수행하였으며, 바닥근처의 유속성분 검토결과 난류강도가 압력변동성분과 상관성이 높을 것으로 판단되어 흐름 및 수직방향에 대한 난류강도를 검토함.
- 그림 104에는 흐름방향 난류강도를 도시하였으며 바닥근처의 흐름방향 난류강도와 유사하게 $(x-x_1)/d_1=10.0$ 정도부터 하류로 이동할수록 난류강도가 감소하는 경향을 보임.
- 수심방향으로 적분된 흐름방향 난류강도 역시 상류유량 또는 하류수위변화와 관계없이 일정한 경향을 보임.
- 특히 바닥근처에서의 난류강도보다 더욱 명확하게 그 경향을 확인할 수 있음.
- 그림 105에는 수직방향 난류강도를 도시하였으며, 수직방향 난류강도 역시 흐름방향 난류강도와 같이 $(x-x_1)/d_1=10.0$ 이후에 서서히 감소하는 경향이 나타남.
- 특히 바닥근처의 수직방향 난류강도보다 더욱 뚜렷한 경향성이 확인되며 하류수위에 관계없이 일정한 값을 보이는 것으로 나타남.
- 수심 적분된 난류강도 값이 바닥근처에서 측정된 난류강도 값의 경향성이 더욱 명확하게 나타나고 있음을 확인하였고 도수구간 및 하류구간에서 유체영역의 수심적분 난류강도가 중요한 설계인자로 활용될 수 있을 것으로 판단됨.

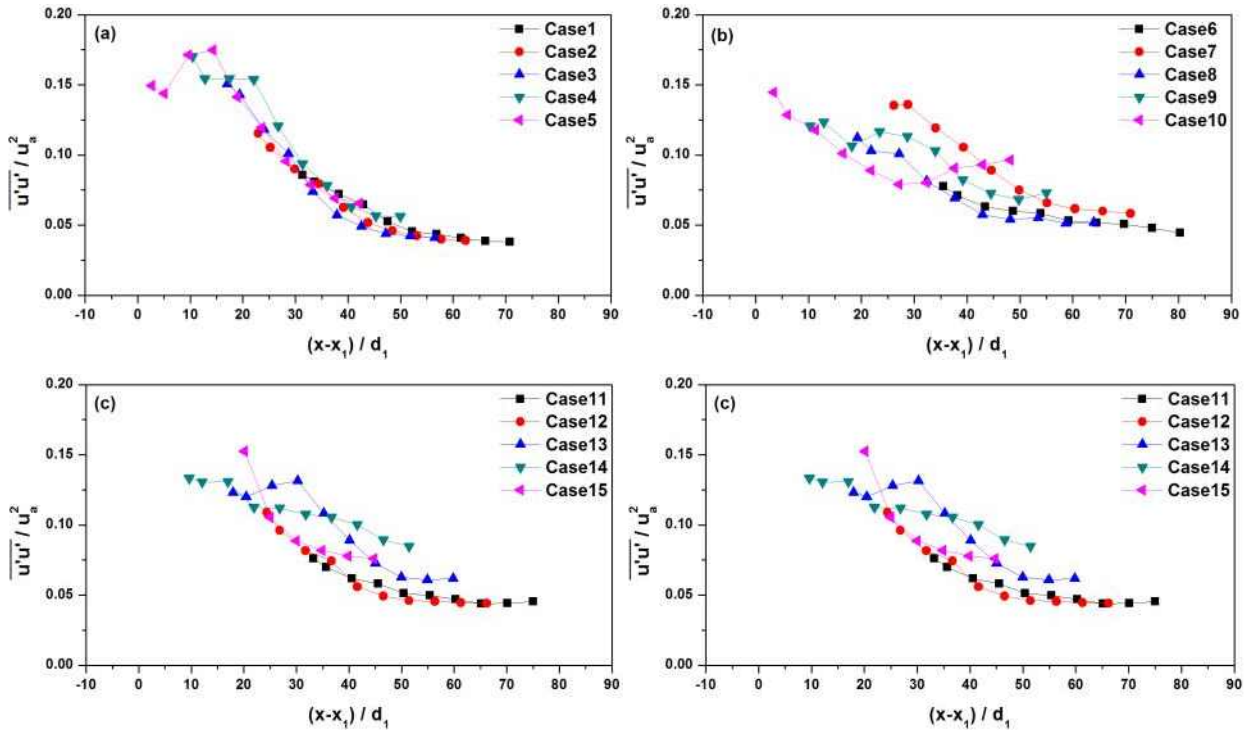


그림 104 수심적분 난류강도($\overline{u'u'}$) 분포

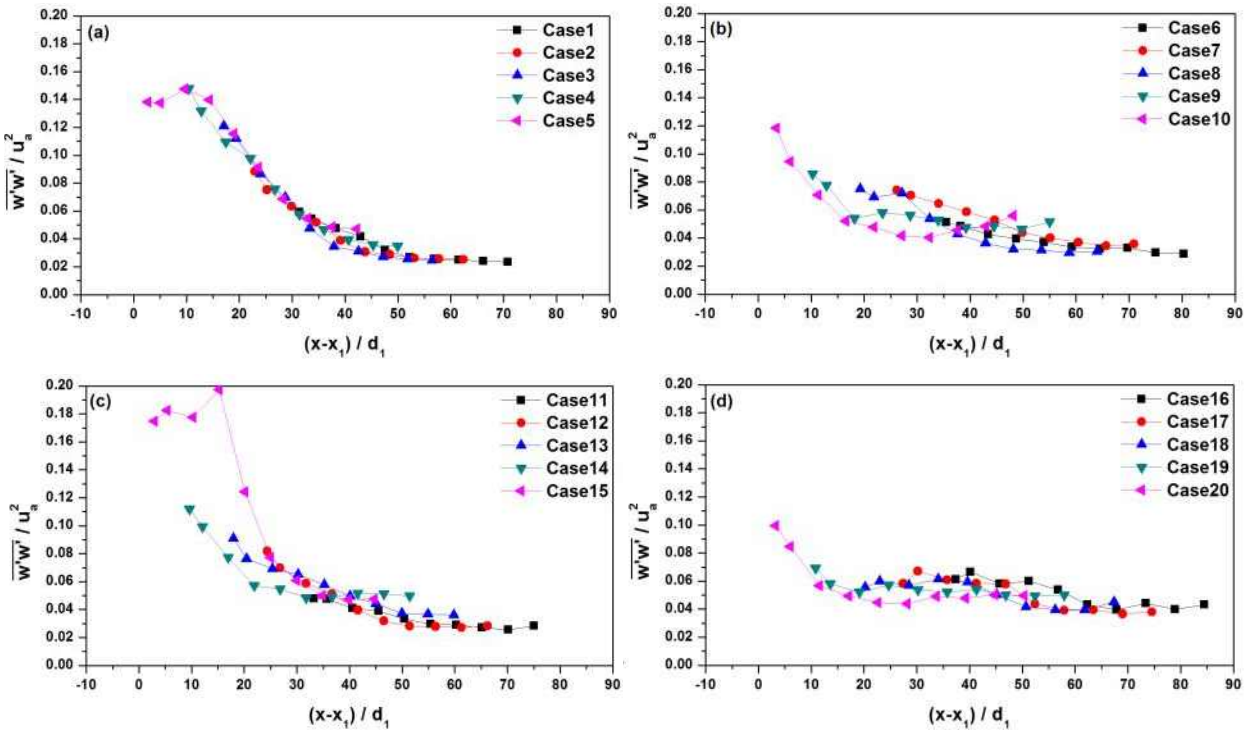


그림 105 수심적분 난류강도($\overline{w'w'}$) 분포

▷ 도수구간 흐름특성분석

- 도수구간에서는 BIV기법을 활용하여 분석을 수행하였으며 평균수위 및 그림자영역을 산정하여 경계를 설정하고 분석에 적용함 (그림 106 참조).

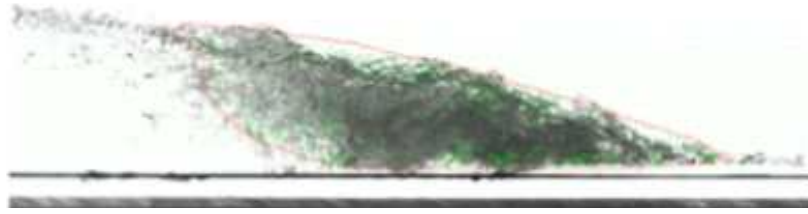


그림 106 수심적분 난류강도($\overline{w' w'}$) 분포

- 도수구간에서 BIV기법은 바닥근처 유속측정이 불가능하며 롤러영역에서만 기포를 추적하는 방식으로 유속취득이 가능함.
- BIV기법은 case1~10에 대하여 수행되었으며 도수구간에서는 수심 적분된 평균유속 및 난류강도에 대한 검토를 수행함.
- 흐름방향 평균유속 분포를 보면 case1~5의 결과에서는 도수구간에서 흐름방향을 따라 일정한 값을 보였으며, case6~10의 결과에서는 다소 불규칙한 분포를 보이는 것으로 나타남.
- 수직방향 평균유속은 case1~5의 경우에는 하류로 이동할수록 증가하는 경향을 보였지만 case6~10의 결과에서는 랜덤한 경향이 나타나고 있음을 확인할 수 있음.
- 이는 도수구간에서 기포영역은 매우 복잡한 흐름특성을 보이며 평균유속을 변수로 한 경향성은 찾아보기 어려운 것으로 나타남.

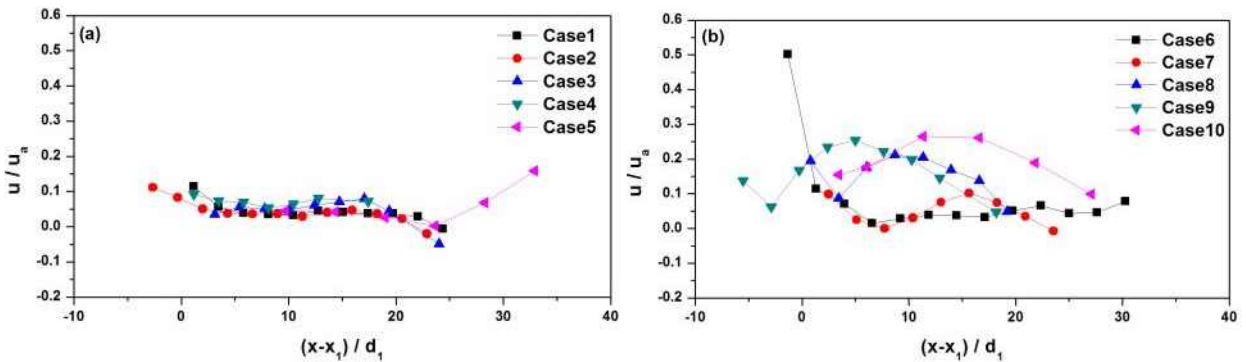


그림 107 수심적분 평균유속($\bar{u}$) 분포

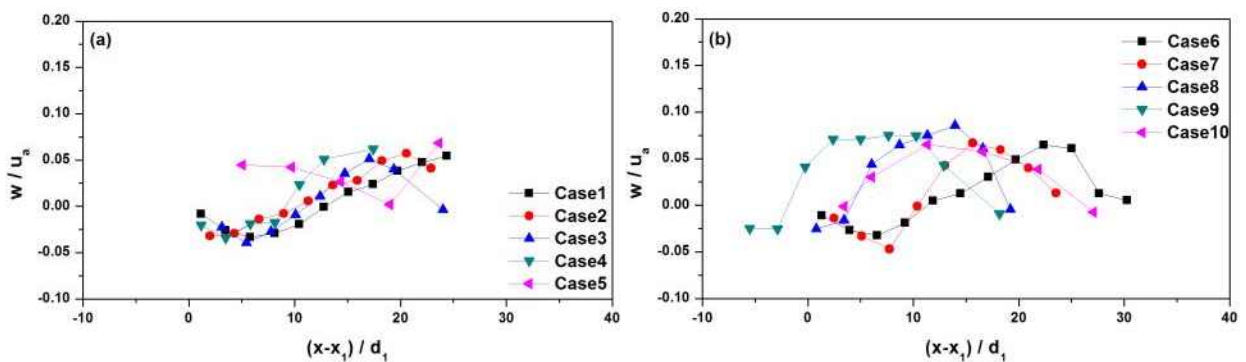


그림 108 수심적분 평균유속($\bar{w}$) 분포

- 도수구간에서는 난류운동에너지가 크게 발생하는 구간이며, 도수가 시작되면서 난류강도가 급격히 증가하고 이후 서서히 감소하는 경향을 보임.
- 이는 PIV로 측정된 도수구간 및 하류의 바닥근처에서 난류강도와 수심적분 난류강도는 같은 경향을 보였으며 역시 수심방향으로 적분된 흐름방향 난류강도와 수직방향 난류강도도 동일한 경향을 나타냄.
- 이에 도수구간의 기포흐름에서 난류강도는 수심 적분된 난류강도를 사용하였으며 다시 말해 롤러영역 기포흐름이 발생하는 지점에서의 수심적분 결과를 분석에 적용함.
- 도수구간의 기포영역에서 흐름방향 및 수심방향 난류강도는 유체영역에서 나타난 경향 즉 흐

름방향을 따라 감소하는 특성을 보임.

- 도수구간의 BIV결과에서 $0 < (x-x_1)/d_1 < 10.0$ 구간에서도 상류로 이동할수록 난류강도가 더욱 증가하는 것으로 나타남.
- 그러나 이 구간은 낮은 수심에서 바닥 레이어를 따라 흐름방향이 지배적인 구간과 기포구간으로 구분될 수 있는데 본 연구에서 측정조건의 제약으로 $0 < (x-x_1)/d_1 < 10.0$ 구간의 바닥 레이어 부분을 측정하기에는 한계가 있음.
- 그러므로 $0 < (x-x_1)/d_1 < 10.0$ 구간에서 난류강도가 상류로 이동할수록 증가한다고 판단하기에는 어려움이 있지만 $(x-x_1)/d_1 > 10.0$ 을 지나면서 하류로 이동할수록 도수구간 및 하류영역에서 PIV기법 및 BIV기법을 활용한 결과의 경향성은 잘 일치한다고 할 수 있음.
- 추가적으로 현재까지 유체영역과 기포흐름영역의 유속성분을 분리하여 검토하였지만 도수구간의 어느 한 지점에서 유체영역과 기포영역이 측정되는 구간은 이를 고려한 수심적분 난류강도 값을 사용하는 것이 타당하다고 판단되며 이에 대한 검토도 필요하다고 판단됨.

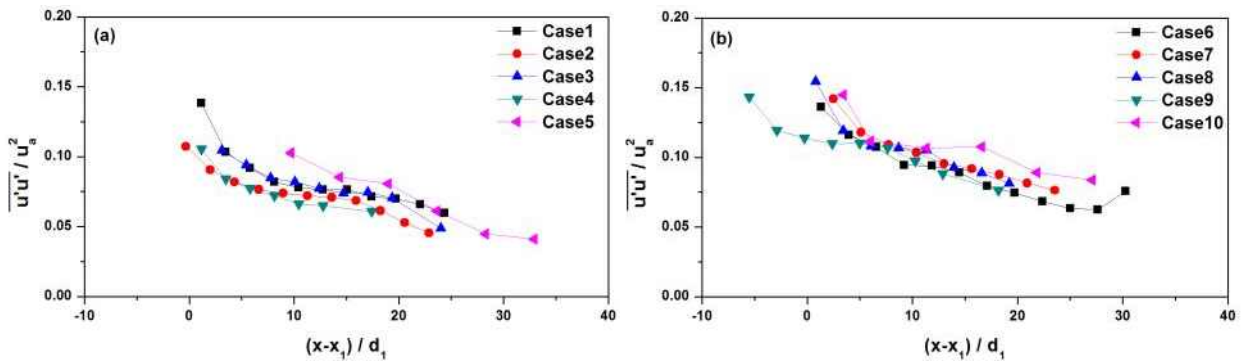


그림 109 수심적분 난류강도($\overline{u'u'}$) 분포

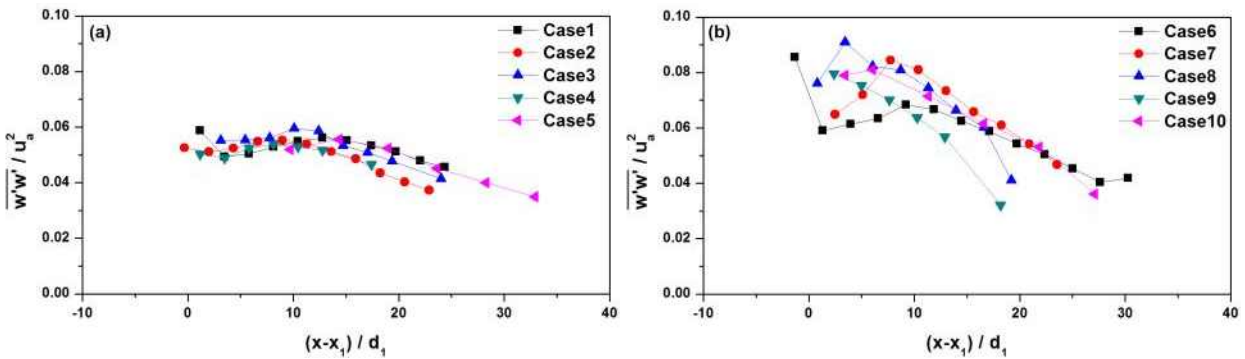


그림 110 수심적분 난류강도($\overline{w'w'}$) 분포

▷ 상관관계

- 본 연구에서는 도수구간에서 물받이공 및 바닥보호공에 작용하는 응력과 수리학적 인자들 간의 상관관계를 파악하기 위한 것으로서 도수구간에서 기포발생으로 인한 유속, 수위 측정의 어려움으로 인한 한계를 극복하고자 함.
- 측정치의 값이 전반적으로 안정적인 PIV를 이용하여 도수 직 하류에서 압력변동(P')과 수리학적 인자(u , w , u' , w' , $-u'w'$ (레이놀즈응력: Reynolds Stress)), u^* (전단속도: shear velocity), I (난류강도: Turbulence Intensity)와의 관계 분석을 수행함.
- 관계도는 고려하는 변수의 단위가 다르기 때문에 표준화된 상관계수인 Correlation coefficient를 활용함

$$\overline{u'u'} = \frac{1}{T-1} \sum_{t=1}^T (u_t - \bar{u})^2 \quad (8)$$

$$-\overline{u'w'} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (u_t - \bar{u})(w_t - \bar{w}) \quad (9)$$

$$u^* = \sqrt{\tau/\rho} = \sqrt{\nu(\partial \bar{u}/\partial y)|_{y=0}} \quad (10)$$

$$I = u_{rms}/\bar{u} \quad (11)$$

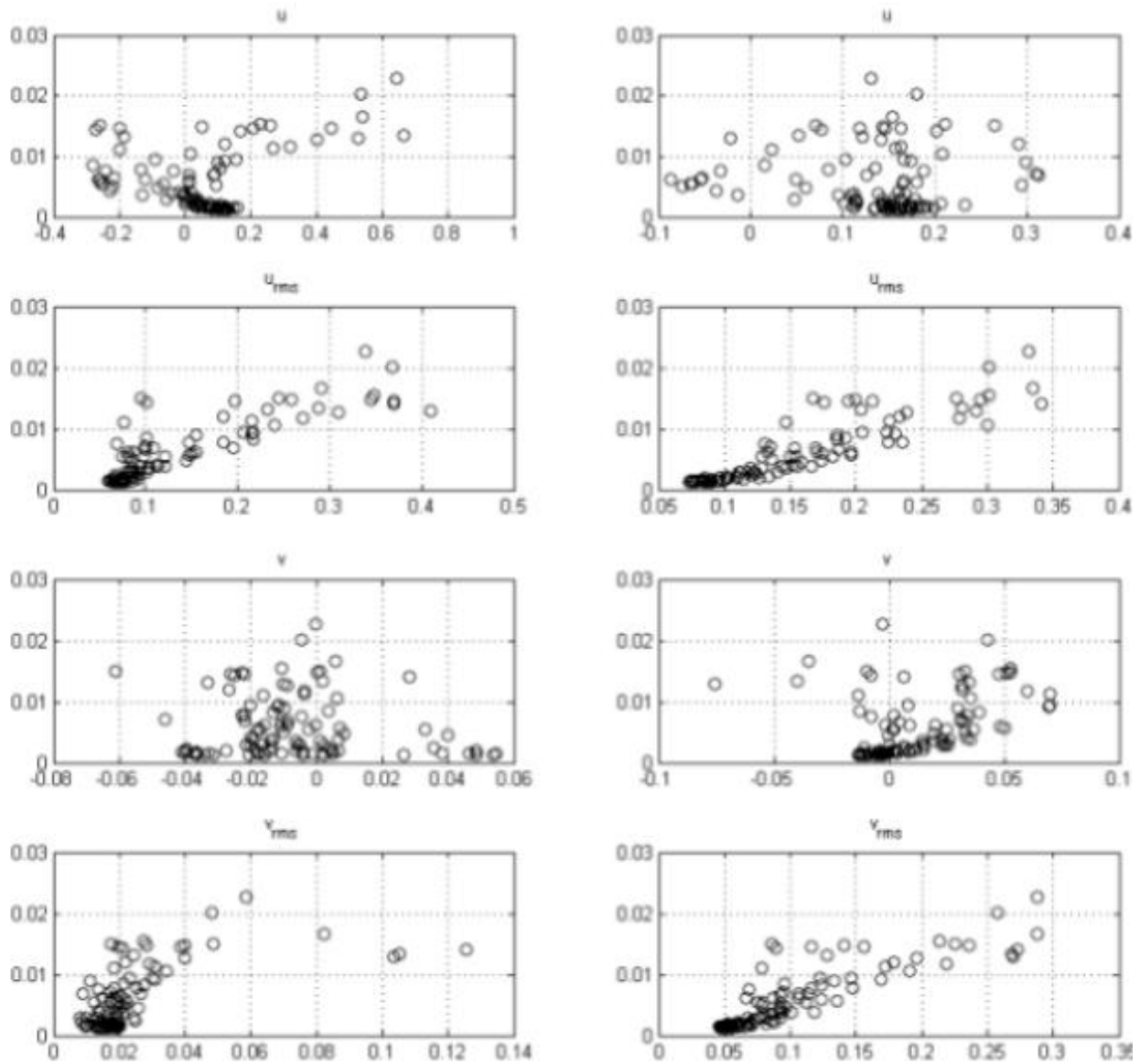


그림 111 바닥부근의 유속성분과 수심적분 유속성분과의 경향성 비교 (단위: m)

- 그림111과 같이 바닥 유속성분(좌측 그래프)과 수심방향 적분 유속성분(우측 그래프)대한 압력변동과의 관계를 나타냈으며, y축은 압력변동성분을 x축은 유속관련 변수의 값을 나타냄.
- 압력변동은 u_{rms} 와 w_{rms} 와 같은 난류강도와 연관성이 높은 것으로 보이며, 특히 w_{rms} 의 바닥부근의 값 및 수심평균 값의 경향은 일정한 것으로 나타났다. 따라서 u_{rms} 가 압력변동을 결정하는 주요한 인자로서 판단된다.
- 분석결과 압력변동은 난류강도와 0.895의 상관계수를 가지므로 연관성이 있는 것을 나타냄 (그림 112 참조).
- 레이놀즈 응력은 0.862로 두 번째로 상관성이 높게 나타났고, 다음으로 전단속도가 0.652, 수면변동이 0.348로 크게 나타남.
- 레이놀즈 응력과 전단속도는 모두 난류강도와 밀접한 상관관계를 나타내는 인자들이므로, 중복인자라고 할 수 있음.

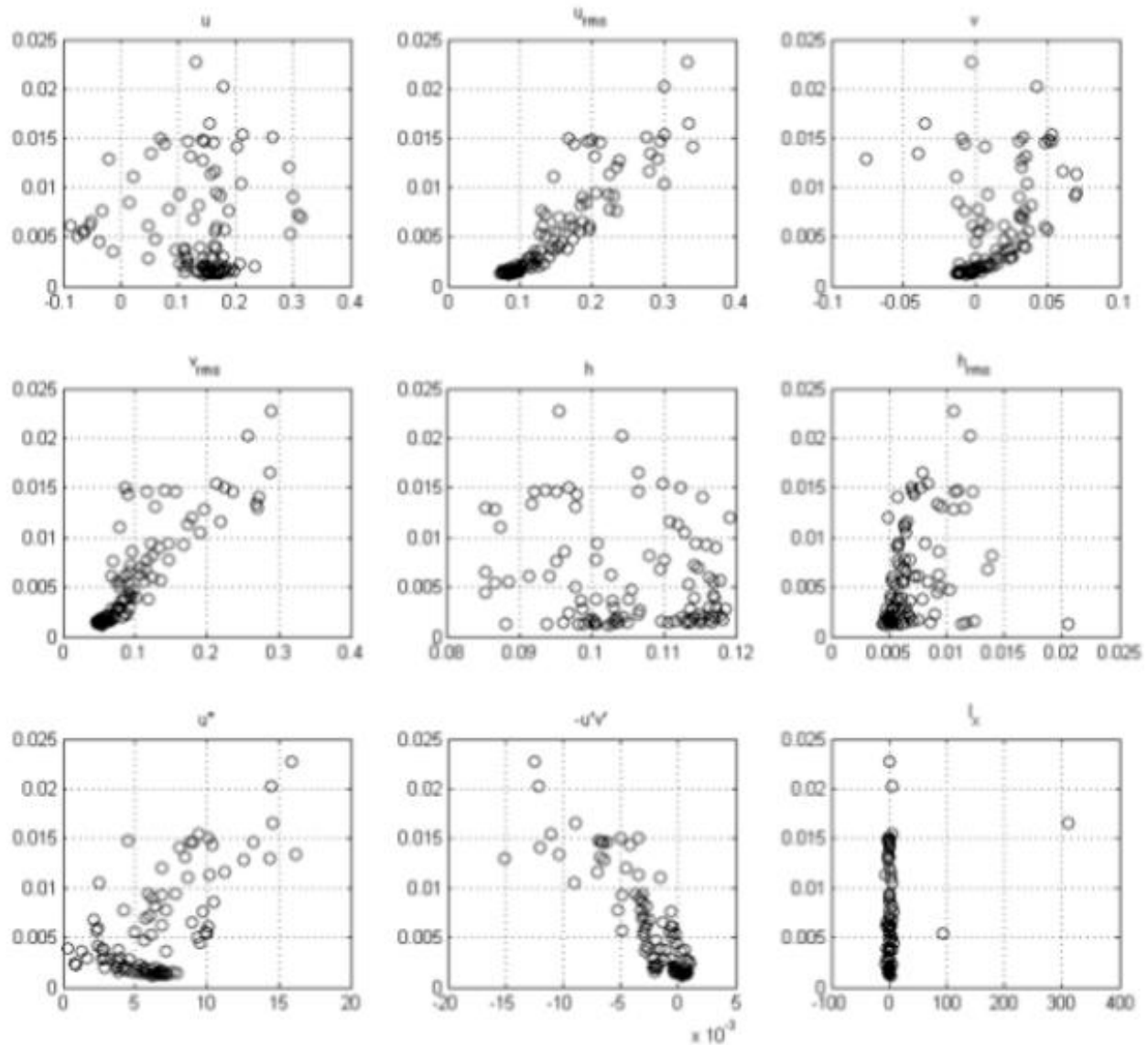


그림 112 PIV결과를 활용한 도수구간 및 하류의 압력변동과 수리학적 인자들의 상관성

- 도수구간을 BIV기법을 이용하여 도출한 유속성분에 대한 압력변동과의 상관관계 분석결과를 그림 113에 나타냄.
- 그림112과 달리 모든 변수에서 약한 상관성을 나타내는 것을 확인함.
- 이는 바닥보호공에 직접적인 영향을 미치는 바닥부분 유속을 측정할 수 없었기 때문인 것으로 보이며, 그림 111과 같이 도수구간에는 접근유속이 지배적인 영향을 미치는 구간이 존재하는데, 이 부분은 기포가 포함되어 있을 뿐만 아니라 매우 작은 레이어를 형성하여 PIV와 BIV 기법 모두 활용하기가 어려움.

