

발간등록번호

11-1543000-002409-01

<http://rri.ekr.or.kr>

# 농업용저수지 제체 붕괴방지 기술개발 연구(Ⅰ)

---

Development of collapse prevention technology for  
agricultural dams

---

2018. 12



농림축산식품부



한국농어촌공사



# 제 출 문

농림축산식품부 장관 귀하

본 보고서를 “농업용저수지 제체 붕괴방지 기술개발” 과제의 1차년도  
보고서로 제출합니다.

2018년 12월

주관연구기관명 : 농어촌연구원  
연 구 지 도 : 장중석, 오수훈  
연 구 책 임 자 : 이태호  
연 구 원 : 허지선  
                  최병한  
                  양영진  
                  허 준  
                  이 백  
                  김현미

공동연구기관명 : 충남대학교  
                  산학협력단  
연 구 책 임 자 : 이달원  
연 구 원 : 이영학



# < 요약 >

## I. 제 목

농업용저수지 제체 붕괴방지 기술개발(1차년도)

## II. 연구기간

2018. 04 - 2020. 12 (3년)

## III. 연구배경 및 목표

### 3.1 연구배경

최근 들어 전 세계적 기후변화 및 도시화 등 환경 변화에 따른 대규모 자연재난이 빈번하게 발생되고 있으며, 최근 자연재난 피해액은 1970년대에 비해 약 10배로, 향후에도 기후변화 등으로 인하여 자연재난 발생빈도는 가속화될 것으로 판단되고 있다.

국내 농업용저수지의 경우 50년 이상 경과된 노후화된 저수지가 전체 저수지 17,313개의 82%로, 기상이변·지진 등 자연재해 발생 시 구조적 취약성이 시설 노후화로 인해 점차 증대되고 있다.

농업용저수지의 제체가 집중호우 등으로 인한 월류 및 제체 파이핑 등으로 인한 붕괴 시 주변지역 및 하류지역에 예측하기 어려운 경제적, 산업적 피해가 발생 될 것으로 예상되므로, 불가피하게 저수지가 월류하는 조건이 형성시, 제체 붕괴로 인한 피해발생을 방지하기 위하여 선제적 대응이 필요하다.

농업용저수지 제체의 경우 암석, 사질토와 점토 등 이질재료로 축조되어 있기 때문에 한 가지 재료로 축조되는 성토구조물과 비교하여 복잡한 거동을 하게 된다.

대부분 흙댐으로 건설된 농업용저수지 제체의 월류는 안전성 측면에서 매우 위험하나 현재는 저수지 월류 상황만을 구현한 모형실험을 통해 기초연구만 진행된 상태이며, 제체의 내부침식에 의한 파이프에 관하여는 모형실험 관련된 기초연구조차 진행되지 않은 상황이다.

따라서, 농업용저수지 제체 특성을 고려한 다양한 재료, 공법의 비교를 통해 집중호우 발생 시 제체의 월류 및 침식으로 인한 붕괴 가능성에 대처할 수 있도록 제체 붕괴방지 공법 개발하여 재해에 대한 취약성을 개선할 필요가 있다.

또한, 이를 실질적으로 현장에 적용 할 수 있도록 연구과정에서 모형 및 대형실험을 병행하여 결과를 검증할 필요성이 있다.

### 3.2 연구목적

본 연구의 최종목적은 집중호우에 의한 농업용저수지 제체 월류 및 내부침식 보호공법 개발이며, 금년은 본연구의 1차년도로서 저수지 제체 주요 붕괴원인 및 붕괴방지 기술조사 분석과 모형실험에 의한 월류 및 내부침식시 제체 붕괴거동 특성분석을 연구목적으로 하였다.

## IV. 연구내용

### 가. 농업용저수지 제체 주요 붕괴원인 및 붕괴방지 기술 분석

- 1) 농업용저수지 통계자료 및 안전진단 현황 분석
- 2) 국내외 댐 및 저수지 붕괴사례 분석
- 3) 저수지 제체 붕괴원인 조사 및 분석
- 4) 저수지 제체 취약부 분석
- 5) 저수지 제체 보호공법 및 붕괴방지 기술 분석

### 나. 월류 및 내부침식시 제체 거동특성 규명

- 1) 저수지 제체 월류모형실험을 위한 실험계획 수립
- 2) 월류 및 내부침식 제체 모형실험
- 3) 월류 및 내부침식시 간극수압, 토압 등 계측
- 4) 월류 및 내부침식 제체 변형 및 파괴형상 분석

## V. 연구결과

농업용저수지의 제체 주요 붕괴원인 및 붕괴방지 기술 분석을 위하여 농업용저수지 현황조사, 국내외 댐 및 저수지 붕괴 사례조사, 제체 취약부 분석 및 붕괴방지 기술분석으로 구분하여 연구를 진행하였다.

또한, 월류 및 내부침식 제체 거동특성 규명을 위하여 필댐에 대한 제정 월류시, 여수토접속부 월류시, 내부침식시 붕괴 모형실험을 실시하여 월류 및 내부침식 파괴시 제체의 변형 및 파괴형상을 분석하였다.

### ○ 농업용저수지 현황분석

2017년 농업생산기반정비사업 통계연보자료를 통하여 농업용저수지 현황을 분석한 결과 현재 우리나라 농업용저수지 평균 준공 후 경과년수는 65년, 평균 제체규모는 높이 8m, 길이 110m, 평균유효저수량은 178천m<sup>3</sup> 정도인 것으로 나타났다.

농업생산기반정비사업 통계연보 데이터베이스의 제체형식은 다양한 명칭으로 되어있으나 농업생산기반 정비사업 계획설계기준상의 필댐의 정의인 균일형, 존형, 표면차수벽형, 코어형으로 분류하여 정리한 결과 콘크리트형은 21개소로 전체 저수지 17,313개소 중 0.1%이며, 나머지 99.9%는 필댐으로 분류되었으며, 필댐 중 균일형은 44%, 존형은 56%를 차지하고 있는 것으로 나타났다.

경과년수에 따라 농업용저수지를 분류한 결과 50년 이상된 저수지가 전체의 81.5%였고, 30년 이상으로 분류하면 전체 저수지의 96.5%가 30년 이상 경과된 것으로 분석되었다.

농업용저수지의 노후화 정도를 살펴보기 위하여 1995년부터 2017년까지 23개년간 농업용저수지 안전진단현황 5,313건을 분석한 결과 "주요부재에 결함이 발생하여 긴급한 보수보강이 필요하며, 사용제한 여부를 결정해야 하는 상태"인 D등급 이하는 764건으로 전체의 19.8%로 나타났다.

다만, 정밀안전진단현황 분석결과는 5년주기로 시행되는 안전진단의 저수지별 중복을 허용하여 분석한 내용이며, 지속적인 개보수사업을 시행하여 최근 5개년 정밀안전진단결과와 D등급 이하의 비율은 8.0%로 나타났다.

농업용저수지 진단결과 제체 결함사항을 살펴보면 사석이완이 23.6%로 가장 빈번하게 나타났고, 다음으로는 여유고 부족, 침식세굴, 누수·파이핑이

뒤를 잇고 있는데 이는 장기적인 정밀안전진단 결과로도 필댐의 가장 큰 취약점이 월류와 누수, 파이핑에 의한 내부침식임을 나타내는 결과로 볼 수 있다.

#### ○ 국내외 댐 붕괴사례 조사

국내의 댐 및 소류지 붕괴사례를 다양한 문헌자료, 기존 보고서, 인터넷, 신문기사 등으로 통하여 수집한 뒤 정리하여, 모두 120건의 국내의 댐 및 소류지 붕괴사례를 수집하였다.

취득한 자료 중 댐 형식 분류가 가능한 자료 107개를 분석한 결과, 붕괴사례 중 필댐이 106건으로 99%, 콘크리트댐이 1건으로 1%를 차지하였고, 필댐을 균일형과 존형으로 구분한 결과는 균일형이 45건, 존형이 61건으로 비슷하게 나타났다.

댐 붕괴의 발생년도를 살펴보면 1998년과 2002년 등 특정년도에 붕괴가 집중되어 나타난 것을 알 수 있는데 1998년에는 7월 31일부터 8월 18일까지 빈번한 집중호우가 발생되었으며, 2002년에는 역대 최강의 태풍루사의 상륙, 1987년에는 태풍 셀마가 상륙하여 많은 소류지 및 댐이 붕괴된 것을 알 수 있다.

이를 통하여 국내의 댐 및 저수지의 붕괴사례는 대부분 집중호우나 태풍에 의한 수해에 의하여 붕괴된 경우가 대부분임을 알 수 있었다.

국내와 마찬가지로 2018년까지 해외의 댐 붕괴사례를 수집하고, 수집한 자료 191개소 중 댐 형식분류가 가능한 151건을 형식별로 분류한 결과, 151건 중 필댐이 125건으로 82.8%를 차지하고 있으며, 콘크리트 댐은 21건으로 나타났다.

2018년까지 국내외 댐 붕괴사례 중 붕괴원인을 파악할 수 있는 140건을 붕괴원인별로 분류한 결과 총 140건 중 월류에 의한 붕괴와 파이핑에 의한 붕괴는 각각 49건, 35%로 전체의 70% 붕괴원인이 월류와 파이핑인 것으로 나타났다.

이중 필댐 형식의 댐의 경우 전체사례 116건 중 월류붕괴가 44건 37.9%, 파이핑붕괴가 46건 39.7%로 전체의 77.6%인 대부분이 월류와 파이핑을 원인으로 붕괴되는 것으로 분석되었으나 콘크리트 댐에서는 필댐과 같이 특정원인에 의하여 붕괴되는 비율은 크지 않고 다양한 원인으로 붕괴되는 것으로 분석되었다.



○ 저수지제체 취약부 분석

장기간에 걸친 농업용저수지 안전진단결과, 소류지 및 댐의 붕괴사례, 전문가 의견수렴결과 우리나라 저수지 제체의 취약부를 분석하면, 월류의 경우 취약부를 3군데로 볼 수 있으며 첫번째는 제정 상단이 같은 표고를 가지고 있지 않아 상대적으로 낮은 제정부, 둘째로는 홍수시 월류심이 높아져 월류높이가 날개벽보다 올라가면 제체를 월류하지 않아도 날개벽과 제체사이의 세굴로 결국 여수로부가 유실되어 붕괴에 이르게 될 확률이 높아 제정보다 상대적으로 낮은 날개벽이 취약부로 분석되었다.

세번째로 여수로 방수로 부가 곡선이거나 설계홍수량을 초과할 경우 여수토의 월류방향과 방수로의 방향이 다른 측구식 여수로 특성상 방수로부 측벽에 부딪혀 처오름 현상에 의하여 배제유량이 방수로와 연결된 외제측으로 넘어와 세굴되는 경우가 많아 취약한 부위로 판단되었다.

내부침식의 경우 저수지를 축조하면서 원지반과의 접촉부, 여수토 콘크리트 접촉부, 복통과 제체의 접촉부 등이 가장 취약한 것으로 판단되고 있으며 우리나라 사례의 경우 복통주변의 누수에 의한 사례가 많아 복통주변이 내부침식에 가장 취약한 부분으로 나타났다.

○ 저수지 월류붕괴모형실험

월류, 내부침식시 제체의 붕괴 거동특성을 규명하기 위하여 저수지 제체모형을 축적 1/20로 제작하였으며, 우리나라 농업용저수지의 붕괴빈도를 고려하여 제정이 월류되어 붕괴되는 경우, 여수토접속부 월류로 시작해서 제정까지 월류되는 경우, 복통주변의 파이핑에 의한 내부침식에 의하여 붕괴되는 세가지 경우에 대하여 붕괴모형 실험을 실시하였다.

제정월류붕괴 실험시 붕괴형상은 월류초기단계에서는 사면유속이 빨라지면서 먼저 하류사면 세굴이 진행되었고, 월류량 증가단계에서는 붕괴폭과 붕괴깊이가 큰 변화는 보이지 않았으나 붕괴영역이 좌우로 점차 확대되는 것을 알 수 있었다.

침투월류단계에서는 붕괴구역이 하류사면 전체로 확대되며 붕괴폭도 깊어지는 경향을 나타냈으며, 사면의 침식범위가 상류측으로 확대되면서 제정상단부가 붕괴되는 모습을 나타냈다.

실험결과 붕괴폭과 붕괴깊이의 발달은 월류의 지속시간에도 영향을 받지만 어느 정도 시간이 경과된 후에는 안정된 상태를 보였으나, 월류량의

증가에 따라서 급격히 변화하는 모습을 보여 월류지속시간보다 월류량에 직접적인 영향을 받는 것으로 판단된다.

제정 월류실험 중 간극수압 및 토압의 계측 결과, 월류 상황에서의 간극수압은 월류 전에는 거의 변화가 없고, 월류 후 급격한 변화가 발생하므로 간극수압의 변화에 따라 월류를 추정하거나 예측하기는 어려울 것으로 판단된다.

여수도 접속부 월류실험은 초기 방수로 측벽월류를 제외하고는 월류실험과 유사하게 진행하였으며, 초기에 방수로에 격벽을 설치하여 처오름 상태를 유도하여 방수로 접속부 침식이 진행되는 상태에서 간극수압과 토압변화를 측정하였다. 침식이 어느 정도 진행된 후에는 월류모형실험과 유사하게 월류상태를 만들어 붕괴를 유도하도록 실험하였다.

실험결과 초기에 방수로 접속부 침식이 발생된 상태에서 제정의 월류가 발생되므로 제정 월류 유량이 방수로 접속부의 침식부에 집중되어 붕괴가 가속화 되는 것으로 나타났다.

내부침식 실험은 제체 내의 복통 주변 및 내부 누수로 인하여 파이핑이 발생할 경우를 가정하여 실험하였으며, 파이핑을 유도할 수 있도록 본 실험 전 복통위치에 다공관을 설치하고 예비 실험을 통하여 파이핑이 발생할 수 있도록 다공관의 적절한 규모, 채움재료를 결정하여 본 실험을 실시하였다.

파이핑 모형실험에서는 파이프의 상단과 하단의 간극수압 차이는 거의 없었으며, 누수로 인하여 제체가 점차 포화되고 누수량이 증가되었으며, 지속적으로 간극수압이 상승하면서 최종적으로 누수량이 급증하면서 파이핑에 의한 붕괴까지 발생하는 것을 알 수 있었다.

따라서, 파이핑의 경우에는 붕괴 전까지 지속적으로 간극수압의 증가가 뚜렷하게 관측되므로 붕괴가능성을 예측하고, 붕괴방지 대책공법을 마련하는데 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

#### ○ 저수지 제체 보호공법 및 붕괴방지 기술 조사분석

향후 저수지 제체의 월류 및 내부침식에 의한 붕괴방지 기술개발을 위하여 국내외에서 저수지 붕괴를 방지할 수 있는 연구상황과 개발된 공법을 조사·분석하였다.

- 차수매트를 이용한 제체 보호공법

월류시 긴급방지 기술로 차수매트를 이용한 보호공법이 있으며 본 공법은 차수매트, 지지대, 지지봉 등으로 구성하여 홍수단계별로 현장에서 직접 설치 포설하여 붕괴를 방지하는 것으로 홍수위까지는 1단계로 제정까지 차수매트를 포설하고, 홍수시 초과시에는 제정 및 하류사면까지 포장하는 2단계로 대응하는 방법임

- 흙부대를 활용한 긴급 수방공법

고전적인 월류 대응 공법으로 흙부대를 쌓아올려 월류를 방지하는 공법으로, 일본 국토교통성의 긴급 수해방지대책으로 사용하고 있다. 현장의 상황에 따라서 흙부대를 쌓아올려 중간을 흙으로 채우는 방법, 흙부대를 쌓아올려 지수를 위하여 차수재료로 쌓는 방법, 도시와 같은 곳에서 흙을 구하기 어려운 상황에서는 물주머니에 물을 채워 월류를 방지하는 방법이 있다.

- CCM(Cellular Concrete Mat)공법

월류에 의한 제체의 침식을 방지하는 영구공법으로 필름의 월류 붕괴를 방지하기 위하여 콘크리트 블록을 셀식으로 조립하고 블록을 연결선으로 연결하여 월류시 제체의 세굴을 방지함.

- 특수 모래주머니 공법

일본 농촌공학연구소에서 개발한 공법으로 특수한 모래주머니를 활용하여 제체의 일부구간을 월류부로 구성하거나 전체를 모래주머니로 보강하여 월류 붕괴를 방지하는 공법임.

- 파이핑 방지용 차수매트

파이핑 방지를 위한 재료의 구성은 토질재료 누출방지를 위한 부직포, 누수지점에 수압을 가하기 위한 물매트와 이를 일체형으로 고정하기 위한 수중접착제, 고정말뚝으로 구성되어 있으며, 설치 후에는 일체형으로 거동하여 토질재료의 누출을 방지하고 물매트를 이용한 수압으로 파이핑을 방지하는 공법임.

- Hydraulic Well공법

일본의 마쓰야마 하천국도사무소에서 사용하는 월류공법을 개선한 방법으로 월류공법은 모래주머니 넓게 누수지점 주변에 쌓고 물을 채워 수압으로 누수를 방지하는 방법인데 비해, Hydraulic Well 공법은 모래주머니를 쌓는 방법이 시간이 많이 소요되고 필요한 수압을 유지하기 어려운 단점을 보완하여 개발한 공법임

건설기술연구원에서 보완 개발한 Hydraulic Well 공법은 조립식 원형 통체를 이용, 누수지점에 수압을 가하여 파이프를 방지하는 공법으로 이동형 제작되어 재해발생시 신속대처가 가능하고 원형통체에 밸브를 설치하여 파이프 정도에 따라서 수압을 자유롭게 조절할 수 있다는 장점이 있음.

- 제체표면피복 및 L드레인 공법

월류와 내부침식을 동시에 방지하는 공법으로 일본 농촌공학연구소에서 개발하였으며 제체표면피복을 통해 월류붕괴를 방지하고, 하류부 사면에 이중으로 제작된 배수용 파이프를 이용한 L형 드레인 설치를 통해 파이프를 방지하는 공법임.

# summary

1. **Title** : Development of collapse prevention technology for agricultural dam

2. **Research Period** : April, 2018 ~ December, 2020

### 3. Background of study

- Recently, large-scale natural disasters are frequently occurring around the world due to environmental changes such as climate change.
- Of the agricultural dams in Korea, 82.3% were constructed more than 50 years ago.
- Therefore, the risk of natural disasters is gradually increasing due to the aging of the reservoir.
- The collapse of agricultural dams due to heavy rainfall is likely to cause economic and industrial damages that are difficult to predict in the surrounding area.
- Preemptive response is needed to prevent damages caused by the collapse of agricultural dams.
- Agricultural dams are mostly constructed as earth fill dams, and there is a high risk of collapse in overtopping and internal erosion.

- Therefore, it is necessary to develop a method to prevent the collapse of the agricultural dam, by the overtopping or piping.

#### 4. Purpose of study

- The ultimate goal of this study is to develop a method to prevent the collapse of agricultural dams due to overtopping and internal erosion.
- The purpose of this year's research is to analyze the cause of collapse of agricultural dams, to investigate collapse prevention techniques, and to analyze collapse characteristics through collapse model experiments by reservoir overtopping and internal erosion.

#### 5. Contents of study

##### 5.1 Cause of major collapse of agricultural dam and analysis of prevention technology

- Analysis of agricultural dam statistics and safety diagnosis status.
- Case analysis of domestic and overseas dam and reservoir collapse.
- Investigation and analysis of causes of reservoir collapse.
- Structural weakness analysis of agricultural dam.
- Analysis of agricultural dam protection method and collapse prevention technology.

## 5.2 Characterization of collapse due to overtopping and internal erosion of agricultural dam

- Establishment of model test plan for agricultural dam overtopping and internal erosion.
- Model test of overtopping and internal erosion.
- Measurement of pore water pressure and earth pressure during overtopping and internal erosion.
- Analysis of the destruction form of agricultural dam by overtopping and internal erosion.

## 6. Results of study

- In order to analyze the causes of collapse of agricultural dams and the prevention technology of collapse, we carried out by analyzing the status of agricultural dams, investigation of domestic and overseas dams and reservoir collapse cases, analysis of vulnerable parts and analysis techniques for preventing collapse.
- In order to investigate the characteristics of reservoir collapse by overtopping and internal erosion, we carried out a overtopping and internal erosion model test and analyzed the deformation and failure shape of overtopping and internal erosion failure.
- Statistical analysis of agricultural dams
  - As a result of analyzing the status of agricultural dams, the average age of agriculture reservoirs is 65 years, average

height is 8m, length is 110m, and effective storage capacity is 178,000m<sup>3</sup>.

- Of the 17,313 reservoirs of agricultural dams, 99.9% were classified as earth fill dams and 0.1% were classified as concrete dams.
  
- Domestic and overseas agricultural dam collapse case investigation
  - 120 cases of domestic agricultural dam collapse were collected
  - Among the collected data, analysis of 107 data that can classify the dam type, 106 cases were in the earth fill dam(99%) and 1 case in the concrete dam (1%).
  - The collapse of domestic dams and reservoirs is mostly collapsed by heavy rainfall or typhoon.
  - By 2018, there were 191 cases of dam collapse overseas were collected.
  - Among the collected data, 151 cases that can be classified as dam type were analyzed. As a result, the number of earth fill dams was 125 (82.8%) and concrete dams were 21 cases.
  - Among the cases of dam collapse at domestic and overseas, 140 cases were classified by cause of collapse as 35% by overtopping collapse and 35% by internal erosion collapse.
  - In the case of the earth fill dam, it was analyzed that the overtopping collapse was 37.9% and the internal erosion collapse was 39.7% among the total 116 cases



- Experimental study on the collapse of reservoir
  - The reservoir models for overtopping and internal erosion model tests were constructed with a 1/20 scale.
  - The model experiment of the agricultural dam collapse experiment was carried out when collapsing by overtopping and internal erosion.
  
- Analysis of agricultural dam protection method and collapse prevention technology
  - In order to develop the technology to prevent collapse due to overtopping and internal erosion of reservoir, we investigated and analyzed the method to prevent reservoir collapse at domestic and overseas.



## < 목 차 >

제1장 서론 .....	1
제1절 연구배경 및 목적 .....	3
1. 연구배경 및 필요성 .....	3
2. 연구목적 .....	4
제2절 연구범위 및 방법 .....	4
1. 연구범위 .....	4
2. 연구방법 .....	4
제2장 농업용저수지 제체 붕괴원인 .....	7
제1절 농업용저수지 현황 .....	9
1. 농업용저수지 제체형식 .....	10
2. 농업용저수지 통계현황 .....	13
3. 저수지 안전진단 현황 .....	20
제2절 저수지 제체 붕괴사례 .....	28
1. 국내 저수지 제체 붕괴 사례 .....	29
2. 국외 저수지 제체 붕괴 사례 .....	39
제3절 저수지 제체 붕괴원인 .....	50
1. 저수지 붕괴원인 통계 .....	51
2. 저수지 붕괴원인 및 붕괴형태 .....	54
제3장 저수지 실내 모형실험 .....	63
제1절 저수지 제체 모형축조 .....	65
1. 모형실험을 위한 상사 .....	67
2. 저수지 붕괴모형 축조 .....	68

<b>제2절 실내모형 실험방법</b>	<b>69</b>
1. 대상저수지의 선정	69
2. 모형실험 방법	70
<b>제4장 저수지 모형실험 결과</b>	<b>75</b>
<b>제1절 월류로 인한 붕괴시</b>	<b>77</b>
1. 모형실험 방법	77
2. 계측기 매설	78
3. 홍수위와 수위급강하시 공극수압과 토압의 변화	79
4. 월류시 공극수압과 토압의 변화	81
5. 침하량 변화	83
6. 월류시 제체 사면의 붕괴거동	84
<b>제2절 여수토 접속부 월류에 의한 붕괴시</b>	<b>87</b>
1. 모형실험방법	87
2. 계측기 매설	88
3. 홍수위와 수위급강하시 공극수압과 토압의 변화	89
4. 월류시 공극수압과 토압의 변화	92
5. 침하량 변화	95
6. 월류시 제체 사면의 붕괴형태	95
7. 수치해석에 의한 제체의 침투특성	99
<b>제3절 내부침식(Piping)에 의한 붕괴시</b>	<b>106</b>
1. 모형실험방법	106
2. 계측기 매설	107
3. Piping 에 따른 공극수압과 토압의 변화	108
4. 침하량 변화	110
5. Piping 에 의한 제체의 붕괴거동	110
6. 수치해석에 의한 제체의 침투특성	114

제5장 저수지 제체 붕괴방지 기술 현황 .....	121
제1절 제체의 손상 판단 및 보수·보강 공법 .....	123
1. 저수지 제체의 보수·보강 공법 .....	124
2. 제체의 손상 판단방법 및 보수·보강공법 .....	126
제2절 월류에 의한 붕괴방지 기술 .....	128
1. 월류 붕괴방지 긴급대응 기술 .....	128
2. 월류 붕괴방지 제체 보강기술 .....	132
제3절 내부침식에 의한 붕괴방지 기술 .....	144
1. 내부침식 붕괴방지 긴급대응 기술 .....	144
2. 내부침식 붕괴방지 제체 보강기술 .....	149
제6장 결론 .....	151
참고문헌 .....	159
부 록 .....	163
[부록 1] 국내의 댐 붕괴사례 및 붕괴원인 .....	165
[부록 2] 국외의 댐 붕괴사계 및 붕괴원인 .....	174

## < 표 차례 >

(표 2-1) 관리주체별 저수지 평균 제원 .....	13
(표 2-2) 통계연보상의 체제형식 및 분류기준 .....	14
(표 2-3) 체제형식에 따른 분류 .....	15
(표 2-4) 체제 높이에 따른 분류 .....	16
(표 2-5) 체제 길이 따른 분류 .....	16
(표 2-6) 경과년수에 따른 분류 .....	17
(표 2-7) 경과년수에 따른 필댐 체제형식별 분류 .....	18
(표 2-8) 유역면적에 따른 분류 .....	19
(표 2-9) 총저수량에 따른 분류 .....	19
(표 2-10) 농업용저수지 안전진단 현황(1995~2017년) .....	20
(표 2-11) 농업용저수지 정밀안전진단 종합평가결과(1995~2017년) .....	21
(표 2-12) 농업용저수지 정밀안전진단 체제평가결과(1995~2017년) .....	21
(표 2-13) 농업용저수지 정밀안전진단 물넘이평가결과(1995~2017년) .....	22
(표 2-14) 농업용저수지 정밀안전진단 방수로평가결과(1995~2017년) .....	22
(표 2-15) 농업용저수지 정밀안전진단 취수시설평가결과(1995~2017년) .....	23
(표 2-16) 농업용저수지 정밀안전진단 체제 결함사항(1995~2017년) .....	24
(표 2-17) 농업용저수지 정밀안전진단 물넘이 결함사항(1995~2017년) .....	24
(표 2-18) 농업용저수지 정밀안전진단 방수로 결함사항(1995~2017년) .....	25
(표 2-19) 농업용저수지 정밀안전진단 취수시설 결함사항(1995~2017년) .....	25
(표 2-20) 농업용저수지 정밀안전진단 체제 보강방안(1995~2017년) .....	26
(표 2-21) 농업용저수지 정밀안전진단 물넘이 보강방안(1995~2017년) .....	27
(표 2-22) 농업용저수지 정밀안전진단 방수로 보강방안(1995~2017년) .....	27
(표 2-23) 농업용저수지 정밀안전진단 취수시설 보강방안(1995~2017년) .....	27
(표 2-24) 댐 형식별 댐 붕괴사례 현황 .....	30
(표 2-25) 국내 소류지 및 댐 붕괴 발생년도별 분류 .....	31
(표 2-26) 댐 형식별 댐 붕괴사례 현황 .....	40
(표 2-27) 댐 형식별 붕괴원인 .....	53
(표 2-28) 댐 붕괴원인 및 발생사유 .....	54
(표 3-1) 모형실험의 상사비 .....	68
(표 3-2) 원형과 모형실험의 제원 .....	68
(표 3-3) 사용된 재료의 특성 .....	70
(표 4-1) 수치해석 월류조건 .....	99
(표 5-1) 필댐 시설물의 손상 부위별 보수·보강방안 .....	124

## <그림 차례>

<그림 2-1> 균일형 필댐의 구조 .....	11
<그림 2-2> 존형 필댐의 구조 .....	11
<그림 2-3> 표면차수벽형 필댐의 구조 .....	12
<그림 2-4> 코어형 필댐의 구조 .....	12
<그림 2-5> 남원 수해지구 주민들 모습(국가기록원) .....	32
<그림 2-6> 연천댐 붕괴 .....	33
<그림 2-7> 장현저수지 여수로 붕괴 현장 .....	35
<그림 2-8> 장현저수지 붕괴 및 하류부 피해 현장 .....	35
<그림 2-9> 동막저수지 붕괴 현장 .....	36
<그림 2-10> 동막저수지 붕괴 및 하류부 피해 현장 .....	36
<그림 2-11> 산대저수지 붕괴사진(외측) .....	37
<그림 2-12> 산대저수지 붕괴사진(내측) .....	38
<그림 2-13> Banqiao 댐 붕괴(중국) .....	40
<그림 2-14> Shihkang댐 붕괴(대만) .....	41
<그림 2-15> (좌)Austin Dam 흔적, (우)댐 붕괴로 파손된 학교 .....	42
<그림 2-16> 댐 사면중간에 파이핑 발생(USBR) .....	43
<그림 2-17> 댐 공동발생(USBR) .....	44
<그림 2-18> 댐 공동 확대 및 상부로 진행(USBR) .....	44
<그림 2-19> 댐 상부 붕괴 및 월류(USBR) .....	45
<그림 2-20> 댐 상단 파이핑 진행 붕괴(USBR) .....	45
<그림 2-21> 댐 우안 붕괴후 유출(USBR) .....	46
<그림 2-22> 붕괴 전 성프란시스 댐(USGS) .....	48
<그림 2-23> 붕괴 후 성프란시스 댐(USGS) .....	48
<그림 2-24> 붕괴 후 성프란시스 댐 측면(USGS) .....	49
<그림 2-25> 붕괴 후 성프란시스 댐 전면(USGS) .....	49
<그림 2-26> 댐 붕괴원인별 현황 .....	51
<그림 2-27> 콘크리트댐에서의 댐 붕괴 원인별 현황 .....	52
<그림 2-28> 필댐에서의 댐 붕괴 원인별 현황 .....	53
<그림 2-29> 일반적인 필댐의 평면도 .....	57
<그림 2-30> 필댐의 월류 취약부(평면도) .....	58
<그림 2-31> 필댐의 월류 취약부(A-A단면) .....	59
<그림 2-32> 필댐의 월류 취약부(B-B단면) .....	59
<그림 2-33> 필댐의 내부침식(파이핑) 취약부(평면도) .....	60

<그림 2-34> 필댐의 내부침식(파이핑) 취약부(A-A단면도) .....	61
<그림 2-35> 필댐의 내부침식(파이핑) 취약부(B-B단면도) .....	61
<그림 3-1> 입도곡선 .....	70
<그림 4-1> 축조모형 단면과 계측기 매설위치 .....	78
<그림 4-2> 홍수위와 수위급강하시 공극수압과 토압의 변화 .....	80
<그림 4-3> 월류시 공극수압과 토압의 변화 .....	82
<그림 4-4> 침하량 변화 .....	83
<그림 4-5> 월류시 제체 사면의 붕괴거동 .....	87
<그림 4-6> 축조모형 단면과 계측기 매설 위치 .....	89
<그림 4-7> 홍수위와 수위급강하시 공극수압과 토압의 변화 .....	91
<그림 4-8> 여수토 접속부 월류시 공극수압과 토압의 변화 .....	94
<그림 4-9> 여수토 접속부 월류시 침하량의 변화 .....	95
<그림 4-10> 여수토 접속부 월류시 제체 사면의 붕괴거동 .....	98
<그림 4-11> 수치해석 적용단면 .....	99
<그림 4-12> 월류단계별 침윤선 및 공극수압 변화 .....	100
<그림 4-13> 월류단계별 공극수압 변화 .....	101
<그림 4-14> 월류단계별 x, z축에서의 변위분포 .....	103
<그림 4-15> 월류단계별 최대변위 .....	104
<그림 4-16> 월류단계별 붕괴형상 .....	105
<그림 4-17> 계측기 매설 위치와 복통 파이프 단면 .....	107
<그림 4-18> 내부침식(Piping)시 공극수압과 토압의 변화 .....	109
<그림 4-19> 내부침식시 침하량 변화 .....	110
<그림 4-20> Piping에 의한 제체의 붕괴거동 .....	114
<그림 4-21> 만수위상태에서의 공극수압과 침윤선 분포 .....	115
<그림 4-22> 하류사면에서의 동수경사 분포 .....	117
<그림 4-23> 복통단면에서의 변위분포 .....	117
<그림 4-24> 시간에 따른 제체의 변형형상 .....	119
<그림 5-1> 차수매트를 이용한 제체 보호공법 개념도 .....	129
<그림 5-2> 차수매트를 이용한 제체 보호공법 설치 상세도 .....	130
<그림 5-3> 차수매트 자동설치 장치(좌), 제체 지지대 및 지지봉(우) .....	130
<그림 5-4> 제체의 월류방지를 위한 다양한 긴급공법 .....	131
<그림 5-5> 댐 제체增高방법 .....	133
<그림 5-6> Parapet wall 설치 진경 .....	134
<그림 5-7> Tholocco Dam에 설치된 RCC 보조여수로 .....	135
<그림 5-8> Red Rock 지역의 댐에 설치된 RCC 보조여수로 .....	136
<그림 5-9> CCM(Cellular Concrete Mat) 공법 개념도 .....	137



<그림 5-10> 댐 사면에 대한 조립된 콘크리트 블록의 거치 .....	137
<그림 5-11> 댐 사면에 설치된 콘크리트 블록 .....	137
<그림 5-12> 흙부대 공법 개요도 .....	138
<그림 5-13> 제체 일부구간 흙부대 공법 시공개념도 .....	139
<그림 5-14> 제체에 적용한 흙부대 공법 .....	140
<그림 5-15> 제체표면 피복공법 단계별 시공전경 .....	142
<그림 5-16> L형 드레인공법 단계별 시공전경 .....	143
<그림 5-17> 월륜공법의 현장시공 전경 .....	144
<그림 5-18> 누출부 위치별 월륜공법의 적용 .....	145
<그림 5-19> 파이핑 방지 차수매트 설치(평면도) .....	146
<그림 5-20> 파이핑 방지 차수매트 설치(단면도) .....	147
<그림 5-21> 하천제방의 파이핑 방지장치 개념도 .....	148
<그림 5-22> 내부침식 방지 하류부 경사드레인 설치 .....	149
<그림 5-23> 누수지점 그라우팅을 통한 누수차단 .....	150



## 제1장

---

# 서론

제1절 연구배경 및 목적

제2절 연구범위 및 방법



# 제1장 서론

## 제1절 연구배경 및 목적

### 1. 연구배경 및 필요성

최근 들어 전 세계적 기후변화 및 도시화 등 환경 변화에 따른 대규모 자연재난이 빈번하게 발생되고 있으며, 최근 자연재난 피해액은 1970년대에 비해 약 10배로, 향후에도 기후변화 등으로 인하여 자연재난 발생빈도는 가속화될 것으로 판단되고 있다.

국내 농업용저수지의 경우 50년 이상 경과된 노후화된 저수지가 전체 저수지 17,313개의 82%로, 기상이변·지진 등 자연재해 발생 시 구조적 취약성이 시설 노후화로 인해 점차 증대되고 있다.

농업용저수지의 제체가 집중호우 등으로 인한 월류 및 제체 파이핑 등으로 인한 붕괴 시 주변지역 및 하류지역에 예측하기 어려운 경제적, 산업적 피해가 발생 될 것으로 예상되므로, 불가피하게 저수지가 월류하는 조건이 형성시, 제체 붕괴로 인한 피해발생을 방지하기 위하여 선제적 대응이 필요하다.

농업용저수지 제체의 경우 암석, 사질토와 점토 등 이질재료로 축조되어 있기 때문에 한 가지 재료로 축조되는 성토구조물과 비교하여 복잡한 거동을 하게 된다.

대부분 흙댐으로 건설된 농업용저수지 제체의 월류는 안전성 측면에서 매우 위험하나 현재는 저수지 월류 상황만을 구현한 모형실험을 통해 기초연구만 진행된 상태이며, 제체의 내부침식에 의한 파이핑에 관하여는 모형실험 관련된 기초연구조차 진행되지 않은 상황이다.

따라서, 농업용저수지 제체 특성을 고려한 다양한 재료, 공법의 비교를 통해 집중호우 발생 시 제체의 월류 및 침식으로 인한 붕괴 가능성에 대처할 수 있도록 제체 붕괴방지 공법 개발하여 재해에 대한 취약성을 개선할 필요가 있다.

또한, 이를 실질적으로 현장에 적용 할 수 있도록 연구과정에서 모형 및 대형실험을 병행하여 결과를 검증할 필요성이 있다.

## 2. 연구목적

본 연구의 최종목적은 집중호우에 의한 농업용저수지 제체 월류 및 내부침식 보호공법 개발이며, 금년은 본연구의 1차년도로서 저수지 제체 주요 붕괴원인 및 붕괴방지 기술조사 분석과 모형실험에 의한 월류 및 내부침식시 제체 붕괴거동 특성분석을 연구목적으로 하였다.

2차년도에는 1차년도 연구결과를 바탕으로 저수지 월류, 내부침식 보호공법 분석 및 모형실험을 통한 제체 보호공법 적용시 제체의 붕괴방지효과 분석, 3차년도에는 월류, 내부침식 방지를 위한 보호공법을 개발 연구를 수행할 예정이다.

## 제2절 연구범위 및 방법

### 1. 연구범위

연구를 시작하는 올해 1차년도는 현재 농업용저수지 중에서 월류 및 내부침식시 붕괴 위험성이 높은 필댐을 대상으로, 기존 저수지 붕괴사례 및 보강공법 조사·분석과 농업용저수지 월류 및 내부침식 모형실험을 통해 필댐의 붕괴시 제체 변형 및 파괴형상을 분석하여 제체의 붕괴시 거동특성을 규명을 연구범위로 하였다.

### 2. 연구방법

농업용저수지 제체 붕괴원인 및 붕괴방지 기술 분석과 저수지 제체 붕괴 모형실험을 통하여 저수지 제체 월류 및 내부침식 보호공법 개발을 3개년 간 수행할 예정이며, 올해는 본 연구의 1차년도로서 연구의 기초가 되는 농업용저수지 제체 주요 붕괴원인 및 붕괴방지기술 분석과 월류 및 내부침식시 제체 거동특성 규명을 위한 모형실험을 중심으로 연구를 수행하고자 한다.

#### 가. 1차년도(2018년)

- 1) 농업용저수지 제체 주요 붕괴원인 및 붕괴방지 기술 분석
  - 저수지 제체 붕괴원인 조사 및 분석

- 저수지 제체 취약부 분석
- 저수지 제체 보호공법 및 붕괴방지 기술 분석
- 2) 월류 및 내부침식시 제체 거동특성 규명
  - 월류 및 내부침식시 제체 파괴현상에 대한 자료조사 및 분석
  - 월류 및 내부침식 제체 모형실험
  - 월류 및 내부침식 제체 변형 및 파괴형상 분석

#### 나. 2차년도(2019년)

- 1) 월류대책 수립을 위한 농업용저수지 홍수특성 분석
  - 농업용저수지 규모별 유입홍수량 분석
  - 농업용저수지 홍수지체 및 저류 특성분석
- 2) 저수지 제체 보호공법 조사 및 분석
  - 저수지 제체 월류 및 내부침식 보호공법 조사 및 분석
  - 저수지 붕괴방지를 위한 비구조적 제체 보호 대책 사례 수집 및 분석
- 3) 저수지 제체 보호공법 개발 idea 구상 및 검토
  - 기존 제체 보호공법의 장단점을 고려한 신규 보호공법 idea 구상
  - 월류 및 내부침식 붕괴방지 idea 검토
- 4) 저수지 제체 보호공법 수치해석 분석 및 평가
  - 수치해석 프로그램을 이용한 제체 보호공법 분석
  - 수치해석을 통한 보호공법 적용시 월류 등에 의한 제체 파괴형태 분석
  - 신뢰성 확보를 위한 수치해석 결과 및 모형실험결과 비교 분석
- 5) 저수지 제체 월류 보호공법 모형실험
  - 저수지 제체 월류 보호공법 모형실험
  - 모형실험을 통한 제체 보호공법 적용 및 결과분석
- 6) 저수지 제체 내부침식 보호공법 모형실험
  - 저수지 제체 내부침식 보호공법 모형실험
  - 모형실험을 통한 제체 보호공법 적용 및 결과분석

#### 다. 3차년도(2020년)

- 1) 저수지 월류, 내부침식 발생시 제체 거동 및 보호공법 개발
  - 월류 및 내부침식 제체 보호공법 개발
  - 저수지 보호공법의 경제성 분석

- 2) 수치해석을 통한 제체 보호공법 적용 및 검증
  - 수치해석 프로그램을 통한 제체 보호공법 적용
  - 개발공법 모형실험결과 및 수치해석결과 검증
- 3) 저수지 제체 월류 보호공법 모형실험
  - 저수지 제체 월류 보호공법 모형실험
  - 모형실험을 통한 제체 보호공법 적용 및 결과분석
- 4) 저수지 제체 내부침식 보호공법 모형실험
  - 저수지 제체 내부침식 보호공법 모형실험
  - 모형실험을 통한 제체 보호공법 적용 및 결과분석



## 제2장

---

# 농업용저수지 제체 붕괴원인

- 제1절 농업용저수지 현황
- 제2절 저수지 제체 붕괴사  
례
- 제3절 저수지 제체 붕괴원  
인



## 제2장 농업용저수지 제체 붕괴원인

### 제1절 농업용저수지 현황

“댐”이란 하천의 흐름을 막아 그 저수를 생활용수, 공업용수, 농업용수, 환경개선용수, 발전, 홍수 조절, 주운, 그 밖의 용도로 이용하기 위한 높이 15미터 이상의 공작물을 말하며, 여수로·보조댐과 그 밖에 해당 댐과 일체가 되어 그 효용을 다하게 하는 시설이나 공작물을 포함한다(댐건설 및 주변지역지원 등에 관한 법률, 제2조).

또한, “저수지”는 농어촌용수를 확보할 목적으로 하천, 하천구역 또는 연안구역 등에 물을 가두어 관리하기 위한 시설과 홍수위 이하의 수면 및 토지를 말한다(농어촌정비법 제2조)라고 정의하고 있다.

한편, 농공기술사전에 의하면 댐은 대규모로 흐름을 가두거나 저수지를 만들기 위한 구조물로서 수위를 높이기 위한 저수댐, 물을 그 지점에서 수로 또는 관로에 분기하기 위한 취수댐, 발전을 위한 낙차를 확보하기 위한 발전댐, 저수를 조절 방류함으로써 주운을 개선하기 위한 주운댐, 하천의 유사를 침전시키기 위한 사방댐으로 정의하고 있으며, 댐 높이가 15미터 이상인 댐을 대댐으로 정의하고 있다.(한국농공학회, 농공용어사전, p238)

즉, 법적인 댐의 정의는 구조물 높이 15미터를 기준으로 하천의 흐름을 막아 그 저수를 활용할 수 있도록 하는 구조물과 해당 구조물과 일체가 되어 그 효용을 다하게 하는 시설 또는 공작물을 포함하여 정의하고, 저수지는 물을 가두기 위한 시설과 해당시설로 인하여 저수되는 수면 및 일시적인 홍수를 저류하는 토지구역을 저수지로 정의하고 있으나 본 연구에서의 댐의 정의는 농공기술사전에 정의된 저수댐, “대규모로 흐름을 가두거나 저수지를 만들기 위한 구조물로서 수위를 높이기 위한 댐”을 기준으로 하고자 한다.

댐은 내측의 저수지로부터 상시수압이 연속하여 작용하는 구조물이며, 가끔 지진과 홍수로 인한 외력이 같이 작용하는 경우도 있다. 또한 댐은 한번 붕괴되면 저수지내 저류된 유수가 댐 하류에 단시간에 유출되어 대규모 재해를 일으키기 때문에 안전성과 내구성의 확보는 댐이 구비해야 할 최대의 요건이다.(댐 및 제방의 설계·시공·안전관리 기술, p135).

댐은 크게 목적, 기능, 구조, 재료, 높이에 따라 다양하게 분류할 수 있으나, 본 연구의 목적이 농업용저수지의 월류 및 내부침식에 의한 붕괴방지 기술개발이므로, 농업용저수지의 대부분을 차지하고 있으며 월류와 내부침식에 취약한 필댐을 주 연구대상으로 하였다.

## 1. 농업용저수지 제체형식

우리나라의 농업용저수지를 축조재료로 크게 분류하면 필댐과 콘크리트댐으로 구분할 수 있으며, 2017년 농업생산기반정비사업 통계연보에 의하면 전체 농업용저수지 17,313개 중 필댐이 17,292개, 콘크리트댐이 21개소로 대부분 농업용저수지의 형식이 필댐으로 되어 있는 것을 알 수 있다.

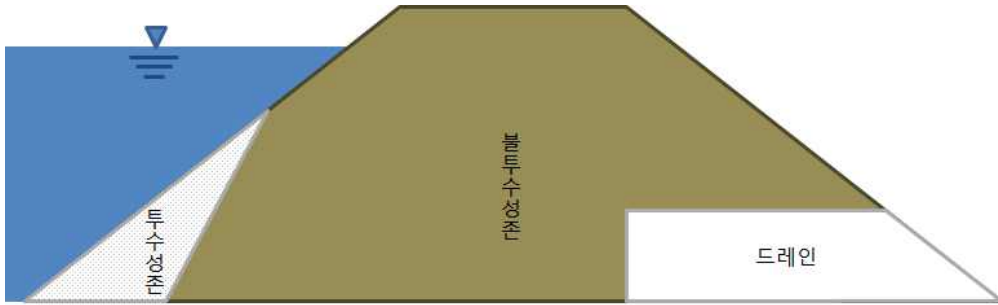
필댐(fill dam)이란 제체의 재료가 암석, 자갈, 토사 등으로 이루어진 것을 총칭해서 말하는 것으로 과거에는 흙댐(earth-fill dam), 록필댐(rock-fill dam)으로 구분하였으나 근래에는 이 두 가지 재료를 같이 축제하는 경우가 많아져서 구별이 곤란하게 되었다. 그래서 천연재료를 모아 쌓아 올려서 만든 부분을 주체로 하는 모든 댐을 필댐이라 규정하게 되었다.(농업생산기반정비사업계획설계기준, 필댐편, 2012)

또한, 기존 필댐의 구분하는 기준 중에서 제체 최대의 단면에서 차지하는 불투수성부의 최대폭이 댐 높이보다 작은 것을 코어형 필댐이라 칭하였으나 이를 존형에 포함시키고 제체내부에 토질재료 이외의 재료로 차수벽을 형성하는 형식의 댐을 코어형이라 칭한다.(농업생산기반정비사업계획설계기준, 필댐편, 2012)

따라서, 우리가 일반적으로 필댐이라 하면 균일형과 존형 필댐의 형식을 가진 흙댐을 말하며 과거 우리나라에서 축조되어 현재까지 사용되고 관리되고 있는 대부분의 필댐이 여기에 속한다.

### 가. 균일형

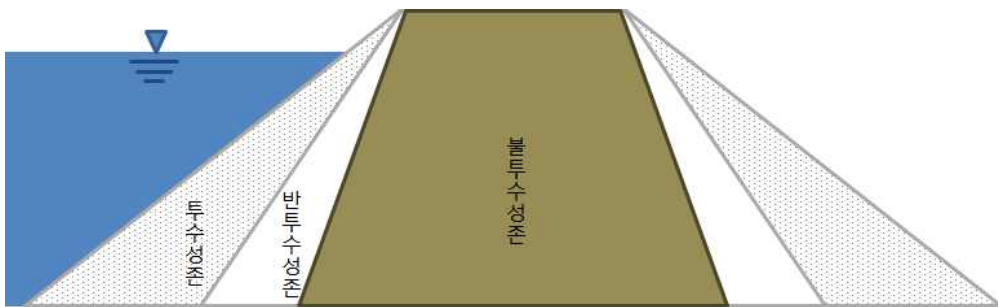
균일형(homogeneous type)댐은 제체 대부분이 흙이나 자갈의 단일 토질재료로 구성되는(제체 최대단면의 80% 이상)댐을 말한다. 일반적으로 이 형식은 중규모 이하에서 대부분 채용되고 있다. 이 형은 불투수성 재료가 댐 인근에서 대량으로 얻기 쉬운 경우에 적합하며, 다른 형의 댐에 비하여 연약지반상에도 축조가 가능하다. 높은 댐 축조는 어렵고 40 m 정도가 한계이다.



<그림 2-1> 균일형 필댐의 구조

#### 나. 존형

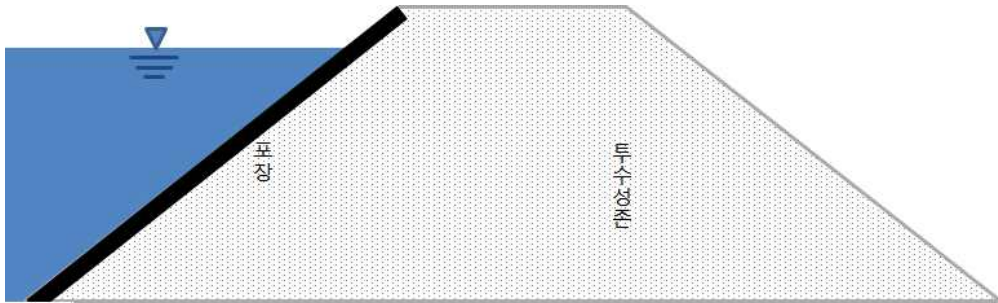
존형(zoned embankment type) 댐은 불투수성과 투수성의 서로 다른 재료를 여러 존으로 형성시킨 댐이다. 불투수 존의 형상과 설치위치에 따라 얇은 경사형 불투수 존을 가진 경사지수 존형과 불투수성부가 중심 전체를 포함하는 중심지수 존형으로 구분한다. 각 존은 투수계수와 재료의 입도가 급변하지 않도록 불투수 존을 중심으로 상·하류 방향으로 순차적으로 조립질의 재료를 배치한다.



<그림 2-2> 존형 필댐의 구조

#### 다. 표면차수벽형

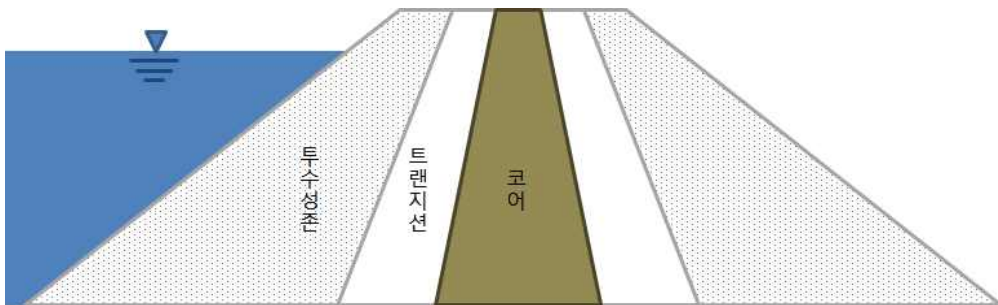
물과 접촉되는 댐 상류면에 아스팔트 콘크리트, 철근 콘크리트 또는 기타 인공 또는 천연재료를 설치하여 차수시키는 댐형을 말한다.



<그림 2-3> 표면차수벽형 필댐의 구조

라. 코어형(core type)

체체 내에 토질재료 이외에 차수벽을 가진 댐을 말한다. 최근에 연속타설 철근 콘크리트벽이나 아스팔트 콘크리트 차수벽을 체체 중앙부에 배치하는 경우가 있다.



