

3cm

15CTAP-  
C098446-  
02

4cm

보와  
하상  
유지공의  
안전성  
확보를  
위한  
물받이와  
바닥  
보호공의  
성능평가  
기법에  
대한  
원천기술  
개발

최  
종  
보  
고  
서

2017

국토교통과학기술진흥원  
국토교통부

Infrastructure R&D Report

보안 과제( ), 일반 과제(○) / 공개(○), 비공개( )  
국토교통기술촉진연구사업 제2차 연도 최종보고서(안)

R&D /  
15CTAP-C098446-02

# 보와 하상유지공의 안전성 확보를 위한 물받이와 바닥보호공의 성능평가 기법에 대한 원천기술개발 최종보고서

2017. 7. 21.

주관연구기관 / 한국건설기술연구원  
공동연구기관 / 주식회사 지티이

국 토 교 통 부  
국토교통과학기술진흥원

## 제 출 문

국토부교통부 장관(국토교통과학기술진흥원장) 귀하

‘보와 하상유지공의 안전성 확보를 위한 물받이와 바닥보호공의 성능평가 기법에 대한 원천기술개발’(연구개발 기간 : 2015. 6. 24 ~ 2017 . 6. 23.) 과제의 최종보고서 10부를 제출합니다.

2017. 7. 21.

|                     |     |     |
|---------------------|-----|-----|
| 주관연구기관명 : 한국건설기술연구원 | 이태식 | (인) |
| 공동연구기관명 : 주식회사 지티이  | 김태원 | (인) |

주관연구기관책임자: 박 문 형  
공동연구기관책임자: 김 태 원

|                                                  |
|--------------------------------------------------|
| 국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에<br>동의합니다. |
|--------------------------------------------------|

## 보고서 요약서

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                    |                                                        |                              |               |                                                           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------|---------------|-----------------------------------------------------------|
| 과제 고유 번호                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 15CTAP-C098446-02  | 해당 단계<br>연구 기간                                         | 2015.6.24.<br>~ 2017.6.23.   | 단계구분          | 2/2<br>(해당단계)/(총단계)                                       |
| 연구사업명                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 중사업명               | 국토교통기술촉진연구사업                                           |                              |               |                                                           |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 세부사업명              | 기초원천                                                   |                              |               |                                                           |
| 연구과제명                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 대과제명               | 보와 하상유지공의 안전성 확보를 위한 물받이와 바닥보호공의<br>성능평가 기법에 대한 원천기술개발 |                              |               |                                                           |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 세부과제명              | 물받이와 바닥보호공의 성능평가 기법 개발                                 |                              |               |                                                           |
| 연구책임자                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 박 문 형              | 해당단계<br>참여<br>연구원 수                                    | 총: 12명<br>내부: 12명<br>외부:   명 | 해당단계<br>연구개발비 | 정부:200,000천원<br>기업: 67,000천원<br>정부 외:   천원<br>계:267,000천원 |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                    | 총 연구기간<br>참여<br>연구원 수                                  | 총: 12명<br>내부: 12명<br>외부:   명 | 총 연구개발비       | 정부:400,000천원<br>기업:134,000천원<br>정부 외:   천원<br>계:534,000천원 |
| 연구기관명 및<br>소속 부서명                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 한국건설기술연구원 수자원하천연구소 |                                                        |                              | 참여기업명         |                                                           |
| 국제공동연구                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 상대국명:              |                                                        |                              | 상대국 연구기관명:    |                                                           |
| 위탁연구                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 연구기관명:             |                                                        |                              | 연구책임자:        |                                                           |
| 요약                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                    |                                                        |                              | 보고서 면수 90     |                                                           |
| <div><div>- 입자영상유속측정(PIV) 및 기포영상유속측정(BIV) 등 최신유동 해석기법을 활용하여 이전에 측정하기 어려웠던 도수흐름에 대한 난류유동을 측정하고 분석함</div><div>- 물받이공 및 바닥보호공에 작용하는 정량화 된 외력조건을 제시하기 위해 난류강도와 압력의 상관관계를 제시하였고 3차원 전산유체 프로그램을 활용하여 횡단구조물 유형 별 흐름 특성과 바닥보호공 사석 공극에서 발생하는 역학적 현상을 구명</div><div>- 개발된 기술을 전문학회가 주관하는 학술회의에서 9건의 발표, 전문학술지에 3건의 게재와 소프트웨어 등록 6건 등으로 연구 성과의 우수성을 인정받음</div><div>- 물받이공 및 바닥보호공에서 발생하는 재료파괴 및 사석저면의 흡출에 대한 복잡한 물리적 현상을 구명한 연구로 하천설계기준 또는 하위 기술지침 반영에 기여할 수 있음</div><div>- 추후 설치되는 하천횡단구조물 물받이공 및 바닥보호공의 안전 확보 및 논란이 되고 있는 보의 성능기준에 대한 사회적 갈등해소가 이루어질 것으로 기대됨</div></div> |                    |                                                        |                              |               |                                                           |

## 〈 요약 〉

|                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |      |       |      |  |
|---------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|-------|------|--|
| 연구의<br>목적 및 내용            | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 물받이공과 바닥보호공의 안전확보를 위한 성능기준(안) 제시               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 입자영상유속측정(Particle Image Velocimeter, PIV), 기포영상유속측정(Bubble image Velocimeter, BIV) 등의 최첨단 난류 유동해석 실험기법과 SPH 등의 난류 수치모형을 이용하여, 정량화된 외력 조건(예: 양압 및 부압 조건, 난류 강도 및 kinetic energy에 의한 피로하중 정량화) 제시</li> <li>- PIV, BIV 등의 실험과 난류 수치모형을 통하여 난류특성과 사석의 중량에 대한 상관관계, 공극 사이에서 발생하는 역학적 현상 등을 구명하여 정량적 성능기준 제시</li> </ul> </li> </ul>                                                                 |      |       |      |  |
| 연구개발성과                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 물받이공 성능기준(안)               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 난류 유동해석을 위한 실험기법을 이용하여, 정량화된 외력 조건(예: 양압 및 부압 조건, 난류강도 및 kinetic energy에 의한 피로하중 정량화) 제시</li> </ul> </li> <li>○ 바닥보호공 성능기준(안)               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 실험을 통하여 난류특성과 사석의 중량에 대한 상관관계, 공극 사이에서 발생하는 역학적 현상 등을 구명하여 정량적 성능기준 제시</li> </ul> </li> <li>○ 횡단구조물 유형별 적정 규모결정 프로그램               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 횡단구조물 설계를 위한 간략계산 프로그램 개발</li> </ul> </li> </ul> |      |       |      |  |
| 연구개발성과의<br>활용계획<br>(기대효과) | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ (기술수요처) 국토교통부, 지자체 등 하천시설물 공사 발주기관 및 설계사</li> <li>○ (현장적용 방안) 정부의 인증을 받은 하천설계기준 또는 하위 기술지침에 반영</li> <li>○ (원천기술 확보) 과학적으로 증명된 횡단구조물의 물받이 및 바닥보호공에 대한 기술지침을 세계 최초로 개발하여 건설산업의 해외시장 진출 지원</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                    |      |       |      |  |
| 핵심어<br>(5개 이내)            | 횡단구조물                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 물받이공 | 바닥보호공 | 성능기준 |  |

## 〈 SUMMARY 〉

|                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |       |                |                      |  |
|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|----------------|----------------------|--|
| Purpose & Contents    | <ul style="list-style-type: none"><li>○ Present the performance standard (draft) for securing the safety of apron and bed protection<ul style="list-style-type: none"><li>– Present the quantified external force conditions (e.g., positive pressure and negative pressure conditions, quantification of fatigue load due to turbulence intensity and kinetic energy) using numerical models such as SPH and the advanced experiment techniques such as particle image velocimeter (PIV) and bubble tracing velocimeter (BTV)</li><li>– Present quantitative performance standards by investigating the correlation between the turbulent characteristics and the weight of riprap and dynamic phenomena occurred between the pore spaces through the experiments such as PIV and BTV and numerical models</li></ul></li></ul>                                                                                                                              |       |                |                      |  |
| Results               | <ul style="list-style-type: none"><li>○ Performance standard (draft) for apron<ul style="list-style-type: none"><li>– Present the quantified external force conditions (e.g., positive pressure and negative pressure conditions, quantification of fatigue load due to turbulence intensity and kinetic energy) using the experiment technique for turbulent flow analysis</li></ul></li><li>○ Performance standard (draft) for bed protection<ul style="list-style-type: none"><li>– Present the quantitative performance standards by investigating the correlation between the turbulent characteristics and the weight of riprap and dynamic phenomena occurred between the pore spaces through the experiments</li></ul></li><li>○ Program which determines a proper size of weir and barrage for each type<ul style="list-style-type: none"><li>– Development of simplified calculation program for designing of weir and barrage</li></ul></li></ul> |       |                |                      |  |
| Expected Contribution | <ul style="list-style-type: none"><li>○ (Technology demand) Government authorities ordering river facility works such as the Ministry of Land, Infrastructure and Transport and local governments</li><li>○ (Field application measure) Applies it to the river design standards certified by the government or lower technology guidelines</li><li>○ (Securing of source technology) Develops the technology guideline for scientifically proven apron and bed protection of weir and barrage for the first time in the world and supports the construction industry to advance into overseas markets</li></ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |       |                |                      |  |
| Keywords              | Weir & Barrage                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Apron | Bed protection | Performance standard |  |

## 〈 Table of Contents 〉

|                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Outline of this study .....                                           | 7  |
| 2. State of the art review .....                                         | 15 |
| 3. Contents and results of this study .....                              | 21 |
| 4. Attainment of goal and contribution to related area .....             | 84 |
| 5. Plan for practical use of results .....                               | 86 |
| 6. Overseas scientific/technical informations obtained in studying ..... | 86 |
| 7. Security class of results .....                                       | 86 |
| 8. Facilities and equipment registered to the NTFS .....                 | 86 |
| 9. Record of safety procedures fulfilled in studying .....               | 86 |
| 10. Representative results of this study .....                           | 87 |
| 11. And others .....                                                     | 87 |
| 12. References .....                                                     | 88 |

## < 목 차 >

|                                           |    |
|-------------------------------------------|----|
| 1. 연구개발과제의 개요 .....                       | 7  |
| 2. 국내외 기술 개발 현황 .....                     | 15 |
| 3. 연구 수행 내용 및 성과 .....                    | 21 |
| 4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 .....               | 84 |
| 5. 연구개발성과의 활용 계획 .....                    | 86 |
| 6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보 .....           | 86 |
| 7. 연구개발성과의 보안등급 .....                     | 86 |
| 8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황 .....    | 86 |
| 9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적 ..... | 86 |
| 10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적 .....               | 87 |
| 11. 기타 사항 .....                           | 87 |
| 12. 참고 문헌 .....                           | 88 |

# 제1장. 연구개발과제의 개요

## 제 1 절 연구개발 필요성

### 1. 연구개발과제의 설명

#### 가. 연구개발의 배경

##### (1) 횡단구조물(보, 하상유지공)의 설치 현황 및 계획

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

<표 1.1> 횡단구조물 설치현황

| 구분  |                              | 계      | 하상유지공             | 보                  | 기타            |
|-----|------------------------------|--------|-------------------|--------------------|---------------|
| 개소수 |                              | 20,753 | 4,010<br>(19.32%) | 16,733<br>(80.63%) | 10<br>(0.05%) |
| 비율  | 하천당 개소수                      | 5.42   | 1.05              | 4.37               | 0.00          |
|     | 단위길이당 개소수 <sup>1)</sup> (km) | 0.70   | 0.13              | 0.56               | 0.00          |

【주 1】 우리나라 전체 하천(소하천 제외)은 3,832개소(29,783 km)로, 국가하천은 61개소(3,002 km), 지방하천은 3,771개소, 26,781 km임 [2007 한국하천일람]

【주 2】 기타는 갑문(수문 포함) 시설임

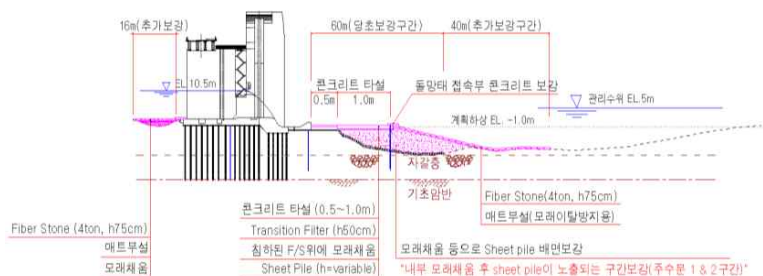
【출처】 전국 하천횡단 구조물 설치현황 및 어도 실태조사 보고서(국토해양부, 2009)

(나) 4대강 살리기사업에서 16개의 다기능보 및 107개의 하상유지공 신설

(다) 2013년부터 시행 중인 「4대강의 국가 및 지방하천 정비계획」에서 약 1,00여개의 횡단구조물에 대한 이설 및 개량 계획

##### (2) 횡단구조물(보, 하상유지공) 피해

(가) 4대강 살리기사업에서 설치된 다기능보의 경우, 준공 이후 하류 바닥보호공 세굴에 대한 논란 지속(2013년 감사원감사 (감사원, 2013), 2014년 국무총리실 4대강사업조사평가위원회 등)



<그림 1.1> 바닥보호공 피해 사례(낙동강 합천창녕보)

(국토해양부, 2012)

(나) (중소하천) 매년 하천횡단구조물의 피해 발생



2012년 9월 감천 하상유지공 유실



2009년 7월 원주천 반곡보 유실

(출처: 원주녹색연합)

<그림 1.2> 중소하천 횡단구조물 피해사례

(다) (일본의 피해사례) 총 피해 211건 중에서 바닥보호공 및 물받이공의 피해가 101건으로 집계(末次 忠司, 2009)

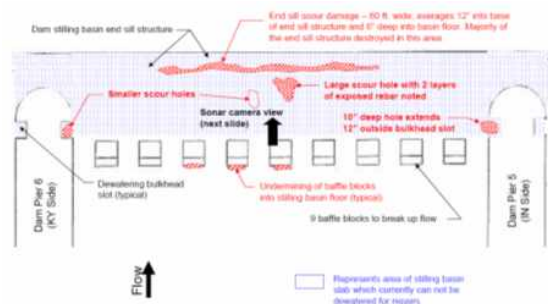
<표 1.2> 일본 피해사례

| 파괴원인   | 건수 | 호안 피해 | 바닥보호공피해 | 물받이공피해 | 본체피해 |
|--------|----|-------|---------|--------|------|
| 세굴     | 39 | 24    | 24      | 23     | 18   |
| 충격     | 25 | 13    | 8       | 18     | 16   |
| 세굴/충격  | 5  | 2     | 3       | 1      | 3    |
| 토사흡출   | 12 | 3     | 4       | 10     | 5    |
| Piping | 9  | 6     | 2       | 4      | 7    |
| 호안     | 7  | 7     | 2       | 1      | 3    |
| 기타     | 2  | 0     | 0       | 1      | 1    |
| 계      | 99 | 55    | 43      | 58     | 53   |

(라) (미국의 피해사례) 주운용 대형 보에서 반복적 피해 발생



미국 일리노이주 주운용 보의 물받이 접합부의  
세굴 피해(USACE, 2008)



미국 오하이오강 Myers 보 하류부 세굴피해

<그림 1.3> 미국의 피해사례

---

## 나. 연구개발의 필요성

- (가) 하천횡단구조물의 물받이와 바닥보호공의 안정에 대한 논란이 계속되고 있으나, 이를 과학적으로 구명할 수 있는 성능기준 부재
- (나) 국토교통부에서는 하천횡단구조물의 물받이와 바닥보호공에 대한 하천설계기준에 대한 문제점을 인식하고 이에 대한 개선안을 마련하였으나, 해외 사례 조사 위주의 결과물로서 과학적 근거 미약
- (다) 따라서 성능개선 공법 개발 등에 활용할 수 있는 수리실험을 포함한 여러 가지 방법으로 하천횡단구조물의 물받이와 바닥보호공의 성능기준을 명확히 구명할 필요가 있음

## 2. 연구개발의 중요성

- (가) 친수공간 조성, 하천지형 안정화 등의 목적으로 보와 하상유지시설과 같은 하천 횡단구조물의 수요가 지속될 전망
- (나) 횡단구조물의 안전확보를 위한 물받이 및 바닥보호공에 대한 현재 설계기준에서는 인도의 20여개 보의 사례로부터 1900년대 초반에 경험적으로 결정된 블라이(Bligh) 공식을 사용하고 있음
- (다) 하천에 설치되는 시설물은 국민의 안전과 직접 연관이 있으므로 적정 성능을 담보할 수 있는 성능 기준 제시가 필요
- (라) 이러한 부분은 공적 영역으로서 정부지원으로 수행되어야 함

## 3. 연구개발 단계(TRL에 근거하여 기술)

- (가) 이 연구에서는 하천횡단구조물 하류에서 발생하는 흐름 현상을 규명하고(TRL 2단계)
- (나) 수리실험 및 수치실험을 통하여 흐름과 구조물사이의 역학적 관계를 수립한 후 (TRL 3단계)
- (다) 대형 수리실험 및 컴퓨터 모의를 통하여 안전확보를 위한 최소 성능 기준을 제시하고자 함 (TRL 4단계)

<표 1.3> 연구개발 단계

| 구분      |       | 표기                                  | 단계별 설명                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|---------|-------|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 기초연구 단계 | TRL 1 | <input type="checkbox"/>            |  <div>TRL 1 이론적 연구단계</div> <div>TRL 2 기술적 개념정립 단계</div> <div>TRL 3 실험적 증명 단계</div> <div>TRL 4 실험실 성능평가 단계</div> <div>TRL 5 유사환경 시험 단계</div> <div>TRL 6 유사환경 기술시험 단계</div> <div>TRL 7 실제환경 시작품 데모 단계</div> <div>TRL 8 시제품 설치 및 성능시험 단계</div> <div>TRL 9 현장적용/사업화 단계</div> |
|         | TRL 2 | <input checked="" type="checkbox"/> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 실험 단계   | TRL 3 | <input checked="" type="checkbox"/> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|         | TRL 4 | <input checked="" type="checkbox"/> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 시작품 단계  | TRL 5 | <input type="checkbox"/>            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|         | TRL 6 | <input type="checkbox"/>            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 실용화 단계  | TRL 7 | <input type="checkbox"/>            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|         | TRL 8 | <input type="checkbox"/>            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 사업화 단계  | TRL 9 | <input type="checkbox"/>            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |

#### 4. 타산업 연계 및 국제협력 가능성

가. (선진국과의 국제협력) 물받이 및 바닥보호공에 대한 국제표준이 정립되지 않은 상황으로  
서 기초기술 확보를 하게 되면 주운용 보와 같이 횡단구조물이 많이 설치된 미국 및 EU  
국가 등과의 국제 협력 가능

나. (개도국에 기술지원) 본 연구결과를 바탕으로 ISO와 같은 국제표준으로 등록하여 동남아  
시아 등의 개도국 치수사업, 물통합관리사업 등과 같은 패키지 사업의 일부로 활용가능

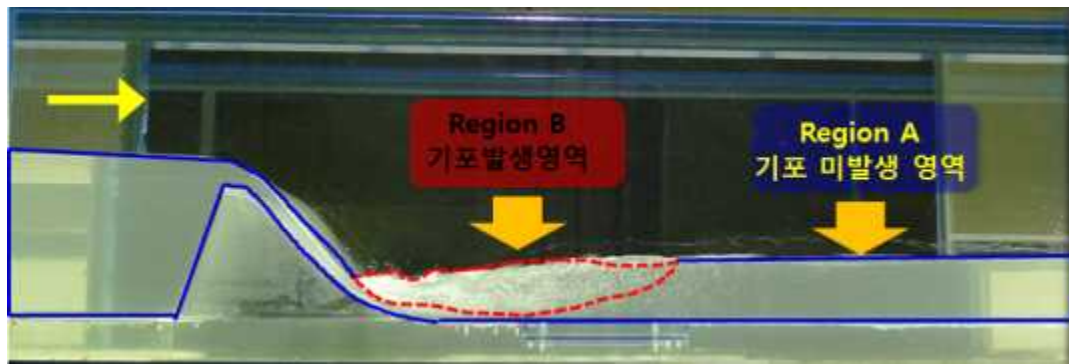
### 제2절 연구개발의 내용 및 범위

#### 1. 물받이공의 흐름특성 및 외력 조건 검토 방법

가. 검토대상 실험 조건은 월류형태(자유 월류, 오리피스 흐름), 도수형태(잠김 도수, 완전 도수,  
불완전 도수), 물받이 형태(평면, pool형, 돌기형 등) 등을 조합하여 약 20여개의 조건에 대  
하여 3차원 모의를 수행하고, 대표 흐름에 대하여 PIV와 BTV를 이용하여 흐름 특성 및  
작용력 분석

나. 입자영상유속계(Particle Image Velocimeter, PIV), 기포추적유속계(Bubble Image  
Velocimeter, BIV) 등의 최첨단 난류 유동해석 실험기법을 이용한 분석하여 외력 조건 구  
명

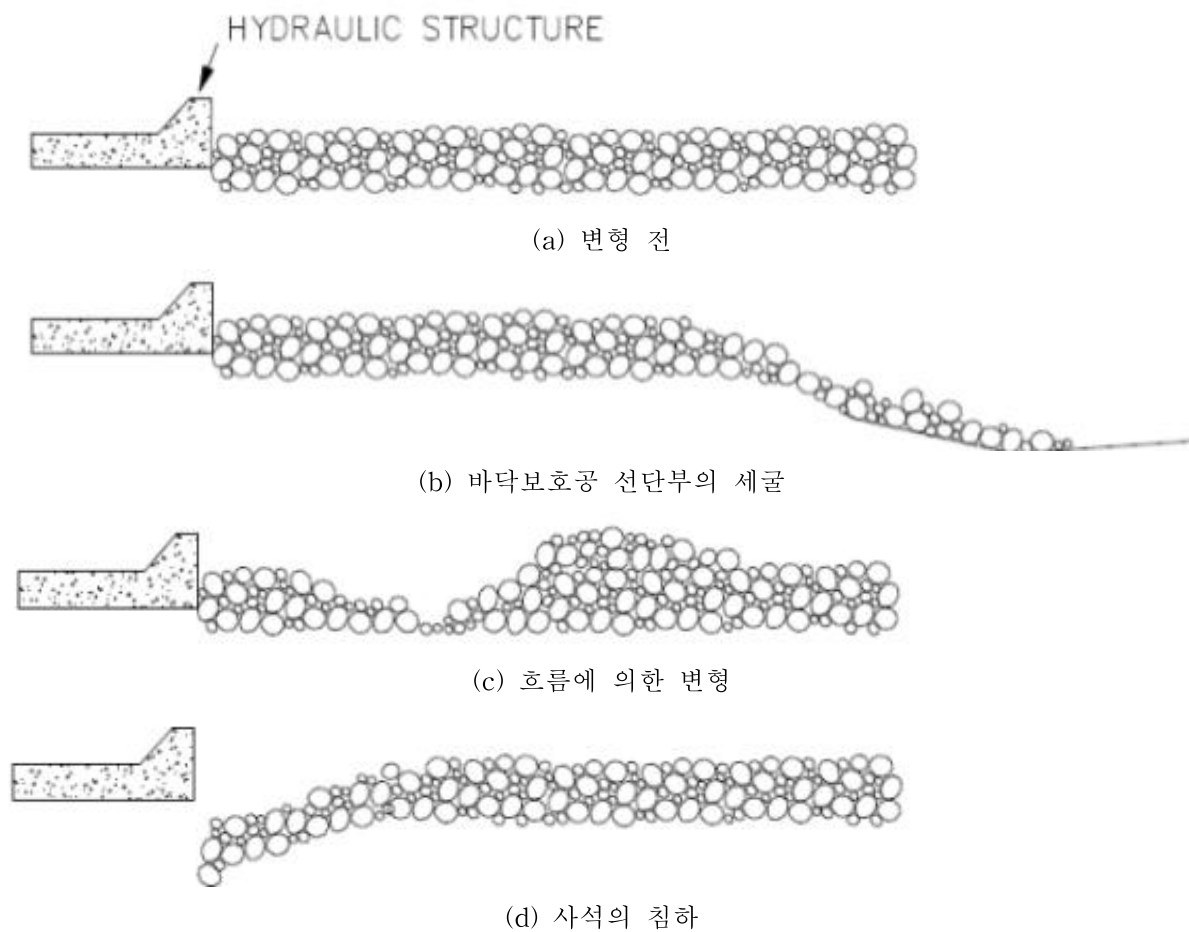
다. 물받이공 슬래브에 작용하는 압력을 직접 측정하여 난류특성과의 상관성 분석



<그림 1.4> 보 하류구간 흐름특성 분석

## 2. 바닥보호공 파괴 조건 검토

가. 바닥보호공은 선단부 세굴, 흐름에 의한 변형, 토사 흡출에 의한 사석의 침하 등에 의하여 파괴가 일어남



<그림 1.5> 바닥보호공 파괴형태

나. 3차원 모의를 통하여 사석 저면 유사의 흡출을 야기하는 작용력을 분석하고 사석규모 및 하상특성 등을 고려한 안정조건 제시

### 3. 대형 수리모형 실험 또는 하천 보 시공 사례를 이용한 검증

가. 대형 수리모형 실험을 통하여 개발된 성능기준에 대한 검증 실험 수행 예정

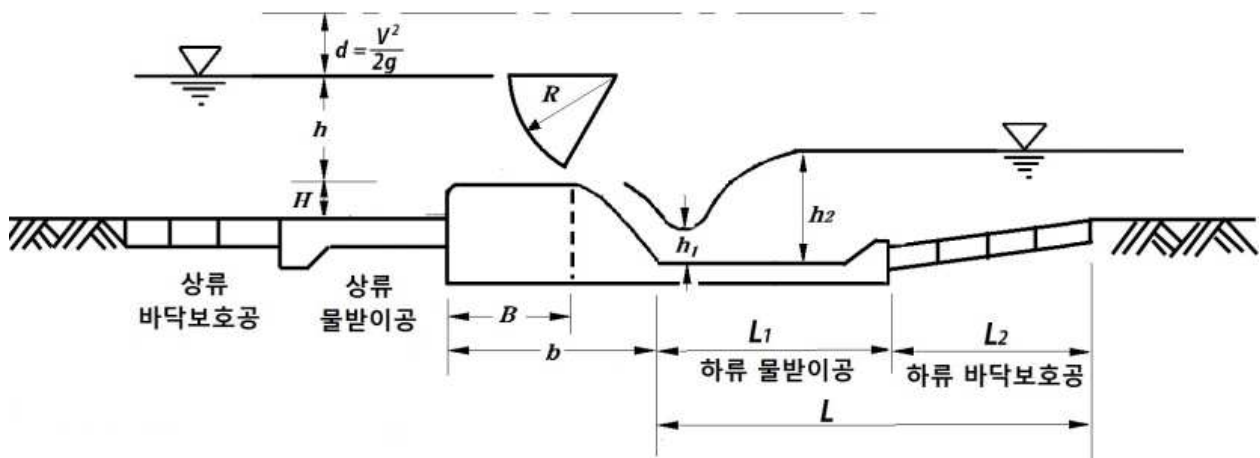
나. 하천에 시공된 횡단구조물의 피해사례에 적용하여 개발예정인 성능기준에 대한 검증 수행

#### 제3절 연구개발 목표

##### 1. 연구개발 최종목표

가. 최종목표

(1) 하천횡단구조물의 물받이공과 바닥보호공의 성능기준 제시



<그림 1.6> 하천 횡단구조물

(2) 물받이공 성능기준

(가) (현황) 현재의 설계기준에서는 도수를 발생하여야 한다는 성능과 부력에 대한 안정조건만을 제시

(나) (연구결과) 입자영상유속측정(Partical Image Velocimeter, PIV), 기포추적유속측정(Bubble Image Velocimeter, BIV) 등의 최첨단 난류 유동해석 실험기법과 SPH 등의 난류 수치모형을 이용하여, 정량화된 외력 조건(예: 양압 및 부압 조건, 난류강도 및 kinetic energy에 의한 피로하중 정량화) 제시

\* 해상풍력발전의 경우 난류강도와 평균유속을 이용한 피로하중 산정식 제시

(3) 바닥보호공 성능기준

(가) (현황) 현재의 설계기준에서는 사석의 중량에 대한 기존 경험적 공식을 나열하고 사석 공극사이의 흡출에 대해 주의를 정성적으로 언급하고 있는 수준

(나) (연구결과) PIV, BTV 등의 실험과 난류 수치모형을 통하여 난류특성과 사석의 중량에 대한 상관관계, 공극사이에서 발생하는 역학적 현상 등을 구명하여 정량적 성능기준 제시

#### (4) 최종목표의 성격 및 설정근거

(가) 이 연구는 횡단구조물의 물받이공과 바닥보호공의 설계기준을 정량적으로 제시하기 위한 것으로서

(나) 실험실 규모의 난류실험을 통한 이론 정립, 3차원 수치모의 및 원형규모의 대형실험을 통한 이론 검증을 통하여 최종 목표 달성 가능

## 2. 연차별 연구목표 및 내용

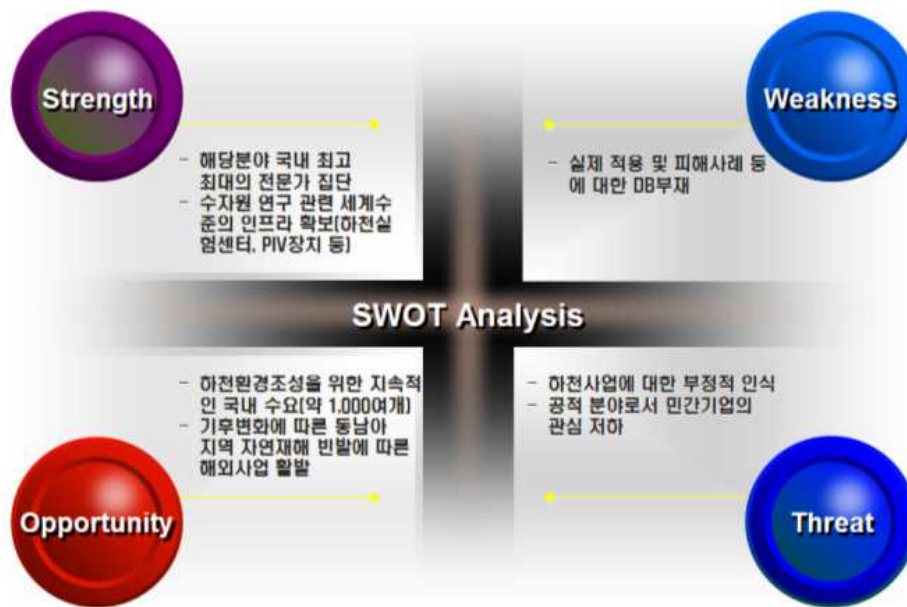
### 가. 연구목표 및 내용

<표 1.4> 연구목표 및 내용

| 연차   | 연구목표                                                                                             | 주요연구내용                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1차년도 | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 횡단구조물 하류구간의 난류 특성 및 물받이와 바닥보호공에 작용하는 외력조건 분석</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 입자영상유속계(Partical Image Velocimeter, PIV), 기포추적유속계(Bubble Tracing Velocimeter, BTV) 등의 난류 유동해석 실험 기법을 이용한 분석하여 외력 조건 구명 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 횡단구조물 하류에서는 상류(super-critical flow)가 하류(sub-critical flow)로 급격히 변화하여 에너지가 감쇄되며 거품이 형성</li> <li>- 난류흐름장의 분석은 일반적으로 PIV를 많이 이용하지만, 기포 발생영역의 측정은 곤란</li> <li>- 이에 대한 보완책으로 기포를 영상처리하여 추적하는 기법인 BTV를 병용하여 전체 흐름장에 대한 분석</li> </ul> </li> </ul> |
| 2차년도 | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 횡단구조물의 안전 확보를 위한 물받이 및 바닥보호공의 성능 평가기준 개발</li> </ul>     | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 흐름장 측정 실험 및 3차원 수치모의를 통한 물받이 및 바닥보호공의 안정조건 분석 및 성능평가 기법 개발</li> <li>- 대형 모형실험을 이용한 개발기법의 검증</li> <li>- 물받이 및 바닥보호공 설계를 위한 간략계산 프로그램 개발</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                          |

### 3. 종합결론

#### 가. SWOT분석



<그림 1.7> SWOT 분석

#### 나. 시사점 및 종합결론

- (1) 보와 하상유지시설은 하천환경 유지관리 및 친수환경 조성 등의 목적으로 지속적인 수요가 예상되지만 이와 관련한 기준은 해외기술 대비 80년대 수준
- (2) 주운용 보가 많이 설치된 유럽 및 미국의 경우에도 성능기준 등의 수립을 위한 연구가 수행되고 있지만 국제표준은 미비한 실정으로서 본 연구결과를 활용하여 국제표준을 제시하는 경우 선도기술로서 의미가 있음
- (3) 또한 기후변화에 의해 자연재해가 빈발하고 있는 동남아시아 등의 개도국을 대상으로 한 물관리통합사업과 같은 패키지 사업의 요소기술로 활용하여 해외시장 진출 가능

## 제2장. 국내외 기술 개발 현황

### 제1절 관련 분야의 국내외 연구동향 및 학술적 성과

#### 1. 국가 연구개발사업 유사연구 실적

##### 가. 연구개발과제의 중복방지를 위한 조사 및 검토결과

(단위 : 억원)

<표 2.1> 유사연구 검토

| 부처명     | 사업명                  | 과제명                       | 예산   | 비 고 |
|---------|----------------------|---------------------------|------|-----|
| 미래창조과학부 | 한국건설기술연구원<br>연구운영비지원 | 실험/실증기반 하천관리 및 대응기술<br>개발 | 11.8 |     |

- (1) (연구내용) 4대강에 설치된 다기능보의 운영/유지관리 대응기술 개발 연구로서, 실제 설치된 보(합천창녕보)에 대하여 상사율을 고려한 대축적 수리모형실험을 실시하여 상하류 하천의 하상변동을 예측

##### 나. 연구개발과제의 차별화 방안

- (1) “실험/실증기반 하천관리 및 대응기술 개발” 연구는 특정 보에 대한 대형수리모형실험을 통한 하상변동을 예측한 것으로서, 보 하류 물받이 및 바닥보호공의 일반적 흐름특성과 이에 대응하기 위한 성능기준 등에 대한 본 연구와의 차별이 있음
- (2) “실험/실증기반 하천관리 및 대응기술 개발” 연구에서 구축된 대형수리모형실험 시설은 본 연구에서 개발 예정인 성능평가 기법의 적용성 평가 등의 테스트베드로 활용 가능하므로 적극 활용할 예정임

#### 2. 관련분야의 국내외 연구동향 및 학술적 흐름 분석

##### 가. 횡단구조물 설계기준

- (1) (미국) 횡단 구조물의 설계, 보수·보강 방안 등에 대해 기존 경험식 및 간략 계산식 위주로 기준 제시(USACE, 2008)하였으며, 실제 하천의 하류 바닥보호공 및 감세공의 유지관리를 위한 표준방안 제시(USACE, 2013)
- (2) (일본) 1990년대 초반까지는 국내 설계기준과 동일하게 횡단 구조물에 대한 경험식 위주로 기준을 제시하였으나, 1997년 수리적 특성을 반영하도록 개정(國土交通省, 2008)
- (3) (유럽) 주운용 보(movable weir)에 대한 기준을 PIANC에서 제시하고 있으며, 구체적인 기준은 미국의 내용을 차용(PIANCA, 2006)

##### 나. 흐름 가시화 실험

- (1) 입자영상유속계(PIV) 관련 연구

- 
- (가) 류권규 등(2006)은 PIV를 이용하여 개수로 흐름에서 부유사의 속도를 측정
  - (나) 배재현 등(2011)은 어도설계에 적용하기 위해 PIV를 이용하여 은어의 유영력 측정
  - (다) 2000년대 이전에는 개수로 흐름의 경계층 부근에서 발생하는 고유속 측정의 어려움으로 주로 유체역학이나 혈관흐름 측정과 같은 의공학에서 주로 사용되어 왔으며, 2000년대에 개수로에 대한 적용이 본격화
  - (라) Adrian 등(2000)은 PIV를 이용하여 개수로흐름에서 경계층 흐름을 측정하였으며, 고유구조(coherent structure)를 가지고 있음을 규명
  - (마) Kadota 등(2007)은 침수 조건의 군말뚝에 대한 측정을 통하여 원기둥 주변의 와구조 규명
  - (바) Sanjou와 Nezu (2009)는 다층 PIV(multi-layer PIV)를 이용하여 만곡수로 내측과 복단면 직선수로의 홍수터 제방에서 발생하는 이차흐름의 발생을 확인
  - (사) Herlina와 Jirka (2008)는 PIV와 LIF(laser-induced fluorescene)을 이용하여 유속장과 용존산소 농도를 동시에 측정

## (2) 다상흐름 측정 관련 연구

- (가) 국내의 하천 및 해안의 다상흐름에 관한 실험적 연구는 전무한 실정으로서, 이는 수치적 연구에 비해 많이 뒤쳐져 있는 국내 실험적 수리학 연구의 상황과 관련이 있으며, 특히 다상흐름의 경우 기존 측정기법과 다른 개념의 연구가 필요하여 접근이 쉽지 않음
- (나) 국외 다상흐름에 관한 실험적 연구는 기계공학분야에서 주로 이루어지고 있으며, 토목수리분야의 경우, 개수로에서 발생하는 기포연행, 도수, 쇄파의 기포분율에 관한 연구가 주로 수행되고 있음
- (다) 관련 연구는 다상흐름의 기포분율(전체흐름 대비 기포 비율)에 대한 내용이 주를 이루고 있으며, 기포유속에 대한 연구는 측정기법 적용의 어려움으로 간헐적으로 발표되고 있음
- (라) 영상기법을 활용한 다상흐름의 경우 광원 사용에 따른 다상 경계의 가시화에 집중되고 있으며 적절한 광원과 측정영역 크기에 대한 상관관계에 대한 연구에 대한 연구도 다수 소개되고 있으며, 광섬유의 경우 침단 접촉면의 변위 및 매질에 대한 반응을 활용한 연구가 소개되고 있음
- (마) 기포분율 및 기포유속은 다상흐름 분석에 있어 매우 중요한 부분으로서 전기전도를 이용한 기존 기법을 개선한 연구에 대한 필요성이 증가하고 있으며, 향상된 기법 및 분석결과 제시를 통한 선도적 연구 수준 확보 가능

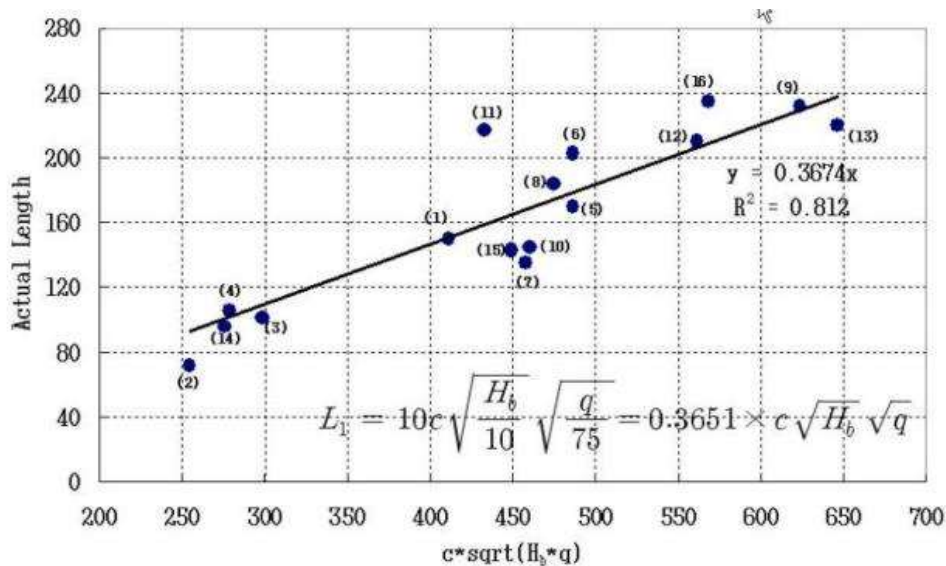
## 제2절 국내외 관련 기술 특허 동향

### 1. 하천 횡단구조물의 물받이 및 바닥보호공 관련 국내외 설계기준 비교

#### 가. 물받이 관련

(1) (국내) 하류측 물받이 길이 결정방법으로 블라이 공식을 제시

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



<그림 2.1> 블라이 공식 결정 배경

(2) (일본) 1997년까지 블라이공식을 사용하였으나, 블라이 공식은 한계(침투 파괴 방어의 목적으로서 월류수의 길이를 반영하지 못함)가 있어 월류수의 낙하길이를 간단하게 계산할 수 있는 Rand 공식으로 대체(국토교통성, 2008)

(3) (미국) 물받이에서 도수발생을 고려하여 설계

<표 2.2> 물받이에 대한 각국 설계기준 비교

|             |        | 하천설계기준-해설                                                                    | 농업생산기반<br>정비사업<br>설계기준-취입보                                                                                                           | 하천사방기술기준                                                                                                    | Hydraulic Design of<br>Navigation Dam |
|-------------|--------|------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| 고<br>정<br>보 | 기능     | · 월류에 의한 보 상하류의 세굴 방지                                                        | · (상류측) 상류측 하상세굴 방지<br>· (하류측) 월류수에 의한 보 하류부의 세굴과 침투수에 의한 파이핑 방지                                                                     | · 본체를 월류하는 물이나 전석(轉石)에 의한 직접충격에 의한 구조물의 파손 방지                                                               | -                                     |
|             | 상류측 길이 | · 3~5m 정도                                                                    | -                                                                                                                                    | -                                                                                                           | · 50 ft 이상                            |
|             | 상류측 두께 | · 하류측 물받이 두께의 1/2~1/3 정도                                                     | · 하류측 물받이 두께의 1/2~1/3 정도                                                                                                             | -                                                                                                           | -                                     |
|             | 하류측 길이 | · 블라이 공식<br>$L_2 = 2d_1 F_1^{1.5}$<br>· 국립건설시험소 공식<br>$L_2 = 2d_1 F_1^{1.5}$ | · 블라이 공식<br>$L_2 = 2d_1 F_1^{1.5}$                                                                                                   | · Rand 식<br>$L_2 = 2d_1 F_1^{1.5}$                                                                          | · 물받이에서 잠긴도수가 발생하도록 길이와 표고결정          |
|             | 하류측 두께 | · 블라이 공식<br>$L_2 = 2d_1 F_1^{1.5}$                                           | · 블라이 공식<br>$L_2 = 2d_1 F_1^{1.5}$                                                                                                   | $L_2 = 2d_1 F_1^{1.5}$<br>* $F_s$ 는 안전율로서 4/3인 경우, 블라이공식과 동일<br>* $L_2 = 2d_1 F_1^{1.5}$ 은 물받이에 작용하는 최대 양압력 | -                                     |
| 가동보         |        | · 고정보와 같은 방법으로 설계하되 그 길이는 일반적 으로 고정보의 물받이 및 바닥보호공 길이의 50 % 정도                | · 보 상하류부의 세굴방지, 침투수에 의한 파이핑 방지, 양압력에 대해 안전하도록 적절한 규모로 결정<br>· (길이) 고정보의 1.5배<br>$L_1 = 0.9 \cdot C \cdot \sqrt{H}$<br>· (두께) 고정보와 동일 | · 고정보와 동일                                                                                                   | -                                     |

## 나. 바닥보호공 관련

- (1) (국내) 블라이 공식 사용
- (2) (일본) 도수발생 및 흐름안정을 고려한 설계절차 제시
- (3) (미국) 하류 공액수심을 고려하여 결정

<표 2-3> 바닥보호공에 대한 각국 설계기준 비교

|             |     | 하천설계기준-해설                                                                                                       | 농업생산기반<br>정비사업<br>설계기준-취입보                                                  | 하천사방기술기준<br>(일본)                                                                                                                                | Hydraulic Design of<br>Navigation Dam                   |
|-------------|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| 고<br>정<br>보 | 기능  | · 유속을 약화시켜 하<br>상의 세굴 방지하고<br>보의 본체 및 물받<br>이 보호                                                                | · 급류하천(5가지)과<br>환경사 하천으로 구<br>분하여 도수 등을<br>감안한 설계절차 및<br>블록의 제원 결정<br>방법 제시 | · (구조) 유속을 약화<br>시켜 유수를 조절하<br>는 작용을 가지고<br>본체 및 수고를 보<br>호하는 것을 목적으<br>로 하며, 원칙적으<br>로 굴요성을 가지는<br>구조<br>· (설계) 강성, 조도,<br>안정성, 흡출 등에<br>대해 설명 | · 하류공액수심( $d_2$ )의<br>4~27배<br>* 두께 및 사석크기<br>에 대한 식 제시 |
|             | 길이  | · 블라이공식<br>$L_2 = 0.66 Cf \sqrt{Hq} - L_1$<br>* $f$ 는 안전율로서 고<br>정보1.0, 가동보<br>1.5<br>* 만곡하천의 경우,<br>충분한 안전율 고려 |                                                                             |                                                                                                                                                 |                                                         |
|             | 가동보 | · 고정보와 같은 방법<br>으로 설계하되 그<br>길이는 일반적으로<br>고정보의 물받이 및<br>바닥보호공 길이의<br>50 % 정도                                    |                                                                             |                                                                                                                                                 |                                                         |

## 다. 특허 동향

- (1) 횡단구조물의 물받이와 바닥보호공의 성능 평가에 대한 원천기술 확보를 위한 연구로서 별  
도의 특허 동향은 없음
- (2) 단, 흐름 가시화 부분과 관련하여 다상흐름 측정을 위한 광학적 전기장치(그림자기법, 광섬  
유) 관련 특허를 분석하기 위해 “그림자기법(shadowgraphy)”, “광섬유 유속 측정(optical  
fiber flow velocity measurement)”, “다상흐름 측정(multi-phase flow measurement)” 등을  
검색하였으며, 관련 특허 128건 확인하였으며, 본 과제에서는 기존 특허와 별도의 기술 적  
용예정

### 제3절 국내외 시장분석 및 산업동향

1. (국내시장) 4대강 사업시 다기능보 16개와 하상유지공 107개가 설치되었으며, 「4대강의 국가 및 지방하천 정비계획」(국토해양부, 2012)에 의하면 약 1,000여개 보의 이설 및 개량이 계획

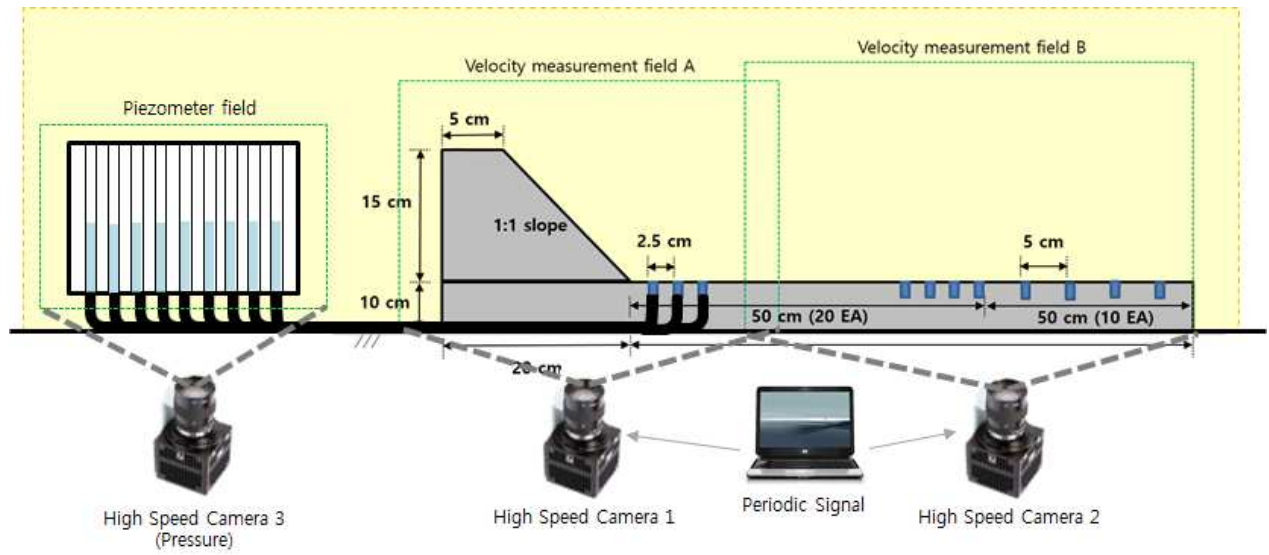
<표 2.4> 국가 및 지방하천 횡단구조물 관련 계획

|     | 설치   |       | 이설 및 개량 계획*<br>(국가하천/지방하천) | 비고 |
|-----|------|-------|----------------------------|----|
|     | 다기능보 | 하상유지공 |                            |    |
| 한강  | 3    | 15    | 3/146                      |    |
| 낙동강 | 8    | 54    | 11/287                     |    |
| 금강  | 3    | 30    | 6/231                      |    |
| 영산강 | 2    | 8     | 1/195                      |    |
| 계   | 16   | 107   | 21/959                     |    |

\* 출처 「국가 및 지방하천 종합정비 마스터플랜」(국토해양부, 2012)의 계획

2. (해외시장) ISO 등의 국제 표준에는 물받이와 바닥보호공에 대한 별도의 표준이 없으므로 본 연구를 통하여 개발될 원천기술에 근거하여 향후 ISO 등의 표준으로 적용가능하며, 이렇게 되는 경우 동남아시아 등의 개도국 치수사업, 물통합관리사업 등과 같은 패키지 사업의 일부로 활용가능





<그림 3.3> 고정보 및 측정장비 모식도



<그림 3.4> 물받이공 하부에 연결된 튜브



<그림 3.5> 피에조미터(Piezometer)



<그림 3.6> 압력계(pressure gauge)

### 가. 실험조건

고정보 하류 물받이공 및 바닥보호공에서 흐름 및 압력 특성을 검토하기 위해 총 10 가지의 다양한 흐름조건이 검토되었다 (표 3.1 참조). 4 가지 유량조건이 검토되었으며 도수(hydraulic jump)가  $x = 0.2 \text{ m}$ 와  $x \approx 0.335 \text{ m}$  사이에서 발생하도록 하류단 수위( $h_d$ )를 조절하였다. 또한, 잠긴도수 조건(Case 1, 4)의 흐름 및 압력특성이 검토되었다.

