

발 간 등 록 번 호

11-1543000-000591-01

농업생산기반시설 통합관리시스템 개발
- 저수지 제체를 중심으로 -

Development of Integrated Management System for
Agricultural Infrastructure
-focused on reservoir embankment-

서울대학교

농 립 수 산 식 품 부

제 출 문

농림축산식품부 장관 귀하

이 보고서를 “농업생산기반시설 통합관리시스템 개발” 과제의 보고서로 제출합니다.

2014년 9월 18일

주관연구기관명 : 서울대학교

주관연구책임자 : 이정재

세부연구책임자 : 강문성

세부연구책임자 : 손영환

연구원 : 이제명

연구원 : 이성용

연구원 : 박지훈

연구원 : 노수각

협동연구기관명 : 충북대학교

협동연구책임자 : 윤성수

연구원 : 박진선

연구원 : 전정배

협동연구기관명 : 한국농어촌공사

협동연구책임자 : 정민철

연구원 : 허준

요 약 문

I. 제목: 농업생산기반시설 통합관리시스템 개발

II. 농업생산기반시설을 둘러싼 환경의 변화: 제1장, 제2장, 제3장

- 가. 우리나라의 기후변화는 일 80mm 이상의 집중호우 발생일수가 70년대에 비해 2배 이상 증가하는 등 기상여건은 점차 열악해지는 것에 비해 농업생산기반 시설은 노후화된 상태로 운영되고 있음
- 나. 농업용 저수지 중 1945년 이전에 준공된 시설이 9,154개로 등록된 저수지 전체의 52%를 초과하고 있어 이들 시설의 보수·보강사업이 시급한 실정임
- 다. 홍수량의 변화와 같은 자연환경의 변화 또는 하류 몽리구역 및 시설물에 대한 요구사항 변화와 같은 사회환경의 변화 등으로 인해 시설물 안전성에 변화가 발생하고 있어 현재를 기준으로 시설물의 안전성 재평가가 필요함
- 라. 농업생산기반시설의 안전성을 평가하는 다양한 체계를 단일 지수로 통합함으로써 시설물간, 지역간 안전에 관한 격차를 정량적으로 비교할 수 있는 평가지표가 필요한 실정임

III. 안전성분석을 위한 현황조사 및 DB 구축: 제7장 4절, 부록A

- 가. 본 연구에서는 한국농어촌공사에서 관리하는 3000여개의 저수지 중 4대강 유역에 위치한 저수지 30개 저수지를 선정하여 조사대상지역으로 선정
- 나. 조사대상지는 한강, 금강, 낙동강, 영산강 4대강 유역별로 각각 중권역 6개, 3개, 4개, 3개 권역, 표준권역 각각 9개, 6개, 4개, 5개 권역으로 구성
- 다. 통합안전성 DB는 유역현황, 저수지 설계제원, 수문자료, 토질자료, 하류부자료 5개 분야의 농업생산기반시설에 관한 자료와 통합안전지수를 산정하기 위해 필요한 과거재해이력, 인프라 구조 및 인구현황 등의 하류부의 자료로 구성하였음
- 마. DB는 새로 자료를 입력받고 새로운 자료유형을 확장할 수 있도록 구성되어 있으며 통합안전지수 산출 시스템과 연계하도록 구성하였음

IV. 기후변화에 따른 농업생산기반시설 안전성 재평가: 제4장

가. 기후변화 모의

- 1) 기후변화 시나리오는 RCP 시나리오 중에서, 우리나라 온실가스 저감정책 현실을 잘 반영하고 있는 RCP 4.5 시나리오를 선택하였음
- 2) CLUE 모형을 선정하여 미래 토지이용변화를 모의하고 이에 따른 CN 및 불투수율의 변화를 분석한 결과 CN 값은 68에서 69로 증가하는 것으로 분석되어 수문 특성을 변화시킬 만큼의 큰 변화는 없는 것으로 나타났음

나. 수리/수문 안전성 재검토

- 1) HEC-HMS 모형 및 HEC-5 모형으로 모의하여 산정된 200년 빈도 홍수량은 30개 저수지 평균 $444 \text{ m}^3/\text{s}$ 에서 $1,036 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 증가하며 PMF는 $1,106 \text{ m}^3/\text{s}$ 에서 $1,983 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 증가하는 것으로 분석되었음
- 2) 미래 기상자료 및 토지이용변화를 반영하여 수행된 물수지 분석을 통해 모의되는 저수지 수위 자료와 사수위의 비교를 통해 대상 저수지의 이수 안정성을 재검토하였음

다. 토질 안전성 재검토

- 1) 강우강도의 변화와 강우 지속시간을 반영하여 체체 표면 침투를 고려한 침투 해석 및 안정성 해석 결과, 강우강도가 0에서 20 mm/hr로 높아질 경우 안전율이 4.7에서 1.5로 낮아지는 것으로 분석되었음
- 2) 안전율 하락폭은 체체의 규모에 영향을 받으며 체체의 규모가 작을수록 안전율이 크게 낮아지는 것으로 나타났는데 기후변화로 인한 높은 강우강도와 큰 홍수량을 가진 강우 사상이 예상될 경우 하류사면의 강우시 표면 침투를 방지하기 위한 대책이 필요할 것으로 분석되었음

라. 구조안전성 재검토

- 1) 저수지의 구조 안전성을 분석한 결과 전체적으로 전도에 대한 안전율이 6.0 이상으로 안전성이 확보된 것으로 평가되었으며 지지력에 대한 안전율은 3.0 이상으로 안전성을 충분히 가지고 있다고 평가되었음
- 2) 활동에 대한 안전율은 2.0 미만으로 평가되어 안전성이 상대적으로 낮은 것으로 분석되었음

V. 농업생산기반시설 안전성 분석기술 개발: 제5장

- 가. 본 연구에서는 시설의 안전성을 수리/수문 안정성, 지반안정성, 구조적 안정성의 항목으로 나누어 분석하고, 그 결과를 통합하여 단일 지수로 나타낼 수 있도록 평가 단위를 도입하였음 (기대피해액 단위)
- 나. 농업생산기반시설의 안전성은 홍수피해시, 지진시 체체붕괴, 평상시 체체붕괴 등의 각기 다른 세가지 재해에 대해 입는 피해를 통해 각 재해를 대상으로 시설의 파괴 및 붕괴에 따른 기대값, 즉 기대피해액을 기준으로 재해의 위험도를 평가하여 서로다른 사상을 통합적으로 판단할 수 있게 하였음
- 다. 각 단위 시설의 붕괴에 따른 피해 기대값을 통하여 단위 시설의 상대적 취약성을 분석할 수 있으며 각 시설에 대한 보수보강효과는, 보수보강에 따른 취약성의 개선으로 나타낼 수 있음

VI. 농업생산기반시설 통합안전성 관리지표 개발: 제6장

- 가. 농업생산기반시설은 설치년도에 따라 설치목적과 안전에 관한 사업기준이 상이하야 시설물에 따라 다른 설계기준을 고려하여 시설물의 안전성을 분석하고 이를 비교할 수 있도록 통합안전지수를 개발하였음
- 나. 통합안전지수는 기대피해액을 정규화과정을 통해 1.0에서 5.0 사이의 지수로 변환하여 시설물의 안전성을 평가하였으며, 안전성 평가에는 시설물의 손괴에 따른 하류부의 예상 피해를 반영할 수 있도록 관리지표를 개발하였음
- 다. 환경변화와 사회변화를 고려하여 시설물의 안전성을 시뮬레이션이 가능하도록 통합안전성 분석 모듈을 개발하였으며 이를 통합안전성 관리시스템에 적용하였음
- 라. 개발한 통합안전성 분석방법을 적용하여 한강, 낙동강, 금강, 영산강의 4대강의 30여개 저수지에 대하여 수리/수문안정성, 제체안정성, 구조적 안정성을 분석하고 이를 통해 통합안전성지수를 산정하였음

VII. 농업생산기반시설 통합안전성 관리시스템 개발: 제7장

- 가. 본 연구에서는 시설물의 안전성을 하나의 단일한 수치로 파악하고 시설물의 취약 부분을 파악할 수 있는 통합안전성 관리시스템 (Integrated Safety System; ISS) 프레임워크(framework)를 개발하였음
- 나. 통합안전성 관리시스템 프레임워크를 바탕으로 웹기반의 시범 시스템을 개발하였으며 이를 본 연구의 연구대상 시설에 적용하여 시설물의 안전성을 분석하였음
- 다. 통합안전성 웹시스템은 개별 농업생산기반시설물의 안전성에 대한 데이터를 일관된 형태로 축적하고, 이들 데이터를 이용하여 시설물 재해에 대한 예상 피해액과 안전성지표를 자동으로 계산하여 관리자의 의사결정을 돕는 것을 목표로 개발하였음
- 라. 본 연구를 통해 개발한 통합안전성 관리시스템은 다음과 같이 구성하였음
- 1) 입력된 자료를 활용하여 통합안전성 산정 모듈에 의해 시설물의 안전성이 계산되고 그 결과가 그래프로 도시
 - 2) 입력된 자료의 결과를 곧바로 확인하고 그 결과를 다른 지역과 비교할 수 있도록 구성
 - 3) 시스템을 통해 어떤 항목에서 더 큰 위험에 노출되어 있는지를 도표를 통해 웹상에서 나타냄
 - 4) 홍수, 지진으로 인한 체체 파괴, 수위급강하로 인한 체체 파괴 등의 경우에 피해액이 어떤 요인에 집중되는지 관리자가 파악할 수 있도록 도표를 통해 웹상에서 나타냄
 - 5) 피해액 항목별로 계산결과를 그래프로 도시화하여 표현하고, 계산과정도표를 통해 확인할 수 있도록 시스템을 구성
- 마. 개발된 통합안전성 관리시스템을 이용하여 표본 농업생산기반시설의 기대피해액의 지수인 통합안전성 지수를 분석하였으며, 도시와 농촌의 지수를 비교한 결과 도시 지역은 평균 1.13인 반면, 농촌지역은 평균 1.33로 산출되어 농촌지역의 안전성이 도시보다 재해에 취약한 것으로 분석됨

VIII. 통합안전성 지수의 활용: 제8장, 제9장

- 가. 통합안전성을 통해 단위시설의 지수를 단일 단위로 나타냄으로써 각 기반시설 안전성 현황을 비교하고 파악할 수 있음
- 나. 시설물의 통합안전성 분석을 통해 시설물 간 안전성 비교가 가능하며, 지역별 취약시설을 선별할 수 있으며 이를 통해 우선보수시설을 분석하는 데에 본 연구에서 개발한 시스템을 활용할 수 있음
- 다. 항목별 안전성 지수를 통해 각 시설의 취약요소를 파악할 수 있으며, 보강에 따른 안전성의 변화를 모의함으로써 보수보강 사업의 효과를 분석하는 데에 활용할 수 있음
- 라. 지역 간 안전성 비교를 통해 도시 및 농촌 지역의 농업생산기반시설 설치지역의 안전성을 비교할 수 있으며 이를 통해 시설물의 유지관리 계획수립에 본 연구에서 개발한 관리시스템을 활용할 수 있음

IX. 제언

- 가. 시설물의 안전성을 통합안전성 지수를 통해 분석하는 기술이 정립되었으며, 자료확충을 통해 전국의 농업생산기반시설 안전성을 파악하여야 할 것임
- 나. 전국적 조사를 실시하고 안전성을 분석함으로써 시설물 안전성 위험지역과 우선 보수보강 대상 시설을 파악할 필요가 있음
- 다. 목표 안전성 지수를 설정하여 시설물의 유지관리 및 보수보강에 대한 장기투자계획을 수립하여야 할 것임

SUMMARY

1. Environmental change of agricultural infrastructures: Chapter 1, 2, and 3
 - A. Agricultural infrastructures in Korea are exposed to harsher climate conditions. Recently, days of torrential rains more than 80 mm per day increased to twice compare to 1970s' . However, most of the agricultural infrastructures are not designed or managed to deal with the worse condition. Furthermore, some of them are aged. Therefore, there should be a new plan which can deal with the climate change.
 - B. Many of the agricultural infrastructures should be repaired or replaced immediately. Reservoirs are representative agricultural infrastructures, and there are 9,154 registered reservoirs in South Korea. The 52 percent of the reservoirs are constructed before 1945, and they are not designed for the current climate condition.
 - C. The infrastructures are asked to deal with change of social needs. Over last few decades, water use patterns of our society is changing. People concerns about the environment more, and farmers idea of agriculture is changed to more market oriented.
 - D. Recently, inequality of life quality between urban and rural areas became an important issue. Therefore, an index which can measures the life quality must be considered.

2. Surveyed results and Database for safety analysis: Chapter 7.4, and Appendix A
 - A. In this research, we selected 30 reservoirs as sample sites among the 3000 registered reservoirs in Korean Rural Community Corporation.
 - B. The selected sites are classified with its rivers.
 - C. Database of researched sites are consist of basin data, reservoir design spec data, hydrologic data, soil data, and neighboring town data.
 - D. Integrated Safety Database is consist of disaster history, infrastructure & population data, and so on.
 - E. Database are designed to accept a new data and to expand new data type.

And a calculation system calculate Integrated Safety Index automatically with the data.

3. Revaluation of agricultural infrastructures in consideration of climate change: Chapter 4.

A. Climate change simulation

- i. We selected RCP 4.5 scenario which reflects Korean greenhouse emission reduce policy.
- ii. We simulated land use change in future with CLUE, but the result shows that change of CN and water permeability are not that huge to cause hydrologic change.

B. Hydrologic safety revaluation

- i. We revaluated flood control safety by HEC-HMS model and HEC-5 model.
- ii. Future climate data and land use change were considered to analyze the flood control safety.

C. Soil safety revaluation

- i. We analyzed soil safety of the dams in consideration of rainfall intensity and rainfall duration.
- ii. The result shows that greater rainfall intensity weakens the safety of dams.
- iii. The decline rate of the safety is affected by the dam size. Smaller sized dams affected more than bigger dams.
- iv. It tells us that there should be countermeasures for greater rainfall intensity

D. Structural safety revaluation

- i. Safety of spillways were revaluated by PRADTM

4. Development of agricultural infrastructure safety: Chapter 5

- A. In this research, we classified safety as hydrological safety, soil & ground safety, and structural safety. We analyzed the three type of safeties and

integrated them as one index.

- B. Agricultural infrastructures safety were calculated based on the expected value of failure.
 - C. The three safety can be expressed as indexes for comparison between deferent threats. A manager of a structure can figure out which threat is the most urgent thing.
5. Integrated Safety Index for agricultural infrastructure: Chapter 6.
- A. Standards for agricultural infrastructures differed by a structure' s designed year and purpose. We developed an Integrated Safety Index to compare different infrastructures' different threat.
 - B. Integrated Safety Index is presented as a number between from 1 to 5, and it can evaluate infrastructures' safety.
 - C. We developed an Integrated Safety Index analysis module to simulate infrastructures safety in consideration of social and environmental changes.
6. Integrated Safety System for agricultural infrastructure: Chapter 7
- A. We developed an Integrated Safety System (ISS) framework to represent as an index for different structures' safety.
 - B. The ISS system is web-based system. Selected sample reservoirs are analyzed with this system.
 - C. The purpose of the system is to collect data for structures safety as an organized form, and calculate expecting damage cost and safety index of a structure. A manager of the structure can be supported by the system for decision making.
 - D. ISS is consist of these below
 - i. Integrated Safety estimation module automatically calculate structures safety with the database.
 - ii. Results of the inputted data immediately, and the result can be compared with other structures.
 - iii. Most of data are shown as a responsive graphs to help users can figure out the most import and urgent issue for safety.
 - iv. Three type of threat for reservoir: flood, earthquake, and sudden

drawdown, were analyzed, and the results are shown as graphs for better decision support.

v. Every step of the calculation are shown as graph and tables to let an user can check the process.

7. Suggestion for Integrated Safety Index: Chapter 8, and 9

- A. Integrated Safety System (ISS) aims decision support for agricultural infrastructures' managers.
- B. ISS developed as a web-based system to collect structures' data and its neighboring areas' data in organized form. User of the system can easily access to database and edit data on web-browser.
- C. A user can compare different sites' safety. It helps the user to make priority of repair plan.
- D. ISS can be applied to simulate different plans. ISS can show simulated result of each plan, and it can be used as decision support system.
- E. ISS can shows the life quality inequality between urban and rural people based on safety index. This result can be applied for rural planning.
- F. ISS' s database can be expanded for better safety evaluation what includes a field investigation.

Contents

	Abstract	i
제1장	Introduction	1
	1. Backgrounds & Needs	1
	2. The Goal	7
	3. Research Scope	9
제2장	Agricultural Infrastructure Design & Management	12
	1. Change of Agricultural infrastructures Design and Management	12
	2. The Limitation of the Current Agricultural Infrastructure Management	24
	3. Importance of Secondary Impact of Disasters	41
제3장	Previous researches	49
	1. Climate Change & Disaster	49
	2. Infrastructure Safety Index	53
	3. Infrastructure Safety Management System	57
제4장	Revaluation by Integrated Safety	62
	1. Basic Concept of Integrated Safety	62
	2. Revaluation of Integrated Safety	64
	3. Hydrological Disasters	66
	4. Ground and Soil Related Disasters	81
제5장	Agricultural Infrastructur Safety Analysis	90
	1. Hydrologic Safety Analysis	90
	2. Ground & Soil Safety Analysis	115
	3. Structural Safety Analysis	133
	4. Dam Collapse Safety Analysis	151
	5. Integrated Safety Analysis	160

제6장	Integrated Safety Index & Model	176
	1. Life cycle cost considering Environmental Change and Deterioration of Structures	176
	2. Natural & Social Change Considering Environment	199
	3. Life Cycle Cost Considering Climate Change	210
제7장	Integrated Safety System (ISS)	213
	1. Integrated System Framework	213
	2. Agricultural Infrastructures' deterioration	228
	3. Structure of Integrated Safety System	234
	4. Integrated Safety System Database	245
	5. Applying and comparison of rural and urban areas	250
제8장	Agricultural Infrastructures Management Planning Guideline	253
	1. Hydrologic Management Guideline	253
	2. Landuse Management Guideline	260
	3. Structural Management Guideline	265
제9장	Suggestions of Integrated Safety Index	275
	1. Developement of region based social safety index	275
	2. Types of Field Study Data	279
	3. Application of Integrated Safety Index	288
제10장	Result	289
	References	294

연 구 성 과

[제5장] 농업생산기반시설 안전성 분석기술

■ Estimating design floods based on the critical storm duration for small watersheds	98
■ HEC-HMS와 HEC-RAS를 이용한 농촌 저지대 침수해석	99
■ 황룡강 유역 저수지군 하류하천 영향평가	101
■ RCP4.5 시나리오에 따른 IDF 곡선 분석; 우리나라 30개 저수지를 대상으로	107
■ Assessment of Flood Vulnerability Based on CMIP5 Climate Projections in South Korea	112
■ 압밀계수의 공간변동성에 따른 압밀도의 확률론적 해석	128
■ 저수지 제체 단면 형상 변화에 따른 안전을 및 침투유량 분석	131
■ BEM을 이용한 Plane Strain 구조물의 LevelIII 신뢰성해석	145
■ 컨볼루션 기법을 이용한 영역이 제한된 비정규 확률문제의 신뢰성 해석	148

[제6장] 통합안전성 관리 지표 및 모델 개발

- 분위사상법을 적용한 RCP 시나리오 기반 시군별 홍수 위험도 평가 109
- 감마분포의 형상계수 추정을 통한 혼합 네트워크의 확산 모형 개발 251
- Estimating regional productivity based on demographic structure
with artificial neural network 209

[제7장] 농업생산기반시설 통합안전성 관리시스템

- 요소독립성이 유지되는 반복해법에 의한 객체지향 유한요소모델 개발 227
- 연결성과 소통구조 모듈을 통한 차세대 범용 농업시스템 시뮬레이터
(GASS2)의 개발 252
- 통합안전성 지수 프레임워크 개발 175

목 차

	요약문	i
제1장	서 론	1
	제 1 절 연구 배경 및 필요성	1
	제 2 절 연구 목표	7
	제 3 절 연구 내용	9
제2장	농업생산기반시설 설계 및 관리 현황 및 문제점	12
	제 1 절 농업생산기반시설 설계/관리의 변화	12
	제 2 절 현재 농업생산기반시설 관리의 한계	24
	제 3 절 후속피해 관리의 중요성	41
제3장	국내외 연구동향	49
	제 1 절 기후변화와 재해대비	49
	제 2 절 기반시설 안전성 평가지수	53
	제 3 절 기반시설 안전성 관리시스템	57
제4장	통합안전성을 통한 시설물 재평가	62
	제 1 절 통합안전성의 기본개념	62
	제 2 절 통합안전성을 통한 시설물 평가	64
	제 3 절 수리/수문 관련 재해의 분석	66
	제 4 절 토질/지반 관련 재해의 분석	81
제5장	농업생산기반시설 안전성 분석기술	90
	제 1 절 수리/수문 안전성 분석기술	90
	제 2 절 지반안전성 분석기술	115
	제 3 절 구조안전성 분석기술	133
	제 4 절 제체파괴에 의한 피해 산정기법	151
	제 5 절 농업생산기반 시설의 통합안전성 분석기법	160

제6장	통합안전성 관리 지표 및 모델 개발	176
	제 1 절 환경변화 및 노후화에 따른 생애주기비용	176
	제 2 절 자연/사회적 환경변화에 대응하는 시설관리기술 .	199
	제 3 절 기후변화에 따른 통합안전성 및 생애주기비용	210
제7장	농업생산기반시설 통합안전성 관리시스템 (ISS)	213
	제 1 절 통합시스템 개발을 위한 프레임워크	213
	제 2 절 농업생산기반시설물 노후화 시뮬레이션	228
	제 3 절 통합안전성 관리시스템 구성과 사용설명	234
	제 4 절 통합안전성 DB 구축	245
	제 5 절 적용예 및 도시/농촌지역 비교	250
제8장	농업생산기반시설 유지관리 계획수립 가이드라인	253
	제 1 절 수리/수문 안전성 관리 가이드라인	253
	제 2 절 지반 안전성 관리 가이드라인	260
	제 3 절 구조 안전성 관리 가이드라인	265
제9장	농업생산기반시설 통합안전성지수 활용에 대한 제안	275
	제 1 절 지역기반 사회안전지수의 개발	275
	제 2 절 조사자료의 유형	279
	제 3 절 통합안전성 지수의 활용 및 제언	288
제10장	결론	289
	참고문헌	294

제 1 장 서 론

제 1 절 연구 배경 및 필요성

1. 연구 배경

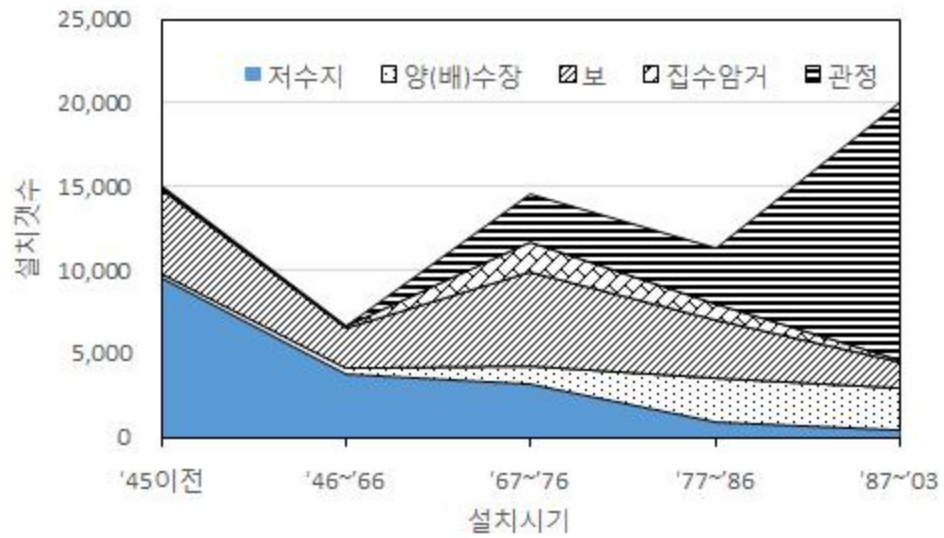
농업생산기반시설은 중소규모 관개사업에서 시작하여 농촌근대화를 위한 영농기반시설 조성 사업으로 규모를 확장하며 설치되어 왔다. 그러나 1990년대 전환기 농정시대를 지나면서 신규 시설의 건립과 함께 물관리 자동화 사업과 같이 기존 시설을 효율적으로 사용하고자 하는 시대적 요구가 생겼다. 2000년대에 이르러 동인도 쓰나미와 동일본 대지진과 같은 큰 천재지변을 겪으면서 이미 설치된 기반 시설의 안전에 대한 관심이 커지고 있다. 빠른 시간내에 효과를 얻기위해 건설을 중심으로 하던 정책에서 기반시설이 초래할 수 있는 재해를 예방하는 것을 중요시하는 정책을 고려해야 한다는 시대적 흐름으로 볼 수 있다.

기반시설의 안전과 관련한 주요한 문제는 기반시설을 구성하는 단위시설들이 서로 유기적으로 결합되어 있기 때문에, 단위 시설이 취약해짐에 따라 대부분의 시설이 안전하더라도, 전체 시스템 안정성이 취약할 질 수 있다는 점이다. 태풍 ‘루사’의 경우 장현댐 여수로 및 일부 집합부의 파손이 댐 전체에 피해를 야기한 바 있으며, 허리케인 ‘카트리나’의 경우는 뉴올리언즈 배수시설 침수로 도시 전체가 마비되기도 하였다.

시설물의 안정성이 떨어지는 이유는 상대적으로 덜 안전했던 설계기준, 설계기준을 넘어서는 잦은 기상이변, 시설 노후화에 따른 기능저하 등으로 생각할 수 있다. 먼저 설계기준의 변화를 살펴보면, 설계기준이 과거에 비해서 강화되고 있다. 이는 과거 시설물이 현재에 비해서 덜 안전하게 설계되었다고 볼 수 있다. 예로 2000년도에서는 설계홍수량으로 200년 빈도를 사용하였으나 2002년 이후에는 PMF(가능최대홍수량)으로 기준을 상향한 바 있다.

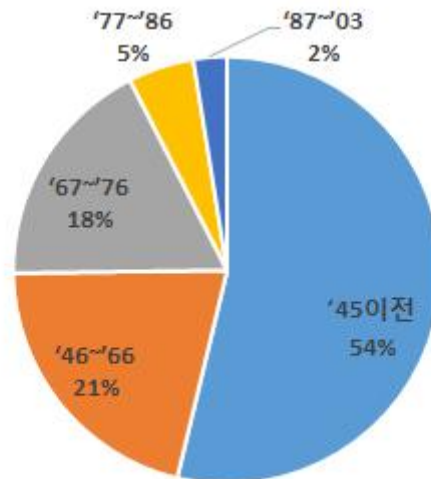
기후변화에 따른 사례로는 배수시설의 규모를 결정하기 위한 기준이었던 인천시의 20년 빈도 강우량은 1984년 기준으로 67.0 mm 이었으나 2007년 기준 값은 74.7 mm 로 예전 설계 값을 상회하였다. 태풍 ‘루사’때의 유출량은 313 m³/s 로 장현저수지 설계홍수량인 190 m³/s 을 초과하여 저수지가

붕괴되었다. 태풍 ‘곶파스’ 때는 서울시 빗물처리장용량인 75 mm/h을 훌쩍 넘는 260 mm/h 의 강수량을 기록한 바 있다. 구리시의 수택배수펌프장은 5년 빈도 집중호우에 대비하도록 설계되어 있으나 500년 빈도의 강우가 온바 있어 처리장의 용량을 넘는 강수량을 기록한 바 있다.



[그림 1-1] 준공년대별 수리시설물 현황

*자료: 농업생산기반정비사업통계연보(2004, 농림수산식품부)



[그림 1-2] 준공년대별 저수지 설치현황

*자료: 농업생산기반정비사업통계연보(2004, 농림수산식품부)

한편 시설의 노후화로 인한 안전성 저하를 우려하는 시각도 있다. [그림 1-1]을 살펴보면, 총 67,000여 개소 (2004년 기준)의 농업기반시설 중 약 53.6%가 1976년 이전에 설치되어 약 40년 이상 운영되고 있다. 특히 시설물 붕괴시 피해가 클 수 있는 농업용 저수지는 [그림 1-2]에 나타난바와 같이 54.8%가 1945년 이전에 축조된 것으로서 다른 시설에 비해서 노후화 정도가 더 심한 편이다.

농업기반시설물 안전에 대한 이러한 우려에 대하여 시설물 관리의 중요성이 부각된다. 자연재해로부터의 재산피해와 노후화로 인한 기능저하를 최소화하기 위해서는 시설물의 상태를 올바르게 평가하고, 지속적인 관리 계획 및 투자가 필요하다.

그러나 많은 관리 노력이 도시 대하천 주변으로 집중되어, 농촌 지역 농업기반시설물에 대한 관리·투자 노력이 부족한 실정이다. 이에 연평균 홍수 피해가 1974~1983 기간에는 1,700억원이던 것이 1994~2003 기간에는 1조7,100억원으로 10배 가까이 증가하였다. 또한 1940~1970년 기간에는 호우 재해 발생빈도가 5.3회 이던 것이 1980~1990년 기간에는 8.8회로 늘어나는 등 자연재해로 인한 피해가 증가하고 있다. 따라서 현재 농업기반시설에 대한 안정성 확보 방안 마련이 시급한 상황이다. 이에 따라 시설물에 대한 설계 재평가 필요하며, 기후변화에 따른 취약성, 직접피해와 예상 간접피해 등 객관적 자료 구축이 요구된다.

2. 연구 필요성

가. 기존시설물에 대한 사회적 기능확대

최근 국책 사업으로 진행되고 있는 새만금 간척지 조성 및 4대강 사업과 같이 다양한 시설물이 유기적으로 기능을 발휘하여 전체 시스템의 기능으로 이어지는 대단위 사업이 이루어짐에 따라 각 시설물의 안전진단 및 유지관리 시 통일된 기준으로 시행되어야 필요성이 대두고 있다. 관개 및 생활용수의 공급뿐만 아니라 기후변화와 환경, 지속가능한 농촌 및 농업의 발전을 위해서 농업생산기반시설에 새롭게 부여된 사회적 기능을 원활하게 수행하기 위해 현재 농업생산기반시설이 처해 있는 안정성 문제를 재평가

할 수 있는 기반 자료의 구축이 요구되고 있다.

나. 단위시설간의 연관효과를 감안한 유역관리

기후변화로 인한 이상기후 현상으로 집중호우가 빈번하게 발생하고 있으며 예측 불가능한 집중호우는 농업생산기반시설물의 피해를 일으키고, 이러한 시설물의 피해는 많은 인명 및 재산 피해를 야기하고 있어 이에 대한 예방과 대책이 필요한데 농업생산기반시설의 유지관리는 관리기관의 분화, 인력 부족 등 현실적인 문제에 직면하였고 상대적으로 작은 규모의 시설, 광역에 산재되어 있는 위치 조건과 같은 농업 수리시설물의 특성에 따라 체계적인 유지관리에 어려움을 겪고 있어 농업 수리시설의 유지관리가 시설물의 설치 못지않게 그 중요성이 부각되고 있다.

다. 유지관리비의 증가에 대한 대비

농촌용수개발사업과 같은 대규모의 투자사업은 단기에 많은 초기비용이 투입되는 반면 투자에 대한 효과는 장기간에 걸쳐 상대적으로 적게 발생하는 사업특성으로 인해 유지관리보다 초기투자비용이 주요 관심사였으나, 최근 원자재와 인건비의 상승 등으로 인한 보수·보강 및 유지관리 비용이 증가함에 따라 시설물의 유지관리에 대한 관심이 커지고 있다. 농업생산기반시설의 경우 초기건설 후 지속적인 유지관리가 수행되지 않을 경우 시설물은 계획을 초과하는 대규모 보수·보강을 하게 되거나 심지어 설계한 수명을 채우지 못하고 기능을 상실하게 되는 문제점이 발생할 수 있으며 이에 따라 해외에서도 시설물의 운영 및 유지관리를 위한 최적 계획·설계 및 적정유지 관리에 많은 노력을 기울이고 있으며 그에 대한 관리도구로서 가치관리(Value Management; VM), 위험도관리(Risk Management), 자산관리(Asset Management)등과 같은 체계적인 관리기법을 개발하여 사용하고 있다.

라. 노후시설의 안전관리 대책수립

농업생산기반시설은 안전 및 유지관리수준에 따라서 노후화의 진행속도

가 달라지거나 시설의 수명이 증대될 수 있으므로 시설물의 안전관리와 보수, 보강 등의 유지관리체계를 구축하는 것이 필수적이다. 구조물에 따라 사용 중의 환경조건이 구조물별로 서로 다르기 때문에 손상현상도 구조물별로 서로 다르게 나타나며, 손상의 원인도 서로 다르게 나타나는데, 우리나라 농업용 저수지 제방의 대부분을 차지하고 있는 필댐의 경우 그 결함의 원인이 여유고 부족(28%)과 침투누수(32%)인 경우가 전체의 60%에 이를 정도로 높아 안정성 재검토와 보수·보강 계획이 필요한 실정이다.

현재 4대강 사업의 일환으로 기존 농업용 저수지 체체의 단면 확대를 실시하여 필요 수량 및 홍수량 증가로 인한 여유고 부족 문제를 해결하고 있으나 기존 체체에 새롭게 성토를 실시할 경우 체체의 안정성 조건이 변화하게 되어 새로운 안정성 검토가 필요하며, 기존 체체의 경우 체체의 안정성 평가를 위하여 상황 변화에 따른 사면의 활동 안정성 평가, 지속적인 침투 누수 안정성 등에 대한 분석이 필요하다. 농업생산기반시설 중 체체의 안정성 분석을 위해서 체체 기초지반에 대한 조사가 필요하며 체체의 재료로 사용된 사석과 토사의 기본적인 물리적, 역학적 성질에 대한 분석이 필요하므로 종합적인 농업생산기반시설 안정성 파악을 위하여 구조물의 지반과 토질에 대한 체계적이고 정확한 분석할 수 있는 시스템의 개발이 필요하다.

다. 생애주기비용(LCC)기법 적용의 필요성

한정된 예산으로 시설물을 관리·제공해야 하는 상황에서 편익을 최대한 늘리기 위해서는 적절한 안전 및 유지관리수준을 도출할 수 있는 평가수단이 마련되어야 하며 이를 위해서는 운영 및 유지관리비용에 대해 고려할 수 있는 방안이 필요하며, 이를 위해 LCC(Life Cycle Cost) 분석기법을 통한 운영 및 유지관리비용 및 유지관리체계 개발 및 안전관리 시스템을 구축이 필요하다. 농업생산기반 시설물에 대한 사업추진시 사업의 타당성 평가방법의 전환과 설계단계에서 부실하거나 과도한 설계를 방지하고 시설물의 성능향상과 공사비 절감 및 비용/편익을 극대화 할 수 있는 합리적인 분석 기법의 개발 및 이를 통한 농업생산기반시설 안전관리시스템의 구축이 필수적이다.

최근 건설사업 진행과정의 예산낭비 요인과 비효율적인 측면을 제거하여 생산성을 향상시키고 효율성을 제고하기 위한 대안으로 생애주기 전반의 원가절감 측면을 고려한 VE/LCC의 도입 필요성이 커지고 있음에도 불구하고 현행 농업생산기반 시설물에 대한 건설단계에서 객관적이고 체계적인 절차 없이 전문가들의 경험에 의존한 의사결정이 이루어지고 있는 실정에서 VE/LCC분석기법의 도입을 통한 안전관리체계의 구축 및 농업생산기반 시설 안전관리시스템의 개발이 필요하다. 새롭게 구축된 농업생산기반시설의 자료를 토대로 네트워크를 이루고 운영되고 있는 개별 시설물의 안정성을 상호 비교가 가능한 수치적 지표로 표현할 수 있어야 하고, 전체 시스템의 안정적 운영을 위해 농업생산기반 시스템을 구성하는 전 구조물에 적용 가능한 통일된 안정성 평가체계의 개발이 필요하다.

바. 시설관리 통합시스템의 필요

농업기반시설을 안전하게 관리하기 위해서는 다양한 위해 요소를 파악하고, 이를 객관적으로 평가하여, 적절한 대응전략을 수립할 수 있는 체계가 중요하다. 이를 위해서 농업기반시설과 관련된 외부 요인과 내부 요인을 정립하고, 이들의 변화를 파악해야한다. 또한 변화에 적응하지 못했을 경우, 재해와 같은 파국이 발생하게 되는데, 사례 분석을 통해 위험정도를 가늠할 수 있어야 할 것으로 판단된다. 그리고 현재 상태는 과연 어느정도 안전한지에 대한 정량적이고 객관적인 평가가 이루어져야하며, 분석 과정에서 사용된 많은 자료와 분석을 통해 도출된 자료들을 효과적으로 저장하여 의사결정에 반영할 수 있도록 정보관리 시스템이 필요하다.

먼저 외적 요인으로 기후변화, 사회변화, 수요변화 등과 같은 주변 환경의 변화를 파악할 필요가 있다. 외적 요인에 의해서 농업기반시설이라는 시스템이 영향을 받게 되고, 취약한 일부 단위 시설의 붕괴가 전체 시스템에 영향을 줄 수 있기 때문에 외부 요인의 변화를 파악하는 것이 중요하다. 한편 노후화와 설계 관리방법의 변화와 같은 내부 요인 역시 중요하게 살펴볼 필요가 있다. 내부 요인은 외부 충격에 의해 시스템이 얼마나 강건하게 유지할 수 있는지를 평가할 수 있기 때문에 중요하다. 또한 내부 요인은 외부 요인과 달리 인위적으로 개선할 수 있기 때문에 개선 방법과 개

선 가능성 등을 평가하는 데 주요한 지표가 될 수 있다.

사. 2차피해의 확대 예방

외부 요인과 내부 요인을 파악하고 농업기반시설을 잘 관리하더라도, 100% 안전을 보장할 수는 없다. 그럼에도 불구하고 보다 철저히 예방하고, 피해 발생을 최소화할 수 있는 대책 수립을 위해서는 다양한 재난 사례를 통해 시스템이 붕괴하였을 때 예상되는 피해와 시설 파괴에 따른 2차 피해와 그 원인들을 파악할 필요가 있다.

앞서 파악한 외부 요인과 내부 요인의 변화를 바탕으로 서로 상이한 내구연한을 지닌 시설들을 현재 시점으로 재평가함으로써 시설물의 안정성을 객관적으로 파악하고, 앞으로 얼마나 유지할 수 있을지, 그리고 유지하기 위해서는 얼마나 보수보강을 해야 하는 지에 대한 정량적인 분석이 필요하다.

지속가능한 시설 관리를 위해서는 조사된 여러 가지 요인과 단위 시설에 대한 분석결과를 효과적으로 관리할 필요가 있다. 이를 위해서 자료를 효율적으로 저장할 수 있도록 데이터베이스를 설계해야 하며, 설계된 데이터베이스에 자료를 축적하기 위한 방안이 필요하다.

제 2 절 연구 목표

본 연구과제는 농촌개발의 타당성을 정량적으로 분석할 수 있는 신뢰성 지수를 개발하고 이를 적용 및 활용할 수 있는 가이드라인과 시범시스템을 개발하는 것을 과제의 최종목표로 한다. 이를 위해 4대강 농업생산기반시스템 현황조사, 기후변화에 따른 농업생산기반시설 안정성분석기술 개발, 농업생산기반시스템 통합 안정성 관리지표 개발 및 4대강의 농업생산기반시스템의 통합 안정성 관리기술/가이드라인 개발을 주요 연구목표로 설정하였다.

이러한 연구목적을 달성하기 위해 재해발생시 직접적인 1차피해에 이어 발생하는 간접적인 2차피해를 고려하는 설계의 중요성을 밝히고 이를 설계

에 반영할 수 있는 방안을 마련하는 것을 목표로 설정하고 이를 위해 카트리나, 후쿠시마 등의 사례분석을 통해 2차피해의 중요성을 분석하였다. 또한 기후변화, 사회변화, 수요변화 등의 환경변화에 대응하기 위해 농업생산기반시설의 설계기준이 어떻게 변화하였는지를 비교 분석하는 것을 두 번째 목표로 설정하여, 지난 30년간 농업생산기반시설 관련 사업기준을 살펴봄으로써 시설물의 설치목적의 변화, 설치목적에 따른 사업기준의 변화 및 새로운 수요에 대응하기 위한 시설계획의 변화를 분석하였다. 아울러 현재의 시설물의 안전성이 변화된 환경에 대응할 수 있는지를 재평가하는 것을 목표로 설정하였다. 이를 위해 지난 최근까지의 기상자료를 통해 변화된 수문환경을 분석하고 이를 활용하여 농업생산기반시설의 수문, 토질 및 구조 안전성을 재검토하였다.

농업생산기반시설의 안정성 확보를 위하여 수행하는 보수보강 사업은 그 예산이 한정되어 있기 때문에 어떤 보수보강 사업을 할 것인지, 어느 시설물부터 우선적으로 하는 것이 효율적인지 분석하는 것이 어렵다. 따라서 본 연구에서 제안하는 통합안전성 평가기법은 다양한 재해를 동일한 기준으로 비교할 수 있도록 개별 재해의 단위를 발생확률과 그 피해액이라는 조건으로 통일하고 서로 비교할 수 있도록 단일단위로서 이를 평가하고 수치화하여 이를 통해 농업생산기반시설의 안정성에 영향을 미칠 수 있는 재해 중 어느 재해가 특히 해당 시설물에 위협하게 작용하고 있는지, 다른 시설물과 비교했을 때 그 위험도는 얼마인지를 비교할 수 있도록 그 방법을 고안하는데 목표를 두었다.

이러한 연구목적을 달성하기 위해 카트리나, 후쿠시마 등의 사례분석을 통해 재해에 따른 1차피해, 2차피해를 정의하고 이를 농업기반 시설의 설계에 직접적으로 반영할 수 있는 방안을 마련하고자 하였다. 지역 내 이수 및 치수와 관련된 수문 안전성, 토질안전성, 구조안전성이 포함된 시설안전성과 시설물과 연관된 하류부의 특성을 반영한 지수를 산정하고 재해발생시 시설물의 안전성을 간단한 지수로 표현하였다.

통합안전지수는 단위 및 기준이 다른 여러 항목을 하나의 항목으로 통합하여야 하므로 고려하고자 하는 요소를 단일한 단위로 치환하기 위해 확률이론에 기반을 둔 신뢰성지수를 통해 통합안전지수를 개발하였다.

또한 이러한 단일지표를 통해 시설물의 안전성을 평가할 수 있도록 농업 생산기반시설의 안전성을 평가하는 기술을 개발하는 것을 목표로 하였다. 이들 안전성을 분석하는 기술 개발을 위해 수리/수문, 토질 및 구조적 안전성을 평가하고 이를 하나의 지수로서 통합안전성을 분석하는 기술 개발을 목표로 설정하였다. 또한 생애주기분석을 통해 환경의 변화 혹은 정책적, 사회적 변화와 같은 상황변화에 대응하여 시설물의 적정 안전성을 확보하는 최적 방안에 대한 관리기술을 개발하고자 하였다. 개발한 기술을 실제 시범지역에 적용하여 봄으로써 기후변화, 안전기준의 변화 등 상황변화에 따른 농업생산기반시설의 관리 방안에 대한 가이드라인을 제안하는 것을 목표로 설정하였다.

아울러, 본 연구에서 개발한 통합안전성 분석기술 및 관리모델을 더욱 효과적으로 활용하여 농업생산기반시설이 설치된 지역의 안전성을 보다 효과적으로 관리할 수 있는 방안에 대한 제안하는 것으로서 본 연구의 목표를 더욱 효과적으로 수행하고자 하였다.

제 3 절 연구내용

본 연구과제는 객관적이고 정량적으로 농업생산기반시설을 포함한 지역의 안전을 개량화하기 위해 다양한 분야의 안전 관련 요소에 대한 자료를 수집하고 이들 자료를 통해 안전관련 지수를 포괄적으로 고려한 통합 안전지수를 개발하고자 하였다. 또한 개발한 통합안전성 지수의 분석기술 및 관리기술을 개발하고 이를 관리할 수 있는 시범시스템의 개발을 통해 농업생산기반시설의 통합안전성 관리 가이드라인을 마련하고자 하였다.

이를 위해 4대강 농업생산기반시스템 현황조사, 기후변화에 따른 농업생산기반시설 안정성분석기술 개발, 농업생산기반시스템 통합 안정성 관리지표 개발 및 4대강의 농업생산기반시스템의 통합 안정성 관리기술/가이드라인 개발의 주요 연구목표 별로 다음과 같은 세부 연구를 진행하였다.

첫째, 4대강 농업생산기반시스템 현황조사를 위해 기후변화 및 사회변화에 따른 농업생산기반시설 안정성 재검토를 위한 농업생산기반시설 현황자료 수집하는 연구를 진행하였다. 이를 위해 조사팀 구성, 조사 대상지역 선

정 및 현장조사를 통한 자료수집, 설치년도, 제원, 관리현황, 설계기준 등의 농업생산시설 주요 인자 조사 및 농업생산기반시설의 안정성 분석을 위한 관련현황 조사항목 선정하는 세부 연구를 수행하였다. 또한 연구대상 농업생산기반시설의 안정성 분석을 위한 기초자료 수집 및 데이터베이스 구축을 위해 농업생산기반시설 주요 안정성 관리인자 도출, 농업생산기반시설 안정성 분석을 위한 조사표 설계 및 안정성 분석을 위한 기초자료 수집 및 전산화를 통한 DB 구축의 세부 연구를 수행하였다.

둘째, 기후변화에 따른 농업생산기반시설 안정성분석기술 개발을 위해 기후변화, 사회변화에 따른 농업생산기반시설 안정성 재검토 및 제방, 취수시설, 홍수배제시설 등의 단위시설이 복합된 농업생산기반 시스템의 통합 안정성 분석 및 농업생산기반시설에 적용 가능한 가치기반 확률적 생애주기비용(VE/PLCC) 분석기법 개발의 연구를 수행하였으며 이를 위해 네트워크 분석을 통한 시스템 취약부분 분석, 확률 신뢰성을 통한 개별시설의 안정도 통합, 시스템시물레이션을 통한 시스템의 안정성 분석틀 제안 및 기후변화에 따른 농업생산기반시설 수문, 구조 및 토질 안정성 분석 기술 개발의 세부 연구를 진행하였다.

셋째, 농업생산기반시스템 통합 안정성 관리지표 개발 위해 농업생산기반시스템 안정성을 상호비교 가능한 수치로 나타낼 수 있는 안정성지수 개발 연구를 수행하였다. 이를 위해 수문, 구조 및 토질 안정성분석을 통해 개별시설의 안정도 평가체계 분석 및 신뢰성 해석에 기반을 둔 농업생산기반시설 시스템 안정성 평가체계 개발의 세부 연구를 진행하였다. 또한 제방, 취수시설, 홍수배제시설 등 농업생산기반 시스템을 구성하는 전 구조물에 적용 가능한 통일된 안정성 평가체계 개발을 위해 수문, 구조 및 토질 안정성 평가기준 및 체계 제시, 농업생산기반시설의 안정성을 단일척도로 평가하는 평가체계 제시 및 안정성지수를 통한 안정성 평가체계와 기존 평가체계 비교의 세부 연구를 진행하였다.

마지막으로 4대강의 농업생산기반시스템의 통합 안정성 관리기술 개발을 위해 기후변화 및 가치평가를 고려한 가치기반 확률적 생애주기비용모델과 최적화기법을 통한 최적유지관리계획 수립방안 분석을 진행하였으며 이를 위해 생산기반시설 안정성 및 유지관리비용의 불확실성 요인 분석 및 설정

된 목표에 따른 최적 운영방안 및 보수보강방안 분석의 세부 연구를 진행하였다. 또한 기후변화를 고려한 농업생산기반시설의 안정성지수 달성목표를 설정하고 이를 통한 농업생산기반시설 안정성 평준화방안 제시를 위해 생애주기비용모델을 통해 구조물의 노화를 반영한 안정성 분석 및 각 생산기반시설의 안정성을 동일수준으로 유지하기 위한 방안 분석의 세부 연구를 진행하였다.

제 2 장 농업생산기반시설 설계 및 관리 현황 및 문제점

제 1 절 농업생산기반시설 설계/관리의 변화

1. 시설물 설치목적의 변화

농업기반시설은 전후 이양용수공급 중심의 중소규모 관개사업을 중심으로 농업용수 공급을 목적으로 설치되었다. 농업용수 수요에 대해 일정부분 기여하던 농업기반시설은 1970년대를 거치면서 항구적 한해대책사업이나 농업용수 10개년계획 등과 같이 농촌근대화촉진법을 기반으로 전천후 영농기반 구축이라는 보다 확장된 목적을 갖고 건설되었다. 최근에 이르러서는 농업 진흥만을 목적보다 지역환경개선과 같이 주변 지역과 연계하여 다양한 기능을 요구받고 있다.

이러한 흐름은 농업기반시설을 담당하는 한국농어촌공사의 변천과정을 통해서 간접적으로 확인할 수 있는데, [표 2-1]과 같이 정리하였다. 한국농어촌공사는 크게 3개의 기관이 통합된 기관으로서 농지개량조합, 농지개량조합연합회, 농업진흥공사로 구성되었었다. 최초로 설립된 기관은 농지개량조합으로 1906년 대한제국 탁지부령으로 수리조합 조례가 제정되어, 1908년 전북 옥구 서부수리조합이 최초로 설립되었다. 특히 50년대에 많은 수리조합이 설립되었으며, 소규모 수리개발을 일부 병행하였으나, 대체로 수리시설의 공동이용과 유지관리를 목적으로 설립된 유지관리 전문기구였다.

농지개량조합연합회는 1938년 조선민사령으로 설립된 조선토지개량협회에서 근원을 찾을 수 있으며, 수리조합의 연합회로서 다양한 이름으로 개칭되었지만, 주요 업무는 농지개량사업의 설계, 시공을 담당하였다. 1970년 농촌근대화촉진법이 제정되면서, 최종적으로 농지개량조합연합회라는 이름으로 개칭되었으며, 시공 기능은 농업진흥공사로, 농지개량조합에 대한 지도/감독 기능은 정부로 이관되었다. 이후 민법상의 순수한 농지개량조합의 연합체로서 설계 업무만 담당하게 되었다.

농업진흥공사는 1970년 농촌근대화촉진법의 제정으로 설립된 기관으로 현재 한국농어촌공사의 전신이기도 하다. 수리시설의 유지관리와 기반정비와 관련된 기술용역 업무를 전담하는 기술용역 기업으로서, 설립 이전 소규모 수원공 개발에서 대단위 관개지구 개발 사업으로 전환되었다.

앞서 3개의 기관은 2000년 농업기반공사 및 농지관리기금법을 통하여 농업기반공사로 3개 기관이 통합되어 농업기반시설을 관리하며, 농업인의 영농규모적정화를 촉진하는 농업기반 종합 관리 기관으로 자리매김하였다. 2005년 한국농촌공사로 개칭되면서 농업이라는 산업 중심 업무에서 농촌이라는 공간 중심 업무로 외연을 확장하였다. 2008년에는 한국농어촌공사 및 농지관리기금법으로 근거법이 수정됨에 따라, 어촌을 포함하는 지역 자원의 유지관리, 정비 업무를 통해 농어촌의 경제·사회 발전에 기여하고 있다.

[표 2-1] 농업생산기반정비사업 추진 주체의 시대적 변화

시기구분	농조	농조연	농진공	비고
수리조합 태동기 (1906~38)	수리조합조례 (1906. 4) 조선수리조합 령(1917. 7)			- 연합회·공사의 미태동기
수리조합 연합회 및 공사 태동기 (1938~50)		조선토지 개량협회 (1938. 5) 조선수리조합연합회 (1940. 7) 조선농지개발영단(1942.12) 대한수리조합연합회 (1949. 7) 조선농지개발영단 해산 (1950. 6)		조합감독수단 및 공공적인 기술용역업체로 서 연합회와 영단 탄생
토지개량조 합난립기 (1950~60)				기반정비 관련 공공사업 부진
조직 미분화기 (1961~69)	토지개량조합 (1962. 1)	토지개량조합연합회 (1962. 1) 토지개량조합연합회 해산 (1970. 1)		토련이 조합의 중앙회와 기술용역업체로 존재
3개 기관 분화와 공사의 전문화기 (1970~99)	농지개량조합 (1970. 2) 1988년 조합비 인하 조치로 농조자립기반 상실	농지개량조합협회 (1971.9) 농지개량조합연합회 (민법:1973. 9) 농지개량조합연합회 (농근법:1978. 4)	지하수개발공사 (1969. 1) 농업진흥공사 (1970. 2) 농어촌진흥공사 (1990. 2)	농조중앙회기능 중단기 (조합의 지도·감독 기능을 정부(농림부, 도)가 수행)
3개 기관 통합 (2000~현 재)	농업기반공사로 3개 기관 통합 (2000, 농업기반공사 및 농지관리기금법) 한국농촌공사로 개명 (2005) 한국농어촌공사로 개명 (2008)			시설 관리 및 지역개발 업무 통합

이러한 관리 기관의 변화와 기관의 목적 변화는 농업기반시설의 목적 및 기능 변화를 초래하고, 이는 시설마다 설계 기준이 달리 적용되어 왔음을 반

증하고 있다. 또한 산업의 변화로 인해 농촌사회는 더 이상 농업에만 의존할 수 없게 되면서, 농업기반시설에 대해서 단순히 농업 생산성 향상을 위한 수단에서 거주공간의 가치를 높일 수 있는 생활환경개선을 지원하는 기반으로 요구가 확장되고 있다. 농업용수는 더 이상 농업을 위한 수자원이 아니라, 지역 환경 개선을 위한 수자원의 기능을 수행하기를 요청되고 있으며, 이러한 요구에 적절하게 대응하고 일본의 사례를 통해서 살펴보고자 한다.

일본은 농업용수시설이 농어촌의 유일한 수원인 경우가 많은 까닭에 예전부터 농업용수의 여유분을 생활용수로 사용하거나, 제설 혹은 방화용수와 같은 안전용수로 사용하였다. 심지어 수로에 농업용수를 계속 흐르게 하여 경관적 기능, 환경적 기능을 발휘토록 한 경우도 있다. 이러한 농업용수의 공익적 기능을 최대화하여 농업인뿐만 아니라 지역주민이 모두 그 혜택을 입을 수 있도록 하고 농업용수 관리에 대한 책임도 지역적으로 공유하려는 움직임이 1990년대 후반부터 본격화되어 현재 일본에서는 지역용수 기능증진사업과 같은 정책들이 꾸준히 시행되고 있다. 대표적인 사례로 비와코 지역용수기능증진 사업을 살펴보자. 비와코 지역용수기능증진 사업으로 인하여 직접 효과로 ① 경관·생태계 보전친수 기능, ② 제설용수 기능, ③ 방화용수 기능, ④ 생활용수 기능, 간접효과로 ① 취락 기능의 활성화, ② 농업수리시설에 대한 주민활동 (유지관리) 지원, ③ 농업수리시설 갱신 사업에 대한 주민의 이해 촉진 등이 이루어진 것으로 평가받고 있다.

일본의 지역용수기능증진 사업과 유사하게 우리나라에서도 1990년 “농어촌발전특별조치법”에서 처음으로 “농어촌용수”라는 개념이 도입되어 농어촌용수합리화계획의 수립을 의무화하고 농어촌용수구역을 지정, 고시토록 하고 있다. 농어촌용수합리화계획은 수리시설 및 수리답 개발 못지않게, 현재의 시설을 유지, 보전함으로써 지역 사회 및 환경을 관리한다는 데 의의가 있다. 농촌의 혼주화, 환경적 가치에 대한 인식이 증대되고 있는 상황에서, 농업용수의 비농업적 기능에 대한 수요가 증대는 필연적이다.

기관의 변천사를 통해서 지금까지의 농업기반시설의 기능 변화를, 그리고 일본 사례를 통해서 앞으로 농업기반시설에 기대하게 될 미래 변화를 살펴보았다. 이러한 변화는 시설의 기능이 한 시점에 머무를 수 없고, 지속적으로 관리되고, 시대에 따라 재평가되고, 유지를 위한 관리업무가 종합적

으로 이루어져야 함을 요구한다.

2. 설치목적에 따른 사업기준의 변화

농업기반시설은 다양한 목적과 다양한 단위 시설들로 구성되어 있다. 따라서 목적에 따라서, 시설에 따라서 설계 기준이 다를 수 밖에 없는데, 농업기반시설로 통합하여 관리하기 위해서는 서로 다른 기준을 파악할 필요가 있다. 먼저 농업용수 관리 측면에서는 크게 치수 부문과 이수 부문으로 나누어 살펴볼 수 있다. 치수 부문은 홍수에 대비한 설계 기준으로서 [표 2-2]에 정리한 바와 같이 시간이 흐름에 따라 강화되고 있다. 사회적 인식의 변화와 기술 발전으로 인하여, 1968년 100년빈도 확률강우량이었던 설계기준이 1982년에는 200년빈도 확률강우로, 2002년 이후에는 최대가능홍수량으로 강화되었다.

[표 2-2] 저수지 설계홍수량 변천과정

구분	유입설계 홍수량 빈도	설계기준
1968년	100년빈도 확률강우량의 1.2배와 기왕최대강우량이 100년빈도 확률강우량보다 클 때는 기왕최대강우량의 1.2배	토지개발사업 계획설계기준 [월담편]
1982년	200년빈도 확률홍수량의 1.2배	농지개발사업 계획설계기준 [담편]
2002년	200년 확률홍수량, 기왕의 최대홍수량, 지역 최대 홍수량 중 큰 값을 설계홍수량으로하고 필담에서는 20%를 가산 붕괴에 따른 인적, 물적 피해가 크게 예상되는 지구는 가능최대홍수량	농업생산기반정비 사업계획설계기준 [필담편]
2004년	200년 확률홍수량, 기왕의 최대홍수량, 지역 최대 홍수량 중 큰 값을 설계홍수량으로하고 필담에서는 20%를 증가시킨 유량을 기준 초과시 인적, 물적 피해가 크게 예상되는 경우에는 가능최대홍수량과 비교하여 큰 값을 적용	농업생산기반정비 사업계획설계기준 [필담편]

이수 측면에서는 수리담 개념으로 설명할 수 있다. 수리담은 수리안전담

이라는 용어와 혼용하여 사용되는데, ‘수리시설로 인하여 관개 혜택을 받는 답’으로 정의되며, 수리안전답이란 ‘수리답 중에서 내한능력이 10년 빈도 이상으로 설계된 답’으로 정의되어 사용되고 있다. 이러한 용어는 농업기반시설이 농업용수 공급을 위하여 한발 대비 10년 빈도로 설계됨을 의미한다. 외국의 경우 수자원계획 시 가뭄에 대비하여 10년빈도에서, 100년 빈도로 다양하고, 과거 최대 한발량을 이용하기도 한다. 이러한 사례는 농업용수가 지역용수로 발전하는 경우, 농업기반시설에 대한 요구 설계치의 상향설계치를 가늠해 볼 수 있다.

[표 2-3] 외국의 물공급 안전도

국 가	수자원계획 대상 가뭄	문 헌
미 국	과거 최대	○수자원개발을 위한 사업계획(미개척국, 1971)
	100년 1회	○미국동부지역 (Water Resources Management, Grigg, 1996)
	20년 1회	○캘리포니아 수자원계획(캘리포니아 수자원국, 1998)
일 본	10년 1회 ~ 40년 1회	○신전국종합수자원계획(일본국토청, 1999) - 지역간 수자원 공급의 안전도가 상이하며, 적어도 10년 1회 가뭄에 대비하려고 하고 있음)
영 국	50년에 1회	○Wessex 물관리정보고(1985)
	과거 최대	○Anglian 물관리정보고(1985)
프랑스	10년 1회	○프랑스 수백서(1977)

앞서 농업용수의 이용측면에서 설계기준의 변화에 대해 살펴보았다면, 이번에는 농업기반시설의 다양한 시설에 대한 설계기준을 살펴보자. 농업기반시설을 구성하는 주요 요소로 댐과 하천을 들 수 있다. [표 2-4]는 미국의 댐 설계 빈도를 정리하였는데, 국내의 경우에도 이와 유사한 기준을 사용하고 있다. 댐의 규모에 따라, 댐 파괴 시 피해 규모에 따라서 설계빈도를 달리 설계하고 있음을 확인할 수 있다. 하천의 경우에는 [표 2-5]와 같이 기본적으로 하천의 법적 지위에 따라서 설계빈도가 결정되나, 도시지역이나 인구밀집지역을 지나는 지방하천의 경우에는 범람시 피해가 크므로 설계빈도를 200년빈도까지 상향할 수 있도록 법제를 제정해 두었다. 이렇듯 구성 요소간 설계 기준이 다를 뿐만 아니라 시설의 규모나 위치에 따라

서도 설계 기준이 다름을 충분히 인식하고, 관리시스템을 구성하여야 하겠다.

[표 2-4] 미국의 댐 설계빈도

구분	댐 및 저수지 규모		댐 파괴로 인한 인명 피해	설계빈도
	저수량(10 ³ m ³)	댐 높이(m)		
소규모 댐	61.5~1,230	8~12	적음	50~100년빈도
			상당	50% PMF
			막대	50~100% PMF
중규모 댐	1,230~61,500	12~30	적음	100년빈도 이상
			상당	50~100% PMF
			막대	100% PMF
대규모 댐	61,500 이상	30 이상	적음	50~100% PMF
			상당	100% PMF
			막대	100% PMF

주) 자료: 미국 National Academy of Sciences

[표 2-5] 하천의 설계빈도

하천 중요도	적용 하천범위	설계빈도	관리자	비고 (과거의 구분)
A	국가하천의 주요구간	200년빈도 이상	건교부장관	직할하천의 주요 구간 (주요도시 관류)
B	국가하천	100~200년빈도	건교부장관	직할하천의 기타 구간 (주요도시 지류)
C	지방 1급하천	80~200년빈도	광역단체장	지방하천, 도시하천
D	지방 2급하천	50~200년빈도	광역단체장	준용하천
E	소하천	30~50년빈도	기초단체장	기타하천

- 주) 1. 지방하천이 도시지역, 인구밀집지역, 국가기간시설이 위치한 지역인 경우에는 빈도를 상향할 수 있도록 상한선을 200년으로 조정
 2. 소하천은 하천법이 아닌 행자부의 소하천정비법의 적용을 받는 하천

지금까지 농업용수 설계의 변화, 시설 구성의 변화에 따른 기술적인 변화에 대해서 살펴보았다. 기술적인 변화 못지않게 사회적 요구도 눈에 띄게 변화하고 있다. WTO, FTA 등과 같이 농산물에 대한 시장개방이 확대되고 있어 국내산 농작물 소비가 감소하고 있으며, 국민들의 식습관 변화에 따른 작부체계 변동으로 농업용수의 수요가 변하고 있다. 논에서 밭작

물을 재배하는 빈도가 늘면서 사계절 관개의 필요성이 높아지고 있고, 발관개 수요가 늘면서 발기반정비사업지구를 중심으로 수리시설을 체계적으로 관리해야 할 필요성도 생겨났다. 농촌의 과소화와 농업인의 노령화는 농업용수의 관리용수량을 증가시키고 있으며, 한편 일부 관개지역은 농지의 감소로 농업용수 수요의 감소가 나타나기도 한다. 이러한 농업환경의 변화는 새로운 농업용수의 수요를 창출하고 있다.

새로운 농업용수 요구 중 하나로 하천유지용수가 있다. 하천유지용수량을 결정하는 설계기준은 하천의 정상적인 기능 및 상태를 유지하기 위하여 수요와 공급의 두 가지 측면을 모두 만족시키는 유량 정하는데, 자연적 요인인 평균 갈수량과 인위적인 요인인 환경보전유량 중에서 큰 유량으로 설계한다. 평균 갈수량은 자연 상태의 하천에서 갈수 시에 흐르는 수량으로 하천의 건천화를 방지하고, 최소한의 기능을 수행할 수 있는 유량이다. 평균갈수량을 결정하기 위해서는 과거 자연상태에서 관측한 유량자료를 매년마다 크기 순으로 나열하여 355일을 유지할 수 있는 갈수량 계열을 작성한 후 이를 평균하여 산출한다. 한편, 갈수량에는 평균갈수량 이외에 갈수량 계열을 빈도해석하여 10년빈도 갈수량을 채택하는 기준갈수량, 7일간 연속 유량을 구하여 평균한 후 가장 작은 평균유량을 그 해의 최저 7일 갈수량으로 하고 이 최소치계열의 10년빈도 갈수량을 채택하는 10년빈도 7일 갈수량 등이 있다. 이 중 평균갈수량이 가장 크고 그 다음이 기준갈수량이며 10년빈도 7일 갈수량이 가장 작은 특징이 있으며, 혼용하여 사용하기도 한다. 반면 환경보전유량은 주운, 어업, 경관, 염해 방지, 하구 막힘 방지, 하천관리시설 보호, 지하수위 유지, 동·식물 생태보호, 수질보전 등과 같은 9가지 기능을 종합적으로 고려하여 하천환경 보전을 위하여 설정하여야 하는 유량으로 정의한다. 산업의 고도화 및 도시화로 인한 오염물질의 대량 유출과 상대적으로 처리시설의 부족에 따른 하천수질 악화가 계속되고 있는 상황이 지속되어, 과거에는 염해방지 기능이 강하였으나, 현재에 이르러서는 오염방지용 희석용수의 기능이 부각되고 있다.

앞서 기술적 변화와 사회적 요구 변화에 대해서 살펴보았다. 이러한 설계기준의 변화는 필연적으로 다양한 기준을 종합적으로 판단하여, 지속적으로 관리해야 하는 필요성을 내포하고 있다. 농업기반시설의 관리기준의

변화에 대해서 좀 더 살펴보도록 하자.

우리나라는 해방 이후 1960년대까지 농업위주의 경제사회체제를 유지하고 있었으나, 1970년대로 넘어오면서“한강의 기적”이라 불리는 경제변혁의 시대를 맞이하여, 경제성장과 더불어 농업용 수리구조물의 관리 개념도 변화하였다. 기존의 농업용 관개용수를 공급하는 수리시설로서의 구조물에서 사회기반시설로서 인식이 전환되게 되었다. 1980년대는 시설물 노후가 심하여 1945년 이전에 설치된 시설이 38%에 달하고 개발위주의 추진으로 시설물 노후가 점진적으로 가속화 되어 수리시설물의 준공 후 경과년수에 따른 노후화, 설계기준의 강화 및 기상변화를 고려한 사회기반시설로서의 농업용 수리구조물의 보강이 절실히 필요하게 되었다.

이러한 문제점 해결을 위해 수리시설의 안전을 도모함은 물론 확고한 식량안보 차원의 농업생산기반을 구축하기 위해 정부는 농촌근대화촉진법 제158조 제3항을 근거로 농림수산부훈령 제641호(1986.11.10)에 의거 농지개량시설관리규정이 제정되었다. 농지개량시설관리규정에 따라 한국농어촌공사 내에 수리시설에 대한 기술진단, 기술지원을 수행하기 위해 수리시설관리단을 설치하여 현재의 정밀안전진단에 해당하는 기술진단을 실시하도록 하였다. 1986년 수리시설관리단이 설치된 이래 농업용 수리구조물 뿐만 아니라 각종 사회기반시설(교량, 터널, 항만 등)에 대한 정밀안전진단을 지속적으로 실시해 오고 있다.

하지만 성수대교 붕괴사건(1994.10.21)과 삼풍백화점 붕괴사고(1995.6.29)와 같은 대형 구조물의 붕괴사건으로 사회기반시설의 지진, 홍수 등 자연재해에 대한 성능향상의 필요성뿐만 아니라 현행 정밀안전진단만으로는 재해를 사전에 방지하기 어렵다고 판단하고, 보다 강화된 안전진단 방안을 마련하여, 취약한 시설은 사전에 보수·보강을 수행함으로써 국민의 생명과 재산을 보호하려고 하였다. 이에 따라 정부는 1995년에 「시설물의 안전관리에 관한 특별법」을 제정하였고, 농림부에서는 소관시설인 농업기반시설에 대해 안전 및 유지관리계획을 수립하고 이에 따라 안전점검 및 정밀안전진단을 실시하도록 「농어촌정비법」을 개정하였다. 한국농어촌공사는 「시설물의 안전관리에 관한 특별법」이 제정된 직후인 1995년 동법의 규정에 따라 안전진단전문기관으로 등록하여 현재까지 농업생산기반시설을 비롯한 중요

사회기반시설에 대해 안전진단을 시행해 오고 있다.

이후 정부에서는 재해로부터 국민의 생명과 재산을 보호하기 위해 각종 사회기반시설들의 재해방재를 위해 「자연재해대책법」, 「재난 및 안전관리 기본법」을 제정하였고, 시설물의 내진성능 향상을 위해 「지진재해대책법」을 제정하는 등 재해를 사전에 차단하기 위해 노력하고 있다. 한국농어촌공사는 「재난 및 안전관리기본법」에 따라 안전관리 전문기관으로 지정되어 있고, 공사관리 농업생산기반시설 (저수지, 방조제, 양배수장 등)이 동법의 규정에 의한 재난방지시설로 지정되었다.

지금까지 기술의 변화, 사회적 변화에 따른 설계 기준의 변화를 살펴보고, 이러한 설계 기준 변화에 따른 시설 관리 대책의 변화양상을 살펴보았다. 앞으로는 이러한 변화 뿐만 아니라 기후변화와 같은 자연적 변화에 대한 대응력이 중요한 이슈가 되고 있다. 최근 이상기후 현상, 특히 국지적인 집중호우, 심각한 가뭄 등이 동시에 발생하는 등 기후 변화로 인해 재해와 가뭄이 기존 패턴을 크게 벗어나고 있어 물 관리의 어려움이 있으며, 나아가 물이용의 안전도 제고를 위한 요구가 커지고 있다. 이러한 현상들은 농업생산기반시설의 양적인 확충만의 한계를 드러내며, 급격한 환경 변화에 능동적이고 탄력적으로 대응하기 위한 농어촌용수 관리의 필요성을 거듭 요구하고 있다. 이러한 패러다임의 전환은 결과적으로 많은 양의 용수확보를 위한 과거의 기반시설 조성 위주의 접근을 벗어나 보다 효율적인 용수 관리로 그 중요성이 점차 옮겨가고 있는 것을 의미한다.

이러한 기술적, 사회적 환경 변화와 이에 따른 관리기준의 변화, 앞으로 예상되는 기후변화에 적절히 대응하면서 시설물을 관리할 필요가 있다. 시설물안전관리에 관한 특별조치법에 따르면, ‘시설물의 유지관리’는 “완공된 시설물의 기능을 보전하고 시설물 이용자의 편의와 안정을 높이기 위해 시설물을 일상적으로 점검/정비하고 손상된 부분을 원상 복구하고 시간의 경과에 따라 요구되는 시설물의 개량/보수/보강 등을 수행하는 것”으로 정의하고 있다. 여기서 시설물의 개보수는 농업기반시설 관리규정에 따라 “노후시설이나 제 기능을 다하지 못하는 시설을 개량/보수하여 재해위험을 해소하고 기능을 회복시키거나 개선하는 것”을 의미한다. 결국 농업수리시설 유지관리를 달리 표현하면, 시설물의 현재 상태를 파악하여 이상 징후 및

손상 유무를 조기에 발견하고, 보수/보강 등 적절한 조치를 취함으로써 이용자의 편의와 안전을 확보하는 행위라 할 수 있다. 즉, 변화를 예측하고, 능동적으로 적응하며, 종합적인 시설물의 유지관리를 수행하는 것이 변화하는 시대에 통합관리 시스템이 필요한 이유이다.

3. 시설계획의 단계에 따른 안전성 관리시스템

시설물은 도로, 교량, 댐, 상수도, 하수도, 전화선로 등 간접자본과 아파트, 빌딩 등의 직접자본을 통칭하여, 생산에 직·간접적인 연관이 있는 구조물을 일컫는다. 이러한 시설물은 독립적으로 기능을 수행하기 보다는 다른 시설물과 상호작용을 통해 유기적으로 기능을 수행하고 있다. 역할의 수행에 문제가 있는 시설물이 발생하면 생산에 차질이 발생하며 이에 따른 많은 손실이 발생하게 되기 때문에 시설물 관리는 중요하다.

특히 시설물은 사회에서 요구하는 역할에 의해서 구성요소가 달라질 뿐만 아니라 같은 구성요소라도 시대의 흐름에 따라 시설물이 수행하는 역할, 시설물의 위치에 따라 달라지는 특징을 가지고 있다. 이에 단일한 관리 시스템을 이용하여, 다양한 목적에 맞게 안정적인 역할을 수행할 수 있도록 시설물을 유지하는데 어려움이 있다. 따라서 시설물의 구성요소, 역할, 위치 등 다양한 요소의 중요성을 고려하여 시설물을 관리할 수 있는 시스템이 필요하다.

시설물의 설치에서부터 이용, 용도변경, 상호 관계 등 각각의 상황과 목적에 의해 관리시스템을 결정한다. 이러한 관리 시스템은 크게 새로운 경영환경 변화와 시설물의 효과적인 유지관리 시스템, 시설물 상태의 유지 및 최적 기능 수행 관리시스템, 기존시설물의 새로운 조합을 통해 고효율 이용을 목적으로 하는 관리시스템이 있다. 국내·외 관리시스템의 사례를 통해 시스템의 특징 및 역할을 분석함으로써 각 상황에 맞는 관리시스템의 필요성을 고찰 할 수 있다.

효과적인 시설물 이용을 위한 통합 관리시스템은 급변하게 변화하는 경영환경에 맞춰 새로운 시설물을 만들기보다, 기존의 시설물을 효과적으로 이용하기 위한 방안이다. 그 대표적인 예로 시설안전기술공단에서 운영하고 있는 시설물 정보 통합 관리시스템과 건설교통부에서 운영하고 있는 포

장 관리시스템, 교량 관리시스템 등이 있다.

시설물 정보 통합 관리시스템은 21세기에 부각된 정보화와 정보기술의 표준화 등으로 활용 여건 증대와 개발이 두드러지고 있다. 특히 수리시설물은 중요 구조물이 아니었지만, 기후 변화에 의한 잦은 홍수, 가뭄 등 사회 및 자연 환경의 변화에 따라 중요성이 부각되고 있는 시설물이나, 사회간접기반 시설물인 대형 교량, 건축물, 철도와 같은 시설물 관리에 주로 사용하고 있다. 이러한 시설물의 수명연장과 효과적인 이용하기 위해 정보 통합 기술인 웹기반 지리정보를 이용하여 2차원 도면을 3차원화 하는 등 다양한 노력이 시도되고 있으며, 다음의 통합시스템의 특징은 [표 2-6]과 같다.

[표 2-6] 시설물 정보 통합 관리시스템

시설물 현황 관리	이력 관리	유지 및 보수	이용사례
<ul style="list-style-type: none"> · GIS 이용 시설물 3차도면 작성 등을 이용 위치 및 현황관리 · 이동하는 시설물은 광섬유센서, GPS, RFID 등을 이용 실시간 위치 관리 	<ul style="list-style-type: none"> · 온도센서 및 광센서 등 첨단 IT 장비를 이용 실시간 시설물 상태 전송 · 시설물의 실시간 상태를 D/B구축하여 시설물 상태 진단 및 안정성 분석 	<ul style="list-style-type: none"> · 손상형태와 손상 정도에 따른 최적 보수 및 보강공법을 선택 	<ul style="list-style-type: none"> · 파리의 TGV · 영흥 대교 유지관리 시스템 · 도로 포장 관리시스템 · 도로 절토사면 관리시스템 · 교량 유지관리 자동화를 위한 첨단 로봇 관리시스템

지속가능성을 고려하기 위한 시설물 통합 관리시스템은 시설물의 이용 효율뿐만 아니라 환경적 평가 등 시설물이 사회에 필요한 역할과 사회에 미치는 영향을 모두 고려한 관리 방안이다. 이 시스템은 현세대의 필요뿐만 아니라 미래세대까지 고려한 지속가능한 개발에 가치를 바탕으로 시설물, 사람, 환경을 고려하고 운영한다. 그 대표적인 예로 하천유역 통합물관리가 있으며, 다음 표에서 기존 수자원관리비교함으로써 통합물관리 시스템의 특징을 파악할 수 있다.

[표 2-7] 지속가능성을 고려하기 위한 시설물 통합 관리시스템

기존의 수자원 관리	통합 수자원관리	이용사례
<ul style="list-style-type: none"> · 수량관리 중심의 단일 저수지 운영 · 지표수 위주의 수자원 관리 · 기관별 정보 공유체계 미비 · 지역사회의 참여와 유관 기관 협조 미비 · 환경과 미래세대에 대한 고려 불충분 	<ul style="list-style-type: none"> · 수량, 수질, 환경생태를 종합적으로 고려한 유역하천-저수지군의 통합운영 · 지표수, 지하수, 대체수자원의 통합관리 · 정보의 공유 · 지역사회, 유관기관 간의 유기적인 협조체계 구축 · 공평성, 효율성, 지속가능성을 고려한 유역 통합 물관리 	<ul style="list-style-type: none"> · KOWACO 통합관리시스템 · RIMS 농업기반시설관리시스템 · DSPMT (USACE), FEMA의 미국 비상관리처

개별 시설물 관리방안의 유기적 이용을 통한 통합 관리시스템은 시간이 지나면서 시설물의 수가 늘어날 뿐 아니라 시설물끼리 서로 영향을 주고받는 것을 고려하기 위한 방안이다. 특히 자연재해 등 시설물 파괴가 일어났을 때 이 파해가 다른 시설물 및 사회에 직·간접적으로 많은 피해를 미치기 때문에 모든 시설물의 개별거동을 관리하고, 피해가 발생했을 때 신속한 종합대응을 실시하기 위해 마련한 통합관리 시스템이다. 특징으로 각 관리 시스템에 세부적인 시스템을 설치하고 유기적인 운영을 통해 시스템의 운영의 정확도를 높였으며, 대표적인 예로 국토해양부의 항공 안전 관리시스템, 일본의 방재 정보 관리시스템, 미국의 WARSMP, 중국의 DSRMS 등이 있다.

[표 2-8] 개별 시설물 관리방안의 유기적 이용을 통한 통합 관리시스템

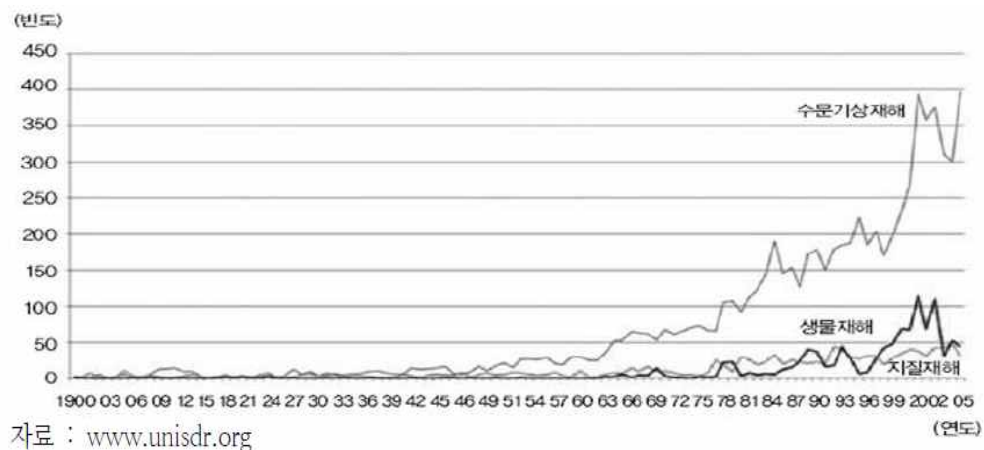
항공 안전 관리시스템		방재 정보 관리시스템	
하위시스템	역할	하위시스템	역할
· 항공안전 IT 시스템	· 항공안전 기술의 전세계 공유	· 기상자료 종합처리시스템	· 기상상황을 실시간 감시하여 신속한 경보 전파
· 국제항공규정 관리시스템	· 빠르게 변하는 국제항공 기준에 신속한 대응	· 지진활동 종합감시시스템	· 지진에 대한 예지정보업무를 신속하고 정확히 수행
· 항공안전감독 관리시스템	· 각 항공서비스 주체들의 안전감독 업무를 효율화 및 체계화	· 홍수경보시스템	· 홍수시 하천 관리시설의 신속하고 정밀한 조작, 수방활동 실시
		· 토사재해발생 감시시스템	· 토사류, 사류 발생을 예측하여 주민 대피

제 2 절 현재 농업생산기반시설 관리의 한계

1. 기후변화

가. 기후변화 현황 및 전망

최근 기후변화에 따른 재해는 전세계적으로 급증하는 현상을 보이고 있다. 이 중 수문기상재해는 1950~1959년 232회에서 2000~2005년 2,135회로 급격하게 증가하고 있어 이에 대한 대비가 필요할 것으로 판단된다.

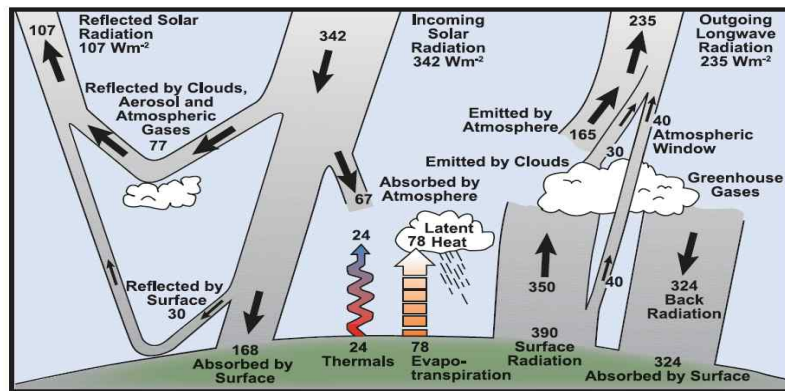


[그림 2-1] 전세계 자연재해 발생빈도 및 추이

우리나라의 기후변화는 전세계 추세보다도 빠르게 진행되고 있다. 지난 100년간(1911~2010) 세계평균기온은 0.75℃ 상승한 것에 비해 우리나라 평균기온은 1.8℃ 상승하였고, 2100년까지 평균기온은 4℃ 상승할 것으로 전망되고 있다. 또한 강수량은 증가하고, 강수일수가 감소하여 강수강도(집중호우일수)가 증가하고 있다. 지난 100년간 강수일수는 18% 감소하였으나, 집중호우일수가 증가하고 있고, 강한 태풍 비중이 높아질 것으로 전망된다. 일 80mm 이상의 집중호우 발생일수가 1970년대에 비해 2배 이상 증가했고, 2011년 서울의 연평균강수량 1,451mm의 약 40%에 해당하는 588mm가 7월 26일~28일에 집중되었던 것도 그 예이다. 해수면의 상승도 괄목할만 하다. 최근 43년간(1964~2006) 한반도 연안 해수면은 약 8cm이나 상승하였고, 같은 기간 동안 제주 부근 해수면은 매년 5.1mm씩 총 22cm 상승하였다.

기후시스템은 대기, 육지, 눈, 얼음, 바다, 기타 수원, 생물체로 구성되어

서로 복잡하게 상호작용하는 시스템으로서 대기가 가장 주요한 요소로서 작용한다 (IPCC, 2007). 기후계는 기후강제력 변화의 효과를 강화시키거나 감쇄시킬 수 있는 피드백 메커니즘이 다양하게 존재한다. 일례로서, 온실가스 농도가 증가하면 지구 기후가 온난화되고 눈과 얼음이 녹기 시작하며, 해당 지역은 육지와 수면이 드러나게 된다. 눈과 얼음이 덮인 지역보다 육지와 수면이 드러난 지역이 태양의 열을 더 많이 흡수하게 되어 온난화를 야기한다. 이처럼 피드백 반복과정은 온실가스 농도의 증가에 의해 야기된 초기 온난화를 가속화시킨다.



[그림 2-2] 지구의 연간 지구평균 에너지 균형
(출처: Kiehl and Trenberth, 1997)

기후변화에 관한 정부간 협의체 (The Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)에서는 기후변화를 자연적 변동 또는 인간 활동의 결과로부터 기인하는 지를 구분하지 않고 모든 기후의 시간적 변화로 정의하고 있다. 이와 달리 UN기후변화협약 (United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)에서는 기후변화를 지구의 대기 조성을 변화시키는 인간 활동에 직·간접적으로 기인하고 있는 변화를 의미하며, 기후의 자연 변동에 대해서는 추가적으로 생기는 것으로 정의하고 있다.

온실가스와 에어러솔의 대기 중의 양, 태양복사, 지표면 특성의 변화는 기후시스템의 에너지 평형을 변화시키며, 인위적·자연적 요인이 지구 기후에 미치는 광범위한 온난화 혹은 한랭화의 영향을 평가하는 데 사용된다.

IPCC의 4차 보고서 (AR4, Fourth Assessment Report, 2007)에 따르면, 지구의 온실가스 중 이산화탄소, 메탄 및 아산화질소의 대기 중 농도는 1750년 이래로 인간활동의 결과로써 현저하게 증가하고 있으며, 수천 년에 걸친 빙하코어(ice core)에서 검출된 산업화 이전의 농도를 훨씬 초과하고 있다고 보고하고 있다. 산업화 이후 대기 중 이산화탄소 농도 상승의 주된 원인은 화석연료의 사용이며, 토지이용의 변화도 중요한 원 중 하나이지만 상대적으로 영향이 적은 것으로 평가되고 있다.

IPCC에서는 지구온난화로 인한 기후변화에 대한 과학적으로 이해된 것들에 관한 현상을 제공하고 있다 (First Assessment Report, FAR, 1990; Second Assessment Report, SAR, 1995; Third Assessment Report, TAR, 2001; Four Assessment Report, AR4, 2007). IPCC는 기후변화와 관련된 전 지구적 위험을 평가하고 국제적 대책을 마련하기 위해 세계기상기구(World Meteorological Organization, WMO)와 유엔환경계획 (United Nations Environment Program, UNEP)과 공동으로 설립한 유엔 산하의 국제 협의체이며, 모든 유엔 회원국이 참여하고 있다. 현재 2007년에 발간된 AR4에는 기후변화에 관련된 과학적·기술적 사실에 대한 평가를 제공하고 있으며, 2014년을 목표로 5차 보고서 (AR5)를 작성 및 검토하는 단계에 있다.

AR4 (2007)에 따르면, 산업혁명 이후 인류의 화석연료 사용 증가로 대기 중 온실가스 농도가 증가해 지구의 평균기온이 상승하고 있으며, 인위적 온실가스 배출량은 1970년 대비 2004년 약 70% 증가하였으며, 특히 이산화탄소는 약 80% 증가하였다. 이로 인한 지구 평균 지표온도는 1950년 이후로 계속 증가하였으며, 갱신된 AR4에서는 지난 100년(1906~2005년)간 $0.74 \pm 0.18^{\circ}\text{C}$ 상승한 것으로 보고하고 있다. 또한, 지구 평균 해수면은 1961년~2003년간 매년 $1.8 \pm 0.5\text{mm}$ 씩 상승하였고, 북극 빙하면적은 '78년 이후 10년마다 $2.7 \pm 0.6\%$ 씩 감소하였으며, 특히, 여름은 $7.4 \pm 2.4\%$ 씩 감소한 것으로 나타났다.

현재와 같이 화석연료를 지속 사용하면 금세기말까지 지구 평균기온은 최대 6.4°C , 해수면은 59cm 상승하는 등의 기후변화가 가속화될 전망이다. 이에 따른 기후변화는 생태계, 산업·경제, 생활양식 전반에 광범위한 파급

효과가 발생할 것으로 예상된다.

기온이 1980-1999년과 대비하여 1.5~2.5℃ 상승시, 생물종의 약20~30%가 멸종되고, 3.5℃ 상승시에는 40~70%가 멸종될 것으로 보고되고 있다. 전세계 해수면 상승에 따른 저지대 침수, 열파, 홍수, 가뭄 등으로 사망자가 증가하고, 모기 등 질병을 매개하는 생물체의 분포가 확대되며, 특히 빈곤층, 노령층 등 취약계층과 저위도, 저개발 국가에 피해가 집중될 것으로 예상된다. 아시아지역의 경우에는 히말라야 산의 빙하 용해로 인해 홍수, 산사태, 수자원 부족에 직면하며, 관광지역 매력도 감소할 것으로 보인다.

기후변화는 세계500대기업 70%이상이 기업경영 위기요인으로 지목한 바 있으며 ('07, 파이낸셜타임즈), 선진국의 온실가스 배출규제가 새로운 무역장벽으로 등장함으로써, 신 경제 경쟁구도의 선점을 위한 각축전 예상된다. 또한, 지구적 감축계획 이행에 따른 온실가스 감축 비용 증대로 기존 산업계의 저탄소형 산업구조로의 큰 변화가 예상되며, 저탄소형 기술 및 산업 관련 거대시장이 등장하여 산업·경제에 영향을 미칠 것으로 예견되고 있다.

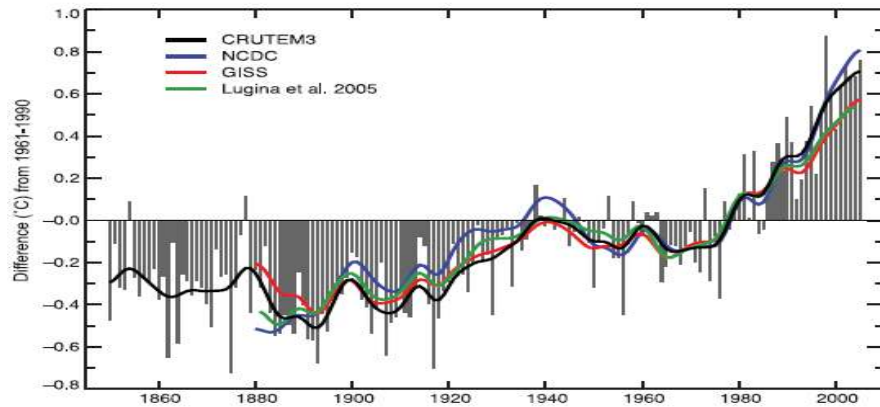
기후변화로 인한 농작물 주산지 북상과 저위도 건조지역 작물 생산량 감소는 대기근이 우려된다. 또한, 농수산 서식지변화에 따른 음식문화 변화, 기후변화적응 주거문화 등 인간생활 의식주 전반에 걸쳐서도 점진적인 변화가 유발될 것으로 예상된다.

나. 기후변화에 의한 수문순환 영향

(1) 기온 변화

지난 157년 동안의 지표 기온 관측 기록을 보면, 지표 기온이 전 지구적으로 상승했고, 지역적으로도 편차가 큰 것으로 나타났다 [그림 2-3]. 지구 평균 지표온도는 1950년 이후로 계속 증가하는 경향을 보이고 있다. AR5 (2007)에 제시된 100년 동안 (1906-2005년)의 온도 변화는 $0.74 \pm 0.18^{\circ}\text{C}$ 이었으며, 이는 TAR (1999)에서 제시되었던 $0.6 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 보다 상승한 것으로 나타났다. 1850년-1899년 기간에서 2001-2005년 기간까지 총 기온상승 폭은 $0.76 \pm 0.19^{\circ}\text{C}$ 인 것으로 산정되었으며, 지난 50년간의 평균 온난화 속도는 $0.13 \pm 0.03^{\circ}\text{C}$ 로서 과거 100년간 속도의 거의 두배에 이르는 것으로 나타났다

다. 지구적 규모에서 추정된 3가지 모두 일관되게 온난화 경향을 보이고 있다. 또한, 해수면 온도와 야간 해양 기온 사이에도 일관성이 나타나고 있는 것으로 보고되고 있다.



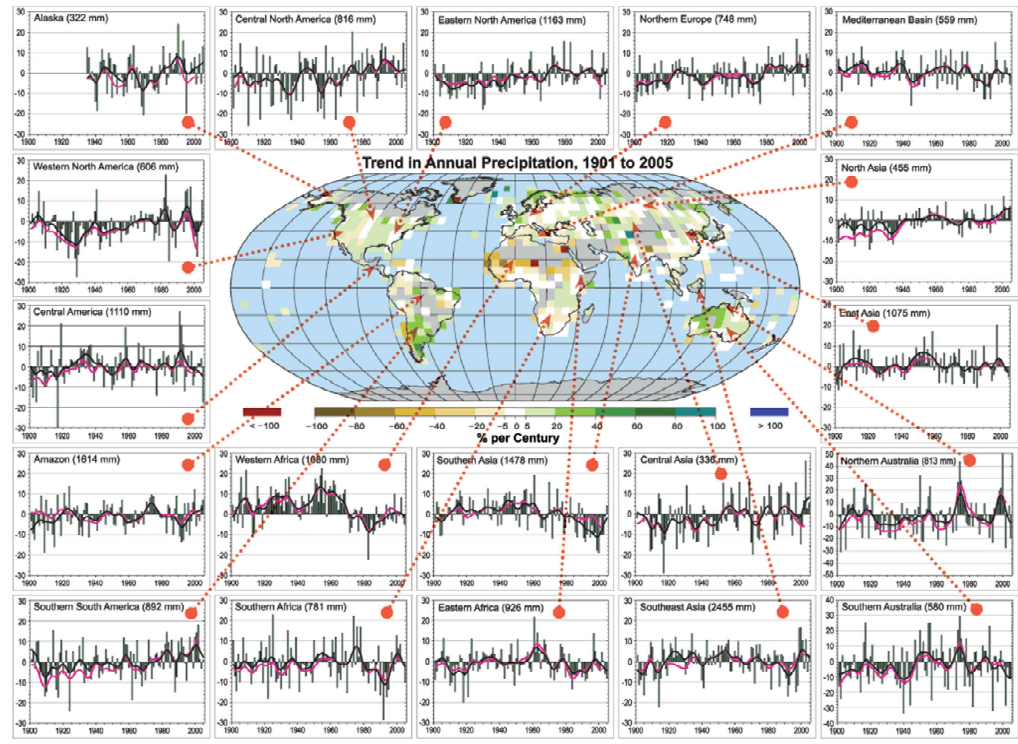
[그림 2-3] 1961-1990년 평균에 대한 1850년부터 2005년까지 지구 육상기온의 연평균 편차 (출처: AR4, 2007)

(2) 강수량 변화

강수량은 기온의 증가에 따라 대기가 수증기를 포함할 수 있는 용량이 증대되어 강수특성 및 극값을 변화시킨다. 전지구 육상 평균 강수량은 지구 수문순환의 중요한 요소임에도 불구하고, 종종 지역적으로 크게 차이가 나며 서로 다른 부호의 편차를 보이기 때문에 해석하기 쉽지 않다.

[그림 2-4]는 1900-2005년의 지역별 연강수량 시계열 자료를 보여주고 있다 (AR4, 2007). 1990년부터 2005년까지 강수량의 장기적 경향은 여러 지역에서 관측되었다. 남북 아메리카, 북유럽, 북부 및 동부 아시아에서 상당한 강수량 증가가 관측되었다. 지중해, 남아프리카, 남아시아 일부에서는 건조화가 관측되었으나, 강수는 공간적, 시간적으로 차이가 큰 것으로 보고되고 있다 (AR4, 2007).

집중호우 빈도는 1950년 이후에 상당히 증가한 것으로 나타났다. 북대서양 지역에서는 약 1970년 이후 강한 열대성 저기압 활동이 증가했다는 보고가 있으며, 허리케인 발생 수는 1955년부터 2005년까지 중 9년은 1981년-2000년 기준의 평균 이상인 것으로 나타났다.



[그림 2-4] 1900-2005년의 지역별 연강수량 시계열 자료
(출처: AR4, 2007)

또한, 강수량이 지구 전체의 많은 지역에서 증가했지만 가뭄 지역, 가뭄 지속기간 및 강도 역시 증가한 것으로 보고되고 있다. 과거에도 가뭄은 발생했지만 오늘날 가뭄이 공간적으로 넓은 지역에 걸쳐 발생하고 있는 것은 온난화 과정에서 예상되는 수문학적 순환의 변화와 대체로 일치한다 (AR4, 2007). 이것은 1970년 이후 열대 및 아열대 지역에서 가뭄이 자주 발생한 예에서 찾을 수 있다. 이 외에도 중앙/남서 아시아, 아프리카, 미국 등 지구 전역에서 극심한 가뭄 사례가 보고되고 있으며, 호주와 유럽에서의 가뭄은 지구온난화와 직접적 관련이 있다고 추론되어 지고 있다.

(3) 지표 유출 변화

20세기 후반부 동안 유량은 전반적으로 강수량이 증가하는 미국이나 남아메리카 남동부 지역 등에서 증가 양상을 보이고 있다. 하천유량 감소는 최근 30-50년 사이에 강수량이 감소하고 있는 캐나다 일원에서 발생하였

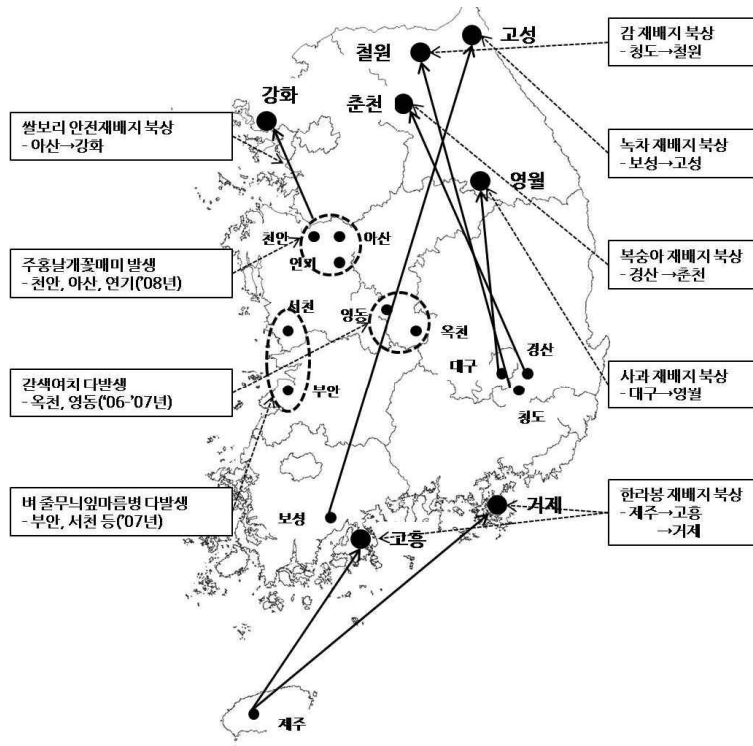
다. Kundzewicz et al. (2002)은 전 세계 195개 하천유량자료를 가지고 연유량 극한값의 장기간 변화를 분석하였다. 그 결과에 따르면, 유량 증가하천은 27개, 감소하천은 30개이며, 137개 하천은 큰 변화가 없는 것으로 보고되었다. 하천에는 큰 댐이나 저수지가 설치되어 있기 때문에 작은 유량은 증가시키고, 큰 유량은 감소시키는 경향을 보인다. 따라서, 세계 주요강의 계절 유량에서 보이는 큰 변화나 증감경향을 해석하는 데에는 조심스럽게 접근해야 할 것이다.

(4) 기후변화가 농업·농촌에 미치는 영향

2002년 태풍 루사 때에 강릉 2개소, 2003년 태풍 매미와 나리 등이 몰려왔을 때 5개소의 저수지 제당이 붕괴되었다. 기상여건은 점차 열악해지는 것에 비해 농업생산기반시설은 그 변화를 따라잡지 못하거나 노후화된 상태로 운영되고 있는 것이다. 태풍에 의한 피해 이외에도 온난화로 인한 해수면 상승도 농업에 직접적인 영향을 줄 수 있다. 해수면이 상승하면 염수로 인한 피해가 증가하는 반면, 수자원으로 사용할 수 있는 담수는 줄어들게 된다. 안전한 영농을 위해서는 연안방재와 수자원 확보에 대한 투자되어야 하는 것이다. 또한 강우일수가 줄어들어서 가뭄지역이 늘어나고, 이는 토질악화와 생산량 감소로 이어질 것으로 우려되기 때문에 저수용량을 확보하는 것이 중요해 질 것이다.