<그림 2-4> 코어형 필댐의 구조

## 2. 농업용저수지 통계현황

우리나라의 농업용저수지는 관리주체에 따라 지방자치단체에서 관리하는 저수지와 한국농어촌공사에서 관리하는 저수지로 구분할 수 있는데 비교적 대규모의 농업용저수지의 경우 한국농어촌공사에서 관리하고, 소규모의 저수지의 경우 지방자치단체에서 직접 관리하고 있다.

농업용저수지의 시설 통계자료는 농업생산기반정비사업 통계연보 및 한국농어촌공사에서 관리하고 있는 농업기반시설관리시스템(RIMS)에서 제공하고 있는데, 한국농어촌공사가 관리하고 있는 농업용저수지는 시설 자료가 비교적 자세히 관리되고 있는 반면에 지방자치단체에서 관리하고 있는 소규모 농업용저수지의 경우 그 규모가 작고 숫자가 많아 자료관리가 잘 되고 있지 않은 상황이다.

현재 관리되고 있는 농업생산기반정비사업 통계연보 및 농업기반시설관리시스템(RIMS)의 자료를 기반으로 농업용저수지의 제체형식, 높이, 길이 등 제원에 따라 분류하면 다음과 같다.

농업용저수지의 평균 준공 후 경과년수는 63년, 인가면적은 36ha, 유역면적은 130ha, 평균 제체높이는 8m, 제체길이는 110m이다.

이를 공사관리와 시군관리로 구분 하여보면 시군관리 저수지의 경우 평균 제체높이는 7m, 제체 길이는 90m이나, 공사관리 저수지의 경우 평균 제체높이는 12m, 제체 길이는 203m로 규모가 큰 것을 알 수 있다.

(표 2-1) 관리주체별 저수지 평균 제원

구 분	경과년수 (년)	인가면적 (ha)	유역면적 (ha)	유효저수량 (천 m <sup>3</sup> )	제체 규모	
					높이(m)	길이(m)
평균	65	36	130	178	8	110
공사	58	135	433	22	12	203
시군	64	12	55	818	7	90

※ 자료 : 농업생산기반정비사업 통계연보(2007), 농업기반시설관리시스템(RIMS)

### 가. 제체형식 및 규모에 따른 분류

농업용저수지의 일반적인 제체 구조 및 특성을 알아보기 위하여, 농업기반시설관리시스템(RIMS)의 자료를 이용하여 우리나라 농업용저수지를 제체형식 및 규모에 따라 분류해 보았다.

현재 농업생산기반정비사업 계획설계기준(필댐편, 2012)에 따르면 코어형 필댐은 차수벽을 콘크리트나 아스팔트 등 토질재료 이외의 재료로 사용하는 것을 뜻하나, 과거 저수지 중 토질재료 이외의 재료로 차수벽을 축조한 저수지가 거의 없으므로 현 기준에 따른 코어형 필댐은 거의 없을 것으로 판단된다.

제체형식을 농업생산기반정비사업 계획설계기준의 형식대로 분류하기 위하여 농업기반시설관리시스템(RIMS)에서 관리하고 있는 댐 세부자료 중 댐형식 구분이 콘크리트, 콘크리트댐(중력형)으로 표시된 댐은 콘크리트댐(중력형)으로 통합하여 분류하였으며, 토언제균일형, 필댐(균일형), 토공, 토사 등으로 표시된 댐을 대표하여 필댐(균일형)으로 구분하였다.

필댐(존형)은 댐형식이 Zone형, 사력댐, 존형필댐, 석축, 중심점토, 토언제중심점토 등으로 분류된 것을 기준으로 하였으며, 마지막으로 필댐(코어형)은 토언제중심콘크리트형으로 표시된 것을 필댐(코어형)으로 구분하였다.

(표 2-2) 통계연보상의 제체형식 및 분류기준

제체형식		통계연보상 형식분류	비 고
콘크리트댐 (중력형)		콘크리트, 콘크리트댐(중력형)	
필 댐	균일형	토언제균일형, 기타, 필댐(균일형), 토공, 토사, 토언제, 토언제균일형, 필댐, 흙댐	
	존형	Zone형, 사력댐, 존형필댐, 석축, 필댐(존형), 중심CORE, 중심점토, 중심코어형필댐, 토언제중심점토, 필댐(코어형)	
	코어형	토언제중심콘크리트형	

※ 자료 : 농업생산기반정비사업 통계연보(2007), 농업기반시설관리시스템(RIMS)

이와 같이 농업용저수지 제체형식을 4가지 형식으로 구분한 결과, 농업용저수지 17,313개 중 콘크리트 댐은 21개소, 필댐은 17,292개소로 나타났다. 필댐 형식 중 존형은 56%, 9,640개소로 가장 많은 것으로 나타났으며, 균일형은 44%, 7,651개소로 나타났다.



차수벽을 토질재료가 아닌 콘크리트 아스팔트 등으로 축조한 필댐(코어형)은 시군관리 저수지인 초리저수지(경기도 파주시 법원읍 법원리에 위치, 토언제중심콘크리트형) 1개소로 나타났다.

제체형식에 따른 분류를 관리주체별로 살펴보면, 한국농어촌공사 관리 저수지의 경우 전체 관리대상 저수지 3,403개소 중 94%가 존형 필댐으로 대부분이 존형 필댐으로 분류되었으며, 시군관리 저수지의 경우 균일형과 존형이 비슷하게 나타났다.

(표 2-3) 제체형식에 따른 분류

관리주체	합 계	콘크리트댐 (중력형)	필댐				비 고
			계	균일형	존형	코어형	
합계	17,313 (100.0)	21 (0.1)	17,292 (99.9)	7,651 (44.2)	9,640 (55.7)	1 (0.0)	
공사	3,403 (100.0)	12 (0.4)	3,391 (99.6)	156 (4.6)	3,235 (95.1)	-	
시군	13,910 (100.0)	9 (0.1)	13,901 (99.9)	7,495 (53.9)	6,405 (46.0)	1 (0.0)	

※ 자료 : 농업생산기반정비사업 통계연보(2007), 농업기반시설관리시스템(RIMS)

제체 높이에 따른 농업용저수지의 분류를 살펴보면 제체 높이가 10~5m 인 저수지가 8,651개소로 전체 저수지의 50%로 가장 많았으며, 다음으로는 5m 미만의 소류지가 5,499개소로 가장 많았다. 저수지 관리주체에 따른 구분에서도 같은 결과를 나타내 제체 높이에 따라서는 관리주체에 따른 차이는 없는 것으로 나타났다.

일반적으로 농업분야에서 대댐으로 분류되는 “댐건설 및 주변지역지원 등에 관한 법률” 제2조에 따른 제체 높이 15m 이상인 댐은 8%로 전체 농업용저수지 17,313개소 중 1,367개소 나타났다.

15m 이상인 농업용 대댐 1,367개소 중 한국농어촌공사 관리 저수지는 992개소이며, 시군관리 저수지는 445개소로 나타나 농업용 대댐 중 72.6%는 한국농어촌공사가 관리하는 것으로 분류되었다.

(표 2-4) 제체 높이에 따른 분류

관리 주체	계	30m 이상	30~ 20m	20~ 15m	15~ 10m	10~ 5m	5m 미만	비고
합계	17,313 (100.0)	253 (1.5)	462 (2.7)	652 (3.8)	1,796 (10.4)	8,651 (50.0)	5,499 (31.8)	
공사	3,403 (100.0)	228 (6.7)	338 (9.9)	356 (10.5)	580 (17.0)	1,221 (35.9)	680 (20.0)	
시군	13,910 (100.0)	25 (0.2)	124 (0.9)	296 (2.1)	1,216 (8.7)	7,430 (53.4)	4,819 (34.6)	

※ 자료 : 농업생산기반정비사업 통계연보(2007), 농업기반시설관리시스템(RIMS)

제체 길이에 따라 분류한 결과 제체 길이가 100~50m 인 저수지가 7,186개소로 전체 저수지의 42%로 가장 많았다. 다음으로는 150~100m 3,910개소, 50m 미만이 3,067개소 순으로 많았다.

관리주체별로 살펴보면 한국농어촌공사 관리 저수지의 경우 제체길이 300m~50m까지 제체 길이에 따라 대부분 고르게 분포하고 있는 것으로 나타났으나, 시군관리 저수지의 경우 절반정도인 46.8%가 100~50m, 150~100m에 21.7%가 분포하고 있는 것으로 나타나 제체의 길이로 살펴볼 때에도 시군관리 대상 중 소규모 저수지가 많은 것으로 알 수 있다.

(표 2-5) 제체 길이 따른 분류

관리 주체	계	300m 이상	300~ 200m	200~ 150m	150~ 100m	100~ 50m	50m 미만	비고
합계	17,313 (100.0)	524 (3.0)	1,096 (6.3)	1,530 (8.8)	3,910 (22.6)	7,186 (41.5)	3,067 (17.7)	
공사	3,403 (100.0)	407 (12.0)	696 (20.5)	632 (18.6)	893 (26.2)	673 (19.8)	102 (3.0)	
시군	13,910 (100.0)	117 (0.8)	400 (2.9)	898 (6.5)	3,017 (21.7)	6,513 (46.8)	2,965 (21.3)	

※ 자료 : 농업생산기반정비사업 통계연보(2007), 농업기반시설관리시스템(RIMS)

### 나. 경과년수에 따른 분류

준공 후 저수지 경과년수에 따라서 제체의 형식이나, 관리주체에 대한 특징 등을 살펴보기 위하여 제체형식별로 경과년수, 관리주체를 구분하여 분류해 보았다.

전체 저수지에 대하여 준공 후 경과년수에 따라 분류해 본 결과 준공 후 50년 이상 경과한 저수지가 14,106개소로 전체의 82%를 차지하고 있어 전체적으로 저수지의 노후화가 심한 것으로 나타났다.

관리주체별로 살펴보면 한국농어촌공사 관리저수지는 전체 3,403개소 중 73%가 준공 후 50년 이상 경과되었으며, 시군관리 저수지는 전체 13,910개소 중 84%가 50년 이상 경과된 것으로 분석되었다.

따라서, 농업용 저수지의 노후화에 따라 구조물의 균열, 누수 등 제체의 구조적 불안정이 심화될 수 있기 때문에 홍수시외에 평상시에도 지속적인 관리가 필요하다.

(표 2-6) 경과년수에 따른 분류

구 분	계	경과년수						비고
		100년이상	100~50년	50~30년	30~20년	20~10년	10년미만	
합계	17,313 (100.0)	64 (0.4)	14,042 (81.1)	2,603 (15.0)	262 (1.5)	208 (1.2)	134 (0.8)	
공사	3,403 (100.0)	9 (0.3)	2,475 (72.7)	545 (16.0)	132 (3.9)	143 (4.2)	99 (2.9)	
시군	13,910 (100.0)	55 (0.4)	11,567 (83.2)	2,058 (14.8)	130 (0.9)	65 (0.5)	35 (0.3)	

※ 자료 : 농업생산기반정비사업 통계연보(2007), 농업기반시설관리시스템(RIMS)

과거 농업용저수지의 건설시기에 따라 제체 형식이 변하는 등의 특징을 살펴보기 위하여 제체 형식별로 준공 후 경과년수에 따른 저수지 분포를 살펴보았다.

대상은 전체 저수지 17,313개소 중 콘크리트댐 21개소를 제외한 필댐 17,292개소를 대상으로 형식별, 관리주체별로 분류하였다.

검토한 결과 필댐의 형식과 관계없이 준공 후 경과년수가 100~50년인

경우가 대부분을 차지하였다. 이는 경제개발 및 수자원개발의 시기가 해당시기에 집중되었기 때문으로 판단된다.

준공 후 50년 이내 준공된 저수지 형식을 살펴보면 균일형이 948개소, 존형이 2,244개소로 2.4배로 많이 준공되어, 균일형 보다는 존형의 필면으로 많이 건설되었다는 것을 알 수 있다.

관리주체별로도 경과년수에 따른 제체형식을 살펴보았으나, 관리주체별로는 특별히 주목할 만한 통계적 특성은 없는 것으로 분석되었다.

(표 2-7) 경과년수에 따른 필면 제체형식별 분류

구 분	계	경과년수						비고	
		100년이상	100~50년	50~30년	30~20년	20~10년	10년미만		
합계	17,292 (100.0)	64 (0.4)	14,035 (81.2)	2,597 (15.0)	259 (1.5)	205 (1.2)	132 (0.8)		
균일형	계	7,651 (100.0)	50 (0.7)	6,653 (87.0)	816 (10.7)	50 (0.7)	43 (0.6)	39 (0.5)	
	공사	156	3	98	21	5	11	18	
	시군	7,495	47	6,555	795	45	32	21	
존형	계	9,640 (100.0)	14 (0.1)	7,382 (76.6)	1,780 (18.5)	209 (2.2)	162 (1.7)	93 (1.0)	
	공사	3,235	6	2,374	521	125	130	79	
	시군	6,405	8	5,008	1,259	84	32	14	
코어형	시군	1	-	-	1	-	-	-	

※ 자료 : 농업생산기반정비사업 통계연보(2007), 농업기반시설관리시스템(RIMS)

#### 다. 기타 제원에 따른 분류

저수지 제체 외에 저수지의 규모를 판단할 수 있는 유역면적, 총저수량을 기준으로 저수지를 분류하여 분석하였다. 유역면적과 총저수량은 홍수방어를 위한 치수측면이나 용수공급능력을 나타내는 이수측면에서 대단히 중요한 제원의 하나이다.

농업용저수지의 유역면적을 기준으로 분류해 보면 전체 저수지의 81%가 유역면적 100ha 미만의 소규모로 분류되었으며, 비교적 규모가 큰 한

국농어촌공사 관리저수지도 49%가 유역면적 100ha 미만으로 나타나 전체적으로 농업용 저수지는 수혜구역 인근의 소규모로 분포하고 있음을 알 수 있다.

저수지의 수자원 공급능력을 대표할 수 있는 총저수량을 살펴보면, 관리주체에 따른 특징이 명확하게 나타나는 것을 볼 수 있는데, 시군관리 저수지의 경우 4%만이 총저수량 10만<sup>m<sup>3</sup></sup> 이상의 저수지로 나타났으나, 한국농어촌공사 관리 저수지의 경우 48%가 총저수량 10만<sup>m<sup>3</sup></sup> 이상으로 나타나 시군관리 대상 저수지에 비해 한국농어촌공사 관리대상 저수지가 상대적으로 규모가 크다는 것을 알 수 있다.

(표 2-8) 유역면적에 따른 분류

구 분	계	1,000ha 이상	1,000~500ha	500~300ha	300~200ha	200~100ha	100ha 미만	비고
합계	17,313 (100.0)	331 (1.9)	362 (2.1)	455 (2.6)	582 (3.4)	1,638 (9.5)	13,945 (80.5)	
공사	3,403 (100.0)	313 (9.2)	322 (9.5)	335 (9.8)	297 (8.7)	483 (14.2)	1,653 (48.6)	
시군	13,910 (100.0)	18 (0.1)	40 (0.3)	120 (0.9)	285 (2.0)	1,155 (8.3)	12,292 (88.4)	

(표 2-9) 총저수량에 따른 분류

관리 주체	계	1,000만 <sup>m<sup>3</sup></sup> 이상	1,000~100만 <sup>m<sup>3</sup></sup>	100~50만 <sup>m<sup>3</sup></sup>	50~30만 <sup>m<sup>3</sup></sup>	30~10만 <sup>m<sup>3</sup></sup>	10만 <sup>m<sup>3</sup></sup> 미만	비고
합계	17,313 (100.0)	33 (0.2)	492 (2.8)	397 (2.3)	334 (1.9)	896 (5.2)	15,161 (87.6)	
공사	3,403 (100.0)	33 (1.0)	490 (14.4)	386 (11.3)	276 (8.1)	463 (13.6)	1,755 (51.6)	
시군	13,910 (100.0)	- -	2 (0.01)	11 (0.1)	58 (0.4)	433 (3.1)	13,406 (96.4)	

### 3. 저수지 안전진단 현황

농업용 저수지의 노후화 및 취약점을 통계적으로 살펴보기 위하여 정밀 안전진단, 긴급정밀점검, 정밀점검 현황자료를 수집하여 분석하였다.

정밀안전진단은 1995년부터 5년마다 주기적으로 시행되어 지속적인 개보수를 수행하였기 때문에, 최근 5개년간 진단결과는 종합평가결과 D등급 이하가 8% 이하로 개선된 것으로 분석되었으나, 금회 분석은 농업용저수지의 취약점을 판단하기 위한 통계분석으로 전체 진단자료를 활용하였다.

“시설물 안전관리에 관한 특별법”이 제정된 1995년부터 2017년까지 23개년간 저수지의 안전진단현황을 살펴보기 위하여 한국농어촌공사에서 관리하고 있는 농업기반시설관리시스템(RIMS)에 수록된 안전진단 현황자료는 아래 (표 2-10)과 같다.

(표 2-10) 농업용저수지 안전진단 현황(1995~2017년)

진단 구분	합계	1종	2종	비고
합계	5,313	3,598	1,715	
정밀안전진단	4,065	2,673	1,392	
긴급정밀점검	348	115	233	
정밀점검	900	810	90	

※ 5년 주기 점검시기에 따른 저수지별 중복점검 포함

농업기반시설관리시스템(RIMS)에는 1995년 이후에 시행된 5,313건의 안전진단 및 정밀점검 자료가 수록되어 있으며, 수집된 5,313건 자료 중 정밀안전진단은 4,065건, 긴급정밀점검은 348건, 정밀점검은 900건 이다.

이 중 상세한 시설진단자료가 있는 정밀안전진단자료 4,065건 중 종합평가자료가 수록되지 않은 197건을 제외한 3,868건을 분석하여 농업용저수지 체체의 안전도 현황을 분석하였다.

저수지 종합평가에서는 저수지 시설을 크게 체체, 물넘이, 방수로, 취수 시설의 4개로 구분하여 시설의 안전도를 평가하고 있으며, 개별 시설의 안전등급을 종합적으로 판단하여 종합평가등급을 제시하고 있다.

(표 2-11) 농업용저수지 정밀안전진단 종합평가결과(1995~2017년)

진단 구분	합계	종합평가등급					비 고
		A	B	C	D	E	
합 계	3,868	2	260	2,841	764	1	건수 등급비율
	100.0%	0.1%	6.7%	73.4%	19.8%	0.0%	
1 종	2,518	2	244	2,034	237	1	"
	100.0%	0.1%	9.7%	80.8%	9.4%	0.0%	
2 종	1,350	0	16	807	527	0	"
	100.0%	0.0%	1.2%	59.8%	39.0%	0.0%	

※ 농업기반시설관리시스템(RIMS)에 종합평가등급이 없는 197개소 제외

분석대상 저수지의 종합평가 등급을 분석한 결과 3,868건 중 “주요부재에 결함이 발생하여 긴급한 보수·보강이 필요하며 사용제한 여부를 결정해야 하는 상태”인 D등급 이하는 전체 정밀안전진단 건수의 19.8%인 765건으로 나타났다.

이중 비교적 규모가 큰 1종시설물의 경우에는 D등급 이하가 9.4%인 반면, 규모가 작은 2종 시설물의 경우에는 39.0%에 달하여 2종 시설물이 안전에 더 취약한 것으로 분석되었다.

(표 2-12) 농업용저수지 정밀안전진단 제체평가결과(1995~2017년)

진단 구분	합계	종합평가등급					비 고
		A	B	C	D	E	
합 계	3,838	6	471	2,539	820	2	건수 등급비율
	100.0%	0.2%	12.3%	66.2%	21.4%	0.1%	
1 종	2,493	6	435	1,802	248	2	"
	100.0%	0.2%	17.4%	72.3%	9.9%	0.1%	
2 종	1,345	0	36	737	572	0	"
	100.0%	0.0%	2.7%	54.8%	42.5%	0.0%	

※ 농업기반시설관리시스템(RIMS)에 제체평가등급이 없는 227개소 제외

농업용저수지 정밀안전진단 제체 평가결과를 분석한 결과 D등급 이하는 전체의 21.5%인 822건으로 나타났으며, 1종 시설물의 경우에 D등급

이하가 10.0%인 반면, 2종 시설물의 경우에는 42.5%로 나타나 1종 시설물보다 D등급으로 판정되는 비율이 4배가량 많은 것으로 나타났다.

(표 2-13) 농업용저수지 정밀안전진단 물넘이평가결과(1995~2017년)

진단 구분	합계	종합평가등급					비 고
		A	B	C	D	E	
합 계	3,763 100.0%	5 0.1%	453 12.0%	2,226 59.2%	1,073 28.5%	6 0.2%	건수 등급비율
1 종	2,444 100.0%	2 0.1%	369 15.1%	1,595 65.3%	476 19.5%	2 0.1%	"
2 종	1,319 100.0%	3 0.2%	84 6.4%	631 47.8%	597 45.3%	4 0.3%	"

※ 농업기반시설관리시스템(RIMS)에 물넘이평가등급이 없는 302개소 제외

물넘이 평가결과를 살펴보면 전체의 28.7%인 1,079건이 D등급 이하로 나타났으며, 1종 시설물의 경우에 D등급 이하가 19.6%, 2종 시설물의 경우에는 45.6%로 나타났다.

종합평가 및 제체 평가에서 1종 시설물의 D등급 판정비율이 약 10% 정도 수준인데 반하여 물넘이 평가에서는 1종 시설물도 D등급 이하가 약 20% 정도의 수준으로 높아지는데 이는 최근 이상기후, 기상이변 등으로 지속적으로 설계홍수량이 상승되고 있기 때문으로 판단된다.

(표 2-14) 농업용저수지 정밀안전진단 방수로평가결과(1995~2017년)

진단 구분	합계	종합평가등급					비 고
		A	B	C	D	E	
합 계	2,372 100.0%	4 0.2%	243 10.2%	1,360 57.3%	762 32.1%	3 0.1%	건수 등급비율
1 종	1,398 100.0%	3 0.2%	177 12.7%	896 64.1%	321 23.0%	1 0.1%	"
2 종	974 100.0%	1 0.1%	66 6.8%	464 47.6%	441 45.3%	2 0.2%	"

※ 농업기반시설관리시스템(RIMS)에 방수로평가등급이 없는 1,693개소 제외



방수로 평가결과를 살펴보면 전체의 32.2%, 1종 시설물 23.1%, 2종 시설물의 45.5%가 D등급 이하로 나타나고 있다.

방수로 또한 물넘이 평가와 마찬가지로 1종 시설물의 D등급 이하 판정 비율이 높는데 이는 물넘이 연결되어 홍수를 배제하는 구조물인 방수로 또한 설계홍수량이 지속적으로 상승하고 있어 그 영향으로 안전도가 취약한 것으로 판정되고 있는 것으로 보인다.

(표 2-15) 농업용저수지 정밀안전진단 취수시설평가결과(1995~2017년)

진단 구분	합계	종합평가등급					비 고
		A	B	C	D	E	
합 계	3,816	11	724	2,529	546	6	건수 등급비율
	100.0%	0.3%	19.0%	66.3%	14.3%	0.2%	
1 종	2,476	5	524	1,706	241	0	"
	100.0%	0.2%	21.2%	68.9%	9.7%	0.0%	
2 종	1,340	6	200	823	305	6	"
	100.0%	0.4%	14.9%	61.4%	22.8%	0.4%	

※ 농업기반시설관리시스템(RIMS)에 취수시설평가등급이 없는 249개소 제외

농업용저수지 정밀안전진단 취수시설 평가결과를 분석한 결과 D등급 이하의 전체의 14.3%인 552건으로 나타났으며, 1종 시설물의 경우에 D등급 이하가 9.7%인 반면, 2종 시설물의 경우에는 23.2%로 나타나 1종 시설물보다는 D등급으로 판정되는 비율이 높은 것으로 나타났다.

취수시설은 제체, 물넘이, 방수로 보다는 D등급으로 평가받는 비율이 낮은 편으로 이는 재해의 개념보다는 취수시설은 상시 관리하고 사용하는 시설로 사용빈도가 높고 취수 불가시 저수지가 역할을 수행할 수 없기 때문에 지속적인 개보수를 진행하고 있기 때문으로 판단된다.

정밀안전진단 결과 저수지를 제체, 물넘이, 방수로, 취수시설로 분류하여 부분별로 결함사항을 조사한 결과는 다음 (표 2-16~19)와 같다.

제체 부분의 결함사항을 살펴보면, 전체 결함사항 9,032건 중 2,132건(23.6%)으로 제일 빈도수가 높은 것이 사석이완 이었으며, 다음으로는 여유고 부족 1,944건(21.5%), 침식세굴이 1,564건(17.3%), 누수·파이핑이 1,308건(14.5%)로 나타났다.

이중 가장 빈도수가 높은 사석이완의 경우 저수지 제체에 직접적인 붕

괴위험을 주는 것은 아니나, 여유고 부족은 월류의 위험성을 증가시키며, 침식세굴이나, 누수·파이핑의 경우 내부침식에 의한 붕괴를 유발하는 요인이므로 지속적으로 관찰하고 관리하여 사고를 예방할 필요가 있다.

(표 2-16) 농업용저수지 정밀안전진단 체계 결함사항(1995~2017년)

구분	합계	여유고 부족	누수 파이핑	누수 사면	안전율 부족	재료 불량	침하 균열	사석 이완	사면 변형	침식 세굴
합계	9,032 (100)	1,944 (21.5)	1,308 (14.5)	51 (0.6)	132 (1.5)	241 (2.7)	1,143 (12.7)	2,132 (23.6)	517 (5.7)	1,564 (17.3)
1종	5,564 (100)	1,103 (19.8)	722 (13.0)	39 (0.7)	107 (1.9)	120 (2.2)	756 (13.6)	1,492 (26.8)	269 (4.8)	956 (17.2)
2종	3,467 (100)	841 (24.3)	586 (16.9)	11 (0.3)	25 (0.7)	121 (3.5)	387 (11.2)	640 (18.5)	248 (7.2)	608 (17.5)

※ ( ) 내서 : 전체 결함진단사항 중 해당 결함사항의 비율

물넘이 부분의 결함사항을 살펴보면, 전체 결함사항 7,796건 중 1,835건(23.5%)이 균열·백태로 가장 흔하게 발생되었으며, 다음으로는 세굴·박락 1,760건(22.6%), 옹벽고 부족이 1,100건(14.1%), 누수가 967건(12.4%)으로 흔하게 결함사항으로 지적되는 것으로 나타났다.

물넘이 부분은 대부분 흙으로 구성 되어있는 필댐에서 홍수를 배제시키기 위한 소류력을 건디기 위하여 콘크리트 구조물을 연결한 부분으로 필댐에서 취약한 부분으로 분류된다. 특히, 접합부에서의 누수는 매우 중대한 결함이므로 빠른 보수·보강이 요구된다.

(표 2-17) 농업용저수지 정밀안전진단 물넘이 결함사항(1995~2017년)

구분	합계	구조 불안전	연장 부족	옹벽고 부족	균열 백태	세굴 박락	철근 노출	누수	재료 분리	문비 노후
합계	7,796 (100)	154 (2.0)	769 (9.9)	1,100 (14.1)	1,835 (23.5)	1,760 (22.6)	479 (6.1)	967 (12.4)	673 (8.6)	59 (0.8)
1종	5,307 (100)	70 (1.3)	406 (7.7)	602 (11.3)	1,404 (26.5)	1,163 (21.9)	388 (7.3)	798 (15.0)	434 (8.2)	42 (0.8)
2종	2,484 (100)	84 (3.4)	363 (14.6)	498 (20.0)	431 (17.4)	597 (24.0)	91 (3.7)	169 (6.8)	234 (9.4)	17 (0.7)

※ ( ) 내서 : 전체 결함진단사항 중 해당 결함사항의 비율

방수로 부분의 결함사항도 콘크리트 구조물이기 때문에 전체건수 중 균열·백태가 전체의 23.3%로 가장 흔하게 발생되었으며, 다음으로는 옹벽고부족이 22.8%, 세굴·박락 21.8%로 대부분을 차지하였으며 다음으로는 재료분리, 누수, 철근노출 등이 결함사항으로 지적되는 것으로 나타났다.

(표 2-18) 농업용저수지 정밀안전진단 방수로 결함사항(1995~2017년)

구분	합계	구조 불안전	옹벽고부족	균열 백태	세굴 박락	철근 노출	누수	전도 단차	재료 분리	기초 공동
합계	8,587 (100)	147 (1.7)	1,954 (22.8)	1,997 (23.3)	1,867 (21.7)	717 (8.3)	747 (8.7)	203 (2.4)	752 (8.8)	203 (2.4)
1종	5,811 (100)	71 (1.2)	1,194 (20.5)	1,435 (24.7)	1,237 (21.3)	566 (9.7)	587 (10.1)	141 (2.4)	482 (8.3)	98 (1.7)
2종	2,776 (100)	76 (2.7)	760 (27.4)	562 (20.2)	630 (22.7)	151 (5.4)	160 (5.8)	62 (2.2)	270 (9.7)	105 (3.8)

※ ( ) 내서 : 전체 결함진단사항 중 해당 결함사항의 비율

취수시설 중 농업용 저수지에서 가장 많은 결함사항을 나타내는 부분은 보통으로 취수시설 결함사항 8,288건 중 1,666건(20.1%)이 보통누수, 1,054건(12.7%)이 보통균열, 975건(11.8%)이 보통세굴로 나타났다.

이는 모두 보통에서 복합적으로 발생하는 결함사항으로 취수시설 결함사항의 44.6%인 3,695건으로 취수시설 결함건수의 거의 절반을 차지하고 있다.

(표 2-19) 농업용저수지 정밀안전진단 취수시설 결함사항(1995~2017년)

구분	합계	구조 불안전	균열 박락	권양기 불량	스핀들 변형	철근 노출	취수공 누수	보통 누수	보통 세굴	보통 균열
합계	8,288 (100)	130 (1.6)	1,297 (15.6)	572 (6.9)	1,199 (14.5)	324 (3.9)	1,071 (12.9)	1,666 (20.1)	975 (11.8)	1,054 (12.7)
1종	5,655 (100)	60 (1.1)	1,012 (17.9)	294 (5.2)	671 (11.9)	276 (4.9)	714 (12.6)	1,195 (21.1)	601 (10.6)	832 (14.7)
2종	2,633 (100)	70 (2.7)	285 (10.8)	278 (10.6)	528 (20.1)	48 (1.8)	357 (13.6)	471 (17.9)	374 (14.2)	222 (8.4)

※ ( ) 내서 : 전체 결함진단사항 중 해당 결함사항의 비율

농업용저수지의 정밀안전진단 결과에 따른 결함사항의 보강방안을 저수지 부분별로 제시한 것은 다음 (표 2-20~23)과 같다.

먼저, 저수지의 본체인 제체에 대한 보강방법은 제방 덧쌓기, 표면차수, 그라우팅, 드레인 설치 등이 있으며, 이중 가장 많이 제시된 보강방법은 사석 채설치(28.2%), 제체 덧쌓기(22.9%), 단면보강(19.1%), 그라우팅(13.3%) 순으로 나타났다.

이는 결함사항에 따른 보강방안을 제시한 것이므로 사석이완은 사석채설치, 제체 덧쌓기와 단면보강은 여유고 부족, 그라우팅은 누수사면, 균열에 대응한 보강방법을 제시하고 있는 것을 알 수 있다

(표 2-20) 농업용저수지 정밀안전진단 제체 보강방안(1995~2017년)

구분	합계	제체 덧쌓기	표면 차수	그라우팅	드레인 설치	제방 압성토	제방 치환	성토 다짐	사석 채설치	단면 보강
합계	8,542 (100)	1,958 (22.9)	160 (1.9)	1,133 (13.3)	583 (6.8)	64 (0.7)	46 (0.5)	559 (6.5)	2,406 (28.2)	1,633 (19.1)
1종	4,820 (100)	985 (20.4)	81 (1.7)	586 (12.2)	300 (6.2)	38 (0.8)	21 (0.4)	362 (7.5)	1,557 (32.3)	890 (18.5)
2종	3,722 (100)	973 (26.1)	79 (2.1)	547 (14.7)	283 (7.6)	26 (0.7)	25 (0.7)	197 (5.3)	849 (22.8)	743 (20.0)

※ ( ) 내서 : 전체 보강공법 제시사항 중 해당 보강공법의 비율

물넘이와 방수로, 취수시설은 철근콘크리트로 만들어진 시설물로서 주요한 보강방법은 단면복구, 균열보수, 방청충전이 공통적인 보강방안이다.

물넘이의 경우 전체 복구방안 5,254건의 65.7%인 3,453건, 방수로의 경우 전체 복구방안 8,167건의 48.0%인 3,921건이 단면복구, 균열보수, 방청충전으로 보강방안을 제시하고 있다.

그 외에는 물넘이 보강방안으로는 증가된 홍수량으로 인한 물넘이 연장부족, 옹벽고 부족을 해결하기 위하여 물넘이 확장(17.6%), 물넘이 채설치(10.6%)를 보강방법으로 제시하고 있으며, 방수로 보강방법으로는 옹벽고 부족 및 단면 보수보강을 위한 옹벽고 승상(21.8%), 방수로 채설치(8.1%)를 보수보강 방법으로 추천하고 있다.

취수시설은 누수를 방지하기 위한 지수공법이 18%로 가장 많이 제시되고 있으며, 기계시설인 권양기·스핀들 보수도 18.5%를 차지하고 있다.

(표 2-21) 농업용저수지 정밀안전진단 물넘이 보강방안(1995~2017년)

구분	합계	물넘이 확장	비상 물넘이	비상 수문	그라우팅	단면 복구	균열 보수	방청 충전	수문 보수	물넘이 재설치
합계	5,254 (100)	926 (17.6)	51 (1.0)	74 (1.4)	96 (1.8)	1,369 (26.1)	1,355 (25.8)	729 (13.9)	95 (1.8)	559 (10.6)
1종	3,531 (100)	504 (14.3)	33 (0.9)	56 (1.6)	61 (1.7)	1,028 (29.1)	1,091 (30.9)	543 (15.4)	58 (1.6)	157 (4.4)
2종	1,723 (100)	422 (24.5)	18 (1.0)	18 (1.0)	35 (2.0)	341 (19.8)	264 (15.3)	186 (10.8)	37 (2.1)	402 (23.3)

※ ( ) 내서 : 전체 보강공법 제시사항 중 해당 보강공법의 비율

(표 2-22) 농업용저수지 정밀안전진단 방수로 보강방안(1995~2017년)

구분	합계	단면 확장	옹벽고 손상	균열 보수	단면 복구	방청 충전	전도 방지	지수공 설치	표면 처리	방수로 재설치
합계	8,167 (100)	650 (8.0)	1,782 (21.8)	1,404 (17.2)	1,406 (17.2)	1,111 (13.6)	34 (0.4)	652 (8.0)	469 (5.7)	659 (8.1)
1종	5,514 (100)	306 (5.5)	1,124 (20.4)	1,085 (19.7)	1,027 (18.6)	837 (15.2)	25 (0.5)	490 (8.9)	385 (7.0)	235 (4.3)
2종	2,653 (100)	344 (13.0)	658 (24.8)	319 (12.0)	379 (14.3)	274 (10.3)	9 (0.3)	162 (6.1)	84 (3.2)	424 (16.0)

※ ( ) 내서 : 전체 보강공법 제시사항 중 해당 보강공법의 비율

(표 2-23) 농업용저수지 정밀안전진단 취수시설 보강방안(1995~2017년)

구분	합계	균열 보수	권양기 보수	스핀들 보수	취수공 복구	지수 공법	방청 충전	단면 복구	표면 처리	시설 재설치
합계	7,504 (100)	827 (11.0)	454 (6.1)	929 (12.4)	730 (9.7)	1,348 (18.0)	1,025 (13.7)	1,145 (15.3)	521 (6.9)	525 (7.0)
1종	5,320 (100)	706 (13.3)	247 (4.6)	542 (10.2)	484 (9.1)	1,016 (19.1)	812 (15.3)	861 (16.2)	456 (8.6)	196 (3.7)
2종	2,184 (100)	121 (5.5)	207 (9.5)	387 (17.7)	246 (11.3)	332 (15.2)	213 (9.8)	284 (13.0)	65 (3.0)	329 (15.1)

※ ( ) 내서 : 전체 보강공법 제시사항 중 해당 보강공법의 비율

## 제2절 저수지 제체 붕괴사례

댐과 관련된 사고 발생시에는 붕괴와 유실이 혼동되어 사용되는데 이와 관련된 사전적의미를 찾아보면 토목용어대사전에서는 붕괴를 “외력의 증가없이 구조물의 변형이 갑자기 증가하는 상태”, 농공용어대사전에서는 제방붕괴를 “침식과정과 중력의 영향을 받아서 하안이나 제방의 사면을 구성하는 물질이 떨어져 나가는 것”으로 정의하고 있으며, 유실은 국어사전에 “단순히 떠내려가서 없어짐”으로 정의하고 있어 본 연구의 댐 붕괴의 정확한 의미는 아닌 것으로 판단된다.

따라서, 본 연구에서의 댐(제체) 붕괴라는 것은 홍수 등 기타요인에 의하여 구조물의 변형이 급격하게 증가하여 댐의 근본적인 목적인 저수능력 일부 또는 전부를 상실한 상태로 정의하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

국제대댐위원회(ICOLD)에서의 1900년과 1973년 사이에 붕괴된 높이 15m이상의 댐에 대한 조사결과를 살펴보면 댐의 주요한 붕괴 요인은 월류 및 부적절한 여수로(34%), 기초부 결함(30%), 파이핑(28%) 등 이었다.

“콘크리트 댐은 기초부 결함(53%), 흙댐의 경우 파이핑과 침투(38%) 및 월류(35%)에 의하여 붕괴가 발생되었으며, 설계시 설계홍수량의 과소 산정, 기초 지질의 부적절한 처리도 댐 붕괴의 주요원인으로 볼 수 있다.” (댐 및 제방의 설계·시공·안전관리기술, p367)

우리나라의 저수지는 앞서 저수지 제체의 통계분석에서 나타난 바와 같이 준공이후 50년 이상 지난 저수지가 82%에 달할 정도로 시설의 노후화가 심각하다. 제체 및 부속 구조물의 노후화가 진행될수록 월류나 내부침식 등에 따른 저수지의 붕괴확률은 증대된다고 판단할 수 있으므로 이에 신속한 대책수립이 필요한 실정이다.

국내에서는 대규모 댐이 붕괴된 경우는 거의 없으나, 태풍이나 집중호우로 인한 급격한 유입량 증가로 소류지가 붕괴된 사례는 상당수 있으며, 국내의 댐, 저수지 붕괴사례는 대부분 태풍이나 집중호우에 의한 홍수발생이 주요한 원인이나, 일부 저수지의 경우에는 파이핑 등 내부침식에 의하여 붕괴된 경우도 있는 것으로 나타났다.

해외에서는 태풍, 집중호우 외에도 지진, 폭격, 시공불량 등 다양한 댐 붕괴사례가 존재하나 대부분은 우리나라와 마찬가지로 홍수에 의한 사례가 많다.

## 1. 국내 저수지 제체 붕괴 사례

국내에서는 아직 최근까지 대규모 댐이 붕괴되어 막대한 피해를 발생시키는 경우는 없었으며, 대부분 태풍이나 집중호우 발생시에 홍수로 인한 소규모의 소류지나 농업용 저수지가 붕괴된 사례는 많이 있다.

가장 오래전에 발생하였으며 인명피해는 가장 많았던 1961년에 효기리 댐 붕괴, 1996년에 붕괴된 발전 전용댐인 연천댐이 있으며, 2002년에 기록적인 폭우를 몰고 와 많은 농업용저수지 붕괴를 유발한 태풍 루사로 붕괴된 장현, 동막, 경포저수지가 대표적 사례라고 볼 수 있다.

2002년 태풍 루사 내습시에는 강릉시내에 생활용수를 공급하는 대규모 농업용저수지인 오봉댐도 붕괴위험에 노출된 바 있다. 이는 모두 단기간의 극단적인 집중호우로 인하여 당초 농업용저수지의 설계홍수량인 200년 빈도나 기왕최대홍수량을 초과한 것이 원인이라 볼 수 있다.

또한, 1987년과 1998년은 다른 해에 비하여 전국적으로 태풍과 집중호우가 많이 발생하여 소규모의 소류지가 많이 붕괴되었던 해로 기록되었다. 이 소류지들은 당시 빈번한 강우에 의하여 약해진 상태에서 장기간 강우가 지속됨에 따라 제체가 포화되어 간극수압이 증가하고, 유효응력이 감소하여 붕괴된 것으로 판단된다.

본 연구에서는 국내의 댐 및 소류지 붕괴사례를 수해방지대책보고서(1999) 등 다양한 문헌자료, 기존 보고서, 인터넷, 신문기사 등을 통하여 조사한 후 각 문헌별 중복된 자료와 추가된 자료를 정리하여 <부록>에 수록하였다.

검토결과 국내의 댐 및 소류지 붕괴사례 수집자료는 모두 120건을 수집하였으나 종합적인 자료가 아닌 단편적인 내용만이 수록되어 있어 저수지 제원, 붕괴단계, 피해상황 등 체계적인 자료취득이 곤란하였다.

따라서, 수집가능한 자료를 바탕으로 댐이나 소류지의 명칭과 행정구역명을 농업기반시설관리시스템(RIMS)과 비교하여 댐 형식, 준공년도 등 보완 가능한 자료를 추가보완하여 국내 댐 및 소류지 붕괴사례 자료를 데이터베이스화 하였다.

수집자료 120건 중 댐 형식으로 구분할 수 있는 107건의 자료를 이용하여 댐 형식을 구분하면 (표 2-10)에 정리한 바와 같이 필댐 중 균일형 필댐이 45건, 준형 필댐이 61건, 콘크리트댐은 1건으로 나타났다.

(표 2-24) 댐 형식별 댐 붕괴사례 현황

구 분	계	필댐			콘크리트 댐	비고
		계	균일형	존형		
저수지수	17,313	17,292	7,651	9,640	21	
붕괴사례	107	106	45	61	1	
발생비율(%)	-	0.6	0.6	0.6	4.8	

※ 수집자료 120개소 중 13개소는 댐 형식 불명확

필댐의 붕괴사례 중 균일형 필댐이 전체 붕괴사례 106건중 45건으로 42.5%이며, 존형 필댐의 61건으로 57.5%를 차지하고 있어, 실제 붕괴사례는 존형 필댐의 비율이 더 높은 것으로 나타났다.

따라서, 단편적으로 살펴보면 존형 필댐의 붕괴빈도가 크다고 볼 수도 있으나 앞서 (표 2-25)를 보면 실제 우리나라 농업용저수지 전체의 필댐 형식 비율을 살펴보면 존형이 55.7%, 균일형이 44.2%를 차지하고 있으므로 필댐의 특정 형식의 붕괴빈도가 높다고 판단할 수는 없으며, 필댐의 형식별 차이는 없다고 볼 수 있다. 콘크리트댐의 경우 저수지수가 워낙 작고 사례가 1건으로 붕괴비율 비교는 의미가 없을 것으로 판단된다.

국내 소류지 및 댐 붕괴사례를 붕괴 발생년도로 구분하여 살펴보면 대부분 집중호우 및 태풍내습시 주로 붕괴사고가 발생한 것을 알 수 있다.

수집자료 120건 중 가장 많은 붕괴사례가 발생한 연도는 1998년으로 수집된 자료 총 120건 중 35%인 42건이 1998년에 발생하였다.

1998년에는 유난히 집중호우가 많았던 해로 7월 31일부터 8월 18일까지 호우가 집중되었으며, 당시 하류 최대 강수량으로는 1998년 8월 4일 경기 강화에서 619.5mm가 내려 연 강수량의 50%에 해당하는 강수량이 하루에 내렸다. 당시 전국적으로 집중호우가 지속되었으며, 이재민 24천명, 1조2천억원의 재산피해가 발생하였다.

다음으로는 태풍루사가 상륙한 2002년 14건, 태풍 셀마가 상륙했던 1987년 9건으로 대부분 집중호우나 태풍의 상륙에 의한 폭우로 인하여 소류지나 댐이 붕괴한 것으로 조사되었다.

국내 소류지 및 댐 붕괴건수를 발생년도로 분류한 것은 아래의 (표 2-10)과 같다.



(표 2-25) 국내 소류지 및 댐 붕괴 발생년도별 분류

발생연도	1961	1972	1980	1987	1996	1998	1999	2002	2003	2004	2005
건수	1	1	1	9	1	42	5	14	4	2	4
발생연도	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2016	합계
건수	6	4	1	3	2	1	4	5	7	3	120

살펴본 바와 같이 국내의 댐 및 소류지 붕괴사례를 살펴보면 대부분 태풍이나 집중호우 등으로 저수지 제체의 월류, 여수로나 방수로 부문의 설계홍수 초과로 인한 전도, 외제사면의 슬라이딩 등이 주요원인으로 판단되나, 저수지별로 구체적인 피해원인에 대한 조사가 수반되지 않아 파괴원인에 대한 정확한 분류 및 통계분석은 어려운 상황이다. 대표적인 저수지에 대한 붕괴사례를 설명하면 다음과 같다.

#### 가. 효기리댐

1961년 7월 11일 20시부터 24시까지 4시간 동안 내린 폭우로 전라북도 남원 일대에 큰 수해가 발생했다. 효기리댐은 전북 남원군 이백면 효기리에 위치하며 이때 폭우로 저수지 제체가 붕괴되며 하류에 위치한 대부분의 가옥이 침수되었다.

효기리댐은 높이 15m, 길이 약 115m, 저수용량 270천m<sup>3</sup>이며, 당시의 남원농지개량조합의 자료에 의하면 1961년 7월 11일 20시에서 22시 30분 사이에 내린 강우량이 150mm로 댐의 여수로의 홍수배제능력을 초과하는 홍수량으로 저수위가 갑자기 상승하며, 댐의 제체를 월류하여 약 60m 구간이 결괴·유실되었다.

갑작스런 저수지 제체의 붕괴로 하류에 위치한 효기마을에서 190여명에 달하는 인명피해가 났다. 당시 보고에 따르면 마을 전체가 1.3m에서 2.0m로 침수된 것으로 추정되고 있으며 저수지 비상대처계획(EAP)이나 홍수예경보시스템의 중요성을 나타내 주는 사고이다.



<그림 2-5> 남원 수해지구 주민들 모습(국가기록원)

#### 나. 연천댐 붕괴

연천댐은 대체에너지 개발을 위하여 민간에 의한 소수력 발전사업을 권장하던 정부방침에 의하여 건설된 소수력 발전용 댐으로, 임진강의 제1지류인 한탄강에 건설되었다.

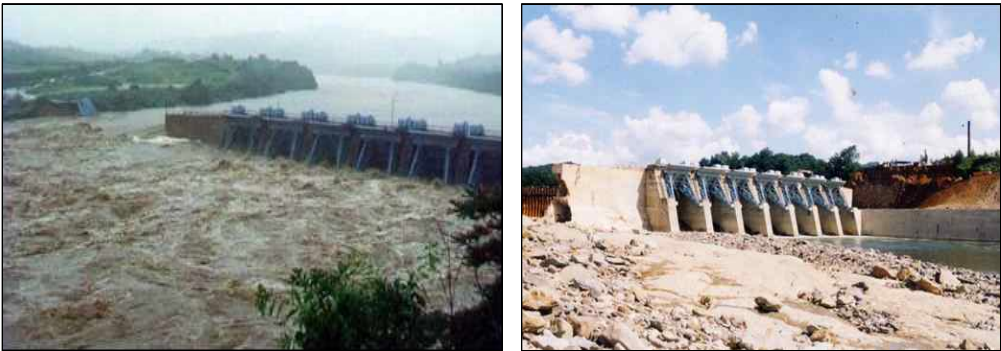
1986년 11월에 준공된 연천 소수력 발전소는 우리나라 최초의 소수력 발전소로 붕괴 당시까지 운영중인 소수력 발전소 가운데 가장 큰 규모였다. 연천댐은 경기도 연천군 청산면 궁평리에서 경기도 연천군 전곡면 신답리를 가로질러 건설된 댐으로서 유역면적 1,838km<sup>2</sup>, 댐 길이 169.5m, 댐 높이가 22m(EL.53.5m)이며, 총저수량 13백만m<sup>3</sup>, 설계홍수량은 5,230m<sup>3</sup>/s인 콘크리트 문비형 토사혼합식 댐이다.

댐이 위치한 연천지역에는 1996년 7월 26일부터 28일 오전까지 계속된 집중호우로 약 700mm의 강우가 발생하였고, 1일 최대 강우량은 약 400mm

에 달했다. 연천댐은 발전소 수문 7개를 모두 개방하고 댐 수위를 조절하려고 하였으나, 1996년 7월 27일 오전 9시가 넘어 댐 양안으로 월류되면서 30분만에 우측 댐체가 붕괴된 것으로 알려졌으며 붕괴원인에 대한 정확한 연구결과는 나오지는 않았다.

1996년 10월 수자원학회에서 발간된 「96년 7월 경기·강원 북부지역 홍수 피해」에서 조사한 결과에 의하면 7월 27일 오전 9시경 유입량은 약 7,540m<sup>3</sup>/s로 추정하고 있으며 이는 연천댐 200년빈도 설계홍수량 5,230m<sup>3</sup>/s 보다 약 2,300m<sup>3</sup>/s 초과하는 유량이다.

이 댐의 붕괴로 인하여 하류에 위치한 한탄강 유원지의 가옥 약 50여 채가 전파된 것으로 나타났으며, 유역전체에 걸쳐 홍수가 발생하여 연천댐의 붕괴로 인하여 피해가 얼마나 가중되었는지는 알 수 없다.



<그림 2-6> 연천댐 붕괴

#### 다. 장현·동막저수지 붕괴

강원도 강릉시에 위치한 장현·동막저수지 붕괴의 직접 원인은 현재까지 우리나라에 가장 많은 피해를 준 태풍 1위를 차지하고 있는 태풍 “루사”에 의한 집중호우이다.

2002년 8월 말에 한반도에 상륙했던 태풍 “루사”는 상륙 당시에 최대 순간풍속 39.7m/s, 중심 최저기압은 970hPa이었으며, 124명이 사망하고 60명이 실종되었으며 총 5조 1497억원의 재산피해를 냈다.

2002년 8월 30일 강원지역에 내습한 태풍 “루사”에 의하여 영동지역은 24시간 최대 강우량이 334~944.5mm를 기록하였으며, 이때 강릉지역의 강우량은 건설교통부(2000)에서 추정된 강릉지역의 25km<sup>2</sup>에 대한 PMP 강우량을 초과하여 강릉지역에 발생 가능한 24시간 최대강우량에 근접하여, 우리나라의 가능최대강수량도(PMP도)를 재작성하는 계기가 되었다.

태풍 “루사”는 앞서 설명한 바와 같이 강릉지역을 통과하는 동안 기록적인 폭우를 동반하였으며, 특히 8월 31일 19시에서 23시까지 5시간동안 56mm/hr 이상의 강우강도를 기록하여 이 시간대 장현저수지 붕괴, 오봉댐의 최고수위 도달, 강릉시까지 대규모 침수 등 피해가 집중되었다.

남대천 제1지류인 섬석천 수계에 속하는 장현, 동막저수지는 홍수조절 기능이 전혀 없는 농업용 저수지로서 장현, 동막저수지 붕괴로 인하여 하류지역의 주택유실, 농경지 침수 등 홍수피해를 가중시켰다.

#### 1) 장현저수지

장현저수지는 유역면적은 11.52km<sup>2</sup>, 제체 길이 170m, 제체 높이가 14.8m인 농업용 저수지로서 섬석천 수계에 위치하고 있다. 장현저수지는 설계홍수량 190m<sup>3</sup>/s로 설계된 저수지로 홍수배제시설은 측구식 여수로 구조로 길이는 80m이었으며, 붕괴당시 설계홍수량을 초과하는 313m<sup>3</sup>/s 이상의 홍수량으로 인하여 여수로 시설을 포함한 약 53m가 유실되었다.

