



농업기반시설 정밀안전진단 평가기준 및 기법 개선(Ⅰ)

The Improvement of Assessment Criteria and Techniques of
Safety Inspection for Agricultural Infrastructures(I)



제 출 문

농림축산식품부 장관 귀하

본 보고서를 “농업기반시설 정밀안전진단 평가기준 및 기법개선”
과제의 1차년도 보고서로 제출합니다.

2014년 12월 30일

주관연구기관 : 한국농어촌공사 농어촌연구원

연구책임자 : 전 상 옥

연구원 : 최 병 한

송 성 호

용 환 호

정 민 철

허 건

허 준

이 규 상

김 성 필

엄 재 연

공동연구기관 : 공주대학교 산학협력단

연구책임자 : 박 승 기

연구원 : 정 남 수

윤 두 현

이 창 범

요 약 문

I. 제 목

농업기반시설 정밀안전진단 평가기준 및 기법개선

II. 연구기간

2014. 2 - 2014. 12(2년중 1년차)

III. 연구배경 및 목표

3.1 연구배경

- 현재 농업용 저수지 상태평가 기준으로 사용하고 있는 「농업생산기반시설 정밀안전진단 실무지침(한국농어촌공사, 2010.6)」 및 「농업생산기반시설 정밀안전진단실무 세부요령(한국농어촌공사, 2011.12)은 대규모 댐을 대상으로 제정되어 소규모 필댐이 대부분인 현실에 맞지 않아 개선방안 마련이 필요함
- 저수지 부대시설물(취수탑, 연락교, 취수터널, 여수로)의 내진성능평가에 대한 구체적인 기준이 없어 불필요한 대규모 보강공사가 예상되는 등 국고낭비 우려가 있어 내진성능 평가기법에 대한 정립이 필요함
- 농업생산기반시설 정밀안전진단 실무지침 및 세부요령에는 국토부의 콘크리트 댐 위주의 안전진단을 위한 물리탐사로 되어 있어 소규모 농업용 저수지에 대한 효과적인 조사와 진단을 위해서는 저수지 제원과 조사자료를 바탕으로 3차원 해석기준 및 방법 설정 필요

3.2 연구목적

- 농업용 저수지의 주요형식인 필댐의 구조적, 재료적 특성을 반영한 농업용 저수지 정밀안전진단의 상태평가 기준 개선 및 보완
- 저수지 부대시설물(취수탑, 연락교, 취수터널, 여수로)에 대해 강화된 내진설계 기준에 따른 내진성능평가 기법 개선 및 성능향상 기법 마련
- 수리시설물 안전진단을 위한 물리탐사 실무지침서 개발 및 보급으로, 해석 기술 체계화 및 표준화를 통한 안정적인 유지·관리 업무에 활용

IV. 연구내용

- 농업용 저수지 상태평가 항목 및 기준 개선
 - 현행 상태평가기준 문제점 도출 및 개선안 마련
- 강화된 내진기준에 따른 저수지 부대시설 내진성능평가 실무활용 기법 정립 및 개선
 - 저수지 부대시설물 내진설계 기법 파악 및 내진설계 기법정립 예제 작성
- 물리탐사 방법별 자료처리 및 해석 기준 제시
 - 물리탐사별 표준안 마련 및 실무지침서 개발 보급

V. 연구결과

5.1 농업용저수지 정밀안전진단 상태평가 기준개선(1과제)

농업용 저수지 정밀안전진단 상태평가 기준 문제점을 도출하기 위하여, 2004년부터 2013년 정밀안전진단 결과와 대상시설의 일반현황을 바탕으로 농업용저수지의 상류유역특성, 저수량, 하류유역특성, 주요용수 활용현황, 주변부활용 등 구조적 특성을 도출해 내고, 제체, 여수로

방수로, 취수시설 등 재료적 특성을 도출하며, 각 유형별로 저수지 시스템을 구성하는 개별 부재 및 시설의 연결과 가중치를 산정하여 개별 현상의 단순합에 의한 종합평가가 아닌 저수지 체계신뢰도에 의한 평가가 이루어질 수 있도록 개선안을 추진하며, 각 유형별로 개발된 평가표를 기존에 평가된 저수지에 적용하여 기존 결과와의 비교검토를 통해 특징을 살펴보고 관련전문가의 의견수렴을 통해 효용이나 보완 방안 등을 도출하고자 하였다.

2차년도 연구에서는 콘크리트댐 시공방식으로 되어 있는 현행 저수지 진단체계를 실제거동과 유사한 필댐 시공방식으로 변경하려고 한다.

5.2 저수지 부대시설물 내진성능평가 기준 검토 및 평가기법 정립(2과제)

- '댐·저수지 부대시설물(취수탑, 관리교)을 대상으로 먼저 국내 내진설계 기준을 파악 하고 실무에서 적용시 혼선을 예방할 수 있도록 적용 기준을 정립하였다. 또한 이를 활용한 내진성능평가에서는 다양한 기법(정적, 동적해석)을 활용하여 실무예를 제시하여 실무 적용시 활용성을 강화하였다.

5.3 수리시설물 안전진단을 위한 물리탐사 실무지침서 개발(3과제)

저수지 및 방조제 규모에 따른 표준화된 방법을 제시하여 정밀안전진단 조사자로 하여금 제체의 상태에 따른 물리탐사의 구체적인 방법을 제시하였을 뿐만 아니라 안전진단 부분에서 물리탐사의 역할을 증대하고자 하였다. 또한 1회성 조사의 단점을 극복하기 위해 3차원 모델링 방법을 도입하였으며, 낮은 등급의 시설물에 대해 2차 탐사의 필요성을 제시하였다. 향후 본 연구결과에서 제시한 방법에 의한 결과들이 축적되면, 전기비저항 감소율을 이용하여 시설물의 상태평가지수에도 반영될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 지금까지 제시한 물리탐사 방법이 시설물 특성에 맞게 잘 반영되어 적용될 경우 보다 효율적인 수리시설물 정밀안전진단이 가능할 것으로 기대된다.

Summary

I. Subject

The Improvement of Assessment Criteria and Techniques of Safety Inspection for Agricultural Infrastructures

II. Periods of Study

2014.2 - 2014.12(Total study periods : 2 years)

III. Research Background and purpose

3.1 Research Background

- 「Practice guideline on Precision Safety Inspection of Facility for Agricultural Infrastructure(KRC, 2010.6)」 and 「Detail Knack on Precision Safety Inspection of Facility for Agricultural infrastructure(KRC, 2011.12)」 that are used current standard of agricultural reservoir are made for large scale dam. Therefore, they are necessary to improve for small scale fill dam.
- It is necessary to establish the seismic capacity assessment of accessorial facility of reservoir(intake tower, connecting bridge, spillway, etc.) because unnecessary large scale reinforcement work may happens
- Because practice guideline and detail knack on precision safety inspection of facility for agricultural infrastructure contain geophysical exploration for concrete dam, it is necessary to set up 3-D translation standard and method based on reservoir data and inspection data in order to perform effective inspection about small scale agricultural reservoir.

3.2 Purpose of Research

- Improvement and supplementation about Precision Safety Inspection standard of facility for agricultural reservoir reflected structural and material characteristics of fill dam
- Provision about seismic capacity assessment improvement and performance improvement technique based on reinforced seismic design standard for reservoir facility(intake tower, connecting bridge, spillway)
- Utilization of stable management work through translation technique systematization and standardization as development and supply of geophysical exploration working guide for safety inspection of irrigation facility

IV. Research Content

- Improvement on article and criteria of condition assessment (1st project)
 - Deduction of problem and provision about improvement current criteria of condition assessment
- Correct about seismic capacity assessment working utilization and improvement for reservoir facility through reinforced seismic criteria(2nd project)
 - Grasp about seismic design technique and making right exercise
- Data processing for geophysical exploration ways and translation standard suggestion(3rd project)
 - Provision for criteria of geophysical exploration proposal and supply of working guide developed

V. Research Result

5.1 Precise Safety Inspection appraisal standard improvement of Agricultural Reservoir(1st project)

We deducted structural characteristics about upper stream basin, capacity, use state, periphery utilization of agricultural reservoir based on precision safety inspection result and general status from 2004 to 2013 in order to deduct problems of criteria of precision safety inspection assessment. Also, we deducted material property about dam body, spillway, water intake facility. We calculated connection and weighting of individual member and facility that consisted reservoir system by each type. So we pushed forward improvement suggestion to be made assessment from reservoir system credibility not comprehensive evaluation from simple sum of individual phenomenon. Also, we thought that deduct supplementations and ways through acceptance of expert's opinion about applying developable score card to assessed reservoir and checking feature through comparison and review of result. We will change current reservoir assessment system to form of construction work for fill dam similar to real motion.

5.2 Provision about seismic capacity standard check and assessment for reservoir facility(2nd project)

'We grasped domestic seismic design for dam-reservoir facility(intake tower, management bridge). We established application standard for prevention of confusion to working. Also, we utilized various techniques(static, dynamic analysis) so we reinforced activity.

5.3 Development of Engineering Geophysics Working Guide for Safety Inspection of Repair Facility(3rd Project)

We weren't only propose specific methods of engineering by proposing standardized methods according to scale of reservoir and sea dike but also increase parts of geophysical exploration in safety inspection. Also, we adopted three dimensional modeling methods in order to overcome weakness of investigation. We proposed the need of secondary exploration about facility of low grade. In future, after accumulate results about proposal methods from now research results, we think that it will be reflected at condition assessment index of facility by using resistivity reduction ratio. Also, until now if proposed geophysical exploration apply well, we expect that we will be possible more effective precision safety inspection of irrigation facility.

농업용저수지 정밀안전진단
상태평가 기준 개선(1과제)

제 목 차 례

제1장 서론	9
제1절 연구배경 및 필요성	9
1. 연구배경	9
2. 연구 목표	10
제2절 연구범위 및 추진체계	11
1. 연구의 범위	11
2. 연구 방법	11
제3절 연구 추진 과정	12
제2장 농업용저수지 현황	13
제1절 총괄	13
1. 관리주체별 현황	14
2. 저수지 종별 지역별 분포현황	15
3. 경과 년수별 현황	16
4. 저수량 규모별 현황	17
제2절 공사관리 저수지	18
1. 지역별 분포현황	18
2. 지역별, 경과 년수별 분포현황	18
3. 규모별 경과 년수 현황	19
4. 규모별 세부현황	21
5. 소관 지사별 분포현황	22
제3절 국내외 사례조사 및 분석	24
1. 해외 댐 유지관리 방법	24
2. 해외 진단표 종류	24
3. 필댐의 저수지 파괴원인	25
4. 일본 댐 진단표 분석	26
5. 미국 댐 진단표 분석	28

6. 파괴확률을 고려한 가중치설정 사례	29
7. 국내 연구 고찰	30
제4절 정밀안전진단 문제점 및 개선방향	32
1. 정밀안전진단 개요	32
2. 상태평가 개요	34
3. 평가유형, 영향계수 및 기준산정 방법	34
4. 현행 저수지의 상태평가 항목 및 기준	35
5. 상태평가 결과 산정방법	45
6. 정밀안전진단 상태평가 기준의 문제점	46
7. 상태평가 기준개선 방향	50
제3장 통계분석을 통한 저수지 유형화	53
제1절 정밀안전진단 결과자료 분류	53
1. 농업용저수지 정밀안전 결과 보고서 분석의 필요성 및 목적	53
2. 종합보고서 항목 분리·구축(2004~2013년)	54
제2절 저수지 유형화	58
1. 저수지 유형화 필요성 및 방법	58
2. 구축자료를 통한 통계분석	59
3. 주요인자에 대한 샘플링	68
4. 유형분류	74
제4장 지표식물을 이용한 누수구역 조사방법	78
제1절 누수구역 탐색용 지표식물종 선발	78
1. 환경 지표생물	78
2. 지표식물종 선발	79
제2절 농업용 저수지 제당의 식생조사 및 누수탐사	85
1. 식생조사방법	85
2. 식생조사 대상저수지 선정 및 현장조사	86
3. 대상저수지의 식생조사 결과	91
4. 대상저수지의 전기비저항 탐사	99
제3절 대상저수지의 누수구역 평가	100
참 고 문 헌	101

표 차례

(표2- 1) 관리기관별 수혜면적	15
(표2- 2) 저수지 종별 지역별 분포현황	15
(표2- 3) 경과년수별 저수지 현황	16
(표2- 4) 저수량 규모별 저수지현황	17
(표2- 5) 지역별 저수지 분포현황	18
(표2- 6) 지역별, 경과 년수별 저수지 분포현황	19
(표2- 7) 30만톤 기준 저수지 경과년수 현황	20
(표2- 8) 10만톤 기준 저수지 경과년수 현황	20
(표2- 9) 종별 세부현황	21
(표2- 10) 지역별 세부규모 분포현황	21
(표2- 11) 필댐의 누수현상	26
(표2- 12) 항목별 가중치	31
(표2- 13) 안전점검 종류 및 실시시기	33
(표2- 14) 농업용저수지 상태평가 항목기준 적용시 문제점	47
(표2- 15) 상태평가 고정수치 항목	48
(표2- 16) 농업용저수지 정밀안전진단 상태평가 기준개선 의견	51
(표3- 1) 종합보고서 평가항목	53
(표3- 2) 주성분 분석	60
(표3- 3) 상관관계분석	62
(표3- 4) 주요인자 결정	63
(표3- 5) 최종 군집분석	64
(표3- 6) 소속군집	65
(표3- 6) 1차표본	68
(표3- 7) 2차표본	69
(표3- 8) 전라도	70
(표3- 9) 경상도	71
(표3- 10) 충청도	72

(표3- 11) 경기도	72
(표3- 12) 강원도	72
(표3- 13) 주요인자에 대한 샘플링 및 자료요청	73
(표3- 14) 유형분류	74
(표3- 15) 유형별 가중치 설정	76
(표3- 16) 항목별 가중치범위	77
(표4- 1) 삶꼴을 고려한 습생식물 목록(1)	80
(표4- 1) 삶꼴을 고려한 습생식물 목록(2)	81
(표4- 2) 지표식물종 선발	83
(표4- 3) 피도계급판정기준(Braun-Blanquet, 1964)	85
(표4- 4) 저수지별 현장조사 개요	90
(표4- 5) 신흥저수지의 단면별 방형구 조사 결과표(1)	91
(표4- 5) 신흥저수지의 단면별 방형구 조사 결과표(2)	92
(표4- 6) 신흥저수지 출현 식물종의 출현빈도	94
(표4- 7) 동향저수지의 단면별 방형구 조사 결과표	95
(표4- 8) 동향저수지 출현 식물종의 출현빈도	96
(표4- 9) 산정저수지의 단면별 방형구 조사 결과표	97
(표4- 10) 산정저수지 출현 식물종의 출현빈도	98
(표4- 11) 산정저수지 전기 비저항탐사 현장조사	99
(표4- 12) 산정저수지 전기 비저항탐사 현장조사 결과	100
(표4- 13) 산정저수지 식생조사 결과	100

그림 차례

<그림2- 1> 농업용저수지 현황	13
<그림2- 2> 해외 진단표 종류	25
<그림2- 3> 일본 진단표	27
<그림2- 4> 미국 진단표	29
<그림2- 5> 가중치설정 사례	30
<그림2- 6> 정밀안전진단 업무흐름도	32
<그림2- 7> 시설물 평가 단계별 절차	45
<그림2- 8> 미국(EPRI)의 댐 진단과 성능평가 목록	46
<그림2- 9> 상태평가 검토대상 항목	47
<그림2- 10> 농업용저수지 상태평가 시행시 고려할 문제점	49
<그림3- 1> 종합보고서 제원	54
<그림3- 2> 종합보고서 상태평가	55
<그림3- 3> 종합보고서 보수·보강	56
<그림3- 4> 종합보고서 시설상태	57
<그림3- 5> 분석의 순서	59
<그림3- 6> 저수지별 군집정리	66
<그림3- 7> 항목별 군집	67
<그림3- 8> 유형별 빈도분석	75
<그림4- 1> 2014년 선정 누수구역 탐색용 대표 지표식물종	84
<그림4- 2> 군도계급판정기준	86
<그림4- 3> 예산군 광시면 신흥저수지	87
<그림4- 4> 안성시 양성면 동향저수지 현황도	88
<그림4- 5> 안성시 양성면 산정저수지 현황도	89
<그림4- 6> 산정저수지 전기비저항탐사 3D 결과도	99

제1장 서론

제1절 연구배경 및 필요성

1. 연구배경

우리나라는 옛날부터 농경문화가 발달되어 농업용수의 확보를 위해 전국에 걸쳐 많은 저수지를 축조하였으며, 국토의 약 70%가 산지이기에 지형이 비교적 험한 우리나라의 경우 유출이 빨라 토지의 보수력이 낮기 때문에 저수지는 농업용수를 안전하게 확보하는 수단이었다.(박삼규, 1999) 현재 2013년 기준으로 17,427여개의 저수지가 전국에 산재되어있으며, 이들 중 흙댐이 99% 이상이고, 50년 이상 경과된 저수지가 전체 70%를 차지하고 있다. 저수지 17,427개소 중에 한국농어촌공사에서 3,377개소, 지방자치단체가 14,050개소를 관리하고 있으며,(농업생산기반정비사업 통계연보, 2013) 시설물별 ‘시설물 안전관리에 관한 특별법(이하 시특법)’, ‘농어촌정비법’을 개정하여 저수지의 총 저수용량에 따라 1, 2, 3 종류로 시설물을 구분하고 있다. 시특법에서는 1종 저수지는 1,000만^m 이상을 보유할 수 있는 시설물이며, 2종 시설물은 100만^m~1,000만^m 이하를 보유할 수 있는 저수지로 지정하여 콘크리트댐 기준으로 진단 및 정기점검이 이루어지고 있으며 농어촌정비법에서는 30만^m 이상을 1종 시설물로 그 미만을 2종 시설물로 구분하여 시설물의 안전점검 및 정밀안전진단세부지침(국토해양부, 2010)을 준용하여 계수조정을 통하여 상태평가를 수행하고 있다.

이러한 저수지들이 장마, 태풍, 국지성호우 등 잦은 자연재해와 저수지 시설물의 노후화로 인한 균열, 누수 등의 문제로 붕괴사고가 일어나고 있다. 이러한 현상을 방지하기 위하여 한국농어촌공사(2011)은 ‘농업생산기반시설 정밀안전진단실무 세부요령’을 통하여 시설물을 조사·평가하고, 그에 대한 적절한 안전조치를 취하여 재해 및 재난을 예방하고 시설물의 효용성을 증진시킴과 더불어 과학적 유지관리를 체계화 하고 있다.

하지만 현행 안전점검 및 정밀안전진단은 국토부기준 (2010. 12) 대규모

댐 기준으로 준용하고 있으며 일반댐과 비교한 농업용 저수지는 규모가 매우 작기 때문에 국토부 기준을 적용하는 것은 불합리하다.

하지만 현행 안전점검 및 정밀안전진단은 국토부기준 (2010. 12) 대규모 댐 기준으로 준용하고 있으며 일반댐과 비교한 농업용 저수지는 규모가 매우 작기 때문에 국토부 기준을 적용하는 것은 불합리하다.

현재 농업용 저수지 정밀안전진단의 상태평가 기준으로 사용하고 있는 「농업생산기반시설 정밀안전진단 실무지침(한국농어촌공사, 2010.6)」 및 「농업생산기반시설 정밀안전진단실무 세부요령(한국농어촌공사, 2011.12)은 「안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(국토해양부, 2010.12)」을 준용하여 제정한 것으로서 시설물 결함에 대한 평가 기준은 대규모 댐을 대상으로 제정된 것이므로, 공사에서 관리하고 있는 소규모 필댐에 그대로 적용하는 것은 시설의 규모나 시설을 구성하고 있는 토질재료 등의 특성을 적절히 반영하지 못하고 있다.

따라서, 공사관리 저수지 형식 중 대부분을 차지하고 있는 필댐의 특성을 보다 정확히 반영한 시설물 상태평가 기준에 대한 개선방안의 마련이 필요하다.

2. 연구 목표

가. 농업용 저수지 정밀안전진단 상태평가 기준 문제점 도출 및 개선 방안을 수립하기 위하여 2004년부터 2013년 정밀안전진단 결과와 대상시설의 일반현황을 바탕으로 농업용저수지의 상류유역특성, 저수량, 하류유역특성, 주요용수 활용현황, 주변부활용 등 구조적 특성을 도출해 내고, 제체, 여수토방수로, 취수시설 등 재료적 특성을 도출하며, 저수지를 유형화

나. 각 유형별로 저수지 시스템을 구성하는 개별 부재 및 시설의 연결과 가중치를 산정하여 개별현상의 단순합에 의한 종합평가가 아닌 저수지 체계신뢰도에 의한 평가가 이루어질 수 있도록 추진

다. 각 유형별로 개발된 평가표를 기준에 평가된 저수지에 적용하여 기존 결과와의 비교검토를 통해 특징을 살펴보고 관련전문가의 의견수렴을 통해 효용이나 보완 방안 등을 도출

제2절 연구범위 및 추진체계

1. 연구의 범위

1,000만㎡ 이하의 농업용저수지 중에서 현재 공사가 관리하는 3,377개소와 지방자치단체에서 관리하는 14,050개 저수지 중 한국농어촌공사에서 정밀안전진단을 수행한 저수지를 대상으로 하였으며, 2011년 12월에서 작성된 농업생산기반시설 정밀안전진단실무 세부요령(한국농어촌공사, 2011.11)을 기준으로 개선방안을 도출하는 것을 연구의 범위로 설정하였다.

2. 연구 방법

한국농어촌공사(2011)은 ‘농업생산기반시설 정밀안전진단실무 세부요령’을 기준으로 기존연구와 문헌조사를 통해 농업용저수지의 정밀안전진단의 문제점을 도출하였으며, 2004년부터 2013년까지의 정밀안전진단보고서와 결과표를 통계적으로 분석하여 개선연구를 수행하고자 한다. 또한 도출된 개선방안에 대해 현장적용을 통해 적용성을 검토하려 한다.

가. D/B 구축 방법 및 과정

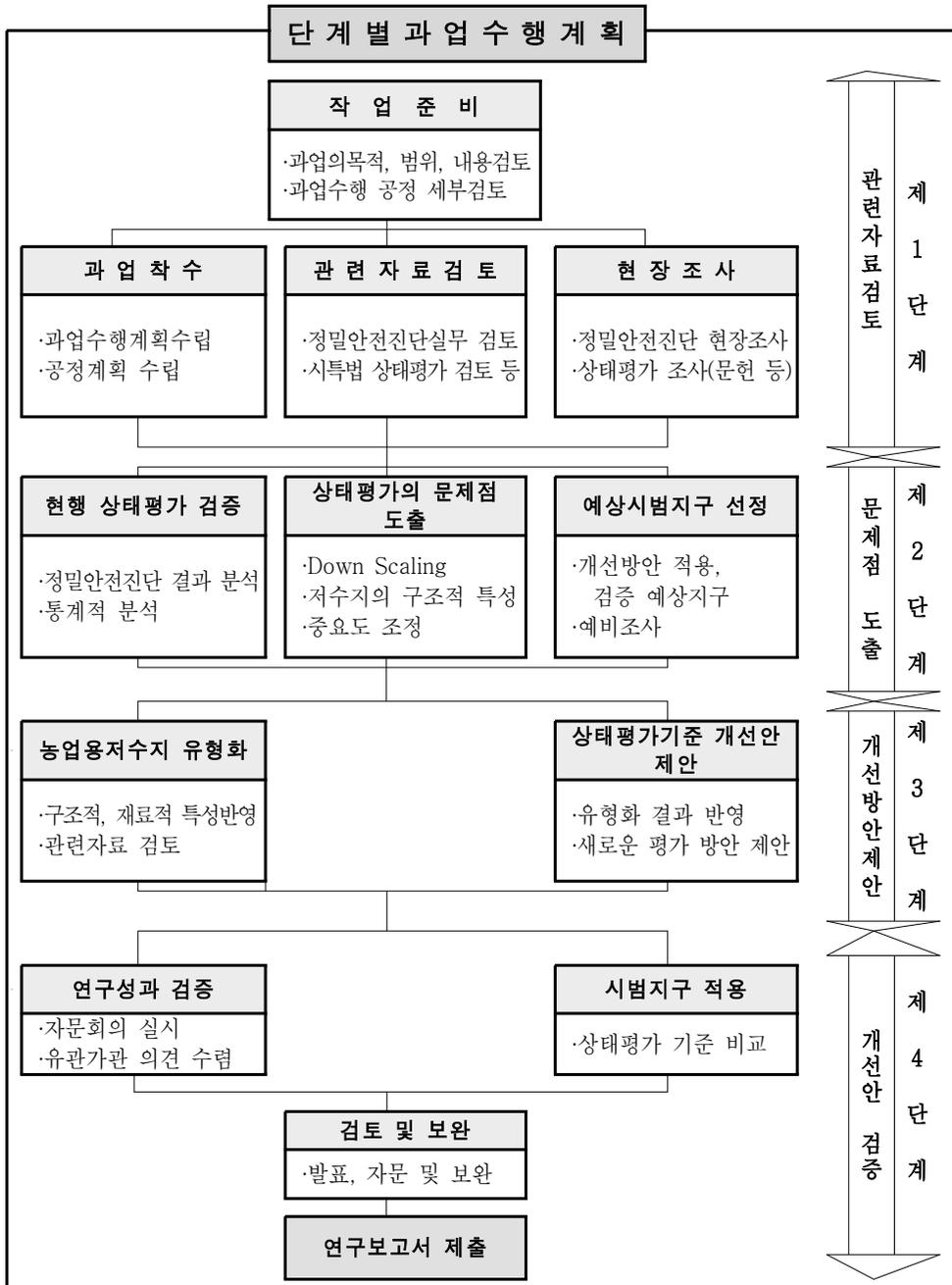
농업용저수지 정밀안전진단 상태평가 종합보고서를 바탕으로 주성분분석과 군집분석을 실시하여 각 군집에 소속되는 저수지들을 결정한다.

결정된 저수지들 중 다시 랜덤 샘플링을 통하여 최종적으로 150개 저수지를 선정하고 150개의 저수지에 대한 세부 상태평가 자료를 확보하여 집중도·기여도를 분석하고자 한다. 기여도·집중도분석을 위하여 세부 상태평가 자료를 한국농어촌공사 기술안전품질원에 결정된 150개 저수지에 대한 자료를 요청하여 구축하고자 한다.

나. 구축된 D/B의 통계분석

구축된 D/B의 항목별 집중도 분석을 통하여 저수지별 변별력이 부족한 항목을 찾아내려 한다. 예를 들어 분석대상 저수지의 특정한 항목이 모두 C등급으로 나왔다면 해당 항목의 경우 C등급의 범위만을 대상으로 세분화해야 한다. 또한 하위항목의 상위항목에 대한 기여도 분석을 통하여 적정한 가중치를 찾아내려 한다.

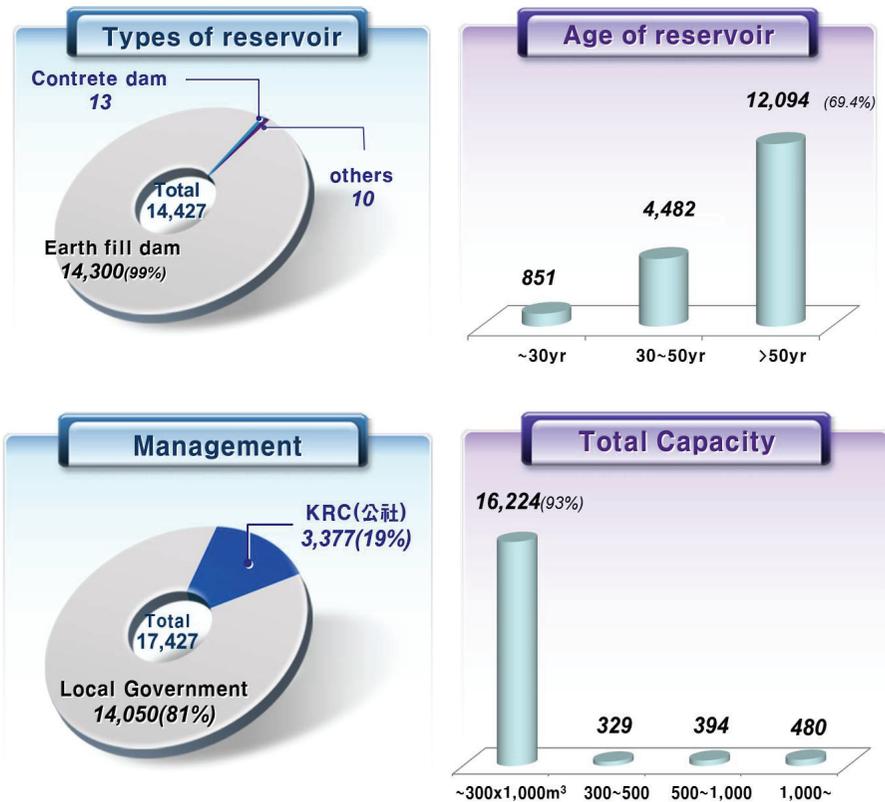
제3절 연구 추진 과정



제2장 농업용저수지 현황

제1절 총괄

농업용저수지는 전국에 걸쳐 총 17,427개소(농업생산기반정비사업 통계 연보, 2013)이고 이중 지자체에서 14,050개소(81%)를 관리하고 농어촌공사에서 3,377개소(19%)를 관리하고 있다. 또한, 총 저수용량 30만³미만 저수지가 16,224개소(93%)로 대부분을 차지하고 있으며, 저수지의 형식은 14,300개소(99%)가 필댐형식으로 되어있다. 또한, 준공후 경과 년도는 50년 이상이 12,094개소(70%)로서 매우 낡은 상태이다.



<그림2- 1> 농업용저수지 현황

공사관리 저수지 중 50년 이상된 시설물이 약 67%에 달하여 시설이 노후화 되거나 파괴되는 등 그 기능을 발휘하지 못하거나 재해발생의 우려가 있어 개보수가 필요한 저수지가 전국에 산재되어 있다.

단위 : 개소

계	계	17,427	공사 관리	3,377	지자체 관리	14,050
	50년미만	5,333		1,104		4,229
	50년이상	12,094		2,273		9,821

또한 대부분의 시설들이 현행 설계기준 제정이전에 설치되어 홍수방어 능력 부족, 시설 노후화 등으로 재해 우려도 있다.

공사에서 관리하고 있는 농업생산기반 수원공 시설은 저수지, 양배수장, 취입보 등 13,569개소에 이르며 수혜면적은 526천ha이다.

공사에서 관리하는 수혜면적 526천ha는 우리나라 총 논면적 964천ha의 54.5%에 해당하는 면적이고 수리답 777천ha의 67.7%에 해당하는 면적으로 우리나라 논의 과반이상을 공사에서 관리하므로써 농업생산기반시설을 관리하는 공사의 중요성을 잘 나타내고 있다.

저수지·댐 관리 주체는 한국농어촌공사, 한국수자원공사, 한국수력원자력(주), 시·군·구이며 한국농어촌공사는 농업용저수지, 한국수자원공사는 다목적댐 및 용수전용댐, 한국수력원자력(주)는 발전용댐, 시·군·구는 농업용저수지 및 상수원댐을 각각 관리하고 있다.

이중 농업용저수지는 17,427개소로서 공사관리가 3,377개소, 시·군·구 관리가 14,050개소가 있다.

1. 관리주체별 현황

농업용 저수지는 공사와 시·군에서 관리하는 것으로 구분할 수 있으며 공사에서 관리하는 저수지는 3,377개소에 수혜면적은 346,299ha이며 시·군에서 관리하는 저수지는 14,050개소에 수혜면적은 107,626ha이다.

공사에서 관리하는 저수지 개소당 수혜면적은 102ha로 시·군관리 개소당 수혜면적 8ha에 비해 10배 이상 규모가 큰 것으로 나타났다.

(표2- 1) 관리기관별 수혜면적

단위 : ha

구 분	계		公 社 관 리		시·군 관 리	
	개소수	면 적	개소수	면 적	개소수	면 적
저 수 지	17,427	453,010	3,377	346,299	14,050	107,626

2. 저수지 종별 지역별 분포현황

농어촌정비법 시행령 제26조 3항에 의거 저수지는 1종과 2종으로 구성되며 총저수량 30만톤 이상은 1종, 그 미만은 2종으로 구분된다.

(표2- 2) 저수지 종별 지역별 분포현황

단위 : 개소

구 분	계			농어촌공사 관리			시·군 관리		
	계	1종	2종	계	1종	2종	계	1종	2종
합 계	17,427	1,224	16,203	3,377	1,152	2,225	14,050	72	13,978
부 산	102	1	101	5	1	4	97	0	97
대 구	201	11	190	21	11	10	180	0	180
인 천	36	15	21	16	13	3	20	2	18
광 주	139	3	136	54	3	51	85	0	85
대 전	15	2	13	2	2	0	13	0	13
울 산	363	14	349	86	14	72	277	0	277
경 기	359	70	289	100	65	35	259	5	254
강 원	317	70	247	78	62	16	239	8	231
충 북	775	104	671	188	102	86	587	2	585
충 남	936	135	801	226	134	92	710	1	709
전 북	2,249	145	2,104	414	133	281	1,835	12	1,823
전 남	3,216	273	2,943	994	252	742	2,222	21	2,201
경 북	5,529	204	5,325	641	188	453	4,888	16	4,872
경 남	3,186	175	3,011	549	170	379	2,637	5	2,632
제 주	4	2	2	3	2	1	1	0	1

3. 경과 년수별 현황

농업용 저수지중 30년 이상 경과된 저수지는 전체 17,427개소의 95.1%에 해당하는 16,567개소에 이르며, 그중 50년 이상 경과된 저수지도 69.4%에 해당하는 12,094개소나 된다.

50년 이상 경과된 저수지 중 공사 관리 저수지가 18.8%인 2,273개소에 불과한 반면 시·군 관리 저수지는 9,821개지로 50년 이상 경과된 저수지의 81.2%를 차지하고 있다.

반면, 경과 년수 30년 미만의 저수지는 전체 저수지의 4.9%에 불과한 851개소로 나타났다.

(표2- 3) 경과년수별 저수지 현황

구분	계		30년 미만 (‘84년이후)		30년 이상(‘64~‘83년)					
					계		30~50년 (‘64~‘83)		50년 이상 (‘63년이전)	
	개소	%	개소	%	개소	%	개소	%	개소	%
계	17,427	100	851	4.9	16,567	95.1	4,482	25.7	12,094	69.4
공사	3,377	19.4	453	2.6	2,924	16.8	651	3.7	2,273	13.1
시·군	14,050	80.6	398	2.3	13,652	78.3	3,831	22.0	9,821	56.3

4. 저수량 규모별 현황

총저수량 기준으로 1만³미만의 저수지가 전체의 44%에 해당하는 7,668개소를 차지하고 있으며, 그중 공사 관리 저수지가 528개소(6.9%) 시·군 관리 저수지가 7,140개소(93.1%)를 차지하고 있다.

총저수량 100만³이상은 503개소로서 전체 저수지의 2.9%에 불과하며 시·군 관리 11개 저수지를 제외한 492개소가 공사 관리 저수지이다.

(표2- 4) 저수량 규모별 저수지현황

총 저수량 구간	계		공사관리		시·군관리	
	구 간 개 수	누 계 개 수	구 간 개 수	누 계 개 수	구 간 개 수	누 계 개 수
1만 ³ 미만	7,668	7,668	528	528	7,140	7,140
1만 ³ 이상~2만 ³ 미만	3,615	11,283	392	920	3,223	10,363
2만 ³ 이상~3만 ³ 미만	1,580	12,863	236	1,156	1,344	11,707
3만 ³ 이상~4만 ³ 미만	861	13,724	168	1,324	693	12,400
4만 ³ 이상~5만 ³ 미만	550	14,274	119	1,443	431	12,831
5만 ³ 이상~10만 ³ 미만	1,045	15,319	318	1,761	727	13,558
10만 ³ 이상~20만 ³ 미만	592	15,911	287	2,048	305	13,863
20만 ³ 이상~30만 ³ 미만	292	16,203	177	2,225	115	13,978
30만 ³ 이상~50만 ³ 미만	330	16,533	277	2,502	53	14,031
50만 ³ 이상~100만 ³ 미만	391	16,924	383	2,885	8	14,039
100만 ³ 이상~150만 ³ 미만	165	17,089	164	3,049	1	14,040
150만 ³ 이상~200만 ³ 미만	95	17,184	95	3,144	-	14,040
200만 ³ 이상~300만 ³ 미만	101	17,285	101	3,249	-	14,040
300만 ³ 이상~500만 ³ 미만	72	17,357	68	3,313	4	14,044
500만 ³ 이상~1,000만 ³ 미만	36	17,393	32	3,345	4	14,048
1,000만 ³ 이상~2,000만 ³ 미만	17	17,410	15	3,360	2	14,050
2,000만 ³ 이상~2,500만 ³ 미만	3	17,413	3	3,363	-	14,050
2,500만 ³ 이상~3,000만 ³ 미만	3	17,416	3	3,366	-	14,050
3,000만 ³ 이상~4,000만 ³ 미만	4	17,420	4	3,370	-	14,050
4,000만 ³ 이상~5,000만 ³ 미만	2	17,422	2	3,372	-	14,050
5,000만 ³ 이상	5	17,427	5	3,377	-	14,050

제2절 공사관리 저수지

1. 지역별 분포현황

공사관리 저수지는 전라남도에 전체의 31%에 해당하는 1,048개소가 있고 제주도는 3개소에 불과한 것으로 나타나고 있다.

전라남·북도, 경상남·북도에 전체 저수지의 81.8%에 해당하는 2,764개소가 분포되어 있다.

(표2- 5) 지역별 저수지 분포현황

단위 : 개소

시설별		본부별 계	지역분부								
			경기	강원	충북	충남	전북	전남	경북	경남	제주
저수지	소계	3,377	116	78	188	228	414	1048	662	640	3
	1종	1,152	78	62	102	136	133	255	199	185	2
	2종	2,225	38	16	86	92	281	793	463	455	1

2. 지역별, 경과 연수별 분포현황

공사관리 저수지중 50년 이상된 저수지는 지역별 분포와 비례하여 전라남·북도, 경상남·북도에 많이 분포되어 있다.

반면 30년 미만의 시설은 경남, 전남, 경북지역에 많이 분포된 것으로 나타났다.

(표2- 6) 지역별, 경과 년수별 저수지 분포현황

단위 : 개소

본부별	계		경과 년수					
			30년 미만 (‘84년 이후)		30년 이상 ~50년 미만 (‘64년~‘83년)		50년 이상 (‘63년 이전)	
	개소수	%	개소수	%	개소수	%	개소수	%
합계	3,377	100	453	13.4	651	19.3	2,273	67.3
경기	116	3.4	17	0.5	33	1.0	66	1.9
강원	78	2.3	23	0.7	21	0.6	34	1.0
충북	188	5.6	36	1.1	43	1.3	109	3.2
충남	228	6.8	48	1.4	46	1.4	134	4.0
전북	414	12.3	43	1.2	74	2.2	297	8.9
전남	1,048	31.0	87	2.6	204	6.0	757	22.4
경북	662	19.6	77	2.3	114	3.4	471	13.9
경남	640	18.9	122	3.6	116	3.4	402	11.9
제주	3	0.1	-		-		3	0.1

3. 규모별 경과 년수 현황

공사 관리 저수지중 30년 이상 경과된 저수지는 전체 3,377개소의 86.6%에 해당하는 2,924개소이며, 그중 50년 이상 경과된 저수지도 67.3%에 해당하는 2,273개소나 된다.

공사 관리 저수지중 규모 30만톤 이상의 1종 시설은 전체의 34.1%인 1,152개소이고, 30만톤 미만의 2종 시설은 전체의 65.9%를 차지하고 있다. 2종 시설 중에서도 50년 이상된 저수지가 전체 저수지의 53.2%에 해당하는 1,799개소가 있어 규모가 작고 경과 년수가 오래된 저수지가 많음을 알 수 있다.

(표2- 7) 30만톤 기준 저수지 경과년수 현황

단위 : 개소, %

구 분	계		30년 미만 (‘84년 이후)		30년 이상(‘64~‘83년)					
					계		30~50년 (‘64~‘83년)		50년 이상 (‘63년 이전)	
	시설 수	%	시설 수	%	시설 수	%	시설 수	%	시설 수	%
계	3,377	100	453	13.4	2,924	86.6	651	19.3	2,273	67.3
30만톤 이상	1,152	34.1	387	11.5	765	22.7	291	8.6	474	14.1
30만톤 미만	2,225	65.9	66	1.9	2,159	63.9	360	10.7	1,799	53.2

또한 저수지 규모를 10만톤 기준으로 볼때도 10만톤 미만의 저수지가 전체 저수지의 52.2%를 차지하는 것으로 나타났고 경과 년수 또한 50년 이상되는 10만톤 미만의 저수지가 전체 저수지의 43.3%에 해당하는 1,460 개소나 되는 것으로 나타나고 있어 30만톤 기준으로 했을때와 큰 차이를 보이지 않고 있다.

(표2- 8) 10만톤 기준 저수지 경과년수 현황

단위 : 개소, %

구 분	계		30년 미만 (‘84년 이후)		30년 이상(‘64~‘83년)					
					계		30~50년 (‘64~‘83년)		50년 이상 (‘63년 이전)	
	시설 수	%	시설 수	%	시설 수	%	시설 수	%	시설 수	%
계	3,377	100	453	13.4	2,924	86.6	651	19.3	2,273	67.3
10만톤 이상	1,616	47.8	429	12.7	1,187	35.1	374	11.1	813	24.0
10만톤 미만	1,761	52.2	24	0.7	1,737	51.5	277	8.2	1,460	43.3

4. 규모별 세부현황

가. 총괄

(표2- 9) 종별 세부현황

단위 : 개소

1종 (30만톤이상)	소계	1,152	2종 (30만톤미만)	소계	2,225
	30만톤이상~ 50만톤미만	277		30만톤 미만	2,225
	50만톤이상~ 100만톤미만	383			
	100만톤이상~ 1,000만톤미만	460			
	1000만톤이상	32			

나. 지역별 분포현황

30만톤 미만의 소규모 저수지는 전남지역에 794개가 분포되어 가장 많은 것으로 나타나고 있으며 전남지역 전체저수지 1,048개소의 75.8%에 이른다.

전북, 경상남·북도지역도 도내 분포된 저수지를 기준할 때 소규모 저수지의 비율이 높은 것으로 나타나고 있다.

(표2- 10) 지역별 세부규모 분포현황

단위 : 개소

본부별	계	총 저수량				
		30만 ^m ³ 미만	30만 ^m ³ 이상 50만 ^m ³ 미만	50만 ^m ³ 이상 100만 ^m ³ 미만	100만 ^m ³ 이상 1,000만 ^m ³ 미만	1,000만 ^m ³ 이상
합계	3,377	2,225	277	383	460	32
경기	116	38	13	22	39	4
강원	78	16	11	18	31	2
충북	188	86	26	41	32	3
충남	228	92	28	40	64	4
전북	414	281	32	33	59	9
전남	1,048	794	60	93	96	5
경북	662	463	43	66	87	3
경남	640	454	63	69	52	2
제주	3	1	1	1	-	-

5. 소관 지사별 분포현황

(가) 경기지역

지사명	계	여주 이천	양평 광주 서울	화성 수원	연천 포천	파주	고양	강화	김포	평택	안성
개소수	116	9	9	21	14	13	-	16	1	14	19

(나) 강원지역

지사명	계	홍천 춘천	원주	강릉	영북	철원
개소수	78	31	18	14	7	8

(다) 충북지역

지사명	계	청주	보은	옥천 영동	진천	괴산	음성	충주 제천 단양
개소수	188	17	19	45	11	29	31	36

(라) 충남지역

지사명	계	천안	공주	보령	아산	서산 태안	논산	세종 대전 금산	부여	서천	청양	홍성	예산	당진
개소수	228	20	12	30	18	34	28	12	9	8	26	10	11	10

(마) 전북지역

지사명	계	남원	순창	동진	부안	군산	익산	전주 완주 임실	고창	정읍	무진 장
개소수	414	76	35	21	22	25	26	86	33	29	61

(바) 전남지역

지사명	계	광주	순천 광양 여수	나주	담양	곡성	구례	고흥	보성
개소수	1,048	55	48	162	48	45	49	46	25

화순	장흥	강진 완도	해남	영암	무안 신안	함평	영광	장성	진도
41	34	35	80	139	79	37	41	50	34

(사) 경북지역

지사명	계	포항	경주	안동	구미 김천	영주 봉화	영천	상주	문경
개소수	662	58	73	22	26	8	94	25	27

경산 청도	의성 군위	청송 영양	영덕 울진	고령	성주	칠곡	예천	달성
47	70	61	27	37	7	43	24	13

(아) 경남지역

지사명	계	김해 양산	고성 통영 거제	울산	진주 산청	의령	함안
개소수	640	15	45	86	71	38	16

창녕	밀양	창원	사천	거창 함양	합천	하동 남해
47	38	16	70	55	72	71

(자) 제주지역 : 제주 3개소

제3절 국내외 사례조사 및 분석

1. 해외 댐 유지관리 방법

현재 진행중인 우리나라 진단표와 해외 진단표를 비교하고, 기준 정립에 대한 조사가 필요하여 해외 문헌조사를 실시하였다. 미국에서는 Buffalo Creek 댐과 Canyon Lake 댐 파괴를 계기로 1972년 “The Dam Inspection Act”를 제정하여 미공병단으로 하여금 댐과 저수지의 설계, 시공, 운영, 유지관리에 대한 조사 및 진행되었으며 이후 1978년 “The Reclamation Safety of Dams Act” 및 “The National Dam Safety Program Act”를 제정하여, 국가 댐 안전 프로그램 지원을 위한 미국 연방 재난관리청이 설립되었다. 영국은 1930년 웨일즈(Wales)에 있는 Coedy 댐의 파괴 후에 댐 안전관리에 관한 법률 “Reservoirs Act”를 제정하여 저수용량이 2.5만 톤 이상인 저수지 댐에 대해 적용하도록 1974년 개정하였다. 이 이외에도 호주는 주별로 댐 안전관리가 이루어지고 있으며, 중국의 경우 댐과 저수지의 목적 및 관리기관에 따라 법 과 규정이 제정되었으며, 일본은 댐의 정기점검 및 정밀조사에 대해 “댐 구조물관리 기준 (1986)”에서 제시하고 있으며, 정기검사는 “댐 정기검사의 기법(국토개발기술센터, 1986)”에 따라 실시하고 있다.

2. 해외 진단표 종류

해외 문헌조사를 통하여 The Inspection, Maintenance and Operation of Dams in Pennsylvania(PA-DEP, 2013), Inspection and Performance Evaluation of Dams(EPRI, 1986), Dam Safety Manual (State of Colorado, 2002), Inspection and Maintenance Manual for Arkansas Dam Owners(ASWC, 2002), Guidelines on Inspecting Small Dams(NZSOLD, 1997) 통하여 4가지 진단표를 <그림2-2>과 같이 나타내었다.

FORM NO. 103M		CHECK FORM 103M		DATE	
NO.	CONDITION	COMMENTS	INDS.	REMARKS	DATE
EMBANKMENT - CREST					
1	Surface Cracking				
2	Surface Seepage/Erosion				
3	Non-Uniformity				
4	Irregular Settlement				
5	Vegetation Condition				
6	Overgrown Vegetation				
Additional Comments (Refer to item number if applicable):					
EMBANKMENT - UPSTREAM FACE					
10	Surface Cracking				
11	Surface Seepage/Erosion				
12	Non-Uniformity				
13	Irregular Settlement				
14	Vegetation Condition				
15	Overgrown Vegetation				
Additional Comments (Refer to item number if applicable):					

DAM INSPECTION AND PERFORMANCE EVALUATION INVENTORY OF POTENTIAL EMBANKMENT DAMS							
NO.	FEATURE	DEFECT	INDICATORS	POSSIBLE CAUSES	CAUSES OF SETTLEMENT	POTENTIAL EFFECTS	POSSIBLE REMEDIES
4.1	CRACK AND DISINTEGRATION	FRESHENING	CRACKS IN CONCRETE, MASONRY, AND OTHER MATERIALS	SETTLEMENT OF FOUNDATION, DEFICIENT CONSTRUCTION, OVERLOADING, AND OTHER CAUSES	EXCESSIVE SETTLEMENT, SLIDING, AND OTHER CAUSES	REDUCTION OF DAM STRENGTH, LEAKAGE OF WATER, AND OTHER EFFECTS	REPAIR OF CRACKS, REPLACEMENT OF MATERIALS, AND OTHER REMEDIES
4.1.1			CRACKS IN CONCRETE, MASONRY, AND OTHER MATERIALS	SETTLEMENT OF FOUNDATION, DEFICIENT CONSTRUCTION, OVERLOADING, AND OTHER CAUSES	EXCESSIVE SETTLEMENT, SLIDING, AND OTHER CAUSES	REDUCTION OF DAM STRENGTH, LEAKAGE OF WATER, AND OTHER EFFECTS	REPAIR OF CRACKS, REPLACEMENT OF MATERIALS, AND OTHER REMEDIES
4.1.2	STRUCTURAL DEFECTS	SLIDING, SETTLEMENT, AND OTHER DEFECTS	SLIDING, SETTLEMENT, AND OTHER DEFECTS	SETTLEMENT OF FOUNDATION, DEFICIENT CONSTRUCTION, OVERLOADING, AND OTHER CAUSES	EXCESSIVE SETTLEMENT, SLIDING, AND OTHER CAUSES	REDUCTION OF DAM STRENGTH, LEAKAGE OF WATER, AND OTHER EFFECTS	REPAIR OF CRACKS, REPLACEMENT OF MATERIALS, AND OTHER REMEDIES
4.1.2			SLIDING, SETTLEMENT, AND OTHER DEFECTS	SETTLEMENT OF FOUNDATION, DEFICIENT CONSTRUCTION, OVERLOADING, AND OTHER CAUSES	EXCESSIVE SETTLEMENT, SLIDING, AND OTHER CAUSES	REDUCTION OF DAM STRENGTH, LEAKAGE OF WATER, AND OTHER EFFECTS	REPAIR OF CRACKS, REPLACEMENT OF MATERIALS, AND OTHER REMEDIES
4.1.3	STRUCTURAL DEFECTS	SLIDING, SETTLEMENT, AND OTHER DEFECTS	SLIDING, SETTLEMENT, AND OTHER DEFECTS	SETTLEMENT OF FOUNDATION, DEFICIENT CONSTRUCTION, OVERLOADING, AND OTHER CAUSES	EXCESSIVE SETTLEMENT, SLIDING, AND OTHER CAUSES	REDUCTION OF DAM STRENGTH, LEAKAGE OF WATER, AND OTHER EFFECTS	REPAIR OF CRACKS, REPLACEMENT OF MATERIALS, AND OTHER REMEDIES
4.1.3			SLIDING, SETTLEMENT, AND OTHER DEFECTS	SETTLEMENT OF FOUNDATION, DEFICIENT CONSTRUCTION, OVERLOADING, AND OTHER CAUSES	EXCESSIVE SETTLEMENT, SLIDING, AND OTHER CAUSES	REDUCTION OF DAM STRENGTH, LEAKAGE OF WATER, AND OTHER EFFECTS	REPAIR OF CRACKS, REPLACEMENT OF MATERIALS, AND OTHER REMEDIES

THE EMBANKMENT	
Key things to look for: Any evidence of movement, either within the dam itself, at its ends, or in the material on which it rests; and excessive surface erosion or other damage to the embankment, or excessive seepage. Is the dam overgrown with underbrush or trees?	
SURFACE CRACKS Yes/No <input type="checkbox"/> Are there any surface cracks?	Remarks May indicate movement within the foundation. Dam or its foundation may be unstable.
Maintenance Tips Should be evaluated by a professional engineer.	
SURFACE EROSION Yes/No <input type="checkbox"/> Is there erosion on upstream face from wave action or changes in pool level?	Remarks If severe or rapid, a serious problem.
<input type="checkbox"/> Is there erosion from runoff, either rills.	Maintenance Tips If severe and progressive, protect upstream face with riprap or other form of wave protection. Improve grass cover; reshape embankment to...

DAM INSPECTION REPORT	
Name of Dam: _____	Date: _____ Division: _____ Dam ID: _____
Type of Dam (check): EARTHFILL, ROCKFILL, CONCRETE, OTHER _____	Estimate Actual Capacity: _____ Estimate Surface Area: _____
Estimate Height: _____	Gate Rod Reading: _____
Waterlevel - from Datum: Spillway: _____	Estimate Spillway Width: _____
Estimate Forebaybed Upstream to Top of Dam: _____	Use: IRRIGATION, MUNICIPAL, OTHER _____
DIRECTIONS: Mark an "X" in the Yes or No column and <input type="checkbox"/> the word or phrase which applies.	
1. Are the roads to the dam adequate to allow ACCESS BY EMERGENCY EQUIPMENT and TRAVEL ACROSS THE DAM in case of EMERGENCIES?	Yes No
2. Is there DEBRIS, TREES, or BRUSH on the upstream slope that prevent viewing the entire surface of the slope?	
3. Are there TREES or BRUSH on the CREST or DOWNSTREAM SLOPE that prevent viewing the entire surface of the slope?	
4. Are there CRACKS, SLIDES, SLUMPS, BOLS, SETTLEMENT or OTHER on the UPSTREAM SLOPE, CREST, or DOWNSTREAM SLOPE?	
5. Are there RODENT HOLES or ERODED GULLIES on the UPSTREAM or DOWNSTREAM SLOPE?	
6. Is the upstream slope washed down wave action?	
7. Is there FLOODING WATER or LARGE BERRY SPOTS on the top of the dam?	

<그림2- 2> 해외 진단표 종류

3. 필댐의 저수지 파괴원인

현재 필댐은 콘크리트댐에 비하여 파괴위험성이 매우 크다. 자연재해와 균열 및 누수로 인한 붕괴사고가 나타나면서 인명 및 재산피해가 커지고 있다. 2002년 태풍 루사에 의해 손상된 농업용 저수지 290개소 중 농업기반공사가 관리하는 손상을 입은 저수지 83개소를 대상으로 수해피해 원인들을 파악하면, 방수로와 여수토 유실이 52.4%로 절반을 차지하며, 제당 유실과 사면붕괴가 26.7%, 유입토사에 의한 매몰이 12.4%, 옹벽파손이 8.6%로 나타났다. (농업기반공사, 2002) 여수토와 방수로 유실이 가장 큰 비율을 차지하고 있으며 제당과 사면붕괴가 80%에 가깝다. 이 외에도 제방의 노화 및 누수현상으로 그 안전성이 우려되고 있다. 저수지 및 하천 제방 등의 누수현상은 제방 전면에 걸쳐 일어나기 보다는 국부적으로 일어나는 경우가 대부분이다. 그러므로 제방의 파괴나 대규모 누수 등에 의한 재해에 직접적으로 영향을 미치는 침투수는 총상으로 존재하기보다는 수맥상으로 존재하는 경우가 많다(박삼규, 1999) 구조물의 누수현상은 붕괴사고로 이어지는 위험요인으로 구조물에서 나타날 수 있는 누수현상의 종류와 현상을 (표2-11)와 같이 정리하였다.

(표2- 11) 필댐의 누수현상

▪ 한 지점에서 흙탕물이 많이 침출됨	
▪ 한 지점에서 물이 많이 침출됨	
▪ 재당 근처 한 지점에서 물이 침출됨	
▪ 날짐승의 굴에서 물이 나옴	
▪ 기초에서 흘러나온 듯한 침윤수가 있음	
▪ 복통근처에서 침윤수가 나옴	
▪ 여수토나 근처에 누수가 있음	
▪ 연결지점이나 콘크리트 구조에 누수가 있음	
▪ 여수토가 작동하지 않은 상태에서 누수가 많음	
▪ 하류사면 중앙부위에 습윤지역이 있음	
▪ 하류사면 상부의 대부분 젖어 있음	
▪ 제체와 지형의 연결부위에 침윤수가 나옴	
▪ 많은 부분이 젖어 있거나 흐름수가 있음	
▪ 식생의 변화가 있음	
▪ 젖은 부분이 튀어 나와 있음	
▪ 하류부 젖은 부위의 트랩블린 효과	
▪ 댐 연결부위의 침윤수	
▪ 방수로의 급격한 흐름이나 토사 증가	

(표2-11)과 같이 이러한 누수현상을 통하여 붕괴사고를 미연에 방지하고 누수의 원인에 따라 적절한 보수·보강이 실시되어야 된다.

4. 일본 댐 진단표 분석

일본의 경우에는 15m 이상을 댐 또는 대댐으로 구분하고 있으며 15m 이하의 낮은 댐을 저수지로 구분하고 있으나 구분에 대한 특별한 기준은 없다. 일본의 댐과 저수지는 관리자에 의해서 실시되고 있으나 관리자가

직접 수행하지 못하거나 위험성이 있는 경우 기술센터 또는 시공 회사에 위탁하여 실시하며 정량적인 평가기준이 없으며, 상태평가는 <해당없음, 이상유무, 보수 필요성>으로 단순하게 나타내었다.

위치	점검 시기		Items	상태		
	저수	비저수		해당사항없음	이상유무	보수필요성
제체	○		제체에 균열·함몰			
	○		상류사면에서 침식 발생			
	○		하류사면에서 누수 발생			
	○		구조물과의 접합부에 함몰 또는 틈새 발생			
	○		호안블록의 균열과 박리 발생			
	○		제체 및 호안 블록 사이에 단차나 틈새 발생			
		○	차수 시트의 파손, 열화, 분리 발생			
		○	저수지내에 균열·함몰 발생			
		○	저수지내의 법면에 침하 발생			
		○	사면에 배부름 발생			
		○	저수 시에 보이지 않는 부분에 함몰, 공동 등의 발생			
	○	방호책 등의 안전시설의 손상 발생				
취수시설	○		권양 시설의 작동 여부			
	○		누수 발생			
	○		유입부에 토사 및 쓰레기 등의 퇴적 발생			
		○	부재의 열화 발생			
		○	사통과 복통의 손상 발생			
	○	토사의 퇴적으로 저수용량 감소				
콘크리트 부대구조물	○		여수토 등의 콘크리트 구조물에 균열 발생			
		○	유목 등으로 인해 통수 저해 발생			
		○	유입부에 토사퇴적 발생			
관리도구	○		필요한 폭 확보 여부			
	○		시야 확보 여부			
		○	노면 함몰 발생			
		○	갓길의 손상 발생			
풀베기	○	○	점검을 위한 공간 확보에 지장 여부			
	○	○	이상 징후 발견에 지장 여부			

<그림2- 3> 일본 진단표

5. 미국 댐 진단표 분석

미국은 연방기관 및 각 주들이 자체적으로 제정한 법률에 의해 안전관리가 실시되며 점검항목들은 우리나라와 유사하고, 상태평가를 <Yes, No, N/A, Condition>으로 단순하게 평가를 실시하고 있다. 조사도니 주요 손상의 정도를 조사된 주요 손상의 정도를 3단계 (No Action, Monitor, Repair) 또는 4단계 (None, Monitor, Maintenance, Repair)으로 평가 하도록 제시하고 있다.

댐과 저수지의 상태등급은 평가하지 않거나 조사된 결과에 따라 기술자에 의해 보통 정성적으로 Low, Signification, High Hazard Potential의 3단계 또는 Satisfactory, fair, Poor, Unsatisfactory의 4단계로 평가 하는 경우가 대부분이다.

	Item	Yes	No	N/A	Condition
1	General Conditions of Dam				
A	Alterations to the dam?				
B	Development in downstream floodplain?				
C	Grass cover adequate?				
D	Settlements, misalignments, or cracks?				
E	Recent high water marks?				
2	Upstream Slope of Dam				
A	Erosion, slides, or depressions?				
B	Trees or excessive vegetation?				
C	Animal burrows or holes?				
D	Evidence of livestock on dam?				
E	Cracks, settlement, or bulges?				
F	Evidence of slides or scarps?				
G	Adequate and sound slope protection?				
3	Crest of Dam				
A	Longitudinal or transverse cracking?				
B	Trees or excessive vegetation?				
C	Crest arching or bowing?				
D	Erosion or ruts?				
E	Low areas or depressions?				
F	Evidence of livestock on crest?				
G	Road on crest?				
4	Downstream Slope of Dam				
A	Erosion, slides, or depressions?				
B	Trees or excessive vegetation?				
C	Animal burrows or holes?				
D	Evidence of livestock on embankment?				
E	Cracks, settlement, or bulges?				
F	Drains or wells flowing?				
G	seepage or boils?				
5	Abutment Contacts				
A	Erosion, cracks, or slides				
B	seepage or boils?				

6	Inlet Structure				
A	Spalling, cracking, or scaling?				
B	Exposed reinforcement?				
C	corrosion present?				
D	coating adequate?				
E	Leakage?				
F	Trash rack adequate?				
G	Obstacles to inlet?				
H	Drawdown operative? Opened & closed				
7	Conduit & Outlet				
A	Spalling, cracking, or scaling				
B	Exposed reinforcement?				
C	Joints displaced or offset?				
D	Joint material lost?				

<그림2- 4> 미국 진단표

6. 파괴확률을 고려한 가중치설정 사례

Mufute(2007)의 경우 Zimbabwe의 저수지들의 진단결과를 이용하여 파괴확률을 계산하기 위하여 진단결과를 정량화하고 가중치를 부여한 사례가 있으며, 우리나라의 경우 균열 및 손상 등을 등급 별로 나뉘어 있으며 등급별 손상의 정도, 균열의 길이 등에 따라 부분별 등급을 통하여 평가하고 있다. 이런 경우 어느 부분에 이상이 있고 어느 정도의 피해가 있는 지 쉽게 파악할 수 있으며 그 피해에 따라 개보수 우선순위를 통하여 보수·보강을 실시할 수 있다. 하지만 많은 저수지와 시설물 세부항목을 모두 분석하고 유지 관리를 위해서는 많은 비용이 요구되고 있으나 현재의 유지관리 비용은 이를 충당하기에 부족한실정이다.(김시운, 2008). 또한, 부위별 기여도나 집중도를 판단하는 점검자에 따라 상태평가 결과가 달라 질 수 있는 우려가 있다.

Risk Factor	Description of Factor(Percentages represents degree of risk.)			
Un wanted seepage on the D/S	Present	Not present		
	100%	0%		
Cracking (embankment)	Mild	Moderate	Serious	No cracking
	5%	10%	85%	0%
	Longitudinal Crack <10mm	Transverse crack < 10mm and not extending throughout the	Longitudinal crack > 20mm. transverse cracks crossing the whole width	

		wall. (Longitudinal > 10mm < 29mm)	of dam wall. Transverse crack > 10mm.	
Tree and shrub growth	Little	Moderate	Dense	Very Dense
	5%	10%	30%	55%
	Little vegetation. no medium sized and large trees.	Sparse vegetation comprising of small and medium sized trees. presence of few large trees.	Dense vegetation. all sizes of trees present	Very dense vegetation cover. all sizes of trees present.
Presence of Spillways	Present	Not Present		
	0%	100%		
Presence of toe drains	present	Not present		
	100%	0%		
Embankment soil type	Bad	Satisfactory	Fair	Good
	85%	10%	5%	0%
	Organic clays. cracking clays or sands.	Inorganic clays. coarse grained soils with less than 10% clay.	Poorly graded Coarse grained soils with clay content between 10 and 20%	Poorly graded Coarse grained soils with clay content between 20 and 30%

<그림2- 5> 가중치설정 사례

7. 국내 연구 고찰

신은철(2013)은 대부분의 농업용저수지는 관개규모가 100ha 이하의 소규모 필담으로 (유철상, 2007), 필담의 안전성을 파악하기 위한 점검 항목, 항목별 평가방법이 정립되어 있지 못한 상태로 체계적인 유지관리가 이루어지고 있지 못해 규모가 큰 댐, 저수지에 비해 파괴 가능성이 높은 것으로 지적하였다.

이종근(2013)은 이러한 문제를 개선하기 위하여 국내와 국외에서 댐과 저수지 평가를 위해 적용하고 있는 기법을 조사 분석하였으며, 파괴에 대한 통계사례를 조사하고, 소규모 저수지를 현상으로 현장조사를 실시하여 저수지의 구성 및 발생 손상의 특성, 주요파괴원인을 분석하여 평가 인자를 도출함. 또한, AHP기법을 활용하여 도출된 평가인자의 상대적인 가중

치를 산정한 바 있으며, 한국의 농업용저수지는 전국에 산재되어 있으며, 다양한 설계 및 축조기술을 적용하여, 동일한 평가기준을 적용하기 힘들다.

(표2- 12) 항목별 가중치

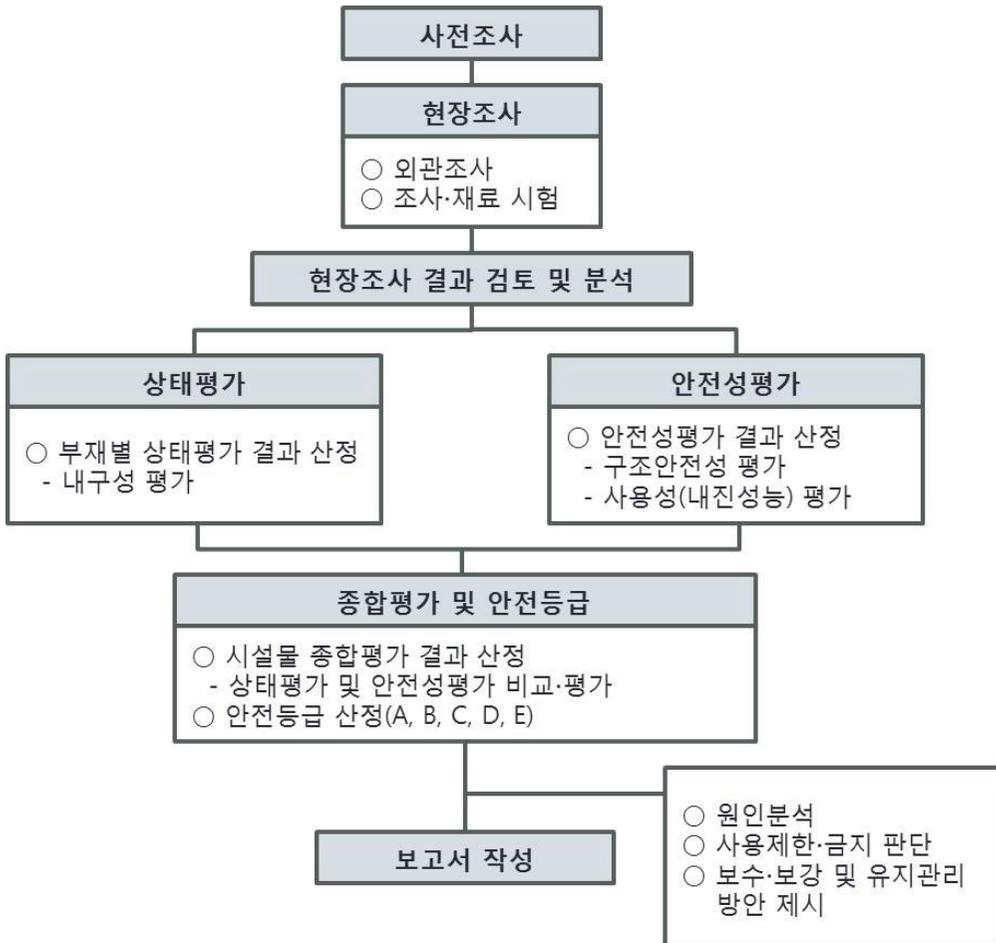
항목	댐마루	상류사면	하류사면	개수로	관수로	수문부	공도교	취수부	방류부
가중치	15.14	21.54	25.23	11.40	11.40	11.34	1.16	5.52	8.67

유철상(2007)은 한국의 농업용저수지의 지형형태학적 특성을 정량화하고, 그 결과를 바탕으로 외국에서 발표된 저수지의 특성과 비교 검토하였으며, 김해도(2009)는 농업용 저수지의 재개발 우선순위를 결정하기 위하여 개발여건, 유역여건, 수요여건 등의 가능성과 지역여건, 환경여건, 재해여건 등의 제한성을 바탕으로 우선순위지수를 결정한 바 있으나, 아직까지 농업용저수지의 특성을 바탕으로 유형화를 시도한 연구는 부족한 실정이다.

제4절 정밀안전진단 문제점 및 개선방향

1. 정밀안전진단 개요

농업용저수지에 대한 정밀안전진단업무의 흐름은 그림과 같다.



<그림2- 6> 정밀안전진단 업무흐름도

(표2- 13) 안전점검 종류 및 실시시기

구 분		대상시설	실시시기
안전 점검	정기점검	1종,2종,3종	-분기1회, 영농기전 반드시 실시(2/4분기:영농기전)
	긴급점검	1종,2종,3종	-재해나 사고 발생 등 시설물 안전에 이상 징후가 있을 때
	정밀점검	1종,2종,3종	-정기점검 또는 긴급점검을 실시한 결과, 시설의 기능 유지, 안전상 재해 위험이 있어 시설물 보수가 필요한 때 실시 (1종·2종 시설은 정밀점검을 생략하고 정밀안전진단을 실시)
안전 진단	정밀안전진단	1종	-준공 후 10년 이상 지난 시설(5년에 1회 이상 정기적 실시) -다만, 정밀안전진단 결과 안전상태가 양호한시설과 개수·보수로 안전하다고 인정되는 시설은 (다음 한 차례 정밀안전진단을 실시하지 아니할 수 있음). -시설관리자가 안전점검 실시한 결과 시설의 기능 유지 및 안전상 재해 위험이 있는 경우
		2종	-시설관리자가 안전점검 실시한 결과 시설의 기능 유지 및 안전상 재해 위험이 있는 경우

2. 상태평가 개요

상태평가는 재료시험 및 외관조사에 의해 시설물의 각 부재로부터 발견된 상태변화(결함, 손상, 열화)를 근거로 하여 상태평가 기준에 따라 실시하며, 시설물의 전체 부재에 대한 외관 조사방도를 작성하여 부재별로 상세히 상태평가를 실시하며, 책임기술자가 시설물 전체에 대한 상태평가 결과를 결정한다.

3. 평가유형, 영향계수 및 기준산정 방법

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

가. 평가유형의 구분

- (1) 중요결함 : 침하, 경사/전도 및 활동 등과 같이 전체 구조물의 구조적인 안전에 직접 영향을 미치는 결함
- (2) 국부결함 : 수평이음부 불량 등과 같이 구조물의 안전성에 직접적인 영향을 미치지 않지만 손상이 진전될 경우 전체 구조물의 안전에 상당한 영향을 끼칠 수 있는 결함.
- (3) 일반손상 : 파손, 마모, 콘크리트 재료분리 등과 같이 구조물의 안전에 크게 영향을 주지 않는 일반적인 손상.

나. 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.

4. 현행 저수지의 상태평가 항목 및 기준

필담에 대한 각 시설물별 정밀안전진단 상태평가항목은 다음 표와 같다.

(1) 댐체 및 양안부

[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 ◆ 종방향 균열깊이가 저수위 이하이고, 횡방향 균열이 깊고 저수위 이하까지 진행되었을 경우
침 하	중요 결함	1.0	a	5	◆ 결함이 없는 최상의 상태
			b	4	◆ 침하 및 부등침하량이 10cm 이하로 경미한 상태
			c	3	◆ 과도한 침하 및 부등침하량이 10~50cm인 상태
			d	2	◆ 과도한 침하 및 부등침하량이 50cm 이상 ◆ 댐마루 도로의 경사와 사면이 함몰된 상태
			e	1	◆ 과도한 침하 및 부등침하량이 50cm 이상 ◆ 상시만수위 0.6m까지 진행된 매우 위험한 상태

상태변화	평가 유형	영향 계수	평가 기준	평가 점수	평가 내용
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 (응기 0~50cm, 측방이동 0~30cm 변위 발생시)
			d	2	◆ 과도한 수평변위로 댐마루 도로의 변형이 심각한 상태 (응기 50cm 이상, 측방이동 30cm 이상 변위 발생시)
			e	1	◆ 과도한 수평변위로 댐마루 도로의 변형이 매우 위험한 상태 (응기 50cm 이상, 측방이동 30cm 이상 변위 발생시)
제체유실	중요 결함	1.0	a	5	◆ 결함이 없는 최상의 상태
			b	4	◆ 댐마루 제체의 유실면적이 5m ² 이하인 상태
			c	3	◆ 댐마루 제체의 유실면적이 5~15m ² 인 상태
			d	2	◆ 댐마루 제체의 유실면적이 15m ² 이상 심각한 상태 (침하량과 누수량이 서서히 증가, 함몰, 누수의 변색 등의 징후가 나타남)
			e	1	◆ 댐마루 제체의 유실면적이 15m ² 이상 매우 위험한 상태 (침하량과 누수량이 급격히 증가, 함몰, 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

[상 류 사 면]

상태변화	평가 유형	영향 계수	평가 기준	평가 점수	평가 내용
누 수	중요 결함	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	중요 결함	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	중요 결함	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<20mm, 철근부식확율 50%일 때)
			d	2	◆ 차수벽의 노후화가 심각한 상태 (슬래브 균열폭>0.1mm, 조인트 열림>20mm, 철근부식확율 90%이상일 때)
			e	1	◆ 차수벽의 노후화가 매우 심각한 상태 (슬래브의 균열, 조인트의 분리, 조인트 열림>2.5mm, 철근의 부식확율이 100% 일 때)
사면불안 정 및 사면보호	중요 결함	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	국부 결함	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 2m 이상이며, 소협곡이 이루어지는 초기상태
		2.0	e	1	◆ 사면침식고가 2m 이상이며, 소협곡이 이루어진 매우 위험한 상태

[하 류 사 면]

상태변화	평가유형	영향계수	평가기준	평가점수	평가내용
누수	중요결함	1.0	a	5	◆ 댐체의 과도한 누수가 없는 최상의 상태
			b	4	◆ 댐체의 과도한 누수가 거의 없는 양호한 상태 (0.1ℓ/s 이하)
			c	3	◆ 댐체의 과도한 누수의 징후가 시작되는 경미한 상태 (0.1~1.0ℓ/s)
			d	2	◆ 댐체의 과도한 누수로 탁류 발생 평소 누수량보다 증가 시 (1.0ℓ/s 이상)
			e	1	◆ 댐체의 과도한 누수로 탁류 발생 누수의 온도변화가 심하고, 비강우시 누수량이 평소 누수량의 배 이상 증가 시 (1.0ℓ/s 이상)
사면불안정	중요결함	1.0	a	5	◆ 사면불안정이 없는 최상의 상태
			b	4	◆ 사면불안정이 없는 양호한 상태
			c	3	◆ 얇은 균열 및 활동, 용기 및 함몰, 습윤지 등이 부분적으로 나타나 사면불안정이 경미한 상태
			d	2	◆ 깊은 균열 및 활동, 용기 및 함몰, 습윤지 등이 나타나 사면불안정이 시작되는 상태
			e	1	◆ 깊은 균열 및 활동, 용기 및 함몰, 습윤지 등이 하류사면 지단과 접하게 되어 사면불안정이 매우 심각한 상태
사면보호 상태	중요결함	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	중요결함	1.0	※ 상류사면과 동일 평가		
사면침식	일반손상	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
식생	일반손상	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	일반손상	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

[기초 및 양안부]

상태변화	평가 유형	영향 계수	평가 기준	평가 점수	평가 내용
부등침하	중요결함	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	◆ 과도한 침하 및 부등침하로 댐마루 도로의 경사와 사면의 함몰되고 기초가 불안정한 상태
			e	1	◆ 과도한 침하 및 부등침하가 상시만수위 0.6m까지 진행되고, 기초가 불안정한 매우 심각한 상태
기초의 불안정	중요결함	1.0	a	5	◆ 기초의 불안정이 없는 최상의 상태
			b	4	◆ 기초의 불안정이 없는 양호한 상태
			c	3	◆ 기초의 불안정이 경미한 상태
			d	2	◆ 과도한 침하 및 부등침하로 기초가 불안정한 상태
			e	1	◆ 과도한 침하 및 부등침하로 기초가 불안정한 매우 심각한 상태
기초의 침식 및 침투	중요결함	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

(2) 여수로

[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 손상 받을 위험이 존재하는 상태
		3.0	e	1	◆ 접근수로 상부의 자연사면이 국부적인 사면붕괴 및 균열로 여수로가 붕괴되거나 손상 받을 위험이 존재하는 상태
접근수로 내의 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 봉쇄할 위험이 있는 상태

[조 절 부]

상태변화	평가유형	영향계수	평가기준	평가점수	평가 내용
에이프런 구조물의 손상 및 노후화	국부결함	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, 철근노출 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	국부결함	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 철근노출, 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	국부결함	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 철근노출, 시공이음부 단차>2mm, 시공이음부 누수 등 노후화가 심각한 상태
		2.0	e	1	◆ 월류부 웨어 구조물의 손상 및 균열, 박락, 철근노출, 이음부의 균열을 통한 누수, 시공이음부 단차 > 5mm 등노후화가 매우 심각한 상태
수문가이드, 각락가이드 또는 수문지수판에서의 공동화 현상	국부결함	1.0	a	5	◆ 수문가이드, 각락 가이드 또는 수문 지수판에서의 공동화 현상이 없는 최상의 상태
		1.1	b	4	◆ 수문가이드, 각락 가이드 또는 수문 지수판에서의 공동화 현상이 없는 양호한 상태
		1.2	c	3	◆ 수문가이드, 각락 가이드 또는 수문 지수판에서의 공동화 현상이 경미한 상태
		1.4	d	2	◆ 수문가이드, 각락 가이드 또는 수문 지수판에서의 공동화 현상이 심각한 상태
		2.0	e	1	◆ 수문가이드, 각락 가이드 또는 수문 지수판에서의 공동화 현상이 매우 심각한 상태

[급경사로]

상태 변화	평가 유형	영향 계수	평가 기준	평가 점수	평가 내용
바닥슬래브의 부등침하, 들뜸, 단차	중요결함	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	국부결함	1.0	a	5	◆ 바닥슬래브의 콘크리트 균열 및 손상이 없는 최상의 상태
			b	4	◆ 바닥슬래브의 콘크리트 균열 및 손상이 없는 양호한 상태
			c	3	◆ 바닥슬래브의 콘크리트 균열 및 손상이 경미한 상태
			d	2	◆ 바닥슬래브의 콘크리트 균열 폭>1.0mm, 깊이>15cm로 손상이 심각한 상태
			e	1	◆ 바닥슬래브의 콘크리트 균열 폭>5.0mm, 깊이>30cm, 철근노출 등 손상이 매우 심각한 상태
벽체의 손상 및 노후화	국부결함	1.0	a	5	◆ 벽체의 손상 및 노후화가 없는 최상의 상태
			b	4	◆ 벽체의 손상 및 노후화가 없는 양호한 상태
			c	3	◆ 벽체의 손상 및 노후화가 경미한 상태
			d	2	◆ 벽체의 손상이 시공이음부 단차 > 2mm, 균열 및 누수 등 노후화가 심각한 상태
			e	1	◆ 벽체의 손상이 시공이음부 단차 > 5mm, 균열 및 누수, 박락, 철근노출 등 노후화가 매우 심각한 상태
횡방향 이음부의 손상	국부결함	1.0	a	5	◆ 횡방향 이음부의 손상이 없는 최상의 상태
			b	4	◆ 횡방향 이음부의 손상이 없는 양호한 상태
			c	3	◆ 횡방향 이음부의 누수 < 4l/min 경미한 상태
			d	2	◆ 횡방향 이음부의 누수 > 75l/min 심각한 상태
			e	1	◆ 횡방향 이음부의 공동현상, 콘크리트 탈락, 누수가 이음부위당 > 370l/min 매우 심각한 상태

[감 세 공]

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

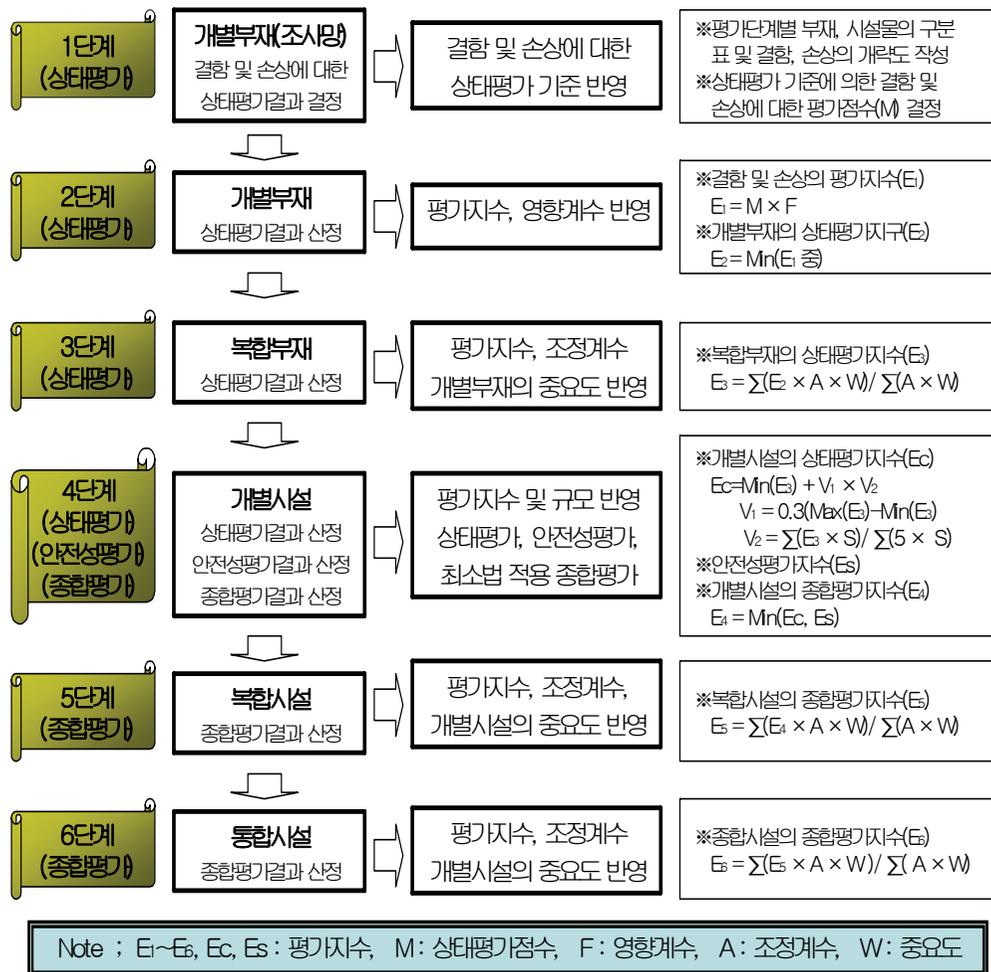
(3) 취수시설 및 방수로

상태변화	평가유형	영향계수	평가기준	평가점수	평가 내용
취수탑 파손 및 변위 발생	중요결함	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	국부결함	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	국부결함	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	국부결함	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

5. 상태평가 결과 산정방법

시설물에 대한 상태평가는 아래 그림과 같이 단계별로 구분할 때 저수지 시설물은 통합시설물(6단계)에 해당하는 시설물로서 간주하고, 하위 단계인 복합시설, 개별시설, 복합부재, 개별부재로 구분한다.