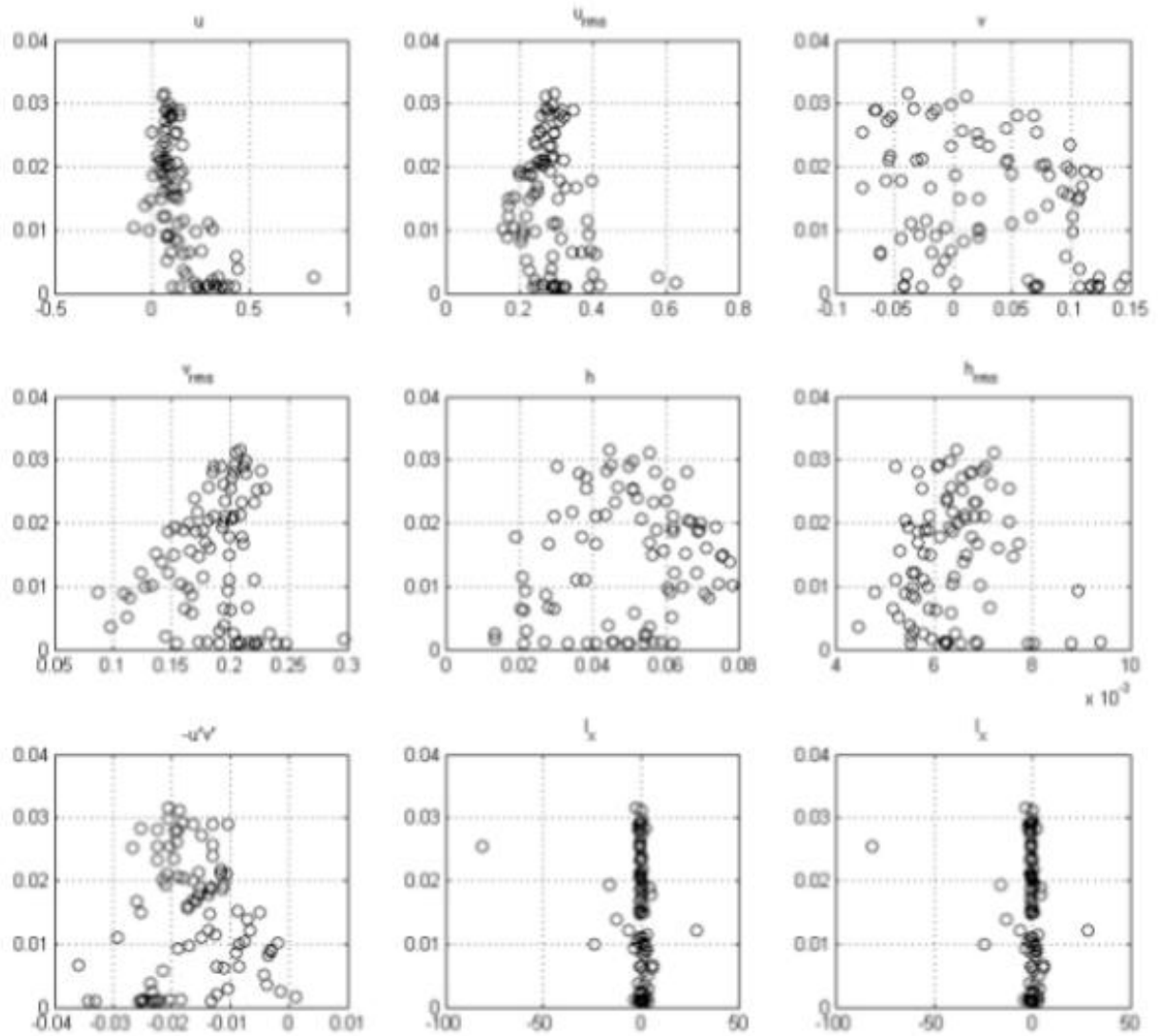


그림 113 도수 구간의 압력변동과 수리학적 인자들의 상관성

- 유체 및 기포영역의 흐름을 PIV와 BIV기법으로 분석하였고 흐름방향 난류강도가 보 하류의 안정성과 관련이 있는 압력변동성과 상관관계가 가장 높은 것으로 나타남.
- 그림 114에 앞서 언급한바와 같이 BIV기법과 PIV기법으로 측정된 난류강도를 같이 도시하였으며 도수구간에서 기포영역과 유체영역이 있는 지점에서는 전체수심에 대하여 적분하여 그 값을 제시함.
- 도수구간 및 하류영역에 걸쳐 PIV기법과 BIV기법이 적용된 결과를 보면 전반적으로 연속적인 결과를 보여주고 있으며 $(x-x_1)/d_1=10.0$ 이후에 감소하는 경향이 잘 나타남.
- 그러나 case6~10의 경우에는 도수 하류부 $30.0 < (x-x_1)/d_1 < 40.0$ 구간에서 경우 다소 불연속적인 경향이 있었지만 그 경향은 잘 일치함.
- 각 유량조건에 대하여 데이터를 분석할 결과 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있음.

$$\frac{\overline{u'u'}}{u_a^2} = \lambda u_a \exp\left(-0.014 \times \frac{(x-x_1)}{d_1}\right) \quad (13)$$

여기서, λ 는 0.7이다.

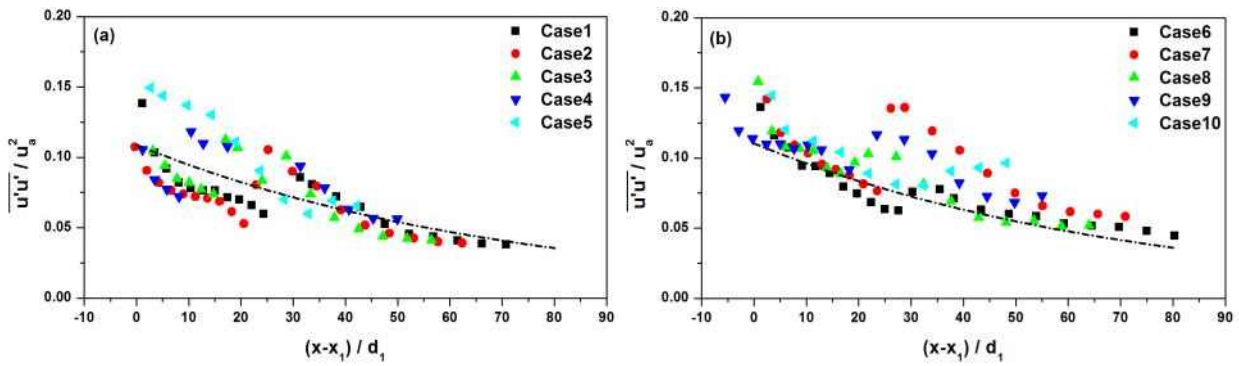


그림 114 수심적분 난류강도($\overline{u'u'}$) 분포

- 최대 압력이 발생하는 지점 $(x-x_1)/d_1=10.0$ 에서 난류강도와 설계인자(상하류수심비, Fr수)들을 최적화하여 예측식 도출

$$\log\left(\frac{u_{rms}}{\sqrt{gH_d}}\right) = -3.671 \log\left(\frac{H_d}{H_u}\right) + 3.01 \log(Fr) - 12.71 \quad (14)$$

- 상·하류 수심비가 증가할수록, Fr수가 증가할수록 난류강도가 증가
- 하류수심이 증가할수록 난류강도가 증가하는 경향이 있음.
- R^2 값은 0.7929의 상관정도를 나타냄.

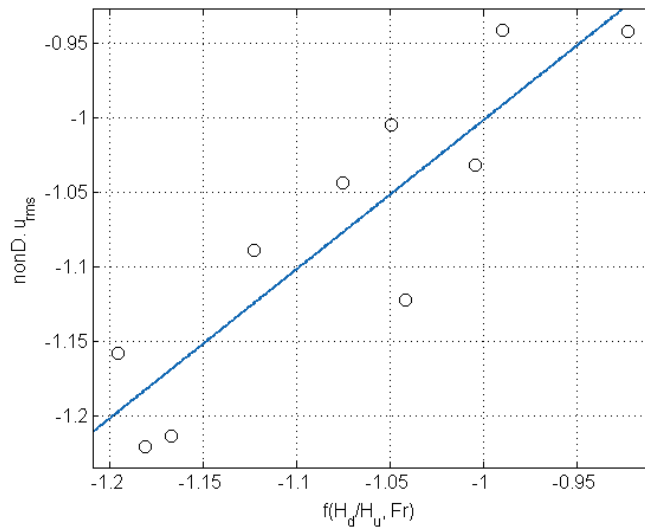


그림 115 난류강도 vs. 상하류수심비, Fr수의 관계도

▷ 압력변동성 검토

- 그림 115는 흐름방향에 따른 압력변동성을 제시함.
- Case1~10의 경우 전 지점에 대하여 압력이 측정되었으나 case11~20의 경우에는 도수 하류부를 중심으로 압력이 측정됨.
- 압력변동성은 도수구간 이전에는 아주 작은 값을 보였고 도수가 시작되면서 급격히 증가하는 것으로 나타남.
- 이후 $(x-x_1)/d_1=10.0$ 지점에서 최대값을 나타냈으며 이후 서서히 감소하는 경향을 보임.
- 도수 하류부만 측정된 case11~20에서도 $(x-x_1)/d_1=10.0$ 지점을 기준으로 감소하는 경향이 동일하게 나타남.
- 이러한 결과는 앞서 난류강도의 결과와 유사한 결과를 나타내는 것으로 확인됨.
- 상관관계 분석결과 흐름방향 난류강도가 상관관계가 가장 높은 것으로 나타났으며 $(x-x_1)/d_1=10.0$ 이후의 경향도 잘 일치하는 모습을 보임.
- 난류흐름에서 압력변동성은 Poisson방정식을 이용하여 순간유속성분으로부터 구할 수 있음.
- 만약 난류성분이 균질(homogeneous)하고 등방성(isotropic)이라고 가정한다면 압력 변동성은

다음과 같이 나타낼 수 있음.

$$\sqrt{p'^2} = \alpha \rho u'^2 \quad (14)$$

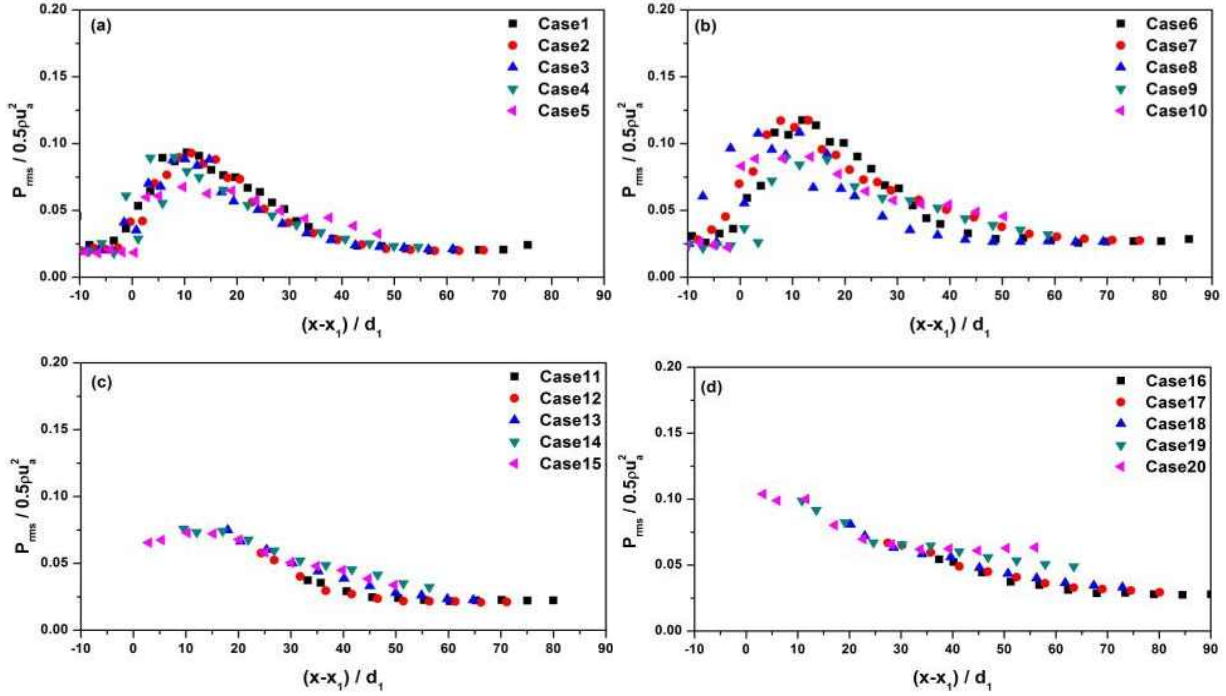


그림 116 압력변동(P_{rms}) 분포

- 접근유속의 영향이 급격하게 감소하여 난류에너지가 크게 발생하면서 수심 적분 유속값이 바닥유속과 비슷한 경향을 나타내는 지점에서는 난류강도와 상관성이 나타나는 것을 확인함.
- 또한 압력 변동성 분석결과 최대 압력 변동을 보이는 지점은 $(x-x_1)/d_1=10.0$ 로 나타났으며 하상유지공의 설계에 이를 기준으로 활용이 가능할 수 있을 것으로 판단됨.
- 그림 116에 압력변동과 난류강도의 관계도를 나타냈으며, R^2 값은 0.8821로 나타남.
- 압력변동과 난류강도의 관계식은 다음과 같이 제시함.

$$\log(P^*) = 2.2125 \log(U^*) - 3.0969 \quad (15)$$

여기서, 압력변동의 무차원 변수 $P^* = \frac{p_{rms}}{\rho u_a^2/2}$, 난류강도의 무차원 변수 $U^* = \frac{u_{rms}}{u_a}$ 이다.

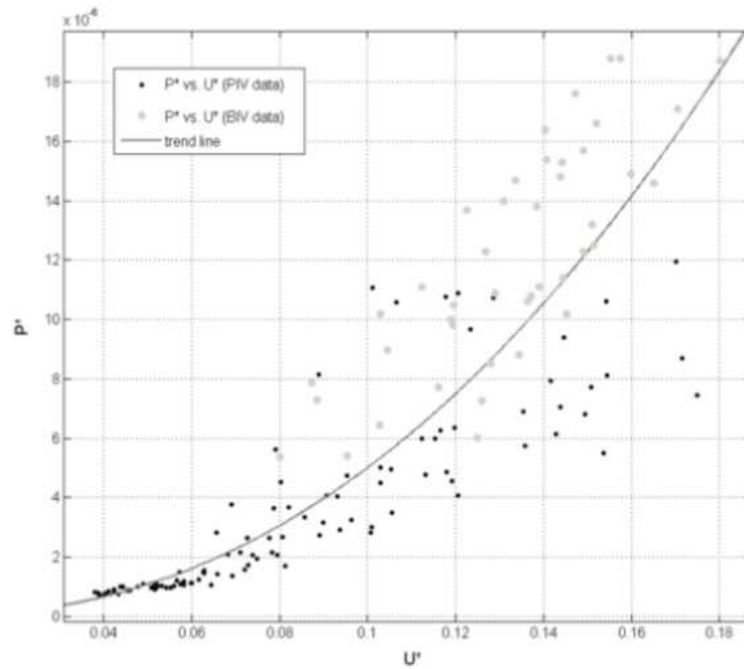


그림 117 압력변동과 난류강도의 관계도

▷ 피로파괴 방법론 제시

- 피로는 일반적으로 철골구조물에 중요한 고려사항이나 콘크리트 구조물에서도 반복하중에서 피로를 나타냄
- 일반적으로 물질의 파괴는 정적강도의 항복강도보다 훨씬 더 낮은 응력 조건에서 피로에 의해 발생
- 작은 결함 또는 절단이 본체의 표면 또는 내부에 발생되며, 이 결함부분에서는 응력의 집중으로 인해 응력이 크게 발생하며, 이로 인해 균열이 성장
- 구조물의 온전한 부분도 감소된 응력저항면적으로 인해 작용응력에 견딜 수 없음.
- 피로강도는 일반적으로 주어진 횟수동안 반복적으로 지지될 수 있는 정적 강도의 비율로 정의되며, 이를 피로수명곡선으로 나타냄
- 주기, 진폭의 도출을 위해 압력값에 대해 FFT 분석을 수행하였으며, 각 압력측정 지점에서 최대 진폭과 주기를 나타냄(그림 119).
- 일반적으로 최대압력변동 지점에서 약 9Hz의 주기성이 강하게 나타남(그림118 참조).

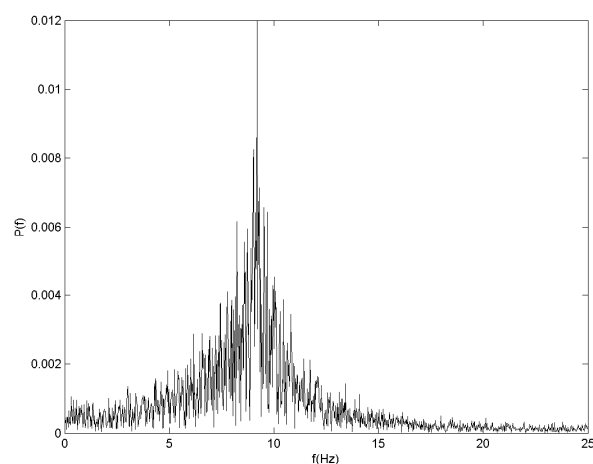
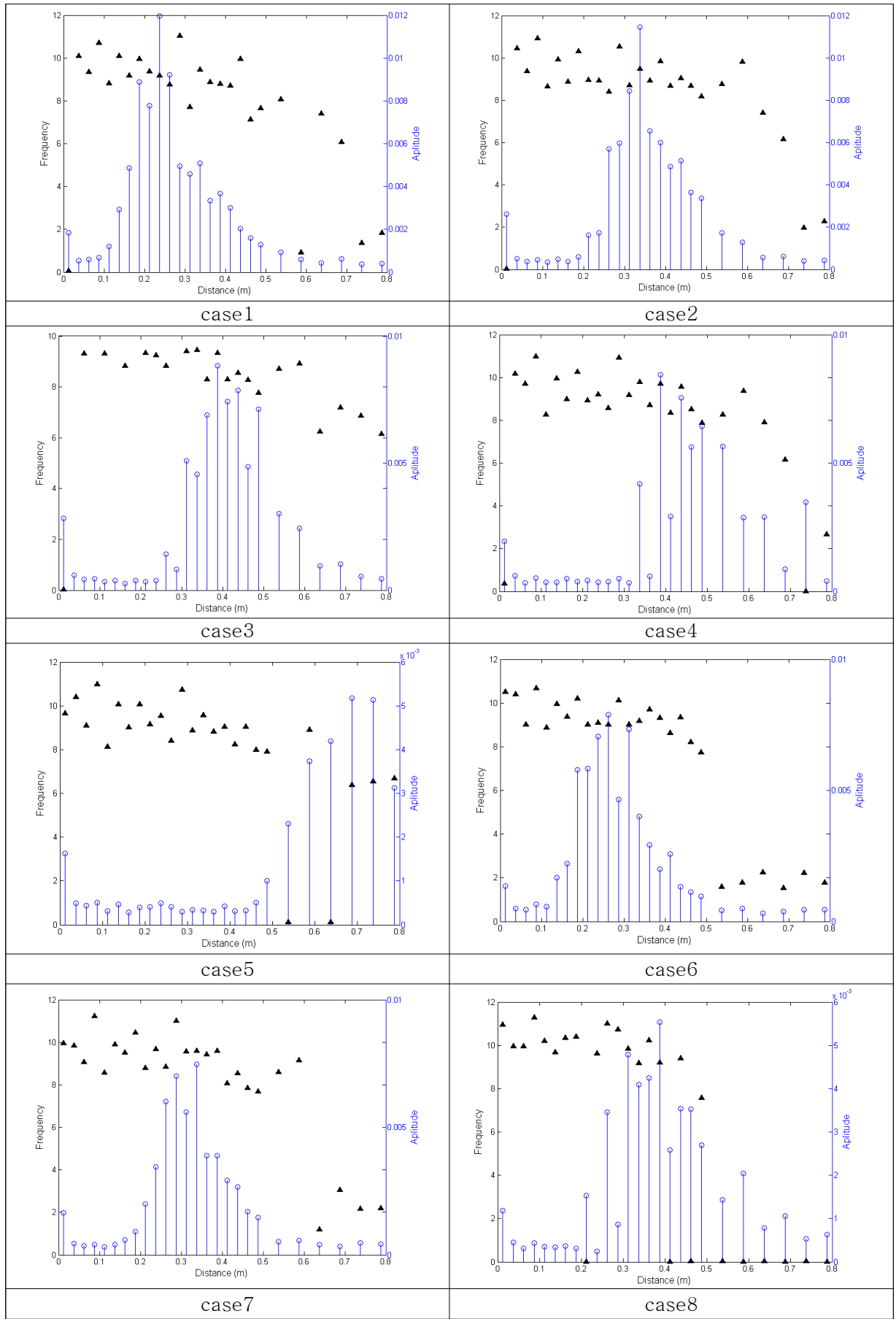


그림 118 case1의 최대압력지점에서 압력 시계열 값의 FFT 분석 결과



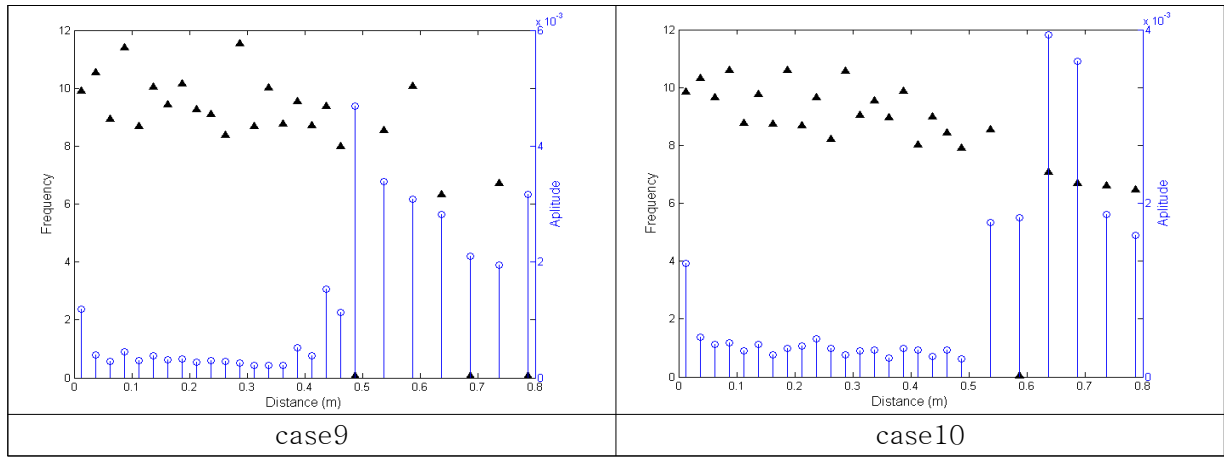


그림 119 조건별 압력측정 지점에서의 최대 진폭과 주기

- 아래에 콘크리트 피로파괴의 분석 방법 제안
- 콘크리트 구조물의 피로해석 코드와 강도를 이용하여 S-N curve를 작성

표 33 총 콘크리트 구조물의 피로해석 코드

구분		규정	비고
DNV	철근인장	$\log N = 6.5 - 2.3 \times \frac{\sigma_r}{(F_y/\gamma_m)} - 0.002 \times \sigma_{\min}$	• $\sigma_r (= \sigma_{\max} - \sigma_{\min})$: 응력 범위 • γ_m: 재료 상수
ACI		$\Delta \sigma_r = 1.630 - 0.33 \times \sigma_{\min}$	
NPD		$\Delta \sigma_r = 1.733$ 이하	
DNV	콘크리트 압축	$\log N_f = C_2 \times \left(1 - \sigma_{\max} / \left(\frac{\alpha f'_c}{\gamma_m} \right) \right) / \left(1 - \sigma_{\min} / \left(\frac{\alpha f'_c}{\gamma_m} \right) \right)$	• DNV: $D = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} \leq 0.2$ • NPD: $D = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} \leq 1.0$
ACI		$\frac{(S_{\max}, S_{\min})}{f'_c} < 0.5$	
NPD		$\log N_f = 12.5 \times \frac{(1 - \sigma_{\max}/f'_c)}{(1 - \sigma_{\min}/\sigma_{\max})}$	
DNV	콘크리트 전단	$\log N_f = C_2 \times \frac{(1 - V_{\max}/V_r)}{(1 - V_{\min}/V_r)}$	• V_r : 설계전단강도

- 각 재현주기의 하중에 의해 발생한 응력에 대해 피로손상도 누적손상법(Cumulative damage rule)* 이용

* 누적손상법(Miner, 1945): 각기 다른 주기의 하중 성분들에 의한 피로 누적 기여를 조합하였을 때 손상임계값이 되면 피로파괴가 발생한다고 추정

$$D = \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^K d_{ij} = \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^K \frac{n_{ij}(\sigma)}{N_{ij}(\sigma)} \geq \eta \quad (16)$$

여기서, 피로손상도 $d_i = \frac{n_i(\sigma)}{N_i(\sigma)}$, n_i 는 응력 이 발생하는 횟수이며, N_i 는 이 응력에 따라

피로파괴가 일어나는 횟수이다. η 는 손상임계값으로 점검 및 수리 접근성에 따라 달라지며, 아래 표 참조

표 34 손상임계값 η 의 한계

점검 및 수리 불가	침수 구역	비침수 구역
0.33	0.5	1.0

- 단위시간 동안 서로 다른 K개의 유효응력에 의해 구조물에 발생한 피로손상도를 대수적으로 합하여 총 피로손상도 D를 산정

- 총 피로손상도가 η 이상일 때 피로파괴가 일어난다고 가정하며, T가 피로수명
- FFT분석을 통해 도출한 유효응력, 주기, 총 피로손상도를 이용하여 피로수명 예측이 가능할 것으로 판단됨.

