제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

'기후변화에 따른 돌발홍수 대비 방류량 조절이 가능한 사이펀 여수로 개발'(연구개발 기간 : 2016. 06. ~ 2018. 06.) 과제의 최종보고서 1부를 제출합니다.

2018. 09. 07

주관연구기관명 : 세종대학교 산학협력단 (대표자) 백 성 욱 (인)
공동연구기관명 : 한국농어촌공사 농어촌연구원 (대표자) 장 중 석

주관연구기관책임자: 이 창 훈
공동연구기관책임자: 장 은 철

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제 고유 번호</td><td>16CTAP-C115126-01</td><td>해당 단계 연구 기간</td><td>2016. 6. 22. ~ 2018. 6.21.</td><td>단계구분</td><td>2/2</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구사업명</td><td>중사업명</td><td colspan="4">국토교통기술촉진연구사업</td></tr>
<tr><td>세부사업명</td><td colspan="4">기초원천</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구과제명</td><td>대과제명</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="4">기후변화에 따른 돌발홍수 대비 방류량 조절이 가능한 사이펀 여수로 개발</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구책임자</td><td rowspan="2">이 창 훈</td><td>해당단계 참여 연구원 수</td><td>총: 12명
내부: 8명
외부: 4명</td><td>해당단계 연구개발비</td><td>정부: 220,000 천원
기업: 천원
정부 외: 천원
계: 220,000 천원</td></tr>
<tr><td>총 연구기간 참여 연구원 수</td><td>총: 19명
내부: 11명
외부: 8명</td><td>총 연구개발비</td><td>정부: 400,000 천원
기업: 천원
정부 외: 천원
계: 400,000 천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및 소속 부서명</td><td colspan="3">세종대학교 산학협력단</td><td colspan="2">참여기업명</td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="3">상대국명:</td><td colspan="2">상대국 연구기관명:</td></tr>
<tr><td>공동연구</td><td colspan="3">연구기관명:한국농어촌공사 농어촌연구원</td><td colspan="2">공동연구책임자: 장 은 철</td></tr>
<tr><td colspan="4">본 연구에서 기후변화에 따른 돌발홍수 및 집중호우 대비 댐 및 저수지의 보조 여수로로서 방류량 조절이 가능한 사이펀 여수로를 개발함. 기존 사이펀 여수로의 단점인 첨두홍수량 발생 이후에도 지속적으로 고 유량이 방류되는 것을 보완하기 위해 air slot과 air vent를 이용하여 사이펀 내에 공기를 공기를 주입하여 방류량을 조절할 수 있는 아이디어를 도출함. 3차원 수치해석과 수리모형실험을 통하여 air slot과 air vent로 공기가 주입되어 사이펀의 관내 유수량을 줄여 사이펀 방류량 조절이 가능함을 물리적으로 입증함. 공기만 유입하는 경우 사이펀 가동에 비해 약 50% 이상의 방류량이 감소하였고, 더 나아가 공기와 물이 혼합하여 사이펀 내로 유입하는 경우 방류량이 점진적으로 감소하여 방류량 조절을 정밀히 할 수 있음을 확인함. 본 연구 결과로 ‘다단계 수위조절 사이펀’과 ‘유량조절이 가능한 사이펀 여수로’ 등 2건의 특허를 출원하였음. 본 연구 성과로 공기가 혼입된 관로 흐름에 대한 이론 및 실험 연구력 향상과 댐의 치수능력 향상으로 돌발홍수 시에도 인명 및 재산피해 감소에 큰 역할을 할 수 있을 것으로 판단됨.</td><td colspan="2">보고서 면수

110</td></tr>
</table>

연구의 목적 및 내용	- 방류량 조절이 가능한 사이펀 여수로 개발 - 사이펀 여수로의 유량 조절 기술 특허 출원				
연구개발성과	- 방류량 조절이 가능한 사이펀 여수로 성능평가 보고서 - 방류량 조절이 가능한 사이펀 여수로 기술 특허 2건 출원 - 방류량 조절이 가능한 사이펀 여수로 운용 지침서				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	- 공기가 혼입된 관로 흐름에 대한 이론 및 실험기술력 향상 - 댐의 치수능력 향상으로 돌발홍수 시에도 인명 및 재산피해 감소 - 창의기술로 해외 건설사업 진출 및 외화 획득				
핵심어 (5개 이내)	사이펀 여수로	방류량 조절	돌발홍수	저수지	설계

〈 SUMMARY 〉

Purpose & Contents	- Developing siphon spillways capable of controlling outflow discharge - Getting patents of controlling outflow discharge of siphon spillways				
Results	- Report of capability of siphon spillways in controlling outflow discharge - Patent of siphon spillways capable of controlling outflow discharge - Operation manual of siphon spillways capable of controlling outflow discharge				
Expected Contribution	- Improvement of theory and experimental technology about pipe flow of water with air - Reduction of disasters to human and real estates by controlling outflow discharge of dam even in sudden flood - Export of this creative technology and getting money				
Keywords	Siphon Spillway	Outflow Control	Sudden Flood	Reservoir	Design

〈 Contents 〉

1. Research and Development Project Overview ····· 6

2. Domestic and Overseas Technology Development Status ····· 8

3. Implementation and Results of Research and Development ····· 16

4. Achievement of Research Objectives and Contribution of Related Areas ····· 94

5. Future Plans of Research and Development Result ····· 97

6. International Scientific and Technical Informations Collected during Research Process ····· 98

7. Security Grade of Research Results ····· 101

8. Research Facilities and Equipment Status Registered in National Science Technology Information System ····· 102

9. Safeguards Carried out of Laboratory According to the Research Procedure ····· 103

10. Main Results of Research and Development ····· 105

11. Others ····· 106

12. References ····· 110

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요 ····· 6

2. 국내외 기술 개발 현황 ····· 8

3. 연구 수행 내용 및 성과 ····· 16

4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 ····· 94

5. 연구개발성과의 활용 계획 ····· 97

6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보 ····· 98

7. 연구개발성과의 보안등급 ····· 101

8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설 · 장비 현황 ····· 102

9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적 ····· 103

10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적 ····· 105

11. 기타 사항 ····· 106

12. 참고 문헌 ····· 110

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

○ 국제적 기상변화로 인한 돌발홍수 및 집중호우 등에 따른 재해로부터 국민의 안전을 확보하는 연구로써 방류량 조절이 가능한 사이펀 여수로를 개발함.

2. 연구개발의 필요성

○ 국내에 약 18,000개의 댐이 건설되었고 이 중 대부분이 1970년 이전에 건설된 필댐 형식으로 조사되어, 현재 국내의 댐 및 저수지의 노후화가 매우 심각한 상황임. 최근 기후변화에 따를 이상기후로 국지성 집중호우 및 돌발홍수가 빈번히 발생하고, 댐 설계홍수량의 설계기준 200년 빈도 홍수량에서 가능최대홍수량(Probably Maximum Flood)으로 변경됨에 따라 과거 건설된 대부분의 댐 및 저수지들이 현재의 설계기준을 만족하지 못하고 있는 실정임. 실제 2013년 경주시 안강 산대저수지 제당이 붕괴되는 등의 사고 발생하였으며, 가능최대홍수량 수준의 집중호우가 발생할 경우 대부분의 댐 및 저수지 하류측 침수피해가 예상됨.



[그림 1.2.1] 경주 산대저수지 붕괴 및 침수피해(2013년)



[그림 1.2.2] 화순 금전저수지 사이펀 가동후 하류 홍수 상황 (2003년)

○ 상기 이유로 규모가 작은 저수용량 100만톤 이상의 댐들에 대해서도 비상대처계획(EAP) 수립을 의무화하고 있으나 홍수예방을 위한 적극적인 대책 수립 및 예산지원은 미미한 수준임. 치수능력증대를 위한 구조적인 보강대책으로 댐 증고, 보조여수로 신설, 여수로 확장, 상류에 홍수조절용 댐 신설 등의 방안이 적용되고 있으나 이러한 대책들은 막대한 예산이 소요

되고 환경파괴 측면에서도 현실적인 어려움이 있음.

- ○ 최근 별도의 추가적인 환경파괴가 발생하지 않는 대책으로 제체 상부에 사이펀을 설치하여 홍수배제능력을 극대화시키는 방안이 고려되고 있으며, 특히 사이펀 여수로의 경우 추가적인 여수로 설치공간에 제한을 받는 경우에도 적용이 가능한 장점이 있음.
- ○ 초기 저수지 수위 상승 시 만관이 되지 않아 유량이 수심의 3/2승에 비례하면서 증가하다가 만관이 되면 관수로흐름이 되면서 유량이 급격히 증가하여, 돌발홍수 시 저수지 상류측 물을 하류로 신속히 방류할 수 있음.
- ○ 사이펀 여수로는 일반 월류형에 비해 방류량이 많은 장점이 있지만 상류 수위 하강에 따른 방류량의 변화는 있지만 사이펀의 저수지 하류 측 방류량이 홍수를 유발할 만큼 큰 경우 이를 제어하기 어려움이 있음.
- ○ 따라서, 사이펀 여수로의 방류량 조절 문제를 해결할 수 있다면 기후변화에 따른 돌발홍수 발생 시 이를 제어하는 방안으로 사이펀 여수로가 댐 및 저수지의 치수능력 증대를 위하여 시공이 증가할 것으로 예상됨.
- ○ 국내에서는 아직까지 대규모의 사이펀 여수로를 운용한 경험이 많지 않기 때문에, 앞으로 발생 가능한 다양한 홍수 피해를 방지하기 위해서는 현 시점에서 재해에 보다 안전한 사이펀 여수로 설치를 위한 연구가 수행되어야 함.

3. 연구개발 범위

- ○ 본 연구의 범위는 크게 3가지로 구분하여 1) 방류량 조절이 가능한 사이펀 여수로 아이디어 도출, 2) 방류량 조절이 가능한 사이펀 여수로 성능평가, 3) 방류량 조절이 가능한 사이펀 여수로 특허 출원임. 이를 위하여 국내외 사이펀 여수로 기술 개발 현황 분석 및 3차원 수치해석과 수리모형실험을 통한 방류량 조절이 가능한 사이펀 여수로 성능평가 등을 통해 방류량 조절이 가능한 사이펀 여수로의 검증 결과를 제시하였음.

제2장. 국내외 기술 개발 현황

1. 국내 기술 현황 및 선행 연구

가. 국내 사이펀 여수로 시설 현황

○ 사이펀 여수로 시설은 우리나라에서 12개소의 댐 및 저수지에 설치되어 있음 [표 2.1.1] 참조. 대부분 댐 및 저수지의 제당고를 높이지 않고 방류능력 확장방안으로 시공하였으며, 지형적 여건의 어려움으로 인해 여수토 확장이 어려울 때 시공하였음. 이는 별도의 구동장치가 필요 없어 유지관리에 유리하며, 낙차가 클수록 방류능력이 크기 때문에 제당고가 높은 댐 및 저수지에 활용하였음.

○ 우목지, 고풍지, 학곡지 등 7개소의 사이펀은 박스형 콘크리트 사이펀 여수로로서 공사비 절감 등의 측면에서 설치하였으나 일정 수위 이상이 되면 사이펀이 동시에 작동하여 다량의 유출수가 하류로 방류하여 범람에 의한 침수피해가 발생하였음. 과거에 설치된 콘크리트 사이펀의 경우 에어벤트의 막힘이나 작동불량으로 인해 사이펀이 형성된 후 저수지 내 수위가 유입구 수위 이하로 떨어지지 않을 경우 홍수에 의한 흐름이 멈추지 않았음.

○ 이러한 문제점을 해결하기 위해 최근 하류부의 범람이 우려될 경우 방류를 멈출 수 있고 사이펀이 순차적으로 작동하여 하류부의 첨두홍수량을 줄일 수 있도록 원형 강관 사이펀이 설치되고 있음. 또한 에어벤트를 만수위에 맞추어 설치하여 상시만수위에서 자동정지가 되게 시공했음. air vent 밸브와 bypass 밸브로 사전방류도 가능하며 이러한 기능을 활용한 저수지로 지평지, 송석지 등이 있음.

(1) 고풍지 현황

○ 충남 서산의 고풍지에 1973년에 비상여수토로 사이펀을 설치하였음. 낙차는 7.5m, 방류유량은 289㎥/s 임.

○ 홍수 시 2.5m×2.5m 크기의 박스형 콘크리트 사이펀 7련이 동시에 작동하여 저수지 하부의 하천이 범람할 가능성이 있음. 또한 air vent의 고장으로 작동 중지의 문제점이 있었음. air vent의 재설치가 필요함. [그림 2.1.1]은 고풍지 사이펀 여수로 현황을 보여줌.



[그림 2.1.1] 고풍지 사이펀 여수로 현황

(2) 우목지 현황

○ 충남 공주의 우목지에 [그림 2.1.2]와 같이 콘크리트 박스 형식의 3m×3m×4련 사이펀을 설치하였음.



[그림 2.1.2] 우목지 사이펀 여수로 현황

(3) 송석지 현황

○ 충남 예산의 송석지에 1976년도에 3련의 박스형 콘크리트 사이펀이 설치되었음. 최근 기후변화로 인한 홍수량 증가(125.88㎥/s)로 홍수배제능력이 부족하여 신규 사이펀 2련을 추가로 설치하는 것으로 결정됨.

○ 사이펀을 통한 방류시기를 조절하기 위해 유입구 높이를 다르게 하여 하류 하천에 첨두홍수량을 줄이고 방류하천 단면을 줄일 수 있게 되었음. [그림 2.1.3]는 송석지 사이펀 여수로현황을 보여줌.

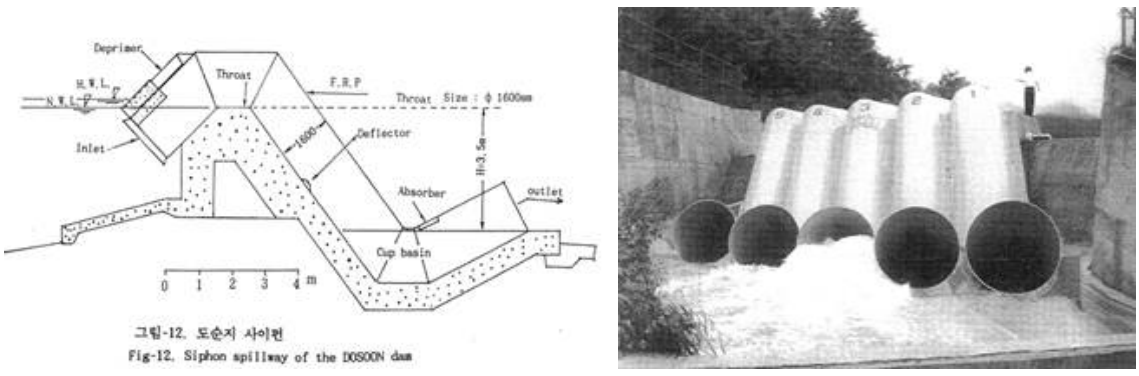


송석지 단면도	기존 사이펀 여수로	신설 사이펀 여수로

[그림 2.1.3] 우목지 사이펀 여수로 현황

(4) 도순지 현황

○ 전북 익산의 도순지는 원형 FRP 사이펀으로 ø1.6m × 5련으로 설치되었음.



[그림 2.1.4] 화순 금전저수지 사이펀 가동 후 하류 홍수 상황(2003년)

[표 2.1.1] 우리나라 사이펀 여수로 시설 현황

저수지	위치	규모	재 질	비고
대가지	경남 고성	ø2.0m × 9련	철관	
도순지	전북 익산	ø1.6m × 5련	FRP	
우목지	충남 공주	□ 3m×3m×4련	콘크리트	
고풍지	충남 서산	□ 2.5m×2.5m×7련	콘크리트 사이펀	
도갑지	전남 영암	□ 2.0m×2.0m×3련	콘크리트 (72년 준공)	여수토로 변경 공사 ('16년 9월 착수 예정)
학지	강원 철원	ø1.2m × 1련 ø1.8m × 17련	FRP	
우천지 (학곡지)	강원 원주	□ 3m×3m×4련 ø1.5m × 1련 ø2.0m × 4련	콘크리트 철관 철관	
송석지	충남 예산	□ 2m×2m×3련 ø1.6m × 2련	콘크리트(기존) 철관(추가)	시공완료
지평지	경북 상주	ø1.3m × 3련	철관 ('13년 완료)	둑높이기사업으로 시공
하동호	경남 하동	ø3.0m × 복층×9련	철관	
미호지	충북 청주	ø0.7m × 2련 ø2.7m × 1련 ø3.0m × 17련	철관 철관 철관	
낙덕	전북 순창	ø1.0m × 1련	철관 (소수력발전)	
금전	전남 화순	ø1.0m × 6련	철관	둑 높이기 사업으로 여수토로 변경 완료

나. 국내 사이펀 연구 현황

○ 여운철(1994)은 노후저수지 보강 개발의 필요성을 강조하고 보 월류 수심을 낮추기 위해서는 사이펀식이 유리하며 용수로의 방수문을 사이펀 식으로 대체하는 방법에 대해 서술함. 국내 사이펀 식 여수로의 수리시형모험을 통한 연대별 연구개발 진척에 대해서 특징 별로 조사함.

○ 유강산업(2005)은 2004년 8월 태풍 메기에 의해 전남 화순 금전지에 설치한 사이펀 여수로의 실제가동 상황을 검토함. 사이펀 여수로의 모의 운영 결과 최고 수위는 현장 검측 수위와 일치하였고 사이펀 여수로가 1기라도 작동하지 않을 시는 최고수위가 제당고를 초과하는 것으로 나타남. 경제성 및 공사 시 용수에 대처할 수 있는 점 등을 종합적으로 감안해 볼 때 기존 개수로와 사이펀 여수로를 병합하면 효과적일 것이라고 판단하였음.



[그림 2.1.5] 금전저수지 사이펀 가동 후 상황(2003년)

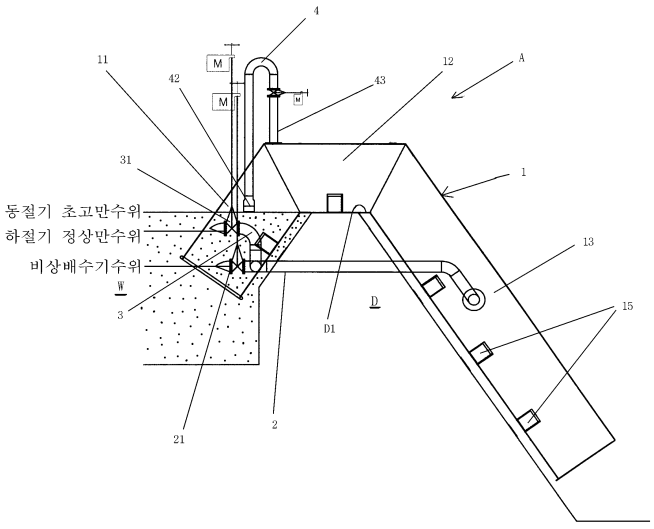
○ 유강산업(2005)은 하동댐 사이펀 여수로 수치해석을 통해 3차원 모델링, 유동해석, 구조해석을 수행함. 유동해석을 통해 사이펀이 정상적으로 작동하며 작동 시 압력 또는 유량의 급격한 변화가 없다는 것을 확인하였으며 구조해석을 통해 응력최대 값은 215Mpa로 사이펀 재질의 허용응력인 245Mpa 보다 낮은 것으로 나타나 안전한 것으로 판단함. 추가적인 보강책을 마련하여 적용한다면 구조적으로 보다 안전할 것을 제시함.

○ 윤(2010)은 국내에 있는 댐의 홍수배제능력을 증가시킬 수 있는 다양한 방안을 검토하였으며 다양한 방안 중 하나인 사이펀 여수로의 장단점을 검토함.

○ 박(2011)은 국내에서는 아직 보편적이지 않은 사이펀을 연구함으로써 사이펀의 효용성을 증명함.

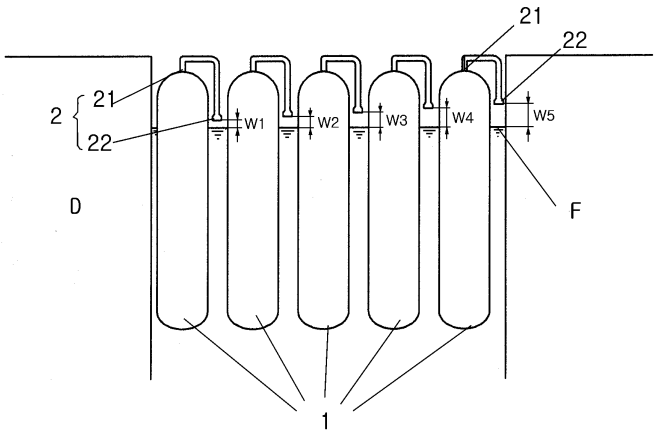
다. 국내 사이펀 특허 현황

○ 한 여수로에 높이가 다른 bypass를 두어 방류량 조절이 가능한 사이펀 여수로를 개발함(2006년 등록). 사이펀 여수로에서 입구부의 높이가 서로 다른 bypass를 설치하고 밸브를 이용하여 특정 높이의 bypass의 개폐를 통해 사이펀 여수로가 작동하는 저수지 수위를 조절할 수 있는 기술임.



[그림 2.1.6] 입구부 높이가 다른 bypass로 방류량 조절이 가능한 사이펀 여수로 개념도

○ 각 여수로마다 높이가 다른 air vent를 둔 다열 사이펀 여수로를 개발함(2007년 등록). 다열의 사이펀 여수로에서 air vent 입구부의 높이가 서로 다르게 설치하여 방류량을 조절하는 기술임. 다열의 사이펀이 한꺼번에 작동하지 않고 순차적으로 작동하게 하여 홍수 초기단계에서의 저수지 만수위 조절이 가능하게 한 기술임.



[그림 2.1.7] 높이차가 있는 공기배출수단이 구비된 사이펀여수로군 개념도

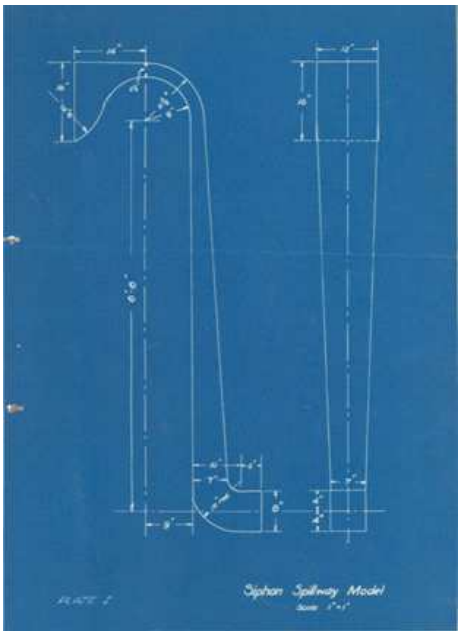
2. 국외 선행연구 사례

○ Ramseyer(1923)는 유럽과 미국에서의 사이펀 사용 실태와 한계에 대해 논의하고, 사이펀 여수로에 대한 수리모형실험을 수행함. 사이펀이 작동하기 위해서는 적절한 파이프 디자인이 필요하고, 사이펀 작용은 사이펀 내에서의 공기가 제거됨에 의해 일어나며 모델마다 조금씩 다른 효율을 가짐을 실험 결과를 통해 서술함.

○ Gramatky and Robinson(1928)은 사이펀 수리실험을 통하여 사이펀 출구의 수심에 따른 물빠짐 상수의 변화를 측정함. 또 사이펀의 부위에 따른 압력에 대해서 비교하고, 사이펀에 축척효과를 고려하면서 상사법칙을 적용함.

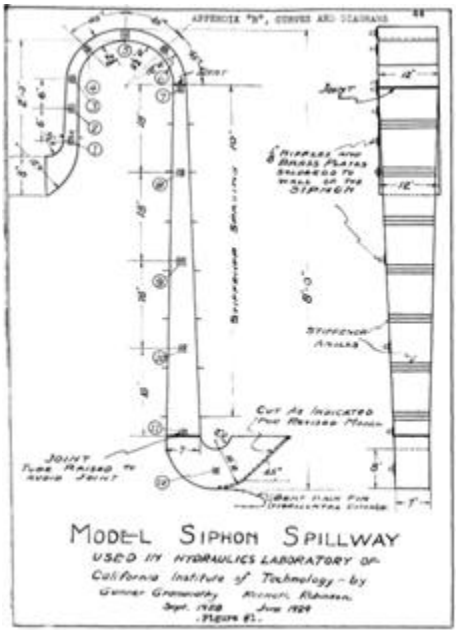
○ James and Young(2001)은 EXTRAN라는 코딩 프로그램을 통하여 복잡한 시스템의 사이펀 보를 수리학적으로 시뮬레이션 함. EXTRAN은 사이펀의 외부 제어를 시뮬레이션 할 수 있으며, 광범위한 유량 및 작동조건에서도 검증되었음.

○ French and Widden(2001)은 사이펀 설치 실험을 통해 사이펀의 공기 펌핑 효율이 일반적인 수력 발전소의 효율보다 낮지만 사이펀 설치의 낮은 비용 때문에 더 경제적으로 전력이 활용될 것이라고 제시함.



<사이펀 모형>

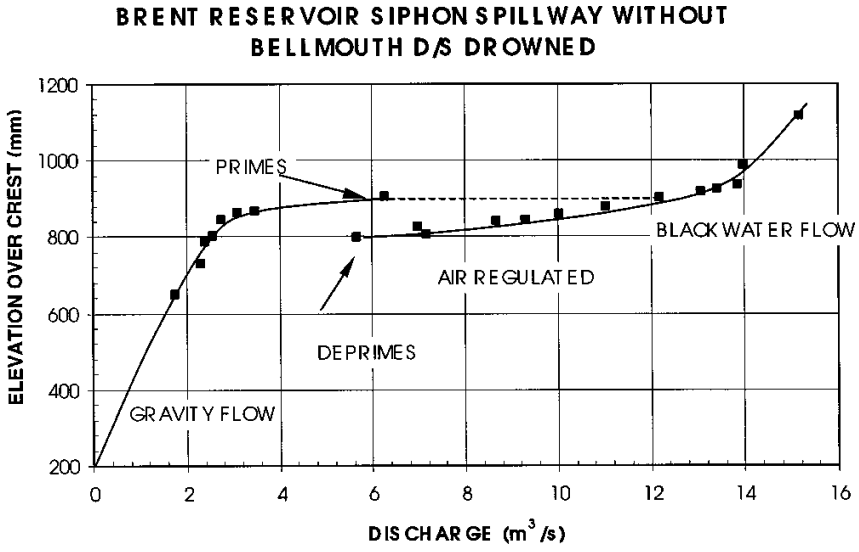
[그림 2.2.1] Design and test of a model siphon spillway(1923)



<사이펀 여수로 모형>

[그림 2.2.2] Siphon spillway(1928)

○ Babaeyan-Koopaei et al.(2002)은 수리모형실험을 통해 런던의 Brent 저수지에 있는 기존의 벨마우스 사이펀이 갑작스런 물의 넘침과 홍수에 대한 방지가 부적절하다는 것을 제시하고 가장 안정적인 수위 유량 조건은 공기 구멍이 배수로 덮개 안으로 잘린 상태인 것을 발견함.



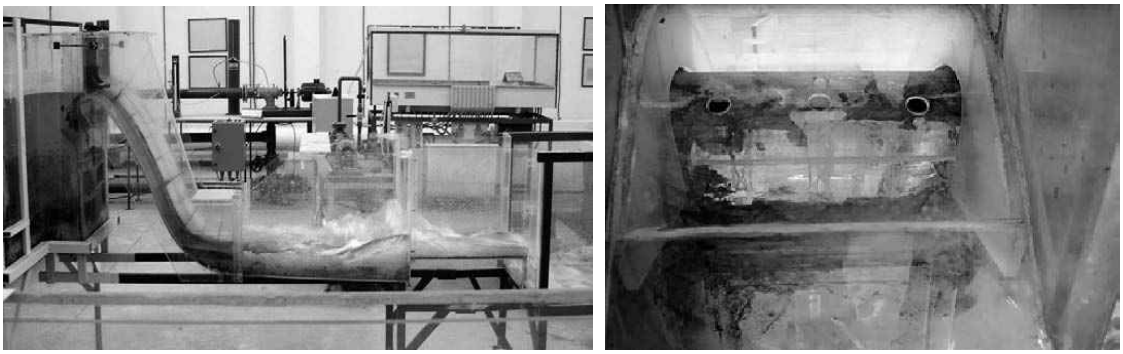
[그림 2.2.3] Case study on hydraulic performance of Brent reservoir siphon spillway (Babaeyan-Koopaei et al., 2002)

○ Coleman et al.(2004)은 토양상태, 댐 높이, 기초 지질학 및 수문학과 관련하여 물넘이 여수로, 단조 여수로, 오리피스, 사이펀, 터널 및 급류와 같은 많은 유형의 여수로와 공동현상 및 폭기를 고려한 방수설계를 연구함.



[그림 2.2.4] hydraulic design of spillway (Coleman et al., 2004)

○ Houichi et al.(2006)은 Creager-Ofitserov 유형의 가공된 사이펀 개수로의 4가지 모델에 대해 배출 용량을 실험적으로 검토함. 사이펀의 넘치는 지점이 증가하면 유동계수가 증가하고 첫 번째 모델에서 네 번째 모델로 가는 동안 계수가 일정하게 증가하는 결론을 제시함.



(a) Experimental station (b) Entrance and aeration orifices

[그림 2.2.5] Hydraulic design of spillway (Houichi et al., 2004)

○ HOUICHI(2009)은 사이펀 여수로와 물넘이 여수로를 수치해석을 통하여 비교함으로써 사이펀 여수로의 편의성을 증명함.

○ Ghafourian(2011)은 사이펀 여수로의 방류량을 수치 모델로 계산했을 때 시간단축과 정확한 결과를 얻을 수 있음을 증명함.

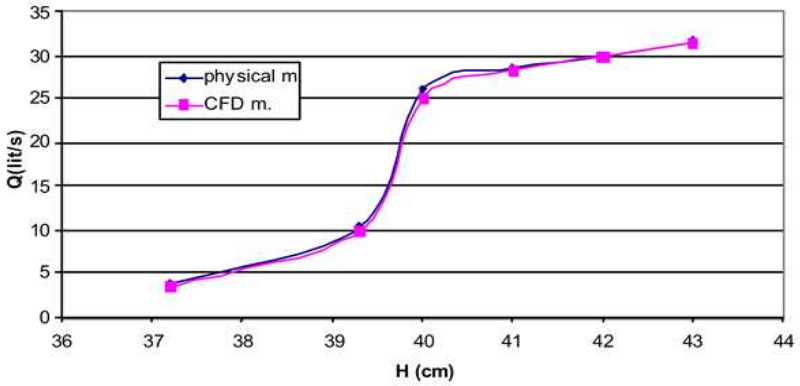
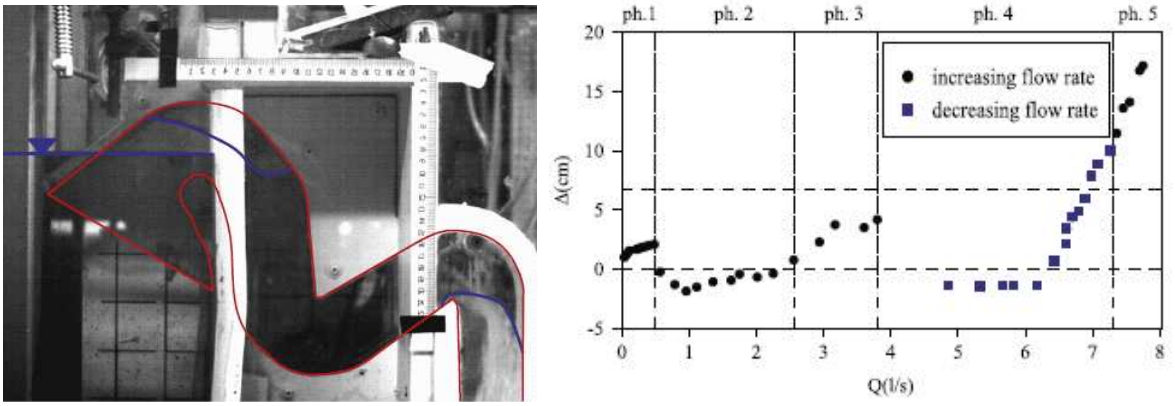


Fig. 7: Relative Error percent of spillway with free outlet

[그림 2.2.6] Hydraulic of Siphon Spillway by Physical and Computational Fluid Dynamics (Ghafourian, 2011)

○ Boatwright(2014)은 공기 조절 식 사이펀 방수로의 유속 및 배출구 크기에 대한 성능을 정량화 하는 연구를 하였으며 실제 노화된 방수로를 크기가 맞는 사이펀으로 교체 하면서 사이펀의 크기 조정 및 건설절차를 검토할 수 있는 가이드라인을 제작함.

○ Petaccia(2015)은 브릭 댐의 사이펀 방류를 피에조전기압력계와 초음파 수위측정기를 사용하여 단계적으로 평가하는 실험을 연구함.



[그림 2.27] Experimental assessment of the stage–discharge relationship of the Heynsiphons of Bric Zerbino dam (2015)

제3장. 연구 수행 내용 및 성과

1. 방류량 조절 사이펀 여수로 아이디어 도출

가. 사이펀 여수로의 기본 이론

○ 사이펀 여수로를 통한 방류량은 Bernoulli 방정식을 통해 다음과 같이 유도됨.

$$Q = CA\sqrt{2gH} \quad \cdots\cdots \quad (3.1.1)$$

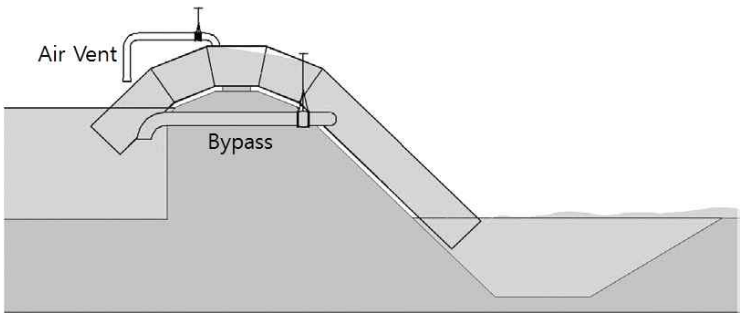
여기서, Q는 방류량, A는 사이펀 여수로 단면적, g는 중력가속도,

H는 상·하류측 수위차, C는 유량계수를 뜻함

○ 일반적으로 국내에 많이 설치되는 사이펀 여수로는 [그림 3.1.1]과 같음.

○ 저수지 내 저장수를 bypass 관로를 통해 먼저 흘려보내 사이펀 관로 하부를 만관시킴. 저수지 수위가 air vent 입구보다 높으면 관 내 공기유입이 차단되어 사이펀이 작동됨.

○ 사이펀의 출구는 U자형 또는 웅덩이를 둠으로써 출구에서의 공기유입을 차단함.



[그림 3.1.1] 국내 설치된 사이펀 여수로 기본 개념도

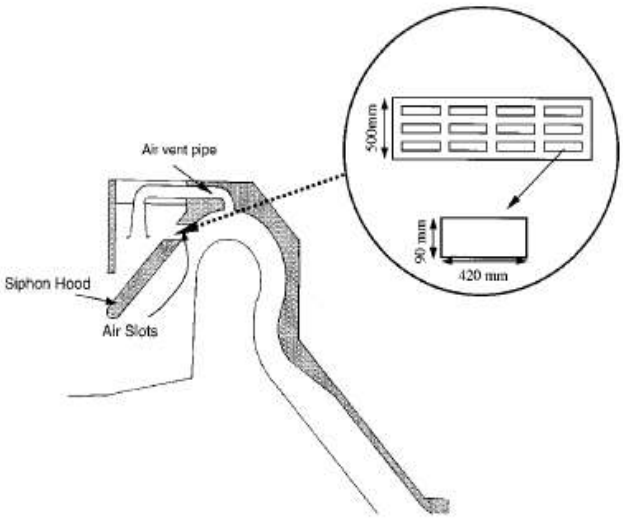
나. 단일 사이펀 여수로에서 방류량 조절 아이디어

(1) air slot 공기량 조절

○ 2000년대 초 영국에서 Babaeyan-Koopaei et al. (2002)이 air slot을 이용한 사이펀 여수로에 대한 연구를 수행하였음[그림 3.1.2 참조].

○ 그 연구에서 수위 상승 시와 하강 시 동일한 방류량을 갖는 장점이 있으나, 특정 수위에서 방류량을 조절하지 못하는 한계가 있음[그림 3.1.3(a) 참조].

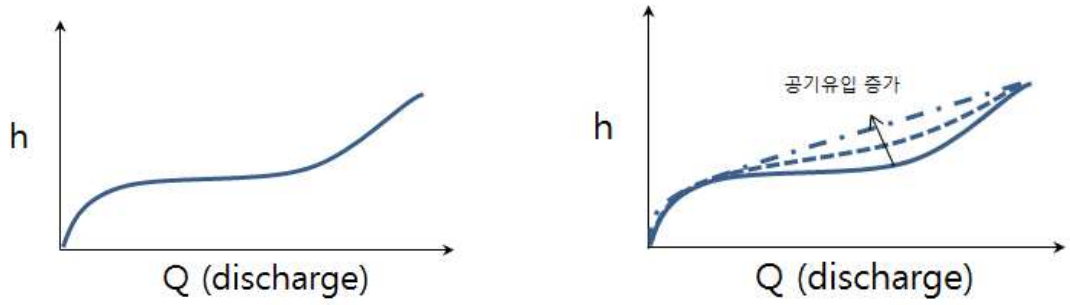
○ 본 연구에서 air slot에서의 공기 유입구 면적을 조절하여 특정수위에서도 유량조절이 가능한 사이펀 여수로를 제안함.



[그림 3.1.2] air slot을 사용한 사이펀 여수로 개념도
(Babaeyan-Koopaei et al., 2002)

○ [그림 3.1.3(b)]는 본 연구에서 제안한 사이펀 여수로의 수위-유량곡선으로 공기 유입량 조절을 통해 저수지 수위(h)에 따른 유량(Q)

의 조절이 가능함을 보여줌. 즉, 공기 유입량이 증가하면 관내 압력이 증가하여 똑같은 수위에서도 유량이 감소하게 됨.



(a) 영국에서 개발 (b) 본 연구 제안

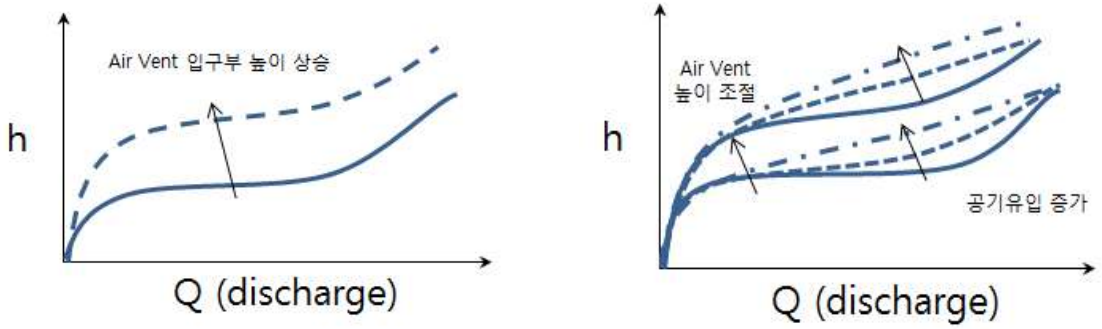
[그림 3.1.3] air slot 공기 유입량에 따른 수위-유량 곡선의 변화

(2) air vent 높이 및 air slot 공기량을 복합적으로 조절

○ air slot의 공기량을 조절하는 방법은 수위-유량곡선의 기울기 조정이 가능하지만 air vent 높이가 고정되어 사이펀 작용이 시작하는 저수지 수위가 고정되어 있음.

○ air slot의 공기량을 고정한 체 air vent 높이를 조절하면 사이펀이 시작하는 수위 조절이 가능함([그림 3.1.4(a)] 참조).

○ 더 나아가 air vent 높이와 air slot의 공기량을 복합적으로 조절하면 수위-유량곡선의 기울기도 조절하여 더 정밀하고 유연한 유량 제어가 가능함([그림 3.1.4(b)] 참조).



(a) air vent 높이 조절 (b) air vent 높이 및 air slot 공기량 조절

[그림 3.1.4] 단일 사이펀 여수로에서의 방류량 조절 방법

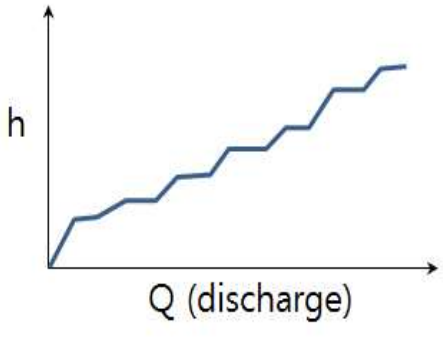
다. 다열 사이펀 여수로에서의 방류량 조절 아이디어

(1) 사이펀 별로 air vent 높이 차등

○ 다열 사이펀 여수에서 air vent 높이를 달리 두어 각 사이펀 여수로가 작동하는 저수지 수위를 달리 함으로써 저수지 수위가 상승함에 따라 순차적으로 사이펀이 작동함.

○ 저수지의 수위-유량 곡선은 계단식으로 상승함([그림 3.1.5] 참조).

○ 저수지 수위가 높을 때 모든 사이펀에서 방류하



[그림 3.1.5] Air vent 높이를 달리한 수위-유량곡선

고, 저수지 수위가 낮을 때 일부 사이펀에서만 방류하여 하류 측에 과다한 사이펀 여수로 방류량에 의한 홍수피해를 방지할 수 있음.

○ 본 아이디어는 인위적인 조작 없이 자동적으로 방류량을 조절할 수 있다는 장점이 있음.

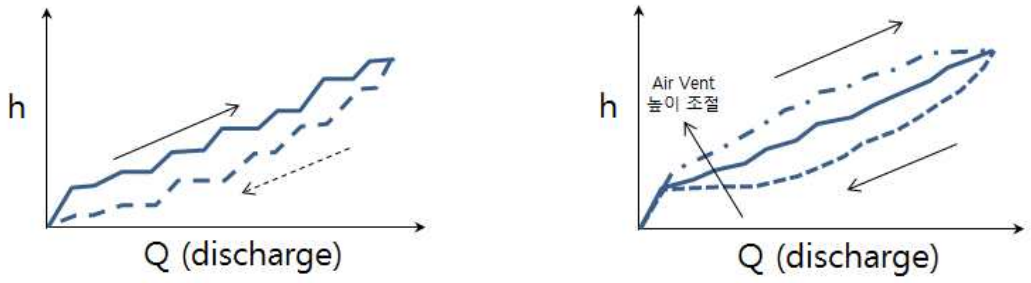
(2) air vent 높이 차등 및 air slot 공기량 조절

○ 사이펀 별로 air vent의 높이를 차등한 방식은 저수지 수위가 상승할 때와 하강할 때 동일한 수위에서 다른 유량을 배출하는 단점이 있음([그림 3.1.6(a)] 참조).

○ 사이펀 별로 air vent 높이를 차등하고 air slot을 사용할 경우 다열 사이펀 여수로에서 더 효율적으로 방류량 조절이 가능함.

○ [그림 3.1.6(b)]에서 보는 바와 같이 air vent 높이를 조절하여 실선, 파선, 일점쇄선과 같은 수위-유량 곡선을 정할 수 있고, air slot을 사용하여 수위 상승 시나 하강 시에 동일한 수위-유량 곡선을 갖는 사이펀 여수로의 설계가 가능.

○ 더 나아가 사이펀 별로 air vent 높이를 차등하고 air slot의 공기량을 조절할 경우 수위-유량 곡선의 기울기도 연속적으로 조절하여 더 정밀하고 유연한 유량 제어가 가능함



(a) air vent 높이 차등 (b) air vent 높이 차등 및 air slot 공기량 조절

[그림 3.1.6] 다열 사이펀 여수로에서 방류량 조절

라. 방류량 조절 air slot 및 수위조절 air vent 개발

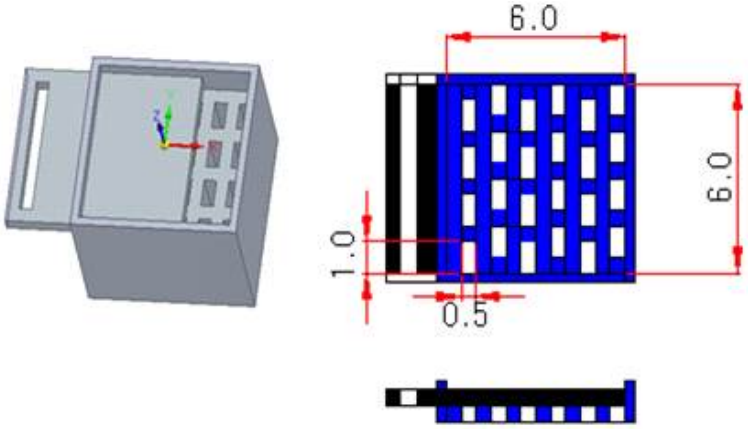
(1) 방류량 조절 air slot 개발

○ 2가지 형상(즉, 직사각형과 원형)의 방류량 조절 air slot을 개발하여 특허 출원함(출원명: 유량조절이 가능한 사이펀 여수로).

○ 직사각형 또는 원형의 air slot을 직경 10cm의 원형 사이펀 표면에 연결하고 공기가 흡입될 수 있는 흡입구를 설치하고 흡입구의 면적을 조절할 수 있게 함.

○ 직사각형 air slot은 가로 및 세로가 6cm×6cm의 규격으로 1.0cm×0.5cm 흡입구를 3개씩 4열 배열하고 미닫이 식 덮개를 흡입구 위에 끼워 공기량을 조절함([그림 3.1.7] 참조).

○ 원형 air slot은 직경 6cm의 규격으로 원형 판 사이사이에 구멍을 둔 air slot 두개를 맞닿게 함. 안쪽 air slot은 고정시키고 바깥쪽 air slot은 유동적이어서 공기의 개구율을 조절함([그림 3.1.8] 참조).