외관조사망도는 개별부재에 대하여 작성하는 것을 원칙으로 하고 필요시 개별부재의 크기, 면적에 따라 부위별로 분할하여 작성한다.



<그림2- 7> 시설물 평가 단계별 절차

6. 정밀안전진단 상태평가 기준의 문제점

Table 6-1 (continued)

NO.	FEATURE	DEFECT	INDICATORS	POSSIBLE CAUSES	DEGREE OF DEFICIENCY			POTENTIAL EFFECTS	POSSIBLE REMEDIAL MEASURES
					MINOR	SERIOUS	VERY SERIOUS		
.2	PIERS & WALLS CONT.	MOVEMENT AT CONSTRUCTION JOINTS	JOINT OPENING VISIBLE; HORIZONTAL OFFSETS.	DIFFERENTIAL SETTLEMENT; EXCESSIVE LOADING; EARTHQUAKE		OFFSETS > 0.1" (2MM) AT MORE THAN ONE CONSTR. JOINT	OFFSETS > 0.2" (5MM) IN SEVERAL JOINTS AND MORE THAN ONE PIER	FAILURE OF PIER(S) IN GATE INOPERABLE.	STRENGTHENING OF PIERS AND WALLS BY DEEP ANCHORS INTO FOUNDATION
.3	CREST (OVERFLOW) STRUCTURE	CAVITATION AT GUIDE OR STOPLOG GUIDES OR GATE SILL	PITTING AND EROSION OF CONCRETE NEAR SILDS OR EMBEDDED METAL PARTS	CAVITATION AT ROUGH PROTRUDING SURFACES; POOR HYDRAULIC CONDITIONS	*			PROGRESSIVE EROSION AND DAMAGE TO GUIDES	PATCH UP WITH EPOXY MORTAR WITH SMOOTH SURFACES AND GRADUAL TRANSITIONS.
		DETERIORATION OR EROSION OF CONCRETE	(SEE 6.1.2.2)				(SEE 6.1.2.2)		(SEE 6.1.2.2)
FOR OTHER POTENTIAL DEFECTS IN CREST STRUCTURE AND GALLERY (IF LOCATED IN STRUCTURE) SEE TABLE 5-1 FOR CONCRETE DAMS									

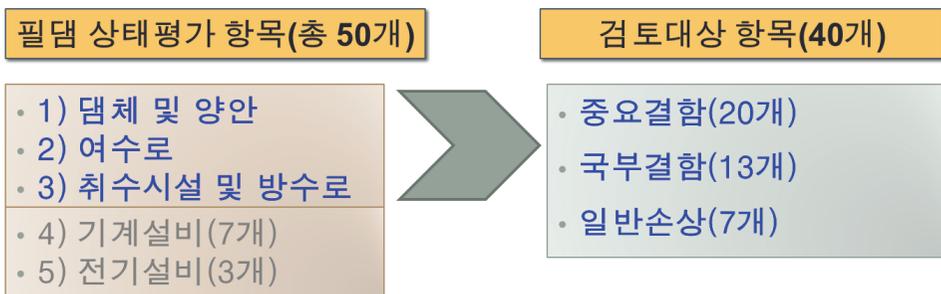
<그림2- 8> 미국(EPRI)의 댐 진단과 성능평가 목록

현재 농업용 저수지 정밀안전진단을 위한 상태평가 기준은 각 등급별 수치지범위가 대규모 댐을 대상으로 만들어진 것으로서 소규모 농업용 저수지에 대해 이를 적용하는 것은 과대하다. 그림 과 같이 수력용 발전댐을 위해 EPRI(Electric Power Research Institute)에 의해 1986년도에 만들어진 미국기준(Inspection and performance evaluation of dams)의 수치를 국내 기준에 그대로 준용하였기 때문에 근본적으로 문제가 있을 수밖에 없다.

(표2- 14) 농업용저수지 상태평가 항목기준 적용시 문제점

중요결함 항목	평가내용(기준 c)	농업용저수지 적용시 문제점
댐마루 중.횡방향 균열	균열길이 1~5m	저수지 마루폭이 매우 좁음 (1.8, 2.5, 3.0m 등)
댐마루 침하	침하량10~50cm	저수지 제정고가 매우 낮음 (5, 5.9m 등 10m 미만 60%)
하류사면 누수	누수의 징후가 시작되는 경미한 상태(0.1~1.0 l/s)	체체 길이가 짧음 (67, 98, 104, 113m 등)
댐마루 수평변위	과도한 수평변위의 징후가 존재하나 경미한 상태 (용기0~50cm, 측방이동 30cm)	저수지 제정고가 매우 낮음

또한, 정밀안전진단 상태평가에는 총 50개의 상태평가 항목이 있는데 이중 기계와 전기시설을 제외한 40개 항목(체체, 여수로, 취수 및 배수 시설)에 대해서는 그 시설규모를 고려하여 검토가 필요하다.



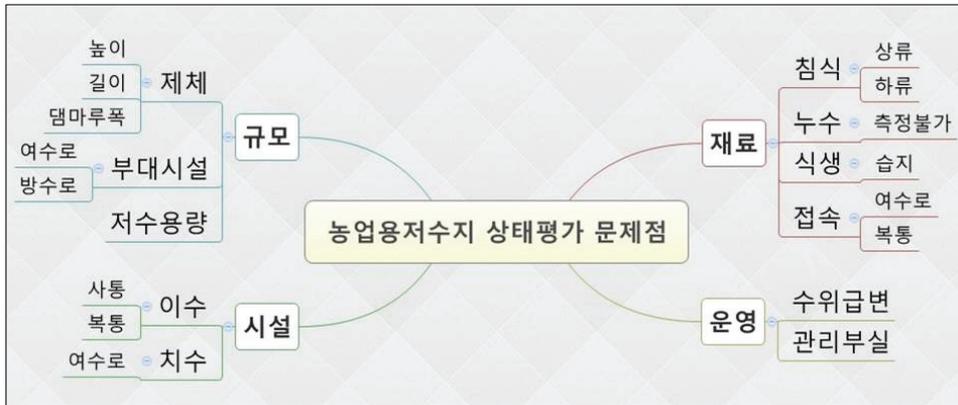
<그림2- 9> 상태평가 검토대상 항목

(표2- 15) 상태평가 고정수치 항목

구분	상세 구분	상태변화	평가내용(고정 수치)	검토 필요
댐 체 및 양안 부	댐마루	종 · 횡방향 균열	균열길이 0~1m, 1~5m, 5m이상	○
		침하	침하량10cm이하, 10~50cm, 50cm이상	○
		수평 변위	용기 0~50cm, 50cm이상, 측방이동 0~30cm, 30cm이상	○
		체체유실	유실면적 5㎡이하, 5~15㎡, 15㎡이상	○
		사면불안정	슬라이딩길이 1m이하, 1~2m, 2m이상	○
	상류 사면	침하 및 변형	침하깊이0~10cm, 10~50cm, 50cm이상	○
		사면 침식	침식고0~5m, 0.5~2m, 2m이상	○
	하류 사면	누수	누수량0.1이하, 0.1~1.0, 1.0 ℓ/s이상	○
		침하 및 변형	침하깊이0~10cm, 10~50cm, 50cm이상	○
	여수로	조절부	에이프런 구조물 손상 및 노후화	부등침하<5mm, 부등침하>5mm
피어와 벽체구조물			단차>2mm, 단차>5mm	
월류부 웨어구조물 손상 및 노후화			단차>2mm, 단차>5mm	
급경사로		바닥슬래브의 콘크리트 균열 및 손상	폭>1.0mm, 길이>15cm, 폭>5.0mm, 길이>30cm	
		벽체 손상 및 노후화	단차>2mm, 단차>5mm	
		횡방향이음부 손상	누수량<4, >75, >370 ℓ/min	
감세공		플립버킷의 하류 또는 기초의 침식	이음부 균열 폭>5mm, 이음부 균열 폭>12mm	
	정수지바닥 및 측벽의 세굴	세굴>0.15m, 균열폭>12mm		

현재 상태평가기준은 1986년 미국 대형 수력발전용 댐을 위해서 만들어진 기준을 국내기준에 그대로 반영하였기 때문에 국내 소규모 농업용저수지에는 적합하지 않다. 또한, 공사가 관리하는 3,377개소 저수지 중 32개소(0.8%)만이 일반 댐 기준에 의한 정밀안전진단 1종 시설물에 해당한다.

농업용저수지에 대한 상태평가 시행시 고려해야 할 문제점은 <그림 2-10>와 같다.



<그림 2- 10> 농업용저수지 상태평가 시행시 고려할 문제점

10년간에 걸친 농업용저수지의 정밀안전진단결과를 수집하여 검토한 결과 총 2,723지구 중 2,000지구(73.5%)가 종합 C등급(보통)으로서 대부분을 차지하고 있다.

정밀안전진단 평가는 제체, 여수로 또는 취수시설의 상태평가가 D등급 이더라도 때때로 종합등급이 C등급이 된다. 특히, 제체 D등급의 주요 결함의 하나인 침출수 유출과 제체 여유고 부족은 즉시 조치가 필요하지만 종합등급이 C등급이므로 D등급보다 개보수 우선순위에서 낮은 문제가 발생한다.

저수지 상태평가기준의 문제점은 다음과 같이 정리할 수 있다.

첫째, 평가내용에서의 고정된 수치는 소규모 댐에서는 과대하다.

둘째, 현재 진단기준은 농업용저수지의 고유한 특성을 반영하지 못한다.

셋째, 농업용저수지는 하류사면의 누수량을 측정할 수 없으나 현재 진단기준에서는 이를 수치로 분류하고 있어 등급산정이 불가능하다.

넷째, 종합등급을 산정하는 과정에서 필댐의 주요한 파괴원인인 누수나 제체여유고 부족은 즉시 파괴로 이어지는 중대한 결함이므로 개별 시설물에 대한 등급과 관계없이 개보수가 이루어져야 하나 C등급에 대해서는 예산부족 등의 이유로 방치되고 있다.

7. 상태평가 기준개선 방향

정밀안전진단의 상태평가기준 개선에 대한 실무자 의견을 수렴하였다. 그러나, 제안된 기준은 안전진단 실무자의 다년간 경험에 의한 값으로서의 의미가 있을 수는 있으나 수치의 범위가 조정되는 것에 대한 객관적인 근거를 찾을 수가 없었다.

이에 대한 근거를 마련하기 위해 기존에 만들어진 기준치에 대한 근거 자료를 찾아본 결과 미국 수력발전용 댐 기준에서 같은 수치범위를 찾을 수는 있었으나 그러한 수치가 어떻게 나왔는지에 대한 근거는 찾을 수 없었다. 두 번째 방법으로서 기존 10년간 안전진단결과를 활용한 통계분석을 시행하였다.

먼저 인자분석과 군집분석을 실시하여 항목별로 유사한 데이터를 묶었다. 그리고 주성분 분석을 실시한 결과 5개의 주성분(제원, 이수, 치수, 지형요인, 하류상황)으로 분석되었다.

항목별 집중도를 분석하여 기준 수치범위의 간격을 조정할 수 있고 기여도분석을 통해 평가항목의 필요성을 검토할 수 있다.

(표2- 16) 농업용저수지 정밀안전진단 상태평가 기준개선 의견

구 분	개선 검토내용	사 유
공 통	<ul style="list-style-type: none"> ○ 부침부재 평가에 대한 중요도 기준 변경(실무세부요령 P407, 표5-2-6) <ul style="list-style-type: none"> - 현행 → 댐머루상류사면하류사면 = 40 : 30 : 30, 20%이내에서 조정 가능 - 변경 → 댐머루상류사면하류사면 = 30 : 30 : 40, 20%이내에서 조정 가능 	<p>상대적으로 노출면적이 적은 댐머루 보다는 파이프, 누수 등으로 인해 문제가 발생되기 쉬운 하류사면에 대한 중요도를 높이는 것이 타당함</p>
공 통	<ul style="list-style-type: none"> ○ 복합시설 중요도 기준 변경(실무세부요령 P422) <ul style="list-style-type: none"> - 현행 → 체체 : 여수로 : 취수시설 = 65 : 25 : 10 - 변경 → 체체 : 여수로 : 취수시설 = 60 : 30 : 10, 20%이내에서 조정 가능 또는 각구별 특성이 반영될 수 있도록 계수화 	<p>체체의 중요도가 65%로 높으므로 60%로 줄이면서 여수로의 중요도를 상대적으로 25%에서 30%로 5%로 높임</p>
공 통	<ul style="list-style-type: none"> ○ 댐체에 대한 평가내용의 수치범위 변경(9개 항목) <ul style="list-style-type: none"> - 댐머루(5):중·횡방향 균열, 침하, 수평변위, 유실, 슬라이딩 - 상류사면 (2) : 침하 및 변형, 침식 - 하류사면 (2) : 누수, 침하 및 변형 	<p>수치범위가 콘크리트댐 또는 대댐 기준과 동일하여 농업용 소규모 댐체에 적합한 수치로 다운스케일링(downscaling) 필요</p>
댐머루 (침하)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 문구 수정(“과다한” 문구 삭제) 	<p>“과다한”이라는 문구가 적절하지 않아 삭제 필요</p>
댐머루 (수평변위)	<ul style="list-style-type: none"> 1. 문구 수정(“과도한” 문구 삭제) 2. 문구 수정(“도로” 문구 삭제) 	<ol style="list-style-type: none"> 1. “과도한”이라는 문구 삭제 필요 2. 농업용저수지의 경우 댐머루에 대부분 도로가 없어 실제 현장상황과 맞지 않아 평가내용에서 삭제 필요
상류사면 (신규)	<ol style="list-style-type: none"> 1. 상류사면의 사면보호공(사석)신규 반영 2. 상류사면에 대한 식생 항목기준 신규 반영 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 농업용저수지 상류사면은 사석보호공이 설치되지 않았거나 상태가 불량한 곳이 다수 있어 체체안전에 영향을 미치므로 반영 필요 2. 상류사면에 대한 관·교목 식생도 필면 사면안전에 증대한 영향을 미치므로 반영 필요

구분	개선 검토내용	사유
상류사면 (삭제)	1. “치수벽 노후화” 항목 전체 삭제 2. 상류사면 누수항목 전체 삭제	1. 치수벽은 콘크리트벽 또는 일반댐에 설치되는 형식으로 농업용저수지에서는 거의 없는 형식으로 항목 삭제 필요 2. 상류사면 누수항목은 외관상태 조사에서 확인이 어려워 결과에 대한 신뢰성과 변별력이 떨어지므로 삭제 필요
하류사면 (누수)	○ 누수량 평가방법 변경 1. 제체에 대한 전기비저항 탐사결과 이용(누수예상구간 면적활용) 2. 습지식생 활용(종류 및 면적을 이용한 간접지표) 3. 제체 하류지역 습윤 및 물고임 면적 이용 - 예) 제체 하류사면 구간의 0~10% : c, 제체 하류사면 구간의 10% 이상 : d	누수량에 대한 정량적인 측정이 어려우므로 대체가 가능한 다른 정성적인 기준을 활용하여 좀 더 객관적으로 평가할 수 있도록 변경 필요
하류사면 (동물의굴)	○ 평가유형 변경(일반순상 ⇒ 중요결함)	필법의 특성상 파이핑에 취약하며 동물의 굴이 파이핑 유로가 되어 체체파괴로 이어질 가능성이 있으므로 중요성을 고려하여 사항 변경 필요
하류사면 (시면침식)	○ 평가유형 변경(일반순상 ⇒ 국부결함 또는 중요결함)	필법의 특성을 고려하면 제체 하류사면 침식은 중요한 상태면 회이므로 국부 또는 중요결함으로 사항 변경 필요
취수시설 및 방수로	○ 부통과 시통에 대한 평가항목 신설	농업용저수지에만 있는 시설인 부통, 시통으로 인한 저수지 안전문제에 대한 고리를 위해 신규 항목 신설 필요

제3장 통계분석을 통한 저수지 유형화

제1절 정밀안전진단 결과자료 분류

1. 농업용저수지 정밀안전 결과 보고서 분석의 필요성 및 목적

한국농어촌공사에서 실시한 농업용저수지 정밀안전진단 종합보고서는 농업기반생산시설 정밀안전진단실무 세부요령(한국농어촌공사, 2011)에 의해 ‘시설물의 안전관리에 관한 특별법’과 ‘농어촌정비법’ 제 18조 및 동법 시행령 제 26조, 농업생산기반시설관리 규정 제 16조에 의한 전국에 산재되어 있는 저수지를 대상으로 정밀안전진단을 실시하고 있다.

(표3- 1) 종합보고서 평가항목

2004 ~ 2013	평가항목
제 원	지구명, 시설구분, 종별, 도, 시군, 읍면, 시설관리자, 준공년도, 관개면적, 수해면적, 유역면적, 유역배율, 저수량, 만수면적, 만수위, 홍수위, 제정고, 여유고, 체체높이, 체체길이, 체체제정폭, 상류사면, 하류사면, 홍수량, 여수토, 설계기준 홍수량시 여수토, 방수로, 복통, 사통 및 취수탑, 지반조사, 준공도서
상태평가	제체의 상태평가, 여수토·방수로의 상태평가, 취수시설손상결함, 상류사면 안전율, 하류사면 안전율, 파이핑안전율, 체체안전성평가, 여수토안전성평가, 방수로 및 정수지 안전성평가, 상태평가 종합, 안전성평가종합, 시설상태 종합평가
보수·보강	제체주요결함사항, 체체 보수보강방안, 체체보수보강, 여수토 주요결함 사항, 여수토 보수·보강, 방수로 주요결함 사항, 방수로 보수·보강, 취수시설 주요결함 사항, 취수시설 보수보강방안
시설상태	시설상태

농업용저수지 정밀안전진단 종합보고서에는 크게 제원, 상태평가, 보수·보강, 시설상태로 분리되며 그 안에서도 준공도서와 정밀진단으로 분리되어 진단하고 있다. 정밀안전진단 상태평가 보고서를 바탕으로 자료 분리·구

측 및 통계적분석, 도별안배를 통하여 전국의 저수지를 바탕으로 유형화를 실시하였다.

2. 종합보고서 항목 분리·구축(2004~2013년)

농업용저수지 정밀안전진단 종합보고서는 2004~2013년 10년간의 평가 지구는 총 2,723개소로 데이터가 방대하였으며 주요기능별 평가내용을 한꺼번에 분석하기에 한계가 있었다. 또한, 보고서 항목의 구분이 준공도서와 정밀진단으로 분리되어 있어서 본 연구에서는 준공도서에 대한 평가항목을 활용하였다. 전체 저수지에 대한 자료분석의 편의를 위하여 구분화된 평가항목을 하나의 항목으로 정규화하였으며, 연차별 종합보고서의 데이터 항목을 제원, 상태평가, 보수·보강, 시설상태로 분리하여 구축하였다.

표준코드 통계코드	평가 연도	지구명	시설 구분	종별	도	시군	읍면	시 설 연간기	준공 연도	면적	수해	유역준공	유역전단	유역 면적	저수용단면 (mm)	총 저수량 (천㎥)	유로저수량 (천㎥)	면수 면적	면수위 (준공)	홍수위 (준공)	제방고 (준공)	대유고 (준공)	면수위 (전단)	홍수위 (전단)
4795010034	2004	해빈	저수지	1	대구	칠곡	지천	달성	1945	260.0	260.0	956.0	956.0	3.0	108.7	1280.0	1112.0	42.0	35.80	36.70	36.70	2.90	35.80	36.70
2723010006	2004	도남	저수지	2	대구	북	도남	칠곡	1944	82.0	70.4	450.0	316.0	4.49	354	35.4	35.4	8.7	90.00	90.50	-	-	90.00	91.27
2917010029	2004	행동2	저수지	2	광주	북	-	광주	1963	40.0	40.0	68.0	46.0	1.70	28	12.0	11.0	1.0	54.78	55.08	57.20	0.78	57.78	56.92
2914010009	2004	통암	저수지	2	광주	서	-	광주	1951	88.3	88.3	376.0	376.0	4.20	483	438.0	427.0	9.4	36.98	37.58	38.83	1.25	36.98	38.21
4125010002	2004	창계	저수지	1	경기	과천	학계	수원	1961	176.0	112.9	790.0	790.0	7.00	967	1092.0	1092.0	21.7	65.31	66.31	68.15	1.84	65.31	67.05
4143010002	2004	백운	저수지	1	경기	의왕	한의	수원	1953	297.0	6.6	1020.0	1020.0	154.00	2091	1380.0	1379.0	30.5	70.20	71.60	72.96	1.28	70.20	71.64
4155010012	2004	금강	저수지	1	경기	안성	금강	안성	1961	2672.0	2134.0	4830.0	4830.0	2.25	456	10390.0	10350.0	160.4	67.00	67.70	69.80	2.10	67.00	69.27
4181010029	2004	기산	저수지	1	경기	포천	일동	연천포천	1979	107.3	107.3	872.0	872.0	8.12	600.00	1074.00	1023.00	13.40	-	-	-	-	195.70	197.67
4181010023	2004	송동	저수지	2	경기	포천	항수	연천포천	1955	53.0	53.0	250.0	250.0	4.71	450.00	400.00	381.00	12.00	-	-	-	-	120.00	131.15
4181010035	2004	재암	저수지	2	경기	포천	영북	연천포천	1932	40.0	40.0	486.0	486.0	12.15	534.00	213.00	203.00	10.80	-	-	-	-	150.00	151.13
4143010021	2004	삼반동	저수지	2	경기	용인	남사	평택	1969	75.0	64.0	328.0	265.0	4.14	473	303.0	302.0	9.0	76.21	77.11	78.25	1.14	76.21	77.28
4211010010	2004	후평	저수지	2	강원	춘천	동	홍천춘천	1957	25.0	25.0	220.0	220.0	6.80	400	326.0	253.0	9.8	87.46	88.16	89.28	1.22	87.46	88.55
4376010072	2004	백마	저수지	1	충북	괴산	사리	괴산	1964	163.0	139.4	665.0	702.0	4.70	-	890.0	873.0	20.00	-	-	-	-	103.09	104.72
4376010087	2004	소수	저수지	1	충북	괴산	소수	괴산	1962	210.0	161.2	652.0	600.0	3.72	663	1288.0	1247.0	18.5	-	-	-	-	190.49	191.89
4376010039	2004	말장	저수지	1	충북	괴산	문암	괴산	1978	252.0	197.8	600.0	600.0	3.00	490	1015.0	996.0	21.20	-	-	-	-	146.90	166.40
4374010017	2004	미진	저수지	2	충북	영동	용산	옥천영동	1968	55.7	54.7	165.0	166.0	3.03	126	401.0	385.0	9.0	200.00	200.80	202.80	2.00	200.00	200.80
4373010063	2004	계삼	저수지	1	충북	옥천	이원	옥천영동	1956	310.0	263.7	1390.0	1390.0	5.27	707	1,861.0	1,861.0	36.0	92.80	94.20	96.20	2.00	92.80	94.20
4373010054	2004	의동	저수지	2	충북	옥천	청산	옥천영동	1981	71.0	61.0	167.0	167.0	2.73	683	417.00	417.00	10.0	161.00	161.90	164.00	2.10	161.00	161.90
4377010067	2004	유선	저수지	1	충북	음성	생곡	음성	1945	151.9	107.4	730.0	730.0	6.8	501.0	892.0	538.0	11.0	117.10	118.20	119.02	1.92	117.10	118.20
4377010010	2004	용계	저수지	1	충북	음성	금강	음성	1981	997.0	997.0	748.0	748.0	0.8	341.0	4259.0	3399.0	46.0	132.90	134.20	136.26	3.26	132.90	134.22
4313010024	2004	중산	저수지	1	충북	충주	상모	충주제원	1982	214.0	214.0	798.0	798.0	3.73	460	2497.0	2270.0	20.00	209.00	210.22	-	-	209.00	211.10

<그림3- 1> 종합보고서 제원

표준코드 통계연도	평가연도	지구명	담당부	성류 시면	취류 시면	어양고	새석고	대수도 손상결함	방수로 손상결함	대수도중수 배출능력	방수로중수 배출능력	사동	취수탑	별동	관개 (안전성평가)	대수도 (안전성평가)	방수로 (안전성평가)	취수시설 (안전성평가)	관개 (시설물성태)	대수도 (시설물성태)	방수로 (시설물성태)	취수시설 (시설물성태)	종합 등급
277010011	2006	노홍	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	-	C	B	C	C	C	C	C	C	C	C
279010002	2006	도원	C	C	B	B	C	C	C	B	B	C	-	C	B	C	B	C	C	C	C	C	C
279010024	2006	연경	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	-	C	C	C	C	B	C	C	C	C	C
287010019	2006	대산	C	C	C	-	-	-	-	-	-	C	-	C	C	-	-	C	C	-	-	C	C
287010011	2006	인산	C	C	D	C	C	D	D	C	C	C	-	C	B	C	C	C	D	D	D	C	D
292010075	2006	황동	C	C	D	D	D	D	D	C	D	-	D	D	D	C	D	D	D	D	D	D	D
302010004	2006	방동	B	B	B	C	C	B	B	C	C	C	-	C	C	C	C	B	C	C	C	C	C
3171010157	2006	두산	B	D	C	B	C	B	B	D	C	D	-	D	C	C	C	-	C	B	C	D	C
3171010218	2006	북만	A	B	C	C	C	D	D	D	D	C	-	C	C	D	D	C	C	D	D	C	C
3171010305	2006	성지곡	D	D	D	D	D	C	D	B	E	-	E	D	D	-	-	D	D	C	E	D	D
415701004	2006	성동	B	B	B	C	C	B	C	C	C	B	-	C	B	C	D	C	C	D	D	C	C
417201015	2006	덕우	C	D	D	B	B	C	C	C	C	C	-	C	C	C	C	C	D	C	C	C	C
411101009	2006	신대	C	B	B	C	D	C	C	B	D	B	-	C	C	C	C	B	C	C	C	B	C
411101010	2006	황송	C	D	C	D	C	B	B	C	C	C	-	C	D	B	B	C	D	B	C	C	C
411101005	2006	일월	D	C	C	C	C	C	C	C	B	-	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
413201006	2006	홍부	C	C	C	D	D	D	C	D	D	C	C	-	D	C	C	C	D	D	C	C	D
415201011	2006	비둔	B	B	B	D	C	C	C	C	D	-	C	C	D	C	C	C	C	C	C	C	C
415201020	2006	오촌	C	D	D	D	D	D	D	D	D	C	-	D	D	D	D	B	D	D	D	C	D
415201016	2006	황용	B	B	B	C	C	C	C	B	C	C	-	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
416201018	2006	고남	B	C	C	A	A	B	C	C	C	C	-	C	B	C	C	C	C	C	C	C	C
416101004	2006	고모	C	C	C	A	A	D	C	A	C	D	-	D	B	C	C	D	C	D	C	D	C
416101025	2006	금주	C	C	C	C	C	D	D	D	C	C	-	D	C	D	C	D	C	D	D	D	D
416101030	2006	백학	B	C	C	D	D	C	C	C	C	C	-	C	C	C	C	D	C	C	C	D	C
416101012	2006	우금	C	C	C	C	C	B	B	C	C	-	C	C	C	B	B	B	C	B	B	C	B
414201044	2006	홍덕	B	B	B	D	D	B	B	D	C	-	C	C	D	C	C	C	C	C	B	C	C
421501013	2006	사천	C	C	C	C	C	D	D	D	D	-	D	D	C	D	D	C	C	D	D	D	D
421501002	2006	강현	B	B	B	A	B	B	C	B	B	-	B	B	B	C	C	B	B	C	C	B	B
421501009	2006	철성	C	C	B	D	D	B	C	B	B	B	-	B	C	C	C	B	C	C	C	B	C
422010011	2006	도원	C	B	B	B	B	C	C	D	-	B	-	C	B	D	B	C	B	D	C	B	C
421201045	2006	교산	B	C	B	B	C	B	B	C	C	C	-	C	B	B	C	B	B	B	C	C	C
421201030	2006	반계	B	B	C	C	B	B	B	C	C	B	-	C	B	C	C	B	B	C	C	B	C
427201012	2006	금현	B	C	C	D	C	C	C	C	B	B	-	A	D	C	B	B	D	C	C	B	C
427201020	2006	계운	C	B	B	C	D	B	B	B	B	C	-	C	C	B	B	B	C	B	B	C	C
429010011	2006	물문	B	B	B	D	D	C	B	B	C	C	-	B	C	C	B	B	C	C	B	C	C

〈그림3- 2〉 종합보고서 상태평가

지구명	개계															이수도 구조 불안전 (주요결함)	연장 부족 (주요결함)	옹벽고 부족 (주요결함)							
	이안고 부족 (주요결함)	경투수 유출 (주요결함)	과이명 안전을 (주요결함)	사면 안전을 (주요결함)	재료 불량 (주요결함)	경이군열 (주요결함)	이원유실 (주요결함)	사면 변형 (주요결함)	침식세굴 (주요결함)	기타 (주요결함)	맞angi (보수보강)	표면차수 (보수보강)	그라우팅 (보수보강)	드래인 설치 (보수보강)	압성도 (보수보강)				처한 (보수보강)	성도모양 (보수보강)	사석경배 (보수보강)	단면보강 (보수보강)	기타 (보수보강)		
단선	0	0									0		0				0	0			0				
용면	0					0	0		0		0						0	0				0			
선선	0	0					0	0			0						0	0							
하열		0				0	0	0			0	0	0				0	0							
세검	0	0			0	0	0	0	0	원미루내 차량통행	0					0	0	0							
병해	0						0		0		0	0	0	0		0	0	0			0	0	0		
가릉	0				0	0	0	0	0		0						0					0	0		
선등	0	0								사석고 부족	0		0				0	0						0	
개동	0										0													0	0
월산	0	0							0	상동사면 보호공 미설 치	0		0				0	0						0	
광동	0	0						0	0	0	0	0	0			0	0	0			0	0	0	0	
문죽	0					0	0	0	0		0					0	0	0					0	0	
수평	0	0				0	0	0	0		0	0	0			0	0	0					0	0	
철조	0	0		0		0	0	0	0		0	0				0	0	0					0	0	
노은사 (경인)	0	0					0				0	0					0						0	0	
뫼양동	0	0					0				0		0				0	0					0		
대천	0	0					0				0	0					0	0					0	0	
농촌	0	0				0		0		사석미설치		0			0		0	0							
도곡	0	0				0	0		0		0	0	0			0	0	0					0	0	
후포	0	0					0				0	0	0	0			0	0	0				0	0	
현명	0	0				0	0		0		0	0	0			0	0	0							
회암	0	0			0	0	0	0	0		0	0	0			0	0	0			0	0	0	0	
수입	0				0		0		0		0					0	0						0	0	

<그림3- 3> 종합보고서 보수·보강

표준코드 통계코드	평가년도	지구명	시설 상태	관리 구분
4785010034	2004	하번	제재 여유고 부족, 하루시면 하단부의 슬럼프 및 만수위시 침투수 발생과 여수토 안정부 이격과 시면부의 균열 및 누수 발생, 방수로 옹벽의 일부구간에 변형이 발생 및 방수로 홍수 배제시 옹벽의 침하 발생과 복동 내부에 균열, 누수, 점토유출 등의 열화상상이 발생한 상태	공사
2723010006	2004	도남	제재의 여유고 부족, 시정부 덩 마루목 부족, 사석고 부족, 사석 전구간 이완, 이탈, 상류토공사면 요철, 하루시면 선단부 일부구간에 토공노출, 세굴, 침식, 침투수 발생, 제재 내부의 중심점토 및 기초지반에 포화대 형성, 설계기준홍수시 배제능력부족, 호안옹벽 및 연계 균열, 방수로 벽리, 벽락, 중층균열, 분리벽 구간 벽락, 좌 우측옹벽 균열 발생, 시통 스킨들 부식 및 스킨스 밸브 누수, 복동 관계 이음부 벽대, 누수, 토립자 유출	공사
2917010028	2004	생음2	제재 여유고 부족, 포화대 분포 하루시면 점토유출 침투수발생, 여수토 홍수배제능력 부족, 방수로 여유고 부족, 시통 스킨스게이트 누수, 복동 점토유출 누수	공사
2914010008	2004	종암	제재 여유고 부족, 포화대 분포 하루시면 사석고 부족, 여수토 홍수배제능력 부족, 방수로 여유고 부족, 비단 균열, 옹벽전도, 복동 점토유출 누수	공사
4129010002	2004	청계	제재 여유고 및 사석고 부족, 상류시면 만수위선 침투 및 사석이완, 여수토 연계 및 방수로 비단 벽락, 세굴, 공개노출, 방수로 피복 불량으로 침근노출 및 벽락 전향출, 취수탑 연력고랑 고간의 기울임 및 부근 복동 관계 누수	공사
4143010002	2004	백운	제재 여유고 부족, 상류시면 석축이완 및 절초항 지지 불량, 경수지 비단 벽락 및 침근 노출, 취수탑 권양기 수동식 및 노후화	공사
4155010012	2004	금강	설계기준에 의한 PMF점중시 제재 여유고 및 사석고 부족, 여수토 연계, 방수로 비단 벽락 및 침근 노출, 취수탑 4호 문비 스킨들대 결현상, 복동관계 거푸집 미 제거 및 미출진으로 침근노출	공사
4181010028	2004	가산	상류시면 사석보호공 이완, 결하, 여수토 콘크리트 파손, 침근노출, 누수, 방수로 축벽, 콘크리트 벽락, 침근노출 및 누수, 시통문비 누수, 복동 관계 점토다랑 유출	공사
4181010023	2004	추동	델마루 여유고 부족, 상류시면 시면결하, 사석이완, 하루시면 석축침하, 방수로 벽리 및 벽락, 시통조작 지반	공사
4181010035	2004	자일	상류시면 사석이완, 제재시점 여수토 인접구간 과포화대 형성, 여수토 콘크리트 벽락, 방수로 비단 콘크리트 파손 및 침근노출, 복동유출부 토시매물	공사
4149010021	2004	삼안동	제재 여유고 및 사석고 부족, 상류시면 사석이완 및 이탈, 하루시면 우안 및 접속부 점토침유한 침투수 발생, 여수토 및 방수로 산측시면부 지면요철로 풍화, 절리 발달, 경수지 미설치, 복동유출부 점토 퇴적	공사
4211010010	2004	후평	제재 여유고 부족, 상류시면 사석고 부족, 이완, 이탈, 하루시면 슬럼프발생, 침투수발생, 여수토 홍수배제능력 부족, 방수로 여유고 부족, 시통 스킨스게이트 누수, 스킨들대 결, 복동 점토유출, 누수	공사
4376010072	2004	백대	여수토 일부구간 미세세굴, 신수축이음부 소량누수, 복동 천정부 소량누수 및 중앙방결 발생	공사
4376010067	2004	소수	제재는 사석고 부족, 하루시면 침투수 일부 발생, 여수토 방수로 부분적으로 누수 및 열화상상, 복동 누수 및 토립자유출	공사
4376010039	2004	문량	하류시면 소량 침투수, 여방수로 부분적으로 결미한 열화상상, 복동 결미한 누수 및 균열, 시통 소량 누수	공사
4374010017	2004	미전	중심점토 및 사석고 설계기준보다 낮음, 상류시면 사석 이탈, 맞물림 불량, 하루시면 요철 및 침투수 발생, 여 방수로 홍수배제능력 부족, 벽리, 벽락, 임반 구간 요철 및 상단 부위 붕괴 위험, 시통 문비 소량 누수, 복동 내부 점토분 유출	공사
4373010063	2004	개심	홍수위상 여유고 부족, 델마루 상하류측으로 침하, 상류시면 사석 이탈, 맞물림 불량 및 사석고 설계기준보다 낮음, 여 방수로 홍수배제능력 부족, 균열, 벽대, 방수로 석축 파손, 모래더리 탈락, 복동 내부 점토분 유출, 누수	공사
4373010054	2004	익동	델마루 상하류측으로 침하, 상류시면 사석 맞물림 불량, 결하, 통계학적 실험식에 의한 시면기울기 부족, 하루시면 요철 발생, 여 방수로 홍수배제능력 부족, 균열, 벽리, 벽락, 침근노출 및 부식, 시통 스킨들 부식, 문비 소량 누수, 복동 내부 점토분 유출, 누수	공사
4377010067	2004	유신	제재의 여유고 부족, 상류시면 보호사석의 여유고부족 및 이완, 침하 발생, 하루시면 하단부의 침투수 발생, 지진시 시면안전을 무효 및 방수로 비단의 벽락 및 공개노출과 시통 조작성 진인 난간 부식, 복동내부의 균열, 누수, 점토유출 발생	공사
4377010010	2004	용계	제재의 델마루 목 부족, 상류시면 보호사석 이완 및 이탈, 하루시면 기울기 부족 및 축수로옹벽의 표면세굴, 방수로 옹벽의 균열 및 비단의 벽락 공개노출과 취수탑 조작성 결함문과 연력고랑 하부의 H-Beam의 부식발생	공사
4313010024	2004	중산	여수토 연계 중점부 표면벽막 및 소량누수, 취수탑 외벽 공개벽리, 문비누수, 칠재류 부식	공사
4313010014	2004	화곡	여수토 슈트부 표면벽막 공개, 절근, 소량누수, 방수로 비단 세굴 및 공개 노출, 복동 토립자 유출 및 누수, 시통 스킨들 저부 돌출형성	공사
4415010063	2004	우목	델마루 재경목 부족, 상류시면 사석 이완, 유실, 차이콘 내부 벽체 침근노출, 벽락, 표면 세굴, 점토유출, 홍수 배제량 부족, 방수로 벽대, 공개노출, 표면세굴, 복동 내부 점토분 유출, 균열, 동공 및 누수 발생, 시통문비 디랑 누수	공사
4415010063	2004	유계	델마루 재경목 부족, 상류시면 사석 이완 및 기울기 부족, 여수토 침근노출, 벽락, 표면 세굴, 방수로 벽대, 침근노출, 표면세굴, 복동 내부 점토분 유출, 시통문비 디랑 누수, 스킨들 부식	공사
4415010067	2004	요동	델마루 재경목 부족, 상류시면 사석 이완 및 결하, 여수토 공극, 누수, 벽락, 표면 세굴, 방수로 벽대, 침근노출, 표면세굴, 경수지 홍수배제량 부족, 복동 내부 점토분 유출, 시통문비 디랑 누수, 스킨들 부식	공사
4415010060	2004	한천	델마루 재경목 부족, 상류시면 사석 이완 및 결하, 경수지 홍수배제량 부족, 복동 내부 점토분 유출, 침근노출, 디랑누수, 시통문비 디랑 누수, 스킨들 부식 및 결 발생	공사
4423010005	2004	고내	델마루는 결하, 상류시면은 이완 및 이탈, 침몰, 석생, 하루시면은 침투수 누출, 여수토는 토사탄적, 방수로는 결식, 콘크리트는 벽리 벽락과 균열, 산측 대궐토부 유실중(H+의 10m), 경수지 균열, 비딕은 침근 노출, 시통 조작성 결함과 노후, 복동 토류부 상단 불량	공사
4418010106	2004	해랑	홍수위상 여유고 부족, 상류시면 전구간 사석 유실 및 탈락, 사석 여유고 부족, 여수토 홍수배제능력 부족, 방수로 소오 여유고 부족, 시통 조작성 기초 세굴 및 제재경지 부식, 복동 관 이음부 이격, 누수 및 점토 유출	공사

<그림3- 4> 종합보고서 시설상태

정밀안전진단 종합보고서의 평가항목이 년도마다 항목이 동일하지 않아, 각 연차별로 2007년도 기준에 맞추어 항목을 통일 하였고, 2007년도 기준으로 평가된 항목은 제원 83개 항목, 상태평가 42개 항목, 보수보강 83개 항목, 시설상태 5개 항목으로 구분하였다.

제2절 저수지 유형화

1. 저수지 유형화 필요성 및 방법

가. 저수지 유형화의 필요성

유형화는 하나의 문제점을 가지는 여러개의 사물들을 비슷한 유형의 기능이나 현상을 하나로 묶어서 생각함으로써 문제의 해결방안을 도출할 수 있다.

현재의 문제는 저수지 고유의 문제가 아닌 저수지를 평가하고 관리하는 기준의 문제로써 하나의 저수지로만 분석이 어려우며 전국의 저수지를 대상으로 형태적 유형을 분리하므로써 유형에 나타는 특성을 파악하고, 유형별 지구를 결정할 수 있다.

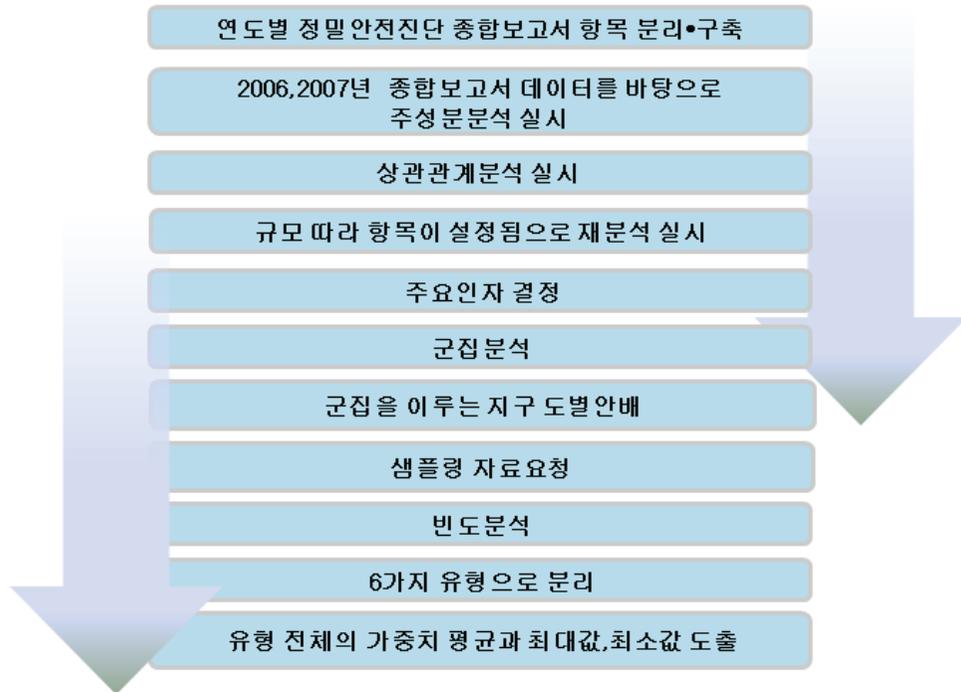
나. 유형화 방법

농업용저수지를 유형화 하기위하여 한국농어촌공사에서 실시한 농업용저수지 정밀안전진단 상태평가 종합보고서를 바탕으로 주성분분석(Principle component analysis)과 군집분석(Cluster analysis)을 활용하였다.

주성분분석을 통하여 저수지 재원 입력자료의 구성요인을 추출하고 추출된 인자를 바탕으로 군집분석을 실시하여 저수지를 군집화하였다. 군집화를 통하여 군집별 경계 수치를 파악하고, 중복되지 않는 유형을 결정하여 빈도분석을 실시하고자 한다.

2. 구축자료를 통한 통계분석

가. 통계분석 순서



<그림3- 5> 분석의 순서

연차별 분리·구축된 자료를 이용하여 가장 먼저 인자분석을 실시하고 분석된 인자를 통해서 항목별로 비슷한 것끼리 묶기 위하여 군집분석을 실시하고, 구축된 자료가 방대하여 2006, 2007년을 토대로 분석을 실시하기 위하여 항목평가 기재란에 문자나 공란이 있는 항목과 지구를 삭제하였다. 2006, 2007년도 종합보고서의 320지구를 통하여 분석을 실시하였고 저수지 체원 83개 항목 중 문자 및 공란으로 평가된 항목이 삭제되어 총 20개 항목으로 예비분석 실시하였으며, 분리·구축된 자료를 활용하여 인자분석을 실시하였으나 유사 중복된 내용이 많았으며, 이를 개선하기 위하여 다시 주성분분석을 실시하였다.

나. 주성분분석

정밀안전진단 종합보고서 제원 부분에 해당 항목 및 지구를 분리·구축한 데이터를 바탕으로 주성분분석을 실시하였다.

주성분 분석은 서로 상관관계가 높은 여러 개의 변수들을 조합하여 그 변수들의 정보를 가능한 많이 함축하고 있는 새로운 인위적 변수를 만들어내기 위한 다변량 통계분석이다(장민원, 2006). 주성분분석의 요인적재치를 단순화하기 위하여 직교회전방식(Varimax)을 활용하였다.

직교회전방식(Varimax)을 이용한 주성분 분석결과 요인적재량을 높은 순으로 정렬하면 다음 (표3-2) 와 같다.

(표3- 2) 주성분 분석

	성분				
	1	2	3	4	5
만수면적	.756	.064	.160	.210	.084
유효저수량	.731	.369	.209	.331	.209
수해면적	.725	.536	.089	-.077	-.031
총저수량	.724	.386	.212	.321	.212
관개면적	.704	.554	.099	-.069	.013
제체길이	.605	-.098	-.148	.249	-.356
복통연장	.181	.814	-.007	.218	.282
제체높이	.071	.800	.112	.263	.288
방수로연장	.227	.638	-.044	.160	-.114
여수토월류심	-.056	.601	.473	.120	-.073
제체 제정폭	.305	.434	.075	.432	.123
취수공규격	.274	.421	-.041	.200	.010
유역배율	-.290	-.043	.793	.083	.192
유역면적	.310	.071	.744	.080	.231
방수로평균폭	.319	-.045	.622	-.028	-.267
여수토길이	.385	.349	.583	.227	.217
상류사면기울기	.178	.271	.117	.757	.041
하류사면기울기	.103	.177	.068	.730	-.012
만수위	-.048	.013	.163	-.055	.794
여유고	.299	.231	-.034	.287	.540

주성분분석을 통해 도출된 제 1요인은 ‘만수면적’, ‘유효저수량’, ‘수혜면적’, ‘총저수량’, ‘관개면적’, ‘제체길이’ 로 면적 및 저수량을 나타내고 있으며 제 2요인은 ‘복통연장’, ‘제체높이’, ‘방수로연장’, ‘여수토월류심’, ‘제체제정폭’, ‘취수공규격’ 으로 여수토 및 취수시설을 나타내며, 제 3요인은 ‘유역배율’, ‘유역면적’, ‘방수로 평균폭’ 으로 이수·치수를 나타내고 있다. 제 4요인으로는 ‘상류사면기울기’, ‘하류사면기울기’ 로 제체의 기울기 및 안전성을 나타내고 있고, 마지막 5요인으로는 ‘만수위’, ‘여유고’ 로 수위를 나타내고 있으며 주성분분석을 통하여 총 5가지 요인으로 정리할 수 있었다.

다. 상관관계분석을 통한 주요인자 결정

주성분 분석을 통해 도출된 요인을 바탕으로 각 요인별 상관성이 가장 높은 하나의 항목으로 나타내기 위하여 상관관계분석을 실시하였다. 상관관계란 변수들 간의 관계를 말하는 것으로서, 두 개이상의 변수에 있어서 한 변수가 변화함에 따라 다른 변수가 어떻게 변화하는지와 같은 변화의 강도와 방향을 상관관계라고 한다(송지준, 2012) 하지만 본 연구에서는 각 항목에 나타는 상관계수를 모두 더하여 가장 높은 점수의 항목을 도출하였다.

(표3- 3) 상관관계분석

			상관계수						
			관개 면적	수혜 면적	총 저수량	유효 저수량	만수 면적	제체 길이	합계
Spear maN 의 rho	관개 면적	상관계수	1.00	0.942	0.788	0.784	0.744	0.354	4.612
		유의확률		.000	.000	.000	.000	.000	
		N	132	132	132	132	132	132	
	수혜 면적	상관계수	0.942	1.000	0.787	0.788	0.75	0.407	4.674
		유의확률	.000		.000	.000	.000	.000	
		N	132	132	132	132	132	132	
	총 저수량	상관계수	0.788	0.787	1.000	0.997	0.786	0.399	4.757
		유의확률	.000	.000		.000	.000	.000	
		N	132	132	132	132	132	132	
	유효 저수량	상관계수	0.784	0.788	0.997	1.00	0.783	0.404	4.756
		유의확률	.000	.000	.000		.000	.000	
		N	132	132	132	132	132	132	
	만수 면적	상관계수	0.744	0.75	0.786	0.783	1.000	0.457	4.520
		유의확률	.000	.000	.000	.000		.000	
		N	132	132	132	132	132	132	
	제체 길이	상관계수	0.354	0.407	0.399	0.404	0.457	1.000	3.021
		유의확률	.000	.000	.000	.000	.000		
		N	132	132	132	132	132	132	

본 연구에서는 상관관계분석 방법을 역으로 이용하여 주성분분석을 통한 하나의 요인에서 관련성이 높은 항목을 도출하여 요인별 대표하는 항목을 추출하였다.

그 결과 1요인: 총 저수량, 2요인: 복통연장, 3요인: 유역면적, 4요인:상류 사면기울기, 5요인 : 만수위로 5개의 항목으로 축소되었다. 하지만 각 요인을 분석한 결과 저수지 규모, 월류심 등 구조 및 재료, 저수지 형태, 유역면적 과 만수위로 구분할 수 있었으나 결과적으로 모두 저수지규모에 영향을 받는 항목들로 나타나 항목을 재조정할 필요가 있었다.

라. 주요인자 결정과정

주요인자를 재조정하기 위하여 저수지의 규모를 결정하는 항목으로 총 저수량을 설정하고 규모에 영향을 받는 항목들은 단위저수량 값으로 바꾸고, 형태적 또는 지리적 등 독립적 특성을 가지는 항목을 도출하고, 도출된 항목간의 조합으로 표현 가능하거나 조합의 일부로 사용되는 항목은

선별하여 삭제하였으며, 취수시설과 방수로 항목 등 독립적 특성을 가진다고 볼 수 있는 항목에서도 정밀안전진단의 유형화 인자로 사용하기에 미비하다고 판단되는 항목은 삭제하였다.

한편, 유철상(2007)은 전국에 분포되어 있는 18,060개의 농업용저수지의 기본적인 제원을 분석하여, 그 평균적인 특성을 파악하였고, 이러한 특성들을 외국의 저수지 특성과 비교하였다. 또한, 저수량/제당높이와 만수면적 관계를 도출하였으며 이를 통하여 제당높이 증가에 따른 급격한 저수량의 증가를 나타내었다. 이러한 선행연구를 통하여 저수지의 형태적 특성으로 제체와 여수토 항목을 간단한 연산방법 (길이÷높이)으로 항목을 축소하였다.

(표3- 4) 주요인자 결정

총 저수량	유역배율	제체길이비	여수토길이비
<ul style="list-style-type: none"> ▪ 유효저수량 ▪ 만수면적 ▪ 만수위 ▪ 여유고 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 수혜면적 ▪ 관개면적 ▪ 유역면적 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 제체길이 ▪ 제체높이 ▪ 제체제정폭 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 여수토 길이 ▪ 여수토월류심

총저수량에 포함될 수 있는 항목을 유효저수량, 만수면적, 만수위, 여유고 항목으로 결정하여 포함 하였고, 유역배율에 포함되는 항목은 수혜면적, 관개면적, 유역면적을 결정하여 포함되었으며, 제체길이높이비 항목에 포함되는 항목은 제체길이, 제체높이, 제체제정폭 항목을 결정하여 포함시켰다. 여수토월류심길이비 항목은 여수토길이, 여수토월류심 항목을 포함시켰다.

최종적으로 4가지 항목인 총저수량, 유역배율, 제체길이높이비, 여수토월류심길이비 네 가지 인자가 결정되었다.

마. 비계층적 군집분석

군집분석(Cluster analysis)은 다수의 대상들을 그들이 소유하는 특성을 토대로 유사한 대상들끼리 그룹핑하는 다변량 통계기법이다. 군집분석에 의해 두 개 이상의 그룹이 형성되며 각 그룹을 군집이라 부른다. (한만섭, 2012) 군집분석에는 계층적 군집분석과 비계층적 군집분석으로 나뉘는데 계층적 군집분석(Hierarchical Clustering)는 군집을 계층적으로 형성하여 분열하거나 응집하는 형태의 덴드로그램 혹은 트리형태의 결과를 출력하며(우호영, 2013) 비계층적 군집분석(Nonhierarchical Clustering)는 주어진 군집개수에 따라 판정기준을 최적화하는 방법으로 K-평균 방법이 대표적이다

축소된 4개의 항목을 가지고 K-평균 군집분석을 실시하였고, 군집 수를 2개로 지정하였으며 새 변수로 소속군집을 선택하여 실시하였다.

(표3- 5) 최종 군집분석

최종 군집중심		
	군 집	
	1	2
유역배율	4.10	19.93
각 군집의 케이스 수		
군 집	1	302.000
	2	18.000
유 효		320.000
결 추		0.000

최종 군집중심		
	군 집	
	1	2
총 저수량	432.3	4152.8
각 군집의 케이스 수		
군 집	1	246.000
	2	74.000
유 효		320.000
결 추		0.000

최종 군집중심		
	군 집	
	1	2
제체 길이비	20.5	305.5
각 군집의 케이스 수		
군 집	1	319.000
	2	1.000
유 효		320.000
결 추		0.000

최종 군집중심		
	군 집	
	1	2
여수토길이비	51.6	16.9
각 군집의 케이스 수		
군 집	1	71.000
	2	249.000
유 효		320.000
결 추		0.000

유역배율의 1군집에는 총 302개의 저수지, 2군집에서는 18개의 저수지가 군집을 이루었고, 총저수량의 1군집에서는 246개, 2군집에서는 74개 저수지로 군집을 이루었으며, 제체길이비는 1군집에서 319개 저수지, 2군집에서는 1개 저수지가 군집을 이루었다. 마지막으로 여수토길이비에서는 1군집 71개, 2군집에서는 249개 저수지가 군집을 형성하였다

그러나 제체 길이비 군집의 경우 유형을 구분하기 어려우며 주요인자로 결정하기에 미비하여 삭제하였다. 군집분석을 통해 군집을 이룬 각 케이스를 소속군집 변수를 이용하여 분리하였으며 소속군집 변수를 통하여 군집별 경계와 범위를 분석하였다. 이를 (표3-6), <그림3-6>으로 정리하였다.

(표3- 6) 소속군집

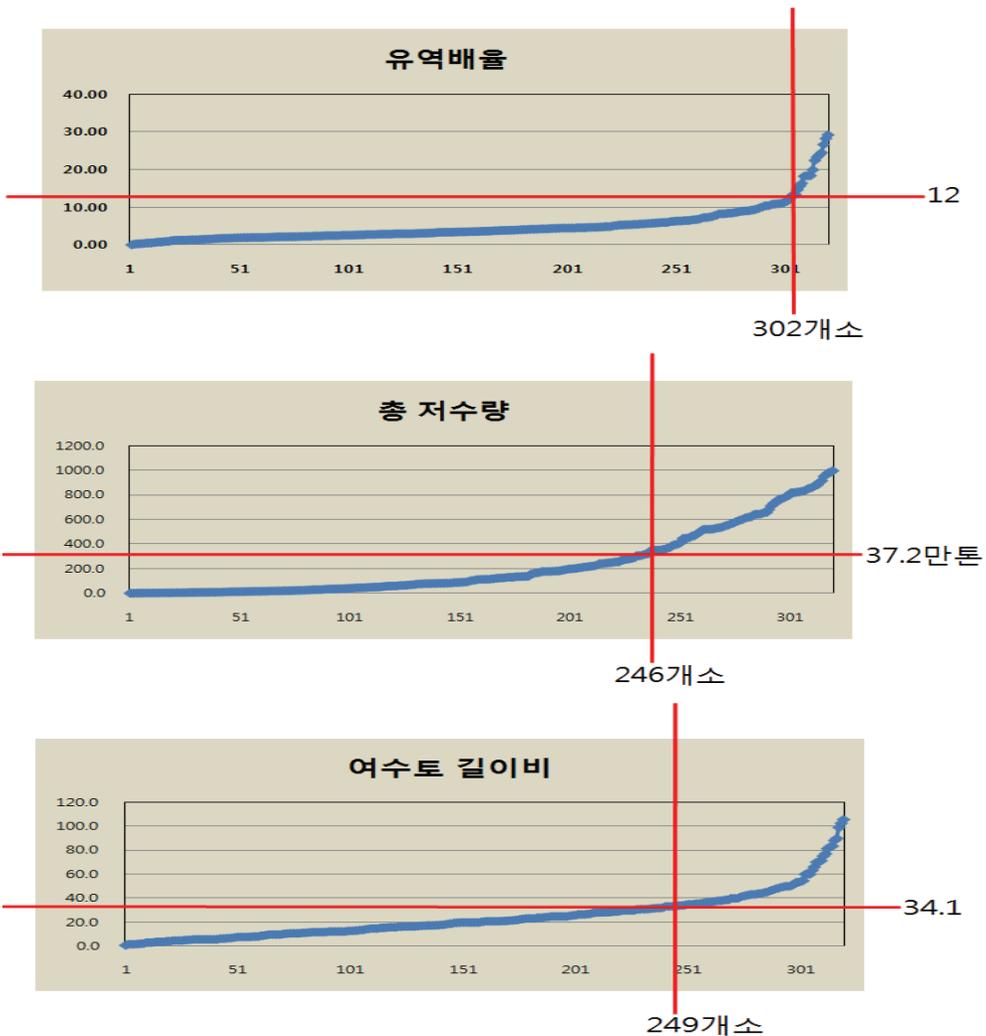
유역배율 소속군집			총 저수량 소속군집			여수토길이비 소속군집		
케이스	군집	거리	케이스	군집	거리	케이스	군집	거리
1	1	.402	1	1	98.642	1	2	4.451
2	1	5.432	2	1	98.152	2	2	8.617
3	1	2.098	3	1	98.112	3	1	8.488
4	1	.202	4	1	97.712	4	2	13.617
5	1	.198	5	1	97.042	5	2	1.383
6	1	1.098	6	1	97.042	6	2	2.049
7	1	1.398	7	1	96.442	7	2	3.049
8	1	.002	8	1	96.342	8	1	15.155
9	2	1.532	9	1	96.342	9	2	3.617
10	1	2.392	10	1	96.342	10	2	2.883
11	2	.068	11	1	96.242	11	2	.951
12	1	.428	12	1	96.142	12	2	14.951
13	1	2.098	13	1	96.042	13	2	11.617
.
.
.
307	1	.492	307	2	173.147	307	1	6.822
308	1	1.878	308	2	182.147	308	2	1.049
309	1	1.478	309	2	193.147	309	2	15.049
310	1	.802	310	2	196.147	310	1	14.322
311	1	1.800	311	2	205.147	311	2	5.049
312	1	1.818	312	2	218.147	312	2	4.049
313	1	.172	313	2	221.147	313	2	3.049
314	1	1.902	314	2	245.147	314	1	16.822
315	1	.298	315	2	255.147	315	1	23.178
316	1	.702	316	2	290.147	316	1	7.822
317	1	.198	317	2	305.147	317	2	12.049
318	1	1.098	318	2	320.147	318	2	13.049
319	1	.632	319	2	322.147	319	1	16.822
320	1	.568	320	2	336.147	320	1	53.512

지구명	유역 배출	총 저수량 (천㎥)	여수도 길미비	유역배출 군집	총저수량 군집	여수도길미비 군집
울성	4.50	1.4	12.5	1	1	2
매산	9.53	1.9	8.3	1	1	2
석사	2.00	2	43.3	1	1	1
석종	4.30	2.3	3.3	1	1	2
복용	3.90	3	18.3	1	1	2
오리	3.00	3.0	19.0	1	1	2
연당	2.70	4	20.0	1	1	2
장등	4.10	4	36.7	1	1	1
월천1호	18.40	3.7	13.3	2	1	2
구	6.49	3.7	19.8	1	1	2
너분동	20.00	3.8	16.0	2	1	2
우무실	3.67	3.9	2.0	1	1	2
내세	2.00	4	5.3	1	1	2
난동	1.47	4	11.0	1	1	2
하석	4.50	4.6	1.0	1	1	2
교동	4.60	5	8.3	1	1	2
내지곡	1.78	4.9	3.8	1	1	2
새동	0.80	5	5.4	1	1	2
작은말	1.43	5.0	2.0	1	1	2
효청	4.37	5.2	3.3	1	1	2
덕촌1	0.46	5.5	5.0	1	1	2
오음	0.35	6.0	2.5	1	1	2
삼곡2	1.35	6.0	20.0	1	1	2
화동	8.50	6.0	12.5	1	1	2
학동	2.70	6.4	8.3	1	1	2
백운	2.38	6.7	5.0	1	1	2
정서상	2.97	7.2	16.0	1	1	2
용두암	4.50	7.5	6.0	1	1	2
덕둔	0.32	8.0	4.0	1	1	2
봉곡	2.00	8.0	25.0	1	1	2

<그림3- 6> 저수지별 군집정리

<그림3-6>와 같이 정리된 데이터를 활용하여 항목별 1군집과 2군집 경계를 이루는 수치를 분석하고, 군집의 범위를 결정할 수 있었다.

유역배출의 경우 1군집은 12이하 302개소, 2군집은 12이상 18개소이며 총저수량의 1군집은 37.2만톤 이하 246개소, 2군집은 37.2만톤 이상 74개소이고 여수토길이비의 1군집은 34.1이하 249개소, 2군집은 34.1이상 71개소로 군집을 이루었으며 <그림3-7>과 같이 그래프로 나타내었다.



<그림3- 7> 항목별 군집

3. 주요인자에 대한 샘플링

가. 표본추출

주성분분석과 군집분석을 통하여 결정된 3가지 인자를 군집별로 평균값과 표준편차값을 바탕으로 2004년부터 2008년까지 랜덤으로 샘플링을 실시하였다.

표본추출의 방법은 저수지의 상태평가 결과값(F_X)과 결과값의 평균(F_{avg}), 표준편차(F_{std})를 통하여 다음과 같은 식으로 z값을 도출하였다.

$$z = (F_X - F_{avg}) \div F_{std}$$

추출된 z값은 ± 3.0 이하 범위를 지정하고 범위안에 속하는 저수지들을 대상으로 엑셀 랜덤함수를 이용하여 각 군집별 5개의 저수지가 추출되었으며 총 5개년도에서 150개 저수지를 선정하여 1차 표본 60개소, 2차표본 90개소를 최종적으로 추출하였다

(표3- 6) 1차표본

2004											
유역배출				총저수량				여수토길이비			
1	z값	2	z값	1	z값	2	z값	1	z값	2	z값
덕동	-1.446	모령	-0.392	화방	-0.883	중산	-0.526	문암	-1.094	업성	1.942
백마	0.444	오궁	-0.441	소수	1.460	경천	-0.525	제대	-0.367	박달	-0.812
2005											
유역배출				총저수량				여수토길이비			
1	z값	2	z값	1	z값	2	z값	1	z값	2	z값
문암	0.270	미로	-0.228	연동	-0.841	덕용	0.1835	문동	-1.260	구시	-0.8294
봉소	0.693	차당	2.1316	적누	1.241	하곡	0.5994	덕곡	0.935	대화	-0.4170
2006											
유역배출				총저수량				여수토길이비			
1	z값	2	z값	1	z값	2	z값	1	z값	2	z값
신방	-1.317	석현	0.9726	동비	-0.977	입암	-0.300	승연2	1.690	홍동	-0.576
비룡	0.534	고현	0.7037	왕송	-0.706	장남	0.9048	신	-1.029	송선	-0.843
2007											
유역배출				총저수량				여수토길이비			
1	z값	2	z값	1	z값	2	z값	1	z값	2	z값
구계	-0.064	표촌	-0.313	석화	-0.699	지평	-0.519	지촌	2.223	장군	0.8287
금반	-0.056	삼울	-0.019	턱골	-0.716	풍전	-0.615	용두	1.441	여천	-0.1555
2008											
유역배출				총저수량				여수토길이비			
1	z값	2	z값	1	z값	2	z값	1	z값	2	z값
용궁	0.8725	부연	-0.2402	후곡	-0.9219	탑정	-0.0025	용천	-0.206	토교	0.7119
유유	0.5559	달전	-0.2497	답천	0.1055	백용	-0.9830	장수	2.0037	만년	-0.4786

(표3- 7) 2차표본

2004											
유역배출				총저수량				여수토길이비			
1	z값	2	z값	1	z값	2	z값	1	z값	2	z값
영풍	-0.172	백운	2.040	연화	-0.637	벽계	-0.526	세곡	0.070	추동	-0.853
지북	-0.725	죽청	-0.365	대포	0.601	금광	0.250	칠동	1.192	영	0.140
제산	-0.046	자일	-0.438	유신	0.169	가혜	2.176	정동	0.005	지정	-0.591
2005											
유역배출				총저수량				여수토길이비			
1	z값	2	z값	1	z값	2	z값	1	z값	2	z값
감동	-0.464	산명호	-0.734	금오	2.27	가음	-0.920	석우	1.194	미륵	-0.295
하곡	-0.031	기곡	0.831	화원2	-0.236	추동	-0.787	방화	-0.511	육연	0.765
승언 1	-0.697	금오	-0.166	국전	-0.350	용당	0.532	도천	0.938	입곡	-0.186
2006											
유역배출				총저수량				여수토길이비			
1	z값	2	z값	1	z값	2	z값	1	z값	2	z값
아암	0.3762	고산	-1.418	신촌	-0.222	도고	0.212	성연	1.664	고현	1.831
상감	2.0688	동면	0.432	양촌	-0.733	조성	-0.295	가학	-1.141	우금	-0.703
삼가	0.9076	반계	-1.438	중화	0.192	공평	1.335	성만	-0.935	육산	-0.584
2007											
유역배출				총저수량				여수토길이비			
1	z값	2	z값	1	z값	2	z값	1	z값	2	z값
가북	-0.317	압수	-0.245	용연	0.832	육계	-0.312	장수	0.2445	풍전	-0.542
대제	0.1100	제동	-0.329	방죽골	-0.694	가북	0.977	백미	-1.300	구계	-0.683
무창	0.3711	너분동	-0.177	신위양	-0.404	명주	2.057	유탕	2.352	생곡	1.008
2008											
유역배출				총저수량				여수토길이비			
1	z값	2	z값	1	z값	2	z값	1	z값	2	z값
백천	-0.954	두곡	-0.181	어촌	-0.053	고려	0.362	가산	-0.020	육성	-0.304
후평	-1.338	귀엄	1.894	신항	1.047	신송	0.084	덕암	-1.810	지천	-0.327
후원 백	-0.794	우천	-0.176	입석상	-0.860	오봉	1.568	상마북	0.0015	수야	-0.394

나. 표본별 도별안배

추출된 표본을 바탕으로 도별안배를 실시하여 저수지를 선별하였다. 지역별 저수지 선별은 엑셀 프로그램의 Random함수를 활용하여 선별하였으며, 선별과정에서 경기도, 강원도 는 전라도, 경상도, 충청도에 비하여 산재되어 있는 저수지의 수가 적어 연도별, 도별간 균등하게 선별하지 못하였다. 이를 위하여 전라도, 경상도, 충청도에서 1~2지구를 추가하여 1차 표본에서 30개소의 우선요구 지역을 선별하였다.

(표3- 8) 전라도

4617010204	2004	덕동	저수지	2	전남	나주	다도
4680010060	2004	모령	저수지	1	전남	장흥	안양
4671010109	2004	화방	저수지	2	전남	담양	수북
4575010128	2004	오궁	저수지	2	전북	임실	신덕
4571010192	2004	경천	저수지	1	전북	완주	화산
4682010006	2005	연동	저수지	2	전남	해남	해남
4682010067	2005	구시	저수지	1	전남	해남	현산
4521010090	2005	대화(대울)	저수지	1	전북	김제	금구
4518010058	2006	입암	저수지	1	전북	정읍	입암
4678010089	2006	신방	저수지	2	전남	보성	조성
1945006926	2006	석현	저수지	1	전남	순천	삼산
4574010048	2006	장남	저수지	1	전북	장수	번암
4672010023	2007	금반	저수지	2	전남	곡성	삼기
4673010018	2007	용두	저수지	2	전남	구례	토지
	2008	용궁	저수지	2	전남	나주	세지
4580010055	2008	유유	저수지	1	전북	부안	변산
4617010134	2008	백용	저수지	1	전남	나주	다시
4682010124	2008	장수	저수지	1	전남	해남	북일

(표3- 9) 경상도

4713010276	2004	박달	저수지	1	경북	경주	내남
4827010034	2004	제대	저수지	2	경남	밀양	부북
4713010095	2005	하곡	저수지	1	경북	경주	안강
4723010718	2005	차당	저수지	2	경북	영천	고경
4827010039	2005	덕곡	저수지	1	경남	밀양	부북
4713010147	2006	송선	저수지	1	경북	경주	건천
4723010404	2006	신 (화북)	저수지	2	경북	영천	화북
4775010176	2006	고현	저수지	1	경북	청송	진보
1995502548	2006	동비	저수지	2	경남	남해	설천
4725010226	2007	지평	저수지	1	경북	상주	공검
4793010019	2007	삼울	저수지	2	경북	울진	후포
4872010164	2007	표촌	저수지	2	경남	의령	유곡
4874010165	2007	구계	저수지	1	경남	창녕	영산
	2008	후곡	저수지	2	경북	경산	남산
4773010556	2008	용천	저수지	2	경북	의성	다인
4711010012	2008	달전	저수지	1	경북	포항	연일
4817010092	2008	답천	저수지	1	경남	진주	일반성

(표3- 10) 충청도

4313010024	2004	중산	저수지	1	충북	충주	상모
4413010011	2004	업성	저수지	1	충남	천안	업성
4413010016	2004	문암	저수지	1	충남	천안	안서
4376010072	2004	백마	저수지	1	충북	괴산	사리
4376010087	2004	소수	저수지	1	충북	괴산	소수
4476010069	2005	덕용	저수지	1	충남	부여	충화
4479010002	2005	적누	저수지	1	충남	청양	청양
4374010059	2005	봉소	저수지	1	충북	영동	학산
4482010010	2006	승언2	저수지	1	충남	태안	안면
4480010012	2006	홍동	저수지	1	충남	홍성	홍성
4372010015	2006	비룡	저수지	1	충북	보은	내속리
4374010048	2007	지촌	저수지	2	충북	영동	양강
4377010074	2007	장군	저수지	1	충북	음성	감곡
4372010033	2007	턱골	저수지	2	충북	보은	삼승
4421010017	2007	풍전	저수지	1	충남	서산	인지
4313010029	2008	부연	저수지	2	충북	충주	이류
	2008	탑정	저수지	1	충남	논산	부창
4376010092	2008	만년	저수지	1	충북	괴산	불정

(표3- 11) 경기도

4111010010	2006	왕송	저수지	1	경기	의왕	월암
1945001056	2007	석화	저수지	2	경기	여주	홍천
4111010008	2007	여천	저수지	1	경기	영통	하동

(표3- 12) 강원도

4223010001	2005	미로	저수지	2	강원	삼척	미로
4278010015	2008	토교	저수지	1	강원	철원	동송

다. 샘플링 및 자료구득

(표3- 13) 주요인자에 대한 샘플링 및 자료요청

평가 년도	표준코드	지구명	종 별	도	시 군	읍 면
2004	4571010192	경천	1	전북	완주	화산
2004	4413010011	업성	1	충남	천안	업성
2004	4376010087	소수	1	충북	괴산	소수
2004	4827010034	제대	2	경남	밀양	부북
2004	4575010128	오궁	2	전북	임실	신덕
2005	4479010002	적누	1	충남	청양	청양
2005	4682010067	구시	1	전남	해남	현산
2005	4713010095	하곡	1	경북	경주	안강
2005	4682010006	연동	2	전남	해남	해남
2005	4223010001	미로	2	강원	삼척	미로
2006	4574010048	장남	1	전북	장수	번암
2006	4775010176	고현	1	경북	청송	진보
2006	4372010015	비룡	1	충북	보은	내속리
2006	4111010010	왕송	1	경기	의왕	월암
2006	4678010089	신방	2	전남	보성	조성
2007	4111010008	여천	1	경기	영통	하동
2007	4725010226	지평	1	경북	상주	공검
2007	4672010023	금반	2	전남	곡성	삼기
2007	1945001056	석화	2	경기	여주	홍천
2007	4793010019	삼울	2	경북	울진	후포
2007	4872010164	표촌	2	경남	의령	유곡
2007	4374010048	지촌	2	충북	영동	양강
2007	4372010033	턱골	2	충북	보은	삼승
2008		탑정	1	충남	논산	부창
2008	4278010015	토교	1	강원	철원	동송
2008		용궁	2	전남	나주	세지
2008		후곡	2	경북	경산	남산
2008	4773010556	용천	2	경북	의성	다인
2008	4313010029	부연	2	충북	충주	이류

표본추출과 도별안배를 통하여 (표3-13)와 같이 연도별로 정리하여 한국농어촌공사 기술안전품질원에 주요인자에 대한 자료를 요청하였다.

4. 유형분류

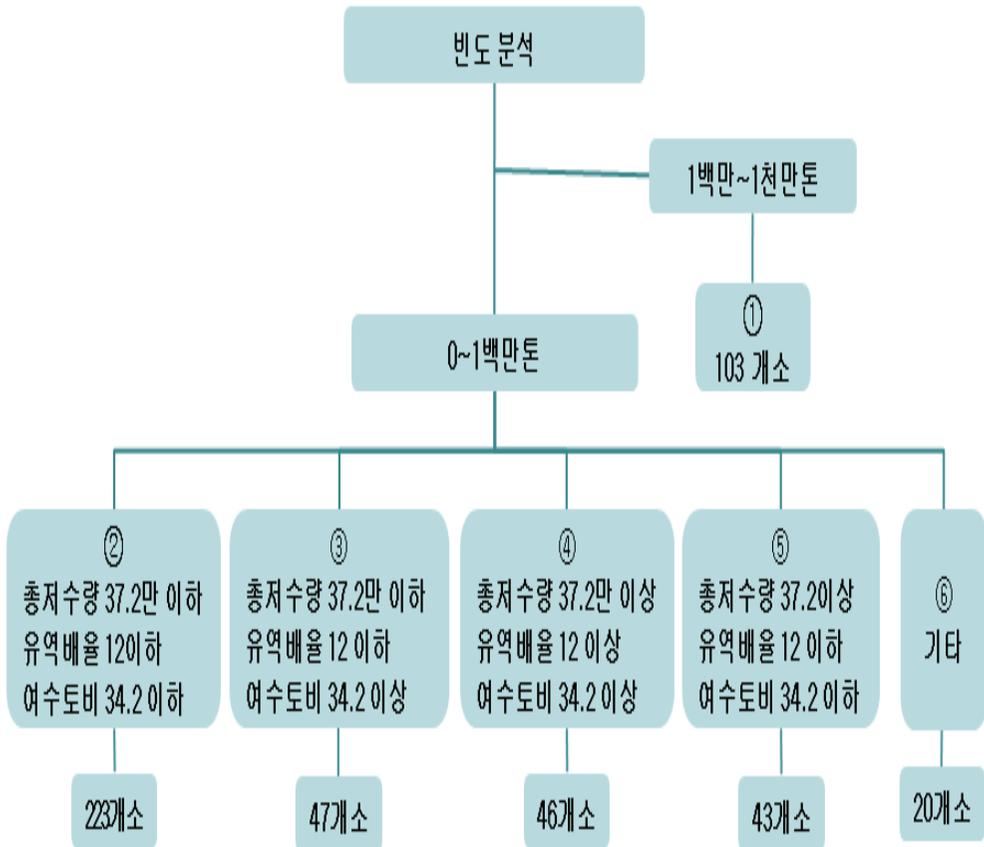
가. 주요인자를 활용한 유형분류

유형분류를 위하여 2004년부터 2013년도까지 2,724개소 자료 중 개별시설물의 상태평가가 누락되지 않은 482개소 자료를 활용하였으며, 주요인자를 통하여 서로 중복되지 않는 유형을 9가지로 분류할 수 있었다.