장현저수지는 8월 31일 오전 10시 50분경에 홍수위를 넘어섰으며, 11시 10분 경에는 여수로가 유실되었고, 21시 10분경에 완전 붕괴되어 약 200만m<sup>3</sup>의 저수량이 약 1시간에 걸쳐 유출되었다.

여수로를 월류하는 과도한 홍수량으로 인하여 저수지 좌안측 댐 제체가 약 80m 정도 유실되었다. <그림>에서 볼 수 있는 저수지의 붕괴로 인해 하류지역에 위치한 모산의 13가구가 유실되어 큰 인명피해를 당하였으며, 저수지의 영향권에 있는 약 1.5km 구간의 농경지가 침수되거나 매몰되는 피해를 입었다.

#### 2) 동막저수지

동막저수지는 유역면적 1.86km<sup>2</sup>, 제체 길이 420m, 제체 높이 24.1m인 농업용 저수지로 장현저수지와 마찬가지로 섬석천 수계에 위치하고 있다.

동막저수지의 여수로도 장현저수지와 마찬가지로 측구식 여수로 구조를 가지고 있었으며, 여수로의 설계홍수량 14m<sup>3</sup>/s를 초과하는 67m<sup>3</sup>/s이상의 홍수량으로 인하여 여수로 시설을 포함한 약 57m가 유실되었다.

동막저수지의 완전붕괴는 8월 31일 20시 이후에 발생되었으며, 홍수로 인한 급격한 수위상승과 저수지 붕괴에 따른 수위급강하에 의한 것으로 판단되는 제체 포락이 약 175m 정도로 발생되었다.



<그림 2-7> 장현저수지 여수로 붕괴 현장



<그림 2-8> 장현저수지 붕괴 및 하류부 피해 현장





<그림 2-9> 동막저수지 붕괴 현장



<그림 2-10> 동막저수지 붕괴 및 하류부 피해 현장

### 라. 산대 저수지

산대저수지는 경상북도 경주시 안강읍 산대리에 위치한 저수지로, 높이 12.2m, 길이 210m, 총저수량 246천톤으로 1964년에 준공된 필댐이다.

산대저수지는 2013년 4월 12일 14시경 제체가 붕괴되었으며, 관계기관 합동조사결과 산대저수지는 중심코어가 없는 균일형 흙댐으로 준공이후 사용연한 50여년이 경과된 노후화된 저수지로, 제체하단에 위치한 복통과 제체의 접촉면을 따라 오랜기간 동안 내부침식으로 인한 유로형성 및 복통주변 공동화로 인한 파이핑으로 제체가 붕괴된 것으로 파악되었다.

피해상황은 저수지 통관 주변 제체 일부(높이 8m, 길이 10m)가 파손되고, 하류부 농경지 2ha, 상가 5개소 및 차량 13대가 침수되었으며, 인근 도로와 안강 종합운동장 인조잔디에 토사가 유입되었다.

산대저수지의 붕괴로 인한 피해는 크지 않았으나, 파이핑으로 인한 붕괴로 사회적으로 노후화된 저수지에 대한 안전진단 및 관리체계의 강화가 중요하다는 점을 나타낸 사고 였다.



<그림 2-11> 산대저수지 붕괴사진(외측)



<그림 2-12> 산대저수지 붕괴사진(내측)



## 2. 국외 저수지 제체 붕괴 사례

세계적으로 댐 및 저수지 사고 및 제체 붕괴사례는 국내보다 사례가 많고 다양한 원인으로 발생한다.

과거 전 세계에서 발생한 댐 사고는 약 15만 개소에 이르고 있으며 12세기 이후에 2,000여개 댐이 손상을 입었고 20세기 이후에는 200여개소에서 댐 사고가 발생하여 약 238,000명이 사망하였으며 1950년 이전에 건설된 댐은 약 2.2%, 그 이후에 건설된 댐은 0.5%가 붕괴되었다고 세계대댐회(ICOLD)는 밝히고 있다.

기존 보고서인 충도저수지 비상대처계획(2007)에서는 외국의 댐 붕괴 사례에 대한 자료를 기존 자료, 각종 문헌 및 보도자료, 인터넷을 통해 조사하여 155건의 댐 붕괴 사례에 대한 댐의 제원, 붕괴 발생원인, 붕괴 형상 및 규모, 댐 하류에서의 피해상황 등 이용 가능한 자료를 수집 및 정리한 바 있다.

본 연구에서는 기존 관련 연구에서 수집된 국외의 댐, 저수지 붕괴사례 자료를 수집하고, 기존 관련연구에서 누락되거나 그 이후에 발생된 외국의 댐 붕괴자료 36건을 추가로 수집하여 [부록]에 정리하였으며, 댐 붕괴원인이 규명된 대표적인 사례를 소개하였다.

그러나, 댐 붕괴사례의 자료가 원인규명을 위한 보고서 형태로 존재하는 것이 아니라, 각종 문헌이나 보도자료, 인터넷 등으로 붕괴사건별로 단편적으로 기록되어 있어 완전한 분석을 위한 자료를 수집하는 것은 현실적으로 어려웠으며 기존에 정리된 자료나 신규로 보완된 자료도 붕괴원인, 댐형식, 댐제원 등 관련자료가 완전하게 정리되어 있지 않고 일부는 누락되어 있으므로 항목별 분석시에는 자료가 있는 붕괴건수에 대하여만 분석을 수행하였다.

수집자료 191건 중 댐 형식으로 구분할 수 있는 151건의 자료를 이용하여 댐 형식을 구분하면 (표 2-10)에 정리한 바와 같이 필댐이 125건, 콘크리트댐은 21건이고 나머지 5건은 표면차수벽형석괴댐(CFRD)으로 구분할 수 있다.

필댐 125건에는 흙댐(erath fill dam) 106개, 사력댐(earth-rock fill dam)이 19개로 나타났으며, 콘크리트댐 21개는 중력식 11개, 아치형 8개, 부벽식 1개, 복합식이 1개로 나타났다.

(표 2-26) 댐 형식별 댐 붕괴사례 현황

계	필 댐			콘크리트댐					CFRD
	계	흙댐	사력댐	계	중력식	아치식	부벽식	복합식	
151	125	106	19	21	11	8	1	1	5

※ 수집자료 191개소 중 40개소는 댐 형식 불명확

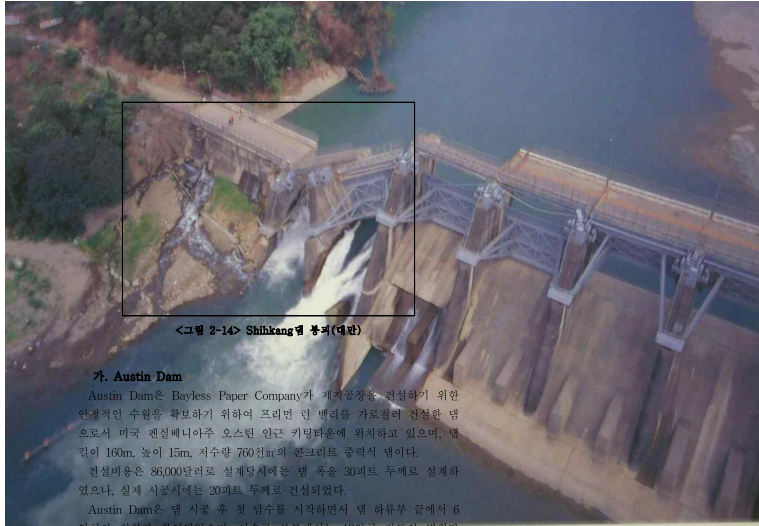
금세기의 대표적인 댐 사고 사례로는 1975년 8월에 중국 허난성에 있던 Banqiao댐의 붕괴로 230,000명이 물에 휩쓸려 사망한 것으로 추정되고 있으며 이재민만 11백만명에 이르렀던 것으로 나타났다.

또한, 1976년 6월 5일에 미국의 Teton댐이 붕괴되어 약 370백만m<sup>3</sup>의 물이 댐 하류지역의 농경지와 도시들을 덮쳐 11명이 사망하고 약 20억\$의 재산피해가 발생한 것으로 추정되고 있다.

또한 대만에서는 1999년 9월 20일에 규모 7.7의 지진이 발생하여 대만 최대의 용수공급원이었던 Shihkang댐이 붕괴되었고 이탈리아의 Vaiont댐은 상류측 좌안에서 사면이 붕괴되어 저수된 물이 월류하여 하류지역에 있던 2,600명이 사망하는 등 많은 재산피해가 발생하였다.



<그림 2-13> Banqiao 댐 붕괴(중국)



<그림 2-14> Shihkang댐 붕괴(대단)

**가. Austin Dam**

Austin Dam은 Bayless Paper Company가 제지공장을 건설하기 위한 안정적인 수원을 확보하기 위하여 프리먼 댐 뱀리톱 가로질러 건설한 댐으로서 미국 펜실베이니아주 오스틴 인근 키링타운에 위치하고 있으며, 댐 길이가 160m, 높이 15m, 저수량 760천㎥의 콘크리트 중력식 댐이다.

건설비용은 86,000달러로 설계당시에는 댐 폭은 30피트 두께로 설계하였으나, 실제 시공시에는 20피트 두께로 건설되었다.

Austin Dam은 댐 시공 중 첫 담수를 시작하면서 댐 하류부 끝에서 6인치 정도의 침하가 확인되었으며, 이후로 부분에서는 13인치 정도의 변위가 발생하였다. 댐의 부분적인 침하와 변위 발생으로 담수를 중단하고, 안전 진단을 통하여 원인을 파악하고 보강 조치를 취하여야 했음에도 불구하고, 댐 운영자인 Bayless Pulp & Paper Company에서는 담수를 계속 시행하였다.

이에 따라 1911년 9월 30일 댐 기초부에서의 대규모 관통과 함께 하류 방향으로 전도가 발생하여 전체적인 댐 붕괴가 발생하였다.

Austin Dam 붕괴로 78명이 사망하고 인적피해가 발생하였으며, 하류부 인구 2,000명의 도시가 전체적으로 침수피해를 입었다.

댐 붕괴의 직접적인 원인은 공학적으로 취약한 기초부와 콘크리트와의 부착력 부족과 댐 콘크리트가 응결되기 전에 담수가 시작되어 댐체의 기초부로의 과도한 수압작용이 원인으로 작용하였다.



<그림 2-15> (좌)Austin Dam 흔적, (우)댐 붕괴로 파손된 학교

#### 나. Teton Dam

Teton Dam은 미국 아이다호 동쪽의 Teton River에 설치된 댐으로 프리몬트와 매디슨 카운티 사이의 주 동부에 위치하며 미 연방기관인 미개척국(USBR)에서 설계되었다.

댐 건설목적은 홍수조절 및 농업용수 공급이며, 1972년 착공하여 1976년 준공한 댐으로서 댐 높이 93m, 댐 길이 940m, 저수용량은 356백만<sup>m</sup>³ 달하는 거대한 중심코어형 사력댐이다.

1976년 6월 3일 Teton Dam은 건설이 완료된 후 초기 담수를 시작하는 동안 댐 우안 암반지역에 소량의 누수가 발생되었는데, 이에 의해 육안관찰이 매일 시작되었으며, 정기적인 계측주기도 1주 1회에서 1주 2회로 증가되었다.

6월 5일 오전 7시에서 8시 사이, 우안부 EL.1,538m 지점에서 초당 0.6~0.8<sup>m</sup>³의 심각한 누수가 발생하기 시작하였으며, EL.1,583m지점의 댐 우안에서도 흔탁한 흙탕물이 관찰되었다.

이 두가지 누수는 댐체와 원지반의 접합부에서 발생되었는데, 3시간 이후에 이 흐름들은 현저하게 증가되었으며, 오전 10시경에는 댐체 사면에서 약 0.4<sup>m</sup>³/s의 큰 누수가 발생되었다.<그림 2-1>

이 누수량은 점점 증가되었으며, 댐측에서 거의 수직으로 제체부 11m까지 확대되면서 약 1.8m 직경의 공동이 발생되었고 점차 유출이 진행되면서<그림 2-2>, 이 공동은 제체 상부로 발전되었다.<그림 2-3>

오전 11시경에는 제체 상류사면 부근의 저수지에 소용돌이가 발견되었으며, 11시 30분경에 댐 정상부근의 하류 사면에 침식도랑의 전면이 확대되면서 11시 57분경에 댐 정상이 붕괴되었다.<그림 2-4>(기존댐의 재개발 사례연구, 2004)

Telton댐 지점의 화산암반은 투수성이 매우 큰 특성을 가지고 있었으며, 화산암반의 특성상 크고 작은 균열이 존재하고 있음을 감안할 때 그라우팅된 부분을 제외하고는 모든 방향으로 침투면에서 매우 불리한 특성을 가지고 있다. 또한, 중앙부 코어는 소성이 작은 실트질 흙으로 축조된 관계로 세굴에 상대적으로 취약했던 것으로 판명되었다. 반면 초기에 제기되었던 담수속도에 관해서는, 담수속도에 관계없이 동일한 현상이 발생했을 것으로 분석되었다.

한편, Arching 현상으로 인한 수압이 불투수성 재료의 측면응력과 성토 재료의 인장강도의 합을 초과할 만큼 상당히 컸음을 보여 주었는데, 이것은 수압할열(hydraulic fracturing)에 의한 균열현상이 이론적으로 가능하였다는 것을 보여주고 있다.(기존댐의 재개발 사례연구, 2004)

결국, 댐의 붕괴로 11명이 사망하고 13,000두의 가축이 피해를 입었으며, 미 정부는 댐 붕괴로 인한 피해관련 소송에 3억달러 이상을 지불했다. 댐 붕괴로 인한 총 피해추정치는 20억달러로 추정되고 있다.



<그림 2-16> 댐 사면중간에 파이핑 발생(USBR)





<그림 2-17> 댐 공동발생(USBR)



<그림 2-18> 댐 공동 확대 및 상부로 진행(USBR)



<그림 2-19> 댐 상부 붕괴 및 월류(USBR)



<그림 2-20> 댐 상단 파이핑 진행 붕괴(USBR)



<그림 2-21> 댐 우안 붕괴후 유출(USBR)

#### 다. St. Francis Dam

성 프란시스 댐은 캘리포니아주 로스앤젤레스시의 북쪽에 위치한 댐으로서 로스앤젤레스 수자원국의 수석기술자인 멀홀랜드에 의하여 설계되었으며, 독특하게 계단식 하류면으로 설계했고 각 계단의 너비는 고도에 따라 달라지게 계획되었다.

댐 건설목적은 로스앤젤레스시의 생활용수 공급이며, 1924년 착공하여 1926년 준공한 댐으로서 댐 높이 62m, 댐 길이 210m, 저수용량은 47백만 m<sup>3</sup>의 중력식 아치 콘크리트 댐이다.

성 프란시스 댐은 준공 후 1926년에 담수를 시작하여 1928년 3월 5일에 EL.559.2m로 46,900천m<sup>3</sup>의 저수용량까지 담수가 되었으며 붕괴가 발생한 이 시점에 실제적인 만수용량에 도달한 것으로 보고되고 있다. 보고서에 의하면 관리인 중 한명이 붕괴 1시간 전인 오후 11:00시에 댐 정상을 관측 점검하였으나, 그때에도 어떤 급박한 상태가 발견되지 않았으며, 홍수가 발생되자 관리인들도 대피하여 댐 파괴순간을 목격한 사람은 아무도 없었다. 이 댐의 붕괴는 갑작스럽게 발생하였으며, 갑작스러운 댐 붕괴로 거대한 콘크리트 건물의 발전소는 발전기 바닥으로 무너져 버렸으며 발전



소 근무자들과 그들 가족들이 대피해 있었던 건물들도 홍수로 인해 파괴되어 떠내려가 버렸다.

댐 붕괴로 저수지의 실질적인 만수용량인 46,900천 $m^3$ 이 하류로 순식간에 흘러내려가 댐 하류 14km 지점에 있는 San Francisquito Creek로 밀어닥쳤으며, 70km의 Santa Clara강을 거쳐 바다로 흘러들어 갔다. 또한, 수천톤의 댐 구조물의 서측 부분에서 파손된 부분들 모두가 하류로 떠내려갔다. 이로 인한 홍수로 댐하류 1.6km지점에서 관측된 최대 수심은 33m를 기록하였으며 하류 발전소에서 약 0.8km 더 떨어진 하부 지점에서는 수심이 이보다 더 깊은 것으로 보고 되었다.(기존댐의 재개발 사례연구, 2004)

이와 같이 성 프란시스 댐은 1928년 3월 12일 23시 57분 붕괴되었으며, 이로 인한 최소한 432명이 사망하여 20세기 최악의 미국 토목공학 재해중 하나로 기록되었다.

성 프란시스 댐은 당초 설계와 달리 건설중인 1924년 7월에 댐 높이를 3m를 높이기로 결정하고, 댐 높이를 승상하였으나 기저부 폭을 늘리지 않고 댐 높이를 11% 높이는 바람에 전도방지 기능을 감소시켰으며, 댐의 상류 기저부에 목조 사다리 잔해가 있어 캔틸레버의 전도 안정성을 감소시켰음이 나타났다.

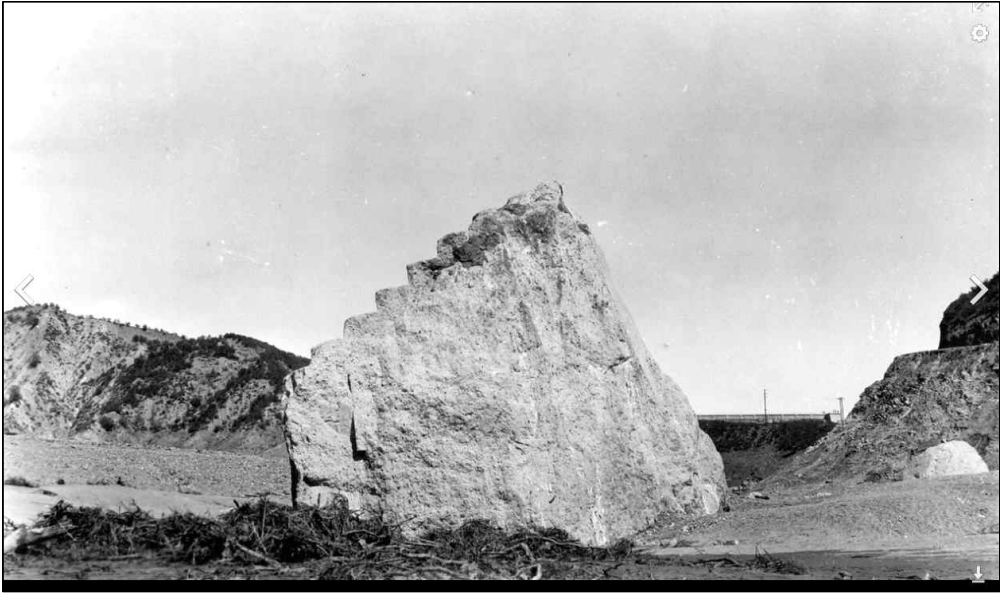
직접적인 댐의 붕괴원인은 수위가 만수위에 도달함에 따라 붕괴당시 댐에 작용하고 있던 양압력의 급속한 증가로 인해 댐체 상류사면의 기울임(tilting)이 발생되었다. 이 같은 현상은 완전한 붕괴 조금 이전에 댐 정상에 설치된 자동계측기에 의해 나타났으며 기울임 현상은 지점으로 작용하고 있던 toe까지 계속된 것으로 판단된다. 결국 댐체가 전체적으로 기울어 균열이 발생되고 확대되면서 댐의 완전한 파괴는 거의 동시에 발생되었을 것으로 추정된다.



<그림 2-22> 붕괴 전 성프란시스 댐(USGS)



<그림 2-23> 붕괴 후 성프란시스 댐(USGS)



<그림 2-24> 붕괴 후 성프란시스 댐 측면(USGS)



<그림 2-25> 붕괴 후 성프란시스 댐 전면(USGS)

### 제3절 저수지 제체 붕괴원인

댐 및 저수지는 다양한 원인에 의하여 붕괴에 이를 수 있다. 일반적으로 저수지를 설계하고, 건설하고, 유지관리 하는 동안 발생할 수 있는 인위적인 결함에 의하여 붕괴될 수 있으며, 태풍, 지진 등 극단적인 자연현상으로 인하여 붕괴에 이를 수 있다.

그러나, 저수지 제체를 완전하게 붕괴에 이르게 하는 근본적인 요인은 결국 저수지의 목적인 물을 가두고 있음으로서 발생하는 제체의 구성성분과 물과의 상호작용에 의하여 인위적이든 자연적이든 발생한 작은 결함이 확대되어 최종적으로 붕괴에 이른다고 볼 수 있다.

저수지의 설계에서 준공 후 유지관리에 이르기까지 건설 단계별로 구분하면 설계시, 시공시, 유지관리시 등으로 구분할 수 있으며, 붕괴를 유발하는 요소에 따라 분류하면 월류, 누수, 균열, 침하, 활동, 침식 등으로 구분할 수 있으나 이와 같이 붕괴를 유발하는 요소들은 저수지 제체가 붕괴되는 과정에서 종합적으로 나타나게 된다.

제체가 월류가 되면 이로 인하여 제체의 침식, 침하, 활동 등이 발생되어 붕괴에 이르게 되며, 제체에 균열이 발생되면 내부침식에 의하여 제체 내 누수가 생기고 이로 인하여 활동, 침식이 수반되어 붕괴에 이르게 되므로 붕괴에 이르는 요인을 월류, 내부침식으로 크게 구분하여 설명할 수 있다.

필댐의 월류에 의한 붕괴는 제정 상단부 월류가 시작되면 제체 월류부 상류단은 월류에 의한 유속이 거의 없으나 제정 상단부 하류단에서는 유속이 빨라지면서 점차 하류단의 침식이 확대되며, 점차 침식된 부분의 월류유량이 집중되면서, 침식의 속도가 빨라져 제체의 하단부까지 썩기형태로 침식이 발달하여 결국 붕괴에 이르게 된다.

내부침식에 의한 붕괴는 작은 균열이나 파이핑 작용에 의하여 발생한 누수로부터 물의 침식작용에 의하여 제체를 구성하는 재료가 용출되어 동공이 발생되며, 누수의 규모가 커짐에 따라 동공이 점차 제체의 상부와 하부로 확대되면서 결국 제체의 상단이 붕괴되면서 전체적인 파괴에 이르게 된다.

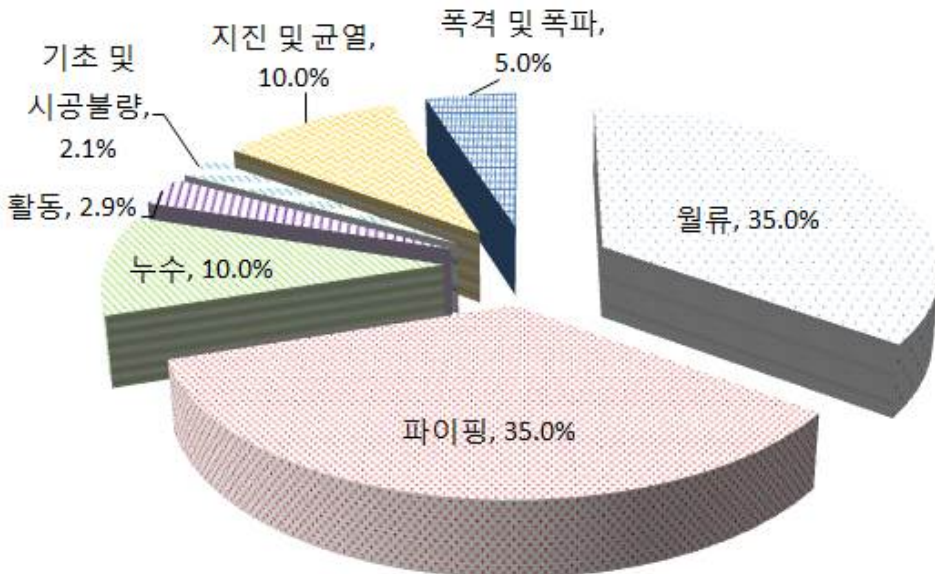
이러한 파이핑이나 내부균열은 원지반과의 접촉부인 기초부, 양안부, 제체를 구성하는 재료 중 콘트리트로 된 여수로 부나 제체 내를 관통하여 용수를 공급하기 위한 복통 주위에서 많이 발생되게 된다.

## 1. 저수지 붕괴원인 통계

댐의 구체적인 붕괴 원인을 살펴보기 위하여 국내외 댐 붕괴사례를 분석하였다. 국내의 댐 붕괴사례 자료의 경우 대부분 호우에 의한 것으로 조사되었으나 월류, 파이핑 등 구체적인 원인을 특정하기가 어려워 붕괴원인 통계분석을 수행하기는 어려운 상황이다.

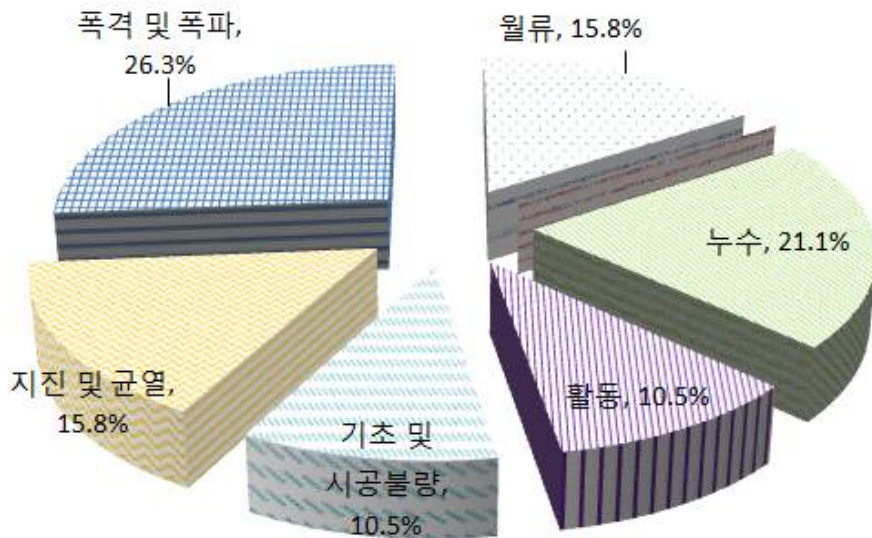
따라서, 본 연구에서는 국외의 댐 붕괴사례 191건 중 댐형식 분류자료가 있으며 붕괴원인이 밝혀진 140개 사례에 대하여 분석하였다.

붕괴원인 분석결과 <그림 2-27>과 같이 월류와 파이핑이 각각 49건으로 35.0%를 차지하여 댐 붕괴의 원인중 가장 빈도가 높은 것으로 나타났고, 누수가 14건으로 10%, 지진 및 균열이 14건 10.0%로 동일하게 나타났다. 다음으로는 폭격 및 폭파가 7건 5.0%, 활동이 4건으로 2.9%, 기초 및 시공불량이 3건으로 2.1% 순으로 나타났다.



<그림 2-26> 댐 붕괴원인별 현황

댐 형식별 댐 붕괴원인 특성을 살펴보기 위하여 콘크리트댐 21개소에서 중 댐 붕괴 원인이 명확한 19개소를 분석한 결과, 콘크리트댐에서는 폭격 및 폭파 등 인위적인 원인이 5건으로 가장 많았고, 다음으로 누수가 4건, 월류와 지진 및 균열이 각각 3건, 활동과 기초 및 시공불량이 각각 2건으로 나타나 콘크리트댐의 주요 붕괴원인은 외부적인 힘의 작용에 의한 인위적인 측면이 많은 것으로 나타났다.



<그림 2-27> 콘크리트댐에서의 댐 붕괴 원인별 현황

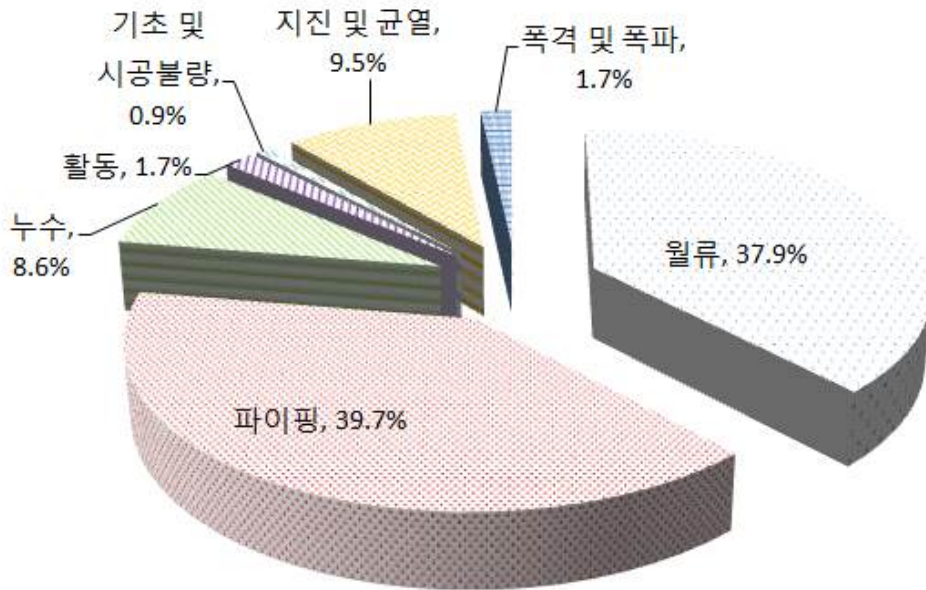
필댐에서는 <그림 2-29>에 도시한 바와 같이 125건의 사례 중 원인 분석이 가능한 116개 자료를 이용한 결과 분석한 결과 파이핑이 39.7%인 46건, 월류가 44건으로 37.9%로 파이핑과 월류가 필댐의 붕괴원인 78%를 차지하여 5건 중 4건은 두가지 원인으로 파괴에 이르는 것으로 나타났다.

나머지는 지진 및 균열이 11건 9.5%, 누수가 10건 8.6%, 활동과 폭격 및 폭파 등이 각각 2건 1.7%로 나타나 필댐의 안정성을 확보하고 붕괴를 방지하기 위하여는 월류방지와 내부침식인 파이핑, 누수의 방지가 매우 중요하다는 것을 알 수 있다.



이와 같이 과거 댐 붕괴사례 수집을 통한 붕괴원인을 분석한 결과, 콘크리트 댐과 필댐의 붕괴원인은 많은 차이가 있으므로, 댐 형식별 특성에 따라 붕괴방지를 위한 공법이나 대응이 달라져야 함을 알 수 있다.

(표 2-27)은 댐 형식별 댐 붕괴원인별 붕괴건수 및 비율을 나타낸 것이다.



<그림 2-28> 필댐에서의 댐 붕괴 원인별 현황

(표 2-27) 댐 형식별 붕괴원인

구 분	합계		댐 형식별					비고
			필댐		콘크리트댐		CFRD (건수)	
	건수	비율	건수	비율	건수	비율		
월 류	49	35.0%	44	37.9%	3	15.8%	2	
파이핑	49	35.0%	46	39.7%	0	0.0%	3	
누 수	14	10.0%	10	8.6%	4	21.1%	-	
활 동	4	2.9%	2	1.7%	2	10.5%	-	
기초·시공불량	3	2.1%	1	0.9%	2	10.5%	-	
지진·균열	14	10.0%	11	9.5%	3	15.8%	-	
폭격·폭파	7	5.0%	2	1.7%	5	26.3%	-	
합 계	140	100%	116	100%	19	100%	5	

## 2. 저수지 붕괴원인 및 붕괴형태

앞서 설명한 바와 같이 저수지의 붕괴원인은 설계오류, 부실시공, 유지관리 부실 등과 같은 인위적 원인, 홍수, 지진, 제체의 노후화 등과 같은 자연적 원인 뿐 만 아니라 전쟁에 의한 폭격, 테러리스트에 의한 공격 등 사회환경적 요인에 의하여도 발생된다고 할 수 있다.

저수지 제체의 직접적인 붕괴를 유발시키는 원인으로 구분하면 크게 제체월류, 계획·시공 품질불량, 유지관리 불량, 재해재난 발생, 기타로 구분할 수 있으며 직접적인 붕괴유발 원인과 발생사유는 (표 2-28)과 같다.

(표 2-28) 댐 붕괴원인 및 발생사유

붕괴원인	발생 사유	비 고
제체월류	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 여수로 방류능력을 초과하는 과도한 홍수</li> <li>○ 충분하지 않은 여수로 규모</li> <li>○ 부유물 등으로 인한 여수로 막힘</li> <li>○ 정전 등으로 인한 수문조작 불능</li> <li>○ 초과저류로 인한 홍수조절용량 감소</li> <li>○ 여수로 월류부 임시구조물의 적기제거 실패</li> </ul>	
계획·시공 품질불량	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 제체 기초 및 제체의 누수/파이핑/슬라이딩</li> <li>○ 제체 양안의 활동</li> <li>○ 여수로·방수로의 콘크리트 품질 불량</li> <li>○ 부등침하 등으로 인한 균열</li> <li>○ 복통이나 기타 내장된 구조물 주변의 파이핑</li> <li>○ 복통·터널·배수로 등 구조물의 품질 불량</li> </ul>	
유지관리 불량	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 여수로·감세공 콘크리트 열화 등 유지관리 불량</li> <li>○ 제체사면 식생관리 불량</li> <li>○ 사면보호공의 풍화/손상</li> <li>○ 댐 유지관리에 대한 책임자 부재</li> </ul>	
재해재난 발생	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 지진</li> <li>○ 전쟁으로 인한 폭격, 테러리스트 공격</li> <li>○ 상류댐 붕괴에 따른 하류댐 연쇄 붕괴</li> <li>○ 설치류에 의한 동공</li> </ul>	
기타	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 제체 굴착으로 인한 붕괴</li> <li>○ 댐 건설계획의 오류</li> </ul>	



## 가. 제체의 주요 붕괴원인

저수지 붕괴는 앞서 설명한 붕괴를 유발하는 사유에 의하여 발생되는데, 계획·시공불량, 유지관리 불량, 재해재난 발생 등에 따라서 다음과 같은 제체의 손상이 발생되기 때문이다.

저수지 붕괴를 발생시키는 제체의 손상요인으로는 월류, 균열, 누수, 침하, 침식, 세굴, 사면활동, 변형, 침투, 액상화 등 여러 가지가 있으며 이러한 요인들은 단독 또는 복합적으로 나타나 저수지 제체, 부속구조물에 작용하여 제체의 비정상상태를 발생시키는 요인이다.

이와 같이 제체는 다양한 요인에 의하여 손상되며 제체의 붕괴를 발생시키는 손상요인 중 주요인과 주요인에 따라 종속적으로 발생하는 요인을 구분할 수 있으나 결국은 필댐 붕괴사례의 통계분석 결과에서 나타나듯이 월류와 내부침식(파이핑, 누수)이 86.2%로 대부분을 차지하게 된다.

### 1) 월류

월류는 댐의 설계홍수량을 초과하는 홍수가 발생되거나, 지진 등에 의한 사면활동, 댐 정상부, 기초부의 침하, 또는 바람, 지진 등에 의하여 댐 정상부보다 높은 파도가 발생하는 경우에 주로 발생된다.

또한, 설계홍수량을 초과하지 않더라도 유지관리 측면의 정전으로 인한 수문작동 곤란, 부유물로 인한 여수로 막힘 등의 이유로 급격히 수위가 상승함에 따라 발생되기도 한다.

월류는 단순히 수위가 상승하여 저수지 제체의 본체를 월류하는 것 외에도 여수로의 설계홍수량 초과에 따라 옹벽의 여유고 부족, 곡선으로 된 방수로의 처오름 현상 등으로도 부분적으로 발생하게 되며, 구조물 주변으로 월류가 발생할 경우 구조물과의 접촉부 침식, 뒷채움 재료의 유실, 구조물 기초부의 유실 등으로 구조물이 전도되거나 균열이 발생되어 저수지의 붕괴를 가속시키게 된다. 우리나라 대부분 저수지들의 붕괴사례를 살펴보면 구체적인 원인은 밝혀지지 않았지만 최종 붕괴형태를 검토해 보면 많은 저수지들이 위와 같은 사례로 붕괴된 것으로 추정된다.

필댐은 제체의 재료가 대부분 흙으로 구성되어 있어 월류에 대한 저항성이 없으므로 월류가 될 경우 체체가 침식되어 쉽게 붕괴되므로 제체를 월류하지 않도록 관리하는 것이 필댐에서는 가장 중요한 사항이다.

제체를 월류하는 수위가 높아지면 제체 상단부의 상대적으로 표고가 낮

거나 취약한 부분의 침식이 진행되며, 침식이 진행되는 부분에 월류 유량이 급격히 증가하여 빠른 속도로 붕괴가 진행된다. 초기에는 침식부를 중심으로 썩기형태로 붕괴가 진행되며 최종적으로는 사다리꼴 형태로 되는 것이 대부분이다.

## 2) 내부침식(파이핑)

내부침식에 의한 댐체의 붕괴는 다짐불량, 침윤, 부등침하, 동물, 식생, 제체의 재료건조 등으로 인한 균열에 의하여 발생하는 누수가 점차 크게 확대되면서 발생되게 된다.

누수는 일반적으로 댐체 또는 댐 기초지반, 댐 양안부 원지반의 접속부를 통해 발생되며, 드물게는 동물에 의하여 발생된 동공, 식물의 뿌리에 의한 균열에 의하여도 발생된다.

댐체의 누수는 누수를 발생시키는 침투수압보다 제체를 구성하는 토립자의 저항력이 작을 경우, 불충분한 다짐, 제체내 또는 접속부 수용성 물질 존재, 부등침하 및 제체 내 구조물과 경계면 누수 등의 요인으로부터 제체를 구성하는 토질재료가 제체 외부로 누출되고 파이핑(piping)현상을 발생시켜 댐의 붕괴를 발생시키게 되기 때문에 상대적으로 수위가 높을 때 발생확률이 더 크다

파이핑을 발생시키는 누수에는 댐이 최초로 만수되었을 때 발생하는 누수와 담수 후 몇 해 지난 후에 생기는 누수가 있는데, 전자는 오래지 않아 일정한 양의 맑은 물로 변화하는 경우 댐이 포화되면서 안정화되는 과정으로 그 위험성이 적다.

그러나, 후자의 경우 누수가 진행되는 상태에서 흙탕물이 점점 많아지는 경우 댐 제체를 구성하고 있는 토질재료가 빠져 나오는 것으로 장기간 계속하여 진행되는 경우 댐 재료가 빠져 나온 위치에서 공동이 형성되고 이 공동이 확대되면서 붕괴가 발생하기 때문에 위험하다.

일반적으로 댐체의 성토는 자연 퇴적토 보다 균일하고 치밀하게 다져져 있기 때문에 이러한 누수에 의한 파이핑 현상은 성토부 보다는 기초부이거나, 콘크리트 구조물의 접합부인 여수로나 복통에서 발생하기 쉽다.

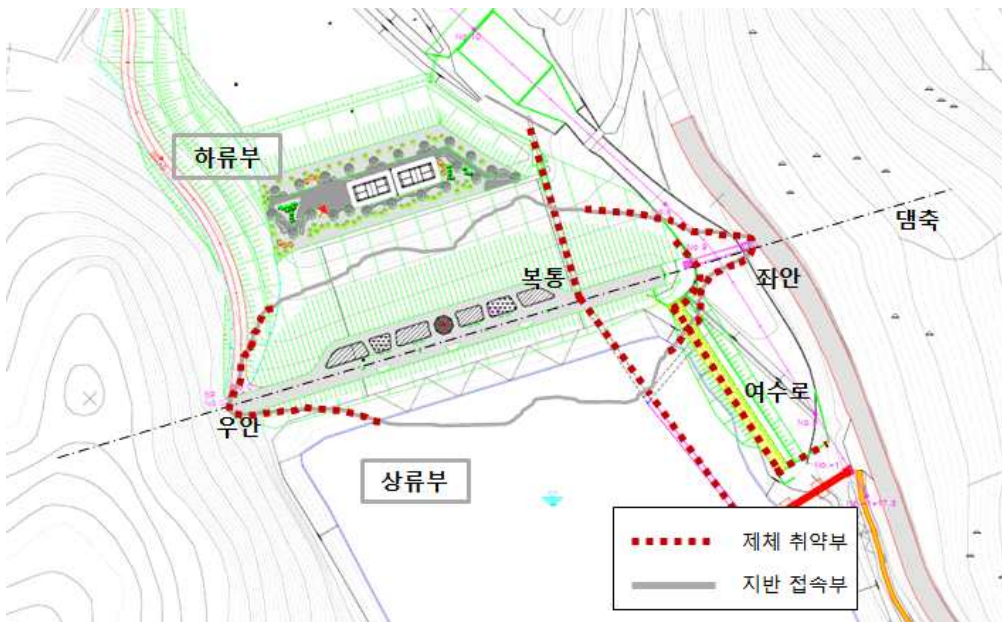
특히, 복통은 댐체의 저면에 위치하고 있기 때문에 침투수압이 크고, 복통내부는 취수를 위해 물과 공기가 드나들게 되므로 동결융해에 의한 균열에 취약하게 되므로 필댐에서는 구조적으로 매우 취약하게 된다.

### 나. 붕괴원인별 붕괴형태 및 취약점

앞서 설명한 바와 마찬가지로 필댐의 붕괴를 초래하는 주요 원인은 월류, 내부침식(파이핑)으로 크게 구분할 수 있으며, 부분적으로는 사면의 활동에 의한 붕괴도 나타날 수 있다.

필댐의 붕괴는 어떤 형태의 붕괴든지 소규모 손상을 가지고 있는 초기 손상지점에서 물의 침식작용에 의하여 물의 소류력이 붕괴부가 점차 확대됨에 따라 비례하여 커지며 최종적으로 필댐이 완전히 붕괴될 때까지 진행된다. 필댐은 원지반에 자연재료인 흙과 암석을 쌓아올려 건설하는 구조물이므로 근본적으로 구조적 취약 부분이 있으므로 건설 및 유지관리시 취약부에 대한 시공관리와 유지관리에 주의하여야 한다.

<그림 2-29>는 일반적인 필댐의 평면도를 나타낸 것으로 필댐의 취약 부위는 기초와 댐체의 좌우안 등 원지반과 제체와의 접속부와 복통, 여수로 등 이질재료인 콘크리트 등과의 접합부 주변이 된다.



<그림 2-29> 일반적인 필댐의 평면도

#### 1) 월류에 의한 붕괴

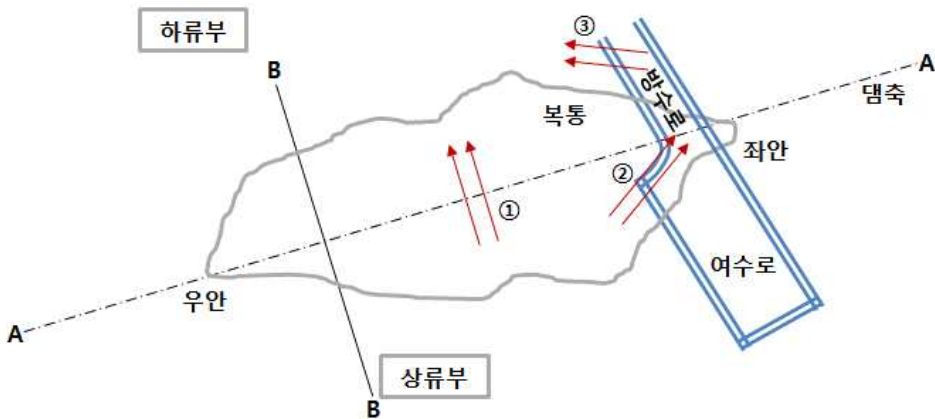
월류에 의한 붕괴는 댐체의 일부분인 침하되거나, 저수지 파랑의 처오를 현상으로 발생되기도 하나, 대부분 태풍, 집중호우 등과 같이 극단적인

기상현상으로 발생한 유역내 과도한 홍수량으로 인하여 여수로의 방류능력을 초과하거나, 여수로의 방류능력이 제한됨으로서 댐내 수위가 급상승하여 홍수량이 제체의 제정 상단부 또는 여수로의 날개벽, 방수로 내측 옹벽을 넘어가면서 발생된다.

보통 제체의 제정상단부를 넘어가는 흐름은 상류사면과 제정부분의 유속은 느리지만 하류사면을 통과하면서 급격히 빨리지며 제정과 하류사면 접속부의 침식이 발생되면서 점차 깊고 넓게 썩기형으로 확대된다.

필댐에서 월류로 인한 붕괴는 제체 전반에 걸쳐 월류하는 상황을 나타내나 대부분 제체 전반에 걸쳐 월류하는 상황은 드물고, 댐의 길이방향에서 상대적으로 낮은 부위를 통하여 월류가 발생하거나, 여수로의 측벽이나 날개벽, 설계홍수량을 초과하는 방류량이 방수로를 통과하면서 방수로 옹벽에 부딪혀 제체 쪽으로 넘쳐 흐르면서 발생하는 경우가 많다.

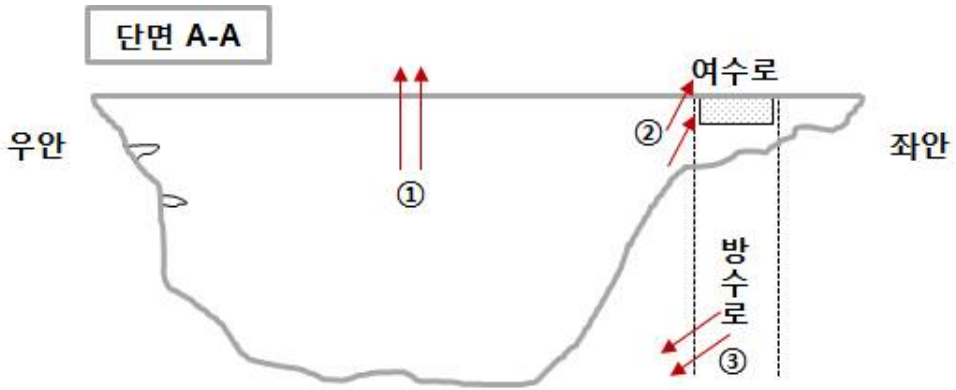
<그림 2-30>은 필댐에서의 월류 취약부를 평면도로 나타낸 것이고, <그림 2-31>은 이를 댐축(A-A단면)에 대한 횡단면도에 나타낸 것이다.



<그림 2-30> 필댐의 월류 취약부(평면도)

<그림 2-30~32>에서 보는 바와 같이 ①은 제체의 종단방향으로 상대적으로 제체 상단 표고가 낮아 월류가 집중되는 구간을 나타낸 것이며, ②는 제체와 여수로의 측벽이나 날개벽의 접속부 위치, ③은 방수로를 흐르는 유량이 반대편 방수로 옹벽에 부딪혀 제체쪽으로 넘쳐 올라와 제체 침식이 발생되는 취약부를 나타내고 있다.

<그림 2-32>는 댐체에 수직된 방향의 횡단면도 상에 월류시 취약부를 나타낸 것이다.



<그림 2-31> 필댐의 월류 취약부(A-A단면)



<그림 2-32> 필댐의 월류 취약부(B-B단면)

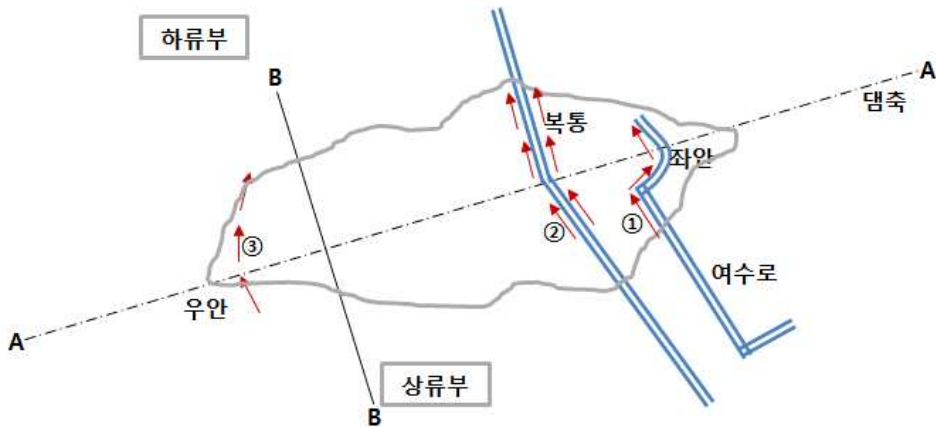
2) 내부침식(파이핑)에 의한 붕괴

내부침식(파이핑)에 의한 붕괴는 제체와 구조물의 접합부, 제체와 기초 연결부, 제체와 양안 접속부, 제체 내부의 균열부, 제체 내부 구조물과의 인접부위에서 소규모 누수가 발생되면서 시작된다.

내부침식(파이핑)에 의한 붕괴도 홍수기에 발생가능성이 더 높기는 하지만 대부분 홍수기에 발생하는 월류와는 다르게 평상시에도 갑자기 발생할 수 있다.

내부침식(파이핑)에 의한 붕괴는 월류에 의한 붕괴보다는 느리게 진행되나, 한계점을 지나면 급속히 확장된다. 초기에는 소규모 누수에 따라 체체를 구성하고 있는 토질재료가 물과 함께 용출되기 시작하여, 구성된 동공이 점차 확대되면서 댐의 상부가 무너질 때까지 확장되고, 붕괴에 의하여 약해진 부분은 수압으로 인하여 급격하게 붕괴된다.

필댐의 내부침식(파이핑)은 크게 체체와 원지반과의 접촉부 또는, 체체내 부속구조물과의 접촉부에서 발생한다. <그림 2-33>은 필댐에서의 내부침식의 취약부를 평면도로 나타낸 것이고, <그림 2-34>는 댐축(A-A단면)에 대하여 횡단면도에 취약부를 나타낸 것이다.



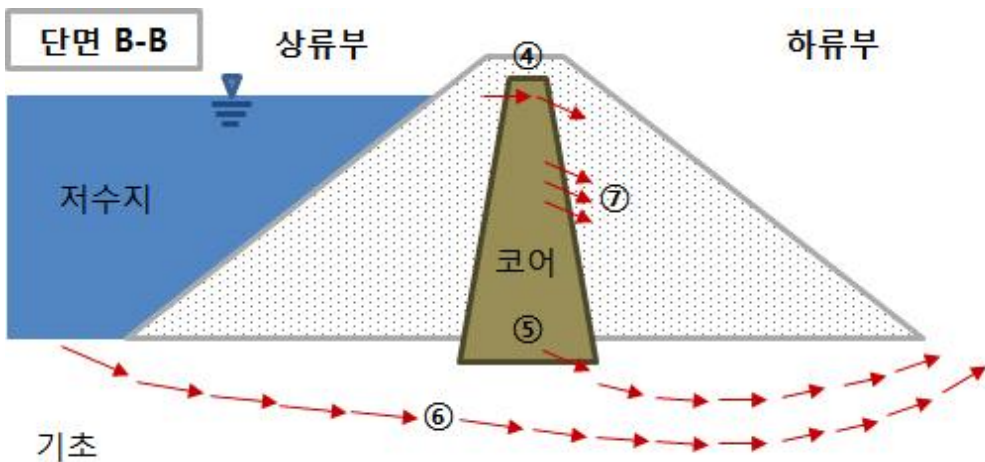
<그림 2-33> 필댐의 내부침식(파이핑) 취약부(평면도)

<그림 2-33~34>에서 보는 바와 같이 ①은 체체를 구성하는 토질재료와 여수로를 구성하는 콘크리트의 접촉부, ②는 체체를 구성하는 토질재료와 복통을 구성하는 콘크리트나 철재 재료와의 접촉부, ③은 양안의 원지반과 체체를 구성하는 접촉부의 균열이나 다짐불량으로 인한 내부침식(파이핑) 취약부를 나타내고 있다.