<표 3.1> 수리실험조건

| Case | Q (m <sup>3</sup> /s) | H (m) | $h_d$ (m) | 비고    |
|------|-----------------------|-------|-----------|-------|
| 1    | 0.0021                | 0.278 | 0.1760    | 잠긴 도수 |
| 2    |                       |       | 0.1497    |       |
| 3    |                       |       | 0.1469    |       |
| 4    | 0.0036                | 0.287 | 0.1760    | 잠긴 도수 |
| 5    |                       |       | 0.1640    |       |
| 6    |                       |       | 0.1630    |       |
| 7    | 0.0044                | 0.294 | 0.1748    |       |
| 8    |                       |       | 0.1719    |       |
| 9    | 0.0055                | 0.301 | 0.1838    |       |
| 10   |                       |       | 0.1818    |       |

## 나. 유속측정장비 및 기법

횡단구조물 고정보 주변 및 하류의 복잡한 난류 유동장을 취득하기 위해 비접촉식 측정방법인 영상기법(image technique)을 활용하였으며 이 연구에서는 PIV(particle image velocimetry)와 BIV(Bubble image velocimetry) 기법을 적용하였다.

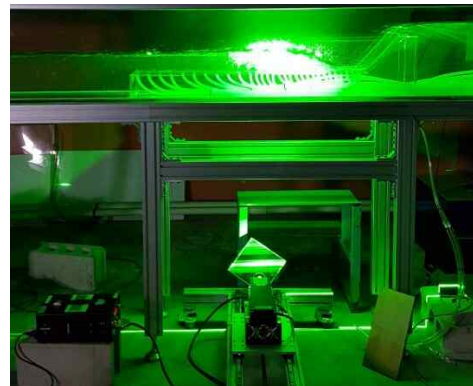
고정보 하류에 도수가 발생하면 기포가 포함된 다상흐름이 발생하므로 PIV와 BIV 기법을 병용하여야 한다. PIV 기법으로 기포가 발생하지 않는 영역의 유동장 측정이 가능하지만, 기포가 다수 포함된 영역은 레이저의 빛 산란과 매질의 차이 및 곡률에 따라 빛 굴절 및 반사 등으로 인하여 측정되기 어렵다. 빛 산란을 없애는 방안으로 그림자 기법을 이용한 측정기법이 적용되어왔으며 이 연구에서는 기포의 흐름을 측정할 수 있는 BIV 기법을 적용하여 복잡한 도수영역의 흐름을 측정하였다.

### (1) PIV 측정

PIV 시스템은 화상을 취득하기 위한 고속카메라와 입자를 가시화 하기 위한 레이저로 구성된다. 고속카메라는 1028×1024 픽셀의 해상도와 8 bit의 분해능을 가지고 있다. 이 연구에 사용된 고속카메라로 초당 최대 2000 Hz의 유속장 측정이 가능하며 실험에서는 50 Hz를 적용하였다. 이 실험의 측정영역을 한 대의 카메라로 측정하기에는 한계가 있기 때문에 두 대의 고속카메라를 측정대에 설치하여 동시에 촬영하였다(그림 3.7 참조). 유속장 취득을 위해 사용된 입자로서 비중 1.02, 직경 40  $\mu\text{m}$ 인 입자를 이용하였으며 초기에 상류에서 주입하였고 이후에는 순환되도록 하였다. 레이저로서 최대 출력 8W의 연속형 레이저(continuous laser)를 사용하였으며, 고정보 하류의 2차원 연직방향 유속장을 측정하기 위해 수로 바닥면으로부터 레이저 광원을 투과시켜 입자를 가시화 시켰다(그림 3.8 참조).



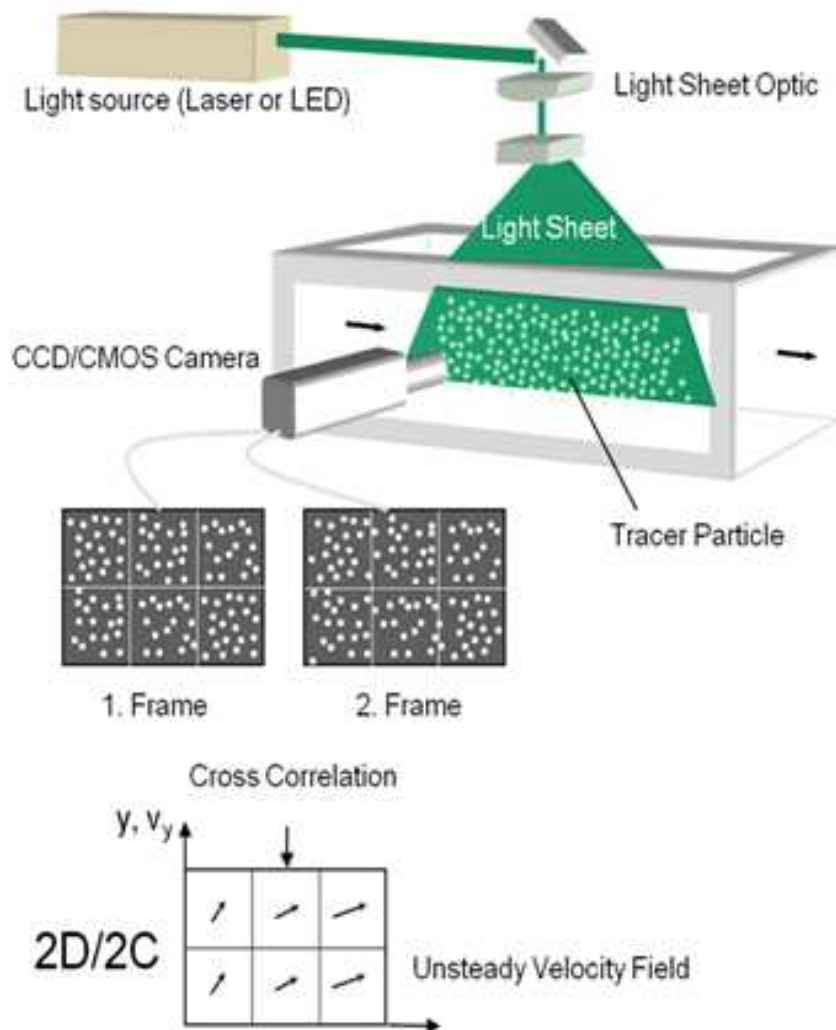
<그림 3.7> 고속카메라



<그림 3.8> PIV 레이저 광원

PIV는 유동장 정보를 눈으로 볼 수 있게 하는 유동 가시화(flow visualization) 기술과 깊은 관련이 있다. 유동 가시화는 유체의 전달 현상(transport phenomena)을 눈에 보일 수 있도록 하는 기법으로, 속도, 압력, 밀도, 그리고 온도와 같이 우리 눈에 직접 보이지 않는 유동 정보의 공간 분포를 어떤 범위의 시간과 공간에서 눈에 보이도록 하는 실험 방법이다. PIV는 이렇게 가시화된 유동장을 영상 또는 화상(사진이나 비디오 등)으로 만들어 속도 분포를 측정하는 방법이다.

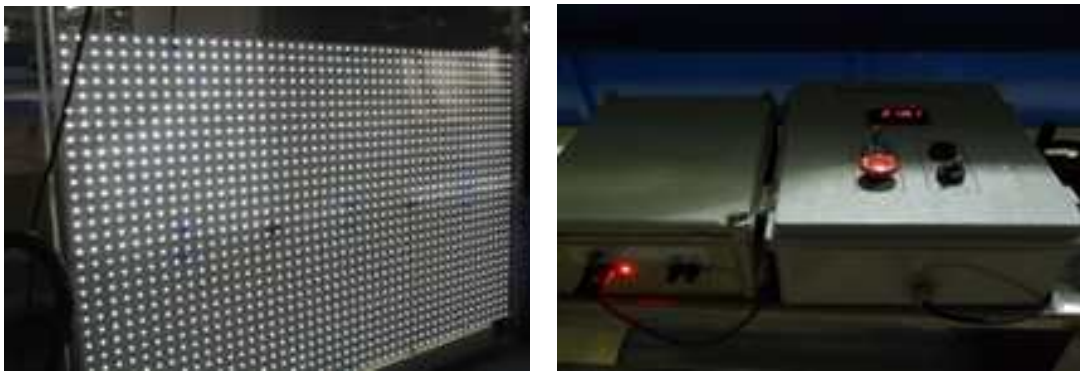
PIV의 기본 원리를 그림 3.9로 간략히 나타낼 수 있다. 실험 수로에 유체와 비중이 비슷한 추적자(tracer particle)를 주입한 후 평면 레이저광(laser sheet)을 조사하면, 추적자들이 빛을 받아 반짝이게 된다. 이 장면을 필름 카메라나 CCD 카메라, 비디오 카메라와 같은 영상 입력 장치를 이용하여 영상으로 만든다. 먼저 시각  $t$ 에서 한 장의 영상을 만들고, 짧은 시간 뒤인 시각  $t' = t + \Delta t$ 에 또 하나의 영상을 만들어 이 두 영상을 하나의 쌍으로 하여 분석하게 된다. 영상 분석 기술(image processing)을 이용하여 한 입자 또는 여러 개의 입자가 영상 내에서 어느정도 움직였는지 계산하고(영상 변위,  $\Delta S$ ), 이 영상 변위에 영상의 축척을 곱하여 환산하면 입자 또는 입자군의 물리적 변위( $\Delta S$ )를 구할 수 있다. 이 물리 변위를 두 사진 사이의 시간간격으로 나누면 한 입자 또는 여러 개의 입자의 속도를 산출할 수 있다.



<그림 3.9> PIV의 원리

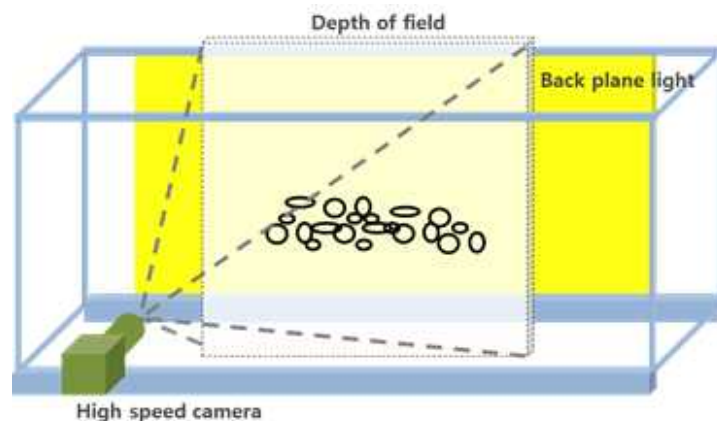
## (2) BIV 측정

BIV 측정은 물과 공기로 이루어진 다상 기포 흐름에서 기포의 속도영역을 획득하기 위해 사용되는 측정기법으로 도수로 인해 발생하는 기포영역을 측정하는데 적합하다. 앞서 설명된 PIV 기법은 유체 내 작은 입자의 거동을 연속된 영상촬영으로 연속화상을 분석하여 입자의 속도를 계산하는 기법이다. 반면, BIV 기법은 측정대상을 가시화하여 얻어진 화상분석을 통하여 유속을 분석하는 방법이다. BIV 기법에 사용되는 측정 장치는 PIV 기법과 같이 고속카메라와 광원으로 사용되는 면광부분으로 구분할 수 있다. BIV 측정에 사용된 고속카메라는 PIV 측정에 사용된 카메라와 동일하며 50 Hz로 측정하였다. 그림 3.10은 면광을 위한 LED 칩으로 패널에 등간격으로 배치하였으며, 전면에 면광을 균등하게 발생시키기 위해 흰색의 불투명 아크릴판을 위치시켰다. 광원 신호의 입출력이 가능하도록 동기화 시스템을 설치하여 조도를 조절할 수 있도록 하였다(그림 3.10 참조).



<그림 3.10> LED 회로판 및 동기화 시스템

BIV 기법은 빛 산란을 막기 위해 빛을 투과하지 않고 측정 카메라 반대편에 광원을 위치하여 경계면의 형상을 가시화하는 기법이며, 이와 같은 기법을 통해 기포의 그림자를 연속촬영하고 그 연속 이미지 사이의 상호관계 해석을 통하여 기포의 속도를 계산한다(그림 3.11 참조).



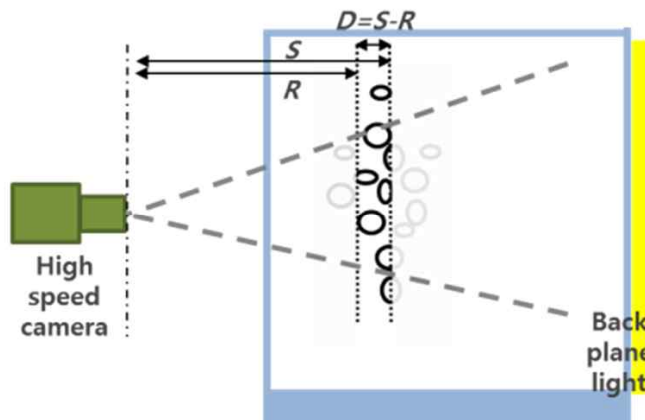
<그림 3.11> BIV 개념도

흐름의 유속이 큰 경우 흐름의 관성적 거동 대비 기포부력에 의한 거동이 미미해져 주위의 유체 흐름을 동시에 추정할 수 있다. 이 연구에 사용된 LED는 점멸신호에 대한 발광의 반응이 빨라 짧은 시간에 두화상을 녹화해야하는 영상유속기법에 적합하며 LED 기술의 발달로 빛의 세기가 강해져 기포밀도가 높은 다상흐름에도 적용이 가능하다. 반도체 칩이 부착된 회로 판이 5 mm 안팎의 두께를 가지므로 2차원 흐름에 대하여 방수막 내 LED 회로를 삽입하여 수조 안에 설치할 경우, 얇은 너비로 인해 흐름의 방해를 최소화하며 피사체 심도(depth of field) 두께 감소와 함께 측정된

화상에 만족스러운 음영차이를 만들 수 있다. BIV 기법에 대한 자세한 설명은 한국건설기술연구원 (2014)를 참조할 수 있다.

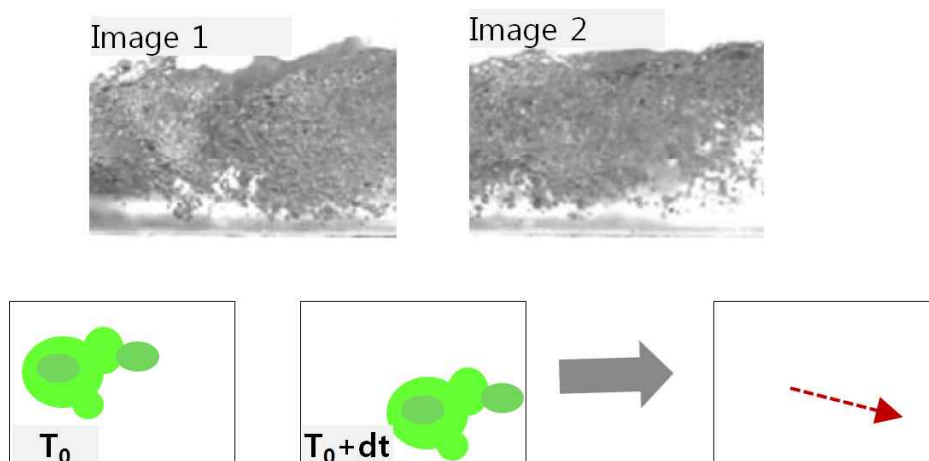
BIV에 사용되는 광원은 경계면을 가시화하고 배경 밝기가 일정하게 유지되도록 등분포 면광이어야 한다. 면광원의 등분포 정도를 높이고 일정한 빛을 제공하기 위해 안정적인 광원이 필요하다. 이 연구에 사용된 LED의 경우, 작은 반도체칩을 회로판에 일정한 간격을 두고 배치하여 면광을 발생시키는데, 반투명 흰색판과 점광원간의 거리를 매우 짧게 설치할 수 있다는 장점이 있다. 또한, LED는 저전압 직류를 사용하므로 수리실험에서 발생할 수 있는 안전문제를 예방할 수 있다.

BIV 기법에 의한 화상측정으로 카메라에 들어오는 3차원적인 모든 피사체를 측정하기 때문에 2차원적으로 보여주는 화상에서 원근효과가 포함된다. 측정지점의 피사체만이 화상이 되는 PIV 기법과 달리 BIV 기법에서는 이러한 원근효과가 제거되어야 한다. 이를 제거 또는 최소화 하기해 피사계 심도의 개념을 적용하여 오차 근거 및 정확한 측정이 가능하다. 피사계 심도 내 위치한 피사체는 선명한데 비해 외부에 위치한 피사체는 희미하거나 뿌옇게 나타난다. 유속분석에 사용되는 상관관계는 희미한 화상이 아닌 선명한 화상에 근거하여 계산이 진행되므로 선명한 화상이 측정되는 피사계 심도 위치를 측정지점으로 결정 할 수 있다. 피사계 심도의 개념은 그림 3.12와 같다.



<그림 3.12> 피사계 심도 개념

BIV 측정 기법은 유체 내 입자가 아닌 기포 및 물-공기 위상경계면을 추적자로 하여 기포 흐름을 추정한다. 다시 말해 상관관계가 적용되는 대상이 입자가 아닌 위상경계면이 되는 것인데, 기포 흐름 관성을 가지고 이동하는 흐름인 경우, 상대적으로 부력이 미미하여 주변흐름 해석에 사용될 수 있다. 상관관계기법의 대상의 차이를 그림 3.13에 도시하였다.

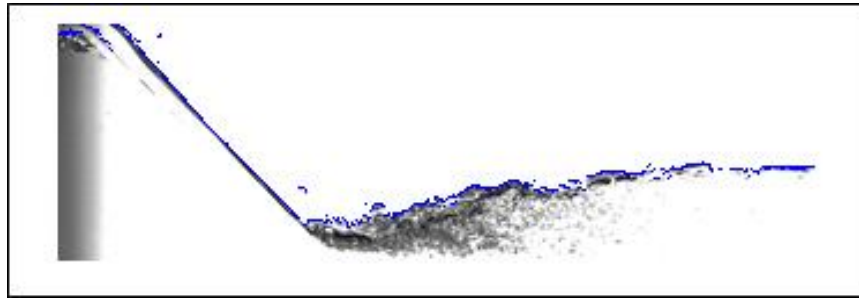


<그림 3.13> 상관관계를 활용한 유속분석

## 다. 수위 및 압력 측정

### (1) 수위 측정

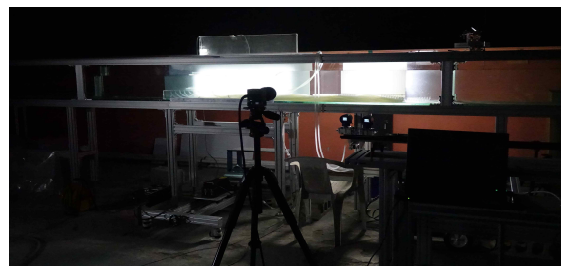
수위측정을 위한 일반적인 계측기로는 포인트 게이지, 초음파 수위계, 파고계 등이 있다. 포인트 게이지는 어떤 위치의 수위를 측정할 때 사용되는데, 도수가 발생하는 흐름구간에서 수위를 측정하거나 시간변화에 따른 수위변동을 측정하는데 한계가 있다. 초음파 수위계 및 파고계는 시간에 따라 수위변동 측정이 가능하지만 강한 물보라가 발생하는 도수 흐름의 수위측정에 어려움이 있다. 이 연구에서는 BIV 기법으로 측정된 영상을 활용하여 수위를 추출하는 방식으로 순간수위 값을 취득하였다(그림 3.14 참조). 이러한 접근방법으로 시간에 따른 수위변동을 쉽고 정확하게 값을 취득할 수 있다. 그림 3.14에 도시된 바와 같이 파란색 점들이 각 지점의 순간의 수위이다.



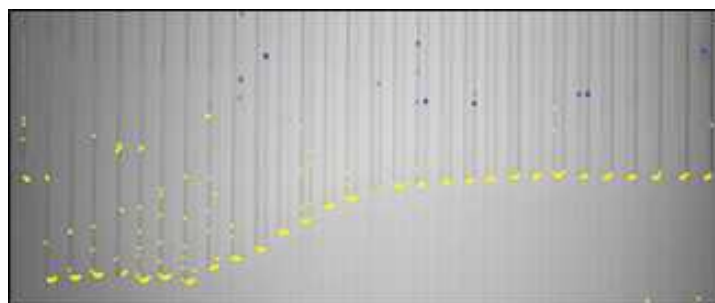
<그림 3.14> 영상기법을 이용한 수위측정

### (2) 압력 측정

고정보 물반이공의 바닥면에 작용하는 압력을 측정하기 위해 피에조미터를 설치하고 순간 압력 수두를 취득하기 위해 고속카메라를 활용하여 100 Hz의 영상을 촬영하였다(그림 3.15 참조). 영상기법을 활용하여 압력수두를 얻기 위해 피에조미터 뒷면에서 LED 광원을 이용하여 면광을 발생시키고 피에조미터의 각 유리관에서 수위를 추출하는 방식으로 데이터를 취득하였다. 그림 3.16과 같이 각 유리관의 노란색 부분이 순간수위이다.



<그림 3.15> 영상기법을 활용한 압력측정



<그림 3.16> 고속카메라로 촬영된 피에조미터

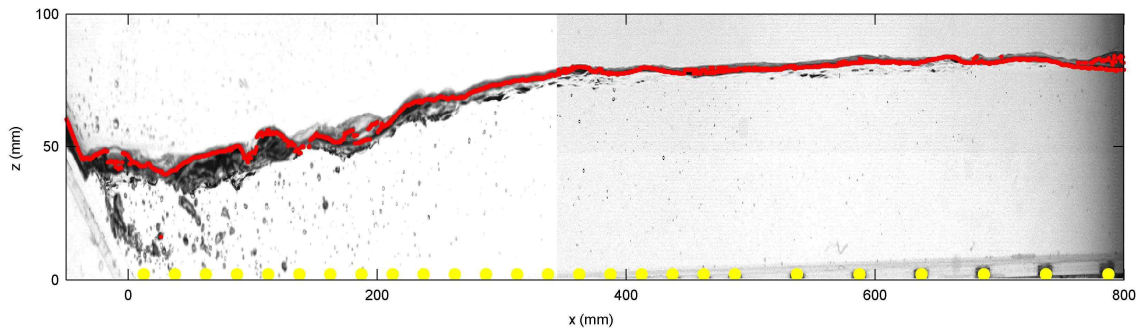
## 2. 실험결과 및 분석

수리실험에 적용된 기법을 이용하여 보 하류부 흐름의 수위, 유속, 압력을 측정하고 결과를 분석하여 측정인자 간의 상호관계를 검토하였다.

### 가. 물받이와 바닥보호공의 흐름특성

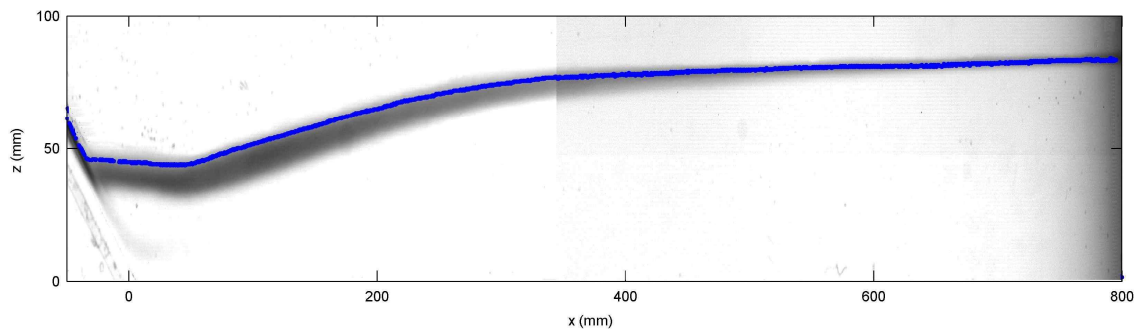
#### (1) 수위 분포

영상측정을 통한 수위 측정은 순간적인 흐름분포 특성과 함께 압력 측정지점에서의 수위 측정값을 얻을 수 있다. 그림 3.17은 Case 4의 영상에서 얻어진 순간 수위분포이다. 그림은 순간 영상에서 수면을 Digitize한 결과를 붉은 점으로 나타낸 것으로서 축에서 제시한 정량적인 수위로 변환되었다. 순간적으로 측정된 수위 값은 보 전면 및 물받이에서 수위 특성을 보여준다. 영상으로 취득한 수위는 점 측정으로 얻어진 기존의 수위결과에 비하여 순간적인 공간분포 특성의 검토가 가능하며, 특히 기포를 포함하는 도수부에서의 수면을 도시할 수 있어 간편하고 정확하게 수위 분포를 검토할 수 있다.



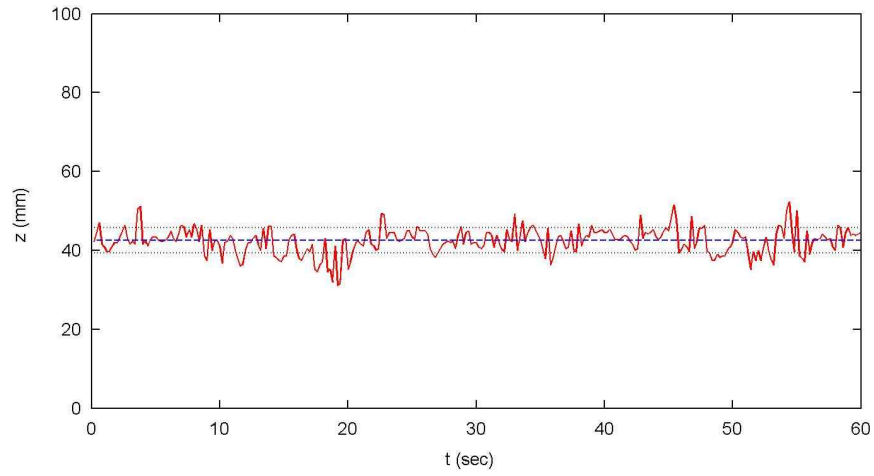
<그림 3.17> Case 4의 순간 수위분포

순간 수위분포는 각 실험 안 별로 50 Hz 영상으로부터 도출하였으며, 60초간 측정된 순간 수위를 평균하여 그림 3.18과 같이 도시하였다. 평균수위는 잠김 도수 후 완만하게 상승하는 흐름 특성을 보여주며 하류로 진행하며 일정한 수위로 수렴한다. 순간 수위분포의 경우, 배경영상은 수위도출에 사용한 해당 영상이며, 평균 수위분포를 나타내는 그림의 배경은 순간영상을 평균한 영상을 사용하였다.

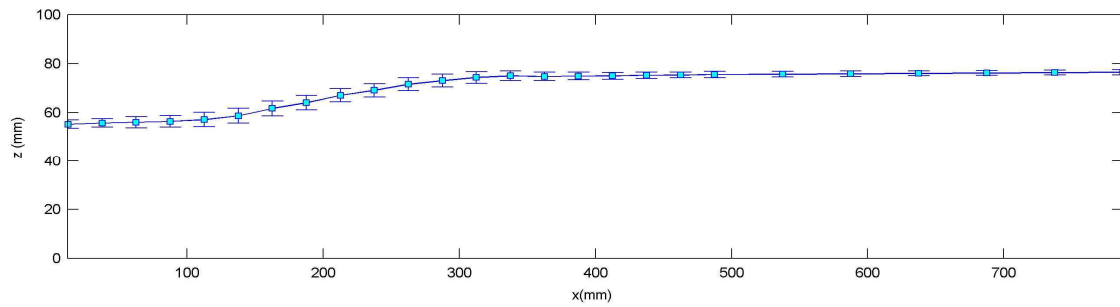


<그림 3.18> Case 4의 평균 수위분포

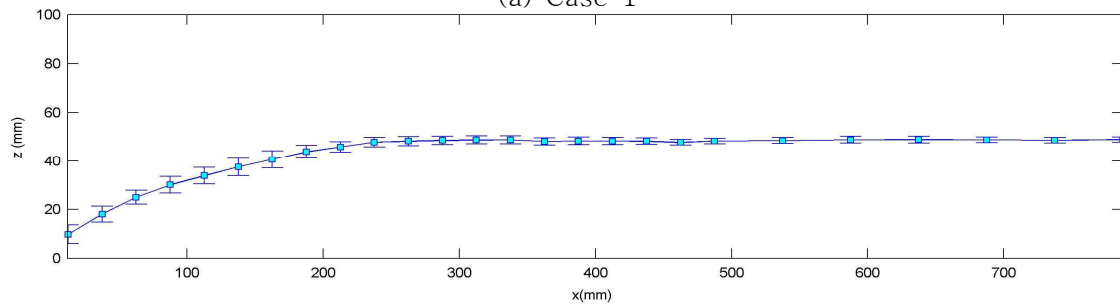
50 Hz의 측정률로 얻어진 수위 결과로부터 압력 측정지점에서 수위 변동을 추출하여 시계열 결과를 그림 3.19에 도시하였다. 그림 3.17에 표시된 노란색 점은 30개 압력 측정지점을 나타낸다. 그림 3.19의 결과는 압력 측정지점 중 보 끝단에 가장 가까운 지점에서의 Case 4 수위 시계열 분포이다. 시계열 결과로부터 평균수위 및 수위 변동성에 대한 통계적 분석을 수행하였다. 그림에서 빨강 실선은 시계열, 파랑 점선은 평균값, 검정 점선은 수위 변동성분의 제곱평균제곱근(root mean square, RMS)값으로서 변동성을 나타낸다.



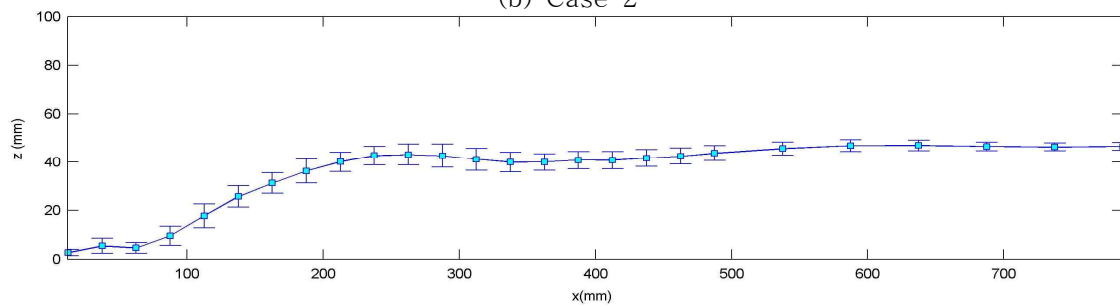
<그림 3.19> Case 1의 보 끝단 주변 수위분포: 시계열(빨간), 평균(파랑), 편차(검정)



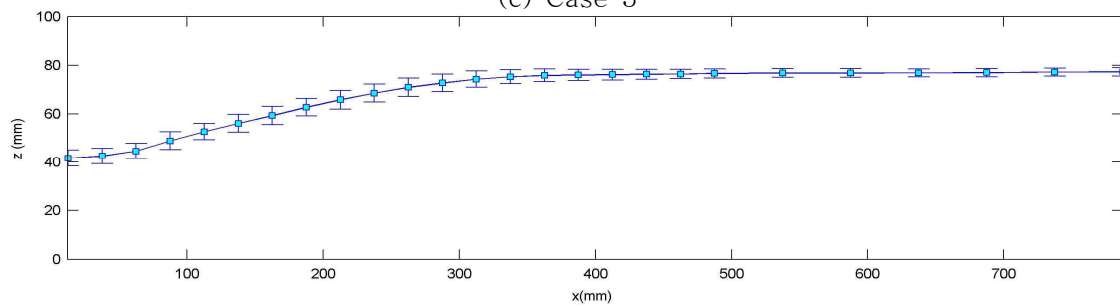
(a) Case 1



(b) Case 2

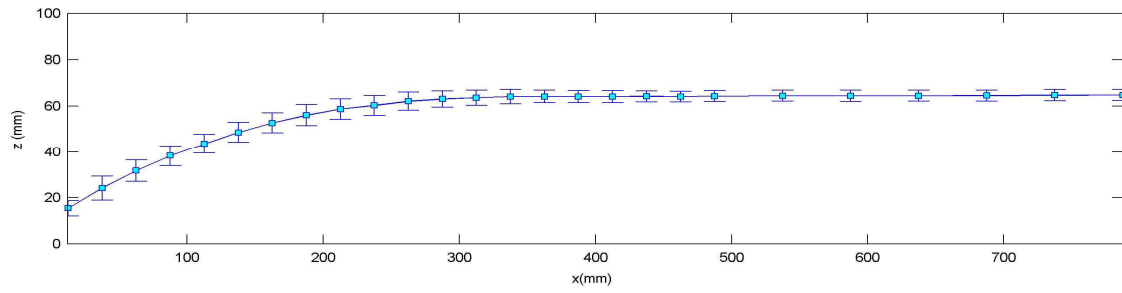


(c) Case 3

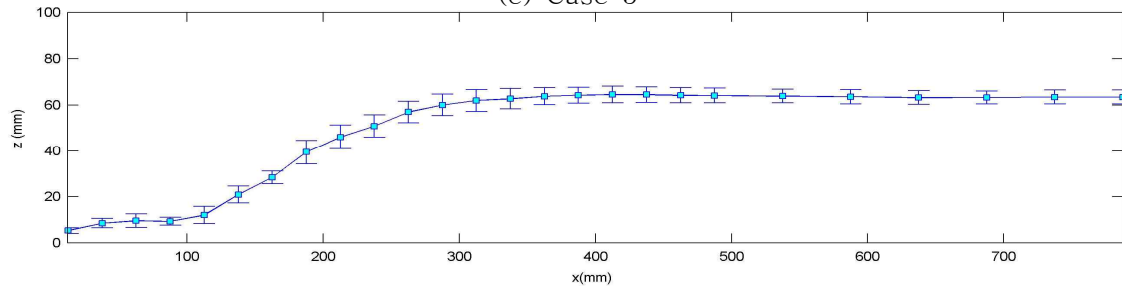


(d) Case 4

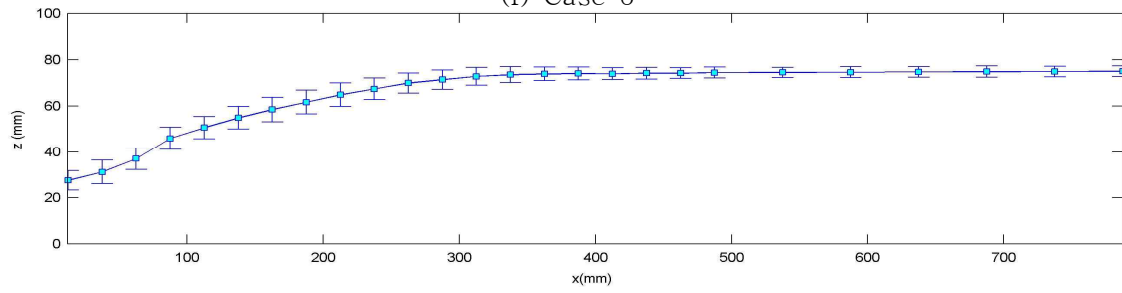
<그림 3.20> 압력 측정지점에서의 수위 특성: 평균수위 및 변동성분 제공평균제곱근



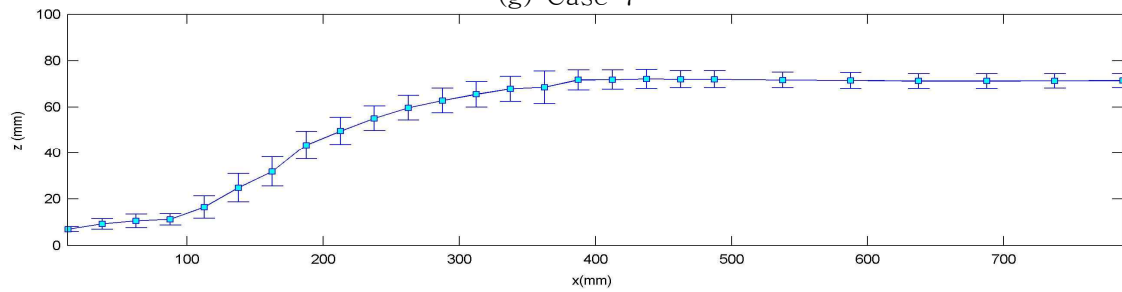
(e) Case 5



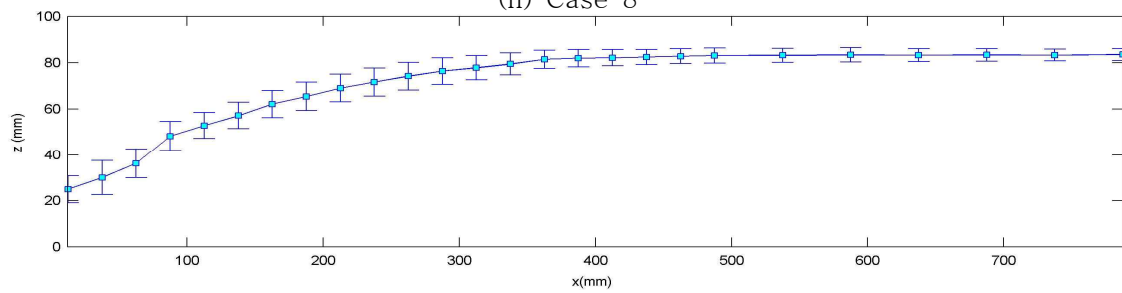
(f) Case 6



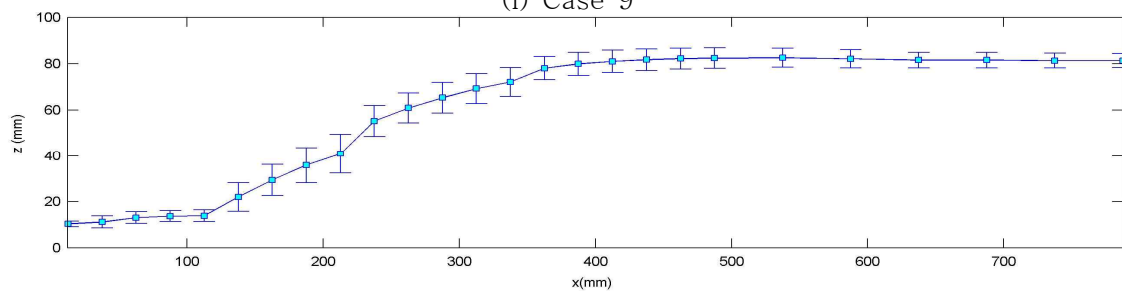
(g) Case 7



(h) Case 8



(i) Case 9

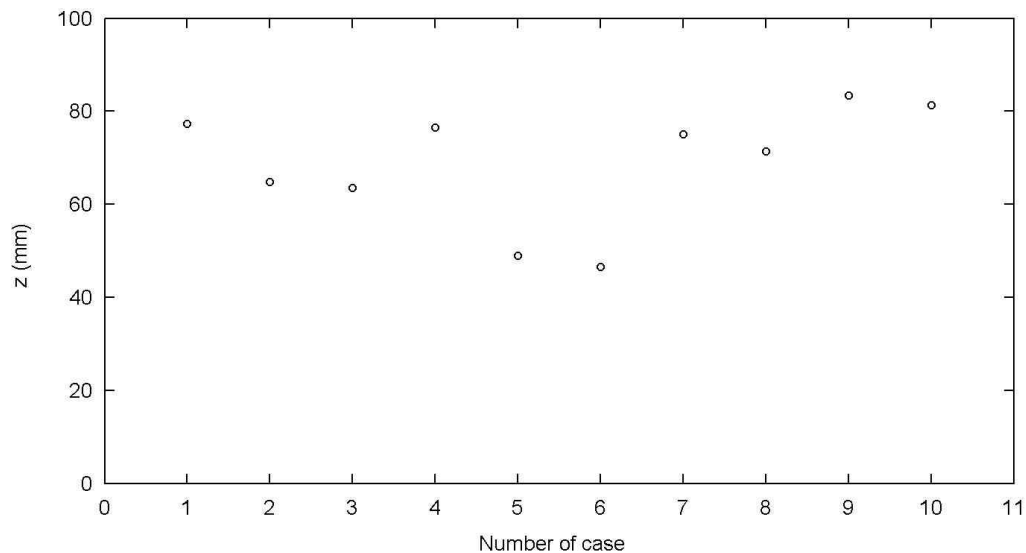


(j) Case 10

<그림 3.20> 압력 측정지점에서의 수위 특성: 평균수위 및 변동성분 제곱평균제곱근(계속)

그림 3.20에서 제시된 결과로부터 수위 변동성은 유량이 작은 경우에 비해 큰 유량에 해당하는 흐름의 수위 변동성이 상대적으로 커져 가는 것을 알 수 있다. 유량의 크기는 실험조건에서 제시된 바와 같이 4개의 유량조건을 대상으로 하였다. 잠김 도수가 일어나는 2개의 작은 유량에서는 상대적으로 수위 변동성이 작게 나타났으며, 공통적으로 발생한 도수현상에서 비교하였을 때, 도수가 보 끝단 및 보 높이만큼 떨어진 하류에서 일어났을 때 유량이 증가하면서 변동성이 증가하는 것을 알 수 있다. 수위 변동성은 보 하류보호공의 바닥에서 측정된 압력 변동성분과 비교하여 그 상관관계를 검토하고자 한다.

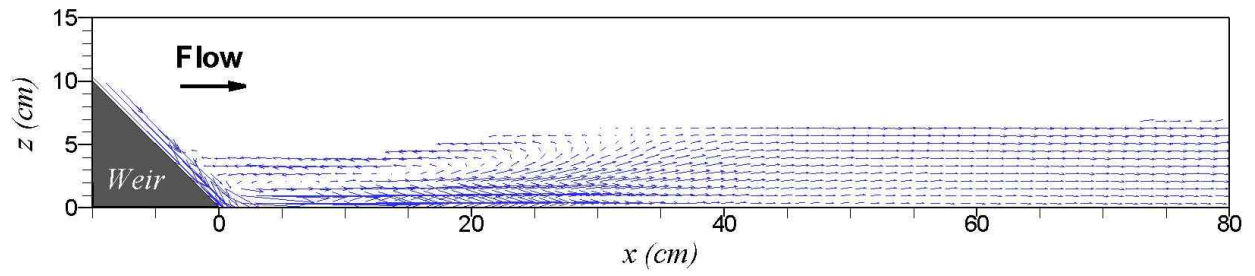
그림 3.21은 모든 실험안의 영상에서 취득된 가장 하류부분의 압력 측정지점에서의 수위를 나타내는데 이는 실험조건에서 제시한 수위 값과 유사한 값을 보여주며 영상측정 값의 정확도를 검토할 수 있다.



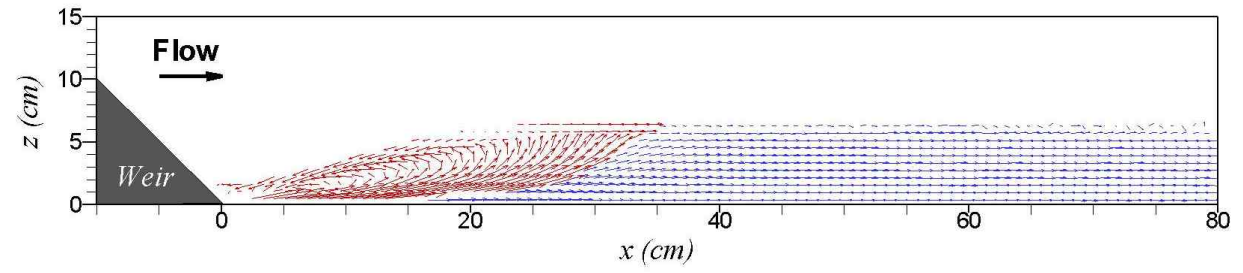
<그림 3.21> 26번째 압력 측정지점에서의 수위 값

## (2) 흐름 평균유속장

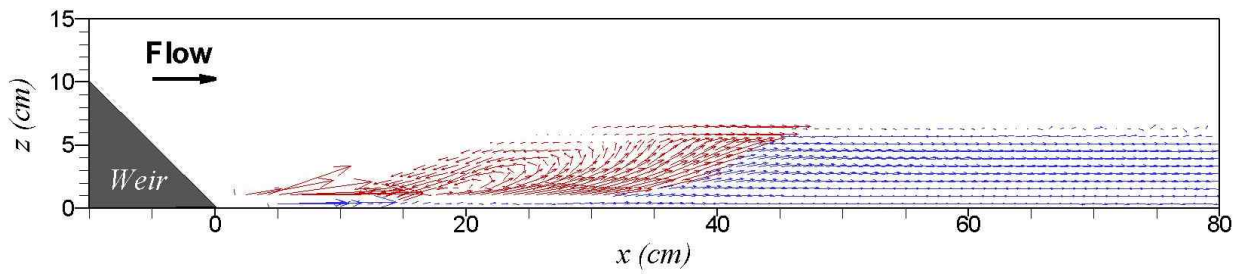
PIV와 BIV 기법을 적용하여 보 하류부의 유속을 측정하였다. 최대 3000개의 순간 유속장을 측정하여 얻어진 결과를 이용하여 평균 유속장을 구했다. 그림 3.22의 영상은 10개의 실험안의 평균 흐름 유속장이다. 그림에서 제시한 벡터 중 파란색 벡터는 PIV기법을 적용하여 측정한 결과이다. PIV 기법은 레이저를 이용하기 때문에 도수 등과 같이 기포를 내재한 흐름에서는 레이저 빛이 산란되어 결과를 얻을 수가 없다. 이와 같은 기포영역은 실험기법에서 소개한 바와 같이 BIV를 이용하여 측정하였으며, 그림에서는 빨간색 벡터로 나타내었다. 다양한 실험 안에서 나타난 바와 같이 BIV를 이용하여 측정한 유속장은 기존 기법으로 측정이 어려웠던 도수의 기포영역의 역회전현상을 구현하고 있으며, 유량 및 흐름강도, 하류수위에 따라 그 측정영역이 다양하게 변하는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 4개의 유량조건에 대하여 실험을 수행하였는데, 상대적으로 유량이 작은 경우인 Case 1~6에서 잠김 도수 조건(Case 1, Case 4)에서는 역류구간이 기포를 내재하지 않아 PIV 기법만을 가지고 측정하였다(그림 3.22(a), (d)). 모든 실험 안에서 도수에 의한 흐름역류구간이 발생하였으며, 기포가 내재된 도수구간은 같은 유량에서 도수 발생구간이 하류로 이동시 증가함을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 그림에서 같은 유량조건이나 도수 발생지점이 다른 (b)와 (c), (e)와 (f), (g)와 (h), 그리고 (i)와 (j)의 비교에서 뚜렷이 알 수 있다. 일반적인 도수 발생에 대한 조건으로 Froude수를 근거로 하여 도수 특성을 구분한다. Froude수는 도수 발생 전의 접근흐름의 수심 및 유속으로 결정하는데, 일반적으로 유량조건에 의해 결정된다. 즉, 도수 발생지점에 따른 특성차이를 위해 비교된 4쌍의 결과는 매우 근접한 Froude수를 갖는다고 볼 수 있는데, 이 경우 같은 Froude수 조건에서 기포내재 역류흐름구간의 크기를 비롯한 특성치가 변할 수 있음을 보여준다.



