

18CTAP-  
C133094  
-02

보안 과제( ), 일반 과제( O ) / 공개( O ), 비공개( )발간등록번호()  
**국토교통기술촉진연구사업 제2차 연도 최종보고서**

R&D /  
18CTAP-C133094-02

수제  
하류  
3차원  
흐름구조  
규명을  
위한  
실험 및  
수치해석  
적 연구

최  
종  
보  
고  
서

2019

국  
토  
교  
통  
과  
학  
기  
술  
진  
흥  
원

# 수제 하류 3차원 흐름구조 규명을 위한 실험 및 수치해석적 연구 최종보고서

2019 .04. 26 .

주관연구기관 / 한양대학교

국토교통부  
국토교통과학기술진흥원

## 2. 제출문

### 제 출 문

국토교통과학기술진흥원 귀하

‘수제 하류 3차원 흐름구조 규명을 위한 실험 및 수치해석적 연구’(연구개발 기간 : 2017 . 06 . ~ 2019 . 03 .) 과제의 최종보고서 10부를 제출합니다.

2019 . 04 . 26 .

|           |       |       |           |
|-----------|-------|-------|-----------|
| 주관연구기관명 : | 한양대학교 | (대표자) | 성 태 현 (인) |
| 협동연구기관명 : |       | (대표자) | (인)       |
| 참여기관명 :   |       | (대표자) | (인)       |

주관연구기관책임자: 성 태 현

협동연구기관책임자:

참여기관책임자:

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에  
동의합니다.

### 3. 보고서 요약서

## 보고서 요약서

|                   |                       |                                     |                             |              |                                                               |
|-------------------|-----------------------|-------------------------------------|-----------------------------|--------------|---------------------------------------------------------------|
| 과제 고유 번호          | 18CTAP-C133<br>094-02 | 해당 단계<br>연구 기간                      | 2018.01.01. -<br>2019.03.30 | 단계구분         | (2단계)/<br>(2단계)                                               |
| 연구사업명             | 중사업명                  | 국토교통기술촉진연구사업                        |                             |              |                                                               |
|                   | 세부사업명                 |                                     |                             |              |                                                               |
| 연구과제명             | 대과제명                  | 수제 하류 3차원 흐름구조 규명을 위한 실험 및 수치해석적 연구 |                             |              |                                                               |
|                   | 세부과제명                 |                                     |                             |              |                                                               |
| 연구책임자             | 강 석 구                 | 해당단계<br>참여연구원 수                     | 총: 5 명<br>내부: 5 명<br>외부: 명  | 해당단계<br>연구비  | 정부:201,000 천원<br>민간: 천원<br>정부외: 천원<br>상대국: 천원<br>계:201,000 천원 |
|                   |                       | 총 연구기간<br>참여연구원 수                   | 총: 5 명<br>내부: 5 명<br>외부: 명  | 총 연구비        | 정부:370,000 천원<br>민간: 천원<br>정부외: 천원<br>상대국: 천원<br>계:370,000 천원 |
| 연구기관명 및<br>소속 부서명 | 한양대학교                 |                                     |                             | 참여기업명        |                                                               |
| 국제공동연구            | 상대국명:                 |                                     |                             | 상대국 연구기관명:   |                                                               |
| 위탁연구              | 연구기관명:                |                                     |                             | 연구책임자: 강 석 구 |                                                               |

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 연구개발성과의<br>보안등급 및<br>사유 | 일반 |
|-------------------------|----|

#### 9대 성과 등록·기탁번호

| 구분           | 논문 | 특허 | 보고서<br>원문 | 연구시설<br>· 장비 | 기술요약<br>정보 | 소프트<br>웨어 | 화합물 | 생명자원     |          | 신품종 |    |
|--------------|----|----|-----------|--------------|------------|-----------|-----|----------|----------|-----|----|
|              |    |    |           |              |            |           |     | 생명<br>정보 | 생물<br>자원 | 정보  | 실물 |
| 등록·기<br>탁 번호 | 3  |    |           |              |            |           |     |          |          |     |    |

#### 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

| 구입기관 | 연구시설<br>· 장비명 | 규격<br>(모델명) | 수량 | 구입연월일 | 구입가격<br>(천원) | 구입처<br>(전화) | 비고<br>(설치장소) | NTIS<br>등록번호 |
|------|---------------|-------------|----|-------|--------------|-------------|--------------|--------------|
|      |               |             |    |       |              |             |              |              |
|      |               |             |    |       |              |             |              |              |

#### 요약

- 수리모형실험으로 수제 주위 흐름의 3차원 유속장을 측정하고 이를 바탕으로 직선하도에서의 수제 주위 3차원 난류 흐름을 규명함.
- 3차원 고정밀 수치해석으로 수제 주위 흐름의 3차원 유속장을 계산하고 이를 바탕으로 직선하도에서의 수제 주위 3차원 난류흐름을 규명함.
- 3차원 고정밀 수치해석으로 얻어진 유속의 시간변화자료를 통해 수제 주위 흐름을 3차원으로 시각화함.
- 4가지 흐름특성 (정수역크기, 하상전단응력, 최대유속, 이차류분포도) 분석을 통해 수제설계시 활용가능한 수제설계인자 값을 도출함.

#### 보고서 면수

44 페이지

#### 4. 국문 요약문

##### 연구의 목적 및 내용

##### 1. 연구의 목적

- 하천에 수제가 설치되면 하류 흐름 영역은 재순환영역, 나선형 이차류 흐름, 강한 난류흐름을 유발하는 말굽와(horseshoe vortex) 등이 혼재된 매우 복잡한 형태를 보임.
- 현재까지 수제 하류 구간에 대한 정밀도 있는 3차원 유동장 측정이 이루어진 사례가 거의 없어 3차원 흐름구조에 대한 정보가 전무한 실정이며 유체역학적 측면에서 흐름구조를 분석한 연구가 없다는 한계가 있음.
- 향후 신뢰성 있는 하천횡단구조물 설계 기법의 개발을 위해서는 수제설치로 인한 3차원 흐름구조 재순환영역 크기, 나선형 이차류와 설치 조건 변화에 따른 흐름변화에 대한 지식습득이 선행되어야함.

##### 2. 연구개발 내용

- 수제 높이와 설치각도를 고려한 수제 하류 3차원 유동장의 실험적 측정 및 분석을 수행함.
- 3차원 유동해석 (CFD: Computational Fluid Dynamics) 모형을 이용한 수치해석을 수행함.
- 3차원 유동장 정보를 바탕으로 수제 설계의 기준이 되는 주요설계인자 값 도출함.
- 3차원 유동장 정보를 이용해 흐름을 시각화하고 이를 통해 수제 하류 3차원 흐름구조의 규명함.

##### ■ 주요 연구 내용의 세부 내용은 아래와 같음

- 1) 수제 높이와 유입흐름 조건을 고려한 수제 하류 3차원 유동장의 실험적 측정 및 분석
  - 총 4건의 개수로 수리모형실험을 수행함.
  - 실험안: 0.5와 1.0의 상대 수제높이 ( $h/H$ =수제높이/수심), 두 가지 유입흐름 조건 ( $Fr=0.10, 0.18$ )에 대한 수리모형실험을 수행함.
  - 3차원 유속측정이 가능한 초음파 유속계와 시간별 수위변화를 mm 단위로 측정할 수 있는 초음파 수위계를 활용하여 시공간적 유속분포를 정밀 측정함.
- 2) 3차원 유동해석 (CFD: Computational Fluid Dynamics) 모형을 이용한 수치해석
  - 수리모형실험 4건 중 2건을 선택하여 정밀 수치해석을 수행함.
  - 천만개 이상의 계산격자 사용
  - 슈퍼컴퓨터 기반의 3차원 병렬연산기법에 근거한 수치모형을 활용하여 기존 상용모형과 비교하였을 때 수십~수백 배의 연산속도와 높은 정확도로 해석을 수행함.
- 3) 3차원 유동장 정보를 바탕으로 주요 설계인자 값 도출
  - 실험 및 수치해석 결과 분석을 통한 4가지 설계인자에 대하여 정량적, 정성적 결과를 도출함.
  - 4가지 주요설계인자는 정수역 길이, 하상전단응력, 최대유속, 이차류 분포양상임.

|                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 연구개발성과              | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 본 연구는 기존에 시도되지 않았던 고정밀 3차원 수치해석기법을 수공 구조물 흐름구조 연구에 활용한 사례로서 향후 새로운 연구의 패러다임을 제시할 수 있을 것임. 3차원 해석기법을 수공구조물 연구에 활용한 사례는 미국이나 유럽의 경우도 흔하지 않으므로 외국 연구기관에서 큰 관심을 보일 것으로 예상되며 본 연구과제의 연구결과를 국제저명학술지와 국외학술발표대회에서 적극적으로 발표하여 연구의 우수성을 홍보할 수 있을 것임.</li> <li>■ 슈퍼컴퓨터 기반의 3차원 흐름해석 기법은 수제 뿐 아니라 댐 여수로, 교각구조물, 어도, 낙차공 등 여타 수공구조물에 적용 된다면 향후 수공구조물 설계 기술의 전반적인 향상으로 이어질 것임.</li> <li>■ 설계기술 선진화가 이루어진다면 홍수 등 자연재해로 인한 경제적 및 인명 피해를 저감할 수 있을 뿐 아니라 과학적인 설계기법을 활용하여 과다설계를 방지함으로써 국가예산을 절감할 수 있을 것이며 장기적으로 수제 설계기술을 축적하여 해외시장에서 우위를 점할 수 있을 것으로 기대됨.</li> <li>■ 본 연구에 참여하는 연구원들을 수공구조물 주위에서 발생하는 3차원 흐름특성을 정확히 이해하고 분석할 수 있는 토목기술자로 양성하고 이들 인력이 산업계나 공기업, 공직 등으로 진출한다면 해당 분야 설계기술 발전에 크게 기여할 수 있을 것임.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                        |
| 연구개발성과의 기대효과 및 활용계획 | <p>1. 기대효과</p> <p>1) 기술적 성과</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 하천의 흐름이 내재하고 있는 방향성 및 난류에너지와 수공구조물의 상호작용에 의해 발생하는 저항력 등을 고려한 과학적 원리에 근거하여 수제 설계에 주요한 인자에 대한 정보 구축함.</li> <li>■ 슈퍼컴퓨팅 기술과 3차원 수치해석 기법을 결합하여 흐름의 난류특성을 고려한 인자요소 정립에 관한 연구를 수행함으로써 수공구조물 설계기술 분야에 새로운 연구 패러다임을 제시함.</li> <li>■ 직선하천의 수제설계 인자간의 관계를 확립하여 차후 수제 설계기술 발전에 기여함.</li> <li>■ 본 연구는 우리나라 최초의 과학적인 자연하천설계기준의 초석이 될 것으로 사료됨.</li> <li>■ 본 연구결과를 해외저명학술지(SCI) 및 국외학술발표회에서 적극적으로 발표하여 우리나라 수공구조물(수제)과 흐름과의 관계연구의 우수성을 홍보함.</li> <li>■ 하천횡단구조물 주위의 3차원 유동장 측정 및 해석결과를 제시함으로써 중장기적 수제 설계기술 선진화를 도모함.</li> </ul> <p>2) 사회·경제적 파급효과</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 홍수 시 제방유실 및 수공구조물 파괴로 인한 인적 및 물적 손실을 최소화하는데 기여함.</li> <li>■ 본 연구를 바탕으로 차후 신뢰성 있는 수제 설계기법이 구축될 경우 수제의 과다설계를 방지하여 궁극적으로 국가예산 절감에 이바지 할 수 있음.</li> <li>■ 장기적으로 수제설계에 대한 과학적인 기술을 축적하여 해외시장에서 우위를 점할 수 있음.</li> <li>■ 합리적이고 과학적인 설계를 위한 기초연구를 제시하여 홍수재난으로 인한 제방의 유실 및 파괴를 미연에 방지하여 경제적 및 인명 피해 최소화 하고 사회적 불안감을 해소함.</li> </ul> |

연구개발성과의  
기대효과 및  
활용계획

## 2. 활용계획

- 본 연구결과는 기존 설계지침에서 고려하지 못하였던 3차원 난류현상과 설계 인자 간 상관관계를 규명함으로써 향후 낙차공 및 보의 설계기법 개선에 필요한 중요한 기초자료로 활용될 수 있을 것임.
- 본 연구 성과물의 일부인 수리모형실험과 수치모형실험(CFD) 결과자료는 향후 수제 설계 가이드라인 개선 시 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단됨.
- 특히 실험으로 측정이 어려운 흐름 수리학적 조건에 관한 설계 기법 개발에 유용하게 사용될 수 있을 것임. 예를 들어 복잡한 난류 흐름으로 인해 구조물과 제방 접합부에서 세굴이 발생하거나 균열 등과 같은 구조적 문제가 발생할 수 있는데 이러한 흐름조건은 실험을 통한 유속 측정이 쉽지 않음. 본 연구에서 이러한 구간에 대한 흐름정보를 취득한다면 설계기법 개선에 기여할 수 있을 것임.
- 향후 흐름 수치해석 자료를 분석하여 접합부에서 발생하는 전단응력을 정밀 산출하여 구조물 안정성 향상을 위한 연구에 활용할 수 있을 것임.
- 본 연구의 결과를 바탕으로 수제 설계 시 가장 지배적인 설계인자와 흐름인자는 무엇인지 규명할 수 있을 것이므로 관련 설계 기술 발전에 크게 기여할 것임.
- 본 연구의 중요 결과물 중 하나인 설계인자 값 분포도는 향후 수제설계 기법 개선에 활용할 수 있음. 예를 들어 정수역 크기 값은 수제 간격 결정에 활용할 수 있으며, 하상전단응력, 최대유속, 이차류 분포도는 세굴 발생 형태 예측에 활용 가능함.
- 본 연구에서 개선하고자 하는 수제 설계 기술은 궁극적으로 구조물 자체의 안정성을 높이고 구조물 설치로 인한 2, 3차 피해를 감소시키는데 있음. 따라서 본 연구에서 개발되는 연구 성과를 활용하여 설계기법 또는 공식이 개선된다면 홍수 시 발생하는 구조물의 피해와 그로 인해 발생하는 인명, 재산피해를 줄일 수 있을 것임.
- 개발된 최종 성과물을 하천설계 기준의 개정 시 반영하여 설계 기술 개선에 기여할 수 있음.
- 물 관리를 수행하는 국가기관의 자연하천 보호, 하천정비, 복원 사업과 관련하여 본 연구결과를 하천횡단구조물 설계에 활용하는 것은 물론이고 유지관리 및 정책 수립에도 활용 가능함.
- 관련업계에서 본 연구 성과를 숙지하고 낙차공 및 보를 월류하는 흐름에 대한 기초지식과 해석기술을 활용하면 과다설계로 인한 경제 손실을 방지할 것으로 기대됨.
- 연구개발이 성공적으로 이루어지면 기술이전을 통한 상용화 노력이나 신기술 제안으로 발전 가능성이 있음.

핵심어  
(5개 이내)

수리모형실험

수공구조물

난류

초음파유속계

3차원 유동해석

## &lt; SUMMARY &gt;

Purpose &  
Contents

## 1. Purpose

- Complicated flow structures, such as recirculation, secondary flow, and horseshoe vortex inducing strong turbulent flows, are observed downstream of the spur dike
- Only a few studies have been conducted on three dimensional velocity field measurements with high resolution
- It is necessary to obtain knowledge on flow structure changes caused by the spur dike to develop reliable hydraulic structure design method.

## 2. Contents

- Experimental measurements and analysis on three dimensional turbulent flow characteristics downstream of the spur dike considering the structure height and the incoming flow conditions
- Numerical analysis based on 3D Computational Fluid Dynamics (CFD) model
- Introduction of crucial design factors based on the three dimensional velocity field data extracted from the physical and numerical experiments
- Visualization of the three dimensional turbulence structure by using the results of the physical and numerical experiments
- Main contents of this project are as below

1) Experimental measurements and analysis on three dimensional turbulent flow characteristics downstream of the spur dike considering the structure height and the installation angle

- 4 open channel flume experiments were conducted
- Experiment design: the relative structure height ( $h/H$ =the structure height/water depth) of 0.5, 1 and incoming flow conditions of  $Fr=0.10$  and  $0.18$  are chosen for the experiments. The design parameters might be changed after the literature review
- Measuring three dimensional velocity field by using ultra sonic velocimeter which can collect three dimensional velocity components and ultra sonic water elevation sensor

2) Numerical analysis based on 3D Computational Fluid Dynamics (CFD) model

- Conducting 2 numerical experiments considering the results of the physical experiments
- Employing more than 10 million grid nodes for the numerical calculation
- Faster and more reliable numerical analysis is possible due to the super computing technology

3) Introduction of crucial design factors based on the three dimensional velocity field data extracted from the physical and numerical experiments

- Qualitative and Quantitative results are induced based on 4 crucial design factors through the experimental and numerical investigations
- 4 crucial design factors are recirculation length, bed shear stress, maximum velocity, secondary flow patterns

|                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Results                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Suggesting the new paradigm on hydraulic structure design research area using the numerical experiment to establish the design criteria. The concepts in this research will make institutions in other countries interested in our work because the concepts are rare in the literature. Also promoting the technology development in hydraulic structure by publishing the paper in a prominent journal</li> <li>■ The hydraulic structure design including, dam, spillway, fish way, and drop structures, will develop if the results of this research are applied in the different hydraulic structures</li> <li>■ Minimizing the economical loss caused by over design with the research results and occupying the global market in a hydraulic structure industry by accumulating the knowledge about the flow around the spur dike</li> <li>■ Contributing the hydraulic design development by educating the research fellows analyzing the complicated three dimensional flow characteristics around hydraulic structures</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Expected Contribution and applications | <p>1. Expected contribution</p> <p>1) Technological contribution</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Establishing the database based on scientific principle such as, direction of the flow and turbulence energy, and the resistance force caused by the spur dike</li> <li>■ Suggesting the new paradigm by employing the super-computing technology with three dimensional numerical scheme in hydraulic structure design research area</li> <li>■ Developing the spur dike design in a straight open channel by demonstrating the relationships among the crucial design factors of the spur dike</li> <li>■ Being the first natural river design criteria based on scientific principle</li> <li>■ Advertising our the hydraulic structure technology by publishing a paper in a prominent journal</li> <li>■ Providing the three dimensional velocity field data to lead hydraulic structure design technology in long term</li> </ul> <p>2) Social and economical contribution</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ minimizing the economical loss cause by the hydraulic structure failure in the flood</li> <li>■ Preventing the over-design of the structure, leading saving the budget in the structure maintenance</li> <li>■ Occupying the global market in a hydraulic structure industry by accumulating the knowledge about the flow around the spur dike</li> </ul> |

## 2. Applications

### Expected Contribution and applications

- The research results are going to be used to help improving the drop structure or weir design by demonstrating the three dimensional turbulence characteristics and the relationships among the design factors in the spur dike
- Parts of the research output, three dimensional velocity field data from the physical experiment and the numerical experiment, are useful to develop spur dike design guide lines
- Especially developing the design guide lines which are difficult to be established by the physical experiments. For example, the scour occurs at the conjunction between the structure and the bank caused by the complicated three dimensional turbulence flow. However the situation is almost impossible to describe in the physical experiments. Therefore It will help improving the design method if the three dimensional data is collected in high resolution numerical experiment
- The results will be used to solve the safety issues by analyzing the shear stress at the conjunction in the high resolution numerical experiment
- Developing the hydraulic design technology by demonstrating the crucial design factors and the relationship between the design factors and the flow characteristics in the spur dike
- Design factor graph obtained in this research can be employed in improving the spur dike design method. For instance the recirculation length can determine the spacing in the spur dike group. The shear stress, maximum velocity, and the secondary flow is going to be used to anticipate the scour patterns
- Establishing the spur dike design criteria considering the flow characteristics change due to the crucial design factors and preventing the 2nd and 3rd damage caused by the hydraulic structure failure
- The obtained results contribute river design refinement
- Helping Establishing policies related to river management and river restoration
- New technology can be suggested if this project finishes successfully

### Keywords

Flume  
experiment

Hydraulic  
structure

Turbulence

Acoustic  
Doppler  
Velocimetry

3D CFD modeling

## < Contents >

|                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Overview of research project .....                            | 1  |
| 2. Review of technological status .....                          | 3  |
| 3. Contents and results .....                                    | 6  |
| 4. Achievements and contributions to related area .....          | 37 |
| 5. Applications of research results .....                        | 38 |
| 6. Information collected during research project .....           | 39 |
| 7. Level of security .....                                       | 40 |
| 8. Registered experiment facilities and equipments in NTIS ..... | 40 |
| 9. Safety training related to research project .....             | 41 |
| 10. Representative research achievements .....                   | 42 |
| 11. Others .....                                                 | 42 |
| 12. References .....                                             | 43 |

## 7. 본문 목차

### < 목 차 >

|                                           |    |
|-------------------------------------------|----|
| 1. 연구개발과제의 개요 .....                       | 1  |
| 2. 국내외 기술 개발 현황 .....                     | 3  |
| 3. 연구수행내용 및 성과 .....                      | 6  |
| 4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 .....               | 37 |
| 5. 연구개발성과의 활용 계획 .....                    | 38 |
| 6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보 .....           | 39 |
| 7. 연구개발성과의 보안등급 .....                     | 40 |
| 8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황 .....    | 40 |
| 9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적 ..... | 41 |
| 10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적 .....               | 42 |
| 11. 기타 사항 .....                           | 42 |
| 12. 참고 문헌 .....                           | 43 |

## 8. 본문

### 제1장. 연구개발과제의 개요

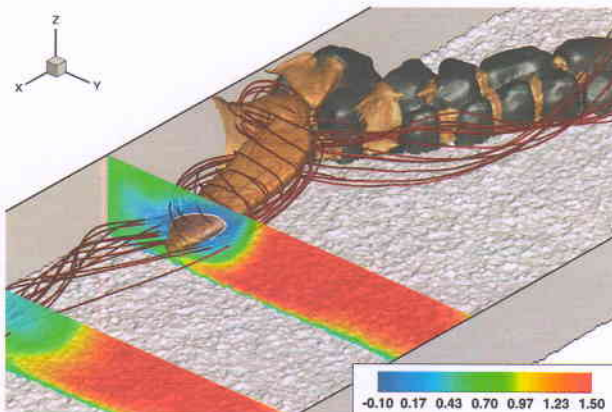
#### 1. 연구개발 목적

하천의 하상과 제방은 흐름에 의한 유수의 영향으로 인하여 지속적인 퇴적과 침식작용에 노출되어 있다. 이러한 이유로 인해 때로는 하천지형과 형상에 따라 하천 내 특정 구간에서 과도한 침식이나 퇴적이 발생하기도 하는데 이는 하천의 이·치수 기능을 저하시키고 홍수 시 하천 내 제방이나 수공구조물의 안전을 위협하는 위험요소로 작용한다. 이와 같이 하천형상의 영향으로 유수가 제방에 부딪혀 유속이 상대적으로 상승하는 구간을 수충부라고 한다. 지방 소하천과 같은 자연하천 뿐 아니라, 직선 정비된 도시하천의 경우에도 직선정비구간이 곡선부로 변화하는 구간 등에 수충부가 존재한다. 홍수 발생 시에는 수충부에서의 유속이 더욱 빨라져 세굴현상 및 호안파괴 현상이 가속화 되는데, 제방유실 등의 사고에 대비하여 수충부를 보호하고 안전하게 유지·관리 하는 것은 하천관리 및 정비에 있어 매우 중요한 요소이다.

하상 세굴이나 제방 유실 현상을 방지하기 위해 널리 사용되는 공법은 콘크리트와 사석을 이용하여 취약 구간을 피복하는 방법인데, 이러한 방법은 유지비용이 높고 수변 및 수생 서식지 파괴를 초래하는 단점도 가진다. 최근 하천환경과 생태계 보전에 대한 사회적 인식이 높아지면서 자연하천의 생태적인 측면을 고려함과 동시에 하천관리의 효율성을 도모하는 콘크리트 블록이나 돌무더기, 통나무 등을 이용한 친환경적 보호 공법 또한 큰 관심을 받고 있다. 이러한 하천횡단구조물은 주로 하천 제방에 부착된 상태로 설치된다는 공통점이 있으며 영어권에서는 groyne, vane, bendway weir, barb 등으로 이름으로 불리며 국내에서는 수제로 알려져 있다. 이와 같은 하천횡단구조물은 제방 측에 낮은 유속을 유발하여 하천 수충부를 효과적으로 보호할 수 있을 뿐 아니라, 하천 단면 중앙부에서는 적절한 유속증가를 유발하여 흐름의 다양성을 높여 수질개선이나 어류 서식에 우호적인 환경을 조성하기도 한다. 이와 같은 이유로 하천횡단구조물은 수충부 보호 뿐 아니라 친환경적 하천복원에도 널리 사용되어 왔다.

