

발 간 등 록 번 호

11-1541000-001610-01

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

농업용 저수지 구조물의 내구성 및 내하력 평가시스템 개발

Development of Durability and Load-Bearing
Capacity Evaluation System for Structures at Reservoir

2012. 12



제 출 문

농림수산식품부 장관 귀하

본 보고서를 “농업용 저수지 구조물의 내구성 및 내하력 평가시스템 개발” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2012년 12월

연구기관명 : 한국농어촌공사 농어촌연구원

책임연구원 : 최 병 한

연구 원 : 김 석 열

김 명 원

허 건

허 준

한 상 필

공동 연구기관 : (주)ES연구소

책임연구원 : 이 민 섭

연구 원 : 허 성 윤

김 상 훈

송 태 현

요 약 문

1. 과제명 : 농업용저수지구조물의 내구성 및 내하력 평가 시스템 개발
(최종)

2. 연구기간 : 2011년 1월 ~ 2012년 12월 (2개년도)

3. 연구의 배경 및 필요성

○ 고전적 국부파괴를 통한 시설물의 안전진단방법에서 비파괴 및 조직 분석을 통한 기술들이 도입되고 있으며, 과거 허용응력 개념의 내하력 평가에서 강도설계법 개념의 내하력 평가를 넘어 이제는 한계상태 내하력 평가가 도입이 되었고 이를 구조물 설계 및 진단에 활용하고 있습니다.

○ 반면 내구성 평가방법의 경우 다양한 실험적 기법이 도입되고 있으나 이를 실제 구조물의 설계나 진단에 활용은 다소 더딘 실정입니다.

○ 최첨단의 분석 장비가 개발되어 설계 및 진단업무의 효율성과 신뢰성이 점차 개선되어가는 시점에, 실무에서 활용도를 극대화 할 수 있는 최신이론에 근거한 일원화된 내구성 및 내하력 평가시스템의 도입이 필요합니다.

○ 특히 댐, 저수지에 속한 콘크리트 수리구조물의 경우, 산간이나 평야에 설치되어 동절기 동해로 인한 손상이 심한 환경에 설치되어 있음에도 불구하고 진단평가 내구성 평가항목에서 빠져 있으며, 내하력평가의 경우, 수리시설물 특성의 반영과 일관된 내진성능평가기법의 정립이 미흡한 실정입니다.

4. 주요연구내용

4.1 1차년도 주요연구내용

1차년도 과제는 농업용 저수지의 내구성 평가시스템 개발에 관한 것으로 주요연구내용은 다음과 같다.

- 농업용저수지의 정밀안전진단 현황분석(내구성 평가부분)
- 휴대형 현장 콘크리트 분말채취장치 발굴
- 콘크리트의 중성화분석을 위한 열분석기법 제안
- 콘크리트 분말의 열분석을 통해 압축강도를 예측하는 기법 제안
- 정밀안전진단 상태평가 항목으로 중성화평가와 동해평가 기법 제안
- 본 연구에서 제안한 예측기법, 평가기법을 구현한 시스템 개발
- 진단평가업무의 효율성 증대를 위한 관련 저수지 시설물 DB 구현

4.2 2차년도 주요연구내용

2차년도 과제는 농업용 저수지의 내하력 평가시스템 개발에 관한 것으로 주요내용은 다음과 같다.

- 농업용저수지의 정밀안전진단 현황분석(내하력 평가부분)
- 저수지 부속 콘크리트 시설물의 내하력 평가 방안 마련
- 마련된 평가방안을 토대로 실무적용성을 극대화한 각 구조물 별 특화된 구조해석 모델 개발
- 현 내진성능평가방법에 관한 타당성 연구
- 수리시설물에 특화된 일관된 내진성능 평가 방안 도출
- 내구성 평가시스템과 연계된 내하력 평가시스템 구현

5. 1차년도 연구결과

5.1 분취장치개발 및 열분석

가. 분취장치 개발

열분석을 위한 시료의 추출에 사용될 분취장치로는, 현장 채취를 위한 휴대의 편리성과 충전식이 요구되며, 구조물의 피해를 최소화하기 위한 채취면적의 소형화 및 열분석을 위한 깊이 단계별 추출 가능성이 요구된다. 검토결과 분진방지용 목적으로 필터가 장착된 햄머드릴이 가장 효율적인 것으로 판단되어 본 연구에 활용하기로 결정하였다.

나. 열분석을 통한 중성화 분석

시멘트 수화물의 온도를 높이면 100℃부근에서 자유수의 탈수, 100~300℃부근에서 모노설페이트(Mono-Sulfate)등의 탈수, 400~500℃에서 수산화칼슘($\text{Ca}(\text{OH})_2$)의 탈수, 650~900℃에서 탄산칼슘(CaCO_3)의 탈탄산이 발생한다. 따라서 시멘트 수화물에 열을 가하여 400~500℃에서 수산화칼슘의 탈수와 650~900℃에서 탄산칼슘의 탈탄산 시의 중량변화를 측정함으로써 수산화칼슘과 탄산칼슘의 정량적인 측정이 가능하다. 또한 공용연한 및 콘크리트 표면 깊이별 일정경향을 보이고 있어 평가인자로 사용이 가능함을 검증하였다.

5.2 콘크리트 분취 및 열분석을 통한 강도추론 엔진 개발

분취장치에서 얻은 깊이별 탄산칼슘 함량을 통해 콘크리트의 압축강도를 추론할 수 있는 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$f_{c_{et}} = \text{Max}(S_1, S_2, S_3) \times \text{Max}(C_{c1}, C_{c2}, C_{c3}) \times F_r$$

여기서, $f_{c_{et}}$: 추정 콘크리트 압축강도

S_i : 측정간 기울기

C_{ci} : 측정별 $CaCO_3$ 함량

F_r : 보수시점까지의 잔여기간에 따른 계수

2011~2012년 정밀안전진단지구의 코어채취지구에 대해 코어실측강도와 제안식에 의한 추정압축강도를 비교한 결과, 평균 109%의 결과를 보인 것으로 분석되었다.

5.3 중성화에 의한 상태평가 모델 개발

현재 중성화 평가시 주로 사용하고 있는 페놀프탈레인 지시약에 의한 중성화 분석은 중성화 깊이를 변수로 하는 방법이다. 하지만 페놀프탈레인 지시약에 의한 방법은 측정방법에서 오차가 발생하기 쉽다. 또한, 중성화 확산 속도를 반영하지 않는 평가방법이라는 한계를 가지고 있다.

본 연구에서는 이러한 단점을 극복할 수 있는 방법으로, 깊이에 따른 탄산칼슘 함량을 변수로 한 중성화 평가 모델을 제안하였다. 대략적인 평가 순서는 다음과 같다.

- ① 보간법에 의한 철근위치에서의 탄산칼슘 함량 추정
- ② 잔존함량 계산(철근위치의 임계값-추정값)
- ③ 표면함량 계산
- ④ 잔존함량과 표면함량에 따른 평가점수 계산

5.4 동결융해에 의한 상태평가 모델 개발

철근콘크리트 구조물의 노후손상 주요 원인중 하나로서, 동결융해로 인한 손상이다. 특히 수리구조물의 특성상 산간이나 평야에 설치되어 있어 늘 젖은 흙과 물에 접하고 있으며, 지형적으로 동절기 눈에 의한 동해피해가 오래 지

속된다. 그러나 현 진단업무 수행 시, 동결융해에 대한 평가는 현장 조사 시 외관을 관찰하여 그 현상에 대한 결과를 보고서에 기록하고 있는 정도인 것으로 파악되었다. 따라서 본 연구에서는 동결융해가 상태평가 인자로 활용되지 못한 이유를 분석하고 정량적 평가기법을 제안하였다. 개략적인 평가방법은 다음과 같으며, 임의 진단대상 지구의 물시멘트비, 연평균 동결융해사이클수, 일최저기온은 설계자료 및 기상청 통계자료로부터 DB화 하였다.

- ① 동결융해 사이클 수 산출
- ② 습윤조건에 따른 보정
- ③ 잔존저항기간 계산
- ④ 외관상태와 잔존저항기간에 따른 평가점수 계산

5.5 정밀안전진단에서 내구성평가의 활용

저수지의 정밀안전진단은 현장조사, 시설물의 기능성 및 안정성 평가, 종합평가 그리고 보수·보강 및 유지관리 방안으로 구성된다. 여기에서 내구성 평가 분야는 현장조사의 외관 조사, 내구성 조사(콘크리트 강도시험, 탄산화시험), 시설물의 상태평가와 관계되며, 결국 기능 및 안전성 평가에 영향을 미치게 된다. 결국 1차년도 주요성과는 다음과 같이 활용될 수 있다.

- 중성화에 의한 상태평가 : 개별부재의 평가항목
- 동결융해에 의한 상태평가 : 개별부재의 평가항목
- 중성화에 의한 강도추론 : 내구성조사자료로 활용
내하력 평가에 활용

5.6 내구성평가 시스템 개발

(가) 시스템 개요

농업용 저수지 구조물의 내구성평가 시스템은 건설교통부의 “내구성 평가 지침”에 따른 구조물의 상태평가와 동결융해와 중성화에 의한 내구성 평가를 목적으로 하는 시스템이다. 프로그램 언어로는 C/C++를 사용하였으며, 내용은 다음과 같다.

(나) 개발 내용

구 분
1. 상태평가 알고리즘
1) 상태평가 알고리즘
2) 중성화 상태평가
3) 동결융해 상태평가
2. 다양한 기법에 의한 강도추론
1) 강도추론

<표 1> 내구성평가 시스템 개발내용

6. 2차년도 연구결과

6.1 농업용 저수지 구조물의 내하력 평가 체계 구축

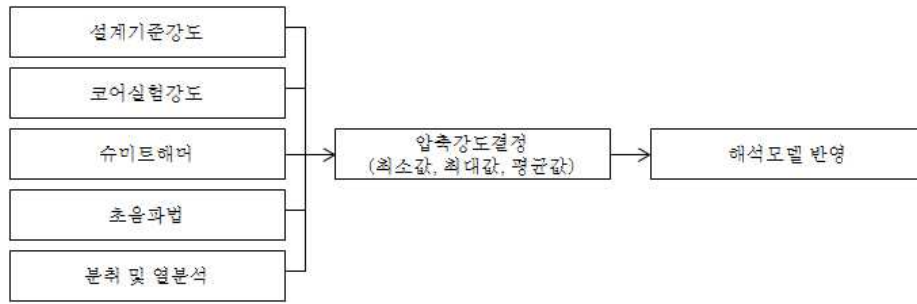
저수지의 부속 구조물인 취수탑, 옹벽, 취수터널에 대하여 기 실시된 진단 자료와 통계자료 분석을 통해 내하력 평가대상을 분류하였다. 각 대상 별 평가 방법은 각 구조물의 하중특성, 구조형식에 따라 선정하였으며 그 내용은 다음과 같다.

구조물	형식	내하력 평가방법
취수탑	원형(복식)단면	허용응력설계법, 극한강도설계법
	원형(복식)변단면	
	원형(단식)원형단면	
	원형(단식)원형변단면	
	취수구형 사각단면	
옹벽	역 T형 옹벽	허용응력설계법, 외적안정검토
	L형 옹벽	
	U형 옹벽	
취수터널	사각단면	허용응력설계법, 극한강도설계법
	마제형단면	

<표 2> 내하력 평가 체계 구축

6.2 콘크리트의 압축강도 결정 방안 제안

콘크리트의 압축강도는 구조물의 내하력을 결정짓는 중요한 인자이다. 이에 본 연구에서는 비파괴 실험 방법으로 슈미트해머법, 초음파법에 의한 강도 추론 방법, 설계기준강도, 코어압축시험강도 그리고 중성화에 의한 강도 추론 방법 중에서 선택적으로 값을 결정할 수 있는 방안을 다음과 같이 제안하였다. 설계기준강도의 경우 추정강도의 적절성을 판단할 수 있는 중요한 자료인데, 설계된 지 오래된 지구의 콘크리트 구조물은 설계자료가 없는 경우가 대부분이다. 이에 과거의 설계자료를 분석하여 준공년도에 따른 설계기준 강도를 추정해 보았다. 준공년도에 따른 설계기준강도 변화를 보면 1981년 이전 준공 지구는 18.0MPa, 1981년부터 1998년사이 준공된 지구는 21.0MPa, 1999년 이후 준공된 지구는 27MPa로 설계된 것을 확인 할 수 있고 이를 내하력 평가에 반영하도록 자료 구축하였다.



<그림 1> 콘크리트 압축강도 결정방안

6.2 내진 성능 평가 지표 검토 및 현행 방법의 타당성 연구

기존 저수지 부속시설에 대한 내진 안전성 검토에 필요한 기준 및 절차, 평가방법 등이 명확히 규정된 기준이나 지침이 아직 마련되지 않아 내진성능 평가를 수행하는 엔지니어에 따라 적용 기준 및 평가방법이 서로 상이한 실정이다.

이에 농업용 저수지 시설물의 부속시설 중 콘크리트 구조물, 즉 취수탑, 취수터널, 여·방수로 등에 대하여 통일된 내진 안전성 평가를 수행할 수 있도록 적용기준 및 평가방법에 관한 타당성 검토를 수행하여, 향후 부속시설의 내진 성능평가 수행에 필요한 지표와 이의 활용방안을 마련하고자 하였다.

가. 내진성능 평가 지표 및 기본방안

저수지 구조물 관련 기준 및 연구결과 등에서 내진성능평가를 위한 항목과 지표, 그리고 평가방법에 대한 검토결과를 근거로 저수지 구조물의 내진성능 평가를 위한 기본방안을 제시하였으며, 요약하면 다음과 같다.

적용 대상	취수탑, 취수터널 및 여·방수로 옹벽
내진성능수준	기능수행 수준과 붕괴방지 수준
내진성능목표	설계지진의 평균재현주기는 각각 500년과 1000년임.
내진등급	특등급 구조물(발주처가 지정하는 저수지 또는 총저수량 2000만 m ³ 이상) I 등급 구조물(높이 15m 이상이고 총저수량 50만 m ³ 이상인 저수지)
설계지반운동	내진설계기준 연구(1997.12)의 표준설계응답스펙트럼
내진설계방법	강도설계법 또는 한계상태설계법을 적용
지진해석방법	등가정적해석법과 응답변위법을 적용을 기본 응답스펙트럼해석법 또는 동적 해석법 사용 가능
하중조합	콘크리트구조설계기준(국토해양부, 1997)의 하중조합

<표 3> 내진성능평가 기본방안

나. 현 내진성능평가방법에 관한 타당성 연구

기존 저수지 시설물의 부속시설에 대한 내진성능 평가방법 타당성 검토 결과를 정리하면 다음과 같다.

내진등급	저수지 제체와 동일한 등급을 적용해야 함
성능수준	붕괴방지수준만을 적용
내진성능 평가방법	강도설계법에 따라 부재 및 기초(기초지반 포함)의 단면력을 검토
지진해석방법	1차 모드가 지배적인 경우에는 등가정적해석법 1차 모드의 참여율이 크지 않은 시설물의 경우에는 동적해석법

<표 4> 저수지 부속시설에 내진성능 평가방법

6.3 내하력 평가 시스템 개발

가. 개발개요

농업용 저수지 구조물의 내하력평가 시스템은 취수탑, 옹벽, 취수터널의 내하력을 유한요소해석법을 통해 평가하는 시스템이다. 프로그램 언어로는

C/C++를 사용하였으며, 내용은 다음과 같다.

나. 개발내용

구 분
1. 템플릿 개발
1) 취수탐
2) 응벽
3) 취수터널
2. 내하력 평가 기능
1) 응력 검토
2) 외적 안정성 검토
3. 기본기능
1) 전처리
2) 해석 솔버
3) 후처리
4. 보고서 출력 기능

<표 5> 내하력 평가 시스템 개발 내용

7. 실용화 방안

7.1 사용성 강화

가. 업무프로세스 단순화

① 내구성평가 시스템

사용성 강화를 위해 다음과 같이 업무 프로세스를 개선하였다.

기존방법	개선방법
1. 개별부재 별 상태평가 항목 구성	1. 템플릿을 통한 자동구성
2. 복합부재 별 개별부재 구성	
3. 개별시설 별 복합부재 구성	
4. 복합시설 별 개별시설 구성	
5. 상태평가 항목 점수 입력	2. 상태평가 항목 점수 입력
6. 개별부재 평가 점수 계산	3. 프로그램에서 자동 계산
7. 복합부재 평가 점수 계산	
8. 개별시설 평가 점수 계산	
9. 복합시설 평가 점수 계산	
10. 개별부재 평가표 작성	4. 프로그램에서 자동 작성
11. 복합부재 평가표 작성	
12. 개별시설 평가표 작성	
13. 복합시설 평가표 작성	
14. 보고서 출력	5. 보고서 출력

<표 6> 내구성평가 시스템 업무프로세스

② 내하력평가 시스템

사용성 강화를 위해 다음과 같이 업무 프로세스를 개선하였다.

기존방법	개선방법
1. 절점 및 요소 모델링	1. 템플릿을 통한 자동구성
2. 재료 물성치 계산	
3. 재료 물성치 입력	
4. 하중 계산	
5. 하중 입력	
6. 해석	2. 해석
7. 응력 검토	3. 프로그램에서 자동 검토
8. 단면 검토	
9. 외적안정 검토	
10. 부재별 안전율 계산	4. 프로그램에서 자동 계산
11. 내하력 평가 점수 계산	
12. 보고서 작성	
13. 보고서 출력	5. 보고서 출력

<표 7> 내하력평가 시스템 업무프로세스

나. 각종 데이터베이스 구현

- ① 저수지 일반정보 데이터베이스
- ② 저수지별 콘크리트 정보 데이터베이스
- ② 동결융해 데이터베이스

다. 정밀안전진단용 보고서 출력

정밀안전진단에 바로 활용할 수 있는 형태의 보고서 형식을 개발하여 탑재하였다.

7.2 신뢰성 강화

각 시스템은 그 결과의 신뢰성을 확보하기 위해 다음과 같이 검증작업을 수행하였다.

1차년도	2차년도
상태평가 알고리즘 검증	해석 솔버 검증
중성화에 의한 강도추론 엔진 검증	상용프로그램과 결과 비교 검증
중성화에 의한 상태평가 알고리즘 검증	
동결용해에 의한 상태평가 알고리즘 검증	

<표 8> 검증결과

Summary

1. Name of assignment: Development of durability and load-bearing capacity evaluation system of reservoir structures for agriculture (final)
2. Study period: Jan. 2011~ Dec. 2012 (2 years)
3. Background and necessity of the study

- The technologies through modern non-destruction and organization analysis is being introduced in the safety diagnosis method of facilities through classic partial destruction of concrete structures, and beyond the ultimate strength design code and the allowable stress design code in the load-bearing capacity evaluation of the past, now limit state design code was introduced in load-bearing capacity evaluation and it is being utilized in structure design and diagnosis.
- On the other hand, in case of durability, although various experimental techniques are being introduced, it is a little difficult to really use it for design or diagnosis of structure.
- While efficiency and reliability of design and diagnosis work is being improved gradually as the forefront analytic equipment was developed, the introduction of durability and load-bearing capacity evaluation system based on the latest theory that can maximize use in practical affair is needed.
- Especially, in case of concrete hydraulic structures belonging to dam, reservoir, although it is installed in the environment like mountains or plain where frost damage in winter season is severe, it is omitted from durability evaluation list. Also, in case of load-bearing capacity evaluation, the establishment of consistent

seismic performance evaluation technique and the reflection of character for hydraulic structure is weak.

4. Main study contents

4.1 1st year study contents

1st year assignment is about development of durability evaluation system of reservoir structures, main study contents are as follows.

- Analysis of present state of inspection of reservoir structures. (durability evaluation part)
- Excavation of portable on-the-spot concrete powder collection device.
- Suggesting of thermal analyzing technique for the estimation of neutralization of concrete.
- Developing the estimation technique of concrete strength through thermal analyzing.
- Suggesting the evaluation techniques of neutralization and F&T Action(freezing and thawing action) as state evaluation item in safety inspection. The data from the National Weather Service are used for F&T Action.
- Developing a system that embodied the estimation technique, and the evaluation technique suggested in this study.
- Building relevant reservoir facility DB for the system efficiency.

4.2 2nd year main study contents

2nd year assignment is about development of load-bearing capacity

evaluation system of reservoir structures, main contents are as follows.

- Analysis of present state of inspection of reservoir structures.
(load-bearing capacity evaluation part)
- Arranging load-bearing capacity evaluation plan of reservoir structures.
- Developing structural analysis models specialized in each structure that maximized practical applicability based on arranged evaluation plan.
- A study on validity of the present seismic performance evaluation method.
- Deducing seismic performance evaluation plan specialized in hydraulic structures.
- Embodying load-bearing capacity evaluation system connected to durability evaluation system.

목 차

제출문	iii
요약문	iv
SUMMARY	xiv
표목차	xxiii
그림목차	xxvii
제1장 서론	1
제1절 연구배경 및 목적	3
1. 연구배경	3
2. 연구목적	3
제2절 연구내용	5
1. 내구성평가 시스템 개발(1차년도)	5
2. 내하력평가 시스템 개발(2차년도)	5
제3절 연구추진 체계	6
제4절 기대효과 및 실용화방안	7
1. 기대효과	7
2. 실용화방안	7

제2장 본론	9
제1절 농업용 저수지 구조물의 내구성 평가	11
1. 내구성 평가와 정밀안전진단	12
2. 중성화	12
3. 동결융해	14
4. 저수지 구조물의 상태평가 분석	24
5. 상태평가 결과 산정 방법	46
6. 내구성설계	47
7. 개선방안	59
제2절 농업용 저수지 구조물의 내구성 평가 방법 개발	60
1. 동결융해에 의한 상태평가 모델 개발	60
2. 분취장치 개발 및 열분석을 통한 중성화 분석	61
3. 중성화에 의한 상태평가 모델 개발	73
4. 압축강도 추정	74
제3절 내구성 평가 시스템 개발	80
1. 내구성 평가 시스템 개요	80
2. 내구성 평가 시스템 구현 모습	81
3. 내구성 평가 알고리즘	86
4. 내구성 평가 시스템 검증	90
5. 내구성 평가 시스템 프로그램 코드	93

제4절 농업용 저수지 구조물의 내하력 평가	95
1. 내하력 평가의 개념 및 연구내용	95
2. 정밀안전진단에서의 내하력 평가 활용	96
3. 안전성 평가결과 산정방법	98
제5절 농업용 저수지 구조물의 내진성능 평가	100
1. 개요	100
2. 저수지 구조물의 내진성능평가 항목 및 지표 결정	101
3. 저수지 구조물의 내진성능평가 기본방안	106
4. 기존 부속시설의 내진성능평가 방법 타당성 검토	117
5. 기존 보석시설에 대한 지진해석 특화방안	132
6. 소결	138
제6절 농업용 저수지 구조물의 내하력 평가 모델	141
1. 개요	141
2. 취수탑	145
3. 옹벽	154
4. 취수터널	169
제7절 내하력 평가 시스템 개발	174
1. 내하력 평가 시스템 개요	174
2. 내하력 평가 시스템 구현모습	176
3. 내하력 평가 시스템 검증	188
4. 내하력 평가 시스템 프로그램 코드	189

제3장 결론	190
제1절 내구성평가 시스템 개발 성과(1차년도)	192
1. 분취장치개발 및 열분석	192
2. 콘크리트의 압축강도 추정	192
3. 정밀안전진단 상태평가	192
4. 내구성평가 시스템 개발	193
제2절 내하력평가 시스템 개발 성과(2차년도)	194
1. 내하력 평가 체계 구축	194
2. 내하력 평가 시스템 개발	194
참고문헌	195
부 록	
부록A. 내진설계기준 검토	
부록B. 기존 저수지 부속시설의 내진성능평가 현황 조사	
부록C. 내진성능평가 방법 타당성 검토 예제 해석	
부록D. 내구성평가 예	
부록E. 내하력평가 예	
부록F. 내구성평가 시스템 사용자설명서	
부록G. 내하력평가 시스템 사용자설명서	

표 목 차

< 표 2.1 > 평가유형의 구분	25
< 표 2.2 > 상태평가 항목 - 필댐(댐마루)	26
< 표 2.3 > 상태평가 항목 - 필댐(상류사면)	27
< 표 2.4 > 상태평가 항목 - 필댐(하류사면)	28
< 표 2.5 > 상태평가 항목 - 필댐(기초 및 양안부)	29
< 표 2.6 > 상태평가 항목 - 필댐(접근수로)	30
< 표 2.7 > 상태평가 항목 - 필댐(조절부)	31
< 표 2.8 > 상태평가 항목 - 필댐(도수로)	32
< 표 2.9 > 상태평가 항목 - 필댐(조절부)	33
< 표 2.10 > 상태평가 항목 - 필댐(취수시설 및 방수로)	34
< 표 2.11 > 상태평가 항목 - 필댐(권양기)	35
< 표 2.12 > 상태평가 항목 - 필댐(수문 및 문틀)	36
< 표 2.13 > 상태평가 항목 - 필댐(기계설비)	37
< 표 2.14 > 상태평가 항목 - 콘크리트댐(댐체)	38
< 표 2.15 > 상태평가 항목 - 콘크리트댐(상류면)	38
< 표 2.16 > 상태평가 항목 - 콘크리트댐(하류면)	39
< 표 2.17 > 상태평가 항목 - 콘크리트댐(검사랑)	40
< 표 2.18 > 상태평가 항목 - 콘크리트댐(배수구 및 그라우팅 터널)	41
< 표 2.19 > 상태평가 항목 - 콘크리트댐(기초 및 양안부)	41
< 표 2.20 > 상태평가 항목 - 일반적인 콘크리트 구조물(No.1)	42

< 표 2.21 > 상태평가 항목 - 일반적인 콘크리트 구조물(No.2)	43
< 표 2.23 > 상태평가 항목 - 일반적인 콘크리트 구조물(No.3)	44
< 표 2.24 > 상태평가 항목 - 계측기(필댐)	45
< 표 2.25 > 상태평가 항목 - 계측기(콘크리트댐)	45
< 표 2.26 > 상태평가 알고리즘	46
< 표 2.27 > 일본의 내구성기술 개발 현황	47
< 표 2.28 > 환경조건에 따른 노출등급	53
< 표 2.29 > 노출환경관련 내구성 요구조건 (Euro Code)	55
< 표 2.30 > 환경조건에 따른 최소 피복두께	56
< 표 2.31 > 보통중량 콘크리트의 최소 피복두께 (Euro Code)	56
< 표 2.32 > 습도보정계수	63
< 표 2.33 > 동해 평가표	63
< 표 2.34 > 지시약에 따른 pH의 지시범위	72
< 표 2.35 > 중성화 평가표	74
< 표 2.36 > 상태평가 알고리즘	86
< 표 2.37 > 상패평가 알고리즘 검증	90
< 표 2.38 > 중성화 상태평가 검증	90
< 표 2.39 > 동결융해 상태평가 검증	91
< 표 2.40 > 중성화에 의한 강도추정	91
< 표 2.41 > 동결융해 추가에 따른 결과 비교	92
< 표 2.42 > 중성화 평가기법 추가에 따른 결과 비교	92
< 표 2.43 > 정적응력에 대한 안전성 평가 기준	97
< 표 2.44 > 내진응력에 대한 안전성 평가 기준	98
< 표 2.45 > 안전성 평가 결과 산정 방법	99

< 표 2.46 > 댐(저수지)의 내진등급	102
< 표 2.47 > 지진구역 구분	103
< 표 2.48 > 위험도계수(평균재현주기 500년 설계지진을 기준)	103
< 표 2.49 > 저수지(댐)의 내진성능목표에 따른 설계지진	104
< 표 2.50 > 저수지 구조물의 내진성능목표와 설계지진의 재현주기(안) ..	107
< 표 2.51 > 저수지 구조물의 내진등급과 설계지진(안)	108
< 표 2.52 > 지진구역계수 (평균재현주기 500년에 해당)	109
< 표 2.53 > 위험도계수	109
< 표 2.54 > 지반의 분류	109
< 표 2.55 > 감쇠보정계수	112
< 표 2.56 > 지진계수 C_a 및 C_v	112
< 표 2.57 > 기존 저수지(댐) 및 취수탑의 내진등급 분석(붕괴방지수준) ·	123
< 표 2.58 > 기존 취수탑의 지진해석 방법 및 조건	123
< 표 2.59 > 기존 취수탑의 해석모델 및 지진안전성 평가방법	124
< 표 2.60 > 내하력 평가 대상 및 방법	142
< 표 2.61 > 외적안정 안전성 평가기준	143
< 표 2.62 > 구조물 별 해석 모델	144
< 표 2.63 > 취수탑- 허용응력 설계법 안전율 계산	148
< 표 2.64 > 취수탑- 강도설계법 안전율 계산	151
< 표 2.65 > 취수탑- 하중조합	152
< 표 2.66 > 취수탑- 허용응력	152
< 표 2.67 > 취수탑- 작용응력	152
< 표 2.68 > 취수탑- 안전율	152
< 표 2.69 > 옹벽- 기준 안전율	156

< 표 2.70 > 응벽- 잔류침하량 한계값	161
< 표 2.71 > 응벽 - 허용응력설계법 평가기준	164
< 표 2.72 > 응벽 - 허용응력설계법 하중조합	165
< 표 2.73 > 응벽 - 허용응력설계법 허용응력	165
< 표 2.74 > 응벽 - 허용응력설계법 작용응력	165
< 표 2.75 > 응벽 - 허용응력설계법 안전율	165
< 표 2.76 > 응벽 - 외적안정평가 작용하중 집계표	166
< 표 2.77 > 응벽 - 외적안정평가 하중조합	167
< 표 2.78 > 응벽 - 외적안정평가 전도에 대한 안전	167
< 표 2.79 > 응벽 - 외적안정평가 활동에 대한 안전	168
< 표 2.80 > 응벽 - 외적안정평가 지지력에 대한 안전	168
< 표 2.81 > 취수터널 - 공칭강도계산	172
< 표 2.82 > 취수터널 - 안전율 계산	173
< 표 2.83 > 내하력평가 시스템 개발 실적	175
< 표 2.84 > 솔버 스펙	182
< 표 2.85 > 내하력평가 시스템 검증결과	188

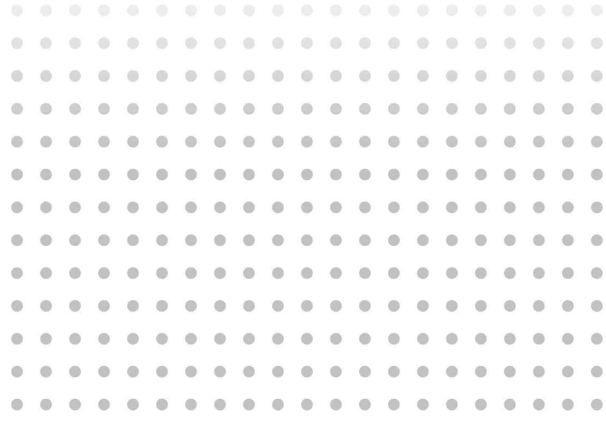
그림 목 차

< 그림 1.1 > 연구추진체계	7
< 그림 2.1 > 저수지 정밀안전진단 지구수	12
< 그림 2.2 > 연차별 진단등급현황	12
< 그림 2.3 > 중성화의 진행	13
< 그림 2.4 > 중성화에 의한 콘크리트 성능저하	13
< 그림 2.5 > 콘크리트의 동결융해	17
< 그림 2.6 > 동결융해 시험기(B-type)	20
< 그림 2.7 > 동탄성계수 측정기	23
< 그림 2.8 > 저수지 산측 옹벽하부	60
< 그림 2.9 > 정수지 제당측 옹벽하부	60
< 그림 2.10 > 물시멘트비와 설계기준강도의 관계	62
< 그림 2.11 > 동해평가	62
< 그림 2.12 > 전국 연평균 동결융해 횟수	64
< 그림 2.13 > 전국 동절기 일최저기온 평균	64
< 그림 2.14 > 장치개발 과정	66
< 그림 2.15 > 휴대용 분취가능 장치 발견	67
< 그림 2.16 > 시멘트 열분석 과정	68
< 그림 2.17 > 동일시료 3회 반복 실험	69
< 그림 2.18 > 깊이별(2, 4.5, 7mm) 열분석 결과(천망지예)	69
< 그림 2.19 > 깊이별(2.5, 7.5, 12.5mm) 열분석 결과(노홍지예)	70
< 그림 2.20 > TG/DSC 분석예(천망지)-깊이 2mm	71
< 그림 2.21 > 지시약에 의한 중성화 측정	71
< 그림 2.22 > 깊이별 탄산칼슘의 함량	73

< 그림 2.23 > 중성화 상태 평가 절차	73
< 그림 2.24 > 준공연도에 따른 설계기준강도 변화(여수토)	75
< 그림 2.25 > 준공연도에 따른 설계기준강도 변화(방수로)	76
< 그림 2.26 > 중성화에 의한 보수시점 예측	77
< 그림 2.27 > 공용연한과 탄산칼슘함량의 상관관계	77
< 그림 2.28 > 깊이별 탄산칼슘의 함량 및 측정간 기울기	78
< 그림 2.29 > 보수시점까지 남아있는 기간에 따른 상관계수	78
< 그림 2.30 > 코어강도와 추정강도의 비교	79
< 그림 2.31 > 프로그램 구성도	80
< 그림 2.32 > MainFrame	81
< 그림 2.33 > FormView(1/2)	82
< 그림 2.34 > FormView(2/2)	83
< 그림 2.35 > 데이터베이스	84
< 그림 2.36 > 템플릿	84
< 그림 2.37 > 보고서	85
< 그림 2.38 > 중성화 평가	87
< 그림 2.39 > 동결융해 평가	87
< 그림 2.40 > 저수지정보	88
< 그림 2.41 > 콘크리트/동결융해 데이터베이스	88
< 그림 2.42 > 중성화에 의한 보수시점 평가 및 강도 추론	89
< 그림 2.43 > 자료구조 소스	93
< 그림 2.44 > 평가알고리즘 소스	93
< 그림 2.45 > 우리나라 지진발생 추이(1978년~2011년)	100
< 그림 2.46 > 옹벽의 내진설계 순서도	105
< 그림 2.47 > 표준설계응답스펙트럼 (감쇠비 5%)	111
< 그림 2.48 > 표준가속도설계응답스펙트럼(5% 감쇠비)	125

< 그림 2.49 > 취수탑의 내하력 평가 체계	145
< 그림 2.50 > 원형(복식)단면 취수탑 구조해석 모델	146
< 그림 2.51 > 원형(단식)단면 취수탑 구조해석 모델	146
< 그림 2.52 > 사각단면 취수탑 구조해석 모델	147
< 그림 2.53 > 솔리드요소 응력 조합 방법	149
< 그림 2.54 > 옹벽의 내하력 평가 체계	154
< 그림 2.55 > 옹벽의 내하력 평가 모델	154
< 그림 2.56 > 내적 안정 평가	155
< 그림 2.57 > 외적 안정 평가	155
< 그림 2.58 > 토압계수 산정-1	157
< 그림 2.59 > 토압계수 산정-2	158
< 그림 2.60 > 토압계수 산정-3	158
< 그림 2.61 > 역 T형 옹벽 구조해석 모델	162
< 그림 2.62 > L형 옹벽 구조해석 모델	162
< 그림 2.63 > U형 옹벽 구조해석 모델	163
< 그림 2.64 > 취수터널 내하력 평가 방법	169
< 그림 2.65 > 취수터널 내하력 평가 모델	169
< 그림 2.66 > 사각형 취수터널 구조해석 모델	170
< 그림 2.67 > 마제형 취수터널 구조해석 모델	170
< 그림 2.68 > 내하력 평가 시스템 프로세스	176
< 그림 2.69 > 역T형 옹벽 템플릿	177
< 그림 2.70 > L형 옹벽 템플릿	178
< 그림 2.71 > U형 옹벽 템플릿	178
< 그림 2.72 > 원형(복식)단면 취수탑 템플릿	179
< 그림 2.73 > 원형(단식)단면 취수탑 템플릿	179
< 그림 2.74 > 사각단면 취수탑 템플릿	180

< 그림 2.75 > 사각형 취수터널 템플릿	180
< 그림 2.76 > 마제형 취수터널 템플릿	181
< 그림 2.77 > 콘크리트 압축강도 입력	181
< 그림 2.78 > 변위 확인 기능	183
< 그림 2.79 > 반력 확인 기능	183
< 그림 2.80 > 부재력 및 단면력 확인 기능	184
< 그림 2.81 > 응력 확인 기능	184
< 그림 2.82 > 보고서 출력	185
< 그림 2.83 > 보고서 출력 설정	186
< 그림 2.84 > 개별시설 평가표	186
< 그림 2.85 > 1차년도 연계 작업	187
< 그림 2.86 > 술버검증보고서	188
< 그림 2.87 > 취수탑 해석 소스	189
< 그림 2.88 > 취수터널 해석 소스	189



제1장 서론

제1장 서론

제1절 연구배경 및 목적

1. 연구배경

고전적 국부파괴를 통한 시설물의 안전진단방법에서 비파괴 및 조직분석을 통한 기술들이 도입되고 있으며, 과거 허용응력 개념의 내하력 평가에서 강도설계법 개념의 내하력 평가를 넘어 이제는 한계상태 내하력 평가 및 내구성 평가 방법이 도입되고 있는 시점이라는 점과 최첨단의 분석장비가 개발되어 업무의 효율성과 신뢰성이 점차 개선되어가는 시점임을 고려할 때 내하력 평가시스템은 반드시 개발되어야 할 것이며, 지속적으로 업그레이드되어 최신의 기준에 따른 진단평가가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

농업용 저수지는 전국에 17,423개가 있는데 이 중 80%가 60년이 넘는 시설물로서 적정시점에 정밀안전진단 등을 통하여 안정성 확보 및 재해예방이 이루어져야 하는데 효율적인 안정성 평가 체계가 도입되면 업무의 효율성 개선은 물론 내구성명이 연장되어 경제적 측면에서도 유리할 것으로 보인다.

첨단장비 및 첨단기술의 도입에 의한 정밀안전진단이 실시된다면 그 결과 또한 신뢰성이 제고될 것이며, 휴대용 간편장비를 현장에 투입하여 조직샘플을 채취하고 이를 실내에서 분석하여 시스템을 통한 다 인자를 고려한 내구성 평가 결과는 진단업무를 수행하는 업무종사자에게 업무의 효율성을 제공할 뿐만 아니라 평가업무에 대한 자신감과 자부심을 갖게 할 것으로 판단된다.

2. 연구목적

본 연구의 목적은 저수지의 정밀안전진단업무 수행시 콘크리트구조물의 국부파괴를 최소화할 수 있으면서 신뢰성 있는 진단결과를 도출할 수 있는

방안을 마련하는 것이다. 현재 수행하고 있는 정밀안전진단방법에는 상태평가와 안전성평가로 구분되는데 본 연구에서는 상태평가에서 추가됨으로서 평가의 신뢰성을 향상시킬 수 있는 내구성 평가 항목을 개발하는 과업과 기존의 방법을 개선함으로써 업무의 효율성을 개선하는 과업으로 구별할 수 있다. 또한 안정성평가에서 현재의 진단절차에서는 포함되지 않는 저수지 부속 철근콘크리트구조물의 내하력에 대한 평가를 추가하고자 한다. 콘크리트의 압축강도는 내하력평가에서 있어서 중요한 콘크리트의 물성자료로 쓰이게 된다. 따라서 본 연구에서는 콘크리트의 국부파괴를 최소화하기 위해 콘크리트의 표면에서 분말을 채취하고 이 분말을 이용하여 중성화정도를 분석할 뿐만 아니라 분석자료를 이용하여 압축강도까지 추정하는 기법을 개발하고자 한다. 이와 같은 세부기법의 개발과 더불어 정밀진단결과의 통계적 활용을 위해 시스템과 DB를 구축하여 업무의 효율성과 기술자간의 편차를 최소화하고자 한다. 내하력 평가는 취수탑, 옹벽, 취수터널의 안전성을 유한요소해석을 통하여 평가할 수 있는 진단전문 시스템으로 개발하였다.

제2절 연구 내용

1. 내구성평가 시스템 개발 (1차년도)

1차년도 과제는 농업용 저수지의 내구성 평가 시스템 개발에 관한 것으로 주요연구내용은 다음과 같다.

- 농업용저수지의 정밀안전진단 현황분석(내구성 평가부분)
- 휴대형 현장 콘크리트 분말채취장치 발굴
- 콘크리트의 중성화분석을 위한 열분석기법 제안
- 현장 콘크리트 분말의 열분석을 통해 압축강도 예측하는 기법 제안
- 정밀안전진단 상태평가 항목으로 중성화평가와 동해평가 기법 제안
- 본 연구에서 제안한 예측기법, 평가기법을 구현하고, 상태평가업무 및 보고서 출력기능을 탑재한 시스템 개발
- 진단평가업무의 효율성 증대와 자료축적을 위한 각종 데이터베이스 구현

2. 내하력평가 시스템 개발 (2차년도)

2차년도 과제는 농업용 저수지의 내하력 평가 시스템 개발에 관한 것으로 주요내용은 다음과 같다.

- 농업용저수지의 정밀안전진단 현황분석(내하력 평가부분)
- 저수지 부속 콘크리트 시설물의 내하력 평가 방안 마련
- 마련된 평가방안을 토대로 실무적용성을 극대화한 각 구조물 별 특화된 구조해석 모델 개발
- 현 내진성능평가방법에 관한 타당성 연구
- 수리시설물에 특화된 일관된 내진성능 평가 방안 도출
- 내구성 평가시스템과 연계된 내하력 평가시스템 구현

제3절 연구추진 체계

본 연구의 목표 달성을 위한 과업추진절차를 <그림 1.1>과 같이 연차별로 수립하였다.

- 준공년도에 따른 대표 저수지 선정 및 조직샘플채취
- 휴대가 가능한 밧데리형 조직샘플 채취장치 개발
- 열분석으로 열중량분석(Thermogravimetric analysis, TGA) 및 시차주사열량계(Differential scanning calorimetry, DSC)분석을 통해 내구성인자 추출
- 열분석 자료 및 슈미트햄머 등 비파괴 자료와 준공연대에 적용되었던 설계기준자료를 종합하여 내하력 평가에 적용될 역학적 물성자료 결정
- 콘크리트표준시방서의 내구성편을 고려하여 구조물의 설치환경에 따라 내구성의 변화에 차등을 줄 수 있는 지수 결정
- 기상청의 기상자료를 분석하여 공용기간동안의 동해영향을 내구성 평가에 반영
- 방수로 옹벽, 취수탑 등 취약 단면에 대한 표준화를 통해 구조해석 엔진 적용 간편화
- 5년마다 이루어지는 정밀안전진단 자료를 DB화하여 차기 진단 시 활용하도록 함
- 휴대용 현장 조직샘플 채취 장치 및 시스템 실무부서에 보급, 교육, 매뉴얼 제공
- 독립형(stand_alone)프로그램 개발
 - 계산 알고리즘의 자동화를 통한 평가결과의 신뢰성 확보
 - 자료의 DB화를 통한 자료열람의 편의성 증대 및 정보의 재사용성 확보
 - 보고서 출력을 통한 평가 업무의 표준화
 - 평가업무의 편의성 증대



< 그림 1.1 > 연구추진체계

제4절 기대효과 및 실용화방안

1. 기대효과

각 연차별 연구는 다음과 같은 효과를 기대한다.

<1차년도>

- 휴대용 분취장치 및 열분석 기법을 통한 구조물의 손상 최소화
- 동결융해에 의한 상태평가 기법 개발을 통한 시설물의 안전성 확보
- 내구성평가 시스템 개발을 통한 정밀안전진단 업무의 효율성 및 체계성 확보

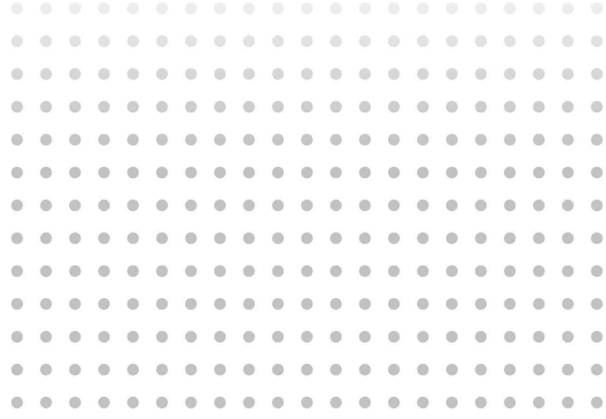
<2차년도>

- 각 저수지 구조물의 내하력평가 방법 체계 구축
- 내진 성능 평가 지표 개발을 통한 신뢰성 확보
- 내하력평가 시스템 개발을 통한 정밀안전진단 업무의 효율성 및 체계성 확보

2. 실용화방안

이번연구의 실용화를 위하여 다음과 같은 방안을 마련하고 추진하였다.

- 시스템의 검증작업을 통한 신뢰성 확보
- 템플릿 위주의 시스템 개발을 통한 편의성 확보
- 공사의 기술본부 및 전문기관에 배포 및 교육 실시
- 동영상 형태의 튜토리얼 개발



제2장 본 론

제2장 본론

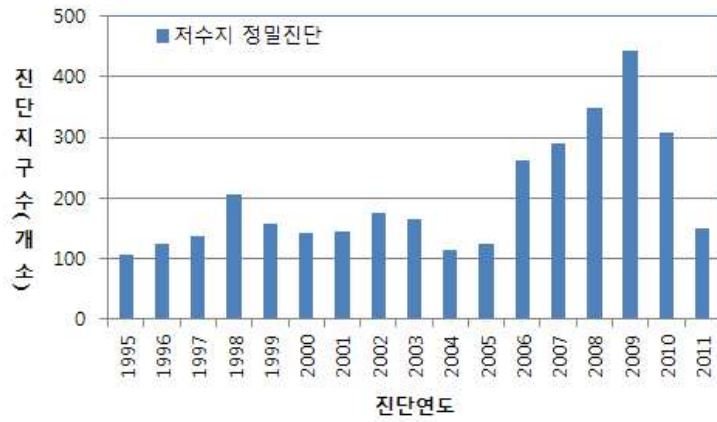
제1절 농업용 저수지 구조물의 내구성 평가

1. 내구성 평가와 정밀안전진단

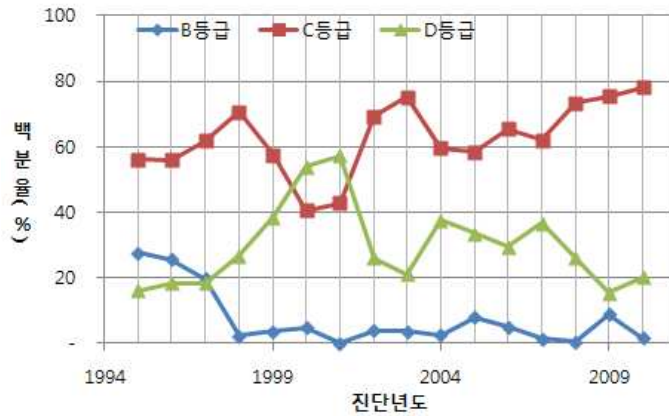
2008년 통계연보에 따르면 국내 저수지의 경우 1906년에 준공된 울산광역시 북구 무룡동의 사당골저수지에서 2008년에 준공된 경북 의성군 황룡지에 이르기까지 17,545개의 저수지가 현재 사용·관리되고 있는 것으로 집계된다. 1995년부터 농어촌정비법(시행령 제21조)에 의거 농업용저수지는 정밀안전진단을 실시해오고 있으며, <그림 2.1>과 같이 2011년 현재 3,398개소(공사관리 2,820, 시군관리 578개소)에 대해 수행하였다. 해당 년 전체 진단지구에 대한 등급별 비율을 살펴보면 <그림 2.2>와 같이 C등급의 비율이 가장 많고 이어서 D등급, B등급 순으로 분석되었다.

내구성이란 장기간에 걸쳐 외부로부터의 물리적 작용 및 화학적작용에 저항하는 성질을 말하는데, 구조물의 경우 시간의 경과와 함께 여러 가지 열화작용에 의한 손상이 발생하여 내구성이 떨어지는 현상이 발생한다. 공용기간 중에 구조물이 계속하여 양호한 상태로 보전되어 기능을 발휘하도록 일상적인 감시가 필요하고, 이러한 감시를 내구성 평가라 할 수 있다.

저수지의 정밀안전진단은 현장조사, 시설물의 기능성 및 안정성 평가, 종합평가 그리고 보수·보강 및 유지관리 방안으로 구성된다. 여기에서 내구성 평가분야는 현장조사의 외관 조사, 내구성 조사(콘크리트 강도시험, 탄산화시험), 시설물의 상태평가와 관계되며, 결국 기능 및 안전성 평가에 영향을 미치게 된다.



< 그림 2.1 > 저수지 정밀안전진단 지구수



< 그림 2.2 > 연차별 진단등급현황

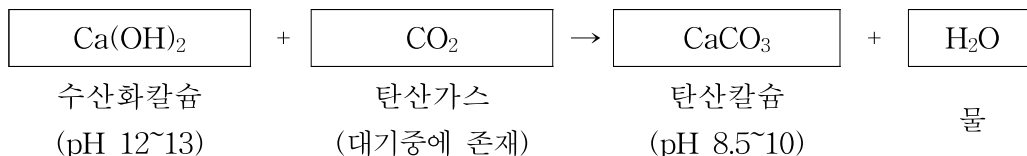
2. 중성화

가. 중성화

콘크리트의 중성화는 일반적으로 강알칼리성인 콘크리트 내부 철근을 보호하고 있는 부동태 피막이 중성화로 인해 알칼리성을 잃게 되므로 철근이 부식환경에 노출된다는 점에서 중요한 내구성 평가 인자로 다루어진다.

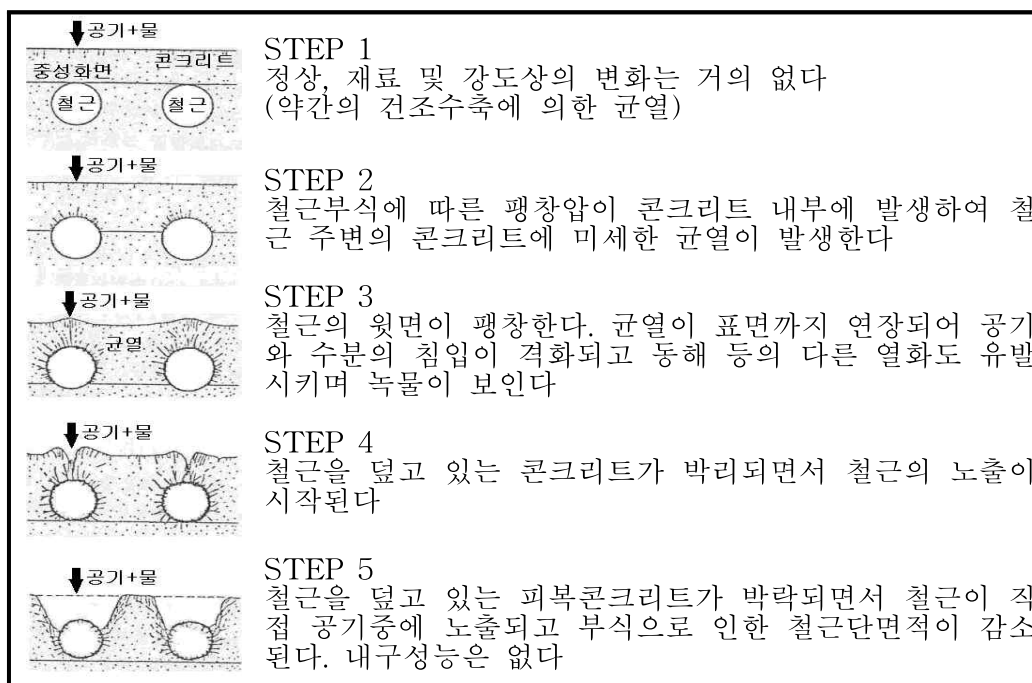
콘크리트의 중성화에 대한 메카니즘을 살펴보면 시멘트의 주요성분인 산

화칼슘(CaO)과 물의 수화반응으로 발생하는 수산화칼슘(Ca(OH)₂)에 의해 초기상태에서는 강알칼리성 물질이지만 경화시멘트풀의 수산화화합물중 약25% 정도를 차지하는 수산화칼슘(Ca(OH)₂)이 공기중의 이산화탄소 가스(CO₂)와 반응하게 되면서 서서히 탄산칼슘과 물로 분해되어 중성화가 진행되며 이러한 현상을 콘크리트의 중성화(Carbonation of Concrete)현상이라고 한다.