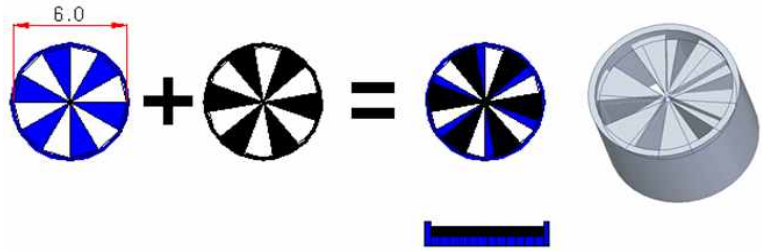


(a) air slot 구상도



(b) air slot 모형 사진

[그림 3.1.7] 직사각형 air slot 개발도



(a) air slot 구상도

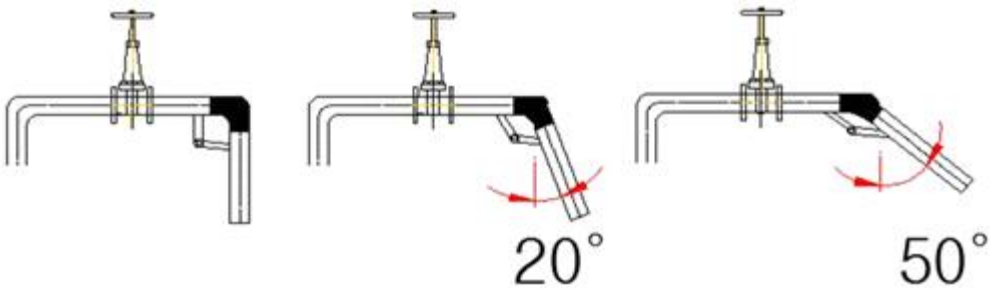


(b) air slot 모형 사진

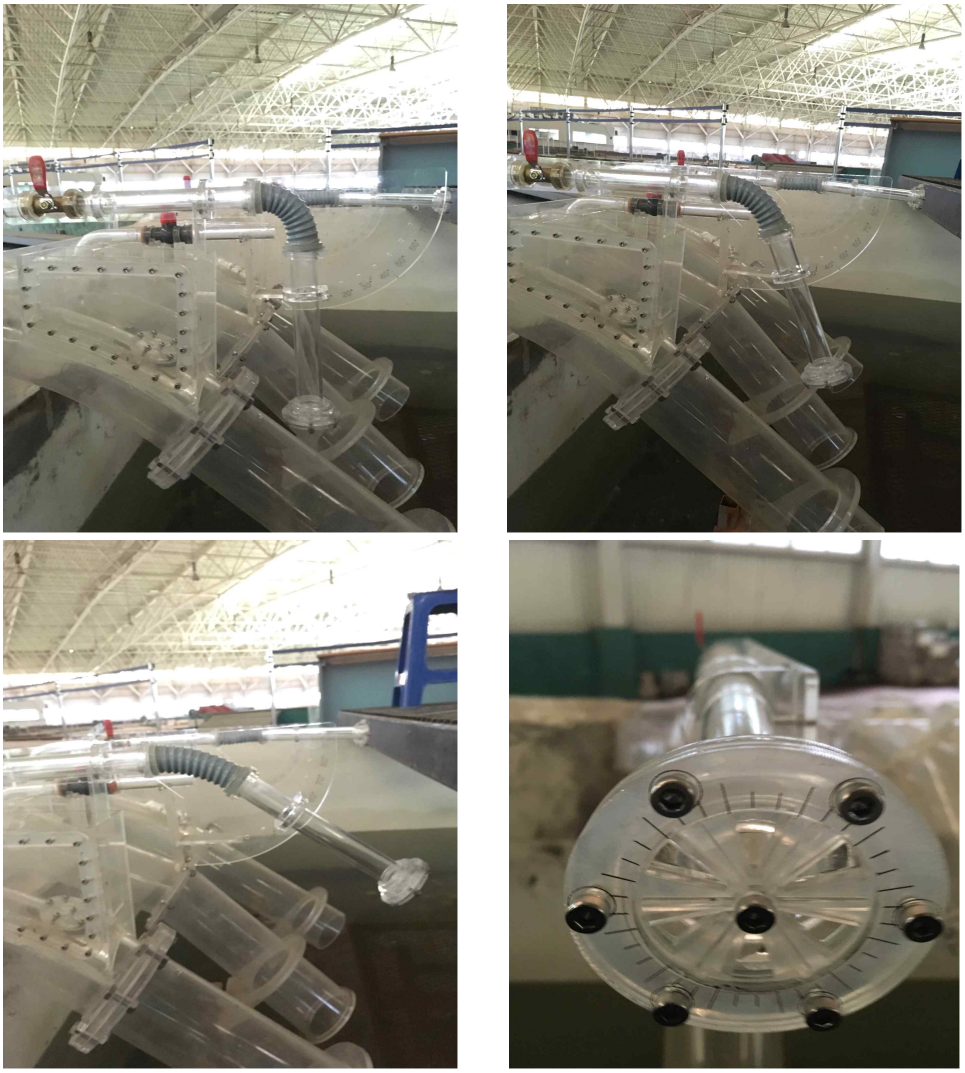
[그림 3.1.8] 원형 air slot 개발도

(2) air vent 입구의 높이와 air slot의 공기량을 동시에 조절하는 장치 개발

- air vent 입구의 높이를 조절함으로써 고 유량의 사이펀 여수로와 저 유량의 월류형 여수로의 경계가 되는 수위를 조절하는 장치를 개발하고 특허를 출원함(출원명: 다단계 수위조절 사이펀).
- air vent를 수평관과 수직관으로 구성함. 즉, 수평관은 사이펀의 관과 연결되어 있고, 수직관은 수면에 닿게 함. 고정된 수평관과 유동적인 수직관의 각도를 조절할 수 있게 함. 즉, 두 관이 90° 로 연결되면 수직관의 입구가 가장 아래에 있게 되고, 0° 로 연결되면 수직관이 가장 위에 있게 되어 air vent의 높이를 조절할 수 있음([그림 3.1.9] 참조).
- 또한, 수직관의 입구에 원형 air slot를 설치하여 저수지 수위조절과 동시에 방류량을 조절할 수 있도록 구성함([그림 3.1.10] 참조).



[그림 3.1.9] air vent 입구 높이 조절 구상도



[그림 3.1.10] air vent 입구 높이 조절 모형 사진

2. 3차원 수치해석을 통한 방류량 조절 사이펀 여수로 성능 평가

가. 3차원 수치해석을 통한 사이펀 여수로 성능 평가

(1) Flow-3D를 사용한 사이펀 여수로 수치해석

(가) Flow-3D 소개

○ FLOW-3D는 1960년대 미국 Los Alamos Lab에서 자유표면 연구의 시작으로 현재는 Version 11.1까지 상용화되어 있음. 세계 최초로 VOF(Volume of Fluid) 와 FAVOR(Fractional Area/Volume Obstacle Representation) 방법을 개발 및 적용하였고 자유표면 예측, 2상 유동, 열전달(대류, 복사, 전도), 응고 등의 정확성으로 명성이 높음. 이 모델은 3차원 Navier-stokes 방정식을 수치해석하며 유체와 유체 또는 유체와 기체간의 경계면을 추적하기 위해 VOF 방법을 사용하고, 계산영역내의 복잡한 경계를 표현하기 위해 FAVOR를 사용하며 이로 인해 모델 영역 내에서 구조물과 경계의 변화를 모의할 수 있음. 그리고 Prandtl Mixing Length, One-Equation, Two-Equation k-ε, Large Eddy, 그리고 Renormalized Group(RNG) 모형 등 5가지 난류모형을 사용함.

(나) Flow-3D 지배방정식 및 수치해석 기법

① 지배방정식

○ FLOW-3D 수치모형은 지배방정식으로 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식과 에너지 방정식 등을 사용함.

○ 압축성 유체에 대한 3차원 연속방정식은 다음과 같음(Flow Science Inc., 2009).

$$V_F\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}(uA_x\rho)+R\frac{\partial}{\partial y}(vA_y\rho)+\frac{\partial}{\partial z}(wA_z\rho)+\zeta\frac{\rho uA_x}{x}=R_{DIF}+R_{SOR} \qquad (3.2.1)$$

여기서 V_F는 전체에서 차지하는 유체의 체적이고, ρ는 유체의 밀도이고, R_{SOR}은 질량 생성항이고, R_{DIF}는 난류 확산항이고, (u,v,w)는 (x,y,z) 방향의 속도성분이고, (A_x,A_y,A_z)는 각 방향별 유체의 면적이고, R과 ξ는 원통좌표계에서 적용하는 상수로 직교좌표계에서 $R=1$, $\xi=0$ 임. 본 연구에서는 직교좌표계에서의 비압축성 유체를 가정하므로 연속 방정식은 다음과 같음.

$$\frac{\partial}{\partial x}+(uA_x)+\frac{\partial}{\partial y}(uA_y)+\frac{\partial}{\partial z}(wA_z)=\frac{R_{SOR}}{\rho} \qquad (3.2.2)$$

○ 직교좌표계를 사용하는 경우의 운동량방정식은 다음과 같음.

$$\frac{\partial u}{\partial t}+\frac{1}{V_F}\left\{uA_x\frac{\partial u}{\partial x}+uA_y\frac{\partial u}{\partial y}+wA_z\frac{\partial u}{\partial z}\right\}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial \rho}{\partial x}+G_x+f_x-\frac{R_{SOR}}{\rho V_F}u \qquad (3.2.3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+\frac{1}{V_F}\left\{uA_x\frac{\partial v}{\partial x}+vA_y\frac{\partial v}{\partial y}+wA_z\frac{\partial v}{\partial z}\right\}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial \rho}{\partial y}+G_y+f_y-\frac{R_{SOR}}{\rho V_F}v \qquad (3.2.4)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t}+\frac{1}{V_F}\left\{uA_x\frac{\partial w}{\partial x}+vA_y\frac{\partial w}{\partial y}+wA_z\frac{\partial w}{\partial z}\right\}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial \rho}{\partial z}+G_z+f_z-\frac{R_{SOR}}{\rho V_F}w \quad (3.2.5)$$

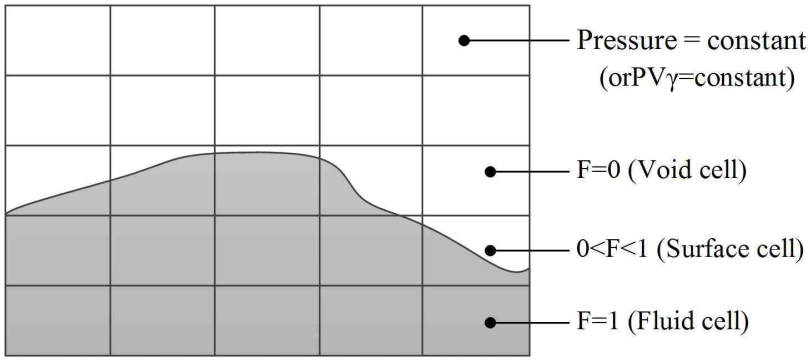
여기서 (G_x, G_y, G_z)는 중력가속도이고, (f_x, f_y, f_z)는 점성가속도이고, R_{SOR}(accelerations caused by mass injection at zero velocity)은 기체와 접하고 있는 액체 표면의 VOF의 함수 $G(x,y,z,t)$와 $f(x,y,z,t)$를 통해 얻을 수 있음.

② 수치해석기법

○ 수치기법으로 유한차분법을 사용함. 자유표면을 포함하는 유동장 해석 시 유한요소법과 경계요소법 등을 사용하여 액체와 공기의 경계면을 자세히 표현함.

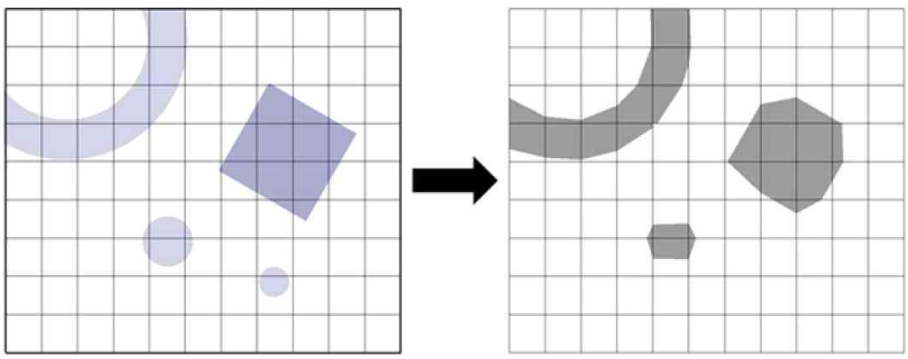
○ 난류 해석을 위해 $k-\varepsilon$ 모형, $k-\omega$ 모형, 난류에너지 모형, 혼합길이 모형, RNG (Renormalized Group Theory) 모형, LES(Large Eddy Simulation) 모형 등을 사용함.

○ 쇄파 또는 비산 같은 복잡한 자유표면에서의 운동을 기술하는 방법으로 VOF(Volume Of Fluid) 방법을 사용함. [그림 3.2.1]은 VOF 기법의 개념도임. F 는 단위 체적 내에 포함되어 있는 기체와 액체가 차지하는 체적비를 나타내며, 자유표면을 포함하고 있는 비압축성 유체의 경우, F는 유체가 점유하고 있는 체적비율을 의미함. 따라서 $F=1$이면 계산 격자내부에 유체가 채워져 있다는 것이고, $F=0$이면 유체가 없는 빈 공간을 의미함.



[그림 3.2.1] VOF (Volume Of Fluid)

○ 구조물을 정확히 표현하기 위해 FAVOR(Fractional Area / Volume Ratio) 방법을 사용함. [그림 3.2.1]은 FAVOR 기법을 적용한 그림임. 왼쪽은 실제 모형이고, 오른쪽은 FAVOR 방법이 적용된 모형의 결과임



[그림 3.2.2] FLOW-3D에서 사용한 FAVOR 방법 적용 예

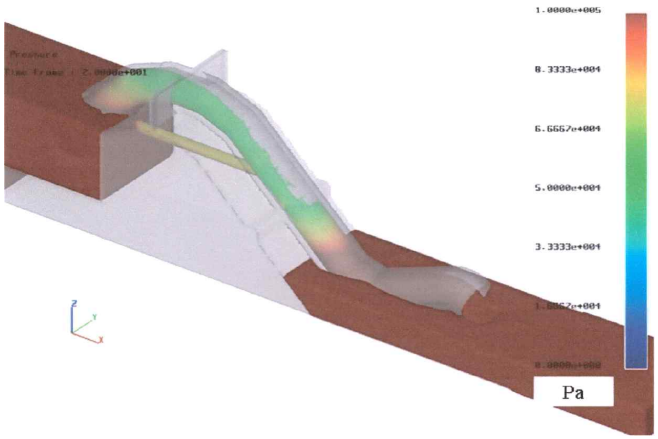
○ 3차원 수치모형실험을 수행하기 위해 지형 및 구조물에 대한 3차원 형상을 입력해야 하며, 지형 및 구조물의 3차원 형상은 해석의 결과에 큰 영향을 미치므로 정확한 형상을 나타낼 수 있도록 수치지형도 및 2차원 CAD 도면을 기초로 작업하여 모델링해야 함.

○ 유체의 물성값 및 조도로서 벽면경계의 조도는 Chow(1959)의 평균조도높이 k의 근사값 자료를 이용. 콘크리트의 평균조도 높이는 0.46~3.05㎜, 자연하천의 상당조도는 30.5~914.4㎜의 범위이며, 본 연구의 수치모델에서는 사이펀 여수로 및 댐체의 콘크리트 조도가 각각 0.1㎜, 3.0㎜로 예상되며, 저수지 및 하류지형에는 10㎜의 표면조도가 예상됨.

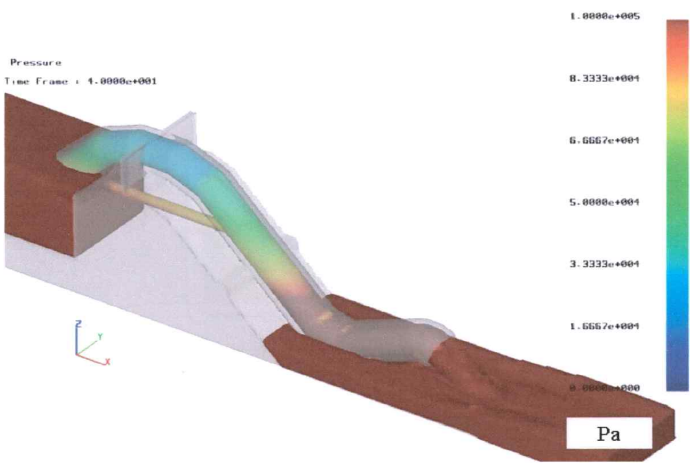
○ 경계조건으로 사이펀의 실제 상황과 동일하게 유입부와 유출부의 수위를 지정하고, 수두차에 의한 압력에 의해 사이펀이 작동할 때의 압력 및 유속 상황을 검토함. 공기 측의 압력은 대기압으로 부여하고, 사이펀 유입부 측 저수지 수위와 유출부 측의 수위가 일정하게 유지되도록 경계조건 부여함.

(다) 기존 연구 조사

○ 유강산업(2005)은 하동댐 사이펀 여수로의 작동 여부를 연구하였음. [그림 3.2.3]은 사이펀 여수로의 압력분포를 FLOW-3D로 예측한 결과임. bypass 개방 후 20초와 40초 후의 수치해석 결과를 보여줌. 시간의 지남에 따라 내부 압력이 감소하여 약 40초 후에 사이펀이 정상적으로 작동하여 정상적으로 수치해석이 수행됨을 볼 수 있음.



(a) t=20sec



(b) t=40sec

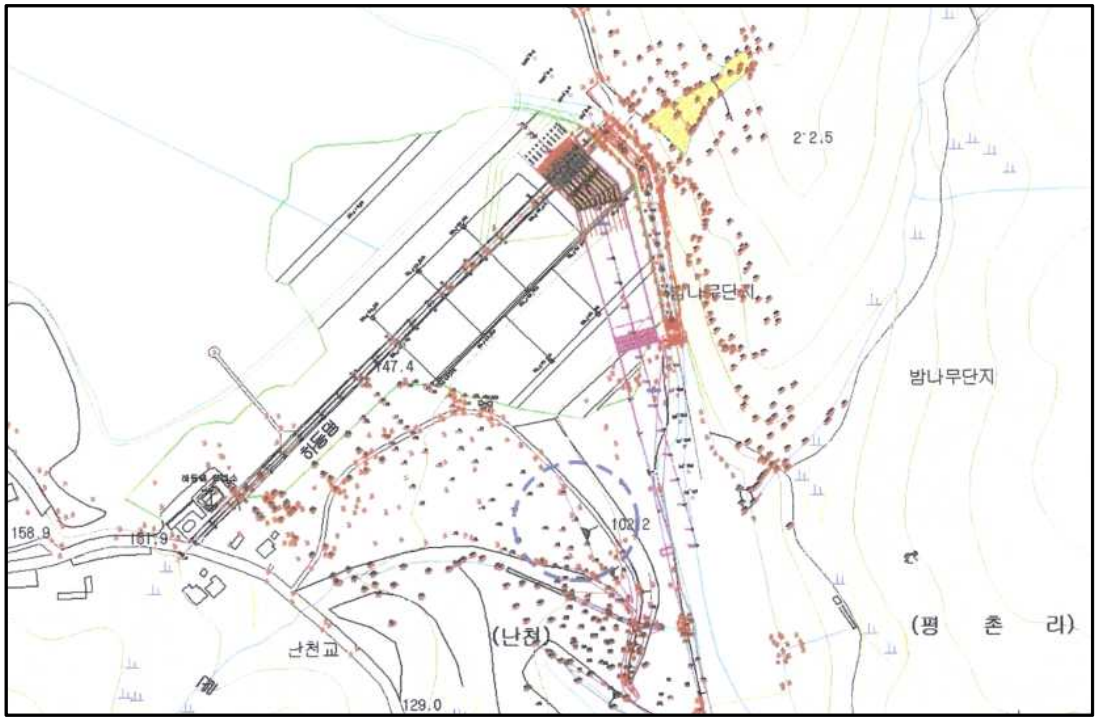
[그림 3.2.3] 사이펀 여수로 작동 시 내부 압력 수치해석 결과(유강산업, 2005)

(2) 하동댐 사이펀 여수로 수치실험 검토

○ 본 연구에서 유강산업(2005)이 수행한 하동댐 사이펀 여수로의 수치실험을 재현하여 사이펀의 작동 가능성을 검증한 후 다양한 조건으로 수치실험을 수행함.

(가) 하동댐 사이펀 여수로 개요

○ 하동댐은 농업용수를 공급하기 위해 1993년 준공되었음. 최근 집중호우와 이상강우로 2002년 필댐에 대한 설계기준이 강화되면서 기존 여수로(수문조절식, 3련)에 사이펀 여수로(9련)를 설치하였음. [그림 3.2.4]은 하동댐 여수로 계획평면도임.

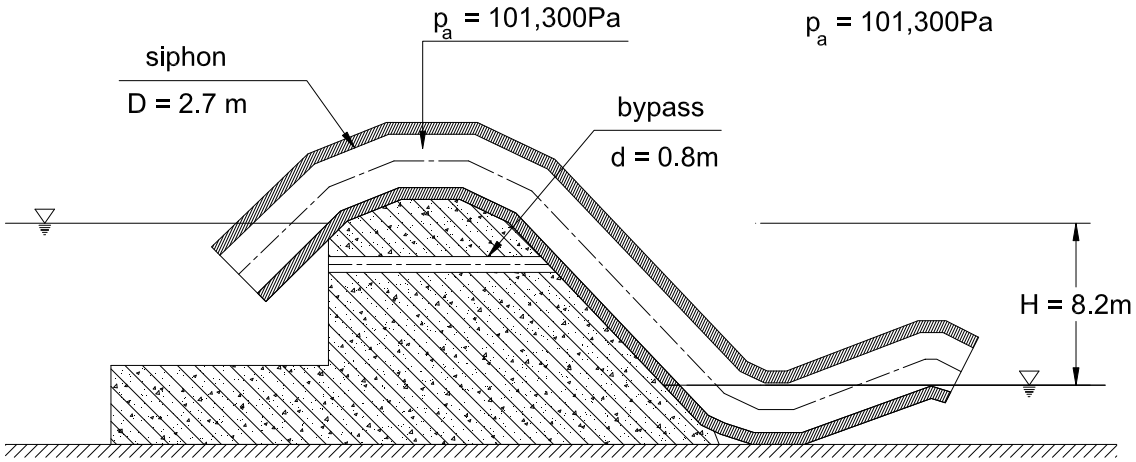


[그림 3.2.4] 하동댐 여수로 계획평면도

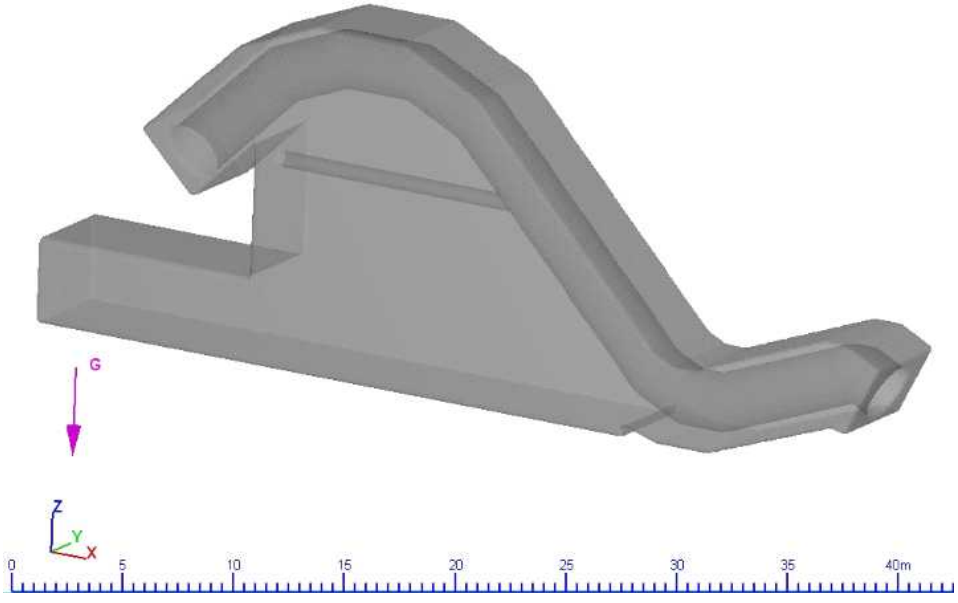
(나) 하동댐 사이펀 여수로 수치실험 입력 조건

○ 3차원 수치해석을 수행하기 위하여 지형 및 구조물의 형상을 3차원적으로 입력해야 함. 효율적인 계산을 위해 지형 자료를 STL(Stereolithography) 형식으로 변환하고, 3차원 지형 자료를 2차원적 등고선으로 표현한 후 각 지점의 좌표를 내삽함. 지형자료는 AutoCAD, 구조물은 Solid-Edge 및 좌표변환 프로그램을 사용함

○ [그림 3.2.5]는 하동댐 사이펀 여수로의 단면도이고, [그림 3.2.6]은 FLOW-3D에서 STL 형식으로 변환된 사이펀 여수로 주변의 3차원 그림임. 저수지 상·하류의 수위차가 8.2m이고, 사이펀 여수로의 내경이 2.7m이고, 길이가 44,128m임. bypass의 내경이 0.80m이고, 길이가 17.13m임. 여수로 내 압력을 대기압인 101,300Pa로 둠.



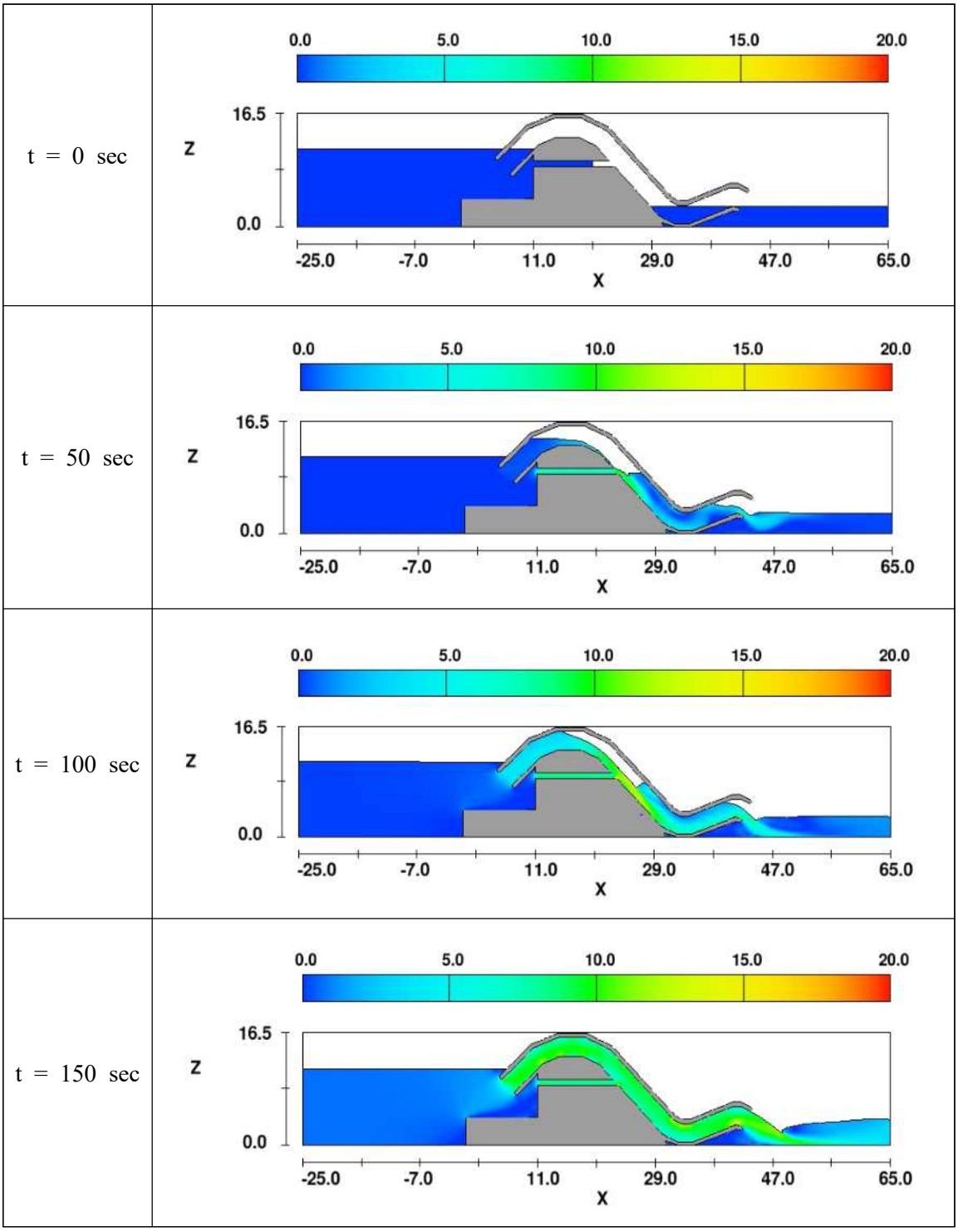
[그림 3.2.5] 수치해석을 위한 하동댐 사이펀 여수로 단면도



[그림 3.2.6] FLOW-3D에서 STL 형식으로 변환된 하동댐 사이펀 여수로의 3차원 모식도

(다) 하동댐 사이펀 여수로 수치실험 결과 및 해석

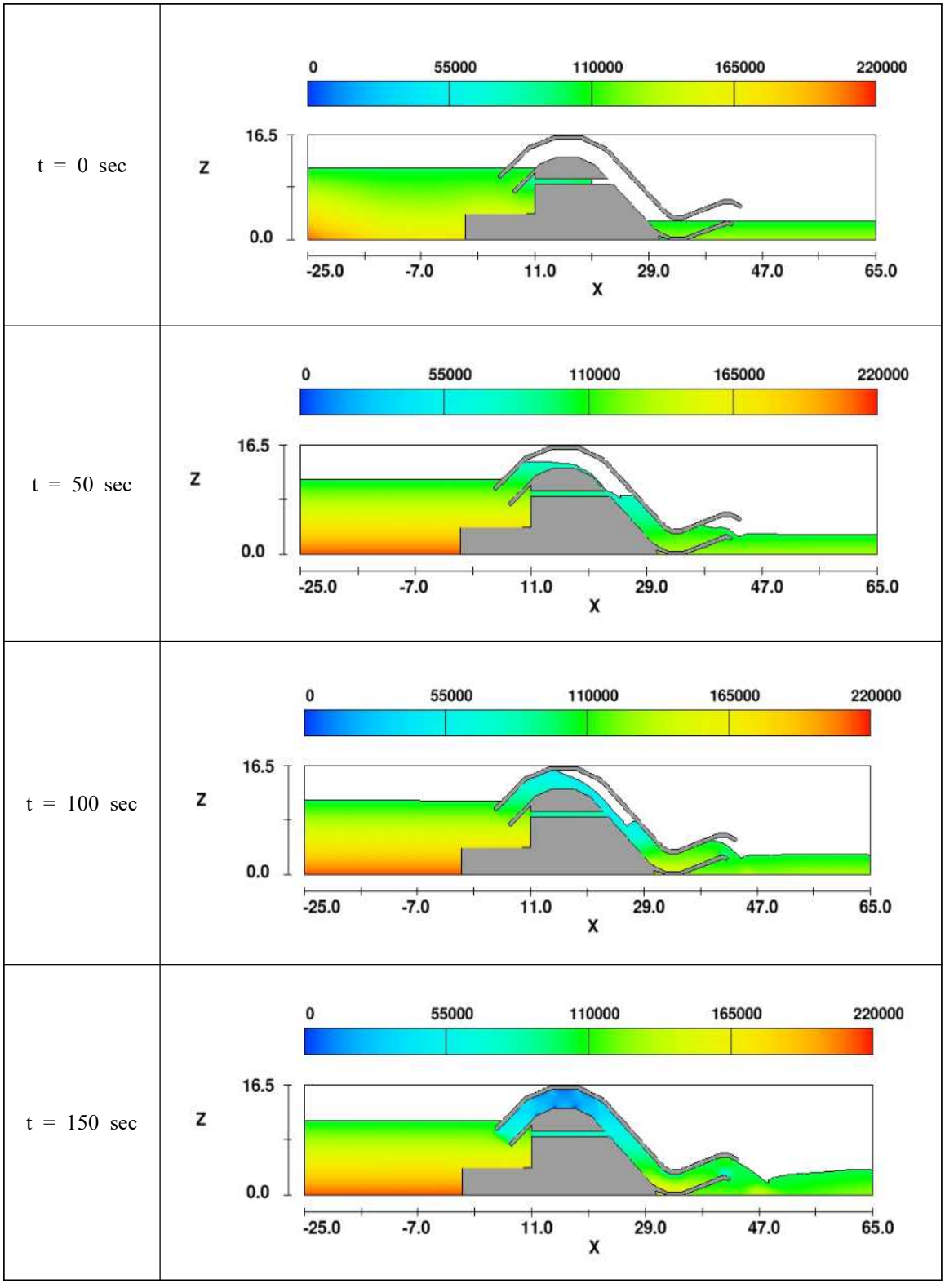
○ [그림 3.2.7]은 FLOW-3D에서 재현된 하동댐 사이펀 여수로의 시간별 속도 분포도임. t=0초에 bypass를 통해 물이 지나가는 것을 볼 수 있음. t=50초 경과한 시각에 bypass를 지나 여수로 안으로 진입한 물이 여수로 밖으로 지나가면서 여수로 내 공기도 함께 빠져나가 부압이 발생함. 그 결과 여수로 입구에 있던 물이 상승하여 천단고 너머 여수로 안으로 진입하고 여수로 내 수위도 상승하고 있음. t=150초 경과한 시각에 여수로의 물이 꽉 차서 사이펀이 온전히 작동하고 있음.



[그림 3.2.7] FLOW-3D에서 재현된 하동댐 사이펀 여수로의 시간별 속도 분포 (단위: m/sec)

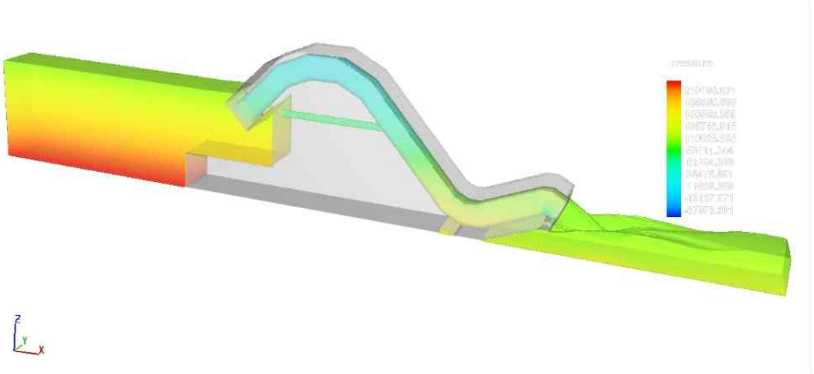
○ [그림 3.2.8]은 FLOW-3D에서 재현된 하동댐 사이펀 여수로의 시간별 압력 분포도임. t=0초에 bypass를 통해 지나가는 물에 대기압(=101,300Pa)보다 작은 부압이 발생하고 있음. t=50초 경과한 시각에 bypass를 지나 여수로 안으로 진입한 물이 여수로 밖으로 지나가면서 여수로 내 공기도 함께 빠져나가 부압이 발생함. 그 결과 여수로 입구에서 상승하고 있는 물에도 부압이 발생하고, 여수로 내 물에도 부압이 발생하고 있음. t=150초 경과한 시각에 여수로의 물이 꽉 차서 여수로 내 대부분의 구간에 부압이 발생하고 있음. 특히, 위치가 가장 높은 천단고 부근

에 최대 부압이 발생하고 있음.



[그림 3.2.8] FLOW-3D에서 재현된 하동댐 사이펀 여수로의 시간별 압력 분포 (단위: Pa)

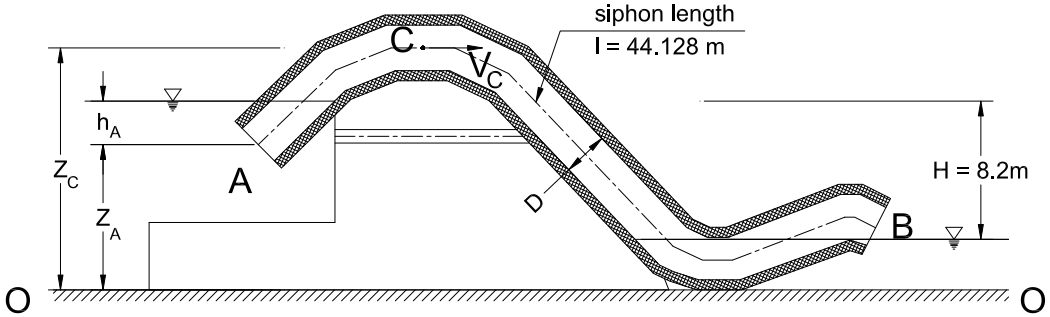
○ [그림 3.2.9]는 t=150초 경과한 시각에 하동댐 사이펀 여수로 주변의 압력분포도임. 사이펀 상류 저수지에 있는 물은 잔잔하지만 사이펀 하류의 물은 요동치는 것을 볼 수 있음. 여수로 내 대부분의 구간과 bypass 구간에서 부압이 발생하고 있음.



[그림 3.2.9] FLOW-3D에서 재현된 하동댐 사이펀 여수로의 3차원 압력 분포 (t=150초)

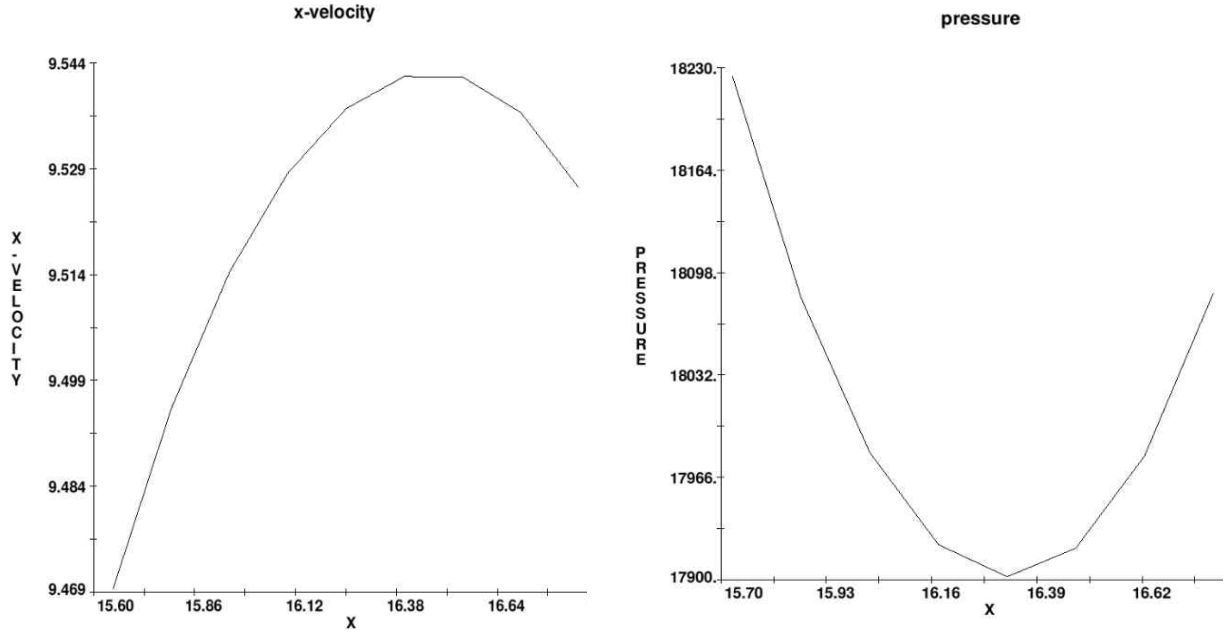
(라) 하동댐 사이펀 여수로 수치실험 결과와 이론 비교

○ 사이펀 여수로 수치실험 조건에서 사이펀의 작용 가능성을 이론적으로 검토함. [그림 3.2.10]은 이론적 검토를 위해 여수로 단면의 중심선을 따라 Bernoulli 방정식을 적용하는 단면도를 도시한 그림임. A, B, C점은 각각 여수로의 입구, 출구, 천단에 위치함. 천단의 중심선을 지나는 C점의 위치는 (x, z)=(16.2m, 14.4m)임.



[그림 3.2.10] 하동댐 사이펀 여수로의 이론 해석을 위한 단면도

○ Flow-3D 를 이용하여 수치해석을 수행한 C점의 유속 및 압력 결과를 [그림 3.2.11]에 나타냄. C점에서의 유속은 9.53m/s, 압력은 17.919pa 임.



[그림 3.2.11] Flow-3D 해석 결과 하동댐 사이펀 여수로 내부 천단(C점) 주변의 유속 및 압력 분포

○ 사이펀 이론식의 결과는 여수로의 입구(A점)와 출구(B점) 사이에 Bernoulli 식을 적용하면 여수로 내의 유속 V을 다음과 같이 구할 수 있음.

$$V = \sqrt{\frac{2gH}{f_e + f_o + f_{cb} + f\frac{l}{D}}} = 9.12 \text{ m/sec} \qquad (3.2.11)$$

여기서 $H(=8.2m)$는 여수로 상·하류의 수위차이고, $f_e(=0.5)$, $f_o(=1.0)$는 각각 여수로의 입구, 출구에서의 에너지손실계수이고, $f_{cb}(=0.43)$는 여수로 전 구간에서 발생한 만곡에 의한 에너지손실계수이고, $f(=0)$는 여수로 벽면의 마찰에 의한 에너지손실계수로 FLOW-3D로 수치실험을 수행할 때 이 효과를 무시하였음.

○ 여수로의 입구(A점)와 천단(C점) 사이에 Bernoulli 식을 적용하면 천단에서의 압력수두 h_C를 다음과 같이 구할 수 있음

$$h_C = z_A + h_A - \left[z_C + \left(1 + fe + f_{cb} + f\frac{l}{D}\right)\frac{V^2}{2g}\right] = -9.95\,\text{m} \qquad (3.2.12)$$

여기서 $z_A(=8.6m)$, $h_A(=2.6m)$는 각각 A점에서의 위치수두와 압력수두이고, $z_C(=14.4m)$는 C점에서의 위치수두이고, $f_e(=0.5)$는 여수로의 입구에서의 에너지손실계수이고, $f_{cb}(=0.0914)$는 여수로 입구에서 천단 사이에 발생한 만곡에 의한 에너지손실계수이고, $f(=0)$는 여수로 벽면의 마찰에 의한 에너지 손실계수임.

$$p_c = p_a - \rho g h = 101{,}300 - 1000 \times 9.81 \times 9.946 = 3.73(Pa)$$

○ 여수로 천단에서의 속도와 압력수두을 수치실험결과와 비교하면 [표 3.2.1]과 같이 대체로 수치해와 이론해가 유사함을 확인할 수 있음.

[표 3.2.1] 사이펀 여수로 천단에서의 유속과 압력수두의 FLOW-3D 수치해와 이론해 비교

solution method	velocity (m/s)	pressure head (m)
FLOW-3D	9.53	17.92
Theory	9.12	3.73

(3) 공기 유입에 따른 유량조절 수치실험 검토

○ 이전 절인 '(2) 하동댐 여수로 수치실험 검토'에서 Flow-3D의 하동댐 수치해석을 통해 사이펀 해석이 충분히 가능함을 확인하였음. 다음 절인 '3. 수리모형실험을 통한 사이펀 여수로 성능 평가'에서 air vent로 공기가 흡입될 경우 유량의 변화를 확인하기 위하여 수리모형실험을 수행하였고, 본 절에서 그 조건 하에 수치해석을 수행함.

(가) Flow3D 밸브 해석

○ Flow-3D에서의 밸브 내부 해석은 실제 형상의 밸브를 대상으로 하는 것이 거의 불가능하여 유량계수를 조정하여 수행함. 사이펀 입구로 들어오는 공기량을 다음 식으로 결정함.

$$Q_{air} = \varepsilon C_0 A \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} \qquad (3.3.1)$$

여기서,

Q_{air} : 밸브 내부로 들어가는 공기량

C_0 : 오리피스 손실계수(유량계수)

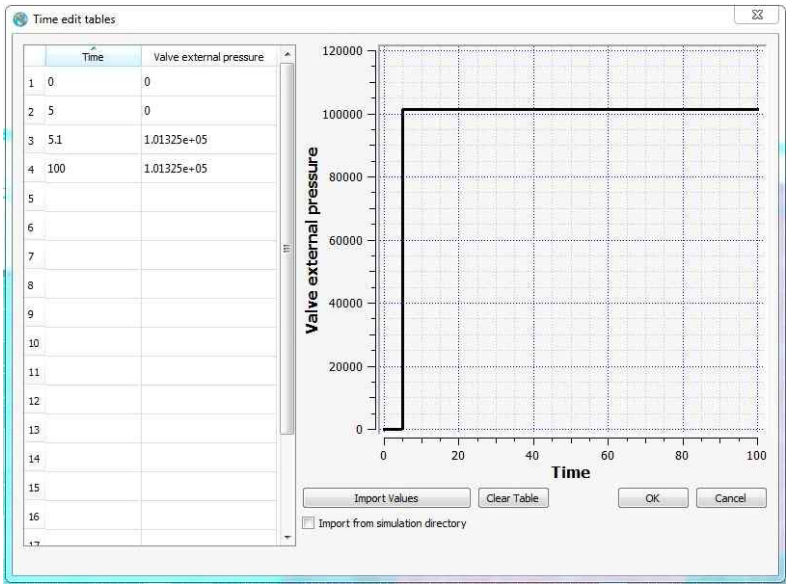
ε : 압축비율 (일반적으로 닫힌 상태 1.0)

A : 단면적

ρ : 밸브를 통과하는 공기의 밀도

p_2 : 해석구간의 측면 밸브에 인접한 압력

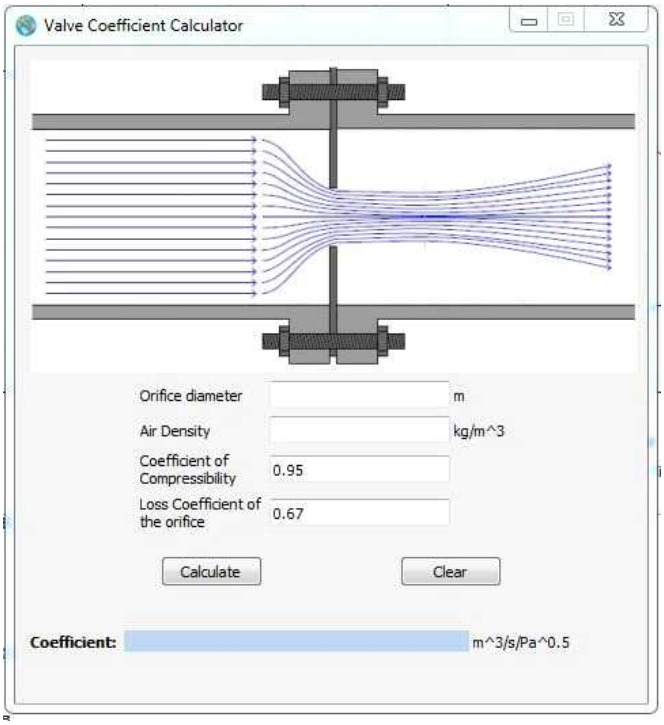
p_1 : 밸브 외부 압력(밸브 설정에 따라 시간적으로 변화는 외부압력(예, 공기량) 제어)



[그림 3.3.1] Flow-3D에서 시간에 따른 밸브 외부압력 변화 설정

○ 밸브를 통한 흐름은 2방향으로 밸브의 안쪽방향과 반대방향으로 규정지을 수 있고, 특별한 경우 한 방향으로 한정할 수 있음.