#### 2. 연구개발의 필요성

그림1에 도시한 바와 같이, 수제역에서의 흐름은 3차원적 흐름구조와 나선형 이차류가 결합된 복잡한 형태의 흐름구조를 갖고 있다. 수제가 설치되면 하류 흐름 영역은 연직방향을 축으로 회전하는 재순환영역, 흐름방향을 축으로 회전하는 나선형 이차류 흐름, 구조물 전면에서 발생하여 하류로 이동하면서 강한 난류흐름을 유발하는 말발굽와(horseshoe vortex) 흐름 등이 혼재된 매우 복잡한 형태를 보인다 (그림1).



<그림 1> 돌무더기 형태 수제 주위의 3차원 흐름 시각화 예

하지만 국내에는 수제설치에 대한 설계지침이 충분치 않고, 수제 설치 사례가 적어 수제 설치에 따른 변화양상을 모니터링하기도 힘든 실정이다. 국내의 하천설계기준(국토해양부, 2009)에 명시되어 있는 수제 설계의 일반적인 사항 및 설계, 시공, 재료에 관한 대부분의 기준과 지침들은 일본과 유럽에서 제안된 경험공식이나 사례를 인용하고 있는데, 이에 대한 현장시험 및 모형실험을 통한 충분한 검증이 진행된 바가 없다. 또한, 앞서 기술한 국내·외 대부분의 기존 연구들은 단순히 실험결과를 나열하는 수준에 그치고 있어 실제 수제 주위의 3차원 흐름특성(재순환영역, 이차류 흐름, 말발굽와)에 대한 자료를 제시하지는 못하고 있다. 그러나 이와 같은 자료는 효율적인 수제설치 및 관리를 위한 지침을 세우는데 있어 필수라 할 수 있다. 따라서 수제 설계의 기본이 되는 인자(수제길이, 폭, 높이, 형태, 설치각도, 군수제의 경우 수제의 개수 및 설치간격)와 실제 하천지형특성(하천 폭 대비 수제길이, 하천곡률, 하상경사 등)을 동시에 고려한 설계기법의 개발이 필요하다. 최근 건설기술연구원(강준구 외 2006, 여홍구 외 2008)에서 수제 설계의 기본이 되는 인자에 대한 실험이 다양하게 이루어지고 있지만, 이 역시도 1,2차원적 기초수리실험으로 한정되어 있어 도출된 제안식을 실제 설계에 직접 적용하기 위해서는 추가적인 검증이 필요하다.

### 3. 연구개발 범위

#### 1) 1차년도

| 분류     | 주요 연구활동                              | 세부 연구내용                                                                             |
|--------|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 수리모형실험 | ▪ 선행연구 사례조사                          | ▪ 수제설계에 중요한 인자 검토                                                                   |
|        | ▪ 수리모형실험 조건 결정                       | ▪ Case 1, 2, 3, 4의 수위, 유량조건 결정                                                      |
|        | ▪ 2건의 수리모형실험 수행                      | ▪ Case 1, 2의 수위, 3차원 유속 측정                                                          |
|        | ▪ 실험자료 분석 및 통계적 처리                   | ▪ 평균유속, 난류응력 산출<br>▪ FFT 스펙트럼 분석<br>▪ 단면별 평균유속 분포도, 단면별 난류응력분포도, 전 영역에 대한 수심 분포도 작성 |
| 수치해석   | ▪ 수치해석 1건에 대한 전처리 작업<br>▪ 수치해석 1건 수행 | ▪ 수치해석 계산격자 작성 및 테스트<br>▪ 3차원 수치해석을 수행하여 수제 하류 3차원 유동장을 계산                          |

#### 2) 2차년도

| 분류         | 주요 연구활동              | 세부 연구내용                                                                                             |
|------------|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 수리모형실험     | ▪ 2건의 수리모형실험 수행      | ▪ Case 3, 4의 수위, 3차원 유속 측정                                                                          |
|            | ▪ 실험자료 분석 및 통계적 처리   | ▪ 평균유속, 난류응력 산출<br>▪ FFT 스펙트럼 분석<br>▪ 단면별 평균유속 분포도, 단면별 난류응력분포도, 전 영역에 대한 수심 분포도 작성                 |
| 수치해석       | ▪ 수치해석 1건에 대한 전처리 작업 | ▪ 수치해석 계산격자 작성 및 테스트                                                                                |
|            | ▪ 1건의 수치해석 수행        | ▪ 병렬연산기법 기반의 3차원 유동해석 모형을 이용한 수치해석 2건 수행                                                            |
|            | ▪ 해석자료 분석 및 통계적 처리   | ▪ 평균유속, 난류응력 산출<br>▪ FFT 스펙트럼 분석<br>▪ 단면별 평균유속분포도, 단면별 난류응력분포도, 단면별 2차원 유선도, 전체 흐름영역에 대한 3차원 유선도 작성 |
| 3차원 흐름 가시화 | ▪ 수치해석 결과 후처리        | ▪ 수치해석으로부터 도출된 크기 10GB 이상의 대용량 유동장 파일을 고해상도 디지털 이미지로 변환                                             |
|            | ▪ 동영상 제작             | ▪ 추출된 100개 이상의 이미지를 동영상으로 변환하여 3차원 흐름 가시화 동영상 제작                                                    |
| 설계인자 값 산출  | ▪ 설계 인자 값 정량적 산출     | ▪ 수치해석결과로부터 정수역 크기, 하상전단응력, 최대유속, 이차류 분포도 작성                                                        |

## 제2장. 국내외 기술 개발 현황

### ○ 국내 현황

우리나라의 하천정비 현황(표1)을 살펴보면 2010년 12월 31일 기준으로 59.8 %의 제방정비가 완료 되었으나, 전체 하천구간의 약 40 %인 12,553 km에 구간에 대한 제방 보강 및 신설이 필요한 것으로 나타났다. 국토교통부 하천정비사업 및 예산지원(표2)에 따르면 국가하천 및 지방하천 정비에 2012년 각각 4천억 원, 7.7천억 등 매년 4천억원 이상의 예산이 투입되고 있다.

[표1] 하천정비 현황

| 구분 | 합계(요계수)<br>(km) | 하천정비(제방)현황 |      |          |      |          |      |
|----|-----------------|------------|------|----------|------|----------|------|
|    |                 | 제방정비완료구간   |      | 제방보강필요구간 |      | 제방신설필요구간 |      |
|    |                 | (km)       | (%)  | (km)     | (%)  | (km)     | (%)  |
| 합계 | 31,229.6        | 18,676.9   | 59.8 | 6,404.7  | 20.5 | 6,148    | 19.7 |
| 국가 | 3,137.8         | 2,490.3    | 79.4 | 524.0    | 16.7 | 123.5    | 3.9  |
| 지방 | 28,091.8        | 16,186.6   | 57.6 | 5,880.7  | 21.0 | 6,024.5  | 21.5 |

■ 한국하천일람(2010.12.31. 기준)

■ 요계수는 하천의 좌·우안에 제방을 설치하였거나 설치할 필요가 있는 구간에 대한 연장의 합

[표2] 하천예산 현황(억 원)

| 구분       | 2006  | 2007  | 2008  | 2009   | 2010  | 2011  | 2012  |
|----------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
| 국가하천정비지원 | 3,430 | 3,660 | 3,729 | 3,490  | 3,040 | 4,120 | 4,603 |
| -국가하천정비  | 3,200 | 3,300 | 3,300 | 3,090  | 2,370 | 3,500 | 4,030 |
| -치수연구개발  | 230   | 210   | 279   | 250    | 420   | 420   | 373   |
| -댐적하류정비  |       | 150   | 150   | 150    | 250   | 200   | 200   |
| 지방하천정비지원 | 6,480 | 6,987 | 7,233 | 10,730 | 8,434 | 7,520 | 8,706 |
| -지방하천정비  | 3,200 | 3,435 | 3,998 | 6,890  | 6,119 | 6,020 | 7,706 |
| -수계치수    | 3,280 | 3,552 | 3,235 | 3,840  | 2,315 | 1,500 | 1,000 |

국내에서는 낙동강, 영산강, 형산강 하류 등지에 수제를 설치하여 유수의 강도 및 방향을 조절하여 하천 내 수충부를 보호한 사례가 있으며(그림2), 최근에는 자연재료를 이용하여 수제를 설치한 경안천, 오산천, 양재천 등의 사례가 있다(그림3). 이와 같이 근래에는 하천 설계 및 관리와 관련하여 경제성뿐만 아니라 환경적, 생태적, 심미적 요소를 고려한 수제 설치기법에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.



<그림2> 낙동강 하류(좌측), 영산강 하류(중간), 형산강 하류(우측)에 설치된 수제



<그림3> 경안천 말뚝수제(좌측), 오산천 사각방틀수제(중간), 양제천 수제(우측)

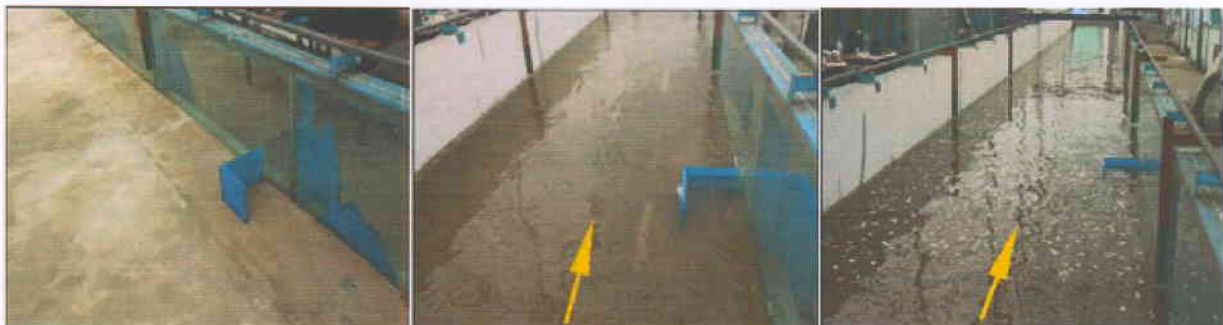
한편, 수제 설계 일반사항(국토해양부, 2009)에서는 '하천에 가장 적합한 형태의 수제를 가장 효율적인 위치에 배치하되, 수제에 의해 기존 하도 또는 계획하도가 수리학적, 생태학적 그리고 친수환경 측면에서 역효과를 발생시키지 않도록 계획하여야 하며, 수제설치로 인하여 대안에 미치는 영향이 크므로 수제 설치시 가능한 한 수리모형실험 등을 실시하여 그 크기와 간격 등을 정하여 악영향이 미치지 않도록 해야 한다' 고 명시하고 있다. 이렇듯 수제는 설계 위치와 방법에 따라 하천 수충부의 보호 및 생태적 측면에서 다양한 장점을 나타내기도 하지만 적절하지 못한 시공으로 인해 부작용을 초래할 수도 있기 때문에, 설계시 설치되는 지역의 하천지형과 수제역 유수의 흐름간의 상호관계에 대한 체계적인 이해와 해석이 선행되어야 한다.

건설부 국립건설시험소(1987)는 남한강 본류와 달천의 합류점에서 제방안정공법의 하나로써 수제(횡수제와 평행수제)를 제시하여 1/80의 고정상 및 이동상 수리모형실험을 수행하였다. 연구결과, 수제가 없는 경우 만곡 외측의 세굴이 심하게 나타나나 수제가 설치된 경우에는 유심선이 수로의 중앙으로 이동하여 세굴이 둔화되는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 강준구 외(2006, 2009)는 LSPIV(Large Scale Particle Image Velocimetry) 기법을 사용한 실험을 통하여 직각 수제의 설치 간격에 따른 흐름특성을 분석하였다(그림 4).



<그림 4> 세굴영역 측정인자 및 굴절수제 하상변동 실험 (강준구 외, 2009)

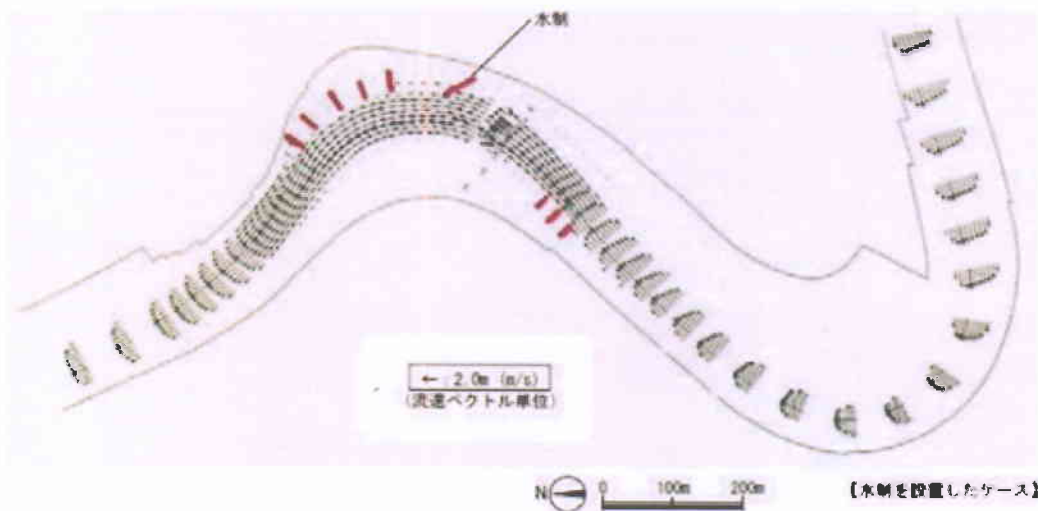
수제는 배치에 따라 횡수제, 평행수제 그리고 혼합형 수제로 분류할 수 있는데, 여홍구 외(2007, 2008)는 혼합형 수제로 분류되는 수제형상들 중 L형 수제를 정의하고 수제팔이 하류로 향하는 배치에 의해 발생하는 흐름특성에 관한 실험적연구를 수행하였다(그림 5). 또한 안선복 외(2008)는 2차원 수치모의를 이용해 수제 설치 간격에 따른 흐름특성 분석을 하였다.



<그림 5> L형 수제 설치모습 및 LSPIV를 이용한 측정 (여홍구 외, 2008)

## ○ 국외 현황

일본에서는 수제를 홍수로 인해 유실된 호안을 복원하는데 사용하여 수제가 홍수방어 구조물의 역할을 하도록 활용하였다. 그 사례로 2005년 일본토목학회 디자인상을 수상한 일본의 코요시강은 설계 초부터 2차원 유황해석을 실시하여 수제 설치 전·후의 흐름 상황을 공학적으로 예측하였다(그림 6). 중국에서는 기존의 설치사례를 분석하고 수리실험 등을 통해 수제설계 기술에 관한 이론을 정립하였으며, 특히 <항도정치공정기술규범>에서는 선박운행을 위한 수제 설치시 수제의 횡단면 경사, 수제 두부 설계 및 천단부의 폭, 수제와 호안의 연결부에 관한 기준을 제시하였다. 이를 통해 1975년 후아 이강에 수제 8기를 배치하여 수제와 수제 사이에 토사퇴적을 유도하여 하안을 보호하고 선박운행을 위한 수심을 확보 하였다. 미국은 1980년대 초 미국 아이오와 대학 수리연구실에서 Odgaard의 실험연구를 시작으로 수제의 한 형태인 베인(vane)에 관한 연구 및 기술개발이 이뤄지고 있는데, 이는 베인을 설치하여 발생하는 이차류로 하여금 만곡하천의 외측제방에 토사퇴적을 유도하여 세굴로 인한 제방유실을 보호하는 기술이다. 실제로 Nishnabotna 강에 베인을 시공한 후, 약 50 %의 하상 횡단경사가 감소하였고 수충부(제방) 부근 유속이 10-20 % 가량 감소한 것으로 알려져 있다.



圖二次元流況解析による水制設置効果の予測シミュレーション(出典11-4)

<그림 6> 2차원 유황해석 (일본국토교통성, 2008)

미육군 공병 수로시험소(U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station)의 Copeland(1983)는 만곡부에서 호안 보호공으로서 불투과 횡수제의 효과를 평가하고 검증하였으며, 이와 관련된 인자로 길이-간격비, 설치각도, 수제의 기부에서 보호공의 영향 등을 설정하였다. 미국 연방도로국(FHWA, 1985)은 모형 시험, 문헌조사 및 현장조사에 기초한 연구를 통해 수제의 설계에 있어 길이와 투과성을 다루고, 투과율이 35 % 이하인 경우와 80 % 이상인 경우에 대해 각각 다른 설계를 제안하였다. Sukhodolov 외(2002)는 독일 Elbe강에 설치된 횡수제에 대한 현장측정으로 수제의 길이와 수제간의 간격이 수제역 내의 흐름에 영향을 미치는 요인으로 정의하였다. McCoy 외(2008)는 LES(Large Eddy Simulation)를 이용하여 두 개의 연속되는 직각 수제 주변에서 발생하는 말굽와(horseshoe vortex, HV)에 관한 연구를 수행하였으며, 이를 통하여 수제 주변의 수리 특성을 정량적으로 설명 할 수 있음을 보여주었다.

### 제3장. 연구수행내용 및 성과

#### 1. 연구 개발 추진 일정 및 체계

##### 1) 연구 개발 추진일정

| 구분 | 연구과제명<br>(연구 수행기관) | 관련 성과목표/지표 |      |         | 세부추진내용<br>(연구수행 Activity) | Activity별<br>산출물 | 소요 연구비<br>(백만원) | 1차년도 |     |     |     | 2차년도 |     |     |     |
|----|--------------------|------------|------|---------|---------------------------|------------------|-----------------|------|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|
|    |                    | 핵심성과       | 단위성과 | 질적 성과지표 |                           |                  |                 | 1/4  | 2/4 | 3/4 | 4/4 | 1/4  | 2/4 | 3/4 | 4/4 |
| 총괄 |                    |            |      |         |                           |                  | 370             |      |     |     |     |      |     |     |     |
| 주관 |                    | 1          | 1-1  | 1-1-①   | 수리모형실험 조건 결정              | 수리모형<br>시나리오     | 60              |      |     |     |     |      |     |     |     |
|    |                    |            |      | 1-1-②   | 수리모형실험 4건                 | 유속장데이터           | 100             |      |     |     |     |      |     |     |     |
|    |                    |            |      | 1-1-③   | 실험자료 분석 및 통계적<br>처리 4건    | 그림 및<br>도표       | 40              |      |     |     |     |      |     |     |     |
|    |                    | 2          | 2-1  | 2-1-①   | 수치해석 계산 격자 작성<br>및 테스트    | -                | 10              |      |     |     |     |      |     |     |     |
|    |                    |            |      | 2-1-②   | 3차원 고정밀 수치해석<br>2건        | 유속장데이터           | 50              |      |     |     |     |      |     |     |     |
|    |                    |            |      | 2-1-③   | 실험자료 분석 및 통계적<br>처리 2건    | 그림 및<br>도표       | 30              |      |     |     |     |      |     |     |     |
|    |                    | 3          | 3-1  | 3-1-①   | 수제 주위 흐름 3차원<br>시각화       | 동영상파일            | 40              |      |     |     |     |      |     |     |     |
|    |                    | 4          | 4-1  | 4-1-①   | 설계인자 값 정량적 산출             | 그림 및<br>도표       | 40              |      |     |     |     |      |     |     |     |

##### 2) 연구 개발 추진 체계

| 연구개발과제 |                                     |
|--------|-------------------------------------|
| 과제명    | 수제 하루 3차원 흐름구조 규명을 위한 실험 및 수치해석적 연구 |

| 기 관 별 참 여 현 황 |     |     |       |
|---------------|-----|-----|-------|
| 구 분           | 기관수 | 인원수 | 총인원 수 |
| 산 업 계         |     |     | 5     |
| 대 학           | 1   | 5   |       |
| 국공립(연)        |     |     |       |
| 출 연 (연)       |     |     |       |
| 기 타           |     |     |       |

| 주 관 연 구 기 관                                                                                                                                          | 공 동 연 구 기 관 | 위 탁 연 구 기 관 | 위 탁 연 구 기 관 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| 한양대학교                                                                                                                                                |             |             |             |
| 참 여 연 구 원                                                                                                                                            | 참 여 연 구 원   | 참 여 연 구 원   | 참 여 연 구 원   |
| 주관연구책임자<br>(강석구)외 4명<br>연구원(박사과정) 1명,<br>연구원보(석사과정)<br>3명                                                                                            |             |             |             |
| 담당연구개발내용                                                                                                                                             | 담당연구개발내용    | 담당연구개발내용    | 담당연구개발내용    |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>선행연구 및 선진사<br/>례 조사</li> <li>수리모형실험</li> <li>수치해석 수행</li> <li>3차원 흐름 시각화</li> <li>수제설계인자 값 도<br/>출</li> </ul> |             |             |             |

## 2. 연구 개발 추진 전략 및 방법

### 1) 수리모형실험

수리모형실험은 한양대학교가 보유한 실험용 개수로 (길이: 18 m, 너비: 0.9 m, 높이: 0.4 m, 그림)에서 수행되었다. 수제 모형은 아크릴을 이용하여 물에 잠기지 않는 수제와 물에 잠기는 수제를 제작하였으며, 하천에 설치된 수제의 국·내외 사례를 검토하여 수제 길이 (L)가 수로 너비(B)의 1/3 이 되도록 실험용 개수로에 설치하였다 (그림7). 본 연구에서는 수제 하류의 3차원 흐름 구조 분석을 위해 수제 주위의 유속과 수위를 측정하였다. 수제 주위의 3차원 유속은 Nortek 사의 초음파 유속계 (Acoustic Doppler Velocimetry, ADV)인 Vectrino profiler를 이용하여 측정하였다. 측정시간은 측정 유속이 측정 시간에 따라 변하지 않는지를 검토하는 수렴도 테스트를 통해 결정되었고, 수제 주위의 흐름 특성을 고려하여 5-10분 동안 측정되었다. 수제 주위의 수위는 Microsonic 사의 mic+130/1U/TC 초음파 거리 센서를 이용하여 측정되었다. 측정 유속과 마찬가지로 수위의 측정시간은 측정 수위가 측정 시간에 따라 변하지 않는지를 검토하는 수렴도 테스트를 통해 결정되었으며, 2분 동안 측정되었다. 유입 흐름조건과 잠김 흐름의 유무에 따른 수제 하류 3차원 흐름 구조를 규명하기 위하여 [표3-표4]와 같이 수리모형실험을 설계하였으며, 표[5]와 같이 측정 수를 결정하였다.