<그림 2-34> 댐의 내부침식(파이핑) 취약부(A-A단면도)

<그림 2-35>는 댐 축의 직각방향으로의 횡단면 상에서 내부침식에 취약한 부위를 나타낸 것으로 <그림 2-35>에서 보는 바와 같이 ④는 불투수층부 상단의 건조로 인한 균열, ⑤는 불투수층부 하단부, ⑥은 기초가 토양 또는 부식성 암석으로 되어 있는 경우, ⑦은 불투수성부의 불충분한 다짐, 점착력이 없는 불투수성부의 후방침식으로 인한 균열발생으로 인한 내부침식(파이핑) 취약부를 나타내고 있다.



<그림 2-35> 댐의 내부침식(파이핑) 취약부(B-B단면도)





## 제3장

---

# 저수지 실내 모형실험

제1절 저수지 제체 모형축  
조

제2절 실내모형 실험방법



## 제3장 저수지 실내 모형실험

### 제1절 저수지 제체 모형축조

최근 기후 변화의 영향으로 과거보다 강우가 집중되어 자연재해가 증가하고 있기 때문에 재해예방에 대한 대책이 필요한 실정이고 이러한 자연환경의 변화는 비교적 침투에 취약한 농업용 저수지의 구조적 안정에 영향을 미치게 된다.

필댐의 붕괴는 월류(37.9%)와 파이핑(39.7%)이 주된 원인으로 분석되고 있고, 월류는 집중호우 등의 기상조건에 의해 발생하는 반면, 파이핑은 시간경과에 따라 제체의 내구성이 저하하는 현상으로 발생하기 때문에 국내의 농업용저수지 제체의 노후화와 관련된 문제는 월류와 파이핑에 관한 문제를 중요하게 고려하여야 한다.

국내 농업용 저수지의 형식은 99%가 필댐으로 구성되어 있고, 축조된 지 50년이 경과된 저수지가 82%에 이르고 있기 때문에 월류, 파이핑 및 누수로 인한 재해위험도가 더욱 가중되고 있다.

농업용 저수지는 93%가 유효저수량이 30만 $m^3$ 미만으로 안전한 용수공급이 어려울 뿐만 아니라 가뭄과 홍수의 양극화 현상이 심화되고 최근의 강우 특성과 더불어 시설물의 사용연한을 고려할 때 홍수 배제능력 부족, 누수 등 재해위험도가 상대적으로 가중되고 있다. 또한 저수지 붕괴는 30만 $m^3$ 미만의 소규모 저수지가 붕괴의 대부분을 차지하고 있기 때문에 이에 대한 대처계획을 수립하여야 한다.

월류에 의한 제방 붕괴속도는 침투나 세굴에 의한 붕괴보다 훨씬 빠르고 계획홍수량 이상의 홍수량이 발생하거나 제체의 여유고가 작을 때 발생한다. 저수지 제방의 월류로 인한 붕괴는 다짐도, 축조재료, 둑마루폭, 사면경사 등에 따라 다르게 나타나지만, 월류 시 제체가 일시에 붕괴되는지 또는 하류사면의 세굴로 점차적으로 붕괴되는지 여부를 파악하고, 가장 중요한 댐마루에서 성토체의 붕괴속도와 코어가 안정성에 어떠한 영향을 미치는지를 평가하는 것은 매우 중요하다고 판단된다.

농업용 저수지 중에서 99%를 차지하고 있는 측수로형 여수로는 구조적으로 측수로의 옹벽높이가 댐마루보다 낮게 설계시공 되고 있기 때문에 발생 가능한 최대홍수량 (PMF) 유입시 측수로내의 수위상승뿐만 아니라 측벽의 월류가 발생되어 옹벽배면부의 붕괴로 인한 세굴파괴에 취약하다.

특히, 여수토 접속부가 월류되는 경우, 저수지의 붕괴를 막을 수 있는 보강방법을 검토하기 위해서는 월류 시 여수토 접속부의 거동 특성을 명확히 파악해야만 댐 하류부의 피해를 저감시키고 저수지 붕괴에 대한 비상대처계획(EAP) 수립시 기초자료를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

혹으로 구성된 농업용 저수지 제체 사면의 보강은 크게 응급상황 보강 방법과 영구적 보강방법으로 분류할 수 있다. 저수지 제체의 월류, 파이핑, 여수토 접속부에서의 붕괴피해는 붕괴단면의 크기 및 형태에 따라 피해규모에 큰 영향을 미침에도 불구하고 이에 관한 연구는 미미한 실정이다.

그러므로 제체의 붕괴거동은 이론적인 연구뿐만 아니라 모형실험 등을 통하여 수위변화에 따른 제체의 침하, 공극수압, 토압 변화 등을 파악하고, 이상강우에 의한 붕괴실험을 바탕으로 보다 정교한 안정성 평가가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

현재 저수지 리모델링 사업으로 설계 시공되는 저수지는 기존 제체내의 코어, 필터가 정상적인 상태로 판단하고 보수 보강하고 있지만 대부분의 저수지가 노후화되어 차수 및 배수 기능이 상실한 상태이므로 이에 대한 확인이 반드시 필요하고 기능 복구를 위해서는 설치위치 및 방법을 변경한 후 안정성을 검토하여야 한다.

또한 성토에 따른 안정문제와 기존 저수지를 확장하여 후면에 축조하기 때문에 제방 설치에 따른 안정 해석이 중요하다. 둑 높임 후에는 저수량의 급증에 따라 침투수압이 몇 배로 증가하고, 제체를 통한 침투수는 제체 하류부를 포화시켜 과잉공극수압의 증가함에 따라 파이핑 현상이 급진전되므로 제체의 안정성을 평가하여야 한다

노후화된 중·소규모 저수지의 붕괴는 상류사면 붕괴, 하류사면 붕괴, 여수토 방수로 붕괴 등의 저수지 자체 붕괴와 이로 인한 하류지역의 인명과 재산 피해로 나타나고, 저수지 하류부에 생활하고 있는 사람들의 안전은 저수지 자체의 구조적인 안정성에 크게 의존할 수밖에 없기 때문에 항상 실시간 모니터링을 통하여 최적화 모델을 결정하고 위험저감 매뉴얼에 따라 행동하여야 한다.

현재 농업용 저수지에서의 계측기 매설은 거의 이루어지지 않기 때문에 여러 가지 이상요인에 대한 대처능력이 떨어질 수 밖에 없고, 저수지 붕괴에 대한 비상대처계획을 수립하기 위한 자료 수집에 어려움이 있다.

따라서 극한상황 발생시 관련기관에서의 역할과 임무를 수행하는데 가

장 정확한 계측 자료를 취득하므로써 비상상황 단계별로 대응절차를 마련할 수 있고, 안전하게 주민들을 대피시킬 수 있을 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 농업용저수지가 이상 강우에 의해 제체로 월류되었을 경우, 여수토가 제기능을 발휘하지 못하고 여수토 접속부로 월류되었을 경우, 파이핑이 발생되었을 경우 등의 붕괴거동을 파악하기 위하여 대형실내모형실험 실시하고 공극수압, 토압, 침하, 붕괴형태 등을 비교분석한 후 현장 실용화 방안을 마련하고자 한다.

## 1. 모형실험을 위한 상사

실내모형실험은 원형과 상사관계에 있다고 가정하여 상사치를 구한 후 현상을 예측하는데 광범위하게 이용되고 있다. 모형에서 측정된 결과를 원형에 적용하기 위해서는 상사법칙이 성립되어야 하는데 일반적으로 기하학적 상사(길이비, 면적비, 체적비), 운동학적 상사(시간비, 가속도비, 속도비, 유량비), 동력학적 상사(힘의 비, 질량비)법칙이 적용된다.

일반적인 상사치의 가정조건은 실물에 사용된 재료는 하나의 물리적 공학적 특성 (응력, 변형률, 시간 등)을 가지고 있고, 모형의 재료는 실물의 재료와 동일한 물리적 공학적 특성을 가진다는 가정조건이 성립된다는 조건에서 유도된다.

상사법칙은 적용한계가 있고 엄밀한 이론적인 측면에서 운동현상을 완전하게 상사법칙으로 구현하기는 불가능하지만, 축적비의 선정이 적합하다면 현장에서 만족할 수 있을 정도의 결과를 재현할 수 있다. 그러나 여러 가지 물리량에 따라 축소모형에서 나타난 결과는 실제와는 다른 거동을 나타내기 때문에 축소모형에서 측정하고자 하는 부분이 현장에서도 적용가능한가를 미리 파악하여야 한다.

저수지에서는 중력과 관성력이 지배하고 Froude number 가 같으면 역학적 상사법칙이 근사적으로 성립한다. 저수지 제체는 자유수면이 존재하고 수위조건에 따라 침투조건이 크게 변화하기 때문에 원형과 모형에서의 중력비와 관성력비가 동일한 조건으로 해석할 수 있다.

상사법칙을 만족하기 위한 기하학적 조건은  $l_m/l_p = n$  이다. ( $l_m, l_p$  : 모형 및 실물 길이) 운동학적 상사 조건에서 시간, 유속 및 투수계수는 다음과 같다.

$$t_m/t_p = n^{1/2}, v_m/v_p = n^{1/2}, k_m/k_p = n^{1/2} \text{ 이다.}$$

본 모형에서는 Darcy 법칙이 적용되고 실내모형축척이 1/20이며, 모형에서 사용한 흙이 원형과 동일재료로 사용하였으므로 입자크기 변환계수 N=1이고 상사법칙을 적용하면 (표 3-1)과 같다.

(표 3-1) 모형실험의 상사비

Definition	Dimension (MLT)	Scale factor (model/prototype)	Scale ratio (1/20)
Length	$L$	$l_m/l_p$	0.05
Time	$T$	$t_m/t_p$	0.22
Density	$ML^{-3}$	$D_m/D_p$	0.90
Force	$MLT^{-2}$	$F_m/F_p$	1.19E-04
Stress	$ML^{-1}T^{-2}$	$\sigma_m/\sigma_p$	4.76E-02
Quality	$L^{-3}T^{-1}$	$Q_m/Q_p$	5.59E-04

(표 3-2) 원형과 모형실험의 제원

구 분	댐높이	댐길이	댐마루폭	상류 사면경사	하류 사면경사	비고
원 형(m)	15.2	288	6	1/2.5	1/2.0	
모 형(cm)	76	-	30	1/2.5	1/2.0	

## 2. 저수지 붕괴모형 축조

실내축소모형은 체체재료의 입도분포와 다짐도 등에 많은 영향을 미치기 때문에 원형과 다른 거동을 나타나게 된다.

수리모형실험의 축척은 원형에서 구하고자 하는 거동에 따라서 축척 범위도 다르게 결정되지만 본 연구에서는 상사법칙의 효율성과 실내모형실험규모의 여건 등을 감안하여 1/20으로 결정하였다.

모형은 길이 (L) 126cm × 폭 (W) 540cm × 높이 (H) 95cm로 콘크리트와 철제 및 아크릴로 제작하였고, 비탈면 경사는 1 : 2.0(하류사면), 1 : 2.5(상류사면)으로 모형을 제작하였다.

여수토는 모형의 뒤 쪽에 나무 합판 (두께 = 1.5cm)을 이용하여 현장저수지 표고를 기준으로 1/20로 축소하고, 방수로 마루표고가 홍수위에서 월류되도록 약 55cm로 하였고, 비조절용 월류언체는 65cm, 방수로 폭은 10cm로 설치하였다.

실내대형모형 토조는 콘크리트와 철제 및 아크릴로 제작하였고, 토조 내부에는 실리콘 및 방수페인트로 처리하여 누수를 방지하였다.

## 제2절 실내모형 실험방법

### 1. 대상저수지의 선정

실험대상 저수지는 충남 공주시에 위치한 독높임 사업을 시행하기 전의 계룡저수지를 원형으로 하여 실내모형 실험을 실시하였으며, 독높임 전 제체 형식은 Zoned Fill-type 으로 축조년수는 50년 이상 경과되었다.

이러한 형식의 노후화된 농업용 저수지는 전체저수지의 81.5%(50년 이상)정도 이고 노후화된 저수지를 리모델링할 경우에 제체의 코어, 수직 및 수평필터가 정상적이라는 판단하에 설게 시공되고 있지만 실제 제체의 코어와 필터는 너무 오랜기간이 경과되어 본래의 기능을 할 수 없는 상태가 대부분이다.

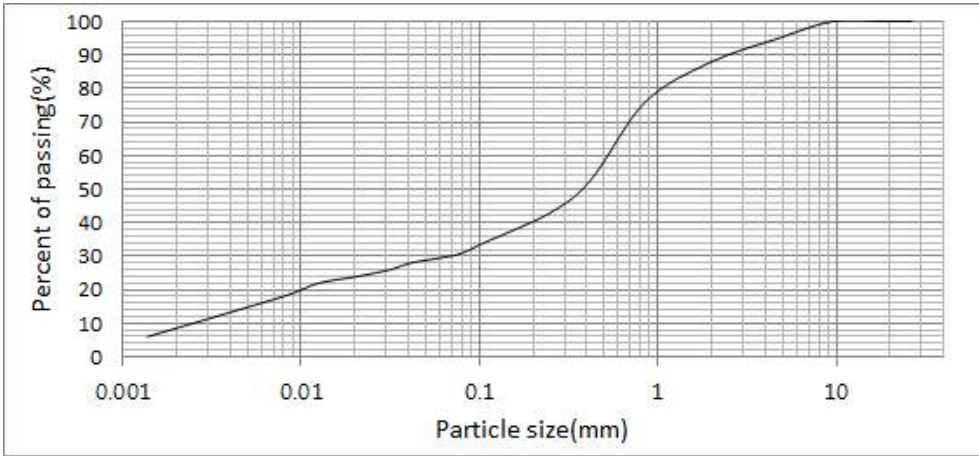
이러한 저수지는 필터가 제 기능을 수행할 수 없기 때문에 균일형 형식으로 볼 수밖에 없고 이와 같은 상태에서 이상강우에 의한 월류 및 파이프 현상이 발생하였을 경우는 붕괴가능성이 매우 높을 것으로 판단된다.

따라서 균일형 형식의 저수지에 대한 붕괴거동을 파악하여 앞으로 노후화된 저수지의 효율적인 리모델링 방법과 현장실용화 방안을 제시하는데 적합하다고 판단하여 연구대상 저수지로 선정하였다.

실험에 사용된 시료는 성토재는 기존 독높임 사업시의 계룡저수지 토취장에서 채취하였고, 사용된 시료의 물리적 성질, 역학적 성질 및 입도곡선은 (표 3-3)과 <그림 3-1>과 같다.

(표 3-3) 사용된 재료의 특성

Sample	$G_s$	PI (%)	$k_v$ (m/s)	$W_{opt}$ (%)	$\gamma_{d\max}$ (gf/cm <sup>3</sup> )	$c$ (kPa)	$\phi^\circ$	USCS
Embankment	2.65	9.2	5.75E-07	14.0	17.25	16.7	24	SC



<그림 3-1> 입도곡선

## 2 모형실험 방법

### 가. 월류시 붕괴거동

월류에 의한 저수지 붕괴 현상은 댐마루와 수위차가 작을 경우에 가장 취약한 댐마루 하류부분부터 침식으로 붕괴가 시작되고, 월류가 진행됨에 따라 하류사면 표면으로 흐르던 물이 사면내부로 침투하여 사면의 침식을 확대시켜 붕괴를 발생시키는데, 하류사면의 토립자가 침식되면서 점차로 커지는 점진적 붕괴 형태를 나타낸다.

월류에 의한 제방 붕괴 속도는 침투나 세굴에 의한 붕괴보다 훨씬 빠르고 계획홍수량 이상의 홍수량이 발생하거나 제체의 여유고가 작을 경우 발생한다.

저수지 제방의 월류로 인한 붕괴는 다짐도, 축조재료, 둑마루 폭, 사면 경사 등에 따라 다르게 나타나지만 적합한 보강방법을 적용하면 붕괴 지속시간을 길게 할 수 있어 제체의 안정성에 큰 영향을 미치게 된다.



실험은 이상강우에 의해 여수토가 홍수량을 정상적으로 처리할 수 없어 댐마루로 월류가 발생되었을 경우를 모사하여 공극수압, 토압, 침하량 변화를 분석하였다.

실험은 이상강우에 의해 여수토가 홍수량을 정상적으로 처리할 수 없어 댐마루로 월류가 발생되었을 경우를 모사하여 공극수압, 토압, 침하량 변화를 분석하였다.

모형저수지의 유입량은 현장저수지를 1/20로 축소한 만수위(55.7cm)와 홍수위(63.8cm)를 기준으로 결정하고, 이상강우에 의해 댐마루(76cm)로 월류되는 월류량은 유량공급조절장치를 통하여 월류심을 조절하였다.

나머지 유입량은 여수토 방수로로 통하여 하류부로 유출되도록 미리 토조에서의 유량검증을 통하여 조절하였다.

실험은 상류측에 담수를 시작하여 제체내로 충분히 침투하여 정상 침투가 이루어졌다고 판단될 때 측정하고, 홍수위시, 수위급강하시, 월류시로 구분하여 상류사면과 하류사면 중앙에서 공극수압, 토압, 침하량을 측정하였다.

월류시 저수지 붕괴형태는 침윤면이 상승하고 점차로 월류량이 증가한 후 사면침식이 발생하고 하류사면 선단 침식으로 붕괴가 발생한다. 이 과정을 초기월류단계, 월류량 급증단계, 침투월류단계 등으로 구분하여 분석하였다.

#### 나. 제체와 여수토 접촉부의 붕괴거동

농업용 저수지 중에서 99 %를 차지하고 있는 측수로형 여수로는 구조적으로 측수로의 옹벽높이가 댐마루보다 낮게 설계시공 되고 있기 때문에 발생 가능한 최대홍수량 (PMF) 유입시 측수로내의 수위상승뿐만 아니라 방수로에서 쳐오름 현상이 발생되어 옹벽으로 월류되기 때문에 옹벽과 제체와의 접촉부는 세굴파괴에 취약하다.

측수로형 여수로의 흐름특성은 평상시에는 웨어를 월류한 물의 흐름이 바닥으로 흘러 하류부로 이동하며 측수로 수위에 영향을 받지 않고 원활한 흐름을 나타낸다. 그러나 설계홍수량을 초과하는 경우 측수로의 수위가 상승하여 월류부의 월류량이 잠류영향을 많이 받는 구조적 문제점을 가지고 있다. 저수지 유입량이 증가하여 측수로 내에 잠류가 발생하면 월류 유속이 감소하면서 급격한 수위 상승이 발생할 수 있으며, 잠류가 발

생되면 월류한 흐름이 수면위로 흐르게 되어 측벽에서 처오름 현상이 발생하게 되어 접속부가 세굴에 의해 붕괴되기 시작한다.

따라서 이상 홍수 발생시에는 여수토 콘크리트와 원지반 사이에 가장 취약한 양안 옹벽 배면부가 월류에 의한 세굴과괴가 진행되고 급류부의 완전유실이 발생된 후에 점차적으로 여수로가 완전히 붕괴되는 과정을 거치게 된다.

특히, 여수토 접속부는 시공 과정에서 다른 부분보다 정밀한 다짐시공이 어려워 다짐이 불균질하게 이루어질 확률이 높아 경계부에 누수에 의한 침투현상이 발생되어 신중한 시공관리가 이루어져야 하고, 수위급강하에 따라 공극수압의 소산속도가 상대적으로 늦어 침투압이 작용하므로 붕괴 위험성을 높이게 된다.

실험은 상류측에 담수를 시작하여 여수토 방수로 표고보다 낮은 수위에서 담수한 물이 제체내로 충분히 침투하여 정상 침투가 이루어졌다고 판단할 때까지 간극수압과 토압을 측정한다.

다음으로는 이상강우시 방수호가 월류되는 조건을 고려하여 유량공급장치를 통한 유입량을 증가시켜 방수로에서 제체 접속부로 월류하도록 유도하고, 점차 유입량을 증가시켜 제정을 월류하여 제체가 파괴되도록 유도하였다.

실험단계는 홍수위시, 수위급강하시, 월류시로 구분하여 공극수압, 토압, 침하량을 측정하였고, 월류시 저수지 붕괴형태는 초기월류단계, 월류량 급증단계, 침투월류단계, 월류량 감소단계 등으로 구분하여 분석하였다.

월류시 모형저수지의 상류부로 유입되는 유입량과 여수토 방수로를 통하여 하류부로 유출되는 유출량은 미리 측정된 토조에서의 유량검증을 통하여 유입량과 방수로 유출량을 조절하였으며, 실험과정의 붕괴양상을 비디오 카메라를 설치하여 전체 붕괴과정을 기록하였다.

#### **다. 내부침식(Piping)에 의한 붕괴거동**

필댐의 붕괴는 월류와 파이핑이 주된 원인으로 분석되고 있고, 월류는 집중호우 등의 기상조건에 의해 발생하는 반면, 파이핑은 시간경과에 따라 제체의 내구성이 저하하는 현상으로 발생하기 때문에 국내의 농업용저수지 제체의 노후화와 관련된 문제는 월류와 파이핑에 관한 문제를 중요하게 고려하여야 한다.

흙 제체는 일반적으로 지역에서 활용가능한 재료로 축조되기 때문에 모래, 실트, 점토등 다양하게 구성되어 있고, 내부침식과정은 흙의 성분, 다짐, 함수비, 구조물의 형태, 저수위, 동수경사, 흙의 침식가능성 등에 따라 매우 다르게 나타난다.

그 동안 파이핑에 관한 연구는 침식과정을 실험에서 시각화하고 모니터링하기가 어렵기 때문에 거의 연구가 진행되지 않았다. 따라서 제체내의 파이핑에 의한 내부침식과정과 파이핑의 확대과정, 파이핑 존에의 면적, 깊이, 침식된 재료의 체적 등을 파악하기 위한 모형실험이 필요하고, 흙의 침식 가능성을 파악하면 제방 붕괴에 대한 시간을 결정하고 내부침식에 따른 붕괴가능성을 미리 예측할 수 있다.

내부침식은 제체내로 토립자가 이동과 운반에 의해 발생되고, 내부침식의 메커니즘은 침식과정이 복잡하고 탐지의 어려움 때문에 실험하기가 매우 어렵다. 내부침식에 따라 수리학적 및 역학적인 특성이 바뀌게 되고 재료의 투수성은 상당히 변하게 되고 이에 따라 제체내의 공극수압의 증가는 하류사면 안정에 매우 큰 영향을 미치게 된다.

실험은 제체내부로 후방진행형 파이핑이 발생되도록 다공관 파이프를 이용하여 복통에서 발생하는 파이핑 현상을 유도할 수 있도록 모형실험 장치를 제작하였다.

또한 내부침식이 발생될 위치와 심도를 고려하여 공극수압계, 토압계를 매설하고 침투특성을 분석하였으며, 파이핑 현상의 메커니즘 분석을 위해 내부침식과정을 진행단계별(초기, 진행, 급진전, 붕괴단계) 로 붕괴형태를 분석하였다.



## 제4장

---

# 저수지 모형실험 결과

제1절 월류로 인한 붕괴시

제2절 여수토 접속부 월류에 의한 붕괴  
시

제3절 내부침식(Piping)에 의한 붕괴시



## 제4장 저수지 모형실험 결과

### 제1절 월류로 인한 붕괴시

#### 1. 모형실험 방법

월류에 의한 저수지 붕괴 현상은 댐마루와 수위차가 작을 경우에 가장 취약한 댐마루 하류부분부터 침식으로 붕괴가 시작되고, 월류가 진행됨에 따라 하류사면 표면으로 흐르던 물이 사면내부로 침투하여 사면의 침식을 확대시켜 붕괴를 발생시키는데, 하류사면의 토립자가 침식되면서 점차로 커지는 점진적 붕괴 형태를 나타낸다.

월류에 의한 제방 붕괴 속도는 침투나 세굴에 의한 붕괴보다 훨씬 빠르고 계획홍수량 이상의 홍수량이 발생하거나 제체의 여유고가 작을 경우 발생한다.

저수지 제방의 월류로 인한 붕괴는 다짐도, 축조재료, 둑마루 폭, 사면 경사 등에 따라 다르게 나타나지만 단기적 및 장기적으로 적합한 보강방법을 적용하면 붕괴 지속시간을 길게 할 수 있어 제체의 안정성에 큰 영향을 미치게 된다.

실험은 이상강우에 의해 여수토가 홍수량을 정상적으로 처리할 수 없어 댐마루로 월류가 발생되었을 경우를 고려하여 공극수압, 토압, 침하량 변화를 분석하였다.

모형저수지의 유입량은 현장저수지를 1/20로 축소한 만수위(55.7cm)와 홍수위(63.8cm)를 기준으로 결정하고, 이상강우에 의해 댐마루(76cm)로 월류되는 월류량은 유량공급조절장치를 통하여 월류심을 조절하였다.

나머지 유입량은 여수토 방수로를 통하여 하류부로 유출되도록 미리 토조에서의 유량검증을 통하여 조절하였다.

실험은 상류측에 담수를 시작하여 제체내로 충분히 침투하여 정상 침투가 이루어졌다고 판단될 때 측정하고, 홍수위시, 수위급강하시, 월류시로 구분하여 상류사면과 하류사면 중앙에서 공극수압, 토압, 침하량을 측정하였다.

월류시 저수지 붕괴형태는 침윤면이 상승하고 점차로 월류량이 증가한 후 사면침식이 발생하고 하류사면 선단 침식으로 붕괴가 발생한다. 이 과정을 초기월류단계, 월류량 급증단계, 침투월류단계 등으로 구분하여 분석하였다.





저수지는 균일형 형식으로 제체 모형 축조에 사용된 시료는 균질한 상태로 포설하기 위하여 12mm 체를 통과한 시료만 사용하였다. 다짐은 최적함수비(14%)로 조절하였고(13.61%) 다짐 시 밀도를 균일하게 하기 위하여 먼저 1층을 약 5cm 가량 포설한 후 나무다짐봉으로 다짐을 하였으며, 다짐을 한 후 밀도는 17.60 kPa이고 다짐도는 100%에 가깝게 나타났다.

### 3. 홍수위와 수위급강하시 공극수압과 토압의 변화

<그림 4-2> (a)는 상류측에 담수를 시작하여 만수위 (55.7cm) 상태에서 46시간 정도 유지시킨 후에 홍수위(63.8cm)로 수위를 상승하고 2시간 정도 후에 수위를 급강하시켰을 경우 공극수압 변화를 나타낸 것이다.

상류사면의 공극수압 (P1)은 초기부터 급격하게 증가한 후 수위급강하에 따라 급격하게 감소하고 사수위에서 일정하게 유지하였다.

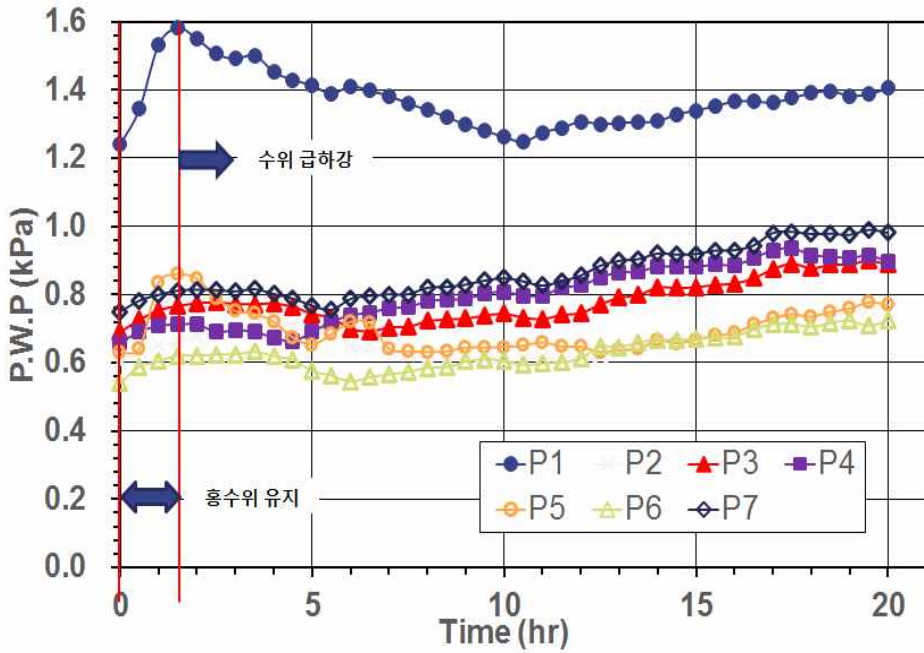
여수도 접속부 댐마루 (P5)에서도 홍수위로 증가하면서 상승폭이 크고 수위하강시에도 감소변화가 뚜렷하게 나타났다. 나머지 위치에서는 약간씩 증가와 감소가 있었지만 큰 변화는 나타내지 않았다.

수위 상승에 따라 공극수압이 급격하게 상승한 후 수위 급강하시에 공극수압의 소산속도가 상대적으로 늦게 나타나면 저수지 제체내에서는 수두차가 발생하게 되어 붕괴위험성을 높이게 된다. 그러나 상류사면과 댐마루를 제외하고는 제체내로 침투가 되지 않아 수압의 영향을 받지 않았기 때문에 공극수압도 큰 변화가 나타나지 않았고 제체도 안정한 것으로 나타났다.

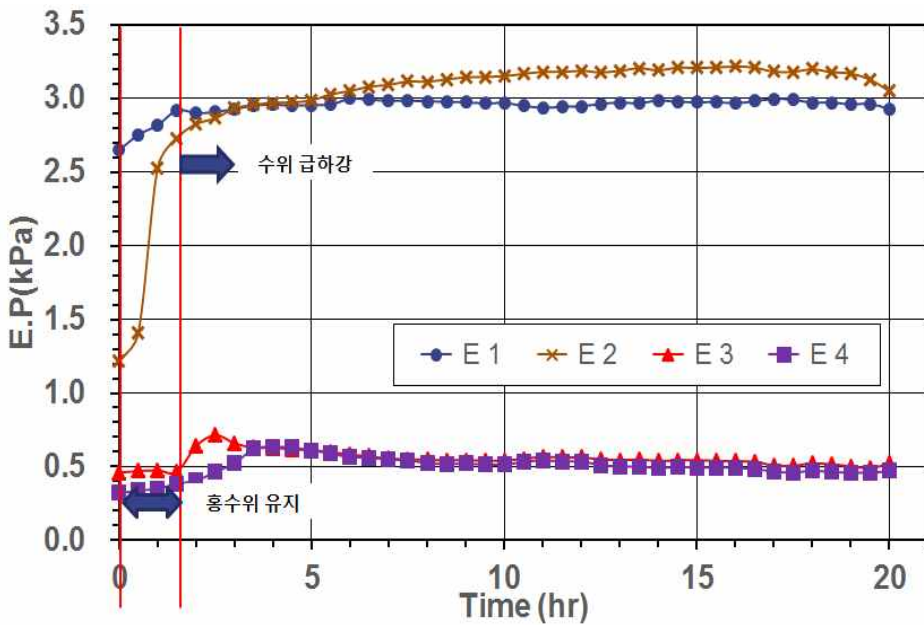
<그림 4-2> (b)는 만수위 상태에서 46시간 유지한 후에 홍수위로 수위를 상승시키고 2시간 정도 후에 수위급강하 하였을 경우의 토압 변화를 나타낸 것이다.

상류사면의 토압 (E1)은 담수로 인하여 약간씩 증가한 후 일정하게 유지되었으며, 댐마루(E2)에서는 급격하게 증가한 후 일정하게 유지되었다. 상류와 댐마루에서는 수위급강하 후에 감소되지 않고 일정하게 유지한 원인은 침투한 공극수의 소산속도가 느리기 때문으로 판단된다.

하류사면의 중앙(E3)와 하부(E4)에서는 약간 상승후에 큰 변화 없이 일정한 상태를 나타냈다.



(a) 공극수압 변화



(b) 토압 변화

<그림 4-2> 홍수위와 수위급강하시 공극수압과 토압의 변화

#### 4. 월류시 공극수압과 토압의 변화

저수지 제방의 월류로 인한 붕괴는 다짐도, 축조재료, 둑마루 폭, 사면 경사 등에 따라 다르게 나타나지만, 월류시 제체의 붕괴형태와 붕괴속도 여부를 파악하고 월류시 제체내에서 어떠한 거동을 하는지를 계측기를 통하여 안정성을 평가하는 것은 매우 중요하다.

수위가 상승하면 성토재는 비압밀 비배수 상태가 되어 사면 안전율이 감소하게 되고, 월류가 발생되면 제방 붕괴 속도는 매우 빠르게 진행된다.

<그림 4-3> (a)는 월류시 공극수압 변화를 나타낸 것으로, 홍수위까지 담수하여 일정하게 유지시키고 4시간 후에 월류실험을 시작하여 4시간 동안 각 위치에서의 변화를 측정하였다.

홍수량 조절은 유량공급장치를 통하여 월류초기단계에서는 홍수량을 1.0L/s로 일정하게 공급하고 여수로로 방류량을 0.22L/s로 방류되도록 하였다. 이상 강우를 모사하여 점차적으로 홍수량을 증가시키면서 월류수심을 측정하고 붕괴에 이르도록 유도하였다.

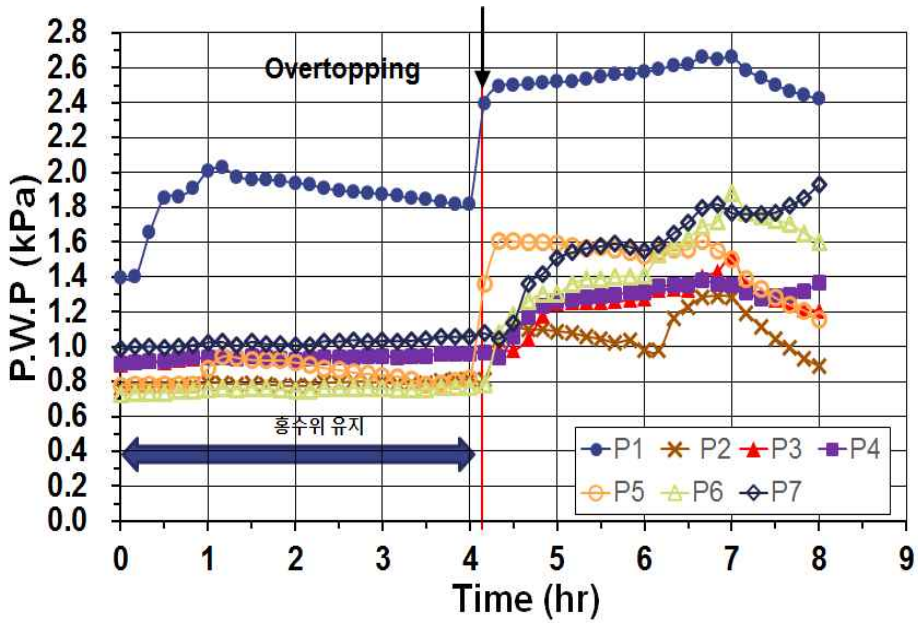
상류사면에서의 공극수압 (P1)은 홍수위로 상승하면서 급격하게 증가하였고 월류가 시작되면서 침투수위 영향으로 다시 급격하게 증가한 후 홍수량이 증가함에 따라 약간씩 증가하다가 붕괴후(7시간 후)에는 감소하였다.

댐마루 공극수압(P5)은 월류가 시작되면서 크게 증가하였고, 하류사면 중앙(P3, P6)과 하부(P4, P7)에서도 큰 변화를 나타냈다.

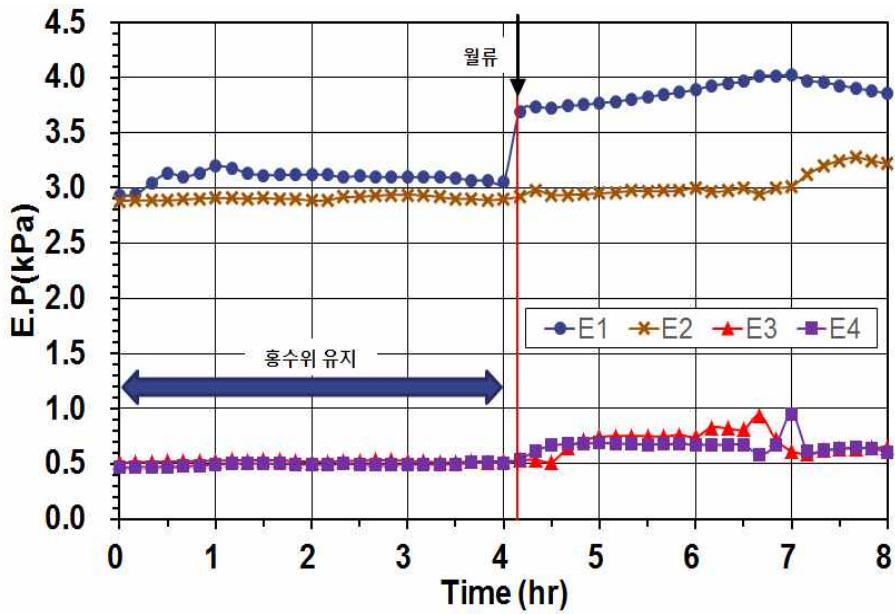
여수로 접속부의 공극수압(P5, P6, P7)에서 다른 위치보다 크게 나타난 원인은 월류초기단계부터 접속부로 월류가 시작되었기 때문으로 판단된다. 월류량 급증단계부터는(약 6시간 후) 제체사면에 세굴과 붕괴가 발생되면서 모든 위치에서 공극수압 증가량이 뚜렷하게 나타났고 붕괴후에 점차로 감소하였다.

<그림 4-3> (b)는 월류시 토압 변화를 나타낸 것으로, 상류사면은(E1) 공극수압과 동일하게 침투수의 영향으로 급격하게 증가하였고 홍수량의 증가에 따라 점차로 증가하다 붕괴후에 감소하였다. 댐마루(E2), 하류사면 중앙(E3), 하부(E4)에서의 토압은 월류량이 증가함에 따라 약간 증가하였지만 큰 변화를 나타내지 않았다.

월류시 공극수압과 토압변화는 매설위치마다 변화량은 다르지만 제체내에서의 거동을 매우 정확하게 알 수 있기 때문에 제체의 붕괴 가능성을 미리 판단하는데 유용한 자료로 이용할 수 있다.



(a) 공극수압 변화



(b) 토압 변화

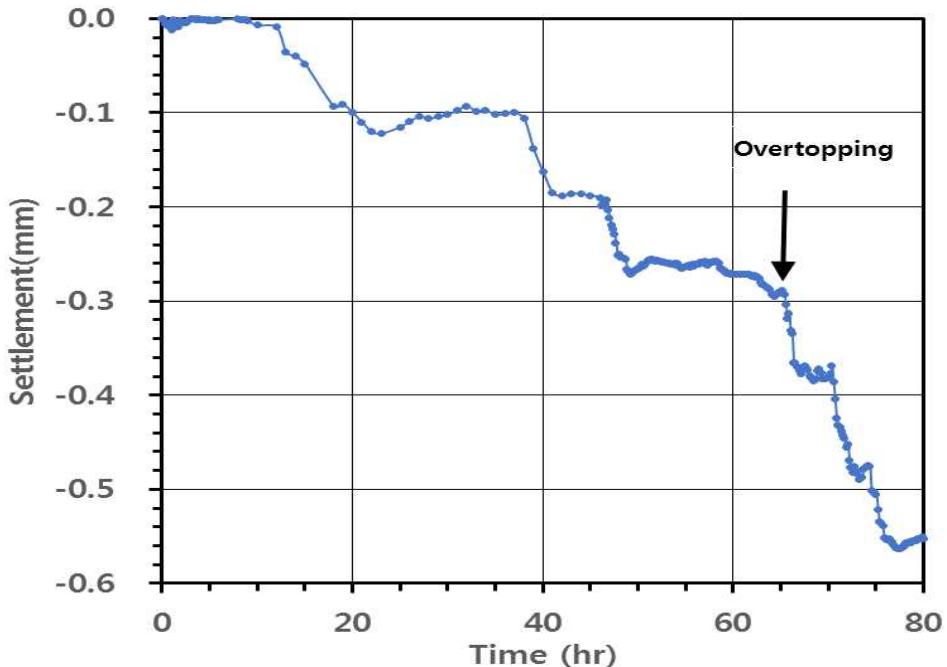
<그림 4-3> 월류시 공극수압과 토압의 변화

## 5. 침하량 변화

<그림 4-4>는 앞에서 언급한 것과 동일한 조건으로 홍수위에서 수위급강하시까지의 침하량과 월류시 침하량의 변화를 나타낸 것이다.

약 46시간부터 홍수위로 수위가 상승하면서 침하량도 점차적으로 증가하고, 약 50시간 후 수위급강하시에는 큰 변화 없이 일정하게 유지되다가 약 66시간 월류시에는 이미 제체내로 충분한 침투가 이루어져 있었기 때문에 급격한 침하현상을 나타냈다. 침하량의 변화폭은 크지만 댐마루 붕괴가 발생되지 않아 상대적으로 작은 값을 나타냈다.

수위가 급격하게 하강하고 상승함에 따라 상대적인 침하가 발생하게 되고, 특히 수위변화에 직접적으로 영향을 미치는 상류측과 하류측은 상대적인 침하량 차이로 인해 결국 부등침하를 유발시켜 댐마루의 균열 가능성을 증대시키게 되고, 잦은 수위 변동으로 인한 반복하중은 댐에 균열을 유발하게 된다.



<그림 4-4> 침하량 변화

## 6. 월류시 제체 사면의 붕괴거동

일반적으로 월류초기단계에서는 지속시간이 오래 걸리고 월류량이 급증하면서 붕괴폭이 점차로 발달하며 첨두월류단계에서는 급격히 붕괴되면서 지속시간이 짧아진다.

모형축조 완료 후 월류 시험 전까지 만수위와 홍수위 상태에서 제체에 충분한 침투가 이루어지도록 하였고, 이상강우시에는 홍수량이 점차적으로 증가하므로 이를 가정하여 유량공급조절장치를 통하여 월류량을 증가시키면서 진행하였고 나머지는 방수로로 방류되도록 하였다. 월류시 저수지 붕괴는 월류초기단계, 월류량 증가단계, 월류량 급증단계, 첨두월류단계 등으로 분석하였다.

<그림 4-5>는 (a)실험전 ( $t=0$ ), (b) 월류초기단계 ( $t=4:15$ ), (c)월류량 증가 ( $t=5:35$ ), (d) 월류량 증가( $t=5:55$ ), (e) 월류량 급증단계( $t=6:15$ ), (f) 첨두월류량단계( $t=6:50$ ), 측정종료( $t=7:15$ )에서의 붕괴 형태를 나타낸 것이다.

월류에 의한 제체와 여수토 접촉부에서의 붕괴 거동은 하류사면의 토립자가 세굴되면서 점차 하부부터 붕괴가 시작되면서 점차로 커지는 점진적 붕괴 형태를 나타냈다.

월류초기단계(b)에서는 유량공급장치를 통하여 홍수량을 1.0L/s로(월류수심:1.2cm) 일정하게 공급하고 나머지는 여수토(0.22L/s)로 방류되도록 하였다. 월류는 여수토 접촉부의 댐마루부터 시작되면서 중앙과 하부쪽으로 세굴이 진행되었고 세굴폭은 18~35cm, 깊이는 1.5~2.8cm로 나타났다.

월류량 증가단계(c), ( $t=5:35$ )에서는 월류량을 1.14L/s(월류수심:1.2cm)로 증가하면서 붕괴폭과 깊이도 증가하여 세굴 폭 18~39cm, 세굴깊이 2.4~4.4cm로 나타났다.

월류량 증가 단계 (d), ( $t=5:55$ )에서는 점차로 월류량이 증가하면서 여수토 접촉부의 세굴은 확대되었지만 세굴방향은 1방향으로만 진행되었고 세굴폭 29~48cm, 깊이 3.1~13cm로 나타났다.

월류량 급증단계(e)에서 월류량을 1.36L/s (월류수심:1.6cm)로 증가시킨 결과, 여수토 부근은 전체가 붕괴하였고 특히 중앙부와 하부는 붕괴폭 20~49cm, 깊이 5.4~15cm로 크게 나타났다. 이 단계에서는 월류량을 증가시켜도 여수토 부근의 붕괴폭과 깊이가 큰 변화가 없고 붕괴영역이 약간씩 오른쪽으로 이동하는 것으로 나타났다.

침투 월류단계(f)에서 월류량을 4.03L/s (월류수심:2.0cm)로 증가시킨 결과, 붕괴영역이 여수토 부근에서 사면중앙부로 이동하면서 붕괴폭 17~58cm, 깊이가 2.2~17cm로 확대되었다. 이 단계에서는 하류사면 전체가 붕괴폭과 깊이가 증가하면서 붕괴가 가속되었지만 댐마루 전체가 완전 붕괴되는 현상은 발생하지 않았다.

제체의 붕괴형태는 삼각형, 직사각형, 사다리꼴 등이 있는데 본 실험에서는 대부분 매우 불규칙한 형태로 나타났다. Fread (1977)는 월댐에서의 붕괴단면은  $H \leq B \leq 3H$  (H: 댐 높이, B: 붕괴부의 평균 폭)이고, 붕괴 지속시간(T)은 재료와 침식에 따라 크게 좌우되지만 비교적 견고하게 축조된 흙 댐에서는  $0.5 \leq T \leq 3.0$  hr 범위로 나타난다고 하였다.

그러나 실험에서 붕괴 폭은 제시한 범위보다 작았고, 붕괴 시간은 제시한 범위 내에 포함되었다.

저수지 제방의 월류로 인한 붕괴는 다짐도, 축조재료, 댐마루 폭, 사면 경사 등에 따라 다르게 나타나지만, 월류가 진행됨에 따라 하류사면 표면을 흐르던 물이 가장 취약한 부분의 작은 입자들을 세굴시키기 시작하고 점차로 굵은 입자들이 침식되면서 확대되는 점진적 붕괴형태를 나타낸다.

전체적으로 붕괴형태는 월류가 시작되면서 가장 취약한 여수토 부근에서 세굴이 진행되었고 점차적으로 댐마루 사면면에서 여러개의 세굴방향이 나타나면서 세굴폭과 깊이가 확대되는 점진적 붕괴형태는 나타났다.

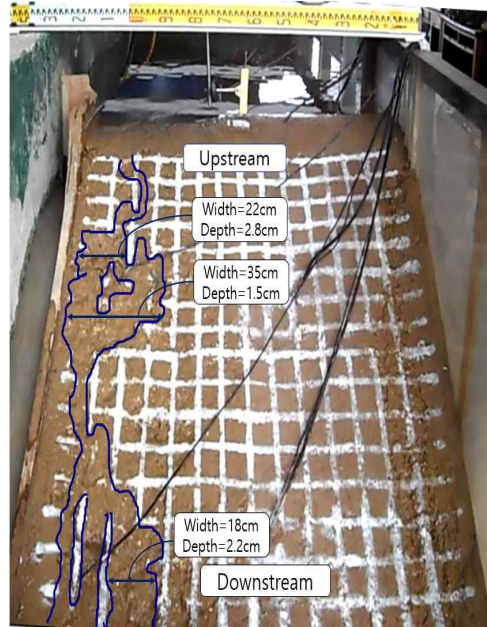
따라서 이러한 위치에는 공극수압이 증가하고 토압변화가 크기 때문에 붕괴모형실험을 바탕으로 노후화된 균일형 저수지의 월류시 보강공법을 적용할 경우에는 붕괴를 지연시키는 방법과 붕괴폭의 확대를 억제하는 방법을 고려해야 할 것으로 판단된다.

댐마루 보강에 의해 침투를 억제하는 공법(아스팔트, 콘크리트, 보도블록, 쇠석 등), 하류사면침식을 억제하는 방법(Geotextile, riprap, 식생피복공 등), 하류사면 선단의 침식을 방지하는 공법(블록 보강, Gabion 공법) 등을 적용할 수 있을 것으로 판단되며 이를 위한 실내모형실험이 요구된다.

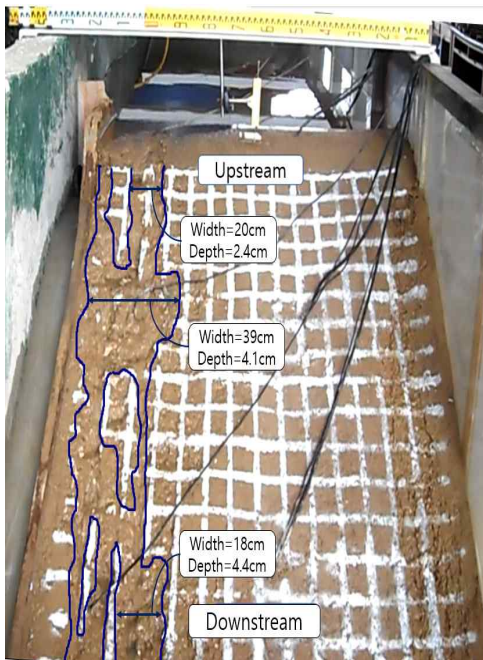




(a) 실험전 (t=0)



(b) 월류초기단계 (t=4:15분)

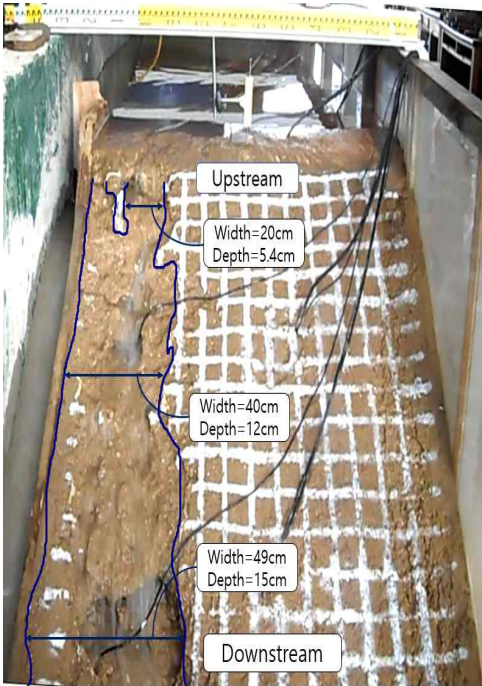


(c) 월류량 증가 (t=5:35)

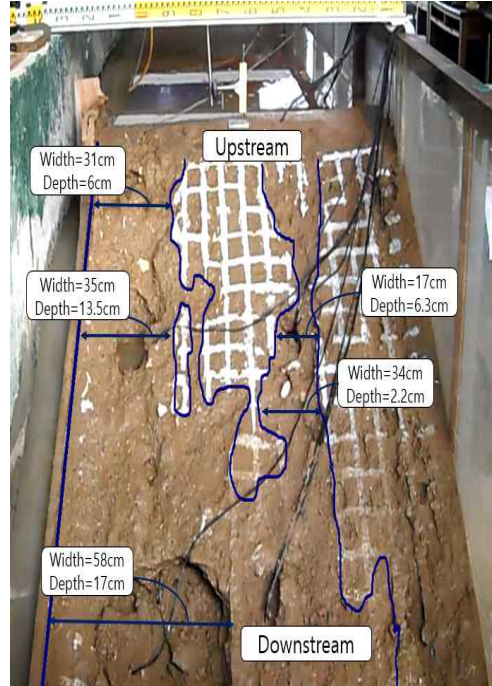


(d) 월류량 증가(t=5:55)





(e) 월류량 급증단계(t=6:15)



(f) 침투월류량단계( t=6:50)

<그림 4-5> 월류시 제체 사면의 붕괴거동

## 제2절 여수토 접속부 월류에 의한 붕괴시

### 1. 모형실험방법

측수로형 여수로는 구조적으로 측수로의 옹벽높이가 댐마루보다 낮게 설계시공 되고 있기 때문에 발생 가능한 최대홍수량 유입시 측수로내의 수위상승으로 방수로에서 옹벽으로 월류되기 때문에 옹벽과 제체와의 접속부는 세굴파괴에 취약하다.