㉔ 결론

- 본 연구에서 수행한 수리실험은 보 하류부에서 도수조건에서 물받이공 및 바닥보호공 근처에서 발생하는 유속성분, 수위변동 및 압력을 측정하여 얻어진 결과로부터 흐름특성을 분석하고 유속성분과 압력변동성 간의 상관관계를 검토한 후 설계인자를 도출하고자 함.
- 수리실험은 총 20cases가 수행되었으며 4가지의 접근유속과 5가지의 하류수위 조건을 변화시키며 실험을 수행하였고, 유동장 및 수위측정을 위해 비접촉 측정방법인 PIV 및 BIV기법을 활용하였으며 이로부터 얻어진 결과로 수위변동, 평균유속, 난류강도 등의 분포를 검토함.
- 수위변동은 도수구간 내에서 측정되었으며 그림자기법을 적용하여 순간수위를 취득하였고 수위변동 분석결과 접근유속 및 하류수위 조절에 수위변동이 민감하지 않은 것으로 나타났으며 $(x-x_1)/d_1 < 10.0$ 에서는 수위변동이 낮은 값을 보였지만 도수구간 내에서는 유사한 수위변동 값을 보이는 것을 확인함.
- 흐름방향 및 수직방향 평균유속은 분석결과 특별한 경향성은 보이지 않았지만 난류강도는 $(x-x_1)/d_1 = 10.0$ 에서 최대값을 보이고 이후 서서히 감소하는 경향을 보임.
- 특히 흐름방향 및 수직방향 난류강도는 바닥부근에서 난류강도와 수심적분된 난류강도의 경향이 동일하게 나타나는 특징을 보임.
- 도수구간의 기포영역에서도 흐름방향에 따라 난류강도가 감소하는 동일한 경향성을 보임.
- 통계적 분석을 통하여 수리인자와 압력변동성간의 상관관계를 분석하였고, 바닥근처의 유속성분과 수심 적분된 유속성분을 사용하는데 그 결과는 유사하게 나타났으며 특히 흐름방향 난류강도가 압력변동성과 상관관계가 가장 높은 것으로 나타남.
- 이를 바탕으로 접근수심과 도수시작지점으로부터의 거리로 나타낼 수 있는 난류강도 추정식을 제시하였고 난류강도로부터 압력변동 산정이 가능한 관계식을 제안함.
- 수리실험 결과로부터 $(x-x_1)/d_1 = 10.0$ 에서 난류강도 및 압력변동이 최대값이 발생하는 것을 확인하였고 이는 하천횡단구조물 설계 시 안정성 평가에 응용이 가능할 것으로 판단됨.
- 또한 접근유속 및 수심, 도수시작위치와 같은 기본적인 수리인자를 알고 있는 경우 난류강도 및 압력변동 추정이 가능하기 때문에 실규모 검증 등에 대한 연구를 추가한다면 실무에서 하천횡단구조물을 설계 시 중요한 설계인자로 활용이 가능할 것으로 판단됨.
- 피로파괴에 대한 분석을 수행하기 위해 바닥보호공에 작용하는 압력에 대한 FFT분석을 수행하였으며, 최대 응력과 주기를 도출했을 때 9Hz의 주기성이 강하게 나타남.
- 본 연구에서는 피로파괴에 대하여 유효응력이 발생하는 대규모 횡단구조물의 바닥보호공에서 활용가능한 피로파괴 분석 방법을 제시

(다) Task 3: 압력변이로 인한 하천횡단구조물 하류 물받이공 및 바닥보호공 설계인자 계산 프로그램 개발

① 하천횡단구조물에 대한 3차원 수치모의

㉞ 수치모의 개요

- 하천횡단구조물은 수위 유지, 하상고 유지 등의 목적을 가지고 설치되나 낙차를 가진 고유속의 흐름을 발생시킴.
- 이러한 낙차로 인해 하천횡단구조물의 하류에서는 사류(supercritical flow)가 상류(subcritical flow)로 바뀌면서 가지고 있는 에너지의 일부를 격렬한 와류와 난류를 통해 소모하는 현상인 도수(hydraulic jump)가 발생됨.
- Fiorotto and Rinaldo (1992)에 의하면 도수 영역에서 양압과 음압이 지속적으로 작용하는 압력변이 때문에 구조물이 파괴될 가능성이 있음을 언급하고 있어 압력변이에 대한 구조적 대책이 필요함.
- 본 연구에서는 이러한 복잡한 흐름장을 정량적으로 분석하고, 물받이공과 바닥보호공에 작용하는 외력을 구명하기 위해 3차원 수치모의를 실시하였음.

㉟ 3차원 수치모형

▷ 수치모형 선정

- 수리구조물에서 발생하는 3차원적인 흐름을 수치모의하기 위해서는 3차원 수치모형이 이용되어야 하며, 상용화된 3차원 수치모형으로는 FLOW-3D, FLUENT, FIDAP, STAR-CD 등이 있음.
- 이 중에서 FLOW-3D 모형은 자유표면(free surface)을 가지는 흐름을 가장 잘 모의하는 것으로 알려져 있으며, 국내에서 댐 및 여수로 등의 수리구조물에 대한 검토 사례가 다수 존재함.
- 따라서 하천횡단구조물에서 발생하는 흐름이 자유표면을 가진 개수로 흐름인 점을 고려하여 FLOW-3D 모형을 선정함(표 35 참조).

표 35 3차원 CFD 프로그램 선정

모델명	개발국	수치기법	자유표면 모델링	구조물 표현	난류 모형	적용성	선정
FLOW-3D	미국	FDM	VOF	FAVOR	MLM, Standard $k-\epsilon$, RNG $k-\epsilon$, LES	댐, 여수로, 하천	□
FLUENT	미국	FVM	VOF	유한체적	Standard $k-\epsilon$, RNG $k-\epsilon$, RSM	기계-구조물의 특성 파악을 위한 열-유체 유동	○
FIDAP	미국	FEM	VOF	유한요소	Standard $k-\epsilon$, RNG $k-\epsilon$, RSM		△
STAR-CD	미국	FVM	VOF	유한체적	Standard $k-\epsilon$, RSM, ARSM		△

▷ 수치모형 이론적 배경

1. FLOW-3D 소개

- FLOW-3D 모형은 미국 뉴멕시코주(New Mexico) 로스알라모스(Los Alamos)에 있는 Flow Science, Inc.에서 개발한 범용 유체역학 프로그램(CFD, Computational Fluid Dynamics)
- 로스알라모스 국립연구소의 수치유체역학 연구실에서 F. Harlow, B. Nichols 및 T. Hirt 등에 의해 개발된 MAC (Marker And Cell) 방법과 SOLA-VOF 방식을 기초로 하여, Dr. Hirt가

1980년에 Flow Science, Inc.사를 설립하여 계속 프로그램을 발전시켰으며, 1985년부터 FLOW-3D 모형을 전 세계에 배포함.

- FLOW-3D 모형은 자유표면 모의에 있어서 매우 정확한 해를 제공하며, 모의 방법은 기본적으로 비정상 유동 상태(unsteady flow condition)로 모의하며, 연속 방정식, 3차원 운동량 방정식 및 에너지 방정식 등을 적용함.
- 유체의 난류 모의에 대해서는 혼합 길이(Prandtl mixing length) 모형, One-equation (turbulent energy) 모형, Two-equation ($k-\epsilon$) 모형, RNG (Reormalized Group) 모형, Two-equation ($k-\omega$) 모형, LES (Large Eddy Simulation) 모형을 적용할 수 있으며, 자유표면 모의를 위하여 VOF (Volume of Fluid) 함수를 이용하고, 격자를 생성할 때 구조물의 형상을 더욱 정확하게 표현하기 위해 FAVOR (Fractional Area/Volume Ratio) 기법을 각 방정식에 적용함(Flow Science, 2015).

2. 지배 방정식

- 열전달 및 유체 흐름의 지배 방정식은 질량, 운동량 및 에너지의 보존관계를 나타내는 연속 방정식, 운동량 방정식 그리고 에너지 방정식이 있음.
- 이 방정식들은 동일한 유체로 이루어지는 계(system)에 질량보존의 법칙, 뉴턴의 운동 제2법칙, 열역학 제1법칙을 적용함으로써 유도됨.
- 다음은 3차원 수치모형에 적용된 흐름과 관련된 기초 방정식들을 직교좌표계(x, y, z)에 대하여 소개함.

(1) 연속 방정식

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z) + \xi \frac{\rho u A_x}{x} = R_{DIF} + R_{SOR} \quad (16)$$

여기서, V_F 는 계산격자의 체적 중 유체가 차지하는 점유율, A_x, A_y, A_z 는 계산격자 각 방향의 유체가 흐를 수 있는 면적의 점유율, ρ 는 유체의 밀도, R_{DIF} 는 난류 확산항, R_{SOR} 은 질량 생성항

(2) 운동량 방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} - \xi \frac{A_y v^2}{x V_F} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (u - u_w - \delta u_s) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} + \xi \frac{A_y u v}{x V_F} &= -\frac{1}{\rho} \left(R \frac{\partial p}{\partial y} \right) + G_y + f_y - b_y - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (v - v_w - \delta v_s) \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z - b_z - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (w - w_w - \delta w_s) \end{aligned} \quad (17)$$

여기서, (G_x, G_y, G_z)는 체적 가속항, (f_x, f_y, f_z)는 점성 가속항, (b_x, b_y, b_z)는 다공성 매질 (medium)에서 흐름 손실항

(3) VOF 함수

- 물과 공기의 경계인 자유표면을 모델링하기 위하여 VOF 함수인 $F(x, y, z, t)$ 를 정의하여 이용하는데, 함수의 값이 1인 경우는 검사 체적(control volume)에 물이 가득 채워진 상태를 의미하고, 0인 경우는 빈 공간을 의미함.
- 이때 빈 공간이라 함은 균일한 압력이 작용하고 유체가 없는 공간을 말하며, 물리적으로 이 공간에는 액체로부터 증발된 증기나 기체가 채워져 있지만, 이들 가스의 밀도가 액체에 비해 무시될 수 있을 정도로 작기 때문에 검사 체적에서 액체 경계면의 상부는 일정한 압력이 작

용하고 있는 빈 공간으로 가정함.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[\frac{\partial}{\partial x} (FA_x u) + R \frac{\partial}{\partial y} (FA_y v) + \frac{\partial}{\partial z} (FA_z w) + \xi \frac{FA_x u}{x} \right] = F_{DIF} + F_{SOR} \quad (18)$$

여기서, F 는 자유표면을 포함하고 있을 때 유체가 차지하는 점유율

(4) 난류 모형

- 난류는 비정상적의 불규칙하고 무질서한 운동으로 예측 불가능하기 때문에 정확한 흐름 계산을 위해서는 난류 현상을 더불어 계산해야 함.
- 그러나 난류는 비정규성(nonnormality), 임의성(randomness)의 특징을 가지고 있는 3차원 현상이다. 이 때문에 난류 문제에 대한 결정론적 접근이 어려우며 이러한 경우 통계적 방법에 의존하게 됨.
- 표 36 및 그림 120은 난류를 계산하는 방법을 나타낸 것이며, 아래로 갈수록 계산의 부하가 작음.

표 36 난류의 수치 계산법(梶島岳夫, 1999)

완전한 모의	FTS	Full Turbulence Simulation
직접 모의	DNS	Direct Numerical Simulation
대규모 와의 모의	LES	Large-Eddy Simulation
평균 흐름의 모의	RANS	Reynolds-Averaged Numerical Simulation

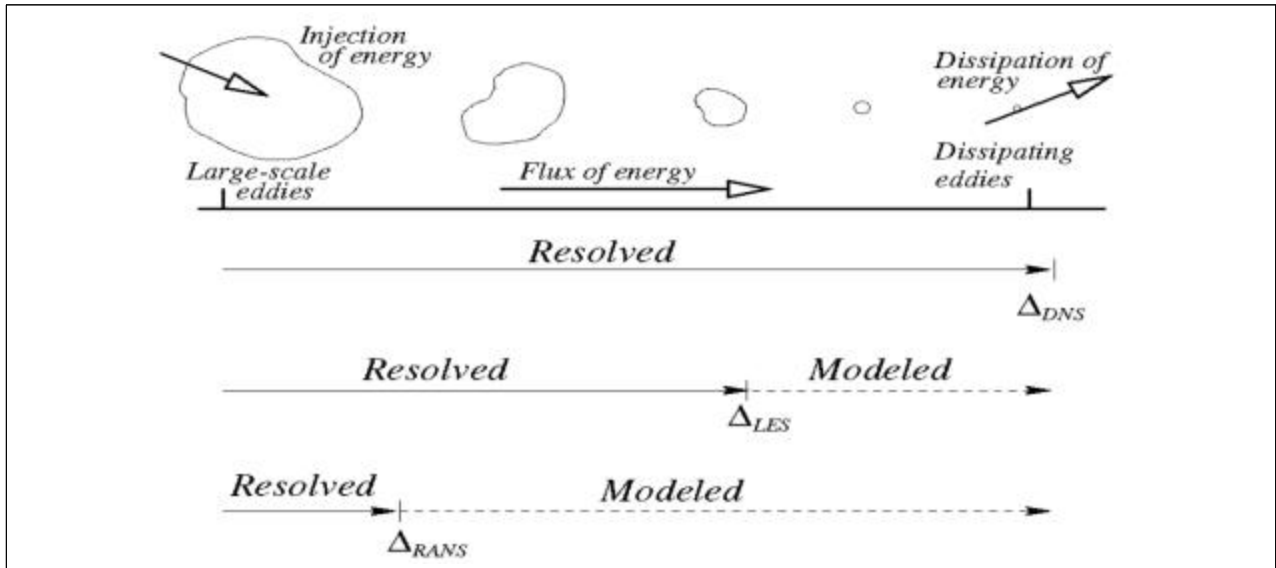


그림 120 난류의 수치 계산법

- 기본적으로 충분한 격자 해상도와 수치 정도로 적절한 초기 조건과 경계 조건의 기반에서 흐름 기초 방정식(Navier-Stokes 방정식)을 계산하면 난류의 전체가 구해질 수 있음.
- 구체적으로는 흐름장을 격자로 분할하고 차분법이나 스펙트럼법에 의해 각 격자에서의 대표 값을 시시각각으로 구해가며, 이것을 완전한 난류 모의(FTS, Full Turbulence Simulation)라고 함.
- 난류의 모든 것을 계산하기 위해서는 계산 영역이 흐름장의 대표 척도 L 보다 크지 않으면 안되고, 격자 폭은 최소의 변동 척도 η 보다도 세밀하지 않으면 안됨.
- 난류가 본질적으로 3차원 현상인 점을 고려하면, 필요한 영역 분할수(격자수)는 적어도 $(L/\eta)^3$ 즉 $Re^{9/4}$ 의 크기이며, 비교적 낮은 Reynolds 수인 10^4 인 경우에도 FTS에 필요한 격자 수는 $1,000^3$ 이 됨.

- 이것은 최신의 슈퍼 컴퓨터에서 실현 가능한 최대 규모나 그것을 상회하는 규모이며, 공학의 대상이 되는 기기나 자연 과학에서 다루는 난류장은 훨씬 높은 Reynolds 수(그림 121 참조)일 뿐 아니라, 복잡한 경계 형상이 되는 경우가 많기 때문에, FTS에 필요한 계산 용량은 방대함.
- 시간 해상도나 시간별의 안정 한계도 고려하면, 비정상 계산의 시간 단계수도 격자수의 크기가 되며 따라서 최신 슈퍼컴퓨터를 이용해도 FTS는 비현실적임.
- 난류의 직접 모의(DNS, Direct Numerical Simulation)도 흐름 기초 방정식에 무언가 조작을 가하지 않은 수치 계산이나 격자수를 $Re^{9/4}$ 로 설정할 수 있는 것은 드물어서, 엄밀하게는 FTS라고 말할 수 없으나 FTS와 마찬가지로 방대한 계산 용량을 필요로 하기 때문에 비현실적임.



그림 121 분사류에서 Reynolds 수의 영향(Tennekes, H. & Lumley, J.L., 1972)

- 현실에 필요한 것은 모든 난류 운동의 자료는 아니며, 큰 흐름의 상황인 것이 대부분이며 실험 사실 및 이론적인 지식으로서, 큰 와는 흐름장 경계 형상의 영향을 강하게 받지만, 작은 와는 보편적, 등방적(isotropic), 소산적(dissipation)임.
- 공학적인 목적으로서의 난류 계산에서는 평균적인 흐름에 강하게 관련된 큰 와(vortex)의 거동을 구하는 것이 중요함.
- 이를 위해서는 직접 계산되지 않는 변동의 효과를 포함한 거시화된 방정식을 수치 계산해야 하며, 이 방정식은 무엇을 계산하는가에 따라 다르지만, Navier-Stokes 방정식에 어떤 종류의 평균화 조작은 하는 것에 의해 유도됨.
- 그래서 풀어야 할 흐름과 그것 이외에 난류 사이의 관계를 주는 것, 결국 난류 모형화가 필요함.
- 정상 흐름(또는 변동에 비해 대단히 완만하게 변하는 비정상 흐름)만을 풀려고 하면, 이른바 난류 운동의 모두를 모형화의 대상으로 함.
- 이때 Navier-Stokes 방정식에는 Reynolds 평균이 시행되며, Reynolds 평균장의 계산은 Reynolds 평균 Navier-Stokes 방정식 또는 그의 수치 모의라고 하는 의미로 RANS (Reynolds Averaged Numerical Simulation)라고 부름.
- 난류의 비교적 큰 구조를 직접 계산의 대상으로 하고, 그것에서 미세한 변동만을 모형화하는 계산을 큰와 모의(LES, Large-Eddy Simulation)라고 함.
- LES 방정식으로서 Navier-Stokes 방정식에 공간적으로 대소의 척도를 분리하기 위한 필터를 곱한 것이 이용되며 수치 계산에서는 격자 척도까지 잡을 수 있기 때문에, ‘큰와’를 격자 척도 이상의 와로 정의하면 가장 무리가 적음.
- 이런 의미에서 LES에서의 필터는 Reynolds 평균에 대해서 격자 평균으로 불리는 경우도 있음(梶島岳夫, 1999).

(5) 난류 수송 방정식

$$\frac{\partial k_T}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial k_T}{\partial x} + v A_y \frac{\partial k_T}{\partial y} + w A_z \frac{\partial k_T}{\partial z} \right\} = P_T + G_T + Diff_{k_T} - \epsilon_T \quad (19)$$

$$P_T = C_{SPRO} \left(\frac{\mu}{\rho V_F} \right) \left\{ \begin{aligned} & 2A_x \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2A_y \left(R \frac{\partial v}{\partial y} + \xi \frac{u}{x} \right)^2 + 2A_z \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \\ & + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + R \frac{\partial u}{\partial y} - \xi \frac{v}{x} \right) \left[A_x \frac{\partial v}{\partial x} + A_y \left(R \frac{\partial u}{\partial y} - \xi \frac{v}{x} \right) \right] \\ & + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \left(A_z \frac{\partial u}{\partial z} + A_x \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ & + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + R \frac{\partial w}{\partial y} \right) \left(A_z \frac{\partial v}{\partial z} + A_y R \frac{\partial w}{\partial y} \right) \end{aligned} \right\}$$

$$G_T = -CRHO \left(\frac{\mu}{\rho^3} \right) \left(\frac{\partial \rho}{\partial x} \frac{\partial p}{\partial x} + R^2 \frac{\partial \rho}{\partial y} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \rho}{\partial z} \frac{\partial p}{\partial z} \right)$$

$$Diff_{k_T} = \frac{1}{V_F} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(v_k A_x \frac{\partial k_T}{\partial x} \right) + R \frac{\partial}{\partial y} \left(v_k A_y R \frac{\partial k_T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_k A_z \frac{\partial k_T}{\partial z} \right) + \xi \frac{v_k A_x k_T}{x} \right\}$$

$$\epsilon_T = CNU^{3/4} \frac{k_T^{3/2}}{TLEN}$$

여기서, A_x , A_y , A_z 및 V_F 는 FAVOR 함수, P_T 는 난류 운동에너지 생성항, G_T 는 부력 생성항, $Diff_{k_T}$ 는 확산항, ϵ_T 는 난류에너지 소산항, C_{SPRO} 는 난류 매개변수(기본 값은 1.0), $CRHO$ 는 난류 매개변수(기본 값은 0.0), v_k 는 확산 계수, CNU 는 매개변수(기본 값은 0.09), $TLEN$ 은 난류길이 척도

3. 처리기법

(1) 유한차분법

- 연속체로 정의된 방정식을 컴퓨터를 이용하여 모의하기 위해서는 이의 이산화(discretization)가 필요하며 이산화하는 방법은 크게 유한요소법(FEM, Finite Element Method), 유한체적법(FVM, Finite Volume Method), 유한차분법(FDM, Finite Difference Method)으로 나눌 수 있음 (그림 122 참조).

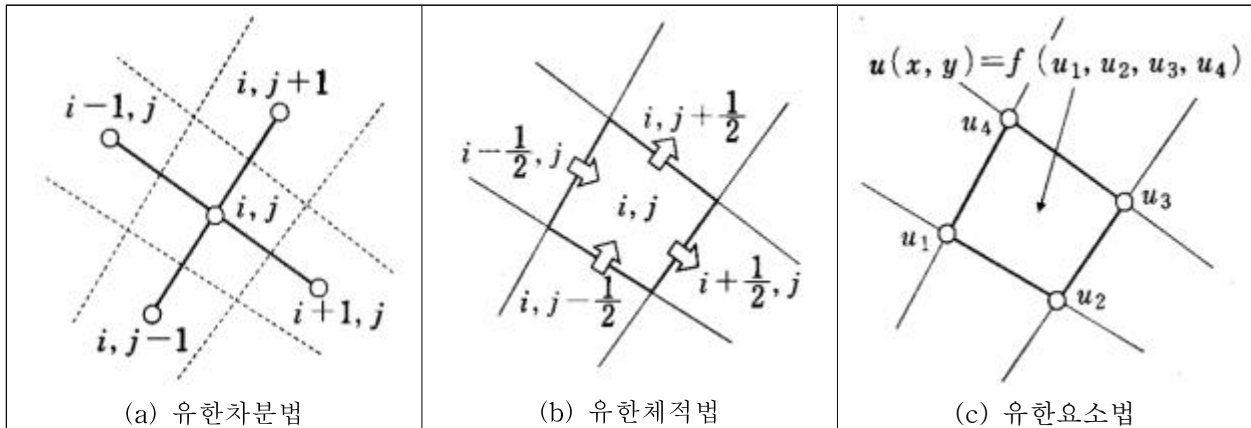


그림 122 이산화의 개념도(梶島岳夫, 1999)

- 지배 방정식은 유한차분법을 이용하여 이산화되고, FAVOR 방법을 이용함으로써 유한체적법의 접근 방법으로 모의됨.
- 일반적으로 수치모의를 하게 되면 모의영역을 격자라 불리는 다수의 작은 영역으로 나눈 후, 격자 단위로 계산이 이루어지게 되며, 각 격자에 주어진 압력을 시간에 대한 외재적 방법(explicit method)으로 다음 시간에서의 속도를 계산하며, 이 속도를 이용하여 포아송 방정식(Poisson equation) 형태의 압력 방정식의 해를 구한 다음 다시 속도를 교정하고, 그 후에 자유 표면의 모의가 요구될 때는 VOF 함수를 풀어나가는 방법을 사용하고 있음.
- 그림 123은 FLOW-3D 모형에서 사용하는 물리량을 간략하게 표시하였으며, 그림에서 보는 바와

같이 속도 및 응력들은 각 격자 면에서 정의되고, 다른 변수들은 격자 중심에서 정의되고 있음.

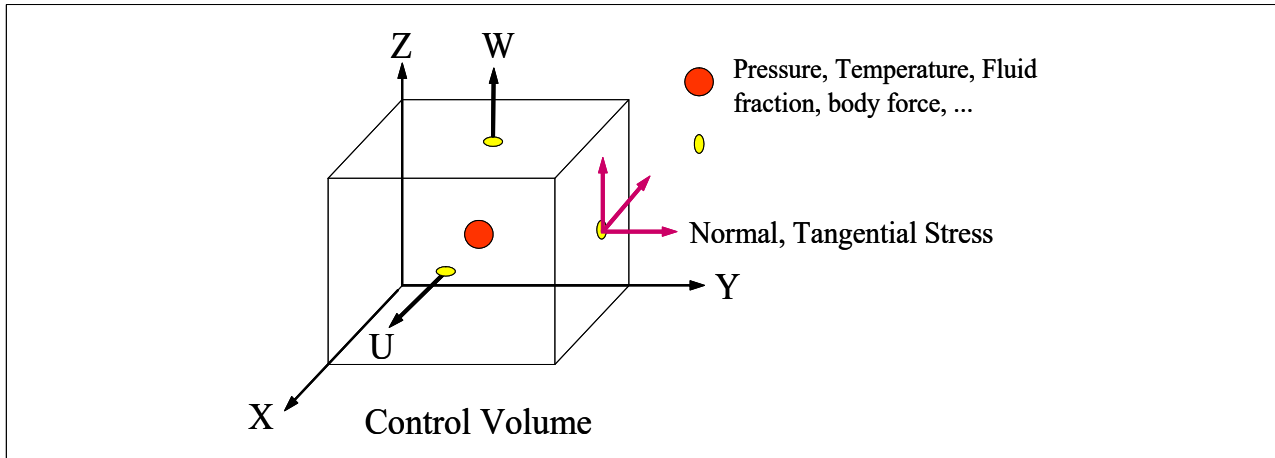


그림 123 FLOW-3D 모형의 격자계

(2) VOF 방법

- 비산, 파랑 및 제트 등과 같은 복잡한 자유표면 운동의 기술은 움직이는 격자를 사용하는 라그랑지안(Lagrangian) 방법보다 고정 오일러리안(Eulerian) 방법을 사용하는 VOF 방법을 이용하여 보다 간단히 이루어질 수 있음.
- FLOW-3D 모형에 이용되고 있는 VOF 방법은 공용되고 있는 VOF 방법과는 달리, 정확한 압력 및 운동학적 경계 조건을 상이 경계면(sharp interface)에 적용하고 있으며, 이산화 할 때 상이경계면의 뭉개짐(smearing)을 방지하기 위해 특별 수치차분법을 이용함으로써 두 유체(액체와 기체일 경우는 보통 자유표면으로 가정함) 사이의 운동을 기술할 수 있는 수치모의 방법이며 그림 124에 VOF 방법의 개념에 대해 나타냄.

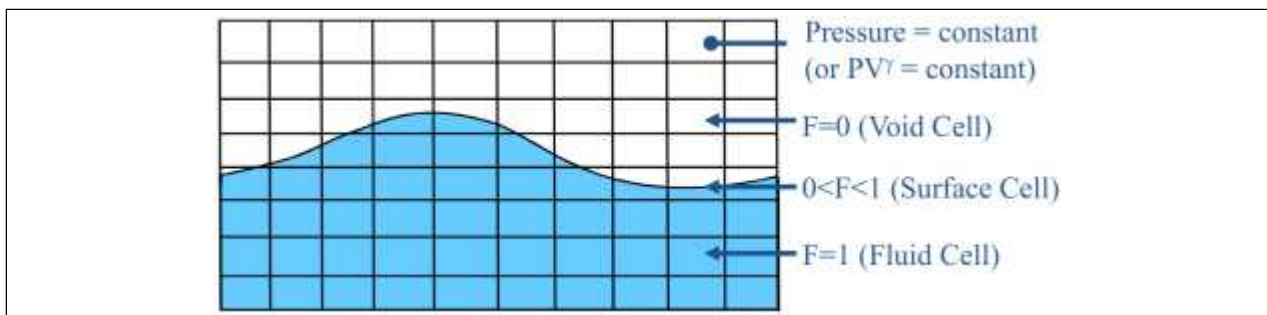


그림 124 VOF의 개념도

(3) FAVOR 방법

- FAVOR는 직육면체 형태의 격자 안에 들어있는 일반 형상을 기술하는 방법으로 직육면체 격자의 6개면 전체 또는 일부가 출입할 수 없는 물체에 의해 막혀있을 수 있다고 정의함.
- 그러므로 하나의 직육면체 격자에서 유동 물질이 차지하는 부피 및 매질이 통과하는 면적이 정의되며, 이 격자 안에서의 통과 면적 및 해당 유속을 고려한 질량, 운동량, 에너지 방정식의 유한체적 적분을 통해 일반 물체 주위의 유동에 대한 영향을 기술하게 됨.
- 따라서 경계 밀착 좌표계(BFC, Body Fitted Coordinate)로의 좌표 변환을 하지 않는 유한차분법을 사용할 때 가장 큰 문제 중 하나인 계단형 격자에 의한 결과의 정확도 저하 문제를 해결하며 그림 125에 FAVOR 방법의 개념에 대해 나타냄.

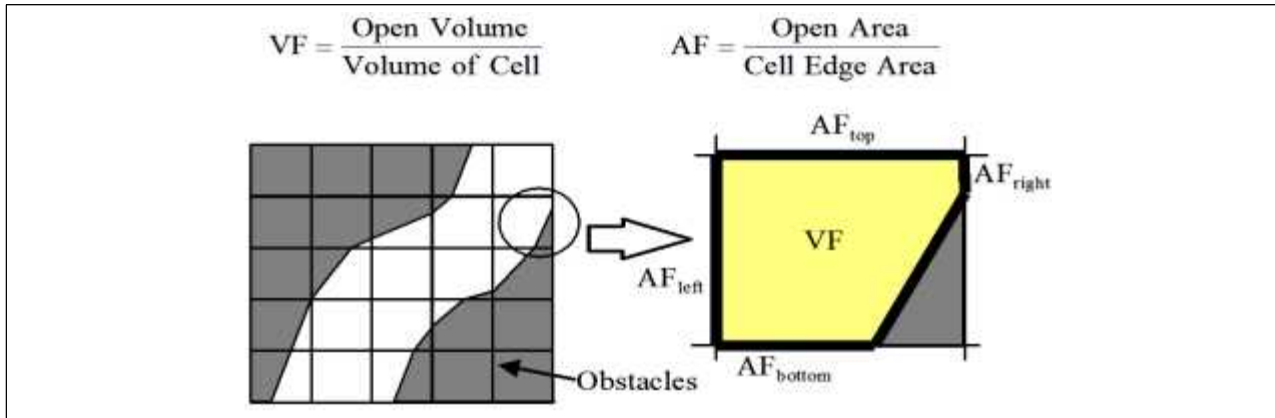


그림 125 FAVOR의 개념도

(4) 경계조건

- FLOW-3D 모형에서 지원하는 경계조건은 아래와 같이 10가지가 있으며, 각 제어 체적면에 하나의 경계조건이 부여됨.