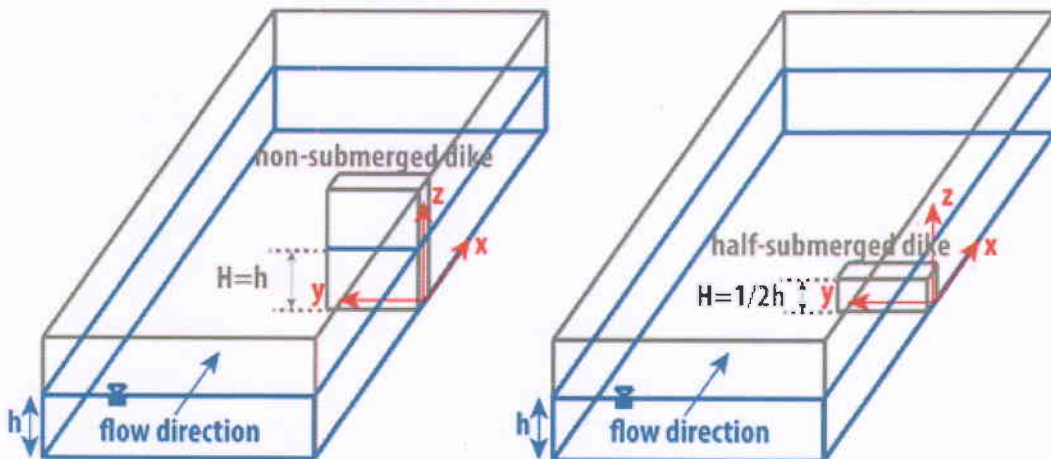


(a) 길이 18m, 폭 0.9m 개수로



(b) Vectrino profiler (100Hz) 초음파 유속계

<그림 7> 본 연구진이 보유한 개수로 실험 장비



<그림 8> 수리모형실험의 모식도

[표3] 수제 및 수로형상

|       | 수제 형상                |                      |                      | 수로                   |                      |                        |                                     |
|-------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------------------|-------------------------------------|
|       | 높이<br>( $H$ )<br>[m] | 길이<br>( $L$ )<br>[m] | 두께<br>( $t$ )<br>[m] | 길이<br>( $l$ )<br>[m] | 너비<br>( $B$ )<br>[m] | 높이<br>( $H_f$ )<br>[m] | 하류<br>게이트<br>높이<br>( $H_t$ )<br>[m] |
| case1 | 0.4                  | 0.3                  | 0.04                 | 18                   | 0.9                  | 0.4                    | 0.156                               |
| case2 |                      |                      |                      |                      |                      |                        | 0.122                               |
| case3 |                      |                      |                      |                      |                      |                        | 0.156                               |
| case4 |                      |                      |                      |                      |                      |                        | 0.122                               |

[표4] 흐름조건

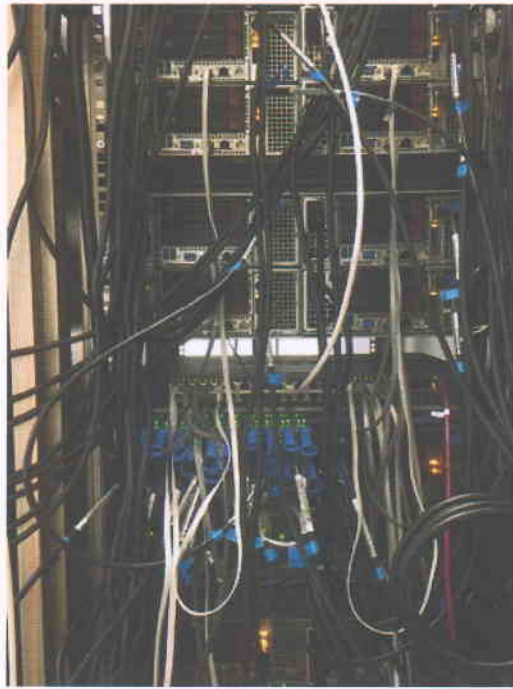
|       | 프루드 수<br>( $Fr$ ) | 유량<br>( $Q$ )<br>[ $m^3/s$ ] | 단면 평균 유속<br>( $U_0$ )<br>[ $m^2/s$ ] | 접근 흐름 수위<br>( $h$ )<br>[m] |
|-------|-------------------|------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|
| case1 | 0.1               | 0.0278                       | 0.144                                | 0.215                      |
| case2 | 0.18              | 0.0528                       | 0.267                                | 0.22                       |
| case3 | 0.1               | 0.0278                       | 0.144                                | 0.215                      |
| case4 | 0.18              | 0.0528                       | 0.267                                | 0.217                      |

[표5] 축점 수

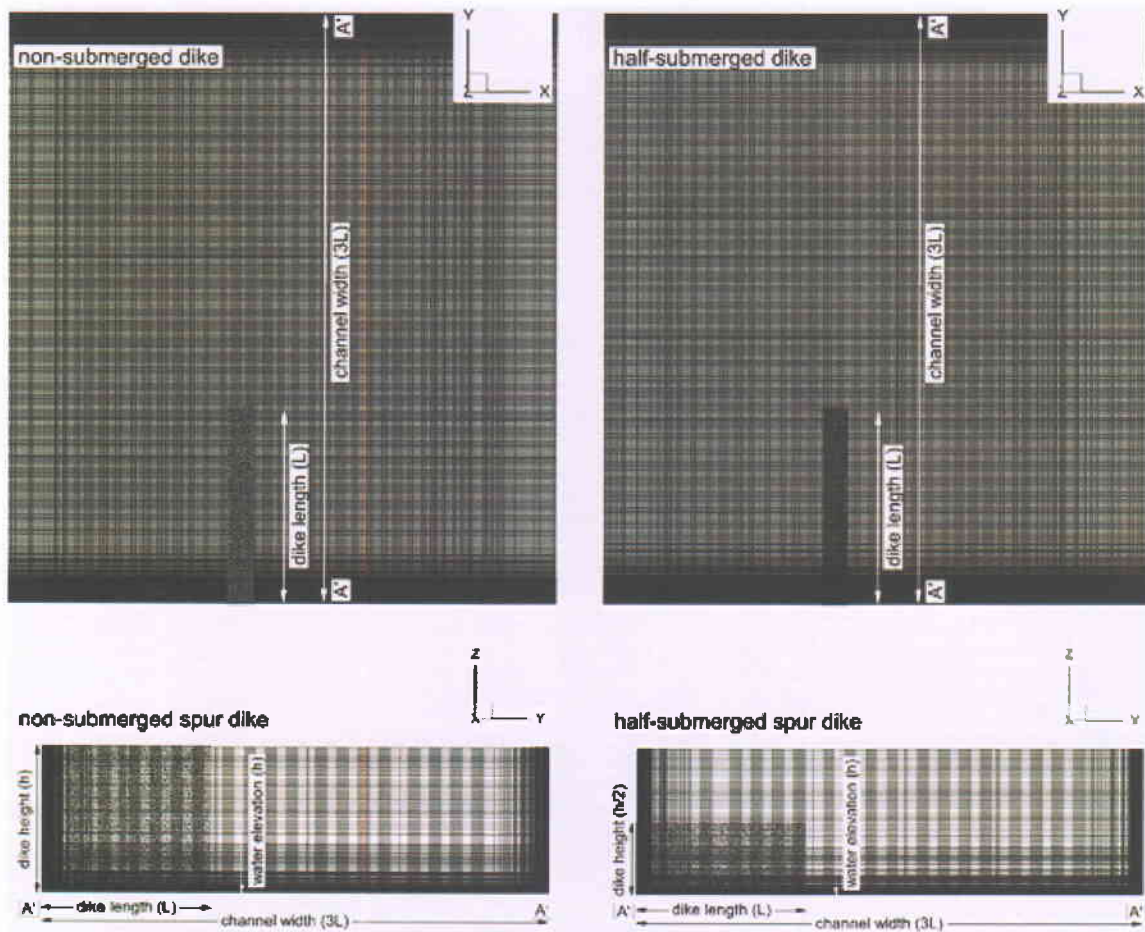
|    | case1 | case2 | case3 | case4 |
|----|-------|-------|-------|-------|
| 유속 | 2268  | 2262  | 185   | 185   |
| 수위 | 596   | 596   | 596   | 596   |

## 2) 3차원 수치해석

수리모형실험은 축점이 제한되며 초음파유속계 (down looking probe)의 특성상 수면 부근에서의 유속을 측정할 수 없다는 한계가 있다. 이를 보완하기 위하여 본 연구진은 수행한 수리모형실험 중 프루드수가 낮은 경우의 잠기지 않은 수제와 잠긴 수제 조건에서 3차원 수치해석을 수행하였다. 3차원 수치해석모형 중 넓은 범위의 난류 흐름 스케일을 모델링하는 Large Eddy Simulation (LES)을 이용하여 수제 하류의 3차원 흐름 구조를 분석하였다. 본 수치모형은 슈퍼컴퓨터 기반의 Message Passing Interface (MPI) 병렬연산기법을 활용하고 대수적다중격자법 (algebraic multigrid method)와 Newton Krylov 기법 등 수렴가속화 기법 (convergence acceleration method) 등을 활용하여 수백~수 천개의 CPU를 사용하여 수천만 ~ 수십억 개의 격자망을 해석할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 따라서 본 과제에 사용된 수치모형은 Flow 3D나 Fluent와 같은 상용 CFD 모형과 비교했을 때 고효율, 고정밀 연산을 수행할 수 있다는 장점을 갖는다. 3차원 수치해석 연산은 본 연구진이 보유한 400코어, 1600GB RAM을 장착한 슈퍼컴퓨팅 리눅스 클러스터를 이용하여 수행되었다 (그림9).



<그림 9> 3차원 수치해석에 사용된 슈퍼컴퓨터



<그림 10> 3차원 수치해석에 사용된 계산 격자

[표6] 3차원 수치해석에 사용된 격자 개수

|                                   | 흐름방향 격자수<br>(개) | 횡방향 격자수<br>(개) | 연직방향 격자수<br>(개) | 총격자수<br>(개) |
|-----------------------------------|-----------------|----------------|-----------------|-------------|
| 잠기지 않은 수제<br>(Non-submerged dike) | 811             | 483            | 146             | 5700만       |
| 잠긴 수제<br>(half-submerged dike)    | 811             | 483            | 146             | 5700만       |

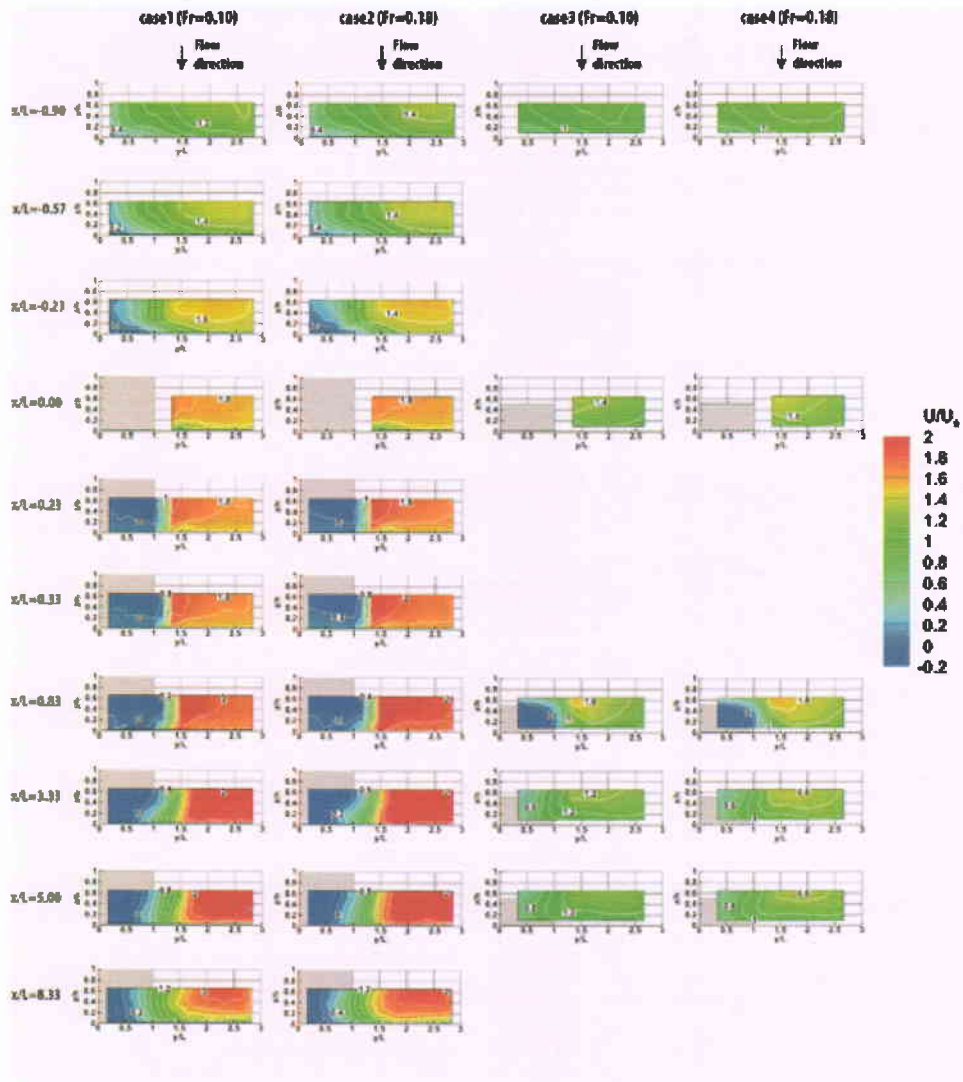
### 3. 연구 내용

[표7] 연구핵심성과

| 연<br>번 | 핵심성과<br>(CTE)                | 핵심성과 설명                                                                          | 성<br>과<br>유<br>형        | 해<br>당<br>연<br>차   | TRL | 목<br>표 | 달<br>성 |
|--------|------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|--------------------|-----|--------|--------|
| 1      | 수리모형<br>실험 결과<br>그림 및<br>도표  | 수리모형실험으로 수제 주위 흐름의 3차원 유속장을<br>측정하고 이를 바탕으로 직선하도에서의 수제 주위<br>3차원 난류 흐름을 규명       | ① 공<br>법<br>·<br>기<br>법 | 1·<br>2차<br>년<br>도 | 3   | 4건     | 4건     |
| 2      | 3차원<br>유동해석<br>결과 그림<br>및 도표 | 3차원 고정밀 수치해석으로 수제 주위 흐름의 3차원<br>유속장을 계산하고 이를 바탕으로 직선하도에서의<br>수제 주위 3차원 난류 흐름을 규명 | ① 공<br>법<br>·<br>기<br>법 | 1·<br>2차<br>년<br>도 | 3   | 2건     | 2건     |
| 3      | 3차원<br>흐름<br>가시화<br>동영상      | 3차원 고정밀 수치해석으로 얻어진 유속의<br>시간변화자료를 통해 수제 주위 흐름을 3차원으로<br>시각화함                     | ① 공<br>법<br>·<br>기<br>법 | 2차<br>년<br>도       | 3   | 2건     | 2건     |
| 4      | 설계인자<br>의 공간<br>분포도          | 4가지 흐름특성 (정수역크기, 하상전단응력,<br>최대유속, 이차류분포도) 분석을 통해 수제 설계 시<br>활용가능한 수제설계인자값 도출     | ① 공<br>법<br>·<br>기<br>법 | 2차<br>년<br>도       | 3   | 4건     | 4건     |

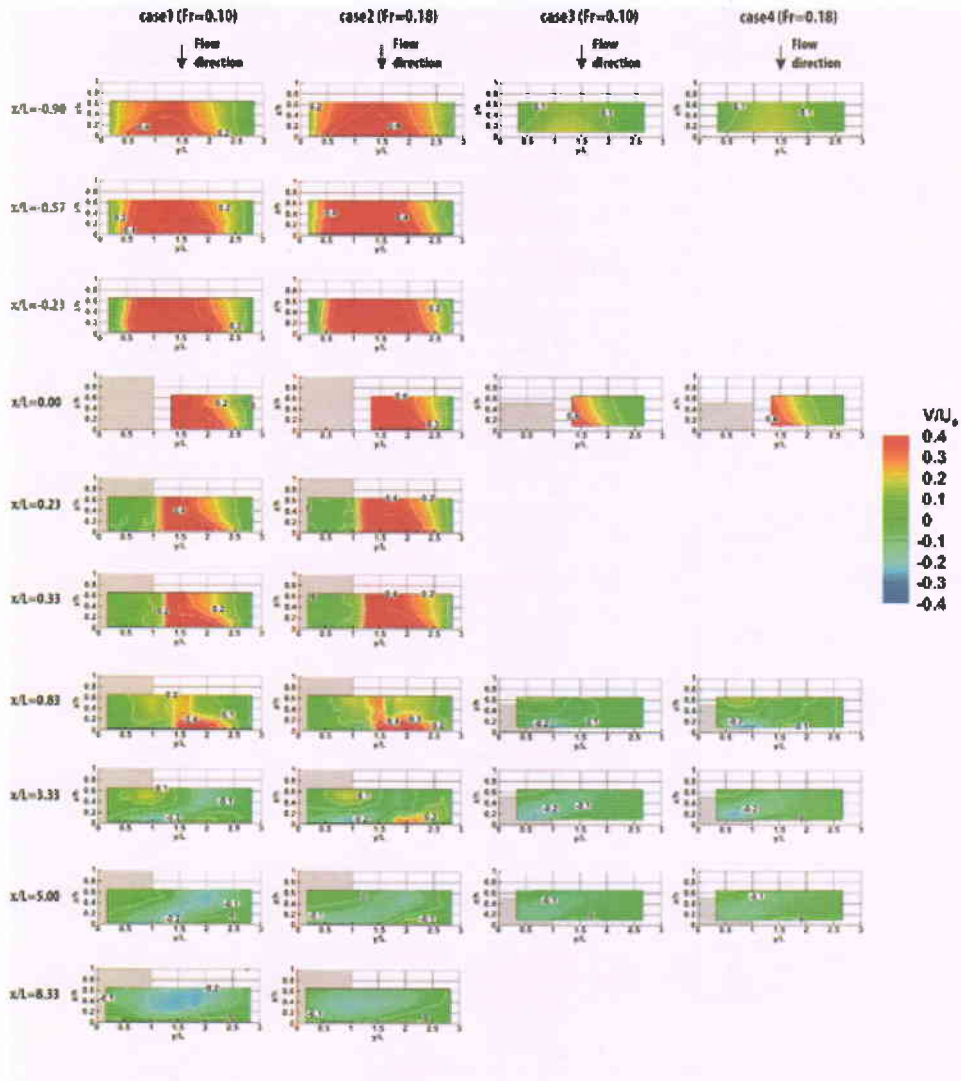
#### 4. 연구 결과

##### 1) 수리모형실험



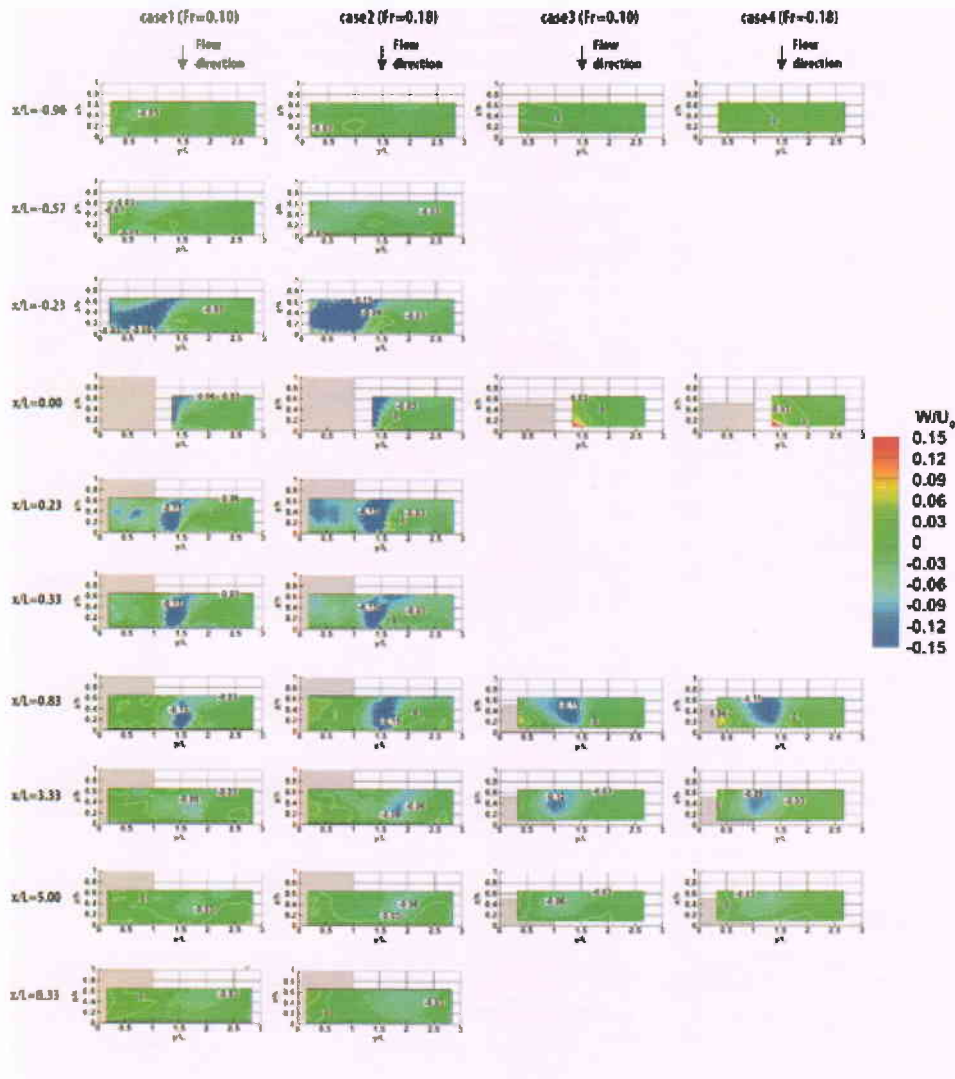
<그림 11> 무차원 흐름 방향 유속 분포 ( $U/U_0$ )

그림 11은 흐름 방향에 대한 무차원 시간평균 유속( $U/U_0$ )의 분포이다. 그림에서 확인할 수 있듯이  $U/U_0$  값은 수제의 잠김 흐름 발생 유무에 따라서 크게 변화한다. 재순환영역은 수제 하류부에서 발생하는 역방향 흐름 유속 ( $U/U_0 < 0$ )으로 그림에서 파란색으로 표시된다. 물에 잠기지 않은 수제의 경우 (case1, case2), 재순환영역이 수제 하류의 모든 유속 측정 횡단면에서 관찰되었다. 반면, 잠긴 수제의 경우 (case3, case4)에는 이러한 흐름이 수제 직하류부 횡단면인  $x/L = 0.83$ 에서만 크게 관찰되고  $x/L = 3.33$  이후에는 그 영역의 크기가 현저히 줄어드는 것을 알 수 있다. 이는 잠긴 수제의 경우에는 수제를 월류하는 흐름과 수제 선단부를 돌아나가는 흐름이 상호작용하면서 흐름의 혼합 (mixing)이 활발히 일어난 결과로 보인다.



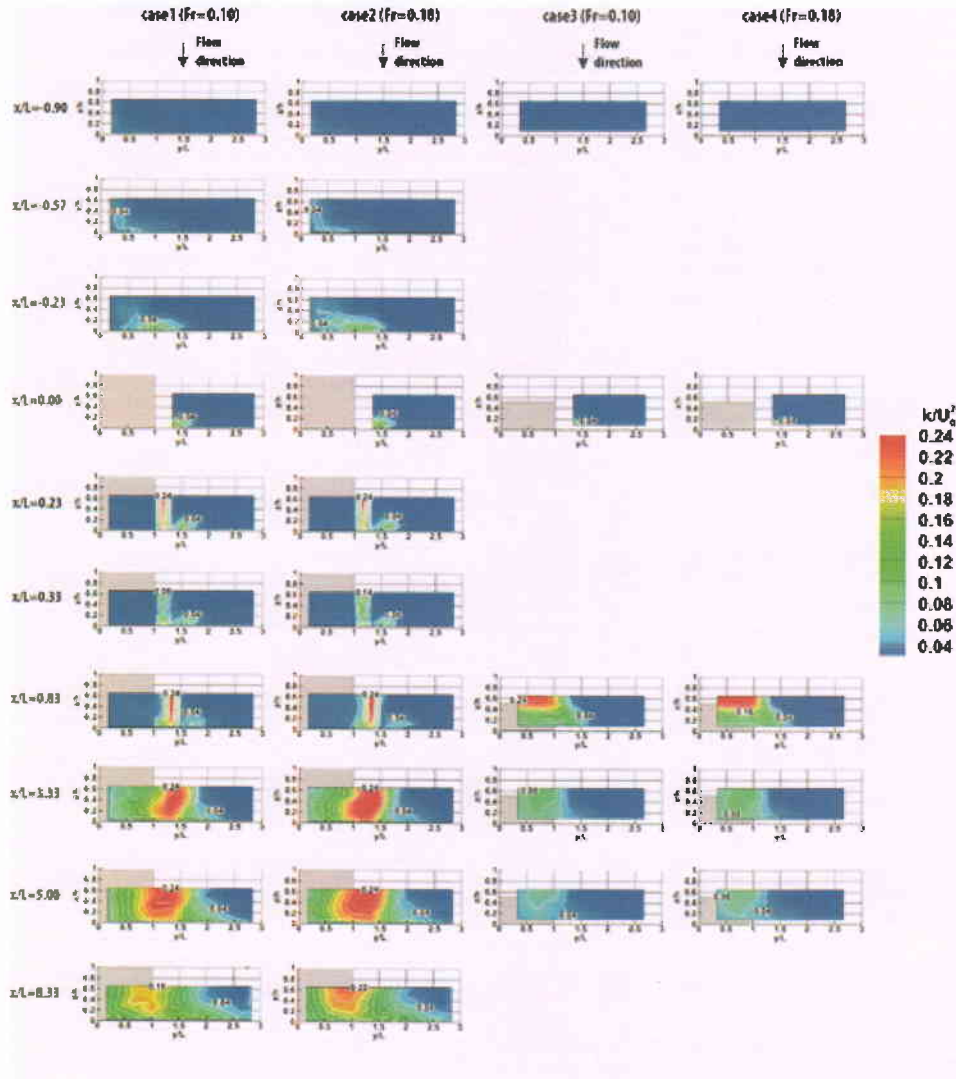
<그림 12> 무차원 횡방향 유속 분포 ( $V/U_0$ )

그림 12는 횡방향에 대한 무차원 시간평균 유속 ( $V/U_0$ )의 분포이다. 앞서 본  $U/U_0$ 의 경우와 마찬가지로 Froude 수 변화에 의한 영향보다 수제의 잠김 흐름 발생여부에 따라 수제 하류 횡방향 흐름 구조가 크게 변하는 것을 확인할 수 있다. 특히, 수제 설치 단면 ( $x/L=0.00$ )을 비롯하여 수제에 인접한 상하류 단면 ( $x/L=-0.90, 0.83$ )에서  $V/U_0$ 의 분포가 수제의 잠김 흐름의 발생 여부에 따라 매우 큰 차이를 보이는데, 이는 수제로 인해 감소하는 흐름 단면적의 차이와 흐름이 흐르는 위치의 차이 때문이다. 수제가 잠기지 않은 경우 (case1, case2), 모든 흐름이 수제 선단부를 횡방향으로 돌아 나간다. 하지만 잠긴 수제의 경우 (case3, case4), 흐름은 수제 선단부를 횡방향으로 돌아나갈 뿐만 아니라 수제 상단부를 월류한다. 이렇게 잠긴 수제의 경우에는 흐름이 수제 주위를 두 방향으로 흐르기 때문에 그림과 같이 수제의 잠김 흐름의 발생에 따라  $V/U_0$ 의 값이 크게 차이 나는 것을 볼 수 있다.  $V/U_0$  분포에서 발견되는 흥미로운 점은 수제 하류 측 단면에서 서로 반대방향으로 회전하는 한 쌍의 이차류가 나타나는 것이다. 이차류는 수제가 잠기지 않은 경우 (case1, case2)  $x/L=3.33$  횡단면에서 발생하였고 잠긴 수제의 경우 (case3, case4),  $x/L=0.83$  횡단면에서 관찰되었다.