이와 더불어 최근 농민들은 주곡생산 일변도에서 벗어나 고소득 원예작물 재배의 비중을 높여가고 있는데, 이는 한반도의 전반적 기온 상승과 맞물려 영농에 큰 변화를 일으키고 있다. 일례로 제주도에서만 재배되던 한라봉은 고흥을 거쳐 거제에서도 재배되고 있으며, 대구가 주산지였던 사과도 강원도 영월까지 재배를 하고 있다. 이러한 영농의 변화를 반영하기 위해서는 농업용수를 비롯하여 이에 제반되는 농업생산기반시설의 설계 및 운영 방법의 재구성이 수반되어야 한다.

이처럼 한반도의 기후변화는 전세계보다 더 빠른 속도로 진행되고 있다. 기후변화는 사회발전에 의한 농산물 수요변화와 맞물려 영농패턴의 변화가 일어남과 동시에 대규모 재해의 가능성도 높아져 이에 대비한 농업생산기반시설의 관리방침이 정해져야 할 것이다.



[그림 2-5] 농작물 재배 한계선 북상과 병충해 발생
(출처: 농촌진흥청, 2008)

다. 기후변화에 대한 대응

우리나라의 기후변화 진행 속도는 세계 평균을 상회하고 있다 (국무총리실, 2011). 우리나라 CO₂ 농도는 2006년에 388.9ppm으로 1999년 대비 18.7ppm 증가하였으며, '05년 온실가스 배출량은 591백만tCO₂eq톤으로서, CO₂ 배출순위(에너지 부문)는 세계 10위 수준에 이른다. 기온(6대도시 평균)은 지난 100년간 약 1.5℃ 상승(세계 평균 0.74℃)하였고, 해수면(제주지역)은 40년간 22cm 상승(세계평균 매년 1.8mm) 하였다.

최근 10년(1996-2005년)동안 15개 지점 평균 연강수량은 평년(1971-2000년)대비 약 10%가 증가하였으며, 특히 여름에는 18% 증가하였다. 태풍 및 게릴라성 집중호우로 인해 피해액이 매 10년 단위로 3.2배 증가하였으며, 해수면 상승으로 해안선 유실·침수 및 범람 폭염으로 인해 최근 10년('94~'05)간 2,127명이 사망하였고, 기온상승으로 말라리아 환자가 '94년 5명에서 '07년 2,227명으로 증가하는 등, 강우패턴 변화로 최근 10년간 기상재

해 총 피해액이 17.7조원에 이르고 있다. 2100년에는 해수면 상승(약 1m)으로 여의도 면적 300배 가량이 침수될 전망이다, 우리나라 인구의 2.6%(125만5천명)가 생계에 지장을 초래할 것으로 우려된다.

이러한 우리나라의 기후변화는 사회 전반의 환경·경제 등 생활전반에 광범위한 파급효과를 보이고 있다. 온실가스 감축의무 부담에 대한 국제사회의 요구 증대 및 기후변화 대응이 위기(새로운 무역장벽)이자 기회(새로운 시장 창출)로 등장하였다. 이러한 현상의 예는 선진국의 온실가스 배출규제가 자동차 및 반도체 등의 산업 분야에서 새로운 무역장벽으로 등장한 것이나, 신재생에너지 등의 기후변화 관련 산업의 급성장에서 찾을 수 있다.

EU는 신규등록차량의 이산화탄소 배출한도를 2012년에 120g/km로 강제 규제 추진하기로 결정하는 등의 무역장벽이 등장하였다. UNFCCC 기준으로 태양광 및 풍력 수출 시장은 2004년에 2백만불과 46백만불에서 2007년에 각각 103백만불 및 397백만불로 추정되었다. 또한, 온실가스 배출권 거래 활성화로 인한 세계 탄소시장이 급성장하였다. 세계 탄소시장(World Bank)은 2005년에 10조원에서 2006년에 30조원, 그리고, 2010년에는 150조원으로 급증이 예상되고 있다.

한반도 기후변화에 적극적으로 대응하기 위하여 범정부적 대응기반을 구축하기 위하여 국무총리실 산하에 기후변화대책기획단을 운영하고 있으며, 이를 통하여 범부처 차원의 추진체계를 마련하여 기후변화 대응 전략을 수립하고 시행하고 있다. 농림수산식품부에서는 2011년 5월에 농림수산식품 분야 최초로 기후변화 대응 기본 계획을 확정하였다. 이 계획은 기후변화의 영향으로 이상기상이 상시화되는 상황에서 농림수산식품분야의 위기대응 시스템을 강화하여 국가의 식량안보를 보장함으로써, 기후변화에 민감한 농림수산식품산업의 지속가능한 발전과 농식품 분야의 선제적으로 대응하고자 하는 것이다. 이를 바탕으로 농업·축산·수산·산림 등을 포괄하는 종합적인 대책을 마련하여 농림수산식품분야 기후변화 대응을 선제적·체계적으로 추진할 수 있는 기반을 구축하였다.

2. 사회변화

가. 농업·농촌에 대한 요구의 변화

우리 농업·농촌은 국민에게 안전한 식품을 값싸게 제공하는 식량생산의 역할을 수행함으로써 우리나라의 산업 및 경제 발전의 기본적 토대를 제공했다. 그러나 현재 우리나라의 농업, 농민, 농촌은 시장과 사회의 변화로 인해 희망의 기로에 서 있다. 농산물 수입개방, 사료값 및 비료값 폭등 등으로 농업 경쟁력이 약화되고 농업소득이 감소하고 있으며, 농촌인구의 도시 진출에 따른 인구의 자연적·사회적 감소로 농가인구가 지속적으로 감소하고 고령농이 증가하고 있는 상황이다. 이에 따라 농촌은 식량생산의 공간으로서의 시장 경쟁력을 확보하는 동시에 생활의 편익, 지역주민의 경제적·문화적 혜택, 어메니티 제공 등으로 역할을 확대해야하는 상황이다.

농업은 식량을 생산하는 전통적인 역할과 함께 사회에 유익한 여러가지 비시장재화(non-commodity output)를 부수적으로 생산하게 된다. 농업·농촌의 시장경쟁력 확보와 사회적 의식 개선이 중요해진 최근 이와 같은 다원적기능의 중요성에 대해 인식하게 되었다. 노르웨이, 핀란드, 스위스 일본 등은 국가 차원에서도 이를 농업을 보호하는 중요한 수단으로 이용하고 있으며, FAO, OECD, WTO 등의 국제기구에서도 이를 인정하고 있다. WTO 농업협정 서문 및 제20조는 농산물 무역자유화 협상 과정에서 식량안보, 환경보전 등 비교역적 기능(NTC)을 고려해야 한다고 명시하였고, 2004년 DDA 오쉬마 초안에는 다원적 기능을 인정하고 소수 NTC품목에 대해서는 관세상한 예외가능성을 시사하였다.

이러한 흐름에 발맞춰 우리나라에서도 우리 농업·농촌이 갖는 가치에 대해 조사하고 증진시키려는 노력을 계속하고 있다. 한국농촌경제연구원(2004)에서는 『농업·농촌종합대책 실천방안 연구』라는 보고서에서 농업의 다원적 기능을 금전적으로 환산하였을 때, 매년 농촌활력제고로 8,165억원, 지역균형발전 효과로 16,676억원, 농촌경관 보전으로 40,316억원 등 연간 총 283,771억원의 가치를 지니고 있다고 분석하였다.

[표 2-9] 농업의 다원적 기능 가치 평가액

(단위: 억원/년)

구분	농업·농촌	산림	평가방법	
농촌활력 제고	8,165	NA	CVM	
지역균형 발전	16,676	NA		
환경 및 생태계 보전	지하수함양 ¹⁾	41,572	-	RCM
	수질정화	21,910	48,269	
	대기정화	55,889	133,754	
	토양 유실 경감	9,520	100,560	
	야생동물 보호	-	7,680	
농촌 어메니티 보전	농촌경관	40,316	NA	CVM
	정서함양	21,514	NA	
	전통문화	16,093	NA	
	휴양 및 여가	12,218	48,300	
재해경감	홍수예방	22,814	132,990	RCM
	산사태 방지	-	26,360	
식량안보	17,084	-	CVM	
총 계 (A)	283,771	497,913		
농업GDP (B)	205,848			
재배업GDP (C)	168,197			
A/B (배)	1.38			
A/C (배)	1.69			

1) 홍수 조절효과에 포함하여 산출

* 출처: 농업농촌종합대책 실천방안 연구. 한국농촌경제연구원(2004)

우리나라 국민들이 갖는 농촌에 대한 인식도 변화하고 있다. 한국농촌경제연구원(2004)의 『농업의 다원적 기능에 대한 국민의식조사』에 의하면, 우리나라 국민들은 농업정책 지원이 식량자급률 향상을 위한 정책보다는 농촌의 교육·문화·복지 확충에 더 많은 정책이 필요하다는 응답을 보였다.

같은 보고서에서 국민들은 농업·농촌의 역할의 비중은 식량생산에서 점차 다원적 기능으로 옮겨갈 것으로 판단하고 있는 것으로 밝혀졌다. 식량의 안정적 공급, 전통문화의 계승 등 우리가 지금까지 농촌의 역할이라고 인식하고 있는 항목들에 대한 비중은 적어지는 대신, 자연환경보전, 전원생활의 공간, 국토의 균형발전, 관광 및 휴식의 장소로서의 역할을 요구받을 것으로 판단하고 있는 것이다.

[표 2-10] 분야별 농업정책 지원 수준에 대한 견해

(단위: %)

구분	지금이 적당	추가지원 필요	줄여야함	모름
식량자급률 향상	18.9	78.8	1.3	1.0
식품의 안전성(환경농업) 확보	14.8	84.3	0.5	0.4
도농 간 소득격차를 줄이기 위한 정책	13.3	84.8	1.8	0.1
농촌의 교육, 문화, 복지 확충	9.2	90.3	0.5	0.0

*출처: 『농업의 다원적 기능에 대한 국민의식조사』.한국농촌경제연구원(2004).

[표 2-11] 농업·농촌의 역할의 변화에 대한 인식

(단위: %)

과거부터 현재까지의 역할		향후 중요시될 역할	
구분	비율	구분	비율
식량의 안정적 공급	38.3	식량의 안정적 공급	29.5
자연환경의 보전	26.4	자연환경의 보전	27.9
국토의 균형발전	11.1	전원생활의 공간	13.3
전통문화의 계승	10.2	국토의 균형발전	12.1
전원생활의 공간	9.3	관광및휴식의장소 (농촌경관보전)	9.0
관광및휴식의장소 (농촌경관보전)	4.8	전통문화의 계승	8.1
계	100.0	계	100.0

* 출처: 『농업의 다원적 기능에 대한 국민의식조사』.한국농촌경제연구원(2004).

도시민의 농업의 다원적 기능에 대한 인식 조사 결과를 보면 ‘환경 및 생태계 보전’의 역할을 가장 중요한 것으로 인식했으며, 그 다음으로 식량 안보 기능, ‘국토의 균형발전’, ‘농촌경관보전’, ‘사회문화적 공익기능’, ‘고용 창출 효과’ 등이 뒤를 이었다.

여러 자료에서 나타나듯이 농업과 농촌에 기대하는 역할은 변화하고 있다. 따라서 농업생산기반시설도 이러한 요구를 충족시킬 수 있도록 변화해야한다. 그러나 많은 수의 농업생산기반시설이 오랜 세월로 노후화 되었고, 현재의 변화된 요구사항을 충족시키지 못하고 있다. 농업생산기반시설의 가장 대표적 시설이라 할 수 있는 저수지 중 1945년 이전에 준공된 시설이 9,154개로 등록된 저수지 전체의 52%를 초과하고 있어 이들 시설의 보수·보강사업이 시급한 실정이다. 또한 이처럼 과거에 설계·시공된 시설물은 변화된 농촌의 환경·문화적 역할에 대한 고려가 되어 있지 않아, 보수·보강

사업시에 이를 반영하려는 노력이 필요하다.

[표 2-12] 도시민의 농업의 다원적 기능에 대한 인식

(단위: %)

구분	전혀중요 하지않다	중요하지 않은편이 다	보통 이다	중요한 편이다	매 우 중 요	모름	점수
환경 및 생태계보전	0.0	0.6	3.8	32.5	63.1	0.0	4.6
식량안보 기능	0.0	1.0	8.3	36.0	54.7	0.0	4.4
국토의 균형발전	0.2	1.7	13.7	52.1	32.3	0.0	4.1
농촌경관보전	0.1	1.7	16.9	54.4	26.9	0.0	4.1
사회문화적 공익기능	0.0	1.8	17.5	51.6	29.1	0.0	4.1
고용창출 효과	0.5	8.1	27.7	41.1	22.3	0.3	3.8

* 주: 점수는 중요도 순에 따라 가중치를 주어 평균을 낸 것임

* 출처: 『농업의 다원적 기능에 대한 국민의식조사』.한국농촌경제연구원(2004).

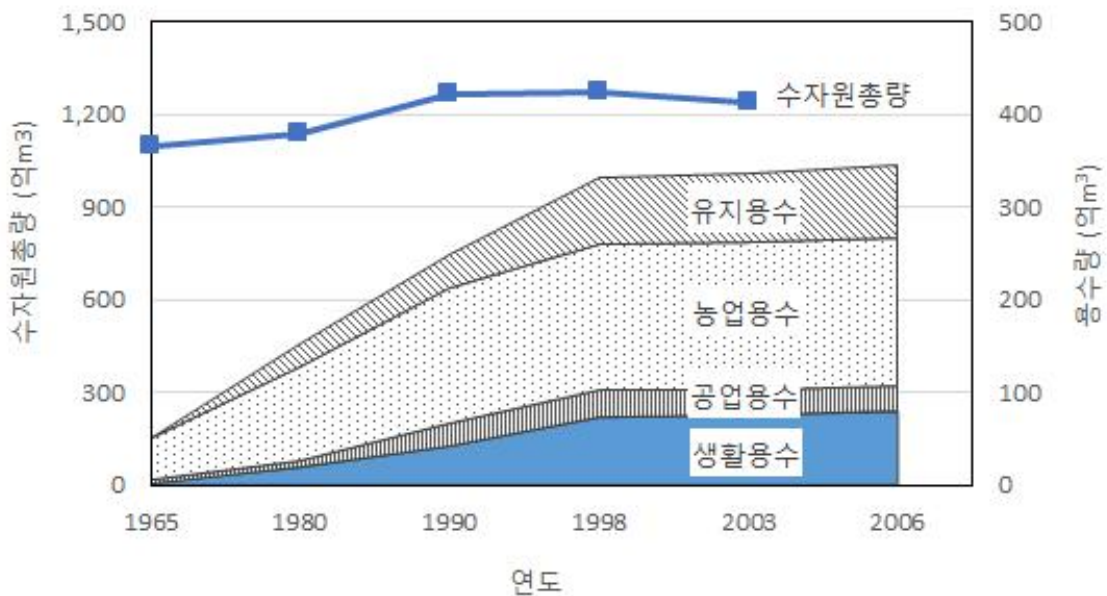
정부에서도 이에 대한 인식을 같이 하여, 2010년 6월 “농업생산기반시설 및 주변지역 활용에 관한 특별법”을 시행하고 있다. 변화하고 있는 농업 및 농촌에 대한 사회적 역할을 제대로 파악하고, 이러한 다원적기능의 가치를 정량적으로 평가하며, 확대하는 방법을 꾀하는 것이 우리 농업·농촌의 경쟁력 강화를 위해 필수적인 시점이다. 이를 위해 농업생산기반시설이 변화하고 있는 농업·농촌의 역할을 제대로 지원할 수 있는지에 대한 면밀한 재검토가 필요하다고 판단된다.

3. 수요변화

가. 급격한 물수요의 증가

경제발전에 따른 삶의 질 추구, 환경유지에 대한 요구 증가, 영농의 다양화, 농촌의 기능 다각화 등의 다양한 요인으로 인해 용수 수요는 급격하게 증가하고 있다. 건설교통부(2006)의 ‘수자원 장기종합계획(2006~2020)’에 따르면 우리나라 수자원 총량은 1965년 1100억³m, 1990년 1,267억³m, 2006년 1,240억³m로 소폭 증가한 것에 비해 수자원 이용량은 같은 기간 동안 51억³m, 249억³m, 344억³m으로 급증하였다. 우리나라는 수자원 총량 중 42%가 증발 등으로 손실되고, 이중 31%는 바다로 유실되는 양이며, 27%정도만

하천, 지하수, 댐 등에서 이용할 수 있는 양이기 때문에 수자원이 중요한 자원으로 인식되고 있다. 이처럼 농업생산기반시설은 급격하게 증가하는 수요를 따라가기 어렵기 때문에 사회갈등을 야기하게 된다. 최근에는 남강 댐 물의 사용권에 대해 경남과 부산이 마찰이 있었으며, 2005년에는 동두천시와 연천군이 취수원을 두고 갈등을 빚었다. 2002년에는 임실군과 전주시가 오원천 상수원 사용에 대해 이견을 둔적이 있다.



[그림 2-6] 수자원 부존량 및 수자원 이용의 변화

* 자료: 건설교통부, 2006. 수자원장기종합계획(2006-2020), 국토해양부, 2008. 국토해양 통계연보

우리나라의 산업화와 경제발전은 수자원 이용에도 변화를 불러오고 있다. 1965년 2.3억³에 불과하던 생활용수이용량은 인구가 증가와 삶의 질 추구 현상으로 인해 1990년 42억³로 증가했으며, 인구가 감소하고 있는 최근까지도 개인당 물사용량 증가로 인해 2006년에는 79억³까지 급속도로 증가했다. 또한 산업화로 인해 1965년 4.1억³이었던 공업용수는 1980년에는 과거의 7배가 넘는 29억³까지 증가하여 현재까지 그 수치를 유지하고 있다. 농업용수는 1965년 44.8억³으로 전체 용수이용량의 87.5%에 달했다. 전체 용수이용량에 대한 농업용수이용의 비중은 2006년에는 46.5%로 크게

감소하였으나, 다른 분야의 이용량이 급증하여 상대적인 비율이 줄어든 것일 뿐 1990년 147억 m^3 , 2006년 160억 m^3 으로 꾸준히 증가하였다. 또한 환경에 대한 관심의 증가로 하천유지용수가 1980년 25억 m^3 에서 1990년 36억 m^3 , 2006년에는 78억 m^3 으로 늘어났다.

이처럼 증가하는 수자원 이용량으로 인해 앞으로 우리나라는 물부족을 겪게 될 것으로 예측하고 있다. 건설교통부가 발표한 “수자원 장기종합계획(2006~2020)”에 따르면, 우리나라 용수수요는 2011년 3억4천만 m^3 에서 2016년 5억 m^3 으로 증가했다가 2020년 4억 4천만 m^3 으로 감소할 것으로 예상되고 있다.

[표 2-13] 물수급 전망

(단위: 백만 m^3 /년)

구분		2006	2011	2016	2020
용수수요		34,378	35,498	35,800	35,568
용수공급		33,975	35,158	35,300	35,129
과부족량	전국	△403	△340	△500	△439
	지역별	△846	△797	△975	△925

* 주: 지역부족량은 각 지역 부족량의 합을 의미하며, 전국 부족량은 공급시설을 확충하여 인접유역의 잉여수자원을 활용할 경우의 과부족량을 의미함.

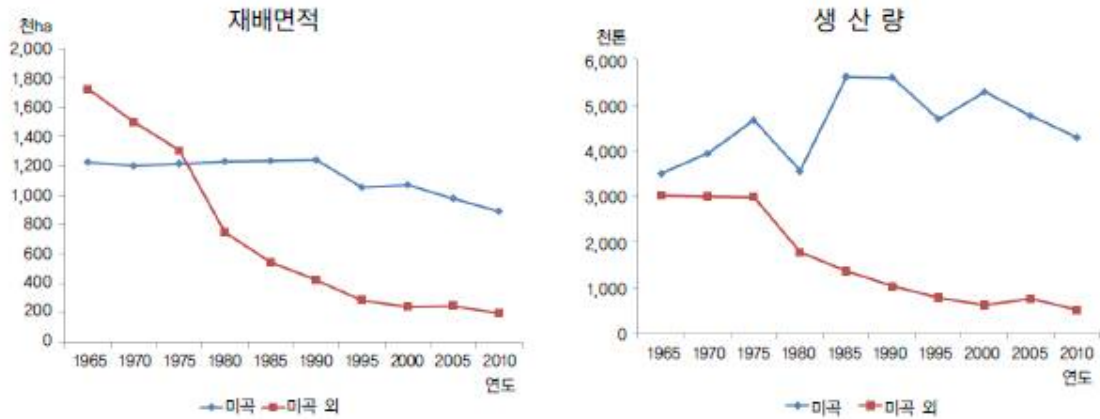
* 출처: 건설교통부. 2006. 수자원장기종합계획(2006-2020)

나. 농촌용수사용의 변화

경제발전으로 인한 국민들의 전반적 소득증진은 식생활의 다양화·고급화로 이어지고 있다. 또한 90년대 WTO체제출범으로 시작하여 현재 FTA에 이르기까지 가속화되는 시장개방은 농업분야도 예외가 아니기 때문에 농업소득을 올릴 수 있는 상업농의 형태로 농업이 변화하고 있다. 이로 인해 70년대 이후 집중되었던 미곡생산은 감소하고, 과실·채소와 같은 상품작물의 생산이 늘어나고 있다. 이러한 농업형태의 변화는 농업용수 사용에도 변화를 발생시킬 것이다.

우리나라의 미곡 생산면적은 65년부터 90년까지 120만ha수준이었으나, 2010년에 89만 ha까지 감소되었으며, 앞으로도 감소할 것으로 예상되고 있다. 또한 맥류·두류 등 밭작물의 재배면적은 65년 172만ha에서 2010현재

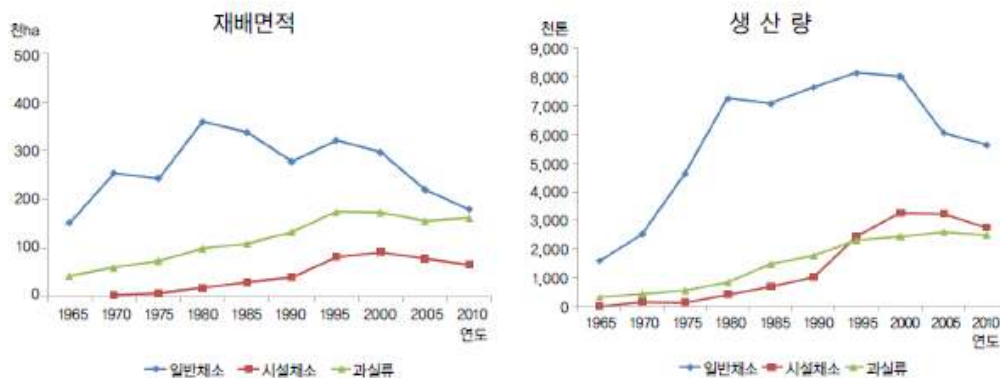
에는 20만ha로 급속도로 축소되었다. 이는 밭에서 재배하는 식량작물의 경제성이 떨어지기 때문에 더 줄어들 가능성이 있다.



[그림 2-7] 1965년 이후 식량작물 재배면적 및 생산량 변화 (자료: 통계청, kosis.kr)

이에 비해 일반채소의 재배면적은 1965년 15만ha에서 2010년 현재 약 18만ha로 증가했으며, 생산량은 같은 기간 1,576,000톤에서 5,640,000톤으로 약 3.6배 증가하였다. 시설채소는 1970년대 4천ha에서 2010년 6만6천ha까지 면적이 급증하였으며, 같은 기간동안 14만톤에서 274만톤으로 약 20배 증가하였다. 과실류는 65년 4만3천ha에서 2010년 16만ha로 증가하였으며, 생산량도 같은 기간 31만톤에서 249만톤으로 증가하였다.

이처럼 농업이 과거 쌀생산에서 채소와 과실류 등 다양한 상품작물로 변화하고 있으므로 용수공급체계도 이에 따라 바뀌어야 한다. 현재까지 농촌용수는 논용수 공급 중심으로 개발되고 운영되었으나, 현행의 용수공급방법으로는 앞으로 다양한 영농형태에 대한 효율적 물관리가 어려워진다.



[그림 2-8] 과실·채소작물 재배면적 변화곡선 (자료: 통계청, kosis.kr)

다. 환경·경관보호에 대한 관심 증대

오늘날 농촌은 식량생산의 역할을 하는 것 이외에도 국토의 환경보전 및 지역사회 유지 등 다원적 역할을 요구받고 있다. 정부에서도 농업생산기반 시설 및 주변지역 활용에 관한 특별법과 같은 농촌의 복지수준과 삶의 질 향상에 대한 많은 정책들을 내놓고 있다. 따라서 농업생산기반시설은 그 시설의 갖는 본래의 농업생산에 관한 기능에 더해 농촌지역과 농촌사회의 발전을 위해 기여할 수 있어야 한다. 최근에 진행되는 농업생산기반시설 관련 사업은 수변개발, 농촌관광 활성화, 생활환경 정비, 어메니티 자원 보전의 측면에서도 접근하고 있다.

농촌의 하천 및 농업용수의 이용은 농업생산 본래의 기능을 유지하면서도 수질개선, 수변환경 조성을 위해 활용되어야 하나 농촌지역에서도 생활 오수, 공장폐수, 축산폐수 및 분뇨가 급증하고 있어 하천에 대한 부담으로 작용하고 있는 실정이다. 이러한 상황에서 농촌하천의 생태, 수질, 친수환경을 적절히 유지하기 위해서는 환경유지용수가 꾸준히 공급되어야 하며, 이 수요는 결국 농업생산기반시설에서 공급받을 수 밖에 없다. 그러나 현재의 농업용수는 논용수에 중심을 두고 개발·운영되었기 때문에 이러한 변화를 반영하기 어려운 경우가 많다. 이처럼 농촌은 다양한 용수수요를 받고 있고, 그 수요량도 증가하고 있기 때문에 이에 대한 적절한 대응이 필요하다.

영국에서도 Water Resource Act(수자원법)에서 우리나라 하천유지유량의 개념과 유사한 MAF(minimum acceptable flow, 최소허용유량)이라는 개념을 정의하고 지방 하천청이 각 하천마다 지정하고 관리하고 있다. 독일에서도 연방정부 혹은 주정부 관할 하천관리협의회에서 하천수 이용과 기능을 고려하여 취수조건에 따라 각종 용수의 수질, 하천환경, 생태계, 여가활동, 또는 희석유량과 관련된 항목을 정성적으로 평가하여 결정하고 있다.

따라서 국내에서도 이러한 수요변화를 고려한 적절한 수자원 규모를 면밀히 분석하고, 이에 대한 지원이 현재의 농업생산기반시설로 가능한지에 대해 검토해야 한다. 이를 위해 객관적인 판단 기준을 정립하고 정책에 반영할 수 있도록 해야 할 것이다.

제 3 절 후속피해 관리의 중요성

1. 기후변화로 인한 재해현황

온실가스 증가로 인하여 열파, 가뭄, 홍수 등 극한 기상현상이 증가하였으며, 바람, 강수량의 유형(pattern) 교란 등 물리 및 생태계 전반의 심대한 변화를 가져왔다. 기후변화의 영향과 심각성은 여러 분야에 다양한 형태로 나타나는데, 근래 들어 집중호우나 태풍, 폭설 등과 같은 자연재해로 인한 피해가 두드러지게 나타나고 있다. 특히 자연재해로 인한 기반시설의 피해는 시설물을 손상시키고 수명을 감소시키며, 사회·경제적인 손실과 더불어 국민의 안전을 위협할 수 있다 (명수정, 2011). 농업기반시설을 기후변화에 적절히 대응 가능할 수 있게 하는 것은 장기적으로 기후변화로 인한 피해와 복구비용을 줄일 수 있다.

이러한 기후변화의 영향에 가장 민감한 분야 중 하나가 바로 농업분야로 기후변화는 농산물 시장의 교란을 가중시킨다. 또한, 기상이변이 발생하면 공사 일정의 지연, 안전사고 노출 등 건설업계의 비용 및 인명사고 위험이 증가하고, 수송업의 경우 항공기/선박 등의 결항, 도로 교통체증 증가로 인한 교통혼잡 비용이 급속히 증가하는 등 사회간접비용의 증가를 초래하게 된다.

우리나라에서 1916년부터 통계작성이 시작된 이래 기상이변에 따른 연간 재산피해액이 가장 컸던 10번 중 6번이 2001년 이후에 발생하였다. 태풍‘루사’ 등의 영향을 받았던 2002년이 7조 7,948억 원으로 피해가 가장 컸고, 다음으로는 태풍 ‘매미’ 등의 영향을 받았던 2003년이 5조 4,972억 원의 피해를 가져왔다.

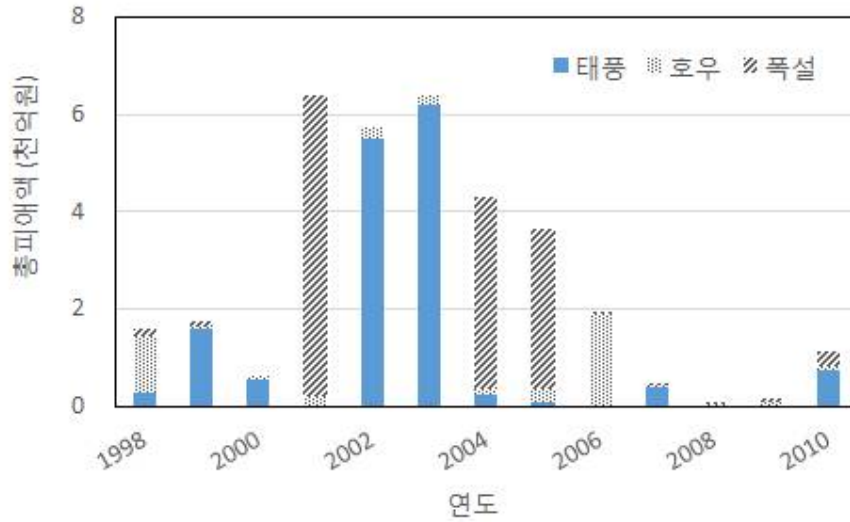
[표 2-14] 한국 기상이변의 연간 재산피해액 순위 (1916~2010년)

순위	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
연도	2002	2003	2006	1987	1998	2001	1999	2004	2005	1990
피해액 (조원)	7.795	5.497	2.216	2.039	2.000	1.596	1.574	1.447	1.208	1.153

* 2010년 물가 환산기준

* 자료: 재해연보 2010 (2010, 소방방재청)

기상재해 형태에 따른 1998-2010년 동안의 연도별 농업생산기반 피해액 추이는 [그림 2-9]와 같다. 태풍과 폭설 형태의 기상재해에 의한 농업생산기반의 피해액이 가장 큰 것으로 나타났다.



[그림 2-9] 농업생산기반 피해액 추이 (1998~2010년)
 총 피해액: 농경지,비닐하우스,축사/잠사,수산증양식,어구의
 피해액을 합산
 *출처: 소방방재청 홈페이지

[그림 2-10]은 기상재해 형태에 따른 1998-2010년 동안의 기상재해 형태에 따른 농업생산기반 피해면적이다. 농업생산기반의 피해면적은 주로 태풍 및 호우 등의 기상이변에 의한 피해면적이 컸고, 폭설은 주로 시설재배지에 피해를 주었다.



[그림 2-10] 피해 원인별 발생 피해액

총 피해액: 농경지,비닐하우스,축사/잠사,수산증양식,어구의 피해액을 합산

*출처: 소방방재청 홈페이지

[표 2-15]은 기상재해 형태에 따른 1998-2010년 동안의 유형별 농업생산기반 피해액을 나타내고 있다. 지난 13년간 총 3조 4,198억원의 농업기반시설 피해가 발생하였으며, 농경지와 비닐하우스 피해가 각각 9,208억원과 1조2,702억원으로 나타났다.

[표 2-15] 기상재해 형태에 따른 유형별 농업생산기반 피해액 (1998~2010 합계)

(단위 : 백만원)

피해유형	태풍	호우	폭설	합계
농경지1)	577,405	343,365	0	920,770
가축	3,630	342	194	4,166
비닐하우스	460,250	47,560	699,396	1,207,206
축사/잠사	86,256	6,823	664,569	757,648
수산증양식	355,180	18,228	45,655	419,063
어구	71,148	33,409	6,389	110,947
총 피해액	1,553,870	449,728	1,416,202	3,419,800

1) 농경지의 유실·매몰 및 침수 등으로 인한 모든 농작물의 피해액

2. 재해발생사례와 피해규모

시설은 자연재해, 노후 등의 원인으로 파괴가 일어나는 경우가 있으며, 이때 경제적 손해뿐만 아니라 돈으로 환원이 어려운 인명 등을 포함한 사

회적 손실을 시설파괴에 의한 피해라 한다. 특히 현대로 오면서 인구가 늘어나고 이를 뒷받침하기 위한 경제의 크기를 증가하였으며, 이에 고도의 기술발전을 이룩하여 시설의 규모가 커지고 있어 시설의 파괴가 일어나면 과거에 비해 심각한 피해가 발생할 것이다. 또한 자연재해 등 시설파괴가 일어날 경우를 예상하여 시설을 설치, 관리, 대책마련 등을 하고는 있으나, 기후변화로 인해 예측하지 못한 자연재해가 생기고 있어, 이로 인한 시설의 파괴 및 피해가 발생하고 있기 때문에 시설파괴로 인해 발생하는 피해의 규모는 커질 것으로 예상된다.

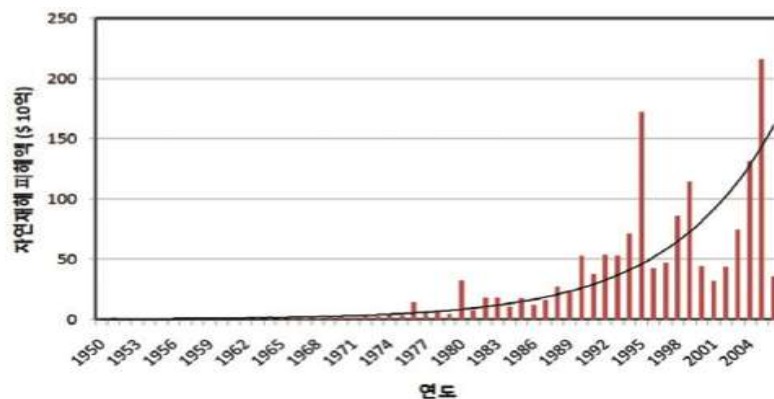
[표 2-16] 미국 주요 자연재해 및 사태에 따른 경제적 손실 및 보조규모

(단위: 십억 달러, %)

재난 및 사태	시점	경제적 손실 (A)			경제적 보조 (B)			B/A (%)
		파괴	생산손실	총손실	보험	정부보조	총보조	
허리케인 Ivan	2004. 9	7.3	6.5	13.8	7.3	6.3	13.6	98.6
9.11 테러	2001. 9	25.7	60.4	86.1	17.0	67.3	84.2	97.8
LA 지진	1994. 1	20.1	12.5	32.7	3.3	15.5	18.8	57.6
중서부 홍수	1993 여름	6.1	9.4	15.5	1.3	7.0	8.4	53.9
허리케인 Andrew	1992. 8	36.7	11.6	48.4	21.5	10.8	32.3	66.8
캘리포니아 지진	1989. 10	10.6	5.4	16.0	1.6	7.6	9.2	57.3
허리케인 Hugo	1989.10	14.5	4.7	19.2	6.6	3.1	9.7	50.4

주: B/A는 경제적 손실대비 보조비율

자료: economy.com



[그림 2-11] 홍수에 의한 전 세계 총 피해액 (EM-DAT, 2013)

이러한 자연재해는 수문기상학적 재해, 지구물리학적 재해, 생물학적 재해로 구분할 수 있는 시설파괴에 직접적인 영향을 미치는 재해는 전체 재해의 76%를 차지하고 있는 수문기상학적 재해인 홍수, 파랑, 폭풍, 가뭄, 산사태 및 눈사태 등과 상대적으로 발생빈도는 낮으나 예측이 어렵고 광범위하게 일어나는 지구물리학적 재해인 지진, 쓰나미, 화산 폭발 등이 있다. 최근에 일어난 수문기상학적 재해로 2005년 미국에서 발생한 카트리나가 있으며, 지구물리학적 재해로는 2011년에 일본에서 일어난 센다이 지진이 있었다. 특히 다음의 자연재해는 시설물 중 규모가 큰 제방, 항만시설, 석유 생산 및 정유시설 등 에너지인프라를 파괴 및 원자력 발전소를 붕괴시킴으로써 직접적인 피해뿐만 아니라 간접적인 피해도 일으켰다. 무엇보다 후쿠시마 원전 파괴로 방사선물질 누출로 2차 피해가 확대되고 있으며, 원전의 완전 폐쇄까지 30년 이상의 시간이 걸리고 사고수습이 2년간 지속될 경우 최대 11 billion 달러의 피해액이 발생할 것으로 예상되고 있다.

[표 2-17] 허리케인 카트리나의 피해내역

피해부문	피해액 (1,000 달러)	피해액의 증가
산업 구조물 피해	21,109,006	직접피해발생 (52 billion \$) → 피해범위확산 (156 billion \$)
산업 기계 피해	36,401,310	
주택 및 주거지 피해	49,724,451	
주거용품 피해	24,437,028	
산업소득 손실액	4,634,533	
전기 기반시설 피해	231,371	
고속도로 피해액	3,049,758	
배수시설 피해액	1,262,512	
총 피해액	156,650,004	

자료: Burton and Hicks, 2005, "Hurricane Katrina: Preliminary Estimates of Commercial and Public Sector Damages"

[표 2-18] 동일본 지진에 따른 피해액

피해부문	피해규모	피해액의 증가
인적피해	사망 15,520명, 행불 7,173	직접피해발생 (35 billion) → 피해범위 확산(181 billion)
전파/반파 주택	10.6만호 / 10.8만호	
산업피해액	15 billion \$	
총 피해액	35 billion \$	

*자료: 조용식 (2011), 조환익 (2011), 한국무역협회 (2011) 참조

3. 피해범위의 확산과 재해방지

시설의 파괴가 발생하면 직접적인 피해와 시설의 파괴로 인해 파생되는 인명 등의 사회 및 시설을 이용하지 못함으로써 발생하는 경제 손실 등 간접적인 피해가 발생한다. 특히 재해에 의한 시설파괴는 하나의 시설이외에 불특정 다수를 대상으로 발생하여 시설의 파괴 범위가 크고, 관리 및 복구 기능의 마비가 되기 때문에 간접적인 피해의 규모가 상대적으로 커지는데 이러한 시설파괴에 이은 간접피해의 규모가 커지는 대표적 사례로써 원자력 발전소 파괴가 있다. 1986년 4월 26일 체르노빌 원자력 발전소의 폭발은 재해에 의한 피해가 아닌 인재에 의한 것이지만, 피해복구비용으로 2015년까지 2500억 달러가 필요할 것으로 예상하고 있을 뿐 만 아니라, 방사선 오염으로 인한 생태계 교란, 피폭 등 계산하기 어려운 피해들도 발생하였다. 이와 유사한 피해로 2011년 3월 일본 동북지역 해안에서 지진으로 발생한 해일이 일본 동북지방의 인프라 시설과 후쿠시마 원자력 발전소를 파괴한 것이 있으며, 간접 피해액은 약 150억 달러로 추정된다.

2011년에 일본 동북지역 해안에서 발생한 규모 9.0의 대지진은 해일을 발생시켰고 이때 일본 방재를 통합 관리하는 시스템을 가동했음에도 예상하지 못한 지진해일은 많은 시설을 파괴하여 일본 전역에 사회 및 경제 활동에 막대한 지장을 주어 추정한 간접피해액을 넘어설 것으로 판단된다. 특히 지진해일에 의해 인명, 인프라 시설의 피해가 컸으며, 후쿠시마 원자력 발전소의 붕괴로 2차 간접피해가 확산될 것이다. 2011년 3월 지진 해일이 해안가를 덮쳐 대피능력이 상대적으로 뒤지는 노약자와 어린이를 중심으로 약 23000명의 사상자가 발생하였다. 이러한 사상자는 지진해일에 의

한 대규모 범람으로 인해 라이프라인시설의 파괴가 이어지면서 화재 등으로 더욱 가중되었으며, 지진해일은 연안에 위치한 원자력발전소, 정유공장, 공항 등을 급습하면서 상대적으로 취약한 가스라인과 전기 시설 등을 파괴하면서 2차적인 피해가 발생하였다. 또한 동북지역은 제조업 및 수출입 비중은 작으나, 관동지역과의 분업구조를 형성하고 있어 조립산업인 자동차 및 전기전자 분야의 피해가 일본 전 지역 경제시스템에 부정적인 영향을 미쳤다.

일본 동북부의 대지진 이후 후쿠시마 원전 붕괴로 인한 방사선 누출로 간접피해가 확산되었고 시설파괴에 대한 피해복구가 늦어지고 있다. 연이은 사고에 후쿠시마현 제 1원전의 6기중 1호기와 3호기의 수소폭발에 이어, 2호기의 노심노출 후 폭발, 4호기 화재가 잇따르며 방사능이 누출되었다. 이로 인해 전력부족인한 산업피해와 인근 바다에서는 기준치의 750만 배에 달하는 방사능 물질이 검출되어 농수산·식품, 수돗물 등 기본생활에 필요한 부분까지 방사능 오염이 확산되어 2차 피해가 확대 지속되고 있는 실정이었으며, 원전에서 150km 떨어진 이바라키지역 어촌에서 방사능이 검출되는 등 방사능 유출이 확산되자 전 세계 각국은 일본산 농수산물에 대한 수입제한 조치를 실시하였다. 이렇게 발생한 피해를 복구하기 위한 기간은 약 5년, 완전 복구까지는 30년 이상이 걸리며, 복구예산은 200억 달러 이상이 필요할 것으로 예상하고 있다.

과거에는 시설에 대한 잘못된 설계, 노후 등으로 인해 시설파괴가 일어난 것에 반해 현대에는 기술 및 시설물 관리시스템의 발전으로 과거에 발생했던 인재에 의한 피해는 거의 줄었지만, 예상하지 못한 재해로 인한 피해가 나타나고 있다. 이러한 예상하지 못한 재난에 의한 피해는 그 규모가 클 뿐 아니라, 앞에서 살펴본 것과 같이 직접적인 피해뿐만 아니라 간접적인 피해도 일으키고 있다. 그래서 시설의 거동에 따라 관리하고 대책을 마련하는 통합 관리시스템이 운영되고는 있어 과거에 비해 큰 피해가 일어났음에도 불구하고 인명피해의 최소화와 빠른 복구 등이 이루어지고 있다. 단적인 예로 앞에서 언급한 체르노빌과 후쿠시마 원자력발전소의 파괴를 비교해 보면 신속한 대응을 할 수 있었음에도 불구하고 더딘 피해사실 전파, 늦장 원조요청 등으로 상대적으로 더 큰 간접피해가 체르노빌에서 일

어나고 있다. 이뿐 아니라 일본에서 발생한 큰 지진에 의한 피해를 다음 표를 통해 비교해 보면 2011년도에 과거와 같이 방재대책 등 시설에 대한 관리시스템이 없었더라면 2011년에 발생한 일본 동북지역 지진 및 해일에 대한 피해는 현재 예상하고 있는 피해보다 몇 배나 더 큰 피해를 입었을 것이다.

하지만 기후변화 등의 이유로 예측하지 못한 자연재해가 발생으로 인해 시설파괴가 일어났다. 이러한 시설파괴는 시설의 이용이 불가능 해 짐으로써 발생하는 피해뿐만 아니라 직접적인 피해 규모 이상으로 시설파괴로 인한 간접피해가 발생하고 있다. 따라서 시설에 대한 관리시스템을 구성하고 운영함에 있어서, 재난 등으로 발생하는 시설파괴로 인한 간접피해 발생의 가능성 및 피해에 대한 대책을 고려하여야만 기후변화와 같이 겪어보지 못한 자연현상으로부터 발생하는 재난에 대해 대처할 수 있으며, 피해의 규모를 최소화 할 수 있을 것이다.

제 3 장 국내외 연구동향

제 1 절 기후변화와 재해대비

기후변화로 인한 시·공간적 강우의 특성 변화는 물부족, 홍수, 가뭄, 수질 악화, 생태계 교란 등의 수자원의 질적·양적 측면에서 종합적으로 문제를 야기하고 있으며, 그 피해 규모는 예측할 수 없을 정도로 증가될 것으로 전망되고 있다 (이진희, 2011).

기후변화가 수자원에 끼치는 영향은 수자원의 비정상성(non-stationarity)·불확실성·민감성·취약성에 기인하며, 기후변화·수문·생태계·용수의 수요 및 공급·사회경제적 분석을 거쳐 파악할 수 있으나, 관련 데이터의 제약으로 관련 연구가 미비한 상태이다.

수자원 분야에서의 기후변화 연구는 1980년대 중반 이후 활발히 진행되었다. 연구 초기에는 기후변화를 수자원 분야에 접목하기 위하여 지역상세화 기법에 초점을 둔 다양한 통계적 방법론이 적용 되었다. 이후 많은 기후모형이 개발되고 고해상도 자료가 생성됨에 따라 2003년도 이후 GCM (Global Circulation Model)과 RCM (Regional Climate Model) 자료를 활용한 연구가 활발히 수행되고 있다 (김수전, 2011).

그러나, 최근까지의 기후변화에 대한 수자원분야의 연구는 IPCC의 GCMs에 의한 미래 강우자료를 이용하여 유출량 산정, 계절별·유역별 수문 변화 예측 및 평가 등을 하는 개별적인 연구가 주로 수행되었다. 따라서 기후변화 인해 우려되는 미래 물관리 및 물부족의 체계적 대응을 위해서는 기후변화 영향에 대한 평가를 통한 취약성 분석 기반의 종합적이고 시스템적인 접근 방식의 다각적인 검토와 방안 제시가 필요하다.

김수전 (2011)은 기후변화가 수자원에 미치는 영향 평가 분야에서의 최신 국내외 연구동향을 정리하였으며, 기후모형의 개발 부문, 지역상세화 기법 개발 부문, 기후변화를 고려한 수자원의 유출특성 부문 등의 세가지로 요약하였다.

한국 수자원학회의 2010년 8월과 9월호(Vol. 43 No. 8 & No. 9) 특집기사에서는 한국건설교통기술평가원 2009년 건설혁신과제 “기후변화에 의한 수문 영향 분석과 전망”연구단의 1차년도 연구 성과의 요약에서 국내외 최

신 연구동향을 정리한 바 있다. 특집기사에서 다루고 있는 국내외 최신 연구동향은 기후변화 시나리오 표준화 기술, 기후변화의 수문영향 분석을 위한 스케일상세화 기법, 기후변화를 고려한 극한 홍수량 및 가뭄 전망, 강수 극치사상의 비정상성 빈도해석, 기후변화에 따른 수문순환 평가 기법, 기후변화에 따른 물수급 분석 기술, 기후변화 영향평가의 불확실성 저감기법, 기후변화에 따른 수공구조물 영향 분석, 기후변화 대응 수자원정책, 기후변화의 사회경제적 영향평가, 기후변화 Warehouse 개발 등의 수자원 분야에서 최신 연구동향을 매우 잘 조사하여 정리하였다. 또한, 기후변화에 의한 미래 변화 환경을 모의함에 있어서 가장 공신력 있는 보고서로 알려진 기후변화에 관한 정부간 협의체 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)에서 발간된 4차 보고서(Four Assessment Report, AR4, 2007)에는 기후변화에 따른 전 지구적, 지역적 수문영향 평가 및 관련 연구 결과를 정리하여 수록하고 있다.

따라서 본 절에서는 기후변화에 따른 수문영향 연구 분야에 대하여 최근에 국내외 최신 연구 동향을 면밀히 조사하고 정리한 김수전 (2011)과 수자원학회지의 특별기사 (2010) 내용을 토대로 요약·정리하고자 한다.

1. 국내

국내의 기후변화에 대한 수자원 전 분야에서의 기술력은 선진국 최고 수준에 비해 뒤떨어지는 것이 사실이다. 현재 국내에서 사용하고 있는 기술이나 연구 분야는 대부분 국외의 기법과 유사하며 선진국 수준의 수월성 확보를 위하여 활발한 연구가 진행되고 있다.

기후변화 수문시나리오 표준화 기술은 기후변화에 의한 “수자원 영향 평가 체계 구축” (과학기술부, 2007), “기후변화 대비 국가 물안보 확보 방안” (국토해양부, 2009), “기수변화에 의한 국가 수자원 영향 분석 및 평가 체계 구축”(교육과학기술부, 2009) 등의 국가개발연구사업 및 기타 연구 사업 등을 통하여 이루어졌다 (이상훈, 2010). 강부식과 문수진 (2010)은 수문영향분석 연구를 위한 스케일 상세화 기법의 최신 연구동향을 정리하였으며, 이정주 등 (2012)은 수자원 평가를 위한 차세대 기후변화 시나리오인 AR5 (2014년 출간 예정)의 이산화탄소 대표농도경로 (Representative

Concentration Pathway, RCP) 시나리오의 적용성을 검토하였다.

기후변화를 고려한 극한홍수량 전망과 관련된 연구는 1990년을 기점으로 시작되었다. 국내의 경우에 기후변화가 수문량에 미치는 영향에 대한 연구는 미비한 실정이고, 특히 극한수문량에 대한 연구는 더욱 미흡한 실정이다 (허준행과 남우성, 2010). 안재현 등 (2001), 김병식 등 (2003), 신형진 등 (2005)과 환경부 (2006) 및 국토해양부 (2008) 등에서 기후변화 시나리오를 이용한 유출모형의 적용성을 검토한 연구를 수행하였다.

과거 가뭄전망 기술과 관련된 연구는 실제 강수량이나 온도 등의 기상 예측 자료를 활용하여 중장기 가뭄 현상을 전망하기 위한 비시나리오 기반의 가뭄연구가 진행되었다. 그러나 최근 들어 기후변화를 고려하여 미래기후변화 시나리오를 기반으로 한 연구가 진행되고 있다 (이주헌과 김창주, 2010). 미래 기후변화 시나리오를 기반으로 한 국내의 연구는 국외에 비하여 상대적으로 미흡한 실정이나, 최진용 등 (2012)이 농어촌용수 수요 평가를 위하여 기후변화를 고려하여 영향을 평가한 바 있다.

우리나라 특성을 고려한 기후변화 시나리오와 연계가 가능한 국내형 수문순환모형은 현재 없는 상태이며, 기후 및 기상변화로 인하여 우리나라의 수자원 영향 평가는 과학적으로 이루어지지 못하고 있는 실정이다 (박근애 등, 2010). 기후변화에 따른 수자원영향평가는 국외와 유사하게 국내에서도 다양한 수문순환모형을 이용하고 있으나 국외와 같이 분포형 수문순환모형을 개발하여 이용하는 연구는 전무한 상태이다. 미래 기후변화 시나리오를 적용한 우리나라의 물수급 분석에 대한 연구는 2000년에 이르러 수 차례의 연구가 수행되었지만 그 수가 많지 않은 실정이다 (서승범 등, 2010).

기후변화를 고려한 수문 전망과정의 불확실성 정량화 기법은 아직 선진국 기술 수준에서도 시작 단계이다 (김용대, 2010). 따라서 국내의 미래 기후변화와 관련된 수자원 분야의 불확실성을 저감하는 새로운 기법을 제안한 연구는 전무한 상태이며, 국외 연구를 국내 지역에 적용하는 실정이다.

기후변화에 따른 수공구조물의 영향 분석과 관련된 연구는 매우 부족한 실정이다 (김울안이, 2010). 임정렬 (2006)과 공정식 등 (2009)은 댐 파괴원인 및 정량적 위험도 평가와 관련된 연구를 수행한 바 있고, 이종현 등 (2009)과 이진학 등 (2004)는 지진 취약도 분석을 통한 성능 평가 및 위험

도 분석을 수행하였다. 그러나, 기후변화를 고려한 수위변화에 따른 수공구조물의 영향 분석과 관련된 연구는 매우 부족한 실정이다. 또한, 박성제 등 (2010)은 기후변화 대응 수자원정책 최신 연구동향을 조사하여 정리하였다.

2. 국외

국외의 선진국에서의 기후변화에 따른 수자원 분야의 연구는 기후변화에 따른 수문시나리오 표준화 기술, 스케일 상세화 기법 기술, 극한 홍수량 및 가뭄 전망 기술, 수문순환모형의 개발 및 적용 기술, 수공구조물 영향 분석 기술, 수자원 정책 수립 등의 분야에서 활발히 이루어지고 있다. 기후변화와 관련된 범 국가적인 연구는 IPCC에 의해 통합되고 있으며, 국제적인 노력과 함께 각국에서도 자체적으로 기후변화와 관련된 수자원에 미치는 영향을 평가하고자 노력하고 있다. 이처럼 국외의 관련 연구는 매우 방대함으로 주요 선진 기술을 보유하고 있는 국가 단위에서의 연구 동향을 정리하면 다음과 같으며, 주로 김수전 (2011)과 한국수자원학회 (2010)의 특별기사를 참조하였다.

가. 미국

기후변화 연구는 전지구변화연구프로그램 (US Global Change Research Program, USGCRP)에 의해 주도적으로 진행되고 있다. 이 프로그램에서는 기후변화 진단기술 개발, 기후 모델의 불확실성 저감 연구 및 기후변화의 기작과 영향에 관한 연구 등 기후변화에 대한 전반적인 연구를 수행하고 있다. 여기서는 기후변화 시나리오에 따른 하천유출량 추정, 저수지 유입량, 농업 및 도시 용수 수요량과 이를 토대로 수자원 기반시설 및 규제, 운영 규칙을 고려한 기후변화 대응 물 공급시스템의 신뢰성을 평가하는 등의 연구를 수행한다.

나. 영국

환경식량도시부 (Department for Environment, Food and Rural Affairs, DEFRA)에서는 1997년부터 영구 기후 영향 프로그램을 시작하여 2002년부

터 현재에 이르기 까지 기후시나리오를 생산하고 있으며, 이를 이용하여 영국전역에 대한 유출 변동을 평가하였다. 또한, 수문모형의 적용을 적용하여 유출량을 산정하고 저수지 저류량 모의 등의 연구를 수행하고 있다. 이와 유사하게 유럽의 독일과 스위스는 라인강에 대한 유출량 평가를 수행하기 위한 연구를 주로 수행하고 있다.

다. 캐나다

1994년부터 연구소와 대학이 협동으로 기후변화 적응과 영향 연구그룹을 구성하여 운영하고 있다. 이 그룹에서는 수자원 분야와 관련하여 물관련 분야의 기후변화에 따른 취약성과 적응방안 도출을 목표로 지표 및 지하수, 수자원 관리를 구분하여 지역별 영향 평가를 수행하고 있다.

라. 호주

기후변화와 관련하여 지속적 수자원 확보를 위하여 연구를 집중하고 있다. 호주에서는 주로 권역별 현재의 수자원 현황을 분석하고 기후변화 시나리오에 따른 유출량 산정 등의 미래 수자원 영향평가를 수행하고 있다.

마. 일본

정부 차원에서 종합적인 기후변화 시나리오를 구축하고 다양한 분야의 예측 및 영향평가를 수행하고 있다. 일본 문무과학성에서는 21세기 기후변화예측 혁신 프로그램을 2007년부터 2011년까지 5개년 계획으로 진행하고 있으며, 온난화 예측 모델의 고도화 및 예측, 불확실성의 정량화 및 저감 기술, 자연재해에 관한 영향평가 등의 연구 분야를 수행하고 있다.

제 2 절 기반시설 안전성 평가지수

우리나라는 2002년 기준, 67,582개의 농업용 수리시설물이 존재하고 있다. 이중 22.8%가 1945년 이전에 축조되었으며 총 47.7%가 설치경과 40년이 넘어 노후화가 상당히 진행된 것으로 평가되고 있기 때문에 지속적인

점검과 관리를 필요로 하고 있다(2004, 정인영 등). 현재 이러한 농업시설물의 유지보수에 약 연 8,000억원을 소요하고 있지만 현재 농업생산기반 시설에 대한 관리에 있어 유지보수 지침만을 제시할 뿐 안정성에 영향을 미치는 요소를 종합적으로 평가할 수 있는 관리 시스템의 개발이 미비한 상태이다(2011, 농림수산식품부).

1. 국내

시설물의 안전 관리를 정량적으로 평가하기 위한 평가지수 개발은 다양한 시설물을 대상으로 연구되고 있다. 개별적 요소들이 유기적으로 결합된 통합 시스템에서는 각 요소에 대한 단일한 안전성 평가의 결과를 복합적으로 결합해서 하나의 지수로 정량화할 필요가 있다. 본 절에서는 다양한 요소의 안전도를 통합적으로 결합한 연구들을 통해서 본 과제의 방법론을 고찰해본다.

상수도관망은 관중, 펌프, 밸브 등 여러 시설물들이 복잡하게 연계되어 있는 시스템으로 노후 및 불량정도 등을 판단하기 위해 다양한 요소들을 고려한 통합적인 관망진단이 수반되어야 한다. ‘AHP분석기법을 이용한 상수도관망 불량도 평가에 관한 연구’(2012, 운영봉 등) 연구에서는 상수도관망 기술 진단매뉴얼에서 지적하는 주요 위험 요인인 관로의 상태, 수압의 적정성, 수량의 안정성, 수질의 안정성, 구조적 물리적 안정성, 비상시의 대응성 등의 위험요인들을 AHP분석 기법을 통해서 상대적인 중요도를 결정하고 모든 위험 요인들을 통합적으로 고려한 안정성 지수를 산정하고자 했다. ‘안전성 향상을 위한 도로터널 등급에 관한 연구’(2005, 유지호 등) 연구는 대형사고를 유발할 가능성이 높은 도로터널을 대상으로 방재등급구분을 위하여 교통량, 중단경사, 혼입율, 위험물수송부부, 정체정도, 통행방식 등의 각종위험지수를 평균하여 재정과 도로의 특성에 맞는 안정성 지수를 개발하고 터널등급구분을 위한 기본적인 방안을 제시하였다. ‘화학공장의 위험도 표현 시스템 개발’(2002, 김정원 등)의 연구에서는 화학산업단지의 위험성을 객관적으로 표현할 수 있는 위험도 수치와 시스템 및 각종 안전계획 가이드라인 개발을 위해서 피해예측을 토대로 계산된 화재, 폭발, 누출사고에 의하여 예상되는 피해 정도(사고 사망률, 개인적 위험 지수, 평

균 사망률, 사망 지수, 등가 사회적 비용 지수)를 기반으로 사업장 위험도를 수치화하여 정량적 평가를 할 수 있는 지표를 개발하였다. 하지만 이들 연구는 각 요소에 대한 중요도 평가가 결여되어있거나 AHP 평가로 전문가들의 주관적인 평가가 개입되어 시설물의 객관적인 안전도를 측정하는데 정확성이 떨어질 수 있다는 단점을 가진다.

‘고령사회를 고려한 고속도로 설계기준 개선방안 연구’ (2009, 조규태 등)를 통해 변화하는 사회 요구에 발맞추어 기존의 설계기준을 재평가하고, 기준을 재정비하는 데 목적을 두고 있다. 과거와 현재 환경의 차이를 비교하여 기준을 재정립하는 방법을 이용한다. ‘철도안전관리를 위한 안전지표 선정에 관한 연구’(2006, 곽상록) 연구에서도 국내 철도의 안전성에 대한 지속적인 관리 외에 국외 수준과의 정량적인 비교, 선진 철도운영국의 대책 분석 등 다양한 목적을 위한 철도안전 지표의 관리를 위해서 철도사고 사망자수 및 철도사고 발생건수 등의 다양한 과거 지표와 선진국 지표의 비교를 통해서 국내의 철도안전관련 효율적인 안전 기준을 설립했다. 화학 공정안전관리 시스템의 정량적 평가를 위한 사고데이터기반의 지수개발(2008, 안성준 외)의 연구는 기존의 공정안전관리 시스템의 평가에 있어서 각각의 공정안전관리 기법 위주의 수행도 평가는 그 결과를 종합하여 정량적인 사업장의 공정안전관리 수준을 평가하기에 어려움을 극복하기 위해서 공정의 안전에 직결이 되는 정량화 가능한 합리적인 안전성 판단기준을 마련했다. 과거의 사고 데이터베이스를 바탕으로 공정의 안전관리 수준을 평가할 수 있는 기준을 제시하고 공정의 안전수준을 평가하는 것에 있어서 사고와 직접적인 연관이 있는 항목으로 공정안전관리 전략을 구성하여, 각각의 사고에 영향을 미치는 작업요소와 설비요소들을 사고이력 자료를 바탕으로 빈도와 심도를 분석하여 사고의 원인 요소 별로 F-N 곡선을 그려 이를 바탕으로 원인 요소가 사고의 발생에 미치는 영향 정도를 정량적으로 평가 할 수 있는 사고요소위험지수(Accidental Factor Risk Index, AFRI)를 개발했다. 재해사례와 위험도 지수를 활용한 건축공사 안전정보 시스템 개발(2005, 고성석 등)의 연구에서는 작업환경, 작업 성격과 공사계약, 고용, 공법기술, 하도급체계 및 공종에서의 다양한 위험요소가 상호 연관된 복합적인 상태에서 재해가 발생하여 다른 산업과 다른 독특한 특성을 가지

고 있는 건설공사의 재해발생가능성 및 예상피해의 범위에 관하여 건설업 특성에 적합한 위험성 평가를 위해 과거 발생한 건설재해사례를 대상으로 건설공종 각 작업을 요소 및 세부작업으로 분류하여 건설공사 공종별 재해 발생정도와 위험도를 분석했다. 또한 이를 기반으로 하여 현장에서 재해사례검색 및 각 건설공종별 재해사례 발생원인 및 안전대책 수립을 제공하고, 건설공종 세부항목별 위험도를 나타낼 수 있는 지수를 개발 하였다. 농업용수의 기후변화 적응능력 지표 개발-가뭄에 대한 적응을 중심으로-(2008, 유가영 등) 연구는 기후변화에 대한 적응능력을 시설물의 취약성을 구성하는 주요한 요소라고 판단하고 농업용수 관리 시스템의 적응능력에 관한 지표를 농업용수 수요량과 공급량 등 다양한 과거 자료를 이용하여 가뭄 스트레스에 대한 농업용수의 적응능력 지표(Adaptive Capacity for Drought Stress index: ACDS index)를 개발했다. 이는 농업용수 시스템이 향후 기후변화로 인해 가뭄과 같은 극한상황에 보다 더 자주 노출될 것으로 예측되고 있는 시점에서 기후변화 취약성 지표를 개발하는 데 도움을 주는 방법론적 틀을 제공했다고 할 수 있다. 이들 연구는 사회적 변화 및 기후 변화 등의 외부적인 환경 변화 요인을 이용하여 기존 설계 기준을 분석하여 개선하고자 했다. 본 과제에서는 외부요인 변화에 따른 설계기준 개선에 그치지 않고, 시설물의 상이한 설계기준을 정리하여, 단일 시설물이 아닌 종합적인 통합 시스템을 평가함으로써, 궁극적으로 환경 변화에도 불구하고 시스템 전체의 유지 보수 등 지속가능성을 파악할 수 있는 안전성 지표 개발을 모색하는데 목적을 둔다.

지속가능한 발전이란 생태학적 안정성의 유지, 관리된 경제성장, 사회적 형평성의 증대를 통합적으로 고려하는 개념으로서, 건설 분야에서의 지속가능한 발전의 의미 역시 환경적, 경제적, 사회적 여건들을 만족시키면서 개발해가는 것을 의미한다. ‘지속가능한 건설을 위한 TBL 통합모델의 개발’ (2007, 박광호 외) 연구에서는 지속가능한 건설 사업을 판단할 수 있는 방법론으로 환경적, 경제적, 사회적 평가모델과 이를 통합하는 TBL(Triple Bottom Line) 통합모델을 제안하였다. 건설 사업에 대한 환경적, 경제적, 사회적 평가지수를 개발하여 건설사업의 지속가능성을 판단할 수 있는 시스템을 구축하였다. 그리고 2008년에 등록된 특허 ‘건설공사

용 수익성 예측방법' (출원번호: 10-2006-0016028)에서는 건설공사의 수익성을 예측하기 위해, 이에 영향을 미치는 복수의 데이터를 평가하고 요인을 분석하여 지속가능성 및 수익성 예측을 한다는 점에서 사업시행 전후의 편익분석을 요하는 본 과제의 목표와 부합하는 면이 있다. 하지만 이들 연구는 신규 건설 공사에 한정되어 있어 개보수, 증축, 재건설 등의 여러 가지 안에 대해 비교분석 및 평가에 한계가 있다는 점에서 본 연구에서 개발하고자하는 안전성 통합 평가 지수와 다르다.

2. 국외

현재 국외에서는 SIL(Safety Integrity Level)이라는 시스템을 개발하여 안정한 공정관리에 활용하고 있다. SIL은 공장 내의 위험을 발생 가능한 확률 수준으로 떨어뜨려 위험을 사전에 방지하는 개념으로 국제규격 IEC 61511(PART 1/2/3) Functional safety instrumented systems for the process industry sector를 따르는데 IEC 61511은 국제규격 IEC 61508의 Process Sector의 적용을 위한 규격이며 Safety Life Cycle과 Safety Integrity Level(SIL) 두 가지 개념을 설명하고 있다.

SIL은 일정기간 내에 Safety Instrumented System이 요구되어진 Safety Instrumented Function을 만족스럽게 수행할 확률의 등급을 나타내는데 SIL이 높을수록 SIF를 잘 수행할 확률이 높아지게 되는데 이러한 시스템은 공정산업에서 널리 이용되고 있으며 향후 안전이 요구되는 많은 산업 분야에의 적용이 확대될 것이라 판단된다.

제 3 절 기반시설 안전성 관리시스템

재해가 발생하였을 때, 인명 재산 등의 피해가 직접적으로 발생할 수 있는 항공, 선박 철도 등 타 분야에서는 재해를 방지하기 위한 관리 시스템은 안전관리 시스템의 개발이 이루어지고 있으며, 직접적인 피해가 빈번하게 발생하는 건설 현장의 경우, 많은 안전관리시스템이 개발되어 현장에

적용되고 있다. 이러한 시스템은 프로세스 안에서 발생할 수 있는 위험 요소를 파악하고 그 요소의 확률적 분석과 위험평가를 실시하여 안전한 상태를 유지할 수 있도록 처리하는 과정들을 포함하고 있다. 중요 시설물 안전관리 시스템에서는 점검 시기 등을 통보하고 각 시설물에 대한 점검 항목들을 제공하여 종합적으로 재해 및 위험에 관하여 종합적으로 관리하도록 개발되었다(2008, 김치경 등).

1. 국내

국내의 재해관리시스템은 관련 정보를 전산화하지 못하였고 분산된 업무체제로 인해 비효율적인 관리가 이루어지므로 사회에 미치는 파급효과가 증대될 수 있다. 따라서 예방 차원의 시설물 관리 업무가 수행되는 체계화된 재해관리업무가 필요하다. ‘시설물 재해관리를 위한 재해관리전자매뉴얼 시스템 구성 방안 연구’ (2006, 강인석 등) 연구에서는 시설물 재해정보관리체계를 개선하기 위한 방안으로 재해관리전자매뉴얼을 구축 방법론을 제안했다. 즉 효율적인 재해관리정보체계 구성방안으로 재해관리전자매뉴얼의 소요기능을 분석하여 재해관리업무의 활용성을 높일 수 있도록 하는 기능 및 시스템 구성안을 소개했다. ‘LBS기반 U-ICT 재난·재해관리 관제 시스템개발’ (2011, 김동현 등) 연구는 현재 교통, 물류관제, 보험, 보안 등 다양한 분야에서 활용되고 있는 GPS기반의 위치기반 시스템을 이용하여 재난·재해관리를 방재 분야에서 다양한 형태의 위기 상황에 대응하기 위해서 규모별로 다양한 정보자원을 이용해야 하고 인적·물적 자원을 활용하여 인위적 재난 방재 분야에서도 중앙정부 차원의 실시간 통합 예방·대응관리 시스템의 필요성을 언급했다. 이 연구에서는 스마트 폰 및 GPS-CDMA단말기를 이용한 산불을 사례로 한 ‘자연재해관제시스템’ 개발과 함께 문화재를 대상으로 한 ‘LBS기반 문화재위험관리시스템’에 대한 구현 방법에 대하여 제안하고 차세대 위험관리 시스템구축 방향을 제시하였다. ‘재난대응체제 확립을 위한 재난관리 협력체제에 관한 연구’ (2005, 김종환)에서는 재난의 환경변화에 대응하는 재난관리조직 전략의 일환으로 조직학습을 효율화하는 방법을 모색하고 우리나라의 재난관리조직의 발전에 기여할 수 있는 합리적이고 체계적인 방안을 제시했다. 위기상황에서

획일적인 조직관리의 매뉴얼보다 해당 조직이 시행착오와 학습과정을 거쳐 취득된 조직관리 기법이 보다 효과적임을 확인하므로써 재난관리를 담당하는 조직이나 정부당국자, 정책입안자들에게 재난관리 조직학습의 중요성을 제시한다는 점에서 의미를 가진다. 이 연구들은 재난 및 예측할 수 없는 환경 변화에 대한 시스템의 시스템 관리기법에 대한 제안이다. 하지만 정량적으로 평가할 수 있는 기준이 미흡하기 때문에 실제 적용성에는 한계를 가질 수 있다.

2009년에 등록된 ‘재건축 시기 예측 모델링에 의한 건축물의 재건축 여부 판정 시스템 및 그 방법과, 건축물 공사비 예측 모델에 따른 건축물 공사비 산정 방법’ 특허(출원번호: 10-2009-0022047)에서는 건물의 재건축 여부 판정 시스템 및 공사비 산정방법에 대한 특허로서 보수, 증축, 재건축에 대해 비교분석하는 데에 목표를 두고 있으나 건물에 대한 구조안전성 평가에 대해서만 다루고 있다. ‘도시구역 내배수시설 유지관리시스템’(2008, 이정호 등), ‘옹벽 시설물의 안전점검 및 정밀안전진단 평가기법 개발’(2003, 신창건 등)의 연구에서는 현재 시설물에 대한 안전점검 및 정밀안전진단의 기준과 세부 지침이 마련되어있지 않아 기술자 및 평가기관마다 일관되지 못한 판정을 야기하는 문제점을 제기하며 시설물 관리에 필요한 자료를 체계적으로 관리하고, 수리·수문 해석, 노후도 평가 모델 등과 같이 공학적 방법을 이용하여 시설물의 현재 상태를 분석하여, 시설물 유지관리에 필요한 정보를 제공하는 연구를 진행한 바 있다. ‘자산관리시스템을 통한 서울시 도로시설물 관리 전략’(2008, 신성일 등), ‘LCC 및 LCA 통합에 근거한 철도시설물 유지관리 필요성 고찰연구’(2008, 진남희 등) 등은 도로, 철도 시설물의 효율적인 유지관리를 위해 시설물의 생애주기(Life Cycle) 동안 자산 가치를 극대화하기 위한 유지관리 체계로 경제성 분석을 통해 최적의 보수시점과 방법을 제안하는 것을 목적으로 했다. 시설물의 유지관리를 위한 의사결정에 환경적 측면과 사회적 측면을 추가적으로 고려하는 지속가능한 발전 개념을 도입하고 있으며, 환경 부하를 정량화하기 위한 도구로서 생애주기비용을 적용하고 있다. 하지만 이 연구들에서 대상으로 하는 시설물은 배수관, 옹벽시설물, 도로, 철도 등으로만 이루어진 단일한 구조로서 안정성 평가가 용이하고, 현재 운영을 하는 데 목적을 두고 있다. 반

면 본 연구는 시설이 복합적으로 연계되어있는 농업생산기반시설을 대상으로 하기 때문에, 평가 기준이 다양하고, 시설물의 성격이 상이하기 때문에 이종 시설물 간의 평가 기준을 통합하기 위한 연구가 수반되어야 한다. 또한 현재 시점뿐만 아니라, 기후변화에 따른 미래의 안전도 변화를 분석하고 대비하는 데 목적을 갖고 있으므로 기존 연구의 시설물 관리 기법과는 차별성이 필요하다.

2. 국외

Edward M. Marsza는 적절한 SIL 선택을 위해 적용하고자 하는 시스템 및 프로세스에 대한 해석 방법을 절차적으로 소개하고 관련 전문 정보를 적용하는 방법을 제안했다. (2004, Edward M. Marsza et al.) 이 연구는 다양한 시스템에 대해서 SIL을 적용하기 위한 기본 매뉴얼이 될 수 있다. Lawrence Beckman은 시스템 설계 당시에 SIL의 적절한 적용 방안에 대해서 일반적인 권장 사항을 제안했다. (1998, Lawrence Beckam) 시스템과 관련된 다양한 요인에 대한 분석 방법 및 프로세스에 대한 지침서를 통해서 SIL을 시스템에 도입하는 방법과 장단점을 소개했다.

전체 시스템을 구성하는 부분 요소들은 각기 다른 변수를 가질 수 있다. 그리고 그 값들은 외부 환경에 따라서 다양한 변이를 가진다. 어떤 요소에서 계측값과 작은 차이가 생긴다면 그 오차는 증폭되어 전체 시스템에서는 복잡도는 더 커지게 된다. Mohamed Salla은 불확실성을 가진 시스템에 대해서 확률적 개념을 도입하여 SIL을 개선하는 새로운 접근법을 제안했다.(2008, Mohamed Salla et al.) 각 부분의 확률적 요소를 Fuzzy probabilistic importance measures을 통해서 합산하고 통합 시스템 전체 안전도를 산정했다. Y. Wang는 SIL의 계산에서 오차가 생길 수 있는 부분 자료의 불확실성을 다루는 절차를 제안했다. (2004, Y. Wang) Failure tree를 이용해서 오차가 생기는 부분을 지속적으로 관리하여 보완하는 방법으로 SIL의 프로세스를 개선하고 실제 safety instrumented system(SIS)에 적용하고 방법론을 평가했다. Arthur M Dowell은 화학 공정의 안전 자동화에 대한 가이드라인을 보정하기 위해서 SIL을 적용하는 방법을 소개했다. (1998, Arthur M Dowell) 각 절차에 따라서 필요한 실패 확률을 합산

하여 최종 위험 확률에 대한 기준을 제안했다. Kumar Bhimavarapu 역시 시스템 전체의 안전성을 유지하기 위해서 각 프로세스에서 가지는 위험성을 평가하고 전체 시스템에 미치는 영향에 대한 대책을 강구하고자 했다. 이들 연구의 경우 다양한 시스템에 대해서 시설물에 대한 SIL의 적용성을 향상시키기 위해서 효율적인 적용 방법에 대해서 제안하고 있으나 절차적 단계에 대한 고찰을 진행하는 반면에 프로세스 내의 다양한 요소를 적절하게 적용하는 방법에 대한 논의는 부족하다. Papadopoulos는 시스템의 SIL을 결정하기 위해서 다양한 요소에 대한 취약성 및 중요도를 자동적으로 할당해주는 시스템을 개발했다. (2010, Y Papadopoulos et al.) 이는 기존의 연구와 달리 다양한 요인에 대한 가중치 배분을 최적화 기법으로 가장 경제적이며 효율적으로 할당하는 기법을 제안했다. 단, 일반적인 법칙이 아닌 자동차라는 특정한 대상에 한정하여 적용된 개념으로 본 연구에서 적용하고자 하는 농업 생산 기반 시설에 같은 방식을 이용하기 위해서는 다른 접근 방식이 요구된다.

제 4 장 통합안전성을 통한 시설물 재평가

제 1 절 통합안전성의 기본개념

1. 통합안전지수

농업생산기반시설은 사회적인 필요나 관심에 따라 홍수량이 증가하거나 하천유지용수가 추가되는 등 다양한 설치목적과 사업기준에 의해 설계하고 관리되어 왔다. 또한 기반시설의 특성상 다양한 수요에 대응하여야 하므로 시설물을 평가하는 요소가 시설물의 효용, 유지관리비의 절약 및 재해에의 대비 등 다양하다. 그러나 이러한 다양한 요소에 대한 평가는 직접적인 비교가 어려운 실정이다. 농업생산기반시설을 하나의 시스템으로 보았을 때 시스템을 평가하는 기준이 다르므로 시스템간의 비교나 하나의 목표를 달성하기 위한 시스템의 현황을 쉽게 파악하기가 어렵게 되는 문제점이 있다. 정책적인 결정을 내림에 있어서도 평가기준 및 지표가 통일되지 않음으로 인해 시설물의 재개발 우선순위와 그 규모를 결정함에 있어 어려움이 발생하고 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 시스템을 다양한 지표를 통해 하나의 통합지표로 평가하려는 연구가 진행된 바 있다. 그러나 이러한 시도는 주로 AHP로 대표되는 정성적인 기법에 의존하고 있어 통합지표를 개발할 당시 활용한 전문가 집단의 구성에 따라 그 결과가 달라짐으로 인해 일관된 결과를 산출하기가 어려운 문제점이 있다.

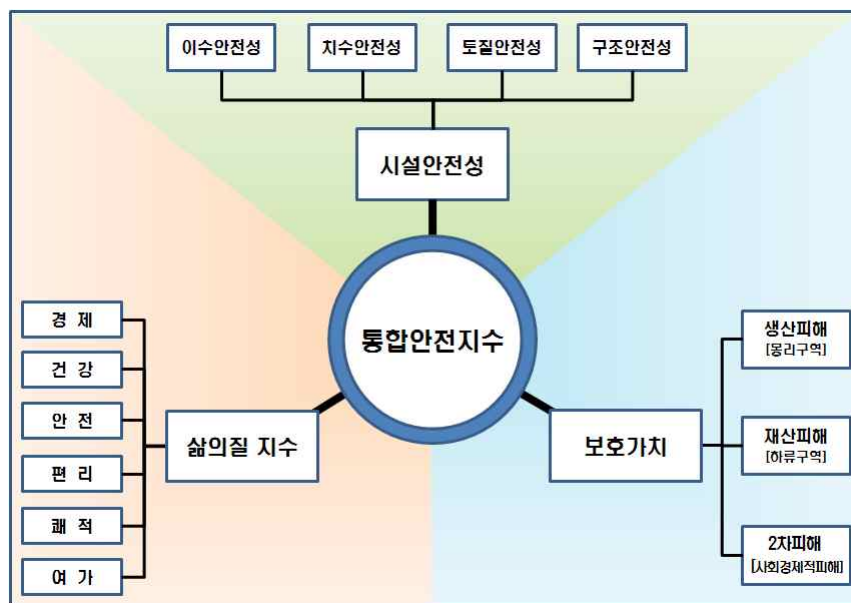
따라서 본 연구에서는 객관적이고 정량적으로 농업생산기반시설의 안전에 관한 지수를 산정할 수 있도록 기반시설의 안전에 관한 신뢰지수인 통합안전지수를 개발하였다. 통합안전지수는 단일 시스템 내에서의 여러 안전기준을 하나로 통합하며, 시설물의 안전성뿐만 아니라 시설물의 안전과 연관된 시설물 하류부의 농촌지역 특성이 반영되도록 개발하고자 한다. 또한 단일 시설물의 안전지수를 산출하는 데에서 나아가 시설물간 안전성 지수를 통합하여 소규모, 중규모, 대규모 지역으로 지수 산정범위를 확장할 수 있도록 지수를 개발하였다. 통합안전지수가 정량적이고 객관적인 과정에 의해 지수가 산출되도록 지수 산정 기법이 개발하고자 한다.

통합안전지수를 통해 시설물의 안전과 관련된 다양한 평가기준이 단일한

지수로 나타남으로써 각각 다른 안전기준으로 설계된 시설물 간에 안전성을 비교 평가하고 이를 농촌개발의 타당성 평가에 활용할 수 있도록 지수를 개발하고자 한다.

2. 통합안전지수의 구조 및 성격

홍수, 가뭄 및 지진에 대한 안전성이나 시설의 내구성에 대한 지표 등, 단일 지표만으로는 기반시설과 연관된 다양한 요소들의 상패를 파악하고 관리하기가 어렵다. 시설 자체의 여러 안전기준뿐만 아니라 시설이 위치한 지역사회의 여러 환경들, 그리고 시설의 설치로 인하여 발생하는 혹은 시설의 손괴로 인하여 발생할 여러 사회·경제적 연관효과를 통합하여 고려할 필요가 있다. 본 연구에서 개발하고자 하는 통합안전지수는 이러한 시설의 안전, 시설이 위치한 지역사회의 환경, 그리고 시설의 직·간접적인 사회·경제적 연관효과를 통합하여 하나의 지수로 표현하고자 한다. 이러한 통합안전지수의 구조는 [그림4-1]과 같다.



[그림 4-1] 통합안전지수의 구조

통합안전지수는 단위 및 기준이 다른 여러 항목을 하나의 항목으로 통합하여야 하므로 먼저 고려하고자 하는 요소를 단일한 단위로 치환하여야 한다. 확률이론에 기반한 신뢰성지수를 사용할 경우 이러한 문제를 해결할 수 있으며 본 연구에서는 통합안전지수를 확률에 기반한 신뢰성 지수로써

개발하고자 하였다.

본 연구에서는 시설물 단위의 경제적 피해액을 고려한 안전성지수로 통합안전지수를 한정하여 개발하였으며, 추후 연구와 조사사업을 통한 자료 확충을 통해 사회안전지수로서의 통합안전지수 개발을 도모해야할 것이다.

제 2 절 통합안정성을 통한 시설물 평가

농업생산기반시설의 안정성 확보를 위해서는 수리·수문, 지반공학, 구조공학 등 다양한 측면에서의 분석이 필수적이다. 이를 위해 농업생산기반시설은 정기점검, 정밀점검 등을 상시화하고 특정 부분에서 문제가 생길 경우 이에 대한 보수보강 하는 것을 그 방법으로 하고 있다. 그러나 대부분의 경우 이들 보수보강 사업비용은 한정되어 있기 때문에 어떤 보수보강 사업을 할 것인지, 어느 시설물부터 우선적으로 하는 것이 효율적인지 분석하는 것이 어렵다.

따라서 본 연구에서 제안하는 통합안정성 평가기법은 다양한 재해를 동일한 기준으로 비교할 수 있도록 개별 재해의 단위를 발생확률과 그 피해액이라는 조건으로 통일하고 서로 비교할 수 있도록 하는 데에 목표를 둔다. 이를 통해 농업생산기반시설의 안정성에 영향을 미칠 수 있는 재해 중 어느 재해가 특히 해당 시설물에 위험하게 작용하고 있는지, 다른 시설물과 비교했을 때 그 위험도는 얼마인지를 비교할 수 있도록 그 방법을 고안하였다.

1. 대상 재해 선정

진정한 의미의 통합안정성 분석을 위해서는 발생가능한 모든 재해에 대해 고려하는 것이 이상적이겠으나, 이는 현실적으로 불가능하기 때문에 농업생산기반시설의 실패에 가장 큰 영향을 미치는 재해 몇가지를 설정하고, 동일한 위험 조건에 대해 다수의 시설물이 얼마나 큰 위험에 노출되어 있는지를 산정하는 것이 통합안정성 평가기법의 기본조건이 될 것이다.

2차년도 연구인 금년도는 정량화가 가능한 재해에 대해 그 적용방법을 제시하고 3차년도에 정성적인 피해를 분석하는 것에 그 방법을 확장할 것

이다. 따라서 금년 연구에서는 수리·수문, 토질·지반, 구조의 조건에서 위험 재해가 무엇인지 분석하고 평가할 것이다.

2. 피해규모 산정방법

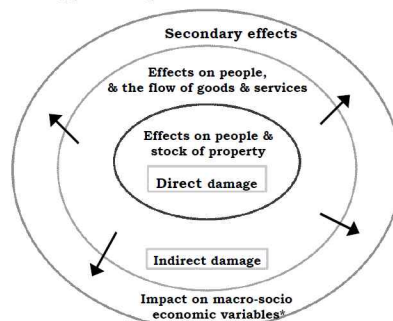
재해에 의해 발생하는 피해를 어디까지 산정하는지는 명확하지 않은 문제이다. 이에 대해 UN에서는 “Manual for Estimating the Socio-Economic Effects of Natural Disaster”에서 [그림 4-2] 와 같이 재해에 대한 사회경제적여파를 설명하고 있다.

공공재산과 사유재산에 대한 복구비용이 1차적 피해라 볼 수 있으며 구체적인 내용으로는 수리비용, 완화된 시설물 및 장비, 유실된 농수산물 등이 해당한다. 또한 인명 피해도 여기에 포함된다고 볼 수 있다.

2차적 피해는 복구완료가 될 때까지 1차 피해로 인해 발생하는 피해를 의미하며 그 예로서 원상복구기간 중 발생하는 생산 혹은 수익의 감소, 공공서비스의 중단 및 계약불이행으로 인한 피해, 생산이나 서비스를 위해 대체방법을 사용하는데 필요한 비용, 피해기간 동안 발생하는 실업, 후속피해를 방지하기 위한 비용 (ex. 홍수시 수인성 전염병 예방활동) 등이 이에 포함되게 된다.

3차적 피해는 사고 이전의 상태와 비교하여 감소한 (무형/비금전적)Intangible 자산을 의미하며 GDP, 무역수지, 부채, 정부재정, 성장률, 취업률의 저하나 교육, 의료, 주택 등 공공서비스의 품질저하 등이 해당한다고 볼 수 있다.

Estimating the socio-economic effects of natural disasters



* A quantitative and qualitative assessment of the impact of the disaster, based on a detailed assessment of damages on diverse indicators of the economic and social conditions in the country affected.

[그림 4-2] UN의 재해 평가 및 분류 방법의 기본개념

제 3 절 수리/수문 관련 재해의 분석

기후변화에 관한 정부 간 협의체 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)는 자연 및 인간 시스템으로 인해 발생하는 기후변화를 명시하고 이에 따른 영향을 최소화하기 위한 대응조치 확립의 중요성을 강조하였다 (IPCC, 2007). 1906 ~ 2005년 동안 전 지구의 평균온도는 약 0.74°C 상승하였으며, 홍수나 폭풍에 의한 기상재해의 발현빈도가 크게 증가하는 것으로 나타났다 (환경부, 2012; UNISDR, 2012). [표 4-1]을 보면 IPCC는 제4차 평가보고서에서 20세기 후반 기후현상의 최근 경향을 전망하였다

기후변화로 인한 기후 양극화 현상으로 비가 많이 내리는 지역의 강수량이 더 크게 증가하여 홍수가 빈번하게 발생하였고, 건조한 지역의 강수량은 더욱 감소하여 가뭄이 발생하였다. 2012년 5월 17일 중국 남부지역의 홍수로 인해 이재민 519만 명이 발생하였으며, 같은 해 미국 중부지역의 봄부터 여름까지의 가뭄으로 인해 세계 곡물 가격이 급등하였다 (기상청, 2012). [그림 4-3]은 전 세계의 이상기후 발생 분포를 보여주고 있다.

기상재해는 지역사회에 전반적으로 큰 피해를 초래하는 경향이 있으며, 최근 들어서는 이상기후로 인한 기상재해의 규모 및 발현빈도가 증가함에 따라 피해액도 급격하게 증가하는 경향을 보인다. [그림 4-4], [그림 4-5]와 같이 세계재해통계연구센터 (Centre for Research on Epidemiology of Disasters, CRED)와 세계보건기구가 협력하여 운영하는 EM-DAT (Emergency Events Database)에서 제공하는 자연재해로 인해 발생한 피해액과 자연재해의 발생기록을 살펴보면, 1950년대에서 들어서면서 조금씩 증가하던 기상재해와 발현빈도가 1980년대에 들어서 급격히 증가하였고 2000년대에는 연 약 400회 이상을 기록하고 있다.

[표 4-1] 20세기 후반 기상현상의 최근 경향과 전망 (명수정 등 2010)

현상과 변화방향	20세기 후반에 발생한 경향의 가능성 (1960년대 이후)	관측된 경향에 대한 인간의 기여 가능성	Da	SRESb 시나리오를 사용한 21세기 전망에서 미래 경향의 가능성
육지 대부분에서 더운 낮과 밤은 증가, 추운 낮과 밤은 감소	가능성 높음c	가능성 있음e	*	사실상 틀림없음e
육지 대부분에서 더 온난해지고, 열대일과 열대야의 출현빈도 증가	가능성 높음d	가능성 있음 (밤)e	*	사실상 틀림없음e
온파 (Warm spell), 열파: 육지 대부분에서 빈도 증가	가능성 있음	가능성 없지는 않음		가능성 높음
집중호우 출현: 육지 대부분에서 빈도 (또는 총강우량에서 집중호우량의 비율) 증가	가능성 있음	가능성 없지는 않음		가능성 높음
가뭄 지역 증가	1970년대 이후로 여러 지역에서 가능성 있음	가능성 없지는 않음	*	가능성 있음
강력한 열대성 저기압 활동 증가	1970년대 이후로 일부 지역에서 가능성 있음	가능성 없지는 않음		가능성 있음
극단적 해수면 상승현상 출현 증가 (쓰나미 제외)f	가능성 있음	가능성 없지는 않음g		가능성 있음h

a: D열의 *표시는 인간 영향의 가능성을 평가하기 위해 전문가 평가와 함께 공식적 탐지 및 원인 규명 연구를 사용했다는 것을 나타냄. 이 표시가 없는 곳의 인간 영향력 가능성은 변수 평균의 변화나 물리적 관련 변수들의 변화에 대한 원인 규명 결과에 기초해서, 또는 관측된 변화와 변화의 정성적 유사성에 기초해서 평가하고 전문가 평가를 결합시킴

b: SRES는 IPCC Special Report on Emission Scenarios (IPCC 배출시나리오 특별 보고서)를 말함

c: 한랭일과 한랭한 밤의 빈도 감소 (가장 추운 낮과 밤의 상위 10%)

d: 열대일과 열대야의 빈도 증가 (가장 더운 낮과 밤의 상위 10%)

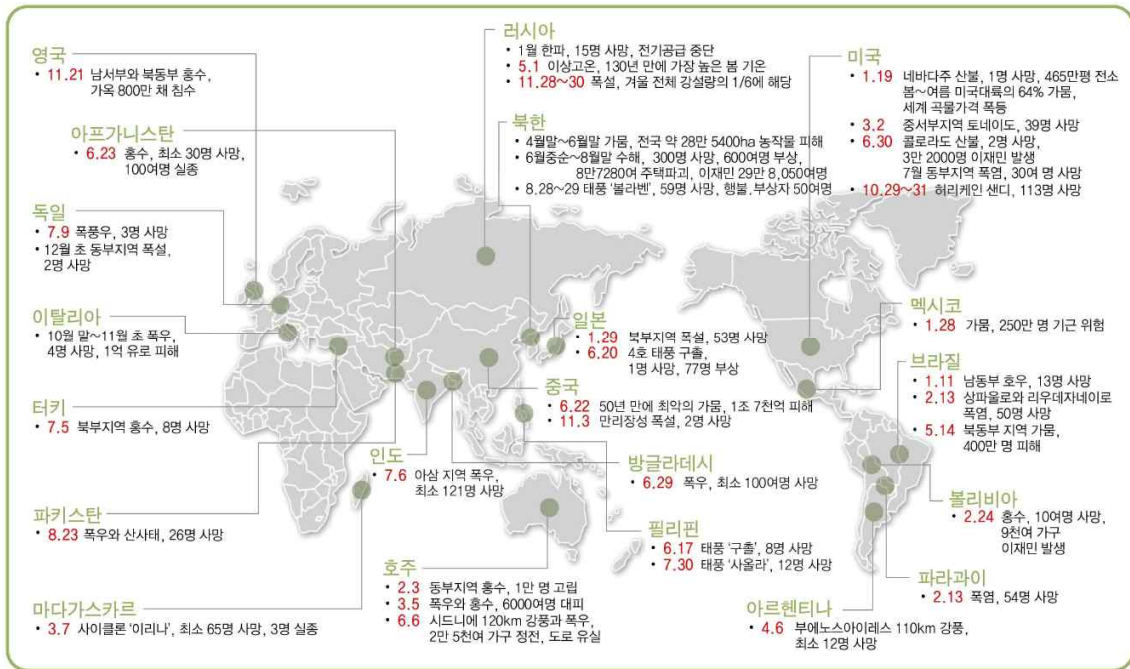
e: 그 해 가장 극단적인 고온을 보인 낮과 밤

f: 극단적 해수면 상승현상은 평균 해수면과 지역 기상체계에 따라 다름. 여기서는 주어진 기준 기간 동안 관측소에서 관측된 시간당 최고 해수면의 상위 1%로 정의함

g: 관측된 극단적 해수면 상승현상의 변화는 평균 해수면 변화와 거의 비슷한 양상을 보임. 인간 활동이 평균 해수면의 상승에 기여했을 가능성이 높음

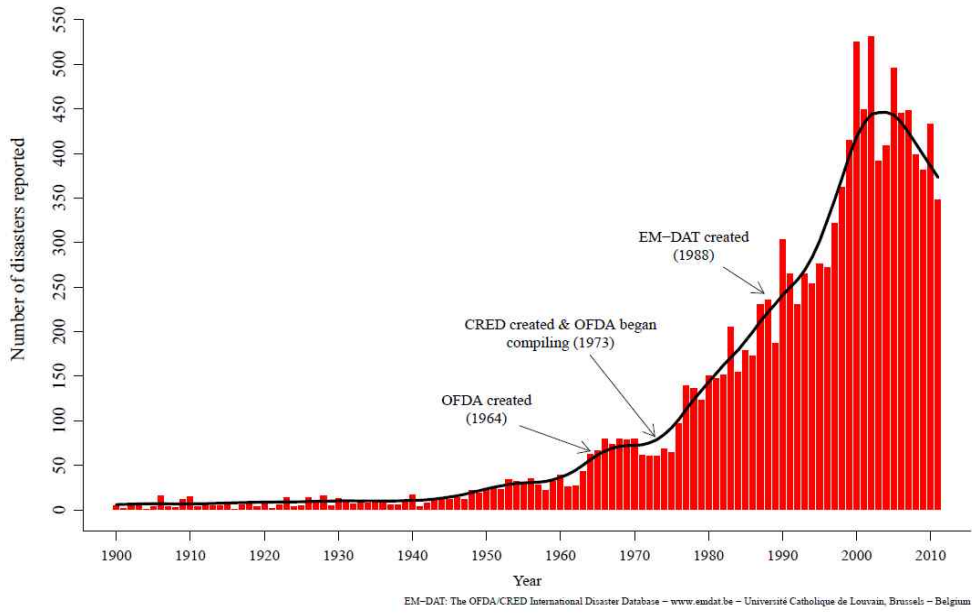
h: 모든 시나리오에서 2100년도 지구평균 해수면 전망은 기준기간의 해수면보다 높음. N10.6 W. 지역 기상체계의 변화가 극단적 해수면 상승 현상에 미치는 영향은 평가되지 않았음

출처: IPCC, 2007

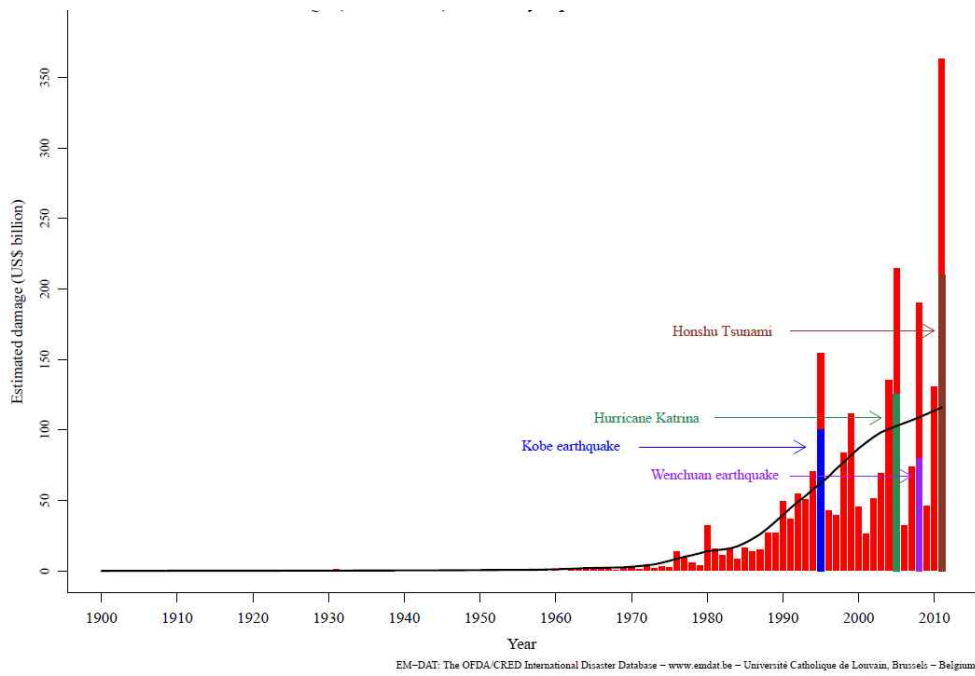


[그림 4-3] 2012년 전 세계 이상기후 발생 분포도 (기상청, 2012)

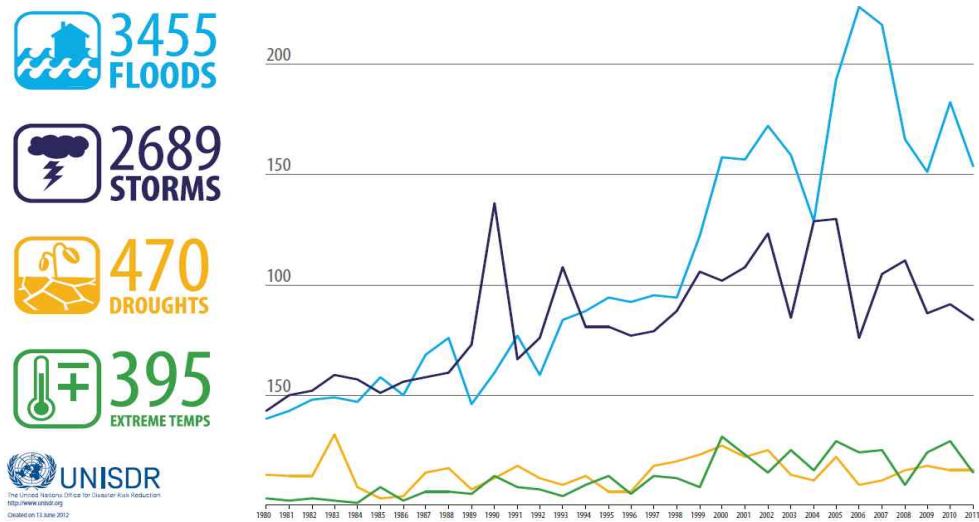
UNISDR (2012)에서 발표한 전 세계 기상관련 재해의 발현빈도를 살펴 보면 1980년 ~ 2011년 동안 홍수, 폭풍, 가뭄, 열파 등과 같은 수문기상학 적인 자연재해의 발현빈도가 가장 많은 비중을 나타내는 것으로 보인다. 특히, [그림 4-6]을 보면 홍수는 최근 들어 발현 빈도의 증가 경향성이 뚜렷하게 나타나고 있다. EM-DAT (2013)에서 보고한 1900년 ~ 2011년 동안의 자연재해의 종류별 발현빈도를 살펴보면 홍수와 폭풍의 발현 빈도 증가가 뚜렷이 나타났으며, [그림 4-7]를 보면 수문과 관련된 재해 중에서 가뭄 역시 2000년대 이후에는 꾸준히 발현하는 것으로 나타났다.