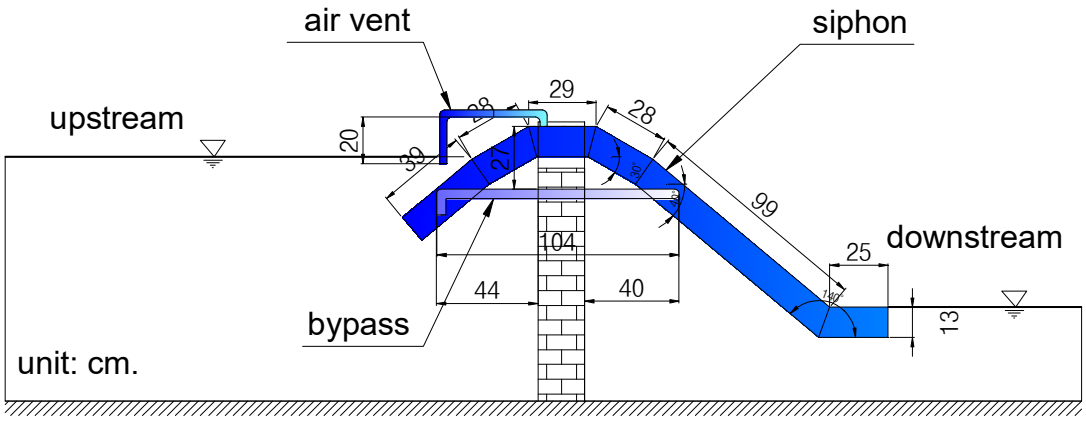
○ 각 밸브는 영역의 포인트에서 source/sink에 의해 표시되며, 직각좌표계에서는 (x,y,z) 좌표로 나타남.



[그림 3.3.2] Flow-3D에서 밸브 계수 설정

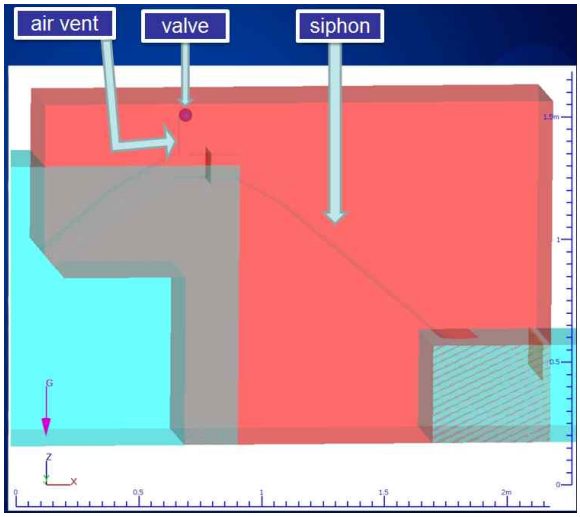
(나) Air vent 조절에 따른 사이펀 방류량 변화 검토

○ Air vent 조절에 따른 사이펀 방류량 변화를 검토하기 위해 수치해석 모형 구성을 수리모형실험과 동일하게 설정함. 수리해석 모형의 단면도를 [그림 3.3.3]에 도시함. 여기서, 사이펀 내경(D)은 10cm, bypass 내경(d_b)은 4cm, air vent의 내경(d_a)은 3cm, 사이펀 길이(L)은 244cm, 사이펀 상류와 하류의 최대 수위차(H_{max})는 66.5cm 임.



[그림 3.3.3] 수치해석을 위한 사이펀 모형 단면도

○ [그림 3.3.4]는 Flow-3D로 사이펀 모형을 재현한 것이며, 사이펀 상단부에 공기량을 조절할 수 있도록 air vent에 밸브를 설치하였음.



[그림 3.3.4] Flow-3D 모델링

○ 사이펀의 air vent로 유입되는 공기량은 C_o (유량계수)의 값으로 결정되며, (식 3.3.1)로부터 공기량이 계산되어짐. 즉, C_o 값이 작으면, 공기량이 적게 유입되고, C_o의 값이 크면 공기량 많이 유입됨.

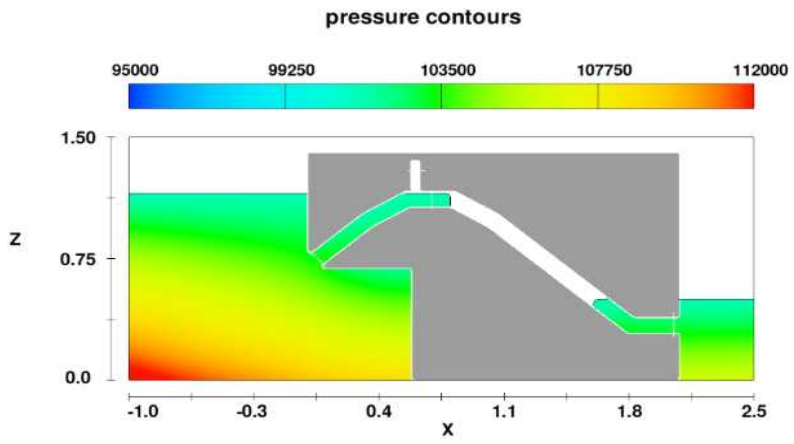
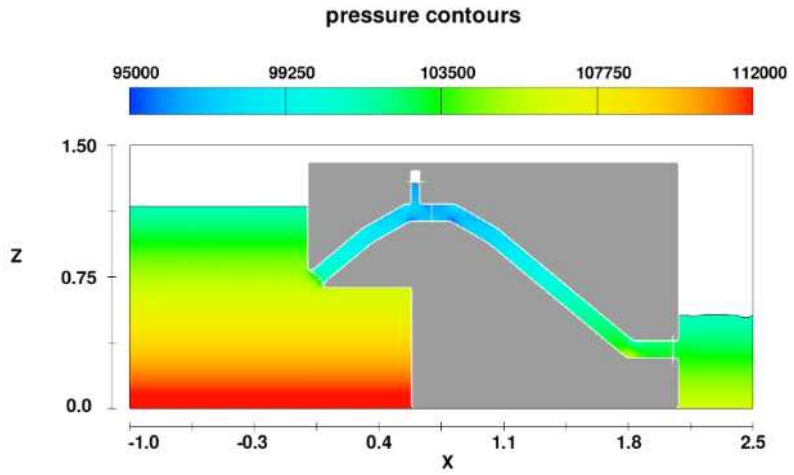
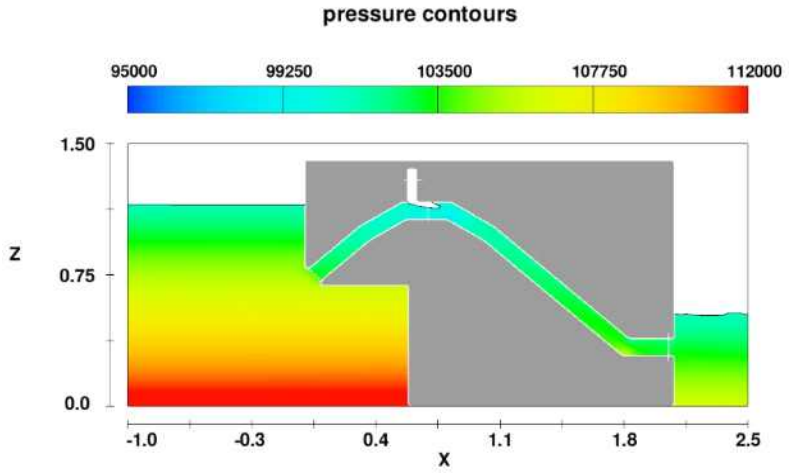
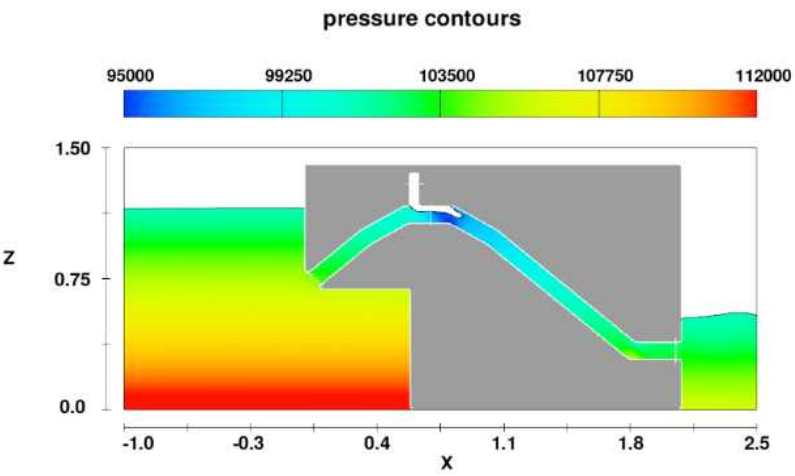
(다) Air vent 조절에 따른 사이펀 방류량 변화 검토 결과

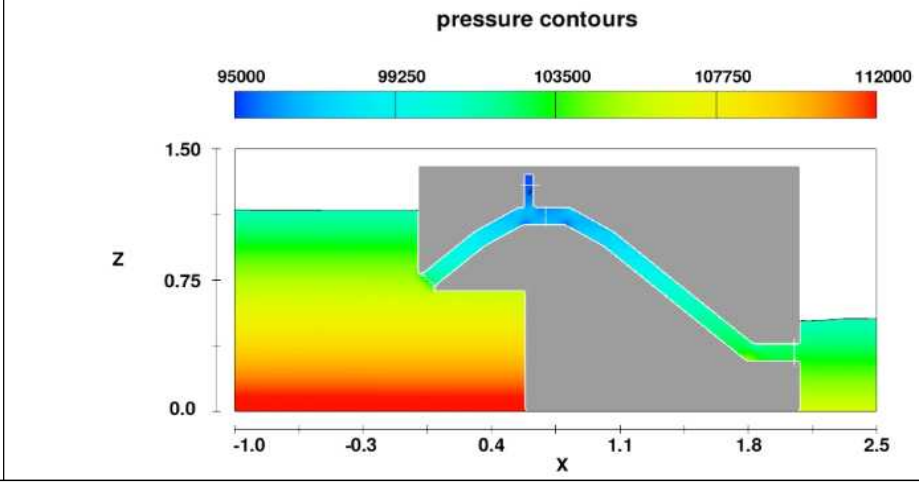
○ 수치해석 검토조건은 총 4가지 조건(즉, 상·하류의 수위차가 큰 경우와 작은 경우와 C_o 의 값이 큰 경우와 작은 경우)에 방류량의 변화를 검토하였음.

○ 사이펀 상·하류의 수위차(H)가 큰 경우는 상류 수위가 사이펀 외부 천단과 동일한 수위로 H=0.65m 이며, 사이펀 상·하류의 수위차(H)가 작은 경우는 상류 수위가 사이펀 내부 월류부 천단을 조금 상회하는 높이로 H=0.59m 임.

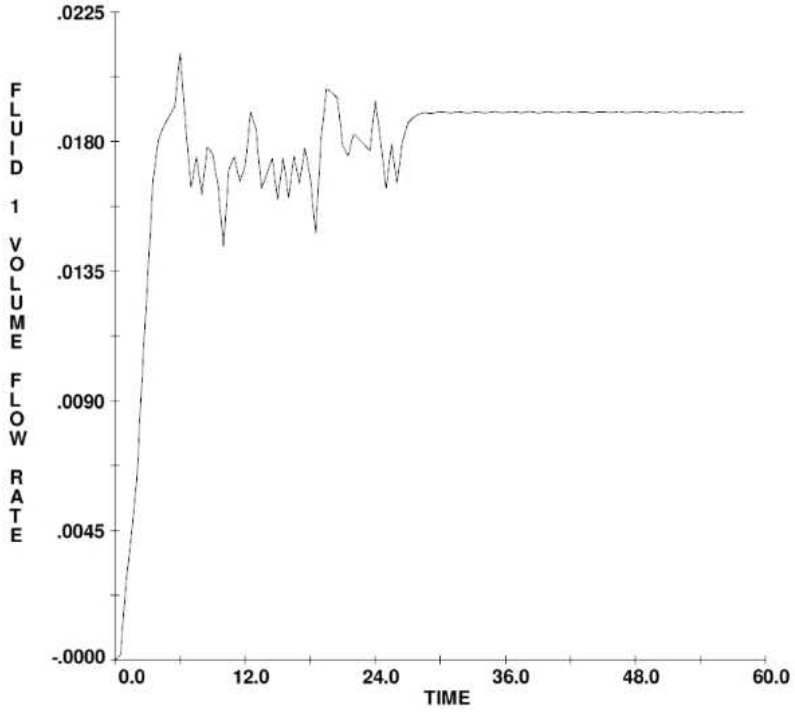
① case 1 (수위차: H=0.65m, 유량계수: C_o= 0.2)

○ case 1의 경우 상·하류 수위차가 충분히 크기 때문에 방류량과 유속이 크고, air vent로 작은 공기량(유량계수: C_o= 0.2)을 주입한 경우임. [그림 3.3.6]에 시간에 따른 사이펀 여수로의 압력 변화를 도시하였음. t=5sec 시각에 여수로 내에 사이펀 현상이 완연함. t=6sec 시각에 공기를 주입한 결과 공기가 사이펀 내로 들어가고 사이펀 내 압력도 증가하였음. 하지만 여수로 내로 주입하는 공기량이 충분하지 않아서 t=26sec 시각에 사이펀 내에 공기가 보이지 않고 사이펀 현상이 완연함. [그림 3.3.5]에서 보는 바와 같이 t=26sec 시각 이전에는 유량이 감소하다가 공기량이 적어서 다시 사이펀 현상으로 되돌아가서 유량이 Q=68.45m^3/hr (=0.019m^3/sec) 증가하였음.

time	pressure (unit: Pa)
t = 0 sec	
t = 5 sec (before valve opens, siphon runs fully)	
t = 6 sec (after valve opens)	
t = 20 sec (valve still opens)	

time	Pressure (unit: Pa)
t = 26 sec (valve still opens, but siphon runs fully again)	

[그림 3.3.5] 시간에 따른 사이펀 여수로의 압력 변화 (case 1)

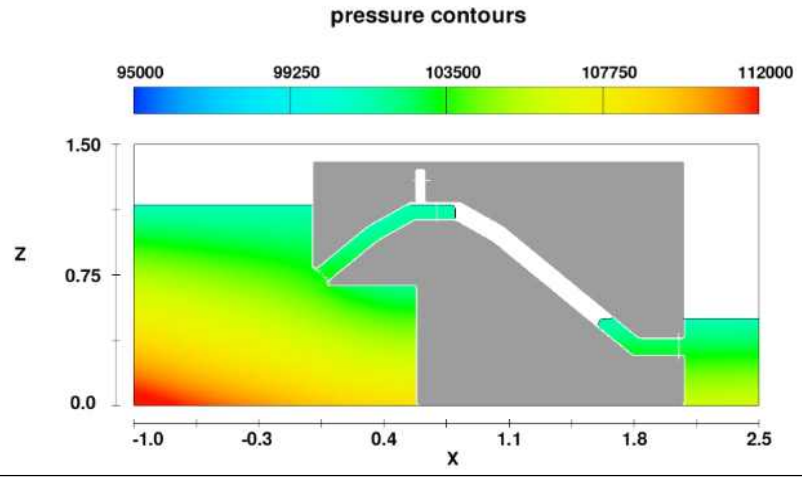
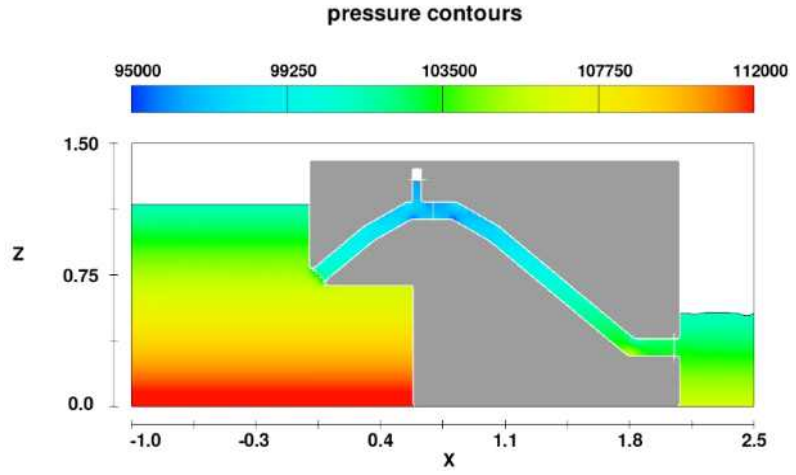
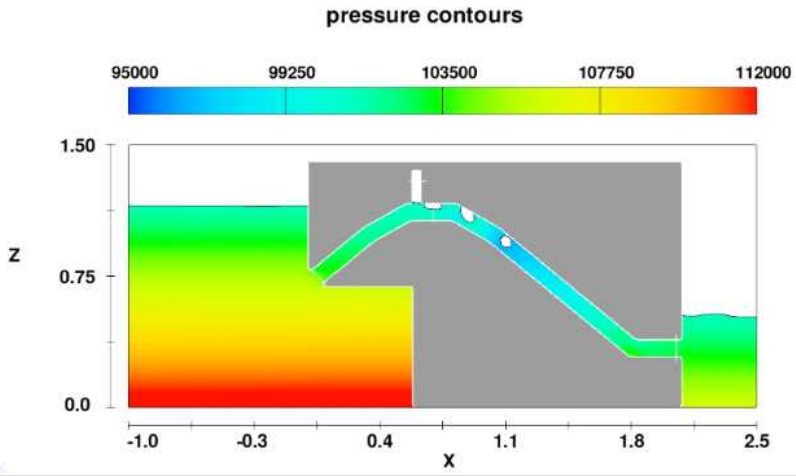
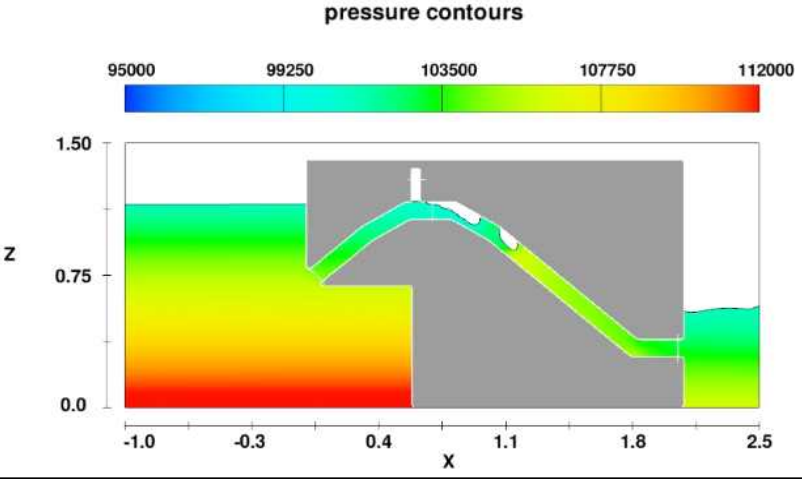


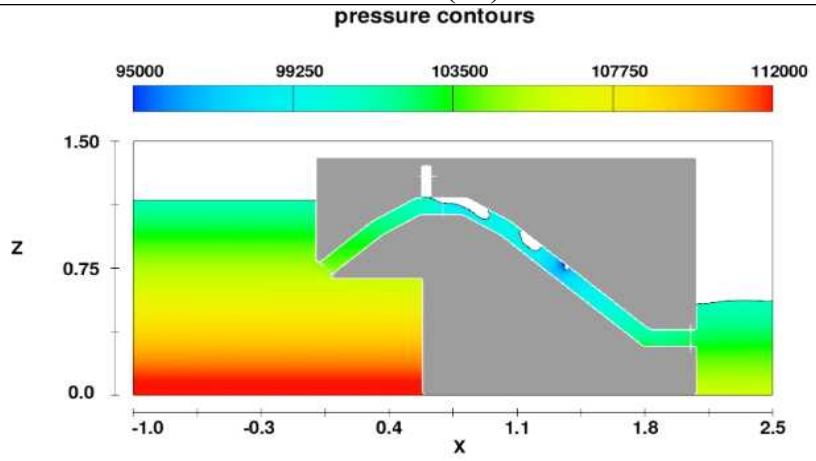
[그림 3.3.6] 시간에 따른 사이펀 여수로의 방류량 변화 (case 1)

(unit: m^3/s)

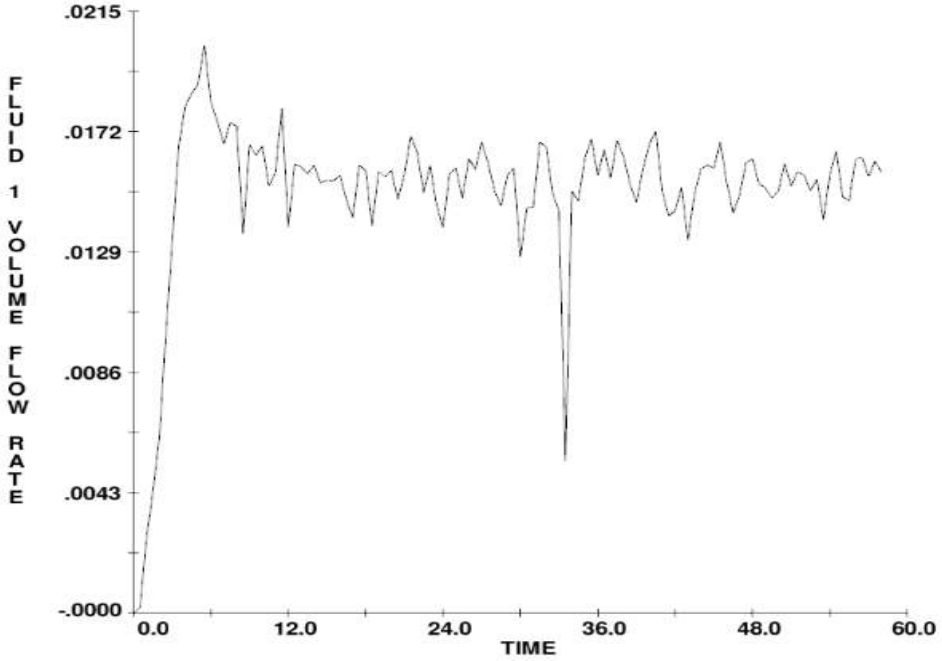
② case 2 (수위차: H=0.65m, 유량계수: C_o= 0.37)

○ case 2의 경우는 case 1과 마찬가지로 상·하류 수위차가 충분히 커서 방류량과 유속이 컸음. air vent로 많은 공기량을 주입하여서(유량계수: C_o= 0.37) [그림 3.3.8]에서 보는 바와 같이 방류량이 일정 범위 안에서 증감 현상이 지속적으로 나타남. 이 방류량의 평균값은 Q=55.31m^3/hr(=0.01536m^3/sec) 임. [그림 3.3.9]에서 보는 바와 같이 유량계수가 C_o=0.37이어서 유량계수가 C_o=0.2인 case 1 비해 방류량이 작음.

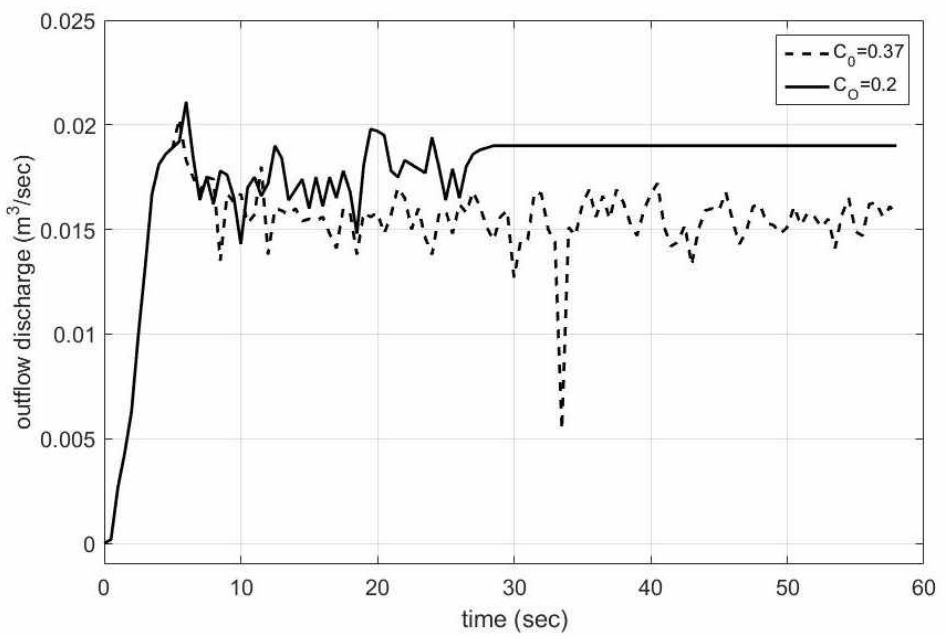
time	pressure (unit: Pa)
t = 0 sec	
t = 5 sec (before valve opens, siphon runs fully)	
t = 6 sec (after valve opens)	
t = 20 sec (valve still opens)	

Time	Pressure (Pa)
t = 50 sec (valve still opens, siphon can not runs fully again because of larger air quantity)	

[그림 3.3.7] 시간에 따른 사이펀 여수로의 압력 변화 (case 2)



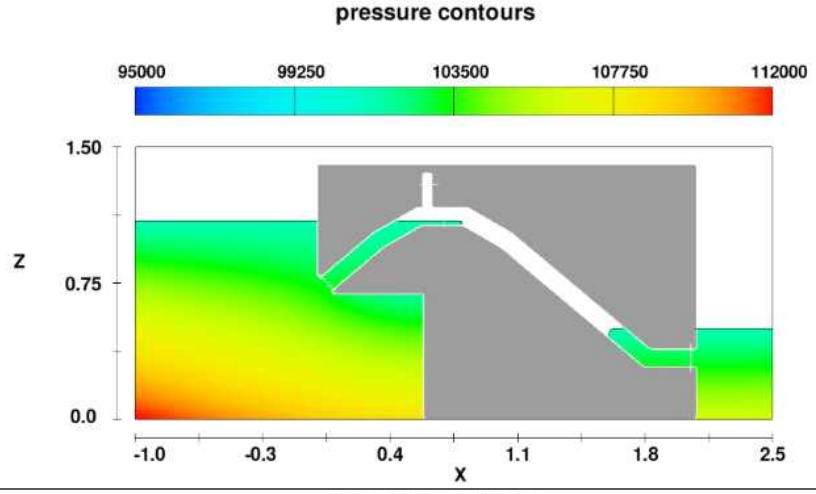
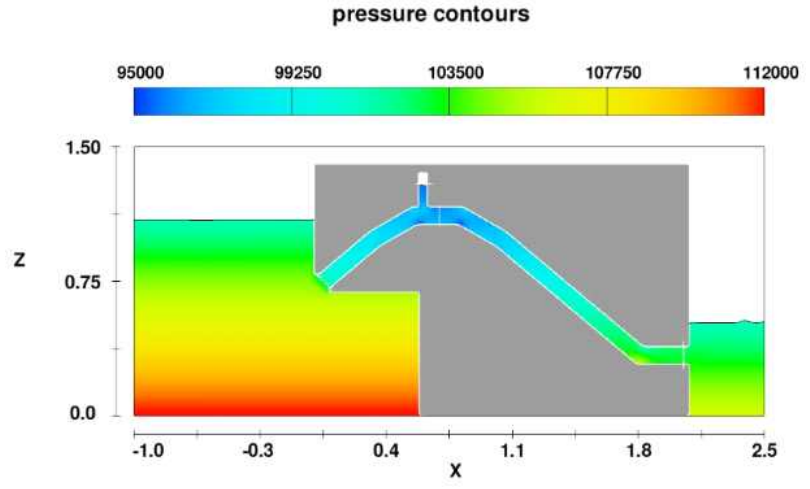
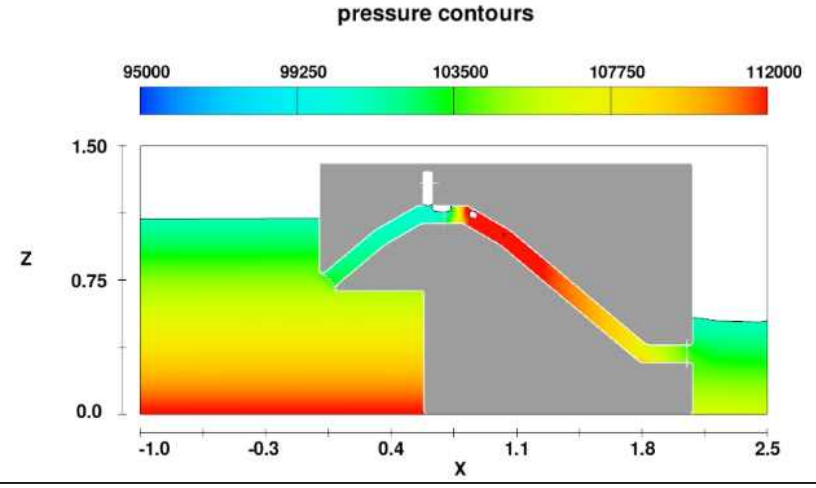
[그림 3.3.8] 시간에 따른 사이펀 여수로의 방류량 변화 (case 2) (unit: m^3/s)

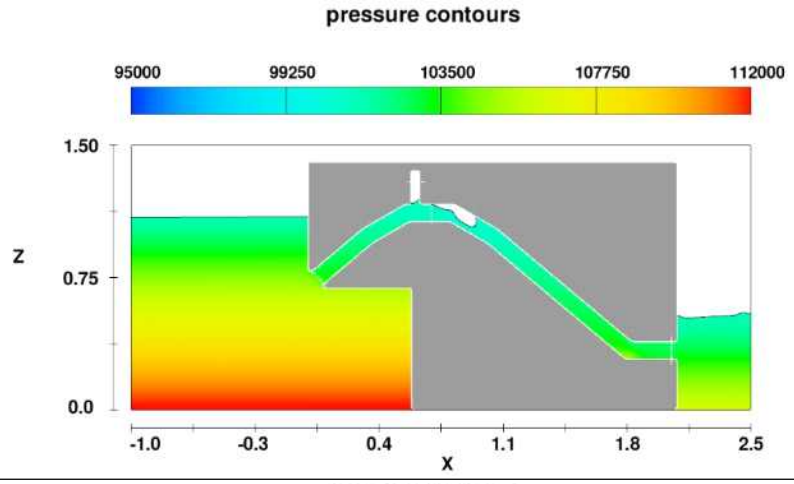
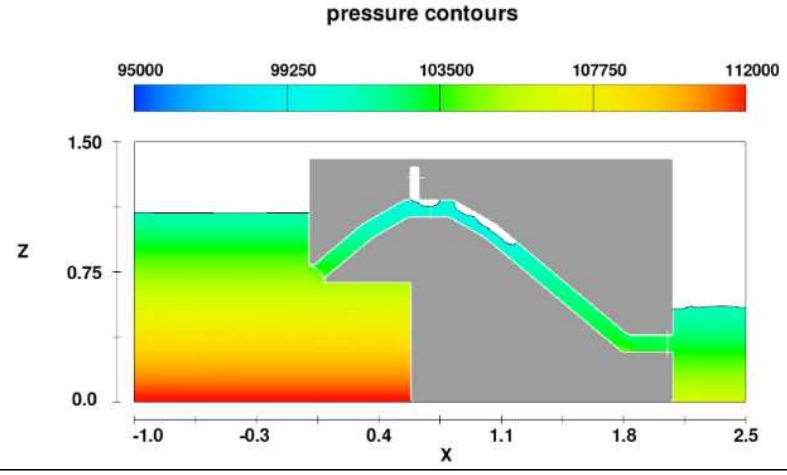


[그림 3.3.9] 시간에 따른 사이펀 여수로의 방류량 변화 비교 (case 1 vs. case 2)

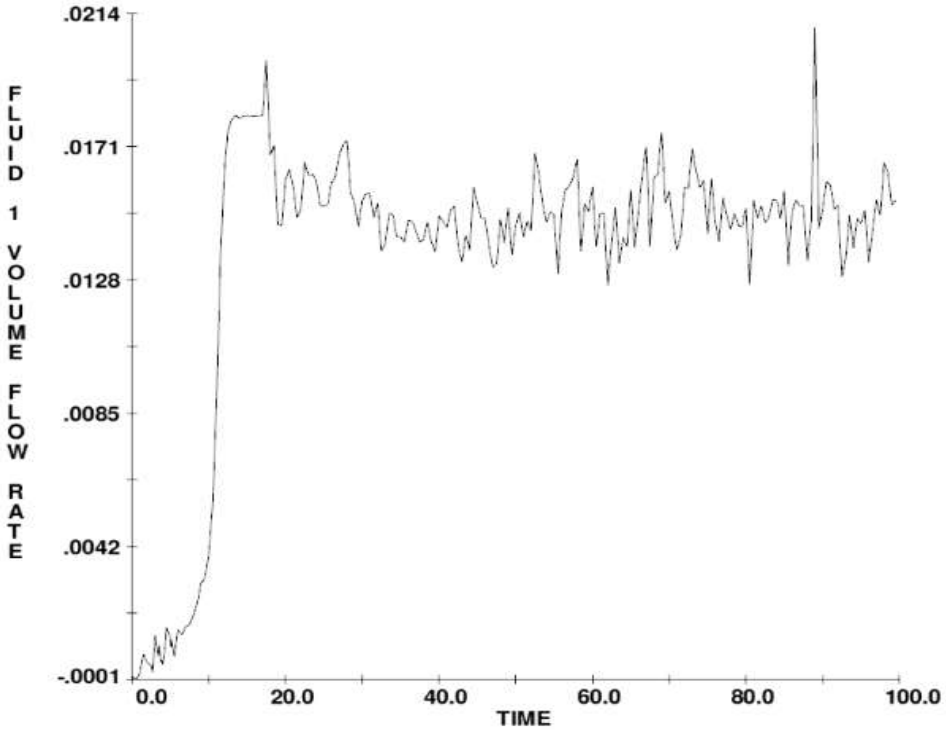
③ case 3 (수위차: H=0.59m, 유량계수: C_o= 0.2)

○ case 3의 경우 상·하류 수위차가 작기 때문에 case 1과 case 2에 비해 사이펀 가동 후 t=15sec 지난 후에 사이펀 현상이 완연히 나타남. air vent로 C_o=0.2의 작은 공기량을 주입하였을 때 [그림 3.3.11]에서 보는 바와 같이 완전한 사이펀 현상에서 유량이 조금 감소된 상태로 방류량이 일정 범위 안에서 증감 현상이 지속적으로 나타남. 이러한 현상은 case 2와 유사하며 방류량의 평균값도 Q=55.31m^3/hr(=0.01536m^3/sec) 나타남.

time	pressure (unit: Pa)
t = 0 sec	
t = 17 sec *(before valve opens, siphon runs fully)*	
t = 18 sec (after valve opens)	

time	pressure (unit: Pa)
t = 28 sec (valve still opens)	
t = 50 sec (valve still opens, siphon can not runs fully again because of low level of water difference)	

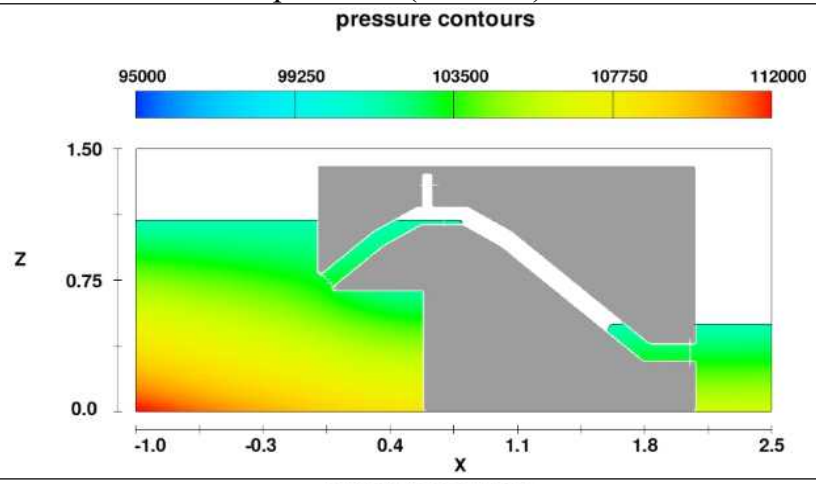
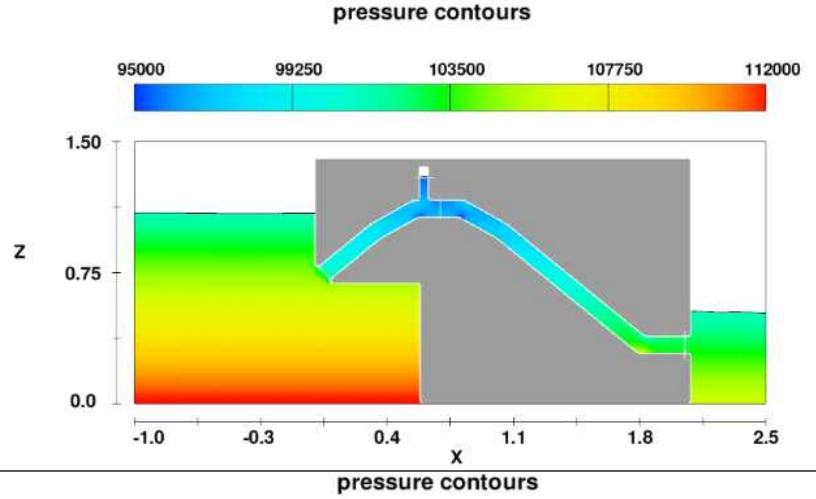
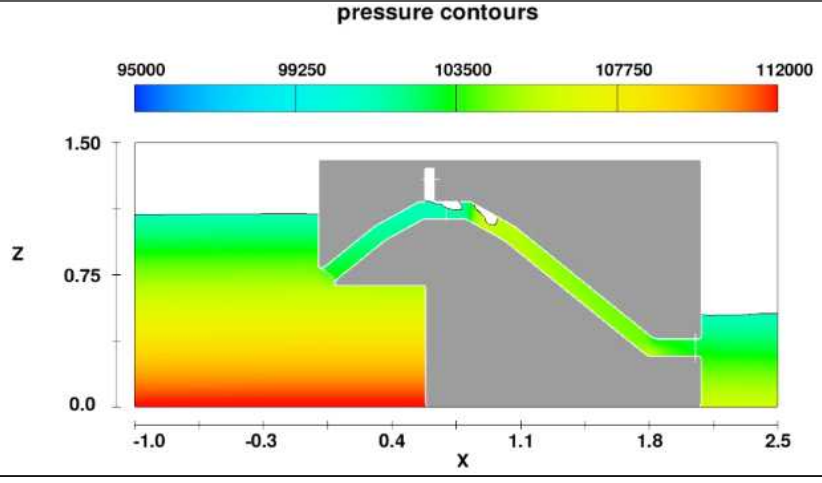
[그림 3.3.10] 시간에 따른 사이펀 여수로의 압력 변화 (case 3)

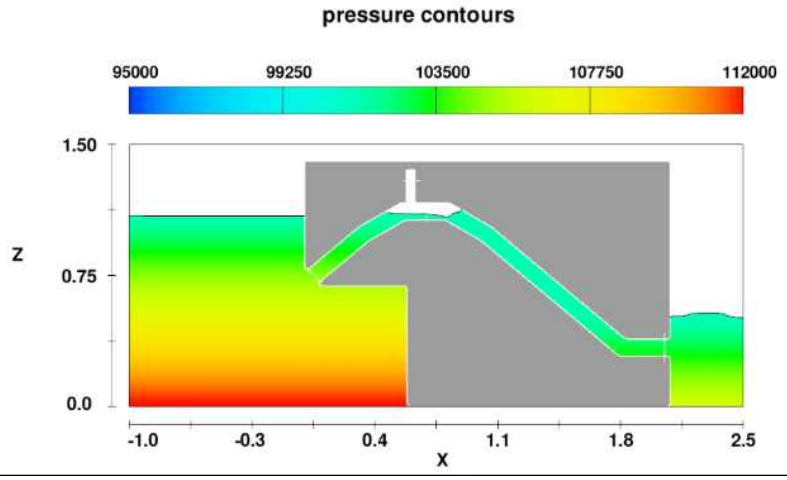
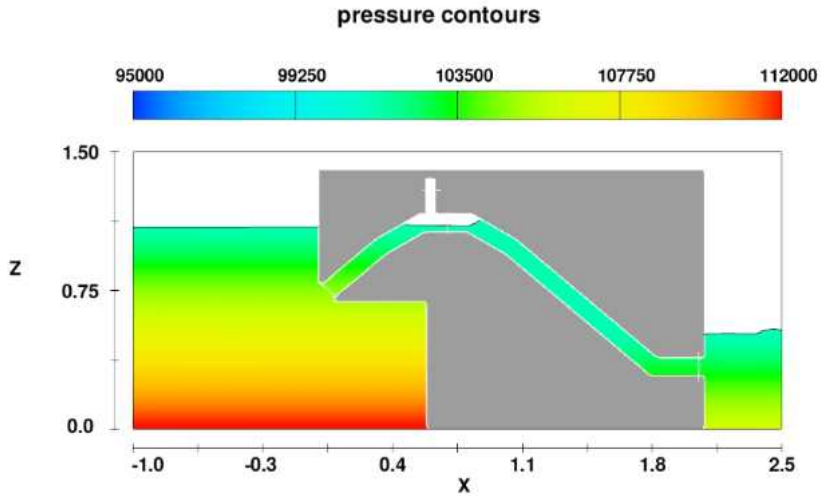


[그림 3.3.11] 시간에 따른 사이펀 여수로의 방류량 변화 (case 3) (unit: m^3/s)

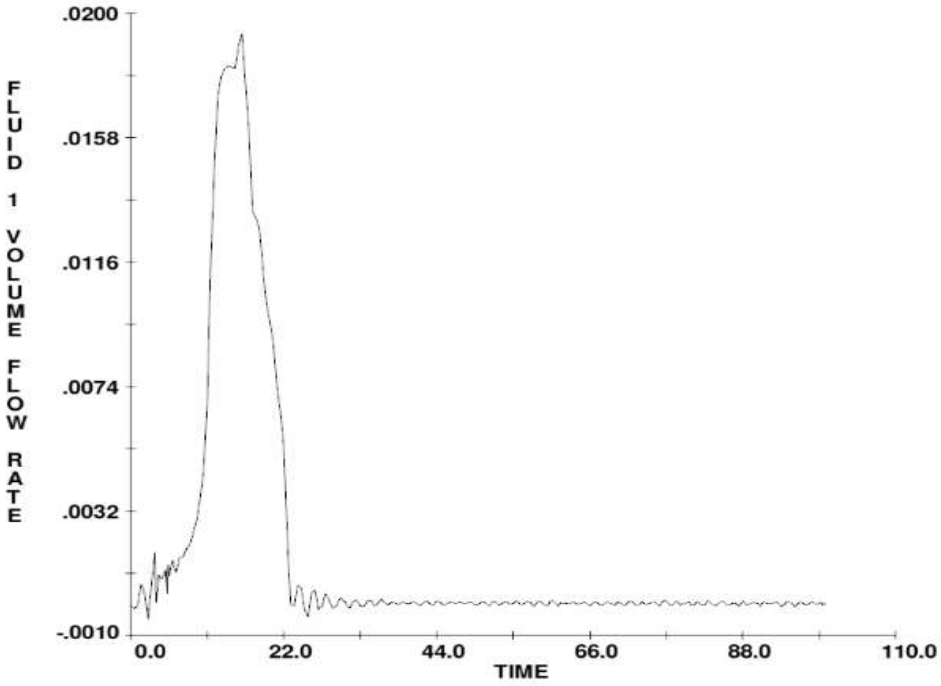
④ case 4 (수위차: H=0.59m, 유량계수: C_o= 0.37)

○ case 4의 경우 상·하류 수위차가 작기 때문에 case 3과 마찬가지로 사이펀 가동 후 t=15sec 지난 후에 사이펀 현상이 완연히 나타남. air vent로 C_o=0.37의 많은 공기량을 주입하였을 때 [그림 3.3.13]에서 보는 바와 같이 완전한 사이펀 현상에서 유량이 크게 감소한 상태로 나타남. 이 방류량의 평균값은 Q=0.30m^3/hr로 사이펀이 멈춘 정도의 값임. [그림 3.3.14]에서 case 3과 case 4의 방류량 변화 곡선에서 확인할 수 있듯이 C_o의 차이로 방류량이 변화가 크게 달라짐. case 3과 case 4와 같이 수위차가 작은 경우 공기량 변화에 더욱 민감하게 유량이 변하는 것을 확인할 수 있었음.