<그림 13> 무차원 연직 방향 유속 분포 ( $W/U_0$ )

그림 13은 연직방향에 대한 무차원 시간평균유속 ( $W/U_0$ )의 분포이다. 그림에서 가장 눈에 띄는 차이는 수제의 잠김 흐름 발생 여부에 따라 변하는 수제 선단부의 연직방향 흐름 방향이다. 물에 잠기지 않은 수제의 경우 (case1, case2), 수제 설치 단면 ( $x/L=0.00$ )에서 수로 바닥을 향하는 흐름 ( $W/U_0 < 0$ )이 발생한다. 반면 잠긴 수제의 경우 (case3, case4), 수제 설치 단면에서 수면을 향하는 흐름 ( $W/U_0 > 0$ )이 발생한다. 이는 수제 상류에서 발달하여 연직 방향으로 하강한 후 수제 선단부 하단을 돌아나가는 말발굽와 (horseshoe vortex)가 수제의 잠김 여부에 따라 다르게 발생되기 때문으로 추측된다. 그림에서 보이는 또 다른 흐름 특징은 하강 흐름 중심부의 이동이다. 잠기지 않은 수제의 경우, 수제 하류 ( $x/L=0.83 \sim 5.00$ )에서 관찰되는 하강흐름은 제방 외측 ( $y/L=3.00$ 을 향하는 방향)으로 이동한다. 반면, 잠긴 수제의 경우, 수제 하류에서 관찰되는 하강흐름은 제방 내측 ( $y/L=0.00$ 을 향하는 방향)으로 이동한다. 이는 잠긴 수제에서 발생하는 월류흐름에 의한 영향으로 나타나는 것으로 보인다.

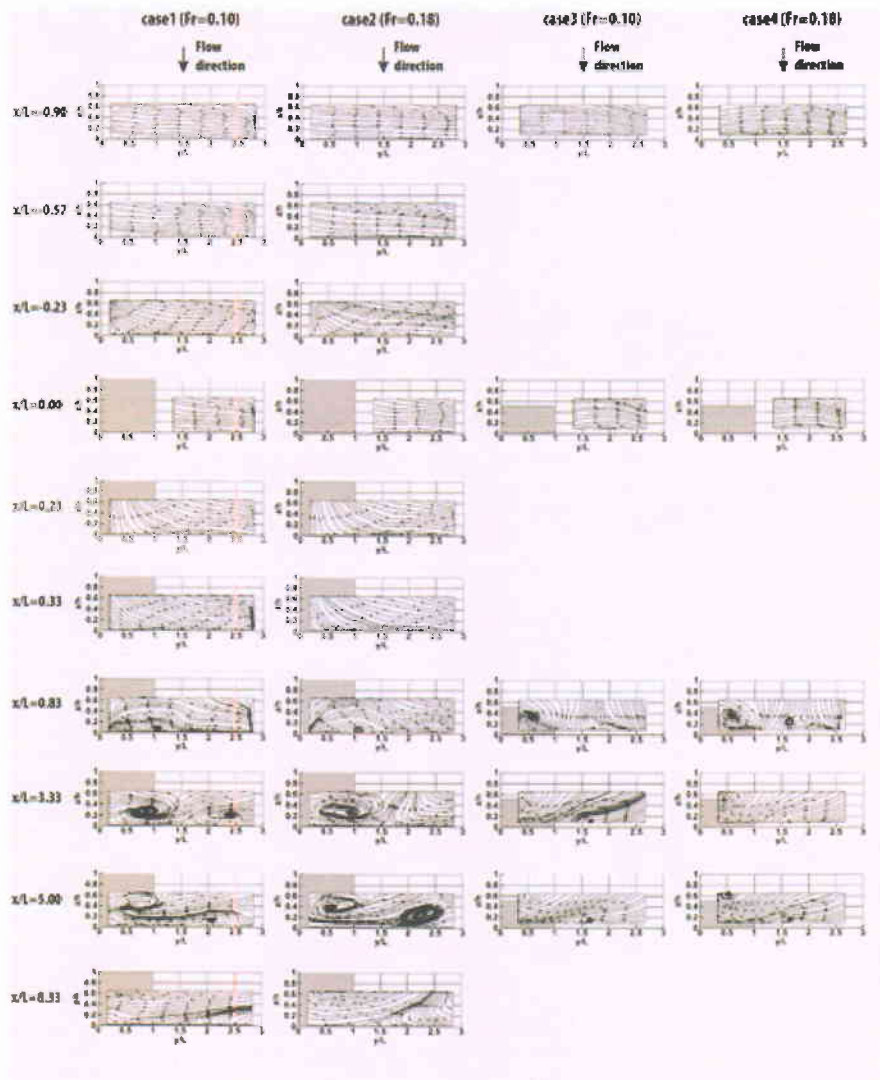


<그림 14> 무차원 난류에너지 분포 ( $k/U_0^2$ )

그림 14를 통해 수저의 잠김 흐름 발생에 관계없이 수저의 선단부 바닥 부근에서 난류 운동에너지가 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 수저 상류에서 발달하여 수저 선단부 하단을 돌아나가는 말발굽와 (horseshoe vortex)와 수저 선단부에서 발달하는 분리전단층 (detached shear layer)으로 설명할 수 있다. 말발굽와는 개수로 흐름에서 연직방향의 구조물을 설치하였을 때 구조물 상류 밑바닥에서 발생해 구조물 선단부 하단을 돌아나가는 와류로 이 와류는 강한 난류에너지를 포함한다 (Koken 2008b). 그리고 수저 하류에서 시작되는 분리전단층은 수저 선단부에서 발생하는 와류들과 상호작용하며 시간에 따라 움직이는데, 이러한 움직임으로 수저 설치 단면에서 난류에너지가 증가하게 된다 (Koken 2008a).

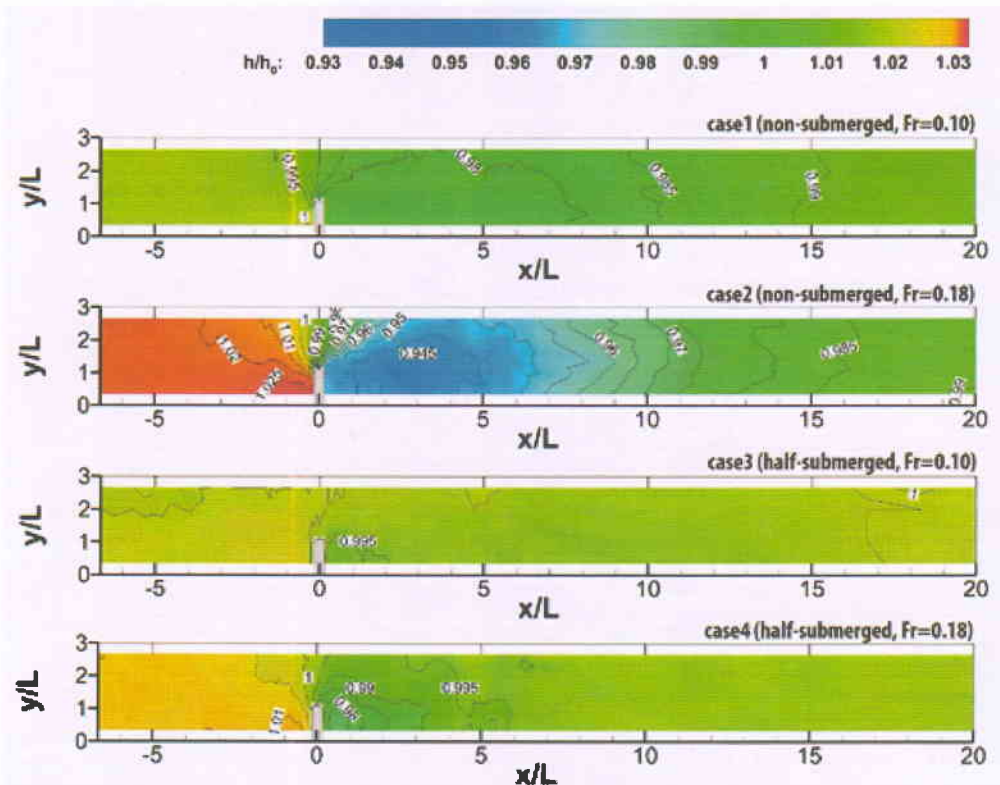
또한, 난류 운동에너지 분포를 통해 수저 하류에서 흐름의 혼합이 어떻게 일어나는지 유추해 볼 수 있다. 일반적으로 수저 하류에서 흐름은 수저 선단부로부터 발생하는 전단층에 의해 강한 난류에너지를 얻는다. 그리고 이 난류에너지는 수저 하류로 흐름이 진행하면서 주변 흐름으로 에너지를 전달한다 (Duan 2009, Duan et al., 2009). 잠기지 않은 수저의 경우, 수저 하류 흐름은  $x/L=0.83$ 에서 수저 선단부로부터 발생하는 전단층에 의해 강한 난류에너지를 얻는다. 그리고 수저 하류로 흐름이 진행함에 따라 횡방향으로 난류에너지 전달이 이루어지며, 주흐름영역방향 ( $y/L=3.00$ 을 향하는 방향)보다 재순환영역방향 ( $y/L=0.00$ 을 향하는 방향)으로 에너지전달이 활발히 일어나는 것을 관찰할 수 있다. 이는 case1, case2의  $y/L=1.00 \sim 1.50$ 에서 관찰되는 빨간색 영역이  $x/L=3.33$ 에서  $x/L=5.00$ 으로 진행하며 주흐름영역 방향보다 재순환흐름영역 방향으로 더욱 빠르게 퍼지는 것을 통해 확인할 수 있다. 반면 잠긴 수저의 경우, 수저 하류 흐름은 수저를 월류하는 흐름으로부터 발생하

는 또 다른 전단층 ( $y/L=0.00 \sim 1.00$ )에 의해 강한 난류에너지를 얻는다. 그리고 수제 하류로 흐름이 진행함에 따라 연직 방향의 에너지전달이 주로 이루어지는 것을 확인할 수 있다. 이는 그림14에서 잠긴 수제의 경우(case3, case4)에서 큰 난류에너지를 갖는 영역이  $y/L=0.00 \sim 1.00$ 에서만 관찰되는 것으로부터 알 수 있다.



<그림 15> 이차류 흐름 분포

그림 15은 유속 측정 횡단면 ( $y-z$  평면)에서  $V$ 와  $W$ 가 이루는 유선 (streamline)을 나타낸다. 수제 모형이 부착된 수로 측 ( $y/L=0.00$ ) 수제 하류에서 반시계방향 (흐름방향을 회전축의 양의 방향으로 가정)으로 회전하는 이차류가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 이차류 흐름이 재순환 영역에서 관찰되는 것으로 미루어 보았을 때, 재순환영역에서는 재순환 흐름과 이차류가 함께 발생하여 복잡한 3차원 회전 흐름을 형성하는 것을 유추할 수 있다. 그림을 통해 알 수 있듯이 Froude 수의 변화로 인한 이차류 특성의 변화는 미미한 것을 알 수 있다. 반면 수제의 잠김 흐름 발생에 따라 이차류의 발생 위치가 다르게 나타나는 것을 볼 수 있다. 잠기지 않은 수제의 경우, 잠긴 수제의 경우보다 이차류가 수제에서 더 먼 하류에서 관찰되고 이차류의 횡방향 범위가 더욱 크다. 이는 잠긴 수제의 경우, 수제를 월류하는 흐름이 재순환영역에서 강한 흐름의 혼합을 유발하기 때문이다. 따라서 수제의 잠김 흐름이 수제 하류에서 발생하는 이차류의 위치 및 범위에 큰 영향을 미치는 것으로 관찰된다.



<그림 16> 시간평균 수위 분포

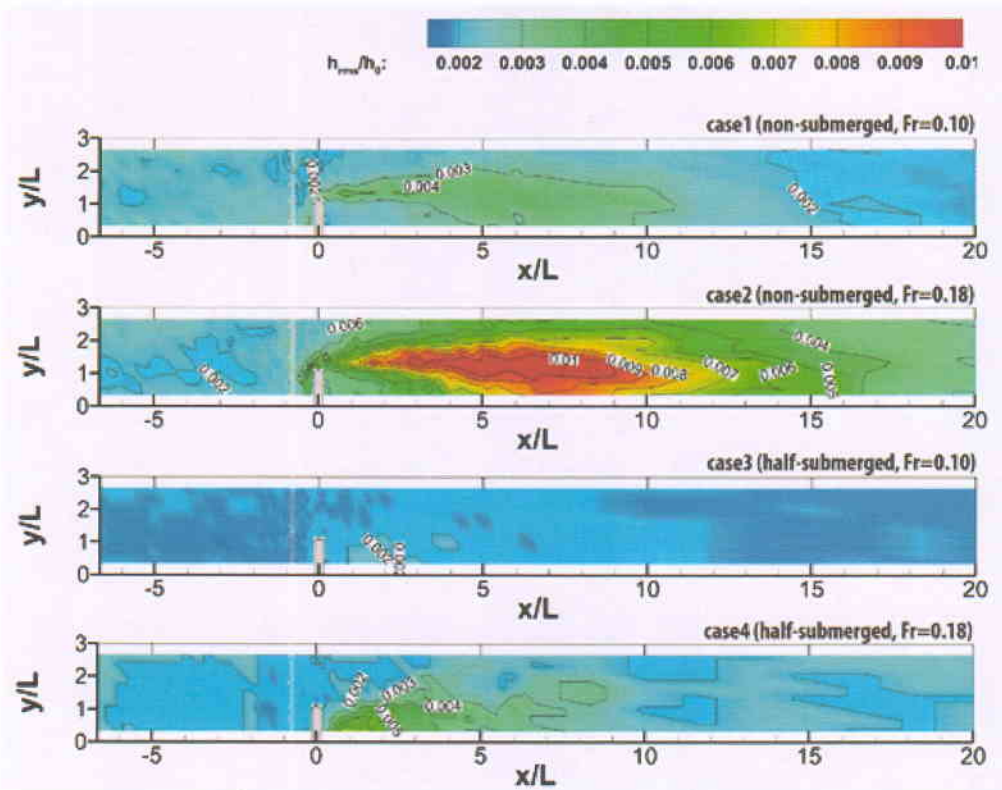
그림 16은 초음파거리센서 (ultra sonic distance sensor)로 측정한 수제 주위의 무차원 수위 ( $h/h_0$ ) 분포를 나타낸다. 수제 상류 흐름의 경우에는 수위가 약간 증가하고, 수제 선단부를 돌아나는 흐름의 경우에는 수위가 급격하게 낮아지는 것을 관찰할 수 있다. 이는 유체의 운동에너지 보존과 관련이 있으며 유체의 운동에너지 방정식은 아래와 같다.

$$\dot{m} \left( \frac{P}{\rho} + \frac{U^2}{2} + gz \right) = \text{일정}$$

위 방정식은 베르누이방정식의 변형 형태이며 베르누이방정식과 마찬가지로 같은 유선 (streamline)을 흐르는 유체의 이동경로를 따라서만 적용할 수 있다. 위 방정식에서  $P$ 는 압력,  $U$ 는 유속,  $z$ 는 수위,  $\rho$ 는 물의 밀도,  $g$ 는 중력가속도이다. 자유수면의 경우 압력이 대기압으로 일정하기 때문에 유체의 압력으로 발생하는 에너지 (flow energy) 변화는 없다고 생각할 수 있다. 수제 상류부 흐름의 경우 수제의 설치로 인해 유속이 감소하며 이로 인하여 유체의 운동에너지가 (kinetic energy)가 감소하게 된다. 유체의 에너지는 항상 보존되어야하기 때문에 유체의 위치에너지 (potential energy)가 증가하면서 수위가 증가하게 된다. 수제 선단부를 돌아나는 흐름의 경우에는 수제의 설치로 흐름 단면적이 감소하면서 유속이 증가하게 되는데 이로 인해 유체의 운동에너지가 증가한다. 따라서 유체의 위치에너지가 감소하면서 수위가 감소한다. 이러한 흐름 특성은 유체역학이론에 기반한 내용으로 수행한 모든 수리모형실험에서 관찰되는 흐름의 일반적인 양상이다.

유입흐름의 Froude수와 수제의 잠김 흐름 발생여부에 따른 차이는 다음과 같다. case1과 case2, case3과 case4를 비교하면 Froude 수가 수제 하류 수위 양상에 미치는 영향을 알 수 있다. case1의 경우에는 수제 하류에서 나타나는 가장 낮은 수심이 약  $h/h_0 = 0.980$ 이며 case2의 경우에는 약  $h/h_0 = 0.945$ 인 것을 알 수 있다. 따라서 물에 잠기지 않은 수제의 경우에는 Froude수의 변화에 따라 수제 상하류에서 약 4% ( $0.980/0.945 = 1.04$ ) 차이가 나타나는 것을 확인하였다. case3의 경우에는 수제 하류에서 나타나는 가장 낮은 수심이 약  $h/h_0 = 0.995$ 로 나타나며 case4의 경우에는  $h/h_0 = 0.980$ 로 나타난다. 따라서 잠긴 수제의 경우에는 Froude 수의 변화에 따라 수제 상하류에서 약 2% ( $0.995/0.980 = 1.02$ )의 차이가 나타나는 것을 알 수 있다. 이와 비슷한 방법으로 case1과 case3, case2와 case4를 비교하면 잠김 흐름이 수제 하류 수위 분포에 미치는 영향을 확인할 수 있다. case1

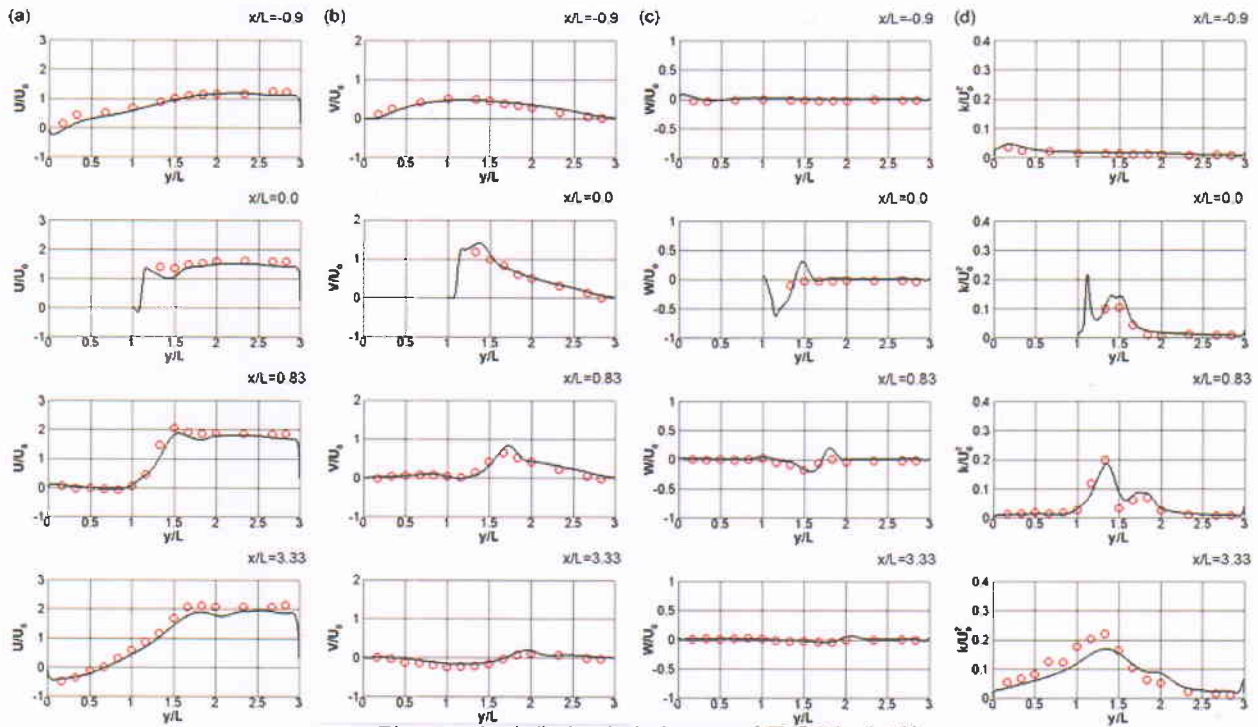
과 case3의 경우에는 약 2% ( $0.995/0.980 = 1.02$ )의 차이를 보이며, case2와 case4의 경우에는 약 4% ( $0.980/0.945 = 1.04$ )의 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서 유입흐름의 Froude 수와 잠김흐름의 발생유무가 수제 하류의 수위 분포 양상에 미치는 영향은 비슷한 수준이라고 판단된다.



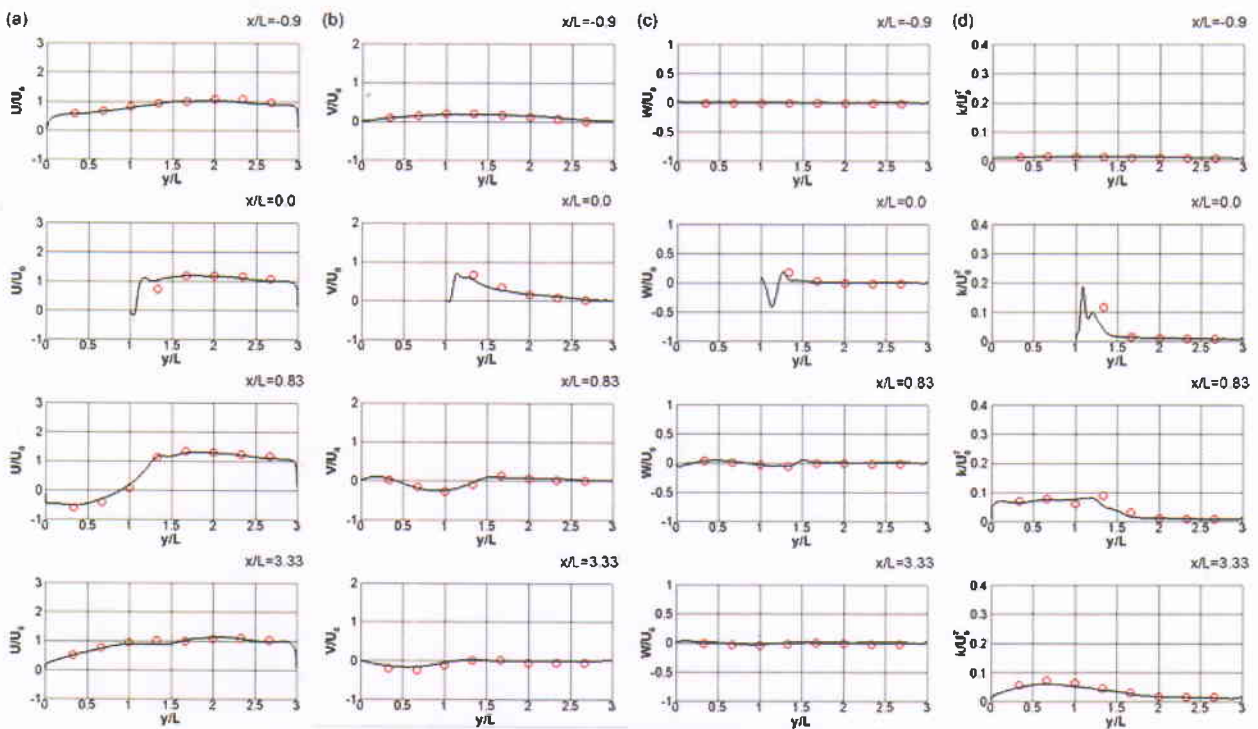
<그림 17> 시간평균 요동수위 분포

그림 17은 초음파거리센서 (ultra sonic distance sensor)로 측정한 수제 주위의 무차원 요동수위 ( $h/h_0$ ) 분포를 나타낸다. 요동수위는 측정된 자료의 표준편차 (standard deviation)를 이용해 산정하는데 이는 수면 변화가 일어나는 정도를 나타낸다. 앞서 수행한 시간평균 수위 분포의 비교 분석과 비슷한 방법으로 유입흐름의 Froude수와 수제의 잠김흐름이 수제 하류의 요동수위에 미치는 영향을 정량적으로 표현하였다. case1과 case2, case3과 case4는 약 150%의 차이를 보이는 것을 알 수 있다 ( $0.01/0.004 = 2.5$ ,  $0.005/0.002 = 2.5$ ). case1과 case3, case2와 case4는 약 100% ( $0.004/0.002 = 2.0$ ,  $0.01/0.005 = 2.0$ )의 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서 요동 수위의 경우에는 수제의 잠김흐름에 의한 영향보다 Froude수의 변화에 의해 더욱 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있다.