(표3- 14) 유형분류

유형	유역배율	총저수량	여수토길이비
1	>12	>37.2만톤	>34.1
2	>12	>37.2만톤	<34.1
3	>12	<37.2만톤	>34.1
4	>12	<37.2만톤	<34.1
5	<12	>37.2만톤	>34.1
6	<12	>37.2만톤	<34.1
7	<12	<37.2만톤	>34.1
8	<12	<37.2만톤	<34.1
9	총 저수량 1백만 ~ 1천만톤		

유형별 빈도분석후 1유형은 2개소, 2유형은 1개소, 3유형은 6개소로 낮은 빈도수를 보이는 유형들을 하나로 묶어 기타유형으로 분류하였으며, 1, 2, 3,유형을 제외한 나머지 유형들을 <그림3-8>와 같이 나타내었다.



<그림3- 8> 유형별 빈도분석

나. 유형별 가중치 설정

분류된 유형별 자료를 활용하여 가중치를 설정하기 위하여 다중회귀 분석을 실시하였다. 다중회귀분석은 종속변수와 독립변수들 사이의 관계를 분석하는 통계적 기법으로써(김진식, 2014) 총 6개 유형의 데이터를 바탕으로 가중치를 도출하였다.

(표3- 15) 유형별 가중치 설정

유형	항목	가중치
① (1백만 ~ 1천만톤)	제체	.490
	여수토	.119
	방수로	.173
	취수시설	.222
② (총저수량 37.2만 이하) (유역배율 12이하) (여수토길이비 34.2 이하)	제체	.614
	여수토	.208
	방수로	.062
	취수시설	.120
③ (총저수량 37.2만 이하) (유역배율 12 이하) (여수토길이비 34.2 이상)	제체	.472
	여수토	.448
	방수로	.002
	취수시설	.082
④ (총저수량 37.2만 이상) (유역배율 12 이상) (여수토길이비 34.2 이상)	제체	.607
	여수토	.204
	방수로	.069
	취수시설	.121
⑤ (총저수량 37.2만 이상) (유역배율 12 이하) (여수토길이비 34.2 이하)	제체	.324
	여수토	.144
	방수로	.152
	취수시설	.387
기타	제체	.266
	여수토	.242
	방수로	.271
	취수시설	.222

다. 유형별 가중치의 범위

도출된 유형별 평가항목의 가중치를 간단한 연산을 통하여 제체, 여수토, 방수로, 취수시설 항목의 가중치평균과 최대값과 최소값을 도출 하였다. (표4-16)와 같이 평균적으로 제체항목이 가장 높았으며, 그다음으로 여수토, 취수시설, 방수로로 나타났다. 이를 통하여 현재 적용되고 있는 복합 시설물에 대한 중요도를 변경·적용할 수 있는 근거 자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

(표3- 16) 항목별 가중치범위

항 목	가중치 평균	최대값	최소값
제 체	0.53	0.61	0.27
여수토	0.21	0.45	0.12
방수로	0.10	0.27	0.094
취수시설	0.17	0.39	0.08

제4장 지표식물을 이용한 누수구역 조사방법

제 1절 누수구역 탐색용 지표식물종 선발

- 우리나라 농업용 저수지의 대부분은 필댐(Earth Fill Dam)이며, 저수지 누수는 필댐 파괴의 가장 중요한 원인임.
- ICOLD(1995)는 필댐의 파괴원인을 월류가 44%, 누수가 47%, 기타9%로 분류
- 저수지 누수는 저수위조건, 계절적 특성, 식생상태, 선행강우조건, 제체 재료의 특성, 시공방법 등에 따라 다양하게 나타날 수 있어, 누수 구역과 누수량을 정확하게 파악하기가 매우 어려움.
- 한국농어촌공사(2011)은 저수지 세부외관조사의 경험적 사항으로 제체 하류부에 침출수가 있을 경우 V-notch, 파이프, 구덩이 등을 설치하여 단위시간당 누수량을 메스실린더로 측정하고 누수되는 물의 색도, 온도, 수량, 저수위 변화 및 토립자 유출여부 등을 조사사항을 제시하였다.
- 저수지 허용 누수량 범위를 ① 제체 길이 100m 당 1L/sec 이하, ② 저수지 유입량의 1%이하, ③ 1일 누수량이 총저수량의 0.05%이하, ④ 저수위가 일정할 때 누수량 변화가 1개월간 10%미만으로 제시하였다.
- 누수대 위치 확인을 위한 방법으로는 물리탐사를 이용하는 방법, 지중의 온도변화를 감시하는 Fibre Optical Temperature Measurement 등의 방법이 있으나 전자는 긴급사항에 대비하기에는 시간적으로 부족하다는 점과 후자는 댐 건설시에 설치되어야 하는 문제점이 있음.

1. 환경 지표생물

- 환경지표생물은 특정지역의 환경상태를 측정하는 척도로 이용되는 생물(주로 미생물이나 식물)로 그 지역의 환경조건이나 오염정도를 알 수 있는 생물종으로 적용되고 있음.
- 식물의 서식처는 태양광도, 토양수분조건, 입지적조건, 기후조건 등 자연적인 서식환경에 따라 결정됨

- 한국농어촌공사(2011)은 제체하류사면에 갈대, 쇠뜨기, 머위, 이끼류 등의 습지식물의 자생이나 지렁이나 두더지의 흙무덤의 유무를 보고 제체가 습윤 포화된 상태를 파악하는 방안을 제시
- 본 연구는 자연적인 서식환경에 따라 식물의 서식특성이 다르게 나타나는 특성을 고려하여 저수지 사면에 서식하는 지표습생식물종의 서식특성을 파악하여 누수구역을 판단하는 방법을 제안하고 안성시 산정저수지에서 적용성을 제시하였음.

2. 지표식물종 선발

- 누수구역을 판단하는 적용할 지표종 선발
- 문헌조사, 현장식생조사 결과와 비교
- 자원식물보호연구회(2008)에서 제시한 삶꼴을 고려한 습생식물 정리

(표4- 1) 삶꼴을 고려한 습생식물 목록(1)

과 명	종 명	삶 길이	삶 꼴	자라는 곳
벼과	갈대	여러해살이	HH	논
벼과	달뿌리풀	여러해살이	HH	
벼과	물피	한해살이	HH(Th)	논
벼과	개피	겨울나기 한해살이	HH(Th)	논 등
벼과	나도겨풀	여러해살이	HH	논 등
벼과	강피	한해살이	Th	논, 밭
벼과	개기장	한해살이	Th	논, 밭
벼과	미국개기장	한해살이	Th	논, 밭
벼과	갯드렁새	한해살이	Th	논
벼과	털물참새피	여러해살이	H	논 하천
벼과	줄	여러해살이	HH	논, 물가
부들과	애기부들	여러해살이	HH	논
부들과	부들	여러해살이	HH	논, 습지
방동사니과	울챙고랭이	한해살이, 여러해살이	HH(Th)	논
방동사니과	새섬매자기	여러해살이	HH	간척지, 논 등
방동사니과	매자기	여러해살이	HH	간척지, 논 등
방동사니과	물고랭이	여러해살이	HH	논 등
방동사니과	세모고랭이	여러해살이	HH	논 등
방동사니과	바람하늘지기	한해살이	HH(Th)	논 밭 등
방동사니과	과대가리	여러해살이	HH	논, 목초지, 잔디, 밭 등
방동사니과	쇠털골	여러해살이	HH	논 등
방동사니과	바늘골	한해살이	HH(Th)	논 등
방동사니과	울방개	여러해살이	HH	논 등
방동사니과	알방통사니	한해살이	HH(Th)	논 밭 과수원 목초지 등
방동사니과	쇠방통사니	한해살이	HH(Th)	논 등
방동사니과	너도방통사니	여러해살이	HH	논 등
방동사니과	방통사니 대가리	한해살이	HH(Th)	논 등
골풀과	골풀	여러해살이	HH	습지
닭의 장풀과	사마귀풀	한해살이	HH(Th)	논
네가래과	네가래	여러해살이	HH	논, 물가, 물속 등
	생이가래	한해살이	HH(Th)	하천, 논 등
마디풀과	고미리	한해살이	HH(Th)	논 등
마디풀과	기생여뀌		HH(Th)	밭, 과수원, 목초지 등
마디풀과	여뀌		HH(Th)	논 등
마디풀과	미꾸리납시		HH(Th)	논, 과수원 등

(표4- 1) 삶꼴을 고려한 습생식물 목록(2)

과 명	종 명	삶 길이	삶 꼴	자라는 곳
미나리아재비과	개구리자리	겨울나기 한해살이	HH(ThW)	논, 습지 등
부처꽃과	마디꽃	한해살이	HH(Th)	논 등
	가는마디꽃	한해살이	HH(Th)	밭 등
마름과	마름	한해살이	HH(rh)	하천 등
바늘꽃과	여뀌바늘	한해살이	HH(Th)	논 등
개미탑과	물수세미	여러해살이	HH	논 등
산형과	미나리	여러해살이	HH	논 등
별이끼과	물별이끼	한해살이	HH(Th)	논 등
현삼과	구와말	여러해살이	HH	논 등
현삼과	등에풀	한해살이	HH(Th)	논 등
현삼과	문모초	겨울나기 한해살이	HH(Th)	논 등
현삼과	물칭개나물	겨울나기 한해살이	HH(Th)	논 등
현삼과	밭뚝외풀	한해살이	HH(Th)	논 등
현삼과	논뚝외풀	한해살이	HH(Th)	논 등
현삼과	미국외풀	한해살이	HH(Th)	논 등
현삼과	가는 미국외풀	한해살이	HH(Th)	논 등
국화과	가막사리	한해살이	HH(Th)	논 등
택사과	질경이택사	여러해살이	HH	논 등
택사과	울미	여러해살이	HH	논 등
택사과	벗풀	여러해살이	HH	논 등
자라풀과	물질경이	한해살이	HH(Th)	논 등
가래과	가래	여러해살이	HH	논 등
물옥잠과	물옥잠	한해살이	HH(Th)	논 등
물옥잠과	물달개비	한해살이	HH(Th)	논, 물가
물별과	물별	한해살이	HH(Th)	논 등
개구리밥과	좁 개구리밥	한해살이	HH(Th)	논 등
속새과	속새	여러해살이	HH(Th)	습지 등
치녀고사리과	치녀고사리	여러해살이	HH(Th)	습지 등
우드풀과	개고사리	여러해살이		습지 등

- 지표식물종은 다년생식물과 관목이며 25과 90종으로 수중에 서식하는 수조, 지하경이 발달한 식물 및 포복경식물은 제외
- 사초과 식물은 21종으로 다양하고 개화기가 4월부터 10월까지로 폭넓게 분포하여 필댐 누수구역 탐색용 지표식물로 활용이 기대됨.
- 선발된 지표식물종은 계절별 특성과 현장 적용성 및 서식분포의 다양성 등을 고려하여 식물종의 수를 최소화하여 소형 핸드북형태로 도서와 인터넷으로 제공할 계획임.
- 2014년 선정 누수구역 탐색용 대표 식물종은 골풀, 처녀고사리, 방울고랭이, 눈갯버들이며 <그림4-1>과 같음

(표4- 2) 지표식물종 선발

과명	종명	
	이영로, 이창복 분류	구자옥 외
고비과	꿩고비, 고비	
고사리과	황고사리	
면마과	처녀고사리, 개고사리, 털고사리	차차사리, 개사리
버드나무과	눈갯버들	
췌기풀과	좀깨잎나무	
마디풀과	개대황, 참소리쟁이, 소리쟁이, 이삭여뀌, 흰꽃여뀌	
미나리아재비과	미나리아재비, 동의나물	
십자화과	논냉이(논황새냉이)	
돌나물과	낙지다리	
장미과	가락지나물, 물양지꽃, 가는오이풀	
물레나물과	물고추나물, 고추나물	
제비꽃과	선제비꽃, 콩제비꽃	
부처꽃과	털부처꽃, 부처꽃	
바늘꽃과	바늘꽃	
산형과	미나리, 큰피막이, 개발나물, 감자개발나물, 바 디나물, 참당귀, 궁궁이, 잔잎바디, 뿔미나리	미나리
꿀풀과	개곽향, 애기꿀무꽃, 췌사리, 애기췌사리, 박하	
현삼과	물파리아재비, 애기물파리아재비, 누운주 름잎, 냉초	
숫잔대과	숫잔대	
국화과	금불초, 가는금불초, 벌개미취, 쑥부쟁이, 벌음썸바귀	
부들과	부들, 애기부들	부들, 애기부들
벼과	물억새, 쇠치기풀, 기장대풀, 나도겨풀, 좁겨풀, 미꾸리광이(진들피), 왕미꾸리광이	나도겨풀, 텃물 참새피
사초과	랭이사초, 애기비늘사초, 솔잎사초, 샷갓 사초, 길뚝사초, 도깨비사초, 산비늘사초, 산둑사초, 왕비늘사초, 이삭사초, 너도고 랭이, 물꼬챙이골, 꿀하늘지기, 솔방울고랭 이, 방울고랭이, 매자기, 올챙이고랭이, 세모 고랭이, 큰고랭이, 너도방동사니, 파대가리	새삼매자기, 매자 기, 물고랭이, 세모 고랭이, 파대가리, 쇠털골, 올방개, 너 도방동사니
골풀과	물골풀, 골풀, 눈비너골풀	골풀
백합과	처녀치마, 산옥잠화	
붓꽃과	제비붓꽃, 꽃창포	



<그림4- 1> 2014년 선정 누수구역 탐색용 대표 지표식물종

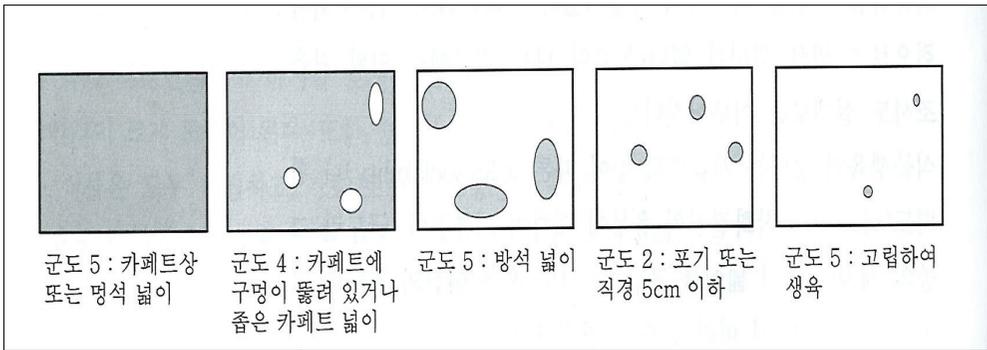
제2절 농업용 저수지 제당의 식생조사 및 누수탐사

1. 식생조사방법

- 방형구를 이용한 측구법(Plot sampling method) 적용
- 방형구 : 1m×1m
- 조사선 : 조사망의 경계선과 동일하게 선정(20m~40m)
- 식생조사측점 : 댐마루를 기준으로 5m 간격
- 조사항목 : 출현식물종, 피도, 군도 및 주변 출현종
- 피도(Coverage, C)sms (표4-3)의 피도계급판정기준(Braun-Blanquet, 1964)을 적용하였고, 군도(Sociability, S)는 <그림4-2>의 군도계급판정기준을 적용

(표4- 3) 피도계급판정기준(Braun-Blanquet, 1964)

부호	피도범위	내 용
5	75~100 %	피도가 조사면적의 3/4이상을 점유하는 것
4	50~75 %	피도가 조사면적의 1/2~3/4를 점유하는 것
3	25~50 %	피도가 조사면적의 1/4~1/2를 점유하는 것
2	5~25 %	개체수가 대단히 많거나 또는 적어도 피도가 1/10~1/4를 점유하는 것
1	1~5 %	개체수가 많지만 피도가 1/20 이하인 경우 또는 피도가 1/10이하로서 개체수가 적은 것
+	<1 %	개체수가 적고, 피도도 적은 것
r	≪1 %	최저 피도를 나타내는 것 (r기호가 생략되고, + 기호에 포함시켜 정리하는 경우도 많다.)



<그림4- 2> 군도계급판정기준

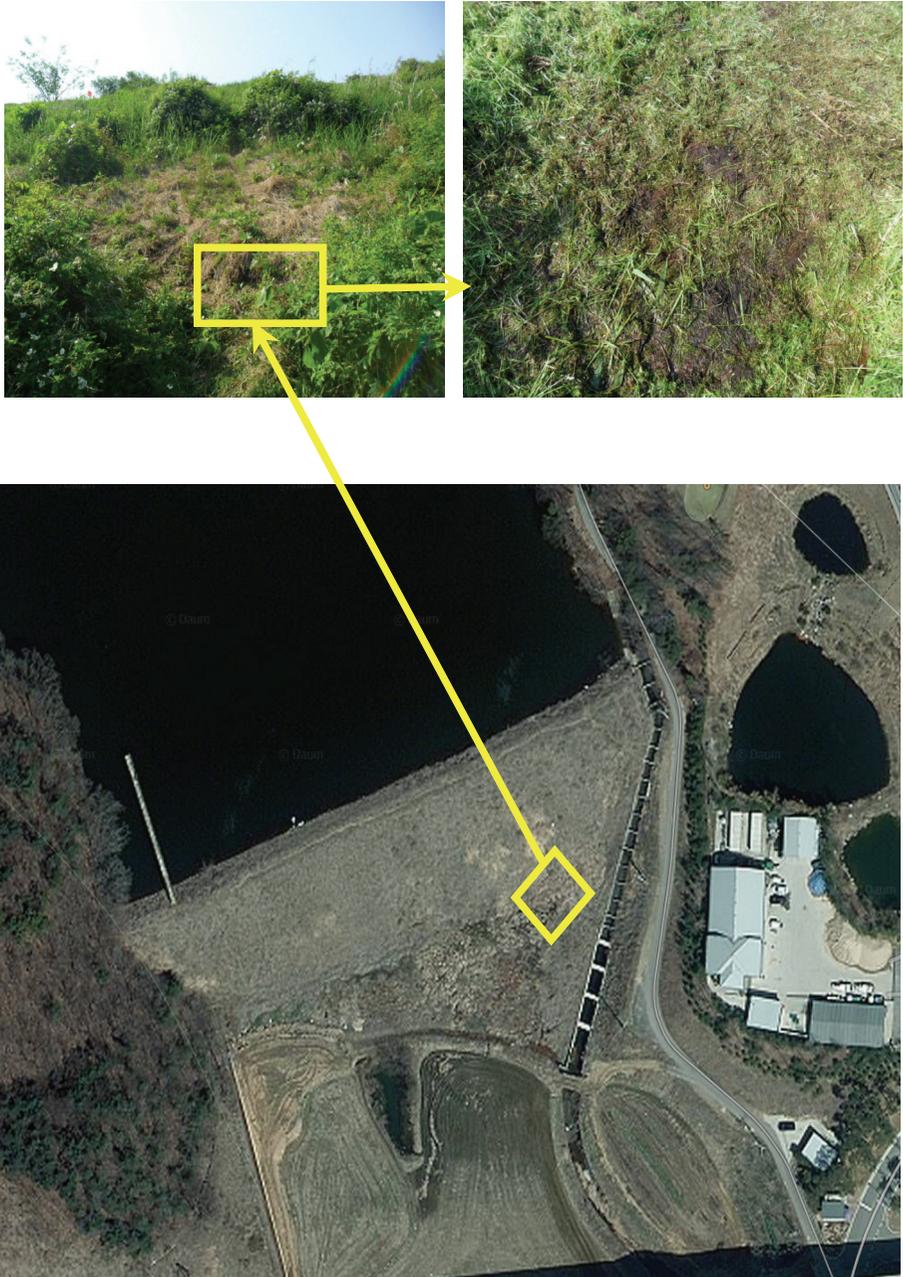
2. 식생조사 대상저수지 선정 및 현장조사

가. 대상저수지 선정

- 2014년 정밀안전진단조사대상 저수지의 식생조사
- 선정된 대상저수지는 예산군 광시면 신흥저수지<그림 4-3>, 안성시 양성면 동향저수지<그림 4-4>, 산정저수지<그림 4-5> 임
- 안성시 양성면 동향저수지는 제체 시점부터 약 100m 하류사면 선단부에서 누수가 발생되었고 외관상 물고임 현상은 확인되지 않으며, 사면이 습윤상태 임
- 산정저수지는 제체 시점부터 약 120m 하류사면선단부에서 누수가 발생되었고, 외관상 물고임 현상이 확인되는 상태



<그림4- 3> 예산군 광시면 신흥저수지



<그림4- 4> 안성시 양성면 동항저수지 현황도



<그림4- 5> 안성시 양성면 산정저수지 현황도

나. 현장식생조사

- 신흥저수지 : 2014년 7월 21일-25일
- 동항지, 산정지 : 2014년 8월 8일
- 조사 저수지의 단면별 식생조사표는 부록에 수록
- 저수지별 조사단면 및 방형구수는 (표4-4)와 같음

(표4- 4) 저수지별 현장조사 개요

저수지명	단면수	조사망 번호	방형구수	출현식물 종류 수
신흥저수지	6	2, 3, 4, 5, 6, 7	50	589
동항저수지	4	1, 3, 5, 7	27	239
산정저수지	4	2, 3, 5, 7	21	254

3. 대상저수지의 식생조사 결과

가. 예산군 광시면 신흥저수지

- 신흥저수지의 단면별 방형구 조사 결과표는 (표 4-5)와 같이 조사단면은 6개, 방형구 수는 50개이며 대표 우점종은 계절상과 위치적 특성을 반영하여 칩, 땅비싸리, 쇠뜨기, 달뿌리풀 등으로 비교적 다양함

(표4- 5) 신흥저수지의 단면별 방형구 조사 결과표(1)

단면 번호	방형구 번호	위치 (m)	출현 종수	우점종	누수 지표종
2	2-1	2	8	칩	
	2-2	6	10	칩	
	2-3	11	11	칩	
	2-4	16	10	칩	
	2-5	21	13	칩	
3	3-1	1	10	땅비싸리	
	3-2	6	6	땅비싸리	
	3-3	11	10	쇠뜨기	
	3-4	16	12	쇠뜨기, 억새	
	3-5	21	14	쭈	
	3-6	26	17	달뿌리풀	
	3-7	31	17	달뿌리풀, 쭈	치녀고사리
	3-8	36	9	쭈	
4	4-1	1	12	땅비싸리, 그늘사초	
	4-2	6	11	쇠뜨기	
	4-3	11	9	쇠뜨기	
	4-4	16	14	쇠뜨기, 쭈	
	4-5	21	11	땅비싸리	
	4-6	26	9	달뿌리풀	
	4-7	31	11	쭈	
	4-8	36	14	쭈, 명석딸기	골풀
	4-9	41	11	달뿌리풀	골풀
	4-10	46	11	토끼풀, 돌콩	골풀

(표4- 5) 신흥저수지의 단면별 방형구 조사 결과표(2)

단면 번호	방형구 번호	위치 (m)	출현 종수	우점종	누수지표종
5	5-1	1	5	취	
	5-2	6	8	취, 쇠뜨기	
	5-3	11	7	취	
	5-4	16	16	쭉, 쇠별꽃	
	5-5	21	14	쇠뜨기, 쇠별꽃	
	5-6	26	9	달뿌리풀	
	5-7	31	16	달뿌리풀	치녀고사리
	5-8	36	16	고삼, 개망초	치녀고사리 골풀, 눈갯버들
	5-9	41	10	개망초	골풀
	5-10	46	10	쇠뜨기	골풀
	5-11	51	10	사초	치녀고사리
	5-12	56	10		눈갯버들
6	6-1	2	15	땅비싸리	
	6-2	6	9	취	
	6-3	11	9	취	
	6-4	16	15	취	
	6-5	21	17	달뿌리풀	
	6-6	26	17	쇠뜨기, 메자기	
	6-7	31	13	쇠뜨기	치녀고사리
	6-8	36	16	치녀고사리	치녀고사리
	6-9	41	18	쭉	치녀고사리, 눈갯버들
	6-10	46	11	메자기	치녀고사리, 눈갯버들
7	7-1	2	11	취, 쭉	
	7-2	6	11	취, 쭉	
	7-3	11	11	습싸리	
	7-4	16	9	억새, 쭉	
	7-5	21	13	대나무	

- 출현한 누수지표종은 골풀, 처녀고사리, 눈 갯버들로 누수가 발생하는 구역을 중심으로 무성하게 성장하고 있으며 특히 6단면 6-8방향구는 처녀고사리가 우점종으로 조사되었음
- 신흥저수지에서 출현 식물종의 출현빈도는 (표 4-6)과 같음
- 쇠뜨기의 출현 방형구는 48개로 출현빈도가 96%로 신흥저수지 하류사면에서 골고루 분포하고 있음
- 쇠뜨기는 4단면의 4-2, 4-3과 같이 저수지 상단에서 우점종으로 출현하고 있어 누수 또는 습윤구역을 판단하는 지표종으로 활용에 신중할 필요가 있음

(표4- 6) 신흥저수지 출현 식물종의 출현빈도

종 명	출현수	출현빈도 (%)	종 명	출현수	출현빈도 (%)
갈퀴나물	1	2.0	붉나무	4	8.0
개망초	36	72.0	붉은서나물	2	4.0
개맥문동	2	4.0	비름	1	2.0
개밀류	12	24.0	비수리	1	2.0
고마리	2	4.0	사위질빵	8	16.0
고비	2	4.0	사초류	10	20.0
고삼	13	26.0	산딸기	10	20.0
골풀	7	14.0	산벗나무	1	2.0
구기자	8	16.0	산층층이	2	4.0
그늘사초	6	12.0	석삼	1	2.0
깨풀류	8	16.0	소리쟁이류	5	10.0
노박덩굴	1	2.0	쇠뜨기	48	96.0
눈갯버들	4	8.0	쇠무릅	3	6.0
다래덩굴	2	4.0	쇠별꽃	7	14.0
달맞이꽃	1	2.0	쉽싸리	1	2.0
달뿌리풀	17	34.0	싸리	8	16.0
닭의장풀	20	40.0	쑥	46	92.0
대나무	2	4.0	쑥부쟁이	6	12.0
댕댕이덩굴	12	24.0	아카시	13	26.0
돌소리쟁이	1	2.0	애기똥풀	6	12.0
돌콩	24	48.0	억새	24	48.0
수영	4	8.0	여뀌	1	2.0
땅비싸리	9	18.0	여우괘	11	22.0
마	37	74.0	왕고들빼기	10	20.0
망초	1	2.0	으름	1	2.0
매듭풀	2	4.0	조팝나무	3	6.0
머위	1	2.0	참나무	8	16.0
명석딸기	6	12.0	참새귀리	8	16.0
메꽃	2	4.0	처녀고사리	9	18.0
메자기	11	22.0	취	31	62.0
며느리밑씨개	14	28.0	토끼풀	2	4.0
며느리배꼽	14	28.0	화본류	3	6.0
박주가리	4	8.0	환삼덩굴	8	16.0
뱀딸기	1	2.0			

- 누수지표종인 골풀, 처녀고사리, 눈 갯버들의 출현방형구는 각각 7개소, 9개소, 4개소이며, 출현빈도는 각각 14%, 18%, 5%임
 나. 안성시 양성면 동향저수지

(표4- 7) 동향저수지의 단면별 방형구 조사 결과표

단면 번호	방형구 번호	위치 (m)	출현 종수	우점종	누수지표종
1	1-1	2	9	참	
	1-2	6	6	참	
	1-3	11	8	쭈	
	1-4	16	7	조팝나무	
	1-5	21	8	참	
	1-6	26	12	참	
	1-7	31	10	환삼덩굴	고마리
3	3-1	2	11	참	
	3-2	6	16	참	
	3-3	11	7	달뿌리풀	
	3-4	16	8	달뿌리풀	가시여뀌
	3-5	21	11	달뿌리풀	가시여뀌, 고마리
	3-6	26	10	참	
	3-7	31	6	참	
	3-8	35	13	고마리	고마리
5	5-1	2	6	참	
	5-2	6	8	참	
	5-3	11	7	참	
	5-4	16	6	참	
	5-5	21	8	참	가시여뀌
	5-6	26	10	환삼덩굴	가시여뀌
	5-7	31	9	환삼덩굴	
7	7-1	2	12	참	
	7-2	6	5	짚래	
	7-3	11	5	짚래	
	7-4	16	9	고사리	고마리
	7-5	21	13	참	가시여뀌

(표4- 8) 동항저수지 출현 식물종의 출현빈도

종 명	출현수	출현빈도 (%)	종 명	출현수	출현빈도 (%)
가막사리	1	3.7	미나리	1	3.7
강아지풀	11	40.7	바랭이	1	3.7
개구리자리	1	3.7	비수리	1	3.7
개망초	3	11.1	산딸기	13	48.1
고들빼기	4	14.8	쇠뜨기	6	22.2
고마리	4	14.8	쇠무릅	1	3.7
고사리	3	11.1	쭈	16	59.3
깨풀	1	3.7	쭈부쟁이	2	7.4
나도개피	2	7.4	아카시	1	3.7
달맞이꽃	8	29.6	억새	2	7.4
달뿌리풀	17	63.0	가시여뀌	5	18.5
닭의장풀	3	11.1	왕고들빼기	11	40.7
댕댕이덩굴	2	7.4	조개풀	1	3.7
돌콩	4	14.8	조팝나무	3	11.1
망초	10	37.0	짚레	9	33.3
메자기	5	18.5	쭈	27	100.0
며느리밑씨개	9	33.3	키버들	1	3.7
며느리배꼽	13	48.1	화본류	11	40.7
명아주	2	7.4	환삼덩굴	24	88.9
무릇	3	11.1			

다. 안성시 양성면 산정저수지

(표4- 9) 산정저수지의 단면별 방형구 조사 결과표

단면번호	방형구 번호	위치 (m)	출현종수	우점종	누수지표종
1	1-1	2	12	강아지풀	
	1-2	6	14	바랭이	
	1-3	11	17	강아지풀	
	1-4	16	16	강아지풀	
	1-5	21	9	산딸기	
	1-6	26	10	달뿌리풀	
3	3-1	2	8	띠풀	
	3-2	6	14	개맥문동	
	3-3	11	11	억새	
	3-4	16	6	억새	
	3-5	21	14	억새	
	3-6	26	11	까마중	
5	5-1	2	10	잔디	
	5-2	6	11	깨풀	
	5-3	11	14	억새	
	5-4	16	11	억새	
	5-5	21	14	명석딸기	
	5-6	26	14	조개풀	고마리
6	6-2	6	7	닭의장풀	
	6-3	11	13	억새	
	6-4	16	18	골풀	골풀, 방울고랭이

(표4- 10) 산정저수지 출현 식물종의 출현빈도

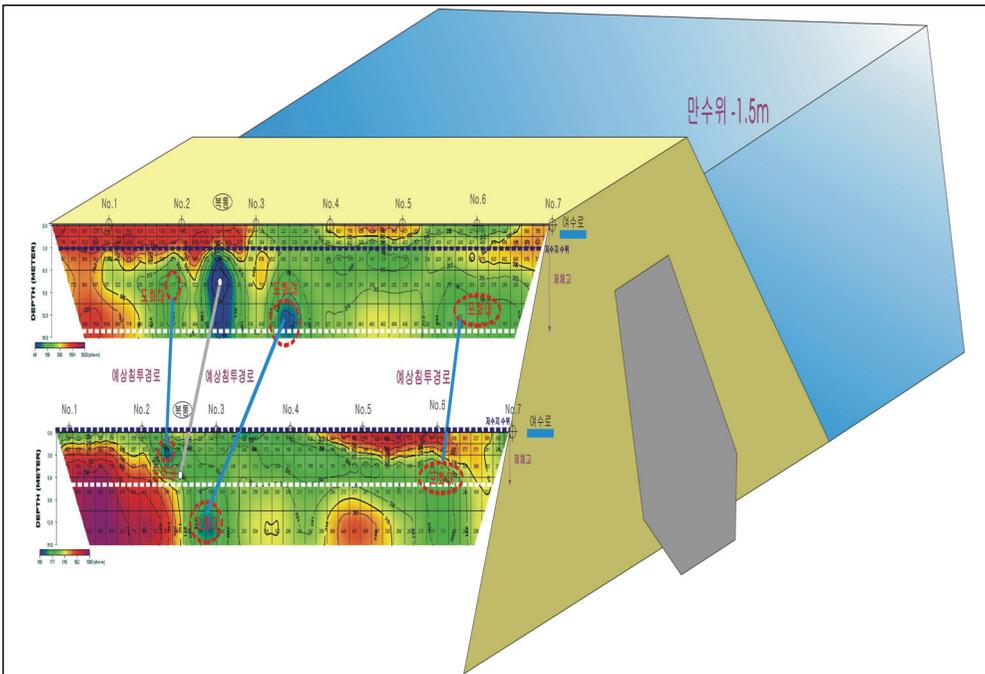
종 명	출현수	출현빈도 (%)	종 명	출현수	출현빈도 (%)
강아지풀	10	47.6	붉은서나물	2	9.5
개망초	10	47.6	사마귀풀	1	4.8
개맥문동	1	4.8	사초류	5	23.8
개밀류	9	42.9	산딸기	9	42.9
개솔새	2	9.5	산초나무	1	4.8
고마리	1	4.8	산층층이	6	28.6
고삼	4	19.0	새	1	4.8
골풀	1	4.8	쇠뜨기	7	33.3
괭이풀	7	33.3	쇠무릎	6	28.6
국화류	2	9.5	쉽싸리	3	14.3
그늘사초	1	4.8	쑥	7	33.3
까마중	3	14.3	쑥부쟁이	2	9.5
깨풀	14	66.7	아카시	7	33.3
나도개피	7	33.3	애기똥풀	5	23.8
달뿌리풀	4	19.0	억새	12	57.1
닭의장풀	16	76.2	여우싸리	2	9.5
댕댕이덩굴	1	4.8	여우팍	8	38.1
띠풀류	1	4.8	오이풀	2	9.5
마	4	19.0	자귀나무	1	4.8
망초	2	9.5	자리공	5	23.8
명석딸기	11	52.4	잔디	1	4.8
메꽃	2	9.5	조개풀	5	23.8
며느리배꼽	7	33.3	죽제비싸리	5	23.8
무릇	1	4.8	질경이	1	4.8
미나리아재비	1	4.8	참새귀리	9	42.9
바랭이	4	19.0	취	10	47.6
박주가리	1	4.8	환삼덩굴	3	14.3
방울고랭이	1	4.8			

4. 대상저수지의 전기비저항 탐사

- 산정저수지의 전기비저항탐사는 (표 4-10)과 같이 수행하였고 그 결과는 <그림 4-6> 및 (표 4-11)와 같음

(표4- 11) 산정저수지 전기 비저항탐사 현장조사

구 분	전극간격 (m)	전극전개 (N)	가탐심도 (m)	제고 (m)	조사구간	측정위치
댐마루	3.0	8	15.0	14.0	No.0+00~No.7+05(145m)	댐마루 외제측
하류 사면	3.0	8	15.0	14.0	No.0+12~No.7+05(133m)	원지반 7m 상부



<그림4- 6> 산정저수지 전기비저항탐사 3D 결과도

(표4- 12) 산정저수지 전기 비저항탐사 현장조사 결과

구분	분류	측점 및 길이	해당구간	심도 (m)	전기비저항 (Ω -m)
댐마루	포화대	No.1+13~No.2+02(9m) No.3+05~No.3+10(5m) No.5+11~No.6+03(12m)	중심점토 및 기초지반	6.0~9.0 11.0~15.0 9.0~14.0	120이하
	습윤대	No.1+07~No.7+04(117m)	건조습윤대를 제외한 전구간	3.0~15.0	120~500
	건조습윤대	No.0+00~No.1+07(27m)	습윤대를 제외한 전구간	0.0~15.0	500이상
하류사면	포화대	No.2+03~No.2+07(7m) No.2+14~No.3+00(6m) No.5+17~No.6+05(8m)	중심점토 및 기초지반	1.5~3.0 11.0~15.0 5.0~9.0	120이하
	습윤대	No.2+08~No.7+04(106m)	건조습윤대를 제외한 전구간	0.0~15.0	120~310
	건조습윤대	No.0+12~No.2+08(16m)	습윤대를 제외한 전구간	1.5~15.0	310이상

제3절 대상저수지의 누수구역 평가

(표4- 13) 산정저수지 식생조사 결과

조사 단면	방향 구수	출현 종수	우점종	누수지표종
2	4	21	닭의장풀	방울고랭이, 골풀
3	6	28	닭의장풀, 억새, 명석딸기, 쇠뜨기	방울고랭이, 골풀
5	6	23	억새, 개맥문동	
7	6	23	강아지풀, 개방초, 명석딸기, 참새귀리	달뿌리풀
합계	22			

- 산정저수지의 전기비저항탐사결과 포화대와 누수지표종의 출현위치가 동일함
- 향후 상대적인 누수지표종의 출현빈도와 전기비저항값과의 상관성 분석

참 고 문 헌

1. 장민원, 2006, 주성분분석법을 이용한 시군단위별 농업가뭇에 대한 취약성 분석에 관한연구 -경기도를 중심으로-, 한국농촌계획학회, Vol.12, No.1, pp.37-48
2. 김시운, 2008, 수해인원을 고려한 농업용 저수지의 최적 정비 모델 개발, Vol.50, No.6, pp.75-81
3. 이주현, 2013, 우리나라 소규모 농업용저수지의 관리, 한국방재학회지, Vol.13, No.2 pp.54-57
4. 단행본- 송지준, 2012, 「논문작성에 필요한 SPSS/AMOS 통계분석방법<개정 2판>」, 21세기사
5. 박삼규, 김희준, 1999, 지온탐사에 의한 저수지 제방의 누수조사, 대한자원환경지질학회, Vol.32, No.2, pp.169-175
6. 유철상, 박현근, 2007, 한국농업용 저수지의 형태학적 특성분석, 대한지리학회지 Vol.42 No.6, pp.940~954
7. 우호영, 박정희, 2013, 계층적 군집화를 이용한 능동적 학습, 한국정보처리학회, Vol.2 No.10, pp.705-712
8. 한만섭, 오홍운, 2012, 군집분석을 이용한 서울시 행정구역별 교통유형 분류, 한국도로학회, Vol.14, No.4, pp.133~140
9. 이종근, 2013, 소규모 댐·저수지 안전성평가 및 보수·보강 연구, 한국시설안전공단 Vol.13, No.6, pp.0-81
10. 신은철, 신창건, 유종모, 이종근, 2013, 가중치분석을 통한 농업용저수지 평가항목 산정에 관한 연구, 한국토목섬유학회논문집, Vol.12, No.3, pp.81-86
11. 김진식, 이승필, 민상윤, 박중운, 김만수, 2014, 다중회귀분석을 통한 하수처리장 환경변화에 따른 적정 운전조건 도출 방법 연구, 한국수처리학회, Vol.22, No.1, pp.39-46
12. 한국농어촌공사, 2011, 농업생산기반시설 정밀안전진단실무 세부요령
13. 구자옥외(2008) 한국의 수생식물과 생활주변식물 도감, 자원식물보호연구회
14. 이영로 (2007) 원색 한국식물도감, 교학사
15. 이창복 (2006) 원색 대한식물도감, 향문사

16. 이창복 (2003) 원색 대한식물도감 검색표, 향문사
17. 건설교통부, 1994, 댐시설 유지관리 기준
18. 한국농어촌공사, 2014, 2013년 농업생산기반정비통계연보
19. ICOLD (1995), Dam Failures Statistical Analysis, Bulletin 99
20. EPRI, 1986, Inspection and Performance Evaluation of Dams

부 록

1. 신흥저수지 식생조사표
2. 동항저수지 식생조사표
3. 산정저수지 식생조사표

1. 신흥저수지 식생조사표

단면번호	거리	종명	피도	군도
2-1	1~2	취	4	4
2-1	1~2	쇠뜨기	3	3
2-1	1~2	여우팔	3	3
2-1	1~2	억새	2	2
2-1	1~2	개망초	1	1
2-1	1~2	산딸기	r	1
2-1	1~2	왕고들빼기	r	1
2-1	1~2	참나무	r	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
2-2	5~6	취	5	5
2-2	5~6	쇠뜨기	2	2
2-2	5~6	머느리밀씨개	1	1
2-2	5~6	산딸기	1	1
2-2	5~6	쭈	1	1
2-2	5~6	여우팔	1	1
2-2	5~6	억새	r	1
2-2	5~6	여우팔	r	1
2-2	5~6	왕고들빼기	r	1
2-2	5~6	참나무	r	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
2-3	10~11	참	4	4
2-3	10~11	쇠뜨기	3	3
2-3	10~11	억새	3	3
2-3	10~11	쭈	1	1
2-3	10~11	개망초	r	1
2-3	10~11	마	r	1
2-3	10~11	며느리밑씨개	r	1
2-3	10~11	쭈부쟁이	r	1
2-3	10~11	여우괭	r	1
2-3	10~11	왕고들빼기	r	1
2-3	10~11	참나무	r	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
2-4	15~16	참	4	4
2-4	15~16	쇠뜨기	3	3
2-4	15~16	억새	2	2
2-4	15~16	쭈	1	1
2-4	15~16	여우괭	1	1
2-4	15~16	깨풀류	r	1
2-4	15~16	닭의장풀	r	1
2-4	15~16	달뿌리풀	r	1
2-4	15~16	개망초	r	1
2-4	15~16	산딸기	r	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
2-5	20~21	취	4	4
2-5	20~21	쇠뜨기	3	3
2-5	20~21	쇠무릅	2	2
2-5	20~21	쭈	1	1
2-5	20~21	환삼덩굴	1	1
2-5	20~21	개망초	r	1
2-5	20~21	그늘사초	r	1
2-5	20~21	마	r	1
2-5	20~21	애기똥풀	r	1
2-5	20~21	여우괭	r	1
2-5	20~21	왕고들빼기	r	1
2-5	20~21	참나무	r	1
2-5	20~21	억새	+	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
3-1	0~1	땅비싸리(논싸리)	3	3
3-1	0~1	쇠뜨기	3	3
3-1	0~1	노박덩굴	2	2
3-1	0~1	마	2	2
3-1	0~1	쭈	1	1
3-1	0~1	맹맹이덩굴	r	1
3-1	0~1	돌콩	r	1
3-1	0~1	소리쟁이류	r	1
3-1	0~1	개망초	+	1
3-1	0~1	수영	+	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
3-2	5~6	땅비싸리(논싸리)	4	4
3-2	5~6	억새류	3	3
3-2	5~6	마	2	2
3-2	5~6	쇠뜨기	2	2
3-2	5~6	소리쟁이류	1	1
3-2	5~6	쭈	1	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
3-3	10~11	쇠뜨기	4	4
3-3	10~11	돌콩	2	2
3-3	10~11	쭈	2	2
3-3	10~11	소리쟁이류	1	1
3-3	10~11	억새류	1	1
3-3	10~11	구기자	r	1
3-3	10~11	맹맹이 덩굴	r	1
3-3	10~11	땅비싸리(논싸리)	r	1
3-3	10~11	마	r	1
3-3	10~11	박주가리	r	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
3-4	15~16	쇠뜨기	4	4
3-4	15~16	억새류	4	4
3-4	15~16	마	2	2
3-4	15~16	쭈	2	2
3-4	15~16	돌콩	1	1
3-4	15~16	소리쟁이류	1	1
3-4	15~16	고삼	r	1
3-4	15~16	그늘사초	r	1
3-4	15~16	달뿌리풀	r	1
3-4	15~16	아카시	r	1
3-4	15~16	취	r	1
3-4	15~16	개망초	+	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
3-5	20~21	쭈	4	4
3-5	20~21	쇠뜨기	3	3
3-5	20~21	달뿌리풀	2	2
3-5	20~21	돌콩	2	2
3-5	20~21	마	2	2
3-5	20~21	개망초	1	1
3-5	20~21	사초류	1	1
3-5	20~21	소리쟁이류	1	1
3-5	20~21	억새류	1	1
3-5	20~21	구기자	r	1
3-5	20~21	그늘사초	r	1
3-5	20~21	싸리	r	1
3-5	20~21	아카시	r	1
3-5	20~21	취	r	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
3-6	25~26	달뿌리풀	4	4
3-6	25~26	쇠뜨기	3	3
3-6	25~26	개망초	2	2
3-6	25~26	돌콩	2	1
3-6	25~26	취	2	2
3-6	25~26	마	1	1
3-6	25~26	쭈	1	1
3-6	25~26	닭의장풀	r	1
3-6	25~26	며느리배꼽	r	1
3-6	25~26	박주가리	r	1
3-6	25~26	싸리	r	1
3-6	25~26	쭈부쟁이	r	1
3-6	25~26	쭈부쟁이	r	1
3-6	25~26	왕고들빼기	r	1
3-6	25~26	조팝나무	r	1
3-6	25~26	황삼덩굴	r	1
3-6	25~26	사초류	+	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
3-7	30~31	달뿌리풀	3	3
3-7	30~31	머위	3	3
3-7	30~31	사초류	3	3
3-7	30~31	쭈	3	3
3-7	30~31	개망초	2	2
3-7	30~31	쇠뜨기	2	2
3-7	30~31	돌콩	1	1
3-7	30~31	마	1	1
3-7	30~31	박주가리	r	1
3-7	30~31	뱀딸기	r	1
3-7	30~31	비수리	r	1
3-7	30~31	사위질빵	r	1
3-7	30~31	싸리	r	1
3-7	30~31	조팝나무	r	1
3-7	30~31	쳐녀고사리	r	1
3-7	30~31	쑥	r	1
3-7	30~31	땅비싸리(논싸리)	+	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
3-8	35~36	쭈	4	4
3-8	35~36	사초류(곧은)	3	3
3-8	35~36	쇠뜨기	3	3
3-8	35~36	달뿌리풀	2	2
3-8	35~36	닭의장풀	2	2
3-8	35~36	사위질빵	1	1
3-8	35~36	황삼덩굴	r	1
3-8	35~36	개망초	+	1
3-8	35~36	마	+	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
4-1	0~1	그늘사초	3	3
4-1	0~1	땅비싸리(논싸리)	3	3
4-1	0~1	땡땡이덩굴	2	2
4-1	0~1	쇠뜨기	2	2
4-1	0~1	수영	1	1
4-1	0~1	쭈	1	1
4-1	0~1	개망초	r	1
4-1	0~1	개망초	r	1
4-1	0~1	개밀류	r	1
4-1	0~1	고삼	r	1
4-1	0~1	붉나무	r	1
4-1	0~1	쭈	r	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
4-2	5~6	쇠뜨기	3	3
4-2	5~6	쭈	2	2
4-2	5~6	고삼	1	1
4-2	5~6	땡땡이덩굴	1	1
4-2	5~6	붉나무	1	1
4-2	5~6	사초류	1	1
4-2	5~6	구기자	r	1
4-2	5~6	마	r	1
4-2	5~6	산벚나무	r	1
4-2	5~6	쭈	r	1
4-2	5~6	돌콩	+	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
4-3	10~11	쇠뜨기	4	4
4-3	10~11	댕댕이덩굴	2	2
4-3	10~11	쭈	2	2
4-3	10~11	닭의장풀	1	1
4-3	10~11	땅비싸리(논싸리)	1	1
4-3	10~11	구기자	r	1
4-3	10~11	붉나무	r	1
4-3	10~11	산딸기	r	1
4-3	10~11	쭈	r	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
4-4	15~16	쇠뜨기	3	3
4-4	15~16	쭈	3	3
4-4	15~16	닭의장풀	2	2
4-4	15~16	개망초	1	1
4-4	15~16	억새류	1	1
4-4	15~16	개밀류	r	1
4-4	15~16	고비	r	1
4-4	15~16	고삼	r	1
4-4	15~16	댕댕이덩굴	r	1
4-4	15~16	돌콩	r	1
4-4	15~16	마	r	1
4-4	15~16	억새	r	1
4-4	15~16	으름	r	1
4-4	15~16	쭈	r	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
4-5	20~21	땅비싸리(논싸리)	4	4
4-5	20~21	쇠뜨기	3	3
4-5	20~21	화분류	2	2
4-5	20~21	개맥문둥	1	1
4-5	20~21	달뿌리풀	1	1
4-5	20~21	맹맹이덩굴	1	1
4-5	20~21	쭈	1	1
4-5	20~21	구기자	r	1
4-5	20~21	마	r	1
4-5	20~21	명석딸기	r	1
4-5	20~21	싸리	r	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
4-6	25~26	달뿌리풀	3	3
4-6	25~26	명석딸기	2	2
4-6	25~26	쭈	2	1
4-6	25~26	개망초	1	2
4-6	25~26	그늘사초	1	1
4-6	25~26	쇠뜨기	1	1
4-6	25~26	고비	r	1
4-6	25~26	돌콩	r	1
4-6	25~26	참나무	r	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
4-7	30~31	쭉	3	3
4-7	30~31	달뿌리풀	2	2
4-7	30~31	사위질빵	2	2
4-7	30~31	쇠뜨기	2	2
4-7	30~31	개망초	r	1
4-7	30~31	개밀류	r	1
4-7	30~31	닭의장풀	r	1
4-7	30~31	싸리	r	1
4-7	30~31	애기똥풀	r	1
4-7	30~31	여뀌류	r	1
4-7	30~31	참새귀리	+	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
4-8	35~36	멍석딸기	3	3
4-8	35~36	쭉	3	3
4-8	35~36	달뿌리풀	2	2
4-8	35~36	개망초	1	1
4-8	35~36	돌콩	1	1
4-8	35~36	토끼풀	1	1
4-8	35~36	고마리	r	1
4-8	35~36	골풀	r	1
4-8	35~36	석삼과	r	1
4-8	35~36	쇠뜨기	r	1
4-8	35~36	싸리	r	1
4-8	35~36	여우팍류	r	1
4-8	35~36	왕고들빼기	r	1
4-8	35~36	참새귀리	+	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
4-9	40~41	달뿌리풀	4	4
4-9	40~41	명석딸기	2	2
4-9	40~41	개망초	1	1
4-9	40~41	돌콩	1	1
4-9	40~41	쭈	1	1
4-9	40~41	갈퀴나물	r	1
4-9	40~41	골풀	r	1
4-9	40~41	달맞이꽃	r	1
4-9	40~41	마	r	1
4-9	40~41	사위질빵	r	1
4-9	40~41	며느리밑씨개	+	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
4-10	45~46	개망초	r	1
4-10	45~46	고마리	r	1
4-10	45~46	참새귀리	r	1
4-10	45~46	돌콩	2	2
4-10	45~46	토끼풀	2	2
4-10	45~46	골풀	1	1
4-10	45~46	사초류	1	1
4-10	45~46	쇠뜨기	1	1
4-10	45~46	쭈	1	1
4-10	45~46	쭈부쟁이	1	1
4-10	45~46	여우팔	1	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
5-1	0~1	취	4	4
5-1	0~1	쭈	3	3
5-1	0~1	개망초	1	1
5-1	0~1	쇠뜨기	1	1
5-1	0~1	마	r	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
5-2	5~6	개망초	3	3
5-2	5~6	쇠뜨기	3	3
5-2	5~6	취	3	3
5-2	5~6	사초류	1	1
5-2	5~6	쇠별꽃	1	1
5-2	5~6	쭈	1	1
5-2	5~6	닭의장풀	r	1
5-2	5~6	마	+	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
5-3	10~11	취	4	4
5-3	10~11	쇠뜨기	2	2
5-3	10~11	쭈	2	2
5-3	10~11	마	1	1
5-3	10~11	메꽃	1	1
5-3	10~11	쇠별꽃	1	1
5-3	10~11	아카시	r	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
5-4	15~16	쇠뜨기	2	2
5-4	15~16	쇠별꽃	2	2
5-4	15~16	쭈	2	2
5-4	15~16	달뿌리풀	1	1
5-4	15~16	애기똥풀	1	1
5-4	15~16	취	1	1
5-4	15~16	고삼	r	1
5-4	15~16	닭의장풀	r	1
5-4	15~16	돌소리쟁이	r	1
5-4	15~16	마	r	1
5-4	15~16	매꽃	r	1
5-4	15~16	며느리배꼽	r	1
5-4	15~16	쇠무릅	r	1
5-4	15~16	수영	r	1
5-4	15~16	아카시	r	1
5-4	15~16	아카시	r	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
5-5	20~21	마	2	2
5-5	20~21	쇠뜨기	2	2
5-5	20~21	쇠별꽃	2	2
5-5	20~21	억새	2	2
5-5	20~21	개망초	1	1
5-5	20~21	며느리배꼽	1	1
5-5	20~21	수영	1	1
5-5	20~21	쭈	1	1
5-5	20~21	애기똥풀	1	1
5-5	20~21	소리쟁이	r	1
5-5	20~21	고삼	r	1
5-5	20~21	구기자	r	1
5-5	20~21	아카시	r	1
5-5	20~21	돌콩	+	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
5-6	25~26	달뿌리풀	3	3
5-6	25~26	개망초	2	2
5-6	25~26	마	2	2
5-6	25~26	쇠뜨기	2	2
5-6	25~26	쭈	2	2
5-6	25~26	쇠별꽃	1	1
5-6	25~26	취	1	1
5-6	25~26	싸리	r	1
5-6	25~26	여우팍	r	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
5-7	30~31	달뿌리풀	3	3
5-7	30~31	개망초	2	2
5-7	30~31	쭈	2	2
5-7	30~31	사초	1	1
5-7	30~31	쇠뜨기	1	1
5-7	30~31	취	1	1
5-7	30~31	고삼	r	1
5-7	30~31	소리쟁이	r	1
5-7	30~31	치녀고사리	r	1
5-7	30~31	개밀류	r	1
5-7	30~31	땡땡이덩굴	r	1
5-7	30~31	돌콩	r	1
5-7	30~31	마	r	1
5-7	30~31	명석딸기	r	1
5-7	30~31	참새귀리	r	1
5-7	30~31	환삼덩굴	r	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
5-8	35~36	개망초	2	2
5-8	35~36	고삼	2	2
5-8	35~36	눈갯버들	1	1
5-8	35~36	돌콩	1	1
5-8	35~36	사위질빵	1	1
5-8	35~36	사초류	1	1
5-8	35~36	쇠뜨기	1	1
5-8	35~36	개밀류	r	1
5-8	35~36	골풀	r	1
5-8	35~36	닭의장풀	r	1
5-8	35~36	명석딸기	r	1
5-8	35~36	머느리밀씨개	r	1
5-8	35~36	참새귀리	r	1
5-8	35~36	치녀고사리	r	1
5-8	35~36	마	+	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
5-9	40~41	개망초	3	3
5-9	40~41	마	2	2
5-9	40~41	쇠뜨기	2	2
5-9	40~41	화본류	2	2
5-9	40~41	돌콩	1	1
5-9	40~41	쭈	1	1
5-9	40~41	골풀	r	1
5-9	40~41	닭의장풀	r	1
5-9	40~41	취	r	1
5-9	40~41	머느리배꼽	+	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
5-10	45~46	쇠뜨기	3	3
5-10	45~46	마	2	2
5-10	45~46	억새	1	1
5-10	45~46	취	1	1
5-10	45~46	골풀	r	1
5-10	45~46	돌콩	r	1
5-10	45~46	매듭풀	r	1
5-10	45~46	산층층이	r	1
5-10	45~46	쭉	r	1
5-10	45~46	개망초	+	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
5-11	50~51	사초류	2	2
5-11	50~51	개망초	1	1
5-11	50~51	돌콩	1	1
5-11	50~51	마	1	1
5-11	50~51	쇠뜨기	1	1
5-11	50~51	쭉부쟁이	1	1
5-11	50~51	억새	1	1
5-11	50~51	치녀고사리	1	1
5-11	50~51	왕고들빼기	r	1
5-11	50~51	쭉	+	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
5-12	55~56	화본류	2	2
5-12	55~56	골풀	1	1
5-12	55~56	눈갯버들	1	1
5-12	55~56	마	1	1
5-12	55~56	사위질빵	1	1
5-12	55~56	쇠뜨기	1	1
5-12	55~56	쭈부쟁이	1	1
5-12	55~56	억새(화분)	1	1
5-12	55~56	닭의장풀	r	1
5-12	55~56	산층층이	r	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
6-1	1~2	땅비싸리(논싸리)	4	4
6-1	1~2	취	3	3
6-1	1~2	깨풀(류)	2	2
6-1	1~2	닭의장풀	2	2
6-1	1~2	쇠뜨기	2	2
6-1	1~2	쇠별꽃	2	2
6-1	1~2	개밀류	1	1
6-1	1~2	쭈	1	1
6-1	1~2	고삼	r	1
6-1	1~2	그늘사초	r	1
6-1	1~2	마	r	1
6-1	1~2	매듭풀	r	1
6-1	1~2	며느리배꼽	r	1
6-1	1~2	산딸기	r	1
6-1	1~2	억새	r	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
6-2	5~6	취	5	5
6-2	5~6	쇠뜨기	2	2
6-2	5~6	쭈	2	2
6-2	5~6	고삼	r	1
6-2	5~6	깨풀(류)	r	1
6-2	5~6	망초	r	1
6-2	5~6	억새	r	1
6-2	5~6	왕고들빼기	r	1
6-2	5~6	닭의장풀	+	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
6-3	10~11	츄	5	5
6-3	10~11	쇠뜨기	3	3
6-3	10~11	쭈	1	1
6-3	10~11	메자기	r	1
6-3	10~11	붉은서나물	r	1
6-3	10~11	개망초	r	1
6-3	10~11	소리쟁이	r	1
6-3	10~11	닭의장풀	+	1
6-3	10~11	댕댕이덩굴	+	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
6-4	15~16	츄	4	4
6-4	15~16	쇠뜨기	3	3
6-4	15~16	머느리밑씨개	1	1
6-4	15~16	쭈	1	1
6-4	15~16	환삼덩굴	1	1
6-4	15~16	개망초	r	1
6-4	15~16	개밀류	r	1
6-4	15~16	달뿌리풀	r	1
6-4	15~16	닭의장풀	r	1
6-4	15~16	메자기	r	1
6-4	15~16	붉은서나물	r	1
6-4	15~16	소리쟁이	r	1
6-4	15~16	아카시	r	1
6-4	15~16	애기똥풀	r	1
6-4	15~16	왕고들빼기	r	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
6-5	20~21	달뿌리풀	3	3
6-5	20~21	쇠뜨기	3	3
6-5	20~21	쭈	2	2
6-5	20~21	취	2	2
6-5	20~21	환삼덩굴	2	2
6-5	20~21	닭의장풀	1	1
6-5	20~21	메자기	1	1
6-5	20~21	머느리밀씨개	1	1
6-5	20~21	개망초	r	1
6-5	20~21	개밀류	r	1
6-5	20~21	고삼	r	1
6-5	20~21	구기자	r	1
6-5	20~21	깨풀(류)	r	1
6-5	20~21	돌콩	r	1
6-5	20~21	마	r	1
6-5	20~21	쇠별꽃	r	1
6-5	20~21	아카시	r	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
6-6	25~26	메자기	3	3
6-6	25~26	쇠뜨기	3	3
6-6	25~26	쭈	2	2
6-6	25~26	돌콩	1	1
6-6	25~26	땅비싸리(논싸리)	1	1
6-6	25~26	마	1	1
6-6	25~26	쭈	1	1
6-6	25~26	개밀류	r	1
6-6	25~26	고삼	r	1
6-6	25~26	깨풀(류)	r	1
6-6	25~26	달뿌리풀	r	1
6-6	25~26	사위질빵	r	1
6-6	25~26	싸리	r	1
6-6	25~26	애기똥풀	r	1
6-6	25~26	참나무	r	1
6-6	25~26	참새귀리	r	1
6-6	25~26	개망초	+	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
6-7	30~31	쇠뜨기	3	3
6-7	30~31	마	2	2
6-7	30~31	메자기	2	2
6-7	30~31	쭈	2	2
6-7	30~31	땡땡이덩굴	1	1
6-7	30~31	돌콩	1	1
6-7	30~31	며느리밑씨개	1	1
6-7	30~31	억새	1	1
6-7	30~31	개망초	r	1
6-7	30~31	깨풀(류)	r	1
6-7	30~31	박주가리	r	1
6-7	30~31	참새귀리	r	1
6-7	30~31	처녀고사리	r	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
6-8	35~36	메자기	3	3
6-8	35~36	처녀고사리	3	3
6-8	35~36	개망초	1	1
6-8	35~36	닭의장풀	1	1
6-8	35~36	돌콩	1	1
6-8	35~36	마	1	1
6-8	35~36	쑥	1	1
6-8	35~36	구기자	r	1
6-8	35~36	며느리밑씨개	r	1
6-8	35~36	산딸기	r	1
6-8	35~36	쇠무릅	r	1
6-8	35~36	아카시	r	1
6-8	35~36	억새	r	1
6-8	35~36	조팝나무	r	1
6-8	35~36	환삼덩굴	r	1
6-8	35~36	쇠뜨기	+	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
6-9	40~41	쭈	3	3
6-9	40~41	개망초	2	2
6-9	40~41	다래덩굴	2	2
6-9	40~41	마	2	2
6-9	40~41	메자기	2	2
6-9	40~41	깨풀(류)	1	1
6-9	40~41	맹맹이덩굴	1	1
6-9	40~41	쇠뜨기	1	1
6-9	40~41	개맥문동	r	1
6-9	40~41	개밀류	r	1
6-9	40~41	눈갯버들	r	1
6-9	40~41	닭의장풀	r	1
6-9	40~41	돌콩	r	1
6-9	40~41	아카시	r	1
6-9	40~41	억새	r	1
6-9	40~41	치녀고사리	r	1
6-9	40~41	환삼덩굴	r	1
6-9	40~41	며느리밑씨개	+	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
6-10	45~46	메자기	4	4
6-10	45~46	사위질빵	2	2
6-10	45~46	닭의장풀	1	1
6-10	45~46	쇠뜨기	1	1
6-10	45~46	참새귀리	1	1
6-10	45~46	눈갯버들	r	1
6-10	45~46	다래덩굴	r	1
6-10	45~46	마	r	1
6-10	45~46	왕고들빼기	r	1
6-10	45~46	참나무	r	1
6-10	45~46	치녀고사리	r	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
7-1	1~2	쭈	3	3
7-1	1~2	츄	3	3
7-1	1~2	개밀류	1	1
7-1	1~2	쇠뜨기	1	1
7-1	1~2	개망초	r	1
7-1	1~2	고삼	r	1
7-1	1~2	마	r	1
7-1	1~2	며느리밑시개	r	1
7-1	1~2	산딸기	r	1
7-1	1~2	아카시	r	1
7-1	1~2	억새	r	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
7-2	5~6	쭈	3	3
7-2	5~6	츄	3	3
7-2	5~6	개밀류	1	1
7-2	5~6	쇠뜨기	1	1
7-2	5~6	억새	1	1
7-2	5~6	여우괭	1	1
7-2	5~6	깨풀(류)	r	1
7-2	5~6	땡땡이덩굴	r	1
7-2	5~6	마	r	1
7-2	5~6	며느리밑시개	r	1
7-2	5~6	산딸기	r	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
7-3	10~11	쉽싸리	5	5
7-3	10~11	메자기	1	1
7-3	10~11	머느리밑씨개	1	1
7-3	10~11	쭉	1	1
7-3	10~11	츄	1	1
7-3	10~11	개망초	r	1
7-3	10~11	닭의장풀	r	1
7-3	10~11	산딸기	r	1
7-3	10~11	아카시	r	1
7-3	10~11	억새	r	1
7-3	10~11	여우팍	r	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
7-4	15~16	쭉	3	3
7-4	15~16	억새	3	3
7-4	15~16	마	1	1
7-4	15~16	머느리밑씨개	1	1
7-4	15~16	쇠뜨기	1	1
7-4	15~16	아카시	1	1
7-4	15~16	대나무	r	1
7-4	15~16	메자기	r	1
7-4	15~16	츄	r	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
7-5	20~21	대나무	5	5
7-5	20~21	메자기	2	2
7-5	20~21	마	1	1
7-5	20~21	치녀고사리	1	1
7-5	20~21	돌콩	r	1
7-5	20~21	며느리밑씨개	r	1
7-5	20~21	붉나무	r	1
7-5	20~21	비름	r	1
7-5	20~21	산딸기	r	1
7-5	20~21	소리쟁이	r	1
7-5	20~21	쇠뜨기	r	1
7-5	20~21	참나무	r	1
7-5	20~21	쭈	+	1

2. 동향저수지 식생조사표

단면번호	거리	종명	피도	군도
1-1	1~2	취	4	4
1-1	1~2	환삼덩굴	3	3
1-1	1~2	달맞이꽃	r	1
1-1	1~2	달뿌리풀	r	1
1-1	1~2	망초	r	1
1-1	1~2	며느리밑씨개	r	1
1-1	1~2	바랭이	r	1
1-1	1~2	쑥	r	1
1-1	1~2	왕고들빼기	r	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
1-2	5~6	취	5	5
1-2	5~6	환삼덩굴	2	2
1-2	5~6	산딸기	1	1
1-2	5~6	쑥	1	1
1-2	5~6	달맞이꽃	r	1
1-2	5~6	며느리밑씨개	r	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
1-3	10~11	쑥	4	4
1-3	10~11	취	3	3
1-3	10~11	산딸기	1	1
1-3	10~11	조팝나무	1	1
1-3	10~11	환삼덩굴	1	1
1-3	10~11	달뿌리풀	r	1
1-3	10~11	억새	r	1
1-3	10~11	며느리밑씨개	+	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
1-4	15~16	조팝나무	4	4
1-4	15~16	며느리밑씨개	1	1
1-4	15~16	취	1	1
1-4	15~16	환삼덩굴	1	1
1-4	15~16	달뿌리풀	r	1
1-4	15~16	망초	r	1
1-4	15~16	쭈	r	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
1-5	20~21	취	4	4
1-5	20~21	며느리밑씨개	2	2
1-5	20~21	쭈	2	2
1-5	20~21	망초	1	1
1-5	20~21	달뿌리풀	r	1
1-5	20~21	닭의장풀	r	1
1-5	20~21	명아주	r	1
1-5	20~21	산딸기	r	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
1-6	25~26	취	2	2
1-6	25~26	달뿌리풀	1	1
1-6	25~26	며느리밑씨개	1	1
1-6	25~26	산딸기	1	1
1-6	25~26	쭈	1	1
1-6	25~26	달맞이꽃	r	1
1-6	25~26	돌콩	r	1
1-6	25~26	망초	r	1
1-6	25~26	명아주	r	1
1-6	25~26	왕고들빼기	r	1
1-6	25~26	화본과	r	1
1-6	25~26	쇠뜨기	+	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
1-7	30~31	화분과	3	3
1-7	30~31	환삼덩굴	2	2
1-7	30~31	고마리	1	1
1-7	30~31	쭈	1	1
1-7	30~31	며느리밑씨개	r	1
1-7	30~31	쇠뜨기	r	1
1-7	30~31	왕고들빼기	r	1
1-7	30~31	쑥	r	1
1-7	30~31	달뿌리풀	+	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
3-1	1~2	쑥	4	4
3-1	1~2	강아지풀	2	2
3-1	1~2	환삼덩굴	2	2
3-1	1~2	돌콩	1	1
3-1	1~2	나도개피	r	1
3-1	1~2	달맞이꽃	r	1
3-1	1~2	땃땃이덩굴	r	1
3-1	1~2	비수리	r	1
3-1	1~2	산딸기	r	1
3-1	1~2	왕고들빼기	r	1
3-1	1~2	조팝나무	r	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
3-2	5~6	취	3	3
3-2	5~6	쇠무릅	2	2
3-2	5~6	달뿌리풀	1	1
3-2	5~6	며느리밑씨개	1	1
3-2	5~6	억새	1	1
3-2	5~6	강아지풀	r	1
3-2	5~6	나도개피	r	1
3-2	5~6	땡땡이덩굴	r	1
3-2	5~6	망초	r	1
3-2	5~6	메자기	r	1
3-2	5~6	며느리배꼽	r	1
3-2	5~6	쭈	r	1
3-2	5~6	쭈부쟁이	r	1
3-2	5~6	왕고들빼기	r	1
3-2	5~6	화분과	r	1
3-2	5~6	환삼덩굴	r	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
3-3	10~11	달뿌리풀	4	4
3-3	10~11	취	2	2
3-3	10~11	강아지풀	r	1
3-3	10~11	달맞이꽃	r	1
3-3	10~11	쭈	r	1
3-3	10~11	환삼덩굴	r	1
3-3	10~11	화분과	+	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
3-4	15~16	달뿌리풀	2	2
3-4	15~16	취	2	2
3-4	15~16	며느리배꼽	1	1
3-4	15~16	산딸기	1	1
3-4	15~16	여뀌(가시)	1	1
3-4	15~16	환삼덩굴	1	1
3-4	15~16	망초	r	1
3-4	15~16	화분과	r	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
3-5	20~21	달뿌리풀	2	2
3-5	20~21	며느리배꼽	1	1
3-5	20~21	산딸기	1	1
3-5	20~21	쑥	1	1
3-5	20~21	취	1	1
3-5	20~21	고마리	r	1
3-5	20~21	무릇	r	1
3-5	20~21	여뀌(가시)	r	1
3-5	20~21	짚레	r	1
3-5	20~21	화분과	r	1
3-5	20~21	환삼덩굴	r	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
3-6	25~26	츄	3	3
3-6	25~26	환삼덩굴	1	1
3-6	25~26	달뿌리풀	r	1
3-6	25~26	며느리배꼽	r	1
3-6	25~26	무릇	r	1
3-6	25~26	산딸기	r	1
3-6	25~26	쇠뜨기	r	1
3-6	25~26	쑥부쟁이	r	1
3-6	25~26	짚래	r	1
3-6	25~26	화본과	r	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
3-7	30~31	며느리배꼽	3	3
3-7	30~31	짚래	3	3
3-7	30~31	츄	3	3
3-7	30~31	쑥	r	1
3-7	30~31	왕고들빼기	r	1
3-7	30~31	환삼덩굴	r	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
3-8	34~35	고마리	5	5
3-8	34~35	메자기	1	1
3-8	34~35	쇠뜨기	1	1
3-8	34~35	가막사리	r	1
3-8	34~35	개망초	r	1
3-8	34~35	달뿌리풀	r	1
3-8	34~35	망초	r	1
3-8	34~35	며느리배꼽	r	1
3-8	34~35	아카시	r	1
3-8	34~35	짚래	r	1
3-8	34~35	취	r	1
3-8	34~35	화본과	r	1
3-8	34~35	환삼덩굴	r	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
5-1	1~2	츄	3	3
5-1	1~2	환삼덩굴	3	3
5-1	1~2	며느리배꼽	1	1
5-1	1~2	강아지풀	r	1
5-1	1~2	달맞이꽃	r	1
5-1	1~2	왕고들빼기	r	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
5-2	5~6	츄	4	4
5-2	5~6	환삼덩굴	2	2
5-2	5~6	달뿌리풀	1	1
5-2	5~6	며느리배꼽	1	1
5-2	5~6	강아지풀	r	1
5-2	5~6	달맞이꽃	r	1
5-2	5~6	며느리밀씨개	r	1
5-2	5~6	왕고들빼기	r	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
5-3	10~11	츄	4	4
5-3	10~11	환삼덩굴	3	3
5-3	10~11	달뿌리풀	2	2
5-3	10~11	며느리배꼽	r	1
5-3	10~11	쭈	r	1
5-3	10~11	왕고들빼기	r	1
5-3	10~11	강아지풀	+	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
5-4	15~16	츄	4	4
5-4	15~16	환삼덩굴	3	3
5-4	15~16	쑥	2	2
5-4	15~16	강아지풀	r	1
5-4	15~16	며느리배꼽	r	1
5-4	15~16	쫄래	r	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
5-5	20~21	츄	4	4
5-5	20~21	환삼덩굴	3	3
5-5	20~21	메자기	1	1
5-5	20~21	달뿌리풀	r	1
5-5	20~21	며느리배꼽	r	1
5-5	20~21	여뀌(가시)	r	1
5-5	20~21	쫄래	r	1
5-5	20~21	화분과	r	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
5-6	25~26	환삼덩굴	4	4
5-6	25~26	츄	3	3
5-6	25~26	며느리배꼽	1	1
5-6	25~26	망초	r	1
5-6	25~26	메자기	r	1
5-6	25~26	산딸기	r	1
5-6	25~26	쑥	r	1
5-6	25~26	여뀌(가시)	r	1
5-6	25~26	왕고들빼기	r	1
5-6	25~26	화분과	r	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
5-7	30~31	환삼덩굴	4	4
5-7	30~31	며느리배꼽	1	1
5-7	30~31	취	1	1
5-7	30~31	닭의장풀	r	1
5-7	30~31	망초	r	1
5-7	30~31	메자기	r	1
5-7	30~31	쇠뜨기	r	1
5-7	30~31	조개풀	r	1
5-7	30~31	키버들	r	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
7-1	1~2	취	2	2
7-1	1~2	강아지풀	1	1
7-1	1~2	쇠뜨기	1	1
7-1	1~2	쭈	1	1
7-1	1~2	환삼덩굴	1	1
7-1	1~2	개망초	r	1
7-1	1~2	고들빼기	r	1
7-1	1~2	깨풀	r	1
7-1	1~2	달맞이꽃	r	1
7-1	1~2	달뿌리풀	r	1
7-1	1~2	망초	r	1
7-1	1~2	산딸기	r	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
7-2	5~6	쭈레	5	5
7-2	5~6	취	2	2
7-2	5~6	산딸기	1	1
7-2	5~6	강아지풀	r	1
7-2	5~6	환삼덩굴	r	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
7-3	10~11	고사리	r	1
7-3	10~11	달뿌리풀	r	1
7-3	10~11	쭈레	4	4
7-3	10~11	산딸기	3	3
7-3	10~11	취	3	3

단면번호	거리	종명	피도	군도
7-4	15~16	고사리	4	4
7-4	15~16	취	3	3
7-4	15~16	환삼덩굴	2	2
7-4	15~16	고마리	r	1
7-4	15~16	닭의장풀	r	1
7-4	15~16	돌콩	r	1
7-4	15~16	왕고들빼기	r	1
7-4	15~16	화분과	r	1
7-4	15~16	강아지풀	+	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
7-5	20~21	개구리자리	r	1
7-5	20~21	고사리	r	1
7-5	20~21	돌콩	r	1
7-5	20~21	무릇	r	1
7-5	20~21	미나리	r	1
7-5	20~21	짚레	r	1
7-5	20~21	취	3	3
7-5	20~21	강아지풀	1	1
7-5	20~21	개망초	1	1
7-5	20~21	산딸기	1	1
7-5	20~21	쭈	1	1
7-5	20~21	여뀌(가시)	1	1
7-5	20~21	환삼덩굴	1	1