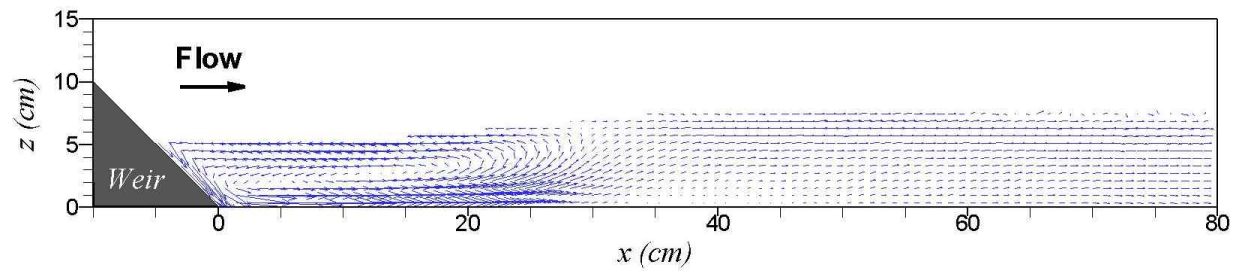
(a) Case 1



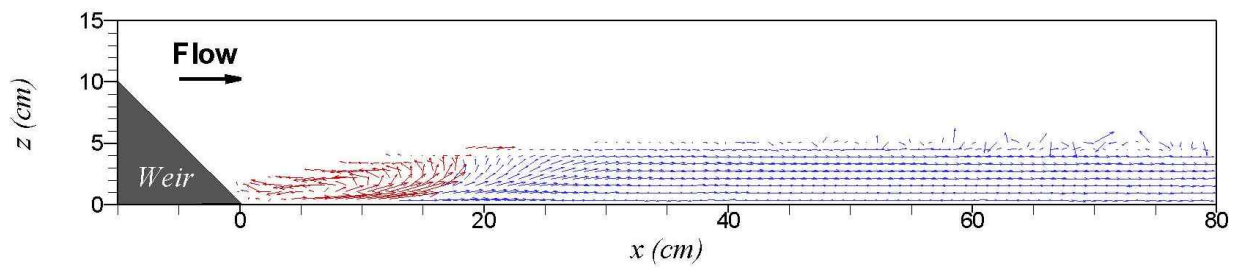
(b) Case 2



(c) Case 3

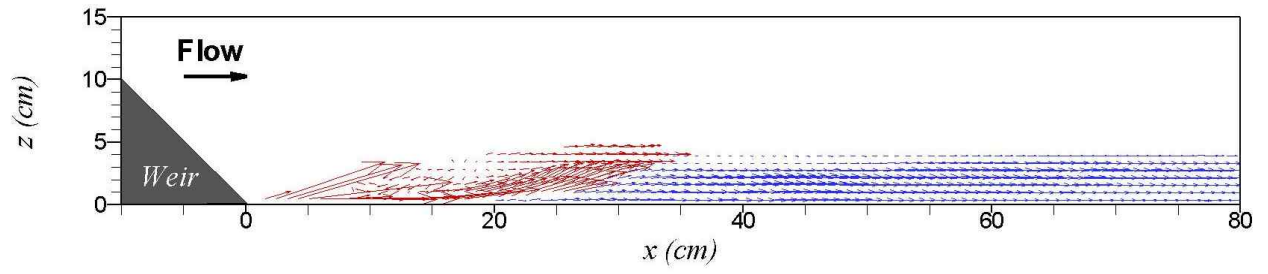


(d) Case 4

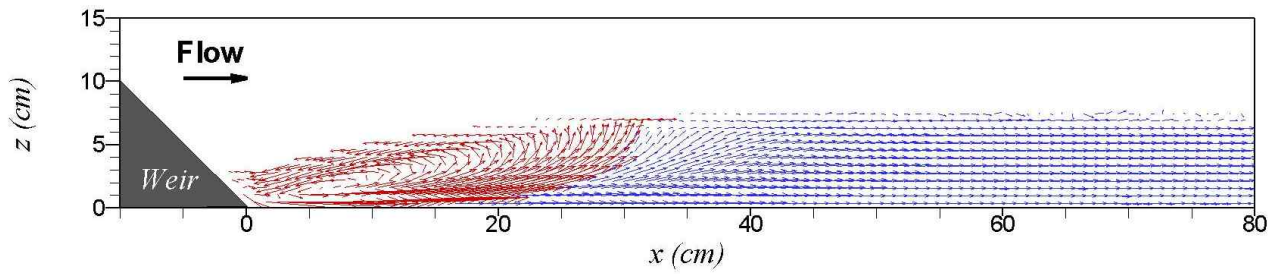


(e) Case 5

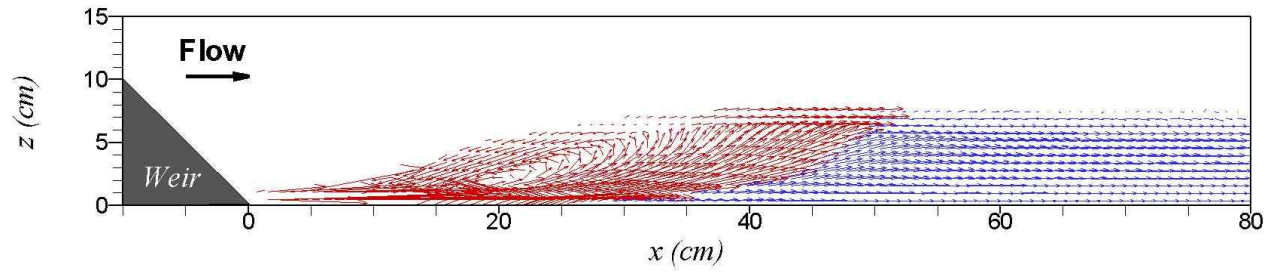
<그림 3.22> 보 하류부 평균 유속장



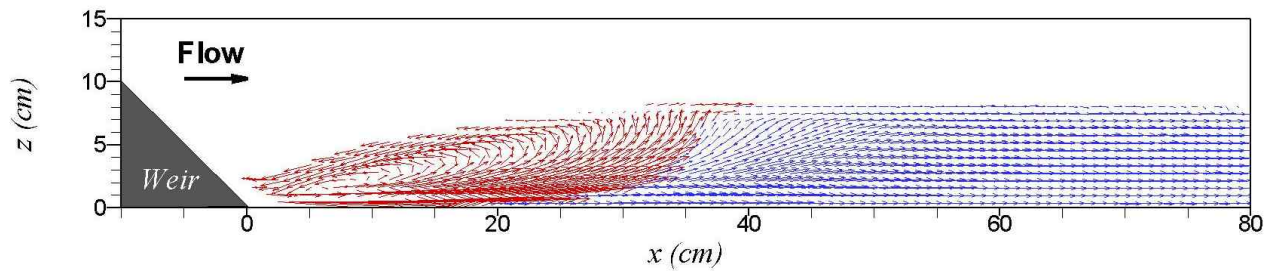
(f) Case 6



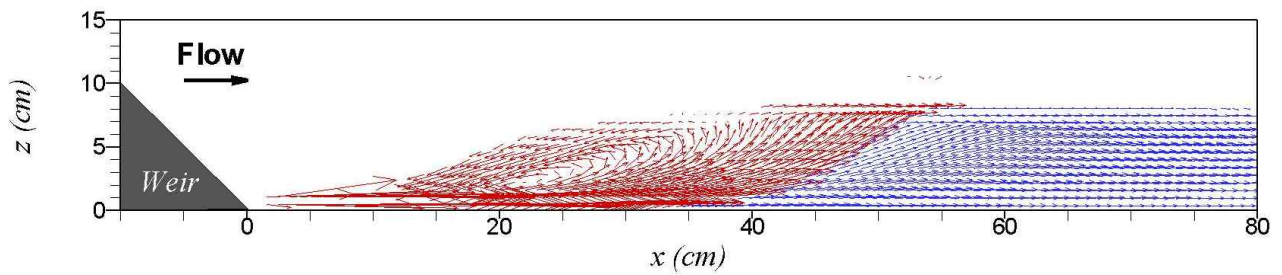
(g) Case 7



(h) Case 8

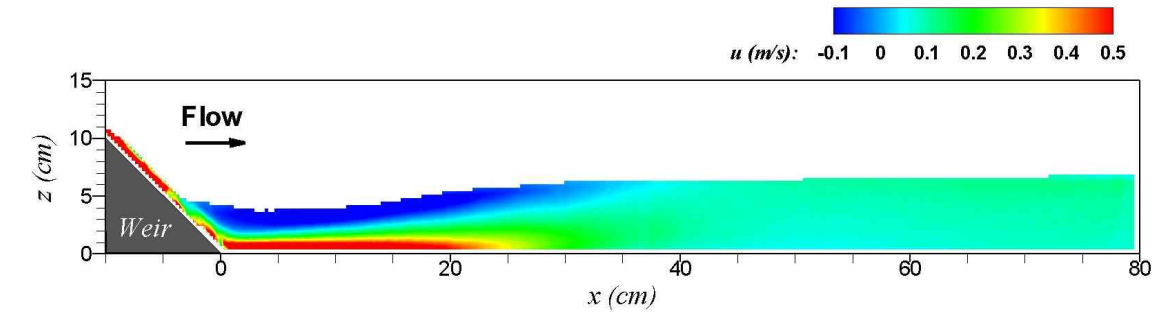


(i) Case 9

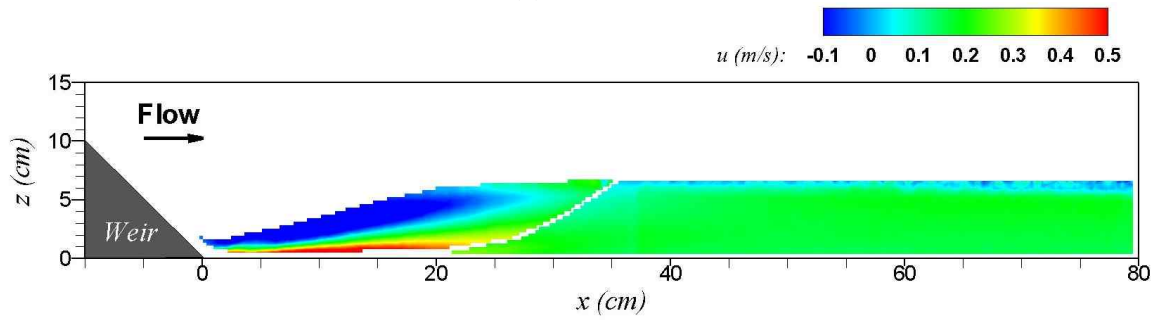


(j) Case 10

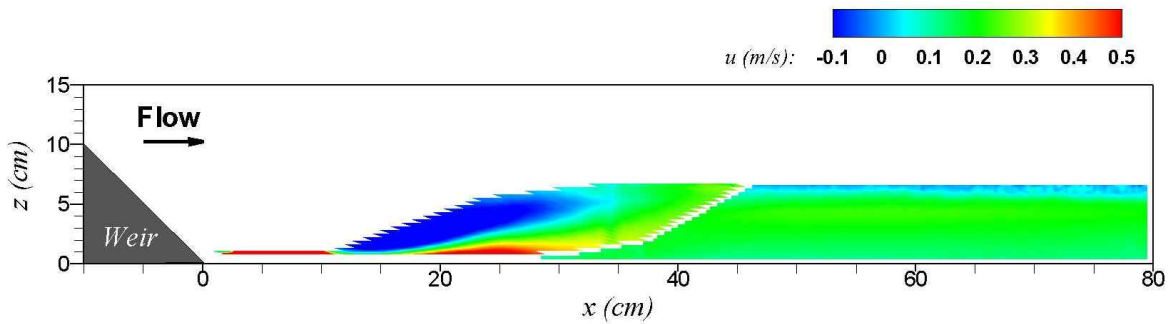
<그림 3.22> 보 하류부 평균 유속장(계속)



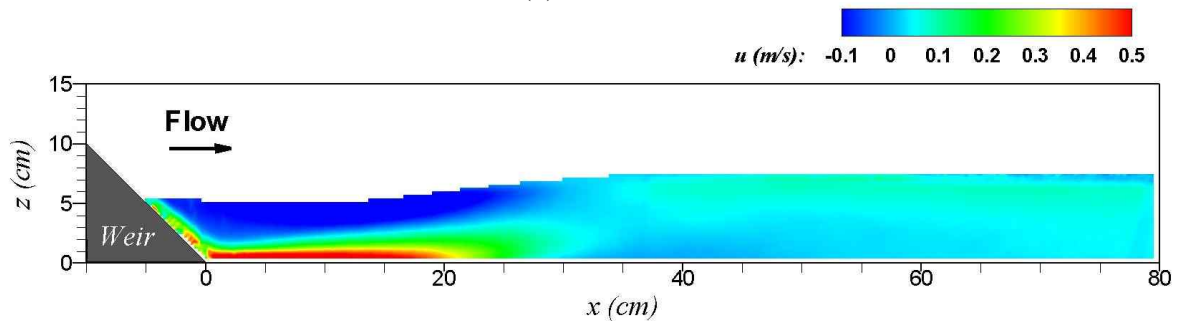
(a) Case 1



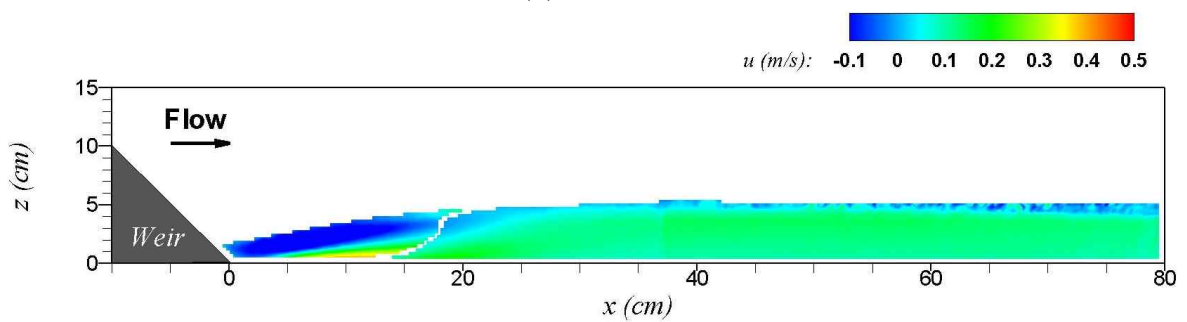
(b) Case 2



(c) Case 3

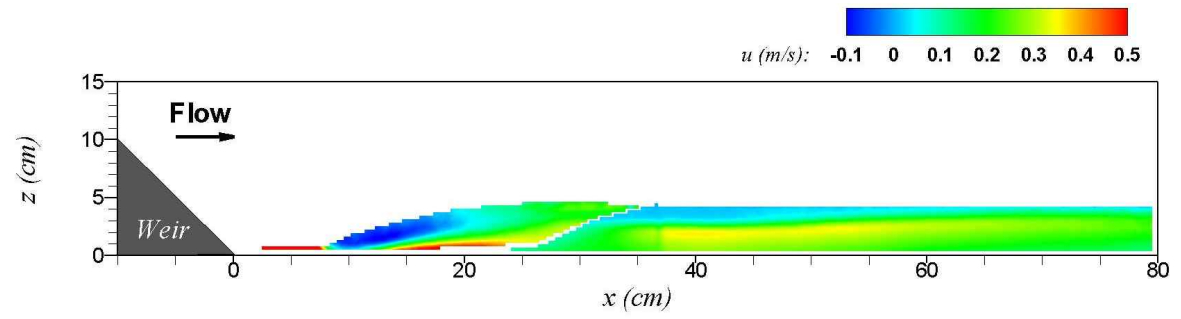


(d) Case 4

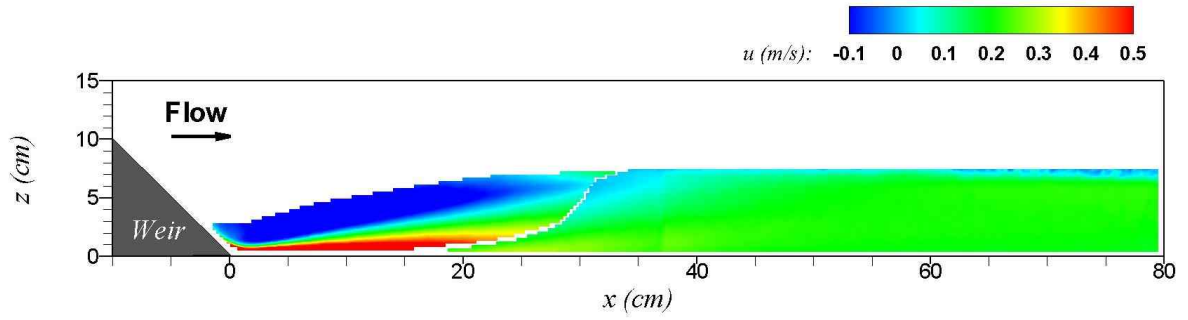


(e) Case 5

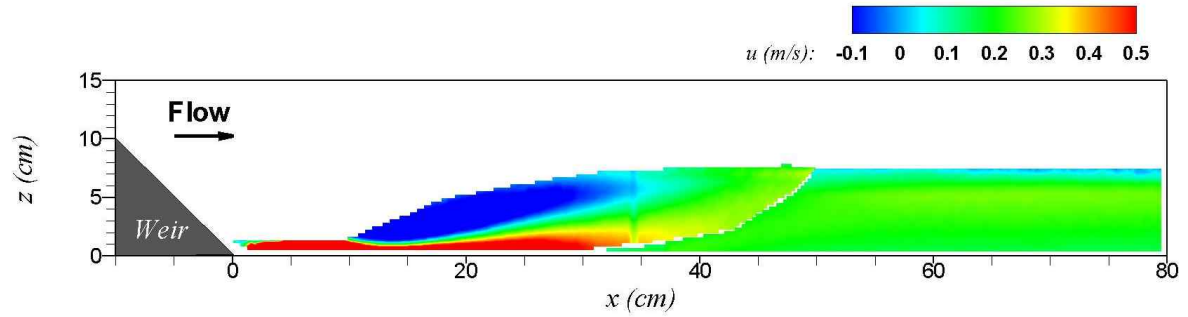
<그림 3.23> 흐름방향 평균유속



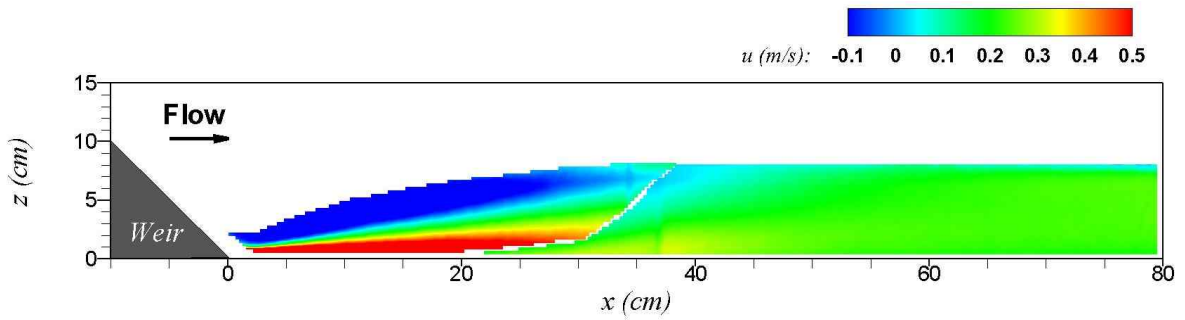
(f) Case 6



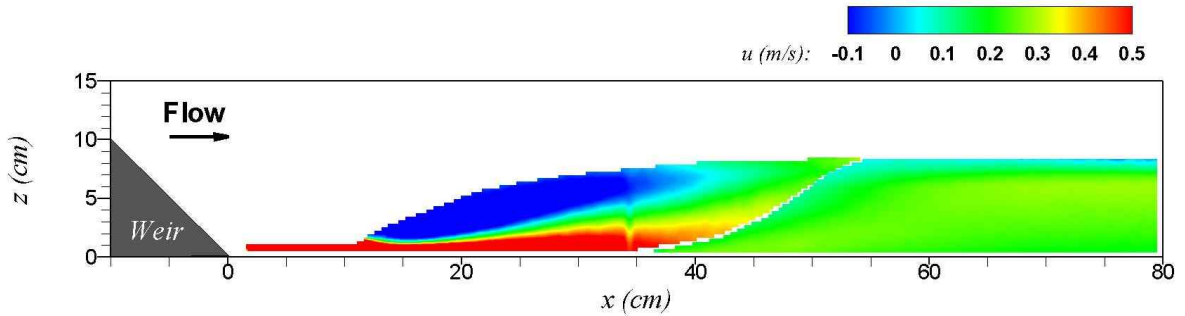
(g) Case 7



(h) Case 8



(i) Case 9



(j) Case 10

<그림 3.23> 흐름방향 평균유속(계속)

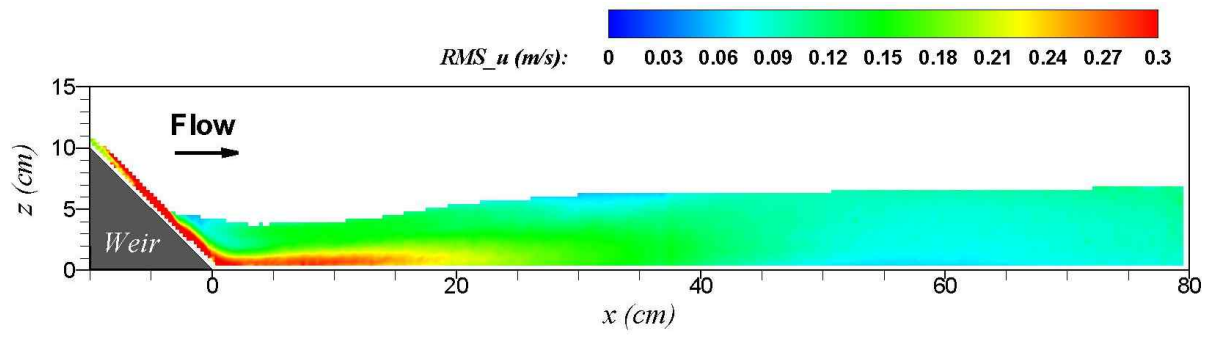
그림 3.22의 유속장에서 제시된 바와 같이 잠김 도수 시 보를 포함한 물받이공에서 역류대가 발생하는 것을 알 수 있다(그림 3.22(a), (d)). 도수가 보 끝단에서 발생하는 구간은 보 끝단부터 역류대가 발생하지만 역류대가 기포흐름을 내재한 흐름으로서 그 특성은 물로 이루어진 잠김 도수의 역류대와 다른 특성을 가질 수 있다. 기포흐름은 단순한 유속분포 이외에 밀도가 물로 이루어진 흐름과 다른 상태를 가지고 있고, 또한 기포에 의한 이상(Two-phase) 상태가 존재하여 흐름 특성이 복잡해지고 이상에 의한 경계면이 발생하여 그에 따른 영향 또한 고려하여야 한다. 기포흐름 영역대가 존재하는 구간에서는 물받이공의 압력에 대한 영향 시 단순한 압력 크기 외에 기포에 의한 기타 물리적 현상도 고려해야 할 수 있다. 본 연구에서 수행된 실험 안 중 잠김 도수인 경우를 제외하고는 모두 기포를 내재한 역류대가 발생하고 있으며 특히 높은 운동량을 나타내는 기포 역류대는 물받이공에 근접하여 발생하기 때문에 이에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다. 그림 3.23에서 제시된 흐름방향의 평균유속의 크기로부터 고유속은 도수 발생 전 및 발생 후 역류대 아래 부분에서 발생하는 것을 알 수 있다. 전반적인 하류부 흐름 분포에 비해 상대적으로 매우 큰 유속을 나타내며 물받이공 안전에 큰 영향을 미칠 수 있음을 예상할 수 있다. 보 하류부에서의 도수흐름은 물받이공을 따라 진행하는 평행한 흐름이 주도적인 양상을 나타내기 때문에 Tangential 하게 진행되는 흐름에 의한 보호공 안전성에 대한 분석이 요구된다.

### (3) 난류 흐름 특성

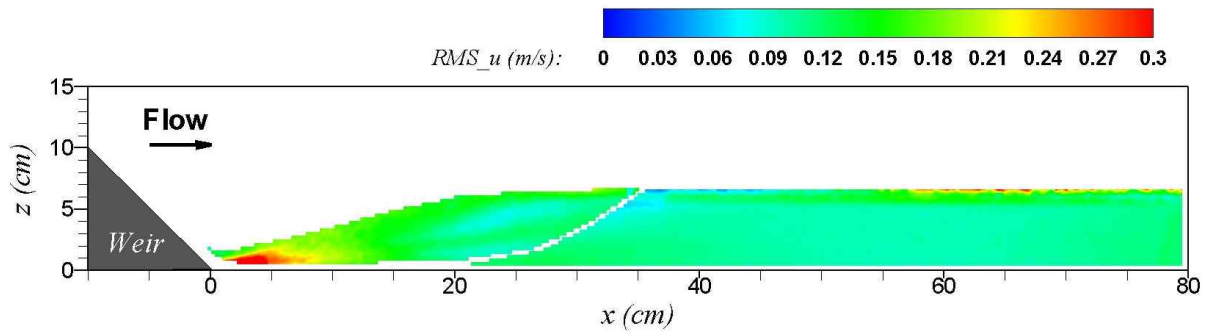
3000개의 PIV 순간유속장과 2000개의 BIV의 순간 유속장을 통계 분석하여 난류 흐름특성을 검토하였다. 난류는 난류흐름의 에너지가 소산되는 역학을 이해하기 위한 중요한 인자로서, 에너지 소산과 함께 세굴 및 확산과 같은 흐름이 인접하는 매체에 외력으로서 영향을 미친다. 이 연구의 관심영역인 보 물받이공 및 바닥보호공은 표면을 따라 진행되는 흐름으로부터 직접적인 영향을 받는다. 평균흐름에 의한 전응력 및 전단응력에 의한 영향이 크지만, 난류와 같이 진동 혹은 변화하는 흐름 또한 구조물에 장기적인 피로를 유발할 수 있기 때문에 그에 대한 영향 검토가 중요하다. 특히 도수흐름은 큰 난류에너지를 발생하고 또한 흐름방향이 명확히 구분되는 흐름으로서 난류강도와 함께 방향을 고려한 난류성분 분석이 필요하다.

수평방향 난류특성은  $u = \bar{u} + u'$ 의 성분 분해에서  $u'$ 의 제곱평균제곱근을 구하여 검토할 수 있다. 도수흐름은 수평주도적인 흐름으로 인해 연직방향 성분에 비해 수평방향 성분의 난류가 상대적으로 주도하고 있다. 그림 3.24에 제시된 수평방향 난류도는 최대 약 0.3 m/s에 달하는 난류유속을 도수 역류대 아래에서 나타낸다. 수평방향 난류는 잠김 도수에 비해 도수구간에서 크게 나타나며 도수시작 위치의 하류에서 발생할 때 더 크다는 것을 알 수 있다. 도수 역류대 구간을 지나면서 수평방향 난류강도는 급격히 감소하며 수심방향으로 큰 차이를 보였던 난류강도는 수심방향으로 일정하게 변하는 특성을 나타낸다. 여기서, 난류강도는 흐름 변화를 나타내는 인자로서 흐름이 접하는 물받이공에 작용하는 외력에 직접적인 영향을 주기 때문에 이에 대한 상관연구가 필요하다.

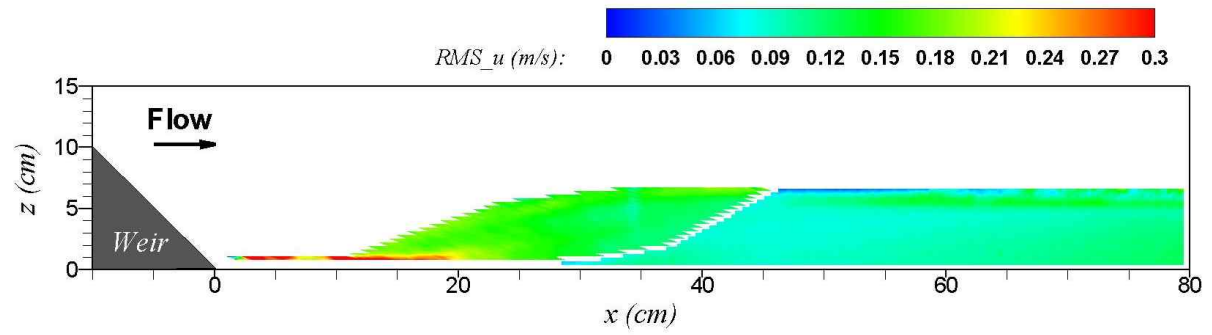
연직방향 난류강도는 유사하게  $w = \bar{w} + w'$ 에서 변동성분의 제곱평균제곱근으로 추정하였다. 그림 3.25에 제시된 바와 같이 연직방향 난류강도는 수평방향의 난류강도에 비해 전반적으로 낮은 크기를 보였다. 보 끝단에서는 그 크기가 3배 이상의 차이를 보여주며 이와 같은 큰 차이는 수평 주도적인 흐름구간인 역류대 아래구간에서도 유사하게 보여준다. 연직방향 난류도는 수평주도구간이 아닌 역류대의 상부구간에서 크게 발생한다. 그 크기는 수평방향 난류성분에 비해 절반 이하의 작은 크기를 보여주며, 발생구간은 흐름표면에 가까운 상부에서 발생하므로 물받이공에 직접적인 영향은 작을 것으로 판단된다. 난류강도의 수평 및 연직방향에 대한 검토와 함께 두 방향을 함께 고려한 난류운동에너지를 검토하여 그림 3.26에 제시하였다. 난류운동에너지는  $TKE = \frac{u'^2 + w'^2}{2}$ 로 계산된다. 난류운동에너지는 분포를 통해 흐름에너지가 소산되는 영역을 추정할 수 있는데 본 도수흐름은 수평방향 난류도가 상대적으로 매우 크기 때문에 고 난류운동에너지가 발생하는 영역은 수평방향 난류강도가 강한 영역과 유사하다.



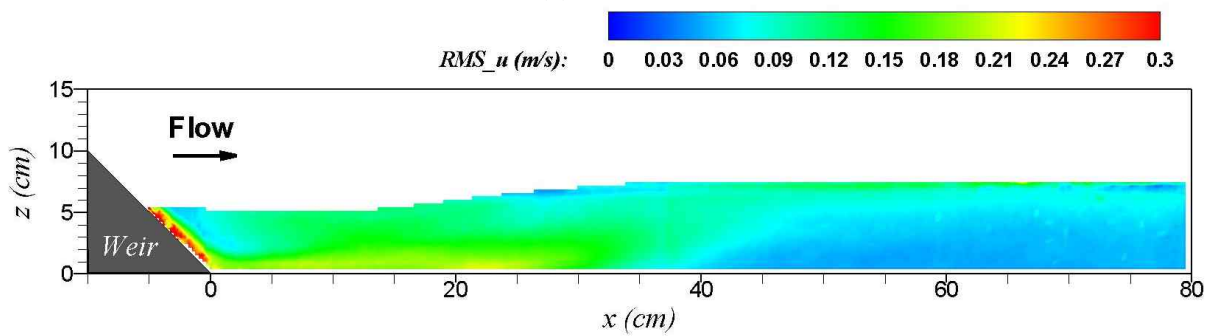
(a) Case 1



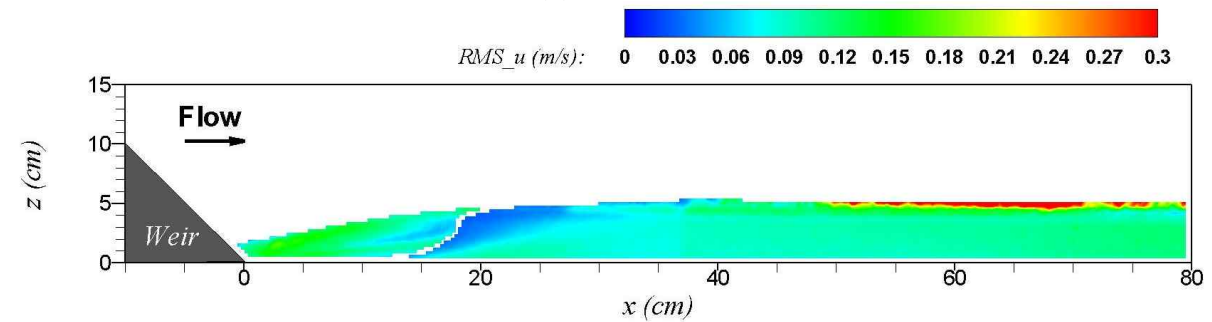
(b) Case 2



(c) Case 3

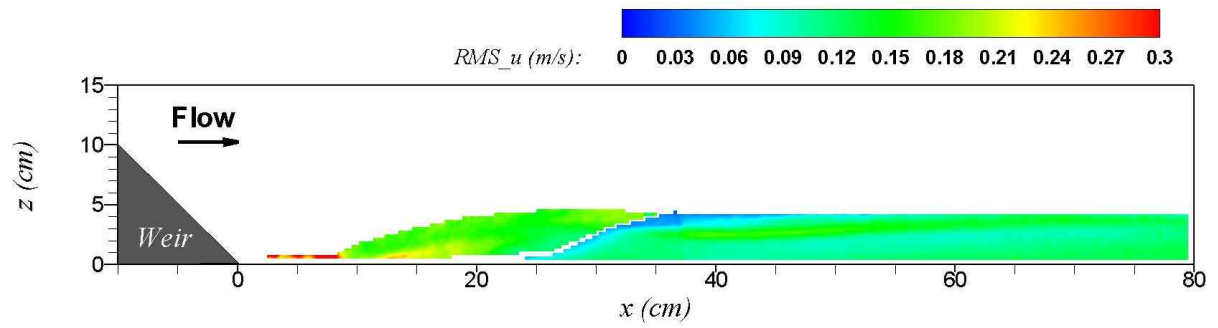


(d) Case 4

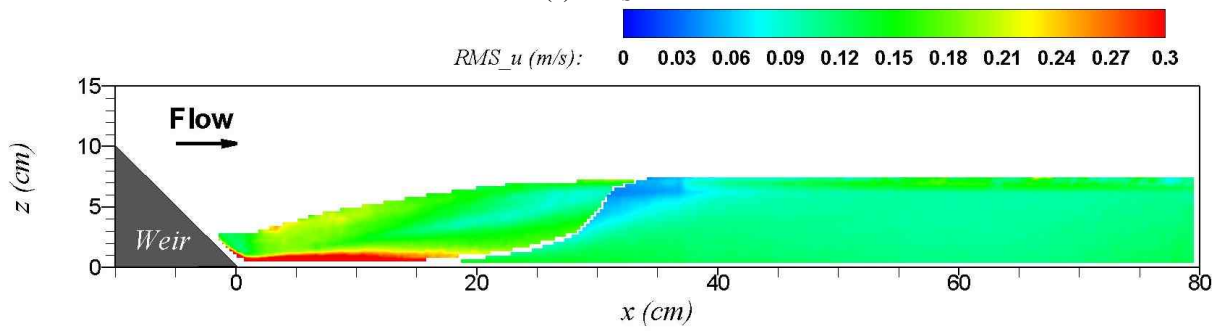


(e) Case 5

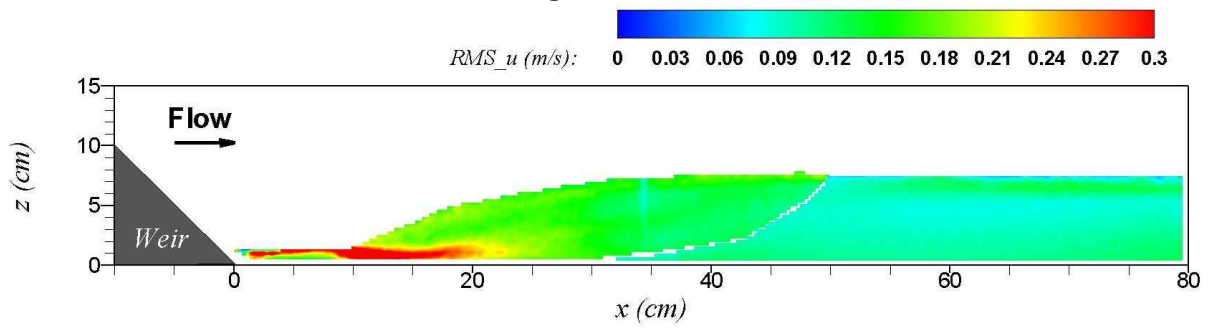
<그림 3.24> 흐름방향 난류강도



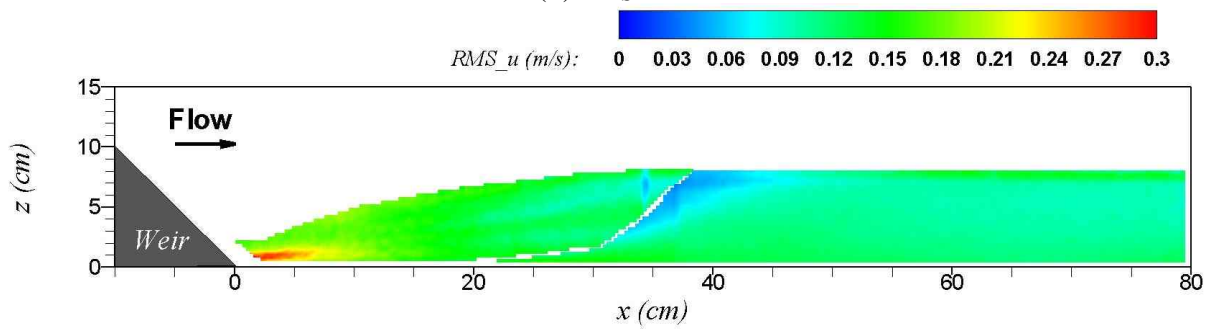
(f) Case 6



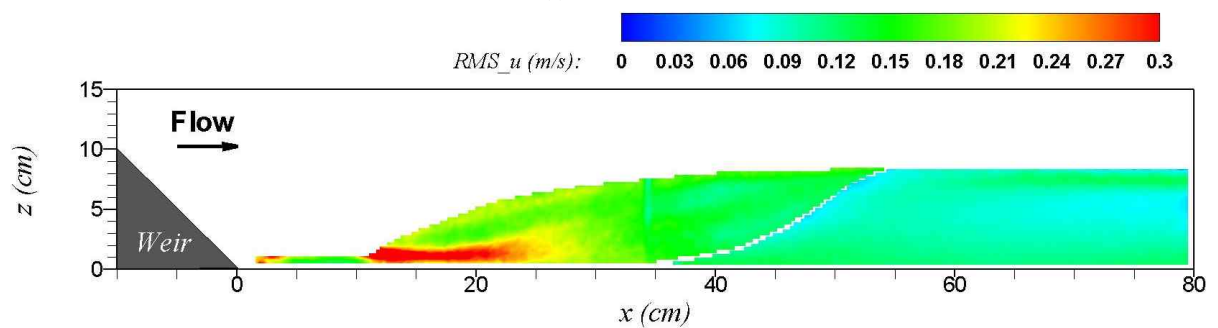
(g) Case 7



(h) Case 8

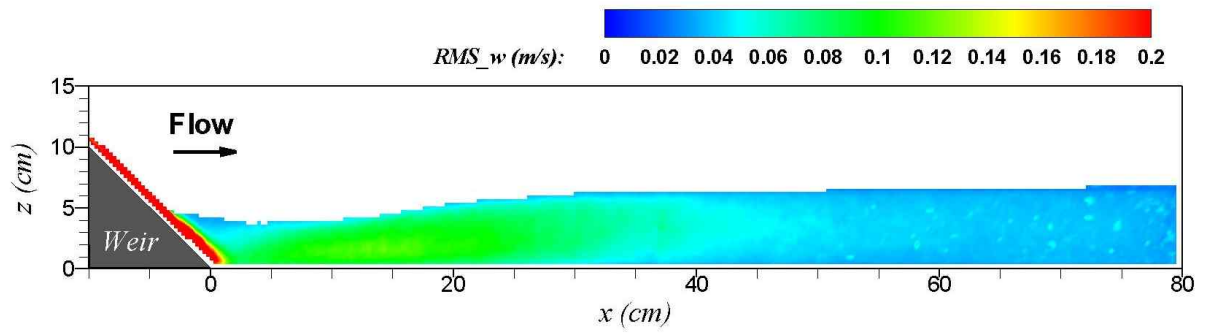


(i) Case 9

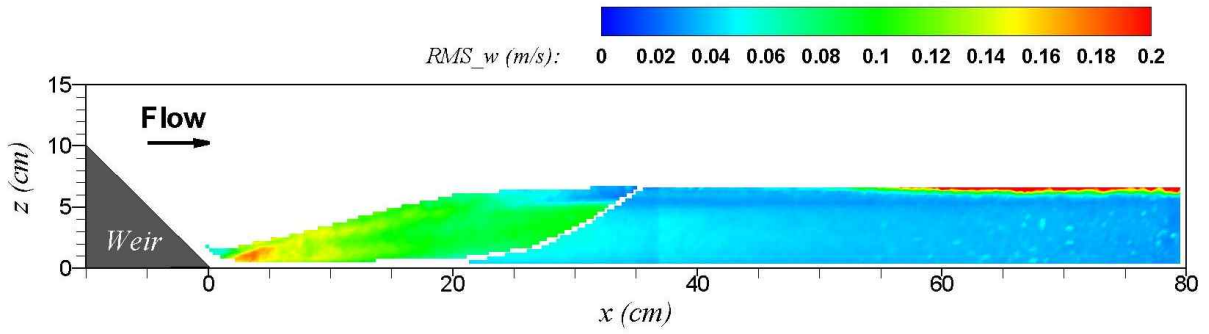


(j) Case 10

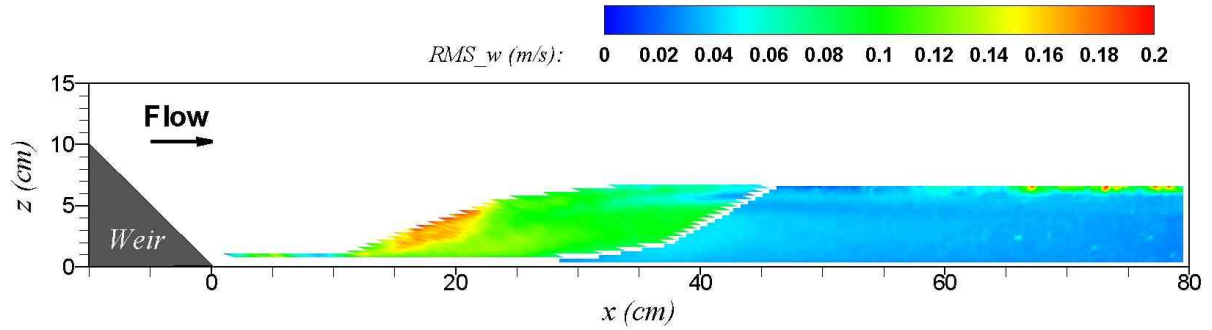
<그림 3.24> 흐름방향 난류강도(계속)