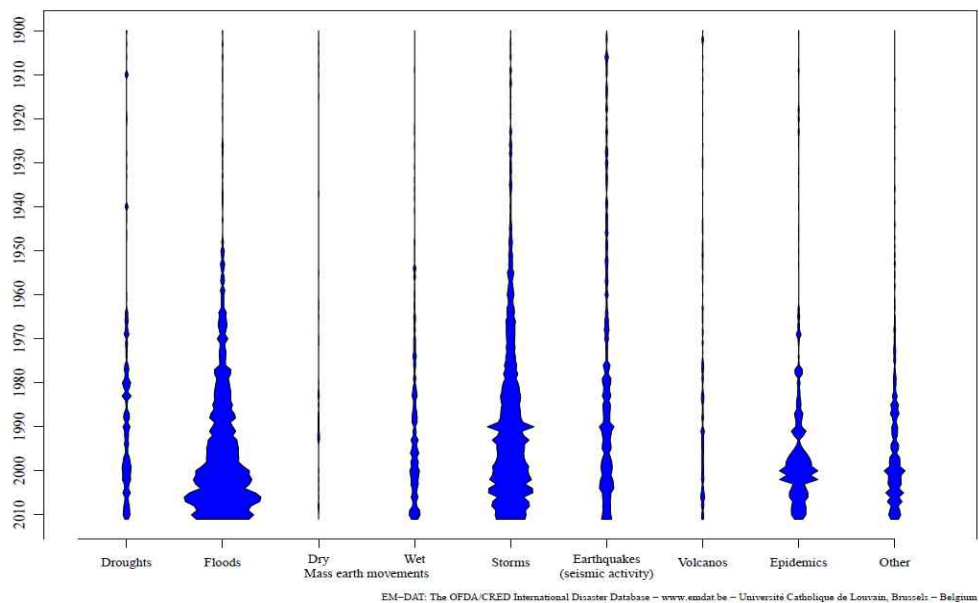
[그림 4-4] 자연재해의 발현빈도 (1900 ~ 2011) (EM-DAT, 2013)



[그림 4-5] 자연재해의 종류별 피해 추산액 (1900 ~ 2011) (단위: \$)
(EM-DAT, 2013)

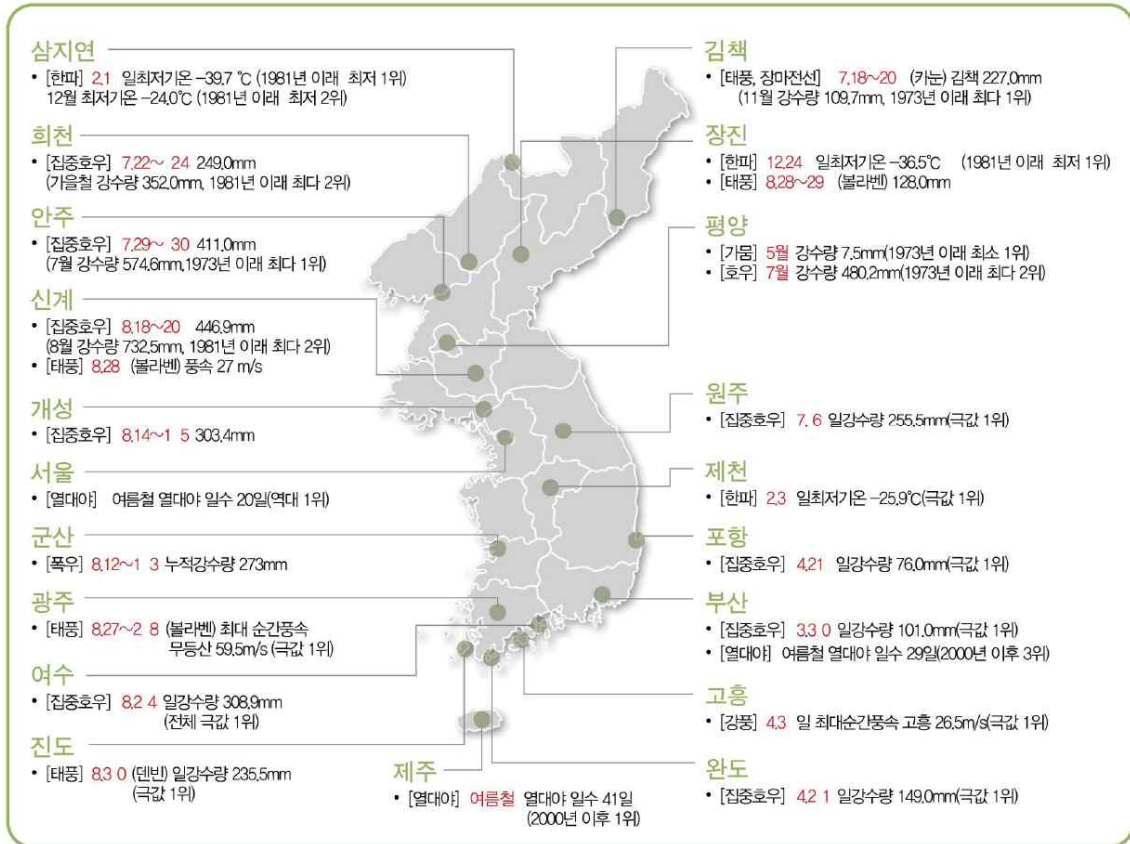


[그림 4-6] 전세계 기상관련 재해의 발현빈도 (1980 ~ 2011)
(UNISDR, 2012)



[그림 4-7] 자연재해의 종류별 발현빈도 (1900 ~ 2011) (EM-DAT, 2013)

우리나라도 유례없는 이상기후 현상이 전국 곳곳이 발생하고 있다. 2012년 2월에는 기록적인 한파가 발생하였으며, 8월 중순부터 중서부지방을 중심으로 많은 비가 내렸고, 11월에는 약하게나마 황사가 관측되었다 (기상청, 2012). [그림 4-8]은 2012년 동안 우리나라의 이상기후 발생현황을 보여주고 있다.



[그림 4-8] 2012년 우리나라의 이상기후 발생 현황 (기상청, 2012)

집중호우가 발생한 현황을 자세히 살펴보면 8월 10일 ~ 22일까지 전국 평균 강수량은 212.2 mm로 평년대비 87%가 증가하였다. 8월중 일강우량의 가장 높게 관측된 지역은 군산으로 251.8 mm를 기록하였다. 가뭄의 경우에는 5월부터 6월까지 전국적으로 발생하였다. 이 기간의 누적강수량은 110.9 mm (평년의 43.2%)로 최근 32년 동안 가장 적은 값을 기록하였다 (기상청, 2012).

이러한 최근의 경향을 고려하여, 본 연구에서는 홍수와 가뭄을 수리/수문 관련 재해로 선정하여 취약성 평가를 수행하였다. 본 연구에서 사용한 홍수는 광범위한 의미로 폭풍, 집중호우, 태풍 등을 포함하였다.

1. 재해 종류

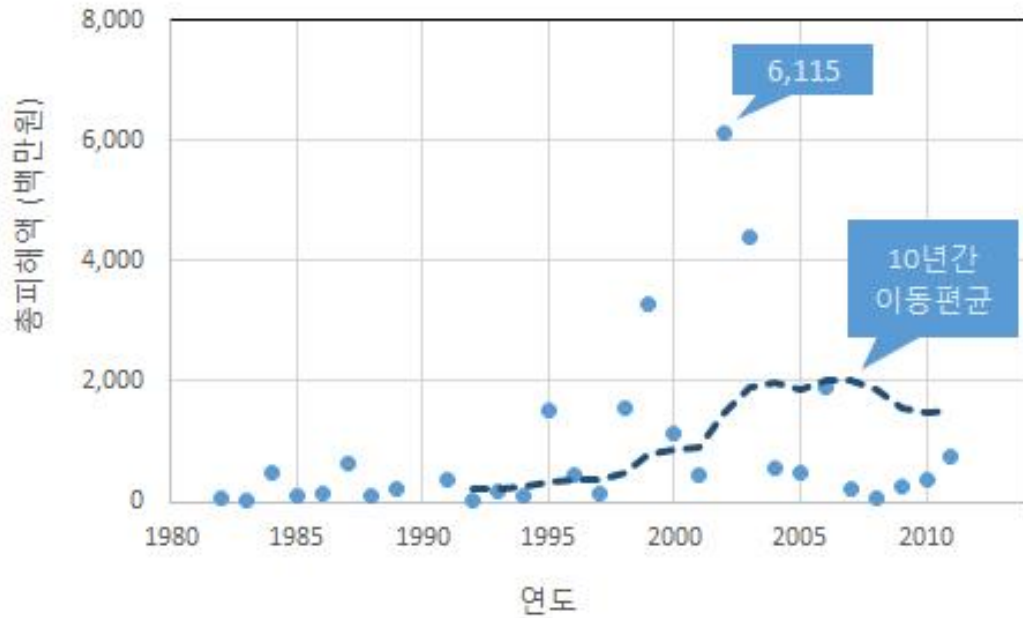
본 연구에서 산정할 수리/수문 관련 재해의 종류로는 홍수와 가뭄을 선

정하였다. 홍수는 집중호우 등으로 하천의 물이 넘쳐흐르는 자연현상으로 하천성 홍수 (Riverine floods), 간만성 홍수 (Estuarine floods), 해안성 홍수 (Coastal floods), 재해성 홍수 (Catastrophic floods)로 구분할 수 있으며, 인간 환경과 경제적 활동에 많은 영향을 끼친다.

가뭄은 물이 부족한 상태로서 여러 가지로 정의 될 수 있다. 이는 물이 부족한 상태를 어떻게 정의하는가에 따라 가뭄 상태를 나타내는 방법이 다르게 나타나기 때문이다. 가뭄은 물 수요량 (demand) 에 대한 공급량 (supply)가 부족한 상태로 정의한다. 가뭄은 기본적으로 강우가 적어서 발생하지만 강우가 적다고 항상 가뭄이라고 정의하지는 않는다. 가뭄은 크게 ‘기상학적 가뭄’, ‘농업가뭄’, ‘수문학적 가뭄’으로 대별한다. 기상학적 가뭄은 강우가 적게 내려 발생하는 물 부족 상태이나 강우가 무조건 적다고 가뭄은 아니고 일반적으로 상대적인 개념으로 표현한다. 즉 지역과 국가마다 그리고 시기마다 평균 강우량이 다르므로 특정지역과 특정시기에 평균적으로 내려야하는 강우량보다 적은 경우에는 가뭄 상태로 나타낼 수 있으며, 무강우일수나 무강우 지속일수, 그리고 강우량의 과소량을 평균적인 값과 비교하여 나타낸다. 대표적인 것이 SPI (Standardized Precipitation Index)이다. 농업가뭄은 부족한 강우로 인하여 토양수분이 감소하여 작물생육에 영향을 주는 경우이다. 당연히 무강우일수가 증가하면 농업가뭄으로 이행되는 특징이 있다. 수문학적 가뭄은 수자원확보에 따른 공급량 가능량으로 평가하는데 수자원확보가 충분하면 기상학적 가뭄에서도 수문학적 가뭄은 발생하지 않는다. 대표적인 것이 SWSI (Surface Water Supply Index)이다.

가. 재해 특성

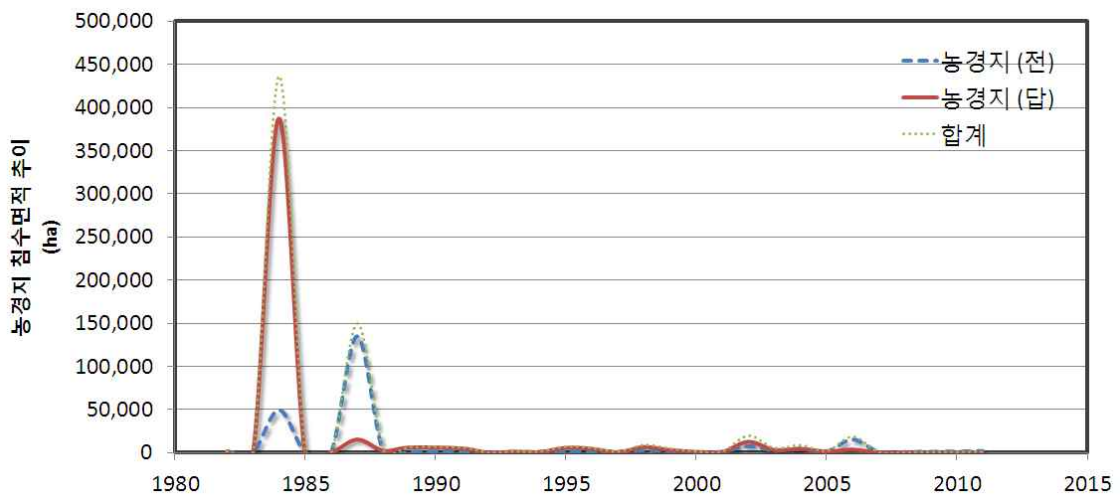
최근 1982년 ~ 2011년 기간 동안 홍수로 인해 발생한 피해의 총액을 살펴보면 1980년대에 비해 2000년대에 들어서 총 피해액이 크게 증가하는 추세를 보이고 있다. [그림 4-9]는 홍수로 인한 총 피해액을 보여주고 있다.



[그림 4-9] 연도별 홍수로 인한 총 피해액 추이 (1982 ~ 2011) (소방방재청, 2013)

*자료: 소방방재청 (2013) 보고서의 자료를 바탕으로 그래프 구성

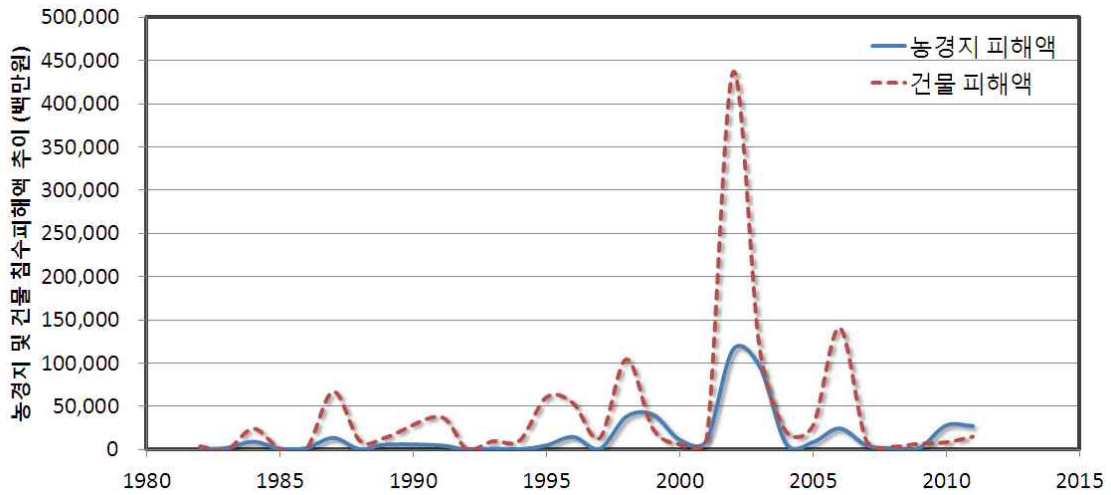
[그림 4-10]은 홍수로 인한 농경지의 침수피해면적을 나타내고 있다. 전체적으로 논의 피해 면적이 밭에 비해 2배 정도 큰 것으로 보인다.



[그림 4-10] 연도별 농경지 침수피해면적 추이 (1982 ~ 2011) (소방방재청, 2013)

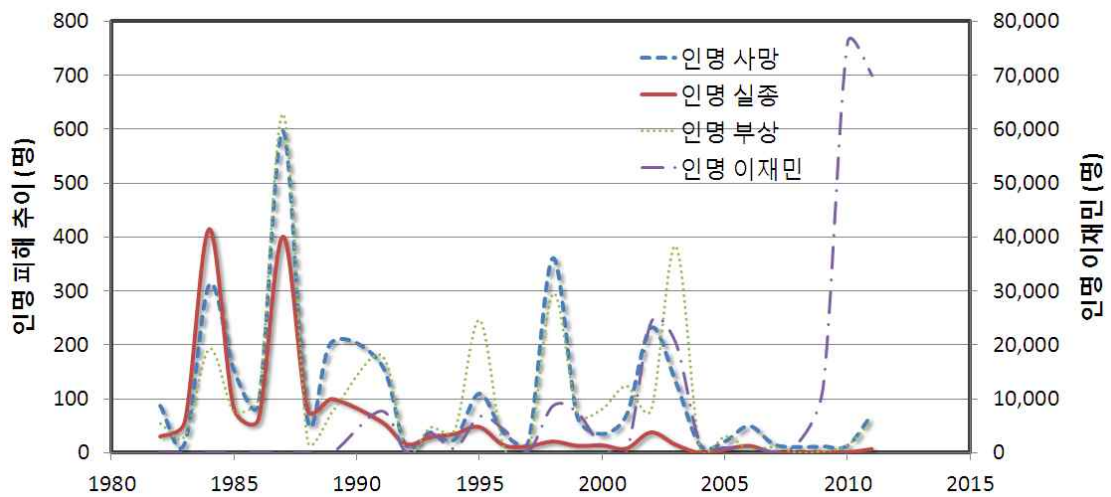
[그림 4-11]은 홍수로 인한 농경지 및 건물의 침수피해액을 나타내고 있다. 농경지 피해액과 침수피해액은 2002년에 약 4369억, 1158억으로 가장

크게 조사되었다.



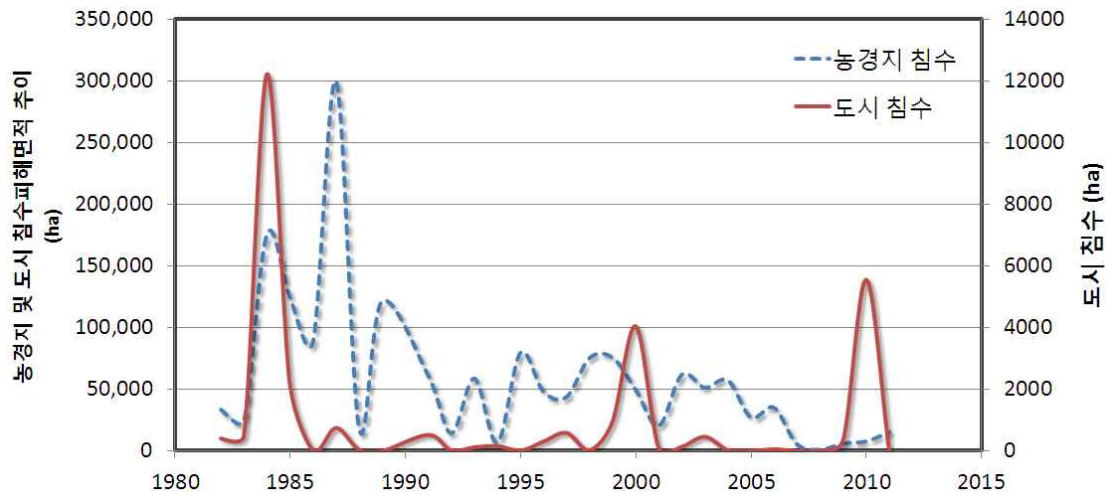
[그림 4-11] 연도별 농경지 및 건물 침수피해액 추이 (1982 ~ 2011) (소방방재청, 2013)

[그림 4-12]는 홍수로 인한 인명 피해 추이를 나타내고 있다. 인명 피해를 살펴보면 1980년대부터 지속적인 피해가 발생한 것으로 조사되었다.

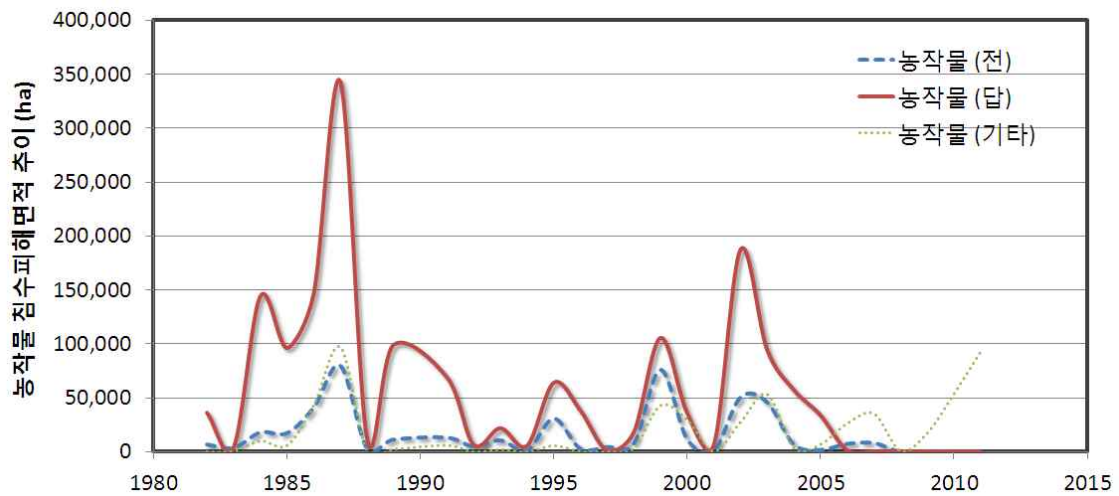


[그림 4-12] 연도별 인명 피해 추이 (1982 ~ 2011) (소방방재청, 2013)

[그림 4-13]은 홍수로 인한 농경지 및 도시 침수피해면적을 보여주고 있으며, [그림 4-14]는 농작물의 침수피해면적을 나타내고 있다.



[그림 4-13] 연도별 농경지 및 도시 침수피해면적 추이 (1982 ~ 2011)
(소방방재청, 2013)

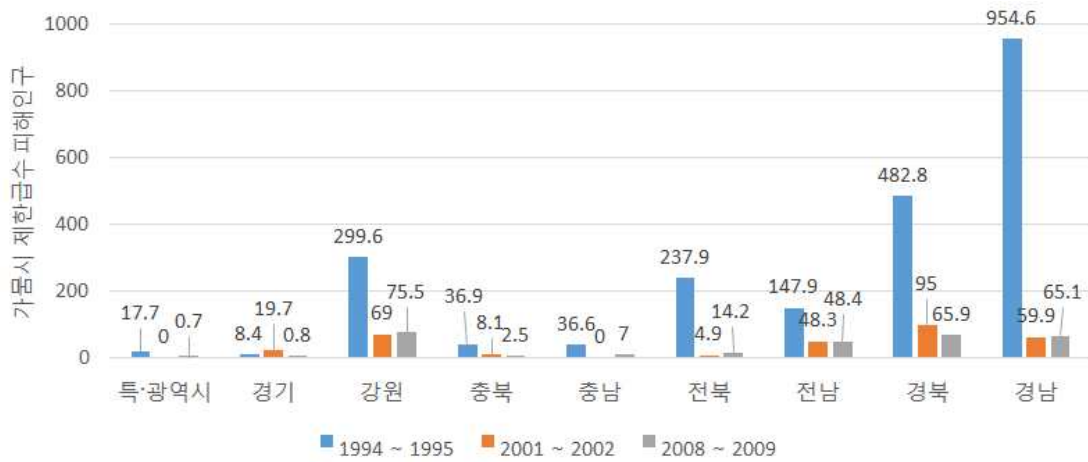


[그림 4-14] 연도별 농작물 침수피해면적 추이 (1982 ~ 2011) (소방방재청, 2013)

기후변화로 인한 이상가뭄의 발현빈도가 증가함에 따라 물 부족에 대한 대처능력의 제고가 필요하다. 1990년대 이후에는 지역에 따라 소규모 가뭄과 7년 주기의 극한 가뭄이 발생하고 있다 (국토해양부, 2011) [표 4-2]와 [그림 4-15]는 최근 40년간 극한가뭄의 발생 현황과 과거 가뭄 발생 시의 피해 현황을 나타내고 있다.

[표 4-2] 최근 40년간 극한가뭄 발생 및 피해 현황 (국토해양부, 2011)

가뭄년도		피해현황	출처
1967 ~ 1968	1967	가뭄면적 420,547ha, 피해액 6,266억 원	가뭄기록조사보고서 (2002.6, 건설교통부)
	1968	가뭄면적 470,422ha, 피해액 7,009억 원	
1981 ~ 1982	1981	가뭄면적 145,457ha, 피해액 2,167억 원	
	1982	가뭄면적 231,244ha, 피해액 3,445억 원	
1994 ~ 1995		86개 시군 가뭄면적 173,269ha	가뭄기록조사보고서 (1995.12, 건설교통부)
2001 ~ 2002	2001	86개 시군 304,815명 제한급수	2001년 가뭄기록조사보고서 (2002.6, 건설교통부)
	2002	23개 시군 92,838명 제한급수	
2008 ~ 2009		77개 시군 1,227개 마을	2008~2009 가뭄극복추진 성과보고서 (2009, 중앙재난 안전대책본부, 소방방재청)



[그림 4-15] 과거 가뭄 시 제한급수 피해인구 현황 (국토해양부, 2011)

나. 피해 사례

2012년에 발생한 홍수와 가뭄 관련 이상기후의 피해현황을 조사하여 정리하였다. [표 4-3]와 [표 4-4]은 각각 세계와 우리나라에서 발생한 이상기후의 피해현황을 나타내고 있다.

[표 4-3] 2012년 세계 이상기후 발생 현황 (기상청, 2012)

국가	재해 종류	발생 현황
아시아/호주		
일본	태풍	6.20 : 제 4호 태풍 구츨, 1명 사망, 77명 부상, 6만 5천여 가구 16만 명 대피
	폭우	7.16 : 규슈지역 폭우로 인한 홍수, 25명 사망, 7명 실종
중국	가뭄	1.26 : 중국 장시성 겨울 가뭄, 100만명 식수난
	가뭄	6.22 : 60년만의 최악의 가뭄, 윈난성에서 300만명 식수난, 경제손실 1조 7천억원 추정, 윈난선 12월부터 3월까지 강수량 1951년 이후 60년 만에 최저기 기록
	가뭄	6.8 : 쓰촨성을 비롯 13개 성 가뭄, 400만ha 농작물 피해, 윈난, 산시, 간쑤성에서 780만명과 가축 460만 마리 식수부족
	가뭄	2.10 : 장수성 등에 50년 만에 최악의 가뭄, 98만여명 피해, 3천 3백만 위안 재산피해 발생
	홍수	5.17 : 남부지역 홍수, 이재민 519만명 발생
	폭우	7.16 : 남부지역 폭우, 최소 12명 사망, 84만여명 피해, 농경지 5만ha 침수, 565억여원 피해, 이재민 70만명
	폭우	7.21 : 베이징 폭우, 77명 사망, 190만명 이재민 발생, 항공기 결항
	폭우	7.22 : 쓰촨성 폭우, 최소 62명 사망 또는 실종, 가옥 6400여채 붕괴, 이재민 62만명 발생
태국	태풍	8.10 : 제 11호 태풍 하이쿠이, 저장성 150만명, 상하이 37만여명 대피, 고속도로 및 철도 운행 중단
	폭우	1.2~4 태국 : 남부 폭우, 도로 및 주택 침수, 3개 지역 재난지역 선포
인도	폭우	7.6 : 북동부 아삼지역 폭우, 최소 121명 사망
	홍수	10.5 : 인도 동북부 아삼주 홍수 어린이 180만명 이재민
대만	홍수	11월 초: 남부 열대 사이클론으로 홍수 발생, 25명 사망, 수만명 이재민 발생
	폭우	6.13 : 타이완전역에 사흘 간 폭우, 반도체공장 침수, 5명사망, 3천여명 이재민 발생, 6천 500여 가구 정전
방글라데시	폭우, 홍수	6.29 : 방글라데시 폭우와 홍수로 인한 산사태, 최소 100여명 사망, 25만여명 대피
필리핀	태풍	6.2 : 제 3호 태풍 마와르 마닐라 폭우, 한국인 2명 실종
	태풍	6.17 : 제 4호 태풍 구츨, 8명 사망, 63명 실종, 이재민 7천여 명
	폭우, 홍수	7.21 : 폭우로 인한 홍수, 8명 사망
	태풍	7.30 : 제 9호 태풍 사올라, 12명 사망, 2명 실종, 이재민 30만명 발생
	집 중 호우	8.9 : 마닐라지역 집중호우, 최소 20명 사망, 이재민 2만여명

	태풍	12.2~6 : 제 24호 태풍 보파 관통, 초대형 태풍 사상자 1600여명 (사망 714명, 실종 890여명), 이재민 20만명
북한	가뭄	5.26 : 서해안지역 50년 만에 최악의 가뭄, 40여일 강수가 없어서 40% 농경지 피해
	태풍	8.28 : 제 15호 태풍 블라벤, 25명 사망 및 실종, 이재민 220만명, 정전 및 문화재 훼손
홍콩	태풍	7.24 : 제 8호 태풍 비센티, 100여명 부상, 항공기 결항
인도네시아	폭풍	1.29 : 인도네시아 열대성 폭풍우로 70여명 사상
우크라이나	가뭄	우크라이나지역 가뭄, 세계 곡물 가격 급등
피지	홍수	1.23 : 홍수, 2명 사망, 700여명 이재민 발생
호주	홍수	2.3 : 동부지역 홍수, 10,000여명 고립, 뉴 사우스 웨일즈 북부도시 주택이 물에 잠겨 2,300여명 대피
	폭우	3.5 : 동부 그리피스 폭우와 홍수, 6,000여명 대피
	강풍, 폭우	6.6 : 시드니지역 120km 강풍과 폭우, 2만 5천여 가구 정전, 도로 유실
베트남	태풍	4.3 : 제 1호 태풍 파카르, 8명 사망, 8명 부상, 가옥 712채 피해
아프가니스탄	홍수	6.23 : 홍수, 최소 30여명 사망, 100여명 이상 실종
파키스탄	폭우	8.23 : 폭우로 인한 산사태와 홍수, 26명 사망, 가옥 수백여채 파손
베트남	태풍	10.29 : 태풍 손뎌 중부 강타 26만명 대피
북미/남미		
미국	허 리 케인	8.30 : 허리케인 아이작, 루이지애나주에 폭우와 해일로 84만 가구 단전, 1조 7000억원 피해
	가뭄	8.22 : 중부지역 가뭄 지속, 미시시피강수위가 낮아져 선박운행 중단
	허 리 케인	10.22~29 : 동부지역 샌디로 인해 최소 113명 사망 (뉴욕시 43명), 역대 최대 급
	허 리 케인	최소 860만가구 정전 피해, 경제적 손실 300억~500억 달러 예상 1851년 이후 처음으로 10월에 허리케인이 미국 뉴저지까지 북상
브라질	호우	1.11 : 브라질 남동부 호우 13명 사망, 수 천명 이재민
	가뭄	1.18 : 가뭄지속, 식량인플레이 우려
	가뭄	5.14 : 북동부지역 30년 만에 최악의 가뭄, 400만명 주민 피해, 가축 폐사, 식수 공급 중단
	홍수	5.6 : 북서부 아마조나스주 홍수, 수 만명 대피
파라과이	가뭄	1.6 : 구제역 이어 가뭄으로 큰 피해
멕시코	가뭄	1.28 : 가뭄, 250만명 기근 위험
볼리비아	홍수	2.24 : 브라질과 접경지대 홍수, 10여명 사망, 9천여 가구 이재민 발생
유럽/아프리카		
소말리아	가뭄	1.15 : 가뭄, 25만명 기근 상황
터키	홍수	7.5 : 북부지역 홍수, 8명 사망
마다가스카르	사이클론	3.7 : 사이클론 이리나, 최소 65명 사망, 3명 실종 1.31 : 동유럽 한파 최소 58명 사망 우크라이나, 모스크바, 폴란드...

남아프리카	호우	1.19 : 크루거 공원 호우
브라질	가뭄	3.14 : 가뭄, 대두 생산지역 타격
아프리카	가뭄	6.21 : 서부 아프리카 사헬지역 가뭄, 1천 3백 만명 피해,
독일	폭풍우	7.9 : 폭풍우로 인해 3명 사망
크로아티아	가뭄	8.29 : 곡창지대 가뭄, 2억 5000만 달러 피해
스페인	폭우	10.1 : 남부 홍수로 수백명 이재민 속출
이탈리아	홍수	10월말~11월초: 수일간 지속된 폭우1m 2cm상승. 베니스 물에 잠겨 1872년 이후 6번째로 큰 홍수, 4명 사망 1억 유로 피해 11.1 4 : 티베르 강 범람, 로마 북부 물에 잠김
영국	홍수	11.21~: 겨울비 일주일 이상 이어져 남서부와 동북부, 웨일즈 북부 호우 경보 발령 남서부 콘월 주 코버 강 범람, 가옥 800만채 물에 잠김
러시아	폭우, 홍수	7.9 : 남서부지역 폭우로 인한 홍수, 150여명 사망, 이재민 1만 3천여명 발생

[표 4-4] 2012년 우리나라 이상기후 발생 현황 (기상청, 2012)

재해종류	월	발생 현황
집중호우	3월	우리나라 남쪽으로 저기압 통로가 형성되었고, 대륙고기압이 세력을 유지하면서 주기적으로 이동성 고기압으로 변질되어 그 후면으로 저기압이 발달하여 잦은 강수가 있었음. [극값 현황] 3월 강수일수 10.8일 (최다 2위) 3월 일강수량 극값 1위 경신 (단위: mm) - 30일 부산 101.0, 고흥 83.5, 밀양 51.5
	4월	따뜻하고 습한 저기압이 우리나라 남쪽해상을 자주 통과하면서 남부 지방 중심을 중심으로 전국에 세 차례 많은 비가 내렸음. [극값 현황] 4월 일강수량 극값 경신 (단위: mm) 21일: 포항 76.0, 흑산도 66.0, 완도 149.0, 고산 84.5, 서귀포 197.5 25일: 진도 99.5
	7월	장마전선의 영향으로 중부지방을 중심으로 많은 비가 내렸으며, 지역적 강수량 편차가 큰 특징을 보였음 (5~6일 중부지방 호우) [극값 현황]

		7월 일강수량 극값 경신 (단위: mm) - 6일: 원주 255.5, 영월 173.5, 태백 172.5
	8월	12~13에 북태평양 고기압의 가장자리를 따라 들어오는 저기압의 영향으로 서해안 일부지역에 300 mm 이상 집중호우가 발생하였음. [강수 현황] 주요 지점 12~13일 누적 강수량 (단위: mm) - 군산 273, 군산산단 (AWS) 444.0, 태안 (AWS) 385.0, 만리포 (AWS) 350.5 24일은 서해상에서 북상하는 기압골의 24 영향으로 전라도와 제주도를 중심으로 시간당 30mm 내외의 강한 비가 내림 [극값 현황] 관측이래 일강수량 극값 경신 (단위: mm) - 여수 308.9 (1위), 서귀포 266.0 (3위)
	10월	22일과 27일에 저기압의 영향을 받아 전국적으로 많은 양의 비가 내렸음 * 10월 하순 전국 강수량이 52.9 mm로 1973년 이후 최고 2위 기록 [극값 현황] 10월 일 강수량 극값 경신 (단위: mm) - 22일: 대전 57.6 (2위) - 27일: 부산 130.0 (2위), 동두천 47.0 (1위), 문산 45.5 (1위)
태 풍	7.18~19 17호 카눈	고위도에서 발생하여 서해안을 따라 북상한 이례적 태풍 서해안을 따라 북상하여 제주도와 서쪽지방에서는 강한 바람과 함께 많은 비 (제주산간과 지리산 부근)가 왔음. [극값 현황] 7월 일 최대 순간풍속 극값 경신 (단위: m/s) - 고창 24.1 m/s (1위)
	8.27~28 15호 블라벤	2000년 이후 서해상으로 북상한 가장 강한 태풍 [주요 지점 누적 강수량 (단위: mm)] - 제주 305.9, 해남 202.5, 흑산도 149.8 [주요 지점 최대 순간풍속 (단위: mm)] - 무등봉 (광주) 59.5 m/s (극값 1위), 완도 51.8, 군산 39.7
	8.29~30 14호 덴빈	43시간내연이어 한반도에 상륙한 관측이래 최초의 태풍으로 육상을 통과하는 동안 진행방향의 왼쪽인 충청도와 전라도에서는 200 mm 이상의 많은 비가 내렸고, 진행방향의 오른쪽인 남부지방은 매우 강한 바람이 불었음. [주요지점 누적 강수량 (단위: mm)] - 진도. 243.4 (30일일강수량은 235.5로 극값 기록), 정읍221.0, 목포181.1 부여165.5 [주요지점 30일 최대순간 풍속 (단위: m/s)] - 고산 34.1, 목포 33.7, 통영 32.3, 제주 32.1, 여수 23.3
		3개의 태풍이 연이어 한반도에 상륙한 최초 사례 한 해 동안 4개의 태풍이 한반도에 상륙한 것은 1962년 이후 50년

	9.16~17 16호 산바	만입. 남해안 상륙 시 중심기압이 965hPa을 기록하여 남해안 상륙한 태풍들 중 역대 5위를 기록 [주요지점 강수량 (단위: mm)] - 제주 399.2 북창원 323.0, 북창원 323.0, 남해 300.0, 여수 230.7 * 17일 진도 9월 일강수량 184.5 mm로 극값 경신 [주요지점 최대 순간풍속 (단위: mm)] - 통영 39.4, 여수 38.8, 제주 30.4, 목포 27.7 * 17일 봉화 일최대순간풍속 25.2 m/s로 극값 경신
가 목	2월, 5월, 6월, 7.21~8.10	[극값 현황] 전국 평균 강수량 (단위: mm) - 2월: 10.4 (평비 24%, 1973년 이후 최저 5위) - 5월: 36.2 (평비 36%, 1973년 이후 최저 3위) - 6월: 74.7 (평비 50%) - 7월21일~8월10일: 16.0 (평비10%, 1973년 이후 최저1위) ※ 한강·낙동강녹조발생 서울 강수 현황 (단위: mm) - 2월 강수량: 0.8 mm (평비 3.2%) 1973년 이후 최저 2위) - 5월 강수량: 8.2 mm (평비 7.7%) 1908년 관측 이래 최저 2위) - 6월 강수일수 4일로 1908년 관측 이래 가장 적었음.

제 4절 토질/지반 관련 재해의 분석

최근 지구온난화로 세계 곳곳에서 집중호우, 돌발폭우 및 태풍 발생으로 인한 댐 및 저수지 붕괴 우려가 증대되고 있고, 이에 따른 하류지역 주민들의 불안감도 고조되고 있는 상황이다. 특히, 20세기 들어 전 세계적으로 약 200여건 이상의 댐 붕괴사고가 발생하여 댐 하류지역에 막대한 인명 및 재산피해가 발생하였으며, 약 11,000여명 이상의 인명피해가 발생한 것으로 조사되었다.

우리나라는 여름철에 연강우량의 2/3가 내리고 국지성 집중호우가 빈발하고 있으며, 좁은 국토에 많은 인구를 수용하기 위한 토지이용의 고도화, 경제발전 및 산업구조의 다양화로 인하여 도시의 인구 및 자산의 집중현상은 호우피해의 대형화, 다원화를 가져올 수밖에 없는 자연적, 인문적인 취약점을 가지고 있다. 지구온난화로 인하여 과거의 기상 특성과 다른 기상

변화가 이미 시작되었고, 그로인해 돌발적이고 국지적인 집중호우 발생으로 막대한 홍수피해를 유발하고 있는 점을 고려할 때 앞으로 건설된 지 오래된 댐의 설계홍수 초과 사례가 증가할 것으로 예상된다.

또한 댐 붕괴와 같은 댐의 비상상황은 하류지역에 많은 인명 및 재산피해를 가져오므로 사전에 이를 방지하는 것이 가장 중요하며, 이를 위하여 대규모 홍수나 지진과 같은 자연현상으로부터 기존 댐에 대한 안전성 여부를 평가하고 댐의 안전성에 문제가 있을 경우 그에 대한 대책을 시급히 강구해야 할 것이다.

1. 댐 붕괴의 원인

댐의 비상상황은 크게 홍수, 지진, 댐체의 노후화에 의한 댐체의 구조적 결함 등과 같은 자연적 원인뿐만 아니라 설계오류, 부실시공, 유지관리 부실 및 파괴 등과 같은 인위적 원인에 의하여 발생된다고 할 수 있다. 이러한 댐의 비상상황의 발생원인에 의하여 각 댐에 나타나는 손상요인으로는 월류, 균열, 파이핑, 침하, 변형침식, 침투, 사면활동 등을 비롯한 여러 요소가 있으며, 이들은 댐체 및 관련 구조물에 작용하여 댐의 비상상황을 유발시키는 주원인이다.

월류로 인해 파괴된 댐의 주된 원인들은 유입량에 대한 낮은 추정치(65%), 원활히 작동하지 않는 수문(14%)이나 월류시의 구조적 불안정성(21%) 등이다 (Vogel, 1992). 그리고 전세계적으로는 월류에 의해 파괴된 경우가 가장 큰 비중을 차지하고 있다.

인적 오류는 발생의 유형에 따라 '단기 오류(Short time error : STE)'와 '장기 오류(Long Time Error : LTE)'로 구별될 수 있다. 단기 오류는 댐 건설 직후 또는 5년 이내, 그리고 초기 담수의 시기에 나타나는 반면에 장기 오류는 오랜기간 잠재되어 다른 인자나 상황과 함께 복합적으로 나타나며, 매우 위협적인 상황을 초래하기도 한다. 댐의 안전도 평가 측면에서 댐의 생애는 건설기(Birth stage : BS), 사용기(Life stage : LS), 노화기(Aging stage : AS) 등 3단계로 나눌 수 있다. 기술자들이 복합적인 업무를 수행해야 하는 조사 및 설계 단계에서는 단기 오류뿐만 아니라 장기 오류도 나타날 수 있다. 댐 건설의 안전성에 대한 연구 결과에 따르면, 댐과

괴의 50%가 담수 전, 초기 담수 동안 또는 초기 담수 후 5년 이내에 발생한다고 한다(Hirschberg 등, 1998). 따라서, 댐 파괴의 50%가 단기오류에 의한다고 할 수 있다(Vogel, 2000).

댐 지역의 장기간에 걸친 수문학적 자료부족은 수문해석의 오류를 발생시켜 건설기간 중 월류에 의한 댐의 파괴가 가끔 발생하게 된다. 월류에 의해 파괴된 85개의 댐 중에서 건설 중에 13개, 준공 후 5년 이내에 19개가 파괴되었다(Vogel, 1992). 수문학적 자료의 결핍은 장기오류를 초래하며 장기적으로 댐 운영에 치명적인 영향을 미친다. 이탈리아의 Sella Zerbino 댐은 준공 후 10년이 경과한 1935년에 월류가 발생하여 기초부까지 완전히 파괴되었다. 조사결과에 따르면, 위험도 등급이 높은 댐은 가능최대홍수량(PMF)으로 설계하여야 하는 것이 최근의 추세이며 기준임에도 불구하고 단지 20년 빈도에 불과한 방류능력을 갖고 있는 댐도 존재하는 것으로 나타났다. 이러한 조건하에서는 다양한 파괴요인에 대해 저항력이 우수한 것으로 간주되는 중력댐에서도 위험한 결과를 나타내게 된다. 지반조사의 오류에는 단기오류와 장기오류가 다같이 존재한다. 초기 담수와 관련하여 지질공학적 단기오류로 대부분 댐의 건설기간 동안에 이미 치명적인 영향을 나타내게 된다.

댐의 안전관리 측면에서 볼 때, 알려진 바와 같이 기초파괴가 가장 위험한 파괴의 결과를 보인다. 1802년 스페인의 Puentes 댐 파괴, 1928년 미국의 St. Francis 댐과 1959년 프랑스의 Malpasset 댐 등이 기초파괴에 의하여 댐체가 단기간(3분)에 붕괴된 전형적인 예이다.

계산오류에 의한 대댐의 파괴로는 1959년에 파괴된 스페인의 Vega de Tera댐이 유일한데, 이 댐은 높이가 33.5m인 콘크리트 슬래브 석괴 부벽댐이었다. 불량한 석재와 모르타르 사용, 부벽 중 한 개 기초의 부실시공으로 인해 석괴의 탄성계수가 계산시 가정했던 것보다 30배나 작은 값을 가지게 되었다. 석괴 부벽과 100m에 이르는 콘크리트 슬래브의 갑작스런 파괴로 8×106m³용량의 저수지 물이 방류되었고, 144명의 인명손실이 발생하였다(Vogel, 1984). 건설기간 중의 단기오류는 a) 흙댐의 부분적인 흘러내림과 활동, b) 초기 담수기간 중에 건설중인 댐체의 침식 또는 월류, c) 시공 불량으로 인한 만수상태에서의 댐의 완전한 붕괴 등 3가지 붕괴형태를 나

타낸다. 건설 후 물이 저수되지 않는 한, 활동과 미끄러짐은 댐체만의 파괴를 가져온다. 댐파괴에 관한 국제적인 통계치는 모든 저수지의 물이 완전 방류되었을 때의 경우만을 고려한 수치이다(ICOLD, 1995).

영국의 Carsington댐은 1984년 건설기간 중 상류사면에서 500,000m³의 토사가 흘러내리면서 파괴되었다. 이와 유사한 요인으로 인해 1888년에 오스트리아의 Prospect 댐, 1909년 멕시코의 Necaxa 댐, 1938년 미국의 Fort Peck Dam 댐 등에 부분적인 파괴가 발생하였다.

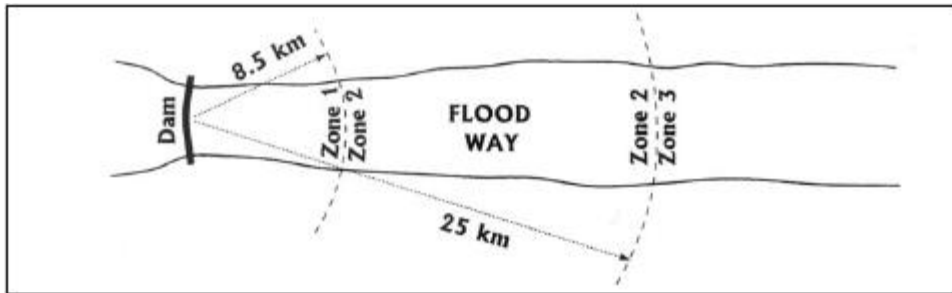
초기 담수 시점으로부터 지질학적, 수문학적 또는 건설기간중의 이러한 인적오류들은 파괴를 가져오고 더 나아가 홍수파를 발생시켜 공공 위험을 증가시킨다. 1923년 이탈리아의 Gleno 댐과 1925년 웨일즈의 Eigiau 댐의 파괴는 잘 알려진 사례이며, 부실한 시공과 감리가 사고의 원인으로 600여 명의 인명손실이 발생되었다(Vogel, 1982).

댐의 생애 중 노화기 단계에서 장기오류가 확실하게 나타나게 된다. 이 단계에서는 부실시공에 의한 내부침식이나 파이핑에 따른 파괴가 발생할 수 있는 시기이며, 또한 공용수명에 도달한 시점이 될 수도 있다. 노후화에 의한 파괴는 시공이나 장기간의 운영상에 놓여있는 하나의 과정이라 할 수 있다. 인도의 Kantalai 댐은 1400년간 운영 후 1986년에 파괴되었다. 미국의 Mohegan Park 댐과 영국의 Warmwithens 댐은 모두 110년간 운영되어 왔으나 내부 노후화에 의해 1963년 및 1970년에 각각 파괴되었다. 누수량 측정장치가 설치되지 않은 오래된 필댐에서는 문제가 심각해지기 전까지 침식에 따른 위험한 상황을 감지하기가 거의 불가능하다. 노후화에 따른 파괴의 진행 속도는 매우 빨라서 인지된 후에는 대처하기가 거의 불가능하다.

2. 저수지 붕괴의 영향

파괴역학에 대한 연구(Vogel, 1993; 1998)와 파괴 후의 측정 결과에 따르면 댐 파괴시 파의 전달속도는 3m/s~7m/s의 범위를 갖는다. 재해의 정도는 댐이나 저수지의 규모와는 상관성이 적지만, 파괴의 진행과정과 밀접한 관련이 있다. 댐 파괴에 대한 위협의 인식과 파괴 후 침수 가능지역의 주

민 대피 여건에 따라 인명 및 재산피해는 증가 또는 감소될 수 있다. 댐 파괴의 경우 홍수발생 지역은 아래의 [그림 4-16]과 같이 세 개의 영역으로 나눌 수 있다.



[그림 4-16] 저수지 파괴 발생시 홍수발생 영역

콘크리트 또는 석괴 댐이 파괴되는 경우 초기 20분내에 침수되는 Zone 1(하류 8.5km 반경범위)에서의 사람이나 동물의 생존가능성은 희박하다. 안전을 고려할 때 댐이 운용되는 동안 Zone 1에는 사람이 거주하지 않아야 하며, Zone 2와 Zone 3에 대한 경보체제의 구축은 필수적이라 할 수 있다. 따라서, 댐으로부터 원격조정이 가능한 홍수예경보 시설이나 원거리 통신시스템을 Zone 2와 3에 설치하되 Zone 1의 침수범위 밖에 위치시켜야 한다. 콘크리트 및 석괴댐의 파괴에 의해 야기되는 홍수는 막대한 힘을 갖고 있으므로, Zone 1에서 발생하는 홍수파고의 예측을 위해서는 예상되는 파괴 요인에 대한 가능 파괴 시나리오(A Probable hazardous failure scenario(PHFS))를 반드시 고려하여야 한다. 적절하게 작동되는 예경보 시스템이 있는 경우, 댐파괴 이후 초기 한시간 내에 침수되는 지역(댐 25km 하류)인 Zone 2에 살고 있는 사람들은 자력으로 대피하는데 문제가 없으며, Zone 3의 하류지역 사람들은 공공의 비상조치계획에 따라 대피가 가능하다.

흙댐이나 제방댐은 그 붕괴과정이 콘크리트댐의 경우와는 전혀 다른 양상을 보인다. 대부분의 경우 흙댐 및 제방댐은 파괴의 경우와는 초기단계에서 최종적인 파괴단계에 이르기까지 상당한 시간이 소요된다. 이 경우 Zone 1에 거주하는 사람들의 효율적인 대피가 가능할 것으로 보인다. 이에 대한 좋은 예로 1960년에 발생한 브라질의 Oros 댐의 파괴를 들 수 있는

데, 120,000명의 사람들이 대피할 수 있었으며, 반면에 사상자는 50명 정도에 그쳤다. 또한 미국 LA의 Baldwin Hill저수지가 1963년에 파괴될 당시 Zone 1에 상주하던 수백명이 성공적으로 대피하였다.

월류에 의해 파괴가 발생하는 경우 대부분의 흙댐은 전체 높이까지 파괴되는데 0.2~3시간이, 록필댐은 0.2시간이 소요된다. 상류에 위치한 대댐이 파괴되어 발생하는 급작스런 홍수는 하류에 위치한 흙댐이나 사력댐의 전체를 휩쓸어버리기도 한다. 콘크리트 댐은 보다 오랜 시간 월류에 견딜 수 있으나, 파괴의 진행속도는 매우 빠르다. 기초를 통한 파이핑 파괴의 경우 파괴에 소요되는 시간은 댐의 형식에 관계없이 0.5~4.0시간의 값을 보인다. 댐의 본체를 통한 파이핑 파괴가 발생할 경우에는 0.3~4.0시간까지로 그 시간이 다양하다. 이 경우 댐 기초형식에 관계없이 갑작스런 파괴를 가져오며, 이는 Puentes, St. Francis, Vega de Tera, Malpasset 댐 파괴의 경우와 같은 비극적인 예를 통해 알 수 있으며, 활동파괴가 발생한 Bayless 댐이나 Tigra 댐의 경우도 비슷한 결과를 보인다.

3. 저수지 붕괴 사례

가. 국내 붕괴 사례

(1) 효기리 댐

구분	내용
시설물 위치 및 붕괴 일시	- 붕괴일시 : 1961년 - 시설물 위치 : 전북 남원군
시설물 형식 및 체원	- 댐형식 : 흙댐 - 높이 : 15m - 총저수용량 : 223,000m ³
붕괴 내용 및 원인	- 2시간 30분 동안의 150mm 강우로 인한 체체 월류
피해정도	- 인명피해 : 57명 실종/9,800여명 이재민

(2) 연천댐

구분	내용
시설물 위치 및 붕괴 일시	- 붕괴일시 : 1996년, 1999년 - 시설물 위치 : 경기도 연천군
시설물 형식 및 제원	- 댐형식 : 콘크리트+토사혼합 - 높이 : 22m - 총저수용량 : 13,000,000m ³
붕괴 내용 및 원인	- 설계홍수량은 5,230m ³ /s, 1996년 7월 26일~27일 집중호우로 약 7,540m ³ /s 유입한 것으로 추정되며 이로 인해 댐 월류, 월류된 홍수량이 댐 우안부를 급속히 세굴시켜 댐체가 수압에 의해 붕괴(2000년 철거)
피해정도	- 소규모 댐으로 댐의 붕괴가 하류부에 얼마나 피해를 가중시켰는지 단정 할수 없음

(3) 동막댐

구분	내용
시설물 위치 및 붕괴 일시	- 붕괴일시 : 2002년 - 시설물 위치 : 강원도 강릉시
시설물 형식 및 제원	- 댐형식 : 흙댐 - 높이 : 32m
붕괴 내용 및 원인	- 여수로 설계홍수량 14m ³ /s를 초과하는 67m ³ /s 이상의 홍수량으로 여수로 및 댐 붕괴 (태풍 루사)
피해정도	- 물적피해 : 하류지역 주택침수 및 붕괴, 농경지 침수, 하천범람, 교량파괴

(4) 장현댐

구분	내용
시설물 위치 및 붕괴 일시	- 붕괴일시 : 2002년 - 시설물 위치 : 강원도 강릉시
시설물 형식 및 제원	- 댐형식 : 흙댐 - 높이 : 15m
붕괴 내용 및 원인	- 여수로 설계홍수량 190m ³ /s를 초과하는 313m ³ /s 이상의 홍수량으로 여수로 및 댐 붕괴 (태풍 루사)
피해정도	- 물적피해 : 13가구 유실, 저수지 영향권 1.5km ² 구간의 농경지 침수/매몰

나. 국외 붕괴 사례

(1) Vaiont

구분	내용
시설물 위치 및 붕괴 일시	<ul style="list-style-type: none"> - 붕괴일시 : 1963년 - 시설물 위치 : 이탈리아
시설물 형식 및 제원	<ul style="list-style-type: none"> - 댐형식 : 아치댐 - 높이 : 262m - 총저수용량 : 115,000,000m³
붕괴 내용 및 원인	<ul style="list-style-type: none"> - 집중호우로 인한 산사태로 저수지에서 발생한 파도에 의해 댐체 손상으로 댐붕괴
피해정도	<ul style="list-style-type: none"> - 인적피해 : 사망 2,600명

(2) Frias

구분	내용
시설물 위치 및 붕괴 일시	<ul style="list-style-type: none"> - 붕괴일시 : 1970년 - 시설물 위치 : 아르헨티나
시설물 형식 및 제원	<ul style="list-style-type: none"> - 댐형식 : 록필댐 - 높이 : 15m - 총저수용량 : 200,000m³
붕괴 내용 및 원인	<ul style="list-style-type: none"> - 저수용량 200천m³의 수십배의 홍수유입으로 댐 월류
피해정도	<ul style="list-style-type: none"> - 인적피해 : 사망 42명, 실종 60명 이상 - 물적피해 : 일부 포도농장과 사과, 배 등 경작물의 심각한 피해

(3) Canyon Lake

구분	내용
시설물 위치 및 붕괴 일시	- 붕괴일시 : 1972년 - 시설물 위치 : 미국
시설물 형식 및 제원	- 댐형식 : 흙댐 - 높이 : 152m
붕괴 내용 및 원인	- 초저녁부터 밤사이에 250mm의 폭우로 인하여 저수지에서 발생한 파도가 제체를 세굴시키고 제체 월류
피해정도	- 인적피해 : 사망 237명, 실종 5명 - 물적피해 : 1,200여 가옥 완파, 2,500 가옥 큰 피해 100여개 상점 및 공장들 파손 및 파괴 5,000 여대 자동차 파손, 7개 고량, 80개 블록의 거리, 8.9km 철도 파괴

(4) Machhu II

구분	내용
시설물 위치 및 붕괴 일시	- 붕괴일시 : 1979년 - 시설물 위치 : 인도
시설물 형식 및 제원	- 댐형식 : 흙댐 - 높이 : 26m - 총저수용량 : 101,000,000m ³
붕괴 내용 및 원인	- 설계홍수량은 5,660m ³ /s, 1979년 8월 14,160m ³ /s이상의 유입량이 발생하여 월류로 붕괴
피해정도	- 인적피해 : 2,000명 이상 사망 - 물적피해 : Machhu I, II 각각 약 200만달러와 400만 달러 피해 및 15백만 달러 상당의 농산물피해 12,000여 가옥 완파, 7,000 가옥 부분파손

제 5 장 농업생산기반시설 안전성 분석기술

제 1 절 수리/수문 안전성 분석기술

본 연구에서는 기후변화 및 사회변화에 따른 농업생산기반시설의 수리/수문 취약성 평가를 실시하였다. 대상 저수지에 대한 수리/수문 안정성 재검토를 수행하여 최근에 발생한 이상기후에 따른 영향을 평가한 다음, 이를 기반으로 수리/수문 취약성을 평가하였다. 안정성 재검토는 홍수량 및 저수지 월류량을 HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System) 모형 및 HEC-5 모형으로 모의하여 산정한 200년 빈도 홍수량과 PMF 홍수량을 설계당시의 저수지 설계홍수량과 비교하여 수행하였으며, 취약성 평가는 IPCC에서 제안하는 취약성 개념을 도입하여 수행하였다. 취약성을 평가하는 방법은 크게 상향식 평가방법 (Bottom-up approach)과 하향식 평가방법 (Top-down approach)으로 나눌 수 있다. 하향식 평가방법은 전 지구 기후 모델링에 기초하여 취약성을 평가하는 방법이고, 상향식 평가방법은 대리변수 (Proxy variable)를 지표로 활용하여 취약성을 평가하는 방법이다. 본 연구에서는 지표를 선정하여 지수를 산정하는 상향식 평가방법을 사용하여 취약성을 평가하였다.

취약성 개념을 도입하여 상향식 평가방법을 수행하기 위해서는 먼저 취약성에 대한 개념 정의가 필요하여 이후 취약성 지표 선정이 이루어져야 한다. 주성분분석을 이용하여 지표에 가중치를 부여한 다음 하나의 지수로 통합하여 취약성 평가를 실시하였다.

1. 취약성 평가 대상지구 및 유역특성인자

가. 대상지구 선정

본 연구에서는 수리/수문 안정성 평가를 적용할 재해의 종류로는 홍수와 가뭄을 선정하였다. 연구의 공간범위는 한국농어촌공사에서 관리하는 3000여개의 저수지 중 4대강 유역에 위치한 저수지 30개소를 선정하여 조사대상지역으로 정하였다. 4대강 권역별 대상지는 한강 유역 11개소, 금강유역 7개소, 낙동강유역 7개소, 영산강 유역 5개소를 선정하였다.

나. 유역 특성 인자 조사

(1) 도형자료 구축

30개 대상 저수지 유역의 특성을 파악하기 위하여 DEM (Digital Elevation Model), 토양도, 토지이용도 등의 GIS (Geographical Information System) 자료를 구축하였다. DEM은 국토지리정보원 수치지도 (1:25,000)를 활용하였으며, 토양도는 농촌진흥청의 개략토양도를 이용하였다. 토지이용도는 환경부 (2007)의 중분류 토지피복지도를 재분류하여 구축하였다.

(2) 유역 특성 인자

유역면적, 유로연장, 하천경사, 도달시간 등의 유역 특성 값은 EAP 보고서¹⁾에 제시된 값을 사용하였다. 저수지 유역별 유출곡선번호 (Curve Number, CN)는 ArcGIS (ver. 10) 프로그램을 이용하여 기 구축된 토양도를 수문학적 토양군으로 재분류한 뒤, 이를 토지이용도와 중첩하여 산정하였다.

2. 기후변화에 따른 기상특성 분석

가. 과거 기상자료 구축

과거 기상자료를 취득하기 위한 대상 기상관측소는 30개 대상 저수지 인근의 15개소를 선정하였다. 저수지 인근에 두 개 이상의 기상관측소가 위치하는 경우에는 Thiessen 계수를 적용하여 보간하였다.

기상 자료는 1시간 단위 강수량과 일 단위 강수량, 평균기온, 풍속, 증발량, 일조시간 등을 취득하였으며, 자료 기간은 관측소별 자료 보유 기간과 동일하다.

1) EAP (Emergency Action Plan, 비상대처계획)란 농업기반시설에 대한 예상치 못한 재해에 대비하기 위한 계획으로서, 저수용량이 100만 톤 이상이거나 그 외에 재해 위험성이 큰 저수지를 대상으로 한다. EAP 보고서에는 비상시의 대처 계획과 함께 저수지 현황 및 상·하류의 유역 현황이 상세하게 나와 있으며, 본 연구에서의 저수지 현황 및 유역 특성 자료로 활용하였다.

나. 미래 기상자료 구축

(1) 미래 기상자료의 생성

본 연구에서는 기상청 기후변화정보센터에서 제공하는 기후변화 자료 중 12.5 km 격자의 일 단위 강수량, 기온, 상대습도, 풍속, 잠열, 하향단파복사량 및 3시간 단위 강수량 자료를 취득하여 활용하였다.

기후변화 시나리오는 2014년 발표 예정인 IPCC 제5차 보고서 (AR5)에 대비하여 새롭게 권장하고 있는 RCP 시나리오 중에서, 우리나라 온실가스 저감정책 현실을 잘 반영하고 있는 것으로 보고되고 있는 RCP4.5 시나리오를 선택하였다. 미래 기상자료에 대한 기왕모의자료 (Historical scenario data)의 자료기간은 1950년 ~ 2005년이며, RCP4.5 시나리오에 대한 자료기간은 2006년 ~ 2100년까지 이다.

본 연구에서는 기상청에서 제공하는 12.5 km 격자로 주어지는 자료를 저수지 인근의 기상관측소 지점으로 상세화하여 사용하였다. 12.5 km 격자의 자료를 대상 저수지 인근의 기상관측소 지점으로 상세화하기 위하여 각 기상관측소 인근의 4개 격자점을 추출하였다. 각 격자점과 기상관측소의 경위도 값을 GIS 파일로 변환한 후, ArcGIS (ver.10) 상에 나타내어 기상관측소 인근의 격자점을 선택하는 방법을 활용하였다. 다음 단계로, 4개 격자점의 기상자료를 기상관측소와의 거리로 가중 평균하여 기상관측소 지점의 기상자료를 추출하였다. 이상의 과정을 거쳐 대상 저수지 인근에 위치한 15개 기상관측소에 대한 미래 기상자료를 생성하였다.

다) 미래 기상변화 추이

대상 저수지 인근에 위치한 15개 기상 관측소의 기온과 강수량을 평균하여 과거로부터 미래의 기상변화 추이를 분석하였다.

(1) 기온

연평균기온은 지속적으로 증가하는 추세를 보였으며, 21세기 말인 2071 ~ 2100년에는 기준년도인 1980 ~ 2011년에 비해 1.7 °C 상승할 것으로 전망되었다.

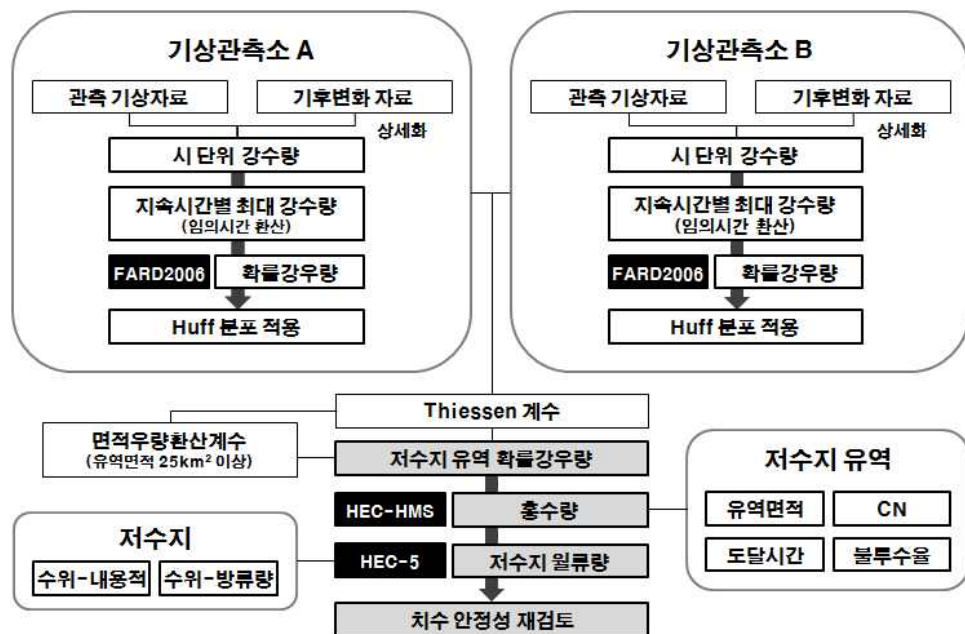
(2) 강수량

본 연구에서 사용된 미래 강수량 자료는 기상청의 RCP4.5 기후변화 시나리오 자료로서, 1981 ~ 2010년의 기왕모의 연평균강수량이 관측 자료의 85%로 나타나는 등 실제 추세를 반영하지 못하는 문제가 있다. 따라서 미래 강수량에 대한 모의 결과에도 편의가 내재할 것이라 사료되어 분위사상법을 이용하여 편의보정을 수행하였다.

2011 ~ 2070년에는 연강수량의 뚜렷한 변화 양상이 나타나지 않았으나, 21세기 말인 2071 ~ 2100년에는 연강수량이 크게 증가하는 것으로 나타났다.

3. 수리/수문 안정성 재검토

치수 안정성 검토를 위해 30개 대상 저수지 구역의 확률강우량을 산정하였고, 이에 따른 홍수량 및 저수지 월류량을 HEC-HMS 모형 및 HEC-5 모형으로 모의하였다. 모의 결과 산정된 200년 빈도 홍수량과 PMF를 설계 당시의 저수지 설계홍수량과 비교하여 치수 안정성 재검토를 수행하였다. 치수 안정성 재검토를 위한 전반적인 연구 흐름도는 [그림 5-1]과 같다.



[그림 5-1] 치수 안정성 재검토 연구 흐름도

가. 기후변화에 따른 강우자료 해석

(1) 미래 확률강우량

(가) 강우 빈도 분석

강우 빈도 분석을 통해 10개 지속시간 (1, 2, 3, 4, 6, 9, 12, 15, 18, 24 시간)과 5개 재현기간 (20년, 50년, 100년, 200년, PMP)에 대해 과거 및 미래의 지속시간에 따른 빈도별 확률강우량을 산정하였다.

과거 자료로는 기상관측소의 시 단위 강수량을 활용하였으며, 자료 기간은 각 관측소별 자료 보유 기간 전체를 적용하였다. 대상 저수지 인근에 위치한 기상관측소의 대부분이 1970년을 전후로 관측을 개시하였으므로, 약 40년의 자료가 빈도 분석에 사용되었다.

미래 자료는 기상청 기후변화정보센터에서 제공받은 RCP4.5 시나리오의 3시간 단위 강수량을 관측소 지점으로 상세화하여 활용하였다. 자료의 기간은 2011년부터 2100년까지 90년이며, 이를 30년씩 나누어 2011 ~ 2040년, 2041 ~ 2070년, 2071 ~ 2100년에 대해 각각 분석하였다. 미래 자료의 경우, 시간 간격이 3시간 단위이므로 지속시간을 3의 배수인 3, 6, 9, 12, 15, 18, 20, 24 시간 등 8개로 설정한 후 빈도 분석을 수행하였다. 이렇게 얻어진 빈도 분석 결과를 확률강우량-지속시간-재현기간 곡선으로 도시한 뒤 회귀식을 도출하여 1, 2, 4 시간에 대한 확률강우량을 산정하였다.

빈도 분석에는 소방방재청에서 제공하는 FARD2006 프로그램을 사용하였다. 본 연구에서는 EAP 보고서에서 각 기상관측소의 최적 분포형으로 선정된 Gumbel 분포와 확률가중모멘트법을 채택하여 분석하였다.

(나) 가능최대강수량

가능최대강수량 (Probable Maximum Precipitation, PMP)의 산정 방법에는 수문기상학적 방법, 최대강우량 포락곡선 방법, 통계학적 방법 등이 있다. 수문기상학적 방법이나 최대강우량 포락곡선 방법은 많은 기상인자와 자료를 필요로 하기 때문에 미래의 PMP를 산정하기에 적절하지 못하다. 이에 본 연구에서는 (통계학적 방법의 일종인) PMP와 확률강우량의 상관관계를 이용하였다. [표 5-1]²⁾은 100년 빈도 홍수량과 PMP의 비율을 지속

시간별로 나타낸 것으로서, 이를 100년 빈도 홍수량에 곱하여 PMP를 산정할 수 있다.

[표 5-1] 지속시간별 100년 빈도 확률강우량에 대한 PMP의 비율

지속시간 (시간) 재현기간 (년)	1	6	12	24	48	72	평균
100	1	1	1	1	1	1	1
PMP	2.05	2.43	2.38	2.74	2.36	2.36	2.39

(다) 확률강우량 산정

과거와 미래 확률강우량을 15개 기상관측소별 30개 대상 저수지에 대한 10개 지속시간 (1, 2, 3, 4, 6, 9, 12, 15, 18, 24 시간)과 5개 재현기간 (20년, 50년, 100년, 200년, PMP)에 대해 산정하였다.

(라) 강우분포

본 연구에서는 각 기상관측소별로 분석되어 있는 Huff 회귀식과 최적 분위를 통해 과거 및 미래의 지속시간에 따른 재현기간별 확률강우량에 대한 시간분포 강수량을 모의하였다.

나. 기후변화에 따른 설계홍수량 산정

(1) 강우-유출 해석

저수지 홍수량의 산정에는 강우-유출 관계를 단순화하여 모의하는 단위도 모형이 많이 사용된다. Sherman (1932)이 처음으로 제안한 단위도 모형 (Unit hydrograph, UH)은 특정 단위시간 동안 균일한 강도로 유역전반에 걸쳐 균등하게 내리는 단위 유효우량(혹은 초과 우량)으로 인하여 발생하는 직접유출 수문곡선으로 정의된다 (Ramirez et al., 2000; 윤용남, 2008).

(2) HEC-HMS 모형

HEC-HMS 모형은 미 육군공병단에서 개발한 강우-유출 모형으로 대규

2) 한국건설기술연구원 (2009). 극치수문사상 변화특성분석 연구보고서

모 유역의 홍수추적 및 도시 소유역, 농촌 유역의 유출량 추정에 이용된다.

(3) 미래 설계홍수량 산정 결과

Clark 단위도법과 SCS 단위도법, CN2와 CN3에 의한 결과를 EAP 보고서에 수록된 200년 빈도 홍수량과 비교하였다. SCS 단위도법에 CN3를 적용한 경우를 제외하면 전반적으로 EAP 보고서의 홍수량보다 낮은 결과를 보인다. 이를 바탕으로 본 연구에서는 SCS 단위도법과 CN3를 적용하여 지속시간에 따른 재현기간별 홍수량을 산정하였다.

미래 설계홍수량의 재검토를 위한 치수목적의 수공구조물의 설계에 있어서는 첨두유량의 최대가 되는 강수의 지속시간을 임계지속시간으로 보는 것이 타당하다. 본 연구에서는 30개 대상 저수지 유역에 대하여 강수의 지속시간을 한 시간으로 세분하여 지속시간에 따른 첨두유량을 강우분포모형인 Huff 분포 모형을 적용하여 임계지속시간을 산정하였다.

다. 기후변화에 따른 저수지 홍수추적

(1) 저수지 홍수추적

저수지 홍수추적 (reservoir routing)은 저수지로 들어오는 유입 수문곡선을 저수지에서 나가는 유출 수문곡선으로 전환하는 절차이다. 저수지 홍수추적을 통해 저수지에 의한 첨두 홍수량 저감 및 첨두 홍수량 발생 시간 지체효과, 저수량 및 저수위 등을 확인할 수 있다.

저수지 홍수추적은 다음과 같은 저류방정식으로 표현된다.

$$I - O = \frac{dS}{dt} \quad (5-1)$$

I : 유입량, O : 유출량, S : 저류량

저류방정식을 임의의 시간으로 변환하여 정리하면 다음과 같다.

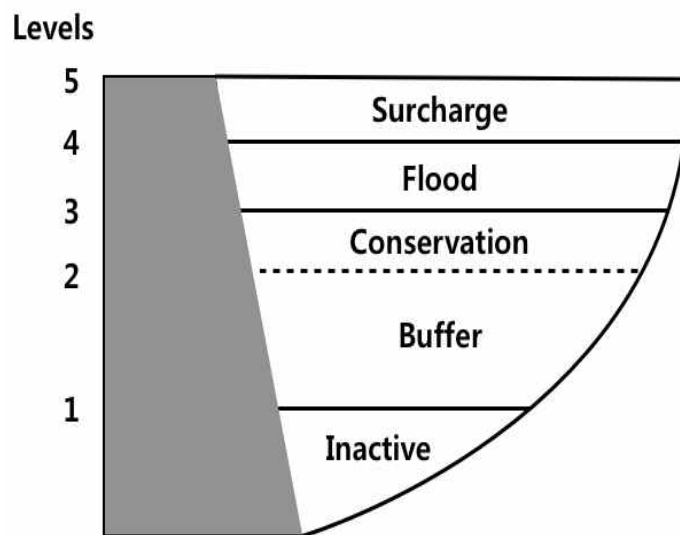
$$\frac{I_1 + I_2}{2} \Delta t - \frac{O_1 + O_2}{2} \Delta t = S_2 - S_1 \quad (5-2)$$

Δt : 추적시간

위 식은 2개의 미지수 (O_2 , S_2)를 가지므로 저류량 (S)과 유출량 (O) 사이의 관계식이 추가로 필요하다. 이 관계식은 수위별 저류량곡선과 수위별 유출량곡선을 통해 결정할 수 있다. 저류량과 유출량 사이에 항상 단일 관계가 성립하는 것은 아니지만, 저수지 수면이 수평이라는 가정 하에 대체로 성립한다고 볼 수 있다 (정종호 외, 2009).

(2) HEC-5 모형

HEC-5 모형의 시스템은 기본적으로 저수지, 유량 조절점, 추적구간 등으로 구성되며 (이진원 외, 2002), 각각 최대 작업 용량 (저수지 40개, 유량 조절점 80개소, 발전소 35개소) 내에서 구성이 가능하다. 입력 자료로는 저수지 유입량, 저수지 수위별 내용적, 저수지 수위별 방류량, 목표수위 등이 필요하다. 목표수위는 월류가 발생하는 수위를 결정짓는 인자이므로 신중하게 선택해야 한다. [그림 5-2]는 HEC-5 모형에서의 목표수위별 저류공간 지수를 나타내고 있다.



[그림 5-2] HEC-5 모형의 목표수위별 저류공간 지수

Estimating design floods based on the critical storm duration for small watersheds

The objective of this study was to propose a new method to determine design floods using the critical storm duration concept. Five different models, including the Rational, SCS, and Clark methods, were used to estimate peak discharges, while the uniform distribution, Mononobe, Huff, and Yen and Chow methods were applied for the determination of temporal rainfall distribution. Two small watersheds, Baran (HP#6) and Banweol (WS#1), for which watershed hydrologic data were available since 1996, were selected as the study areas. A total of 41 rainfall events was chosen from the study watersheds to calculate peak runoffs and evaluate the performances of the selected hydrological models based on the statistics of RMSE, Nash efficiency criterion (NEC), and R2 value. The Clark method performed the best overall among the selected models, with both NEC and R2 values greater than 0.95. The Huff method resulted in the longest critical storm duration, which was much greater than the times of concentration. The increase in the recurrence interval decreased the critical storm duration while increasing the peak flow rates. The SCS model estimated the greatest design floods, 94.2 m³/s for HP#6 and 56.4 m³/s for WS#1, with a 25-year return period. The design floods for the study watersheds that were estimated by the selected hydrologic models ranged from 68.3 to 132.1% of those estimated by the Rational method. The greatest to the smallest peak flows resulted from the SCS, WFRP, Clark and Nakayasu methods in order. As an alternative to the Rational method, the WFRP method may be appropriate for rural watershed areas in Korea, where paddy fields commonly exist, whereas the SCS model may be more suitable for urban areas, where most land surfaces are covered with impervious material. It was concluded that the incorporation of a critical storm duration concept can contribute to the advance of design flood estimation method in Korea.

참고문헌:

Kang, M. S., et al. (2013). "Estimating design floods based on the critical storm duration for small watersheds." *Journal of Hydro-environment Research* 7(3): 209-218.

(3) 미래 저수지 홍수추적 모의 결과

HEC-HMS 모형으로 산정한 임계지속시간을 고려한 지속시간별 저수지 유입량 추정 결과 자료와 EAP 보고서에 제시된 수위-내용적 곡선 및 수위-방류량 관계를 이용하여 HEC-5 모형을 구동하였다. 목표수위는 농업용 저수지의 경우 용수 공급이 원활하여야하므로 상시만수위 (Level 3)로 설정하였다.

관련연구

HEC-HMS와 HEC-RAS를 이용한 농촌 저지대 침수해석

The objective of this study is to analyze the flood inundation in a low-lying rural area. The study watershed selected for this study includes the Il-Pae and Ahn-Gok watersheds. It is located in the Namyangju, Korea and encompasses 3.64km². A major flood event that occurred in July 2011 was chosen as the case for the flood inundation analysis. The Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) and River Analysis System (HEC-RAS) were used to simulate flood runoff and water surface elevation at each cross-section, respectively. The watershed topographic, soil, and land use data were processed using the GIS (Geographic Information System) tool for the models. The contribution to the total flood volume was estimated based on the results simulated by HEC-HMS and HEC-RAS. The results showed that the overflow discharge from the Il-Pae stream constituted 80% of the total flood volume. The contributions of rainfall falling directly on the inundation area and overflow discharge from the Ahn-Gok stream were 15 % and 5 %, respectively. The simulation results in different levee scenarios for the Ahn-Gok stream were also compared. The results indicated that the levee could reduce the flood volume a little bit.

참고문헌:

김학관, 강문성, 송인홍, 황순호, 박지훈, 송정현, 김지혜, (2012), "HEC-HMS와 HEC-RAS를 이용한 농촌 저지대 침수해석", 한국농공학회논문집, 54(2): 1-6.

라. 기후변화에 따른 치수 안정성 재검토

[표 5-2]와 [표 5-3]은 권역별 30개 대상저수지의 준공 당시의 설계홍수량과 본 연구에서 산정된 임계지속시간에 따른 200년 빈도 및 PMF의 미래 침투홍수량을 비교하여 나타내고 있다.

한강 권역의 11개 대상저수지는 기존의 설계홍수량과 비교하여 200년 빈도 및 PMF에서 추정된 미래 설계홍수량은 큰 값을 보임으로서, 향후 물넘이 보강 및 비상대처계획 등의 치수계획 수립이 필요할 것으로 전망되었다.

낙동강 권역의 7개 대상저수지는 해당 지역의 임계지속시간에 따른 미래 설계홍수량이 기존 설계홍수량에 미치지 못하는 것으로 나타났다. 낙동강 권역의 해당 저수지들은 미래 강우에 대하여 수문학적으로 안전한 것으로 나타났으나, 노후화가 지속된 수공구조물로서 지반 및 구조적인 검토가 필요할 것으로 사료된다.

금강과 영산강 권역의 12개 저수지 역시 설계 당시의 설계홍수량 값을 크게 상회하는 것으로 나타남으로서, 물넘이 보강 검토 및 치수 안전 계획 수립에 따른 수공구조물의 전반적인 검토가 필요한 것으로 나타났다.

관련연구

황룡강 유역 저수지군 하류하천 영향평가

Works for dam heightening plan have dual purposes: flood disaster prevention by securing additional storage volume and river ecosystem conservation by supplying stream maintenance flow. Now, the dam heightening project is in progress and there are 93 dam heightened reservoir. After the dam heightening project, 2.2 hundred million ton of flood control volume in reservoirs will be secured. Thus it is necessary to evaluate the effects of the dam heightening project on watershed hydrology and stream hydraulics, and resulting flood damages. This study was aimed to assess the impact of outflow from the dam heightened reservoir group on the Whangryong river design flood. The HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System) model was used for estimating flood discharge, while HEC-5 (Hydrologic Engineering Center-5) was used for reservoir routing. This study analysed flood reduction effect on 100yr and 200yr return periods about the before and after heightening of agricultural dams. Based on the results of this study, the reduction of flood peak discharge at downstream of the reservoir group was estimated to be about 41% and 53% for 100yr and 200yr frequencies, respectively.

참고문헌:

황순호, 강문성, 김지혜, 송정현, 전상민, 이상현, 최진용, (2012), "황룡강 유역 저수지군 하류하천 영향평가" 한국농공학회논문집, 54(3): 103-111.

[표 5-2] 대상저수지 설계홍수량과 미래 침투홍수량 (200년 빈도)

대권역	저수지	설계 빈도	설계 홍수량		관측 (~2011)	200년 빈도 홍수량×1.2(m ³ /s)					
			RIMS1)	EAP2)		RCP4.5			RCP4.5 (편의보정)		
						2011 ~2040	2041 ~2070	2071 ~2100	2011 ~2040	2041 ~2070	2071 ~2100
한강	용설	200	123		249	286	220	392	670	542	894
	용계	200	183		177	92	104	170	245	239	556
	금석	200	186		182	94	105	184	264	250	604
	무극	200	318		289	156	173	278	413	404	908
	백운	100	257		302	199	198	262	460	522	636
	오남	100	235		613	230	329	533	456	763	1,126
	마지	200	76		491	209	294	440	407	666	954
	애룡	200	55		330	126	184	258	260	428	617
	용당	100	302		464	304	299	429	646	634	1,309
	추평	100	238		322	181	183	299	450	439	976
낙동강	삼곡	200	485	527	542	297	443	614	733	1,212	1,836
	오봉	100	194	194	146	134	103	93	373	235	199
	금오	100	146	146	105	96	72	64	289	168	137
	대성	100	290	290	172	160	122	109	451	278	234
	도원	200	141		86	50	57	101	151	163	264
	달창	200	572	1,330	487	310	392	362	656	845	883
	주남	20	583		302	146	286	190	329	869	460
금강	가월	100	487		556	336	622	387	646	1,580	875
	도림	200	25	85	201	168	131	209	366	317	498
	반산	200	194	194	267	258	262	423	586	536	949
	계룡	60	75	178	361	361	250	264	643	608	1,283
	탑정	200	2,781	1,300	1,266	1,259	1,113	1,874	3,980	7,267	5,903
	복심	200	136	136	279	317	262	275	586	539	954
	덕용	200	358	358	362	362	303	289	702	605	997
영산강	동부	200	389	389	451	451	475	411	935	757	1,406
	담양	500	546	546	860	487	698	1,136	988	1,690	3,438
	광주	500	495	495	555	539	549	656	1,097	1,189	1,679
	장성	500	1,040	1,040	1,238	936	1,184	1,988	1,769	2,572	4,732
	수양	200	1,543	250	515	477	504	626	998	1,080	1,609
	나주	200	972	972	1,146	823	841	1,602	2,801	1,618	3,964

1) EAP 보고서 저수지 물넘이 제원 자료

2) 한국농어촌공사 농업기반관리시스템 (RIMS) 저수지 제원 자료

[표 5-3] 대상저수지 설계홍수량과 미래 침투홍수량 (PMF)

대권역	저수지	설계 빈도	설계홍수량		가능최대홍수량						
			RIMS1)	EAP2)	관측 (~2011)	RCP4.5			RCP4.5 (편의보정)		
						2011 ~2040	2041 ~2070	2071 ~2100	2011 ~2040	2041 ~2070	2071 ~2100
한강	용설	200	123		550	604	486	808	1,112	923	1,468
	용계	200	183		394	223	248	388	433	426	909
	금석	200	186		408	222	250	399	458	435	984
	무극	200	318		666	379	421	611	731	719	1,486
	백운	100	257		668	435	456	573	803	896	1,071
	오남	100	235		1,343	564	788	1,158	871	1,375	1,942
	마지	200	76		1,054	471	661	912	733	1178	1,644
	애룡	200	55		704	300	431	563	476	762	1,064
	용당	100	302		1,080	737	736	992	1,149	1,145	2,204
	추평	100	238		748	433	460	681	827	812	1,640
	잠곡	200	485	527	1,211	741	1,016	1,341	1,325	2,079	3,058
낙동강	오봉	100	194	194	391	367	297	274	696	472	414
	금오	100	146	146	331	282	225	207	591	377	323
	대성	100	290	290	469	461	361	332	860	576	502
	도원	200	141		230	141	165	258	299	320	484
	달창	200	572	1,330	1,202	879	1,061	984	1,373	1,702	1,698
	주남	20	583		625	341	618	412	584	1,396	771
	가월	100	487		1,332	804	1,430	922	1,264	2,929	1,647
금강	도림	200	25	85	455	381	309	448	628	552	843
	반산	200	194	194	1,081	604	618	979	1,064	994	1,709
	계룡	60	75	178	798	798	578	585	1,110	1,054	2,097
	탑정	200	2,781	1,300	3,551	3,364	2,916	4,428	9,290	15,848	13,086
	복심	200	136	136	731	731	622	654	1,069	1,010	1,738
	덕용	200	358	358	814	814	675	668	1,201	1,051	1,736
	동부	200	389	389	1,081	1,081	1,118	993	1,768	1,456	2,603
영산강	담양	500	546	546	2,038	1,208	1,661	2,670	1,885	3,014	5,759
	광주	500	495	495	1,388	1,331	1,357	1,608	2,051	2,193	2,952
	장성	500	1,040	1,040	3,496	2,710	3,305	5,225	4,048	5,583	9,866
	수양	200	1,543	250	1,179	1,119	1,141	1,404	1,799	1,939	2,665
	나주	200	972	972	3,171	2,364	2,409	4,183	4,941	3,554	7,877

1) EAP 보고서 저수지 물넘이 제원 자료

2) 한국농어촌공사 농업기반관리시스템 (RIMS) 저수지 제원 자료

4. 기후변화에 따른 농업생산기반시설 수리/수문관련 취약요소 도출

가. 수리/수문 취약성 정의

농업생산기반시설에 대한 취약성 평가를 수행하기 위해 취약요소를 도출하였다. 수문을 대표하는 취약요소는 기존의 수행된 취약성 지표 선정 관련 문헌을 조사하여 그 중 가중치가 높은 항목을 선정하였다. IPCC (2007)는 기후변화 취약성을 기후노출이라는 외부적인 요인과 민감도, 적응능력이라는 내부적인 요인으로 구분하여 정의하였다. 기후노출은 기후변화에 의해 발생하는 영향, 민감도는 기후노출의 정도, 적응능력은 기후변화에 따른 영향을 감소시킬 수 있는 정도를 나타낸다 (박지훈, 2013). 본 연구에서는 세 개의 항목에 맞추어 홍수 및 가뭄 취약성 지표를 선정하였다.

가뭄 취약성은 가뭄에 대응하는 대응력의 정도로 나타낼 수 있다. 가뭄은 물 수요량에 대한 공급량이 부족한 상태라고 정의할 수 있는 바, 공급을 위한 수자원의 확보가 충분하면, 강우가 부족한 기상학적 가뭄 상태에서도 수문학적 가뭄은 발생하지 않는다. 따라서 가뭄에 대한 대응력의 정도를 나타내는 취약성은 국가적, 지역적, 시기적인 잠재적 물 수요량에 대한 공급능력의 비율로 나타낼 수 있다. 한편 공급능력이외에도 사회경제적인 요인이 취약성에 영향을 준다. 바로 탄력성 (resilience)이다. 그 사회의 구성원의 사회경제적 가뭄 대응능력이나 정책적 대응능력과 같은 비구조적 가뭄 대처 능력이 취약성 평가에 고려될 수 있다. 따라서 가뭄의 취약성은 평가의 대상이 되는 공간 내에서 가뭄에 영향을 받는 대상이 가뭄에 대응하는 종합적인 능력으로 평가되어야 하는 것으로서 구조적, 비구조적 대응 능력과 가뭄의 정도간의 상대적인 비교로 평가되어야 한다.

나. 수리/수문 취약성 지표

[표 5-4]는 홍수 취약성 지표를 기후노출, 민감도, 적응능력 항목으로 구분하여 선정한 결과를 나타내고 있다.

[표 5-4] 홍수 취약성 지표

지 수	지 표	단위	정 의	참 고 문 헌
기후노출	CN80	day	일강우량이 80 mm 이상인 날 평균횟수	(고재경, 2009)
	CX3h	mm	3시간 동안의 최대강우량	
	CX24h	mm	24시간 동안의 최대강우량	(환경부, 2012)
	CP24h200y	mm	24시간 지속기간, 200년 빈도 확률강우량	
	C90th	mm/day	강우발생일의 90%양	
	CSDI	mm/day	단일 강우 강도	
	CX5d	mm	최대 5일 총 강우량	(STARDEX, 2005)
	CPL90th	%	90% 호우 한계점 이상 강우량 비율	
	CNL90th	day	90% 호우 한계점 이상 강우량 발생빈도	
민감도	SPD	명/km ²	인구밀도	(국립방재연구원, 2011)
	SWF	m ³ /day	하수발생량	(환경부, 2012)
	SRL	km	도로연장	
	SFRA	km ²	홍수범람위험구역	
	SIR	%	불투수율	(국토해양부, 2011)
	SRI	m/km	하천경사도	
	CN II		유출곡선번호	
적응능력	ARS	%	하천개수율	(환경부, 2012)
	AGRDP	백만원	1인당 지역내 총생산	
	ANDPS	개	배수펌프장 개소수	(국토해양부, 2011)

[표 5-5]는 가뭄 취약성 지표를 기후노출, 민감도, 적응능력 항목으로 구분하여 선정한 결과를 나타내고 있다.

[표 5-5] 가뭄 취약성 지표 및 가중치 (국립환경과학원, 2012)

지표	가중치	변수목록	가중치
기후노출	0.31	연속적인 무강수일수의 최대값 (회)	0.22
		12~2월 강수량 (mm)	-0.18
		3~5월 강수량 (mm)	-0.21
		12~2월 증발산량 (mm)	0.10
		3~5월 증발산량 (mm)	0.13
		지하유출 (mm/day)	-0.15
민감도	0.31	인구밀도 (명/km ²)	0.12
		상수도:1인1일급수량 (liter)	0.08
		면적당곡물생산 (ton/km ²)	0.08
		면적당축산물생산 (마리/km ²)	0.07
		지하수이용량 (m ³ /년)	0.09
		하천수이용량 (m ³ /년)	0.10
		생활용수사용량 (천m ³ /년)	0.17
		공업용수사용량 (천m ³ /년)	0.16
		농업용수사용량 (천m ³ /년)	0.14
적응능력	0.38	재정자립도 (%)	0.12
		인구당공무원수 (명/만명)	0.05
		지역내총생산 (GRDP) (백만원)	0.09
		면적당 물관리 공무원수 (명)	0.09
		상수도 보급률 (%)	0.15
		지하수 가용량 (천m ³)	0.14
		단위면적당 용수공급용 저수지 저수용량 (천m ³)	0.21
		단위면적당 물재이용량 (천m ³ /년)	0.15

관련연구

RCP4.5 시나리오에 따른 IDF 곡선 분석; 우리나라 30개 저수지를 대상으로

The main objective of this study is to evaluate the impact of climate change on Intensity-Duration-Frequency (IDF) curves for the selected 30-Reservoirs in South Korea. A bias inherent in future precipitation data based on Representative Concentration Pathways (RCP) scenario was corrected by a quantile mapping method. The trends in future precipitation changes were analyzed for the three different time periods (correspond to 2025s: 2011~2040, 2055s: 2041~2070, and 2085s: 2071~2100). Gumbel distribution was selected as the probability distribution and parameters were estimated by probability weighted moment method. Rainfall intensity of Han, Geum and Yeongsan river watersheds was greatly increased in 2085s period than 1990s period. Rainfall intensity of Nakdong river watershed appeared to increase sharply in 2025s period than 1990s period. The newly developed IDF curve might enhance the stability of agricultural reservoirs through considering climate change impact into structure design process.

참고문헌:

박지훈, 강문성, 송인홍, 황순호, 송정현 (2013), "RCP4.5 시나리오에 따른 IDF 곡선 분석: 우리나라 30개 저수지를 대상으로" 한국방재학회 논문집, 13(6), pp.145-159

5. 수리/수문 안정성 지수 평가방법 개발

가. 취약성 지표 표준화

본 연구에서 선정한 재해에 대한 취약성을 평가하기 위해 취약지표를 도출하여 산정하는 방법론을 선정하였다. 지표를 이용한 취약성 평가는 각 지표의 단위와 산포도가 다르기 때문에 통합된 취약성 분석을 수행하기 위해서는 표준화 과정을 거쳐야한다.

본 연구에서는 보편적으로 사용하는 Z-score 방법을 표준화 방법으로 선정하였다. Z-score 방법은 자료를 평균은 0, 표준편차는 1이 되도록 변환하여 자료의 수치를 표준화된 확률변수인 Z값으로 나타낸다

$$Z\text{-score} = \frac{\text{Actual value} - \text{Mean}}{\text{Standard deviation}} \quad (5-3)$$

나. 취약성 지표 가중치 산정

기후노출, 민감도, 적응능력 항목으로 구분하여 선정한 취약성 지표를 종합적으로 판단하기 위해서는 각각의 지표를 대표하는 종합적인 지표를 산정할 필요가 있다. 지표간의 상관관계가 존재하는 다변량 자료에서 종합적인 지표를 산정하기 위해서는 지표 각각에 대한 가중치를 산정해야하며 이는 복잡한 분석을 필요로 한다 (박지훈, 2013). 항목간 지표의 가중치를 산정하는 방법으로는 전문가의 판단을 근거로 하는 델파이분석, AHP와 통계적 기법을 사용하여 분석하는 주성분분석이 있으며 본연구에서는 주성분분석 (Principal Component Analysis, PCA)을 통해 지표의 가중치를 산정하였다.

다. 취약성 지수 산정

취약성 지수는 기후노출, 민감도, 적응능력 지표에 대한 표준화를 실시한 다음 주성분분석을 통해 산정한 성분 부하량 (Factor loading)을 가중치 (a_i, b_i, c_i)로 대입하여 각각의 세부지수를 도출하였다. 최종적으로는 IPCC (2007)에서 제안하는 취약성 개념을 사용하여 기후노출과 민감도 지수를 더한 값에 적응능력 지수를 제하여 통합 취약성 지수를 산정하였다. [그림 5-6]은 취약성 지수를 산정하는 과정을 나타내고 있다.

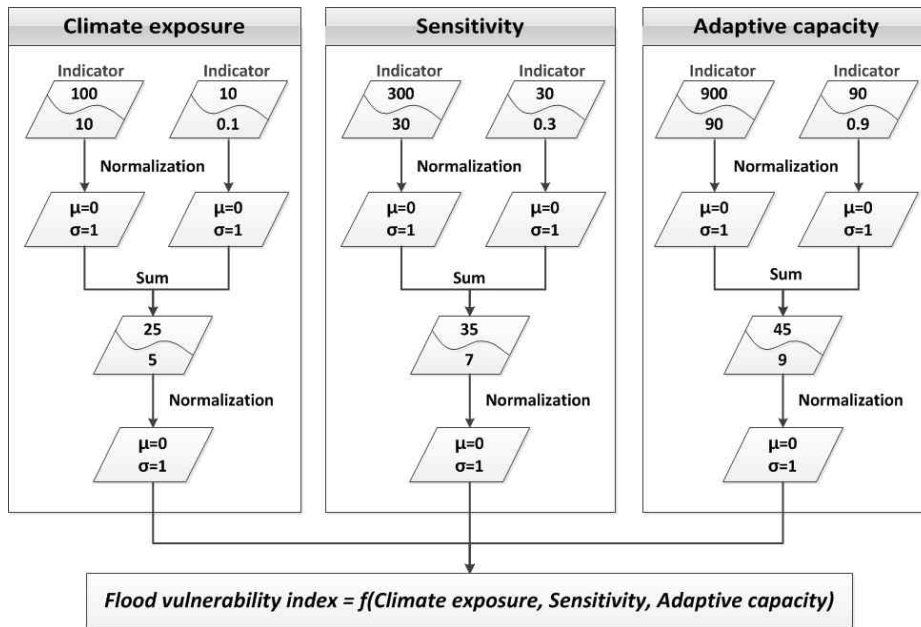
관련연구

분위사상법을 적용한 RCP 시나리오 기반 시군별 홍수 위험도 평가

The main objective of this study was to evaluate Representative Concentration Pathways (RCP) scenarios-based flood risk at a Si-Gun level. A bias correction using a quantile mapping method with the Generalized Extreme Value (GEV) distribution was performed to correct future precipitation data provided by the Korea Meteorological Administration (KMA). A series of proxy variables including CN80 (Number of days over 80 mm) and CX3h (Maximum precipitation during 3-hr) etc. were used to carry out flood risk assessment. Indicators were normalized by a Z-score method and weighted by factors estimated by principal component analysis (PCA). Flood risk evaluation was conducted for the four different time periods, i.e. 1990s, 2025s, 2055s, and 2085s, which correspond to 1976~2005, 2011~2040, 2041~2070, and 2071~2100. The average flood risk indices based on RCP4.5 scenario were 0.08, 0.16, 0.22, and 0.13 for the corresponding periods in the order of time, which increased steadily up to 2055s period and decreased. The average indices based on RCP8.5 scenario were 0.08, 0.23, 0.11, and 0.21, which decreased in the 2055s period and then increased again. Considering the average index during entire period of the future, RCP8.5 scenario resulted in greater risk than RCP4.5 scenario.

참고문헌:

박지훈, 강문성, 송인홍, (2012), "분위사상법을 이용한 RCP 시나리오 기반 시군별 홍수 위험도 평가", 한국농공학회논문집, 55(4): 73-82

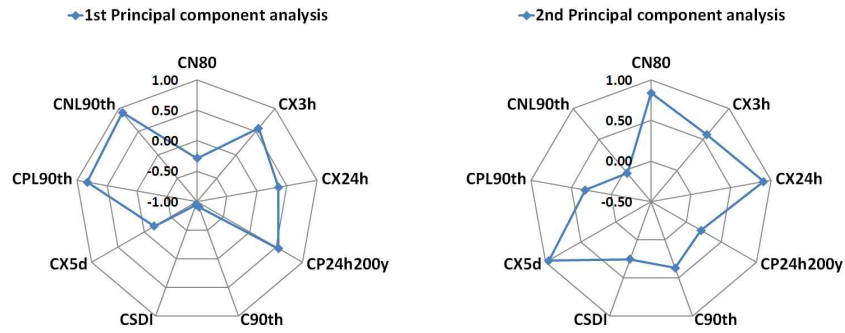


[그림 5-6] 취약성 지수 산정 흐름도 (박지훈, 2013)

6. 농업생산기반시설 수리/수문 안정성 지수 분석 및 평가

가. 주성분분석

기후노출, 민감도, 적응능력 지표들의 가중치를 산정하기 위해 과거 30년 (1976 ~ 2005) 기간 동안의 지표들에 대해 주성분분석을 수행하였다. 총 3 주성분까지 분석되었으며 분산 설명량은 제 1 주성분이 45.6%, 제 2 주성분이 34.9%, 제 3 주성분이 12.4%을 대표하는 것으로 나타났다. 각 주성분별로 성분 부하량 (Factor loading)의 크기가 다를 수 있으며, 각 주성분에서의 분포특성을 [그림 5-7]에 도시화하였다. 제 1 주성분에서는 90% 호우 한계점 이상 강우량 발생빈도 (CNL90th), 90% 호우 한계점 이상 강우량 비율 (CPL90th), 제 2 주성분에서는 최대 5일 총 강우량 (CX5d), 24시간 동안의 최대강우량 (CX24h), 일강우량이 80 mm 이상인 날 평균횟수 (CN80), 제 3 주성분에서는 24시간 지속기간 200년 빈도 확률 강우량 (CP24h200y) 등이 주요 지표로 분석되었다.