< 그림 2.3 > 중성화의 진행

콘크리트의 중성화 현상으로 인하여 생성되는 탄산칼슘은 수산화칼슘에 비하여 체적과 분자량이 크기 때문에 탄산가스와 반응한 중량에 비례하여 약간의 미세균열 발생과 더불어 치밀해지고 중량이 증가되며 공극률(Porosity)과 공극의 크기분포(Pore size distribution)에도 영향을 미치게 된다.



< 그림 2.4 > 중성화에 의한 콘크리트의 성능저하

또한, 중성화 반응을 일으키기 위해서는 소량의 수분이 필요로 하기 때문에 상대습도가 25% 미만인 콘크리트에서 중성화 속도는 상당히 느리며 이와 반대로 높은 습도에서는 간극에 충전된 수분으로 인하여 이산화탄소의 확산이 지연된다. 따라서 상대습도가 50~60%인 대기중의 콘크리트에서 가장 빠른 중성화 진행을 보이게 된다. 콘크리트의 내부로 이산화탄소가 침투하게 되면 이산화탄소의 농도가 높은 중성화영역에서 콘크리트의 pH는 낮아지게 되고 표면에서 내부로 진행될수록 pH가 증가한다.

중성화 현상은 콘크리트 자체의 문제보다는 강알칼리성 환경에서 보호되고 있는 철근의 부동태 피막을 파괴되기 쉬운 환경으로 만들어 철근의 부식으로 인한 구조물의 내구성 및 내하력을 저하시킬 수 있기 때문에 매우 주의해야 할 현상이다.

저수지의 정밀안전진단에서 사용되고 있는 중성화분석은 콘크리트 코어를 채취하는 과정에서 페놀프탈레인 지시약을 이용하여 중성화 깊이를 측정하거나 햄머드릴을 이용하여 콘크리트분말에 지시약을 뿌려서 그 깊이를 측정하는 방식을 택하고 있다.

본 연구에서 제안하고자 하는 중성화측정은 코어를 채취하는 대신 분말을 채취하여 분말에 포함된 탄산칼슘의 함량에 따라 중성화 정도를 평가하는 정량적 측정법이다. 분말에 포함된 탄산칼슘의 함량은 열분석인 TG/DSC 분석장치를 이용하는 방식으로 측정된다.

3. 동결융해

가. 콘크리트의 동결융해 저항성에 미치는 영향 인자

콘크리트의 동결융해 저항성에 영향을 미치는 인자에 대한 문헌자료 조사내용을 간략히 정리하였다. 콘크리트의 내동해성은 일반적으로 기포조직 및 분포에 따라 크게 영향을 받으며, 물시멘트비 및 콘크리트의 강도와도 관

런이 있는 것으로 알려져 있다. 콘크리트는 동결융해 사이클이 진행됨에 따라 상대동탄성계수가 감소하여 < 그림 3.2.3.1 >과 경향의 곡선을 그리며, 내구성지수 90이상에서는 내구성 저하 징후가 나타는 과정, 90~60사이는 내구성능저하가 명확하게 나타나는 과정, 60이하에서는 콘크리트가 파괴되는 과정으로 크게 나누어 볼 수 있다.

1) 공기량

콘크리트의 동결융해에 대한 저항성은 일반적으로 공기량이나 기포의 분포와 밀접한 관계를 가지고 있으며, 콘크리트의 강도나 수밀성에도 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 콘크리트의 동결에 의한 파괴는 콘크리트의 내부 공극에 가득 차 있는 물이 동결할 때 약 9%의 체적팽창을 일으키고, 이때 콘크리트 내에서 내압이 발생하게 되어 파괴가 일어나게 된다. 이 내압의 정도는 내부 공극에 얼마의 물이 차 있는가에 따라 다르고 포화 상태에 가까울수록 높은 내압을 발생하여 파괴에너지가 커지게 된다. 또한 콘크리트중의 공극이 완전히 물로 채워져 있지 않는다면 동결에 의한 얼음의 팽창압은 물로 채워져 있지 않은 공극에 흡수되어 콘크리트는 열화를 받지 않거나, 완화되게 된다. 이렇듯 공극과 관련된 콘크리트의 공기량은 콘크리트의 열화에도 큰 영향을 미친다.

굳은 콘크리트의 공극구조는 겔공극, 모세관 공극, 공기포, 골재 하면의 수막으로 나누어진다.

① 겔공극

시멘트 풀을 구성하는 겔 내부에는 28% 정도의 일정한 공극을 갖고 있으며 수화가 진행될수록 겔공극의 양은 증가한다. 내부에는 충전수, 물리적 흡착수, 자유수 같은 물이 존재하고 시멘트 겔내의 물은 겔의 표면장력에 의해 물분자의 유통이 잘 일어나지 않아 얼음으로 변화되기 어려워 0℃보다 낮은 온도에서는 초냉각수로 존재하며 -78℃이하에서 얼게 된다.

② 모세관 공극

고유수축과 수화에 사용되지 않은 물에 의해서 발생하며 수화가 진행될 수록, 물-시멘트비가 적을수록 모세관 공극의 양은 감소한다. 물은 겔입자 표면력의 영향을 받지 않는 자유수이므로 빙점인 0℃이하에서 얼게 된다. 공극 내의 물이 얼게 되면 체적이 팽창되고, 이 체적의 증가가 공극의 체적을 초과하면 콘크리트의 내부에 압력이 발생하여 시멘트 풀이 손상을 받게 된다. 또한 공극의 체적을 초과하는 물은 겔공극을 통하여 비교적 크기가 큰 공기포로 이동하게 되는데, 공기포와 거리가 멀수록, 물의 이동통로가 작을수록 압력이 커져 통로인 시멘트겔이 손상된다.

저품질 콘크리트의 경우는 모세관공극을 통해 공기포로 쉽게 물이 이동되고, 겔공극을 통해 이동되는 양보다 많기 때문에 공기포가 쉽게 포화된다. 포화된 공기포내의 물이 동결할 때 공기포의 체적을 초과하는 압력이 겔공극 내의 압력에 비해 매우 크게 되며, 강도가 낮은 저품질 콘크리트는 그 압력에 심한 손상을 받게 된다.

③ 공기포

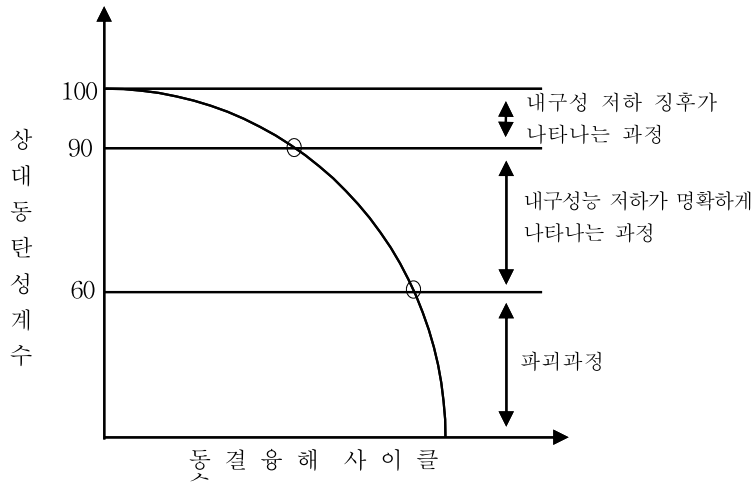
콘크리트의 재료를 혼합하는 과정에서 굳지 않은 시멘트풀 내에 갇힌 공기와 콘크리트의 동결융해 내구성, 수밀성, 워커빌리티 등의 향상을 목적으로 AE 혼화제에 의해 인위적으로 발생하는 연행공기가 있으며, 공기포 내에는 공기가 가득 차 있으므로 상압으로 인한 물의 영향은 받지 않는다고 알려져 있다.

④ 골재 하면의 수막

콘크리트 타설 후 골재와 시멘트 입자의 침강현상이 일어나는데 이로 인하여 시멘트 반죽내의 물과 미세입자가 부상하고 이때 굵은 골재에 의해 물의 상승이 억제되면 골재 밑면에 수막현상이 발생한다. 이 내부 블리딩 현상에 의하여 콘크리트가 경화한 후에는 골재 하면은 공극으로 남게된다.

⑤ 공극의 크기

공극의 크기는 겔공이 지름 15~20Å 정도이고 모세관 공극은 5000Å 정도이며 공기포의 크기는 수 μm 에서 수 mm에 이른다.



< 그림 2.5 > 콘크리트의 동결융해

2) 물-시멘트비

단위결합재량 변화에 따른 물-시멘트비는 모세관 공극과 밀접한 관계를 가지고 있어 동해에 대한 콘크리트 저항성에 중요한 영향을 미친다.

저품질의 콘크리트, 다시 말해 물-시멘트비가 높은 콘크리트의 경우는 수화에 사용되지 못한 물이 많기 때문에 모세관 공극의 수와 양이 많아지고 연결이 잘 되어 동결시 물의 이동량이 많고 인접한 모세관 공극을 통하여 공기포로 이동하게 되어 동결 융해시 낮은 저항성을 갖게 된다. 그러나 물-시멘트비를 너무 낮춘다면 충분한 수화가 일어나기 전에 자연상태에 노출되기 때문에 오히려 동결융해 저항성이 작아지는 것으로 알려져 있다.

3) 혼화재

실리카흄, 고로슬래그, 플라이애쉬 등의 혼화재를 이용한 콘크리트의 동결융해 저항성에 대한 연구는 여러 연구자들에 의해 이루어지고 있으나 혼화재의 사용에 따른 동결융해 저항성의 변화에 대한 상관성은 아직 분분한 상

태이고 정확한 해답을 이끌어 내지 못하고 있다.

나. KS F 시험방법

1) 동결융해 시험 방법(KS F 2456)

① 동결융해 장치

동결융해 장치는 공시체가 소정의 동결융해 사이클을 받는 데 적당한 체임버, 동결 및 가열장치 고정의 요구 온도 하에서 연속적이고 자동적으로 재현성 사이클을 발생시킬 수 있는 장치로 구성된다. 장치가 자동적으로 작동이 되지 않을 경우에는 1일 24시간 기준으로 연속적인 수동 조작을 해야 되고 또는 장치가 작동하지 않을 때는 모든 공시체는 동결 상태로 저장해야 한다. 그리고 동결 단계시 공기 중, 융해 단계시 수중에 놓이도록 배치되어야 한다.

② 동결융해 사이클

정상적인 동결융해 사이클은 공시체의 온도를 2시간 내지 4시간 사이에서 교대로, 4℃에서 -18℃로 떨어뜨리고, 다음에 -18℃에서 4℃로 상승시키는 것이다. 총시간의 20%보다 적게 사용해서는 안된다. 냉각 기간이 끝나는 순간의 공시체의 중심온도는 $-18 \pm 2^\circ\text{C}$ 이어야 하며, 가열시간이 끝나는 순간의 온도는 $4 \pm 2^\circ\text{C}$ 이어야 하고, 언제라도 공체의 온도가 -19°C 이하 또는 6°C 이상이 되어서는 안된다.

임의의 공시체 중심에서의 온도가 3℃에서 -16℃로 떨어지는데 소요되는 시간은 냉각시간의 1/2이하가 되어서는 안되고, 또 -16℃에서 3℃로 상승하는데 소요되는 시간은 가열시간의 1/2 이하가 되어서는 안된다.

상호 비교를 목적으로 하는 공시체에서는 임의의 공시체의 중심 온도가 2℃에서 -12℃로 변화하는데 소요되는 시간이 다른 공시체에서 소요되는 시간이 다른 공시체에서 소요되는 냉각 시간의 1/6 이상 차이가 나서도 안된다.

또, 임의의 공시체의 중심 온도가 -12℃에서 2℃로 변화하는데 소요되는

시간이 다른 공시체에서 소요되는 가열 시간의 1/3이상 차이가 나서는 안된다.

장치 내에서 공시체의 저항 하중을 일정하게 유지하면 쉽게 균등한 온도와 시간조건을 조절할 수 있다. 공시체의 저항 하중을 이용할 수 없을 경우에는 빈 공간을 임의의 모조 공시체로 채워야 한다. 또한 공시체의 중심과 표면의 온도차는 항상 28℃를 초과해서는 안된다.

동결융해에서 상태가 바뀌는 순간의 시간이 10분을 초과해서는 안된다.

③ 시험 방법

특별히 다른 재령으로 규정되어 있지 않는 한, 공시체는 14일간 양생한 후 동결융해 시험을 시작한다.

동결 상태의 초기에 용해수 내에 공시체를 넣고 동결융해 시험을 시작한다. 동결융해 사이클이 36사이클을 초과하지 않는 범위의 간격으로 용해 상태에서 장치로부터 공시체를 꺼낸다. 다음에 바로 6±3℃의 온도 조건 하에서 가로 1차 주파수 시험을 하고, 무게를 단 후 다시 시험 장치내로 옮긴다.

공시체가 온전히 용해상태에 있는지, 그리고 어떤 특정 온도 조건으로 조절 수조 내에 놓여 있는지를 확인하고, 또한 용해 사이클이 끝날 때까지 시험 중인 각 공시체 전체가 이런 상태가 되도록 공시체를 충분히 동결해 시험기 내에 두었는지를 확인한다.

공시체를 장치에서 꺼낸 동안 함수량의 손실이 없도록 보호하고, 다시 넣을 때는 양 끝이 반대가 되도록 돌려 놓는다.

각 공시체는 특별한 제한이 없는 한, 300사이클이 될 때까지 또는 초기의 최초 시험시에 측정된 탄성계수의 60%가 될 때까지 시험을 계속해야 한다.

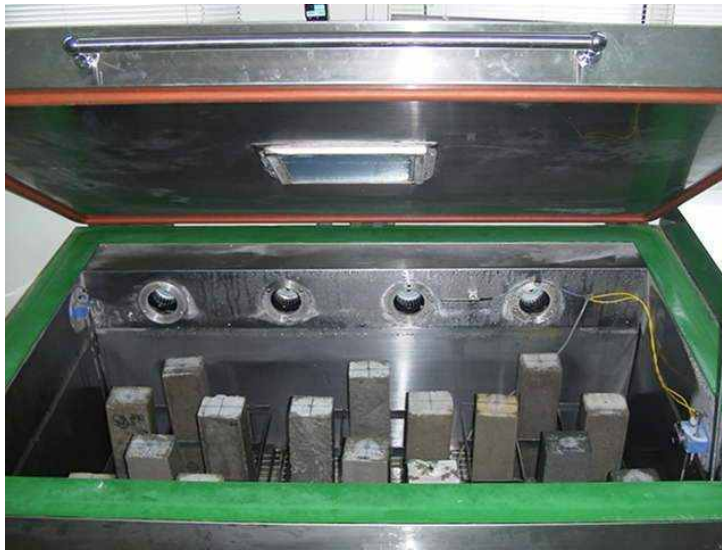
1차 진동 주파수 시험은 공시체마다 매번하며, 또한 육안으로 관측한 공시체의 상태를 기록하고, 그 기록지에 나타난 결점에 대한 평가도 기록한다.

공시체의 질이 급격히 저하될 우려가 있을 경우, 초기 동결융해시의 가로 1차 진동 주파수시험은 10 사이클을 초과하지 않는 범위 내에서 하여야 한다. 상대 동탄성계수가 50% 이하로 떨어진 후에는 공시체의 시험을 계속해

서는 안된다.

장치의 고장 또는 다른 이유로 어떤 기간 동안 사이클을 중지해야 한다면, 수분의 손실을 방지하면서 동결상태로 공시체를 저장해야 한다. 용기 속에 공시체를 놓아 두기가 어려우면 가능한 한 습한 상태로 봉한 후에 $-18 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 인 차가운 방이나 냉장고 속에 저장해야 한다.

일반적으로 공시체를 2사이클 이상 용해조건 내에 두는 것이 바람직하지 못하지만, 전체 시험을 하는 동안 이런 일이 한 두 번만 있게 된다면 기간이 길어져도 무방하다.



< 그림 2.6 > 동결용해 시험기(B-type)

2) 동탄성 계수 측정(KS F 2437)

이 시험은 콘크리트의 원주형 및 각주형 공시체의 종 진동, 변형 진동 및 비틀림 진동의 1차공명 진동수를 구하여, 여기서 동탄성계수를 구하는 시험이다.

① 시험용 기구

구동회로, 픽업(Pick up)회로, 공시체의 지지대로 이루어져 있다.

· 구동회로

구동 회로는 진동수가 가변인 발진기, 증폭기 및 구동단자로 되어 있다. 발진기는 진동수가 500~10000Hz의 범위에 있는 것을 표준으로 하며, 오차 $\pm 2\%$ 이내로 진동수를 조정할 수 있는 것이라야 한다. 이 조정에 있어서 진동수의 검정에는 음극선 역전류 검출관(Oscilloscope)과 표준 발진자(1000Hz의 음 표준 발진자)를 사용한다.

발진기와 증폭기를 조합시킨 것은 소요의 출력을 낼 수 있으며, 그 출력을 적당히 제어할 수 있는 것이어야 한다. 공시체에 진동을 일으키게 하는 구동 단자는 발진기와 증폭기의 출력을 최대로 한 경우에도 잘 작동해야 한다. 구동 단자의 진동 부분의 무게는 시험 결과에 영향을 미치지 않는 정도로 아주 작아야 한다. 발진기와 증폭기를 조합시켰을 때의 출력 전압은 발진기의 진동수의 전 범위내에서는 $\pm 20\%$ 이상의 변화를 가져서는 안 된다.

또, 공시체의 구동 단자를 접촉시켰을 때, 위공명(공시체의 1차 공명 진동과는 무관계한 것을 말한다)이 일어나지 않도록 해야 한다. 구동 단자의 지지물은 시험결과에 영향을 미치거나 공시체의 진동을 구속해서는 안된다.

· 픽업(Pick up) 회로

픽업 회로는 픽업, 증폭기 및 지시기로 구성된다. 픽업은 공시체의 진폭 진동의 속도 또는 가속도에 비례한 전압을 발생하는 것으로서, 그 진동 부분의 무게는 공시체의 진폭 진동의 속도 또는 가속도에 비례한 전압을 발생하는 것으로서, 그 진동 부분의 무게는 공시체의 무게에 비교하여 매우 작아야 한다. 증폭기는 그 출력이 지시기를 움직이는데 충분한 것임과 동시에 출력을 제어할 수 있는 것이어야 한다. 지시기(음극선 역전류 검출관을 사용해도 되지만, 일반적으로 미터형의 지시기를 사용하는 쪽이 편리하다. 다만, 1

차 공명 진동수가 있는 것을 확인하는데 음극선 역전류 검출관을 이용하는 것이 좋다.)는 전압계 또는 미소 전류계로 한다. 픽업(1차 공명진동수는 공시체의 치수 기타의 이유로 인하여 많이 변하므로 거기에 따른 픽업을 사용하여야 한다.)을 사용하는 진동수의 범위내에서 평탄한 것이어야 한다.

- 공시체의 지지대

지지대는 공시체가 너무 구속되지 않고 진동될 수 있는 것이어야 한다. 지지대의 치수는 그 고유 진동수가 사용하는 진동수의 범위에 있도록 하여야 한다.

② 시험 방법

- 종 진동 경우의 공명 진동수 결정

공시체는 양 끝 자유 종진동으로 될 때는 너무 구속되지 않고 진동되도록 지지대 위에 놓아야 한다. 구동력은 공시체의 끝면에서 여기에 직각으로 가하고, 픽업은 공시체의 진동 방향으로 작동하도록 콘크리트의 다른 끝면에 접촉시켜야 한다.

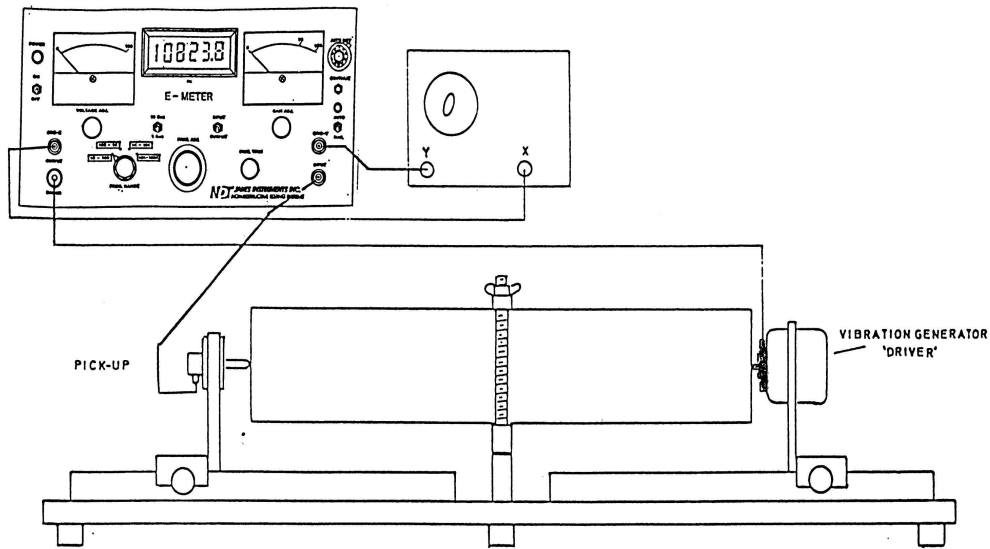
발전기의 진동수를 바꾸고, 여기에 따라 공시체가 진동하도록 구동력을 가하면서, 증폭된 픽업의 출력 전압을 관측한다. 지시기는 명확한 최대의 흔들림을 생기게 하고, 더구나 진동의 파절을 측정할 결과, 즉 진동의 파절이나 복부(腹部)의 위치를 확인하는데, 픽업을 공시체의 길이 방향으로 이동시켜 지시기의 움직임을 측정하면된다. 또한 파절에 있어서는 지시값이 최소치를 나타내고, 복부에 있어서는 최대치를 나타낸다. 음극선 역전류 검출관을 구비한 장치라면 리사주의 도형이 파절의 전후에서 위상이 변하는 것을 역전류 검출관에 의하여 확인해도 좋다. 이러한 것이 1차 공명진동임을 확인했을 때는, 이경우의 진동수를 종진동의 1차 공명 진동수로 한다.

(동탄성 계수의 계산)

$$E_D = C_1 W f_1^2$$

$$\text{다만, } C_1 = 408 \times 10^{-5} \frac{L}{A} \text{ (s}^2/\text{cm}^2\text{)}\{\text{s}^2/\text{mm}^2\}$$

- 여기서 E_D : 동탄성 계수(kgf/cm²){N/mm²}
 W : 공시체 무게(kgf){N}
 f_1 : 종진동의 1차 공명 진동수(HZ)
 L : 공시체의 길이 (cm){mm}
 A : 공시체의 단면적(cm²){mm²}



< 그림 2.7 > 동탄성계수 측정기

다. 국내의 기상조건

동결융해 작용에 미치는 온도요인으로서는 동결 최저온도, 동결속도, 융해온도 및 동결 최저온도의 지속시간이 있으나 이 중에서 동결 최저온도가 동결융해 작용에 의한 콘크리트의 내구성능 저하에 가장 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다. 그리고 동결속도, 융해온도 및 동결 최저온도의 지속시간은 일반적인 자연환경하의 온도범위에서 동결융해 저항성에 별다른 영향을 주지 않는다고 알려져 있다.

4. 저수지 구조물의 상태평가 분석

가. 상태평가 항목 및 기준

안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(시설안전공단, 2010)에 따르면 저수지 구조물의 상태평가 방법은 다음과 같다.

1) 평가유형, 영향계수 및 기준산정 방법

시설물의 상태평가는 결함 및 손상에 따른 각각의 상태평가 기준을 적용하며, 상태변화가 전체 구조물에 미치는 안전성의 영향정도, 구조적인 중요도가 적절히 고려되어 평가 될 수 있도록 결함 및 손상을 평가유형(評價類型) 별로 구분하여 영향계수를 적용한다.

① 평가유형의 구분

결함 및 손상에 대한 평가유형은 다음과 같이 구분한다.

* 중요결함

침하, 경사/전도 및 활동 등과 같이 전체 구조물의 구조적인 안전에 직접 영향을 미치는 결함.

* 국부결함

수평이음부 불량 등과 같이 구조물의 안전성에 직접적인 영향을 미치지 않는 않지만 손상이 진전될 경우 전체 구조물의 안전에 상당한 영향을 끼칠 수 있는 결함.

* 일반손상

파손, 마모, 콘크리트 재료분리 등과 같이 구조물의 안전에 크게 영향을 주지 않는 일반적인 손상.

② 영향계수의 적용

각 부재에서 발생하는 각종 손상 및 결함에 대한 상태평가 시 손상이 전체 구조물에 미치는 안전성의 영향정도, 구조적인 중요도가 적절히 고려되어 평가될 수 있도록 영향계수를 적용한다.

영향계수는 안전성에 직접적인 영향을 미치는 중요 결함의 상태등급을 기준으로 하여 국부적인 결함의 등급을 상향조정함으로써 이들이 전체 구조물에 미치는 영향을 평가절하하는 계수이며, 영향계수는 상태평가를 위한 표준기준이며, 조사책임자의 판단으로 다소 조정할 수 있다.

<표 2.1> 평가유형의 구분

평가유형	정 의	평가기준	평가점수	영향계수
중요결함	침하, 경사/전도 및 활동 등과 같이 전체 구조물의 구조적인 안전에 직접영향을 미치는 결함.	a b c d e	5 4 3 2 1	1.0
국부결함	수평이음부 불량 등과 같이 구조물의 안전성에 직접적인 영향을 미치지 않지만 손상이 진전될 경우 전체구조물의 안전에 상당한 영향을 끼칠 수 있는 결함	a b c d e	5 4 3 2 1	1.0 1.1 1.2 1.4 2.0
일반손상	파손, 마모, 콘크리트 재료분리 등과 같이 구조물의 안전에 크게 영향을 주지 않는 일반적인 손상.	a b c d e	5 4 3 2 1	1.0 1.1 1.3 1.7 3.0

2) 상태평가 항목 및 기준

① 필댐

* 댐체 및 양안부

<표2.2> 상태평가 항목 - 필댐(댐마루)

[댐 마 루]

상태변화	평가 유형	영향 계수	평가 기준	평가 점수	평가 내용
중·횡방향 균열	중요 결함	1.0	a	5	○중·횡방향 균열이 없는 최상의 상태
			b	4	○중·횡방향 균열길이 0~1m, 제정의 10% 이하인 상태
			c	3	○중·횡방향 균열길이 1~5m, 제정의 10~50% 상태
			d	2	○중·횡방향 균열길이 5m이상, 제정의 50% 이상 ○난간이 기울어진 상태
			e	1	○중·횡방향 균열길이 5m이상, 제정의 50% 이상 ○중방향 균열길이 저수위 이하이고, 횡방향 균열이 깊고 저수위 이하까지 진행되었을 경우
침하	중요 결함	1.0	a	5	○결함이 없는 최상의 상태
			b	4	○침하 및 부등침하량이 10cm 이하로 경미한 상태
			c	3	○과다한 침하 및 부등침하량이 10~50cm인 상태
			d	2	○과다한 침하 및 부등침하량이 50cm 이상 ○댐마루 도로의 경사와 사면이 합몰된 상태
			e	1	○과다한 침하 및 부등침하량이 50cm 이상 ○상시만수위 0.6m까지 진행된 매우 위험한 상태
수평변위	중요 결함	1.0	a	5	○결함이 없는 최상의 상태
			b	4	○과도한 수평변위가 없는 양호한 상태
			c	3	○과도한 수평변위의 징후가 존재하나 경미한 상태 (움기 0~50cm, 측방이동 0~30cm 범위 발생시)
			d	2	○과도한 수평변위로 댐마루 도로의 변형이 심각한 상태 (움기 50cm 이상, 측방이동 30cm 이상 범위 발생시)
			e	1	○과도한 수평변위로 댐마루 도로의 변형이 매우 위험한 상태 (움기 50cm 이상, 측방이동 30cm 이상 범위 발생시)
제체유실	중요 결함	1.0	a	5	○결함이 없는 최상의 상태
			b	4	○댐마루 제체의 유실면적이 5㎡ 이하인 상태
			c	3	○댐마루 제체의 유실면적이 5~15㎡ 인 상태
			d	2	○댐마루 제체의 유실면적이 15㎡ 이상 심각한 상태 (침하량과 누수량이 서서히 증가, 합몰, 누수의 변색 등의 징후가 나타남)
			e	1	○댐마루 제체의 유실면적이 15㎡ 이상 매우 위험한 상태 (침하량과 누수량이 급격히 증가, 합몰, 누수의 변색 등의 징후가 나타남)
사면 불안정	중요 결함	1.0	a	5	○최상의 건전한 상태
			b	4	○댐체에 슬라이딩 길이가 1m 이하의 손상이 있는 상태
			c	3	○댐체에 슬라이딩 길이가 1~2m 이하의 손상이 있는 상태
			d	2	○댐체에 슬라이딩 길이가 2m 이상의 손상이 있는 상태
			e	1	○댐체에 슬라이딩 길이가 2m 이상 매우 위험한 상태

<표2.3> 상태평가 항목 - 필댐(상류사면)

[상 류 사 면]

상태변화	평가 유형	영향 계수	평가 기준	평가 점수	평가 내용
누수	중요결함	1.0	a	5	○결함이 없는 최상의 상태
			b	4	○댐체를 통한 누수가 일정한 양호한 상태
			c	3	○댐체를 통한 누수가 크게 증가하지 않는 보통의 상태
			d	2	○댐체를 통한 초과누수로 저수지 수면에 거품 또는 소용돌이 현상이 시작되는 심각한 상태
			e	1	○댐체를 통한 초과누수로 저수지 수면에 거품 또는 소용돌이 현상, 저수지 수위의 저하, 함몰 등의 현상이 매우 심각한 상태
침하 및 변형	중요결함	1.0	a	5	○결함이 없는 최상의 상태
			b	4	○침하깊이 0~10cm, 제체의 변형 0~10%인 상태
			c	3	○침하깊이 10~50cm, 제체의 변형 10~50%인 상태
			d	2	○침하깊이 50cm 이상, 제체의 변형 50% 이상인 상태
			e	1	○침하깊이 50cm 이상, 제체의 변형 50% 이상 위험한 상태
차수벽 노후화	중요결함	1.0	a	5	○차수벽의 노후화가 없는 최상의 상태
			b	4	○차수벽의 노후화가 없는 양호한 상태
			c	3	○차수벽의 노후화가 경미한 상태 (슬래브 균열폭<0.1mm, 조인트 열림<2.0mm, 철근부식확률 50%일 때)
			d	2	○차수벽의 노후화가 심각한 상태 (슬래브 균열폭≥0.1mm, 조인트 열림≥2.0mm, 철근부식확률 90%이상일 때)
			e	1	○차수벽의 노후화가 매우 심각한 상태 (슬래브의 균열, 조인트의 분리, 조인트 열림>2.5mm, 철근의 부식확률이 100% 일 때)
사면불안정 및 사면보호	중요결함	1.0	a	5	○결함이 없는 최상의 상태
			b	4	○사면 전체의 0~10%가 유실된 상태
			c	3	○사면 전체의 10~50%가 유실된 상태
			d	2	○사면 전체의 50% 이상 유실된 심각한 상태
			e	1	○사면 전체의 50% 이상이 유실된 매우 위험한 상태
사면침식	국부결함	1.0	a	5	○사면침식이 없는 최상의 상태
		1.1	b	4	○사면침식고가 0~0.5m 이하인 상태
		1.2	c	3	○사면침식고가 0.5~2m 이하이며, 사석의 유실이 일부 존재하는 상태
		1.4	d	2	○사면침식고가 2m이상이며, 소협곡이 이루어지는 초기상태
		2.0	e	1	○사면침식고가 2m이상이며, 소협곡이 이루어진 매우 위험한 상태

<표2.4> 상태평가 항목 - 필댐(하류사면)

[하 류 사 면]

상태변화	평가 유형	영향 계수	평가 기준	평가 점수	평가 내용
누 수	중요 결함	1.0	a	5	○댐체의 과도한 누수가 없는 최상의 상태
			b	4	○댐체의 과도한 누수가 거의 없는 양호한 상태 (0.1 L/sec 이하)
			c	3	○댐체의 과도한 누수의 징후가 시작되는 경미한 상태 (0.1~1.0 L/sec)
			d	2	○댐체의 과도한 누수로 탁류 발생, 평소 누수량보다 증가 시 (1.0 L/sec 이상)
			e	1	○댐체의 과도한 누수로 탁류 발생, 누수의 온도변화가 심하고, 비강우시 누수량이 평소 누수량의 배 이상 증가 시 (1.0 L/sec 이상)
사면불안정	중요 결함	1.0	a	5	○사면불안정이 없는 최상의 상태
			b	4	○사면불안정이 없는 양호한 상태
			c	3	○얕은 균열 및 활동, 융기 및 함몰, 습윤지 등이 부분적으로 나타나 사면불안정이 경미한 상태
			d	2	○깊은 균열 및 활동, 융기 및 함몰, 습윤지 등이 나타나 사면불안정이 시작되는 상태
			e	1	○깊은 균열 및 활동, 융기 및 함몰, 습윤지 등이 하류사면 지단과 접하게 되어 사면불안정이 매우 심각한 상태
사면보호 상태	중요 결함	1.0	a	5	○사면불안정의 징후가 없는 최상의 상태
			b	4	○사면 전체의 0~10%가 유실된 상태
			c	3	○사면 전체의 10~50%가 유실된 상태
			d	2	○사면 전체의 50% 이상이 유실된 매우 심각한 상태
			e	1	○사면 전체의 50% 이상이 유실된 매우 위험한 상태
침하 및 변형	중요 결함	1.0	※ 상류사면과 동일 평가		
사면침식	일반 손상	1.0	a	5	○사면침식이 없는 최상의 상태
		1.1	b	4	○사면침식이 없는 양호한 상태
		1.3	c	3	○사면침식이 일부 나타난 경미한 상태
		1.7	d	2	○사면침식에 의하여 도랑이 형성되기 시작하는 상태
		3.0	e	1	○사면침식에 의하여 도랑이 형성된 매우 심각한 상태
식 생	일반 손상	1.0	a	5	○사면에 식생이 없는 최상의 상태
		1.1	b	4	○사면에 일년생 식물이 있는 상태
		1.3	c	3	○사면에 다년생 식물이 있는 상태
		1.7	d	2	○사면에 관목류가 있는 상태
		3.0	e	1	○사면에 다년생 식물 및 관목류가 있는 상태
동물의 굴	일반 손상	1.0	a	5	○사면에 동물의 서식 흔적이 없는 최상의 상태
		1.1	b	4	○사면에 동물의 굴 직경이 0~1cm, 개수 0~1개
		1.3	c	3	○사면에 동물의 굴 직경이 1~5cm, 개수 2~4개
		1.7	d	2	○사면에 동물의 굴 직경이 5cm 이상, 개수 5개 이상
		3.0	e	1	○사면에 동물의 굴 직경이 5cm 이상이 수없이 존재

<표2.5> 상태평가 항목 - 필댐(기초 및 양안부)

[기초 및 양안부]

상태변화	평가 유형	영향 계수	평가 기준	평가 점수	평가 내용
침하	중요 결함	1.0	a	5	○과도한 침하, 부등침하가 없는 최상의 상태
			b	4	○과도한 침하, 부등침하가 없는 양호한 상태
			c	3	○과도한 침하, 부등침하가 경미한 상태
			d	2	○과다한 침하 및 부등침하로 댐마루 도로의 경사와 사면이 함몰되고 기초가 불안정한 상태
			e	1	○과다한 침하 및 부등침하가 상시만수위 0.6m까지 진행되고, 기초가 불안정한 매우 심각한 상태
기초의 불안정	중요 결함	1.0	a	5	○기초의 불안정이 없는 최상의 상태
			b	4	○기초의 불안정이 없는 양호한 상태
			c	3	○기초의 불안정이 경미한 상태
			d	2	○과다한 침하 및 부등침하로 기초가 불안정한 상태
			e	1	○과다한 침하 및 부등침하로 기초가 불안정한 매우 심각한 상태
기초의 침식 및 침투	중요 결함	1.0	a	5	○기초 및 양안부의 침식, 과도한 침투가 없는 최상의 상태
			b	4	○기초 및 양안부의 침식, 과도한 침투가 없는 양호한 상태
			c	3	○기초 및 양안부의 침식, 과도한 침투가 일부 나타나는 경미한 상태
			d	2	○기초 및 양안부의 침식, 과도한 침투로 도랑이 형성되고, 탁류 발생, 평소 누수량보다 증가하여 심각한 상태
			e	1	○기초 및 양안부의 침식, 과도한 침투로 도랑이 형성되고, 누수의 온도 변화가 심하고, 비강우시 누수량이 평소 누수량의 배 이상 증가하여 매우 심각한 상태

*여수로

<표 2.6> 상태평가 항목 - 필댐(접근수로)

[접근수로]

상태변화	평가 유형	영향 계수	평가 기준	평가 점수	평가 내용
콘크리트 라이닝 손상	일반 손상	1.0	a	5	○콘크리트 라이닝 손상이 없는 최상의 상태
		1.1	b	4	○콘크리트 라이닝 손상이 없는 양호한 상태
		1.3	c	3	○콘크리트 라이닝 손상이 경미한 상태
		1.7	d	2	○콘크리트 라이닝에 균열 또는 슬래브의 변형이 심각한 상태
		3.0	e	1	○콘크리트 라이닝에 균열 또는 슬래브의 변형이 매우 심각한 상태
불안정한 측벽 또는 라이닝	일반 손상	1.0	a	5	○불안정한 측벽 또는 라이닝 손상이 없는 최상의 상태
		1.1	b	4	○불안정한 측벽 또는 라이닝 손상이 없는 양호한 상태
		1.3	c	3	○불안정한 측벽 및 라이닝에 균열, 누수 등 손상이 경미한 상태
		1.7	d	2	○불안정한 측벽의 배수불량, 배면토압 증가에 의한 균열과 라이닝면의 균열 또는 허빙현상 등 손상이 심각한 상태
		3.0	e	1	○불안정한 측벽의 배수불량, 배면토압 증가와 라이닝 라이닝면의 균열 또는 허빙현상 등 손상이 매우 심각한 상태
접근수로 상부의 자연사면 불안정	일반 손상	1.0	a	5	○접근수로 상부의 자연사면 불안정이 없는 최상의 상태
		1.1	b	4	○접근수로 상부의 자연사면 불안정이 없는 양호한 상태
		1.3	c	3	○접근수로 상부의 자연사면이 일부 낙석이 있는 상태
		1.7	d	2	○접근수로 상부의 자연사면이 일부 사면붕괴 및 균열로 여수로가 손상받을 위험이 존재하는 상태
		3.0	e	1	○접근수로 상부의 자연사면이 국부적인 사면붕괴 및 균열로 여수로가 붕괴되거나 손상받을 위험이 존재하는 상태
접근수로내의 식생 및 잡물	일반 손상	1.0	a	5	○접근수로내의 식생 및 잡물이 없는 최상의 상태
		1.1	b	4	○접근수로내의 식생 및 잡물이 없는 양호한 상태
		1.3	c	3	○접근수로내의 식생 및 잡물이 경미한 상태
		1.7	d	2	○접근수로내의 식생 및 잡물이 수문조작을 방해하는 상태
		3.0	e	1	○접근수로내의 식생 및 잡물이 산사태 등으로 여수로를 붕괴할 위험이 있는 상태

<표 2.7> 상태평가 항목 - 필댐(조절부)

【 조 절 부 】

상태변화	평가 유형	영향 계수	평가 기준	평가 점수	평가 내용
에이프런 구조물의 손상 및 노후화	국부 결함	1.0	a	5	○에이프런 구조물의 손상 및 노후화가 없는 최상의 상태
		1.1	b	4	○에이프런 구조물의 손상 및 노후화가 없는 양호한 상태
		1.2	c	3	○에이프런 구조물의 손상 및 균열, 박락, 켈근노출 등 노후화가 경미한 상태
		1.4	d	2	○에이프런 구조물의 손상 및 이음부 균열을 통한 침투, 부등침하 ≤ 5mm 등 노후화가 심각한 상태
		2.0	e	1	○에이프런 구조물의 손상 및 이음부 균열을 통한 침투, 부등침하 > 5mm 등 노후화가 매우 심각한 상태
피어와 벽체 구조물의 손상 및 노후화	국부 결함	1.0	a	5	○피어와 벽체 구조물의 손상 및 노후화가 없는 최상의 건전한 상태
		1.1	b	4	○피어와 벽체 구조물의 손상 및 균열, 백태, 일부누수, 박리·박락, 세굴, 콘크리트 탈락 등 노후화가 경미한 상태
		1.2	c	3	○피어와 벽체 구조물의 손상 및 균열, 백태, 일부누수, 박리·박락, 세굴, 콘크리트 탈락 등 노후화가 진행되어 성능회복을 위한 보수를 필요로 하는 상태
		1.4	d	2	○피어와 벽체 구조물의 손상 및 켈근노출, 시공이음부 단차 > 2mm 등 노후화가 심각한 상태
		2.0	e	1	○피어와 벽체 구조물의 손상 및 이음부 균열, 시공이음부 단차 > 5mm 등 노후화가 매우 심각한 상태
월류부 웨어 구조물의 손상 및 노후화	국부 결함	1.0	a	5	○월류부 웨어 구조물의 손상 및 노후화가 없는 최상의 건전한 상태
		1.1	b	4	○월류부 웨어 구조물의 손상 및 균열, 백태, 일부누수, 박리·박락, 세굴, 콘크리트 탈락 등 노후화가 경미한 상태
		1.2	c	3	○월류부 웨어 구조물의 손상 및 균열, 백태, 일부누수, 박리·박락, 세굴, 콘크리트 탈락 등 노후화가 진행되어 성능회복을 위한 보수를 필요로 하는 상태
		1.4	d	2	○월류부 웨어 구조물의 손상 및 켈근노출, 시공이음부 단차>2mm, 시공이음부 누수 등 노후화가 심각한 상태
		2.0	e	1	○월류부 웨어 구조물의 손상 및 균열, 박락, 켈근노출, 이음부의 균열을 통한 누수, 시공이음부 단차 > 5mm 등 노후화가 매우 심각한 상태
수문가이드, 각각가이드 또는 수문지수판에서의 공동화 현상	국부 결함	1.0	a	5	○수문가이드, 각각 가이드 또는 수문 지수판에서의 공동화 현상이 없는 최상의 상태
		1.1	b	4	○수문가이드, 각각 가이드 또는 수문 지수판에서의 공동화 현상이 없는 양호한 상태
		1.2	c	3	○수문가이드, 각각 가이드 또는 수문 지수판에서의 공동화 현상이 경미한 상태
		1.4	d	2	○수문가이드, 각각 가이드 또는 수문 지수판에서의 공동화 현상이 심각한 상태
		2.0	e	1	○수문가이드, 각각 가이드 또는 수문 지수판에서의 공동화 현상이 매우 심각한 상태

<표 2.8> 상태평가 항목 - 필댐(도수로)

【 도 수 로 】

상태변화	평가 유형	영향 계수	평가 기준	평가 점수	평가 내용
바닥슬래브의 부등침하, 들뜸, 단차	중요 결함	1.0	a	5	○바닥슬래브의 부등침하, 들뜸, 단차가 없는 최상의 상태
			b	4	○바닥슬래브의 부등침하, 들뜸, 단차가 없는 양호한 상태
			c	3	○바닥슬래브의 부등침하, 들뜸, 단차 < 2mm 상태
			d	2	○바닥슬래브의 부등침하, 들뜸, 단차 ≥ 2mm 상태
			e	1	○바닥슬래브의 부등침하로 인한 슬래브판의 변형, 들뜸, 단차 > 5mm 매우 심각한 상태
바닥슬래브의 콘크리트 균열 및 손상	국부 결함	1.0	a	5	○바닥슬래브의 콘크리트 균열 및 손상이 없는 최상의 상태
		1.1	b	4	○바닥슬래브의 콘크리트 균열 및 손상이 없는 양호한 상태
		1.2	c	3	○바닥슬래브의 콘크리트 균열 및 손상이 경미한 상태
		1.4	d	2	○바닥슬래브의 콘크리트 균열 폭>1.0mm, 길이>15cm로 손상이 심각한 상태
		2.0	e	1	○바닥슬래브의 콘크리트 균열 폭>5.0mm, 길이>30cm, 철근노출 등 손상이 매우 심각한 상태
벽체의 손상 및 노후화	국부 결함	1.0	a	5	○벽체의 손상 및 노후화가 없는 최상의 상태
		1.1	b	4	○벽체의 손상 및 노후화가 없는 양호한 상태
		1.2	c	3	○벽체의 손상 및 노후화가 경미한 상태
		1.4	d	2	○벽체의 손상이 시공이음부 단차 > 2mm, 균열 및 누수 등 노후화가 심각한 상태
		2.0	e	1	○벽체의 손상이 시공이음부 단차 > 5mm, 균열 및 누수, 박락, 철근노출 등 노후화가 매우 심각한 상태
횡방향 이음부의 손상	국부 결함	1.0	a	5	○횡방향 이음부의 손상이 없는 최상의 상태
		1.1	b	4	○횡방향 이음부의 손상이 없는 양호한 상태
		1.2	c	3	○횡방향 이음부의 누수 < 4 L/min 경미한 상태
		1.4	d	2	○횡방향 이음부의 누수 > 75 L/min 심각한 상태
		2.0	e	1	○횡방향 이음부의 공동현상, 콘크리트 탈락, 누수가 이음부위당 > 370 L/min 매우 심각한 상태

<표 2.9> 상태평가 항목 - 필댐(조절부)

[감 세 공]

상태변화	평가 유형	영향 계수	평가 기준	평가 점수	평가 내용
플립버켓의 세굴	중요 결함	1.0	a	5	○플립버켓의 세굴이 없는 최상의 상태
			b	4	○플립버켓의 세굴이 없는 양호한 상태
			c	3	○플립버켓의 세굴구멍의 지름과 깊이 < 0.15m 상태
			d	2	○플립버켓의 세굴구멍의 지름과 깊이 > 0.30m 상태
			e	1	○플립버켓의 세굴이 기초에 도달한 매우 심각한 상태
플립버켓의 하류 또는 기초의 침식	중요 결함	1.0	a	5	○플립버켓의 하류 또는 기초의 침식이 없는 최상의 상태
			b	4	○플립버켓의 하류 또는 기초의 침식이 없는 양호한 상태
			c	3	○플립버켓의 하류 또는 기초의 침식이 경미한 상태
			d	2	○플립버켓의 하류 또는 기초의 침식이 심각한 상태 (이음부 균열 폭 > 5mm)
			e	1	○플립버켓의 하류 또는 기초의 침식이 매우 심각한 상태 (이음부 균열 폭 > 12mm, 측벽기울기 > 10°)
플립버켓의 이음부 손상	국부 결함	1.0	a	5	○플립버켓의 이음부 손상이 없는 최상의 상태
		1.1	b	4	○플립버켓의 이음부 손상이 없는 양호한 상태
		1.2	c	3	○플립버켓의 이음부에 침식, 균열 등 손상이 경미한 상태
		1.4	d	2	○플립버켓의 이음부에 침식, 균열 등 손상이 심각한 상태
		2.0	e	1	○플립버켓의 이음부에 침식, 균열 등 손상이 매우 심각한 상태
정수지 바닥 및 측벽의 세굴	국부 결함	1.0	a	5	○정수지 바닥 및 측벽의 세굴이 없는 최상의 상태
		1.1	b	4	○정수지 바닥 및 측벽의 세굴이 없는 양호한 상태
		1.2	c	3	○정수지 바닥 및 측벽의 세굴이 경미한 상태
		1.4	d	2	○정수지 바닥 및 측벽의 세굴 > 0.15m 심각한 상태
		2.0	e	1	○정수지 바닥 및 측벽의 세굴이 슬래브 전체 두께 침식 또는 파괴로 매우 심각한 상태 (균열 폭 > 12mm, 측벽기울기 > 10°)

* 취수시설 및 방수로

<표 2.10> 상태평가 항목 - 필댐(취수시설 및 방수로)

상태변화	평가 유형	영향 계수	평가 기준	평가 점수	평가 내용
취수탑 파손 및 변위 발생	중요 결합	1.0	a	5	○취수탑의 파손 및 변위 발생이 없는 최상의 상태
			b	4	○취수탑의 파손 및 변위 발생이 없는 양호한 상태
			c	3	○취수탑의 파손 및 변위 발생이 경미한 상태
			d	2	○취수탑의 수문 파손 및 변위 발생(기울기 > 5°)이 심각한 상태
			e	1	○취수탑의 수문 파손으로 작동 불능 및 변위 발생(기울기 > 10°)이 매우 심각한 상태
취수량 감소 및 취수 곤란	국부 결합	1.0	a	5	○취수량 감소 및 취수 곤란이 없는 최상의 상태
		1.1	b	4	○취수량 감소 및 취수 곤란이 없는 양호한 상태
		1.2	c	3	○취수량 감소 및 취수 곤란이 경미한 상태
		1.4	d	2	○취수량 감소 및 취수 곤란이 심각한 상태
		2.0	e	1	○취수량 감소 및 취수 곤란이 매우 심각한 상태(수문 작동 불능)
제진 격자망의 부식 및 변형 손상	국부 결합	1.0	a	5	○제진 격자망의 부식 및 변형 손상이 없는 최상의 상태
		1.1	b	4	○제진 격자망의 부식 및 변형 손상이 없는 양호한 상태
		1.2	c	3	○제진 격자망의 부식 및 변형 손상이 경미한 상태
		1.4	d	2	○제진 격자망의 부식 및 변형 손상이 심각한 상태
		2.0	e	1	○제진 격자망의 부식 및 변형 손상이 매우 심각한 상태(수문 작동 불능)
독과 사면의 침식	국부 결합	1.0	a	5	○독과 사면의 침식이 없는 최상의 상태
		1.1	b	4	○독과 사면의 침식이 없는 양호한 상태
		1.2	c	3	○독과 사면의 침식이 경미한 상태
		1.4	d	2	○독과 사면의 침식이 심각한 상태
		2.0	e	1	○독과 사면의 침식이 매우 심각한 상태

* 기계설비

<표 2.11> 상태평가 항목 - 필댐(권양기)

【 권 양 기 】

상태변화	평가 유형	영향 계수	평가 기준	평가 점수	상태평가 기준
작동 유무 (수문 및 권양기)	중요 결함	1.0	a	5	○상승 및 하강에 이상이 없는 양호한 상태
			b	4	○작동시 이음발생이 없으며 상승 및 하강에 이상이 없는 정상 상태
			c	3	○상승 및 하강이 가능하나 이음발생 등이 있으며, 상하한 자동정지가 불량하나, 약간의 조정으로 원상복구가 가능한 상태
			d	2	○상승 및 하강이 정상 작동되지 않고, 비상점검 등의 임시조치 후에 제한 작동 가능한 상태
			e	1	○전혀 작동되지 않는 상태
와이어 로프 손상	국부 결함	1.0	a	5	○와이어 로프의 손상이 없는 양호한 상태
		1.1	b	4	○와이어 로프의 손상이 없는 건전한 상태
		1.2	c	3	○와이어 로프 표면의 그리스 도포가 불량한 상태
		1.4	d	2	○와이어 로프 표면에 산화부식 진행상태, ○약간의 찍임이 발생한 상태
		2.0	e	1	○와이어 로프의 직경감소가 7%이상, ○하나의 꼬임에서 소선 절단이 10% 이상, ○심한 키크가 있는 경우
마찰부손상 (시브, 감속기, 커플링)	일반 손상	1.0	a	5	○손상이 없는 양호한 상태
		1.1	b	4	○손상이 없는 건전한 상태
		1.3	c	3	○약간의 이음 이상진동이 있으나 사용가능한 상태, ○그리스 도포가 불량한 상태
		1.7	d	2	○부식고착으로 이음 이상진동이 과도한 상태 ○그리스가 건조되거나 이물질이 다량 함유된 상태
		3.0	e	1	○손상 등이 발생하여 보수가 필요한 상태 ○정상 작동되지 않고 비상점검 등의 임시조치 후에 제한적 작동이 되는 상태

<표 2.12> 상태평가 항목 - 필댐(수문 및 문틀)