- Symmetry - Continuitive - Specified pressure - Grid overlay - Wave
- Wall - Periodic - Specified velocity - Outflow - Volume flow rate

㉔ 수치모형 적용

- 일반적으로 하천횡단구조물을 설계할 경우 정수압(static pressure) 상태를 고려하여 설계를 하지만 설계유량 내에서 구조물이 파괴되는 현상이 종종 발생되며 이는 유속의 변동성분과 압력의 변동성분으로 인해 순간적으로 구조물에 작용되어지는 힘이 구조물의 파괴에 중요한 원인이 될 것으로 추정됨.
- 따라서 하천횡단구조물 하류부에 위치한 하상 구조물의 안전성 증대를 위해 압력변이 등의 흐름장을 정량적으로 분석하고자 하며, 또한 PIV (Particle Image Velocimetry) + BIV (Bubble Image Velocimetry) 기법 및 압력계를 이용한 수리실험 결과와 비교하여 수치모의의 신뢰성을 확보하고자 함.

▷ 난류모형 선정 및 Data 필터링

1. 수치모의 조건

- FLOW-3D 모형은 다음과 같이 6가지 난류모형을 이용할 수 있음.
- 난류모형 중 RNG 모형은 표준 k-ε 모형과 달리 낮은 Reynolds 수를 가지는 약한 난류흐름에 적용 가능하고, 강한 전단 흐름을 발생시키는 조건하에서 표준 k-ε 모형보다 정확한 해석이 가능함.
- 이러한 특징을 가지고 있어 FLOW-3D 모형을 이용한 기존 연구 및 사업 사례 중 대부분이 RNG 모형을 적용한 것으로 조사됨.
- LES 모형은 Navier-Stokes 방정식의 시간 평균 대신 격자 내 공간 평균을 실시하여 필터에서 표현할 수 있는 크기까지의 흐름은 직접 계산하고 그 보다 작은 흐름은 통계적으로 처리함.
- 따라서 다른 모형에 비해 사실적인 난류 모의가 가능하나 복잡한 형상에서는 계산시간이나 수렴성에서 비효율적임

- 혼합 길이(Prandtl mixing length) 모형 - One-equation (turbulent energy) 모형
- Two-equation (k-ε) 모형 - Two-equation (k-ω) 모형
- RNG (Renormalized Group) 모형 - LES (Large Eddy Simulation) 모형

- 본 연구의 목적인 압력변이를 적절히 재현할 수 있는 난류모형을 선정하기 위해 일반적으로 많

이 사용되는 RNG 모형과 Navier-Stokes 방정식을 시간평균하지 않는 LES 모형을 비교함.

- 수치모의에 사용된 수로(철곡보 주변의 낙동강 지형을 사각형 단면의 개수로로 가정)는 길이 400 m(보 상류부 길이 100 m, 보 하류부 길이 300 m), 폭 1 m, 높이 17 m이며, 수로 내부에는 그림 123과 같이 12 m 높이의 철곡보(또는 하천횡단구조물)를 설치함.
- 구조물의 재료는 대부분이 콘크리트 구조물이므로 조도계수(roughness coefficient)는 0.013을 적용하였으며, 이는 Chow (1959)가 제시한 다양한 종류의 수로에 대한 조도계수 중 Concrete의 Normal 값을 나타냄.
- FLOW-3D 모형은 조고(roughness height)를 사용하므로, Christensen (1984)이 제시한 식(20)를 이용하여 환산된 조고 0.0014 m를 적용함

$$n = \frac{k_s^{1/6}}{8.25 \sqrt{g}} = 0.039 k_s^{1/6} \quad (20)$$

여기서, n 은 조도계수, g 는 중력가속도, k_s 는 조고이다.

- 격자는 총 149,760개가 사용되었으며, x축으로 0.20 ~ 0.50 m 간격, y축으로 1 m 간격 그리고 z 축으로 0.05 ~ 0.20 m 간격을 부여함.
- 특히 본 연구의 관심 대상인 물받이공 및 바닥보호공에 조밀한 격자를 부여하여 비교적 작은 척도의 와를 해상할 수 있도록 하였음.
- 경계조건은 물받이공 및 바닥보호공에 악영향을 줄 수 있는 상류 계획홍수위(보 상류부 수위 EL.28.42 m), 하류 관리수위(보 하류부 수위 EL.19.50 m) 조건을 적용하였으며, 모의시간을 단축하기 위해 경계조건에 해당하는 수위를 초기조건으로 부여함.

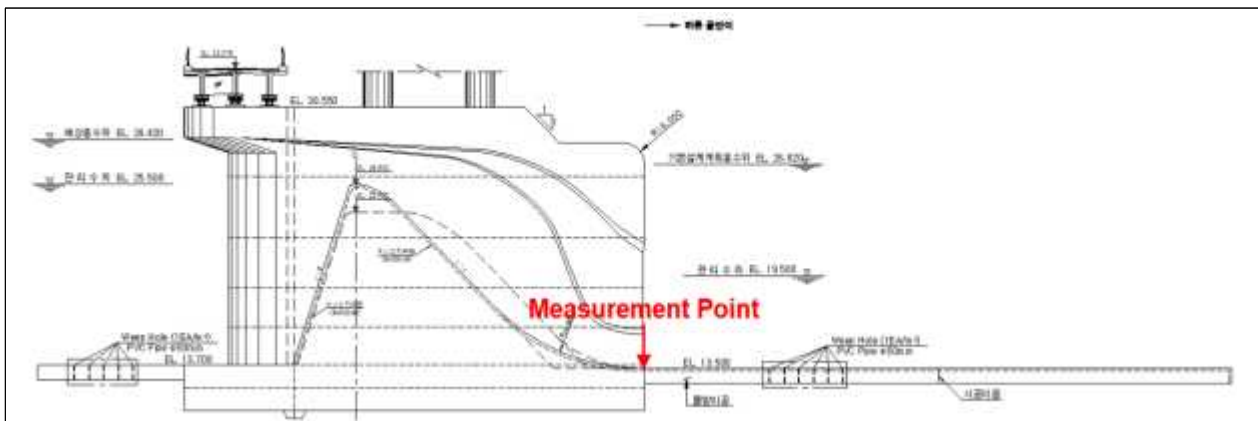


그림 126 낙동강 철곡보의 종단면도

2. 난류모형 선정

- 낙동강 철곡보에 대한 수치모의 결과 상류 계획홍수위, 하류 관리수위 조건의 경우 물받이공 시점에서 도수가 발생되었으며(그림 127 및 그림 128 참조), 도수위치 측면에서 두 난류모형의 결과가 유사한 것으로 보여짐.
- 그러나 LES 모형이 철곡보에서 낙하하는 흐름의 유속 및 Froude 수를 상대적으로 더 작게 모의함.
- 이는 도수영역에서 LES 모형이 더 작은 척도의 난류를 해상하고, 해상된 난류가 흐름장에 영향을 주어 손실수두가 더 증가하였기 때문인 것으로 예측됨.
- 본 연구의 목적인 압력은 그림 129에 시계열 자료로 나타내었으며, 30초 동안 1초에 100회(100 Hz) 측정하였다. Fiorotto and Rinaldo (1992)에 의하면 도수 영역에서 양압과 음압이 지속적으로 작용한다고 언급하였으나, RNG 모형은 이러한 압력변이 특성을 적절히 재현하지 못하는 것으

로 나타남.

- 이와 같은 결과는 RNG 모형이 대부분의 RANS (Reynolds Averaged Numerical Simulation)와 마찬가지로 난류를 등방성(isotropic)으로 가정하여 시간에 따른 변동을 감쇠시키기 때문인 것으로 판단됨.
- 반면에 LES 모형은 시간 변화에 따른 압력변이를 상대적으로 잘 재현하는 것으로 나타나며 참고로 FLOW-3D 모형을 개발한 Flow Science, Inc.는 3가지 결과(LES 모형, LES 모형의 결과를 시간 평균, RNG 모형)를 비교하였고 그 결과 RNG 모형의 결과는 LES 모형의 결과를 시간 평균한 결과와 유사한 것으로 나타남(<https://www.flow3d.co.kr> 참조).
- 상기의 결과를 종합해보았을 때, 난류의 비등방성이 강하거나 변동성이 강한 흐름장 모의는 LES 모형을 이용해야 할 것으로 판단되며, 따라서 난류모형으로 LES 모형을 선정함.

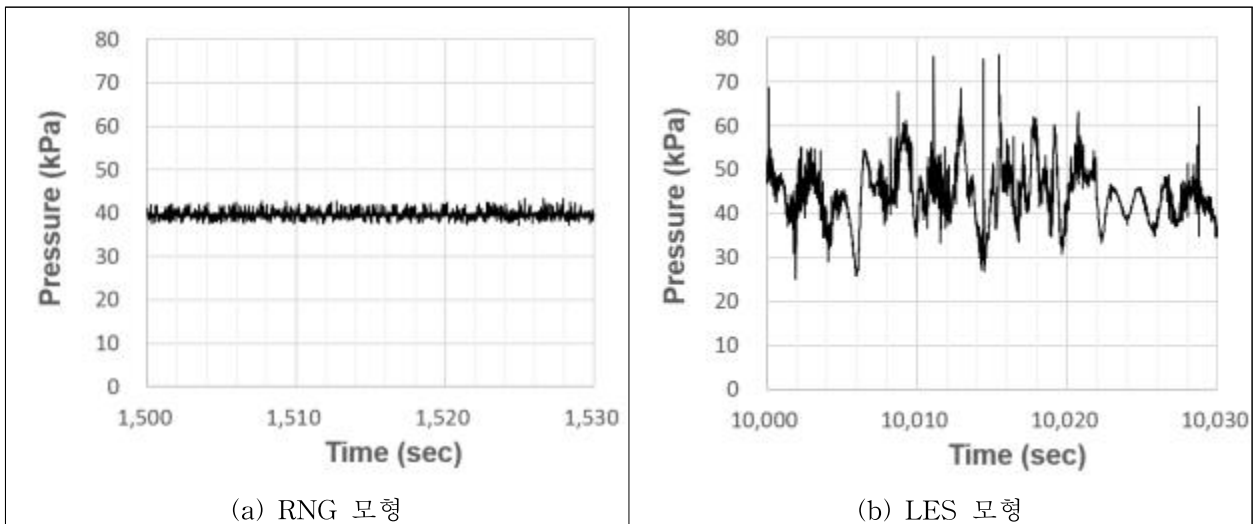
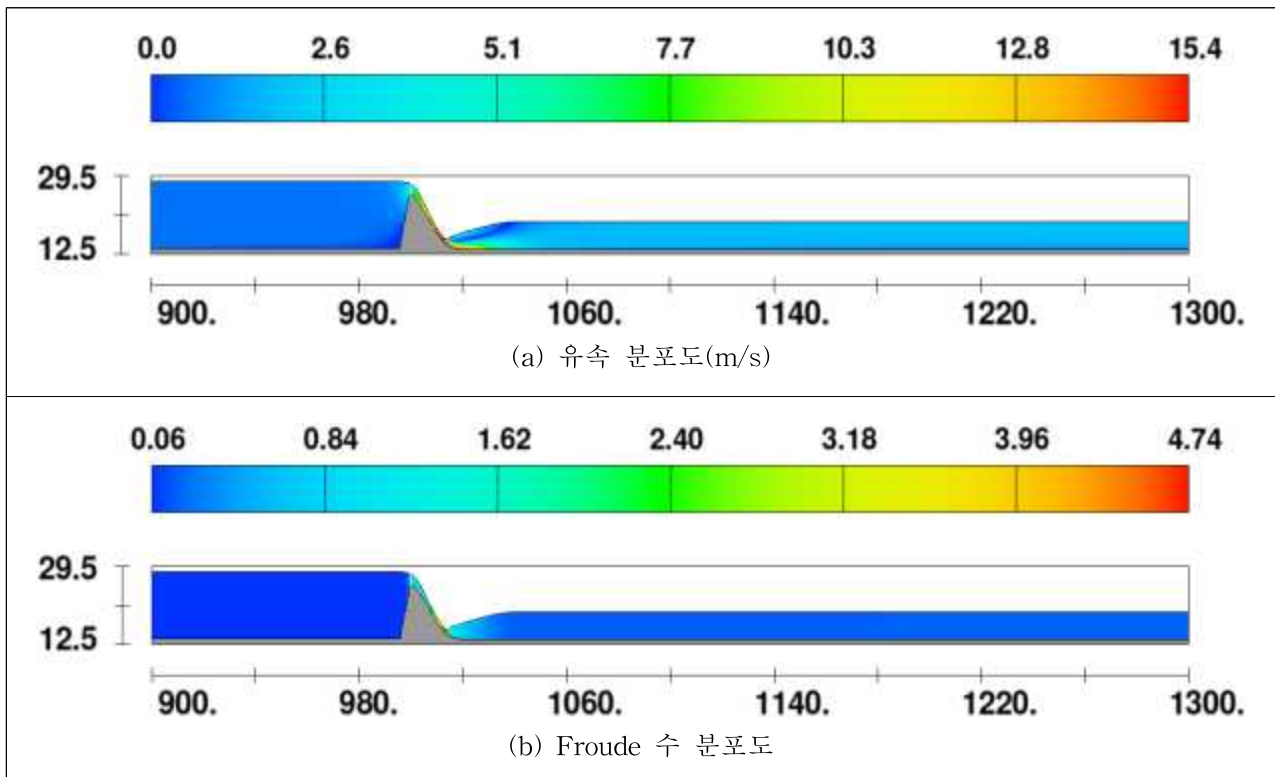


그림 127 난류모형별 압력 Data (측정위치는 그림 125 참조)



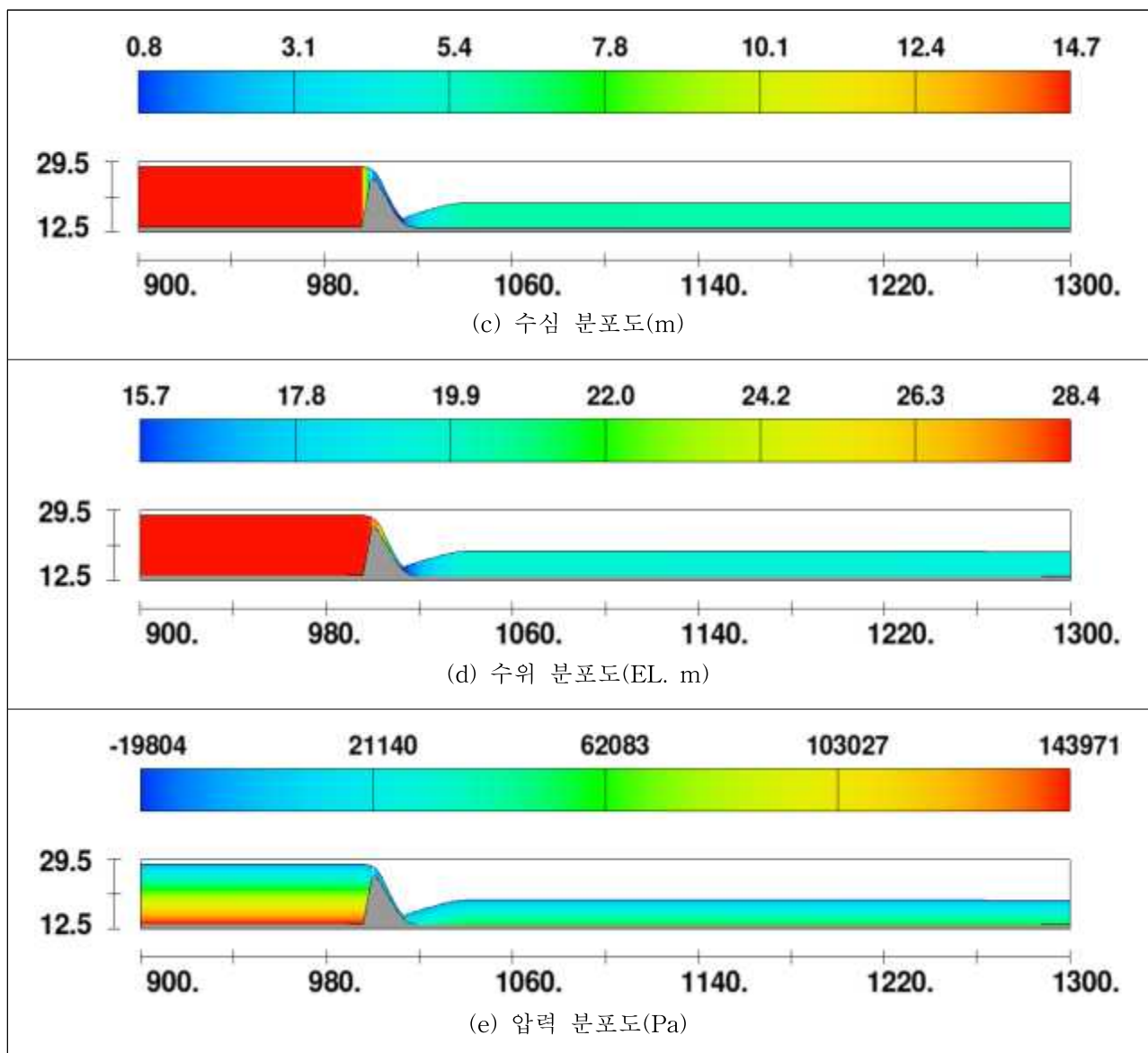
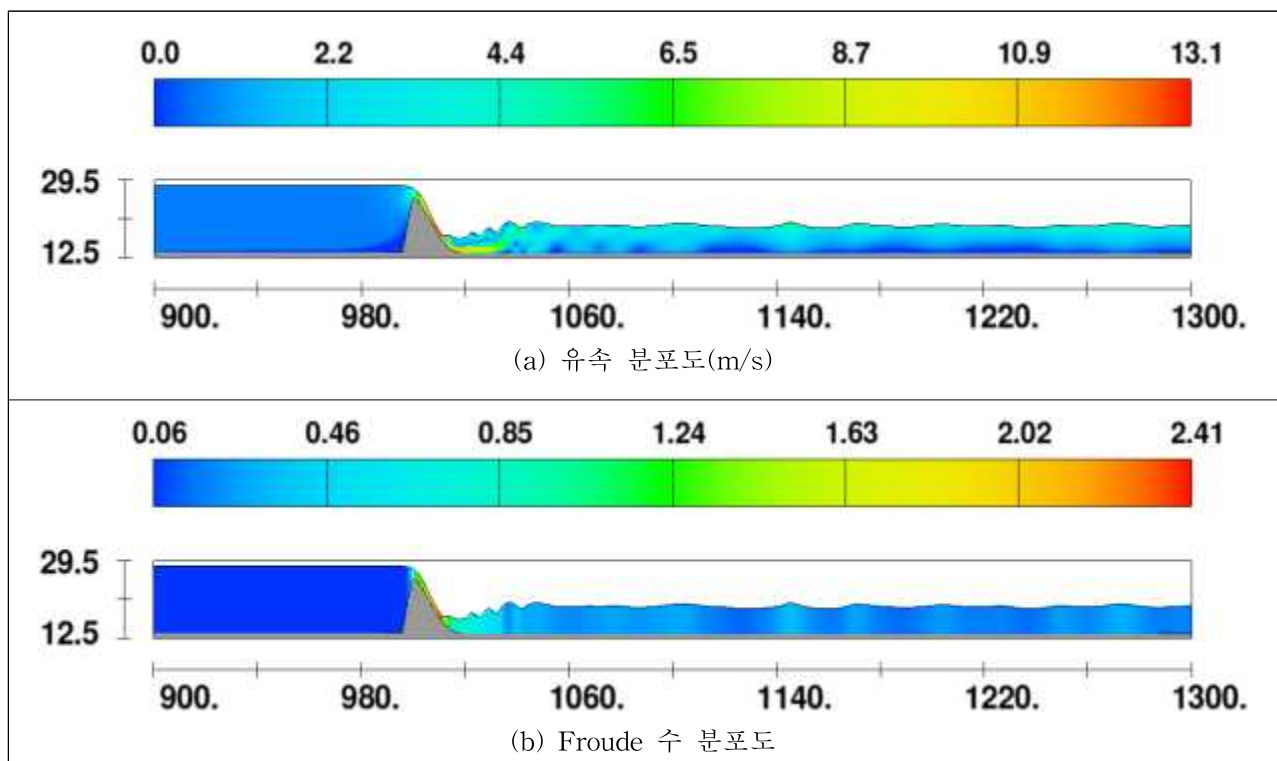


그림 128 RNG 모델을 이용한 수치모의 결과



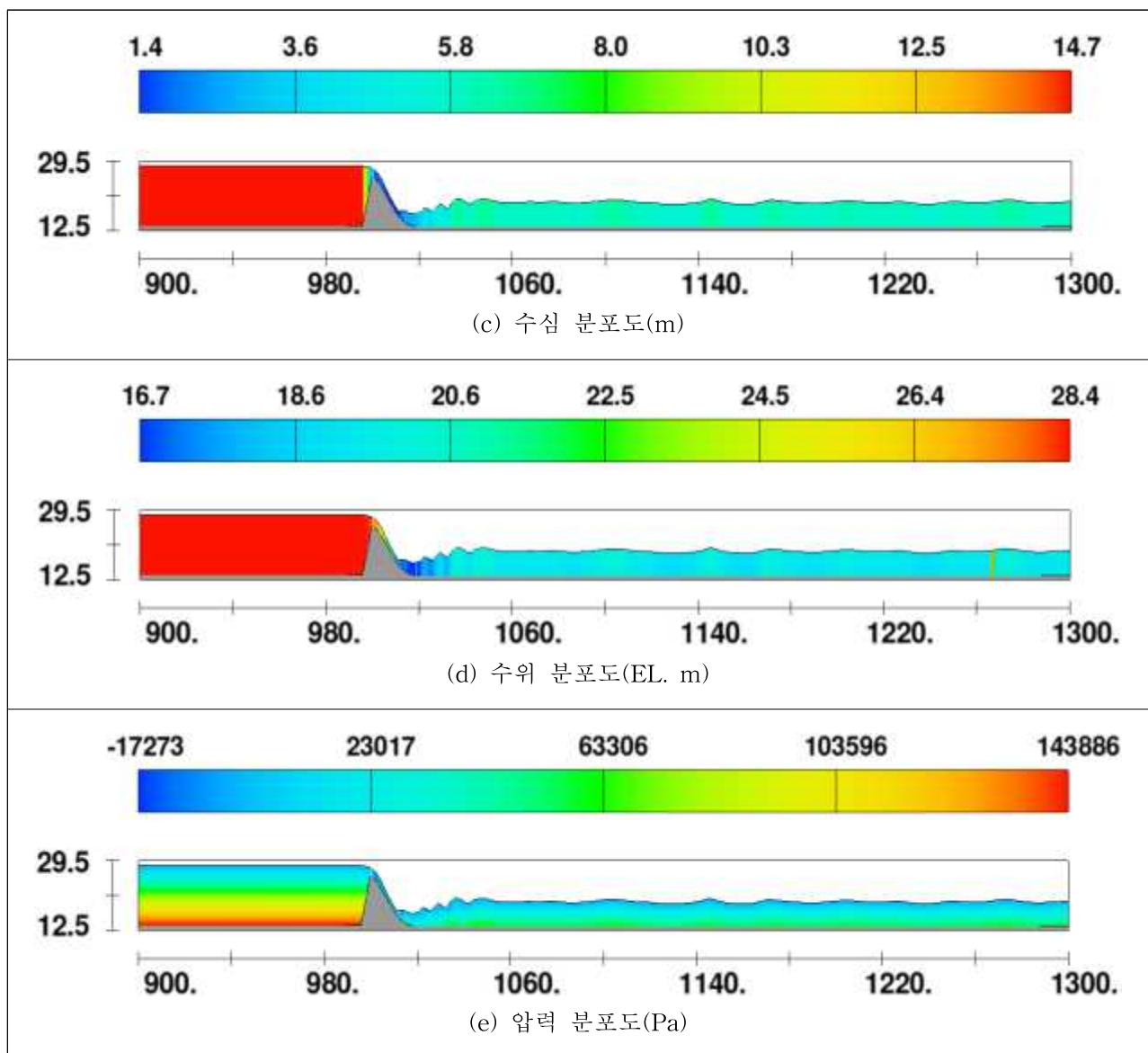


그림 129 LES 모형을 이용한 수치모의 결과

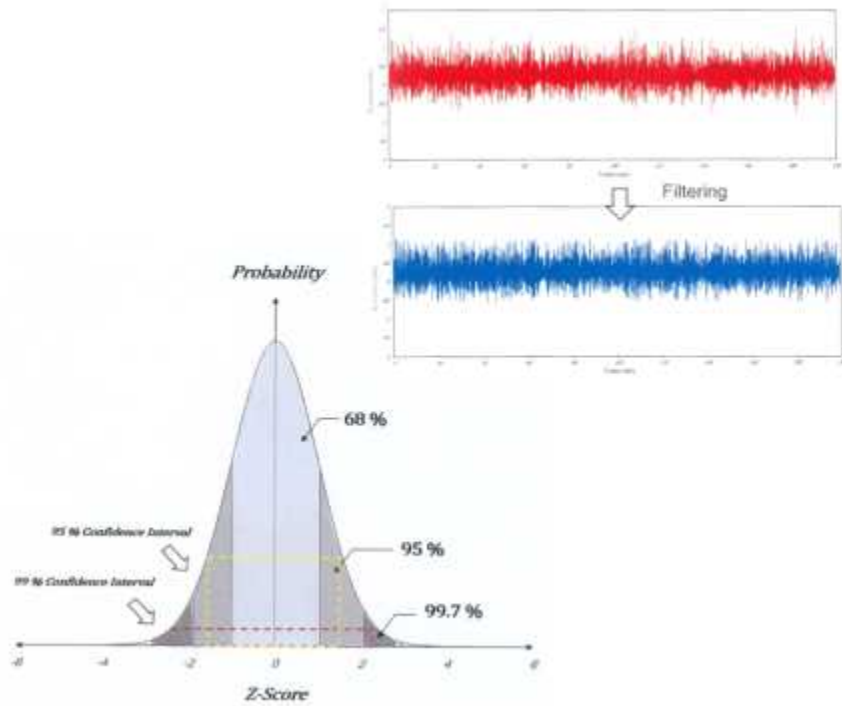
3. Data 필터링

- 그림 130의 (b)의 수치모의 결과는 그림 129의 (b) 그래프를 가져온 것이며, 시간 변화에 따라 압력 Data가 심하게 진동하는 것을 확인할 수 있음.
- 이때 Data가 난류흐름에 의한 것인지 이상치(outlier)인지 판단하기가 다소 어렵기 때문에, 따라서 수리실험에서 적용한 후처리 방법과 같이 측정 Data 중 이상치로 추정되는 Data를 제거하기 위해 표준 정규분포 및 신뢰구간 개념을 적용함.
- 이때 신뢰구간은 99.7% (3σ)로 설정하였으며, 그림 130의 (c)는 신뢰구간 내의 Data를 나타냄.