(a) 1st Principal component (b) 2nd Principal component

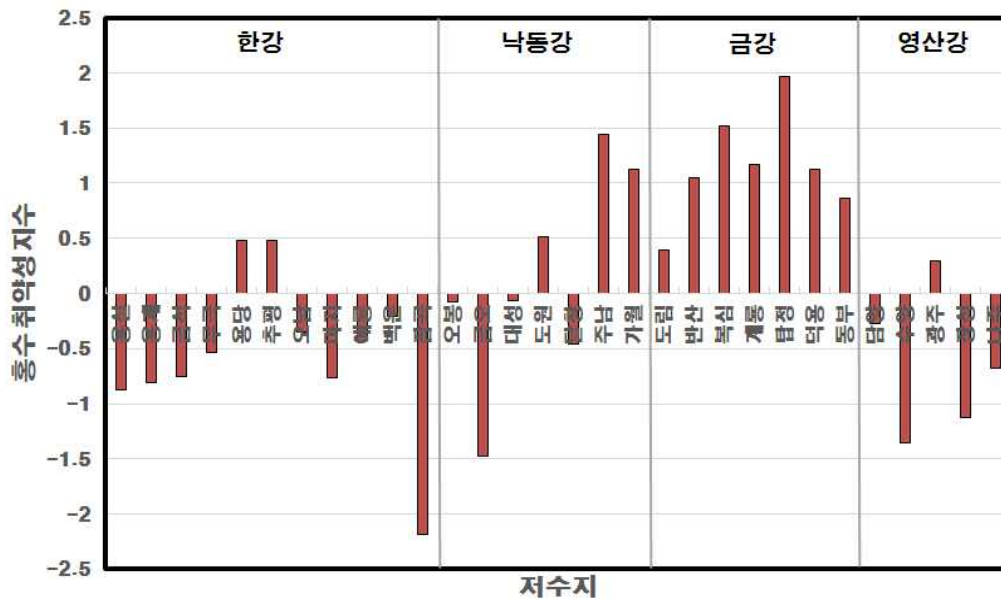


(c) 3rd Principal component

[그림 5-7] 홍수 취약성 기후노출 지표의 성분 부하량
(1976 ~ 2005)

나. 취약성 지수 평가

과거 30년 (1976 ~ 2005) 기간 동안의 기후노출, 민감도, 적응능력 세부 지수를 최종적으로 통합하여 30개 대상 저수지의 홍수 취약성 지수를 도출하였다. [그림 5-8]은 과거 기간 동안의 저수지별 홍수 취약성 지수를 나타내고 있다. 홍수 취약성 지수를 살펴보면 한강유역과 영산강유역은 대체적으로 홍수 취약성이 낮은 것으로 나타나며, 낙동강 유역의 주남, 금강유역의 북심, 탐정저수지가 홍수에 취약한 것으로 분석되었다. 이중 금강유역의 탐정저수지가 1.97로 홍수에 가장 취약한 것으로, 한강유역의 잠곡저수지가 -2.19로 가장 안전한 것으로 나타났다.



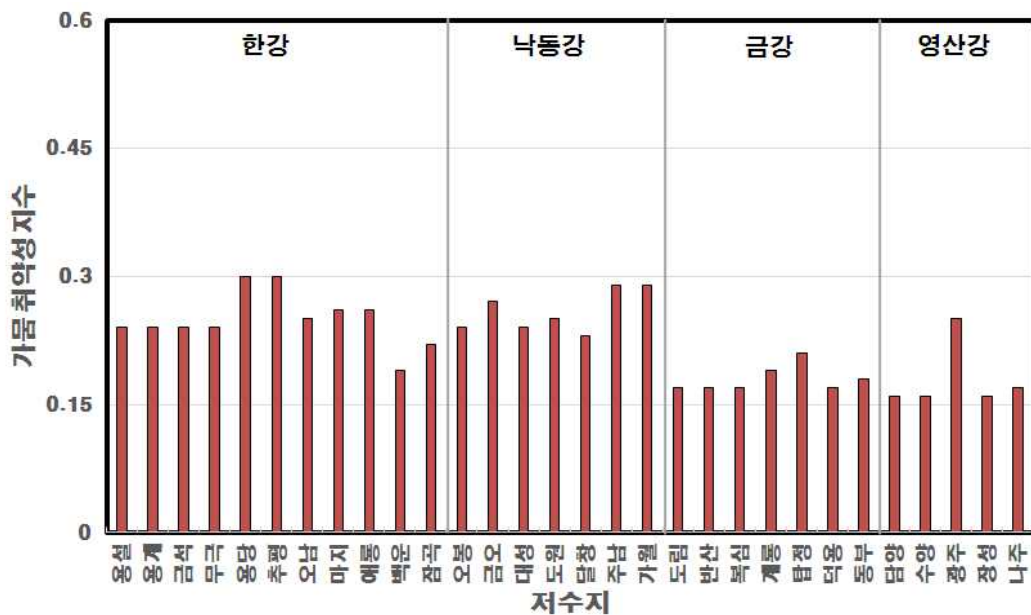
[그림 5-8] 홍수 취약성 지수 (1976 ~ 2005)

관련연구

Assessment of Flood Vulnerability Based on CMIP5 Climate Projections in South Korea

The objective of this article was to assess flood vulnerability based on the representative concentration pathways (RCP) scenarios at a city and county levels. A quantile mapping method was adopted to correct bias that is inherent in the climate change scenarios. A series of proxy variables related to climate exposure, sensitivity, and adaptive capacity were chosen to assess flood vulnerability. Proxy variables were standardized using the Z-score method. Principal component analysis (PCA) was carried out to calculate the weighting of proxy variables. The study area was the Korean peninsula. The spatial resolution was on a city and county basis and the temporal resolution was 1990s, 2025s, 2055s, and 2085s (divided into 1976-2005, 2011-2040, 2041-2070, and 2071-2100). In the spatial comparison, the areas with high-level flood vulnerability increased over time in the central region, including metropolitan areas, and near the southern coast. In the temporal comparison, the RCP4.5 scenario showed a tendency to increase steadily, and the RCP8.5 scenario showed a tendency to increase again after a slight decrease in the 2055s. The study findings may provide useful data for the determination of priority for countermeasures development.

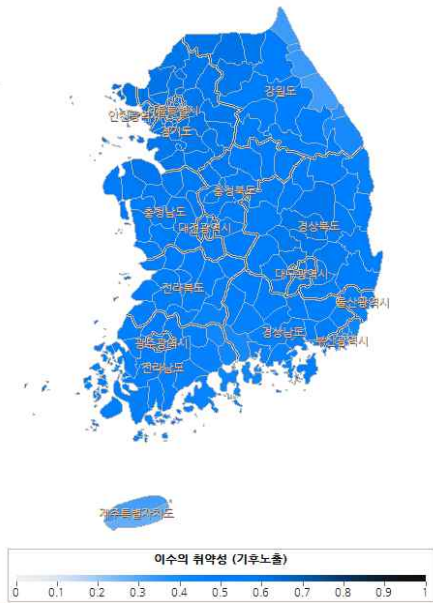
과거 30년 (1976 ~ 2005) 기간 동안의 기후노출, 민감도, 적응능력 세부 지수를 최종적으로 통합하여 30개 대상 저수지의 가뭄 취약성 지수를 도출하였다. [그림 5-9]는 과거 기간 동안의 저수지별 가뭄 취약성 지수를 나타내고 있다. 가뭄 취약성 지수를 살펴보면 금강유역의 가뭄 취약성이 상대적으로 낮은 것으로 나타나며, 한강유역의 용당, 추평, 낙동강유역의 주남, 가월저수지가 가뭄에 취약한 것으로 분석되었다. 이중 한강유역의 용당, 추평저수지가 0.30으로 가뭄에 가장 취약한 것으로, 영산강유역의 담양, 수양저수지가 0.16으로 가장 안전한 것으로 나타났다.



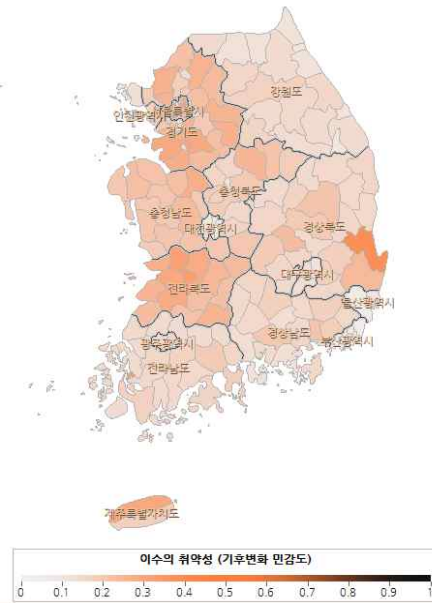
[그림 5-9] 가뭄 취약성 지수 (1976~2005) (국립환경과학원, 2012)

과거 30년 (1976 ~ 2005) 기간 동안의 홍수 취약성 기후노출, 민감도, 적응능력 세부지수를 도출한 결과를 ArcGIS (ver. 10)를 이용하여 각 유역별로 도시화하였다.

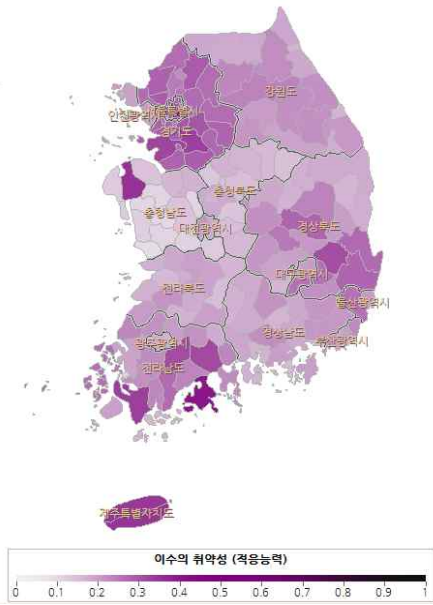
[그림 5-10]은 과거 30년 (1976 ~ 2005) 기간 동안의 가뭄 취약성 기후노출, 민감도, 적응능력 세부지수와 가뭄 취약성 지수를 도출한 결과를 보여주고 있다.



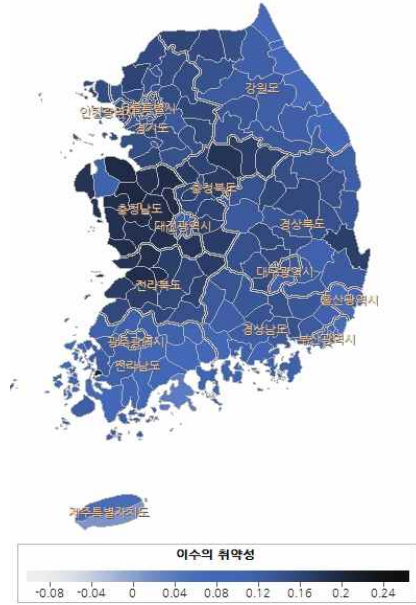
(a) 가뭄 취약성 기후노출 지수



(b) 가뭄 취약성 민감도 지수



(c) 가뭄 취약성 적응능력 지수



(d) 가뭄 취약성 지수

[그림 5-10] 가뭄 취약성 지수 (국립환경과학원, 2012)

제 2절 지반안전성 분석기술

1. 제체 안정성 검토

가. 기본사항

대상 저수지 제체 침투류 해석과 사면 안정성 해석, 내진 안정성 해석을 실시하기 위하여 각 저수지 제체에 적합한 토질 정수를 적용하였다. 성토재와 점토재에 적용된 토질 정수는 기존에 조사된 자료를 활용하였으며 확인되지 않은 자료는 문헌을 참고하였다. 각 제체에 적용된 토질 정수와 토질 정수의 출처는 [표 5-6]~[표 5-9]와 같다. 또한 사석, 풍화토층, 연암층, 필터, 드레인은 문헌을 참고하였으며 [표 5-10]과 같다. 토질 특성에 따른 불포화 함수특성 곡선을 적용하였으며 각 대상지에 성토재와 점토에 적용된 함수특성 곡선은 [표 5-11]과 같으며 각 함수특성 곡선은 [그림 5-11]과 같다. 또한 적용된 함수특성곡선의 Fredlund-Xing 함수 상수는 [표 5-12]에 정리하였다.

[표 5-6] 대상 저수지 적용 토질 정수(한강 수계)

저수지	구분	투수계수 (m/s)	습윤단위 중량 (kN/m ³)	비중	함수비 (%)	점착력 (kN/m ²)	내부마찰 각 (°)	출처
마지	성토	3.50E-08	18.388	2.695	9.9	26	32	정밀진단 (2009)
	점토	5.30E-10	20.55	2.673	10.3	36	27	
무극	성토	1.00E-07	17.9523	2.63	17.3	13	28	EAP (문헌)
	점토	1.00E-09	18.54	2.44	14.5	15	25	
백운	성토	1.00E-09	17.97	2.66	22.40	15	25.00	정밀진단 (2009)
	점토	1.00E-11	19.13	2.66	27.20	30	19.00	
애룡	성토	1.98E-06	20.10	2.68	0.00	28	19.00	정밀진단 (2008)
	점토	1.06E-07	20.42	2.68	0.00	37	24.50	
오남	성토	1.40E-08	19.31	2.66	16.70	15	25.00	EAP (2006)
	점토	9.60E-09	19.18	2.66	22.20	42	12.00	
용계	성토	1.90E-09	19.55	2.67	12.50	15	32.00	정밀진단 (2009)
	점토	1.90E-09	19.55	2.67	12.50	15	32.00	
용당	성토	7.83E-07	18.48	-	17.30	17	25.00	정밀진단 (2005)
	점토	2.61E-09	19.73	-	21.80	39	14.00	
추평	성토	1.70E-07	19.31	2.76	27.50	25	30.00	정밀진단 (2005)
	점토	3.20E-09	19.09	2.66	23.60	51	18.00	
용설	성토	1.00E-07	17.95	2.63	17.30	15	25.00	EAP (문헌)
	점토	1.00E-09	18.54	2.44	14.50	15	25.00	
잠곡	성토	7.40E-09	20.1105	2.67	20.1	11	28	EAP
	점토	7.10E-11	18.54	2.68	28.4	6	20	
금석	성토	2.09E-09	17.95	2.43	17.30	15	25.00	정밀진단 (2009)
	점토	1.66E-09	18.54	2.44	14.50	15	25.00	

[표 5-7] 대상 저수지 적용 토질 정수(금강 수계)

저수지	구분	투수계수 (m/s)	습윤단위 중량 (kN/m ³)	비중	함수비 (%)	점착력 (kN/m ²)	내부 마찰각 (°)	출처
계룡	성토	3.70E-09	19.33	2.66	20.60	31	30.00	정밀진단 (2006)
	점토	5.30E-09	18.91	2.66	24.80	26	12.00	
덕용	성토	4.10E-07	19.57	2.69	22.40	15	25.00	정밀진단 (2005)
	점토	2.50E-08	19.73	2.71	25.40	10	6.00	
도림	성토	2.50E-07	20.77	2.68	20.10	24	38.00	정밀진단 (1987)
	점토	1.00E-09	20.31	2.69	26.40	32	28.00	
동부	성토	1.70E-05	19.45	2.70	25.10	15.80	28.00	정밀진단 (2011)
	점토	8.12E-06	18.65	2.71	32.40	18.86	24.50	
반산	성토	2.70E-08	18.36	2.67	12.50	16	20.00	정밀진단 (2004)
	점토	1.10E-08	19.38	2.66	18.70	11	26.00	
복심	성토	6.00E-09	20.10	2.66	18.90	24	29.00	정밀진단 (2004)
	점토	4.30E-09	19.56	2.69	26.00	31	4.00	
탑정	성토	4.00E-06	21.29	2.67	30.70	15	25.00	정밀진단 (2003)
	점토	4.31E-08	18.71	2.68	29.50	5	33.70	

[표 5-8] 대상 저수지 적용 토질 정수(낙동강 수계)

저수지	구분	투수계수 (m/s)	습윤단위 중량 (kN/m ³)	비중	함수비 (%)	점착력 (kN/m ²)	내부 마찰각 (°)	출처
가월	성토	6.73E-06	17.51	30	24.90	43.9	24.90	정밀진단 (2007)
	점토	-	-	-	-	-	-	
금오	성토	2.41E-07	19.34	2.653	16.2	30	20	EAP
	점토	5.80E-09	19.40	20	14	20	14	
달창	성토	1.07E-09	17.13	45	9	45	9	EAP
	점토	5.85E-09	19.50	40	21.5	40	21.5	
대성	성토	1.28E-07	20.75	30	38	30	38	EAP
	점토	5.80E-09	19.40	20	14	20	14	
도원	성토	1.00E-07	17.66	6	29	5	29	정밀진단 (2011)
	점토	1.00E-09	16.67	25	20	25	20	
오봉	성토	2.40E-07	19.39	23	31.00	23	31.00	EAP
	점토	5.85E-09	19.46	11	21.50	40	21.50	
주남	성토	7.80E-10	18.34	12	26.00	12	26.00	EAP
	점토	1.65E-10	17.02	15	19.50	15	19.50	

[표 5-9] 대상 저수지 적용 토질 정수(영산강 수계)

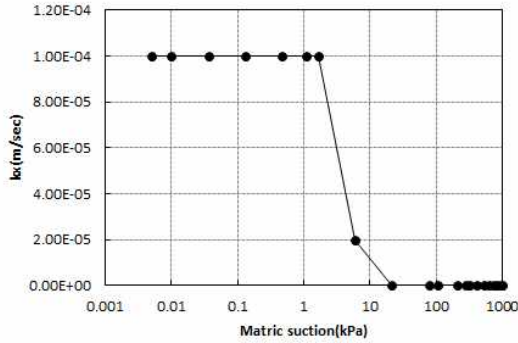
저수지	구분	투수계수 (m/s)	습윤단위 중량 (kN/m ³)	비중	함수비 (%)	점착력 (kN/m ²)	내부 마찰각 (°)	출처
장성	성토	8.60E-08	20.60	-	-	0.30	33	정밀진단 (1999)
	점토	6.70E-10	19.62	-	-	0.35	9	
나주	성토	4.20E-09	19.52	-	-	0.18	17	정밀진단 (1999)
	점토	8.20E-10	19.62	-	-	0.30	30	
담양	성토	1.30E-06	18.39	-	-	0.08	41.5	정밀진단 (1999)
	점토	2.00E-09	19.40	-	-	1.30	15	
광주	성토	1.30E-06	18.39	-	-	0.08	41.5	정밀진단 (1999)
	점토	5.70E-09	19.91	-	-	0.19	15	
수양	성토	8.60E-08	20.60	-	-	0.30	33	정밀진단 (1999)
	점토	6.70E-10	19.62	-	-	0.35	9	

[표 5-10] 대상 저수지 적용 토질 정수(공통사항)

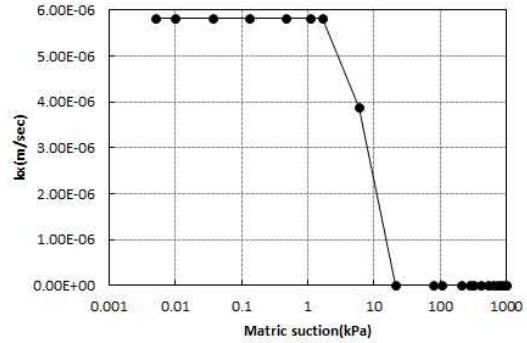
구분	투수계수 (m/s)	습윤단위 중량 (kN/m ³)	비중	함수비 (%)	점착력 (kN/m ²)	내부 마찰각 (°)	출처
풍화토	5.00E-08	18.64	-	-	15	30.00	문헌
연암	5.00E-11	24.53	-	-	100	35.00	문헌
사석	1.00E-03	18.15	-	-	0	40.00	문헌
드레인	3.00E-04	19.62	-	-	0	40.00	문헌
필터	5.00E-06	17.66	-	-	0	30.00	문헌

[표 5-11] 대상저수지 적용 함수특성곡선

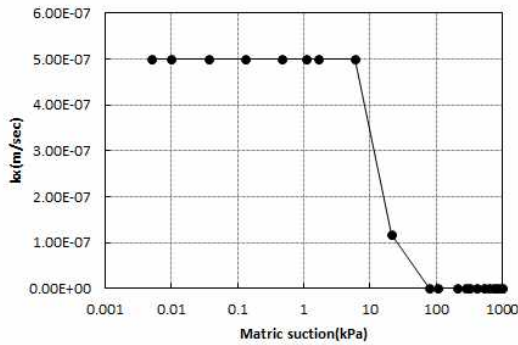
수계	대상지	성토	점토
한강	마지	Silty Sand	Sandy Loam
	무극	Silty Sand	Silty Loam
	백운	Silty Sand	Silty Loam
	애룡		
	오남	Silty Sand	Silty Loam
	용계	Sandy Loam	Sandy Loam
	용당	Silty Sand	Silty Loam
	추평	Silty Sand	Silty Loam
	용설	Silty Sand	Silty Loam
	잠곡	Silty Sand	Silty Loam
	금석	Silty Loam	Silty Loam
금강	계룡	Silty Sand	Silty Sand
	덕용	Silty Sand	Silty Sand
	도림	Silty Sand	Silty Sand
	동부	Silty Loam	Silty Loam
	반산		
	복심		
	탐정	Silty Sand	Silty Loam
낙동강	가월	Silty Loam	Silty Loam
	금오		
	달창	Silty Loam	Silty Loam
	대성		
	도원	Sandy Loam	Silty Loam
	오봉	Silty Sand	Silty Loam
	주남	Silty Loam	-
영산강	광주	Silty Sand	Silty Loam
	담양	Silty Sand	Silty Loam
	장성	Silty Sand	Silty Loam
	나주	Silty Sand	Silty Loam
	수양	Silty Sand	Silty Loam



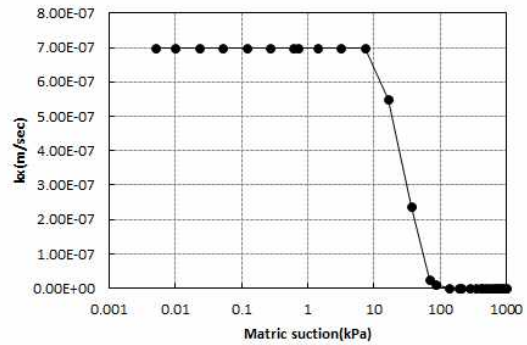
(a) Uniform Sand



(b) Sandy Loam



(c) Silty Sand



(d) Silty Loam

[그림 5-11] 적용 함수특성곡선

[표 5-12] Fredlund-Xing 함수 상수

Classification	a	n	m	M_v	W_{sat}
Uniform sand	4.88	6.44	0.50	1.00E-07	0.35
Sandy loam	2.99	3.83	0.51	1.00E-07	0.30
Silty sand	18.84	3.90	0.82	1.00E-07	0.51
Silty loam	43.28	2.80	1.28	1.00E-07	0.45

나. 제체 침투수 안정성 검토

(1) 개요

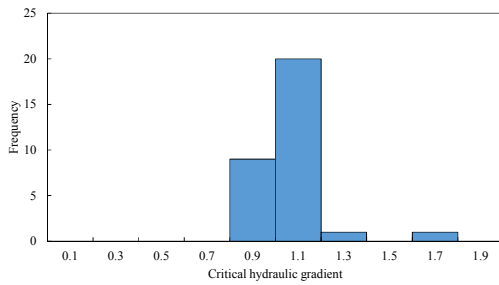
대상 저수지 침투해석을 실시하기 위하여 GEOSLOPE사의 지반공학해석 Package GeoStudio 2007의 수리침투해석 프로그램 Seep/W를 사용하였다. Seep/W를 통해 구한 지반의 간극 수압 값은 지반의 침투해석 뿐 아니라 GeoStudio에서 기능상으로 다른 프로그램과 연동할 수 있는 장점이 있다. 해석 조건은 1차원 정상류 해석을 실시하였으며 저수위는 만수위를 가정하였다. 침투류 해석을 통해 최대 출구경사를 산출하여 파이핑 안전율을 구하였으며 침투수량을 통해 침투 안정성을 파악하였다.

(2) 해석 결과

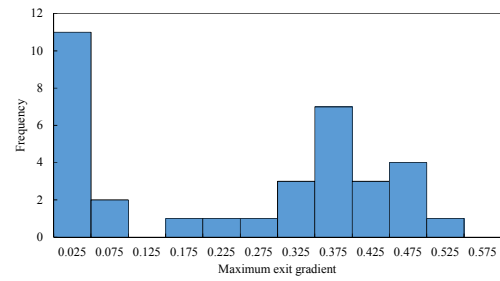
대상 저수지에 대한 침투류 해석을 수행하였으며 해석 결과를 바탕으로 파이핑 안정성과 침투 수량 안정성 검토를 실시하였다. 모든 저수지에 대한 침투류 해석 결과는 다음과 같다.

[표 5-13] 대상 저수지 침투류 해석 결과

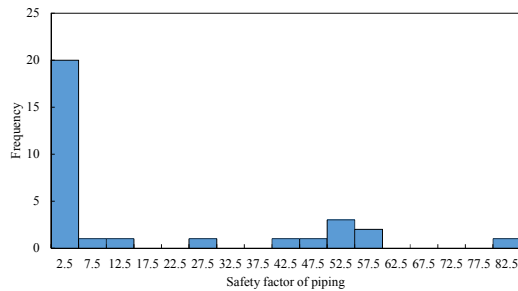
수계	저수지	한계동수경사	최대출구경사	안전율	침투수량		허용침투수량 (m ³ /day)
					(m ³ /sec/m)	(m ³ /day)	
한강	마지	1.07	0.48	2.24	4.14E-08	9.16E-01	1,706
	무극	1.11	0.28	3.96	2.69E-08	3.09E-01	1,534
	백운	0.93	0.46	2.03	3.99E-10	8.72E-03	690
	애룡	1.12	0.44	2.55	1.11E-06	1.03E+01	515
	오남	1.05	0.54	1.95	5.99E-08	2.13E+00	1,355
	용계	1.11	0.03	44.36	8.99E-09	1.98E-01	2,130
	용당	0.99	0.02	49.57	1.14E-07	-	-
	추평	1.13	0.32	3.52	4.77E-07	-	-
	용설	1.10	0.34	3.24	1.78E-08	7.06E-01	1,510
금강	금석	1.11	0.02	55.50	8.56E-08	1.31E+00	1,919
	계룡	1.15	0.02	57.60	1.38E-08	3.43E-01	1,835
	덕용	1.02	0.42	2.43	7.69E-09	1.95E-01	1,829
	도림	1.02	0.40	2.56	3.48E-07	5.14E+00	1,593
	동부	1.16	0.04	28.98	1.78E-07	1.94E+00	6,090
	반산	1.07	0.42	2.55	2.48E-05	1.94E+03	3,137
		1.04	0.02	52.05	3.14E-08	2.46E+00	
	복심	1.04	0.02	52.05	1.06E-08	2.90E-01	1,618
탑정	1.02	0.36	2.83	3.94E-09	1.95E-01	15,964	
낙동강	가월	0.92	0.40	2.30	1.38E-06	3.45E+02	4,852
		0.85	0.40	2.12	3.75E-06	9.37E+02	
		0.85	0.34	2.49	3.77E-06	9.42E+02	
	금오	0.85	0.50	1.69	4.44E-06	9.67E+01	1,062
	달창	1.06	0.38	2.78	6.86E-07	3.11E+01	4,464
	대성	0.83	0.10	8.25	1.76E-08	2.86E-01	1,651
	도원	1.23	0.38	3.23	1.07E-07	4.25E+00	703
	오봉	1.08	0.48	2.25	1.05E-07	6.99E-01	1,979
	주남	1.08	0.02	54.00	2.94E-07	8.04E+01	7,180
0.81		0.38	2.12	1.35E-08	3.69E+00		
1.11		0.08	13.88	3.88E-09	1.06E+00		
영산강	광주	0.88	0.20	4.40	7.15E-09	3.12E-01	8,680
	담양	1.66	0.02	82.90	4.14E-09	1.13E-01	33,335
	장성	-	0.02	-	2.17E-09	1.13E-01	44,880
	나주	-	0.24	-	4.72E-10	2.02E-02	45,600
	수양	-	0.04	-	2.42E-10	7.11E-03	3,795



(a) 한계동수경사



(b) 최대 출구 경사



(c) 파이핑 안전율

[그림 5-12] 침투류 해석 결과 부분별 분포도

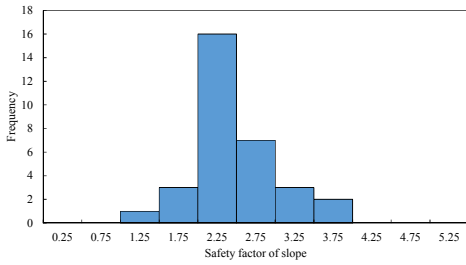
다. 제체 사면 평상시/지진시 활동 안정성 검토

(1) 개요

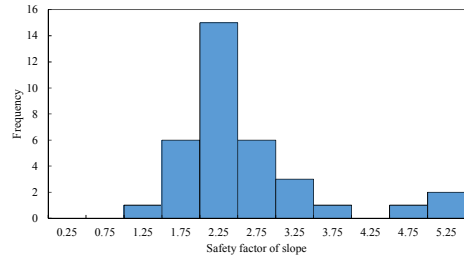
대상 저수지 제체 활동 안정성 해석을 실시하기 위하여 GEOSLOPE사의 지반공학해석 Package GeoStudio 2007의 사면안정해석 프로그램 Slope/W를 사용하였다. 침투해석 결과는 Seep/W 해석 결과를 적용하였으며 만수위를 가정하여 지진시, 평상시의 상류/하류 사면의 안정해석을 실시하였다. 또한 수위 급강하시 상류사면의 안전율 변화를 분석하였다. 사면 안정 해석은 Bishop 간편법을 사용하였다. Bishop 간편법은 방법이 간편하고 편리하나 다른 정확한 방법과 비교하여 결과가 별 차이 없어 사면 안정 해석의 절편법 중에서 가장 널리 사용되고 있다.

(2) 해석 결과

대상 저수지에 대한 사면 활동 안정성 검토를 실시하였다. 대상 저수지 각 해석 케이스에 대한 활동 안정성 해석 결과는 다음과 같다.



(a) 상류사면



(b) 하류사면

[그림 5-13] 제체 사면 안전율 분포

[표 5-14] 대상 저수지 사면 안정성 해석 결과

수계	저수지	만수위 상류		만수위 하류		수위급강하 상류
		정상시	지진시	정상시	지진시	
한강	마지	3.160	1.959	1.813	1.312	1.959
	무극	2.251	1.225	1.460	1.110	1.512
	백운	2.659	1.440	1.619	1.149	1.305
	애룡	2.714	1.550	1.766	1.275	1.885
	오남	2.039	1.147	0.937	0.713	1.288
	용계	2.786	1.506	1.663	1.199	1.867
	용당	2.492	1.374	2.050	1.421	1.992
	추평	2.441	1.33	1.855	1.306	1.567
	용설	2.036	1.205	1.515	1.142	1.469
	잠곡	2.108	1.425	1.459	1.228	1.337
	금석	2.106	1.214	1.260	0.939	1.260
금강	계룡	3.167	1.744	2.094	1.396	2.106
	덕용	1.983	1.098	1.445	0.963	1.546
	도림	1.347	2.509	2.122	1.449	1.586
	동부	2.638	1.464	1.662	1.172	2.120
	반산1	2.272	1.209	1.687	1.130	1.611
	반산2	2.217	1.193	1.685	1.143	1.903
	복심	2.482	1.532	3.053	1.865	1.976
	탑정	2.148	1.156	1.584	1.091	1.648
낙동강	가월 1	6.297	3.326	4.658	2.949	4.853
	가월 2	6.738	3.579	4.806	3.005	5.070
	가월 3	6.468	3.488	4.406	2.843	4.757
	금오	2.438	1.336	1.709	1.159	1.585
	달창	2.769	1.471	1.556	1.100	1.667
	대성	2.632	1.540	1.686	1.242	1.657
	도원	1.994	1.076	1.274	0.935	1.346
	오봉	2.426	1.383	1.634	1.217	1.540
	주남 1	2.727	1.508	2.328	1.527	2.061
	주남 2	2.159	1.366	2.548	1.700	2.126
	주남 3	3.031	1.596	2.548	1.689	2.128
영산강	광주	2.415	1.486	2.120	1.584	2.105
	담양	3.847	1.785	2.047	1.539	2.384
	장성	2.420	1.427	1.853	1.324	1.393
	나주	1.899	1.117	1.116	0.840	1.146
	수양	3.688	2.157	2.741	1.901	2.957

모든 대상지의 제체 사면 활동 안전을 산정 결과, 한강 수계의 오남 저수지와 영산강 수계의 도원 저수지는 만수위시 평상시에 하류사면의 안전율이 부적합한 것으로 나타났다. 외 모든 저수지가 안정한 것으로 나타났다. 또한 지진시에는 오남, 덕용, 반산, 탑정, 도원, 나주 저수지 등 총 6개 저수지의 상류사면 활동 안정성이 부적합한 것으로 나타났으며 하류사면은 무극, 백운, 오남, 용계, 용설, 금석, 덕용, 동부, 반산, 탑정, 금오, 달창, 도원, 나주 저수지 등 총 15개 저수지에서 부적합한 것으로 나타났다.

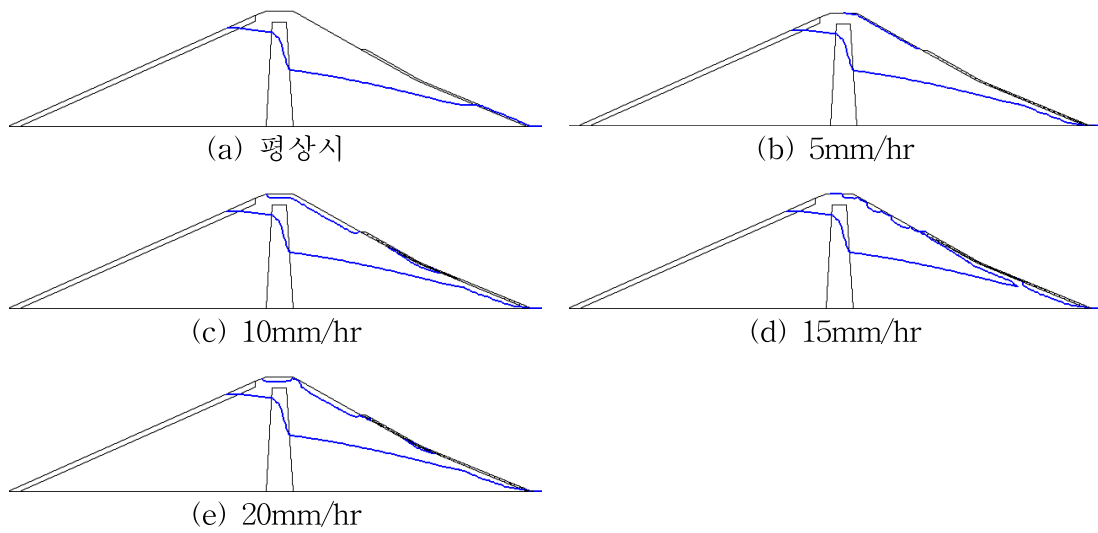
2. 기후변화를 고려한 제체 안정성 재검토

기존 제체 안정성 검토에 있어 만수위시 저수로 인한 침투를 고려하여 활동 안정성 검토를 실시한다. 하지만 강우 시 저수위는 만수위나 홍수위로 한정되지만 하류 사면에 강우침투로 인한 침윤선 하강 효과는 고려하지 못한다. 최근 우리나라는 기후변화로 인하여 강우사상의 양상이 과거와 비교하여 변화가 나타나고 있어 기후변화로 인해 변화하는 강우사상을 고려할 수 있는 강우에 따른 표면침투를 고려한 사면안정 해석이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 서로 다른 강우강도에 대하여 표면 침투를 고려하였을 때 변화하는 안전율을 검토하였으며 강우 지속 시간에 따른 안전율 변화를 분석하였다.

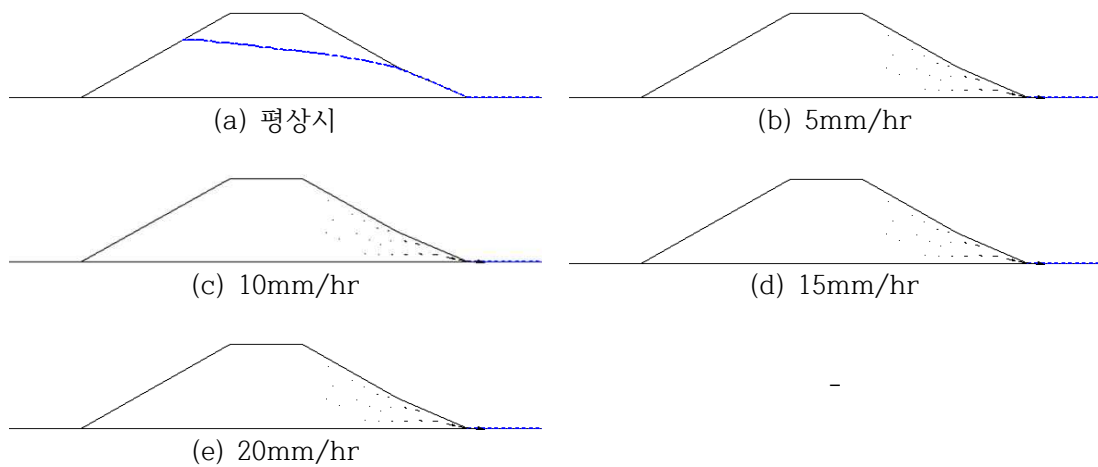
가. 강우 강도에 따른 표면 침투를 고려한 사면 안정성 재검토

본 연구에서는 강우사상으로 인한 하류사면 침투를 고려한 안정성 검토를 위하여 강우강도 5, 10, 15, 20 mm/h에 대하여 침투해석을 실시하였다. 강우강도 변화시 침투해석은 지속시간을 12시간으로 가정하였으며 해석 단면은 제체의 크기를 고려하여 대성 저수지, 가월 저수지를 선정하였다.

각 강우 강도에 대한 강우시작 12시간 경과 후 표면 침투 결과는 다음과 같다.



[그림 5-14] 강우강도에 따른 표면 침투해석 결과(대성 저수지)



[그림 5-15] 강우강도에 따른 표면 침투해석 결과(가월 저수지)

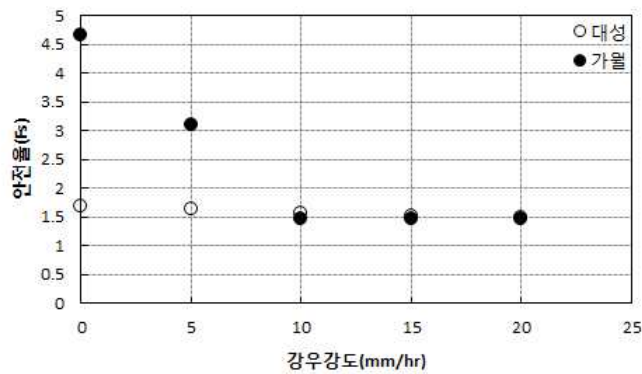
각 강우강도를 적용한 표면침투 해석 결과, 대성 저수지에서는 강우강도가 증가할수록 저수지 체체 상부 사석 피복이 되어 있지 않은 부분에서 침투가 일어났으며 하부 사석층에서는 일정 강우강도(10mm/hr) 이상에서 사석층 하부에서부터 습윤전선이 형성되는 것으로 나타났다. 가월 저수지는 체체의 표면적이 매우 작아 낮은 강우강도(5mm/hr)에서 12시간 지속되었을 때 이미 체체 전체가 포화되는 것으로 나타났다.

표면 침투를 고려하여 각 강우강도를 적용한 침투해석 후, 체체 활동 안정성 검토를 실시하였다. 대상지의 각 강우 사상에 대한 안전율 산정 결과

는 [표 5-15]과 [그림 5-16]와 같다.

[표 5-15] 강우강도 변화에 따른 안전율 변화

수계	사면 보호공	저수지	강우강도(지속시간 12hr)				
			평상시	5mm/hr	10mm/h r	15mm/h r	20mm/h r
낙동강	일부구간	대성	1.686	1.632	1.573	1.524	1.493
낙동강	무	가월	4.658	3.114	1.469	1.467	1.467



[그림 5-16] 강우강도 변화에 따른 안전율 변화(12hr)

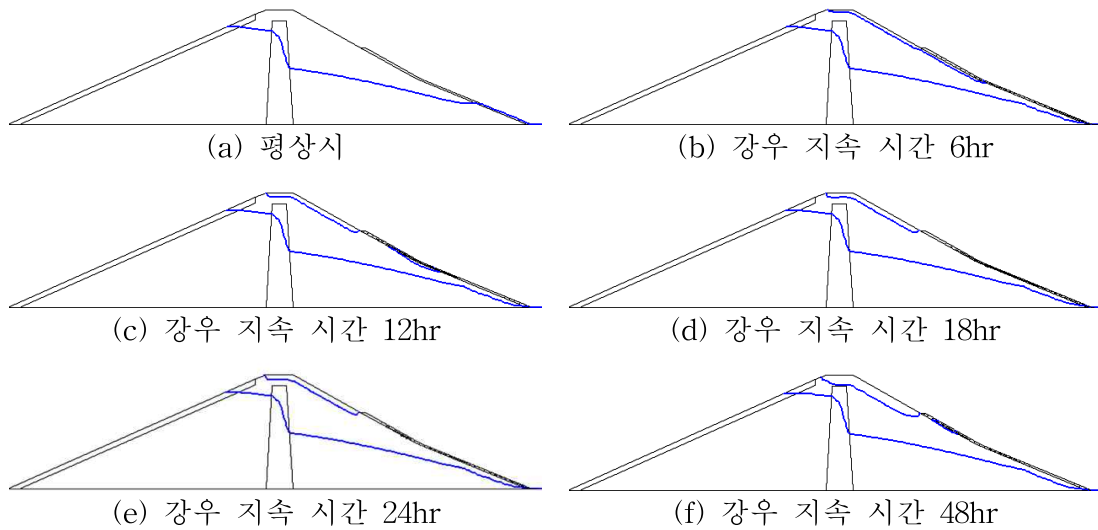
각 강우 강도를 고려한 표면 침투 해석 결과를 적용하여 대상 체체의 안정 해석 결과, 강우 강도가 커짐에 따라 안전율이 낮아지는 것으로 나타났다. 대성 저수지에 비하여 가월 저수지의 안전율이 더 크게 낮아 졌으며 15mm/hr이상의 강도로 강우가 내릴 시, 안전율 하락은 나타나지 않았다. 이는 두 저수지의 규모 차이에 의하여 발생하는 것으로 규모가 상대적으로 작은 가월 저수지의 단면이 더 빠르게 포화되어 더 빠르게 안전율이 낮아지는 것으로 판단된다. 또한 10mm/hr이상의 강우가 내릴 시 단면이 작은 체체가 완전 포화되어 더 이상의 안전율 하락이 없는 것으로 판단된다.

나. 강우 지속 시간에 따른 표면 침투를 고려한 사면 안정성 재검토

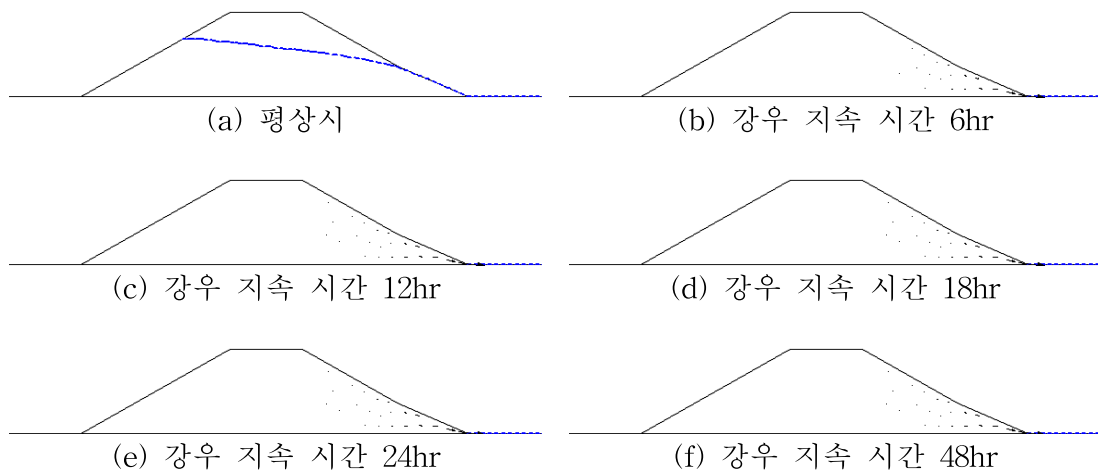
본 연구에서는 강우사상으로 인한 하류사면 침투를 고려한 안정성 검토를 위하여 지속시간에 따른 안전율 변화를 살펴보기 위해 지속 시간을 6, 12, 18, 24, 48시간으로 가정하여 침투 해석을 실시하였으며 강우강도는

10mm/hr로 가정하였다.

각 강우 지속 시간에 대한 표면 침투 결과는 [그림 5-17], [그림 5-18]과 같다.



[그림 5-17] 강우 지속 시간에 따른 표면 침투해석 결과(대성 저수지)



[그림 5-18] 강우 지속 시간에 따른 표면 침투해석 결과(가월 저수지)

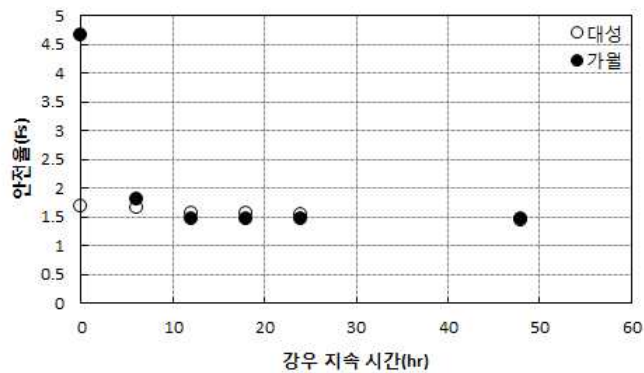
10mm/hr 강우에 대하여 서로 다른 강우 지속 시간을 적용하여 표면침투 해석 결과, 서로 다른 강우 강도에 대한 침투 해석 결과와 유사하게 나타났다. 대성 저수지에서는 강우 지속 시간이 증가할수록 저수지 체체 상부 사석 피복이 되어 있지 않은 부분에서 침투가 일어났으며 강우 지속 시간

이 길어짐에 따라 제체 상부 습윤전선이 더 깊에 형성되는 것으로 나타났다. 가월 저수지는 제체의 표면적이 매우 작아 짧은 지속시간(6hr)에서 제체 전체가 포화되는 것으로 나타났다.

표면 침투를 고려하여 각 강우 지속시간을 적용한 침투해석 후, 제체 활동 안정성 검토를 실시하였다. 대상지의 각 강우 사상에 대한 안전율 산정 결과는 [표 5-16]과 [그림 5-19]와 같다.

[표 5-16] 강우 지속시간 변화에 따른 안전율 변화

수계	사면 보호공	저수지	강우지속시간(강우강도 10mm/hr)					
			평상시	6hr	12hr	18hr	24hr	48hr
낙동강	o	대성	1.686	1.669	1.573	1.558	1.541	1.442
낙동강	x	가월	4.658	1.801	1.469	1.467	1.467	1.466



[그림 5-19] 강우지속시간 변화에 따른 안전율 변화(12hr)

각 강우 지속 시간을 고려한 표면 침투 해석 결과를 적용하여 대상 제체의 안정 해석 결과, 강우 지속 시간이 늘어남에 따라 안전율이 낮아지는 것으로 나타났다. 대성 저수지는 상대적으로 강우 지속 시간 증가에 따른 안전율 변화가 매우 작게 나타났으며 가월 저수지는 6시간 강우시 안전율이 크게 낮아졌으며 6시간 이상 강우가 지속 될 시 안전율 변화가 크게 나타나지 않았다. 침투 해석 결과를 살펴보았을 때, 가월 저수지는 6시간 강우가 지속 되었을 때 제체 단면이 이미 포화되어 그 이상의 강우가 더 지속된다 하더라도 영향을 받지 않는 것으로 판단된다.

3. 제체 안정성 확률 해석

가. 기본사항

(1) 개요

대상 저수지 확률론적 침투해석, 안전도 검사 및 민감도 분석을 실시하기 위하여 GEOSLOPE사의 지반공학해석 Package GeoStudio 2007의 수리 침투해석 프로그램 Seep/W와 사면안정 해석 프로그램 Slope/W를 사용하였다. Seep/W를 통해 구한 지반의 간극 수압 값은 지반의 침투해석 뿐 아니라 GeoStudio에서 기능상으로 다른 프로그램과 연동할 수 있는 장점이 있다. 해석 조건은 1차원 정상류 해석을 실시하였으며 저수위는 만수위를 가정하였다.

(2) 확률해석

침투에서의 확률론적 해석은 주요 변수가 되는 제체의 코어 및 성토재의 투수계수를 표준정규분포 공간으로 변환하여야 한다. 또한, 다항식의 전개에 따른 계수 (a_k)는 표본점을 통하여 산정하게 되며 이에 따라 응답변이 생성되므로 정확한 계수 산정을 위해서는 표본점의 선정이 중요하다. SRSM의 기저함수는 Hermite 다항식으로 표준정규분포를 따르는 확률변수를 입력값으로 사용하므로 위와 같이 물성값을 정규분포 공간으로 바꿔주어야 하는 것이다. 로그정규분포를 갖는 확률변수에 대한 표준정규분포 변환은 Hermite 다항식을 이용하였다.

응답면의 정확성은 표본점의 위치 및 개수, 기저다항식의 차수에 영향을 받게 된다. 독립변수와 종속변수의 비선형성이 강할수록 많은 표본점을 필요로 하게 되며 Hermite 다항식 차수가 증가할수록 필요로 하는 표본점의 개수가 증가하게 된다. 정확도를 높이기 위해서는 표본점의 개수를 늘려서 계산하면 되지만 오차 등을 고려하여 적절한 표본점의 선정이 필요하다.

본 연구에서는 표본점 선정을 위해 구간을 나누어 7개의 표준정규분포 값을 선정하였으며 이에 따라 두 값의 조합을 통하여 총 49개의 표본점을 선정하였다. 이후에 선정된 49개의 투수계를 통해 SEEP/W를 통하여 각각의 투수계수에 대한 침투수량을 산출하여 확률분포를 산정하였다.

사면안정의 확률론적 해석은 각 재료의 단위중량, 마찰각, 점착력의 변수를 5시그마 범위 내에서 변화시켜가며 해석을 수행하였으며 상, 하류의 사면안전율과 각 변수별 민감도를 계산하였다.

나. 침투류 해석

허용침투수량 자료가 없는 용당, 추평, 잠곡을 제외한 나머지 저수지들은 투수계수에 변동성을 주어도 최대 침투수량이 허용 침투수량에 미치지 못하는 결과를 볼 수 있다. 따라서 침투수량이 허용 침투수량을 넘을 확률은 0이라고 할 수 있으며 침투에 대해서는 안전한 것으로 판단된다.

관련연구

압밀계수의 공간변동성에 따른 압밀도의 확률론적 해석

Soil properties are not random values which is represented by mean and standard deviation but show spatial correlation. Especially, soils are highly variable in their properties and rarely homogeneous. Thus, the accuracy and reliability of probabilistic analysis results is decreased when using only one random variable as design parameter. In this paper, to consider spatial variability of soil property, one-dimensional random fields of coefficient of consolidation were generated based on a Karhunen-Loeve expansion. A Latin hypercube Monte Carlo simulation coupled with finite difference method for Terzaghi's one dimensional consolidation theory was then used to probabilistic analysis. The results show that the failure probability is smaller when consider spatial variability of than not considered and the failure probability increased when the autocorrelation distance increased. Thus, the uncertainty of soil can be overestimated when spatial variability of soil property is not considered, and therefore, to perform a more accurate probabilistic analysis, spatial variability of soil property needed to be considered.

참고문헌:

봉태호, 손영환, 노수각, 박재성, (2012), "압밀계수의 공간변동성에 따른 압밀도의 확률론적 해석." 한국농공학회논문집, 54(3): 55-63.

[표 5-17] 저수지별 허용침투수량 초과확률

저수지	허용침투수량(m ³ /s)	최대침투수량(m ³ /s)	초과확률	
한강	마지	0.0197	8.6518e-7	0
	무극	0.0177	1.4645e-6	0
	백운	0.0079	3.3250e-6	0
	애룡	0.0059	1.8447e-5	0
	오남	0.0015	5.1038e-7	0
	용계	0.0246	5.5612e-7	0
	용당	-	7.7131e-6	-
	추평	-	3.4067e-6	-
	용설	0.0174	1.2652e-6	0
	잠곡	-	3.8176e-7	-
금강	계룡	0.0212	5.9332e-8	0
	덕용	0.0211	4.3988e-6	0
	도림	0.0187	5.8556e-6	0
	동부	0.070	1.8656e-4	0
	반산1	0.036	4.4012e-7	0
	반산2		3.6915e-7	0
	복심	0.0184	3.9446e-8	0
탐정	0.1847	4.0447e-5	0	
낙동강	가월55	0.0562	1.9544e-5	0
	가월67		1.9599e-5	0
	가월72		2.3055e-5	0
	금오	0.0123	7.8774e-6	0
	달창	0.0517	7.7741e-8	0
	대성	0.0191	2.9857e-6	0
	도원	0.0081	1.3593e-6	0
	오봉	0.0229	4.0717e-6	0
	주남1호	0.0831	1.9423e-8	0
	주남2호		6.2829e-9	0
주남3호	1.2130e-8		0	
영산강	광주	0.1005	2.8557e-8	0
	담양	0.5278	1.2019e-9	0
	장성	0.3858	3.4170e-8	0
	나주	0.0439	8.5275e-9	0
	수양	0.5194	2.8603e-8	0

3. 사면안정 확률 해석

각 저수지 별 평상 시, 지진 시로 나누어 하류, 상류면에 대한 안전율 및 수위급강하 시에 대한 안전율을 구하였으며 이에 따른 확률해석을 실시하여 파괴확률을 산정하였다. 또한, 각 재료별 토질정수에 대한 안전율의 민감도 분석을 실시하여 그 결과를 그래프로 나타내었다.

상류의 경우, 평상시에는 모든 제체의 안전율이 1.9 이상으로 나타나서

매우 안전한 것으로 나타났으나 지진 시에는 5개 체체가 허용 안전율 1.2 이하로 나타났다. 하지만 각 체체의 파괴확률은 가장 큰 값이 0.02%으로 나타났다.

수위급강하 시에는 한강 수계의 백운 저수지가 안전율이 1.31으로 기준 값 넘게 나타나지만 파괴확률이 3.2%로 나타났다. 영산강 수계의 나주 저수지는 안전율 1.15, 파괴확률 5.3%로 나타났으며 총 2개의 저수지가 허용 기준치 미만인 것으로 나타났다.

하류의 경우, 한강 수계의 오남 저수지가 만수위 조건에서 안전율이 1 미만으로 나타났으며 파괴확률은 85%로 산정됐다. 또한, 영산강 수계의 나주 저수지는 안전율이 1.12이며 파괴확률은 3.1%로 나타났다. 지진 시에는 각 수계에서 총 10개의 저수지가 안전율 1.3 미만으로 나타났으며 지진 시에는 일반적으로 하류가 더 위험한 것으로 판단된다.

결론적으로 한강수계의 경우 무극, 백운, 오남, 용계, 용설, 금석 등에서 안전율이 허용치 밑으로 나타났으며 특히 오남의 경우 만수위 시 하류에서 파괴확률이 무려 85%로 나타났다. 금강수계의 경우 덕용, 동부, 반산, 탑정 등에서 기준치 밑의 안전율이 나타났으며 낙동강 수계의 경우 금오, 달창, 도원 등에서 안전율이 기준치 밑으로 나타났다. 마지막으로 영산강의 경우 나주에서 평상시를 제외하고 전부 기준치 밑의 안전율을 보여주었다.

관련연구

저수지 제체 단면 형상 변화에 따른 안전율 및 침투유량 분석

Many factors about the stability for the reservoir embankments is determined when the facility is completed. Therefore the initial design of the embankment is important. Many researchers focused the effect of soil parameters although the cross section greatly affects the stability and can be controlled in design step. The objective of this research is to analysis of the effects for the safety factor of slope and seepage according to change cross-section in embankment. As a result the quality of seepage decreased as the gradient of downstream slope decreased and was proportional to the height of embankments. there was a linear relationship between the gradient of slope and the safety factor of slope. However the gradient of slope did not affect other side slope. All in a relationship, regressive equation with a high correlation coefficient were calculated and can be applied the simple estimation method of the stability using the cross-section. As results of analyzing the sensitivity, the friction angle and permeability critically effect for the slope stability and the seepage, respectively. The effect of the slope gradient was similar to major soil properties.

참고문헌:

노수각, 손영환, 봉태호, 박재성, 최우석 (2013), “저수지 제체 단면 형상변화에 따른 안전율 및 침투유량 분석”, 한국농공학회논문집, 55(6):

[표 5-18] 저수지 상황별 사면안전율 및 파괴확률

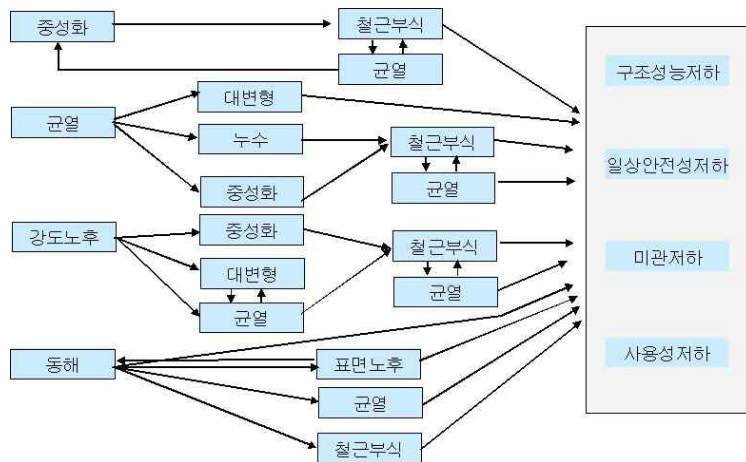
저수지		만수위 상류(평상시)		만수위 상류(지진시)		수위급강하 상류(평상시)		만수위 하류(평상시)		만수위 하류(지진시)	
		안전율	파괴확률	안전율	파괴확률	안전율	파괴확률	안전율	파괴확률	안전율	파괴확률
한강	마지	3.16	0.0E+00	1.96	8.7E-06	1.96	0.0E+00	1.81	0.0E+00	1.31	2.6E-04
	무극	2.25	0.0E+00	1.23	5.2E-03	1.51	0.0E+00	1.46	0.0E+00	1.11	1.4E-02
	백운	2.66	0.0E+00	1.44	1.4E-03	1.31	3.2E+00	1.62	0.0E+00	1.15	1.7E-02
	애룡	2.71	0.0E+00	1.55	1.0E-04	1.89	0.0E+00	1.77	0.0E+00	1.28	6.0E-03
	오남	2.04	0.0E+00	1.15	1.7E-02	1.29	9.8E-04	0.94	8.5E+01	0.71	2.0E-01
	용계	2.79	0.0E+00	1.51	6.4E-05	1.87	0.0E+00	1.66	0.0E+00	1.20	3.6E-03
	용당	2.49	0.0E+00	1.37	1.0E-03	1.99	0.0E+00	2.05	0.0E+00	1.42	8.1E-06
	추평	2.44	0.0E+00	1.33	1.1E-03	1.57	0.0E+00	1.86	0.0E+00	1.31	5.2E-05
	용설	2.04	0.0E+00	1.21	7.1E-03	1.47	0.0E+00	1.52	0.0E+00	1.14	1.3E-02
	잠곡	2.11	0.0E+00	1.43	3.6E-04	1.34	0.0E+00	1.46	0.0E+00	1.23	1.5E-03
금석	2.11	0.0E+00	1.21	2.5E-07	1.26	0.0E+00	1.26	0.0E+00	0.94	1.6E-01	
금강	계룡	3.17	0.0E+00	1.74	2.5E-07	2.11	0.0E+00	2.09	0.0E+00	1.40	7.3E-04
	덕용	1.98	0.0E+00	1.10	3.3E-02	1.55	0.0E+00	1.45	0.0E+00	0.96	1.3E-01
	도림	2.51	0.0E+00	1.35	3.6E-04	1.59	0.0E+00	2.12	0.0E+00	1.45	4.3E-08
	동부	2.64	0.0E+00	1.46	1.1E-04	2.12	0.0E+00	1.66	0.0E+00	1.17	3.5E-03
	반산1	2.27	0.0E+00	1.21	8.2E-03	1.61	0.0E+00	1.69	0.0E+00	1.13	6.6E-03
	반산2	2.22	0.0E+00	1.19	9.5E-03	1.90	0.0E+00	1.69	0.0E+00	1.14	4.1E-03
	복심	2.48	0.0E+00	1.53	3.3E-05	1.98	0.0E+00	3.05	0.0E+00	1.87	0.0E+00
탑정	2.15	0.0E+00	1.16	1.3E-02	1.65	0.0E+00	1.58	0.0E+00	1.09	2.9E-02	
낙동강	가월55	6.30	0.0E+00	3.33	0.0E+00	4.85	0.0E+00	4.66	0.0E+00	2.95	1.7E-07
	가월67	6.74	0.0E+00	3.58	0.0E+00	5.07	0.0E+00	4.81	0.0E+00	3.01	1.4E-07
	가월72	6.47	0.0E+00	3.49	0.0E+00	4.76	0.0E+00	4.41	0.0E+00	2.84	2.2E-07
	금오	2.44	0.0E+00	1.34	2.4E-03	1.59	0.0E+00	1.71	0.0E+00	1.16	5.4E-03
	달창	2.77	0.0E+00	1.47	2.1E-05	1.67	0.0E+00	1.56	7.1E-03	1.10	3.9E-02
	대성	2.63	0.0E+00	1.54	2.1E-08	1.66	0.0E+00	1.69	0.0E+00	1.24	1.5E-08
	도원	1.99	0.0E+00	1.08	4.4E-02	1.35	0.0E+00	1.27	0.0E+00	0.94	1.8E-01
	오봉	2.43	0.0E+00	1.38	6.0E-05	1.54	0.0E+00	1.63	0.0E+00	1.22	4.7E-08
	주남1	2.73	1.5E-04	1.51	0.0E+00	2.06	0.0E+00	2.33	0.0E+00	1.53	0.0E+00
	주남2	2.16	0.0E+00	1.37	6.0E-04	2.13	0.0E+00	2.55	0.0E+00	1.70	0.0E+00
주남3	3.03	2.6E-05	1.60	2.6E-12	2.13	0.0E+00	2.55	0.0E+00	1.69	0.0E+00	
영산강	광주	2.42	0.0E+00	1.49	7.1E-06	2.11	0.0E+00	2.12	0.0E+00	1.58	0.0E+00
	담양	3.85	0.0E+00	1.79	1.5E-07	2.38	0.0E+00	2.05	0.0E+00	1.54	0.0E+00
	장성	2.42	0.0E+00	1.43	2.1E-04	1.39	0.0E+00	1.85	0.0E+00	1.32	1.5E-04
	나주	1.90	0.0E+00	1.12	1.9E-02	1.15	5.3E+00	1.12	3.1E+00	0.84	2.0E-01
	수양	3.69	0.0E+00	2.16	1.9E-09	2.96	0.0E+00	2.74	0.0E+00	1.90	1.0E-09

제 3 절 구조안전성 분석기술

1. 농업생산기반시설의 구조물 재해

가. 구조 재해

저수지에 발생하는 노후화와 손상현상은 다양한 원인으로 발생하는데, 그 주요한 현상은 저수지의 표면에 조수와외 마모, 마찰, 풍화 등으로 인한 골재 노출 현상과 구조물 표면에 부식과 균열이 증대되어 철근이 부식되거나 철근이 노출되는 현상이다. 또한 표면에 콘크리트의 박리와 박락이 발생하고, 콘크리트가 부분적으로 탈락하는 기계적인 현상이며, 벽체의 콘크리트에 균열이 증가되며, 누수가 발생하거나 백화 현상에 의한 열화, 그리고 염해나 황산염 등에 의한 열화 현상들이다. 저수지 콘크리트에 발생할 손상은 그림 [5-20]과 같은 상관성을 보인다.

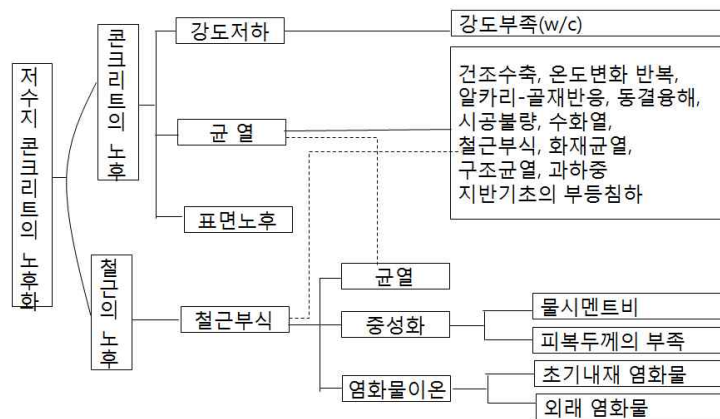


[그림 5-20] 저수지 콘크리트의 손상과정

저수지의 콘크리트에 발생하는 주요 손상은 중성화, 균열, 강도 저하 그리고 동해로 구별되며, 중성화는 콘크리트 표면에 균열을 진전시키고, 결국 철근을 부식시키며, 이들의 상호작용이 중성화를 다시 촉진시킨다. 균열은 구조물의 변형과 누수, 중성화를 촉진시키며, 이들은 철근 부식과 콘크리트의 균열을 진전시킨다. 동해는 콘크리트 표면을 노후화 시키며 균열과 철근을 부식시키는데 이들의 손상은 배수갑문의 구조성능을 저하시키고, 안전성과 사용성을 저하시키고, 미관을 저해하여 저수지의 콘크리트를 열

화시킨다.

저수지 콘크리트 구조물의 노후화는 콘크리트의 노후화와 철근의 노후화로 나누어지는데, 콘크리트의 노후화는 강도의 저하와 균열 및 표면을 노후화 시킨다. 강도의 저하는 설계에서 고려하지 못한 구조적인 원인에 의해 발생하며, 부적절한 물-시멘트비나 시공의 불량에 의한 강도의 부족에 의한 부분이며, 콘크리트의 균열은 콘크리트 표면의 건조수축, 주기적인 주변온도의 변화, 동결융해 작용, 알카리-골재반응, 시공불량, 수화열 등의 재료적인 문제점과 과하중, 기초지반의 부등침하에 의한 구조적 균열 등에 의해 발생한다. 철근의 노후화의 결과는 철근의 부식으로 나타나는데, 이는 철근을 보호해야할 콘크리트 표면의 열화, 특히 균열로 인해 철근의 대기 중 혹은 해수에 노출되는 직접적인 상황에 의한 원인과 물-시멘트비나 피복두께의 부족으로 중성화가 계획보다 일찍 발현하여 철근을 부식시키는 원인, 그리고 콘크리트에 내재되어 있는 염화물이나 해수에 의해 콘크리트 내부에 유입된 염화물에 의해 축적된 염화물이온으로 철근이 노후화 된다. 이들의 관계는 [그림 5-21]와 같다.



[그림 5-21] 저수지 콘크리트의 열화인자

이들 원인에 의해 저수지가 갖게 되는 노후화는 구조물의 직접적인 손상과 노후화에 의한 구조내력, 내구성, 내수성 등 대부분의 기능을 저하시키므로 저수지가 주어진 기능을 수행할 수 있도록 완전한 대책들이 필요하게 된다. 저수지의 콘크리트 구조물은 완공 당시에는 일정한 평균값에 수렴하

는 특성을 가지게 되지만, 일정시간이 경과된 이후에는 수위, 기온, 풍화등에 의하여 편차가 커지게 된다. 따라서 저수지의 콘크리트에 해당하는 인자의 특성을 평균과 표준편차를 기준으로 재해석 되어야 한다.

나. 구조 재해의 대책

많은 수리 구조물의 설계, 제작에 있어 콘크리트와 철이 주요 재료로 사용되고 있다. 콘크리트는 압축력에 매우 유리하고, 제작이 간편하고, 임의의 일체화된 구조물을 만들 수 있고, 경제적이며, 철은 인장에 강하고, 세장하고, 균질하며, 신뢰성이 높다. 철과 콘크리트로 제작된 구조물은 재료적, 물리적 특성으로 열화를 피할 수 없다. 국내의 환경에서 볼 때 수리구조물 중 콘크리트 부분은 과거 허용응력설계법으로 설계되었으며, 근래 설계된 것은 극한강도설계법으로 설계되었으며, 따라서 수리구조물의 설계방법의 차이로, 단면의 크기나 배근의 형태도 각 설계법에 따라 다르게 계획되고, 제작되었다. 허용응력설계법은 설계하중이 상시하중이므로, 수리구조물 설계에 적당하나 파괴에 근접한 상태에서는 거동에 대한 판단이 설계에 반영되어 있지 않았으며, 극한강도설계법으로 설계된 구조물은 설계하중이 극한강도이므로 상시하중의 반복적인 상태에 대한 고려가 부족하다.

일반적으로 구조설계에 관련된 하중과 재료, 기하적 요인에서 수리구조물의 하중이 비교적 작아, 내구적 기준으로 설계되는 경우가 많으며, 수리구조물이 구조적원인으로 파괴 또는 붕괴되는 경우는 매우 작다. 반면 콘크리트 재료의 열화 및 국부적인 응력 과다에 의한 파괴가 발생하고 있으며, 대부분의 경우는 주변 기반구조의 붕괴로 인해 콘크리트 구조물의 파괴 또는 붕괴에 이른다.

콘크리트 구조물 또는 철골 구조물의 경우 재료적 파괴의 첫 결과로 균열이 발생하게 되므로 균열에 대한 파악이 필요하며, 따라서 콘크리트를 사용한 수리시설물의 유지관리, 보수, 검사에서 첫 과제는 균열의 발견과 그에 따른 조치라 할 수 있다. 콘크리트의 균열은 반드시 원인을 가지고 있으며, 그 원인에 따라 균열이 발생하는 형상에도 차이가 있다. 균열의 제어는 구조물의 초기 설계 단계부터 계획 되어야 한다.

콘크리트 표면 발생하는 균열은 구성 재료가 어떤 원인에 의해 모체로부

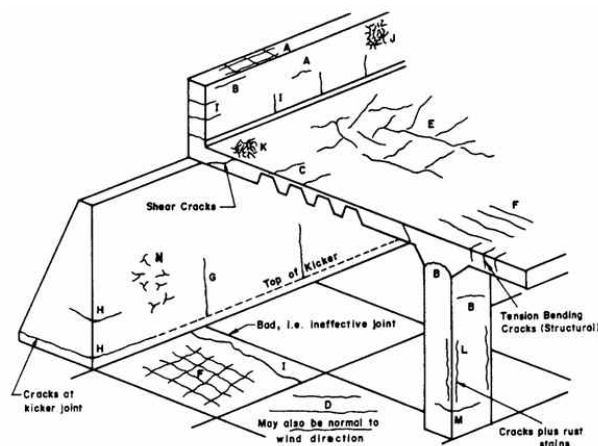
터 갈라져 틈이 생기는 현상을 의미하며, 균열은 폭, 깊이, 형태로 구별하는데, 폭은 구조물에 미치는 영향 판단 항목이며, 깊이는 일반적으로 폭 0.05mm이상의 균열 길이이고, 형태는 발생원인 추정 항목이 되며, 진행성은 보수보강 선정을 판단하는 항목이다.

열의 측정은 목검, 액체누수실험, 초음파탐색으로 파악된다. 균열의 조사에서 물질 충전 여부, 철근 녹, 주변 건습에 따른 표면상태, 박리, 박락 등 주요조사 항목이 된다.

철근콘크리트에서 균열은 재료적으로 보면, 콘크리트는 인장에 약하고, 균열되기 쉬운 재료이며, 콘크리트에 균열되지 않을 조건으로는 콘크리트 인장력보다 콘크리트의 인장강도가 클 때, 인장방향 변위보다 콘크리트의 신장력이 더 클 때이다. 재료적 이유로 콘크리트는 균열을 피할 수 없으며, 제어가 문제가 된다.

균열의 제어에서는 배근이 주요 문제가 되는데, 균열 폭에 영향을 주는 요인으로는 철근의 응력, 피복두께, 인장철근 배근 상태 등이며, 인장축 최대 균열 폭과 균열 간격은 설계기준에 제시하고 있다.

구조적 대책은 구조물이나 구조부재에 사용하중의 작용으로 인한 균열의 제어로 설계오류, 외부하중, 단면 및 철근량 부족으로 인한 균열의 제어이며, 비구조적 균열의 제어는 구조물의 안전성 저하 없고, 내구성, 사용성 저하되는 것으로, 소성침하 균열, 수성수축균열, 불규칙 미세균열, 염화물에 의한 철근 부식, 알카리 골재 반응 균열 등에 의한 제어이다.



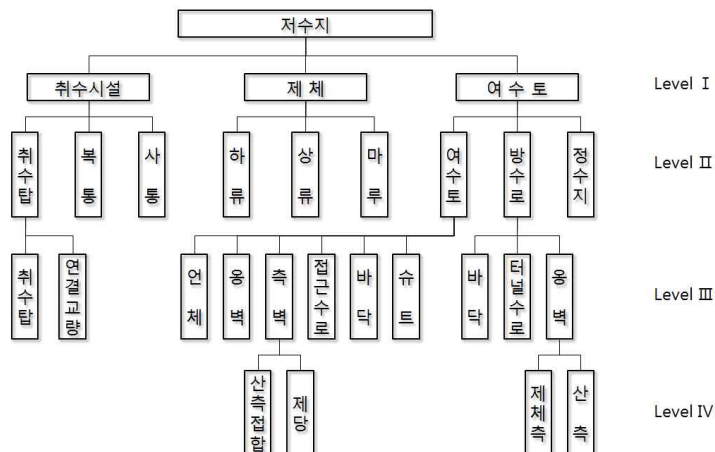
[그림 5-22] 비구조적 균열의 발생 부위와 원인

콘크리트 구조물의 균열에 의한 붕괴 중 부등침하에 의한 경우가 가장 심각하며, 이것은 부등침하에 의한 변형은 일반적으로 설계에서 고려하지 않는 예측하지 못한 상황이고, 대부분 바닥면에서 휨에 의한 인장력이 발생하기 때문이다. 이때 생기는 균열은 구조물의 수직으로 발생하며 균열 폭이 윗 부분과 아래 부분이 다르게 나타난다. 이 상태에서 구조물은 일체로 동작하지 않으며, 균열이 진행하게 되며, 즉시 조치하지 않을 경우 구조물은 재료적 파괴, 구조적 붕괴의 과정을 거치게 된다. 수리구조물에서 누수 현상은 콘크리트의 투수성을 고려 할 때 매우 심각하다.

2. 농업생산기반시설의 구조물 안전성 평가

가. 저수지 구조 요소

농업용 저수지는 저수지 본체를 이루는 3가지 구성체인 제체와 여수토·방수로, 그리고 취수시설로 구분된다. 제체는 상류사면과 하류사면 그리고 제체마루로 나뉜다. 여수토·방수로 부분은 여수토, 방수로, 정수지 구분되며, 다시 여수토는 언체, 옹벽, 측벽, 접근수로, 바닥, 슈트로 구분되며 또다시 측벽은 산측접합부와 제당접합부로 구분된다. 방수로는 바닥, 터널수로, 옹벽부로 구분되며, 옹벽부는 측벽과 마찬가지로 제체측과 산측접합부로 구분된다. 취수시설은 취수탑, 복통, 사통으로 분류되며, 여기서 취수탑은 취수탑 본체와 연결교량으로 분류한다[그림 5-23].



[그림 5-23] 농업용 저수지의 분류체계

나. 저수지 구조 요소별 안전성 분석

(1) 여수토의 안전성 분석

7개 지구 여수토의 활동, 전도, 침하에 대하여 안전율을 산정한 결과 모두가 안전하게 검토가 되었다. 전도의 경우에는 평균 4.59의 안전율로 높은 값을 보이고 있다. 활동의 경우에는 2.19로 평가되었으나 최소 안전율이 1.52의 값을 보여 일부 저수지에서 활동에 대한 안전율이 낮음을 파악하였다.

[표 5-19] 여수의 안전도 분석결과

저수지	전도	활동	침하
용설	6.67	1.97	3.40
무극	2.91	2.75	3.36
잠곡	4.58	1.92	2.95
마지	7.27	3.20	6.00
복심	4.11	1.95	4.89
담양	2.51	2.04	5.17
광주	4.05	1.52	2.74
평균	4.59	2.19	4.07
편차	1.79	0.58	1.26

(2) 옹벽의 안전성 분석

7개 지구 산측옹벽과 제측옹벽의 활동, 전도, 침하에 대하여 안전율을 산정한 결과 모두가 안전하게 검토가 되었다. 전도의 경우에는 평균 6.27의 안전율로 높은 값을 보이고 있다. 활동의 경우에는 2.62로 평가되었으나 최소 안전율이 1.62의 값을 보여 일부 저수지에서 활동에 대한 안전율이 낮음을 파악하였다. 또한 침하의 안전율은 3.00으로 검토되었으나 최소 1.44의 값을 보여 일부분의 옹벽에서는 침하에 대한 안전율이 낮음을 파악하였다.

[표 5-20] 옹벽의 안전도 분석결과

저수지	전도	활동	침하
용설 산측	5.80	2.01	3.01
용설 제측	4.41	2.16	2.67
무극 산측	3.25	2.03	3.02
무극 제측	5.95	2.51	1.86
잠곡 산측	6.44	1.62	4.09
잠곡 제측	8.43	2.03	3.44
마지 산측	9.69	4.36	3.01
마지 제측	9.10	4.39	2.37
복심 산측	3.06	1.84	5.84
복심 제측	5.72	1.77	3.66
담양 산측	4.18	3.05	1.44
담양 제측	4.44	1.84	3.02
광주 산측	10.90	2.95	2.37
광주 제측	6.35	4.12	2.14
평균	6.27	2.62	3.00
편차	2.43	1.00	1.08

(3) 교량의 안전성 분석

3개 지구 취수탑 연결교량의 저항모멘트와 하중모멘트에 대하여 안전율을 산정한 결과 모두가 안전하게 검토되었다. 안전율의 평균은 1.49로 일부 연결교량의 안전율이 낮음을 파악하였다.

[표 5-21] 취수탑 연결교량의 안전도 분석결과

저수지	저항	하중	안전율
잠곡	1266.00	986.49	1.23
복심	1167.80	533.72	2.19
담양	402.54	368.64	1.06

(4) 교량의 안전성 분석

3개 지구 취수탑의 침하에 대하여 안전율을 산정한 결과 모두가 안전하게 검토가 되었다. 안전율의 평균은 2.16으로 대부분의 취수탑이 침하에 대하여 안전율이 높음을 파악하였다.

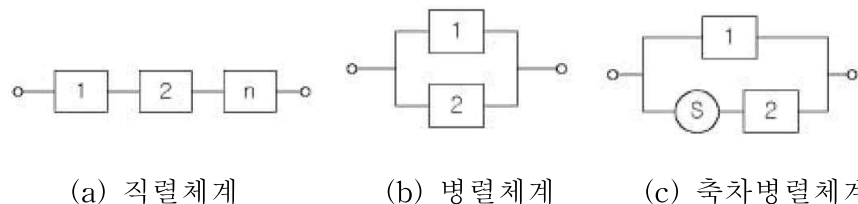
[표 5-22] 취수탑 안전도 분석결과

저수지	저항	하중	안전율
잠곡	4880.68	1996.88	2.44
복심	2397.31	1275.06	1.88
담양	2111.39	980.76	2.15

3. 농업생산기반시설의 구조물 신뢰성 평가

가. 저수지 체계도

저수지의 최종 신뢰도를 계산하기 위해서는 저수지를 구성하는 단위 시설로 구분하여 단위시설의 개별적인 신뢰도를 평가해야 한다. 저수지를 단위시설로 구분하게 되면, 단위시설이 저수지에 신뢰성 측면에서 기여하는 기능적 체계적 분류 체계를 구성해야 한다. 저수지의 신뢰성에는 저수지 구성요소인 단위 시설의 고유의 문제와 그것을 조합시켜 상위 시스템을 구성할 때 문제를 동시에 관계하고 있다. 이 때 저수지 시스템의 각 단위시설의 신뢰성이 시스템 전체의 신뢰성에 대하여 체계신뢰성에서 개별구조물은 직렬(series), 병렬(parallel), 축차병렬(standby) 중 어느 것인가 관계하고 있다.



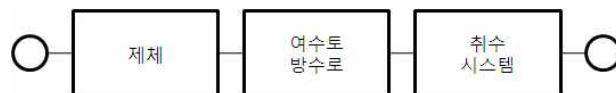
저수지의 직렬 체계에서 볼 때 저수지의 3대 시설인 제체, 여수토방수로, 취수시스템은 각각 독립된 기능체계로 볼 수 있으며, 이는 직렬체계에 해

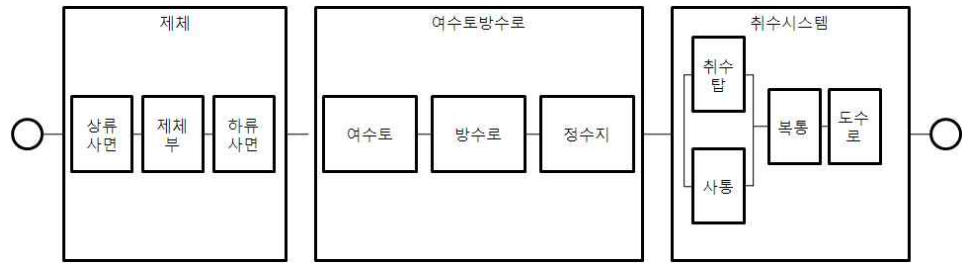
당된다. 직렬체계에서는 각 시설의 영향이 확률적으로 독립되어 있어야 하며, 잔존은 어느 하나의 요소라도 파괴되어서는 안 됨을 의미하며, 한 단위 시스템의 파괴가 전체 저수지 시설의 파괴-붕괴를 의미하게 된다.

저수지의 병렬 체계에서 볼 때 저수지의 직렬체계 내에서 각 단위시설의 하부의 요소로 동일한 기능을 수행할 수 있는 예비시설 등이 이에 해당한다. 병렬체계에서는 각 시설의 영향이 확률적으로 독립되어 있어야 하며, 잔존은 모든 요소의 파괴를 나타내며, 단위시스템의 모든 파괴가 전체 저수지 시설의 파괴-붕괴를 의미하게 된다. 저수지의 축차병렬 체계에서 볼 때 저수지의 설계에서 예비시설의 선택이 가능하게 구성한 경우에 해당한다. 저수지의 체계신뢰도를 평가하기 위한 체계도를 작성하면, 대부분의 요소는 필요에 의해 설계하되 같은 기능을 가진 두 가지 요소를 설계에 반영하지 않고, 안전율의 개념을 적용하여 여유도로 설계하게 된다. 따라서 일반적인 제작에 따른 리턴던시 같은 개념보다는 안전을 위한 여유이므로 대부분 직렬요소로 평가된다.

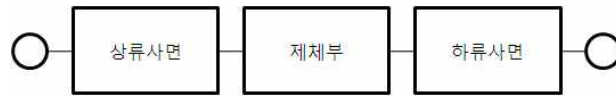
저수지의 체계신뢰도는 먼저 제체, 여수토방수로, 취수시스템으로 구분되며, 모두 직렬로 구성된다. 제체는 상류부, 제체부, 하류부로 구성되어 있으며, 또한 직렬로 구성된다. 여수토방수로는 여수로-방수로-정수지의 세 요소로 구별되며 또한 직렬구조이다. 각 여수로, 방수로, 정수지는 각각 부재요소를 가지게 된다. 취수시스템은 취수탐시스템과 사통시스템으로 구성되며, 이 두 요소는 병렬요소이다. 취수탐과 사통에서 복통과 도수로로 구성되는 부분은 직렬구성이다. 취수탐시스템은 취수탐과 연결교량으로 직렬 연결되며, 취수탐은 기초-구체-권양기실로, 연결교량은 상부공-하부공으로 직렬 구성된다. 이를 그려보면 다음과 같다.

(1) 저수지 체계도

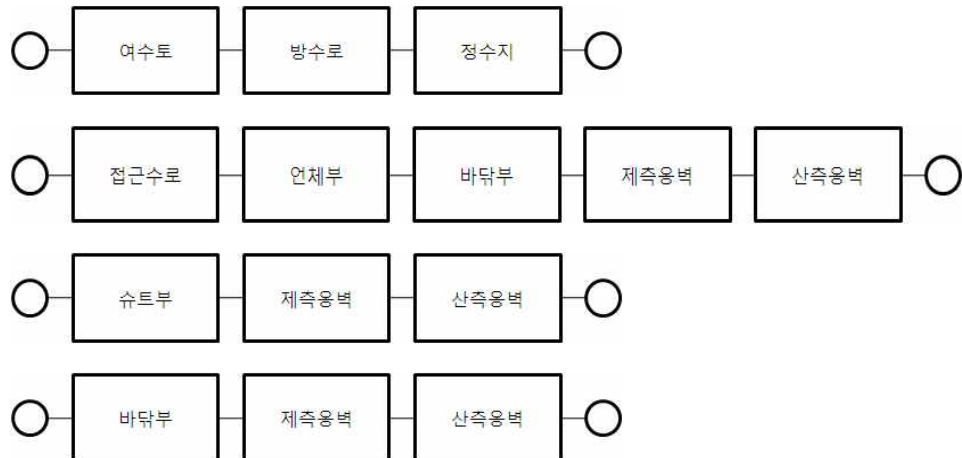




(2) 제체 체계도



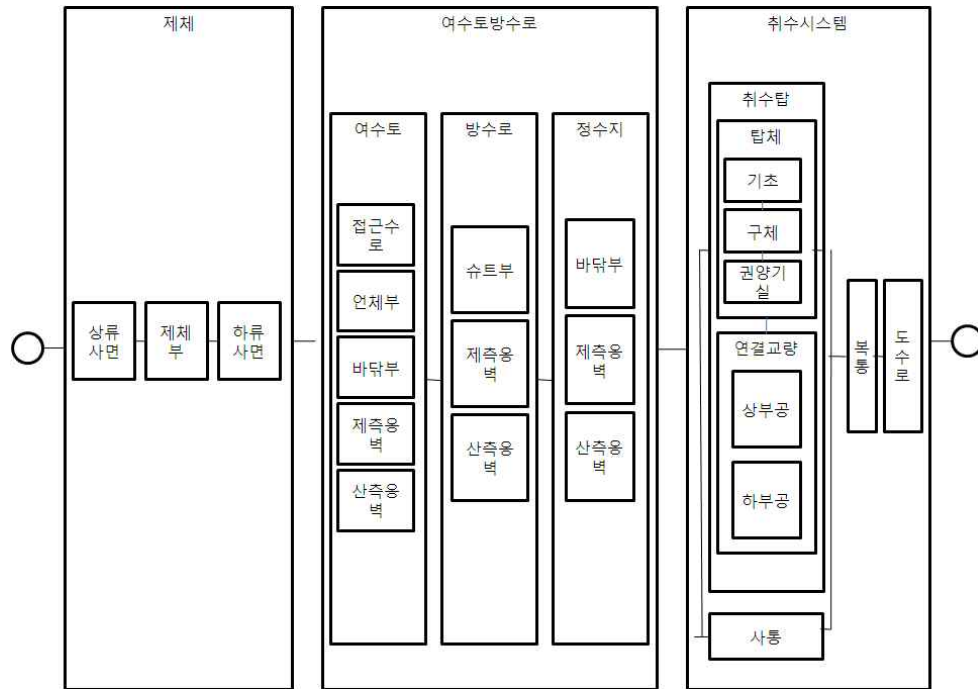
(3) 여수토방수로 체계도



(4) 취수시스템 체계도



(5) 저수지의 체계신뢰성 종합체계도



나. 확률변수

구조물이 파괴되는 원인을 보면 수치계산의 잘못, 지나친 이상화, 단순화, 부실시공 등 설계에 고려하지 않은 많은 내용에 의하는 경우가 많다. 이러한 설계시공에 포함되어 있는 불확실성을 객관적으로 계산하여 정량적으로 결정하는 일이 무엇보다도 신뢰성문제에서 중요한 일이다. 신뢰성해석에서는 부재치수 및 재료강도의 작은 변화가 구조물 전체의 파괴확률에 미치는 영향을 무시할 수 없으므로 설계자는 예상하지 못한 원인으로 인한 파괴의 가능성을 항상 염두에 두어야 하며 불확실량의 계상에서는 변수의 분포에 내재된 변동성과 예측 모델의 불완전 등을 포함하여야 한다.

(1) 토질정수의 확률변수

흙의 성질은 시간과 공간에 따라 변화가 크기 때문에 다른 구조재료와는 다르게 그 불확실성이 상대적으로 커지게 된다. 흙의 강도는 현장실험이나 실내실험으로 결정할 수 있으나 그 흙의 비균질, 시료의 흐트러짐, 제한된 시료의 수, 실험방법, 숙련도 등 여러 가지 요인으로 하여 동일한 흙

일지라도 같은 결과를 얻기는 어려운 일이다. 따라서 모든 토질정수 (내부 마찰각, 점착력, 단위중력 등)는 그 본질상 단일 값으로 취급할 수 없는 확률변수이다. 본 연구에서 택한 이러한 변수의 실험자료는 현실 여건에 적합한 통계자료를 이용하였으며, [표 5-23]과 같다.

[표 5-23] 토질정수의 평균과 표준편차

확률변수	평균	분산계수	확률분포
$\gamma_1 (t/m^3)$	1.9	0.08	정규분포
$\gamma_2 (t/m^3)$	1.9	0.08	정규분포
$\Phi_1 (^\circ)$	35	0.10	정규분포
$\Phi_2 (^\circ)$	23	0.15	정규분포
$c_1 (t/m^2)$	10	0.30	정규분포
$c_2 (t/m^2)$	10	0.30	정규분포

(2) 콘크리트 압축강도 확률변수

콘크리트의 압축강도에 영향을 미치는 주요기본변수는 구성하는 재료, 대입, 운반, 타설, 양생 등에 의하며, 이러한 것들이 강도의 변동성을 보이기 때문에 이 변동성을 분산계수로 나타낸다. 국내에서는 콘크리트강도의 확률특성을 조사한 자료가 많지 않은 데 한국건설기술연구원이 국내현장에서 시공되는 콘크리트의 강도 특성을 조사한 것이 표 5-00이다. 이것은 외국의 결과에 비하여 공침강도에 대한 실제 강도의 대비나 분산계수 수준이 낮다. 이러한 결과를 낳게 한 정확한 원인 즉, 콘크리트 배합, 타설 과정에서의 다량의 가수 및 타설방법 등 철저한 분석이 필요하다 하겠다. 외국의 경우 Mirza , Ellingwood 등의 연구에 의한 콘크리트 강도 확률특성은 [표 5-24]와 같다.

[표 5-24] 콘크리트 압축강도의 통계자료

공칭강도 $\sigma_{ck}(kg/cm^2)$	평균강도 $\bar{\sigma}_{ck}(kg/cm^2)$	$\frac{\overline{\sigma_{ck}}}{\sigma_{ck}}$	분산계수	확률분포	비 고
180	173	0.96	0.21	대수정규분포	국내
210	180	0.86	0.10		
240	199	0.83	0.16		
210	194	0.92	0.18	정규분포	외국
280	238	0.85	0.18		
350	283	0.81	0.15		

(3) 철근 항복강도 확률변수

철근은 콘크리트보다 구성재료가 간단하고 공장제품으로 생산되기 때문의 철근의 통계적 분산은 비교적 작으며 품질관리가 용이하다. 그러나 철근과 콘크리트는 상호 합성에 의하여 작용하중에 저항하므로 철근콘크리트 부재의 확률특성을 결정하려면 철근의 통계적 특성이 필요하다. 철근의 확률특성은 [표 5-25]와 같다. 국산 철근의 항복강도에 대한 분산성이 외국산 철근보다 작은 이유는 조사 생산회사의 자료 수가 적어서 나타나는 특성으로 분석되었다.

[표 5-25] 철근 항복강도의 통계자료

공칭강도 $\sigma_y(kg/cm^2)$	평균강도 $\bar{\sigma}_y(kg/cm^2)$	$\frac{\bar{\sigma}_y}{\sigma_y}$	분산계수	확률분포	비고
SD 30	3600	1.20	0.064	정규분포	국내
SD 35	3955	1.13	0.038		
SD 40	4360	1.09	0.048		
Grade 40	3185	1.13	0.116	베타분포 대수정규분포	외국
Grade 60	4745	1.12	0.098		
Grade 40	3353	1.19	0.090		

관련연구

BEM을 이용한 Plane Strain 구조물의 LevelIII 신뢰성해석

The objectives of this study are intended to analyze stresses using the boundary element method and probability analysis for the agricultural structure. The loads and material properties are important factors when analyzing the structure. Until now, in structural design, loads and material properties are applied to deterministic value. However, the loads and material properties involve uncertainties due to those probabilistic characteristics. The deterministic analysis could not consider uncertainties. To solve these problems, the reliability analysis based on probability properties scheme was developed. The reliability analysis is easy to approach to analysis frame structure, however it has limitation when solving plane stress/strain problems in the agricultural structures. The BEM(Boundary Element Method) is able to analyze the plane strain problem by boundary equation. Thus, this study applied to the boundary element analysis to plane strain problem. The loads and material properties as a probabilistic value to calculate the analytical model using Monte Carlo simulation were developed.

참고문헌:

전정배, 박진선, 이형렬, 윤성수, (2012), "BEM을 이용한 Plane Strain 구조물의 LevelIII 신뢰성해석", 농업과학연구, 28(2): 93-98.

다. 저수지 구조 요소별 신뢰성 분석

(1) 구조 요소 신뢰성 분석

7개 지구 여수토의 활동, 전도, 침하에 대하여 신뢰성을 산정한 결과 대부분의 파괴확률이 낮은 것으로 분석되었다. 전도의 경우에는 1군데에서만 낮은 파괴확률이 나타났으며 나머지는 0으로 분석되었다. 여수토의 경우에는 대부분이 $10e-05$ 이하의 파괴확률로 분석되어 파괴의 가능성은 낮은 것으로 파악되었으나, 옹벽의 경우에는 몇몇 지구에서 $10e-02$ 의 파괴확률로 일부 옹벽에서 높은 것으로 파악되었다. 또한 취수탑은 모두가 $10e-01$ 로 분석되어 침하의 대한 파괴확률이 높은 것으로 분석되었다.

[표 5-26] 여수토의 신뢰성 해석

항목		전도	활동	침하
여수토	용설	0	2.20e-07	2.44e-09
	무극	0	1.30e-07	1.30e-06
	잠곡	6.16e-07	2.48e-03	2.67e-16
	마지	0	6.79e-06	3.32e-08
	복심	0	3.39e-06	1.46e-10
	담양	0	1.33e-05	3.12e-14
	광주	0	1.30e-06	2.95e-13

[표 5-27] 산측옹벽의 신뢰성 해석

항목		전도	활동	침하
산측 옹벽	용설	0	1.66e-05	1.72e-04
	무극	0	2.78e-10	1.61e-18
	잠곡	0	1.02e-11	2.00e-23
	마지	0	6.64e-04	8.49e-05
	복심	0	2.12e-03	0
	담양	0	0	2.24e-04
	광주	0	1.02e-11	5.13e-12

[표 5-28] 제측옹벽의 신뢰성 해석

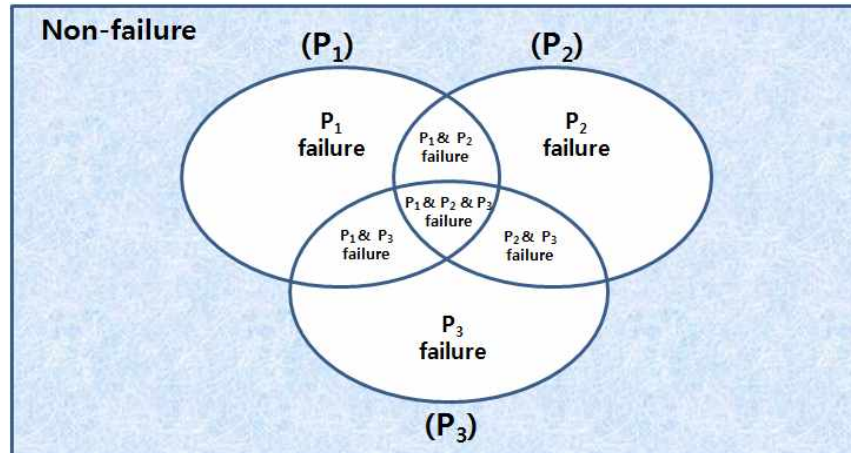
항목		전도	활동	침하
제측 옹벽	용설	0	5.01e-04	9.64e-03
	무극	0	2.17e-17	4.66e-04
	잠곡	0	2.70e-19	3.86e-18
	마지	0	6.06e-16	3.07e-03
	복심	0	7.22e-05	1.09e-19
	담양	0	8.69e-02	4.98e-08
	광주	0	0	1.10e-02

[표 5-29] 취수탑 및 연결교량의 신뢰성 해석

항목		β	$\Phi(-\beta)$
연결교량	잠곡	8.76	0.6623e-18
	복심	1.74	0.4093e-01
	담양	4.83	0.7914e-06
취수탑	잠곡	1.89	0.2938e-01
	복심	1.60	0.5480e-01
	담양	1.86	0.3144e-01

라. 저수지 구조 시스템 신뢰성 분석

외부하중에 의한 저수지 콘크리트의 전도, 활동, 침하는 독립된 파괴를 가지지 않고 복합적인 파괴의 양상을 가진다. 또한 여수토, 옹벽, 교량, 취수탑도 마찬가지로 복합적인 파괴의 양상을 가진다. 이 관계를 벤 다이어그램으로 나타내면 다음의 그림과 같다.



[그림 5-24] 복합과괴의 벤 다이어그램

벤 다이어그램으로부터 구조물이 파괴될 확률은 다음과 같다.

$$P_{failure} = P(A) + P(B) + P(C) - P(A) \cap P(B) - P(A) \cap P(C) - P(B) \cap P(C) + P(A) \cap P(B) \cap P(C)$$

위의 식을 통해 시스템 신뢰성분석을 한 결과는 아래의 테이블과 같다.

관련연구

컨볼루션 기법을 이용한 영역이 제한된 비정규 확률문제의 신뢰성 해석

Appropriate random variables and probability density functions based on statistical analysis should be defined to execute reliability analysis. Most studies have focused on only normal distributions or assumed that the variables showing non-normal characteristics follow the normal distributions. In this study, the reliability problem with non-normal probability distribution was dealt with using the convolution method in the case that the integration domains of variables are limited to a finite range. The results were compared with the traditional method (linear transformation of normal distribution) and Monte Carlo simulation method to verify that the application was in good agreement with the characteristics of probability density functions with peak shapes. However it was observed that the reproducibility was slightly reduced down in the tail parts of density function.