【 수문 및 문틀 】

상태변화	평가 유형	영향 계수	평가 기준	평가 점수	상태평가 기준
문비(강제) 부식	중요 결함	1.0	a	5	○부식이 없음
			b	4	○전면부식이 조금 발견되거나, 건전부 모재두께의 5%미만의 점부식이 관찰되는 상태
			c	3	○가벼운 전면부식이 전단면에 발생되거나, 건전부 모재두께의 5~10%의 점부식이 관찰되는 상태
			d	2	○심화된 전면부식이 전단면에 발생되어 있거나, 건전부 모재두께의 10~30%의 점부식이 관찰되는 상태로 보수를 하지 않으면 안되는 상태
			e	1	○전면부식과 건전부 모재두께의 30% 이상의 점부식으로 인하여 당장 보강을 하지 않으면 안되는 상태
문비 변형	국부 결함	1.0	a	5	○문짝에 변형이 없는 양호한 상태
		1.1	b	4	○문짝의 변형을 육안으로 판별이 어려운 상태
		1.2	c	3	○외부충격에 의한 국부적인 변형이 발생한 상태이나 기능에 이상이 없는 상태
		1.4	d	2	○변형이 경간의 1/800이상 발생한 상태
		2.0	e	1	○변형으로 작동이 원활하지 못한 상태로 작동시 접촉, 끼임 발생과 부분적인 두께감소가 1/2이상인 경우
누 수	일반 손상	1.0	a	5	○누수가 없는 양호한 상태
		1.1	b	4	○누수 가능성이 없는 건전한 상태
		1.3	c	3	○미세한 누수 가능성이 있는 경미한 상태
		1.7	d	2	○지수고무의 훼손 및 밀착불량 등으로 부분적인 누수가 발생하는 상태
		3.0	e	1	○문짝의 변형으로 누수가 다량으로 발생하여 별도 부대설비(모래주머니)를 설치하여야 누수가 가능한 상태
마찰부 손상 (롤러 힌지)	일반 손상	1.0	a	5	○부식고착이 없고 회전이 원활한 건전한 상태
		1.1	b	4	○부식고착이 있으나, 회전이 원활한 건전한 상태
		1.3	c	3	○고착으로 회전 및 작동이 불량하나, 수문의 작동에는 이상이 없는 상태
		1.7	d	2	○고착으로 회전이 불량(마찰음 발생 등)하여 수문작동이 불량한 상태
		3.0	e	1	○고착으로 회전이 불량(마찰음 발생 등)하여 작동이 불가능한 상태

* 기계설비

<표 2.13> 상태평가 항목 - 필댐(기계설비)

상태변화	평가 유형	영향 계수	평가 기준	평가 점수	평가 내용
작동 유무	중요 결함	1.0	a	5	○ 전기적인 수문작동 상에 이상이 없는 양호한 상태
			b	4	○ 전기적인 수문작동 상에 이상이 없는 건전한 상태
			c	3	○ 전기적인 수문작동 상에 이상이 경미한 상태 (현장제어반 및 조작반, 구동모터, 브레이크 등의 결함이 경미하여 현장에서 즉시 초치가 가능한 상태)
			d	2	○ 전기적으로 수문작동이 불량한 상태 (정상 작동되지 않고 비상점검 등의 임시조치 후에 제한 작동 가능한 상태)
			e	1	○ 전기적으로 수문작동이 전혀 되지 않는 상태
현장제어반 및 조작반 불량	일반 손상	1.0	a	5	○ 현장 제어반의 불량이 없는 양호한 상태
		1.1	b	4	○ 현장 제어반의 불량이 없는 건전한 상태
		1.3	c	3	○ 현장 제어반의 불량이 경미한 보통인 상태 (불량이 경미하여 전기설비의 기동 및 운전에 영향이 없는 상태, 절연: 경년열화를 고려한 1MQ 정도, 접지: 규정치 이내의 상태)
		1.7	d	2	○ 현장 제어반 상태가 불량인 상태 (불량이 심각하여 전기설비의 기동 및 운전에 큰 영향을 주는 경우, 절연: 규정치~1MQ이하, 접지: 규정치를 초과하나 규정치의 +30% 이내)
		3.0	e	1	○ 현장 제어반의 불량이 매우 위험한 상태 (불량 상태가 위험하여 전기설비의 기동 및 운전이 불가능한 상태, 절연: 0MQ이하, 접지: 규정치의 +30% 초과~ ∞)
구동모터 및 브레이크 장치 불량	일반 손상	1.0	a	5	○ 구동모터·브레이크장치의 불량이 없는 양호한 상태
		1.1	b	4	○ 구동모터·브레이크장치의 불량이 없는 건전한 상태
		1.3	c	3	○ 구동모터·브레이크장치의 불량이 경미한 보통인 상태 (불량이 경미하여 설비운전에 영향이 없는 상태, 절연: 경년열화를 고려한 1MQ 정도, 접지: 규정치 이내의 상태)
		1.7	d	2	○ 구동모터·브레이크장치의 상태가 불량한 상태 (불량이 심각하여 설비운전에 큰 영향을 주는 경우, 절연: 규정치~1MQ이하, 접지: 규정치를 초과하나 규정치의 +30% 이내)
		3.0	e	1	○ 구동모터·브레이크장치의 불량이 매우 위험한 상태 (불량 상태가 위험하여 설비운전이 불가능한 상태, 절연: 0MQ이하, 접지: 규정치의 +30% 초과~ ∞)

② 콘크리트댐

* 댐체

<표 2.14> 상태평가 항목 - 콘크리트댐(댐체)

【 댐 마 루 】

상태변화	평가 유형	영향 계수	평가 기준	평가 점수	평가 내용
균열 및 단차	중요 결함	1.0	a	5	○상류에서 하류까지 확장된 횡방향 균열 및 단차가 없는 최상의 상태
			b	4	○상류에서 하류까지 확장된 횡방향 균열 및 단차가 없는 양호한 상태
			c	3	○상류에서 하류까지 확장된 횡방향 균열 및 단차가 상태 (균열깊이 < 30cm)
			d	2	○상류에서 하류까지 확장된 횡방향 균열 및 단차가 발생한 상태 (균열깊이 ≥ 30cm)
			e	1	○상류에서 하류까지 확장된 횡방향 균열 및 단차가 발생한 상태 (균열깊이 > 300cm, 단차 > 2mm)
수축이음부의 열림	중요 결함	1.0	a	5	- 수축이음부의 열림이 없는 최상의 상태
			b	4	- 수축이음부의 열림이 없는 양호한 상태
			c	3	- 수축이음부의 열림이(< 2.0 mm) 상태
			d	2	- 수축이음부의 열림이(≥ 2.0 mm) 진행성인 상태
			e	1	- 수축이음부의 열림이(> 2.5 mm) 진행성인 상태

<표 2.15> 상태평가 항목 - 콘크리트댐(상류면)

【 상 류 면 】

상태변화	평가 유형	영향 계수	평가 기준	평가 점수	평가 내용
수축이음부 열림	중요 결함	1.0	a	5	○수축이음부의 열림이 없는 최상의 상태
			b	4	○수축이음부의 열림이 없는 양호한 상태
			c	3	○수축이음부의 열림이(< 2.0mm) 상태
			d	2	○수축이음부의 열림이(≥ 2.0mm) 상태
			e	1	○수축이음부의 열림이(> 2.5mm) 상태
균열	중요 결함	1.0	a	5	○연직 및 대각선 균열과 박락이 없는 최상의 상태
			b	4	○연직 및 대각선 균열과 박락이 없는 양호한 상태
			c	3	○연직 및 대각선 균열이 경미한 상태 (길이 < 150cm, 깊이 < 30cm)
			d	2	○연직 및 대각선 균열이 심각한 상태 (길이 ≥ 150cm, 깊이 ≥ 30cm)
			e	1	○연직 및 대각선 균열이 매우 위험한 상태 (길이 > 600cm, 깊이 > 150cm)
박락	일반 손상	1.0	a	5	○박락이 없는 최상의 상태
		1.1	b	4	○박락이 없는 양호한 상태
		1.3	c	3	○박락이 경미한 상태 (길이<150cm, 깊이<30cm)
		1.7	d	2	○박락이 심각한 상태 (길이≥150cm, 깊이≥30cm)
		3.0	e	1	○박락이 매우 위험한 상태 (길이>600cm, 깊이>150cm)

<표 2.16> 상태평가 항목 - 콘크리트댐(하류면)

[하 류 면]

상태변화	평가 유형	영향 계수	평가 기준	평가 점수	평가 내용
균열 및 단차	중요 결함	1.0	a	5	○상류에서 하류까지 확장된 횡방향 균열 및 단차가 없는 최상의 상태
			b	4	○상류에서 하류까지 확장된 횡방향 균열 및 단차가 없는 양호한 상태
			c	3	○상류에서 하류까지 확장된 횡방향 균열(균열길이<30cm) 및 단차가 발생한 상태
			d	2	○상류에서 하류까지 확장된 횡방향 균열(균열길이≥30cm) 및 단차가 발생한 상태
			e	1	○상류에서 하류까지 확장된 횡방향 균열(균열길이>300cm) 및 단차가(단차 > 2.5mm) 발생한 상태
수축 시공이음부 누수	중요 결함	1.0	a	5	○수축이음부를 통한 누수가 없는 최상의 상태
			b	4	○수축이음부를 통한 누수가 없는 양호한 상태
			c	3	○수축이음부를 통한 누수가 경미한 상태 (이음부위당 < 3 L/min)
			d	2	○수축이음부를 통한 누수가 심각한 상태 (이음부위당 > 75 L/min)
			e	1	○수축이음부를 통한 누수가 매우 위험한 상태 (이음부위당 > 370 L/min)
수평 시공이음부 누수	중요 결함	1.0	a	5	○수평시공이음부 누수가 없는 최상의 상태
			b	4	○수평시공이음부 누수가 없는 양호한 상태
			c	3	○수평시공이음부 누수가 경미한 상태 (이음부위당 < 3 L/min)
			d	2	○수평시공이음부 누수가 심각한 상태 (이음부위당 > 75 L/min)
			e	1	○수평시공이음부 누수가 매우 위험한 상태 (이음부위당 > 370 L/min)
균열 및 박락	일반 손상	1.0	a	5	○연직 및 대각선 균열과 박락이 없는 최상의 상태
		1.1	b	4	○연직 및 대각선 균열과 박락이 없는 양호한 상태
		1.3	c	3	○연직 및 대각선 균열과 박락이 경미한 상태 (길이 < 150cm, 깊이 < 30cm)
		1.7	d	2	○연직 및 대각선 균열과 박락이 심각한 상태 (길이 ≥ 150cm, 깊이 ≥ 30cm)
		3.0	e	1	○연직 및 대각선 균열과 박락이 매우 위험한 상태 (길이 > 600cm, 깊이 > 150cm)

* 검사량

<표 2.17> 상태평가 항목 - 콘크리트댐(검사량)

상태 변화	평가 유형	영향 계수	평가 기준	평가 점수	평가 내용
횡방향 검사량의 균열	중요 결함	1.0	a	5	◦ 횡방향 검사량에서의 균열이 없는 최상의 상태
			b	4	◦ 횡방향 검사량에서의 균열이 없는 양호한 상태
			c	3	◦ 횡방향 검사량에서의 균열이 경미한 상태 (균열 폭 < 0.5mm)
			d	2	◦ 횡방향 검사량에서의 균열이 심각한 상태 (균열 폭 > 1.0mm)
			e	1	◦ 횡방향 검사량에서의 균열이 매우 위험한 상태 (균열 폭 < 2.0mm, 균열을 통한 침투 > 38 L/min)
상류 종방향 검사량의 균열	중요 결함	1.0	a	5	◦ 상류 종방향 검사량에서의 균열이 없는 최상의 상태
			b	4	◦ 상류 종방향 검사량에서의 균열이 없는 양호한 상태
			c	3	◦ 상류 종방향 검사량에서의 균열이 경미한 상태 (약간습윤)
			d	2	◦ 상류 종방향 검사량에서의 균열이 심각한 상태 (균열을 통한 침투 > 19 L/min)
			e	1	◦ 상류 종방향 검사량에서의 균열이 매우 위험한 상태 (균열을 통한 침투 > 75 L/min)
기초배수 턱수	중요 결함	1.0	a	5	◦ 기초배수의 턱수가 없는 최상의 상태
			b	4	◦ 기초배수의 턱수가 균열이 없는 양호한 상태
			c	3	◦ 기초배수의 턱수가 경미한 상태
			d	2	◦ 기초배수의 턱수가 심각한 상태 (배수량 > 180 L/min, 증가율 < 3 L/일)
			e	1	◦ 기초배수의 턱수가 매우 위험한 상태 (배수량 > 370 L/min, 증가율 < 19 L/일)

* 배수구 및 그라우팅 터널

<표 2.18> 상태평가 항목 - 콘크리트댐(배수구 및 그라우팅 터널)

상태변화	평가 유형	영향 계수	평가 기준	평가 점수	평가 내용
콘크리트 라이닝 균열 및 단차	중요 결함	1.0	a	5	○콘크리트 라이닝 균열 및 단차가 없는 최상의 상태
			b	4	○콘크리트 라이닝 균열 및 단차가 없는 양호한 상태
			c	3	○콘크리트 라이닝 균열 및 단차가 경미한 상태 (균열 폭 < 2.0mm)
			d	2	○콘크리트 라이닝 균열 및 단차가 심각한 상태 (균열 폭 < 5.0mm, 단차 > 2.0mm, 침투 > 19 L/min)
			e	1	○콘크리트 라이닝 균열 및 단차가 매우 위험한 상태 (균열 폭 < 12.0mm, 단차 > 5.0mm, 침투 > 75 L/min)
암반 낙석	일반 손상	1.0	a	5	○암반낙석이 없는 최상의 상태
		1.1	b	4	○암반낙석이 없는 양호한 상태
		1.3	c	3	○암반낙석이 경미한 상태
		1.7	d	2	○암반낙석이 심각한 상태
		3.0	e	1	○암반낙석이 매우 위험한 상태 (암반의 이동 및 이음부 단차 > 5.0mm)

* 기초 및 양안부

<표 2.19> 상태평가 항목 - 콘크리트댐(기초 및 양안부)

상태변화	평가 유형	영향 계수	평가 기준	평가 점수	평가 내용
양안부를 통한 과도한 침투	중요 결함	1.0	a	5	○양안부를 통한 과도한 침투가 없는 최상의 상태
			b	4	○양안부를 통한 과도한 침투가 없는 양호한 상태
			c	3	○양안부를 통한 과도한 침투가 경미한 상태
			d	2	○양안부를 통한 과도한 침투가 심각한 상태 (침투량 > 180 L/min, 증가율 < 3 L/일)
			e	1	○양안부를 통한 과도한 침투가 매우 위험한 상태 (침투량 > 370 L/min, 증가율 < 19 L/일)
암반 불안정	중요 결함	1.0	a	5	○암반의 불안정이 없는 최상의 상태
			b	4	○암반의 불안정이 없는 양호한 상태
			c	3	○암반의 불안정이 경미한 상태
			d	2	○암반의 불안정이 심각한 상태 (이동중지, 사면보호공 원상태 유지)
			e	1	○암반의 불안정이 매우 위험한 상태 (이동이 진행, 양압력 생성)

③ 일반적인 콘크리트 구조물

No. 1

<표 2.20> 상태평가 항목 - 일반적인 콘크리트 구조물(No.1)

상태변화	평가 유형	영향 계수	평가 기준	평가 점수	평가 내용	
탄산화 잔여 깊이	국부 결함	1.0	a	5	○ 30mm이상	탄산화에 의한 부식이 발생할 우려 없음.
		1.1	b	4	○ 10mm이상 ~ 30mm미만	향후 탄산화에 의한 부식이 발생할 가능성 있음.
		1.2	c	3	○ 0mm이상 ~ 10mm미만	경우에 따라서 탄산화에 의한 부식이 발생할 가능성이 있음.
		1.4	d	2	○ 0mm미만	철근부식 발생
		2.0	e	1	-	-
전염화물 이온량	국부 결함	1.0	a	5	○ 0.3kg/m ³ 이하	염화물에 의한 부식이 발생할 우려 없음.
		1.1	b	4	○ 0.3kg/m ³ 초과~1.2kg/m ³ 미만	염화물이 함유되어 있으나, 부식 발생 가능성 낮음.
		1.2	c	3	○ 1.2kg/m ³ 이상~2.5kg/m ³ 미만	향후 염화물에 의한 부식이 발생할 가능성 높음.
		1.4	d	2	○ 2.5kg/m ³ 이상	철근부식 발생
		2.0	e	1	-	-
철근노출	국부 결함	1.0	a	5	○ 철근노출 없음	
		1.1	b	4	○ 철근노출 면적율이 1.0% 미만	
		1.2	c	3	○ 철근노출 면적율이 1.0~3.0% 미만	
		1.4	d	2	○ 철근노출 면적율이 3.0~5.0% 미만	
		2.0	e	1	○ 철근노출 면적율이 5.0% 이상	

No. 2

<표 2.21> 상태평가 항목 - 일반적인 콘크리트 구조물(No.2)

상태변화	평가 유형	영향 계수	평가 기준	평가 점수	평가 내용	
일반 구조물 균열	국부 결함	1.0	a	5	면적율 ¹⁾ 5% 이하	0.1mm 미만
		1.0	a	5		0.1mm ~ 0.2mm 미만
		1.0	a	5		0.2mm ~ 0.3mm 미만
		1.1	b	4		0.3mm ~ 0.5mm 미만
		1.2	c	3		0.5mm 이상
		1.0	a	5	면적율 20% 이하	0.1mm 미만
		1.0	a	5		0.1mm ~ 0.2mm 미만
		1.1	b	4		0.2mm ~ 0.3mm 미만
		1.2	c	3		0.3mm ~ 0.5mm 미만
		1.4	d	2	0.5mm 이상	
		1.0	a	5	면적율 20% 이상	0.1mm 미만
		1.1	b	4		0.1mm ~ 0.2mm 미만
		1.2	c	3		0.2mm ~ 0.3mm 미만
		1.4	d	2		0.3mm ~ 0.5mm 미만
		2.0	e	1	0.5mm 이상	
수처리 구조물 균열	국부 결함	1.0	a	5	면적율 5% 이하	0.1mm 미만
		1.0	a	5		0.1mm ~ 0.2mm 미만
		1.1	b	4		0.2mm ~ 0.3mm 미만
		1.2	c	3		0.3mm ~ 0.5mm 미만
		1.4	d	2		0.5mm 이상
		1.0	a	5	면적율 20% 이하	0.1mm 미만
		1.1	b	4		0.1mm ~ 0.2mm 미만
		1.2	c	3		0.2mm ~ 0.3mm 미만
		1.4	d	2		0.3mm ~ 0.5mm 미만
		2.0	e	1	0.5mm 이상	
		1.1	b	4	면적율 20% 이상	0.1mm 미만
		1.2	c	3		0.1mm ~ 0.2mm 미만
		1.4	d	2		0.2mm ~ 0.3mm 미만
		2.0	e	1		0.3mm ~ 0.5mm 미만
		2.0	e	1	0.5mm 이상	

<표 2.23> 상태평가 항목 - 일반적인 콘크리트 구조물(No.3)

상태변화	평가 유형	영향 계수	평가 기준	평가 점수	평가 내용
박 리	국부 결합	1.0	a	5	○박리발생이 없음
		1.1	b	4	○박리깊이 0.5mm 미만이면서 박리 면적을 10% 미만
		1.2	c	3	○박리깊이 0.5 ~ 1.0mm 미만이면서 박리면적을 10% 미만 ○박리깊이 0.5mm 미만이면서 박리면적을 10% 이상
		1.4	d	2	○박리깊이 1.0 ~ 25mm 미만이면서 박리면적을 10% 미만 ○박리깊이 0.5~10mm 미만이면서 박리면적을 10% 이상
		2.0	e	1	○박리깊이 1.0~25mm 미만이면서 박리면적을 10% 이상 ○박리깊이 25mm 이상이거나 조골재 손실
박락 및 층분리	국부 결합	1.0	a	5	○박락/층분리의 발생이 없음
		1.1	b	4	○박락/층분리 깊이 15mm 미만이면서 면적을 10% 미만
		1.2	c	3	○박락/층분리 깊이 15~20mm 미만이면서 면적을 10% 미만 ○박락/층분리 깊이 15mm 미만이면서 면적을 10% 이상
		1.4	d	2	○박락/층분리 깊이 20~25mm 미만이면서 면적을 10% 미만 ○박락/층분리 깊이 15~20mm 미만이면서 면적을 10% 이상
		2.0	e	1	○박락/층분리 깊이 20~25mm 미만이면서 면적을 10% 이상 ○박락/층분리 깊이 25mm 이상이거나 조골재 손실
누 수	국부 결합	1.0	a	5	○누수가 없음
		1.1	b	4	○현저한 흔적 (누수부위가 습윤된 상태)
		1.2	c	3	○누수의 진행이 관찰가능 상태 (방울방울 떨어짐)
		1.4	d	2	○누수의 진행이 관찰가능 상태 (소량이 분출)
		2.0	e	1	○누수의 진행이 확인한 상태 (많은 양의 분출)
파손 및 손상	일반 손상	1.0	a	5	○파손/손상 없음
		1.1	b	4	○파손/손상깊이 20mm 미만이면서 면적을 10% 미만,
		1.3	c	3	○파손/손상깊이 20~50mm 미만이면서 면적을 10% 미만 ○파손/손상깊이 20mm 미만이면서 면적을 10% 이상
		1.7	d	2	○파손/손상깊이 50~80mm 미만이면서 면적을 10% 미만 ○파손/손상깊이 50mm 미만이면서 면적을 10% 이상
		3.0	e	1	○파손/손상깊이 80mm 이상이면서 면적을 10% 미만, ○파손/손상깊이 50mm 이상이면서 면적을 10% 이상
백 태	일반 손상	1.0	a	5	○백태가 없음
		1.1	b	4	○백태 발생 면적이 5% 미만
		1.3	c	3	○백태 발생 면적이 5~10% 미만
		1.7	d	2	○백태 발생 면적이 10~20% 미만
		3.0	e	1	○백태 발생 면적이 20% 이상

④ 계측기

* 필댐

<표 2.24> 상태평가 항목 - 계측기(필댐)

상태변화	평가 유형	영향 계수	평가 기준	평가 점수	평가 내용
간극수압계 토압계	일반 손상	1.0	a	5	○ 계측기 작동율이 90% 이상인 상태
		1.1	b	4	○ 계측기 작동율이 80~90% 미만인 상태
		1.2	c	3	○ 계측기 작동율이 70~80% 미만인 상태
		1.4	d	2	○ 계측기 작동율이 50~70% 미만인 상태
		2.0	e	1	○ 계측기 작동율이 50% 이하인 상태
침하계 변위계	일반 손상	1.0	a	5	○ 기능 및 구조상 손상이 없는 최상의 건전한 상태
		1.1	b	4	○ 기능 및 구조상 손상이 없는 건전한 상태
		1.2	c	3	○ 기능 및 구조상 전체 개소수에 10% 정도가 작동하지 않는 경미한 상태
		1.4	d	2	○ 기능 및 구조상 전체 개소수에 30% 이상이 작동하지 않는 상태
		2.0	e	1	○ 기능 및 구조상 전체 개소수에 50% 이상이 작동하지 않는 상태
누수량 측정시설	일반 손상	1.0	a	5	○ 기능 및 구조상 손상이 없는 최상의 건전한 상태
		1.1	b	4	○ 기능 및 구조상 손상이 없는 건전한 상태
		1.2	c	3	○ 기능 및 구조상 손상이 경미한 상태
		1.4	d	2	○ 기능 및 구조상 손상이 있어 누수량 측정이 정확하지 않은 상태
		2.0	e	1	○ 기능 및 구조상 손상이 있어 누수량 측정이 불가능한 상태

* 콘크리트댐

<표 2.25> 상태평가 항목 - 계측기(콘크리트댐)

상태변화	평가 유형	영향 계수	평가 기준	평가 점수	평가 내용
간극수압계 양압력 응력계 무응력계 변형계 온도계 개도계	일반 손상	1.0	a	5	○ 계측기 작동율이 90% 이상인 상태
		1.1	b	4	○ 계측기 작동율이 80~90% 미만인 상태
		1.2	c	3	○ 계측기 작동율이 70~80% 미만인 상태
		1.4	d	2	○ 계측기 작동율이 50~70% 미만인 상태
		2.0	e	1	○ 계측기 작동율이 50% 이하인 상태
누수량 측정시설 손상	일반 손상	1.0	a	5	○ 계측기 작동율이 90% 이상인 상태
		1.1	b	4	○ 계측기 작동율이 80~90% 미만인 상태
		1.2	c	3	○ 계측기 작동율이 70~80% 미만인 상태
		1.4	d	2	○ 계측기 작동율이 50~70% 미만인 상태
		2.0	e	1	○ 계측기 작동율이 50% 이하인 상태

5. 상태평가 결과 산정 방법

가. 댐 시설물 평가 단계별 절차 (안전점검 및 정밀안전진단 세부 지침, 시설안전공단, 2010)

댐 시설물에 대한 상태평가는 단계별로 구분할 때 댐 시설물은 통합시설물(6단계)에 해당하는 시설물로서 간주하고, 하위단계인 복합시설, 개별시설, 복합부재, 개별부재로 구분한다. 외관조사망도는 개별부재에 대하여 작성하는 것을 원칙으로 하고 필요시 개별부재의 크기, 면적에 따라 부위별로 분할하여 작성한다.

단계	범위	반영항목	평가 지수 계산 방법
1단계	개별부재	평가지수, 영향계수 반영	* 결함 및 손상의 평가지수(E_1) $E_1 = M \times F$ * 개별 부재의 상태평가지수(E_2) $E_2 = \text{Min}(E_1 \text{ 중})$
2단계	복합부재	평가지수, 조정계수 개별부재의 중요도 반영	* 복합 부재의 상태평가지수(E_3) $E_3 = \sum(E_2 \times A \times W) / \sum(A \times W)$
3단계	개별시설	평가지수 및 규모 반영	* 개별 시설의 상태평가지수(E_4) $E_4 = \text{Min}(E_3) + V_1 + V_2$ $V_1 = 0.3 \{ \text{Max}(E_3) - \text{Min}(E_3) \}$ $V_2 = \sum(E_3 \times S) / \sum(5 \times S)$
4단계	복합시설	평가지수, 조정계수 개별시설의 중요도 반영	* 복합 시설의 상태평가지수(E_5) $E_5 = \sum(E_4 \times A \times W) / \sum(A \times W)$

< 표 2.26 > 상태평가 알고리즘

6. 내구성 설계

가. 국외내구성설계방법

국내외 내구성 설계에 대해 살펴보면 현재 일본, 미국 유럽 등에서는 기존의 강도설계 위주에서 내구성 설계로 전환하는 추세이며 내구성설계와 관련한 각국의 시방서에 제시된 내용은 다음과 같다.

1) 일 본

내구성 설계에 관한 연구는 1980년부터 시작된 일본 건설성의 「건축물의 내구성 향상기술 개발」 연구가 기폭제가 되었으며, 1980년대에 각 학회를 중심으로 집중적인 연구가 추진되어 「콘크리트 표준시방서(日)」에 그 내용을 수록하였다. 최근에는 내구성 설계에 관련된 연구자들에 의하여 구조설계 및 내구설계의 통합 움직임이 일어나고 있으며, 다음 <표 2.27>에 내구성 설계관련 현황을 나타내었다.

< 표 2.27 > 일본의 내구성기술 개발 현황

년도 기관	1975년	1980년	1985년	1990년	1995년
건설성		(1980~1984) [건축물의 내구성 향상 기술 개발]			
건축학회	(1979) [내구성 소위원회 설치]		(1986), JASS 5 [고내구성 콘크리트 규정] (1988), [건축물의 내구 계획에 관한 생각]	(1991), [고내구성 철근 콘크리트조 설계시공 지침(안)·동해설]	(1997), JASS 5 [내구설계 기준강도 도입]
토목학회			(1986), [콘크리트 표준시방서, 설계편, 내구설계 개념 도입] (1989), [콘크리트 구조물의 내구설계 지침(시안)]		(1995), [콘크리트 구조물의 내구설계 지침(안)](2000), [콘크리트 표준시방서, 시공편, 내구성 조사형, 개정자료]
○○협회			(1986), [내구성 설계 연구위원회 설치] (1988), [콘크리트 구조물의 수명예측과 내구성 설계에 관한 기술의 현상] (1988), [특집, 콘크리트 구조물의 내구성 설계]	(1991), [콘크리트 구조물의 내구성 설계에 관한 생각]	(1998), [콘크리트 구조물의 구조·내구 설계 계문제]

2) 미 국

미국에서는 내구성 설계방법에 관한 구체적인 언급은 없으나, 다음과 같이 소위원회에서 내구성에 관한 규정 및 기준을 소개하고 있는 단계이다.

가. ACI 201 Committee

ACI 201.2R-92 「Guide to Durable Concrete」는 콘크리트가 동결융해, 화학적인 침해, 마모 및 알칼리-골재 반응 등에 의해 영향을 받는 경우에 대한 손상 기구와 이에 따라 요구되는 대책들을 제시하고 있으며, 이외에도 철근의 부식 및 콘크리트 구조물이 손상되었을 경우의 보수과정, 콘크리트 구

구조물의 내구성을 높이기 위한 보호체계 등에 대해서도 소개하고 있다.

나. ACI 210 Committee

ACI 210 위원회는 수리구조물의 침식에 대한 원인, 제어 및 유지·보수에 관한 사항을 다루고 있다. 이러한 수리구조물의 침식원인으로는 공동현상(Cavitation), 표면마모(Abrasion), 화학적인 침투(Chemical attack) 등을 들 수 있으며 설계요인, 재료의 선택과 품질, 환경요소 및 기타 요인들에 의한 적절한 고려를 통해 이들 원인에 의한 콘크리트 구조물의 침식을 제어할 수 있음을 밝히고 있다.

다. ACI 362 Committee

주차구조물은 내구성과 관련하여 철근부식, 동결융해작용, 균열, 물의 고입, 물의 침투에 의한 콘크리트 탈락(Spall), 주행표면의 박리(Delamination), 이음부와 균열부의 누수 현상 등에 대한 고려가 필요하며 특히 제빙화학물(Deicer)에 의한 구조물의 열화에 주의해야 한다고 제시하고 있다. ACI 362에서 다루고 있는 내구성 관련 사항은 다음과 같다.

- 동결융해에 대한 저항성
- 부식에 대한 저항성
- 물/시멘트 비
- 철근덮개
- 철근코팅
- 콘크리트의 코팅
- 부식억제제

라. ACI 357 Committee

적절한 재료, 배합비, 시공과정 및 품질관리에 의해 내구성을 가진 콘크리트를 제조할 수 있으며 강도가 크고 조밀한 골재의 사용과 낮은 물/시멘트 비 및 습윤양생에 의해 해양환경에서 40년 이상 내구성을 유지하는 콘크리트 구조물을 만들 수 있다고 규정되어 있다. 한편, 해양구조물의 내구성을 검토하기 위해서는 다음과 같이 3가지의 노출조건을 고려해야 한다고 되어있다.

- 해수에 의해 지속적으로 덮여있는 수중(Submerged zone)
- 건습을 지속적으로 반복하는 물보라지역(Splash zone)
- 해상대기 지역(Atmospheric zone)

이 경우 각각의 노출조건에 대해 고려해야 하는 항목은 다음과 같다.

- 수 중 : 콘크리트의 화학적 성능저하, 철근의 부식, 콘크리트의 침식
- 물보라지역 : 동결융해에 대한 내구성, 철근부식, 콘크리트의 화학적인 성능저하, 얼음에 의한 마모
- 해상대기지역 : 동결융해에 대한 내구성, 철근의 부식, 화재에 의한 피해

3) 유럽 및 기타

유럽은 내구성 설계수법에 관한 연구를 R〇〇을 중심으로 활발하게 진행하고 있으며 그 내용은 다음과 같다.

가. BS 7543의 내구설계 관련규정(영국)

BS 7543 「Guide to durability of buildings and building elements, products and components」은 새로 건설되는 구조물의 수명과 내구성을 예측하기 위해 필요한 지침(Guidance), 목표내구년한(Required service life)과 설계내구년한(Predicted service life)등에 대한 개략적인 설계과정을 제시하고 있다.

BS 7543에서 설계내구년함을 결정하기 위해 제시하고 있는 방법은 아래와 같으며 BS 8110과 CEB-FIP Model Code 90 및 Euro Code의 방법을 조합하면 비교적 합리적으로 구조물의 내구년함을 예측할 수 있다고 언급한다.

- 유사한 조건 하에서 시공되고 유사한 환경에서 사용되고 있는 구조물로부터 얻어진 경험에 의한 산정
- 손상의 자연적인 속도를 측정하고 그 측정치로부터 내구성 한계를 평가하는 방법에 의한 산정
- 반응시간을 짧게 하기 위한 촉진시험에 의해서 보간법으로 산정하는

방법

그러나, 위와 같은 방법으로 예측된 구조물의 내구년한이 정확한 것은 아니며, 구조물이 지니고 있는 수명을 예측하는 데는 다음과 같은 점을 유의해야 한다.

- 구조물이 지니고 있는 내구성능의 예측은 많은 매개변수와 관련되어 있으므로 정확할 수는 없다.

- 요소들의 촉진시험(Accelerated testing) 자체로는 구조물의 예상수명 산정에 별 도움이 되지 못한다. 촉진시험은 일반적으로 요소(Component)들이 모여 있는 구조체(Assembly)에는 적합하지 않다.

- 관련된 실험결과를 언제나 얻을 수 있는 것은 아니므로, 이런 경우에는 직접 실험을 통해서 정보를 얻어야 한다.

나. BS 8110 (영국)

BS 8110도 CEB-FIP나 ACI Code와 마찬가지로 콘크리트 구조물의 내구성을 확보하기 위한 규정을 구조설계에 관한 규정중의 이루어 다루고 있으며, 내구성을 확보하기 위한 주요과정은 CEB-FIP와 유사하게 구조물의 환경조건에 따른 노출등급을 분류하고 이 노출등급에 따라 최소피복두께, 최대물/시멘트 비, 최소 단위시멘트량 및 콘크리트의 강도 등을 정하도록 되어있다.

- 내구성 콘크리트의 정의 및 고려사항

BS 8110의 CHP. 3.1.5 「Durability of Structural Concrete」에는 내구성 콘크리트 부재(Durable concrete element)란 “매입된 금속이 부식되지 않도록 보호하고 구조물의 사용연한동안 사용환경 조건을 만족하도록 설계 및 시공된 것”이라고 정의되어 있다. 한편, 콘크리트 구조물의 내구성을 만족시키기 위한 주요 고려사항은 다음과 같다.

- 구조물의 설계 및 상세 (구조물의 형상포함)
- 매입된 철근의 덮개
- 주위 환경에 대한 노출조건

- 시멘트의 종류
- 골재의 종류
- 시멘트량 및 물/시멘트 비
- 혼화재료의 종류 및 배합량
- 적절한 덮개, 완전한 다짐, 효과적인 양생 위한 작업자의 숙련도 및 자세
- 이음부의 적절한 설계 및 시공

다. CEB-FIP Model Code 90 및 Euro Code

CEB-FIP Code 90 및 Euro Code는 정량적으로 내구년한을 산출하여 목표 내구년한을 보장하는 내구설계기법은 제시하고 있지 않으나, CEB-FIP Code 90의 경우에는 Code에서 제시한 제반규정을 준수하여 설계할 경우 50년 이상의 내구년한을 확보할 수 있다고 제시되어 있다.

- 내구설계 개념

CEB-FIP Model Code 90에서 제안하고 있는 내구년한 설계개념(Service life design concept)은 구조물의 성능저하 과정에 따른 내구수명을 초기상태(Initiation phase)와 진행상태(Propagation phase)의 두 가지로 구분하고 있다.

초기단계에서는 기능이나 재료면에 있어 현저한 성능저하가 발생하지 않는다.

< 표 2.28 > 환경조건에 따른 노출등급

노출 등급	환경 조건
1. 건조환경	• 사무실 또는 주거 건물의 내부
2a. 습윤환경의 동결이 없는 경우	• 습기가 높은 건물 내부
2b. 습윤환경의 동결이 있는 경우	• 옥외 부재 • 화학적인 작용을 일으키지 않는 토양이나 수중에 위치한 부재 • 동상에 노출된 경우의 화학적인 작용을 일으키지 않는 토양이나 수중에 위치한 부재 • 습도가 높고 동상에 노출된 경우의 내부부재
3. 동결이 있고 제빙 화학제와 접하는 습윤환경	• 동결에 노출되어 있으며 제빙 화학제가 사용되는 옥내·외 부재
4a. 해수환경의 동결이 없는 경우	• 부분적으로 해수에 잠겨 있거나 해수의 접촉을 받는 지역에 설치된 부재
4b. 해수환경의 동결이 있는 경우	• 염분을 함유한 공기로 포화된 지역의 부재(해안지역) • 동결에 노출된 경우로 부분적으로 해수에 잠겨 있거나 해수의 접촉을 받는 지역의 부재 • 동결에 노출된 경우이면서 염분을 함유한 공기로 포화된 지역의 부재
5a. 약한 정도의 위해적인 화학 작용을 받는 경우	• 약간 위해적인 화학작용을 받는 환경 (기체, 액체, 고체)
5b. 중간 정도의 위해적인 화학 작용을 받는 경우	• 위해한 산업오염으로 인한 대기환경 • 중간정도의 위해적인 화학작용을 받는 환경
5c. 심한 정도의 위해적인 화학 작용을 받는 경우	• (기체, 액체, 고체) • 심한정도의 위해적인 화학작용을 받는 환경 (기체, 액체, 고체)

그러나 이 단계에서는 내구성을 유지하기 위한 콘크리트의 방어기구가 환경적 요인에 의해 일부 파괴되기 시작한다. 철근의 부식과정을 예로 들자면 부동태 피막이 파괴되는 상태에 해당된다. 이후 구조물 성능저하의 전과 단계에서는 초기상태에서 이미 발생한 방어기구의 파괴에 이어 구체적 손상 요인에 의한 성능저하 현상이 활발하게 진행되며 경우에 따라 성능저하 현상이 가속화되기도 한다. CEB-FIP Model Code 90에서는 위와 같은 성능저하 과정에 기초하여 콘크리트 구조물의 내구년한을 충족시키기 위해 가능한 한

성능저하의 초기단계를 장기간 유지할 수 있도록 구조물의 내구성에 영향을 미치는 직·간접적인 작용들을 고려하여 내구설계를 하도록 되어있다. 유럽의 새로운 건설기준인 Euro Code 2에서는 내구설계에 관한 특별한 개념을 설명하고 있지는 않지만 내구성을 확보하기 위한 규정은 CEB-FIP Model Code 90과 거의 동일한 개념을 내재하고 있다고 볼 수 있다.

• 내구설계 과정

CEB-FIP Model Code 90 및 Euro Code에서 규정하고 있는 내구설계 과정은 구조설계의 일부분으로 다루고 있으며 “구조물의 수명이 유지되는 동안 효용성을 크게 잃지 않는 범위에서 사용성, 강도, 안정성 등을 만족하도록” 크게 다음과 같은 사항들에 대해 고려하도록 되어있다.

- 환경조건
- 콘크리트 품질
- 시멘트 종류
- 시멘트량
- 물/시멘트 비
- 양생방법

• 구조물의 노출환경에 따른 등급의 분류

CEB-FIP Model Code 90 및 Euro Code에서는 구조물의 내구성능을 저하시키는 요인인 구조물 주변의 환경을 고려하기 위해 내구설계시 주변의 환경조건에 따른 노출등급을 규정하고 있으며, 건설되는 구조물의 내구성능을 확보하기 위해서는 이들 노출등급에 따라 W/C비, 피복두께 등의 내구설계에 필요한 값 등을 결정하도록 하고 있다. 다음 표에 구조물이 위치한 환경에 따른 노출등급이 주어져 있다.

라. 노출등급에 따른 내구성 요구조건

다음 표에는 CEB-FIP Model Code 90 및 Euro Code에서 규정하고 있는 구조물의 노출등급에 따른 내구설계 주 요소에 대한 요구조건이 나타나있다.

< 표 2.29 > 노출환경관련 내구성 요구조건 (Euro Code)

구 분	노출 등급								
	1	2a	2b	3	4a	4b	5a	5b	5ca
최대 물/시멘트 비 ^{b)}									
- 무근콘크리트	-	0.70							
- 철근콘크리트	0.65	0.60	0.55	0.55	0.55	0.50	0.55	0.50	0.45
- 프리스트레스트콘크리트	0.60	0.60							
최소 시멘트 량 (kgf/m ³)									
- 무근콘크리트	150	200	300				200		
- 철근콘크리트	260	280	280	300	300	300	280	300	300
- 프리스트레스트콘크리트	300	300	300				300		
미경화 콘크리트 속의 최소 공기함유량(%)									
공칭 최대골재치수 ^{c)}									
- 32mm	-	-	4	4	-	4	-	-	-
- 16mm	-	-	5	5	-	5	-	-	-
- 8mm	-	-	6	6	-	6	-	-	-
동결저항골재 ^{e)}	-	-	사용	사용	-	사용	-	-	-
수밀성 콘크리트	-	-	사용	사용	사용	사용	사용	사용	사용
								황산염 함유물이 물속 500mgf/gf 이상, 토양 중 3,000mgf/kgf 이상에 대한 내황산염 시멘트	
EN 197에 따른 무근 및 철근콘크리트에 사용된 시멘트 종류	물/시멘트 비와 시멘트량의 값들은 여러 나라에서의 오랜 경험을 토대로 한 것이다. 그러나 초안에서 EN197에 표준화된 일부 시멘트에 대한 시방경험은 일부 국가의 지역적 기상조건에 한한다. 따라서, 이 시방규정이 유효한 기간 중 특히 노출등급 2b, 3, 4b에 있어서 시멘트의 선정과 그 배합비율은 콘크리트가 사용되는 현장에 적합한 국가표준 혹은 규정에 따라야 한다. 다시 말해 시멘트 사용에 대한 적합성은 상용될 환경조건 하에서 실험을 통해 입증할 수도 있다. 추가로 CEI 시멘트는 일반적으로 프리스트레스트 콘크리트에 사용할 수 있고, 다른 종류의 시멘트는 동종의 시멘트를 사용한 경험이 있고 국가 표준이나 규정에서 그 사용을 허용하고 있다면 사용가능 할 수 있다.								

- a) 추가로, 특별한 이유로 코팅과 같은 보호가 불필요하다고 판단되지 않는 한 콘크리트의 코팅을 통해 침해인자의 직접적인 접촉으로부터 보호한다.
- b) 본 규정의 최소 시멘트량과 최대 물/시멘트 비는 포틀랜드 시멘트만을 대상으로 한다. 포졸란이나 잠재 수경성 재료가 배합시 첨가될 때에는 최소 혹은 최대값을 수정할 수 있는 여부 및 수정방법을 밝히는 것이 좋다.
- c) 경화된 콘크리트 상에서 측정한 연행 공극이 0.20m 이하인 경우
- d) 예상기간동안 포화도가 높은 경우에 해당함. 콘크리트가 적절한 동결 저항성을 가지고 있다는 것이 시험에 의해 밝혀진 경우, 측정값을 사용해도 좋다.
- e) 시멘트의 내황산성은 콘크리트 사용 현장에 적합한 국가표준이나 규정에 따라 판단한다.

마. 노출등급에 따른 피복두께

CEB-FIP Model Code 90과 Euro Code의 내구설계 과정은 개념적으로 동일하다고 할 수 있으며, 이에 따라 노출등급의 분류와 주 요소에 대한 요구조건 또한 동일하다. 그러나 노출등급에 따라 요구되는 최소피복두께는 미세한 차이를 보이고 있으며, 상대적으로 Euro Code의 경우 더욱 세밀하게 분류되어 있다.

다음 <표 2.30>에는 CEB-FIP Model Code 90에서 철근 및 PS강선의 부식방지를 위해 요구하는 최소피복두께가 나타나 있으며, 다음 <표 2.31>에는 Euro code에 따른 최소피복두께가 제시되어 있다.

< 표 2.30 > 환경조건에 따른 최소 피복두께

노출 등급	최소피복두께 (mm)
1	10
2	25
3, 4	40
5	*

* 주변환경에 따라 결정

< 표 2.31 > 보통중량 콘크리트의 최소 피복두께 (Euro Code)

		환경조건에 따른 노출 등급								
		1	2a	2b	3	4a	4b	5a	5b	5c
최소피복두께 (mm)	철 근	15	20	25	40	40	40	25	30	40
	긴장재	25	30	35	50	50	50	35	40	50

바. 기타사항

콘크리트 구조물의 내구성을 확보하기 위해서는 노출환경, 콘크리트 품질, 피복두께와 같은 주요소 외에도 구조물의 형상, 구조물의 보호대책, 시

공 및 유지관리와 같은 보조요소에 대한 고려가 필요하다고 규정하고 있다. 특히, 큰 하중이 재하되는 경우에는 하중에 의해 발생하는 균열 폭을 제한해야 함을 밝히고 있다.

사. Australian Standard의 내구설계 방법

공용기간은 40~60년으로 설계자는 공용기간을 설정할 수 없고 정해진 환경조건 등급에 따라 목표공용기간을 유지하기 위한 시방규정이다. 시방규정으로서, 콘크리트 강도, 양생조건, 피복두께를 규정하고, 특수 열화외력으로는 마모를 받는 부재, 동결융해를 고려하는 부재를 설정하고 있다.

나. 국내 내구성 설계방법

1) 설계방향

1996년 「콘크리트 표준시방서 공통 부문(설계)」 제6장 사용성 및 내구성에 CEB-FIP Model Code 90의 내구성 설계방법을 도입하여 내구성 설계가 가능하도록 개념적인 내구성 설계기준을 제시하고 있다. 위 시방서에서는 내구성 설계시 구조물의 종류, 용도, 중요도 등에 따라 100년 이상의 내구연한을 필요로 하는 경우 등도 있을 수 있겠지만, 가능한 한 50년 이상의 내구연한을 갖도록 콘크리트 구조물을 설계, 시공, 유지 관리하도록 규정하고 있으며, 이때 요구되는 구조물의 내구연한이란 잦은 유지관리를 해야 하는 특별표면보호를 고려치 않고 확보할 수 있도록 하는 것으로 정의하고 있다.

또한 대한토목학회에서 수행한, 일본토목학회의 「콘크리트 구조물의 내구설계지침(안)」을 참고로 하는 「지하철 구조물 내구성 확보를 위한 연구용역」에서의 내구성 설계가 처음 서울시 지하철 9호선 공사에서부터 적용하였으며, 점차 각종 Turn-Key, 대안설계에 다수 적용 중이다.

여기서는 콘크리트 구조물의 내구성을 체계적 및 정량적으로 설계하는 것에 주안점을 두고 있다. 구조설계에 있어서 단면력에 상당하는 환경지수를 구조물의 환경조건과 Maintain Free 기간으로부터 산정 한다. 내력에 상당하

는 내구지수는 구조물의 재료, 설계(구조세목), 시공에 관한 사항에서 산정하고 있다. 특징적인 것은 구조물의 내구성을 내구성 포인트라는 일원적인 인덱스로 표시하고 그 총합을 취해 정량화 하는 방법을 취하고 있다.

2) 내구성 설계모형

㉞. 내구성 판정방침

부재 각부의 내구성은 내구지수(D_T)와 환경지수(E_T)를 정의하여 다음 식에 의해 정량적으로 판정하며, 모든 부재가 다음 식을 만족하면 구조물은 내구적이라고 판단한다.

$$D_T \geq E_T$$

㉟. 환경지수 (ET)

구조물이 놓여있는 환경조건 및 요구되는 Maintenance Free 기간을 고려하여 정하는 지수이다.

$$E_T = E_S + \sum \Delta E_T$$

여기서, E_S 는 표준 환경지수로 50년간 Maintenance Free인 경우 85, 100년 경우에는 128로 산정하며, ΔE_T 는 환경지수 증분치로 염해, 중성화, 동해 및 황산염침해에 대한 점수이다.

㊱. 내구지수 (DT)

설계작업, 부재의 형상, 보강재의 종류, 보강재의 상세, 설계도, 설계균열, 특수한 거푸집, 표면 보호공사, 콘크리트 재료품질, 콘크리트 품질, 콘크리트 공, 철근공, 거푸집공, 동바리공 등 재료, 설계 및 시공분야를 고려하여 산정한다.

$$D_T = D_0 + \sum \Delta D_T$$

여기서, D_0 는 기본 내구지수로 30을 사용하며, ΔDT 는 재료, 설계 및 시공분야의 내구지수 증분치

6. 개선방안

앞서 분석한 상태평가 기법 중에서 다음과 같은 두가지 문제점을 제시하고, 개선방향을 제안하였다.

- ① 중성화 상태평가 방법은 깊이만을 변수로 하는 것, 함량에 대한 고려가 필요
- ② 동결융해에 대한 상태평가가 이루어지지 않고 있음.

제2절 농업용 저수지 구조물의 내구성 평가 방법 개발

1. 동결융해에 의한 상태평가 모델 개발

가. 개요

철근콘크리트구조물의 노후손상현상원인의 중요한 요인 중의 하나가 동결융해로 인한 손상이다. 이미 보수되어 이러한 구조물은 현재 없지만 <그림 2.8, 9>은 동해의 주요작용으로 인한 손상유형에 해당된다. 여수토산측옹벽하부와 정수지 제당측 옹벽하부로서 물과 접하면서 동절기 동결과 융해의 오랜 반복작용으로 인한 동해메카니즘으로 손상된 것이다.



<그림 2.8> 저수지 산측 옹벽하부 <그림 2.9> 정수지 제당측 옹벽하부

농업용저수지의 콘크리트구조물은 설치환경이 열악하다. 산간이나 평야에 설치되어있으며 젖은 흙이나 물에 접하고 있으며 그늘진 곳이 많다. 동절기 눈이 내릴 경우 잘 녹지 않고 오랫동안 동해를 받기 쉬운 환경인 것이다. 하지만 진단업무 수행 시 동해에 대한 평가가 현장 조사 시 외관을 관찰하여 그 현상에 대한 결과를 보고서에 기록하고 있는 정도인 것으로 분석되었다. 따라서 본 연구에서는 평가가 이루어지지 못한 이유를 분석하고 정량적 평가 기법을 제안하였다.

나. 동결융해에 의한 상태평가 모델

일본 山下모델로부터 물시멘트비와 일최저기온의 변수를 통해 동결융해 사이클 수를 산출하여 현장구조물의 현장 습윤조건을 습도보정계수로 보정한 후 해당구조물이 설치된 지역의 연평균동결융해사이클 수로 나누어 해당구조물의 동해저항기간(년)을 산출하도록 구성하였다. 총 동해저항기간에서 공용연한을 제하면 남아있는 동해저항기간이 되도록 함수식을 구성하였다.

임의의 진단대상 지구의 물시멘트, 연평균 동결융해사이클수, 일최저기온은 설계자료 및 기상청 통계자료를 분석하여 시스템 DB로 구축하였다.

$$Y_R = \left(\frac{N_T}{F_H} \right) \div N_Y - Y \quad (3)$$

여기서, Y_R : 잔존동해저항기간(년)

$$N_T : N_T = f(w/c, T_L),$$

山下모델에 의해 산출된 사이클 수(Non AE concrete)

$$: \text{山下모델 } N_T = 10^{(((0.14 \ln(c/w) + 0.004) T_L) + (3.15 \ln(c/w) + 1.43))}$$

- w/c : 물시멘트비

- T_L : 일최저기온(°C)

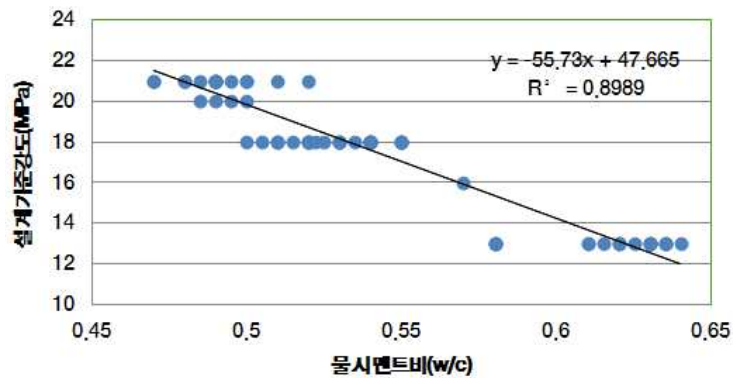
F_H : 습도보정계수

N_Y : 연평균 동결융해 사이클 수

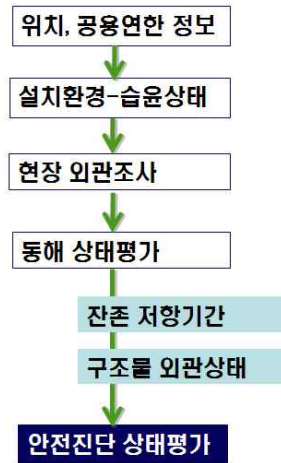
Y : 공용연한(년)

<그림 2.10>는 설계기준강도와 물시멘트비의 상관관계를 도시한 그래프이다. 준공된 지 오래된 진단지구의 경우 콘크리트에 대한 기초자료가 부족한 경우가 많아 설계자료 및 문헌자료를 분석하여 그래프로 도시하였으며, 시스템에서 DB자료로 활용될 수 있도록 구축하였다. 동결융해의 작용은 온도의 영향도 중요하지만 콘크리트 공극의 습윤상태 역시 중요한 인자이기 때문에 <표 2.6>과 같이 진단대상 콘크리트구조물의 습윤상태를 조사하여 습도보정계수를 산출하도록 하였다. 전체적인 동해평가의 흐름을 <그림 2.11>

와 같이 안전진단 상태평가에 포함되기까지의 과정을 계략적으로 요약하였다. 상태평가기준은 <표 2. 32>와 같이 제안하였으며, 현재 적용중인 정밀안전진단 상태평가요령과 유사한 형태로 구성하였다. 시스템을 통해 동해평가 적용사례는 부록에 첨부하였으며, 중성화 평가와 마찬가지로 시스템에서 선택하여 적용할 수 있도록 콤보박스 처리하였다.