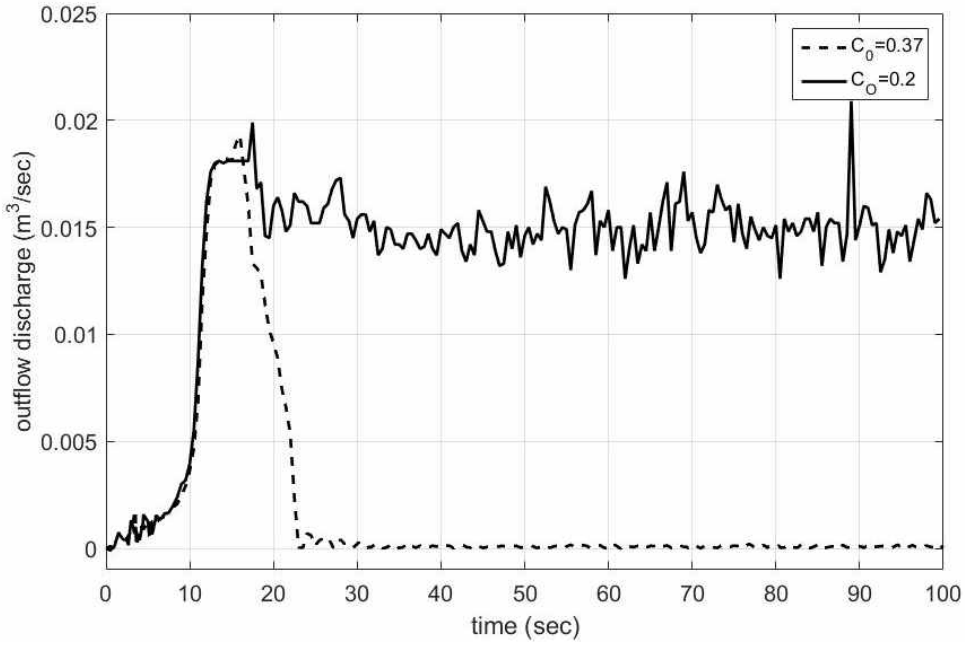
time	pressure (unit: Pa)
t = 0 sec	
t = 15 sec (before valve opens, siphon runs fully)	
t = 16 sec (after valve opens)	

time	pressure (unit: Pa)
t = 28 sec (valve still opens)	
t = 50 sec (valve still opens, siphon can runs stably because of low level of water difference)	

[그림 3.3.12] 시간에 따른 사이펀 여수로의 압력 변화 (case 4)



[그림 3.3.13] 시간에 따른 사이펀 여수로의 방류량 변화 (case 4) (unit: m^3/s)

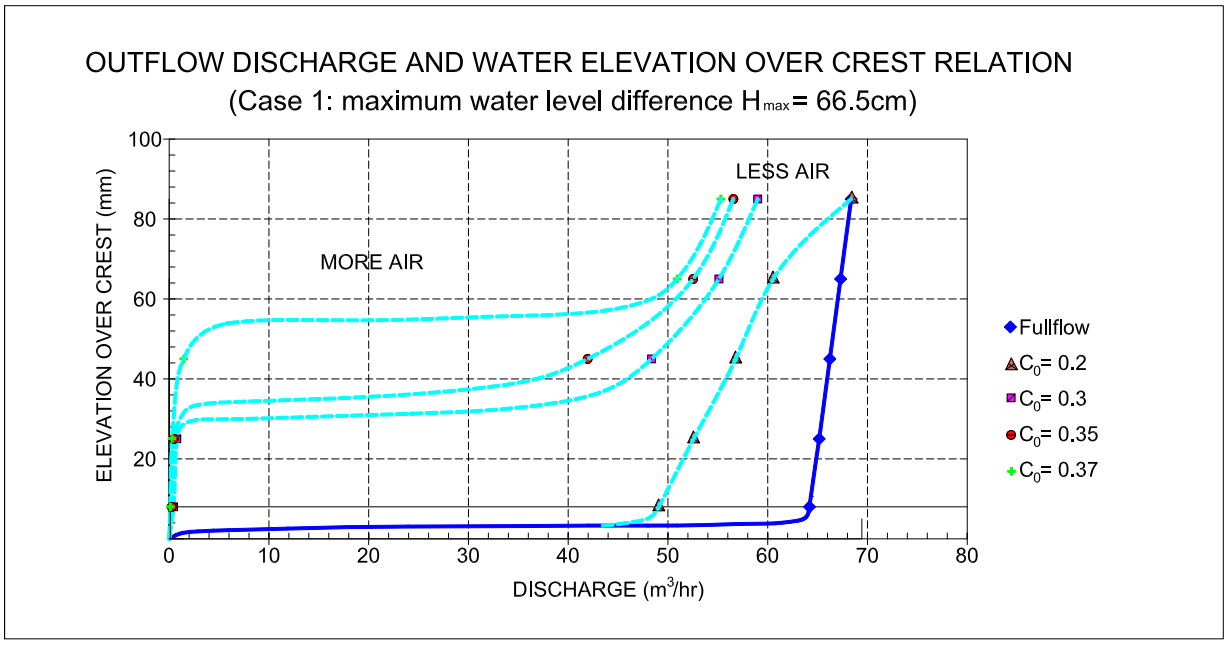


[그림 3.3.14] 시간에 따른 사이펀 여수로의 방류량 변화 비교 (case 3 vs. case 4)

(라) 공기량의 조절에 따른 수위-방류량 곡선의 변화 검토

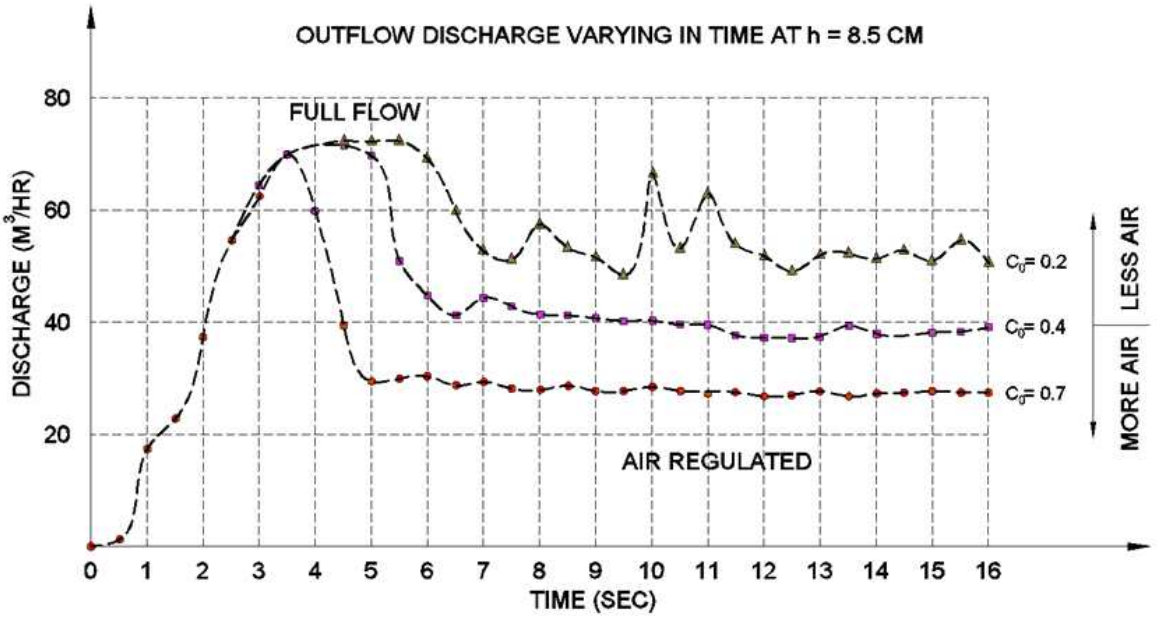
○ C_o 값의 변화로 사이펀의 방류량을 조절할 수 있음을 (다)에서 확인하였음. 수위-방류량 곡선은 사이펀 내부 천단에서부터 사이펀 외벽 천단까지의 수위 범위에서 공기량이 변화될 때(유량계수: C_o= 0.2, 0.3, 0.35, 0.37)의 수위-방류량 곡선을 [그림 3.3.15]에 나타냄.

○ C_o=0.2의 공기량이 작게 유입될 경우 고수위에서 저수위까지 유량값이 점차 줄어들어 연속적인 수위-방류량 곡선을 보이고 있고, C_o=0.3 이상으로 공기량이 많이 유입되면 고수위에서도 사이펀의 완전 가동 시에 비해 방류량이 10~15% 정도 감소한 상태에서 수위가 낮아짐에 따라 연속적으로 감소하였음.



[그림 3.3.15] 공기량 변화에 따른 수위-방류량 곡선(H=66.5cm)

○ [그림 3.3.16]에 천단고 위 8.5cm 지점에서 공기량이 달리 두었을 때 시간에 따른 방류량의 변환를 도시함. 공기량을 C_o= 0.2, 0.4, 0.7 로 공기량이 많아질수록 방류량의 감소 현상이 확연하였음. 특히 C_o= 0.7의 경우에는 사이펀 완전 가동 시에 비해 50% 이상 방류량이 감소하였음.



[그림 3.3.16] 천단고 위 8.5cm 지점에 시간의 변화에 따른 방류량 변화 곡선 (C_o= 0.2, 0.4, 0.7)

(4) 수치해석과 수리모형실험 결과 비교 검토

○ 공기량을 조절하기 전에 예비 실험으로 사이펀 완전 가동 시 상류저수지에서의 수위별 방류량 검토를 수행하였음. 수리모형실험의 사이펀 여수로와 동일한 규격으로 [그림 3.3.3]과 같이 수치해석 모형을 구성하고 수리모형실험 결과와 사이펀 이론식 결과를 같이 비교・검토함.

○ 사이펀 내경(D)은 10cm, bypass 내경(d_b)은 4cm, air vent의 내경(d_a)은 3cm, 사이펀 길이(L)은 244cm, 사이펀 상류와 하류의 최대 수위차(H_{max})는 76.5cm 임.

① 베르누이 식을 사용하여 유량을 다음과 같이 산정함.

$$Q = \frac{\pi D^2}{4}\sqrt{\frac{2gH}{f_o + f\frac{l}{D} + f_e + f_{cb}}} \qquad (3.4.1)$$

H : 상・하류 수위차 (H_{max} = 0.75 m); g : 중력가속도 (= 9.81 m/s2);

f_o : 유출부 손실계수 (=1.0); f_e : 유입부 손실계수 (=0.5);

f_{cb} : 곡면부 손실계수 ; $f_{cb} = \sum f_{cbi} = 0.318$

l : 사이펀 총 길이 (=2.44m); D : 사이펀 직경 (=0.1m);

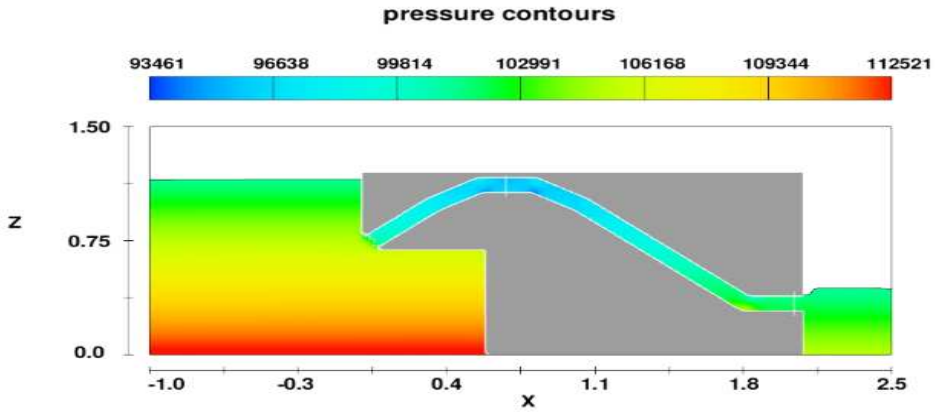
f : 마찰손실계수 (=0.015)

H_{max} = 0.75m 조건에서 방류량은

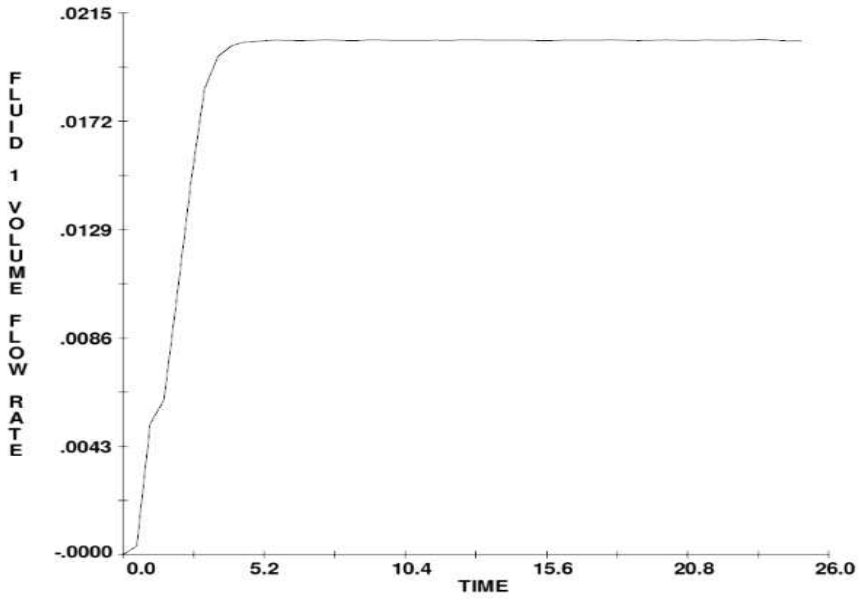
$$Q = \frac{\pi x 0.1^2}{4}\sqrt{\frac{2x9.81x0.75}{1+0.366+0.5+0.318}} = 0.0204 \quad (m^3/s)$$

따라서, Q = 0.0204 (m^3/s)= 73.44 (m^3/hr).

② FLOW-3D를 이용하여 해석한 결과는 다음과 같음.



[그림 3.4.1] FLOW-3D를 사용한 사이펀 주변의 압력분포 결과 (t = 25sec)

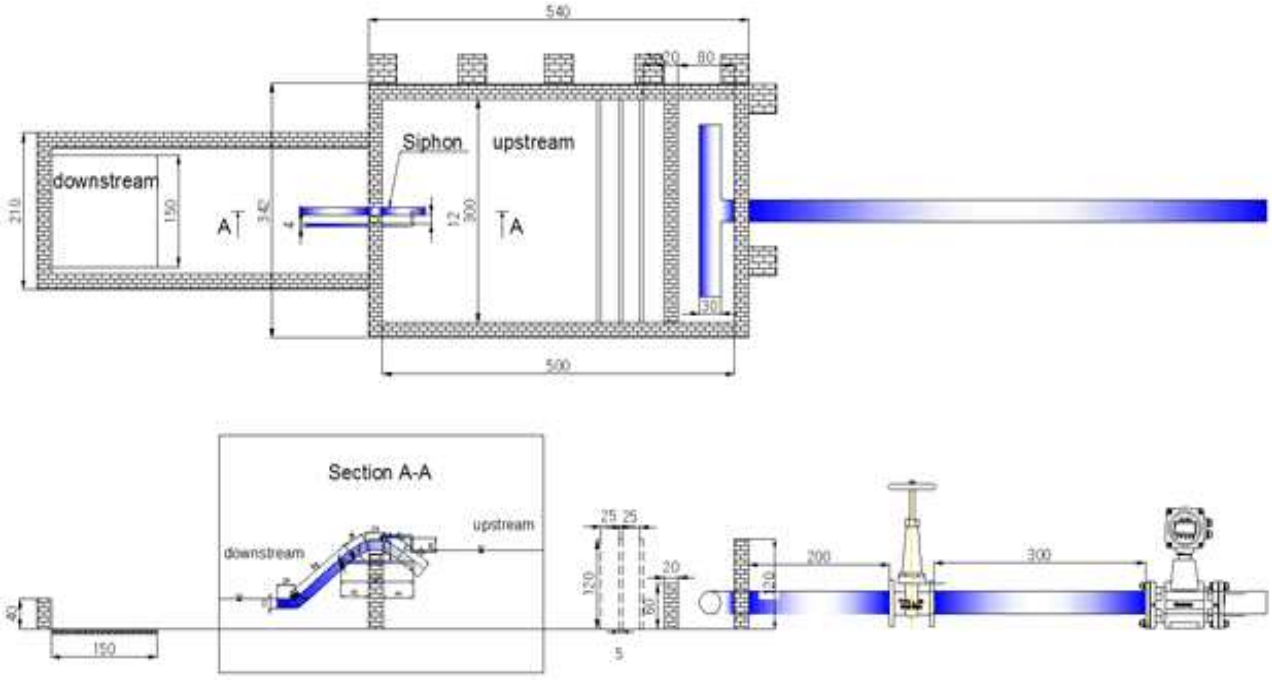


[그림 3.4.2] FLOW-3D를 사용한 시간에 따른 방류량 결과

(Hmax = 0.75m)

○ 3차원 수치해석결과는 이론식과 동일하게 Q = 0.0204 (m^3/s)= 73.44 (m^3/hr)으로 나타남.

③ 수리모형실험은 [그림 3.4.3]와 같이 구성하여 실험하였으며, 사이펀의 규격은 수치해석과 동일함.



[그림 3.4.3] 사이펀 여수로 수리실험모형 제작도

○ 수리모형실험의 자세한 설명은 ‘3장. (나) 수리모형실험’에 수록하였음.

○ 수리모형실험 결과, H_{max} = 0.75m 일 때, 사이펀 방류량은 Q = 72.74 (m^3/hr)로 관측됨.

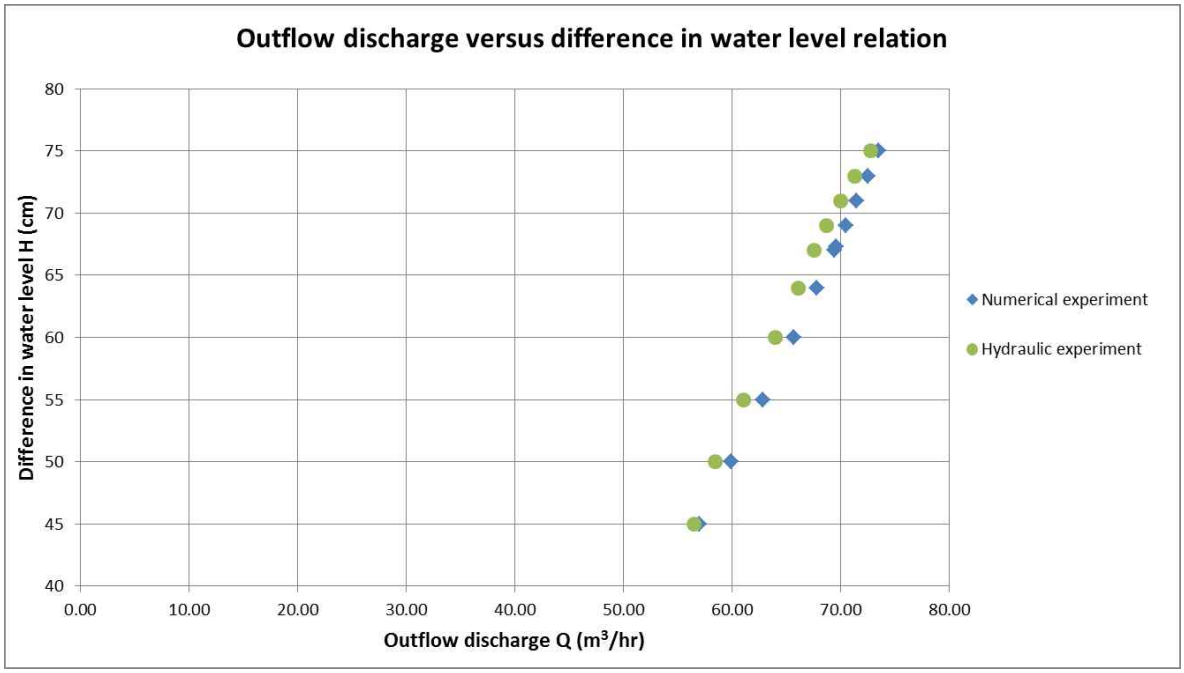
○ 이론식, 수치해석, 수리모형실험 결과를 [표 3.4.1]에 나타내었으며, 비교 결과 오차가 1% 정도로 매우 유사함

[표 3.4.1] 방류량 결과 비교(이론식, 수치해석, 수리실험)

No.	구 분	방류량 (m^3/hr)
1	이론식	73.44
2	Flow-3D 수치해석	73.44
3	수리모형실험	72.74

○ 사이펀 완전 가동 후 상류 수위가 낮아짐에 따른 방류량 변화를 수치해석결과와 수리모형실험 결과를 비교하여 [그림 3.4.4]에 나타냄.

○ 비교 결과 수치해석과 수리모형실험결과의 차이가 2.81%로 매우 유사한 결과를 나타내고 있어 3차원 수치해석의 신뢰도를 확인할 수 있었음.



[그림 3.4.4] 사이펀 여수로 수위-방류량 곡선 비교 (수치해석 및 수리모형실험)

(5) 3차원 수치해석 결론

① 동일한 조건하에서의 3차원 수치해석과 수리모형실험의 결과가 매우 유사하게 나타남을 확인함. 수치해석을 통해 공기량 조절을 통한 사이펀 방류량의 검토해석이 충분히 가능함을 제시하였음.

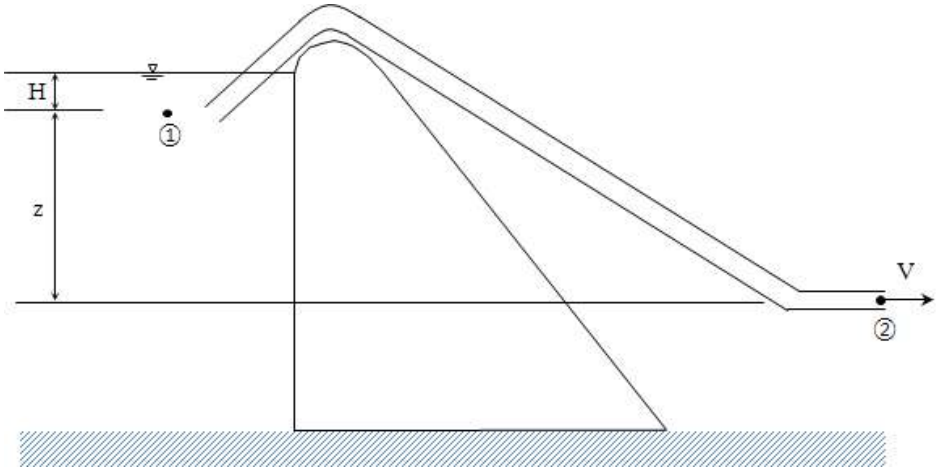
② FLOW-3D의 밸브해석 조건을 이용하여 사이펀 내부로 유입되는 공기량을 충분히 조절할 수 있으며, 적은 공기량 C_o= 0.2에서 많은 공기량 C_o= 0.37의 사이의 C_o 값 변화로 사이펀 방류량의 조절이 충분히 가능함을 확인함.

3. 수리모형실험을 통한 사이펀 여수로 성능 평가

가. 사이펀 여수로에서 사이펀 가동 실험

(1) 사이펀 이론

○ 유체가 높은 곳에서 낮은 곳으로 관수로를 통해 이동할 때 관수로 일부가 에너지선보다 높은 경우 이를 사이펀이라고 한다. 사이펀에서 에너지선보다 위에 위치하는 관수로 내 압력은 대기압보다 낮은 부압이 발생되며, [그림 3.3.1]은 사이펀에 대한 개념도임.



[그림 3.3.1] 사이펀 개념도

○ 지점 ①과 지점 ② 사이에 Bernoulli 식을 적용하면 다음과 같음

$$z+H=\frac{V^2}{2g}+H_l \tag{3.3.1}$$

여기서 V는 사이펀 유출구에서의 유속이고, H는 지점 ①의 압력수두이고, H_l은 관내 손실수두를 뜻함.

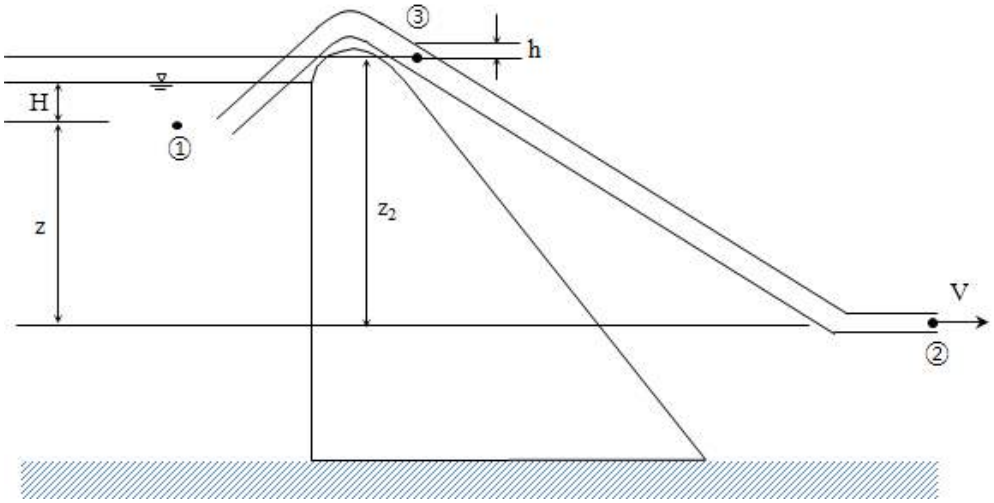
○ 식 (3.3.2~3)을 이용하여 유속과 유량을 다음과 구할 수 있음.

$$V=\sqrt{2g(z+H-H_l)} \tag{3.3.2}$$

$$Q=\frac{\pi}{4}D^2\sqrt{2g(z+H-H_l)}=C\frac{\pi}{4}D^2\sqrt{2g(z+H)} \tag{3.3.3}$$

여기서, Q는 유량임. 식 (3.3.3)에서 관내 마찰에 의한 손실수두 H_l은 식의 단순화를 위해 유량계수 C를 이용하여 근사화 할 수 있음. 본 연구에서 수리모형실험을 통해 사이펀의 방류량을 계측하고 이를 이용하여 유량계수 C를 제시함.

○ 사이펀 관수로 내에서는 에너지 선보다 높은 곳에 부압이 작용함. 이론적으로 사이펀 관수로에서의 최대 부압은 대기압과 동일함. 농업용 취수시설을 위해 사이펀을 설치할 때 플라스틱 종류의 관은 강한 부압에 의해 파손될 수 있으므로 사이펀 관내 압력의 예측은 매우 중요함. [그림 3.3.2]는 사이펀 관내 부압 예측을 위한 개념도임. 그림에서 z_2는 기준점에서 지점 ③까지의 높이를 뜻하며, h는 지점 ③에서 관 상부 지점까지의 거리를 나타냄.



[그림 3.3.2] 사이펀 관내 압력 산정 개념도

○ 지점 ③에 Bernoulli 방정식을 적용함

$$z_2 + h + \frac{p}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + H_{l2} = \text{const.} \tag{3.3.4}$$

여기서 H_{l2} 는 지점 ③에서 손실수두를 뜻함. 지점 ③에서의 관내 손실수두는 관의 길이에 비례한다는 가정 하에 유입구부터 유출구까지의 총 길이 L 과 유입구에서 지점 ③까지 관수로의 길이 l 의 비로 다음과 같이 나타낼 수 있음

$$H_{l2} \approx \frac{l}{L} H_l \tag{3.3.5}$$

○ 지점 ①과 지점 ③ 사이에 Bernoulli 방정식을 적용하면 다음 식을 구할 수 있음.

$$z_2 + h + \frac{p}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + \frac{l}{L} H_l = z + H \tag{3.1.6}$$

식 (3.1.6)를 압력 p 에 대해 정리하면 다음과 같은 식이 성립함.

$$p = \gamma \left(z + H - z_2 - h - \frac{l}{L} H_l - \frac{V^2}{2g} \right) \tag{3.3.7}$$

○ 수리모형 실험을 통해 유량을 계측하면 손실수두 H_l 을 알 수 있고, 이를 통해 압력 p 를 예측할 수 있음.

(2) 수리모형 제작

(가) 상사법칙

○ 사이펀 여수로는 물의 표면장력과 점성의 영향에 민감하므로 축소모형 제작에 따른 축척 효과가 다른 모형에 비해 크게 발생함(Ettema et al., 1982). Wattington and Ali(1976)는 사이펀 수리모형실험을 위한 축소모형의 축척은 1/30 이하로 제작하여야 한다고 제안함. 본 연구에서 사이펀의 수리모형실험 1/1 원형 규격으로 실험을 수행함.

○ 관내 공기 혼입량이 적다고 가정하여 Froude 상사를 적용함. Froude의 상사법칙은 원형과 모형의 Froude 수가 같다는 조건에서 왜곡모형의 경우 다음 관계식을 구할 수 있음.

$$V_R = \frac{V_P}{V_M} = \left(\frac{L_P}{L_M}\right)^{1/2} = L_V^{1/2} \tag{3.3.8}$$

여기서 V_P, V_M은 각각 원형과 모형의 유속이고, L_P, L_M은 각각 원형과 모형의 길이이고, V_R은 속도의 축척이고, L_V는 길이의 수직 축척임.

○ 연속방정식으로부터 유량의 축척 Q_R을 다음과 같이 구할 수 있음.

$$Q_R = A_R V_R = L_H L_V {L_V}^{1/2} = L_H {L_V}^{3/2} \tag{3.3.9}$$

여기서 A_R은 통수단면적의 축척이고, L_H는 길이의 수평 축척이고, 시간 축척 T_R은 다음과 같음

$$T_R = \frac{L_H}{V_R} = \frac{L_H}{{L_V}^{1/2}} \tag{3.3.10}$$

○ Manning 공식을 사용하면 속도의 축척 V_R은 다음과 같음

$$V_R = \frac{1}{n_R} R_R^{2/3} \left(\frac{L_V}{L_H}\right)^{1/2} = \frac{1}{n_R} L_V^{2/3} \left(\frac{L_V}{L_H}\right)^{1/2} \tag{3.3.11}$$

여기서 n_R은 조도의 축척이고, $R_R(=L_V)$은 동수반경의 축척으로 길이의 수직축척과 같음. 위 식에 식 (3.3.10)을 사용하면 조도의 축척 n_R을 다음과 같이 구할 수 있음.

$$n_R = \frac{L_V^{3/2}}{L_H^{1/2}} \tag{3.3.12}$$

○ 길이의 수평 축척 L_H와 수직 축척 L_V가 4인 정상모형으로 정하면 각 수리인자의 모형 대 원형의 비는 [표 3.3.1]과 같이 계산됨. 사이펀 모형은 표면이 매끈한 아크릴을 사용하여 조도계수의 변화를 최소화 하였음.

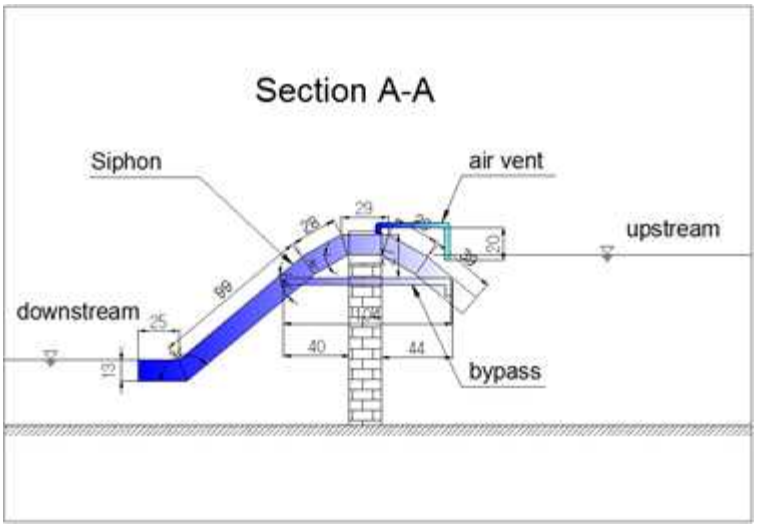
[표 3.3.1] 사이펀 여수로 모형의 축척

구 분	기 호	모형과 원형의 비
수평 축척	L_H	4
수직 축척	L_V	4
유 속	${L_V}^{1/2}$	2
유 량	$L_H {L_V}^{3/2}$	32
시 간	$L_H {L_V}^{-1/2}$	2
면 적	${L_H}^2$	16
체 적	${L_H}^2 L_V$	64
조 도	${L_V}^{3/2} {L_H}^{-1/2}$	4

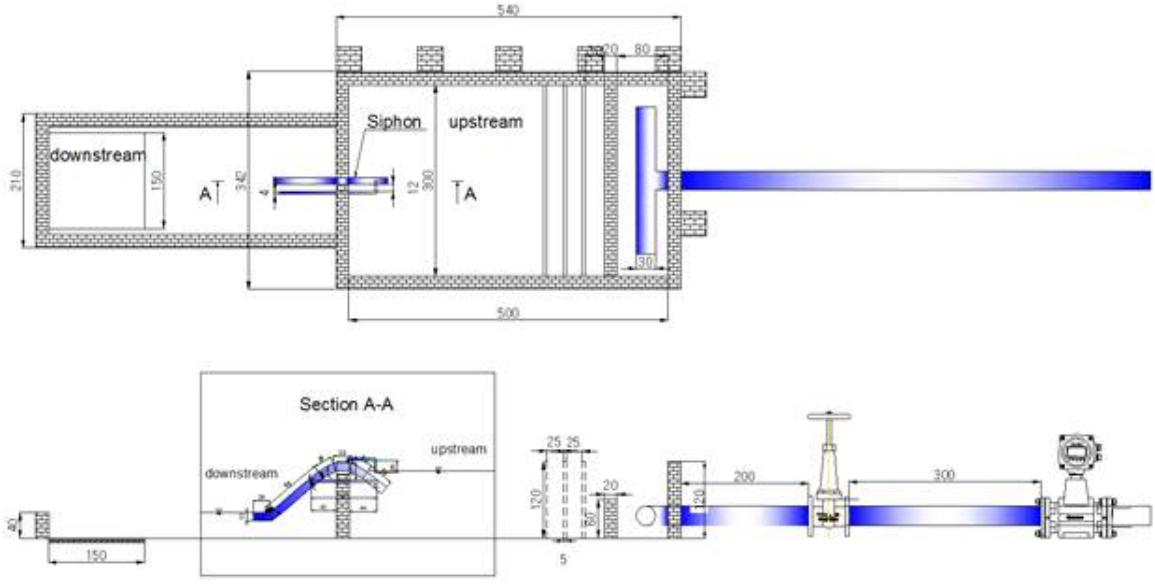
(3) 실험모형 제작

○ 본 실험에서는 사이펀 여수로 입구부(직경 0.1m)의 흡입으로 인해 영향이 없도록 상류저수지를 폭 3m × 길이 5m × 높이 1.2m로 충분히 넓게 제작하였으며, 제체는 콘크리트 블록으로 조공하여 미장함. 하류하천 부분은 폭 2.1m × 길이 4.5m × 높이 0.4m 로 조적함. 상류저수지 내에는 유량공급배관(Ø300mm)관 정류판 3장을 설치하여 상류저수지 내 정온을 유지함.

○ 사이펀은 관(Ø100mm) 내 흐름현상을 관찰할 수 있도록 투명 아크릴로 제작하고 bypass(Ø40mm)와 air vent(Ø30mm)를 사이펀에 설치함. [그림 3.3.18]에 사이펀 여수로 단면도와 [그림 3.3.19]에 실험모형제작 평면도와 단면도를 도시함. [그림 3.3.20]은 모형제작 사진임. 사이펀 내경(D)은 10cm, bypass 내경(d_b)은 4cm, air vent의 내경(d_a)은 3cm, 사이펀 길이(L)은 244cm, 사이펀 상류와 하류의 최대 수위차(H_{max})는 75.0cm 임.



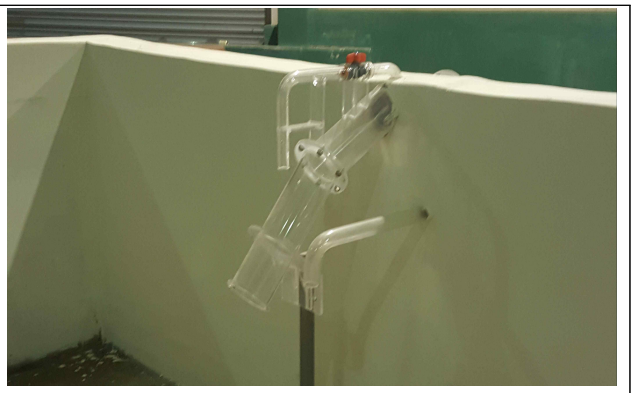
[그림 3.3.18] 사이펀 여수로 실험 단면도



[그림 3.3.19] 사이펀 여수로 실험 모형제작 평면도 및 단면도



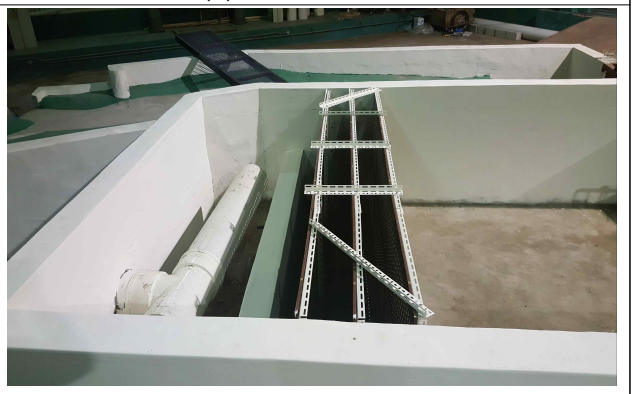
(a) 사이펀 유출부



(b) 사이펀 유입부



(c) 유량공급배관



(d) 정류판

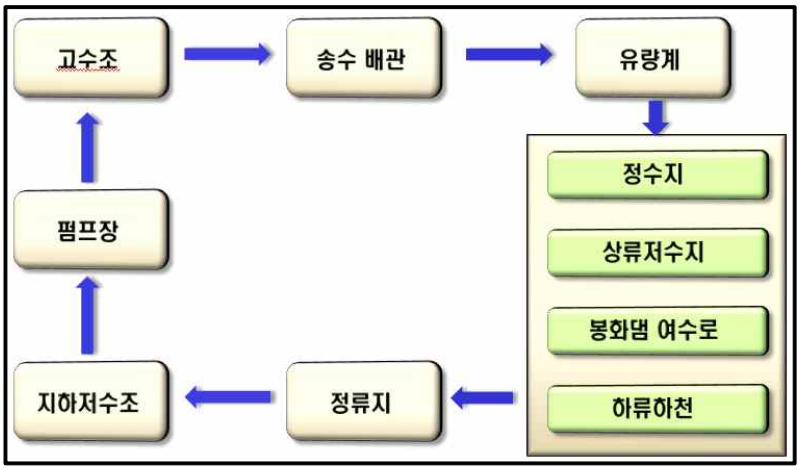


(e) 하류하천

[그림 3.3.20] 사이펀 여수로 실험 모형 제작 사진

(4) 실험 설비

○ 본 실험은 농어촌연구원 수리종합시험연구동에서 수행되었으며, 수리종합시험연구동의 실험설비의 사양은 아래와 같음. [그림 3.3.21]은 수리모형실험을 위한 실험용수의 순환 계통도임. 수리모형실험은 장시간 지속적으로 일정한 유량이 공급되어야하기 때문에 용수의 순환이 중요함. 본 실험장의 실험용수 순환은 지하저수조에서 펌프로 양수하여 고수조로 공급 후 지속적으로 안정적인 유량이 공급될 수 있도록 일정한 수두를 유지하고, 송·수배관을 통해 실험유량을 실험모형에 공급함. 실험모형에 공급된 실험수는 하류 정류지를 거쳐 지하 저수조로 유입됨. 이러한 일련의 과정을 장시간 지속할 수 있도록 실험설비가 준비되어 있음.



[그림 3.3.21] 사이펀 여수로 실험 용수의 순환 계통도

① 지하저수조

○ 모형실험에 필요한 유량은 모형에서 채워지는 실험유량과 급배수관로, 고수조 등에 소요되는 유량이 모두 고려되어야 함. 또한 모형에 실험용수가 공급될 때, 저수조의 사수위는 양수펌프의 흡입부에 일정 수심을 유지시켜 공기가 펌프에 유입되지 않도록 하여야 함. 따라서 모형실험에 안정적으로 유량을 공급하기 위하여, 100m×53m×1m 규모의 최대 5,300m^3의 실험용수를 사용함.

② 펌프장

○ 저수조에서 저류된 실험용수를 고수조로 양수하기 위하여 원심펌프 6기가 설치되어 있으며, 1기당 출력은 55KW 이며, 양정은 6.62m에서 0.5m^3/s를 양수할 수 있다. 고수조의 위어마루(EL. (+)8.5m)와 지하저수조 사수위 (EL. (+)3.2m)를 감안하면 펌프의 실제 양정은 약 5.3m 임.

③ 고수조

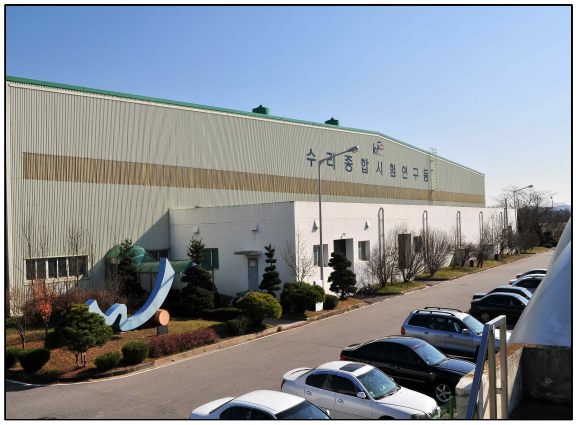
○ 고수조는 8.0m×30.0m×5.0m 이며, 고수조 내부에는 높이 4.5m의 위어가 설치되어 있어, 지하저수조에서 양수된 물이 일정한 수두를 유지할 수 있도록 하였다. 실험 시 고수조의 수두는 최대 실험유량 이상에서도 항상 2cm 이내의 범위에서 안정적으로 되게 함.

④ 통수관

○ 고수조에 양수된 실험용수는 정수압에 의하여 직경 700mm의 도수관 2개를 통하여 주 급수관로인 콘크리트 암거에 공급됨. 콘크리트 관로에서의 유속은 1 m/s 이내로 유지될 수 있도록 1.6m × 0.8m 의 단면으로 구성되어 있음.

⑤ 기타 급배수 시설

○ 주 급수관로인 콘크리트 암거는 수리종합시험연구동(L:102m×B:100m) 벽면을 따라 전체 실험동을 둘러싸고 있으며, 콘크리트 암거에 일정간격으로 Φ300mm, Φ400mm 배관이 설치되어 있고, 시험동 바닥에는 일정간격으로 맨홀이 설치되어 실험 모형의 설치위치에 관계없이 실험용수의 급배수 순환이 원활히 이루어지도록 설치되었음.



[그림 3.3.22] 시험동 및 옥외 고수조



[그림 3.3.23] 지하저수조



[그림 3.3.24] 펌프 시설



[그림 3.3.25] 통수 관로

⑥ 전자기식 유량계

○ 실험 모형에 공급되는 유량을 측정하기 위하여 ㈜서용엔지니어링에서 제작한 EF-501 300A 모델 1대를 사용하였음. 유량계의 세부사양은 [표 3.3.8]에 제시하였음. 허용 오차는 ±0.5%이며, 유량측정이 가능한 유속범위는 0.03 ~ 12m/s 임. 전자 유량계는 실험을 수행하기 전에 국제시험기관인정협력체 상호인정협정에 서명한 한국인정기구(KOLAS)로부터 공인받은 K-water 연구원에서 검·교정을 받았음.

[표 3.3.8] 전자기식 유량계 사양

구 분	EF - 501
모 델 (Model)	
직 경 (Diameter)	300mm
재 질 (Material)	Stainless Steel
유속 측정 범위 (Flow Velocity Range)	0.03 ~ 12m/s
정확도 (Accuracy)	±0.5%
전도도 (Conductivity)	5μs/cm

(5) 실험 방법 및 결과

(가) 사이펀 방류능력실험

○ 여수로의 방류능력 검토는 여수로 설계에 있어서 가장 중요한 부분으로 여수로 물넘이를 통해 설계 홍수량을 충분히 방류할 수 있는지 여부를 확인함.

○ 홍수 시 신설되는 물넘이의 방류능력을 확인하기 위해 상류 저수지에 유량을 변화시키면서 공급하고, 각 유량에 대해 저수지 내 수위가 안정 상태에 도달하였을 때 저수지 수위를 관측하여 수위-방류량을 검토함.

○ 본 실험의 경우 여수로가 사이펀 형식으로 상류 저수지의 물이 사이펀 내부 월류언을 월류할 때와 사이펀이 완전히 가동되었을 때 유량의 변화가 매우 크게 나타남을 확인함. [그림 3.3.26]에 실험사진과 [표 3.3.9]와 [그림 3.3.27]에 결과를 제시함.

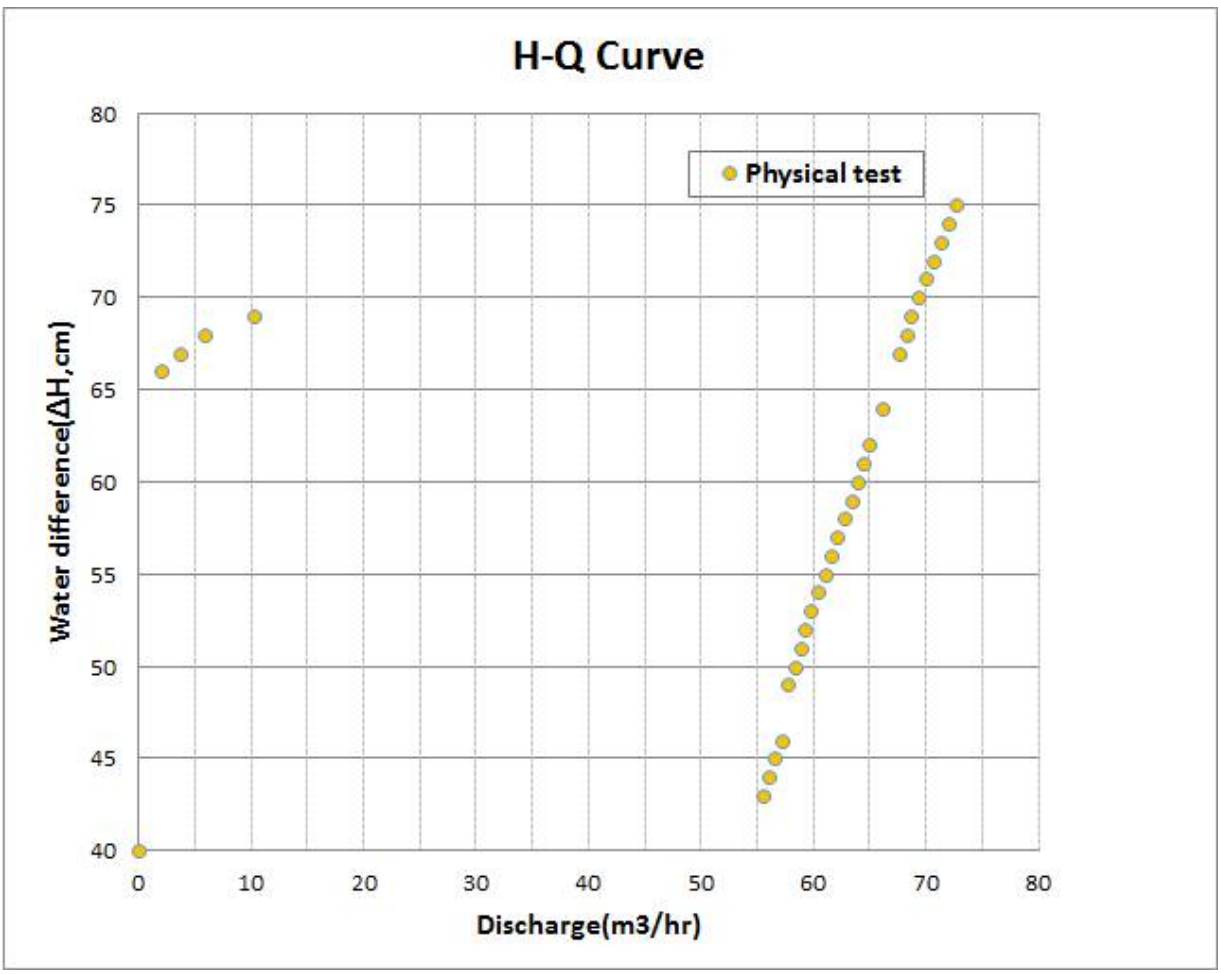
○ 저수지 상류와 하류의 수위차(H)가 66cm에서 사이펀 내부 월류언을 월류하기 시작하였음. 사이펀 직경(10cm)의 절반정도도 수위가 상승했을 때(H=70cm) 사이펀이 완전 가동 되었음. 수위 상승은 사이펀 외벽 천단고인 H=75cm 까지 하고, 다시 수위를 감소시키면서 방류량을 관측하였음. 수위차에 따라 방류량이 점차 감소하고 수위차가 사이펀 상류 입구부인 H=40cm에서 공기가 흡입되면서 사이펀 가동이 멈추었음.