참고문헌:

이현만, 김태근, 최원, 서교, 이정재, (2013), “컨볼루션 기법을 이용한 영역이 제한된 비정규 확률문제의 신뢰성 해석”, 한국농공학회논문집, pp.49-58

[표 5-30] 여수토의 시스템해석

항목		전도	활동	침하	시스템
여수토	용설	0	2.20e-07	2.44e-09	2.23eE-07
	무극	0	1.30e-07	1.30e-06	1.43e-06
	잠곡	6.16e-07	2.48e-03	2.67e-16	2.48e-03
	마지	0	6.79e-06	3.32e-08	6.83e-06
	복심	0	3.39e-06	1.46e-10	3.39e-06
	담양	0	1.33e-05	3.12e-14	1.33e-05
	광주	0	1.30e-06	2.95e-13	1.30e-06

[표 5-31] 산측옹벽의 시스템해석

항목		전도	활동	침하	시스템
산측 옹벽	용설	0	1.66e-05	1.72e-04	1.88e-04
	무극	0	2.78e-10	1.61e-18	2.78e-10
	잠곡	0	1.02e-11	2.00e-23	1.02e-11
	마지	0	6.64e-04	8.49e-05	7.48e-04
	복심	0	2.12e-03	0	2.12e-03
	담양	0	0	2.24e-04	2.24e-04
	광주	0	1.02e-11	5.13e-12	1.54e-11

[표 5-32] 제측옹벽의 시스템해석

항목		전도	활동	침하	시스템
제측 옹벽	용설	0	5.01e-04	9.64e-03	1.01e-02
	무극	0	2.17e-17	4.66e-04	4.66e-04
	잠곡	0	2.70e-19	3.86e-18	4.13e-18
	마지	0	6.06e-16	3.07e-03	3.07e-03
	복심	0	7.22e-05	1.09e-19	7.22e-05
	담양	0	8.69e-02	4.98e-08	8.69e-02
	광주	0	0	1.10e-02	1.10e-02

[표 5-33] 저수지 전체의 시스템해석

항목	여수토	산측옹벽	제측옹벽	교량	취수탑	최종
저수지	용설	2.23e-07	1.88e-04	1.01e-02		1.03e-02
	무극	1.43e-06	2.78e-10	4.66e-04		4.68e-04
	잠곡	2.48e-03	1.02e-11	4.13e-18	6.62e-17	2.94e-02
	마지	6.83e-06	7.48e-04	3.07e-03		3.83e-03
	복심	3.39e-06	2.12e-03	7.22e-05		5.48e-02
	담양	1.33e-05	2.24e-04	8.69e-02	7.91e-07	3.14e-02
	광주	1.30e-06	1.54e-11	1.10e-02	4.09e-02	5.19e-02

4. 농업생산기반시설의 구조물 피해복구비용

가. 저수지 피해복구비용 산정

저수지의 파괴에 따르는 피해비용은 붕괴 이후에 발생하는 토목공사비, 기계공사비, 전기공사비, 건축공사비등을 기준으로 산정되어야 한다. 저수지의 파괴 형태에 따라서 피해비용은 달라지겠지만, 현재의 기준으로 피해비용의 산정에 대한 연구는 미비한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 기존의 공사비를 기준으로 하여 실적공사비 개념으로 작성하고자 한다. 담양저수지를 기준으로 작성된 여수토의 공사비를 이용하여 체적대비 공사비를 산정하고자 한다. 담양저수지의 공사비 내역은 다음의 [표 5-34]와 같다.

[표 5-34] 담양저수지 여수토 공사비 내역

(단위 : 천원)

	노무비	재료비	경비	합계
토목 공사비	330,254	109,250	16,729	456,233
기계 공사비	629,872	513,595	10,709	1,154,176
전기 공사비	210,744	178,679	1,206	390,629
건축 공사비	78,176	39,660	364	118,200
부대 공사비	47,656	340	46,860	94,856

담양 저수지의 경우에는 여수토의 전체 체적이 약 114.41m³으로 계산되

며, 1m³을 기준으로 약 19,353천원의 공사비가 소요된다. 정확한 공사비를 산정하기 위하여는 토목공사비를 위한 토질정수, 토질상태, 토양종류 등의 세밀한 정보가 필요하며, 기계공사비에 필요한 전기장치의 위치 및 기하조건이 필요하지만 현상태의 저수지는 30년 이상 경과한 경우가 많기 때문에 건축도면을 이용하여 산정하기에는 판단하기 어렵다. 따라서 단위 체적당 공사비를 기준으로 공사비를 산정하였으며, 산정된 결과는 아래의 표와 같다.

[표 5-35] 저수지 예상 피해복구비 내역

(단위 : 천원)

저수지명	여수토	옹벽	교량	취수탑
용설	13,204,111	77,416,025		
무극	14,504,575	43,149,168		
잠곡	21,149,771	50,905,173	449,609	2,778,187
마지	9,099,003	15,817,356		
복심	29,373,209	16,976,452		1,028,225
광주	7,307,693	214,790,277	836,050	

제 4 절 제체파괴에 의한 피해 산정기법

제체 붕괴에 따른 피해액 산정방법 역시 홍수피해액 산정방법과 유사하다. 제체붕괴로 따른 침수구역을 설정하고, 침수발생시 피해액을 계산하여 가중치를 곱하는 방법이다.

1. 제체붕괴 피해 가중치 산정

제체붕괴 피해 가중치는 사면파괴확률을 이용하는 것을 목표로 하였다. 지반안정성 평가기술개발에서 제시하고 있는 사면파괴 확률은 평상시와 지진시 만수위 조건에서 상류와 하류의 파괴확률을 구한다. 그리고 수위가 급강하하는 상황에 대해서도 파괴확률을 구하도록 되어 있다. 흙댐의 제체붕괴는 상류부나 하류부 어느 한 부분이 붕괴되더라도 댐 전체의 파괴로

이러므로 조건을 평상시와 지진시의 조건으로 구분하여 두 개 조건에서 가장 큰 파괴확률 값을 그 저수지의 파괴확률 값으로 채택하였다. 이 값을 이용하여 제체붕괴 피해 가중치값으로 이용하였다.

[표 5-36] 저수지의 조건별 파괴확률

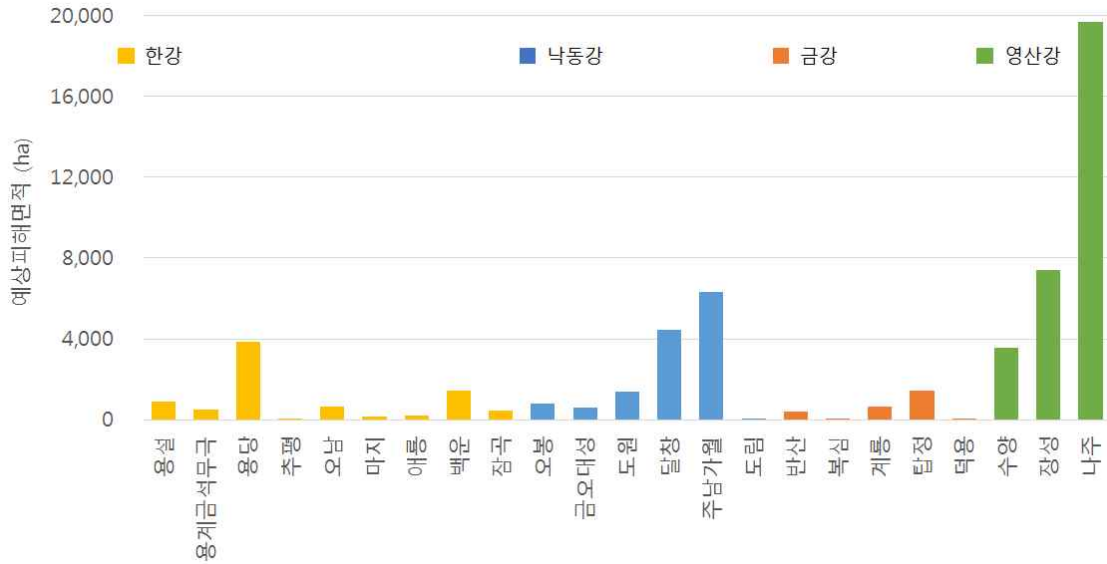
평상시				지진시			
저수지	파괴확률	저수지	파괴확률	저수지	파괴확률	저수지	파괴확률
마지	0.00.E+00	반산	0.00.E+00	마지	2.60.E-04	반산	9.50.E-03
무극	0.00.E+00	복심	0.00.E+00	무극	1.40.E-02	복심	3.30.E-05
백운	3.20.E+00	탑정	0.00.E+00	백운	1.70.E-02	탑정	2.90.E-02
애룡	0.00.E+00	가월	0.00.E+00	애룡	6.00.E-03	가월	2.20.E-07
오남	1.69.E-01	금오	0.00.E+00	오남	2.00.E-01	금오	5.40.E-03
용계	0.00.E+00	달창	7.10.E-03	용계	3.60.E-03	달창	3.90.E-02
용당	0.00.E+00	대성	0.00.E+00	용당	1.00.E-03	대성	2.10.E-08
추평	0.00.E+00	도원	0.00.E+00	추평	1.10.E-03	도원	1.80.E-01
용설	0.00.E+00	오봉	0.00.E+00	용설	1.30.E-02	오봉	6.00.E-05
잠곡	0.00.E+00	주남	1.50.E-04	잠곡	1.50.E-03	주남	6.00.E-04
금석	0.00.E+00	광주	0.00.E+00	금석	1.60.E-01	광주	7.10.E-06
계룡	0.00.E+00	담양	0.00.E+00	계룡	7.30.E-04	담양	1.50.E-07
덕용	0.00.E+00	장성	0.00.E+00	덕용	1.30.E-01	장성	2.10.E-04
도림	0.00.E+00	나주	5.30.E+00	도림	3.60.E-04	나주	3.10.E+00
동부	0.00.E+00	수양	0.00.E+00	동부	3.50.E-03	수양	1.90.E-09

2. 예상피해면적 산정

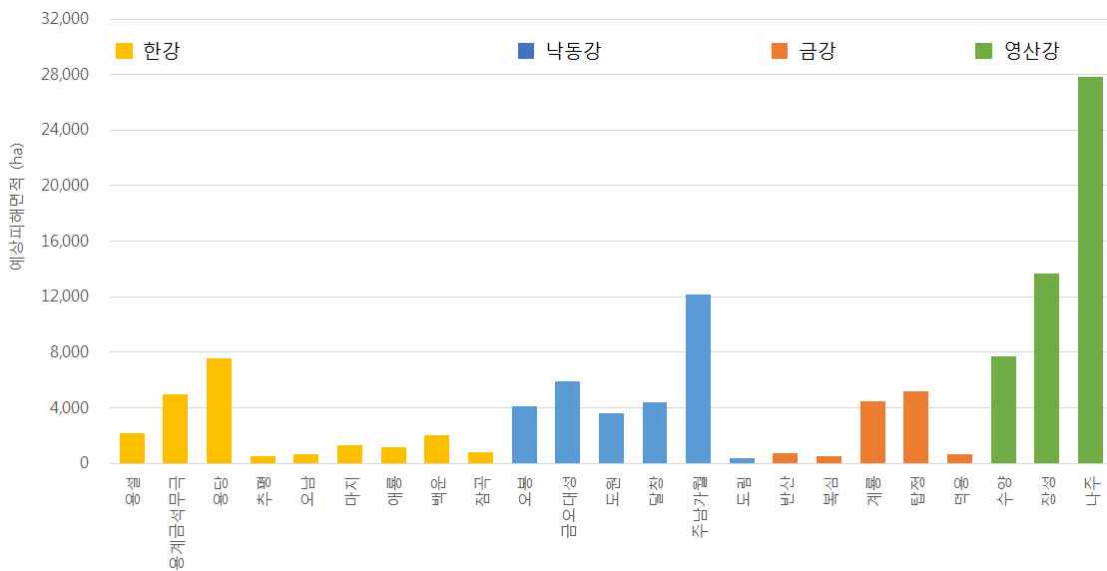
한국농어촌공사에서는 지진이나 PMF 발생시 저수지 하류부의 피해를 최소화 하기 위해 Emergency Action Plan(이하 EAP)을 작성한 바 있다. EAP보고서에는 해당 지역의 침수심 0.5m, 1.0m, 1.5m, 2.0m 일 때의 침수 면적을 도시하여 비상대처계획도를 제작해놓았다.

제체의 파괴확률이 가장 높아지는 때는 만수위이거나 수위가 급강하는 경우이다. 제체의 파괴확률이 가장 높은 때가 만수위인 경우는 피해규모가 최대인 때이므로 2.0m침수심일 때의 면적으로 계산하였으며, 수위 급강하

시일 때는 1.0m의 침수심을 갖는 것으로 가정하였다. 단, 수위급강하와 지진 발생이 동시에 일어나는 경우는 매우 희박하므로 지진시는 항상 만수위인 것으로 가정하였다.



[그림 5-26] 평상시 제체붕괴시 예상피해면적



[그림 5-27] 지진시 제체붕괴시 예상피해면적

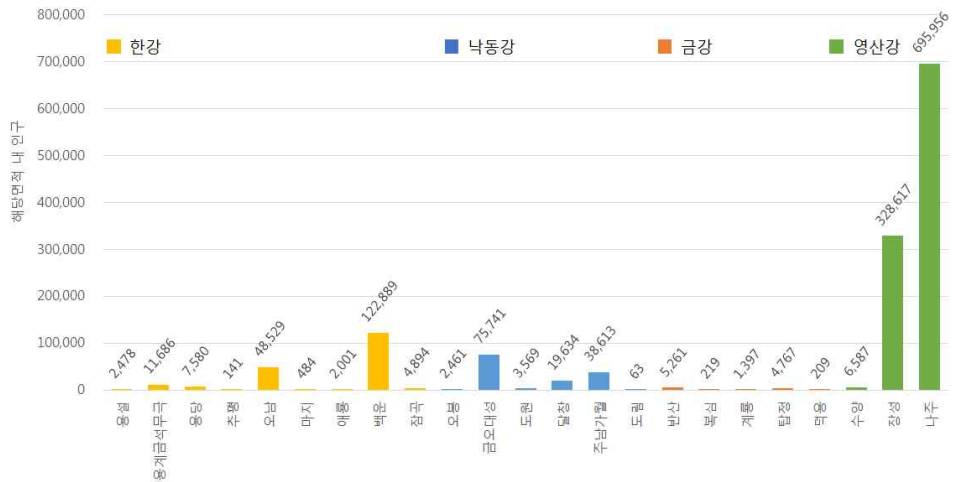
3. 최종 피해액 산정

침수면적에 따른 피해액 산정방법은 8장 2절 3. 항목별 피해액 산정과 동일하다. 위의 방법을 바탕으로 평상시와 지진 발생시의 두가지 조건에 대해 분석한 결과를 아래 [표 5-37]과 [표 5-38]에 나타내었다.

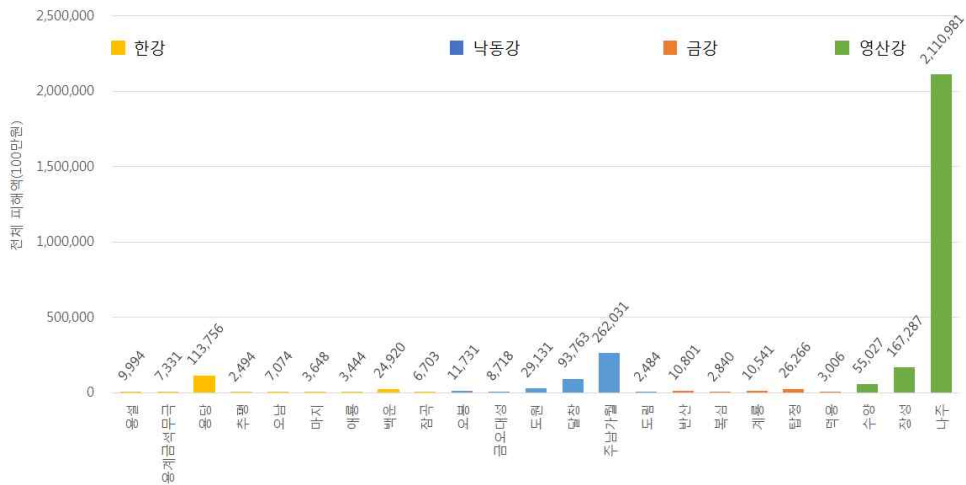
평상시 제체붕괴가 일어날 가능성이 제일 높은 저수지는 나주저수지, 백운저수지, 오남저수지 순이었다. 특히 나주 저수지는 예상 피해면적이 다른 저수지에 비해 월등히 넓어 피해가 발생할 경우 대규모의 피해가 우려됨에도 불구하고, 사면파괴 확률이 가장 높은 것으로 분석되 이에 대한 대비가 시급한 것으로 판단된다. 나주저수지 하류부에 거주하는 주민들은 늘 1인당 16만원 이상의 기대피해액을 떠안고 있어 대부분의 지역이 0원의 기대피해액을 갖고 있는 것과 극명하게 대비되고 있다. 이는 1인당 기대피해액 기준으로 두 번째와 세 번째를 기록하고 있는 달창저수지와 오남저수지와 비교하더라도 각각 339원, 246원이기 때문에 매우 큰 값을 알 수 있다.

[표 5-37] 평상시 제체붕괴시 예상 피해액

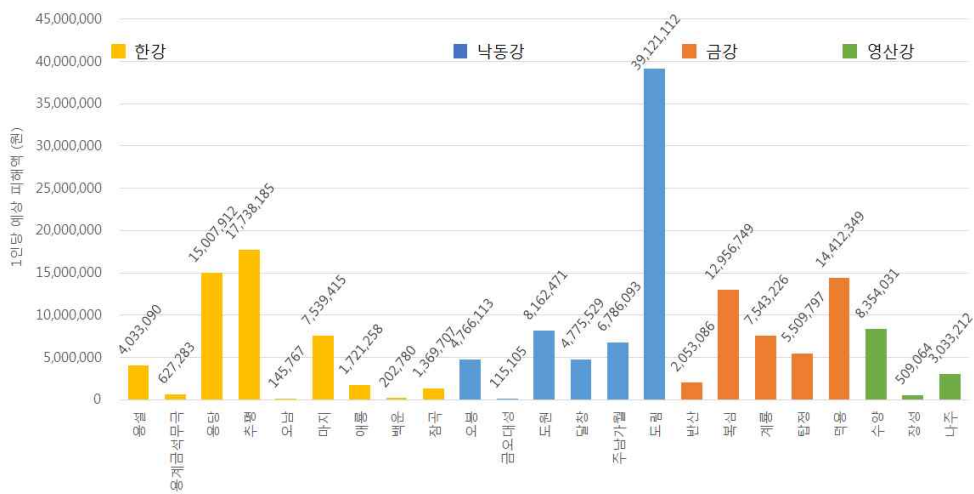
대권역	저수지명	평상시 사면파괴 확률	예상피해면적 (ha)	해당면적내 인구	제체파괴 가중치 고려시		제체파괴시	
					총피해액	1인당 피해액	총피해액	1인당 피해액
한강	용설	0.000.E+00	878.943	2478	₩0	₩0	₩9,994,297,614	₩4,033,090
	용계	0.000.E+00						
	금석	0.000.E+00	504.271	11686	₩0	₩0	₩7,330,705,177	₩627,283
	무극	0.000.E+00						
	용당	0.000.E+00	3,866.326	7580	₩0	₩0	₩113,756,076,263	₩15,007,912
	추평	0.000.E+00	22.503	141	₩0	₩0	₩2,494,345,572	₩17,738,185
	오남	1.890.E-01	650.175	48529	₩11,954,938	₩246	₩7,073,927,814	₩145,767
	마지	0.000.E+00	172.309	484	₩0	₩0	₩3,647,946,229	₩7,539,415
	애통	0.000.E+00	230.223	2001	₩0	₩0	₩3,444,497,347	₩1,721,258
낙동강	백운	3.200.E+00	1,459.599	122889	₩7,974,244	₩65	₩24,919,512,983	₩202,780
	잠곡	0.000.E+00	461.293	4894	₩0	₩0	₩6,703,418,835	₩1,369,707
	오봉	0.000.E+00	779.719	2461	₩0	₩0	₩11,730,943,256	₩4,766,113
	금오	0.000.E+00						
	대성	0.000.E+00	606.844	75741	₩0	₩0	₩8,718,113,795	₩115,105
	도원	0.000.E+00	1,386.983	3569	₩0	₩0	₩29,130,596,319	₩8,162,471
	달창	7.100.E-03	4,429.882	19634	₩6,657,155	₩339	₩93,762,740,847	₩4,775,529
	주남	1.500.E-04						
	가월	0.000.E+00	6,323.196	38613	₩393,046	₩10	₩262,030,802,974	₩6,786,093
금강	도림	0.000.E+00	14.878	63	₩0	₩0	₩2,483,937,865	₩39,121,112
	반산	0.000.E+00	423.664	5261	₩0	₩0	₩10,801,397,927	₩2,053,086
	복심	0.000.E+00	53.604	219	₩0	₩0	₩2,840,495,442	₩12,956,749
	계룡	0.000.E+00	663.480	1397	₩0	₩0	₩10,541,290,250	₩7,543,226
	탑정	0.000.E+00	1,457.473	4767	₩0	₩0	₩26,265,626,023	₩5,509,797
	덕동	0.000.E+00	71.385	209	₩0	₩0	₩3,006,202,186	₩14,412,349
영산강	수양	0.000.E+00	3,573.325	6587	₩0	₩0	₩55,027,205,288	₩8,354,031
	장성	0.000.E+00	7,383.572	328617	₩0	₩0	₩167,286,787,790	₩509,064
	나주	5.300.E+00	19,684.547	695956	₩111,881,976,874	₩160,760	₩2,110,980,695,726	₩3,033,212



[그림 5-28] 평상시 제체붕괴시 예상 피해인구



[그림 5-29] 평상시 제체붕괴시 예상 전체 피해액

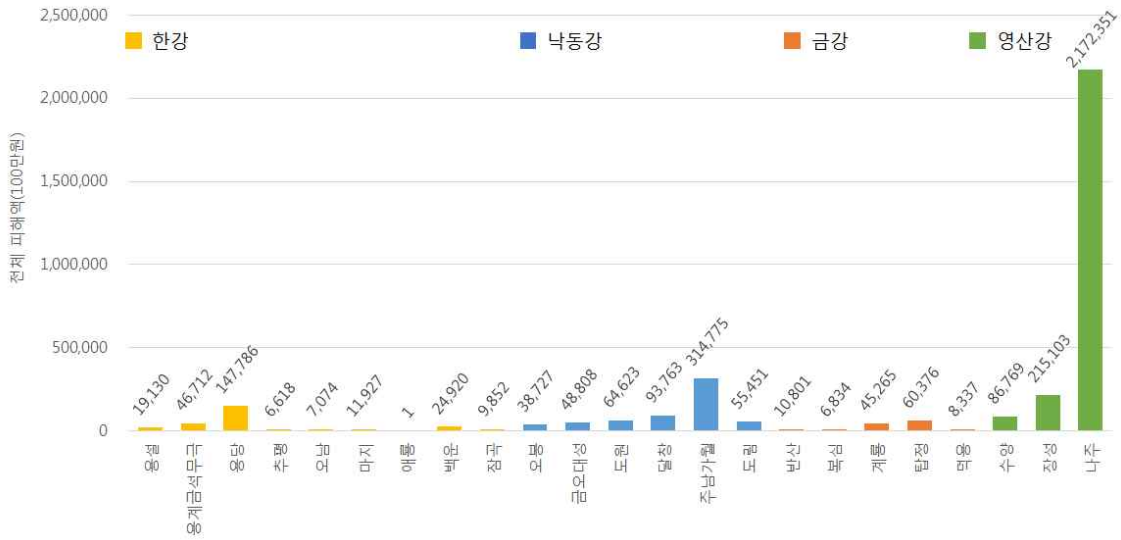


[그림 5-30] 제체붕괴시 1인당 예상 피해액

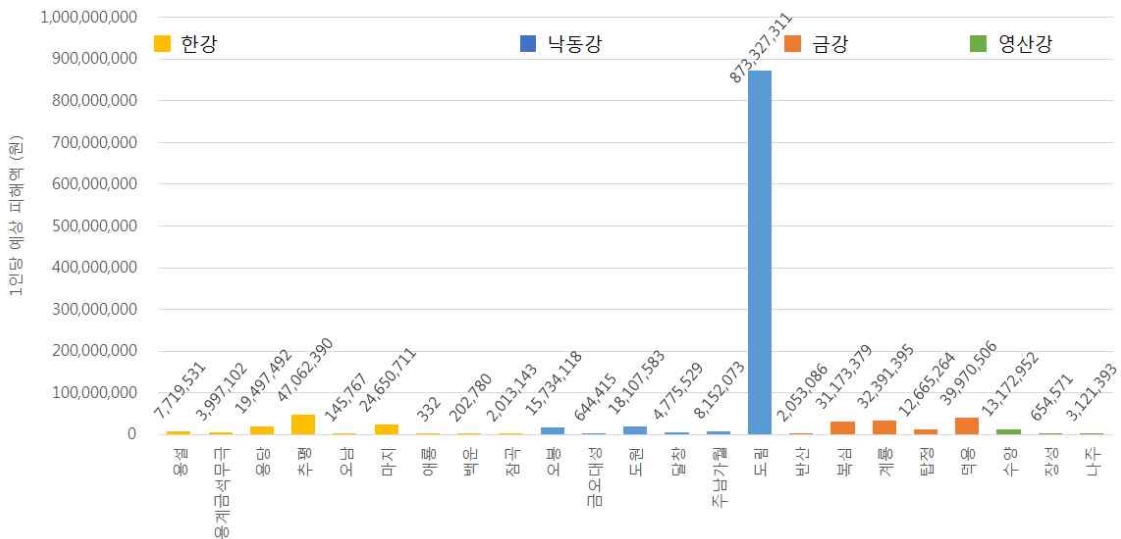
[표 5-38]는 지진시 제체 붕괴 가능성과 예상피해액을 나타내고 있는데 [표 5-37]의 평상시와 비교할 때 사면파괴확률이 더 높은 경향을 보이고 있다. 평상시 기준과 마찬가지로 나주저수지의 파괴확률이 월등히 높은 것으로 분석되었다. 다만, 나주저수지의 파괴확률이 평상시일 때보다 더 낮은 것으로 분석되었는데, 이는 지진시의 파괴확률은 만수위일 때 최대였던 것에 비해 평상시의 파괴확률은 수위급강하 조건에서 최대가 되었기 때문으로 동일한 조건이 아니다. 나주저수지 이외에 1인당 피해액이 큰 지역은 덕용저수지와 도원저수지가 그 뒤를 잇고 있다. 덕용저수지 하류부의 주민들은 기대피해액이 5만1천원을 넘고, 도원저수지 역시 3만원 이상의 기대피해액을 안고 살아가고 있으므로 이들에 대한 대비책도 준비되어야 할 것이다.

[표 5-38] 지진시 제체붕괴시 예상 피해액

대권역	저수지명	지진시 사면파괴 확률	예상피해면적 (ha)	해당면적내 인구	제체파괴 가중치 고려시		제체파괴시	
					총피해액	1인당 피해액	총피해액	1인당 피해액
한강	용설	1.300.E-02	2,194.098	2,478	₩2,486,845	₩1,004	₩19,129,574,128	₩7,719,531
	용계	3.800.E-03						
	금석	1.800.E-01	4,941.912	11,686	₩70,177,355	₩6,005	₩46,711,903,411	₩3,997,102
	무극	1.400.E-02						
	용당	1.000.E-03	7,540.103	7,580	₩1,477,859	₩195	₩147,785,926,445	₩19,497,492
	추평	1.100.E-03	486.810	141	₩72,797	₩518	₩6,617,918,522	₩47,062,390
	오남	2.000.E-01	650.175	48,529	₩14,147,856	₩292	₩7,073,927,814	₩145,767
	마지	2.800.E-04	1,322.633	484	₩28,625	₩59	₩11,927,247,063	₩24,650,711
	애통	6.000.E-03	1,169.780	2,001	₩1,087,581	₩543	₩663,512	₩332
	백운	1.700.E-02	2,015.811	122,889	₩4,236,317	₩34	₩24,919,512,982	₩202,780
낙동강	잠곡	1.500.E-03	830.865	4,894	₩147,786	₩30	₩9,852,431,705	₩2,013,143
	오봉	6.000.E-05	4,088.158	2,461	₩23,236	₩9	₩38,726,745,153	₩15,734,118
	금오	5.400.E-03						
	대성	2.100.E-08	5,939.122	75,741	₩2,635,654	₩35	₩48,808,414,257	₩644,415
낙동강	도원	1.800.E-01	3,645.410	3,569	₩116,321,688	₩32,594	₩64,623,160,258	₩18,107,583
	달창	3.900.E-02	4,429.882	19,634	₩36,567,469	₩1,862	₩93,762,740,847	₩4,775,529
	주남	6.000.E-04						
금강	가월	2.200.E-07	12,134.014	38,613	₩1,888,651	₩49	₩314,775,246,201	₩8,152,073
	도림	3.800.E-04	352.428	63	₩19,962	₩314	₩55,450,641,952	₩873,327,311
	반산	9.500.E-03	709.696	5,261	₩1,026,133	₩195	₩10,801,397,927	₩2,053,086
	복심	3.300.E-05	493.910	219	₩2,255	₩10	₩6,834,109,239	₩31,173,379
	계룡	7.300.E-04	4,489.509	1,397	₩330,437	₩236	₩45,265,391,154	₩32,391,395
	탑정	2.900.E-02	5,217.102	4,767	₩17,509,124	₩3,673	₩60,376,290,503	₩12,665,264
	덕용	1.800.E-01	659.147	209	₩10,838,431	₩51,962	₩8,337,254,754	₩39,970,506
영산강	수양	1.900.E-09	7,739.152	6,587	₩2	₩0	₩86,768,984,349	₩13,172,952
	장성	2.100.E-04	13,662.176	328,617	₩451,716	₩1	₩215,102,735,253	₩654,571
	나주	3.100.E+00	27,861.605	695,956	₩67,342,884,381	₩96,763	₩2,172,351,123,589	₩3,121,393



[그림 5-31] 지진시 제체 붕괴시 예상 총피해액



[그림 5-32] 지진시 제체붕괴시 1인당 예상 피해액

4. 구조물 파괴로 인한 피해 산정방법

구조물 파괴에 대해 많은 저수지에 대하여 해석을 하는 것이 이상적이겠으나, 2차년도 구조물 파괴확률은 설계도면과 유지보수관리 이력 등을 이용하여 산정하는 방식을 채택하였기 때문에 연령이 30년 이상 된 다수의 저수지는 자료를 아직 구득하지 못해 시범적으로 일부 저수지 시설물에 대해 분석하고 방법론을 개발하는 것을 목표로 하였다. 2차년도에 구축된 방법론을 보강하여 자료가 미비된 농업생산기반시설의 구조물파괴확률을 간

편법으로 산정하는 방법이 추후 연구될 예정이다.

통합안정성 프레임워크의 기본구성대로 구조물 파괴에 대한 예상 피해액도 재해 발생확률과 피해발생시 피해액의 곱으로 기대피해액을 산정하게 된다. 이에 대해 예시로서 용설, 무극, 잠곡, 마지, 복심, 광주 저수지의 파괴확률을 계산하였으며 그 결과는 아래 [표 5-39]와 같다.

[표 5-39] 저수지 구조물의 파괴확률

항목		여수토	산측옹벽	제측옹벽	교량	취수탑	최종
저수지	용설	2.23E-07	1.88E-04	1.01E-02			1.03E-02
	무극	1.43E-06	2.78E-10	4.66E-04			4.68E-04
	잠곡	2.48E-03	1.02E-11	4.13E-18	6.62E-17	2.94E-02	3.19E-02
	마지	6.83E-06	7.48E-04	3.07E-03			3.83E-03
	복심	3.39E-06	2.12E-03	7.22E-05		5.48E-02	5.70E-02
	광주	1.30E-06	1.54E-11	1.10E-02	4.09E-02		5.19E-02

저수지의 구조물 파괴는 저수지의 이용성 저하로 복구기간동안 지역주민들의 용수이용 등에 문제가 있을 수 있으나, 이는 3차년도에서 정성적 2차, 3차 피해 부분에서 계산할 예정이다. 따라서 금년도 연구에서는 구조물을 복구하기 위한 공사비를 산정하는 것이 목표가 된다. 저수지의 예상 피해 복구비 내역은 [표 5-40]과 같다.

[표 5-40] 저수지 피해복구비 내역

(단위: 천원)

저수지명	여수토	옹벽	교량	취수탑
용설	13,204,111	77,416,025		
무극	14,504,575	43,149,168		
잠곡	21,149,771	50,905,173	449,609	2,778,187
마지	9,099,003	15,817,356		
복심	29,373,209	16,976,452		1,028,225
광주	7,307,693	214,790,277	836,050	

이를 바탕으로 저수지의 예상피해액을 산정한 결과 잠곡저수지가 가장 높은 예상피해액을 보이는 것으로 분석되었다. 이 중 대부분이 여수토의 높은 파괴확률에 기인하고 있는 바 이에 대한 대비책이 필요할 것으로 보인다. 일반적인 경우에는 옹벽의 예상피해액이 높은 것으로 분석되었으므로 저수지의 구조적 안정성을 확보하기 위해서는 옹벽의 안정성 해석에 노력을 기울여야 할 것으로 사료된다.

[표 5-41] 저수지 예상 피해액

저수지명	여수토	옹벽	교량	취수탑	계
용설	2,945	14,554,213			14,557,157
무극	20,742	12			20,754
잠곡	52,451,432	1	0	0	52,451,433
마지	62,146	11,831,382			11,893,528
복심	99,575	35,990,078		-	36,089,653
광주	9,500	3	9,196,550		9,206,053

제 5 절 농업생산기반 시설의 통합안전성 분석기법

1. 통합안전성 분석과정

한 지역단위의 안정성 및 가치를 평가하기 위해서는 그 지역이 포함하고 있는 다양한 공공시설, 혹은 사유 재산 등의 물적 자원과 인명과 같은 인적자원 등 모든 자원을 고려하는 것이 가장 이상적일 것이다. 그러나 현실적으로 이들 모두를 고려할 수는 없으므로 현실을 가장 잘 반영할 수 있는 항목으로 분석대상을 한정하는 것이 현실적인 대안이 된다. 이에 1차년도 연구에서는 농업생산기반시설을 본 과제의 주요 대상으로 상정하고 분석을 하는데 집중하였다.

2차년도 연구에서도 이전의 연구의 연장선상에서 농업생산기반시설의 대표적 시설물인 저수지에 대해서 안정성 분석을 실시하였다. 농업생산기반시설 통합안전성 분석방법의 적용 예시로서 한강, 낙동강, 금강, 영산강의 4대강의 30여개 저수지에 대하여 수리/수문안전성, 제체안전성, 구조적 안전성을 분석함으로써 파괴가능성을 계산하고, 이에 따른 후속 피해를 산정하였다.

농업생산기반시설 근처에서 거주하거나 생활하고 있는 당사자들이 해당 농업생산기반시설의 붕괴 및 실패시 겪게 되는 직간접적인 피해를 합리적으로 산정하기 위해서는 재해 이전으로 시설물을 복구하는데에 필요한 비용만 산정하는 것으로는 불충분하다. 농업생산기반시설의 가장 대표적인 저수지의 경우, 붕괴시 그 하류부에서 생활을 영위하고 있는 사람들의 생사와 삶의 터전이 심하게 훼손되기 때문이다. 따라서 농업생산기반시설의 복구비용뿐만 아니라 재해에 의한 개인의 사유재산 및 사회간접자본시설의 피해까지 고려해야 합당할 것이다. 또한 복구과정에서 겪게 되는 삶의 질 저하 또한 포함되어야 한다. 2차년도 연구에서는 이러한 여러 가지 항목 중, 농업생산기반시설의 실패시 가장 직접적인 피해를 발생시키는 침수에 대한 항목을 중점적으로 조사하였으며, 저수지의 사용성에 영향을 미칠 수 있는 취수탑, 연결교량, 옹벽등의 항목들에 대해서도 피해액을 산정할 수 있는 방법을 연구하고자 하였다. 또한 3차년도에 수행할 간접적 피해에 의한 손실액을 계산하기 위해 가뭄에 의한 피해와 용수공급에 영향을 끼칠

수 있는 저수지의 취수탑 파괴 등의 상황에서 발생할 피해에 대해서도 연구를 진행할 것이다.

2차년도 연구에서는 수리/수문 안정성, 지반안정성, 구조적 안정성 등의 항목에 대해 연구하였다. 그러나 이들 재해 중 어떤 항목을 개선하는 것이 가장 시급한지를 분석하기 위해서는 상이한 재해에 대해 비교가 가능해야한다. 이를 위해서는 이들 안정성을 객관적으로 분석할 수 있는 통일된 단위가 필요하며 이를 통해 상호비교가 가능할 것이다. 이를 위해 본 연구에서는 각종 재해에 대한 피해액을 분석함으로써 단위를 통일하고자 하였다.

따라서 본 장에서는 2차년도 연구에서 안정성 분석에 중요하다고 판단한 수리/수문 재해, 제체붕괴에 영향을 미치는 토질적 재해, 사용성에 영향을 미치는 구조적 재해에 대해 예상되는 피해액을 산정하는 방법에 대해 기술할 것이다.

2. 홍수 피해 산정방법

통합안정성 연구에서는 수리/수문 안정성 평가 방법에 대해 기술하면서 홍수에 대한 안정성지수를 계산한 바 있다. 이는 홍수에 대해 해당 지역이 얼마나 안전한지를 나타내는 지표로서 그 숫자가 클수록 홍수에 대해 안정적인임을 의미하며 200년 빈도 강우 발생시, PMP발생시 홍수가 발생할 확률에 관한 자료를 얻었다. 다른 재해와의 비교를 위해서는 이들의 값을 이용하여 홍수에 대한 피해액을 산정하는 방법이 필요하다.

가. 홍수피해 가중치 산정

통합안정성 평가방법은 해당 재해 발생시 피해액을 산정하고, 이에 대한 가중치를 곱하여 해당 재해의 위험성을 금액화 하는 것을 목표로 하고 있다. 따라서 홍수안정성지수와 강우별 홍수발생확률을 이용하여 대상지역의 홍수재해 가중치를 산정할 수 있다. 소방방재청에서는 [표 5-42]와 같이 전국의 시군별 홍수피해 주기를 산정하고 있다.

[표 5-42] 시군별 평균 홍수피해주기 (소방방재청)

도시명		주기	도시명		주기	도시명		주기
서울	서울시	1.8	강원	화천군	3.6	전남	담양군	1.7
부산	부산시	1.2		횡성군	2.2		무안군	1.4
대구	대구시	1.4	경남	거제시	2.2		보성군	1.5
인천	인천시	1.2		김해시	1.3		신안군	1.5
광주	광주시	1.5		마산시	1.5		여천군	1.4
대전	대전시	1.8		밀양시	1.2		영광군	1.5
울산	울산시	1.5		사천시	1.3		영암군	1.4
	고양시	1.6		양산시	1.4		완도군	1.7
경기	과천시	2.2		진주시	1.4		장성군	2.4
	광명시	1.7		진해시	1.9		장흥군	1.4
	구리시	2.2		창원시	1.3	진도군	1.5	
	군포시	1.9		통영시	1.6	함평군	1.5	
	김포시	1.6	거창군	3.6	해남군	1.4		
	남양주시	1.9	고성군	1.4	화순군	2.2		
	동두천	2.1	남해군	2.1	전북	군산시	1.5	
	부천시	1.6	산청군	1.5		김제시	1.5	
	성남시	3.6	의령군	1.3		남원시	2.2	
	수원시	2.2	창녕군	1.2		익산시	1.4	
	시흥시	1.5	하동군	1.4		전주시	1.5	
	안산시	1.5	함안군	1.3		정읍시	1.4	
	안양시	3.6	하양군	4.1		고창군	1.5	
	오산시	1.5	합천군	1.2		무주군	2.1	
	용인시	1.6	경산시	2.4		부안군	1.5	
	의왕시	1.8	경주시	1.8		순창군	2.4	
	의정부시	2.9	구미시	1.3	완주군	1.4		
	이천시	1.5	김천시	1.9	임실군	1.8		
	파주시	1.3	문경시	1.8	장수군	4.1		
	평택시	1.5	상주시	1.7	진안군	1.9		
하남시	2.2	안동시	1.5	충남	공주시	1.7		
가평군	2.2	영주시	1.9		논산시	1.6		
광주군	2.6	영천시	2.9		보령시	1.5		
안성군	2.2	포항시	2.4		서산시	1.5		
양주군	1.9	고령군	1.7		아산시	1.7		
양평군	1.9	군위군	3.2		천안시	2.1		
여주군	1.4	봉화군	2.9		금산군	1.8		
연천군	2.1	성주군	2.2		당진군	1.5		
포천군	3.2	영덕군	2.9		부여군	1.6		
화성군	1.3	영양군	2.6		서천군	1.7		
강원	강릉시	1.9	예천군	1.7	충북	연기군	1.6	
	동해시	1.9	울진군	3.6		예산군	1.8	
	삼척시	1.8	의성군	1.8		청양군	1.5	
	속초시	3.6	청도군	2.9		태안군	1.5	
	원주시	1.9	청송군	3.2		홍성군	1.8	
	춘천시	2.1	칠곡군	1.5		제천시	1.7	
	태백시	3.6	광양시	1.7		청주시	2.9	
	고성군	2.9	나주시	1.3		충주시	1.6	
	양구군	3.2	목포시	1.8		괴산군	1.7	
	양양군	2.9	순천시	1.5		단양군	1.8	
	영월군	1.9	여수시	3.6	보은군	2.4		
	인제군	2.4	여천시	1.4	영동군	2.2		
	정선군	1.9	강진군	1.5	옥천군	1.8		
	철원군	3.6	고흥군	1.5	음성군	1.8		
	평창군	2.1	곡성군	1.8	진천군	1.7		
	홍천군	2.6	구례군	1.9	청원군	1.5		

[표 5-42]의 값의 평균과 표준편차를 구하면 평균 1.95, 표준편차 0.66의 값을 얻을 수 있다. 홍수안정성지수를 평균 0, 표준편차 1로 정규화한 값이므로, 이를 [표 5-42]의 값을 통해 얻은 평균과 표준편차의 분포로 변환하면 [표 5-43]의 홍수가중치를 얻을 수 있다.

[표 5-43] 홍수안정성지수를 이용한 홍수가중치 산정1

대권역	저수지명	홍수안정성지수	홍수가중치	대권역	저수지명	홍수안정성지수	홍수가중치
한강	용설	-0.87	1.373.E+00	낙동강	달창	-0.46	1.644.E+00
	용계	-0.81	1.413.E+00		주남	1.44	2.899.E+00
	금석	-0.75	1.453.E+00		가월	1.13	2.694.E+00
	무곡	-0.54	1.591.E+00	금강	도림	0.39	2.205.E+00
	용당	0.48	2.265.E+00		반산	1.05	2.641.E+00
	추평	0.48	2.265.E+00		복심	1.52	2.951.E+00
	오남	-0.35	1.717.E+00		계룡	1.17	2.720.E+00
	마지	-0.76	1.446.E+00		탑정	1.97	3.249.E+00
	애룡	-0.43	1.664.E+00		덕용	1.12	2.687.E+00
	백운	-0.21	1.809.E+00		동부	0.86	2.516.E+00
	잠곡	-2.19	5.017.E-01		영산강	담양	-0.27
낙동강	오봉	-0.08	1.895.E+00	수양		-1.36	1.050.E+00
	금오	-1.47	9.771.E-01	광주		0.29	2.139.E+00
	대성	-0.07	1.902.E+00	장성		-1.12	1.208.E+00
	도원	0.51	2.284.E+00	나주	-0.68	1.499.E+00	

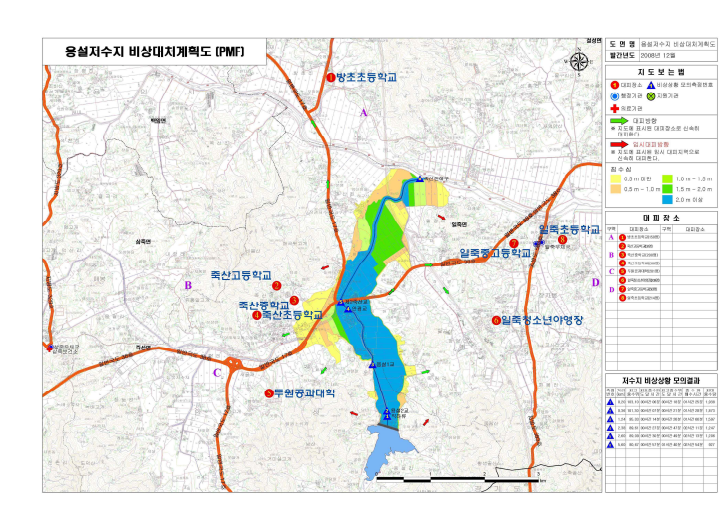
이때 홍수안정성지수는 클수록 홍수에 더 안전한 지역이라는 뜻이므로 이를 역수로 사용하여 큰 가중치의 값이 추후 예상피해액에 곱해졌을 때 더 큰 안정성지수를 가진 지역의 피해액이 더 많이 산정될 수 있도록 한다. 이 값에 200년 빈도 강우시 홍수발생확률 혹은 PMF시 홍수발생확률을 곱함으로써 최종적인 홍수재해 가중치를 계산할 수 있으며 그 결과는 다음과 같다.

[표 5-44] 홍수안정성지수를 이용한 홍수가중치 산정2

대권역	저수지명	200년빈도 강우시 가중치	PMF시 가중치	대권역	저수지명	200년빈도 강우시 가중치	PMF시 가중치
한강	용설	8.67.E-03	1.81.E-02	낙동강	달창	0.00.E+00	0.00.E+00
	용계	2.92.E-02	8.49.E-02		주남	0.00.E+00	0.00.E+00
	금석	3.10.E-03	4.17.E-02		가월	4.42.E-03	1.65.E-01
	무극	5.47.E-03	7.43.E-02	금강	도림	8.21.E-03	1.81.E-02
	용당	1.00.E-02	2.38.E-02		반산	3.79.E-01	3.79.E-01
	추평	9.54.E-03	2.47.E-02		복심	2.63.E-01	2.85.E-01
	오남	1.68.E-02	7.90.E-02		계룡	7.54.E-03	1.92.E-02
	마지	4.17.E-02	1.74.E-01		담정	0.00.E+00	1.42.E-02
	애룡	2.87.E-02	1.08.E-01		덕용	2.53.E-03	5.73.E-03
	백운	5.64.E-03	9.56.E-03		동부	5.96.E-04	6.96.E-02
잠곡	3.41.E-02	9.91.E-02	영산강	담양	1.58.E-03	3.24.E-02	
오봉	5.38.E-03	1.63.E-02		수양	8.19.E-03	1.75.E-02	
금오	5.73.E-03	1.89.E-02		광주	3.64.E-01	3.60.E-01	
대성	7.36.E-03	2.16.E-02		장성	6.04.E-01	6.88.E-01	
도원	4.73.E-03	1.54.E-02		나주	4.67.E-01	5.32.E-01	

나. 예상피해면적 산정

한국농어촌공사에서는 지진이나 PMF 발생시 저수지 하류부의 피해를 최소화 하기 위해 Emergency Action Plan(이하 EAP)을 작성한 바 있다. EAP보고서에는 홍수발생시 침수구역이 도시되어 있어 홍수 발생시 0.5m의 침수심을 갖는 것으로 가정하고 EAP보고서의 내용을 이용하여 홍수발생시 예상침수면적을 산정하였다.



[그림 5-33] EAP보고서의 비상대처계획도

다. 항목별 피해액 산정

피해액 산정은 아래 식과 같이 인명피해, 이재민피해, 농작물 피해, 건물 피해, 농경지피해, 공공시설 피해 등을 고려하여 산정하였다.

$$\text{피해액} = \text{인명 피해액(사망, 부상)} + \text{이재민 피해액} + \text{농작물 피해액} + \text{기타 피해액(건물 피해액 + 농경지 피해액+공공시설 피해액 + 기타)}$$

(1) 인명피해

인명피해액은 사망자피해액과 부상자 피해액으로 구성된다.

인명피해를 금액화 하는 것은 정성적 평가에 해당하기 때문에 논란의 여지가 있을 수 있으나, 본 연구에서는 불가피하게 기존 보상금 체계를 이용하여 산정할 수밖에 없었다. 인명피해액을 산정하는 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{사망자 피해액} &= \text{침수면적당 손실 인명수(명/ha)} \times \text{손실 원단위(원/명)} \\ &\quad \times \text{침수면적(ha)} \times \text{홍수가중치} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{부상자 피해액} &= \text{침수면적당 손실 인명수(명/ha)} \times \text{손실 원단위(원/명)} \\ &\quad \times \text{침수면적(ha)} \times \text{홍수가중치} \end{aligned}$$

단위침수면적당 손실인명은 행정자치부에서 발행하는 재해연보자료를 이용하여 산정한 결과를 이용하였다. 이 자료는 도시 유형을 대도시, 중소도시, 전원도시, 농촌지역, 산간지역으로 분류하고, 해당 지역 유형별로 단위 침수면적당 손실인명을 산정해놓았다. 이 중 대도시는 인구 100만명 이상의 광역시급 도시를 의미하며, 인구 100만명 미만의 일반 시급 도시는 중소도시, 인구증가 등으로 인해 군 전체가 시로 승격된 도시는 전원도시, 군급 도시중 인구밀도 500명 이상, 임야면적 70%미만인 도시는 농촌지역, 그 밖은 산간지역으로 구분하였다. 지역 유형별 단위침수면적당 손실인명은 다음 [표 5-45]와 같다. 인명 1인 당 기준가격은 사망은 2억5천만원/명, 부상 2천만원/명을 적용하였다.

[표 5-45] 단위침수면적당 손실 인명수

(단위 : 명/ha)

구분	대도시	중소도시	전원도시	농촌지역	산간지역
사망	0.0215	0.0013	0.0005	0.0013	0.0075
부상	0.0365	0.0012	0.0005	0.0011	0.0024

※ 자료 : 재해연보, 소방방재청

(2) 이재민 발생 피해

거주민이 사망이나 부상을 당하지 않더라도 직접피해가 발생하는 기간동안 근로를 할 수 없어 발생하는 피해는 이재민 발생피해에서 고려하고자 하였다.

$$\text{이재민 피해액} = \text{침수면적당 발생 이재민(명/ha)} \times \text{대피일수(일)} \\ \times \text{일평균 국민소득(원/명·일)} \times \text{침수면적(ha)} \times \text{홍수가중치}$$

이때 대피일수는 열흘로 가정하였으며, 2009년 국민소득을 365일로 나누어 하루 5만3천원으로 가정하였다. 또한 침수면적당 발생 이재민 수는 과거 30년간의 자료를 평균하여 지역특성 별로 다음과 같이 적용하였다.

[표 5-46] 침수면적당 발생 이재민 수

(단위 : 명/ha)

구분	대도시	중소도시	전원도시	농촌지역	산간지역
이재민수	3.88	0.30	0.16	0.27	0.61

자료:재해연보,1994~2008,소방방재청

(3) 농작물피해액

농작물 피해액은 침수지역 내 경지면적과 단위 면적당 수확량, 농작물 피해율, 농작물 단가를 곱하여 계산한다. 그 식은 다음과 같다.

$$\text{농작물 피해액} = \text{침수지역 내 경지면적} \times \text{단위면적당 수확량} \\ \times \text{농작물 피해율} \times \text{농작물 단가}$$

본 연구에서는 농업생산기반시설과 그 시설물에 영향을 받는 하류부의 침수면적이 필요하나 재해연보 등의 이력자료에는 행정단위로 자료가 조사되어 있어 곧바로 적용하는 것이 불가능하다. 또한 EAP보고서에서 작성한 비상대처계획도에서 표시되어 있는 침수위치는 농경지와 비농경지의 구분 없이 도시되어 있어 곧바로 침수면적을 살피기가 어렵다. 따라서 침수심 0.5m를 가정하고 EAP보고서의 비상대처계획도의 침수면적을 구한 뒤, 해당지역의 재해연보자료를 이용하여 과거 침수 발생시 농경지 침수면적 대비 전체 침수면적이 얼마였는지를 계산한 다음 곱함으로서 농작물 침수면적을 산정하였다.

$$\begin{aligned} \text{침수지역 내 경지면적} &= 0.5\text{m 침수심인 경우 침수면적} \\ &\times (\text{해당지역 재해연보 농경지 침수면적} / \text{해당지역} \\ &\quad \text{재해연보 전체 침수면적}) \end{aligned}$$

단위면적당 수확량은 논인 경우 10a당 500Kg이 산정되는 것으로 가정하였으며, 밭은 100Kg의 수확량을 얻는 것으로 가정하였다.

농작물 피해율은 침수기간이 얼마인가에 따라 달라지는데, 본 연구에서는 3~4일 정도 침수가 지속된다고 가정하고 중앙재해대책본부 재해대책 편람에서 제시하는 농작물 피해율을 적용하였다. 따라서 침수가 발생할 경우 논은 47%, 밭은 67%의 피해를 입는 것으로 산정하였다.

[표 5-47] 침수기간 별 농작물 피해율

	8hr~24hr	1일~2일	3일~4일	5일~7일	7일이상
논(%)	14%	27%	47%	77%	95%
밭(%)	35%	51%	67%	81%	95%

※ 중앙재해대책본부 재해대책편람

농작물 단가는 2009년 Kg당 쌀 산지평균가격을 이용하여 1964원으로 가정하였으며, 밭작물의 경우는 그의 열배인 것으로 가정하였다.

(4) 건물, 농경지, 공공시설, 기타 피해

기타 피해액은 건물피해액, 농경지 피해액, 공공시설물 피해액 등을 고려한 항목이다. 피해액 산정식은 다음과 같다.

$$\text{피해액} = (\text{상수항} + \text{침수면적항}) \times \text{기준가격} \times \text{홍수가중치}$$

자연재해위험지구 관리지침에서는 과거 재해연보 및 건교부 통계연보를 이용하여 침수면적과 건물피해액, 농경지 피해액, 공공시설물 피해액, 기타 피해액 사이의 상관성을 관계식으로 도출하였다.

[표 5-48] 도시유형별 침수면적-피해액 관계식

(단위 : 백만원, ha)

대 상 지 역	변 수	상수항	침수면적항	적합도
대 도시 지역	건 물	0.23294	0.245 s^2	0.63
	농 경 지	0.09896	0.288 s^2	0.91
	공공시설	0.53365	0.149 s^2	0.55
	기 타	0.3835	1.741 \sqrt{s}	0.44
중소도시지역	건 물	0.55283	0.182 s^2	0.52
	농 경 지	0.63246	0.150 s^2	0.50
	공공시설	0.85311	0.060 s^2	0.45
	기 타	0.12471	0.356 s^2	0.54
전원도시지역	건 물	0.13849	0.302 s^2	0.78
	농 경 지	0.00528	0.353 s^2	0.80
	공공시설	0.38754	0.215 s^2	0.51
	기 타	0.11562	0.310 s^2	0.64
농 촌 지 역	건 물	0.01164	0.286 s^2	0.95
	농 경 지	0.11744	0.226 s^2	0.84
	공공시설	0.38670	0.157 s^2	0.63
	기 타	0.49185	0.130 s^2	0.62
산 간 지 역	건 물	0.41041	0.271 s^2	0.72
	농 경 지	0.64000	0.165 s^2	0.65
	공공시설	0.67713	0.148 s^2	0.50
	기 타	0.27659	0.332 s^2	0.72

※ 1 : s = 침수면적(ha)/도시유형별 평균침수면적(ha)

[표 5-49] 지역유형별 기준가격

(단위:백만원)

구 분	대도시	중소도시	전원도시	농촌지역	산간지역
건 물	206.8	59.5	153.2	206.7	234.6
농 경 지	245.9	220.6	413.2	933	741.1
공공시설물	3,668.7	2,370.1	3,541.4	5,370.3	7,381.7
기 타	1,476.0	782.3	1,004.3	325.1	611.9

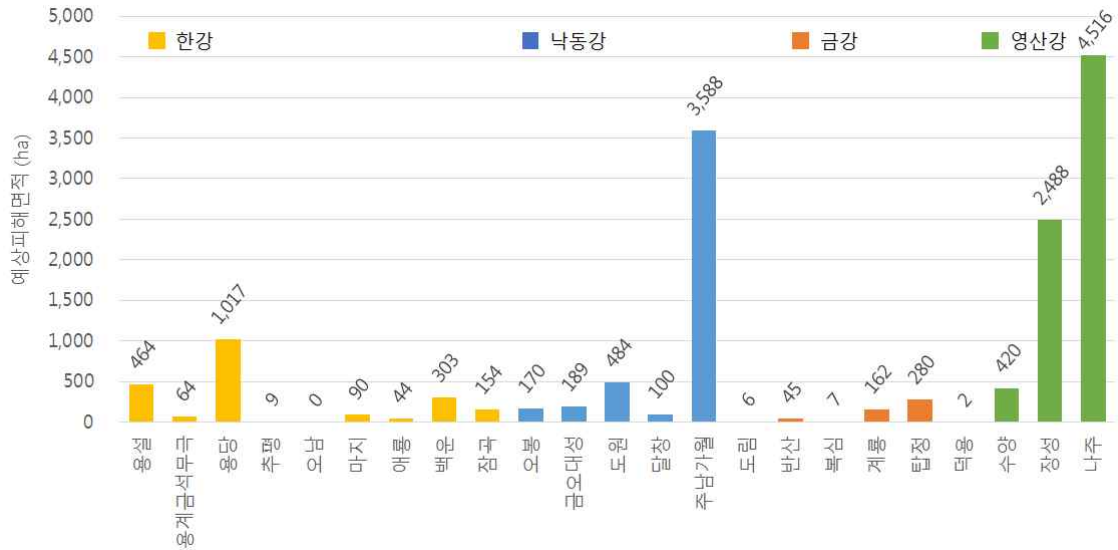
라. 최종 피해액 산정

위의 방법을 바탕으로 한강, 낙동강, 금강, 영산강의 최종 피해액을 산정하였으며 그 결과는 [표 5-50] 저수지별 예상 홍수피해액과 같다. 홍수가 발생하였을 때 침수면적 전체에서 발생하는 피해액은 나주저수지, 장성저수지, 주남가월저수지 순으로 나타났는데, 이들 저수지는 홍수 발생시 예상 침수면적이 가장 넓은 지역이기 때문에 당연한 결과라고 판단된다.

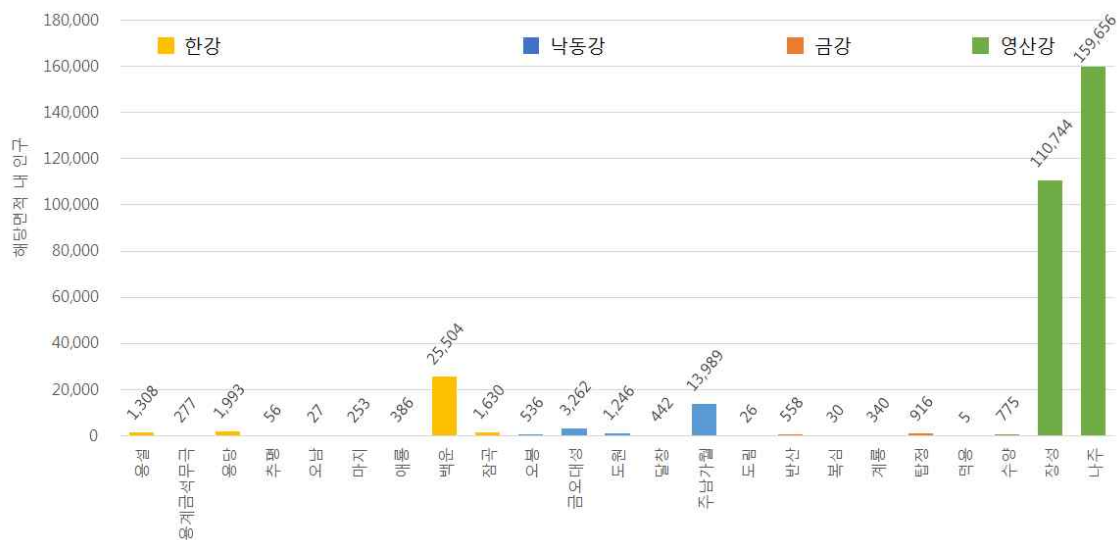
200년 빈도 강우시나 PMF 발생시 홍수 발생가능성과 홍수안정성 지수를 고려하여 홍수가중치를 이용해 구했을 때에는 장성저수지, 나주저수지, 반산저수지의 순으로 예상피해액이 클 것으로 판단되었다. 특히 장성저수지와 나주저수지는 낮은 홍수안정성지수를 갖고 있으며, 200년빈도 혹은 PMF발생시 홍수발생확률도 높은 것으로 되어 있어 위험성이 매우 높은 것으로 분석되어 홍수에 대한 대비가 필요한 것으로 판단된다. 이에 비해 홍수발생시 큰 피해를 입을 것으로 분석되었던 주남가월저수지는 홍수안정성지수가 다른 저수지에 비해 좋은 편이고, 홍수발생가능성도 낮은 편이기 때문에 실질적인 위험성은 상대적으로 적은 것으로 판단되었다.

[표 5-50]에서 1인당 피해액은 홍수가 발생하였을 때, 그 지역에서 살고 있는 주민이 감당해야할 예상 피해액을 의미한다. 인구에 비해 홍수피해액이 클 경우 큰 값이 산정되게 되는데, 0.5m침수심 가정시 침수구역 1.6ha 내에 5명이 거주할 것으로 판단되는 덕용저수지의 경우, 홍수 발생시 전체 피해액은 2,363,090,197원으로 적은 편에 속하나, 1인이 감당해야하는 피해액은 다른 지역에 비해 월등히 높은 것으로 분석되어 이들 주민에 대한 배려가 필요할 것으로 판단된다. 실질적인 홍수피해 가능성인 홍수가중치를

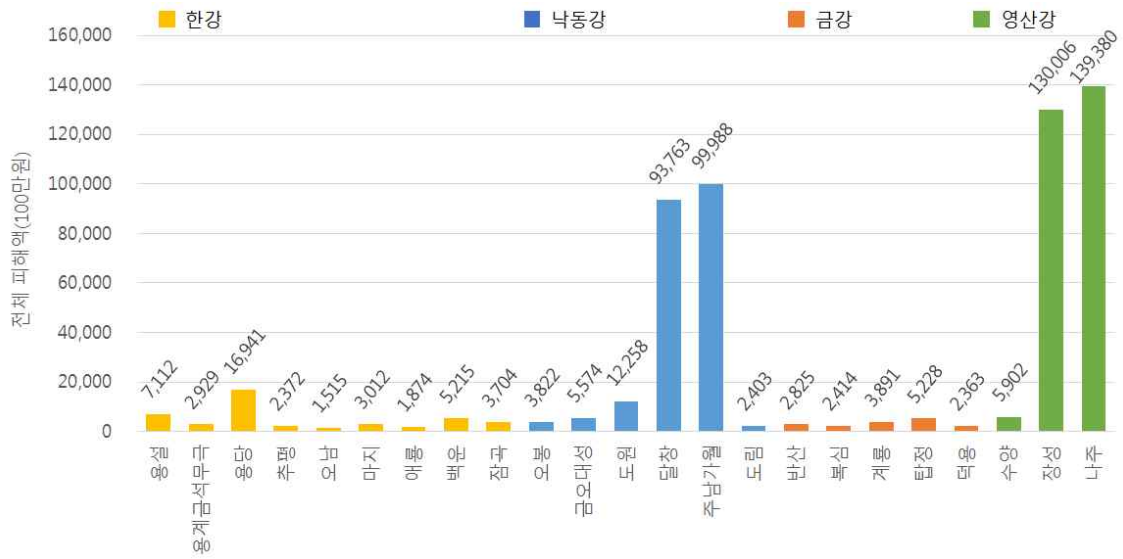
고려하여 계산한 결과에서는 복심저수지가 1인당 예상피해액이 가장 높은 것으로 판단된다. 이는 복심저수지의 홍수안정지수가 높음에도 불구하고 높은 홍수발생가능성을 가지고 있으며, 예상 침수구역 내의 인구가 적기 때문에 나타나는 현상이다.



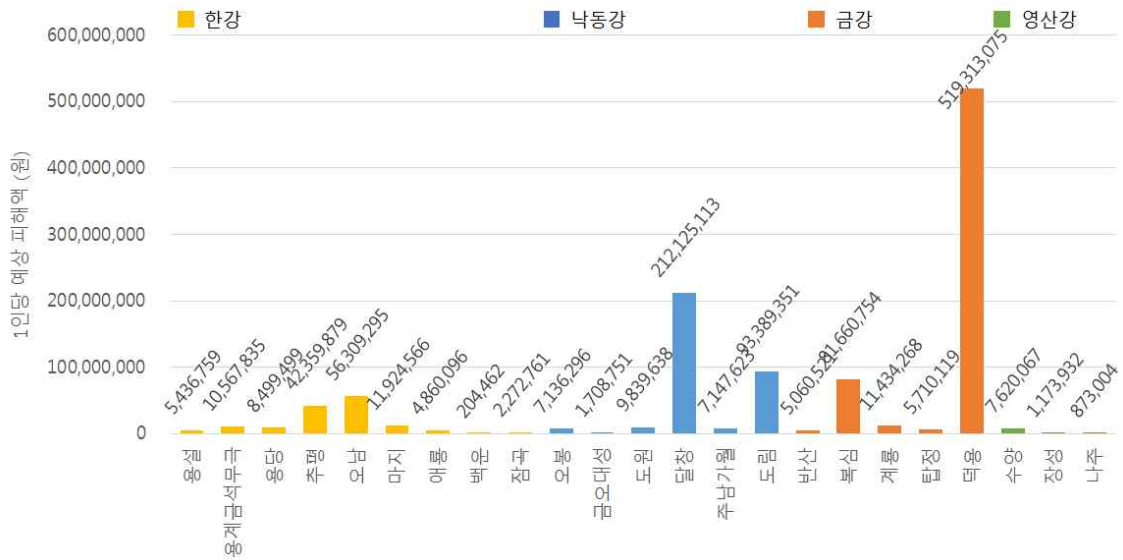
[그림 5-34] 0.5m침수시 예상피해 면적



[그림 5-35] 0.5m 침수시 예상 피해인구



[그림 5-36] 홍수 발생시 예상 전체 피해액



[그림 5-37] 홍수 발생시 1인당 예상 피해액

[표 5-50] 저수지별 예상 홍수피해액

대권역	저수지명	홍수안정성지수	200년빈도 강우시 홍수발생확률	PMP 시 홍수발생확률	0.5m 침수시 예상침수면적 (ha)	0.5m침수구역내 인구	200년빈도		PMP		홍수발생시	
							전체 피해액	1인당 피해액	전체 피해액	1인당 피해액	전체 피해액	1인당 피해액
한강	용설	-0.87	1.19.E-02	2.49.E-02	464.0	1308	₩ 61,627,644	₩ 47,111	₩ 128,951,962	₩ 98,577	₩ 7,112,037,316	₩ 5,436,759
	용계	-0.81	4.13.E-02	1.20.E-01	64.5	277	₩ 85,623,119	₩ 308,900	₩ 207,319,901	₩ 747,943	₩ 2,929,264,340	₩ 10,567,835
	금석	-0.75	4.50.E-03	6.08.E-02								
	무극	-0.54	8.70.E-03	1.18.E-01								
	용당	0.48	2.27.E-02	5.39.E-02	1016.7	1993	₩ 169,804,540	₩ 85,194	₩ 403,192,279	₩ 202,289	₩ 16,940,733,246	₩ 8,499,499
	주평	0.48	2.18.E-02	5.60.E-02	9.0	56	₩ 22,626,077	₩ 404,017	₩ 58,660,199	₩ 1,047,452	₩ 2,372,270,838	₩ 42,359,879
	오남	-0.35	2.89.E-02	1.38.E-01	0.4	27	₩ 25,505,935	₩ 947,973	₩ 119,674,904	₩ 4,447,931	₩ 1,515,043,689	₩ 56,309,295
	마지	-0.76	6.03.E-02	2.51.E-01	90.0	253	₩ 125,630,545	₩ 497,293	₩ 523,773,119	₩ 2,073,293	₩ 3,012,487,135	₩ 11,924,566
	애룡	-0.43	4.78.E-02	1.81.E-01	44.4	386	₩ 53,845,060	₩ 139,625	₩ 203,327,059	₩ 527,246	₩ 1,874,247,427	₩ 4,860,096
	백운	-0.21	1.02.E-02	1.73.E-02	302.9	25504	₩ 29,400,690	₩ 1,153	₩ 49,865,876	₩ 1,955	₩ 5,214,558,218	₩ 204,462
잠곡	-2.19	1.71.E-02	4.97.E-02	153.6	1630	₩ 126,256,061	₩ 77,462	₩ 366,954,751	₩ 225,138	₩ 3,704,397,137	₩ 2,272,761	
낙동강	오룡	-0.08	1.02.E-02	3.08.E-02	169.7	536	₩ 20,574,992	₩ 38,413	₩ 62,128,407	₩ 115,993	₩ 3,822,369,528	₩ 7,136,296
	금오	-1.47	5.60.E-03	1.85.E-02	188.6	3262	₩ 385,466,803	₩ 118,177	₩ 115,640,041	₩ 35,453	₩ 5,573,580,140	₩ 1,708,751
	대성	-0.07	1.40.E-02	4.10.E-02								
	도원	0.51	1.08.E-02	3.51.E-02	484.2	1246	₩ 57,949,297	₩ 46,517	₩ 188,335,217	₩ 151,180	₩ 12,257,886,123	₩ 9,839,638
	달창	-0.46	0.00.E+00	0.00.E+00	99.7	442	₩ -	₩ -	₩ -	₩ -	₩ 4,990,309,355	₩ 11,289,878
	주남	1.44	0.00.E+00	0.00.E+00	3587.5	13989	₩ 215,028,583	₩ 15,371.23	₩ 788,438,137	₩ 56,361	₩ 99,988,290,990	₩ 7,147,623
	가월	1.13	1.19.E-02	4.46.E-01								
금강	도림	0.39	1.81.E-02	3.99.E-02	6.0	26	₩ 19,723,446	₩ 766,507	₩ 43,478,756	₩ 1,689,703	₩ 2,403,056,699	₩ 93,389,351
	반산	1.05	1.00.E+00	1.00.E+00	45.0	558	₩ 2,690,382,568	₩ 4,819,543	₩ 2,690,382,568	₩ 4,819,543	₩ 2,824,901,697	₩ 5,060,521
	복심	1.52	7.77.E-01	8.42.E-01	7.2	30	₩ 635,600,377	₩ 21,501,249	₩ 688,601,155	₩ 23,294,173	₩ 2,413,980,949	₩ 81,660,754
	계룡	1.17	2.05.E-02	5.21.E-02	161.6	340	₩ 29,320,408	₩ 86,168	₩ 74,516,744	₩ 218,993	₩ 3,890,732,332	₩ 11,434,268
	탑정	1.97	0.00.E+00	4.60.E-02	279.9	916	₩ -	₩ -	₩ 74,028,754	₩ 80,857	₩ 5,227,910,591	₩ 5,710,119
	덕용	1.12	6.80.E-03	1.54.E-02	1.6	5	₩ 5,979,657	₩ 1,314,090	₩ 13,542,165	₩ 2,976,028	₩ 2,363,090,197	₩ 519,313,075
영산강	수양	-1.36	8.60.E-03	1.84.E-02	420.2	775	₩ 48,352,389	₩ 62,426	₩ 103,451,623	₩ 133,563	₩ 5,902,139,999	₩ 7,620,067
	장성	-1.12	7.30.E-01	8.31.E-01	2488.3	110744	₩ 78,505,159,327	₩ 708,889	₩ 89,426,587,057	₩ 807,508	₩ 130,005,878,089	₩ 1,173,932
	나주	-0.68	7.00.E-01	7.97.E-01	4515.7	159656	₩ 65,051,739,311	₩ 407,450	₩ 74,128,293,645	₩ 464,301	₩ 139,379,977,543	₩ 873,004

3. 통합안정성 분석

농업생산기반시설은 다양한 토질, 구조, 수리/수문적 분석을 통해 설계·시공 되어 있어 안정성 분석시에도 이들 조건에 대한 분석이 필수적이다. 그러나 다양한 조건을 분석함에 있어 어떤 조건을 우선시 되어야 하는지에 대한 명확한 판단을 내리기 어려워 유지보수 사업시 우선순위 및 방법 결정에 어려움을 겪게 된다. 이를 위해 각 재해에 대한 위험도를 “기대피해액”이라는 단위로 통일하여 안정성을 파악하고자 하였다. 금년도 연구에서는 홍수피해시, 지진시 체체붕괴, 평상시 체체붕괴 등의 각기 다른 세가지 재해에 대해 1차적으로 입는 피해에 대해 분석하는데에 목표를 두었다. 3차년도에는 시설물의 파괴 없이 정성적인 피해가 발생하는 가뭄, 질병 등의 재해에 대해서도 분석하는 것으로 그 범위를 넓혀갈 것이다.

[표 5-51]은 통합안정성을 산정한 결과이다. 가장 큰 예상피해액을 보이는 곳은 나주저수지로서 홍수에 의한 피해, 지진에 의한 피해, 평상시 체체붕괴로 인한 피해 모든 조건에서 압도적인 상위권을 차지하고 있어 그 위험도가 244억을 초과하고 있다. 나주저수지는 하류부에 많은 인구가 거주하고 있어 1인당 피해액은 비교적 낮은 것으로 분석되었으나, 이 역시 1인당 66만원 이상의 예상피해액을 떠안고 있어 결코 낮은 수준이 아니며, 많은 인구가 고통을 경험하게 될 가능성이 있다는 점에서 시급한 관리가 필요할 것이다.

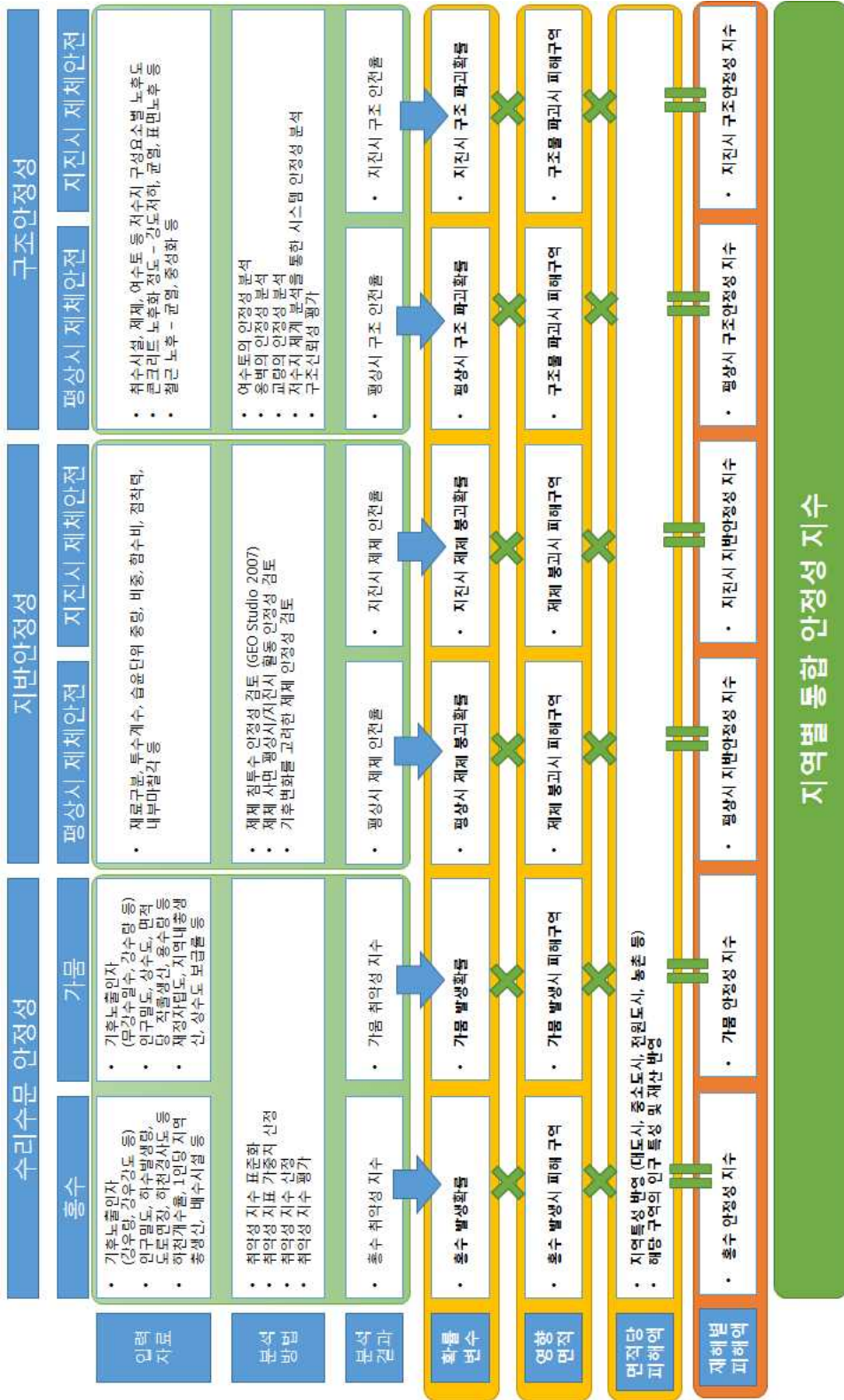
다음으로 위험성을 내포하고 있는 저수지는 장성저수지로서 전체 통합안정성 피해액 중 대부분이 홍수발생에 의한 것으로 이에 대한 대비가 시급한 상태인 것으로 분석되었다.

복심저수지의 경우에는 전반적으로 안전하게 관리되고 있고 전체피해액의 규모도 낮은 편이나, 피해가능성이 있는 면적이 좁아 피해가 집중될 수 있는 지역이다. 이 지역에서 거주하고 있는 인구에 대한 대책마련이 필요할 것이다.

[표 5-51] 통합안정성 산정결과

저수지명	200년 빈도강우시		지진발생시		평상시 제체붕괴		통합안정성	
	전체 피해액	1인당 피해액	전체 피해액	1인당 피해액	전체 피해액	1인당 피해액	전체 피해액	1인당 피해액
용설	61,627,644	47,111	₩2,486,845	₩1,004	₩0	₩0	₩ 64,114,489	₩ 48,114
용계금석무극	85,623,119	308,900	₩70,177,355	₩6,005	₩0	₩0	₩ 155,800,474	₩ 314,905
용당	169,804,540	85,194	₩1,477,859	₩195	₩0	₩0	₩ 171,282,399	₩ 85,389
추평	22,626,077	404,017	₩72,797	₩518	₩0	₩0	₩ 22,698,874	₩ 404,535
오남	25,505,935	947,973	₩14,147,856	₩292	₩11,954,938	₩246	₩ 51,608,729	₩ 948,511
마지	125,630,545	497,293	₩28,625	₩59	₩0	₩0	₩ 125,659,170	₩ 497,352
애룡	53,845,060	139,625	₩1,087,581	₩543	₩0	₩0	₩ 54,932,641	₩ 140,169
백운	29,400,690	1,153	₩4,236,317	₩34	₩7,974,244	₩65	₩ 41,611,251	₩ 1,252
잠곡	126,256,061	77,462	₩147,786	₩30	₩0	₩0	₩ 126,403,847	₩ 77,492
오봉	20,574,992	38,413	₩23,236	₩9	₩0	₩0	₩ 20,598,228	₩ 38,423
금오대성	385,466,803	118,177	₩2,635,654	₩35	₩0	₩0	₩ 388,102,457	₩ 118,211
도원	57,949,297	46,517	₩116,321,688	₩32,594	₩0	₩0	₩ 174,270,985	₩ 79,111
달창	-	-	₩36,567,469	₩1,862	₩6,657,155	₩339	₩ 43,224,624	₩ 2,202
주남가월	215,028,583	15,371	₩1,888,651	₩49	₩393,046	₩10	₩ 217,310,280	₩ 15,430
도림	19,723,446	766,507	₩19,962	₩314	₩0	₩0	₩ 19,743,408	₩ 766,821
반산	2,690,382,568	4,819,543	₩1,026,133	₩195	₩0	₩0	₩ 2,691,408,701	₩ 4,819,738
복심	635,600,377	21,501,249	₩2,255	₩10	₩0	₩0	₩ 635,602,632	₩ 21,501,259
계룡	29,320,408	86,168	₩330,437	₩236	₩0	₩0	₩ 29,650,845	₩ 86,405
탑정	-	-	₩17,509,124	₩3,673	₩0	₩0	₩ 17,509,124	₩ 3,673
덕용	5,979,657	1,314,090	₩10,838,431	₩51,962	₩0	₩0	₩ 16,818,088	₩ 1,366,052
수양	48,352,389	62,426	₩2	₩0	₩0	₩0	₩ 48,352,391	₩ 62,426
장성	78,505,159,327	708,889	₩451,716	₩1	₩0	₩0	₩ 78,505,611,043	₩ 708,890
나주	65,051,739,311	407,450	₩67,342,884,381	₩96,763	₩111,881,976,874	₩160,760	₩ 244,276,600,566	₩ 664,974

통합안전성지수 산정 프레임워크



제 6 장 통합안전성 관리 지표 및 모델 개발

제 1 절 환경변화 및 노후화에 따른 생애주기비용

1. 지반 변화를 고려한 기반시설 생애주기비용 분석

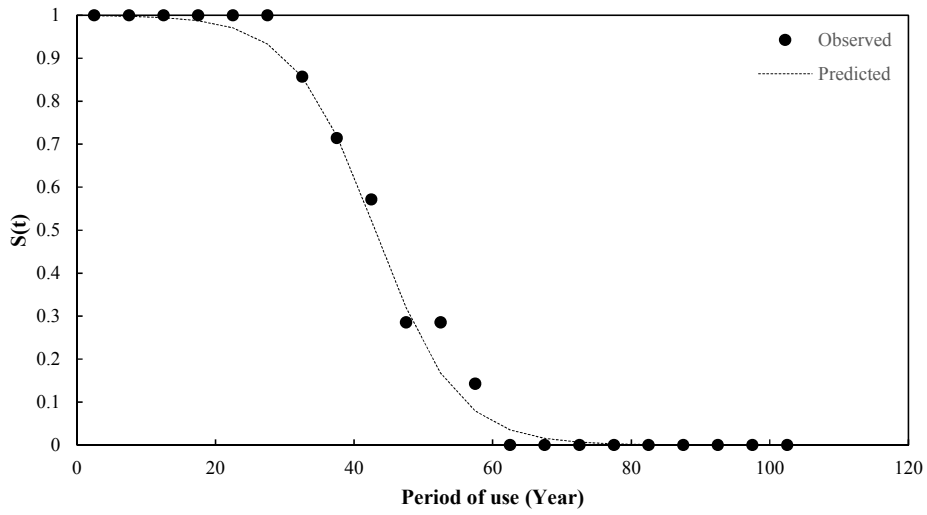
체체의 보수 공사 주기를 규정하기 위하여 각 보수 공종에 대한 생애주기 함수를 생성하였다. 생애주기 함수를 생성하기 위하여 한국농어촌공사 관리 저수지 150개 정밀조사 보고서를 참고하였으며 체체 덧쌓기, 그라우팅, 사석 보수 공종에 대한 보수 내역을 분석하였다. 각각의 보수 시기를 이용하여 빈도 분석을 실시하였으며 각각의 보수 공종에 대한 도수 분포는 [표 6-1]과 같다.

[표 6-1] Frequency of the period of use for each repair works

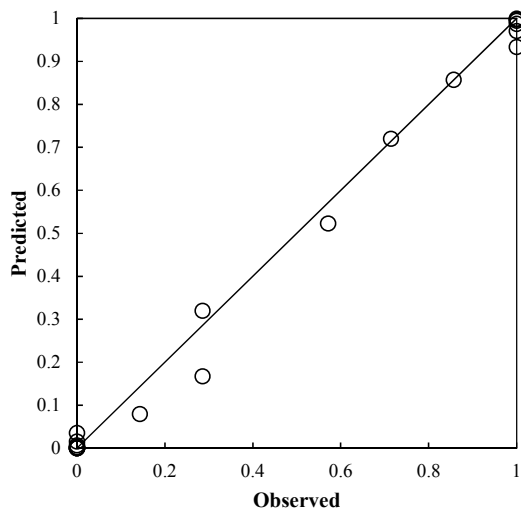
Period of use		Elevation		Grouting		Riprap	
Min	Max	Relative frequency	Cumulative frequency	Relative frequency	Cumulative frequency	Relative frequency	Cumulative frequency
0	5	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	1.000
5	10	0.000	1.000	0.026	1.000	0.000	1.000
10	15	0.000	1.000	0.000	0.974	0.000	1.000
15	20	0.000	1.000	0.000	0.974	0.000	1.000
20	25	0.000	1.000	0.128	0.974	0.000	1.000
25	30	0.143	1.000	0.077	0.846	0.000	1.000
30	35	0.143	0.857	0.128	0.769	0.143	1.000
35	40	0.143	0.714	0.077	0.641	0.143	0.857
40	45	0.286	0.571	0.179	0.564	0.286	0.714
45	50	0.000	0.286	0.026	0.385	0.143	0.429
50	55	0.143	0.286	0.077	0.359	0.286	0.286
55	60	0.143	0.143	0.179	0.282	0.000	0.000
60	65	0.000	0.000	0.026	0.103	0.000	0.000
65	70	0.000	0.000	0.000	0.077	0.000	0.000
70	75	0.000	0.000	0.000	0.077	0.000	0.000
75	80	0.000	0.000	0.077	0.077	0.000	0.000
80	85	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
85	90	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
90	95	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
95	100	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
100	105	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

각 공종별 도수분포표를 이용하여 확률분포함수의 매개 변수 값을 산정하였다. 또한 산정된 매개 변수를 통하여 각각의 보수 공종의 사용 연한에 따른 생존 함수를 생성하였으며 측정된 값과 함께 [그림 6-1]~[그림 6-3]

에 도시하였다.

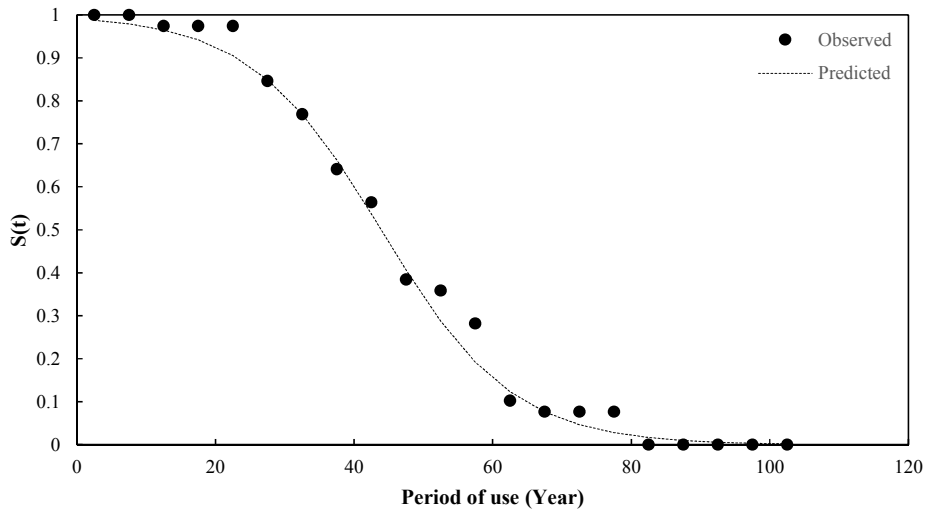


(a) Survivor function

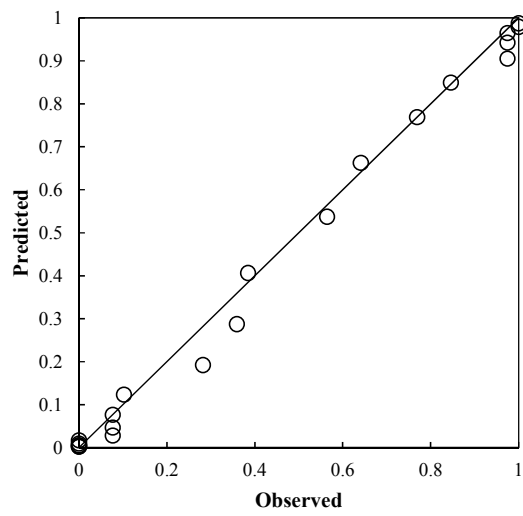


(b) Verification

[그림 6-1] Survivor function and verification of elevation works

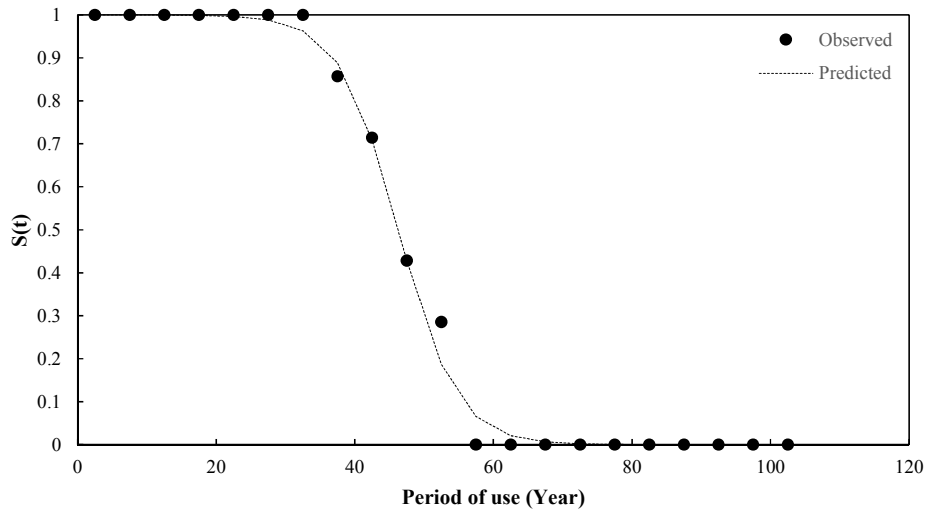


(a) Survivor function

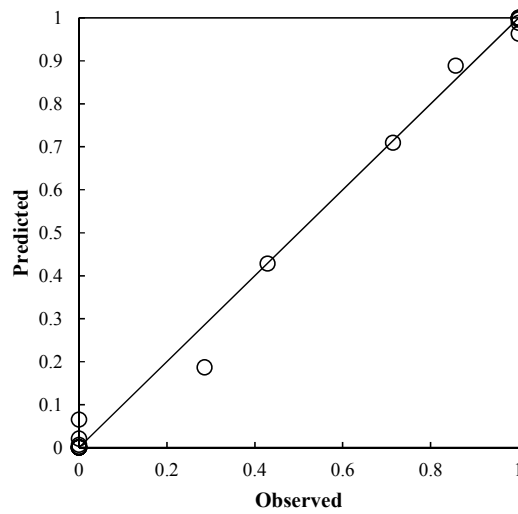


(b) Verification

[그림 6-2] Survivor function and verification of grouting works



(a) Survivor function



(b) Verification

[그림 6-3] Survivor function and verification of repair works of riprap

모든 공종에서 확률분포함수를 이용하여 생성된 생존 함수와 실측 데이터와의 오차가 작은 것으로 나타났다. 덧쌓기 공종과 사석 재정비 공종은 한 시점에 보수 시기가 밀집되어 나타났으며 그라우팅 공정은 다양한 시점에서 보수공사를 실시하는 것으로 분석되었다. 하지만 덧쌓기와 사석 정비 공종은 주요 보수 시점에서 다소 차이가 있었다. 이러한 각각의 생존확률에 따른 사용연한에 대한 정확한 분석을 위하여 확률분포함수를 통하여 모

텔링 된 식을 통하여 각 보수공종에 대하여 생존확률에 대한 시기를 산정하였다. 각 보수 공종의 생존 확률에 따른 사용 연한 분석 결과는 [표 6-2]과 같다.

[표 6-2] Time at probability p

p	$T(p)$ (year)		
	Elevation	Grouting	Riprap
0.1	56	65	56
0.2	51	57	52
0.3	48	52	50
0.4	45	48	48
0.5	43	44	46
0.6	41	40	45
0.7	38	36	43
0.8	35	31	40
0.9	30	23	37

다양한 사용 연한에서 보수 공사가 실시되었던 그라우팅 공종은 다른 보수 공사에 비하여 생존 확률이 높을 때의 사용 연한이 낮게 나타났으나 생존확률이 낮을 때의 사용 연한은 단면보수 공종과 사석 재정비 공정에서 더 낮은 것으로 분석되었다.

2. 유지보수 비용변화 분석을 위한 토질요소 분석

가. 보수시기의 결정

각 보수 공사의 보수시기는 현재 등급에 따라 달라진다. 또한 보수 공사는 각 등급에서 A등급으로의 상향을 목표로 하며 각 공종의 생애주기 함수에 따라 등급 하락 속도가 달라진다. 앞서 산출한 각 공종의 생애주기 함수를 이용하여 각 등급에서의 보수시기를 결정하였으며 산출된 각각의 보수시기는 [표 6-3과 같다. 보수 시기는 참고문헌에서 인용한 함수와 본 연구에서 산출한 생애주기함수에 대한 결과를 모두 표기하였다.

[표 6-3] 보수공종 등급별 보수시기

등급	생애주기함수			참고문헌		
	그라우팅	사석정비	단면보강	그라우팅	사석정비	단면보강
A	57	51	52	53	53	53
B	26	11	11	33	33	33
C	17	7	17	23	23	23
D	1	1	1	1	1	1
E	1	1	1	1	1	1

본 연구에서 산출한 보수시기는 각각의 보수 공종에 따라 달라지지만 참고문헌에서 산출한 보수 시기는 한 함수를 이용하기 때문에 모든 보수 공종에 같은 보수시기가 적용된다.

유지보수 비용을 분석하기 위한 토질요소에 대한 보수공종의 보수시기를 결정하기 위하여 현재의 상태 분석이 필요하다. 따라서 각각의 대상지에 대한 현재 상태 분석을 위하여 정밀진단 보고서의 진단 내용을 조사하였다. 저수지 정밀진단 보고서에서는 제체부를 맴마루, 상류사면, 하류사면, 총 3부분으로 구분하고 있으며 각각 세부 요소에 대하여 평가를 실시한다. [표 6-4]은 저수지 제체부에 대한 진단 내용이다.

전체 30개 대상 저수지 중 22개 저수지는 제체부 전체 등급이 기술되어 있으나 세부 점수는 8개 저수지에서만 확인되었다. 세부 등급이 없는 경우 저수지 체에 전체 평가 등급을 각각의 세부 요소 등급으로 사용하였다.

본 연구에서 산출된 각각의 생애 주기 함수와 참고 문헌에서의 생애 주기 함수를 통하여 산출한 보수 시기를 적용하여 대상 저수지에서의 각각의 보수 공종에 대한 보수시기를 결정하였다. [표 6-5]은 각 대상지에서의 보수 공종에 대한 보수시기를 나타낸다.

[표 6-4] 대상지 정밀진단 보고서 제체부 평가등급

수계	대상지	댐마루				상류사면				하류사면				제체 평점	제체 등급	평가 년도	
		표면	침하	보호공	총계	양안부	사석	식생	총계	양안부	경계면	누수	식생				총계
한강	금석														-	C	2009
	마지														-	B	2009
	무극														-	C	-
	백운														-	C	2009
	애룡														-	C	2008
	오남														-	C	2011
	용계														-	C	2009
	용당	1.2	1.2	0.6	3	1.8	4.4	1.8	8	1.8	1.8	6.4	1.8	11.8	22.8	C	2005
	용설	2.6	1.8	-	4.4	2.4	7.2	2.8	12.4	2.4	2.8	12.8	2.4	20.4	37.2	A	-
	잠곡																
	추평																
금강	계룡																
	덕용	1	1.2	0.5	2.7	1.4	2	1	4.4	1.5	1.5	5.5	1	9.5	16.6	C	2005
	도림																
	동부														-	D	2011
	반산	1.4	1.4	0.7	3.5	0.9	4.5	1.5	6.9	0.8	1.5	3.8	1.5	7.6	18	D	2004
	복심	1.2	1	0.3	2.5	0.7	3.7	0.7	5.1	1.3	1.3	4	0.7	7.3	14.9	D	2004
	탐정				B				B					B		B	2008
	가월														-	C	2007
	금오	1	1	0.6	2.6	1.6	4	1.4	7	1.8	1.4	7	1.5	1.7	21.3	C	2005
	달창				C				C					C	-	C	1999
	대성														-	B	2008
	도원																-
	오봉	1.6	1.4	0.7	3.7	1.5	4.5	1.5	7.5	2.1	2.1	11.2	1.5	16.9	28.1	C	2006
	주남														-	C	2008
	광주															C	2007
	나주																
	담양																
	수양	1	1	0.3	2.3	1.5	4	0.9	6.4	1.5	2.1	4.8	0.9	9.3	18	C	2005
	장성																

[표 6-5] 정밀진단등급에 따른 각 공종별 보수 시기

수계	대상지	생애주기합수			참고문헌		
		그라우팅	사석정비	단면보강	그라우팅	사석정비	단면보강
한강	금석	17	7	11	23	23	23
	마지	26	11	17	33	33	33
	무극	17	7	11	23	23	23
	백운	17	7	11	23	23	23
	애룡	17	7	11	23	23	23
	오남	17	7	11	23	23	23
	용계	17	7	11	23	23	23
	용당	1	7	11	1	23	23
	용설	26	11	52	33	33	53
	잠곡						
	추평						
금강	계룡						
	덕용	1	1	11	1	1	23
	도림						
	동부	1	1	1	1	1	1
	반산	1	7	1	1	23	1
	복심						
낙동강	탑정	1	7	1	1	23	1
	가월	17	7	11	23	23	23
	금오	17	7	11	23	23	23
	달창	17	7	11	23	23	23
	대성	26	11	17	33	33	33
	도원						
	오봉	26	7	11	33	23	23
영산강	주남	17	7	11	23	23	23
	광주	17	7	11	23	23	23
	나주						
	담양						
	수양	1	7	11	1	23	23
장성							

나. 유지보수 단가 산출

생애주기 비용 산출을 위한 유지보수 공종에 대한 단가는 이준구 등 (2011)에 하여 수행된 기존 연구 내용을 참고하였다. 각각의 보수공종의 단위 가격은 [표 6-6]과 같다.

[표 6-6] 보수공종 단위 가격(2011년 기준)

공종	단위가격	단위	영향인자
그라우팅	3,304	천원/공	길이
사석정비	135	천원/m ²	길이, 높이
단면보강	93	천원/m ²	길이, 높이

그라우팅은 영향인자로써는 제체 길이가 고려되었으며 사석정비와 단면보강은 제체 길이와 높이가 영향인자로 고려된다. 대상 저수지의 제체 재원을 적용하여 각각의 보수 공종에 대한 1회 보수 비용을 산출하였다. 각 대상지의 공종별 유지보수 단가는 [표 6-7]과 같다.

대상지 제체 규모에 따라 유지보수 단가가 결정되었으며 각각의 단가에 보수 횟수를 통하여 토질요소에 대한 저수지 생애 비용을 산출하였다. 분석기간은 현재부터 향후 100년을 분석하였으며 현재 등급을 고려하여 보수 시기와 보수 횟수를 결정하였다. 또한 현재 상태에 따른 보수 시기의 결정으로 현재 상태 등급이 있는 22개 저수지에 대하여 분석하였다. 대상지에 대한 토질요소의 총 생애 주기 비용 산출 결과는 [표 6-8] 과 같다. 또한 경과 시간에 따른 보수비용을 분석하기 위하여 시간의 흐름에 따른 누적 보수 비용을 [그림 6-4]~[그림 6-7]에 도시하였다.