< 그림 2.10 > 물시멘트비와 설계기준강도의 관계



<그림 2.11> 동해평가

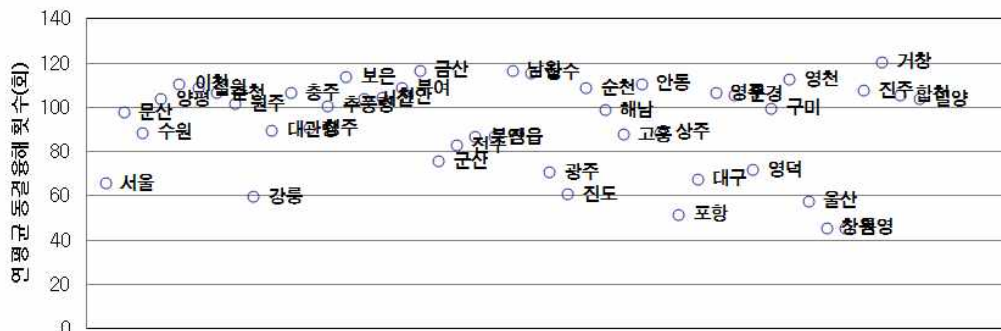
< 표 2.32 > 습도보정계수

구분	건조	습윤	포화	침지
계수	0.3	0.51	1	0.4
습도(%)	0	30	100	수중

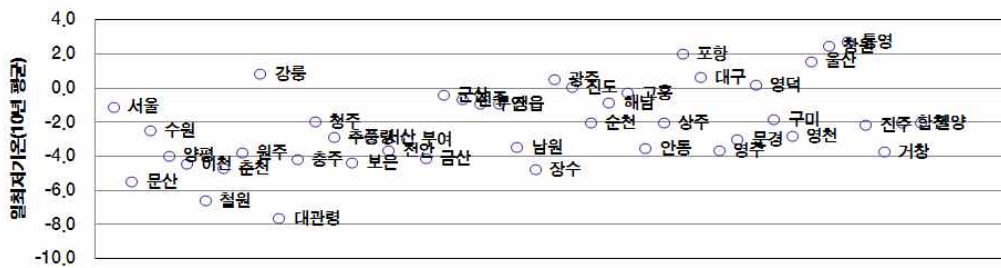
< 표 2.33 > 동해 평가표

잔존저항기간	외관상태				
	1	0.75	0.5	0.25	0.05
>50	A	A	B	C	D
50>=, >25	A	B	B	C	D
25>=, >0	B	B	C	D	D
0>=, >-25	B	C	C	D	E
-25>=	C	C	D	E	E

기상청에서 전국의 동절기 기상자료를 분석하여 연간 동결융해의 횟수를 계산하였다. 최근 10개년의 평균 동결융해 횟수를 분석한 결과 <그림 2.12> 과 같이 40~120회로 최대와 최소를 비교하면 약 3배에 달하는 것을 알 수 있었다. 경남 거창의 경우 121회, 창원외의 경우 41회로 분석되었다. 또한 전국 동절기(11월~3월) 일최저기온평균을 최근 10년 자료를 분석하여 <그림 2.13> 과 같이 도시하였다. 경남 통영의 경우 2.8℃, 강원도 대관령의 경우 -7.6℃로 나타나 그 차가 10℃가 넘는 것을 알 수 있었다.



< 그림 2.12 > 전국 연평균 동결융해 횟수



< 그림 2.13 > 전국 동절기 일최저기온 평균

2. 분취장치 개발 및 열분석을 통한 중성화 분석

가. 분취장치개발

농업용저수지구조물은 산간이나 평야부에 위치하여 전원의 공급이 용이하지 않는 점을 고려하여 충전식이며 휴대가 가능한 장치를 개발하기 위해 기존 연구에 활용한 장치를 개조하여 활용하고자 보안사항을 정리하여 개발자와 논의를 하던 중 기성제품에 대한 검토 병행 제안을 받았다.

기존연구에서 활용한 분취장치는 발전기를 대동해야하는 점과 2인이 1조가 되어야 분말의 포집이 가능한 점이었기에 기성제품의 선별과정에서 콘크리트의 천공이 가능하고 깊이별 분말의 포집이 가능해야 하는 점을 주안점으로 두고 공구별 제작사와 성능검토를 수행하였다(<그림 2.14>).

분진방지용 목적으로 필터가 장착된 햄머드릴이 가장 효율적일 것으로 검토되어 본 연구에 활용하기로 결정하였다. 분진 포집용 필터를 채취할 시료 수만큼 준비하여 현장조사를 나간다면 별도의 동력원이 없이도 시료채취가 가능할 것으로 검토되었다(<그림 2.15>).

현장 휴대용 분말채취법은 구조물에 손상을 최소화할 수 있을 것이며, 시료채취부위의 제약을 적게 받기 때문에 손상정도가 심한 부위에서 시료채취가 가능할 것이며, 실구조물의 손상현상을 잘 평가할 수 있을 것으로 기대한다. 콘크리트의 중성화는 적정 습도와 온도가 맞을 때 반응이 활발해지는 것으로 연구결과 나타난 점을 고려하여 적정한 구조물 부위를 선택하여 시료채취를 한다면 전체 콘크리트구조물의 중성화 평가가 이루어질 수 있을 것으로 판단된다.



(a) 기존 분취장치



(b) 기존장치 분말 수집



(c) 기성제품 시험운전



(d) 필터에 포집된 분말

< 그림 2.14 > 장치개발 과정



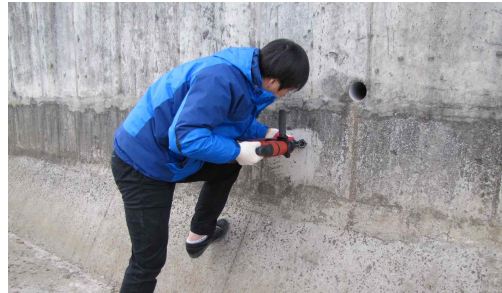
(a) 휴대가능(4kg, 36V)



(b) 비트직경다양(5~16mm)



(c) 분진필터로 시료포집



(d) 현장적용 용이



(e) 손상 최소화



(f) 시료포집 간편

< 그림 2.15 > 휴대용 분취가능 장치 발견

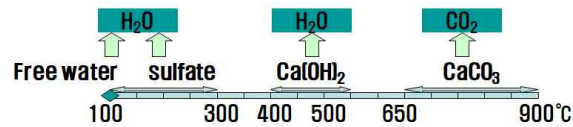
나. 열분석(TGA/DSC)

① 열중량분석법

시멘트 화학에서 사용되는 방법으로서 가열 또는 냉각하는 과정에서 결정구조가 변화할 때에 흡수 또는 방출하는 에너지를 열량으로 변환하는 열변화를 통해 결합수와 흡착수 등의 이탈과정의 열변화를 측정하는 방법으로, 분석대상물질과 기준물질의 온도를 조절된 프로그램에 따라 변화시키면서 측

정 물질의 기준물질에 대한 에너지 입력차(ΔH)를 온도의 함수로 측정하는 방법, 시차주사열량측정법(DSC : differential scanning calorimetry), 열변화에 의한 중량변화를 측정하는 열중량분석(TGA : thermo gravimetric analysis)을 동시에 실시한다.

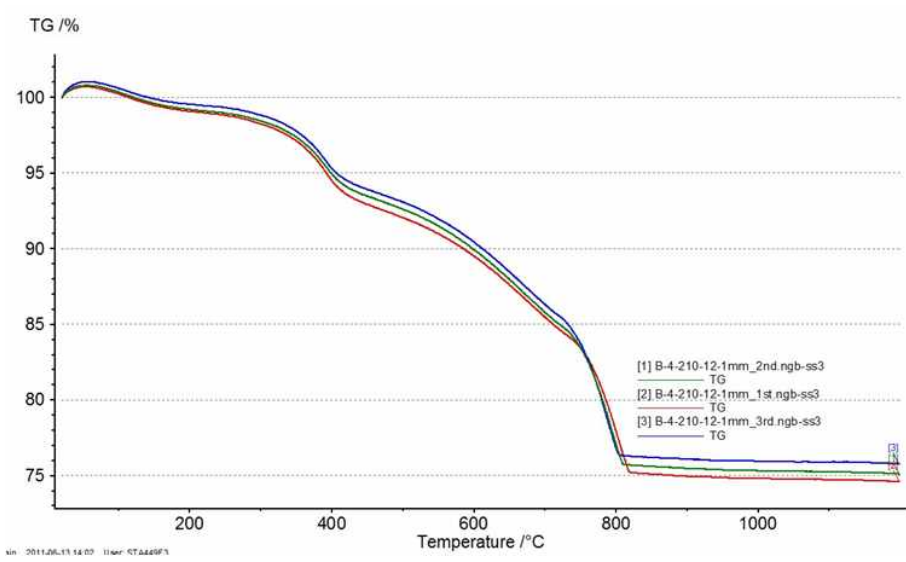
시멘트 수화물의 온도를 높이면 100℃부근에서 자유수의 탈수, 100~300℃부근에서 모노설페이트(mono-sulfate)등의 탈수, 400~500℃에서 수산화칼슘의 탈수, 650~900℃에서 탄산칼슘의 탈탄산이 발생한다. 물론 시멘트 수화물의 조성은 복잡해서 반드시 이러한 반응들만이 일어나는 것은 아니지만, 이들 반응이 지배적이므로 시멘트 수화물에 열을 가하여 400~500℃에서 수산화칼슘의 탈수와 650~900℃에서 탄산칼슘의 탈탄산 시의 중량변화를 측정함으로써 Ca(OH)₂와 CaCO₃의 정량적인 측정이 가능하다(<그림 2.16>).



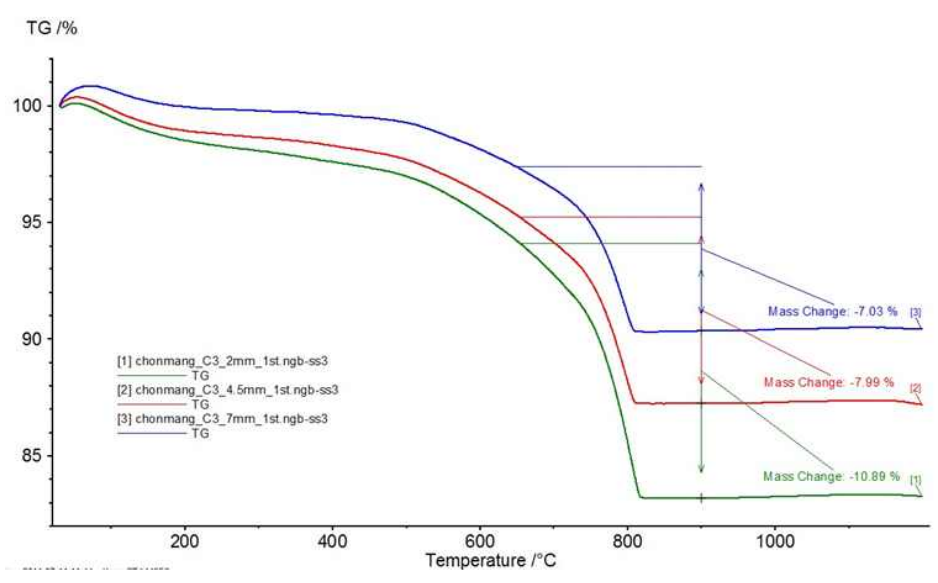
< 그림 2.16 > 시멘트 열분석 과정

대상시료의 열분석에 앞서 장치의 신뢰성 검정을 위해 동일 시료를 대상으로 3회 분석한 결과 <그림 2.17>과 같이 동일한 결과를 보임을 확인할 수 있었다.

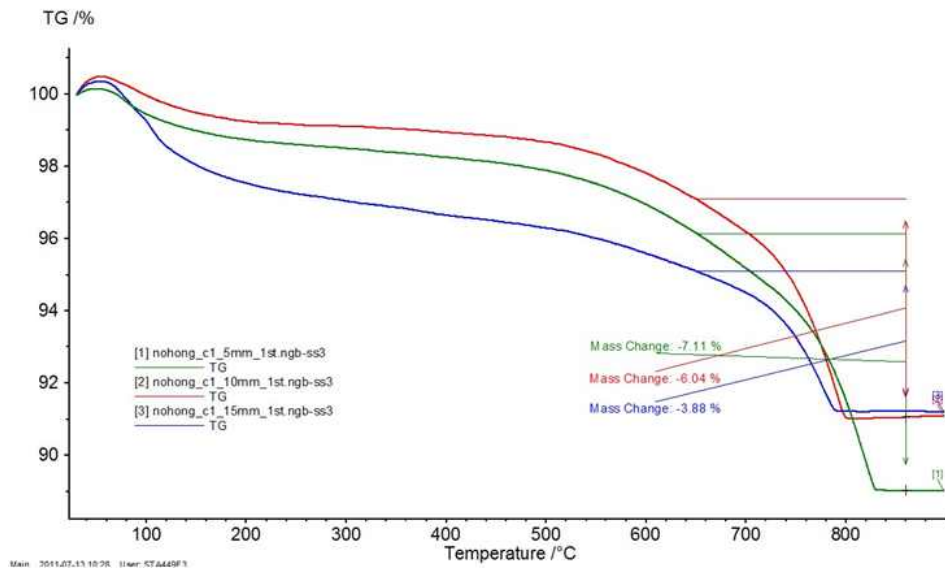
깊이별 콘크리트의 분말의 열분석결과를 <그림 2.18, 2.19>과 같이 도시하였다. 준공된 지 57년이 경과한 천망지의 콘크리트표면에서 2mm깊이 시료에서 10.89%, 4.5mm깊이에서 7.99%, 7mm깊이에서 7.03%의 중량감소를 보인 반면, 준공된 지 34년 경과한 노홍지의 경우 2.5mm에서 7.11%, 7.5mm에서 6.04%, 12.5mm에서 3.88%의 중량감소를 보인 것으로 나타나 공용연한에 따라 깊이에 따라 일정 경향을 보이고 있어 평가 인자로 사용이 가능함을 검증하였다.



< 그림 2.17 > 동일시료 3회 반복 실험



< 그림 2.18 > 깊이별(2, 4.5, 7mm) 열분석 결과(천망지(준공 후 57년경과 예))

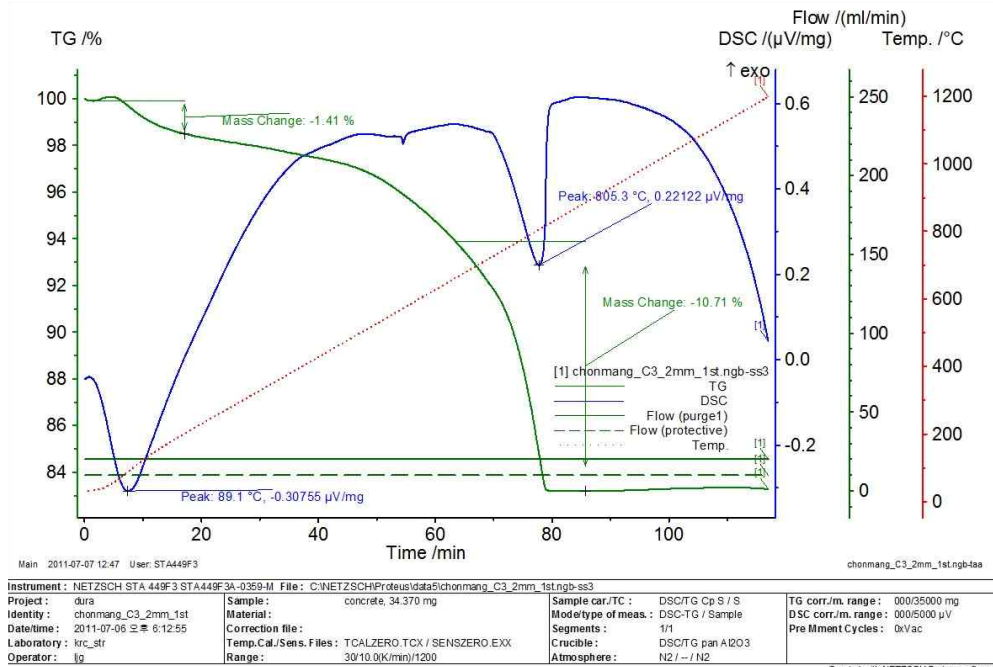


< 그림 2.19 > 깊이별(2.5, 7.5, 12.5mm) 열분석 결과(노홍지(준공 후 34년경과 예))

<그림 2.20>는 천망저수지의 깊이 2mm에서 측정 예를 나타내고 있으며 TG측의 중량의 변화 10.71%가 온도 650~900°C사이에서 나타남을 알 수 있다. 탄산칼슘에서 탄산가스(CO₂)가 이탈하면서 중량이 감소함을 보여주고 있

으며 정량적으로 탄산칼슘의 함량을 계산하면 $w_{CaCO_3} = \frac{m_{CaCO_3}}{m_{CO_2}} \times L_{CO_2}$,

$w_{CaCO_3} = 2.2743 \times 10.71 = 24.35$ (wt, %) 이다. 즉 탄산칼슘의 분자량 대비 탄산가스의 분자량 비에 중량감소율을 곱하여 분석시료 중량대비 24.35%가 탄산칼슘임을 의미한다.

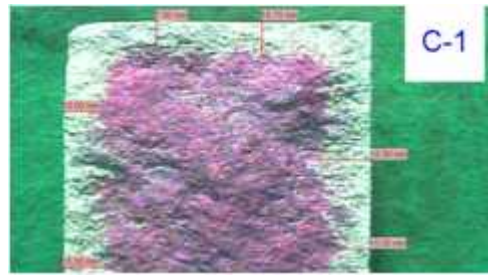


< 그림 2.20 > TG/DSC 분석예(천망지)-깊이 2mm

저수지의 정밀안전진단시 주로 사용하고 있는 페놀프탈레인 지시약에 의한 중성화 분석 예를 <그림 2.21>에 나타내었으며, 지시약에 따른 pH의 지시범위를 <표 2.34>에 나타내었다.



(a) 현장 코어



(b) 실내축진(모르타르)

< 그림 2.21 > 지시약에 의한 중성화 측정

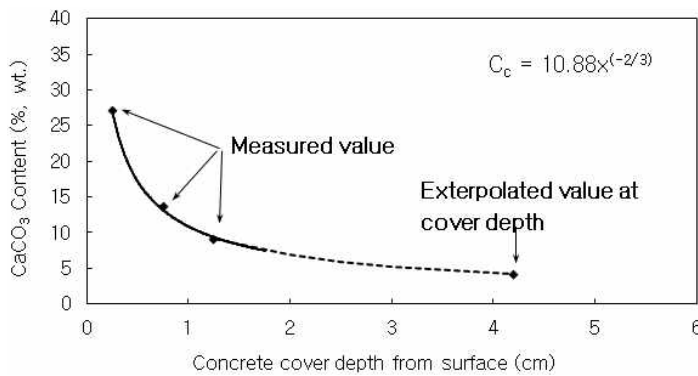
< 표 2.34 > 지시약에 따른 pH의 지시범위

Indicator	pH range
Tropaeolin O	pH 11.1~12.7
Alizarin yellow R	pH 10.2~12.2
Nitramin	pH 11~12
Thymolphthalein	pH 9.3~10.5
Phenolphthalein	pH 8.3~9.5
m-nitrophenol	pH 7.5~8.5

3. 중성화에 의한 상태평가 모델 개발

본 연구에서 정밀안전진단 상태평가 항목으로 제안하는 중성화 평가법은 기존의 페놀프타레인 지시약법으로 측정된 방식과 달리 열분석에 의한 방법이다. pourbaix(1996)의 연구결과에 따르면, 철근의 부식을 방지하는 환경을 만들어주는 것으로 알려져 있는 콘크리트의 부동태 피막이 파괴되는 임계 콘크리트 페하(pH)는 10.4로 할 수 있다. 열분석으로부터 얻어들이 깊이별 탄산칼슘의 함량은 <그림 2.22>과 같이 도출될 수 있으며 세 측정값을 통해 철근이 있는 위치에서의 콘크리트 탄산칼슘의 함량을 외삽법으로 추정할 수 있다. 따라서 철근의 위치에서의 임계탄산칼슘의 함량과의 차이를 얻을 수 있다. 표면의 탄산칼슘의 함량과 철근위치에서의 잔존함량(=임계값-현 측정값)으로서 중성화평가를 <표 2.36>과 같이 수행하는 방안을 제안하였다. 간략한 일련의 평가흐름을 <그림 2.23>과 같이 제시하였다.

기존방식의 중성화평가와 제안방식의 중성화평가는 선택형으로 시스템에 포함하였으며 깊이별 탄산칼슘의 측정값은 보수시점예측 등에도 사용된다. 시스템 개발 내용 및 적용사례는 부록에 수록하였다.



< 그림 2.22 > 깊이별 탄산칼슘의 함량



<그림 2.23> 평가절차

< 표 2.35 > 중성화 평가표

잔존함량 (%, wt.)	표면함량(%, wt.)				
	<=12	<=17	<=22	<=27	>27
>=22	A	A	B	B	B
>=17	B	B	B	C	C
>=12	B	C	C	D	D
>=7	C	C	C	D	E
< 7	C	C	E	E	E

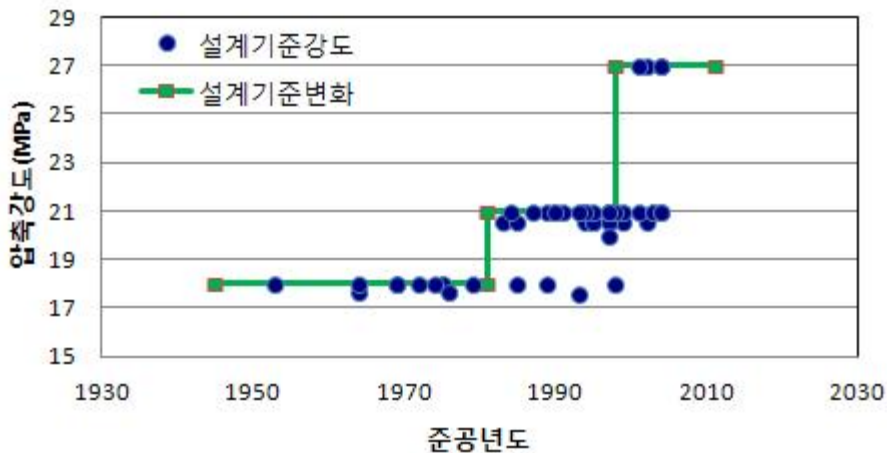
4. 콘크리트 압축강도 추정

시설물안전관리 특별법, 농어촌정비법 등 관련법령에 따라 농업용저수지는 5년에 1회의 빈도로 정밀안전진단을 수행하고 있다. 경우에 따라서는 콘크리트 코어를 채취하여 압축강도를 측정한다. 콘크리트는 비균질재료로서 위치에 따라 강도의 크기에 편차가 발생하기 마련이다. 측정된 압축강도는 정밀안전진단 시 설계기준강도에 비하여 어느 정도 유지되고 있는지를 가늠하는 기준으로 사용된다. 비파괴 시험결과와 함께 다양한 방법으로 강도를 추정하기도 한다.

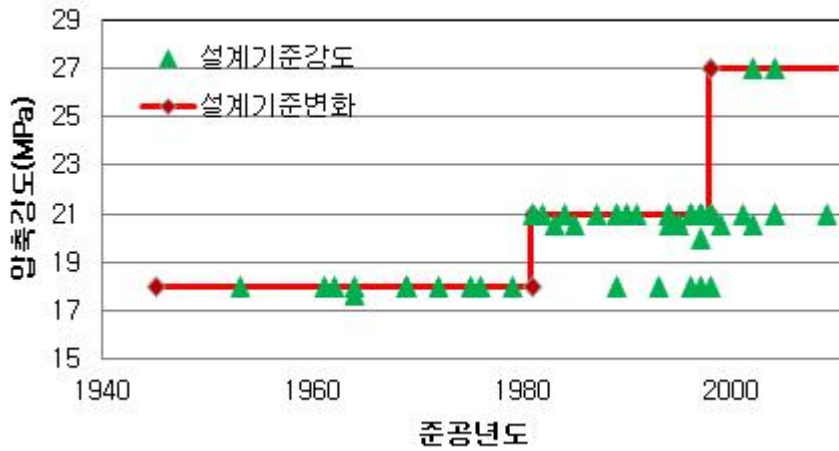
본 연구에서는 그 동안 진단을 수행했던 지구의 자료와 설계자료, 본 연구에서 중성화분석에 사용한 열분석자료를 종합하여 콘크리트의 압축강도를 추정하는 기법을 제안하고자 한다. 또한 추정된 압축강도 혹은 경우에 따라서는 코어를 채취하여 실측한 압축강도를 활용하여 내하력 평가를 수행하고자 함이 콘크리트의 압축강도를 추정하는 목적이다. 압축강도를 얻기 위해 매회 코어를 채취하는 방법보다는 제안된 방법으로 추정함으로써 구조물의 손상을 최소화하고, 측정된 강도자료의 활용도를 극대화하고자 함이 수반되는 목적이라 할 수 있다.

가. 설계기준강도의 변화

농업생산기반정비사업 계획설계기준 등 각종 설계기준에 따라 콘크리트 구조물을 설계해오고 있다. 과거 설계지구에 비하여 최근 설계지구의 콘크리트 강도가 크게 설계되고 있는 경향으로 분석되고 있다. 설계된 지 오래된 지구의 콘크리트 구조물에 대한 설계자료가 없는 경우가 대부분이기 때문에 정밀안전진단업무 수행시 준공년도별 적용 설계기준을 임시로 정하고 있는 것으로 조사되었다. 1981년 이전 준공 지구는 18.0MPa, 1981년부터 1998년사이 준공된 지구는 21.0MPa, 1999년 이후 준공된 지구는 27MPa로 잠정 정하고 있다. 한국농어촌공사 본사 서고에서 과거의 설계자료를 분석한 결과 여수도와 방수로의 설계기준강도가 <그림 2.24, 25>과 같이 설계기준의 변천이 생기는 년도를 기점으로 강도가 변화한 것으로 분석되었다.



< 그림 2.24 > 준공연도에 따른 설계기준강도 변화(여수도)

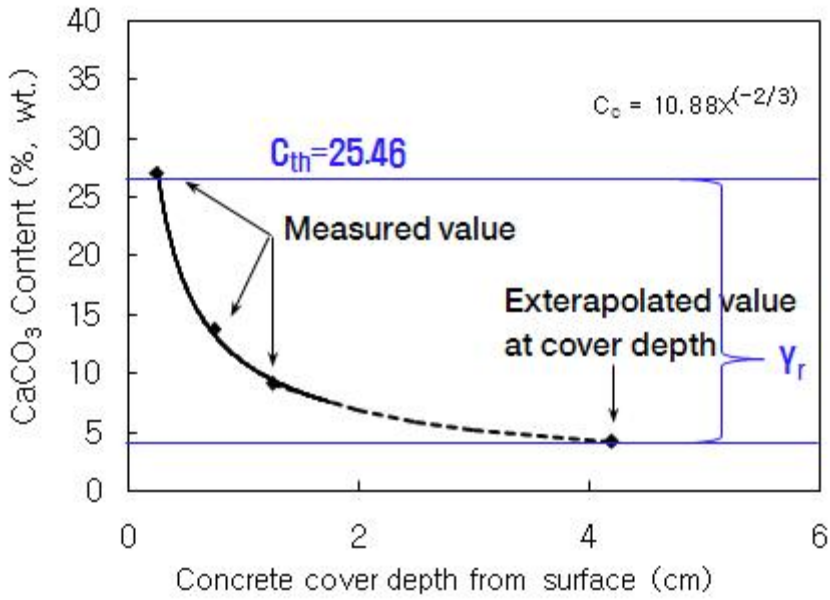


< 그림 2.25 > 준공연도에 따른 설계기준강도 변화(방수로)

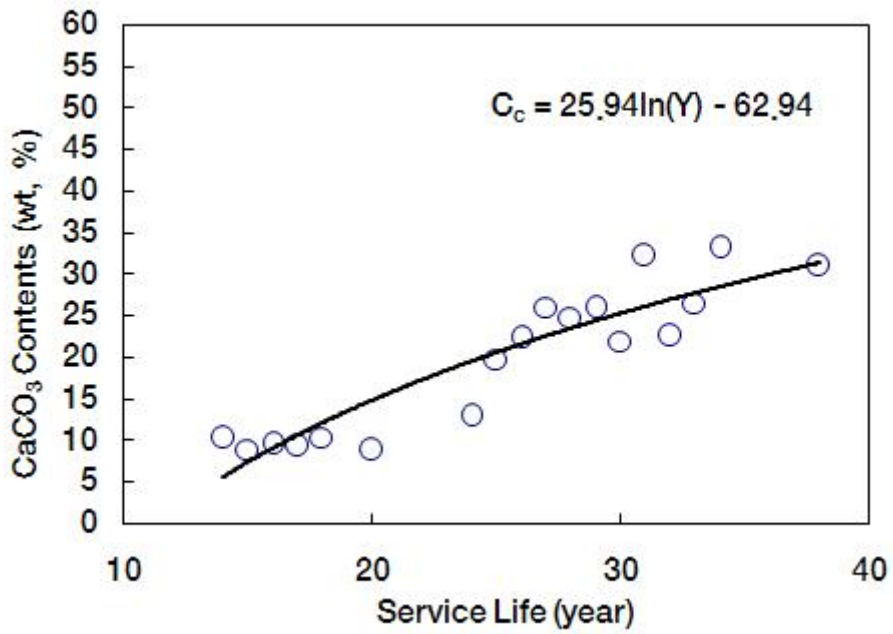
나. 분취 및 열분석을 통한 압축강도 추정

콘크리트의 표면에서부터 3개의 깊이에서 분말을 채취하여 열분석을 통해 탄산칼슘의 함량을 얻는다. <그림 2.28>과 같이 세 점으로 도시하여 두 점간의 기울기 3개를 얻는다. 식 (2)와 같이 기울기의 최대값과 탄산칼슘의 최대값을 곱하고 여기에 계수 F_r 를 곱한다. F_r 는 <그림 2.29>과 같이 보수시점까지 남아 있는 잔여기간으로부터 얻는 계수값이다.

보수시점은 임계탄산 칼슘함량과 현재의 철근위치에서의 탄산칼슘 함량을 비교하여 계산할 수 있다. 탄산칼슘 함량과 pH의 관계곡선(Lee, 2003)으로부터 임계 pH 10.4에 해당하는 탄산칼슘의 함량이 25.46%을 알 수 있다. 그리고 공용연한과 탄산칼슘함량의 상관관계 <그림 2.27>을 통해 탄산칼슘 함량에 따른 공용연한을 계산할 수 있고, 임계탄산칼슘에 해당하는 연한과 현재 탄산칼슘 함량에 해당하는 차를 보수시점이라 할 수 있다.



< 그림 2.26 > 중성화에 의한 보수시점 예측



< 그림 2.27 > 공용연한과 탄산칼슘함량의 상관관계

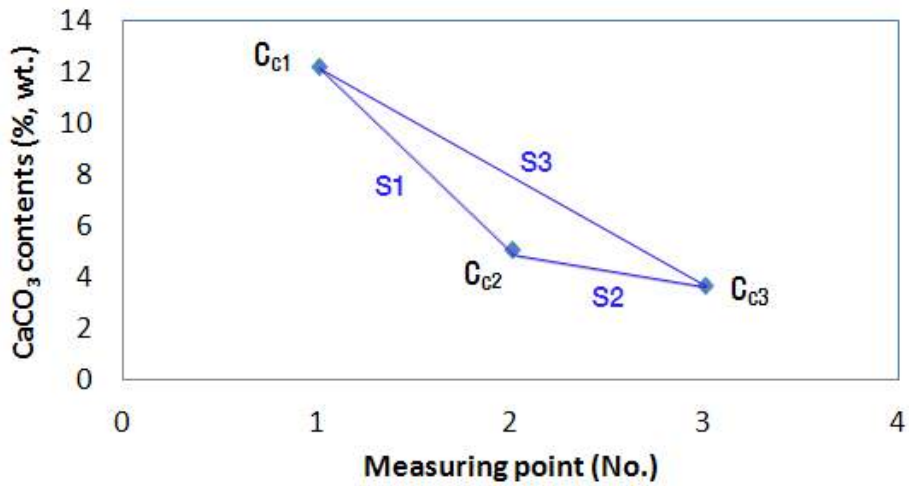
$$f_{ct} = \text{Max}(S_1, S_2, S_3) \times \text{Max}(C_{c1}, C_{c2}, C_{c3}) \times F_r \quad (2)$$

여기서, f_{ct} : 추정 콘크리트 압축강도

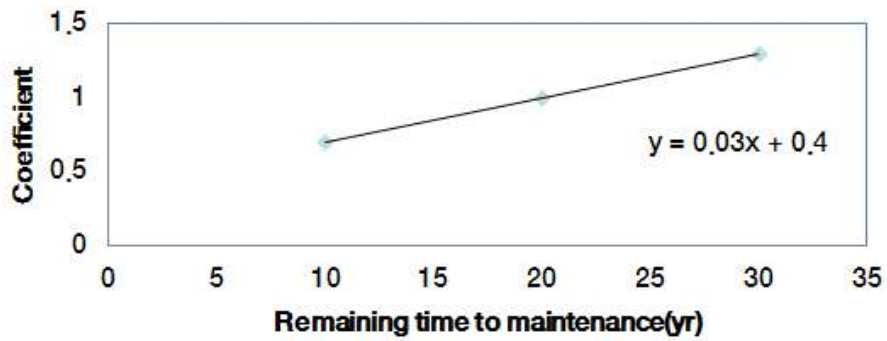
S_i : 측정점간 기울기

C_{ci} : 측정점별 $CaCO_3$ 함량

F_r : 보수시점까지의 잔여기간에 따른 계수

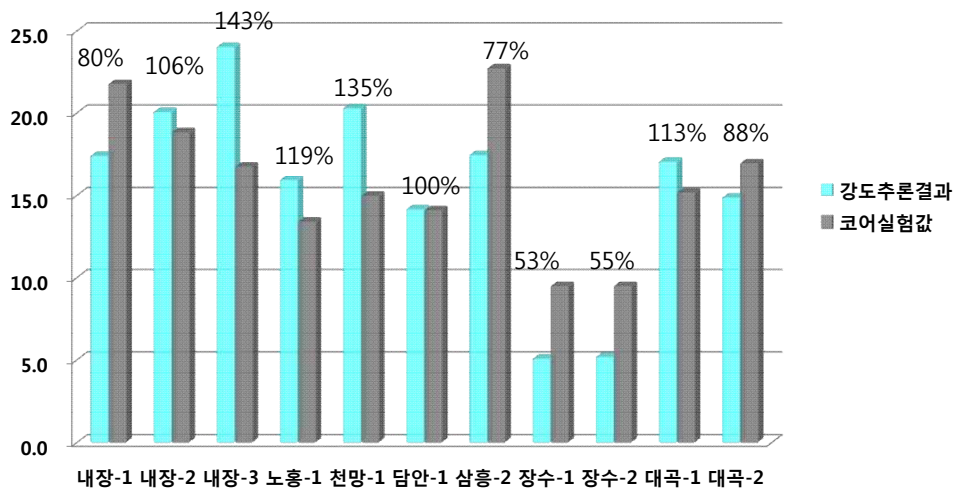


< 그림 2.28 > 깊이별 탄산칼슘의 함량 및 측정점간 기울기



< 그림 2.29 > 보수시점까지 남아있는 기간에 따른 상관계수

2011년, 2012년 정밀안전진단지구의 코어채취지구에 대해 코어실측강도와 제안식에 의한 추정압축강도를 <그림 2.30>과 같이 비교한 결과 평균 76%의 유사성을 보인 것으로 분석되었다. 정밀안전진단보고서작성에서 추정강도 자료를 활용하기까지 한시적으로 기존방식과 병행운영하는 방안을 모색함으로써 그 신뢰성이 인정될 때 변경하는 방안을 제안하고자 한다.

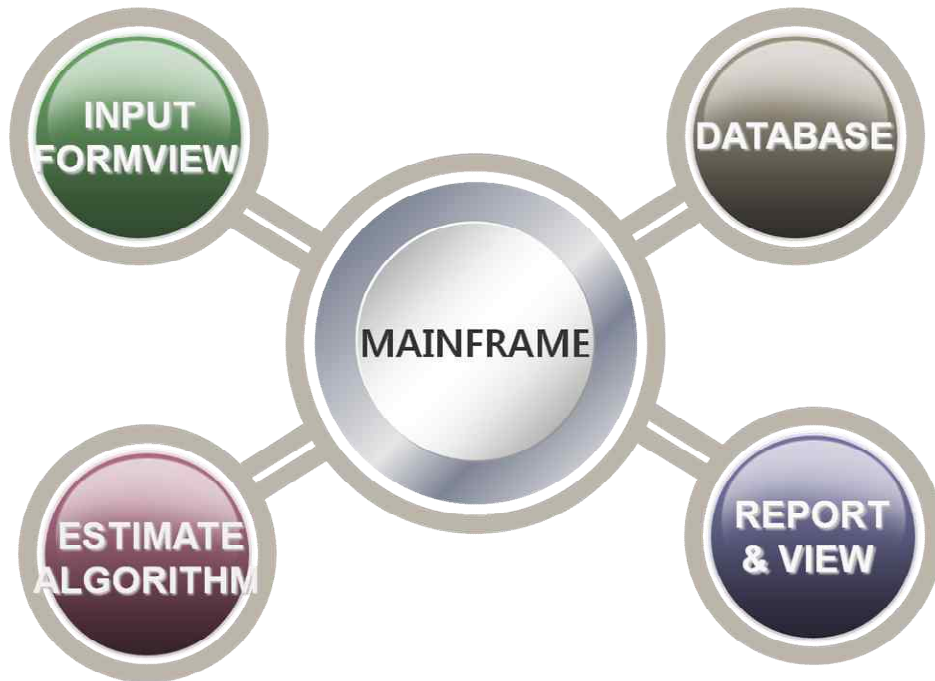


< 그림 2.30 > 코어강도와 추정강도의 비교

제3절 내구성평가시스템 개발

1. 내구성 평가 시스템 개요

시스템의 구성은 크게 입력을 담당하는 Input-FormView, 기존 자료의 열람을 위한 Database, 평가를 담당하는 Estimate-Algorithm 그리고 보고서 작성과 열람을 위한 Report & View로 나눌 수 있다.



< 그림 2.31 > 프로그램 구성도

가. Input-FormView

- 입력을 담당하는 View 이며 MainFrame의 좌측에 위치한다.

나. Database

○ 기존의 정보를 열람하고 수정하며 보존할 수 있는 기능으로 대화상자를 통하여 열람하고 입력, 수정, 삭제 등의 정보 관련기능과 파일저장 or 불러오기 등의 기능을 수행한다.

다. Estimate-Algorithm

- 실제 평가 알고리즘을 담고 있으며 C++로 작성되어 있다.

라. Report & View

- 정해진 포맷에 맞는 보고서 구현부와 작성된 보고서를 보여주고 인쇄할 수 있는 View로 구성되어 있다.

2. 내구성 평가 시스템 구현 모습

가. MainFrame



< 그림 2.32 > MainFrame

○ MainFrame은 위의 그림과 같이 왼쪽에 입력과 기능실행을 위한 FormView가 위치하고 있으며 오른쪽은 보고서를 열람할 수 있는 View로 구성되어 있다.

- 왼쪽 입력 부분은 입력정보를 확인 할 수 있는 트리컨트롤이 상단에

위치하며 입력과 관련된 컨트롤 및 기능실행을 위한 버튼들이 하단에 위치하고 있다.

○ 우측의 보고서 View는 좌측에서 입력한 정보를 가지고 보고서를 작성하고 미리보기를 할 수 있으며 출력도 가능하다. 기본적인 View의 기능인 Pan(이동), Zoom(확대, 축소 등)의 기능도 지원한다.

나. Input-FormView



< 그림 2.33 > FormView(1/2)

시설물	
이름 : 제체	중요도 : 25,000
복합부재	
이름 : 블록-1	규모 : 100,000
개별부재	
이름 : 덩마루	중요도 : 40,000
평가항목	
손상유형 : 중횡방향 균열	중요결함 :
손상내용 : 중횡방향 균열	
평가등급 : A	상세내용
추가	수정
삭제	
보고서 작성	
데이터 베이스	

< 그림 2.34 > FormView(2/2)

○ FormView 상단에는 위의 좌측 그림과 같이 입력한 정보를 트리구조 형태로 열람할 수 있도록 트리컨트롤을 이용하여 정보를 표현하고 있다. 입력하는 정보가 전체구조물 - 시설물 - 복합부재 - 개별부재 - 평가항목의 구조를 가지고 있으므로 트리컨트롤로 표현하기 가장 좋다고 판단하여 상단에 배치하였다.

○ 위의 우측 그림은 FormView 하단에 위치한 입력관련 컨트롤들이며 입력의 편리함과 신속성을 위해 대화상자를 이용하여 입력하기 보단 좌측에서 바로 입력할 수 있도록 하도록 구성하였다.

○ 상단의 트리컨트롤에서 선택된 항목에 따라 하단의 입력 컨트롤들의 동작이 달라지도록 구현되어 있다. 트리컨트롤에서 시설물을 선택하면 복합부재를 입력할 수 있고, 복합부재를 선택하면 개별부재, 개별부재 선택 시 평가항목을 입력할 수 있도록 컨트롤들이 활성화 되며 입력 즉시 계산과정을 수행하도록 구현되어 있다.

다. 데이터베이스

구조	Part	규마 (MPa)	f _{ck} (MPa)	중성축 (mm)	실근피복 (mm)		실근간격 (mm)		피복기준 (mm)		간격기준 (mm)		중량률 (%)	배합설계		
					중 (mm)	활 (mm)	중 (mm)	활 (mm)	중 (mm)	활 (mm)	중 (mm)	활 (mm)		C (kg)	S (kg)	G (kg)
A-1	대수도	0.0	0.0	7.0	131.0	151.0	220.0	210.0	50.0	50.0	250.0	250.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	방수로	21.0	21.0	11.0	66.0	85.0	210.0	200.0	50.0	50.0	250.0	250.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	복토	0.0	0.0	15.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	취수탑	12.3	21.0	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	사통	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
A-2	대수도	0.0	0.0	9.0	134.0	157.0	250.0	280.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	방수로	22.9	21.0	13.0	91.0	124.0	250.0	270.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	복토	0.0	0.0	22.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	취수탑	15.3	21.0	6.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	사통	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
A-3	대수도	0.0	0.0	18.0	141.0	178.0	265.0	330.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	방수로	0.0	0.0	15.0	123.0	154.0	270.0	290.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	복토	0.0	0.0	24.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	취수탑	0.0	0.0	8.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	사통	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
B-1	대수도	0.0	0.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	방수로	0.0	0.0	7.0	62.0	94.0	150.0	230.0	50.0	50.0	210.0	250.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	복토	0.0	0.0	12.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

< 그림 2.35 > 데이터베이스

○ 데이터베이스는 입력과 수정이 간편하고 엑셀과 연계작업이 가능한 그리드방식을 이용하였으며 상단에서 지역과 이름을 선택하면 해당 구조물의 정보를 보여주며 파일로 저장 또는 불러오기 기능을 수행하도록 구성하였다.

라. 템플릿

< 그림 2.36 > 템플릿

○ Template은 프로젝트를 시작할 때와 사용자의 요청에 의해 호출되며

대화상자에서 기본적인 정보를 입력하면 기본항목을 생성해주는 기능을 수행하도록 구성하였다.

○ 현재는 필댐과 콘크리트댐으로 구분되어 있으며 세부지침과 기존의 항목, 구분 방법 등을 이용해 기본입력정보를 구성하였다.