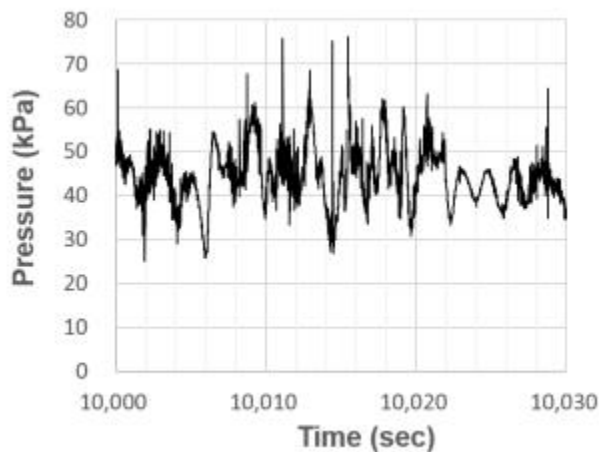
② 실험규모 하천횡단구조물에 대한 수치모의

㉞ 수치모의 개요

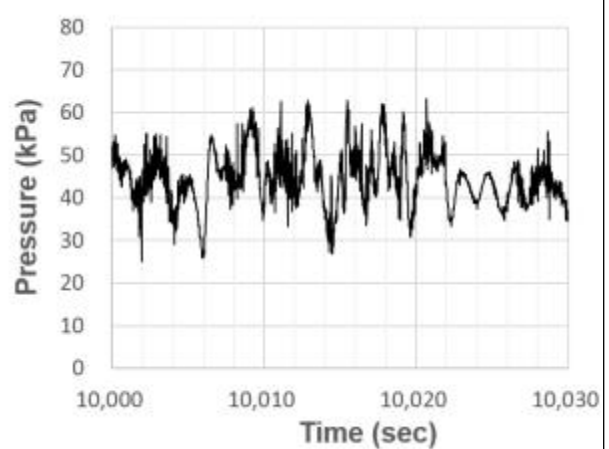
- 수리실험에 사용된 개수로 및 하천횡단구조물 제원을 바탕으로 기초자료를 구성하였으며, 수리 실험의 압력측정 위치와 동일한 지점에서 흐름특성 측정함.
- 압력은 1초에 100회(100 Hz) 측정하였으며, 시계열 Data 중 이상치로 판단되는 측정 값 제거 → 표준정규분포에서 신뢰구간 99.7% (3σ)로 설정함.



(a) 표준 정규분포 및 수리실험 결과의 필터링



(b) 수치모의 - 필터링 전



(c) 수치모의 - 필터링 후

그림 130 압력 Data의 필터링

▷ 수치모의 조건

- 수치모의 결과의 적정성을 평가하기 위해 홍익대학교 및 한국건설기술연구원에서 수행된 수리실험 결과를 비교 대상으로 선정함.
- 수리실험에 사용된 수로는 그림 131과 같이 길이 10 m, 폭 0.3 m, 높이 0.4 m의 크기를 갖는 순환수로 방식이며, 수로 내부에는 0.3 m 높이의 보(또는 하천횡단구조물)가 설치되어 있음.
- 수로 및 구조물의 재료로서 수로의 바닥과 벽면은 강화유리, 보는 아크릴로 제작되었음.
- 따라서 조도계수는 0.010을 적용하였으며, 이는 Chow (1959)가 제시한 다양한 수로에 대한 조도계수 중 Glass의 Normal 값을 나타냄.
- FLOW-3D 모형은 조고를 사용하므로, Christensen (1984)이 제시한 식(20)을 이용하여 환산된 조고 0.0003 m를 적용함.

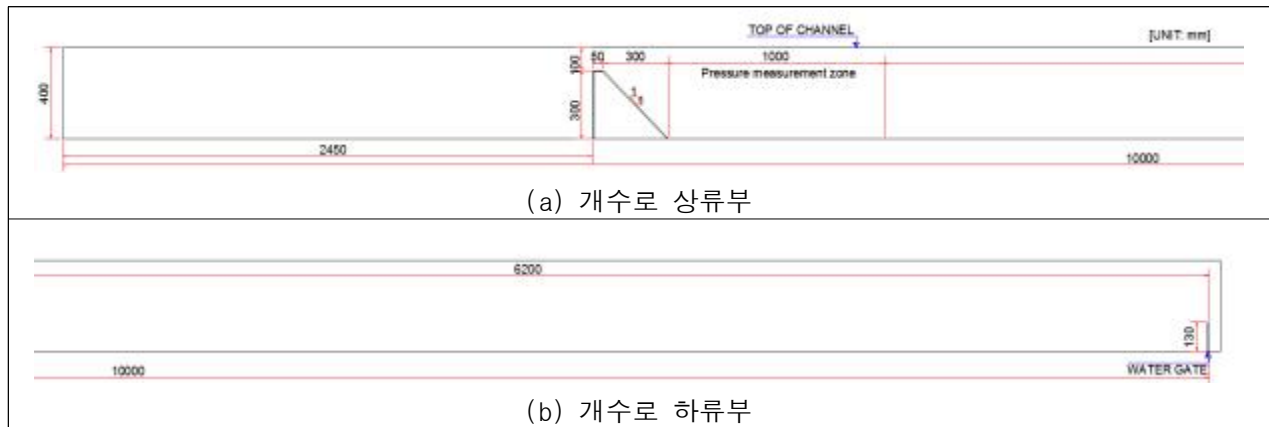


그림 131 수리실험에 적용된 개수로 및 구조물 제원

- 수치모의에 적용된 계산 영역은 보 마루부(weir crest)를 기준으로 상류(upstream) 방향으로 1.0 m, 하류(downstream) 방향으로 2.3 m 구간이고, 격자는 총 3,508,596개가 사용되었으며, x 및 z축으로 0.003 ~ 0.005 m 간격, y축으로 0.005 ~ 0.010 m 간격을 부여함.
- 특히 도수 발생 영역은 조밀한 격자를 부여하여 비교적 작은 척도의 와를 해상할 수 있도록 하였고, 경계조건은 표 37와 같이 수리실험 조건과 동일하게 적용하였으며, 모의시간을 단축하기 위해 경계조건에 해당하는 수위를 초기조건으로 부여함.

표 37 수치모의 검토안 및 결과 요약

검토안	상류수심 (m)	하류수심 (m)	도수위치(m) ¹⁾			도수 영역에서의 압력(kPa)	
			수리실험 (a)	수치모의 ²⁾ (b)	차이 (a)-(b)	최고압력 ³⁾	최저압력
Case 1	0.3550	0.0900	0.13	0.01	0.12	-	-0.01
Case 2	0.3550	0.0893	0.22	0.03	0.19	-	-0.01
Case 3	0.3550	0.0871	0.28	0.25	0.03	0.50	0.00
Case 4	0.3550	0.0863	0.35	0.28	0.07	0.56	-0.01
Case 5	0.3550	0.0851	0.43	0.37	0.06	0.51	0.04
Case 8	0.3470	0.0730	0.37	0.14	0.23	0.46	0.00
Case 13	0.3380	0.0569	0.28	0.23	0.05	0.38	-0.01
Case 18	0.3270	0.0351	0.24	0.41	-0.17	-	0.05

¹⁾ 도수위치는 보 끝단((a)에서 1:1 경사 종점 또는 물받이공 시점)으로부터의 거리를 나타냄

²⁾ 수치모의를 이용한 도수위치는 흐름특성이 수렴된 후 80초 동안(10초 간격)의 결과를 평균함

³⁾ 최고압력 값이 기입되어 있지 않은 검토안은 도수에 의한 영향을 파악하기 어려운 검토안을 나타냄

㉡ 수치모의 결과

- 수리실험 경계조건인 표 37의 상·하류수심을 적용하여 수치모의를 실시하였으며, 수치모의 결과는 그림 134 ~ 그림 141과 같음.
- (a) ~ (c)는 흐름이 충분히 수렴(convergence)된 후의 흐름특성 결과를 나타내고, (d)는 흐름이 수렴된 후 5초 동안 1초에 100회(100 Hz) 측정된 압력 시계열 자료를 바탕으로 정리된 그래프를 나타내며, (e)는 (d)와 동일한 위치에서 측정된 수리실험 결과를 나타냄.

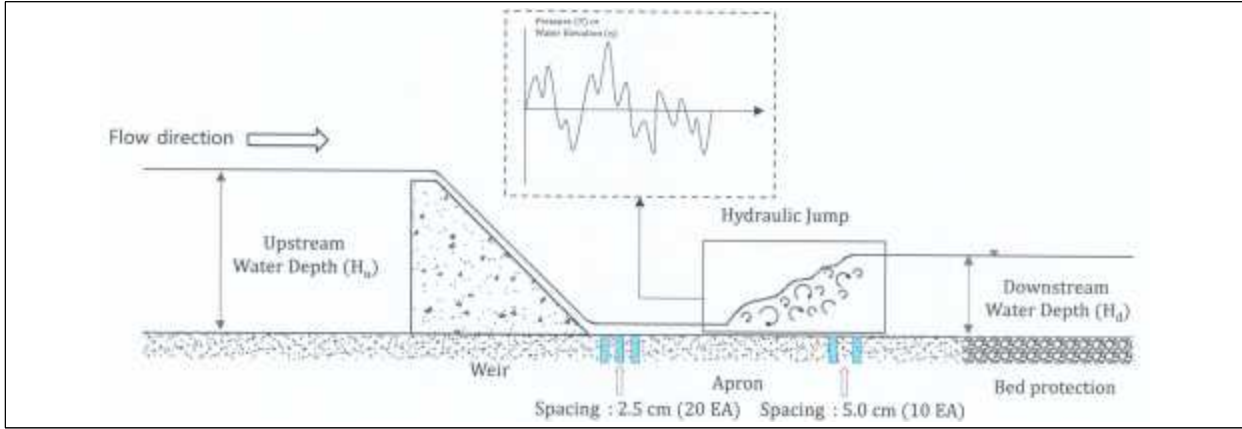


그림 132 압력 측정위치(30 EA)

- 모든 검토안의 흐름은 약 0.3 m 높이의 낙차로 인해 약 2 m/s의 유속이 발생되었으며, 물받이공 내에 Froude 수 3 ~ 7 범위의 도수가 발생함. (Froude 수 2.5 ~ 4.5 범위의 도수는 진동도수 (oscillating jump), 4.5 ~ 9.0 범위의 도수는 정상도수(steady jump)를 나타냄)
- 도수 영역 내에서는 격렬한 난류와 와류가 형성되어 흐름이 가지고 있는 에너지의 일부가 손실되면서 수위가 완만하게 상승되었고, 흐름이 하류로 진행하면서 수위가 안정화 되는 경향을 보임.
- 수치모의 결과를 수리실험 결과와 비교하였을 때, 먼저 도수위치의 경우 일부 검토안(Case 1, Case 2, Case 8 및 Case 18)이 0.10 m 이상의 큰 차이를 보임(표 35 참조).
- 도수위치의 차이가 격자 해상도가 주는 영향인지의 여부를 판단하기 위해 Case 1의 조건으로 민감도(sensitivity) 분석을 실시함(그림 133 참조).
- 성긴격자(coarse mesh)와 조밀격자(fine mesh)를 적용하여 모의된 결과를 비교하였을 때, 도수위치는 거의 유사한 것으로 나타났으며, 이는 두 검토안의 격자 해상도가 충분히 높기 때문인 것으로 판단됨.

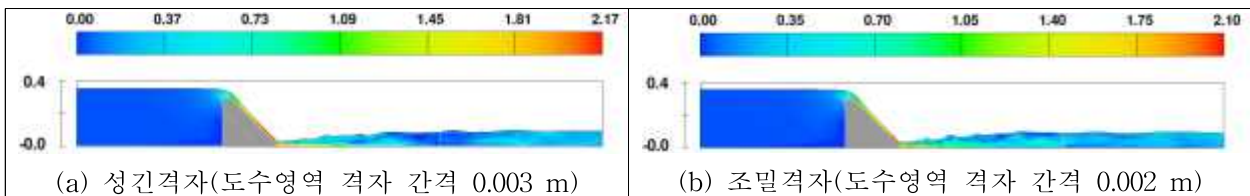


그림 133 Case 1에 대한 격자 민감도 분석

- 압력의 경우 평균압력, 최대 및 최소압력으로 구분하여 그래프로 나타냄.
- 평균압력은 각 지점에 작용하는 정수압과 유사하였으며, 보 끝단의 일부를 제외한 나머지 영역에서 수위와 거의 동일한 분포를 보임.
- 최대 및 최소압력은 압력의 변동성분을 나타내며, 도수 영역에서 큰 변동성분을 보이다가 하류로 이동할수록 작아지는 경향을 보임.
- 이때 각 검토안의 그림 (e)와 같이 수리실험 또한 같은 경향을 나타내는 것을 확인할 수 있음.
- 그러나 수치모의 결과 중 도수 영역에서 측정된 압력 변동성분의 크기가 상대적으로 아주 작게 계산됨.
- 이는 FLOW-3D가 와점성 모형으로 사용하는 Smargorinsky 모형이 항상 양의 와점성 값을 가지기 때문에 작은 척도에서 큰 척도로 되돌아오는 에너지에 대응할 수 없기 때문인 것으로 판단됨.
- 따라서 LES 모형이 더욱 작은 척도를 직접 계산할 수 있도록 물받이공 바닥 주변의 격자 간격 조정 등에 대한 연구가 필요할 것으로 판단됨.

(가) Case 1 (상류수심 0.3550 m, 하류수심 0.0900 m)

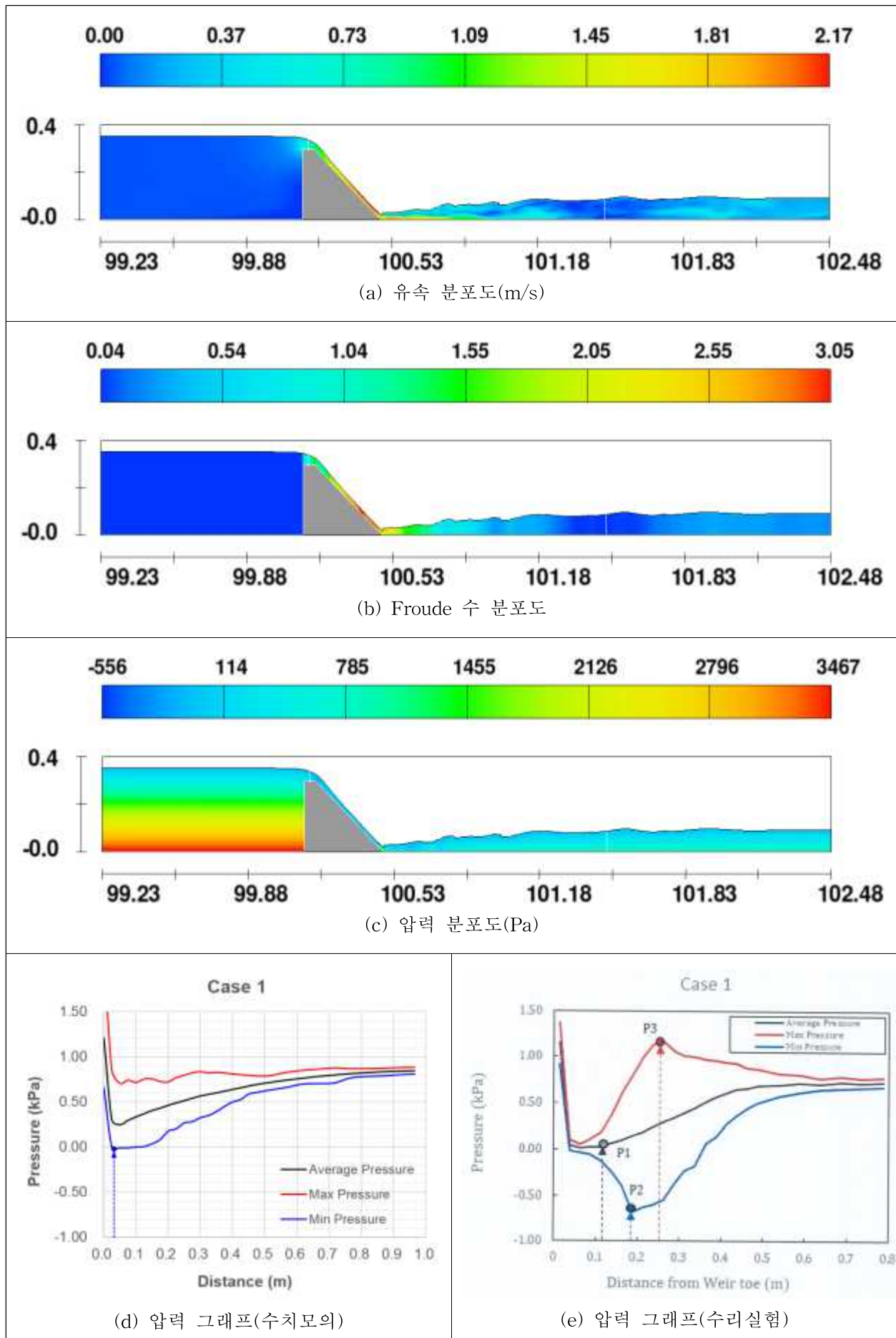


그림 134 Case 1의 흐름특성 분포도 및 그래프

(나) Case 2 (상류수심 0.3550 m, 하류수심 0.0893 m)

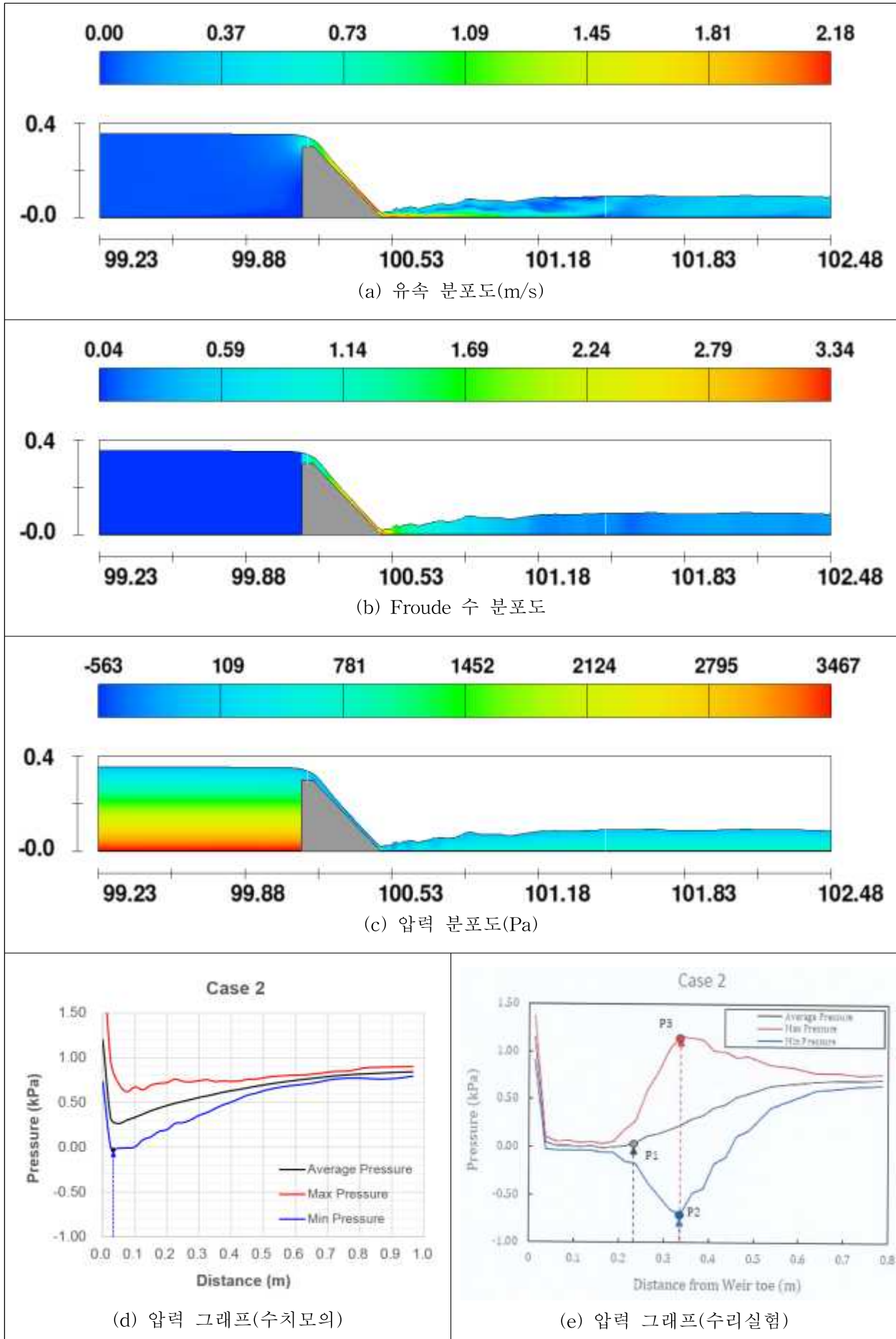


그림 135 Case 2의 흐름특성 분포도 및 그래프

(다) Case 3 (상류수심 0.3550 m, 하류수심 0.0871 m)

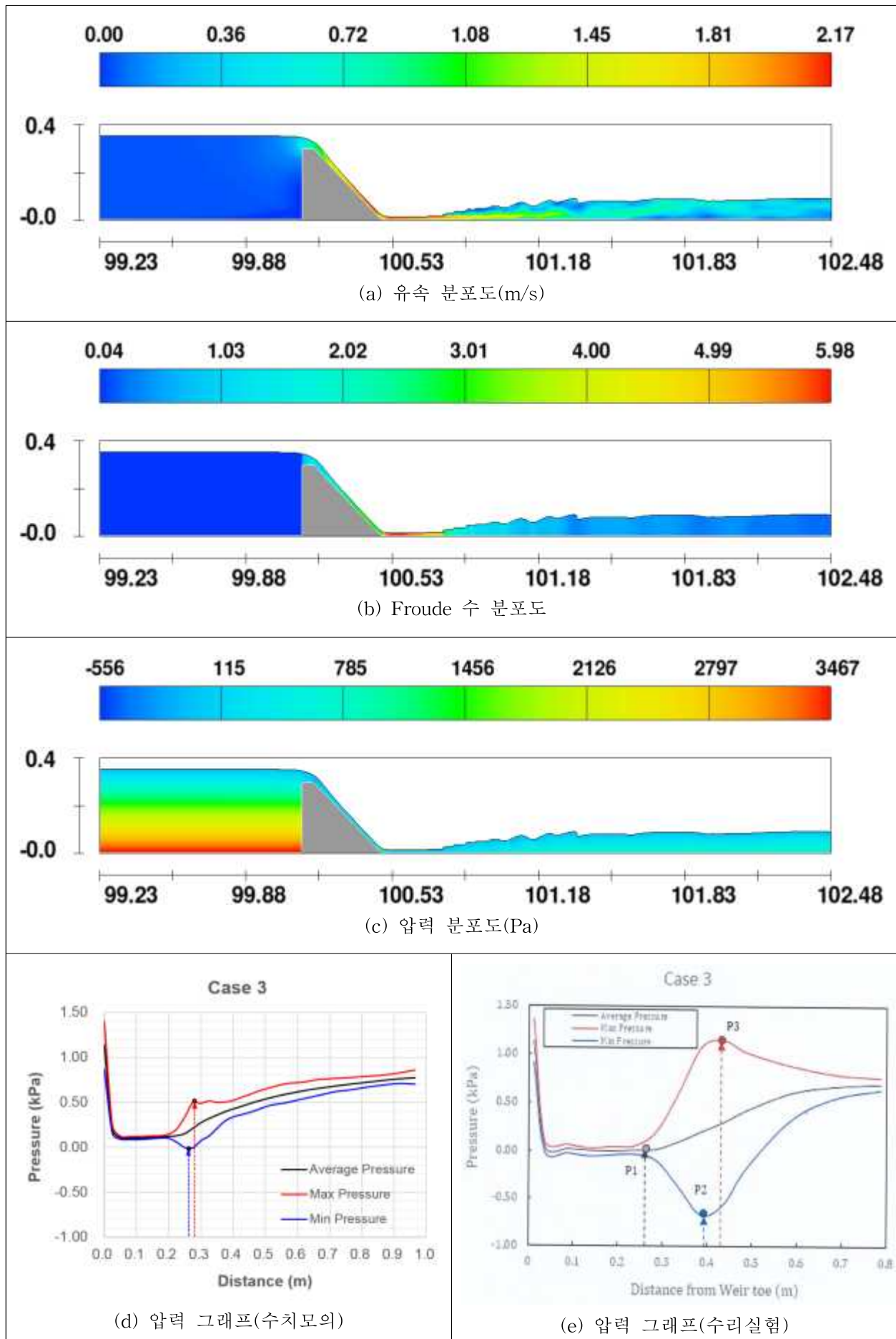


그림 136 Case 3의 흐름특성 분포도 및 그래프

(라) Case 4 (상류수심 0.3550 m, 하류수심 0.0863 m)

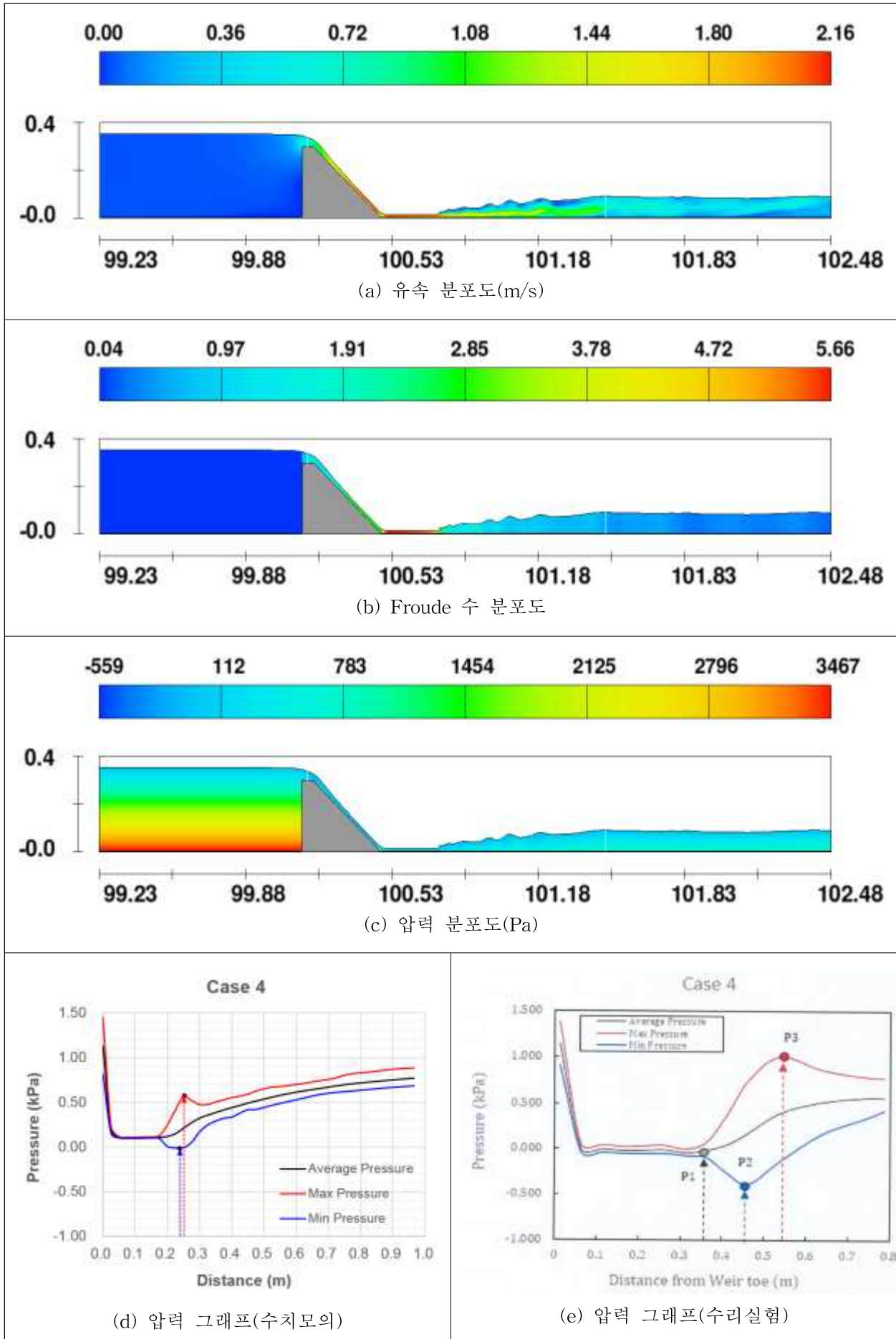


그림 137 Case 4의 흐름특성 분포도 및 그래프

(마) Case 5 (상류수심 0.3550 m, 하류수심 0.0851 m)