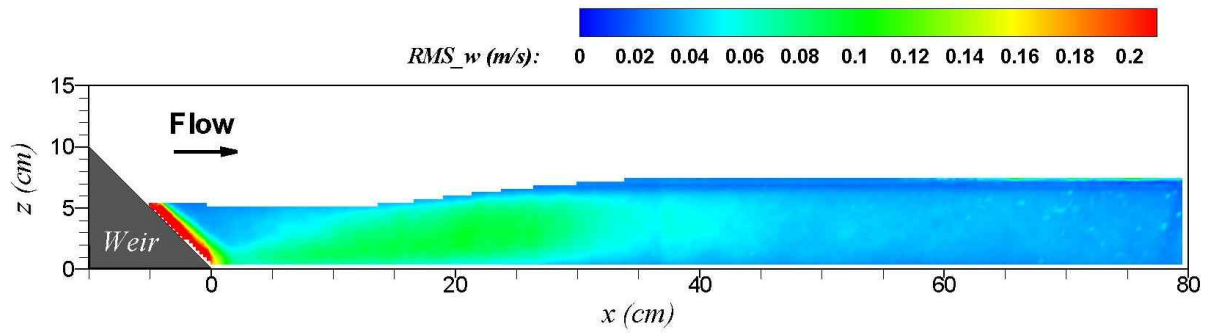
(a) Case 1



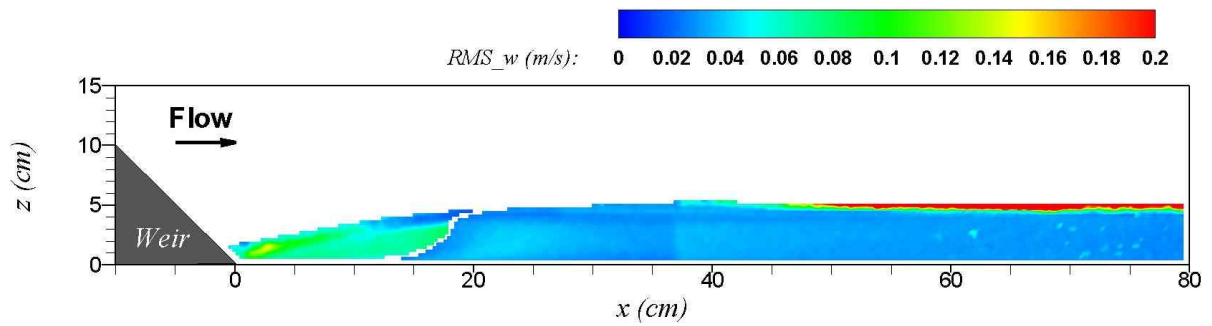
(b) Case 2



(c) Case 3

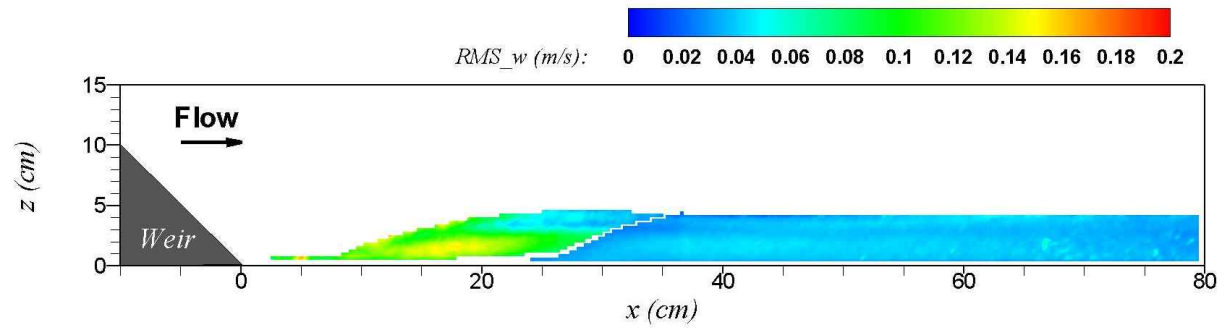


(d) Case 4

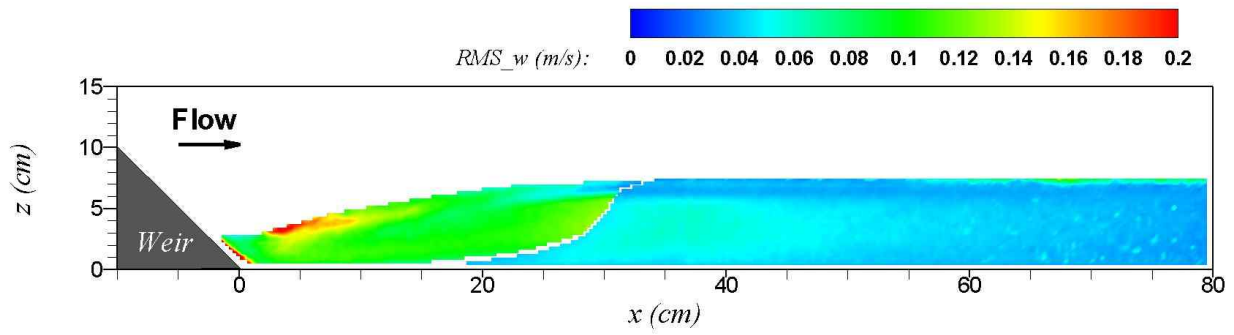


(e) Case 5

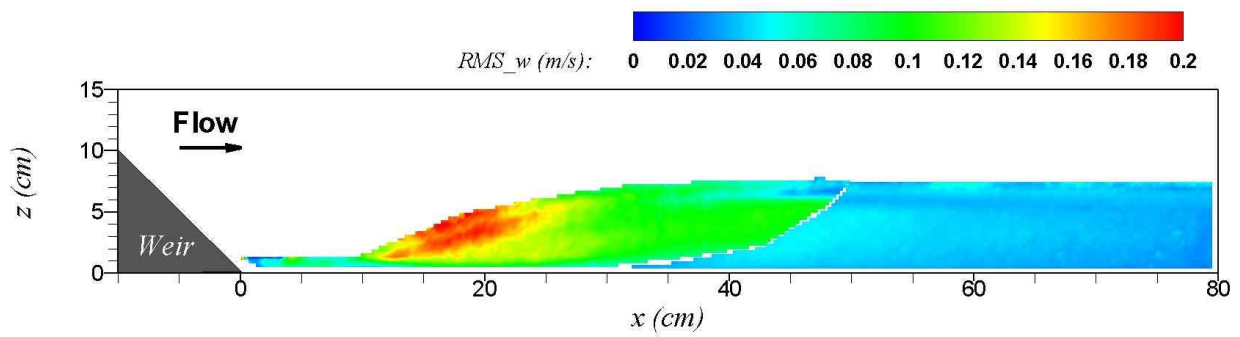
<그림 3.25> 수직방향 난류강도



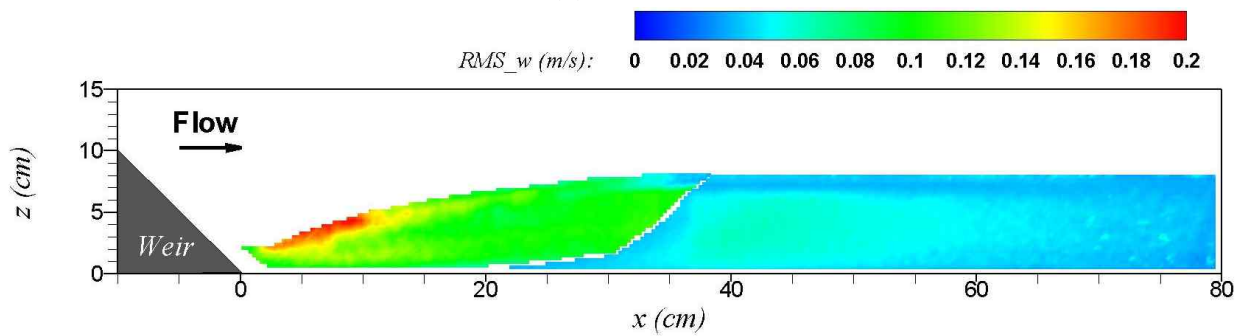
(f) Case 6



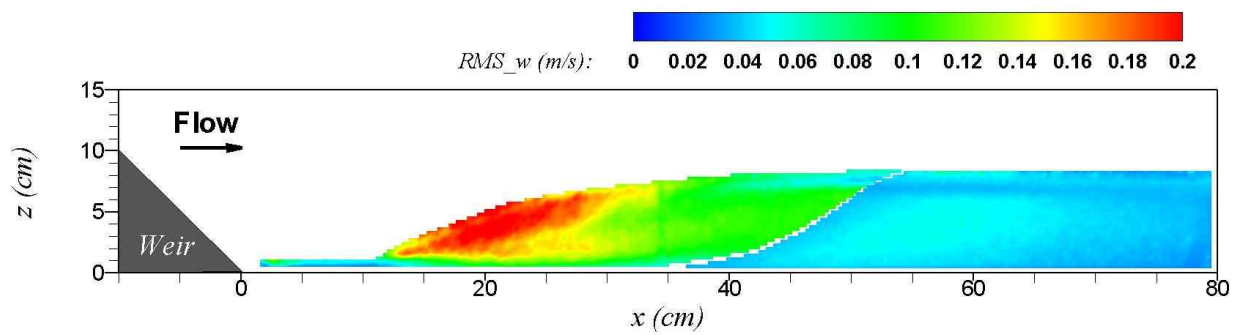
(g) Case 7



(h) Case 8

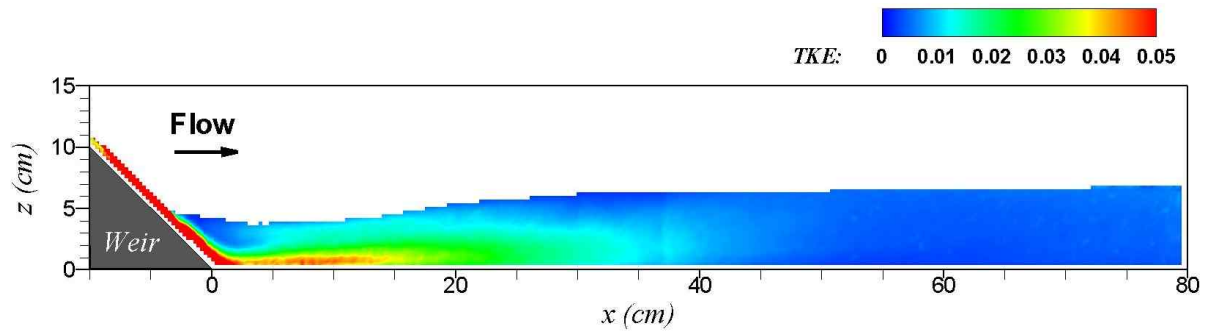


(i) Case 9

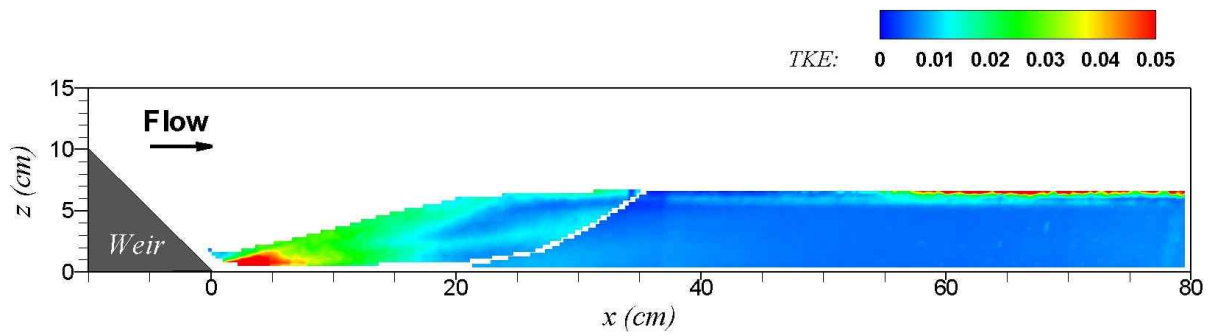


(j) Case 10

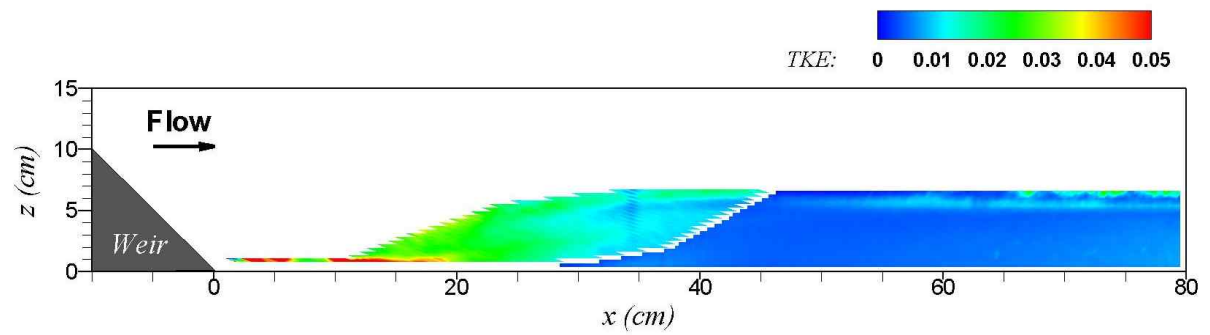
<그림 3.25> 수직방향 난류강도 (계속)



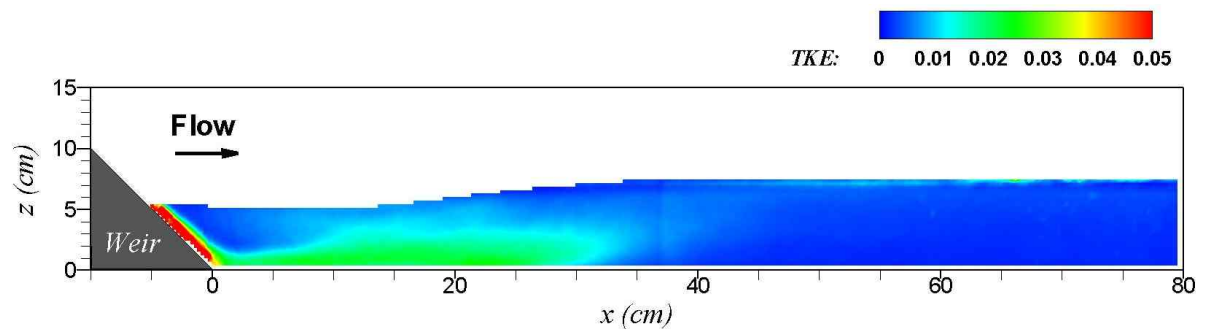
(a) Case 1



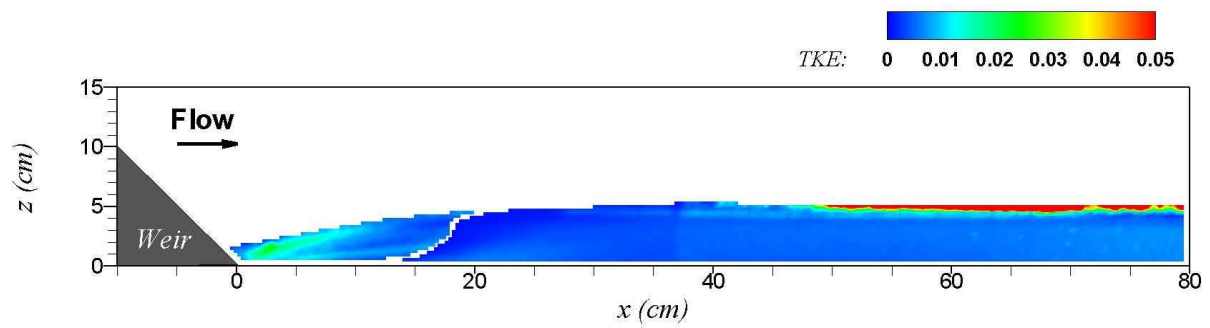
(b) Case 2



(c) Case 3

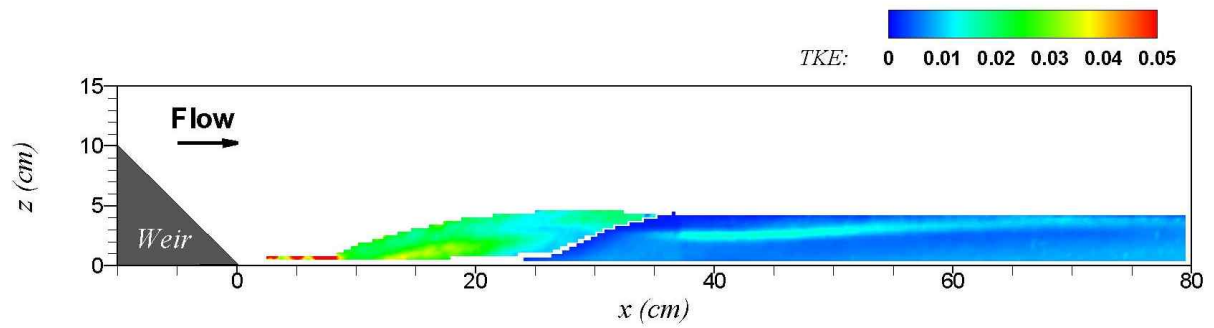


(d) Case 4

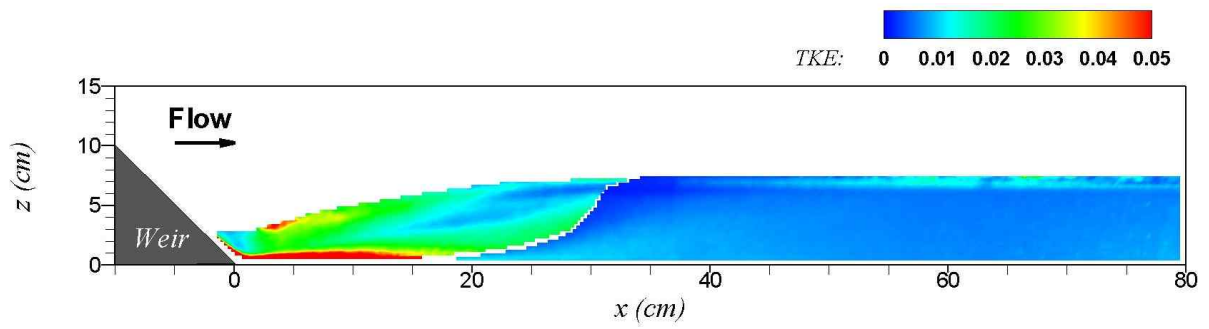


(e) Case 5

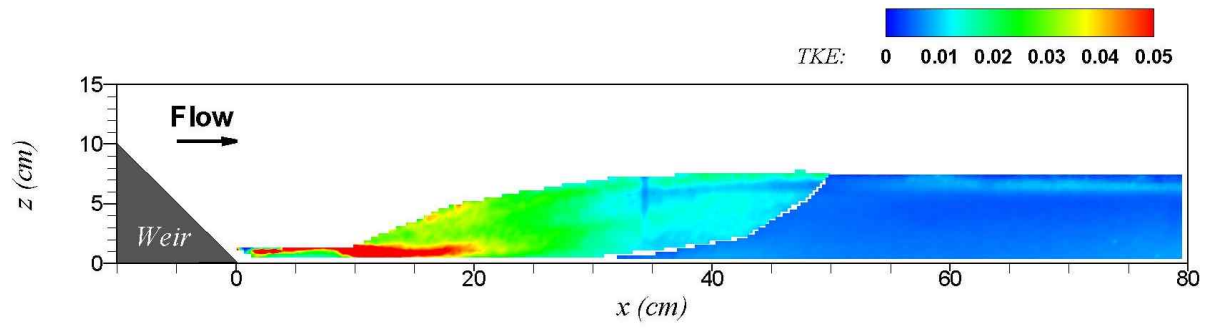
<그림 3.26> 난류운동에너지



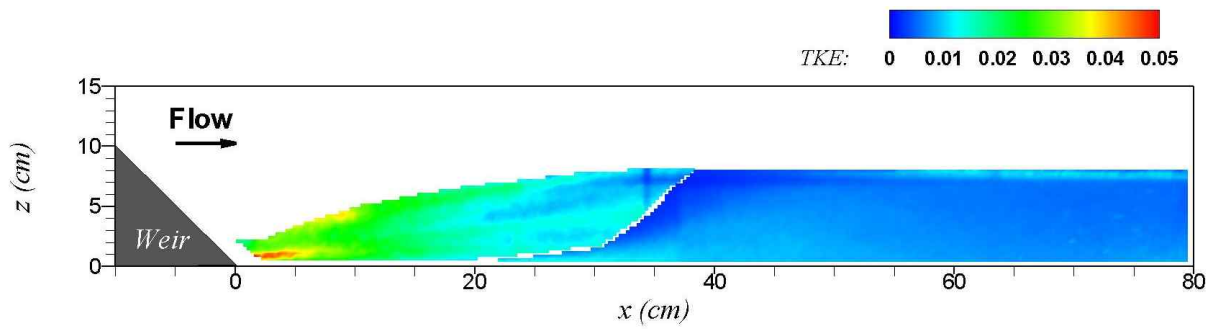
(f) Case 6



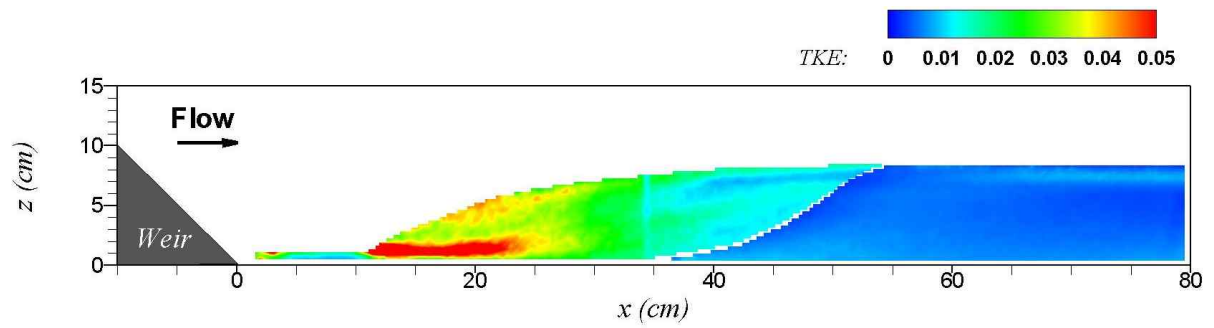
(g) Case 7



(h) Case 8



(i) Case 9



(j) Case 10

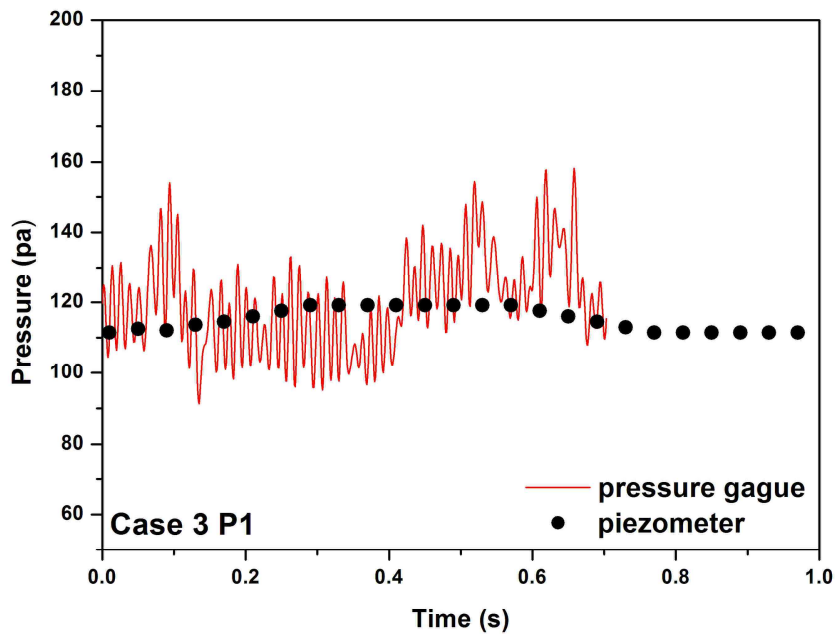
<그림 3.26> 난류운동에너지(계속)

## 나. 물받이와 바닥보호공의 압력특성

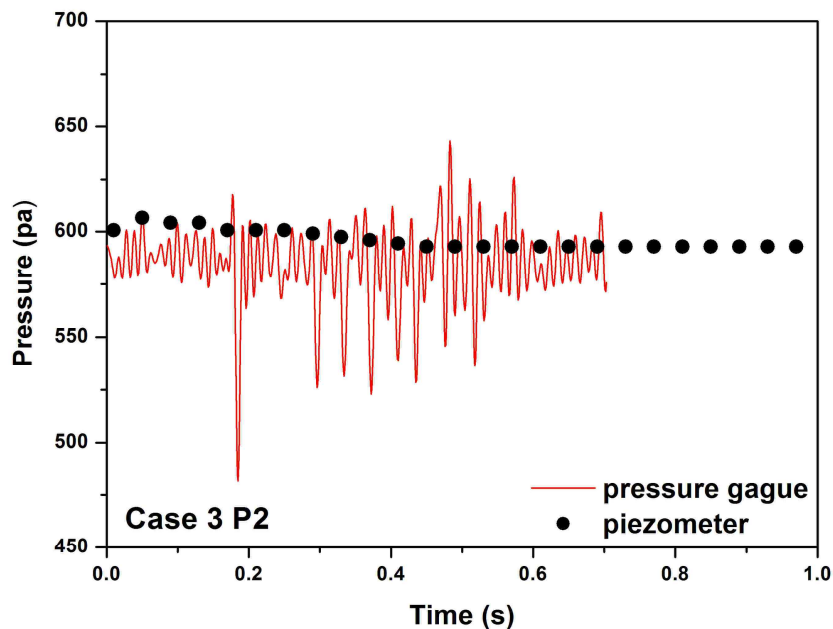
압력 측정을 위해 피에조미터를 고속카메라로 측정하여 얻어진 영상을 피에조미터 수위를 수치화하여 압력을 추정하였다. 2개 지점에 동시에 측정된 압력계와 비교를 통해 그 정확도를 검증하고 전 구간 적용하여 얻어진 압력 결과를 제시하였다.

### (1) 압력 data 검증

이 연구에서는 피에조미터를 고속카메라로 측정하여 압력시계열을 획득하였다. 피에조미터 압력값을 검증하기 위해 2개소(5번째, P1; 21번째, P2)에서 압력계로 측정된 Case 3의 값과 비교하였다. 압력계에서 얻은 값은 다양한 원인에 의해 노이즈가 포함되어 있으므로 Wang et al. (2014)의 연구를 참고하여 low-pass filter기법을 적용한 데이터를 검증 값으로 사용하였다.



<그림 3.27> 5번째 위치에서 압력 데이터 비교



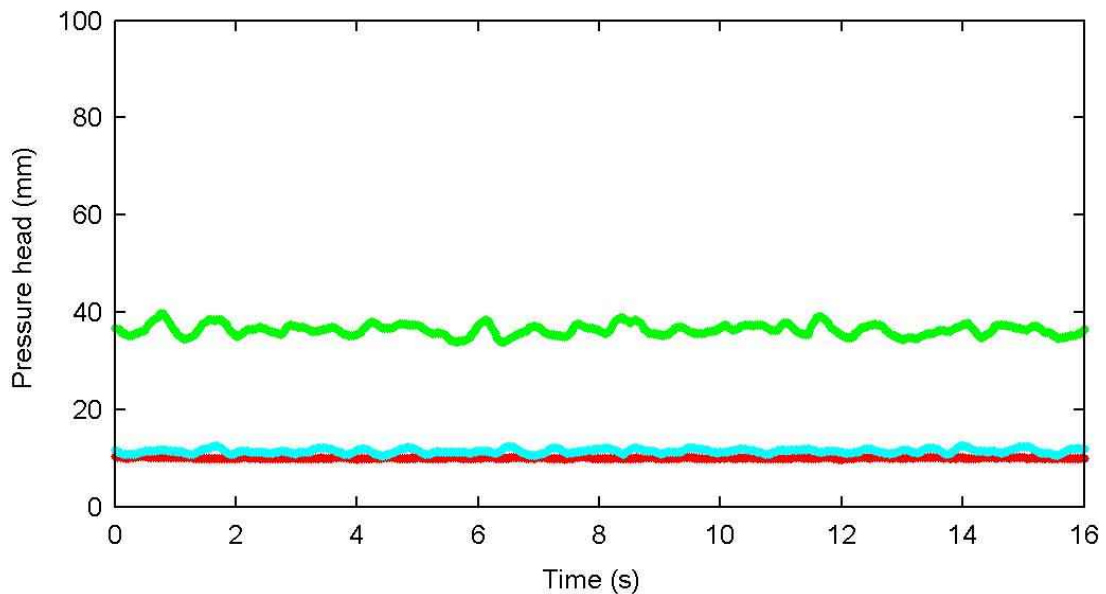
<그림 3.28> 21번째 위치에서 압력 데이터 비교

그림 3.28과 3.29의 압력계의 결과를 보면 압력 데이터가 심하게 진동하는 것을 확인할 수 있다.

압력계에서 얻은 데이터는 난류흐름에 의한 것인지 노이즈인지 판단하기 매우 어렵다. 반면, 피에조미터의 결과를 보면 압력 값이 시간에 따른 변동성이 미미하게 나타났다. 피에조미터가 도수에 의한 복잡한 난류특성을 정확히 반영하지 못 했지만 평균값은 압력계로 측정된 값의 평균과 잘 일치하는 것으로 나타났다.

## (2) 압력 시계열 분석

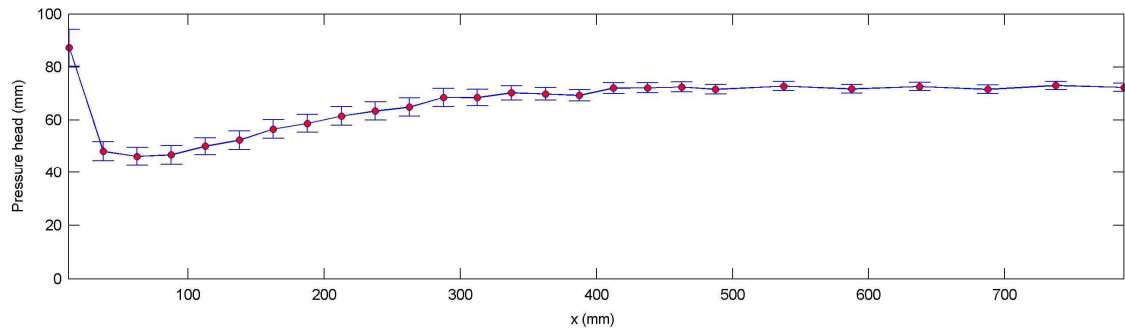
압력 시계열은 100 Hz로 측정된 영상으로부터 취득하였으며, 그림 3.29는 Case 3의 3개 위치에서 얻어진 압력 시계열 분포이다. 그림에서 빨간선으로 나타낸 보 끝단 5 cm 지점에서의 압력은 크게 진동이나 변화가 없었다. 이는 도수가 발생하기 이전 구간이며 이는 연파란색으로 나타낸 7.5 cm 지점에서 진동폭이 커지기 시작하였으며, 도수가 발생하는 구간에서는 압력의 진동이 발생하였다. 압력 검증에서 보여진 바와 같이 피에조미터를 이용한 압력 측정은 미세한 진동보다는 주기가 큰 압력 진동을 측정할 수 있었으며, 분석 시 이에 대한 고려가 필요하다.



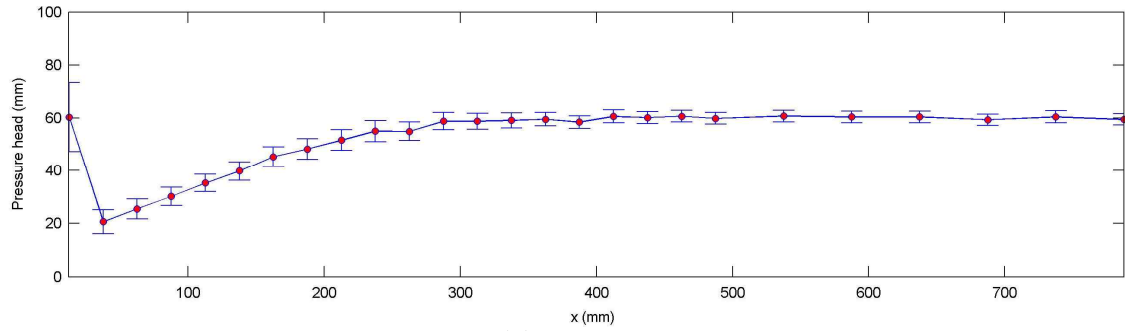
<그림 3.29> 압력 시계열 분포: Case 3의 2번 지점(빨강), 5번 지점(연파랑), 10번 지점(연두)

## (3) 압력 변동성 검토

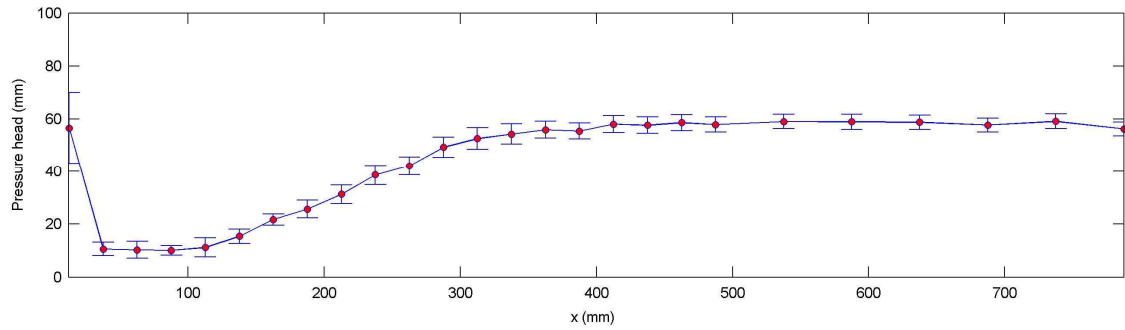
그림 3.30은 각 조건 별 압력 측정위치에서 평균압력 및 변동성분을 제시하였다.  $p = \bar{p} + p'$ 로 압력 값을 분해하여 평균압력을 정압으로 추정할 수 있고, 변동성분을 동수압 개념으로 그 영향을 검토하고자 하였다. 전반적인 압력분포는 앞 절에서 제시된 수위 변동성과 유사한 분포를 나타내었다. 그림의 결과는 각 지점에서 발생한 정수압은 수위와 유사한 값 및 분포를 보여주는데, 수위에 비해 수두 값이 다소 감소한 경향을 보여주었다. 이는 약 3 mm 내외의 수두차를 보여주는 정수압의 특성을 보여주는 수위와 동수압의 영향까지 포함하고 있는 압력측정치의 차이인 동수압을 영향으로 추정할 수 있다. 수위와 비례하게 정수압은 도수 발생 후 하류에 이동하면서 증가하다가 수렴한다. 압력 변동성분의 위치 별 차이를 검토하기 위해 그림 3.31에 변동성분의 분포를 도시하였다. 압력 변동성분의 크기는 보 하류단에서 흐름 특성에 의해 다소 다른 분포를 보이지만 도수 발생 후 하류로 진행하며 감소되는 경향을 보인다. 변동성분의 특성 중 Case 3, 6, 8, 10에서 보 끝단에서 작은 변동성분을 보이다가 이후 증가하는 양상을 보이는데 이는 도수 전후에서 나타나는 압력 변동성분의 특성으로 도수 전 크지 않다가 도수 발생 후 전반적으로 상승한다. 또한 도수 구간에서 발생하는 큰 변동성분은 흐름의 난류의 영향으로도 판단할 수 있으나, 도수 발생 구간의 상하류를 오가는 진동현상에서 기인할 수 있으므로 수위 변동과 연동하여 검토할 필요가 있다.



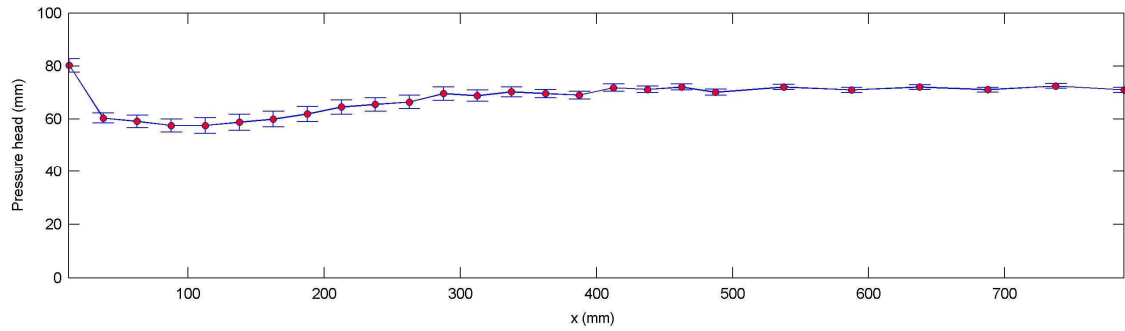
(a) Case 1



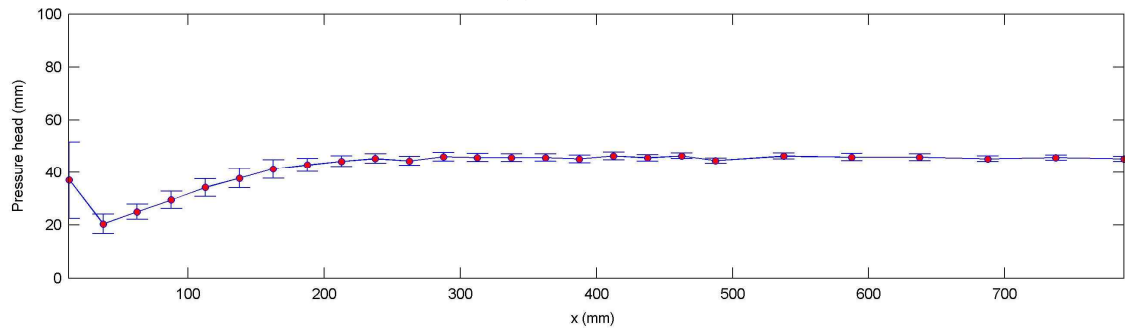
(b) Case 2



(c) Case 3

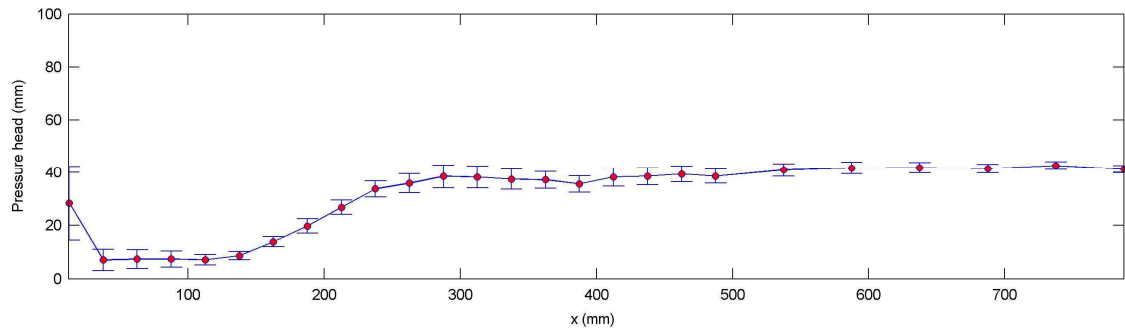


(d) Case 4

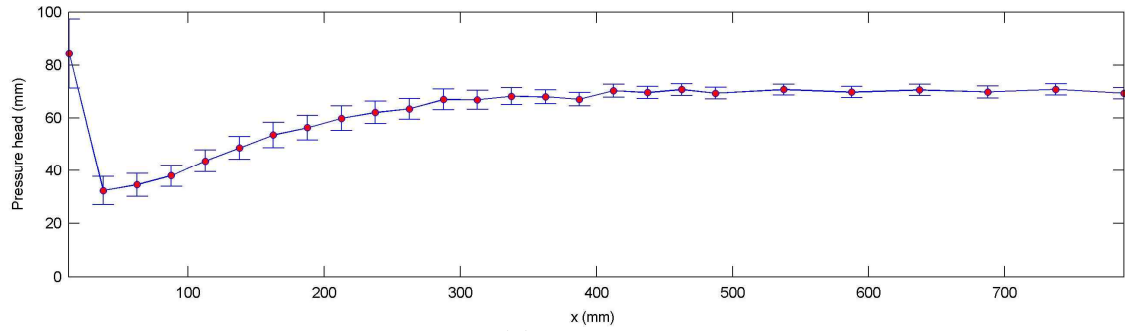


(e) Case 5

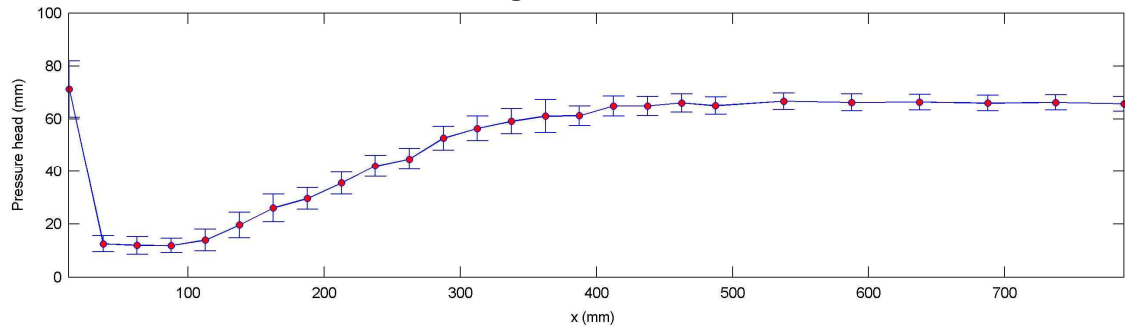
<그림 3.30> 보 물받이 압력 분포: 평균 및 변동성분의 제곱평균제곱근



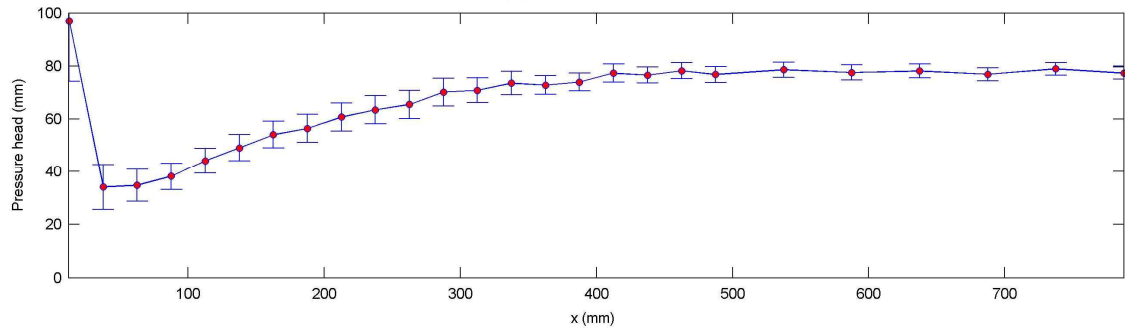
(f) Case 6



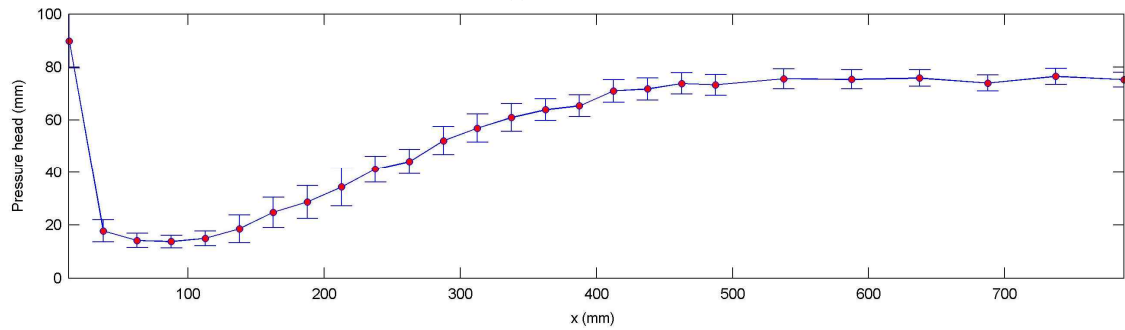
(g) Case 7



(h) Case 8

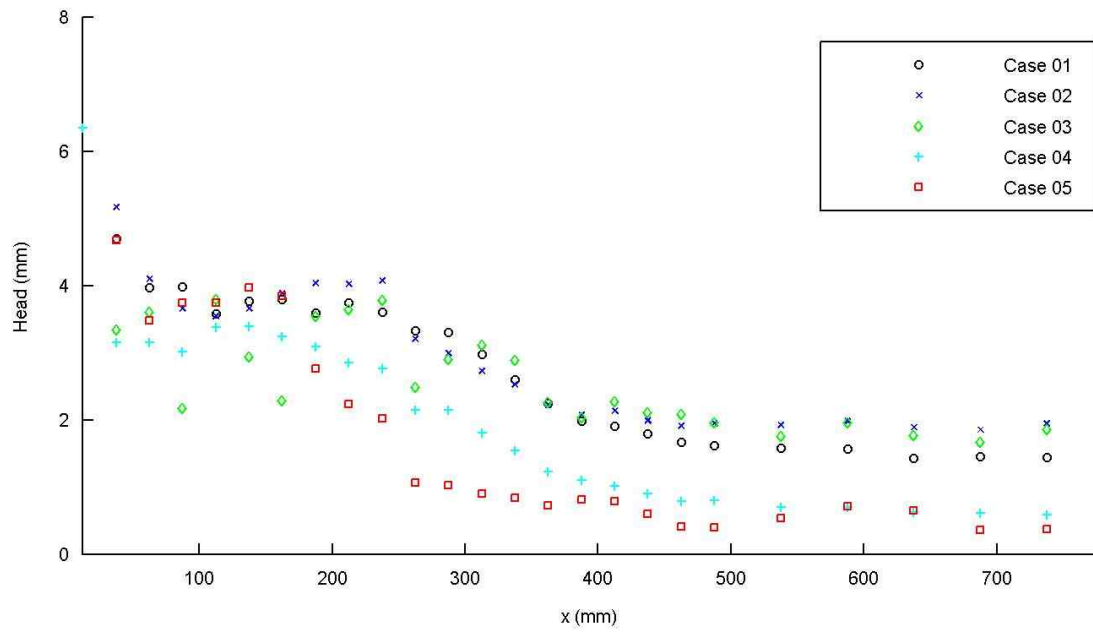


(i) Case 9

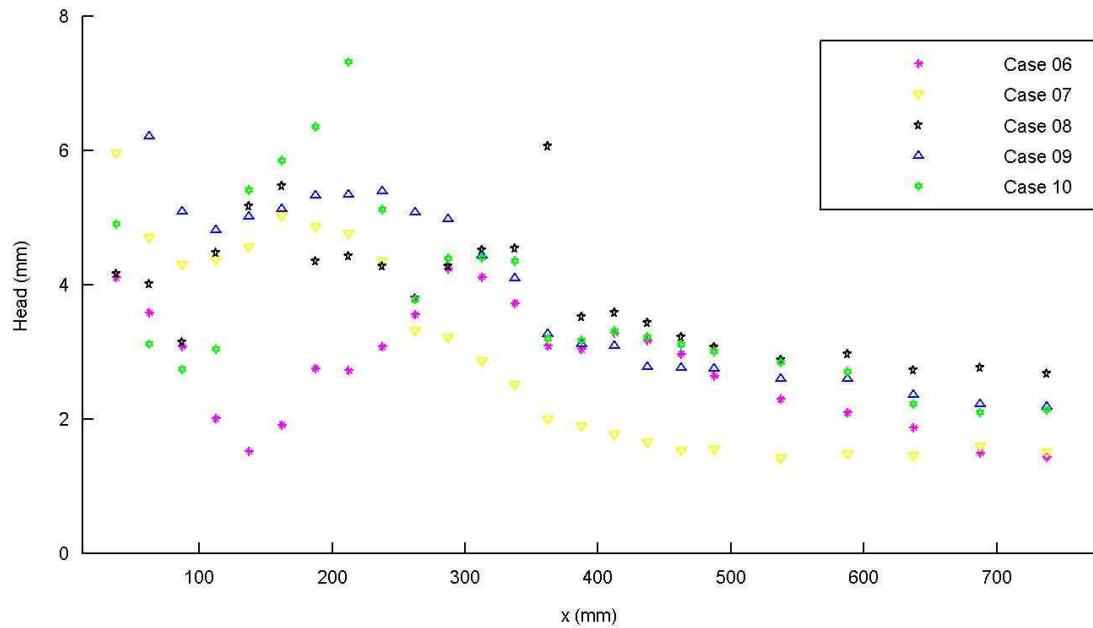


(j) Case 10

<그림 3.30> 보 물받이 압력 분포: 평균 및 변동성분의 제곱평균제곱근(계속)



(a) Case 1 - 5



(b) Case 6 - 10

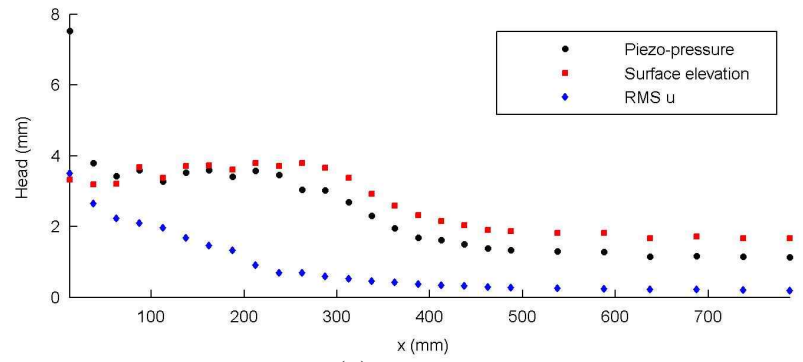
<그림 3.31> 압력 변동성분 크기 비교

## 다. 결과분석

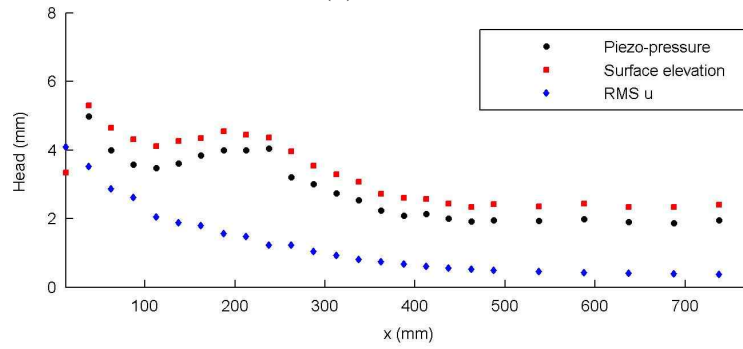
보 물받이에서의 압력 변동에 영향을 주는 인자로서 흐름의 난류 및 수위 진동 간 상호관계를 분석하였다. 상호관계 분석을 위해 인자의 시계열자료로부터 변동성분의 크기를 분석하고, 주기분석의 가능성을 제시하였다.

### (1) 압력, 난류, 수위 간 상관관계를 위한 변동성분 크기 분석

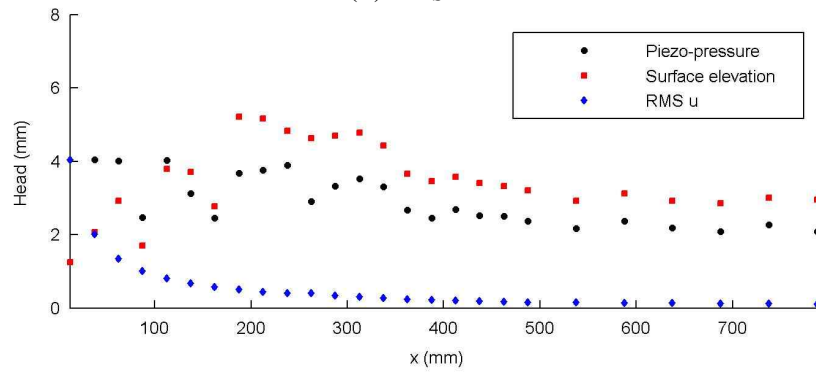
그림 3.32는 보 물받이 구간에서 발생한 피에조미터의 압력과 수위, 그리고 수평 난류강도의 변동성분을 수두 값으로 환산하여 도시하였다. 이는 압력 변동성분의 영향을 난류 흐름특성과 수위 변동 사이의 상관관계가 있는지를 알아보기 위함이다. 그림에 제시된 인자들은 보 끝단에서 큰 변동성을 나타내다가 하류로 이동하면서 감소하며 수렴하는 양상을 보여준다.