## 2) 3차원 수치해석



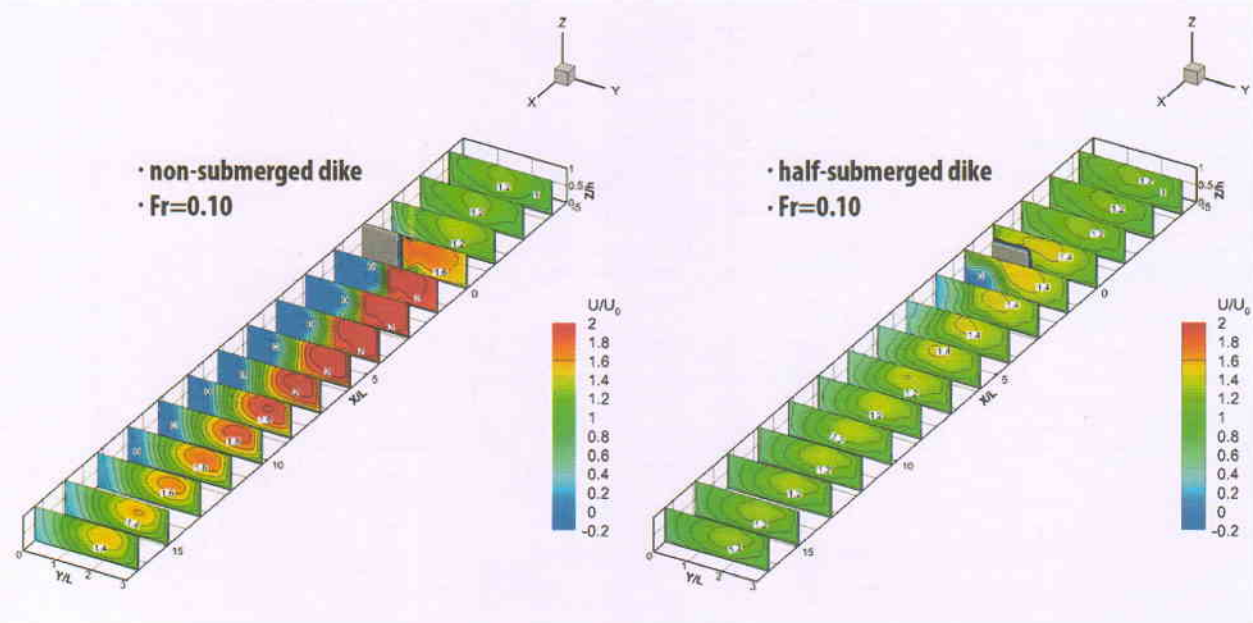
<그림 18> 수치해석 결과의 검증 (돌출형 수제)



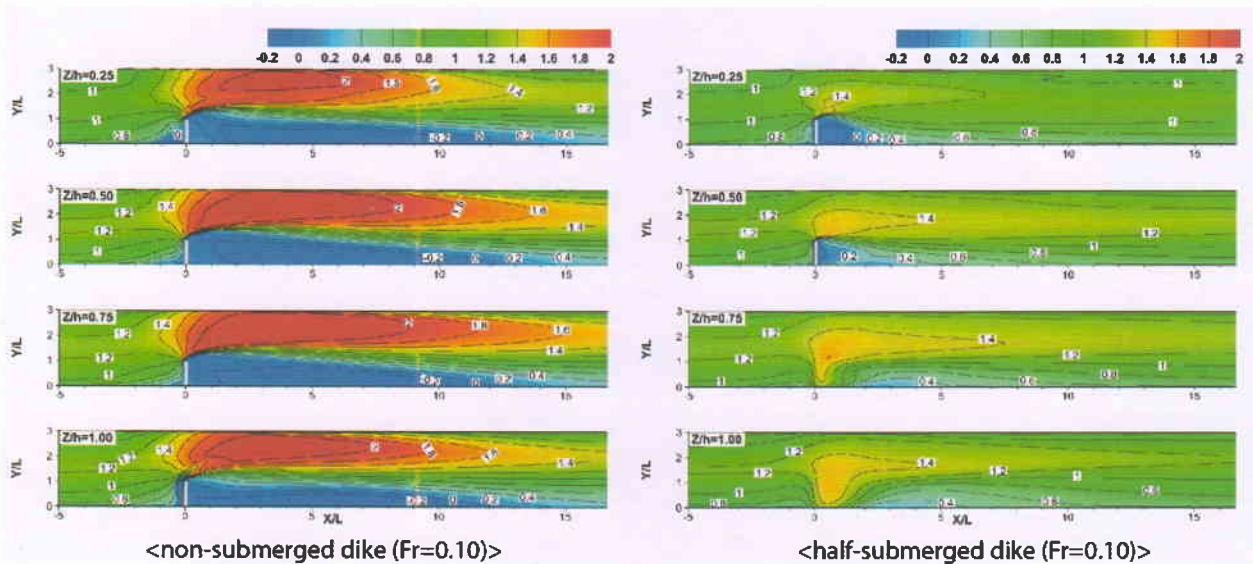
<그림 19> 수치해석 결과의 검증 (잠긴 수제)

그림 18과 그림 19는 돌출형 수제와 잠긴 수제에서 수행된 3차원 수치해석결과를 검증하기 위해 분석한 수치해석과 수리모형실험 결과의 비교 그래프이다. 잠긴 수제를 이용한 수리모형실험에서의 측정값을 기준으로 비교하였으며 측정된 모든 연직방향에 대하여 분석하였다. 그림에서 확인할 수 있듯이, 흐름방향, 횡방향, 연직방향 유속과 난류에너지의 분포가 수리모형실험과 수치해석에서 매우 유사한 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 사용된 3차원 수치해석모형이 수제 주변의 3차원 흐름을 효과적으로 재현한다는 것을 검증하였다. 모든 연직방향에 대하여 비슷한 비교 결과를 확인하였으며, 보고서의 간결성을 위해 수로 바닥부 ( $z=0.02$  m)에서의 결과만을 나타내었다.

## 2) 3차원 수치해석

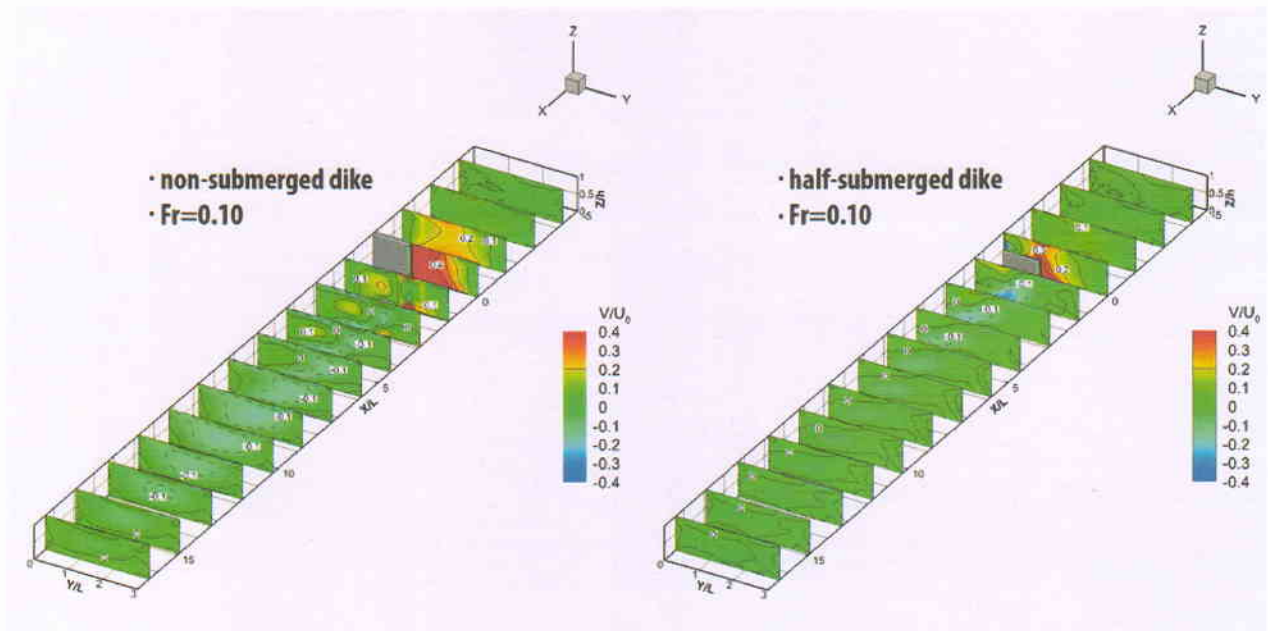


<그림 20> 무차원 흐름 방향 유속 ( $U/U_0$ ) 횡단면 분포도

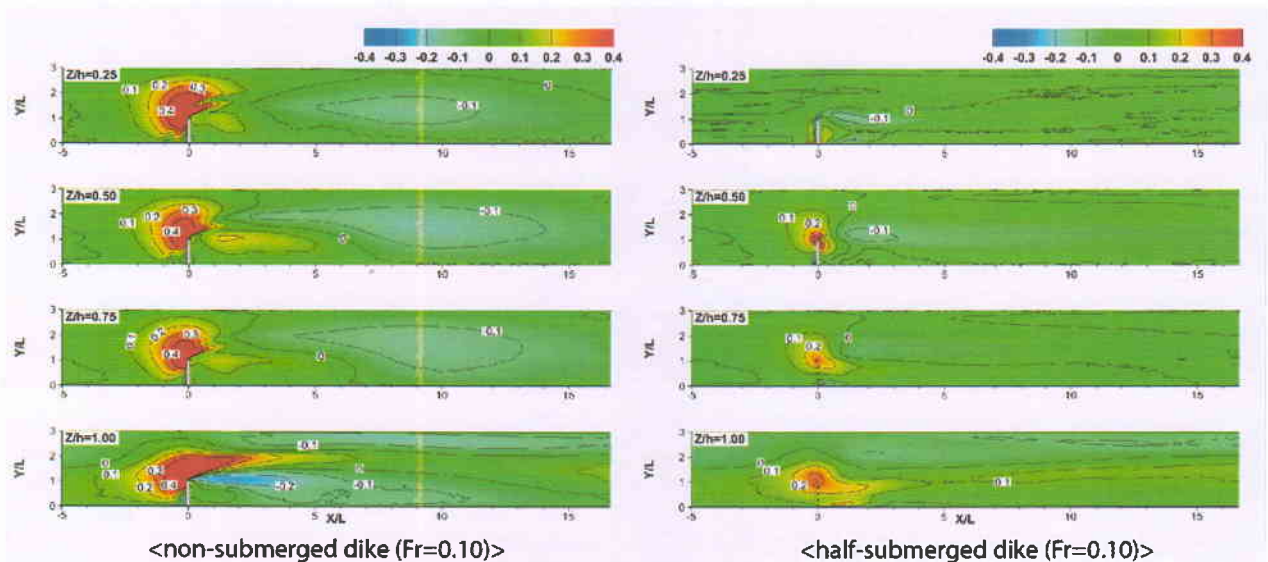


<그림 21> 무차원 흐름 방향 유속 ( $U/U_0$ ) 평면 분포도

그림 20와 그림 21는 3차원 수치해석을 통해 계산된 무차원 흐름 방향 유속 ( $U/U_0$ )의 횡단면과 평면 분포도를 나타낸다. 수치해석은 흐름 분석에 있어 공간적 제약이 없기 때문에 수리모형실험에서는 측정하지 못한 수면 부근에서의 흐름에 대한 분석이 가능하다는 장점이 있다. 앞서 분석한 수리모형실험에서와 유사한 흐름 양상이 나타나는 것을 알 수 있다. 물에 잠기지 않은 수제의 경우, 수제의 설치단면에서의 흐름 단면적 감소로 인해 수제를 돌아나가는 흐름의  $U/U_0$ 이 급격하게 증가하는 것을 알 수 있다. 그리고 수제가 설치된 제방의 하류부에서는  $U/U_0 < 0$ 의 흐름영역이 나타나는 것을 확인하였다. 물에 잠긴 수제의 경우에는 수제 선단부를 돌아나가는 흐름뿐만 아니라 수제를 월류하는 흐름이 발생하는 것을 알 수 있다. 이로 인해서 수제 설치 단면에서의  $U/U_0$ 의 증가가 물에 잠기지 않은 수제의 경우보다 적게 일어나고  $U/U_0 < 0$ 의 흐름영역이 나타나는 흐름 방향 범위가 현저히 줄어드는 것을 알 수 있었다.

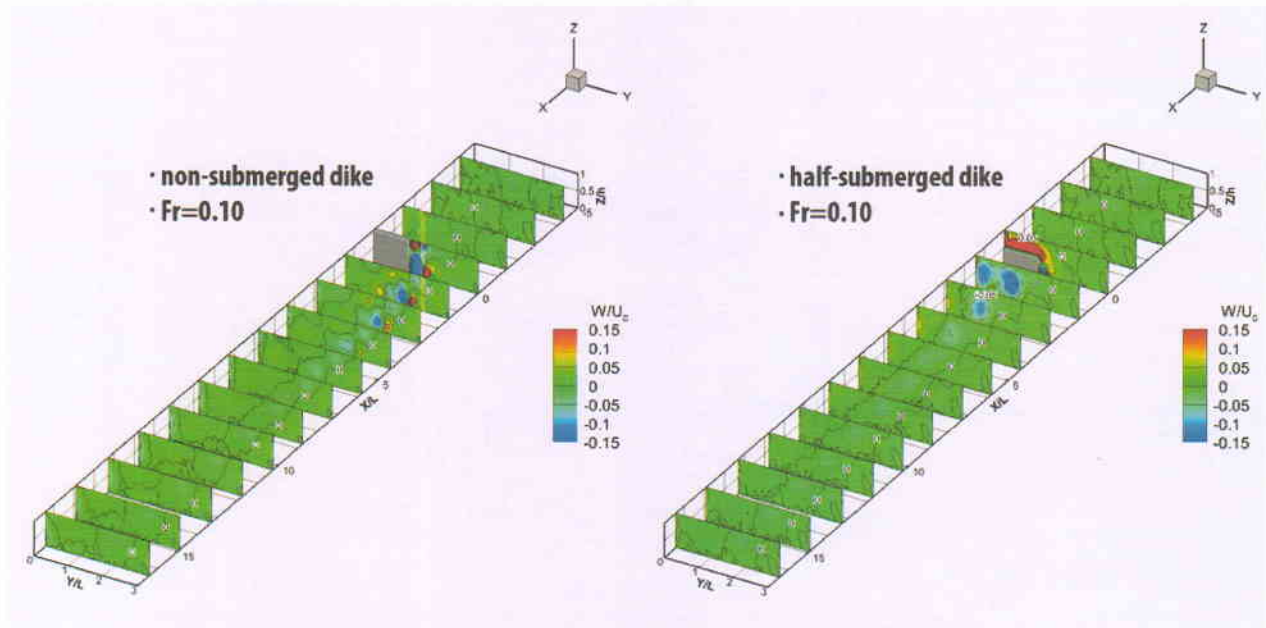


<그림 22> 무차원 횡방향 유속 ( $V/U_0$ ) 횡단면 분포도

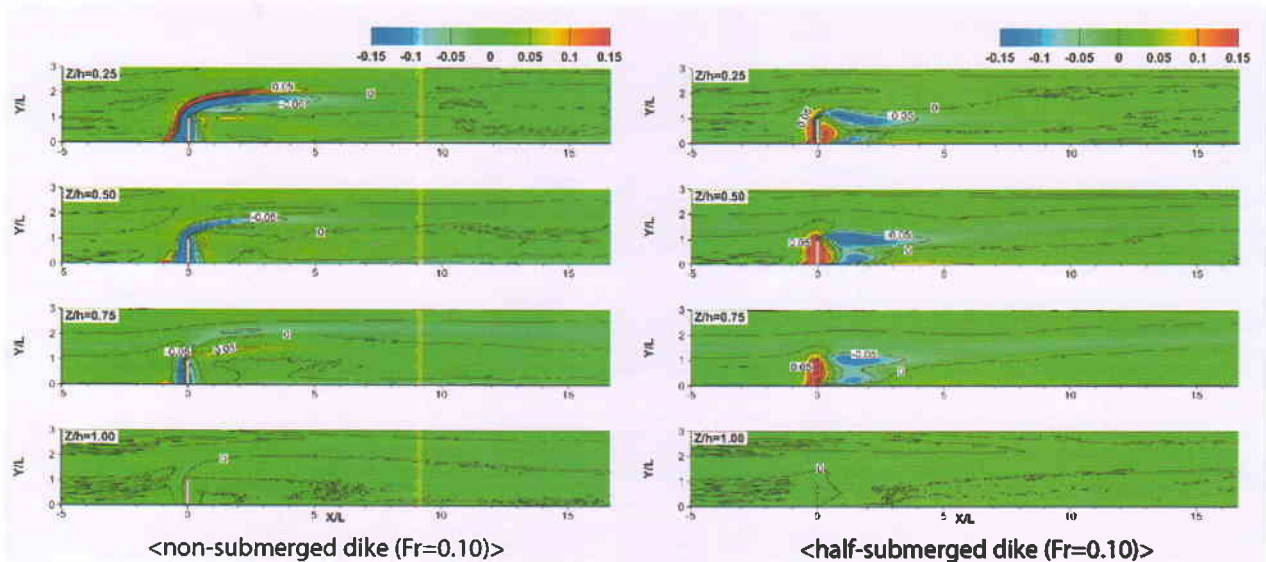


<그림 23> 무차원 횡방향 유속 ( $V/U_0$ ) 평면 분포도

그림 22와 그림 23은 3차원 수치해석을 통해 계산된 무차원 횡방향 유속 ( $V/U_0$ )의 횡단면과 평면 분포도를 나타낸다. 3차원 수치해석을 통해 계산된 무차원 횡방향 유속 분포에서는 수리모형실험을 통해 발견할 수 없었던 수제 하류의 흐름 특징들이 관찰되었다. 물에 잠기지 않은 수제의 경우, 수제 하류 선단부 수면 근처에서 말발굽와와 반대방향으로 회전하는 흐름이 발생하는 것을 알 수 있었다. 잠긴 수제의 경우, 수제 하류 수면부근에서  $V/U_0 > 0$ 인 흐름이 나타나는 것을 알 수 있었다. 이러한 수면 부근에서의 횡방향흐름 분포는 수리모형실험에서는 관찰할 수 없었던 수면 와류의 존재를 보여준다.

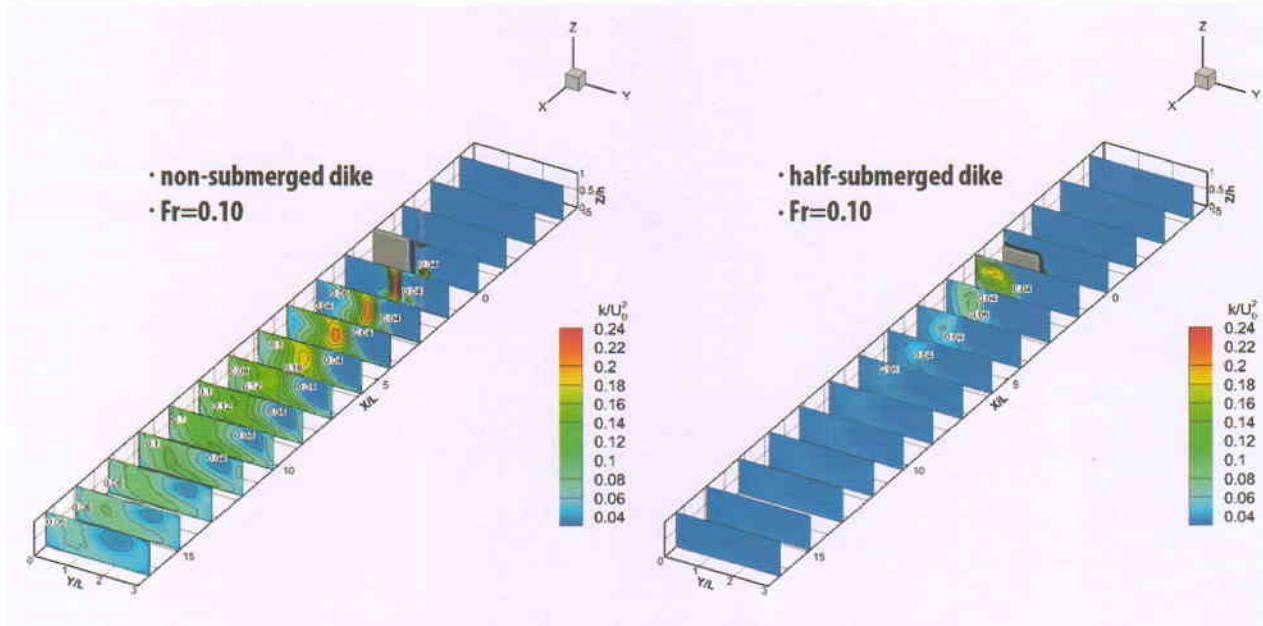


<그림 24> 무차원 연직방향 유속 ( $W/U_0$ ) 횡단면 분포도

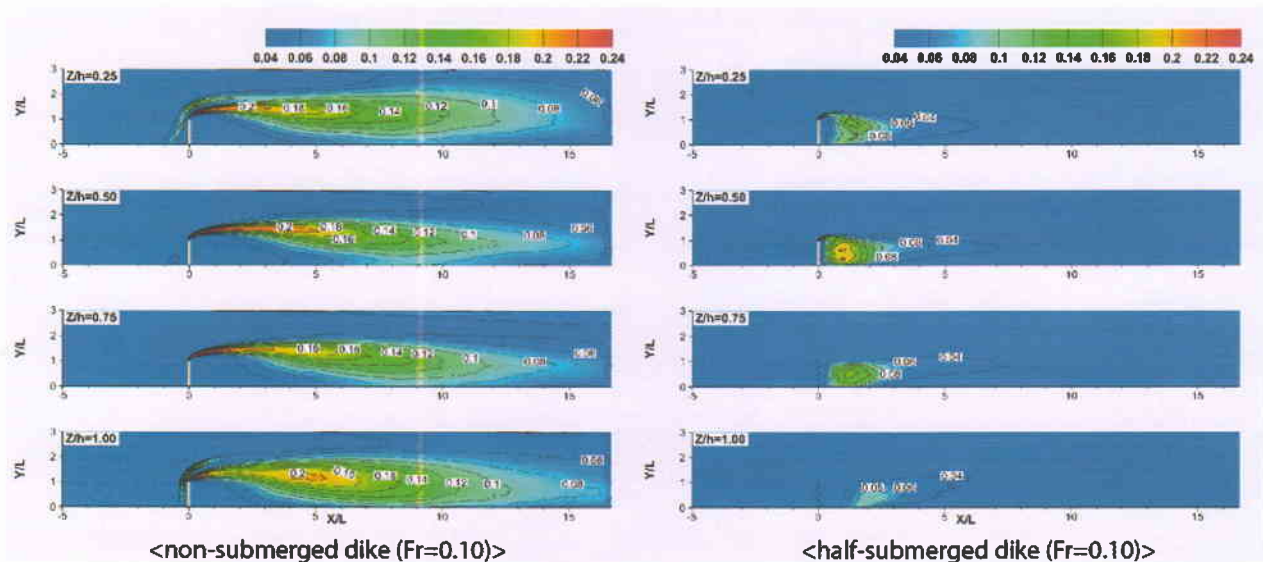


<그림 25> 무차원 연직방향 유속 ( $W/U_0$ ) 평면 분포도

그림 24와 그림 25는 3차원 수치해석을 통해 계산된 무차원 연직방향 유속 ( $W/U_0$ )의 횡단면 및 평면 분포도를 보여준다. 물에 잠기지 않은 수제의 경우, 수제 상류부에서 수로 바닥을 향하는 흐름이 발생하다가 ( $Z/h = 0.50$ 과  $0.75$ 의 파란색 영역) 수로 선단부를 회전하며 돌아나가는 말발굽와의 존재 ( $Z/h = 0.25$ 에서 빨간색 영역과 파란색 영역)를 확인할 수 있다. 반면 물에 잠긴 수제의 경우에는 이러한 흐름 패턴이 다르게 나타나는 것을 알 수 있다. 잠긴 수제의 상류부에서는 수제를 월류하는 흐름이 발생하면서  $W/U_0 > 0$ 인 흐름이 발생한다. 그리고 수제 하류에서는 월류한 흐름이 다시 수로 바닥을 향해 내려오면서  $W/U_0 < 0$ 인 흐름이 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서 잠긴 수제의 경우에는 월류하는 흐름이 발생하면서 수제 주위의 흐름 구조가 잠기지 않은 수제에서와는 다른 양상을 보이는 것을 확인하였다. 뿐만 아니라 3차원 수치해석을 통해 수리모형실험의 무차원 연직방향 유속 분포도에 대한 결과에 대한 차이를 설명할 수 있었다. 수리모형실험 결과, 수제 선단부 바닥 부근에서 물에 잠기지 않은 수제의 경우에는  $W/U_0 < 0$ 인 흐름이 발생하고 물에 잠긴 수제의 경우에는  $W/U_0 > 0$ 인 흐름이 발생하는 것을 관찰하였다. 3차원 수치해석을 통해 이러한 차이가 수제 주위에서 발생하는 말발굽와의 흐름구조가 수제의 잠김 흐름 발생 유무에 따라 바뀌기 때문에 나타난다는 것을 확인하였다.