마. 보고서 출력

PROJECT	DATE																														
SUBJECT	CALCUL. By																														
필댐 계층-기본-1 <table border="1"> <thead> <tr> <th>계층부재</th> <th>발기높이</th> <th>발기위치</th> <th>기준</th> <th>계산값</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>필댐</td> <td>A</td> <td>5.00</td> <td>100.00</td> <td>500.00</td> </tr> <tr> <td>필댐-3</td> <td>A</td> <td>5.00</td> <td>100.00</td> <td>500.00</td> </tr> <tr> <td>필댐-2</td> <td>A</td> <td>5.00</td> <td>100.00</td> <td>500.00</td> </tr> <tr> <td>필댐-1</td> <td>A</td> <td>5.00</td> <td>100.00</td> <td>500.00</td> </tr> <tr> <td>합계</td> <td></td> <td></td> <td>20.00</td> <td>5.00</td> </tr> </tbody> </table> 1. 계층부재의 상대발기위치(%) = 5.00 2. 계층부재의 상대발기높이 = 5.00 3. V1 = 0.00 4. V2 = 20.00 5. 계층시공의 상대발기위치(%) = 5.00 6. 계층시공의 상대발기높이 = 5.00		계층부재	발기높이	발기위치	기준	계산값	필댐	A	5.00	100.00	500.00	필댐-3	A	5.00	100.00	500.00	필댐-2	A	5.00	100.00	500.00	필댐-1	A	5.00	100.00	500.00	합계			20.00	5.00
계층부재	발기높이	발기위치	기준	계산값																											
필댐	A	5.00	100.00	500.00																											
필댐-3	A	5.00	100.00	500.00																											
필댐-2	A	5.00	100.00	500.00																											
필댐-1	A	5.00	100.00	500.00																											
합계			20.00	5.00																											
필댐 계층-기본-2 <table border="1"> <thead> <tr> <th>계층부재</th> <th>발기높이</th> <th>발기위치</th> <th>기준</th> <th>계산값</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>필댐</td> <td>A</td> <td>5.00</td> <td>100.00</td> <td>500.00</td> </tr> <tr> <td>필댐-3</td> <td>A</td> <td>5.00</td> <td>100.00</td> <td>500.00</td> </tr> <tr> <td>필댐-2</td> <td>A</td> <td>5.00</td> <td>100.00</td> <td>500.00</td> </tr> <tr> <td>필댐-1</td> <td>A</td> <td>5.00</td> <td>100.00</td> <td>500.00</td> </tr> <tr> <td>합계</td> <td></td> <td></td> <td>20.00</td> <td>5.00</td> </tr> </tbody> </table> 1. 계층부재의 상대발기위치(%) = 5.00 2. 계층부재의 상대발기높이 = 5.00 3. V1 = 0.00 4. V2 = 20.00 5. 계층시공의 상대발기위치(%) = 5.00 6. 계층시공의 상대발기높이 = 5.00		계층부재	발기높이	발기위치	기준	계산값	필댐	A	5.00	100.00	500.00	필댐-3	A	5.00	100.00	500.00	필댐-2	A	5.00	100.00	500.00	필댐-1	A	5.00	100.00	500.00	합계			20.00	5.00
계층부재	발기높이	발기위치	기준	계산값																											
필댐	A	5.00	100.00	500.00																											
필댐-3	A	5.00	100.00	500.00																											
필댐-2	A	5.00	100.00	500.00																											
필댐-1	A	5.00	100.00	500.00																											
합계			20.00	5.00																											
필댐 계층-기본-3 <table border="1"> <thead> <tr> <th>계층부재</th> <th>발기높이</th> <th>발기위치</th> <th>기준</th> <th>계산값</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>필댐</td> <td>A</td> <td>5.00</td> <td>100.00</td> <td>500.00</td> </tr> <tr> <td>필댐-3</td> <td>A</td> <td>5.00</td> <td>100.00</td> <td>500.00</td> </tr> <tr> <td>필댐-2</td> <td>A</td> <td>5.00</td> <td>100.00</td> <td>500.00</td> </tr> <tr> <td>필댐-1</td> <td>A</td> <td>5.00</td> <td>100.00</td> <td>500.00</td> </tr> <tr> <td>합계</td> <td></td> <td></td> <td>20.00</td> <td>5.00</td> </tr> </tbody> </table> 1. 계층부재의 상대발기위치(%) = 5.00 2. 계층부재의 상대발기높이 = 5.00 3. V1 = 0.00 4. V2 = 20.00 5. 계층시공의 상대발기위치(%) = 5.00 6. 계층시공의 상대발기높이 = 5.00		계층부재	발기높이	발기위치	기준	계산값	필댐	A	5.00	100.00	500.00	필댐-3	A	5.00	100.00	500.00	필댐-2	A	5.00	100.00	500.00	필댐-1	A	5.00	100.00	500.00	합계			20.00	5.00
계층부재	발기높이	발기위치	기준	계산값																											
필댐	A	5.00	100.00	500.00																											
필댐-3	A	5.00	100.00	500.00																											
필댐-2	A	5.00	100.00	500.00																											
필댐-1	A	5.00	100.00	500.00																											
합계			20.00	5.00																											
필댐 계층-기본-4 <table border="1"> <thead> <tr> <th>계층부재</th> <th>발기높이</th> <th>발기위치</th> <th>기준</th> <th>계산값</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>필댐</td> <td>A</td> <td>5.00</td> <td>100.00</td> <td>500.00</td> </tr> <tr> <td>필댐-3</td> <td>A</td> <td>5.00</td> <td>100.00</td> <td>500.00</td> </tr> <tr> <td>필댐-2</td> <td>A</td> <td>5.00</td> <td>100.00</td> <td>500.00</td> </tr> <tr> <td>필댐-1</td> <td>A</td> <td>5.00</td> <td>100.00</td> <td>500.00</td> </tr> <tr> <td>합계</td> <td></td> <td></td> <td>20.00</td> <td>5.00</td> </tr> </tbody> </table> 1. 계층부재의 상대발기위치(%) = 5.00 2. 계층부재의 상대발기높이 = 5.00 3. V1 = 0.00 4. V2 = 20.00 5. 계층시공의 상대발기위치(%) = 5.00 6. 계층시공의 상대발기높이 = 5.00		계층부재	발기높이	발기위치	기준	계산값	필댐	A	5.00	100.00	500.00	필댐-3	A	5.00	100.00	500.00	필댐-2	A	5.00	100.00	500.00	필댐-1	A	5.00	100.00	500.00	합계			20.00	5.00
계층부재	발기높이	발기위치	기준	계산값																											
필댐	A	5.00	100.00	500.00																											
필댐-3	A	5.00	100.00	500.00																											
필댐-2	A	5.00	100.00	500.00																											
필댐-1	A	5.00	100.00	500.00																											
합계			20.00	5.00																											

PROJECT	DATE																									
SUBJECT	CALCUL. By																									
콘크리트댐 계층-기본-1 <table border="1"> <thead> <tr> <th>계층부재</th> <th>발기높이</th> <th>발기위치</th> <th>기준</th> <th>계산값</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>콘크리트댐</td> <td>A</td> <td>5.00</td> <td>1.00</td> <td>40.00</td> </tr> <tr> <td>콘크리트댐</td> <td>A</td> <td>5.00</td> <td>1.00</td> <td>30.00</td> </tr> <tr> <td>콘크리트댐</td> <td>A</td> <td>5.00</td> <td>1.00</td> <td>30.00</td> </tr> <tr> <td>합계</td> <td></td> <td></td> <td>100.00</td> <td>100.00</td> </tr> </tbody> </table> 1. 계층부재의 상대발기위치(%) = 5.00 2. 계층부재의 상대발기높이 = 5.00		계층부재	발기높이	발기위치	기준	계산값	콘크리트댐	A	5.00	1.00	40.00	콘크리트댐	A	5.00	1.00	30.00	콘크리트댐	A	5.00	1.00	30.00	합계			100.00	100.00
계층부재	발기높이	발기위치	기준	계산값																						
콘크리트댐	A	5.00	1.00	40.00																						
콘크리트댐	A	5.00	1.00	30.00																						
콘크리트댐	A	5.00	1.00	30.00																						
합계			100.00	100.00																						
콘크리트댐 계층-기본-2 <table border="1"> <thead> <tr> <th>계층부재</th> <th>발기높이</th> <th>발기위치</th> <th>기준</th> <th>계산값</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>콘크리트댐</td> <td>A</td> <td>5.00</td> <td>1.00</td> <td>40.00</td> </tr> <tr> <td>콘크리트댐</td> <td>A</td> <td>5.00</td> <td>1.00</td> <td>30.00</td> </tr> <tr> <td>콘크리트댐</td> <td>A</td> <td>5.00</td> <td>1.00</td> <td>30.00</td> </tr> <tr> <td>합계</td> <td></td> <td></td> <td>100.00</td> <td>100.00</td> </tr> </tbody> </table> 1. 계층부재의 상대발기위치(%) = 5.00 2. 계층부재의 상대발기높이 = 5.00		계층부재	발기높이	발기위치	기준	계산값	콘크리트댐	A	5.00	1.00	40.00	콘크리트댐	A	5.00	1.00	30.00	콘크리트댐	A	5.00	1.00	30.00	합계			100.00	100.00
계층부재	발기높이	발기위치	기준	계산값																						
콘크리트댐	A	5.00	1.00	40.00																						
콘크리트댐	A	5.00	1.00	30.00																						
콘크리트댐	A	5.00	1.00	30.00																						
합계			100.00	100.00																						
콘크리트댐 계층-기본-3 <table border="1"> <thead> <tr> <th>계층부재</th> <th>발기높이</th> <th>발기위치</th> <th>기준</th> <th>계산값</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>콘크리트댐</td> <td>A</td> <td>5.00</td> <td>1.00</td> <td>40.00</td> </tr> <tr> <td>콘크리트댐</td> <td>A</td> <td>5.00</td> <td>1.00</td> <td>30.00</td> </tr> <tr> <td>콘크리트댐</td> <td>A</td> <td>5.00</td> <td>1.00</td> <td>30.00</td> </tr> <tr> <td>합계</td> <td></td> <td></td> <td>100.00</td> <td>100.00</td> </tr> </tbody> </table> 1. 계층부재의 상대발기위치(%) = 5.00 2. 계층부재의 상대발기높이 = 5.00		계층부재	발기높이	발기위치	기준	계산값	콘크리트댐	A	5.00	1.00	40.00	콘크리트댐	A	5.00	1.00	30.00	콘크리트댐	A	5.00	1.00	30.00	합계			100.00	100.00
계층부재	발기높이	발기위치	기준	계산값																						
콘크리트댐	A	5.00	1.00	40.00																						
콘크리트댐	A	5.00	1.00	30.00																						
콘크리트댐	A	5.00	1.00	30.00																						
합계			100.00	100.00																						
콘크리트댐 계층-기본-4 <table border="1"> <thead> <tr> <th>계층부재</th> <th>발기높이</th> <th>발기위치</th> <th>기준</th> <th>계산값</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>콘크리트댐</td> <td>A</td> <td>5.00</td> <td>1.00</td> <td>40.00</td> </tr> <tr> <td>콘크리트댐</td> <td>A</td> <td>5.00</td> <td>1.00</td> <td>30.00</td> </tr> <tr> <td>콘크리트댐</td> <td>A</td> <td>5.00</td> <td>1.00</td> <td>30.00</td> </tr> <tr> <td>합계</td> <td></td> <td></td> <td>100.00</td> <td>100.00</td> </tr> </tbody> </table> 1. 계층부재의 상대발기위치(%) = 5.00 2. 계층부재의 상대발기높이 = 5.00		계층부재	발기높이	발기위치	기준	계산값	콘크리트댐	A	5.00	1.00	40.00	콘크리트댐	A	5.00	1.00	30.00	콘크리트댐	A	5.00	1.00	30.00	합계			100.00	100.00
계층부재	발기높이	발기위치	기준	계산값																						
콘크리트댐	A	5.00	1.00	40.00																						
콘크리트댐	A	5.00	1.00	30.00																						
콘크리트댐	A	5.00	1.00	30.00																						
합계			100.00	100.00																						
콘크리트댐 계층-기본-5 <table border="1"> <thead> <tr> <th>계층부재</th> <th>발기높이</th> <th>발기위치</th> <th>기준</th> <th>계산값</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>콘크리트댐</td> <td>A</td> <td>5.00</td> <td>1.00</td> <td>40.00</td> </tr> <tr> <td>콘크리트댐</td> <td>A</td> <td>5.00</td> <td>1.00</td> <td>30.00</td> </tr> <tr> <td>콘크리트댐</td> <td>A</td> <td>5.00</td> <td>1.00</td> <td>30.00</td> </tr> <tr> <td>합계</td> <td></td> <td></td> <td>100.00</td> <td>100.00</td> </tr> </tbody> </table> 1. 계층부재의 상대발기위치(%) = 5.00 2. 계층부재의 상대발기높이 = 5.00		계층부재	발기높이	발기위치	기준	계산값	콘크리트댐	A	5.00	1.00	40.00	콘크리트댐	A	5.00	1.00	30.00	콘크리트댐	A	5.00	1.00	30.00	합계			100.00	100.00
계층부재	발기높이	발기위치	기준	계산값																						
콘크리트댐	A	5.00	1.00	40.00																						
콘크리트댐	A	5.00	1.00	30.00																						
콘크리트댐	A	5.00	1.00	30.00																						
합계			100.00	100.00																						

PROJECT	DATE																																			
SUBJECT	CALCUL. By																																			
콘크리트댐 계층-기본-1-상부사면 <table border="1"> <thead> <tr> <th>계층부재</th> <th>발기높이</th> <th>발기위치</th> <th>기준</th> <th>계산값</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>상부사면</td> <td>S</td> <td>A</td> <td>1.00</td> <td>5.00</td> </tr> <tr> <td>상부사면</td> <td>S</td> <td>A</td> <td>1.00</td> <td>5.00</td> </tr> <tr> <td>상부사면</td> <td>S</td> <td>A</td> <td>1.00</td> <td>5.00</td> </tr> <tr> <td>상부사면</td> <td>S</td> <td>A</td> <td>1.00</td> <td>5.00</td> </tr> <tr> <td>상부사면</td> <td>S</td> <td>A</td> <td>1.00</td> <td>5.00</td> </tr> <tr> <td>합계</td> <td></td> <td></td> <td>5.00</td> <td>5.00</td> </tr> </tbody> </table> 1. 계층부재의 상대발기위치(%) = 5.00 2. 계층부재의 상대발기높이 = 5.00		계층부재	발기높이	발기위치	기준	계산값	상부사면	S	A	1.00	5.00	상부사면	S	A	1.00	5.00	상부사면	S	A	1.00	5.00	상부사면	S	A	1.00	5.00	상부사면	S	A	1.00	5.00	합계			5.00	5.00
계층부재	발기높이	발기위치	기준	계산값																																
상부사면	S	A	1.00	5.00																																
상부사면	S	A	1.00	5.00																																
상부사면	S	A	1.00	5.00																																
상부사면	S	A	1.00	5.00																																
상부사면	S	A	1.00	5.00																																
합계			5.00	5.00																																
콘크리트댐 계층-기본-1-하부사면 <table border="1"> <thead> <tr> <th>계층부재</th> <th>발기높이</th> <th>발기위치</th> <th>기준</th> <th>계산값</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>상부사면</td> <td>S</td> <td>A</td> <td>1.00</td> <td>5.00</td> </tr> <tr> <td>상부사면</td> <td>S</td> <td>A</td> <td>1.00</td> <td>5.00</td> </tr> <tr> <td>상부사면</td> <td>S</td> <td>A</td> <td>1.00</td> <td>5.00</td> </tr> <tr> <td>상부사면</td> <td>S</td> <td>A</td> <td>1.00</td> <td>5.00</td> </tr> <tr> <td>상부사면</td> <td>S</td> <td>A</td> <td>1.00</td> <td>5.00</td> </tr> <tr> <td>합계</td> <td></td> <td></td> <td>5.00</td> <td>5.00</td> </tr> </tbody> </table> 1. 계층부재의 상대발기위치(%) = 5.00 2. 계층부재의 상대발기높이 = 5.00		계층부재	발기높이	발기위치	기준	계산값	상부사면	S	A	1.00	5.00	상부사면	S	A	1.00	5.00	상부사면	S	A	1.00	5.00	상부사면	S	A	1.00	5.00	상부사면	S	A	1.00	5.00	합계			5.00	5.00
계층부재	발기높이	발기위치	기준	계산값																																
상부사면	S	A	1.00	5.00																																
상부사면	S	A	1.00	5.00																																
상부사면	S	A	1.00	5.00																																
상부사면	S	A	1.00	5.00																																
상부사면	S	A	1.00	5.00																																
합계			5.00	5.00																																
콘크리트댐 계층-기본-1-중간사면 <table border="1"> <thead> <tr> <th>계층부재</th> <th>발기높이</th> <th>발기위치</th> <th>기준</th> <th>계산값</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>상부사면</td> <td>S</td> <td>A</td> <td>1.00</td> <td>5.00</td> </tr> <tr> <td>상부사면</td> <td>S</td> <td>A</td> <td>1.00</td> <td>5.00</td> </tr> <tr> <td>상부사면</td> <td>S</td> <td>A</td> <td>1.00</td> <td>5.00</td> </tr> <tr> <td>상부사면</td> <td>S</td> <td>A</td> <td>1.00</td> <td>5.00</td> </tr> <tr> <td>상부사면</td> <td>S</td> <td>A</td> <td>1.00</td> <td>5.00</td> </tr> <tr> <td>합계</td> <td></td> <td></td> <td>5.00</td> <td>5.00</td> </tr> </tbody> </table> 1. 계층부재의 상대발기위치(%) = 5.00 2. 계층부재의 상대발기높이 = 5.00		계층부재	발기높이	발기위치	기준	계산값	상부사면	S	A	1.00	5.00	상부사면	S	A	1.00	5.00	상부사면	S	A	1.00	5.00	상부사면	S	A	1.00	5.00	상부사면	S	A	1.00	5.00	합계			5.00	5.00
계층부재	발기높이	발기위치	기준	계산값																																
상부사면	S	A	1.00	5.00																																
상부사면	S	A	1.00	5.00																																
상부사면	S	A	1.00	5.00																																
상부사면	S	A	1.00	5.00																																
상부사면	S	A	1.00	5.00																																
합계			5.00	5.00																																

보고서 용지 설정 (mm)

머리말 표기
 본문 테두리선
 페이지 번호 삽입

여백 : 용지 끝선 ~ 테두리선
 수평여백 (1~50) : 20.0
 수직여백 (1~50) : 20.0

여백 : 테두리선 ~ 본문
 수평여백 (1~30) : 5.0
 수직여백 (1~30) : 5.0

본문 줄높이 (3~20) : 5.6
 머리말 높이 (10~50) : 24.0

보고서 폰트 (0.1mm)
 머리말 : 36 Arial
 목차 : 36 Arial
 본문 : 36 Arial

회사명 (보고서 하단) : 동서남북연구원

확인 취소

< 그림 2.37 > 보고서

○ 보고서 기능은 입력한 정보를 바탕으로 보고서를 출력해주는 기능과 위의 그림과 같이 출력될 보고서를 미리 볼 수 있는 뷰로 구성하였다. 이 뷰

는 기본적으로 이동과 확대, 축소의 기능을 가지고 있으며 보고서 제목의 표시여부와 페이지번호 표시여부 등의 설정도 그림의 대화상자를 통해 가능하도록 구성하였다.

3. 내구성 평가 알고리즘

가. 상태평가 알고리즘

○ 상태평가 알고리즘은 “[세부지침]담 - 시설물의 정기점검 및 정밀안전진단 지침, 건설교통부고시제2003-170호 (2003. 7. 4)”를 기준으로 작성하였으며 요약하자면 다음과 같다.

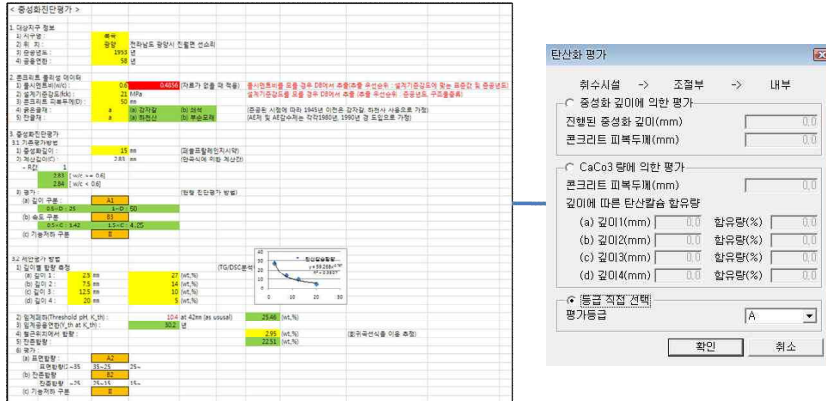
< 표 2.36 > 상태평가 알고리즘

단계	범위	반영항목	평가 지수 계산 방법
1단계	개별부재	평가지수, 영향계수 반영	* 결함 및 손상의 평가지수(E_1) $E_1 = M \times F$ * 개별 부재의 상태평가지수(E_2) $E_2 = \text{Min}(E_1 \text{ 중})$
2단계	복합부재	평가지수, 조정계수 개별부재의 중요도 반영	* 복합 부재의 상태평가지수(E_3) $E_3 = \sum(E_2 \times A \times W) / \sum(A \times W)$
3단계	개별시설	평가지수 및 규모 반영	* 개별 시설의 상태평가지수(E_4) $E_4 = \text{Min}(E_3) + V_1 + V_2$ $V_1 = 0.3 \{ \text{Max}(E_3) - \text{Min}(E_3) \}$ $V_2 = \sum(E_3 \times S) / \sum(5 \times S)$
4단계	복합시설	평가지수, 조정계수 개별시설의 중요도 반영	* 복합 시설의 상태평가지수(E_5) $E_5 = \sum(E_4 \times A \times W) / \sum(A \times W)$

나. 콘크리트의 중성화

○ 콘크리트의 중성화 평가는 기존의 방식과 새로 제안한 방식, 그리고

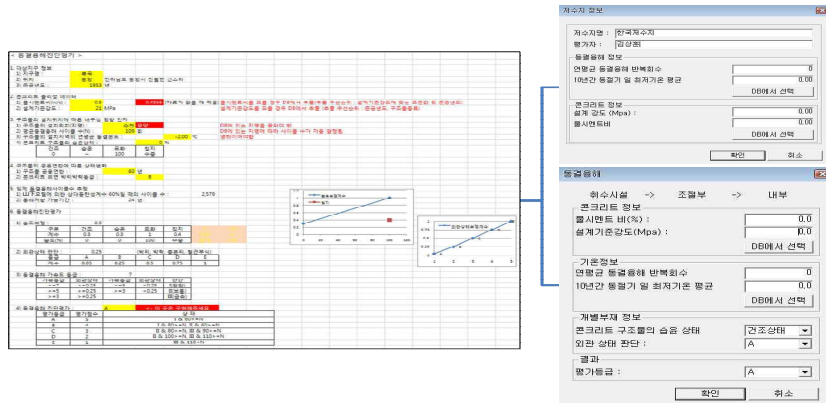
직접 등급을 선택할 수 있는 세 가지 방식 중 사용자가 선택하여 등급을 산출하도록 구성되어 있으며 대화상자를 통해서 필요한 정보를 입력하고 대화상자 안에서 엑셀로 정리된 로직대로 등급이 산출 되는 방식으로 구현하였다.



< 그림 2.38 > 중성화 평가

다. 동결융해

① 동결융해평가



< 그림 2.39 > 동결융해 평가

○ 동결융해에 대한 평가는 기존의 상태평가에 없던 항목으로 중성화 평가와 마찬가지로 대화상자에서 필요한 정보를 입력하면 등급이 산출 되는 방식으로 구현하였다.

② 저수지 공통 정보

< 그림 2.40 > 저수지정보

○ 동결융해에서 기본 값으로 사용되는 정보는 저수지 정보에서 입력할 수 있다. 연평균 동결융해 반복회수, 10년간 동절기 일 최저기온 평균, 콘크리트의 설계 강도와 물시멘트비는 통상적인 경우 저수지 대부분에서 같은 값을 이용한다고 판단하여 한 곳에서 정보를 입력할 수 있도록 구현하였으며 동결융해 각 항목에서 수정도 가능하게 구현하였다.

저수지	설계강도	물시멘트비
1 홍북-음성-명동	13.00	0.64
2 경남-하남-하동	13.00	0.63
3 전북-부안-석포	13.00	0.64
4 경북-성주-성주	13.00	0.63
5 경북-문경-경천	13.00	0.62
6 전북-무진장-지소	13.00	0.61
7 충북-괴산-소암	13.00	0.58
8 경남-고통가-척정	13.00	0.62
9 경북-구미-오봉	13.00	0.62
10 충남-논산-탑정	13.00	0.58
11 경기-화.수-백운	13.00	0.58
12 경기-화.수-형계	13.00	0.58
13 강원-홍.춘-원창	13.00	0.61
14 충북-옥.영-장면	13.00	0.63
15 충남-서.태-중앙	13.00	0.63
16 충북-충재단-선고	13.00	0.63
17 전북-남원-동화	13.00	0.61
18 경남-의령-천락	13.00	0.64

지역	동결융해회수	평균최저기온
1 서울	76	-1.10
2 문산	107	-5.50
3 수원	98	-2.40
4 양평	112	-3.90
5 미천	119	-4.40
6 칠원	119	-6.60
7 춘천	116	-4.70
8 원주	110	-3.80
9 강릉	64	0.80
10 대관령	109	-7.60
11 충주	117	-4.20
12 청주	97	-1.90
13 추풍령	110	-2.80
14 보은	122	-4.40
15 서산	111	-2.90
16 천안	113	-3.60
17 부여	114	-3.00
18 금산	123	-4.10

< 그림 2.41 > 콘크리트/동결융해 데이터베이스

○ 저수지 정보 대화상자와 동결융해 항목 대화상자에서는 필요한 정보를 직접 입력할 수도 있고 “DB에서 선택” 버튼을 이용하여 위의 그림과 같은 대화상자를 실행하여 입력할 수도 있다.

라. 강도 추론

① 분취 및 열분석을 통한 압축강도 추정

지수지명 :	한국지수지	평가날짜 :	2011-12-13
평가단계 :	중성화에 의한 잔존 수명 평가	평가자 :	

1. 조사자료

1.1 탄산칼슘함량 측정량

	측정 깊이(mm)	탄산칼슘 함량(%)
(a)	2.50	27.00
(b)	7.50	14.00
(c)	12.50	10.00
(d)	17.50	5.00
(e)	22.50	2.50
(f)	27.50	1.00

1.2 조사년도 = 2011 년
1.3 콘크리트 피복 두께 = 20.00 mm

2. 임계값 계산

2.1 부식임계 pH = 10.40 pH
2.2 임계수명 = 30 년

3. 중성화 진행 상황 산정

3.1 최근위치의 탄산칼슘 함량 산정 = 5.96 %
3.2 사용기간 추정 = 14 년

4. 잔존수명 = 16 년

5. 추정강도 = 10.23 MPa

중성화에 의한 잔존수명

입력값

조사년도(년) : 2011

콘크리트 피복두께(mm) : 20.00

깊이에 따른 탄산칼슘 함유량

(a) 깊이1(mm)	2.50	함유량(%)	27.00
(b) 깊이2(mm)	7.50	함유량(%)	14.00
(c) 깊이3(mm)	12.50	함유량(%)	10.00
(d) 깊이4(mm)	17.50	함유량(%)	5.00
(e) 깊이5(mm)	22.50	함유량(%)	2.50
(f) 깊이6(mm)	27.50	함유량(%)	1.00

부식임계 pH : 10.40

결과값

최근위치의 탄산칼슘 함유량(%) : 5.96

진행량(년) : 14.24

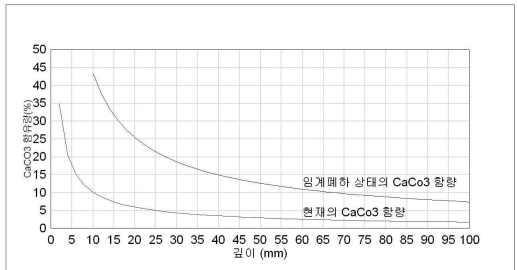
임계탄산 칼슘 함유량(%) : 25.46

임계수명 : 30.20

잔존수명(년) : 15.96

중성화 추정강도(MPa) : 10.23

확인 취소



Page 33

< 그림 2.42 > 중성화에 의한 보수시점 평가 및 강도 추론

○ 중성화에 의해 압축강도를 추정하는 기능이다. 출력된 레포트를 통해 자세한 계산과정을 확인 할 수 있으며, 그래프 형태로 현재와 임계상태의 탄산칼슘 함량을 비교 할 수 있다.

4. 내구성 평가 시스템 검증

가. 상태평가 알고리즘

상태평가 알고리즘의 검증을 위해 기 실시된 “농업기반시설 정밀안전진단 보고서(오봉 저수지), 2008.11”의 상태평가를 프로그램을 통해 재현하였고, 결과가 일치하는 것을 확인하였다. (자세한 결과는 부록에 첨부)

< 표 2.37 > 상패평가 알고리즘 검증

항목		평가 점수	
		프로그램 실행 결과	보고서의 결과
개별시설물	체체	3.07 (C등급)	3.07 (C등급)
	여수로	2.13 (D등급)	2.13 (D등급)
	취수시설	2.18 (D등급)	2.18 (D등급)

나. 중성화 상태평가

중성화 상태평가의 등급산출 알고리즘을 검증하기 위하여, 다음과 같은 조건에서의 수계산 결과와 프로그램 결과를 비교하였다.

< 표 2.38 > 중성화 상태평가 검증

항목		입력값
콘크리트 정보	콘크리트 피복두께	50mm
깊이별 함량	2.5mm	27%
	7.5mm	14%
	12.5mm	10%
	20mm	5%

항목	프로그램 실행 결과	수계산 결과
상태평가 등급	C등급	C등급

중성화 상태평가의 등급산출 알고리즘을 검증하기 위하여, 다음과 같은 조건에서의 수계산 결과와 프로그램 결과를 비교하였다.

< 표 2.39 > 동결융해 상태평가 검증

항목		입력값
콘크리트 정보	물시멘트비	0.55
내구성 영향인자	연평균 동결융해사이클	122
	연평균 동결온도	-3.7
	습윤상태	포화상태
	공용연한	60년
	박리박락등급	B

항목	프로그램 실행 결과	수계산 결과
상태평가 등급	C등급	C등급

다. 중성화에 의한 압축강도 추정

< 표 2.40 > 중성화에 의한 강도추정

항목		입력값
콘크리트정보	콘크리트 피복두께	42mm
깊이별 함량	2.5mm	27.06%
	7.5mm	13.71%
	12.5mm	9.12%
부식임계 pH		10.4

항목	프로그램 실행 결과	수계산 결과
임계수명	30.20년	30.20년
잔존수명	17.31년	17.31년
추정강도	10.00Mpa	10.00Mpa

라. 상태평가 결과 정리

① 동결융해 상태평가 추가에 의한 평가점수 비교

동결융해 상태평가를 개별부재별로 추가한 결과는 다음과 같다.

< 표 2.41 > 동결융해 추가에 따른 결과 비교

항목		평가 점수	
		동결융해 추가 전	동결융해 추가 후
개별시설물	제체	3.07 (C등급)	3.07 (C등급)
	여수로	2.13 (D등급)	2.13 (D등급)
	취수시설	2.18 (D등급)	2.18 (D등급)

② 중성화 평가방법 수정에 의한 평가점수 비교

중성화 상태평가를 개별부재별로 추가한 결과는 다음과 같다.

< 표 2.42 > 중성화 평가기법 추가에 따른 결과 비교

항목		평가 점수	
		수정 전	수정 후
개별시설물	제체	3.07 (C등급)	3.07 (C등급)
	여수로	2.13 (D등급)	2.13 (D등급)
	취수시설	2.18 (D등급)	2.18 (D등급)

5. 내구성 평가 시스템 프로그램 코드

가. 자료구조 소스

```
class CEKRData
{
public :
    CEKRData();

    TCHAR szName[100];           //시설물 이름
    double dEstimation;         //복합시설물 평가 지수
    int nDanType;

    CArray <sClass1, sClass1&> arClass1; //개별시설물 데이터
    CArray <sClass2, sClass2&> arClass2; //복합부재 데이터
    CArray <sClass3, sClass3&> arClass3; //개별부재 데이터
    CArray <sCarbonation, sCarbonation&> arCarbonation; //탄산화 데이터

    void AddClass1(LPCTSTR szName, double dWeight, double dEstimation);
    void AddClass2(LPCTSTR szName, double dSize, double dEstimation, int nClass1);
    void AddClass3(LPCTSTR szName, double dWeight, double dEstimation, int nClass2, CUIntArray &arC14Index);
    void DeleteClass1(int nIndex);
    void DeleteClass2(int nIndex);
    void DeleteClass3(int nIndex);

    void SetEstimation();
    void SetClass1Est(int nIndex);
    void SetClass2Est(int nIndex);
    void SetClass3Est(int nIndex);
    void SetClass3SubItem(sClass3 *curData, int nType);
    void SetDefault(int nType);
};
```

< 그림 2.43 > 자료구조 소스

○ 위의 소스에서처럼 CArray라는 동적 배열을 이용하여 입력정보와 같이 물고 물리는 형식의 자료구조를 구현하였으며 평가도 CEKRData 라는 하나의 Class에서 자신의 Function을 호출하여 수행되도록 구성하였다. 이렇게 하나의 Class에서 자료구조 및 평가에 대해서 모두 수행하게 함으로 객체의 캡슐화를 이루었으며 이를 통해 이식성을 확보하였다.

나. 평가알고리즘 소스

```

void CEKRData::SetClass1Est(int nIndex)
{
    int nCount = g_cEKRdata.arClass2.GetSize();
    CArray<CClass2, sClass2&> C12ofCL1;
    sClass2 addItem;
    int i(0);
    double dMaxUalue(0.);
    double dMinUalue(5.);
    double dU1(0.);
    double dSumES(0.);
    double dSumS(0.);
    double dU2(0.);
    double dEc(0.);

    //Seek Class2 Data (nClass == nIndex)
    for (i=0; i<nCount; i++)
    {
        if(g_cEKRdata.arClass2[i].nClass1 == nIndex)
        {
            addItem = g_cEKRdata.arClass2[i];
            C12ofCL1.Add(addItem);
        }
    }

    nCount = C12ofCL1.GetSize();

    for(i=0; i<nCount; i++)
    {
        dMaxUalue = max(dMaxUalue, C12ofCL1[i].dEstimation);
        dMinUalue = min(dMinUalue, C12ofCL1[i].dEstimation);
        dSumES += C12ofCL1[i].dEstimation * C12ofCL1[i].dSize;
        dSumS += C12ofCL1[i].dSize;
    }
}

```

< 그림 2.44 > 평가알고리즘 소스

○ 평가알고리즘 소스는 긴 관계로 일부분만 발췌하였으며 현재 정보의 계층구조에 따라 하단의 정보에서 상단으로 호출하는 재귀함수식으로 구성하였다.

제4절 농업용 저수지 구조물의 내하력 평가

1. 내하력 평가의 개념 및 연구내용

가. 내하력 평가의 개념

모든 토목구조물은 설계 당시에 구조해석을 통하여 단면의 크기 및 배근량 등을 계산하고 설계되고 있다. 그러나 적게는 수년에서 많게는 수십년의 시간이 경과함에 따라 콘크리트의 재료 강도와 하중상태가 변하게 된다. 따라서 저수지 구조물의 안전성을 평가함에 있어, 반드시 구조해석을 수행하여 안전한지를 확인해야 할 필요가 있다.

이러한 안전성의 평가 방법으로서 허용응력법에 의한 검토와 극한강도법에 의한 검토 방법이 주로 사용되는데, 허용응력법에 의한 검토란 콘크리트 및 철근의 허용응력과 하중조합 상의 사용응력의 비를 계산하여 안전율을 평가하는 방식이다. 다른 방법으로 극한강도법에 의한 방법은 부재의 단면의 강도와 부재력의 비로서 안전율을 계산하는 방식이다.

하중조건은 정적하중 조건과 동적하중 조건에 대한 검토가 필요하며, 특히 동적하중에 대한 검토의 경우 응답스펙트럼 방식을 적용한 사례가 늘고 있다.

나. 연구내용

구조 해석을 통한 내하력 평가를 수행하는 데는 지반상태, 단면상태, 지하수위, 토압등을 고려한 구조물의 모델링이 중요하다. 본 연구에서는 기존 내하력 평가 사례 조사 및 분석을 통해 취수탑, 옹벽, 취수터널의 모델링 방법을 제시하였다. 또한 최근 중요시 되고 있는 내진성능평가에 관하여 내진성능 평가지표를 검토하고 현 적용방법의 타당성을 연구하였다.

이러한 내하력 평가 체계를 실 진단업무에 반영하고자 시스템 개발도 추진하였다.

2. 정밀안전진단에서의 내하력 평가 활용

안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(시설안전공단, 2010)의 안전성평가 방법을 정리하자면 다음과 같다.

가. 안전성 평가

시설물의 안전성평가의 목적은 시설물이 제 기능 및 역할을 유지할 수 있는 구조적 및 운영상의 안전성에 대한 확보여부를 평가하는데 있으므로 현장에서부터 시설물의 현황과 상태 및 특성을 충분히 파악하여 제반 문제점을 도출하고 기초자료 분석 및 구조검토 해석 등에 의해 문제점에 대한 원인을 규명함과 더불어 안전성 여부를 판단하여야 한다. 안전성 평가를 위하여 기본과업 이외의 필요한 계측 측정 조사 및 시험 등의 선택과업을 시설물 종류 및 구조적 특성에 따라 책임기술자는 관리주체와 협의하여야 하며 이를 위해서는 설계자료 검토 시공방법과 사용재료의 검토 기록을 통한 운영이력의 분석 부재별 상태평가 결과 및 각종 계측측정조사 시험 등을 통하여 충분한 기초자료를 확보하는 것이 중요하며 안전성평가 시 검토할 사항은 다음과 같다

- ① 제체의 사면안정 해석
- ② 제체의 침투수에 대한 안전성 해석
- ③ 제체의 응력 변형 해석
- ④ 구조물의 내하력 해석
- ⑤ 구조물의 안정해석
- ⑥ 수리 수문학적 안전성 해석
- ⑦ 시설물의 내진성 평가
- ⑧ 계측자료 분석 등

본 연구에서는 ④ 구조물의 내하력 해석, ⑤ 구조물의 안정해석, ⑦ 시설물의 내진성 평가의 정량적 평가를 제안, 구현하여 안전성 평가에 활용할 수 있도록 하였다.

나. 정적응력에 대한 안전성 평가

정적 해석은 정적상태시 구조물의 역학적 거동특성을 파악하여 댐체에 발생하는 압축및 인장응력을 허용응력과 비교 분석하여 안전성을 검토하고자 하였으며 해석에 필요한 외력과 허용응력은 댐 설계기준 콘크리트구조설계기준 및 기존댐의 내진성능평가 및 향상요령」에서 제시하고 있는 기준을 적용한다.

평가기준	평가점수	안전성평가 기준	비 고
a	5	SF(안전율) > 1.0으로 주부재에 손상이 없는 경우	◦허용응력설계법 $SF = \frac{\text{허용응력}}{\text{발생응력}} = \frac{f_a}{f_{d+t}}$
b	4	SF(안전율) > 1.0으로 주부재에 손상(중요결함)이 있는 경우	
c	3	0.9 ≤ SF(안전율) < 1	
d	2	0.75 ≤ SF(안전율) < 0.9	◦강도설계법 $SF = \frac{\text{설계강도}}{\text{소요강도}} = \frac{\phi Mn}{M}$
e	1	SF(안전율) < 0.75	

< 표 2.43 > 정적응력에 대한 안전성 평가 기준

다. 내진응력에 대한 안전성 평가

댐의 내진성능평가는 「기존 댐의 내진성능평가 및 향상요령(2004, 국토부)」에 의거 크게 예비평가, 1단계평가, 2단계평가로 구성된다. 그러나 시 특법에 의한 정기적인 정밀안전진단 대상시설물은 중요 구조물로 가장 정밀한해석이 요구되므로 바로 2단계평가를 내진성능평가로 하여 수치해석을 수행한다.

평가기준	평가점수	상 태	비 고
a	5	SF(안전율) > 1.0으로 주부재에 손상이 없는 경우	◦허용응력설계법 $SF = \frac{\text{허용응력}}{\text{발생응력}} = \frac{f_a}{f_{d+1}}$ ◦강도설계법 $SF = \frac{\text{설계강도}}{\text{소요강도}} = \frac{\phi Mn}{M}$
b	4	SF(안전율) > 1.0으로 주부재에 손상(중요결함)이 있는 경우	
c	3	$0.9 \leq SF(\text{안전율}) < 1$	
d	2	$0.75 \leq SF(\text{안전율}) < 0.9$	
e	1	SF(안전율) < 0.75	

< 표 2.44 > 내진응력에 대한 안전성 평가 기준

3. 안전성 평가결과 산정방법

구조물의 각종 해석을 통하여 안전성 평가기준에 따른 각각의 안전성 평가 결과가 결정되면 이들을 종합하여 하나의 안전성평가 결과를 결정하기 위하여 본 평가체계에서 다음과 같은 수식을 사용한다.

이 수식에 의해 산출되는 안전성평가지수(Es)는 각 검토항목의 안전성평가 결과 중 가장 낮은 안전성평가 결과보다 다소 상향된 결과로 평가된다.

$$\begin{aligned}
 \text{안전성평가지수}(E_s) &= L + 0.3(H - L) \frac{\sum_{i=1}^{N-2} M_i}{5 \times (N-2)}, \quad (N > 2) \\
 &= L + 0.3(H - L), \quad (N = 2)
 \end{aligned}$$

여기서, N : 안전성 검토항목 수

L : 검토항목의 안전성평가 지수(평가점수) 중 최소값

H : 검토항목의 안전성평가 지수(평가점수) 중 최대값

M_i : 검토항목의 최대 및 최소값을 제외한 나머지 값들

검토단면이 다수인 경우도 각 검토단면의 안전성평가 결과를 하나의 검

토항목으로 간주하여 위의 식에 의해 최종적인 전체 구조물의 안전성평가 결과를 결정할 수 있다. 안전성평가는 각 시설물의 개별부재 또는 복합부재에 대한 각종 해석(구조, 수리해석등)에 의한 안전율을 계산하여 각각의 안전성평가 기준에 따른 안전성평가 결과를 결정 후 위의 식으로 개별시설물의 안전성평가 지수를 산출한다. 또한 [표 2.45]에 제시된 안전성평가지수 범위에 따른 안전성평가 기준에 의해 개별시설물의 안전성평가 결과를 결정한다.

안전성평가 지수의 범위	안전성평가 기준	안전성평가점수	비 고
$4.5 \leq E_s \leq 5.0$	A	5	
$3.5 \leq E_s < 4.5$	B	4	
$2.5 \leq E_s < 3.5$	C	3	
$1.5 \leq E_s < 2.5$	D	2	
$1.0 \leq E_s < 1.5$	E	1	

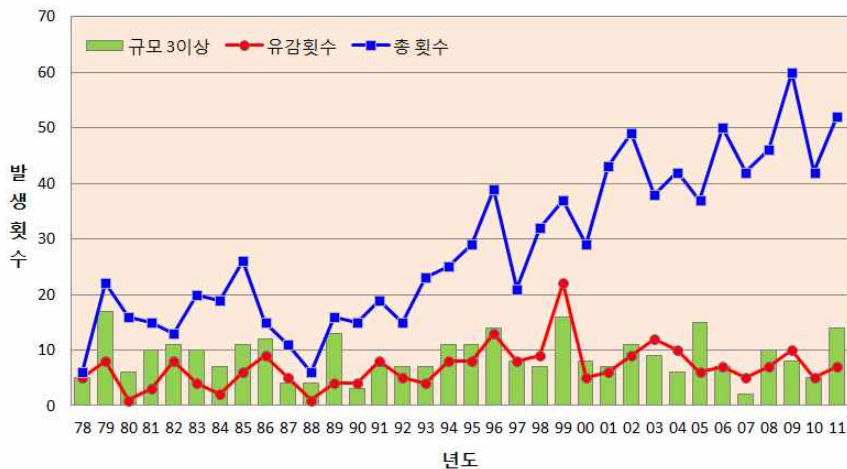
< 표 2.45 > 안전성 평가 결과 산정 방법

제5절 농업용 저수지 구조물의 내진성능 평가

1. 개 요

가. 연구 배경 및 목적

최근 중국(2008, 사천성, M8.0), 칠레(2010, Maule, M8.8), 일본(2011, 후쿠시마, M9.0) 등에서 일어난 대규모 지진에 의해 수많은 인명손실과 사회기반시설 파괴 등 사회적·경제적 피해가 발생하였다. 한반도 주변에서도 최근 지진관측횟수가 지속적으로 증가하고 있으며, 속리산 지진 등과 같은 인명 및 재산 피해를 일으킬 가능성이 있는 규모 5.0 이상의 지진이 수차례 관측됨에 따라 우리나라가 비록 판 경계에서는 떨어져 있지만 결코 지진의 안전지대가 아니라는 의견이 대다수이다.



<그림 2.45> 우리나라 지진발생 추이(1978년~2011년)

국내에서는 지진의 위험으로부터 국민의 생명과 재산을 보호하기 위하여 지진재해대책법(2008)을 제정하고 31개 법정시설물에 대해서 신설 시설물 뿐만 아니라 기존 시설물에 대해서도 지진재해경감을 위한 매 5년마다 내진보강기본계획을 수립하여 내진보강사업을 추진하도록 규정하고 있다. 「농어촌정비법」에 따른 농업생산기반시설은 국민의 먹거리를 생산하는 농업용수의 저수 및 공급을 담당하는 중요 시설물로 지진 안정성을

확보하지 못하면 생산과 경제활동에 미치는 영향이 매우 크다.

신설 농업생산기반시설은 「농업생산기반정비사업계획설계기준」의 내진설계를 적용하여 충분한 내진 안전성을 확보하도록 하고 있으며, 내진설계가 적용되지 않은 기존 기반시설에 대해서는 한국농어촌공사에서 내진보강대책을 마련하여 단계적으로 내진보강을 수행하고 있으나, 대상시설물이 저수지 제체와 취수탑에 국한되며, 대부분의 부속시설에 대해서는 아직 보강대책이 마련되어 있지 않은 실정이다. 또한 기존 저수지 부속시설에 대한 내진 안전성 검토에 필요한 기준 및 절차, 평가방법 등이 명확히 규정된 기준이나 지침이 아직 마련되지 않아 내진성능평가를 수행하는 엔지니어에 따라 적용 기준 및 평가방법이 서로 상이한 실정이다.

이에 본 과업에서는 “농업용 저수지 구조물의 내구성 및 내하력평가 시스템 개발” 연구의 일환으로써, 농업용 저수지 시설물의 부속시설 중 콘크리트 구조물, 즉 취수탑, 취수터널, 여·방수로 및 연락교량 등에 대하여 통일된 내진 안전성 평가를 수행할 수 있도록 적용기준 및 평가방법에 관한 타당성 검증을 수행하여, 향후 부속시설의 내진성능평가 수행에 필요한 지표와 이의 활용방안을 마련하고자 한다.

2. 저수지 구조물 내진성능평가 항목 및 지표 결정

저수지 구조물의 내진성능평가를 위한 항목과 지표를 결정하기 위하여 관련 내진설계기준을 검토하였다. 관련 내진설계기준은 「내진설계기준연구 (Ⅱ) (건설교통부, 1997)」, 「국가내진성능기준(안) (소방방재청, 2009)」, 「농업생산기반정비사업계획설계기준 : 필댐편 (농림부, 2002), 관수로편 (농림수산식품부, 2009)」, 「상수도시설 내진 설계기준 마련을 위한 연구(환경부, 1999)」, 「상수도시설기준(환경부, 2010)」 및 「댐설계기준 (국토해양부, 2011)」 등이다.

가. 내진성능평가를 위한 항목 및 지표 검토

1) 내진성능수준

내진설계기준에서는 공통적으로 기능수행수준과 붕괴방지수준의 2가지 내진성능수준을 만족하는 설계를 하도록 규정하고 있으며, 이에 대한 농업생산기반정비사업계획설계기준(관수로편)의 정의는 다음과 같다.

- ① 기능수행수준 : 설계지진 발생 후에 농업생산기반시설물들이 허용범위 이내의 변위가 발생하며 국부적인 보수를 통해 기능수행에 문제가 발생되지 않는 수준의 성능수준을 말한다.
- ② 붕괴방지수준 : 설계지진 작용시 구조물이나 시설물에 심각한 변형이나 손상이 발생할 수는 있지만 그 수준과 범위는 농업생산기반시설물이 붕괴되거나 또는 손상으로 인하여 대규모 피해가 초래되는 것을 방지할 수 있는 성능수준을 말한다.

2) 내진등급

시설물의 내진등급은 상위기준인 「내진설계기준 (Ⅱ) (건설교통부, 1997)」에서는 시설물의 중요도에 따라 내진Ⅱ등급, 내진Ⅰ등급 및 내진특등급의 3가지 등급으로 분류하고 있으나, 저수지(댐) 구조물에서는 내진Ⅰ등급과 내진특등급의 2가지 등급으로 분류하고 있다(<표 2.46> 참조).

<표 2.46> 댐(저수지)의 내진등급

내진등급	구 분
내진특등급댐	<ul style="list-style-type: none"> · 사회, 안보, 경제적인 측면에서 특별한 댐으로 발주처가 지정하는 댐 · 법에 의하여 다목적 댐으로 분류한 댐 · 총저수량 2,000만 m³ 이상인 댐
내진Ⅰ등급댐	높이 15m 이상이고 총저수량 50만 m ³ 이상인 댐

3) 설계지반운동

상위기준에서는 설계지반운동 수준을 다음과 같이 분류하며, 시설물별 내진설계기준은 이를 따르고 있다.

- ① 평균재현주기 50년 지진지반운동 (5년내 초과확률 10%)
- ② 평균재현주기 100년 지진지반운동 (10년내 초과확률 10%)

- ③ 평균재현주기 500년 지진지반운동 (50년내 초과확률 10%)
- ④ 평균재현주기 1000년 지진지반운동 (100년내 초과확률 10%)

또한, 지진재해도 해석결과를 토대로 우리나라의 지진구역을 <표 2.47>와 같이 설정하였다. 평균재현주기 500년의 지진지반운동에 해당하는 각 지진구역별 지진구역계수는 구역 I 은 0.11, 구역 II는 0.07이다.

<표 2.47> 지진구역 구분

지진구역	행정구역	
I	시	서울특별시, 인천광역시, 대전광역시, 부산광역시, 대구광역시, 울산광역시, 광주광역시
	도	경기도, 강원도남부 ⁽¹⁾ , 충청북도, 충청남도, 경상북도, 경상남도, 전라북도, 전라남도 북동부 ⁽²⁾
II	도	강원도 북부 ⁽³⁾ , 전라남도 남서부 ⁽⁴⁾ , 제주도

주 : (1) 강원도 남부 : 영월, 정선, 삼척시, 강릉시, 동해시, 원주시, 태백시
 (2) 전남 북동부 : 장성, 담양, 곡성, 구례, 장흥, 보성, 여천, 화순, 광양시, 나주시, 여천시, 여수시, 순천시
 (3) 강원도 북부 : 홍천, 철원, 화천, 횡성, 평창, 양구, 인제, 고성, 양양, 춘천시, 속초시
 (4) 전남 남서부 : 무안, 신안, 완도, 영광, 진도, 해남, 영암, 강진, 고흥, 함평, 목포시

평균재현주기별 최대 유효 지반가속도의 중력가속도에 대한 비를 의미하는 위험도계수는 <표 2.48>과 같다.

<표 2.48> 위험도계수(평균재현주기 500년 설계지진을 기준)

재현주기	500년	1,000년	2,400년
위험도계수	1.0	1.4	2.0

4) 내진성능목표

저수지(댐) 구조물의 내진성능목표에 따른 설계지진은 기타 시설물의 내진성능목표에 따른 설계지진과는 차이가 있으며, 이를 <표 2.49>에 도시하였다.

<표 2.49> 저수지(댐)의 내진성능목표에 따른 설계지진

성능목표		기능수행	붕괴방지
평균재현주기			
설계지진 (재현주기, 년)	50	I 등급(II 등급)	-
	100	특등급(I 등급)	-
	500	-	I 등급(II 등급)
	1000	-	특등급(I 등급)

()안의 내진등급은 기타 시설물의 내진등급 임.

나. 내진성능수준에 따른 평가방법 검토

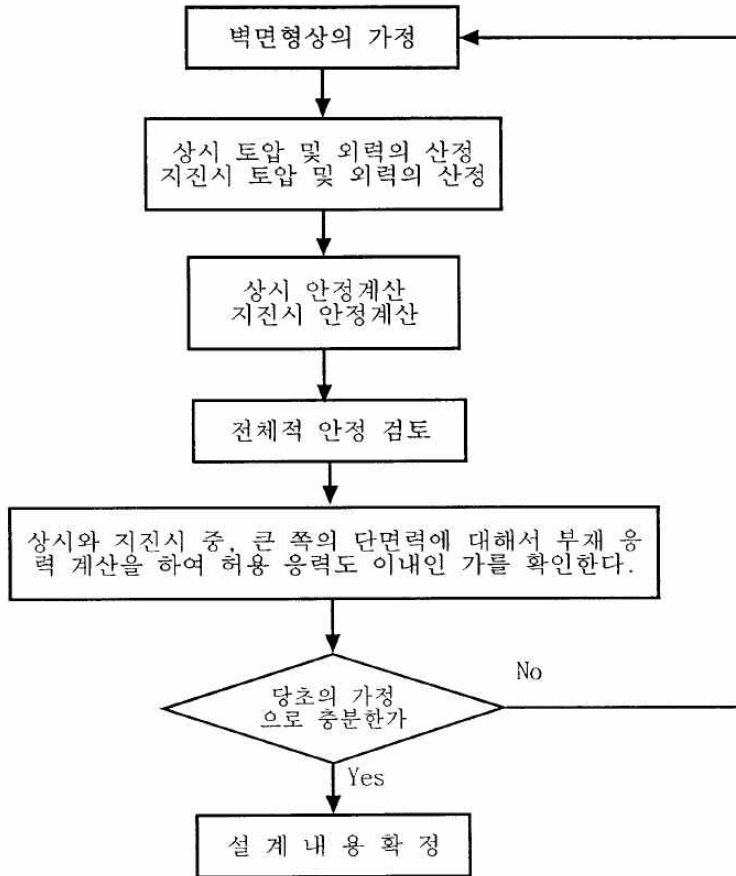
1) 평가방법

관련 내진설계기준에서는 구조물의 특성과 지반조건 및 중요도에 따라 등가정적하중법, 응답변위법으로 기본 평가를 하고, 필요시 응답스펙트럼 방법, 동적해석법(시간이력해석법, 진동수 영역해석)등의 동적 내진안정성 평가를 병행해야 한다고 규정하고 있다. 또한 동적해석법에 대한 상세한 내용은 「댐설계기준(국토해양부, 2011)」 및 「상수도시설기준(환경부, 2010)」에 자세히 수록하고 있다.

2) 평가절차 및 유의사항

「상수도시설 내진 설계기준 마련을 위한 연구(환경부, 1999)」에서는 저수지 구조물의 부속시설과 관련된 시설물의 내진설계 절차 및 유의사항을 제시하고 있다.

부속시설 중 옹벽의 내진설계절차는 <그림 2.46>과 같다.



<그림 2.46> 옹벽의 내진설계 순서도

부속시설별 내진설계시 유의사항은 다음과 같다.

- ① 옹벽 : 옹벽의 내진설계는 옹벽에 작용하는 동토압, 동수압 및 옹벽 자중의 관성력을 고려하여 등가정적해석법으로 실시한다. 일반 옹벽에서는 지진에 의한 하중의 증가는 평상시의 설계에서 적용하는 안전율을 고려할 때 내진설계는 시행하지 않아도 좋다. 그러나 높이가 8m 정도는 넘는 옹벽, 또는 옹벽 붕괴가 부근에 막대한 손해를 주거나 복구가 지극히 곤란한 옹벽에 대해서는 내진설계를 시행할 필요가 있다.
- ② 압거, 공동구 및 수직갱
 - * 압거, 공동구 및 수직갱은 원칙적으로 철근콘크리트구조로 한다.

- * 지진하중에 대한 횡단면 내진설계는 응답변위법을 사용하는 것을 기본으로 한다. 암거 및 공동구가 연약지반부나 지반조건의 변화가 현저한 위치에 놓이게 되는 경우는 종방향의 내진설계도 합리적으로 이루어져야 한다.

③ 취수탑

- * 취수탑 및 지상수조는 구조물의 종류, 중요도, 구조형태, 주변지반의 특성 등에 적합한 지진해석모델과 지진응답해석방법에 의하여 결정된 지진력에 대하여 앞의 5.5.1 항(해석 및 설계에 대한 일반 규정)의 요건이 만족되도록 설계되어야 한다.
- * 지진응답결정을 위한 해석방법은 원칙적으로 선형해석방법을 사용하며, 필요한 경우 비선형거동의 영향을 고려할 수 있다.
- * 수직방향지진성분에 의한 영향은 무시할 수 있다.
- * 취수탑 및 지상수조는 철근콘크리트, 프리스트레스트 콘크리트 혹은 강재구조로 건설하는 것을 원칙으로 한다.
- * 취수탑 및 지상수조의 내진설계는 구조물의 만수시, 공수시 및 중간정도 찬 경우에 대하여 각각 구조물의 응력과 변형도에 대한 구조적 건전성 및 안정성에 대하여 검토되어야 한다.

3. 저수지 구조물 내진성능평가 기본방안

가. 기본 요건

이 방안은 농업생산기반시설 중 저수지 구조물과 그 부속시설물(이하 저수지 구조물)의 내진성능평가에 필요한 조건을 규정한 것으로서 저수지 구조물의 중요도에 따라 지진에 의한 피해를 제어하여 기능회복과 안전성을 확보하는 것을 기본개념으로 한다.

또한, 이 방안은 저수지 구조물 중 철근콘크리트 구조물, 즉 취수탑, 취수터널 및 여·방수로 옹벽 등을 대상으로 한다. 이 방안이 적용되지 않은 시설물에 대하여 내진성능평가를 수행할 경우는 관련 기준 또는 지방서에 따른다.

나. 내진성능목표와 내진등급

1) 내진성능수준과 목표

저수지 구조물의 내진성능평가 지표 중 하나로 활용되는 내진성능목표에 대한 관련 기준 및 연구에서는 내진성능수준을 1) 기능수행수준과 붕괴방지수준, 또는 2) 붕괴방지수준만으로 규정하고 있다.

대상 구조물을 저수지 구조물과 관련 부속시설물로 위주로 국한하고, 기존의 관련 기준과 연구결과를 만족하며, 가장 최근에 공인된 내진설계기준을 반영할 때, 「댐 설계기준(국토해양부, 2011)」과 「농업생산기반정비사업계획설계기준 : 필댐편(농림부, 2002)」에서 제시한 다음의 내진성능수준과 목표가 합당할 것으로 사료된다.

“이 방안에서 제시된 방법으로 내진성능평가를 할 경우에는 기능수행수준과 붕괴방지 수준을 만족하는 것으로 본다.”

<표 2.50> 저수지 구조물의 내진성능목표와 설계지진의 재현주기(안)

내진등급	붕괴방지수준	
	I등급	특등급
평균재현주기(년)	500	1000

2) 내진등급

관련 기준 및 연구에서는 내진성능등급에 대한 분류를 1) 특등급, I등급, II등급, 2) I등급, II등급, 또는 3) 특등급, I등급으로 규정하고 있다. 내진등급에 대한 관련 기준 및 연구를 취합하여 정리한 결과는 다음과 같다.