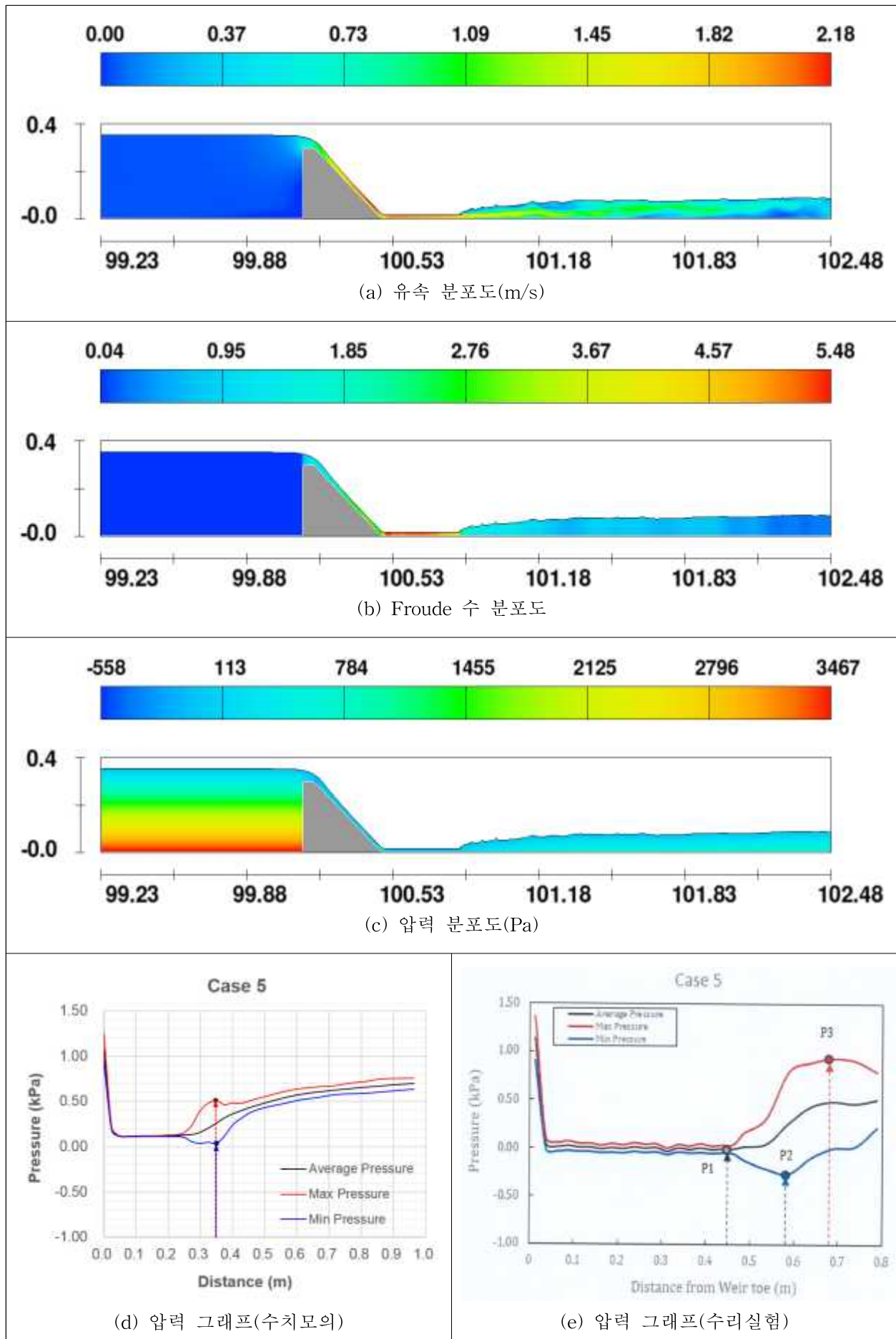


그림 138 Case 5의 흐름특성 분포도 및 그래프

(바) Case 8 (상류수심 0.3470 m, 하류수심 0.0730 m)

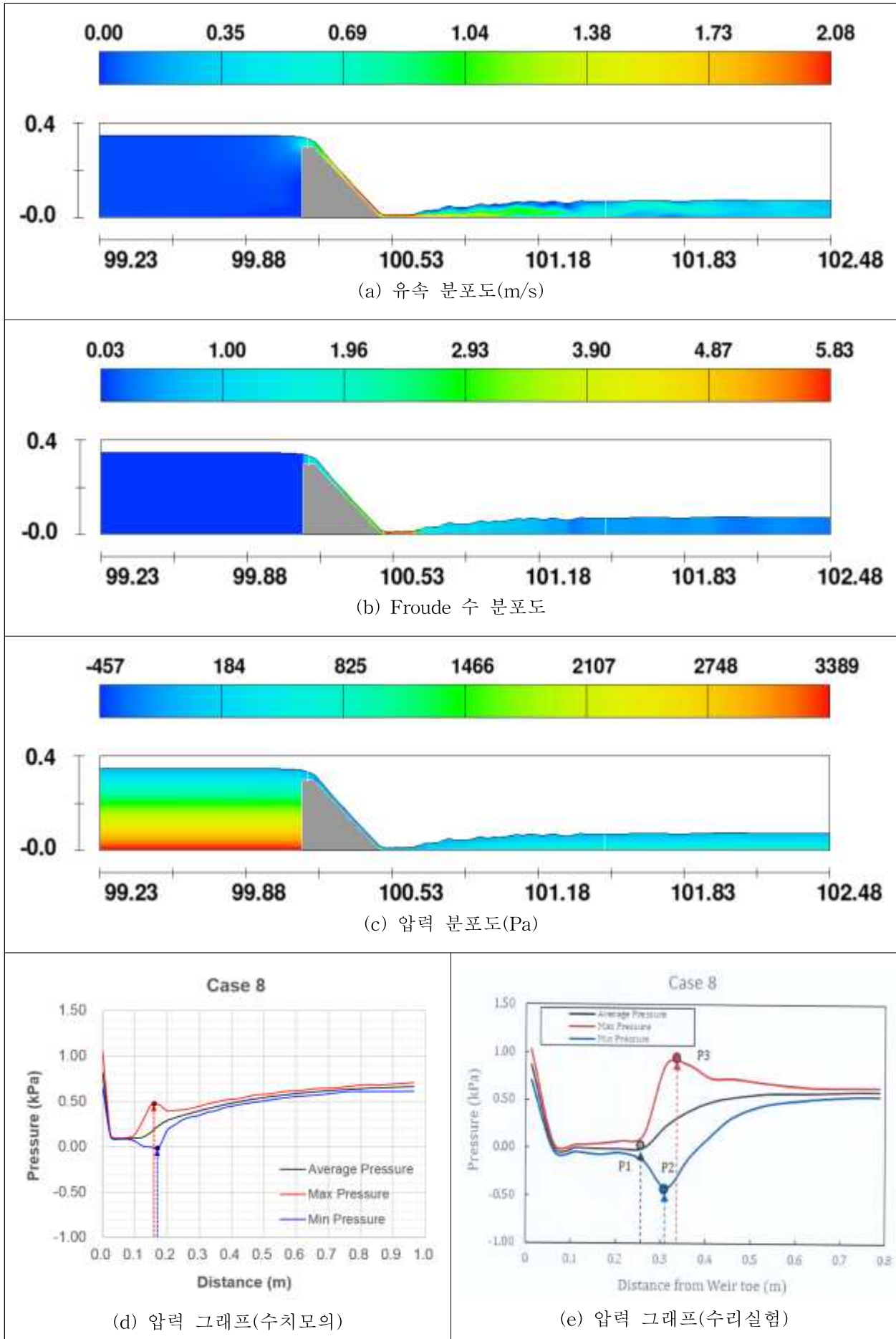


그림 139 Case 8의 흐름특성 분포도 및 그래프

(사) Case 13 (상류수심 0.3380 m, 하류수심 0.0569 m)

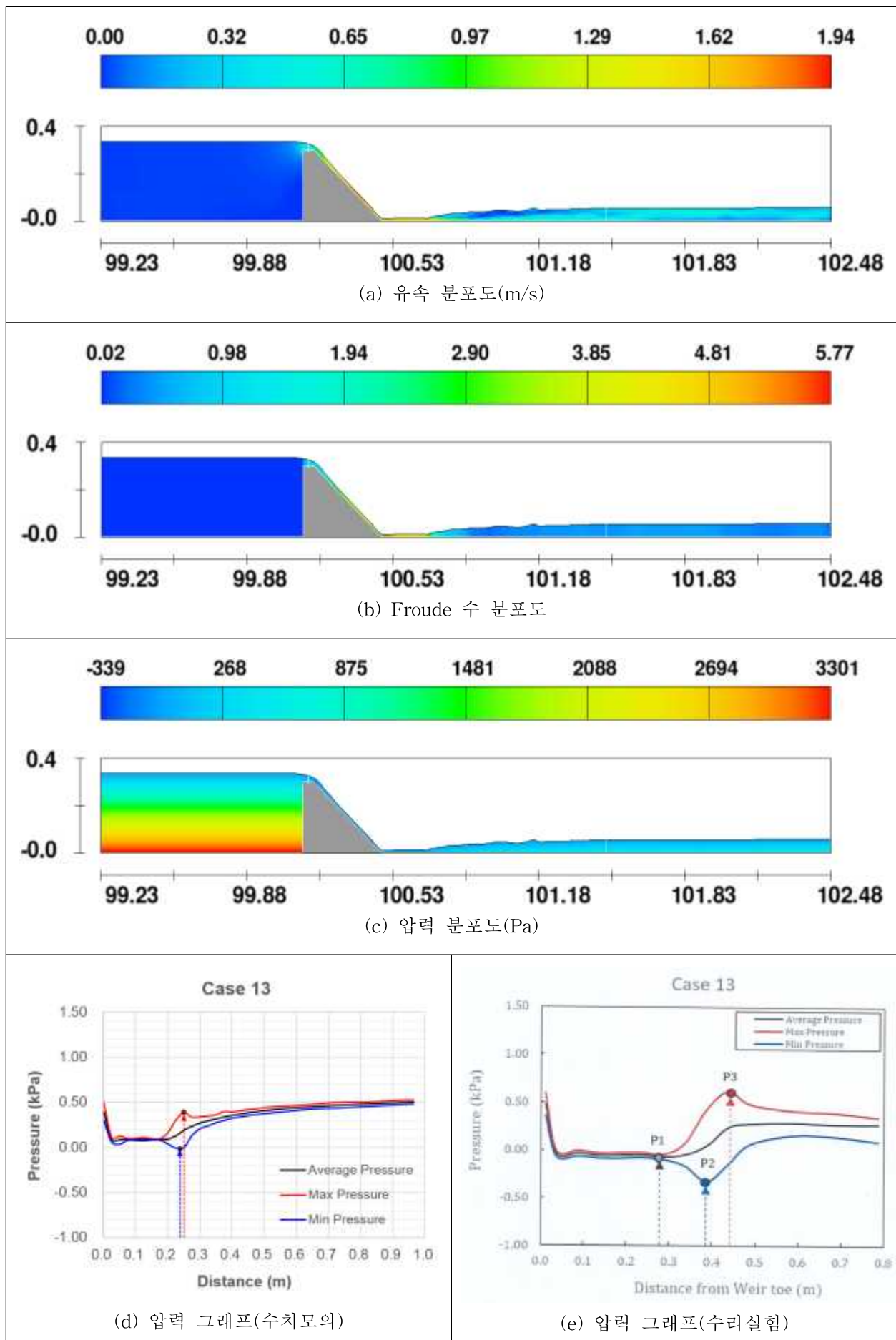


그림 140 Case 13의 흐름특성 분포도 및 그래프

(아) Case 18 (상류수심 0.3270 m, 하류수심 0.0351 m)

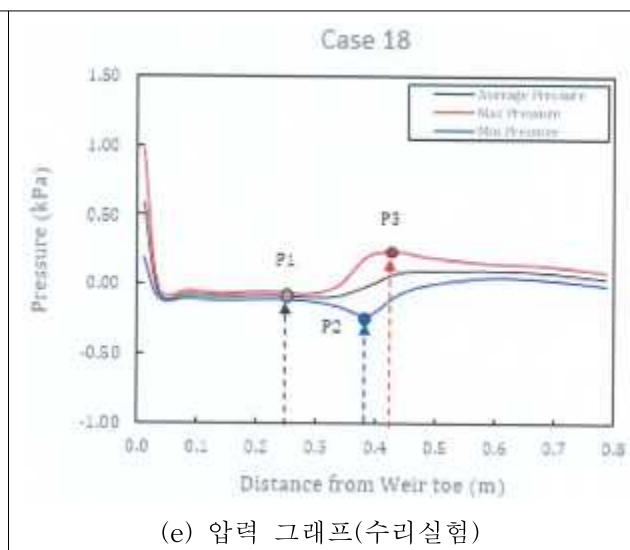
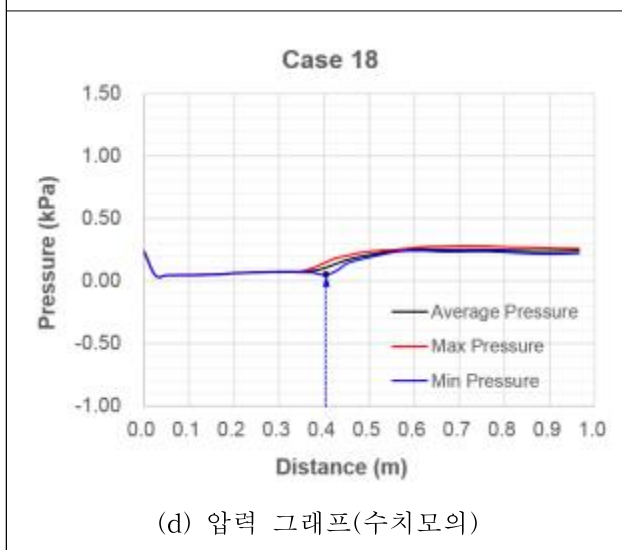
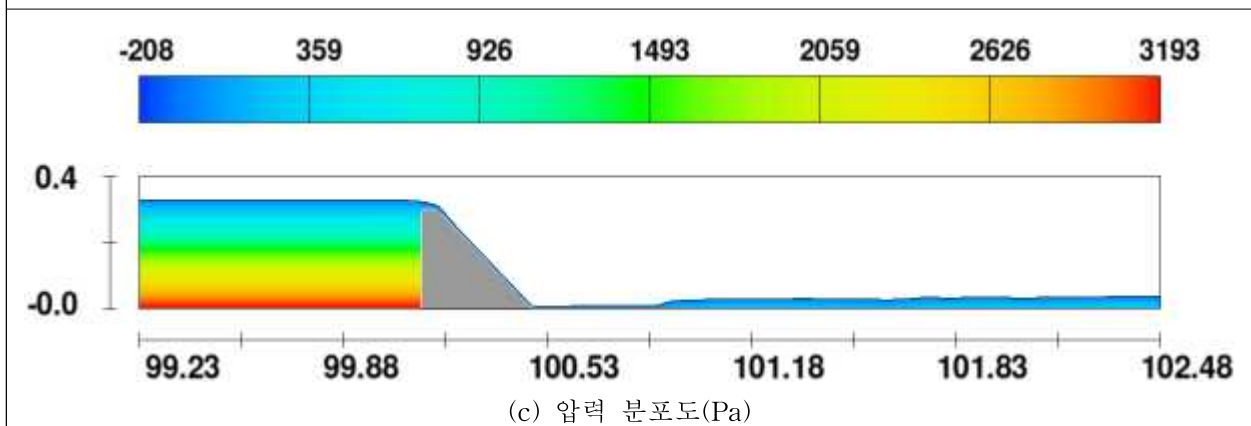
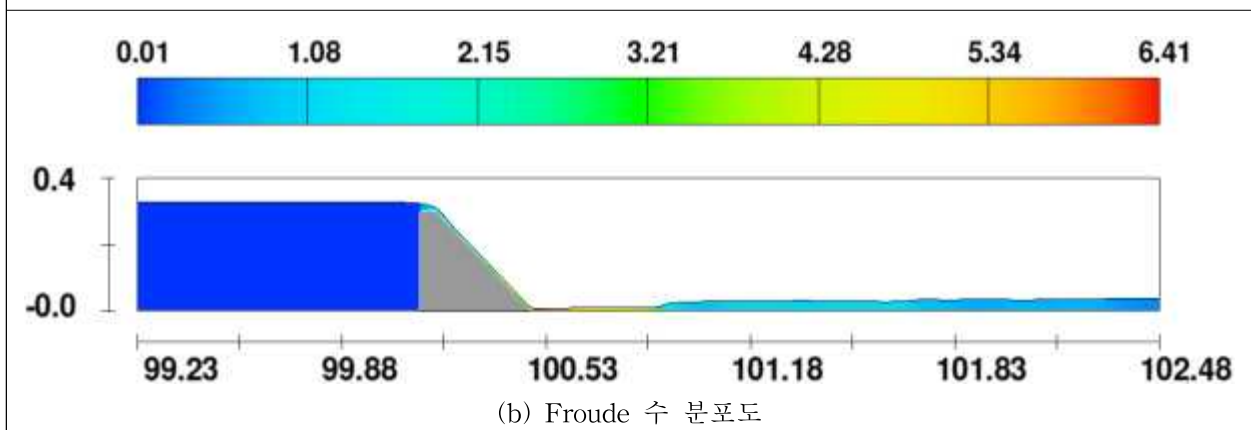
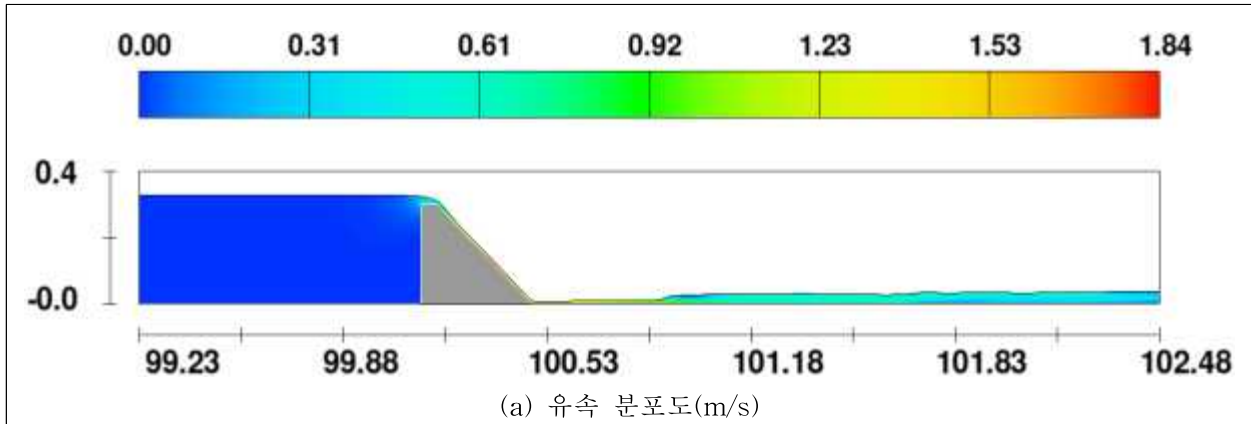


그림 141 Case 18의 흐름특성 분포도 및 그래프

③ 실규모(낙동강 철곡보) 하천횡단구조물에 대한 수치모의

㉞ 수치모의 개요

- 낙동강 철곡보 제원을 바탕으로 기초자료를 구성하였으며, 흐름특성을 측정함
- 도수영역 내에서 최대 압력변동성 9,097 Pa(동일 지점 평균압력 47,342 Pa의 약 20% 규모) 발생

▷ 수치모의 조건

- 수리실험으로 재현할 수 없는 실규모 하천횡단구조물에 작용하는 흐름특성을 검토하기 위해, 낙동강 철곡보를 대상으로 수치모의를 실시함.
- 수치모의 조건은 본 보고서의 “가. 난류모형 선정 및 Data 필터링”에 기술된 조건과 동일함.

㉟ 수치모의 결과

- 낙동강 철곡보는 상하류 수위의 낙차가 커 물받이공에 좋지 않은 영향을 줄 수 있는 조건인 상류 계획홍수위 EL.28.42 m, 하류 관리수위 EL.19.50 m를 적용하였으며, 수치모의 결과는 그림 142와 같음.
- (a) ~ (c)는 흐름이 충분히 수렴된 후의 흐름특성 결과를 나타내고, (d)와 (e)는 흐름이 수렴된 후 30초 동안 1초에 100회(100 Hz) 측정된 압력 시계열 자료를 바탕으로 정리된 그래프를 나타냄

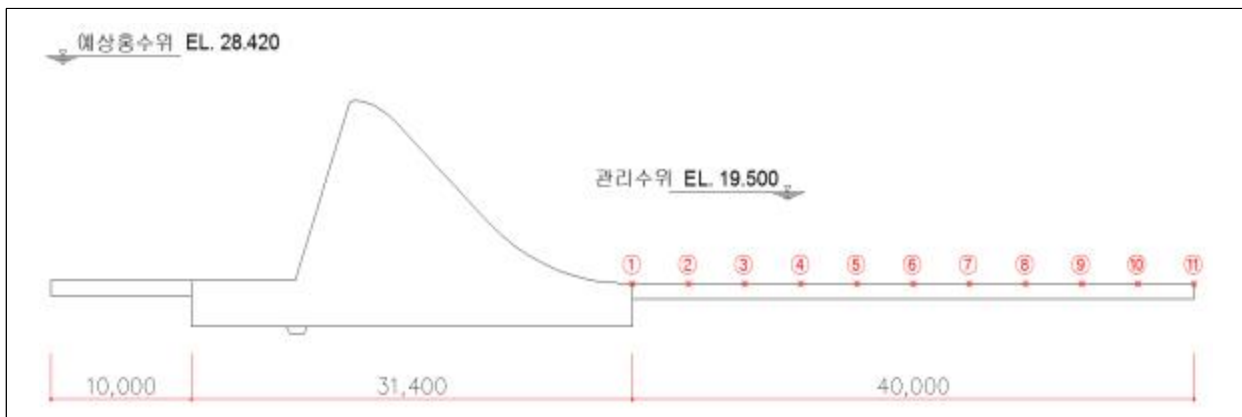
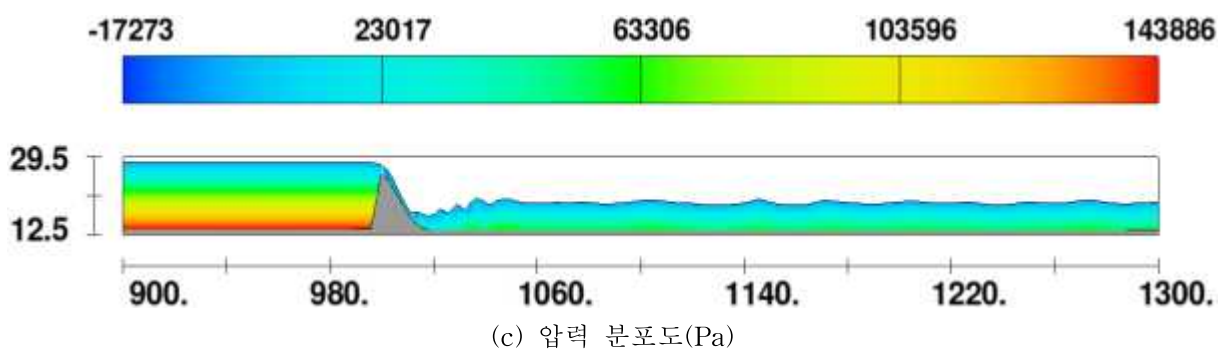
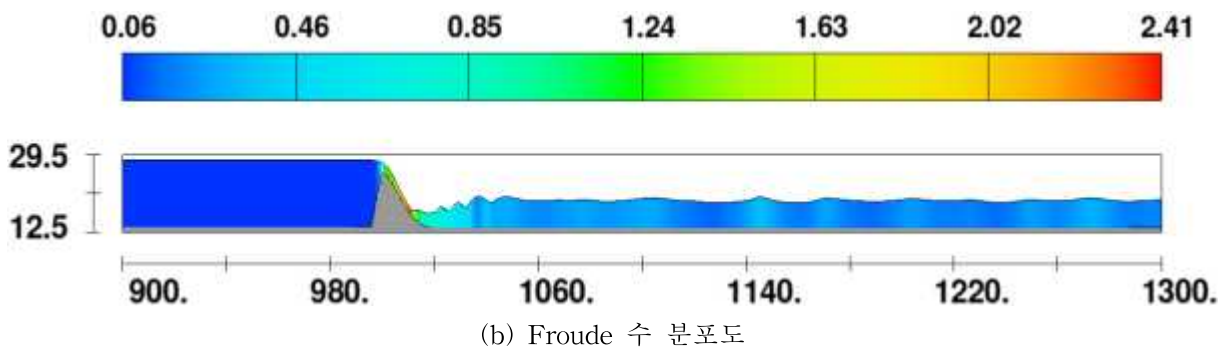
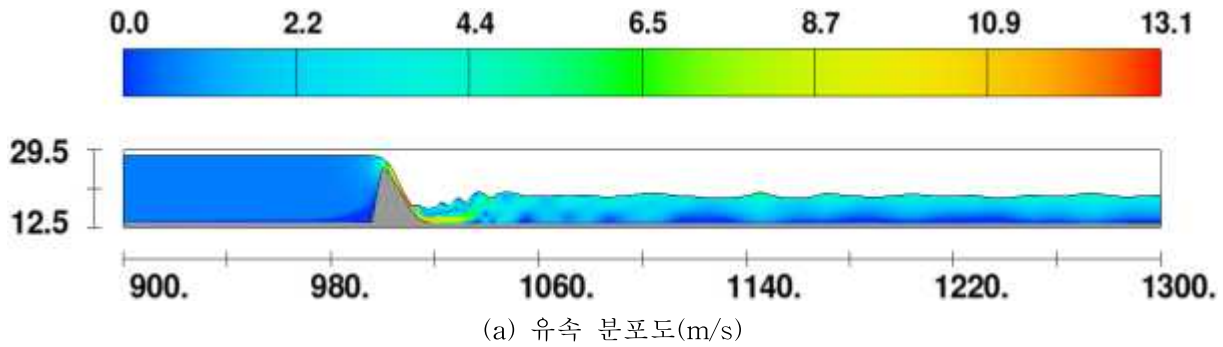


그림 142 압력 측정위치(11 EA)

- 낙동강 철곡보의 흐름은 약 17 m 높이의 낙차로 인해 약 13 m/s의 유속이 발생되었으며, 물받이공 내에 Froude 수 2.4의 도수가 발생함. (Froude 수 1.7 ~ 2.5 범위의 도수는 약도수(weak jump)를 나타냄)
- 실규모 수치모의의 결과는 실험규모와 마찬가지로 도수 영역 내에서는 격렬한 난류와 와류가 형성되어 흐름이 가지고 있는 에너지의 일부가 손실되면서 수위가 완만하게 상승되었고, 흐름이 하류로 진행하면서 수위가 안정화 되는 경향을 보였으며 이와 같은 특징으로 인해 도수 영역에 큰 압력변이가 분포되었음.
- 물받이공에 작용하는 압력의 크기는 정수압 40 ~ 60 kPa, 동수압 약 9 kPa 이하로 검토됨.
- 실험규모의 수치모의와 수리실험을 비교하였을 때 수치모의가 압력변이를 과소 추정하는 경향을 보였기 때문에 실제로는 더 큰 압력변이가 작용할 것으로 예측됨.
- 낙동강 철곡보의 실시설계보고서(국토해양부, 2010)를 살펴보면 이러한 압력변이가 설계에 고려되지 않았으며, 하천설계기준(국토해양부, 2009)에 규정된 블라이(Bligh) 공식을 이용하여 설계되었음.
- 물받이공에 작용하는 압력변이는 구조물 진동 문제, 피로파괴 문제 등이 발생할 수 있으므로 정량화시켜 하천횡단구조물 설계에 반영해야 할 것으로 판단됨.
- 작용하는 압력을 국부적으로 살펴보면 실험규모 수치모의 결과와 달리 물받이공 시점(또는 보 끝단)에 큰 규모의 동수압이 작용하지 않는 것으로 검토됨(“나. 실험규모 하천횡단구조물에 대한 수치모의” 참조).