[표 6-7] 각 대상지의 공종별 유지보수 단가

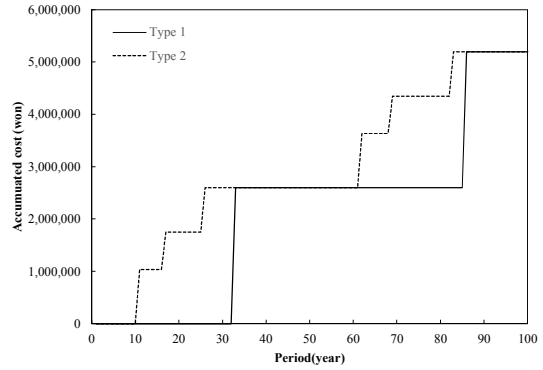
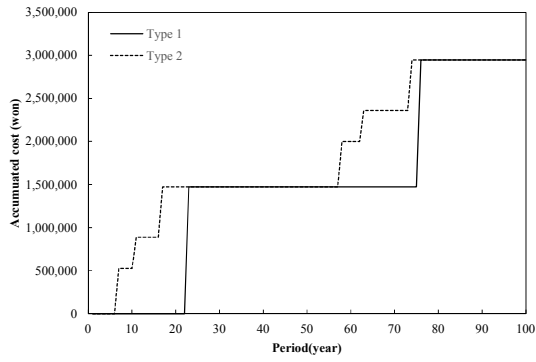
(unit : 천원)

수계	대상지	그라우팅	사석정비	단면보강
한강	금석	584,808	525,690	362,142
	마지	845,824	1,036,800	714,240
	무극	439,432	414,761	285,724
	백운	862,344	451,008	310,694
	애룡	353,528	216,675	149,265
	오남	1,361,248	1,668,600	1,149,480
	용계	842,520	850,298	585,761
	용당	925,120	676,620	466,116
	용설	1,453,760	1,128,600	777,480
	잠곡	842,520	1,022,423	704,336
	추평	0	0	0
금강	계룡	951,552	555,984	383,011
	덕용	971,376	666,792	459,346
	도림	564,984	796,433	548,654
	동부	416,304	205,821	141,788
	반산	2,996,728	1,542,807	1,062,823
	복심	8,659,954	1,047,368	458,334
	탑정	46,733,549	1,893,192	1,376,919
낙동강	가월	9,558,472	2,218,352	1,528,198
	금오	832,608	731,430	503,874
	달창	1,724,688	1,212,084	834,991
	대성	621,152	507,600	349,680
	도원	1,519,840	1,210,950	834,210
	오봉	882,168	857,871	590,978
	주남	10,457,160	3,845,475	2,649,105
영산강	광주	1,668,520	1,772,550	1,221,090
	나주	1,638,784	2,075,760	1,429,968
	담양	1,011,024	1,900,260	1,309,068
	수양	1,123,360	642,600	442,680
	장성	1,992,312	2,930,580	2,018,844

[표 6-8] 총 유지보수 비용 (참고, 분석)

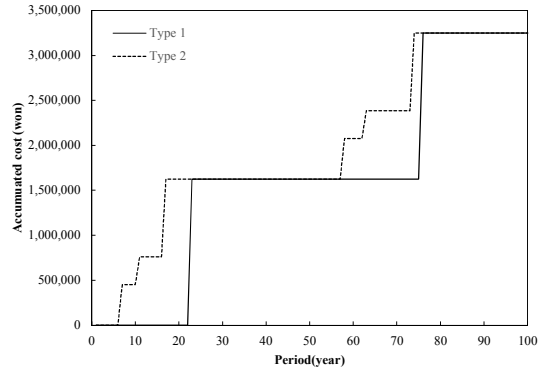
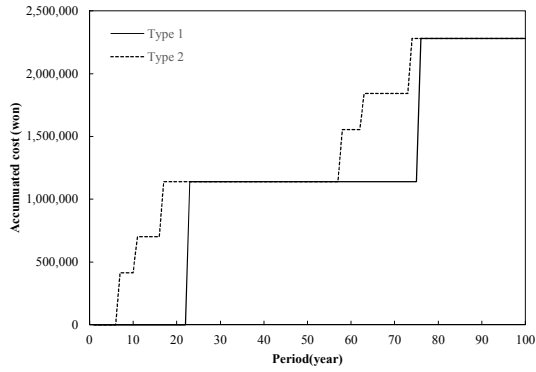
(unit : 천원)

수계	대상지	생애주기비용	참고문헌
한강	금석	2,945,280	2,945,280
	마지	5,193,728	5,193,728
	무극	2,279,833	2,279,833
	백운	3,248,093	3,248,093
	애룡	1,438,936	1,438,936
	오남	8,358,656	8,358,656
	용계	4,557,156	4,557,156
	용당	4,135,712	4,135,712
	용설	5,942,200	5,942,200
	잠곡	-	-
	추평	-	-
금강	계룡	-	-
	덕용	4,195,027	4,195,027
	도림	-	-
	동부	1,527,826	1,527,826
	반산	11,204,715	11,204,715
	복심	3,642,888	3,642,888
	탑정	8,437,310	8,437,310
낙동강	가월	26,610,045	26,610,045
	금오	4,135,824	4,135,824
	달창	7,543,526	7,543,526
	대성	2,956,864	2,956,864
	도원	-	-
	오봉	4,662,034	4,662,034
	주남	33,903,480	33,903,480
영산강	광주	9,324,320	9,324,320
	나주	-	-
	담양	-	-
	수양	4,417,280	4,417,280
	장성	-	-



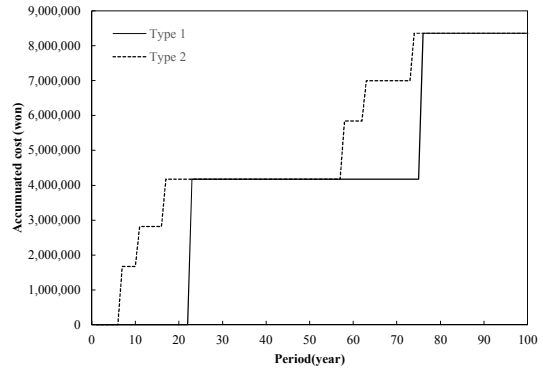
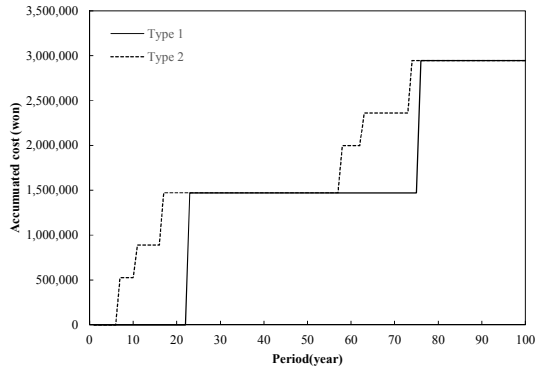
금석

마지



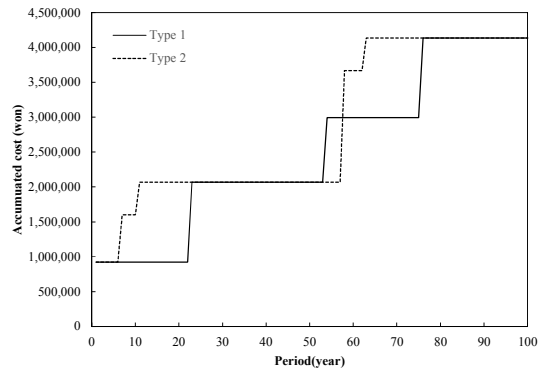
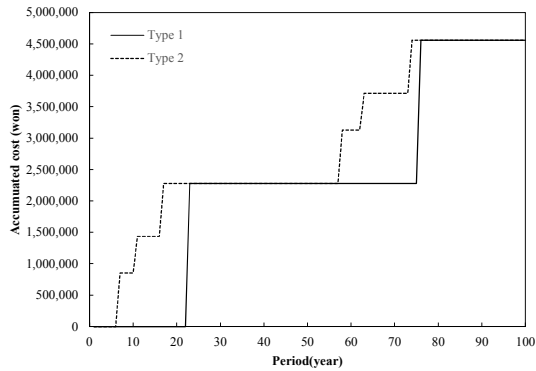
무극

백운



애룡

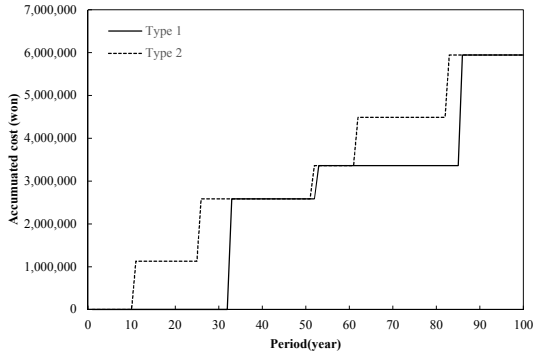
오남



용계

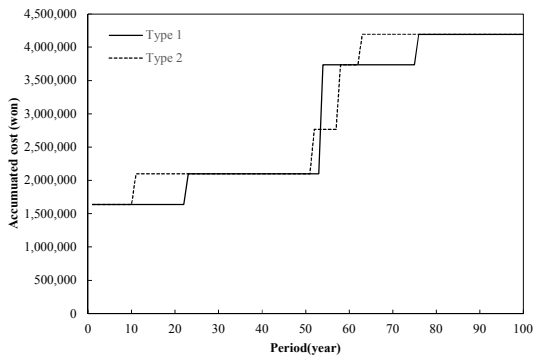
용당

[그림 6-4] 한강수계 생애주기비용

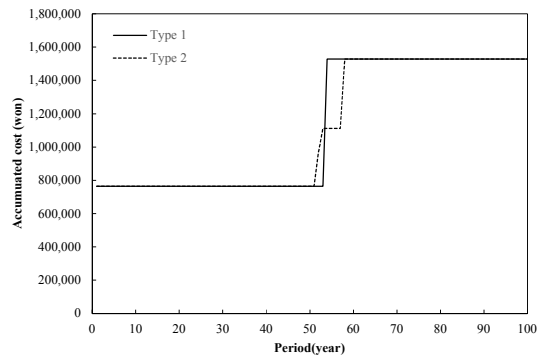


용설

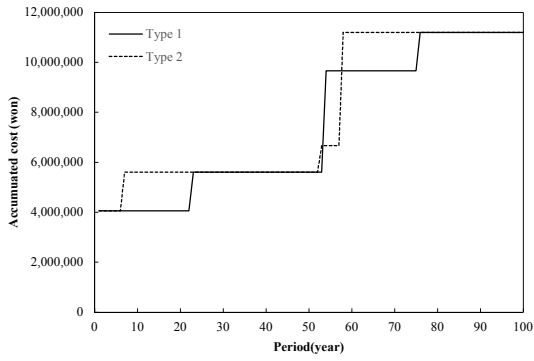
[그림 6-4] 한강수계 생애주기비용 (계속)



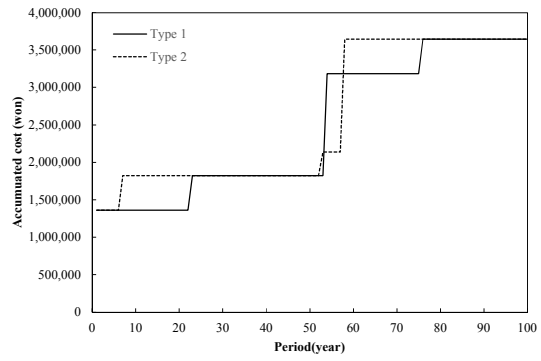
덕용



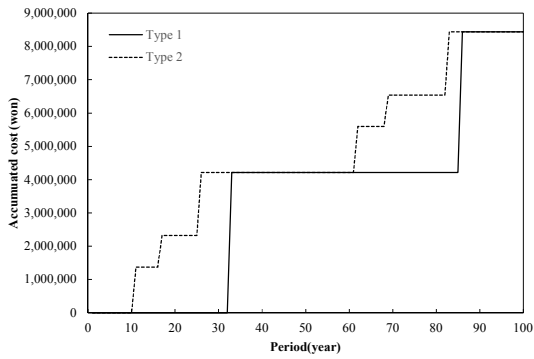
동부



반산

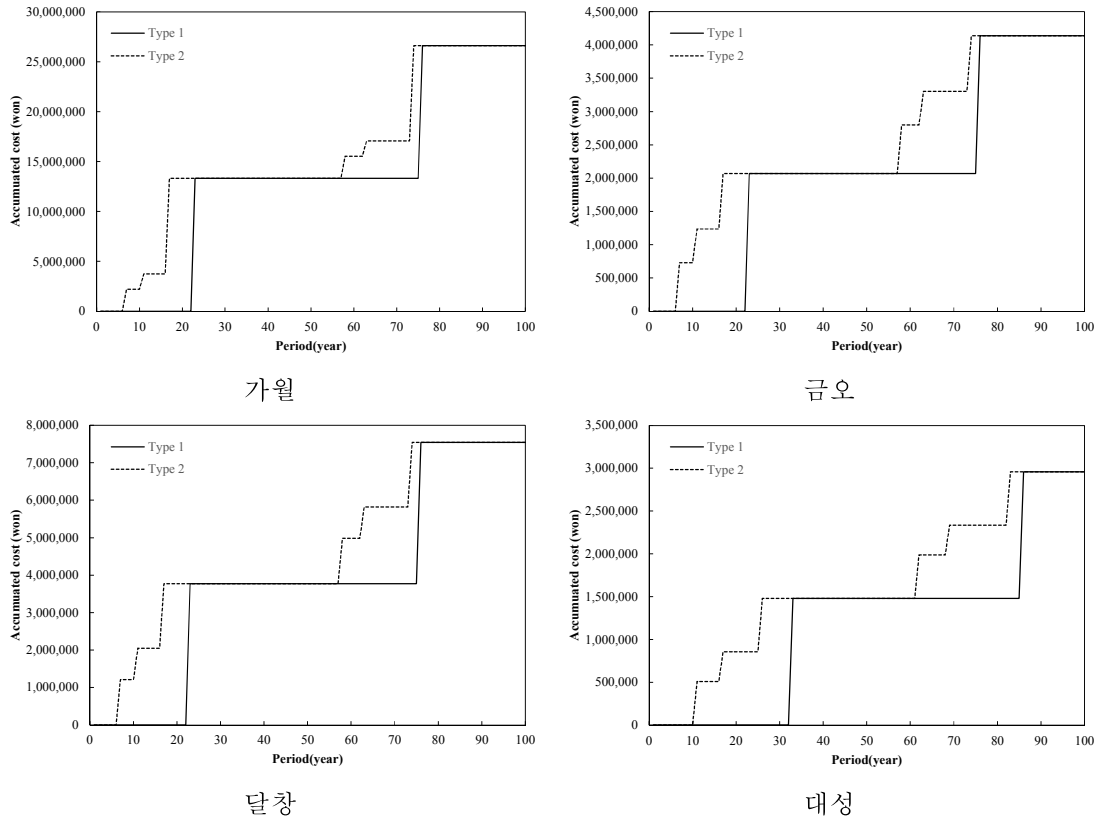


북심

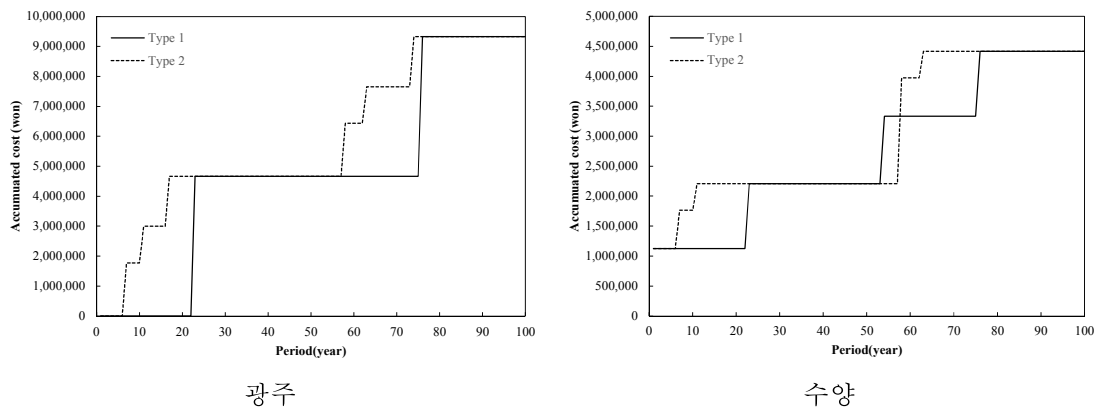


탑정

[그림 6-5] 금강수계



[그림 6-6] 낙동강 수계



[그림 6-7] 영산강 수계

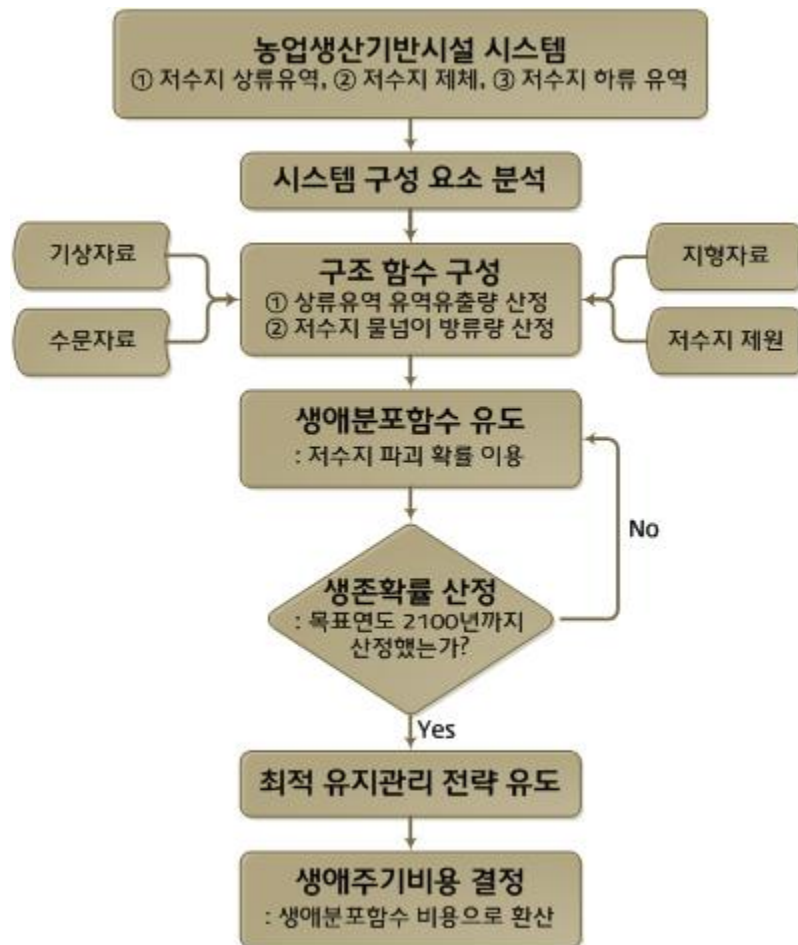
총 생애 주기 비용은 분석 기간 동안 총 보수 횟수가 동일하기 때문으로 참고문헌과 본 연구에서 산출한 생애주기 함수를 사용하였을 때 모두 동일하게 산출되었다. 하지만 보수 시기의 차이로 인하여 유지보수 비용이 발생하는 시기는 다소 차이가 있는 것으로 나타났다. 또한 총 유지보수 비용은 제체의 연장이 긴 가월과 주남 저수지에 매우 높게 산출되었는데 이는 제체의 높이는 고려하지 못하고 제체의 연장 길이로만 그라우팅 비용을 산

출하여 과대 평가된 것으로 판단된다. 따라서 그라우팅 비용은 높이와 길이를 모두 고려할 수 있는 방법의 도입이 필요할 것이라 사료된다.

3. 수리/수문 변화를 고려한 기반시설 생애주기비용 분석

가. 생애주기비용 함수

대표적인 농업생산기반시설인 농업용 저수지의 생애주기비용함수는 농업용 저수지 시스템을 요소별로 구분하여 각각의 구조 함수를 구성하고, 요소별 생애분포함수를 유도하여 요소별 유지 보수 효과를 분석하는 과정으로 구성하였다. [그림 6-8]은 생애주기비용을 분석하는 과정을 나타내고 있다.

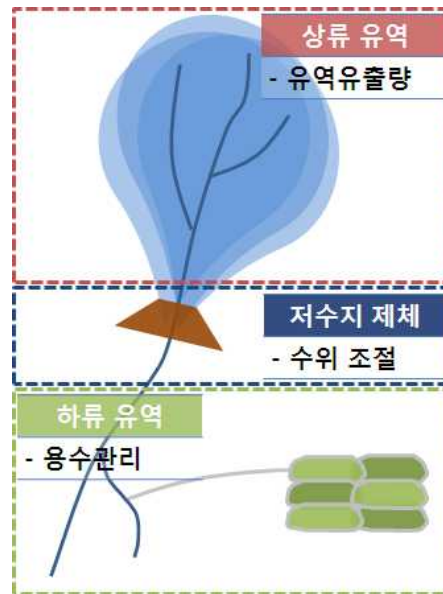


[그림 6-8] 생애주기비용 분석 과정

나. 생애주기비용 함수 구성

(1) 농업생산기반시설 시스템 분석

농업용 저수지는 상류유역, 저수지 제체, 하류유역으로 구분할 수 있다. 상류 유역에서는 대상유역의 기상학적, 지상학적 인자를 사용하여 유역유출량을 산정하고, 저수지 제체에서는 물넘이, 취수탑 등의 시설을 이용하여 저수지 수위를 관리하며, 하류 유역에서는 저수지로부터 공급받은 용수를 관리한다 [그림 6-9].



[그림 6-9] 저수지 시스템 분석

본 연구에서는 기후변화에 따른 저수지 상류 유역의 유역유출량 변화를 분석하고 이를 저수지 물넘이 방류능력에 적용하여 저수지 생애주기를 분석하고자 한다.

(2) 농업생산기반시설 구조함수 구성

농업용 저수지의 구조함수는 상류유역의 유역유출량을 산정하는 함수 (\bar{R})와 저수지 물넘이의 방류량 (\bar{O})을 산정하는 함수로 구분할 수 있다. 각각의 함수를 다음과 같이 정의하였다 (6-1 ~ 6-2).

$$\bar{R} = (\overline{PR}, WA, CN, IM, TC, IF, BBFR, RC) \quad (6-1)$$

where, $\bar{R} = [r_1, r_2, \dots, r_n]$: 유역유출량 (*Runoff*)
 $\overline{PR} = (\overline{T_1}, \overline{T_2}, \dots, \overline{T_n})$: 기준연도별 확률강우량
 $\bar{T} = \begin{bmatrix} pre_1 \\ pre_2 \\ \vdots \\ pre_n \end{bmatrix}$: 기준연도별 최근 30년 동안의 연최대치 강수량
WA: 유역면적 (*Watershed Area*)
CN: 유출곡선지수 (*Curve Number*)
IM: 불투수율 (*Impervious*)
TC: 집중시간 (*Time of Concentration*)
IF: 초기유량 (*Initial Discharge*)
BBFR: 기저유출감수 시작유량 (*Begin Base Flow Recession*)
RC: 감수상수 (*Recession Constant*)

$$\bar{O} = (\overline{IN}, \overline{RE}, \overline{RS}, \overline{RQ}, \overline{RL}) \quad (6-2)$$

where, \bar{O} : 저수지 방류량 (*Outflows*)
 \overline{IN} : 저수지 유입량 (*inflows*)
 \overline{RE} : 저수지 수위 (*Reservoir Elevations*)
 \overline{RS} : 저수지 저류량 (*Reservoir Storage*)
 \overline{RQ} : 저수지 물넘이 방류용량 (*Reservoir Outlet Capacities*)
 \overline{RL} : 저수지 지침수위별 저수량 (*Reservoir Target Level*)

(3) 생애분포함수 유도

생애분포함수는 저수지 파괴확률을 이용하여 유도한다. 저수지 물넘이의 방류량 (\bar{O})을 확률분포에 적합시켜서 저수지 방류량의 확률밀도함수 (PDF)를 구한 다음, EAP 보고서에 기재된 저수지 홍수위를 상회하는 부분을 산정하여 저수지 홍수발생확률을 유도하였다. 저수지 홍수발생확률 (\bar{P})은 식 (6-3)와 같이 산정할 수 있으며, 이를 저수지 파괴확률로 가정한다면 저수지 생애분포함수 (\overline{LDF})는 생애주기별 저수지 생존확률을 이용하여 식 (6-4)와 같이 정의할 수 있다.

$$\bar{P} = f(\bar{R}, \bar{O}, RFL) \quad (6-3)$$

where, \bar{P} : 저수지 홍수발생확률
 $\bar{R} = [r_1, r_2, \dots, r_n]$: 유역유출량 (*Runoff*)
 \bar{O} : 저수지 방류량 (*Outflows*)
 \overline{RFL} : 저수지 홍수위 (*Reservoir Flood Level*)

$$\overline{LDF} = 1 - \overline{P} \quad (6-4)$$

where, \overline{LDF} : 생애분포함수 (*Lifecycle Distribution Function*)
 \overline{P} : 저수지 홍수발생확률
 $SP = 1 - P$: 생존확률 (*Survival Probability*)

(4) 생애주기비용함수 유도

생애주기비용은 생애분포함수 (\overline{LDF})의 면적을 합산한 다음 이를 비용으로 환산하여 산정하였다.

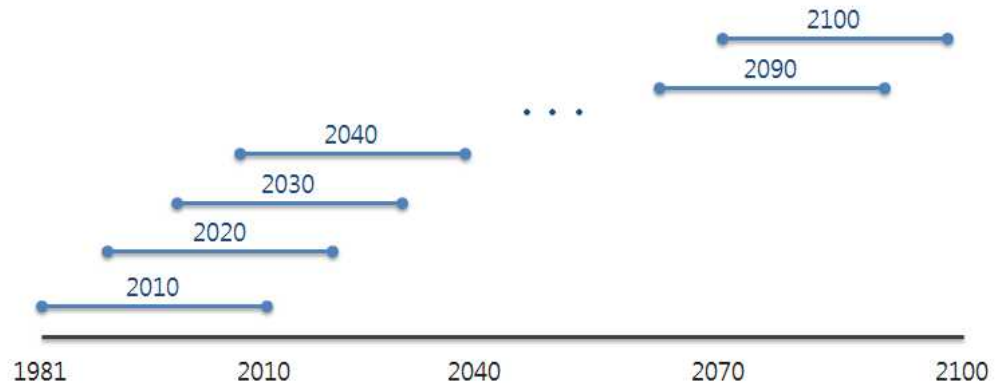
$$LCC = C_R \times \int_{t=i}^{t=n} \overline{LDF} dt \quad (6-5)$$

where, \overline{LCC} : 생애주기비용 (*Lifecycle Cycle Cost*)
 C_R : 저수지 피해비용 (*Cost*)
 \overline{LDF} : 생애주기비용함수 (*Lifecycle Cost Function*)

4. 유지보수 비용변화 분석을 위한 수리/수문요소 분석

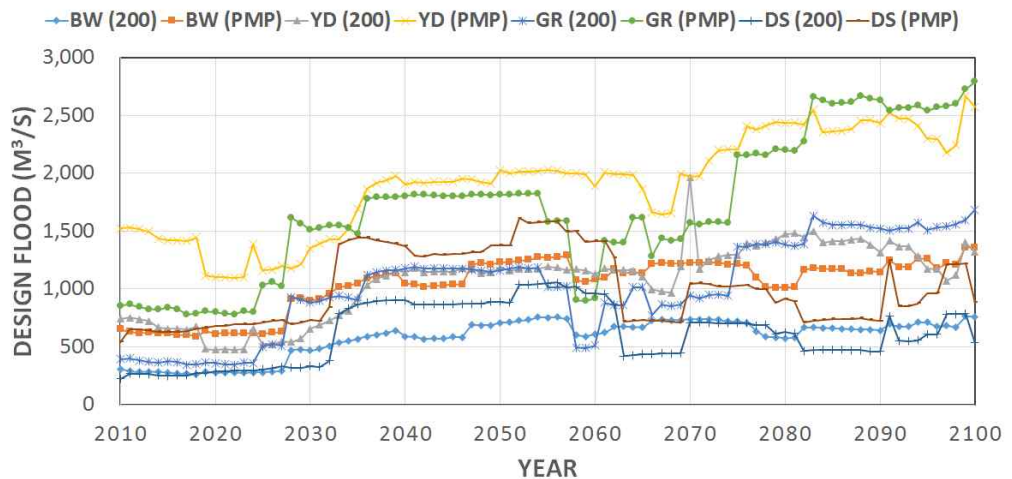
최근 들어 홍수나 가뭄 등의 이상재해의 발현빈도가 증가하면서 기존 농업생산기반시설의 설계 기준을 상회하는 경우가 발생하고 있다. 이러한 기후변화에 따른 피해를 저감하고 유지보수 비용을 절감하기 위해서는 농업생산기반시설의 안정성을 재평가하고 적합한 평가기준을 제시해야한다. 본 연구에서는 생애주기비용에 따른 유지보수 비용변화 분석을 실시하여 기후변화에 따른 농업생산기반시설의 안정성 검토를 수행하기 위해 농업생산기반시설의 수리/수문 요소를 분석하여 생애주기비용함수를 구성하였다. 농업생산기반시설의 유지보수 비용변화 분석을 위한 요소는 상류유역의 유역유출량과 저수지 물넘이의 방류량을 선정하여 분석하였다. 상류유역의 유역유출량은 HEC-HMS 모형을 이용하여 산정하였다. 산정기간은 2010년부터 2100까지 30년씩 기간을 이동하여 총 91개의 자료를 도출하여 기후변화에 따른 수리/수문요소의 변화를 반영할 수 있도록 하였다. 산정한 91개의 상류유역의 유출량 자료를 입력 자료로 이용하여 저수지 물넘이의 방류

량을 산정하여 수리/수문요소를 분석하였다. [그림 6-10]은 저수지의 수문/수리요소 분석을 위해 설정한 기간을 나타내고 있다.



[그림 6-10] 수리/수문요소 분석 기간

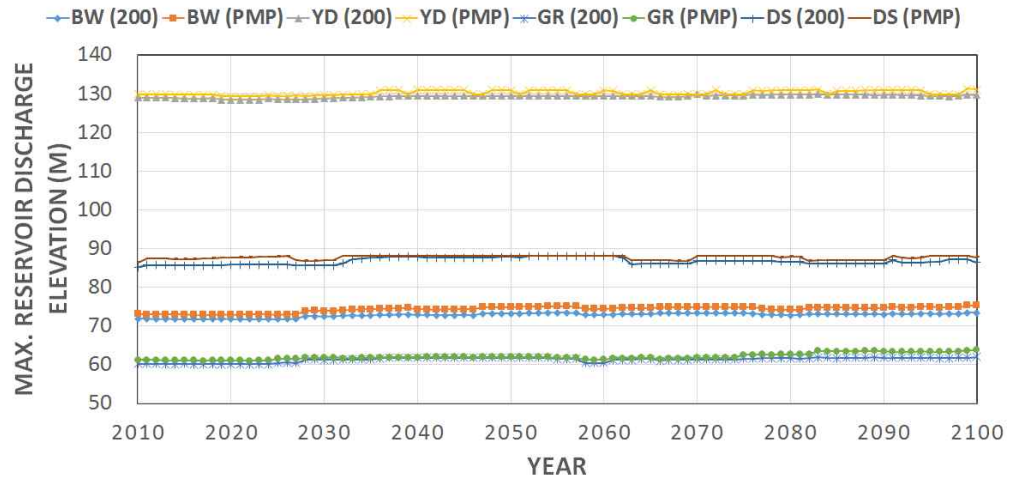
[그림 6-11]는 기간별로 산정한 대상구역의 설계홍수량을 나타내고 있다. 저수지 유역에 따라 차이가 나기는 하나 2030년대 이후로 설계홍수량이 증가하는 경향을 보인 다음에 2060년대 이후에 소폭 감소하는 추세를 보인 다음 이후에 증가 및 유지하는 추세를 나타내고 있다. 계룡 및 용당저수지는 PMP에서 2070년대 이후에 크게 증가하는 경향을 보여주고 있다.



[그림 6-11] 기간별 설계홍수량 (백운, 용당, 계룡, 대성저수지)

[그림 6-12]는 기간별로 산정한 대상구역의 저수지 물넘이 방류수위 중

최대치의 값을 보여주고 있다. 전반적으로 저수지 물넘이 방류수위의 최대치는 2030년대 이후에 증가하는 경향을 보이며 이후 저수지 유역에 따라 상이한 추세를 나타내고 있다.



[그림 6-12] 기간별 최대 방류수위 (백운, 용당, 계룡, 대성저수지)

5. 구조 변화를 고려한 기반시설 생애주기비용 분석

농업시설물 중에서 비교적 장기간의 수명을 가진 농업기반시설은 과거에는 생애주기비용을 추정하기가 어려워 제한적으로 일정 유지관리비를 설정하여 비용·편익을 계산하는 경제성 평가가 일반적으로 이루어져 왔다. 그러나 보다 합리적인 시설을 설치하기 위해서는 생애주기비용을 산출하여야 한다. 이 경우 기존 시설물의 유지관리 실적, 정밀안전진단자료 등의 생애분포특성자료가 많이 필요하다. 따라서 자료획득이 비교적 용이한 저수지에 대해서 생애주기비용함수를 작성하여야 한다.

저수지는 수자원의 확보를 위해 설치되지만 교량 등 단일 목적을 위한 일체구조물과는 달리 홍수에 대해서도 충분히 방비를 해야 한다. 우리나라 농업용 댐의 대부분은 토언제로 이루어져 있어 콘크리트 등 탄성재료로 이루어진 시설물에 비하여 시설의 운영과정에서 불안한 상태가 되기 쉽다. 즉, 농업용 저수지는 여러 부속시설의 집합으로 이루어져 있으므로 생애주

기비용을 산출하기 위해서는 불확정인자가 많이 포함된 부속시설이 네트워크를 이루고 있는 시스템으로 간주하여야 한다. 지금까지 생애주기비용을 구해온 건축물이나 교량이 시설의 파괴를 방지하기 위한 유지관리만 하는 경우를 가정하는 것이 보통이다. 그러나 관개용 저수지는 홍수나 제체 누수와 같은 시설의 안전 확보 측면의 유지관리와 관개설비인 통관이나 수문 등과 같은 기능확보 측면의 유지관리로 구분할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 여러 부속시설로 이루어진 시설물에 대해 시스템 접근법을 이용하여 시스템의 생애주기비용 항목 중 유지관리비용을 안전대책확보비용과 기능 유지확보비용으로 구분하여 생애주기비용모델을 확립하고자 한다.

생애주기비용은 시스템엔지니어링에서 반드시 다루어져야 하는 부분으로서 체계적인 사고를 통해 보다 나은 시스템을 개발하는데 필수인자로서 분석되고 있다. 사회간접자본 시설을 다루는 분야에서도 여러 요소가 하나의 목적을 위해 그 기능을 발휘하는 형태의 시설물들을 하나의 시스템으로 보고 시스템엔지니어링 분석기법들을 적용하여 분석하고 있다. 대표적인 농업용 시설물인 저수지는 제체시설, 여수방류시설, 취수시설로 나눌 수 있으며, 이들은 물을 가두어 농업용수를 공급하는 목적을 달성하기 위해 각각의 기능을 수행한다. 또한 홍수와 같은 기상재해로부터 안전해야 한다는 특징을 갖는다. 농업용 저수지를 정밀안전대상 시설물로 분류하여 5년마다 1회의 비율로 진단을 실시하고 있는 이유도 이러한 특징 때문일 것이다. 실제 유지보수의 이력자료를 분석하여도 안전 확보를 위한 유지보수와 기능확보를 위한 유지보수로 구분이 가능하다. 즉, 농업용수를 공급해야 하는 기능적 특징과 재해로부터 안전을 유지해야 하는 특징을 갖는 이러한 시설물의 생애주기비용을 기능특성을 반영하여 현실적으로 산출할 필요가 있으므로 농업시설물의 기능특성을 분석하는 시스템적 접근방법을 조사하고, 현재 사용되고 있는 생애주기비용함수를 검토하여, 안전측면과 기능측면의 유지관리가 이루어져야 하는 농업시설물에 적용이 가능한 생애주기비용 함수를 작성한다.

저수지시스템의 생애동안 소요되는 생애주기비용은 아래의 식 (6.6)과 같이 설계비, 시공비, 유지관리, 사용자비, 해체폐기 및 재활용비로 구성되며, 사용자비는 시스템의 파괴가 발생하여 유지보수하는 동안 시스템의 사

용자들에게 돌아가는 피해비용을 의미한다.

$$C_t = f(C_D, C_C, C_M, C_U, C_R) \quad (6.6)$$

where, C_D : Design Cost
 C_C : Construction Cost
 C_M : Maintenance Cost
 C_U : User Cost
 C_R : Recycle Income & Demolition Cost

위 식에서 유지관리비는 식 (6.7)와 같이 유지보수, 진단 및 파괴에 따르는 경비를 포함하게 된다.

$$C_M = f(C_{RE}, C_{INS}, C_F) \quad (6.7)$$

where, C_{RE} : Repair, Rehabilitation,
Replacement(reconstruction) Cost
 C_{INS} : Inspection Cost
 C_F : Failure Cost

위 식에서 유지보수비는 시스템을 구성하는 요소의 유지보수비의 합이 최소가 되도록 하는 유지보수전략에 의해 결정된 비용을 말하며 식 (6.8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{RE} = \min \left[\sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{C_{kj}}{(1+v)^{t_{kj}}} \right] \quad (6.8)$$

where, v : Discount Rate

또한, 생애주기비용은 모든 비용을 현재가치로 환산하여 비교하게 되므로 할인율을 고려한 현재가치로 환산하여야 한다. 따라서 식 (6.7)은 식 (6.9)와 같이 표현될 수 있다. 할인율은 은행 공공부분대출이자율의 최근 10년간 평균치인 실질할인율을 적용하였다.

$$C_M = \sum_{j=1}^m \frac{C_{RE}}{(1+v)^{t_{pj}}} + \sum_{j=1}^m \frac{C_{INS}}{(1+v)^{t_{pj}}} + \sum_{j=1}^m \left[\frac{C_F}{(1+v)^{t_{pj}}} \times F_t(t) \right] \quad (6.9)$$

식 (6.6)은 일반적인 구조물의 생애주기비용 함수이므로 저수지에 적용이 가능도록 기능과 안전으로 구분되는 함수로 전개하여야 한다. 저수지에 적용하기 위한 함수로의 전개는 생애주기비용항목 중 유지관리비식인 식 (6.7)를 안전시스템과 기능시스템으로 구분하여 식 (6.10)와 같이 변경하여 사용하였다. 또한 생애주기 비용항목 중 사용자 비용을 시스템의 기능적 파괴에 의한 피해비용으로 표현하였다. 그 이유는 기존의 LCC에서 사용하던 복잡한 조사를 통해 추정함으로서 발생될 수 있는 주관성과 설문 등의 번거로움을 해소함과 동시에 시스템 안전의 파괴비용 산출방법과 같이 신뢰성 기반의 비용 산정이 가능하도록 하기 위함이다. 이를 식 (6.7)의 파괴비용 ($C_F = C_f + F$)을 식 (6.14)로 개선하였다. 마지막으로 진단비용을 세분화한다. 정밀안전 진단은 5년마다 실시되는 점검이며, 일상관리는 거의 매일 실시되는 점검이다. 식 (6.15)에서 C_{INS} 는 정밀안전진단비용이며, C_{CH} 는 일상관리 비용이다. LCC에서 누락된 C_{CH} 를 추가하였다.

$$C_t = f(C_D, C_C, C_M, C_R) \quad (6.10)$$

$$\text{where, } C_M = f(C_{RE}, C_{INS}, C_{CH}, C_F) \quad (6.11)$$

$$C_{RE} = \begin{cases} C_{REsa} \\ C_{REse} \end{cases} \quad (6.12)$$

$$C_{CH} : \text{Annual Cost for Daily Check} \quad (6.13)$$

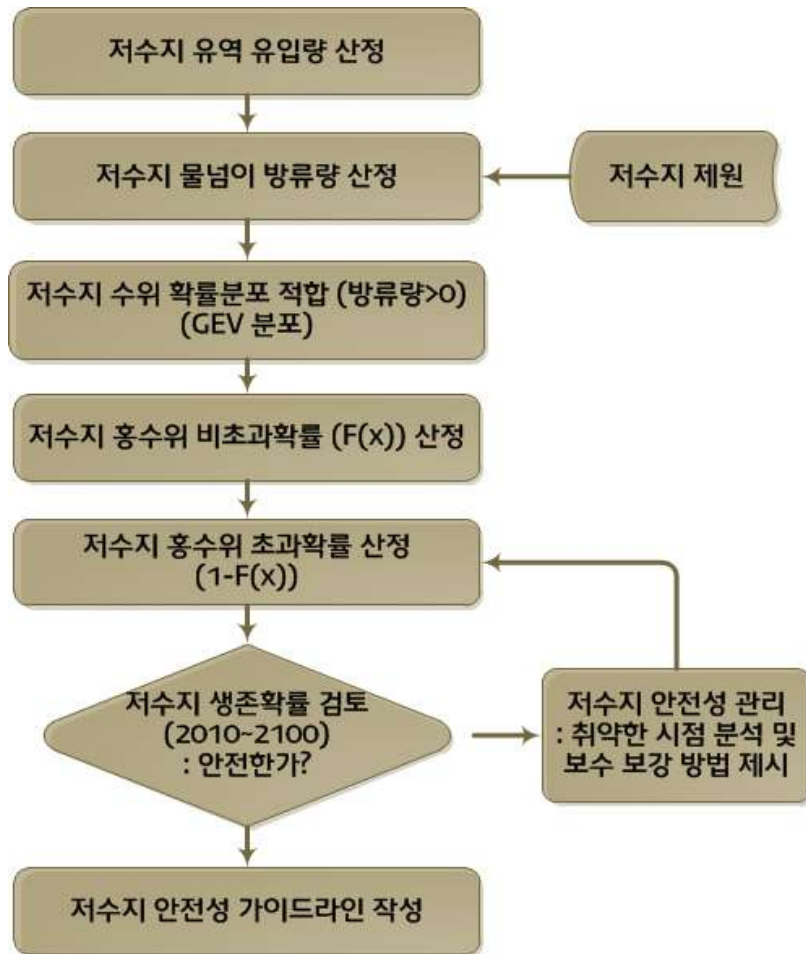
$$C_F = \begin{cases} C_{Fsa} = F_{tsa}(t) \times C_{f_{sa}} \\ C_{Fse} = F_{tse}(t) \times C_{f_{se}} \end{cases} \quad (6.14)$$

$$C_M = \sum_{j=1}^m \frac{C_{REsa}}{(1+v)^{t_{pj}}} + \sum_{j=1}^m \frac{C_{REse}}{(1+v)^{t_{pj}}} + \sum_{j=1}^m \frac{C_{INS}}{(1+v)^{t_{pj}}} + \sum_{j=1}^m \frac{C_{CH}}{(1+v)^{t_{pj}}} + \sum_{j=1}^m \left[\frac{C_{f_{sa}}}{(1+v)^{t_{pj}}} \times F_{tsa}(t) \right] + \sum_{j=1}^m \left[\frac{C_{f_{se}}}{(1+v)^{t_{pj}}} \times F_{tse}(t) \right] \quad (6.15)$$

제 2 절 자연적/사회적환경변화에 대응하는 시설관리기술

1. 수리/수문 안전성 최적관리를 위한 관리기술 개발

수리/수문 안전성을 평가하여 최적화하는 기술은 시설물의 안전성을 제고하는 있어 필수적이다. 수리/수문을 구성하는 다양한 인자를 평가하여 통합적으로 분석하기 위해서는 하나의 대푯값으로 나타내는 것이 중요하며 확률론적 접근 방법은 이에 대한 합리적인 해결책을 제시할 수 있다. 본 연구에서는 확률론적 방법을 이용하여 수리/수문 안전성 최적관리를 위한 기술을 개발하였다. 저수지의 구성요소를 요소별로 산정하여 얻은 결과를 수문 모형 및 저수지 운영 모형에 대입하여 저수지 구역별 특성을 분석한 뒤에 수리/수문 안전성 관리에 중요한 인자인 홍수에 초점을 맞추어 안전성 관리기술을 개발하였다. 저수지 운영 모형을 통해 얻은 저수지 물넘이 수위 자료를 이용하여 확률분포에 적합시켜서 각 저수지 구역의 특성을 나타낼 수 있는 확률 밀도 함수를 유도하였다. 저수지 물넘이 수위에 적합한 확률 분포로는 GEV 분포를 선정하였고, GEV 분포를 이용하여 얻은 확률 밀도 함수를 기준으로 하여 기존에 설정된 각 저수지의 홍수위를 초과하는 확률을 산정하여 저수지의 생존확률을 검토하였다. 앞서 수리/수문요소를 분석할 때 적용한 기간과 마찬가지로 2010년부터 2100년까지 30년씩 기간을 이동하여 총 91개의 생존확률을 도출하였고, 이 결과를 이용하여 연도별 생애주기비용을 통해 취약한 기간을 산정하여 보수/보강을 할 수 있는 가이드라인을 제시하는 최적화 기술을 개발하였다. 가이드라인은 2010년부터 2100년도까지 산정한 생애주기비용을 기준으로 취약한 시점에 보수/보강의 규모와 빈도를 결정하는 방법으로 개발하였다. 저수지의 구성요소별 보수/보강 비용을 결정하고 이를 생존확률에 따른 생애주기비용과 비교하여 최적화를 수행하였다. [그림 6-13]은 저수지의 수문/수리요소 안전성 최적관리 기술을 보여주고 있다.

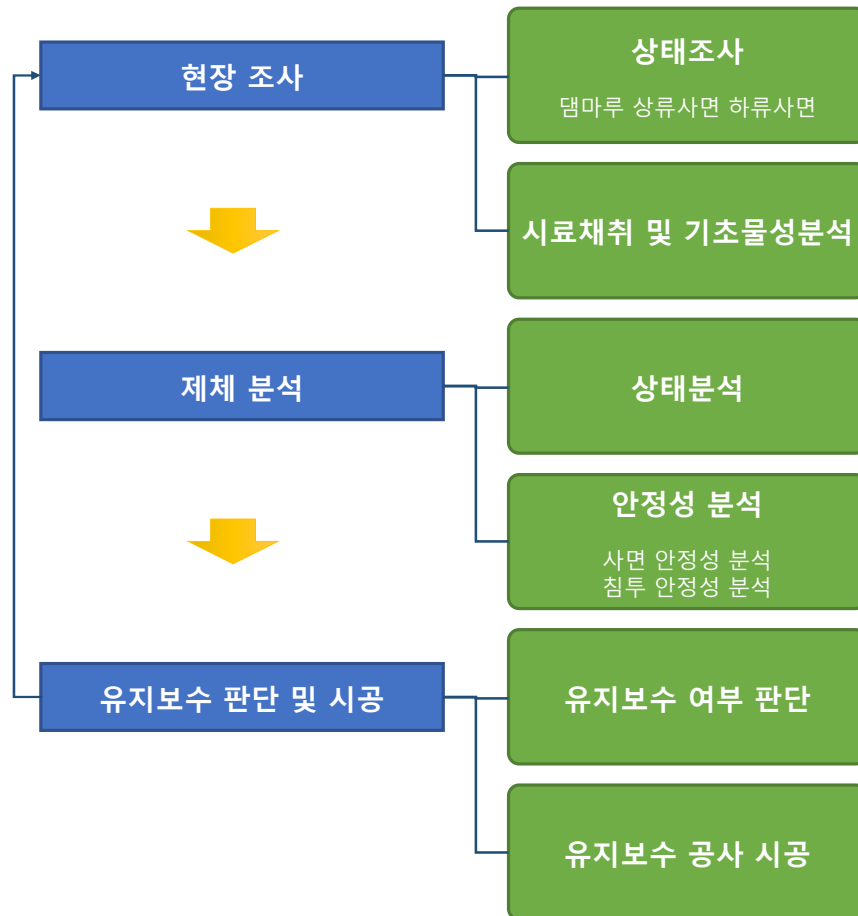


[그림 6-13] 수리/수문 안정성 최적관리

본 연구에서 개발한 수리/수문 최적관리 기술은 연도별 안전성 평가 자료를 근거로 하여 안전성이 감소한 시점에 피드백 작용을 수행하여 안전성을 관리하는데 초점이 있다. 저수지 생존확률을 산정할 결과를 이용하여 저수지 보수/보강을 실시하였을 때의 안전성 제고 효과를 분석하고 이를 기반으로 안전성 가이드라인을 작성하는 과정을 이루어진다. 저수지 안전성 가이드라인은 저수지 생존확률의 시계열 자료를 기반으로 유지관리 주기, 보수/보강 비용을 종합적으로 판단하여 제시된다.

2. 토질 안정성 최적관리를 위한 관리기술 개발

본 연구에서는 토질 안정성 최적 관리를 위하여 다음과 같은 관리 기술을 개발하였다.



[그림 6-14] 토질 안정성 최적관리 관리 기술

토질 안정성의 확보를 위해서는 주기적인 현장 조사가 필요하다. 현재 정밀진단, 상시 점검, 긴급 점검 등의 방식으로 현장 조사를 실시하고 있으나 그 항목이 체계적이지 않고 연속적으로 측정되는 데이터의 축적이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 상태분석과 안정성 분석을 위한 체계적인 현장조사 항목을 제안하고 제안된 현장 조사항목을 기반으로 제체의 정확한 상황을 분석하여 유지보수 필요여부를 판단하여 실시하는 방식을 제안하고자 한다. 유지보수 후에도 정기적인 제체의 점검과 데이터의 축적을 통하여 제체의 현재상태를 정확히 판단하도록 한다.

3. 구조 안전성 최적관리를 위한 관리기술 개발

저수지의 구조부분의 안전성 최적관리를 위하여 유지 관리효과분석을 선행적으로 실시하였다. 저수지의 유지보수에 필요한 요소별 단위공사비, 유지보수주기, 보강효과 계수(α)는 [표 6-9]와 같이 기존의 연구를 통하여 산정된 기존의 값을 기준으로 결정하였다.

요소별 유지보수에 의한 생존확률을 표현할 수 있는 수학적 함수들을 검토하여 요소별 유지관리 수준은 크게 보수(repair), 보강(rehabilitation), 교체(reconstruction)로 나눌 수 있으며, 단계별 유지관리 수준은 Kececioglu가 제시한 식 (6.16)을 이용하여 산정하였다.

$$S_{t_p}(t) = [S_t(t_p)]^j S_t(\tau) \quad (6.16)$$

where, $S_t(t)$ = Survivor function
 $S_{t_p}(t)$ = Survivor function with maintenance interval t_p
 j = Number of maintenance
 t = $jt_p + \tau$ ($0 \leq \tau \leq t_p$)

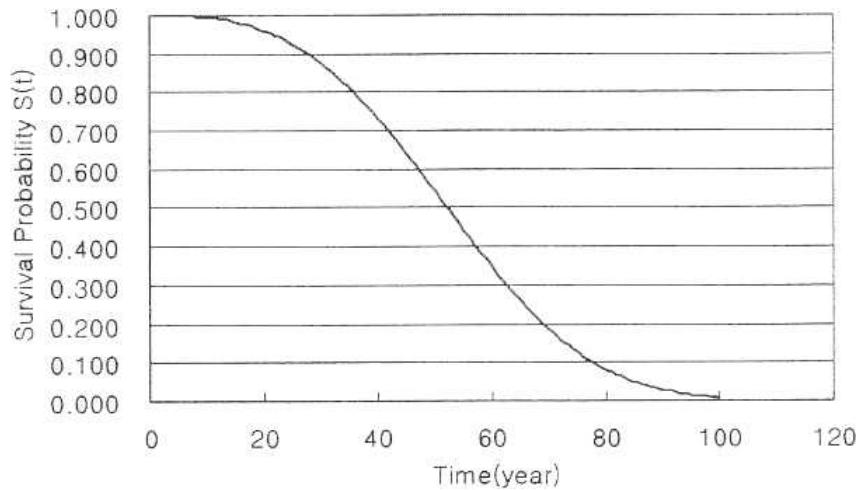
[표. 6-9] 각 구성요소에 대한 관리

레벨	유지보수	요소	구분	간격	단가 (천원)	α	이벤트
보강	둑 높임	제방	안전	47	403	0.6	E_DC_F
				47	403	0.6	E_US_RH
			기능	47	403	0.6	E_DC_SC
				47	403	0.6	E_US_RP
				47	403	0.6	E_DS_SP
보수	그라우팅	제방	안전	35	1,920	SLC	E_DS_S
			기능	35	1,920	SLC	E_DS_S
교체	그라우팅	여수토	안전	36	375	RTTI	S_CC_SC
				36	375	RTTI	S_CC_DD
기능				36	375	RTTI	S_CC_DD
				36	375	RTTI	S_CC_DD
교체	게이트	여수토	안전	53	120,000	RTTI	E_DS_S
				53	120,000	RTTI	E_DS_S
기능				53	120,000	RTTI	E_DS_S
				53	120,000	RTTI	E_DS_S
보수	그라우팅	여수토	안전	24	137	SLC	S_CC_SC
				24	137	SLC	S_CC_DD
			기능	24	137	SLC	S_CC_DD
보수	그라우팅	여수토	안전	36	490	SLC	S_CC_DD
				36	490	SLC	S_CC_DD
교체	높임	옹벽	안전	38	375	RTTI	S_OC_DC
				38	375	RTTI	S_OC_DD
			기능	38	375	RTTI	S_OC_DD
보수	그라우팅	옹벽	안전	29	130	SLC	S_OC_DC
				29	130	SLC	S_OC_DD
			기능	29	130	SLC	S_OC_DD
교체	재건축	정수지	안전	38	375	RTTI	S_SB_DD
				38	375	RTTI	S_SB_DD
보수	라이닝	취수탑	안전	32	360	SLC	O_TS_DD
				32	360	SLC	O_TS_L
			기능	32	360	SLC	O_TS_DD
				32	360	SLC	O_TS_L
교체	재건축	취수 시설	안전	42	27,500	RTTI	O_OP_CD
				42	27,500	RTTI	O_TS_DD
				42	27,500	RTTI	O_TS_L
				42	27,500	RTTI	O_TS_GT
			기능	42	27,500	RTTI	O_OP_CD
				42	27,500	RTTI	O_TS_DD
				42	27,500	RTTI	O_TS_L
				42	27,500	RTTI	O_TS_GT
보강	강관	도관	안전	40	2,500	0.6	O_C_CD
				40	2,500	0.6	O_C_L
			기능	40	2,500	0.6	O_C_CD
				40	2,500	0.6	O_C_L
보강	준설	저수지	기능	39	2.8	Dredged volume	Storage

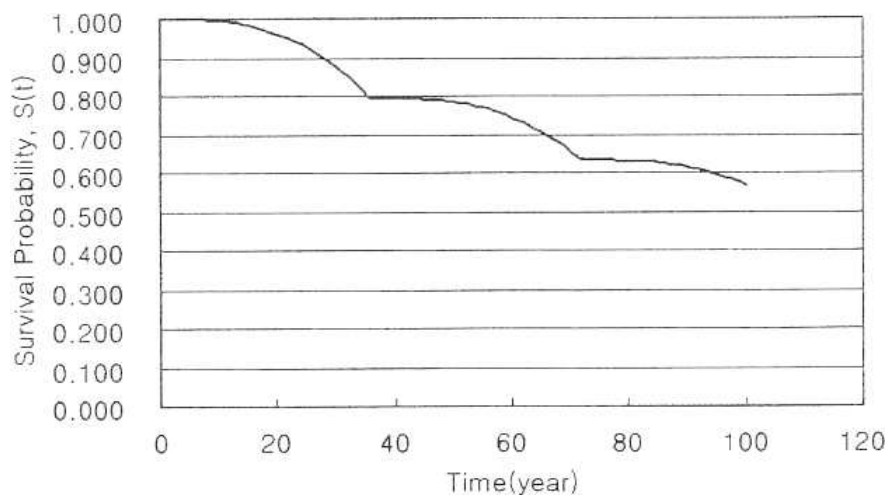
※SLC : Slope Change, RTTI : ReTurn To Initial value

가. 보수(repair)

유지보수는 유지보수 수준 중 가장 낮은 수준으로 보수의 경우 생존확률의 변화는 교체시점에서 요소의 생존확률 감소율을 감소시켜주는 함수(Slope Change, SLC)를 적용하였다. 이 함수는 Kececioglu가 제안한 식으로 신뢰성기반 유지관리 분야의 연구에서 주로 사용되는 함수이다. [그림 6-15]와 같은 생애분포를 갖는 요소의 유지보수를 보수수준으로 실시한다면 [그림 6-16]과 같이 목표내구연한 100년동안 2회 실시함으로써 시스템의 기능특성을 유지할 수 있음을 예시하였다.



[그림 6-15] 저수지의 생애분포



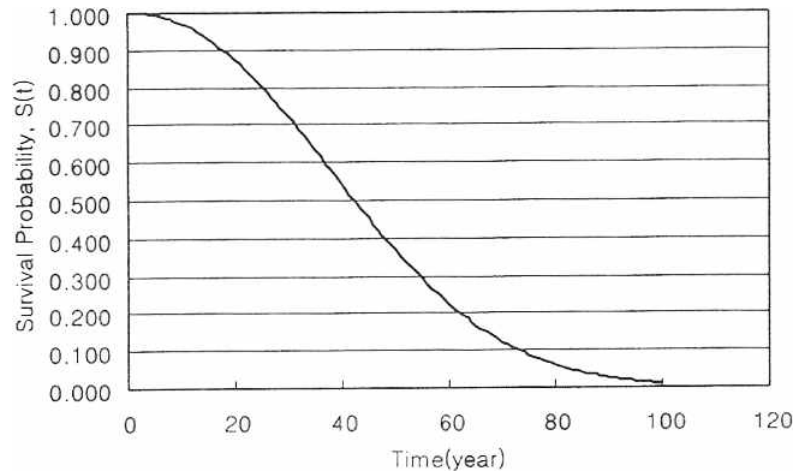
[그림 6-16] 보수를 적용한 저수지의 생애분포

나. 보강(rehabilitation)

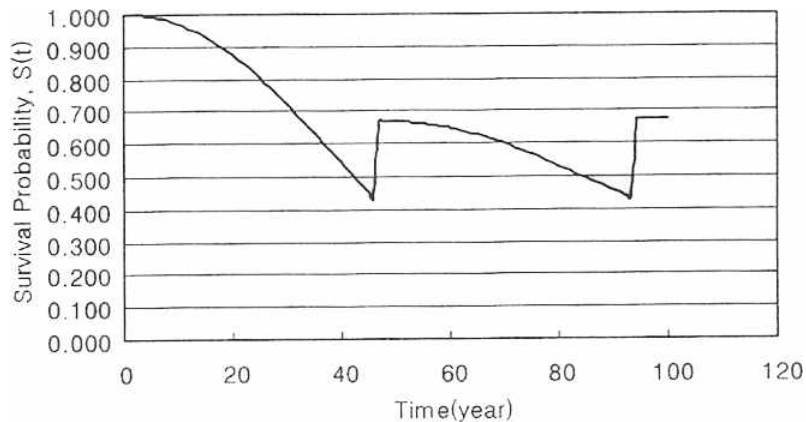
보강은 유지보수 수준 중 중간 단계 수준으로 추가 보강재를 덧대거나 일부를 교체하여 강성을 높여주는 유지보수 방법으로 요소의 생애함수에서는 첫 번째 보수시점의 생존확률에 일정 보강효과계수(α)를 곱한 값을 보수시점의 생존확률에 더하여 주는 방식으로 식(6.17)과 같이 표현된다. [그림 6-17]은 임의의 요소의 보강 전 생존함수이며 [그림 6-18]은 보강효과계수($\alpha=0.6$)을 적용하여 보강 후 생존확률의 변화를 나타낸 것이다.

$$S_{t_p}(t) = \alpha \cdot j \cdot S_t(t_p) + [S_t(t_p)]^j S_t(\tau) \quad (6.17)$$

where, α : Effect ratio of maintenance



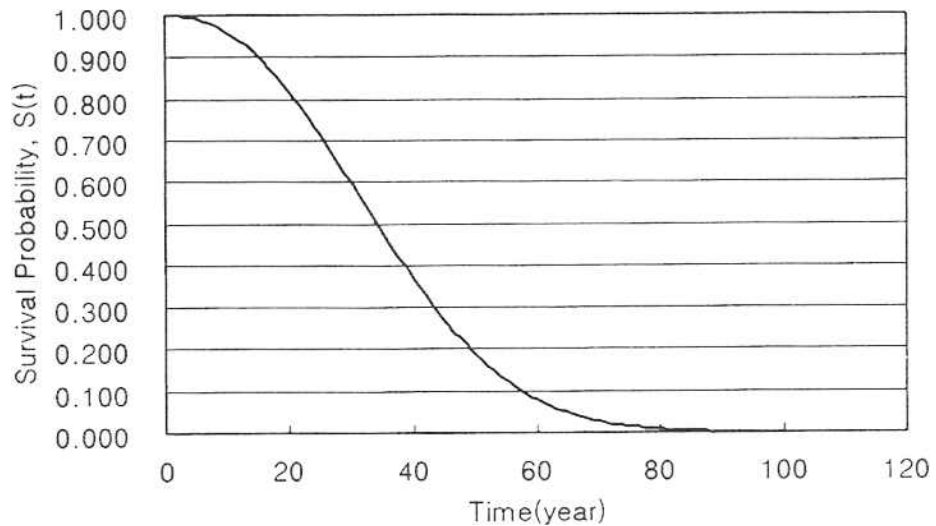
[그림 6-17] 저수지의 생애분포



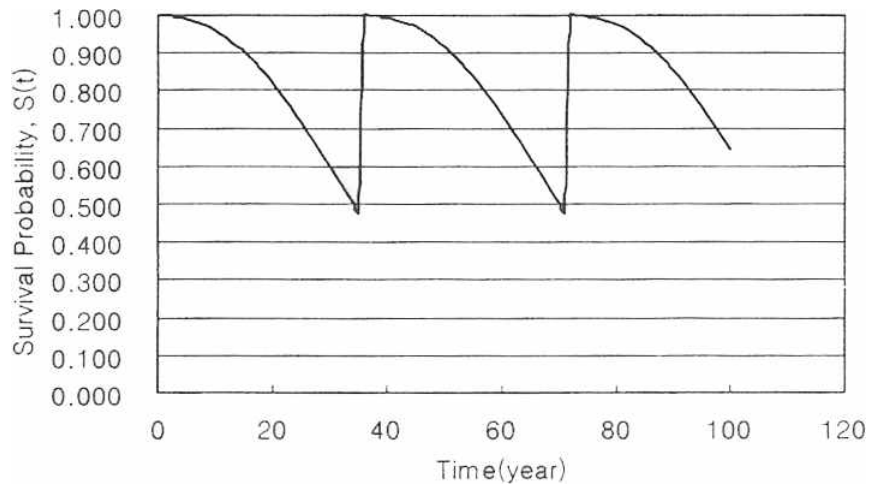
[그림 6-18] 보강을 적용한 저수지의 생애분포

다. 교체(reconstruction)

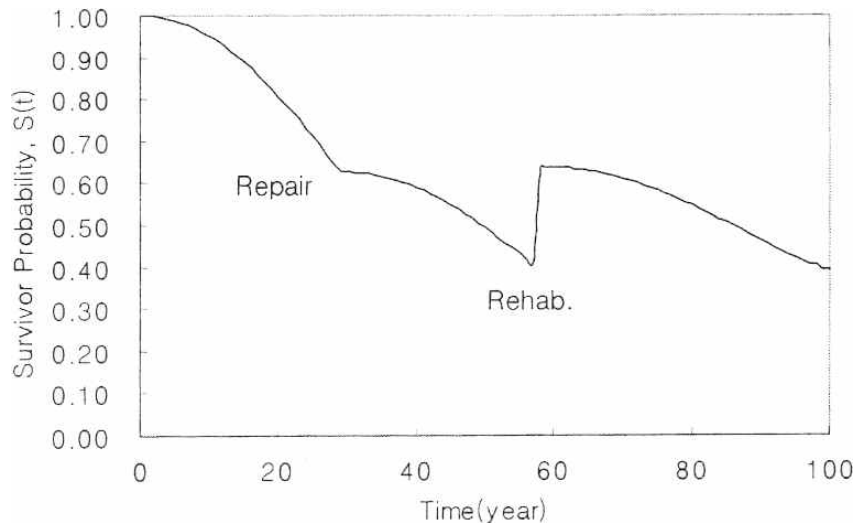
교체는 유지보수 수준 중 가장 높은 수준으로 요소를 교체할 경우 생존확률의 변화는 교체시점에서 요소의 탄생시점의 확률로 회복 (ReTurn To Initial value, RTTI)되는 개념의 함수로 정하였다. [그림 6-19]은 교체 유지보수 전의 생존확률을 나타내며, [그림 6-20]은 내용연한 동안 교체의 수준으로 시스템의 기능특성을 유지한 예를 보였다. [그림 6-21]은 보수와 보강을 통하여 생존확률 한계이상으로 시스템을 유지하면서 최소의 비용이 발생하도록 하는 최적 유지관리의 전략 예를 도시한 것이며, [그림 6-22]은 보수와 교체의 예를 보인 것이다.



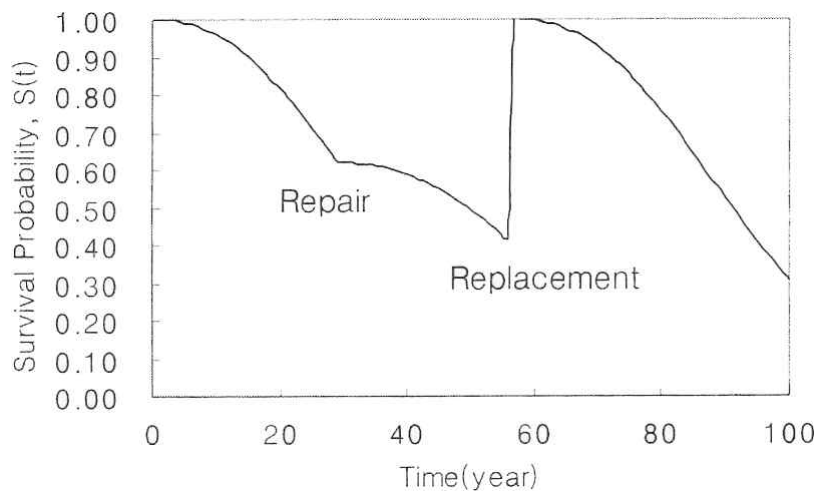
[그림 6-19] 저수지의 생애분포



[그림 6-20] 교체를 적용한 저수지의 생애분포



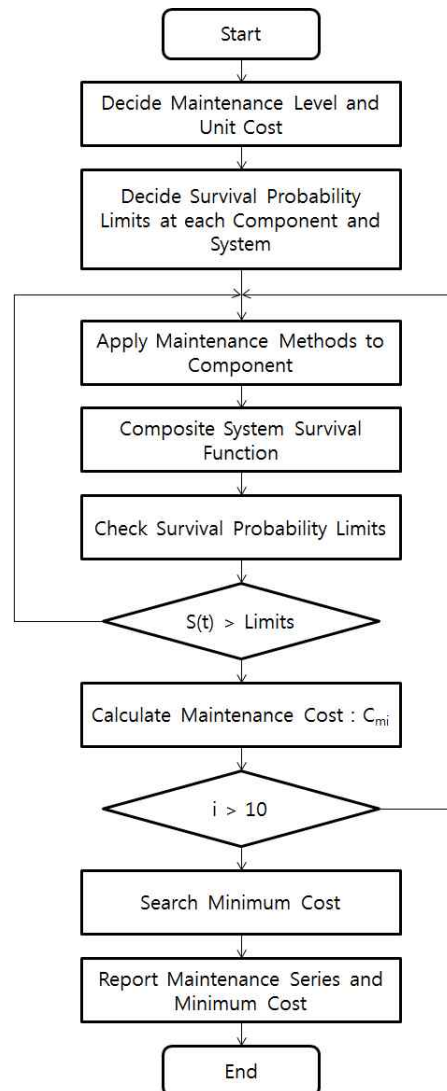
[그림 6-21] 보수와 보강을 적용한 저수지의 생애분포



[그림 6-22] 보수와 교체를 적용한 저수지의 생애분포

라. 최적유지관리

저수지의 생애주기비용함수를 보수, 보강, 교체를 기준으로 Kececioglu가 제시한 식을 이용하여 결정하였다. 최적의 유지관리를 위하여 먼저 기존의 유지관리이력자료를 분석하여 유지관리 수준, 단위비용을 요소단위로 결정 한 후 요소와 시스템의 생존확률한계를 결정한다. 요소와 시스템의 생존확률이 한계이하로 내려가지 않도록 최소의 비용으로 현행의 유지보수방법을 적용하여 시스템의 기능적 특성을 유지시키는 최적의 전략을 찾는 순으로 수행되며, 최적유지관리 알고리즘은 다음의 차트와 같다.



[그림 6-23] 최적유지관리 Flowchart

관련연구

Estimating regional productivity based on demographic structure with artificial neural network

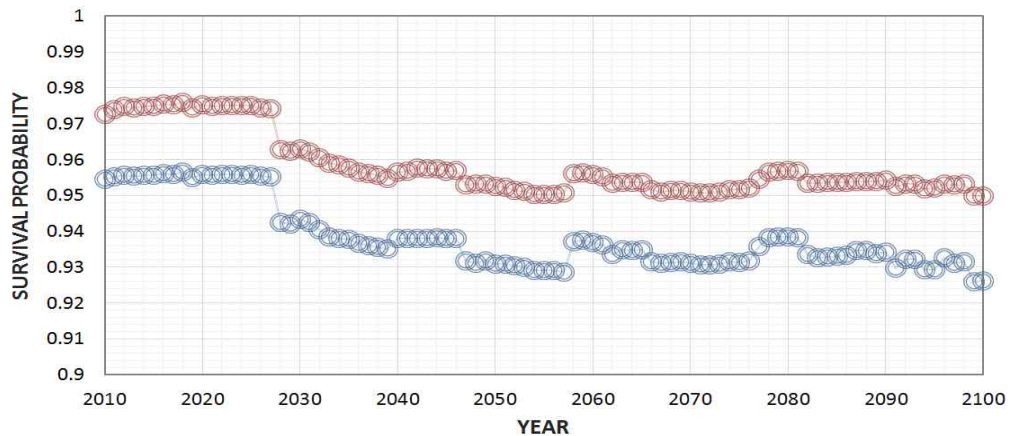
This paper explores the impact of the age structure on regional productivity with an estimation model based on artificial neural network (ANN) on the assumption that demographic change such as ageing and migration has a significant effect on the regional productivity, especially in rural regions. A multilayer perceptron ANN model was applied to consider the composition of demographic structure rather than ratio between two population groups such as aged-child ratio. Regional productivity was estimated by applying the estimation model developed in this research study to population and aggregate product data of sixteen South Korean cities and counties, from 2000 to 2011. Developed model is trained with data of sixteen cities and counties, from 2000 to 2009, and verified with observation data and estimation results of 2010 and 2011. The results revealed that gross regional domestic product (GRDP) per capita, which represents regional productivity, is significantly related to demographic structure and can be estimated by age-structure.

제 3 절 기후변화에 따른 통합안전성 및 생애주기비용

1. 기후변화에 따른 시설물 안전성 변화

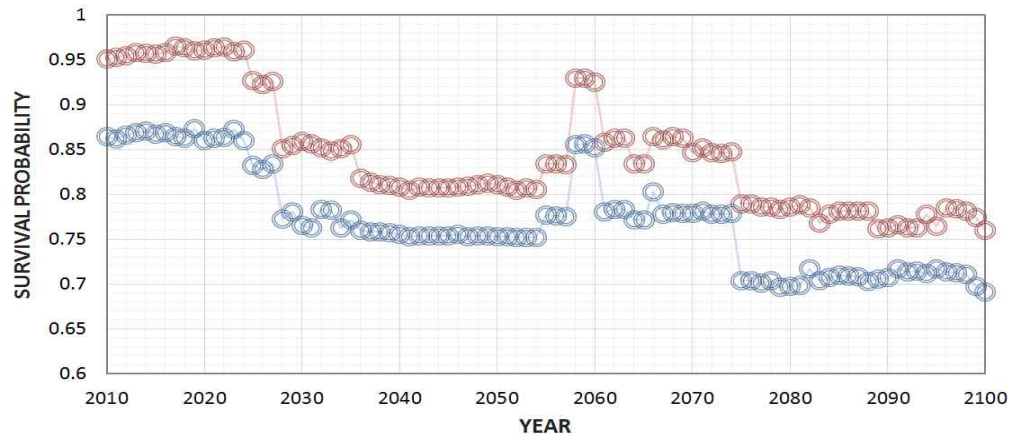
생존확률을 이용하여 기후변화를 고려한 저수지의 안전성 변화를 분석하였다. [그림 6-24]~[그림 6-28]은 저수지의 기간별 생존확률 변화를 보여주고 있다. 장성저수지를 제외하고는 전반적으로 시간이 지남에 따라 생존확률이 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 저수지별로 급격한 생존확률의 변화를 보이는 시점을 확인할 수 있다.

백운저수지의 생존확률은 2028년도에 급격하게 감소하는 것으로 나타나고 추후 소폭의 증가와 감소를 반복하면 전체적으로는 감소하는 경향을 보여주고 있다.



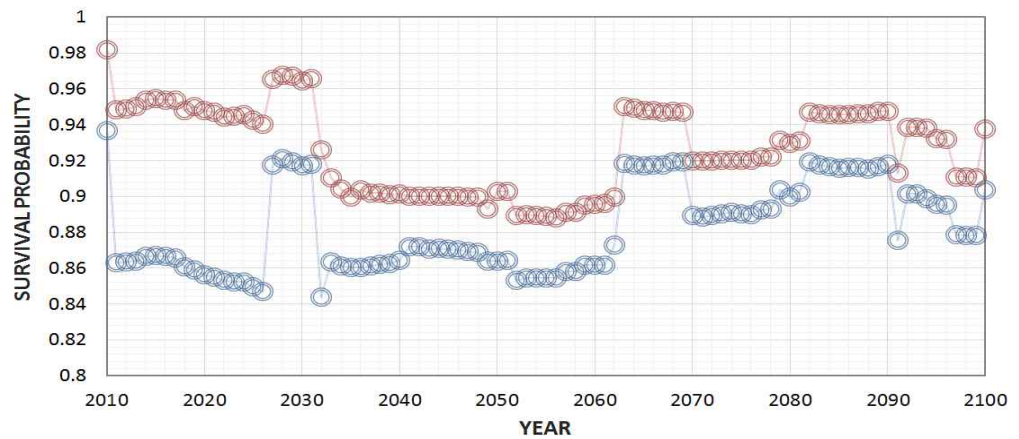
[그림 6-24] 백운저수지의 기간별 생존확률 변화

계룡저수지의 생존확률은 2025년과 2028년에 급격하게 감소하고, 2058~2060년에는 크게 증가하는 결과를 나타내고 있다. 이후 2074년에도 급격하게 감소한 후 일정한 값을 유지하는 결과를 보여주고 있다.



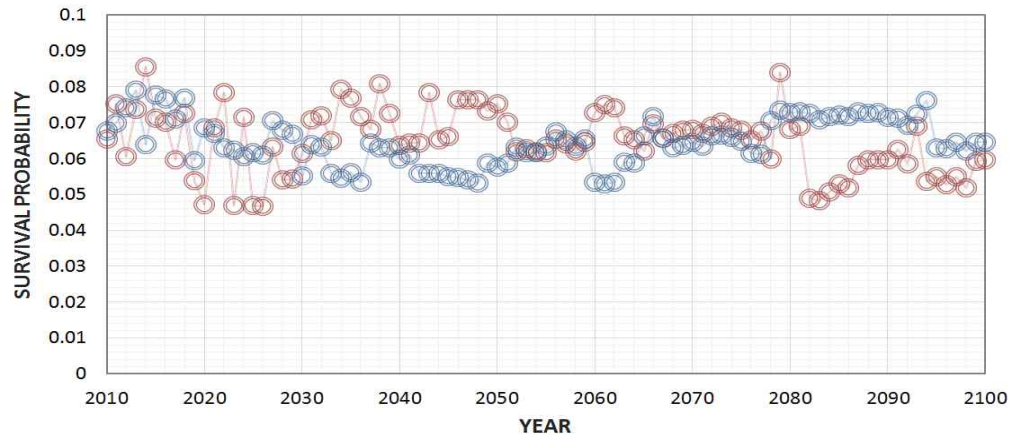
[그림 6-25] 계통저수지의 기간별 생존확률 변화

대성저수지의 생존확률은 증가와 감소를 반복하는 경향을 보여주고 있다. 2011년에 급격하게 감소한 뒤 전반적으로 감소하다가 2060년대 이후로는 전반적으로 증가하는 경향을 보여주고 있다.



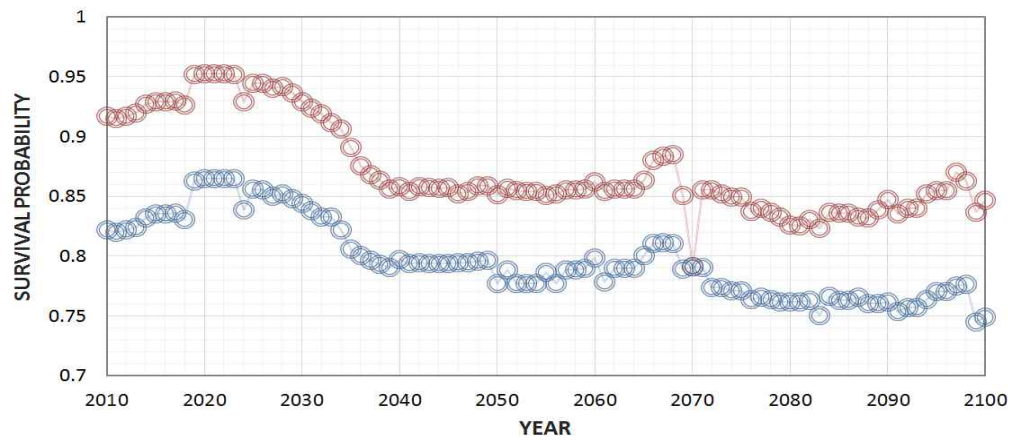
[그림 6-26] 대성저수지의 기간별 생존확률 변화

장성저수지의 생존확률은 전반적으로 매우 낮은 값을 유지하고 있으며 전반적으로 변동 폭이 큰 것으로 나타났다. 특히 가까운 미래 기간 (2010~2040) 동안의 변동 폭이 큰 것으로 나타나며 이후에도 일정한 경향을 보이지 않는 것으로 사료된다.



[그림 6-27] 장성저수지의 기간별 생존확률 변화

용당저수지의 생존확률은 가까운 미래 기간 (2010~2040) 동안에는 전반적으로 감소하면서 이후에 일정한 값을 유지하는 경향을 보여주고 있다. 오히려 2019년에 소폭 증가하는 결과를 나타내고 있다.



[그림 6-28] 용당저수지의 기간별 생존확률 변화

제 7 장 농업생산기반시설 통합안전성 관리시스템 (ISS)

제 1 절 통합시스템 개발을 위한 프레임워크

농업생산기반시설의 생애주기비용 산정을 위해서는 관리자, 설계자, 정책 입안자들에게 있어서 시설의 유지관리에 따른 사후적 평가와 사전적인 예측 방법론의 개발이 필요하다. 사후적 평가(Ex-post evaluation)는 어떤 결정이나 현상이 발생한 후에 이를 평가하는 방법으로 최근의 농업정책 평가 방법론으로 많이 이용되고 있다. 사전적인 평가(Ex-ante assessment)는 정책적인 결정 혹은 선택의 상황에서 선택조건에 따른 각각의 잠재적인 영향을 파악하고 모의(Simulation)하여 그 결과를 사전에 추정하는 방법이다. 이러한 두 가지 방법 중에서 사후적인 평가는 입력조건을 조사한 상태에서 그 결과를 분석하는 것으로 비교적 정확한 분석이 이루어 질 수 있는 반면에, 사전적 평가는 사회구조나 환경문제와 같이 복잡계 시스템(Complex System)에서 어떤 선택의 결과가 유발하는 잠재적인 영향을 사전에 파악하는 것으로 모델 및 모델링의 주요한 동기가 된다.³⁾

모델 혹은 모델링은 정량적인 시스템으로서 분석 대상이 되는 현실 세계의 일부를 의도적으로 단순화하여 나타낸 것을 의미한다. 아래 표는 모델링에 대한 정의 및 구분을 나타내고 있다.⁴⁾ 기존의 모델은 경제, 농업, 환경 등 각각의 분야에 대한 프로세스만을 단순화하여 모델링하였기 때문에 서로간의 복합적인 상호영향을 설명하는데 한계가 있다. 최근에 이러한 한계를 극복하기 위해 다양한 학문분야(multi-disciplinary)에 걸쳐 모델을 통합하고 상호간의 영향을 분석하여 전체적인 시스템을 평가(integrated assesment)하는 연구가 진행되고 있다. 이러한 통합시스템 구축은 서로 다른 배경의 학문분야에서 개발된 모델간 연동을 지원해야 하는데 대부분 시간적(temporal), 공간적(spatial) 스케일(scale)이 다른 모델간 연동을 어떻

3) Rob Knapen, Sander Janssen, et. al., 2013, "Evaluating OpenMI as a model integration platform across disciplines", Environmental Modelling & Software 39. 274-282

4) Gerard F. Laniak, Gabriel Olchin, et. al., 2013, "Integrated environmental modeling: A vision and roadmap for the future", Environmental Modelling & Software 39. 3-23

계 효과적으로 지원할 수 있는가에 많은 연구가 진행되고 있다.

[표 7-1] 통합시스템 구축을 위한 모델링 방법연구

Modeling Type	Description
Conventional Modeling	A process of creating a simplified representation of reality to understand it and potentially predict and control its future development. Models are generally single purpose (i.e., represent a single modeling discipline) and can come in a variety of forms and implementations, including mental, verbal, graphical, mathematical, logical, physical, etc.
Integrated Modeling	Integrating modeling includes a set of interdependent science-based components (models, data, and assessment methods) that together form the basis for constructing an appropriate modeling system.
Integrated Assessment	Integrated assesment seeks to provide relevant information within a decision making context that brings together a broader set of areas, methods, styles of study, or degrees of certainty, than would typically characterize a study of the same issue within the bounds of a single research discipline
Integrated Assessment Modeling	Integrated assessment modeling is an analytical approach that brings together knowledge from a variety of disciplinary sources to describe the cause effect relationships by studying the relevant interactions and cross-linkages
Integrated Decision Making	Integrated decision making is an approach for evaluating complex problems holistically by integrating resources and analyses to address the problems as they occur in the real-world; including input from appropriate stakeholder.
Participatory Modeling	Participatory modeling is a generic term used for modeling strategies that rely upon stakeholder involvement and participation in various forms. In various applications also known as group model building, mediated modeling, companion modeling, shared vision planning, participatory simulation, etc.

효과적인 모델간 연동을 지원하기 위해서는 의미론적 통합(semantic integration), 방법론적 통합(methodological integration), 기술적 통합

(technical integration)이 뒷받침 되어야 한다.⁵⁾

- 의미론적 통합: 통합의 대상이 되는 각 분야의 모델과 모델러간의 공통된 언어와 공통된 문제의식, 공통된 기술언어(UML, Flow-Chart 등)를 구축하는 것을 의미한다.
- 방법론적 통합: 모델과 모델간의 연동을 위해서 하나의 모델에서 추출된 결과가 다음 모델에서 이용될 수 있는 형태로 변형하는 과정을 정의하는 것으로, 대부분 시간차원과 공간차원에 대한 데이터의 통합이 요구된다.
- 기술적 통합: 통합모델을 운용하는데 있어서 사람의 개입 없이 모델간 데이터의 연동 및 교환이 이루어지도록 하는 부분으로 시뮬레이션 툴 개발 및 피드백 구조의 정의가 여기에 해당 된다.

모델링 프레임워크(Modeling Framework)는 모델간 연동에 있어서 방법론적 통합과 기술적 통합의 효과적으로 지원할 수 있는 구조를 제공한다. 아래 표는 최근의 모델링 프레임워크에 대한 종류 및 장·단점을 비교한 것이다. Complexity는 해당 프레임워크에 대상 모델을 적용하기 위해 모델이 지원해야 하는 구속조건을 나타내는 것이다. Standard functionality은 프레임워크 자체에서 모델의 통합, 계산, 분석, 그래픽환경 등의 지원여부를 판별하는 것이다. Impact on model은 프레임워크와 모델간의 통합을 위한 코드 수정 정도를 나타낸다. Open development는 소스의 공개여부, 프레임워크의 라이선스 상태에 대한 것을 나타낸다. Technical/semantic은 프레임워크의 제공 기능이 기술적인 통합을 제공하는 것인지 아니면 추상적인 개념에서 의미론적 통합까지 포함하는지에 대한 것이다. 이상의 프레임워크 각 요소에 대한 평가를 검토해 볼 때, TIME 및 Object Modelling System이 가장 좋은 프레임워크 구성을 보이고 있지만, TIME은 공개프로그램 형태가 아니므로 프레임워크에서 제공하지 않는 기능에 대한 확장성이 부족하고, Object Modelling System은 공간 및 시간차원에서 데이터의

5) G. Schopfer, A Yang, et. al., 2004, "CHEOPS: A tool-integration platform for chemical process modelling and simulation", Int J Softw Tools Technol Transfer 6. 186-202.

연동 기능이 명확하지 않아 학제 간 통합모델을 구성하는데 어려움이 있다. 본 연구에서는 이러한 기능 비교를 통해 OpenMI를 기본 프레임워크로 선정하였다.

[표 7-2] 모델링 프레임워크의 특성 비교 (Rob Knapen, 2013)

Framework	Complexity	Standard functionality	Impact on model	Open development	Technical /Semantic
Object Modelling System	Low	High	Low	Yes	Technical
TIME	Low	High	Low	No	Technical
OpenMI	Medium	Low	Medium	Yes	Technical
Common Modelling Protocol	Medium	Low	High	Partly	Technical
MODCOM	Medium	High	High	Partly	Technical
FRAMES	High	High	Very High	No	Technical / Semantic
Kepler	High	High	High	Yes	Technical / Semantic

농촌용수 물순환 종합해석을 위해서는 관련된 다양한 모델의 통합을 지원하는 프레임워크로서 다음 조건을 만족해야 한다.

- 수리모형, 수문모형, 생태모형, 시설물관리, 보수/보강 기법의 선정, 경제성 검토, 사업성 검토 등 다양한 모델의 통합을 지원해야 한다.
- 모델간 서로 다른 차원의 데이터 이용을 지원하기 위해 데이터 차원 변형 기능을 지원해야 한다.
- 모델간 서로 다른 시간에 대한 데이터를 처리할 수 있는 기능을 제공해야 한다.
- 모델간 서로 다른 스케일(시설의 형태, 공사형태 등) 사용에 따른 데이터의 변환 기능을 지원해야 한다.
- 데이터베이스, 파일, API, SOAP 등 다양한 외부 인터페이스를 지원해야 한다.
- 기존 모델을 프레임워크에 반영하기 위해 새로 개발하거나 많은 소스 수정 없이 다른 모델과의 연결을 지원할 수 있어야 한다.

- 다양한 OS 상에서 운영될 수 있어야 한다.
- 다양한 언어로 구현할 수 있어야 하며, 기존 모델을 통합할 경우 기존 모델간의 언어(Program Language)가 동일하지 않아도 통합할 수 있어야 한다.
- 관리자의 개입 없이 시뮬레이션 구성이 가능해야 하고, 각각의 프로세스에 대한 모니터링이 지원되어야 한다.

OpenMI(Open Modeling Interface, <http://www.openmi.org>)는 2002년 통합수문유역관리(Integrated hydrological catchments management) 시스템 개발에 필요한 요구조건을 만족하는 프레임워크를 구축하기 위해 개발되었다. OpenMI는 필요한 기능을 인터페이스(Interface)를 정의하는 형태로 구성되어 있으며, OpenMI 그룹에서 이에 대한 표준 인터페이스 플랫폼을 지원하고 있다. OpenMI는 기존의 모델을 통합하는데 있어서 기존 모델을 수정하지 않고 입력 조건 및 결과를 Wrapper로 처리하여 하나의 모델에서 출력된 결과를 다른 모델에서 이용될 수 있는 형태로 변환하도록 하여 모델간 통합을 지원하고 있다.

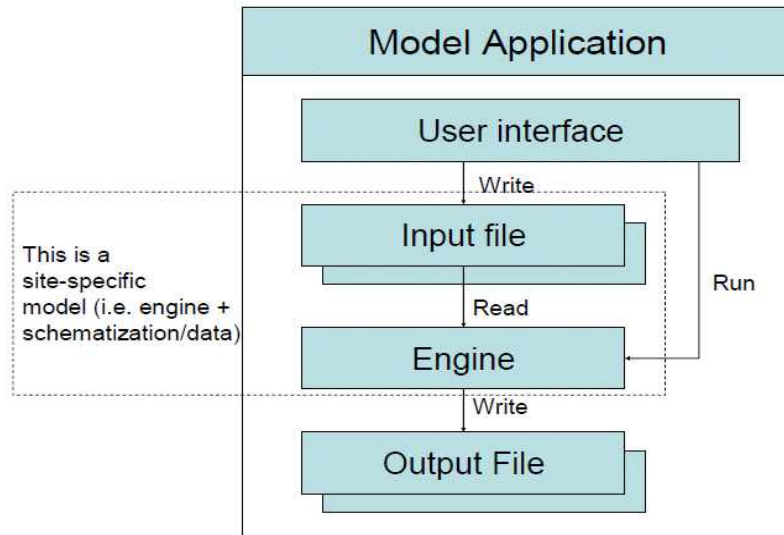
본 연구에서는 공사비의 산정 및 경제성 검토, 유지관리에 따른 의사결정 지원시스템 개발을 위해 OpenMI 프레임워크를 적용하였다.

1. OpenMI 프레임워크의 아키텍처

OpenMI 프레임워크는 가장 먼저 수문분석에서 이용되었는데 개발언어가 다르고 서로간의 입력변수가 상이하며, 운영체계가 서로 다른 3개의 모델 즉, 강우모델, 유역모델, 하천모델을 OpenMI에서 제공하는 Wrapper Interface를 통해 서로 연동하고 시뮬레이션 할 수 있도록 설계되었다.

OpenMI v1.4 는기본적으로 “Request & Reply” 형태의 모델간 통합을 지원한다. 사용자(관리자)는 해당 모델을 구동하기 위해 필요한 입력자료를 Wrapper를 통해 구성하고, 이 결과를 이용하여 대상 모델을 구동한다. 모델의 동작 결과 출력되는 결과파일 혹은 스트림을 다시 Wrapper에 입력하여 다음 모델에서 필요한 형태로 가공한다. 이러한 OpenMI 구조는 응용프로그램, 엔진, 모델, 엔진 컴포넌트가 완전히 분리된 상태에서 개발하고 통

합할 수 있으므로 모델의 재사용성을 높일 수 있고 응용프로그램의 확장성을 크게 향상시킬 수 있다. [표-7-3]은 OpenMI에서 정의하고 있는 다양한 인터페이스를 나타낸다.



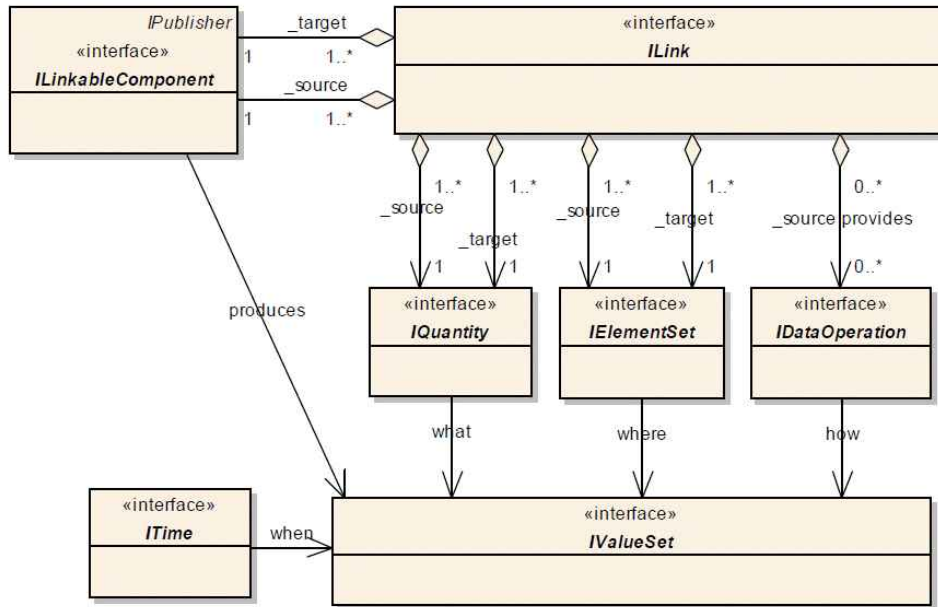
[그림 7-1] OpenMI 프레임워크에서 모델의 적용 방법

[표 7-3] OpenMI 프레임워크의 인터페이스

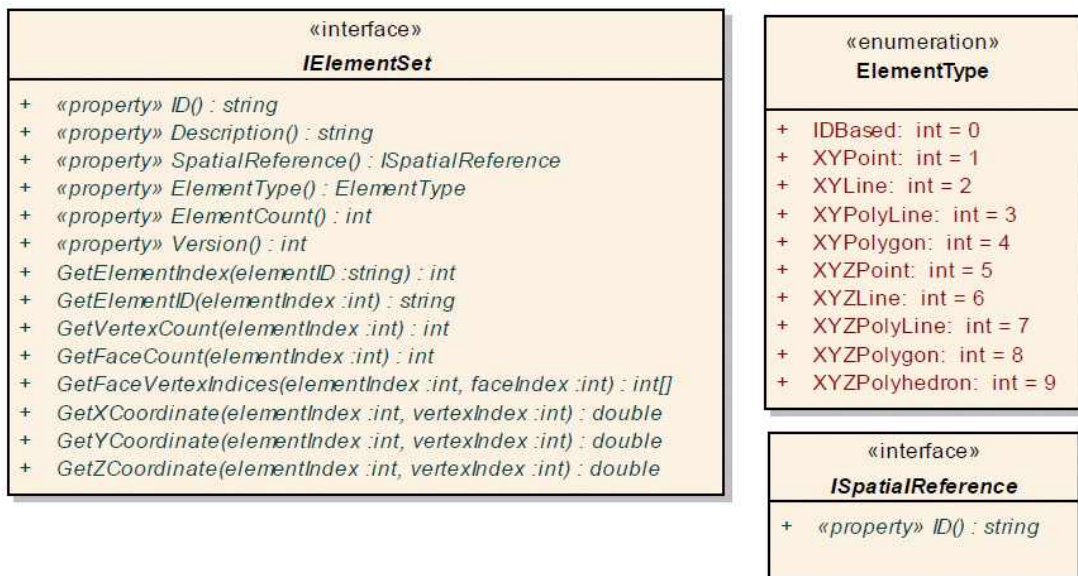
LinkableComponent	standard interface for engine components that OpenMI-compliant engine components must implement.
Link	holds reference to the two linked components, contains information about what is requested, where the requested values apply and how the requested data should be calculated.
Quantity	defines what should be retrieved, represented as a text string.
ElementSet	defines where the retrieved values must be used.
ExchangeItem	each exchange item contains a Quantity and an ElementSet describing what can be accepted / provided at which location.
GetValues	one LinkableComponent invokes the GetValues method of another LinkableComponent, the source LinkableComponent must return the values for the specified quantity, at the specified time stamp or time span and at the specified location.

2. 데이터의 정의

모델 간 데이터의 교환을 위해서 각각의 모델에서 이용되는 입력/출력 자료에 대한 정의가 필요하다. 이러한 정의는 공간자료(Where), 시간자료(When), 대상자료(What), 집합자료(Set), 연산자료(How)로 구성된다.

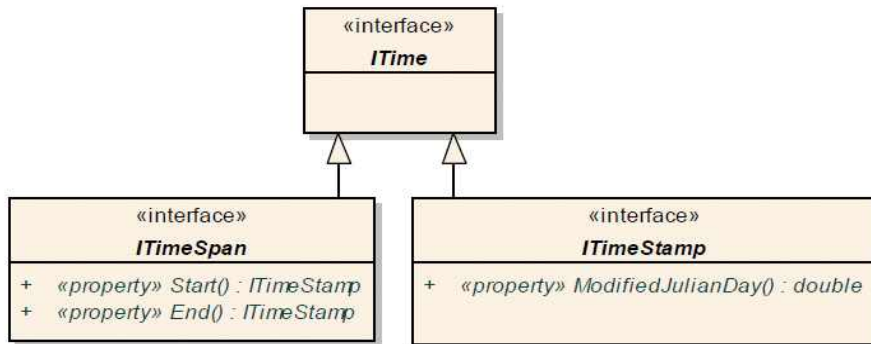


[그림 7-2] 데이터 정의 인터페이스



[그림 7-3] 공간자료 구성 (IElementSet interface)

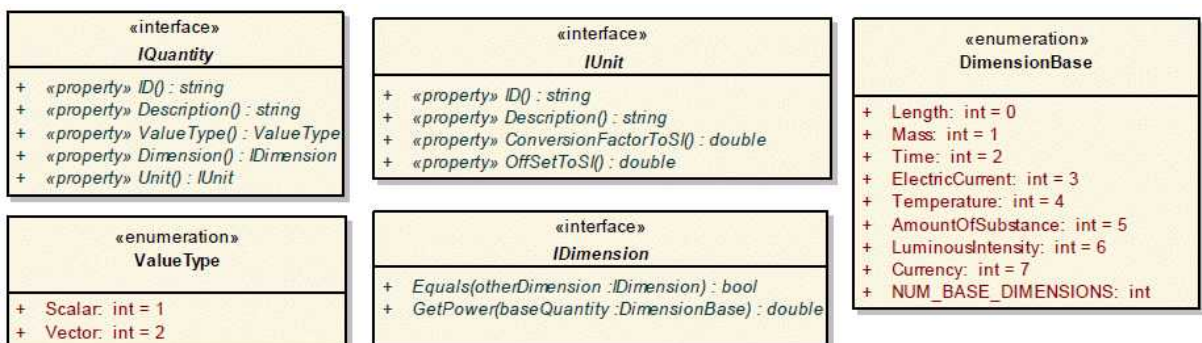
OpenMI에서 “IElementSet” 인터페이스는 공간자료에 대해 정의한다. 공간자료는 대상의 자료가 공간적으로 어떻게 구성되어 있는지를 나타내며, 1/2/3차원 형식으로 기술된다. ElementType은 총 10개의 형식으로 구분되며, Radial-Edge 데이터구조를 채용하고 있다.



[그림 7-4] 시간자료 구성 (ITime interface)

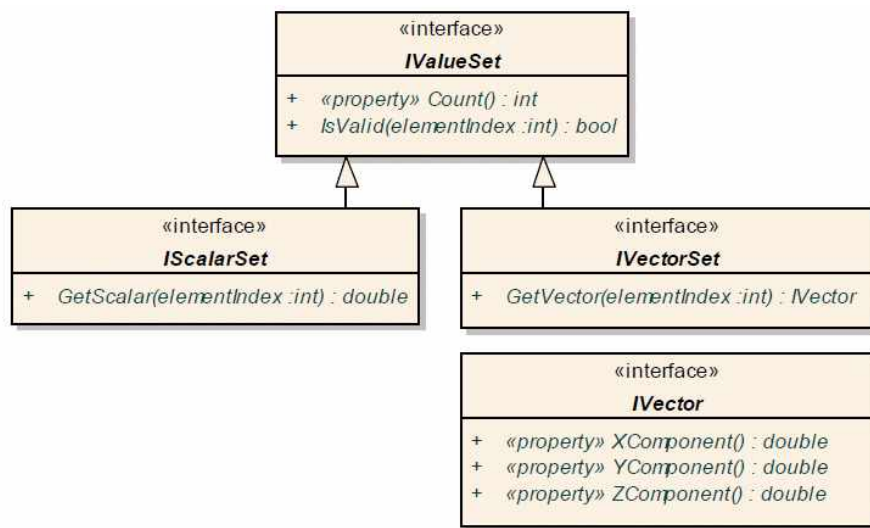
“ITime”은 시간자료에 대한 내용을 정의한다. ITime은 다시 ITimeSpan과 ITimeStamp로 구분되는데, ITimeSpan은 시작시간과 종료시간을 갖는 Period 개념을 포함하며, ITimeStamp는 특정 시간을 나타내는데 이용된다.