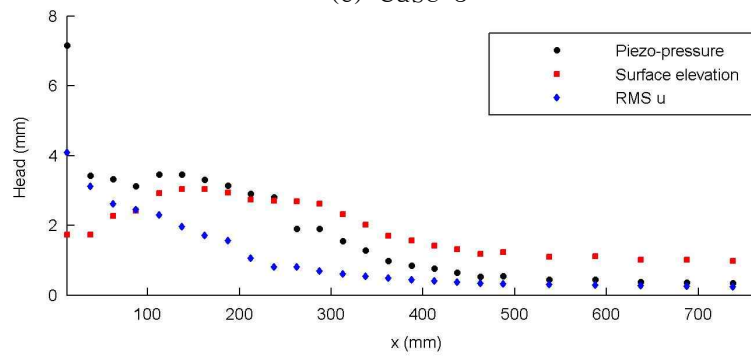
(a) Case 1



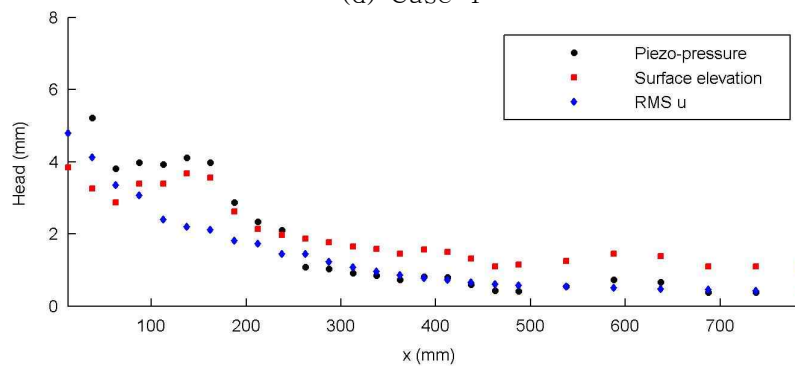
(b) Case 2



(c) Case 3

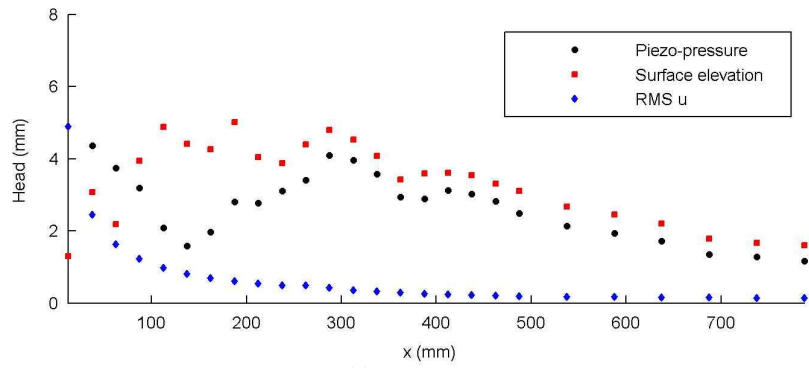


(d) Case 4

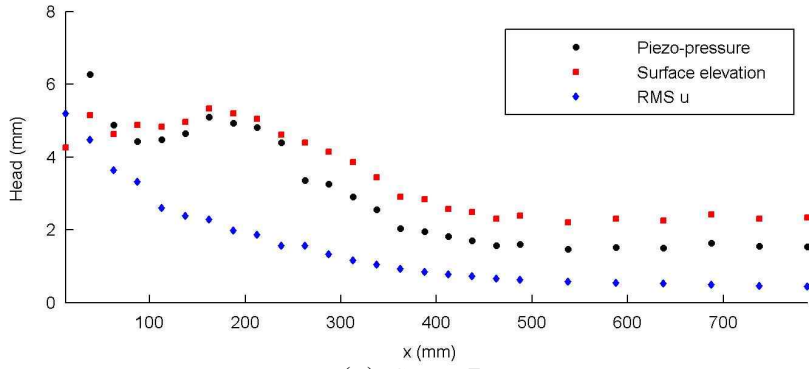


(e) Case 5

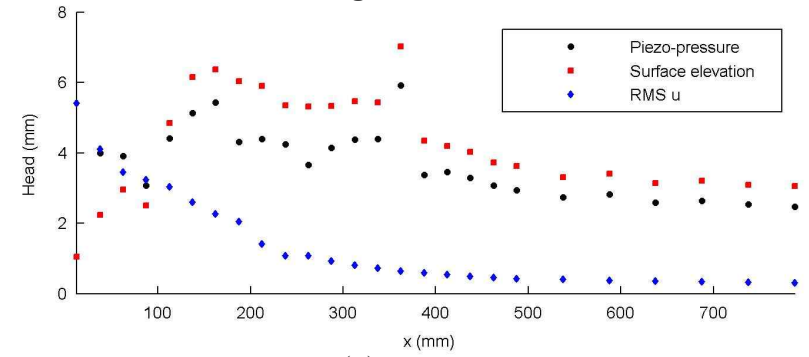
<그림 3.32> 실험안 별 압력, 난류, 수위의 변동성분의 수두 표시



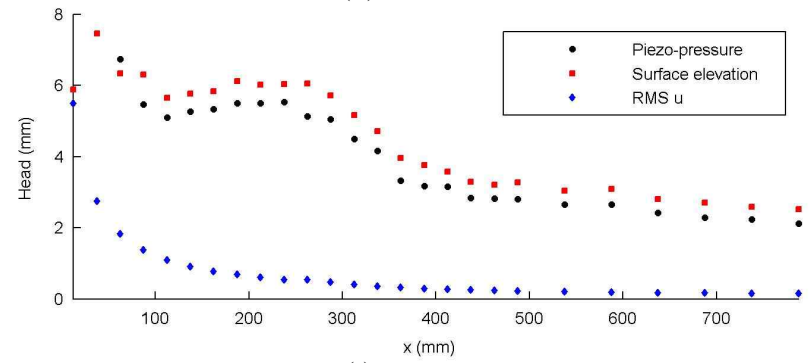
(f) Case 6



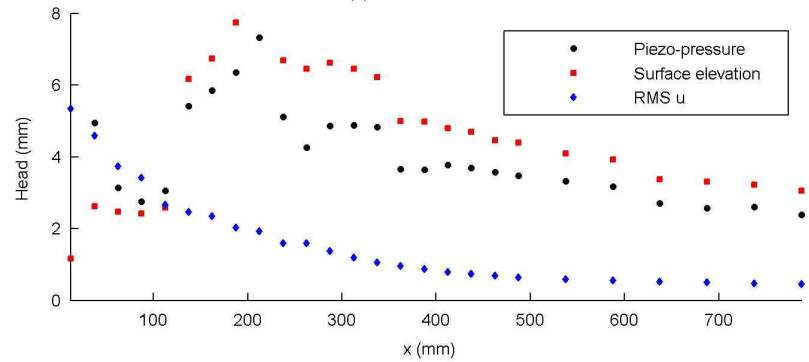
(g) Case 7



(h) Case 8



(i) Case 9

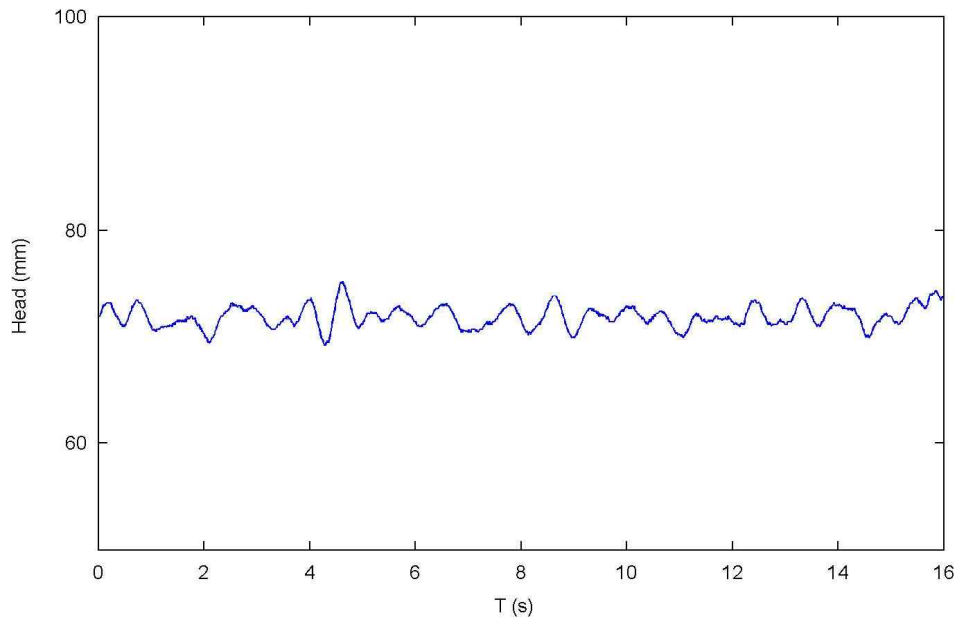


(j) Case 10

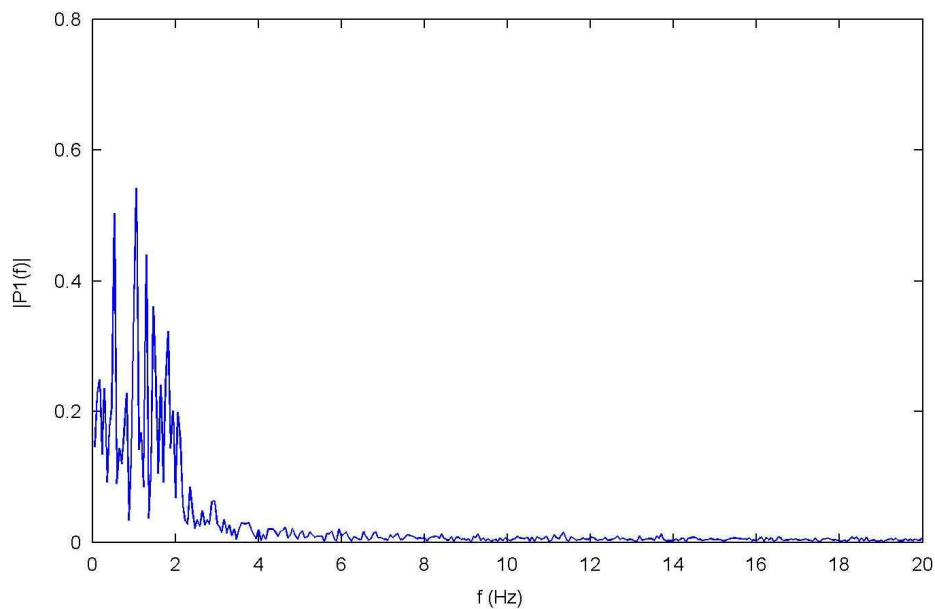
<그림 3.32> 실험안 별 압력, 난류, 수위의 변동성분의 수두 표시(계속)

수두 값의 분포에서 전반적으로 수위의 변동성분이 압력 변동성분과 수평 난류도보다 큰 값을 보여주었다. 압력과 수위의 비교에서 일반적인 분포 특성과 같이 전반적으로 수위 변동성이 더 컸으나, 실험 안에 따라 보 근처에서는 압력 변동성이 수위 변동성보다 크다는 것을 알 수 있다. 유량이 적은 경우 이와 같은 역전 현상이 더 자주 나타났다. 난류강도는  $h = \frac{u'^2}{2g}$  을 근거로 수두 값으로 변환하였으며, 난류강도가 가장 크게 일어나는 보 끝단 부근에서 약 5 mm전후의 수두 크기를 보여주었다. 수두 크기의 비교에서는 보 끝단을 제외하고 전반적으로 작은 크기를 보여주었으며, 보 끝단부터 하류부까지 exponential의 역수 형태로 감소하는 경향을 보여주었다.

## (2) 압력, 난류, 수위 간 상관관계를 위한 변동성분 시계열 주기 분석



(a) 피에조미터 압력의 시계열



(b) 시계열의 FFT분석

<그림 3.33> 압력 시계열의 FFT 분석

이 연구에서는 주요인자의 변동성분의 분석에 크기를 고려하는 일반적인 분석방안에 주기분석을 제안하였다. 도수흐름은 도수구간이 일정하지 않고 진동하는 경향을 보이고 난류도가 큰 흐름에서

는 와류나 shedding과 같은 현상으로 평균흐름 및 난류흐름에서 일정한 주기적 변동 특성을 보인다. 그림 3.33에 제시된 피에조미터 압력의 시계열의 FFT(Fast Fourier Transform)분석으로부터 반복적으로 나타나는 주기 혹은 큰 진폭을 갖는 주기를 도출할 수 있는데 에너지 손실 등 고려가 어려운 인자를 배제한 크기분석에 비해 주기 분석은 인자가 상호관계를 도출하는데 필요할 것으로 판단된다. 그림 3.33(b)에 제시된 주기 분포에서 2 Hz 주기 및 아래 주파대에서 에너지가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이 결과는 100 Hz로 압력이 측정되었으나 피에조미터의 특성상 큰 주기 값을 나타내는 압력 측정 특성에서 기인할 수 있다. 고 측정률을 갖는 압력계의 사용 시 고주파의 변동성에 의한 영향의 검토가 가능할 것으로 판단되며, 저주파 및 고주파에 의한 신호분석이 가능하여 주파 대별 인자 영향의 분석이 가능할 것이다. 그림 3.33은 주기분석에 대한 가능성을 제시하고 있으며, 고 측정률로 장시간 측정 시 유의미한 인자 간 상호관계를 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

### 3. 수리실험 결론

이 연구에서 수행한 수리실험은 보 하류부 물받이공 위에서 발생하는 흐름의 도수현상 시 유속, 압력, 수위변동을 측정하여 얻어진 결과로부터 흐름 특성을 분석하고 인자 간 상호관계를 도출하고자 하였다. 4개의 유량조건을 적용하고 하류수위를 변동하여 잠김 도수 및 도수를 재현하였으며, 도수의 경우 도수발생위치를 보 끝단 및 하류지점에서 발생시켜 Froude수 및 도수형태에 따른 흐름 특성을 분석하였다.

도수흐름 수위는 영상기법을 이용하여 측정하였으며, 흐름의 기포 내재 유무와 상관없이 수면의 가시화를 통해 수위 값을 정량적으로 얻었다. 수위 값은 공간적 순간흐름 특성과 여러 지점에서의 시계열 결과를 얻을 수 있었다. 수위는 도수가 발생하며 큰 변동성을 보였으며, 수위 값으로부터 평균수위 및 변동성을 검토하였다.

유속은 기포의 내재 유무에 따라 PIV 기법과 BIV 기법을 적용하여 도수흐름의 전 구간을 측정하였다. 도수흐름은 상대적으로 큰 운동량을 흐름으로서 기포를 매개로 흐름 유속을 측정하는 BIV 기법 시 기포의 부력 특성에 의한 오차를 최소화할 수 있었다. 도수 흐름에서 두 기법에 의한 기포흐름 영역 경계면에서 좋은 연속성을 보여주었으며, 이를 바탕으로 도수흐름의 전 영역에서의 흐름 특성을 검토할 수 있었다. 도수는 보 물받이공을 따라 평행한 방향으로 주도적이 흐름이 발생하였으며, 잠김 도수는 기포 발생이 미미한 물이 주도된 흐름의 역류대가 발생하였다. 도수 발생이 보 이후 물받이공에서 일어날 경우 기포를 내재한 역류대가 발생하였으며 고유속은 역류대 아래 부분에서 관측되었다. 잠김 도수와 비교하여 고유속이 보 끝단 부근에서 발생하였으나 기포가 내재한 역류대가 발생하는 차이를 보였으며 이 경우 기포에 의한 특성을 검토할 필요가 있다. 난류도 또한 수평방향에서 크게 나타났으며, 연직방향 난류도는 역류대의 상부에서 발생하였다. 연직방향 난류도는 수표면 부근에서 발생하여 에너지 소산에 큰 영향을 줄 수 있으나 물받이공 상부에서의 흐름 안정성에는 상대적으로 영향이 적을 것으로 판단된다. 연직방향에 비해 3배 이상의 크기를 보여주던 수평방향 난류도는 도수 역류대 이후 급격히 감소하여 수심방향으로 일정한 양상을 보여주며, 연직방향 난류도와 유사한 크기를 나타낸다.

피에조미터를 이용하여 측정한 압력 값은 상대적으로 큰 주기에 해당하는 압력 값을 측정할 수 있었으며 미세한 변동에서는 측정이 어려웠다. 하지만, 상대적으로 측정의 용이함, 고속영상을 이용한 고측정률, 동시 측정 등 다양한 측정의 장점을 나타냈으며 흐름 진동 구간이 적절한 구간에 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 다만, 본 연구와 같이 고주파의 미세한 흐름변동이 발생할 경우 고주파대 흐름변동 측정에 제약이 따를 것으로 판단된다.

이 실험연구는 보의 물받이공에서 발생하는 압력을 측정하고 수위, 유속 등 흐름의 주된 특성의 변동성분을 측정하여 그 상관관계를 도출하고자 하였다. 변동성분의 고주파대 특성의 측정 및 분석은 어려웠으나 물받이공의 재료파괴에 영향을 줄 수 있을 것으로 예상한 각 흐름인자의 변동성의 저주파 구간에서는 상호관계가 있음을 확인하였다.

## 제2절 3차원 수치모형을 이용한 흐름 특성 분석

횡단구조물은 수위 유지, 하상고 유지 등의 목적을 가지고 설치되나, 낙차를 가진 고유속의 흐름이 발생할 수 있다. 특히 횡단구조물의 하류에서는 사류가 상류로 바뀌면서 가지고 있는 에너지의 일부를 격렬한 와류와 난류를 통해 소모하는 현상인 도수가 발생된다. 이 연구에서는 이러한 복잡한 흐름을 정량적으로 분석하고, 물반이공과 바닥보호공에 작용하는 외력을 구명하기 위해 3차원 수치모형을 이용하였다.

### 1. 수치모형

#### 가. 수치모형 선정

수리구조물에서 발생하는 3차원적인 흐름을 수치모의하기 위해서는 3차원 수치모형이 이용되어야 하며, 상용화된 3차원 수치모형으로는 FLOW-3D, FLUENT, FIDAP, STAR-CD 등이 있다. 이 중에서 FLOW-3D 모형은 자유표면(free surface)을 갖는 흐름을 가장 잘 모의하는 것으로 알려져 있으며, 국내·외에서 댐 및 여수로 등의 수리구조물에 대한 검토 사례가 다수 있다. 따라서 횡단구조물에서 발생하는 흐름이 자유표면을 갖는 개수로 흐름인 점을 고려하여 FLOW-3D 모형을 선정하였다(표 3.2 참조).

<표 3.2> 3차원 수치모형 선정

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

#### 나. 수치모형 이론적 배경

##### (1) FLOW-3D 소개

FLOW-3D 모형은 미국 뉴 멕시코(New Mexico) 주 로스 알라모스(Los Alamos)에 있는 Flow Science, Inc.가 개발한 범용 전산유체역학(CFD, Computational Fluid Dynamics) 프로그램이다. 로스 알라모스 국립 연구소의 수치유체역학 연구실에서 F. Harlow, B. Nichols 및 T. Hirt 등에 의해 개발된 MAC(Marker And Cell) 방법과 SOLA-VOF 방식을 기초로 하여, Dr. Hirt가 1980년에 Flow Science, Inc.를 설립하여 계속 프로그램을 발전시켰으며, 1985년부터 FLOW-3D 모형을 출시하였다.

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

## (2) 지배 방정식

열전달 및 유체 흐름의 지배 방정식은 질량, 운동량, 에너지의 보존관계를 나타내는 연속 방정식, 운동량 방정식 그리고 에너지 방정식이다. 이 방정식들은 동일한 유체로 이루어지는 계(system)에 질량보존의 법칙, 뉴턴의 운동 제2 법칙, 열역학 제1법칙을 적용함으로써 유도된다. 다음은 3차원 수치모형에 적용된 흐름과 관련된 기초 방정식들을 직교좌표계( $x, y, z$ )에 대하여 소개하였다.

### (가) 연속 방정식

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z) + \xi \frac{\rho u A_x}{x} = R_{DIF} + R_{SOR} \quad (3.1)$$

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

### (나) 운동량 방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} - \xi \frac{A_y v^2}{x V_F} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (u - u_w - \delta u_s) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} + \xi \frac{A_y u v}{x V_F} &= -\frac{1}{\rho} \left( R \frac{\partial p}{\partial y} \right) + G_y + f_y - b_y - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (v - v_w - \delta v_s) \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z - b_z - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (w - w_w - \delta w_s) \end{aligned} \quad (3.2)$$

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

### (다) VOF 함수

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

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[ \frac{\partial}{\partial x}(F A_x u) + R \frac{\partial}{\partial y}(F A_y v) + \frac{\partial}{\partial z}(F A_z w) + \xi \frac{F A_x u}{x} \right] = F_{DIF} + F_{SOR} \quad (3.3)$$

여기서,  $F$ 는 자유표면을 포함하고 있을 때 유체가 차지하는 점유율이다.

#### (라) 난류 모형

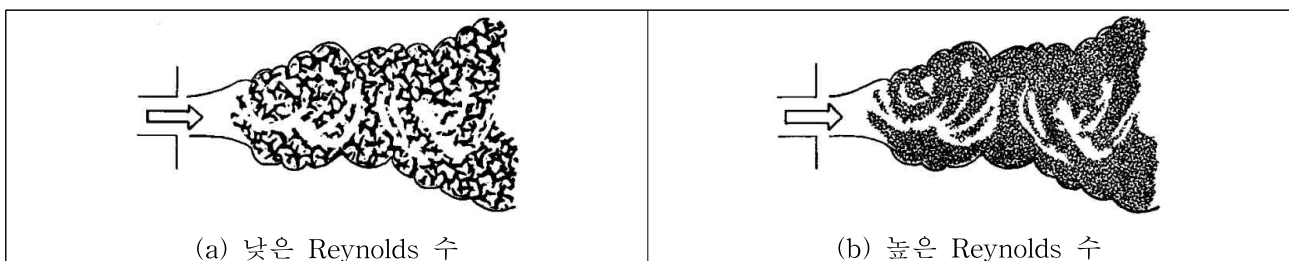
난류는 비정상의 불규칙하고 무질서한 운동으로 예측 불가능하기 때문에 정확한 흐름 계산을 위해서는 난류 현상을 더불어 계산해야 한다. 그러나 난류는 비정규성(nonnormality), 임의성(randomness)의 특징을 가지고 있는 3차원 현상이다. 이 때문에 난류 문제에 대한 결정론적 접근이 어려우며 이러한 경우 통계적 방법에 의존하게 된다. 표 3.3은 난류를 계산하는 방법을 나타낸 것이며, 아래로 갈수록 계산의 부하가 작다.

<표 3.3> 난류의 수치 계산법

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

기본적으로 충분한 격자 해상도와 수치 정도로 적절한 초기 조건과 경계 조건의 기반에서 흐름 기초 방정식(Navier-Stokes 방정식)을 계산하면 난류의 전체가 구해질 수 있다. 구체적으로 흐름장을 격자로 분할하고 차분법이나 스펙트럼법에 의해 각 격자에서의 대표 값을 시시각각으로 구해간다. 이것을 완전한 난류 모의(FTS, Full Turbulence Simulation)라고 한다. 난류의 모든 것을 계산하기 위해서는 계산 영역이 흐름장의 대표 척도,  $L$ 보다 크지 않으면 안되고, 격자 폭은 최소의 변동 척도  $\eta$ 보다도 세밀하지 않으면 안된다. 난류가 본질적으로 3차원 현상인 점을 고려하면, 필요한 영역 분할수(격자수)는 적어도  $(L/\eta)^3$  즉  $Re^{9/4}$ 의 크기이다. 비교적 낮은 Reynolds 수인  $10^4$ 인 경우에도 FTS에 필요한 격자수는  $1,000^3$ 이 된다. 이것은 최신의 슈퍼 컴퓨터에서 실현 가능한 최대 규모나 그것을 상회하는 규모이다. 공학의 대상이 되는 기기나 자연 과학에서 다루는 난류장은 훨씬 높은 Reynolds 수(그림 3.34 참조)일 뿐 아니라, 복잡한 경계 형상이 되는 경우가 많기 때문에, FTS에 필요한 계산 용량은 방대한 것이 된다. 시간 해상도나 시간별의 안정 한계도 고려하면, 비정상 계산의 시간 단계 수도 격자 수의 크기가 된다. 따라서 최신 슈퍼컴퓨터를 이용해도 FTS는 비현실적이다.

난류의 직접 모의(DNS, Direct Numerical Simulation)도 흐름 기초 방정식에 무언가 조작을 가하지 않은 수치 계산이다. 그러나 격자수를  $Re^{9/4}$ 로 설정할 수 있는 것은 드물어서, 엄밀하게는 FTS라고 말할 수 없으나 FTS와 마찬가지로 방대한 계산 용량을 필요로 하기 때문에 비현실적이다.



<그림 3.34> 분사류에서 Reynolds 수의 영향(Tennekes & Lumley, 1972)

현실에 필요한 것은 모든 난류 운동의 자료는 아니며, 큰 흐름의 상황인 것이 대부분이다. 실험 사실 및 이론적인 지식으로서, 큰 와는 흐름장 경계 형상의 영향을 강하게 받지만, 작은 와는 보편적, 등방적(isotropic), 소산적(dissipation)이다. 공학적인 목적으로서의 난류 계산에서는 평균적인 흐름에 강하게 관련된 큰 와(vortex)의 거동을 구하는 것이 중요하게 된다. 이를 위해서는 직접 계산되지 않는 변동의 효과를 포함한 거시화 된 방정식을 수치 계산하지 않으면

안된다. 이 방정식은 무엇을 계산하는가에 따라 다르지만, Navier-Stokes 방정식에 어떤 종류의 평균화 조작은 하는 것에 의해 유도된다. 그래서 풀어야 할 흐름과 그것 이외에 난류 사이의 관계를 주는 것, 결국 난류 모형화가 필요하게 된다.

정상 흐름(또는 변동에 비해 대단히 완만하게 변하는 비정상 흐름)만을 풀려고 하면, 이른바 난류 운동의 모두를 모형화의 대상으로 한다. 이때 Navier-Stokes 방정식에는 Reynolds 평균이 시행된다. Reynolds 평균장의 계산은 Reynolds 평균 Navier-Stokes 방정식 또는 그의 수치 모의라고 하는 의미로 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes) 방정식의 해석이라고 부른다.

난류의 비교적 큰 구조를 직접 계산의 대상으로 하고, 그것에서 미세한 변동만을 모형화하는 계산을 큰 와 모의(large-eddy simulation)라고 한다. LES 방정식으로서 Navier-Stokes 방정식에 공간적으로 대소의 척도를 분리하기 위한 필터를 곱한 것이 이용된다. 수치 계산에서는 격자 크기까지 잡을 수 있기 때문에, ‘큰 와’를 격자 크기 이상의 와로 정의하면 가장 무리가 적다. 이런 의미에서 LES에서의 필터는 Reynolds 평균에 대해서 격자 평균으로 불리는 경우도 있다.

(마) 난류 수송 방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial k_T}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial k_T}{\partial x} + v A_y \frac{\partial k_T}{\partial y} + w A_z \frac{\partial k_T}{\partial z} \right\} &= P_T + G_T + Diff_{k_T} - \epsilon_T \quad (3.4) \\ P_T &= CS PRO \left( \frac{\mu}{\rho V_F} \right) \left\{ \begin{aligned} &2A_x \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2A_y \left( R \frac{\partial v}{\partial y} + \xi \frac{u}{x} \right)^2 + 2A_z \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \\ &+ \left( \frac{\partial v}{\partial x} + R \frac{\partial u}{\partial y} - \xi \frac{v}{x} \right) \left[ A_x \frac{\partial v}{\partial x} + A_y \left( R \frac{\partial u}{\partial y} - \xi \frac{v}{x} \right) \right] \\ &+ \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \left( A_z \frac{\partial u}{\partial z} + A_x \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ &+ \left( \frac{\partial v}{\partial z} + R \frac{\partial w}{\partial y} \right) \left( A_z \frac{\partial v}{\partial z} + A_y R \frac{\partial w}{\partial y} \right) \end{aligned} \right\} \\ G_T &= - CRHO \left( \frac{\mu}{\rho^3} \right) \left( \frac{\partial \rho}{\partial x} \frac{\partial p}{\partial x} + R^2 \frac{\partial \rho}{\partial y} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \rho}{\partial z} \frac{\partial p}{\partial z} \right) \\ Diff_{k_T} &= \frac{1}{V_F} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left( v_k A_x \frac{\partial k_T}{\partial x} \right) + R \frac{\partial}{\partial y} \left( v_k A_y R \frac{\partial k_T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_k A_z \frac{\partial k_T}{\partial z} \right) + \xi \frac{v_k A_x k_T}{x} \right\} \\ \epsilon_T &= CNU^{3/4} \frac{k_T^{3/2}}{TLEN} \end{aligned}$$

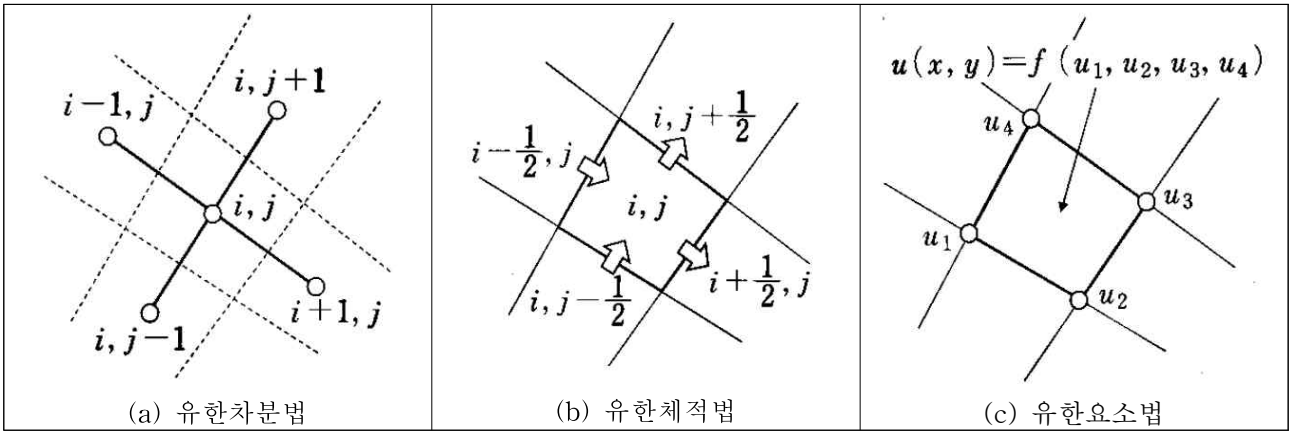
여기서,  $A_x, A_y, A_z$  및  $V_F$ 는 FAVOR 함수,  $P_T$ 는 난류 운동에너지 생성항,  $G_T$ 는 부력 생성항,  $Diff_{k_T}$ 는 확산항,  $\epsilon_T$ 는 난류에너지 소산항,  $CS PRO$ 는 난류 매개변수(기본 값은 1.0),  $CRHO$ 는 난류 매개변수(기본 값은 0.0),  $v_k$ 는 확산 계수,  $CNU$ 는 매개변수(기본 값은 0.09),  $TLEN$ 은 난류길이 척도이다.

### (3) 처리기법

(가) 유한차분법

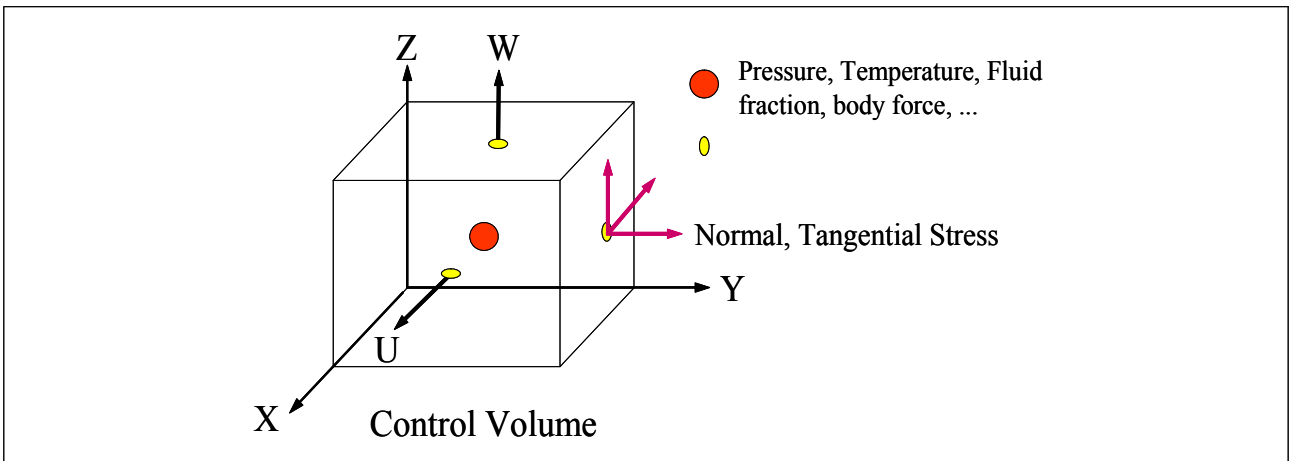
연속체로 정의된 방정식을 컴퓨터를 이용하여 모의하기 위해서는 이의 이산화(discretization)가 필요하며 이산화하는 방법은 크게 유한요소법(FEM, Finite Element Method), 유한체적법(FVM, Finite Volume Method), 유한차분법(FDM, Finite Difference Method)으로 나눌 수 있다(그림 3.35

참조).



<그림 3.35> 이산화의 개념도

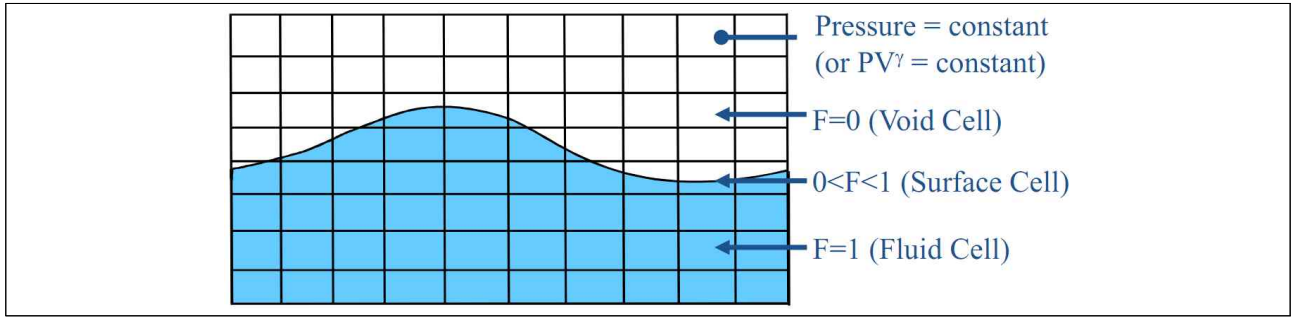
지배 방정식은 유한차분법을 이용하여 이산화되고, FAVOR 방법을 이용함으로써 유한체적법의 접근 방법으로 모의된다. 일반적으로 수치모의를 하게 되면 모의영역을 격자라 불리는 다수의 작은 영역으로 나눈 후, 격자 단위로 계산이 이루어지게 된다. 각 격자에 주어진 압력을 시간에 대한 양해법(explicit method)으로 다음 시간에서의 속도를 계산하며, 이 속도를 이용하여 포아송 방정식(Poisson equation) 형태의 압력 방정식의 해를 구한 다음 다시 속도를 교정하고, 그 후에 자유표면의 모의가 요구될 때는 VOF 함수를 풀어나가는 방법을 사용하고 있다. 그림 3.36는 FLOW-3D 모형에서 사용하는 물리량을 간략하게 표시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 속도 및 응력들은 각 격자 면에서 정의되고, 다른 변수들은 격자 중심에서 정의되고 있다.



<그림 3.36> FLOW-3D 모형의 격자계

#### (나) VOF 방법

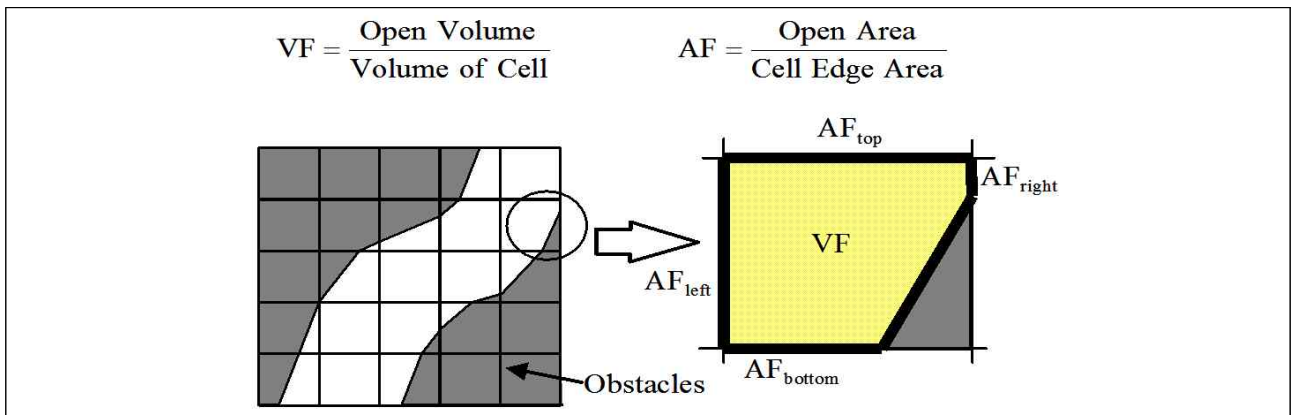
비산, 파랑 및 제트 등과 같은 복잡한 자유표면 운동의 기술은 움직이는 격자를 사용하는 라그랑지안방법(Lagrangian) 보다 고정 오일러리안방법(Eulerian)을 사용하는 VOF 방법을 이용하여 보다 간단히 이루어질 수 있다. FLOW-3D 모형에 이용되고 있는 VOF 방법은 공용되고 있는 VOF 방법과는 달리, 정확한 압력 및 운동학적 경계 조건을 상이 경계면(sharp interface)에 적용하고 있으며, 이산화 할 때 상이경계면의 뭉개짐(smearing)을 방지하기 위해 특별 수치차분법을 이용함으로써 두 유체(액체와 기체일 경우는 보통 자유표면으로 가정함) 사이의 운동을 기술할 수 있는 수치 모의 방법이다. 그림 3.37에 VOF 방법의 개념에 대해 나타내었다.



<그림 3.37> VOF의 개념도(Flow Science, 2015)

#### (다) FAVOR 방법

FAVOR는 직육면체 형태의 격자 안에 들어있는 일반 형상을 기술하는 방법으로 직육면체 격자의 6개면 전체 또는 일부가 출입할 수 없는 물체에 의해 막혀있을 수 있다고 정의하는 것이다. 그러므로 하나의 직육면체 격자에서 유동 물질이 차지하는 부피 및 매질이 통과하는 면적이 정의되며, 이 격자 안에서의 통과 면적 및 해당 유속을 고려한 질량, 운동량, 에너지 방정식의 유한체적 적분을 통해 일반 물체 주위의 유동에 대한 영향을 기술하게 된다. 따라서 경계 밀착 좌표계(BFC, Body Fitted Coordinate)로의 좌표 변환을 하지 않는 유한차분법을 사용할 때 가장 큰 문제 중 하나인 계단형 격자에 의한 결과의 정확도 저하 문제를 해결하였다. 그림 3.38에 FAVOR 방법의 개념에 대해 나타내었다.



<그림 3.38> FAVOR의 개념도(Flow Science, 2015)

#### (라) 경계조건

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

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

## 2. 수치모형 적용

횡단구조물 하류에서 발생하는 난류현상에 의해 물받이공의 피로파괴 및 바닥보호공 사석 저면의 하상토가 흡출되는 흡출파괴가 빈번하게 발생된다. 이 연구는 이러한 파괴를 방지하기 위해 흐름을 정량적으로 분석하고, 물받이공과 바닥보호공에 작용하는 외력을 구명하고자 한다. 또한 PIV (Particle Image Velocimetry) + BIV (Bubble Image Velocimetry) 기법을 병용한 수리실험 결과와 비교하여 수치모의의 신뢰성을 확보하고자 한다.

## 가. 수리실험과 비교

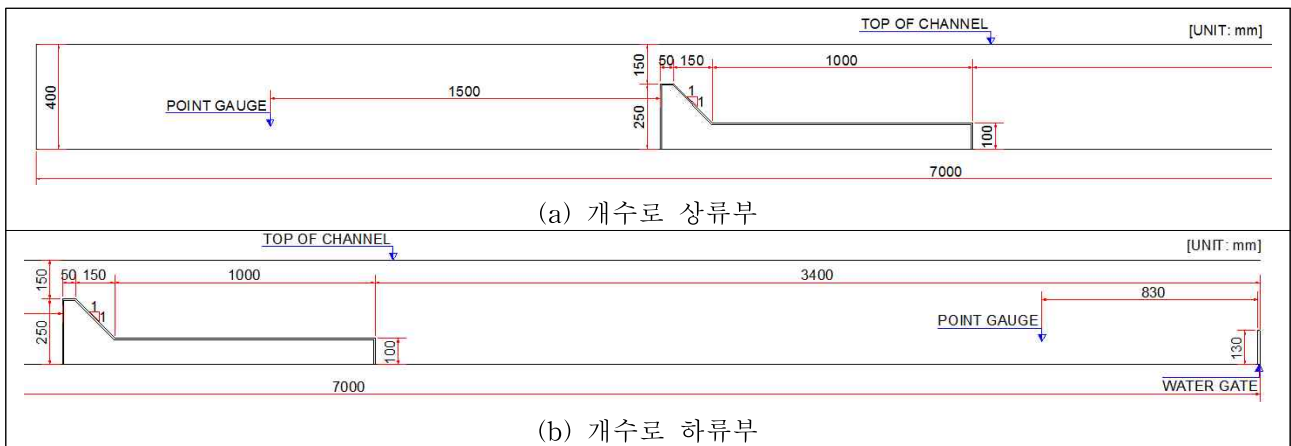
### (1) 수치모의 조건

수치모의 결과의 적정성을 평가하기 위해 한국건설기술연구원에서 수행된 수리실험 결과를 비교 대상으로 선정하였다. 수리실험에 사용된 수로는 길이 7.0 m, 폭 0.3 m, 높이 0.4 m의 크기를 갖는 순환수로 방식이다. 수로 내부에는 0.15 m 높이의 보(또는 횡단구조물)와 1.0 m 길이의 하상유지공(또는 물받이공과 바닥보호공)을 설치하였다. 구조물의 재료로서 수로의 바닥과 벽면은 강화유리, 보와 하상유지공은 아크릴로 제작되었다. 따라서 조도계수(roughness coefficient)는 0.010을 적용하였으며, 이는 Chow (1959)가 제시한 다양한 종류의 수로에 대한 조도계수 중 Glass의 Normal 값을 나타낸다. 이때 FLOW-3D 모형은 조고(roughness height)가 사용되므로 Christensen (1984)이 제시한 식 (3.5)를 이용하여 환산된 조고 0.0003 m를 적용하였다.

$$n = \frac{k_s^{1/6}}{8.25\sqrt{g}} = 0.039k_s^{1/6} \quad (3.5)$$

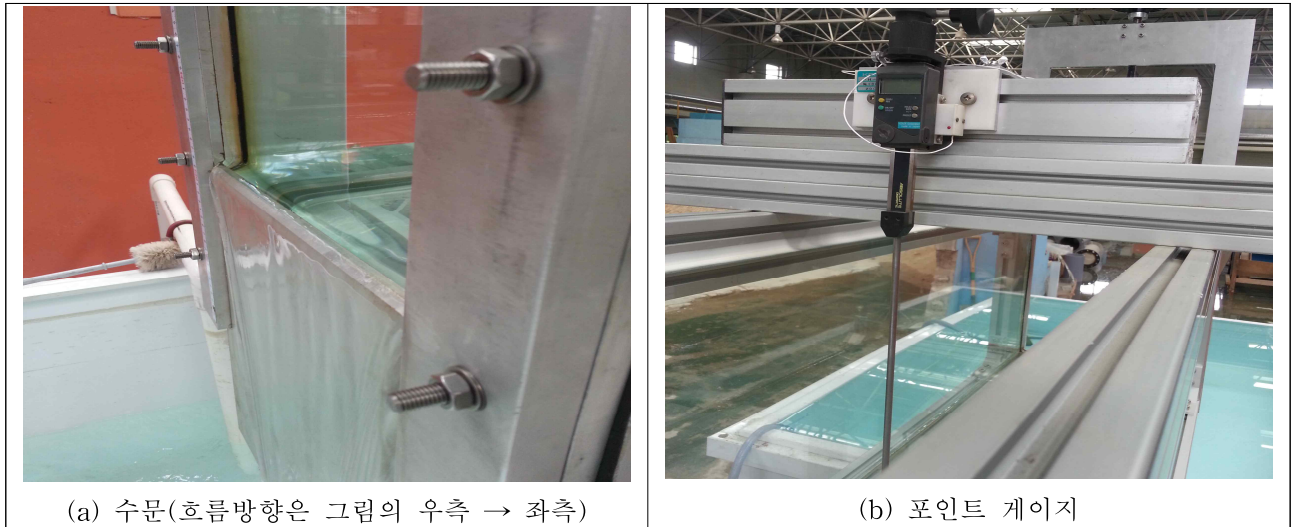
여기서,  $n$ 은 조도계수,  $g$ 는 중력가속도,  $k_s$ 는 조고이다.

수치모의에 적용된 계산 영역은 시점인 보 마루부(weir crest)를 기준으로 상류(upstream) 방향으로 1.5 m, 하류(downstream) 방향으로 4.6 m 구간이다(그림 3.39 참조). 격자는 총 2,294,175개가 사용되었으며, x 및 y축으로 0.005 ~ 0.010 m 간격, z축으로 0.005 m 간격을 부여하였다. 특히 본 연구의 관심 대상인 하상유지공 주변에 조밀한 격자를 부여하여 비교적 작은 척도의 와를 해상할 수 있도록 하였다. 경계조건은 수리실험 결과와 비교하기 위해 상류에 수위 0.287 m, 하류에 유출경계조건(outflow boundary condition) 및 수문 높이 0.13 m(그림 3.39의 (a) 참조)를 적용하여 동일하게 구성하였으며, 모의시간을 단축하기 위해 경계조건에 해당하는 수위를 초기조건으로 부여하였다. 이때 유출경계조건은 수문 하류의 흐름특성이 월류량에 영향을 주지 않는 완전 월류 조건이 되도록 하는 경계조건이다.

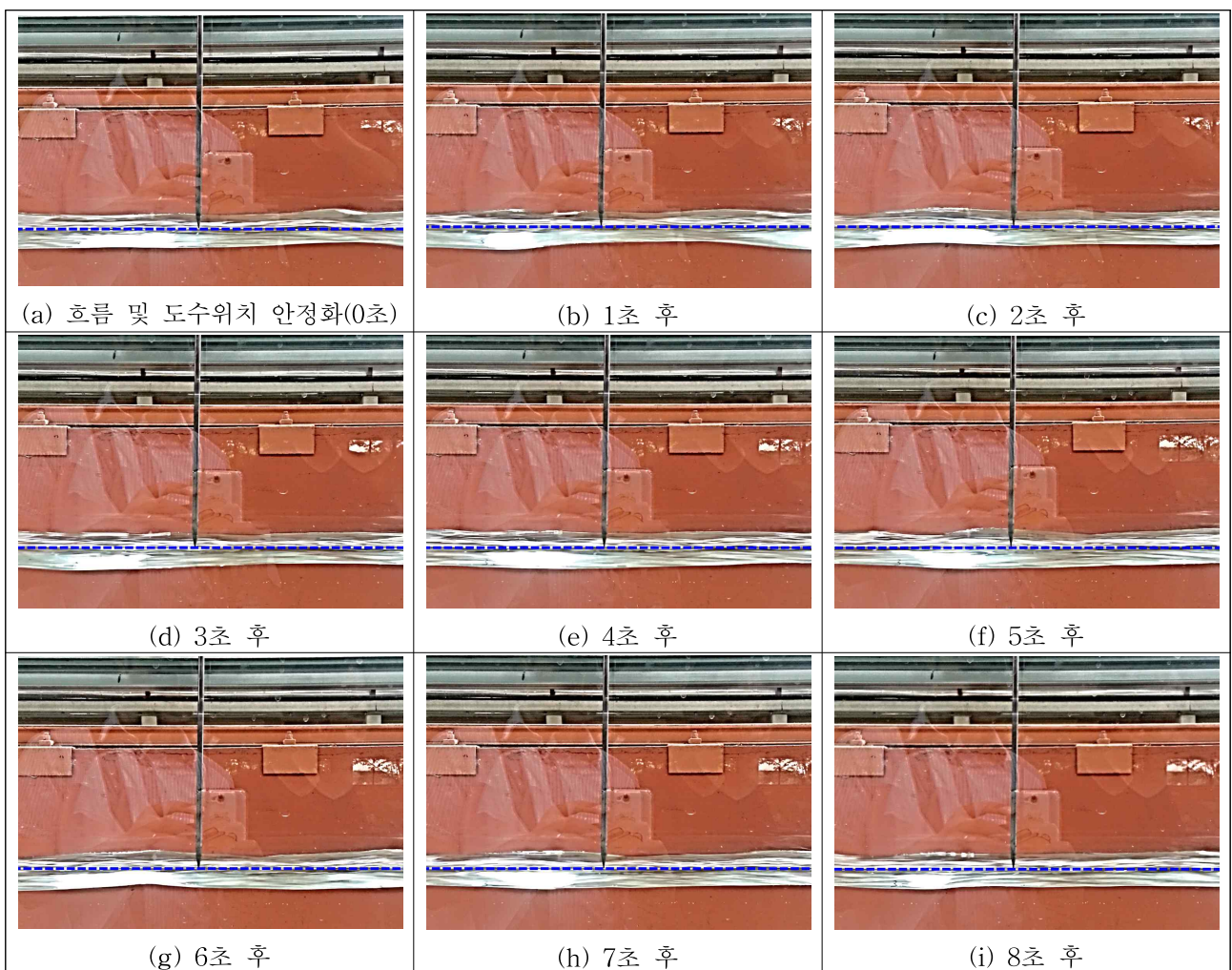


<그림 3.39> 수리실험에 적용된 개수로 및 구조물 제원

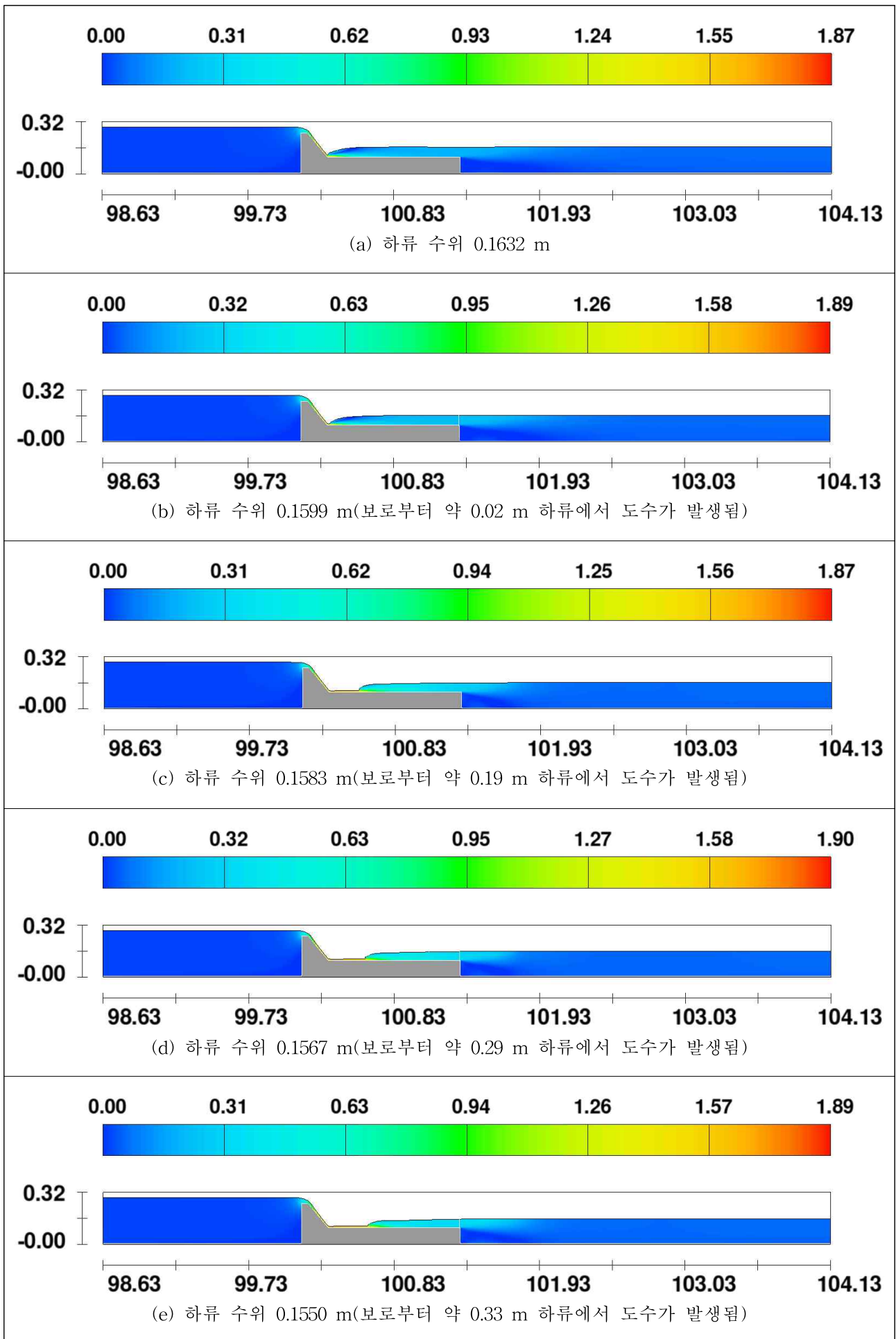
그림 3.39 및 그림 3.40의 (b)와 같이, 보 상류뿐만 아니라 하류에도 수위를 측정하는 장치인 포인트 게이지가 설치되어 있어, 수치모의를 위한 하류 경계조건으로 측정된 수위를 부여할 수 있다. 그러나 수리실험에서 도수의 영향으로 하류 수위가 미소하게 진동(oscillation)하는 현상이 발생되었으며(그림 3.41 참조), 하류 수위와 도수 발생 위치의 상관성을 검토하기 위한 사전 수치모의에서 하류 수위 0.1632 m를 기준으로 1%(약 1.6 mm)씩 저하시킬 때마다 도수 발생 위치가 민감하게 변화되는 것을 확인하였다(그림 3.42 참조). 따라서 상대적으로 오차가 작은 하류 경계조건을 부여하기 위해 개수로 말단에 설치된 수문(그림 3.40(a) 참조) 높이를 반영하였다.