[그림 3.3.26] 사이펀 여수로 수위-방류량 실험 사진

[표 3.3.9] 전자기식 유량계 사양

H(cm)	유량(m^3/hr)		H(cm)	유량(m^3/hr)	
	수위 상승 시	수위 하강 시		수위 상승 시	수위 하강 시
75	72.74	72.74	58		62.79
74	71.96	71.96	57		62.12
73	71.28	71.28	56		61.55
72	70.58	70.58	55		61.04
71	69.95	69.95	54		60.42
70	69.32	69.32	53		59.77
69	10.2	68.67	52		59.23
68	5.8	68.33	51		58.85
67	3.6	67.57	50		58.41
66	2		49		57.71
64		66.04	46		57.1
62		64.91	45		56.46
61		64.44	44		56
60		63.92	43		55.5
59		63.36	40		0



[그림 3.3.27] 사이펀 여수로 수위-방류량 곡선

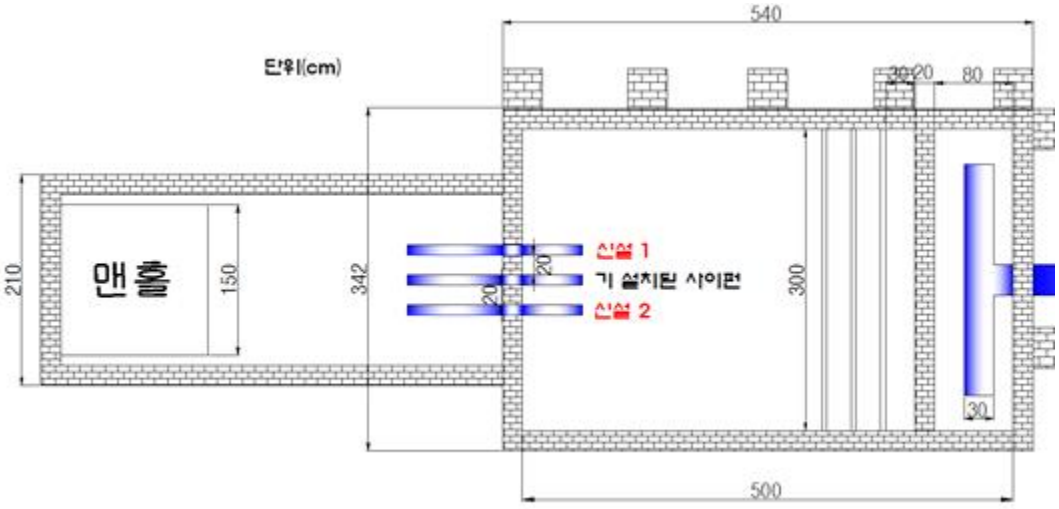
나. 사이펀 여수로에서 방류량 조절 실험

(1) 실험모형 제작

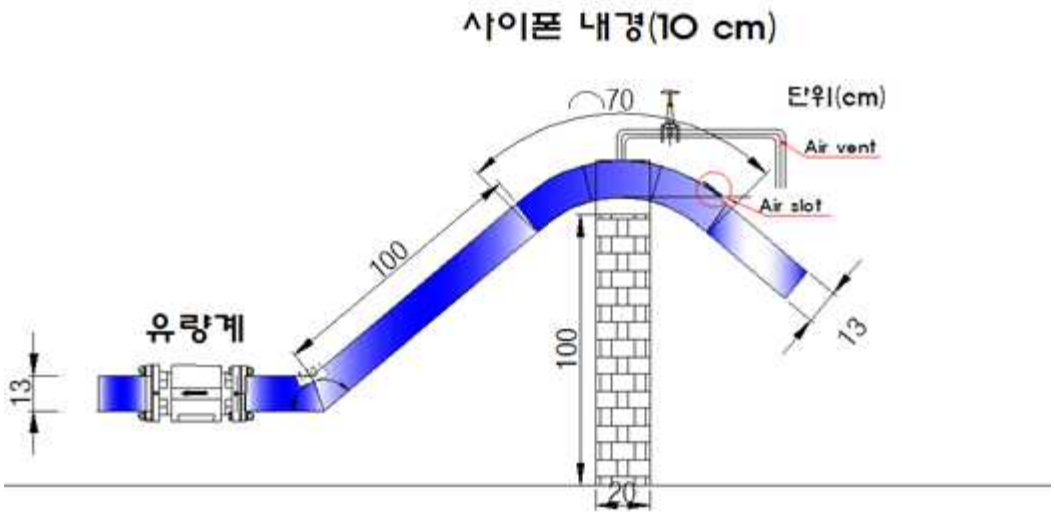
○ 본 실험에서는 ‘제3장 1. 방류량 조절 사이펀 여수로 아이디어 도출’에서 제시한 air slot과 air vent를 설치한 사이펀 모형을 아크릴로 제작하고 단일 사이펀 여수로 실험 모형의 좌·우에 설치함.

○ air slot과 air vent를 설치한 사이펀의 입구부(Ø0.1m)의 흡입으로 인해 영향이 없도록 상류저수지를 충분히 넓게 제작하였음. 제체는 콘크리트 블록으로 조공하여 미장함. 하류하천 부분은 폭 2.1m × 길이 4.5m × 높이 0.4m 로 조적함. 상류저수지 내에는 유량공급배관(Ø300mm)관 정류판 3장을 설치하여 상류저수지 내 정온을 유지함. [그림 3.3.28~29]은 모형 평면도와 단면임. [그림 3.3.30~31]은 모형 사진임. [그림 3.3.13]에서 좌측 사이펀은 원형 air slot이 설치된 사이펀이고 우측 사이펀은 직사각형 air slot이 설치된 사이펀임.

○ [그림 3.3.29]에서 보는 바와 같이 air slot은 사이펀 내부 천단보다 더 위에 설치되어 있고, air vent는 사이펀 외부 곡면 천단에 설치되어 있음.



[그림 3.3.28] 유량조절 사이펀 모형 평면도



[그림 3.3.29] 유량조절 사이펀 모형 단면도



[그림 3.3.30] 유량조절 사이펀 설치 사진 (1)



[그림 3.3.31] 유량조절 사이펀 설치 사진 (2)

(3) 실험 방법 및 조건

○ 실험 방법은 이전 사이펀 방류 능력 실험과 동일하게 사이펀 여수로 천단 너머로 설계 홍수량을 충분히 방류할 수 있는지 여부를 확인함.

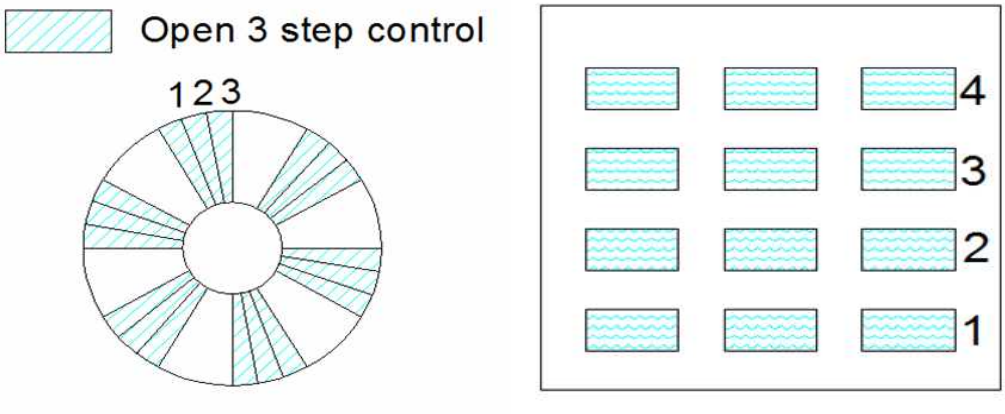
○ 이전 실험에서 본 사이펀 형식으로 상류 저수지의 물이 사이펀 내부 천단을 월류할 때와 사이펀이 완전 가동되었을 때 유량의 변화가 매우 크게 나타남을 확인할 수 있었으며, 사이펀이 가동되면, 사이펀 상류 입구부까지 상류수위가 하강해야 사이펀이 멈추는 것을 확인하였음.

○ 본 실험에서는 air slot 형태의 변화와 air slot의 개방정도에 따라 방류량이 변하는 것을 확인함.

○ 실험 조건으로 case 1 : air slot으로 공기만 유입되는 경우, case 2: air slot으로 공기와 물이 함

께 유입되는 경우의 2가지로 설정함.

○ [그림 3.3.32]에서 보는 바와 같이 원형 air slot은 3단계로 공기량을 조절할 수 있고, 직사각 air slot은 4단계로 공기량 조절할 수 있음.



(a) 원형 air slot 조건 단계 (b) 사각형 air slot 조건 단계

[그림 3.3.32] air slot 형태 별 공기량 조절 단계

○ 실제 공기가 사이펀 내부로 유입될 때의 공기량을 정량적으로 측정할 수 없기 때문에 각 case 별 공기량을 사이펀 내부 단면적(A)과 air slot의 열린 면적의 비로 [표 3.3.10~11]에 나타냄.

[표 3.3.10] 원형 air slot 공기량 조절 면적 비

circular shape				
	siphon area (cm^2)	open area (cm^2)		
		1 step open	2 step open	3 step open (full)
	78.5	2.052	4.104	6.156
ratio of area	1	2.614	5.228	7.842

[표 3.3.11] 직사각형 air slot 공기량 조절 면적 비

rectangular shape					
	siphon area (cm^2)	open area (cm^2)			
		1 row open	2 row open	3 row open	4 row open (full)
	78.5	1.65	3.3	4.95	6.6
ratio of Area	1	2.102	4.204	6.306	8.408

(4) 실험 결과

(가) 사이펀 여수로에 공기만 유입하는 경우 (case 1)

○ 저수지 상류와 하류의 수위차(H)가 60cm에서 사이펀 내부 천단을 월류하기 시작함. 사이펀

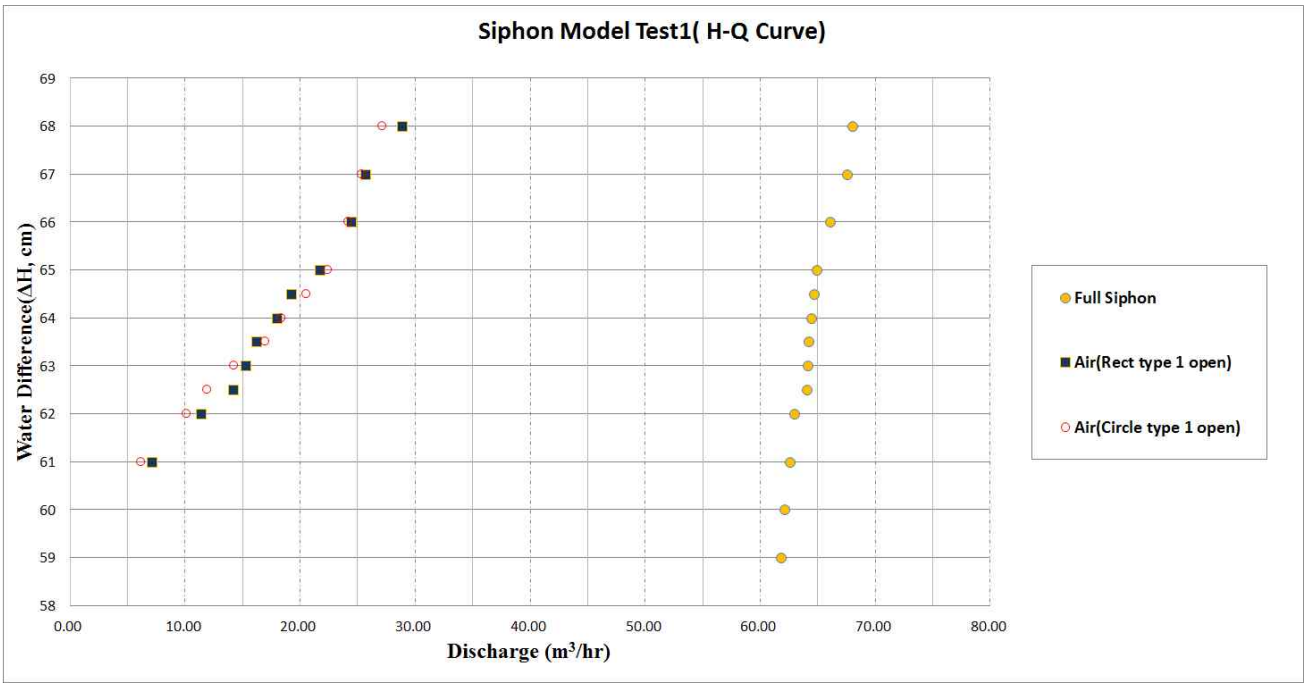
직경(10cm)의 절반 정도도 수위가 상승했을 때(H=65cm) 사이펀이 완전 가동됨. 수위차 H=68cm에서부터 수위를 낮추면서 방류량을 관측함.

○ 최대 수위차가 H=68cm 일 때부터 공기를 주입한 경우 방류량이 급격히 감소하였음. [표 3.3.12]와 [그림 3.3.33]에 공기만 유입한 경우의 수위-방류량 곡선의 변화를 보여줌. 두 가지 다른 형상의 air slot 모두 공기량을 가장 작게 개방한 1단계에서 유량이 급속히 감소하였음. 2단계부터 사이펀이 멈추는 현상이 발생함.

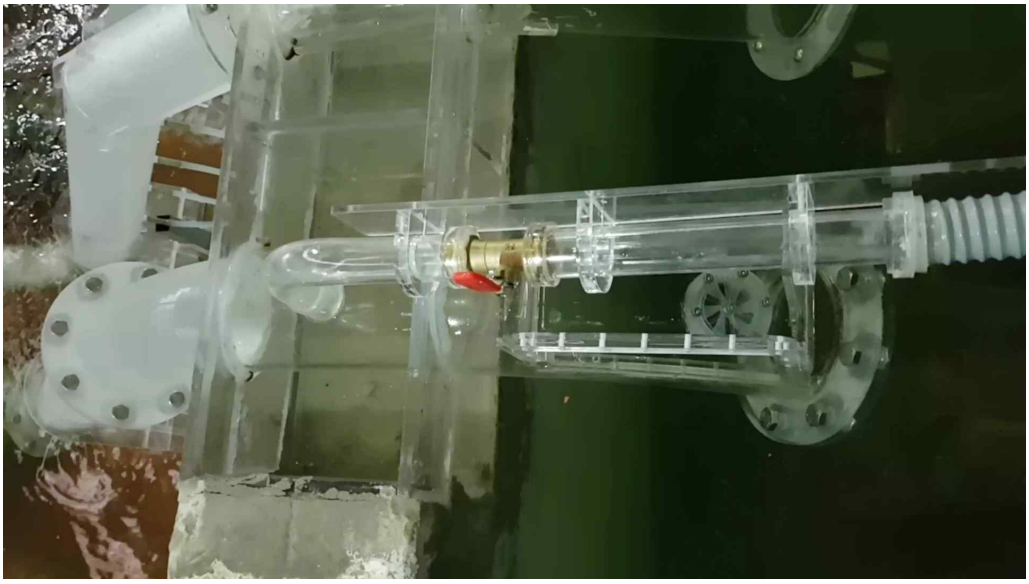
○ 원형 및 직사각형 air slot 모두 공기가 유입되었을 때 유량이 사이펀이 완전 가동되는 경우에 비해 60% 이상 감소하였음.

[표 3.3.12] air slot 형태 별 수위-방류량 곡선 (case 1)

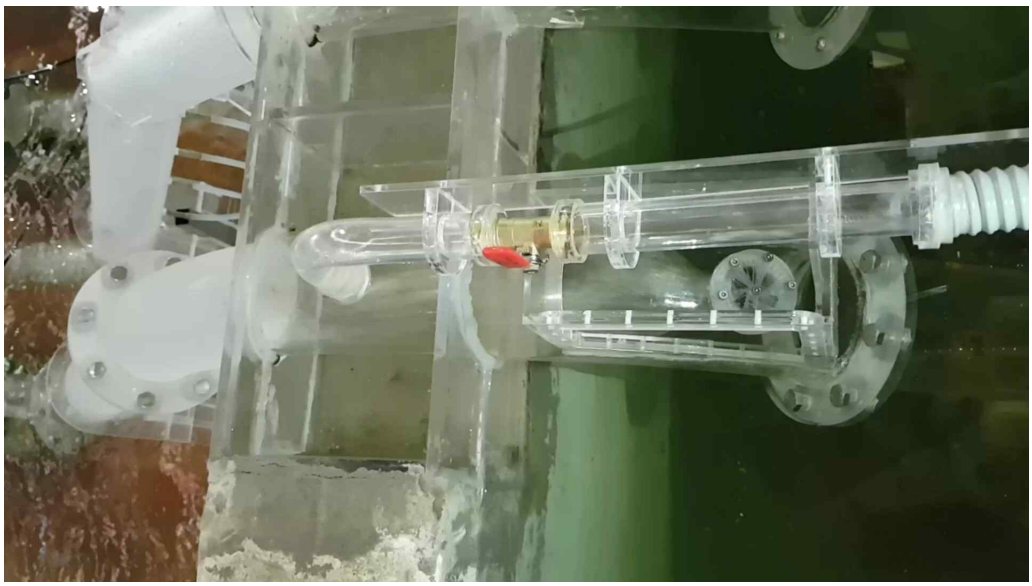
water level difference (H, cm)	discharge (m^3/hr)		
	full siphon	air insertion (rect., 1 opening)	air insetion (circle.. 1 opening)
68	68.00	28.83	27.12
67	67.58	25.63	25.32
66	66.11	24.44	24.22
65	64.88	21.71	22.40
64.5	64.65	19.25	20.57
64	64.40	18.00	18.35
63.5	64.20	16.22	16.95
63	64.10	15.28	14.25
62.5	64.04	14.16	11.90
62	62.93	11.34	10.14
61	62.57	7.08	6.19
60	62.08		
59	61.76		



[그림 3.3.33] 사이펀 여수로에 공기만 유입하는 경우 (case 1) 수위-방류량 곡선



[그림 3.3.34] 사이펀이 완전 가동한 상태 (case 1) 사진



[그림 3.3.35] 사이펀 여수로에 공기만 유입하는 경우 (case 1) 사진

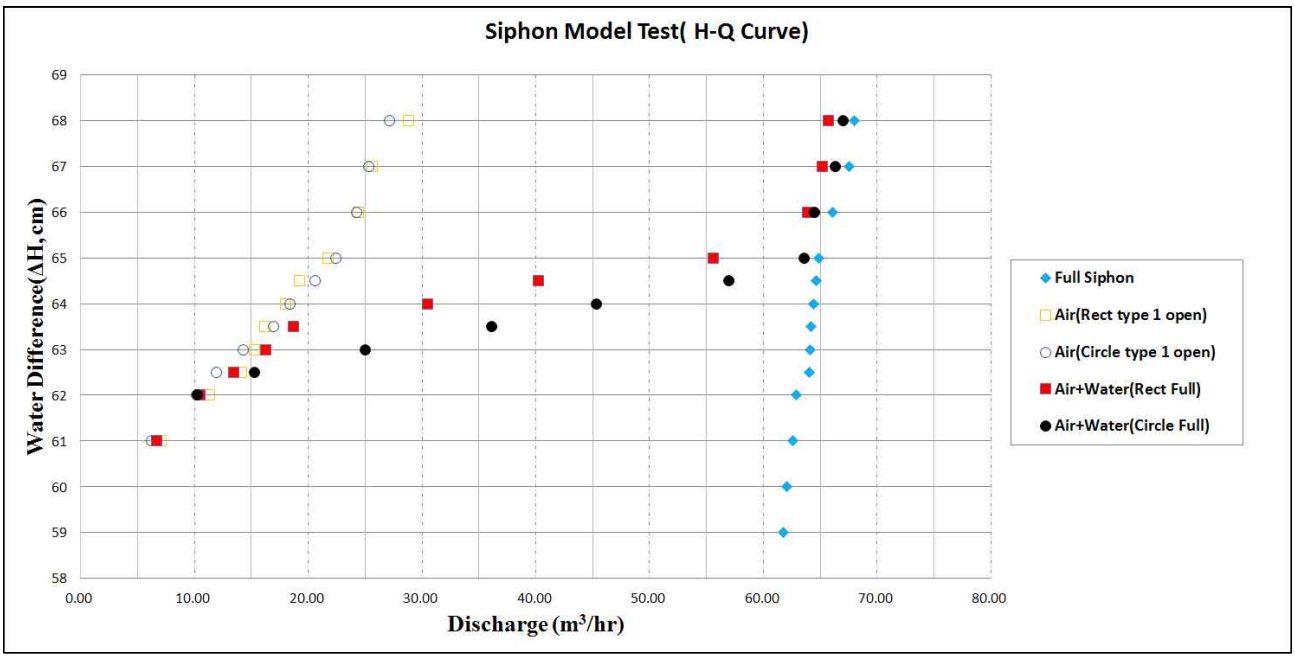
(나) 사이펀 여수로에 공기와 물이 함께 유입하는 경우 (case 2)

○ 저수지 상·하류의 수위차(H)가 60cm에서 사이펀 내부 천단을 월류하기 시작함. 사이펀 직경(10cm)의 절반 정도로 수위가 상승했을 때(H=65cm) 사이펀이 완전 가동됨. 수위차 H=68cm에서부터 수위를 낮추면서 방류량을 관측함.

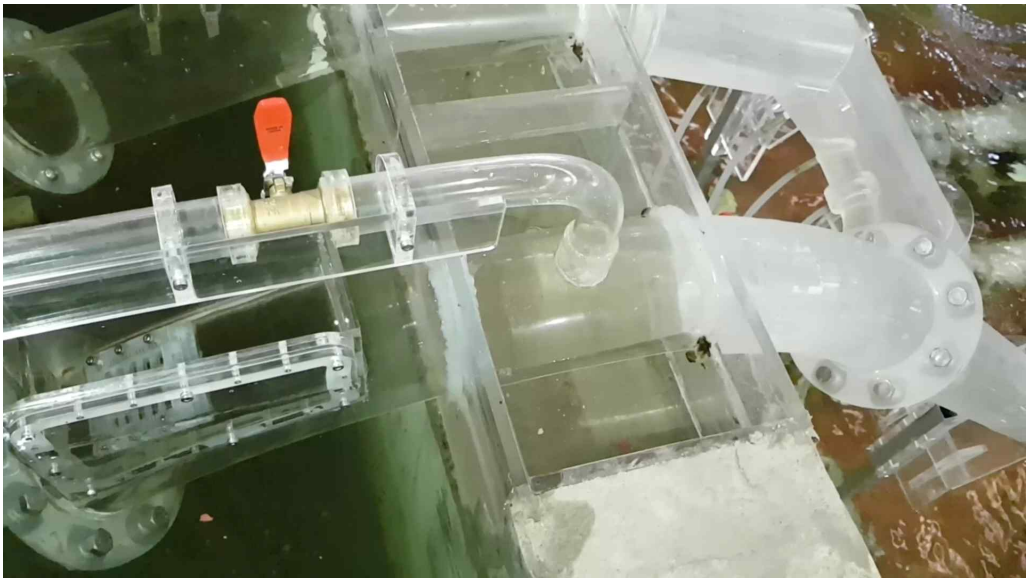
○ 최대 수위차 H=68cm에서부터 공기를 주입하였을 때, 방류량이 점차 줄어들어 연속적으로 수위가 저감함. 두 가지 형상의 air slot 모두 1단계 개방만 하여 실험하였음. [표 3.3.13]과 [그림 3.3.36]에 공기만 유입한 경우와 공기와 물을 함께 유입한 경우에 수위-방류량 곡선의 변화를 비교하여 보여줌.

[표 3.3.13] air slot 형태 별 수위-방류량 곡선 (case 1 & 2)

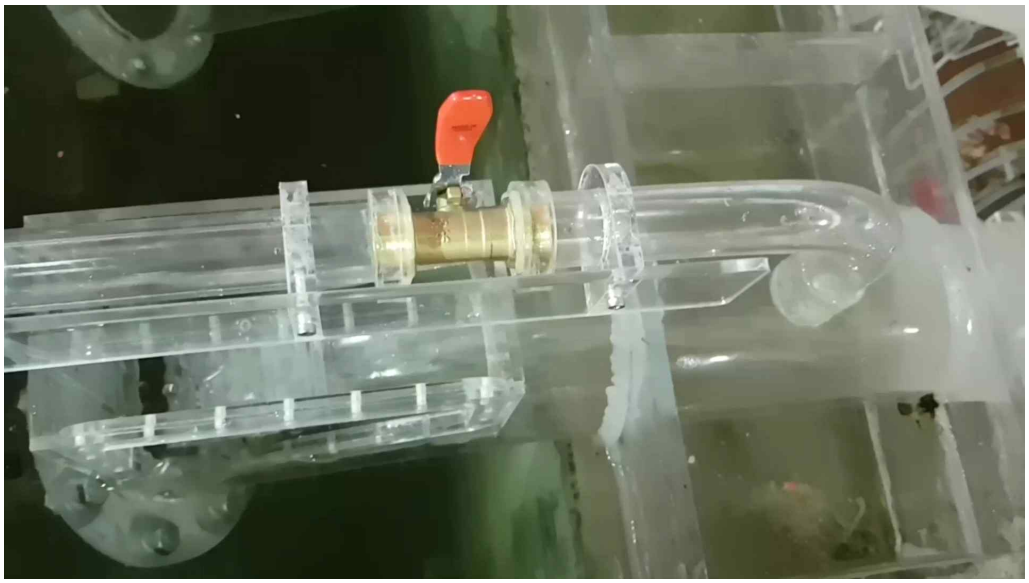
water level difference (H, cm)	discharge (m^3/hr)				
	full siphon	air (rect. 1 opening)	air (circle., 1 opening)	air+water (rect., 1 opening)	air+water (circle, 1 opening)
68	68.00	28.83	27.12	65.69	67.04
67	67.58	25.63	25.32	65.21	66.36
66	66.11	24.44	24.22	63.91	64.48
65	64.88	21.71	22.40	55.63	63.59
64.5	64.65	19.25	20.57	40.26	56.95
64	64.40	18.00	18.35	30.45	45.35
63.5	64.20	16.22	16.95	18.66	36.11
63	64.10	15.28	14.25	16.25	25.00
62.5	64.04	14.16	11.90	13.48	15.24
62	62.93	11.34	10.14	10.47	10.22
61	62.57	7.08	6.19	6.66	6.24
60	62.08				
59	61.76				



[그림 3.3.36] 사이펀 여수로에 공기와 물이 함께 유입하는 경우 (case 2) 수위-방류량 곡선



[그림 3.3.37] 사이펀이 완전 가동한 상태 (case 2) 사진



[그림 3.3.38] 사이펀 여수로에 공기와 물이 함께 유입하는 경우 (case 2) 사진

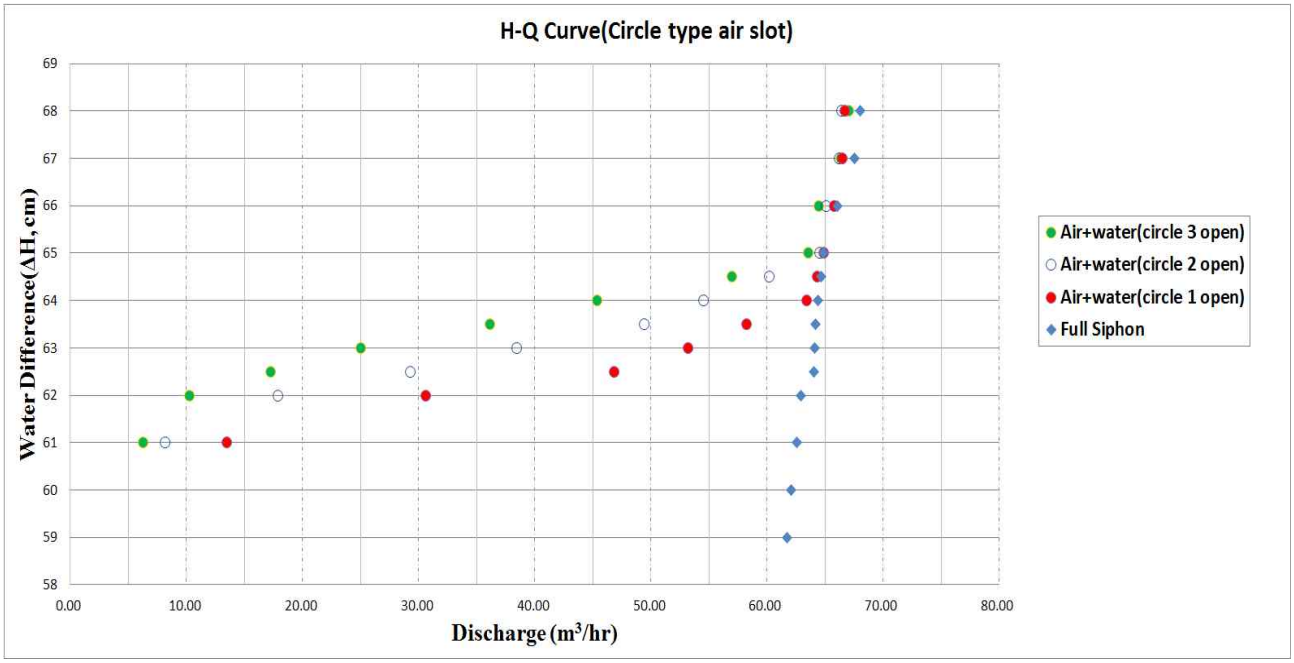
(다) air slot 형상별 공기 조절 방법에 따른 수위-방류량 곡선 변화 검토

① 원형 air slot

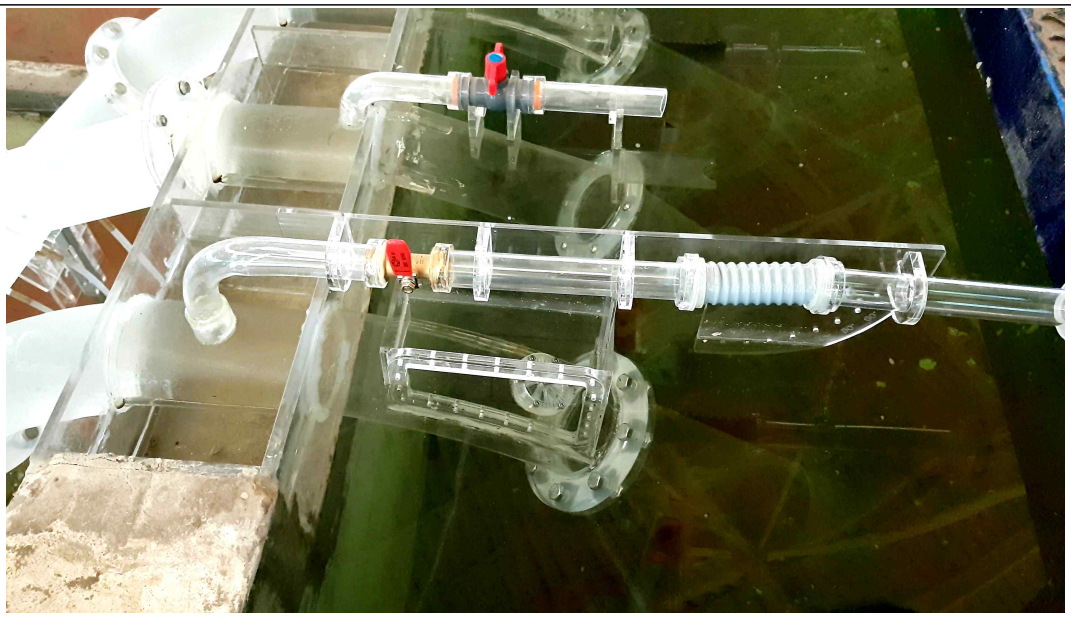
- 원형 air slot에 공기만을 주입한 경우 방류량이 급격히 감소하였음. 반면 공기와 물을 함께 주입한 경우 방류량이 점진적으로 감소함.
- 동일한 수위에서도 air slot의 개방 정도에 따라 방류량이 서로 달라서 정밀하게 방류량을 조절할 수 있음을 확인함.

[표 3.3.14] 원형 air slot 수위-방류량 결과 Case 2)

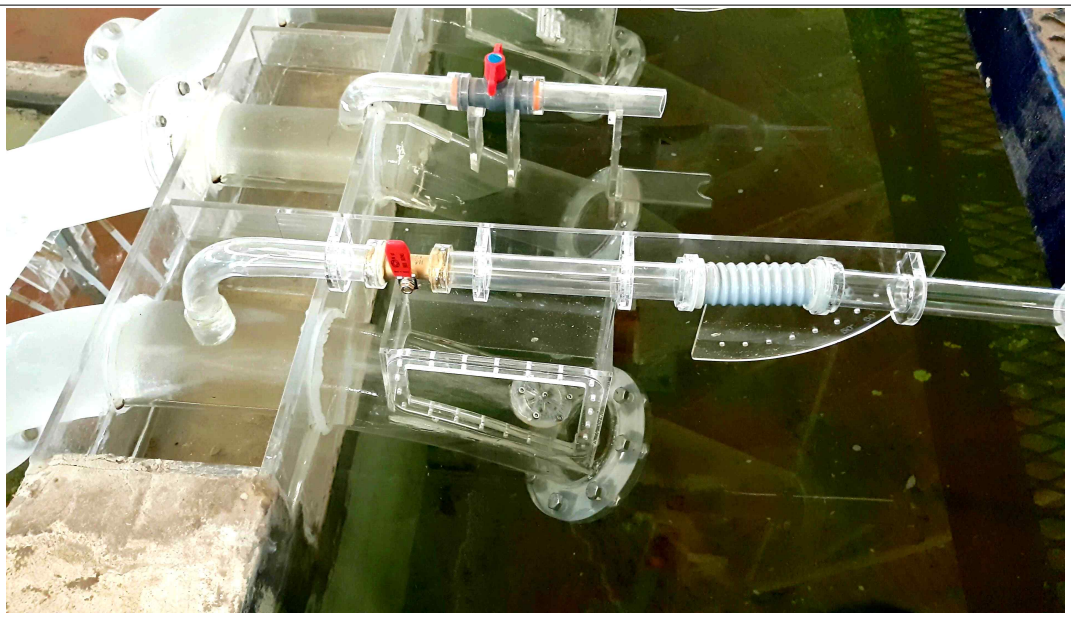
water level difference (H, cm)	discharge (m^3/hr)			
	full siphon	air+water (circ., 3 opening)	air+water (circ., 2 opening)	air+water (circ., 1 opening)
68	68.00	67.04	66.42	66.70
67	67.58	66.36	66.22	66.49
66	66.11	64.48	65.10	65.82
65	64.88	63.59	64.54	64.92
64.5	64.65	56.95	60.23	64.35
64	64.40	45.35	54.55	63.45
63.5	64.20	36.11	49.46	58.22
63	64.10	25.00	38.45	53.22
62.5	64.04	17.24	29.30	46.83
62	62.93	10.22	17.88	30.62
61	62.57	6.24	8.19	13.48
60	62.08			
59	61.76			



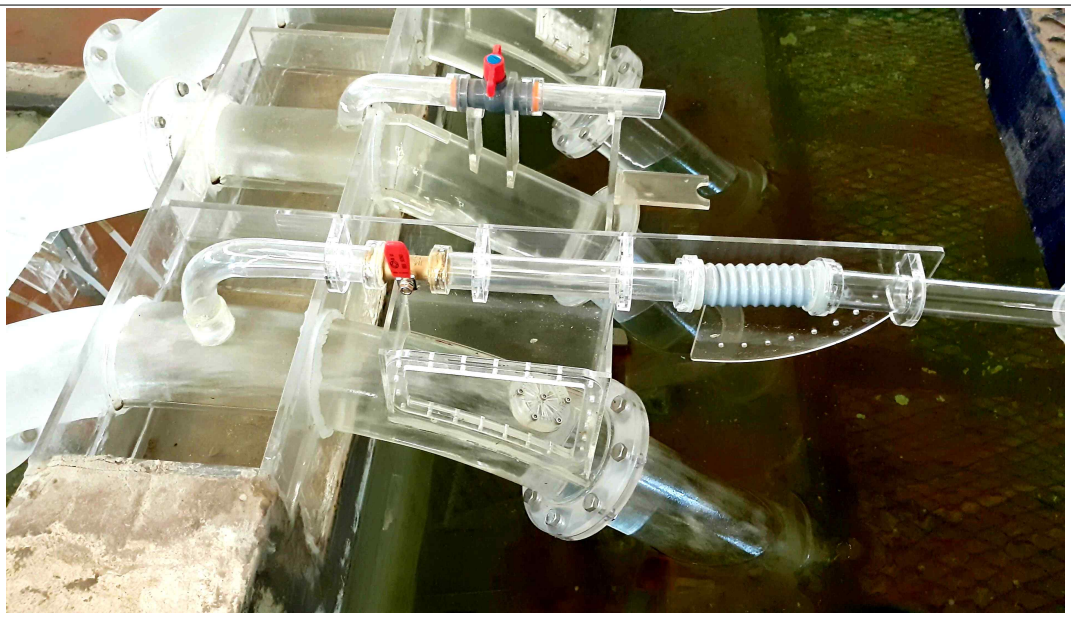
[그림 3.3.39] 원형 air slot 수위-방류량 곡선 (case 2)



(a) 원형 air slot 공기+물 혼입(H=68.0cm)

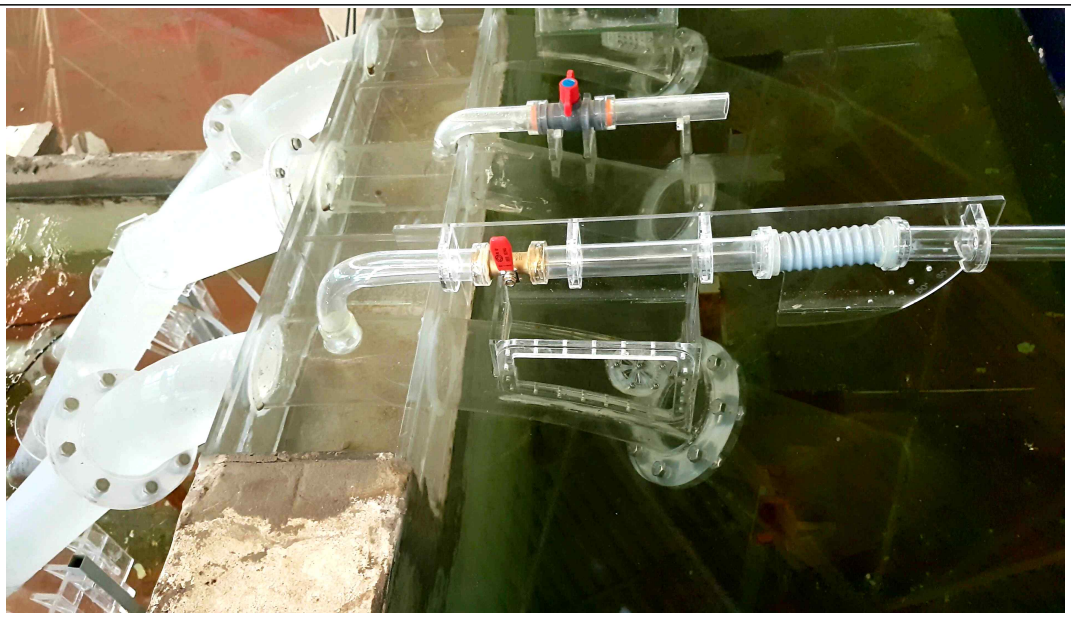


(b) 원형 air slot 공기+물 혼입(H=64.0cm)

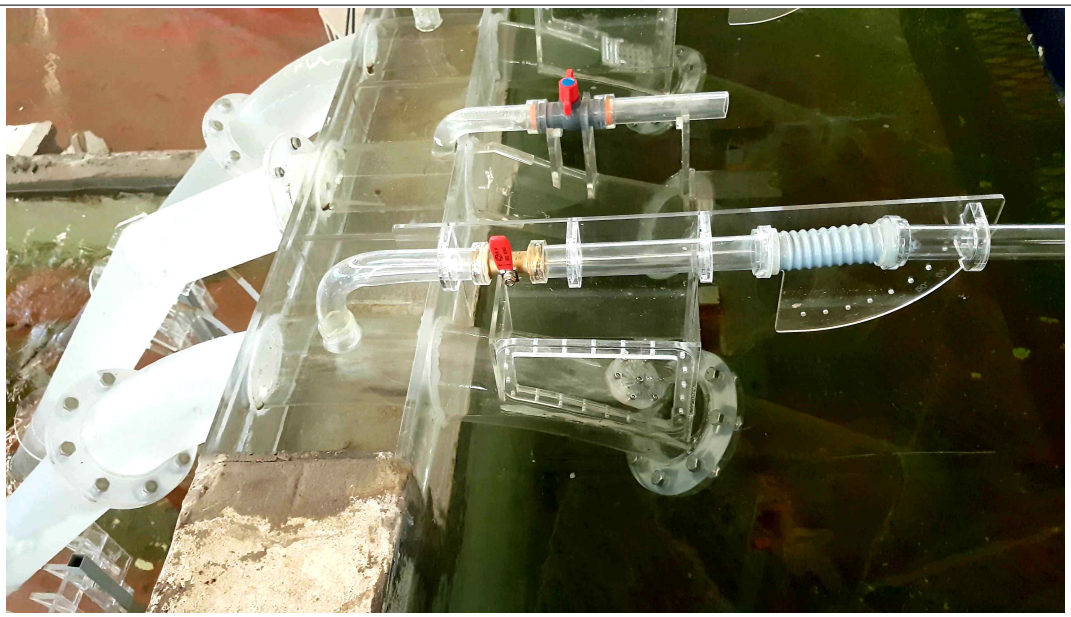


(c) 원형 air slot 공기+물 혼입(H=62.0cm)

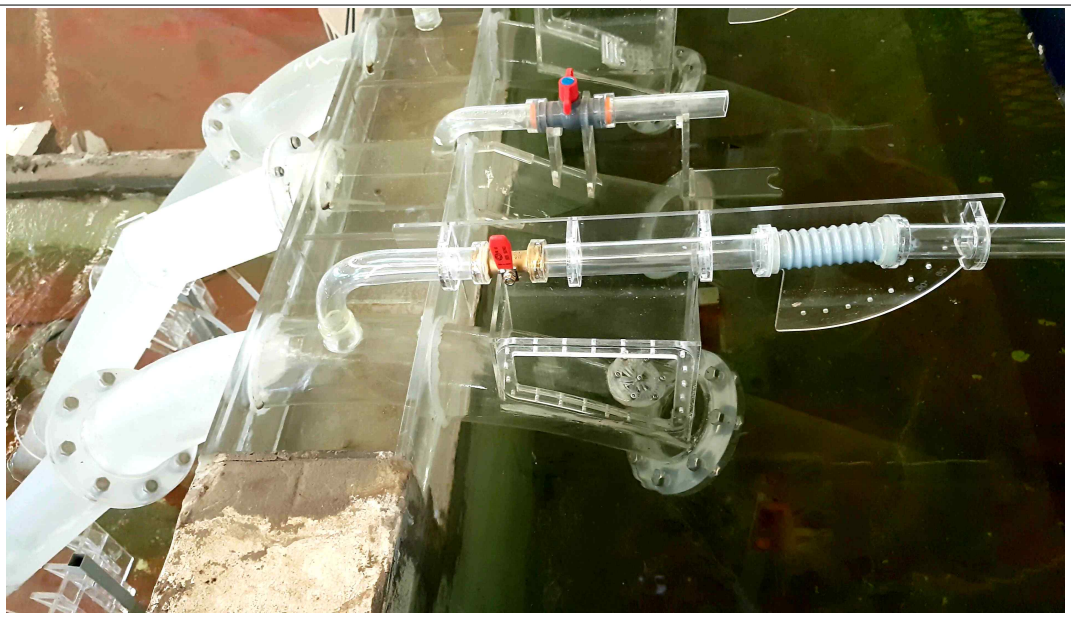
[그림 3.3.40] 원형 air slot (Circle 1 open)



(a) 원형 air slot 공기+물 혼입(H=67.0cm)

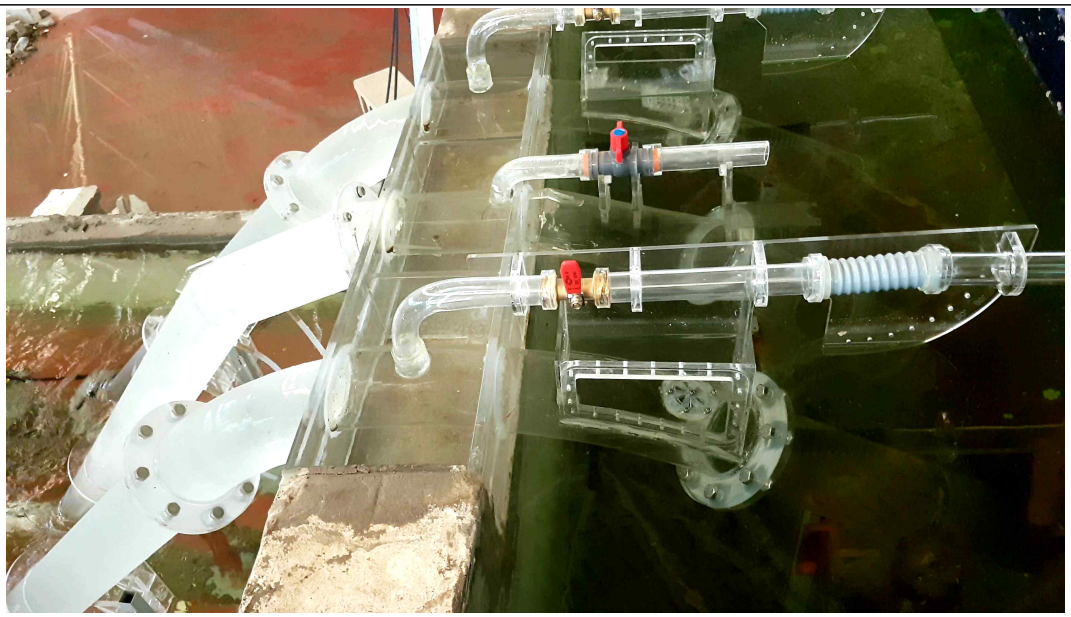


(b) 원형 air slot 공기+물 혼입(H=64.0cm)

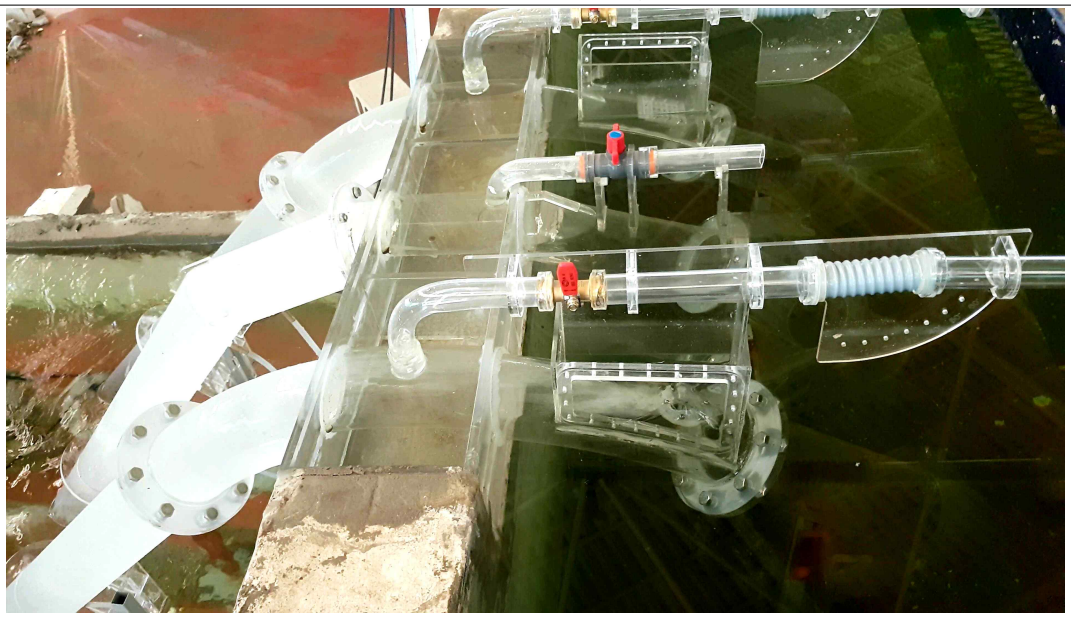


(c) 원형 air slot 공기+물 혼입(H=62.0cm)

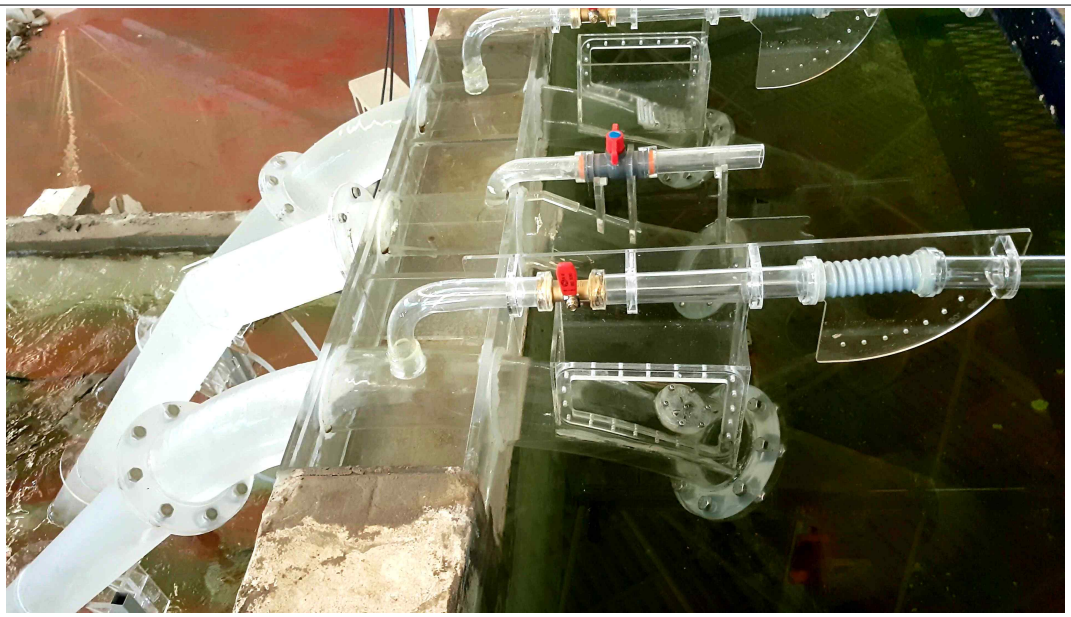
[그림 3.3.41] 원형 air slot (Circle 2 open)



(a) 원형 air slot 공기+물 혼입(H=67.0cm)



(b) 원형 air slot 공기+물 혼입(H=64.0cm)



(c) 원형 air slot 공기+물 혼입(H=62.0cm)

[그림 3.3.42] 원형 air slot (Circle 3 open)

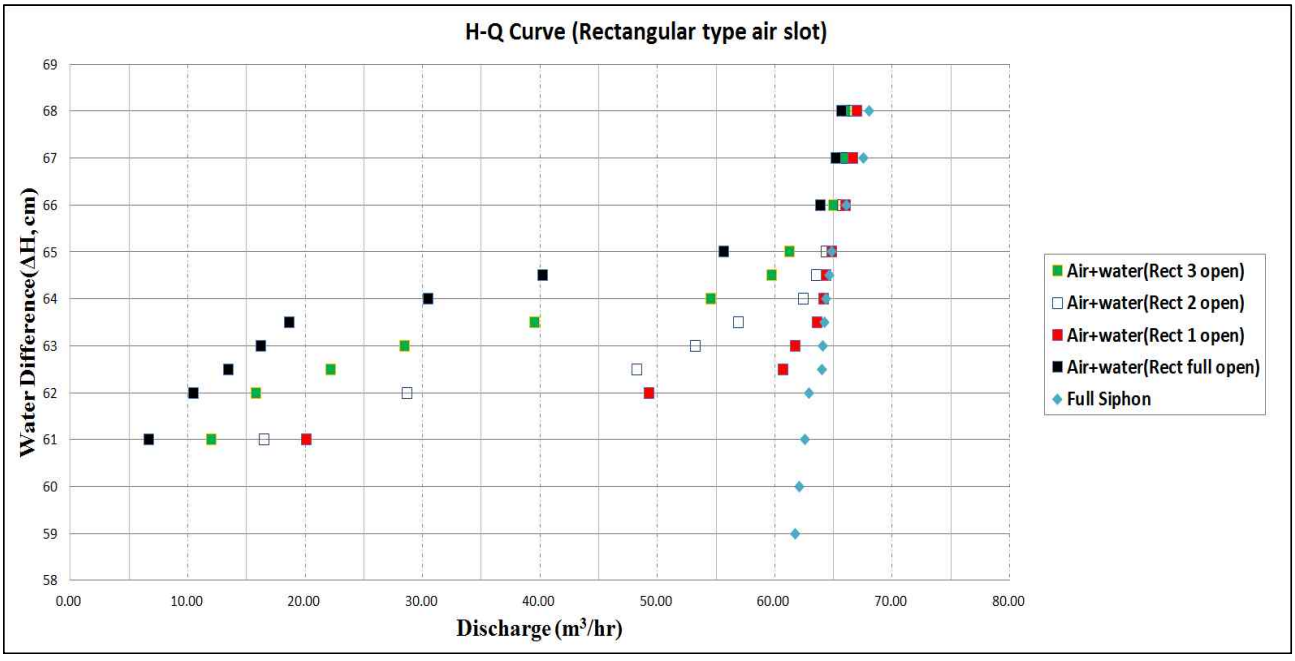
② 직사각형 air slot

○ 원형 air slot에 공기만을 주입한 경우 방류량이 급격히 감소하였음. 반면 공기와 물을 함께 주입한 경우 방류량이 점진적으로 감소하였음.