“IQuantity”는 대상자료를 나타내는 것으로 모델링 대상이 되는 목적물에 대한 정보를 포함한다. 이러한 대상자료에는 수문모델에서 수위자료, 지하수위 자료, 저수지 수위자료 등이 될 수 있다. 대상자료는 크게 대상물을 정의하는 문자열과 단위를 나타내는 속성, 값의 형태(스칼라, 벡터)를 나타내는 속성, 차원을 나타내는 속성, 단위를 나타내는 속성값으로 구성된다.



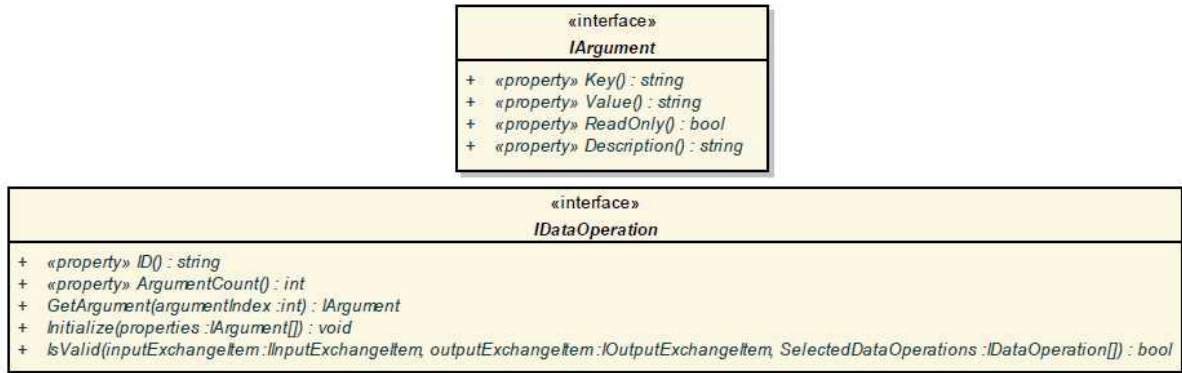
[그림 7-5] 대상자료 구성 (IQuantity interface)

“IValueSet” 인터페이스는 이상의 시간, 공간, 대상 자료를 저장하기 위해 사용된다. 즉, 하나의 포인트로 구성된 자료라면 IValueSet에는 하나의 자료로 이루어진 집합(Set)으로 저장되고, 메쉬 형태로 구성된 자료라면 메쉬를 구성하는 포인트 좌표로 구성된 자료집합이 저장된다. 이러한 집합은 스칼라 형식이 저장되는 IScalarSet, 벡터 형식이 저장되는 IVectorSet으로 구분된다.



[그림 7-6] 집합자료 구성 (IValueSet interface)

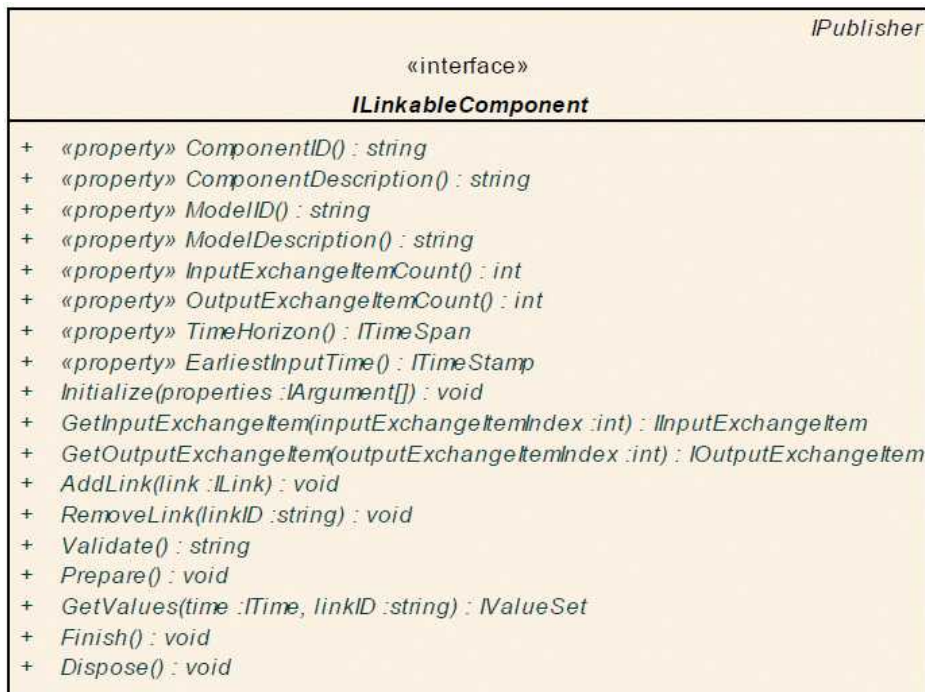
“IDataOperation”은 데이터의 처리에 있어서 연산방법을 정의한다. 즉, 특정 시간동안 저수지 수위의 변화를 분석하는데 있어서 최고수위를 결정하는 연산이 있다면 연산방법은 MAX() 함수가 호출되고, 평균 저수위를 결정할 때에는 AVERAGE() 연산이 이용된다.



[그림 7-7] 연산자료 구성 (IDataOperation interface)

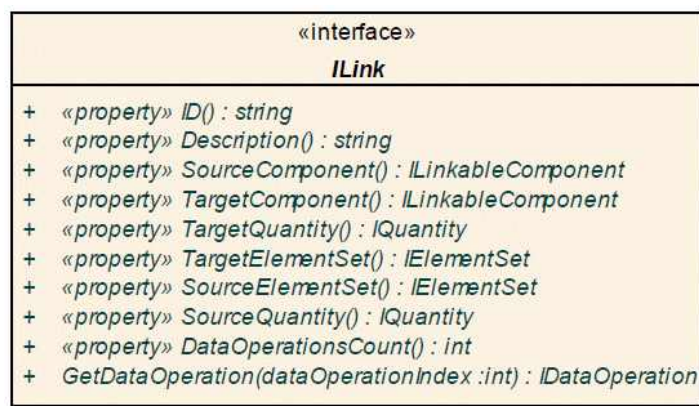
3. 데이터의 교환

기본적으로 모델은 데이터를 제공하거나 받아들일 수 있는 객체로 표현될 수 있다. 대부분의 모델은 입력 파일을 읽고 출력 파일을 작성하는 형태로 제공되지만, 런타임시에 데이터를 argument 형식으로 전달받거나 전달하는 경우가 있다. 이러한 경우 모델의 엔진 부분은 OpenMI와의 호환을 위해 LinkableComponent 인터페이스를 구현해야 한다.



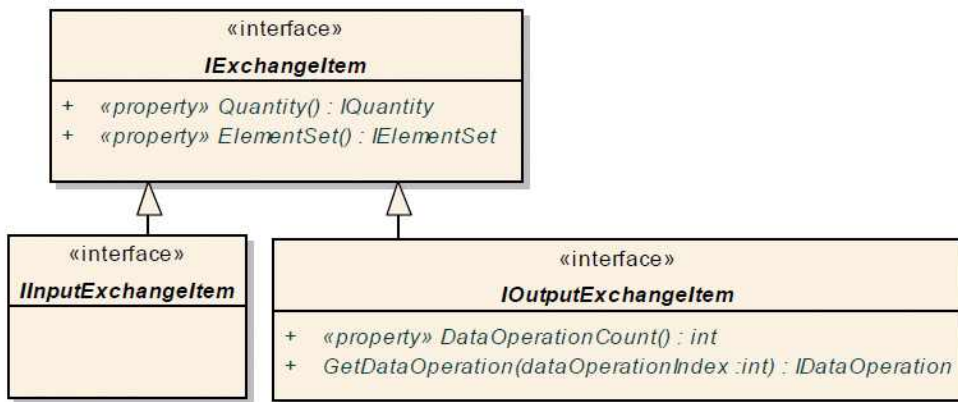
[그림 7-8] ILinkableComponent 인터페이스

두 모델이 앞에서 정의한 ILinkableComponent를 상속하고 있다면 두 모델 사이에서는 GetValues() 메소드를 호출하여 기본적인 데이터 전송이 이루어질 수 있다. 하지만, 이에 앞서 두 모델의 교환 데이터에 대한 확실한 정의, 예를 들어 데이터 타입, 단위, 시간단위 등이 동일한 경우에 문제가 없게 된다. 따라서 데이터의 전송이 이루어지기 전에 두 모델의 데이터 정합성을 확인할 필요가 있는데 이때 ILink 인터페이스를 이용한다.



[그림 7-9] ILink interface

두 모델이 ILinkableComponent를 상속하고 ILink 인터페이스를 통해 정합성이 확인되면 서로간의 데이터 교환을 할 수 있는데, 일반적으로 데이터 교환은 하나의 엔터티(객체)로 존재하기 보다는 여러개의 객체 집합으로 존재하게 된다. 따라서 이에 대한 객체의 관리가 필요한데 이때 IExchangeItem 인터페이스를 사용한다.

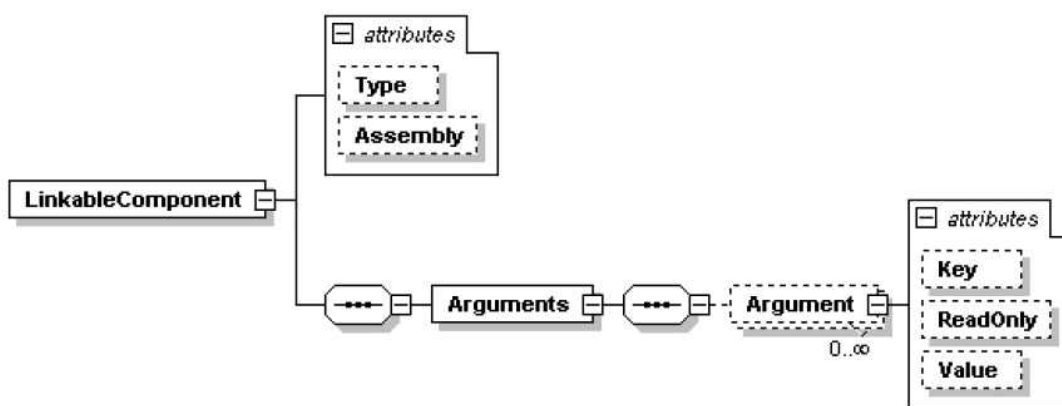


[그림 7-10] IExchange 인터페이스

4. 레거시 모델의 통합

실제 레거시 모델(Legacy Model)의 통합을 통해 응용프로그램을 구축하기 위해서는 다음과 같은 절차를 통해 이루어진다.

- ① OMI-파일 구성 : 대상 모델이 OpenMI에서 관리하고 접근할 수 있는 형태로 변환하기 위해 대상이 되는 모든 모델은 각각의 OMI-파일을 구성해야 한다. 이러한 OMI-파일은 모델의 속성과 입력/출력 파일에 대한 속성값이 정의되어 있다.

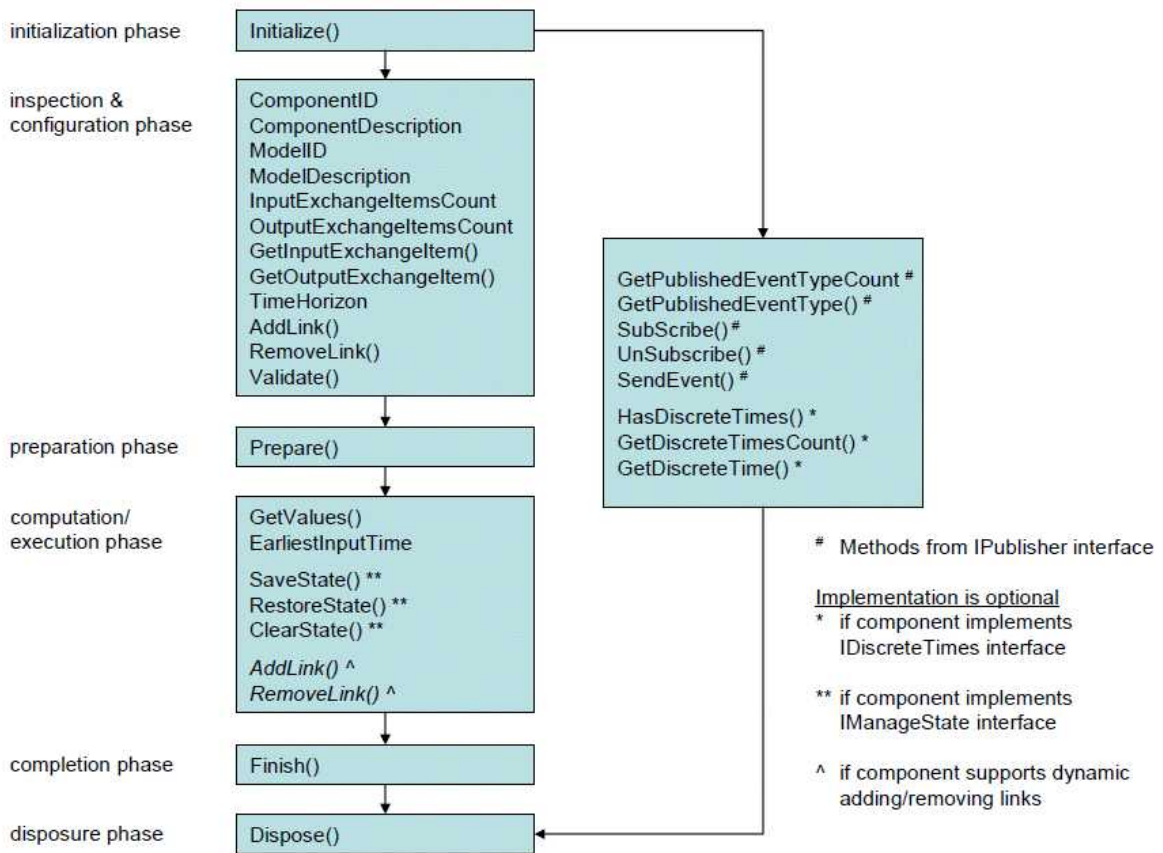


[그림 7-11] OMI-file structure

[표 7-4] OMI-file 내용의 예시

```
<?xml version="1.0"?>
<LinkableComponent Type="w1Delft.OpenMI.WLLinkableComponent"
Assembly="w1Delft.OpenMI, Version=1.0.0.0,
Culture=neutral, PublicKeyToken=8384b9b46466c568"
xmlns="http://www.openmi.org/LinkableComponent.xsd">
  <Arguments>
    <Argument Key="Model" ReadOnly="true" Value="RR" />
    <Argument Key="Schematization" ReadOnly="true"
      Value="D:\RainRRCF\ Model\Cmtwork\sobek_3b.fnm" />
  </Arguments>
</LinkableComponent>
```

- ② 모델 초기화 : 대상이 되는 모델이 ILinkableComponent를 상속한지를 확인하고 이를 초기화 한다. 초기화 방법은 대상 모델의 OMI-파일을 읽어 런-타임상의 메모리에 객체를 생성한다.
- ③ 모델의 구성 : 데이터 전달을 위해 먼저 InputExchangeItem과 OutputExchangeItem을 생성한뒤, 모델간 링크를 구성한다. 구성된 링크의 유효성을 체크하고 에러 발생시 이를 상위 프로세스에게 통보한다.
- ④ 모델은 동작하기 위한 다양한 기능 예를 들어 데이터베이스를 연동하거나 파일을 오픈하는 등의 필요한 기능을 수행한다.
- ⑤ 링크에 의해 정해진 흐름대로 모델을 수행하고 데이터를 전달한다. 이러한 모든 수행단계를 IManageState 인터페이스를 통해 모니터링 된다.
- ⑥ 작업을 종료하고 기존 메모리상에 남아 있던 값을 삭제하고 버퍼를 초기화 한다.



[그림 7-12] OpenMI LinkableComponent를 이용한 모델 구성의 예시

관련연구

요소 독립성이 유지되는 반복해법에 의한 객체지향 유한요소모델 개발

Application of the Object-oriented Programming (OOP) method to the Finite Element Model (FEM) program has various strengths including the features of encapsulation, polymorphism and inheritance. However, this technique should be based upon a premise that the independency of the object method and data to be used is guaranteed. By attempting to apply the OOP to the FEM, existing researches go against the independency of the OOP which is an essential feature of the method. The reason is this: existing researches apply the OOP to modules in accordance with analysis procedures, although the data to be used is classified as an element unit in the FEM. Therefore, the required independency cannot be maintained as whole stiffness matrices and boundary conditions are combined together. Also, solutions are sought from analysis module after data is regrouped at the pre-processor, and their results are analyzed during the post-processor. As this is similar to a batch processing, it cannot use data at analysis, and recalculation should be done from the beginning if any condition is changed after the analysis is complete, which are limitations of the existing researches. This research implemented the Object-orientation of elements so that the three features of the OOP (i.e. encapsulation, polymorphism and inheritance) can be guaranteed and their independency maintained as a result. For this purpose, a model called 'Object-oriented Finite element Model ensuring the Independency of Elements (OFMIE)', which enables the analysis of targets through mutual data exchanges within instance, was developed. In conclusion, the required independency was achieved in the instance of the objected elements and the analysis results of previous conditions could be used for the analysis after changes. The number of repetitive calculations was reduced by 75 per cent through this gradual analysis processes.

참고문헌:

이한귀, 김태곤, 이정재, (2012), "요소 독립성이 유지되는 반복해법에 의한 객체지향 유한요소모델 개발.", 한국농공학회논문집, 54(2): 115-125.

제 2 절 농업생산기반시설물 노후화 시뮬레이션

농업생산기반시설 중 저수지 및 용수로, 배수갑문 등은 구조물의 사용성 및 안정성에 문제가 있을 경우 후속되는 피해가 크므로 시설물의 안정성에 영향을 줄 수 있는 열화현상에 대해 관리되어야 하고, 이에 대한 보수·보강 방법에 대해 신중하게 결정해야 한다. 외부 대기 및 배수갑문과 같이 해양환경에 노출된 콘크리트 구조물에 발생하는 열화현상은 염해, 동해, 중성화, 황산염해 등으로 대별되는데, 구조물의 열화 메커니즘을 규명하고 사용연한에 따른 열화정도 및 생애주기비용을 고려한 적정 유지보수 일정을 수립할 수 있어야 한다.

생애주기비용을 고려한 적정 보수시기에 관해서는 시설물의 사용성과 함께 시설의 경제성 검토가 수반되어야 한다. 경제성 검토를 위해서 시설물의 수명기간인 생애주기 즉, Life Cycle 동안 발생할 수 있는 모든 비용으로 나타나는 생애주기비용을 산출하여 시설 설치로 인한 편익과 비교한다. 생애주기비용은 적용하는 분야별로 시스템획득과 운용 및 지원 단계로 구분하여 비용을 산출하거나 기획, 설계, 시공, 및 폐기 과정으로 구분하는 등 구체적인 방법론에서는 서로 차이가 있지만 개념에서는 차이가 없다.

본 연구에서는 농업생산기반시설의 노후화 특히 콘크리트 구조물의 열화현상에 대해 사용성 및 안정성을 예측할 수 있는 노후화 시뮬레이션 모형을 개발하고, 이를 바탕으로 보수보강 기법에 따른 생애주기비용 산정모형을 개발하고자 한다. 이를 바탕으로 관리자가 보수보강에 대한 적절한 계획을 수립하고 시행할 수 있는 의사결정지원시스템을 개발을 목표로 하고 있다.

1. 철근콘크리트 구조물의 노후화 특징

저수지 여수토 및 간척지의 배수갑문은 동결융해, 중성화, 염해 등의 악조건에 노출되어 있다. 이러한 시설물은 노후화 등으로 인해 이상이 발생할 경우 막대한 인명, 환경, 재산 피해를 발생시키므로 안전성 확보가 매우 중요하다. 그러나 이러한 시설물에 대한 보수보강 및 유지관리는 막대한 자원 및 재원을 필요로하기 때문에 적정의 유지관리 계획을 수립하고 실행

할 필요가 있다. 따라서 이들 시설물이 목표수명기간 동안 내구성을 확보할 수 있도록 설계초기부터 유지관리에 이르기까지 전 기간에 대한 효율적 계획수립이 필요하다.

이와 같은 요구를 충족시키기 위해서 열화 조건에서 시간에 따른 철근위치의 염화물 이온량을 예측하는 Life-365 등의 프로그램이 개발된 바 있다 (Ehlen 2009). 이 프로그램은 콘크리트의 배합비 등을 고려하여 물성치를 수정할 수 있으며, 철근의 위치와 단면의 형상을 입력하여 여러 가지 대안 비교분석을 할 수 있도록 설계되었다. 그러나 이들 프로그램은 단순 염해만을 고려하고 있어 동결융해나 중성화는 고려하지 못하는 한계가 있으며, 대부분 단순 1차원 해석에 그치고 있어 프로그램에서 제공하는 사각형 혹은 원과 같은 결정된 단면에 대해서만 해석을 할 수 있었다.

따라서 본 연구에서는 기존의 연구와 같은 단독염해조건 이외에도, 동결융해나 중성화에 의한 복합열화 조건에서도 염화물 이온량을 예측할 수 있는 모델을 만들고자 한다. 또한 설계자 혹은 관리자에게 실질적인 도움을 주기 위해 보수나 복구 등의 시공을 할 때 이들 효과에 대한 예측결과도 제공할 수 있도록 하였으며, 2차원 유한차분해석을 함으로써 단면의 형상을 자유롭게 설정하고 이들 형상을 고려하여 계산할 수 있도록 하였다.

철근콘크리트 구조물의 복합열화에 의한 노후도를 평가하기 위해 염화이온침투, 동결융해, 중성화와 같은 열화현상을 조합하여 가장 큰 열화현상을 발생하는 복합열화 평가방법을 개발하였다.



[그림 7-13] 철근콘크리트 구조물의 시나리오별 복합열화 평가 방법

2. 콘크리트 열화 시뮬레이션 프로그램

본 연구에서는 보수보강 시나리오에 따른 시멘트 내의 염화물이온량을 시뮬레이션하기 위하여 아래 순서도와 같은 프로세스의 프로그램을 개발하였다. 연구를 위해 작성한 프로그램은 유한차분법을 이용하고 있으므로, 분석의 시간탐 dt , 절점간의 간격 dx 를 입력자료에서 결정할 수 있도록 하였으며 구조물의 단면 형상도 입력하도록 하였다. 또한 이 입력자료에서 단면보수 및 표면처리를 하는 시점과 시멘트 재료의 물성치와 물/시멘트비 등도 입력할 수 있도록 하였다. 여기서 입력된 값을 바탕으로 초기의 염화물 확산계수를 결정하고, 인풋파일에 정의된 단면 형상과 절점 간격을 이용하여 격자를 생성한다.

시멘트 구조물이 완공된 시점을 $t=0$ 으로 보았을 때, 그 시점에서 시멘트 내부의 염화물양은 0일 것이므로 모든 절점의 값을 0으로 설정하고, 해수와 직접적으로 접하는 표면의 염화물양은 해수에 노출된 시멘트 구조물 표면의 염화물양을 입력하도록 하였다.

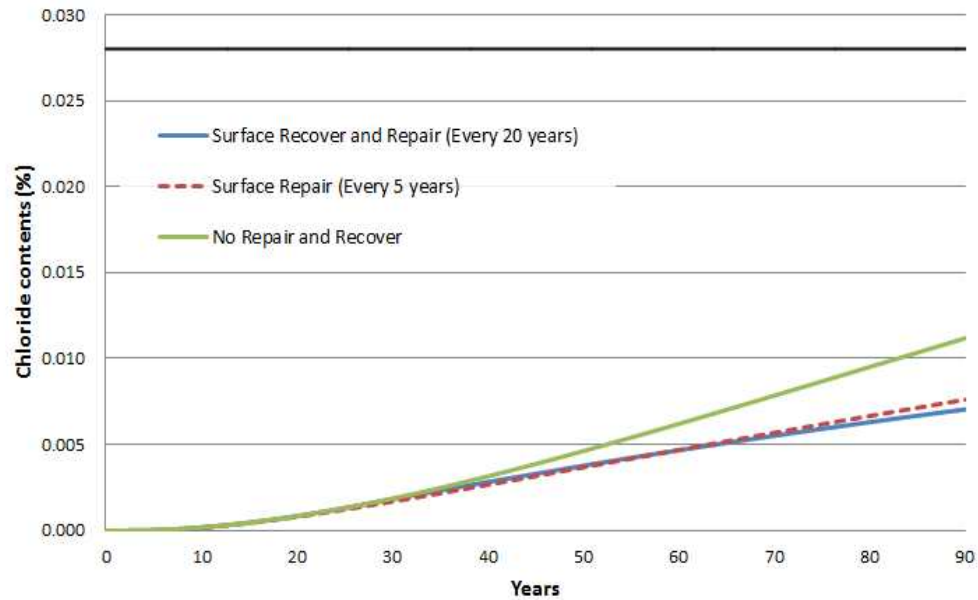
dt 가 지날 때마다 Maage 식을 이용하여 시간에 따른 염화물 확산계수의 변화를 반영한다. 그리고 그 시점이 표면처리의 효과가 남아있는 시

점인지 확인 후 맞을 경우, 확산계수의 값을 절반으로 또다시 감소시킨다. 만약, 그 시점이 단면 보수를 해야 하는 시점이라면, 해당 절점의 시멘트에는 염화물이 없는 새로운 시멘트가 시공된 것이므로 염화물양을 0으로 설정하고, 그 절점의 연령을 0으로 수정하여 다음 시점에서 Maage식을 이용해 확산계수를 설정할 경우 이를 반영할 수 있도록 한다.

이를 이용해 유한차분법을 이용해 각 절점의 염화물양을 계산한 다음, 각 절점의 연령을 dt만큼 증가시킨 후 염화물 확산계수를 수정하는 단계로 돌아가 반복한다. 정해진 횟수를 반복한 후 계산결과를 출력파일에 기록하고 프로그램을 종료한다.

구조물의 염해 및 중성화 피해가 비교적 큰 새만금지구의 신시-배수갑문을 대상으로 생애주기비용을 고려한 구조물 유지관리 의사결정 지원시스템을 OpenMI 프레임워크를 적용해 개발하였다.

먼저 대상 구조물에 대한 열화현상에 대한 시뮬레이션을 통해 유지보수의 적정 시기를 결정하였다. 유지보수 공법은 20년 마다 단면보수와 표면처리를 시공하는 경우와 5년에 한 번씩 에폭시 표면처리를 하는 경우에 대해 철근의 위치라고 가정한 10 cm 깊이에서 염해가 진행되는 속도를 모의하였으며, 에폭시 표면처리는 그 유효기한이 5년이라고 할 때, 후자의 경우는 표면에서의 염화물 침투속도가 시공된 시점과 동일하게 유지되는 경우이다. 신시배수갑문의 콘크리트 배합조건을 고려했을 때 염소이온량이 0.028%일 때 철근 부식이 발생할 수 있다.. 그러나 신시배수갑문의 경우 염소이온 확산계수가 작기 때문에, 보강 및 보수 공사를 하지 않고 90년이 지난 이후에도 철근 부식 임계염소이온량 0.028%에 훨씬 못 미치는 0.013%에 불과한 것으로 분석되었다. 20년마다 단면보수 및 표면처리를 하거나 5년마다 표면처리만을 할 경우는 이에 비해 더욱 느린 염해진행속도를 보이기 때문에 장기간 유지가 가능할 것으로 판단된다. 따라서 설계 및 시공초기부터 콘크리트 배합조건을 고려하여 시공할 경우, 추후 유지·보수 비용을 크게 절감할 수 있음을 유추할 수 있다.

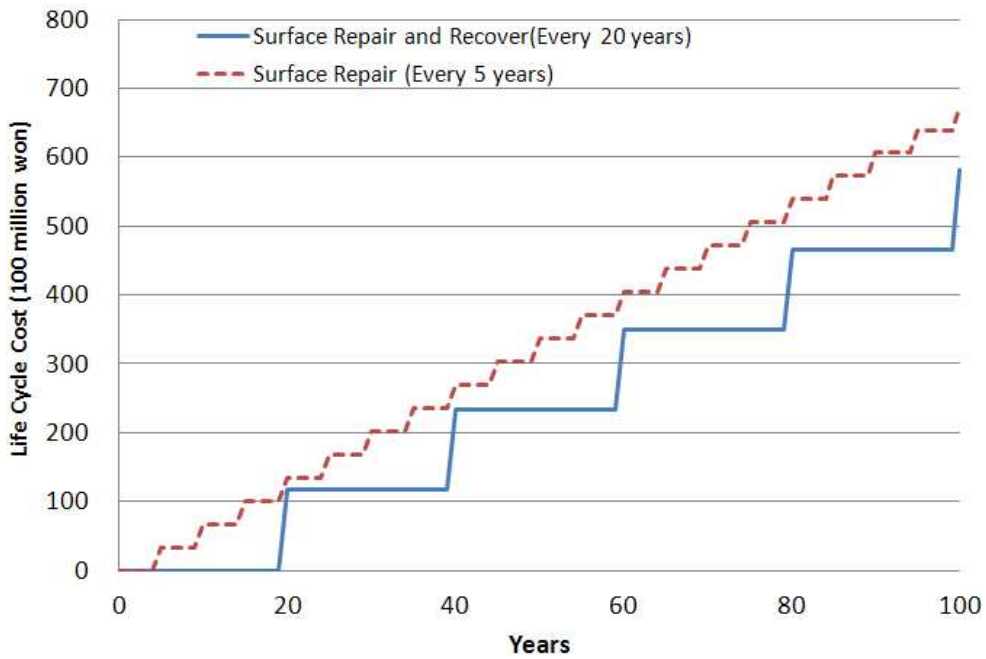


[그림 7-14] 열화 시뮬레이션에 의한 구조물 유지보수 관리 계획 수립 예시

구조물의 염해에 의한 유지관리비 산정과 대안분석을 위하여 소요되는 공사비는 2006년 아산만 방조제 공사를 참조하여 신시 배수갑문의 규모와 형태를 반영해 산정하였으며, 아래 표와 같다. 신시배수갑문은 단면보수공사 비용이 약 116억원, 표면처리 공사비는 약 34억원정도인 것으로 조사되었다. 아래 그림은 위의 공사비를 바탕으로 향후 유지관리에 소요되는 금액을 추정한 그래프이다. 그러나 그림에서 보는 바와 같이 신시배수갑문의 피어 부분은 90년이 지난 시점에서 철근위치로 가정된 10cm 깊이 부분에서 염해피해가 발생하지 않는 것으로 분석되었다. 따라서 목표연한을 100년 이상 설정하더라도 염해에 대한 우려를 하지 않아도 된다는 결론을 얻을 수 있다.

표면처리를 하는 방법은 단면보수에 비해 1회 공사비가 저렴하나 표면의 침투량을 일시적으로 감소시키는 방법이므로 단면보수에 비해 그 효과가 적다. 시멘트 내부로 염화물이 침투되지 않은 초기에는 단면보수에 비해 효과가 있으나 항상 완공초기 때처럼 표면처리 상태를 유지한다고 하더라도 약 65년 후에는 20년마다 단면보수를 하는 방법이 더 적은 염해를 받게 된다. 따라서 단면보수를 20년 마다 시행하는 것이 5년 마다 표면처리를 하는 것에 비해 유지보수비가 더 적게 투입됨에도 불구하고 더 나은 효과

를 보임을 알 수 있다.

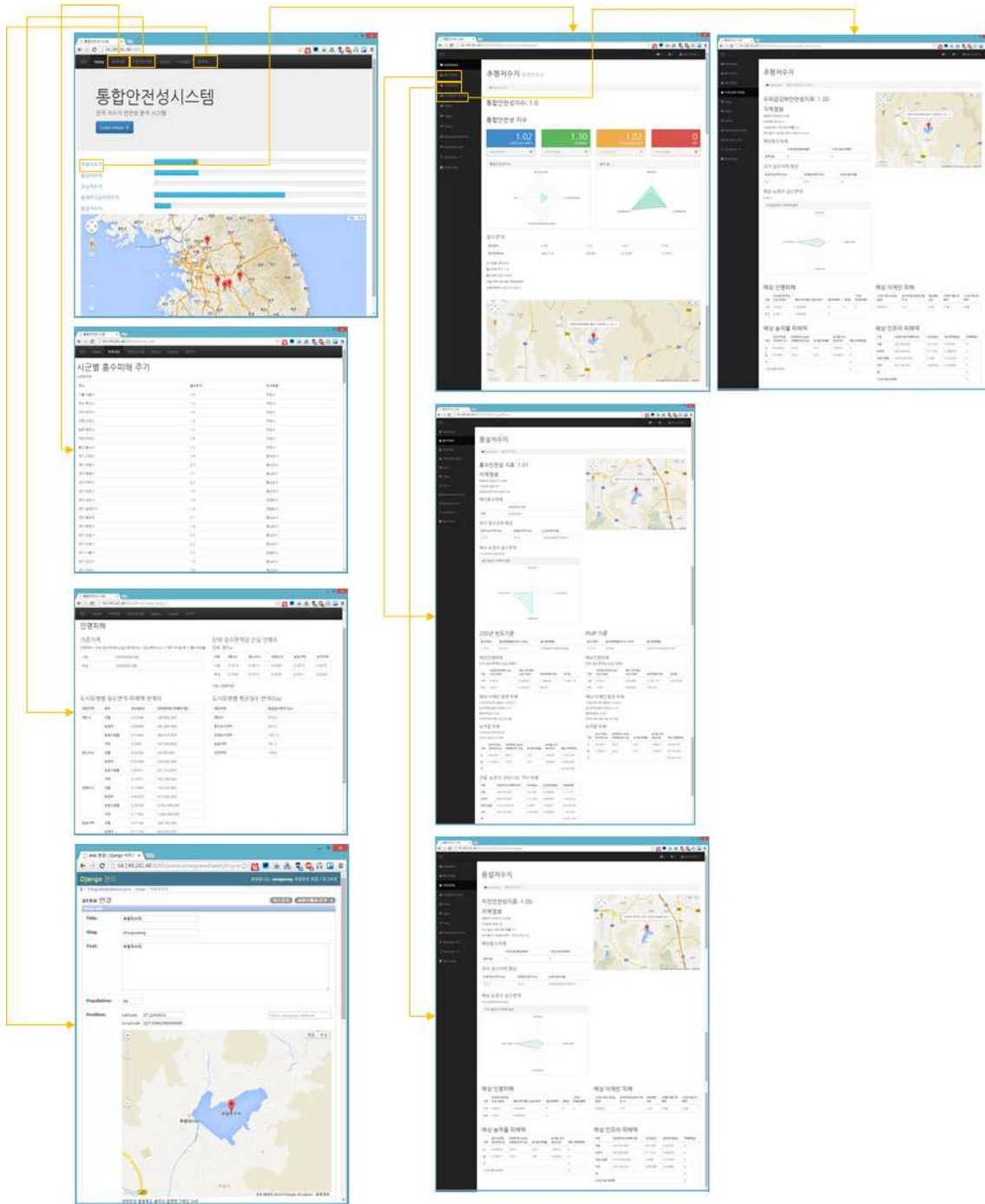


[그림 7-15] 구조물 보수/보강에 따른 공사비 예측

[표 7-5] 유지보수 방법에 따른 공사비 예측

단면복구 (Recover)		단면 보수 (Surface Repair)	
Temporary Cofferdam	₩2,136,651,853	Temporary Cofferdam	₩2,136,651,853
Recover	₩9,508,869,632	Surface Repair	₩1,230,656,579
Total	₩11,645,521,485	Total	₩3,367,308,432

제 3 절 통합안전성 관리시스템 구성과 사용설명



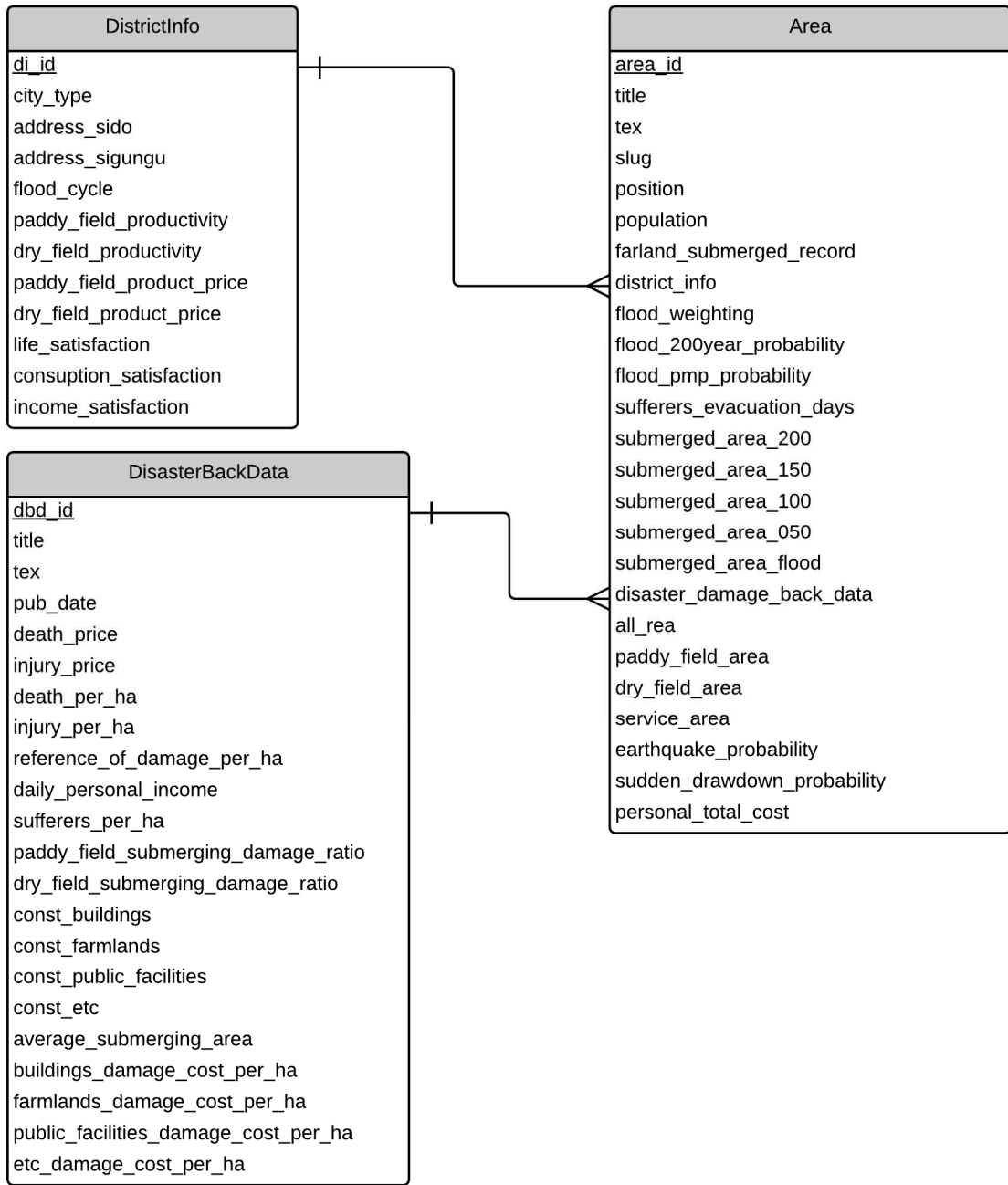
[그림 7-16] 웹기반 통합안전성시스템 구조도

통합안전성 웹시스템은 개별 농업생산기반시설물의 안전성에 대한 데이터를 일관된 형태로 축적하고, 이들 데이터를 이용하여 시설물 재해에 대

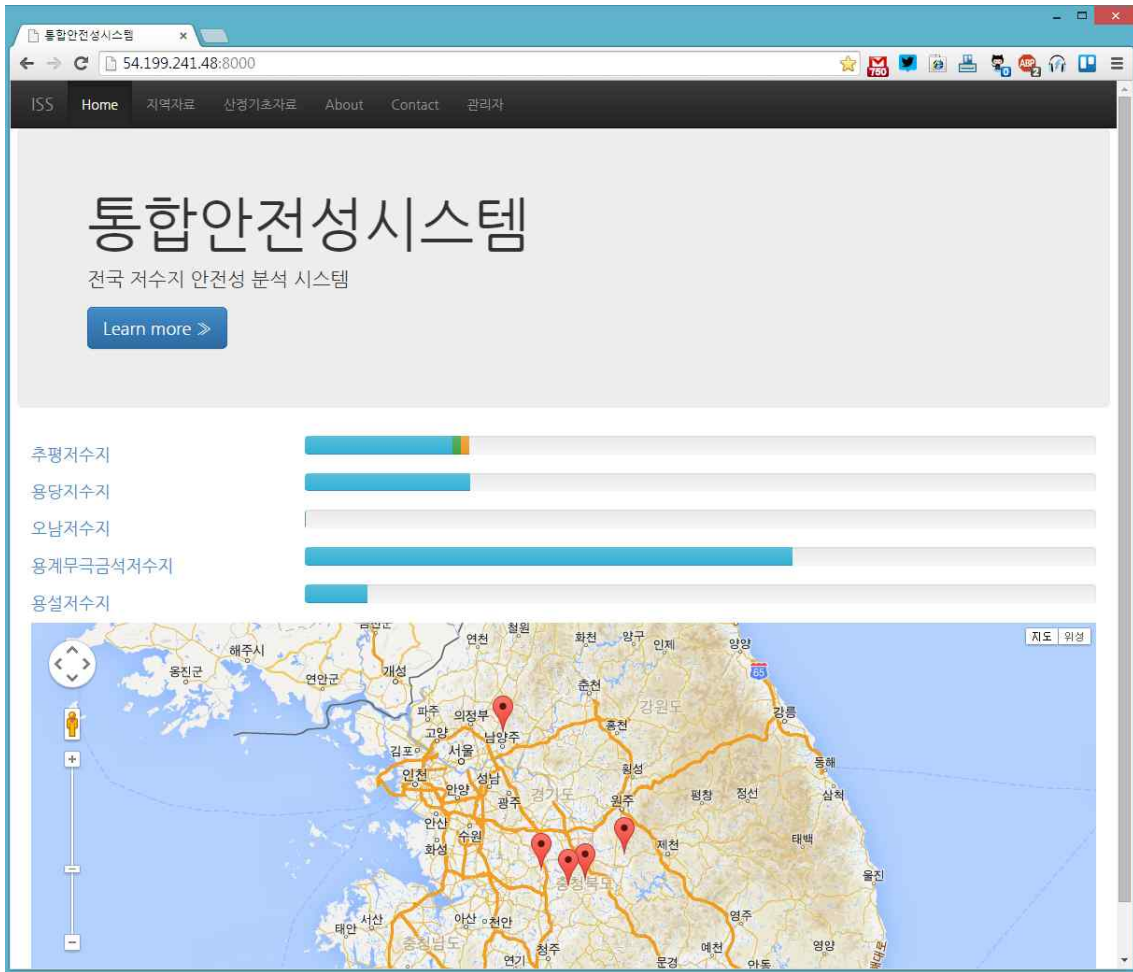
한 예상 피해액과 안전성지표를 자동으로 계산하여 관리자의 의사결정을 돕는 것을 목표로 설계되었다.

온라인 상에서 데이터베이스에 웹을 통해 손쉽게 접근할 수 있게 하고, 데이터 입력시 무결성 체크를 하도록 함으로써 조사자나 관리자의 실수를 최소화하여 데이터의 질을 확보하고자 하였다. 입력된 자료는 바로 통합안전성 지표 산정 방법에 따라 계산되고 그래프로 도시되어 입력된 자료의 결과를 곧바로 확인 할 수 있게 하였으며, 다른 지역과의 비교도 할 수 있도록 목표를 두고 있다. 계산결과는 Dashboard페이지에서 통합안전성 지표는 물론, 개별 요인들에 대한 안전성 지표까지 계산하여, 어떤 항목에서 더 큰 위험에 노출되어 있는지를 파악할 수 있게 방사형 그래프로 표현한다. 홍수, 지진으로 인한 제체 파괴, 수위급강하로 인한 제체 파괴 등의 경우에 피해액이 어떤 요인에 집중되는지 관리자가 파악할 수 있도록, 피해액 항목별로 계산결과를 그래프로 도시화하여 표현하고, 계산과정도 표를 통해 확인할 수 있도록 구성하였다.

데이터베이스는 [그림 7-17]과 같이 DistrictInfo, DisasterBackData, Area의 세 개의 모델로 구축되어 있다. DistrictInfo에는 대상지역의 주소, 도시유형, 농경지 면적, 삶의 질 척도 등의 데이터가 저장된다. DisasterBackData 모델에서는 과거 재해이력에 관한 자료들이 저장되고, 도시 유형에 따른 면적당 인프라구조 피해액, 인명피해, 면적당 피해비용과 관련한 데이터들이 저장된다. Area는 각 농업생산기반시설물에 대한 관련 자료가 입력된다. 농업생산기반시설 이름, 설명, 위치, 인구, 높이별 침수면적, 홍수발생가능성, 지진발생시 시설물파괴확률, 수위급강하시 시설물파괴확률 등의 데이터를 입력받을 수 있도록 되어 있다. Area모델에서 입력된 자료들은 DistrictInfo, DisasterBackData 등의 기초자료를 바탕으로 재해별 예상피해액, 재해별 안전성 지표, 통합안전성 지표 등을 계산하는 메소드(함수)들을 포함하고 있다.



[그림 7-17] 데이터베이스 구조



[그림 7-18] 대문화면

위의 그림은 웹기반 통합안전성시스템의 대문화면이다. 데이터베이스에 입력된 저수지의 1인당 예상피해액을 그래프로 표현해주고 있다. 하늘색, 녹색, 주황색의 순서대로 홍수시, 지진시, 수위급강하시 1인당 예상 피해액을 이미지화 하고 있다.

상단 메뉴바에 “지역자료”, “산정기초자료” 등은 피해액 및 안전성 지수 산정을 위해 데이터베이스에 구축한 기초자료들을 보여주는 페이지로 연결 된다.

주소	홍수주기	도시유형
서울-서울시	1.8	대도시
부산-부산시	1.2	대도시
대구-대구시	1.4	대도시
인천-인천시	1.2	대도시
광주-광주시	1.5	대도시
대전-대전시	1.8	대도시
울산-울산시	1.5	대도시
경기-고양시	1.6	중소도시
경기-과천시	2.2	중소도시
경기-광명시	1.7	중소도시
경기-구리시	2.2	중소도시
경기-군포시	1.9	중소도시
경기-김포시	1.6	전원도시
경기-남양주시	1.9	전원도시
경기-동두천	2.1	중소도시
경기-부천시	1.6	중소도시
경기-성남시	3.6	중소도시
경기-수원시	2.2	중소도시
경기-시흥시	1.5	전원도시
경기-안산시	1.5	중소도시
경기-안양시	3.6	중소도시

[그림 7-19] 기초자료 페이지

인명피해

기준가격
인명피해 = 단위 침수면적당 손실인명(명/ha) × 침수면적(ha) × 기준가격(원/명) × 홍수빈도율

사망	250000000.0원
부상	200000000.0원

단위 침수면적당 손실 인명수
단위: 명/ha

구분	대도시	중소도시	전원도시	농촌지역	산간지역
사망	0.0215	0.0013	0.0005	0.0013	0.0075
부상	0.0365	0.0012	0.0005	0.0011	0.0024

도시유형별 침수면적-피해액 관계식

대상지역	변수	상수항(A)	단위면적당 피해액(원)
대도시	건물	0.23294	206,800,000
	농경지	0.09896	245,900,000
	공공시설물	0.53365	366,870,000
	기타	0.3835	147,600,000
중소도시	건물	0.55283	59,500,000
	농경지	0.63246	220,600,000
	공공시설물	0.85311	237,010,000
	기타	0.12471	782,300,000
전원도시	건물	0.13849	153,200,000
	농경지	0.00528	413,200,000
	공공시설물	0.38754	3,541,400,000
	기타	0.11562	1,004,300,000
농촌지역	건물	0.01164	206,700,000
	농경지	0.11744	933,000,000

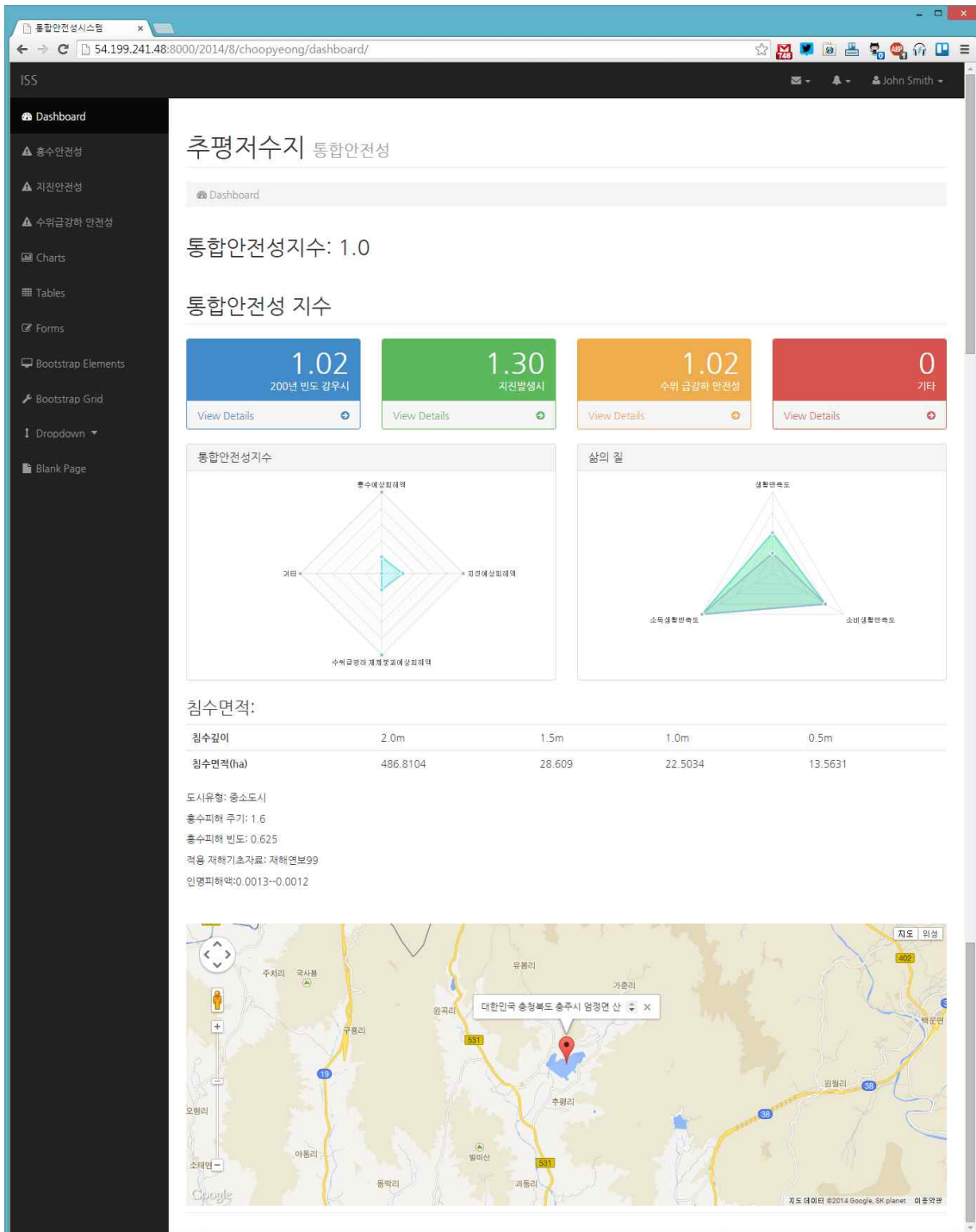
도시유형별 평균침수 면적(ha)

대상지역	평균침수면적(ha)
대도시	875.3
중소도시지역	303.0
전원도시지역	1001.4
농촌지역	761.2
산간지역	139.6

[그림 7-20] 산정기초자료

행정 구역별 홍수피해주기, 도시유형 등의 자료를 보여주는 페이지이다.

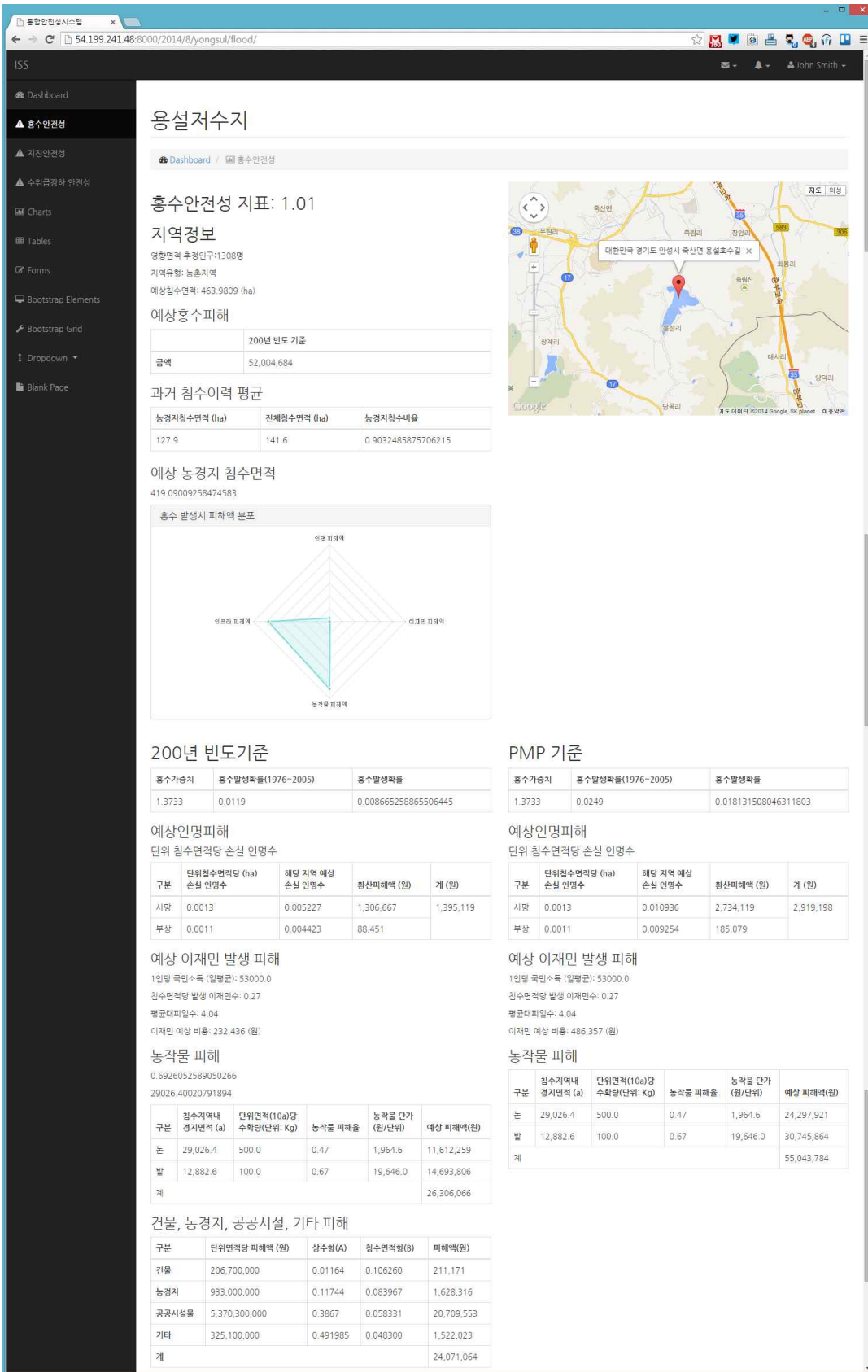
지역은 대도시, 중소도시, 전원도시, 농촌지역, 산간지역 등으로 구분되어 있으며, 이들 유형에 따라 사회인프라 피해규모, 사상자 및 이재민 등을 계산할 수 있는 기초자료가 된다.



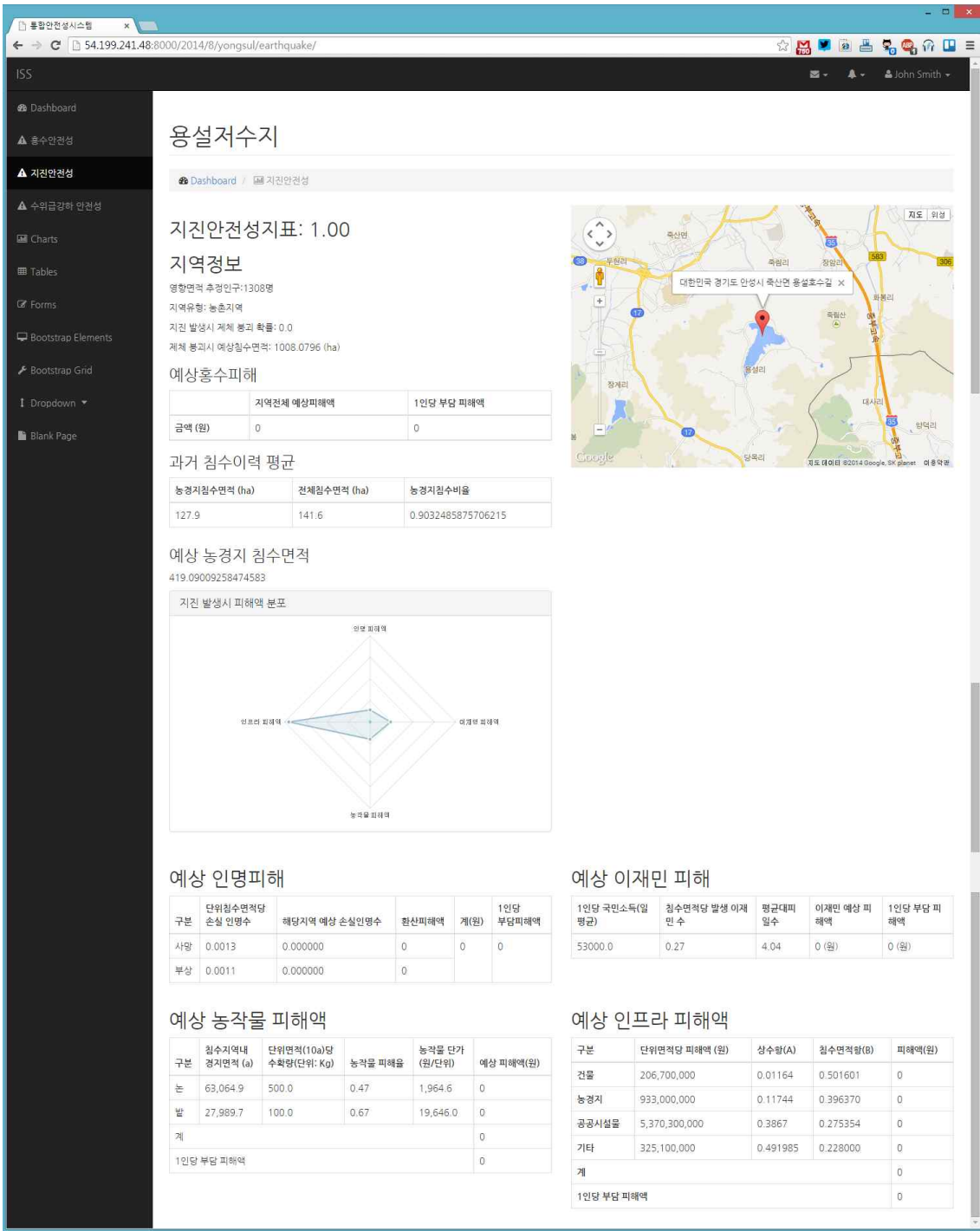
[그림 7-21] 저수지의 Dashboard 페이지

[그림 7-18]의 저수지를 클릭하면 더 자세한 정보를 제공하는 [그림 7-21]의 Dashboard 페이지로 연결된다. Dashboard 페이지에서는 통합안전성에 대한 자료와 삶의 질에 대한 자료를 제공한다. 통합안전성 지수는 5단계로 되어 있어 이 중 해당 저수지가 어디에 해당하는지를 제공해주며, 개별 위험성에 따라 예상 1인당 피해액을 계산하도록 되어 있다. 홍수안전성, 지진안전성, 수위급강하시에 대한 피해액은 파란색, 녹색, 노란색의 순으로 표현되고 있으며, 클릭을 하면 상세 계산 내역 화면으로 넘어갈 수 있다. 그 하단에는 통합안전성지수 그래프와 삶의 질 지수에 대한 그래프가 도시되어 있어, 어떤 부분에 대한 대책을 세우는 것이 시급한지 확인할 수 있도록 하였다. 가장 하단에는 그 지역에 대한 기본 자료 및 구글지도를 제공하여 해당 지역의 정보를 쉽게 확인 할 수 있도록 하였다.

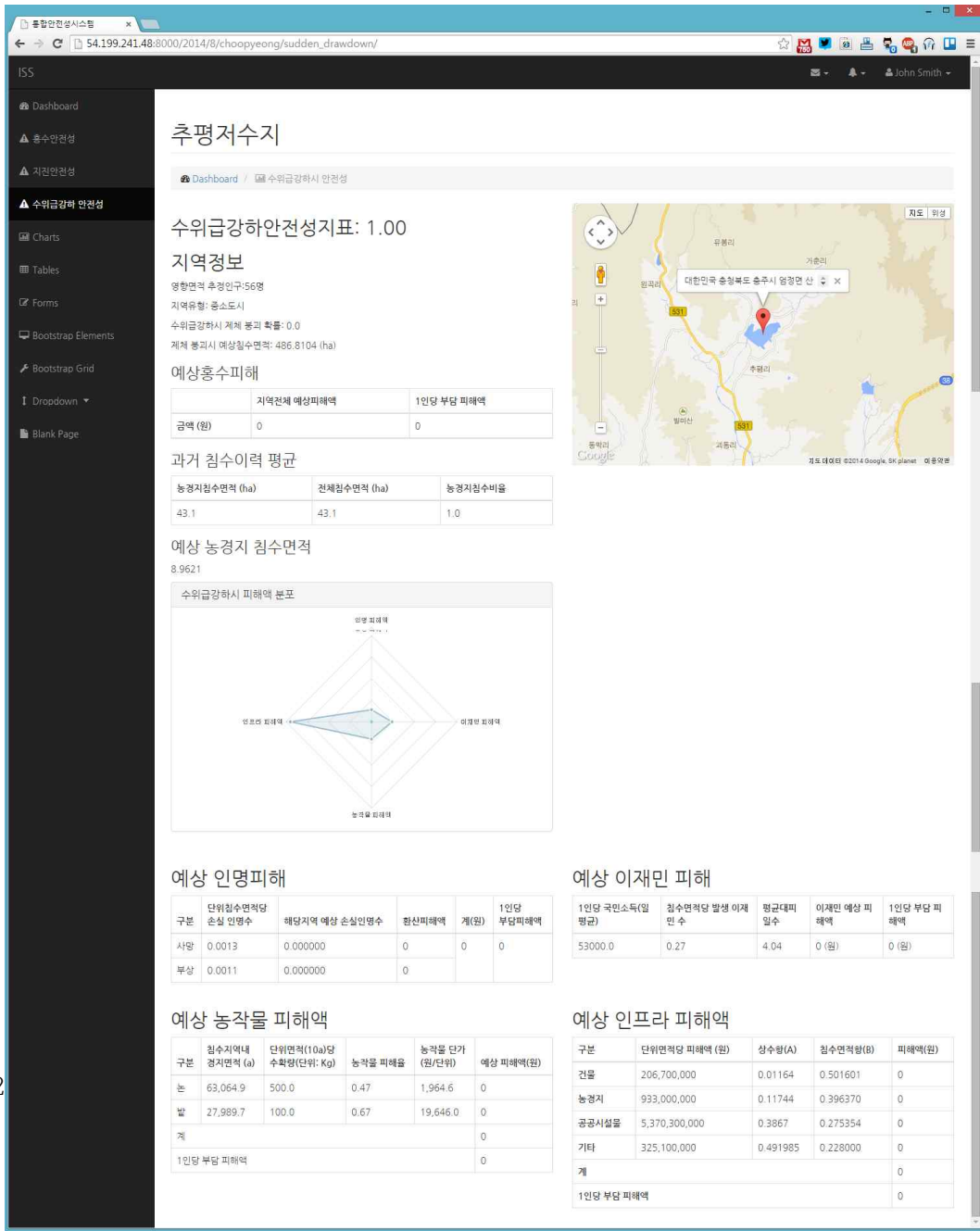
[그림 7-22] ~ [그림 7-24]에서는 재해별 피해액 계산과정을 보여주고 있다. 홍수 발생시 피해액 규모를 인명피해액, 이재민 피해액, 농작물 피해액, 인프라 피해액으로 구분하여 어느 부분에서 피해가 더 크게 발생하는지에 대한 정보를 제공한다. 그리고 그 계산과정은 하단에 표로 나타내고 있다.



[그림 7-22] 홍수 안전성 산정 과정



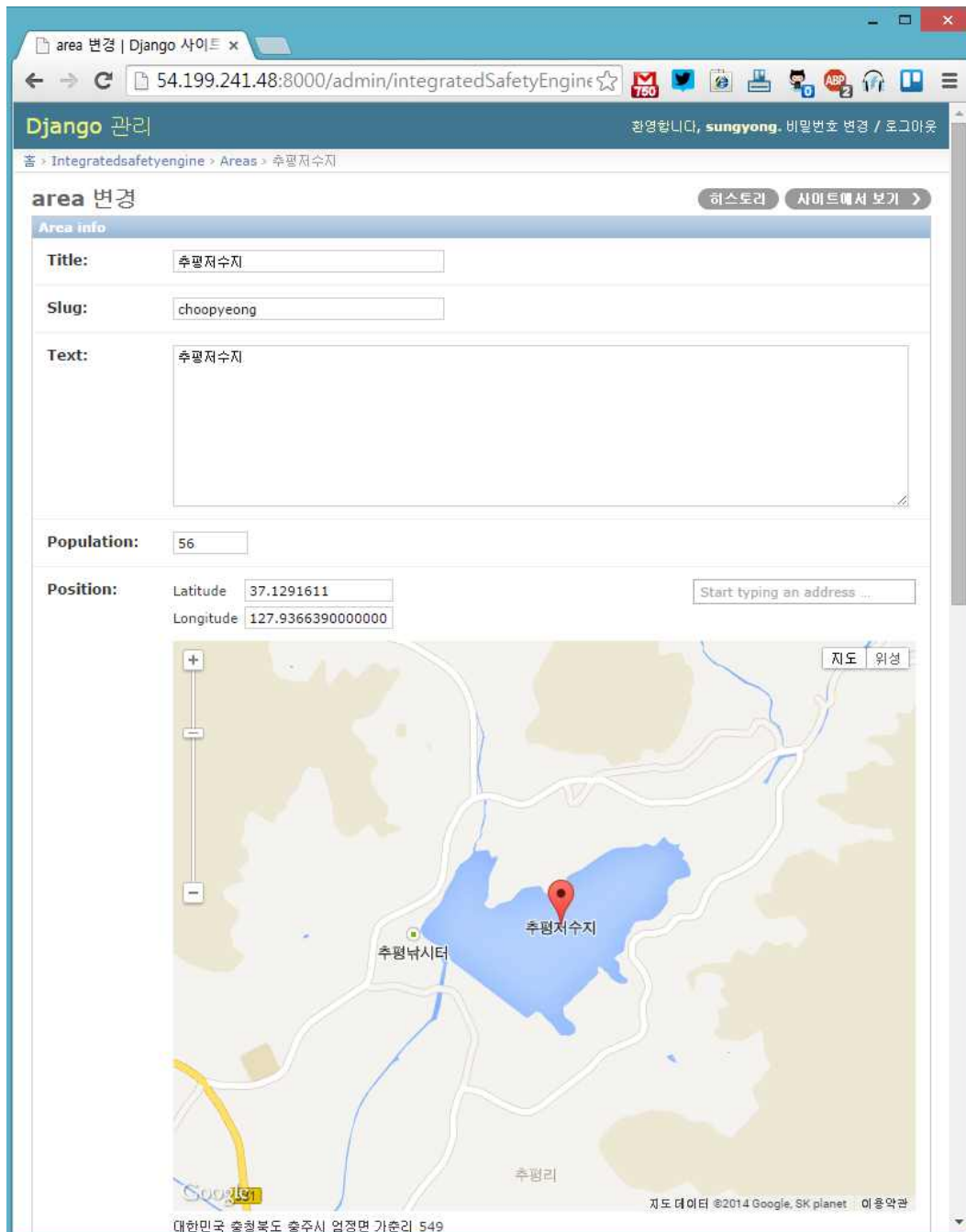
[그림 7-23] 지진 안전성 산정 과정



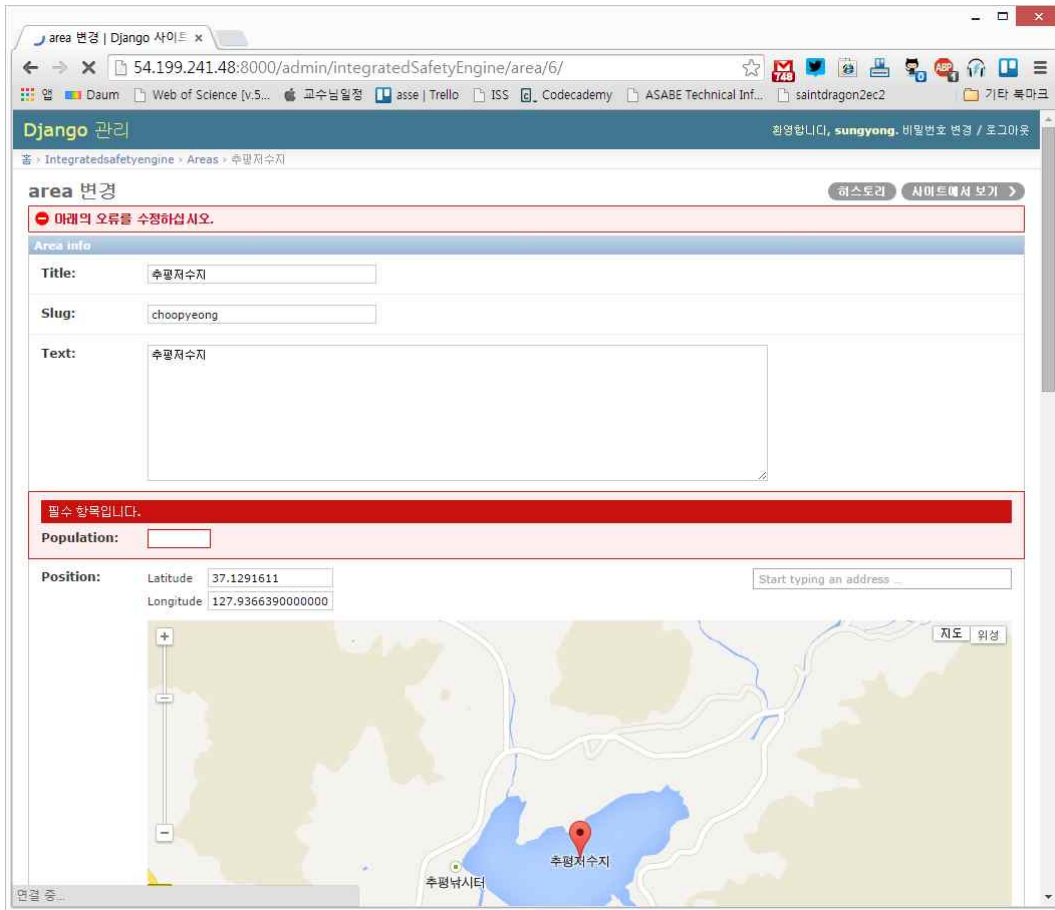
[그림 7-24] 수위급강하하시 안전성 산정 과정

관리자는 로그인을 통해 [그림 7-25] 와 같이 관리자 페이지에 접근하여 새로운 지역에 대한 자료를 입력하거나, 기입력된 자료를 수정할 수 있다. 저수지를 검색하면 자동으로 해당 저수지의 위도경도를 데이터베이스에 입력할 수 있도록 되어 있으며, 인구, 과거 재해이력, 예상 침수면적 등을 입력할 수 있도록 구성되어 있다. 관리자가 잘못된 입력을 할 경우에는 자료

의 무결성 체크를 하도록 설계하여, 누락되거나 허용되는 범위를 초과하는 데이터를 입력하거나 잘못된 데이터를 입력할 경우에 경고메세지와 함께 재입력을 유도하여, 사용자의 실수로 인한 오류를 방지하고 데이터의 질을 확보할 수 있도록 하였다.



[그림 7-25] 관리자 페이지



[그림 7-26] 데이터 무결성 체크 기능

제 4 절 통합안정성 DB구축

1. 조사대상 시설 및 시설

본 연구에서는 한국농어촌공사에서 관리하는 3000여개의 저수지 중 4대강 유역에 위치한 저수지 30개소를 선정하여 조사대상지역으로 선정하였다. 4대강 권역별 대상지는 한강 유역 11개소, 금강유역 7개소, 낙동강유역, 7개소, 영산강 유역 5개소를 선정하였다. 선정된 저수지의 재원과 기본 정보는 다음과 같다.

[표 7-6] 조사대상지 제원 및 기본정보

권역	저수지	도	시군	읍면	유역 면적 (ha)	총 저수량 (만m ³)	제당 형식	제당 높이 (m)	제당 길이 (m)	수문 개수	수문형태
한강	용설	경기	안성	죽산	790	302.0	필댐	19	459	1	측구식, 비상수문
	용계	충북	음성	금왕	748	425.9	필댐	24.7	255	1	측구식, 비상수문
	금석	충북	음성	금왕	717	383.8	필댐	26.3	177	1	측구식, 비상수문
	무극	충북	음성	음성	1,315	306.8	필댐	23.1	133	1	측구식, 비상수문
	오남	경기	남양주	오남	1,552	271.0	필댐	30	412	1	측구식, 인양식수문
	백운	경기	의왕		1,020	138.0	필댐	15	253	1	측구식, 비상수문
	용당	충북	충주	신니	2,783	446.5	필댐	17	280	0	측구식
	추평	충북	충주	엄정	1,610	380.9	필댐	26	318	0	측구식
	잠곡	강원	철원	근남	1,970	436.4	필댐	29.7	255	0	측구식
	마지	경기	파주	법원	1,420	341.2	필댐	30	256	1	측구식, 인양식수문
	애룡	경기	파주	법원	890	103.0	필댐	15	107	1	측구식, 인양식수문
금강	도림	충남	청양	장평	650	318.6	필댐	37	171	0	측구식
	반산	충남	부여	규암	1,740	627.3	필댐	12.6	907	1	수문식, 측구식
	계룡	충남	공주	계룡	1,574	367.7	필댐	14.3	288	0	측구식
	탑정	충남	논산	부적	21,880	3,192.7	필댐	17.8	573	1	수문식(radial), 측구식(슈트)
	복심	충남	부여	충화	1,785	323.6	필댐	7	317	1	측구식 전도게이트
	덕용	충남	부여	충화	1,577	365.7	필댐	16.8	294	0	측구식
	동부	충남	서천	시초	2,811	1218	필댐	11.5	126	1	현재)자연형 계획)자연형+수문식
낙동강	오봉	경북	김천	남면	1,460	395.8	필댐	23.8	277	0	측구식
	금오	경북	구미		1,100	212.4	필댐	20.1	252	0	측구식
	대성	경북	구미		1,780	330.2	필댐	18.8	188	0	측구식
	도원	경북	달서		1,050	140.6	필댐	20.8	460	0	측수로형
	달창	경북	달성	유가	5,630	892.7	필댐	20	524	1	radial gate
	주남	경남	창원	동읍	3,510	1,435.9	필댐	9	3,165	1	배수문비
	가월	경남	창원	동읍	3,741	970.3	필댐	6.8	2,893	1	배수문비
영산강	담양	전남	담양	금성	6,560	6,667.0	필댐	46	316	0	자유월류식
	광주	전남	담양	고서	4,130	1,736.0	필댐	25	505	0	자유월류식
	장성	전남	장성	장성	12,280	8,976.0	필댐	36	603	1	radial gate
	수양	전남	장성	삼서	3,300	759.0	필댐	14	340	0	자유월류식
	나주	전남	나주	다도	10,470	9,120.0	필댐	31	496	1	radial gate

2. 통합안정성 DB구축

최근 국지성 및 산발성 특성을 지닌 강우로 인해 피해가 급증하는 추세를 보이고 있다. 특히 농업용 수리시설물에 의한 피해는 대형 재난으로 이어지는 가능성이 높기 때문에 농업용 수리시설물의 재해 관리에 대한 필요성이 대두되고 있는 실정이다. 현재 저수지 및 댐의 붕괴 등으로 인한 재해를 예방·경감하기 위하여 “저수지·댐의 안전관리 및 재해예방에 관한 법률”이 시행되고 있는 만큼 중요관리대상으로 볼 수 있다. 그러나 전국에 산재해 있는 저수지의 현황 정보에 대한 체계적인 관리가 이루어지지 않아 저수지 관련 DB 구축이 요구되는 실정이다.

본 연구에서는 이러한 배경에 따라 농업용 저수지 시설물을 대상으로 DB를 표준화하여 설계하고 현황 데이터를 구축 하였다. 그리고 이들 자료를 기반으로 저수지 현황자료를 제공하고 중앙정부와 지방자치단체, 저수지 관리자가 공유하여 재해발생피해 경감을 위한 저수지 데이터베이스를 구축하였다.

저수지 관련 데이터베이스를 통하여 시스템 구축을 위한 기초정보 및 가공이 이루어지며, 이러한 자료를 토대로 저수지 재해관리 시스템 개발을 진행하고, 사용자에게는 정량적 평가를 가능하도록 시스템을 표출하는 형태로 정보를 제공한다.



[그림 7-27] 저수지 재해관리시스템 구성

3. 저수지자료 분류

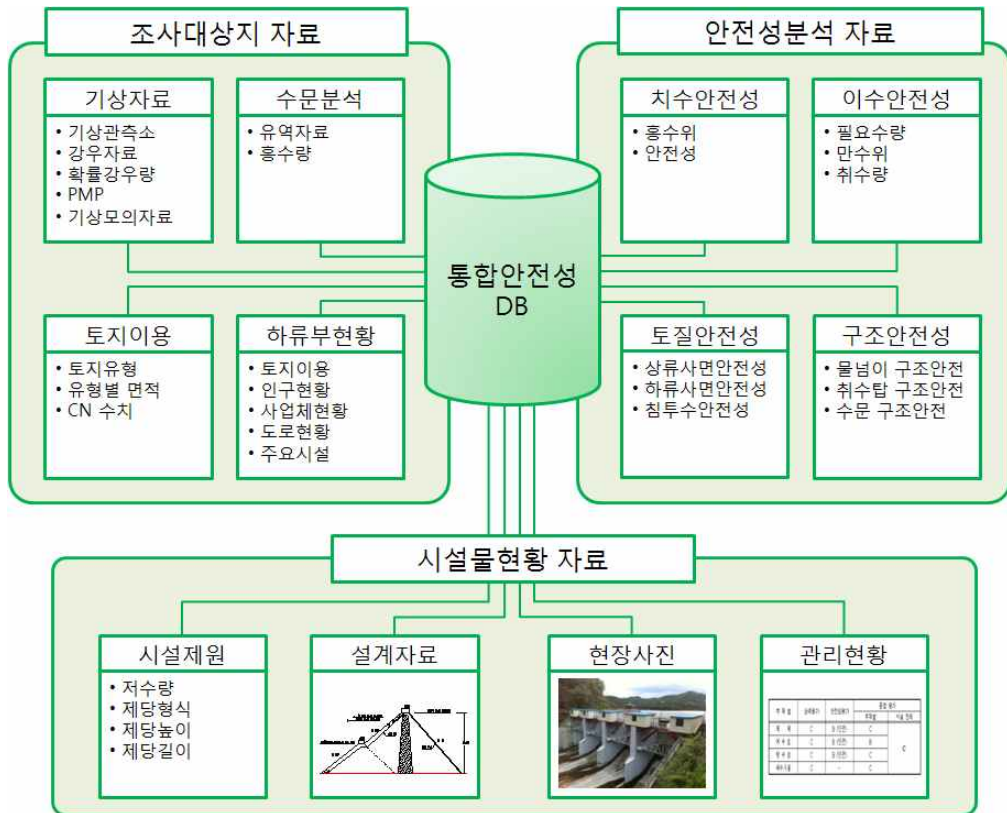
저수지자료의 분류는 기본정보, 상세정보, 저수지 붕괴시 하류피해예상 규모, 과거 홍수피해, 저수지 효용성 조사, 저수지 시설물 점검 등으로 분류한다.

[표 7-7] 저수지 자료분류

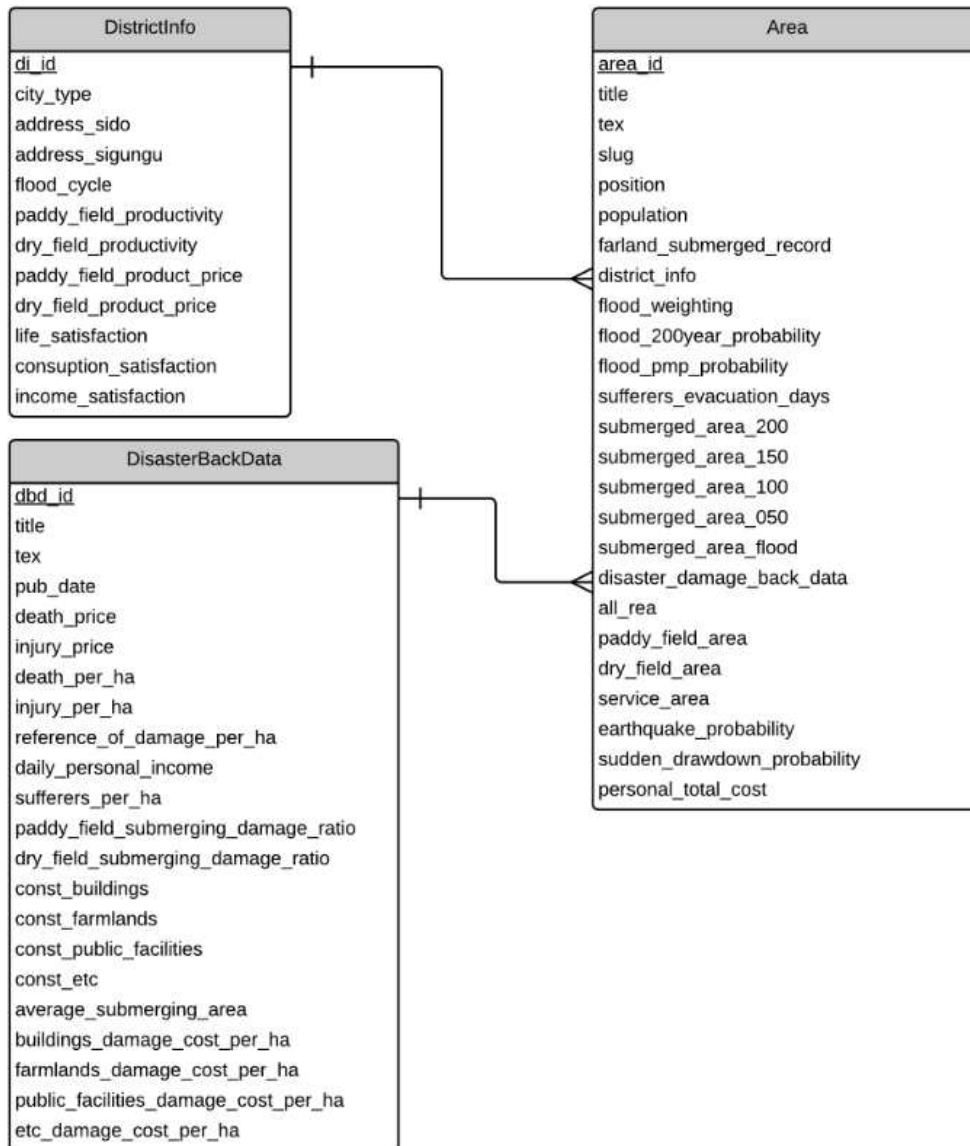
항목	구성내용
기본정보	한글명, 통계코드, 주소코드, 시설명, 조사일자, 행정구역, 관리주체, 시설용도, 준공연도, 폐지여부, 폐지년도, 유역면적, 총저수량, 만수면적, 유효저수량, 수해면적, 한발빈도, 설계도서 비치여부, 설계빈도
상세정보	댐의재료, 제당길이, 제당높이, 제당폭, 제당경사_상류, 제당경사_하류, 사면보호_상류, 사면보호_하류, 여수토형식, 방수로구조, 언체길이, 언체높이, 언체 측벽고, 평균폭, 평균높이, 상류부, 하류부, 취수형식, 통관구조, 통관규격, 도로유무, 도로폭, 도로포장형식
조사자 정보	소속, 직급, 성명, 연락처
저수지 붕괴시 하류부 피해예상 규모	이격거리, 마을수, 가구수, 인구수, 공공시설, 도로, 교량, 농경지, 하천, 용배수로, 공장, 기타
과거홍수 피해	발생이력, 조사방법, 발생년도, 발생원인, 하류부 피해내용, 피해금액, 인구수, 가구수, 건물수, 농경지, 도로, 기타
홍수대비 사전방류 시설	방류시설유무, 방류시설종류
저수지 효용성 조사	저수지 제기능 유지여부, 제기능 상실원인, 저수지주변 개발에 따른 용도폐기시점, 용도폐기시 저수지 활용방안
관측장비	강우량계, 수위관측계
저수지 시설물 점검	댐마루, 상류사면, 하류사면, 접근수로
현황사진	제당 상류사면, 제당 하류사면, 상류부 전경, 하류부 전경, 여수토, 방수로, 사통, 복통, 정수지부 전경, 특이사항

4. 농업기반시설 DB설계

1차년도에 이어 2차년도에도 통합안전성 데이터베이스는 크게 조사대상지에 대한 기초적인 자료부문과 시설물현황에 대한 자료부문 그리고 안전성 재검토를 위해 분석한 자료부문에 나뉘어 구축하였다. 조사대상지 자료는 실내조사 또는 현장조사를 통해 수집한 대상지에 대한 기본적인 자료를 저장하였으며, 시설물현황 자료는 시설 제원, 설계도면, 현장사진 및 관리현황 등에 대한 자료를 저장하였다. 또한 저수지의 안전성을 분석한 자료를 저장함으로써 통합안전성 데이터베이스를 구축하였다. 본 연구에서 구축한 통합안전성 데이터베이스의 구조는 [그림 7-28]에 나타내었다.



[그림 7-28] 통합안전성 DB 구조



[그림 7-29] 통합안전성 DB 스키마

제 5 절 적용예 및 도시/농촌지역 비교

1. 통합안전지수 분석 적용예

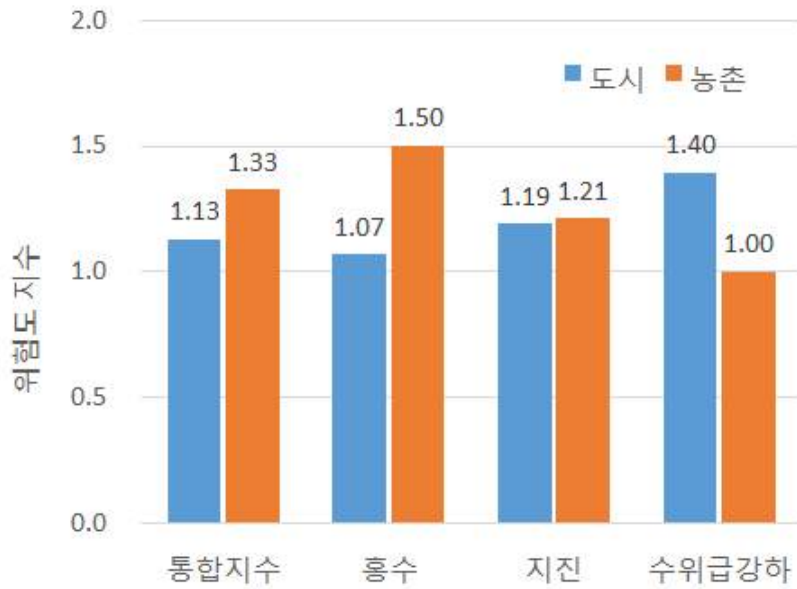
본 연구에서 개발한 통합안전지수 관리시스템을 통해 산정한 표본 농업생산기반시설의 안전성을 [표7-8]에 정리하였다. 각 시설물 별 안전성은 홍수로 인한 제체 파괴, 지진으로 인한 제체 파괴, 수위급강하로 인한 제체 파괴의 경우로 나누어 안전성 지수가 분석되었으며 이를 통합한 통합안전지수가 산정되었다.

[표 7-8] 통합안전성 지수 분석 적용결과

저수지명	지역유형	홍수 위험도	지진 위험도	수위급강하 위험도	통합안전성
용계	농촌	3.46	1.00	1.00	2.20
용당	도시	1.73	1.38	1.00	1.50
덕용	농촌	1.00	2.39	1.00	1.70
탑정	도시	1.00	1.81	1.00	1.40
계룡	도시	1.00	1.03	1.00	1.00
복심	농촌	1.07	1.00	1.00	1.00
반산	농촌	1.03	1.02	1.00	1.00
도림	농촌	1.03	1.00	1.00	1.00
주남가월	도시	1.00	1.13	2.96	1.10
달창	도시	1.00	1.93	4.16	1.60
도원	도시	1.00	1.13	1.00	1.10
금오대성	도시	1.00	1.06	1.00	1.00
오봉	도시	1.00	1.00	1.00	1.00
잠곡	농촌	1.88	1.07	1.00	1.40
백운	도시	1.00	1.00	1.00	1.00
애룡	도시	1.02	1.00	1.00	1.00
마지	도시	1.08	1.00	1.00	1.00
추평	도시	1.05	1.00	1.00	1.00
오남	도시	1.00	1.00	1.02	1.00
용설	농촌	1.05	1.00	1.00	1.00

2. 도시/농촌 지역의 통합안전지수 비교

분석된 통합안전성 지수를 바탕으로 도시지역과 농촌지역의 농업생산기반시설의 안전성을 비교하여 [그림 7-29]에 나타내었다. 비교결과 전반적으로 농촌지역의 시설물이 기대피해액이 높은 것으로 나타났다. 시설물 파괴 원인에 따른 비교에서도 수위급강하를 제외하고는 홍수와 지진으로 인한 시설물 붕괴의 기대피해에 따른 안전성이 취약한 것으로 분석되었다.



[그림 7-29] 도시/농촌 지역 시설물 안전성 비교

관련연구

연결성과 소통구조 모듈을 통한 차세대 범용 농업시스템 시뮬레이터 (GASS2)의 개발

The purpose of this study is to develop improved Generic Agricultural Systems Simulator (GASS) which can simulate rural systems based on object-oriented model. GASS is developed to simplify integrated agricultural systems simulation model. Irrigation system for rice production with various configuration simulated easily with GASS. The renewal of GASS was improved in connectivity and communication. Geometrical connectivity replaced topological connectivity, and communication expanded not only series structure but also parallel structure. In this paper, the 1st stage of this study simulated the water height of linked tanks. The simulated results using GASS verified through comparing analytical solution of differential equations. The renew GASS simulated the 4-tank problem, which is topological, series-parallel problem, showed graphical and dynamical results.

제 8 장 농업생산기반시설 유지관리 계획수립 가이드라인

제 1 절 수리/수문 안전성 관리 가이드라인

수리/수문의 안전성 관리를 위해서 확률론적 방법을 이용하여 산정한 생존확률을 기준으로 가이드라인을 개발하였다. 수리/수문 안전성 관리 가이드라인은 시설물의 유지관리 주기를 산정하여 적절한 보수/보강 비용을 제안하여 미래에 발생할 피해에 능동적으로 대처하는 것을 목표로 한다. 현재 우리나라에서 진행하고 있는 수리시설개보수사업은 수리시설개보수, 저수지준설, 수리시설안전진단, 방조제 개보수, 생산기반 정비사업 통계조사, 재해대책 국고채 상환, 저수지비상대처지원으로 구성되어 있으며 예산은 ‘수리시설개보수’와 ‘수리시설유지관리지원’으로 구분하여 사용하고 있다. 본 보고서에서는 수리시설개보수에 국한하여 가이드라인을 개발하였다.

1. 수리/수문 유지관리 운영주기

수리/수문 시설 유지관리 운영주기는 생존확률함수 변화를 분석함으로써 얻을 수 있으며 보수/보강을 위한 시설물의 상태등급에 따른 구간설정으로 각 구간별 공용연한을 도출할 수 있다. 보수/보강을 위한 적정주기는 시설물의 유지관리 전략에 따라 그 구간을 정함으로써 결정할 수 있다. 생존확률이 낮은 한계상태에서 개수에 가까운 보수/보강을 추진하여 거의 신축상태에 버금가는 안전도까지 끌어올리는 유지관리 전략을 선택할 경우 주기는 길어지며, 일정 수준의 보수 또는 보강으로 신축상태까지는 아니지만 어느 정도의 안전도를 회복할 수준의 보수/보강을 유지관리 전략으로 선택한다면 주기는 전자보다 짧아진다.

2. 실적자료기반 적정 보수/보강 비용

이준구 등 (2011)에 의하면 수리시설 보수/보강 적정 비용은 시설물 유지관리 전략에 따라 사후적 보수/보강과 예방적 보수/보강으로 구분하여 산출할 수 있다. 시설물의 유지관리에 소요될 미래비용을 제시하기 위해서는 화폐의 시간에 따른 가치변화를 고려하여 제시하여야 하나 당시 현재가치

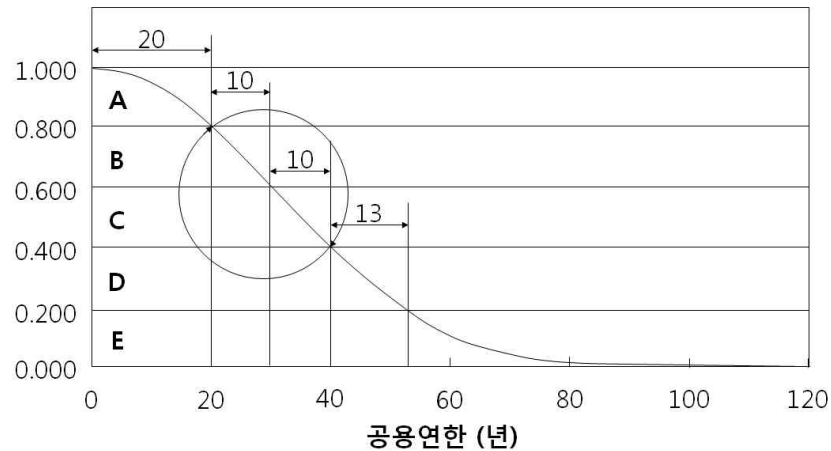
를 기준으로 제시하였다. 시설물 유지관리의 비용 산출을 위한 규모정보와 단위비용정보는 농업기반시설관리시스템 (RIMS)의 자료를 분석하여 도출할 수 있다.

저수지의 보수/보강 주기를 5개 등급 (A, B, C, D, E)으로 구분하였을 때 C등급의 시설물을 A등급으로 보수/보강할 때와 B등급으로 보수/보강할 때의 단위비용은 정밀안전진단 자료와 보수/보강 실적자료를 분석함으로써 유도할 수 있으며, 실적자료가 없는 구간의 자료는 비례적으로 추정이 가능하다. 5개 등급으로 구분 조사된 현재시설물의 상태등급은 여러 가지 분포형태를 띠겠지만 동일한 깊이를 갖는 균등분포로 가정할 수 있다.

사후적 보수/보강은 D등급의 일정 지구수를 매년 보수/보강함으로써 A등급으로 끌어올려 놓으면 공용연한의 증가에 따라 다시 B등급, C등급을 거쳐 D등급으로 내려오게 되는 운영전략인 반면, 예방적 보수/보강은 재해 대비지구를 우선적으로 전반부에 보수/보강을 시행하고, D, C 등급의 일정 지구수를 A등급으로 끌어올리는데 점차적으로 D등급으로 내려가는 지구가 발생하지 않도록 지구수를 조정하여 초기에 많은 지구를 A등급으로 끌어올려야 한다. 모든 지구의 상태등급이 C등급 이상이 되는 시점이 도래하면 C등급을 B등급으로 올리는 보수/보강을 실시한다. 물론 미처 D등급에서 당해 연도에 모두 보수/보강하지 못하는 경우에는 E등급도 발생된다.

3. 저수지의 적정 보수/보강 주기

저수지의 보수/보강 주기는 [그림 8-1]과 같이 5개 등급으로 구분하여 각 등급별 공용연한으로부터 산출할 수 있다.



[그림 8-1] 각 등급별 생존확률 (이준구 등, 2011)

[표 8-1]은 저수지의 유지관리 전략을 사후적 보수/보강과 예방적 보수/보강으로 구분하여 정한 보수/보강의 주기 정리하여 나타내고 있다. 저수지의 유지관리 주기는 시설물의 안전도가 D등급이하로 떨어질 경우 시설물의 서비스 정도가 낮아질 뿐만 아니라 안전도를 회복시키는 데 많은 비용이 지출되기 때문에 안전도가 C등급상태에서 조치를 취하는 것이 오히려 경제적일 수 있다는 전략에서 정하였다. 현재상태의 시설물상태를 모두 조사하여 C등급 이하의 시설물들은 40년에 걸쳐 보수/보강을 실시하여 C등급 이상으로 끌어올리는 일제정비를 실시한다. 물론 일제정비를 하는 40년간에도 A등급시설물은 C등급으로 낮아지게 된다. 모든 시설을 C등급이상으로 끌어올린 이후에는 보수/보강을 실시하되 A등급으로 올리지 않고 B등급까지만 끌어올리는 보수/보강의 수준을 적용하여 시설물의 유지관리를 실시한다. C등급의 시설을 B등급으로 끌어올리면 공용연한 20년이 경과하는 시점에 다시 C등급 끝나는 시점에 이르게 된다. 물론 모든 시설이 Fig. x 와 같은 곡선을 따른다고 가정하에서 나온 개념이다. 예방 보수/보강 시나리오에는 재해대비지구를 별도로 관리하여 보수/보강하는 전략이 포함되어 있다. 재해대비 보수/보강 대상은 설계기준미달 지구로서 500 만톤 이상, 2500ha이상인 PMF보강 대상 지구와 100 만톤 이상의 EAP 수립 대상 시설로 구분하여 향후 7개년에 걸쳐 보수/보강함으로써 이상기후에 대비한다는 전략이다.

[표 8-1] 저수지의 유지관리 전략 비교 (이준구 등, 2011)

Division	Corrective	Preventive
First Time	<ul style="list-style-type: none"> · Level : D grade · About 53yr 	<ul style="list-style-type: none"> · Level : C grade · About 40yr
Period	<ul style="list-style-type: none"> · D grade → A grade · Entire Improvement Time: After about 53yr 	<ul style="list-style-type: none"> · Improvement all at once: D, C grade → A grade (about 40yr) · Preventive period: C grade → B grade (about 20yr) ※ Keep doing by 20yr-cycle after whole Improvement.
Disaster Prevention	<ul style="list-style-type: none"> · Just doing Corrective Repair and Improvement Without Special Strategy 	<ul style="list-style-type: none"> · Falling Short of the Criteria: PMF Upgrading (more than 500million m³, more than 2500ha), EAP Establishing(more than 100million m³) · Giving Priority to R&I Project for Disaster Prevention

4. 저수지의 적정 보수/보강 비용

저수지의 유지관리를 위한 보수/보강 적정 비용을 산출하기 위해 시설물의 규모정보, 진단정보, 보수/보강정보 등을 이용하여 적정 주기와 운영전략을 결정해야 한다. 이준구 등 (2011)은 7개년의 보수/보강 실적자료를 공종별로 구분하여 [표 8-2]와 같은 주요 인자별 단위비용을 산출하였다.