<그림 3.40> 수리실험 장치



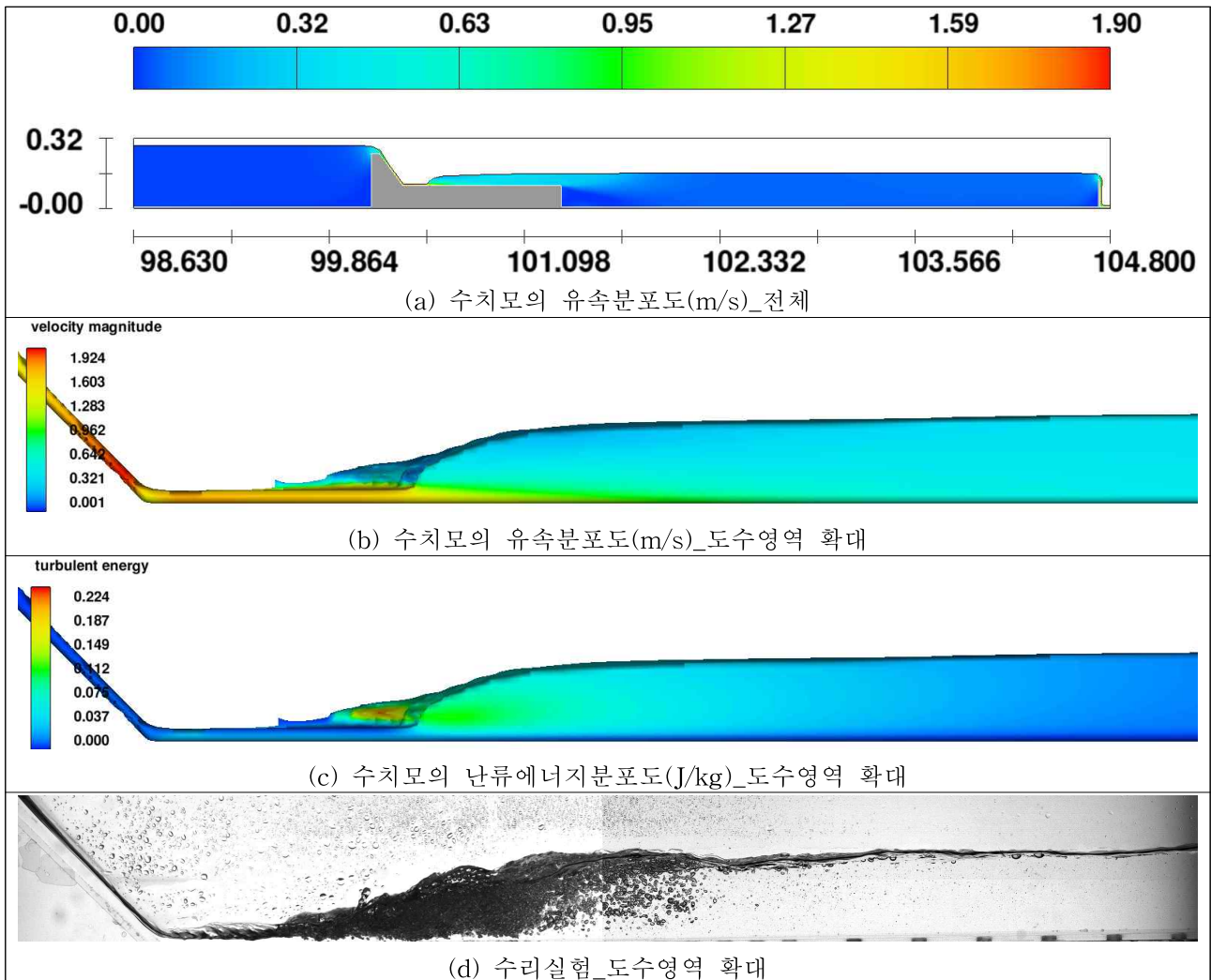
<그림 3.41> 하류 수위 측정지점(포인트 게이지 설치 지점)에서 수면 변화



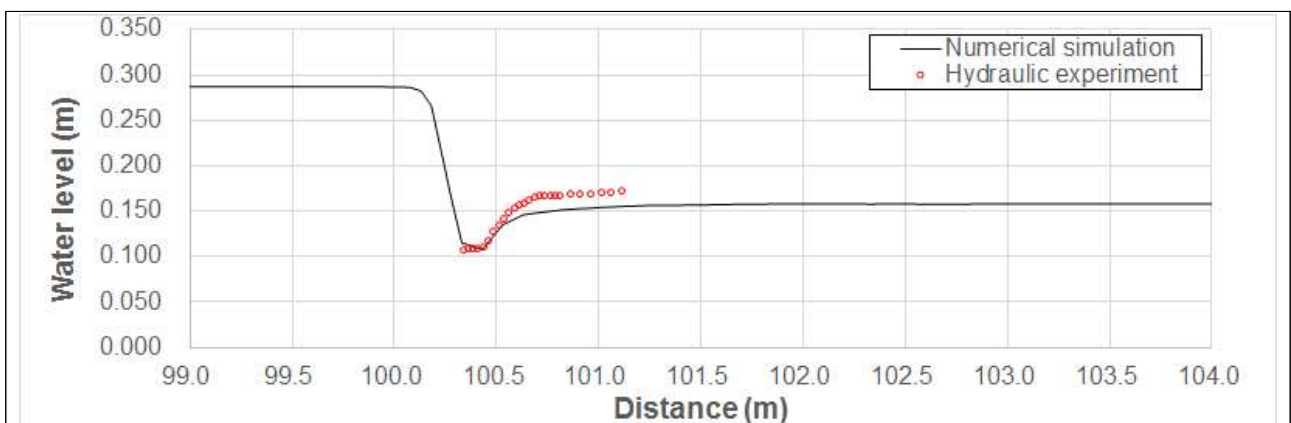
<그림 3.42> 하류 수위 변화에 따른 도수 발생 위치 검토

## (2) 수치모의 결과

물받이공에서 완전 도수가 발생하는 조건으로 수치실험 결과와 비교하였다(그림 3.43 참조). 먼저 수위의 경우 Weir 하류 26개 지점에서 비교(그림 3.44 참조)하였으며, 수치실험 대비 1.0~9.8%의 오차를 보였다. 이때 대부분의 오차는 도수 영역에서 발생되었다. 도수 영역은 물받이공 끝단(보 끝단으로부터 1 m 하류)보다 약 32배 높은 난류에너지가 분포되어, 변동의 운동에너지가 큰 영역이기 때문에 오차가 다른 영역에 비해 큰 것으로 판단된다. 도수의 경우 수치실험과 거의 동일한 지점에서 발생된 것으로 보아 수치모형이 도수를 잘 재현한 것으로 판단되며, 도수의 형태는 Froude number가 약 6.2인 것으로 보아 정상도수(steady jump) 범위에 포함된다.



<그림 3.43> 수치모의와 수치실험의 도수 위치 비교



<그림 3.44> 수위 비교 그래프

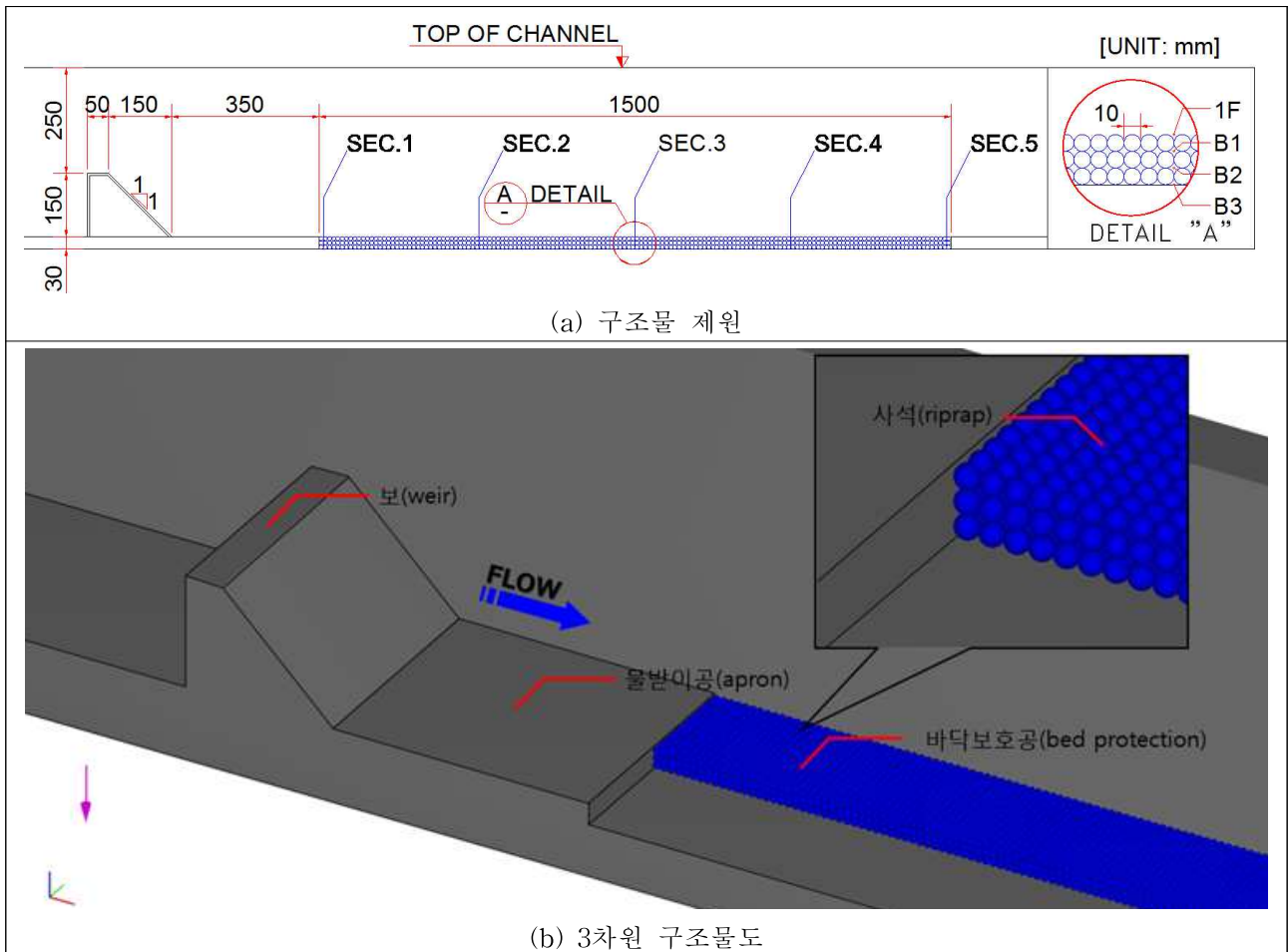
## 나. 유형별 흐름특성 검토

### (1) 수치모의 조건

유형별 흐름특성 검토는 3장 2절 2-가 「수리실험과 비교」에 사용된 보와 동일한 제원(보 높이 0.15 m)을 적용하여 수행하였다. 하천설계기준(한국수자원학회, 2009)에서 보는 ‘기초지반에서 고정 보 마루까지의 높이가 15 m 미만인 경우’로 정의하고 있으며, 수리실험에 사용된 보 높이가 0.15 m 인 점을 고려하여 축척을 1:100으로 가정하였다. 물받이공 길이( $L_1$ )는 현실적인 제원을 반영하기 위해 Bligh(1910)가 제시한 식 (3.6)을 이용한 결과 34.86 m(Bligh 계수는 15로 가정)로 산정되었으며, 해당 축척을 반영하여 0.35 m를 적용하였다. 바닥보호공 길이( $L_2$ )는 포설 범위를 평가하기 위해 충분히 길게 구성하였으며, 바닥보호공이 굴요성 구조(flexible structure)인 점을 고려하여, 형상은 직경 0.01 m의 구체(sphere)로 가정하여 3층으로 배치하였다. 구조물의 조도계수는 수로의 바닥과 벽면에 0.010(조고 0.0003 m)을 적용하였으며, 구체로 반영된 바닥보호공은 조도계수 0.030(조고 0.2072 m)을 적용하였다. 조도계수 0.030은 Chow(1959)가 제시한 다양한 종류의 수로에 대한 조도계수 중 Riprap의 Normal 값을 나타낸다.

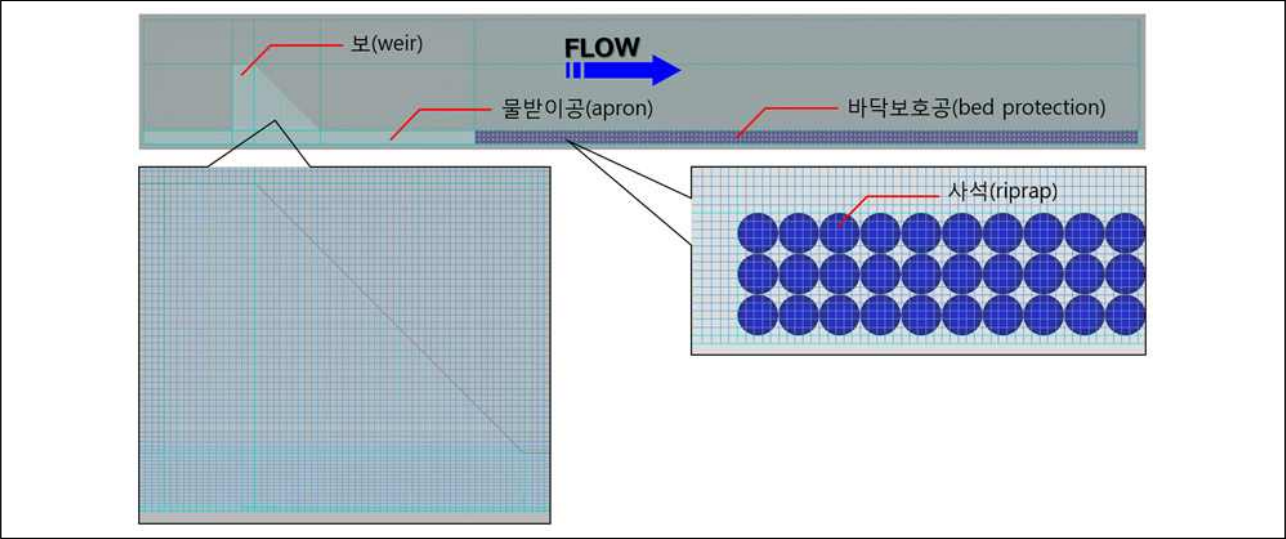
$$L_1 = 0.6 C \sqrt{H_u} \quad (3.6)$$

수치모의에 적용된 계산 영역은 시점인 보 마루를 기준으로 상류 방향으로 0.20 m, 하류 방향으로 2.05 m 구간이며(그림 3.45 참조), FLOW-3D 모형에서 경계에 수직한 유속 및 경사 성분이 0인 조건(symmetry condition)을 적용할 수 있어 수로 폭은 0.05 m만 적용하였다. 흐름특성 검토 위치로는 물받이공의 경우 보 경사면 끝단으로부터 0.025 m 간격(바닥으로부터 0.001 m 상부)으로 총 14개 위치에 대해 검토하였으며, 바닥보호공의 경우 그림 3.45의 (a)와 같이 5개 단면과 4개 층으로 구성된 총 20개 위치에 대해 검토하였다.



<그림 3.45> 수치모의에 적용된 개수로 및 구조물 제원

격자는 총 2,105,400개가 사용되었으며, x축으로 0.002 ~ 0.004 m 간격, y축으로 0.002 m 간격, z축으로 0.002 ~ 0.004 m 간격을 부여하였다(그림 3.46 참조). 특히 이 연구의 관심 대상인 물받이공 주변 및 바닥보호공의 공극에 조밀한 격자를 부여하여 비교적 작은 척도의 와를 해석할 수 있도록 하였다.



<그림 3.46> 격자 구성

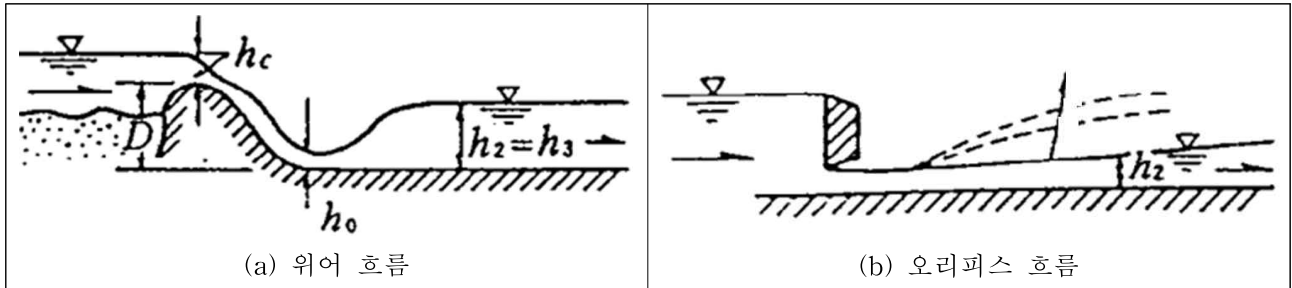
경계조건은 월류 형태(위어 흐름, 오리피스 흐름), 도수 형태(완전 도수, 불완전 도수), 물받이 형태(평면형, 웅덩이형, 썰기형, 돌출형) 변화에 따라 물받이공 및 바닥보호공에 작용하는 흐름특성을 검토하기 위해 표 3.4와 같이 다양하게 구성하였으며, 총 16 Cases에 대해 검토하였다. 이때 물받이공에 완전 도수( $Fr > \sqrt{3}$ )가 발생되도록 하류에 수위 0.072 m( $Fr = 4.46$ )를 적용하였으며, 불완전 도수( $Fr < \sqrt{3}$ )가 발생되도록 하류에 수위 0.178 m( $Fr = 1.19$ )를 적용하였다. 나머지 조건은 구조물의 형상만 변경되는 것이다.

월류 형태에서 오리피스 흐름의 경우, 상류 및 하류 경계조건 외에 저류 수문(underflow gate)의 개도 높이를 변수로 입력해야 한다. 이 연구의 주목적은 물받이공 및 바닥보호공에서의 흐름특성 검토이기 때문에 위어 흐름의 접근유속과 유사하게 재현하고자 하였으며, 낙차에 의한 도수 전 수심을 저류 수문의 개도 높이로 부여하였다.

<표 3.4> 수치모의 검토안

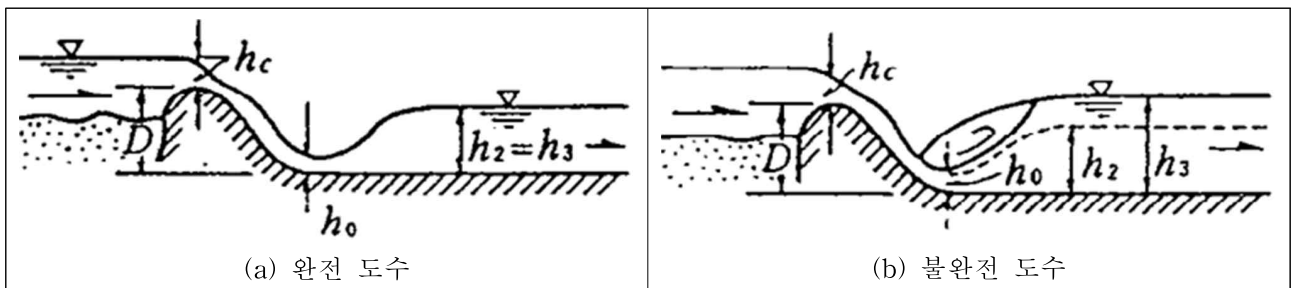
| Case       | 상류 경계조건       | 하류 경계조건<br>(도수 형태)        | 월류 형태   | 물받이 형태 |
|------------|---------------|---------------------------|---------|--------|
| Case W-1-1 | 수위<br>0.200 m | 수위<br>0.072 m<br>(완전 도수)  | 위어 흐름   | 평면형    |
| Case W-1-2 |               |                           |         | 웅덩이형   |
| Case W-1-3 |               |                           |         | 썰기형    |
| Case W-1-4 |               |                           |         | 돌출형    |
| Case W-2-1 |               | 수위<br>0.178 m<br>(불완전 도수) |         | 평면형    |
| Case W-2-2 |               |                           |         | 웅덩이형   |
| Case W-2-3 |               |                           |         | 썰기형    |
| Case W-2-4 |               |                           |         | 돌출형    |
| Case O-1-1 | 수위<br>0.200 m | 수위<br>0.072 m<br>(완전 도수)  | 오리피스 흐름 | 평면형    |
| Case O-1-2 |               |                           |         | 웅덩이형   |
| Case O-1-3 |               |                           |         | 썰기형    |
| Case O-1-4 |               |                           |         | 돌출형    |
| Case O-2-1 |               | 수위<br>0.178 m<br>(불완전 도수) |         | 평면형    |
| Case O-2-2 |               |                           |         | 웅덩이형   |
| Case O-2-3 |               |                           |         | 썰기형    |
| Case O-2-4 |               |                           |         | 돌출형    |

위어 흐름은 보의 시설물 중 수문이 없어 수위를 조절할 수 없는 고정보를 의미하며, 오리피스 흐름은 보의 시설물 중 수문 조작을 통해 수위의 조절이 가능한 가동보를 의미한다(일부 가동보는 위어 흐름과 오리피스 흐름이 모두 가능함). 이때 가동보의 물받이공 및 바닥보호공은 고정보와 같이 Bligh 공식 또는 국립건설시험소 공식으로 설계하되 그 길이는 일반적으로 고정보의 50% 정도로 하면 된다(한국수자원학회, 2009).



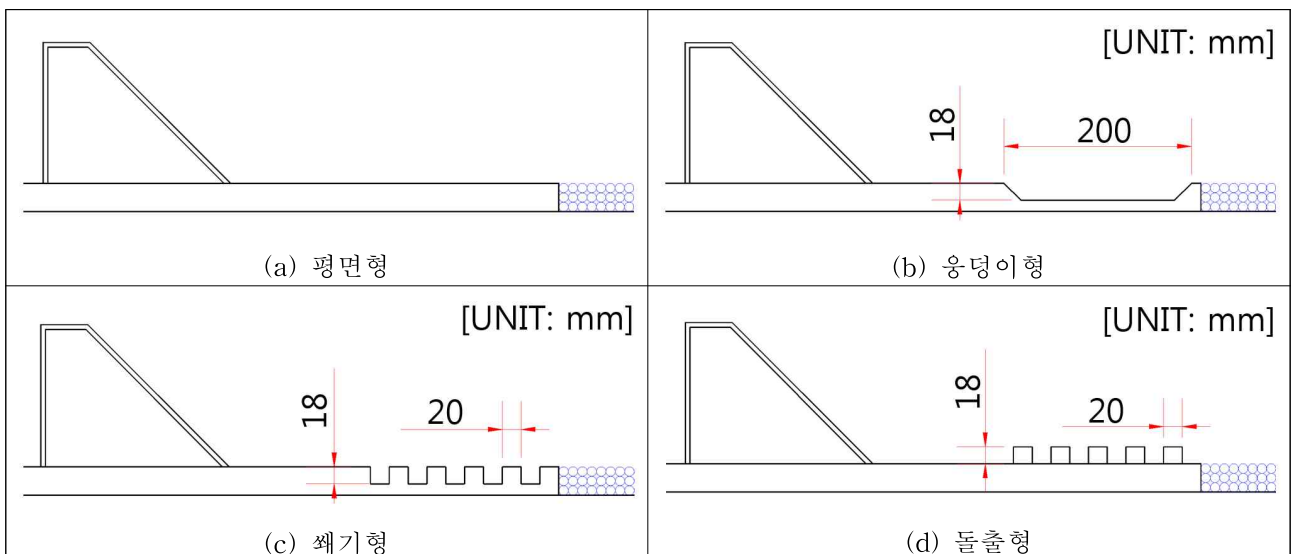
<그림 3.47> 월류 형태(농림부, 1996)

완전 도수는 하류 수심,  $h_3$ 가 공액 수심,  $h_2$ 와 일치하는 경우로서 비탈 끝에서 도수가 일어나 에너지가 소멸되어, 가장 이상적인 감세가 생기는 수리영역이다. 불완전 도수는 하류 수심,  $h_3$ 에 의한 수위가 보 마루에서의 한계 수심,  $h_c$ 에 의한 수위보다 낮고, 비탈 끝에서의 수심,  $h_0$ 에 대응하는 공액 수심,  $h_2$ 에 의한 수위보다 높은 경우이다. 이때 불완전 도수의 경우 최고유속이 바닥층의 흐름에서 나타나므로 바닥보호공에 대한 공법의 선정에 주의가 필요하다(농림부, 1996).



<그림 3.48> 도수 형태(농림부, 1996)

보 하류부에 위치한 물받이공 영향에 의한 흐름특성을 분석하기 위해, 물받이공의 형태를 평면형, 웅덩이형, 켜기형, 돌출형으로 구성하였다. 이때 감세주(baffle pier)의 높이는 Paterka(1984)의 Basin III을 기준으로 결정하였다.

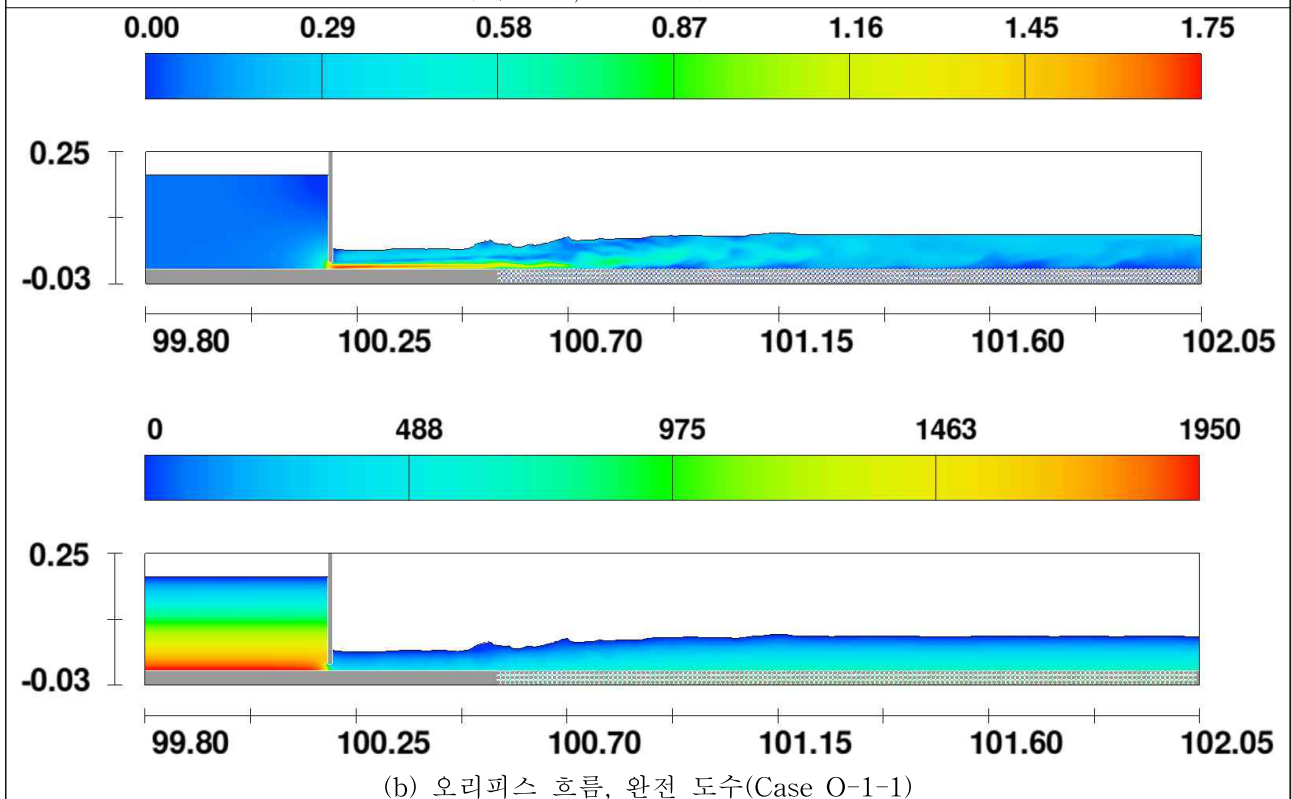
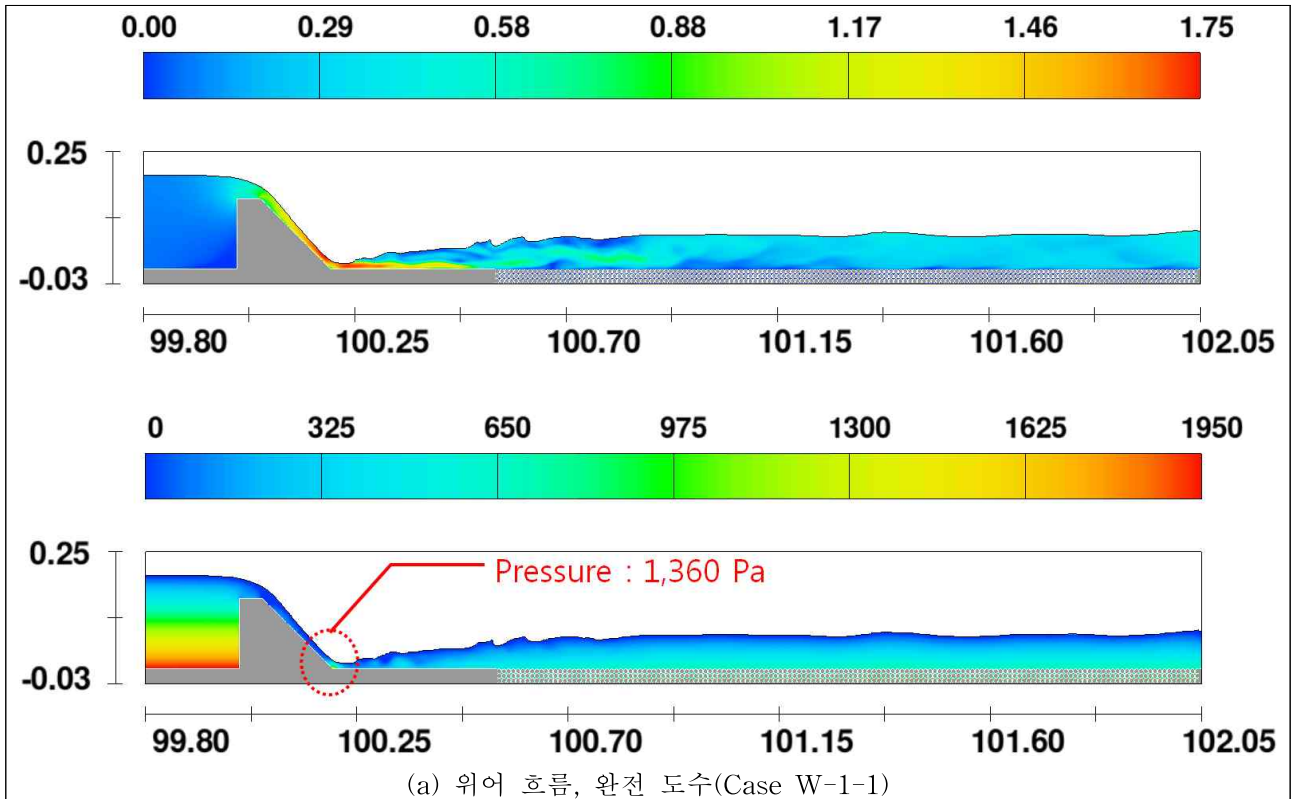


<그림 3.49> 물받이 형태

## (2) 수치모의 결과

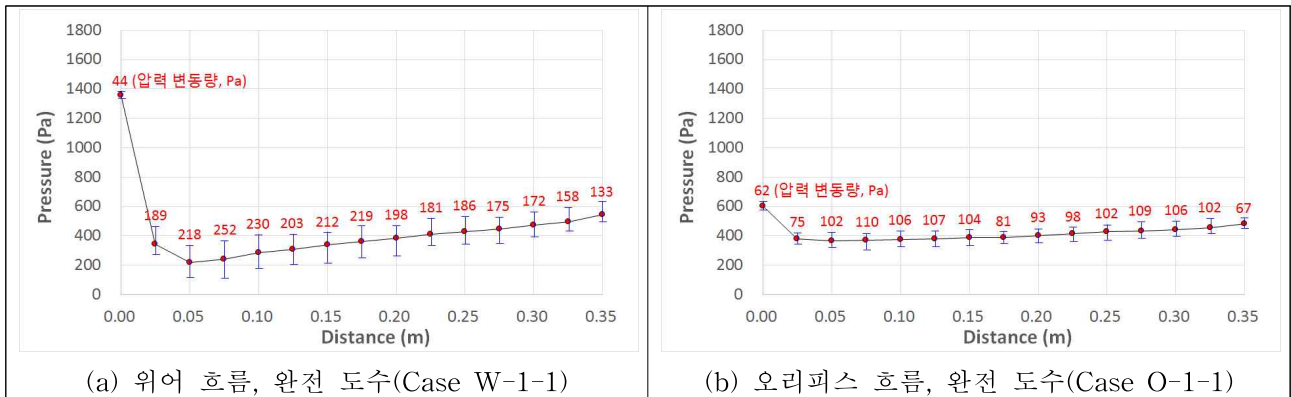
### (가) 위어 흐름과 오리피스 흐름의 검토

앞서 언급한 바와 같이 오리피스 흐름의 접근유속을 위어 흐름과 유사하게 재현하기 위해, 낙차에 의한 도수 전 수심을 저류 수문의 개도 높이로 부여하였으며, 그 결과 그림 3.50과 같이 물받이공의 접근유속이 1.75 m/s로 유사하게 형성되었다. 그러나 오리피스 흐름의 경우 저류 수문에 의한 사류 제트 위에 와류가 얹혀 있는 잠김 방류(drowned flow) 형태를 보이고 있다.



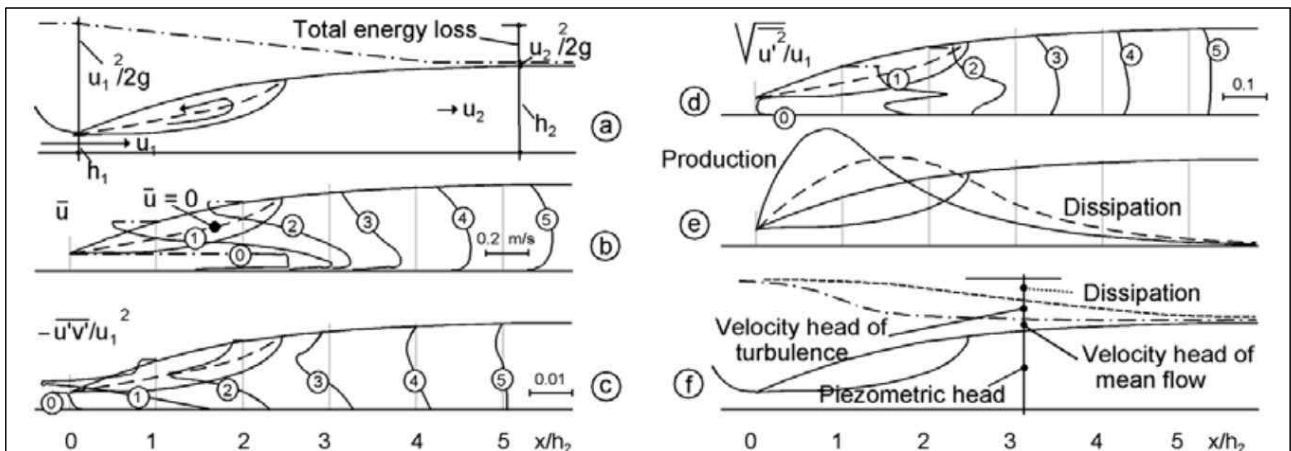
<그림 3.50> 유속 및 압력 분포도

위어 흐름과 오리피스 흐름의 하류 경계조건인 수위가 동일하여, 그림 3.51과 같이 물받이공에 형성되는 평균압력은 유사한 경향을 보였다. 그러나 위어 흐름의 경우 보 경사면 끝단의 수위가 낮음에도 불구하고 약 1,360 Pa의 높은 압력이 국부적으로 분포되었으며(그림 3.51 (a) 참조), 물받이공 전체 압력 변동량은 0.7~2.7배 높은 것으로 검토되었다. 위어 흐름에서 압력 변동량이 높게 나타난 이유는 격렬한 난류와 와류를 동반한 도수가 발생되었기 때문으로 판단된다.



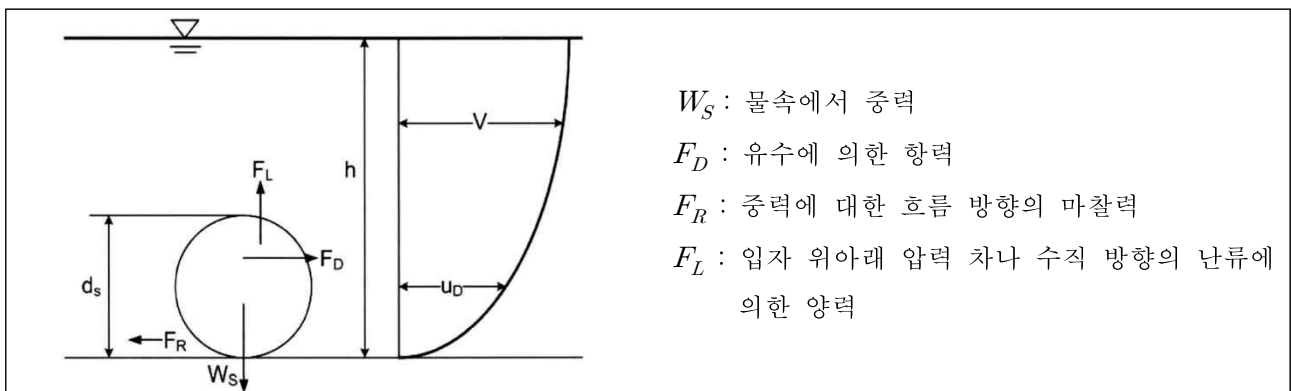
<그림 3.51> 물받이공에서 압력 변동량 그래프

물받이공 길이 방향에 대한 압력 변동량의 경향을 보았을 때, 에너지가 생성되는 도수 시점 주변에서 압력 변동량이 높게 분포되었으며, 에너지가 소멸되는 도수 종점으로 갈수록 압력 변동량이 점차 감소하였다. 이는 Rouse(1959)가 제시한 도수에서 난류 분포( $Fr = 4$ 에 대한 분포를 나타냄)와 일치하는 것으로 판단된다(그림 3.52 참조).

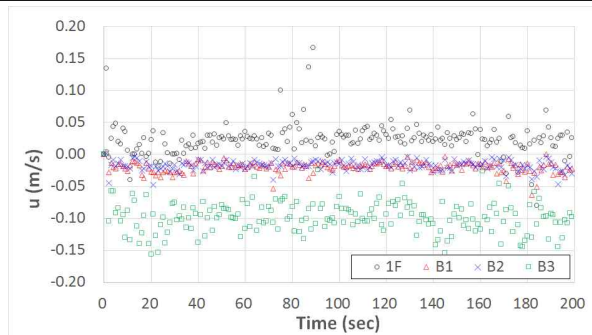


<그림 3.52> 도수에서 흐름과 난류(Rouse, 1959)

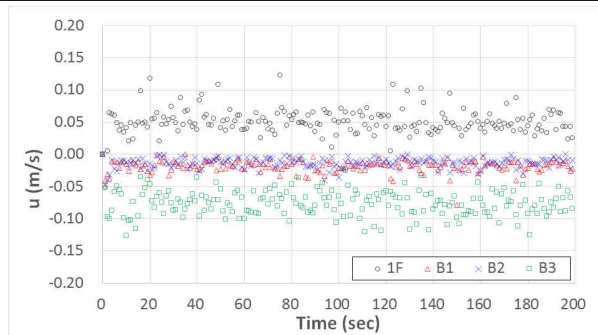
위어 흐름과 오리피스 흐름에서 바닥보호공의 전단 파괴를 유발하는 그림 3.54의 x-방향 유속과 흡출 파괴를 유발하는 그림 3.55의 z-방향 유속은 아주 유사하게 분포되었다.