<그림 26> 무차원 난류에너지 ( $k/U_0^2$ ) 횡단면 분포도

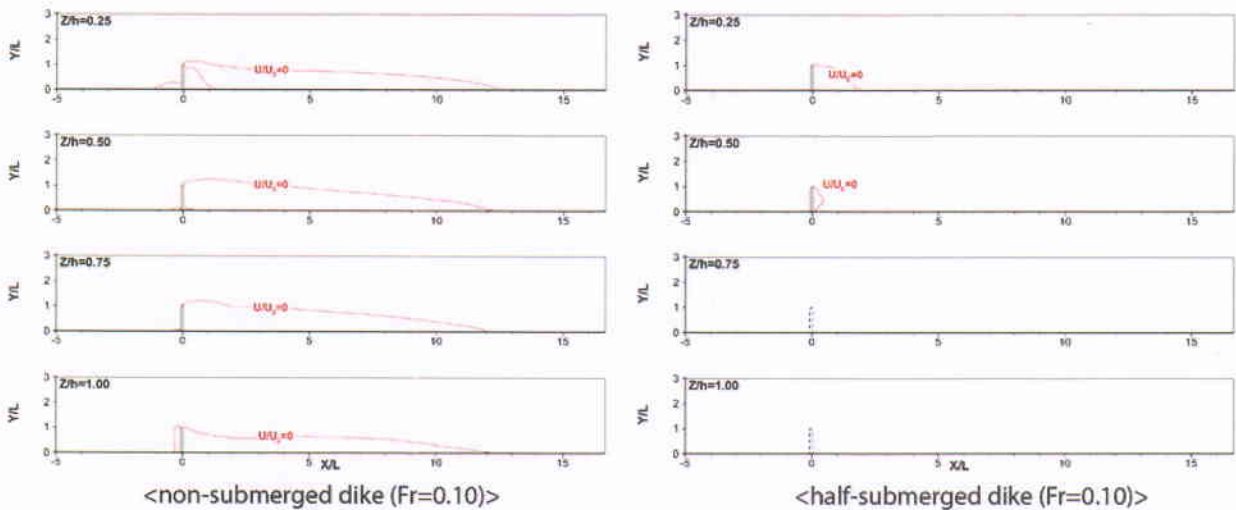


<그림 27> 무차원 난류에너지 ( $k/U_0^2$ ) 평면 분포도

그림 26과 그림 27은 3차원 수치해석을 통해 계산한 무차원 난류에너지 ( $k/U_0^2$ ) 횡단면과 평면 분포도를 나타낸다. 물에 잠기지 않은 수체의 경우에는 수체 선단부에서 시작하여 수체 하류 약  $x/L = 15.0$ 까지 강한 난류에너지가 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 전단층 (빠른 유속 구간과 느린 유속 구간의 경계)에서 난류 에너지의 전달이 활발하기 일어나기 때문에 나타나는 현상이다. 이러한 난류흐름의 특징은 흐름의 높이에 큰 영향 없이 수체 하류의 전 구간에서 관찰되는 것을 알 수 있다. 뿐만 아니라  $Z/h = 0.25$ 에서는 수체 선단부 상류쪽에서 난류에너지가 크게 나타나는데 이는 말발굽와에서 발생하는 난류에너지에 의해 관찰되는 현상이다. 흐름의 수면부에서도 수체 상류쪽에서 난류에너지가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 수면 부근에서 발생하는 자유수면와류에 의해 난류에너지가 크게 발생하면서 나타나는 현상이다. 물에 잠긴 수체의 경우에는 난류에너지의 크기가 증가하는 수체 하류 방향 범위가 약  $x/L = 5.0$ 로 물에 잠기지 않은 수체의 경우와 비교하여 그 범위가 현저히 줄어드는 것을 알 수 있다. 이는 월류하는 흐름으로 인해 전단층이 빠르게 사라지기 때문이다. 또한, 흐름의 높이에 따라 난류에너지의 분포가 크게 달라지는 것을 확인할 수 있었다.  $Z/h = 0.5$ 에서 난류에너지의 크기가 가장 크게 나타났는데 이는 월류하는 흐름과 월류하는 흐름 밑에서 발생하는 느린 유속 구간사이에서 전단층이 발생하면서 큰 난류에너지가 발생하기 때문이다.

측정 지점에 제한이 있는 수리모형실험과 다르게 3차원 수치해석에서는 이러한 공간적 제약 없이 흐름을 분석할 수 있다는 장점이 있다. 본 과제의 핵심성과인 4가지 설계 인자 (정수역 크기, 이차류 분포, 바닥전단응력 분포도, 최대유속 분포)의 공간 분포도를 정량적으로 보여주기 위해서는 흐름 분석의 공간적 제약에서 벗어나야한다. 뿐만 아니라 4가지 설계 인자는 유속분포를 이용하여 계산을 하게 되는데 수리모형실험 결과 유입흐름의 Froude 수가 수제 주위의 유동장에 크게 영향을 미치지 않는다는 사실을 알아내었다. 따라서 4가지 설계 인자의 분포도 작성은 3차원 수치해석 결과를 이용해 이루어졌다.

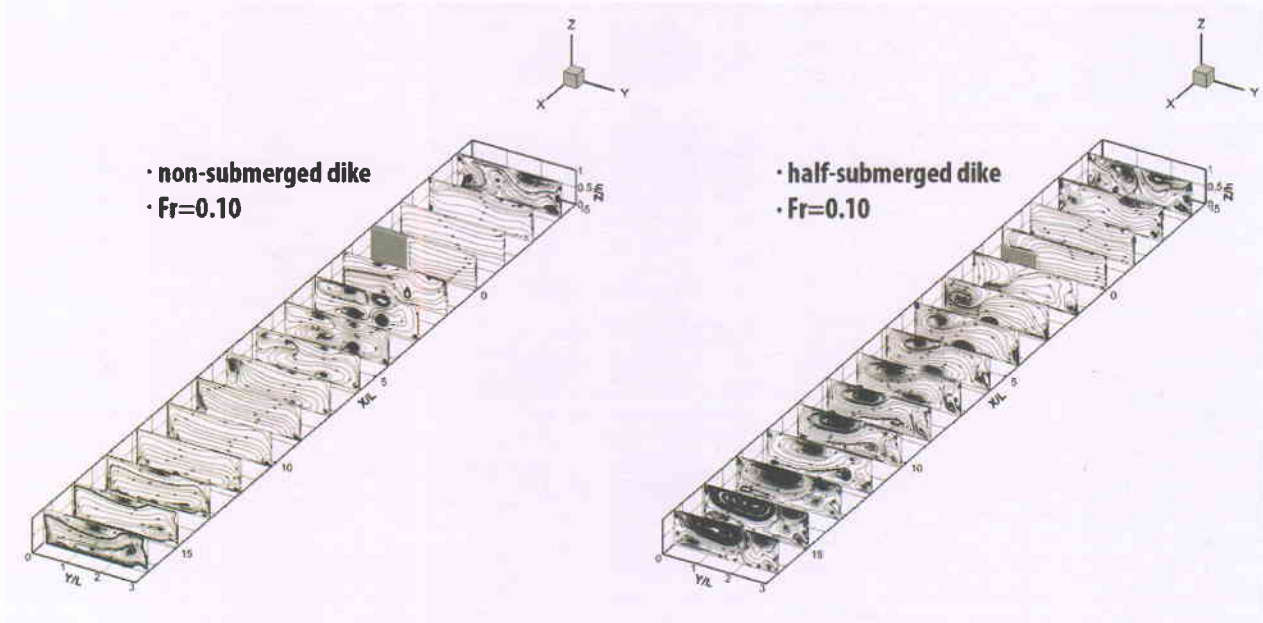
■ 설계 인자의 공간 분포도 1 (정수역 크기)



<그림 28> 정수역 ( $U/U_0 = 0$ ) 크기

그림 28은 수제 하류의 정수역 분포도를 나타낸다. 정수역은 수제 주위에서 발생하는 유속이 매우 느린 상태의 흐름 영역으로 정의되며 사수역 (dead zone)이라고도 불리고 본 연구에서는  $U/U_0 = 0$ 인 흐름 영역으로 정의된다. 수제 하류에서 발생하는 정수역의 크기는 수제의 설치로 인해 보호되는 하천 제방의 영역을 나타낸다. 그림 28에서 확인할 수 있듯이, 물에 잠기지 않은 수제의 경우에는 흐름 높이에 따른 정수역의 크기변화가 미미하고 약  $x/L = 12.0$  정도의 크기를 갖는 것을 알 수 있다. 따라서 물에 잠기지 않은 수제의 경우에는 수제가 설치된 제방 축의 약  $x/L = 0.0 \sim 12.0$ 의 영역이 수제로 인해 보호되는 것을 알 수 있다. 이렇게 수제로 인해 보호되는 흐름 방향 영역은 물에 잠기지 않은 수제를 이용해 군수제를 설치할 때 수제 사이의 간격 산정에 대한 중요한 판단 근거로 생각된다. 물에 잠긴 수제의 경우에는 정수역이  $x/L = 0.0 \sim 2.0$ 에서 관찰되며 그 크기가 물에 잠기지 않은 수제에 비해 매우 작은 것을 알 수 있다. 앞선 내용을 종합해 볼 때 물에 잠기지 않은 수제는 수제 하류의 흐름구조에 큰 영향을 미치고 넓은 흐름방향 범위에서 수제가 설치된 하천 제방을 보호하는 것을 알 수 있다. 반면, 물에 잠긴 수제의 경우에는 수제의 설치로 인한 주위의 흐름구조 변화에 미치는 영향이 적지만 그 만큼 수제 하류의 제방 보호 영역 또한 크지 않다는 것을 확인하였다. 따라서 향후 하천에 수제를 설치할 때는 수제의 설치 목적에 맞게 수제의 높이를 선택하는 것이 바람직하다고 판단된다. 예를 들어, 넓은 범위의 제방이 하천흐름에 의해서 침식이 되고 있는 경우에는 수제가 물에 잠기지 않도록 설치하는 것이 좋고, 하천흐름이 좁은 범위의 침식을 유발하는 경우에는 수제가 물에 잠기도록 설치하여 하천의 자연경관을 유지하고 하천 흐름의 교란을 최소화하는 것이 적절하다고 생각된다.

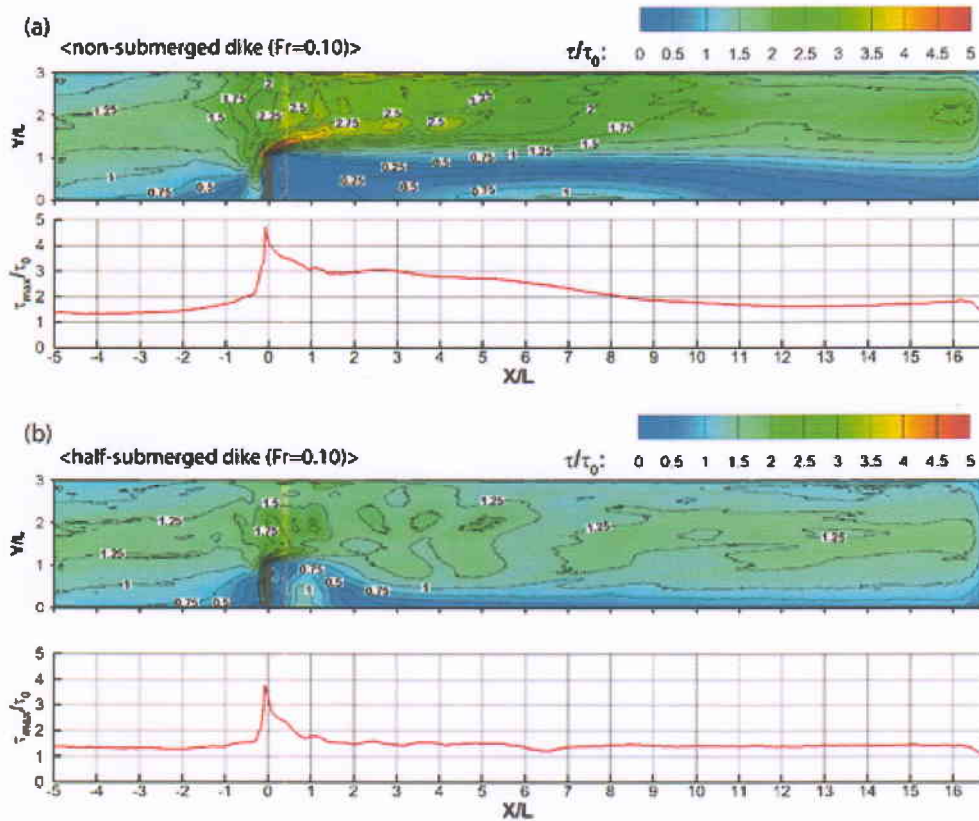
▪ 설계 인자의 공간 분포도 2 (이차류 분포)



<그림 29> 이차류 흐름 분포도

그림 29는 수치해석으로 계산된 유동장의 횡단면 이차류 흐름 분포도를 나타낸다. 그림에서 나타나 듯 수제 하류에서 발생하는 이차류 흐름의 발생 양상이 수제의 높이에 따라 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 물에 잠기지 않은 수제의 경우, 3L 부근에서부터 이차류 흐름이 뚜렷하게 나타나며, 수로 바닥과 수면 근처에서 서로 반대방향으로 회전하는 한 쌍의 이차류 흐름이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 발생한 이차류 흐름은 6L 부근까지 관찰되다가 사라지며 13L 근처에서 다시 이차류 흐름이 발생한다. 물에 잠긴 수제의 경우에도 이차류 흐름이 3L 부근에서부터 관찰되기는 하지만 물에 잠기지 않은 수제와는 다르게 서로 반대방향으로 회전하는 한 쌍의 이차류 흐름만이 발생하는 것을 알 수 있다. 물에 잠기지 않은 수제의 수면 근처에서 발생하는 이차류 흐름은 자유수면 와류와 관련이 깊다. 물에 잠긴 수제의 경우에는 월류하는 흐름으로 인해 자유수면와류가 발생되지 않는다. 따라서 잠긴 수제의 경우에는 수제 하류에서 서로 반대방향으로 회전하는 한 쌍의 이차류 흐름만이 관찰된다. 잠긴 수제에서 발생하는 이차류 흐름 중 수제가 설치된 제방의 수면 부근에서 발생하는 회전 흐름은 수제 상부 선단부를 월류하는 흐름과 관련이 있고 수로 바닥 중심부에서 발생하는 회전 흐름은 수제 측면 선단부를 돌아나가는 흐름과 관련이 있다. 따라서 잠긴 수제의 경우에는 월류하는 흐름이 수제 하류 흐름 구조에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있으며, 월류 흐름이 발생하는 경우에 수제 하류에서 관찰되는 회전 흐름이 더욱 강하게 발생한다는 것을 확인하였다. Duan (2009)은 초음파유속계를 통해 측정된 수제 주위 유속을 통해 잠기지 않은 수제의 경우에 발생하는 이차류 흐름의 발생을 관찰하였다. 하지만 Duan (2009)의 연구에서는 유속의 흐름방향 측정범위가 수제 주위로( $x/L = -2.5 \sim 3.0$ ) 제한되어 있었기 때문에 본 연구에서와는 달리 이러한 이차류 흐름이 수제 하류로 얼마나 지속되는지에 대한 분석이 이루어지지 못했다.

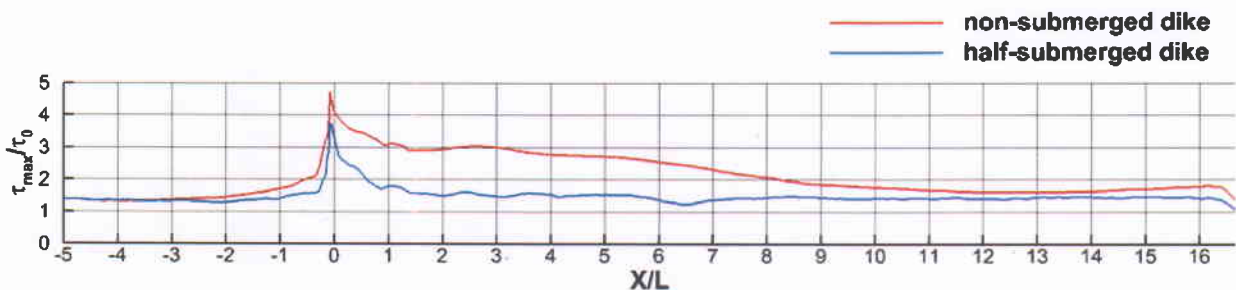
설계 인자의 공간 분포도 3 (바닥전단응력 분포도)



<그림 30> 바닥전단응력 분포도

그림 30은 수제 주위의 바닥전단응력분포를 나타낸다. 바닥전단응력은 흐름방향과 횡방향 유속의 연직방향 변화량의 크기를 이용하여 산정하였으며 다음과 같은 식을 이용하여 계산하였다

( $\tau = \sqrt{(\frac{\partial U}{\partial Z})^2 + (\frac{\partial V}{\partial Z})^2}$ ). 계산된 바닥전단응력은 유입 흐름 ( $x/L = -5.0$ )에서 계산된 전단응력 ( $\tau_0$ )으로 이를 무차원 하였다. 이와 더불어 각 횡단면에서 발생하는 최대 전단응력의 흐름방향 분포도를 함께 그래프로 표시하여 최대바닥전단응력의 분포를 분석하였다. 그림을 통해서 수제 높이에 관계없이 최대 전단응력은 수제 선단부에서 나타나며 물에 잠기지 않은 수제의 경우 (약  $\tau/\tau_0 = 5.0$ )일 때 물에 잠긴 수제 (약  $\tau/\tau_0 = 4.0$ )에 비해 약 25% 크게 나타나는 것을 알 수 있었다.



<그림 31> 수제 높이 따른 바닥전단응력 분포도

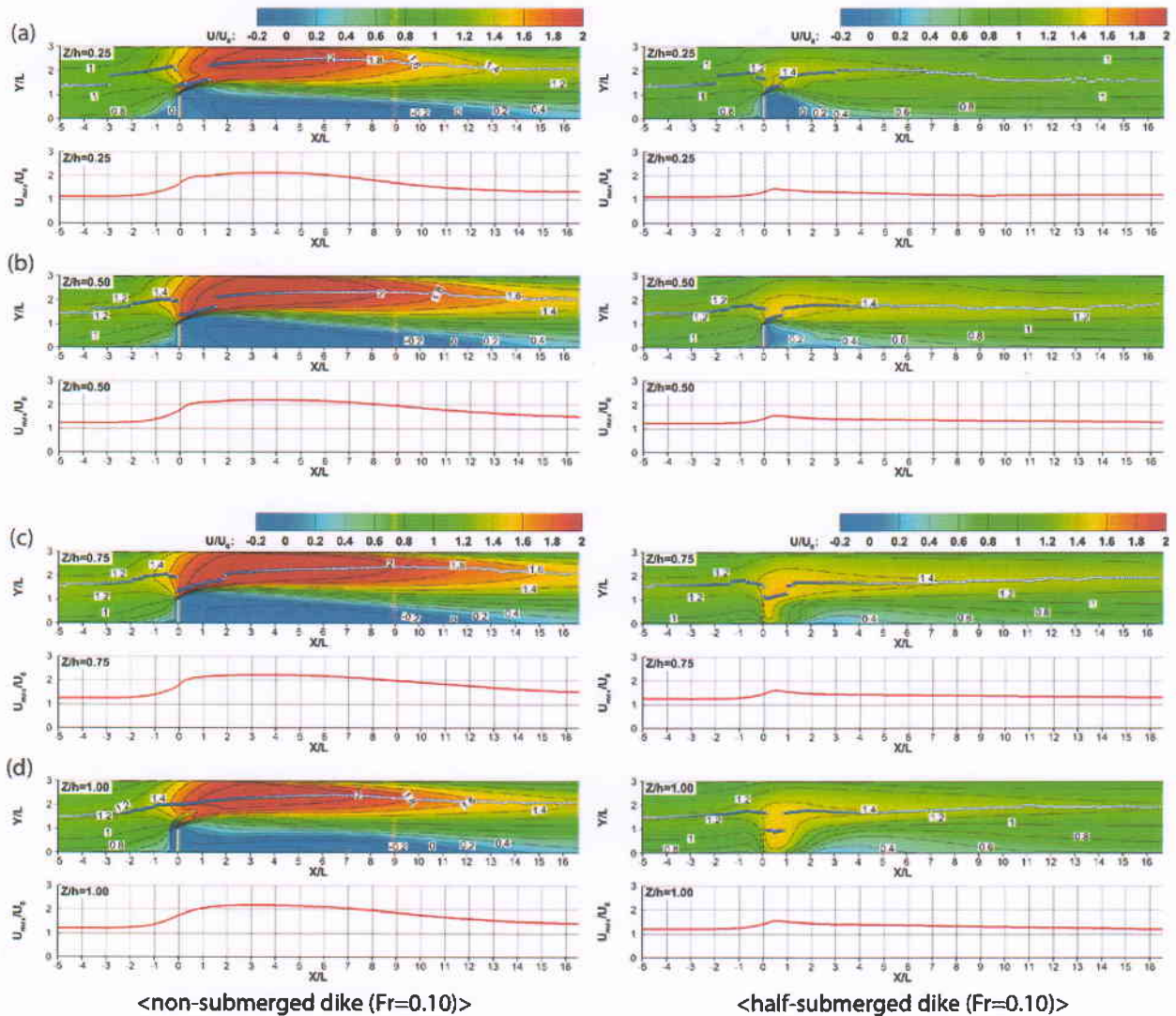
그림 31은 그림 30에서 계산한 최대바닥전단응력의 수제 높이에 따른 변화 양상을 나타낸다. 물에 잠기지 않은 수제의 경우 잠긴 수제에 비해 최대바닥전단응력이 크게 나타나며 증가된 바닥 전단응력이 수제 하류에 미치는 영향이 큰 것을 알 수 있다. 물에 잠긴 수제의 경우에는 약  $x/L = 2.0$ 에서 수제 유입부의 바닥전단응력과 비슷한 수준으로 회복되는 반면 물에 잠기지 않은 수제의 경우에는 약  $x/L = 12.0$ 에서 수제 유입부의 바닥전단응력과 비슷한 수준으로 회복되는 것을 알 수 있다. 따라서 물에 잠기지 않은 수제가 하류 흐름의 바닥전단응력에 미치는 영향이 크다는 것을 알 수 있다.