특히, 여수토 접속부는 시공 과정에서 다른 부분보다 다짐이 불균질하게 이루어져 경계부에 누수에 의한 침투현상이 발생되어 신중한 시공관리가 이루어져야 하고, 수위급강하에 따라 공극수압의 소산속도가 상대적으로 늦어 침투압이 작용하므로 붕괴위험성을 높이게 된다.

측수로형 여수로의 흐름특성은 설계홍수량을 초과하는 경우 측수로의 수위가 상승하여 월류부의 월류량이 잠류영향을 많이 받는 구조적 문제점을 가지고 있다. 측수로 내에 잠류가 발생하면 월류 유속이 감소하면서 급격

한 수위 상승이 발생되고, 월류한 흐름이 수면위로 흐르게 되어 측벽에서 처오름 현상이 발생하게 되어 접속부가 세굴에 의해 붕괴되기 시작한다.

이상 홍수 발생시 여수토 콘크리트와 원지반 사이에 가장 취약한 양안 옹벽 배면부가 월류에 의한 세굴과괴가 진행되고 급류부의 완전유실이 발생된 후에 점차적으로 여수로가 완전히 붕괴되는 과정을 거치게 된다.

실험은 이상강우시 월류조절장치를 통하여 여수토 방수로에서 접속부로 1차적으로 월류되는 조건을 모사하고, 2차적으로 상류유역에서 유입량이 증가하다고 가정하여 댐마루로 월류하도록 조절하였다.

상류측에 담수를 시작하여 여수토 방수로 표고보다 낮은 수위에서 담수한 물이 체체내로 충분히 침투하여 정상 침투가 이루어졌다고 판단할 때까지 측정하였다.

실험과정은 홍수위시, 수위급강하시, 월류시로 구분하여 공극수압, 토압, 침하량을 측정하였고, 월류시 저수지 붕괴형태는 초기월류단계, 월류량 급증단계, 침투월류단계 등으로 구분하고 동일한 단계에서 3차원 침투해석 프로그램으로 분석하였다.

월류시 모형저수지의 상류부로 유입되는 유입량과 여수토 방수로를 통하여 하류부로 유출되는 유출량은 미리 측정된 토조에서의 유량검증을 통하여 유입량과 방수로 유출량을 조절하였다. 실험과정의 붕괴양상을 비디오 카메라를 설치하여 전체 붕괴과정을 기록하였다.

## 2. 계측기 매설

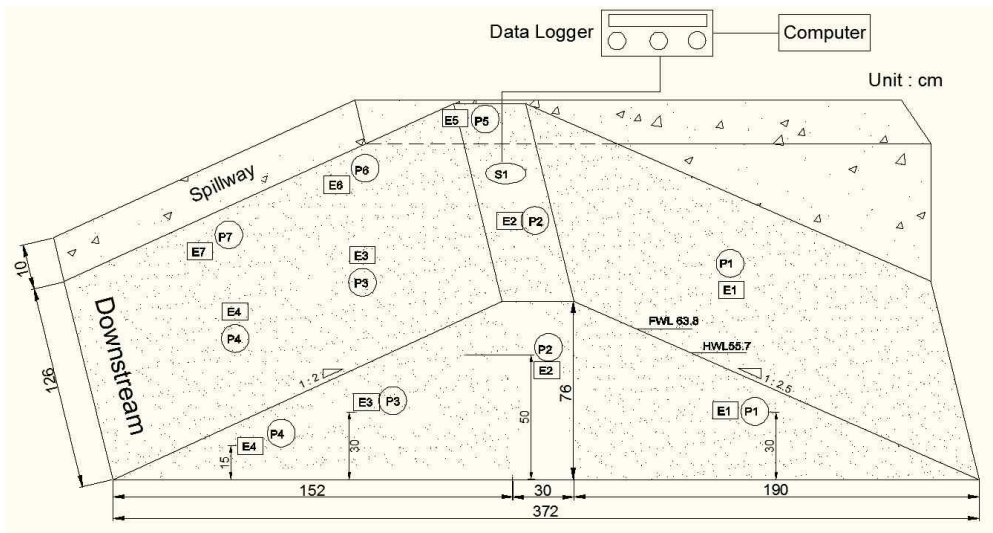
체체를 구성하는 성토재 내부에 작용하는 공극수압과 토압을 측정하기 위해 <그림 4-6>과 같이 공극수압계 (P) 7개와 토압계(E) 7개를 각각의 위치에 매설하였다. 공극수압계의 매설위치는 체체의 상류사면 P1, 댐마루 P2, 하류사면 중앙 P3, 하류사면 하부 P4, 여수토 접속부의 댐마루 P5, 중앙 P6, 하부 P7에 매설하였으며, 토압계도 공극수압계와 같은 위치에 매설했다.

매설깊이는 사면의 높이와 경사를 고려하여 월류 시 공극수압과 토압 측정 시 비교가 용이하도록 체체 하부로부터 15~50cm 떨어진 지점에 매설하였다.

체체 덧쌓기 후 댐마루 중앙에 침하계 (S)를 설치 (LVDT)하여 침하량을 측정하였고, 계측기는 모형 토조내 적용할 수 있는 초소형 크기의 공

극수압계 (정격용량: 50kPa)와 토압계(정격용량: 200kPa)를 사용하였다. 각각의 측정값은 Data Logger와 Computer에 의해 자동적으로 저장하도록 하였다.

저수지는 균일형 형식으로 제체 모형 축조에 사용된 시료는 균질한 상태로 포설하기 위하여 12mm 체를 통과한 시료만 사용하였다. 다짐은 최적 함수비(14%)로 조절하였고(13.95%) 다짐 시 밀도를 균일하게 하기 위하여 먼저 1 층을 약 5cm 가량 포설한 후 나무다짐봉으로 다짐을 한 후 밀도는 16.06 kPa(다짐도 : 93%)로 나타났다.



<그림 4-6> 축조모형 단면과 계측기 매설 위치

### 3. 홍수위와 수위급강하시 공극수압과 토압의 변화

<그림 4-7> (a)는 상류측에 담수를 시작하여 만수위 (55.7cm) 상태에서 26시간 정도 유지시킨 후에 홍수위(63.8cm)까지 수위를 상승하였고 2시간 정도 후에 수위를 급강하시켰을 경우 공극수압 변화를 나타낸 것이다.

상류사면, 하류사면, 여수토 접속부에서 공극수압은 만수위에서 홍수위까지 약간씩 증가한 후 수위급강하에 따라 급격하게 감소하고 사수위에서 일정하게 유지하였다.

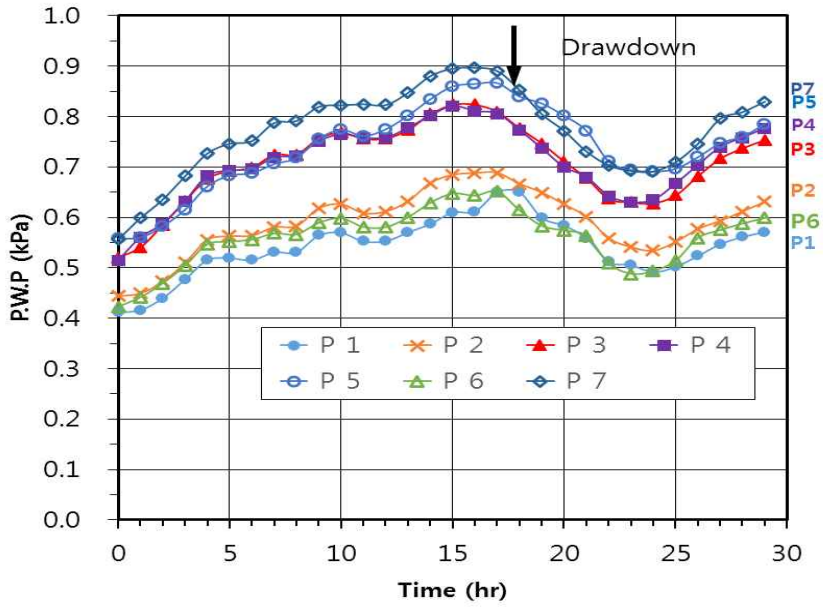
여수토 접속부 하부(P7) 및 접속부 댐마루 (P5), 하류사면 중앙(P3), 하부(P4)에서는 다른 위치보다 약간 큰 값을 나타냈다.

전체적으로 수위상승과 수위급강하에 따라 공극수압 변화는 나타났지만 변화폭이 작기 때문에 제체의 위험성은 나타나지 않았다.

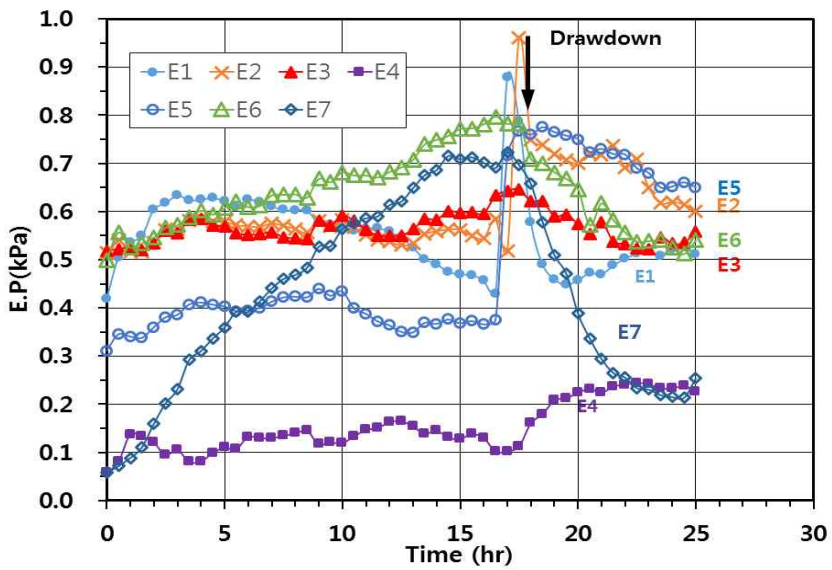
<그림 4-7> (b)는 공극수압과 동일한 조건에서 수위급강하 하였을 경우의 토압 변화를 나타낸 것이다.

상류사면(E1), 댐마루(E2), (E5)에서는 홍수위로 수위를 상승하였을 경우 급격하게 토압이 증가하였고 수위급강하시에는 급격한 감소변화가 나타났는데 이는 댐마루에서 침투수의 영향으로 판단된다.

다른 위치에서는 약간의 증가와 감소 변화량을 나타냈고 하류사면 하부(E7)에서는 만수위에서는 누수가 없다가 시간이 경과하면서 약간씩 누수가 발생되어 증가하기 시작하였고, 홍수위로 상승하면서 여수토 접촉부가 누수되어 변화폭이 크게 나타난 것으로 판단된다.



(a) 공극수압 변화



(b) 토압 변화

<그림 4-7> 홍수위와 수위급강하시 공극수압과 토압의 변화

#### 4. 월류시 공극수압과 토압의 변화

여수토 접속부는 시공 과정에서 다른 부분보다 다짐이 불균질하게 이루어져 경계부에 누수에 의한 침투현상이 발생할 가능성이 높으므로 신중한 시공관리가 이루어져야 하고, 이상강우에 의한 여수토 접속부로 월류되었을 경우에는 매우 위험한 상태로 나타나기 때문에 계측을 통한 공극수압 및 토압변화를 파악하여야 한다.

<그림 4-8> (a)는 홍수위까지 일정하게 유지한 후 수위를 댐마루 월류 전까지 상승시킨 후 여수토 방수로에서 쳐올림 현상을 모사하여 접속부로 월류시키고, 이상강우에 의해 계속해서 유입되는 홍수량이 증가하면서 방수로뿐만 아니라 댐마루로 월류되는 조건을 모사하여 4시간동안 공극수압과 토압의 변화를 나타낸 것이다.

홍수량 조절은 유량공급장치를 통하여 댐마루전까지 수위를 유지(75cm)하면서 여수토로 0.25 L/s로 방류되도록 하고 방류된 유량은 월류조절장치를 통하여 접속부로 월류되도록 유도하였다.

여수토 접속부 댐마루에서의 공극수압(P5)은 접속부 월류시에는 영향을 미치지 않기 때문에 일정하다가 댐마루 월류가 시작되면서 급격하게 증가하였고 침투월류단계(약 3.6시간)후에는 변동폭이 크게 나타났다.

접속부 중앙에서의 공극수압(P6)은 접속부 월류시에는 일정하다가 댐마루 월류가 시작되는 시점부터(2.3시간) 급격하게 증가하였고 유입량 증가에 따라 증가하다가 침투월류단계에서 다시 급격하게 증가한 후 붕괴후에 감소하였다.

접속부 하부의 공극수압(P7)은 접속부 월류가 시작되면서 세굴이 진행되었고 그 영향으로 초기부터 점차적으로 증가하다가 침투월류단계에서 가장 큰 값을 나타낸 후 감소하였다.

상류사면에서의 공극수압 (P1)은 방수로에서 월류되는 조건을 모사하기 위하여 유입량을 홍수위에서 댐마루 월류전까지 증가시킨 후 점차적으로 증가하고 일정하게 유지하다가 침투월류량 단계에서(3.6시간) 급격하게 증가한 후 감소하였다.

댐마루(P2), 하류사면 중앙(P3)은 댐마루 월류전부터 약간씩 증가하였고 일정하게 유지하다가 침투월류단계에서 변화폭이 크게 나타났다.

하류사면 하부(P4)에서는 월류시에 큰 변화가 없이 일정하게 유지하다가 침투월류단계에서 침투수의 영향으로 급격하게 증가하였다.

여수토 접속부의 공극수압(P5, P6, P7)은 초기단계에서 월류되도록 유도하였기 때문에 공극수압의 변화폭이 크게 나타났고 침투월류단계에서는 모든 위치에서 공극수압이 크게 증가한 후 붕괴후에 감소하였다.

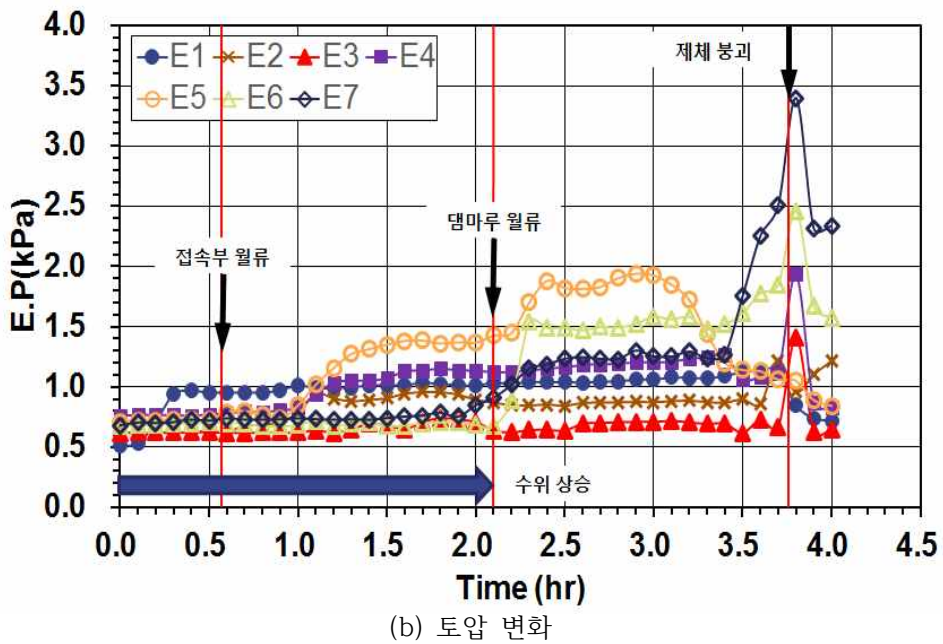
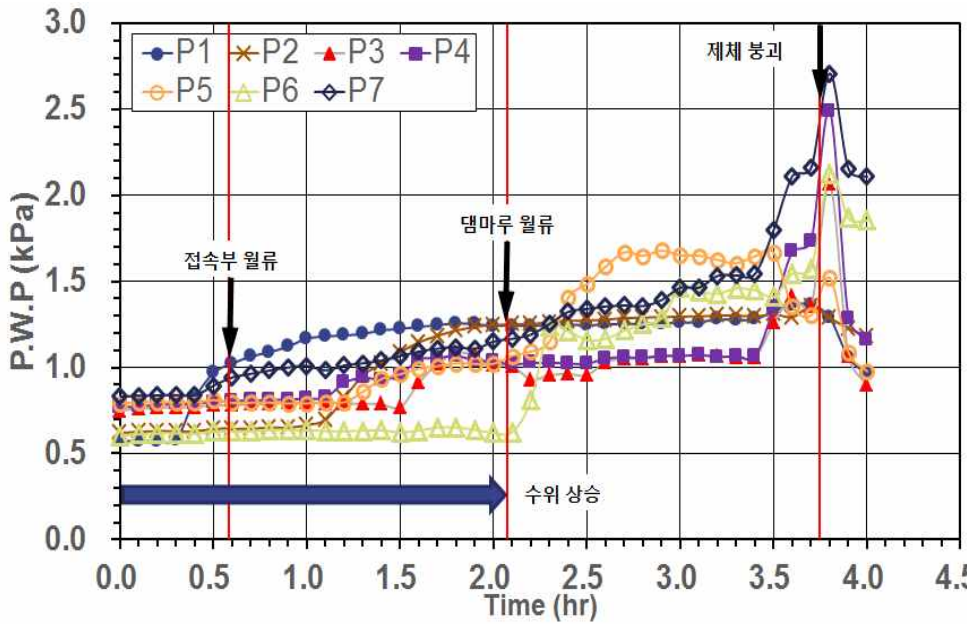
전체적으로 유입량 증가에 따라 세굴과 붕괴가 발생되면서 여수토 접속부의 공극수압은 급격하게 상승하는 것으로 나타났고, 붕괴폭이 커질수록 그 영향은 더 크게 나타났다.

<그림 4-8> (b)는 월류시 토압 변화를 나타낸 것으로 여수토 접속부의 토압(E6, E7)은 초기단계에서는 큰 변화를 나타내지 않다가 월류가 시작되면서 급격하게 증가하였고 침투월류단계에서는 가장 큰 증가폭을 나타냈다. 접속부 댐마루에서의 토압(E5)은 접속부 월류후와 댐마루 월류후에 급격하게 증가하였고 변동폭이 크게 나타나다가 침투월류단계에서는 붕괴로 인하여 감소하였다.

상류사면은(E1) 유입량 증가의 영향으로 초기에 급격하게 상승하고 일정하게 유지하다가 붕괴후에 감소하였다. 댐마루(E2), 하류사면 중앙(E3) 및 하부(E4)에서의 토압은 월류량이 증가함에 따라 큰 변화를 나타내지 않았고 침투월류단계에서만 변화폭이 크게 나타났다.

전반적으로 토압은 여수토 접속부에서 월류로 세굴이 확대 되면서 급격하게 증가하였고 붕괴시에는 급격한 변동폭을 나타냈고, 공극수압과 동일하게 월류시 제체내에서의 거동을 정확하게 파악할 수 있기 때문에 붕괴 가능성을 미리 판단하는데 유용한 자료로 이용할 수 있다.





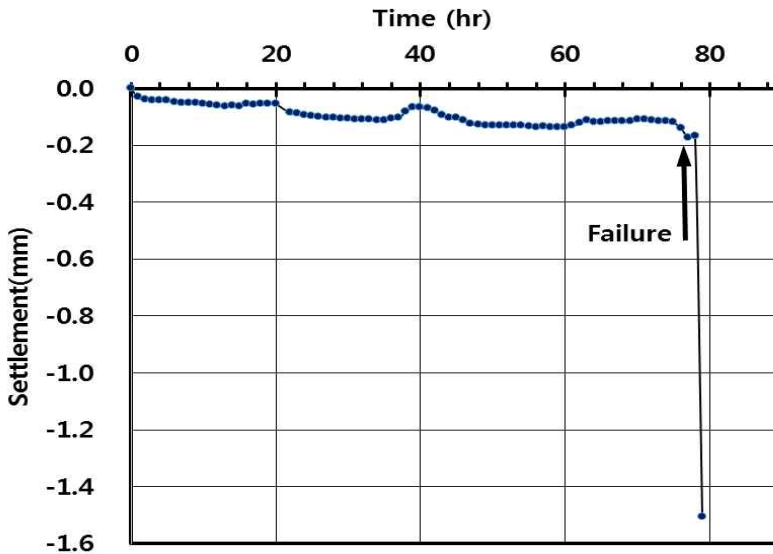
<그림 4-8> 여수토 접속부 월류시 공극수압과 토압의 변화



## 5. 침하량 변화

<그림 4-9>는 초기부터 월류시까지 침하량의 변화를 나타낸 것이다.

약 46시간부터 홍수위로 수위가 상승하였지만 큰 변화를 나타내지 않았고, 수위급강하시에도 큰 변화 없이 일정하게 유지되었다. 월류전까지는 비교적 작은 침하량이 일정하게 유지되다가 약 75시간 후 월류시에는 점차적으로 침하량이 증가하였고 댐마루 붕괴와 동시에 급격하게 증가하였다.



<그림 4-9> 여수토 접속부 월류시 침하량의 변화

## 6. 월류시 제체 사면의 붕괴형태

농업용저수지 중에서 측수로형 여수로는 수리학적으로 효율적이거나 측수로내의 수위가 한계를 초과하면 월류흐름의 잠류영향을 받게 되어 수위가 급격하게 상승하게 되고 이어서 쳐올림 현상이 발생하는 특성을 가지고 있어 월류에 의한 세굴파괴에 취약하다.

이상 홍수 발생시 콘크리트와 여수토 접속부 사이에 가장 취약한 옹벽 배면부가 월류에 의한 세굴파괴가 진행되고 급류부의 완전유실이 발생된 후에 점차적으로 여수로가 완과되는 과정을 거치게 된다.

월류시 저수지 붕괴는 월류초기단계, 월류량 급증단계, 침두월류단계 등으로 검토할 수 있는데, 일반적으로 월류초기단계에서는 지속시간이 오래

걸리고 월류량이 급증하면서 붕괴폭이 점차로 발달하며 침두월류단계에서는 급격히 붕괴되면서 지속시간이 짧아진다.

모형축조 완료 후 월류 시험 전까지 만수위 상태에서 제체에 충분한 침투가 이루어지도록 하였고, 이상강우시 홍수량이 점차적으로 증가하는 쳐올림 현상을 모사하여 방수로에서 월류조절장치를 통하여 초기에 여수토 접속부로 월류하도록 유도하였고 계속해서 월류량을 증가시키면서 댐마루에서도 월류되는 조건을 모사하여 4시간동안 붕괴형상을 측정하였다.

<그림 4-10>은 (a) 실험전( $t=0$ ), (b) 월류초기단계 ( $t=1:50$ ), (c) 월류량 증가 ( $t=2:30$ ), (d) 월류급증단계( $t=2:55$ ), (e) 월류량 증가( $t=3:05$ ), (f) 침두 월류량단계( $t=3:35$ ), 측정종료( $t=3:45$ ) 에서의 붕괴 형태를 나타낸 것이다.

월류초기단계(b)에서는 유량공급장치를 통하여 홍수위까지 일정하게 유지시키고 나머지는 여수토( $0.25L/s$ )로 방류되도록 한 후 월류조절장치를 통하여 접속부로 월류하도록 유도하였다. 월류는 여수토 접속부의 댐마루 아래부터 시작되면서 하부쪽으로 세굴이 진행되었고 세굴폭은  $20\sim 21cm$ , 깊이는  $3.8\sim 5.4cm$ 로 나타났다.

월류량 증가 단계(c)에서는 월류량을  $0.48L/s$ (월류수심:  $1.5cm$ )로 유지한 상태에서 댐마루에서 월류가 시작되었고 세굴 폭  $10\sim 26cm$ , 깊이  $5.6\sim 13.1cm$ 로 점차적으로 증가하였다. 월류량이 점차로 증가하면서 여수토 접속부의 세굴깊이만 증가하였고 중앙부로 이동은 진행되지 않았다.

월류 급증단계(d)에서 월류량을  $1.48L/s$  (월류수심: $2.0cm$ )로 증가시켰을 경우, 여수토 접속부의 댐마루가 붕괴하면서 세굴깊이  $8.5\sim 22.4cm$ 로 증가하였고 하류사면 중앙부에서도 붕괴폭  $8\sim 9cm$ , 깊이  $5cm$ 로 붕괴되면서 붕괴영역이 이동하였다.

월류량 증가 단계(e)에서는 월류량을  $2.99L/s$ (월류수심:  $2.2cm$ )로 유지한 상태에서 댐마루에서 월류가 시작되었고 하류사면 우측에서도 폭  $8\sim 10cm$ , 깊이  $6.5\sim 6.9cm$ 로 세굴범위가 점차적으로 확대되었다.

침두 월류단계(f)에서 월류량을  $4.85L/s$  (월류수심: $2.5cm$ )로 증가시킨 결과, 여수토 접속부 댐마루가 완전붕괴 되었고(폭  $36\sim 55cm$ , 깊이  $24\sim 27cm$ ) 사면 중앙부에서도 폭  $9\sim 16cm$ , 깊이  $7\sim 17cm$ 로 붕괴영역이 확대되었다.

제체와 여수토 접속부 사이에는 시공상의 문제로 불균질한 다짐과 누수로 인해 세굴현상이 증가되어 붕괴를 일으키는 요인으로 작용한다. 특히, 접속부에서의 월류는 하류사면 토립자의 세굴이 가속되면서 댐마루쪽으로

붕괴영역이 이동되고 점차적으로 중앙부로 붕괴영역이 확대되면서 폭과 깊이를 증가시키는 점진적 붕괴 형태를 나타냈고 최종적으로 저수지 전체가 붕괴되는 형상을 나타냈다.

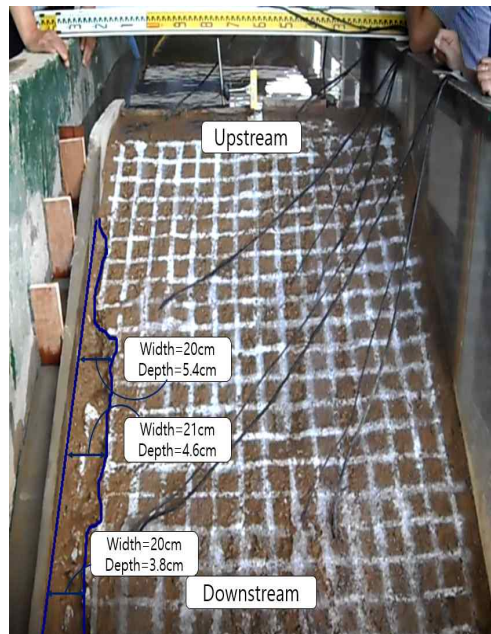
제체의 붕괴형태는 매우 불규칙한 형태로 나타났고 붕괴단면은  $B = 0.7H$  ( $H$ : 댐 높이,  $B$ : 붕괴부의 최대 폭)이고, 붕괴 지속시간( $T$ )은 재료와 침식에 따라 크게 좌우되지만 본 실험에서는 약  $T=4.0$  hr 범위로 나타났다.

앞으로 붕괴모형실험 거동을 바탕으로 노후화된 균일형 저수지의 월류시 여수로 접속부의 보강공법으로는 표면차수공법으로 지오멤브레인, 쇄석, 지오텍스타일 등을 적용할 수 있을 것으로 판단되며 현장 적용성 평가를 위해 실내모형실험을 통해 검증해야 한다.

댐마루 보강에 의해 침투를 억제하는 공법으로 아스팔트, 콘크리트, 보도블록, 쇄석 등으로 보강할 수 있고, 하류사면침식을 억제하는 방법으로 Geotextile, riprap, 식생피복공 등이 있으며, 하류사면 선단의 침식을 방지하고 침윤선을 저하시킬 수 있는 공법으로 Gabion 공법, 블록공법 등을 사용하면 Toe drain 역할을 병행할 수 있어 안정성을 보다 더 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

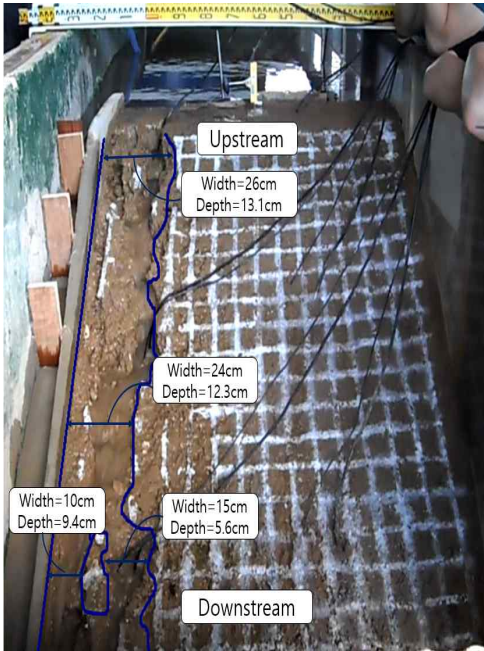


(a) 실험전 ( $t=0$ )

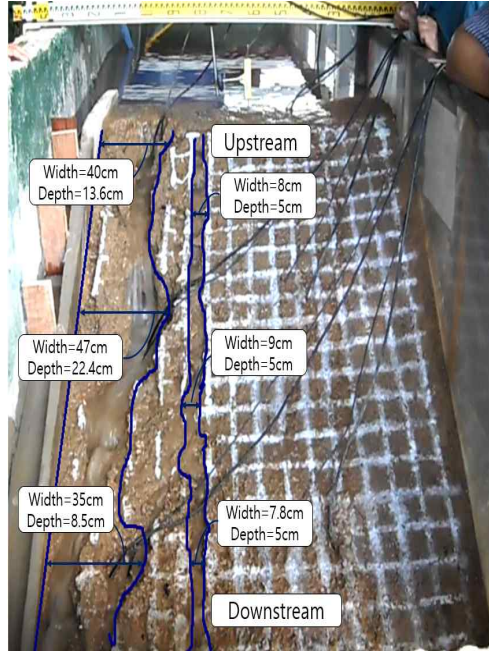


(b) 월류초기단계 ( $t=1:50$ 분)

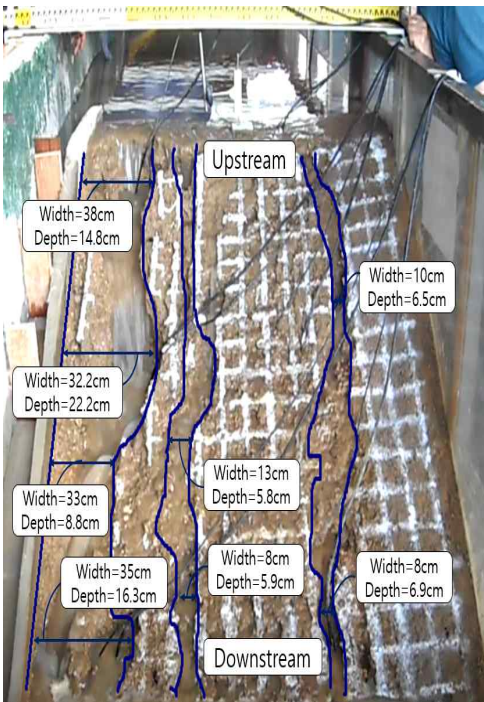




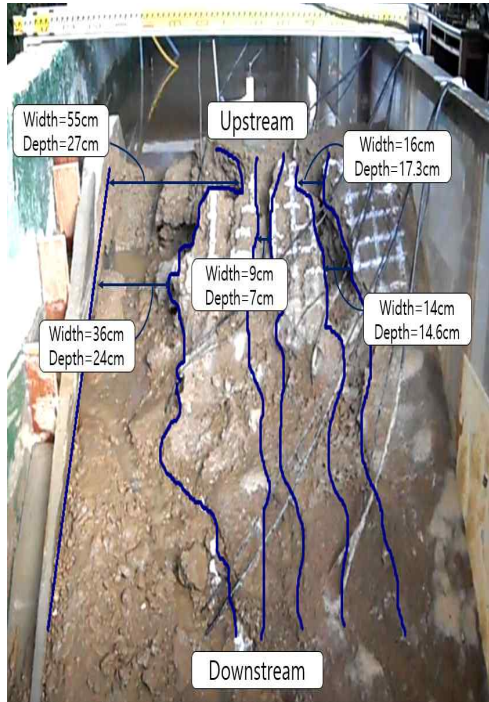
(c) 월류량 증가 (t=2:30)



(d) 월류량 급증단계(t=2:55)



(e) 월류량 증가(t=3:05)



(f) 첨두월류량단계( t=3:35)

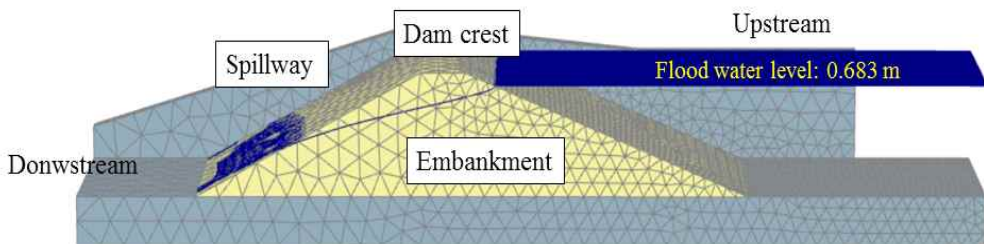
<그림 4-10> 여수로 접속부 월류시 체체 사면의 붕괴거동

## 7. 수치해석에 의한 제체의 침투특성

### 가. 공극수압 및 침윤선의 분포

3차원 침투해석 프로그램인 Plaxis 3D에 의한 침투특성을 분석하기 위한 해석단면과 해석조건은 <그림 4-11> 및 (표 4-1)과 같다.

<그림 4-11>은 침투류 및 변형 해석에 적용한 요소의 형상으로 삼각형으로 구성하였으며 반복해석을 수행하여 해석결과에 영향을 미치지 않는 최대크기를 적용하였다.



<그림 4-11> 수치해석 적용단면

해석조건은 균일형 제체의 여수토 방수로에서 초기 월류가 시작되고 홍수량의 증가로 인해 점차적으로 댐마루에서 월류수심이 상승되는 현상으로 모사하였다.

(표 4-1) 수치해석 월류조건

Case	수위 (H:cm)	월류 조건	경과시간(hr)
Case 1	68.3	홍수위 상태 유지	t =0.5
Case 2	76.0	초기월류단계 <그림 4-12> (b) 방수로에서 접속부로 월류 조건	t =1:50(1.8hr)
Case 3	77.5	월류량 증가 <그림 4-12> (c) 월류수심 (15mm)유지	t=2:30(2.5hr)
Case 4	78.0	월류 급증단계 <그림 4-12> (d) 월류수심 (20mm)	t =2:55(2.9hr)
Case 5	78.2	월류량 증가 <그림 4-12> (e) 월류수심 (22mm)	t =3:05(3.1hr)
Case 6	78.5	침투월류량 단계 <그림 4-12> (f) 월류수심 (25mm)	t =3:35(3.6hr)

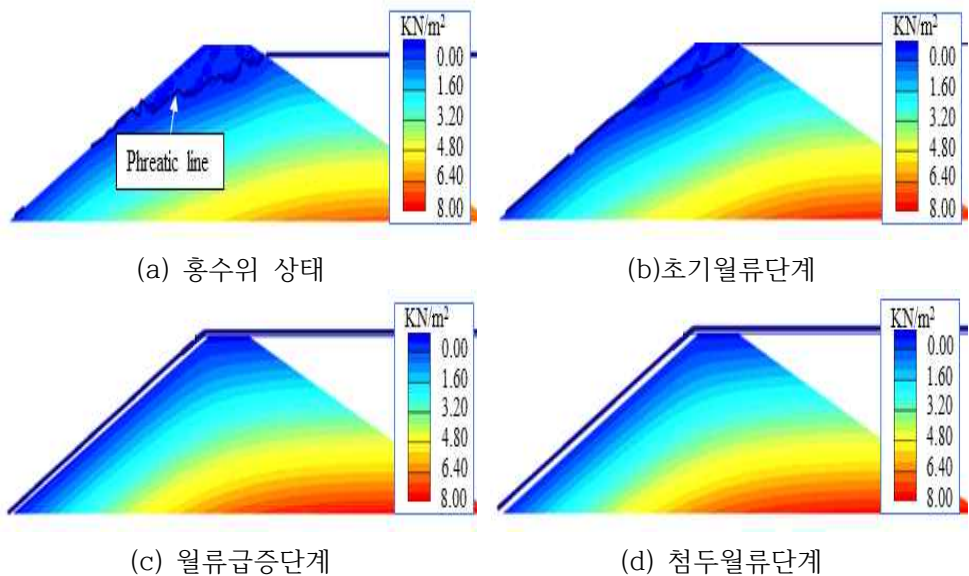
댐마루 월류현상을 모사하기 위하여 실내모형실험의 붕괴형상을 기준으로 적용하였고, 홍수위 조건에서는 여수토 접촉부로부터 월류하도록 하고 점차적으로 댐마루를 월류하여 하류사면 비탈표면이 침수되는 조건으로 적용하였다.

(표 4-1)은 침투해석에 적용된 6개의 Case를 나타낸 것으로, 홍수위 (FWL: 63.8cm), 초기월류단계(H=76cm), 월류량 증가, 월류급증단계, 월류량 증가, 침두월류단계까지 실내모형실험과 동일하게 월류수심이 점차적으로 증가하는 단계로 해석하였다.

<그림 4-12>는 해석조건을 기준으로 월류단계별 침윤선과 공극수압의 분포를 나타낸 것이다.

홍수위 상태에서의 침윤선은 상류사면에서 하류사면으로 불규칙한 형태로 나타났고, 수위가 상승함에 따라 하류사면 표면위에 나타났으며, 월류후 댐마루 중앙에서 완전포화가 발생하는 시점은 월류초기단계(약 110-115분 경과)로 이 때부터 하류사면 표면이 침수되기 시작하였다.

공극수압은 댐마루부터 하류사면의 비탈면에서 작게 나타났지만 월류수심이 증가함에 따라 점차적으로 증가하였다.



<그림 4-12> 월류단계별 침윤선 및 공극수압 변화

<그림 4-13>은 모형실험의 매설위치와 동일한 지점에서 해석조건별로 공극수압을 나타낸 것이다.

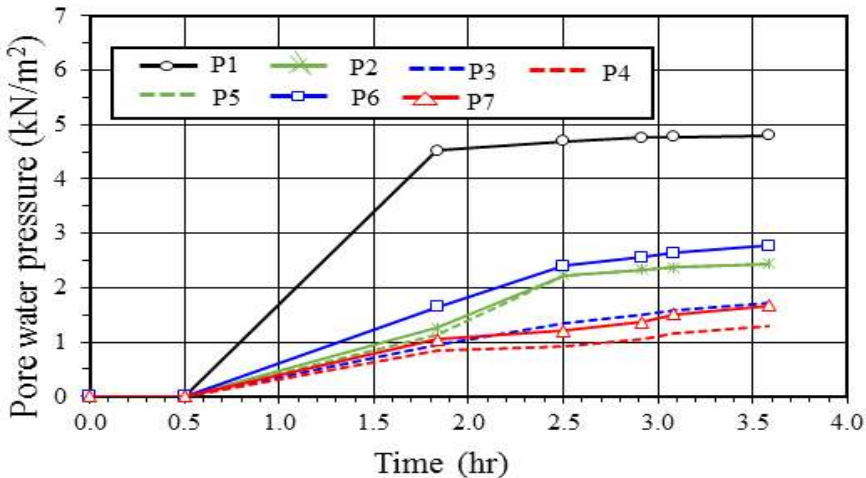
상류사면에서의 공극수압 (P1)은 홍수위에서 수위를 증가시킨 후부터 초기월류단계까지 급격하게 증가하였고 침투월류단계까지는 약간씩 증가하였다.

댐마루(P2), 하류사면 중앙(P3), 하류사면 하부(P4)에서는 수위가 증가함에 따라 일정하게 증가하였고 댐마루에서 가장 크게 나타났다.

여수토 접속부 댐마루(P5), 중앙(P6), 하부(P7)에서의 공극수압은 홍수위부터 댐마루 월류가 시작되면서 점차적으로 증가하였고 중앙이 댐마루보다 약간 더 크게 나타났다.

여수토 접속부(P5, P6, P7)의 공극수압은 접속부부터 월류하였기 때문에 제체 중심축 (P2), (P3), (P4)보다 약간 더 크게 나타났다.

전체적으로 해석치는 실험치보다 더 크게 나타났고 월류단계별로 실험치는 변화폭이 큰 반면에 해석치는 뚜렷한 변화폭을 나타나지 않고 일정하게 증가하는 경향만을 나타냈다.



<그림 4-13> 월류단계별 공극수압 변화

#### 나. 변위의 분포

월류단계별 여수토와 제체에서의 변위분포는 침투-변형 연계해석 (Seepage-Deformation coupled analysis)에서 산출된 수압분포를 이용하여



각 제체 단면위치에서 제체의 변형이 나타나지 않을 한계점까지 강도를 감소시키고 실제적인 제체의 변형 및 파괴형상을 나타낼 수 있는 강도감소법을 적용하였다.

침투-변형 연계해석에서는 시간경과에 따라 제체에 수압이 작용할 경우의 변형만을 고려하고 하중을 별도로 고려하지 않기 때문에 실제보다 낮게 나타낼 수 있어 강도감소법을 이용하여 전체적인 변위분포를 나타냈다.

<그림 4-14>는 월류단계별 x축과 z축 방향에서 변위를 나타낸 것이다.

x축 방향 변위는 홍수위부터 침투월류단계까지 수위가 증가함에 따라 제체가 포화되고 수압이 하중으로 작용하기 때문에 점차적으로 증가하는 것으로 나타났고, 하류사면 비탈끝부터 변위가 커지고 점차적으로 댐마루 상부로 확대되는 형상을 나타냈다.

z축 방향 변위는 홍수위부터 침투월류단계까지 수위가 증가함에 따라 댐마루에서 하류사면 중앙부쪽으로 점차적으로 확대되었고 댐마루에서 가장 큰 변위를 나타냈다.

<그림 4-15>는 월류단계별로 x축과 z축 방향에서 최대변위를 기준으로 나타낸 것이다.

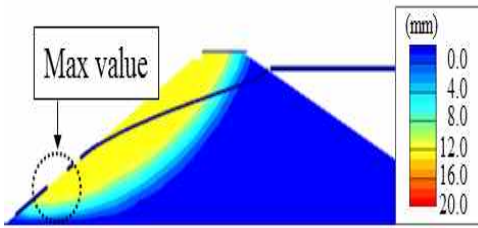
x축 방향 최대변위(a)는 홍수위에서 급격하게 증가하고 수위가 증가함에 따라 수압의 영향으로 점차적으로 증가하였고, z축 방향 최대변위(b)는 홍수위에서 급격하게 증가하고 수위가 증가함에 따라 약간 감소한 후 일정한 경향을 나타냈다.

이와 같은 감소원인은 해석시에는 성토재료의 변형만을 고려하기 때문에 홍수위에서 이미 상당히 큰 변위가 발생된 직후에 추가적으로 큰 외부하중이 작용하지 않아 변위량이 작아진 것으로 판단된다.

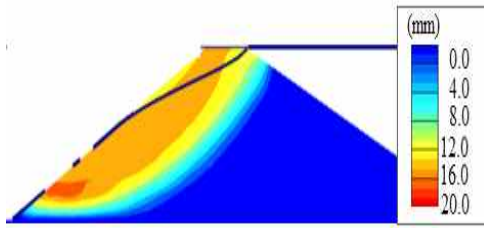
전체적으로 수위가 증가함에 따라 변위는 증가하였고 변위가 가장 커서 붕괴가 시작되는 시점인 최대치만으로 비교하였을 경우에는 z축 방향에서 약간 감소하는 경향을 나타냈다.

그리고 x, z축 방향에서의 변위분포 결과를 바탕으로 하류사면과 댐마루에서 우선적으로 보강이 필요한 부분이 어느 위치인지를 판단하는데 기준으로 적용할 수 있다.

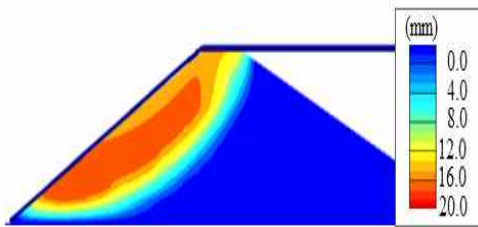




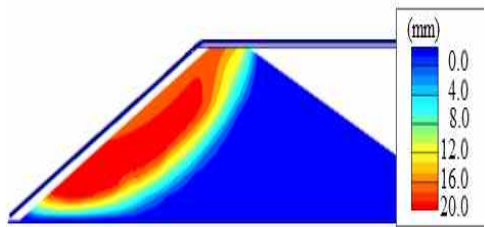
(a) 홍수위 단계에서 x축 변위



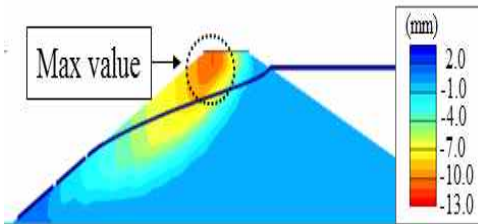
(b) 초기월류단계에서 x축 변위



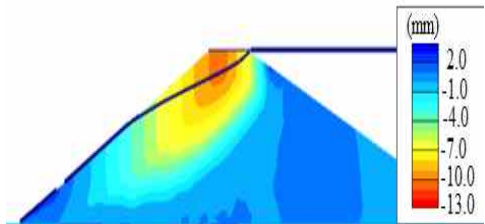
(c) 월류급증단계에서 x축 변위



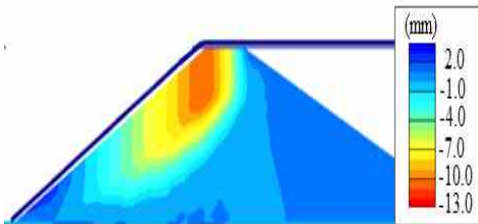
(d) 침두월류단계에서 x축 변위



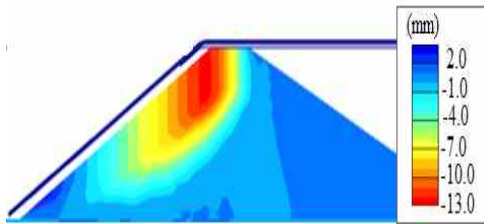
(e) 홍수위 단계에서 z축 변위



(f) 초기월류단계에서 z축 변위

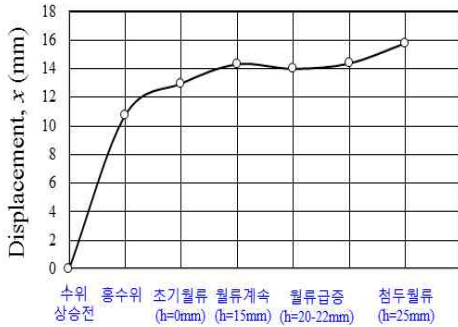


(g) 월류급증단계에서 z축 변위

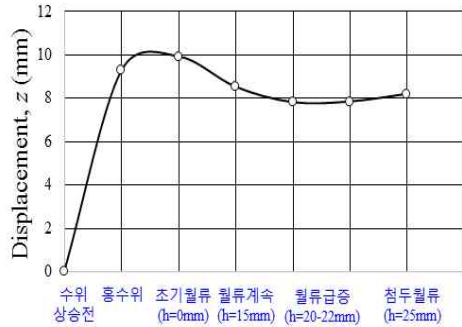


(h) 침두월류단계에서 z축 변위

<그림 4-14> 월류단계별 x, z축에서의 변위분포



(a) x축 최대변위



(b) z축 최대변위

<그림 4-15> 월류단계별 최대변위

#### 다. 월류시 제체의 변형 형상

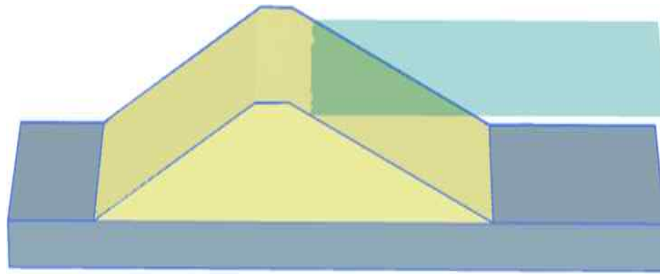
<그림 4-16>은 월류단계별 붕괴형상을 나타낸 것이다.

변형형상은 홍수위단계를 변형이 발생하기 시작하는 초기단계로 설정하였고, 침두월류단계에서 하류사면의 변형이 더 이상 나타나지 않는 상태로 분석하였다.

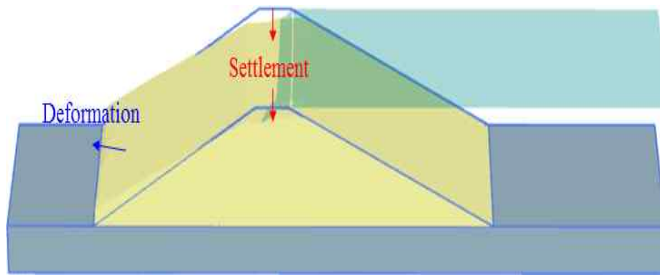
각 수위조건에서의 변형도는 시간에 따른 축척효과(Scale effect)를 이용하여 추정하였기 때문에 제체 붕괴에 대해 정확하게 제시하기 어려우나 월류시 전체적인 붕괴형상을 파악할 수 있다.

월류초기단계에서는 댐마루에서 국부적인 침하가 발생하고 하류사면에서는 수압의 증가로 인해 댐마루에 인접한 사면으로 침하가 발생하는 것으로 나타났다.

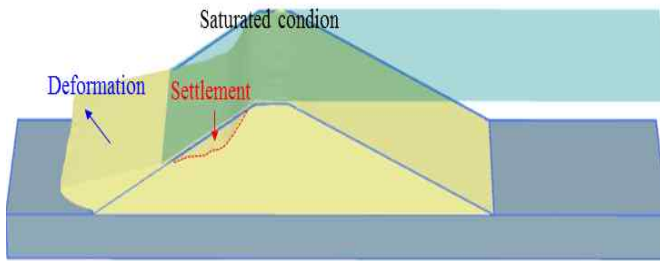
월류급증단계에서는 댐마루 부근에서 침하가 커지면서 중앙부로 확장하기 시작하고 하류사면 비탈끝에서의 변형이 증가하였다. 침두월류단계에서는 댐마루 붕괴가 발생되어 침하량도 커지고 하류사면으로 변형량도 커지는 완전히 붕괴되는 형상을 나타냈다.



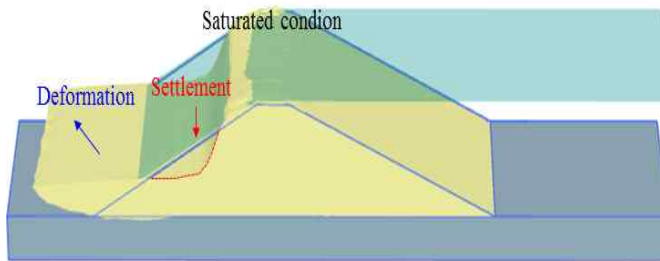
(a) 홍수위



(b) 월류초기단계



(c) 월류급증단계



(d) 첨두월류량 단계

<그림 4-16> 월류단계별 붕괴형상

## 제3절 내부침식(Piping)에 의한 붕괴시

### 1. 모형실험방법

필댐의 붕괴는 월류와 파이핑이 주된 원인으로 분석되고 있고, 월류는 집중호우 등의 기상조건에 의해 발생하는 반면, 파이핑은 시간경과에 따라 제체의 내구성이 저하하는 현상으로 발생하기 때문에 국내의 농업용저수지 제체의 노후화와 관련된 문제는 월류와 파이핑에 관한 문제를 중요하게 고려하여야 한다.