저수지 구조물과 관련 부속시설물로 국한할 때, 지진재해대책법 시행령 제10조 「농어촌정비법」에 따른 농업생산기반시설의 정의와 「농업생산기반정비사업계획설계기준-필댐편(농림부, 2002)」에서 제시한 다음의 내진등급과 적용대상이 합당할 것으로 사료된다.

<표 2.51> 저수지 구조물의 내진등급과 설계지진(안)

내진등급	정의	평균재현주기(년)
특등급	○ 사회, 안보, 경제적인 측면에서 특별한 저수지로 발주처가 지정하는 저수지 ○ 총저수량 2000만 m ³ 이상인 저수지	1,000
I등급	○ 높이 15m 이상이고 총저수량 50만 m ³ 이상인 저수지	500

3) 설계지반운동

① 일반사항

* 설계지반운동은 부지 정지작업이 완료된 지표면에서의 자유장 운동으로 정의한다.

* 국지적인 토질조건, 지질조건과 지표 및 지하 지형이 지반운동에 미치는 영향이 고려되어야 한다.

* 기본적인 지진재해도는 보통암 지반을 기준으로 평가한다.

* 설계지반운동은 흔들림의 세기, 진동수 성분 및 지속시간의 세 가지 측면에서 그 특성이 잘 정의되어야 한다.

* 설계지반운동은 수평 2축방향으로 정의되며 그 세기와 특성은 동일한 것으로 가정할 수 있다.

* 지진에 의한 수직방향의 영향이 댐 안정에 영향을 주게 되는 경우에는 이 방향의 지진력을 고려하며 그 크기는 수평방향의 지반운동의 1/2로 본다.

* 댐의 내진설계를 할 때 댐 상류의 저수지 수위 및 수위의 변화상태에 따라 댐 안전에 가장 불리한 방향으로 가진(加震)되는 경우를 상정하고 안정 해석을 한다. 이때 해당 저수지 수위의 발생빈도가 특히 낮은 경우에는 그때의 적용 지진력을 조정할 수 있다.

② 설계지반운동수준

- 설계지반운동의 수준은 다음과 같이 분류한다.

* 평균재현주기 100년 지진지반운동 (10년내 초과확률 10%)

* 평균재현주기 500년 지진지반운동 (50년내 초과확률 10%)

* 평균재현주기 1000년 지진지반운동 (100년내 초과확률 10%)

- 지진재해도 해석 결과에 근거하여 우리나라의 경기도와 강원도 남쪽을 두 개의 지진구역으로 설정한다. 각 지진구역에서의 평균재현주기 500년 지진지반운동에 해당하는 구역계수(Z)는 <표 2.52>에 수록된 바와 같다.

- 평균재현주기별 최대유효지반가속도의 비를 의미하는 위험도계수(I)가 <표 2.53> 주어져 있다.

<표 2.52> 지진구역계수 (평균재현주기 500년에 해당)

지진구역	I	II
구역계수, Z (g값)	0.11	0.07

<표 2.53> 위험도계수

평균재현주기 (년)	100	500	1000
위험도계수, I	0.57	1	1.4

<표 2.54> 지반의 분류

지반종류	지반종류의 호칭	지표면 아래 30m 토층에 대한 평균값		
		전단파속도(m/s)	표준관입시험(N치 ⁽¹⁾)	비배수전단강도(kPa)
S_A	경암지반	1,500 초과	-	-
S_B	보통암지반	760에서 1,500		
S_C	매우 조밀한 토사지반 또는 연암지반	360에서 760	> 50	> 100
S_D	단단한 토사지반	180에서 360	15에서 50	50에서 100
S_E	연약한 토사지반	180 미만	< 15	< 50
S_F	부지 고유의 특성평가가 요구되는 지반			

주 : (1) 비점착성 토층만을 고려한 평균 N치

③ 지반의 분류

- 국지적인 토질조건, 지질조건과 지표 및 지하 지형이 지반운동에 미치는 영향을 고려하기 위하여 지반을 <표 6.3.5>에서와 같이 S_A , S_B , S_C , S_D , S_E , S_F 의 6종으로 분류한다.
- 지반종류 S_F 는 부지고유의 특성 조사가 요구되는 다음 경우에 속하는 지반을 일컫는다.

* 액상화가 일어날 수 있는 흙, 키클레이와 매우 민감한 점토, 붕괴될 정도로 결합력이 약한 붕괴성 흙과 같이 지진하중 작용시 잠재적인 파괴나 붕괴에 취약한 지반

- * 이탄 또는 유기성이 매우 높은 점토지반
- * 매우 높은 소성을 갖는 점토지반
- * 층이 매우 두꺼우며 연약하거나 중간 정도로 단단한 점토

④ 설계지반운동의 특성 표현

- * 설계지반운동의 특성은 표준설계응답스펙트럼으로 표현한다.
- * 5% 감쇠비에 대한 표준설계응답스펙트럼은 <그림 2.47>에 정의되어 있다. 5% 이외의 감쇠비에 대해서는 <표 2.55>의 감쇠보정계수를 곱하여 사용한다.

* <그림 2.47>에서 표준설계응답스펙트럼의 결정을 위해 요구되는 단주기지진계수(C_a)와 장주기지진계수(C_v)로 구분하여 <표 2.56>에 지반종류별로 지진구역별로 각각 주어져 있다.

* 설계지반운동의 수준은 가속도계수로 표현하고, 가속도계수는 지진구역과 지반종류에 따라 구분하여 결정한다.

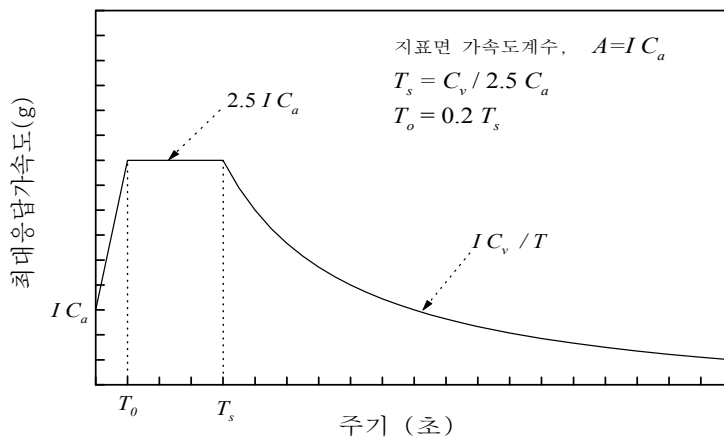
* 가속도계수 (A)는 위험도계수 (I)와 단주기지진계수 (C_a)의 곱으로서 다음과 같이 결정한다.

$$A = IC_a$$

* 모든 점에서 똑같이 가진하는 것이 합리적일 수 없는 특징을 갖는 구조물에 대해서는 지반운동의 공간적 변화모델을 사용해야 한다.

* 가속도 시간이력

- ㉠ 지반가속도의 시간이력으로 지반운동이 표현될 수 있다.
- ㉡ 공간적인 모델이 필요할 때 지반운동은 동시에 작용하는 3개의 가속도 성분으로 구성되어야 한다.
- ㉢ 필요시에는 인공가속도 시간이력이 사용될 수 있다.
- ㉣ 인공가속도 시간이력은 표준설계응답스펙트럼과 잘 부합되도록 생성되어야 한다.
- ㉤ 지반운동의 장주기 성분이 구조물의 거동에 미치는 영향이 중요하다고 판단될 경우에는 지진원의 발진기구 특성과 국지적인 영향을 고려하여 인공가속도 시간이력을 생성하여야 한다.
- ㉥ 인공가속도 시간이력의 지속시간은 지진의 규모와 발진기구특성, 전파경로 및 부지의 국지적인 조건이 미치는 영향을 고려하여 합리적으로 결정되어야 한다.
- ㉦ 2방향 이상의 시간이력을 동시에 고려할 경우, 각 직교방향의 인공가속도시간이력 상호간에는 통계적 독립성이 유지되어야 한다.



<그림 2.47> 표준설계응답스펙트럼 (감쇠비 5%)

<표 2.55> 감쇠보정계수

감쇠비(%)	0.5	1	2	3	5	7	10	20
감쇠보정계수	1.88	1.62	1.35	1.20	1.00	0.87	0.73	0.46

주 : 1) 위에 표시되지 않은 감쇠비에 대한 감쇠보정계수는 선형보간하여 사용한다.
 2) 주기 T_0 이후의 구간에 대하여 적용하고, $T=0$ 에서 T_0 구간은 선형보간 한다.

<표 2.56> 지진계수 C_a 및 C_v

지 반 종 류	C_a (단주기)		C_v (장주기)	
	I 구역	II 구역	I 구역	II 구역
S_A	0.09	0.05	0.09	0.05
S_B	0.11	0.07	0.11	0.07
S_C	0.13	0.08	0.18	0.11
S_D	0.16	0.11	0.23	0.16
S_E	0.22	0.17	0.37	0.23

4) 내진설계방법

① 일반사항

* 구조물의 내진설계는 구조물의 지지조건 및 구조특성 등을 고려하여 그에 적합한 내진설계방법에 따라 실시하여야 한다.

* 구조부재를 설계할 때는 기본적으로 강도설계법 또는 한계상태설계법을 적용하고, 댐설계기준 등에서 제시하는 설계법 중에서 이와 동등 이상의 성능을 확보할 수 있다고 인정하는 다른 구조설계법을 적용하여 수행할 수 있다.

② 지진해석방법

* 구조물의 지진해석방법은 대상 구조물의 구조특성, 중요도 및 손상 형태 등의 제반조건을 고려하여 선택하고, 다음의 지진해석방법을 사용할 수 있다.

㉠ 등가정적해석법

㉡ 동적해석법

㉔ 응답변위법

㉕ 발주자가 인정하는 검증된 정밀 해석법

* 부재의 설계지진력은 기본적으로 등가정적해석법과 응답변위법을 적용하여 구하고, 보다 진보된 설계를 원하는 경우에는 응답스펙트럼해석법 또는 동적 해석법(시간이력해석법 또는 진동수 영역해석법)을 통하여 구할 수 있다.

③ 설계거동한계

- * 구조물의 해석은 2차원 해석을 원칙으로 하지만 월류부 피어, 엘리베이터 또는 수압관(penstock) 등이 포함된 특이 단면부에는 필요시 3차원 해석을 실시하여 검토한다.
- * 구조물은 지진이 발생되더라도 저수기능이 유지되어야 하며 보수 및 용수 공급이 가능해야 한다. 이를 위해 여수로 및 부대시설물에 대해서도 내진설계가 이루어져야 한다. 이때, 권양기 및 현장조작반은 강체 거동하는 것으로 가정하여 기초앵커의 강도를 검토하며, 관리교는 낙교의 가능성에 대해 검토한다.
- * 이음부의 열림 또는 국부적 파괴로 인해 통제 불가능한 유출이 발생하지 않아야 한다.
- * 구조물은 들림을 고려한 미끄러짐과 전도에 대하여 소정의 안전율을 유지한다.
- * 지진시 발생하는 파랑고에 의해 댐체가 월류되거나 여수로 및 부대시설물의 기능이 장시간 정지되어서는 안 된다.
- * 구조물 기초에는 액상화가 발생해서는 안 된다.
- * 강재구조물의 발생 강도는 허용강도 이내여야 하고 콘크리트 구조물의 발생 외력은 내하력보다 작아야 한다.

④ 등가정적해석법

* 등가정적해석법은 지진력을 관성력으로 계산하여 구조물의 지진거동을 해석하는 방법을 말한다.

* 구조물에 적용하는 지진력은 작용 정하중에 대한 지진 관성력과 동수압이며 지진에 의한 저수지의 파랑고를 따로 고려할 수 있다.

* 구조물이 위치할 지점의 설계진도는 해당지역의 지진구역계수에 내진 등급별 설계지진의 평균재현주기에 따른 위험도계수, 지반계수 및 중력가속도를 곱한 값으로 한다.

* 수평지진 관성력

- ㉠ 구조물의 수평지진 관성력은 체체의 자중에 설계진도를 곱한 값으로 한다.
- ㉡ 관성력 작용점은 단면형상에 관계없이 질량의 중심이며 작용방향은 수평방향으로 하되, 구조물 안정에 불리한 방향으로 작용하는 것으로 한다.
- ㉢ 만수시의 안정해석에서는 지진 관성력이 상류측에서 하류측으로, 구조물 축에 직각방향으로 수평으로 작용하는 것으로 한다.
- ㉣ 저수지가 비어있을 경우에는 반대로 하류측에서 상류측으로 작용하는 것으로 하되, 설계진도는 소정 설계진도의 1/2을 적용해도 무방하다.
- ㉤ 구조물의 축방향으로 지진 관성력을 작용할 때도 설계진도는 구조물 축의 직각방향과 같다.
- ㉥ 수평지진에 의한 수압 증가량은 Westergaard의 공식에 의하여 구할 수 있다.

* 수직지진 관성력

- ㉦ 구조물 중량에 설계진도의 1/2로 가정한 수직설계진도를 곱한 값인 수직 관성력을 고려할 수 있다.
- ㉧ 관성력은 상하 방향 중 불리한 쪽으로 작용하는 것으로 한다.

* 지진에 의한 동수압

- ㉨ 지진력이 작용할 경우에 발생하는 수평방향 동수압은 구조물을 강체로 가정한 Westergaard의 공식에 의하여 계산하며, 동수압은 구조물의 연직면에 관성력 방향으로 수평으로 작용하는 것으로 한다.
- ㉩ 수문 등 강재구조물에서도 구조물과 같이 동수압이 작용하는 것으로 한다.

- ㉔ 수직방향 동수압은 구조물에 작용하는 물 무게에 수직 설계진도를 곱한 값으로 하여 물 무게 중심에서 관성력 방향으로 작용하는 것으로 한다.
- ㉕ 구조물 축방향의 지진력이 작용할 때 월류부 교각(pier)의 상류측은 교각 좌·우 측면에 동수압을 모두 관성력 방향으로 작용하는 것으로 한다.
- ㉖ 동수압 계산시 적용하는 수심은 상시만수위에서 퇴사부의 저면의 기초지반의 지반고까지로 하여 퇴사부위에서도 지진에 의한 동수압이 작용하는 것으로 하되, 퇴사압에 대한 지진의 영향은 고려하지 않는다.

⑤ 동적해석법

* 동적해석법은 지진력을 구조동역학 이론으로 평가하여 구조물의 지진 거동을 해석하는 방법을 말한다.

* 여수로 및 부대시설물의 응답은 선형 및 비선형 거동특성을 고려할 수 있는 해석법을 사용하여 해석하고, 입력지반운동에는 구조물의 지진응답 영향을 고려한다.

* 유체-구조물-지반 상호작용 해석시 유체의 압축성, 구조물의 유연성과 지반의 변형성을 고려한다. 이때, 보수성이 입증된다면 유체는 비압축성으로 모델링될 수 있다.

⑥ 응답변위법

응답변위법이란 지진 발생시에 생기는 지반 변위에 의한 지진 토압과 지중 구조물과 주변지반 관계에서의 경계조건을 적절히 모델링하여 정적으로 계산하는 방법을 말한다.

5) 하중조합

- ① 구조물을 내진설계할 때 다음에 제시된 하중계수와 하중조합을 모두 고려하여 해당 구조물에 작용하는 최대 요구강도에 대하여 만족하도록 설계하여야 한다.

$$U=1.2D+1.0E+1.0L+0.2S$$

$$U=0.9D+1.0E+1.6H$$

여기서,

U = 계수하중 또는 이에 의해서 생기는 요구강도

D = 고정하중 또는 이에 의해서 생기는 단면력

E = 지진하중 또는 이에 의해서 생기는 단면력

L = 활하중 또는 이에 의해서 생기는 단면력

S = 적설하중 또는 이에 의해서 생기는 단면력

H = 흙, 지하수 또는 기타 재료의 횡압력에 의한 수평방향 하중, 또는 이에 의해서 생기는 단면력

② 규정된 하중조합에서 고정하중 외의 하중에 대해서는 하나 또는 그 이상의 하중이 작용하지 않을 경우도 검토하여야 한다.

6) 내진설계절차

① 구조물의 내진설계의 절차는 다음과 같다.

- * 구조물의 분류
- * 구조형식 선정
- * 지반조건 검토
- * 지진해석방법 선정
- * 지진하중 선정
- * 구조물의 체원 결정
- * 안전성 평가

② 구조물의 체원 결정은 구조설계로서 부재의 단면 재질과 체원을 결정한다.

③ 안전성 평가는 구조설계의 안전성 검토, 구조시스템의 변위 검토 및 기초부의 안정성 평가를 포함한다.

4. 기존 부속시설의 내진성능 평가방법 타당성 검토

가. 부속시설 관련 내진설계기준 검토

기존 저수지 시설물의 부속시설에 대한 내진 안전성 검토시 필요한 기준 및 절차, 적용방법 등을 명확히 규정한 기준이나 지침이 아직 마련되어 있지 않아 기존 부속시설의 내진 안전성 검토시 「내진설계기준연구(Ⅱ)」(건설교통부, 1997), 「농업생산기반정비사업계획설계기준」(농림부), 「댐 설계기준」(국토해양부, 2011), 「콘크리트구조설계기준」(건설교통부, 2007), 「상수도시설기준」(환경부, 2010), 「기존 댐의 내진성능 평가 및 향상요령」 및 「기존 상수도의 내진성능 평가 및 향상요령」(한국시설안전공단, 2004) 등을 준용하여 평가를 수행하고 있어 내진성능평가를 수행하는 엔지니어에 따라 평가방법이 서로 상이한 실정이다.

기존 저수지 구조물 부속시설의 내진안전성 평가에 적용되는 기준 및 평가방법의 타당성을 검증하기 위해서 우선 구조물별 준용되고 있는 내진설계기준의 내용 중 부속시설과 관련된 내용을 검토하여 본문에 간략히 기술하였으며, 보다 상세한 사항은 부록의 ‘내진설계기준 검토’에 기술하였다.

1) 농업생산기반정비사업계획설계기준 : 필댐편(2002)

농림부에서 2002년에 개정한 「농업생산기반정비사업계획설계기준 : 필댐편」의 4.9.5절에서는 ‘필댐 및 부속시설의 내진성 확보를 위해 필요한 최소 요구조건을 만족하도록 신설되는 높이 15 m 이상인 총저수량 50만 m³ 이상의 댐 및 부속시설에 대하여 내진설계를 적용한다.’라고 내진성능을 확보하는데 필요한 최소 요구조건을 만족하도록 내진설계를 수행하라고 기술되어 있으나, 본문에는 필댐 규모에 따라 내진설계 방법 및 설계

진도 등을 산정하는 기준은 제시되어 있지만 부속시설(즉, 취수탑, 취수터널, 여·방수로 옹벽, 연락교량 등)에 대한 명확한 기준은 제시되어 있지 않은 실정이다. 본문 중 4.11절 취수시설의 구조설계 기준에서는 취수탑의 수리 및 구조설계시 지진에 대한 안전도를 검토하도록 기술하고 있으나 상세 기준은 제시되어 있지 않다.

댐 내진설계 방법은 정역학적 방법으로 해석하는 진도법을 기본으로 하고 있으나, 이 방법은 간편하고 안정적인 해석결과를 얻을 수 있는 장점이 있으나 댐의 동적 특성을 고려하지 않고 지반과 구조물의 상호작용 관계인 설계진도와 최대 응답 가속도의 관계가 명백하지 않다. 이에 선진국에서는 지진과에 의한 응답을 구하여 동적인 과동으로 해석하는 동역학적 안정해석 방법이 많이 개발되어 설계에 적용하고 있으나, 우리 나라의 경우 빈약한 지진 해석자료 및 연구 미흡으로 여러 가지 불명확한 사항에 대한 가정이 불가피하여 설계기준으로 동적 해석방법을 댐의 내진설계기준에 규정하기에는 무리가 따른다.

하지만 최근 10년간 내진설계 관련기술의 급속한 발달로 동적 해석방법도 크게 발달하여, 교량 등의 설계기준에서는 이미 동적 해석법을 채택하고 있다.

2) 댐설계기준(2002)

댐 설계기준(2011)의 제12장 내진설계편에는 댐 부속시설에 대한 정의와 내진성능을 확보하기 위해서 필요한 기준을 규정하고 있다.

설계진도 산정시 지진구역 II에 위치한 다목적 댐 및 동역학적 검토가 필요한 100m 이상의 높이를 가진 댐은 지진구역 I의 구역계수를 채택하도록 하였으며, 최소 0.1g 이상을 취하도록 규정하고 있다. 또한 기초지반 분류에 따른 지반계수의 정의가 포함되어 있다.

여수로 및 부대시설물에 대해서는 내진설계가 이루어져야 하며, 권양기 및 현장조작반은 강체 거동하는 것으로 가정하여 기초앵커의 응력을 검토하고, 관리교는 낙교의 가능성에 대해 검토하도록 규정하고 있다.

댐 내진설계 방법은 정역학적 방법으로 해석하는 진도법을 기본으로 하고 있다. 이 방법은 간편하고 안정적인 해석결과를 얻을 수 있는 장점이 있으나 댐의 동적 특성을 고려하지 않고 지반과 구조물의 상호작용 관계인 설계진도와 최대 응답 가속도의 관계가 명백하지 않다. 이에 선진국에

서는 지진파에 의한 응답을 구하여 동적인 과동으로 해석하는 동역학적 안정해석 방법이 많이 개발되어 설계에 적용하고 있으나, 우리 나라의 경우 빈약한 지진 해석자료 및 연구 미흡으로 여러 가지 불명확한 사항에 대한 가정이 불가피하여 설계기준으로 동적 해석방법을 댐의 내진설계기준에 규정하기에는 무리가 따른다.

따라서 종래의 정역학적 설계 방법인 진도법을 내진설계의 기본으로 규정하고, 추가로 진도법으로 설계된 댐체 단면에 대한 상세검토가 필요한 경우(댐 높이가 매우 높은 경우 등)에는 동역학적 해석 방법에 의한 검토를 수행하도록 하였다.

3) 상수도시설기준(2010)

환경부에서 2010년에 개정된 「상수도시설기준」의 ‘제10장 내진설계’ 편에는 상수도시설의 내진성능을 확보하기 위해서 필요한 최소 기준을 규정하고 있다.

이 시설기준은 「상수도시설 내진 설계기준 마련을 위한 연구」(환경부, 1999) 보고서를 따르고 있으며, 성능수준은 붕괴방지수준에 대해서만 만족하도록 규정하고 있다. 또한 내진등급을 내진 I 등급(재현주기 1,000년)과 내진 II 등급(재현주기 500년)으로 분류하고 있다.

설계지반운동의 특성은 표준설계응답스펙트럼(지상구조물은 가속도응답스펙트럼, 지중구조물은 속도응답스펙트럼)으로 감쇠비를 고려하여 표현하며, 지반종류에 따라 지진계수 C_a , C_v 를 제시하였으며, 인공지진 가속도 시간이력 생성시 주요사항을 제시하였다.

지진해석 및 설계방법에 대한 기본적인 사항을 기술하였다. 이때, 대상으로 하는 구조물 또는 배관의 구조적 특성과 지반조건에 따라 등가정적 해석법, 응답변위법, 응답스펙트럼법, 동적해석법 중 시설물별 관련기준에 적합한 방법을 따르도록 기술하고 있다.

4) 상수도시설 내진 설계기준(2000)

「상수도시설 내진 설계기준(2000)」은 수자원공사에서 시행하는 광역상수도 시설 중 주요 수구조물로서 지진에 따른 시설물 손괴시 응급복구가 불가능하여 장기간 급수중단을 초래할 수 있는 시설에 대해 적용하도

록 그 범위를 정하고 있다. 또한, 부속시설물별 적용방법과 동수압 산정방법, 지진계수 C_u 및 위험도계수 I 결정방법 등에 대해 상세히 언급하고 있다.

5) 콘크리트구조설계기준(2007)

건설교통부에서 2007년에 개정된 「콘크리트구조설계기준」에서는 ‘제21장 내진설계 특별 고려사항’ 및 ‘부록Ⅱ 내진설계를 위한 대체 고려사항’편에 철근콘크리트 부재의 설계 및 상세 규정에 대한 특별 사항을 규정하고 있으며, 지진운동에 의해 발생된 힘에 저항하는 일체식 철근콘크리트 골조에만 적용하여야 한다고 제한하고 있다. 또한 ‘제21장 내진설계 특별 고려사항’편에서는 보, 기둥, 보가 없는 2방향 슬래브와 같은 골조에 대한 요구조건을 규정하고 있으며, ‘부록Ⅱ 내진설계를 위한 대체 고려사항’편에서는 특수모멘트골조의 휨부재, 휨과 축력을 받는 특수모멘트골조의 부재, 특수모멘트골조의 접합부, 특수철근콘크리트 구조벽체와 연결보, 구조격막과 트러스 및 기초에 대한 요구조건을 규정하고 있다.

철근콘크리트 구조물의 내진성능평가에 필요한 사항 중 철근콘크리트 관련 규정은 제21장 및 부록Ⅱ 뿐만 아니라 설계기준 본문을 전체적으로 참고할 수 있다.

6) 기존 시설물의 내진성능평가 및 향상요령

한국시설안전공단에서는 내진설계가 수행되지 않았거나, 관련기준의 강화로 인하여 내진성능평가가 필요하다고 판단되는 기존시설물(건축물, 교량, 댐, 터널, 상수도, 기초 및 지반, 제방)에 대해 내진성능을 평가하여 지진에 의해 발생할 수 있는 큰 피해를 사전에 막을 수 있도록 2004년에 「기존 시설물의 내진성능평가 및 향상요령」을 발간하여, 이를 토대로 기존 시설물의 내진성능평가 및 내진보강 업무를 수행해 왔다. 또한, 설계기준의 개정, 관련 기술의 발달 및 최근 개발된 다양한 보강기법 등의 내용을 반영하여 2011년에 건축물, 교량, 터널 3개 시설물에 대해 개정을 마쳤으며, 현재 나머지 시설물의 개정이 진행 중에 있다.

기존 저수지 구조물의 내진성능평가를 수행하는데 참고할 수 있는 요령은 「기존 댐의 내진성능 평가요령」과 「기존 상수도의 내진성능 평가요

령」 및 「기존 시설물(교량) 내진성능 평가요령」이다.

「기존 댐의 내진성능 평가요령」은 「댐 설계기준」에 기초하여 적용 범위, 내진등급 및 평가기준 지진 등을 규정하였으며, 댐체 위주로 평가절차 및 방법, 예제 등을 제시하였다. 추가로 동적해석(상세내진성능평가)을 위한 가속도 시간이력을 결정하는 방법과 사용목표수명을 고려한 지진위험도 산정방법을 제시하였다. 여기서 기존 저수지 구조물의 내진성능평가에 참고할 수 있는 내용은 여수로에 대한 간편해석과 동해석 부분으로 부록의 내진설계기준 검토에 간추려 정리하였다.

「기존 상수도의 내진성능 평가요령」은 「상수도시설 내진 설계기준 마련을 위한 연구」(환경부, 1999)와 「도시철도 내진설계기준」 등에 기초하여 상수도 시설물 중 지중에 건설된 도수 및 송수터널을 제외한 관로 시설물과 지하맨홀 구조물에 대해서만 적용하고 있다. 기존 저수지 구조물의 내진성능평가에 참고할 수 있는 내용은 지하맨홀의 내진안전성 해석 정도이나, 중첩되는 부분이 극히 일부이므로 참고만 하였다.

「댐 설계기준」(국토해양부, 2011)의 12.5.1 (나)항(본문 2.2.4 가. 2)항)에서는 관리교의 내진안전성에 대해 낙교의 가능성에 대해 검토하도록 규정하고 있다. 이에 「기존 시설물(교량) 내진성능 평가요령」(2011)의 낙교와 관련된 내용을 부록의 내진설계기준 검토에 간추려 정리하였다.

나. 기존 저수지 부속시설의 내진성능평가 현황 조사

1) 개 요

신규로 건설되는 농업생산기반시설은 「농업생산기반정비사업계획설계기준」에 규정된 내진설계 기준을 적용하여 내진성능을 확보하도록 하고 있으나, 내진설계가 적용되지 않은 기존 기반시설에 대해서는 한국농어촌공사에서 내진보강대책을 마련하여 단계적으로 내진보강을 수행하고 있으나, 대상시설물이 저수지 체체와 취수탑에 국한되며, 대부분의 부속시설에 대해서는 아직 보강대책이 마련되어 있지 않은 실정이다.

또한, 기존 저수지 시설물의 부속시설에 대한 내진 안전성 검토시 필요한 기준 및 절차, 적용방법 등을 명확히 규정한 기준이나 지침이 아직 마련되어 있지 않아 기존 부속시설의 내진 안전성 검토시 「내진설계기준연

구(Ⅱ)」, 「농업생산기반정비사업계획설계기준」, 「댐 설계기준」, 「콘크리트구조설계기준」, 「상수도시설 내진 설계기준」, 「기존 댐의 내진 성능평가 및 향상요령」, 「기존 상수도의 내진성능평가 및 향상요령」 등을 준용하여 평가가 이루어지고 있어 내진성능평가를 수행하는 엔지니어에 따라 평가방법이 서로 상이한 실정이다.

본 절에서는 내진설계가 수행되지 않은 기존 저수지 시설물의 부속시설에 대해 내진 안전성 평가가 수행된 시설물을 검토하여 부속시설의 내진 안전성 평가에 적용된 기준 및 방법의 현황 조사를 실시하였다. 다만, 현황 조사는 내진성능 평가방법이 합리적이라고 판단되는 저수지 시설물의 부속시설에 대해 실시하였다.

또한, 저수지 구조물과 유사한 구조물의 내진안전성 평가 기준 및 방법의 비교를 위해 기존 댐 구조물의 내진안전성 평가에 대한 현황 조사도 추가로 실시하였다.

2) 기존 취수탑의 내진안전성 평가 현황 분석

내진설계가 수행되지 않은 기존 저수지(댐) 시설물의 정밀안전진단 자료를 검토하여 부속시설에 대하여 내진 안전성 평가를 수행한 시설물을 조사하였다. 부속시설 중 취수탑만 내진 안전성 평가가 이루어 졌으며, 8개 취수탑에 대해 부록에 요약/정리하였다.

조사된 저수지(댐) 시설물의 내진등급은 모두 내진특등급으로 산정되며, 부속시설인 취수탑은 대부분이 한단계 낮은 내진 I 등급으로 산정하여 내진안전성 평가를 수행하였다(<표 2.57>). 또한 저수지 부속시설은 지진시 작동을 중지하므로 붕괴방지수준에 대해서만 검토하였다.

<표 2.57> 기존 저수지(댐) 및 취수탑의 내진등급 분석(붕괴방지수준)

시설물명	저수지(댐) 시설물			취수탑				
	총저수량 (만m ³)	높이 (h, m)	내진 등급	높이 (H, m)	내경 (D, m)	H/D	내진 등급	재현 주기
탑정저수지	3,161	17.80	특등급	14.5	5.0	2.90	I 등급	500년
경천저수지	2,560	22.72	특등급	20.0	4.0	5.00	I 등급	500년
대아저수지	5,528	55.00	특등급	43.0	6.0	7.17	I 등급	500년
청천저수지	2,080	23.00	특등급	18.0	3.0	6.00	I 등급	500년
백곡저수지	2,175	27.2	특등급	26.9	5.0	5.38	I 등급	500년
하동저수지	3,120	58.6	특등급	40.6	5.0	8.12	특등급	1,000년
나주댐	9,120	31.0	특등급	26.0	5.0	5.20	I 등급	500년
안동다목적댐	124,800	83.0	특등급	56.5	4.5	12.56	I 등급	500년

※ 저수지는 「농업생산기반정비사업계획설계기준-필댐편」을, 댐은 「댐설계기준」을 적용하여 제체에 대한 내진등급을 산정

<표 2.58> 기존 취수탑의 지진해석 방법 및 조건

시설물명	지진해석 방법			지진해석 조건					
	ESM	RSM	THM	위치	지진 구역	지역 계수	I	S	Ca/Cv
탑정저수지	○			충남/논산	I 구역	0.11	1.0	S _B	0.11/0.11
경천저수지	○	○		전북/완주	I 구역	0.11	1.0	S _B	0.11/0.11
대아저수지		○		전북/완주	I 구역	0.11	1.0	S _B	0.11/0.11
청천저수지		○		충남/보령	I 구역	0.11	1.0	S _B	0.11/0.11
백곡저수지		○		충북/진천	I 구역	0.11	1.0	S _B	0.11/0.11
하동저수지		○		경남/하동	I 구역	0.11	1.4	S _B	0.11/0.11
나주댐		○		전남/나주	I 구역	0.11	1.0	S _B	0.11/0.11
안동다목적댐	○			경북/안동	I 구역	0.11	1.0	S _B	0.11/0.11

※ ESM : 등가정적해석법, RSM : 응답스펙트럼해석법, THM : 시간이력해석법
I : 위험도계수, S : 지반종류, Ca/Cv : 지진계수

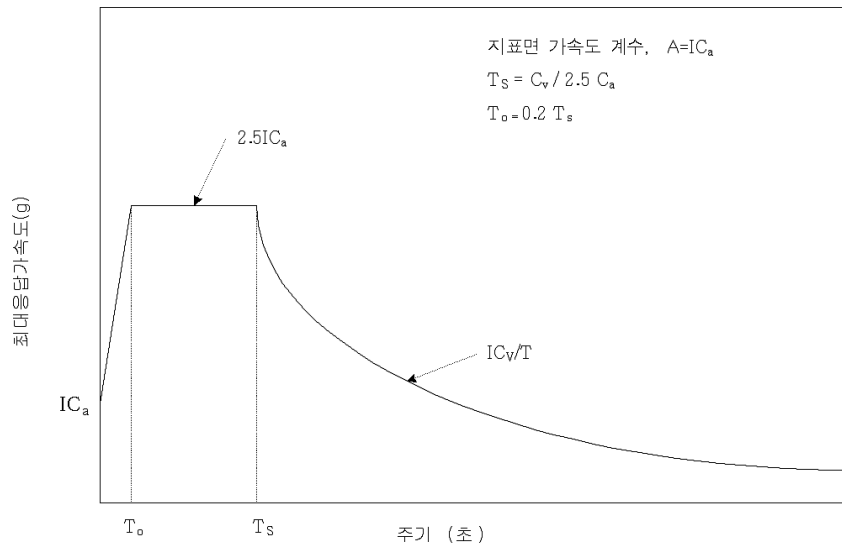
<표 2.59> 기존 취수탑의 해석모델 및 지진안전성 평가방법

시설물명	유한요소해석프로그램					수위조건		평가방법	
	해석 방법	요소 종류	지진작용방향			상시 만수위	사수위	응력	단면력
			X	Y	Z				
탑정저수지	3D	PLATE	○	○		○	○	○	
경천저수지	3D	SOLID	○	○	○	○	○	○	○
대아저수지	3D	SOLID	○	○	○	○	○	○	
청천저수지	3D	SOLID	○	○	○	○	○	○	
백곡저수지	3D	SOLID	○	○	○	○	○	○	○
하동저수지	3D	SOLID	○	○		○		○	○
나주댐	3D	PLATE	○	○	○	○	○		○
안동다목적댐	3D	SOLID	○	○		○	○	○	

※ X : 취수구 방향, Y : 취수구 직각 방향, Z : 연직방향

지진해석 방법은 등가정적해석법과 응답스펙트럼해석법(동적해석법)을 적용하였으며, 기초지반은 모두 보통암으로 판단(S_B 지반)하여 경계조건을 고정단으로 가정하였으며, 설계진도는 하동저수지만 0.154g이고, 나머지는 0.11g이다.

응답스펙트럼은 <그림 2.48>과 같이 5% 감쇠비를 고려한 지표면에서의 표준가속도응답스펙트럼을 적용하였다.



<그림 2.48> 표준가속도설계응답스펙트럼(5% 감쇠비)

다. 부속시설별 내진성능 평가방법 타당성 검토

「농업생산기반정비사업계획설계기준 - 필댐편(2002)」 및 「댐 설계기준(2011)」 등에서는 부속시설의 내진성 확보를 위하여 필요한 최소 요구조건을 만족시키는 내진설계를 하도록 규정할 뿐 성능수준 및 평가방법에 대한 규정은 명확히 제시되지 않아 부속시설의 내진설계 및 내진성능 평가시 성능수준 및 평가방법을 선정하는데 어려움이 따른다.

본 절에서는 기존 저수지의 부속시설 중 철근콘크리트 구조물, 즉 취수탑, 취수터널, 여수토·방수로 및 연락교량에 대한 내진성능 평가방법에 대한 타당성 검토를 수행하고자 한다. 타당성 검토는 앞에서 검토한 내진설계기준과 기존 취수탑의 내진 안전성 평가 현황 조사 자료에 기초하여 구조물별 특성을 고려하여 내진성능평가에 적용할 기준 및 평가방법을 선정하고 예제 해석을 통해 수행하였다. 적용기준 및 평가방법은 본문에 기술하였으며, 예제 해석은 부록에 수록하였다.

이때 부속시설에 적용한 내진성능목표 및 평가방법은 다음과 같다.

부속시설의 내진등급은 「댐설계기준(2011)」의 “12.4.1 설계거동한계”(사)항에 제시된 ‘지진으로 인해 댐체 또는 여수로 및 부대시설물과의 경계, 기초와 양안(abutment)을 통해 제어 불가능한 누수가 발생하여 댐의 기능이 손상되어서는 안 된다.’와 같이 지진시 저수지 시설물의 기능이 유지되려면 체체와 부속시설이 모두 동일한 내진등급 하에서 내진 안전성을 확보하고 있어야 하므로, 부속시설의 내진등급은 저수지 체체와 동일한 내진등급(재현주기)을 적용하였다.

기존 시설물의 성능수준은 붕괴방지수준(극한하중)만을 적용하였다. 이는 기존시설물에 여러 단계의 성능수준, 특히 기능수행수준(사용하중)을 적용하게 되면 지나친 보강이 이루어질 수 있어 경제적이지 못하므로 지진시 최소한의 안전을 확보할 수 있도록 붕괴방지수준만을 적용하여 지진 해석을 수행하였다.

내진성능 평가방법은 극한하중인 붕괴방지수준을 적용하였으므로 강도설계법에 따라 부재의 단면력을 검토하였으며, 기초 및 기초지반도 부재와 동일한 방법을 적용하였다. 이를 위해 해석모델은 보요소(Beam element)를, 하중은 구조물의 특성에 맞게 고정하중 및 지진하중(지진시 동수압 및 토압 포함)을 고려하여 ‘콘크리트구조설계기준(2007)’에 제시된

하중계수 및 하중조합을 적용하였다.

1) 취수탑의 내진성능 평가방법 타당성 검토

「상수도시설기준(환경부, 2010)」과 「상수도시설 내진 설계기준(한국수자원공사, 2000)」에서는 부속시설에 대한 지진해석 및 내진설계방법이 비교적 상세하게 규정되어 있으므로, 이 기준들을 취수탑의 내진성능평가에 적용하여 타당성을 검토하였다. 이 기준들은 「상수도시설 내진 설계기준 마련을 위한 연구(환경부, 1999)」 보고서를 근간으로 작성되었으므로, 기준에 규정되지 않은 사항은 보고서에 기술된 내용을 적용하였다.

취수탑의 내진성능 평가방법은 대상 구조물의 구조특성, 중요도, 손상형태, 주변지반의 특성 등을 고려하여 적합한 지진해석모델과 지진응답해석방법에 의해 결정된 지진력에 대하여 충분한 내력을 갖도록 하여야 한다.

취수탑의 내진성능 평가방법은 다음과 같다.

- ① 내진성능목표 : 체체의 내진성능목표를 따른다.
- ② 내진성능수준 : 기존 시설물의 내진성능평가임을 감안하여 붕괴방지 수준만을 적용한다.
- ③ 수평지반운동 : 수평지반운동은 지표면에서의 자유장 운동으로, 세기와 특성이 동일한 수평 2축 방향성분으로 정의한다. 대상 구조물이 대칭인 경우에는 1축 방향성분만 고려하여 해석해도 무방하다.
- ④ 수직지반운동 : 수직방향 성분의 지반운동은 무시하여도 무방하다. 다만, 수직방향 성분의 지반운동에 의한 영향이 예상되는 경우에는 수평방향 성분의 1/2 세기로 가정하여 적용할 수 있다.
- ⑤ 구성재료의 거동 : 탄성거동 한계 내에 있도록 ‘댐설계기준(2011)’에 규정하고 있으므로 원칙적으로 선형해석방법을 적용하며, 필요한 경우 비선형거동의 영향을 고려할 수 있다.
- ⑥ 수위 조건 : 취수탑의 내진성능평가는 만수위시, 공수위시 및 중간정도 찬 경우에 대하여 검토하여야 한다.
- ⑦ 지진해석방법 : 부재의 평가지진력 산정을 위한 지진해석방법은 등

가정적해석법을 적용한다. 다만 진보된 평가를 원할 경우, 응답스펙트럼해석법과 동적해석법을 적용할 수 있다.

- ⑧ 해석모델 : 해석모델은 3차원 보요소를 기본으로 하며, 구조특성을 고려하여 평면요소 및 고체요소를 적용할 수 있다. 또한 기초면의 경계조건은 고정으로 가정하여 해석을 수행하나, 보다 정밀한 해석을 원할 경우에는 기초의 등가강성을 산정하여 적용할 수 있다.
- ⑨ 하중계수 및 하중조합 : 하중은 구조물의 특성에 맞게 고정하중 및 지진하중(지진시 동수압 및 토압 포함)을 고려하여 ‘콘크리트구조설계기준(2007)’에 제시된 하중계수 및 하중조합을 적용한다.
- ⑩ 내진성능 평가방법 : 극한하중인 붕괴방지수준의 지진하중을 적용하였으므로 강도설계법에 따라 부재의 단면력을 검토하며, 기초 및 기초 지반도 부재와 동일한 방법을 적용한다.

2) 취수터널의 내진성능 평가방법 타당성 검토

「도시철도내진설계기준(국토해양부, 2009)」, 「도로교설계기준(한국도로교통협회, 2010)」 및 「콘크리트구조설계기준(건설교통부, 2007)」를 참고하여 취수터널의 내진성능 평가방법의 타당성을 검토하였다.

토목구조물 중 지중에 매설된 관로나 지하에 건설된 구조물은 종방향으로 동일한 패턴이 반복·지속되는 구조물로 평면 해석이 가능하며, 구조물의 단위체적중량이 주변지반과 비교해서 상대적으로 작기 때문에 지진시 구조물의 거동은 독자적으로 진동하기 보다는 주변지반의 거동에 지배된다. 따라서 이와 같은 지중구조물의 지진해석방법은 설계기준에서 규정한 바와 같이 응답변위법에 의한 내진해석을 수행하는 것이 바람직할 것이다. 응답변위법은 구조물과 지반의 접촉면이 완전부착상태라는 가정에 기초하여 기반면으로부터 발생한 지반운동으로 인하여 지중구조물에 발생된 가상의 변위와 주면전단력을 이용하여 내진해석을 수행하는 방법이다.

취수터널의 내진성능 평가방법은 다음과 같다.

- ① 내진성능목표 : 제체의 내진성능목표를 따른다.

- ② 내진성능수준 : 기존 시설물의 내진성능평가임을 감안하여 붕괴방지 수준만을 적용한다.
- ③ 수평지반운동 : 수평지반운동은 구조물 밑면에 작용하는 운동으로 정의하며, 기반암과 구조물 사이에 토사가 존재하는 경우 지반증폭 효과를 고려한 지반운동을 적용할 수 있다.
- ④ 수직지반운동 : 수직방향 성분의 지반운동은 무시하여도 무방하다. 다만, 수직방향 성분의 지반운동에 의한 영향이 예상되는 경우에는 수평방향 성분의 1/2 세기로 가정하여 적용할 수 있다.
- ⑤ 구성재료의 거동 : 탄성거동 한계 내에 있도록 ‘댐설계기준(2011)’에 규정하고 있으므로 원칙적으로 선형해석방법을 적용하며, 필요한 경우 비선형거동의 영향을 고려할 수 있다.
- ⑥ 지진해석방법 : 부재의 평가지진력 산정을 위한 지진해석방법은 응답변위법을 적용한다. 다만 진보된 평가를 원할 경우, 응답스펙트럼 해석법과 동적해석법을 적용할 수 있다.
- ⑦ 해석모델 : 해석모델은 2차원 보요소를 기본으로 하며, 구조특성을 고려하여 평면요소를 적용할 수 있다. 또한 구조물과 지반의 접촉면이 완전부착상태라 가정하여 지반반력계수를 적용한다.
- ⑧ 하중계수 및 하중조합 : 하중은 구조물의 특성에 맞게 고정하중 및 지진하중(지진시 토압 포함)을 고려하여 ‘콘크리트구조설계기준(2007)’에 제시된 하중계수 및 하중조합을 적용한다.
- ⑨ 내진성능 평가방법 : 극한하중인 붕괴방지수준의 지진하중을 적용하였으므로 강도설계법에 따라 부재의 단면력을 검토한다.

3) 여수토·방수로의 내진성능 평가방법 타당성 검토

「도로교설계기준(한국도로교통협회, 2010)」과 「콘크리트구조설계기준(건설교통부, 2007)」를 참고하여 여수토·방수로의 내진성능 평가방법의 타당성을 검토하였다.

여수토·방수로 구조물의 대부분은 구조물의 밑면이 지반선보다 아래에 있으며, 종방향으로 유사한 패턴이 반복·지속되는 구조물은 2차원 평면해석이 가능하다.

여수토·방수로의 내진성능 평가방법은 다음과 같다.

- ① 내진성능목표 : 제체의 내진성능목표를 따른다.
- ② 내진성능수준 : 기존 시설물의 내진성능평가임을 감안하여 붕괴방지 수준만을 적용한다.
- ③ 수평지반운동 : 수평지반운동은 지표면에서의 자유장 운동으로 정의한다.
- ④ 수직지반운동 : 수직방향 성분의 지반운동은 무시하여도 무방하다. 다만, 수직방향 성분의 지반운동에 의한 영향이 예상되는 경우에는 수평방향 성분의 1/2 세기로 가정하여 적용할 수 있다.
- ⑤ 구성재료의 거동 : 탄성거동 한계 내에 있도록 ‘댐설계기준(2011)’에 규정하고 있으므로 원칙적으로 선형해석방법을 적용하며, 필요한 경우 비선형거동의 영향을 고려할 수 있다.
- ⑥ 지진해석방법 : 부재의 평가지진력 산정을 위한 지진해석방법은 등가정적해석법을 적용한다. 다만 진보된 평가를 원할 경우, 응답스펙트럼해석법과 동적해석법을 적용할 수 있다.
- ⑦ 해석모델 : 해석모델은 2차원 보요소를 기본으로 하며, 구조특성을 고려하여 평면요소를 적용할 수 있다. 또한 구조물과 지반의 접촉면이 완전부착상태라 가정하여 지반반력계수를 적용한다.
- ⑧ 하중계수 및 하중조합 : 하중은 구조물의 특성에 맞게 고정하중 및 지진하중(지진시 토압 포함)을 고려하여 ‘콘크리트구조설계기준(2007)’에 제시된 하중계수 및 하중조합을 적용한다.
- ⑨ 내진성능 평가방법 : 극한하중인 붕괴방지수준의 지진하중을 적용하였으므로 강도설계법에 따라 부재의 단면력을 검토한다.

4) 연락교량의 내진성능 평가방법 타당성 검토

「댐 설계기준(국토해양부, 2011)」, 「도로교설계기준(2010)」 및 「기존 시설물(교량) 내진성능 평가 및 향상요령(한국시설안전공단, 2011)」를 준용하여 연락교량의 내진성능 평가방법의 타당성을 검토하였다.

「댐 설계기준(2011)」에서는 지진시 연락교량(관리교)에 대해 낙교의 가능성을 검토하도록 규정하고 있다. 이에 연락교량의 내진 안전성 검토를 위해 「기존 시설물(교량) 내진성능 평가 및 향상요령(한국시설안전공단, 2011)」의 '4.3.3 받침지지길이(낙교)' 항목을 적용하여 낙교 유무를 검토하였다.

교각 또는 교대에서 낙교 유무의 판별은 소요역량(받침부 발생변위와 「도로교설계기준(한국도로교통협회, 2010)」에 제시된 최소받침지지길이 중 큰값)이 공급역량(받침지지길이)을 초과하는지의 여부로 결정한다.

연락교량(관리교)의 내진성능 평가방법은 다음과 같다.

- ① 내진성능목표 : 체체의 내진성능목표를 따르는 것을 기본으로 하나, 필요시 한단계 낮은 내진성능목표를 적용하여도 무방하다.
- ② 내진성능수준 : 기존 시설물의 내진성능평가임을 감안하여 붕괴방지 수준만을 적용한다.
- ③ 수평지반운동 : 수평지반운동은 지표면에서의 자유장 운동으로 정의한다.
- ④ 구성재료의 거동 : 탄성거동 한계 내에 있도록 '댐설계기준(2011)'에 규정하고 있으므로 원칙적으로 선형해석방법을 적용하며, 필요한 경우 비선형거동의 영향을 고려할 수 있다.
- ⑤ 지진해석방법 : 부재의 평가지진력 산정을 위한 지진해석방법은 등가정적해석법을 적용한다. 다만 진보된 평가를 원할 경우, 응답스펙트럼해석법과 동적해석법을 적용할 수 있다.
- ⑥ 해석모델 : 해석모델은 3차원 보요소를 기본으로 하며, 기초부는 고정단으로 가정한다.
- ⑦ 하중계수 및 하중조합 : 하중은 구조물의 특성에 맞게 고정하중 및 지진하중(지진시 토압 포함)을 고려하여 '콘크리트구조설계기준(2007)'에 제시된 하중계수 및 하중조합을 적용한다.
- ⑧ 내진성능 평가방법 : 낙교의 가능성을 검토하며, 필요시 기존 시설물(교량) 내진성능 평가 및 향상요령(2011)에 따라 교각 등을 평가할 수 있다.

5. 기존 저수지 부속시설에 대한 지진해석 특화방안

앞에서 수행한 부속시설별 내진성능평가지 적용기준 및 평가방법의 타당성 검토를 토대로 기존 저수지 시설물의 부속시설에 대한 지진해석 특화방안을 제시하였다.

부속시설의 내진성능목표 설정시 중요한 내진등급과 성능수준, 내진성능 평가방법 및 절차를 제시하였다. 또한 저수지 시설물의 내진안전성 확보에 필요한 추가 연구과제를 제안하였다.

가. 부속시설의 내진성능목표 설정

1) 부속시설의 내진등급

기존 저수지 부속시설의 내진등급은 「댐설계기준(2011)」의 “12.4.1 설계거동한계” (사)항에 제시된 ‘지진으로 인해 댐체 또는 여수로 및 부대시설물과의 경계, 기초와 양안(abutment)을 통해 제어 불가능한 누수가 발생하여 댐의 기능이 손상되어서는 안 된다.’와 같이 지진시 저수지 시설물의 기능이 유지되려면 제체와 부속시설이 모두 동일한 내진등급 하에서 내진 안전성을 확보하고 있어야 하므로, 부속시설의 내진등급은 저수지 제체와 동일한 내진등급(재현주기)을 적용하여야 한다.

만약 부속시설의 내진등급이 제체보다 낮게 선정된 경우에 있어서, 부속시설의 내진등급이 견딜 수 있는 지진보다 큰 지진이 발생하여 저수지 제체는 안전하지만 부속시설이 붕괴되었다면, 지진 후 부속시설이 복구되는 동안 저수지는 제 기능을 하나도 수행할 수 없는 상태가 된다. 이를 방지하기 위해서라도 저수지의 기능 유지에 필요한 부속시설은 제체와 동일한 내진등급을 적용하여야 한다. 다만, 연락교량(관리교)과 같이 지진시 붕괴되더라도 저수지의 기능상 문제가 없는 부속시설은 제체의 내진등급보다 낮은 등급을 적용하여도 무방하다.

2) 부속시설의 성능수준

기존 시설물들의 성능수준을 살펴보면 붕괴방지수준(극한하중)만을 적용하고 있는 경우가 많다. 이는 기존 시설물에 신설 시설물과 동일한 성능수준, 특히 기능수행수준(사용하중)을 적용하게 되면 지나친 보강이 이루어질 수 있어 경제적인 측면에서 비효율적이므로, 성능수준을 붕괴방지수준만 적용하여 지진시 시설물의 기능은 정지되더라도 붕괴는 되지 않도록 최소한의 안전을 확보할 수 있도록 하는 것이 바람직하다.