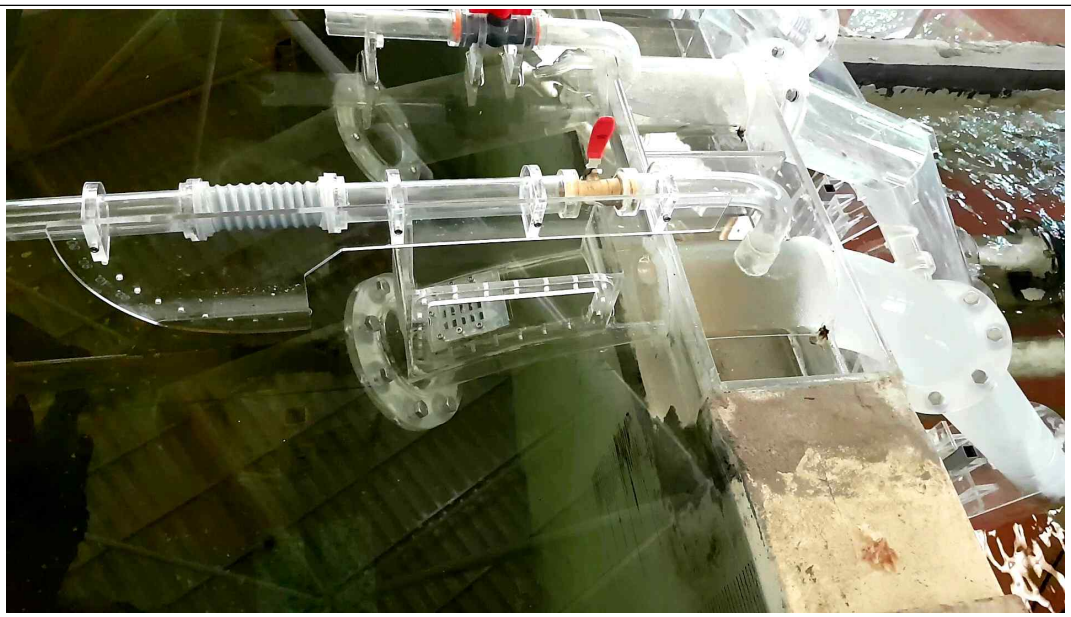
○ 동일한 수위에서도 air slot의 개방 정도에 따라 방류량이 서로 달라서 정밀하게 방류량을 조절할 수 있음을 확인함.

[표 3.3.15] 직사각형 air slot 수위-방류량 결과 (case 2)

water level difference (H, cm)	discharge (m^3/hr)				
	full siphon	air+water (rect., full opening)	air+water (rect., 3 opening)	air+water (rect., 2 opening)	air+water (rect., 1 opening)
68	68.00	65.69	66.02	66.19	67.02
67	67.58	65.21	65.86	66.03	66.62
66	66.11	63.91	64.97	65.73	66.03
65	64.88	55.63	61.23	64.35	64.84
64.5	64.65	40.26	59.74	63.56	64.35
64	64.40	30.45	54.55	62.45	64.13
63.5	64.20	18.66	39.53	56.89	63.64
63	64.10	16.25	28.45	53.22	61.76
62.5	64.04	13.48	22.17	48.26	60.72
62	62.93	10.47	15.78	28.67	49.26
61	62.57	6.66	12.04	16.47	20.13
60	62.08				
59	61.76				



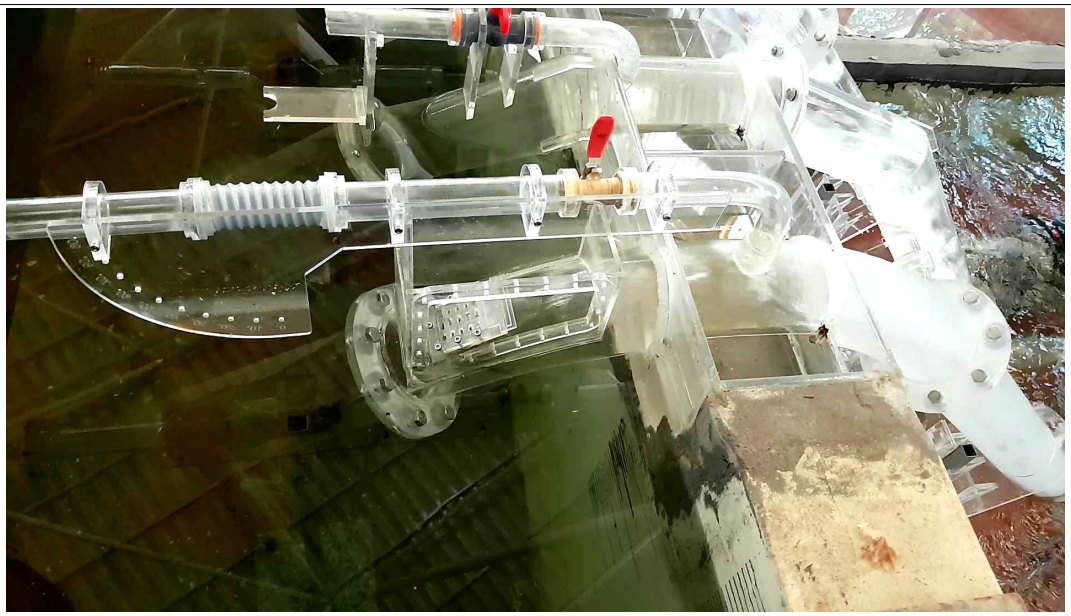
[그림 3.3.43] 직사각형 air slot 수위-방류량 결과 (case 2)



(a) 직사각형 air slot 공기+물 혼입(H=67.0cm)

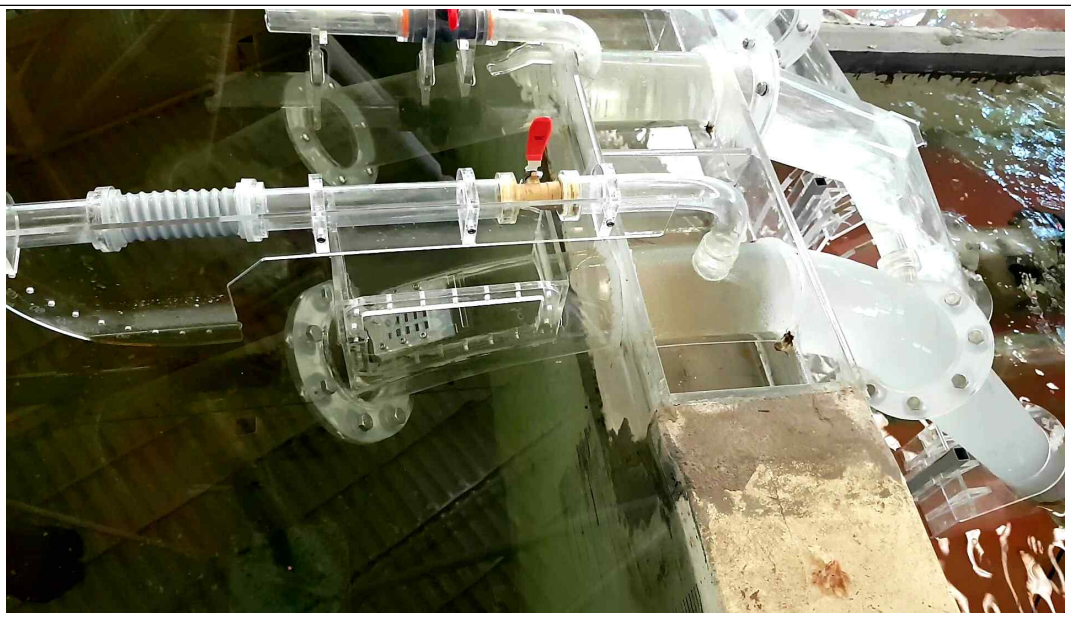


(b) 직사각형 air slot 공기+물 혼입(H=63.5cm)

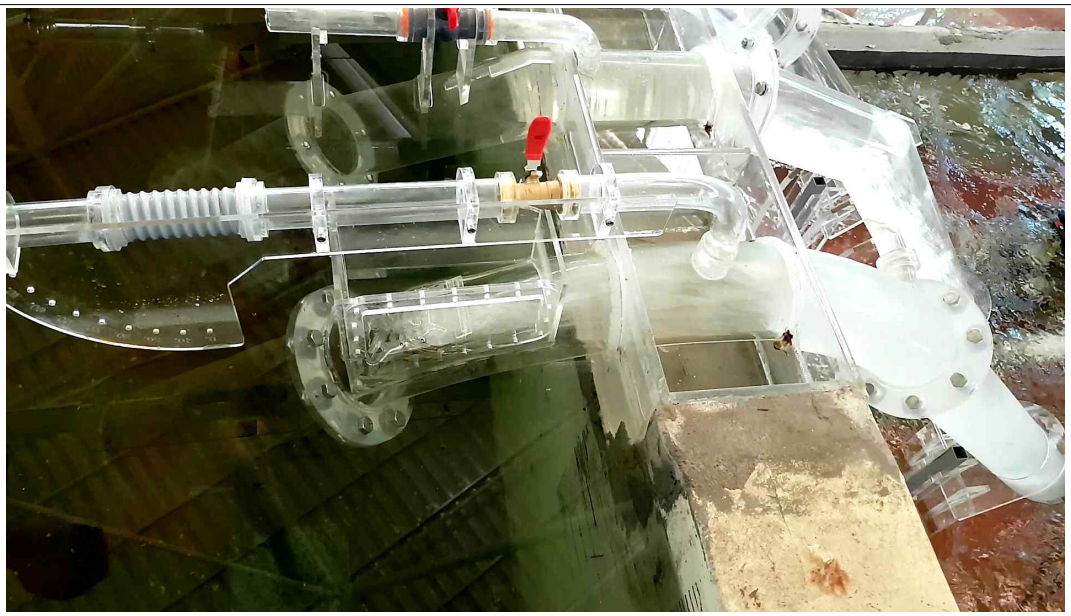


(c) 직사각형 air slot 공기+물 혼입(H=62.0cm)

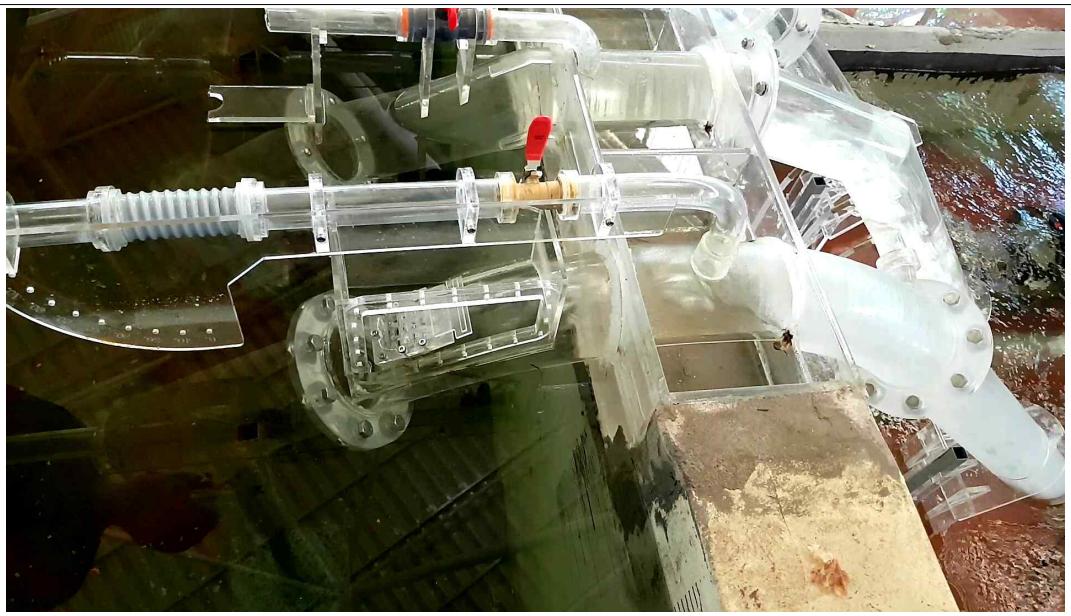
[그림 3.3.44] 직사각형 air slot (Rect 1 open)



(a) 직사각형 air slot 공기+물 혼입(H=67.0cm)

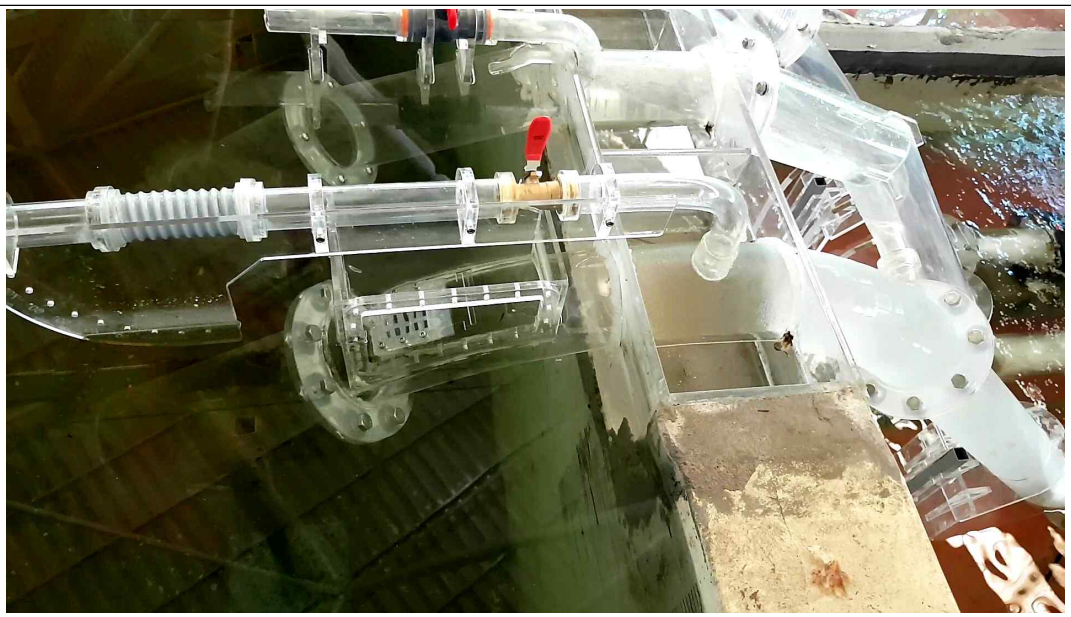


(b) 직사각형 air slot 공기+물 혼입(H=63.5cm)

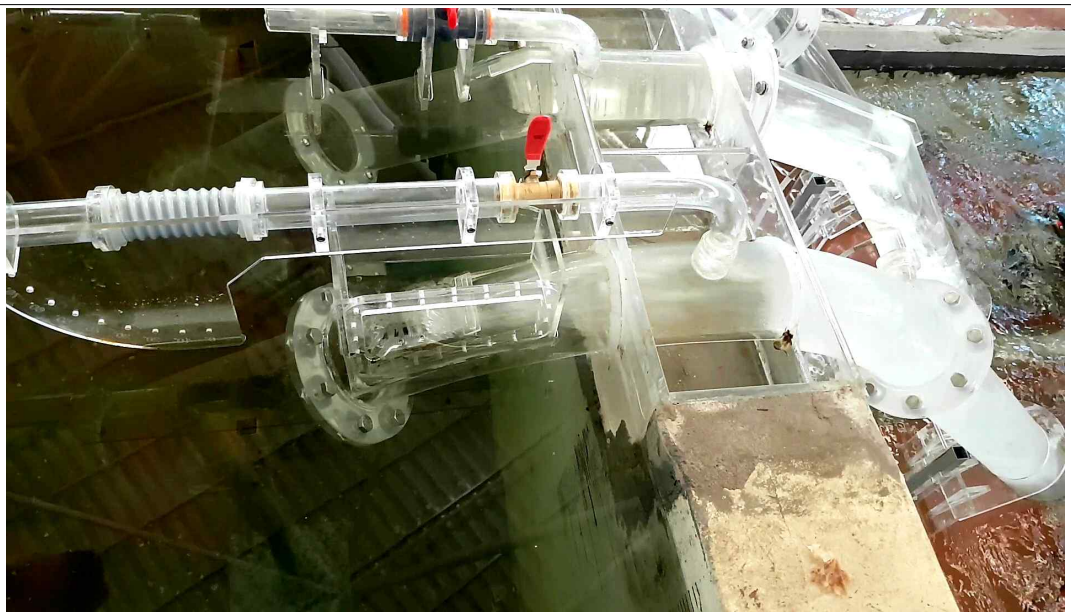


(c) 직사각형 air slot 공기+물 혼입(H=62.0cm)

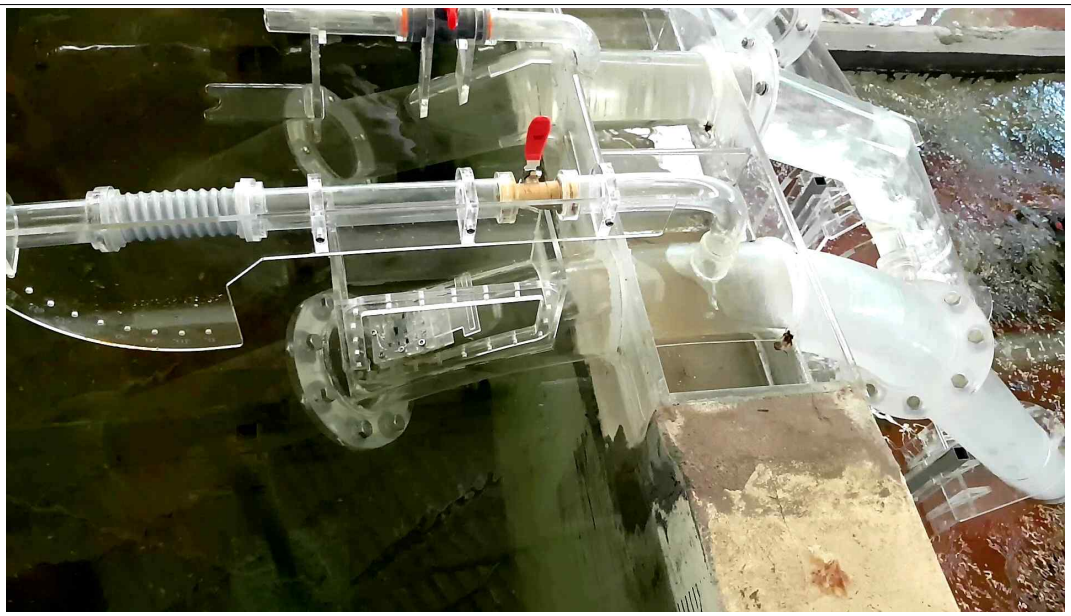
[그림 3.3.45] 직사각형 air slot (Rect 2 open)



(a) 직사각형 air slot 공기+물 혼입(H=67.0cm)



(b) 직사각형 air slot 공기+물 혼입(H=63.5cm)



(c) 직사각형 air slot 공기+물 혼입(H=62.0cm)

[그림 3.3.46] 직사각형 air slot (Rect 3 open)

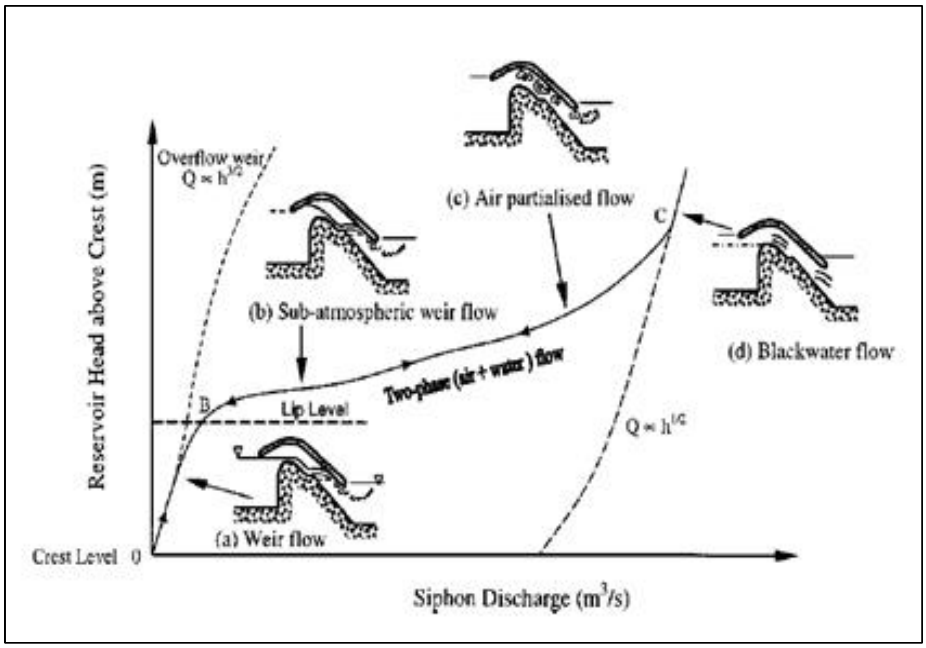
(5) 수리모형실험 결론

○ ‘사이펀에 공기를 주입할 때 방류량 조절이 가능한가?’ 이 의문이 본 연구에 가장 중요한 논제였음. 본 실험 결과 공기 주입을 통해 사이펀의 방류량 조절이 가능함을 확인함.

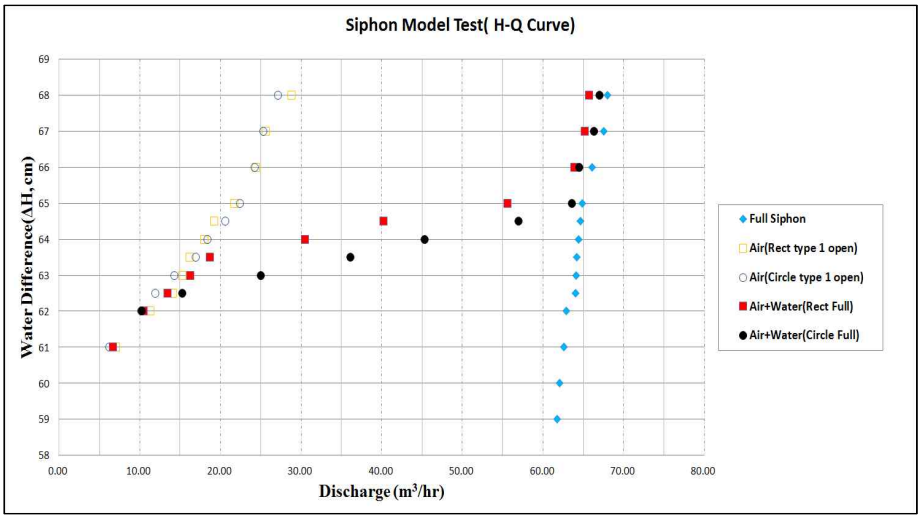
○ 공기만을 주입한 경우 사이펀이 완전 가동될 때에 비해 방류량이 60% 이상 감소하였음. 따라서 공기 주입만으로 방류량을 조절하기 위해서는 매우 정밀한 공기량 조절장치가 필요한 것으로 판단됨.

○ 공기와 물을 함께 주입한 경우 air slot의 개방 정도에 따라 방류량 조절을 유연하게 할 수 있음을 확인함.

○ air slot의 개방 면적을 조절하면 이전 연구(Babaeyan-Koopaei et al., 2002)에 비해 보다 다양하게 유량조절이 가능함을 확인하여 본 연구 목적이 달성되고, 세계적으로 더 우수한 연구 결과라는 것이 입증함.



[그림 3.3.41] air slot을 이용한 선행 연구 결과 (Babaeyan-Koopaei et al., 2002)



[그림 3.3.36] 본 연구의 방류량조절이 가능한 수위-방류량 곡선

다. 수리모형실험 결과 분석

(1) 무차원 변수 유도

○ 무차원 변수는 Buckingham의 파이 이론을 이용하여 유도

$$F = F(Q, \triangle H, a, g) \tag{3.3.13}$$

여기서, Q는 유량, $\triangle H$는 상류 및 하류측 수두차이, a는 Air slot의 열린 면적, 그리고 g는 중력가속도를 뜻함.

○ 본 연구에서 수행한 사이펀 실험은 모두 동일한 단면적(A)을 대상으로 수행하였기 때문에, 유량 Q에 영향을 주는 변수에서 제외

○ 식 (1)에 포함된 차원은 $[L]$, $[T]$로 2개이며, 독립변수는 4개이므로 4-2=2개의 무차원 변수의 유도가 가능하며, 다음식이 성립함

○ 반복변수로는 Air slot의 열린 면적인 a와 중력가속도 g를 선정

$$\Pi_1 = \Pi_1(Q, a, g) \tag{3.3.14}$$

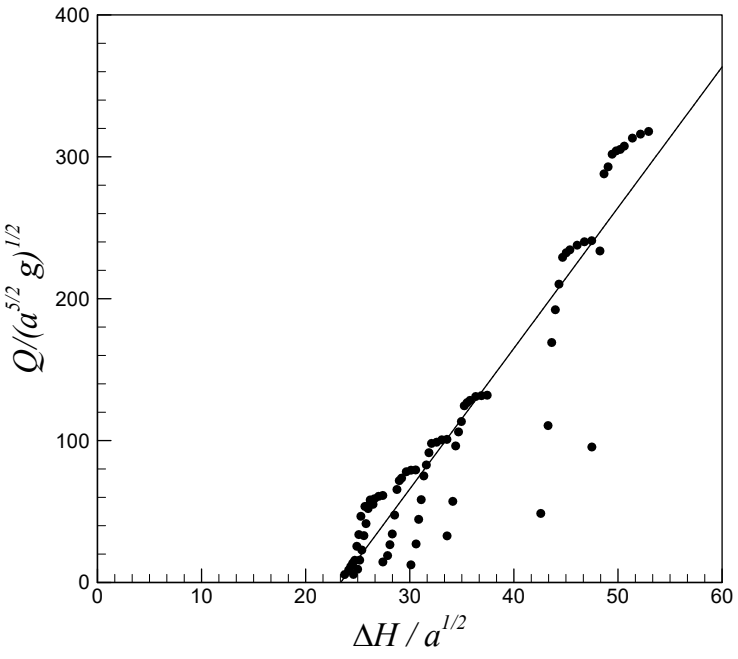
$$\Pi_2 = \Pi_2(\triangle H, a, g) \tag{3.3.15}$$

○ 식 (3.3.14) 및 (3.3.15)으로부터 다음과 같은 무차원 변수가 유도됨

$$\Pi_1 = \frac{Q}{\sqrt{a^{5/2} g}}, \quad \Pi_2 = \frac{\triangle H}{\sqrt{a}} \tag{3.3.16}$$

(2) 실험 결과 분석

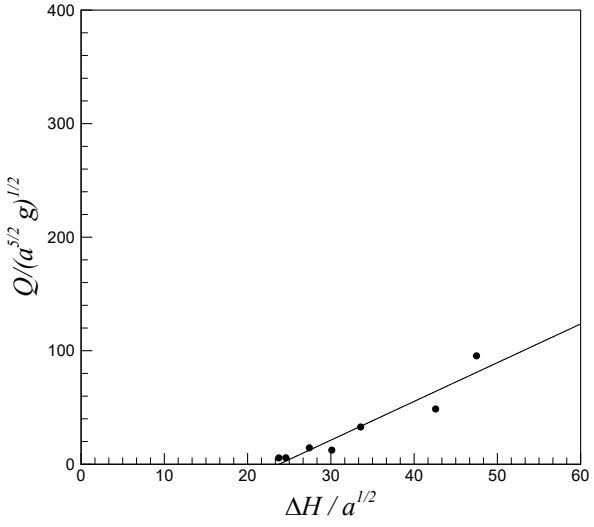
○ 식 (3.3.16)에서 유도된 무차원 수두차 및 무차원 유량을 이용하여 그래프를 작성하면 아래 그림 1과 같음



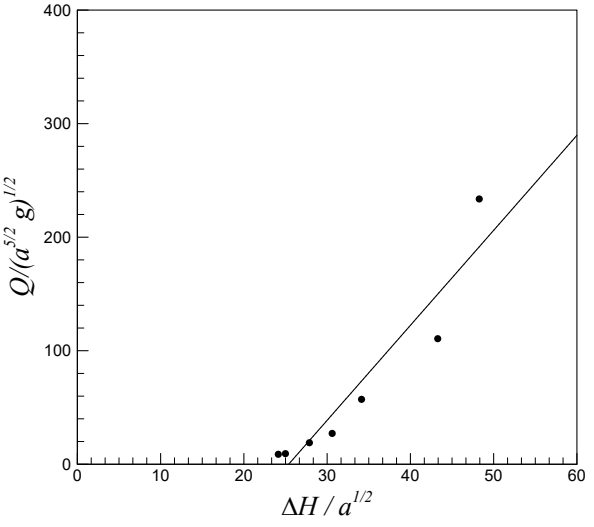
[그림 3.3.37] 무차원 수두차에 따른 무차원 유량

○ 그림 3.3.37에서 무차원 수두차와 무차원 유량은 서로 비례하는 관계에 있음을 확인할 수 있음

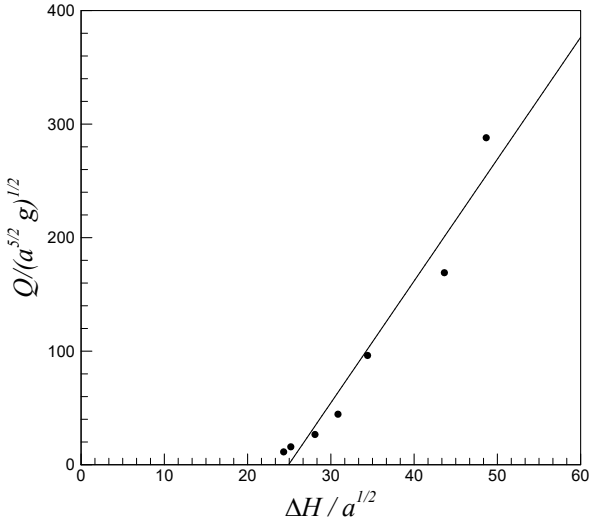
○ 동일한 수두차이(△H)에 대한 실험결과를 나타내면 아래 그림과 같으며, 무차원 수두차이와 무차원 유량 사이의 비례 관계를 보다 명확히 볼 수 있음



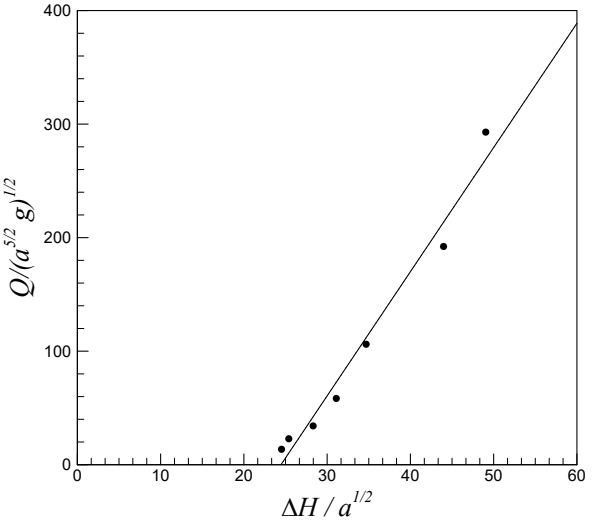
(a) $\triangle H = 61.5\,\mathrm{cm}$



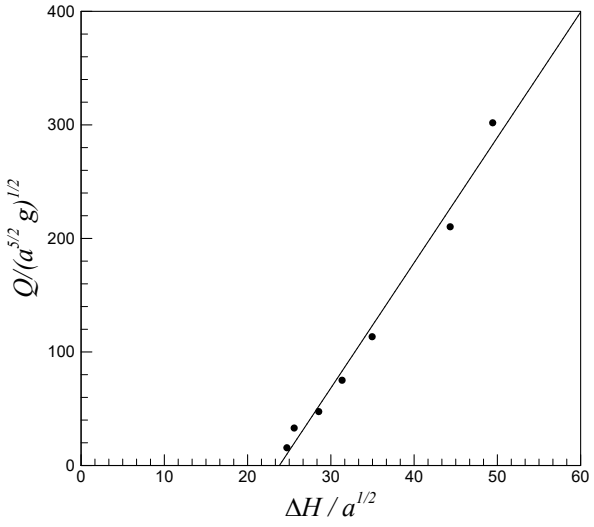
(b) $\triangle H = 62.0\,\mathrm{cm}$



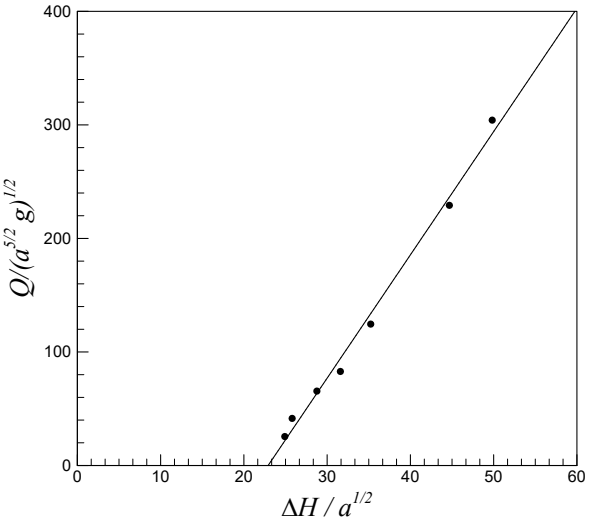
(c) $\triangle H = 62.5\,\mathrm{cm}$



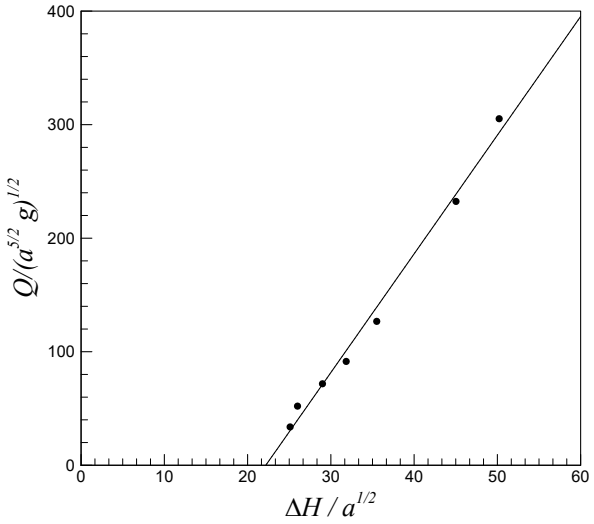
(d) $\triangle H = 63.0\,\mathrm{cm}$



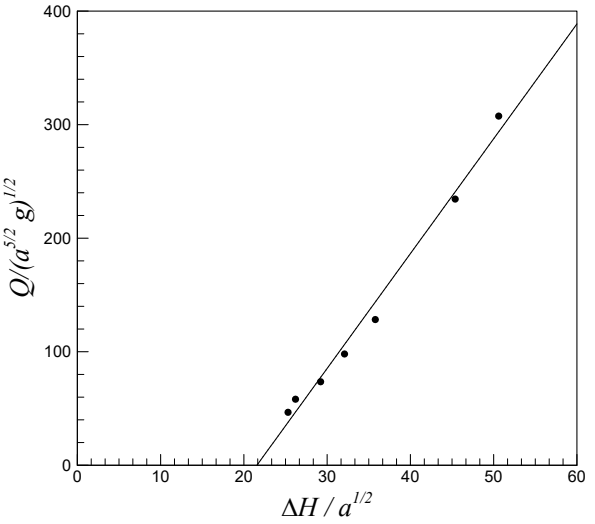
(e) $\triangle H = 63.5\,\mathrm{cm}$



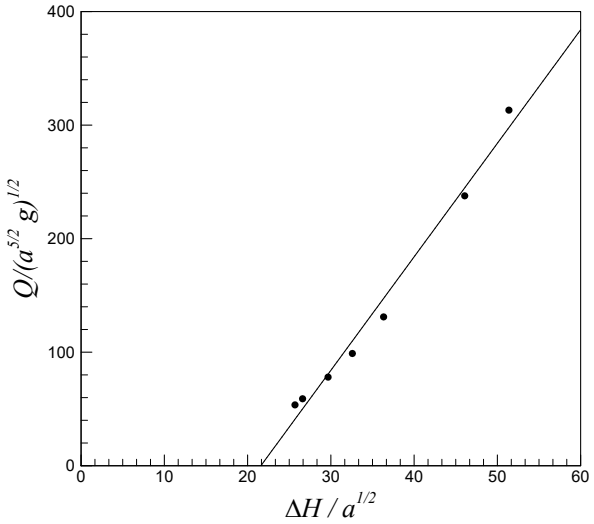
(f) $\triangle H = 64.0\,\mathrm{cm}$



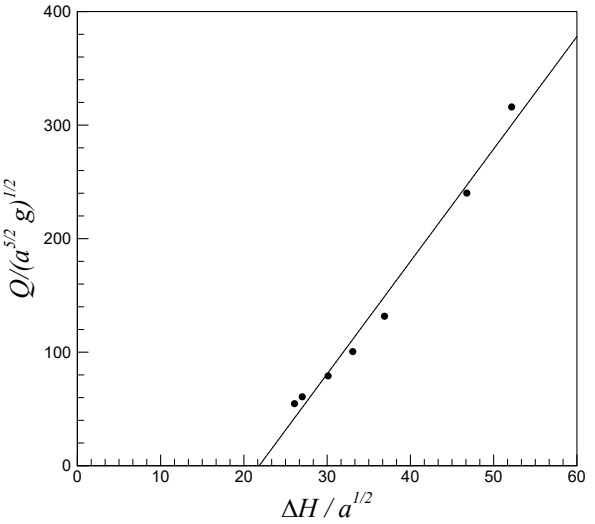
(g) $\triangle H = 64.5\,\mathrm{cm}$



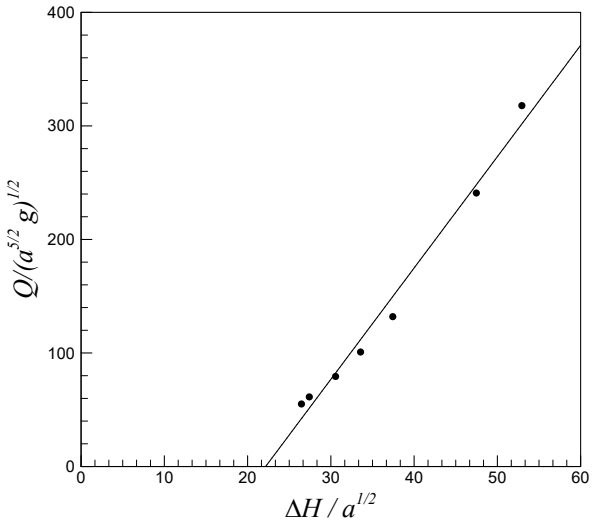
(h) $\triangle H = 65.0\,\mathrm{cm}$



(i) $\triangle H = 66.0\,\mathrm{cm}$



(j) $\triangle H = 67.0\,\mathrm{cm}$



(k) $\triangle H = 68.0\,\mathrm{cm}$

[그림 3.3.38] 수두차 $\triangle H$가 동일한 조건에서 무차원 수두차에 따른 무차원 유량

○ 그림 3.3.38에서 (a), (b)의 조건은 사이펀이 거의 작동하지 않는 조건이므로 무차원 수두차이 및 무차원 유량 사이의 선형의 관계가 나타나기는 하나 편차가 비교적 크게 나타남

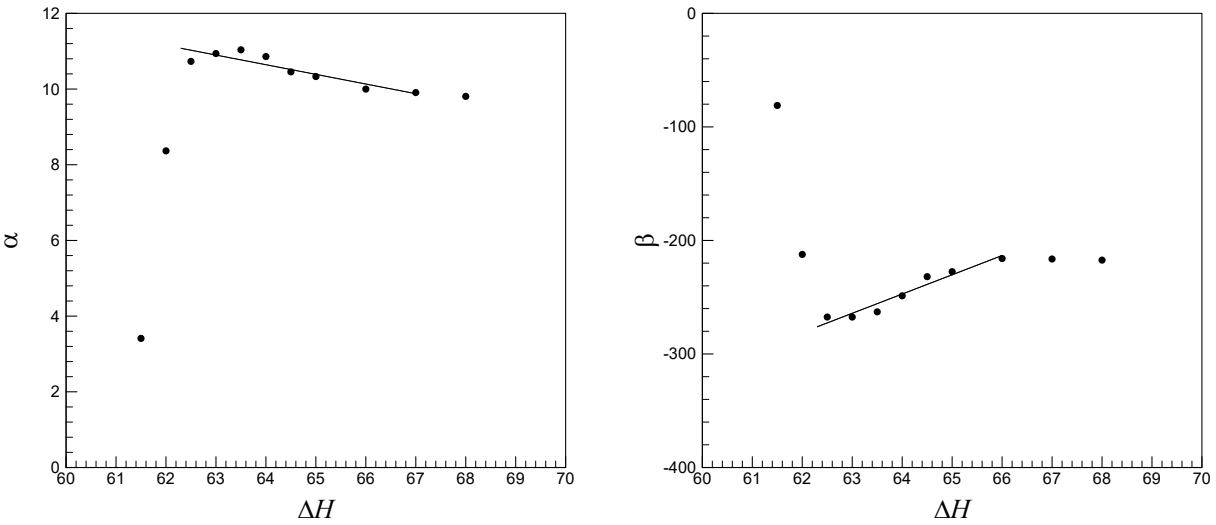
○ 그림 2의 (c) ~ (f)는 공기가 혼입된 사이펀 방류 조건으로 무차원 수두차이가 증가함에 따라 무차원 유량도 증가하는 경향이 뚜렷이 보임

○ 무차원 수두차이와 무차원 유량 사이의 관계를 $\frac{Q}{\sqrt{a^{5/2}g}}=\alpha\frac{\triangle H}{\sqrt{a}}+\beta$로 가정하고, 각 수두차이 $\triangle H$에 따른 계수 α 및 β값을 정리하면 다음 표와 같음

○ 무차원 수두차이와 무차원 유량 사이의 관계를 선형의 관계로 가정했을 때, R^2 값은 평균 0.967로 나타나 실험데이터와 추세선 사이의 상관관계가 큰 것을 알 수 있음

[표 3.3.16] 수두차 $\triangle H$에 따른 α, β 추산 결과

수두차이 (ΔH,cm)	α	β	R^2
68.0	9.806	−217.35	0.9831
67.0	9.907	−216.35	0.9839
66.0	9.999	−215.93	0.9845
65.0	10.331	−227.5	0.9868
64.5	10.453	−231.9	0.9903
64.0	10.859	−248.78	0.9918
63.5	11.037	−262.88	0.9848
63.0	10.938	−267.49	0.9746
62.5	10.732	−267.46	0.9519
62.0	8.367	−212.31	0.8916
61.5	3.412	−81.123	0.9086



(a) 수두차이 및 α의 관계 (b) 수두차이 및 β의 관계

[그림 3.3.39] 수두차 $\triangle H$ 및 α, β 관계

○ 표 3.3.16을 그림으로 나타내면 그림 3.3.39과 같으며, 그림 3.3.39에서 수두차이 $\triangle H$가 62.5 cm 보다 낮은 경우는 사이펀 내부를 자연 월류하는 흐름으로 사이펀 흐름이 아니기 때문에

α 및 β의 경향이 $\triangle H$가 62.5 cm 보다 큰 경우와 반대 경향을 보임

○ 사이펀 내부를 자연 월류하는 흐름이 발생하는 $\triangle H \leq 62.5$ cm 인 조건과 사이펀이 만관인 상태로 가동되어 공기유입이 발생하지 않는 $\triangle H \geq 67.0$ cm 인 조건을 제외한 나머지 조건(Air slot을 통한 공기 유입이 큰 영향을 미치는 조건)에 대해 무차원 수두차이 - 무차원 유량 관계를 검토할 필요가 있음

○ 공기의 유입이 사이펀 방류량에 영향을 크게 미치는 수두차이 62.5 ~ 66.0 cm에서 $\triangle H$와 α 및 β의 관계를 추산하면 그림 3.3.39의 실선과 같으며, 관계식은 식 (3.3.17) - (3.3.19)와 같음

$$\frac{Q}{\sqrt{a^{5/2}g}} = \alpha \frac{\triangle H}{\sqrt{a}} + \beta \tag{3.3.17}$$

$$\alpha = -0.265 \triangle H + 27.603 \tag{3.3.18}$$

$$\beta = 16.961 \triangle H - 1332.700 \tag{3.3.19}$$

4. 방류량 조절이 가능한 사이펀 여수로 운영지침

가. 금전저수지 사이펀 여수로 모의 운영

○ 2004년 8월 18일 태풍 메기로 인해 극한 강우가 발생하였을 때 금전저수지에 설치된 사이폰 여수로의 능력을 최대한 활용하여 위기를 극복하였음. 본 연구에서 방류량 조절이 가능한 사이펀 여수로 운영지침 검토를 위해 저수지 모의운영을 통하여 태풍 메기 사상을 재현하고 이를 바탕으로 운영지침 자료로 활용하고자 함.