흙 제체는 일반적으로 지역에서 활용가능한 재료로 축조되기 때문에 모래, 실트, 점토 등으로 다양하게 구성되어 있고, 내부침식 과정은 흙의 성분, 다짐, 함수비, 구조물의 형태, 저수위, 동수경사, 흙의 침식가능성 등에 따라 매우 다르게 나타난다.

그 동안 파이핑에 관한 실험적 연구는 침식과정을 실험에서 시각화하고 모니터링하기가 어렵기 때문에 거의 연구가 진행되지 않았고 주로 수치해석에 의한 연구가 진행되어 왔다.

따라서 제체내의 파이핑에 의한 내부침식과정과 파이핑의 확대과정, 파이핑 존에의 면적, 깊이, 침식된 재료의 체적 등을 파악하여 붕괴시간과 붕괴가능성과 붕괴시간을 추정하기 위한 실내모형실험이 필요하다.

내부침식은 제체내로 토립자가 이동과 운반에 의해 발생되고, 내부침식의 메커니즘은 침식과정이 복잡하고 탐지의 어려움 때문에 실험하기가 매우 어렵다. 내부침식에 따라 수리학적 및 역학적인 특성이 바뀌게 되고 재료의 투수성은 상당히 변하게 되고 이에 따라 제체내의 공극수압의 증가는 하류사면 안정에 매우 큰 영향을 미치게 된다.

Yusuf et al.(2015)은 실험실 수로에 설치한 흙 제체에서 파이핑 침식과정을 규명하기 위하여 서로 다른 다짐율로 모래, 실트, 점토를 혼합하여 제체를 축조하고, 영상처리기술을 이용하여 침식깊이, 침식폭, 면적 등을 추정하는 관계식을 제안하였다.

모형실험은 복통에서 제체내부로 후방진행형 파이핑이 발생되도록 다공관 파이프를 이용하여 파이핑 현상을 모사하였다. 내부침식이 발생할 위치와 심도에 공극수압계, 토압계를 매설하고 침투특성 분석하였다.

파이핑 현상의 메커니즘 분석을 위해 내부침식과정을 초기, 진행, 붕괴급진전, 댐마루 붕괴, 월류단계, 최종단계로 구분하여 붕괴형태를 분석하

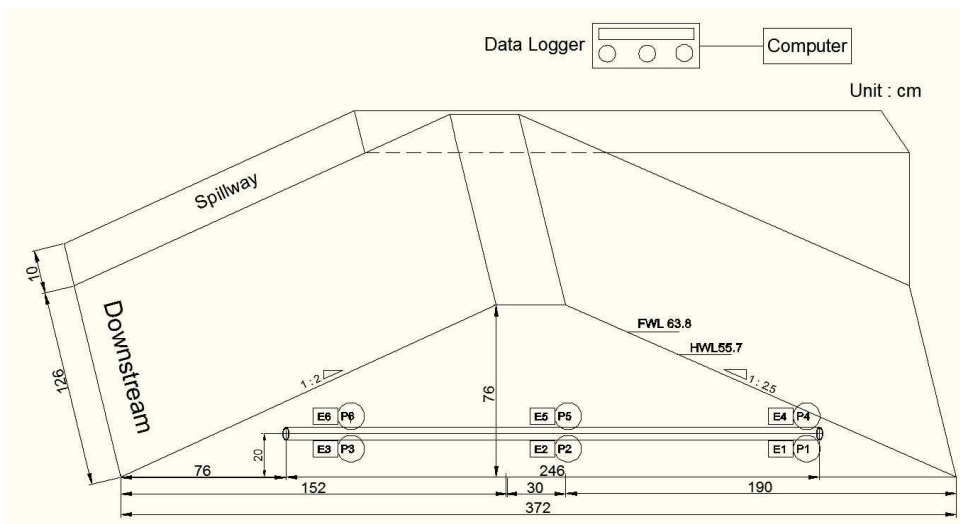
였고, 시간이 경과함에 따라 제체의 하류사면에서 댐마루가 완전붕괴될 때 까지 위치별 세굴깊이와 세굴폭을 측정하였다.

침투해석은 실내모형실험과 동일한 조건에서 3-D 침투해석 프로그램에 의해 침투거동을 비교분석하였다.

## 2. 계측기 매설

제체를 구성하는 성토재 내부에 작용하는 공극수압과 토압을 측정하기 위해 <그림 4-17>과 같이 공극수압계 (P) 6개와 토압계(E) 6개를 복통 하부와 상부에 매설하였다. 공극수압계의 매설위치는 상류사면 복통하부 P1, 중앙 하부 P2, 하류사면 하부 P3, 상류사면 복통상부 P4, 중앙 상부 P2, 하류사면 상부 P3, 토압계도 공극수압계와 같은 위치에 매설하였다.

복통의 매설깊이는 사면의 높이와 경사를 고려하여 제체 하부로부터 20 cm 지점에 매설하였고, 복통은 길이 246cm 이고, 원형(φ50mm) 파이프에 구멍을 뚫은 후 복통 주위에 모래를 부설하였다.



(a) 계측기 매설 위치



(b) 복통 파이프(내경: 50mm, 길이: 246 cm)

<그림 4-17> 계측기 매설 위치와 복통 파이프 단면

댐마루 중앙에 침하계 (S)를 설치 (LVDT)하여 침하량을 측정하였고, 계측기는 모형 토조내 적용할 수 있는 초소형 크기의 공극수압계 (정격용량: 50kPa)와 토압계(정격용량: 200kPa)를 사용하였다. 각각의 측정값은 Data Logger와 Computer에 의해 자동적으로 저장하도록 하였고, 모든 과정을 비디오 카메라로 촬영하여 붕괴형태를 분석하였다.

저수지는 균일형 형식으로 제체 모형 축조에 사용된 시료는 균질한 상태로 포설하기 위하여 12 mm 체를 통과한 시료만 사용하였다. 다짐은 최적 함수비(14%)로 조절하였고(13.68%) 다짐 시 밀도를 균일하게 하기 위하여 먼저 1층을 약 5cm 가량 포설한 후 나무다짐봉으로 다짐을 한 후 밀도는 15.55 kPa(다짐도 : 90%)로 나타났다.

### 3. Piping 에 따른 공극수압과 토압의 변화

<그림 4-18> (a)은 만수위 (55.7cm) 상태까지 담수하여 일정하게 유지시킨 후에 파이핑이 진행되는 동안 공극수압 변화를 나타낸 것이다.

복통 하부의 상류(P1), 중앙(P2), 하류(P3)에서 공극수압은 만수위로 수위가 상승하면서 급격하게 증가하였고, 하류사면에서 파이핑이 진행되면서 약간씩 증가하다가 붕괴후에 감소하였다.

복통 상부의 상류(P4), 중앙(P5), 하류(P6)에서 공극수압도 만수위로 수위가 상승하면서 급격하게 증가하였고, 붕괴 후에는 큰 변동폭을 나타냈다.

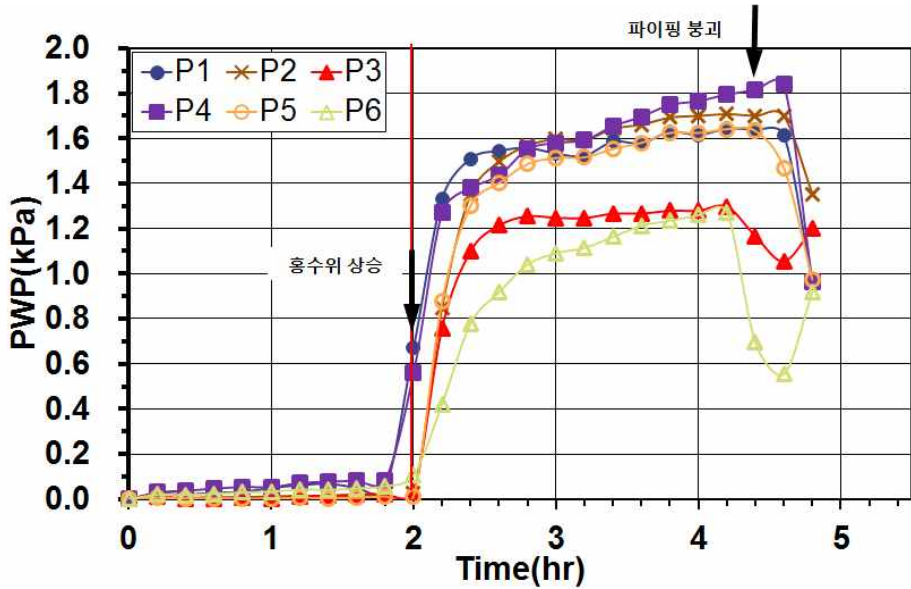
전체적으로 만수위로 수위가 상승함에 따라 공극수압은 크게 증가한 후 약간씩 증가하다가 하류사면에 파이핑이 발생된 후 약 13분정도의 매우 짧은 시간에 댐마루가 완전붕괴 되었고 붕괴시에는 변화폭이 크게 나타났다.

<그림 4-18> (b)는 공극수압과 동일한 위치에서 파이핑이 진행되는 동안의 토압 변화를 나타낸 것이다.

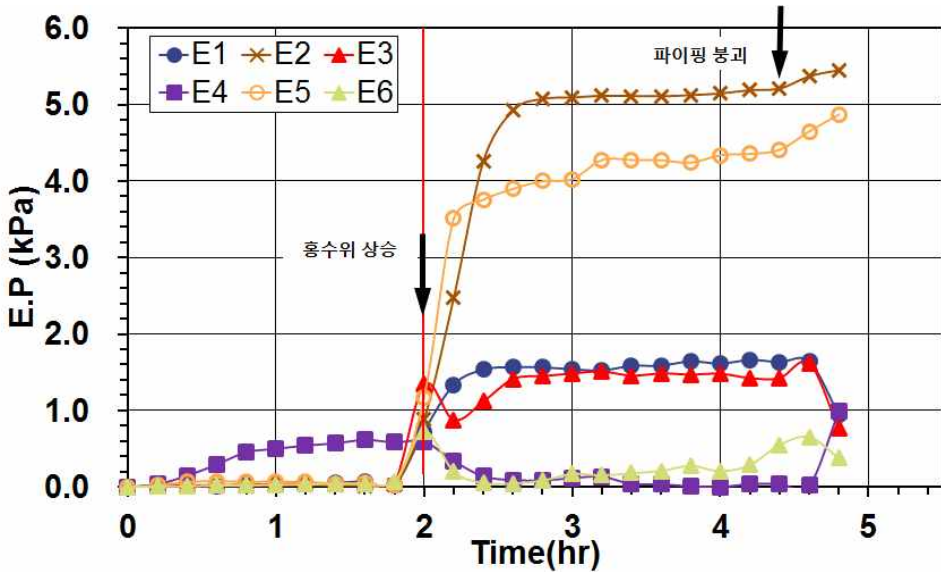
복통 하부의 상류(E1), 하류(E3)에서 토압은 만수위로 상승하면서 약간 증가한 후 일정하게 유지하다가 붕괴가 발생되면서 감소하였다. 중앙(E2)에서는 가장 큰 성토하중이 작용하고 수압의 영향으로 매우 크게 증가하였고 파이핑이 진행되는 동안에는 큰 변화를 나타내지 않았다.

복통 상부의 상류(E4), 하류(E6)에서 토압은 만수위로 상승하면서 약간 증가하다가 파이핑이 발생되면서 변동폭이 크게 나타났다. 중앙(E5)에서는 하부위치와 동일하게 성토하중과 수압의 영향으로 매우 크게 증가하였고 파이핑이 진행되는 동안에는 약간씩 증가하였다.

전체적으로 만수위로 상승함에 따라 복통 중앙부는 성토하중과 침투압의 영향으로 하부와 상부 모두에서 크게 증가하였고 하류사면에 파이핑이 진행되면서도 약간 증가하였다. 나머지 위치에서는 약간의 증가를 나타냈고 붕괴상태에서는 변화폭이 크게 나타났다.



(a) 공극수압 변화



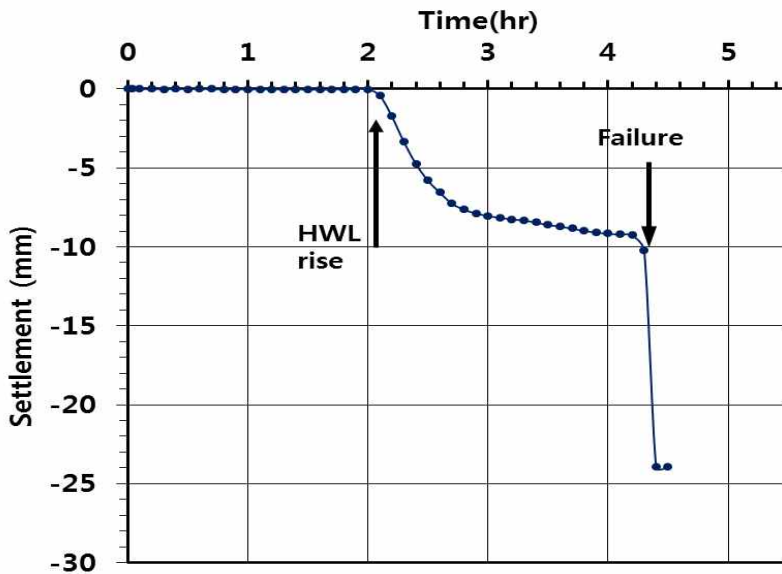
(b) 토압 변화

<그림 4-18> 내부침식(Piping)시 공극수압과 토압의 변화

#### 4. 침하량 변화

<그림 4-19>은 측정 시작 2시간 후부터 만수위로 담수하여 일정하게 유지시킨 후에 파이핑이 진행되는 2:50분 동안 침하량 변화를 나타낸 것이다.

만수위 담수가 시작되면서 급격하게 침하한 후 일정하게 유지하다가 하류사면에서 파이핑이 시작되고 짧은 시간에 댐마루가 붕괴되면서 약 24mm로 매우 큰 침하량을 나타냈다.



<그림 4-19> 내부침식시 침하량 변화

#### 5. Piping 에 의한 제체의 붕괴거동

농업용저수지의 붕괴원인은 매우 복잡하고 다양하나 통계적으로 월류 및 파이핑이 전체붕괴원인 중 95%이상을 차지하고 있고, 제체형식에 의한 붕괴위험성은 균일형 흙댐이 콘크리트 코어 록필댐, CFRD, 중심코어형 록필댐 보다 높게 나타난다.

농업용저수지에서 월류는 이상강우에 의해 발생되고, 제체를 관통하는 파이핑은 곧바로 제체붕괴로 이어질 가능성이 매우 높고 처음 담수시에 약 48%가 발생한다는 통계가 있어 이에 대한 실험적인 평가가 필요하다. 또한 내부침식으로 인한 붕괴는 대부분 복통과 여수토를 포함한 구조물과



제체 재료와의 경계면 접촉부에서 발생하기 때문에 이에 대한 실험적 검증이 필요하다.

붕괴원인 중 약 50% 이상을 차지하는 파이핑은 설계, 시공, 유지관리시 반드시 평가해야 하는 항목이기 때문에 일반적으로 수치해석을 이용하여 침투류 해석, 응력-변형 해석, 사면의 안정해석 등을 수행하여 안정성을 평가하고 있다. 그러나 수치해석과는 다른 원인에 의하여 파이핑이 발생하므로 이에 대한 위험성을 객관적으로 평가하기 위해서는 대형모형실험을 통하여 원인을 규명해야 한다.

모형실험은 파이핑에 의한 제체의 붕괴거동을 파악하기 위하여 농업용 저수지에 사용되고 있는 복통에 누수가 발생되었을 경우를 모사하여 실험하였다.

복통은 다공관 파이프를 이용하였고, 상류사면에서 하류사면으로 복통을 통하여 침투수가 이동되면서 점차적으로 하류사면을 포화시키고, 복통주위의 작은 토립자가 침식되고 붕괴형태가 커지는 후방진행형 파이핑 현상을 모사하였다.

상류사면은 만수위 상태로 수위를 일정하게 유지하였고 시간이 경과함에 따라 제체의 하류사면에서 댐마루가 완전붕괴될 때까지 발생위치별 붕괴폭과 깊이를 측정하였다.

파이핑 현상의 메커니즘 분석을 위해 내부침식과정을 진행단계별로 초기, 진행, 붕괴 급진전, 댐마루 붕괴, 월류단계, 최종단계로 구분하여 붕괴형태를 분석하였다.

<그림 4-20>은 만수위로 담수( $t=0$ )한 후 (a) 초기단계 ( $t=2:35$ ), (b) 진행단계 ( $t=2:37$ ), (c) 붕괴 급진전단계( $t=2:39$ ), (d) 댐마루 붕괴단계 ( $t=2:45$ ), (e) 월류단계 ( $t=2:48$ ), (f) 최종 단계 ( $t=3:00$ )에서의 붕괴 형태를 나타낸 것이다.

초기단계(a)에서는 복통을 통한 침투수로 인하여 하류사면이 포화되면서 파이핑이 진행되었고 붕괴폭은 40cm, 깊이는 2cm 정도로 나타났다.

진행 단계(b)에서는 파이핑에 의한 붕괴가 급속하게 진행되면서 하류사면 하부뿐만 아니라 댐마루쪽으로도 붕괴범위가 확대되었고, 붕괴폭은 67cm, 깊이는 7cm 정도로 나타났다.

붕괴 급진전단계(c)에서는 댐마루 상부까지 붕괴영역이 확대되면서 침식이 가속화 되었고 붕괴폭은 66cm, 깊이는 10cm 정도로 나타났다.

댐마루 붕괴 단계(d)에서는 급속한 내부침식으로 인하여 토립자가 하류사면 하부쪽으로 이동되면서 댐마루 전체가 붕괴되었고, 붕괴폭은 92cm, 깊이는 30cm 정도로 나타났다.

월류단계(e)에서는 댐마루가 붕괴 되면서 상류사면에서 월류가 시작되었고 급속한 월류량의 증가로 저수지 전체가 완전히 붕괴되었고 붕괴폭은 97cm, 깊이는 35cm 정도로 나타났다.

농업용 저수지 노후화에 따른 제체, 여수토 방수로 및 기타 시설물의 불안정성은 계속해서 증가하고 있고, 특히 모든 저수지에 시공되어 있는 복통 누수 문제는 안정성에 심각한 영향을 주고 있다.

전체적인 붕괴형태는 제체와 복통 접속부에서 공극수의 침투로 포화영역이 존재하고 미세한 토립자가 하류사면으로 이동하면서 가장 취약한 부분에서 파이핑이 시작되었다.

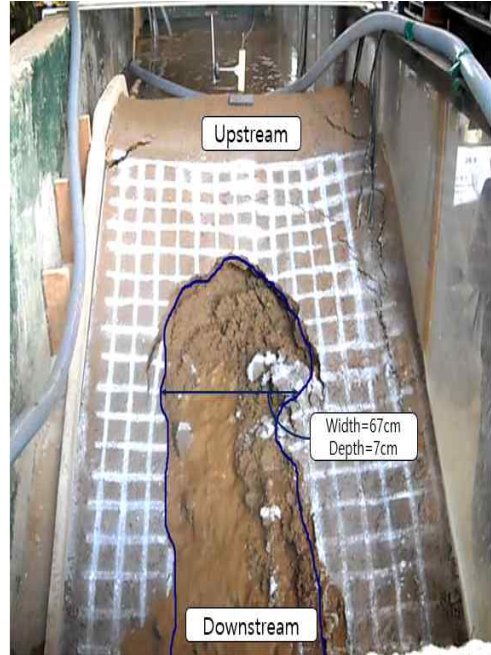
점차적으로 내부침식이 가속화되면서 댐마루 쪽으로 붕괴영역이 급속하게 확대되었고 상류사면의 월류로 저수지 전체가 붕괴되는데 약 13분정도로 빠르게 진행되는 형태를 나타냈다.

앞으로 파이핑 붕괴모형실험을 바탕으로 노후화된 저수지의 복통을 어떠한 방법으로 보수보강할 것인가에 대하여 실내모형실험을 수행하고 현장 적용성을 평가해야 할 것으로 판단된다.

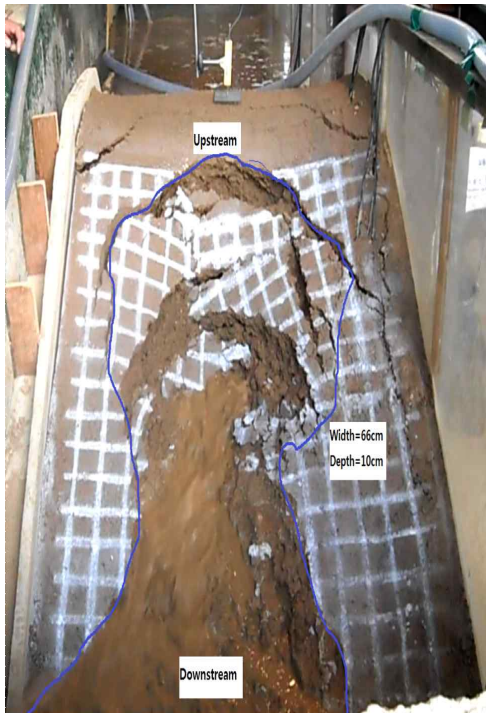
또한 국내에서 농업용저수지의 파이핑에 대한 이론적 연구는 있었지만 실제적으로 실험을 통한 연구는 거의 없기 때문에 본 연구결과는 파이핑 메커니즘에 대한 현상을 규명하고 파이핑의 붕괴가능성을 미리 예측하여 재해예방 방안 제시하고 대책공법을 마련하는데 활용될 수 있을 것으로 판단된다.



(a) 초기단계 (t=2:35)



(b) 진행단계 (t=2:37)



(c) 붕괴 급진전단계(t=2:39)



(d) 댐마루 붕괴단계(t=2:45)



(e) 월류단계 (t=2:48)

(f) 최종 단계 (t=3:00)

<그림 4-20> Piping에 의한 제체의 붕괴거동

## 6. 수치해석에 의한 제체의 침투특성

### 가. 공극수압 및 침윤선의 분포

해석에 사용한 매쉬는 수치해석 프로그램에서 표현할 수 있는 가장 작은 격자(0.4m)로 형성하였고, 복통 배출구와 경계부에서 누수로 인한 제체의 파이프링 현상을 모사하기 위하여 제체 중앙부에 복통을 설치(높이 20cm, 하류사면 선단으로부터 76cm) 하였다.

복통의 외관은 불투수 조건으로 설정하였고, 복통내관은 침투수가 원활하게 배수되도록 하였으며 해석조건은 실험모형과 동일하게 만수위 (H: 55.7cm) 조건에서 공극수압, 침윤선, 변위 및 변형형상을 검토하였다

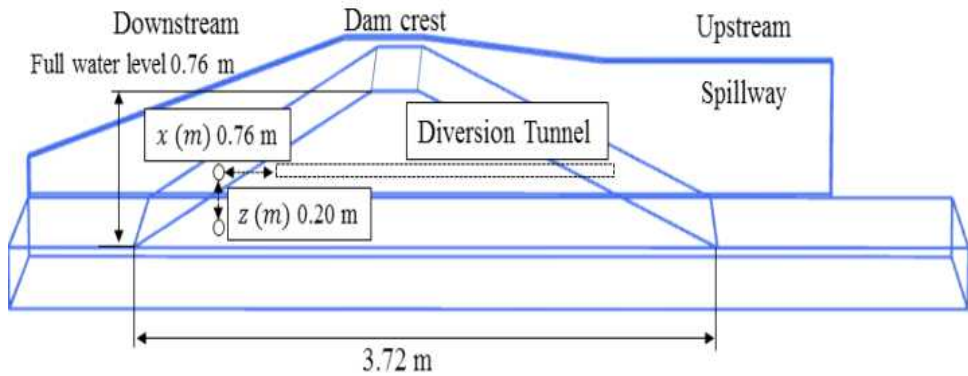
<그림 4-21>은 만수위 상태에서 공극수압과 침윤선 분포를 나타낸 것으로 공극수압은 상류사면에서는 크고 하류사면으로 갈수록 점차적으로 작게 나타났다.



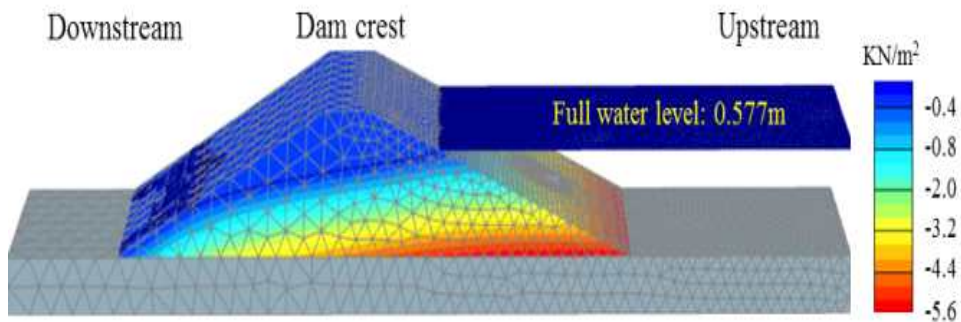
침윤선은 하류사면 복통 배출구 부분에 위치하는데 이는 복통 외관이 불투수층으로 설정되어 있고 복통내는 투수계수가 크기 때문에 배출구 지점에 침윤선이 위치하는 것으로 나타났다.

침윤선의 위치 결정은 저수지 안정성 검토에 반드시 고려해야 하고, 침윤선의 상승은 제체내의 침투수량을 증가시켜 동수경사를 커지게 하고, 공극수압을 상승시켜 유효응력이 감소되므로 파이핑 위험가능성을 더 커지게 한다.

이러한 지점은 침투수의 흐름이 집중되는 취약부로서 복통누수로 인해 파이핑이 시작되는 위치이므로 3차원 해석과 같은 수치해석을 통하여 침출점 위치를 파악하고 보수보강공법에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.



(a) 복통의 해석조건



(b) 공극수압과 침윤선의 분포

<그림 4-21> 만수위상태에서의 공극수압과 침윤선 분포

## 나. 동수경사의 분포

노후화된 저수지의 복통은 대부분 너무 오랜 시간이 경과되어 누수현상이 발생되고 있고, 완전한 보수보강을 위해서는 수위를 저하시킨 후에 상류 및 하류사면을 절취하고 시공하여야 한다.

그러나 영농시기별 담수용량 제한문제, 복통 보수 후 신설성토와 기존 성토와의 비균질성으로 인한 안정성 문제, 예산문제 등 여러 가지 어려움 때문에 촬영장비에 의해 복통내의 누수현상을 파악한 후 부분적으로 보수 보강하고 있는 실정이다.

이러한 누수현상이 복통 주변부와 하류사면에 어떠한 영향을 미치는가를 3차원 수치해석에 의해 파악할 수 있다면 보수보강뿐만 아니라 파이핑에 대한 안정성을 평가하는데 효율적이라고 판단된다.

파이핑에 대한 안정성을 평가하는 방법 중에 하나는 한계동수경사에 의한 방법으로 공극비와 비중에 따라 다르게 나타나지만 일반적으로 0.8-1.4범위로 분포하고 있고, 모형실험에서는  $I_{cr}=0.99$  로 나타났다.

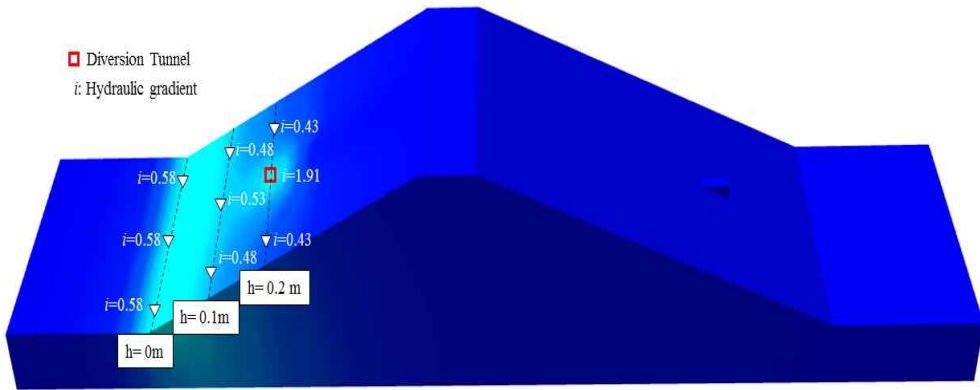
<그림 4-22>는 3차원 침투해석에 의해 하류사면의 비탈끝으로부터 ( $h=0m$ ) 복통이 매설된 지점(기초지반으로부터 0.2m 높이)까지의 동수경사를 위치별로 나타낸 것이다.

성토존의 재료특성에 따라 파이핑의 발생조건이 달라질 수 있으나, 기준안전율( $F_s$ )을 2.0이상으로 평가해보면 그 범위는 하류사면의 출구동수경사가 약 0.5이내의 범위에서만 안전성을 확보할 수 있다.

따라서 복통 배출구는 동수경사 최대값은 1.91이고 안전율은( $F_s$ ) 0.52로 나타나 파이핑에 매우 불안정한 상태를 나타냈고, 복통과 동일선상 ( $h=0.2m$ )에 있는 좌우의 동수경사는 0.43으로 파이핑이 발생할 가능성이 높게 나타났다.

복통의 매설지점으로부터 하류 비탈끝으로 갈수록 동수경사는 증가하고, 0.1m의 높이에서 하류사면 중앙값은 0.53이고, 사면 비탈끝에서는 0.58으로 복통의 누수가 집중되고 있어 파이핑이 발생 가능성이 높게 나타났다.

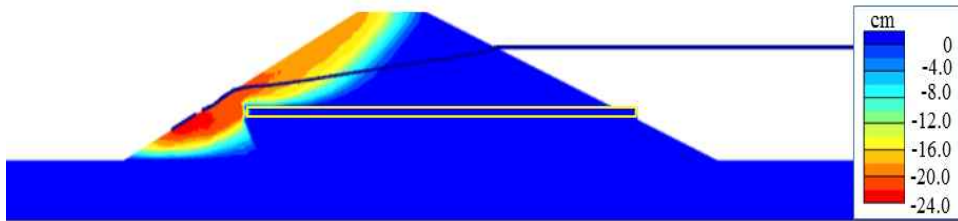
전체적으로 동수경사는 복통의 출구에서 가장 크게 나타났고, 하류사면의 중앙부에서는 크고 좌우측에서는 작게 나타났다. 복통 출구 및 주변부는 제체내 취약부가 되며 파이핑 발생 가능성이 높은 지점이고, 복통 출구에서는 침투수의 도달이 빠르고 내부침식이 시작되는 지점이기 때문에 이에 대한 보강방법을 강구하여야 한다.



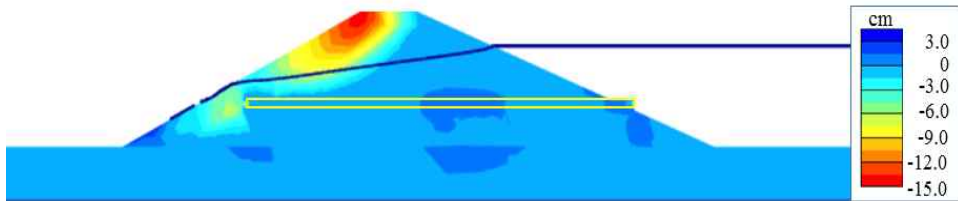
<그림 4-22> 하류사면에서의 동수경사 분포

다. 시간에 따른 변형형상

<그림 4-23>은 3시간 경과 후 복통이 매설된 단면과 복통으로부터 임의의 거리에 떨어져 있는 단면에서 변위분포를 나타낸 것이다.



(a) x축 변위분포(t=3hr)



(b) z축 변위분포(t=3hr)

<그림 4-23> 복통단면에서의 변위분포

x축 변위(수평변위)는 하류사면의 비탈끝으로 갈수록 증가하고, 복통이 매설된 지점의 변위는 동일 높이 ( $h=0.2$  m)에서 발생된 변위보다 크게 나타났다. 이는 복통 배출구 지점에 큰 수압이 작용하기 때문이며 복통의 실제위치가 하류사면으로부터 0.76m 떨어져 있음에도 불구하고 복통매설 지점의 변위는 제체의 사면안정에 미치는 영향이 큰 것으로 판단된다.

z축 변위(수직변위)에서는 댐마루 부근에서 가장 크게 나타났고, 3시간 경과 후 복통매설지점과 그 주변부에서는 약 3-9cm의 큰 변위가 발생되었고 복통 출구 지점에서는 복통의 상부와 주변부에서 침하가 약간 감소하였다. 이는 복통시설물의 강성으로 인해 복통 상부면에 작용하는 하중에 대하여 일부 저항효과가 발생되었기 때문인 것으로 판단된다.

<그림 4-24>는 만수위로 담수한 후 모형실험과 같은 조건에서( $t=3.0$ 시간) 시간별로 변형 형상을 3차원 해석으로 나타낸 것이다.

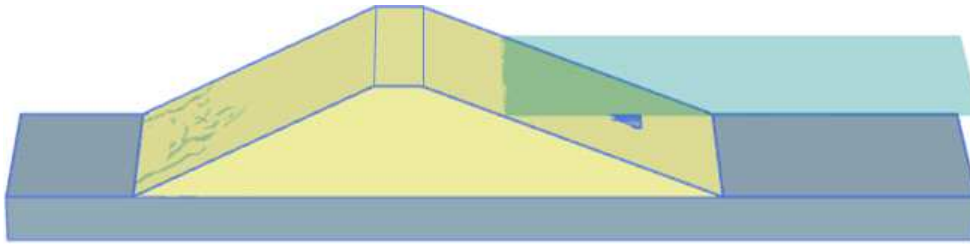
담수 후 1시간 경과상태에서는 댐마루에서 작은 침하가 나타났고 사면 활동으로 인하여 하류사면에서 변형이 발생되었으며 복통 매설지점에서는 융기되는 현상이 나타났다.

담수 후 2시간 경과상태에서는 제체 붕괴가 가속화되면서 복통매설지점에서 복통이 노출될 정도의 큰 변형이 발생되었고, 댐마루가 침하되면서 하류사면으로 제체가 이동되는 붕괴형상을 나타냈다.

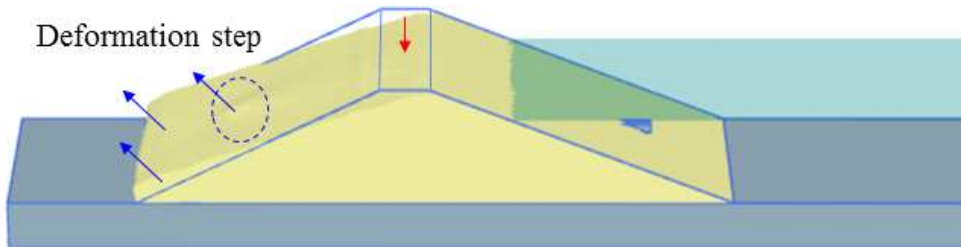
담수 후 3시간 경과상태에서는 댐마루 침하가 커지면서 하류사면으로의 침식량이 더 많아졌고 점차적으로 댐마루 부근으로 변형이 확장되었으며, 상류측에서 월류가 발생하여 하류사면이 완전붕괴 상태로 더 이상 변형이 발생되지 않았다.

3차원 수치해석은 파이핑에 대한 안정성 평가뿐만 아니라 복통이 설치된 저수지가 누수되었을 경우의 붕괴형상을 파악할 수 있기 때문에 향후 노후화된 저수지 리모델링시에 침투거동을 비교분석하는데 효과적으로 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

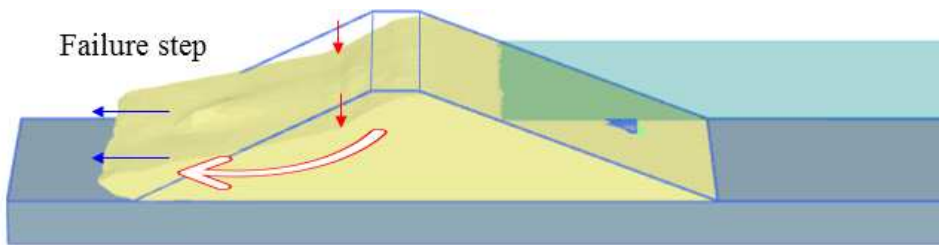




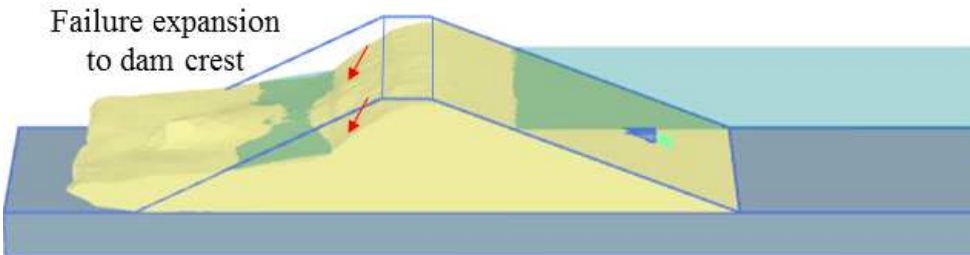
(a)  $t=0$  hr



(b)  $t=1.0$  hr



(c)  $t=2.0$  hr



(d)  $t=3.0$  hr

<그림 4-24> 시간에 따른 제체의 변형형상



## 제5장

---

# 저수지 제체 붕괴방지 기술 현황

제1절 제체의 손상 판단 및 보수보강 공  
법

제2절 월류에 의한 붕괴방지 기술

제3절 내부침식에 의한 붕괴방지 기술



## 제5장 저수지 제체 붕괴방지 기술 현황

일반적으로 농업용 저수지 등 토목구조물은 구조물의 설계기준에 따라 적절히 설계되고, 시방서에 따라 완전하게 시공된 경우, 지속적인 유지관리를 통하여 사용상 발생하는 결함을 보수·보강할 경우 설계에서 고려되지 않은 지진, 홍수 등 극단적인 자연재해 또는 인위적인 재해가 발생하지 않는 이상 붕괴까지 이르는 경우는 흔하지 않다.

대부분 댐 시설물이 붕괴까지 이르게 되는 경우는 극단적인 자연재해 또는 설계 및 시공상의 결함, 유지관리상의 문제점을 간과하여 댐의 결함이 오랫동안 누적되는 경우 발생하게 된다.

앞서 살펴본 바와 같이 국내외에서 발생한 댐 붕괴사례를 살펴보면 사고의 주 원인은 월류(Overtopping)와 내부침식 중 관공작용(Piping)인 것으로 나타났다.

이번 장에서는 우선 댐 붕괴를 유발할 수 있는 균열, 침식, 유실 등 결함에 대한 일반적인 제체의 보수·보강기술에 대하여 살펴보고, 제체의 붕괴를 유발하는 주 원인인 월류와 내부침식에 대하여 붕괴를 방지할 수 있는 기술에 대하여 알아보고자 한다.

### 제1절 제체의 손상 판단 및 보수·보강 공법

저수지 제체의 손상요인인 균열, 침하, 침식, 유실, 누수, 배수불량 등은 방치할 경우 점점 확대되어 최종적으로 댐 붕괴의 원인이 되므로 지속적인 유지관리를 통하여 결함 및 손상요인을 제거해야 한다.

일반적인 댐의 보수·보강은 댐을 유지관리 하는데 있어 발생될 수 있는 댐의 손상 부위를 개선함과 동시에 댐의 기능을 회복시키는데 목적이 있다. 댐의 보수·보강이 필요한 경우는 제체의 노후화 또는 이상이 발생되어 구조물의 건설당시 본래의 목적을 달성할 수 없거나, 댐의 안전성을 확보하지 못하는 경우이다.

보수란 낡은 구조물이나 시설을 수리하여 원래의 기능을 회복시키는 유지관리 대책을 말하며, 보강이란 구조물이나 부재의 강성 등 역학적인 성능을 회복 또는 향상시키는 것을 목적으로 한 것을 말한다..

따라서, 댐 구조물에 대한 보수·보강은 손상 구조물의 영향정도, 구조물의 중요도, 사용환경 조건 및 경제성 등에 의해서 보수·보강방법 및 수준을 정해야 한다.

## 1. 저수지 제체의 보수·보강 공법

댐 건설 후 지속적인 유지관리를 통하여 제체의 결함을 미리 발견하고, 조치를 취할 경우 극단적인 자연현상이 발생하지 않는 한, 제체가 붕괴에 가지 이르는 경우는 흔하지 않다. 제체는 건설 후 노후화에 따라 크고 작게 제체의 균열, 침하, 침식, 유실, 누수 등이 발생하며 일반적으로 저수지 제체 결함발생 부위별 보수·보강공법은 (표 5-1)과 같다.

(표 5-1) 필댐 시설물의 손상 부위별 보수·보강방안

시설물	결함	보수·보강 방안	비고
댐마루	균열	그라우팅, 치환	
	변형	그라우팅, 치환, 압성토	
	침하	그라우팅, 치환	
	침식	침식방지	
	동식물	그라우팅, 치환, 식생제거	
상·하류 사면	균열	그라우팅, 치환, 수위저하	
	침하	그라우팅, 치환, 덧쌓기	
	침식	수위저하, 치환, 아스팔트지수	
	활동	그라우팅, 치환, 수위저하, 압성토, 말뚝공법	
	사석	콘크리트보수, 사석채움	
	동식물	그라우팅, 치환, 식생제거	
누수		그라우팅, 아스팔트지수, 시트파일, 점토지수, 트렌치, 배수로, 감압정, 블랭킷, 단면확대, 압성토	

### 가. 그라우팅 공법

그라우팅 공법은 물, 시멘트, 벤토나이트 등의 재료를 혼합하여 토립자의 간극, 토층의 경계, 암반 및 콘크리트 구조물의 균열 등에 주입하는 공법으로 필댐의 균열, 변형, 침하, 활동, 누수, 양압력의 경감 등 보강 및 지수를 목적으로 사용하는 많이 사용되는 공법이다.

국내에서는 물유리약액(CMG)공법, 고분자약액(ARC)공법, 고압분사(JSP)공법, 콤팩션주입(CGS)공법 등이 있으며, 단독 또는 2~3가지 공법을 병행하여 사용하기도 한다.

#### 나. 치환공법

치환공법은 제체의 손상이 발생된 부분을 제거하고 안전도가 높은 양호한 토질재료로 치환하는 것으로 그라우팅공법과 마찬가지로 필댐의 보수·보강공법으로 널리 사용된다. 필댐의 균열, 변형, 침하, 동식물흔적, 활동 등 손상에 사용하는 공법으로 손상된 부위를 치환하는 방법에 따라 굴착치환공법, 활동치환공법, 폭파치환공법이 있다.

##### 1) 굴착치환공법

제체의 손상부위나 연약층을 굴착기계 또는 준설기계를 이용하여 제거하고 난 다음 양질토로 치환하는 공법

##### 2) 활동치환 공법

직접 양질토를 연약지반상에 살포하여 그 하중으로 기초지반의 파괴를 일으켜 연약토를 주위에 배제하여 양질토를 우겨넣어 치환하는 공법으로 강제치환공법이라고도 한다.

##### 3) 폭파치환공법

폭발에 의해 연약층을 제거하여 양질토로 치환하는 공법으로 폭파에너지의 대부분을 굴착에 이용하는 방법과 폭파에너지를 성토에 의한 하중과 조합시켜 성토하부의 연약토층을 주위로 이동하는 방법 등이 있다.

#### 다. 압성토 공법

연약지반 위에 성토를 하거나, 댐체가 포화되어 유효응력이 작아지게 되면 전단저항력이 작아져 활동의 가능성이 커지는데 이와 같이 사면이나, 기초지반의 활동으로 인한 손상을 막기 위하여 댐 사면 전면부분에 소단 모양으로 성토하여 사면의 활동에 대한 저항성을 높이는 공법이다.

#### 라. 말뚝 공법

사면의 활동면에 대한 활동력이 지반이나 체체 사면의 대한 저항력보다 크면 사면이 파괴되어 체체와 지반활동이 발생되므로 이를 방지하기 위하여 흙의 강도를 증가시키지 않고 별도의 말뚝으로 흙의 저항력을 강화시키고 사면의 활동력을 분담시켜 사면을 안정시키는 공법이다.

#### 마. 시트파일 공법

양단이 구멍형 또는 요철로 되어 있어 서로 끼워 맞출 수 있는 폭이 넓은 얇은 강판을 특수한 타입틀로 지지하면서 필요한 심도까지 진동 해머와 워터 제트를 이용하여 타입하는 공법이다. 시트파일을 수직을 땅속에 타입하고, 이어서 요철부분을 이어 다시 땅속에 타입하는 과정을 되풀이하여 누수를 방지하는 지수벽을 만드는 공법이다.

#### 바. 점토차수 공법

사면 기울기를 그대로 하고 소단형태로 점토를 피복하는 공법으로 차수재료의 선정을 위해 입도분포, 다짐시험, 액성한계시험, 점토광물 시험 등이 필요하다. 댐 축조재료와 같은 흙을 사용하므로 재료의 유리현상 및 역학적 불일치로 인한 문제점이 발생하지 않고 점토의 특성상 시간경과에 따라서 차수성이 높아지는 장점을 보유하는 공법이다.

#### 사. 아스팔트 차수 공법

아스팔트의 특성을 이용하는 것으로 기초지반의 압밀변형에 대응할 수 있고 휨특성 및 불투수성이 우수하여 댐 등과 같은 수공구조물에 많이 사용되는 공법으로 주로 사력댐의 상류사면, 댐마루, 수로 등의 표면처리에 적용하는 공법이다.

#### 아. 에폭시 주입 공법

콘크리트 댐, 여수로 등 기타 콘크리트 구조물의 균열, 누수를 방지하는 공법으로 특히 미세한 균열이나 산발적인 큰 균열을 보수할 때 주로 사용하는 공법이다.

## 2. 제체의 손상 판단방법 및 보수·보강공법

일반적으로 발생하는 제체에서의 균열, 침하, 침식, 유실, 누수에 대한 판단방법, 발생원인 및 보수·보강방안을 살펴보면 다음과 같다.

#### 가. 균열

제체의 균열은 안전점검, 안전진단시 직접 유관으로 균열부위를 관찰하거나 간접적으로 제체에 설치되어 있는 시설인 도로, 난간의 균열, 포장



면, 제체에 설치된 풋말의 기울어짐 등으로 보고 균열을 판단할 수 있다.

균열의 보수방법은 일반적으로 균열이 발생되지 않은 부분까지 수위를 저하시켜 보링이나 시험굴을 통하여 균열의 깊이를 결정하고 불투수성재료로 되메움을 하거나 벤토나이트 그라우팅을 통하여 보수할 수 있다.

#### **나. 침하**

제체의 침하는 제정이나 사면의 함몰, 꺼짐현상을 유관으로 확인하거나 침하계 또는 변위계를 통하여 확인할 수 있으며, 침하가 발생되면 댐 전체적으로 여유고가 부족해져 월류 위험이 증가되므로 심각한 결함으로 판단할 수 있다. 침하의 경우 기초지반에 문제가 없는지 판단하고, 댐마루의 성토로 보강할 수 있다.

#### **다. 침식**

사면침식은 사석의 유실, 사면하류로 사면의 구성 재료가 흘러내려 모이는 것을 보면 알 수 있으며, 비교적 경미한 결함으로 다짐재료로 치환하거나 침식방지를 위한 사석설치 등으로 보수 할 수 있다.

#### **라. 유실**

제체의 유실은 침하량과 누수량의 증가, 함몰 등 유관으로 확인 가능하며 유실이 커지게 되면 붕괴로 이어질 수 있어 심각한 결함으로 분류할 수 있다. 보수방안은 유실부분의 되메움을 통하여 보수할 수 있다.

#### **마. 누수**

제체의 누수는 배수구로부터 특별한 이유없이 유량이 증가하는 경우, 탁류, 유출수의 탁도 변화 등을 통해 알 수 있으며, 이는 제체 내부의 침식이 점차 확대 진행되고 누수량 증가로 제체 붕괴 가능성이 크기 때문에 심각한 결함으로 분류된다.

대책으로는 댐체에 차수벽 설치, 커튼 그라우팅, 불투수 점토 또는 합성 멤브레인으로 상류층에 블랭킹을 설치하여 보수하는 방법이 있다.

## 제2절 월류에 의한 붕괴방지 기술

월류에 의한 저수지 제체의 붕괴를 방지하는 기술은 크게 붕괴에 임박한 상황에서 긴급하게 대응하는 기술과 댐체를 보강하여 월류시에도 제체가 침식되어 붕괴되지 않도록 하거나 붕괴를 지연시키는 기술로 구분할 수 있다.

### 1. 월류 붕괴방지 긴급대응 기술

#### 가. 차수매트를 이용한 제체보호공법(강원대학교, 2009, 김용성)

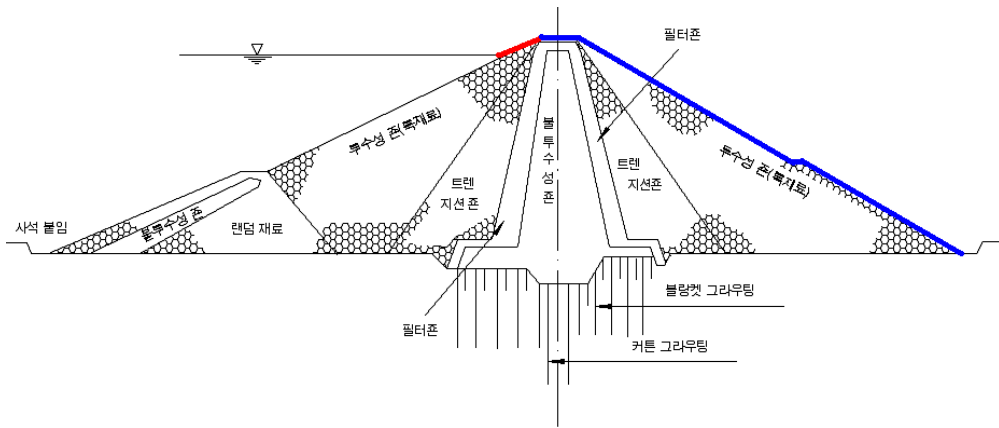
월류 붕괴방지를 위한 차수매트를 이용한 제체보호공법은 대부분의 농업용저수지인 필댐 형식의 저수지에서 집중호우 등에 의한 설계홍수량 이상의 홍수발생시 수위가 급격히 상승하고, 제체표면을 통하여 월류 발생시 제체 표면의 침식을 방지하여 제체의 유실과 붕괴를 방지할 수 있도록 소방방재청에서 주관하고 강원대학교 산학협력단(김용성, 2009)에서 연구·개발된 것이다.

상기 공법은 부직포에 폴리에틸렌액을 일체화시켜 제작한 불투수층 매트를 저수지 제체에 전체적 덮는 방법으로 시공하여 제체의 침식을 방지하는 공법이다.

본 공법은 홍수단계별로 2단계에 걸쳐 시공하도록 되어있으며, 홍수주의보나 홍수경보에 따른 저수지 수위상승에 따라 대응하도록 구상하였다. 대응 1단계는 홍수가 발생하여 저수지 수위가 만수위 이상으로 상승하려고 할 때, 대응 2단계는 지속적으로 홍수가 상승하여 홍수위 이상이 되는 경우로 구분한다.