- 이는 미국 공병단 수로시험소(waterways experiment station, WES)의 표준여수로 형상과 곡률로 인해 흐름이 급격히 변화되지 않고 안정적으로 물받이공에 진입하기 때문인 것으로 판단됨.
- 물받이공 종점의 경우 약 2.6 kPa의 범위로 압력변이가 발생되었으며, 유사한 흐름이 바닥보호공에 진입할 것으로 판단됨.
- 바닥보호공은 보호공(사석, 콘크리트 블록 등) 사이로 하상 재료가 노출되기 때문에 이러한 압력변이가 흡출파괴를 유발할 수 있을 것으로 판단됨.



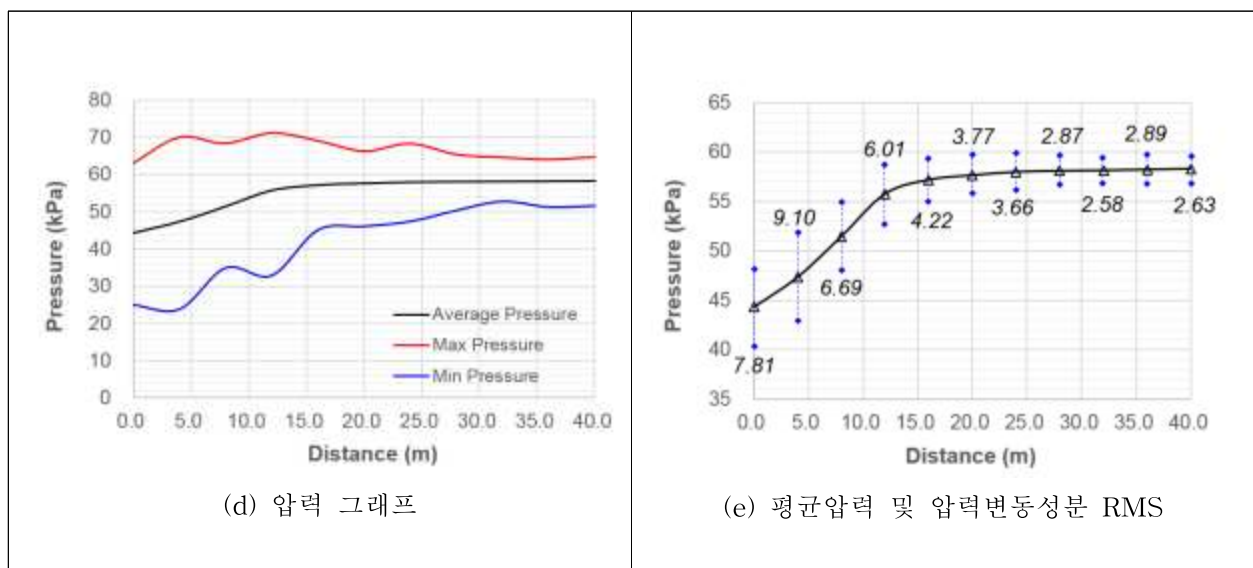


그림 143 칠곡보의 흐름특성 분포도 및 그래프

④ 수치모의 결론

- 기존 Fiorotto and Rinaldo (1992)에 의하면 도수 영역에서 양압과 음압이 지속적으로 작용하는 압력변이 때문에 구조물이 파괴될 가능성이 있음을 언급하고 있으나, 국내 하천설계기준(국토해양부, 2009)은 이러한 외력이 고려되지 않은 기존 경험식을 이용할 것을 권장하고 있는 실정임.
- 따라서 본 연구는 FLOW-3D 모형을 이용한 3차원 수치모의 통해 하천횡단구조물에 발생되는 흐름장을 정량적으로 분석하고, 물받이공 및 바닥보호공에 작용하는 외력을 구명하기 위해 수행됨.
- FLOW-3D 모형은 6가지의 난류모형을 이용할 수 있음.
- 본 연구 목적인 압력변이를 적절히 재현할 수 있는 난류모형을 선정하기 위해 일반적으로 많이 이용되는 RNG 모형과 LES 모형을 비교하였음.
- RNG 모형은 대부분의 RANS와 마찬가지로 난류를 등방성으로 가정하여 시간에 따른 변동을 감쇠시키는 특성을 가지고 있어 압력변이를 적절히 재현하지 못하는 것으로 검토되었으나, LES 모형은 Navier-Stokes 방정식을 시간 평균하지 않고 공간 평균을 실시하기 때문에 압력변이를 상대적으로 잘 재현하는 것으로 검토됨.
- 따라서 난류의 비등방성이 강하거나 변동성이 강한 흐름장 모의는 LES 모형이 이용되어야 할 것으로 사료됨.
- 물받이공 저면에서 측정된 압력을 시계열 자료로 나타내면, 불규칙적인 진폭으로 진동하는 경향을 보여 난류흐름의 의한 것인지 이상치인지 판단하기가 다소 어려움.
- 따라서 이상치로 추정되는 압력 Data를 제거하기 위해 표준 정규분포 및 신뢰구간 개념을 적용하여 99.7% (3σ) 이내의 자료를 이용하여 정량화 함.
- 수치모의 결과의 적정성을 평가하기 위해 수리실험과 동일한 조건(경계조건, 수로의 구조적 조건)으로 검토함.
- 그 결과 압력은 도수 영역에서 가장 큰 변동성분을 보이다가 흐름이 하류로 진행될수록 변동성분이 작아지는 경향을 보임.
- 이는 수리실험 결과와 유사한 경향을 나타내나 수치모의 결과 중 도수 영역에서 측정된 압력 변동성분의 크기가 수리실험 결과와 비교하여 아주 작게 계산됨.

- 이는 FLOW-3D가 와점성 모형으로 사용하는 Smargorinsky 모형이 항상 양의 와점성 값을 가지기 때문에 작은 척도에서 큰 척도로 되돌아오는 에너지에 대응할 수 없기 때문인 것으로 예측됨.
- 실험 하천 횡단 구조물에 작용하는 압력변이량을 파악하기 위해 낙동강 칠곡보를 대상으로 검토함.
- 그 결과 물받이공의 도수 영역에서 정수압 외에 약 9 kPa(정수압의 약 20% 규모) 범위의 압력변이가 발생되는 것으로 검토됨.
- 도수 영역에서 물받이공 종점으로 갈수록 동수압의 크기는 점차적으로 감소되었으며, 물받이공 종점에서는 약 2.6 kPa의 압력변이가 발생됨.
- 물받이공 종점은 바닥보호공과 접해있기 때문에 바닥보호공의 일부 영역에서도 이러한 압력변이가 발생할 것으로 예측되며, 압력변이는 바닥보호공의 흡출과피를 유발할 수 있어 물받이공 길이 설계 측면에서 이러한 외력이 고려되어야 할 것으로 판단됨.
- 본 연구 결과, 압력변이에 대한 경향성 파악 측면에서는 수리실험과 유사한 결과를 보임.
- 그러나 압력변이량을 과소 추정하는 문제가 있어 향후 LES 모형이 더욱 작은 척도를 직접 계산할 수 있도록 물받이공 바닥 주변의 격자 간격 조정 등에 대한 연구가 필요할 것으로 판단됨.
- 실험수로의 기하학적인 측면에서는 물받이공과 바닥보호공이 편평(flat)하여(유속 감세 구조물이 없음), 수치모의에서 수리실험과 유사한 도수 형상 및 위치를 재현하기 어려움.
- 따라서 향후 Baffle pier 및 End sill 등의 구조물을 배치하여 도수가 물받이공 내에서 명확하게 발생되도록 실험할 필요가 있을 것으로 판단됨.

□ 수치해석 Guide Line 제시

- 시간 변화에 따라 흐름이 변화되는, 즉 변동성이 강한 흐름을 재현하기 위해서는 Navier-Stokes 방정식을 시간평균하지 않는 LES 모형 선정이 필수적인 것으로 사료됨.
- 이때 LES 모형은 3차원 난류모형이고, 점성이 2차원(x-z plane) 계산에서도 격자 폭에 의해 결정되기 때문에 2차원적 수치해석은 부적절한 것으로 사료됨.
- 격자 해상도에 따라 도수 영역 내의 난류 및 와류의 재현 정도가 달라져 도수 위치가 변화되므로 적정 격자 해상도를 결정하기 위한 수치해석 과정이 필요함.
- 하류 수위 변화에 따라 도수 위치가 변화되기 때문에, 하류 수위가 충분히 안정화된 지점에 하류경계조건을 부여해야 함.

□ Step 1 - 수치해석 Guide Line 제시

[난류모형 선정 단계]

- 하천 횡단 구조물 하류 구조물에 발생하는 도수는 사류(supercritical flow)가 상류(subcritical flow)로 바뀌면서 격렬한 난류와 와류가 형성되어 흐름이 가지고 있는 에너지의 일부가 손실되는 흐름특성을 나타냄
- 이때 난류는 시간과 공간에 걸쳐서 불규칙적으로 변화하는 흐름특성을 나타내며, 이러한 변동성이 강한 흐름을 재현하기 위해서는 본 보고서의 ‘난류모형 선정’에 제시된 결과와 같이 LES 모형 사용이 필수적임
- FLOW-3D에서 사용할 수 있는 6개의 난류 모형 중 LES 모형은 Navier-Stokes 방정식을 시간평균하지 않고, 비등방성 잔여 응력항의 완결 문제(closure problem)를 해결하기 위해 Smagorinsky 모형을 사용하기 때문에 상대적으로 변동성을 잘 재현하는 것으로 사료됨(RNG k- ϵ 모형은 등방성 난류로 가정)

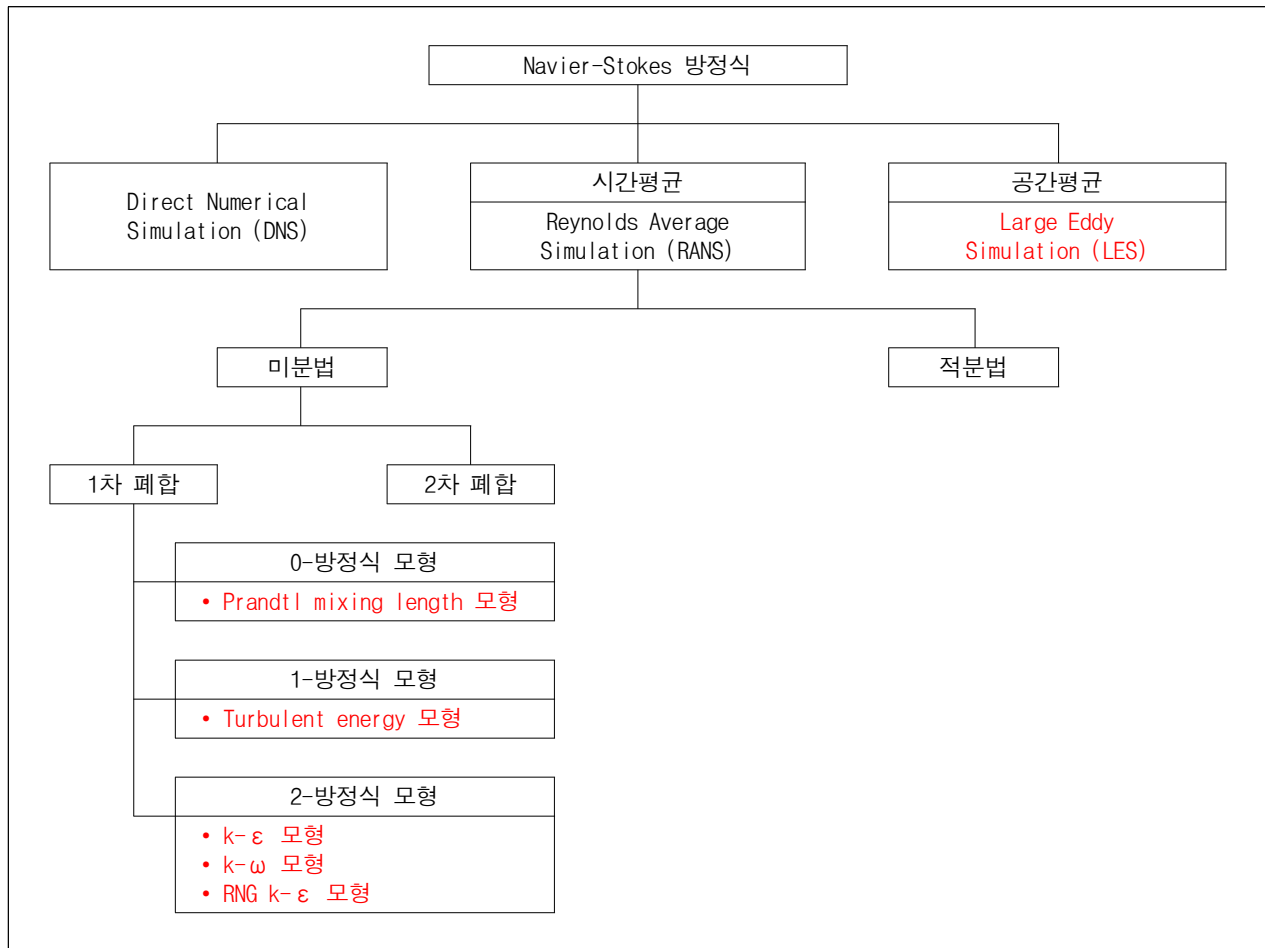


그림 144 FLOW-3D에서 사용가능한 난류모형의 분류

[매개변수 결정 단계]

- FLOW-3D 모형에 사용되는 주요 매개변수(parameter)인 조고(roughness height)의 선정은 상당한 주의를 요하며, 단지 관측된 수위와 일치시키기 위한 목적만으로 조고를 변화시키는 것은 피해야 함(Vanoni, 1975)
- Chow (1959)가 다양한 재료에 대한 조고의 근사 값을 제시하고 있으나, 그 값의 범위가 비교적 넓고, 일반적으로 사용되는 조도계수와 유사한 값을 알기 어려움
- 따라서, Christensen (1984)가 제시한 조도계수와 조고의 관계식을 이용하여 조고를 산정하는 것이 권장됨(여기서 n 은 조도계수, k_s 는 조고(m), g 는 중력가속도(m/s^2))

$$n = \frac{k_s^{1/6}}{8.25 \sqrt{g}} = 0.039 k_s^{1/6} \quad (21)$$

Material	k, ft
Brass, copper, lead, glass.....	0.0001-0.0030
Wrought iron, steel.....	0.0002-0.0080
Asphalted cast iron.....	0.0004-0.0070
Galvanized iron.....	0.0005-0.0150
Cast iron.....	0.0008-0.0180
Wood stave.....	0.0006-0.0030
Cement.....	0.0013-0.0040
Concrete.....	0.0015-0.0100
Drain tile.....	0.0020-0.0100
Riveted steel.....	0.0030-0.0300
Natural river bed.....	0.1000-3.0000

그림 145 조고의 근사 값(Chow, 1959)

[격자 구성 단계]

- 본 연구에서 난류모형으로 선정된 LES 모형은 3차원 난류모형이고, 점성은 2차원(x-z plane)

계산에서도 격자 크기에 의해 결정되기 때문에 2차원적 수치모의는 부적합한 것으로 사료됨

- 아래 결과는 x, z축 격자는 동일하고, y축 격자의 크기를 조절하여 검토한 것이며, y축 격자 크기가 작아질수록 도수가 하류로 이동하는 것을 확인할 수 있음(단, y축 경계조건으로 symmetry 조건 적용)
- 3차원적 수치모의 또한 격자 해상도에 따라 도수 영역 내의 난류 및 와류의 재현 정도가 달라져 도수 위치가 변화되므로 적정 격자 해상도를 결정하기 위한 수치모의가 요구됨

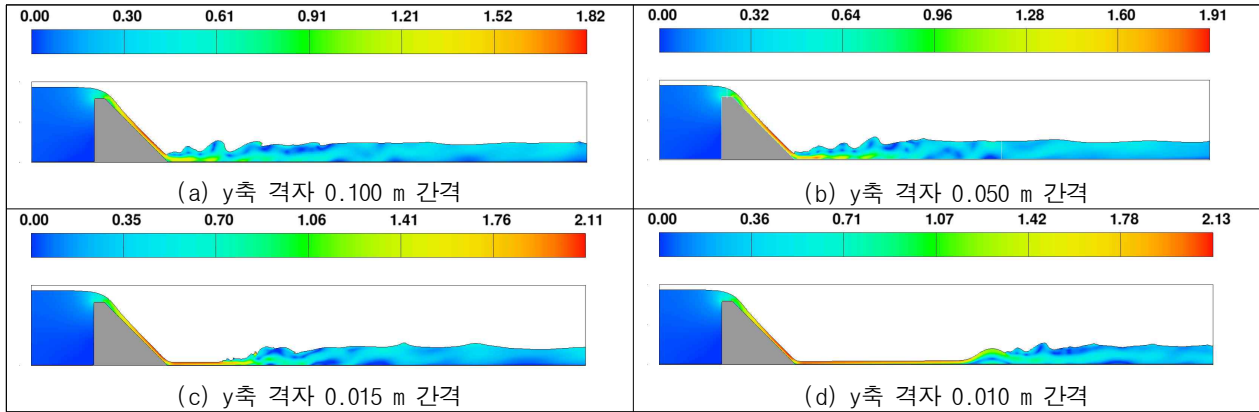


그림 146 2차원적(x-z plane) 수치모의 결과(m/s)

[경계조건 구성 단계]

- 수치모의에 사용되는 편미분 방정식의 일반해는 임의 함수를 포함하여 여러 가지 해가 산정될 수 있으므로, 이것을 하나로 결정하기 위해서는 경계조건을 필요로 함
- 일반적으로 유입 경계조건은 경계를 따라 유속 분포를 결정하는 유량이 사용되며, FLOW-3D에서 유량 조건을 사용하면 전단면에 균일(uniform) 유속으로 분포시켜 유입 경계조건의 위치를 하천횡단구조물로부터 충분히 멀리 이격시켜야 하는 단점이 있음
- FLOW-3D는 유입 경계조건으로 수위를 사용할 수 있으며, 수위 조건은 전단면에 균일 유속으로 분포시키지 않고 하천횡단구조물에서 형성되는 흐름장이 지배적으로 분포됨 → 유입 경계조건의 위치를 멀리 이격시키지 않아 격자 수 감소 및 해석시간 단축 가능

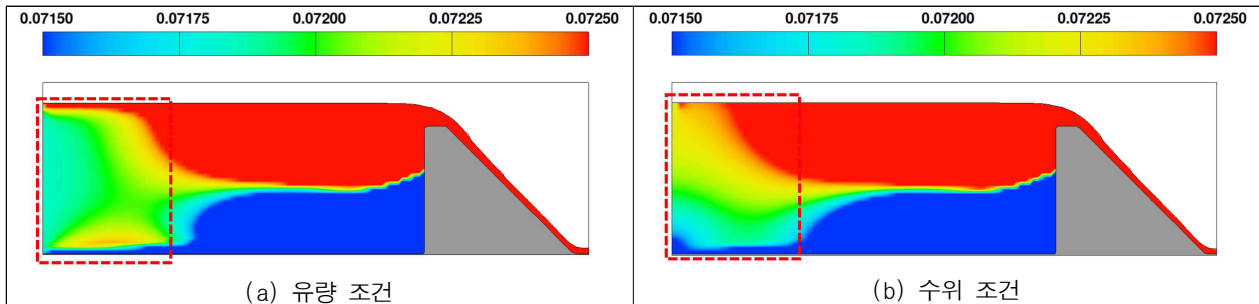


그림 147 유입 경계조건 변화에 따른 유속 분포도(m/s)

□ Step 2 - 프로그램 개발

- 본 연구에서 도출된 설계식을 바탕으로 프로그램을 개발하였으며, 관련 실무자(하천 설계 및 구조 설계 실무자 등)가 설계와 관련된 변수를 입력하면 계산 결과를 한 화면에서 확인할 수 있도록 배치
- 프로그램은 관련 실무자의 접근성을 고려하여 html (Hypertext Markup Language)로 개발(여기서 말하는 접근성은 별도의 프로그램 설치를 필요로 하지 않는 것을 의미함)

(3) 결론

(가) 각 Task 별 결론

① Task 1. 음압구배 및 물받이공 진동으로 인한 하천횡단구조물 설계인자 도출

- 압력변동성 실험을 통하여 보 상·하류 수심비에 따라 평균압력(=정수압, Static Pressure)대비 발생 가능한 최대양압력(Maximum Positive Pressure) 및 최대음압력(Maximum Negative Pressure)의 크기를 도출함.
- 도수(Hydraulic Jump)형태 에 따라서 물받이공 하류에 발생 가능한 압력변동 폭(Pressure Fluctuation Width)의 범위 및 관계식을 도출함.
- Froude 수에 따라서 흐름방향으로 사석이 받는 외력(=항력, Drag Force)의 변동 폭(Fluctuation Width)의 범위 및 관계식을 도출함.
- 압력변동성을 고려한 구조해석을 통하여 유량 변화와 도수 발생위치 변화(=동일 유량 $Q=22.8\text{m}^3/\text{h}$)에 따른 수로 표면과 바닥면의 최대주응력(σ_1)을 검토함.

② Task 2. 압력변이로 인한 하천횡단 구조물 하류 물받이 피로파괴 설계인자 도출

- 수위변동 분석결과 접근유속 및 하류수위 변화에 따라 수위변동이 민감하지 않은 것으로 나타났으며 $(x-x_1)/d_1 < 10$ 에서는 수위변동이 낮은 값을 보였지만 도수구간 내에서는 유사한 수위변동 값을 보이는 것을 확인함.
- 흐름방향 및 수직방향 평균유속을 분석한 결과 두 인자간의 경향성은 보이지 않았지만 난류강도는 $(x-x_1)/d_1 = 10.0$ 에서 최대값을 보이고 이후 서서히 감소하는 경향을 보임.
- 통계적 분석을 통하여 수리인자와 압력변동성간의 상관관계를 분석하였고, 특히 흐름방향 난류강도가 압력변동성과 상관관계가 가장 높은 것으로 나타남.
- 접근수심과 도수시작점으로부터의 거리로 나타낼 수 있는 난류강도 추정식을 제시하였고, 난류강도로부터 최대 압력변동 산정이 가능한 관계식을 제안함.

③ Task 3. 압력변이로 인한 하천횡단구조물 하류 물받이공 및 바닥보호공 설계인자 계산 프로그램 개발

- 압력변이를 적절히 재현할 수 있는 난류모형을 선정하기 위해 FLOW-3D의 RNG 모형과 LES 모형을 적용하여 실험결과와 비교하였음. → (FLOW-3D의 LES 모형이 실험결과와 압력변동 형태를 비교적 정확히 재현함.)
- 실규모 하천횡단구조물에 작용하는 압력변동성을 파악하기 위해 낙동강 칠곡보를 대상으로 검토한 결과 도수영역에서 정수압의 약 20% 규모의 압력변이가 발생하는 것을 확인함.
- Task 1 및 2에서 도출된 설계인자 및 인자 별 상관관계를 Python 프로그램으로 코딩하여 물받이공 길이 및 두께 산정, 바닥보호공 입경 또는 최소중량을 계산하는 프로그램 개발

(나) 최종 성과물

□ Task 1 및 2에서 도출된 설계인자 및 인자 별 상관관계식

- Froude 수 및 상·하류 수심비(H_d/H_u)에 따라 도수길이 산정식 제시를 통한 물받이공 길이(L) 도출함.
- Froude 수에 따른 압력변동 폭의 비(C_{WFR}) 및 압력변동성과 난류변동성과의 관계식을 통하여 기존 물받이공 두께 산정에서 고려하지 못한 압력변동성을 고려 및 적용함.
- 구조해석을 통하여 도출된 최대주응력 및 최대 주응력의 감소율은 향후 콘크리트 휨 파괴식에 적용하여 정량적인 물받이공 두께를 산정할 예정임.
- 사석의 입경 및 사석의 중량은 외력(=항력)의 변동 폭의 비(CD_{FWR})를 고려하여 적용하였으나, 본 연구에서는 흐름방향의 외력변동성분만 고려한 한계점이 있어, 향후 중력방향(=양력)의 변동성에 대한 검토가 필요함.
- 각 설계인자에 대한 관계식 등은 다음 표 36와 같이 제시함.