---

Kuhnle et al. (2008)은 사다리꼴 모양 수제 주변의 유속을 초음파유속계로 측정하여 바닥전단응력을 산정하였다. 이들은 수제 끝단부에서 바닥전단응력이 유입흐름에서 관찰되는 값의 2.7배로 최대값을 나타낸다는 것을 확인하였다. 뿐만 아니라 Duan et al. (2009)은 얇은 철판으로 묘사된 수제 주위 유속을 초음파유속계를 이용해 측정하고 바닥전단응력 분포도를 작성하였다. 분석 결과, 평평한 바닥을 갖는 수로에서는 수제 상류에서의 바닥전단응력이 최대값을 갖으며, 그 값이 유입흐름에서의 값에 비해 6-8배 크게 나타나는 것을 알 수 있었다. 이들의 연구 결과는 본 연구에서 얻은 결과와 최대값에서는 약간의 차이를 보였지만 바닥전단응력 분포도의 전반적인 양상에서는 큰 차이를 보이지 않았다. 따라서 본 연구에서 산정한 바닥전단응력 값을 이용해 수제 주위의 세굴양상을 예측할 수 있음을 알 수 있다.

또한, Kuhnle et al. (2008)과 Duan et al. (2009)의 연구가 각각  $x/L = -3.5 \sim 4.5$ 와  $x/L = -1.5 \sim 2.5$ 로 수제 주위의 제한된 영역에서만 바닥전단응력분포도를 작성한 것에 반해 본 연구에서는  $x/L = -15 \sim 16.5$ 로 수제 상하류 넓은 범위에서의 바닥전단응력분포도를 작성하여 수제 설치로 인해 바닥전단응력의 변화를 보다 자세하게 알 수 있었다.

■ 설계 인자의 공간 분포도 4 (최대 유속 분포)



<그림 32> 최대유속분포

그림 32는 수제 주위의 최대 흐름방향 유속의 분포도를 나타낸다. 흐름방향유속의 수평면분포도에서 흰 선은 수평면에서 관찰되는 최대 유속의 위치를 나타내며 최대 흐름방향유속의 흐름방향위치에 따른 변화도 함께 표시하였다. 물에 잠기지 않은 수제의 경우에는 4가지 흐름 높이 ( $z/H = 0.25, 0.50, 0.75, 1.00$ )에서 유입흐름의 약 2배가 되는 최대 유속이 발생하였으며, 물에 잠긴 수제의 경우에는 유입흐름의 약 1.5배가 되는 최대 유속이 발생하는 것으로 나타났다. 물에 잠기지 않은 수제와 잠긴 수제의 경우 모두 흐름 높이에 따른 최대 유속 발생 위치 및 크기 변화는 미미한 것으로 관찰되었다. 수제의 설치로 가속된 흐름이 수제 하류 흐름구조에 미치는 영향은 물에 잠기지 않은 수제의 경우에는 약  $13L \sim 14L$ 까지 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 물에 잠긴 수제의 경우에는 약  $3L \sim 4L$ 까지 큰 영향을 주는 것으로 보인다. 최대 흐름방향유속의 위치는 수제 설치로 인해 가속된 흐름이 수제가 설치된 반대편 제방에 미치는 영향에 대한 분석 자료로 활용될 수 있다. 그림30에서 나타난 바와 같이, 물에 잠기지 않은 수제의 경우, 물에 잠긴 수제의 경우일 때와 비교하였을 때 최대 흐름방향유속의 발생 위치가 수제 반대편 제방으로 더욱 가까워지는 것을 확인할 수 있다. 이는 물에 잠기지 않은 수제의 하류에서 강한 운동에너지를 갖는 흐름이 수제 반대편 제방으로 가까워져 해당 제방의 침식을 유발할 수도 있음을 의미한다. 따라서 물에 잠기지 않은 수제를 설치할 때는 수제가 설치된 반대편 제방에 침식이 발생할 수 있음을 염두에 두고 하천의 하쪽과 수제 길이에 따른 최대 흐름방향유속의 크기 및 발생위치를 추가적으로 분석하여 수제가 설치된 반대편 제방의 침식 가능성 여부를 고려하여 수제를 설치해야 할 것으로 판단된다.

## 5. 연구 개발 성과

### 1) 핵심연구성과

| 연번 | 핵심성과<br>(CTE)              | 핵심성과 설명                                                                            | 성과유형 <sup>1)</sup> | 해당<br>연차     | TRL | 목표 | 달성 |
|----|----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------|-----|----|----|
| 1  | 수리모형실험<br>결과 그림 및<br>도표    | 수리모형실험으로 수제주위 흐름의 3차원 유속장을<br>측정하고 이를 바탕으로 직선하도에서의 수제 주위<br>3차원 난류 흐름을 규명          | ①공법·<br>기법         | 1차년도<br>2차년도 | 3   | 4건 | 4건 |
| 2  | 3차원 유동<br>해석 결과<br>그림 및 도표 | 3차원 고정밀 수치해석으로 수제 주위 흐름의 3차원<br>유속장을 계산하고 이를 바탕으로 직선하도에서의<br>수제 주위 3차원 난류 흐름을 규명   | ①공법·<br>기법         | 2차년도         | 3   | 2건 | 2건 |
| 3  | 3차원 흐름<br>가시화<br>동영상       | 3차원 고정밀 수치해석으로 얻어진 유속의<br>시간변화자료를 통해 수제 주위 흐름을 3차원으로<br>시각화함                       | ①공법·<br>기법         | 2차년도         | 3   | 2건 | 2건 |
| 4  | 설계인자의<br>공간 분포도            | 4가지 흐름특성(정수역 크기, 하상전단응력,<br>최대유속, 이차류 분포도) 분석을 통해 수제설계 시<br>활용 가능한 수제설계 인자<br>값 도출 | ①공법·<br>기법         | 2차년도         | 3   | 4건 | 4건 |

| 핵심성과 1                | 수리모형실험 결과 그림 및 도표                                                                                                                                                                                                                                  |                         |
|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| 정의                    | 개수로 실험장치에 수제모형을 설치하고 수제모형 주위 흐름의 3차원 유속을<br>측정함으로 직선하도에서 수제 주위 흐름의 복잡한 3차원 난류 특성을 규명함.                                                                                                                                                             |                         |
| 목적                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 실험을 통해 얻은 수제 주위의 3차원 유속자료로 수제 주위에서 나타나는 3차원 난류현상과 설계인자 간 상관관계를 규명함.</li> <li>■ 향후 낙차공 및 보 등, 수공구조물의 설계기법 개선에 필요한 중요한 기초자료로 활용함.</li> <li>■ 본 실험결과를 바탕으로 수공기술자들이 수공구조물 주위의 3차원 흐름을 이해하는데 도움을 줌.</li> </ul> |                         |
| 성능목표                  | (기존기술 수준) 관련 연구가 2차원 유속장 및 세굴심 측정에 국한되어<br>연구결과를 실제 수제 설계 시 적용하는 것이 불가능함.<br>(개발기술 수준) 3차원 유속장 측정을 통해 수제 주위의 복잡한 3차원<br>흐름구조를 규명하고 이를 기반으로 수제설계인자에 대한 3차원 흐름구조의<br>변화를 정확하게 예측할 수 있음.                                                              |                         |
| 성과달성 책임자<br>(소속기관)    | 강석구(한양대학교)                                                                                                                                                                                                                                         |                         |
| 소요기간                  | ' 17.07 ~ ' 18.06 (12개월, 1,2년차)                                                                                                                                                                                                                    |                         |
| 성과달성<br>확인방법          | 보고서                                                                                                                                                                                                                                                |                         |
| 성과달성에<br>다른 정량적<br>성과 | 특허 출원/등록                                                                                                                                                                                                                                           | 0건                      |
|                       | 논문                                                                                                                                                                                                                                                 | [SCI(E) : 1건, 학술지 : 2건] |
|                       | 저작                                                                                                                                                                                                                                                 | 0건                      |
|                       | S/W                                                                                                                                                                                                                                                | 0건                      |
|                       | 신기술                                                                                                                                                                                                                                                | 0건                      |
|                       | 기타                                                                                                                                                                                                                                                 | 0건                      |

| 핵심성과 2                | 3차원 유동 해석 결과 그림 및 도표                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                         |
|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| 정의                    | 수리모형실험에서 도출된 결과를 바탕으로 2가지 경우에 대해 3차원 고정밀 수치해석을 수행하고 이를 바탕으로 수제 주위 흐름의 복잡한 3차원 난류 특성을 규명함.                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                         |
| 목적                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 3차원 정밀수치해석을 통해 계산된 수제 주위의 3차원 유속자료로 수제 주위에서 나타나는 3차원 난류현상과 설계인자 간 상관관계를 규명함.</li> <li>■ 향후 낙차공 및 보 등 수공구조물의 설계기법 개선에 필요한 중요한 기초자료로 활용함.</li> <li>■ 슈퍼컴퓨팅 기술과 3차원 수치해석 기법을 결합하여 흐름의 난류특성을 고려한 인자요소 정립에 관한 연구를 수행함으로써 수공구조물 설계기술 분야에 새로운 연구 패러다임을 제시함.</li> <li>■ 본 수치해석 결과를 바탕으로 수공기술자들이 수공구조물 주위의 3차원 흐름을 이해하는데 도움을 줌.</li> </ul> |                         |
| 성능목표                  | <p>(기존기술 수준) 1,2차원적 수치모형을 이용해 수공구조물 주위의 3차원 흐름 현상을 규명하려고 함.</p> <p>(개발기술 수준) 3차원 흐름의 지배방정식인 3차원 Navier-Stokes 방정식을 슈퍼컴퓨터를 이용해 직접 해석하고 3차원 난류 유속장을 정밀 계산함. 이 결과를 바탕으로 수제설계인자에 대한 3차원 흐름구조의 변화를 정확하게 예측할 수 있음.</p>                                                                                                                                                           |                         |
| 성과달성 책임자<br>(소속기관)    | 강석구(한양대학교)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                         |
| 소요기간                  | '17.07 ~ '17.12 (6개월, 1차년도)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                         |
| 성과달성<br>확인방법          | 보고서                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                         |
| 성과달성에<br>따른 정량적<br>성과 | 특허 출원/등록                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 0건                      |
|                       | 논문                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | [SCI(E) : 0건, 학술지 : 0건] |
|                       | 저작                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 0건                      |
|                       | S/W                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 0건                      |
|                       | 신기술                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 0건                      |
|                       | 기타                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 0건                      |

|                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                         |
|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| 핵심성과 3                | 3차원 흐름 가시화 동영상                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                         |
| 정의                    | 3차원 고정밀 수치해석 결과로 얻어진 100개 이상의 이미지 자료를 이용해 동영상파일을 제작하고 이를 통해 수제 주위의 복잡한 흐름구조를 갖는 3차원 난류특성을 규명함.                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                         |
| 목적                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 3차원 고정밀 수치해석으로 얻어진 유속의 시간변화자료를 통해 수제 주위 흐름을 3차원으로 시각화함 이를 통해 수리모형실험으로는 관찰할 수 없는 수제 주위 흐름의 3차원 난류흐름특성을 시각화함.</li> <li>■ 수리모형실험으로는 관찰할 수 없는 수제 주위 흐름의 3차원 난류흐름특성을 시각화함.</li> <li>■ 슈퍼컴퓨팅 기술과 3차원 수치해석 기법을 결합하여 흐름의 난류특성을 고려한 인자요소 정립에 관한 연구를 수행함으로써 수공구조물 설계기술 분야에 새로운 연구 패러다임을 제시함.</li> <li>■ 본 수치해석 결과를 바탕으로 수공기술자들이 수공구조물 주위의 3차원 흐름을 이해하는데 도움을 줌.</li> </ul> |                         |
| 성능목표                  | <p>(기존기술 수준) 1,2차원적 수치모형을 이용해 수공구조물 주위의 흐름을 계산하기 때문에 흐름의 3차원 시각화가 불가능함.</p> <p>(개발기술 수준) 3차원 흐름의 지배방정식인 3차원 Navier-Stokes 방정식을 슈퍼컴퓨터를 이용해 직접 해석하고 3차원 난류 유속장을 정밀 계산하기 때문에 흐름의 3차원 시각화가 가능함.</p>                                                                                                                                                                                                          |                         |
| 성과달성 책임자<br>(소속기관)    | 강석구(한양대학교)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                         |
| 소요기간                  | '19.01 ~ '19.03 (3개월, 2차년도)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                         |
| 성과달성<br>확인방법          | 동영상 파일                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                         |
| 성과달성에<br>따른 정량적<br>성과 | 특허 출원/등록                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 0건                      |
|                       | 논문                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | [SCI(E) : 0건, 학술지 : 0건] |
|                       | 저작                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 0건                      |
|                       | S/W                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0건                      |
|                       | 신기술                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0건                      |
|                       | 기타                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 0건                      |

|                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                         |
|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| 핵심성과 4                | 설계인자의 공간 분포도                                                                                                                                                                                                                                                                           |                         |
| 정의                    | 수리모형실험과 3차원 고정밀 수치해석을 통해 얻은 결과를 분석해 수제설계 시 활용 가능한 수제설계 인자 값 도출함.                                                                                                                                                                                                                       |                         |
| 목적                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 본 연구의 결과를 바탕으로 수제 설계시 가장 지배적인 설계인자와 흐름인자가 무엇인지 규명함.</li> <li>■ 기존 설계지침에서 고려하지 못하였던 3차원 난류현상과 설계인자 간 상관관계를 규명함으로써 향후 낙차공 및 보의 설계기법 개선에 필요한 중요한 기초자료로 활용함.</li> <li>■ 구조물 자체의 안정성을 높이고 구조물 설치로 인한 2,3차 피해를 감소시키고 이에 따른 인명, 재산피해를 줄임.</li> </ul> |                         |
| 성능목표                  | <p>(기존기술 수준) 유럽 또는 일본에서 개발된 경험식을 이용하거나 1,2차원적 수리모형실험을 활용해 수제설계기준을 정립함.</p> <p>(개발기술 수준) 본 연구결과를 기반으로 수제설계인자 값을 도출함으로써 수제설계 인자 변화에 따른 3차원 흐름구조의 변화를 정확하게 예측할 수 있는 수제설계기준을 정립함.</p>                                                                                                      |                         |
| 성과달성 책임자<br>(소속기관)    | 강석구(한양대학교)                                                                                                                                                                                                                                                                             |                         |
| 소요기간                  | '19.01 ~ '19.03 (3개월, 2년차)                                                                                                                                                                                                                                                             |                         |
| 성과달성<br>확인방법          | 보고서                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                         |
| 성과달성에<br>다른 정량적<br>성과 | 특허 출원/등록                                                                                                                                                                                                                                                                               | 0건                      |
|                       | 논문                                                                                                                                                                                                                                                                                     | [SCI(E) : 0건, 학술지 : 0건] |
|                       | 저작                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 0건                      |
|                       | S/W                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 0건                      |
|                       | 신기술                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 0건                      |
|                       | 기타                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 0건                      |

○ 최소 성과 목표

| 성과지표               | 최소 성과 목표 | 달성 성과 |
|--------------------|----------|-------|
| SCI(E)급 학술지 게재(2점) | 2건       | 1건    |
| 일반학술지게재(1점)        | 1건       | 2건    |
| 특허출원(1점)           |          |       |
| 특허등록(2점)           |          |       |
| 디자인 등록(1점)         |          |       |
| 소프트웨어(1점)          |          |       |
| 하드웨어(1점)           |          |       |
| 기타(1점)             |          |       |
| 소계(점수)             | 5점       | 4점    |

## ○ 성과점검기준표

[총괄]

| 구분  | 핵심성과<br>(CTE)            | 단위성과               | 성과점검기준                                      |     |     |      |      |                                                |                                                | 양적 성과<br>건수 |
|-----|--------------------------|--------------------|---------------------------------------------|-----|-----|------|------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|-------------|
|     |                          |                    | 질적 성과지표                                     | 목표치 | 달성치 | 측정방법 | 검증방법 | 기준치                                            |                                                |             |
| 1주관 | 1 수리모형 실험 결과 그림 및 도표     | 1-1 수리모형실험         | ① 수리모형 실험 조건 결정                             | 4건  | 4건  |      | 보고서  | 10                                             | 특허: 출원 건<br>등록 건<br>논문: 3 건<br>시제품: 건<br>SW: 건 |             |
|     |                          |                    | ② 수리모형 실험 수행                                | 4건  | 4건  |      | 보고서  | 20                                             |                                                |             |
|     |                          |                    | ③ 실험자료 분석 및 통계적 처리                          | 4건  | 4건  |      | 보고서  | 15                                             |                                                |             |
|     | 2 3차원 유동 수치해석 결과 그림 및 도표 | 2-1 3차원 고정밀 수치해석   | ① 수치해석 계산 격자 작성 및 테스트                       | 2건  | 2건  |      | 보고서  | 5                                              | 특허: 출원 건<br>등록 건<br>논문: 건<br>시제품: 건<br>SW: 건   |             |
|     |                          |                    | ② 병렬연산기법 기반의 3차원 유동해석 모형을 이용한 수치해석 수행       | 2건  | 2건  |      | 보고서  | 15                                             |                                                |             |
|     |                          |                    | ③ 실험자료 분석 및 통계적 처리                          | 2건  | 2건  |      | 보고서  | 15                                             |                                                |             |
|     | 3 3차원 흐름 가시화 동영상         | 3-1 3차원 흐름 가시화 동영상 | ① 수치해석으로 부터 도출된 고해상도 디지털 이미지를 이용해 동영상 파일 제작 | 2건  | 2건  |      | 보고서  | 10                                             | 특허: 출원 건<br>등록 건<br>논문: 건<br>시제품: 건<br>SW: 건   |             |
|     | 4 설계 인자의 공간분포도           | 4-1 수제설계인자 값 도출    | ① 설계 인자 값 정량적 산출                            | 4건  | 4건  |      | 보고서  | 10                                             | 특허: 출원 건<br>등록 건<br>논문: 건<br>시제품: 건<br>SW: 건   |             |
| 계   |                          |                    |                                             |     |     |      | 100  | 특허: 출원 건<br>등록 건<br>논문: 3 건<br>시제품: 건<br>SW: 건 |                                                |             |

[1차년도]

| 구분 | 핵심성과<br>(CTE)            | 단위성과             | 성과점검기준                                |     |     |      |      |                                              |                                              | 양적 성과<br>건수 |
|----|--------------------------|------------------|---------------------------------------|-----|-----|------|------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|-------------|
|    |                          |                  | 질적 성과지표                               | 목표치 | 달성치 | 측정방법 | 검증방법 | 기준치                                          |                                              |             |
| 주관 | 1 수리 모형 실험 결과 그림 및 도표    | 1-1 수리모형실험       | ① 수리 모형 실험 조건 결정                      | 4건  | 4건  |      | 보고서  | 10                                           | 특허: 출원 건<br>등록 건<br>논문: 건<br>시제품: 건<br>SW: 건 |             |
|    |                          |                  | ② 수리 모형 실험 수행                         | 2건  | 2건  |      | 보고서  | 10                                           |                                              |             |
|    |                          |                  | ③ 실험자료 분석 및 통계적 처리                    | 2건  | 2건  |      | 보고서  | 7.5                                          |                                              |             |
|    | 2 3차원 유동 수치해석 결과 그림 및 도표 | 2-1 3차원 고정밀 수치해석 | ① 수치해석 계산 격자 작성 및 테스트                 | 1건  | 1건  |      | 보고서  | 2.5                                          | 특허: 출원 건<br>등록 건<br>논문: 건<br>시제품: 건<br>SW: 건 |             |
|    |                          |                  | ② 병렬연산기법 기반의 3차원 유동해석 모형을 이용한 수치해석 수행 | 1건  | 1건  |      | 보고서  | 7.5                                          |                                              |             |
|    |                          |                  | ③ 실험자료 분석 및 통계적 처리                    | 1건  | 1건  |      | 보고서  | 7.5                                          |                                              |             |
| 계  |                          |                  |                                       |     |     |      | 45   | 특허: 출원 건<br>등록 건<br>논문: 건<br>시제품: 건<br>SW: 건 |                                              |             |

[2차년도]

| 구분  | 핵심성과<br>(CTE)          | 단위성과               | 성과점검기준                                     |     |     |      |      |     |                                                | 양적 성과<br>건수 |
|-----|------------------------|--------------------|--------------------------------------------|-----|-----|------|------|-----|------------------------------------------------|-------------|
|     |                        |                    | 질적 성과지표                                    | 목표치 | 달성치 | 측정방법 | 검증방법 | 가중치 |                                                |             |
| 1주관 | 수리모형 실험 결과 그림 및 도표     | 1-1 수리모형 실험        | ② 수리모형 실험 수행                               | 2건  | 2건  |      | 보고서  | 10  | 특허: 출원 건<br>등록 건<br>논문: 3 건<br>시제품: 건<br>SW: 건 |             |
|     |                        |                    | ③ 실험자료 분석 및 통계적 처리                         | 2건  | 2건  |      | 보고서  | 7.5 |                                                |             |
|     | 3차원 유동 수치해석 결과 그림 및 도표 | 2-1 3차원 고정밀 수치해석   | ① 수치해석 계산 격자 작성 및 테스트                      | 1건  | 1건  |      | 보고서  | 2.5 | 특허: 출원 건<br>등록 건<br>논문: 건<br>시제품: 건<br>SW: 건   |             |
|     |                        |                    | ② 병렬연산기법 기반의 3차원 유동해석 모형을 이용한 수치해석 수행      | 1건  | 1건  |      | 보고서  | 7.5 |                                                |             |
|     |                        |                    | ③ 실험자료 분석 및 통계적 처리                         | 1건  | 1건  |      | 보고서  | 7.5 |                                                |             |
|     | 3차원 흐름 가시화 동영상         | 3-1 3차원 흐름 가시화 동영상 | ① 수치해석으로부터 도출된 고해상도 디지털 이미지를 이용해 동영상 파일 제작 | 2건  | 2건  |      | 보고서  | 10  | 특허: 출원 건<br>등록 건<br>논문: 건<br>시제품: 건<br>SW: 건   |             |
|     | 설계 인자의 공간분포도           | 4-1 수제설계인자 값 도출    | ① 설계 인자 값 정량적 산출                           | 4건  | 4건  |      | 보고서  | 10  | 특허: 출원 건<br>등록 건<br>논문: 건<br>시제품: 건<br>SW: 건   |             |
|     | 계                      |                    |                                            |     |     |      |      | 55  | 특허: 출원 건<br>등록 건<br>논문: 3 건<br>시제품: 건<br>SW: 건 |             |

## 6. 연구 개발 성과

- 현재까지 국내에서 수행되어 온 연구들은 주로 수제 주위에서 발생하는 세굴양상 분석, 또는 Large Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV)를 이용한 수제 주위의 수면 흐름 분석에 초점을 두었음 (Kang et al., 2005; Yeo et al., 2006; Kang et al., 2009; Kim et al., 2014).
- 국내에서 수행된 수제 관련 수리모형실험에서 3차원 유속을 측정하여 흐름을 분석한 사례는 극히 드물며, 일부 3차원 유속을 측정한 수리모형실험 연구에서도 측정 수가 많지 않기 때문에 수제 주위의 흐름 분석을 하는데 한계가 있었음.
- 본 연구에서 수행한 실험은 약 5000 개의 측정점에서 측정한 3차원 유속 자료를 통해 수제 하류의 흐름 특성을 분석하였다는 점에서 기술개발의 의의가 있음.
- 국내에서 수제 주위의 흐름을 분석하기 위해 LES 모형을 이용하여 5700만개 가량의 계산격자를 해석한 사례는 전무함.
- 국외에서는 수제 주위의 3차원 흐름을 측정하여 수제 주위 흐름을 분석한 사례가 다수 존재함 (Dey and Barbuia, 2006; Duan, 2009; Duan et al., 2009; Safarzadeh et al., 2016).
- 하지만 국외의 수리모형실험 사례에서는 대부분 수제 주위의 흐름만을 측정하였기 때문에 수제 설치로 인한 하류 흐름 변화를 3차원으로 분석하는데 제한이 있음.
- 본 연구에서 수행한 수리모형실험에서는 수제길이의 약 20배에 해당하는 지점까지 유속과 수위를 측정하여 수제 하류의 3차원 흐름구조를 광범위하게 분석할 수 있었음.
- 이렇게 광범위한 수리모형실험을 바탕으로 분석한 수제 주위의 3차원 흐름구조는 단일 수제 하류의 흐름을 면밀하게 조사할 수 있다는 장점뿐만 아니라 향후 여러 개의 수제를 하천에 설치하여 하천을 관리하고자 할 때 수제의 간격을 결정하는데 주요한 역할을 할 수 있음.
- 일반적으로 수제는 하천의 수위 변화에 따라 평수기에는 잠기지 않고, 홍수기에는 잠기는 수공 구조물임. 뿐만 아니라 하천의 자연 경관을 해치지 않기 위해 의도적으로 하천의 평수기 수위보다 낮은 높이의 수제를 하천에 설치하기도 함. 따라서 수제 주위에서 잠김 흐름이 발생하는 양상에 대한 분석도 수제 관련 연구에서 큰 의미를 가짐.
- 국외에서 잠기지 않은 수제에 대한 3차원 수치해석 사례는 다수 존재하지만 (Koken and Constantinescu, 2008a; Koken and Constantinescu, 2008b; Kara et al., 2015; Khosronejad et al., 2018). 수치해석을 통해 잠기지 않은 수제 주위의 3차원 흐름 분석 사례는 많지 않음.
- 본 연구에서는 잠긴 수제에 대한 연구를 통해 수제에 잠김 흐름이 발생할 경우 흐름이 수제를 월류하면서 수제 하류에서 관찰되는 흐름 양상이 잠기지 않은 수제와는 확연히 다르다는 것을 알아내었음.
- 본 과제에서는 연구 사례가 많지 않은 수제 주위의 잠김 흐름을 관찰하고 그 결과를 분석하였다는 점에서 연구 개발에 의의가 있음.