3. 산정저수지 식생조사표

단면번호	거리	종명	피도	군도
1-1	1~2	강아지풀	4	4
1-1	1~2	바랭이	3	3
1-1	1~2	쇠무릎	1	1
1-1	1~2	개망초	r	1
1-1	1~2	개밀류	r	1
1-1	1~2	괭이풀	r	1
1-1	1~2	깨풀	r	1
1-1	1~2	명석딸기	r	1
1-1	1~2	애기똥풀	r	1
1-1	1~2	질경이	r	1
1-1	1~2	참새귀리	r	1
1-1	1~2	취	r	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
1-2	5~6	명석딸기	2	2
1-2	5~6	바랭이	2	2
1-2	5~6	개밀류	1	1
1-2	5~6	쇠무릎	1	1
1-2	5~6	취	1	1
1-2	5~6	강아지풀	r	1
1-2	5~6	개망초	r	1
1-2	5~6	깨풀	r	1
1-2	5~6	나도개피	r	1
1-2	5~6	닭의장풀	r	1
1-2	5~6	산딸기	r	1
1-2	5~6	쭈	r	1
1-2	5~6	애기똥풀	r	1
1-2	5~6	환삼덩굴	r	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
1-3	10~11	강아지풀	4	4
1-3	10~11	개밀류	1	1
1-3	10~11	명석딸기	1	1
1-3	10~11	바랭이	1	1
1-3	10~11	참새귀리	1	1
1-3	10~11	고삼	r	1
1-3	10~11	깨풀	r	1
1-3	10~11	닭의장풀	r	1
1-3	10~11	박주가리	r	1
1-3	10~11	산딸기	r	1
1-3	10~11	쇠무릎	r	1
1-3	10~11	쑥	r	1
1-3	10~11	아카시	r	1
1-3	10~11	애기똥풀	r	1
1-3	10~11	여우팍	r	1
1-3	10~11	취	r	1
1-3	10~11	괭이풀	+	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
1-4	15~16	강아지풀	1	1
1-4	15~16	닭의장풀	1	1
1-4	15~16	명석말기	1	1
1-4	15~16	여우팍	1	1
1-4	15~16	개망초	r	1
1-4	15~16	개밀류	r	1
1-4	15~16	깨풀	r	1
1-4	15~16	달뿌리풀	r	1
1-4	15~16	산초나무	r	1
1-4	15~16	쇠무릎	r	1
1-4	15~16	아카시	r	1
1-4	15~16	애기똥풀	r	1
1-4	15~16	자리공	r	1
1-4	15~16	족제비싸리	r	1
1-4	15~16	참새귀리	r	1
1-4	15~16	환삼덩굴	r	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
1-5	20~21	개밀류	3	3
1-5	20~21	산딸기	3	3
1-5	20~21	참새귀리	2	2
1-5	20~21	자리공	1	1
1-5	20~21	강아지풀	r	1
1-5	20~21	개망초	r	1
1-5	20~21	고삼	r	1
1-5	20~21	달뿌리풀	r	1
1-5	20~21	쇠뜨기	r	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
1-6	25~26	달뿌리풀	3	3
1-6	25~26	취	1	1
1-6	25~26	강아지풀	r	1
1-6	25~26	개망초	r	1
1-6	25~26	깨풀	r	1
1-6	25~26	닭의장풀	r	1
1-6	25~26	산딸기	r	1
1-6	25~26	자리공	r	1
1-6	25~26	죽제비싸리	r	1
1-6	25~26	참새귀리	r	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
3-1	1~2	띠풀류	4	4
3-1	1~2	사초류	3	3
3-1	1~2	개솔새	r	1
3-1	1~2	나도개피	r	1
3-1	1~2	산딸기	r	1
3-1	1~2	여우팍	r	1
3-1	1~2	참새귀리	r	1
3-1	1~2	취	r	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
3-2	5~6	개맥문둥	4	4
3-2	5~6	팽이풀	1	1
3-2	5~6	닭의장풀	1	1
3-2	5~6	바랭이	1	1
3-2	5~6	사초류	1	1
3-2	5~6	강아지풀	r	1
3-2	5~6	개망초	r	1
3-2	5~6	깨풀	r	1
3-2	5~6	나도개피	r	1
3-2	5~6	산딸기	r	1
3-2	5~6	억새	r	1
3-2	5~6	참새귀리	r	1
3-2	5~6	취	r	1
3-2	5~6	산층층이	+	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
3-3	10~11	억새	5	5
3-3	10~11	산딸기	1	1
3-3	10~11	참새귀리	1	1
3-3	10~11	개망초	r	1
3-3	10~11	깨풀	r	1
3-3	10~11	나도개피	r	1
3-3	10~11	닭의장풀	r	1
3-3	10~11	메꽃	r	1
3-3	10~11	며느리배꼽	r	1
3-3	10~11	쇠무릎	r	1
3-3	10~11	취	r	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
3-4	15~16	억새	5	5
3-4	15~16	깨풀	1	1
3-4	15~16	닭의장풀	r	1
3-4	15~16	망초	r	1
3-4	15~16	며느리배꼽	r	1
3-4	15~16	아카시	r	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
3-5	20~21	억새	4	4
3-5	20~21	닭의장풀	1	1
3-5	20~21	강아지풀	r	1
3-5	20~21	괭이풀	r	1
3-5	20~21	까마중	r	1
3-5	20~21	깨풀	r	1
3-5	20~21	며느리배꼽	r	1
3-5	20~21	쇠뜨기	r	1
3-5	20~21	쭈	r	1
3-5	20~21	아카시	r	1
3-5	20~21	자리공	r	1
3-5	20~21	참새귀리	r	1
3-5	20~21	취	r	1
3-5	20~21	환삼덩굴	r	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
3-6	25~26	까마중	4	4
3-6	25~26	며느리배꼽	1	1
3-6	25~26	취	1	1
3-6	25~26	개망초	r	1
3-6	25~26	개밀류	r	1
3-6	25~26	닭의장풀	r	1
3-6	25~26	산딸기	r	1
3-6	25~26	산딸기	r	1
3-6	25~26	산층층이	r	1
3-6	25~26	쭈	r	1
3-6	25~26	아카시	r	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
5-1	1~2	사초류	2	2
5-1	1~2	잔디	2	2
5-1	1~2	명석딸기	1	1
5-1	1~2	새-2	1	1
5-1	1~2	개솔새	r	1
5-1	1~2	고삼	r	1
5-1	1~2	국화과	r	1
5-1	1~2	메꽃	r	1
5-1	1~2	억새	r	1
5-1	1~2	쉽사리	+	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
5-2	5~6	깨풀	3	3
5-2	5~6	닭의장풀	2	2
5-2	5~6	명석딸기	2	2
5-2	5~6	나도개피	1	1
5-2	5~6	며느리배꼽	1	1
5-2	5~6	개밀류	r	1
5-2	5~6	고삼	r	1
5-2	5~6	까마중	r	1
5-2	5~6	쇠뜨기	r	1
5-2	5~6	억새	r	1
5-2	5~6	족제비싸리	r	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
5-3	10~11	억새	4	4
5-3	10~11	나도개피	2	2
5-3	10~11	명석딸기	1	1
5-3	10~11	사초류	1	1
5-3	10~11	국화과	r	1
5-3	10~11	닭의장풀	r	1
5-3	10~11	미나리아재비과	r	1
5-3	10~11	산층층이	r	1
5-3	10~11	쇠뜨기	r	1
5-3	10~11	쉽싸리	r	1
5-3	10~11	여우팔	r	1
5-3	10~11	조개풀	r	1
5-3	10~11	족제비싸리	r	1
5-3	10~11	괭이풀	+	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
5-4	15~16	억새	2	2
5-4	15~16	조개풀	2	2
5-4	15~16	닭의장풀	1	1
5-4	15~16	괭이풀	r	1
5-4	15~16	마	r	1
5-4	15~16	무릇	r	1
5-4	15~16	쇠뜨기	r	1
5-4	15~16	쭈	r	1
5-4	15~16	오이풀	r	1
5-4	15~16	족제비싸리	r	1
5-4	15~16	여우팔	+	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
5-5	20~21	명석딸기	2	2
5-5	20~21	깨풀	1	1
5-5	20~21	마	1	1
5-5	20~21	사초류	1	1
5-5	20~21	강아지풀	r	1
5-5	20~21	괭이풀	r	1
5-5	20~21	닭의장풀	r	1
5-5	20~21	맹맹이덩굴	r	1
5-5	20~21	망초	r	1
5-5	20~21	산층층이	r	1
5-5	20~21	억새	r	1
5-5	20~21	조개풀	r	1
5-5	20~21	쇠뜨기	+	1
5-5	20~21	여우팍	+	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
5-6	25~26	며느리배꼽	1	1
5-6	25~26	애기똥풀	1	1
5-6	25~26	여우팍	1	1
5-6	25~26	조개풀	1	1
5-6	25~26	개망초	r	1
5-6	25~26	개밀류	r	1
5-6	25~26	고마리	r	1
5-6	25~26	깨풀	r	1
5-6	25~26	명석딸기	r	1
5-6	25~26	쇠무릎	r	1
5-6	25~26	쭈	r	1
5-6	25~26	아카시	r	1
5-6	25~26	억새	r	1
5-6	25~26	취	r	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
6-2	5~6	닭의장풀	4	4
6-2	5~6	명석딸기	2	2
6-2	5~6	깨풀류	1	1
6-2	5~6	강아지풀	r	1
6-2	5~6	마	r	1
6-2	5~6	붉은서나물	r	1
6-2	5~6	자리공	r	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
6-3	10~11	그늘사초	3	3
6-3	10~11	명석딸기	3	3
6-3	10~11	억새	3	3
6-3	10~11	깨풀류	1	1
6-3	10~11	닭의장풀	1	1
6-3	10~11	개밀류	r	1
6-3	10~11	며느리배꼽	r	1
6-3	10~11	산층층이	r	1
6-3	10~11	쉽싸리	r	1
6-3	10~11	아카시	r	1
6-3	10~11	여우싸리	r	1
6-3	10~11	여우팔	r	1
6-3	10~11	쭈	+	1

단면번호	거리	종명	피도	군도
6-4	15~16	골풀	2	2
6-4	15~16	강아지풀	1	1
6-4	15~16	조개풀	1	1
6-4	15~16	개망초	r	1
6-4	15~16	나도개피	r	1
6-4	15~16	마	r	1
6-4	15~16	방울고랭이	r	1
6-4	15~16	붉은서나물	r	1
6-4	15~16	사마귀풀	r	1
6-4	15~16	산층층이	r	1
6-4	15~16	쇠뜨기	r	1
6-4	15~16	쭈부쟁이	r	1
6-4	15~16	쭈부쟁이	r	1
6-4	15~16	억새	r	1
6-4	15~16	여우싸리	r	1
6-4	15~16	오이풀	r	1
6-4	15~16	자귀나무	r	1
6-4	15~16	닭의장풀	+	1

저수지 부대시설물(취수탑 및 관리교)
내진성능평가 현황 및 기법 정립(2과제)

제 목 차 례

제1장 연구배경 및 필요성	9
제1절 연구 목적 및 범위	9
제2장 취수탑	11
제1절 시설물의 특성	11
제2절 취수탑 관련 내진설계기준	12
1. 댐 설계기준(2011)	12
2. 농업생산기반정비사업계획설계기준 - 필댐편(2002)	22
3. 상수도시설기준(2010)	27
4. 상수도시설 내진 설계기준(2000)	38
5. 콘크리트구조설계기준(2007)	45
6. 기존 시설물의 내진성능평가 및 향상요령	46
제3절 취수탑 내진설계 예제	48
1. 취수탑 설계 예	49
2. 소결	62
제4절 고찰	63
제3장 취수탑의 내진성능평가	64
제1절 일반사항	64
제2절 원형단면을 갖는 취수탑	65
1. 취수탑 제원	65
2. 정역학적 해석법(선형)	68
3. 동역학적 해석법 - 다중모드해석법(선형)	77
4. 동역학적 해석법 - 시간이력해석법	85

제4장 유지관리교의 내진성능평가	102
제1절 일반사항	102
제2절 유지관리교	102
1. 유지관리교 제원	102
2. 내진해석 조건	103
3. 탄성지진력 산정	103
4. 내진성능 평가	119
 참 고 문 헌	 158

표 차례

<표 2.1> 지진구역 구분	15
<표 2.2> 지진구역계수(재현주기 500년에 해당)	15
<표 2.3> 위험도계수	15
<표 2.4> 댐의 내진등급별 설계지진	16
<표 2.5> 기초지반 분류에 따른 지반계수	17
<표 2.6> 댐의 내진등급과 설계지진	24
<표 2.7> 내진등급별 시설분류	29
<표 2.8> 위험도계수	32
<표 2.9> 지반의 분류	32
<표 2.10> 감쇠보정계수	35
<표 2.11> 지진계수 C_a	35
<표 2.12> 지진계수 C_v	35
<표 2.13> 성능수준별 내진등급에 따른 평균재현주기	43
<표 2.14> 위험도계수	43
<표 3.1> 구조물 높이에 따라 분배된 수평지진력,	70
<표 3.2> 수심방향 동수압 분포	71
<표 3.3> 단면력 산정	72
<표 3.4> 벽체 하단의 철근상세	74
<표 3.5> 구조물의 고유주기	79
<표 3.6> 단면력 산정(지진시 동수압은 정역학적 해석법과 동일)	81
<표 3.7> 지진시 외부 유체에 의한 부가질량	89
<표 3.8> 지진시 내부 유체에 의한 부가질량	90
<표 3.9> 구조물의 고유주기	92
<표 3.10> 단면력 산정	95
<표 3.11> 벽체(하단) 철근상세	100

<표 4.1> 유지관리교 제원	102
<표 4.2> 내진해석 조건	103
<표 4.3> 받침 특성	104
<표 4.4> 받침부 반력	106
<표 4.5> 교각 하부 축력	106
<표 4.6> 콘크리트 모델	107
<표 4.7> 철근 모델	108
<표 4.8> 교축방향 M- ϕ 해석결과	112
<표 4.9> 교축직각방향 M- ϕ 해석결과	112
<표 4.10> 고유치 해석결과	114
<표 4.11> 교각 하부 전단력	116
<표 4.12> 교각 하부 모멘트	116
<표 4.13> 교각부 탄성받침 1기당 최대발생력(kN)	117
<표 4.14> 교각부 탄성받침 1기당 최대발생변위(mm)	117
<표 4.15> 교각 하부 전단력	117
<표 4.16> 교각 하부 모멘트	118
<표 4.17> 교각부 탄성받침 1기당 최대발생력(kN)	118
<표 4.18> 교각의 특성값	119
<표 4.19> 받침부 발생 전단변위	129
<표 4.20> 앵커 볼트 평가	141
<표 4.21> 받침부 평가지진력	142
<표 4.22> 받침부 발생 전단변위	143
<표 4.23> 앵커 볼트 평가	153
<표 4.24> 기초 중앙작용력	155
<표 4.25> 전도 안전성 평가	156
<표 4.26> 활동 안전성 평가	157
<표 4.27> 확대기초 단면 평가	157

그림 차례

<그림 2.1> 표준설계응답스펙트럼(5% 감쇠비)	34
<그림 2.2> 교량의 받침지지길이(또는)	47
<그림 3.1> 상부슬래브 평면도	65
<그림 3.2> 단면도	66
<그림 3.3> 해석모델	72
<그림 3.4> 수평관성력 단면력도	73
<그림 3.5> 내부동수압 단면력도	73
<그림 3.6> 외부동수압 단면력도	73
<그림 3.7> 평가용 가속도응답스펙트럼(5% 감쇠비)	78
<그림 3.8> X방향 진동모드 형상	80
<그림 3.9> 다중모드스펙트럼해석 단면력도	81
<그림 3.10> 해석모델	85
<그림 3.11> 평가용 가속도응답스펙트럼(5% 감쇠비)	87
<그림 3.12> 평가용 가속도 시간이력	88
<그림 3.13> 높이별 부가질량 산정	91
<그림 3.14> X방향진동모드 형상	93
<그림 3.15> 단면력 산정위치	94
<그림 3.16> 벽체 하단부 단면력도(SET #02)	96
<그림 3.17> 벽체 중앙부 단면력도(SET #02)	97
<그림 3.18> 벽체 하단부 단면력 시간이력(SET #02)	98
<그림 3.19> 벽체 중앙부 단면력 시간이력(SET #02)	99
<그림 4.1> 상부구조 단면도	103
<그림 4.2> 하부구조 단면도	104
<그림 4.3> 받침 배치도	105
<그림 4.4> 구조해석 모형도	105
<그림 4.5> 콘크리트 모델	108

<그림 4.6> 철근 모델	109
<그림 4.7> 전산 INPUT	110
<그림 4.8> 전산 OUTPUT	111
<그림 4.9> 평가응답스펙트럼	113
<그림 4.10> 진동모드의 누적 질량 참여율(%)	115
<그림 4.11> 교축직각방향 1차 모드 형상	115
<그림 4.12> 교축방향 1차 모드 형상	116
<그림 4.13> 부재의 공급변위연성도에 따른 콘크리트 전단강도 감소계수 k	122
<그림 4.14> 교축방향 공급역량곡선에 의한 파괴모드 결정	124
<그림 4.15> 교축직각방향 공급역량곡선에 의한 파괴모드 결정	125
<그림 4.16> 교량받침 제원	130
<그림 4.17> 콘크리트 파괴강도에 대한 투영면적 산정 - 교축방향	133
<그림 4.18> 콘크리트 파괴강도에 대한 투영면적 산정 - 교축직각방향	135
<그림 4.19> 프라이아웃 강도에 대한 투영면적 산정 - 교축방향	138
<그림 4.20> 프라이아웃 강도에 대한 투영면적 산정 - 교축직각방향 ...	139
<그림 4.21> 교량받침 제원	144
<그림 4.22> 콘크리트 파괴강도에 대한 투영면적 산정 - 교축방향	146
<그림 4.23> 콘크리트 파괴강도에 대한 투영면적 산정 - 교축직각방향	148
<그림 4.24> 프라이아웃 강도에 대한 투영면적 산정 - 교축방향	150
<그림 4.25> 프라이아웃 강도에 대한 투영면적 산정 - 교축직각방향	152
<그림 4.26> 확대기초 제원 및 형상	155

제1장 연구 배경 및 필요성

현재 저수지 내진성능평가의 경우, 농업생산기반정비사업계획설계 기준-필댐편(농림부,2002, 댐설계기준(국토해양부,2011) 및 기존댐 내진성능 평가요령(한국시설안전공단,2004)을 준용하고 있으나 부속 시설물의 경우 제체와는 달리 구체적인 평가 내용 및 방법의 부재로 인해 안전진단 사업 수행 시 혼돈을 야기, 결과 신뢰성 문제가 제기되고 있다.

- 최근 지진증가 및 국가적 지진대응능력 강화 경향으로, 댐설계기준 등 관련 기준에서 댐 저수지 부대시설물 내진설계 의무화
- 기존 저수지 부대시설물에 대한 구체적 수행 지침 및 요령의 부재로 인해 불필요한 대규모 보강공사가 예상되는 등 국고낭비 우려가 있음.

제 1절 연구 목적 및 범위

“댐설계기준(2005년)”에서는 댐 본체에 대한 내진설계방법이 주로 제시 되어 있었고, “기존 댐 내진성능평가 및 향상요령(2004년)”에서도 댐 본체에 대한 내진성능평가 및 향상방법이 주로 제시되어 있다. 2012년 6월 연구완료 된 “기존 댐 내진성능평가 및 향상요령 개정연구”에서도 댐 본체에 대한 내진성능평가 및 향상방법이 주로 제시되었다.

개정된 “댐설계기준(2011년)”에서는 전기 등 부대시설물의 손상에 의한 일본원자력발전소의 파괴를 참조하여, 댐 본체 뿐만 아니라 부대 시설물에 대한 내진설계를 의무화하였다.

- 부대시설물 (“댐설계기준(2011년)”)

여수로, 취수탑, 발전소, 댐 관리동, 수로터널 등을 말하며 이들 시설에 설치된 수문, 권양기, 현장조작반, 관리교, 전기 및 계측제어 설비 등 부대설비를 포함.

그런데 “댐설계기준(2011년)”에서 제시된 부대시설물에 대한 내진설계 기법을 적용하면 기존 부대시설물은 보강이 필요한 것으로 판

정될 수 있음. 이에 따라 기존 부대시설물에 대한 불필요한 대규모 보강 공사가 예상되고 막대한 국고가 낭비될 우려가 있다. 따라서 기존 부대시설물에 적합한 내진성능평가 및 향상 기법개발이 요구되고 있다.

본 과업은 ‘댐·저수지 부대시설물(취수탑, 관리교) 내진성능평가 현황 및 기법 정립(취수탑 및 관리교 편)으로서, 연구 범위는 다음과 같다.

- 댐 저수지 부대시설물(취수탑, 관리교)의 설계 기법 파악 및 정립
 - 국내외 댐 저수지 부대시설물의 내진설계현황 및 기법 파악
 - 국내 댐 저수지 부대시설물의 내진설계 기법 정립
 - 국내 댐 저수지 부대시설물의 내진설계 예제작성

- 댐 저수지 부대시설물(취수탑, 관리교)의 내진성능평가 기법 파악 및 정립
 - 국내외 댐 부대시설물의 내진성능평가 현황 및 기법 파악
 - 국내 댐 부대시설물의 내진성능평가 기법 정립
 - 국내 댐 부대시설물의 내진성능평가 예제작성

제2장 취수탑

제 1절 시설물의 특성

취수탑은 수원으로부터 취수를 하기 위하여 설치한 탑 모양의 구조물로 가운데가 빈 원통형의 구조물로 외벽에는 높이에 따라 여러 단의 취수구를 두어 적당한 수심으로부터 취수할 수 있도록 되어 있다. 탑 정부에 취수구 제수밸브 등을 조작할 수 있는 조작실과 관리를 위한 관리교가 설치된다.

기존 댐의 다른 부속시설과 마찬가지로 취수탑에 대한 내진 안전성 검토시 필요한 기준 및 절차, 적용방법 등을 명확히 규정한 기준이나 지침이 아직 마련되어 있지 않아 기존 취수탑의 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.

제2절 취수탑 관련 내진설계기준

기존 댐의 취수탑의 내진설계 및 안전성 평가에 적용되는 기준 및 평가방법의 타당성을 검증하기 위해서 우선적으로 구조물별 준용되고 있는 내진설계기준에 대한 검토를 수행하였다.

1. 댐 설계기준(2011)

국토해양부에서 2011년에 개정한 「댐 설계기준」에서는 ‘제12장 내진설계’ 편에 댐에 관한 내진설계기준이 상세하게 기술되어 있다.

본 절에서는 내진설계 공통사항 및 댐 부속시설물(취수탑)에 관한 기준에 대해서만 발췌하였다.

가. 내진설계 적용시설

- (1) 이 기준은 댐체, 여수로 및 부대시설물의 내진성능을 확보하기 위하여 필요한 기준을 규정하는 것으로서 신설되는 **높이 15m 이상 인 댐**의 내진설계에 적용한다. 또한 높이 15m 미만인 소규모댐의 내진설계에도 준용할 수 있다.
- (2) 댐의 부대시설물은 **취수탑, 발전소, 댐 관리동, 수로터널** 등을 말하며 이들 시설에 설치된 수문, 권양기, 현장조작반, 관리교, 전기 및 계측제어설비 등을 포함한다.

나. 내진설계기준의 기본개념

- (1) 이 기준은 국토해양부의 연구과제 내진설계기준 연구(1997.12) 에서 제시된 내진설계 성능기준 및 기타 연구결과를 참고하고 기존의 설계 체제를 정리하여 제정한 것이다.
- (2) 내진설계기준 연구(1997.12)에서 제시된 내진설계 개념의 특징은 지진의 발생 빈도와 지반운동의 세기, 시설의 중요도에 따라 요구

되는 내진성능을 기능수행 수준과 붕괴방지 수준으로 구분하여 만족시키도록 규정하고 있다. 따라서 이 기준에서 제시된 방법으로 내진설계를 할 경우에는 기능수행 수준과 붕괴방지 수준을 만족하는 것으로 본다.

- (3) 이 내진설계기준은 다음과 같은 기본개념에 기초를 두고 있다.
- (가) 댐에 미소한 변형과 부분적 손상이 발생하는 것은 허용할 수 있으나, 지진이 발생되더라도 통제 불가능한 저수의 유출이 없어야 하며, **댐의 저수기능이 유지되어 용수공급에 지장이 없어야 한다.**
 - (나) 어떤 경우에도 댐이 붕괴되지 않도록 댐체의 활동이나 전도의 방지를 위해 충분한 안전율이 확보되어야 한다.
 - (다) 이 기준을 따르지 않더라도 창의력을 발휘하여 보다 발전된 설계를 할 경우에는 이를 인정한다.

다. 내진설계 일반

(1) 내진설계 기법

- (가) 현재 우리나라에서 댐에 대한 내진설계 방법은 지진력을 지진계수에 의한 하중의 관성력과 동수압으로 대치하고 정역학적 방법으로 해석하는 **진도법**을 기본으로 하고 있다. 이 방법은 이미 경험적으로 안정적인 방법임이 입증되고 있다.
- (나) 정역학적 방법은 간편하고 안정적인 해석결과를 얻을 수 있는 장점이 있으나, 댐의 동적 특성을 고려하지 않고 지반과 구조물의 상호작용 관계인 설계진도와 최대응답 가속도의 관계가 명백하지 않다.
- (다) 최근 미국 등 일부 국가에서는 지진파에 의한 댐의 응답을 구하여 동적인 과동으로 해석하는 동역학적 안정해석 방법을 설계에 적용하고 있다.
- (라) 동역학적 안정해석 방법도 댐 설계에 적용할 때 다음과 같은 사항의 명확한 규명에 문제점이 있어 그 적용에 신중해야 한다.

- ① 설계 지진파형의 설정
 - ② 댐 축조재료의 동적인 응력 왜곡 특성
 - ③ 해석 방법으로서의 3차원적 응답이나 지하 소산 규정
 - ④ 파괴 기준 및 파괴 현상의 모의
- (마) 우리나라의 경우에는 빈약한 지진 해석자료 및 연구 미흡으로 여러 가지 불명확한 사항에 대한 가정이 불가피하여 설계기준으로 동적 해석 방법을 댐의 내진설계기준에 규정하기에는 무리가 따른다.
- (바) 따라서 종래의 정역학적 설계 방법인 진도법을 내진설계의 기본으로 한다. 그러나 진도법으로 설계된 댐체 단면에 대한 상세검토가 필요한 경우(댐 높이가 매우 높은 경우 등)에는 동역학적 해석 방법에 의한 검토를 수행한다.

(2) 설계지반운동

(가) 일반사항

- ① 설계지반운동은 **지표면에서의 자유장 운동**으로 정의한다.
- ② 설계지반운동은 수평 2축 방향 성분으로 정의되며 그 세기와 특성은 동일한 것으로 가정한다.
- ③ 지진에 의한 수직방향의 영향이 댐 안정에 영향을 주게 되는 경우에는 이 방향의 지진력을 고려하며 그 크기는 수평방향의 지반운동의 1/2로 본다.
- ④ 댐의 내진설계를 할 때 댐 상류의 저수지 수위 및 수위의 변화상태에 따라 댐 안전에 가장 불리한 방향으로 가진(加震)되는 경우를 상정하고 안정해석을 한다. 이때 해당 저수지 수위의 발생빈도가 특히 낮은 경우에는 그때의 적용 지진력을 조정할 수 있다.

(나) 설계진도(震度)

- ① 지진재해도 해석결과에 따라 우리나라의 지진구역을 <표 2.1>과 같이 설정한다. 평균재현주기 500년의 지진지반운동에 해당하는 각 지진구역별 지진구역계수는 <표 2.2>과 같이 구역 I 은 0.11, 구역Ⅱ는 0.07이다.

<표 2.1> 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

<표 2.2> 지진구역계수(재현주기 500년에 해당)

지진구역	I	II
구역계수	0.11	0.07

② 평균재현주기별 최대 유효 지반가속도의 증력가속도에 대한 비를 의미하는 위험도계수는 <표 2.3>와 같다. 이 표에서 기준은 평균재현주기 500년 지진이다.

<표 2.3> 위험도계수

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

③ 댐이 위치할 지점의 설계진도는 해당지역의 지진구역계수에 ‘다. 내진등급별 설계지진 수준’에서 규정하는 내진등급별 설계지진의 평균재현주기에 따른 위험도계수, ‘라. 기초지반의 영향’의 지반계수 및 ‘마. 댐 형식의 영향’의 댐 형식

별 할증계수와 중력가속도를 곱한 값으로 한다. 단, 지진구역 II에 위치한 다목적댐 및 동역학적 검토가 필요한 100m 이상의 높이를 가진 댐은 지진구역 I의 구역계수를 채택한다.

- ④ 그러나 위의 방법으로 산출된 설계진도가 0.1g 이하이면 0.1g을 취한다.

(3) 내진등급별 설계지진 수준

(가) 댐의 내진등급은 <표 2.4>과 같이 댐의 중요도에 따라 내진 I 등급 및 내진특등급의 두 가지 등급으로 분류한다.

(나) 댐은 <표 2.4>에서 내진 등급별로 규정된 평균재현주기를 갖는 설계지진에 대하여 설계된다.

<표 2.4> 댐의 내진등급별 설계지진

내진등급	구 분	설계지진의 평균재현주기
내진특등급 댐	·사회, 안보, 경제적인 측면에서 특별한 댐으로 발주처가 지정하는 댐 ·법에 의하여 다목적 댐으로 분류한 댐 ·높이 45m 이상이고 총저수용량 50백만m ³ 이 상인 댐	1,000년
내진 I 등급 댐	·내진특등급 댐 이외의 모든 댐	500년

(4) 기초지반의 영향

지반의 영향은 댐의 지진하중을 결정하는데 고려된다. <표 2.4>는 기초지반의 구분과 이에 상응하는 지반계수를 나타내고 있다. 이 표는 보통암의 기초를 기준으로 작성된 것이다.

<표 2.5> 기초지반 분류에 따른 지반계수

지반의 종류	지표면 아래 30m 토층에 대한 평균값			지반계수	
	전단파속도 (m/s)	표준관입시험 (N치)	비배수 전단강도 (kPa)	I 구역	II 구역
경암지반(S _A)	1,500 이상	-	-	0.8	
보통암지반(S _B)	760 ~ 1,500	-	-	1.0	0.7
연암지반 및 매우 조밀한 토사지반(S _C)	360 ~ 760	> 50	> 100	1.2	1.1
단단한 토사지반(S _D)	180 ~ 360	15 ~ 50	50 ~ 100	1.5	1.6

(5) 지반조사

(가) 댐의 내진 안정성 평가에 필요한 지반물성을 파악하기 위하여 지반조사를 실시한다. 지반조사는 지층구성, 지하수위, 각지층의 역학적 특성과약 및 실내시험을 위한 시료의 채취 등을 위한 현장시험과 채취된 시료를 이용한 실내에서의 역학적 시험을 포함한다.

(나) 필요한 경우 전단파속도 주상도 등을 얻을 수 있는 동적 현장 시험을 실시하며, 지진에 취약한 지반은 액상화 특성과 다양한 변형을 크기에 대한 변형계수와 감쇠비 특성을 얻을 수 있는 시험을 실시한다.

(6) 지진하중

(가) 지진시 댐에 발생하는 응력과 변형을 평가할 때 댐에 작용하는 고정하중에 설계진도를 곱한 지진 관성력을 고려한다.

(나) 지진 관성력은 댐 안정에 불리한 방향으로 작용하는 것으로 해석한다. 즉, 댐 본체는 상 하류 방향의 수평지진력만을 고려하여 설계하며, 여수로 및 부대시설물은 구조물의 특성에 따라 상 하류 방향 또는 댐축 방향의 지진력을 선별적으로 고려하여 설계한다.

(다) 지진시에는 유체의 동압력 뿐만 아니라 파랑고의 영향도 고려할 수 있다.

라. 콘크리트 중력댐의 내진설계

(1) 설계거동한계

콘크리트 중력댐은 다음과 같은 조건이 충족되어 지진이 발생해도 붕괴되지 않아야 한다.

(가) 콘크리트댐은 지진이 발생되더라도 저수기능이 유지되어야 하며 보수 및 용수 공급이 가능해야 한다. 이를 위해 여수로 및 부대 시설물에 대해서도 내진설계가 이루어져야 한다. 이때, 권양기 및 현장조작반은 강제 거동하는 것으로 가정하여 기초앵커의 응력을 검토하며, 관리교는 낙교의 가능성에 대해 검토한다.

(나) 콘크리트에 발생한 변형은 탄성한계를 현저히 초과하지 않아야 한다.

(다) 이음부의 열림 또는 국부적 파괴로 인해 통제 불가능한 유출이 발생하지 않아야 한다.

(라) 지진시 발생하는 파랑고에 의해 댐체가 월류되거나 여수로 및 부대시설물의 기능이 장시간 정지되어서는 안 된다.

(마) 여수로 및 취수탑의 재료는 탄성거동 한계 내에 있도록 설계하며, 강제구조물의 발생 응력은 허용응력 이내여야 하고 콘크리트 구조물의 발생 외력은 내하력보다 작아야 한다.

(2) 정역학적 설계기준

(가) 지진력

① 설계에 적용하는 지진력은 작용 정하중에 대한 지진 관성력과 동수압이며 지진에 의한 저수지의 파랑고를 따로 고려할 수 있다.

② 수평지진 관성력

㉠ 체체의 수평지진 관성력은 체체의 자중에 설계진도를 곱한 값으로 한다.

- ㉔ 관성력 작용점은 단면형상에 관계없이 질량의 중심이며 작용방향은 수평방향으로 하되, 댐 안정에 불리한 방향으로 작용하는 것으로 한다.
 - ㉕ 만수시의 안정해석에서는 지진 관성력이 상류측에서 하류측으로, 댐축에 직각방향으로 수평으로 작용하는 것으로 한다.
 - ㉖ 저수지가 비어있을 경우에는 반대로 하류측에서 상류측으로 작용하는 것으로 하되, 설계진도는 소정 설계진도의 1/2을 적용해도 무방하다.
 - ㉗ 댐축 방향으로 지진 관성력을 작용할 때도 설계진도는 댐축 직각방향과 같다.
 - ㉘ 수평지진에 의한 수압 증가량은 Westergaard의 공식에 의하여 구할 수 있다.
- ③ 수직지진 관성력
- ㉙ 콘크리트 중량에 설계진도의 1/2로 가정한 수직설계진도를 곱한 값인 수직 관성력을 고려할 수 있다.
 - ㉚ 관성력은 상하 방향 중 불리한 쪽으로 작용하는 것으로 한다.
- ④ 지진에 의한 동수압
- ㉛ 지진력이 작용할 경우에 발생하는 수평방향 동수압은 댐을 강체로 가정한 Westergaard의 공식에 의하여 계산하며, 동수압은 댐의 연직면에 관성력 방향으로 수평으로 작용하는 것으로 한다.
 - ㉜ 수문 등 강제구조물에서도 댐체와 같이 동수압이 작용하는 것으로 한다.
 - ㉝ 수직방향 동수압은 댐체에 작용하는 물 무게에 수직 설계진도를 곱한 값으로 하여 물 무게 중심에서 관성력 방향으로 작용하는 것으로 한다.
 - ㉞ 댐축 방향의 지진력이 작용할 때 월류부 교각(pier)의 상류측은 교각 좌우 측면에 동수압을 모두 관성력 방향으로 작용하는 것으로 한다.

- ㉞ 동수압 계산시 적용하는 수심은 상시만수위에서 퇴사부의 저면의 기초지반의 지반고까지로 하여 퇴사부위에서도 지진에 의한 동수압이 작용하는 것으로 하되, 퇴사압에 대한 지진의 영향은 고려하지 않는다.

(3) 동역학적 검토

(가) 동적 검토법의 필요성

- ① 댐의 정적 설계 방법은 주로 경험을 토대로 하여 타당성이 입증되고 있으나, 본질적으로 지진시 댐의 거동을 정확히 해석할 수 없으며 지반운동과 댐체와의 거동특성이 분명하지 않다.
- ② 반면, 동적 응답 해석법은 높은 댐의 안정성이나 기초암반의 거동특성을 가장 과학적으로 해석할 수 있는 방법이라 할 수 있다.
- ③ 동적 해석법은 아직 연구 중인 기법으로 댐의 내진성능을 충분히 정량적으로 판단하기는 어렵지만 100m 이상의 높은 댐과 특수한 구조의 댐에서 현행 설계법의 보조적 수단으로 사용될 수 있다.

(나) 지진해석 방법과 절차의 일반

- ① 댐 저면에 발생하는 최대압축응력을 분석하여 지지력에 대한 안전성을 평가할 수 있다. 또한 지반의 허용지지력의 1.3배 또는 콘크리트 동적 압축강도와 비교하여 댐체에 발생하는 압축응력에 대한 안전성을 평가할 수 있다.
- ② **콘크리트의 동적 탄성계수는 정적 탄성계수에 15%를 할증하여 적용하며, 동적 포아슨비는 정적 포아슨비의 0.7배와 같다.** 또한, 콘크리트의 동적 전단탄성계수는 동적 포아슨비와 동적 탄성계수와의 관계식으로 구하며, **감쇠비는 5%를 적용**한다. 댐의 지반은 보통암 이상이므로 지진시 변형이 극히 작아 정적인 상태와 동적인 상태에서의 물성치 차이가 거의 없다.
- ③ 콘크리트 동적 전단강도는 정적 전단강도의 1.0배를 적용한다. 정적 인장강도는 정적 쪼갠 인장강도를 채택하며, 동적 인장강

도는 정적 인장강도의 1.5배를 적용한다. 동적 압축강도는 정적 압축강도의 1.15배를 적용한다.

- ④ 지반을 통한 지진파의 방사조건을 반영하며, 지반매질의 변형도 의존 특성을 고려한다.
- ⑤ 여수로 및 부대시설물의 응답은 선형 및 비선형 거동특성을 고려할 수 있는 해석법을 사용하여 해석하고, 입력지반운동에는 댐의 지진응답 영향을 고려한다.

마. 소 결

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 선진국에서는 지진파에 의한 응답을 구하여 동적인 파동으로 해석하는 동역학적 안정해석 방법이 많이 개발되어 설계에 적용하고 있으나, 우리나라의 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 필

요한 경우(댐 높이가 매우 높은 경우 등)에는 동역학적 해석 방법에 의한 검토를 수행하도록 하였다.

2. 농업생산기반정비사업계획설계기준 - 필댐편(2002)

농림부에서 2002년에 개정한 「농업생산기반정비사업계획설계기준 - 필댐 편」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 부속시설**에 대하여 내진설계를 적용한다.’라고 필댐의 내진설계기준을 제시하고 있다.

가. 내진설계 방법

지진시에는 댐 및 기초의 직접 파괴 이외에 저수지 주변 또는 물넘이 사면의 활동이나 저수의 진동에 의한 간접 피해도 발생할 수 있기 때문에 이에 충분히 검토해야 한다.

(1) 기본 개념

댐에 상당한 변형과 부분적 손상이 발생하는 것은 허용할 수 있으나 지진시 또는 지진 경과 후에도 댐의 저수기능은 유지되어야 하며 통제 불가능한 저수량의 유출상태는 있어서는 안된다. 어느 경우에도 댐이 붕괴되지 않도록 댐체의 활동이나 전도를 방지하기 위한 충분한 안전율을 확보하여야 하며, 댐의 정상수명기간 내에 설계 지진력이 발생할 가능성은 희박한 것으로 본다.

(2) 설계 방법

내진설계방법은 지진력을 지진계수에 의한 하중의 관성력과 동수압으로 대치하고 정역학적인 방법으로 해석하는 진도법과 지진파에 의한 응답을 구하여 동적인 파동으로 해석하는 동역학적 안정해석 방법이 있다.

댐 내진설계 방법은 정역학적 방법으로 해석하는 진도법을 기본으로 하고 있는데, 이미 경험적으로 안정적인 방법임이 입증되고 있다. 이 방

법은 간편하고 안정적인 해석결과를 얻을 수 있는 장점이 있으나 댐의 동적 특성을 고려하지 않고 지반과 구조물의 상호작용 관계인 설계진도와 최대 응답 가속도의 관계가 명백하지 않다.

선진국에서는 지진파에 의한 응답을 구하여 동적인 파동으로 해석하는 동역학적 안정해석 방법이 많이 개발되어 설계에 적용하고 있다. 이 방법도 댐 설계에 적용할 때는 다음의 문제점이 있어 적용에 신중해야 한다.

- (가) 설계 지진파형의 설정
- (나) 댐 축조재료의 동적인 응력 왜곡 특성
- (다) 해석방법으로서의 3차원적 응답이나 지하 소산 규정
- (라) 파괴규준 및 파괴현상의 모의 등

특히, 우리 나라의 경우 빈약한 지진 해석자료 및 연구 미흡으로 여러 가지 불명확한 사항에 대한 가정이 불가피하여 설계기준으로 동적 해석방법을 댐의 내진설계기준에 규정하기에는 무리가 따른다.

나. 설계 지반운동 및 설계진도

(1) 설계지반운동

설계지반운동은 지표면에서의 자유장 운동으로 정의한다. 설계지반운동은 수평 2축 방향성분으로 정의되며 세기와 특성은 동일한 것으로 가정하고, 지진에 의한 수직방향의 영향이 댐 안정에 영향을 주게 되는 경우는 이 방향의 지진력을 고려하여야 하며 크기는 수평방향 지반운동의 1/2로 본다. 또한, 댐의 내진설계 시에는 댐 상류의 저수지 수위 및 수위의 변화상태에 따라 댐 안전에 가장 불리한 방향으로 가진 되는 경우를 산정하고 안정해석을 해야 한다.

(2) 설계진도

우리나라의 지진구역을 <표 2.1>과 같이 설정한다. 각 지진구역에서의 평균 재현주기 500년의 지진 지반운동에 해당하는 지진구역계수는

구역 I에서는 0.11, 구역 II에서는 0.07이다. 평균 재현주기별 최대 유효지반가속도의 중력가속도에 대한 비를 의미하는 위험도 계수는 평균 재현주기 500년일 때 1.0이며, 1,000년일 때는 1.4이다.

필댐 설계시 적용되는 설계진도는 지진 구역계수에 내진 등급별 설계지진의 평균 재현주기에 따른 위험도 계수, 지반계수 및 댐 형식별 할증계수를 곱한 값에 중력가속도를 곱하여 구한다. 단, 지반계수와 댐 형식별 할증계수는 정역학적 설계방법인 진도법에 의한 경우에만 적용한다. 그러나 위의 방법으로 산출된 설계진도가 0.2 g 이상이어서 우리나라보다 지진규모나 발생빈도가 훨씬 높은 나라에서 적용하는 진도보다 과다하다고 판단되는 경우 설계자는 적용 설계진도를 0.2 g 이하로 조정할 수 있다.

(3) 내진등급과 설계지진 수준

댐 내진등급은 <표 2.6>와 같이 댐의 중요도에 따라 내진 I 등급 및 내진특등급의 두가지 등급으로 분류한다.

<표 2.6> 댐의 내진등급과 설계지진

내진등급	내 용	설계지진의 평균 재현주기
내진특등급 댐	·사회, 안보, 경제적인 측면에서 특별한 댐으로 발주처가 지정하는 댐 ·법에 의하여 다목적 댐으로 분류한 댐 ·총저수량 2000만 m ³ 이상인 댐	1,000년
내진 I 등급 댐	높이 15m 이상이고 총저수량 50만 m ³ 이상인 댐	500년

(4) 지진하중

지진시 댐에 발생하는 응력과 변형을 평가할 때에는 댐에 작용하는 사하중에 설계진도를 곱한 지진 관성력을 고려하여야 하며, 이 관성력의 작용방향은 댐의 안정성에 불리한 방향으로 작용하는 것으로 해석

하여야 한다. 이는 유체의 동압력의 영향뿐만 아니라 수면과의 영향이 고려되어야 한다.

다. 땀땀의 내진설계

땀땀의 내진설계상 주의사항 및 설계거동 한계를 정의하고 있으나, 부속시설에 대한 사항은 규정되어 있지 않다.

라. 정역학적 설계기준

설계에 적용하는 지진력은 작용 정하중에 대한 지진 관성력만 고려하고 동수압은 영향이 미미하므로 제외한다. 지진에 의한 파랑고는 필요한 경우에만 따로 고려한다.

(1) 지진력

진도법에 의한 정역학적 설계에서 땀땀에 작용하는 지진력은 활동면상의 체체 무게에 설계 진도를 곱한 지진 관성력이며, 이 힘의 작용점은 활동면의 중심이며 작용방향은 수평방향으로 하되 안정에 불리한 쪽으로 정한다.

활동면에 연직으로 작용하는 동수압은 아주 작으므로 무시하며, 활동면에 연직으로 작용하는 지진 관성력은 수평지진 관성력의 1/2로 계산할 수 있으나 수평지진 관성력을 적용하는 경우가 가장 불리하므로 실제로는 적용하지 않는다.

마. 동적 설계

최근에 건설되는 땀땀은 해석법의 발전과 시공장비의 발달 등에 따라 점차 대형화되고 있는 추세이다. 과거 경험적인 방법인 진도법은

보수적으로 채택되어 왔으나, 적정지진 규모와 경제적인 조건이 충분히 고려되지 못했기 때문에 보다 과학적이고 이론적인 동적해석 기법의 적용이 필요하다.

이러한 동적인 방법은 축제 재료의 비선형 거동특성을 고려한 비선형 모델링 방법을 사용하거나 타당성이 입증된 단순화된 방법으로 해석해야 한다.

부속 구조물의 응답은 비선형 거동특성을 고려할 수 있는 해석법에 의해서 해석하고 일반 구조물의 지진응답 해석법을 준용한다.

동적해석에서 일반적으로 선형적 방법을 응력해석에 이용하고 있으나 면밀한 검토를 위하여 단계적 해석이 사용되어야 하며, 흙의 소성적 성질과 동적 간극수압을 고려하며, 주로 유한차분법이나 유한요소법을 사용하여 해석한다.

바. 소 결

설계기준 - 필댐편(2002)의 4.9.5절에서는 **높이 15m 및 총저수량 50만 m³ 이상** 규모로 신설되는 필댐 및 **부속시설**에 대하여 내진성능을 확보하는데 필요한 최소 요구조건을 만족하도록 내진설계를 수행하라고 기술되어 있으나, 본문에는 필댐 규모에 따라 내진설계 방법 및 설계진도 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 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 선진국에서는 지진파에 의한 응답을 구하여 동적인 파동으로 해석하는 동역학적 안정해석 방법이 많이 개발되어 설계에 적용하고 있으나, 우

리 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.

3. 상수도시설기준(2010)

환경부에서 2010년에 개정된 「상수도시설기준」에서는 ‘제10장 내진설계’ 편을 신설하여 상수도시설의 내진성능을 확보에 필요한 최소설계요건을 규정하여 지진발생 시에도 상수도시설의 급수기능을 최대한 확보하고, 시설의 지진피해가 중대한 2차 재해를 발생시킬 가능성을 최소화 할 수 있도록 도모하였다.

본 절에서는 내진설계 공통사항 및 취수시설 중 저수지 부속시설물과 관련된 내용에 대해서만 발췌하였다.

가. 적용범위

- (1) 이 기준은 상수도시설기준에 의해 상수도시설을 신설하는 경우의 내진설계에 적용된다. 상수도시설물 중 주요 구조물로서 지진에 따른 시설물 손괴 시 응급복구가 불가능하여 장기간 급수 중단을 초래할 수 있는 시설에 대해 우선 적용한다.
- (2) 기존시설의 정비와 내진성능 개선은 이 시설기준의 개념 및 원칙을 준수하는 범위 내에서 적절한 보완을 거쳐 별도의 시설기준을 작성하여 설계에 적용할 수 있다.
- (3) 이 시설기준에 규정되어 있지 않은 사항에 대해서는 환경부 및 국토해양부에서 제정한 관련 설계기준과 설계지침 등에 따른다. 이때, 관련 설계기준과 지침 예는 다음과 같다.

- (가) 콘크리트구조설계기준(건설교통부)
- (나) 도로교설계기준(한국도로교통협회)
- (다) 수도시설내진공법 지침·해설(일본수도협회)
- (라) 공동구 설계지침(일본도로협회)
- (마) 댐설계기준(한국수자원학회)
- (바) 터널설계기준(한국터널공학회)
- (사) 구조물기초설계기준(한국지반공학회)

나. 내진설계 일반

(1) 내진설계의 기본방침

- (가) 본 기준의 목적은 상수도시설의 내진성능 기준의 목적을 달성하기 위한 최소 요건을 규정하는데 있으며, 본 기준을 따르지 않더라도 상수도시설의 내진성능기준을 충족시킬 수 있는 창의력이 발휘된 보다 발전된 설계를 할 경우에는 이를 인정한다.
- (나) 지진시 시설물이 보유해야 할 성능수준은 기능수행수준과 붕괴방지수준으로 구분할 수 있으나, 이 시설기준에서는 **붕괴방지수준**에 대한 설계만을 고려한다.
- (다) 상수도시스템을 구성하는 개개 시설의 중요도, 지진에 의한 시설의 손상으로 초래 될 수 있는 영향 범위를 고려하여 내진등급을 분류한다.
- (라) 시설물의 중요도와 성능목표를 고려하여 설계지진의 수준을 정하여야 하며, 설계지반운동은 지진운동의 불확실성과 부지고유특성이 잘 반영될 수 있어야 한다.
- (마) 지진에 의한 영향을 관련 시설기준에 근거하여 설계에 반영하여야 한다.
- (바) 지진시 토압은 지상구조물, 송·배수관로, 암거, 공동구 등의 횡단면 설계와 안정계산, 배수탑, 저수탑 및 옹벽 등 부속구조물의 안정계산에 적용한다.
- (사) 물에 접하는 구조물은 지진시 동수압과 수면동요의 영향을 필요에 따라 고려해야 한다.

(2) 시설물의 분류와 내진등급

(가) 상수도시설은 취수시설(취수댐, 취수탑, 취수문, 취수관거, 집수관거, 침사지 등), 도수 및 송·배수시설(관로, 가압장, 배수지, 배수탑, 조절지, 수관교, 수로터널, 수로터널 입·출구부 등), 정수 및 배출수 처리 시설(착수정, 응집지, 침전지, 여과지, 정수지, 고도정수처리 시설(오존, 입상활성탄 여과지), 설비를 수용하고 있는 건물 등), 기계 및 전기설비, 기타 취수시설 내지 정수/배출수 처리 시설의 기능상 필요한 부속구조물로 분류된다.

(나) 상수도시설물의 내진등급은 내진 I등급과 내진 II등급으로 분류한다.

- ① 개개의 시설을 그 기능의 중요도와 지진에 의한 손상으로 초래될 수 있는 영향범위를 고려하여 내진 I 등급과 내진 II 등급으로 분류한다. 내진등급별 시설의 분류는 <표 2.7>과 같다.

<표 2.7> 내진등급별 시설분류

내진등급	상수도시설	비 고
내진 I 등급	대체시설이 없는 송·배수 간선시설, 중요시설과 연결된 급수공급관로, 복구 난이도가 높은 환경에 놓이는 시설, 지진재해시 긴급대처 거점시설, 중대한 2차 재해를 유발시킬 가능성이 있는 시설 등	
내진 II 등급	내진 I 등급 이외의 시설	

- ② 상수도시설 중 상류에 위치하는 시설, 도수관로, 송·배수 간선 시설로서 대체시설이 없는 경우, 중요시설과 연결된 급수관로, 복구 난이도가 높은 환경에 놓이는 시설, 지진재해시 긴급 대책 수립 거점시설, 중대한 2차 재해를 유발시킬 가능성이 있

는 시설 등의 중요도가 높은 시설은 내진 I 등급으로 분류하고 그 외는 내진 II 등급으로 하는 것을 원칙으로 한다.

- ③ 세부 내진등급 분류는 「상수도시설 내진설계기준 마련을 위한 연구」(1999, 환경부)의 별첨1을 참고로 하되 수도사업자가 시설 및 기능의 중요도를 감안하여 조정할 수 있다.

(3) 설계거동한계 및 등급별 내진설계 목표

(가) 설계거동한계는 설계지진시 구조부재의 과도한 소성변형, 지반의 액상화, 지반 및 기초의 파괴 등의 원인으로 부분적인 급수기능 유지가 불가능하게 되지 않아야 하고, 쉽게 조기 복구가 가능하여야 한다.

(나) 상수도시설물의 내진성능 목표에 따른 설계지진강도는 붕괴방지수준에서 시설물의 내진등급이 I 등급인 경우에는 재현주기 1000년, II 등급인 경우에는 500년에 해당되는 지진지반운동으로 한다.

(4) 설계지반운동 수준 및 표현 방법

(가) 설계지반운동은 지상구조물의 경우, 지표면에서의 자유장운동으로, 지중구조물의 경우는 기반암에서의 자유장 운동으로 정의된다.

- ① 설계지반운동은 지상구조물의 경우, 부지정지작업이 완료된 지표면에서의 자유장운동으로, 지중구조물의 경우는 기반암에서의 자유장운동으로 정의된다.
- ② 국지적인 토질조건, 지질조건과 지표 및 지하지형이 지반운동에 미치는 영향이 고려되어야 한다.
- ③ 기본적인 지진재해도는 암반지반을 기준으로 평가한다.
- ④ 설계지반운동은 흔들림의 세기, 주파수 성분 및 지속시간의 세가지 측면에서 그 특성이 잘 정의되어야 한다.
- ⑤ 설계지반운동은 수평 2축 방향과 수직방향 성분으로 정의된다.
- ⑥ 설계지반운동의 수직방향 성분의 세기는 수평방향 성분의 1/2로 가정할 수 있고, 주파수 성분과 지속시간은 수평방향 성분과 동일하다고 가정할 수 있다.

(나) 설계지반운동수준은 지진재해도 해석결과에 근거한 구역계수, 평균재현주기별 최대유효지반가속도비를 나타내는 위험도계수, 기초지반의 영향을 고려한 지반분류에 의한 지반계수를 산정하고, 이로부터 설계지반운동수준을 결정한다.

① 설계지반운동 수준

㉠ 설계지반운동 수준은 다음과 같이 분류한다.

- 평균재현주기 500년 지진 지반운동(50년내 초과확률 10%)

- 평균재현주기 1,000년 지진 지반운동(100년내 초과확률 10%)

㉡ 지진재해도 해석결과에 근거하여 <표 2.1>에 기술된 바와 같이 남한을 두 개의 지진구역으로 설정한다. 각 지진구역에서의 평균재현주기 500년 지진 지반운동에 해당하는 구역계수는 <표 2.2>에 수록된 바와 같이 지진구역 I에서는 0.11, 지진구역 II에서는 0.07이다.

㉢ 평균재현주기별 최대유효지반가속도의 비를 의미하는 위험도계수(I)는 <표 2.8>와 같다.

㉣ 상수도시설의 각 구조물 및 관로가 위치할 부지에 대한 지표면 지진 지반운동의 가속도계수(A)는 내진등급별 설계지진의 평균재현주기에 해당되는 위험도계수를 지진구역에 따른 지진계수(C_a)에 곱하여 계산한다.

㉤ 기반암 위치에서 지진 지반운동의 가속도계수는 평균재현주기에 해당되는 위험도계수에 지진구역 I에서는 0.09, 지진구역 II에서는 0.05를 곱하여 구한다.

㉥ 기반암의 정의는 전단파속도가 760m/s ~ 1,500m/s를 초과하는 지반을 말한다. 기반암의 위치를 판단하기가 어려운 경우는 전문가의 자문을 받아 결정해야 한다.

<표 2.8> 위험도계수

재현주기(년)	500년	1,000년
위험도계수	1.0	1.4

② 지반의 분류

- ㉠ 국지적인 토질조건 및 지질조건과 지표 및 지하 지형이 지반운동에 미치는 영향을 고려하기 위하여 지반을 <표 2.9>에서와 같이 S_A, S_B, S_C, S_D, S_E, S_F의 6종으로 분류한다.
- ㉡ 지반종류 S_F는 부지고유의 특성 평가가 요구되는 다음 경우에속하는 지반을 일컫는다.
 - 액상화가 일어날 수 있는 흙, 키클레이와 매우 민감한 점토, 붕괴될 정도로 결합력이 약한 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

<표 2.9> 지반의 분류

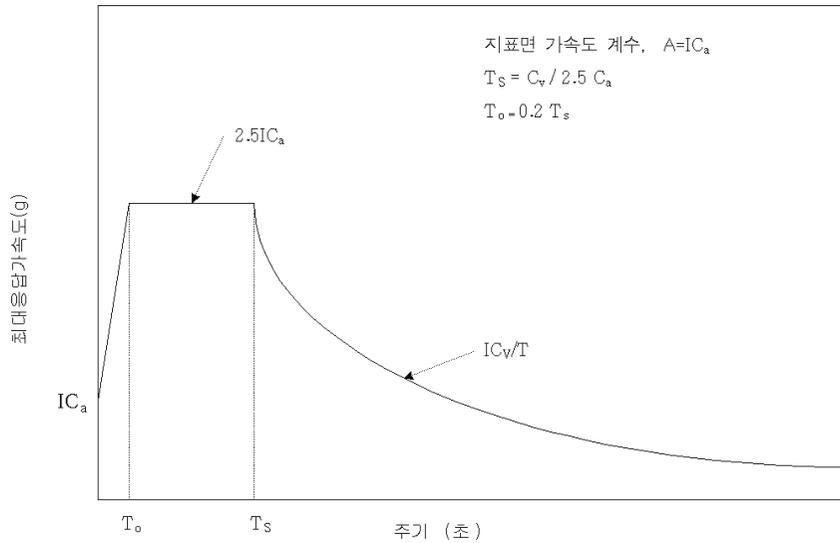
지반 분류	지반종류의 호칭	지표면 아래 30m 토층에 대한 평균값 ¹⁾		
		전단파속도 ²⁾ (m/s)	표준관입시험 ²⁾ N	비배수 전단강도 \bar{S}_u (kPa)
S _A	경암지반	1,500 이상	-	-
S _B	보통암지반	760에서 1,500	-	
S _C	매우 조밀한 토사지반 또는 연암지반	360에서 760	> 50	> 100
S _D	단단한 토사지반	180에서360	15 ~ 50	50 ~ 100
S _E	연약한 토사지반	180 미만		
S _F	부지 고유의 특성평가가 요구되는 지반			

주 : 1) 상부 30m 이내에 기반암층이 있는 경우는 30m 이내의 기반암을 포함한 평균지반특성을 고려한다.
 2) 전단파속도 또는 표준관입시험치는 현장시험 결과치를 이용하는 것을 원칙으로 한다. 또한 전단파속도와 표준관입시험치를 모두 측정할 경우는 전단파속도에 의해 분류한다.

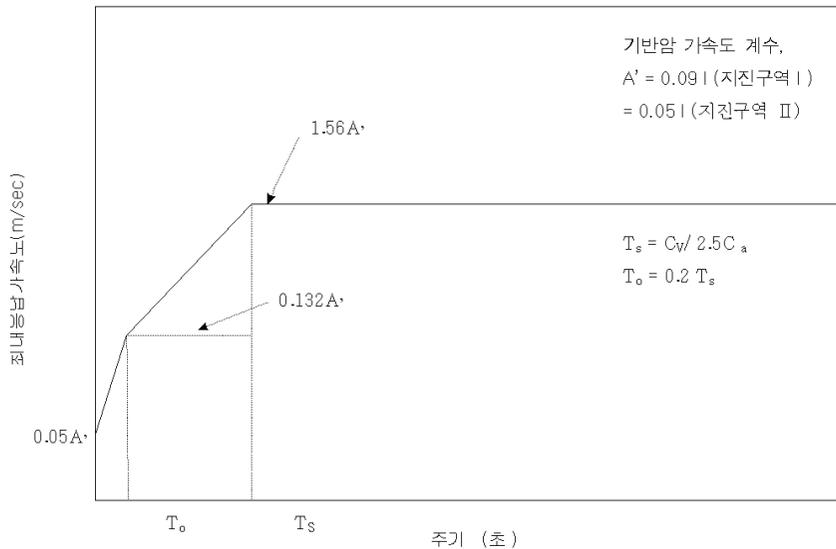
- (다) 설계지반운동의 특성은 표준설계응답스펙트럼으로 표현한다.
- ① 설계지반운동의 특성은 <그림 2.1>과 같은 표준설계응답스펙트럼으로 표현하며 지상구조물의 설계기준으로 가속도응답스펙트럼(<그림 2.1>의 (a))을 지중구조물은 속도응답스펙트럼(<그림 2.1>의 (b))을 적용한다.
 - ② 5% 감쇠비에 대한 표준설계응답스펙트럼이 <그림 2.1>에 정의되어 있다. 5% 이외의 감쇠비에 대해서는 <표 2.10>의 감쇠보정계수를 곱하여 사용한다.
 - ③ <그림 2.1>에서 표준설계응답스펙트럼의 결정을 위해 요구되는 지진계수 C_a 와 C_v 의 값은 지반종류의 $S_A, S_B, S_C, S_D, S_E, S_F$ 에 대하여 지진구역별로 <표 2.11>와 <표 2.12>에 각각 주어져 있다. 지반종류 S_F 로 분류되는 경우에는 부지고유의 지반특성 평가가 요구되는 지반이므로 이 경우에는 지진재해도 평가 경험이 있는 지반, 지질 및 지진 전문가에 의해 C_a, C_v 를 구하는 절차를 따라야 한다.
 - ④ 지반운동의 공간적 변화 특성 고려 방법
 - ㉠ 구조물의 모든 위치에서 똑같은 지반운동으로 가진되는 것이 불합리하다고 판단되는 구조물에 대해서는 지반운동의 공간적 변화를 고려할 수 있는 모델을 사용해야 한다.
 - ㉡ 지반운동의 공간적 변화에 관한 구체적인 내용은 필요한 경우에는 관련기술기준에 따른다.
 - ⑤ 가속도 시간이력
 - ㉠ 지반가속도의 시간이력으로 지반운동이 표현될 수 있다.
 - ㉡ 공간적인 모델이 필요할 때 지반운동은 동시에 작용하는 3개의 가속도 성분으로 구성되어야 한다.
 - ㉢ 가속도 시간이력으로 후술되는 ⑥항에서 기술하는 인공가속도 시간이력이 사용될 수 있다.
 - ⑥ 인공지진 가속도 시간이력
 - ㉠ 인공가속도 시간이력은 설계응답스펙트럼과 잘 부합되도록 생성되어야 한다.
 - ㉡ 지반운동의 장주기 성분이 구조물의 거동에 미치는 영향이 중요하다고 판단될 경우에는 지진원의 발진기구 특성과 국

지적인 영향을 고려하여 시간이력을 생성하여야 한다.

- ㉔ 인공가속도 시간이력의 지속시간은 지진의 규모와 발진기구 특성, 전파경로 및 부지의 국지적인 조건이 미치는 영향을 고려하여 합리적으로 결정되어야 한다.



(a) 지표면 설계가속도응답스펙트럼



(b) 기반암 설계속도응답스펙트럼

<그림 2.1> 표준설계응답스펙트럼 (5% 감쇠비)

<표 2.10> 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 선형 보간하여 사용한다.
 2) 주기 T_0 이후의 구간에 대하여 적용하고, T=0에서 T_0 구간은 선형 보간한다.

<표 2.11> 지진계수 C_a

지반종류	지진구역	
	I	II
S_A	0.09	0.05
S_B	0.11	0.07
S_C	0.13	0.08
S_D	0.16	0.11
S_E	0.22	0.17

<표 2.12> 지진계수 C_v

지반종류	지진구역	
	I	II
S_A	0.09	0.05
S_B	0.11	0.07
S_C	0.18	0.11
S_D	0.23	0.16
S_E	0.37	0.23

다. 지진해석 및 내진설계 방법

(1) 하중

내진설계에서는 상시상태에서 고려되는 하중 외에 지진으로 인한 하중이 추가적으로 고려되어야 한다.

- (가) 지진시의 지반 변위 또는 변형
- (나) 구조물의 자중과 적재하중 등으로 유발된 관성력
- (다) 지진시 토압
- (라) 지진시 동수압
- (마) 수면동요
- (바) 지진시 지반의 액상화
- (사) 지질이나 지형이 급변하는 지반의 지진시 이완 또는 붕괴

(2) 기본적인 지진해석 및 설계 방법

상수도시설물의 지진해석 및 내진설계는 다음의 각 호에 해당되는 시설 및 설비에 대해 시행하되, 시설물별로 합리적인 지진해석 및 설계방법이 적용되어야 한다.

(가) 각호에 해당되는 시설 및 설비

- ① 기초
- ② 흡구조물 및 용벽
- ③ 상수도 전용댐
- ④ 매설관로 및 수로터널
- ⑤ 암거, 공동구 및 수직갱
- ⑥ 상수도 관로 전용 교량
- ⑦ 대용량 저수조
- ⑧ 취수탑 및 지상수조
- ⑨ 펌프장
- ⑩ 건축물
- ⑪ 기계 및 전기설비

(나) 지진해석 및 설계방법은 기본적으로 다음에 따라야 한다.

- ① 지반을 통한 파의 방사조건이 적절히 반영된 수평 2축 방향 성분과 수직방향 성분이 고려되어야 한다.

- ② 지진해석에 필요한 지반정수는 동적 하중조건에 적합한 값들이 선정되어야 하며, 특히 지반의 변형계수와 감쇠비는 발생 변형을 크기에 알맞게 선택되어야 한다.
- ③ 유체-구조물-지반의 상호작용 해석시 구조물의 유연성과 지반의 변형성을 고려해야 한다. 단, 유체-구조물 상호작용이 경미할 경우에는 구조물을 강체로 가정하여 유도한 단순 유체 모델을 사용할 수 있다.
- ④ 대상으로 하는 구조물 또는 배관의 구조적 특성과 지반조건에 따라 등가정적해석법, 응답변위법, 응답스펙트럼법, 동적해석법(시간영역해석, 주파수영역해석) 중 시설물별 관련기준에 적합한 방법을 사용한다.
 - ㉠ 매설관로와 공동구 구조물과 같이 지중구조물로 그 내공부를 포함한 단위체적중량이 주변지반의 단위체적중량과 비교하여 가벼운 경우에는 주변지반에 발생하는 변위 변형 등에 구조물의 지진시 거동이 좌우되므로 응답변위법을 적용하는 것이 적절하다.
 - ㉡ 지상구조물, 반지중구조물 중 상부가 개방된 구조물과 지중구조물이라 할지라도 구조물의 단위체적중량이 주변지반에 비해 매우 크고 횡방향 변위가 전혀 허락되지 않는 구조물의 경우에는 등가정적해석법을 적용하는 것이 적절하다.
 - ㉢ 동적해석법은 상세한 검토를 필요로 하는 경우나 구조조건, 지반조건이 복잡한 경우, 지반과 구조물의 상호작용을 고려하는 경우에 적용하는 것이 적절하다.
 - ㉣ 매설관로, 수로터널, 지하공동구와 같이 종방향으로 길게 설치되는 선상구조물의 경우, 내진해석은 2차원 횡단면 해석을 원칙으로 하나, 지반상태가 급격히 변화하는 구간 통과 등의 경우에는 종방향에 대한 내진해석을 추가로 수행해야 한다.
- ⑤ 붕괴방지수준을 고려하기 때문에 지진응답은 비선형 거동특성을 고려할 수 있는 해석법에 의해서 해석하는 것을 기본으로 한다. 이 경우 보수성이 입증된 단순해석법 및 설계법이 사용

될 수 있다.

⑥ 액상화 가능성 판단은 설계지진 가속도에 의해 지반에 발생하는 반복 전단응력과 액상화에 대한 지반의 강도를 기준으로 이루어져야 한다.

(3) 상수도시설물 중 국내 관련 설계기준 및 지침에 반영되어 있지 않는 시설물에 대한 해석과 설계는 「상수도시설 내진 설계기준 마련을 위한 연구」(환경부, 1999)에 기술된 해석 및 설계방법의 적용도 가능하다.

라. 소 결

상수도시설기준(2010)의 제10장 내진설계편에는 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 가속도 응답스펙트럼, 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 등가정적해석법, 응답변위법, 응답스펙트럼법, 동적해석법 중 시설물별 관련기준에 적합한 방법을 따르도록 기술하고 있다.

4. 상수도시설 내진 설계기준(2000)

한국수자원공사에서 2000년에 시행한 「상수도시설 내진 설계기준」은 상수도시설의 내진설계에 관한 기준을 제시하고 있다.

가. 적용기준

(1) 적용범위

수자원공사에서 시행하는 광역상수도 시설 중 주요 수구조물로서 지진에 따른 시설물 손괴시 응급복구가 불가능하여 장기간 급수중단을 초래할 수 있는 시설에 대해 적용하며 그 대상은 다음과 같다.

(가) 취수시설

취수댐, 취수탑, 취수문, 취수관거, 집수관거, 침사지

(나) 도수 및 송·배수시설

관로, 가압장, 배수지, 배수탑, 조절지, 수관교, 수로터널 입·출구부

(다) 정수 및 배출수처리

착수정, 응집지, 침전지, 여과지, 정수지, 고도정수처리시설(오존, 입상활성탄 여과지), 설비를 수용하고 있는 건물 등

(라) 기타 상기 1)항 내지 3)항 구조물의 기능상 필요한 부속구조물

(2) 적용방법

(가) 건축물

건축물은 건축법 제38조 제2항, 건축법 시행령 제32조, 건축물의 구조기준 등에 관한 규칙 제14조를 적용 또는 준용한다.

(나) 지중구축물

지중구축물은 도로교 표준시방서(설계편, 1996, 건설교통부)의 제 V 내진설계편의 Mononobe - Okabe 공식을 적용한다.

① Mononobe-Okabe식에 적용될 수평지진계수는 다음과 같다.

$$K_h = 2.5 C_a \cdot I$$

㉠ 지진계수(C_a)의 결정은 '라' 항에 따른다.

㉡ 위험도계수(I)의 결정은 '마' 항에 따른다.

② 수직지진계수(K_v)는 특별한 경우를 제외하고는 무시하는 것을 원칙으로 한다.

(다) 관 로

관로공사 설계기준 제4항 「관두께 결정」 항에 따른다.

(3) 동수압

물에 접하는 구조물은 지진시 동수압을 고려해야 하며, 동수압 크기의 계산은 다음에 의한다.

(가) 내부동수압

① 취수탑

㉠ 원통형

$$P(z_1) = A_h \cdot r_o \cdot \pi a_1^2 \cdot I \left(\frac{z_1}{h_1} \right)$$

여기서, $P(z_1)$: z_1 높이에 작용하는 취수탑 내부동수압력 (tf/m)

A_h : 설계 수평가속도계수 ($A_h = C_a \cdot I$)

r_o : 물의 단위체적중량 (tf/m³)

a_1 : 취수탑 내부반경 (m)

h_1 : 취수탑 내부수심 (m)

z_1 : 취수탑 내부저면으로부터 임의 상부지점까지 높이

(m)

I : 제1종 변형 Bessel 함수

$$I \cdot \left(\frac{z_1}{h_1} \right) = \sum_{i=0}^5 \frac{(-1)^i}{\lambda_i} \cdot I^{(i)} \left(\frac{a}{h} \right) \cdot \cos \left(\lambda_i \frac{z}{h} \right)$$

※ $I \left(\frac{z_1}{h_1} \right)$ 는 2.4.2절의 제1종 변형 Bessel 함수표를 적용하며 표시되지 않는 경우는 선형보간하여 사용한다.

㉡ 직사각형

πa_1^2 대신에 직사각형 내부단면적으로 치환하여 적용한다.

② 수 조

㉠ 원통형

동수압 계산은 취수탑의 경우에 따른다.

㉔ 직사각형

$$P(z) = \beta \cdot \frac{7}{8} \cdot r_0 \cdot A_h \cdot \sqrt{h \cdot z}$$

여기서, z : 수면을 원점으로 한 깊이방향의 좌표(m)

h : 구조의 수심(m)

β : 지진가속도 방향의 수로폭(B)과 수심(h)의 비에

따른

보정계수. 단, B/h가 표시되지 않는 경우는 선형

보간

하여 사용한다.

B/h	β
0.5	0.397
1.0	0.670
1.5	0.835
2.0	0.921
3.0	0.983
4.0	0.996
∞	1.000

(나) 외부동수압

① 취수탑

㉕ 원통형

$$P(z_2) = A_h \cdot r_o \cdot \pi a_2^2 \cdot K \left(\frac{z_2}{h_2} \right)$$

여기서, $P(z_2)$: z_2 높이에 작용하는 취수탑 내부동수압력
(tf/m)

a_2 : 취수탑 외부반경(m)

h_2 : 취수탑 외부수심(m)

z_2 : 취수탑 외부저면으로부터 임의 상부지점까지 높이(m)

K : 제2종 변형 Bessel 함수

$$K \cdot \left(\frac{z_2}{h_2} \right) = \sum_{i=0}^5 \frac{(-1)^i}{\lambda_i} \cdot K^{(i)} \left(\frac{a}{h} \right) \cdot \cos \left(\lambda_i \frac{z}{h} \right)$$

※ $K \left(\frac{z_2}{h_2} \right)$ 는 2.4.2절의 제2종 변형 Bessel 함수표를 적용하며
표시되지 않는 경우는 선형보간하여 사용한다.

㉞ 직사각형

πa_2^2 대신에 직사각형 외부단면적으로 치환하여 적용한다.

(4) 지진계수 C_a 결정방법

- (가) 지진재해도 해석결과에 근거하여 <표 2.1>에 기술된 바와 같이 남한을 두 개의 지진구역으로 구분하였다.
- (나) 국지적인 토질조건 및 지질조건과 지표 및 지하 지형이 지반운동에 미치는 영향을 고려하기 위하여 지반을 <표 2.9>에서와 같이 $S_A, S_B, S_C, S_D, S_E, S_F$ 의 6종으로 분류한다.
- (다) 지진계수 C_a 값은 지반종류의 $S_A, S_B, S_C, S_D, S_E, S_F$ 에 대하여 지진구역별로 <표 2.11>에 주어져 있다. 지반종류 S_F 로 분류되는 경우에는 부지고유의 지반특성 평가가 요구되는 지반이므로 이 경우에는 지진재해도 평가 경험이 있는 지반, 지질 및 지진 전문가에 의해 C_a 를 구하는 절차를 따라야 한다.

(5) 위험도계수 I 결정방법

- (가) 개개의 시설을 그 기능의 중요도와 지진에 의한 손상으로 초래될 수 있는 영향범위를 고려하여 <표 2.7>과 같이 내진 I 등급과 내진 II 등급으로 분류한다.
- (나) 목표성능수준은 성능수준별 내진등급에 따라 <표 2.13>과 같이 결정한다.
- (다) 평균재현주기에 따른 위험도계수(I)는 <표 2.14>와 같다.

<표 2.13> 성능수준별 내진등급에 따른 평균재현주기

성능수준 평균재현주기	기능수행	과괴방지
50년	II 등급	-
100년	I 등급	-
500년	-	II 등급
1,000년	-	I 등급

<표 2.14> 위험도계수

재현주기(년)	50	100	500	1,000
위험도계수	0.4	0.57	1.0	1.4

나. Bessel 함수표

(1) 제1종 변형 Bessel 함수표

$$I \cdot \left(\frac{z_1}{h_1} \right) = \sum_{i=0}^5 \frac{(-1)^i}{\lambda_i} \cdot I^{(i)} \left(\frac{a}{h} \right) \cdot \cos \left(\lambda_i \frac{z}{h} \right)$$

a/h \ z/h	0.00	0.10	0.30	0.50	0.70	0.90
0.01	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.9999
0.25	0.9989	0.9986	0.9951	0.9789	0.9080	0.5896
0.50	0.9579	0.9550	0.9295	0.8636	0.7182	0.3882
0.75	0.8572	0.8529	0.8163	0.7335	0.5797	0.2921
1.00	0.7403	0.7358	0.6986	0.6178	0.4770	0.2327
1.25	0.6334	0.6292	0.5951	0.5222	0.3987	0.1916
1.50	0.5440	0.5403	0.5100	0.4459	0.3386	0.1616
1.75	0.4717	0.4684	0.4418	0.3856	0.2921	0.1389
2.00	0.4137	0.4108	0.3873	0.3377	0.2556	0.1215
2.25	0.3669	0.3644	0.3434	0.2994	0.2265	0.1076
2.50	0.3289	0.3266	0.3078	0.2683	0.2030	0.0965
2.75	0.2975	0.2954	0.2784	0.2428	0.1837	0.0874
3.00	0.2714	0.2694	0.2540	0.2215	0.1676	0.0798
3.25	0.2493	0.2475	0.2333	0.2035	0.1541	0.0734
3.50	0.2304	0.2288	0.2157	0.1881	0.1425	0.0680
3.75	0.2141	0.2126	0.2004	0.1749	0.1325	0.0633
4.00	0.1999	0.1985	0.1872	0.1633	0.1238	0.0591
4.25	0.1875	0.1862	0.1756	0.1532	0.1162	0.0555
4.50	0.1765	0.1753	0.1653	0.1443	0.1094	0.0523
4.75	0.1667	0.1655	0.1561	0.1363	0.1034	0.0495
5.00	0.1579	0.1568	0.1479	0.1291	0.0980	0.0469

$$I^{(i)}\left(\frac{a}{h}\right)$$

$a/h \backslash i$	0	1	2	3	4	5
0.01	1.999876	1.998889	1.996920	1.993975	1.990064	1.985200
0.25	1.926210	1.505450	1.087722	0.805948	0.626343	0.507868
0.50	1.738532	0.930976	0.561358	0.393458	0.301611	0.244236
0.75	1.505450	0.626343	0.365722	0.256449	0.197198	0.160122
1.00	1.280545	0.463265	0.269936	0.189875	0.146351	0.119035
1.25	1.087722	0.365722	0.213670	0.150671	0.116320	0.094712
1.50	0.930976	0.301611	0.176743	0.124863	0.096505	0.078637
1.75	0.805948	0.256449	0.150671	0.106594	0.082454	0.067225
2.00	0.706331	0.222977	0.131290	0.092984	0.071973	0.058705
2.25	0.626343	0.197198	0.116320	0.082454	0.063855	0.052101
2.50	0.561358	0.176743	0.104411	0.074066	0.057382	0.046832
2.75	0.507868	0.160122	0.094712	0.067225	0.052101	0.042531
3.00	0.463265	0.146351	0.086660	0.061541	0.047709	0.038953
3.25	0.425610	0.134757	0.079870	0.056743	0.044000	0.035931
3.50	0.393458	0.124863	0.074066	0.052639	0.040826	0.033343
3.75	0.365722	0.116320	0.069047	0.049089	0.038080	0.031104
4.00	0.341572	0.108870	0.064666	0.045986	0.035679	0.029146
4.25	0.320368	0.102315	0.060807	0.043253	0.033563	0.027420
4.50	0.301611	0.096505	0.057382	0.040826	0.031684	0.025887
4.75	0.284905	0.091318	0.054323	0.038658	0.030004	0.024516
5.00	0.269936	0.086660	0.051573	0.036707	0.028494	0.023283

(2) 제2종 변형 Bessel 함수표

$$K \cdot \left(\frac{z_2}{h_2}\right) = \sum_{i=0}^5 \frac{(-1)^i}{\lambda_i} \cdot K^{(i)}\left(\frac{a}{h}\right) \cdot \cos\left(\lambda_i \frac{z}{h}\right)$$

$a/h \backslash z/h$	0.00	0.10	0.30	0.50	0.70	0.90
0.01	0.9998	0.9998	0.9997	0.9996	0.9988	0.9896
0.25	0.8983	0.8962	0.8779	0.8321	0.7296	0.4577
0.50	0.7367	0.7337	0.7083	0.6500	0.5375	0.3010
0.75	0.6081	0.6051	0.5802	0.5247	0.4229	0.2260
1.00	0.5129	0.5101	0.4873	0.4371	0.3475	0.1812
1.25	0.4416	0.4391	0.4184	0.3735	0.2944	0.1512
1.50	0.3868	0.3846	0.3659	0.3255	0.2552	0.1297
1.75	0.3437	0.3416	0.3247	0.2882	0.2250	0.1135
2.00	0.3090	0.3071	0.2916	0.2584	0.2011	0.1009
2.25	0.2805	0.2788	0.2646	0.2341	0.1818	0.0908
2.50	0.2567	0.2551	0.2420	0.2139	0.1658	0.0826
2.75	0.2366	0.2351	0.2230	0.1969	0.1524	0.0757
3.00	0.2194	0.2180	0.2066	0.1824	0.1410	0.0699
3.25	0.2045	0.2032	0.1925	0.1698	0.1311	0.0649
3.50	0.1914	0.1902	0.1802	0.1589	0.1226	0.0605
3.75	0.1800	0.1788	0.1694	0.1492	0.1150	0.0567
4.00	0.1698	0.1687	0.1597	0.1407	0.1084	0.0534
4.25	0.1606	0.1596	0.1511	0.1331	0.1025	0.0504
4.50	0.1525	0.1515	0.1434	0.1262	0.0971	0.0478
4.75	0.1451	0.1441	0.1364	0.1200	0.0923	0.0454
5.00	0.1383	0.1374	0.1301	0.1144	0.0880	0.0432

$$K^{(i)}\left(\frac{a}{h}\right)$$

$a/h \backslash i$	0	1	2	3	4	5
0.01	1.997893	1.985947	1.967330	1.944190	1.917860	1.889279
0.25	1.668310	1.075528	0.771075	0.596870	0.485663	0.408926
0.50	1.322459	0.673280	0.444054	0.330258	0.262630	0.217903
0.75	1.075528	0.485663	0.310307	0.227599	0.179610	0.148302
1.00	0.899948	0.378889	0.238195	0.173507	0.136407	0.112364
1.25	0.771075	0.310307	0.193195	0.140155	0.109941	0.090436
1.50	0.673280	0.262630	0.162466	0.117450	0.092070	0.075666
1.75	0.596870	0.227599	0.140155	0.101210	0.079193	0.065041
2.00	0.535683	0.200786	0.123225	0.088859	0.069475	0.057032
2.25	0.485663	0.179610	0.109941	0.079193	0.061881	0.050779
2.50	0.444054	0.162465	0.099240	0.714230	0.055783	0.045761
2.75	0.408926	0.148302	0.090436	0.065041	0.050779	0.041646
3.00	0.378889	0.136407	0.083066	0.059705	0.046598	0.038209
3.25	0.352922	0.126276	0.076806	0.055179	0.043054	0.035297
3.50	0.330258	0.117545	0.071423	0.052190	0.040010	0.032797
3.75	0.310307	0.109941	0.066745	0.047913	0.037368	0.030627
4.00	0.292614	0.103261	0.062642	0.044953	0.035054	0.028727
4.25	0.276818	0.097345	0.059014	0.042338	0.033009	0.027049
4.50	0.262630	0.092070	0.055783	0.040010	0.031190	0.025556
4.75	0.249819	0.087337	0.052887	0.037925	0.029561	0.024219
5.00	0.238195	0.083066	0.050278	0.036046	0.028093	0.023015

5. 콘크리트구조설계기준(2007)

건설교통부에서 2007년에 개정한 「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 휨 부재, 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

한국시설안전공단에서 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 댐 구조물(취수탑)의 내진성능평가를 수행하는데 참고할 수 있는 요령은 「기존 댐의 내진성능 평가요령」과 「기존 상수도의 내진성능 평가요령」 및 「기존 시설물(교량) 내진성능 평가요령」이다.

「기존 댐의 내진성능 평가요령」은 「댐 설계기준」에 기초하여 적용범위, 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.

「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 댐 구조물(취수탑)의 내진성능평가에 참고할 수 있는 내용은 극히 일부이다.