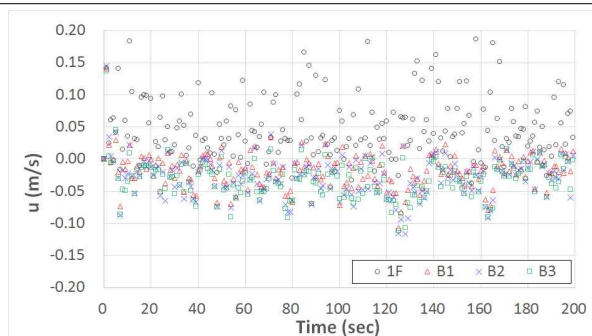
<그림 3.53> 하상에 위치한 사립자에 작용하는 힘(우효섭, 2001)



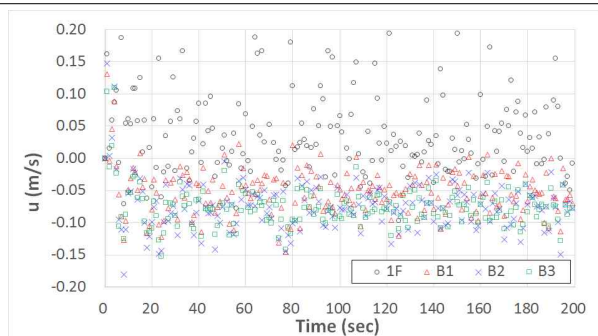
(a1) 위어 흐름, SEC.1 (Case W-1-1)



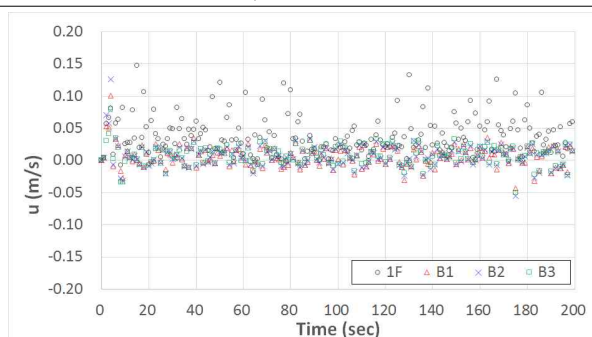
(a2) 오리피스 흐름, SEC.1 (Case O-1-1)



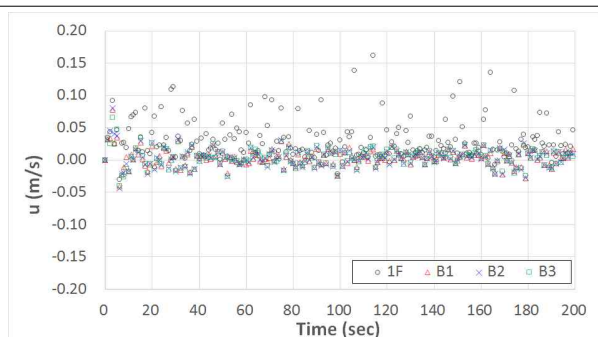
(b1) 위어 흐름, SEC.2 (Case W-1-1)



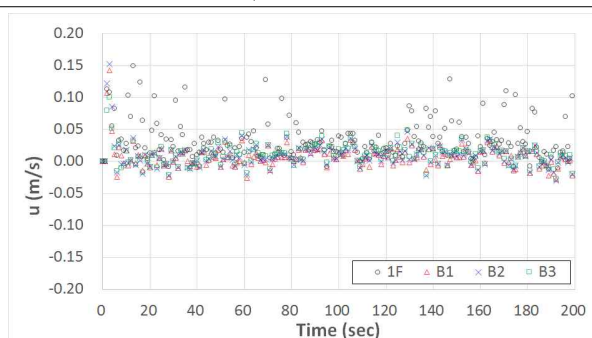
(b2) 오리피스 흐름, SEC.2 (Case O-1-1)



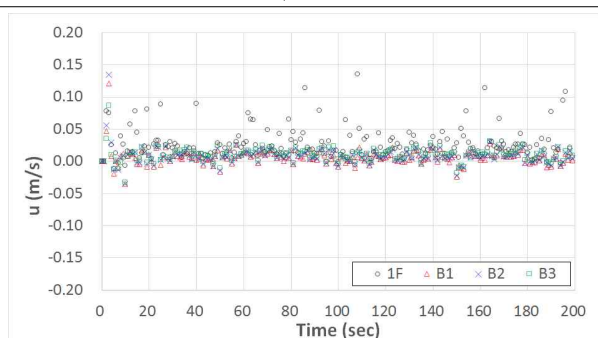
(c1) 위어 흐름, SEC.3 (Case W-1-1)



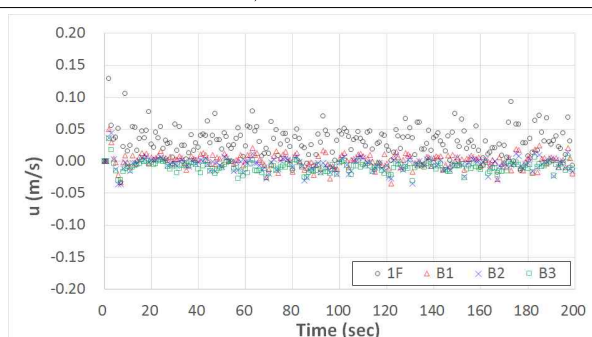
(c2) 오리피스 흐름, SEC.3 (Case O-1-1)



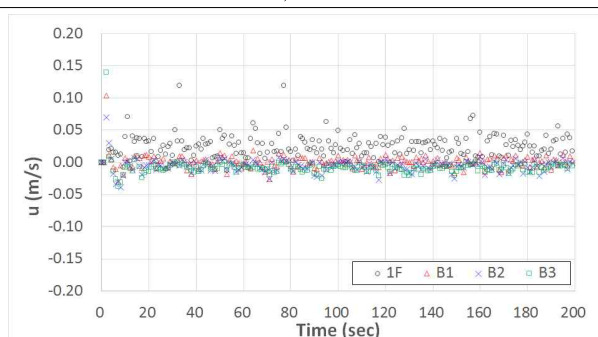
(d1) 위어 흐름, SEC.4 (Case W-1-1)



(d2) 오리피스 흐름, SEC.4 (Case O-1-1)

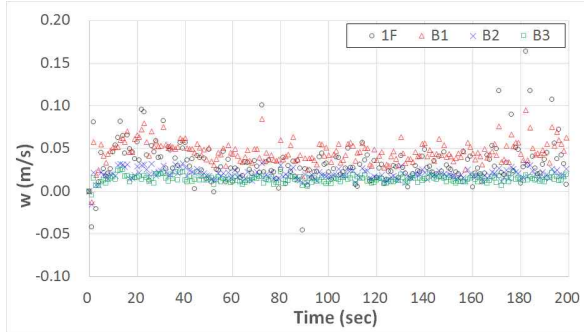


(e1) 위어 흐름, SEC.5 (Case W-1-1)

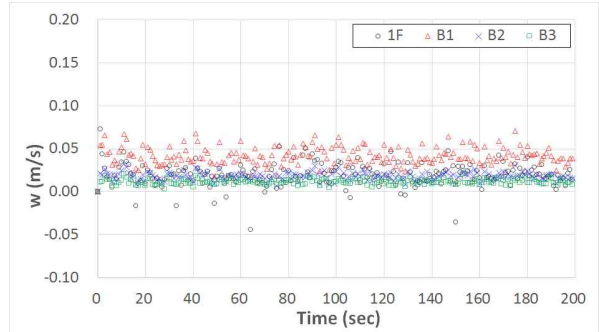


(e2) 오리피스 흐름, SEC.5 (Case O-1-1)

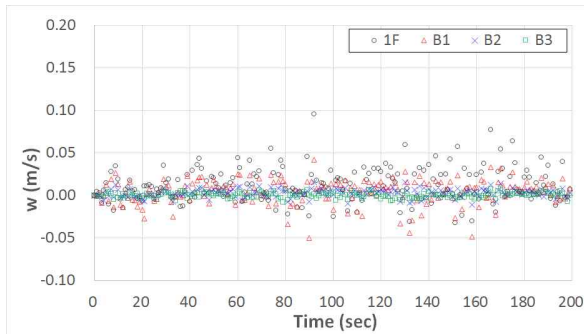
<그림 3.54> 바닥보호공에서 x-방향 유속 변화 그래프(그림 3.45의 위치 참조)



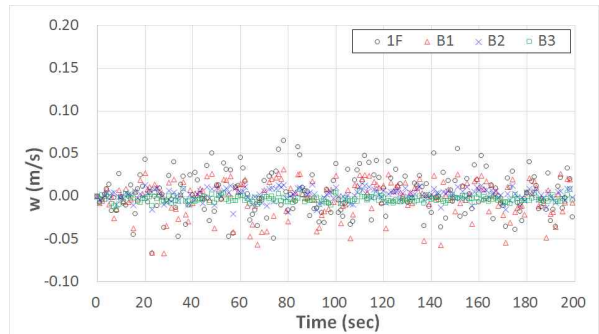
(a1) 위어 흐름, SEC.1 (Case W-1-1)



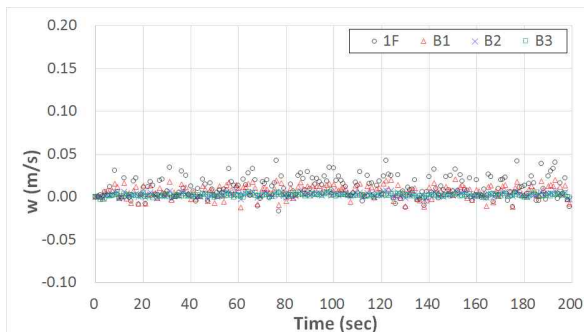
(a2) 오리피스 흐름, SEC.1 (Case O-1-1)



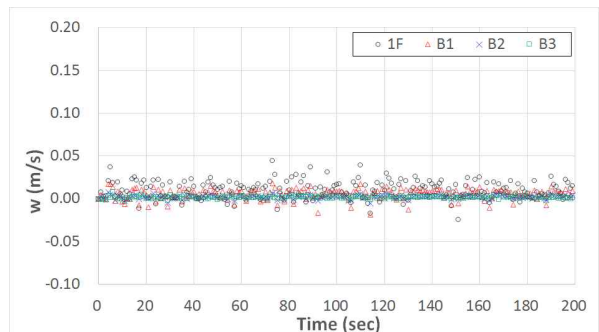
(b1) 위어 흐름, SEC.2 (Case W-1-1)



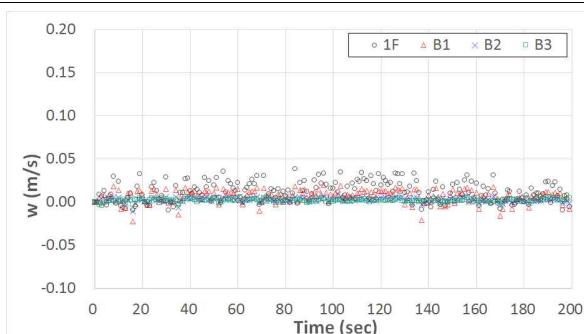
(b2) 오리피스 흐름, SEC.2 (Case O-1-1)



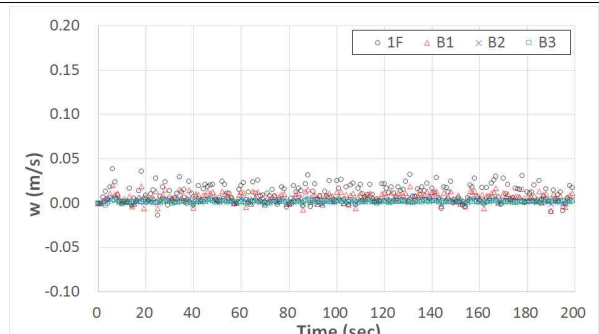
(c1) 위어 흐름, SEC.3 (Case W-1-1)



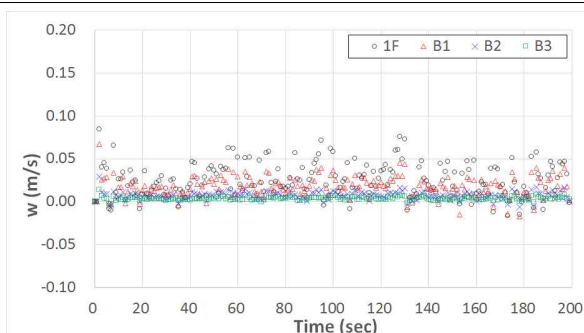
(c2) 오리피스 흐름, SEC.3 (Case O-1-1)



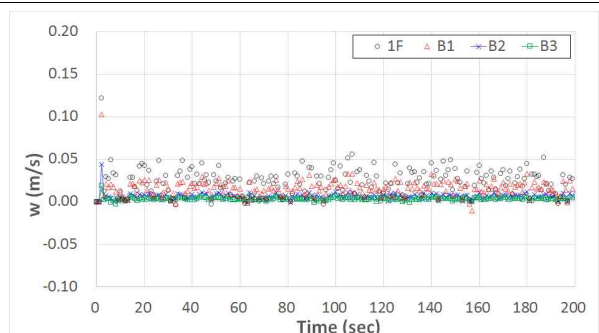
(d1) 위어 흐름, SEC.4 (Case W-1-1)



(d2) 오리피스 흐름, SEC.4 (Case O-1-1)



(e1) 위어 흐름, SEC.5 (Case W-1-1)

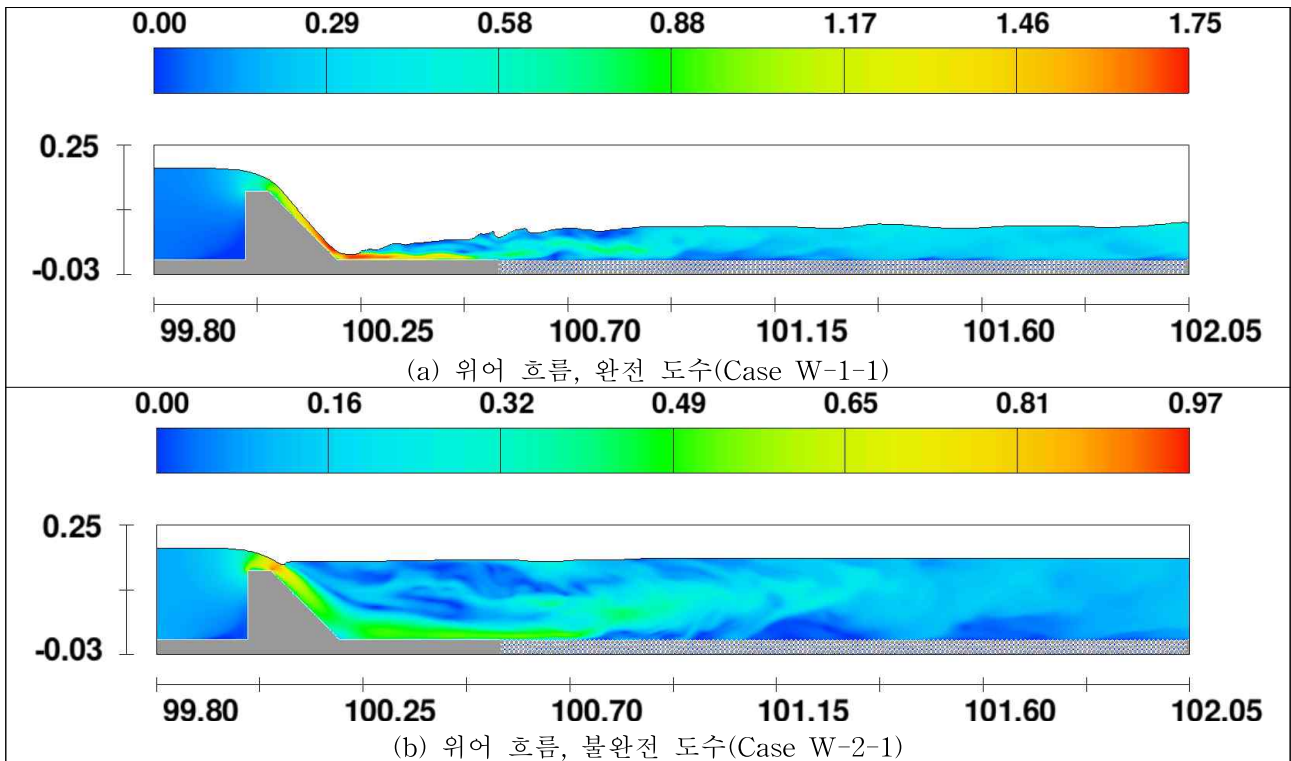


(e2) 오리피스 흐름, SEC.5 (Case O-1-1)

<그림 3.55> 바닥보호공에서 z-방향 유속 변화 그래프(그림 3.45의 위치 참조)

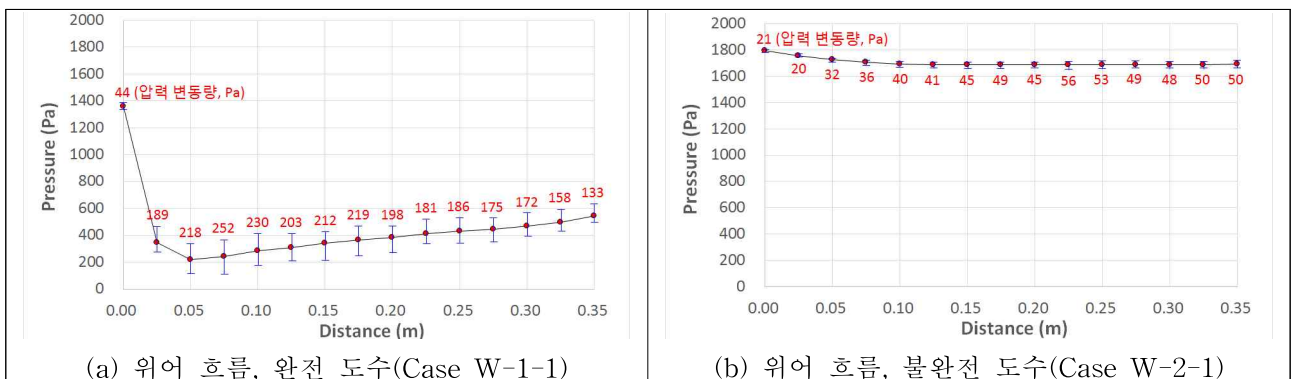
(나) 완전 도수와 불완전 도수 검토

물받이공에서 완전 도수가 발생되면 물받이공 설치 목적인 세굴 방지 측면에서 가장 이상적인 조건이 될 수 있으나, 관련된 수리 계수의 실제 값과 가정 값 사이의 차이로 도수의 위치가 예상보다 하류로 이동할 수 있기 때문에 그 위치를 제어하는 구조물(감세주, 끝턱 등)을 필요로 한다. 하류 수위가 상승하여 물받이공에서 불완전 도수가 발생되면 도수의 위치가 고정될 수 있어 안전한 설계가 될 수 있으나, 에너지 소산 측면에서 비효율적이다. 수치모의 결과, 완전 도수의 경우 물받이공 접근유속은 약 1.7 m/s, 바닥보호공 접근유속은 약 0.9 m/s이며, 불완전 도수의 경우 물받이공 및 바닥보호공 접근유속이 약 0.5 m/s로 검토되었다. 이는 완전 도수가 발생되면 에너지 소산이 잘 이루어지고 있음을 나타낸다(그림 3.56 참조).



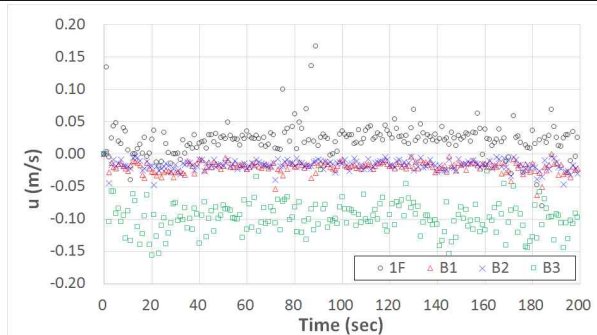
<그림 3.56> 위어 흐름 조건에서 완전 도수와 불완전 도수의 비교

불완전 도수는 하류 수위가 0.106 m 높아 그림 3.57과 같이 물받이공에 형성되는 평균압력 또한 높게 나타나는 경향을 보였다. 그러나 물받이공의 피로 파괴를 유발하는 압력 변동량은 완전 도수보다 2.0~9.5배 낮은 것으로 검토되었다.

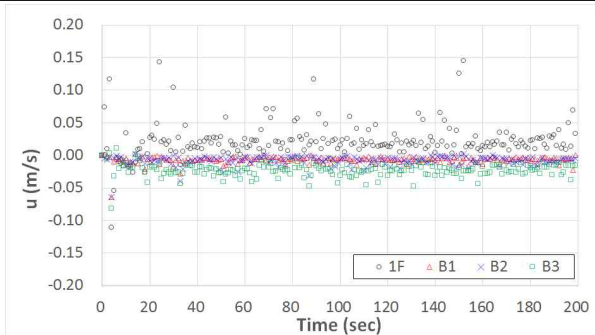


<그림 3.57> 물받이공에서 압력 변동량 그래프

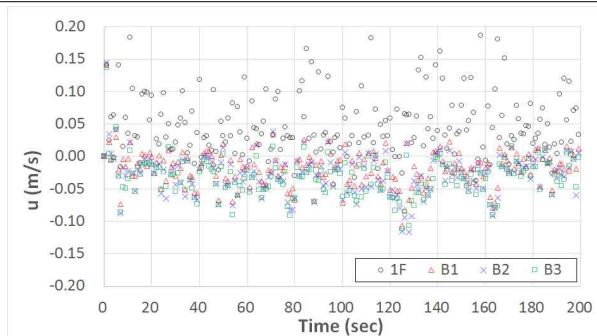
완전 도수에서 바닥보호공의 전단 파괴를 유발하는 그림 3.58의 x-방향 유속과 흡출 파괴를 유발하는 그림 3.59의 z-방향 유속의 변동량이 높게 분포되었다. 이는 격렬한 난류와 와류를 동반한 도수가 발생되었기 때문으로 판단된다.



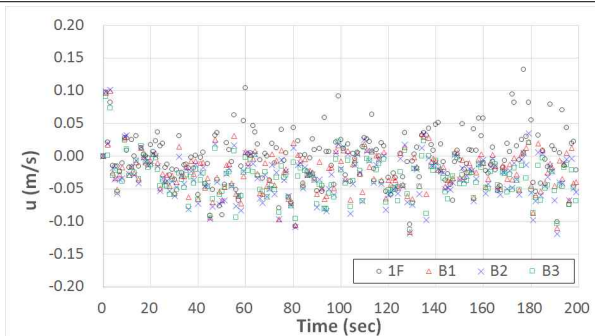
(a1) 완전 도수, SEC.1 (Case W-1-1)



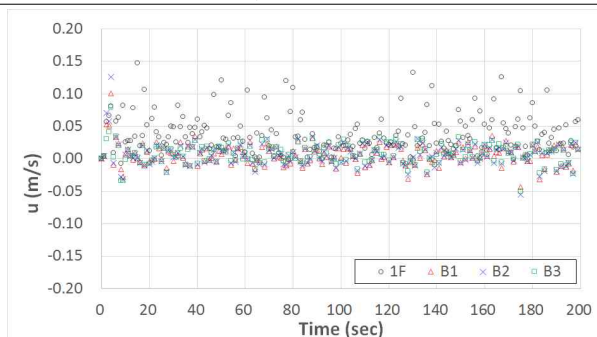
(a2) 불완전 도수, SEC.1 (Case W-2-1)



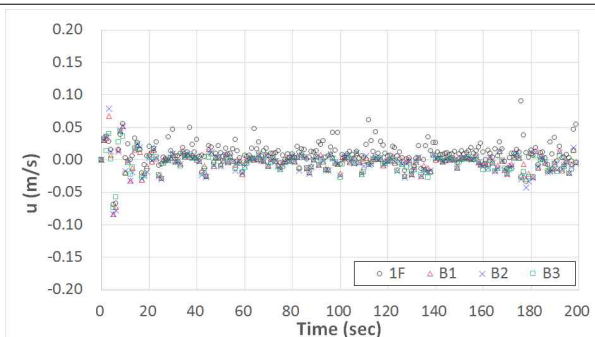
(b1) 완전 도수, SEC.2 (Case W-1-1)



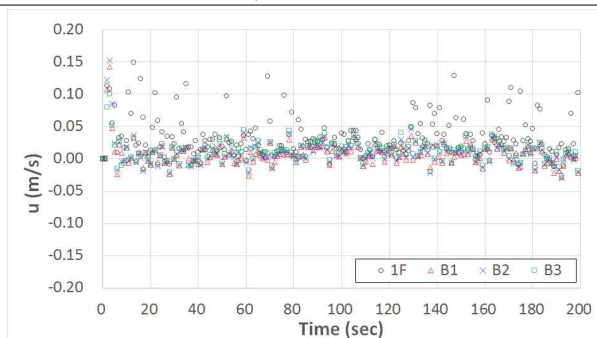
(b2) 불완전 도수, SEC.2 (Case W-2-1)



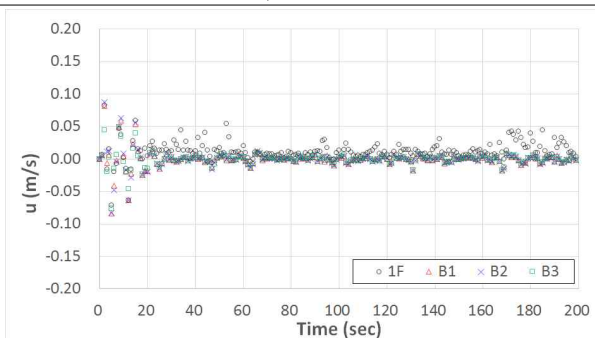
(c1) 완전 도수, SEC.3 (Case W-1-1)



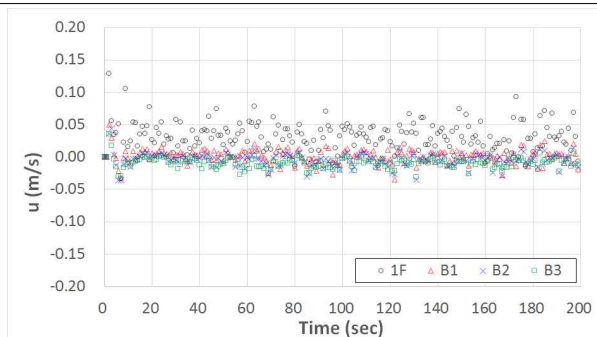
(c2) 불완전 도수, SEC.3 (Case W-2-1)



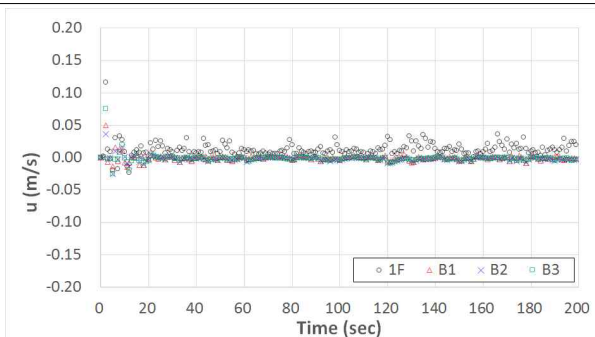
(d1) 완전 도수, SEC.4 (Case W-1-1)



(d2) 불완전 도수, SEC.4 (Case W-2-1)

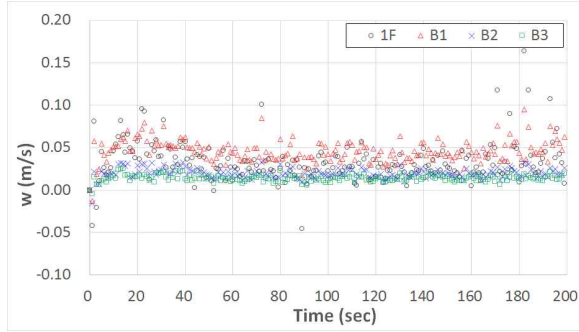


(e1) 완전 도수, SEC.5 (Case W-1-1)

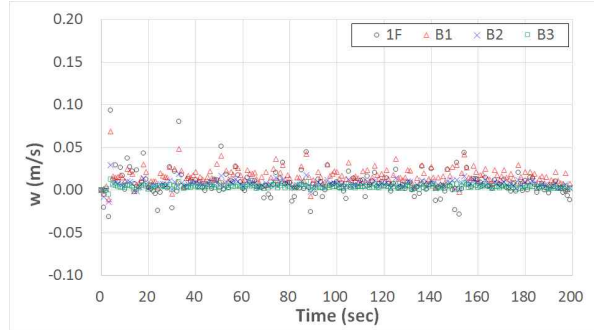


(e2) 불완전 도수, SEC.5 (Case W-2-1)

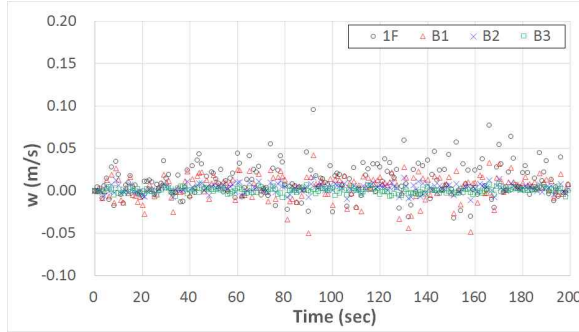
<그림 3.58> 바닥보호공에서 x-방향 유속 변화 그래프(그림 3.45의 위치 참조)



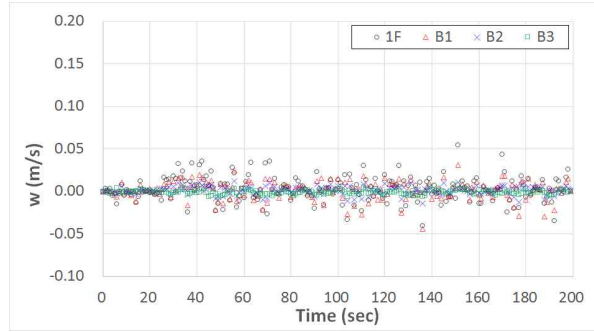
(a1) 완전 도수, SEC.1 (Case W-1-1)



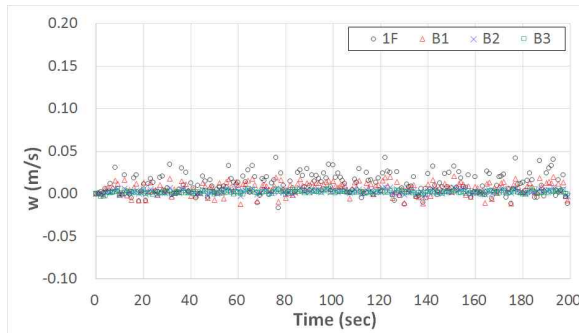
(a2) 불완전 도수, SEC.1 (Case W-2-1)



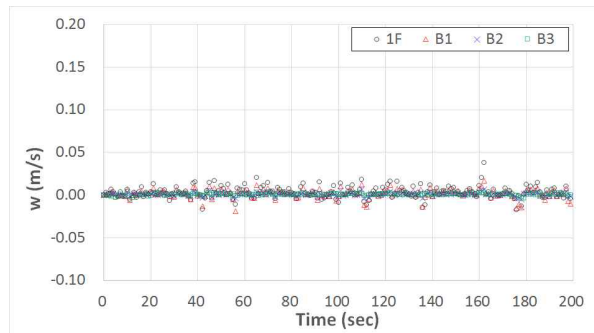
(b1) 완전 도수, SEC.2 (Case W-1-1)



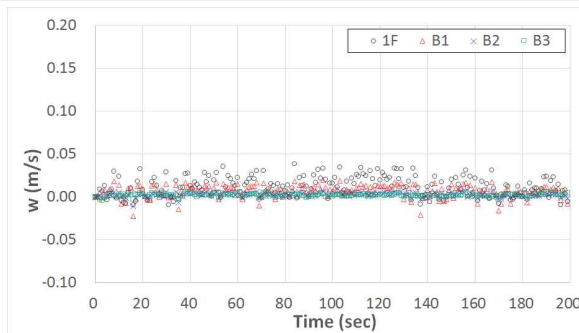
(b2) 불완전 도수, SEC.2 (Case W-2-1)



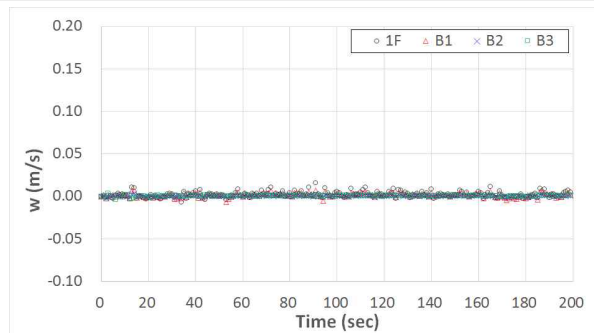
(c1) 완전 도수, SEC.3 (Case W-1-1)



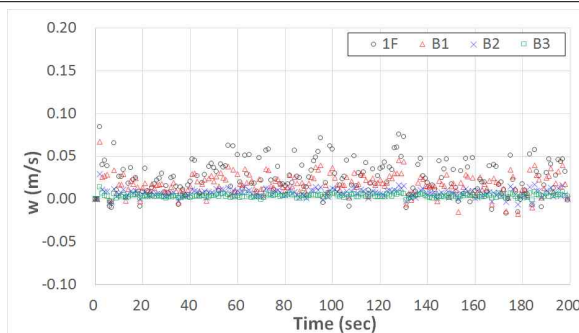
(c2) 불완전 도수, SEC.3 (Case W-2-1)



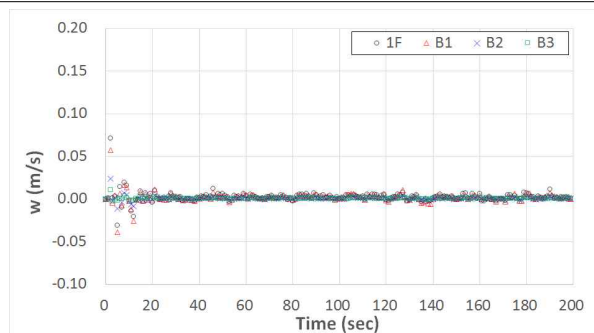
(d1) 완전 도수, SEC.4 (Case W-1-1)



(d2) 불완전 도수, SEC.4 (Case W-2-1)



(e1) 완전 도수, SEC.5 (Case W-1-1)



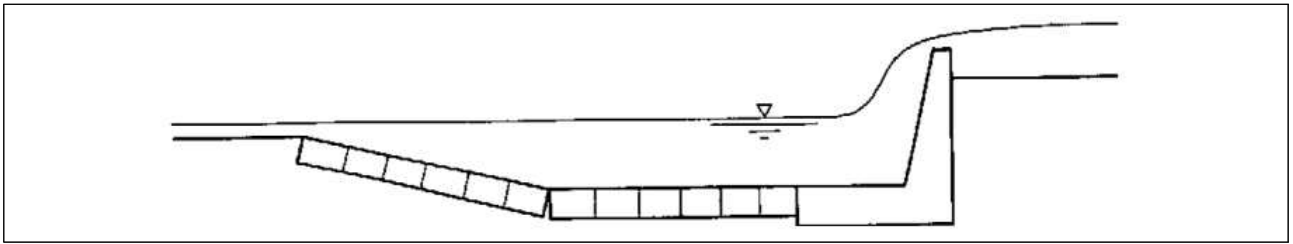
(e2) 불완전 도수, SEC.5 (Case W-2-1)

<그림 3.59> 바닥보호공에서 z-방향 유속 변화 그래프(그림 3.45의 위치 참조)

(다) 물받이 형태 변화에 따른 검토

위어 흐름, 완전 도수 조건에서 물받이공 형태 변화에 따라 바닥보호공의 흡출 파괴를 유발하는  $z$ -방향 평균유속을 비교한 결과, 평면형( $0.046 \text{ m/s}$ ) > 썰기형( $0.043 \text{ m/s}$ ) > 돌출형( $0.027 \text{ m/s}$ ) > 웅덩이형( $0.020 \text{ m/s}$ )의 순서로 분포되었다(표 3.5 참조). 따라서  $z$ -방향 평균유속 측면에서 웅덩이형 물받이공이 가장 우수한 것으로 판단된다. 또한 하상유지공 구조설계 지침(국토기술연구센터, 1998)에 의하면 그림 3.60과 같이 물받이공과 바닥보호공을 웅덩이화하여 어류의 생식이나 어도의 기능을 확보하도록 권고하고 있다.

물받이공 형태 중 평면형과 썰기형의 경우, 물받이공에 도수의 위치를 제어하는 구조물이 없기 때문에 하류 수위가 조금 더 낮아지는 경우 도수가 바닥보호공으로 이탈될 가능성이 높을 것으로 판단된다.



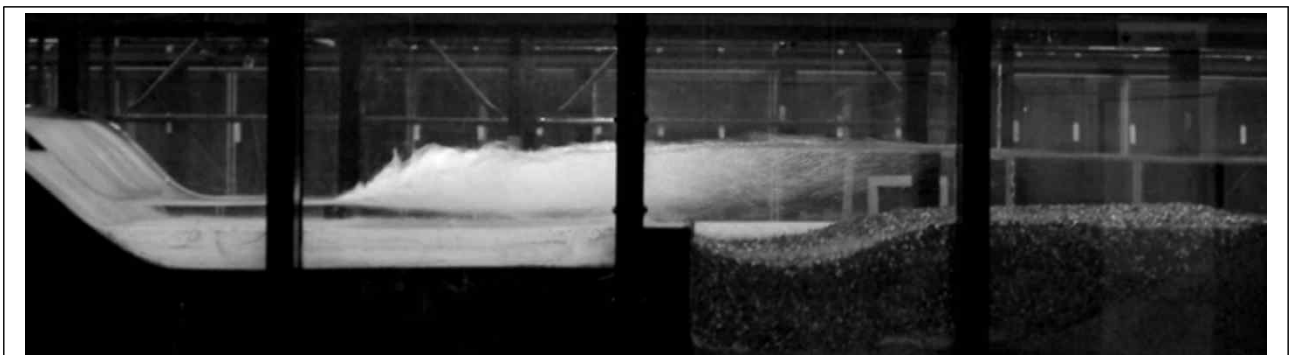
<그림 3.60> 물받이공과 바닥보호공의 웅덩이화 개념도(국토기술연구센터, 1998)

위어 흐름, 불완전 도수 조건에서  $z$ -방향 평균유속을 비교한 결과, 썰기형( $0.017 \text{ m/s}$ ) > 평면형( $0.016 \text{ m/s}$ ) > 웅덩이형( $0.015 \text{ m/s}$ ) = 돌출형( $0.015 \text{ m/s}$ )의 순서로 분포되었다(표 3.6 참조). 따라서 불완전 도수가 발생하는 경우 물받이공 형태와  $z$ -방향 평균유속의 상관성이 거의 없는 것으로 판단되며, 바닥보호공 흡출 파괴 측면에서 완전 도수 조건보다 안전할 것으로 판단된다.

오리피스 흐름, 완전 도수 조건에서  $z$ -방향 평균유속을 비교한 결과, 썰기형( $0.045 \text{ m/s}$ ) > 평면형( $0.042 \text{ m/s}$ ) > 돌출형( $0.033 \text{ m/s}$ ) > 웅덩이형( $0.032 \text{ m/s}$ )의 순서로 분포되었다(표 3.7 참조). 따라서 오리피스 흐름과 위어 흐름의  $z$ -방향 평균유속이 대체로 유사한 경향을 보이나, 웅덩이형의 SEC.1 위치에서 약 1.5배 높은 유속이 분포되었다.

오리피스 흐름, 불완전 도수 조건에서  $z$ -방향 평균유속을 비교한 결과, 썰기형( $0.024 \text{ m/s}$ ) > 평면형( $0.022 \text{ m/s}$ ) > 웅덩이형( $0.015 \text{ m/s}$ ) > 돌출형( $0.012 \text{ m/s}$ )의 순서로 분포되었다(표 3.8 참조). 오리피스 흐름의 경우 물받이공 접근유속이 위어 흐름보다 빠른 특징을 가지고 있어, 감세 구조물이 없는 썰기형과 평면형의  $z$ -방향 평균유속이 증가된 것으로 판단된다.

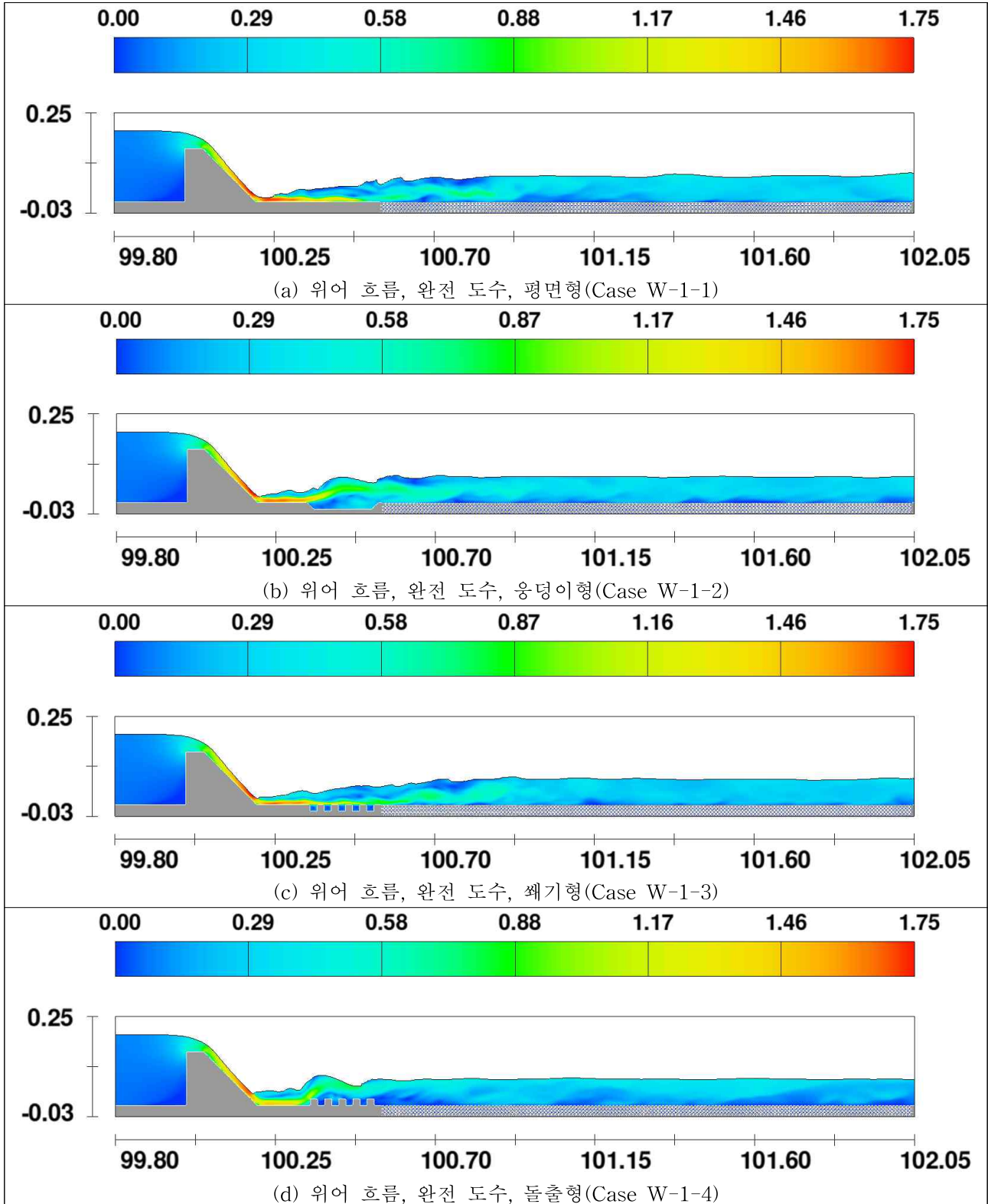
모든 흐름 조건에서  $z$ -방향 평균유속을 살펴보았을 때, SEC.1 ~ SEC.5 위치 중 SEC.1에서 가장 높은 평균유속이 분포되었다. 이는 물받이공과 바닥보호공의 접점에서 세굴이 발생할 가능성이 가장 높은 것을 의미하며, 그림 3.61과 같이 횡단구조물 하류 세굴 양상과 일치하는 것으로 판단된다.



<그림 3.61> 횡단구조물 하류 세굴 양상(Oliveto and Comuniello, 2010)

<표 3.5> 위어 흐름, 완전 도수 조건에서 z-방향 평균유속(m/s)

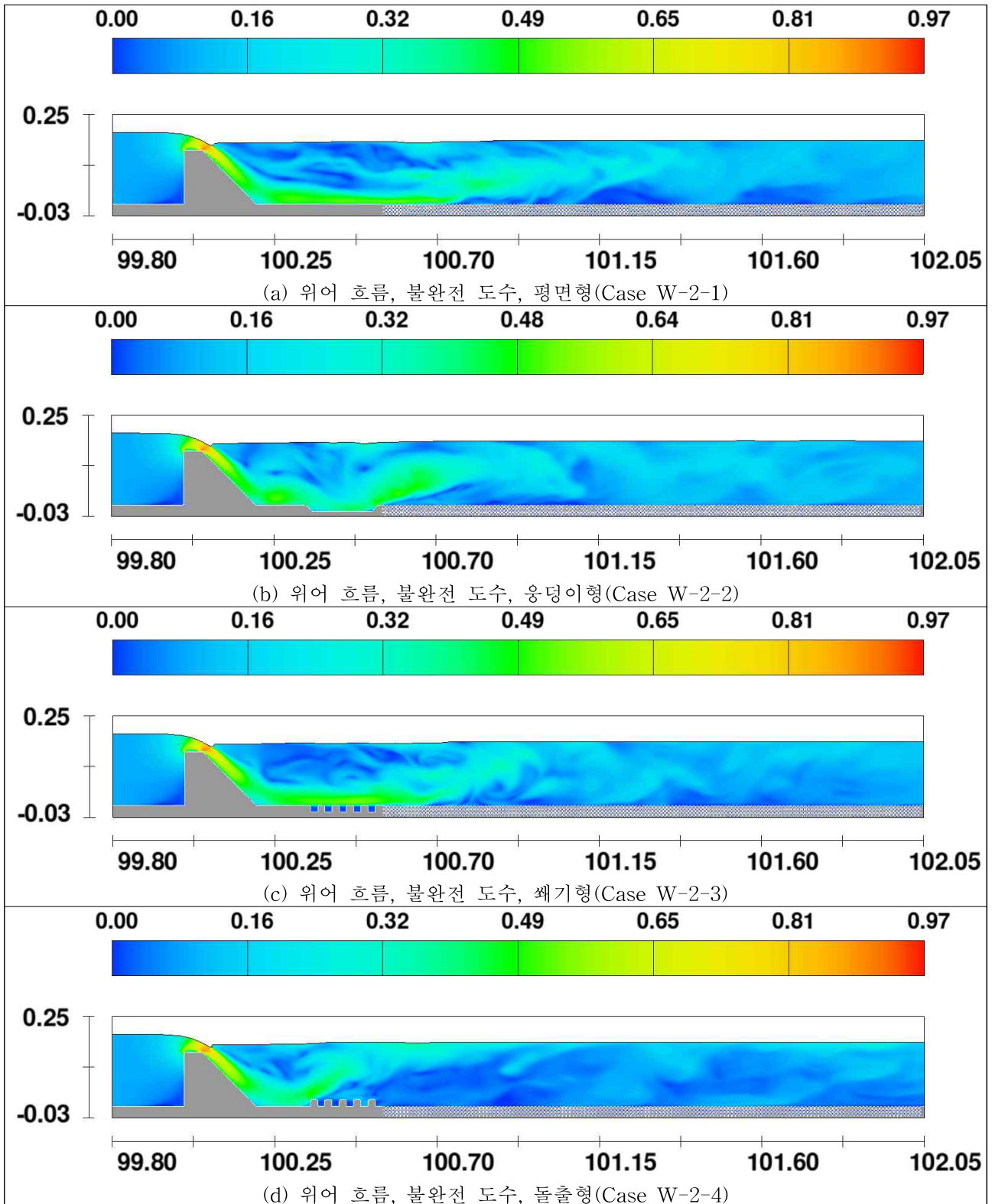
| 물받이 형태 | SEC.1 |       |       | SEC.2 |       |       | SEC.3 |       |       | SEC.4 |       |       | SEC.5 |       |       |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|        | B1    | B2    | B3    | B1    | B2    | B3    | B1    | B2    | B3    | B1    | B2    | B3    | B1    | B2    | B3    |
| 평면형    | 0.046 | 0.019 | 0.014 | 0.012 | 0.005 | 0.003 | 0.008 | 0.003 | 0.002 | 0.008 | 0.003 | 0.002 | 0.018 | 0.007 | 0.004 |
| 웅덩이형   | 0.020 | 0.009 | 0.005 | 0.009 | 0.003 | 0.002 | 0.007 | 0.003 | 0.001 | 0.007 | 0.002 | 0.001 | 0.013 | 0.005 | 0.003 |
| 썰기형    | 0.043 | 0.019 | 0.013 | 0.014 | 0.006 | 0.003 | 0.008 | 0.003 | 0.002 | 0.008 | 0.003 | 0.002 | 0.017 | 0.006 | 0.003 |
| 돌출형    | 0.027 | 0.011 | 0.007 | 0.009 | 0.003 | 0.002 | 0.007 | 0.003 | 0.002 | 0.008 | 0.003 | 0.002 | 0.017 | 0.006 | 0.003 |



<그림 3.62> 위어 흐름, 완전 도수 조건에서 물받이 형태 비교

<표 3.6> 위어 흐름, 불완전 도수 조건에서 z-방향 평균유속(m/s)

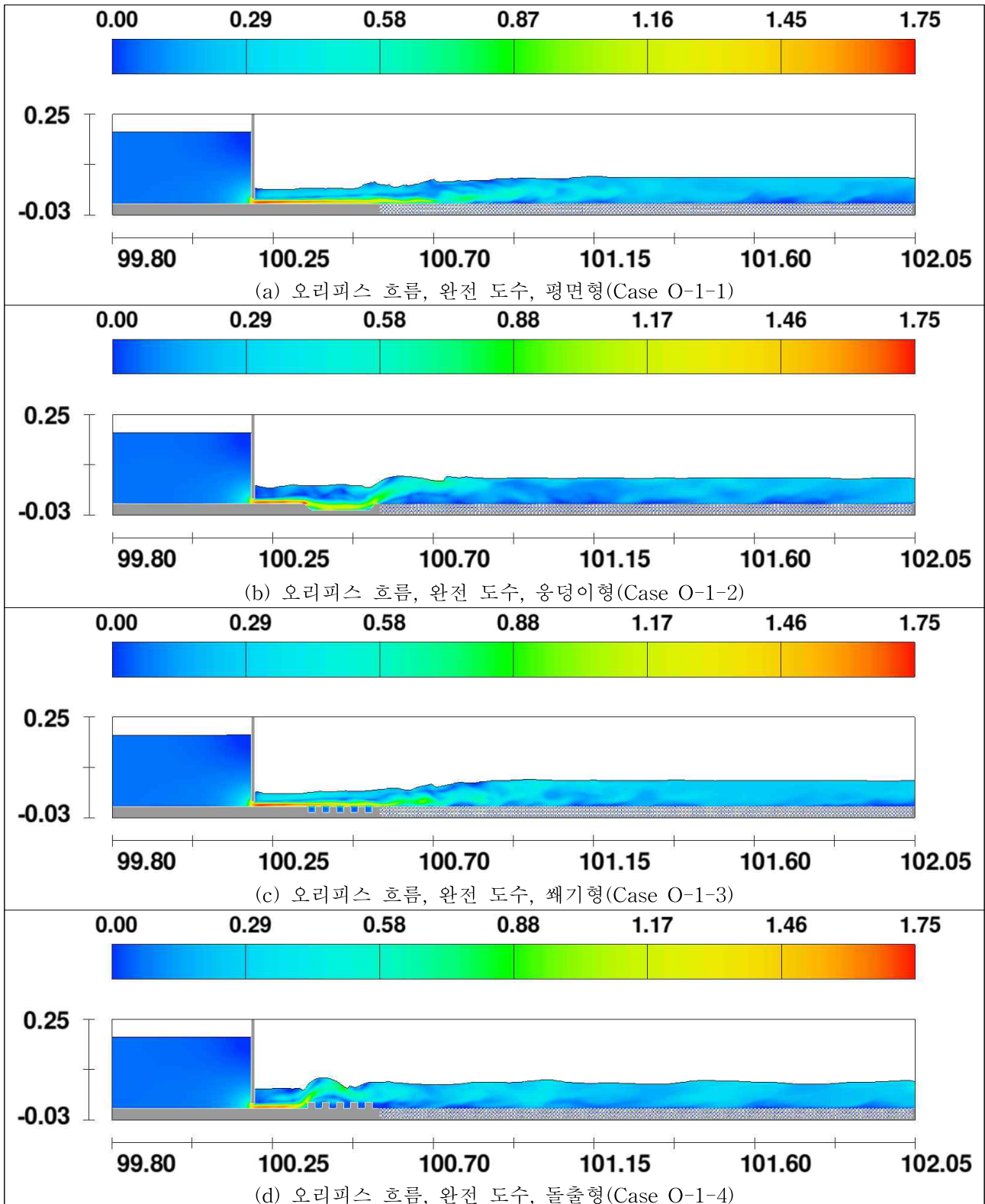
| 물받이 형태 | SEC.1 |       |       | SEC.2 |       |       | SEC.3 |       |       | SEC.4 |       |       | SEC.5 |       |       |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|        | B1    | B2    | B3    | B1    | B2    | B3    | B1    | B2    | B3    | B1    | B2    | B3    | B1    | B2    | B3    |
| 평면형    | 0.016 | 0.007 | 0.004 | 0.009 | 0.004 | 0.002 | 0.004 | 0.002 | 0.001 | 0.002 | 0.001 | 0.001 | 0.003 | 0.001 | 0.001 |
| 웅덩이형   | 0.015 | 0.006 | 0.004 | 0.008 | 0.004 | 0.002 | 0.004 | 0.001 | 0.001 | 0.002 | 0.001 | 0.001 | 0.003 | 0.001 | 0.001 |
| 썰기형    | 0.017 | 0.007 | 0.004 | 0.010 | 0.004 | 0.002 | 0.004 | 0.001 | 0.001 | 0.002 | 0.001 | 0.001 | 0.003 | 0.001 | 0.001 |
| 돌출형    | 0.015 | 0.006 | 0.004 | 0.006 | 0.003 | 0.002 | 0.004 | 0.002 | 0.001 | 0.003 | 0.001 | 0.001 | 0.005 | 0.002 | 0.001 |