(1) 검토 대상 유역 현황 및 태풍 메기

(가) 검토 대상 유역

○ 금전저수지가 위치한 한천천은 영산강 제2지류로서 유역면적 32.96㎢, 유로연장 10.48㎞, 유역평균고도E.L 208.93m, 유역평균경사 42.31%인 지방하천임.

○ 한천천은 전라남도 화순군 한천면에 위치한 천운산(EL.604.7m)에서 발원하여 남서쪽으로 흐르다가 우안에 오음소하천이 유입되는 지점에서 서쪽으로 방향을 선회한 이후 우안에 오음소하천과 지방하천 결우천이 유입된 후 금곡저수지에 유입됨. 금곡저수지를 지난 후 모산마을을 지나 지석천에 유입됨. 금전저수지는 한천천 하류부에 위치하고, 유역 면적은 31.86㎢이며, 유로연장은 9.12㎞임.



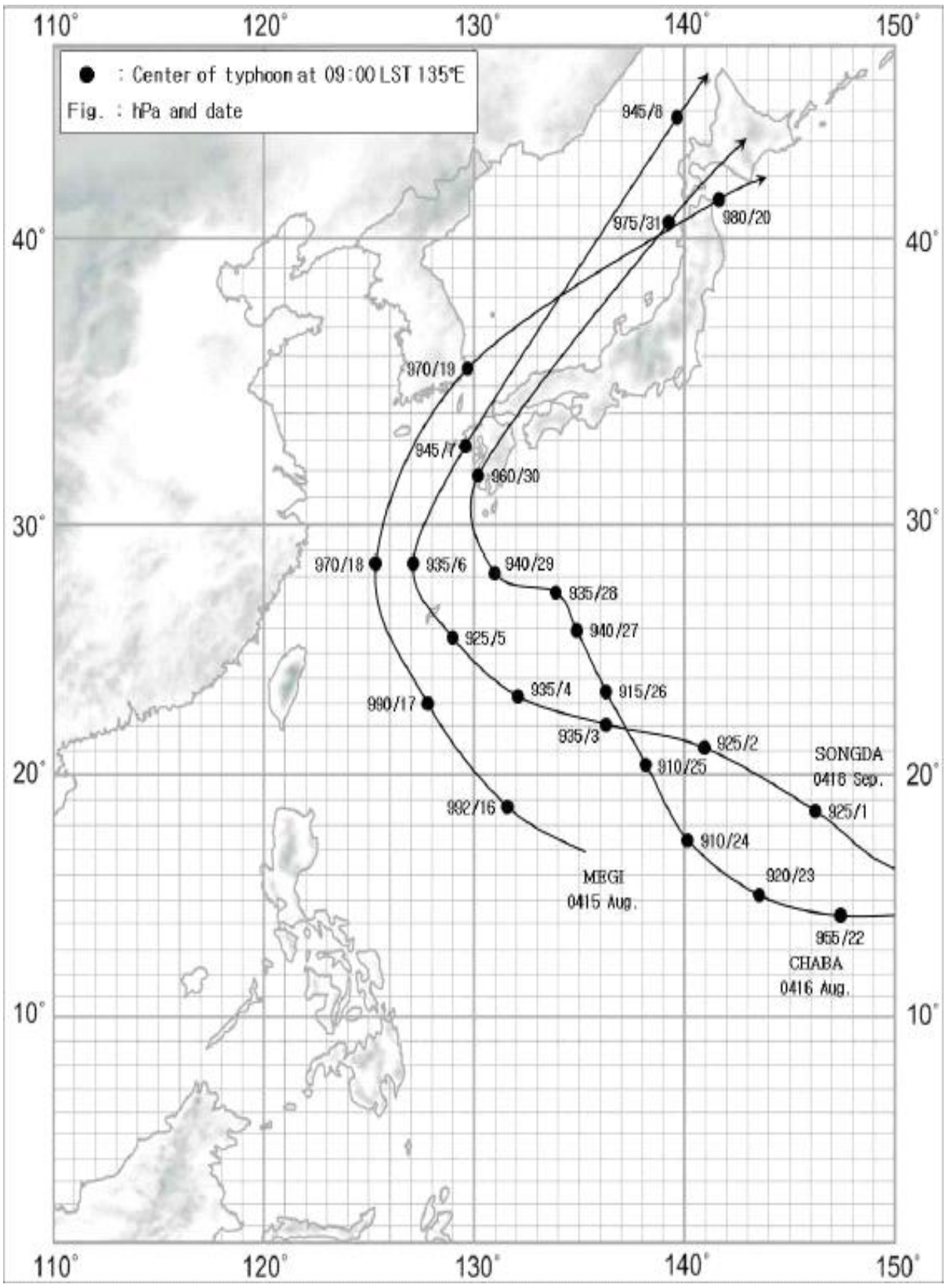
[그림 3.4.1] 금전저수지 평면도

[표 3.4.1] 유역 면적 및 유로연장

구 분	유역면적	유로연장
한천천	32.96㎢	10.48㎞
금전저수지	31.86㎢	9.12㎞

(나) 태풍 메기

○ 태풍 메기는 2004년 8월 16일부터 8월 20일까지 활동한 태풍으로 금전저수지가 위치한 전라남도 및 경상남도에 많은 비를 내렸음.



[그림 3.4.2] 2004년 메기 태풍 경로

(2) 저수지 홍수추적을 위한 모형의 구축

○ 저수지 홍수추적을 위해서는 유입량, 수위별 방류조건, 저수지 수위-저류량, 홍수기 저수지 운영조건 등이 필요함.

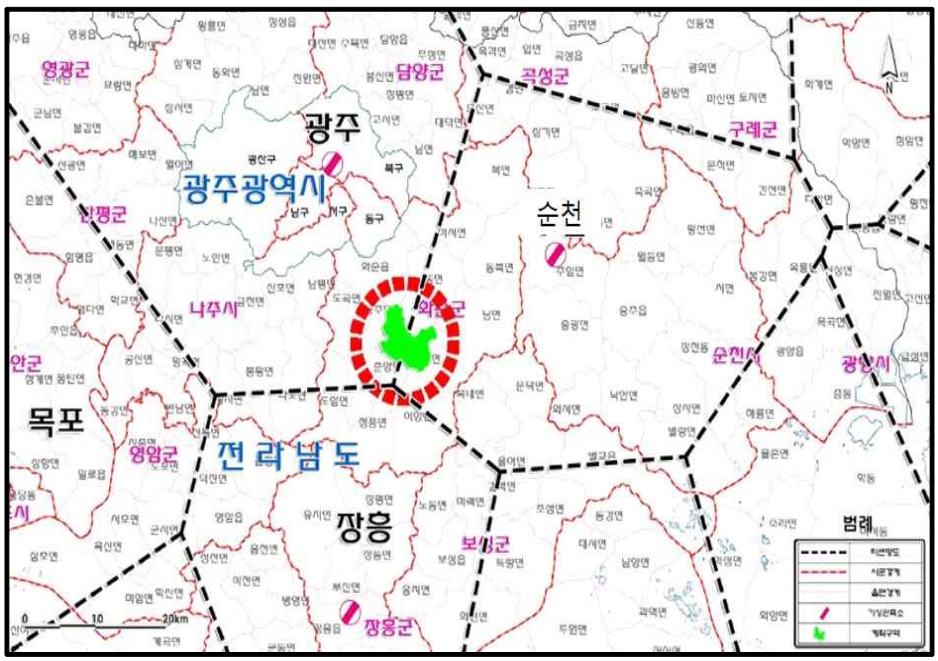
○ 모형의 구축에서 유량의 유입조건은 매우 중요한 요소로 계측자료를 사용하는 것이 바람직함. 그러나 금전저수지 유역에 유량 관측소가 없어서 금전저수지 인근에 위치한 강우관측소의 강우자료를 바탕으로 Clark 유역추적법을 적용하여 태풍 메기로 인항 유입량을 추정함. 수위별 방류조건은 사이폰공식을 이용하여 금전저수지에 설치된 8개 사이폰 여수로의 각 수위별 방류량을 산정하여 이를 적용함.

○ 저수지의 수위-저류량 및 홍수기 운영조건은 한국농어촌공사로부터 제원 및 운영조건을 제공받아 적용함.

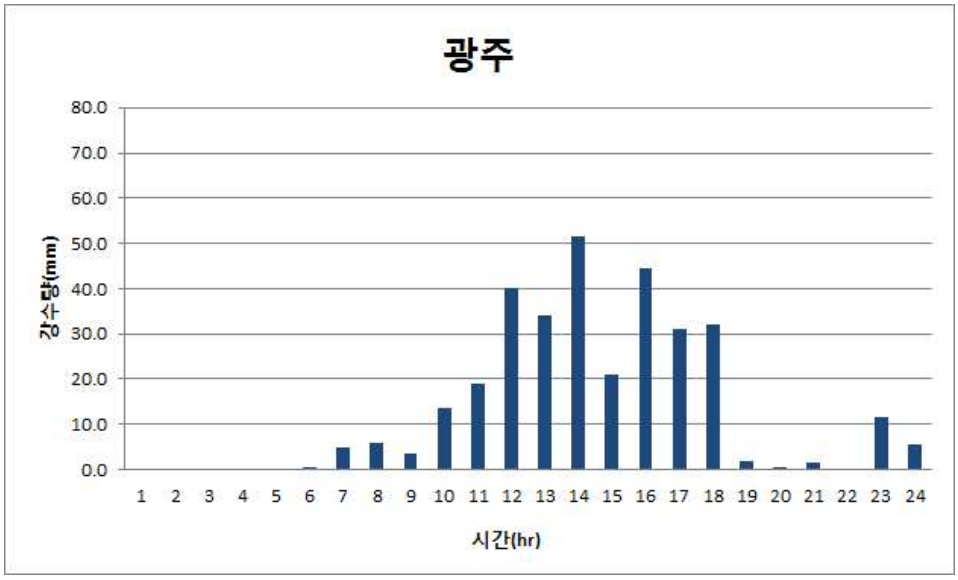
(가) 유입량의 추정

① 기상청관할 강우관측소

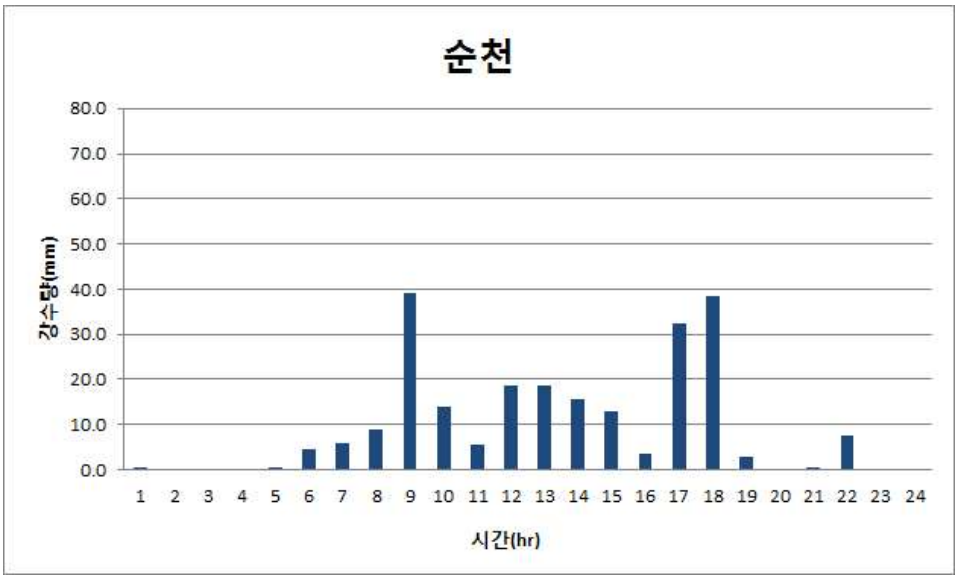
○ 금전저수지 유역 인근에 위치한 기상청관할 관측소는 광주, 순천, 장흥관측소가 있음. 태풍 메기가 금전저수지에 영향을 미친 2004년 8월 18일 일 강수량은 광주 322.5㎜, 순천 230.0㎜, 장흥 328.0㎜ 으로 관측되었음.



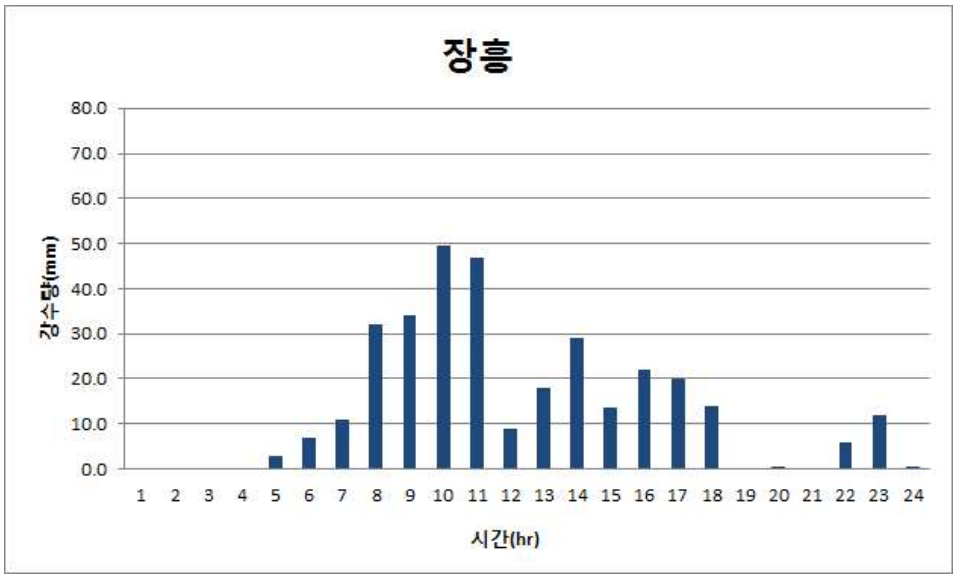
[그림 3.4.3] 금전저수지 부근 기상청 관할 관측소 현황



[그림 3.4.4] 광주관측소 2004년 8월 18일 강우량



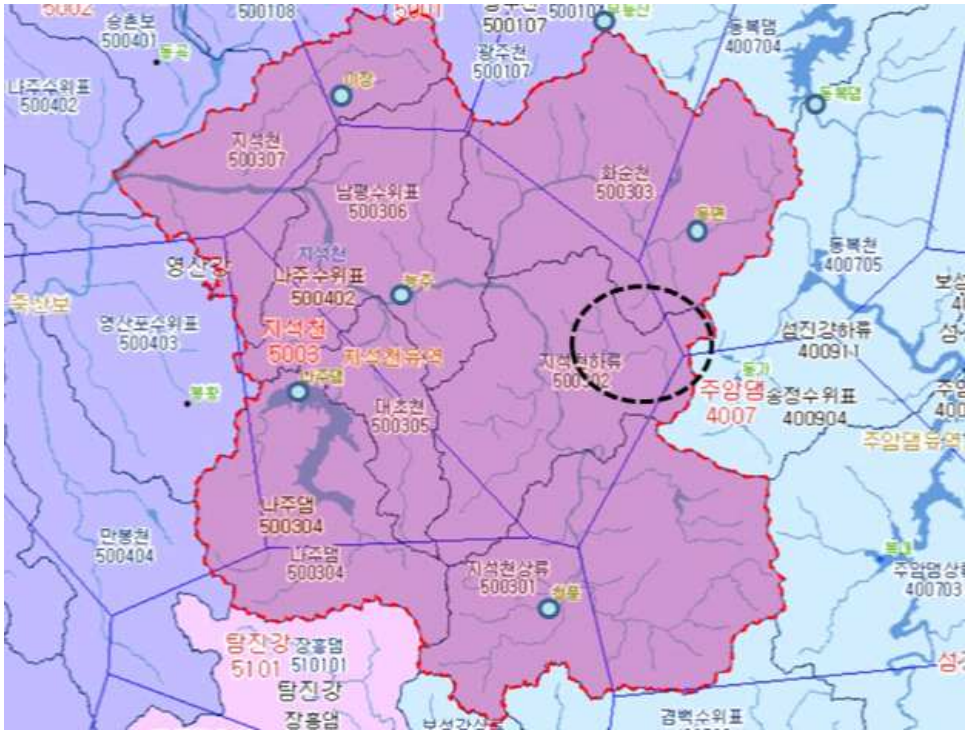
[그림 3.4.5] 순천관측소 2004년 8월 18일 강우량



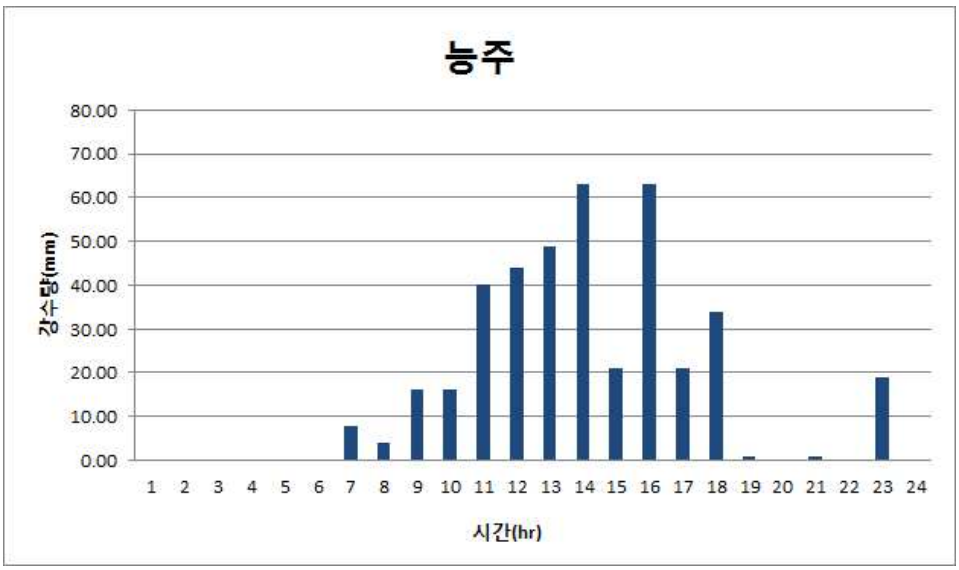
[그림 3.4.6] 장흥관측소 2004년 8월 18일 강우량

② 국토교통부 관할 관측소 강우자료

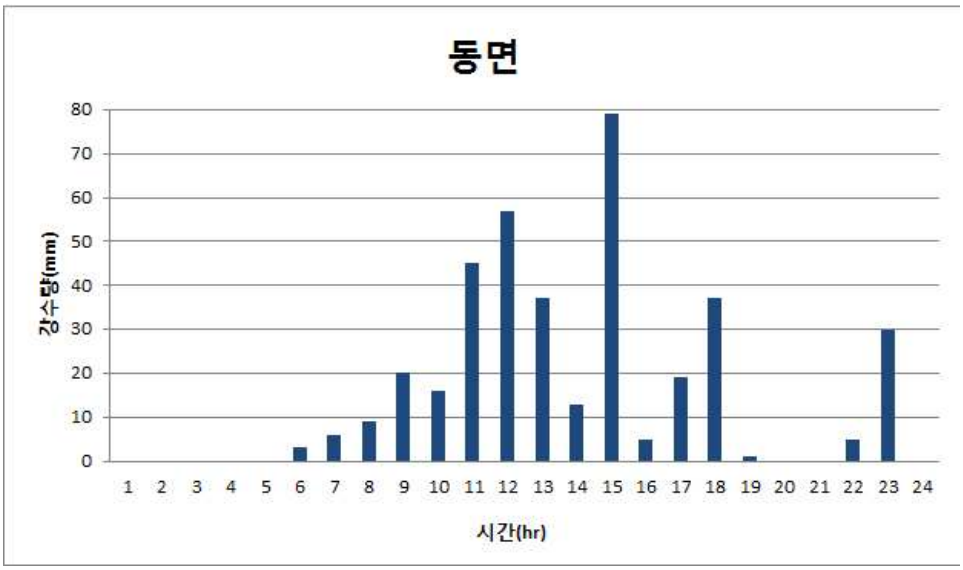
○ 금전저수지 유역 인근에 위치한 국토교통부 관할 관측소는 능주 및 동면 관측소가 있음. 2004년 8월 18일 일 강수량은 능주 400.0㎜, 동면 382.0㎜로 기상청 관측소의 일강우량 보다 큼.



[그림 3.4.7] 국토교통부 관할 강우 관측소 현황



[그림 3.4.8] 능주관측소 2004년 8월 18일 강우량

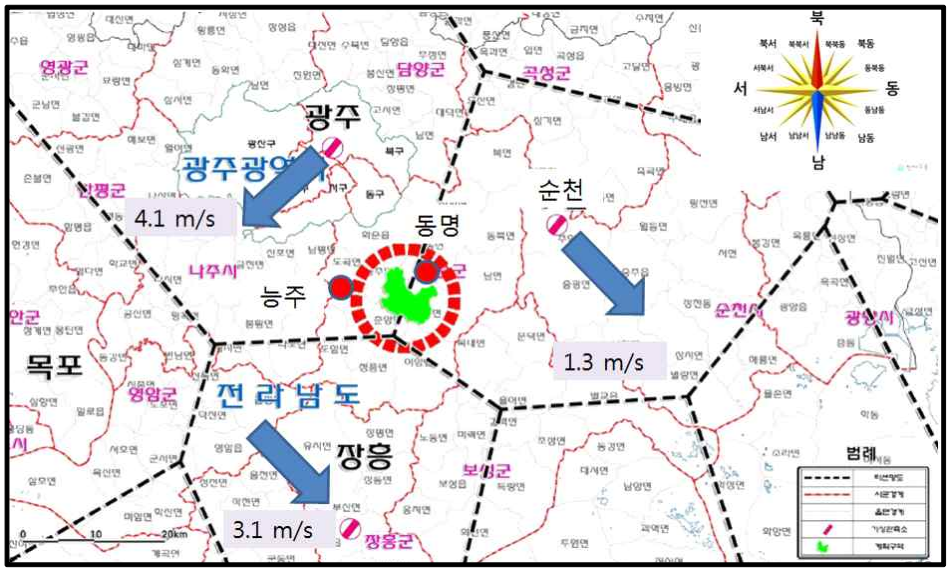


[그림 3.4.9] 동면관측소 2004년 8월 18일 강우량

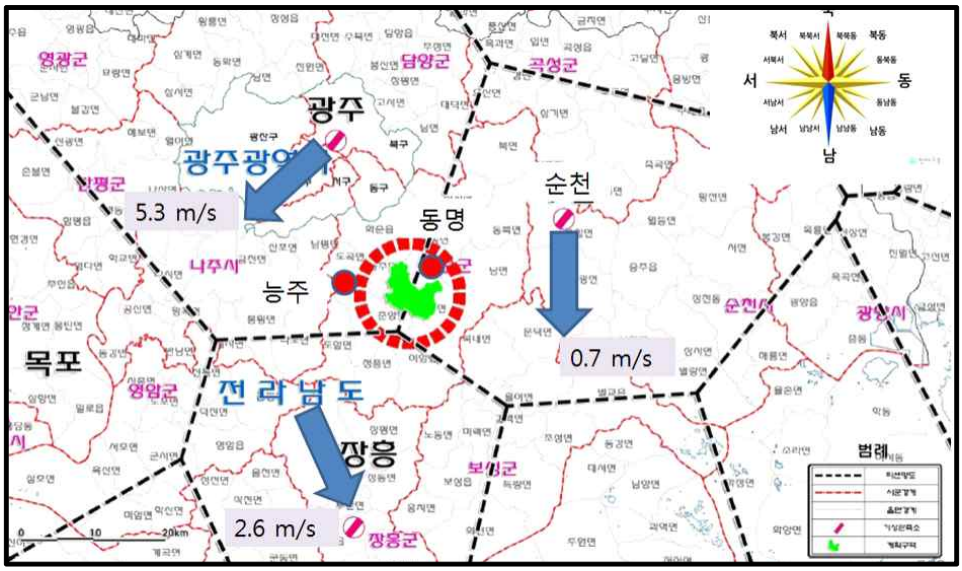
③ 풍향과 풍속에 따른 강우의 이동 검토

○ 금전저수지 유역 인근에 위치한 능주 관측소와 동면관측소의 강우자료가 1시간의 시간 간격으로 강우의 발행 양상이 차이를 보임. Marshall(1980)은 219개 폭풍의 강우분포를 검토하여 강우의 이동은 바람의 방향과 세기에 영향을 많이 받음을 보임. 본 연구에서 태풍 메기 발생 시 풍향 및 풍속의 변화와 강우량의 변화를 비교・검토함.

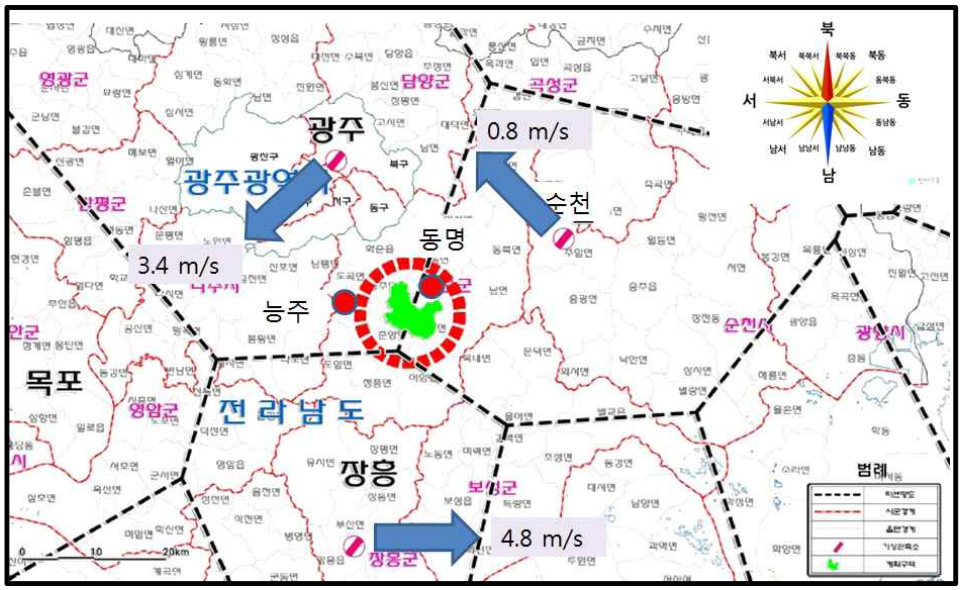
○ 풍향 및 풍속의 관측이 이루어지는 3개의 기상청 관할 관측소의 풍향 및 풍속 검토결과 최대 강우량이 발생하는 15:00~18:00에 금전저수지 유역은 북동풍의 영향을 받은 것으로 추정됨. 따라서 금전저수지 유역 북동방향에 위치한 동면관측소 강우자료에 강우이동시간을 고려할 경우 1시간 차이가 나는 강우가 영향을 미쳤을 것으로 추정됨. 추정자료를 유출모형 적용 시 불확실성의 증가가 예상되므로 본 연구에서 동면 관측소 강우자료와 1시간 차이로 비슷한 양상의 강우를 보이는 능주 관측소 자료를 적용하여 유출모의를 수행함.



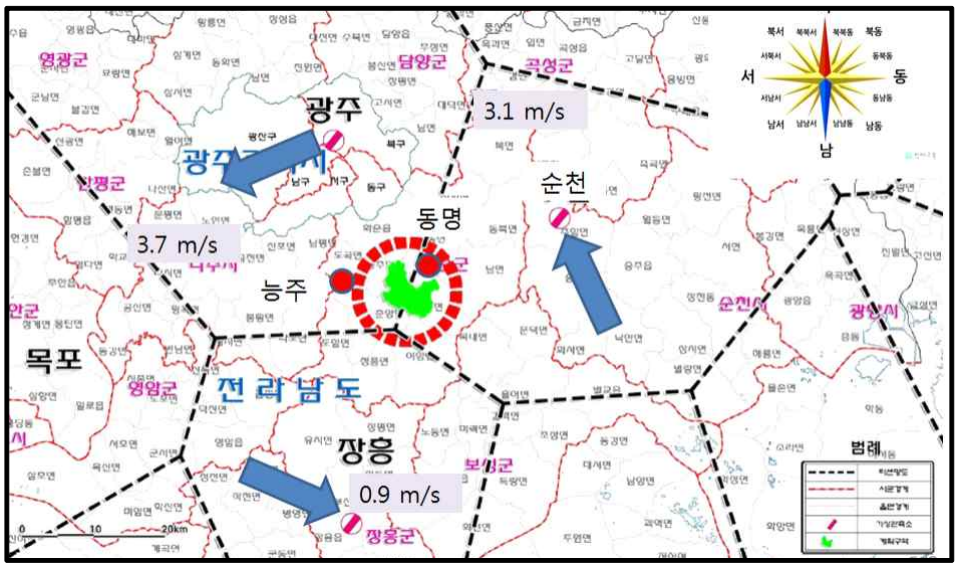
[그림 3.4.10] 2004년 8월 18일 15:00 풍향 및 풍속현황



[그림 3.4.11] 2004년 8월 18일 16:00 풍향 및 풍속현황



[그림 3.4.12] 2004년 8월 18일 17:00 풍향 및 풍속현황



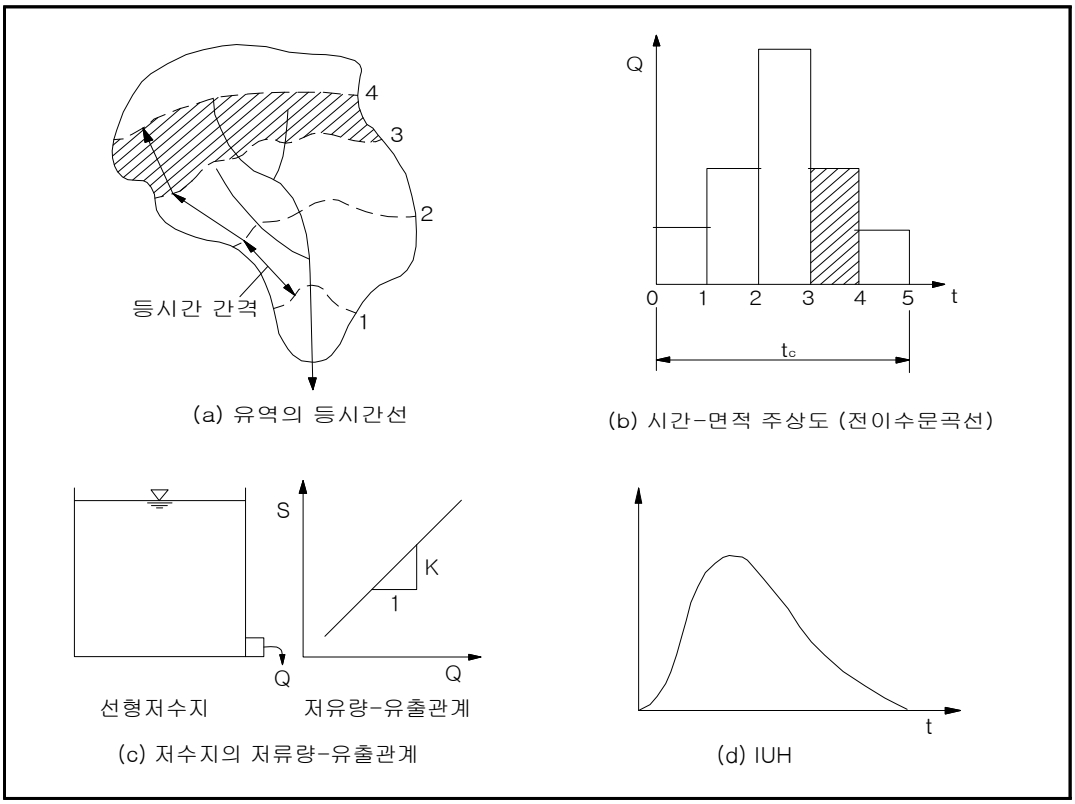
[그림 3.4.13] 2004년 8월 18일 18:00 풍향 및 풍속현황

④ Clark 유역추적법

○ 자연하도구간에서의 유량은 추적구간으로의 유입수문곡선이 저류효과와 단순 전이 효과에 의해 감쇠 및 지체 현상을 거치면서 하류로 이동함. Clark는 이러한 현상을 모의하기 위해 유역의 출구에 1개의 선형저수지가 있다고 가정하고, 이 가상저수지로의 유입량은 도달시간구간별 면적상에 내린 유효우량을 유량으로 환산한 값으로 보았음.

○ 유역출구에 있는 가상저수지로의 유입량은 유역전반에 걸쳐 순간적으로 내린 단위유효우량으로 계산함. 도달시간-구간면적곡선을 이용하여 단순 전이를 고려함. 가상저수지에 의한 유역의 저류효과는 해당유역과 동등한 저류특성을 갖는 선형저수지의 홍수추적을 통하여 고려함.

○ Clark의 유역추적법은 유출의 전이현상뿐 아니라 유역의 저류효과도 고려하여 실제 유역의 유출특성을 구체적으로 기술할 수 있으므로 자연유역에 적용하기 적합한 방법임.



[그림 3.4.14] Clark 단위도의 개념

○ 유역의 유출현상을 단순전이에 의해 계산한 가상저수지로의 유입량는 다음과 같이 계산됨.

$$I_i = \frac{A_i \times 10^6}{\Delta t \times 3{,}600 \times 100} = 2.778\frac{A_i}{\Delta t} \qquad (3.4.1)$$

여기서 I_i는 i번째 시간구간에서의 유입량(㎥/s), A_i는 i번째 시간구간에 포함되는 유역면적(㎢), Δt는 단위시간임. 가상저수지에서의 홍수추적은 선형성 가정에 의해 다음과 같이 표현됨.

$$S = K \cdot O \qquad (3.4.2)$$

여기서 S는 저류량(㎥), O는 유출량(㎥/s), K는 저류상수(hr)이며, 하천구간에서의 연속방정식은 다음과 같이 표현됨.

$$\bar{I} - \bar{O} = \frac{\Delta S}{\Delta t} \qquad (3.4.3)$$

이를 추적기간의 시점과 종점의 항으로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{I_1 + I_2}{2}\Delta t - \frac{O_1 + O_2}{2}\Delta t = K(O_2 - O_1) \qquad (3.4.4)$$

여기서, I_1는 홍수추적기간 시점의 유입량, I_2는 홍수추적기간 종점의 유입량 O_1는 홍수추적기간 시점의 유출량 O_2는 홍수추적기간 종점의 유출량임. 변형된 저류방정식을 O_2에 관해 풀면 다음과 같이 정리되며, 계수m_o, m_1, m_2는 저류상수 K와 시간간격 Δt를 결정하면 산정 가능함.

$$O_2 = m_o I_2 + m_1 I_1 + m_2 O_1 \qquad (3.4.5)$$

여기서

$$m_o = m_1 = \frac{0.5\Delta t}{K + 0.5\Delta t}, \quad m_2 = \frac{K - 0.5\Delta t}{K + 0.5\Delta t} \qquad (3.4.6)$$

상기 저류방정식의 적용에 있어서 도달시간-누가면적곡선으로부터 작성되는 시간-면적주상도의 경우에는 추적기간Δt의 시점 및 종점 유입량이 동일(I_1=I_2)하므로 다음과 같이 재정리되며, 이를 이용하여 유입수문곡선을 추적기간별로 축차 추적함으로써 유역출구점의 순간단위도(IUH)의 종거를 결정할 수 있다.

$$O_2 = (m_0 + m_1)I + m_2 O_1 \qquad (3.4.7)$$

순간단위도(IUH)를 이용하여 필요한 지속기간의 단위도를 작성하기 위해서는 t 시간만큼 오른쪽으로 지체시켜 2개의 IUH의 t 시간 간격 종거를 매 시각 평균하여 지속기간 t 시간 단위도를 작성하는 정수배방법에 의한 단위도의 지속기간 변환 방법을 주로 적용함.

⑤ 매개변수의 추정

- Clark의 유역추적법으로 홍수량을 산정하기 위한 매개변수는 집중시간(T_c)과 저류상수(K)가 있음. 집중시간은 계측유역에서는 유효우량 끝에서 수문곡선 변곡점까지 시간 등으로 결정할 수 있으며, 미계측 유역에서는 Kraven공식(I), Kraven공식(II), Rziha공식, Kirpich공식 등과 같은 경험공식으로 도달시간으로 산정하여야 함.
- 금회 대상유역은 계측된 홍수유출 수문곡선 자료가 전무한 미 계측지역으로 경험공식을 적용하여 도달시간을 산정하였음. 경험공식을 적용하여 산정한 도달시간 중 평균유속이 3.5m/s로 일반적으로 홍수기 하도유속으로 가장 타당한 Kraven공식(II)의 산정 결과를 도달시간으로 결정하였음.

[표 3.4.2] 도달시간의 산정

구 분	유역면적	유로연장	도달시간 (hr)			
			Kraven I	Kraven II	Rziha	Kirpich
금전저수지	31.86㎢	9.12㎞	0.60 (4.23m/s)	0.72 (3.5m/s)	1.61 (1.57m/s)	1.86 (1.36m/s)

○ 저류상수는 호우사상별 강우-유출자료가 있는 계측유역의 경우에는 계측된 수문곡선으로부터 추정할 수 있는 방법이 있으나 미 계측 유역의 경우 여러 가지 경험공식을 적용한 결과를 비교 검토하여 저류상수 K값을 최종적으로 결정함. 우리나라의 경우 실측자료가 부족하여 이론적인 방법에 의하여 결정하기 어려워 실무에서 주로 사용되고 있는 경험공식을 이용하여 저류상수를 결정하고 있음. 저류상수 공식은 다음과 같음.

• Clark 공식 $$K = C\frac{L}{\sqrt{S}} \quad (3.4.8)$$

• Linsley 공식 $$K = \frac{bL\sqrt{A}}{\sqrt{S}} \quad (3.4.9)$$

여기서 K는 저류상수(hr), L은 유로연장(㎞), A는 유역면적(㎢), S는 평균하도경사(%), C는 0.5～1.4 범위의 상수, b는 0.01～0.03 범위의 상수임.

• Russel 공식(「Flood Runoff Analysis(USACE, 1994)」) $$K = \alpha T_c \quad (3.4.10)$$

여기서 K는 저류상수(hr), α는 도시지역은 1.1～2.1, 자연지역은 1.5～2.8, 산림지역은 8.0～12.0 범위, T_c는 도달시간(hr)임.

• Sabol 공식(「Flood Runoff Analysis(USACE, 1994)」)

$$K = \frac{T_c}{1.46 - 0.0867\frac{L^2}{A}} \quad (3.4.11)$$

여기서, K는 저류상수(hr), T_c는 도달시간(hr), L은 유로연장(km), A는 유역면적(㎢)이다.

○ 본 연구에서는 도달시간과 유역면적 및 유로연장 등 유역특성을 반영할 수 있는 Sabol 공식을 채택하여 저류상수 K값을 결정하였음.

[표 3.4.3] 저수상수의 선정

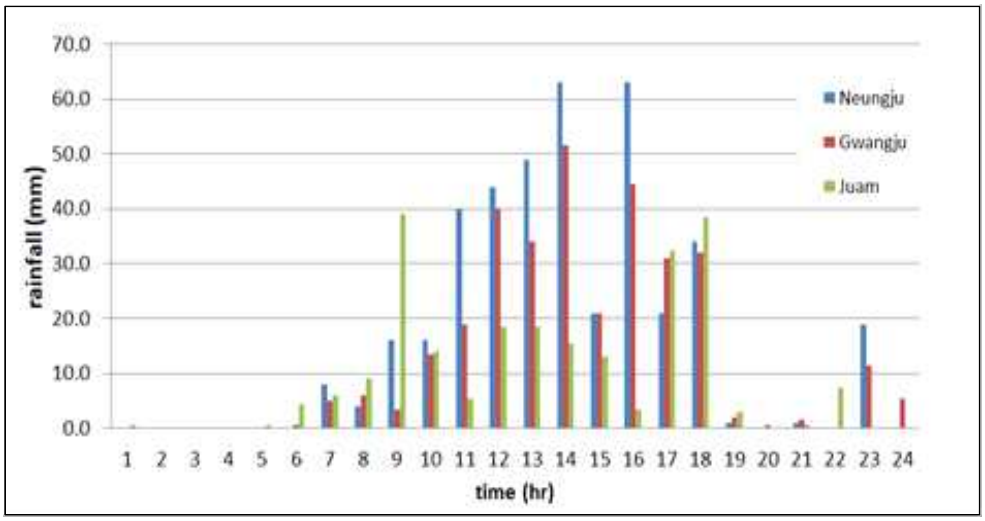
구 분	유역면적	유로연장	도달시간(hr)			
			Clark	Russel	Sabol	Linsley
금전저수지	31.86㎢	9.12㎞	18.56	1.09	0.59	0.63

⑥ 강우분포방법을 이용한 강우시나리오 구축

○ 2004년 8월 18일에 발생한 단일 강우사상을 대상으로 하여 태풍메기로 인하여 발생한 능

주관측소의 일강우와 광주, 주암관측소의 일강우의 상관관계를 검토함.

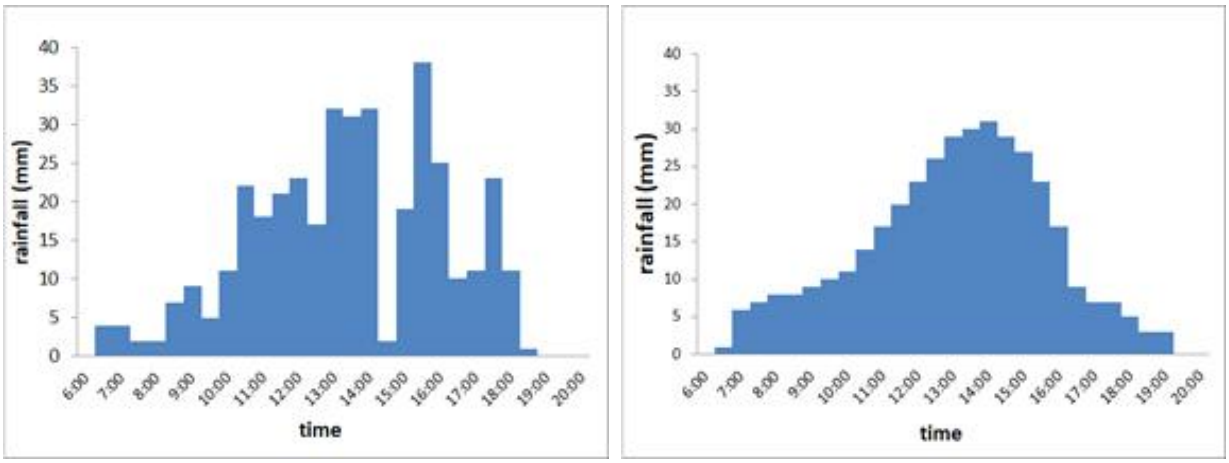
○ 상관계수가 높게 나온 광주관측소의 Huff분포 무차원 누가곡선을 적용함.



[그림 3.4.15] 능주, 광주, 주암관측소 강우량 (2004.08.18.)

[표 3.4.4] Huff 분포 적용을 위한 상관계수 검토결과

Rainfall Station	Rainfall in Aug.18, 2004	Correlation coefficient
Neungju	400.0㎜	-
Gwangju	322.5㎜	0.950
Juam	230.0㎜	0.428



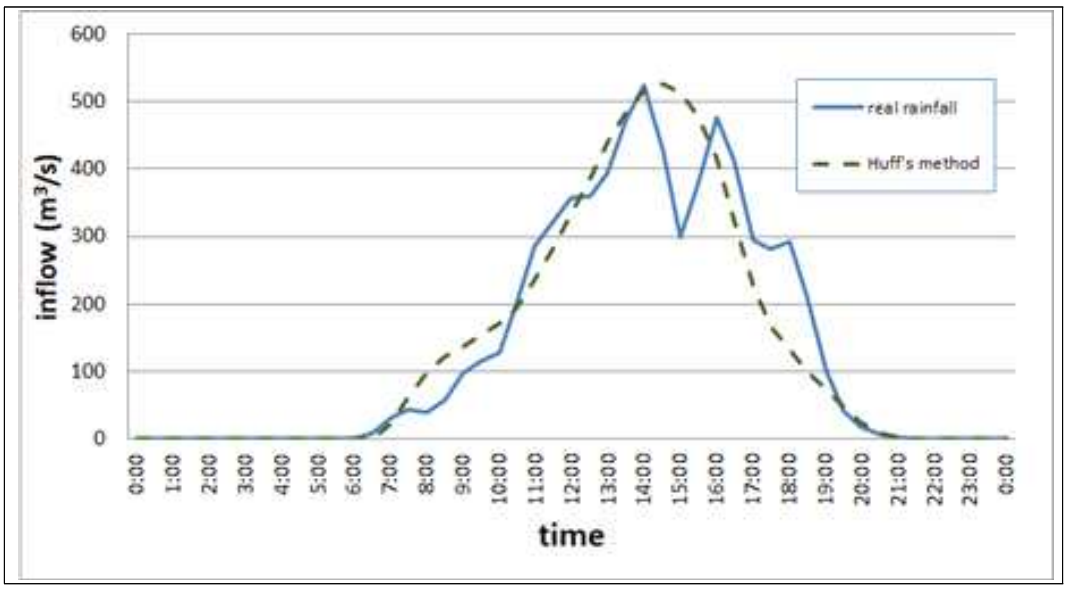
(a) 태풍메기 실강우량(능주관측소) (b) Huff 분포를 이용한 강우시나리오

[그림 3.4.16] 금전저수지 주변 강우시나리오 비교

(나) 유입량 산정결과

○ 태풍메기 발생 시 능주관측소 강우자료와 Clark 유역추적법을 이용하여 추정한 유입량은 [그림 3.4.17]과 같음. 추정 결과 집중강우 중간에 소강상태가 발생하는 강우특성이 잘 반영되어 있으며, 첨두 유입량은 524.2㎥/s으로 추정되었음.