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

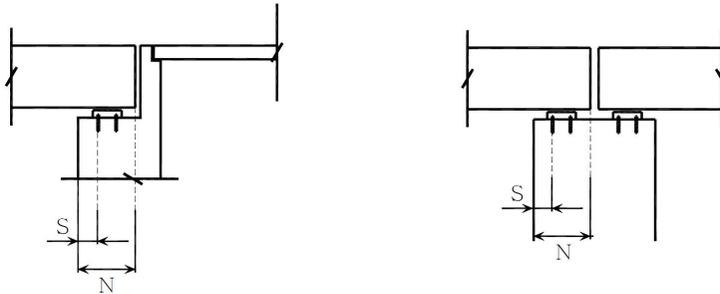
가. 기존 시설물(교량) 내진성능 평가요령(2011)

「기존 시설물(교량) 내진성능 평가요령」(한국시설안전공단, 2011)에서 기존 댐 구조물(취수탑)의 내진성능평가에 활용할 수 있는 내용은 관리교의 낙교에 대한 내용으로 ‘4.3.3 받침지지길이(낙교)’ 항목이다.

「기존 시설물(교량) 내진성능 평가요령」에서는 교각 또는 교대의 소요역량이 공급역량(받침지지길이)을 초과하는지의 여부로 낙교 유무를 판단하고 있다.

(1) 공급역량(받침지지길이)

받침지지길이는 <그림 3.9.2>과 같이 교각 및 교대의 거더 단부끝단까지의 거리를 말하며, 현장조사나 설계도면을 통해 조사한다.



<그림 2.2> 교량의 받침지지길이(N 또는 N_C)

(2) 소요역량

소요역량은 「도로교 설계기준 - 내진설계편」에 규정되어 있는 최소 받침지지길이(N_{min})와 응답변위 중 큰 값으로 한다.

$$N_D = \max [\text{응답변위}, N_{min}]$$

$$N_{min} = (200 + 1.67L + 6.66H)(1 + 0.000125\theta^2)$$

여기서, L : 인접 신축이음부 또는 교량단부까지 거리(m)
 H : 교각의 평균높이(m)
 θ : 교량의 받침선이 교축직각방향과 이루는 사잇각(°)

(3) 내진성능평가

받침지지길이에 대한 내진성능평가는 공급역량(N_C)과 소요역량(N_D)을 비교하여 평가한다.

$N_C / N_D \geq 1.0$ 만 족

$N_C / N_D < 1.0$ 불만족

제 3절 취수탑 내진설계 예제

「내진설계기준연구(Ⅱ)」, 「농업생산기반정비사업계획설계기준」, 「댐 설계기준」, 「콘크리트구조설계기준」, 「상수도시설 내진 설계기준」, 「기존 댐의 내진성능평가 및 향상요령」, 「기존 상수도의 내진성능평가 및 향상요령」 등에서는 부속시설의 내진성 확보를 위하여 필요한 최소 요구조건을 만족시키는 내진설계를 하도록 규정할 뿐 성능수준 및 평가방법에 대한 규정은 명확히 제시되지 않아 부속시설의 내진설계 시, 성능수준 및 평가방법을 선정하는데 어려움이 따른다.

본 절에서는 취수탑 내진설계 예를 통하여 내진설계에 적용된 기준 및 방법의 현황 조사를 실시하였다.

1. 취수탑 설계 예

1. 설계조건

(1) 사용 재료

f_{ck} =	27	MPa	: 콘크리트 설계기준강도
f_y =	400	MPa	: 철근 설계기준항복강도
g =	25,0	kN/m ³	: 콘크리트 단위중량

(2) 지반조건

q_c =	70,0	MPa	: 허용지지력
g_{c1} =	19,0	kN/m ³	: 기초지반 수평단위중량
g_{soil} =	10,0	kN/m ³	: 기초지반 수중단위중량
f =	35,0	degree	: 뒷채울층 내부마찰각
f_b =	30,0	degree	: 기초지반 내부마찰각
C_1 =	0,0	kN/m ²	: 기초지반 점착력
μ =	0,60		: $\mu = 0,600$; $\tan\phi_b = 0,60$, $C_b = 0$: 암과 콘크리트

(3) 치수 및 기타 입력값

p_1 =	75,00	kN/m	: 방압 - <댐설계요령>
q =	3,00	kN/m ³	: 풍속압 - <댐설계요령>
g_w =	10,0	kN/m ³	: 물의 단위중량
H_s =	35,00	m	: 수면 높이 (H, W, L 적용시)
d_s =	100,0	mm	: 저판 철근피복
d_w =	100,0	mm	: 벽체 철근피복

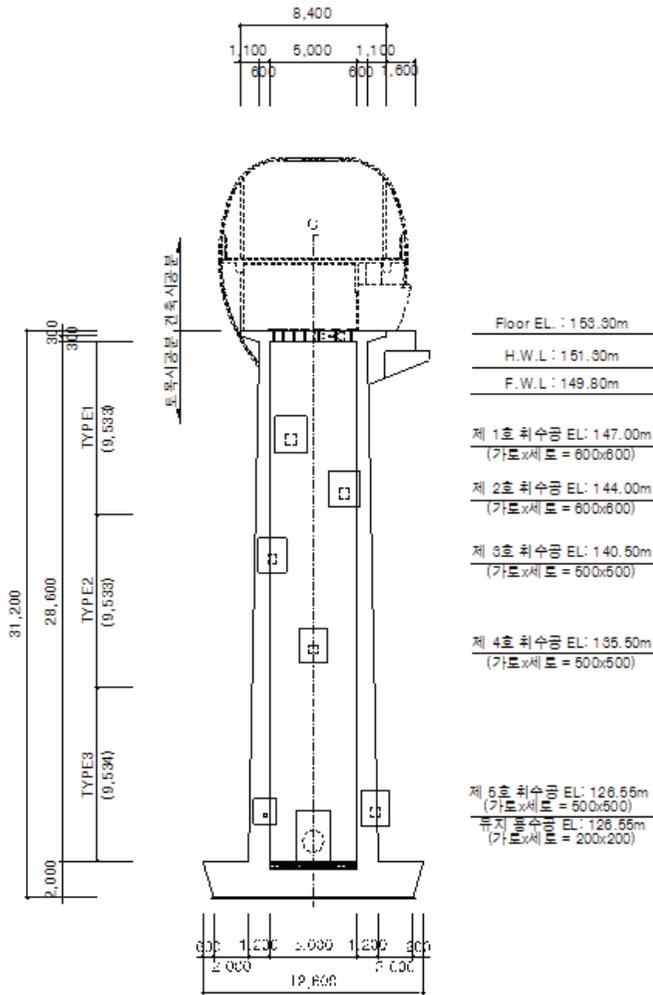
(4) 내진설계 조건

- 지진구역 구분 : I (경상북도)
- 지진구역 계수 : 0,11
- 위험도 계수 : 1000년 (1,4)
- 가속도 계수 : $0,11 \times 1,4 = 0,154$
- 지반계수 : 연암지반 (II), 적용계수 : 1,2

(5) 참고문헌

- 상수도 시설 기준
- 댐 설계기준
- 콘크리트 구조설계 기준
- 상수도 시설 내진설계기준
- 도로교 설계기준 해설

2. 단면가정



3. 하중산정

3.1 고정하중

- 1) 요소하중 : 구조해석 Program에서 자동으로 콘크리트 자중을 고려함.
- 2) 건축 하중 = 744,500 kN (총재하하중)
- 3) 연락교량 고정하중 반력값 = 171.25 kN/EA
- 4) 권양기 하중 = 2,00 kN/EA

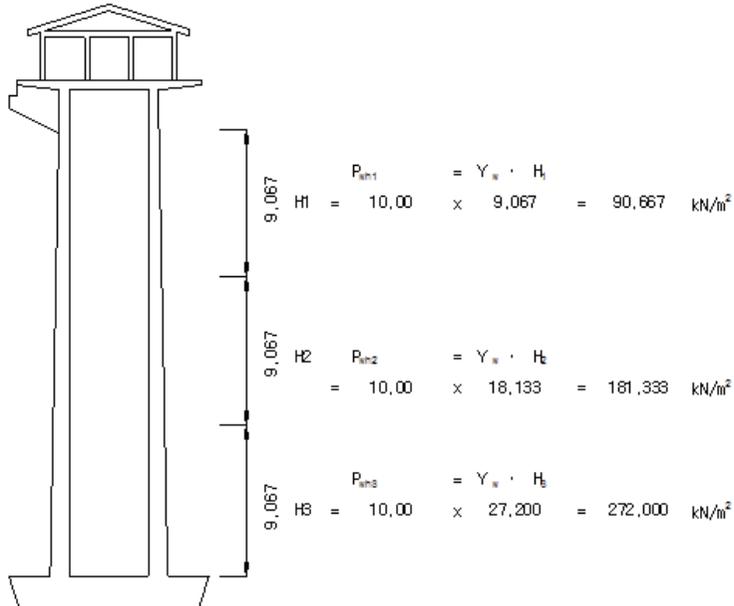
3.2 활하중

- 1) 조작실 보도하중 = 5,000 kN/m²
- 2) 조작실 권양하중 = 12,400 kN - 제1취수문 16,000 kN - 제2취수문
13,700 kN - 제3취수문 17,700 kN - 제4취수문
25,300 kN - 제5취수문
8,100 kN - 유지용수수문 111,000 kN - 조절수문
- 3) 연락교량 활하중 반력값 = 60,000 kN
- 4) 건축물 활하중 = 451,000 kN (총재하하중)

3.3 수압

3.3.1 홍수위시

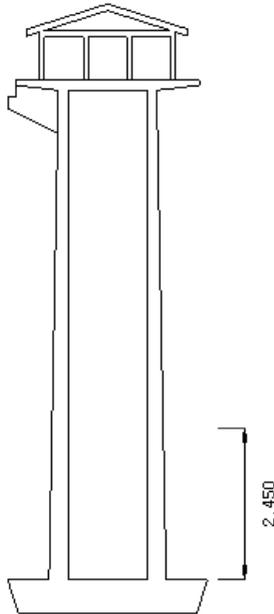
H,W,L = 27,200 m



3.3 수압

3.3.2 사수위시

H, W, L = 2,450 m



$$P_{int} = Y_w \cdot HI$$

$$HI = 10,00 \times 2,450 = 24,500 \text{ kN/m}^2$$

3.4 동수압 (상수도시설 내진 설계기준)

1) 동수압 - 홍수위시

$$P(z_2) = A_w \cdot r_0 \cdot \pi \cdot (a_2)^2 \cdot K(z_2/h_2)$$

$$= 0,154 \times 10 \times 3,14 \times 3,400^2 \times 0,949$$

$$= 53,076 \text{ kN/m}$$

$P(z_2)$: z_2 의 높이에 작용하는 취수탑 외부 동수압력 (kN/m)

A_w : 설계수평가속도 계수 ($A_w = C_a \cdot I$)

r_0 : 물의 단위체적중량 (kN/m^3)

a_2 : 취수탑 외부반경 (m)

h_2 : 취수탑 외부수심 (m)

z_2 : 취수탑 외부저면으로부터 임의의 상부지점까지 높이 (m)

K : 제 2종 변형 bessel 함수

$$a/h = 0,13 \quad z/h = 0,00$$

$$K(z_2/h_2) = 0,949$$

2) 동수압- 사수위시

$$\begin{aligned}
 P(z_2) &= A_n \cdot r_0 \cdot \pi \cdot (a_2)^2 \cdot K(z_2/h_2) \\
 &= 0,154 \times 10 \times 3,14 \times 3,400^2 \times 0,416 \\
 &= 23,266 \text{ kN/m}
 \end{aligned}$$

$P(z_2)$: z_2 의 높이에 작용하는 취수탑 외부 동수압력 (kN/m)

A_n : 설계수평가속도 계수 ($A_n=C_d \cdot 1$)

r_0 : 물의 단위체적중량 (kN/m³)

a_2 : 취수탑 외부반경 (m)

h_2 : 취수탑 외부수심 (m)

z_2 : 취수탑 외부저면으로부터 임의의 상부지점까지 높이 (m)

K : 제 2종 변형 bessel 함수

$$a/h = 1,39 \quad z/h = 0,00$$

$$K(z_2/h_2) = 0,416$$

3.4 풍하중

- 설계계요령 (Page 1-12)

$$W_n = A \cdot q \text{ (kN)}$$

A : 바람을 받는 면적 (m²) q : 풍속압 (3,0 kN/m²)

- 도로교 설계기준 해설 (Page 48)

< 하부구조에 작용하는 풍하중 (Mpa)>

구체의 단면형상	풍하중	
원형 및 트랙형	활하중 재하시	$0,75 \times 10^{-5}$
	활하중 비재하시	$1,50 \times 10^{-5}$
각 형	활하중 재하시	$1,50 \times 10^{-5}$
	활하중 비재하시	$3,00 \times 10^{-5}$

1) 건축구조물의 풍하중에 의한 반력

: 건축물 풍하중 = 100,200 kN (총재하하중)

2) 취수탑 상부 슬래브 및 벽체에 작용하는 풍하중 산정

: 풍하중 재하깊이는 안전측을 고려하여 사수위 (D,S,L)를 고려하여 적용한다.

D,S,L (사수위) : 0 m (사공시를 고려하여 풍하중을 최대로 고려)

· 상부슬래브(각형 활하중 비재하시 적용) :

$$\begin{aligned}
 &3,000 \text{ kN/m}^2 \times (0,300 / 2 + 0,300) \\
 &= 1,350 \text{ kN/m}
 \end{aligned}$$

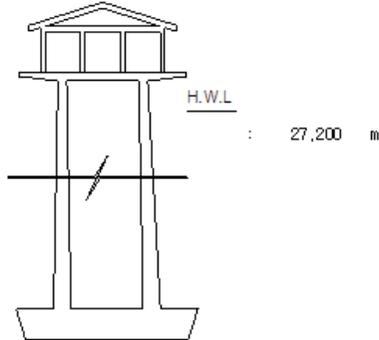
· 벽 체 (원형 및 트랙형 활하중 비재하시 적용) : 1,500 kN/m²

위의 두가지 풍하중 산정 방법 중 구체의 단면형상을 고려한 하중산정이 타당하다고 사료되는 본 설계에 적용하는 하중의 크기는 원형 및 트랙형의 단면형상의 활하중 비재하시의 풍하중으로 적용한다.

3.5 방압

방압 작용면 높이(H,W,L 적용) = 27,200 m

방압 적용하중 75,000 kN/m (얼음두께 : 0.75 m, 기온상승률 2.8℃/hr)



3.6 유목충돌하중

: 유송물에 의한 하중은 홍수위에서 발생하는 것으로 가정(도로교 설계기준 해설(2008) P63)

$$P = 0.1 \cdot W \cdot v \text{ (kN)}$$

P : 충돌력(kN) W : 유송물의 중량(kN) - 10 kN 으로 가정한다.

v : 표면유속(m/s)

: 유목충돌은 철류시 발생하는 부유물에 의한 충돌하중으로 유속 및 유목의 중량은 현장현황을 고려하여 선정한다.

$$P = 0.10 \times 10,00 \times 20,00 = 20,000 \text{ kN}$$

3.7 지진하중

: 현장여건을 고려하여 지역구분계수, 위험도, 지반계수를 적용.

4. 하중재하

4.1 하중재하

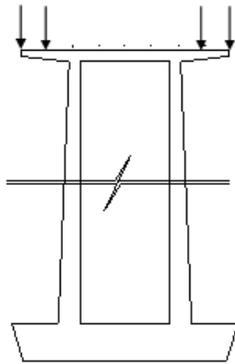
1) 고정하중

건축구조물 고정하중은 조작대 상단에 집중하중 재하

$$\text{연락교량 반력값} : 171,249 \text{ kN} / 0,553 \text{ m}^2 = 309,953 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{원양기 하중} : 2,000 \text{ kN/EA} \quad 0,154 \text{ m}^2 = 12,970 \text{ kN/m}^2$$

건축물 고정하중 : 744,500 kN/m²



2) 활하중

조작대 보도하중 : 5,000 kN/m²

건축구조물 활하중은 조작대 상단에 집중하중 재하

원양기 인양하중 :

$$\text{- 제1취수문} \quad 12,400 \text{ kN/EA} \quad 12,400 \text{ kN} / 0,154 \text{ m}^2 = 80,415 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{- 제2취수문} \quad 16,000 \text{ kN/EA} \quad 16,000 \text{ kN} / 0,154 \text{ m}^2 = 103,761 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{- 제3취수문} \quad 13,700 \text{ kN/EA} \quad 13,700 \text{ kN} / 0,154 \text{ m}^2 = 88,846 \text{ kN/m}^2$$

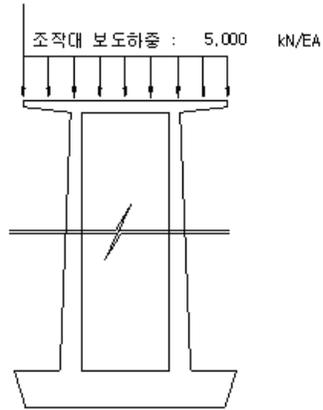
$$\text{- 제4취수문} \quad 17,700 \text{ kN/EA} \quad 17,700 \text{ kN} / 0,154 \text{ m}^2 = 114,786 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{- 제5취수문} \quad 25,300 \text{ kN/EA} \quad 25,300 \text{ kN} / 0,154 \text{ m}^2 = 164,073 \text{ kN/m}^2$$

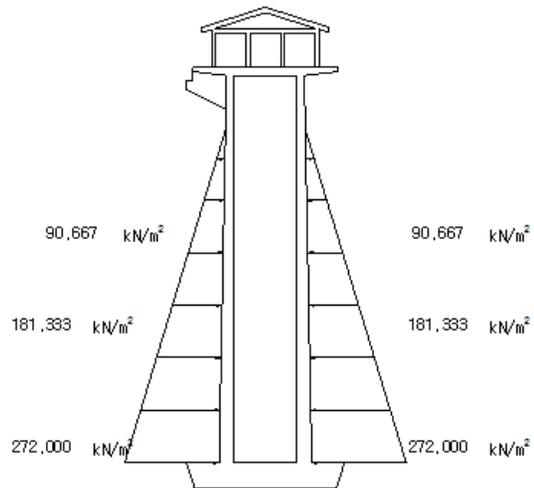
$$\text{- 유지용수수문} \quad 8,100 \text{ kN/EA} \quad 8,100 \text{ kN} / 0,154 \text{ m}^2 = 52,529 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{- 조결수문} \quad 111,000 \text{ kN/EA} \quad 111,000 \text{ kN} / 0,154 \text{ m}^2 = 719,844 \text{ kN/m}^2$$

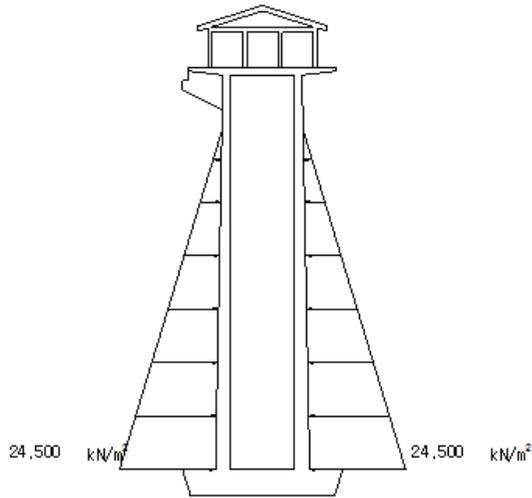
$$\text{연락교량 활하중 반력값} : 60,000 \text{ kN} / 0,553 \text{ m}^2 = 108,597 \text{ kN/m}^2$$



3) 수압 (홍수위시)

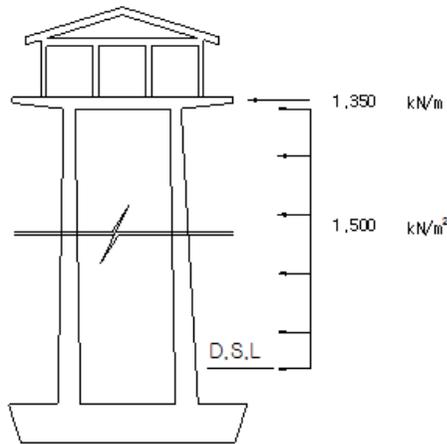


4) 수압 (사수위시)

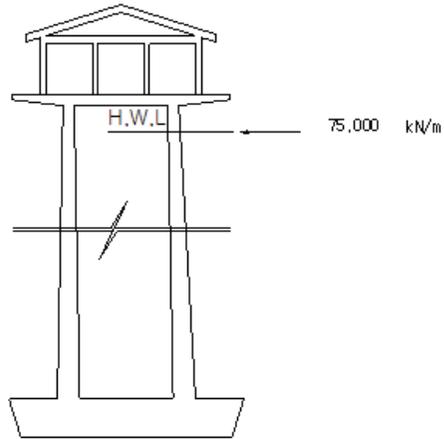


4) 풍하중

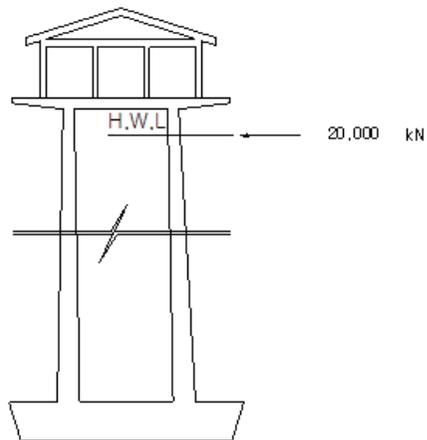
- : 교축 및 교축직각방향 재하
- : 건축구조물 풍하중은 조작대 상단에 집중하중 재하



5) 받 압



6) 유목 충돌하중



4.2 하중조합

1) 단면검토 하중조합

하중조합	사하중	활하중	수 입		풍하중	빙압	충돌하중	비고
			홍수위	사수위				
1	1,4	0,0	1,4	0,0	0,0	0,0	0,0	홍수위
2	1,4	0,0	0,0	1,4	0,0	0,0	0,0	사수위
3	1,2	1,6	0,0	0,0	1,3	0,0	0,0	시공시
4	1,2	1,6	1,6	0,0	0,0	0,0	0,0	홍수위
5	1,2	1,6	0,0	1,6	0,0	0,0	0,0	사수위
6	1,2	0,0	1,6	0,0	0,0	0,0	0,0	홍수위
7	1,2	0,0	0,0	1,6	0,0	0,0	0,0	사수위
8	1,2	1,0	1,6	0,0	1,3	0,0	0,0	홍수위
9	1,2	1,0	0,0	1,6	1,3	0,0	0,0	사수위
10	1,2	1,0	1,6	0,0	1,3	0,0	0,0	홍수위
11	1,2	1,0	0,0	1,6	1,3	0,0	0,0	사수위
12	1,2	0,0	1,6	0,0	1,3	1,2	0,0	홍수위
13	1,2	0,0	0,0	1,6	1,3	1,2	0,0	사수위
14	0,9	0,0	1,6	0,0	1,3	0,0	1,0	홍수위
15	0,9	0,0	0,0	1,6	1,3	0,0	1,0	사수위

2) 사용성 검토 조합

하중조합	사하중	활하중	수 입		풍하중	빙압	충돌하중	비고
			홍수위	사수위				
1	1,0	1,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	시공시
2	1,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	홍수위
3	1,0	1,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	사수위
4	1,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	홍수위
5	1,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	사수위
6	1,0	1,0	1,0	0,0	1,0	0,0	0,0	홍수위
7	1,0	1,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	사수위
8	1,0	1,0	1,0	0,0	1,0	0,0	0,0	홍수위
9	1,0	1,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	사수위
10	1,0	0,0	1,0	0,0	1,0	1,0	0,0	홍수위
11	1,0	0,0	0,0	1,0	1,0	1,0	0,0	사수위
12	1,0	0,0	1,0	0,0	1,0	0,0	1,0	홍수위
13	1,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	1,0	사수위

3) 지진시 하중조합

하중조합	사하중	활하중	수 입		동수압	빙압	지진하중	비고
			홍수위	사수위				
1	1,2	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	시공시
2	0,9	0,0	1,6	0,0	1,0	0,0	1,0	홍수위
3	1,0	0,0	1,0	0,0	1,0	0,0	1,0	사수위
4	1,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	1,0	사수위

5. 구조해석

안정검토용

구 분	하중			하중조합	비 고
	축력 (kN)	수평력 (kN)	모멘트 (kN·m)		
축력최대	15189,243	0,000	7545,364	s3	사수위
모멘트최대	12481,619	444,551	9789,124	s1	시공시
지진시	18684,713	3402,317	77247,831		지진시

단면검토용

구 분	하중			하중조합	비 고
	축력 (kN)	수평력 (kN)	모멘트 (kN·m)		
축력최대	19820,095	0,000	4259,605	c1	홍수위
모멘트최대	18639,905	459,500	12704,283	c3	시공시
지진시	18684,713	3402,317	77247,831		지진시

6. 단면 검토

□ 벽체 설계

구 분		극한모멘트 (kN, m)	극한전단력 (kN, m)	사용하중 모멘트 (kN, m)
벽체 1	x방향	48,295	106,167	48,295
	y방향	102,720	108,960	87,013
벽체 2	x방향	13,865	16,301	13,865
	y방향	87,982	10,017	87,982
벽체 3	x방향	78,367	20,228	78,361
	y방향	435,371	855,832	435,371

		M	φM	필요철근량	사용철근량	철근간격	허용철근 간격
벽체 1	x방향	48,295	159,648	285,51	19 × 300 = 955,0	300,000	510,79
	y방향	102,720	214,423	610,74	22 × 300 = 1290,3	300,000	325,91
벽체 2	x방향	13,865	156,257	58,30	16 × 300 = 662,0	300,000	2024,41
	y방향	87,982	224,588	371,39	19 × 300 = 955,0	300,000	344,73
벽체 3	x방향	78,367	246,289	209,89	16 × 300 = 662,0	300,000	478,77
	y방향	435,371	1204,677	1217,45	29 × 300 = 3431,7	300,000	374,45

·
·
·

7. 안정성 검토

(1) 전도에 대한 안정검토

항 목	Mr (kN·m)	Mb(kN·m)	V(kN)	S, F	e(m)	허용편심(m)	비고
축력최대	24417,491	628,780	4283,770	38,833	0,447	1,900	OK
모멘트최대	9177,769	889,852	1610,135	10,314	0,853	1,900	OK
지진시	12124,239	7004,372	2127,059	1,731	3,593	3,800	OK

- 직접기초에 작용하는 하중의 합력이 작용하는 위치는 평상시에는 바닥판 중심으로부터 바닥판폭의 1/6 이내, 지진시와 폭풍시에는 바닥판 폭의 1/30이내에 있어야 한다. [도로교설계기준 5.6.2]
- 평상시 전도에 대한 저항모멘트는 전도모멘트의 2.0배 이상이어야 한다.
- 지진시 전도에 대한 저항모멘트는 전도모멘트의 1.5배 이상이어야 한다.

(2) 활동에 대한 안정검토

항 목	V(kN)	Hu(kN)	H(kN)	S, F	허용안전율	비고
축력최대	4283,770	2570,262	0,000	∞	1,500	OK
모멘트최대	1610,135	966,081	37,046	26,078	1,500	OK
지진시	2127,059	1276,236	283,526	4,501	1,200	OK

- 직접기초 바닥면에서의 전단지반반력은 바닥면 아래 기초지반의 허용전단저항력 이내에 있어야 한다. [도로교설계기준 5.6.2]
- 안전율 — 상시(1.5) 지진시(1.2)

$$H_u = C_b A + V \tan \phi_b$$

- Hu : 기초저면과 지반과의 사이에 작용하는 전단 저항력(kN)
- Cb : 기초저면과 지반과의 부착력(kN/m²)
- φb : 기초저면과 지반과의 마찰각(degree)
- A' : 기초저면의 유효재하면적(m²)
- V : 기초저면에 작용하는 연직하중(kN), 다만 부력을 뺀 값으로 한다.

tanφb = 암과 콘크리트 일경우 tanφb = 0,600 Cb = 0,000

(3) 지지력에 대한 안정검토

항 목	V(kN)	M(kN)	e(m)	Qmax(kPa)	Qmin(kPa)	Qa(kPa)	비고
축력최대	4283,770	23788,710	0,447	464,131	287,408	2040,000	OK
모멘트최대	1610,135	8287,917	0,853	204,624	77,856	2040,000	OK
지진시	2127,059	5119,866	3,593	673,008	0,000	3060,000	OK

- 직접기초 바닥면에서의 연직지반반력은 바닥아래 지지지반의 허용연직지지력 이내에 있어야 한다. [도로교설계기준 5.6.2]

B : 기초의 폭원 (11,400m), M = Mr-Mb, e = B/2 - M/V

- 하중의 작용위치가 저면 핵 내에 있는 경우 (사다리꼴 분포)

$$Q_{max} = \frac{V}{B} \left(1 + \frac{6e}{B}\right), Q_{min} = \frac{V}{B} \left(1 - \frac{6e}{B}\right)$$

- 하중의 작용위치가 저면 핵 외에 있는 경우 (삼각형 분포)

$$Q_{max} = \frac{2V}{Lx}$$

x : 3(B/2-e) L : 기초길이

2. 소결

취수탑의 설계 예제는 지진구역 I 에 건설된 내진특등급 댐의 부속시설로서, 가정된 그림에 보인 바와 같은 철근콘크리트 원통형 축대칭 구조물이다. 취수탑의 내진등급은 댐 본체의 내진등급과 동일하게 설계되어, 「상수도시설기준」의 내진 I 등급(1,000년 재현주기, 저수지 제체의 내진특등급과 동일한 재현주기 임)으로 분류하였으며, 성능수준도 「상수도시설기준」을 적용하여 붕괴방지수준만을 고려하였다.

취수탑의 벽체는 기초상단에서 고정지지되는 캔틸레버 보로 해석하였고, 지진력을 지진계수에 의한 하중의 관성력과 동수압으로 대치하고 정역학적 방법으로 해석하는 진도법을 따랐다. 구조해석용 프로그램의 Flate 요소를 이용하여 선형탄성해석 수행하였다.

단면검토는 기둥벽체, 조작대, 기초에 대하여 휨강도와 전단강도를 검토하였고, 외적안정성 검토를 수행하였다.

제 4절 고찰

「댐 설계기준」, 「농업생산기반정비사업계획설계기준」 「콘크리트구조설계기준」, 「상수도시설 내진 설계기준」, 「기존 댐의 내진성능평가 및 향상요령」, 「기존 상수도의 내진성능평가 및 향상요령」 등에서는 부속시설의 내진성 확보를 위하여 필요한 최소 요구조건을 만족시키는 내진설계를 하도록 규정할 뿐, 성능수준 및 평가방법에 대한 규정은 명확히 제시되지 않아 부속시설의 내진설계 시, 성능수준 및 평가방법을 선정하는데 어려움이 따른다.

취수탑의 내진설계 방법은 구조물의 구조특성, 중요도, 주변지반의 특성 등을 고려하여 적합한 지진해석모델과 지진응답해석방법에 의해 결정된 지진력에 대하여 충분한 내력을 갖도록 하여야 한다.

설계 예를 통한 검토 결과, 취수탑의 내진성능목표는 댐 본체의 내진성능목표와 동일하거나 한 단계 낮은 목표로 설계되는 등 설계자에 따라 다른 실정이며, 내진성능수준은 붕괴방지수준을 적용하고 있다. 구조해석은 진도법에 따라 수행하고 있고, 이때 동수압을 산정시 설계자에 따라 산정 방법과 적용이 상이한 실정이며, 선형해석방법을 적용하고 있다.

수위 조건도 설계자에 따라 취수탑의 만수위시, 공수위시 및 중간정도 찬 경우에 대하여 다양하게 적용되고 있고, 해석모델은 구조특성을 고려하여 평면요소 및 고체요소를 적용할 수 있으나, 주로 평면요소를 적용하고 있다. 또한 기초면의 경계조건은 보다 정밀한 해석을 원할 경우에는 기초의 등가강성을 산정하여 적용할 수 있으나, 획일적인 고정으로 가정하여 해석을 수행하고 있다.

하중계수 및 하중조합은 구조물의 특성에 맞게 고정하중 및 지진하중(지진시 동수압 및 토압 포함)을 고려하여 ‘콘크리트구조설계기준(2007)’에 제시된 하중계수 및 하중조합을 적용하고 있으며, 강도설계법에 따라 부재의 단면력을 검토하며, 기초 및 기초 지반도 부재와 동일한 방법을 적용하고 있다.

제3장 취수탑의 내진성능평가

제 1절 일반사항

댐설계기준(2011)에서는 제체와 부속시설이 모두 동일한 지진에 대하여 내진성능을 확보하도록 규정하고 있으며, 해석방법은 정역학적 방법을 기본으로 하고 있으며, 동역학적 방법은 100m 이상의 높은 댐과 특수한 구조의 댐에 대해 보조적 수단으로만 사용하도록 규정하고 있다.

본 과업에서는 해석방법에 따른 취수탑의 내진성능 평가결과를 분석하고자 한다. 이를 위해 정역학적 해석법과 동역학적 해석법(다중모드 해석법, 시간이력해석법)을 모두 적용하여 내진성능평가를 수행하고, 콘크리트의 비선형 특성을 파악하기 위해 비선형 시간이력해석을 추가로 수행하였다. 이때, 해석모델은 보편적으로 많이 사용되는 원형단면을 갖는 취수탑으로 하였다.

제 2절 원형단면을 갖는 취수탑

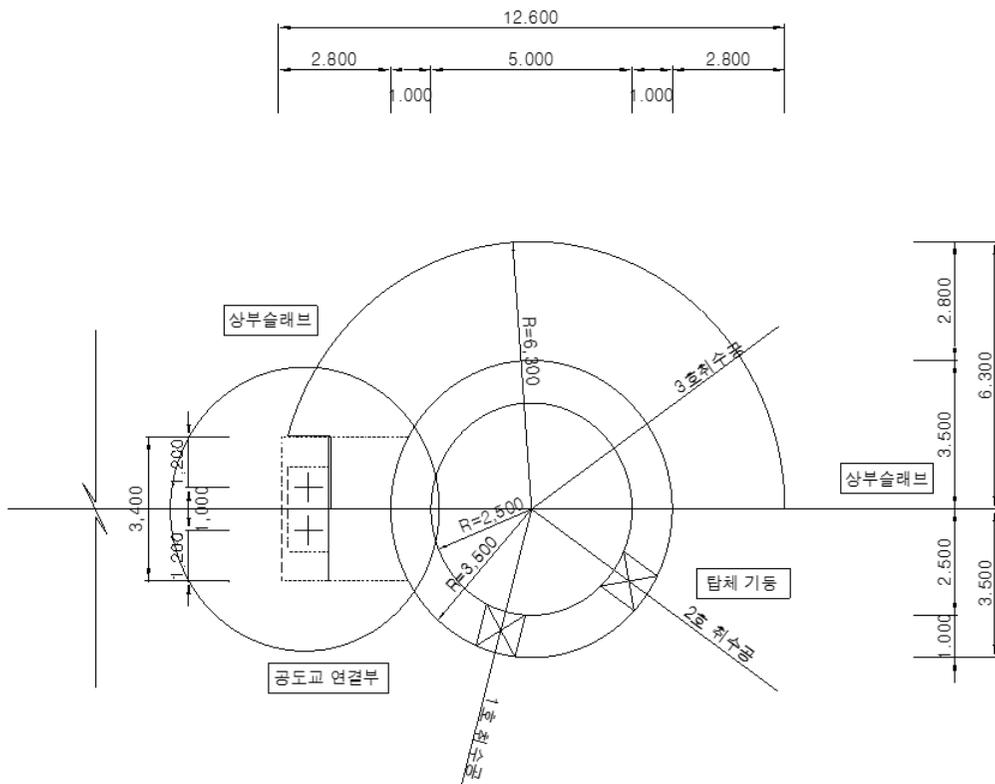
1. 취수탑 제원

가. 일반사항

- (1) 구조형식 : 철근콘크리트 구조
- (2) 단면형상 : 원형단면
- (3) 기초형식 : 직접기초
- (4) 소재지 : 경남-○○

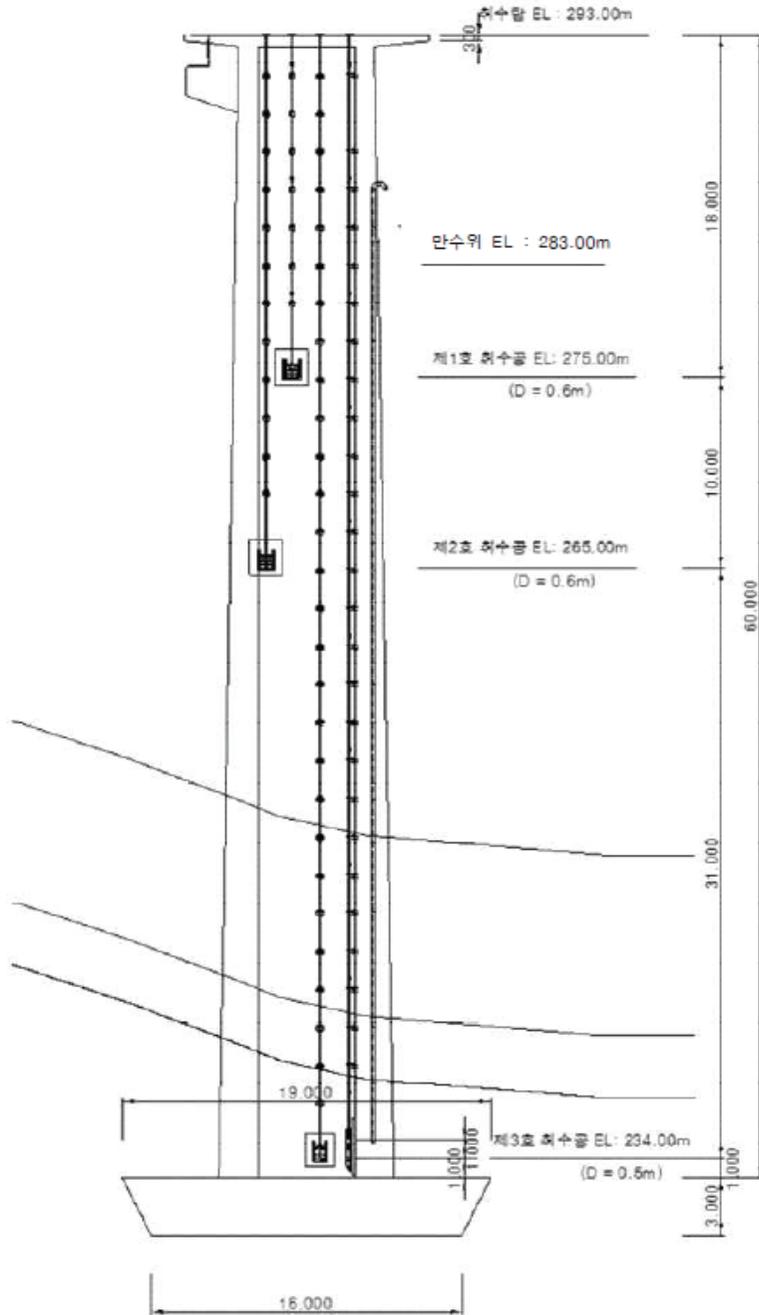
나. 구조물 일반도

- (1) 상부슬래브



<그림 3.1> 상부슬래브 평면도

(2) 단면도



<그림 3.2> 단면도

다. 재료 물성 및 지반 조건

(1) 콘크리트

(가) 설계강도 : $f_{ck} = 27 \text{ MPa}$

(나) 탄성계수 : $E_c = 8,500 \sqrt[3]{f_{cu}} = 26,702 \text{ MPa}$

$$f_{cu} = f_{ck} + \Delta f = 27 + 4 = 31 \text{ MPa}$$

(다) 포와송비 : $\nu = 0.167$

(라) 단위중량 : $\gamma_c = 24.5 \text{ kN/m}^3$

(2) 철근

(가) 종류 : SD400 이형철근

(나) 항복강도 : $f_y = 400 \text{ MPa}$

(다) 탄성계수 : $E_s = 2.0 \times 10^5 \text{ MPa}$

(3) 지반조건

(가) 습윤단위중량 : $\gamma_t = 19.0 \text{ kN/m}^3$

(나) 내부 마찰각 : $\phi = 30^\circ$

(다) 정지토압계수 : $K_o = 1 - \sin \phi = 0.50$

(라) 적용N치(평균) : $N = 50$

라. 하중조합

CASE 1 : 1.0D+1.0E

여기서, D : 고정하중, E : 지진하중(동수압 포함)

2. 정역학적 해석법(선형)

가. 작용하중

(1) 고정하중, D (z_i 는 기초 상단으로부터의 높이)

(가) 건축하중 : $W_1 = 2,131.60 kN$, $z_1 = 63.80 m$

(나) 난간하중 : $W_2 = 37.70 kN$, $z_2 = 60.50 m$

(다) 받침하중 : $W_3 = 1,302.40 kN$, $z_3 = 58.75 m$

(라) 상판하중 : $W_4 = 1,388.33 kN$, $z_4 = 59.75 m$

(마) 벽체하중 : $W_5 = 45,719.60 kN$, $z_5 = 26.40 m$

(바) 취수탑 고정하중 : $W = \sum_{i=1}^5 W_i = 50,579.63 kN$

2) 지진하중, E (상수도시설 내진설계 기준마련을 위한 연구)

(가) 지진구역 : I 구역

(나) 위험도계수 : $I=1.4$ (재현주기 1,000년)

(다) 지반분류 : 보통암지반, S_B

(라) 지진계수

▸ $C_a = 0.11$

▸ $C_v = 0.11$

(마) 지표면 수평가속도계수, A_h

▸ $A_h = I \times C_a = 1.4 \times 0.11 = 0.154$

(바) 통제주기

▸ $T_s = \frac{C_v}{2.5 C_a} = \frac{0.11}{2.5 \times 0.11} = 0.4 \text{ sec}$

▸ $T_0 = 0.2 T_s = 0.2 \times 0.4 = 0.08 \text{ sec}$

(사) 구조물의 고유주기, T

▸ 건축하중을 고려한 취수탑의 등가콘크리트 원통형 높이, l

$$l = 60 + \frac{2,131.60}{\frac{\pi(7^2 - 5^2)}{4} \times 24.5} = 64.6 m$$

▶ 공수위시

$$T = \frac{\pi l^2}{a} \sqrt{\frac{2 \gamma_c}{3 g E} \left\{ 1 + 12 \left(\frac{a}{l} \right)^2 \right\}}$$

$$= \frac{\pi \times 64.6^2}{4.0} \sqrt{\frac{2 \times 24.5}{3 \times 9.8 \times 2.67 \times 10^7} \left\{ 1 + 12 \left(\frac{4.0}{64.6} \right)^2 \right\}} = 0.837 \text{ sec}$$

여기서, a : 수조의 외측반경 (m)

γ_c : 벽체 콘크리트의 단위중량 (kN/m³)

E_c : 벽체 콘크리트의 탄성계수 (kN/m²)

g : 중력가속도 (9.8m/sec²)

▶ 만수위시

$$T = \frac{\pi l^2}{a} \sqrt{\frac{2 q'}{3 g E} \left\{ 1 + 12 \left(\frac{a}{l} \right)^2 \right\}}$$

$$= \frac{\pi \times 64.6^2}{4.0} \sqrt{\frac{2 \times 37.78}{3 \times 9.8 \times 2.67 \times 10^7} \left\{ 1 + 12 \left(\frac{4.0}{64.6} \right)^2 \right\}} = 1.04 \text{ sec}$$

여 기 서 ,

$$q' = \gamma_c + \frac{\gamma_w a}{2 t} \cdot \frac{\tanh\left(\frac{\sqrt{3} a}{l}\right)}{\frac{\sqrt{3} a}{l}}$$

$$= 24.5 + \frac{10 \times 4.0}{2 \times 1.5} \times \frac{\tanh\left(\frac{\sqrt{3} \times 4.0}{64.6}\right)}{\frac{\sqrt{3} \times 4.0}{64.6}} = 37.78 \text{ kN/m}^3$$

t (수조의 측벽두께) : (1.0+2.0)/2=1.5m

γ_w (물의 단위중량) : 10kN/m³

(아) 설계지진력

① 관성력에 의한 수평지진력

▶ 밀면 전단력, V

$$V = \frac{C_v \cdot I}{T} \cdot W \leq 2.5 \cdot C_a \cdot I \cdot W$$

$$\frac{C_v \cdot I}{T} \cdot W = \frac{0.11 \times 1.4}{1.04} \times 50,579.63 = 7,489.67 \text{ kN}$$

$$2.5 \cdot C_a \cdot I \cdot W = 2.5 \times 0.11 \times 1.4 \times 50,579.63 = 19,473.16 \text{ kN}$$

$$\therefore V = 7,489.67 \text{ kN}$$

- ▶ 최상층에 작용시킬 수평지진력, F_t

$$F_t = 0.07 T V \quad (\text{단, } T \leq 0.7 \text{ sec 인 경우, } F_t = 0)$$

$$F_t = 0 \quad (\because T \leq 0.7 \text{ sec})$$

$$F_t = 0.07 T V = 0.07 \times 1.04 \times 7,489.67 = 545.25 \text{ kN}$$

- ▶ 구조물 높이에 따라 분배시킬 수평지진력, F_x

$$F_x = \frac{(V - F_t) W_x h_x}{\sum W_x h_x} \quad (W_x, h_x : \text{각층의 중량과 높이})$$

<표 3.1> 구조물 높이에 따라 분배된 수평지진력, F_x

구 분	W_x (kN)	h_x (m)	$W_x h_x$ (kN·m)	F_x (kN)
건축하중	2,131.60	63.80	135,996.08	627.63
난간하중	37.70	60.50	2,280.85	10.53
받침하중	1,302.40	58.75	76,516.00	353.12
상판하중	1,388.33	59.75	82,952.72	382.83
벽체하중	45,719.60	26.40	1,206,997.44	5,570.32
Σ	50,579.63	-	1,504,743.09	6,944.43

- ② 수심별 지진시 동수압 (만수위시 고려, Bessel 함수표 이용)

- ▶ 내부동수압 ($h_1 = 50.0 \text{ m}$, $a_1 = 2.5 \text{ m}$)

$$\frac{a_1}{h_1} = \frac{2.5}{50.0} = 0.05$$

$$P_1(z_1) = A_h \cdot \gamma_w \cdot \pi \cdot a_1^2 \cdot I\left(\frac{z_1}{h_1}\right)$$

$$= 0.154 \times 10 \times \pi \times 2.5^2 \times I\left(\frac{z_1}{50.0}\right) = 30.238 \times I\left(\frac{z_1}{50.0}\right)$$

③ 외부동수압 ($h_2 = 50.0\text{ m}$, $a_2 = 4.0\text{ m}$)

$$\frac{a_2}{h_2} = \frac{4.0}{50.0} = 0.08$$

$$P_2(z_2) = A_h \cdot \gamma_w \cdot \pi \cdot a_2^2 \cdot K\left(\frac{z_2}{h_2}\right)$$

$$= 0.154 \times 10 \times \pi \times 4.0^2 \times K\left(\frac{z_2}{50.0}\right) = 77.409 \times K\left(\frac{z_2}{50.0}\right)$$

<표 3.2> 수심방향 동수압 분포

z/h	취수탑 내부 ($h_1 = 50.0\text{ m}$)			취수탑 외부 ($h_2 = 50.0\text{ m}$)		
	z_1 (m)	$I\left(\frac{z_1}{h_1}\right)$	$P_1(z_1)$ (kN/m)	z_2 (m)	$K\left(\frac{z_2}{h_2}\right)$	$P_2(z_2)$ (kN/m)
0.0	0.00	0.9998	30.232	0.00	0.9702	75.102
0.1	5.00	0.9998	30.231	5.00	0.9696	75.054
0.3	15.00	0.9992	30.213	15.00	0.9642	74.636
0.5	25.00	0.9965	30.132	25.00	0.9507	73.596
0.7	35.00	0.9847	29.774	35.00	0.9203	71.238
0.9	45.00	0.9315	28.167	45.00	0.8345	64.595
1.0	50.00	-	0.000	50.00	-	0.000

나. 구조해석

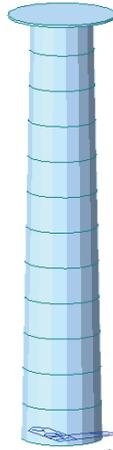
(1) 일반사항

(가) 취수탑의 벽체는 기초상단에서 고정지지되는 캔틸레버 보로 해석

(나) 지진시 관성력과 동수압에 의한 횡력에 의한 정적해석 수행

(다) 벽체에 대해 단면력 산정

(라) 구조해석용 프로그램의 보요소를 이용하여 선형탄성해석 수행

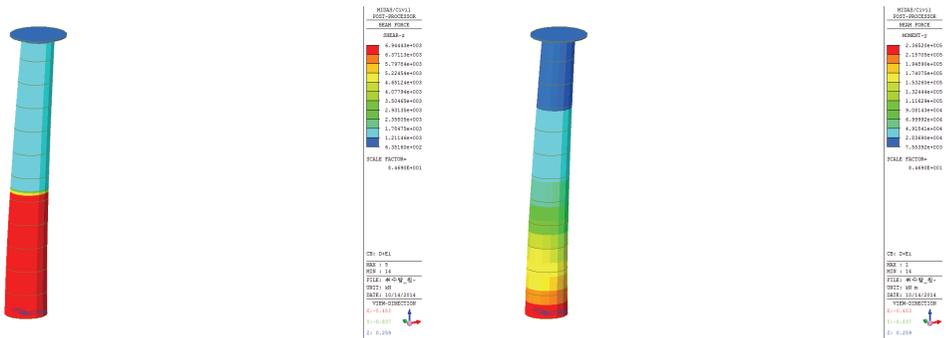


<그림 3.3> 해석모델

(2) 구조해석 결과

<표 3.3> 단면력 산정

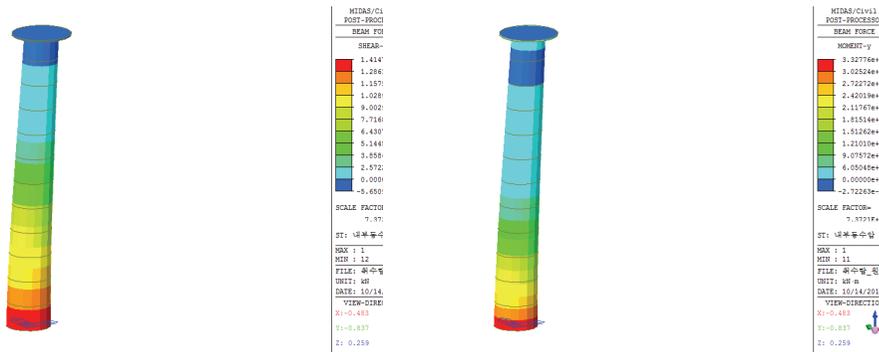
기초상면 으로부터 높이 (z_i)	수평관성력(자중포함)		내부동수압		외부동수압	
	전단력 (kN)	모멘트 (kN·m)	전단력 (kN)	모멘트 (kN·m)	전단력 (kN)	모멘트 (kN·m)
0	6,944	236,520	1,415	33,278	3,430	79,587
5	6,944	201,798	1,264	26,582	3,054	63,376
10	6,944	167,076	1,112	20,642	2,680	49,041
15	6,944	132,353	961	15,457	2,306	36,578
20	6,944	97,631	810	11,028	1,934	25,978
25	6,944	62,909	660	7,353	1,565	17,232
30	1,374	48,240	509	4,430	1,200	10,323
35	1,374	41,370	360	2,257	841	5,224
40	1,374	34,499	213	825	493	1,898
45	1,374	27,628	70	117	161	269
50	1,374	20,758	0	0	0	0
55	1,374	13,887	0	0	0	0
59.4	1,021	8,071	0	0	0	0
59.7	1,021	7,765	0	0	0	0
60	638	7,554	0	0	0	0



(a) 전단력

(b) 모멘트

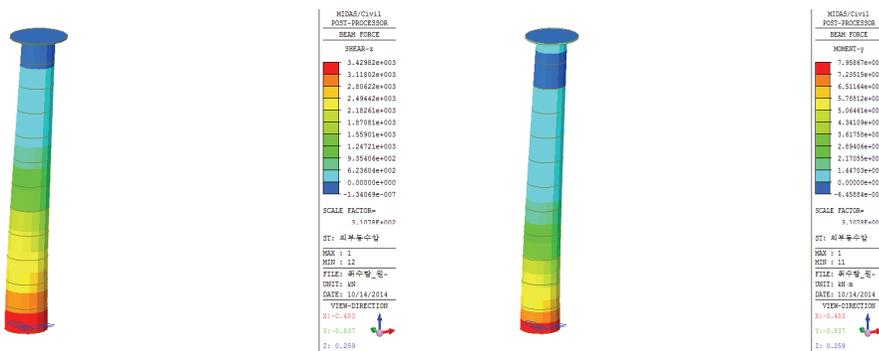
<그림 3.4> 수평관성력 단면력도



(a) 전단력

(b) 모멘트

<그림 3.5> 내부동수압 단면력도



(a) 전단력

(b) 모멘트

<그림 3.6> 외부동수압 단면력도

다. 단면검토

- (1) 원환단면을 등가의 면적을 갖는 상자형 단면으로 가정
- (2) 철근상세

<표 3.4> 벽체 하단의 철근상세

구 분	내 부	외 부
연직철근	180EA-H29	260EA-H29
	160EA-H29	240EA-H29
수평철근	H22@200	H22@200

- (3) 단면의 설계강도

(가) 휨강도

$$\phi M_n = \phi A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right), \quad \phi = 1.0 \text{ (평가시)}, \quad a = \frac{A_s f_y}{0.85 f_{ck} b}$$

$$A_s = 210EA-H29 = 134,904 \text{ mm}^2$$

$$a = \frac{134,904 \times 400}{0.85 \times 27 \times 7,980} = 294.64 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} \phi M_n &= 1.0 \times 134,904 \times 400 \times \left(7,095 - \frac{294.64}{2} \right) \\ &= 374,908 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{mm} \end{aligned}$$

$$= 374,908 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_u = 236,520 + 79,587 = 316,107 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\phi M_n > M_u \quad (\because \text{O.K.})$$

(나) 전단강도

$$\phi V_n = \phi (V_c + V_s), \quad \phi = 1.0, \quad V_c = \frac{1}{6} \sqrt{f_{ck}} b d,$$

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{s}$$

① 콘크리트 단면이 부담하는 전단강도, V_c

$$V_c = \frac{1}{6} \sqrt{f_{ck}} b d = \frac{1}{6} \times \sqrt{27} \times 2 \times 1,770 \times 7,095 = 21,751,353 \text{ N}$$

$$= 21,751,35 \text{ kN}$$

② 전단철근이 부담하는 전단강도, V_s

$$A_v = 4 - H22@200 \text{ mm}$$

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{s} = \frac{4 \times 387.1 \times 400 \times 7,095}{200} = 21,971,796 \text{ N} \\ = 21,971.80 \text{ kN}$$

③ 전단강도, V_n

$$\phi V_n = \phi (V_c + V_s) = 1.0(21,751 + 21,972) = 43,723 \text{ kN}$$

$$V_u = 6,944 + 3,430 = 10,374 \text{ kN}$$

$$\phi V_n > V_u \quad (\because \text{O.K.})$$

라. 기초 안정 검토

(1) 전도에 대한 검토

(가) 수직력

$$V_{\max} = 50,579.63 + 17,678.82(\text{기초}) = 68,258.45 \text{ kN}$$

(나) 저항모멘트

$$M_r = 68,258.45 \times 8 = 546,067 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(다) 발생모멘트

$$M_o = 236,520 + 79,587 = 316,207 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(라) 전도 검토

$$S.F = \frac{M_r}{M_o} = \frac{546,067}{316,207} = 1.73 > 1.5 \quad (\because \text{O.K.})$$

(2) 활동에 대한 검토

(가) 최대 수평력

$$H_{\max} = 6,944 + 3,430 = 10,374 \text{ kN}$$

(나) 최대 저항수평력

$$V_{\max} = 68,258.45 \text{ kN}$$

(다) 활동 검토

$$S.F = \frac{0.6 V_{\max}}{H_{\max}} = \frac{0.6 \times 68,258.45}{10,374} = 3.95 > 1.20 \quad (\because \text{O.K.})$$

(3) 지지력에 대한 검토

(가) 편심

$$e = \frac{B}{2} - \frac{M_r - M_o}{W} = \frac{16}{2} - \frac{546,067 - 316,207}{68,258.45} = 4.633 \text{ m}$$

(나) 지지력 검토

① 하중의 작용위치가 저면핵내에 있는 경우 (사다리꼴 분포)

$$q = \frac{V}{A} \left(1 \pm \frac{6e}{B}\right)$$

② 하중의 작용위치가 저면핵외에 있는 경우 (삼각형 분포)

$$q = \frac{2V}{L \cdot x} \quad \text{여기서, } x = 3 \left(\frac{B}{2} - e\right)$$

$$q_u = \frac{2V}{L \cdot x} = \frac{2 \times 68,258.45}{12.566 \times 10.101} = 1,075.54 \text{ kN/m}^2$$

$$L = \frac{\pi}{4} \times 16^2 \div 16 = 12.566 \text{ m}$$

③ 지반의 허용지지력 : 지반조사 보고서 참조

$$q_a = 1,785.00 \text{ kN/m}^2$$

④ 지지력 검토

$$q_u < q_a = 1,075.54 \text{ kN/m}^2 < 1,785.00 \text{ kN/m}^2 \quad (\because \text{O.K})$$

3. 동역학적 해석법 - 다중모드해석법(선형)

가. 작용하중

(1) 고정하중, D (작용위치)

(가) 건축하중 : $W_1 = 2,131.60 kN$ (상부슬래브)

(나) 난간하중 : $W_2 = 37.70 kN$ (상부슬래브)

(다) 받침하중 : $W_3 = 1,302.40 kN$ (상부슬래브)

(라) 구조물자중 : 프로그램에서 자동계산

(2) 지진하중, E

(가) 지진구역 : I 구역

(나) 위험도계수 : $I=1.4$ (재현주기 1,000년)

(다) 지반분류 : 보통암지반, S_B

(라) 지진계수

▸ $C_a = 0.11$

▸ $C_v = 0.11$

(마) 지표면 수평가속도계수, A_h

▸ $A_h = I \times C_a = 1.4 \times 0.11 = 0.154$

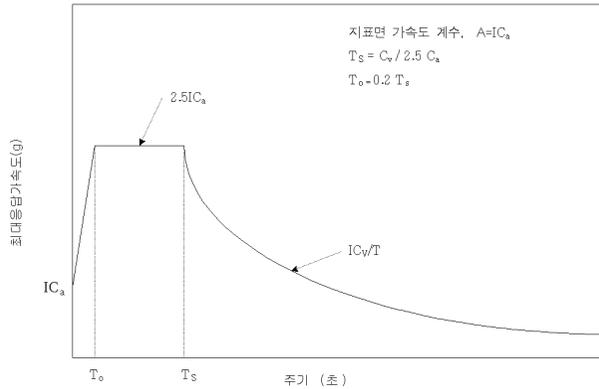
(바) 통제주기

▸ $T_s = \frac{C_v}{2.5 C_a} = \frac{0.11}{2.5 \times 0.11} = 0.4 \text{ sec}$

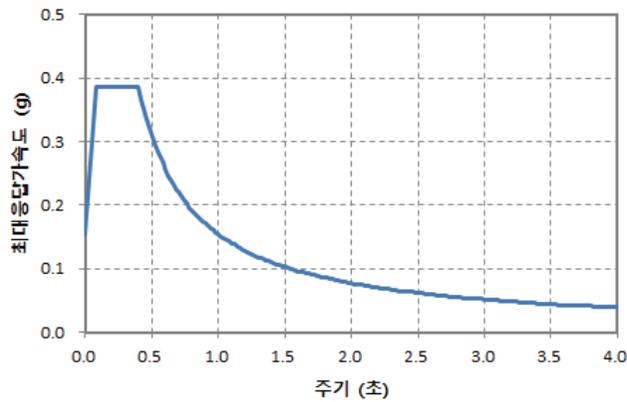
▸ $T_0 = 0.2 T_s = 0.2 \times 0.4 = 0.08 \text{ sec}$

(사) 지진하중

① 평가용 가속도응답스펙트럼



(a) 기본 스펙트럼 형상



(b) 대상 취수탑용 스펙트럼

<그림 3.7> 평가용 가속도응답스펙트럼 (5% 감쇠비)

② 수심별 지진시 동수압

- ▶ 정역학적 해석법의 지진시 내·외부동수압과 동일하게 적용

나. 구조해석

(1) 일반사항

- (가) 취수탑의 벽체는 기초상단에서 고정지지되는 캔틸레버 보로 해석
- (나) 지진력은 응답스펙트럼으로 재하하여 다중모드를 고려
- (다) 동수압은 만수위시를 적용
- (라) 벽체에 대해 단면력 산정

- (마) 구조해석용 프로그램의 보요소를 이용하여 선형탄성해석 수행
- (바) 진동모드는 질량참여율을 고려하여 20개 모드 고려

(2) 구조물의 고유주기

<표 3.5> 구조물의 고유주기

Mode	주기 (sec)	모드별 질량참여율(%)			누적질량참여율(%)		
		X방향	Y방향	Z방향	X방향	Y방향	Z방향
1	0.791386	0	56.29	0	0	56.29	0
2	0.791386	56.29	0	0	56.29	56.29	0
3	0.160627	0	23.38	0	56.29	79.67	0
4	0.160627	23.38	0	0	79.67	79.67	0
5	0.070913	0	0	76.55	79.67	79.67	76.55
6	0.065775	0.15	9.6	0	79.82	89.27	76.55
7	0.065775	9.6	0.15	0	89.42	89.42	76.55
8	0.038009	0.83	4.07	0	90.25	93.49	76.55
9	0.038009	4.07	0.83	0	94.32	94.32	76.55
10	0.027622	0	0	13.31	94.32	94.32	89.86
11	0.026183	0.07	2.53	0	94.39	96.85	89.86
12	0.026183	2.53	0.07	0	96.92	96.92	89.86
13	0.020046	0.14	1.28	0	97.06	98.2	89.86
14	0.020046	1.28	0.14	0	98.34	98.34	89.86
15	0.016605	0	0	4.85	98.34	98.34	94.71
16	0.016467	0.5	0.29	0	98.84	98.63	94.71
17	0.016467	0.29	0.5	0	99.13	99.13	94.71
18	0.014225	0.11	0.33	0	99.24	99.46	94.71
19	0.014225	0.33	0.11	0	99.57	99.57	94.71
20	0.012769	0.01	0.22	0	99.58	99.79	94.71



(a) Mode #2



(b) Mode #4



(c) Mode #7



(d) Mode #9

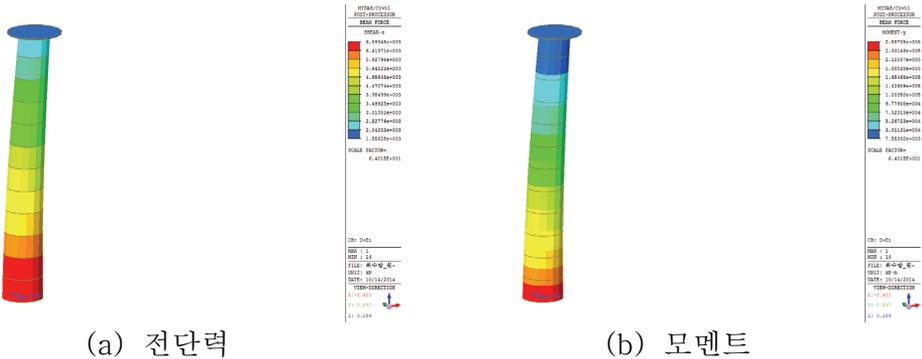


<그림 3.8> X방향 진동모드 형상

(3) 구조해석 결과

<표 3.6> 단면력 산정(지진시 동수압은 정역학적 해석법과 동일)

기초상면 으로부터 높이 (z_i)	수평관성력 (자중포함)		내부동수압		외부동수압	
	전단력 (kN)	모멘트 (kN·m)	전단력 (kN)	모멘트 (kN·m)	전단력 (kN)	모멘트 (kN·m)
0	6,899	255,705	1,415	33,278	3,430	79,587
5	6,735	225,594	1,264	26,582	3,054	63,376
10	6,385	197,096	1,112	20,642	2,680	49,041
15	5,898	170,705	961	15,457	2,306	36,578
20	5,354	146,594	810	11,028	1,934	25,978
25	4,825	124,596	660	7,353	1,565	17,232
30	4,355	104,322	509	4,430	1,200	10,323
35	3,964	85,316	360	2,257	841	5,224
40	3,643	67,198	213	825	493	1,898
45	3,334	49,825	70	117	161	269
50	2,928	33,457	0	0	0	0
55	2,340	18,865	0	0	0	0
59.4	1,828	8,569	0	0	0	0
59.7	1,556	8,021	0	0	0	0
60	1,556	7,554	0	0	0	0



<그림 3.9> 다중모드스펙트럼해석 단면력도

다. 단면검토

(1) 원환단면을 등가의 면적을 갖는 상자형 단면으로 가정

(2) 단면의 설계강도

(가) 휨강도

$$\phi M_n = \phi A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right), \quad \phi = 1.0 \text{ (평가시)}, \quad a = \frac{A_s f_y}{0.85 f_{ck} b}$$

$$A_s = 210EA - H29 = 134,904 \text{ mm}^2$$

$$a = \frac{134,904 \times 400}{0.85 \times 27 \times 7,980} = 294.64 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} \phi M_n &= 1.0 \times 134,904 \times 400 \times \left(7,095 - \frac{294.64}{2} \right) \\ &= 374.908 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{mm} \end{aligned}$$

$$= 374,908 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_u = 255,705 + 79,587 = 335,292 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\phi M_n > M_u \quad (\because \text{O.K.})$$

(나) 전단강도

$$\phi V_n = \phi (V_c + V_s), \quad \phi = 1.0, \quad V_c = \frac{1}{6} \sqrt{f_{ck}} b d,$$

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{s}$$

① 콘크리트 단면이 부담하는 전단강도, V_c

$$V_c = \frac{1}{6} \sqrt{f_{ck}} b d = \frac{1}{6} \times \sqrt{27} \times 2 \times 1,770 \times 7,095 = 21,751,353 \text{ N}$$

$$= 21,751,35 \text{ kN}$$

② 전단철근이 부담하는 전단강도, V_s

$$A_v = 4 - H22 @ 200 \text{ mm}$$

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{s} = \frac{4 \times 387.1 \times 400 \times 7,095}{200} = 21,971,796 \text{ N}$$

$$= 21,971.80 \text{ kN}$$

③ 전단강도, V_n

$$\phi V_n = \phi (V_c + V_s) = 1.0(21,751 + 21,972) = 43,723 kN$$

$$V_u = 6,899 + 3,430 = 10,329 kN$$

$$\phi V_n > V_u \quad (\because \text{O.K})$$

라. 기초 안정 검토

(1) 전도에 대한 검토

(가) 수직력

$$V_{\max} = 50,579.63 + 17,678.82(\text{기초}) = 68,258.45 kN$$

(나) 저항모멘트

$$M_r = 68,258.45 \times 8 = 546,067 kN \cdot m$$

(다) 발생모멘트

$$M_o = 255,705 + 79,587 = 335,292 kN \cdot m$$

(라) 전도 검토

$$S.F = \frac{M_r}{M_o} = \frac{546,067}{335,292} = 1.63 > 1.5 \quad (\because \text{O.K})$$

(2) 활동에 대한 검토

(가) 최대 수평력

$$H_{\max} = 6,899 + 3,430 = 10,329 kN$$

(나) 최대 저항수평력

$$V_{\max} = 68,258.45 kN$$

(다) 활동 검토

$$S.F = \frac{0.6 V_{\max}}{H_{\max}} = \frac{0.6 \times 68,258.45}{10,329} = 3.96 > 1.20 \quad (\because \text{O.K})$$

(3) 지지력에 대한 검토

(가) 편심

$$e = \frac{B}{2} - \frac{M_r - M_o}{W} = \frac{16}{2} - \frac{546,067 - 335,292}{68,258.45} = 4.912 \text{ m}$$

(나) 지지력 검토

① 하중의 작용위치가 저면핵내에 있는 경우 (사다리꼴 분포)

$$q = \frac{V}{A} \left(1 \pm \frac{6e}{B}\right)$$

② 하중의 작용위치가 저면핵외에 있는 경우 (삼각형 분포)

$$q = \frac{2V}{L \cdot x} \quad \text{여기서, } x = 3 \left(\frac{B}{2} - e\right)$$

$$q_u = \frac{2V}{L \cdot x} = \frac{2 \times 68,258.45}{12.566 \times 9.264} = 1,172.71 \text{ kN/m}^2$$

$$L = \frac{\pi}{4} \times 16^2 \div 16 = 12.566 \text{ m}$$

③ 지반의 허용지지력 : 지반조사 보고서 참조

$$q_a = 1,785.00 \text{ kN/m}^2$$

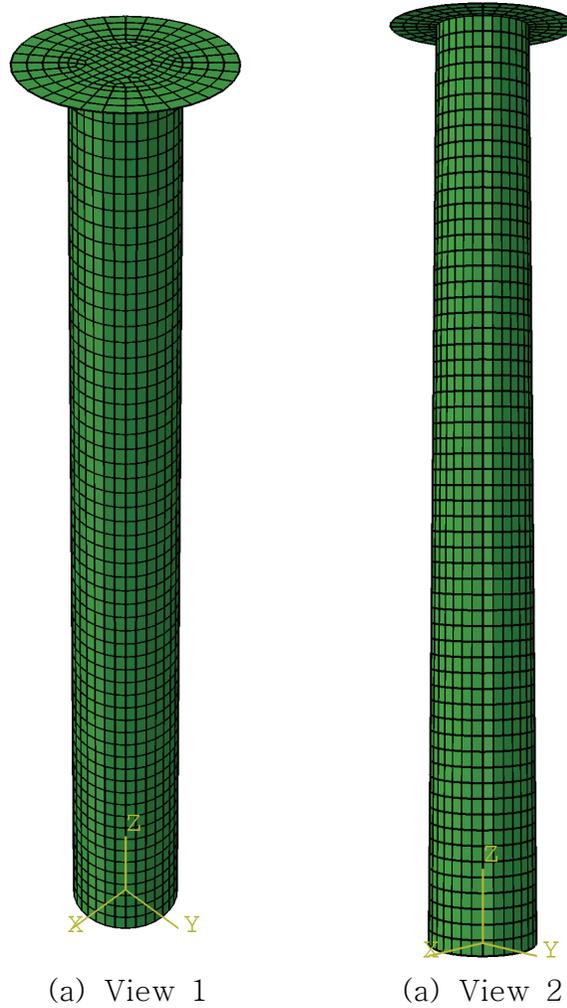
④ 지지력 검토

$$q_u < q_a = 1,172.71 \text{ kN/m}^2 < 1,785.00 \text{ kN/m}^2 \quad (\because \text{O.K})$$

4. 동역학적 해석법 - 시간이력해석법

가. 해석일반

- (1) 해석개요
 - (가) 해석방법 : 3차원 시간이력해석
 - (나) 부재요소 : SHELL Element
- (2) 해석프로그램 : ABAQUS/Standard
- (3) 해석모델



<그림 3.10> 해석모델

나. 구조해석

(1) 일반사항

- (가) 범용구조해석프로그램인 ABAQUS를 사용
(3차원 SHELL 요소로 모델링 하여 시간이력해석 수행)
- (나) 취수탑의 벽체는 기초상단에서 고정으로 지지된다고 가정
- (다) 시간이력하중은 평가용 응답스펙트럼을 만족하는 가속도시간이력 3쌍 생성하여 적용
- (라) 동수압은 만수위시를 적용
- (마) 벽체에 대해 단면력 산정
- (바) 진동모드는 질량참여율을 고려하여 20개 모드 고려

(2) 지진시 유체의 영향

- (가) 댐, 항만, 교각 등과 같이 유체와 접하고 있는 구조물은 유체의 영향을 고려한 지진해석을 수행하여야 함
- (나) 유체의 영향을 고려한 구조물의 지진해석법
 - ① 지진시 유체의 동수압을 등가정적 하중으로 변환하여 등가정적 지진해석을 수행하는 진도법
 - ② 지진시 유체의 동수압을 구조물에 부가된 유체질량으로 고려하여 동적 해석을 수행하는 부가질량법(동적유체질량법)
 - ③ 유체과 구조물의 상호작용을 엄밀히 고려하는 유체-구조물 상호작용 해석법

다. 작용하중

(1) 고정하중, D (작용위치)

- (가) 건축하중 : $W_1 = 2,131.60 kN$ (상부슬래브)
- (나) 난간하중 : $W_2 = 37.70 kN$ (상부슬래브)
- (다) 받침하중 : $W_3 = 1,302.40 kN$ (상부슬래브)
- (라) 구조물자중 : 프로그램에서 자동계산

(2) 지진하중, E

- (가) 내진등급 : 내진특등급 (댐체의 내진등급 적용)
- (나) 구역계수 : $Z=0.11$ (I 구역)
- (다) 위험도계수 : $I=2.0$ (재현주기 2,400년)

(라) 지반분류 : 보통암지반, S_B

(마) 지진계수

- ▶ $S=1.2$ (댐설계기준)
- ▶ $C_a=0.11, C_v=0.11$ (내진설계기준연구 II)

(바) 지표면 수평가속도계수, A_h

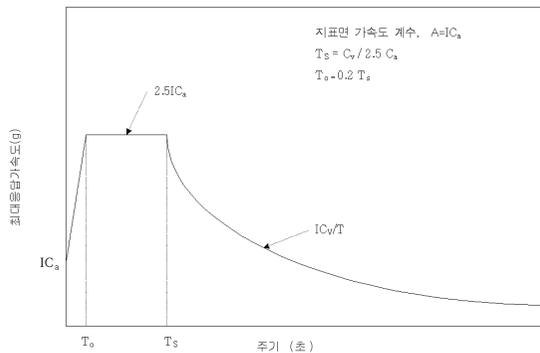
- ▶ $A_h = Z \times I \times S = 0.11 \times 2.0 \times 1.0 = 0.22$ (댐설계기준)
- ▶ $A_h = I \times C_a = 2.0 \times 0.11 = 0.22$ (내진설계기준연구 II)

(사) 통제주기

- ▶ $T_s = \frac{C_v}{2.5 C_a} = \frac{0.11}{2.5 \times 0.11} = 0.4 \text{ sec}$
- ▶ $T_0 = 0.2 T_s = 0.2 \times 0.4 = 0.08 \text{ sec}$

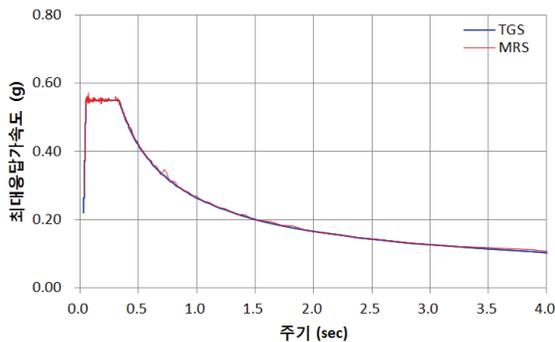
(아) 지진하중

① 평가용 가속도응답스펙트럼

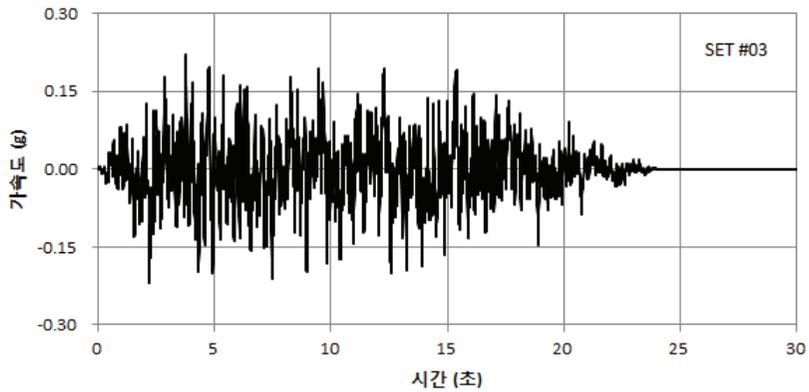
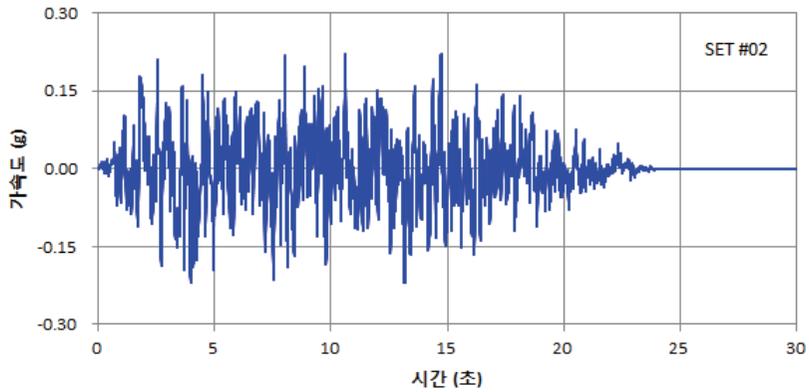
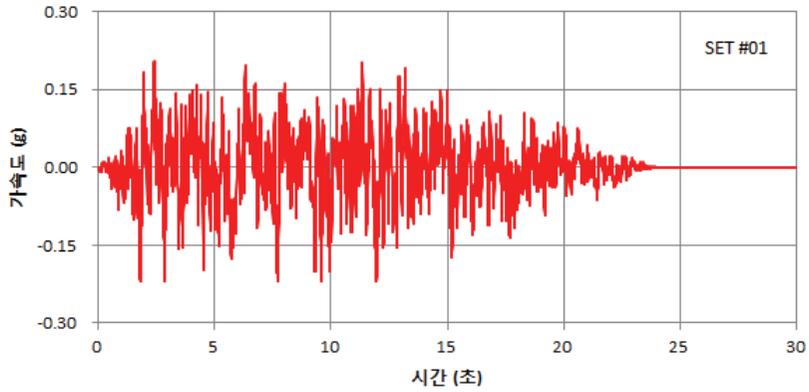


<그림 3.11> 평가용 가속도응답스펙트럼 (5% 감쇠비)

② 평가용 가속도시간이력 (3개 SET)



(a) 시간이력의 응답스펙트럼(MRS)과 평가용 응답스펙트럼(TGS)의 비교



(b) 가속도시간이력
 <그림 3.12> 평가용 가속도 시간이력

(자) 지진시 유체의 영향

- ① 지진시 내·외부 동수압을 부가질량으로 치환하여 부과
- ② 실린더형 기둥 구조물의 내·외부 유체를 부가질량(동적유체 질량)으로 근사하여 동적 해석을 수행할 수 있는 방법 적용