표 39 본 연구를 통하여 도출된 설계 인자(물받이공 및 바닥보호공)

설계 인자		본 연구를 통하여 도출된 인자 별 상관관계	최종 성과물 제시 형태
물받이공	길이(L)	◦ 도수길이(L_j)를 이용하여 물받이공 길이 산정 (도수 길이 이상으로 물받이공 길이 확보). $\frac{L_j}{H_s} = f(Fr) = 0.037Fr^{1.81} < \frac{L_j}{H_s} < 0.05Fr^{1.71}$ 여기서, L_j는 도수길이, Fr는 Froude 수, H_s는 구조물의 높이를 의미함.(범위는 상·하류 수심비에 따라 변동됨)	물받이공 길이 산정식
	두께(S)	◦ 압력변동 폭의 비(C_{FWR})와 난류변동성분 및 구조 해석을 통해 도출한 최대주응력(σ_1)을 통하여 두께 산정 ◦ Step 1 : 압력변동 폭의 비(C_{FWR})와 난류변동성분을 고려하여 적용 (ex. Toso (1988) & Hajdin(1982)) $1. S = \frac{C_p \gamma}{6g(\gamma_c - \gamma)} \times C_{FWR} \quad (Toso, 1988)$ 여기서, S는 물받이공 두께, γ_c, γ는 콘크리트와 물의 단위중량, $C_p (= \frac{P}{V_1^2/2g})$는 평균 압력의 무차원화, $C_{FWR} (= 0.0026 \times Fr^{3.85})$는 압력변동 폭의 비를 의미함. $2. S = \frac{C_p' K \phi_1 \phi_2 V_1^2 \gamma}{2g(\gamma_c - \gamma)} \quad (Hajdin, 1982)$ $\log(C_p') = 2.2125 \log(U^*) - 3.0969$ 여기서, s=물받이공의 두께, K힘의 발생 빈도를 정의하는 계수 (일반적으로 3.09이면 발생 확률이 99.8%), $C_p' = \sqrt{(p')^2} / \frac{V_1^2}{2g}$, p': 물받이공에서의 순간압력(실험값), ϕ_1, ϕ_2: 물받이공 폭과 길이에 따른 상관 계수 (형상에 따라 실험값을 제시함), $U^* (= \frac{\sqrt{(V')^2}}{V_1})$는 난류강도의 무차원 변수를 의미함. ◦ Step 2 : 최대주응력(σ_1) → 최대 주응력의 감소율 및 최대 주응력의 무차원화 변수 도출 및 휨 파괴 검토를 통하여 물받이공 두께 산정	물받이공 두께 계수 제시
바닥보호공	입경(D)	◦ 사석에 작용하는 외력(=항력)의 변동성분(CD_{FWR})	바닥보호공

	과 중량(W)	을 고려하여 적용 (ex. Escarameia & May, 1992) $D_{50} = C \frac{U_b^2}{2g(s-1)} \times (1 + CD_{FWR})$ 여기서, D_{50}는 사석의 중앙 입경(m), C는 난류강도에 의한 계수 ($=12.3 \times T.I - 0.2$), U_b는 바닥 유속 (m/s), $CD_{FWR}(=0.19Fr^{0.45}, 0 < Fr < 1)$는 외력의 변동성분 폭의 비를 의미함. ◦ 사석의 중량의 경우 위에서 구한 사석의 중앙입경을 적용하여 다음과 같이 산정할 수 있음. $W = \frac{\pi}{6} \rho_s D_{50}^3$ 여기서, W는 사석의 중량(kg), ρ_s는 사석의 밀도 (kg/m^3), D_{50}은 사석의 중앙 입경(m)을 의미함.	사석입경 계수 제시
--	------------	---	---------------

□ Python 코딩을 통하여 설계인자 도출 프로그램 개발

- Task 1 및 2에서 제시된 설계인자에 대한 한계조건 및 정량적인 값을 도출하기 위하여 Python을 통하여 프로그램 개발함.
- 각 설계인자 별 변수 값을 입력하여 한계 조건 및 정량적인 설계인자 도출이 가능함.
- 그림 141은 도출된 설계인자를 통하여 코딩을 한 Python Code 이며, 그림 142는 코드를 통하여 도출되는 결과의 예시를 나타냄

□ 향후 연구

- 물받이공의 재료 특성(콘크리트, 사석 등)과 난류 특성 등에 따라 물받이공 두께가 변동 될수 있으므로, 향후 연구에 이를 고려하여 설계인자를 도출하도록 하겠음.

```

%% 유입조건에 따른 압력변이로 인한 하천횡단구조물 하류 물받이공 및 바닥보호공 설계인자 도출 프로그램

%% 본 프로그램은 토목 관련업에 종사하는 기술자들이 현장 상황에 적합한 수리적 기초 자료를 입력하여 하천횡단구조물
%% 하류 물받이공 및 바닥보호공 설계인자를 계산할 수 있는 프로그램임,

%% 연구개발 기간 : 2017.06.30 ~ 2018.12.31

import math
%% 입력 변수 LIST
h = 0.1 임의 지정 수 (Unit: m) Hu = 0.347 보 상류 수심 (Unit: m)
Hd = 0.073 보 하류 수심 (Unit: m) d1 = 0.05 Froude 수 계산을 위한 접근 수심 (m)
Ub = 2.0 접근 유속 (m/s) Hs = 0.3 보 높이 (m)
g = 9.81 중력가속도 (m/s^2) rc = 24.03 콘크리트 단위중량 (kN/m3)
rw = 9.81 물의 단위중량 (kN/m3) x1 = 0.3 도수발생 시작지 (m)
U = 0.02 난류강도 K = 3.09 pi1 = 0.01 pi2 = 0.02 s=2.65 (사석의 비중) , rho_s = 2650 사석의 밀도 (kg/m3)

%% 흐름 상태 및 정수압 계산
P = rw*h # 정수압
Fr = Ub**2/math.sqrt(g*d1)

%% Cp 계산
Cp = P/(Ub**2/(2*g))

$$ 물받이공 길이 (범위 제시 Hd/Hu에 따라 변동)
Lj_min = (0.037*Fr**1.81)*Hs
Lj_max = (0.05*Fr**1.71)*Hs

%% 물받이공 두께
C_FWR = 0.0026*Fr**3.85

%% Toso (1988)
S1 = (Cp*rw)/(6*g*(rc-rw))*C_FWR

%% Hajdin (1982)
S2 = 10**(2.2125*math.log10(U)-3.0969)*K*pi1*pi2*Ub**2*rw/(2*g*(rc-rw))

%% 바닥보호공 입경과 중량
CD_FWR = 0.19*Fr**0.45 # 0<Fr<1
C = 12.3 * U - 0.2

D50 = C*Ub**2/(2*g*(s-1))*(1+CD_FWR)
W = 3.14/6*rho_s*D50**3

```

그림 152 Python 코딩을 통한 설계인자 도출 프로그램

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

가. 목표 달성도

(1) 질적 성과목표 및 달성도

핵심성과 (level1)		단위성과 (level2)		1차년도 성과점검기준				
				질적 성과지표		목표치	측정방법	달성도
A	바닥보호공 설계 인자 도출	A-1	Jet 분사장치 (1차 년도)	①	Jet 재현성 및 창의성	정확도 99% 이상	수리실험	100%
		A-2	측정된 수리적 인자들 간의 관계 도출 (2차 년도)	②	바닥보호공 이탈 한계 조건 제시	정확도 60% 이상	수리실험 및 수치해석	100%
	공간으로 인한 휨파괴 관련 물 받이공 설계인자 도출	A-3	측정된 수리적 인자들 간의 관계 도출 (2차 년도)	①	물받이공 휨 파괴 한 계조건 제시	정확도 60% 이상	수리실험 및 수치해석	100%
B	피로파괴 관련 물받이공 설계인 자 도출	B-1	측정된 수리적 인자들 간의 관계 도출 (2차 년도)	①	물받이공 피로 파괴 한계조건 제시	정확도 60% 이상	수리실험 및 수치해석	100%
C	한계조건 계산을 위한 프로그램	C-1	계산 프로그램 (2차 년도)	①	정확한 계산 프로그램	정확도 60% 이상	수리실험 및 수치해석	100%

(2) 양적 성과목표 및 달성도

■ 1차년도(2017.06.30~2017.12.31)

과제명	성과지 표 종류	양적 성과점검기준					
		양적 성과지표		목표치	측정방법	달성치	달성도
유입조건에 따른 압력변이로 인한 하천횡단구조물 하류 물받이공 및 바닥보호공 설계인자 도출	기술적 성과	①	특허출원/특허등록	2/0	출원, 등록 건수	2/0	100%
	학술적 성과	①	SCI 논문/비SCI 논문	0/0	논문 게재 건수	1/0	초과달 성

■ 2차년도(2018.01.01.~2018.12.31)

과제명	성과지 표 종류	양적 성과점검기준					
		양적 성과지표		목표치	측정방법	달성치	달성도
유입조건에 따른 압력변이로 인한 하천횡단구조물 하류 물받이공 및 바닥보호공 설계인자 도출	기술적 성과	①	특허출원/특허등록	0/0	출원, 등록 건수	1/1	100%
		②	소프트웨어 등록	1건	소프트웨어 등록 건수	1건	100%
	학술적 성과	①	SCI 논문/비SCI 논문	1/4	논문 게재 건수	2/3	100%

나. 관련 분야 기여도

(1) 기존 기술 대비 최종성과의 차별성

최종 성과명	기존 기술과의 차별성
압력변동성을 고려한 물받이공 설계 인자 제시	압력변동성을 고려함으로써 국내 다수의 수공구조물에 대한 새로운 안전성 검토 방법 제시가능
구조적 관점에서 보 구조물 안정을 위한 설계인자 도출	압력변이로 인하여 물받이공이 진동하고 이로 인하여 물받이공이 받는 응력 등을 고려하여 휨 파괴에 대한 설계인자 제시가능
재료파괴 관련 물받이공 설계인자 도출	난류흐름특성을 고려함으로써 국내 다수의 수공구조물에 대한 새로운 안전성 검토 방법 제시가능
보 구조물 한계조건 계산을 위한 프로그램 개발	1) 압력변이의 순간적인 음압구배, 2) 난류 흐름특성 및 압력변이로 인한 지속적인 진동으로 인한 재료파괴, 3) 진동으로 인한 휨 파괴로 총 3가지 원인에 대한 한계조건 계산 가능 - 하천횡단구조물 유입 조건을 입력하면 기존 설계에 고려되지 않은 압력변동량이 산정되며, 하천 설계 실무자들이 쉽게 사용할 수 있도록 프로그램 구성

(2) 기존 기술 대비 최종성과의 기술적 경제적 우수성

최종 성과명	기술 수준	
	연구 전 ('17)	연구 후 ('18)
압력변동성을 고려한 물받이공 설계 인자 제시	블라이 공식을 사용	물받이공 주변의 도수 및 압력변이 특성을 고려한 설계인자 제시가능
구조적 관점에서 보 구조물 안정을 위한 설계인자 도출	하천설계기준에 제시된 공식 사용(일반적인 수리적 특성만 이용)	보 하류 구조물에 작용하는 압력의 변동성분을 고려하여 역학적인 설계인자 제시가능
재료파괴 관련 물받이공 설계인자 도출	하천설계기준에 제시된 공식 사용(일반적인 수리적 특성만 이용)	물받이공 주변의 난류흐름특성 및 압력변이 특성을 고려한 설계인자 제시가능
보 구조물 한계조건 계산을 위한 프로그램 개발	관련 프로그램 없음	- 프로그램 개발을 통하여 보 구조물 한계조건 계산 가능 - 하천횡단구조물 설계에 본 프로그램을 사용하여 하천 설계 실무자들의 주관적 판단 최소화 가능 - 프로그램 사용이 간단하여 업무 효율성 증대

제5장. 연구개발성과의 활용계획

가. 연구결과의 활용방안

- (기술수요처) 국토교통부, 지자체 등 하천시설물 공사 발주기관 및 설계사
- (현장적용 방안) 정부의 인증을 받은 하천설계기준 또는 하위 기술지침에 반영
- (원천기술 확보) 과학적으로 증명된 횡단구조물의 물받이 및 바닥보호공에 대한 기술지침을 세계 최초로 개발하여 건설산업의 해외시장 진출 지원
- (실용성) 보 구조물 한계조건 계산을 위한 프로그램 제공에 따른 업무 효율성 증진

나. 기대성과 및 파급효과

○ 기술적 측면

- 전반적인 하천 관리 및 설계기술의 향상을 가져올 것으로 기대됨
- 하천횡단구조물 물받이 및 바닥보호공에 대한 과학적이고 정량적 한계기준을 최초로 제시하여 국내에 설치되어 있는 약 20,000개 및 추후 설치될 구조물에 대한 안전성 증진
- 압력변이의 측정기술 개발로 국내 다수의 수공구조물에 대한 새로운 안전성 검토 방법 제시
- 압력변이를 고려한 과학적으로 증명된 하천횡단구조물의 물받이 및 바닥보호공에 대한 원천 기술의 최초 확보
- USBR, USACE, MILT 등 선진국 설계기준에 대한 기술적 종속 극복
- 압력변동량 계산 프로그램 제공에 따른 설계 오류(하천 설계 실무자의 주관적 판단) 최소화 가능

○ 경제적·산업적 측면

- 명확하고 정량적인 한계기준제시로 효율적이고 경제적인 하천횡단구조물 설계 가능
- 바닥구조물 파괴로 인한 경제적인 비용 최소화 가능
- 특정 재난에 대한 선제적 대응 가능성을 증가시켜 더 큰 재난의 발생확률을 감소시킬 수 있을 것으로 판단됨
- 수공구조물 파괴로 관련 비용이 증가하고 있는 상황에서, 선제적 대응으로 인한 복구 비용의 감소는 전체적인 하천관리비용의 증가로 이어질 수 있으며, 이러한 순환은 하천의 치수 안전성 증대에 큰 기여를 할 수 있을 것으로 판단됨.
- 설계 원천 기술 확보에 따른 경쟁력 확보 및 해외 건설사업 수주 활성화에 기여

○ 사회적 측면

- 관련 기술을 토대로 설계기준이 반영된다면, 하천의 전체적인 치수 안전도 향상을 가져와 재난에 대한 사회적 불안 감소 효과를 가져올 수 있음
- 하천 재난의 복구비용 감소는 사회적 복지 관련 예산이 증가되는 효과를 가져올 수 있기 때문에 국민 삶의 질 향상에 조금이나마 기여할 수 있을 것으로 사료됨.
- 중소하천 주변 지역의 주민들에게 보다 쾌적한 하천 환경 조성에 이바지 할 수 있으며, 이는 곧 국민 복지 향상으로 이어질 수 있음
- 수공구조물의 명확한 파괴 원인 규명에 따른 관련기관의 신뢰성 증진

○ 기타 (학술적 측면)

- 세계 최초의 연구로써 관련 분야의 선점 효과
- 다양한 수공구조물 연구에 응용될 수 있을 것으로 판단됨
- 기존에 고려하지 못했던 구조물의 파괴 원인에 대한 방법론을 제시하는 것은 관련 분야의 연구 범위 및 수준 향상에 획기적인 기여를 하는 것이라 판단됨.

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

· 해당사항 없음

제7장. 연구개발성과의 보안등급

· 보안등급 - 일반

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황

· 해당사항 없음

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

○ 기술적 위험 요소 분석, 안전 관리 대책

가. 연구활동종사자 환경안전교육 실시

「연구실 안전 환경 조성에 관한 법률」 및 「환경안전관리규정」에 의거 연구활동종사자를 대상으로 실험실 안전환경 조성 및 사고예방을 위한 환경안전교육 실시

－ 교육 대상자: 이공계 대학 학부생, 대학원생, 연구원, 교수 및 직원 등

□ 석/박사

－ 신규교육: 신입생을 대상으로 하는 집체교육으로 현재 매 학기 당 이틀 간 14시간 교육을 매년 2월, 8월 교육 예정

－ 정기교육: 사고사례 및 안전교육 동영상을 공개하여 자체교육 자료를 제공

나. 실험실 안전점검 실시

「연구실 안전환경 조성에 관한 법률」에 의거 이공계 대학, 연구소 실험실 및 미술대학 작업장을 [표1]과 같이 실험 특성에 따라 유형별로 분류하여 일상점검, 정기점검, 특별안전점검, 정밀안전진단을 실시

1) 일상점검

연구개발활동 전 연구개발활동에 사용되는 실험 장비의 이상 유무 점검

－ 기간: 년중

－ 실시자: 연구활동종사자

－ 내용: 실험실별 특성에 맞는 점검표 작성 후 점검 실시

2) 정기점검

실험실 안전점검 체계에 따라 매년 정기점검실시하고, 그 결과를 배포하여 부적합 사항에 대하여 개선요구

－ 기간: 매년 4월 ~ 7월

－ 실시자: 환경안전원

－ 내용: 실험실 안전점검 프로그램을 사용하여 분야별 항목 점검

3) 특별안전점검

폭발사고, 화재사고 등 연구활동종사자의 안전에 치명적인 위험을 야기할 가능성이 있을 것으로

예상되는 경우에 총장의 지시에 의해 실시

- 기간: 년중 필요시
- 실시자: 총장의 지시에 의거 환경안전원 실시 또는 외부기관에 의뢰
- 내용: 위험요인별 점검

4) 정밀안전진단

정기점검 실시 후 도출된 위해요인에 대하여 외부 전문기관에 진단을 의뢰하여 위해요인의 개선방향 및 안전관리방안 수립

- 기간: 매년 11월
- 실시자: 외부전문 진단기관
- 내용: 정기점검 후 선정된 중점 점검항목 및 연안법에 규정된 점검항목 진단

다. 실험실 안전사고 대응 및 예방

실험실에서 발생하는 안전사고에 적절히 대응하여 그 피해를 최소화 하고 유사 사고 방지를 위해 대책을 수립

1) 실험실 안전사고 대응 및 처리 매뉴얼 보완, 사고 대응 훈련 실시

실험실 안전사고 대응 및 처리 매뉴얼에 따라 사고전파, 조치하며 실험실 안전사고 대응훈련을 실시하여 유사사고 발생 시 대응능력 향상

2) 실험실 사고사례 전파

실험실 안전사고에 대한 경각심을 높이고 유사사고 예방하기 위해 국 [대외 대학과 연구기관에서 발생하는 사고를 수집하여 학내 대학원생 및 연구원 등 연구활동 종사자에게 이메일을 통해 전파

3) 실험실 사고처리 흐름도 작성 및 비치

실험실사고 발생시 신속하고 정확하게 처리할 수 있도록 일련의 사고처리 흐름도 작성 후 비치

바. 연구활동종사자 특수건강검진 실시

「연구실 안전환경 조성에 관한 법률」 제18조 4항에 따라 「산업안전보건법 시행령」 제29조 및 동법 시행규칙 별표 12의2 「특수건강진단 대상 유해인자」 에 노출될 위험성이 있는 연구활동종사자를 모니터링하여 특수건강검진 실시

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	논문	Influence of flow resistance stresses on debris flow runoff	홍익대 학교	주저자	Environmental Earth Sciences	1.435	2018.06.19	단독	SCI
2	논문	2차 정수지의 수리특성 및 바닥 유속 저감효과 분석	홍익대 학교	주저자	한국안전학회지	0.2	2018.10.25	단독	비SCI
3	논문	통계적 접근을 통한 하천 횡단구조물 하부의 압력 변동성 및 수면 변위 특성 분석	홍익대 학교	주저자	한국방재학회지	0.25	2018.12.06	단독	비SCI
4	논문	Computational Modeling of Flow and Scour around Two Cylinders in Staggered Array	한국건설기술연구원	주저자	Water	1.832	2017.09.01	단독	SCI
5	논문	Numerical Simulation of Flow and Suspended Sediment Deposition Within and Around a Circular Patch of Vegetation on a Rigid Bed	한국건설기술연구원	주저자	Water Resources Research	4.36	2018.10.04	중복	SCI
6	논문	도수 롤러의 거동 분석을 위한 실험 연구	한국건설기술연구원	주저자	한국해안해양공학회	0.26	2018.12.31	단독	비SCI
7	특허	블록 조합형 개수로 실험장치	홍익대 학교	주저자	대한민국	-	2018.10.29	단독	등록
8	S/W	하류수문에 의한 고정 도수 확인 모듈	한국건설기술연구원	주저자	대한민국	-	2017.12.20	단독	등록

제11장. 기타 사항

· 해당사항 없음

제12장. 참고 문헌

국토기술연구센터 (1998) 하상유지공의 구조설계 지침.

감사원 (2013) 감사원 결과보고서- 4대강살리기 사업 주요시설물 품질 및 수질관리 실태.

국토해양부 (2009) 전국 하천횡단 구조물 설치현황 및 어도 실태조사 보고서.

국토해양부 (2010). 낙동강 살리기 사업 24공구(성주~칠곡지구) 실시설계보고서.

국토해양부 (2012) 보도자료-준공대비 점검결과, 4대강 보 안전 재확인.

국토해양부 (2012) 국가 및 지방하천 종합정비 마스터플랜.

국토교통성 (2008) 하천사방기술기준.

농림부 (1996). 농업생산기반정비사업계획 설계기준.

류권규(역자) (2009). 난류의 수치모의(원저자 : 梶島岳夫, 1999).

류권규, 마리안 머스테, 로버트 에테마, 윤병만 (2006). “난류 중 부유사의 속도 지체 측정.” 한국수자원학회논문집, 제39권, 제2호, pp.99-108.

배재현, 이경훈, 신종근, 양용수, 이주희 (2011). “입자영상유속계를 이용한 은어의 유영능력 측정.” 제47권, 제4호, pp.411-418.

우효섭 (2001). 하천수리학. 청문각.

한국수자원학회 (2009). 하천설계기준제정.

한국건설기술연구원 (2014) 입자영상유속계(PIV)를 이용한 하천구조물 주변 유동해석 기법 개발

한국건설기술연구원 (2017) 보와 하상유지공의 안전성 확보를 위한 물받이와 바닥보호공의 성능평가 기법에 대한 원천기술개발

국토기술연구센터 (1998) 하상유지공의 구조설계 지침.

감사원 (2013) 감사원 결과보고서- 4대강살리기 사업 주요시설물 품질 및 수질관리 실태.

국토해양부 (2009) 전국 하천횡단 구조물 설치현황 및 어도 실태조사 보고서.

국토해양부 (2012) 보도자료-준공대비 점검결과, 4대강 보 안전 재확인.

국토해양부 (2012) 국가 및 지방하천 종합정비 마스터플랜.

국토교통성 (2008) 하천사방기술기준.

농림부 (1996). 농업생산기반정비사업계획 설계기준.

류권규(역자) (2009). 난류의 수치모의(원저자 : 梶島岳夫, 1999).

류권규, 마리아 머스테, 로버트 에테마, 윤병만 (2006). “난류 중 부유사의 속도 지체 측정.” 한국수자원학회논문집, 제39권, 제2호, pp.99-108.

배재현, 이경훈, 신종근, 양용수, 이주희 (2011). “입자영상유속계를 이용한 은어의 유영능력 측정.” 제47권, 제4호, pp.411-418.

우효섭 (2001). 하천수리학. 청문각.

한국수자원학회 (2009). 하천설계기준**제**설.

한국건설기술연구원 (2014) 입자영상유속계(PIV)를 이용한 하천구조물 주변 유동해석 기법 개발

한국건설기술연구원 (2017) 보와 하상유지공의 안전성 확보를 위한 물받이와 바닥보호공의 성능평가 기법에 대한 원천기술개발

Adrian, R. J., Meinhart, C. D., & Tomkins, C. D. (2000). Vortex organization in the outer region of the turbulent boundary layer. *Journal of Fluid Mechanics*, 422, 1-54.

Anderson, T. W., & Darling, D. A. (1954). A test of goodness of fit. *Journal of the American statistical association*, 49(268), 765-769.

Altman, E. I. (1968). Financial ratios, discriminant analysis and the prediction of corporate bankruptcy. *The journal of finance*, 23(4), 589-609.

Barjastehmaleki, S., Fiorotto, V., & Caroni, E. (2016). Spillway stilling basins lining design via Taylor hypothesis. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(6), 04016010.

Beheshti, M. R., Khosrojerdi, A., & Borghei, S. M. (2013). Experimental study of air-water turbulent flow structures on stepped spillways. *International Journal of Physical Sciences*, 8(25), 1362-1370.

Bligh, W. G. (1910). Dams, barrages and weirs on porous foundations. *Engineering News*, 64(26), 708-710.

Bowers, C. E., & Tsai, F. Y. (1969). Fluctuating pressure in spillway stilling basins. *Journal of the Hydraulics Division*, 95(6), 2071-2080.

Brater, E. F., King, H. W., Lindell, J. E., & Wei, C. Y. (1976). *Handbook of hydraulics for the solution of hydraulic engineering problems* (Vol. 7). New York: McGraw-Hill.

Castillo, L. G., Carrillo, J. M., & Sordo-Ward, Á. (2014). Simulation of overflow nappe impingement jets. *Journal of Hydroinformatics*, 16(4), 922-940.

Lin, C., Hsieh, S. C., Lin, I. J., Chang, K. A., & Raikar, R. V. (2012). Flow property and self-similarity in steady hydraulic jumps. *Experiments in Fluids*, 53(5), 1591-1616.

-
- Chanson, H. (1999). The Hydraulics of Open Channel Flow: An Introduction. Physical Modelling of Hydraulics.
- Chow, V. T. (1959). Open-Channel Hydraulics, McGraw Hill Book Company, Inc., New York.
- Christensen, B. A. (1984). "Analysis of Partially Filled Circular Storm Sewers." J. of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 110, No. 8.
- El-Ragaby, A., El-Salakawy, E., and Benmokrane, B., "Fatigue Life Evaluation of Concrete Bridge Deck Slabs Reinforced with Glass FRP Composite Bars," Journal of Composites for Construction, ASCE, Vol. 11, No. 3, 2007, pp. 258-268. (doi: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2007\)11:3\(258\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2007)11:3(258))),
- Fiorotto, V., & Rinaldo, A. (1992). Turbulent pressure fluctuations under hydraulic jumps. Journal of Hydraulic Research, 30(4), 499-520.
- Flow Science (2015). FLOW-3D User Manual(Release 11.1.0), Los Alamos, New Mexico.
- González-Betancourt, M. (2016). Uplift force and momenta on a slab subjected to hydraulic jump. Dyna, 83(199), 124-133.
- Grinstein, L., & Lipsey, S. I. (2001). Encyclopedia of mathematics education. Routledge.
- Grubbs, F. E., & Beck, G. (1972). Extension of sample sizes and percentage points for significance tests of outlying observations. Technometrics, 14(4), 847-854.
- Gylltoft K. (1983): Fracture mechanics models for fatigue in concrete structures. Doctoral thesis / Tekniska högskolan i Luleå, 25D, Luleå, 210 pp.
- Herlina, H. and Jirka, G. H. (2008). "Experiments on gas transfer near the air-water interface in a grid-stirred tank." Journal of Fluid Mechanics, 594, pp.183-208.
- IACWD (Interagency Advisory Committee on Water Data). (1982). Guidelines for determining flood flow frequency. Bulletin 17B.
- JIRKA, G. H. (2008). Experiments on gas transfer at the air-water interface induced by oscillating grid turbulence. Journal of Fluid Mechanics, 594, 183-208.
- Kadota, A., Suzuki, K., Rummel, A. C., Weitbrecht, V., & Jirka, G. H. (2007). Shallow flow visualization around a single groyne. In Proc. of 7th International Symposium of Particle Image Velocimetry (CD-ROM).
- Kazemi, F., Khodashenas, S. R., & Sarkardeh, H. (2016). Experimental study of pressure fluctuation in stilling basins. International Journal of Civil Engineering, 14(1), 13-21.
- Klowak, C., Memon, A., and Mufti, A., "Static and fatigue investigation of second generation steel-free bridge decks," Cement & Concrete Composites, ScienceDirect, Elsevier, Vol. 28, No.
-

10, 2006, pp. 890–897. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.07.019>),

Koca, K., Noss, C., Anlanger, C., Brand, A., & Lorke, A. (2017). Performance of the Vectrino Profiler at the sediment-water interface. *Journal of Hydraulic Research*, 55(4), 573–581.

Kolmogorov, A. (1933). Sulla determinazione empirica di una legge di distribuzione. *Inst. Ital. Attuari, Giorn.*, 4, 83–91.

Leon, A., & Alnahit, A. (2016). A Remotely Controlled Siphon System for Dynamic Water Storage Management.

Lin, C., Hsieh, S., Chang, K. and Raikar, R. (2012). “Flow property and self-similarity in steady hydraulic jumps.” *Experiments in Fluids*, 53, pp. 1591–1616.

Lopardo, R., Fattor, C. A., Casado, J. M. and Lopardo, M. C. (2004). “Aspects of vibration and fatigue of materials related to coherent structures of macroturbulent flows” *International Conference on Hydraulic of Dams and River Structures*.

Lopardo, R. A., & Romagnoli, M. (2009). Pressure and velocity fluctuations in stilling basins. In *Advances in Water Resources and Hydraulic Engineering* (pp. 2093–2098). Springer, Berlin, Heidelberg.

Sanchez, P. A., Ramirez, G. E., Vergara, R., & Minguillo, F. (1973). Performance of Sulfur-Coated Urea Under Intermittently Flooded Rice Culture in Peru 1. *Soil Science Society of America Journal*, 37(5), 789–792.

Matsui, S., Tokai, D., Higashiyama, H., and Mizukoshi, M., “Fatigue Durability of Fiber Reinforced Concrete Decks Under Running Wheel Load,” *Proceedings 3rd International Conference on Concrete Under Severe Conditions*, Ed. N. Banthia, Vancouver, Canada, 2001, pp. 982–991.,

Mohammadi, S. F., Galgoul, N. S., Starossek, U., & Videiro, P. M. (2016). An efficient time domain fatigue analysis and its comparison to spectral fatigue assessment for an offshore jacket structure. *Marine Structures*, 49, 97–115.

Pothof, I. (2011). Co-current air-water flow in downward sloping pipes. *Stichting Deltares*

Pothof, I. W. M., & Clemens, F. H. L. R. (2011). Experimental study of air-water flow in downward sloping pipes. *International journal of multiphase flow*, 37(3), 278–292.

Ryu, Y., Chang, K. A., & Lim, H. J. (2005). Use of bubble image velocimetry for measurement of plunging wave impinging on structure and associated greenwater. *Measurement Science and Technology*, 16(10), 1945.

Sanjou, M., & Nezu, I. (2009). Turbulence structure and coherent motion in meandering compound open-channel flows. *Journal of Hydraulic Research*, 47(5), 598–610.

Sargison, J. E., & Percy, A. (2009). Hydraulics of broad-crested weirs with varying side slopes. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 135(1), 115–118.

Sobani, A. (2014). Pressure fluctuations on the slabs of stilling basins under hydraulic jump.

Song, Y., Chang, K, Ryu, Y. and Kwon, S. (2013). “ Experimental study on flow kinematics and impact pressure in liquid sloshing.” , Experiments in Fluid, 54, pp. 1592.

Stagonas, D., Lara, J. L., Losada, I. J., Higuera, P., Jaime, F. F., & Muller, G. (2014). Large scale measurements of wave loads and mapping of impact pressure distribution at the underside of wave recurves. In Proceedings of the HYDRALAB IV Joint User Meeting.

Toso, J. W., & Bowers, C. E. (1988). Extreme pressures in hydraulic-jump stilling basins. Journal of Hydraulic Engineering, 114(8), 829-843.

Youn, S. G. and Chang, S. P., “Behavior of Composite Bridge Decks Subjected to Static and Fatigue Loading,” Structural Journal, ACI Technical paper, Title No. 95-S23, 1998, pp. 249-258. (doi: <http://dx.doi.org/10.14359/543>),

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.