○ Huff분포를 적용한 강우분포의 강우-유출모형을 적용한 결과 첨두유입량은 526.5㎥/s로 실강우 첨두홍수량과 비슷한 값으로 산정되었음.



[그림 3.4.17] 유입량 추정결과

(다) 금전저수지 사이폰 여수로 수위-방류량

○ 태풍 메기 발생 당시 금전저수지에는 총 8개의 사이폰 여수로가 설치되어 있었으며, 사이폰 공식을 이용하여 산정한 수위별 방류량은 다음 [그림 3.4.18]과 같음.

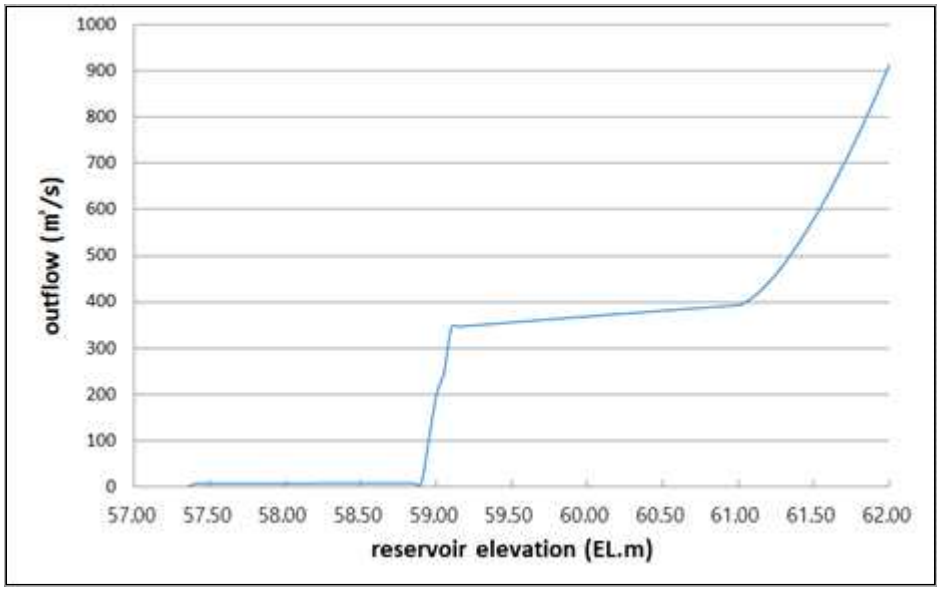
○ 금전저수지의 사이펀은 직경 2.2m의 원형사이펀으로 사이펀 입구부 위치에 차등을 두어 단계적으로 사이펀이 가동되도록 설치되었음.

○ 사이펀 방류량 공식을 적용하 방류량을 산정함.

$$Q = A \times \sqrt{\frac{2g\Delta H}{f_o + f\frac{l_1 + l_2}{D} + f_e + f_{cb}}} \qquad (3.4.12)$$

[표 3.4.5] 금전지 사이펀 규모 및 손실계수

구 분	1기	2기	3기	4기	5기	6기	7기	8기
관경(m)	1.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2
입구부 Elevation (EL. m)	56.5	59.0	59.0	58.97	58.94	58.91	58.88	58.85
길이(m)	21							
손실 계수	유입손실계수(fe) : 0.5, 출구손실계수(fo) : 1.0 곡관손실계수(fcb) : 0.42, 마찰손실계수(f) : 0.012							



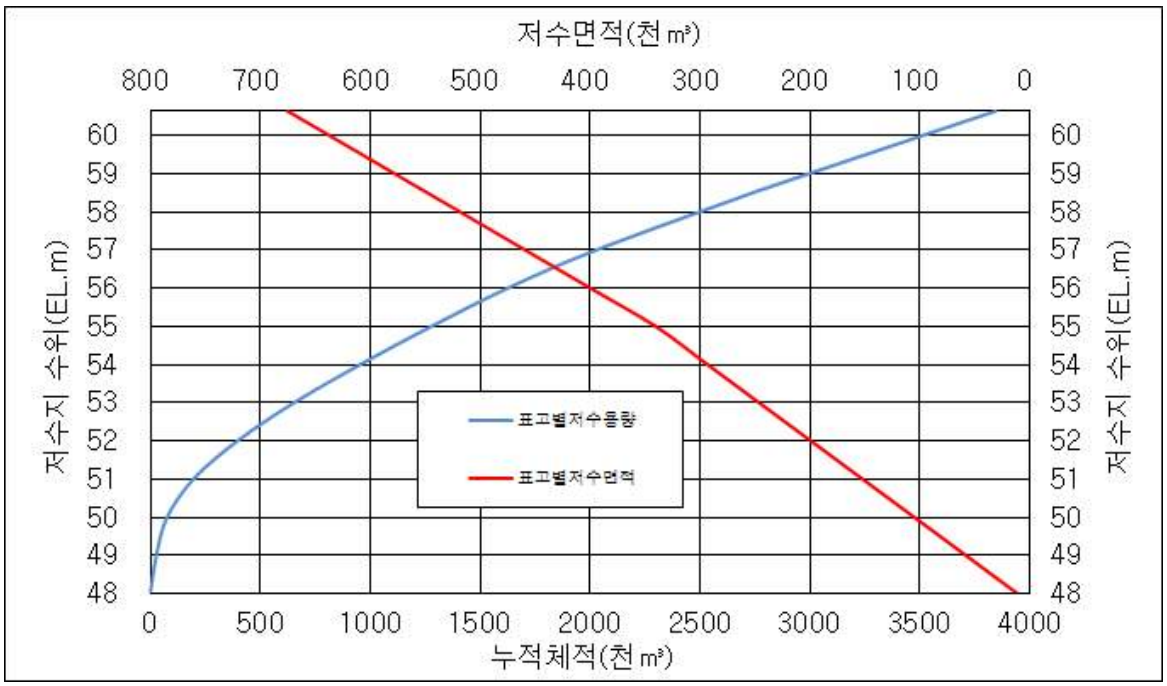
[그림 3.4.18] 금전저수지 수위별 방류량

(라) 금전저수지 제원 및 저수지 수위-저류량

○ 금전저수지는 저수용량 2,813.70천㎥의 저수지로 상시만수위는 EL.57.35m(저수용량 2,027.66천㎥)까지 저류하여 농업용수를 공급하고 있음. EL.58.85m부터 사이폰 여수로를 통하여 방류를 시작하고 홍수위는 EL.59.00m 임. 제당고는 EL.61.00m으로 태풍메기 시 홍수위를 넘어서 제당높이에 근접한 EL.60.53m 높이까지 수위가 상승하였음.

[표 3.4.6] 금전저수지 운영수위

구 분	상시만수위	사이폰 만수위	홍수위	제당높이
금전저수지	EL.57.35m	EL.58.85m	EL.59.00m	EL.61.00m



[그림 3.4.19] 금전저수지 내용적 곡선

(3) 태풍 메기 사상 금전저수지 홍수추적

(가) 저수지 홍수추적

○ 수문·수리조건을 입력 자료로 저수지 홍수추적을 실시하여 저수지에 의한 첨두홍수량 감쇠효과 및 저수지 내의 저류량, 저수지 최고상승수위 등을 검토함. 저수지로 유입하는 홍수는 저수지의 저류효과로 인하여 첨두홍수량이 감소되고 첨두발생시간이 지체되는데 이러한 현상들에 대한 지배방정식은 다음과 같은 저류방정식으로 표현됨.

$$I - O = \frac{dS}{dt} \qquad (3.4.13)$$

여기서 I 는 유입량, O 는 유출량, S 는 저류량임. 위 식이 임의의 시간에서 변화하는 과정은 다음의 식으로 표현됨.

$$\frac{I_{i-1} + I_i}{2}\Delta t - \frac{O_{i-1} + O_i}{2}\Delta t = S_i - S_{i-1} \qquad (3.4.14)$$

여기서 Δt 는 시간간격임. 이 식을 기지항과 미지항으로 나누어 표시하면 다음과 같음.

$$\frac{1}{2}(I_{i-1} + I_i)\Delta t + (S_{i-1} - \frac{1}{2}O_{i-1}\Delta t) = (S_i + \frac{1}{2}O_i\Delta t) \qquad (3.4.15)$$

(나) 금전저수지 운영조건

○ 태풍 메기때 능주관측소 강우자료를 적용하여 추정한 유입량 유입시 다음과 같은 기준에 따라 금전저수지를 운영하는 것으로 운영조건을 적용하였음.

○ 금전저수지 홍수추적 초기 수위는 상시만수위 EL.57.35m로 가정함.

○ 홍수유입 당시 수위가 상시만수위 이하일 경우 상시만수위까지 유입량 전량을 저수지에 저류하고 상시만수위 도달 후 유입홍수량 사이폰 여수로를 이용하여 최대로 방류함.

○ 저수지의 수위가 다시 하강하여 상시만수위에 이르면 상시만수위를 유지할 수 있도록 조절 방류함.

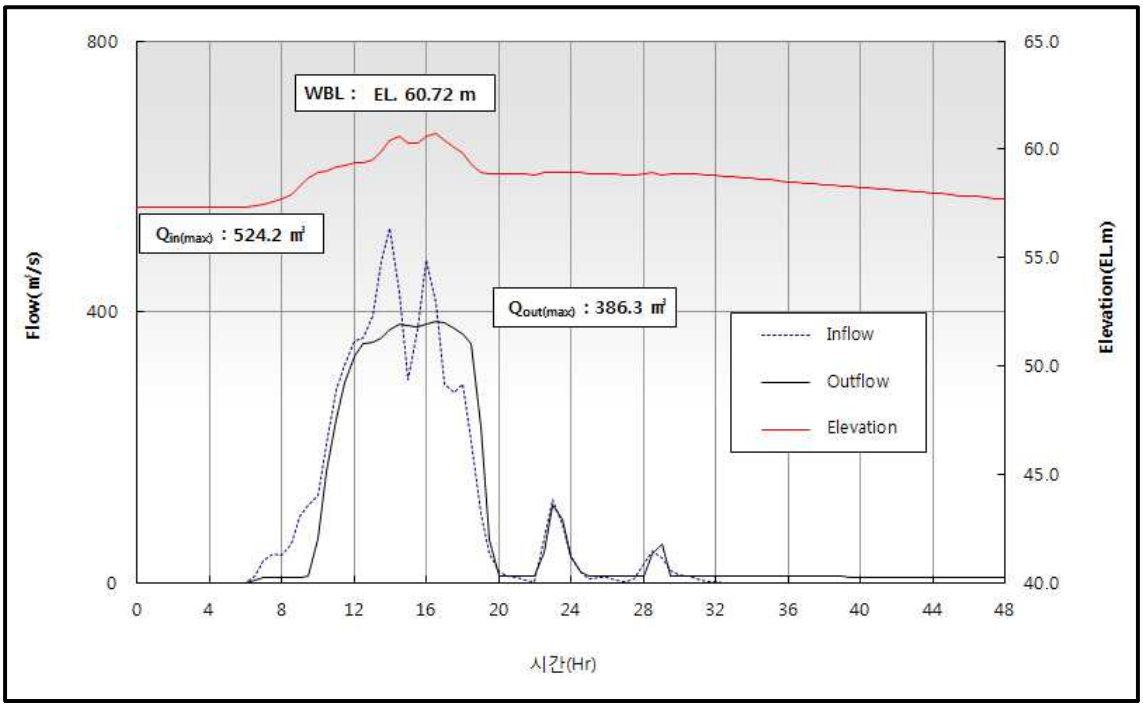
(다) 금전저수지 홍수추적 결과

○ 태풍 메기 사상에 대하여 저수지 홍수추적을 수행한 결과 첨두 유입량 524.2㎥/s일 때 최대 수위는 EL.60.72m까지 상승하였음. 이때 사이폰 여수로의 최대 방류량은 386.3㎥/s가 발생하였음.

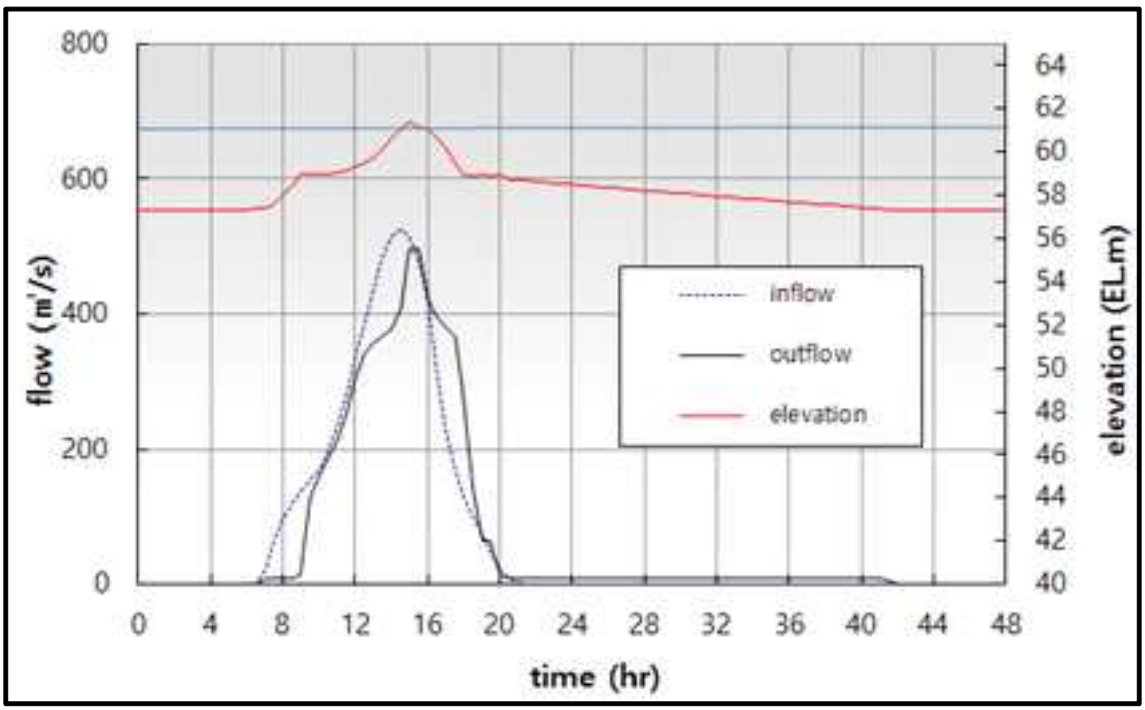
○ Huff분포를 적용한 강우시나리오의 경우 실 강우와 비슷한 첨두 유입량에도 불구하고 저수지가 월류하는 것으로 분석됨.

○ 실 강우의 경우 첨두 유입 후 강우소강상태로 인한 유입량 감소가 발생했으나, 강우시나리오의 경우 지속적으로 유입되어 저수지가 월류하는 것으로 판단됨.

○ 따라서 태풍메기 시 강우중간의 소강상태가 없었다면 금전저수지는 월류를 했을 것으로 추정됨.



[그림 3.4.20] 금전저수지 태풍 메기 홍수추적 결과



[그림 3.4.21] Huff 분포를 적용한 강우시나리오 홍수추적결과

나. 사이펀 여수로 운영지침

(1) 다열 사이펀 방류 성공사례 (금전저수지, 2004년)

- 2004년 8월 18일 태풍 메기로 인한 발생한 극한강우에 대하여 금전저수지는 설치되어 있는 사이폰 여수로(8련)의 능력을 최대한 활용하여 위기를 극복함.
- 초기 우안 #1번 사이펀부터 #8번 사이펀까지 순차적으로 방류되어 당초 계획 홍수 유입량 ($308m^3/s$)를 190% 초과한 $584m^3/s$의 유입량을 성공적으로 방류함.



(a) 우안 #1련부터 방류　　(b) 전체 방류(8련)

[그림 3.4.22] 다열 사이펀 여수로 순차적 방류(금전지,2004)

(2) 다열 사이펀 방류 순서 및 방법 검토

① 평수 시

○ 평수 시 저수지와 댐은 물을 가두어 채우는 수량 확보가 우선임.

○ 하류의 가뭄 또는 홍수 대비 목적으로 사전 방류가 필요할 경우 bypass 관을 이용하여 방류함.

② 홍수 시 방류 시나리오

○ 홍수 시 다열 사이펀의 방류수위를 조절하여 방류함.

○ 수위상승 시 점차적으로 사이펀 수를 증가시키면서 방류함.

○ 첨두홍수량 발생 시 모든 사이펀이 방류되도록 설정함.

○ 첨두홍수량 발생 후 수위하강 시 하류 하천의 홍수피해 저감을 위해 방류량을 조절하면서 방류함.

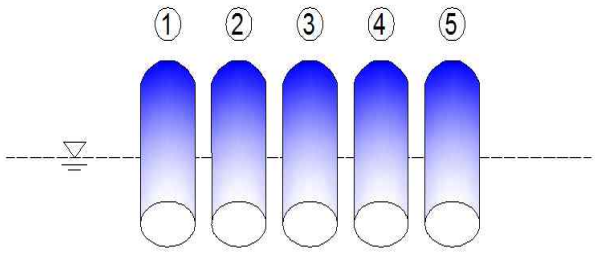
○ 방류량 조절은 각 사이펀의 공기량 조절 시 수위-방류량 곡선을 이용하여 유연하게 방류함.

③ 사이펀 가동 순서

○ 다열 사이펀의 가동순서는 다음 표와 같이 다양한 방법으로 운영할 수 있음.

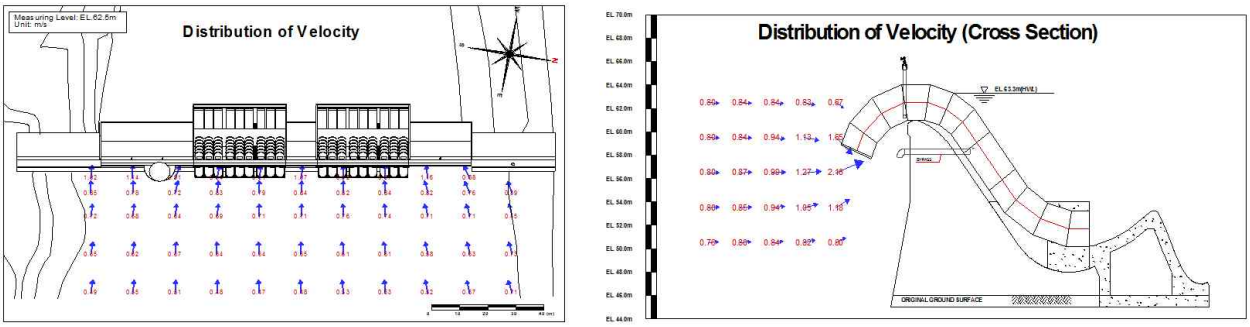
[표 3.4.71] 다열 사이펀 가동 순서

case 1	① → ② → ③ → ④ → ⑤
case 2	③ → ② → ④ → ① → ⑤
case 3	① → ⑤ → ② → ④ → ③
case 4	③ → ②,④ → ①⑤
case 5	①⑤ → ②,④ → ③



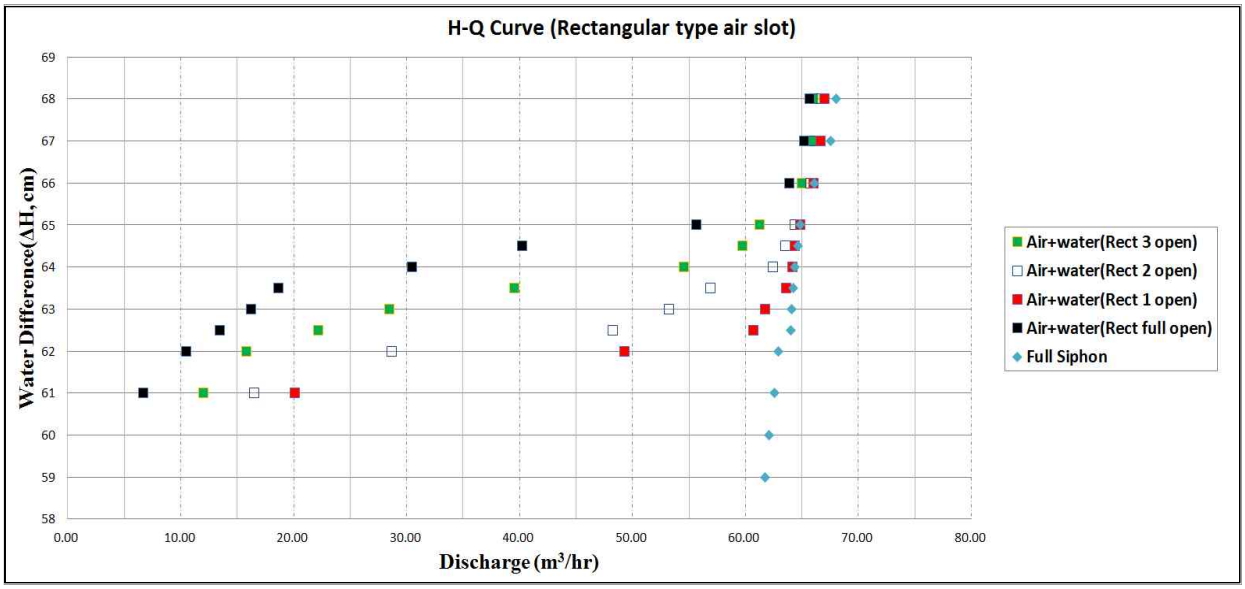
④ 최적 방류 시나리오 도출

○ 홍수 시 방류 시나리오별 수리모형실험 및 수치해석을 통해 [그림 3.4.23]과 같이 사이펀 유입부 부근 유속 및 유황 검토



[그림 3.4.23] 접근 유속 및 유황 검토(수리모형실험 예시)

○ 각 사이펀 여수로의 공기량 조절에 따른 수위-방류량 관계곡선 결과 검토를 통해 최적 방류 시나리오를 도출함.



[그림 3.4.24] air slot을 이용한 수위-방류량 곡선 (본 연구)

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

○ 본 연구의 최종목표는 “방류량 조절이 가능한 사이펀 여수로의 개발”이다. 최종목표에 합리적으로 도달하기 위해 3가지 핵심목표를 설정하여 년차별로 연구를 추진함.

○ 핵심연구목표

1) 방류량 조절이 가능한 사이펀 여수로 성능평가

2) 방류량 조절이 가능한 사이펀 여수로 특허출원

3) 방류량 조절이 가능한 사이펀 여수로 운용지침서 작성

가. 1차년도 연구목표

(1) 1차년도 정량적 성과지표 달성도

세부 연구 목표	성과지표	목표치	가중치	달성치
1)방류량 조절이 가능한 사이펀 여수로 성능평가	국외 학술지 논문게재 건수 국내 학술지 논문게재 건수	1 2	63.5%	47.6%
2)방류량 조절이 가능한 사이펀 여수로 특허출원	국내외 지적재산권 확보 건수	2	11%	11%
3)방류량 조절이 가능한 사이펀 여수로 운용지침서	국내외 학술회의 발표 논문건수	1	25.5%	25.5%
총 계			100%	84.1%

○ 현재 국외 학술지에 “Development of siphon discharge control technology using air slot”으로 논문 게재 중에 있음.

(2) 연구목표 및 달성도

구분	연구목표	주요연구내용	달성치
주관연구기관 (세종대)	방류량 조절이 가능한 사이펀 여수로 수치해석 및 수리모형실험 보고서	- 선행연구 사례조사 - 이론 연구 및 3차원 수치해석 - 수치해석 및 수리실험 보고서 작성	100%
	방류량 조절이 가능한 사이펀 여수로 특허출원	- 선행연구 사례조사 - 단일 사이펀 아이디어 도출	
	방류량 조절이 가능한 사이펀 여수로 운용지침서	- 선행연구 사례조사 - 자문회의 개최 - 지침서 작성	
공동연구기관 (농어촌연구원)	방류량 조절이 가능한 사이펀 여수로 수치해석 및 수리모형실험 보고서	- 수리모형 제작 및 수리모형실험 수행 계획 작성 - 수리모형 실험 수행 - 수치해석 및 수리실험 보고서 작성	100%
	방류량 조절이 가능한 사이펀 여수로 특허출원	- 다열 사이펀 아이디어 도출	
	방류량 조절이 가능한 사이펀 여수로 운용지침서	- 시나리오 검토 - 실험을 통한 가능성 판단	

2. 관련 분야 기여도

가. 기술적 측면

- 본 제안연구는 사이펀 여수로에 관한 원천기술을 개발하는 단계로 본 연구로 개발된 기술의 이전을 통해 우리나라 건설 기업의 사이펀 관련 기술력이 크게 향상
- 이를 통해 국내 건설기업의 해외 건설사업 수주경쟁력 향상에도 도움이 될 것으로 판단되며, 특히 본 연구는 공기가 혼입된 복잡한 관로 흐름에 대한 이론적, 실험적 규명을 통해 유체역학과 관련하여 우리나라의 기초 학문 및 기술력 발달에도 큰 기여 기대
- 사이펀 여수로는 내부에 부압이 작용하는 특수한 수공구조물로 관로 내부에 공기가 혼입될 경우에는 매우 복잡한 흐름이 발생하며, 이에 대한 체계적인 해석은 매우 어려운 학문 분야 중 하나임
- 3차원 전산유체역학 수치모델과 수리모형실험을 통해 이와 같은 흐름에 대한 이론적인 규명이 이루어짐에 따라 관련된 다양한 분야에 응용이 가능할 것으로 판단됨

나. 경제적 · 산업적 측면

- 국내에는 약 18,000개의 댐이 건설된 것으로 추산되는데 대부분 1970년 이전에 건설된 필댐 형식임

- 최근 기후변화에 따른 이상기후로 국지성 집중호우가 빈번히 발생하고 있으며, 댐 설계홍수량의 설계기준이 가능최대홍수량으로 변경됨에 따라 과거 건설된 대부분의 댐 및 저수지들이 현재의 설계기준을 만족하지 못하고 있는 실정임
- 따라서, 국가에서는 설계기준을 만족하지 못하는 댐 및 저수지들의 치수 능력 증대 사업을 수행하고 있으며, 이 사업들은 앞으로 더욱 확대 수행될 전망임
- 댐 및 저수지의 치수능력을 증대시키는 하나의 대안인 “사이펀 여수로”는 장래에 다양한 댐 및 저수지 적용될 것으로 전망되며, 따라서 앞으로의 시장 규모는 더욱 커질 것으로 판단됨
- 해외에서는 저수지 치수능력증대 뿐만 아니라 발전소의 냉각수 취배수 시설, 소수력 발전 등 다양한 분야에서 사이펀 활용
- 본 제안연구의 결과는 약간의 응용을 통해 댐 및 저수지에 설치되는 사이펀 여수로 뿐만 아니라 발전소 냉각수 취배수 시설, 소수력 발전 등의 사이펀에도 적용 가능
- 따라서, 해외 사업에 진출하는 국내 기업에 원천기술을 제공하여 해외 사업 수주능력을 더욱 향상시킬 수 있을 것으로 판단됨

제5장. 연구개발성과의 활용계획

1. 연구성과물의 질적 우수성

- 본 연구의 경우 이미 선행 사례조사 및 연구를 통해 “방류량 조절이 가능한 사이펀 여수로”의 핵심적인 아이디어가 도출된 상태임
- 본 연구는 세계 최초로 아이디어가 제시되고 3차원 수치해석과 수리모형실험을 통하여 그 결과를 확인함.
- air slot을 이용하여 사이펀의 방류량을 유연하게 조절할 수 있는 기술은 매우 실용적이고 현장적용이 가능한 기술임
- 3차원 수치해석의 경우 공기와 물의 2가지 유체를 동시에 해석해야 함으로 관련 기술의 발전에도 기여를 할 것으로 판단

2. 연구성과의 기술적·사회적 잠재영향력

가. 기술수요처

- 본 연구의 성과인 “방류량 조절이 가능한 사이펀 여수로”는 저수지의 치수능력 증대와 사이펀 하류측 홍수 예방을 위해 반드시 필요한 기술임
- 사이펀 여수로는 댐 및 저수지의 치수능력을 증대시키기 위한 하나의 대안으로써 다목적 댐과 농업용 저수지를 관리하고 있는 한국수자원공사, 한국농어촌공사 등 공공기관 및 지방자치단체에서 활용이 가능
- 또한 사이펀을 설계, 시공하는 엔지니어링 업체 및 건설기업 등에서 활용 가능
- 본 연구는 저수지 치수능력 증대를 위한 사이펀 여수로에 관한 원천적인 연구로써, 본 연구 결과는 국내 건설 기업의 해외 진출 등을 위한 기술력 향상에도 큰 도움이 될 것으로 판단
- 엔지니어링 업계의 해외 진출 및 해외 건설사업의 수주 등을 통해 외화 획득에도 기여

나. 현장적용 방안(계획)

- 본 연구의 성과인 “방류량 조절이 가능한 사이펀 여수로”는 기술개발이 완료된 이후 적극적인 기술 이전을 통해 엔지니어링 업체 또는 건설 기업에서 기술을 적극 활용할 수 있도록 하며, 국토교통부 및 농림축산식품부 등 댐 및 저수지를 관리하는 부처에서 이를 도입할 수 있도록 학회 논문발표, 부스 운영 등 홍보 활동을 병행할 계획
- 설계지침서 작성 및 보급을 통해 현장에서 손쉽게 “방류량 조절이 가능한 사이펀 여수로”를 활용할 수 있도록 기여할 계획임.
- 향후 추가적으로 Air slot과 Air vent 입구에 이송 잡물등의 유입이 되지 않도록 스크린을 설치하여 효과를 검토할 계획임.
- 또한, 본 연구 성과를 국내 특허에 머무르지 않고 해외시장 진출을 위하여 국제 특허를 획득할 수 있도록 추진할 계획임.

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

1. 영국 국외공무여행을 통한 전문가 자문의견 수집

가. 배경 및 목적

- “기후변화에 따른 돌발홍수대비 방류량 조절이 가능한 사이펀 여수로 개발” 수행을 위해 최신기법을 도입한 수리모형실험 필요
- 영국 스코틀랜드 Dundee 대학의 전문가 자문 및 협의
- 연구결과의 신뢰성 확보 및 연구성과 향상을 위해 HR wallingford 연구소의 해외 전문가와 연구협의 및 HR wallingford 연구소 시설 견학
- 실제 사이폰이 설치되어 있는 런던 Brent 저수지를 견학함으로서 연구성과에 대한 실제 시공 적용성 및 효율성 확인

나. 방문기관

- Dundee 대학(스코틀랜드), HR Wallingford 연구소(옥스퍼드), Brent 저수지 현장 견학(런던)

다. 전문가 자문내용

(1) Dundee 대학(Dr. Yong Sung Park)

- 사이펀의 유량을 조절하는 Air Slot, Air Vent의 아이디어에 대해 높은 관심을 보임.
- 연구 방법 및 연구 결과를 사전에 예측한 부분에 대해 실험시 예측한 결과에 따라가지 않도록 주의가 필요하며, 정확한 실험 결과만을 토대로 연구가 진행되도록 당부함.
- Air Slot으로 유입되는 공기량을 관측하는 것은 현 상태에서 어려움이 따를 것으로 예상되고 유량을 관측하여 유량이 감소된 량만큼 공기가 유입된 것으로 판단하는 것을 권고함.



(a) 가변경사 수로



(b) 성층 실험장치



(c) 실험장비 기술자와 협의



(d) 전문가 연구 협의

[그림 6.1.1] Dundee 대학 방문 사진

(2) HR Wallingford 연구소(Dr. Stephen Richardson, Jonathan Hinks)

- 사이펀의 유량을 조절하는 Air Vent의 방식에 대해 본 연구에서 제안한 것과 다른 아이디어를 제공
- Air vent로의 수위 조절시 공기가 유입되지 않도록 모형을 제작할 것을 권고 함.
- 유량조절 사이펀 개발연구에 대해 높은 관심을 보이며, 추후 연구결과를 해외 논문으로 게재해 주길 원함.



(a) 실내 수리시험장(80m×100m)



(b) 불규칙파 조파기



(c) 지형스캐너 촬영



(d) 전문가 연구 협의

[그림 6.1.2] HR Wallingford 방문 사진

라. Brent 저수지 현장 답사(영국, 런던)

- Air slot이 설치된 Brent 저수지를 견학함으로서 연구 성과에 대한 실제 시공 적용성 및 효율성을 확인



(a) Brent 저수지 사이펀 방류구



(b) Brent 저수지 air vent

[그림 6.1.3] Brent 저수지 현장 사진

2. 베트남 국외공무여행을 통한 자료 수집 및 연구 홍보

가. 배경 및 목적

- “기후변화에 따른 돌발홍수대비 방류량 조절이 가능한 사이펀 여수로 개발” 연구 성과의 홍보 및 해외적용 대상지 조사와 더불어 한국농어촌공사 농어촌연구원과 베트남 남부수자원기획원 및 남부수자원연구원과의 국제기술교류 협력을 위한 수리시험 및 방재분야 연구주제 발표 및 토론회 참석

나. 방문기관

- 남부수자원기획원(호치민), 남부수자원연구원(호치민), 수리모형실험장

다. 남부수자원기획원 및 남부수자원연구원과 주요 협의 내용

- 한국-베트남 과학기술 공동연구과제) 추진 합의(‘19년도 제안서 제출)
- 유량조절 사이펀의 베트남 적용에 대해 호의적 의견 제시, 공동연구 추진모색
- 실험수로 활용연구 등 국제공동연구 추진



(a) 남부수자원기획원 연구성과 홍보



(b) 남부수자원연구원 연구성과 홍보



(c) 남부수자원연구원 수리실험장



(d) 남부수자원연구원 수리실험장

[그림 6.2.1] 베트남 방문 사진

제7장. 연구개발성과의 보안등급

일반

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황

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

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

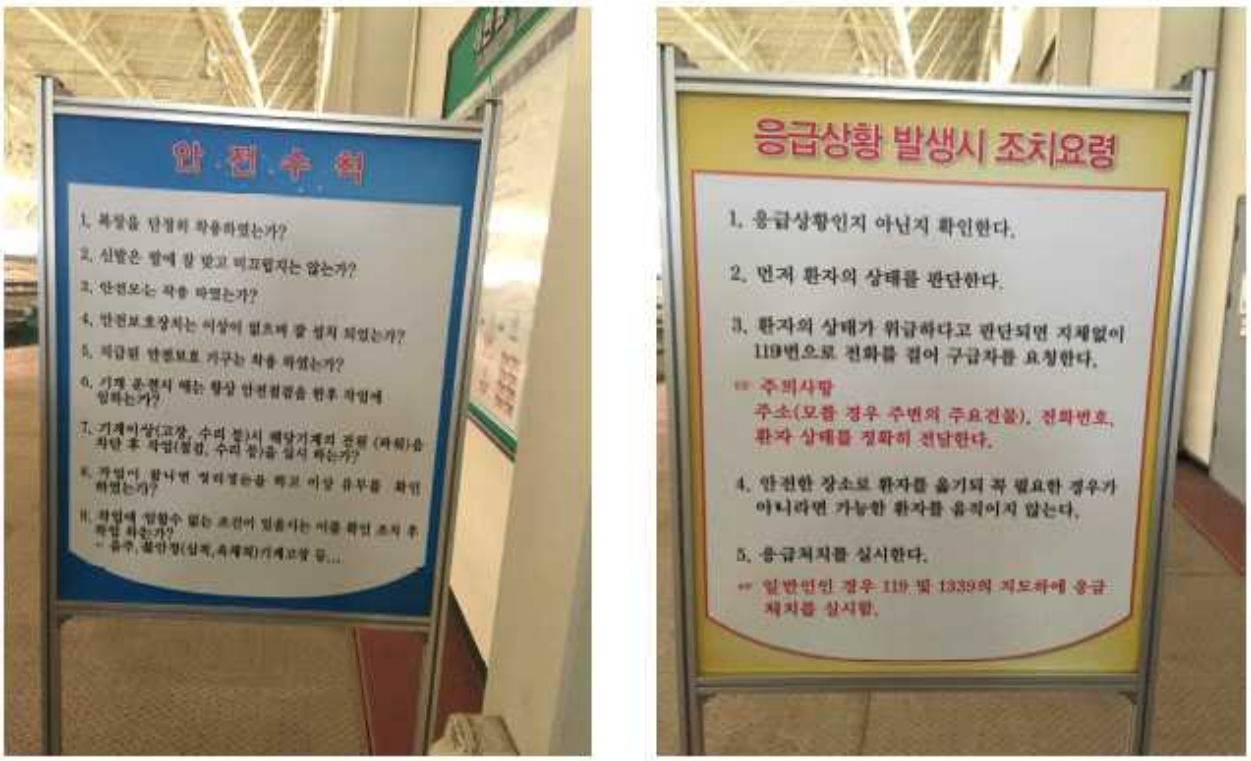
1. 실험실 안전수칙의 명문화 및 정기적 교육 실시

가. 주관연구기관 : 세종대학교 산학협력단



[그림 9.1.1] Brent 저수지 현장 사진

나. 공동연구기관 : 한국농어촌공사 농어촌연구원



[그림 9.1.2] Brent 저수지 현장 사진

2. 안전관리 교육주기

가. 주관연구기관 : 세종대학교 산학협력단

- 연구실 안전관리 교육 : 연구실안전관리센터에서 1학기에 최소 1번 시행

나. 공동연구기관 : 한국농어촌공사 농어촌연구원

- 실험실 안전수칙 교육 : 매일
- 응급상화 발생시 조치요령 : 주 1 회



[그림 9.2.1] 실험인력의 안전수치 교육

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/ 기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 출원일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	특허	유량조절이 가능한 사이펀 여수로	세종대학교, 농어촌연구원	저자	한국		2017.11.14	단독 사사	
2	특허	다단계 수위조절 사이펀 여수로	세종대학교, 농어촌연구원	저자	한국		2017.11.14	단독 사사	
3	논문	Extended Boussinesq equations for waves in porous media	세종대학교	저자	Coastal Engineering	2.674	2018.09.01	단독 사사	SCI
4	학술발표논문	파랑수치모형의 이론과 적용	세종대학교	저자	한국해안·해양공학회 학술발표논문집		2017.11.09	단독사사	
5	학술발표논문	사이펀 여수로의 통기공을 사용하여 저수지 하류의 유량 조절	세종대학교, 농어촌연구원	저자	한국방재학회학술발표대회논문집		2018.02.18	단독 사사	
6	학술발표논문	극한강우 시 금전저수지 사이펀 여수로 운영	세종대학교, 농어촌연구원	저자	한국방재학회학술발표대회논문집		2018.02.18	단독 사사	
7	학술발표논문	천수방정식을 사용하여 해저사면사태 수치모의	세종대학교	저자	한국해양과학기술협의회공동학술대회		2018.05.24	단독사사	

제11장. 기타 사항

1. 1차 자문회의

가. 일시 및 장소 : 2017.05.11.(목) 16:00~18:00 / 세종대학교 충무관 교수회의실

나. 참석자 : 8명

- 이창훈 교수(세종대), 장은철 박사(농어촌연구원), 김 원 박사(건설기술연구원), 최성욱 교수(연세대학교), 전범진 부장(삼안 엔지니어링), 문정은 이사(STI C&D), 김경환 이사(STI C&D)

다. 발표내용(1차년도 성과 발표)

- 국내외 사이펀 연구현황 파악 및 조사
- 예비 사이펀 수리모형실험 결과
- 유량조절 사이펀 아이디어 도출
- 사이펀 수리모형실험 모형제작
- 금전저수지 사이폰 여수로 모의운영을 위한 수문검토 (2004 태풍 메기 사상)

[표 11.1.1] 주요자문의견

자문위원	자문의견	조치계획	비고
최성욱 교수 (연세대)	- Air vent를 통한 유량조절시 민감한 측정 필요 - 실험과 수치해석을 통한 정량적 연구 필요 - 실험에 의한 공기 주입량에 대한 사상법칙 적용 방법 - 사이펀 방류량을 조절하게 되면 하류하도의 홍수피해를 줄일 수 있을 것으로 판단됨.	- 보완 실험시 반영 - 수리실험과 수치해석을 동시에 수행예정. - 사상법칙의 적합성을 확인하고 실험 계획 제시	
김 원 책임연구원 (건설기술연구원)	- 사이펀 유입부에 대한 손실계수를 고려하여 실험필요 - air slot의 공기유입량과 사이펀 방류량과의 관계 실험검토 필요	- 보완 실험시 반영 - 최종보고서에 제시 계획	
김경환 이사 ((주)에스티아이씨엔디)	- air slot, air vent의 인위적 조작없이 할수 있는 방안 필요. - 실험시 관경, 유입구 깊이, 이격거리 영향등 조건에 따른 실험 필요 - air slot과 air vent의 조합시 사이펀 정지에 필요한 공기량 유입 조건 파악	- 최종보고서에 제시 계획 - 보완 실험시 반영 - 최종보고서에 제시 계획	
전범진 부장 ((주)삼안)	- Air slot을 통한 유량조절시 공기량 측정 필요 - intake 지점에서 voltex에 따른 공기유입여부 확인 - Air slot의 공기유입량과 사이펀 방류량의 상관관계를 정량적으로 도출할 필요성이 있음.	- 보완 실험시 반영 - 최종보고서에 제시 계획 - 최종보고서에 제시 계획	



[그림 11.1.1] 1차 자문회의 사진

창의도전과제 자문회의 참석자

2017년 5월 11일

소 속	직 위	성 명	서 명
(주) 삼안	부장	전 범진	
한 세 대	단수	최 성욱	
에스티아이씨앤디	이사	윤 정은	
〃	이 사	김 경환	김경환
(주) 한 도	부 장	조 윤기	
농어촌연구원	주임전임	강 은철	
KICT	선임연구위원	김 [illegible]	
세종대	교수	이창호	

[그림 11.1.2] 1차 자문회의 참석자 명단

2. 2차 자문회의

가. 일시 및 장소 : 2018.05.11.(금) 16:00~18:00 / 농어촌연구원 델프트 실

나. 참석자 : 7명

- 이창훈 교수(세종대), 장은철 박사(농어촌연구원), 여홍구 박사(건설기술연구원), 최성욱 교수(연세대학교), 전범진 부장(삼안 엔지니어링), 문정은 이사(STI C&D),

다. 발표내용(2차년도 성과 발표)

- 국내외 사이펀 연구현황 파악 및 조사
- 유량조절 사이펀 3차원 수치해석 결과
- 사이펀 수리모형실험 결과
- 금전저수지 사이폰 여수로 모의운영을 위한 수문검토 (2004 태풍 메기 사상)

[표 11.2.1] 주요자문의견

자문위원	자문의견	조치계획	비고
최성욱 교수 (연세대)	- 수리실험과 수치해석 결과의 세밀한 비교 검토 필요 - 사이펀 방류량을 조절하게 되면 하류하도의 홍수피해를 줄일 수 있을 것으로 판단됨.		
여홍구 책임연구원 (건설기술연구원)	- air slot의 위치에 따라 공기유입량도 변화될 것으로 예측됨. - 추후 air slot의 위치변화에 따른 연구가 수행되면 매우 우수한 연구가 될 것임	- 추가 연구시 반영	
문정은 이사 ((주)에스티아이씨엔디)	- air slot, air vent의 인위적 조작없이 할수 있는 방안 필요. - air slot을 자동 조절할 수 있는 방안 개발 필요	- 최종보고서에 제시	
전범진 부장 ((주)삼안)	- 원하는 수위에서 사이펀을 시작/멈춤 시킬 수 있는 Air vent와 유량을 zero에서 max까지 조절 가능한 Air slot 장치가 본 연구의 주요 성과이며, 이러한 결과가 일회성 연구로 그치지 않고 실무에 적용될 수 있도록 성과 보고서에 이해하기 쉽게 수록되고 홍보되기 바람	- 최종보고서에 제시 계획	



[그림 11.2.1] 2차 자문회의 사이펀 실험 참관

참 석 자 서 명 부

ㄴ 일 시 : 18. 05. 11. [금]

ㄴ 회의명 : 국토교통부 창의도전과제[방류량 조절 사이펀] 2차년도 자문회의

번호	참 석 자	소 속	서 명	비 고
1	최 성욱	연.세.대		
2	이 창호	세종대	Changho	
3	팜 반 코이	세종대	Pham Van Khoi	
4	윤 정은	STT CND		
5	여 홍구	KICT		
6	전 범진	(주) 삼안		
7	강 지연	서울시립대		
8	정 재 상	〃		
9	장 순철	〃		
10	윤 재신	〃		
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				
18				
19				
20				

[그림 11.2.2] 2차 자문회의 참석자 명단

제12장. 참고 문헌

농림축산식품부(2017). 재해대비 농업용저수지 취수시설개선 연구

박환철 (2011). 사이펀을 활용한 댐체 안정 및 하류하천 재해대비방안

여운철 (1994). 사이펀식 물넘이 설계 및 시공사례. (재) 한국농지개발연구소

유강산업 (2005). 사이폰 여수로의 설제 기동상황 및 수치해석 자료

유강산업 (2005) 하동댐 사이폰 여수로 수치해석 보고서

윤동균 (2010) 저수지 홍수배제능력증대 방안 검토

Babaeyan-Koopaei, K., Valentine, E.M. and Ervine, D.A. (2002). Case study on hydraulic performance of Brent Reservoir siphon spillway, Journal of Hydraulic Engineering, 128(6), 562-567.

Boatwright, J.D. (2014). Air-Regulated Siphon Spillways: Performance, modeling, design, and construction, M.S. Thesis, Clemson University.

Coleman, H.W., Wei, C.Y. and Lindell, J.E. (2004). Hydraulic Design of Spillway, Hydraulic Design Handbook, 17.1-17.54, McGraw-Hill Book Company.

French, M.J. and Widden, M.B. (2001). The exploitation of low-head hydropower by pressure interchange with air, using siphons, Proc. Instn. Mech. Engrs, 215(A), 223-230.

Ghafourian, A., Jahromi, H.M. and Bajestan, M.S. (2011). Hydraulic of Siphon Spillway by Physical and Computational Fluid Dynamics, World Applied Sciences Journal, 14(8), 1240-1245.

Gramatky, G. and Robinson, K. (1928). Siphon Spillway, M.S. Thesis, California Institute of Technology Pasadena, California.

Houichi, L., Ibrahim, G. and Achour, B. (2006). Experiments for the discharge capacity of the siphon spillway having the creager - Ofitserov Profile, International Journal of Fluid Mechanics Research, 33(5), 395-406.

Houichi, L., Ibrahim, G. and Achour, B. (2009). Experimental comparative study of siphon spillway and over-flow spillway, Courrer du Savoir, Mars, 95-100 (in French).

James, W. and Young, B.C. (2001). Modeling siphon weir within EXTRAN, Models and Applications to Urban Water Systems, Monograph 9, 383.

Petaccia, G. and Fenocchi, A. (2015). Experimental assessment of the stage–discharge relationship of the Heyn siphons of Bric Zerbino dam, Flow Measurement and Instrumentation, 41, 36-40.

Ramseyer, R.G. (1923). Design and test of a model siphon spillway, Thesis Report, California Institute of Technology Pasadena, California.

특허 출원(2017). 다단계 수위조절 사이펀 여수로(출원번호 10-2017-0151323)

특허 출원(2017). 유량조절이 가능한 사이펀 여수로(출원번호 10-2017-051318)

9. 뒷면지

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.

210mm×297mm[백상지(80g/㎡) 또는 중질지(80g/㎡)]