(차) Goyal & Chopra(1989) 방법에 의한 부가질량 산정

- ① 외부 유체의 부가질량

<표 3.7> 지진시 외부 유체에 의한 부가질량

지진시 외부 유체에 의한 부가질량 계산 (원형 실린더 구조로 교축 및 교축직각방향 동일)													
Outside Geometry				Equivalent Ellipse		Equivalent Cylinder				Infinite Long Tower			
z_0	a_0/b_0	a_0/H_0	A_0	\tilde{a}_0/\tilde{b}_0	\tilde{a}_0/H_0	\tilde{r}_0/H_0	z_0/H_0	$m_a^0(z)/m_\infty^0$	$\rho_w A_0$	m_∞^0	$m_\infty^0/(\rho_w A_0)$	$m_a^0(z)$	
m	m ²							MN-s ² /m ²		MN-s ² /m ²		ton	
0.0	1.00	0.0800	50.265	1.00	0.0800	0.0840	0.00	0.982	0.0503	0.0503	1.0000	0.0494	96.81
2.0	1.00	0.0800	50.265	1.00	0.0800	0.0840	0.04	0.982	0.0503	0.0503	1.0000	0.0494	96.81
4.0	1.00	0.0800	50.265	1.00	0.0800	0.0840	0.08	0.982	0.0503	0.0503	1.0000	0.0494	96.81
6.0	1.00	0.0800	50.265	1.00	0.0800	0.0840	0.12	0.981	0.0503	0.0503	1.0000	0.0493	96.71
8.0	1.00	0.0800	50.265	1.00	0.0800	0.0840	0.16	0.981	0.0503	0.0503	1.0000	0.0493	96.71
10.0	1.00	0.0800	50.265	1.00	0.0800	0.0840	0.20	0.98	0.0503	0.0503	1.0000	0.0493	96.61
12.0	1.00	0.0800	50.265	1.00	0.0800	0.0840	0.24	0.979	0.0503	0.0503	1.0000	0.0492	96.51
14.0	1.00	0.0800	50.265	1.00	0.0800	0.0840	0.28	0.977	0.0503	0.0503	1.0000	0.0491	96.31
16.0	1.00	0.0800	50.265	1.00	0.0800	0.0840	0.32	0.975	0.0503	0.0503	1.0000	0.0490	96.12
18.0	1.00	0.0800	50.265	1.00	0.0800	0.0840	0.36	0.973	0.0503	0.0503	1.0000	0.0489	95.92
20.0	1.00	0.0800	50.265	1.00	0.0800	0.0840	0.40	0.971	0.0503	0.0503	1.0000	0.0488	95.72
22.0	1.00	0.0800	50.265	1.00	0.0800	0.0840	0.44	0.968	0.0503	0.0503	1.0000	0.0487	95.43
24.0	1.00	0.0800	50.265	1.00	0.0800	0.0840	0.48	0.964	0.0503	0.0503	1.0000	0.0485	95.03
26.0	1.00	0.0800	50.265	1.00	0.0800	0.0840	0.52	0.96	0.0503	0.0503	1.0000	0.0483	94.64
28.0	1.00	0.0800	50.265	1.00	0.0800	0.0840	0.56	0.956	0.0503	0.0503	1.0000	0.0481	94.24
30.0	1.00	0.0800	50.265	1.00	0.0800	0.0840	0.60	0.95	0.0503	0.0503	1.0000	0.0478	93.65
32.0	1.00	0.0800	50.265	1.00	0.0800	0.0840	0.64	0.94	0.0503	0.0503	1.0000	0.0472	92.66
34.0	1.00	0.0800	50.265	1.00	0.0800	0.0840	0.68	0.928	0.0503	0.0503	1.0000	0.0466	91.48
36.0	1.00	0.0800	50.265	1.00	0.0800	0.0840	0.72	0.91	0.0503	0.0503	1.0000	0.0457	89.71
38.0	1.00	0.0800	50.265	1.00	0.0800	0.0840	0.76	0.9	0.0503	0.0503	1.0000	0.0452	88.72
40.0	1.00	0.0800	50.265	1.00	0.0800	0.0840	0.80	0.87	0.0503	0.0503	1.0000	0.0437	85.76
42.0	1.00	0.0800	50.265	1.00	0.0800	0.0840	0.84	0.835	0.0503	0.0503	1.0000	0.0420	82.31
44.0	1.00	0.0800	50.265	1.00	0.0800	0.0840	0.88	0.77	0.0503	0.0503	1.0000	0.0387	75.91
46.0	1.00	0.0800	50.265	1.00	0.0800	0.0840	0.92	0.68	0.0503	0.0503	1.0000	0.0342	67.03
48.0	1.00	0.0800	50.265	1.00	0.0800	0.0840	0.96	0.5	0.0503	0.0503	1.0000	0.0251	49.29
50.0	1.00	0.0800	50.265	1.00	0.0800	0.0840	1.00	0	0.0503	0.0503	1.0000	0.0000	0.00

비 고 $a_0=4.00\text{m}$, $b_0=4.00\text{m}$, $H_0=50.00\text{m}$, $\rho_w=0.001\text{MN-s}^2/\text{m}^4$

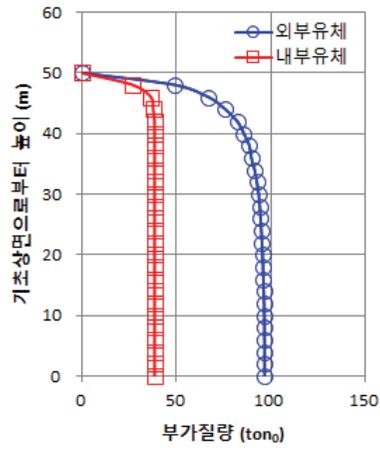
② 내부 유체의 부가질량

<표 3.8> 지진시 내부 유체에 의한 부가질량

지진시 내부 유체에 의한 부가질량 계산 (원형 실린더 구조로 교축 및 교축직각방향 동일)

z _i	Inside Geometry			Equivalent Ellipse		Equivalent Cylinder		Infinite Long Tower		ρ _w A _i	m _a ⁱ (z)	
	a _i /b _i	a _i /H _i	A _i	\tilde{a}_i/\tilde{b}_i	\tilde{a}_i/H_i	\tilde{r}_i/H_i	z _i /H _i	m _∞ ⁱ /(ρ _w A _i)	MN-s ² /m ²		MN-s ² /m ²	ton
m	m ²											
0.0	1.00	0.05	19.635	1.00	0.05	0.05	0.00	1.00	0.0196	0.0196	38.51	
2.0	1.00	0.05	19.635	1.00	0.05	0.05	0.04	1.00	0.0196	0.0196	38.51	
4.0	1.00	0.05	19.635	1.00	0.05	0.05	0.08	1.00	0.0196	0.0196	38.51	
6.0	1.00	0.05	19.635	1.00	0.05	0.05	0.12	1.00	0.0196	0.0196	38.51	
8.0	1.00	0.05	19.635	1.00	0.05	0.05	0.16	1.00	0.0196	0.0196	38.51	
10.0	1.00	0.05	19.635	1.00	0.05	0.05	0.20	1.00	0.0196	0.0196	38.51	
12.0	1.00	0.05	19.635	1.00	0.05	0.05	0.24	1.00	0.0196	0.0196	38.51	
14.0	1.00	0.05	19.635	1.00	0.05	0.05	0.28	1.00	0.0196	0.0196	38.51	
16.0	1.00	0.05	19.635	1.00	0.05	0.05	0.32	1.00	0.0196	0.0196	38.51	
18.0	1.00	0.05	19.635	1.00	0.05	0.05	0.36	1.00	0.0196	0.0196	38.51	
20.0	1.00	0.05	19.635	1.00	0.05	0.05	0.40	1.00	0.0196	0.0196	38.51	
22.0	1.00	0.05	19.635	1.00	0.05	0.05	0.44	1.00	0.0196	0.0196	38.51	
24.0	1.00	0.05	19.635	1.00	0.05	0.05	0.48	1.00	0.0196	0.0196	38.51	
26.0	1.00	0.05	19.635	1.00	0.05	0.05	0.52	1.00	0.0196	0.0196	38.51	
28.0	1.00	0.05	19.635	1.00	0.05	0.05	0.56	1.00	0.0196	0.0196	38.51	
30.0	1.00	0.05	19.635	1.00	0.05	0.05	0.60	1.00	0.0196	0.0196	38.51	
32.0	1.00	0.05	19.635	1.00	0.05	0.05	0.64	1.00	0.0196	0.0196	38.51	
34.0	1.00	0.05	19.635	1.00	0.05	0.05	0.68	1.00	0.0196	0.0196	38.51	
36.0	1.00	0.05	19.635	1.00	0.05	0.05	0.72	1.00	0.0196	0.0196	38.51	
38.0	1.00	0.05	19.635	1.00	0.05	0.05	0.76	1.00	0.0196	0.0196	38.51	
40.0	1.00	0.05	19.635	1.00	0.05	0.05	0.80	1.00	0.0196	0.0196	38.51	
42.0	1.00	0.05	19.635	1.00	0.05	0.05	0.84	1.00	0.0196	0.0196	38.51	
44.0	1.00	0.05	19.635	1.00	0.05	0.05	0.88	0.98	0.0196	0.0192	37.74	
46.0	1.00	0.05	19.635	1.00	0.05	0.05	0.92	0.95	0.0196	0.0187	36.58	
48.0	1.00	0.05	19.635	1.00	0.05	0.05	0.96	0.70	0.0196	0.0137	26.96	
50.0	1.00	0.05	19.635	1.00	0.05	0.05	1.00	0.00	0.0196	0.0000	0.00	

비 고 a_i=250m, b_i=250m, H_i=50.00m, ρ_w=0.001MN-s²/m⁴

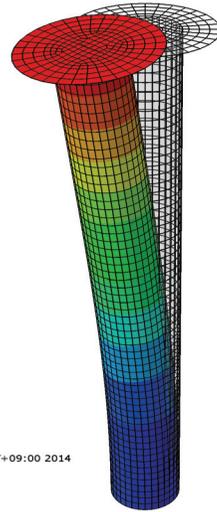
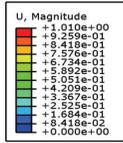


<그림 3.13> 높이별 부가질량 산정

(3) 구조물의 고유주기

<표 3.9> 구조물의 고유주기

Mode	주기 (sec)	모드별 질량참여율(%)					
		TX방향	TY방향	TZ방향	RX방향	RY방향	RZ방향
1	0.6491	1.7725	-0.0399	0.0000	1.6134	71.7090	0.0000
2	0.6491	0.0399	1.7725	0.0000	-71.7090	1.6134	0.0000
3	0.1550	-1.2057	-0.0858	0.0000	1.0904	-15.3220	0.0000
4	0.1550	0.0858	-1.2057	0.0000	15.3220	1.0904	0.0000
5	0.1028	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-8.7805
6	0.0804	0.0000	0.0000	1.6838	0.0000	0.0000	0.0000
7	0.0704	0.2637	0.5656	0.0000	-4.0159	1.8723	0.0000
8	0.0704	0.5656	-0.2637	0.0000	1.8722	4.0157	0.0000
9	0.0427	0.3013	0.7005	0.0000	-2.9663	1.2758	0.0000
10	0.0427	-0.7005	0.3013	0.0000	-1.2759	-2.9664	0.0000
11	0.0412	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	4.7767
12	0.0350	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
13	0.0350	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
14	0.0324	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
15	0.0324	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
16	0.0322	0.0000	0.0000	-3.0787	0.0000	0.0000	0.0000
17	0.0307	2.0124	0.2013	0.0000	-0.5566	5.5649	0.0001
18	0.0307	-0.2013	2.0125	0.0000	-5.5650	-0.5566	0.0000
19	0.0298	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
20	0.0298	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

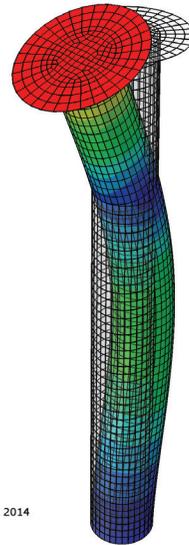
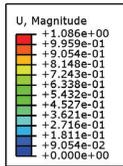


ODB: Freq.odb Abaqus/Standard 6.10-1 Tue Oct 14 19:59:28 GMT+09:00 2014

Step: Frequency
 Mode 1: Value = 93.709 Freq = 1.5407 (cycles/time)
 Primary Var: U, Magnitude
 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +6.000e+00



(a) Mode #01



ODB: Freq.odb Abaqus/Standard 6.10-1 Tue Oct 14 19:59:28 GMT+09:00 2014

Step: Frequency
 Mode 3: Value = 1642.8 Freq = 6.4508 (cycles/time)
 Primary Var: U, Magnitude
 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +6.000e+00



(c) Mode #3

<그림 3.14> X방향 진동모드 형상

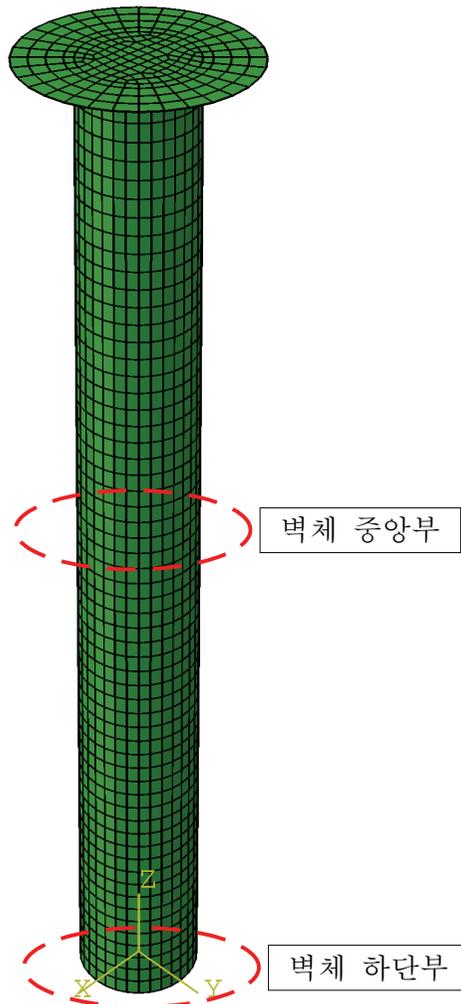
(4) 하중조합

- CASE I : 1.0D+1.0E

여기서, D : 고정하중, E : 지진하중(동수압 포함)

(5) 단면력 산정위치

- 벽체 중앙부 및 하단부



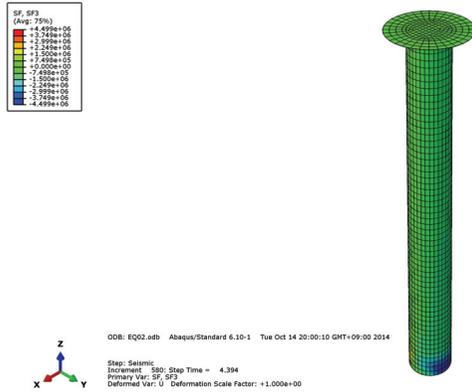
<그림 3.15> 단면력 산정위치

(6) 구조해석 결과

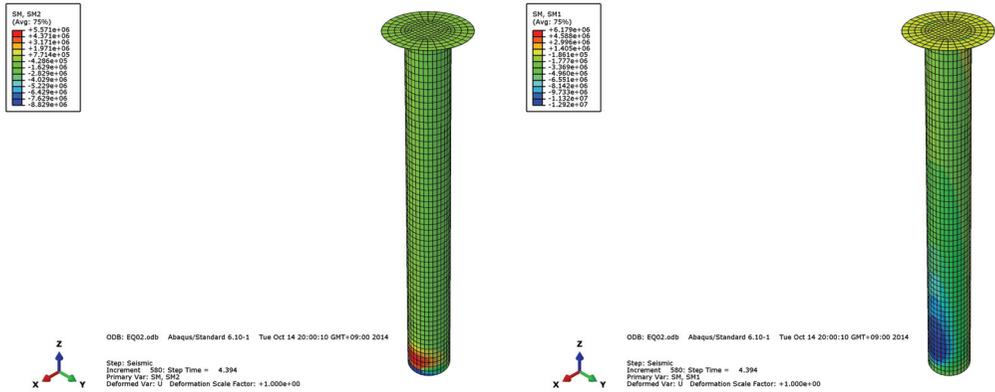
- 인공지진과 3SET 중 최대값 적용

<표 3.10> 단면력 산정

구 분		전단력 (kN)	모멘트 (kN·m)	
			연직방향	수평방향
벽체 중앙부	EQ01	649	44	3,894
	EQ02	766	43	4,689
	EQ03	584	43	4,035
	최대값	766	44	4,689
벽체 하단부	EQ01	4,176	8,172	1,800
	EQ02	4,579	8,829	2,093
	EQ03	3,133	6,542	1,599
	최대값	4,579	8,829	2,093



(a) 전단력도

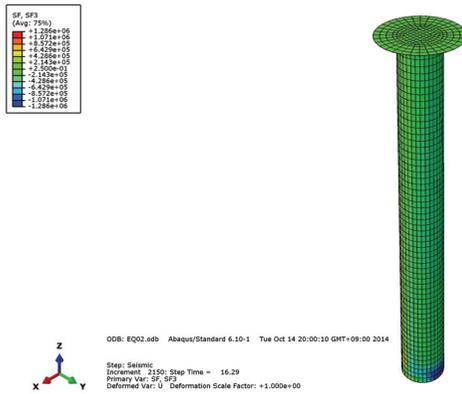


연직방향

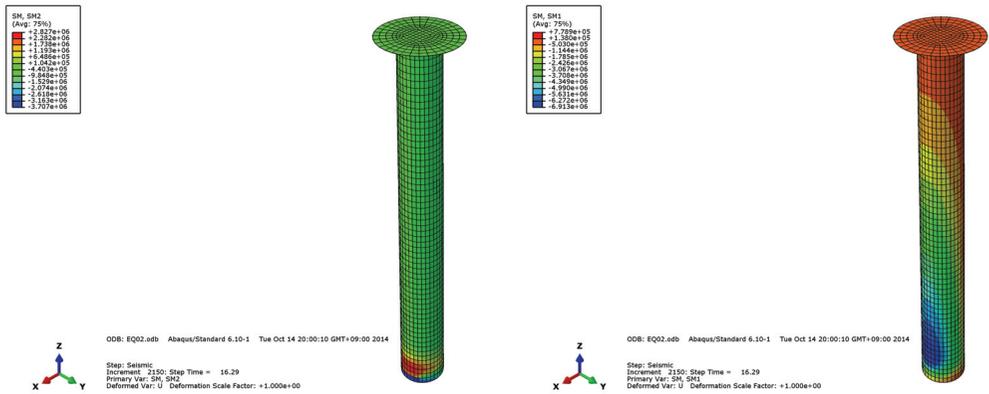
수평방향

(b) 모멘트도

<그림 3.16> 벽체 하단부 단면력도 (SET #02)

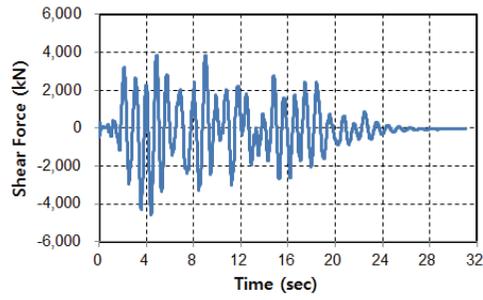


(a) 전단력도

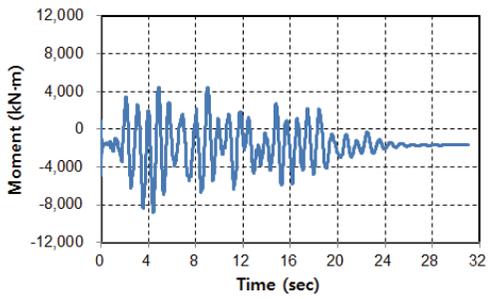


(b) 모멘트도

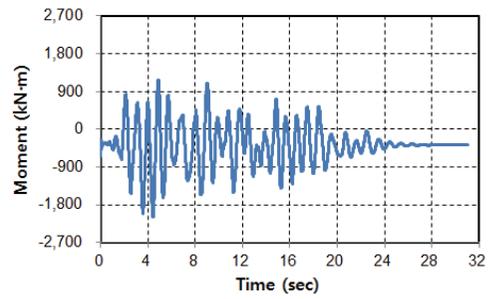
<그림 3.17> 벽체 중앙부 단면력도 (SET #02)



(a) 전단력



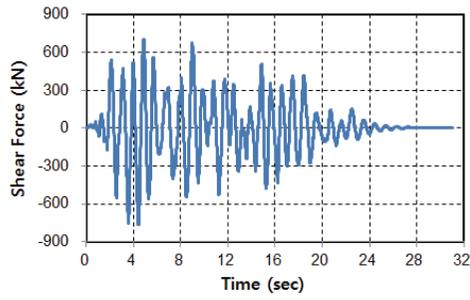
연직방향



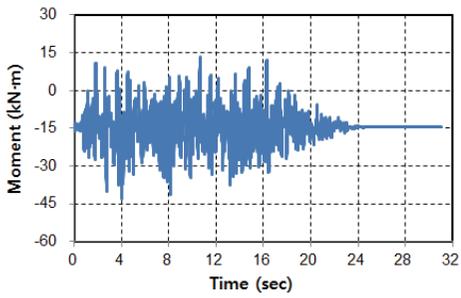
수평방향

(b) 모멘트

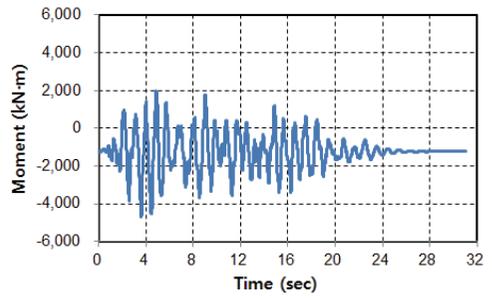
<그림 3.18> 벽체 하단부 단면력 시간이력 (SET #02)



(a) 전단력



연직방향



수평방향

(b) 모멘트

<그림 3.19> 벽체 중앙부 단면력 시간이력 (SET #02)

라. 단면검토

(1) 단면강도 산정

(가) 부재별 철근상세

<표 3.11> 벽체(하단) 철근상세

구분	연직방향		수평방향	
	인장	전단	인장	전단
1단 배근	H29@100, d=100	H13-2.5, s=400	H22@200, d=100	H16-2.5, s=200
2단 배근	H29@100, d=200	-	-	-

(나) 휨강도, ϕM_n

$$\phi M_n = \phi A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right), \quad \phi = 1.0 \text{ (평가시)}, \quad a = \frac{A_s f_y}{0.85 f_{ck} b}$$

① 벽체(하단) - 연직방향

$$A_s = H29@100 + H29@100 = 12,848.0 \text{ mm}^2$$

$$a = \frac{12,848.0 \times 400}{0.85 \times 27 \times 1,000} = 223.93 \text{ mm}$$

$$\phi M_n = 1.0 \times 12,848.0 \times 400 \times \left(1,850 - \frac{223.93}{2} \right)$$

$$= 8.93211 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$= 8,932.11 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_u = 8,829 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\phi M_n > M_u \quad (\because \text{O.K.})$$

② 벽체(하단) - 수평방향

$$A_s = H22@200 = 1,935.50 \text{ mm}^2$$

$$a = \frac{1,935.50 \times 400}{0.85 \times 27 \times 1,000} = 33.73 \text{ mm}$$

$$\phi M_n = 1.0 \times 1,935.50 \times 400 \times \left(1,900 - \frac{33.73}{2} \right)$$

$$= 1.45792 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$= 1,457.92 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_u = 2,093 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\phi M_n > M_u \quad (\because \text{O.K.})$$

(다) 전단강도, ϕV_n

$$\phi V_n = \phi (V_c + V_s), \quad \phi = 1.0, \quad V_c = \frac{1}{6} \sqrt{f_{ck}} b d,$$

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{s}$$

① 벽체(하단) - 연직방향

㉠ 콘크리트 단면이 부담하는 전단강도, V_c

$$\begin{aligned} V_c &= \frac{1}{6} \sqrt{f_{ck}} b d = \frac{1}{6} \times \sqrt{27} \times 1,000 \times 1,900 = 1,645,448 N \\ &= 1,645.448 kN \end{aligned}$$

㉡ 전단철근이 부담하는 전단강도, V_s

$$\begin{aligned} A_v &= 2.5 - H13@400 mm \\ V_s &= \frac{A_v f_y d}{s} = \frac{316.75 \times 400 \times 1,900}{400} = 599,925 N \\ &= 599.925 kN \end{aligned}$$

㉢ 전단강도, V_n

$$\phi V_n = \phi (V_c + V_s) = 1.0(1,645.448 + 599.925) = 2,245.373 kN$$

$$V_u = 4,579 kN$$

$$\phi V_n < V_u \quad (\because N.G)$$

② 벽체(하단) - 수평방향

㉠ 콘크리트 단면이 부담하는 전단강도, V_c

$$\begin{aligned} V_c &= \frac{1}{6} \sqrt{f_{ck}} b d = \frac{1}{6} \times \sqrt{27} \times 1,000 \times 1,900 = 1,645,448 N \\ &= 1,645.448 kN \end{aligned}$$

㉡ 전단철근이 부담하는 전단강도, V_s

$$\begin{aligned} A_v &= 2.5 - H16@200 mm \\ V_s &= \frac{A_v f_y d}{s} = \frac{496.5 \times 400 \times 1,900}{200} = 1,886,700 N \\ &= 1,886.700 kN \end{aligned}$$

㉢ 전단강도, V_n

$$\phi V_n = \phi (V_c + V_s) = 1.0(1,645.448 + 1,886.700) = 3,532.148 kN$$

$$V_u = 4,579 kN$$

$$\phi V_n < V_u \quad (\because N.G)$$

제4장 유지관리교(연락교량)의 내진성능평가

제 1절 일반사항

댐설계기준(2011)에서는 지진시 유지관리교(연락교량)에 대해서는 낙교의 가능성을 검토하도록 규정하고 있다. 그러나 낙교의 정의 및 기준, 적용범위 등은 명시되어 있지 않다. 도로교설계기준(2010)의 내진설계편에 수록된 내용을 살펴보면, 단경간교는 낙교의 가능성만을 검토하도록 규정하고 있으며, 유지관리교의 상부제원은 대부분이 단경간교로 설계되어 있다. 추정컨대 유지관리교의 낙교 가능성 검토 항목은 이러한 경향을 반영한 것으로 판단되며, 「기존 시설물(교량) 내진 성능 평가 및 향상요령(한국시설안전공단(2011))」의 ‘4.3.3 받침지 지질이(낙교)’ 항목을 적용하여 지진시 낙교에 대한 안전성을 검토하도록 하였다.

또한 유지관리교의 교각, 앵커볼트를 포함한 교량받침, 기초에 대한 내진성능평가를 수행토록 하였다.

제 2절 유지관리교

1. 유지관리교 제원

<표 4.1> 유지관리교 제원

교 량 명	취수탑 유지관리교	소 재 지	경남-○○
교량연장	2@45.0=90.0m	설계하중	DB,DL-13.5
상부구조		하부구조	
형식	개량형 PSC BEAM교	교대형식	역T형식 교대
교폭	3.40m	교각형식	T형 교각
바닥판 f_{ck}	27MPa	기초형식	확대기초
거더 f_{ck}	45MPa	콘크리트 f_{ck}	27MPa

2. 내진해석 조건

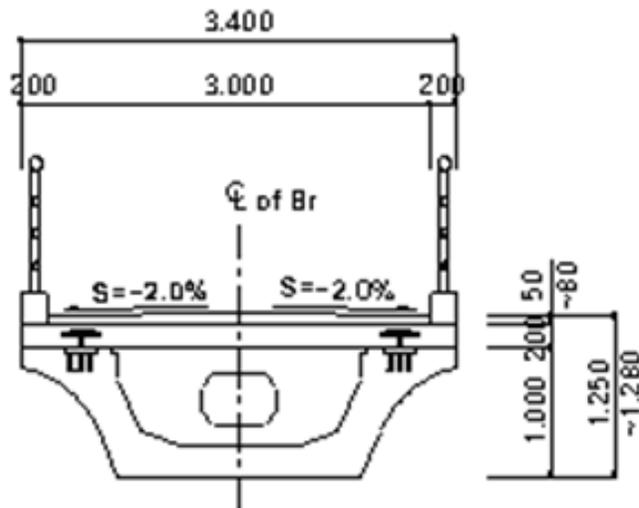
<표 4.2> 내진해석 조건

내진등급	내진1등급교
지진구역계수	0.11
위험도 계수	1.40
가속도 계수	0.154
지반계수	1.0 (지반 종류 I)
고유치 해석방법	Eigen Value Analysis
MODE 조합방법	C.Q.C 방법
받침형식 및 용량	탄성받침 / 2,250kN

3. 탄성지진력 산정

가. 교량 해석모델 작성 및 교각 축력 산정

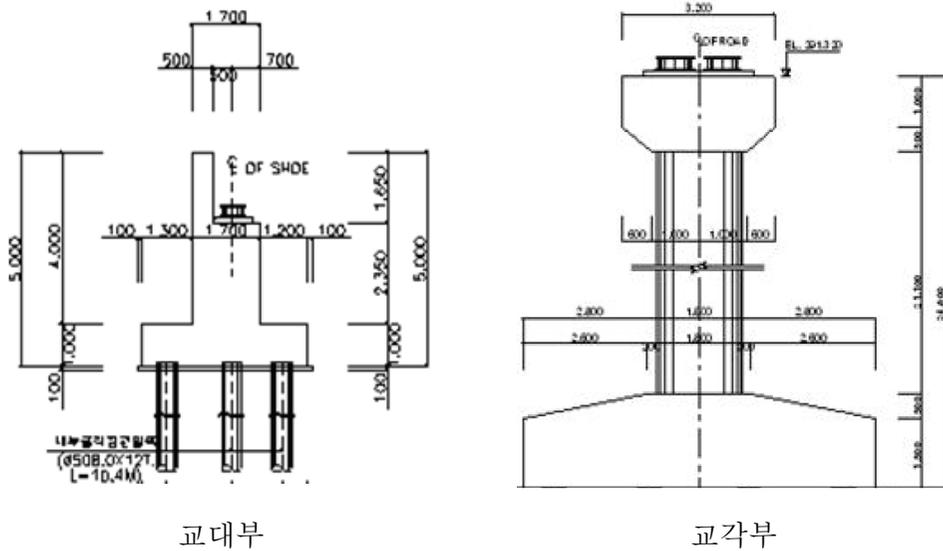
(1) 상부구조 단면특성



<그림 4.1> 상부구조 단면도

(2) 하부구조 단면특성

교대는 역T형, 교각은 T형으로 구성됨



<그림 4.2> 하부구조 단면도

(3) 교량받침 특성

(가) 해석대상 교량에 탄성받침 특성

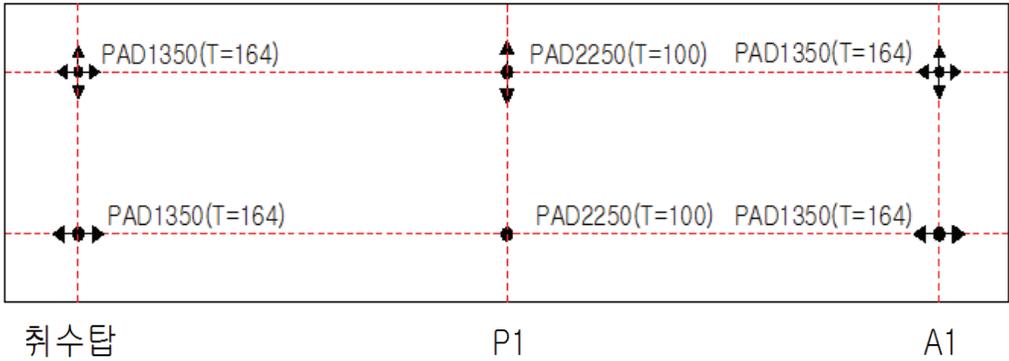
<표 4.3> 받침 특성

수직하중 (kN)	허용수평력 (kN)		압축스프링계수 (kN/m)	전단스프링계수 (kN/m)
	상시	지진시		
1,350	-	207.0	254,531	1,438
2,250	-	345.1	1,394,000	4,793

(나) 지반의 영향은 입력지진하중에 반영, 교각하부는 고정단으로 모델링

(다) 받침은 ELASTIC LINK를 사용하여 각 받침의 스프링 계수에 대해 모델링

(라) 교량의 받침 배치도



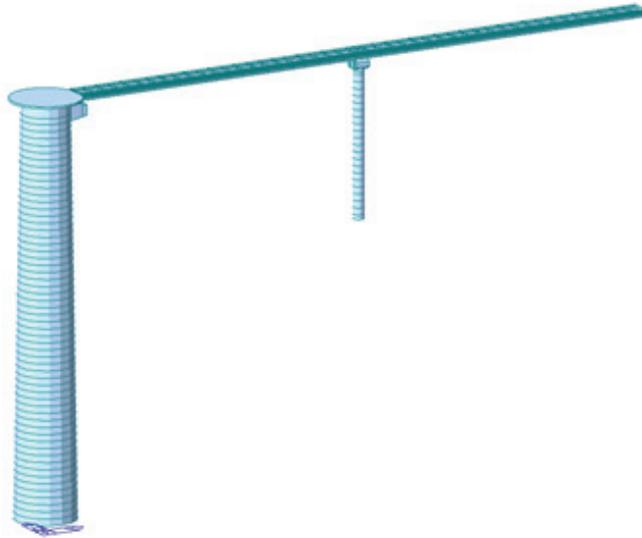
<그림 4.3> 받침 배치도

(4) 모델링

(가) 해석대상 교량은 뼈대구조로 모델링

(나) 기초 중심부는 고정점, 받침은 선형요소를 사용, 탄성받침은 축방향 및 수평방향 강성을 적용하여 모델링

(다) 상부 질량은 프로그램 자동계산과 프레임 요소의 단위길이 당 질량으로 모델링



<그림 4.4> 구조해석 모형도

(5) 자중해석에 의한 축력 산정

(가) 교량 받침부 반력 (교각 상부 축력, kN)

<표 4.4> 받침부 반력

받침번호	취수탑		교각		교대	
	1	2	1	2	1	2
고정하중	693.75	693.75	1516.79	1516.79	693.75	693.75
계	1,387.5		3,033.58		1,387.5	

(나) 교각 하부 축력(kN)

<표 4.5> 교각 하부 축력

구분	상부고정하중	코핑	교각자중	합 계
교각 하부	3,033.58	134.75	1,342.324	4,510.654

나. 교각(고정단) 단면해석

(1) 개요

(가) 교각의 단면강도, 수평변위 및 유효강성 산정을 위해 축력의 효과를 고려하여 모멘트-곡률($M-\phi$) 관계곡선을 산정

(나) 콘크리트는 Mander 모델 사용, 극한압축변형률 $\epsilon_{cu} = 0.002$ 로 제한, 변위연성도 $\mu_{\Delta c} \leq 1.8$ 로 제한해서 교각의 $M-\phi$ 곡선을 산정

(다) 항복시 곡률은 이상화된 $M-\phi$ 곡선의 변곡점에서, 극한시 곡률은 콘크리트 압축연단의 변형을 $\epsilon_{cu} = 0.003$ (소성힌지부의 축방향철근이 겹이음된 경우)에 도달할 때의 곡률로 산정
단면강도를 평가하기 위해 이상화된 $M-\phi$ 곡선의 항복 및 극한시 곡률에 해당하는 모멘트를 산정함

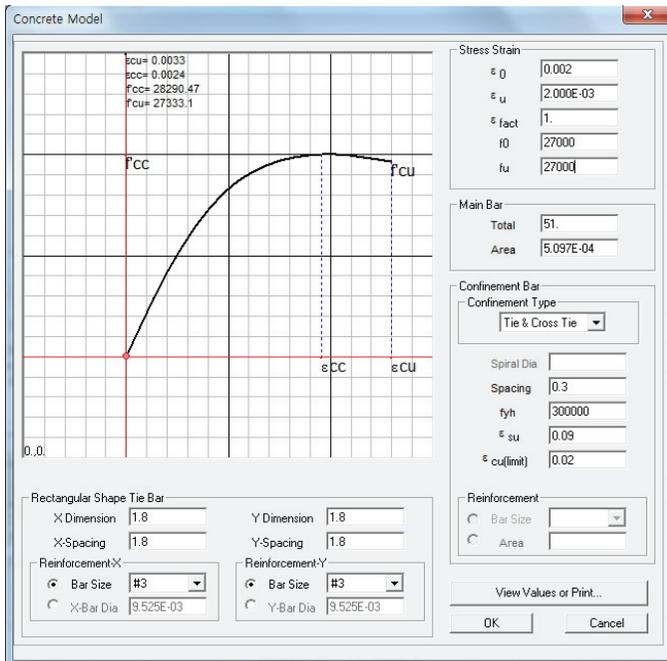
(2) 콘크리트 및 철근 모델

(가) 콘크리트 모델 : Mander Concrete Model

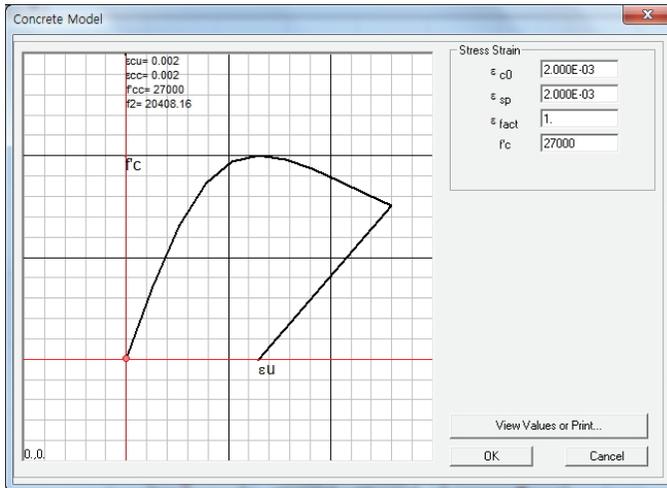
<표 4.6> 콘크리트 모델

설계기준 강도	항 목	적용	단위	비 고
$f_{ck} = 27\text{MPa}$	ϵ_{co} : 콘크리트의 초기변형률	0.002	-	-
	ϵ_{cu} : 콘크리트의 극한변형률	0.002	-	-
	$f'_c = f'_{cc}$: 콘크리트압축강도	27	MPa	f_{ck}

▶ Mander Confined Concrete



▶ Mander Unconfined Concrete



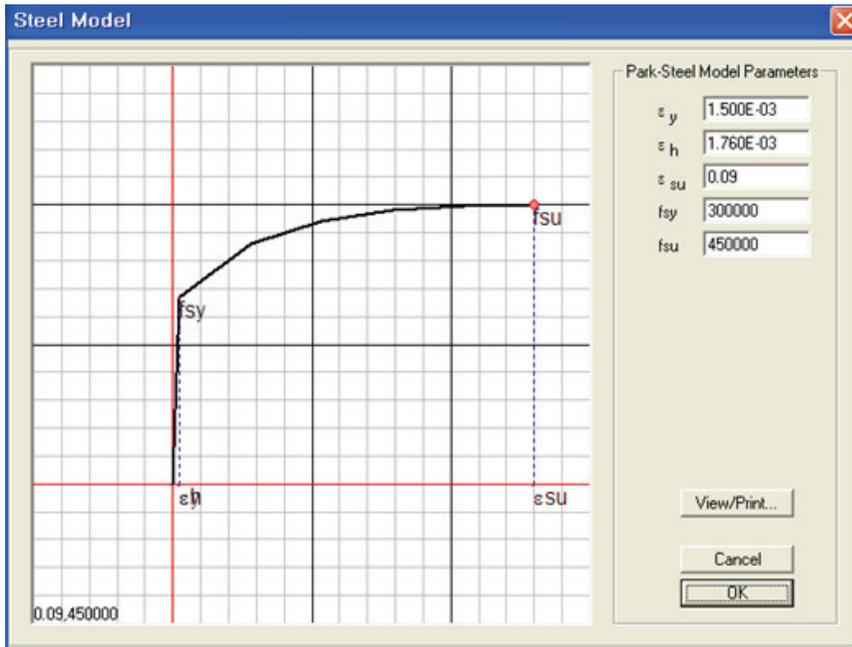
<그림 4.5> 콘크리트 모델

(나) 철근 모델 : Park Steel Model

<표 4.7> 철근 모델

설계기준 강도	항목	적용	근거 및 단위	비고
$f_y = 300\text{MPa}$	ϵ_y : 철근의 항복 변형률	0.0015	$f_y/E_s = 300/20000$	도로교 설계기준
	ϵ_{lr} : 철근의 경화시 변형률	0.00176	D29	Shima
	ϵ_{su} : 철근의 극한시 변형률	0.09	D35이하	CALTRANS
	f_{sy} : 철근의 항복강도	300	f_y (MPa)	도로교 설계기준
	f_{su} : 철근의 극한강도	450	SD30(MPa)	Priestley

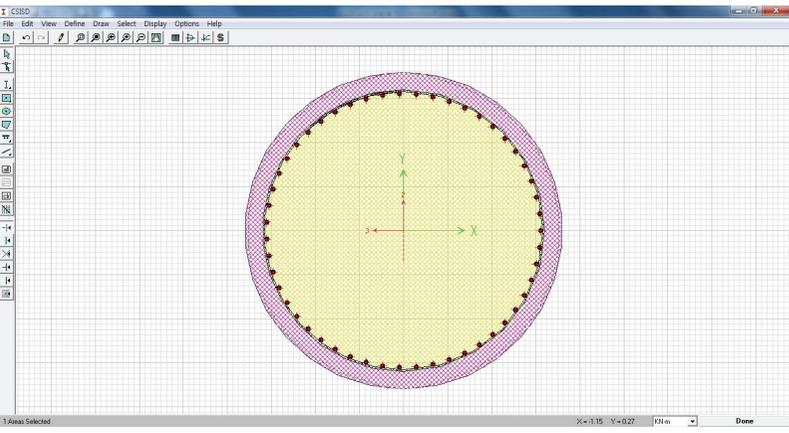
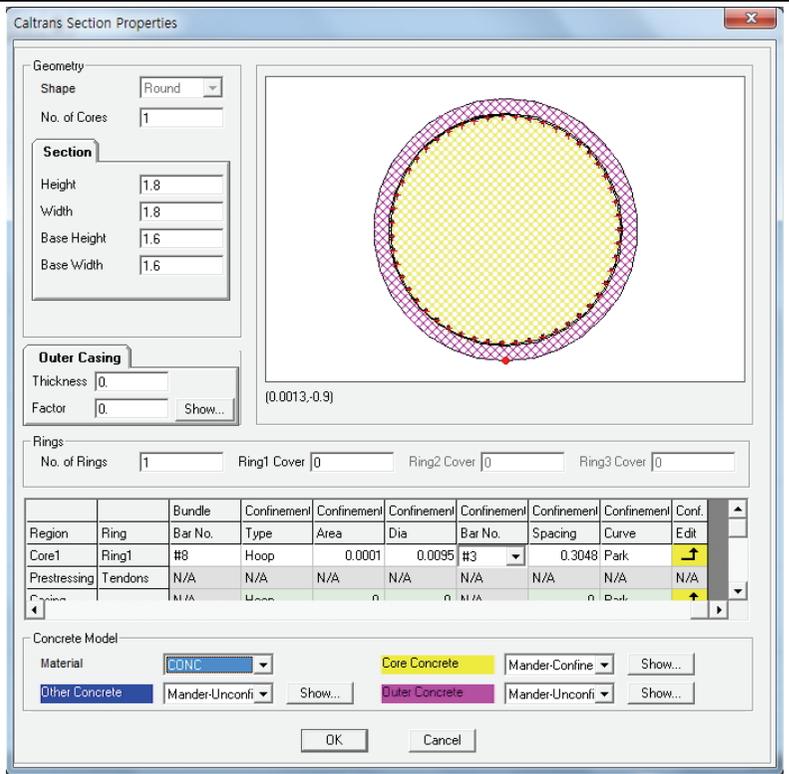
▶ Park Steel Model



<그림 4.6> 철근 모델

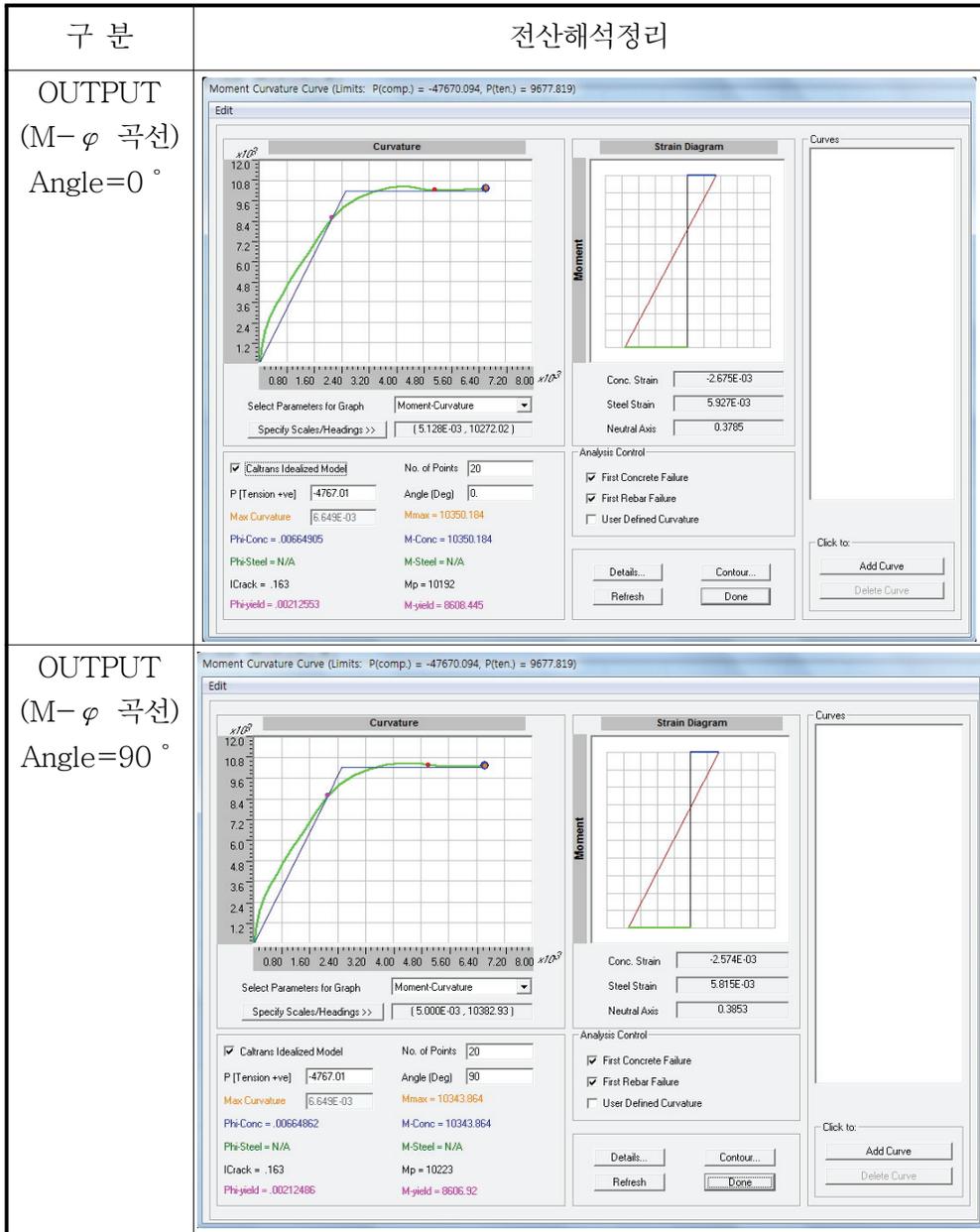
(3) 교각의 $M-\phi$ 해석

(가) 전산 INPUT

구 분	전산해석정리																																								
INPUT (기둥상세)																																									
INPUT (data)	 <p>Caltrans Section Properties</p> <p>Geometry Shape: Round No. of Cores: 1</p> <p>Section Height: 1.8 Width: 1.8 Base Height: 1.6 Base Width: 1.6</p> <p>Outer Casing Thickness: 0 Factor: 0</p> <p>Rings No. of Rings: 1 Ring1 Cover: 0 Ring2 Cover: 0 Ring3 Cover: 0</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Region</th> <th>Ring</th> <th>Bundle</th> <th>Confinement</th> <th>Confinement</th> <th>Confinement</th> <th>Confinement</th> <th>Confinement</th> <th>Confinement</th> <th>Confi.</th> </tr> <tr> <th></th> <th></th> <th>Bar No.</th> <th>Type</th> <th>Area</th> <th>Dia</th> <th>Bar No.</th> <th>Spacing</th> <th>Curve</th> <th>Edit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Core1</td> <td>Ring1</td> <td>#8</td> <td>Hoop</td> <td>0.0001</td> <td>0.0095</td> <td>#3</td> <td>0.3048</td> <td>Park</td> <td>↑</td> </tr> <tr> <td>Prestressing</td> <td>Tendons</td> <td>N/A</td> <td>N/A</td> <td>N/A</td> <td>N/A</td> <td>N/A</td> <td>N/A</td> <td>N/A</td> <td>N/A</td> </tr> </tbody> </table> <p>Concrete Model Material: CONC Core Concrete: Mander-Confin Other Concrete: Mander-Unconfi Outer Concrete: Mander-Unconfi</p> <p>OK Cancel</p>	Region	Ring	Bundle	Confinement	Confinement	Confinement	Confinement	Confinement	Confinement	Confi.			Bar No.	Type	Area	Dia	Bar No.	Spacing	Curve	Edit	Core1	Ring1	#8	Hoop	0.0001	0.0095	#3	0.3048	Park	↑	Prestressing	Tendons	N/A							
Region	Ring	Bundle	Confinement	Confinement	Confinement	Confinement	Confinement	Confinement	Confi.																																
		Bar No.	Type	Area	Dia	Bar No.	Spacing	Curve	Edit																																
Core1	Ring1	#8	Hoop	0.0001	0.0095	#3	0.3048	Park	↑																																
Prestressing	Tendons	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A																																

<그림 4.7> 전산 INPUT

(나) 전산 OUTPUT



<그림 4.8> 전산 OUTPUT

(다) 교축방향 교각하단 M-φ 해석결과
 <표 4.8> 교축방향 M-φ 해석결과

구 분	모멘트(kN·m)	곡률(m ⁻¹)	비 고
초기항복시	8,608	0.00213	M_{yi}^L, ϕ_{yi}^L
항복시	9,366	0.00252	M_y^L, ϕ_y^L
극한시	10,350	0.00665	M_u^L, ϕ_u^L

(라) 교축직각방향 교각하단 M-φ 해석결과
 <표 4.9> 교축직각방향 M-φ 해석결과

구 분	모멘트(kN·m)	곡률(m ⁻¹)	비 고
초기항복시	8,607	0.00212	M_{yi}^T, ϕ_{yi}^T
항복시	9,374	0.00252	M_y^T, ϕ_y^T
극한시	10,344	0.00665	M_u^T, ϕ_u^T

다. 지진해석에 의한 탄성지진력 산정

(1) 입력지진하중 (평가응답스펙트럼)

(가) 교량내진등급 : 내진 I 등급교

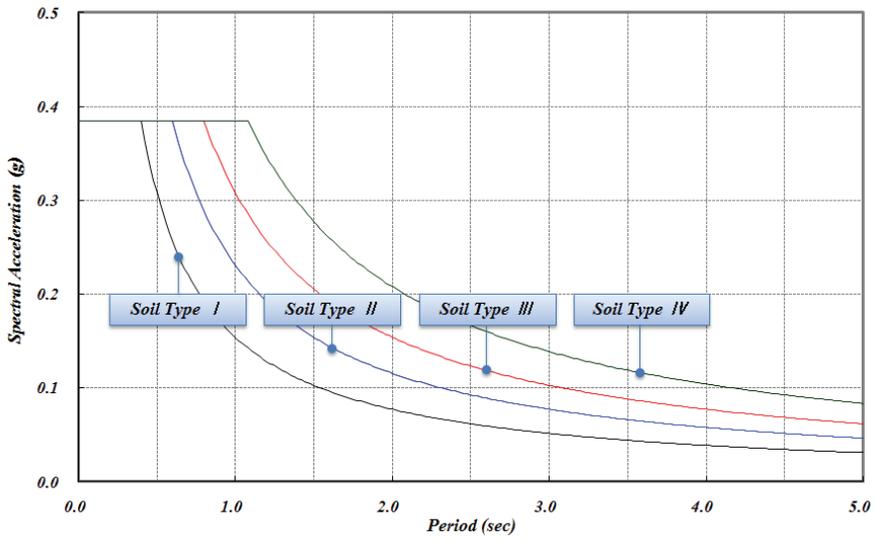
(나) 지진재현주기 : 1,000년

(다) 지진구역계수 : 0.11 (지진구역 I)

(라) 위험도 계수 : $I = 1.4$

(마) 가속도 계수 : $A = 0.11 \times 1.4 = 0.154g$

(바) 지반 계수 : $S = 1.00$ (지반종류 I)



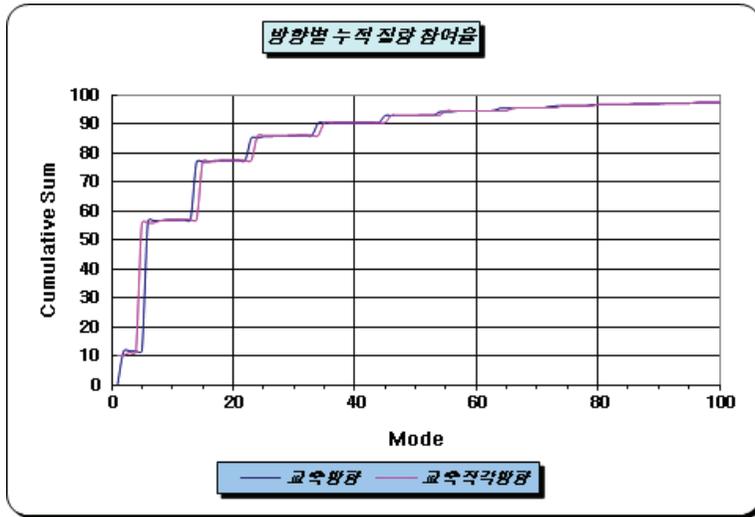
<그림 4.9> 평가응답스펙트럼

(2) 지진해석결과

(가) 고유치 해석결과

<표 4.10> 고유치 해석결과

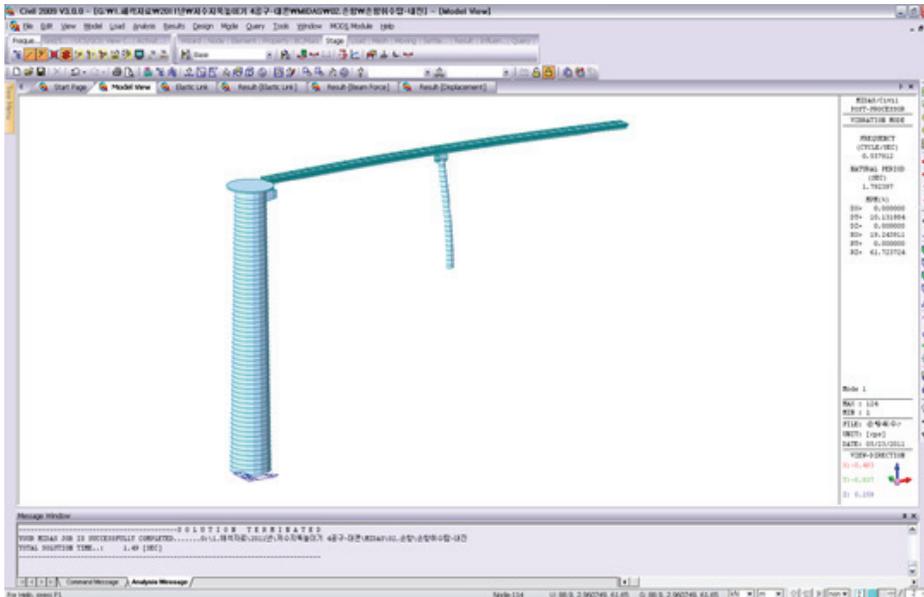
MODE	PERIOD	INDIVIDUAL MODE (%)			CUMULATIVE SUM (%)			비 고
	(CYC/TIME)	UX	UY	UZ	UX	UY	UZ	
1	1.7924	0.000	10.130	0.000	0.000	10.130	0.000	교직
2	1.5315	11.600	0.000	0.000	11.600	10.130	0.000	교축
3	1.0531	0.000	1.020	0.000	11.600	11.150	0.000	
4	0.9280	0.000	0.000	0.000	11.600	11.150	0.000	
5	0.7204	0.000	44.680	0.000	11.600	55.830	0.000	
6	0.7170	44.890	0.000	0.010	56.490	55.830	0.010	
7	0.5992	0.050	0.000	5.700	56.550	55.830	5.710	
8	0.5677	0.000	0.780	0.000	56.550	56.620	5.710	
9	0.3662	0.310	0.000	0.000	56.860	56.620	5.710	
10	0.3450	0.000	0.270	0.000	56.860	56.890	5.710	
• • •								
96	0.0083	0.000	0.280	0.000	97.060	97.300	94.550	
97	0.0083	0.240	0.000	0.030	97.290	97.300	94.580	
98	0.0083	0.000	0.000	0.000	97.290	97.300	94.580	
99	0.0081	0.000	0.000	0.000	97.290	97.300	94.580	
100	0.0077	0.000	0.000	0.000	97.290	97.300	94.580	



<그림 4.10> 진동모드의 누적 질량 참여율(%)

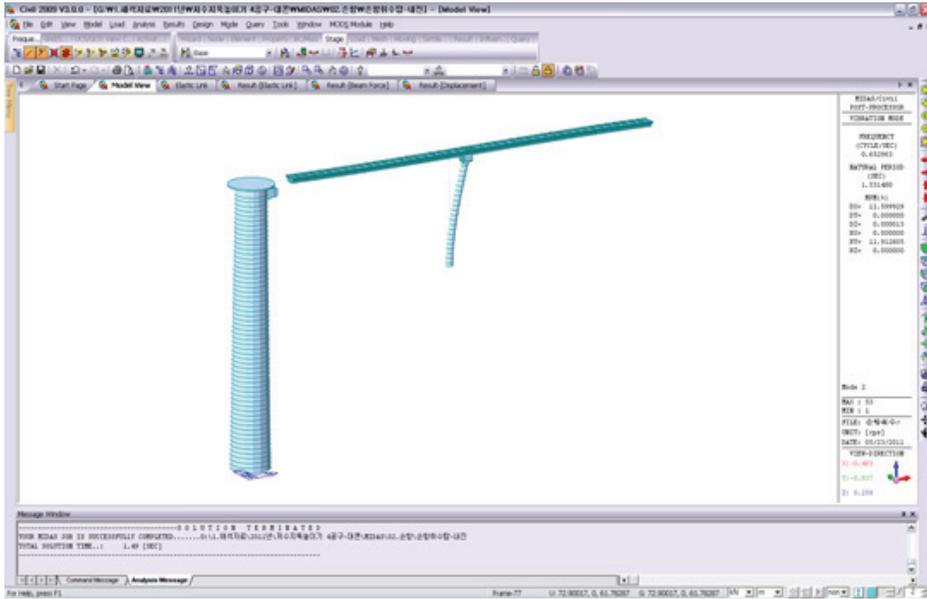
(나) 주요 모드 형상(Mode Shape)

▶ 교축직각방향 (T = 1.7924 sec)



<그림 4.11> 교축직각방향 1차 모드 형상

▸ 교축방향 ($T = 1.5315 \text{ sec}$)



<그림 4.12> 교축방향 1차 모드 형상

(다) 해석결과

<표 4.11> 교각 하부 전단력

구분	교축방향 해석		교축직각방향 해석	
	교축방향 전단력(kN)	교직방향 전단력(kN)	교축방향 전단력(kN)	교직방향 전단력(kN)
교각	169.380	0.000	0.000	209.820

<표 4.12> 교각 하부 모멘트

구분	교축방향 해석		교축직각방향 해석	
	교축방향 모멘트(kN·m)	교직방향 모멘트(kN·m)	교축방향 모멘트(kN·m)	교직방향 모멘트(kN·m)
교각	3213.740	0.000	0.000	4168.780

<표 4.13> 교각부 탄성받침 1기당 최대발생력(kN)

구분		교축방향 지진하중 재하시		교축직각방향 지진하중 재하시	
		교축방향	교축직각방향	교축방향	교축직각방향
교각	1	53.950	0.000	1.800	73.370
	2	53.950	0.000	1.800	73.370

<표 4.14> 교각부 탄성받침 1기당 최대발생변위(mm)

구분		교축방향 지진하중 재하시		교축직각방향 지진하중 재하시	
		교축방향	교축직각방향	교축방향	교축직각방향
교각	1	11.369	0.000	0.000	15.308
	2	11.369	0.000	0.000	15.308

(라) 교각(고정단) 하중경우별 해석결과(30% 규정 적용)

- 하중 경우 1 : 1.0 x (교축방향해석) + 0.3 x (교직방향해석)
- 하중 경우 2 : 0.3 x (교축방향해석) + 1.0 x (교직방향해석)

<표 4.15> 교각 하부 전단력

구분	교축방향(kN)		교축직각방향(kN)	
	하중경우 1	하중경우 2	하중경우 2	하중경우 1
교각	169.380	50.814	209.820	62.946

<표 4.16> 교각 하부 모멘트

구분	교축방향 (kN)		교축직각방향 (kN)	
	하중경우 1	하중경우 2	하중경우 2	하중경우 1
교각	3213.740	964.122	4168.780	1250.634

<표 4.17> 교각부 탄성반침 1기당 최대발생력 (kN)

구분	교축방향 지진하중 재하시		교축직각방향 지진하중 재하시		
	하중경우 1	하중경우 2	하중경우 2	하중경우 1	
교각	1	54.490	17.985	73.370	22.011
	2	54.490	17.985	73.370	22.011

4. 내진성능 평가

가. 교각의 내진성능 평가

(1) 교각(고정단)의 형식 특성값

<표 4.18> 교각의 특성값

구 분	교축방향	교축직각방향	비 고
거동형태	켄틸레버식	켄틸레버식	
교각유효높이(He)	22.6m	23.7m (22.6+0.4+0.7)	하중작용점 높이
진동주기(T)	1.532sec	1.792sec	구조해석결과

(2) 교각(고정단)의 휨단면강도 산정

단면강도는 수평하중에 대한 부재의 최대저항능력으로, 하중작용점의 높이는 교축방향에 대해서는 교각의 상단, 교축직각방향에 대해서는 상부구조 질량의 중심 높이로 산정

(가) 교축방향 - 교각하단

$$\bullet F_y^L = \frac{M_y^L}{H_e^L} = \frac{9,366}{22.6} = 414.425 \text{ kN}$$

$$\bullet F_f^L = \frac{M_n^L}{H_e^L} = \frac{10,350}{22.6} = 457.965 \text{ kN}$$

(나) 교축직각방향 - 교각하단

$$\bullet F_y^T = \frac{M_y^T}{H_e^T} = \frac{9,374}{23.7} = 395.527 \text{ kN}$$

$$\bullet F_f^T = \frac{M_n^T}{H_e^T} = \frac{10,344}{23.7} = 436.456 \text{ kN}$$

여기서, F_y^L, F_y^T : 교각의 항복시 교축 및 교축직각방향
휨단면강도 (kN)

F_f^L, F_f^T : 교각의 극한상태시 교축 및 교축직각방향
휨단면강도 (kN)

M_y^L, M_y^T : 교각의 항복시 교축 및 교축직각방향
휨모멘트 (kN·m)

M_n^L, M_n^T : 교각의 극한상태시 교축 및 교축직각방향
공칭휨모멘트 (kN·m)

H_e^L, H_e^T : 교각의 교축 및 교축직각방향 유효높이 (m)

(3) 교각(고정단)의 공급연성도 산정

(가) 교축방향

① 항복변위 Δ_y

$$\bullet \Delta_y^L = \frac{\phi_y^L \cdot (H_e^L)^2}{3} = \frac{0.00252 \times 22.6^2}{3} = 0.429 \text{ m}$$

② 소성힌지길이 L_p (단, $L_p \geq 0.044 \cdot f_y d_{bl}$)

$$\bullet L_p^L = 0.08 H_e^L + 0.022 f_y d_{bl} = 0.08 \times 22.6 + 0.022 \times 300 \times 0.0254$$

$$= 1.973 \text{ m}$$

$$\geq 0.044 \cdot f_y d_{bl} = 0.044 \times 300 \times 0.0254 = 0.330 \text{ m}$$

여기서, f_y : 축방향철근 항복강도 (MPa)

d_{bl} : 기둥의 축방향철근 직경 (m)

③ 소성변위 Δ_p

$$\bullet \theta_p^L = (\phi_u^L - \phi_y^L) \cdot L_p^L = (0.00665 - 0.00252) \times 1.973 = 0.0082$$

$$\begin{aligned} & \triangleright \Delta_p^L = \left(\frac{M_u^L}{M_y^L} - 1 \right) \Delta_y^L + \theta_p^L \left(H_e^L - \frac{L_p^L}{2} \right) \\ & = \left(\frac{10,350}{9,366} - 1 \right) \times 0.42853 + 0.0082 \times \left(22.6 - \frac{1.973}{2} \right) = 0.222 \text{ m} \end{aligned}$$

④ 극한변위 Δ_u

$$\triangleright \Delta_u^L = \Delta_y^L + \Delta_p^L = 0.429 + 0.222 = 0.651 \text{ m}$$

⑤ 공급변위연성도 μ_{Δ_c} (단, $\mu_{\Delta_c} \leq 1.80$)

$$\triangleright \mu_{\Delta_c}^L = \frac{\Delta_u^L}{\Delta_y^L} = \frac{0.651}{0.429} = 1.517 \leq 1.80 \text{ 제한}$$

(축방향철근 접이음 존재)

$$\therefore \mu_{\Delta_c}^L = 1.517$$

(나) 교축직각방향-기둥하단

① 항복변위 Δ_y

$$\triangleright \Delta_y^T = \frac{\phi_y^T \cdot (H_e^L)^2}{3} = \frac{0.00252 \times 23.7^2}{3} = 0.471 \text{ m}$$

② 소성힌지길이 L_p (단, $L_p \geq 0.044 \cdot f_y d_{bl}$)

$$\begin{aligned} \triangleright L_p^T &= 0.08 H_e^T + 0.022 f_y d_{bl} \\ &= 0.08 \times 23.7 + 0.022 \times 300 \times 0.0254 = 2.061 \\ &\geq 0.044 \cdot f_y d_{bl} = 0.044 \times 300 \times 0.0254 = 0.330 \text{ m} \end{aligned}$$

③ 소성변위 Δ_p

$$\triangleright \theta_p^T = (\phi_u^T - \phi_y^T) \cdot L_p^T = (0.00665 - 0.00252) \times 2.061 = 0.0085$$

$$\triangleright \Delta_p^T = \left(\frac{M_u^T}{M_y^T} - 1 \right) \Delta_y^T + \theta_p^T \left(H_e^T - \frac{L_p^T}{2} \right)$$

$$= \left(\frac{10,344}{9,374} - 1 \right) \times 0.47126 + 0.0085 \times \left(23.7 - \frac{2.061}{2} \right) = 0.242 \text{ m}$$

iv) 극한변위 Δ_u

▶ $\Delta_u^T = \Delta_y^T + \Delta_p^T = 0.471 + 0.242 = 0.713 \text{ m}$

④ 공급변위연성도 μ_{Δ_c} (단, $\mu_{\Delta_c} \leq 1.80$)

▶ $\mu_{\Delta_c}^T = \frac{\Delta_u^T}{\Delta_y^T} = \frac{0.713}{0.471} = 1.514 \leq 1.80 \text{ 제한}$ (축방향철근 겹이음 존재)

$\therefore \mu_{\Delta_c}^T = 1.514$

(4) 교각(고정단)의 전단강도

(가) 교축방향

① 콘크리트가 부담하는 전단강도 V_c

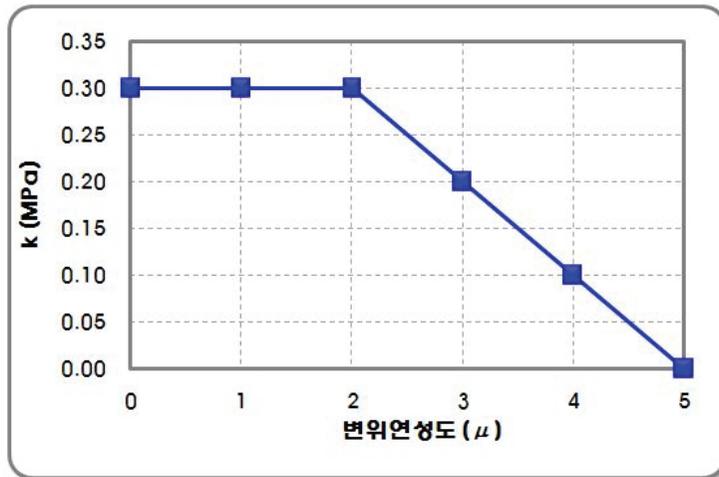
▶ $V_c^L = k^L \sqrt{f_{ck}} A_e = 0.30 \sqrt{27} \times 2.036 = 3,173 \text{ kN}$

여기서, $k^L = 0.3$ ($k = 0.3 - 0.1(\mu_{\Delta_c} - 2)$)

단, $\mu_{\Delta_c} \leq 2.0$ 이면 $k = 0.3$)

$A_e = 0.8 \times A_{\text{gross}} = 0.8 \times 2.545 = 2.036 \text{ m}^2$ (유효 단면적)

$A_{\text{gross}} = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi \cdot 1.80^2}{4} = 2.545 \text{ m}^2$



<그림 4.13> 부재의 공급변위연성도에 따른 콘크리트 전단강도 감소계수 k

② 전단철근이 부담하는 전단강도 V_s

$$\bullet V_s^L = \frac{\pi A_v f_y D'}{2s} = \frac{\pi \times 198.6 \times 300 \times 1,641.3}{2 \times 300} = 512 \text{ kN}$$

여기서, $A_v = 198.6 \text{ mm}^2$

(전단력 작용방향 횡철근 1층의 단면적, D16)

$$D' = D(\text{기둥폭}) - 2c(\text{피복}) + \text{축방향철근직경} + \text{횡방향철근직경}$$

$$= 1800 - 2 \times 100 + 25.4 + 15.90$$

$$= 1,641.3 \text{ mm (횡철근 중심간 거리)}$$

③ 축력에 의한 전단강도 V_p

$$\bullet V_p^L = 0.15 \frac{P \times h}{L_s} = 0.15 \times \frac{4,606.08 \times 1.80}{22.600} = 55.028 \text{ kN}$$

여기서, $P = 4,606.08 \text{ kN}$

(구조해석에서 얻은 교각의 최소 계수축력)

$$h = 1.800 \text{ m (= D)}, \quad L_s = 22.600 \text{ m (= } H_e)$$

④ 전단강도 V_n

$$\therefore V_n^L = V_c^L + V_s^L + V_p^L = 3,173 + 512 + 55 = 3,740 \text{ kN}$$

(나) 교축직각방향 기둥하단

① 콘크리트가 부담하는 전단강도 V_c

$$\bullet V_c^T = k^T \sqrt{f_{ck}} A_e = 0.30 \sqrt{27} \times 2.036 = 3,173 \text{ kN}$$

여기서, $k^T = 0.3$ ($k = 0.3 - 0.1(\mu_{\Delta c} - 2)$)

단, $\mu_{\Delta c} \leq 2.0$ 이면 $k = 0.3$)

$$A_e = 0.8 \times A_{\text{gross}} = 0.8 \times 2.545 = 2.036 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{gross}} = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi \cdot 1.80^2}{4} = 2.545 \text{ m}^2$$

② 전단철근이 부담하는 전단강도 V_s

$$V_s^T = \frac{\pi A_v f_y D'}{2s} = \frac{\pi \times 198.6 \times 300 \times 1,641.3}{2 \times 300} = 512 \text{ kN}$$

여기서, $A_v = 198.6 \text{ mm}^2$

(전단력 작용방향 횡철근 1층의 단면적, D16)

$$\begin{aligned} D' &= D(\text{기둥폭}) - 2c(\text{피복}) + \text{축방향 철근 직경} + \text{횡방향 철근 직경} \\ &= 1800 - 2 \times 100 + 25.4 + 15.9 \\ &= 1,641.3 \text{ mm (횡철근 중심간거리)} \end{aligned}$$

③ 축력에 의한 전단강도 V_p

$$V_p^T = 0.15 \frac{P \times h}{L_s} = 0.15 \times \frac{4,606.08 \times 1.80}{23.70} = 52.474 \text{ kN}$$

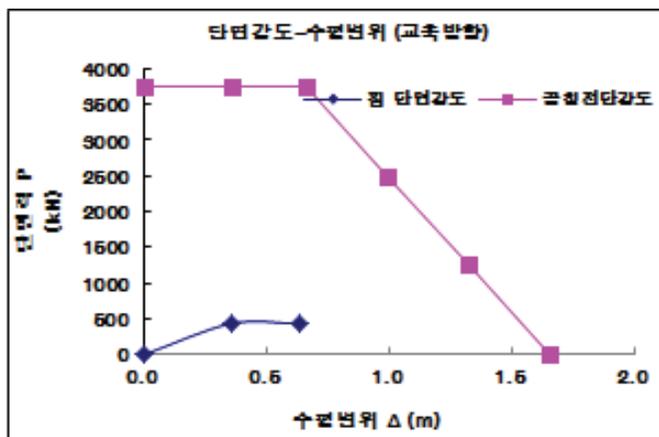
여기서, $P = 4,606.080 \text{ kN}$

(구조해석에서 얻은 교각의 최소 계수축력)

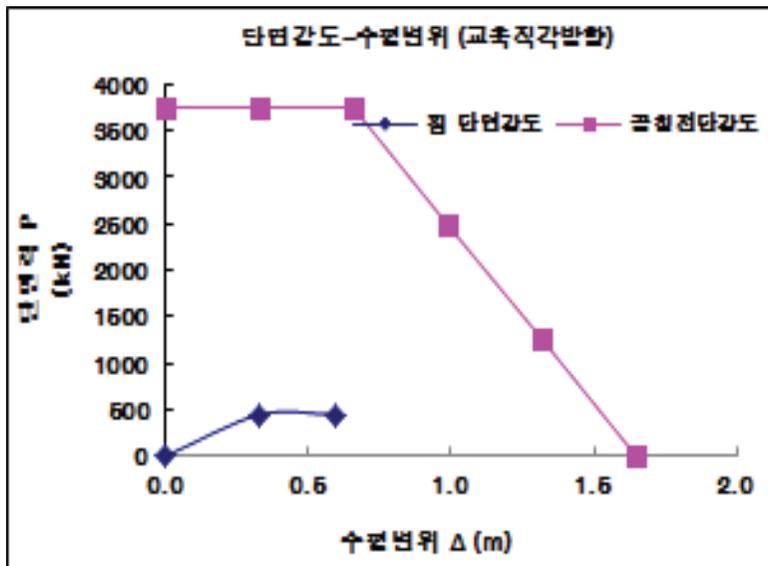
$h = 1.800 \text{ m} (= D)$, $L_s = 23.640 \text{ m} (= H_e)$

④ 전단강도 V_n

$$\therefore V_n^T = V_c^T + V_s^T + V_p^T = 3,173 + 512 + 53 = 3,738 \text{ kN}$$



<그림 4.14> 교축방향 공급역량곡선에 의한 파괴모드 결정



<그림 4.15> 교축직각방향 공급역량곡선에 의한 파괴모드 결정

(다) 교각(고정단)의 파괴모드

∴ 교각(고정단)는 휨파괴에 이를 때까지 전단파괴가 발생하지 않아 교각은 ‘휨파괴 모드’에 의해 지배됨

(5) 교각(고정단)의 소요역량 산정

(가) 교축방향

① P- Δ 효과를 고려한 탄성지진모멘트 $M_{E,pd}$

$$\begin{aligned} \bullet M_{E,pd}^L &= M_E^L + P \cdot \Delta_E^L \\ &= 3,213.74 + 3,033.58 \times 0.05745 \\ &= 3,388.02 \text{ kN} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

여기서 , M_E^L : 교축방향 탄성지진모멘트

P : 교각 상단에 작용하는 축력

Δ_E^L : 교축방향 탄성지진변위

② 단면강도비 R_s

$$\bullet R_s^L = \frac{M_{E,pd}^L}{M_n^L} = \frac{3,388}{10,350} = 0.327$$

\therefore 탄성영역상에서 거동

(나) 교축직각방향 - 기둥하단

① P- Δ 효과를 고려한 탄성지진모멘트 $M_{E,pd}$

$$\begin{aligned} \bullet M_{E,pd}^T &= M_E^T + P \cdot \Delta_E^T \\ &= 4,168.78 + 3,033.58 \times 0.07503 \\ &= 4,396.4 \text{ kN} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

여기서 , M_E^T : 교축직각방향 탄성지진모멘트

P : 교각 상단에 작용하는 축력

Δ_E^T : 교축직각방향 탄성지진변위

② 단면강도비 R_s

$$\bullet R_s^T = \frac{M_{el,pd}^T}{M_n^T} = \frac{4,396}{10,344} = 0.425$$

∴ 탄성영역상에서 거동

(6) 교각(고정단)의 내진성능 평가

(가) 공급역량(휨모멘트)

- ▶ 교축방향 : $M_c^L = 10,350 \text{ kN} \cdot \text{m}$
- ▶ 교축직각방향 : $M_{B,c}^T = 10,344 \text{ kN} \cdot \text{m}$

(나) 소요역량(휨모멘트)

- ▶ 교축방향 : $M_d^L = 3,388 \text{ kN} \cdot \text{m}$
- ▶ 교축직각방향 : $M_{B,d}^T = 4,396 \text{ kN} \cdot \text{m}$

(다) 평가(휨모멘트)

- ▶ 교축방향 : $\frac{M_c^L}{M_d^L} = \frac{10,350}{3,388} = 3.055 \geq 1.0 \quad \therefore \text{O.K}$
- ▶ 교축직각방향 : $\frac{M_{B,c}^T}{M_{B,d}^T} = \frac{10,344}{4,396} = 2.353 \geq 1.0 \quad \therefore \text{O.K}$

나. 교각부 교량 받침의 내진성능 평가

교각의 받침부 평가시 지진하중은 교각의 단면강도와 받침부 발생지진력 중 작은 값을 취함

(1) 받침 본체 - 횡방향 저항력

(가) 받침 1기당 횡방향 저항용량 f_B

- ▶ 교축방향 $f_B^L = 345.1 \text{ kN}$
- ▶ 교축직각방향 $f_B^T = 345.1 \text{ kN}$

(나) 공급역량 : 횡방향 저항용량 $F_{B,C}$

- ▶ 횡방향 저항용량 = 받침 1기당의 횡방향 저항용량(f_B) $\times R$
- ▶ 교축방향 $F_{B,C}^L = 345.1 \times 1.0 = 345.1 \text{ kN}$
- ▶ 교축직각방향 $F_{B,C}^T = 345.1 \times 1.0 = 345.1 \text{ kN}$

(다) 소요역량 : 받침부 평가지진력 $F_{B,D} = \text{Min}$

(교각 단면강도, 발생지진력)

- ▶ 교각 단면강도 = 기둥 1개당 상부전단력 ($[V_E]_{\text{comb, Top}}$)
/저항 받침수 (n_B)
- ▶ 교축방향 $F_{B,D}^L = \text{Min}(374.682/2 = 187.341, 54.490) = 54.490 \text{ kN}$
- ▶ 교축직각방향 $F_{B,D}^T = \text{Min}(387.758/2 = 193.87, 73.370) = 73.370 \text{ kN}$