나. 부속시설의 내진성능 평가방법

1) 부속시설의 지진해석방법

부속시설의 형상이 대칭이며, 1차 모드가 지배적인 경우에는 간편하면서도 안정적인 해석결과를 얻을 수 있는 등가정적해석법을 기본으로 적용하는 것이 효율적이다. 다만, 1차 모드의 참여율이 크지 않은 다중모드를 갖는 시설물의 경우는 응답스펙트럼해석법이나 동적해석법(시간이력해석법이나 진동수영역 해석법)을 적용하여 그 특성을 적절히 고려할 수 있다. 이때, 하중은 구조물의 특성에 맞게 고정하중 및 지진하중(지진시 동수압 및 토압 포함)을 고려하여 ‘콘크리트구조설계기준(2007)’에 제시된 하중계수 및 하중조합을 적용한다.

2) 부속시설의 내진성능 평가방법

부속시설의 내진성능 평가방법은 극한하중인 붕괴방지수준을 적용하였으므로 강도설계법에 따라 부재의 단면력을 검토하는 것이 바람직하며, 기초 및 기초지반도 부재와 동일한 방법을 적용하여야 한다.

다. 부속시설별 내진성능 평가절차

1) 취수탑

① 적용기준

취수탑의 내진성능평가를 위해 다음의 설계기준에 제시된 내진 규정을 따른다.

- * 상수도시설기준(환경부, 2010)
- * 상수도시설 내진 설계기준(한국수자원공사, 2000)
- * 상수도시설 내진 설계기준 마련을 위한 연구(환경부, 1999)
- * 콘크리트구조설계기준(건설교통부, 2007)

② 내진성능 평가절차

취수탑의 내진성능 평가절차를 다음과 같다.

- * 재료 물성 및 지반조건 조사
 - 준공도서 검토, 현장조사, 재료 및 토질시험 등
- * 하중산정(등가정적해석법)
 - 고정하중 및 지진하중(관성력, 지진시 동수압)
- * 구조해석
 - 해석모델 작성 및 선형탄성해석 수행을 통한 부재력 산정
- * 단면 검토
 - 공칭강도와 부재력 비교를 통한 부재의 내진성능평가
- * 기초 및 기초지반 검토
 - 기초 단면 평가(휨, 전단)
 - 기초 안전성 평가(활동, 전도, 침하)

2) 취수터널

① 적용기준

취수터널의 내진성능평가를 위해 다음의 설계기준에 제시된 내진 규정을 따른다.

- * 도시철도내진설계기준(국토해양부, 2009)
- * 도로교설계기준(한국도로교통협회, 2010)
- * 콘크리트구조설계기준(건설교통부, 2007)

② 내진성능 평가절차

취수터널의 내진성능 평가절차를 다음과 같다.

- * 재료 물성 및 지반조건 조사
 - 준공도서 검토, 현장조사, 재료 및 토질시험 등
- * 지반반력계수 산정
- * 하중산정(응답변위법)
 - 고정하중 및 지진하중(관성력, 지진시 토압)
- * 구조해석
 - 해석모델 작성 및 선형탄성해석 수행을 통한 부재력 산정
- * 단면 검토
 - 공칭강도와 부재력 비교를 통한 부재의 내진성능평가
- * 기초 및 기초지반 검토
 - 기초 지지력 검토(상시하중으로 검토)

3) 여수토·방수로

① 적용기준

여수토·방수로의 내진성능평가를 위해 다음의 설계기준에 제시된 내진 규정을 따른다.

- * 도로교설계기준(한국도로교통협회, 2010)
- * 콘크리트구조설계기준(건설교통부, 2007)

② 내진성능 평가절차

여수토·방수로의 내진성능 평가절차를 다음과 같다.

- * 재료 물성 및 지반조건 조사
 - 준공도서 검토, 현장조사, 재료 및 토질시험 등
- * 지반반력계수 산정
- * 하중산정(등가정적해석법)
 - 고정하중 및 지진하중(관성력, 지진시 토압)
- * 구조해석
 - 해석모델 작성 및 선형탄성해석 수행을 통한 부재력 산정
- * 단면 검토
 - 공칭강도와 부재력 비교를 통한 부재의 내진성능평가
- * 기초 및 기초지반 검토
 - 기초 지지력 검토(상시하중으로 검토)

4) 연락교량

① 적용기준

연락교량의 내진성능평가를 위해 다음의 설계기준에 제시된 내진 규정을 따른다.

- * 댐설계기준(국토해양부, 2011)
- * 도로교설계기준(한국도로교통협회, 2010)
- * 콘크리트구조설계기준(건설교통부, 2007)
- * 기존 시설물(교량) 내진성능평가 및 향상요령(한국시설안전공단, 2011)

② 내진성능 평가절차

연락교량의 내진성능평가는 낙교에 대해서만 검토하도록 되어 있으며, 평가절차는 다음과 같다. 다만, 필요시 기존 시설물(교량) 내진성능 평가 및 향상요령(2011)에 따라 교각 등을 평가할 수 있다.

- * 공급역량 산정
 - 교각의 받침지지길이 산정(현장 실측값)
- * 소요역량 산정
 - 구조해석시 발생변위
 - 도로교설계기준(2010)에 제시된 공식에 의한 최소받침지지길이
 - 소요역량 = MAX{발생변위, 최소받침지지길이}
- * 내진성능평가
 - F.S = 공급역량 / 소요역량

라. 향후 연구과제

현재, 기존 및 신설 저수지 시설물의 내진 안전성을 확보하기 위해서 대부분 개별 시설물에 대해 독립적으로 내진성능을 만족하도록 설계 및 보강을 수행하고 있다.

그러나 댐설계기준(국토해양부, 2011)에서는 ‘지진으로 인해 댐체 또는 여수로 및 부대시설물과의 경계, 기초와 양안(abutment)을 통해 제어 불가능한 누수가 발생하여 댐의 기능이 손상되어서는 안 된다’고 규정하고 있다. 그리고 저수지 시설물의 경계부, 특히 재료가 다른 저수지 제체와 제체에 접하는 콘크리트 구조물의 경계부와 부속시설과 지반이 접하는 경계부에서 피해사례가 종종 발생하고 있다.

이는 개별 시설물은 내진성능이 충분히 확보되었더라도 시설물간이나 지반과 접하는 경계부에서 손상이 발생하면 댐의 기능이 손상될 수 있으므로 이에 대한 내진 안전성을 확보하여야 한다.

이에 이러한 경계부의 내진성능을 평가할 수 있는 방법과 보강방안 마련을 위한 연구가 추가로 수행되어야 한다.

또한, 본 연구에서 취수탑의 내진성능 평가방법의 기본으로 등가정적해석법을 제시하였다. 이 방법은 많은 연구자들이 검증하여 충분한 안전율을 고려한 해석법이나 동적인 성분이 제대로 고려되지 않은 방법이다. 그리하여 제시된 등가정적해석법은 1차 모드가 지배적인 취수탑 구조물에 국한되어 적용하여야 한다. 다중모드를 갖는 취수탑 구조물은 응답스펙트럼 해석법이나 동적해석법(시간이력해석법 및 진동수영역 해석법)을 적용

하도록 하였다. 이때 취수탑 구조물에 작용하는 수압과 지반조건을 어떻게 고려하느냐에 따라 구조물의 거동이 달라지게 된다. 일반적으로 널리 사용되고 있는 부가질량법이나 지진시 동수압은 근사적인 방법이므로, 보다 정밀한 거동을 파악하고 한다면 유체-지반-구조물 상호작용 (Fluid-Soil-Structure interaction, FSSI)을 고려한 지진해석을 수행하여야 한다. 이에 대한 연구는 현재까지 미비한 수준이며, FSSI 해석을 통해 근사적인 방법의 타당성을 검토를 수행하여 구조형식 및 지반조건에 따른 취수탑 구조물의 해석방법을 결정하는 추가연구가 필요하다.

6. 소 결

가. 저수지 구조물 내진성능평가 지표 및 활용방안 연구

본 연구에서는 저수지 구조물 관련 기준 및 연구결과 등에서 내진성능평가를 위한 항목과 지표, 그리고 평가방법에 대한 검토결과를 근거로 저수지 구조물의 내진성능평가를 위한 기본방안을 제시하였으며, 이를 요약하면 다음과 같다.

1. 기본 요건: 저수지 구조물 중 철근콘크리트 구조물, 즉 취수탑, 취수터널 및 여·방수로 옹벽 등의 내진성능평가를 목적으로 한다.
2. 내진성능수준: 이 방안에서 제시된 방법으로 내진성능평가를 할 경우에는 기능수행 수준과 붕괴방지 수준을 만족하는 것으로 본다.
3. 내진성능목표: I 등급과 특등급 구조물의 내진성능평가를 위한 설계지진의 평균재현주기는 각각 500년과 1000년이다.
4. 내진등급: 특등급 구조물은 사회, 안보, 경제적인 측면에서 특별한 저수지로 발주처가 지정하는 저수지 또는 총저수량 2000만 m³ 이상인 저수지를 말하며, I 등급 구조물은 높이 15m 이상이고 총저수량 50만 m³ 이상인 저수지를 말한다.
5. 설계지반운동: 설계지반운동은 내진설계기준 연구(1997.12)에서 제시한 표준설계응답스펙트럼을 따른다.

6. 내진설계방법: 구조부재를 설계할 때는 기본적으로 강도설계법 또는 한계상태설계법을 적용하고, 댐설계기준 등에서 제시하는 설계법 중에서 이와 동등 이상의 성능을 확보할 수 있다고 인정하는 다른 구조설계법을 적용하여 수행할 수 있다.
7. 지진해석방법: 부재의 설계지진력은 기본적으로 등가정적해석법과 응답변위법을 적용하여 구하고, 보다 진보된 설계를 원하는 경우에는 응답스펙트럼해석법 또는 동적 해석법(시간이력해석법 또는 진동수영역해석법)을 통하여 구할 수 있다.
8. 하중조합: 콘크리트구조설계기준(국토해양부, 1997)의 하중조합을 기본으로 한다.

또한, 저수지 구조물의 내진성능평가를 위한 지표를 기존 관련 기준과 연구결과를 토대로 검토한 후, 활용방안에 대해 연구하였다. 저수지 구조물의 내진성능평가는 설계기준에서 정한 내진성능 목표 이상을 만족하는지의 여부를 판별하므로 합리적인 내진성능평가를 위해서는 관련 내진설계기준이 먼저 마련되어야 한다. 그러나 관련 내진설계기준과 연구는 배경, 설계방법 그리고 적용 대상이 상이하거나 상충되는 것도 있으므로, 이에 저수지 구조물의 내진성능평가를 위한 합리적인 방안을 제시할 필요가 있다. 이를 위해 다음 사항을 결정할 필요가 있다.

1. 강도설계법과 허용응력설계법 등 내진설계방법
2. 내진성능수준 및 목표
3. 설계지반운동
4. 하중조합

나. 기존 저수지 구조물의 내진성능평가 기준 및 적용방법에 관한 타당성 연구

본 연구에서는 기존 저수지 시설물의 부속시설에 대한 내진성능 평가방법의 타당성 검토를 수행하여, 그 결과를 토대로 부속시설의 지진해석 수행을 위한 특화방안을 다음과 같이 제시하였다.

1. 부속시설의 내진등급 : 댐설계기준(2011)에서는 지진시 저수지 시설물의 기능이 유지되도록 규정하고 있으며, 저수지 시설물의 기능이 유지되려면 지진시 제체와 부속시설이 모두 내진 안전성을 충분히 확보하고 있어야 한다. 그러므로 부속시설의 내진등급은 저수지 제체와 동일한 등급(재현주기)을 적용하여야 한다.
2. 부속시설의 성능수준 : 기존 저수지 시설물의 내진성능수준을 신설 시설물과 동일한 성능수준, 특히 기능수행수준을 만족하도록 하게 되면 지나친 보강이 이루어질 수 있어 경제적인 측면에서 비효율적이므로, 성능수준을 붕괴방지수준만을 적용하여 지진시 시설물의 기능은 정지되더라도 붕괴는 되지 않도록 최소한의 안전만은 확보할 수 있도록 하여야 한다.
3. 부속시설의 내진성능 평가방법 : 극한하중인 붕괴방지수준을 적용하였으므로 강도설계법에 따라 부재 및 기초(기초지반 포함)의 단면력을 검토를 통해 내진성능을 평가하여야 한다.
4. 부속시설의 지진해석방법 : 부속시설의 형상이 대칭이며, 1차 모드가 지배적인 경우에는 간편하면서도 안정적인 해석결과를 얻을 수 있는 등가정적해석법을 적용한다. 다만, 1차 모드의 참여율이 크지 않은 다중 모드를 갖는 시설물의 경우에는 응답스펙트럼해석법이나 동적해석법(시간이력해석법 및 진동수영역 해석법)을 적용해 그 특성을 적절히 고려한다. 이때, 재료물성은 동적물성을 적용하여야 하며, 하중조건(지진시 관성력, 동수압 및 토압의 적용방법)에 의한 영향을 적절히 고려하여야 한다.
5. 향후 연구사항
 - ① 다른 재료를 갖는 시설물의 접합부나 시설물과 지반의 경계부의 내진성능 평가방법과 보강방안 마련을 위한 추가연구가 필요하다.
 - ② 취수탑의 유체-지반-구조물 상호작용(FSSI)을 고려한 해석을 통해 근사적인 방법의 타당성 검토 연구가 필요하다.

제6절 농업용 저수지 구조물의 내하력 평가 모델

1. 개요

가. 내하력 평가 사례 조사

1) 조사대상

내하력 평가 방법의 합리성을 확보하기 위하여 기 실시된 정밀안전진단 자료를 조사하여 분석하였다. 조사범위는 2005년 이후 실시된 진단자료 중에서 취수탑, 옹벽, 취수터널의 내하력 평가가 실시된 것들로 한정하였고 조사방법은 한국농어촌공사 기술본부 및 시설안전기술공단 방문을 통한 진단 자료조사(대아지,백곡지,안동댐,청천지,탑정지,하동지,홍덕지,수청지)를 기본으로 하였다.

2) 조사결과

취수탑의 경우 Solid요소를 이용한 3차원 해석을 통해 내하력을 평가되고 있고, 옹벽과 취수터널은 엑셀을 이용한 내하력평가가 이루어지고 있다. 하중의 경우 정적하중과 동적하중에 대한 검토가 되고 있으며, 허용응력법과 극한강도법을 통해 안전성을 평가 하는 것으로 분석되었다.

나. 내하력 평가 대상 및 평가 방법 선정

저수지의 부속 구조물인 취수탑, 옹벽, 취수터널에 대하여 기 실시된 진단자료와 통계자료 분석을 통해 내하력 평가 대상을 분류하였다. 각 대상별 평가 방법은 각 구조물의 하중특성, 구조형식에 따라 선정하였으며 그 내용은 <표 2.60>과 같다.

<표 2.60> 내하력 평가 대상 및 방법

구조물	형식	내하력 평가방법
취수탑	원형(복식)단면	허용응력설계법, 극한강도설계법
	원형(복식)변단면	
	원형(단식)단면	
	원형(단식)변단면	
	사각단면	
옹벽	역 T형 옹벽	허용응력설계법, 외적안정검토
	L형 옹벽	
	U형 옹벽	
취수터널	사각단면	허용응력설계법, 극한강도설계법
	마제형단면	

응력검토는 구조물에 발생하는 압축 및 인장응력을 허용응력과 비교 분석하여 안전성을 검토하는 방법으로, 해석에 필요한 외력과 허용응력은 “댐 설계기준(2011)”, “콘크리트구조설계기준(2007)” 및 “기존댐의 내진성능평가 및 향상요령(2004)”에서 제시하고 있는 기준을 사용하였다. 외적안정검토는 옹벽의 활동, 전도, 지지력에 대한 안전성을 평가하는 것을 말한다. 안전성 평가 기준은 다음 <표 2.61>와 같다.

<표 2.61> 외적안정 안전성 평가기준

평가기준	평가점수	안전성 평가기준
a	5	SF(안전율) > 1.0 으로 주부재에 손상이 없는 경우
b	4	SF(안전율) > 1.0 으로 주부재에 손상이 있는 경우
c	3	$0.9 \leq \text{SF(안전율)} < 1$
d	2	$0.75 \leq \text{SF(안전율)} < 0.9$
e	1	$\text{SF(안전율)} < 0.75$

다. 해석모델 선정

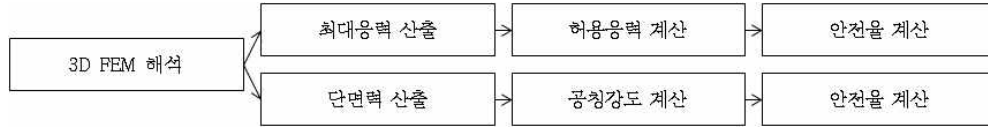
저수지 구조물의 형상을 모델링 하여 구조해석을 수행하기 위하여 각 구조물 별 사용요소와 하중조건, 지점조건을 <표 2.62>와 같이 선정하였다. 취수탑과 옹벽의 경우 비정형적인 형태에서의 응력검토를 위한 솔리드요소 사용을 결정하였고, 취수터널은 단면의 균질성을 고려해 프레임요소를 통한 부재력 검토를 하는 것이 적절한 것으로 판단되었다. 지중구조물인 취수터널은 스프링요소를 통한 지점조건을 사용하였고, 취수탑과 옹벽은 하단 고정단을 지점 조건으로 하였다. 하중조건은 토압, 수압, 자중, 부가하중을 고려할 수 있도록 모델링 하였다. 추가적으로 동적하중에 의한 해석을 위해 구조물의 자중을 질량으로 입력 하였다.

<표 2.62> 구조물 별 해석 모델

구조물	형식	사용요소	지점조건	하중
취수탑	원형(단식) 단면	솔리드	고정단	수압, 자중, 연락교량, 지진하중
	원형(단식) 변단면	솔리드	고정단	수압, 자중, 연락교량, 지진하중
	원형(복식) 단면	솔리드	고정단	수압, 자중, 연락교량, 지진하중
	원형(복식) 변단면	솔리드	고정단	수압, 자중, 연락교량, 지진하중
	사각단면	솔리드	고정단	수압, 자중, 연락교량, 지진하중
옹벽	역 T형 옹벽	솔리드	고정단	수압, 토압, 자중, 상재하중
	L형 옹벽	솔리드	고정단	수압, 토압, 자중, 상재하중
	U형 옹벽	솔리드	고정단	수압, 토압, 자중, 상재하중
취수터널	사각단면	프레임	스프링	토압, 자중, 상재하중
	마제형단면	프레임	스프링	토압, 자중, 상재하중

2. 취수탑

가. 취수탑의 내하력 평가 방법



<그림 2.49> 취수탑의 내하력 평가 체계

<그림 2.49>는 취수탑의 내하력 평가 체계를 도시화 한 것으로 허용응력설계법에 의한 안전율 계산과 강도설계법에 의한 안전율을 계산함으로써 내하력을 평가하는 방식이다.

나. 구조해석 개요

1) 사용요소

취수탑의 유한요소해석을 위하여 3차원 솔리드요소의 사용을 고려하였다. 이를 통해 최대 압축응력 및 인장응력을 구할 수 있다.

2) 하중

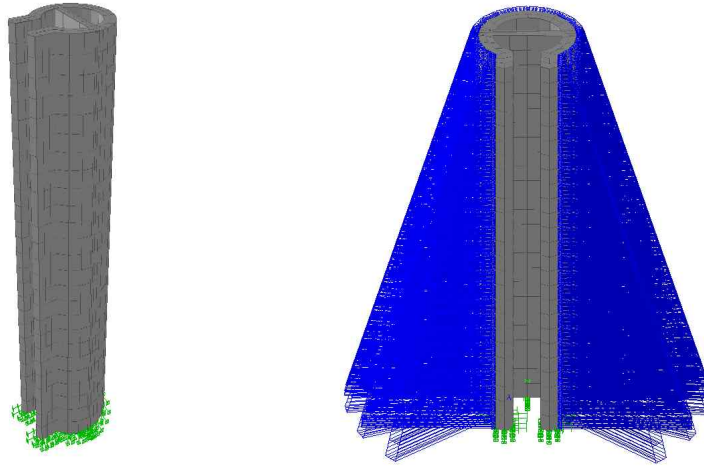
취수탑에 작용하는 하중에는 수압, 연락교량, 자중, 지진하중이 있다. 수압의 경우 수위를 입력받아 자동으로 계산하여 적용시키는 방법을 사용하였고, 연락교량 하중은 절점하중으로 입력하는 것으로 하였다. 자중은 콘크리트의 물성치를 통해 프로그램에서 자동으로 계산 되도록 하였으며, 지진하중은 응답스펙트럼법에 의한 설계하중을 받도록 하였다.

3) 지점조건

취수탑의 지점조건은 최하단부의 고정단으로 가정하였다.

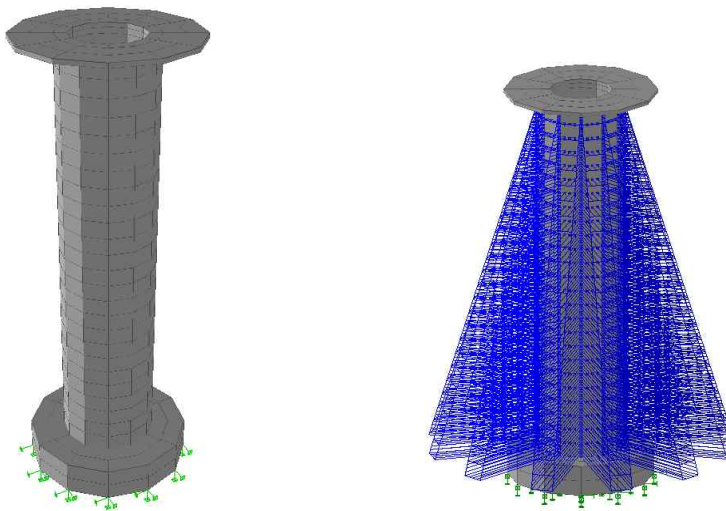
다. 단면별 취수탑의 구조해석 모델

1) 원형(복식)단면 취수탑



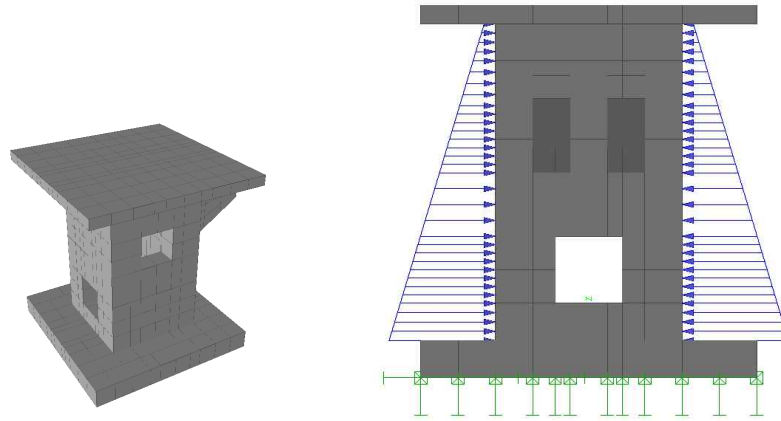
<그림 2.50> 원형(복식)단면 취수탑 구조해석 모델

2) 원형(단식)단면 취수탑



<그림 2.51> 원형(단식)단면 취수탑 구조해석 모델

3) 사각단면 취수탑



<그림 2.52> 사각단면 취수탑 구조해석 모델

다. 허용응력법에 의한 응력 검토

1) 콘크리트 허용응력 계산 [콘크리트 구조설계 기준(2007)]

콘크리트 허용압축응력 : $0.4 f_{ck}$

허용인장응력 : $0.42 \sqrt{f_{ck}}$

균열응력 : $2.0 \sqrt{f_{ck}}$

2) 최대응력 산출

발생한 최대 인장응력 및 압축응력은 솔리드 요소의 주응력 결과에서 얻을 수 있고 발생한 위치는 3차원 그래픽으로 표현하였다.

3) 안전율 계산

허용응력설계법에 의한 안전율 계산은 허용응력과 발생응력의 비로 계산한다. 검토해야 하는 응력은 압축 및 인장응력이고 보수적인 관점에서 작은값을 선택하여 적용한다.

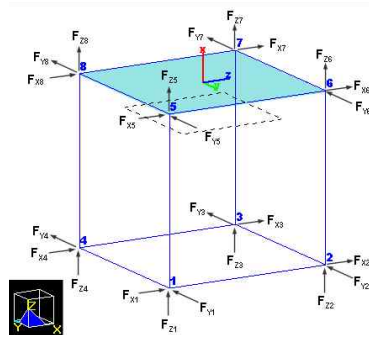
<표 2.63> 취수탑- 허용응력 설계법 안전율 계산

평가기준	평가점수	상태	비고
a	5	SF > 1.0 주부재의 손상이 없는 경우	$SF = \frac{\text{허용응력}}{\text{발생응력}}$
b	4	SF > 1.0 주부재의 손상이 있는 경우	
c	3	$0.9 \leq SF < 1.0$	
d	2	$0.75 \leq SF < 0.9$	
e	1	SF < 0.75	

라. 강도설계법에 의한 응력 검토

1) 단면력 계산

나타난 취수탑 하단부 단면력은 지정한 영역 내에 있는 솔리드 절점요소 내력을 이용하여 산정하였다



<그림 2.53> 솔리드요소 응력 조합 방법

$$\begin{aligned}
 F_x &= F_{Z5} + F_{Z6} + F_{Z7} + F_{Z8} \\
 F_y &= -(F_{Y5} + F_{Y6} + F_{Y7} + F_{Y8}) \\
 F_z &= F_{X5} + F_{X6} + F_{X7} + F_{X8} \\
 M_x &= [F_{X5} \cdot d_{Y5} + F_{X6} \cdot d_{Y6} + F_{Y6} \cdot d_{Z6} + F_{Y7} \cdot d_{Z7}] \\
 &\quad - [F_{Y5} \cdot d_{Z5} + F_{X7} \cdot d_{Y6} + F_{X8} \cdot d_{Y8} + F_{Y8} \cdot d_{Z8}] \\
 M_y &= [F_{Z6} \cdot d_{Z6} + F_{Z7} \cdot d_{Z7}] - [F_{Z5} \cdot d_{Z5} + F_{Z8} \cdot d_{Z8}] \\
 M_z &= [F_{Z7} \cdot d_{Y7} + F_{Z8} \cdot d_{Y8}] - [F_{Z5} \cdot d_{Y5} + F_{Z6} \cdot d_{Y6}]
 \end{aligned}$$

2) 공칭강도 계산

취수탑의 단면 공칭강도의 계산은 기둥으로 가정하여 계산하였으며, 그 예는 다음과 같다.

1) 공칭강도 검토

계수축하중 : $P_u = 33006\text{kN}$

계수모멘트 : $M_y = 187810\text{kN}\cdot\text{m}$

계수모멘트 : $M_z = 51738\text{kN}\cdot\text{m}$

합성모멘트 : $M_u = 194806\text{kN}\cdot\text{m}$

최소면심 : $E_{\min} = 0.726\text{m}$

평형면심 : $E_b = 2.130\text{m}$

작용면심 : $E_{\text{app}} = 5.902\text{m}$

∴ 영역 2 → 인장지배구간

사용철근비 : $\rho = 0.0079\%$

평형축하중 : $\psi P_b = 214,277.81\text{kN}$

평형모멘트 : $\psi M_b = 456,422.70\text{kN}$

공칭축하중 : $\phi P_n = 54,992.07\text{kN}$

공칭모멘트 : $\phi M_n = 324,571.01\text{kN}$

3) 안전율 계산

강도설계법에 의한 안전율 계산은 공칭강도와 소요강도의 비로 계산한다. 보수적인 관점에서 안전율이 작은값을 선택하여 평가한다.

<표 2.64> 취수탑- 강도설계법 안전율 계산

평가기준	평가점수	상태	비고
a	5	SF > 1.0 주부재의 손상이 없는 경우	$SF = \frac{\text{공칭강도}}{\text{소요강도}}$
b	4	SF > 1.0 주부재의 손상이 있는 경우	
c	3	0.9 ≤ SF < 1.0	
d	2	0.75 ≤ SF < 0.9	
e	1	SF < 0.75	

마. 평가결과 예

1) 허용응력 설계법에 의한 안전율 계산예

* 하중조합

<표 2.65> 취수탑- 하중조합

하중조합	고정하중	수압	지진하중	응력증가계수
LCB1	1.00	1.00	0.00	1.00
LCB2	1.00	0.00	1.00	1.33

* 허용응력(MPa)

<표 2.66> 취수탑- 허용응력

구분	하중조합	압축응력	인장응력	전단응력
상시	LCB1	6.75	0.68	0.42
지진시	LCB2	8.98	0.90	0.55

* 작용응력(MPa)

<표 2.67> 취수탑- 작용응력

구분	하중조합	압축응력	인장응력	전단응력
상시	LCB1	2.07	0.41	0.25
지진시	LCB2	1.28	0.60	0.47

* SF(안전율)

<표 2.68> 취수탑- 안전율

구분	하중조합	압축응력	인장응력	전단응력
상시	LCB1	0.31	0.60	0.60
지진시	LCB2	0.14	0.67	0.85

2) 강도설계법에 의한 안전율 계산예

1. Case1 (상시)

1) 공칭강도 검토

계수축하중 : $P_u = 33006\text{kN}$
 계수모멘트 : $M_y = 187810\text{kN}\cdot\text{m}$
 계수모멘트 : $M_z = 51738\text{kN}\cdot\text{m}$
 합성모멘트 : $M_u = 194806\text{kN}\cdot\text{m}$
 최소편심 : $E_{min} = 0.726\text{m}$
 평형편심 : $E_b = 2.130\text{m}$
 작용편심 : $E_{app} = 5.902\text{m}$
 \therefore 영역 2 \rightarrow 인장지배구간
 사용철근비 : $\rho = 0.0079\%$
 평형축하중 : $\psi P_b = 214,277.81\text{ kN}$
 평형모멘트 : $\psi M_b = 456,422.70\text{ kN}$
 공칭축하중 : $\phi P_n = 54,992.07\text{ kN}$
 공칭모멘트 : $\phi M_n = 324,571.01\text{ kN}$

2) 휨강도 평가 결과

P_u	M_{uy}	M_{uz}	θ	M_n	ϕM_n
33006	187810	51738	-11.96	194806	324571

2. Case2 (지진시)

1) 공칭강도 검토

계수축하중 : $P_u = 32993\text{kN}$
 계수모멘트 : $M_y = 59893\text{kN}\cdot\text{m}$
 계수모멘트 : $M_z = 172290\text{kN}\cdot\text{m}$
 합성모멘트 : $M_u = 182403\text{kN}\cdot\text{m}$
 최소편심 : $E_{min} = 0.726\text{m}$
 평형편심 : $E_b = 1.569\text{m}$
 작용편심 : $E_{app} = 5.529\text{m}$
 \therefore 영역 2 \rightarrow 인장지배구간
 사용철근비 : $\rho = 0.0079\%$
 평형축하중 : $\psi P_b = 246,623\text{ kN}$
 평형모멘트 : $\psi M_b = 386850\text{ kN}$
 공칭축하중 : $\phi P_n = 57504\text{ kN}$
 공칭모멘트 : $\phi M_n = 317914\text{ kN}$

2) 휨강도 평가 결과

P_u	M_{uy}	M_{uz}	θ	M_n	ϕM_n
32993	59893	172290	-71	182403	317914

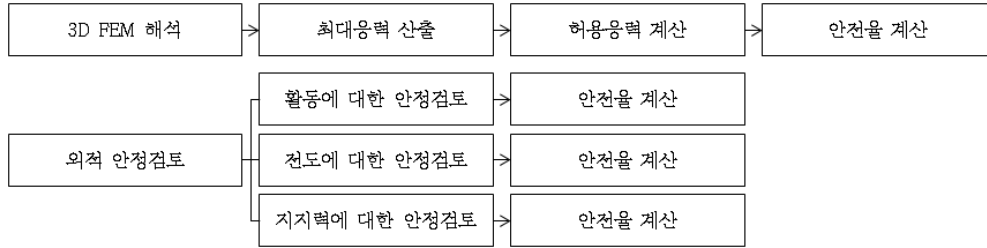
3. 안전율 계산

	ϕM_n	MU	SF	ϕP_n	PU	SF	OK/NG
Case1	324871	194806	1.67	54992	33006	1.67	OK
Case2	317914	194806	1.63	57504	32993	1.74	OK

3. 옹벽

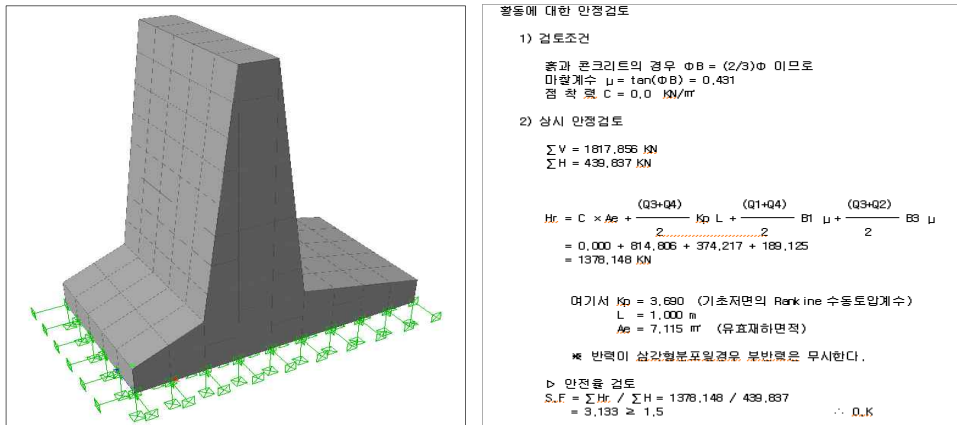
가. 옹벽의 내하력 평가 방법

옹벽의 경우 다음 <그림 2.54>과 같이 3D FEM 해석을 통한 응력 검토와 함께 활동, 전도, 지지력에 대한 외적안정을 검토하는 것으로 내하력 평가 체계를 구축하였다.



<그림 2.54> 옹벽의 내하력 평가 체계

3D FEM 해석모델은 최종보고서에 수록하였으며, 대표적으로 역 T형 옹벽의 해석 모델과 외적안정성평가의 예를 첨부 하였다.

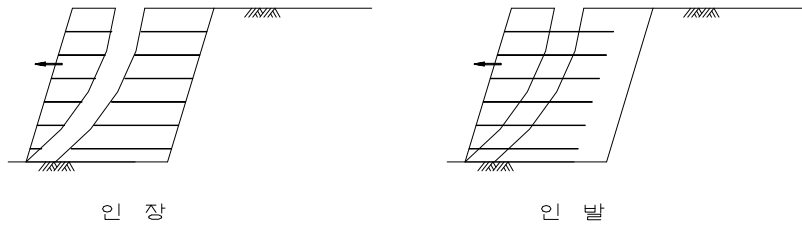


<그림 2.55> 옹벽의 내하력 평가 모델

나. 옹벽의 안정성 평가

1) 내적 안정

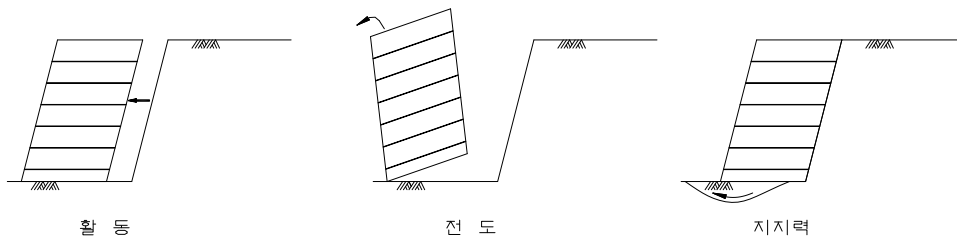
인장파괴 및 인발파괴에 대한 안정성을 평가한다.



<그림 2.56> 내적 안정 평가

2) 외적 안정

활동, 전도, 지지력파괴에 대한 안정성을 평가한다.



<그림 2.57> 외적 안정 평가

3) 설계 하중

옹벽의 설계시에는 시공위치에서의 기상조건 및 환경조건, 사용목적, 시공조건, 구조물의 규모 등을 고려하여 필요한 하중을 선택하여 적용하여야 하며 설계에 사용하는 하중으로는 자중, 상재하중 및 토압 등이 주로 고려되며, 현장여건에 따라 부력, 수압, 풍하중, 지진하중 등이 고려될 수 있다.

4) 안전율

보강토옹벽에 적용되는 인발적인 안전율은 외적안정성과 내적안정성으로 구분하여 다음과 같이 적용한다.

<표 2.69> 옹벽- 기준 안전율

외적안정성			내적안정성	
저면활동	전도	지반지지력	인장	압축
1.5	1.5	2.5	1.5	1.5

다. 외적 안정해석

보강토옹벽의 외적 안정해석에서는 보강토체를 균질한 복합토체로 고려하여 중력식 콘크리트 옹벽에서와 같이 전형적인 파괴유형에 따라 안정성을 평가하여야 한다.

1) 안정조건 평가

보강토옹벽의 외적 안정해석을 위하여 검토자는 다음과 같은 사항들을 정의하고 평가하여야 한다.

- ① 옹벽높이 및 경사도
- ② 자중, 상재하중, 지진력 등의 하중조건
- ③ 뒷채움흙의 공학적 특성
- ④ 기초지반 및 배면토의 공학적 특성
- ⑤ 기준안전율

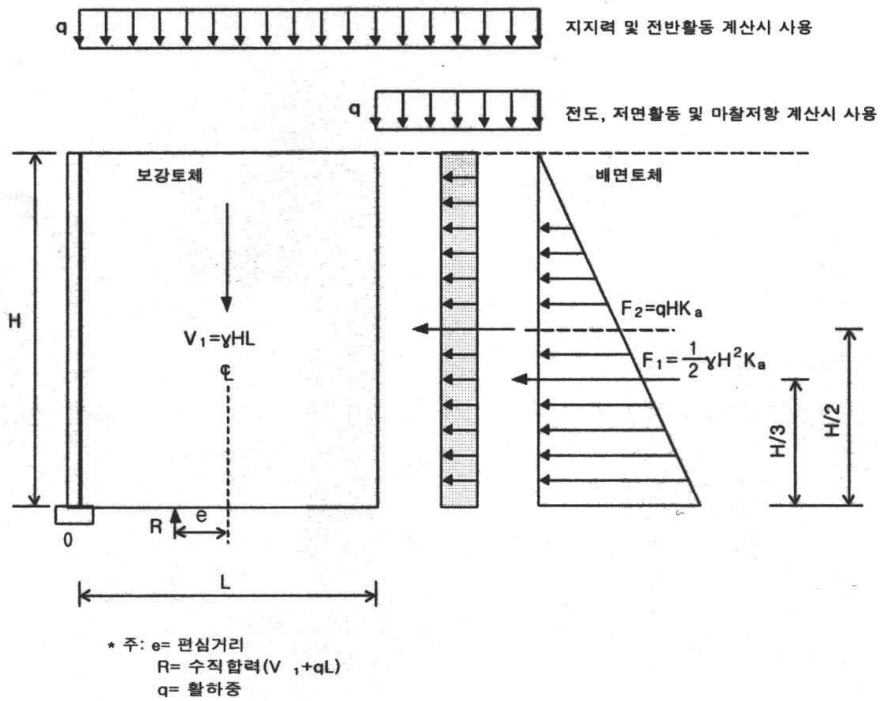
2) 외적안정을 위한 토압

외적 안정해석에서는 보강토체를 하나의 강성체로 가정하여 보강토체 배면으로부터 작용하는 토압을 산정하여야 한다.

① 보강토체에 작용하는 배면토압 산정시 사용하는 주동토압계수(Ka)

* 상부가 수평한 경우

$$K_a = \tan^2(45 - \phi/2)$$

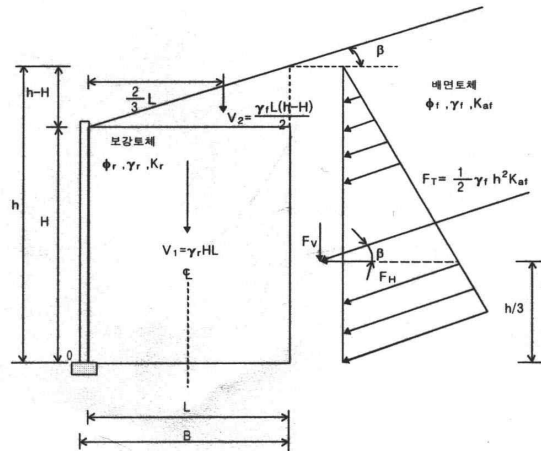


<그림 2.58> 토압계수 산정-1

* 상부에 무한 성토사면이 있는 경우

$$K_a = \cos\beta \left[\frac{\cos\beta - \sqrt{\cos^2\beta - \cos^2\phi}}{\cos\beta + \sqrt{\cos^2\beta - \cos^2\phi}} \right]$$

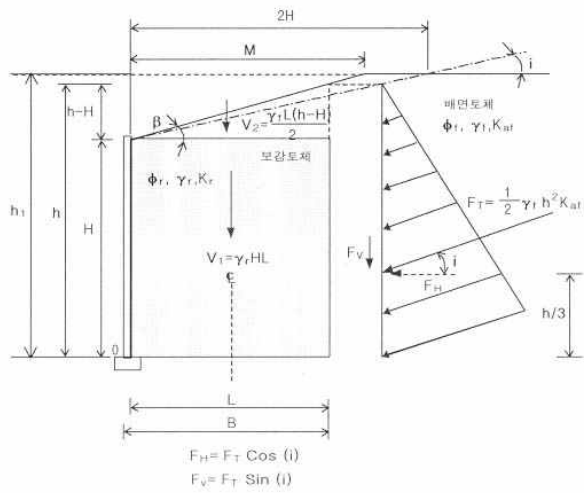
($\therefore \beta$ = 성토사면의 경사각)



<그림 2.59> 토압계수 산정-2

- * 상부의 성토사면이 무한하지 않고 중간에서 수평으로 변화하는 경우
 - 무한 성토사면화하여 수정된 사면각, i 를 β 대신에 윗식에 대입하여 주동토압계수 산정(Mononobe-Okabe 공식 사용)

$$K_a = \cos i \left[\frac{\cos i - \sqrt{\cos^2 i - \cos^2 \phi}}{\cos i + \sqrt{\cos^2 i - \cos^2 \phi}} \right]$$



<그림 2.60> 토압계수 산정-3

- * 전면벽의 경사도가 10°보다 클 경우

- Coulomb 토압론에 의거하여 산정

$$K_a = \frac{\sin^2(\theta + \phi)}{\sin^2\theta \cdot \sin(\theta - \delta) \cdot \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \cdot \sin(\phi - \beta)}{\sin(\theta - \delta) \cdot \sin(\theta + \beta)}} \right]^2}$$

(여기서, θ = 전면벽의 경사도, β = 보강체 상부의 성토사면각, δ = 보강 토체와 배면 토체 사이의 마찰각 (“ $\delta = 0$ ” 가정))

② 보강토체의 저면에 작용하는 수직응력의 계산

* 일반적인 수직응력 계산시에는 전면벽의 중량은 무시한다.

* 배면토압, FT의 산정

$$FT = K_{af} \cdot \gamma_f \cdot h^2/2$$

* 모멘트 평형($\sum Mc = 0$)을 고려하여 보강토체 저면에 작용하는 수직합력의 편심거리, e 의 산정

$$e = \frac{\sum Mc}{R_v}$$

(여기서, e 는 흙의 경우 $L/6$, 암반의 경우 $L/4$ 보다 작아야 하며, 이 조건을 만족하지 않을 경우에는 보다 긴 보강재의 길이가 요구된다.)

* 보강토체 저면에 작용하는 균등한 등가 수직응력(σ_v)의 산정

$$\sigma_v = \frac{R_v}{L - 2e}$$

* 성토사면하중 이외의 상재하중이나 집중하중이 보강토체 상부에 작용하는 경우에는 하중조건을 고려하여 보강토체 저면에 작용하는 등가 수직응력을 산정하여야 한다.

3) 활동에 대한 안정검토

보강토 옹벽 전체를 중력식 옹벽으로 가정하여 안정을 검토하여야 하며 보강토 옹벽의 밑면과 기초지반 사이의 마찰력이 보강토체 배면에 작용하는 수평토압보다 커야 안정하며 활동에 대한 안전율은 보통 1.5이상으로 하여야 한다.

$$F_s = \frac{Q_n}{R_n}$$

(여기서 Q_n = 보강토체 저면에서의 마찰저항력, R_n = 저면에 작용하는 수평분력의 합)

$$\text{여기서, } Q_n = f \cdot R_v + C \cdot B'$$

f : 접촉저면에서의 마찰계수($\tan\theta$)

C : 접촉면에서의 점착력

4) 전도에 대한 안정검토

전도에 대한 안정검토는 옹벽의 앞굽판 중심으로 분석하며 토압에 의한 전도 모멘트와 보강토의 중량에 의한 저항 모멘트의 균형을 고려하여 안전율을 계산한다.

전도에 대한 안전율은 보통 1.5이상으로 하여야 한다.

$$F_s = \frac{M_r}{M_o}$$

(여기서, M_o = 전도 모멘트, M_r = 저항 모멘트)

5) 지지력에 대한 안정검토

보강토 옹벽 저면의 지반반력과 보강토체 아래 지반의 허용지지력을 비교하여 안정성을 검토하여야 한다.

① 편심거리(e)

$$\frac{L}{2} - e = \frac{M_o}{R_v} \quad (\text{여기서, } M_o : \text{모멘트의 합, } R_v : \text{수직분}$$

력의 합)

② 사다리꼴 분포

$$q_{\max} = \frac{R_v}{L} \cdot \left(1 + \frac{6e}{L}\right) \left(1 + \frac{B'}{2L}\right)$$

③ Meyerhof가 제안한 분포

$$q_{ref} = \frac{R_v}{L - 2e}$$

④ 안전율은 보통 2.5이상으로 하여야 한다.

$$F_s = \frac{\text{지반의극한지지력}(q_u)}{\text{지반반력}(q_{max}, q_{ref})}$$

6) 기초지반의 침하에 대한 안정성 검토

① 침하의 가능성이 있는 지반 위에 설치된 보강토 옹벽에 대해서는 침하의 영향을 고려해야 한다.

잔류침하량의 한계값(구조물 기초 설계기준-지반공학회)

<표 2.70> 옹벽- 잔류침하량 한계값

검 토 항 목	잔 류 침 하 량
교량, 고가의 접속부에 있는 옹벽	10 ~ 20cm
상기 이외의 경우	15 ~ 30cm

② 기초지반의 부등침하가 예상되는 지점에서는 부등 침하량이 보강토옹벽 전면판의 안정에 영향을 미치는가에 대해서도 검토해 두어야 한다.

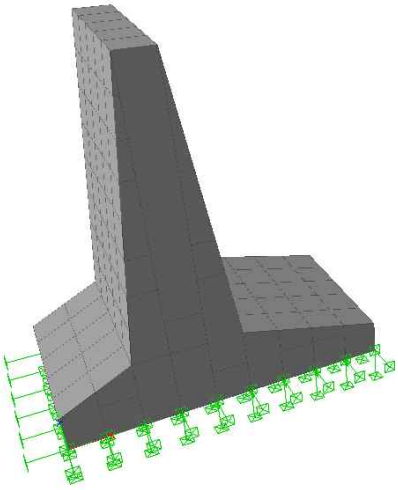
3) 패널식 콘크리트 전면벽체 : $\Delta/L = 1/100$

4) 블록식 콘크리트 전면벽체 : $\Delta/L = 1/200$

(여기서, Δ : 침하량, L : 벽체길이)

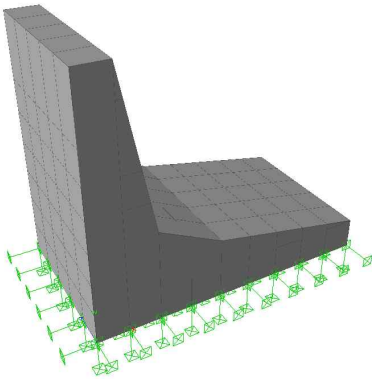
라. 옹벽 종류별 구조해석 모델

1) 역 T형 옹벽



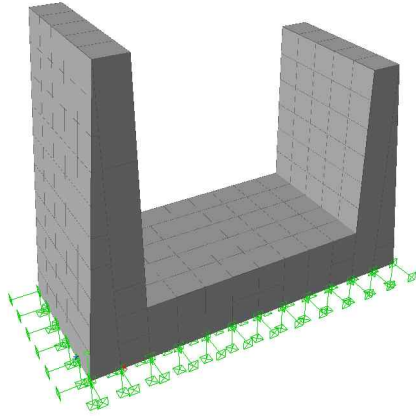
<그림 2.61> 역 T형 옹벽 구조해석 모델

2) L형 옹벽



<그림 2.62> L형 옹벽 구조해석 모델

3) U형 옹벽



<그림 2.63> U형 옹벽 구조해석 모델

마. 허용응력법에 의한 응력 검토

1) 콘크리트 허용응력 계산

콘크리트 허용압축응력 : $0.4 f_{ck}$

허용인장응력 : $0.42 \sqrt{f_{ck}}$

균열응력 : $2.0 \sqrt{f_{ck}}$

2) 최대응력 산출

발생한 최대 인장응력 및 압축응력은 솔리드 요소의 주응력 결과에서 얻을 수 있고 발생한 위치는 3차원 그래픽으로 표현하였다.

3) 안전율 계산

허용응력설계법에 의한 안전율 계산은 허용응력과 발생응력의 비로 계산한다. 검토해야 하는 응력은 압축 및 인장응력이고 보수적인 관점에서 작은값을 선택하여 적용한다.