<그림 3.63> 위어 흐름, 불완전 도수 조건에서 물받이 형태 비교

<표 3.7> 오리피스 흐름, 완전 도수 조건에서 z-방향 평균유속(m/s)

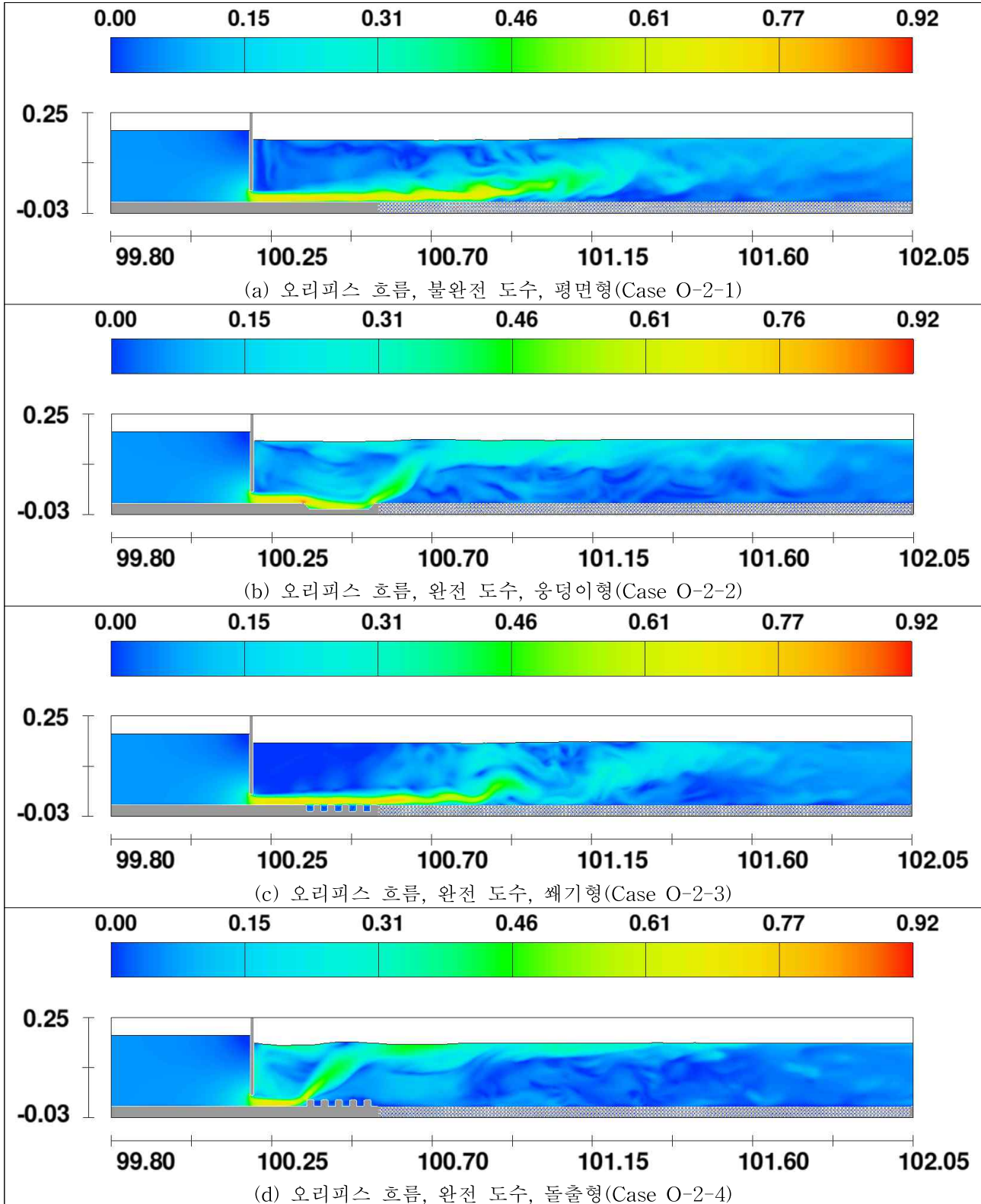
| 물받이 형태 | SEC.1 |       |       | SEC.2 |       |       | SEC.3 |       |       | SEC.4 |       |       | SEC.5 |       |       |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|        | B1    | B2    | B3    | B1    | B2    | B3    | B1    | B2    | B3    | B1    | B2    | B3    | B1    | B2    | B3    |
| 평면형    | 0.042 | 0.018 | 0.012 | 0.015 | 0.005 | 0.004 | 0.007 | 0.003 | 0.002 | 0.008 | 0.003 | 0.002 | 0.016 | 0.006 | 0.003 |
| 웅덩이형   | 0.032 | 0.015 | 0.009 | 0.014 | 0.006 | 0.003 | 0.010 | 0.003 | 0.002 | 0.009 | 0.003 | 0.002 | 0.020 | 0.007 | 0.003 |
| 썰기형    | 0.045 | 0.020 | 0.014 | 0.012 | 0.004 | 0.003 | 0.007 | 0.003 | 0.002 | 0.007 | 0.002 | 0.002 | 0.013 | 0.005 | 0.003 |
| 돌출형    | 0.033 | 0.013 | 0.008 | 0.006 | 0.002 | 0.002 | 0.006 | 0.002 | 0.002 | 0.006 | 0.002 | 0.002 | 0.012 | 0.005 | 0.003 |



<그림 3.64> 오리피스 흐름, 완전 도수 조건에서 물받이 형태 비교

<표 3.8> 오리피스 흐름, 불완전 도수 조건에서 z-방향 평균유속(m/s)

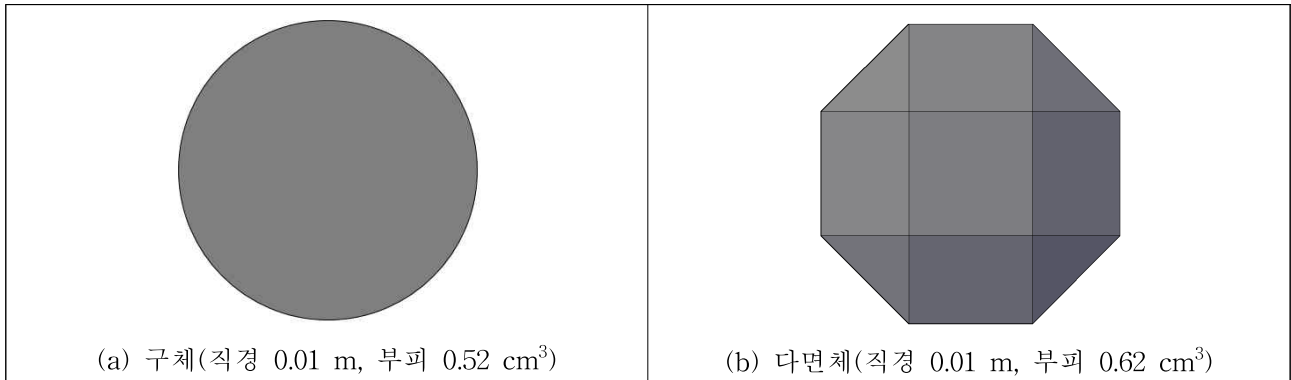
| 물받이 형태 | SEC.1 |       |       | SEC.2 |       |       | SEC.3 |       |       | SEC.4 |       |       | SEC.5 |       |       |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|        | B1    | B2    | B3    | B1    | B2    | B3    | B1    | B2    | B3    | B1    | B2    | B3    | B1    | B2    | B3    |
| 평면형    | 0.022 | 0.010 | 0.005 | 0.013 | 0.006 | 0.003 | 0.006 | 0.002 | 0.001 | 0.002 | 0.001 | 0.001 | 0.002 | 0.001 | 0.001 |
| 웅덩이형   | 0.015 | 0.007 | 0.004 | 0.007 | 0.004 | 0.002 | 0.005 | 0.002 | 0.001 | 0.004 | 0.001 | 0.001 | 0.004 | 0.002 | 0.001 |
| 썰기형    | 0.024 | 0.010 | 0.006 | 0.025 | 0.011 | 0.004 | 0.006 | 0.003 | 0.001 | 0.003 | 0.001 | 0.001 | 0.002 | 0.001 | 0.001 |
| 돌출형    | 0.012 | 0.005 | 0.003 | 0.007 | 0.004 | 0.002 | 0.005 | 0.002 | 0.001 | 0.004 | 0.002 | 0.001 | 0.004 | 0.002 | 0.001 |



<그림 3.65> 오리피스 흐름, 불완전 도수 조건에서 물받이 형태 비교

(라) 바닥보호공의 사석 모양 변화에 따른 검토

바닥보호공은 다수의 사석으로 구성되어 있으며, 사석의 크기, 형상 및 시공 방법에 따라 하상토가 흡출될 수 있는 공극의 크기가 결정된다. 이때 공극의 크기를 결정하는 요소 중 하나인 사석의 형상을 변화(그림 3.66 참조)시켜 수치모의를 실시하였다.

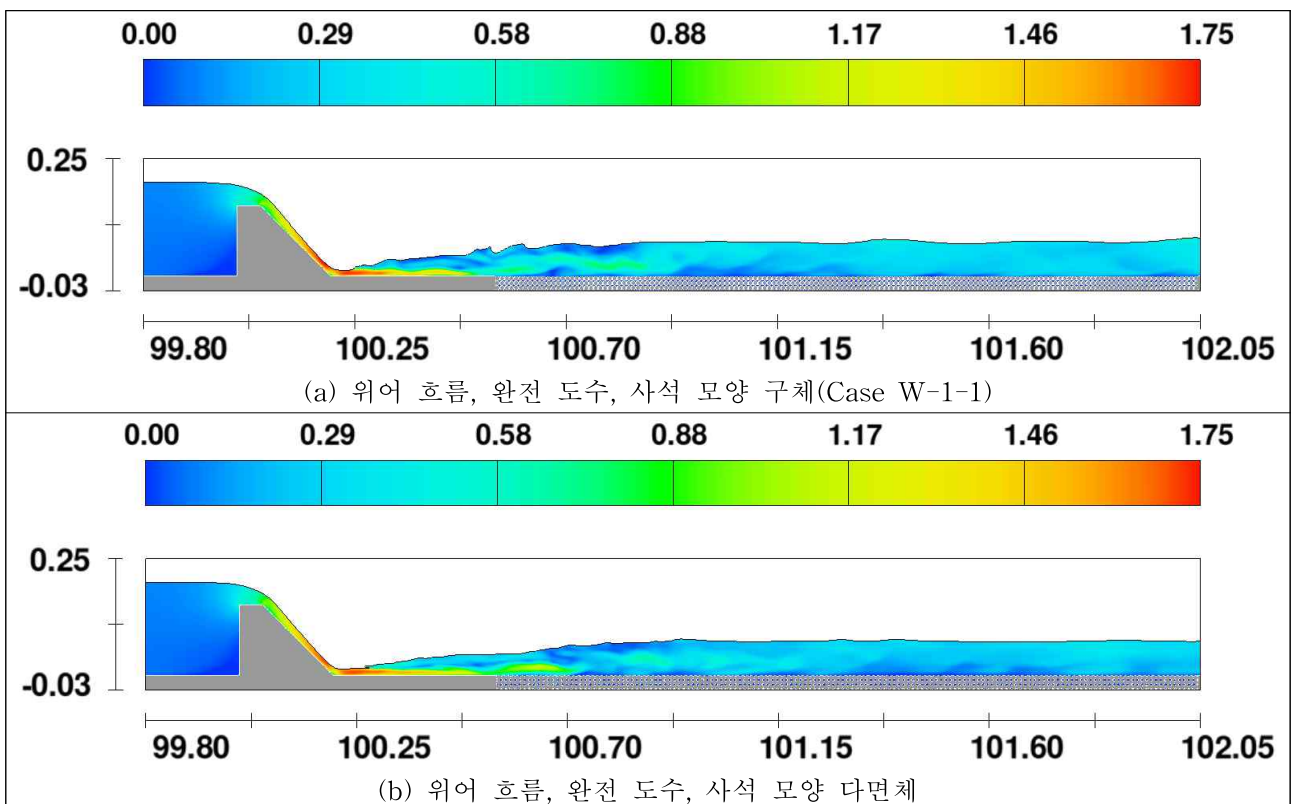


<그림 3.66> 사석 모양

구체의 부피는 0.52 cm<sup>3</sup>, 다면체의 부피는 0.62 cm<sup>3</sup>로 하상토가 흡출될 수 있는 공간이 상대적으로 큰 구체를 적용할 경우 바닥보호공이 흡출 파괴될 가능성이 높다. 수치모의 결과(표 3.9 참조) 또한 구체가 흡출 파괴를 유발하는 z-방향 평균유속이 상대적으로 높은 것으로 검토되었다. 그러나 SEC.1은 경향이 반대로 나타나 추후 다양한 모양에 대한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

<표 3.9> 위어 흐름, 완전 도수 조건에서 z-방향 평균유속(m/s)

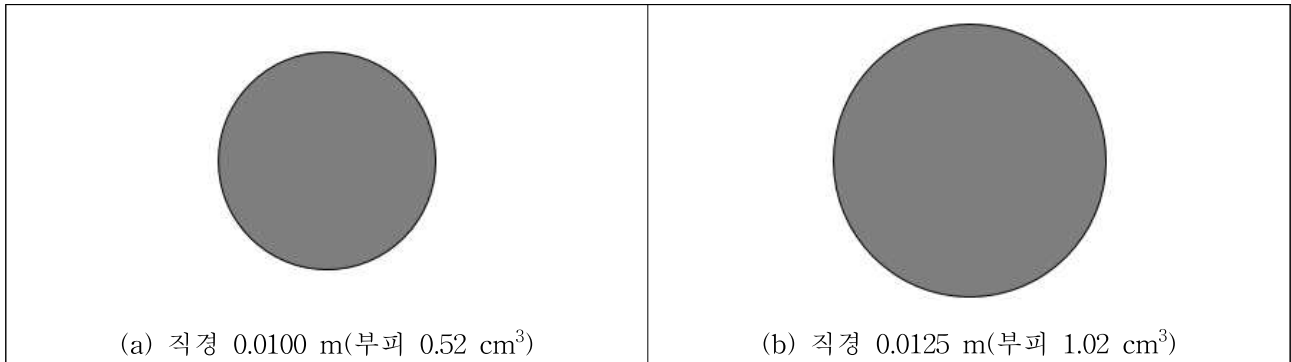
| 사석 모양 | SEC.1 |       |       | SEC.2 |       |       | SEC.3 |       |       | SEC.4 |       |       | SEC.5 |       |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|       | B1    | B2    | B3    | B1    | B2    | B3    | B1    | B2    | B3    | B1    | B2    | B3    | B1    | B2    | B3    |
| 구체    | 0.046 | 0.019 | 0.014 | 0.012 | 0.005 | 0.003 | 0.008 | 0.003 | 0.002 | 0.008 | 0.003 | 0.002 | 0.018 | 0.007 | 0.004 |
| 다면체   | 0.073 | 0.027 | 0.015 | 0.009 | 0.003 | 0.003 | 0.004 | 0.001 | 0.002 | 0.004 | 0.001 | 0.002 | 0.009 | 0.003 | 0.002 |



<그림 3.67> 위어 흐름, 완전 도수 조건에서 사석 모양 비교

(마) 바닥보호공의 사석 크기 변화에 따른 검토

바닥보호공은 다수의 사석으로 구성되어 있으며, 사석의 크기, 형상 및 시공 방법에 따라 하상토가 흡출될 수 있는 공극의 크기가 결정된다. 이때 공극의 크기를 결정하는 요소 중 하나인 사석의 크기를 변화(그림 3.68 참조)시켜 수치모의를 실시하였다.

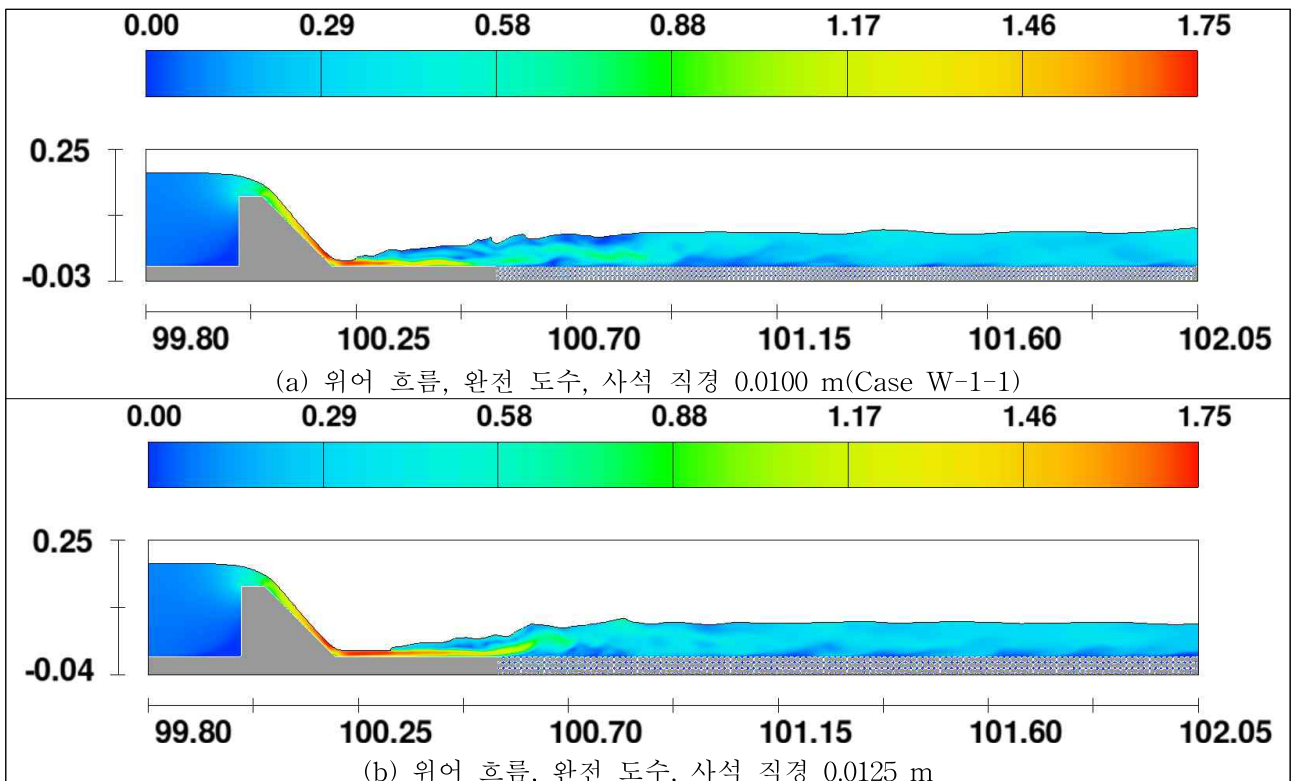


<그림 3.68> 사석 크기

직경 0.0100 m의 부피는 0.52 cm<sup>3</sup>, 직경 0.0125 m 부피는 1.02 cm<sup>3</sup>로 하상토가 흡출될 수 있는 공간인 공극율은 동일하나 하상토 입경 대비 사석의 직경이 클수록 바닥보호공이 흡출 파괴될 가능성이 높다. 수치모의 결과(표 3.10 참조) 또한 직경 0.0125 m가 흡출 파괴를 유발하는 z-방향 평균유속이 상대적으로 높은 것으로 검토되었다. 그러나 SEC.3 지점부터는 흐름이 충분히 안정화되어 그 차이가 미미하였다.

<표 3.10> 위어 흐름, 완전 도수 조건에서 z-방향 평균유속(m/s)

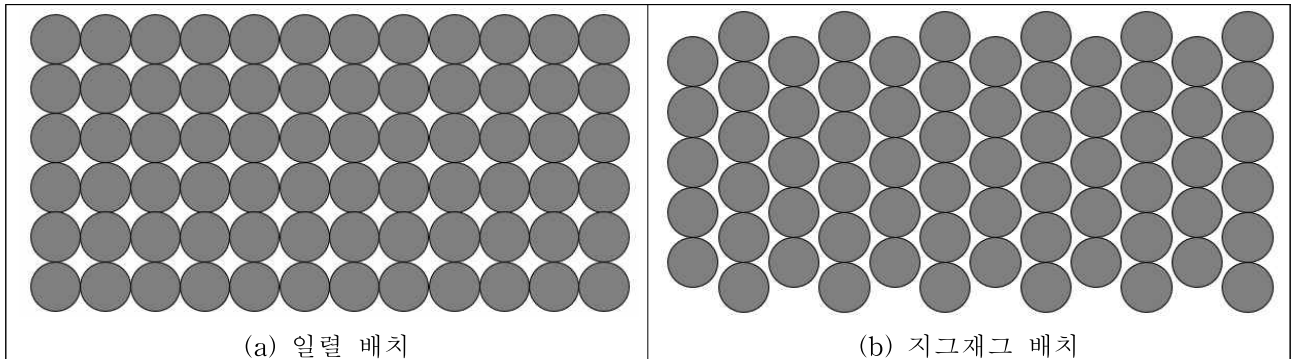
| 사석 크기       | SEC.1 |       |       | SEC.2 |       |       | SEC.3 |       |       | SEC.4 |       |       | SEC.5 |       |       |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|             | B1    | B2    | B3    | B1    | B2    | B3    | B1    | B2    | B3    | B1    | B2    | B3    | B1    | B2    | B3    |
| 직경 0.0100 m | 0.046 | 0.019 | 0.014 | 0.012 | 0.005 | 0.003 | 0.008 | 0.003 | 0.002 | 0.008 | 0.003 | 0.002 | 0.018 | 0.007 | 0.004 |
| 직경 0.0125 m | 0.064 | 0.042 | 0.013 | 0.017 | 0.006 | 0.002 | 0.008 | 0.003 | 0.001 | 0.009 | 0.003 | 0.001 | 0.011 | 0.005 | 0.002 |



<그림 3.69> 위어 흐름, 완전 도수 조건에서 사석 직경 비교

(바) 바닥보호공의 사석 배치 변화에 따른 검토

바닥보호공은 다수의 사석으로 구성되어 있으며, 사석의 크기, 형상 및 시공 방법에 따라 하상토가 흡출될 수 있는 공극의 크기가 결정된다. 이때 공극의 크기를 결정하는 요소 중 하나인 사석의 배치(시공 방법)를 변화(그림 3.70 참조)시켜 수치모의를 실시하였다.

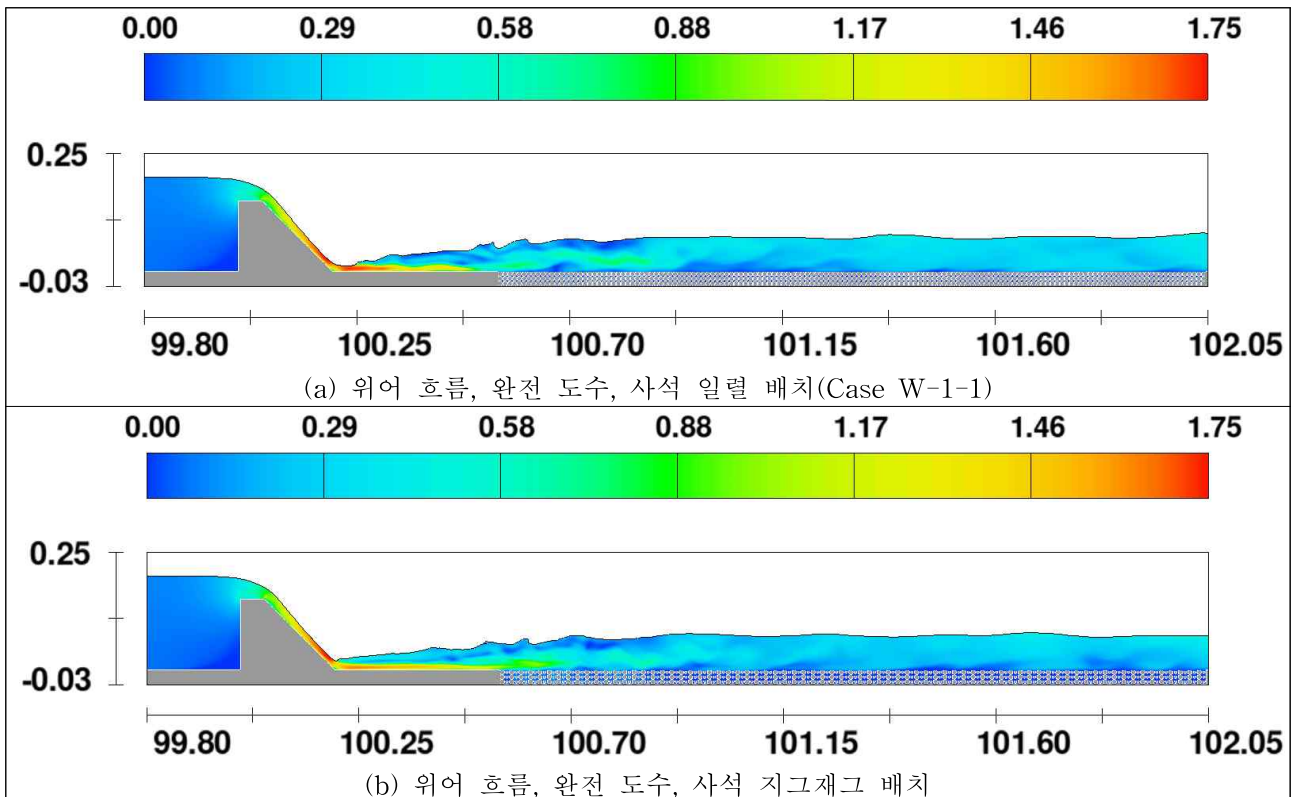


<그림 3.70> 사석 배치

바닥보호공 내부의 흐름을 차단시킬 목적으로 사석을 지그재그로 배치하였으나, 하상토가 흡출될 수 있는 공간인 공극율은 동일하다. 수치모의 결과(표 3.11 참조) 흡출 파괴를 유발하는 z-방향 평균유속이 매우 유사하게 분포되었으며, 지그재그 배치 목적인 흐름 차단 효과는 미미한 것으로 판단된다.

<표 3.11> 위어 흐름, 완전 도수 조건에서 z-방향 평균유속(m/s)

| 사석 배치   | SEC.1 |       |       | SEC.2 |       |       | SEC.3 |       |       | SEC.4 |       |       | SEC.5 |       |       |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|         | B1    | B2    | B3    | B1    | B2    | B3    | B1    | B2    | B3    | B1    | B2    | B3    | B1    | B2    | B3    |
| 일렬 배치   | 0.046 | 0.019 | 0.014 | 0.012 | 0.005 | 0.003 | 0.008 | 0.003 | 0.002 | 0.008 | 0.003 | 0.002 | 0.018 | 0.007 | 0.004 |
| 지그재그 배치 | 0.048 | 0.022 | 0.016 | 0.011 | 0.004 | 0.002 | 0.007 | 0.002 | 0.002 | 0.008 | 0.002 | 0.002 | 0.009 | 0.003 | 0.001 |



<그림 3.7> 위어 흐름, 완전 도수 조건에서 사석 배치 비교

### 3. 수치모의 결론

보는 고정보(위어 흐름)와 가동보(오리피스 흐름)로 구분할 수 있으며, 상·하류 수위 및 수문 개도 높이 등에 따라 물받이공 및 바닥보호공에 형성되는 흐름 특성이 달라진다. 이 연구는 완전 도수 및 불완전 도수 조건에서 주요 구조물의 형상, 크기 및 배치(시공 방법)의 변화에 따른 수치모의를 통해 물받이공의 피로 파괴와 바닥보호공의 흡출 파괴를 유발하는 흐름특성을 구명하고자 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 수치모의 결과의 적정성을 판단하기 위해 수리실험 결과와 비교하였다. 수위의 경우 보 상·하류 26개 지점에서 비교한 결과, 수리실험의 수심 대비 1.0~9.8 %의 오차를 보였다. 이때 대부분의 오차는 도수 영역에서 발생되었다.
2. 위어 흐름과 오리피스 흐름을 경계조건, 물받이공 접근유속(저류 수문의 개도 높이를 조절)이 동일한 조건에 대해 비교하였다. 바닥보호공 내부에서 x-방향 및 z-방향 유속은 아주 유사하게 분포되었으나, 물받이공에서 압력 변동량은 위어 흐름이 0.7~2.7배 높은 것으로 검토되었다. 이는 위어 흐름이 격렬한 난류와 와류를 동반하는 도수가 발생되었기 때문으로 판단된다. 물받이공 길이 방향에 대한 압력 변동량의 경향을 보았을 때, 에너지가 생성되는 도수 시점 주변에서 압력 변동량이 높게 분포되었으며, 에너지가 소멸되는 도수 종점으로 갈수록 압력 변동량이 점차 감소하였다.
3. 완전 도수는  $Fr = 4.46$ , 불완전 도수는  $Fr = 1.19$ 가 되는 조건에 대해 비교하였다(완전 도수와 불완전 도수는  $Fr = \sqrt{3}$ 을 기준으로 구분). 불완전 도수의 경우, 물받이공에서 도수가 발생되지 않기 때문에 압력 변동량이 2.0~9.5배 낮은 것으로 검토되었으며, 바닥보호공 내부의 x-방향 및 z-방향 유속 또한 상대적으로 낮게 분포되었다. 따라서 세굴 또는 구조물 파괴 측면에서는 불완전 도수가 안전할 것으로 판단되나, 에너지 소산 측면에서는 완전 도수가 효율적이다.
4. 바닥보호공의 형상을 평면형, 웅덩이형, 썰기형, 돌출형으로 구성하여 비교하였다. 위어 흐름, 완전 도수의 경우, 물받이공 형상이 바닥보호공 내부의 흐름 특성에 큰 영향을 미치는 것으로 검토되었으며, 웅덩이형이 상대적으로 낮은 유속이 분포되었다. 위어 흐름-불완전 도수의 경우, 물받이공 형상이 바닥보호공 내부의 흐름특성에 미치는 영향은 미미하였다. 그러나 오리피스 흐름-불완전 도수의 경우, 저류 수문 아래로 방류되는 흐름의 유속이 감세되지 않고 물받이공에 도달하였으며, 물받이공의 형상에 따라 바닥보호공 내부의 흐름 특성이 변화되는 것으로 검토되었다.
5. 바닥보호공 재료인 사석의 모양 및 크기를 변화시켜 완전 도수 조건에 대해 비교하였다. 대체로, 하상토가 흡출될 수 있는 공간인 공극률이 클수록 z-방향 평균유속이 증가되는 것으로 검토되었다. 따라서 ① 사석의 직경과 하상토의 입경 차이를 최소화, ② 사석과 하상 사이에 필터층을 설치, ③ 바닥보호공의 공극이 최소화 되도록 시공하는 등의 대책을 강구해야 할 것으로 판단된다.
6. 결과적으로, 물받이공의 경우 완전 도수가 발생되면, 콘크리트의 피로 파괴를 유발하는 압력 변동량이 높게 분포되는 것을 확인하였다. 바닥보호공의 경우, 흐름 방향으로 길고 다층으로 포설할수록, 바닥보호공의 재료인 사석 사이의 공극이 작을수록 하상토의 흡출을 유발하는 유속이 점차 저감되는 것을 확인하였다. 따라서 추후 수리실험을 통해 이러한 수리 조건과 콘크리트 강도 또는 하상토 한계조건의 상관관계를 구명하여 물받이공 및 바닥보호공의 성능 기준을 마련할 필요가 있다.

### 제3절 연구개발 성과

연구개발 성과는 수리실험을 통한 물받이공 및 바닥보호공의 도수에 의한 흐름장을 100% 측정하였으며 3차원 수치모형을 이용한 물받이공 및 바닥보호공의 유형별 5 case에 대한 수치모의를 수행을 완료하였다. 물받이공 및 바닥보호공의 작용력에 대한 압력과 난류흐름의 관계를 정량화할 수 있는 접근방법 및 성능기준(안)을 제시하였다. 정량적 목표(논문 2건, 학술회의 4건, S/W 2건)에 대한 달성도가 각각 논문 3건, 학술회의 11건, S/W 6건으로 연구 목표를 초과 달성하였다.

#### 1. 논문 게재

| No. | 논문명                                          | 학술지명    | 저자명 | 권/호   | 국명   | SCI여부 |
|-----|----------------------------------------------|---------|-----|-------|------|-------|
| 1   | 불연속 지형을 지나는 천수 흐름의 해석을 위한 수심적분 모형에 대한 새로운 기법 | 대한토목학회  | 황승용 | 35/6  | 대한민국 | 비SCI  |
| 2   | 측면 위어를 넘나드는 천수 흐름에 대한 2차원 수치모의               | 한국수자원학회 | 황승용 | 48/11 | 대한민국 | 비SCI  |
| 3   | 발산형 바닥 경사 생성항의 재검토와 체적-수위 관계의 수정             | 한국수자원학회 | 황승용 | 50/5  | 대한민국 | 비SCI  |

#### 2. 학술회의 발표

| No. | 회의명칭          | 발표자                                                           | 발표일시       | 장소        | 국명        |
|-----|---------------|---------------------------------------------------------------|------------|-----------|-----------|
| 1   | 한국수자원학회 학술발표회 | 하성원/김태원                                                       | 2016.05.27 | 대전        | 대한민국      |
| 2   | 한국수자원학회 학술발표회 | 황승용                                                           | 2016.05.27 | 대전        | 대한민국      |
| 3   | 한국수자원학회 학술발표회 | 김형석/박문형                                                       | 2016.05.27 | 대전        | 대한민국      |
| 4   | 대한토목학회 정기학술대회 | 김형석/박문형                                                       | 2016.10.21 | 제주        | 대한민국      |
| 5   | 대한토목학회 정기학술대회 | 황승용                                                           | 2016.10.21 | 제주        | 대한민국      |
| 6   | 한국수자원학회 학술발표회 | 황승용                                                           | 2017.05.25 | 창원        | 대한민국      |
| 7   | 한국수자원학회 학술발표회 | 하성원                                                           | 2017.05.25 | 창원        | 대한민국      |
| 8   | 한국수자원학회 학술발표회 | 류용욱/박문형/김형석/최서혜                                               | 2017.05.25 | 창원        | 대한민국      |
| 9   | 한국수자원학회 학술발표회 | 김형석/박문형                                                       | 2017.05.25 | 창원        | 대한민국      |
| 10  | ISRS 2016     | 김형석/박문형/<br>IchiroKimura/<br>YasuyukiShimizu/<br>Mohamed Nabi | 2017.09.20 | Stuttgart | Germany   |
| 11  | IAHR APD 2016 | 박문형/류용욱/김형석/<br>이종석                                           | 2016.08.29 | Colombo   | Sri Lanka |

---

### 3. 소프트웨어 등록

| No. | 명칭                         | 구분 | 등록일        | 등록번호          |
|-----|----------------------------|----|------------|---------------|
| 1   | 물받이공 설계 프로그램               | 응용 | 2016.06.01 | C-2016-012876 |
| 2   | 바닥보호공 설계 프로그램              | 응용 | 2016.06.01 | C-2016-012877 |
| 3   | 불규칙 지형을 지나는 흐름의 수위 도시 프로그램 | 응용 | 2016.12.21 | C-2016-033596 |
| 4   | 잠긴 계산 격자의 체적-수위 관계 계산 모듈   | 응용 | 2016.12.21 | C-2016-033596 |
| 5   | 물받이공 기하학적 설계 프로그램          | 응용 | 2017.05.18 | C-2017-011708 |
| 6   | 바닥보호공 기하학적 설계 프로그램         | 응용 | 2017.05.18 | C-2017-011709 |

## 제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

### 1. 목표달성도

- 가. 2년에 걸쳐 목표하였던 질적 및 양적성과를 달성
- 나. 물받이공 및 바닥보호공의 복잡한 난류 흐름장을 영상측정기법인 PIV와 BIV를 적용하여 100%로 목표를 충족함
- 다. 3차원 전산유체프로그램을 활용하여 물받이공 및 바닥보호공 유형별 각 5 case 수치모의를 수행
- 라. 횡단구조물의 적정규모 결정에 대한 프로그램을 개발하여 질적 성과가 충족됨
- 마. 압력측정을 통해 물받이공 및 바닥보호공의 작용력을 분석하였고 난류강도와 관계를 제시하여 질적 성과가 충족되지만 창의도전 과제에 부합하는 기초실험 수행으로 관계식 제시에는 다소 미흡

| 핵심성과                               | 단위성과                 | 성과지표             | 성과검증 기준       |       |       |                | 가중치 (%) | 달성도 (%) |
|------------------------------------|----------------------|------------------|---------------|-------|-------|----------------|---------|---------|
|                                    |                      |                  | 목표치           | 측정 방법 | 검증 방법 | 달성치            |         |         |
| 물받이공 성능기준                          | 물받이공 부분<br>흐름 특성 분석  | 물받이공<br>흐름장 측정   | 흐름장<br>100%측정 | 실험결과  | 보고서   | 100%<br>측정     | 10      | 10      |
|                                    |                      | 유형별 3차원<br>수치모의  | 5 case        | 모의개수  | 보고서   | 5 case<br>이상   | 5       | 5       |
|                                    | 물받이공 작용력<br>분석       | 작용력 정량화          | 관계식<br>제시     | 제시여부  | 보고서   | 상관<br>관계<br>제시 | 10      | 8       |
|                                    | 성능평가<br>기준(안) 개발     | 성능평가<br>기준(안) 제시 | 성능기준<br>제시    | 제시여부  | 보고서   | 제시             | 15      | 15      |
| 바닥<br>보호공<br>성능기준                  | 바닥보호공 부분<br>흐름 특성 분석 | 바닥보호공<br>흐름장 측정  | 흐름장<br>100%측정 | 실험결과  | 보고서   | 100%<br>측정     | 10      | 10      |
|                                    |                      | 유형별 3차원<br>수치모의  | 5 case        | 모의개수  | 보고서   | 5 case<br>이상   | 5       | 5       |
|                                    | 바닥보호공<br>작용력 분석      | 작용력 정량화          | 관계식<br>제시     | 제시여부  | 보고서   | 상관<br>관계<br>제시 | 10      | 8       |
|                                    | 성능평가<br>기준(안) 개발     | 성능평가<br>기준(안) 제시 | 성능기준<br>제시    | 제시여부  | 보고서   | 제시             | 15      | 15      |
| 횡단구조물<br>유형별<br>적정규모<br>결정<br>프로그램 | 적정규모 결정<br>프로그램 개발   | 프로그램 개발          | 2건<br>이상      | 등록여부  | 등록증   | 6건             | 20      | 20      |
| 계                                  |                      |                  |               |       |       |                | 100     | 96      |

| 성과지표      | 목표치 | 달성치 | 가중치 | 달성도 |
|-----------|-----|-----|-----|-----|
| 학술지 논문 게재 | 2   | 3   | 50  | 150 |
| S/W 등록    | 2   | 6   | 50  | 300 |
| 계         |     |     | 100 | 450 |

## 2. 관련 분야 기여도

- 가. 이 연구는 기존의 도수영역에서 접촉식 유속측정 장치의 한계를 극복하기 위해 비접촉식 유속측정기법인 PIV와 BIV를 병용하여 도수에 의한 다상흐름을 측정하고 분석한 국내 최초로 시도된 것으로 실험분야에 독보적인 성과를 도출함
- 나. 연구 성과를 전문학회가 주관하는 학술회의에서 발표하여 그 우수성과 독창성을 인정받음
- 다. 현재 하천설계기준에 다루어지지 않은 물반이공 슬래브의 재료파괴, 바닥보호공 사석저면의 하상토 흡출에 대한 연구가 최초로 시도됨
- 라. 지속적인 연구를 통해 과학적으로 증명된 하천횡단구조물의 기술지침 개발을 할 수 있을 것으로 기대됨

## 제5장. 연구개발성과의 활용계획

- 가. 이 연구는 기존의 도수영역에서 접촉식 유속측정 장치의 한계를 극복하기 위해 영상측정 기법인 PIV와 BIV를 병용한 기법을 적용하여 유동장 및 압력 측정에 우수한 결과를 보였으며 향후 후속연구의 기초자료로 활용될 수 있음
- 나. 물받이공 및 바닥보호공에서 발생하는 재료파괴 및 사석저면의 흡출에 대한 복잡한 물리적 현상을 규명한 연구로 하천설계기준 또는 하위 기술지침 반영에 기여할 수 있음
- 다. 계속과제를 통해 하천횡단구조물 물받이공 및 바닥보호공의 안전성 확보를 위한 정량적 성능기준을 제시하여 추후 설치되는 구조물의 안전 확보 및 논란이 되고 있는 보의 성능기준에 대한 사회적 갈등 해소가 이루어질 것으로 기대됨
- 라. 수리실험과 수치모의 결과에 대한 심도 있는 분석이 추가적으로 수행되어야하며 하천횡단구조물의 안정성 확보를 위한 기술개발과 최종연구목표인 실용화 및 하천설계기준에 반영하기 위한 후속연구가 필요함

## 제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

○ 해당사항 없음

## 제7장. 연구개발성과의 보안등급

○ 해당사항 없음

## 제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

| 구입 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 |
|-------|----------------|-------------|----|--------|---------------|---------------|---------------|-----------------|
|-------|----------------|-------------|----|--------|---------------|---------------|---------------|-----------------|

○ 해당사항 없음

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

주관기관의 자체 내규 「산업안전보건지침」에 의해 산업안전보건법과 연구실안전환경조성에 관한법률 제6조, 시행규칙 제2조에 의거 연구실의 안전을 유지증진하고 쾌적한 연구환경 조성에 노력하였음

## 제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

| 번호 | 구분<br>(논문/<br>특허/<br>기타) | 논문명/특허명/<br>기타                                              | 소속<br>기관명         | 역할  | 논문 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<br>사항<br>(SCI<br>여부/인용<br>횟수 등) |
|----|--------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------|-----|------------------------|-----------|-------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| 1  | 논문                       | 불연속 지형을<br>지나는 천수<br>흐름의 해석을<br>위한 수심적분<br>모형에 대한<br>새로운 기법 | 한국건<br>설기술<br>연구원 | 주저자 | 대한토목학회                 | -         | 2015.12.31        | 중복                              | 비SCI                               |
| 2  | 논문                       | 측면 위어를<br>넘나드는 천수<br>흐름에 대한<br>2차원 수치모의                     | 한국건<br>설기술<br>연구원 | 주저자 | 한국수자원학회                | -         | 2015.11.30        | 중복                              | 비SCI                               |
| 3  | 논문                       | 발산형 바닥<br>경사 생성항의<br>재검토와<br>체적-수위<br>관계의 수정                | 한국건<br>설기술<br>연구원 | 주저자 | 한국수자원학회                | -         | 2017.05.31        | 단독                              | 비SCI                               |
| 4  | S/W                      | 물받이공 설계<br>프로그램                                             | 주식회사<br>지티이       | 저작자 | 한국저작권<br>위원회           | -         | 2016.06.01        | 단독                              |                                    |
| 5  | S/W                      | 바닥보호공<br>설계 프로그램                                            | 주식회사<br>지티이       | 저작자 | 한국저작권<br>위원회           | -         | 2016.06.01        | 단독                              |                                    |
| 6  | S/W                      | 불규칙 지형을<br>지나는 흐름의<br>수위 도시<br>프로그램                         | 한국건<br>설기술<br>연구원 | 저작자 | 한국저작권<br>위원회           | -         | 2016.12.21        | 단독                              |                                    |
| 7  | S/W                      | 잠긴 계산<br>격자의<br>체적-수위 관계<br>계산 모듈                           | 한국건<br>설기술<br>연구원 | 저작자 | 한국저작권<br>위원회           | -         | 2016.12.21        | 단독                              |                                    |
| 8  | S/W                      | 물받이공<br>기하학적 설계<br>프로그램                                     | 주식회사<br>지티이       | 저작자 | 한국저작권<br>위원회           | -         | 2017.05.18        | 단독                              |                                    |
| 9  | S/W                      | 바닥보호공<br>기하학적 설계<br>프로그램                                    | 주식회사<br>지티이       | 저작자 | 한국저작권<br>위원회           | -         | 2017.05.18        | 단독                              |                                    |

## 제11장. 기타 사항

○ 해당사항 없음

## 제12장. 참고 문헌

---

- 국토기술연구센터 (1998) 하상유지공의 구조설계 지침.
- 감사원 (2013) 감사원 결과보고서- 4대강살리기 사업 주요시설물 품질 및 수질관리 실태.
- 국토해양부 (2009) 전국 하천횡단 구조물 설치현황 및 어도 실태조사 보고서.
- 국토해양부 (2012) 보도자료-준공대비 점검결과, 4대강 보 안전 재확인.
- 국토해양부 (2012) 국가 및 지방하천 종합정비 마스터플랜.
- 국토교통성 (2008) 하천사방기술기준.
- 농림부 (1996). 농업생산기반정비사업계획 설계기준.
- 류권규(역자) (2009). 난류의 수치모의(원저자 : 梶島岳夫, 1999).
- 류권규, 마리안 머스테, 로버트 에테마, 윤병만 (2006). “난류 중 부유사의 속도 지체 측정.” 한국수자원학회논문집, 제39권, 제2호, pp.99-108.
- 배재현, 이경훈, 신종근, 양용수, 이주희 (2011). “입자영상유속계를 이용한 은어의 수영능력 측정.” 제47권, 제4호, pp.411-418.
- 우효섭 (2001). 하천수리학. 청문각.
- 한국수자원학회 (2009). 하천설계기준 · 해설.
- 한국건설기술연구원 (2014) 입자영상유속계(PIV)를 이용한 하천구조물 주변 유동해석 기법 개발
- 國土交通省 (2008). 河川砂防技術基準.
- 末次 忠司(2009) 河川 構造物 維持管理の 實際.
- Adrian, R. J., C. D. Meinhart, and C. D. Tomkins (2000). “Vortex organization in the outer region of the turbulent boundary layer.” *Journal of Fluid Mechanics*, 422, pp.1-54.
- Bligh, W. G. (1910). “Dams, barrages, and weirs on porous foundations.” *Engineering News*, 64(26).
- Chow, V. T. (1959). *Open-channel hydraulics*, McGraw Hill Book Company, Inc., New York.
- Christensen, B. A. (1984). “Analysis of partially filled circular storm sewers.” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 110, No.8.
- Flow Science (2015). *FLOW-3D user manual*(Release 11.1.0), Los Alamos, New Mexico.
- Herlina, H. and Jirka, G. H. (2008). “Experiments on gas transfer near the air-water interface in a grid-stirred tank.” *Journal of Fluid Mechanics*, 594, pp.183-208.
- Kadota, A., Suzuki, K. and Rummel, A. C. (2007). “Shallow flow visualization around a single groyne, *Pro. of 7th International Symposium of Particle Image Velocimetry*.
- Oliveto, G. and Comuniello, V. (2010). “Local scour progress downstream of low-head

- 
- stilling basins.” European IAHR Congress, Nanjing, China.
- Paterka, A. J. (1984). “Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators.” Engineering Monograph No. 25, USBR, Denver, Colorado.
- PIANCA (2006). Design of movable weirs and storm surge barriers, International Navigation Association, Belgium.
- Rouse, H. (1959). Advanced mechanics of fluids, Wiley, New York.
- Sanjou, M. and Nezu, I. (2009). “Turbulence structure and coherent motion in meandering compound open channel flows.” *Journal of Hydraulic Research*, 47, pp.598-610.
- Tennekes, H. and Lumley, J. L. (1972). A first course in turbulence, the MIT press.
- U.S. Army Corps of Engineers (2008). Detection and evaluation of scour protection for navigation dams, ERDC/CHL TR-08-14, Washington, DC.
- U.S. Army Corps of Engineers (2013). Hydraulic design of navigation dams, Washington, DC.
- Wang, H., Murzyn, F. and Chanson, H. (2014). “Total pressure fluctuations and two-phase flow turbulence in hydraulic jumps.” *Experiments in Fluids*, 55, 1847.

#### 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.