## 제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

### 1. 목표 달성도

본 연구의 핵심성과는 다음과 같다. 1차년도에는 2건의 수리모형실험과 1건의 3차원 수치해석을 계획하였으며 2차년도에는 2건의 수리모형실험과 1건의 3차원 수치해석을 계획하였다. 4건의 수리모형실험을 통해서는 유입흐름 (Froude 수)과 수제의 높이에 따른 수제 하류 3차원 흐름구조를 규명하였으며, 4건의 수리모형실험 중 낮은 Froude수를 갖는 유입흐름에 대하여 수제의 잠김 흐름 발생 여부에 따른 수제 하류 3차원 흐름을 규명하였다. 3차원 수치해석 모형으로 계산된 결과를 이용해 실시간 유속장 분포 변화를 관찰하고 이를 바탕으로 물에 잠기지 않은 수제와 물에 잠긴 수제 주위 흐름에 대한 2건의 흐름 가시화 동영상 제작을 계획하였다. 마지막으로 수행된 3차원 수리모형실험과 수치해석결과를 이용하여 4가지 흐름특성 (정수역 크기, 하상전단응력, 최대유속, 이차류 분포도)의 분포도 작성을 계획하였다. 본 연구진은 과제의 목표 달성을 위해 연구를 성실히 수행하여 본 과제에서 최초 과제 협약 시 목표로 세웠던 핵심성과에 대한 목표를 100% 달성하였다.

### 2. 관련 분야 기여도

현재 수제와 관련된 설계 기준은 세굴심과 관련한 내용에 초점을 맞추고 있으며 이 같은 설계 기준은 일본이나 유럽에서 만든 경험식을 바탕으로 만들어졌다. 이와 같이 현재까지도 수제와 관련한 설계 기준에 대한 가이드라인이 명확하게 제시되어 있지 않는 이유는 수제 주위의 복잡한 흐름 메커니즘에 대한 이해가 부족하기 때문이다. 본 연구에서는 3차원 수리모형실험과 수치해석을 통하여 물에 잠긴 수제와 잠기지 않은 수제에 관하여 면밀한 흐름 분석을 하였으며 이는 향후 수제 설계 시 기초자료로 사용되어 수제 설계 기술을 발달시킬 수 있을 것으로 기대한다. 뿐만 아니라 본 연구에서는 기존에 시도되지 않았던 고정밀 3차원 수치해석기법을 수공구조물 흐름구조 연구에 활용한 사례로 향후 새로운 연구의 패러다임을 제시하였다는 점에서 기술적으로 의의가 있다.

### 3. 목표 미달성 시 원인(사유) 및 차후대책(후속연구의 필요성 등)

본 연구에서는 2건의 SCI 논문과 1건의 국내학술논문 게재를 목표로 설정하였다. 하지만 수제 하류의 면밀한 흐름 분석을 위해 약 5000개의 측정점에서 3차원 유속과 수위를 측정하였으며 이로 인하여 수리모형실험 결과를 수집하는데 계획했던 것보다 많은 시간이 필요했다. 뿐만 아니라 3차원 수치해석에서 5700만개가 넘는 계산격자를 이용하여 흐름 분석을 시도하였는데 이는 기존 다른 연구에서 사용된 계산격자보다 월등히 많은 숫자로 연산하는데 많은 시간이 소요되었다. SCI 논문의 경우에는 준비 및 출판까지 오랜 시간이 걸리기 때문에 과제 종료 내 2건의 SCI 논문을 출판하는 것이 어려울 것이라고 판단하였다. 따라서 비교적 논문의 준비와 출판에 적은 시간이 소요되는 국내학술지에 2건의 논문을 게재하였고 1건의 SCI 논문을 수자원 분야 최상위 저널 중 하나인 Water Resource Research에 게재하였으며, 해당 논문은 Featured article에 선정되어 그 연구의 우수성을 검증 받았다. 현재 부족한 SCI 연구 성과를 달성하기 위하여 논문을 작성 중에 있으며 과제의 사후관리 기간 안에는 SCI 논문이 추가적으로 출판 될 것으로 기대한다.

본 연구에서는 수제 높이와 하천의 유량에 따른 수제 하류 흐름구조 변화에 중점을 두었다. 위 연구결과와 더불어 다양한 수제의 기하하적인 인자 (수제 길이, 수제 폭, 수제 높이, 수제 간격 등)와 하천 수리 인자 (유속, 수위 등)가 수제 하류 흐름구조 변화에 미치는 영향에 대한 후속연구가 진행된다면 수제 하류의 3차원 흐름구조 규명에 대한 연구의 완성도를 높일 수 있을 것으로 판단된다.

## 제5장. 연구개발성과의 활용계획

### ○ 기술·환경적 측면

- 본 연구결과는 기존 설계지침에서 고려하지 못하였던 3차원 난류현상과 설계인자 간 상관관계를 규명함으로써 향후 낙차공 및 보의 설계기법 개선에 필요한 중요한 기초자료로 활용할 수 있음.
- 본 연구 성과물의 일부인 수리모형실험과 수치모형실험(CFD) 결과자료는 향후 수제 설계 가이드라인 개선 시 유용하게 활용될 수 있음.
- 향후 흐름 수치해석 자료를 분석하여 접합부에서 발생하는 전단응력을 정밀 산출하여 구조물 안정성 향상을 위한 연구에 활용할 수 있음.
- 본 연구의 중요 결과물 중 하나인 설계인자 값 분포도는 향후 수제설계 기법 개선에 활용할 수 있음. 예를 들어 정수역 크기 값은 수제 간격 결정에 활용할 수 있으며, 하상전단응력, 최대유속, 이차류 분포도는 세굴 발생 형태 예측하는데 활용 가능함.
- 본 연구에서 개발되는 연구 성과를 활용하여 설계기법 또는 공식이 개선된다면 홍수 시 발생하는 구조물의 피해와 그로 인해 발생하는 인명, 재산피해를 줄일 수 있을 것임.
- 개발된 최종 성과물을 하천설계 기준의 개정 시 반영하여 설계 기술 개선에 기여할 수 있음.
- 물 관리를 수행하는 국가기관의 자연하천 보호, 하천정비, 복원 사업과 관련하여 본 연구결과를 하천형단구조물 설계에 활용하는 것은 물론이고 유지관리 및 정책 수립에도 활용 가능함.
- 관련업계에서 본 연구 성과를 숙지하고 낙차공 및 보를 월류하는 흐름에 대한 기초지식과 해석 기술을 활용하면 과다설계로 인한 경제 손실을 방지할 것으로 기대됨.

### ○ 기술적 측면

- 본 연구는 기존에 시도되지 않았던 고정밀 3차원 수치해석기법을 수공 구조물 흐름구조 연구에 활용한 사례로서 향후 새로운 연구의 패러다임을 제시하였음.
- 하천의 흐름이 내제하고 있는 방향성 및 난류에너지와 수공구조물의 상호작용에 의해 발생하는 저항력 등을 고려한 과학적 원리에 근거하여 수제 설계에 주요한 인자에 대한 정보를 구축함.
- 슈퍼컴퓨팅 기술과 3차원 수치해석 기법을 결합하여 흐름의 난류특성을 고려한 인자요소 정립에 관한 연구를 수행함으로써 수공구조물 설계기술 분야에 새로운 연구 패러다임을 제시함.
- 슈퍼컴퓨터 기반의 3차원 흐름해석 기법은 수제 뿐 아니라 댐 여수로, 교각구조물, 어도, 낙차공 등 여타 수공구조물에 적용 된다면 향후 수공구조물 설계기술의 전반적인 향상으로 이어질 것임.
- 홍수기에 보다 탄력적으로 대응 할 수 있는 재해방지형 자연하천설계기준의 초석을 마련하는데 이용 가능함.
- 본 연구에서 사용된 물에 잠기지 않은 수제의 경우, 정수역의 크기가 약  $x/L=12$ 인 것을 확인할 수 있음. 이 결과를 바탕으로 군수제 설치 시 수제 간격을 약  $x/L=12$ 로 한다면 수제 개수 대비 제방 보호 구간을 늘려 효율적인 수제 설치가 가능할 것임.

### ○ 경제적·산업적 측면

- 합리적이고 과학적인 설계기법을 기반으로 홍수재난으로 인한 제방의 유실 및 파괴를 방지하여, 경제적 및 인명 피해 최소화할 수 있을 것으로 예상함.
- 정확한 설계기법을 활용하여 수제의 과설계를 방지하여 설계 비용절감 및 국가예산 절감할 수 있음.
- 미래예측 가능한 설계를 통해 추후 유지·관리의 편의성과 장기적으로 경제적 이익을 줄 수 있음.
- 장기적으로 수제설계에 대한 과학적인 기술을 축적하여 해외시장에서 우위를 점할 수 있음.

### ○ 수제 길이에 대한 설계 가이드 (미국)

미국내무부 (Department of the Interior)에서 2015년 발간한 하천제방 보호 설계기준 (Bank Stabilization Design Guidelines, Report No. SRH-2015-25)에 따르면, 수제 길이가 설계 하폭의 3-30%인 수제의 성공적인 현장 설치 사례가 보고되었다 (Lagasse et al., 2009). 이를 바탕으로 본 연구에서 사용된 수제의 하폭 대비 수제 길이가 현장스케일에서도 성공적으로 설치 가능함을 확인할 수 있었다.

### ○ 후속연구의 필요성

Kara et al. (2015)는 직각 수제와 비슷한 형상을 갖는 교대를 직선 수로에 설치하고 Large Eddy Simulation (LES)를 이용하여 교대 주위의 시간 평균 유속분포와 난류흐름분포를 분석하였다. Kara et al. (2015)의 연구는 길이수심비 ( $L/H$ )가 2.63이고  $Fr = 0.33$ 인 흐름 조건에서 수행되었으며, 자유수면변화가 교대 주위 수로 바닥부의 유속 및 난류 특성분포에 미치는 영향을 규명하기 위해 Rigid-Lid와 Level-Set 방법을 이용하였다. Rigid-Lid는 흐름 내 자유수면변화가 무시할정도로 작다고 가정하여 흐름 내 수면변화를 고려하지 않는 해석 방법이고 Level-Set 방법은 3차원 흐름변화에 의한 자유수면변화를 계산하여 흐름 내 수면변화를 고려하는 해석 방법이다. 해석결과, 자유수면변화를 고려하는 Level-Set 방법의 경우, 레이놀즈수와 난류에너지의 크기 및 분포가 Rigid-Lid 방법을 이용할 때와는 확연히 다른 양상을 보이는 것을 알 수 있었다. Khosronejad et al. (2018)는 Kara et al. (2015)의 연구를 확장하여 자유수면변화가 교대 주위 바닥부의 시간평균 유속과 난류흐름분포에 미치는 영향을 알아보았다. Khosronejad et al. (2018)는 Kara et al. (2015)의 연구에서 보다 높은 레이놀즈수를 갖는 흐름 조건에서 5배 큰 길이 축척을 갖는 수로와 교대를 이용하여 LES를 수행하였다. Khosronejad et al. (2018)는 Kara et al. (2015)의 연구에서와 동일하게 Level-Set 방법과 Rigid-Lid 방법으로 자유수면을 해석하였고, 레이놀즈수를 제외한 다른 흐름 조건은 Kara et al. (2015)의 연구에서와 유사한 값을 나타내었다( $L/H = 2.50$ ,  $Fr = 0.36$ ). 3차원 수치해석 결과, 자유수면변화의 고려 여부에 따라 난류흐름분포와 시간평균유속 분포가 무시할 수 없는 정도의 차이를 나타내는 것을 알 수 있었다.

개수로흐름 (open channel flow)에서 Froude 수가 증가함에 따라 자유수면변화가 커진다는 사실을 고려하면 Kara et al. (2015)와 Khosronejad et al. (2018)의 수치해석 결과는 Jeon et al. (2018)의 수리모형실험 결과와 상반됨을 알 수 있다. Jeon et al. (2018)은  $L/H = 1.40$ 인 흐름 조건에서 두 가지 Froude 수 ( $Fr = 0.10$ ,  $Fr = 0.19$ )에 대하여 수리모형실험을 수행하였으며, Froude 수가 수제 하류 3차원 흐름구조에 미치는 영향이 크지 않다는 결론을 내렸다. 따라서 본 연구진은 자유수면변화가 수제 하류의 흐름특성에 미치는 영향에 대해 서로 다른 견해가 있다는 사실을 연구 과정 중 수집한 해외 과학기술 정보를 통해 확인하였으며, 이에 대한 연구가 필요하다는 사실을 알게 되었다.

## 제7장. 연구개발성과의 보안등급

일반

## 제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

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

## 제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

### ○ 기술적 위험 요소 분석, 안전 관리 대책

| 안전점검        |                                                                                          |                                              |                                                         |                                  |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------|
| 구분          | 연구실 일일안전점검                                                                               | 정밀안전진단                                       | 개선조치 확인점검                                               | 소방정밀안전진단                         |
| 점검범위        | 대학원 연구실                                                                                  | 교내 전체 연구실                                    | 이공계열 연구·실습실 전체                                          | 건물 전체                            |
| 점검시기        | 매일(단, 실습실(연구실)을 사용하지 않는 날은 제외)                                                           | 매년 9월 말 ~ 10월 말                              | 정밀안전진단실시 후 ~ 차기년도 안전진단 시 까지 지속점검 및 재개선 통보               | 매년 4월 중순 ~ 6월 중순                 |
| 점검내용        | 기계, 기구, 전기, 약품, 병원체 등의 유해요소 이상유무의 일상(육안)적인 점검                                            | 기계, 기구, 전기, 약품, 병원체 등의 육안 및 정밀측정기를 이용한 점검    | 안전진단 미비점 개선조치 여부확인 및 피드백                                | 소방시설물 점검(설비, 펌프, 탱크, 소화기, 감지기 등) |
| 점검자         | 실습실 조교 및 각 연구실 안전관리담당자(책임자)                                                              | 미래창조과학부 허가기관                                 | 관재팀                                                     | 법정안전점검 전문기관                      |
| 교육훈련 (법정교육) |                                                                                          |                                              |                                                         |                                  |
| 구분          | 온라인 정기안전교육                                                                               | 오프라인 안전교육/훈련                                 | 신규 연구활동종사자 교육                                           |                                  |
| 교육대상        | 이공계열 전체 연구활동종사자(교원, 직원, 연구원(보조원 포함), 대학원생, 학부생, 기타 실험에 참여하는 모든 자)                        | 연구실 안전책임자/ 담당자/연구활동종사자                       | 신규 연구활동종사자 (신규 입학자, 복학자, 신규직원)                          |                                  |
| 교육주기        | 학기당 6시간<br>(1학기 : 3월 ~ 8월, 2학기 : 9월 ~ 2월)                                                | 년 1회 이상 (1시간 이상)                             | 입.복학자 : 2시간<br>신규채용자 : 8시간                              |                                  |
| 교육방법        | 온라인 안전교육시스템                                                                              | 집체교육, 대피훈련 (화학물질 방재요령, 심폐소생술 및 소화기/소화전 사용요령) | 안전관리자 표준교안 작성배포 및 연구실 안전책임자 (지도교수, 연구소장, 연구센터장)이 교육 실시  |                                  |
| 교육내용        | 연안법에 정하는 모든 사항<br>(기본 6시간 + 심화 2시간)                                                      | -                                            | 표준교안 활용 및 연구프로젝트별 (사용기계, 기구, 취급물질 등) 연구실 현장에 맞는 안전교육 실시 |                                  |
| 구분          | 연구활동종사자 건강검진                                                                             |                                              |                                                         |                                  |
| 검진대상        | 유해인자178종에 노출된 연구실을 이용하는 연구활동종사자                                                          |                                              |                                                         |                                  |
| 검진시기        | 매년 1회 실시(1학기 : 4월 ~ 6월, 2학기 10월 ~ 11월)                                                   |                                              |                                                         |                                  |
| 검진방법        | 일반건강검진 및 유해인자에 따른 특수건강검진 시행                                                              |                                              |                                                         |                                  |
| 검진기관        | 산안법에 허가된 특수건강검진 전문기관                                                                     |                                              |                                                         |                                  |
| 검진형태        | 출장검진(3일) 및 원내검진(미수검자 검진)                                                                 |                                              |                                                         |                                  |
| 검진절차        | 유해인자 및 인원조사 → 검진대상자 및 유해인자 선정 → 검진 → 미수검자 추적검진 → 결과통보 및 의사진료                             |                                              |                                                         |                                  |
| 구분          | 연구활동종사자 보험가입                                                                             |                                              |                                                         |                                  |
| 대상범위        | 이공계열 학부생, 대학원생, 연구원(재학생/재직자) ※ 산재보험 및 사학연금 법에 의해 가입된(교원,교직원,계약직)제외                       |                                              |                                                         |                                  |
| 보험명         | 연구활동종사자 상해보험(안전공제)<br>관재팀 : 학부생 및 대학원생 (매년 6월 갱신) / 산학협력단 연구진흥팀 : 연구원 및 연구보조원 (매년 2월 갱신) |                                              |                                                         |                                  |
| 보장내용        | 사망/휴유장해(1급시) : 100,000,000원, 상해 : 10,000,000원                                            |                                              |                                                         |                                  |

## 제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

| 번호 | 구분<br>(논문/<br>특허/<br>기타) | 논문명/특허명/<br>기타                                                                                                                                                                                      | 소속<br>기관명 | 역할      | 논문<br>게재지/<br>특허 등록<br>국가            | 영향력<br>지수 | 논문 게재일<br>/특허 등록일 | 사사 여부<br>(단독 사사<br>또는<br>중복 사사) | 특기 사항<br>(SCI<br>여부/인용<br>횟수 등) |
|----|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|---------|--------------------------------------|-----------|-------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 1  | 논문                       | Froude 수<br>변화에 따른<br>수제 하류 난류<br>흐름 측정                                                                                                                                                             | 한양대<br>학교 | 주저<br>자 | 수자원학회<br>논문집<br>/한국                  |           | 2019.02.26.       | 단독                              |                                 |
| 2  | 논문                       | Experimental<br>Investigation of<br>Three-Dimensi<br>onal Flow<br>Structure and<br>Turbulent Flow<br>Mechanisms<br>Around a<br>Nonsubmerged<br>Spur Dike With<br>a Low<br>Length-to-Dep<br>th Ratio | 한양대<br>학교 | 주저<br>자 | Water<br>Resource<br>Research<br>/미국 | 4.36      | 2018.04.17.       | 단독                              | Featured<br>article에<br>선정      |
| 3  | 논문                       | 수제의 잠김<br>정도에 따른<br>3차원 흐름<br>구조 변화에<br>관한 실험 연구                                                                                                                                                    | 한양대<br>학교 | 주저<br>자 | 수자원학회<br>논문집<br>/한국                  |           | 2018.02.23.       | 단독                              |                                 |

## 제11장. 기타 사항

해당없음

- Dey, S. and Barbhuiya, A. K. (2006). "Velocity and turbulence in a scour hole at a vertical-wall abutment" . *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 17, No. 1, pp. 13-21.
- Duan, J. G. (2009). "Mean flow and turbulence around a laboratory spur dike" *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 135, No. 10, pp. 803-811.
- Duan, J. G., He, L., Fu, X., and Wang, Q. (2009). "Mean flow and turbulence around experimental spur dike" *Advances in Water Resources*, Vol. 32, No. 12, pp. 1717-1725.
- Jeon, J.S. and Kang, S.K. (2016). "Flume experiments for turbulent flow around a spur dike" *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 49, No. 8, pp. 707-717.
- Jeon, J.S., Lee, J.Y., and Kang, S.K. (2018). "Experimental investigation of three-dimensional flow structure and turbulent flow mechanisms around a nonsubmerged spur dike with a low length-to-depth ratio" *Water Resources Research*, Vol. 54, No. 5, pp. 3530-3556.
- Kang, J.G., Yeo, H.K., Kim, S.J. (2005). "An experimental study on tip velocity and downstream recirculation zone of single groyne conditions." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 38, No. 2, pp. 143-153.
- Kang, J.G., Kim, S.J., Yeo, H.K. (2009). "An experimental study on flow characteristic around inclined crest groyne" *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 42, No. 9, pp. 715-724.
- Kim, S.J., Kang, J.G., Yeo, H.K. (2014). "An experimental study on flow characteristics for optimal spacing suggestion of 45° upward groynes" *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 47, No. 5, pp. 459-468.
- Koken, M., Constantinescu, G. (2008). "An investigation of the flow and scour mechanisms around isolated spur dikes in a shallow open channel: 1. Conditions corresponding to the initiation of the erosion and deposition process" *Water Resources Research*, Vol. 44, No. 8, pp. 1-19.
- Koken, M., Constantinescu, G. (2008). "An investigation of the flow and scour mechanisms around isolated spur dikes in a shallow open channel: 2. Conditions corresponding to the final stage of the erosion and deposition process" *Water Resources Research*, Vol. 44, No. 8, pp. 1-16.
- Kara, S., Kara, M. C., Stoesser, T., & Sturm, T.W. (2015). "Free-surface versus rigid-lid LES computations for bridge-abutment flow" *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 141, No. 9, 04015019, pp. 1-9.
- Khosronejad, A., Ghazian Arabi, M., Angelidis, D., Bagherizadeh, E., Flora, K., & Farhadzadeh, A. (2018). "Comparative hydrodynamic study of rigid-lid and level-set methods for LES of open-channel flow" *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 145, No. 1, 04018077, pp. 1-15.
- Kuhnle, R. A., Alonso, C. V., & Shields, F. D. (1999). Geometry of scour holes associated with 90 spur dikes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(9), 972-978.
- Lagasse, P.F., Clopper, P.E., Pagan-Ortiz, J.E., Zevenbergen, L.W., Arneson, L.A., Schall, J.D., Girard, L.G. 2009. Bridge scour and stream instability countermeasure: experience, selection, and design guidance. FHWA Rep. No. NHI-09-12, HEC-23, 3<sup>rd</sup> Ed, Vol. 2. Federal Highway Administration, Arlington, V.A.
- Drew, C.B., Lisa, F., Cassie, C.K., Michael, S. 2015. Bank stabilization design guidelines, Rep. No. SRH-2015-25, Department of the Interior.

- 
- Safarzadeh, A., Salehi Neyshabouri, S. A. A., and Zarrati, A. R. (2016). "Experimental investigation on 3D turbulent flow around straight and T-shaped groynes in a flat bed channel" *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 142 No. 8, pp. 1-15 (04016021).
- Yeo, H.K., Roh, Y.S., Kang, J.G., Kim, S.J. (2006). "Variations of flow thalweg alignment and separation region around a groyne" *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 39, No. 4, pp. 313-320.
-

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.