(라) 내진성능 평가

- ▶ 교축방향 $\frac{F_{B,C}^L}{F_{B,D}^L} = \frac{345.1}{54.490} = 6.333 \geq 1.0 \quad \therefore \text{O.K}$
- ▶ 교축직각방향 $\frac{F_{B,C}^T}{F_{B,D}^T} = \frac{345.1}{73.370} = 4.704 \geq 1.0 \quad \therefore \text{O.K}$

(2) 받침 본체 - 변위

(가) 공급역량 : 받침부 허용변위 $\delta_{B,C}$

▶ 받침부 허용변위 = 받침 1기당의 수평방향 허용전단변위
 $\times R$

▶ 교축방향 $\delta_{B,C}^L = 72.0 \times 1.0 = 72.0 \text{ mm}$

▶ 교축직각방향 $\delta_{B,C}^T = 72.0 \times 1.0 = 72.0 \text{ mm}$

(나) 소요역량 : 받침부 발생 전단변위 (30% 규정 적용)

<표 4.19> 받침부 발생 전단변위

구 분	교축방향 작용력 (Comb1)		교축직각방향 작용력 (Comb2)	
	교축방향	교축직각방향	교축방향	교축직각방향
전단변위 (mm)	11.369	0.000	0.000	15.308

▶ 교축방향 $\delta_{B,D}^L = \text{MAX} [\delta_{B,D,comb1}^L, \delta_{B,D,comb2}^L]$
 $= \text{MAX} [11.369, 0.000] = 11.369 \text{ mm}$

▶ 교축직각방향 $\delta_{B,D}^T = \text{MAX} [\delta_{B,D,comb1}^T, \delta_{B,D,comb2}^T]$
 $= \text{MAX} [0.000, 15.308] = 15.308 \text{ mm}$

(다) 내진성능 평가

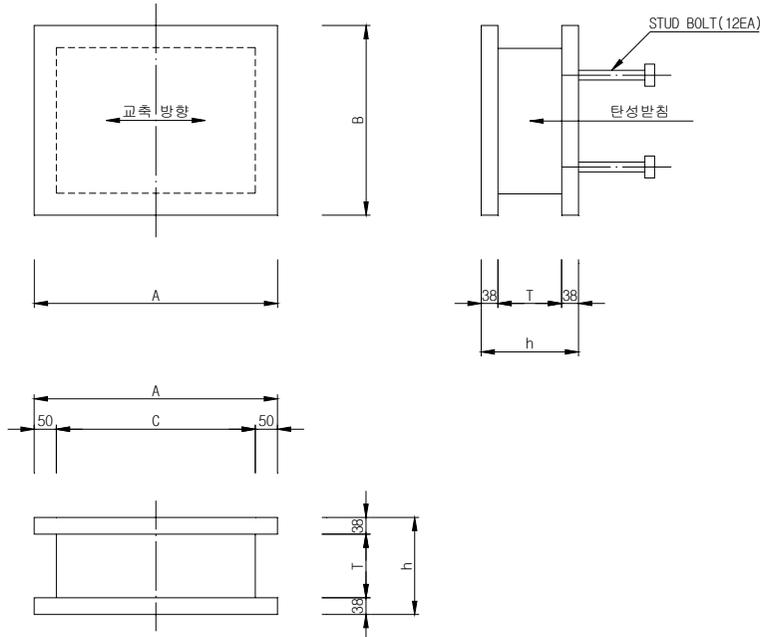
▶ 교축방향 $\frac{\delta_{B,C}^L}{\delta_{B,D}^L} = \frac{72.0}{11.369} = 6.333 \geq 1.0 \quad \therefore \text{O.K}$

▶ 교축직각방향 $\frac{\delta_{B,C}^T}{\delta_{B,D}^T} = \frac{72.0}{15.308} = 4.703 \geq 1.0 \quad \therefore \text{O.K}$

(3) 앵커 볼트

(가) 받침 관련 제원 및 재료 특성

① 본체 규격



<그림 4.16> 교량받침 제원

A	=	600	mm	(x)	STUD 직경 D	=	50	mm
B	=	600	mm	(y)	STUD 길이 L	=	150	mm
C	=	500	mm		교축 앵커 CTC	=	500	mm
T	=	80	mm		교직 앵커 CTC	=	500	mm
h	=	148	mm		볼트 직경 D	=	18	mm
m×n	=	2×2	(교축×교직)	=	4	EA		

② 콘크리트 설계기준강도 $f_{ck} = 27 \text{ MPa}$

③ 앵커의 유효단면적 $A_{se,V} = 254.5 \text{ mm}^2$ (볼트 지름 적용)

④ 앵커의 인장강도 $f_{uta} = 410 \text{ MPa}$ (단, $f_{uta} \leq \text{Min}(1.9 f_{ya}, 860 \text{ MPa})$)

⑤ 앵커의 유효문힘길이 $h_{ef} = 150 \text{ mm}$

⑥ 코핑부의 깊이 $H1 = 1,000 \text{ mm}$ (교각 코핑부 변단면 중점깊이, 끝단)
 $H2 = 1,500 \text{ mm}$ (교각 코핑부 변단면 시점 깊이)

(나) 강재 파괴 - 선설치 헤드스터드

① 공급역량 : 강재강도 V_{sa}

▶ $V_{sa} = n \cdot A_{se,V} \cdot f_{uta}$ (여기서 n 은 받침의 앵커볼트 수)

▶ 교축방향 $V_{sa}^L = 4 \times 254.5 \times 410 = 417.4 \text{ kN}$

▶ 교축직각방향 $V_{sa}^T = 4 \times 254.5 \times 410 = 417.4 \text{ kN}$

② 소요역량 : 받침 1기당 평가지진력 $F_{AS,D}$

▶ 교축방향 $F_{AS,D}^L = F_{B,D}^L = 54.49 \text{ kN}$

▶ 교축직각방향 $F_{AS,D}^T = F_{B,D}^T = 73.37 \text{ kN}$

③ 평가

▶ 교축방향 $\frac{V_{sa}^L}{F_{AS,D}^L} = \frac{417.4}{54.49} = 7.660 \geq 1.0 \quad \therefore \text{O.K}$

▶ 교축직각방향 $\frac{V_{sa}^T}{F_{AS,D}^T} = \frac{417.4}{73.37} = 5.689 \geq 1.0 \quad \therefore \text{O.K}$

(다) 콘크리트 파괴

① 공급역량 : 콘크리트 파괴강도 V_{cbg} (앵커 그룹)

$$\text{㉠ } V_{cbg} = \frac{A_{Vc}}{A_{Vco}} \cdot \psi_{ed,V} \cdot V_b$$

여기서, A_{Vc} : 단일 앵커 또는 앵커 그룹의 전단력 방향 자유 단면에 형성되는 전단파괴면 투영면적, mm^2

$$A_{Vc} = [c_{a2} + (n-1)s_2 + 1.5 \alpha c_{a1}] \times 1.5 \alpha c_{a1}$$

$$\alpha = \frac{\sin \theta \times \cos(90 - \tan^{-1}(1.5))}{1.5 \times \sin(180 - (\theta + \tan^{-1}(1.5)))}$$

$A_{V_{co}}$: 연단거리, 간격 또는 부재두께에 제한을 받지 않는
단일 앵커의 전단력 방향 자유 단면에 형성되는
전단파괴면 투영면적, mm²

$$A_{V_{co}} = 4.5 c_{a1}^2$$

$\psi_{ed,V}$: 연단거리 영향에 대한 전단강도 수정계수

$$c_{a2} \geq 1.5 c_{a1} \text{ 인 경우 } \psi_{ed,V} = 1.0$$

$$c_{a2} < 1.5 c_{a1} \text{ 인 경우 } \psi_{ed,V} = 0.7 + 0.3 \frac{c_{a2}}{1.5 c_{a1}}$$

V_b : 전단력을 받는 단일 앵커의 기본 콘크리트 파괴강도, N

$$V_b = 0.6 \left[\frac{l_e}{d_0} \right]^{0.2} \sqrt{d_0} \sqrt{f_{ck}} c_{a1}^{1.5}$$

$$V_b = 0.7 \left[\frac{l_e}{d_0} \right]^{0.2} \sqrt{d_0} \sqrt{f_{ck}} c_{a1}^{1.5} \text{ (직경 10mm 이상의}$$

헤드스터드일 경우)

c_{a1} : 앵커볼트 중심에서 하중 작용 방향으로 콘크리트
표면까지의 수직거리, mm

c_{a2} : 앵커볼트 중심에서 하중 작용 직각방향으로 콘크리트
표면까지의 수직거리, mm

s_1 : 하중 작용 직각방향으로 배열된 앵커볼트 중심간 거리, mm

s_2 : 하중 작용 방향으로 배열된 앵커볼트 중심간 거리, mm

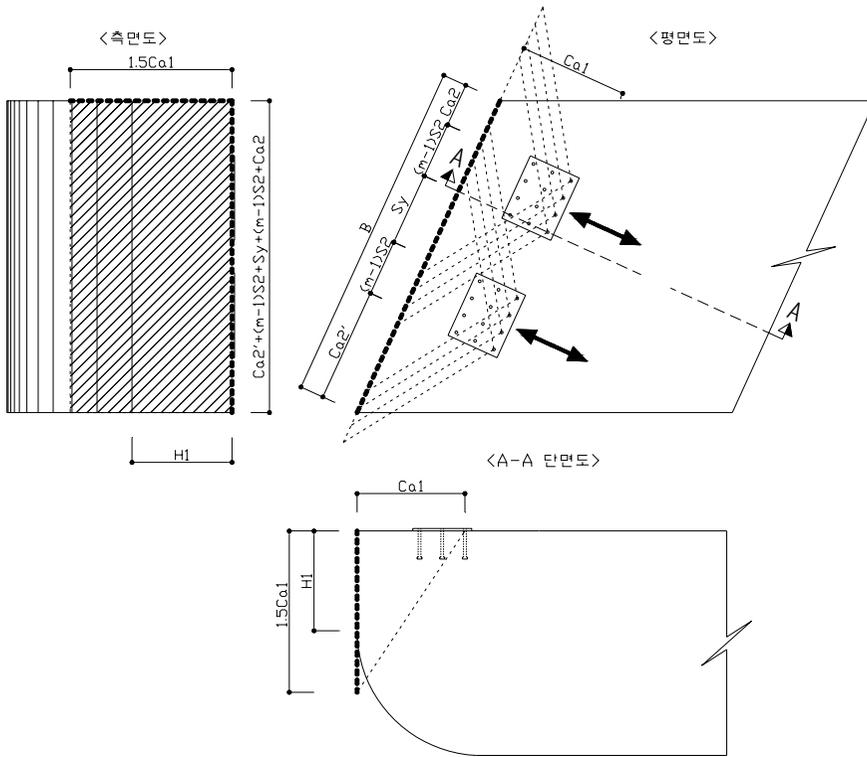
h_a : 앵커가 정착되는 콘크리트 두께, mm

α : 사각에 따른 투영면적 보정계수

㉠ 교축방향

▶ $c_{a1} = 1,350 \text{ mm}$, $c_{a2} = 850 \text{ mm}$, $c_{a2}' = 850 \text{ mm}$

▶ $s_1 = 500 \text{ mm}$, $s_2 = 500 \text{ mm}$, $s_y = 500 \text{ mm}$



<그림 4.17> 콘크리트 파괴강도에 대한 투영면적 산정 - 교축방향

$$\begin{aligned}
 A_{V_c} &= [c_{a2}' + (m-1) \times s_2 + s_y + (m-1) \times s_2 + c_{a2}] \times 1.5 c_{a1} \\
 &= [850 + 1 \times 500 + 500 + 1 \times 500 + 850] \times 1.5 \times 1,350 \\
 &= 6,480,000 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

▶ $A_{V_{co}} = 4.5 c_{a1}^2 = 4.5 \times 1350^2 = 8,201,250 \text{ mm}^2$

∴ $A_{V_c} = 6,480,000 \text{ mm}^2 < n \cdot A_{V_{co}} = 4 \times 8,201,250 = 32,805,000 \text{ mm}^2$

$$\bullet V_{cbg} = \frac{A_{Vc}}{A_{Vco}} \cdot \psi_{ed,V} \cdot V_b = \frac{6,480,000}{8,201,250} \times 0.889 \times 1,589 = 1,116 \text{ kN}$$

여기서

$$\psi_{ed,V} = 0.889 \left(\min(c_{a2}) < 1.5 c_{a1} \text{ 인 경우 } \psi_{ed,V} = 0.7 + 0.3 \frac{\min(c_{a2})}{1.5 c_{a1}} \right)$$

$$V_b = 0.7 \left[\frac{l_e}{d_0} \right]^{0.2} \sqrt{d_0} \sqrt{f_{ck}} c_{a1}^{1.5}$$

$$= 0.7 \times \left[\frac{150}{50} \right]^{0.2} \times \sqrt{50} \times \sqrt{27} \times 1,350^{1.5} = 1,589 \text{ kN}$$

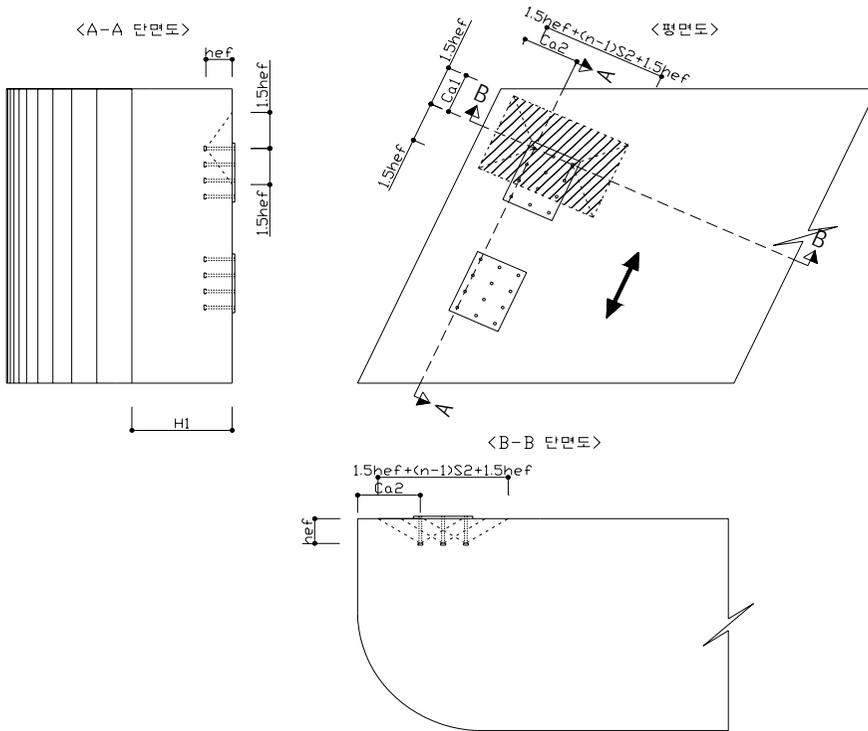
$$l_e = \text{MIN}[h_{ef}, 8d_0] = \text{MIN}[150, 400] = 150 \text{ mm}$$

$$(d_0 = 50 \text{ mm})$$

㉞ 교축직각방향

$$\bullet c_{a1} = 850 \text{ mm}, \quad c_{a2} = 850 \text{ mm}, \quad s_1 = 500 \text{ mm}, \quad s_2 = 500 \text{ mm}$$

$$\bullet \theta = 90.0^\circ, \quad \alpha = 1.000, \quad B = 2,200 \text{ mm}$$



<그림 4.18> 콘크리트 파괴강도에 대한 투영면적 산정 - 교축직각방향

$$\begin{aligned}
 \bullet A_{V_c} &= [c_{a2} + (n-1) \times s_2 + 1.5 \alpha c_{a1}] \times 1.5 \alpha c_{a1} \\
 &= [850 + 1 \times 500 + 1.5 \times 1.0 \times 850] \times 1.5 \times 1.00 \times 850 \\
 &= 3,346,875 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\bullet A_{V_{co}} = 4.5 c_{a1}^2 = 4.5 \times 850^2 = 3,251,250 \text{ mm}^2$$

$$\therefore A_{V_c} = 3,346,875 \text{ mm}^2 < n \cdot A_{V_{co}} = 2 \times 3,251,250 = 6,502,500 \text{ mm}^2$$

$$\bullet V_{cbg} = \frac{A_{V_c}}{A_{V_{co}}} \cdot \psi_{ed,V} \cdot V_b = \frac{3,346,875}{3,251,250} \times 0.900 \times 794 = 736 \text{ kN}$$

여기서,

$$\psi_{ed,V} = 0.900 \left(c_{a2} < 1.5 c_{a1} \text{ 인 경우 } \psi_{ed,V} = 0.7 + 0.3 \frac{c_{a2}}{1.5 c_{a1}} \right)$$

$$\begin{aligned} V_b &= 0.7 \left[\frac{l_e}{d_0} \right]^{0.2} \sqrt{d_0} \sqrt{f_{ck}} c_{a1}^{1.5} \\ &= 0.7 \times \left[\frac{150}{50} \right]^{0.2} \times \sqrt{50} \times \sqrt{27} \times 850^{1.5} = 794 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$l_e = \text{MIN}[h_{ef}, 8d_0] = \text{MIN}[150, 400] = 150 \text{ mm}$$

$$d_0 = 50 \text{ mm} \text{ (앵커소켓 직경)}$$

② 소요역량 : 방향별 평가지진력 $F_{AC,D}$

$$\text{▶ 교축방향 } F_{AC,D}^L = F_{AS,D}^L \times n_B^L = 54.49 \times 2 = 108.98 \text{ kN}$$

(저항받침: 2)

$$\text{▶ 교축직각방향 } F_{AC,D}^T = F_{AS,D}^T \times n_B^T = 73.37 \times 1 = 73.37 \text{ kN} \text{ (저항받침: 1)}$$

③ 평가

$$\text{▶ 교축방향 } \frac{V_{cbg}^L}{F_{AC,D}^L} = \frac{1,116}{108.98} = 10.240 \geq 1.0 \quad \therefore \text{O.K}$$

$$\text{▶ 교축직각방향 } \frac{V_{cbg}^T}{F_{AC,D}^T} = \frac{736}{73.37} = 10.031 \geq 1.0 \quad \therefore \text{O.K}$$

(라) 콘크리트 프라이아웃 파괴

① 공급역량 : 콘크리트 프라이아웃 강도 V_{cpg} (앵커 그룹)

$$\text{㉠ } V_{cpg} = k_{cp} \cdot N_{cbg}$$

여기서, k_{cp} : 콘크리트 프라이아웃 강도 계수

$h_{ef} < 65 \text{ mm}$ 인 경우 : $k_{cp} = 1.0$

$h_{ef} \geq 65 \text{ mm}$ 인 경우 : $k_{cp} = 2.0$

N_{cbg} : 인장을 받는 앵커 그룹의 콘크리트 파괴강도

$$\textcircled{\ominus} N_{cbg} = \frac{A_{Nc}}{A_{Nco}} \cdot \psi_{ed,N} \cdot N_b$$

여기서, A_{Nc} : 인장강도 산정을 위한 단일 앵커 또는 앵커 그룹의 콘크리트 파괴면 투영면적, mm^2

$$A_{Nc} = (1.5 h_{ef} + 1.5 h_{ef}) \times (1.5 h_{ef} + (n-1) \times s_2 + 1.5 h_{ef})$$

$$(c_{a1} \geq 1.5 h_{ef} \ \& \ c_{a2} \geq 1.5 h_{ef})$$

A_{Nco} : 연단거리 또는 간격에 제한을 받지 않는 경우에 인장 강도 산정을 위한 단일 앵커의 콘크리트 파괴면 투영면적, mm^2 $A_{Nco} = 9 h_{ef}^2$

$\psi_{ed,N}$: 연단거리 영향에 대한 인장강도 수정계수

$c_{a,min} \geq 1.5 h_{ef}$ 인 경우 $\psi_{ed,N} = 1.0$

$c_{a,min} < 1.5 h_{ef}$ 인 경우 $\psi_{ed,N} = 0.7 + 0.3 \frac{c_{a,min}}{1.5 h_{ef}}$

N_b : 인장력을 받는 단일 앵커의 기본 콘크리트 파괴강도, N

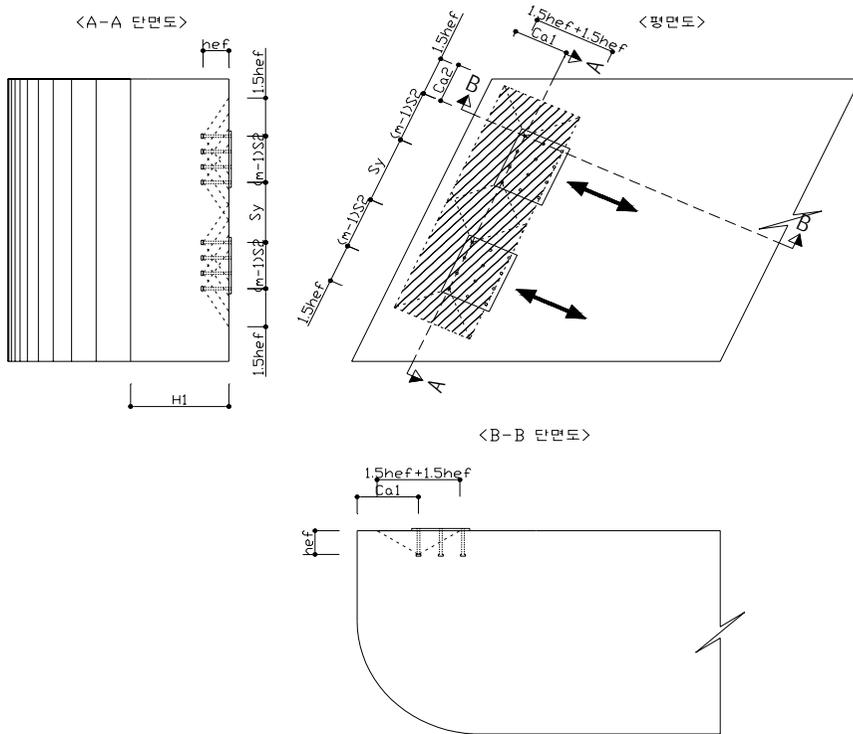
$N_b = 10 \sqrt{f_{ck}} h_{ef}^{1.5}$ (선설치앵커)

$N_b = 3.9 \sqrt{f_{ck}} h_{ef}^{5/3}$ ($280 \leq h_{ef} \leq 635 \text{mm}$ 인 헤드스터드와 헤드볼트)

㉔ 교축방향

▶ $c_{a1} = 1,350 \text{ mm} \geq 1.5 h_{ef} = 1.5 \times 150 = 225$

▶ $c_{a2} = 850 \text{ mm} \geq 1.5 h_{ef} = 1.5 \times 150 = 225$



<그림 4.19> 프라이아웃 강도에 대한 투영면적 산정 - 교축방향

$$\begin{aligned}
 A_{N_c} &= (1.5 h_{ef} + 1.5 h_{ef}) \times (1.5 h_{ef} + (m-1) s_2 + s_y + (m-1) s_2 + 1.5 h_{ef}) \\
 &= (1.5 \times 150 + 1.5 \times 150) \\
 &\quad \times (1.5 \times 150 + 1 \times 500 + 500 + 1 \times 500 + 1.5 \times 150) \\
 &= 877,500 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

▶ $A_{N_{co}} = 9 h_{ef}^2 = 9 \times 150^2 = 202,500 \text{ mm}^2$

$$\therefore A_{N_c} = 877,500 \text{ mm}^2 > n \cdot A_{N_{co}} = 4 \times 202,500 = 810,000 \text{ mm}^2$$

$$\triangleright N_b = 10 \sqrt{f_{ck}} h_{ef}^{1.5} = 10 \times \sqrt{27} \times 150^{1.5} = 95.5 \text{ kN}$$

$$\triangleright N_{cbg} = \frac{A_{N_c}}{A_{N_{co}}} \cdot \psi_{ed,N} \cdot N_b = \frac{877,500}{202,500} \times 1.000 \times 95.5 = 413.8 \text{ kN}$$

여기서,

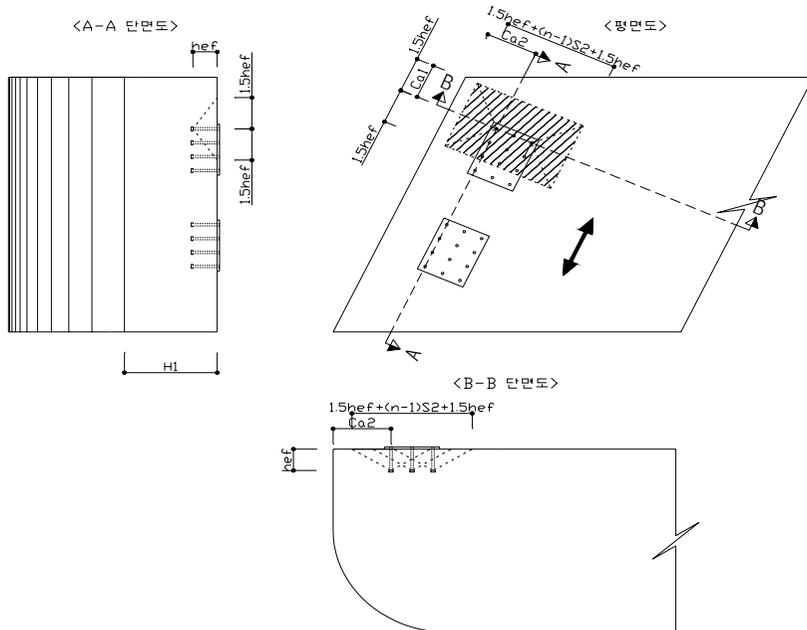
$$\psi_{ed,N} = 1.000 \left(c_{a,\min} < 1.5 h_{ef} \text{ 인 경우 } \psi_{ed,N} = 0.7 + 0.3 \frac{c_{a,\min}}{1.5 h_{ef}} \right)$$

$$\triangleright V_{cp} = k_{cp} \cdot N_{cbg} = 2.0 \times 413.8 = 827.6 \text{ kN}$$

㉔ 교축직각방향

$$\triangleright c_{a1} = 850 \text{ mm} \geq 1.5 h_{ef} = 1.5 \times 150 = 225$$

$$\triangleright c_{a2} = 850 \text{ mm} \geq 1.5 h_{ef} = 1.5 \times 150 = 225$$



<그림 4.20> 프라이아웃 강도에 대한 투영면적 산정 - 교축직각방향

$$\begin{aligned}
 \bullet A_{N_c} &= (1.5 h_{ef} + 1.5 h_{ef}) \times (1.5 h_{ef} + (n-1) s_2 + 1.5 h_{ef}) \\
 &= (1.5 \times 150 + 1.5 \times 150) \times (1.5 \times 150 + 1 \times 500 + 1.5 \times 150) \\
 &= 427,500 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\bullet A_{N_{co}} = 9 h_{ef}^2 = 9 \times 150^2 = 202,500 \text{ mm}^2$$

$$\therefore A_{N_c} = 427,500 \text{ mm}^2 > n \cdot A_{N_{co}} = 2 \times 202,500 = 405,000 \text{ mm}^2$$

$$\bullet N_b = 10 \sqrt{f_{ck}} h_{ef}^{1.5} = 10 \times \sqrt{27} \times 150^{1.5} = 95.5 \text{ kN}$$

$$\bullet N_{cbg} = \frac{A_{N_c}}{A_{N_{co}}} \cdot \psi_{ed,N} \cdot N_b = \frac{427,500}{202,500} \times 1.000 \times 95.5 = 201.6 \text{ kN}$$

여기서,

$$\psi_{ed,N} = 1.000 \left(c_{a,min} < 1.5 h_{ef} \text{ 인 경우 } \psi_{ed,N} = 0.7 + 0.3 \frac{c_{a,min}}{1.5 h_{ef}} \right)$$

$$\bullet V_{cp} = k_{cp} \cdot N_{cbg} = 2.0 \times 201.6 = 403.2 \text{ kN}$$

② 소요역량 : 방향별 평가지진력 $F_{AP,D}$

$$\bullet \text{교축방향 } F_{AP,D}^L = F_{AS,D}^L \times n_B^L = 54.49 \times 2 = 108.98 \text{ kN} \quad (\text{저항받}$$

침: 2)

$$\bullet \text{교축직각방향 } F_{AP,D}^T = F_{AS,D}^T \times n_B^T = 73.37 \times 1 = 73.37 \text{ kN} \quad (\text{저항받}$$

침: 1)

③ 평가

▸ 교축방향 $\frac{V_{\text{cpg}}^L}{F_{\text{AP,D}}^L} = \frac{827.6}{108.98} = 7.594 \geq 1.0 \quad \therefore \text{O.K}$

▸ 교축직각방향 $\frac{V_{\text{cpg}}^T}{F_{\text{AP,D}}^T} = \frac{403.2}{73.37} = 5.495 \geq 1.0 \quad \therefore \text{O.K}$

④ 앵커 볼트 평가 요약

<표 4.20> 앵커 볼트 평가

구 분	교축방향			교축직각방향		
	공급역량	소요역량	판정	공급역량	소요역량	판정
강재파괴	417	54.5	O.K ----- 7.66	417	73.4	O.K ----- 5.689
콘크리트파괴	1116	109	O.K ----- 10.24	736	73.4	O.K ----- 10.031
프라이아웃 파괴	828	109	O.K ----- 7.597	403	73.4	O.K ----- 5.495

다. 교대부 교량 받침의 내진성능 평가

(1) 받침 본체받침 본체

(가) 받침 1기당 횡방향 저항용량 f_B

▶ 교축방향 $f_B^L = 207.1 \text{ kN}$

▶ 교축직각방향 $f_B^T = 207.1 \text{ kN}$

(나) 공급역량 : 횡방향 저항용량 $F_{B,C}$

▶ 횡방향 저항용량 = 받침 1기당의 횡방향 저항용량(f_B) \times R

▶ 교축방향 $F_{B,C}^L = 207.1 \times 1.0 = 207.1 \text{ kN}$

▶ 교축직각방향 $F_{B,C}^T = 207.1 \times 1.0 = 207.1 \text{ kN}$

(다) 소요역량 : 받침부 평가지진력 $F_{B,D}$

▶ 받침부 평가 지진력 = MAX [교축 및 교축직각방향 지진하중 작용시 받침1기당 발생조합지진력]

<표 4.21> 받침부 평가지진력

구 분	교축방향 작용력(Comb1)		교축직각방향 작용력(Comb2)	
	교축방향	교축직각방향	교축방향	교축직각방향
Force (kN)	99.7	31.2	24.4	81.3

▶ 교축방향 $F_{B,D}^L = \text{MAX} [F_{B,D,comb1}^L, F_{B,D,comb2}^L]$

$= \text{MAX} [99.7, 24.4] = 99.7 \text{ kN}$

▶ 교축직각방향 $F_{B,D}^T = \text{MAX} [F_{B,D,comb1}^T, F_{B,D,comb2}^T]$

$= \text{MAX} [31.2, 81.3] = 81.3 \text{ kN}$

(라) 내진성능 평가

▶ 교축방향 $\frac{F_{B,C}^L}{F_{B,D}^L} = \frac{207.1}{99.7} = 2.077 > 1.0 \quad \therefore \text{O.K}$
 ▶ 교축직각방향 $\frac{F_{B,C}^T}{F_{B,D}^T} = \frac{207.1}{81.3} = 2.547 > 1.0 \quad \therefore \text{O.K}$

(2) 받침 본체 - 변위

(가) 공급역량 : 받침부 허용변위 $\delta_{B,C}$

▶ 받침부 허용변위 = 받침 1기당의 수평방향 허용전단변위 $\times R$

▶ 교축방향 $\delta_{B,C}^L = 144 \times 1.0 = 144 \text{ mm}$

▶ 교축직각방향 $\delta_{B,C}^T = 144 \times 1.0 = 144 \text{ mm}$

(나) 소요역량 : 받침부 발생 전단변위 (30% 규정 적용)

<표 4.22> 받침부 발생 전단변위

구 분	교축방향 작용력 (Comb1)		교축직각방향 작용력 (Comb2)	
	교축방향	교축직각방향	교축방향	교축직각방향
전단변위 (mm)	69.3	0.0	0.0	56.5

▶ 교축방향 $\delta_{B,D}^L = \text{MAX} [\delta_{B,D,\text{comb1}}^L, \delta_{B,D,\text{comb2}}^L]$
 $= \text{MAX} [69.3, 0.0] = 69.3 \text{ mm}$

▶ 교축직각방향 $\delta_{B,D}^T = \text{MAX} [\delta_{B,D,\text{comb1}}^T, \delta_{B,D,\text{comb2}}^T]$
 $= \text{MAX} [0.0, 56.5] = 56.5 \text{ mm}$

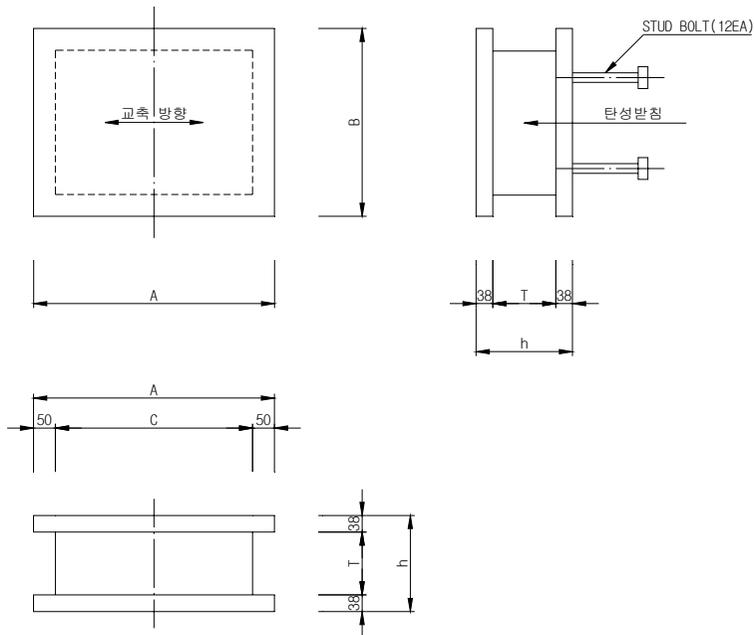
(다) 내진성능 평가

- ▶ 교축방향 $\frac{\delta_{B,C}^L}{\delta_{B,D}^L} = \frac{144}{69.3} = 2.078 > 1.0 \quad \therefore \text{O.K}$
- ▶ 교축직각방향 $\frac{\delta_{B,C}^T}{\delta_{B,D}^T} = \frac{144}{56.5} = 2.549 > 1.0 \quad \therefore \text{O.K}$

(3) 앵커 볼트

(가) 받침 관련 제원 및 재료 특성

① 본체 규격



<그림 4.21> 교량받침 제원

A	=	500 mm (x)	STUD 직경 D	=	40 mm
B	=	500 mm (y)	STUD 길이 L	=	150 mm
C	=	400 mm	교축 앵커 CTC	=	400 mm
T	=	144 mm	교직 앵커 CTC	=	400 mm
h	=	212 mm	볼트 직경 D	=	16 mm
m×n	=	2×2 (교축×교직)	=	4	EA

② 콘크리트 설계기준강도 $f_{ck} = 24 \text{ MPa}$

③ 앵커의 유효단면적 $A_{se,V} = 201.1 \text{ mm}^2$ (볼트 지름 적용)

④ 앵커의 인장강도 $f_{uta} = 410 \text{ MPa}$ (단, $f_{uta} \leq \text{Min}(1.9 f_{ya}, 860 \text{ MPa})$)

⑤ 앵커의 유효문힘길이 $h_{ef} = 150 \text{ mm}$

⑥ 교대 높이 $H = 5,000 \text{ mm}$

(나) 강재 파괴 - 선설치 헤드스터드

① 공급역량 : 강재강도 V_{sa}

▶ $V_{sa} = n \cdot A_{se,V} \cdot f_{uta}$ (여기서 n은 받침의 앵커볼트 수)

▶ 교축방향 $V_{sa}^L = 4 \times 201.1 \times 410 = 329.8 \text{ kN}$

▶ 교축직각방향 $V_{sa}^T = 4 \times 201.1 \times 410 = 329.8 \text{ kN}$

② 소요역량 : 받침 1기당 평가지진력 $F_{AS,D}$

▶ 교축방향 $F_{AS,D}^L = F_{B,D}^L = 99.7 \text{ kN}$

▶ 교축직각방향 $F_{AS,D}^T = F_{B,D}^T = 81.3 \text{ kN}$

③ 평가

▶ 교축방향 $\frac{V_{sa}^L}{F_{AS,D}^L} = \frac{329.8}{99.7} = 3.308 \geq 1.0 \quad \therefore \text{O.K}$

▶ 교축직각방향 $\frac{V_{sa}^T}{F_{AS,D}^T} = \frac{329.8}{81.3} = 4.057 \geq 1.0 \quad \therefore \text{O.K}$

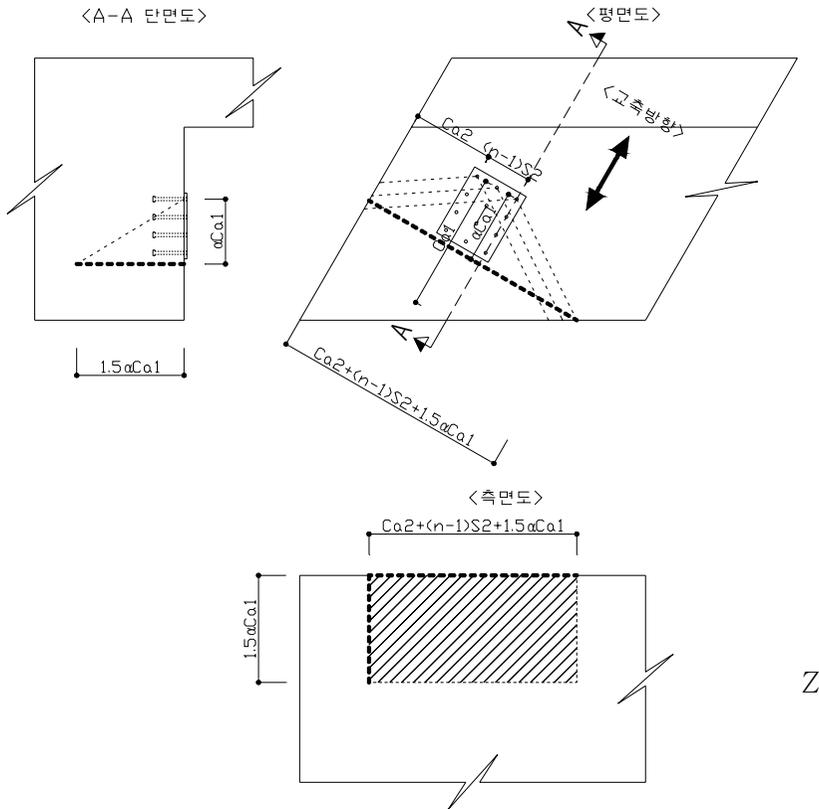
(다) 콘크리트 파괴

① 공급역량 : 콘크리트 파괴강도 V_{cbg} (앵커 그룹)

㉠ 교축방향

▶ $c_{a1} = 900 \text{ mm}$, $c_{a2} = 900 \text{ mm}$

▶ $s_1 = 400 \text{ mm}$, $s_2 = 400 \text{ mm}$, $\theta = 90^\circ$, $\alpha = 1.0$



<그림 4.22> 콘크리트 파괴강도에 대한 투영면적 산정 - 교축방향

$$\begin{aligned}
\bullet A_{V_c} &= [c_{a2} + (n-1)s_2 + 1.5\alpha c_{a1}] \times 1.5\alpha c_{a1} \\
&= [900 + 1 \times 400 + 1.5 \times 1.0 \times 900] \times 1.5 \times 1.0 \times 900 \\
&= 3,577,500 \text{ mm}^2
\end{aligned}$$

$$\bullet A_{V_{co}} = 4.5 c_{a1}^2 = 4.5 \times 900^2 = 3,645,000 \text{ mm}^2$$

$$\therefore A_{V_c} = 3,575,500 \text{ mm}^2 < n \cdot A_{V_{co}} = 2 \times 3,645,000 = 7,290,000 \text{ mm}^2$$

$$\bullet V_{cbg} = \frac{A_{V_c}}{A_{V_{co}}} \cdot \psi_{ed,V} \cdot V_b = \frac{3,575,500}{3,645,000} \times 0.9 \times 827 = 730 \text{ kN}$$

여기서,

$$\psi_{ed,V} = 0.90 \left(c_{a2} < 1.5 c_{a1} \text{ 인 경우 } \psi_{ed,V} = 0.7 + 0.3 \frac{c_{a2}}{1.5 c_{a1}} \right)$$

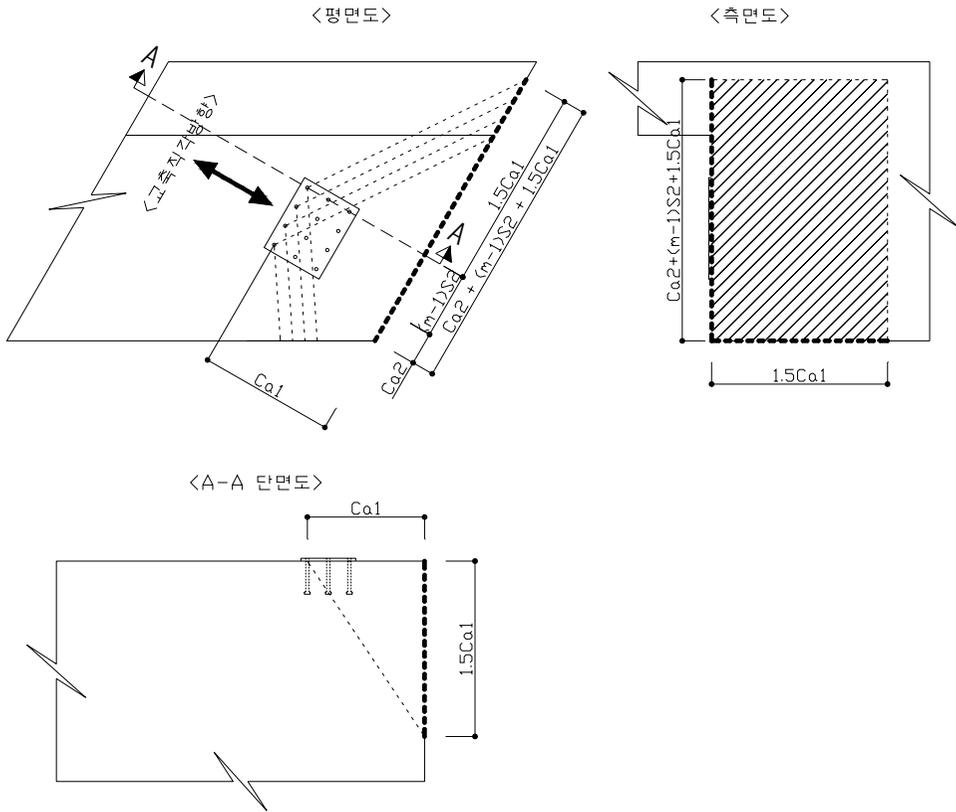
$$l_e = \text{MIN}[h_{ef}, 8d_0] = [150, 320] = 150 \text{ mm} \quad (d_0 = 40 \text{ mm})$$

$$\begin{aligned}
V_b &= 0.7 \left[\frac{l_e}{d_0} \right]^{0.2} \sqrt{d_0} \sqrt{f_{ck}} c_{a1}^{1.5} \\
&= 0.7 \times \left[\frac{150}{40} \right]^{0.2} \times \sqrt{40} \times \sqrt{24} \times 950^{1.5} = 827 \text{ kN}
\end{aligned}$$

㉔ 교축직각방향

$$\bullet c_{a1} = 1,300 \text{ mm}, \quad c_{a2} = 500 \text{ mm}, \quad s_1 = 400 \text{ mm},$$

$$s_2 = 400 \text{ mm}$$



<그림 4.23> 콘크리트 파괴강도에 대한 투영면적 산정 - 교축직각방향

$$\begin{aligned}
 \bullet A_{V_c} &= [1.5 c_{a1} + (m-1) s_2 + c_{a2}] \times 1.5 c_{a1} \\
 &= [1.5 \times 1,300 + 1 \times 400 + 500] \times 1.5 \times 1,300 \\
 &= 5,557,500 \text{ mm}^2 \\
 \bullet A_{V_{co}} &= 4.5 c_{a1}^2 = 4.5 \times 1,300^2 = 7,605,000 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\therefore A_{V_c} = 5,557,500 \text{ mm}^2 < n \cdot A_{V_{co}} = 2 \times 7,605,000 = 15,210,000 \text{ mm}^2$$

$$\bullet V_{dbg} = \frac{A_{V_c}}{A_{V_{co}}} \cdot \psi_{ed,V} \cdot V_b = \frac{5,557,500}{7,605,000} \times 0.846 \times 1,324 = 818 \text{ kN}$$

여기서,

$$\psi_{ed,V} = 0.846 \left(c_{a2} < 1.5 c_{a1}' \text{ 인 경우 } \psi_{ed,V} = 0.7 + 0.3 \frac{c_{a2}}{1.5 c_{a1}'} \right)$$

$$V_b = 0.7 \left[\frac{l_e}{d_0} \right]^{0.2} \sqrt{d_0} \sqrt{f_{ck}} c_{a1}^{1.5}$$

$$= 0.7 \times \left[\frac{150}{40} \right]^{0.2} \times \sqrt{40} \times \sqrt{24} \times 1300^{1.5} = 1,324 \text{ kN}$$

$$l_e = \text{MIN}[h_{ef}, 8d_0] = [150, 320] = 150 \text{ mm}$$

$$(d_0 = 40 \text{ mm})$$

② 소요역량 : 방향별 평가지진력 $F_{AC,D}$

$$\text{▶ 교축방향 } F_{AC,D}^L = F_{AS,D}^L \times n_B^L = 99.7 \times 1 = 99.7 \text{ kN}$$

(저항받침: 1)

$$\text{▶ 교축직각방향 } F_{AC,D}^T = F_{AS,D}^T \times n_B^T = 81.3 \times 1 = 81.3 \text{ kN}$$

(저항받침: 1)

③ 평가

$$\text{▶ 교축방향 } \frac{V_{cbg}^L}{F_{AC,D}^L} = \frac{730}{99.7} = 7.322 \geq 1.0 \quad \therefore \text{O.K}$$

$$\text{▶ 교축직각방향 } \frac{V_{cbg}^T}{F_{AC,D}^T} = \frac{818}{81.3} = 10.062 \geq 1.0 \quad \therefore \text{O.K}$$

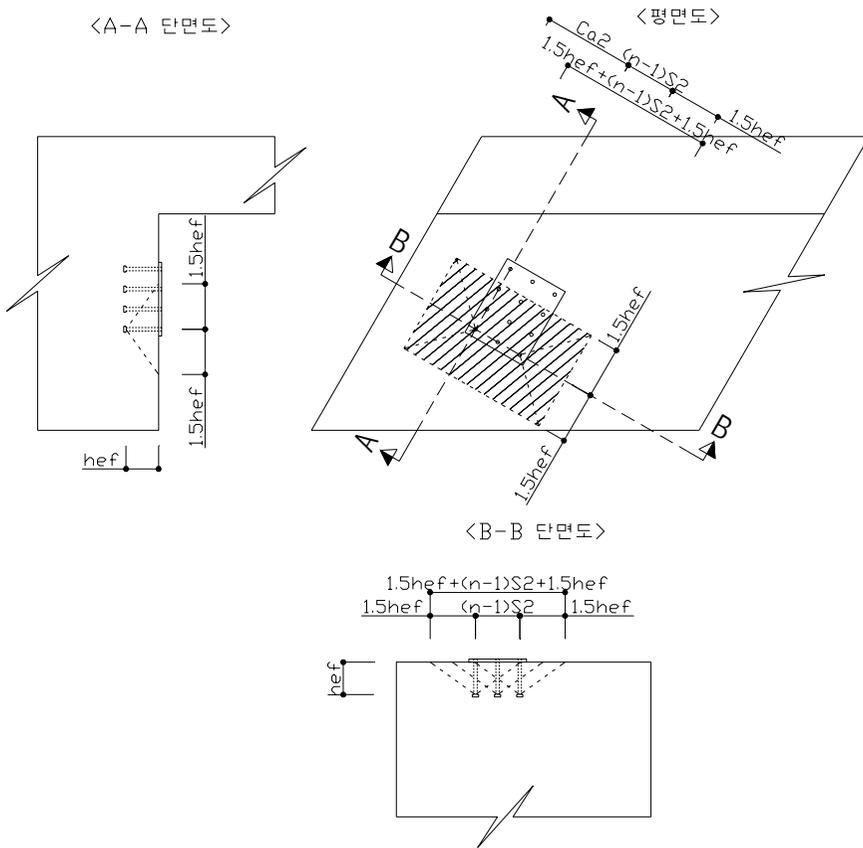
(라) 콘크리트 프라이아웃 파괴

① 공급역량 : 콘크리트 프라이아웃 강도 V_{cpg} (앵커 그룹)

㉠ 교축방향

$$\text{▶ } c_{a1} = 900 \text{ mm} \geq 1.5 h_{ef} = 1.5 \times 150 = 225 \text{ mm}$$

$$\text{▶ } c_{a2} = 900 \text{ mm} \geq 1.5 h_{ef} = 1.5 \times 150 = 225 \text{ mm}$$



<그림 4.24> 프라이아웃 강도에 대한 투영면적 산정 - 교축방향

$$\begin{aligned}
 \bullet A_{N_c} &= (1.5 h_{ef} + 1.5 h_{ef}) \times (1.5 h_{ef} + (n-1) s_2 + 1.5 h_{ef}) \\
 &= (1.5 \times 150 + 1.5 \times 150) \times (1.5 \times 150 + 1 \times 400 + 1.5 \times 150) \\
 &= 382,500 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\bullet A_{N_{co}} = 9 h_{ef}^2 = 9 \times 150^2 = 202,500 \text{ mm}^2$$

$$\therefore A_{N_c} = 382,500 \text{ mm}^2 < n \cdot A_{N_{co}} = 3 \times 202,500 = 607,500 \text{ mm}^2$$

$$\cdot N_b = 10 \sqrt{f_{ck}} h_{ef}^{1.5} = 10 \times \sqrt{24} \times 150^{1.5} = 90 \text{ kN}$$

$$\cdot N_{cbg} = \frac{A_{N_c}}{A_{N_{co}}} \cdot \psi_{ed,N} \cdot N_b = \frac{382,500}{202,500} \times 1.000 \times 90 = 170 \text{ kN}$$

여기서,

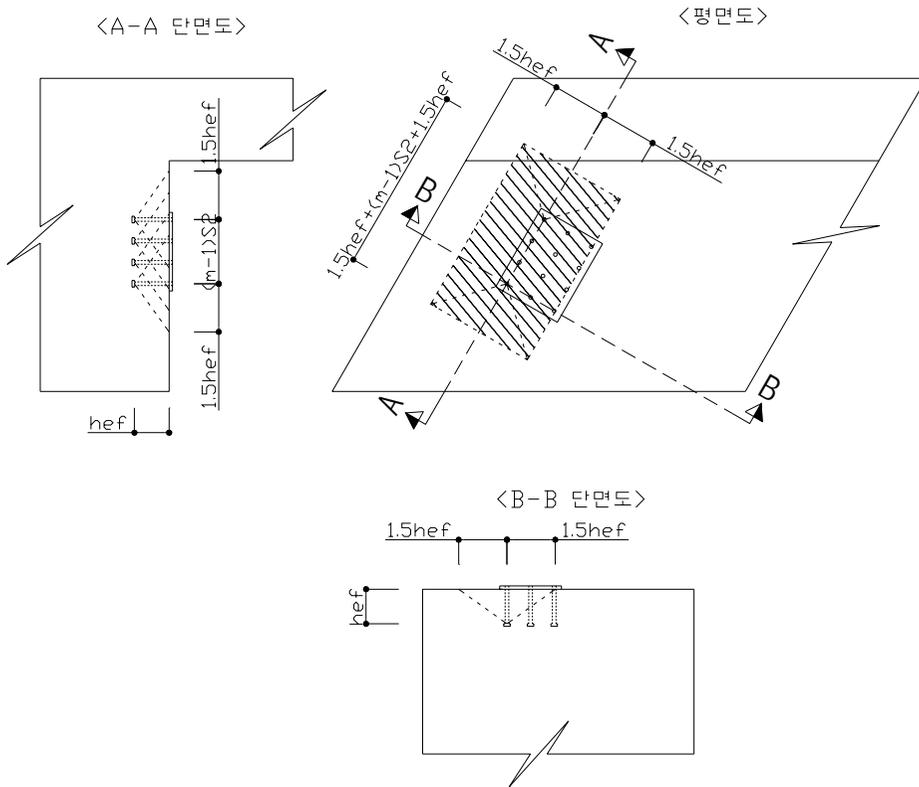
$$\psi_{ed,N} = 1.000 \left(c_{a,\min} < 1.5 h_{ef} \text{ 인 경우 } \psi_{ed,N} = 0.7 + 0.3 \frac{c_{a,\min}}{1.5 h_{ef}} \right)$$

$$\cdot V_{cp} = k_{cp} \cdot N_{cbg} = 2.0 \times 170 = 340 \text{ kN}$$

㉞ 교축직각방향

$$\cdot c_{a1} = 1300 \text{ mm} \geq 1.5 h_{ef} = 1.5 \times 150 = 225 \text{ mm}$$

$$\cdot c_{a2} = 500 \text{ mm} \geq 1.5 h_{ef} = 1.5 \times 150 = 225 \text{ mm}$$



<그림 4.25> 프라이아웃 강도에 대한 투영면적 산정 - 교축직각방향

$$\begin{aligned}
 \bullet A_{N_c} &= (1.5h_{ef} + 1.5h_{ef}) \times (1.5h_{ef} + (m-1)s_2 + 1.5h_{ef}) \\
 &= (1.5 \times 150 + 1.5 \times 150) \times (1.5 \times 150 + 1 \times 400 + 1.5 \times 150) \\
 &= 382,500 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\bullet A_{N_{co}} = 9 h_{ef}^2 = 9 \times 150^2 = 202,500 \text{ mm}^2$$

$$\therefore A_{N_c} = 382,500 \text{ mm}^2 < n \cdot A_{N_{co}} = 4 \times 202,500 = 810,000 \text{ mm}^2$$

$$\bullet N_b = 10 \sqrt{f_{ck}} h_{ef}^{1.5} = 10 \times \sqrt{24} \times 150^{1.5} = 90 \text{ kN}$$

$$\bullet N_{cbg} = \frac{A_{Nc}}{A_{Nco}} \cdot \psi_{ed,N} \cdot N_b = \frac{382,500}{202,500} \times 1.000 \times 90 = 170 \text{ kN}$$

여기서,

$$\psi_{ed,N} = 1.000 \left(c_{a,min} < 1.5 h_{ef} \text{ 인 경우 } \psi_{ed,N} = 0.7 + 0.3 \frac{c_{a,min}}{1.5 h_{ef}} \right)$$

$$\bullet V_{cpg} = k_{cp} \cdot N_{cbg} = 2.0 \times 170 = 340 \text{ kN}$$

② 소요역량 : 방향별 평가지진력 $F_{AP,D}$

$$\bullet \text{교축방향 } F_{AP,D}^L = F_{AS,D}^L \times n_B^L = 99.7 \times 1 = 99.7 \text{ kN}$$

(저항받침:1)

$$\bullet \text{교축직각방향 } F_{AP,D}^T = F_{AS,D}^T \times n_B^T = 81.3 \times 1 = 81.3 \text{ kN}$$

(저항받침:1)

③ 평가

$$\bullet \text{교축방향 } \frac{V_{cpg}^L}{F_{AP,D}^L} = \frac{340}{99.7} = 3.410 \geq 1.0 \quad \therefore \text{O.K}$$

$$\bullet \text{교축직각방향 } \frac{V_{cpg}^T}{F_{AP,D}^T} = \frac{340}{81.3} = 4.182 \geq 1.0 \quad \therefore \text{O.K}$$

④ 앵커 볼트 평가 요약

<표 4.23> 앵커 볼트 평가

구 분	교축방향			교축직각방향		
	공급역량	소요역량	판정	공급역량	소요역량	판정
강재파괴	329.8	99.7	$\frac{O.K}{3.308}$	329.8	81.3	$\frac{O.K}{4.057}$
콘크리트파괴	730	99.7	$\frac{O.K}{7.322}$	818	81.3	$\frac{O.K}{10.062}$
프라이아웃 파괴	340	99.7	$\frac{O.K}{3.410}$	340	81.3	$\frac{O.K}{4.182}$

라. 받침길이의 내진성능 평가

(1) 공급역량 N_C

(가) 교대의 받침지지길이 $N_C = 1100.0 \text{ mm}$

(2) 소요역량 N_D

(가)

$$N_D = \text{MAX} [\text{응답변위}, N_{\min}] = \text{MAX} [69.3, 500.82] = 500.82 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} \text{▶ 응답변위} &= \text{MAX} [\text{교대 교축방향 변위}, \text{취수탑 교축방향 변위}] \\ &= \text{MAX} [69.3, 39.61] = 69.3 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{취수탑 교축방향 변위} &= \text{상부거더변위} - \text{취수탑 상부변위} \\ &= 69.02 - 29.41 = 39.610 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{▶ } N_{\min} &= (200 + 1.67L + 6.66H) \times (1 + 0.000125\theta^2) \\ &= (200 + 1.67 \times 90 + 6.66 \times 22.6) \times (1 + 0.000125 \times 0.0^2) \\ &= 500.82 \text{ mm} \end{aligned}$$

여기서, $L = 90.00 \text{ m}$ (연속경간장)

$H = 22.6 \text{ m}$ (교각 높이)

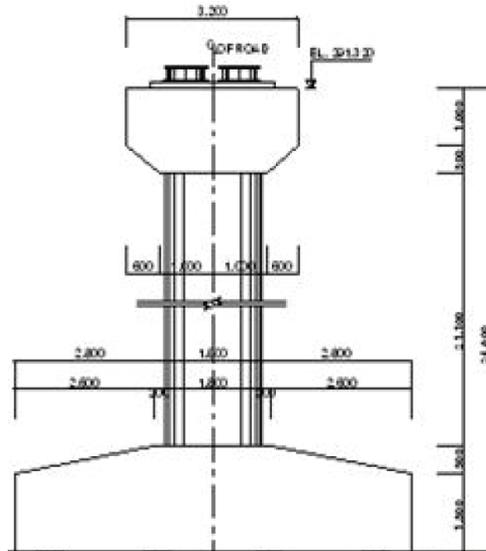
$\theta = 0.0^\circ$ (사각)

(3) 내진성능 평가

$$(가) \frac{N_C}{N_D} = \frac{1100}{500.82} = 2.196 \geq 1.0 \quad \therefore \text{O.K}$$

마. 확대 기초 평가

(1) 확대기초 제원 및 형상



<그림 4.26> 확대기초 제원 및 형상

(2) 확대기초의 안전성 평가

(가) 전도에 대한 안정 검토

① 기초 중앙작용력 산정

<표 4.24> 기초 중앙작용력

구 분	Nf(kN)	H(kN)	Mr(kN · m)	Mf(kN · m)	비 고
교축방향	7,298	169.4	27,002	3,553	
교직방향	7,298	209.8	27,002	4,588	

$$\triangleright Mr = \sum N \times x$$

② 전도에 대한 안전성 평가

<표 4.25> 전도 안전성 평가

구 분	Mr (kN · m)	Mf (kN · m)	V (kN)	S.F	e (m)	허용폭 (m)	비 고
교축방향	27,002	3,553	7,298	7.601	0.487	2.467	O.K
교직방향	27,002	4,588	7,298	5.885	0.629	2.467	O.K

(나) 허용지지력 검토

① 지반의 허용지지력 Q_C

▶ 교축방향

$$Q_C = A' [\alpha \cdot C \cdot N_C + \beta \cdot \gamma_1 \cdot B' \cdot N_{\gamma} + \gamma_2 \cdot D_f \cdot N_q]$$

$$= 296,716 \text{ kN}$$

▶ 교직방향

$$Q_C = A' [\alpha \cdot C \cdot N_C + \beta \cdot \gamma_1 \cdot B' \cdot N_{\gamma} + \gamma_2 \cdot D_f \cdot N_q]$$

$$= 276,025 \text{ kN}$$

② 기초 저면의 허용지지력 (Q_C)

▶ 교축방향 $Q_C = Q / a' / SF = 296,716 / 47.555 / 2 = 3119.7 \text{ kN}$

▶ 교직방향 $Q_C = Q / a' / SF = 276,025 / 45.455 / 2 = 3.036 \text{ kN}$

▶ 연암지반의 지진시 최대 지반반력의 상한값 $Q_C = 900 \text{ kN}$

③ 지반의 허용지지력 평가

▶ 교축방향

$$Q_D = 185.8 \text{ kN}$$

$$\frac{Q_C}{Q_D} = \frac{900}{185.8} = 4.844 \geq 1.00 \quad \therefore \text{O.K}$$

▸ 교축직각방향

$$Q_D = 201.208 \text{ MPa}$$

$$\frac{Q_C}{Q_D} = \frac{900}{201.2} = 4.473 \geq 1.00 \quad \therefore \text{O.K}$$

(다) 활동에 대한 안정성 평가

<표 4.26> 활동 안전성 평가

구 분	V(kN)	H _C (kN)	H _D (kN)	H _C /H _D	허용안전율	비 고
교축방향	7,298	4,379	169.4	25.85	1.20	O.K
교직방향	7,298	4,379	209.8	20.87	1.20	O.K

$$\bullet H_C = C_b \cdot A' + V \cdot \tan \phi_B$$

(3) 확대기초의 단면 평가

<표 4.27> 확대기초 단면 평가

구 분	전단력(kN)			휨모멘트(kN·m)		
	공급역량	소요역량	평가	공급역량	소요역량	평가
교축방향	9,132	2,403	O.K	19,584	3,805	O.K
교직방향	9,132	2,600	O.K	9,406	4,158	O.K

참고문헌

1. Simplified Evaluation of Added Hydrodynamic Mass for Intake Towers Alok Goyal and Anil K. Chopra
Journal of Engineering Mechanics Jul 1989, Vol. 115, No. 7, pp. 1393–1412
2. Earthquake Response Spectrum Analysis of Intake-Outlet Towers Alok Goyal and Anil K. Chopra
Journal of Engineering Mechanics Jul 1989, Vol. 115, No. 7, pp. 1413–1433
3. 구조동역학, 제3판, 김두기 저, 구미서관, 2013, pp. 488–495

수리시설물 안전진단을 위한
물리탐사 실무지침서 개발(3과제)

제 목 차 례

제1장 연구 개요	13
제1절 연구 배경	13
제2절 연구 범위	13
제2장 수리시설물 물리탐사 적용방법	15
제1절 제체 상태에 대한 목적별 물리탐사 적용방법	15
제2절 수리시설물 정밀안전진단 물리탐사 수행 현황 분석	17
제3장 정밀안전진단 지구 물리탐사 수행 체계	19
제1절 저수지 물리탐사 수행 체계	19
제2절 방조제 물리탐사 수행 체계	20
제4장 물리탐사 이론	21
제1절 전기비저항 탐사	21
제2절 자연전위 탐사	27
제3절 탄성과 탐사	30
제5장 물리탐사 지침 개선방향	40
제1절 전기비저항 탐사 개선방향	40
제2절 자연전위 탐사 개선방향	62
제3절 탄성과 탐사 개선방향	66
제6장 제체에서의 물리탐사 적용 대표사례	76
제1절 전기비저항 탐사 적용사례 1	76
제2절 전기비저항 탐사 적용사례 2	79

제3절 전기비저항 탐사 및 자연전위 탐사 분석사례 1	81
제4절 전기비저항 탐사 및 자연전위 탐사 분석사례 2	92
제5절 전기비저항 탐사와 시추공영상의 융합 분석사례	96
제6절 전기비저항 탐사와 지반조사 자료의 복합 분석사례	100
제7절 전기비저항 탐사와 온도 모니터링 자료의 복합 해석사례	106
제8절 저수지 누수탐지를 위한 자연전위 탐사 적용사례들	112
제7장 결론 및 향후전망	115
※ 참고문헌	117

표 차례

(표 2-1) 제체 상태에 대한 목적별 물리탐사 적용방법	16
(표 2-2) 최근 3년간 정밀안전진단 지구수 및 물리탐사 적용 지구수	17
(표 4-1) 전기비저항 탐사 배열법 및 거리 계수 공식	23
(표 4-2) 대표적인 암석의 P와 속도 (m/s)	34
(표 5-1) 제체 높이에 따른 전극 간격과 N값에 따른 최대 탐사 심도	42
(표 5-2) 굴절과 탐사변수의 예	67
(표 6-1) Line 1의 탐사변수	77
(표 6-2) Line 2의 탐사변수	77
(표 6-3) 그라우팅 전후 Line 1의 자연전위 탐사변수	82
(표 6-4) 그라우팅 전후 Line 2의 자연전위 탐사변수	82
(표 6-5) 그라우팅 전후 Line 3의 자연전위 탐사변수	82
(표 6-6) 그라우팅 전 Line 1의 전기비저항 탐사변수	83
(표 6-7) 그라우팅 전 Line 2의 전기비저항 탐사변수	83
(표 6-8) 그라우팅 전 Line 3의 전기비저항 탐사변수	84
(표 6-9) 그라우팅 후 Line 1의 전기비저항 탐사변수	84
(표 6-10) 그라우팅 후 Line 2의 전기비저항 탐사변수	85
(표 6-11) 그라우팅 후 Line 3의 전기비저항 탐사변수	85
(표 6-12) 각 측선들의 전기비저항 탐사변수	93
(표 6-13) Line 1의 전기비저항 탐사변수	96
(표 6-14) Line 2의 전기비저항 탐사변수	96
(표 6-15) DC-1 측선의 전기비저항 탐사변수	101
(표 6-16) DC-2 측선의 전기비저항 탐사변수	101
(표 6-17) DC-3 측선의 전기비저항 탐사변수	102
(표 6-18) DC-4 측선의 전기비저항 탐사변수	102
(표 6-19) Dpline-1 측선의 전기비저항 탐사변수	107

(표 6-20) Dpline-2 축선의 전기비저항 탐사변수	107
(표 6-21) Dpline-3 축선의 전기비저항 탐사변수	108
(표 6-22) Dpline-4 축선의 전기비저항 탐사변수	108

그림 차례

<그림 2-1> 최근 3년간 정밀안전진단 지구별 물리탐사 적용 지구 변화 추이	18
<그림 3-1> 저수지 물리탐사 수행 체계 모식도	19
<그림 3-2> 방조제 물리탐사 수행 체계 모식도	20
<그림 4-1> 두 지점 사이의 전위차 측정 모식도	22
<그림 4-2> 웨너 배열의 종류	24
<그림 4-3> 슐림버저 배열	25
<그림 4-4> 단극 배열	25
<그림 4-5> 쌍극자 배열	26
<그림 4-6> 변형된 단극 배열	26
<그림 4-7> 자연전위 발생 모식도	27
<그림 4-8> 임계굴절과 선두파	31
<그림 4-9> 여러가지 파들의 파선 경로	32
<그림 4-10> 굴절파 탐사 모식도	33
<그림 5-1> 저수지에서의 전기비저항 탐사측선 모식도	41
<그림 5-2> 제체의 3차원 요소분할 예시	41
<그림 5-3> 전기비저항 탐사 순서 모식도	43
<그림 5-4> 모델변수 입력 예시	44
<그림 5-5> 재질별 전기비저항 재설정 단계	45
<그림 5-6> 정모델링 측선 설정단계	46
<그림 5-7> 모델링 자료에 의한 역산결과 대비 현장자료 역산결과 비교 사례	47
<그림 5-8> 중심점토가 있는 경우 담수와 제체의 요소분할 (제고 9 m, 저수위 8 m)	47
<그림 5-9> 중심점토가 있는 경우 3차원 효과를 가정한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과 (제고 9 m, 저수위 8 m)	48

<그림 5-10> 3차원 효과를 배제한 수평 무한 지층에 대한 2차원 전기비저항 탐사결과	48
<그림 5-11> 중심점토가 있는 경우 담수와 제체의 요소분할 (제고 9 m, 저수위 7 m)	48
<그림 5-12> 중심점토가 있는 경우 3차원 효과를 가정한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과 (제고 9 m, 저수위 7 m)	49
<그림 5-13> 중심점토가 있는 경우 담수와 제체의 요소분할 (제고 9 m, 저수위 6 m)	49
<그림 5-14> 중심점토가 있는 경우 3차원 효과를 가정한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과 (제고 9 m, 저수위 6 m)	49
<그림 5-15> 중심점토가 있는 경우 담수와 제체의 요소분할 (제고 9 m, 저수위 5 m)	50
<그림 5-16> 중심점토가 있는 경우 3차원 효과를 가정한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과 (제고 9 m, 저수위 5 m)	50
<그림 5-17> 중심점토가 있는 경우 담수와 제체의 요소분할 (제고 9 m, 저수위 4 m)	50
<그림 5-18> 중심점토가 있는 경우 3차원 효과를 가정한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과 (제고 9 m, 저수위 4 m)	51
<그림 5-19> 중심점토가 있는 경우 담수와 제체의 요소분할 (제고 9 m, 저수위 3 m)	51
<그림 5-20> 중심점토가 있는 경우 3차원 효과를 가정한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과 (제고 9 m, 저수위 3 m)	51
<그림 5-21> 중심점토가 있는 경우 담수와 제체의 요소분할 (제고 9 m, 저수위 2 m)	52
<그림 5-22> 중심점토가 있는 경우 3차원 효과를 가정한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과 (제고 9 m, 저수위 2 m)	52
<그림 5-23> 중심점토가 있는 경우 담수와 제체의 요소분할 (제고 9 m, 저수위 1 m)	52
<그림 5-24> 중심점토가 있는 경우 3차원 효과를 가정한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과 (제고 9 m, 저수위 1 m)	53
<그림 5-25> 중심점토가 있는 경우 담수와 제체의 요소분할 (제고 9 m, 저수위 0 m)	53

<그림 5-26> 중심점토가 있는 경우 3차원 효과를 가정한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과 (제고 9 m, 저수위 0 m)	53
<그림 5-27> 중심점토가 있는 경우 저수위 8 m 대비 7 m에서의 전기비저항 변화비	54
<그림 5-28> 중심점토가 있는 경우 저수위 8 m 대비 6 m에서의 전기비저항 변화비	54
<그림 5-29> 중심점토가 있는 경우 저수위 8 m 대비 5 m에서의 전기비저항 변화비	55
<그림 5-30> 중심점토가 있는 경우 저수위 8 m 대비 4 m에서의 전기비저항 변화비	55
<그림 5-31> 중심점토가 있는 경우 저수위 8 m 대비 3 m에서의 전기비저항 변화비	55
<그림 5-32> 중심점토가 있는 경우 저수위 8 m 대비 2 m에서의 전기비저항 변화비	56
<그림 5-33> 중심점토가 있는 경우 저수위 8 m 대비 1 m에서의 전기비저항 변화비	56
<그림 5-34> 중심점토가 있는 경우 저수위 8 m 대비 0 m에서의 전기비저항 변화비	56
<그림 5-35> 중심점토가 없는 경우 담수와 제체의 요소분할 (제고 9 m, 저수위 8 m)	57
<그림 5-36> 중심점토가 없는 경우 3차원 효과를 가정한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과 (제고 9 m, 저수위 8 m)	57
<그림 5-37> 중심점토가 없는 경우 담수와 제체의 요소분할 (제고 9 m, 저수위 6 m)	58
<그림 5-38> 중심점토가 없는 경우 3차원 효과를 가정한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과 (제고 9 m, 저수위 6 m)	58
<그림 5-39> 중심점토가 없는 경우 담수와 제체의 요소분할 (제고 9 m, 저수위 4 m)	58
<그림 5-40> 중심점토가 없는 경우 3차원 효과를 가정한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과 (제고 9 m, 저수위 4 m)	59
<그림 5-41> 중심점토가 없는 경우 담수와 제체의 요소분할 (제고 9 m, 저수위 2 m)	59

<그림 5-42> 중심점토가 없는 경우 3차원 효과를 가정한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과 (제고 9 m, 저수위 2 m)	59
<그림 5-43> 중심점토가 없는 경우 담수와 제체의 요소분할 (제고 9 m, 저수위 0 m)	60
<그림 5-44> 중심점토가 없는 경우 3차원 효과를 가정한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과 (제고 9 m, 저수위 0 m)	60
<그림 5-45> 중심점토가 없는 경우 저수위 8 m 대비 6 m에서의 전기비저항 변화비	60
<그림 5-46> 중심점토가 없는 경우 저수위 8 m 대비 4 m에서의 전기비저항 변화비	61
<그림 5-47> 중심점토가 없는 경우 저수위 8 m 대비 2 m에서의 전기비저항 변화비	61
<그림 5-48> 중심점토가 없는 경우 저수위 8 m 대비 0 m에서의 전기비저항 변화비	61
<그림 5-49> 절대 전위법 (기준점법) 모식도	62
<그림 5-50> 상대 전위법 (차분법) 모식도	63
<그림 5-51> 단위 전극 간격과 전체 전극 간격 사이의 전위차 관계 ..	63
<그림 5-52> 자연전위 변화량 산정 예시	64
<그림 5-53> 자연전위 변화량 산정 예시	65
<그림 5-54> 굴절과 탄성파탐사 자료처리 과정	67
<그림 5-55> 초동 선택 예제	68
<그림 5-56> 관측 주시와 모델 주시의 비교	69
<그림 5-57> 10개의 층을 가정한 초기모델	69
<그림 5-58> 제체 피복상태에 따른 각각의 수진기 방식을 이용한 탐사전경	70
<그림 5-59> 지오폰 및 송신기 위치 모식도	71
<그림 5-60> 표면파 탐사 자료처리 순서도	71
<그림 5-61> 자료변환 단계	72
<그림 5-62> 지오메트리 작성 단계	73
<그림 5-63> 측정 좌표 생성결과	74
<그림 5-64> 분산분석 예시	74
<그림 5-65> 특정 지점에 대한 역산결과 예시	74

<그림 6-1> 댐의 상류사면 좌안부 전경	76
<그림 6-2> 척치댐의 평면도 및 축선위치도	76
<그림 6-3> Line 1의 전기비저항 탐사결과(댐마루)	78
<그림 6-4> Line 2의 전기비저항 탐사결과(하류사면 소단부)	78
<그림 6-5> 대야댐과 전기비저항 탐사 축선 모식도	79
<그림 6-6> 제체마루 상부 축선의 전기비저항 탐사결과	80
<그림 6-7> 여수로 상부 축선의 전기비저항 탐사결과	80
<그림 6-8> 후평저수지 탐사 축선 모식도	81
<그림 6-9> 그라우팅 이전 자연전위 탐사결과 (Line 1)	86
<그림 6-10> 그라우팅 이전 자연전위 탐사결과 (Line 2)	86
<그림 6-11> 그라우팅 이전 자연전위 탐사결과 (Line 3)	87
<그림 6-12> 그라우팅 이후 자연전위 탐사결과 (Line 1)	87
<그림 6-13> 그라우팅 이후 자연전위 탐사결과 (Line 2)	88
<그림 6-14> 그라우팅 이후 자연전위 탐사결과 (Line-3)	88
<그림 6-15> 그라우팅 이전의 전기비저항 탐사결과 (Line 1)	89
<그림 6-16> 그라우팅 이전의 전기비저항 탐사결과 (Line 2)	89
<그림 6-17> 그라우팅 이전의 전기비저항 탐사결과 (Line 3)	90
<그림 6-18> 그라우팅 이후의 전기비저항 탐사결과 (Line 1)	90
<그림 6-19> 그라우팅 이후의 전기비저항 탐사결과 (Line 2)	91
<그림 6-20> 그라우팅 이후의 전기비저항 탐사결과 (Line 3)	91
<그림 6-21> 전기비저항 탐사와 자연전위 탐사 축선 모식도	92
<그림 6-22> 각 축선에 따른 2차원 전기비저항 탐사 역산 결과	94
<그림 6-23> 자연전위 탐사 측정 지반의 풍화 지역	95
<그림 6-24> 자연전위 탐사 결과 평면도	95
<그림 6-25> 2011년과 2012년의 전기비저항 탐사 단면도 (No.6~25)	97
<그림 6-26> 2011년과 2012년의 전기비저항 탐사 단면도 (No.25~45)	97
<그림 6-27> 2011년과 2012년의 전기비저항 탐사 단면도 (No.45~65)	98
<그림 6-28> No.8 (BH-1) 시추공영상 촬영결과	98
<그림 6-29> No.37 (BH-2) 시추공영상 촬영결과	99

<그림 6-30> No.43 (BH-3) 시추공영상 촬영결과	99
<그림 6-31> 탐사 대상 댐의 및 시추공 위치 모식도	100
<그림 6-32> 전기비저항 탐사 2차원 역산결과 (DC-1)	102
<그림 6-33> 전기비저항 탐사 2차원 역산결과 (DC-2)	103
<그림 6-34> 전기비저항 탐사 2차원 역산 결과와 시추공의 위치	104
<그림 6-35> BH-1 시추공 위치에 해당되는 전기비저항 분포와 N값	104
<그림 6-36> BH-2 시추공 위치에 해당되는 전기비저항 분포와 N값	105
<그림 6-37> BH-3 시추공 위치에 해당되는 전기비저항 분포와 N값	105
<그림 6-38> 전기비저항 탐사 축선 모식도	106
<그림 6-39> 각 축선에서 측정된 전기비저항 탐사 2차원 역산결과 ·	109
<그림 6-40> Dpline-4 축선의 2차원 역산결과	109
<그림 6-41> 취수탑에서 온도 측정결과	110
<그림 6-42> 시추공 S1, S2 에서 온도 측정결과	111
<그림 6-43> 댐체 하부에서의 온도 모니터링 결과	111
<그림 6-44> 양안 접합부를 통한 누수 유형에서의 자연전위 탐사결과	112
<그림 6-45> 제체마루와 하류사면의 음의 이상대 위치	113
<그림 6-46> 파이핑 형태의 누수 유형에서의 자연전위 탐사결과	113
<그림 6-47> 복합적 요인에 의한 누수 유형에서의 자연전위 탐사결과	114

제1장 연구 개요

제1절 연구 배경

농업생산기반시설 정밀안전진단 실무지침 및 세부요령에 포함된 물리탐사 방법은 국토부에서 관리하는 콘크리트 댐 위주로 구성되어 있어, 시설노후화로 붕괴의 우려가 있는 소규모 농업용 저수지에 대한 효과적인 조사와 진단을 위해서는 저수지 제원과 기초조사 자료를 이용한 3차원 해석기준 및 방법에 대한 설정이 필요하다.

또한 현재 저수지 및 방조제 안전진단 시 적용하는 물리탐사 기술은 제체를 통한 누수지점 탐지를 위한 전기비저항탐사 위주로 적용됨에 따라, 제체 규모에 따른 맞춤형 탐사 적용 및 해석 방법 부재로 탐사 결과를 효과적으로 해석하는데 한계가 있다. 따라서 저수지 및 방조제 안전진단에 이용되는 다양한 물리탐사의 현장 적용, 자료 처리 및 자료 해석의 표준화를 위한 물리탐사 실무지침서의 정립이 필요하다.