[표 8-2] 저수지 보수/보강을 위한 주요 인자별 단위 비용 (이준구 등, 2011)

Facility	Division	Works	Unit cost	Unit (thousand)	Main Parameters
Reservoir	Embankment	Stacking	196	won/m ² /m	length, height, crest width, increase
		Grouting	2,202	won/hole	length
		Riprap rear.	90	won/m ²	length, height
		Slope reinf.	1	won/m ²	length, height
		Others	79	won/m ²	length, height
	Spillway	Expansion	9,359	won/m	length
		Emerg. Gate	477,354	won/each	number (except for gate)
		Grouting	5,850	won/hole	length
		Reinstallation	9,090	won/m	length
		Others	6,541	won/m	length
	Outlet Channel	Expansion	896	won/m ²	length, bottom width
		Increase	481	won/m ²	length, bottom width
		Reinstallation	1,050	won/m ²	length, bottom width
		Others	267	won/m ²	length, bottom width
	Intake Facilities	Hoist	67,389	won/each	number
		Spindle	4,822	won/m	height
		Reinstallation	10,810	won/m	height
		Others	7,982	won/m	height
	Sup.works	Supplementary	120,984	won/each	number

이준구 등 (2011)은 또한 규모정보 자료, 정밀 안전진단 자료를 분석하여

아래의 [표 8-3]와 같이 보수/보강 수준에 따라 보수/보강 단위비용을 유도하였다. 낮은 등급에서 높은 등급으로 보수/보강을 추진할수록 많은 비용이 소요되는 것으로 유도되었으며, 각 지구별 소요 비용 산출은 등급별 평균 총저수량과 해당 등급의 단위공사비를 곱하여 산출하였다. D등급인 저수지를 A등급으로 보수/보강하고자 할 때 소요되는 비용은 등급별 평균 총저수량인 471천m³과 D->A 단위공사비인 5,180 won/천m³를 곱한 2,439,780won이 된다. [표8-4]은 저수지별 평균 홍수 피해액을 나타내고 있다. 과거 기간의 평균 피해액을 산정하여 정리하였다.

[표 8-3] 저수지 보수/보강 수준에 따른 단위비용 (이준구 등, 2011)

Grade	Sum of Storage (1,000 m ³)	Average Storage (1,000 m ³)	Scale	Unit Cost (won/1,000 m ³)	Scale	Unit Cost (won/1,000 m ³)
A	427,681	1,062	A->A	0	-	-
B	520,214	503	B->A	3,200	B->B	768
C	556,178	437	C->A	4,416	C->B	2,153
D	131,244	474	D->A	5,180	D->B	2,648
E	-	-	E->A	6,170	-	-
Sum	1,635,497	-	-	-	-	-
Mean	-	471	-	-	-	-

[표 8-4] 저수지별 평균 홍수 피해액 (1982-2011) (단위: 천원)

대권역	저수지명	홍수피해액	대권역	저수지명	홍수피해액	
한강	용설	4,120,574	낙동강	달창	3,217,039	
	용계	3,045,976		주남	2,698,325	
	금석	3,045,976		가월	2,698,325	
	무극	3,045,976	금강	도림	3,296,217	
	용당	3,270,642		반산	10,221,671	
	추평	3,270,642		복심	10,221,671	
	오남	5,041,892		계룡	7,450,739	
	마지	11,681,593		탑정	6,314,916	
	애룡	11,681,593		덕용	10,221,671	
	백운	977,784		동부	4,186,288	
	잠곡	12,050,050	영산강	담양	2,248,330	
	낙동강	오봉		26,148,079	수양	2,973,083
		금오		1,637,449	광주	2,248,330
대성		1,637,449		장성	2,973,083	
도원		592,382		나주	5,500,053	

위의 기준에 맞추어 보수/보강을 수행해야할 저수지를 선정하면 생존확률이 E등급으로 산정된 장성저수지가 해당된다. 다만 장성저수지와 같은 경우는 과거로부터 일정하게 낮은 생존확률을 유지하고 있어 어느 등급으로 안전도를 상향할지에 대한 기준이 필요하다. 이에 대해서는 본 연구에서 선정한 C등급을 선정하여 적용하도록 하고 인근의 저수지의 등급을 참고하여 조정하도록 한다. 백운저수지는 생존확률이 A등급으로 산정되어 추가적인 보수/보강이 필요해보이지는 않으나 특정시기 (2028년)에 안전도가 급격히 떨어지는 결과가 도출됨에 따라 그 시점에서 B->A등급의 단위비용을 적용하여 안전도를 유지하도록 하며, 안전도의 급격한 변화가 발생하는 기간인 18년을 보수/보강 주기에 추가하여 분석하도록 한다. 계룡저수지의 생존확률은 A등급, B등급으로 산정되어 추가적인 보수/보강이 필요해보이지는 않으나 특정시기 (2028년, 2074년)에 안전도가 급격히 떨어지는 결과가 도출됨에 따라 B->A등급의 단위비용을 적용하여 안전도를 유지하도록 한다. 대성저수지의 생존확률은 A등급으로 유지되고 있으나 변동폭이 큰 것으로 나타났다. 생존확률이 증가하는 경우와 감소하는 경우가 주기적으로 발생하고 있어 이에 따른 보수/보강 전략이 필요하다. 특히, 특정시기 (2032년)에 안전도가 급격히 감소하는 것으로 나타나므로 이 시기에 B->A등급의 단위비용을 적용하여 안전도를 상향시키는 전략이 필요하며, 안전도의 급격한 변화가 발생하는 기간인 22년을 보수/보강 주기에 추가하여 분석하도록 한다. 용당저수지의 생존확률은 A등급, B등급으로 유지되고 있으며, 감소폭이 완만한 것으로 나타났다. 이에 따라 B등급으로 특정시기 (2036년)에 B->A등급의 단위비용을 적용하여 안전도를 상향시키는 전략이 필요하다.

수리/수문 안전성 관리는 앞서 구분한 5등급을 기준으로 C등급을 유지할 수 있도록 보수/보강하는 것을 우선으로 한다. 다만, 저수지의 특성, 기후환경을 고려하여 C등급 이상이 유지되더라도 미래기간의 생존확률의 변화를 고려하여 급격하게 변하는 시기가 발생하거나 먼 미래기간에 등급변화가 발생하는 경우에 등급을 상향조정하는 것이 필요하다. 이러한 기준에 따라 C등급이 이상이 유지되더라도 급격한 등급변화가 예상되면 추가적으로 보수/보강을 실시한다. 다만, 전체적인 예산 책정의 문제가 발생할 경우

에 대비에 급격한 등급변화로 인한 보수/보강의 중요도를 추후로 선정하여 우선순위를 결정하도록 한다.

제 2 절 지반 안전성 관리 가이드라인

1. 지반 안정성 조사 관련 기존 자료 분석

정적 생애주기관리 분석을 위한 토질 요소를 분석하기 위하여 현재 실시되고 있는 저수지 정밀진단 보고서의 체체부에 대한 진단 항목을 분석하였다. [표 8-5] 은 정밀진단 보고서의 체체부에 대한 진단 항목이다.

[표 8-5] 정밀진단 보고서 진단 항목 (체체부)

대분류	소분류	평가항목
댐마루	-	표면균열
		침하상태
		보호공 및 유지관리
체체사면	상류사면	양안부 접속상태
		사석 보호공
		식생 및 유지관리
	하류사면	양안부 접속상태
		경사면 유실
		누수
안전율	활동	상류사면 활동 안전율
		하류사면 활동 안전율
	침투	파이핑 안전율
		침투누수량

저수지 체체부에 대한 정밀진단 항목은 댐마루와 체체 사면으로 분리되며 체체 사면은 상류사면과 하류사면의 검사 항목을 구분하여 실시한다. 현재 조사되고 있는 항목은 체체의 상태를 확인 하는 것으로 확인된 항목에 따른 유지보수 공종을 선택할 수 없다는 문제점이 있다. 따라서 이에 대한 고려가 필요하다.

또한 생애주기관리 분석을 위하여 현재까지 제체부에 실시된 유지보수 공종을 조사하였다. [표 8-6] 는 대상지에 실시된 유지보수 공종을 나타낸다.

[표 8-6] 저수지 제체 유지보수 구분 항목

분류	공종	보수내용
수원공	제체	제체보수
		그라우팅
		사석 재정비
		단면보수
		승상
		준설
	여수토	여수토 확장
		여수토 보수
		여수토 그라우팅
		옹벽보강
		비상수문 설치
	배수장	배수장 신설
		배수장 보수
		배수장 증설
	사통	사통 보수
취수탑	취수탑 보수	
평야부	용수로	개거
	기타	수로관

유지보수 공종은 크게 수원공과 평야부로 구분되며 수원공은 제체 여수토 배수장 사통 취수탑 등으로 나뉜다. 하지만 보수 공종이 제체 보수 등으로 정확히 표기되지 않는 경우가 많으며 같은 공종에 대하여 다르게 표현하는 경우도 있어 용어 통일이 요구된다. 따라서 제체부의 보수 공종에 대한 정확한 정의가 필요하며 데이터를 체계적으로 정리하기 위해서는 일관된 용어로 사용되어야 한다.

기존에 실시된 저수지 관리 관련 연구를 조사하였으며 기존 연구에서 사용된 자료를 분석하였다. 소방방재청에서 실시한 “저수지의 재해예방을 위

한 안전관리기법 및 DB구축 개발 등에 관한 연구”에서는 저수지 안전관리를 수리, 지반, 취수로 구분하여 조사하였으며 조사 항목은 각각 상태 평가와 안정성 평가로 구분하여 분석하였다. 소방방재청에서 실시한 연구에서 실시한 저수지 조사 항목은 [표 8-7]과 같다.

[표 8-7] 저수지의 재해예방을 위한 안전관리기법 및 DB구축 개발 등에 관한 연구

분류	구분	평가 항목
수리	수리 안정성 평가	홍수량
		접근수로
	수리 상태 평가	여수토언체
		측수로
		방수로
		감세공
지반	지반 안정성 평가	댐마루폭
		사면기울기-상류
		사면기울기-하류
	지반 상태 평가	댐마루
		상류사면
		하류사면
취수	취수 상태 평가	복통
		사통
		취수탑

기존 연구에서는 저수지 안정성 확보를 위하여 기존에 실시되던 방식에서 벗어나 실제 유지보수 실시 여부에 대한 기준을 제시하였으며 조사항목과 저수지 유지보수 관리와 직접적으로 연계가 되어 실용성이 높아졌다. 하지만 각각의 유지보수 공종이 선택되고 실시되는 과정에 대한 고찰이 부족하여 이에 대한 대안이 필요하다.

산림방재청에서 실시한 연구에서는 현재 상태를 기반으로 유지보수 필요 여부를 판단하였으며 그에 따른 생애주기 함수를 작성하여 연구에 적용하였다. 저수지 제체 관련 유지보수 공종에 대한 판단 인자 기준은 다음과 같다.

[표 8-8] 유지보수 판단 인자

보수 공종	판단 인자
그라우팅	하류사면-제체누수
사석정비	상하류사면-상태조사
단면보강	하류사면-토공사면 붕괴 하류사면-보호공 침하 지반 안정성 총점

2. 지반 안정성 관리 가이드 라인 제시

지반 안정성 관리 가이드 라인을 제시하기 위하여 조사된 기존의 제체 관리 항목을 바탕으로 관리 항목을 선정하였다. 표 ##은 향후 저수지 제체를 관리하기 위한 항목과 현재 실시되고 있는 현황을 나타낸다.

지반 관련 저수지 안정성 관리 및 평가 항목은 크게 상태조사와 안전조사로 구분하였으며 상태조사는 댐마루, 사면으로 구분하여 실시하고 비저항탐사를 통하여 제체 내부 상태를 파악할 수 있도록 하였다. 현재 댐마루와 사면 관련하여 다수의 항목이 현재 실시되고 있으나 기존 하류사면의 경우 식생과 사석을 혼용하여 사용하였기 때문에 하류사면 사석 관리 항목이 포함되어 있지 않아 추가하였다. 또한 현재 비저항 탐사는 지구 상황에 따라 실시되고 있으며 정확하나 침투누수대를 확인하기 위하여 이 항목을 추가하였다. 안전조사 항목에서는 현재 활동과 침투에 대하여 모두 분석하고 있으나 분석에 사용되는 토질 인자들이 현장상황을 고려하지 못하고 문헌값이나 기존 자료를 활용하는 경우가 많다. 토질 정수가 안전 지수의 결정에 많은 부분 영향을 주기 때문에 현장조건에 적합한 토질 정수의 적용이 필요하다. 하지만 토질 정수의 파악을 위하여 보링을 통한 시료 채취를 실시할 경우 제체에 손상을 줄 수 있기 때문에 이에 대한 적절한 주기를 설정하여 파악하는 것이 중요하다. 지속적인 토질정수 분석을 통한 안전율의 변화분석은 시간의 흐름에 따른 제체 안전율 변화 분석에 큰 도움을 줄 것이라 판단된다.

[표 8-9] 지반 안정성 관리 및 평가 항목

대분류	소분류	구분	평가항목	기타	현재실시여부	
상태 조사	댐마루		표면균열		정밀진단	
			침하상태		정밀진단	
			보호공 및 유지관리		정밀진단	
	사면	상류사면		양안부 접촉상태		정밀진단
				사석 보호공		정밀진단
				식생 및 유지관리		정밀진단
		하류사면		양안부 접촉상태		정밀진단
				경사면 유실		정밀진단
				누수상태		정밀진단
				식생 및 유지관리		정밀진단
				사석 보호공		미실시
비저항 탐사		침투누수대 파악		일부 지역 실시		
안전 조사	안전율	활동	상류사면 활동 안전율	단위중량	일부 지역 실측값 사용	
				내부마찰각		
				점착력		
			사면 경사도	설계도면사용		
			하류사면 활동 안전율	단위중량	일부 지역 실측값 사용	
				내부마찰각		
		점착력				
		사면 경사도	설계도면사용			
		침투	침투류 해석		제체 단면	설계도면사용
					투수계수	일부 지역 실측값 사용
			파이핑 안전율		제체 단면	설계도면사용
					투수계수	일부 지역 실측값 사용
침투누수량			제체 단면	설계도면사용		
			투수계수	일부 지역 실측값 사용		

각각의 조사 항목은 유지보수 여부를 판단하는 기준으로 활용된다. 하지만 기존 저수지 제체 유지보수는 종합적으로 판단하여 공종을 선택하고 보수 공사를 실시해 왔다. 따라서 조사 항목에서 문제가 발생하였을 때 어떠한 보수 공종을 선택하고 고려하여야 하는지에 대한 근거가 부족하다. 따라서 본 연구에서는 제체에서 주로 실시되는 보수 공종에 대하여 판단할

수 있는 근거 항목을 지정하였다. [표 8-10] 은 그라우팅, 사석 재정비, 단면 보수 공종에 대하여 판단할 수 있는 조사 항목을 제시하였다.

[표 8-10] 보수 공종과 판단 인자

보수 공종	판단 인자
그라우팅	사면-하류사면-누수상태 비저항 탐사-침투누수대 파악 안전율-침투-침투누수량
사석 재정비	사면-상류사면-사석보호공 사면-하류사면-사석보호공
단면 보수	댐마루-표면균열 댐마루-침하상태 사면-하류사면-경사면 유실 제체 상태 전체 등급 안전율-활동-상류사면 안전율 안전율-활동-하류사면 안전율
제체 손상	제체 전반적인 평가로 수문요소와 종합하여 제체 전면 보수 및 제체 손상을 결정

제 3 절 구조 안전성 관리 가이드라인

현재 저수지 시설물은 준공된 지 30년 이상 된 시설이 약 47.7%로 약 절반을 차지하고 있어 노후화된 시설이 많기 때문에 재해로 인한 농촌, 농업부분의 피해가 증가하면서 농업수리시설물에 대한 재해대비 기능이 강조됨에 따라 노후시설물들의 재해대비 능력 강화를 위한 시설정비의 필요성이 날로 높아지고 있다. 수리시설물은 대부분 단위사업규모가 작고 총사업량이 많으며 장기간의 수명을 가진 농업기반시설이기 때문에 넓은 유역에 걸쳐 설치되어 있어 시설물별 관리가 제대로 이루어지지 않아 노후화 가속도가 증가하고 있으며, 대부분 흙과 콘크리트로 만들어져 항상 관개용수와 접촉하여 기능을 발휘하기 때문에 유지관리상의 여러 가지 문제가 발생하여 이에 따른 유지관리 및 개보수비용이 많이 소요될 뿐만 아니라 기후변화 및 여건 변화에 대응해야 하는 많은 과제를 안고 있다. 따라서 본 보고서에서는 저수지의 실태조사에 따른 재해대비 정비방안에 대한 가이드라인을 검토하였다.

1. 저수지 구조분야 정비 현황

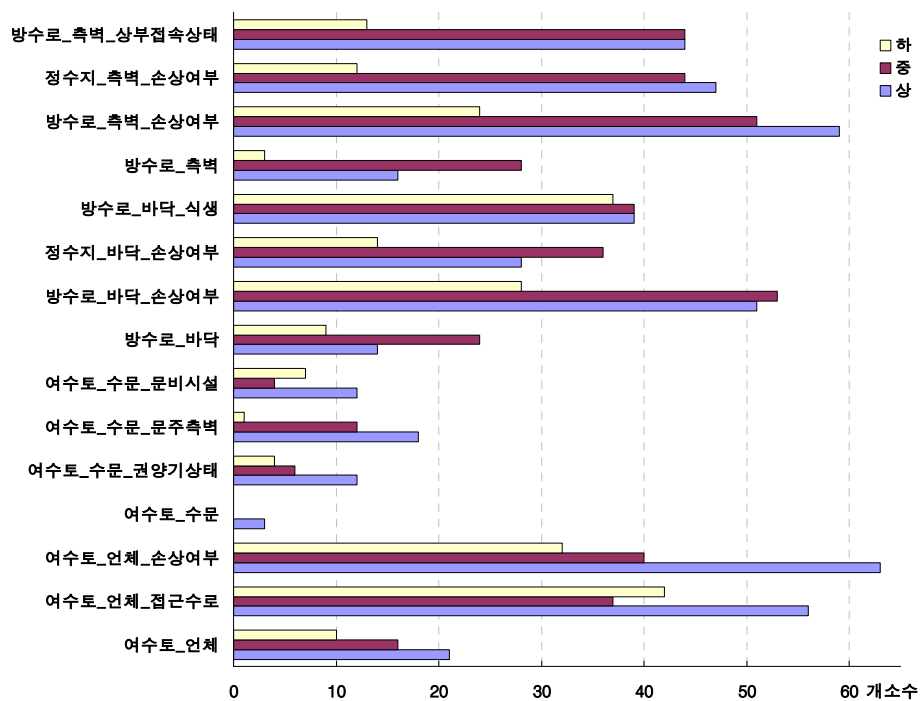
저수지 구조시설의 유지관리 운영주기는 생애함수 변화를 분석함으로써 얻을 수 있다. 기존의 생애함수 혹은 생존확률함수는 수리시설개보수사업, 안전진단, 정밀안전진단, 구조물진단 등의 자료를 이용하여 생애함수를 추정하고 있다. 그러나 이 자료를 이용할 경우에 많은 시험법이 따르게 되며 시간과 노동력이 증가되는 단점이 있다. 따라서 본 보고서에서는 저수지 구조물 요소를 기반으로 한 평가방법을 통하여 생애함수를 추정하는 가이드라인을 제시하고자 한다.

저수지의 생애함수를 추정하기 위해 한국농촌공사와 시·군에서 관리하는 농업용 저수지를 대상으로 하여, 충청북도 일원 진천군, 음성군의 약 134개 저수지를 조사하였다. 조사 항목은 한국농어촌공사에서 실시하는 ‘시설상태 평가표’를 바탕으로 정밀안전진단을 시행하기 전 육안으로 조사하는 시설 상태 평가의 항목을 채택하였으며, [표 8-11] 와 같다.

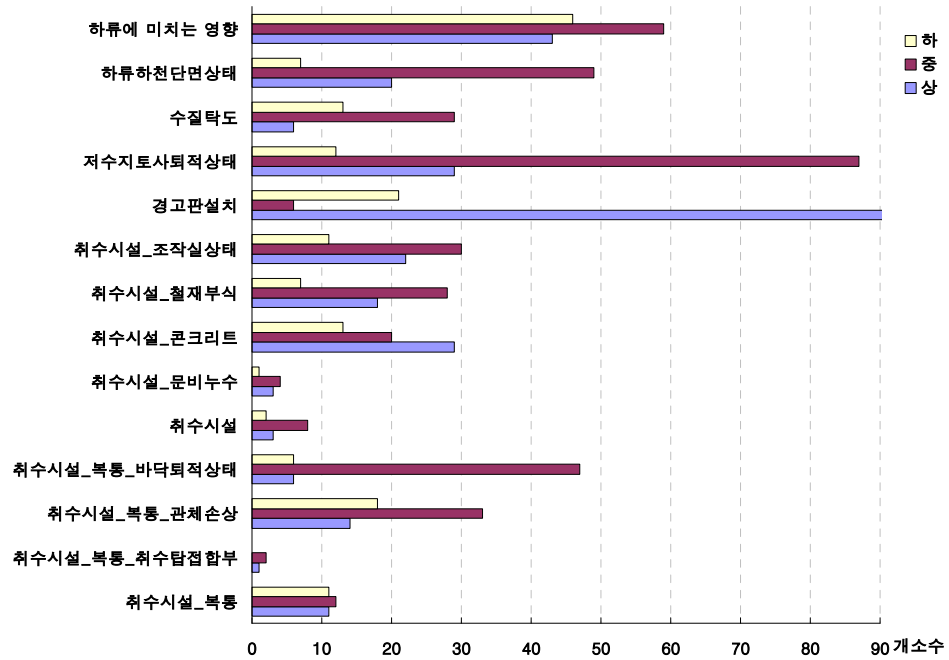
[표 8-11] 저수지 구조물의 평가항목

구 분		평가항목	배점 (상·중·하)	비고
제 체	댐마루	소 계		
		표면균열 상태		
		침하(세굴) 상태		
		보호공 및 유지관리 상태		
	상류사면	소 계		
		양안부 접속 상태		
		사석 보호공 상태		
		식생 및 유지관리 상태		
	하류사면	소 계		
		양안부 접속 상태		
		경사면 유실(세굴) 상태		
		누수(습윤·포화) 상태 식생 및 유지관리 상태		
여 수 토	언 체	소 계		
		접근수로 상태		
		언체 손상 상태		
	수 문	소 계		
		권양기대 손상 상태		
		문주 및 측벽 손상 상태 문비 및 권양시설		
방 수 로	바 닥	소 계		
		방수로 바닥 손상 상태		
		정수지 바닥 손상 상태		
		퇴적(식생) 상태		
	측 벽	소 계		
		방수로 측벽 손상 상태 정수지 측벽 손상 상태 상부 접속사면 상태		
취 수 시 설	복 통	소 계		
		취수탑 접합부 상태		
		관채 손상 상태		
		바닥 퇴적(장애물) 상태		
	취수탑	소 계		
		문비 누수 상태		
		콘크리트 손상 상태		
		철재류 부식(손상) 상태 조작실(대) 상태		
기 타 사 항	주 변 여 건	경고판 설치 상태		
		저수지내 토사퇴적		
		수질 오염 상태		
		하류하천 단면		
		하류에 미치는 영향		

조사결과 저수지에서 여수토, 방수로, 정수지 및 취수시설의 경우 항상 물과 접하기 때문에 노후도가 상당히 진행되었다. 특히 여수토와 방수로의 경우 유속이 급한 경우가 주로 발생되기 때문에 상당부분 구조물로서의 기능을 다하지 못하고 파괴된 경우를 상당히 볼 수 있었다. 상대적으로 용량이 큰 저수지는 여수토와 방수로 바닥의 경우 침전효과가 적어서 유지관리의 이점에 유리할 것으로 판단되었으며 취수시설 또한 양호한 것으로 조사되었다.



[그림 8-2] 저수지 여수토, 방수로, 정수지 평가결과



[그림 8-3] 저수지 취수시설 및 기타 평가결과

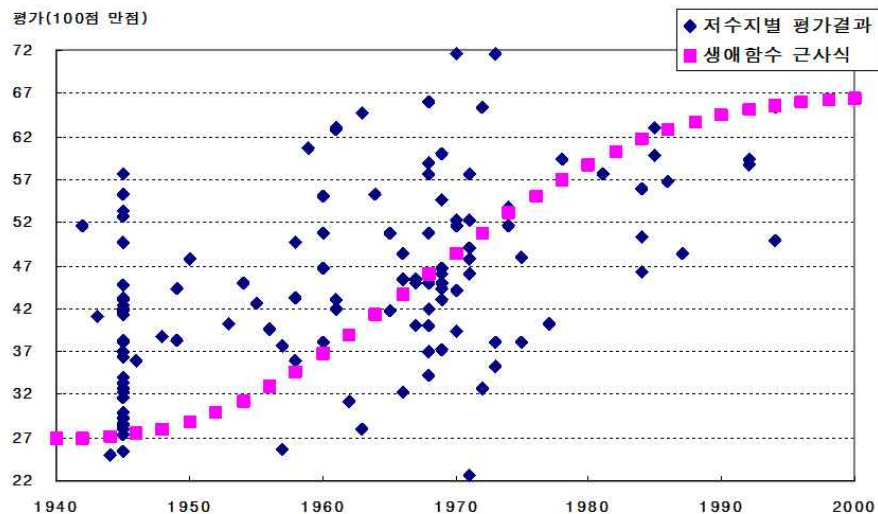
2. 저수지 구조분야 생애합수

조사[표 8-11]의 상·중·하로 평가한 평가결과는 저수지 요소별 평가결과로 저수지를 단일한 시스템으로 평가하기 위해 요소별 평가결과를 합산해야 한다. 또한 저수지 요소별로 저수지 안전도에 미치는 영향이 다르기 때문에 요소별로 가중치도 설정해야 한다. 따라서 각 요소별 가중치는 한국농촌공사 시설상태 평가표의 점수표를 가중치로 채택하였으며 자세한 내용은 [표 8-12]와 같다. 저수지별 평가를 위해 각 요소별 평가가 불분명하거나 많은 요소들이 평가가 이루어 지지 않은 경우 평가 대상에서 제외되었다.

[표 8-12] 저수지 평가를 위한 가중치

구 분		평가항목	가중치
체 체	댐마루	소 계	5.0
		표면균열 상태	2.0
		침하(세굴) 상태	2.0
		보호공 및 유지관리 상태	1.0
	상류사면	소 계	15.0
		양안부 접속 상태	3.0
		사석 보호공 상태	9.0
		식생 및 유지관리 상태	3.0
	하류사면	소 계	25.0
		양안부 접속 상태	3.0
		경사면 유실(세굴) 상태	3.0
		누수(습윤·포화) 상태	16.0
		식생 및 유지관리 상태	3.0
여 수 토	언 체	소 계	6.0
		접근수로 상태	2.0
		언체 손상 상태	4.0
	수 문	소 계	9.0
		권양기대 손상 상태	3.0
		문주 및 측벽 손상 상태	3.0
		문비 및 권양시설	3.0
방 수 로	바 닥	소 계	8.0
		방수로 바닥 손상 상태	5.0
		정수지 바닥 손상 상태	2.0
		퇴적(식생) 상태	1.0
	측 벽	소 계	7.0
		방수로 측벽 손상 상태	4.0
		정수지 측벽 손상 상태	2.0
		상부 접속사면 상태	1.0
취 수 시 설	복 통	소 계	13.0
		취수탑 집합부 상태	2.0
		관체 손상 상태	10.0
		바닥 퇴적(장애물) 상태	1.0
	취수탑	소 계	7.0
		문비 누수 상태	2.0
		콘크리트 손상 상태	2.0
		철재류 부식(손상) 상태	2.0
		조작실(대) 상태	1.0
기 타 사 항	주 변 여 건	경고판 설치 상태	1.0
		저수지내 토사퇴적	1.0
		수질 오염 상태	1.0
		하류하천 단면	1.0
		하류에 미치는 영향	1.0
		총점	100.0

[그림 8-4]은 평가결과로 저수지 생애함수 근사식은 일반적인 생애함수 근사식으로 이용하고 있는 Weibull 분포를 채택하였다. 1940년도와 1950년도 사이의 그래프가 일직선상으로 나타나는 이유는 이번에 조사한 경기도 저수지의 경우 이 기간에 설치된 저수지가 대다수를 차지하기 때문에 나타나는 현상으로 대부분의 저수지가 D나 E 등급에 가까운 것을 볼 수 있다. Weibull 분포식은 $S(t) = e^{-(\lambda t)^\beta}$ 를 적용하였으며 분포함수의 계수는 $\lambda=0.03$, $\beta=0.03$, $R^2=0.45$ 이다. Weibull 분포함수에 따르면 1970년에 저수지가 20년이 지나면 거의 대부분의 저수지가 보수·보강이 필요할 것으로 판단된다. 이는 향후 저수지를 통합한 신규 저수지 비용보다 기하급수적으로 증가할 것으로 판단되며 재해위험도나 유지관리 면에서도 불리할 것으로 판단된다.



[그림 8-4] 저수지 평가결과 및 생애함수 근사식

3. 저수지의 보수/보강 공법

농업수리구조물의 보수/보강 공법은 공법을 소유하고 있는 업체간의 특허논쟁과 각 공법에 대한 적용가능 범위에 대한 물리적 평가가 진행되어야 한다. 그러나 이 자료는 현실적으로 소규모, 다품종의 공법을 제공하고 있는 업체들로서는 표준공시가격과 같은 품셈으로 적용하기에 한계가 있다. 따라서 본 보고서에서는 가격에 대한 설계 대신에 사용빈도와 실무적용사례, 공법과 현장조건의 적합성 요소를 설계 및 진단자가 스스로 평가할 수

있는 설계로 한정하였으며, 차후 공개되는 가격에 따른 공법을 이용하여야 한다.

농콘크리트 구조물에 발생하는 성능저하나 이상은 균열, 박리, 누수 등이 있지만 복수 이상이 동시에 나타나는 경우가 많고 손상 정도도 다양하다. 콘크리트 구조물의 보수는 조사 및 진단을 실시하여 성능저하 및 손상에 대해서 정밀하게 그 내용을 파악하는 것이 중요하다. 이는 손상 정도, 원인, 부위 등에 따라 보수 방법이 달라지기 때문이다. 따라서 보수의 목적을 정확하게 파악하여 어떠한 보수공법이 적절한가를 선정해야 한다.

먼저 현 상태의 구조적 안전성, 내구성, 기능성 등의 성질을 유지하기 위해 성능저하, 손상의 진행을 억제하는 것과 성능저하, 손상된 또는 그 가능성이 있는 구조물에 대해 실용상 지장이 없는 성능까지 회복시키는 것, 그리고 성능저하, 손상된 또는 그 가능성이 있는 구조물에 대해 그 성능을 초기 수준 이상으로 개선하는 것에 따라 보수 공법을 달리 선정해야 한다. 콘크리트 구조물의 보수공법은 보강공법과 비교하면 종류도 적고 간단히 생각되기 쉽지만 실제로는 보강보다 복잡한 면을 가지고 있다. 그것은 보강이 내하력만의 대책에 한정되기 쉬운데 반해 보수는 그 이외의 성능저하, 미관, 역학, 화학적 요인 등의 이상 전체에 대해 대응하여야 하기 때문이다. 구조물의 보강은 보통 원 설계시의 구조성능을 회복시키는 것이 목표 성능이 되지만 부재의 성능저하 상황을 콘크리트 내부 깊숙히 파악하는 것이 곤란하고 현존하는 구조물에 대한 공사이기 때문에 시공상 제약조건을 수반하는 점을 함께 고려할 필요가 있다. 따라서 보강시에는 충분한 여력을 확보할 수 있도록 해야 한다. 특히, 시공 상황에 따라 크게 성능이 변동되는 보강공법의 채용은 피해야 한다. 콘크리트 구조물에 보강을 필요로 하는 요인으로서 내구성 저하, 과대한 균열, 과대한 변형, 진동장해 등의 발생과 과하중에 의한 손상 등이 있다. 이에 대해 콘크리트 구조물의 보강 방법은 보강대상 부재의 단면을 증대시키는 방법, 보강대상 부재에 강재 등의 보강재를 설치하는 방법, 새로운 구조부재를 설치하거나 지지점을 새롭게 추가함으로써 보강 대상 부재의 응력을 경감시키는 방법 등이 있다.

[표 8-13] 국내 보수 공법

대분류	중분류	세분류	세분류내용
보수 기술	균열 보수공법	주입 공법	- 균열부에 주입재를 주입하는 공법 - 균열부위에 수지계 또는 시멘트계 재료를 주입
		충전공법	- 균열에 따라 V, U ; 형으로 절단하여 보수재료를 충전하는 공법 - 좁은 파손부위에 충전성과 유동성이우수한 모르타 등 충전
	단면 복구공법	바탕 처리공법	- 열화된 표면을 보수하기 위하여 표면의 바탕을 처리 - 표면연마, 워터제트, 표면청소, 표면깨어내기 등 실시
		방청 처리공법	- 콘크리트내의 철근, 강재 등을 방청처리 하는 공법 - 전기방식, 탈염, 전착, 표면코팅, 페인팅, 도막포장 등
		함침 처리공법	- 열화부위내부에 각종 재료를 침투시켜 보수하는 공법 - 침투성흡수방지재로서 실리콘, 아크릴, 폴리에스테르 등 - 침투성고화재로는 규산염, 실리카의 무기계와 에폭시수지, 아크릴수지의 유기계 재료 등
		단면 피복공법	- 열화부위단면을 피복처리하는 공법 - 부분피복 및 전체피복으로 단면을 보호함
		중성화 억제공법	- 콘크리트의중성화를 억제하기 위한 공법 - 표면마감, 표면도장, 재알칼리화등적용
		염해 억제공법	- 해양, 해상구조물의 염해침해를 억제하는 공법 - 염분제거, 염해접근차단, 염해저감, 약제침투 등 적용
		동해 억제공법	- 동결융해의 반복에 의한 손상을 억제하는 공법 - 동해억제를 위한 가열, 피막도포 등
	누수 보수공법	방수공법	- 외부의물이 들어오지 못하게 도포처리하는 공법 - 멤브레인방수공법, 도막방수, 우레탄방수, 복합방수 공법등 - 시멘트모르타방수, 스프레이방수 등
		지수공법	- 건물 지하벽 등에 물의 유입을 그치게 하는공법 - 지수판, 지수제 수입 등
		차수공법	- 댐, 제방등의 누수를 억제하기 위한 공법 - 댐차수, 제방차수, 지반약액주입차수 등 적용
		배수공법	- 누수를 유도하여 배수하는 공법 - 터널 유도배수, 배수트렌치 등
	표면 처리공법	마감부위 보수공법	- 건축마감열화에 대한 보수하는 공법 - 건축마감인 타일, 화강석, 석고보드, 금속재, 실링재, 미장공사 등의 보수
		오버 레이공법	- 열화된 콘크리트 표면을 덧씌우는 공법 - 콘크리트 또는 아스팔트 등으로 덧씌움

*출처 : 한국콘크리트학회편 “콘크리트진단 및 유지관리”

[표 8-14] 국내 보강 공법

대분류	중분류	세분류	세분류내용
보강 기술	단면 증설공법	강재 증설공법	- 내력손상된 구조물 주요부위(보, 슬라브, 코너 등)의 표면에 강재 등을 부착하여 보강하는 방법 - 슬라브하부에 작은 철골 보를 설치하거나 슬라브의 지지거리를 감소시켜 슬라브의 휨모멘트와 처짐을 감소시키는 방법
		보강재 매입 공법	- 내력손상된 구조물 주요부위에 보강재를 매입하여 보강하는공법 - 단섬유 보강된 콘크리트재질 혹은 고강도 모르타르와 특수폴리머의 복합구조의 형틀을 내력손상부위에 사용하여 형틀의 역할과 구조체의 일부가 되도록 매입하는 공법
		콘크리트 증타공법	- 내력손상된 구조물 주요부위에 콘크리트를 증타하여 보강하는 공법 - 화재 등에 의한 구조물 일부 파손 부위에 형틀을 대고 유동성과 접착성이 양호한 고성능콘크리트나 모르타르등을 타설 혹은 뿜칠함
	부착공법	강판 부착공법	- 손상된 구조물 주요부위에 강판을 부착하여 보강하는 공법 - 보 전단 및 휨인장보강, 슬라브 보강 등이 있음 - 콘크리트 및 강판접착면에 에폭시수지를 각각 균일하게 도포하고 미리 콘크리트면에 고정시킨 앵커볼트 등에 의해 강판을 부착 - 콘크리트면과 강판면 사이의주변을 실링 하고 한쪽 방향에서 점도가 낮은 에폭시수지를 접착하는 보강공법
		섬유시트 · 패널 부착공법	- 탄소섬유시트공법 : 탄소섬유, 함침 접착용수지, 프라이머를 사용하여 단면손상부위에 접착시켜 보강하는 공법 - 유리섬유시트공법 : 장유리섬유와 에폭시수지를 침윤기를 통해 침윤시킨 재료를 구조물에 접착하는 보강공법 - 아라미드섬유시트공법 : 아라미드 섬유를 1 방향으로 배열하여 시트모양으로 가공한 재료로 시트에 에폭시수지를 함침시키면서 콘크리트표면과 일체화시켜 성능을 개선하는 공법 - 패널부착공법 : 섬유강화플라스틱판 등의패널을 보강부에 접착하여 보, 상판 등의 여러 가지 구축물 보강하는 공법
	프리 스트레싱 공법	프리 텐션공법	- 기존부재에 외적 프리스트레싱을 부여함으로써 부재에 발생하고 있는 인장응력을 감소시켜 균열을 복귀시킬 뿐만 아니라 압축응력을 부여하여 휨모멘트, 전단력, 출력의증가로 구조의 내력 및 강성의증가 등을 기대할 수 있는 보강공법으로 콘크리트를 치기전에 PC 강재를 미리 긴장시키는 공법
		포스트텐 션공법	- 상기와동일하고 콘크리트 경화 후에 스트랜드에 인장력을 주고 그 강재를 콘크리트에 정착시켜서 프리스트레스를 부여하는 공법

*출처 : 한국콘크리트학회편 “콘크리트진단 및 유지관리”

제 9 장 농업생산기반시설 통합안전성 활용에 대한 제안

제 1 절 지역기반 사회안전지수의 개발

농업생산기반시설과 같은 기반시설은 지역사회에 직·간접적으로 많은 영향을 끼친다. 시설의 설치로 인해 직접적으로 발생하는 이익이나, 시설의 파괴로 인한 직접적인 피해에 대해서는 사업계획서나 비상대처계획(EAP)을 통해 그 영향력이 잘 분석되어 있다. 그러나 직접적인 1차피해에 이어 발생하는 간접적인 2차피해의 영향력에 대한 분석은 미비한 실정이다. 카트리나, 후쿠시마의 사례에서 보듯 재해로 인한 기반시설의 손상이나 파괴 시 직접적인 피해보다 그와 연관되어 발생하는 간접적인 2차피해는 그 범위와 규모가 1차피해에 비해 훨씬 크다. 따라서 시설물의 손상이나 파괴로 인한 2차피해에 대한 분석은 매우 중요하다.

2차피해는 피해발생 범위가 넓고 피해의 인과관계를 규명하기가 어려워 정량적으로 분석하기가 까다롭다. 본 연구에서는 기반시설이 지역사회에 미치는 사회·경제적 영향력을 거시적인 관점에서 지역사회 전체 범위의 특징을 나타내는 지수를 통해 분석함으로써 2차피해 분석의 어려움을 해결하고자 하였으며 이를 통해 시설 단위의 안전성 지수를 개발하였다. 시설물의 안전성을 관리하고 유지보수를 실행하는 장기계획을 수립하기 위해서는 시설물의 안전도에 따른 지역의 안전성을 확인할 수 있는 지수가 필요하다. 따라서 본 연구에서 개발한 저수지 체제 중심의 농업생산기반시설 통합안전성 지수를 활용하여 지역의 사회적 안전성을 평가할 수 있는 지수 개발할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 시설단위의 안전성 지수를 평가하는 기법을 개발하였으며 이를 지역단위의 안전성을 평가하는 데에도 활용할 수 있을 것이다. 또한 시설물의 안전성뿐만 아니라 사회 전반의 다양한 분야의 안전성을 평가하는 기법의 개발을 통해 지역의 사회적 안전성을 평가하는 데에 본 연구에서 개발한 기법이 기초적인 토대로 활용할 수 있을 것이다. 따라서 시설단위의 안전성 지수를 지역단위로 확대하는 방안에 대한 추가 연구를 통해 지역단위의 사회안전성 지수의 개발이 필요하며, 본 연구에서 개발한 시설 중심의 통합 안전성 분석 기법 및 관리 시스템을 사회안전 지수의 개발에

활용할 수 있을 것이다.

본 절에서는 이러한 시설단위의 지수를 통한 지역단위의 안전지수의 개발가능성을 확인해보고자 시설의 안전성이 지역사회 사회·경제에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 이를 위해 시설의 안전성이 지역 내 인구 변화와 지역내총생산량(GRDP)에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 농업생산기반시설의 파괴로 인한 사회·경제적 영향력을 분석하기 위해 실제 저수지 손괴로 인해 피해를 입은 지역의 사례를 분석하였다. 피해를 입은 지역과 비슷한 조건을 가진 지역을 대조군으로 설정하고 인구변화와 GRDP의 변화를 살펴봄으로써 기반시설 파괴로 인한 사회·경제적인 2차피해를 정량적으로 분석할 수 있는 방안에 대해 모색하였다. 이를 통해 농업생산기반시설의 사회·경제적 영향력을 분석하고 2차피해 예방으로 인한 사회·경제적인 이득을 기반시설 재개발 로 인한 편익에 포함시킬 수 있을 것이다.

본 절에서는 2002년 8월 제15호 태풍 「루사」 때의 호우로 인해 시설의 손괴가 발생한 장현저수지와, 동막저수지가 위치한 강릉 지역의 사례를 분석하였다. 동막저수지는 1961년에 강원도 강릉시 구정면 어단리 금광천(지방2급) 상류에 설치되었으며, 장현저수지는 1947년에 강원도 강릉시 장현동 섬석천(지방2급) 상류에 설치되었다. 두 시설 모두 2002년 태풍 「루사」 때의 호우 영향으로 제체 일부를 포함한 물넘이 및 방수로가 완전 유실되어 하류지역에 피해를 발생시킨 바 있다 (농업기반공사, 2004a, 2004b). 본 절에서는 2002년 태풍 「루사」 가 발생하기 전의 강릉과 위치, 인구 및 GRDP 조건이 비슷한 원주와 춘천과의 비교를 통해 농업생산기반시설의 손괴로 인한 사회·경제적 영향력을 분석하였다. 2000년도의 강릉, 원주 및 춘천의 인구와 GRDP는 [표 9-1]에 정리하였다.

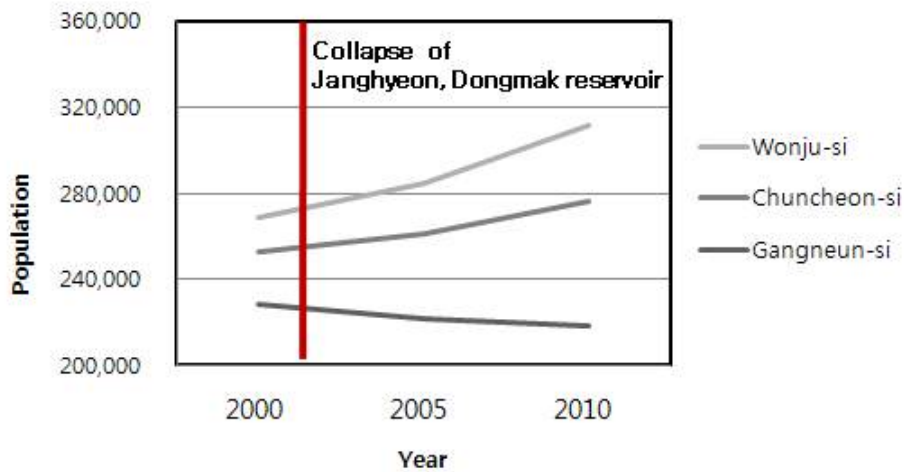
[표 9-1] 2000년도 강릉, 원주, 춘천 인구 및 GRDP 비교

	강릉시	원주시	춘천시
행정구역	강원도	강원도	강원도
인구 (명)	228,232	268,352	252,547
GRDP (백만원)	2,680,570	3,295,985	2,728,400

*출처: 통계청, 국가통계포털 (<http://kosis.kr>)

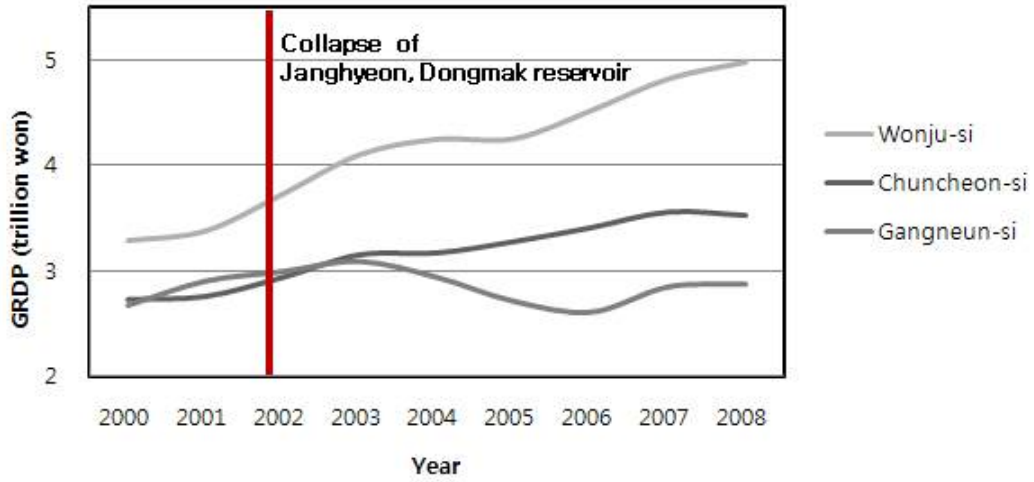
*참고: 인구는 총조사인구, GRDP는 2005년 기준가격 사용

장현·동막저수지 손괴 이후의 강릉과 원주, 춘천의 인구를 비교한 결과를 [그림 10-1]에 나타내었다. 원주, 춘천의 경우 2000년 이후 꾸준히 인구가 증가한 반면 비슷한 인구조건을 가진 강릉의 경우는 지속적으로 인구가 감소하는 경향을 확인할 수 있다.



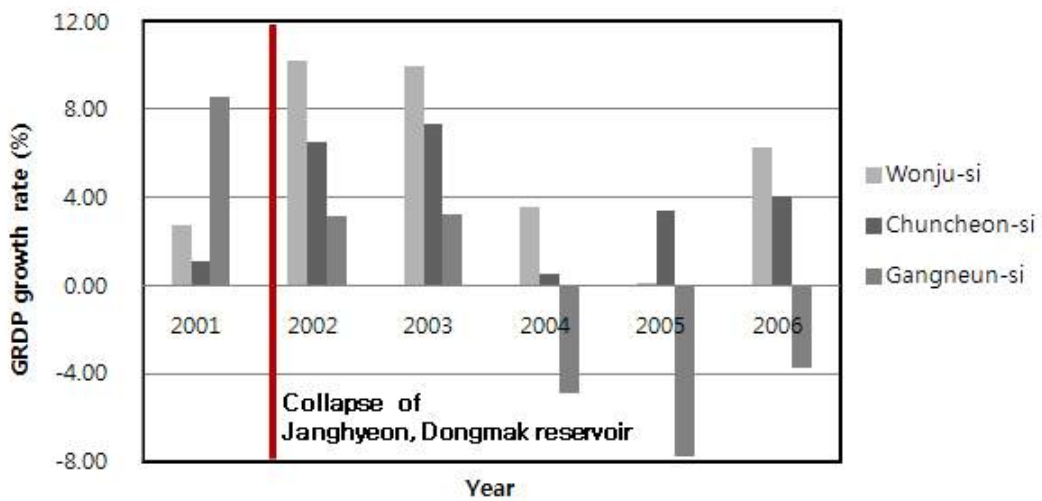
[그림 9-1] 태풍「루사」이후의 원주, 춘천 및 강릉의 인구변화

지역내총생산(GRDP)의 경우도 원주, 춘천의 GRDP가 증가하는 동안 강릉의 GRDP는 그 성장세가 둔화되다 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 강릉지역 GRDP의 감소가 저수지의 손괴로 인해 발생하였다는 인과관계가 밝혀지진 않았으나 비슷한 조건의 2지역이 성장하는 동안 강릉의 경우 GRDP가 감소하였다는 사실로 미루어보았을 때 기반시설의 파괴가 지역사회 인구의 인구와 GRDP에 영향을 끼쳤음을 짐작할 수 있다.

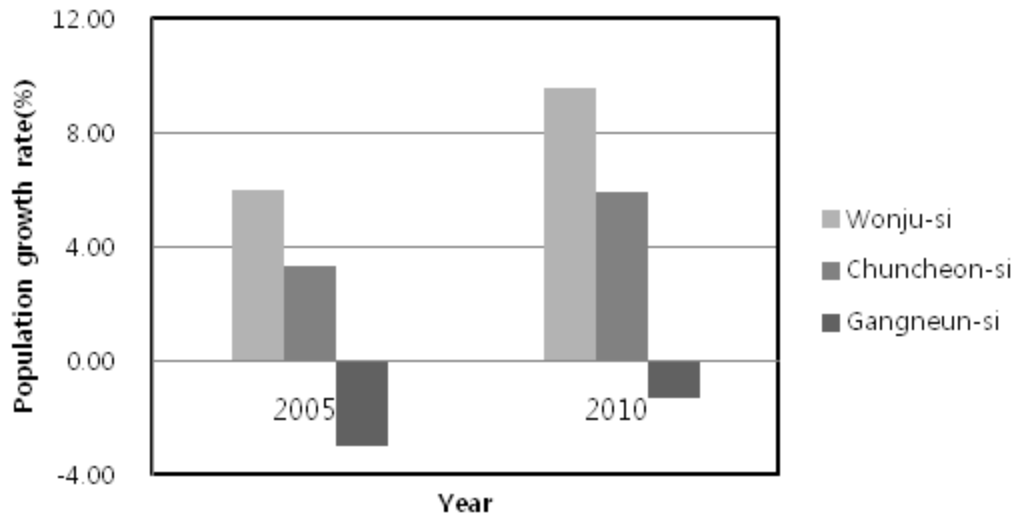


[그림 9-2] 태풍「루사」이후의 원주, 춘천 및 강릉의 GRDP변화

[그림 9-1], [그림 9-2]에 나타난 인구증가율과 GRDP증가율을 비교하면 기반시설의 손괴가 지역사회에 미친 사회·경제적인 영향력이 보다 확연히 드러남을 확인할 수 있다.



[그림 9-3] 태풍「루사」이후의 원주, 춘천 및 강릉의 GRDP증가율 변화



[그림 9-4] 태풍「루사」이후의 원주, 춘천 및 강릉의 인구증가율 변화

본 절에서는 태풍 「루사」로 인해 저수지가 붕괴되었던 장현, 동막지구의 사례를 분석함으로써 기반시설의 손상·파괴가 지역사회에 미치는 사회·경제적인 영향을 살펴보았다. 이러한 2차피해의 영향력을 정량적으로 분석할 수 있는 기법에 대한 추가 연구를 통해 시설물의 안전성이 지역의 사회경제 전반에 미치는 영향에 대해 분석할 수 있을 것이다. 이러한 분석을 통해 시설물 중심의 안전성 지수를 활용함으로써 지역 단위의 사회안전지수 분석 기법 개발이 가능하게 될 것이다. 그러나 이러한 사회안전지수를 개발하고 지역의 안전성을 평가하기 위해서는 사회 전반에 대한 다양한 분야의 기초자료가 필요하다. 여러 현장조사 사업을 통해 기초자료가 많이 수집되었으나 지역의 사회적 안전성 분석에 필요한 자료가 여전히 남아있어 추가 조사사업이 필요한 것으로 판단된다.

제 2 절 조사자료의 유형

본 연구에서 개발한 시설단위의 안전성 지수를 지역단위의 안전성 지수로 확대 적용하기 위해서는 추가적인 자료가 필요하다. 이러한 추가 자료를 수집하기 위해 필요한 조사표를 각 분야별로 정리하여 저수지제원, 하

천설계기준, 제체안전성, 하류지역 현황, 하류지역 생산시설, 하류지역 환경, 지역경제, 그리고 지역 삶의 질의 8가지 분야에 대한 조사표로 나타내었다.

1. 저수지제원

대분류	중분류	소분류	기존설계	재설계
제체안전성 설계기준	홍수	설계빈도년		
	지진	설계빈도년		
	내구성	설계수명		
관개배수 설계기준	배수	설계빈도년		
	관개	설계빈도년		
하천안전성 설계기준	홍수	설계빈도년		
	가뭄	설계빈도년		
저수지	설계기준	홍수량		
		갈수량		
		한발빈도		
	수혜면적	합계		
		순관개		
		관개배수		
		구역외		
	저수량	총저수량		
		유효저수량		
	관리수위	홍수위		
		만수위		
		사수위		
	면적	유역면적		
		관개면적		
		만수면적		
	제당	형식		
		제정표고		
		길이		
		높이		
		제정폭		
	물넘이	형식		
		길이		
		접근수심		
		일류수심		
	방수로	길이		
		폭		
	설치	준공년도		
	진단	진단년도		
		진단등급		
		진단횟수		
	유역	표준유역		
		중권역		
		대권역		
	위치	도시		
		시·군·구		
		읍·면·동		
주소코드				

2. 하천설계기준

대분류	중분류	소분류	기존설계	재설계
하천안전성 설계기준	홍수	일강우량이 80 mm 이상인 날 평균횟수		
		3시간 동안의 최대 강우량		
		24시간 동안의 최대강우량		
		24시간 지속기간, 200년 빈도 확률강우량		
		강우발생일의 90%양		
		단일 강우 강도		
		최대 5일 총 강우량		
		90% 호우 한계점 이상 강우량 비율		
		90% 호우 한계점 이상 강우량 발생 빈도		
	가뭄	연속적인 무강수일 수의 최대값		
		12~2월 강수량		
		3~5월 강수량		
		12~2월 증발산량		
		3~5월 증발산량		
		지하유출		

3. 제체안전성

대분류	소분류	구분	평가항목	기타	현재실시여부	
상태 조사	댐마루		표면균열		정밀진단	
			침하상태		정밀진단	
			보호공 및 유지관리		정밀진단	
	사면	상류사면		양안부 접속상태		정밀진단
				사석 보호공		정밀진단
				식생 및 유지관리		정밀진단
		하류사면		양안부 접속상태		정밀진단
				경사면 유실		정밀진단
				누수상태		정밀진단
				식생 및 유지관리		정밀진단
				사석 보호공		미실시
비저항 탐사		침투누수대 파악		일부 지역 실시		
안전 조사	안전율	활동	상류사면 활동 안전율	단위중량	일부 지역 실측값 사용	
				내부마찰각		
				점착력		
			사면 경사도	설계도면사용		
			하류사면 활동 안전율	단위중량	일부 지역 실측값 사용	
				내부마찰각		
		점착력				
		사면 경사도	설계도면사용			
		침투	침투류 해석		제체 단면	설계도면사용
					투수계수	일부 지역 실측값 사용
	파이핑 안전율			제체 단면	설계도면사용	
				투수계수	일부 지역 실측값 사용	
	침투누수량			제체 단면	설계도면사용	
투수계수		일부 지역 실측값 사용				

4. 하류지역 현황

대분류	중분류	소분류	설계당시	현 재
주거지	주민	인명		
		이재민		
	건물	단독주택		
		연립주택		
		아파트		
농경지	논	경지정리답		
		미경지정리답		
	밭	보통특수작물		
		과수원,기타		
	하우스재배지	하우스재배지		
	과수원	과수원		
	기타	원예지		
조경지				
농장/목장				
시설물	비닐하우스	철골팻트온실		
		철골유리온실		
		자동화비닐하우스		
		철재파이프하우스		
		목재하우스		
		죽재하우스		
	가축시설	가축시설		
		분뇨처리시설		
	저장시설	농기계창고		
		농산물창고		
		농산물집하장		
	공공시설물	마을도로		
		교량		
하수도				
농업용시설				
임야	초지	자연초지		
		공원묘지		
		가로수		
		기타인공초지		
	임목지	침엽수림		
		활엽수림		
혼합수림				

5. 하류지역 생산시설

대분류	중분류	소분류	설계당시	현 재
수계	습지	갯벌		
		염전		
	하천	하천		
	호소	호소		
	기타	백사장		
나지	채광지역	광산		
		채석장		
		기타 광물		
시가화/건조지역	관공서	시군구청		
		읍면동사무소		
		소방서		
		우체국		
		보건소		
		치안행정기구		
	마을시설	마을회관		
	교육시설	초등학교		
		중학교		
		고등학교		
	공공시설	환경기초시설		
		발전시설		
		군사시설		
	공업시설	공업시설		
	상업시설	상업,업무시설		
		혼합지역		
		주유소		
	위락시설	휴양시설		
		유원지		
		경기장		
		관광시설		
	교통시설	공항		
		항만		
		철도		
	도로시설	고속도로		
		국도		
		지방도		
군도				
면도,리도				
통신시설	전신주			
	기타통신시설			

6. 하류지역 환경

대분류	중분류	소분류	설계당시	현 재
시가화/건조지역	수리환경	하천개수율		
		하수발생량		
		홍수범람위험구역		
		불투수율		
		하천경사도		
		유출곡선번호		
	도로환경	도로연장		
	인적환경	인구밀도		
		인구당 공무원수		
		면적당 물관리 공무원수		
	용수환경	상수도:1인1일급수량		
		지하수이용량		
		하천수이용량		
		생활용수사용량		
		공업용수사용량		
		농업용수사용량		
		상수도 보급률		
		지하수 가용량		
		단위면적당 용수공급 용 저수지 저수용량		
		단위면적당 물재이용량		

7. 지역경제

대분류	중분류	소분류	설계당시	현 재
자본	자본금	공공자본		
		민간자본		
소비	소비인구	0~20세		
		21~40세		
		41~65세		
		65세이상		
		상설시장		
	시장	정기시장		
		식음료점		
		기타상가		
생산	산업체	농림 및 임업		
		광업		
		제조업		
		전기가스 및 수도업		
		건설업		
		도매 및 소매업		
		숙박 및 음식점업		
		운수업		
		통신업		
		금융 및 보험업		
		부동산 및 임대업		
		사업서비스업		
		공공행정국방 및 사회보장행정		
		교육서비스업		
		보건 및 사회복지사업		
		오락문화 및 운동관련 산업		
기타공공수리 및 개인 서비스업				
노동	종사자	농림 및 임업		
		광업		
		제조업		
		전기가스 및 수도업		
		건설업		
		도매 및 소매업		
		숙박 및 음식점업		
		운수업		
		통신업		
		금융 및 보험업		
		부동산 및 임대업		
		사업서비스업		
		공공행정국방 및 사회보장행정		
		교육서비스업		
		보건 및 사회복지사업		
		오락문화 및 운동관련 산업		
기타공공수리 및 개인 서비스업				
문화	정보의 양	인터넷등록건수		
		신물등록건수		
		문화행사		
		유적지		
		마을전통행사		

8. 지역 삶의 질

대분류	중분류	소분류	설계당시	현 재
소득	소득소비	소득수준		
		소비수준		
		경제생활안정		
	노동	경제활동		
		근로조건		
건강	보건의료	시설		
		인력		
	서비스			
	수질	수질		
안전	생활안전	치안		
		사고안전		
		안전의식		
	작업환경안전	활동가능시간		
		가로등/보도		
편리	주거	주거상태		
		주거의질		
	정보화	정보화정도		
		정보화인식		
	교통	교통시설		
		교통의 질		
	이동	버스갯수/면적		
		도로/면적		
	생활	시장/면적		
		시장/인구		
쾌적	환경	환경압력		
		환경의질		
		환경관리		
	생활	복구소요시간		
		도로보수주기		
		상수도보수주기		
사회	교육	교육기회		
		교육자원		
	활력	인구밀도		
		인구증감		
		고령화율		
	복지	사회보험		
		공공부조		
		사회복지		
문화	문화여가	문화예술활동		
		여가활동		
	공동체	이웃친구		
		사회참여		
	교육	학교밀도		
		학원밀도		
		교육시설		
		교육기회		
		교육수준		

제 3 절 통합안전성 지수의 활용 및 제언

1. 통합안전성 지수의 활용 방안

통합안전성을 통해 단위시설의 지수를 단일 단위로 나타냄으로써 각 기반시설 안전성 현황을 비교하고 파악할 수 있다. 시설물의 통합안전성 분석을 통해 시설물 간 안전성 비교가 가능하며, 지역별 취약시설을 선별할 수 있으며 이를 통해 우선보수시설을 분석하는 데에 본 연구에서 개발한 시스템을 활용할 수 있으며, 항목별 안전성 지수를 통해 각 시설의 취약요소를 파악할 수 있으며, 보강에 따른 안전성의 변화를 모의함으로써 보수보강 사업의 효과를 분석하는 데에 활용할 수 있다. 또한 지역 간 안전성 비교를 통해 도시 및 농촌 지역의 농업생산기반시설 설치지역의 안전성을 비교할 수 있으며 이를 통해 시설물의 유지관리 계획수립에 본 연구에서 개발한 관리시스템을 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 제언

본 연구결과를 통해 시설물의 안전성을 통합안전성 지수를 통해 분석하는 기술이 정립되었으며, 자료확충을 통해 전국의 농업생산기반시설 안전성을 파악하여야 할 것이다. 전국적 조사를 실시하고 안전성을 분석함으로써 시설물 안전성 위험지역과 우선 보수보강 대상 시설을 파악할 필요가 있다. 이를 통해 목표 안전성 지수를 설정하여 시설물의 유지관리 및 보수보강에 대한 장기투자계획을 수립하여야 할 것이다.

제 10 장 결론

본 연구과제는 농촌개발의 타당성을 정량적으로 분석할 수 있는 신뢰성 지수를 개발하고 이를 적용 및 활용할 수 있는 가이드라인과 시범시스템을 개발하는 것을 과제의 최종목표로 한다.

이를 위해 본 연구에서는 재해발생시 직접적인 1차피해에 이어 발생하는 간접적인 2차피해를 고려하는 설계의 중요성을 밝히고 기후변화, 사회변화, 수요변화 등의 환경변화에 대응하기 위한 농업생산기반시설의 설계기준의 변화하였는지를 비교 분석하고 현재의 시설물의 안전성이 변화된 환경에 대응할 수 있는지를 재평가하는 3가지 목표를 설정하였다. 다양한 재해조건에 대해 각기 다른 농업생산기반시설의 안정성을 평가하기 위해 통합안정성 평가방법을 개발하고자 하였다. 농업생산기반시설은 다른 시설물과 달리 실패시 해당시설물 주변의 넓은 지역과 그 지역에 거주하는 주민들의 삶에 치명적인 영향을 끼칠 수 있기 때문에 농업생산기반시설물 자체의 안정성뿐만 아니라 해당 지역 거주민들의 입장에서 분담해야하는 안정성의 측면에서도 분석을 하고자 하였다. 이를 위해 농업생산기반시설에 결정적인 위험을 끼칠 수 있는 위험조건을 수리수문, 지반 및 토질, 구조적 측면에서 분석하고 위험 요인을 도출하였다. 홍수, 가뭄, 지진, 평상시 체체붕괴, 구조물 파괴, 콘크리트 노후화 등이 위험요인으로 분석되었으며, 그 해석방법을 제시하였다.

연구 대상시설은 지역적 특성에 따른 왜곡을 최소화하고 자료 구득이 가능하도록, 한국농어촌공사 관할 시설 중 한강 수계, 낙동강 수계, 금강 수계, 영산강 수계를 고려하여 30개 대상지역을 선정하였다. 당해연구는 농업기반시설 중 단위 시설에 대하여 안전성 분석을 수행하였으며, 현재 시설물의 안전성 평가와 미래기후 변화에 따른 안전성 변화를 모의하였다. 관련 자료 구축은 데이터베이스 설계와 구축방안으로 한정하였다.

농업생산기반시설은 전후 중소규모 관개사업을 시작으로, 농촌근대화를 위한 영농기반시설 조성 사업으로 규모를 확장하며 건설되어 왔다. 1990년대를 지나 2000년대에 이르러 효율 측면에서 기반시설 건설을 우선시하던

정책이 안전 측면에서 기반시설을 관리하는 측면으로 변화하였다.

농업기반시설을 안전하게 관리하기 위해서는 다양한 위해 요소를 파악하고, 이를 객관적으로 평가하여, 적절한 대응전략을 수립할 수 있는 체계가 중요하다. 변화에 적응하지 못했을 경우, 재해와 같은 과국이 발생하게 되는데, 사례 분석을 통해 위험정도를 가늠할 수 있어야 할 것으로 판단된다. 그리고 현재 상태는 과연 어느 정도 안전한지에 대한 정량적이고 객관적인 평가가 이루어져야하며, 분석 과정에서 사용된 많은 자료와 분석을 통해 도출된 자료들을 효과적으로 저장하여 의사결정에 반영할 수 있도록 정보 관리 시스템이 필요하다.

농업생산기반시설은 사회적인 필요나 관심에 따라 홍수량이 증가하거나 하천유지용수가 추가되는 등 다양한 설치목적과 사업기준에 의해 설계하고 관리되어 왔다. 기반시설의 특성상 다양한 수요에 대응하여야 하므로 시설물을 평가하는 요소가 시설물의 효용, 유지관리비의 절약 및 재해에의 대비 등 다양하나 이러한 다양한 요소에 대한 평가는 직접적인 비교가 어려운 실정이다.

본 연구에서는 객관적이고 정량적으로 농업생산기반시설의 안전에 관한 지수를 산정할 수 있도록 기반시설의 안전에 관한 신뢰지수인 통합안전지수를 개발하고자 한다. 통합안전지수는 단일 시스템 내에서의 여러 안전기준을 하나로 통합하며, 시설물의 안전성뿐만 아니라 시설물의 안전과 연관된 시설물 하류부의 농촌지역 특성이 반영되도록 개발되어야 한다.

통합안전지수를 통해 시설물의 안전과 관련된 다양한 평가기준이 단일한 지수로 나타남으로써 각각 다른 안전기준으로 설계된 시설물 간에 안전성을 비교 평가하고 이를 농촌개발의 타당성 평가에 활용할 수 있도록 지수를 개발하고자 하였다.

통합안전지수는 단위 및 기준이 다른 여러 항목을 하나의 항목으로 통합하여야 하므로 먼저 고려하고자 하는 요소를 단일한 단위로 치환하여야 한다. 확률이론에 기반한 신뢰성지수를 사용할 경우 이러한 문제를 해결할 수 있으며 본 연구에서는 통합안전지수를 확률에 기반한 신뢰성 지수로써 개발하고자 하였다.

농업생산기반시설과 같은 기반시설은 지역사회에 직·간접적으로 많은

영향을 끼친다. 2차피해는 피해발생 범위가 넓고 피해의 인과관계를 규명하기가 어려워 정량적으로 분석하기가 까다롭다. 본 연구에서는 기반시설이 지역사회에 미치는 사회·경제적 영향력을 거시적인 관점에서 지역사회 전체 범위의 특징을 나타내는 지수를 통해 분석함으로써 2차피해 분석의 어려움을 해결하고자 하였다.

본 연구의 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

본 연구에서는 한국농어촌공사에서 관리하는 3000여개의 저수지 중 4대강 유역에 위치한 저수지 30개 저수지를 선정하여 조사대상지역으로 선정하였으며 조사대상지는 한강, 금강, 낙동강, 영산강 4대강 유역별로 각각 구성다. 통합안전성 DB는 유역현황, 저수지 설계제원, 수문자료, 토질자료, 하류부자료 5개 분야의 농업생산기반시설에 관한 자료와 통합안전지수를 산정하기 위해 필요한 과거재해이력, 인프라 구조 및 인구현황 등의 하류부의 자료로 구성하였다.

기후변화를 모의하고 이에 따른 기존 농업생산기반시설의 안전성을 분석한 결과는 다음과 같다. 기후변화를 모의 함에 있어 기후변화 시나리오는 RCP 시나리오 중에서, 우리나라 온실가스 저감정책 현실을 잘 반영하고 있는 RCP 4.5 시나리오를 선택하여 분석한 결과 HEC-HMS 모형 및 HEC-5 모형으로 모의하여 산정된 200년 빈도 홍수량은 30개 저수지의 평균이 444 m³/s에서 1,036 m³/s으로 증가하였으며 평균 PMF는 1,106m³/s에서 1,983m³/s로 크게 증가하는 것으로 분석되었다. 저수지 별로 편차는 있겠으나 전반적으로 기후변화에 따른 홍수량이 크게 증가하는 것으로 분석되었다. 홍수량이 저수지의 안전성에 크게 영향을 미치므로 기후변화에 따른 저수지의 안전성에도 큰 변화가 있을 것으로 예상된다. 강우강도의 변화와 강우 지속시간을 반영하여 체체 표면 침투를 고려한 침투 해석 및 안정성 해석 결과, 강우강도가 0에서 20 mm/hr로 높아질 경우 안전율이 4.7에서 1.5로 낮아지는 것으로 분석되었으며, 안전율 하락폭은 체체의 규모에 영향을 받으며 체체의 규모가 작을수록 안전율이 크게 낮아지는 것으로 나타났는데 기후변화로 인한 높은 강우강도와 큰 홍수량을 가진 강우사상이 예상될 경우 하류사면의 강우시 표면 침투를 방지하기 위한 대책이 필요할 것으로 분석되었다.

본 연구에서는 시설의 안전성을 수리/수문 안정성, 지반안정성, 구조적 안정성의 항목으로 나누어 분석하고, 그 결과를 통합하여 단일 지수로 나타낼 수 있도록 평가 단위를 도입하였다. 농업생산기반시설의 안전성은 홍수피해시, 지진시 제체붕괴, 평상시 제체붕괴 등의 각기 다른 세가지 재해에 대해 입는 피해를 통해 각 재해를 대상으로 시설의 파괴 및 붕괴에 따른 기대값, 즉 기대피해액을 기준으로 재해의 위험도를 평가하여 서로다른 사상을 통합적으로 판단할 수 있게 하였다. 각 단위 시설의 붕괴에 따른 피해 기대값을 통하여 단위 시설의 상대적 취약성을 분석할 수 있으며 각 시설에 대한 보수보강효과는, 보수보강에 따른 취약성의 개선으로 나타낼 수 있다.

농업생산기반시설은 설치년도에 따라 설치목적과 안전에 관한 사업기준이 상이하어 시설물에 따라 다른 설계기준을 고려하여 시설물의 안전성을 분석하고 이를 비교할 수 있도록 통합안전지수를 개발하였다. 통합안전지수는 기대피해액을 정규화과정을 통해 1.0에서 5.0 사이의 지수로 변환하여 시설물의 안전성을 평가하였으며, 안전성 평가에는 시설물의 손괴에 따른 하류부의 예상 피해를 반영할 수 있도록 관리지표를 개발하였으며, 환경변화와 사회변화를 고려하여 시설물의 안전성을 시뮬레이션이 가능하도록 통합안전성 분석 모듈을 개발하였으며 이를 통합안전성 관리시스템에 적용하였다. 개발한 통합안전성 분석방법을 적용하여 한강, 낙동강, 금강, 영산강의 4대강의 30여개 저수지에 대하여 수리/수문안정성, 제체안정성, 구조적 안전성을 분석하고 이를 통해 통합안전성지수를 산정하였다.

본 연구에서는 시설물의 안전성을 하나의 단일한 수치로 파악하고 시설물의 취약 부분을 파악할 수 있는 통합안전성 관리시스템 (Integrated Safety System; ISS) 프레임워크(framework)를 개발하였다. 통합안전성 관리시스템 프레임워크를 바탕으로 웹기반의 시범 시스템을 개발하였으며 이를 본 연구의 연구대상 시설에 적용하여 시설물의 안전성을 분석하였다. 통합안전성 웹시스템은 개별 농업생산기반시설물의 안전성에 대한 데이터를 일관된 형태로 축적하고, 이들 데이터를 이용하여 시설물 재해에 대한 예상 피해액과 안전성지표를 자동으로 계산하여 관리자의 의사결정을 돕는 것을 목표로 개발하였다. 개발된 통합안전성 관리시스템을 이용하여 표본

농업생산기반시설의 기대피해액의 지수인 통합안전성 지수를 분석하였으며, 도시와 농촌의 지수를 비교한 결과 도시 지역은 평균 1.13인 반면, 농촌지역은 평균 1.33으로 산출되어 농촌지역의 안전성이 도시보다 재해에 취약한 것으로 분석되었다.

통합안전성을 통해 단위시설의 지수를 단일 단위로 나타냄으로써 각 기반시설 안전성 현황을 비교하고 파악할 수 있으며 시설물의 통합안전성 분석을 통해 시설물 간 안전성 비교가 가능하다. 지역별 취약시설을 선별하여 우선보수시설을 분석하는 데에 본 연구에서 개발한 시스템을 활용할 수 있을 것이다. 항목별 안전성 지수를 통해 각 시설의 취약요소를 파악할 수 있으며, 보강에 따른 안전성의 변화를 모의함으로써 보수보강 사업의 효과를 분석하는 데에도 본 연구의 결과를 활용할 수 있다. 지역 간 안전성 비교를 통해 도시 및 농촌 지역의 농업생산기반시설 설치지역의 안전성을 비교할 수 있으며 이를 통해 시설물의 유지관리 계획수립에 본 연구에서 개발한 관리시스템을 활용할 수 있을 것이다.

본 연구를 통해 시설물의 안전성을 통합안전성 지수를 통해 분석하는 기술의 기초가 마련되었으며 추가적인 자료의 조사 및 수집을 통해 전국 단위의 농업생산기반시설이 위치한 지역 안전성을 파악하여야 할 것이다. 이를 위해 전국 단위의 조사를 실시하고 안전성을 분석함으로써 시설물 안전성 위험지역과 우선 보수보강 대상 시설을 파악할 필요가 있다. 이러한 분석을 통해 목표 안전성 지수를 설정하고 이를 통해 시설물의 유지관리 및 보수보강에 대한 장기투자계획을 수립하여야 할 것으로 본 연구를 통해 제안하는 바이다.

참고문헌

1. 강명오, 2001, 고속도로 구조물 유지관리체계 및 발전방안, 대한토목학회, 49(7), 37-44
2. 강부식, 문수진, 2011. 가뭄전망과 실시간 물관리를 위한 APCC 계절예측정보의 활용. 한 국방재학회논문집, Vol. 11 (1), pp. 31-36.
3. 강상혁, 2004, 2002년 태풍루사 및 2003년 태풍 매미에 따른 지역수해 대응의 개선대책에 관한 연구, 한국방재학회지, 3(4), 111-118
4. 강원발전연구원, 2003, 일본의 방재기본계획 .풍수해 대책을 중심으로
5. 강인석, 문현석, 박서영, 2006, 시설물 재해관리를 위한 재해관리전자매뉴얼 시스템 구성방안 연구, 대한토목학회 정기학술대회, 광주.
6. 강정은, 이명진, 2012. 퍼지모형과 GIS를 활용한 기후변화 홍수취약성 평가 - 서울시 사례를 중심으로 -. 한국지리정보학회논문집, Vol. 15 (3), pp. 119-136.
7. 건설교통부, 2006, 수자원장기종합계획(2006-2020) 보고서. 건설교통부
8. 고성석, 송혁, 이한민, 2005, 재해사례와 위험도 지수를 활용한 건축공사 안전정보 시스템 개발, 대한건축학회, 21(6), 113-120
9. 고익환, 2002, 하천유역 통합수자원관리 기반기술 구축방안, 한국수자원학회논문집
10. 고재경, 2009. 경기도 기후변화 취약성 평가 연구. 경기개발연구원.
11. 광상록, 왕종배, 조연옥, 박찬우, 2006, 철도안전관리를 위한 안전지표 선정에 관한 연구, 한국철도학회 추계학술대회, 부산
12. 국가수자원관리 종합정보시스템 (Water Management Information System, WAMIS), <http://www.wamis.go.kr>, 국토해양부.
13. 국립기상연구소, 2011. IPCC 5차 평가보고서 대응을 위한 기후변화 시나리오 보고서.
14. 국립방재연구원, 2011. 지역사회기반 홍수피해저감지수 개발.
15. 국립환경과학원, 2012. 지자체 기후변화 부문별 취약성 평가 고도화.
16. 국토연구원, 2004, 공간분석기법
17. 국토연구원, 2007, 농촌지역특성의 진단지표개발과 정책적 활용방안
18. 국토해양부, 2008, 국토해양통계연보
19. 국토해양부 항공정책실, 2009, 항공안전관리시스템 승인지침, 국토해양부훈령 제277호
20. 국토해양부, 2012. 수자원장기종합계획 (2011 ~ 2012).
21. 권오상, 2010, 기상순위결정방법을 이용한 자연생태계의 경제적 가치평가, 경제학연구, 48-3, pp. 177-196
22. 기상청 (Korea Meteorological Administration), <http://www.kma.go.kr>.
23. 기상청, 2012. 2012년 이상기후 보고서.
24. 김대식, 전택기, 배승종, 2010, 농촌마을단위의 정주환경진단지표 개발, 농촌계획학회, pp. 27-41
25. 김동현, 장연태, 전희조, 2008LBS기반 U-ICT 재난·재해관리 관제시스템 개발, 한국화재소방학회 춘계학술발표회, 대전.
26. 김만일, 채병근, 정교철, 2005, 흙사면 절개지 불포화토의 침투거동 특성에 관한 연구, 대한지질공학회 논문집, 15(4), 487-494
27. 김상규, 1994, 강우로 인한 절취사면의 불안정, 한국지반공학회 정기 학술대회
28. 김선주, 2004a, 농업수리시설의 환경친화적 정비와 농촌개발, 한국관개배수 논문집.

- 11-2. pp. 186-189
29. 김선주, 2004b. 농업수리시설의 환경친화적 정비와 농촌개발, 한국관개배수, pp. 186-189.
 30. 김울안이, 정민철, 공정식, 2010, 기후변화에 따른 수공구조물 영향분석 최신 연구동향, 한국수자원학회 논문집, 43(9), 37-42.
 31. 김용태, 2011, 동일본 대지진 발생 100일 일본동향, 한국무역협회 도쿄지부
 32. 김정부, 이두순, 김홍상, 1998. 농업생산기반정비사업의 추진체계에 관한 연구, 한국농촌경제연구원
 33. 김정원, 김윤화, 신현순, 송성욱, 권혁면, 고재욱, 2002, 화학공장의 위험도 표현 시스템 개발, Theories and Applications of Chem. Eng., 8(2), 3161-3164
 34. 김종렬, 강승구, 상희복, 박승균, 박철원, 2005, 강우 시 석회암 풍화토 사면의 안정해석에 관한 연구, 대한지질공학회 논문집, 15(1), 9-17.
 35. 김종환, 2005, 재난대응체제 확립을 위한 재난관리 협력체제에 관한 연구, 법학연구학회, 20권, 621-642.
 36. 김태철, 김진수, 노재경, 송창섭, 이남호, 유기송, 장의웅, 최신일, 최진규, 한중희, 2002, 농업생산기반정비사업계획설계기준 필담편, 농림수산식품부.
 37. 김태형, 한건연, 조완희, 2011. 홍수위험지도 활용을 위한 낙동강 유역에서의 홍수취약도 분석. 한국지리정보학회논문집, Vol. 14 (3), pp. 203-222.
 38. 김홍상, 신은정, 2004. 농업용수 관리체계 개편의 방향과 정책과제, 한국농촌경제연구원
 39. 김환석, 박기정, 김상단, 최민하, 박무중, 윤재영, 2012. 기후변화와 대규모 하천정비 사업을 고려한 낙동강 유역 자연재해 홍수 취약성 평가. 한국방재학회논문집, Vol. 12 (2), pp. 107-113.
 40. 김환중, 2004, 웹기반 정보시스템을 활용한 시설물의 유지관리 체계 구축, 한국관개배수학회, 제11권 제2호
 41. 김훈, 김용수, 2011, 시설물 안전관리 네트워크 운영시스템 개발, 한국토목학회지, 특별기사 II-1, 제59권 제2호
 42. 김흥순, 2010, 계획의 실패 또는 한계에 관한 연구 : 허리케인 카트리나로 인한 뉴올리언즈 시의 재난을 중심으로, 한국지역개발학회지 22(4)
 43. 나수엽, 이호진, 2005. 허리케인 카트리나가 미국 및 우리 경제에 미치는 영향, 오늘의 세계경제, 대외경제정책연구원
 44. 남원호, 2013. 확률론 기반 농업용 저수지의 용수공급 지속가능성 및 운용성 평가. 서울대학교 박사학위논문.
 45. 노삼규, 이종철, 권기환, 강성희, 2005, 허리케인 '카트리나'의 피해현황, 국립방재교육연구원, 방재연구 7(4), 28
 46. 노준우, 이상욱, 정세웅, 2008, 유역통합수자원관리를 위한 하천수질 예측시스템의 개발 및 적용, 한국수자원학회논문집, 41(1), 33-38
 47. 노형진, 2010. Excel 및 SPSS를 활용한 다변량분석 원리와 실천. 한울출판사.
 48. 녹색성장 위원회, 기상청, 외교통상부, 농림수산식품부, 지식경제부, 환경부, 보건복지부, 국토해양부, 소방방재청, 농촌진흥청, 산림청, 식품의약품안전청, 2011. 2011년 이상기후 보고서, 관계부처 합동
 49. 농림수산식품부, 2010, 농어업재해조사 및 복구계획 수립지침

50. 농림수산식품부·한국농어촌공사, 2010, 농어촌 환경용수 실태조사 및 산정방안 연구(최종)
51. 농어촌연구원, 1995. 수리시설물관리의 문제점 및 개선방안연구, 농어촌진흥공사
52. 농어촌연구원, 2005. 북한의 농업생산성 향상을 위한 수리시설 복구 지원방안 연구(I) (양수장시설을 중심으로), 농림부
53. 농업기반공사, 2004a, 동막저수지 비상대처계획, 농림부
54. 농업기반공사, 2004b, 장현저수지 비상대처계획, 농림부
55. 농정대책특별연구단, 2004, 한국농촌경제연구원, 농업·농촌종합대책 실천방안 연구
56. 농촌진흥청, 2008, 농업분야 기후변화대책 추진현황, 국회기후변화대책특별위원회 업무보고자료
57. 대한무역투자진흥공사, 2011. 일본 대지진 발생 한 달 - 일본 산업계 복구현황과 대일 수출입 영향, Global Business Report
58. 류권규, 이남주, 이상호, 2011, 일본의 침투에 대한 제방의 안전성 평가 방법, 한국수자원학회 논문집, 44(3), 68-72
59. 류권규, 이남주, 2011, 침식에 대한 일본의 제방 안전성 평가 방법, 한국수자원학회 논문집, 44(1), 79-84.
60. 명수정, 2009. 기후변화 적응 강화를 위한 사회기반시설의 취약성 분석 및 대응방안 연구 I. 한국환경정책·평가연구원.
61. 명수정, 김지영, 신상희, 안병옥, 2010. 기후변화 적응 강화를 위한 사회기반시설의 취약성 분석 및 대응방안 연구 II. 한국환경정책·평가연구원.
62. 박광호, 황용우, 남궁은, 2007, 지속가능한 건설을 위한 TBL 통합모델의 개발, 대한환경공학회지, Special Feature, 369-376
63. 박종대, 2012, 미래형 용수공급체계 개선 및 친수공간 정비, 농어촌과 환경 No.114. : pp.1-14
64. 박지훈, 강문성, 송인홍, 2012. 분위사상법을 이용한 RCP기반 미래 극한강수량 편익보정: 우리나라 20개 관측소를 대상으로. 한국농공학회논문집, Vol. 54 (6), pp. 133-142.
65. 배덕효, 이문환, 2010. 기후변화에 따른 홍수취약성 평가와 사례 분석. 국토연구원 국토, Vol. 344, pp. 20-31.
66. 사공명, 임경재, 2005, 강우를 고려한 사면내 요부에서의 안정성 해석, 한국지반공학회 논문집, 21(9), 77-86
67. 소방방재청, 중앙재난안전대책본부, 2010, 재해연보
68. 소방방재청, 2012. 국가재난정보센터. <https://www.safekorea.go.kr>.
69. 송영석, 홍원표, 2011, 강우시 습윤전선 및 지하수위를 고려한 사면의 안정성 해석, 대한지질공학회 논문집, 21(1), 25-34.
70. 송인홍, 송정현, 김상민, 장민원, 강문성, 2012. 우리나라 농업기상재해의 공간 분포 및 지역 특성. 한국농공학회논문집, Vol. 54 (6), pp. 45-52.
- 71.
72. 신성일, 이광훈, 2008, 자산관리시스템을 통한 서울시 도로시설물 관리 전략, 23권, 1-21.
73. 신승목, 김상규, 장연수, 박종관, 1994, 강우침투를 고려한 사면의 변형특성모델, 한국지반공학회 가을 정기 학술대회, 서울.
74. 신영철, 1997, 이중 양분선택형 질문 CVM을 이용한 한강 수질개선 편익 추정, 환경경제

- 연구, 6-1, pp. 171-192
75. 신창건, 이종영, 송원근, 장범수, 2003, 응벽 시설물의 안전점검 및 정밀안전진단 평가기법 개발, 대한토목학회 정기 학술대회, 대구
 76. 심우배, 2011, 2011. 기후변화에 따른 새로운 도시방재 패러다임과 도시정책방안, 국토연구원심재엽, 2011, 일본 지진 사태의 영향과 전망, 신한금융투자 투자전략팀.
 77. 안성준, 김정희, 김용달, 윤인섭, 2008, 화학공정안전관리 시스템의 정량적 평가를 위한 사고데이터기반의 지수개발, 한국화학공학회, 부산
 78. 안재현, 2007, 외국의 물관리 현황검토 및 국내 적용방안 연구, 한국수자원학회논문집, 40(2), 39-45
 79. 안종필, 오희주, 김진택, 박용훈, 심태섭, 2008, 강우침투에 따른 사면안정 해석에 관한 연구, 한국지반공학회 가을 정기 학술대회, 광주.
 80. 엄영숙, 1998, 대기오염이 건강에 미치는 영향에 대한 가치평가: 회피행위접근법을 사용하여, 환경경제연구, 7-1, pp. 1-24
 81. 오세익, 김동원, 박혜진, 2004, 한국농촌경제연구원, 농업의 다원적 기능에 대한 국민의식 조사유기영, 김진택, 김정은, 2008, 농업용수의 기후변화 적응능력 지표 개발 - 가뭄에 대한 적응을 중심으로 -, 환경정책연구, 7(4), 36-56
 82. 유가영, 김정은, 2007, 기후변화가 농업생태계에 미치는 영향분석 - 벼 생산 취약성 평가 방법론 연구, 한국환경정책평가연구원
 83. 유가영, 김인애, 2008. 기후변화 취약성 평가지표의 개발 및 도입방안. 한국환경정책·평가연구원.
 84. 유승환, 2009. 기후변화에 따른 미래 농업가뭄 특성 분석. 서울대학교 박사학위논문.
 85. 유승환, 최진용, 이상현, 오윤경, 박나영, 2012. 고해상도 기후시나리오를 이용한 논용수 수요량 및 단위용수량의 기후변화 영향 분석. 한국농공학회논문집 Vol. 54 (2), pp. 15-26.
 86. 유지호, 이동호, 신현준, 2005, 안전성 향상을 위한 도로터널 등급에 관한 연구, 한국안전학회, 20(3), 112-119
 87. 윤영봉, 위옥량, 강금배, 최익훈, 김창환, 2012, AHP분석기법을 이용한 상수도관망 불량도 평가에 관한 연구, 대한상하수도학회 학술발표회, 일산
 88. 윤영창, 김성일, 1992, 산림자원의 휴양가치 산출을 위한 경제적 평가방법론 비교연구, 환경경제연구, 1-1, pp. 155-184
 89. 윤두현, 박병순, 2011. 농업생산기반시설 안전진단, 한국관개배수학회, pp. 62-68.
 90. 윤용남, 2008. 수문학 -이론과 응용 -. 청문각.
 91. 이대수, 1996, 수위가 변동하는 댐의 안정성 해석(I)-침투류 해석을 중심으로, 한국지반공학회 논문집, 12(6), 65-78
 92. 이문환, 2010. 기후변화에 따른 국내 홍수 취약성 평가. 세종대학교 석사학위논문.
 93. 이승래, 오태규, 김윤기, 김희철, 2009, 강우침투시 강우강도와 포화투수계수가 안전율에 미치는 영향, 한국지반공학회 논문집, 25(1), 65-76
 94. 이승래, 이성진, 변위용, 장범수, 2001, 화강풍화토 지반의 불포화 특성을 고려한 최적화 기법에 의한 사면안정해석 방법, 한국지반공학회 논문집, 17(6), 123-133.
 95. 이장화, 2004. 재해 및 재난에의 대응, 건설기술정보, pp. 1-3.
 96. 이정식, 조성근, 신창동, 2011, 강우시 불포화투수계수를 이용한 침투능 산정, 한국수자원

학회 정기 학술대회.

97. 이정주, 권현한, 박재영, 염경택, 2012. 수자원 평가를 위한 차세대 기후변화 시나리오 <IPCC Assessment Report 5, RCP 시나리오에 대하여>. 한국수자원학회지, Vol. 45 (2), pp. 48-53.
98. 이지평, 배민근, 윤상하, 2011. 일본 대지진 - 경제적 충격파는 어디까지?, 빌딩경영, pp. 56-66.
99. 이호진, 2005. 허리케인 카트리나가 미국 및 우리 경제에 미치는 영향, 대외경제정책연구원, 제05-31호
100. 이형근, 김은지, 2011. 동일본대지진 이후 일본의 피해복구 현황과 시사점, 오늘의 세계 경제, 대외경제정책연구원
101. 이형근, 김은지, 2001, 동일본대지진 이후 피해복구 현황과 시사점, 대외경제정책연구원, 11(22),
102. 임경수, 송두범, 박지영, 윤성수, 2008. 재난발생의 지역경제효과 분석사례 및 기법연구, 충남발전연구원
103. 임진혁, 임봉택, 주민근, 이홍정, 배진석, 진해군항의 태풍 피항방안과 부두시설 개선방안에 관한 연구 : 태풍 매미의 교훈을 중심으로, 해군사관학교 논문집, 제36집, 47-74
104. 장민원, 2004. GIS를 이용한 농업가뭄에 대한 지역 취약성 평가 기법의 개발. 서울대학교 박사학위논문.
105. 정근채, 2007, u-City 서비스 모델을 활용한 미래형 유비쿼터스 도시 구축전략, Entru Journal of Information Technology, 6(1)
106. 정상섭, 최재영, 이재환, 2009, 지속강우특성에 따른 불포화 풍화토사면의 안정성분석, 대한토목학회 논문집, 29(1C), 1-9.
107. 정진홍, 오현제, 2010, 도시 물순환 통합관리 네트워크 구축기술, 대한토목학회지, 제58권, 12호
108. 정찬기, 2010. 지속가능한 농어촌용수 관리방안, 한국관광개배수학회지, pp. 4-6.
109. 조규태, 노관섭, 이재식, 김동균, 2009, 고령사회를 고려한 고속도로 설계기준 개선방안 연구, 한국도로학회 학술대회, 부산.
110. 조성은, 이승래, 2000, 강우침투에 따른 불포화 토사사면의 안정해석, 한국지반공학회 논문집, 16(1), 51-64
111. 조용식, 2011. 동일본 지진해일과 방재대책, 시설안전 38: 9-21.
112. 조환익, 2011, 일본 대지진 발생 한달, KOTRA, Global Business Report 11-012
113. 주관정, 천영철, 김동욱, 여영건, 2005, 영흥대교 유지관리 및 상태평가 시스템 개발, 유신기술회보 제12호
114. 진남희, 박준오, 박미연, 2008, LCC 및 LCA 통합에 근거한 철도시설물 유지관리 필요성 고찰, 한국철도학회 추계학술대회, 대구
115. 추장민, 공성용, 백승아, 2010, 저소득계층의 기후변화 적응역량 강화를 위한 정책방안 연구, 한국환경정책평가연구원
116. 통계청, 2012. 국가통계포털. <http://kosis.kr>.
117. 한국농촌연구원, 2010. 농업생산기반정비사업 총사업비 유형분석 및 관리기법 개발, 농림수산식품부
118. 한국무역협회, 2011. '동일본 대지진 발생 100일' 일본 동향

119. 한국희, 2004, 일본의 방재정보시스템에 관한 연구, 한국인터넷정보학회 추계학술발표대회, 제5권 제2호
120. 한상열, 최관, 이주희, 1997, 산림휴양자원에서 비이용가치의 존재와 평가, 산림경제연구, 5-2, pp. 1-11
121. 한화진 외, 2007, 기후변화 영향평가 및 적응시스템 구축 III, 한국환경정책평가연구원
122. 행정자치부, 국립방재연구소, 2001, 재해취약시설의 선정기준 및 점검기법 연구
123. 홍은미, 최진용, 이상현, 2009. LARS-WG를 이용한 기후변화에 따른 논벼 증발산량 산정. 한국농공학회논문집, Vol. 51 (3), pp. 25-35.
124. 환경부·국립환경과학원, 2012. (지자체 기후변화 적응 세부시행계획 수립 지원을 위한) 기후변화 부문별 취약성 지도 - 물 관리·해양/수산(양식)·재해(기반시설) -.
125. 환경부·국립환경과학원, 2012. (지자체 기후변화 적응 세부시행계획 수립 지원을 위한) 기후변화 부문별 취약성 지도 - 총괄/요약보고서 -.
126. 황혜선, 2012. 도시지역의 기후변화 취약성 지표 개발 및 평가. 인하대학교 석사학위논문.
127. 황혜선, 변병설, 2011. 기후변화 취약성 평가 지표의 개발: 서울시를 중심으로, 환경정책, Vol. 19 (4), pp. 93-119.
128. (주)베이스소프트, 2004, SEEP/W 2004 Tutorial, Geo-Slope International
129. (주)베이스소프트, 2004, SLOPE/W 2004 Tutorial, Geo-Slope International
130. Arthur M. Dowell III, 1998, Layer of protection analysis for determining safety integrity level, 37, 155-165.
131. Edward M. Marszal, Brad A. Fuller, and Jatin N. Shah, 2004, Comparison of Safety Integrity Level Selection Methods and Utilization of Risk Based Approaches, 18(4), 189-194.
132. Brooks, N. W., N. Agder, and P. M. Kelly. 2005. The Determinants of Vulnerability and Adaptive Capacity at the National Level and the Implications for Adaption, Global Environmental Change, Vol. 15 (2), pp. 151-163.
133. CRU, 2005. STARDEX Final Report.
134. Fraser, Evan D.G., E. Simelton, M. Termansen, S. N. Gosling, and A. South, 2012. "Vulnerability Hotspots": Integrating Socio-Economic and Hydrological Models to Identify Where Cereal Production May Decline in the Future Due to Climate Change Induced Drought. Agricultural and forest Meteorology.
135. Füssel, H.-M., 2007. Vulnerability: A Generally Applicable Conceptual Framework for Climate Change Research. Global Environmental Change, Vol. 17, pp. 155-167.
136. Füssel, H.-M., and Richard J. T. Klein, 2006. Climate Change Vulnerability Assessments: An Evolution of Conceptual Thinking. Climatic Change, Vol. 75, pp. 301-329.
137. Giupponi, C., S. Giove, and V. Giannini, 2012. A Dynamic Assessment Tool for Exploring and Communicating Vulnerability to Floods and Climate Change. Environmental Modelling & Software, pp. 1-12.
138. Hahn, M. B., A. M. Riederer, and S. O. Foster, 2009. The Livelihood

- Vulnerability Index: A Pragmatic Approach to Assessing Risks from Climate Variability and Change—A Case Study in Mozambique. *Global Environmental Change*, Vol. 19, pp. 74-88.
139. Hashino, T., A. A. Bradley, and S. S. Schwartz, 2007. Evaluation of Bias-Correction Methods for Ensemble Streamflow Volume Forecasts. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, Vol. 11, pp. 939-950.
 140. IPCC, 2007. *Climate Change 2007: Impacts, Adaption and Vulnerability*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
 141. IPCC, 2011. <http://www.ipcc-data.org>.
 142. Kumar Bhimavarapu and Pans Stavrianidis, 2000, Safety Integrity Level Analysis for Processes: Issues and Methodologies, *Process Safety Progress*, 19(1), 19-24
 143. Lawrence Beckman, 1998, Determining the required safety integrity level for your process, 37, 105-111.
 144. Mohamed Sallak, Christophe Simon, and Jean-Francois Aubry, 2008, A fuzzy probabilistic approach for determining Safety Integrity Level, *IEEE TRANSACTIONS ON FUZZY SYSTEMS*, 16(1), 1-10.
 145. Moss, R. H., A. L. Brenkert, and E. L. Malone, 2001. *Vulnerability to Climate Change a Quantitative Approach*. The U.S. Department of Energy.
 146. Moss, R., M. Babiker, S. Brinkman, E. Calvo, T. Carter, J. Edmonds, I. Elgizouli, S. Emori, L. Erda, K. Hibbard, R. Jones, M. Kainuma, J. Kelleher, J. F. Lamarque, M. Manning, B. Matthews, J. Meehl, L. Meyer, J. Mitchell, N. Nakicenovic, B. O'Neill, R. Pichs, K. Riahi, S. Rose, P. Runci, R. Stouffer, D. Van Vuuren, J. Weyant, T. Wilbanks, J. P. Van Ypersele, and M. Zurek, 2008. *towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies*. Technical Summary. intergovernmental Panel on Climate Change.
 147. Moss, R., M. Babiker, S. Brinkman, E. Calvo, T. Carter, J. Edmonds, Nitschke, C. R., and J. L. Innes, 2008. Integrating Climate Change into Forest Management in South-Central British Columbia: An Assessment of Landscape Vulnerability and Development of a Climate-Smart Framework. *Forest Ecology and Management*, Vol. 256, pp. 313-327.
 148. Pittman, J., V. Wittrock, S. Kulshreshtha, and E. Wheaton, 2011. Vulnerability to Climate Change in Rural Saskatchewan: Case Study of the Rural Municipality of Rudy No. 284, *Journal of Rural Studies*, Vol. 27, pp. 83-94.
 149. Srivastava, A., S. N. Kumar, and P.K. Aggarwal, 2010. Assessment on Vulnerability of Sorghum to Climate Change in India. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, Vol. 138, pp. 160-169.
 150. Stedinger, J. R., R. M. Vogel, and E. Foufoula-Georgiou, 1993. Chapter 18: Frequency Analysis of Extreme Events. *Handbook of Hydrology*, Maidment, D. R. (Editor in Chief), Mcgraw-Hill.

151. Teutschbein, C., and J. Seibert, 2012. Bias Correction of Regional Climate Model Simulations for Hydrological Climate-Change Impact Studies: Review and Evaluation of Different Methods. *Journal of Hydrology*, Vol. 456, pp. 12-29.
152. UNISDR, 2012. <http://www.unisdr.org>.
153. Y. Wang, H. H. West and M. S. Mannan, 2004, The Impact of data uncertainty in determining safety integrity level. *Process Safety and Environmental Protection*, 82(B6), 393-397.
154. Y. Papadopoulos, M. Walker, M.-O. Reiser, M. Weber, D. Chen, M. Törnngren, D. Servat, A. Abele, F. Stappert, H. Lonn, L. Berntsson, R. Johansson, F. Tagliabo, S. Torchiaro, A. Sandberg 2010, Automatic Allocation of Safety Integrity Levels, *Proceedings of the 1st Workshop on Critical Automotive applications: Robustness & Safety*, New York.

주 의

1. 이 보고서는 농림축산식품부에서 시행한 생명산업기술개발사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 농림축산식품부에서 시행한 생명산업기술개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니 됩니다.