대응1단계인 저수지 만수위 상태까지는 홍수상황을 지켜보면서 만수위를 초과할 경우(<그림 5-1>의 빨간색 부분) 만수위부터 제정상단까지 1단계로 차수매트를 시공하여 보호하며, 홍수위를 초과하는 경우 대응2단계인 기존 시공된 부분과 연결하여 제정상단부터 하류부까지(<그림 5-1>의 파란색 부분) 전체적으로 시공함으로써 제체의 침식을 방어하게 된다.

그러나, 본 공법은 길이가 긴 저수지 제체 특성상 전단면을 보강하기에는 시간과 비용이 많이 소요되기 때문에 현실적으로 제정이 상대적으로 낮은 부분 등 취약부분만 보강하도록 할 수밖에 없는 단점이 있다.



**<그림 5-1> 차수매트를 이용한 제체 보호공법 개념도**

출처 : 제체보호용 차수구조(공개특허10-2011-0046948, 강원대학교산학협력단)

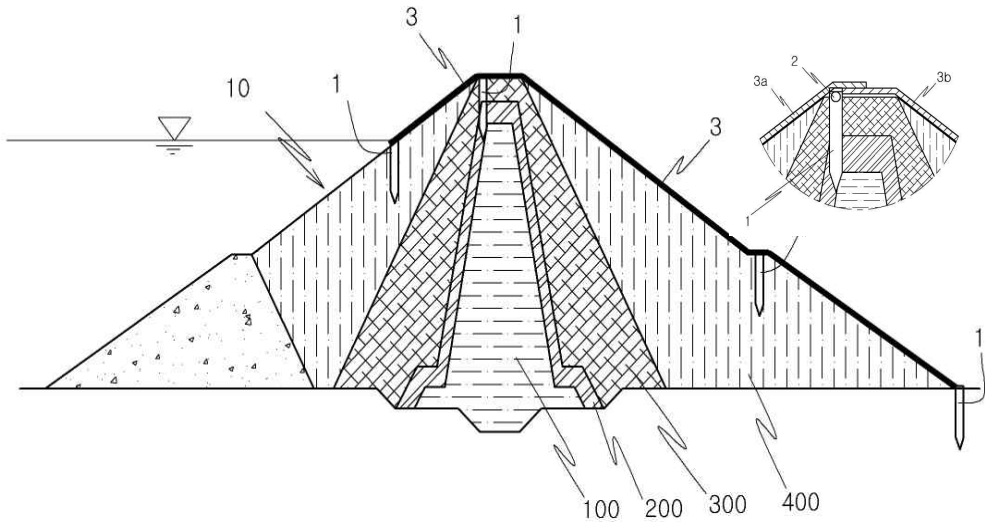
차수매트를 이용한 제체 보호공법의 구성품은 차수매트(제체보호), 지지대(만수위 부근, 제정에 설치 차수매트 고정), 지지봉(차수매트를 지지대에 연결)으로 구성된다.

설치방법은 구성품 중 지지대(<그림 5-2>의 1)은 홍수기 이전에 저수지 만수위 및 제정부근이 설치하고 1단계로서 상류면 지지대와 제정 지지대 사이에 차수매트(<그림 5-2>의 3a)를 포설한다.

차수매트 하부는 세립질의 토사로 면 고르기를 실시하고 만수위에서 수위가 상승하게 되면 수압에 의해 차수매트가 하중을 받게 되므로 제체와 밀착되게 된다.

수위가 계속 상승하여 홍수위를 넘어서게 되면 2단계 차수매트 포설을 진행하며 2단계는 제정에 설치된 지지대에 지지봉(<그림 5-2>의 2)을 연결하여 차수매트(<그림 5-2>의 3b)를 포설한다.

유티시 수압 벡터는 제체하부 및 하류사면 방향으로 작용하게 되므로 수압보다 지지봉의 지지력이 크다면 차수매트는 제체와 밀착되어 제체를 보호하게 된다.



<그림 5-2> 차수매트를 이용한 제체 보호공법 설치 상세도

출처 : 제체보호용 차수구조(공개특허10-2011-0046948, 강원대학교산학협력단)



<그림 5-3> 차수매트 자동설치 장치(좌), 제체 지지대 및 지지봉(우)

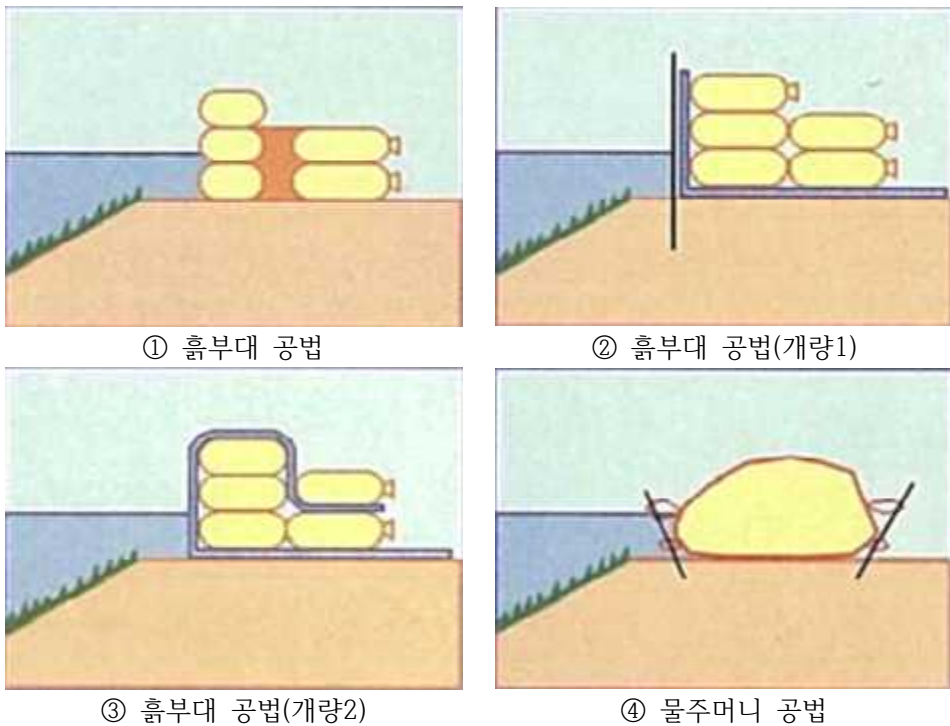
출처 : 제체보호용 차수구조(공개특허10-2011-0046948, 강원대학교산학협력단)

### 나. 기타 월류 방지대책

고전적인 방법으로 제정 상단부분에 흙부대나 모래주머니, 톤마대를 쌓아올려 제정의 월류를 방지하는 방법으로 제정에 흙부대 만을 쌓아올리는 방법과 현장 상황에 따라서 이를 개량하여 적용하기도 한다.

일본 국토교통성에서는 “시대에 맞는 수방공법 선정과 제작가이드(일본, 국토교통성, 2006)” 발행을 통하여 제방의 월류 및 침식방지 긴급대책으로 <그림 5-4>와 같은 수해방지공법을 제시하고 있다.

소규모 농업용저수지의 형식은 균일형 필댐이므로 구조적으로 하천제방과 큰 차이가 있는 것은 아니므로, 긴급대책의 경우 동일한 방법을 활용하여 적용할 수 있다.



<그림 5-4> 제체의 월류방지를 위한 다양한 긴급공법

출처 : 시대에 맞는 수방공법 선정과 제작가이드(日本 國土交通省, 2006)

<그림 5-4>의 ① 흙부대 공법은 가장 기본적으로 흙부대를 제정에 쌓아올려 월류를 방지하는 공법으로 구조가 간단하고 다양한 재료로 만들

수 있어 널리 이용되는 방법이다. 지수역할을 주로 포장재료가 담당하며 이중으로 쌓아 중간을 흙으로 채워넣어 수압을 견디는 구조이다.

② 흙부대 공법(개량1)의 경우 흙부대 사이에 흙을 채워넣지 않고, 말뚝을 박고, 지수가 가능한 시트 위에 흙부대를 쌓아올리는 방법이다. 말뚝과 흙부대의 무게로 수압에 저항하는 구조로 말뚝을 박을 수 없는 곳은 수압에 대한 저항이 낮아지는 단점이 있다.

③ 흙부대 공법(개량2)의 경우, 말뚝을 박을 수 없는 곳에서 사용할 수 있는 방법으로 지수가 가능한 시트를 깔고, 흙부대를 쌓아 시트로 둘러싼 후 그 위에 흙부대를 올려 고정시키는 방법이다.

④ 물주머니 공법은 도시에서와 같이 다량의 흙을 얻을 수 없는 곳에서 사용하는 방법으로 제정 상단에 말뚝을 박아 물주머니가 위치할 공간을 마련하고 물주머니에 펌프로 물을 주입하여 월류를 방지하는 공법이다. 물주머니공법은 많은 물주머니가 필요하고, 예상보다 높게 상승하는 경우 더 높에 쌓아올릴 수 없는 것이 단점이다.

## 2. 월류 붕괴방지 제체 보강기술

### 가. 댐 제체 증고를 통한 보강

댐 제체를 증고하는 방법은 기존 댐의 재개발시 저수량을 증가시켜 이수측면의 댐 이용율을 향상시키는 것을 주 목적으로 하고 있으나, 이에 부가하여 오래된 댐의 기능을 향상시키고, 치수측면에서도 전반적으로 댐체를 보강하여 활용도와 안정성을 높이고자 하는 목적에서 시행된다.

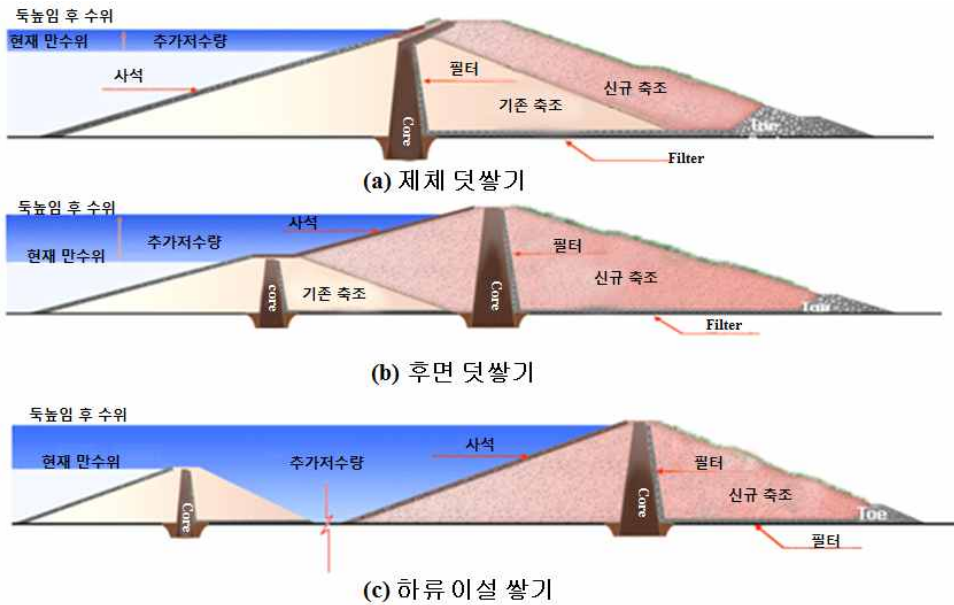
댐 제체 증고를 통한 보강방법은 일반적으로 기존댐의 제체와 연결하여 증고하기 때문에 증고된 높이와 설계된 하류 사면경사에 따라 댐체의 기저부도 동시에 확장되게 된다.

기존댐과 제체를 연결하여 증고하는 경우 기존댐과 신규댐의 접합부위가 가장 취약한 부위가 되기 때문에 불투수층의 시공이나, 필터의 시공시 기존댐과 신규댐이 일체화 할 수 있도록 증따기를 하는 등 정밀한 시공이 필요하다.

일반적으로 댐 제체의 증고방법은 <그림 5-6>에서 보는 바와 같이 기존제체와 연결하여 불투수성부를 경사지게 시공하고 하류부 사면에 연결하여 시공하는 제체 덧쌓기 방식, 기존댐과 연결하여 시공하기는 하지만

기존댐을 마치 가물막이 댐처럼 활용하고 하류부에 불투수성부와 댐체를 신규로 축조하는 후면 덧쌓기 방식, 기존댐의 하류부에 신규로 댐을 축조하는 하류 이설쌓기 등으로 나눌 수 있다.

독높임의 경우 노후화된 댐을 재축조와 유사한 수준으로 보강개발하는 방식이므로 홍수배제 측면이나, 댐체의 여유고를 확보하는 측면에서 최근의 이상홍수 등에 대응하는 댐의 종합적인 보강방법으로 볼 수 있다.



<그림 5-5> 댐 제체 증고방법

#### 나. Parapet wall 설치

Parapet wall은 보통 댐에서 월류방지나 바람에 의한 처오름 현상에 의한 제체 상부의 침식을 방지하기 위하여 보조적으로 설치되는 시설로 제정 상단부에 제체의 길이방향으로 설치되는 일정한 높이의 콘크리트 벽을 말한다.

보통은 Parapet wall 만 단독으로 설치되는 경우는 드물고 기존 제체의 증고를 위하여 성토와 병행하여 설치되는 것이 경제적으로 알려져 있다. 제체의 상단에 길이방향으로 설치되는 콘크리트 구조물이기 때문에 높게



시공은 가능하나 경관 상 좋지 않고 시야를 가려 유지관리상 불리하기 때문에增高높이가 1m이상일 경우에는 다른 방법과 병행하여 설치한다.

시공형태는 보통 직사각형의 연속된 벽체의 형태이나 최근에는 상단부를 곡선화 시공하여 파랑에 의한 방어를 극대화하기도 한다.



<그림 5-6> Parapet wall 설치 전경

출처 : Small Dams Design, Surveillance and Rehabilitation(CIGB ICOLD)

#### 다. RCC공법(Roller Compacted Concrete)

RCC공법은 매우 된 반죽의 콘크리트를 얇은 층으로 깔고, 진동 롤러로 다지는 공법으로 여기에서는 사력댐의 표면을 월류에 의한 침식으로부터 보호하기 위하여 롤러다짐콘크리트를 사용하여 표면 보호체를 만드는 것이다.



RCC를 활용한 월류대책은 경제적 및 시공편의성에서 댐의 안정성을 확보하는데 우수한 공법으로 평가되고 있다. 다만, 여기서는 상시적인 월류 상태가 아닌 돌발적인 상황에서 댐의 체체의 침식을 방지하여 붕괴를 방지하거나 지연시키는 것이 목적이므로 RCC공법을 이용하여 어느 정도 유량을 어느 정도시간을 방어하여야 하는 것을 결정하는 것이 중요하다.

따라서, RCC를 활용한 체체의 월류대책시설을 고려할 경우에는 설계홍수량, 기존댐의 설계 특성, 하류부 하천 및 지역의 특성을 종합적으로 판단하여야 한다.

RCC공법은 여수로 및 체체 월류방지공법으로 오랫동안 사용되어 왔으며 미국에서 130개 이상의 댐에서 적용된 바 있다.

미국에서 Tholocco 댐에 적용된 사례를 살펴보면 Tholocco 댐은 1930년대에 지어진 댐으로 1979년 댐의 홍수배제규모가 부족한 것으로 나타났으며, 1994년 7월 폭우로 비상여수로의 붕괴로 6년동안 비어있는 상태로 방치되었다. 그 후 댐을 어떻게 보강할 것인지 여러 가지 대안을 조사하고 가장 효율적인 방법으로 RCC 보조여수로를 설치하는 것으로 결론을 내렸다. 이후 2004년, 2005년, 2007년에 월류하였으나 안정적인 기능을 발휘하는 것으로 나타났다.

<그림 5-9>는 Tholocco 댐에 설치된 RCC 보조여수로를 나타낸 것이며 <그림 5-10>은 Red rock 유역의 댐에 설치된 보조여수로에서 홍수시 월류 전경과 홍수 후 상태를 나타낸 것이다.



**<그림 5-7> Tholocco Dam에 설치된 RCC 보조여수로**

출처 : Small Dams Design, Surveillance and Rehabilitation(CIGB ICOLD)



<그림 5-8> Red Rock 유역의 댐에 설치된 RCC 보조여수로  
출처 : Small Dams Design, Surveillance and Rehabilitation(CIGB ICOLD)

#### 라. CCM공법(Cellular Concrete Mat)

CCM 공법은 콘크리트 블록을 연속된 셀식으로 조립한 뒤 각 블록을 철제 케이블 등으로 연결하여 일체화하여 제체의 표면을 보호하는 보강체를 만드는 공법으로 제체의 월류에 의한 침식을 방지하여 붕괴를 방지할 수 있는 공법이다.

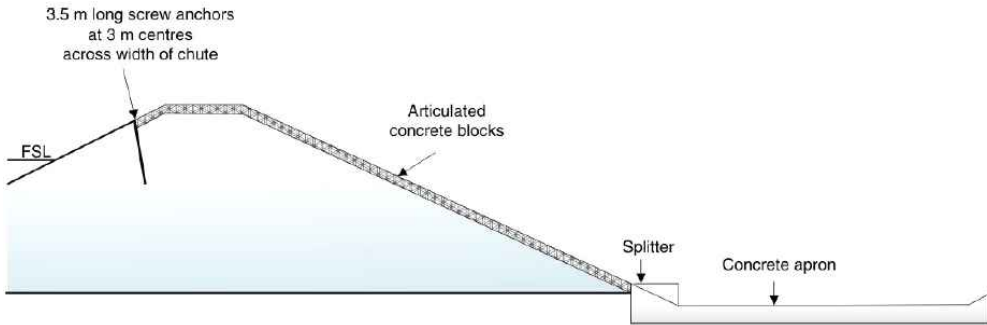
콘크리트 블록은 블록의 상부가 막혀있는 것과 개방되어 있는 것이 있으며, 블록의 상단이 개방되어 있는 블록의 경우 시공후 식생이 가능하여 친환경적인 시공이 가능한 장점이 있다.

보통 콘크리트 블록의 두께는 10~23cm, 평면넓이 0.1~0.2m<sup>2</sup> 규모의 콘크리트 블록이 시공에 사용된다.

CCM 공법은 향만에서 파랑에 의한 방파제의 세굴방지 등 안정성 확보를 위한 목적으로 개발된 공법으로 각 콘크리트 블록이 케이블로 연결되기 때문에 굴곡이 있는 곳에서도 시공이 가능하며, 일정규모로 공장이나 작업장에서 케이블로 연결한 뒤 현장으로 이동하여 시공할 경우 빠르게 시공할 수 있는 장점도 있다.

다음 <그림 5-11>은 월류에 대한 제체를 보강하는 공법으로 CCM 공법을 시공할 경우 개념도를 나타낸 것이다.

CCM 공법의 콘크리트 블록은 이질재료인 제체의 흙 위에 덮여있는 구조이므로 월류시 흐름방향의 저항성이 취약하므로 이를 보강하기 위하여 CCM 구조체를 제체와 일체화 할 수 있도록 앵커를 시공하여 보강할 수 있으며, 시공 후 상부에 성토를 하고 식생이 활착될 경우 시공직후 보다 더 큰 안정성을 확보할 수 있다.



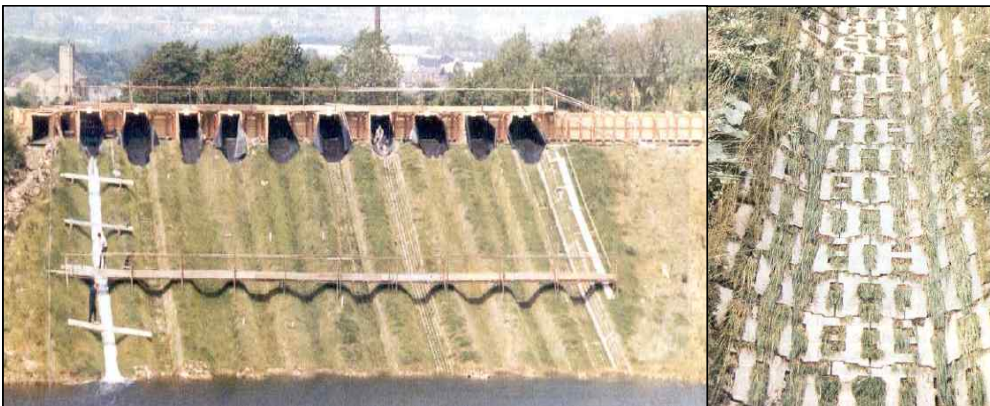
<그림 5-9> CCM(Cellular Concrete Mat) 공법 개념도

출처 : Small Dams Design, Surveillance and Rehabilitation(CIGB ICOLD)



<그림 5-10> 댐 사면에 대한 조립된 콘크리트 블록의 거치

출처 : Small Dams Design, Surveillance and Rehabilitation(CIGB ICOLD)



<그림 5-11> 댐 사면에 설치된 콘크리트 블록

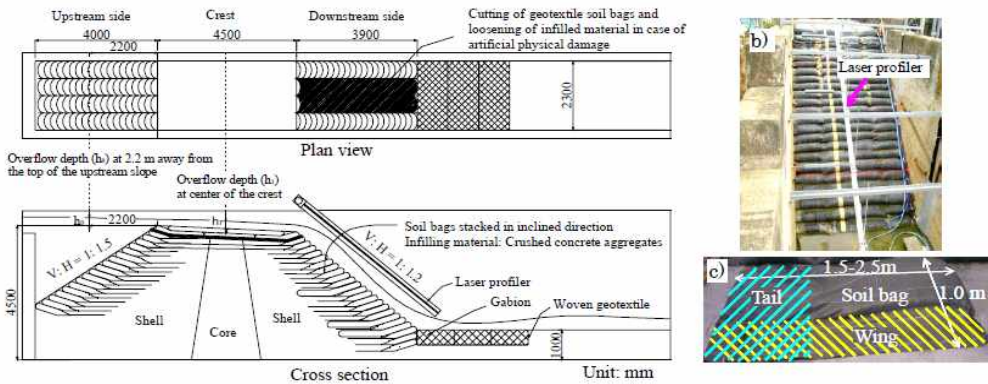
출처 : Small Dams Design, Surveillance and Rehabilitation(CIGB ICOLD)

#### 마. 특수형상의 흙부대 공법(일본, 농촌공학연구소)

특수형상의 흙부대 공법은 일본 농촌공학연구소에서 개발한 공법으로 폭 1.0m, 길이 1.5~2.5m 크기의 특수 제작한 흙부대를 사용하여 층층이 쌓아올려 제체를 보강하는 방법이다.

특수형상의 흙부대는 흙을 담는 부분과 제체와 흙부대를 일체화 할 수 있는 꼬리부분, 양옆의 흙부대와 일체화 할 수 있는 날개부를 가지도록 제작한다.(<그림 5-14>, c)

또한, 흙부대를 수평으로 쌓아올리는 경우 수평 전단력에 저항하지 못하고 흙이 쉽게 변형하거나 움직이게 되는 문제점을 해결하기 위하여 흙부대를 수평면에 대하여 약 18° 경사지게 쌓아올림으로서(<그림 5-14>, a) 수평으로 쌓을 때의 약 2배의 저항을 가질 수 있다는 것을 실험으로 확인하였다.



<그림 5-12> 흙부대 공법 개요도

출처 : 지진·월류에 강한 저수지 및 도로성토의 구축기술(일본 농촌공학연구소)

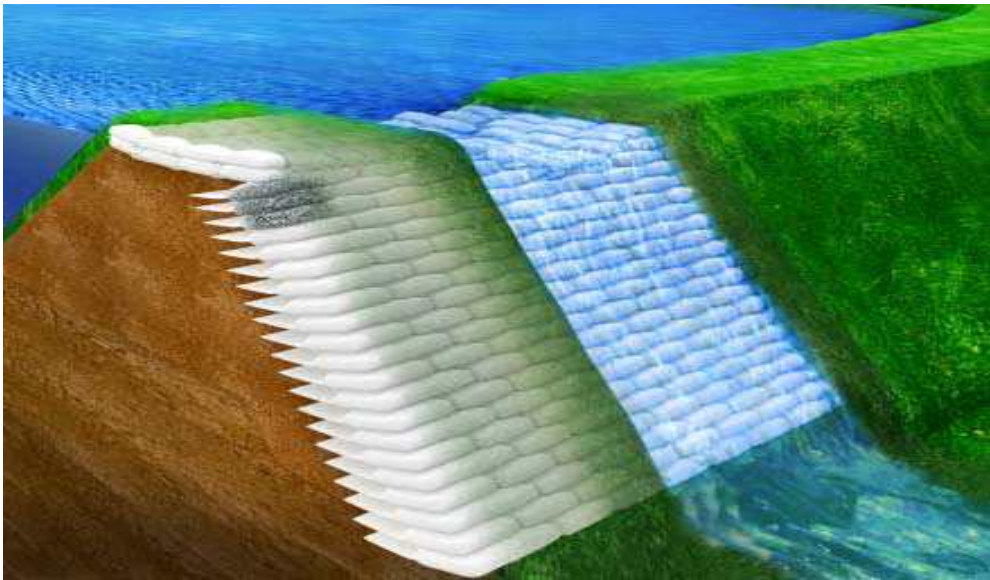
농업용 저수지는 유역면적이 작기 때문에 월류가 단시간에 집중하여 발생하게 되므로 몇시간 정도의 월류를 허용하고, 그에 대한 제체 하류 사면의 침식여부를 확인하면 공법의 활용성을 평가할 수 있다.

농촌공학연구소에서는 특수형상의 흙부대 공법을 이용하여 구축한 저수지 제체에 대하여 월류실험을 실시한 결과, 월류수심 30cm, 월류 지속시간 6시간에 충분한 허용능력이 있는 것으로 판단하였으며, 이에 따라 돌발적인 월류에 대해서도 침식의 발달속도가 느린 붕괴 방지대책에 효과적인 공법으로 판단하였다.



실험결과 특수형상 흙부대를 적층한 제체 구조는 유수에 의한 침식방지 대책으로서 유효하며 저수지 제체 외에 저수 기능을 갖는 흙 구조물에 적용할 수 있다. 또한, 제체가 흙부대와 인장 보강재에 의해 보강되기 때문에 경사가 가파른 저수지, 경사지와 토지 제약조건이 있는 곳에서도 적용이 가능하다.

다만, 자외선 등에 의한 흙부대 재료의 복토 및 식물보호 등 열화대책에 대하여는 별도의 검토가 필요한 것으로 판단하고 있다.



<그림 5-13> 제체 일부구간 흙부대 공법 시공개념도

출처 : 지진·월류에 강한 저수지 및 도로성토의 구축기술(일본 농촌공학연구소)



**<그림 5-14> 제체에 적용한 흙부대 공법**

출처 : 지진·월류에 강한 저수지 및 도로성토의 구축기술(일본 농촌공학연구소)

**바. 제체표면 피복공법+L형드레인 공법(일본 농촌공학연구소)**

제체표면 피복공법은 제체를 대규모로 굴착하지 않고 제체를 보강재로 감싸서 저비용으로 단기간에 호우에 강한 저수지 개보수를 실시하는 획기적인 공법이며, L형 드레인 공법은 하류사면 법면에 먼저 L형 드레인을 설치하여 침투선을 저하시켜 제체의 안정성을 높이는 공법이다.

제체표면 피복공법은 수세미구조의 침식방지매트를 통하여 파랑에 의한 침식을 방지하고, 미끄럼 및 월류침식을 방지하며, L형 드레인 공법을 통하여 파이프를 방지할 수 있다. 또한, L형 드레인은 필터재료 막힘에 대비하여 2중관으로 구성하여 내부를 세정할 수 있어 유지관리에 용이한 장점이 있다.

제체표면 피복공법과 L형드레인 공법에 필요한 재료는 모두 인력으로 운반할 정도로 경량이며 접근성이 나쁜 산간 벽지에 위치한 소규모 저수지에 쉽게 반입이 가능하다. 제체 표면 피복공법에 사용되는 재료는 수세미 모양의 물에 차수성 부직포가 접착된 침식방지매트와 2중관 구조로 구성된 L형 드레인이다.

제체표면 피복공법은 상류사면에서 하류사면까지 보수를 일련의 과정으로 시행할 수 있어 기존 공법에 비해 빠르게 시공할 수 있다. 또한, 덤프 등 대형 중장비가 필요없고, 재료가 경량이기 때문에 접근이 어려운 산간지의 저수지도 간편하게 보수가 가능하다.

<그림 5-17>은 제체표면 피복공법의 시공순서를 나타낸 것이며, <그림 5-18>은 L형드레인공법의 시공순서를 나타낸 것이다.

농촌공학연구소에서는 제체표면 피복공법의 월류침식방지 성능을 확인하기 위하여 실규모의 제체 월류실험을 실시하였다. 저수지에 여수로 방류능력을 초과한 유입이 발생되면 제체 월류가 발생하고, 월류수심이 깊어지게 되면 월류부 끝에서 수류가 점프하여 하류사면에 충돌하여 침식되게 되는데 월류실험 결과 보강제체는 월류수심 20cm의 월류에 견디는 것으로 실험결과 나타났다.

실험결과 무대책의 경우 200l/m/s의 월류유량으로도 완전파괴에 이르는 데 제체피복공법은 260l/m/s 월류가 12시간 지속되도 전혀 손상이 발생하지 않았다.

제체표면 피복공법의 극한강우의 제체 침식방지 성능을 살펴보기 위하여 강우시험을 실시하였다. 무보강 저수지의 경우 50mm/hr의 강수량을 3시간 지속한 결과 제체가 크게 붕괴된 반면 제체표면 피복공법은 150mm/hr의 강수량을 12시간 계속 지속하더라도 약간의 변형만 발생할 뿐 붕괴에 이르지 않는 것으로 실험결과 나타났다.



<그림 5-15> 제체표면 피복공법 단계별 시공전경

출처 : 제체 표면피복공법 및 L형드레인 공법(일본 농촌공학연구소 시설자원부)





<그림 5-16> L형 드레인공법 단계별 시공전경

출처 : 제체 표면피복공법 및 L형드레인 공법(일본 농촌공학연구소 시설자원부)

### 제3절 내부침식에 의한 붕괴방지 기술

#### 1. 내부침식 붕괴방지 긴급대응 기술

##### 가. 유출부 가압을 통한 월륜공법(일본, 마쓰야마 하천국토 사무소)

월륜공법은 일본 마쓰야마 하천국토사무소에서 제안한 방법으로 일본에서 하천제방의 파이핑을 방지하기 위한 긴급 수방대책으로 활용되고 있다.

파이핑은 누수에 의하여 침투유선상의 침투압이 점차 증가되어 누수가 집중되면서 제방 또는 제체내의 토립자가 누수지점으로 빠져나와 발생된 동공이 점차 확대되면서 발생하게 되는데 월륜공법은 초기 누수지점에 수압을 가하여 침투압을 감소시켜 파이핑을 지연시키거나 방지하는데 목적이 있다.

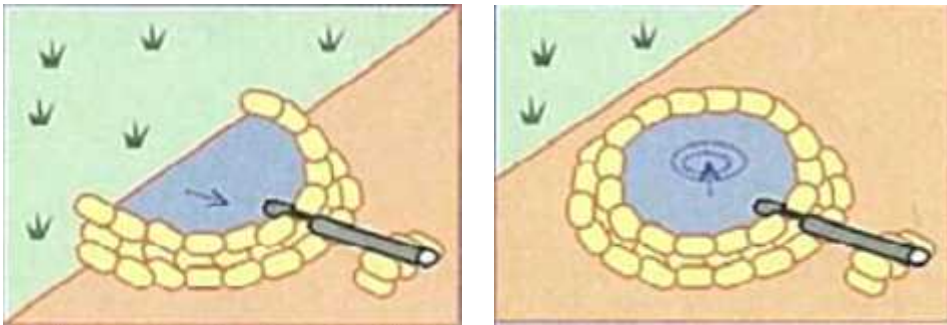
아래 <그림 5-17>은 월륜공법의 현장시공 전경으로 경사진 사면이나 평면상에 흙부대를 쌓아 올려 임시 우물을 만들고 물을 채워 누수지점에 수압을 가하는 방식으로 시공하게 된다.



<그림 5-17> 월륜공법의 현장시공 전경

일본 마쓰야마 하천국토사무소에서는 홍수시 내제 사면이나, 사면과 연결된 부근에 제체의 누수나 파이프이 발생될 경우 수방대책으로 월륜공법을 수방대책으로 사용하고 있다.

월륜공법은 현장의 누수상태에 따라 흙부대, 배수를 위한 파이프, 방수시트를 사용하여 현장 지형의 상태에 따라 1~2m의 원형이나 반원형의 우물을 구축하고 물을 담아 수압을 가해야 한다. 이때 수압을 가하는 높이는 누수부분의 표면에서 보이지 않을 정도로 충분한 수압을 가하여야 한다.



누출부가 경사진 경우(반원형)

누출부가 평평한 경우(원형)

### <그림 5-18> 누출부 위치별 월륜공법의 적용

출처 : 시대에 맞는 수방공법 선정과 제작가이드(日本 國土交通省, 2006)

월륜공법은 현장에서 인력으로 긴급하게 시공하는 공법으로, 흙부대를 쌓아올리고, 우물을 채우는 작업이 인력으로 수행해야 하므로 많은 시간과 인력이 필요한 단점이 있다.

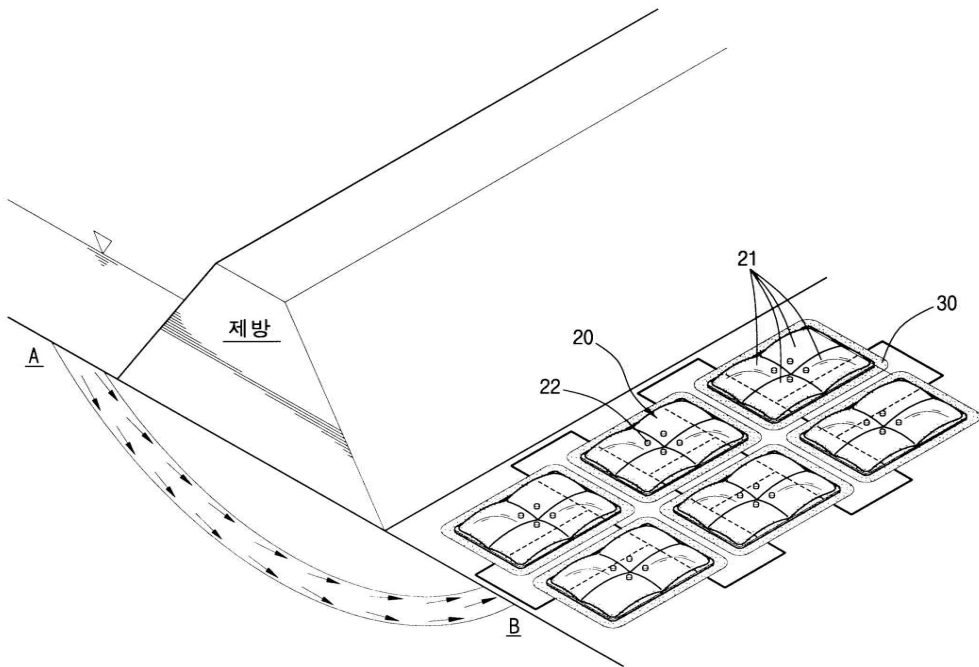
**나. 파이핑 방지용 차수매트 설치(2003, 김동규·김오규)**

파이핑 방지용 차수매트는 제방의 제내지층의 지반을 통하여 용출되는 파이핑 현상에 의하여 제방의 붕괴를 방지하기 위하여 누수부분에 차수매트를 설치하여 파이핑 현상을 차단하거나 지연시키는 방법이다.

본 공법은 부직포, 물매트, 수중접착제, 고정말뚝으로 구성되며, 누출부위에 부직포를 설치하여 토립자의 유출을 방지하고 그 위에 물매트를 설치한다. 각각의 물매트를 수중접착제로 연결하고 지반에 고정말뚝을 설치하여 일체형으로 누수부위를 중력식으로 압박함으로써 파이핑의 진행을 차단하거나 지연시키게 된다.

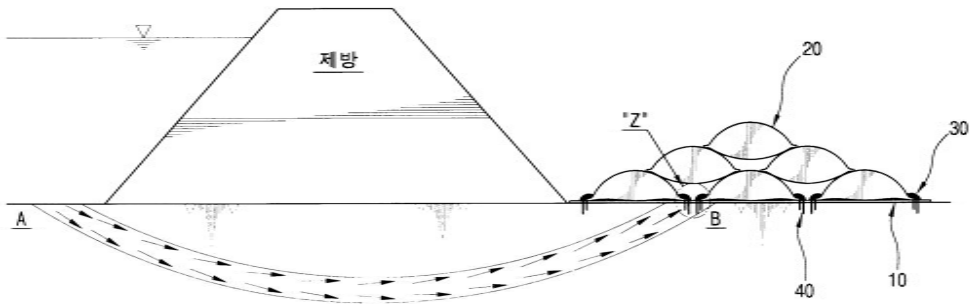
물매트는 각각 밸브가 있어 초기 설치시에는 부직포 설치 후 매트만 설치한 후 밸브를 통하여 물을 채움으로서 차수매트의 이동성을 향상할 수 있도록 한 것이 특징이다. 또한, 충분한 압력을 가할 수 있도록 다층의 물매트를 구성할 수도 있다.

파이핑 방지용 차수매트는 구성품이 간단하고, 조립식으로 구성되어 휴대 및 이동이 용이하며 재사용이 가능하므로 파이핑 대비용 응급대책용으로 사용이 가능할 것으로 판단된다.



**<그림 5-19> 파이핑 방지 차수매트 설치(평면도)**

출처 : 하천 제방의 파이핑 방지용 차수매트 설치구조(등록실용신안20-0310490, 김동규)



<그림 5-20> 파이핑 방지 차수매트 설치(단면도)

출처 : 하천제방의 파이핑 방지용 차수매트 설치구조(등록실용신안20-0310490, 김동규)

파이핑 방지 차수매트 공법은 제내지 층의 평지의 누수나 파이핑에 대응할 수는 있으나, 제방사면에는 구조적으로 설치가 불가능하고 설치공정상 부직포 설치, 물매트 설치, 수중접착, 고정말뚝 설치, 밸브를 통한 물매트 물공급 등 여러 단계를 거쳐서 시공되기 때문에 시공시 상당한 시간이 소요될 것으로 판단된다.

#### 다. 하천제방의 파이핑 방지장치(2016, 한국건설기술연구원)

건설기술연구원에서 2016년에 개발한 하천제방의 파이핑 방지장치는 일본에서 하천제방의 누수나 파이핑을 방지하기 위하여 사용하는 월륜공법이나, 하천제방의 파이핑 방지용 차수매트 설치구조(등록실용신안, 2003)의 단점을 개량한 방법으로 하천제방의 파이핑을 방지하기 위한 목적으로 개발되었으나, 소규모 농업용저수지의 경우에도 동일한 목적으로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

“하천제방의 파이핑 방지장치”는 일본의 긴급 수방공법으로 사용하고 있는 월륜공법의 적용시 많은 인력과 시간이 필요한 단점이 있으며, 기존 하천제방의 파이핑 방지용 차수매트(등록실용신안, 2003)는 여러 가지 설치공정을 거쳐야 하며, 다수의 물매트를 수중접착제 시공시 간단하지 않고, 큰 압력을 필요로 하는 경우 다층의 물매트를 설치하는 것 자체가 쉽지 않은 시공이므로 긴급한 대응시 어려움이 있음을 개선하였다.

하천제방의 파이핑 방지장치는 수두를 조절할 수 있는 밸브가 달린 원통형 누수방지장치를 파이핑 발생 위치에 설치하여 파이핑을 방지하거나 누수를 지연시키는 공법이다.

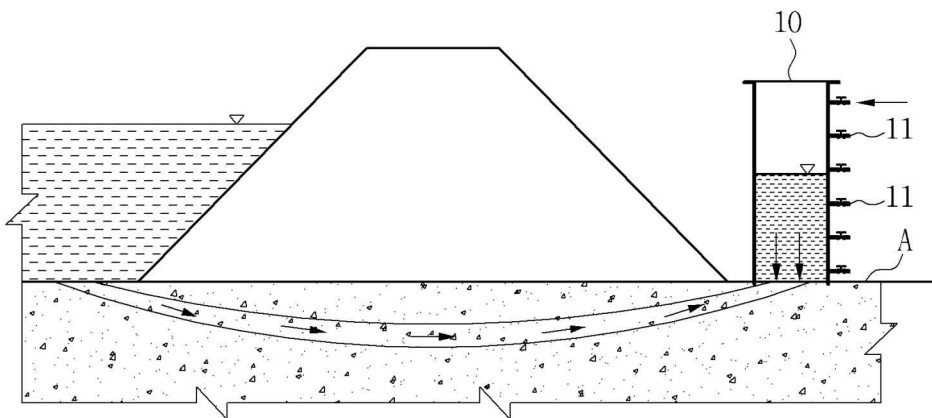


본 공법은 원통형의 누수방지장치 상하단에 설치되어 있는 플랜지를 사용하여 필요한 높이만큼 추가 설치하여 높이를 조절할 수 있으며, 플랜지 사이에는 패킹으로 누수를 방지한다.

따라서, 누수 부위의 압력수두를 쉽게 조절할 수 있기 때문에 시공성이 뛰어나다. 또한, 구조가 간단하여 설치, 이동, 해체가 용이하고 보관 등 유지관리에 유리한 장점이 있다.

박민철, 김진만 등은 대형제방실험을 통한 Hydraulic well의 효용성 검증 연구에서 본 파이핑 방지장치와 유사한 Hydraulic well을 제작하고 침수압 분포특성을 평가한 바 있다.

박민철, 김진만 등의 연구에서는 Hydraulic well의 수위가 10cm~70cm로 변화할 때 지중 내 침투압의 변화를 살펴보았는데, Hydraulic well의 수위가 70cm인 경우 설치 전보다 지표밑 5cm에서는 88.2%, 15cm에서는 62.7%, 25cm의 경우 62.5%의 침투압 감소효과가 있는 것으로 나타났다.



<그림 5-21> 하천제방의 파이핑 방지장치 개념도

출처 : 하천제방의 파이핑 방지장치(등록특허10-1631523, 건설기술연구원)

## 2. 내부침식 붕괴방지 제체 보강기술

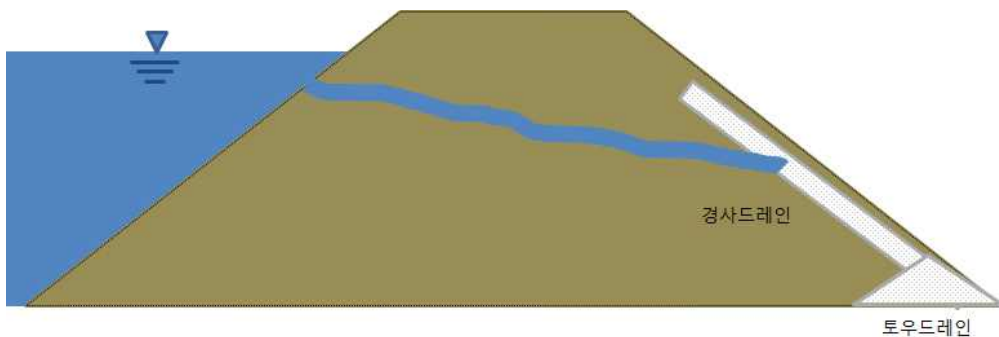
내부침식 붕괴방지를 위한 긴급대응 기술은 누수되어 나오는 부분에 압력을 가하여, 누수량을 감소시키거나 차단하여 붕괴를 지연시키는 방법으로 내부침식에 대한 근본적인 해결방법이 아니다.

내부침식에 대한 근본적인 해결방법은 누수의 원인을 찾아 누수를 차단하거나, 누수로 인한 동공 발생 및 확장이 되지 않도록 누수량을 원활히 하부로 배출하여 간극수압을 적절히 낮출 수 있는 드레인을 설치하는 방법으로 아래와 같은 방법이 일반적으로 내부침식에 대한 제체 보강기술로 사용된다.

### 가. 제체내 내부침식 붕괴방지 드레인 설치

제체 내 내부침식 방지를 위한 드레인 설치는 누수량이 발생하더라도 하류부로 신속하게 배제하여 누수에 의한 간극수압 상승을 빠르게 소산시키고, 동공이 발생되거나 확장이 되지 않도록 하여 제체의 붕괴를 방지하는 방법이다.

제체 붕괴를 방지하고 있는 드레인은 하류사면으로 침투되는 누수량을 신속하게 배제하기 위한 하류사면 경사드레인과 제체 바닥의 토우드레인과 연결시켜 누수량을 배제하는 방식이다.



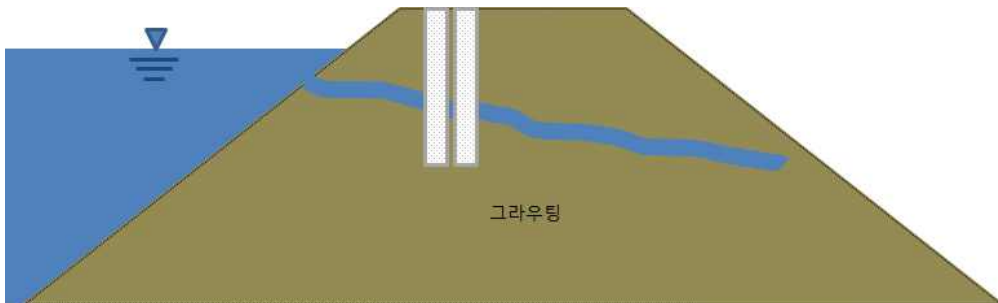
<그림 5-22> 내부침식 방지 하류부 경사드레인 설치

### 나. 누수지점 그라우팅

그라우팅은 일반적으로 누수차단을 위하여 사용하는 공법으로 제체 내부로 각종 시멘트, 모르타르, 고결제 등을 제체내로 강력한 압력을 가하여 주입하는 방법으로 누수를 차단하는 방법이다.

일반적으로 누수를 차단하기 위하여 누수지점을 기준으로 제체의 종방향으로 일정간격으로 그라우팅을 시행한다.

비교적 간단한 시공으로 누수를 차단할 수 있다는 장점은 있으나, 정확하게 누수지점에 시공했는지 여부, 그라우팅 지점간 연속적인 차단막의 형성을 성공했는지 여부를 확인하기 어려워 시공 후 현장투수시험을 통하여 효과에 대한 확인이 필요하다.



<그림 5-23> 누수지점 그라우팅을 통한 누수차단



제6장

---

결 론



## 제6장 결론

국내 농업용저수지의 82%는 50년이상 노후화된 상태이며, 전체 농업용저수지의 99.9%는 월류시 붕괴위험이 높은 흙댐 형식으로 되어있고, 흙댐의 붕괴원인은 제정의 월류(38%)와 제체 내부의 누수로 인한 파이핑(40%)이 주된 원인으로 분석되고 있다.

또한, 최근에는 기왕 최대를 초과하는 호우의 빈번한 발생으로 물넘이 확장만으로 월류붕괴 방지에 한계가 있을 것으로 판단되며, 누수를 동반한 파이핑은 제체의 노후화에 따른 내구성 저하에 따라 발생하므로 노후화 대응이 필요하다.

올해는 농업용저수지의 제체 주요 붕괴원인 및 붕괴방지 기술 분석을 위하여 농업용저수지 현황조사, 국내외 댐 및 저수지 붕괴 사례조사, 제체 취약부 분석 및 붕괴방지 기술분석으로 구분하여 연구를 진행하였다.

또한, 월류 및 내부침식 제체 거동특성 규명을 위하여 필댐에 대한 제정 월류시, 여수토접속부 월류시, 내부침식시 붕괴 모형실험을 실시하여 월류 및 내부침식 파괴시 제체의 변형 및 파괴형상을 분석하였다.

### ○ 농업용저수지 현황분석

2017년 농업생산기반정비사업 통계연보자료를 통하여 농업용저수지 현황을 분석한 결과 현재 우리나라 농업용저수지 평균 준공 후 경과년수는 65년, 평균 제체규모는 높이 8m, 길이 110m, 평균유효저수량은 178천 $m^3$  정도인 것으로 나타났다.

농업생산기반정비사업 통계연보 데이터베이스의 제체형식은 다양한 명칭으로 되어있으나 농업생산기반 정비사업 계획설계기준상의 필댐의 정의인 균일형, 존형, 표면차수벽형, 코어형으로 분류하여 정리한 결과 콘크리트형은 21개소로 전체 저수지 17,313개소 중 0.1%이며, 나머지 99.9%는 필댐으로 분류되었으며, 필댐 중 균일형은 44%, 존형은 56%를 차지하고 있는 것으로 나타났다.

경과년수에 따라 농업용저수지를 분류한 결과 50년 이상된 저수지가 전체의 81.5%였고, 30년 이상으로 분류하면 전체 저수지의 96.5%가 30년 이상 경과된 것으로 분석되었다.

농업용저수지의 노후화 정도를 살펴보기 위하여 1995년부터 2017년까지 23개년간 농업용저수지 안전진단현황 5,313건을 분석한 결과 "주요부재에

결합이 발생하여 긴급한 보수보강이 필요하며, 사용제한 여부를 결정해야 하는 상태"인 D등급 이하는 764건으로 전체의 19.8%로 나타났다.

다만, 정밀안전진단현황 분석결과는 5년주기로 시행되는 안전진단의 저수지별 중복을 허용하여 분석한 내용이며, 지속적인 개보수사업을 시행하여 최근 5개년 정밀안전진단결과와 D등급 이하의 비율은 8.0%로 나타났다.

농업용저수지 진단결과 제체 결합사항을 살펴보면 사석이완이 23.6%로 가장 빈번하게 나타났고, 다음으로는 여유고 부족, 침식세굴, 누수·파이핑이 뒤를 잇고 있는데 이는 장기적인 정밀안전진단 결과로도 필댐의 가장 큰 취약점이 월류와 누수, 파이핑에 의한 내부침식임을 나타내는 결과로 볼 수 있다.

#### ○ 국내외 댐 붕괴사례 조사

국내의 댐 및 소류지 붕괴사례를 다양한 문헌자료, 기존 보고서, 인터넷, 신문기사 등으로 통하여 수집한 뒤 정리하여, 모두 120건의 국내의 댐 및 소류지 붕괴사례를 수집하였다.

취득한 자료 중 댐 형식 분류가 가능한 자료 107개를 분석한 결과, 붕괴사례 중 필댐이 106건으로 99%, 콘크리트댐이 1건으로 1%를 차지하였고, 필댐을 균일형과 준형으로 구분한 결과는 균일형이 45건, 준형이 61건으로 비슷하게 나타났다.

댐 붕괴의 발생년도를 살펴보면 1998년과 2002년 등 특정년도에 붕괴가 집중되어 나타난 것을 알 수 있는데 1998년에는 7월 31일부터 8월 18일까지 빈번한 집중호우가 발생되었으며, 2002년에는 역대 최강의 태풍루사의 상륙, 1987년에는 태풍 셀마가 상륙하여 많은 소류지 및 댐이 붕괴된 것을 알 수 있다.

이를 통하여 국내의 댐 및 저수지의 붕괴사례는 대부분 집중호우나 태풍에 의한 수해에 의하여 붕괴된 경우가 대부분임을 알 수 있었다.

국내와 마찬가지로 2018년까지 해외의 댐 붕괴사례를 수집하고, 수집한 자료 191개소 중 댐 형식분류가 가능한 151건을 형식별로 분류한 결과, 151건 중 필댐이 125건으로 82.8%를 차지하고 있으며, 콘크리트 댐은 21건으로 나타났다.

2018년까지 국내외 댐 붕괴사례 중 붕괴원인을 파악할 수 있는 140건을 붕괴원인별로 분류한 결과 총 140건 중 월류에 의한 붕괴와 파이핑에 의

한 붕괴는 각각 49건, 35%로 전체의 70% 붕괴원인이 월류와 파이핑인 것으로 나타났다.