<표 2.71> 용벽 - 허용응력설계법 평가기준

평가기준	평가점수	상태	비고
a	5	SF > 1.0 주부재의 손상이 없는 경우	$SF = \frac{\text{허용응력}}{\text{발생응력}}$
b	4	SF > 1.0 주부재의 손상이 있는 경우	
c	3	0.9 ≤ SF < 1.0	
d	2	0.75 ≤ SF < 0.9	
e	1	SF < 0.75	

바. 평가결과

1) 허용응력 설계법에 의한 안전율 계산예

* 하중조합

<표 2.72> 응벽 - 허용응력설계법 하중조합

하중조합	고정하중	수압	지진하중	응력증가계수
LCB1	1.00	1.00	0.00	1.00
LCB2	1.00	0.00	1.00	1.33

* 허용응력(MPa)

<표 2.73> 응벽 - 허용응력설계법 허용응력

구분	하중조합	압축응력	인장응력	전단응력
상시	LCB1	6.75	0.68	0.42
지진시	LCB2	8.98	0.90	0.55

* 작용응력(MPa)

<표 2.74> 응벽 - 허용응력설계법 작용응력

구분	하중조합	압축응력	인장응력	전단응력
상시	LCB1	2.07	0.41	0.25
지진시	LCB2	1.28	0.60	0.47

* SF(안전율)

<표 2.75> 응벽 - 허용응력설계법 안전율

구분	하중조합	압축응력	인장응력	전단응력
상시	LCB1	0.31	0.60	0.60
지진시	LCB2	0.14	0.67	0.85

2) 외적안정검토에 의한 안전율 계산예

* 작용하중 집계표

<표 2.76> 옹벽 - 외적안정평가 작용하중 집계표

No	구 분	수직력 (kN)	수평력 (kN)	작용거리		모멘트	
				X (m)	Y (m)	Mr (kN.m)	Mo (kN.m)
1	옹벽구체(정상시)	497.60	-	3.03	-	1508.6 6	-
2	옹벽구체(지진시)	497.60	38.31	3.03	3.06	1508.6 6	117.45
3	뒷채움재(정상시)	1006.80	-	5.22	-	5262.4 3	-
4	뒷채움재(지진시)	1006.80	77.52	5.22	6.24	5262.4 3	484.27
5	상재활하중	60.37	-	4.98	-	300.74	-
6	상재활하중	-	36.247	-	5.44	-	197.27
7	배면토압(정상시)	-	374.82 2	-	3.62	-	1359.9 7
8	배면토압(지진시)	-	428.85 0	-	5.44	-	2334.0 1

* 하중조합

<표 2.77> 옹벽 - 외적안정평가 하중조합

구 분	구성	V (kN)	H (kN)	Mr (kN.m)
Combo 1	고정하중(1.0)+토압(1.0) [1,3,6,7]	1504.40	411.06	6771.09
Combo 2	고정하중(1.0)+활하중(1.0)+토압(1.0) [1,3,5,6,7]	1564.77	411.06	7071.84
Combo 3	고정하중(0.9)+토압(1.0) [1,3,6,7]	1353.96	411.06	6093.98
Combo 4	고정하중(0.9) + 토압(1.6) + 지진하중(1.0) [2,4,8]	1353.96	533.10	6093.98

* 전도에 대한 안전

<표 2.78> 옹벽 - 외적안정평가 전도에 대한 안전

구 분	Mr (kN.m)	Mo (kN.m)	S.F
Combo 1	6771.098	1557.253	4.348
Combo 2	7071.845	1557.253	4.541
Combo 3	6093.988	1557.253	3.913
Combo 4	6093.988	2875.570	2.119

* 활동에 대한 안전

<표 2.79> 옹벽 - 외적안정평가 활동에 대한 안전

구 분	Hu (kN)	H (kN)	S.F
Combo 1	902.641	411.069	2.196
Combo 2	938.867	411.069	2.284
Combo 3	812.377	411.069	1.976
Combo 4	812.377	533.105	1.524

* 지지력에 대한 안전

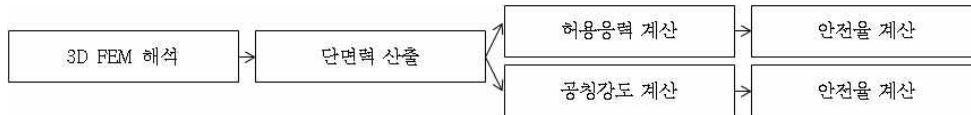
<표 2.80> 옹벽 - 외적안정평가 지지력에 대한 안전

구 분	Qmax (kN)	Qmin (kN)	Qa (kN)	S.F
Combo 1	263.403	112.698	1967.500	7.5
Combo 2	265.396	125.799	1967.500	7.4
Combo 3	251.662	86.829	1967.500	7.8
Combo 4	379.733	0.000	2951.300	7.8

4. 취수터널

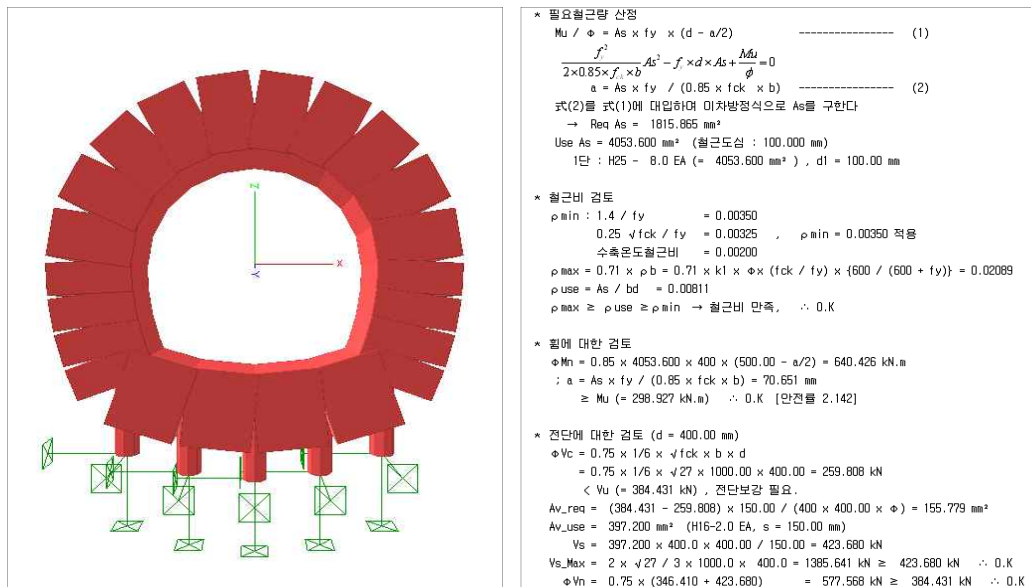
가. 취수터널의 내하력 평가 방법

취수터널 경우 다음 <그림 2.64>과 같이 3D FEM 해석을 통해 단면력을 산출하고 허용응력설계법과 강도설계법을 통해 안전율을 계산 함으로서 내하력을 평가하는 것으로 하였다.



<그림 2.64> 취수터널 내하력 평가 방법

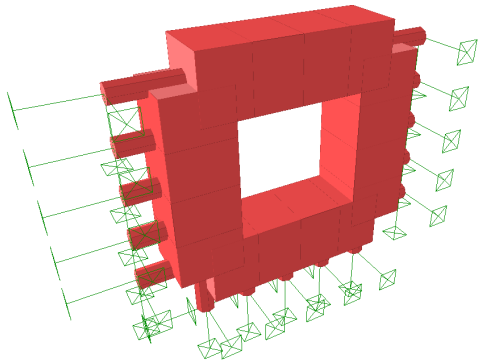
3D FEM 해석모델은 부록에 수록하였으며, 대표적으로 마제형 단면의 해석 모델과 강도설계법의 예를 첨부 하였다.



<그림 2.65> 취수터널 내하력 평가 모델

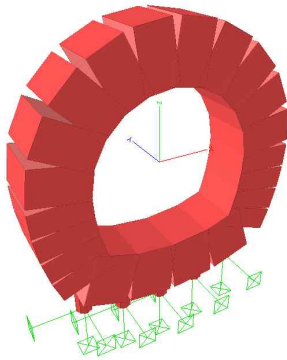
나. 단면별 취수터널의 구조해석 모델

1) 사각형 취수터널



<그림 2.66> 사각형 취수터널 구조해석 모델

2) 마제형 취수터널



<그림 2.67> 마제형 취수터널 구조해석 모델

다. 강도설계법에 의한 응력 검토
 취수터널의 부재는 설계법에 의하여 안전율을 계산하며 그 예는 다음과 같다.

<p>Design Conditions</p> <p>Design Code : KCI-USD07</p> <p>Material Data</p> <p>$f_{ck} = 24 \text{ N/mm}^2$ ($\beta_1 = 0.850$)</p> <p>$f_y = 400$, $f_{ys} = 400 \text{ N/mm}^2$</p> <p>Section Data</p> <p>B = 1000 mm H = 500 mm</p> <p>Rebar Data</p> <p>Upper : 4/4 - D22</p> <p>Lower : 4/4 - D25</p> <p>Skin : 4/4 - D16</p> <p>Total Rebar Area = 8739 mm² ($\rho_{st} = 0.0175$)</p>	
<p>Design Force and Moment</p> <p>$M_u = 275.0 \text{ kN}\cdot\text{m}$, $T_u = 0.0 \text{ kN}\cdot\text{m}$</p> <p>$V_u = 0.0 \text{ kN}$</p>	
<p>Check Tension Bar Ratio and Crack Width</p> <p>$A_{s,min} = \text{Max} \left[\frac{0.25\sqrt{f_{ck}}}{f_y} B_d, \frac{1.4}{f_y} B_d \right] = 1444 < A_{s,ten} = 4054 \text{ mm}^2 \text{ ---> O.K.}$</p> <p>$s_{max} = \text{Min} [375(210/f_y) - 2.5c_c, 300(210/f_y)] = 171 < s = 292 \text{ mm} \text{ ---> N.G.}$</p>	
<p>Check Bending Moment Capacity</p> <p>Strength Reduction Factor $\phi = 0.850$</p> <p>Balanced Axis Depth $c_b = 263 \text{ mm}$</p> <p>Neutral Axis Depth $c = 108 \text{ mm}$</p> <p>Max. Tensile strain $\epsilon_t = 0.0091 > 0.0040 \text{ ---> O.K.}$</p> <p>Tension : Rebar $T_s = -2257.0 \text{ kN}$</p> <p>Compression : Rebar $C_s = 380.4 \text{ kN}$</p> <p>Compression : Concrete $C_c = 1876.6 \text{ kN}$</p> <p>Design Moment Capacity $\phi M_n = 638.4 \text{ kN}\cdot\text{m}$</p> <p>$M_u / \phi M_n = 0.431 < 1.000 \text{ ---> O.K.}$</p>	

라. 평가결과

1) 공칭 강도 계산

<표 2.81> 취수터널 - 공칭강도계산

구 분		상부슬래브	하부슬래브	좌측벽체	우측벽체
사용재료 (Mpa)	fy	400	400	400	400
	fck	24	24	24	24
사용 철근량	상부	D25*8	D25*8	D25*8	D25*8
	하부	D25*8	D25*8	D25*8	D25*8
단면치수 (mm)	B	1000	1000	1000	1000
	H	500	500	500	500
순피복두께 (mm)		40	40	40	40
강도저감계수		0.850	0.850	0.850	0.850
균형파괴축 (mm)		263	263	263	263
중립축 (mm)		108	108	108	108
공칭강도 (kNm)		638.4	638.4	638.4	638.4

2) 안전율 계산

<표 2.82> 취수터널 - 안전율 계산

구 분	위 치	ΦM_n	Mu	S.F
		kN.m	kN.m	
상부슬래브	단지점부(좌측)	640.43	275.91	2.32
	중앙부	502.60	387.43	1.30
	단지점부(우측)	640.43	352.66	1.82
하부슬래브	단지점부(좌측)	795.41	509.18	1.56
	중앙부	620.68	430.43	1.44
	단지점부(우측)	620.68	300.02	2.07
좌측벽체	상부	795.41	298.93	2.66
	중앙부	640.43	-377.59	-1.70
	하부	502.60	525.59	0.96
우측벽체	상부	795.41	471.34	1.69
	중앙부	640.43	-407.30	-1.57
	하부	502.60	289.88	1.73

제7절 내하력 평가 시스템 개발

1. 내하력 평가 시스템 개요

가. 개발 개요

농업용 저수지 구조물의 내하력평가 시스템은 취수탑, 옹벽, 취수터널의 내하력을 3D 유한요소 해석법을 통해 평가하는 시스템이다.

프로그램 언어	: C/C++를 사용한 객체지향 프로그래밍
개발 도구	: Microsoft Visual Studio 6.0
개발 기간	: 2012.01 ~ 2012.11
소 유 권	: 프로그램 사용 및 배포에 관한 모든 권한

나. 개발 내용 및 실적

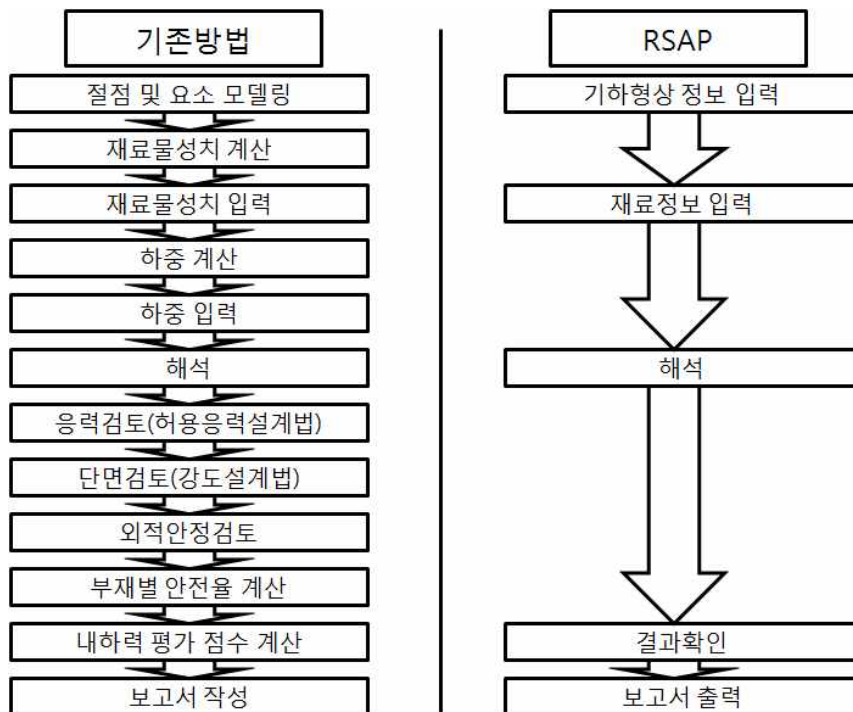
<표 2.83> 내하력평가 시스템 개발 실적

구분	내용
1. 기본설계	
1) 요구분석	업무분석 및 프로그램 요구분석
2) 시스템 설계	프로그램 구성 및 시스템 설계
2. 템플릿 개발	
1) 취수탑	취수탑의 기하형상, 지점, 하중 조건, 재료물성치 자동 생성
2) 옹벽	옹벽의 기하형상, 지점, 하중 조건, 재료물성치 자동 생성
3) 취수터널	취수터널의 기하형상, 지점, 하중 조건, 재료물성치 자동 생성
3. 내하력 평가 기능	
1) 응력 검토	허용응력설계법, 강도설계법에 의한 응력 검토 기능
2) 외적 안정성 검토	활동, 전도, 지지력에 대한 안정성 검토 기능
3. 기본기능	
1) 전처리	기하형상, 재료물성치, 지점, 하중조건 모델링 기능
2) 해석 솔버	솔리드, 프레임요소의 정적, 동적 하중에 대한 해석 기능
3) 후처리	부재력, 응력, 반력, 변위 확인 기능
3. 보고서 출력 기능	각종 보고서 출력 기능

2. 내하력 평가 시스템 구현모습

가. 평가 프로세스

기존의 내하력 평가 프로세스를 분석한 결과 모델링 방법이 불편하고 하중등의 계산에 많은 수고가 필요한 문제가 있었다. 이에 프로그램에서는 평가 프로세스를 기하형상 정보 입력, 재료정보 입력, 해석, 결과확인, 보고서 출력의 다섯 단계로 축소하여 소요되는 인력 및 시간을 줄일 수 있도록 하였다.



<그림 2.68> 내하력 평가 시스템 프로세스

나. 템플릿을 통한 모델링

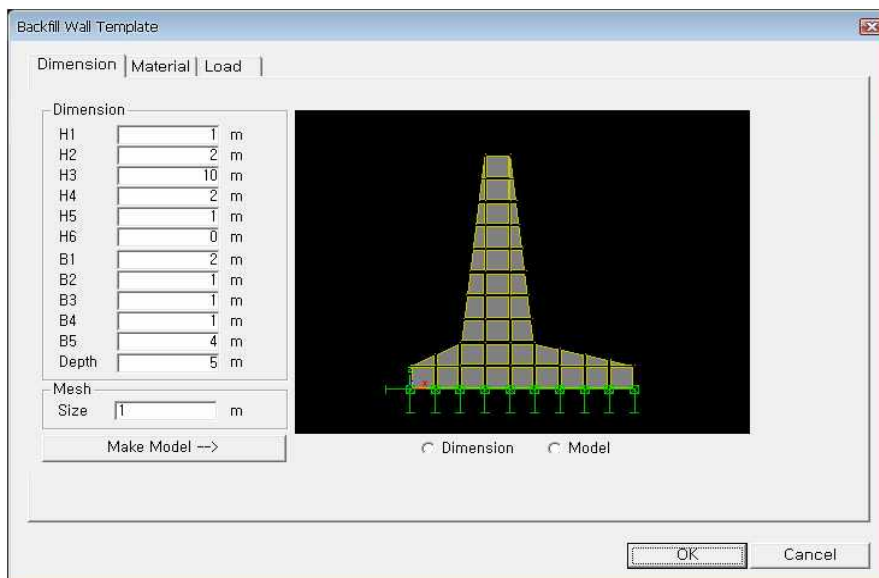
평가시간의 단축 및 사용성을 위하여 각 구조물 별 모델링 템플릿을 구현하였다. 템플릿에서는 기하형상, 정적하중 및 동적하중, 지점조건, 재료 물성치를 자동으로 생성할 수 있다.

각 템플릿은 채원(Dimension Tab), 재료물성치(Material Tab), 하중(Load Tab)의 세 가지 탭으로 구성된다. 채원에서는 치수 및 메쉬 사이즈를 입력할 수 있고, 재료물성치에서는 사용하는 콘크리트 정보 및 토질정보가 입력된다. 마지막으로 하중에서는 정적 및 동적 하중을 입력 받는다.

각 구조물 별 템플릿은 아래와 같다.

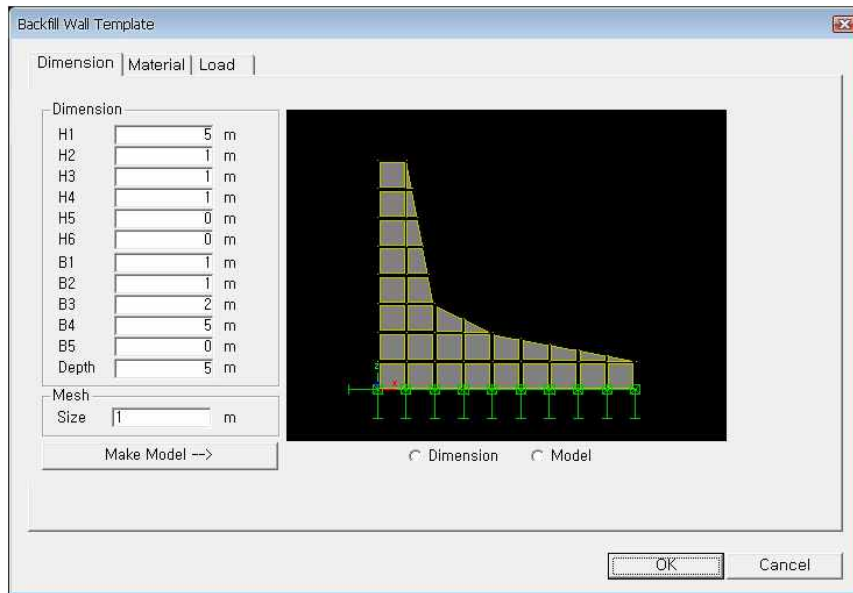
1) 옹벽

① 역 T형 옹벽



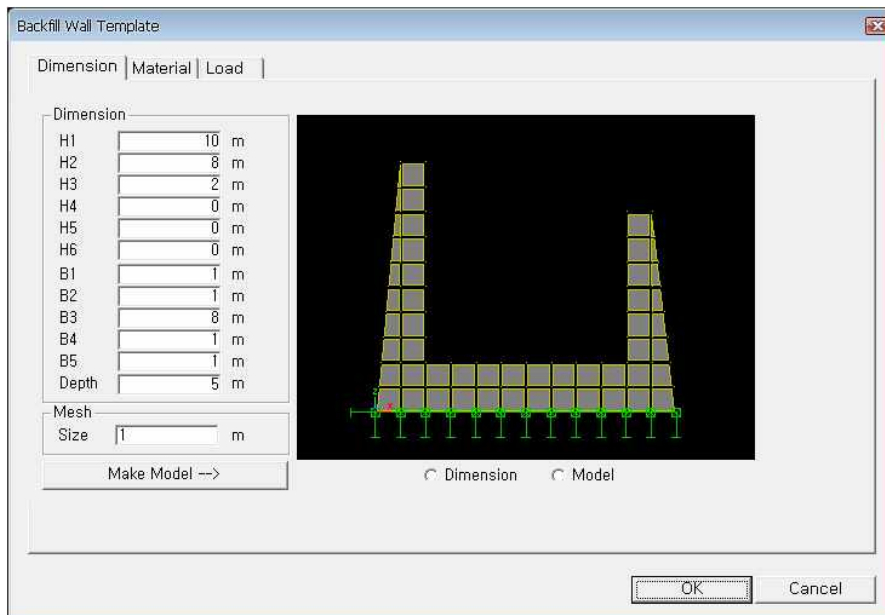
<그림 2.69> 역T형 옹벽 템플릿

② L형 옹벽



<그림 2.70> L형 옹벽 템플릿

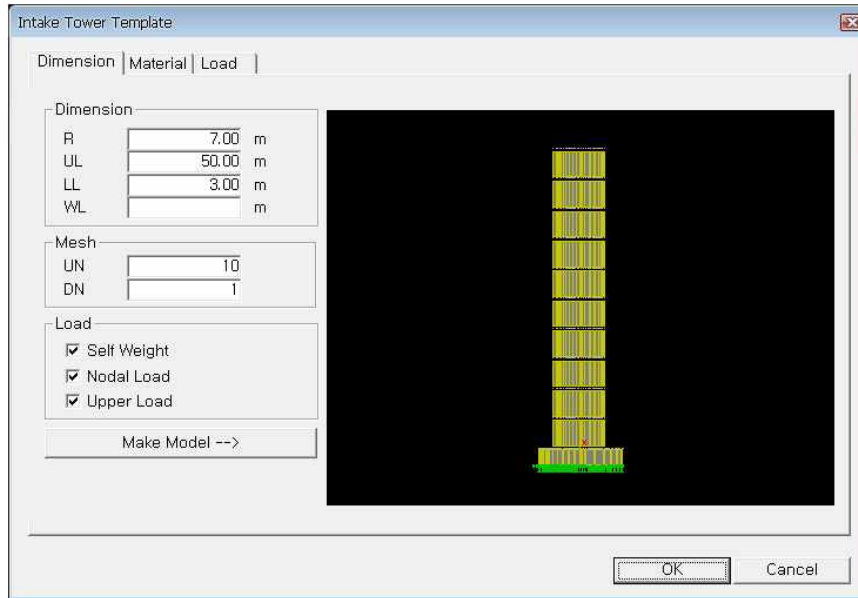
③ U형 옹벽



<그림 2.71> U형 옹벽 템플릿

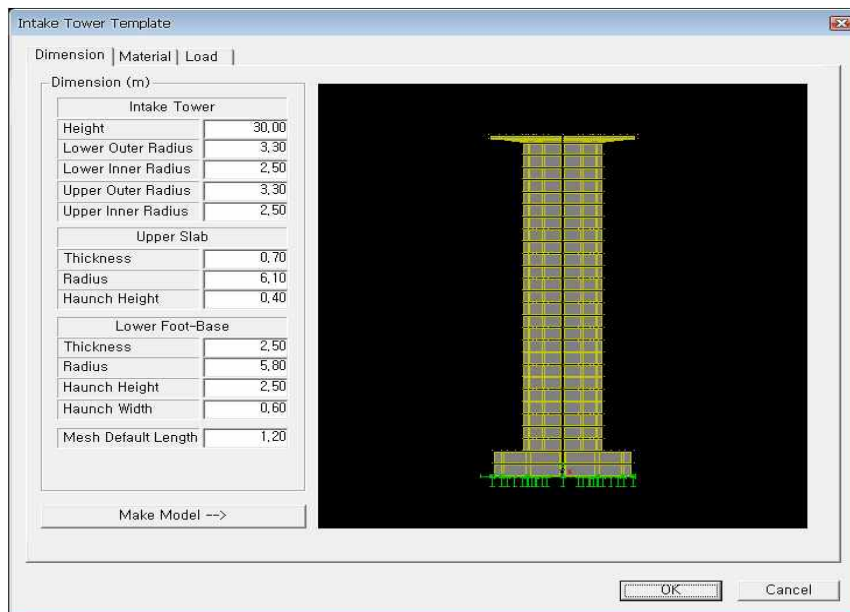
2) 취수탑

① 원형(복식)단면 취수탑



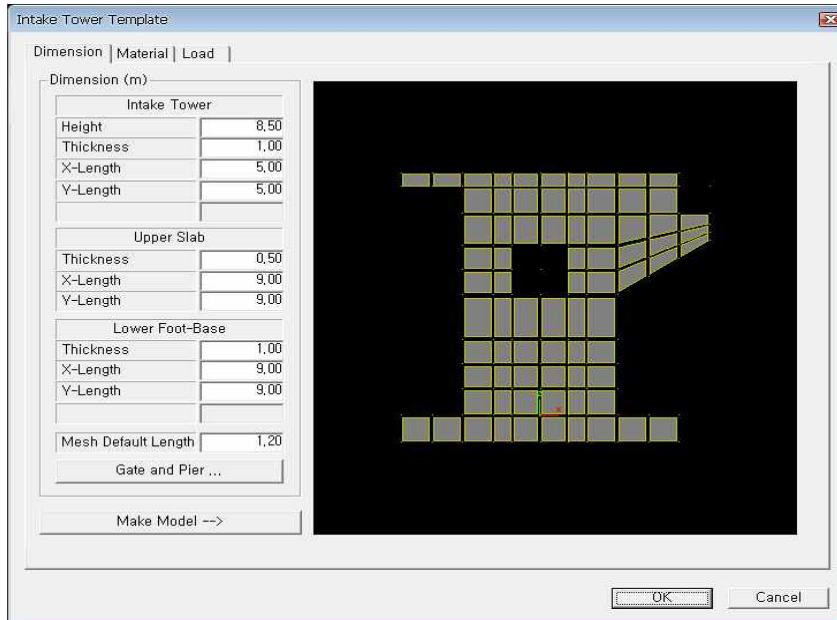
<그림 2.72> 원형(복식)단면 취수탑 템플릿

② 원형(단식)단면 취수탑



<그림 2.73> 원형단면 취수탑 템플릿

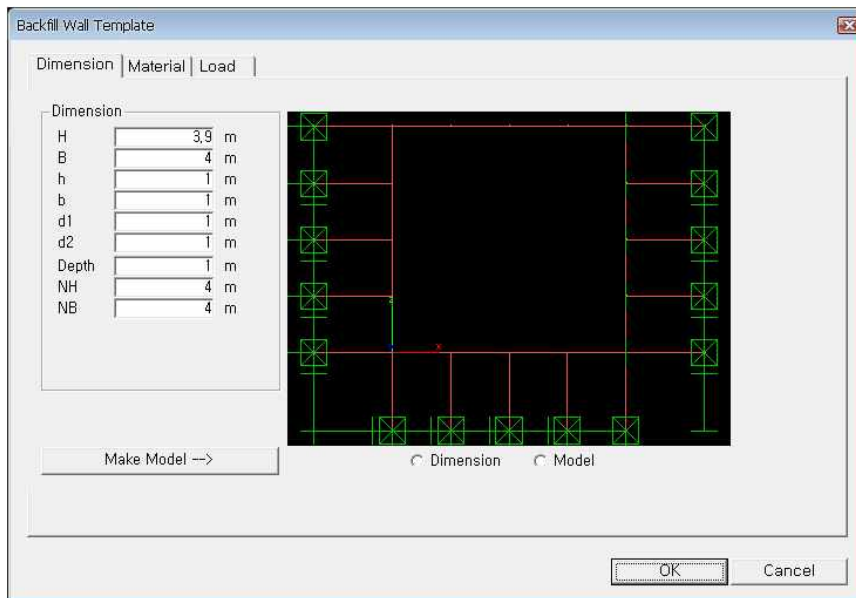
③ 사각단면 취수탑



<그림 2.74> 사각단면 취수탑 템플릿

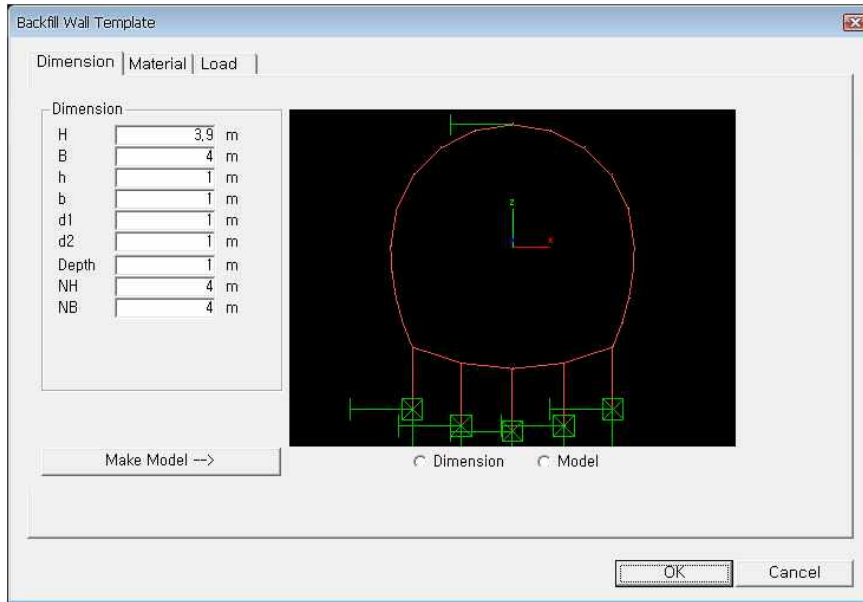
3) 취수터널

① 사각형 취수터널



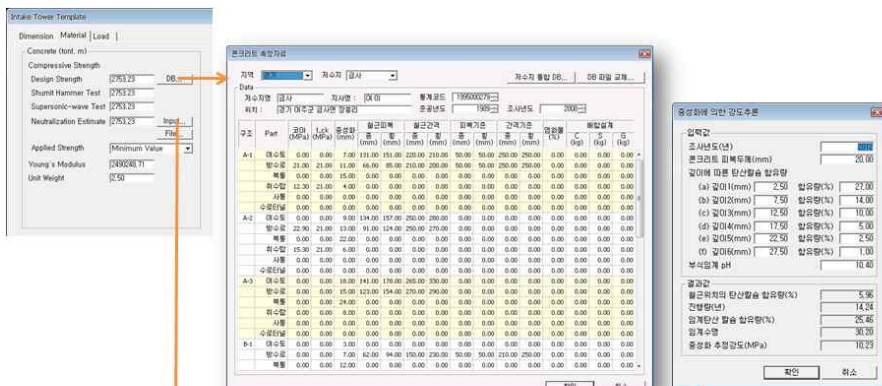
<그림 2.75> 사각형 취수터널 템플릿

②마제형 취수터널



<그림 2.76> 마제형 취수터널 템플릿

다. 콘크리트 압축강도 결정



<그림 2.77> 콘크리트 압축강도 입력

콘크리트의 압축강도는 DB에서 추출하는 방법, 중성화에 의한 추론법, 슈미트헤머법, 초음파법에서 선택적으로 사용할 수 있게 구현 하였다.

선택방법은 개별항목을 직접 선택하거나, 최소값, 평균값, 최대값등을 자동으로 적용할 수 있게 하였다.

라. 3D FEM해석 솔버

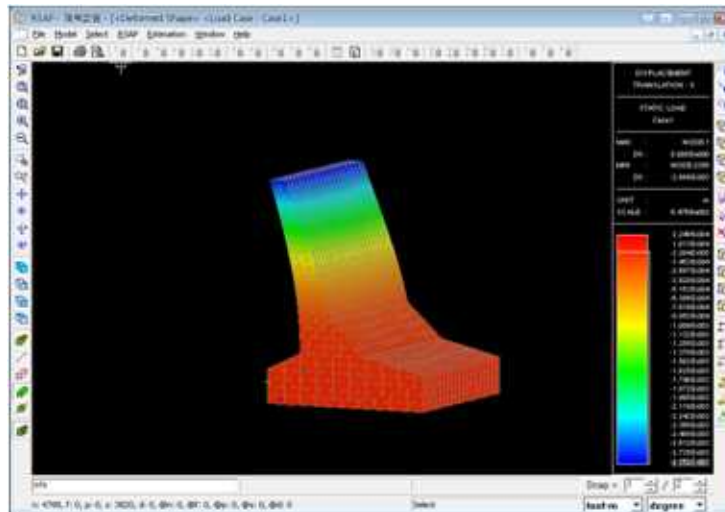
<표 2.84> 솔버 스펙

해석	1. 사용요소	1. 부재	1. 트러스		
			2. 보		
		2. 요소	1. 평면요소	1. 평면응력요소	
				2. 평면변형도요소	
				3. 축대칭요소	
			2. 쉘요소		
			3. 솔리드요소		
			4. 전단벽요소		
	2. 해석방법	1. 하중	1. 정적		
			2. 동적	1. 고유치해석	
				2. 응답스펙트럼해석	
		3. 시간이력해석			
		2. 하중-변위/ 응력-변형도	1. 선형		
			2. 비선형	1. 재료비선형	
2. 기하비선형					

마. 해석결과 확인

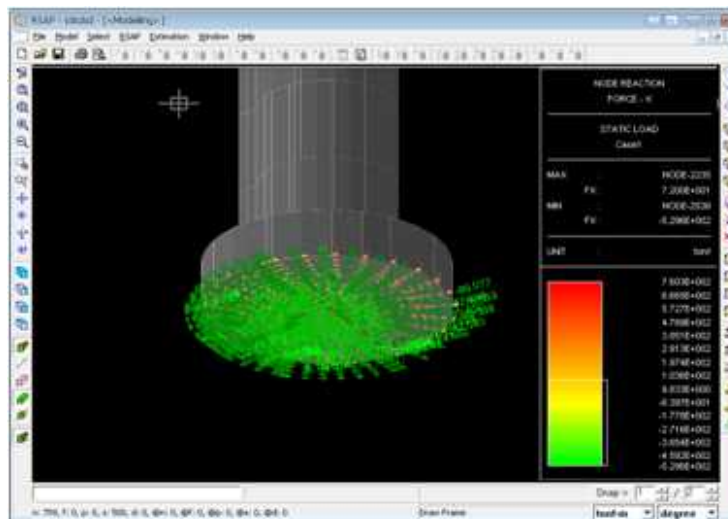
해석한 결과는 3차원 그래픽을 통해 확인할 수 있도록 구현하였다. 확인할 수 있는 내용은 변위, 반력, 부재력, 응력과 함께 동적해석의 결과인 모드형상, 고유주기, 고유치 등의 확인이 가능하다.

1) 변위



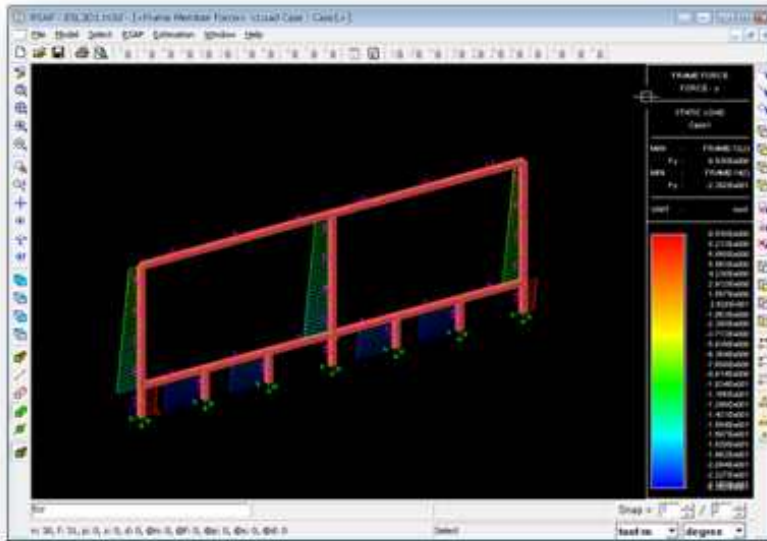
<그림 2.78> 변위 확인 기능

2) 반력



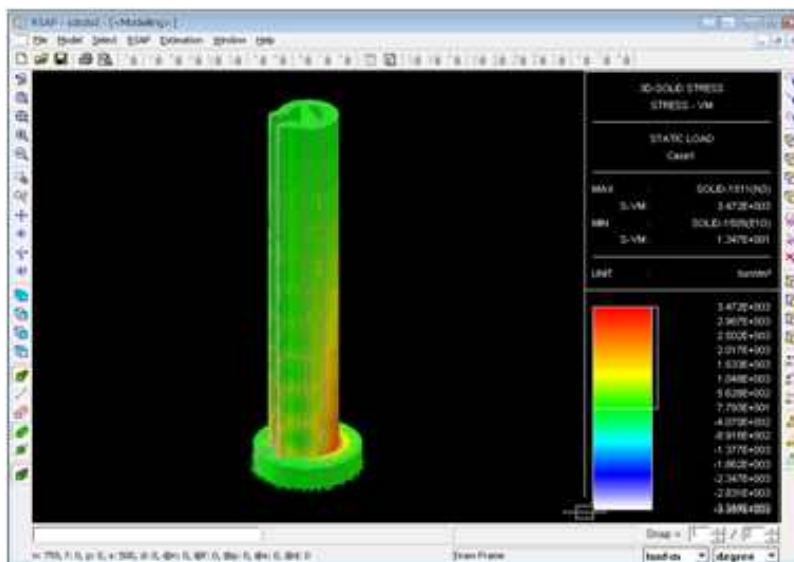
<그림 2.79> 반력 확인 기능

3) 부재력 및 단면력



<그림 2.80> 부재력 및 단면력 확인 기능

4) 응력



<그림 2.81> 응력 확인 기능

바. 보고서 출력

1) 보고서 종류

정밀안전진단 보고서에 바로 활용할 수 있는 보고서의 출력기능을 구현하였다. 출력가능한 보고서 타입은 다음과 같다.

* 기본정보(Geometry & Load)

해석에 사용한 기본 정보를 표현하는 보고서로 재원, 하중, 재료 물성치 등이 표현된다.

* 응력검토

허용응력 설계법 및 강도설계법에 의한 응력검토 보고서이다.

* 외적안정검토

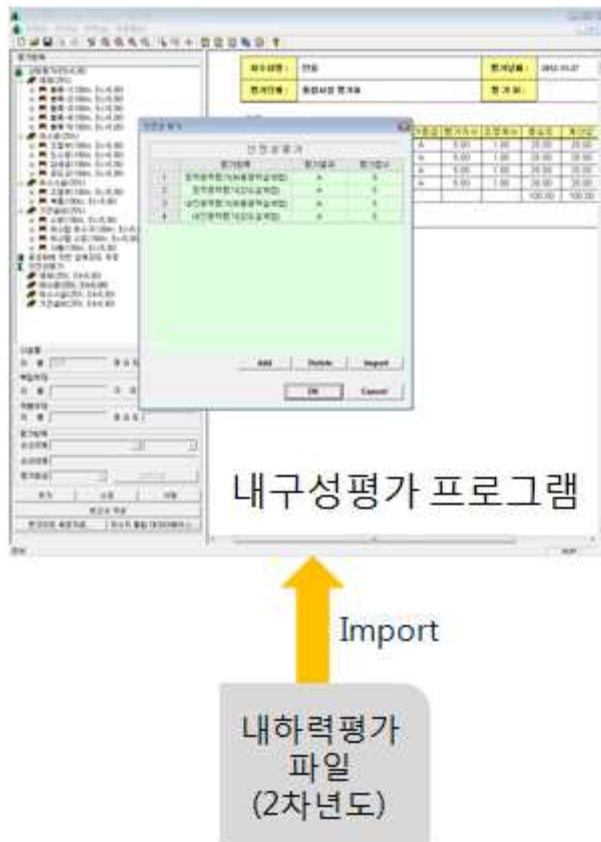
활동, 전도, 지지력에 대한 안정검토 보고서이다.



<그림 2.82> 보고서 출력

사. 1차년도 연계

내하력평가는 정밀안전진단 보고서에 활용되는 자료이므로 1차년도 내구성 평가 시스템에서 2차년도 내하력 평가 시스템의 파일을 참조 할 수 있도록 구성하였다. 개별시설물 평가에 안전성평가 카테고리로 추가되며 그 방법은 아래와 같다.

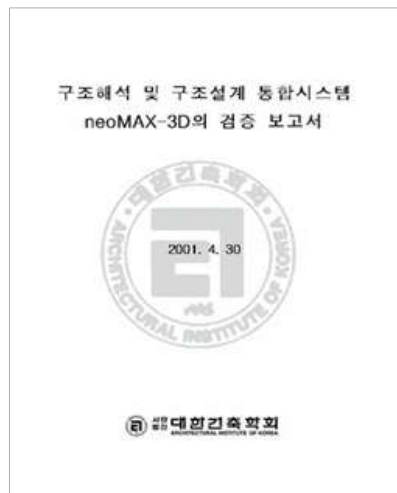


<그림 2.85> 1차년도 연계 작업

3. 내하력 평가 시스템 검증

가. 해석 솔버 검증

프로그램에 탑재한 해석솔버는 neoMAX-3D로 지난 2001년 대한건축학회로부터 검증 받은 솔버이다. 한국 농어촌 공사에서는 “양배수장 설계 프로그램” 등의 프로그램 개발에 사용되어 왔고, 그 결과에 대해 신뢰성이 있다고 판단된다.



<그림 2.86> 솔버검증보고서

나. 프로그램 검증

각 구조물에 대하여 다른 상용 프로그램(MIDAS GEN, SAP 2000)과의 최대 변위를 통한 검증을 수행 하였고 그 내용은 다음 <표 2.85>와 같다.

항목	결과 일치 여부
원형(단식)단면 취수탑	일치
역 T형 옹벽	일치
마제형 취수 터널	일치

<표 2.85> 내하력평가 시스템 검증결과

4. 프로그램 코드

```

////////////////////////////////////
// 3. IntakeTower template
////////////////////////////////////
struct xTemplateInTower
{
    // 1. dimension
    xFLOATArray spanz; // story height
    xFLOATArray spanr; // radius

    // 2. option
    xBOOL bMember[xTC_MEM_CNT]; // include each member type ?
    xBOOL bAutoBC; // set boundary condition ?
    xSHORT nSegment; // segment count

    // 3. section and group
    xLONGArray secA; // section index
    xLONGArray grpA; // group index

    // 4. Dimension
    double dDia;
    double dUpperLength;
    double dLowerLength;
    int nUpperDivide;
    int nLowerDivide;
    xBOOL bSelfWeight;
    xBOOL bNodal;
    xBOOL bUpper;
    int nMat1;

    // Operations
    xTemplateInTower() { Init(); }
    void Init(int no=3);
    void SetDone();
    void MakeCylinder(xGeoTemplate& st);
};

```

<그림 2.87> 취수탑 해석 코드

```

struct xTemplateWall
{
    // 1. dimension
    xFLOAT arH[S];
    xFLOAT arB[S];
    xFLOAT fDepth;
    xFLOAT fMeshS;

    // 2. Concrete
    xFLOAT fFck; // 설계기준 강도
    xFLOAT fFsh; // 슈미트 배치
    xFLOAT fFus; // 초음파 시험
    xFLOAT fFcc; // 종심화 시험
    int nFTp; // 강도 적용방법 : 0. fFck, 1.fFsh, 2.fFus, 3. fFcc, 4. Min, 5. Max
    xFLOAT fEcc; // 탄성계수
    xFLOAT fCWg; // 단위중량

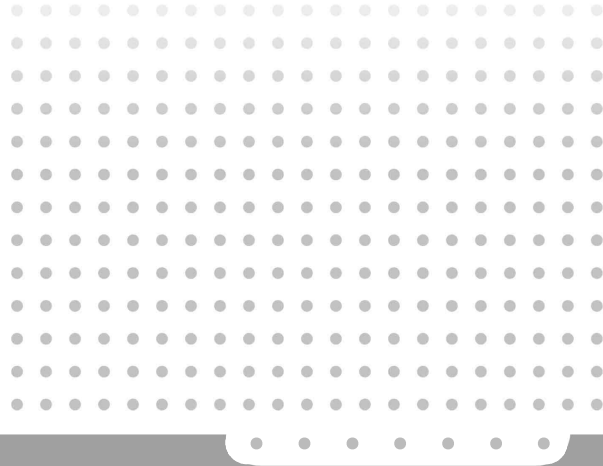
    // 3. 뒷채움 흙
    xFLOAT fBWg; // 단위중량 (Back Soil Unit Weight)
    xFLOAT fBFA; // 마찰각 (Back soil Friction Angle)
    xFLOAT fBSA; // 경사각 (Back soil Slanting Angle)
    xFLOAT fBWF; // 벽면 마찰각 (Back soil Wall Friction angle)

    // 4. 지반 조건
    xFLOAT fFWg; // 단위중량 (Footing Soil Unit Weight)
    int nFNS; // 타격회수 (Number of Strike)
    xFLOAT fFFA; // 마찰각 (Foot soil Friction Angle)
    xFLOAT fFAP; // 점착력 (Foot soil Adhesive Power)
    xFLOAT fFAB; // 허용지지력 (Foot soil Allowable Bearing capacity)
    xFLOAT fFFC; // 마찰계수 (Foot soil Friction Coefficient)

    // Operations
    xTemplateWall() { Init(); }
    void Init(int nType=0);
    void MakeWallType1(xGeoTemplateP& st);
    void MakeWallType2(xGeoTemplateP& st); // L형 모델 만들기.
    void MakeWallType3(xGeoTemplateP& st); // U형 모델 만들기.
};

```

<그림 2.88> 취수터널 해석 코드



제3장 결 론

제3장 결론

제1절 내구성평가 시스템 개발 성과(1차년도)

1. 분취장치 개발 및 열분석

산간이나 평야부에 위치한 농업용 저수지 콘크리트 구조물로부터 콘크리트 분말시료를 깊이별로 용이하게 채취할 수 있는 휴대용 장치를 상업용 시제품에서 발굴하였다. 이렇게 채취한 콘크리트 분말로부터 중성화 정도를 계산할 수 있는 열분석 기법을 도입 함으로서 구조물의 손상을 최소한으로 한 현장 조사가 가능 함을 확인 하였다.

2. 콘크리트의 압축강도 추정

중성화에 의한 콘크리트의 압축강도 추정은 그 결과가 미치는 파급효과를 감안하여 조심스럽지만 많은 비파괴 예측법보다는 그 신뢰성이 높을 것으로 판단되어 조직샘플채취를 통한 예측기법을 제안하였다. 또한 2차년도의 내하력 평가시스템에는 고전적인 압축강도 추정법(코어실험, 슈미트해머 등)을 함께 구현하는 한편 설계년도에 따른 압축강도 추론 방법도 추가 탑재하여 신뢰성을 높이는 방안을 제안하였다.

3. 정밀안전진단 상태평가

콘크리트의 내구성을 평가하는 항목을 정밀안전진단 상태평가 항목에서 검토한 결과 동해에 대한 평가가 없는 것을 발견하고 동해에 대한 평가기법을 제안하였다. 또한, 콘크리트의 분말시료를 채취하여 중성화 깊이 측정, 보수시점예측, 압축강도 예측 등으로 활용하고 있는 열분석 자료를 이용하여 현재 수작업으로 진행하고 있는 중성화 측정법을 본 제안 방법으로 대체하고자 하였다.

4. 내구성 평가 시스템 개발

정밀안전진단업무의 효율성 증대를 목적으로 내구성평가시스템을 개발하였다. 내구성평가시스템은 업무의 효율성뿐만 아니라 지금까지의 진단자료의 DB화 기술자간의 편차의 최소화, 복잡한 평가알고리즘의 적용을 목적으로 개발되었다. 정밀안전진단의 상태평가 흐름을 시스템으로 구축하였으며, 중성화평가, 동해평가, 압축강도의 예측함수도 수치 모델화하여 시스템으로 구축하고 검증하였다.

제2절 내하력평가 시스템 개발 성과(2차년도)

1. 내하력 평가 체계 구축

기 실시된 정밀안전 진단 보고서를 분석하여, 현재 실시하고 있는 내하력 평가 방법을 정리하고 표준화된 방법을 제시하였다. 허용응력설계법과 강도설계법에 의한 응력검토와 함께 외적안정성 평가도 함께 제시하여 검토에서의 신뢰성을 확보하였으며, 다양한 형식(취수탑 5가지, 옹벽 3가지, 취수터널 2가지)의 구조물을 검토함으로서 대부분의 저수지에 적용할 수 있도록 하였다.

2. 내하력 평가 시스템 개발

내하력 평가 시스템은 사용성과 신뢰성에 초점을 맞추어 개발 하였다. 취수탑을 통해 입력한 물성치를 바탕으로 평가에 필요한 해석모델을 자동으로 생성 하였고, 보고서는 정밀안전진단 보고서에 바로 수록할 수 있는 형태로 개발하였다. 또한 동영상 형태의 튜토리얼도 함께 첨부함으로서 처음 사용자의 접근성을 향상 시키고자 하였다.

평가시스템의 신뢰성 확보를 위해 대한건축사협회에서 인증받은 해석솔버를 사용하였고, 다른 상용 해석 프로그램과의 비교를 통해 그 결과를 비교 검증 하였다.



참고문헌

1. 건설교통부, 2003, 콘크리트 표준시방서, 한국콘크리트학회
2. 국토해양부, 2011, 댐설계기준
3. 환경부, 2010, 상수도시설기준
4. 소방방재청, 2009, 국가내진성능기준(안)
5. 농림부, 2002, 농업생산기반정비사업계획설계기준 : 필댐편
6. 농림수산식품부, 2009, 농업생산기반정비사업계획설계기준 : 관수로편
7. 환경부, 1999, 상수도시설 내진 설계기준 마련을 위한 연구
8. 건설교통부, 1997, 내진설계기준연구 (Ⅱ)
9. 국토해양부, 2009, 콘크리트 표준시방서, 한국콘크리트학회
10. 농림수산식품부, 2008, 2008년 농업생산기반정비사업 통계연보
11. 농림부, 2003, 재해대비 수리시설 설계기준개정
12. 농어촌진흥공사, 1998, “농촌용수계획설계편람”,
13. 농업기반공사, 2005, 농업기반시설 정밀안전진단 실무지침
14. 양인환, 콘크리트 교량의 압축강도 추정기법, 대림기술정보, pp.52~58, 1999
15. 조빈아, 김찬순, 조영상, “비파괴검사 데이터를 이용한 다중 신경망 콘크리트 강도추정 모델의 개발”, 대한건축학회 학술발표논문집, Vol.24.No.2, 2004, pp215~218
16. 고경택, “동결융해 작용을 받는 콘크리트 구조물의 내구성능저하 예측기법”, 건설기술정보, pp. 11~15, 2001
17. 배인환, 이승재, “전문가 시스템을 이용한 유지관리 모니터링 기술”, 콘크리트학회지, Vol.12, No.3, pp.31~38, 2000.
18. 신경준, 이광명, 김지상, 배수호, “확률론적 방법기반의 내구성 설계 프로그램 개발”, 한국콘크리트학회 2007년 가을 학술발표회 논문집, pp.525~

528, 2007.

19. 조명석, 노재명, 권기주, “원전 장수명 운전을 위한 구조물 수명관리 통합 시스템”, 콘크리트학회지 Vol.22, No.6, pp.61~64, 2010.
20. Andrade C., “Quantification of Durability of Reinforcing Steel,” International RILEM Workshop, E & F. N. SPON, 1994.
21. Andrade C., and C.L. Page, “Pore Solution Chemistry and Corrosion in Hydration Cement System Containing Chloride Salt,” Cement and Concrete Research, Vol.21, pp.49~53, 1986.
22. Tang L, Nilsson L.O. “Chloride Binding Capacity and Binding Isotherms of OPC Paste and Mortars,” *Cement and Concrete Research*, Vol.23, pp.247~253, 1993.
23. Tuutti K., “Corrosion of Steel in Concrete,” Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 1982.
24. Weyers R.E. et al., “Service Life Estimates,” Concrete Bridges Protection and Rehabilitation: Chemical and Physical Techniques, Washington D.C., Strategic Highway Research Program, 1994.
25. D. C. Killoh, L. J. Parrott, and R. G. Patel, 1989, Influence of Curing at Different Relative Humidities on the Hydration and Porosity of a Portland/Flyash Cement Paste (SP-114), Vol. 114, pp. 157~174.
26. Pourbaix M., 1966, Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions, Pergamon Press, Oxford, pp. 307~21
27. Lee, J. G., Park, K. S., Kim, H. J., Lee, J. J., Prediction Model of Remaining Service Life of Concrete for Irrigation Structures by Measuring Carbonation, Journal of KCI, Vol.15, No.4, pp. 529~540, 2003.
28. 山下英俊, “凍結融解を受けるコンクリートの劣化豫測に關する研究”, 콘크리트工學年次論文報告集, Vol. 14, No. 1, 1992
29. OKUMURA Corporation, “耐久性診断・評價システム”, civil engineering

technology, 2003.

30. Magne Maage, Steinar Helland, Ervin Poulsen, Oystein Vennesland, and Jan Erik Carl, "Service Life Prediction of Existing Concrete Structures Exposed to Marine Environment", ACI Materials Journal, Vol. 93, No. 6, 1996, pp.602~608

주 의

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

■ 발 행 처

농업용저수지 구조물 내구성 내하력 평가 시스템개발	
발행일	2012. 12
발행인	정 해 창
발행처	한국농어촌공사 농어촌연구원
주 소	경기도 안산시 상록구 사동 해안로 391번지 전 화 031 - 400 - 1700 FAX 031 - 409 - 6055
※ 이 책의 내용을 무단 전재하거나 복사하면 법에 저촉됩니다. 단, 이 책의 출처를 명시하면 인용이 가능합니다.	