이중 필댐 형식의 댐의 경우 전체사례 116건 중 월류붕괴가 44건 37.9%, 파이핑붕괴가 46건 39.7%로 전체의 77.6%인 대부분이 월류와 파이핑을 원인으로 붕괴되는 것으로 분석되었으나 콘크리트 댐에서는 필댐과 같이 특정원인에 의하여 붕괴되는 비율은 크지 않고 다양한 원인으로 붕괴되는 것으로 분석되었다.

#### ○ 저수지제체 취약부 분석

장기간에 걸친 농업용저수지 안전진단결과, 소류지 및 댐의 붕괴사례, 전문가 의견수렴결과 우리나라 저수지 제체의 취약부를 분석하면, 월류의 경우 취약부를 3군데로 볼 수 있으며 첫번째는 제정 상단이 같은 표고를 가지고 있지 않아 상대적으로 낮은 제정부, 둘째로는 홍수시 월류심이 높아져 월류높이가 날개벽보다 올라가면 제체를 월류하지 않아도 날개벽과 제체사이의 세굴로 결국 여수로부가 유실되어 붕괴에 이르게 될 확률이 높아 제정보다 상대적으로 낮은 날개벽이 취약부로 분석되었다.

세번째로 여수로 방수로 부가 곡선이거나 설계홍수량을 초과할 경우 여수토의 월류방향과 방수로의 방향이 다른 측구식 여수로 특성상 방수로부 측벽에 부딪혀 처오름 현상에 의하여 배제유량이 방수로와 연결된 외제측으로 넘어와 세굴되는 경우가 많아 취약한 부위로 판단되었다.

내부침식의 경우 저수지를 축조하면서 원지반과의 접촉부, 여수토 콘크리트 접촉부, 복통과 제체의 접촉부 등이 가장 취약한 것으로 판단되고 있으며 우리나라 사례의 경우 복통주변의 누수에 의한 사례가 많아 복통주변이 내부침식에 가장 취약한 부분으로 나타났다.

#### ○ 저수지 월류붕괴모형실험

월류, 내부침식시 제체의 붕괴 거동특성을 규명하기 위하여 저수지 제체모형을 축적 1/20로 제작하였으며, 우리나라 농업용저수지의 붕괴빈도를 고려하여 제정이 월류되어 붕괴되는 경우, 여수토접속부 월류로 시작해서 제정까지 월류되는 경우, 복통주변의 파이핑에 의한 내부침식에 의하여 붕괴되는 세가지 경우에 대하여 붕괴모형 실험을 실시하였다.

제정월류붕괴 실험시 붕괴형상은 월류초기단계에서는 사면유속이 빨라

지면서 먼저 하류사면 세굴이 진행되었고, 월류량 증가단계에서는 붕괴폭과 붕괴깊이가 큰 변화는 보이지 않았으나 붕괴영역이 좌우로 점차 확대되는 것을 알 수 있었다.

첨두월류단계에서는 붕괴구역이 하류사면 전체로 확대되며 붕괴폭도 깊어지는 경향을 나타냈으며, 사면의 침식범위가 상류측으로 확대되면서 제정상단부가 붕괴되는 모습을 나타냈다.

실험결과 붕괴폭과 붕괴깊이의 발달은 월류의 지속시간에도 영향을 받지만 어느 정도 시간이 경과된 후에는 안정된 상태를 보였으나, 월류량의 증가에 따라서 급격히 변화하는 모습을 보여 월류지속시간보다 월류량에 직접적인 영향을 받는 것으로 판단된다.

제정 월류실험 중 간극수압 및 토압의 계측 결과, 월류 상황에서의 간극수압은 월류 전에는 거의 변화가 없고, 월류 후 급격한 변화가 발생하므로 간극수압의 변화에 따라 월류를 추정하거나 예측하기는 어려울 것으로 판단된다.

여수도 접속부 월류실험은 초기 방수로 측벽월류를 제외하고는 월류실험과 유사하게 진행하였으며, 초기에 방수로에 격벽을 설치하여 치오름 상태를 유도하여 방수로 접속부 침식이 진행되는 상태에서 간극수압과 토압변화를 측정하였다. 침식이 어느 정도 진행된 후에는 월류모형실험과 유사하게 월류상태를 만들어 붕괴를 유도하도록 실험하였다.

실험결과 초기에 방수로 접속부 침식이 발생된 상태에서 제정의 월류가 발생되므로 제정 월류 유량이 방수로 접속부의 침식부에 집중되어 붕괴가 가속화 되는 것으로 나타났다.

내부침식 실험은 제체 내의 복통 주변 및 내부 누수로 인하여 파이핑이 발생할 경우를 가정하여 실험하였으며, 파이핑을 유도할 수 있도록 본 실험 전 복통위치에 다공관을 설치하고 예비 실험을 통하여 파이핑이 발생할 수 있도록 다공관의 적절한 규모, 채움재료를 결정하여 본 실험을 실시하였다.

파이핑 모형실험에서는 파이프의 상단과 하단의 간극수압 차이는 거의 없었으며, 누수로 인하여 제체가 점차 포화되고 누수량이 증가되었으며, 지속적으로 간극수압이 상승하면서 최종적으로 누수량이 급증하면서 파이핑에 의한 붕괴까지 발생하는 것을 알 수 있었다.

따라서, 파이핑의 경우에는 붕괴 전까지 지속적으로 간극수압의 증가가

뚜렷하게 관측되므로 붕괴가능성을 예측하고, 붕괴방지 대책공법을 마련하는데 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

○ 저수지 제체 보호공법 및 붕괴방지 기술 조사분석

향후 저수지 제체의 월류 및 내부침식에 의한 붕괴방지 기술개발을 위하여 국내외에서 저수지 붕괴를 방지할 수 있는 연구상황과 개발된 공법을 조사·분석하였다.

- 차수매트를 이용한 제체 보호공법

월류시 긴급방지 기술로 차수매트를 이용한 보호공법이 있으며 본 공법은 차수매트, 지지대, 지지봉 등으로 구성하여 홍수단계별로 현장에서 직접 설치 포설하여 붕괴를 방지하는 것으로 홍수위까지는 1단계로 제정까지 차수매트를 포설하고, 홍수시 초과시에는 제정 및 하류사면까지 포장하는 2단계로 대응하는 방법임

- 흙부대를 활용한 긴급 수방공법

고전적인 월류 대응 공법으로 흙부대를 쌓아올려 월류를 방지하는 공법으로, 일본 국토교통성의 긴급 수해방지대책으로 사용하고 있다. 현장의 상황에 따라서 흙부대를 쌓아올려 중간을 흙으로 채우는 방법, 흙부대를 쌓아올려 지수를 위하여 차수재료로 쌓는 방법, 도시와 같은 곳에서 흙을 구하기 어려운 상황에서는 물주머니에 물을 채워 월류를 방지하는 방법이 있다.

- CCM(Cellular Concrete Mat)공법

월류에 의한 제체의 침식을 방지하는 영구공법으로 필댐의 월류 붕괴를 방지하기 위하여 콘크리트 블록을 셀식으로 조립하고 블록을 연결선으로 연결하여 월류시 제체의 세굴을 방지함.

- 특수 모래주머니 공법

일본 농촌공학연구소에서 개발한 공법으로 특수한 모래주머니를 활용하여 제체의 일부구간을 월류부로 구성하거나 전체를 모래주머니로 보강하여 월류 붕괴를 방지하는 공법임.

- 파이핑 방지용 차수매트

파이핑 방지를 위한 재료의 구성은 토질재료 누출방지를 위한 부직포, 누수지점에 수압을 가하기 위한 물매트와 이를 일체형으로 고정하기 위한 수증접착제, 고정말뚝으로 구성되어 있으며, 설치 후에는 일체형으로 거동

하여 토질재료의 누출을 방지하고 물매트를 이용한 수압으로 파이핑을 방지하는 공법임.

- Hydraulic Well공법

일본의 마쓰야마 하천국도사무소에서 사용하는 월류공법을 개선한 방법으로 월류공법은 모래주머니 넓게 누수지점 주변에 쌓고 물을 채워 수압으로 누수를 방지하는 방법인데 비해, Hydraulic Well 공법은 모래주머니를 쌓는 방법이 시간이 많이 소요되고 필요한 수압을 유지하기 어려운 단점을 보완하여 개발한 공법임

건설기술연구원에서 보완 개발한 Hydraulic Well 공법은 조립식 원형통체를 이용, 누수지점에 수압을 가하여 파이핑을 방지하는 공법으로 이동형 제작되어 재해발생시 신속대처가 가능하고 원형통체에 밸브를 설치하여 파이핑 정도에 따라서 수압을 자유롭게 조절할 수 있다는 장점이 있음.

- 제체표면피복 및 L드레인 공법

월류와 내부침식을 동시에 방지하는 공법으로 일본 농촌공학연구소에서 개발하였으며 제체표면피복을 통해 월류붕괴를 방지하고, 하류부 사면에 이중으로 제작된 배수용 파이프를 이용한 L형 드레인 설치를 통해 파이핑을 방지하는 공법임.

본 연구의 2차년도에서는 중소규모 농업용저수지의 홍수 및 저류특성분석을 통하여 월류 발생시 월류지속시간 및 홍수유량을 검토할 예정이며, 1차년도의 기초연구결과를 바탕으로 저수지 제체 월류 및 내부침식 보호공법에 대한 시공성, 경제성을 추가로 분석하고, 저수지 붕괴방지를 위한 비구조적 대책 조사 및 분석을 수행할 예정이다.

또한, 제정포장, 차수매트 등 다양한 저수지 제체 보호공법 모형실험을 통하여 보호공법의 붕괴지연효과 및 공법성능 평가하고, 실무적으로 제체의 전단면에 월류방지공법 시행할 수 없는 경우 제정의 일부구간을 여수로와 같이 활용할 경우의 효과 등에 대하여 연구를 수행할 예정이다.



농업용저수지 제체 붕괴방지 기술개발 연구(I)

---

# 참 고 문 헌



## 참고문헌

1. 이지원, 1996. 댐의 설계와 시공편람
2. (사)한국지반공학회, 2012, 댐 및 제방의 설계, 시공, 안전관리기술
3. 수해방지기획단, 1999. 수해방지대책 보고서
4. USBR, 1983, Dams and Public Safety
5. 김수일, 2001, 기존 시설물에 대한 내진성 평가기법 개발(댐), 연세대학교
6. 2007, 충도저수지 비상대처계획(EAP), 한국농어촌공사
7. 한국수자원공사, 2004. 기존댐의 재개발 사례연구
8. J.David Rogers etc, 2013, The St. Fransis Dam Failure
9. 김진만 외, 2017, 파이핑에 의한 하천제방 붕괴 메커니즘 분석 및 대책공법평가, 한국건설기술연구원
10. 한국농어촌공사, 2007, 수리시설개보수사업 업무편람(저수지편)
11. 한국농어촌공사, 2011, 농업생산기반시설 정밀안전진단실무 세부요령
12. 김영익 외, 2011, 저수지 월류시 여수토 접속부 세굴에 따른 붕괴현상의 실험적 연구
13. 이달원, 2012, 월류에 의한 저수지 제체의 붕괴 거동
14. 이달원, 2014, 농업용저수지 월류시 제체와 여수토 접속부의 붕괴거동
15. 농식품부, 2002, 농업생산기반정비사업계획설계기준(필댐편)
16. 행정안전부, 2018, 저수지정량적 위험도 분석 및 보수보강 우선순위 평가기술 개발
17. 농식품부, 2016, 저수지(댐) 재해예측 및 붕괴예경보를 위한 복합위험 기준연구
18. ICOLD, 2011, Small dams(Design, Surveillance and Rehabilitation)
19. USBR Design of Small dams
20. HORI Toshikazu, 2005, Damage of Small Earth Dams for Irrigation Induced by Heavy Rainfall
21. 松島健一, 2011, 地震・洪水に強いため池、堤防・水路護岸等の盛土補強技術の開発
22. 農研機構農村工學研究所, ため池の 低コストリニューアル工法



---

## 부 록

[부록 1] 국내의 댐 붕괴사례 및 붕괴원인

[부록 2] 국외의 댐 붕괴사례 및 붕괴원인



[부록 1] 국내의 댐 붕괴사례 및 붕괴원인

번호	저수지명	시도	시군	완공 년도	붕괴 년도	붕괴 원인	붕괴 유형	댐형식	댐높이 (m)	댐길이 (m)	저수 용량 (천m <sup>3</sup> )	피해규모
1	효기	전북	남원	1962	1961	폭우	월류	필댐(존형)	15.6	115.0	7	제체붕괴, 사망156명, 부상 65명, 주택190 침수
2	구덕	부산	서구		1972	폭우	월류	필댐(균일형)	20.0	50.0		사망 75명, 피해당시현황확인 불가, 무허가 판자촌 주택 50여동
3	장속 (장유,장곡)	충북	보은		1980	폭우		필댐(균일형)				농경지 1ha유실, 가옥1동 유실, 3시간동안 읍전체 침수(약 200억원)
4	월곡	경남	산청	1979	1987			필댐(존형)	10.8	130	40.3	
5	둔기	경남	함양	1970	1987			필댐(존형)	8.5	45	12.8	
6	산골	충남	공주	1945	1987			필댐(존형)	8	58	22.4	
7	죽교	충남	부여		1987				2.1	84	2.5	
8	차동	충남	부여	1945	1987			필댐(균일형)	4.7	103	10.2	
9	성북	충남	서천	1964	1987			필댐(존형)	7	85	14.5	
10	길탕	충북	보은		1987				8*	30*		
11	적음	충북	보은		1987				14*	35*		
12	관기	충북	영동		1987				4*	20*		
13	연천댐	경기	연천		1996	폭우	월류	콘크리트댐	22	169.5	13,000	주택 50동 전파
14	윤오골	강원	양구	1945	1998			필댐(균일형)	5	90	8	
15	백교	경기	구리		1998				3	30	2	
16	고막	경기	김포	1946	1998			필댐(균일형)	4	146	30	
17	양택	경기	김포	1956	1998			필댐(균일형)	6.5	191	38	
18	먹골	경기	남양주		1998				6	67	15	
19	어둔	경기	양주	1972	1998			필댐(균일형)	3	70	7	
20	서경	경기	이천	1945	1998			필댐(존형)	5.7	180	198	

(계속)

번호	저수지명	시도	시군	완공 년도	붕괴 년도	붕괴 원인	붕괴 유형	댐형식	댐높이 (m)	댐길이 (m)	저수 용량 (천m <sup>3</sup> )	피해규모
21	정운	경북	구미	1945	1998			필댐(존형)	7	87	23	
22	녹동	경북	군위	1945	1998			필댐(존형)	8	60	13	
23	신방	경북	군위	1945	1998			필댐(존형)	11	220	106	
24	오가실	경북	상주	1945	1998			필댐(존형)	4	120	7	
25	내곡	경북	의성	1945	1998			필댐(균일형)	7	150	21	
26	불매곡	경북	청도		1998			필댐(존형)	6	25	1	
27	내곡	경북	청도		1998				6	127	14	
28	상장기	경북	청도	1965	1998			필댐(존형)	8	58	5	
29	순덕	경북	청도	1945	1998			필댐(존형)	6	50	5	
30	향죽	경북	청도	1949	1998			필댐(존형)	9	60	11	
31	홍계	경북	포항	1945	1998			필댐(존형)	10	20	4	
32	도장골	경북	포항		1998				5	52	6	
33	초곡2	경북	포항	1967	1998			필댐(존형)	6	34	5	
34	덕성	경북	포항	1945	1998			필댐(존형)	12	90	79	
35	남실	경북	포항	1945	1998			필댐(존형)	3	54	6	
36	세장골	경북	포항		1998				4	37	4	
37	대안	경북	포항	1945	1998			필댐(존형)	6	49	12	
38	농도원	인천	강화		1998				10	150	9	
39	신평	인천	강화	1973	1998			필댐(균일형)	7	100	13	
40	진정	전남	영광	1968	1998			필댐(균일형)	7	86	14	



(계속)

번호	저수지명	시도	시군	완공 년도	붕괴 년도	붕괴 원인	붕괴 유형	댐형식	댐높이 (m)	댐길이 (m)	저수 용량 (천m <sup>3</sup> )	피해규모
41	용산	전북	남원	1979	1998			필댐(존형)	20	120	93	
42	치목	전북	무주	1951	1998			필댐(균일형)	3	84	94	
43	도산	충남	당진	1961	1998			필댐(존형)	4	100	36	
44	대덕	충남	당진	1945	1998			필댐(균일형)	4	67	29	
45	신시	충남	당진	1945	1998			필댐(존형)	4	323	60	
46	용연	충남	당진	1961	1998			필댐(존형)	6	116	54	
47	항곡	충남	당진	1955	1998			필댐(균일형)	7	200	66	
48	교암	충북	보은	1945	1998			필댐(균일형)	8	51	2	
49	성리	충북	보은	1966	1998			필댐(균일형)	9	60	28	
50	셋터	충북	보은	1955	1998			필댐(균일형)	5	60	6	
51	증상골	충북	보은	1945	1998			필댐(존형)	6	107	47	
52	평각	충북	보은		1998				5	137	17	
53	한각골	충북	보은		1998				10	93	30	
54	한실	충북	보은	1962	1998			필댐(균일형)	7	51	24	
55	홍골	충북	보은	1945	1998			필댐(균일형)	6	42	9	
56	핏골	경북	영주	1945	1999			필댐(균일형)	7	40	4	
57	송암	전남	영광	1969	1999			필댐(균일형)	5	125	7	
58	중리2	전남	해남	1968	1999			필댐(균일형)	9	117	19	
59	상산명	충남	논산	1947	1999			필댐(존형)	5	54	2	
60	장곡	충남	홍성	1986	1999			필댐(존형)	18	170	173	

(계속)

번호	저수지명	시도	시군	완공 년도	붕괴 년도	붕괴 원인	붕괴 유형	댐형식	댐높이 (m)	댐길이 (m)	저수 용량 (천m <sup>3</sup> )	피해규모
61	구상	전북	남원	1999	2002		활동	필댐(균일형)	36.9	230.0	396	이설도로 100m, 원호활동파괴
62	수평	전남	구례	1961	2002		월류	필댐(균일형)	8.0	156.0	39	제체 월류로 인한 활동
63	탄금	전남	담양	1942	2002			필댐(존형)	5.0	334.0	36	여수로 및 제체 공극(0.8m)
64	달산(봉산)	경북	영덕	1969	2002			필댐(존형)	21.5	104.0	478	제체 유실
65	동막	강원	강릉	1961	2002	태풍 루사		필댐(균일형)	24.2	420.0	942	저수지 여수로, 방수로 전구간 (232m) 유실 및 제당(230m) 활동 발생 주택, 농경지침수, 교량파괴
66	장현	강원	강릉	1947	2002	태풍 루사		필댐(균일형)	16.1	206.0	2,197	우안측 측구식 여수로의 조절 부 일부와 도수로부 이하 완전 파손, 좌안측 제체(85m) 유실, 여수로(25m), 방수로 및 정수 지(130m) 유실 주택 13가구 유실, 농경지침수(저 수지영향권약1.5km구간)
67	경포	강원	강릉	1972	2002	태풍 루사		필댐(균일형)	17.3	115.0	1,136	우안측 여수로 조절부 이하의 도수로 파손 및 여수로 댐체 접합부위 유실, 제체 경사면 하단부(80m) 세굴 및 여수로, 방수로(90m) 완전 유실 하류농경지(60ha) 유실 및 매몰
68	오봉	강원	강릉	1983	2002	태풍 루사		필댐(존형)	50.6	268.0	12,718	방수로 옹벽 8m 유실(26억원)
69	철통	강원	고성	2005	2002	태풍 루사		필댐(균일형)	8.5	139.0	25	제체 유실, 농경지 유실
70	거진(송강)	강원	고성	1975	2002	태풍 루사		필댐(균일형)	24.3	109.0	1,486	여수로 유실, 농경지 유실

(계속)

번호	저수지명	시도	시군	완공 년도	붕괴 년도	붕괴 원인	붕괴 유형	댐형식	댐높이 (m)	댐길이 (m)	저수 용량 (천m <sup>3</sup> )	피해규모
71	성주	경북	성주		2002	태풍 루사		필댐(존형)				12,000명 대피, 정수지 하단보(길이80m, 폭3m) 및 돌망태 유실, 정수지 토구 측벽 및 콘 밸브 방수로 파손, 발전소 진입로 유실(7억)
72	묘곡	경북	영덕	1963	2002	태풍 루사		필댐(존형)	26.6	430.0	8,671	저수지 여수토, 방수로 급류부(100m) 및 외제사면(100m) 유실(15억원)
73	가화	전남	고흥		2002	태풍 루사		필댐(균일형)				제체, 정수지 유실
74	상관	경북	상주	1979	2002			필댐(균일형)	23.7	276.5	5,773	방수로 정수지 하류 하천 연결부 옹벽 18m 파손(32백만원)
75	원부	경기	여주	1944	2003			필댐(존형)	12.0	249.0	583	제체 일부 유실
76	송월	전북	정읍	1969	2003			필댐(균일형)	4.4	90.0	3	제체 외제 하단부(길이 10m, 폭 5m, 높이 4m) 유실
77	미천	경북	의성		2003			필댐(균일형)				집중호우로 위천수위가 상승하여 미천제 2개소가 외수압에 의해 붕괴발생
78	수동	경북	영덕	1975	2003			필댐(존형)	22.6	153.0	434	방수로 일부 전도, 제체 일부 유실
79	가평	전북	고창	1961	2004	태풍 디엔무		필댐(균일형)	18.8	198.0	306	방수로(폭 2m, 높이 2m) 20m가 전도되면서 물 흐름을 방해, 좌우로 월류하여 방수로 접속도로(콘크리트 포장)가 유실, 농경지가 매몰되고 제체(높이 4~5m) 유실
80	운정	광주	북구	1956	2004	태풍 메기	활동	필댐(존형)	6.5	76.8	27	제체 외제가 활동으로 제체 붕괴(L=30m, H=7m), 여수로 폭파, 농경지 매몰

(계속)

번호	저수지명	시도	시군	완공 년도	붕괴 년도	붕괴 원인	붕괴 유형	댐형식	댐높이 (m)	댐길이 (m)	저수 용량 (천m <sup>3</sup> )	피해규모
81	가목	전북	완주	1942	2005	폭우		필댐(존형)	5.0	85.0	39	여수로, 방수로 유실(L=15m, B=7m)
82	월산1	전남	영암		2005		활동	필댐(존형)				제당 활동(B=2m, H=1.5m, L=30m)
83	영천	전남	보성	1985	2005			필댐(존형)	20.0	376.0	2,660	제체 붕괴, 반파
84	덕암	경남	함안	1975	2005			필댐(존형)	11.0	110.0	10	제체 붕괴
85	송호	강원	원주	1947	2006	누수	배수로 균열	필댐(균일형)	5.6	125.0	25	제체 붕괴(H=7m L=5m), 주택 2동 및 농경지 침수
86	삼합	경기	여주	1944	2006	폭우	누수	필댐(존형)	11.0	113.0	154	저수지 제체 100여m중 기초부분을 지탱하고 있는 사토층 10여m가 누수에 쓸려 내려감, 제체가 포화되어 활동 발생(L=10m, B=5m)
87	오촌	경기	안성	1945	2006	폭우		필댐(균일형)	6.0	110.0	4	방수로(5.5X1.4X40.0m)와 토공(355m <sup>2</sup> )이 붕괴됨
88	칠동	전남	보성	1989	2006	태풍 에위니아		필댐(존형)	36.5	306.0	2,062	제체 외제 하단부 일부 유실(폭 50.0m, 길이 35m)
89	기	경북	의성	1940	2006	폭우	활동	필댐(존형)	12.2	171.0	159	제체 외제측 활동(폭 12m, 높이 10.0m), 제체 붕괴 위기
90	당곡	경북	포항	1965	2006	폭우		필댐(존형)	12.3	120.0	42	제체 외제측 중간부분(L=60m) 붕괴

(계속)

번호	저수지명	시도	시군	완공 년도	붕괴 년도	붕괴 원인	붕괴 유형	댐형식	댐높이 (m)	댐길이 (m)	저수 용량 (천m <sup>3</sup> )	피해규모
91	사곡	경북	청도	1945	2007	폭우		필댐(준형)	6.0	37.0	5	둑 아래 부분하류 제체유실 (L=70여m) 주택2동,돈사완파,농경지3300 ㎡매몰
92	춘정1	전남	보성	1964	2007	폭우		필댐(균일형)	8.5	48.0	11	제체유실(L=25m), 농경지 유 실(1.5ha)
93	대사	전남	고흥	1968	2007	폭우		필댐(준형)	6.0	98.0	17	제체유실, 농경지 매몰
94	미력	전남	보성		2007			필댐(균일형)				제체 붕괴(25m)
95	만봉	전남	나주	1957	2008			필댐(준형)	11.0	224.0	2,416	저수지 비상통관이 파손, 인접 농경지 침수
96	금곡	전북	익산	1943	2009	폭우		필댐(균일형)	6.0	120.0	19	제체 붕괴, 인근 논 600평, 하 우스 작물 피해
97	교동	전북	고창	1945	2009	폭우		필댐(균일형)	6.8	40.0	14	제체 붕괴, 농경지 유실
98	화지	전남	나주	1958	2009	폭우		필댐(준형)	6.2	283.0	187	여수로 축수로 바닥 세굴, 물 넘이 부위 전도(15m)
99	양곡	충북	괴산	1967	2010	폭우		필댐(균일형)	5.7	68.0	8	제체유실, 주택 및 농경지 침 수
100	명곡	경남	양산	1967	2010	폭우		필댐(준형)	15.0	82.0	190	제체유실 주택및농경지침수

(계속)

번호	저수지명	시도	시군	완공 년도	붕괴 년도	붕괴 원인	붕괴 유형	댐형식	댐높이 (m)	댐길이 (m)	저수 용량 (천m <sup>3</sup> )	피해규모
101	척곡(노은)	전북	정읍	1967	2011	폭우		필댐(균일형)	16.5	70.0	80	제체붕괴제체유실 주택140채,상가85채침수 면소재지침수및농경지유실, 붕 괴에따른200억원피해
102	두야	충남	태안	1966	2012	폭우		필댐(존형)	4.5	92.0	11	제체붕괴제체유실(60m)-제당 범람 및 붕괴 농경지침수
103	어은	전북	남원	1945	2012	폭우	월류	필댐(존형)	8.1	104.0	17	제당 범람 및 붕괴 도로,농경지침수
104	죽림	전북	고창	1945	2012	태풍 볼라벤		필댐(균일형)	4.0	133.0	20	제당사면 및 여수토 유실 농경지침수
105	관춘	전남	해남	1945	2012	태풍 볼라벤	월류	필댐(균일형)	3.6	144.0	40	제당 범람 및 붕괴 농경지침수
106	산대	경북	경주	1964	2013	누수	누수	필댐(존형)	12.2	210.0	246	복동부 누수로 인한 토사유출 복동간부분가로10m토사유실제 체외복동의 접촉면에 재료불균질 로인한누수경로형성 주택(6동),농경지(1.5ha)침수, 하류주차된차량13대부분침수
107	조선(교수)	전북	고창	1956	2013	폭우	활동	필댐(존형)	21.0	231.7	2,557	제체 외벽붕괴 여방수로 우안5m높이의옹벽 30m두높이기사업중방수로외벽 붕괴 수민2천명대피,농경지침수
108	지소	전북	장수	1996	2013	폭우	활동	필댐(존형)	49.3	285.0	3,280	제체유실제체유실(독 덧붙이기 구간 30m의 사석이 흘러내려 여방수로 옹벽 일부 무너짐)
109	옥촌	경기	여주	1945	2013	폭우		필댐(균일형)	6.3	42.0	83	제체 붕괴(42m/높이6.3) 농경지(10ha)와비닐하우스5동, 주택2동침수
110	대관	경기	이천	1957	2013	폭우		필댐(존형)	4.4	230.0	51	제체 붕괴 농경지(2.3ha)와주택침수

(계속)

번호	저수지명	시도	시군	완공 년도	붕괴 년도	붕괴 원인	붕괴 유형	댐형식	댐높이 (m)	댐길이 (m)	저수 용량 (천m <sup>3</sup> )	피해규모
111	괴연	경북	영천	1945	2014	폭우	누수	필댐(균일형)	5.5	160.0	61	물넘이(여수토)와 주변부 둑 30m 무너짐 제체유실집중호우로인한배수로 와제체접촉면유로형성및제체유 실 주택15동,농경지(5,000m <sup>2</sup> )유실 및침수
112	내덕	부산	기장	1945	2014	폭우	월류	필댐(존형)	12.0	57.0	45	집중호우시 여수로와 제체 접 촉면으로 월류 및 제체 유실 주택1동,건물1동,교량1개소,농 경지유실및침수
113	금난곡	부산	기장	1945	2014	폭우		필댐(존형)	0.0	0.0	3	제체유실, 농경지 침수
114	부미골	경북	영덕	1945	2014	시설노 후	누수		4.2	89.0	4	제체 6m 유실, 양봉 16군 및 농경지(0.07ha) 침수
115	구천(화 장)	경북	청송	1987	2014	폭우		필댐(존형)	25.7	180.0	727	180m 둑 중간쯤 되는 지점 제 체 붕괴(폭 1m, 길이 3m, 깊 이 3.5m), 둑높이기 공사 이후 지반이 안정화되기 전 흩나짐 을 해놓은 곳이 함몰
116	화본	경북	군위	1958	2014	시설노 후	누수	필댐(존형)	10.0	175.0	219	농경지 1만5천여 m <sup>2</sup> 침수
117	북군	경북	경주	1971	2014	시설노 후	누수	필댐(존형)	10.1	147.0	115	복통 폐통부 파손, 논 0.1ha 침수, 경작물 없어 피해없음(미 나리 0.025ha 침수)
118	냉천	전남	영암	1957	2016	시설노 후	누수	필댐(존형)	13.5	180.0	591	농경지 2.3ha 침수, 하우스2동 침수
119	탑	경북	영천	1945	2016	시설노 후	누수	필댐(존형)	5.0	600.0	202	하류부(포도밭,논등) 2.85ha 침수
120	사당골	울산	북구	1907	2016	태풍 차바		필댐(존형)	8.5	55.0	46	제체 44m 및 취수시설 유실, 용수로 300m 파손 및 유실

[부록 2] 국외의 댐 붕괴사례 및 붕괴원인

번호	댐 명	국가	완공 년도	붕괴 년도	붕괴 원인	댐형식	댐높이 (m)	댐길이 (m)	저수 용량 (천m <sup>3</sup> )	폐해규모
1	Algodoes Dam	브라질		2009	폭우					사망 7명, 이재민 2000명
2	Alla Sella Zerbino	이탈리아	1923	1935	월류	곡선식 중력댐	12.0		18,000	사망 100명 이상
3	Anbuklao	필리핀		1990	지진	Rockfill	129.0			
4	Apishapa	미국	1920	1923	파이핑	Homogeneous earthfill, fine sand	34.1		22,500	
5	Austin	미국	1909	1911	기초불 량	Rolled earthfill/Cyclopen concrete	15.0	166.0	760	사망 80명
6	B.F. Sisk	미국		1981	활동	Earthfill	117.0	6000.0		
7	Babii Yar	소련		1961	월류	Rolled earthfill				사망 145명
8	Baldwin Hills	미국	1951	1963	파이핑	Homogeneous earthfill	71.0	198.0	1,100	사망 5명, 가옥 41동 파괴, 986동 침수
9	Banqiao and Shimantan Dam	중국	1952	1975	균열	Earthfill	24.5		592,000	사망 230000명, 이재민 11 백만명
10	Bearwallow Lake	미국	1963	1976	활동	Homogeneous earthfill				
11	Big Bay Dam	미국	1992	2004	파이핑	Earthfill	15.7	576.5		주택 25동 파괴
12	Bila Desna	체코	1915	1916	파이핑	Earthfill	17.0			사망 65명
13	Bilberry reservoir	영국	1840	1852	폭우					사망 81명
14	Bouzey	프랑스	1881	1895	누수	수직형 중력식 석괴댐	20.0	528.0		사망 100여명
15	Bradfield	영국	1863	1864	파이핑	Rockfill/earthfill	29.0	382.2	3,200	사망 238명, 가옥 800동 파 괴, 4,000동 침수
16	Break Neck Run	미국	1877	1902			7.0		49	
17	Briesis	호주		1929	월류	CFRD	24.0			
18	Brodhead Creek	미국	1976	1984	파이핑	Earthfill	32.9	260.0	1,360	
19	Broken Down Dam	미국	1908	1909	균열	중력식 콘크리트댐				주택, 농장등 침수
20	Buckhaven No.2	미국			월류					



(계속)

번호	댐 명	국가	완공 년도	붕괴 년도	붕괴 원인	댐형식	댐높이 (m)	댐길이 (m)	저수 용량 (천m <sup>3</sup> )	폐해규모
21	Buffalo Creek	미국	1972	1972	누수	Homogeneous fill, coal waste	14.0		484	사망 125명, 가옥 4,000여동 파괴
22	Bullock Draw Dike	미국	1971	1971	파이핑	Homogeneous earthfill	5.8		1,130	
23	Butler	미국		1982	월류	Homogeneous earthfill				
24	Camara Dam	브라질	2002	2004			50.0			사망 3명, 이재민 3천명
25	Campos Novos Dam	브라질	2006	2006	균열	Rockfill	202.0	600.0		
26	Canyon Lake	미국	1938	1972	월류		6.1	152.4	985	사망238명, 실종 5명, 가옥 1,200동 전파, 2,500동 침수
27	Castlewood	미국	1890	1933	월류	Earth/rockfill with masonry wall	21.3		4,230	
28	Caulk Lake	미국			파이핑					
29	Cheaha Creek	미국	1970	1970	월류	Zoned earthfill	7.0		69	
30	Clearwater Lake Dam	미국	1965	1994	월류	Homogenous earthfill				
31	Coedty	영국	1924	1925	월류	Earthfill with corewall	11.0	262.1	310	
32	Coedty reservoir	영국	1924	1925	누수					사망 17명
33	Cogoti	칠레		1943	지진		160.0			
34	Cougar Creek	캐나다			월류					
35	Coyote	미국		1984	지진	Rockfill	37.0	302.0		
36	Davis Reservoir	미국	1914	1914	파이핑	Earth with concrete facing	11.9		57,974	
37	Delhi Dam	미국	1929	2010	월류	Earthfill	18.0	215.0	4,670	8천명 대피
38	DMAD	미국		1983		Earthfill	8.0		19,700	
39	Dnjeprosking	소련		1941	폭파	곡선형 중력식 콘크리트댐	40.0	800.0		
40	Dworshak	미국	1973	1980	균열	중력식 콘크리트댐	218.5	1002.0	4,259,850	

(계속)

번호	댐 명	국가	완공 년도	붕괴 년도	붕괴 원인	댐형식	댐높이 (m)	댐길이 (m)	저수 용량 (천m <sup>3</sup> )	폐해규모
41	East Fork Pond River	미국			파이핑					
42	Eder	독일	1914	1943	폭격	중력식 콘크리트댐	48.0	399.0	202,000	사망 70명
43	Eigiau	영국	1911	1925	누수	중력식 석괴댐	6.0		4,500	사망 6명
44	Elk City	미국	1925	1936	월류	Rolled sandy clay fill with concrete corewall	9.1	563.9	740	
45	Emery	미국			파이핑					
46	Ennepe	독일		1943	폭격	중력식 콘크리트댐	51.0	800.0		
47	Erindale	캐나다	1910	1912	월류	Earthfill with concrete masonry corewall	10.7	213.4		
48	Euclides de Cunha	브라질	1958	1977	월류	Earthfill	53.0		13,600	
49	Fogelman	미국		1965	파이핑					
50	Fontenelle	미국	1964	1965	누수	Earthfill	39.6			
51	Frankfurt	독일	1975	1977	파이핑	Earthfill	9.8		350	
52	Fred Burr	미국		1948	파이핑	Homogeneous earthfil	10.4		752	
53	French Landing	미국	925	1925	파이핑	Homogeneous earthfil	12.2			
54	Frenchman Creek	미국	1952	1952	파이핑	Homogeneous earthfil	12.5		21,000	
55	Frias	아르헨티나	1940	1970	월류	Homogeneous rockfil		62.2		사망 42명, 실종 60명
56	Fujinuma Dam	일본	1949	2011	지진	Earthfill	18.5	133.0	1,504	사망 8명
57	Glen Canyon	미국		1983		아치형 콘크리트댐	261.4	475.0	33,304,000	
58	Gleno	이탈리아		1923	시공불량	복합식 콘크리트댐	43.6	236.0	5,400	사망 600여명(추정)
59	Gohna Lake dam	인도		1894	활동					사망 1명
60	Goose Creek	미국	1903	1916	월류	Earthfill	6.1		10,600	

(계속)

번호	댐 명	국가	완공 년도	붕괴 년도	붕괴 원인	댐형식	댐높이 (m)	댐길이 (m)	저수 용량 (천m <sup>3</sup> )	폐해규모
61	Gouhou	중국		1993	파이핑	Sand-Gravel with concrete face	71.0	265.0	3,300	
62	Grand Rapids	미국	1874	1900	월류	Earthfill with clay corewall	7.6	440.5	220	
63	Granite Creek	미국		1971						
64	Gusau Dam	나이지리아		2006	폭우					사망 40명, 주택 500동 파괴, 1000명의 이재민
65	Haas Pond	미국			파이핑					
66	Hans Srtijdom	남아공		1977	월류	Rockfill	57.0	525.0	1,538,000	
67	Hart	미국	1920	1986	파이핑	Homogeneous earthfill				
68	Hatchtown	미국	1908	1914	파이핑	Zoned earthfill	19.2	237.7	14,800	
69	Hatfield	미국	1908	1911			6.8		12,300	
70	Hauser Dam	미국	1907	1908	누수	중력식 콘크리트댐	23.0	190.0		
71	Hebron	미국	1913	1914	파이핑	Earthfill	11.6			
72	Hell Hole	미국	1964	1964	파이핑	Rockfill	67.1		30,600	
73	Herrin	미국		1935	월류	Zoned earthfill				
74	Hope Mills Dam	미국	1924	2003	월류	Earthfill				주택 40동 파괴, 1천6백명 대피
75	Hope Mills Dam	미국	2008	2010	누수	중력식 콘크리트댐	10.0	230.0	1,007	주택 40동 유실, 1600명 대피
76	Horse Creek	미국	1911	1914	파이핑	Homogeneous earthfill, with concrete facing	12.2	701.0	21,000	
77	Hutchinson Lake Dam	미국	1960	1994	월류	Homogeneous earthfil				
78	Iowa Beef Processors	미국	1971	1993	파이핑	Earthfill	4.6	304.8	333	
79	Ireland No.5	미국		1984	파이핑	Homogeneous earthfil				
80	Iruka Lake Dam	일본		1868	폭우					사망 941명, 주택 807동 침수

(계속)

번호	댐 명	국가	완공 년도	붕괴 년도	붕괴 원인	댐형식	댐높이 (m)	댐길이 (m)	저수 용량 (천m <sup>3</sup> )	폐해규모
81	Jacobs Creek	미국			파이핑					
82	Johnston City	미국	1921	1981	파이핑	Homogeneous earthfil	4.3		575	
83	Johnstown (South Fork)	미국	1853	1889	월류	Zoned earth and rockfill	38.1	283.5	18,900	사망 2209명
84	Ka Loko Dam	미국		2006	폭우	Earthfill				사망 7명
85	Kaddam	인도	1957	1958	월류	Earthfill	12.5		214,000	
86	Kantale Dam	스리랑 카		1986	누수	Earthfill	15.0	4267.0		사망 180명, 주택 1600동 파 괴
87	Kelly Barnes	미국	1948	1977	파이핑	Homogeneous earthfill	11.6		505	사망 39명
88	Kendall Lake Dam	미국	1900	1990	월류	Earthfill	5.5	128.0	728	
89	Khadakwasla (Poona)	인도	1879	1961	월류	Rockfill	40.0	1472.0		가옥 약 5,000동 파괴(추정)
90	Kopru Dam	터키		2012	폭우	중력식 콘크리트댐	109.0		93,200	사망 10명(건설중 근로자)
91	Kraftsmen's Lake	미국		1994	월류	Homogeneous earthfill				
92	Kyzyl-Agash Dam	카자흐 스탄		2010	폭우					사망 43명, 211명 부상, 1천 명 마을에서 대피
93	La Fruta	미국	1930	1930	파이핑	Homogeneous earthfill				
94	La villita	멕시코		1985	지진	Rockfill	60.0			
95	Lake Avalon	미국	1894	1904	파이핑	Earthfill	14.5		7,750	
96	Lake Barcroft	미국	1913	1972	월류	Earthfill	21.0		3,120	
97	Lake Frances	미국	1899	1899	파이핑	Homogeneous earthfill	15.2		865	
98	Lake Genevieve	미국			파이핑	Earthfill				
99	Lake Latonka	미국	1966	1966	파이핑	Homogeneous earthfill	13.0		1,590	
100	Lake Philema	미국	1965	1994	월류	Homogeneous earthfill				

(계속)

번호	댐 명	국가	완공 년도	붕괴 년도	붕괴 원인	댐형식	댐높이 (m)	댐길이 (m)	저수 용량 (천m <sup>3</sup> )	폐해규모
101	Lake Toxaway Dam	미국	1890	1916	폭우	Earthfill				
102	Lambert Lake	미국			파이핑	Earthfill				
103	Laurel Run	미국		1977	월류	Earthfill	12.8		385	사망 40명
104	Lawn Lake	미국	1903	1982	파이핑	Homogeneous earthfill	7.9			사망 3명
105	Lily Lake	미국	1913	1951	파이핑	Homogeneous earthfill				
106	Little Deer Creek	미국	1962	1963	파이핑	Homogeneous earthfill	26.2		1,730	
107	Long Branch Canyon	미국			파이핑					
108	Lower Latham	미국		1973	파이핑	Homogeneous earthfill			7,080	
109	Lower Otay	미국	1897	1916	월류	Rockfill with concrete/steel corewall	41.2	172.2	49,300	
110	Lower San Fernando	미국	1912	1971	지진	Earthfill	43.0		25,000	지진, 80000명 소개,
111	Lower Two Medicine	미국	1913	1964	파이핑	Homogeneous earthfill	11.3		19,600	
112	Lyman	미국	1913	1915	파이핑	Zoned earthfill	19.8		49,500	
113	Lynde Brook	미국	1871	1876	파이핑	Earthfill with corewall	12.5		2,520	
114	Machhu II	인도		1979	누수	Earthfill	60.1	4175.8	110,000	사망 2,000명이상, 가옥 12,000동 전파, 7,000동 침수
115	Makio	일본		1984	지진	Rockfill	105.0			
116	Malpasset	프랑스	1954	1959	누수	아치형 콘크리트댐	61.0		22,000	사망 423명
117	Mammoth	미국	1916	1917	누수		21.3		13,600	
118	Martin Cooling Pond Dike	미국		1979	기초불 량				135,683	
119	Meadow Pond Dam	미국		1996	시공불 량					사망 1명
120	Melville	미국	1907	1909	파이핑	Zoned earthfill	11.0			

(계속)

번호	댐 명	국가	완공 년도	붕괴 년도	붕괴 원인	댐형식	댐높이 (m)	댐길이 (m)	저수 용량 (천m <sup>3</sup> )	폐해규모
121	Merimac (Upper) Lake	미국	1939	1994	월류	Homogeneous earthfill				
122	Mill River Dam	미국		1874	폭우	Earth and masonry	13.1		2,500	사망 139명
123	Mohne	독일	1913	1943	폭격	중력식 콘크리트댐	40.3			사망 1579명
124	Mossy Lake	미국	1963	1994	월류	Homogeneous earthfill				
125	Muyama	일본		1923	지진	Earthfill	27.0			
126	Nahzille	미국		1996	월류	Homogeneous earthfill	5.5	129.5		
127	Nanaksagar	인도	1962	1967			15.9		210,000	사망 100여명
128	North Branch	미국		1977		Earthfill	5.5			
129	Oakford Park	미국		1903	월류	Earthfill with corewall	6.1	106.7		
130	Ono	일본		1923	지진	Earthfill	37.3			
131	Opuha Dam	뉴질랜드		1997	폭우		40.0			
132	Oros	브라질	1960	1960	월류	Zoned earthfill and rockfill	35.4		650,000	사망 1,000명(추정), 가옥 700여동 파괴
133	Otter Lake	미국			파이핑	Earthfill				
134	Otter Run	미국		1977		Earthfill	5.8			
135	Panshet	인도		1961	월류	Zoned earthfill	51.0		2,700	사망 1000명, 가옥 약 5,000동 파괴(추정)
136	Patel milmet Dam	케냐		2018	폭우				600	사망 48명, 이재민 2000여명
137	Peruca	유고		1993	폭파	Rockfill	63.0	450.0		
138	Pierce Reservoir	미국		1986	파이핑	Homogeneous earthfill				
139	Potato Hill Lake	미국	1947	1977	월류	Homogeneous earthfill				
140	Prospect	미국	1914	1980	파이핑	Homogeneous earthfill				

(계속)

번호	댐 명	국가	완공 년도	붕괴 년도	붕괴 원인	댐형식	댐높이 (m)	댐길이 (m)	저수 용량 (천m <sup>3</sup> )	폐해규모
141	Puddingstone	미국	1926	1926	월류	Homogeneous earthfill				
142	Quail Creek	미국	1986	1989	파이핑	Homogeneous earthfill				
143	Rainbow Lake	미국		1986	월류	Homogeneous earthfill				
144	Renegade Resort Lake	미국			월류					
145	Rito Manzanares	미국		1975	파이핑	Homogeneous earthfill	7.3		25	
146	Rutte	이탈리아	1952	1965	기초불량	복합식 아치댐	15.0			
147	Salles Oliveira	브라질	1966	1977	월류	Earthfill	35.1		25,900	
148	Sandy Run	미국		1977	월류	Earthfill	8.5		57	
149	Schaeffer	미국		1921	월류	Earthfill with concrete corewall	30.5	335.3	3,920	
150	Scott Farm Dam No.2	캐나다			파이핑					
151	Secondary Dam of Sella Zerbino	이탈리아	1906	1935	폭우					사망 111명
152	Sella Zerbino	이탈리아	1925	1935	월류	콘크리트 중력식	16.7	80.0	18,000	100명사망
153	Sempor	인도네시아		1967	파이핑	Rockfill	54.0	228.0		사망 200여명
154	Shakidor Dam	파키스탄	2003	2005	폭우			485.0		사망 70명
155	Sheep Creek	미국	1969	1970	누수	Earthfill	17.1		1,430	
156	Sherburne	미국	1892	1905	누수	Earthfill with corewall	10.4	91.4	42	
157	Shihgang Dam	타이완	1977	1999	지진	중력식 콘크리트댐	25.0	352.0	3,380	
158	Silver Lake Dam	미국	1944	2003	폭우	Earthfill	9.1	45.7		1천8백명 대피
159	Sinker Creek	미국	1910	1943	누수	Earthfill	21.3		3,330	
160	Situ Gintung Dam	인도네시아		2009	월류					사망 98명, 주택 250동 파괴, 이재민 171명

(계속)

번호	댐 명	국가	완공 년도	붕괴 년도	붕괴 원인	댐형식	댐높이 (m)	댐길이 (m)	저수 용량 (천m <sup>3</sup> )	폐해규모
161	Smartt Syndicate	남아공	1912	1961	파이핑	Earthfill	28.0		98,000	
162	Sorpe	독일		1943	폭격	Earthfill	69.0	700.0		
163	South Fork Tributary	미국		1977		Earthfill	1.8			사망2,209명
164	Spitsikop	남아공		1988	월류	Earthfill	18.5			
165	Spring Lake, R.I.		1887	1889	파이핑	Homogeneous earthfill, clay and gravel	5.5		135	
166	St. Francis	미국	1926	1928	활동	아치형 중력식 콘크리트댐	62.5	213.0	46,900	사망 450명
167	Statham Lake	미국	1955	1994	월류	Homogeneous earthfill				
168	Sweetwater Dam	미국	1888	1916	월류	아치형 콘크리트댐	18.0			
169	Swift	미국	1914	1964	월류	Rockfill with concrete facing	57.6	225.6	37,004	사망 28명
170	Taum Sauk reservoir	미국		2005	누수	Earthfill	30.0			
171	Testalinda Dam	캐나다		2010	폭우					
172	Teton	미국	1975	1976	파이핑	Zoned earthfill	93.0		356,000	사망 11여명
173	Tigra	인도		1976	월류	중력식 사력댐	26.0	1341.0		
174	Tigra Dam	인도	1915	1917	누수		24.0	1341.0		사망 1000명
175	Trial Lake	미국			파이핑					
176	Trout Lake	미국			월류					
177	Upper Pond	미국			월류					
178	Urft	독일		1943	폭격	중력식 콘크리트댐	59.0	226.0		
179	Vaiont	이탈리아	1960	1963	활동	아치형 콘크리트댐	262.0	160.0	168,715	사망 2,600명
180	Van Norman (San Fernando)	미국	1921	1971	지진	Earthfill	43.0	634.0	25,300	8만명 대피



(계속)

번호	댐 명	국가	완공 년도	붕괴 년도	붕괴 원인	댐형식	댐높이 (m)	댐길이 (m)	저수 용량 (천m <sup>3</sup> )	폐해규모
181	Vega de Tera	스페인	1957	1959	누수	Slab-and- Buttress	34.0	100.0	7,800	사망 144명, 가옥 125동 파괴, 25동 침수
182	Wadi Qattarah	리비아	1972	1977	파이핑	Earthfill	28.0	217.0	223	
183	Walnut Grove Dam	미국		1890						사망 100명
184	Wheatland No.1	미국	1893	1969	파이핑	Homogeneous earthfill	13.6		11,500	
185	Wilkinson Lake	미국	1956	1994	파이핑	Homogeneous earthfill with corewall				
186	Winston	미국	1904	1912	월류	Earthfill with corewall; earth with rubble core	7.3	132.6	664	
187	Wolf Creek	미국	1951	1967	파이핑	콘크리트 중력식 및 흙댐	78.6	1200.0	7,512,000	
188	Xe-Pian Xe-Namnoy Dam	라오스		2018	폭우	Earthfill				사망 36명, 6천6백명 이재민 발생
189	Xonxa	남아공		1972	월류	Earth/rockfill	48.0	300.0	158,000	
190	Zeyzoun Dam	시리아	1996	2002	누수		32.0		71,000	사망 22명, 2000명 대피
191	Zgorigrad	불가리아		1966	월류	Earthfill	12.0			사망 96명, 실종 25명, 가옥 196동 파괴



## 참 여 연 구 원

목 차	소속	참여자
1장 서론	농어촌연구원	이태호, 양영진
2장 농업용저수지 제체 붕괴원인	농어촌연구원	이태호, 양영진 최병한
3장 저수지 실내 모형실험	충남대학교	이달원, 김영학
4장 저수지 모형실험 결과	충남대학교	이달원, 김영학
5장 저수지 제체 붕괴방지 기술 현황	농어촌연구원	이태호, 양영진 허준, 이백
6장 결론	농어촌연구원	이태호, 양영진

## 주 의

1. 이 보고서는 농림축산식품부로부터 연구비를 지원받아 한국농어촌공사 농어촌연구원에서 수행한 연구보고서입니다.
2. 이 보고서의 내용은 연구원의 공식견해와 반드시 일치하는 것은 아닙니다.

### ■ 발 행 처

연구과제명 : 농업용저수지 제체 붕괴방지 기술개발 연구(I)	
발 행 일	2018. 12
발 행 인	장 중 석
발 행 처	한국농어촌공사 농어촌연구원
주 소	경기도 안산시 상록구 해안로 870 전 화 031 - 400 - 1805 FAX 031 - 409 - 1794
■ 이 책의 내용을 무단 전재하거나 복사하면 법에 저촉됩니다. 단, 이 책의 출처를 명시하면 인용이 가능합니다.	