제2절 연구 범위

‘농업생산기반시설 정밀안전진단실무 세부요령’ 및 ‘농업생산기반시설 정밀안전진단 실무지침’ 중 물리탐사 부분에 대한 표준화 및 개선사항을 제시하고, 지침서 상에 언급되지 않았던 2차 탐사 (자연전위탐사, 탄성파 탐사)의 조사방법과 자료처리 및 해석에 대해 제시함으로써 정밀안전진단 실무자들의 효율적인 진단업무에 도움이 되고자 한다. 즉, 저수지 위치 및 규모별 전기비저항 탐사 방법과 해석 기준, 누수량 변동이 심한 제체에 대한 자연전위탐사 방법과 해석 기준, 저수지 제체 내 중심점토 손상 부위 탐지를 위한 탄성파 탐사 방법과 해석 기준 등에 대한 표준안을 제시하고자 한다. 또한 제체를 대상으로 물리탐사 방법에 대한 타당성 검토와 국내외 사례들을 정리하였다. 실제로, 선진국의 경우 수리시설물 분야에서 물리탐사를 이용한 자동 모니터링이 실시되고 있으며, 우리나라에서도 비교적 규모가 큰 1종 저수지 (총저수량 300,000 m³ 이상)들을 대상으로 전기비저항 탐사가 수행되고 있다. 현재 농업용 수리시설물에 대해 적용되는 물리탐사 기준

은 규모와 상관없이 일률적으로 적용되는 실정으로, 본 연구에서는 시설물의 종류 및 규모를 고려하여 기준을 마련하고자 한다. 수리시설물 이외에 적용한 사례로는, 한국농어촌공사 농어촌연구원에서 수행한 해안지역 지하수 분야에서 전기비저항 탐사방법의 품질관리지침 수립 및 지반침하 분야에서 전기비저항 토모그래피 기술 적용 사례가 대표적이다. 또한 한국지질자원연구원에서 토목 지반조사 및 환경 오염대 조사 분야의 물리탐사 기준을 선정한 사례가 있다.

제2장 수리시설물 물리탐사 적용방법

제1절 제체 상태에 대한 목적별 물리탐사 적용방법

지금까지 수리시설물을 대상으로 한 물리탐사 중 제체의 누수현상과 관련되어 이루어진 탐사방법은 전기비저항 탐사, 자연전위 탐사, 소형루프 전자탐사가 주로 적용되었으며, 제체의 물성이나 연약지반 파악을 목적으로는 주로 탄성과 탐사와 지표레이더 (ground penetrating radar: GPR) 탐사나 자기지전류 (magnetotelluric: MT) 탐사가 적용되었다. 전기비저항 탐사는 주로 쌍극자 배열 (dipole-dipole array) 방법이 이용되었는데, 이는 다른 배열법에 비해 분해능이 가장 뛰어난 배열방법이기 때문이다. 자연전위 탐사는 누수량 보다는 누수경로나 누수지점 파악을 목적으로 적용되었는데, 이는 누수에 의해 발생한 유동전위가 자연전위에 큰 영향을 미치기 때문이다. 탄성과 탐사는 굴절법, 반사법이 주로 적용되었으나, 최근에는 제체와 같이 성토된 미고결층을 대상으로 표면파 탐사 (multi-channel analysis of surface wave: MASW)가 많이 이용되고 있는 추세이다. 전자 탐사는 저수지와 방조제에서 서로 다른 방법이 적용되었으며, 소형루프 탐사를 제외하고는 대부분 두 가지 이상의 복합 탐사가 필요한 것으로 나타났다. (표 2-1)에서 확인되는 원형 표시는 저수지에서 적용된 사례이며, 삼각형 표시는 방조제에서 적용된 사례이다.

(표 2-1) 제체 상태에 대한 목적별 물리탐사 적용방법

구 분	전기비저항 탐사	자연전위 탐사	탄성파 탐사	전자 탐사		
				GPR 탐사	MT 탐사	소형루프 탐사
제체 물성파악	○		○△	△	△	
연약지반 파악	○		○△	△	△	
누수경로 파악	○△	○△				
누수지점 파악	○△	○△				○△

※ 저수지(○), 방조제(△)

이와 같이 다양한 물리탐사가 수리시설물 현장을 대상으로 적용되었지만, 기존의 정밀안전진단 시행요령이나 지침서에는 제체의 규모나 상태에 따른 적용 방법의 표준화가 없는 상황이다. 또한 시설물 관리, 연구, 점검 등 목적에 따라 적용 방법이 서로 달라, 정밀안전진단 시 수리시설물에 대한 특화된 물리탐사 방법의 표준화가 시급한 실정이다.

제2절 수리시설물 정밀안전진단 물리탐사 수행 현황 분석

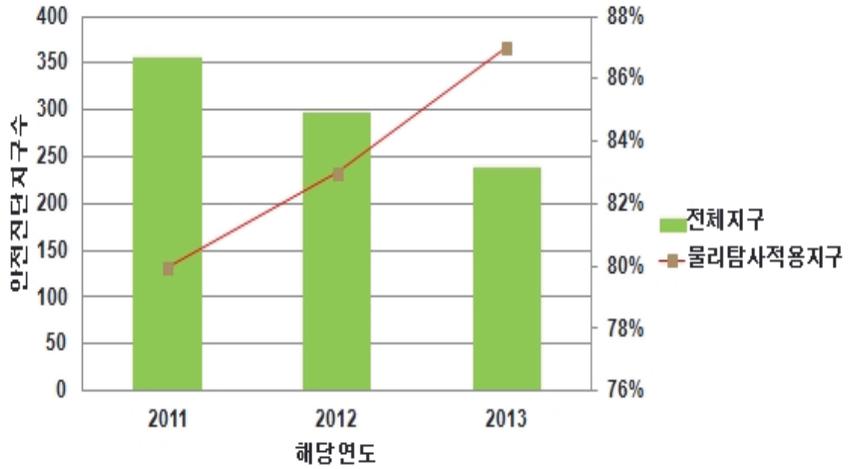
최근 3년간 한국농어촌공사 관리 정밀안전진단 대상 지구 중 물리탐사 적용 지구는 약 83%로, 그 중 저수지와 방조제는 각각 84%와 66%이다 (표 2-2). 적용된 탐사방법은 누수지점 파악을 목적으로 전기비저항 탐사 위주로 수행되었다. 탐사측선은 저수지의 경우 지구당 각각 제체 마루부 1 측선과 소단 1 측선이 적용되었으며, 방조제의 경우 제체 마루부에서 1 측선이 적용되었다.

(표 2-2) 최근 3년간 정밀안전진단 지구수 및 물리탐사 적용 지구수

연도	전체 지구수(지구)			물리탐사 적용 지구수(지구)		
	소계	저수지	방조제	소계	저수지	방조제
계	892	833	59	742	703	39
2011	356	342	14	286	275	11
2012	298	277	21	248	236	12
2013	238	214	24	208	192	16

연도별로는 전체 정밀안전진단 지구수가 점차적으로 감소하였으나, 물리탐사 적용 지구는 전체 지구 대비 2011년 80%, 2012년 83%, 2013년 87%로 점차 증가되는 경향을 보였다 <그림 2-1>. 이와 같이 정밀안전진단 분야에서 물리탐사의 적용은 과거 3년의 추세로 보면 계속 늘어날 전망이다.

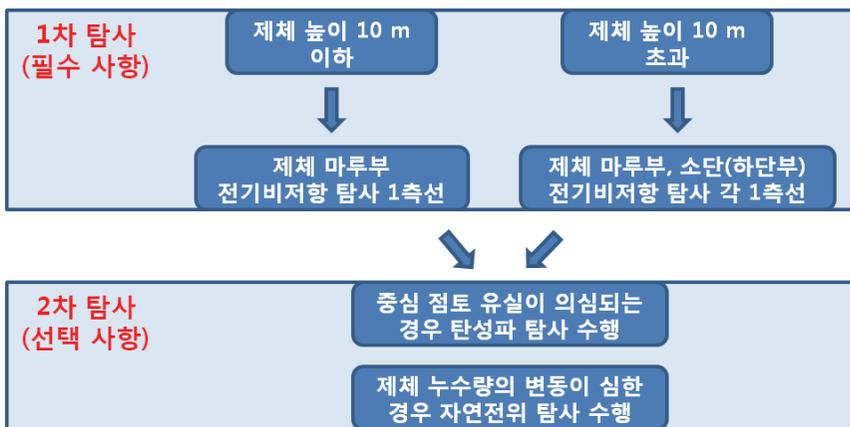
<그림 2-1> 최근 3년간 정밀안전진단 지구별 물리탐사 적용 지구 변화 추이



제3장 정밀안전진단 물리탐사 수행 체계

제1절 저수지 물리탐사 수행 체계

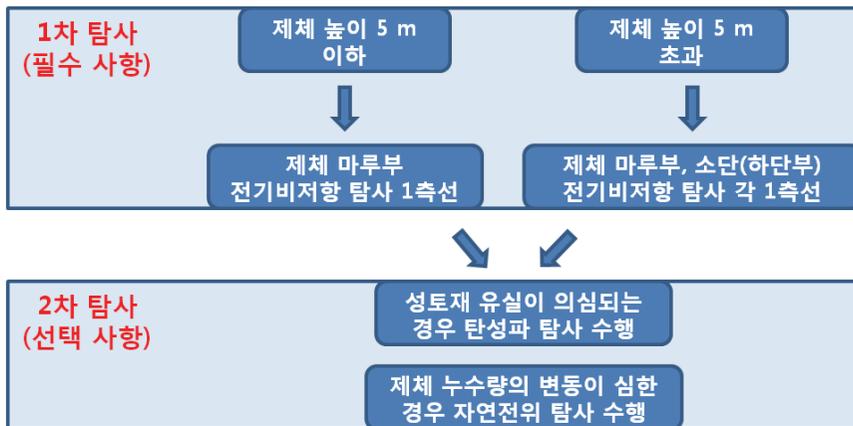
본 장에서는 정밀안전진단 대상 지구 중 저수지 1종 (총저수용량 300,000 m³ 이상인 저수지), 2종 (총저수용량 300,000 m³ 미만인 저수지) 시설을 대상으로 물리탐사의 수행 체계를 제시하여 기존의 불규칙적인 탐사설계 및 측선설정 등의 문제점을 해소하고자 하였다. 기존 물리탐사 지침 개선책으로 모든 대상 지구의 1차 탐사는 전기비저항 탐사로 일원화하였으며, 제체 높이에 따른 측선의 수와 설정 위치를 표준화하였다. 제체 높이를 기준으로 10 m 이하인 지구는 제체 마루에서 1 측선을 수행하는 것을 원칙으로 하였으며, 10 m를 초과하는 지구는 각각 제체 마루 1 측선, 소단 또는 하단부 1 측선을 수행하는 것을 기본으로 하였다. 여기에서 모든 측선의 전개 방향은 제체의 종방향이다. 또한 2차 탐사방법으로는 제체 중심점토 유실이 의심되는 지구와 제체 누수량의 변동이 심한 지구에 대해서 각각 탄성과 탐사와 자연전위 탐사를 부분적으로 수행할 수 있도록 제시하였다 <그림 3-1>. 단, 전기비저항 탐사가 불가능한 지구에 대해서는 2차 탐사방법인 탄성과 탐사나 자연전위 탐사로 대체가 가능하도록 하였다.



<그림 3-1> 저수지 물리탐사 수행 체계 모식도

제2절 방조제 물리탐사 수행 체계

정밀안전진단 대상 지구중 방조제 1종 (방조제 관리법에 따른 국가 방조제), 2종 (방조제 관리법에 따른 지방자치단체관리방조제) 시설을 대상으로 물리탐사의 수행 체계를 제시하여 기존의 불규칙적인 탐사설계 및 축선설정 등의 문제점을 해소하고자 하였다. 저수지와 마찬가지로 1차 탐사는 전기비저항 탐사로 일원화하였으며, 제체 높이에 따른 축선의 수와 설정 위치를 표준화하였다. 방조제는 통상적으로 제체의 높이가 저수지보다 낮지만, 제체의 길이는 상대적으로 길다. 1차 탐사에서는 제체 높이 5 m 이하인 지구의 경우 제체 마루 1 축선을 수행하도록 하며, 5 m 초과인 지구는 각각 제체 마루 1 축선, 소단 또는 하단부 1 축선을 기본으로 하였다. 제체를 구성하는 성토재 유실이 의심되는 지구 및 제체 누수량의 변동이 심한 지구에 대해서는 2차 탐사방법으로 저수지와 마찬가지로 각각 탄성과 탐사와 자연전위 탐사를 부분적으로 수행할 수 있도록 제시하였다 <그림 3-2>. 또한 동일하게 전기비저항 탐사가 불가능한 지구에 대해서는 2차 탐사방법인 탄성과 탐사나 자연전위 탐사로 대체가 가능하도록 하였다. 이와 같이 저수지 및 방조제를 구분하여 제체 규모에 따른 탐사방법 및 축선설정이 이루어지게 되는 경우에는, 정밀안전진단 조사를 수행하는 기술자로 하여금 물리탐사를 최초로 적용하는 단계부터 체계적인 접근이 가능할 것으로 판단된다.



<그림 3-2> 방조제 물리탐사 수행 체계 모식도

제4장 물리탐사 이론

제1절 전기비저항 탐사

대부분의 암석은 전도성이 나쁘기 때문에, 전기비저항이 대단히 크다. 그러나 암석 내의 공극 (pore)은 주로 물로 채워진 다공성 (porous)의 특성으로, 전도성의 특징을 갖게 된다. 전기비저항은 전기 전도도의 역수로서 전류의 흐름에 저항하는 고유한 특성을 갖는다.

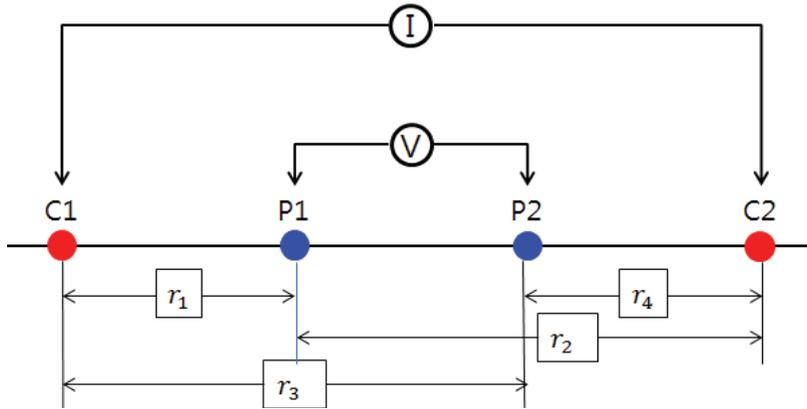
전기비저항 탐사는 지하에 일정한 전류를 흘려보낸 후, 전위차를 측정하여 파쇄대나 균열대 등 지하수로 부터 발생될 수 있는 전기비저항 이상대 (anomaly zone)를 찾는 방법이다. 실제의 지하구조는 균질한 공간이 아닌 층서, 파쇄대, 단층 등의 지질구조를 포함하는 다양한 암석들로 구성되어 있으므로, 전기비저항 탐사에서 얻은 전기비저항 값은 전류 경로에 존재하는 지하구조의 복합적인 영향에 나타나는 겉보기비저항 값이다. 이 값은 지하 매질에 대한 정보를 포함하고 있으나, 그 값 자체가 지하 특정 위치의 실제 전기비저항 값이 아니기 때문에 적절한 해석 과정을 거쳐야만 지하의 전기비저항 분포를 알 수 있다. 균질 (homogeneous)하고 등방성 (isotropic)인 대지에서 흘려준 전류량과 측정된 전위차를 이용하면, 전극 간격과 관계없이 지하 매질의 참 전기비저항 (true resistivity) 값을 얻을 수 있다. 그러나 매질이 불균질한 경우에는 입력 전류가 전기비저항이 낮은 쪽으로 더 많이 흐르게 되어, 측정된 전기비저항 값은 전극이 위치한 매질의 참 값이 아닌 결과로 나타나는데 이를 겉보기비저항 (apparent resistivity)이라고 한다.

전기비저항에 대한 물리적인 특성은 다음과 같다. 저항 (resistance)은 매질이 직류 전류의 흐름을 방해하는 것을 의미한다. 여러 가지 매질은 각기 다른 저항을 가지고 있는데, 이는 전기적 특성 뿐만 아니라 기하학적 특성에 의해서도 달라진다. 길이가 l 이고, 단면적이 A 인 저항기에서 전류는 단면적이 넓을수록, 길이가 짧을수록 더 잘 흐른다. 전류가 잘 흐른다는 것은 저항이 낮다는 것을 의미하게 된다. 그러므로 식(4.1)과 같이 저항기의 저항 (R)은 단면적과 길이, 저

항기의 고유성질인 전기비저항 (electrical resistivity) ρ 에 좌우된다.

$$R = \rho \frac{l}{A}, \quad \text{or} \quad \rho = R \frac{A}{l} \quad \text{식 (4.1)}$$

전기비저항의 단위는 ohm-m이며, 전기비저항의 역수는 전기전도도 (electrical conductivity)로 단위는 mho/m, 또는 S/m 이다. <그림 4-1>은 두 지점 사이의 전위차를 측정하는 모식도를 나타낸 것이다.



<그림 4-1> 두 지점 사이의 전위차 측정 모식도

여기서, C1, C2를 통해 전류를 흘려주게 되는데, 결과적으로 두 전위전극 P1, P2와 두 개의 전류전극 C1, C2가 있을 때, 전위차는 식 (4.2)와 같다.

$$\Delta V = V_{p_1} - V_{p_2} = \left(\frac{\rho i}{2\pi r_1} - \frac{\rho i}{2\pi r_2} \right) - \left(\frac{\rho i}{2\pi r_3} - \frac{\rho i}{2\pi r_4} \right) \quad \text{식 (4.2)}$$

즉,

$$\Delta V = \frac{\rho i}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right) \quad \text{식(4.3)}$$

이 되고, 위 식을 전기비저항에 대한 식(4.4)와 같이 바꾸면,

$$\rho = G \cdot \frac{V}{i} \quad \text{식(4.4)}$$

이때, 식(4.3)의 괄호 항은 흔히 거리계수 (geometric factor, G)라고 부른다. 이렇게 거리계수가 결정되고, 각 배열법에 따라 다른 거리계수를 갖는다. (표 4-1)은 전기비저항 탐사 배열별 거리계수를 나타낸 것이다.

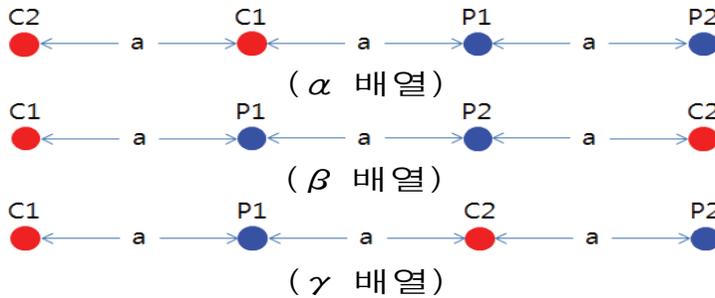
(표 4-1) 전기비저항 탐사 배열법 및 거리 계수 공식

배열법 종류	거리계수 (G)
웨너 배열 (Wenner array)	$2\pi a$
슐럼버저 배열 (Schlumberger array)	$\frac{\pi(2a^2 - b^2)}{4b}$
단극배열 (pole-pole array)	$2\pi a$
쌍극자 배열 (dipole-dipole array)	$n(n+1)(n+2)\pi a$
변형된 단극배열 (modified pole-pole array)	$\frac{(s+n)(n+p)(s+n+p)}{sp(s+2n+k)}$

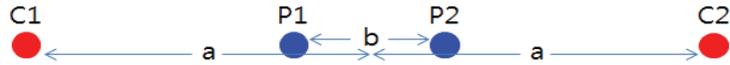
전기비저항 탐사에서는 웨너 배열 (Wenner array), 슐럼버저 (Schlumberger array) 또는 쌍극자 배열 (dipole-dipole) 등의 전극 배열들이 사용된다. 웨너 배열은 모든 전극 간의 간격이 같으며 ‘a’로 표시한다. 수직탐사를 수행할 때는 배열의 중심을 고정한 채 a를 확대시켜 간다. 이때 10 단위 (decade)당 6지점을 로그 스케일로 확대시켜 나간다. 예를 들면 10.0, 14.7, 21.5, 31.6, 46.4, 68.1, 100,

147, 215, 316, 464, 681 등이다. 이렇게 전극간격 (a)을 확대시켜 가는 이유는 얇은 매질은 항상 임의의 전기비저항 측정 자료에 포함되어 있으므로 깊은 매질의 합리적인 전기비저항 값을 구하기 위해서는 전극간격이 점점 더 커질 필요가 있다. 추천된 전극간격을 사용하면 현장자료를 log-log 그래프상의 수평축에 동일한 간격으로 나타낼 수 있다. <그림 4-2>는 웨너 배열의 여러 가지 종류를 나타낸 것이다.

전극배열의 중앙점에 대해 전류 및 전극간격을 대칭적으로 전개하는 배열로서 웨너 배열 외에 슬림버저 배열이 있다. 그러나 전위전극의 간격 (b)이 전류전극의 간격 (2a)에 비해 훨씬 좁다. 전극간격은 통상 $2a > 5b$ 를 유지하도록 선택한다. 이러한 기하학적 배열 때문에 전류전극 간격이 수 배 이상 증가하면 탐사기의 민감도 (sensitivity)가 떨어진다. 그러면 전위전극 간격을 그 다음 큰 값으로 증가시킨다. 예를 들면 앞의 예에서 $b=10$ m이면, 그 다음은 $b=14.7$ m로 한다. 이 때 전류전극 간격 a는 앞선 측정시 사용된 최대 a에서 두 단계 낮춘 값을 취한다. 예를 들면 최대 $a=215$ m이면, 그 다음 측정에서는 $a=100$ m부터 측정을 시작한다. 이런 기록과정은 걸보기비저항대 전극간격의 그래프 상에 겹치는 부분을 만듦으로써 보정해 주는 역할을 한다. <그림 4-3>은 슬림버저 배열을 나타낸 것이다.

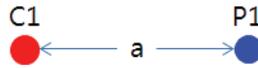


<그림 4-2> 웨너 배열의 종류



<그림 4-3> 솔럼버저 배열

단극배열은 일반적으로 사용하는 웨너, 쌍극자, 솔럼버저 배열과 달리, 전류전극과 전위전극이 각각 하나씩 존재한다. 단극배열을 근사화하기 위해서는 C2, P2를 C1, P1 거리의 20배 이상의 거리에 위치해야 한다. 다른 배열에 비해 큰 측정값을 가지고 원거리 접지전극을 용이하게 설치할 수 있으며 수식적으로 간단하다는 장점이 있지만, 거리가 길면 데이터의 질을 저하시키는 잡음을 다량 함유한다는 단점이 있다. 따라서 이 배열은 주로 10 m 이하의 길이에 사용하는 것이 적합하다. <그림 4-4>는 단극 배열을 나타낸 것이다.



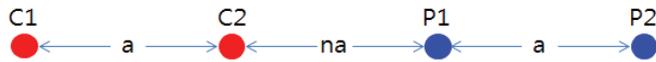
<그림 4-4> 단극 배열

<그림 4-5>는 쌍극자배열을 나타낸 것으로 전류전극과 전위전극 사이의 간격을 모두 a 로 일정하게 고정하고, 전류전극과 전위전극의 거리를 연속적으로 쌍극자 길이 (a)의 정수배 (na)만큼 증가시켜가면서 측정한다. 이때 n 을 전극 전개수 (electrode separation index)라 부른다. 쌍극자 길이 전류 및 전위전극의 간격은 탐사목적과 정밀도 등을 고려하여 결정한다. 쌍극자배열법으로 얻어진 측정값은 전류전극과 전위전극의 중심에서 45° 로 그어 만나는 점에 기록함으로써 겹보기비저항 값의 수평적, 수직적 변화를 파악 할 수 있다.

솔럼버저 및 웨너의 수직탐사는 지표면 상의 특정 지점 하부의 정보를 1차원적으로 획득할 수 있는 반면, 쌍극자 배열은 신속하게 수직 및 수평 탐사를 수행할 수 있어 비교적 광역적으로 지하의 2차원적인 전기비저항 정보를 얻을 수 있다. 물론 솔럼버저 및 웨너 배열을 이용한 수직탐사를 여러 지점에서 수행함으로써 2차원적인 전기비저항 분

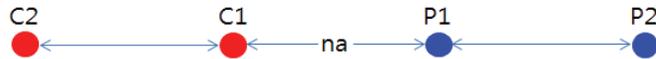
포를 파악할 수 있으나 이런 경우 쌍극자배열 탐사에 비해 탐사기간과 비용이 많이 소요되며, 더욱이 각 측정점 사이에 존재하는 국부적인 이상대 (local anomaly)의 탐지는 사실상 어려워진다.

그러나 쌍극자 배열 탐사는 지하의 2차원적인 정보를 파악할 수 있기 때문에 이러한 수직탐사의 단점을 피할 수 있으나, 지표 천부의 수평적인 전기전도도 (lateral conductivity variation)에 민감하므로 이에 의한 영향을 정확히 해석하기가 어렵다는 단점이 있다.



<그림 4-5> 쌍극자 배열

<그림 4-6>은 변형된 단극 배열을 나타낸 것으로 기존의 단극 배열을 변형한 것으로 음의 전류 및 전위전극을 원거리 접지하는 대신에 측선의 양단에 각각 고정시키고 단극법과 같은 방법으로 양의 전류 및 전위전극을 이동하면서 추정하는 방법이다. 이 전극 배열은 원거리 접지가 불가능한 현장에서 사용될 수 있으며, 원거리 접지가 불필요하다는 점에서 현장 탐사의 이점이 있다. 그러나 측선 양단에 음의 전류 및 전위전극을 고정시킴으로 인하여 측정되는 전위는 측선 양단 부분에서는 단극 배열보다는 낮은 값이 측정되며, 측선의 중앙 부위에서는 단극 배열에 가까운 정도의 높은 전위측정이 가능하다.



<그림 4-6> 변형된 단극 배열

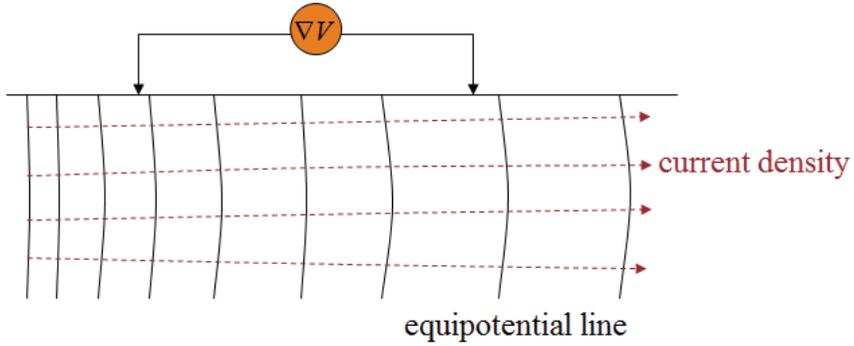
제2절 자연전위 탐사

자연전위 탐사는 전도체와 지하유체 사이의 전기화학적 작용과 유체의 유동성에 기인하는 전기역학적 작용에 의해 발생하는 자연전위를 측정하는 탐사법이다. 전기비저항 탐사와는 달리 인위적으로 지하에 전류를 흘려줄 필요가 없는 가장 간단하면서도 오래된 탐사법으로써, 황화광체 등과 같은 광물자원 탐사에 주로 적용되었다. 그러나 최근의 자연전위 탐사는 지열, 환경 및 공학분야에 광범위하게 활용되고 있다. 즉, 댐, 제방 및 저수지 바닥의 누수부위 탐지, 관정, 단층, 사면, 함몰원 근처의 지하수 흐름 양상 등을 알아보기 위해 적용되고 있다.

지하에서 자연적으로 발생하는 전위는 전도체와 지하유체 사이의 전기화학적 작용과 유체의 기동성에 기인하는 전기역학적 작용에 발생한다. 전기역학적 전위는 흔히 유동전위 (streaming potential)이라고 불린다. 유동전위는 지층의 공극 또는 모세관을 통하여 전해질이 이동하면서 나타나는 전위이다. 물리탐사에서 유동전위는 지하수 및 지열수의 흐름과 관련되어 나타나는 것으로 통상 mV에서 수백 mV의 크기를 갖는다. 따라서 암석의 대수층 내 균열을 따라 누수 되는 지역, 양수 기간 동안 양수정 근처, 고도차가 큰 지형 그리고 지열대 등에서 나타난다.

자연전위의 발생원인은 그 발생 기작이 명확하게 밝혀지지지는 않지만 전기화학적 (electrochemical), 전기역학적 (electrokinetic) 및 열전기적 (thermoelectric) 효과 등이 있고 전기 화학적 효과를 제외하고는 여전히 연구가 진행되고 있다. 일반적으로 가장 크게 관측되는 자연전위는 광화전위 (mineralization potential)로 불리는 광화대 주변에서 차등 산화 환원에 의한 전기화학적 (electrochemical) 전위로서 수백 mV 이상의 크기로 관측되기도 한다. 다른 주요 자연전위 발생 기작은 유동전위로서 전해액이 다공성 매질을 통해 흐를 경우 전기역학적 기작에 의해 발생하는 전기전위를 말한다. 이러한 유동전위는 공극수가 유동하는 과정에서 공극과 지하수의 경계에 형성된 전하들의 운동에 기인한다. 또한 지열광상 주변에서도 대류 형태에 따른 소용돌이도 (vorticity)에 기반하여 열전기적 (thermoelectric) 자연전위가

관측되기도 한다. <그림 4-7>은 두 측정점 사이의 자연전위 발생 모식도를 나타내고 있다.



<그림 4-7> 자연전위 발생 모식도

1) 특히, 해안가에 위치한 방조제에서의 유동전위는 조위차에 의한 압력 차이, 누수경로의 구조 및 특성, 해수와 담수의 염분 농도 등이 영향을 줄 수 있다.

물로 포화된 다공성 매질에서 전류밀도는 식(4.5)와 같은 결합방정식 (coupling equation)에 따라 수압구배(∇P)와 전위구배(∇V)에 관련된다.

$$J = \sigma_r \nabla V - C_s \sigma_r \nabla P \quad \text{식(4.5)}$$

여기서, σ_r 은 다공성 매질의 전기전도도이고, C_s 는 포화대의 결합계수 (coupling coefficient)이다. 결합계수는 식(4.6)과 같은 유체흐름 수압구배(∇P)와 유도된 전위구배(∇V)를 적용함으로써 실내시험으로 측정할 수 있다 (Guichet et al., 2006).

$$C = \frac{\nabla V}{\nabla P} = \frac{\varepsilon \zeta}{\eta \sigma_f} \quad \text{식(4.6)}$$

여기서, σ_f 와 ε 은 유체의 전기전도도와 유전율이고, ζ 는 암석과 유체 사이의 공간에서 이중층 안에 있는 제타 (zeta) 전위이며 (Davis et al., 1978; Ishido and Mizutani, 1981; Morgan et al., 1989), η 은 유체의 점성도이다. 각각의 방조제에서 σ_f , ε , ζ 는 대개 큰 제한이 없이 다양하며, 실제적으로 상수로 사용된다. 그러므로 방조제에서 유동 전위는 식(4.7)과 같이 주로 수압에 따른 전위구배와 관련된다. 정상 전류의 경우에 총 전류밀도의 발산은 0이다.

$$\nabla \cdot J = \nabla \cdot (\sigma_r \nabla V) - \nabla \cdot (C \sigma_r \nabla P) = 0 \quad \text{식(4.7)}$$

이것이 V 에 대한 포와송 방정식이며, ∇P 의 발산은 주로 전기역학적 신호에 해당하는 항이다. 그러므로 신호에 해당하는 항은 식(4.8)과 같이 전도성 매질에서 전류원 I_k 에 의한 직류 비저항 반응으로 알려진 지배방정식의 결과인 유체 흐름에 따른 전류밀도의 발산에 해당된다.

$$\nabla \cdot (\sigma_r \nabla V) = \sum_k I_k \delta(r - r_{s_k}) \quad \text{식(4.8)}$$

여기서, r_k 는 신호원 위치를 나타내며, 수학적으로 전기비저항 탐사 방법과 같다. 그러므로 자연전위 모델링은 전기비저항 모델링과 매우 유사하다. 전위는 유한차분법 (finite difference method: FDM), 유한요소법 (finite elements method: FEM)과 같이 다양한 수치적인 방법을 사용하여 계산할 수 있으며, 이를 적용하여 식(4.8)은 다음과 같은 선형방정식(4.9)로 변환할 수 있다.

$$V = KS$$

식(4.9)

여기서, K 는 임피던스 행렬이고, K 의 계산은 지표하부의 전기비저항 분포를 필요로 한다. K 는 전기비저항 탐사를 통하여 얻을 수 있으며, 자연전위 신호원 S 는 이론적으로 역산을 통해 계산할 수 있다.

제3절 탄성과 탐사

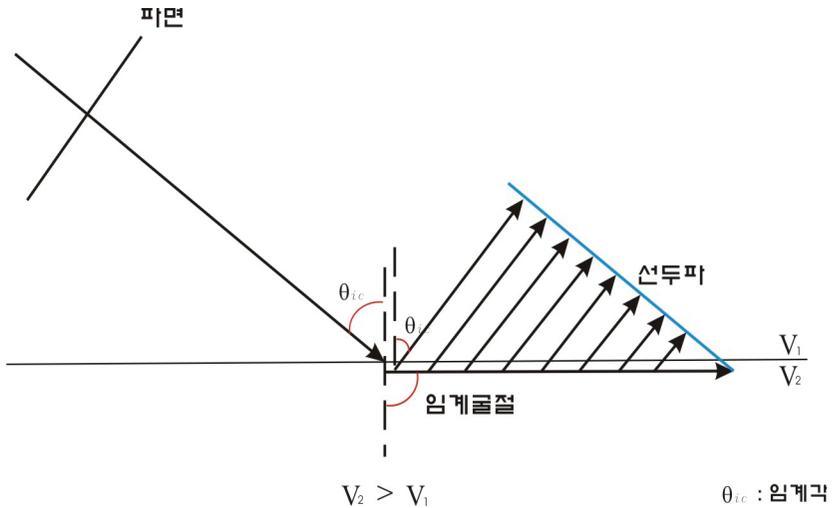
탄성과 탐사는 지표상이나 해상에서 인공적으로 지진파 (seismic wave)를 발생시키고 수진기로 받은 후, 그 자료에서 지진파들의 전파 시간과 파형을 분석하여 지질구조를 결정하는 방법이다. 수리시설물에 대한 탄성과 탐사 방법은 현장 적용성과 해석 방법의 용이성을 토대로, 굴절파 (refraction wave) 탐사와 다중채널 표면파 (multi-channel analysis of surface wave) 탐사가 적합하다.

굴절파 탐사는 다음의 식(4.10)과 같은 매질의 경계면에서 탄성과의 굴절 특성을 나타내는 스넬의 법칙을 따른다. 이 법칙은 지하구조를 유추하기 위한 반사법 및 굴절파 탐사에서 다른 식을 유추하는 기본적인 관계식이다.

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{V_1}{V_2} \quad (4.10)$$

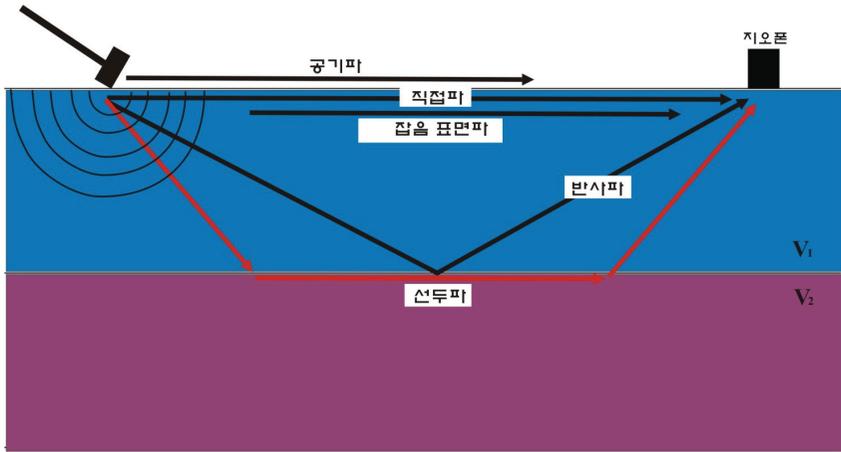
이때 θ_1 은 입사각, θ_2 는 굴절각, V_1 , V_2 는 각각 첫 번째 층과 두 번째 층의 속도를 의미한다. 한편, 입사각의 증가에 따라 굴절각이 증가하여 $\theta_2 = 90^\circ$ 가 되면 $\sin\theta_1 = V_1/V_2$ 이 된다. 이때 파선이 두 매질의 경계면과 평행하게 되는데, 이때를 임계굴절 (critical refraction)이라고 하며, 굴절각이 90° 일 때의 입사각을 임계각 (critical angle)이라고 한다. 입사각이 임계각보다 더 크게 된다면 굴절은 발생하지 않고 전반사가 일어나게 된다. 굴절파 탐사는 임계각과 임계굴절을 이용하는 방법이다. 임계굴절된 파선은 V_2 의 속도로 경계면에 파동을 만들면

서 진행하며, 이러한 파동은 다시 2차 파형요소를 만들어 V_1 의 속도로 지표로 진행한다. 이러한 파를 선두파 (head wave)라고 하며, 이 파선들은 모두 임계각으로 굴절하게 되므로 이러한 선두파로부터 주시 방정식을 유도하여 지하 정보를 알아낼 수 있다 <그림 4-8>.



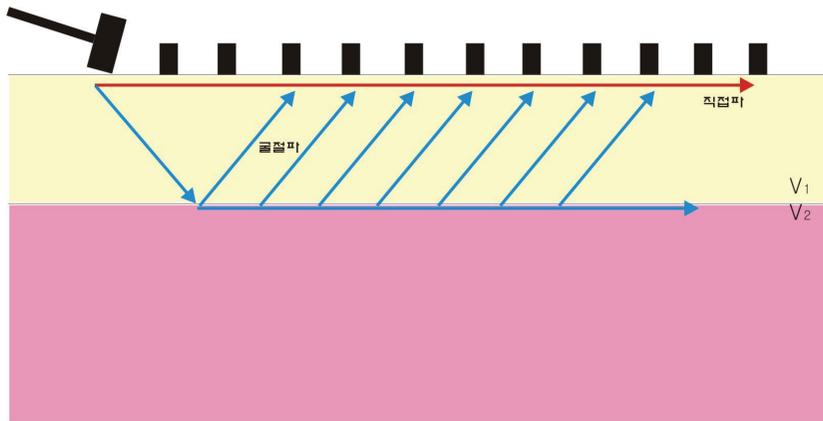
<그림 4-8> 임계굴절과 선두파

<그림 4-9>는 지표면의 어느 한 지점에서 에너지를 발생시켰을 때 나타나는 여러가지 파와 그 파들의 파선 경로를 나타낸 것이다. 지표 위 한 지점에서 타격했을 때, 우선 공기 중을 전파하는 공기파 (air wave)와 지층의 최상부를 따라 전파하는 직접파가 발생한다. 또한 타격 시 땅의 진동으로 인한 표면 잡음파도 발생한다. 한편, 지층이 서로 다른 속도를 갖는 여러 층으로 구성되어 있다면, 각 지층의 경계에서 반사파와 굴절파 (선두파, 임계굴절파)가 발생해 수신기 (geophone)에 감지된다.



<그림 4-9> 여러가지 파들의 파선 경로

굴절파 탐사는 속도가 서로 다른 지층의 경계에서 굴절되어 지표로 되돌아오는 파를 기록하여 지하의 속도 구조를 해석하는 방법으로, 심부로 갈수록 지반의 탄성과 속도가 커진다는 가정을 전제로 한다. 대부분의 경우 이와 같은 지반 조건을 만족하므로 굴절파 탐사는 댐 기초 암반의 평가나 터널 주변 지반 상황 파악 등 토목 분야의 많은 조사에 폭넓게 이용되고 있다. 탄성파탐사에서 얻어지는 속도구조는 지질 분포, 강도 또는 균열의 정도, 풍화·변질대 등의 지질 상황, 단층 파쇄대의 유무 및 규모 등의 지질구조를 파악하는데 이용된다 <그림 4-10>.



<그림 4-10> 굴절파 탐사 모식도

(표 4-2)는 대표적인 물질에 대한 현장에서의 탄성과 속도 범위를 정리한 것이다 (Reynolds, 1997). 탄성과 속도는 같은 암석일지라도 고결도, 풍화, 변질 및 균열의 정도, 포화 유무 등의 지질학적 조건에 따라서 서로 다른 속도 층으로 구분되기도 하고, 이와 반대로 서로 다른 지층일지라도 같은 속도 층으로 파악되는 경우도 있다. 그러나 불포화된 퇴적물은 포화된 퇴적물 보다 속도가 느리고, 미고결 퇴적물은 고결 퇴적물보다 속도가 느리다. 또한 풍화된 암석은 그렇지 않은 암석보다 속도가 느리다. 또한 포화된 미고결 퇴적물들은 그 종류가 무엇이든지 속도가 비슷하다는 특징이 있다.

일반적으로 암석의 P와 속도를 기준으로 판단하면 포화된 퇴적물과 불포화된 퇴적물, 퇴적물과 암석, 화성암과 변성암을 구분하는 것은 가능하다. 그러나 서로 다른 암석인 경우에도 포화된 경우에는 서로 비슷한 속도 분포를 나타내므로 P와 속도를 이용한 구분이 불가능하다. 따라서 대략적으로 탐사계획을 수립하는 경우에는, 건조된 미고결 매질은 500 m/s, 포화된 미고결 매질은 1,500 m/s, 퇴적암은 4,000 m/s, 풍화되지 않은 화성암과 변성암은 6,000 m/s의 속도로 가정할 수 있다 (손호웅 외, 2000).

(표 4-2) 대표적인 암석의 P파 속도 (m/s)

미고결 물질		고결 물질		기타	
풍화층	300~900	화강암	5,000~6,000	물	1,400~1,600
토양	250~600	현무암	5,400~6,400	공기	331.5
충적층	500~2,000	변성암	3,500~7,000		
점토	1,100~2,500	사암, 혈암	2,000~4,500		
모래		석회암	2,000~6,000		
불포화	200~1,000				
포화	800~2,200				
모래와 자갈					
불포화	400~500				
포화	500~1,500				
빙하 퇴적물					
불포화	400~1,000				
포화	1,700				
압축	1,200~2,100				

굴절과 탐사는 심부로 갈수록 지반의 탄성과 속도가 커진다는 가정을 전제로 한다. 그러나 실제 지하구조에서는 드물게 하부층이 상부층보다 속도가 느린 경우, 지층의 경계가 단층이거나 기복이 있는 경우, 얇은 층이 있는 경우, 하부 지층과 속도 차이가 뚜렷하지 않는 경우가 존재하며, 이런 경우 해석에 오류가 발생한다. 또한 매질이 수평층이 아닌 경우에는 해석에 어려움이 있기 때문에 다양한 해석 방법이 제시되고 있다. 지연시간법 (delay time method)은 불규칙한 굴절면을 그려내기 위해 고안되었으나 굴절면의 깊이에 비하여 굴절면의 기복이 작고, 굴절면의 경사가 10° 이하의 경우에만 적용할 수 있다. 또한 숨은 층 문제를 해결하지 못한다는 단점이 존재한다. 파면법 (wavefront method)은 수평이나 경사진 경계면에 적용하기가 간단하며, 불규칙한 굴절면을 그리는데도 유용하나 보다 복잡한 표면에 이 방법을 적용할 경우 파면 작성이 복잡해지며, 많은 시간이 소요되는 단점이 있다 (Thornburgh, 1930). 파선 추적 (ray tracing; Cerveny et al., 1974)과 GRM 방법 (generalized reciprocal method; Palmer, 1980)은 위 방법들보다 복잡한 지하상태에 적용할 수 있는 방법이다. 파선 추적법은 탄성과 자료에 근거한 이론 모델을 제시한 후 이 모델을 계산된 주시와 관측주시를 비교해 수정하여 오차를 줄여나가는 방법이다. GRM 방법은 지연시간법을 일반화시킨 방법으로 굴절면의 경사가 20° 까지 적용할 수 있으며, 저속도층이나 얇은 층 같은 숨은 층에 대한 문제를 어느 정도 해결 할 수 있는 방법이다.

기존의 굴절과 탐사 자료해석 방법인 절편시간법 (Ewing et al., 1939; Dooley, 1952; Adachi, 1954; Mota, 1954), 파면법 (Thornburgh, 1930), 임계거리법 (Heiland, 1963), 양단 주시법 (Hagiwara and Omote, 1939; Hawakins, 1961), 지연 시간법 (Barry, 1967) 등은 굴절면 깊이에 비해 굴절면의 기복이 상대적으로 작고 굴절면의 경사가 10° 이내이어야 하며, 얇은 층 및 저속도층 등의 숨은 층이 존재하지 않는 층 모델을 가정하므로 복잡한 지질구조를 규명하는데 한계가 있다. 굴절면의 경사에 대한 한계는 파선 추적법과 GRM 방법 등을 통하여 어느 정도 해결되었으나, 여전히 층 모델을 가정하고 있어서 지형변화가 심하고 지질구조가 복잡한 환경에서는 적용하기 어렵다.

이러한 문제점은 토모그래피 개념 (Radon, 1917)을 굴절과 자료해석에 도입한 굴절과 주시 토모그래피 (refraction travel-time tomography)방법으로 해결할 수 있다. 주시 토모그래피는 초동을 이용하여 매질의 속도를 도출하는 역산의 일종으로, 초동주시와 가장 잘 맞는 속도모델로부터 지하구조를 파악하는 방법이다. 이때 얻은 탄성과 속도분포는 매질의 물성을 지시하며, 이 단면을 보통 속도 토모그램 (velocity tomogram)이라 한다. 속도분포는 SIRT (simultaneous iterative reconstruction technique) 역산법을 이용하여 구할 수 있다. 이 방법은 주어진 셀을 통과하는 모든 파선에 대한 증분치를 동시에 계산한 후, 이 증분치들을 각각의 셀에 대해 동시에 보정하는 과정을 반복하여 주어진 오차 범위 보다 작아질 때까지 수정된 모델의 주시를 다시 계산하고 셀의 역속도 (slowness)를 보정하는 과정을 반복해 오차를 줄여 나가는 방법이다.

표면파 탐사는 비파괴, 비관입적인 지반조사 방법으로 지표면에서 지반의 강성구조를 신속하게 평가할 수 있는 방법이다. 진동파는 크게 P파, S파로 구분되는 실체파 (body wave)와 러브파 (love wave) 및 레일리파 (rayleigh wave)로 구분되는 표면파 (surface wave)로 구성되며, 그 에너지 비율을 보면 실체파가 33%, 표면파가 67%로 표면파가 차지하는 비중이 매우 큼에도 불구하고 탄성과 탐사에서는 단지 잡음 (noise)으로 취급되어 왔다. 표면파는 지표면을 따라 전파되는 탄성파로 이중 러브파는 특별한 지층 구조에서만 존재하며 레일리파는 모든 자유 지표면이 있을 경우 항상 발생 존재하는 탄성파로 통상 표면파는 레일리파를 말한다. 표면파는 주파수에 따라 그 전파 속도 및 파장이 변화하며 또한 그 에너지는 지표면 부근에 집중된다. 또한 지표면 하부 심도로 갈수록 지수함수적인 감쇠를 나타내어 대략 한 파장 (wave length) 정도의 심도 이상에서는 거의 소멸되는 특성을 갖고 있다. 이를 분산특성 (dispersion characteristic)이라 하며, 이는 표면파의 전파 속도는 한 파장 이내의 심도 구간 지층 상태에 따라 영향을 받게 됨을 의미한다.

표면파 탐사는 이러한 표면파의 분산특성을 이용하여 지층의 전단파 속도 분포 파악 및 간접적인 지층 상태를 파악하기 위한 시험 방법으로 미국 Kansas 지질연구소에서 1990년대 후반에 개발된 시험법으로 국내에서는 2000년 후반에 도입되어 적용되어 오고 있으며 이와 같은 원리를 이용한 탐사법을 표면파 기법이라고 총칭하며, 이외에도 SASW (spectral-analysis of surface waves) 기법, f-k (주파수-파수)기법, 시간-주파수 영역 기법, 상시 미진동 기법 등이 있다.

표면파 탐사방법 중 MASW 기법은 SASW 기법의 개념과 CMP 모음 기법을 병합하여 개발된 방법으로 CMP 모음 기법을 통하여 신호 품질의 개선을 기하고, SASW 기법의 개념을 도입하여 분산곡선 결정과 역산 해석을 수행하는 기법이다. 즉, 다수의 채널 (보통 12채널 이상)을 이용한 동시 측정으로 레일리파 위상속도 결정을 위하여 충분한 잉여의 자료를 확보하고, 탄성과 시간-공간 영역 자료에서 표면파 성분의 추출을 용이하게 함으로써 S/N 비를 향상시키는 기법이라고 할 수 있다. MASW 기법에 도입된 SASW 기법의 기본개념은 표면파의 전파를 두 개의 감진기를 이용하여 측정하고, 감진기 신호를 주파수별

로 분리한 후에 각 주파수의 전파 속도를 위상각 차이를 이용하여 결정하는 방법이다.

두 감진기를 이용한 표면파의 측정, 전달 함수의 결정, 주파수별 위상각 결정, 마스킹 작업에 의한 위상 스펙트럼의 분석, 위상속도 분산곡선의 결정, 역산에 의한 전단파 속도 결정 등의 순서로 진행된다. 표면파가 지표면을 따라 전파되는 속도를 겉보기 속도 (apparent velocity)라고 한다. 일반적으로 겉보기 속도는 어느 특정 지층의 탄성과 속도와 일치하지 않고 각 층의 속도를 적절히 조합한 임의의 속도에 해당된다. 한편 균질한 반무한 지반에서 표면파가 전파될 때는 표면파 전파 속도는 한 매질의 탄성과 속도로 전파하게 되지만, 다층구조 지반에서는 각 층마다 탄성과 속도가 달라지기 때문에 전파되는 탄성과 그룹 속에는 각기 다른 층의 속도로 전파하는 여러 종류의 파들이 혼재하게 된다. 각기 다른 지층으로 구성된 다층구조 시스템에서는 표면파 전파에 있어서 지층 구조의 특성에 따라 여러 개의 모드를 발생시키며, 각 모드는 다층구조 시스템의 각 지층과 연관성을 갖게 된다.

표면파 각각의 주파수 성분은 서로 다른 진행 속도를 갖는다. 이와 같은 특성을 분산 (dispersion)이라 하며, 지표면 근처의 표면파 전파 특성과 같은 중요한 정보를 제공할 수 있다 (Park et al., 1999). 그러므로 이와 같은 분산 특성을 분석하여 지표 근처의 S파 속도는 식 (4.11)과 같은 두 변수 사이의 관계로 계산된다.

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad \text{식(4.11)}$$

여기서, ρ 와 μ 는 각각 물질의 밀도와 전단 계수 (shear moduli)를 의미한다. 일반적으로 심도에 따른 밀도의 변화는 전단계수 변화와 비교할 경우 매우 작기 때문에 무시될 수 있다. 이와 같이 표면파 탐사를 이용한 분석은 물질의 강성을 지시하는 전단계수와 직접적으로 비례하기 때문에 지질공학 분야에서 지표면 근처의 강성 (stiffness)을 평가하는데 주로 사용된다. (Stokoe et al., 1994).

다음으로는 표면파 영역에 해당되는 주파수 영역과 위상속도 범위를 선정하여 최종 분산곡선 (dispersion curve)을 통해 분석을 수행한다. 분산분석 과정에서는 적절한 주파수의 범위와 위상속도의 분포 등 각각의 변수 범위를 결정하여 분산곡선을 얻는다. 수평적으로 이동하는 그라운드 롤의 파장은 임의의 거리 dx 에 따라 지표에 설치된 지오폰에 의해 기록된다. 기록된 파장은 식(4.12)와 같이 두 수신기에서 그라운드 롤의 경과시간에 대한 차이 값인 Δt_f 에 근거한 위상속도 C_f 를 위해 각각의 다른 주파수 f 에서 분석된다.

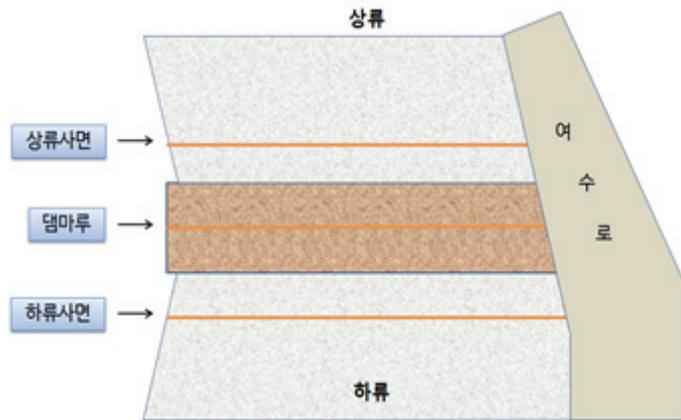
$$C_f = \frac{dx}{\Delta t_f} \quad \text{식(4.12)}$$

이후, 1차원 역산과정을 거쳐 전단파 속도 프로파일을 작성한다. 1차원 역산방법은 주로 최소자승법 (least square method)을 이용하며, 이 방법은 전단파 속도에 대한 이론적 분산곡선과 실제 분산곡선의 차이를 최소화하는 알고리즘이다 (Nazarian, 1983; Sanchez-Salinero et al., 1987; Rix and Leipski, 1991).

제5장 물리탐사 지침 개선방향

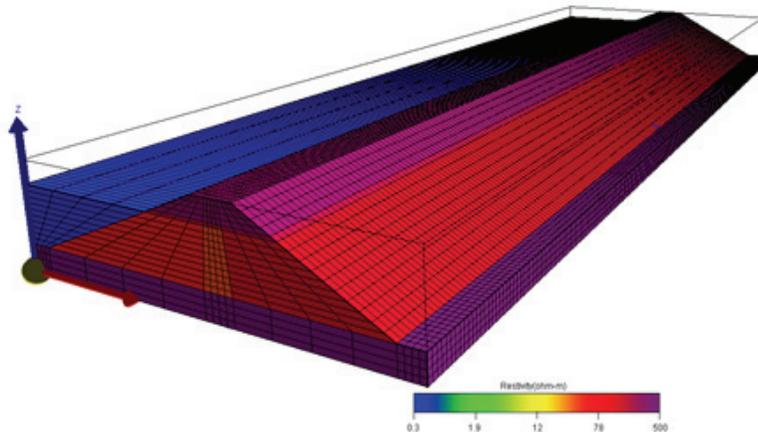
제1절 전기비저항 탐사 개선방향

전기비저항 탐사는 저수지, 방조제에서 공통적으로 적용되는 1차 탐사방법으로 탐사계획 수립이 매우 중요하다. 탐사계획 수립은 첫 단계로 측선 위치와 개수를 결정해야 하는데, 이 과정은 4.2장에서 제시한 물리탐사 수행 체계에서 제체의 높이에 따라 결정된다. 두 번째 단계로는 전극배열법을 선정해야 하는데, 통상적으로 흙담에서는 분해능이 우수한 것으로 검증된 쌍극자 배열법을 이용한다. 다만, 해안가에 위치한 방조제와 같이 상대적으로 전기전도도가 높은 지역, 또는 해안가의 저수지, 전도성이 높지 않은 제체의 경우에는 안정적으로 자료를 획득할 수 있는 다른 전극배열을 이용해야 한다. 최근 전도도가 높은 지반에서 자료획득이 가능한 변형된 단극 배열법이 적합하다. 세 번째 단계로는 측선 길이와 전극 간격을 설정해야 한다. 측선 길이는 제체 시점부와 종점부가 모두 포함될 수 있도록 충분한 거리를 확보해야 하며, 전극 간격은 탐사 심도와 밀접한 관련이 있기 때문에 제체의 높이를 고려해야 한다. 최대 탐사 심도는 대상 심도의 1.2~1.5배 정도로 설정하는 것이 보편적이지만, 저수지의 경우 복통이 있는 깊이를 고려하여 결정해야 한다. 앞서 제체 높이 10 m를 초과하는 저수지와 5 m를 초과하는 방조제에 대해 소단에서의 탐사측선 설정을 제시한 바 있는데, 소단에서는 소단 중앙부에서 탐사를 실시하는 것이 좋다. <그림 5-1>은 저수지의 경우 평면도 상에 표시된 전기비저항 탐사측선의 모식도이다. 여기에 표시된 측선은 상류사면 측선, 제체마루 측선, 하류사면 측선과 같이 3 측선으로 구성되어 있으나, 상류사면의 경우 사적으로 덮여있는 경우가 대부분으로 생략하는 경우가 많다.



<그림 5-1> 저수지에서의 전기비저항 탐사측선 모식도

제체 소단이나 하단부의 측선에서 자료를 추가로 확보하면 제체의 왜곡된 해석을 방지할 수 있다. 즉, 제체 마루에서 실시한 한 측선의 자료만으로는 3차원 구조물의 2차원 해석 시 주변의 영향에 대한 왜곡된 해석이 이루어지기 쉬운데, 이때 추가적인 측선에 대한 정보는 왜곡된 해석을 방지할 수 있는 효과가 있다. <그림 5-2>는 3차원 효과의 왜곡된 현상들을 방지하기 위해 담수와 제체에 해당되는 매질들을 3차원으로 요소분할 한 예를 보여주고 있다.



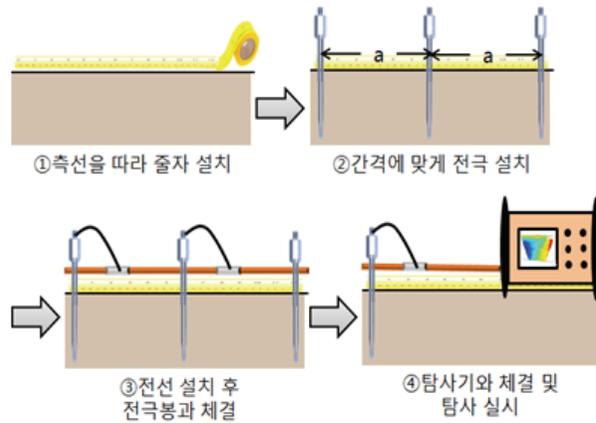
<그림 5-2> 제체의 3차원 요소분할 예시

체체의 성토재 하부는 기초지반으로 구성되어 있으므로 전극 간격 설정은 매우 중요하다. 적절한 전극 간격을 설정해야 체체를 보다 정밀하게 분석할 수 있게 된다. (표 5-1)은 최대 탐사 심도를 고려하여 체체 높이에 따라 설정할 수 있는 전극 간격의 예시를 보여주고 있다. 전기비저항 탐사 순서는 첫째, 설정한 측선 위치에 맞게 줄자를 설치하고, 둘째, 설정한 전극 간격에 맞게 전극봉을 설치해야 한다. 셋째, 전극들을 연결할 전선을 측선 옆에 배치해야 하며, 넷째, 전선과 전극봉을 연결해야 한다. 다섯째, 연결된 전선과 전기비저항 탐사기를 연결해야 하며, 여섯째, 데이터를 얻기 전 탐사 사전점검을 실시한다.

(표 5-1) 체체 높이에 따른 전극 간격과 N값에 따른 최대 탐사 심도

체체 높이 (m)	전극 간격 (m)	N	최대 탐사 심도 (m)
0~10	2	8	9
	3		13.5
	4		18
10~20	4	8	18
	5		22.5
20 초과	5	8	22.5
	10		45

점검 항목으로는 각 전극봉의 연결 유무, 접지저항, 단선 체크가 있다. 일곱째, 접지저항을 측정한다. 접지저항은 통상적으로 5k ohm 이하가 되어야 양질의 자료를 확보할 수 있다. 접지저항이 높을 경우 전극을 재설치하고 그래도 문제가 되면 소금물을 전극봉에 흘려서 접지저항을 낮추어야 한다. 여덟째, 전극배열, 측선간격, 측선위치, 측선 주변상황에 대한 정보를 마지막으로 기입한다. 이와 같이 탐사 준비가 완료되면 본 탐사 측정을 시작한다. <그림 5-3>은 전기비저항 탐사 순서 모식도이다.



〈그림 5-3〉 전기비저항 탐사 순서 모식도

정밀안전진단의 주기는 최소 5년이므로 1회성 탐사결과로 특정 측선에 대한 결과로 기존의 방식과 같이 해석을 하게 되면 제체 지하 구조 및 지형과 같은 왜곡된 현상을 충분히 설명할 수 없다. 또한 측정 시기별로 저수위의 높이가 모두 다르며, 제체의 압력 조건 등이 모두 상이하다. 그러므로 본 연구에서는 지구별로 3차원 모델링 기법으로 산정한 역산 결과를 이용하여 현장자료 역산 결과를 대비하는 방법을 제시하였다.

자료처리 순서는 첫째, 저수지의 지오메트리를 작성하여 요소를 분할한다. 둘째, 저수지 제원 정보, 저수지 규모, 저수위, 수질 등의 모델 변수를 입력한다 <그림 5-4>. 모델변수 입력창에서 왼쪽 상단의 전기비저항 측선 설정 부분은 전극 간격, 측정 수, 전극전개수, 측선 길이를 입력할 수 있는데, 측선 길이는 전극 간격과 측정 수에 따라 자동으로 적용된다. 왼쪽 하단의 저수지 독 정보 부분에서는 제체 높이, 제정 폭, 저수위, 중심코어 높이, 코어 상단너비, 코어 하단너비, 상류사면 높이 대비 너비의 비, 하류사면 높이 대비 너비의 비를 입력한 후, 복통 존재 여부를 선택한다. 여기서, 주의할 점은 높이의 경우 기초지반에서 시작되는 부분이 기준이 된다. 상류사면 높이 대 너비의 비와 하류사면 높이 대 너비의 비는 각각 상류사면과 하류사면의 경사도와 관련이 있다. 모델변수 입력창의 우측 상단 부분은 모델링을 위한 요

소분할시 메시의 크기와 관련이 된다. 즉, 메시의 간격을 조절할 수 있는데, 메시의 간격이 조밀할수록 모델링의 정밀도는 향상될 수 있으나, 모델링에 소요되는 시간이 길어진다. 반면, 메시의 간격이 조밀하지 않을 경우 모델링 소요시간은 단축될 수 있으나, 모델링 결과의 해상도는 낮아질 우려가 있다. 이와 같은 두 장점들을 모두 받아들일 수 있도록 <그림 5-4>에서는 기본 간격의 50% 정도로 메시의 조밀도를 선택한 경우이다.

<그림 5-4> 모델변수 입력 예시

마지막으로 모델변수 입력창에서 재질별 전기비저항을 입력해야 하는데, 모델링의 큰 영향을 미치는 값이므로 제체의 체원, 담수호 수질, 주변 지질 및 환경 등 사전에 종합적인 정보를 취득해야 한다. 입력 항목으로는 제체마루, 저수지 물, 기초지반, 상류사면의 수위 상부와 하부, 하류사면의 수위 상부와 하부, 코어의 수위 상부와 하부, 복통이

있다. 각각의 항목에 전기비저항을 입력해야 하는데, 앞서 설명한 대로 현장조사 자료 및 문헌을 토대로 최대한 현장 상황에 맞는 전기비저항 값을 입력해야 한다. 모델변수 입력 후에도 정모델링 (forward modelling)을 수행하기 이전에는 언제든지 체체 모델 정보의 수정이 가능하다. <그림 5-5>는 재질별 전기비저항 값 재설정이 이루어지는 과정을 나타낸 것이다. 여기서, 재질별로 전기비저항을 입력하여 변경란에 체크하여 확인하게 되면 기존의 모델변수가 수정된다.

또한 기존에 선택되었던 복통을 제거할 수도 있으며, 복통 주변의 취약범위를 별도로 설정할 수도 있다. 복통의 위치 및 구경을 재설정할 수 있으며, 복통 주변에 손상이 있는 경우 손상 범위를 지정할 수 있다. 물론, 손상 부위의 전기비저항 값의 재설정도 가능하다. 체체의 침윤선 하단 전기비저항의 수정도 가능한데, 이 과정에서 저수지의 물 높이를 고려하여 저수지의 물과 상류 중심점토와 만나는 높이, 하류 중심점토와 만나는 높이, 하류사면과 만나는 높이를 결정할 수 있다. 침윤선 하부의 전기비저항 값 설정 방식은 단일 전기비저항 값을 적용하는 방식, 기존 값에 따라 비례하는 값으로 적용하는 방식, 침윤선과 기초지반 접합부 사이의 경사를 적용하는 방식으로 나눌 수 있다. 이 중에서 가장 간단한 방식은 단일 전기비저항 값을 적용하는 것이다.

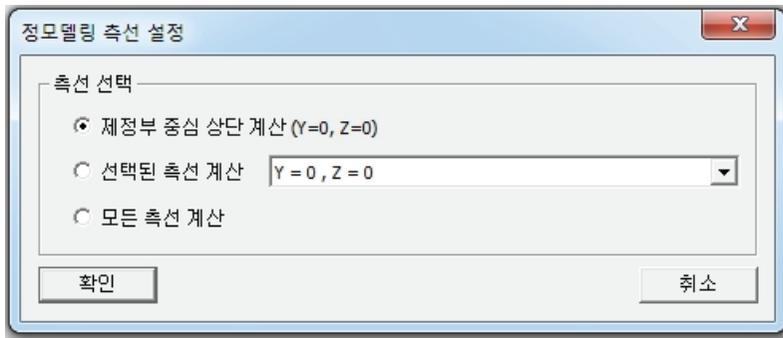
재질별 비저항값 재설정		
재질별 비저항값(단위 : ohm-m)		
멤마루 :	300	<input type="checkbox"/> 변경
저수지물 :	50	<input type="checkbox"/> 변경
기초지반 :	350	<input type="checkbox"/> 변경
상류사면(수위상부) :	200	<input type="checkbox"/> 변경
상류사면(수위하부) :	60	<input type="checkbox"/> 변경
코어(수위상부) :	200	<input type="checkbox"/> 변경
코어(수위하부) :	80	<input type="checkbox"/> 변경
하류사면(수위상부) :	150	<input type="checkbox"/> 변경
하류사면(수위하부) :	150	<input type="checkbox"/> 변경
복통 :	1e+007	<input type="checkbox"/> 변경

확인 취소

<그림 5-5> 재질별 전기비저항 재설정 단계

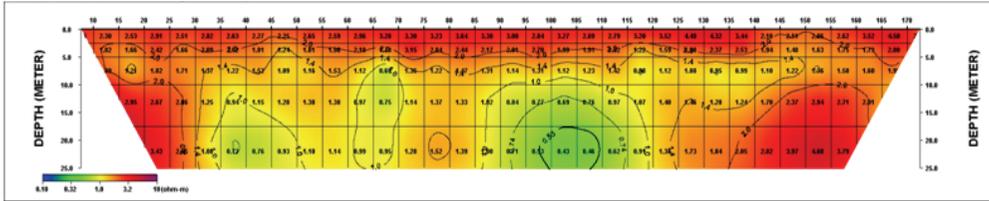
또한 제체와 기초지반 연결부위의 누수 설정도 가능하다. 기초지반 접합부의 전기비저항 값으로 이 부분의 누수가 의심된다면 보다 낮은 전기비저항 값을 입력해야 한다. 손상범위의 두께와 손상부위를 지정할 수도 있다. 즉, 손상부위의 경우 제체와 기초지반 중 하나를 선택하거나 모두를 선택할 수도 있다. 만일, 이와 같은 수정 사항을 반영하지 않는다면, 매우 건전한 저수지의 상황을 모사할 수 있게 된다. 그러므로 모델링 대상지구의 경우 사전 현장조사를 통해 제체의 취약 부분을 사전에 인지할 필요가 있다.

셋째, 모든 입력 작업이 완료되면 3차원 지형효과를 고려한 정모델링을 수행한다. 모델링을 수행하기 전에는 <그림 5-6>과 같이 제체마루 중심을 기준으로 제체 횡방향의 좌표 (y축), 제체 높이의 좌표 (z축)를 입력하여 축선의 위치를 모사할 수 있다. 만일 소단 중심에 축선이 위치한다면, 제체마루 중심부에서 y 좌표는 증가할 것이며, 높이를 나타내는 z 좌표는 감소할 것이다.



<그림 5-6> 정모델링 축선 설정단계

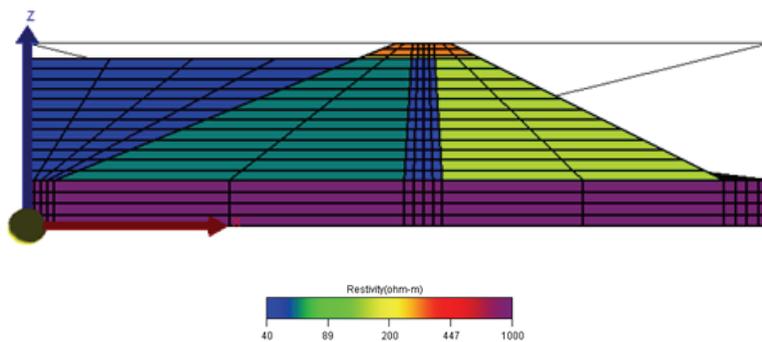
넷째, 모델링 자료를 역산한다. 다섯째, 현장자료를 입력하고 역산한다. 여섯째, 각각의 역산 결과를 비교하여 전기비저항 감소율을 산정한다. 향후, 전기비저항 감소율 자료가 많이 확보되면 통계 분석을 통해 전기비저항 감소율 기준을 설정할 수 있게 될 전망이다. 그렇게 되면 상태평가에도 반영이 가능하게 된다. <그림 5-7>은 모델링에 의한 역산결과와 현장자료의 역산결과를 비교한 예를 나타낸 것이다.



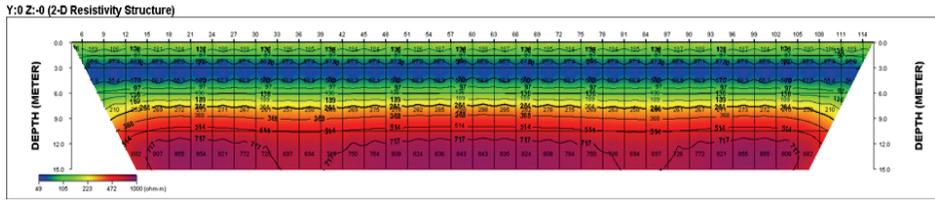
〈그림 5-7〉 모델링 자료에 의한 역산결과 대비
현장자료 역산결과 비교 사례

이와 같은 방법으로 중심점토 유무에 따라 저수위가 탐사결과에 미치는 영향을 확인하였으며, 담수와 제체의 매질에 대한 지오메트리 및 전기비저항 값은 모두 동일한 값을 사용하였다.

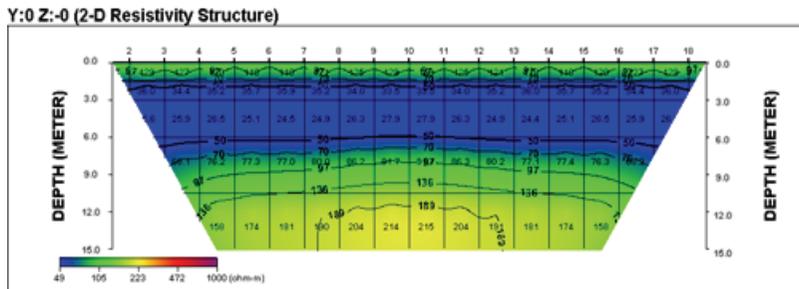
중심점토가 있는 경우를 가정하면 다음과 같다. 〈그림 5-8〉은 제고 9 m, 저수위 8 m를 가정하여 요소분할 한 제체의 횡단면을 보여주고 있다. 〈그림 5-9〉는 제고가 9 m, 저수위가 8 m인 경우 3차원 효과를 고려한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과를 나타낸 것이다. 정상적인 건전한 저수지로 가정되므로 전기비저항 구조가 수평 다층구조를 보이는 것을 확인할 수 있다. 〈그림 5-10〉의 3차원 효과를 배제한 수평 무한 지층에 대한 2차원 탐사와는 많이 구분된다.



〈그림 5-8〉 중심점토가 있는 경우 담수와 제체의 요소분할
(제고 9 m, 저수위 8 m)

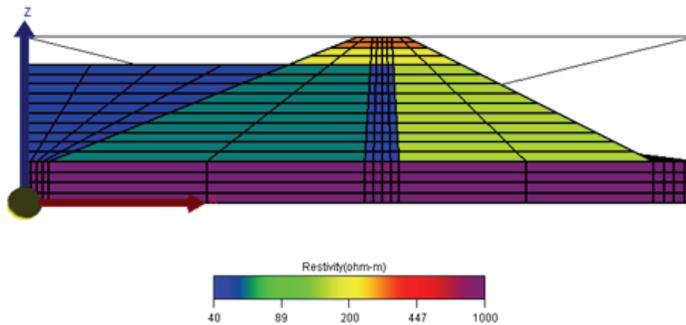


<그림 5-9> 중심점토가 있는 경우 3차원 효과를 가정한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과(제고 9 m, 저수위 8 m)



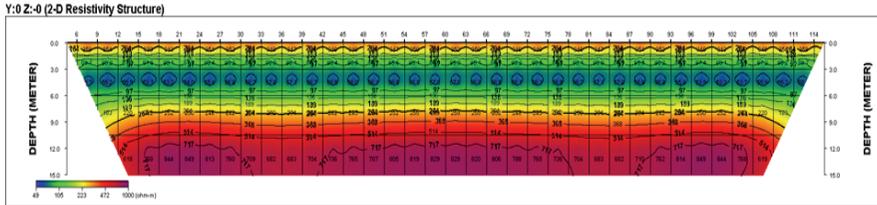
<그림 5-10> 3차원 효과를 배제한 수평 무한 지층에 대한 2차원 전기비저항 탐사결과

<그림 5-11>은 제고 9 m, 저수위 7 m를 가정하여 요소분할 한 체체의 횡단면을 보여주고 있다.



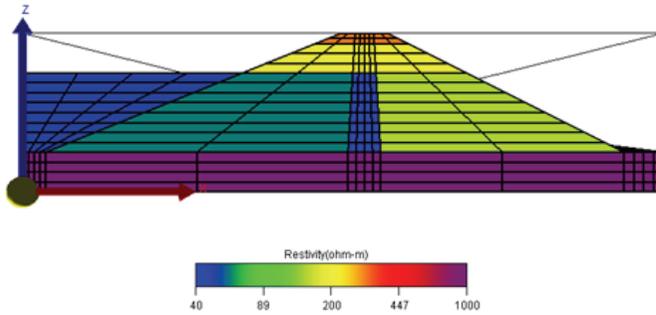
<그림 5-11> 중심점토가 있는 경우 담수와 체체의 요소분할 (제고 9 m, 저수위 7 m)

<그림 5-12>는 제고가 9 m, 저수위가 7 m인 경우 3차원 효과를 고려한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과를 나타낸 것이다.



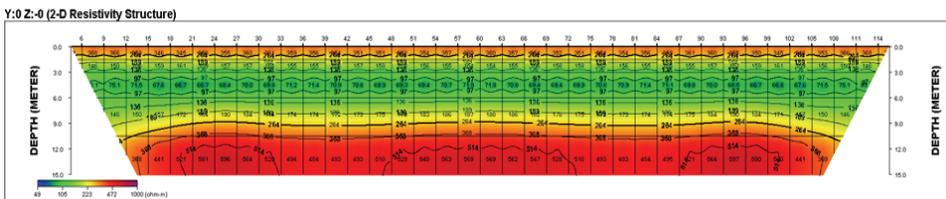
<그림 5-12> 중심점토가 있는 경우 3차원 효과를 가정한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과(제고 9 m, 저수위 7 m)

<그림 5-13>은 제고 9 m, 저수위 6 m를 가정하여 요소분할 한 체체의 횡단면을 보여주고 있다.



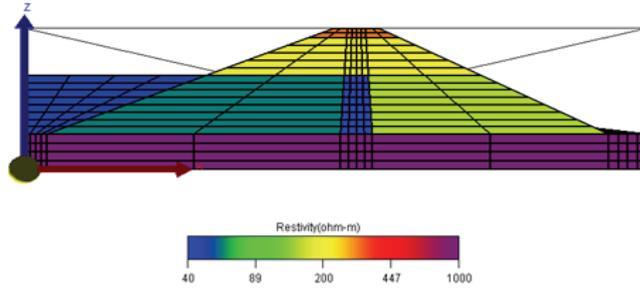
<그림 5-13> 중심점토가 있는 경우 담수와 체체의 요소분할 (제고 9 m, 저수위 6 m)

<그림 5-14>는 제고가 9 m, 저수위가 6 m인 경우 3차원 효과를 고려한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과를 나타낸 것이다.

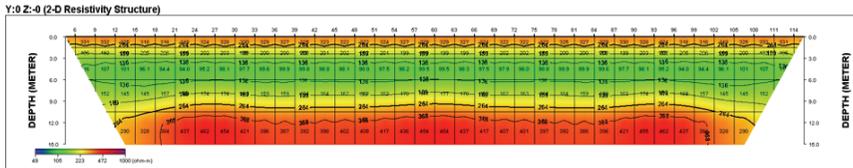


<그림 5-14> 중심점토가 있는 경우 3차원 효과를 가정한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과(제고 9 m, 저수위 6 m)

<그림 5-15>는 제고 9 m, 저수위 5 m를 가정하여 요소분할 한 체체의 횡단면을 보여주고 있다. <그림 5-16>은 제고가 9 m, 저수위가 5 m인 경우 3차원 효과를 고려한 전기비저항 모델링에 의한 역산 결과를 나타낸 것이다.

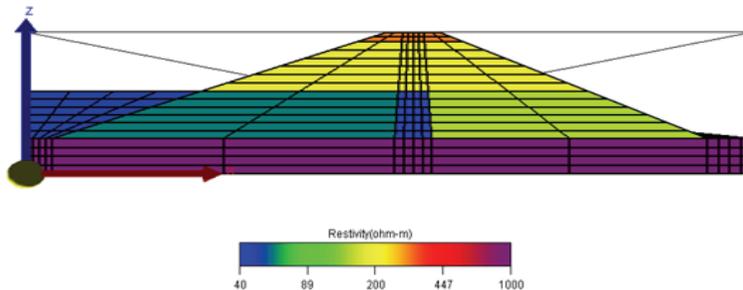


<그림 5-15> 중심점토가 있는 경우 담수와 체체의 요소분할 (제고 9 m, 저수위 5 m)



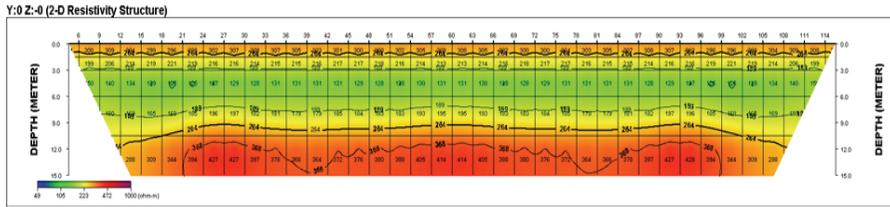
<그림 5-16> 중심점토가 있는 경우 3차원 효과를 가정한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과(제고 9 m, 저수위 5 m)

<그림 5-17>은 제고 9 m, 저수위 4 m를 가정하여 요소분할 한 체체의 횡단면을 보여주고 있다.



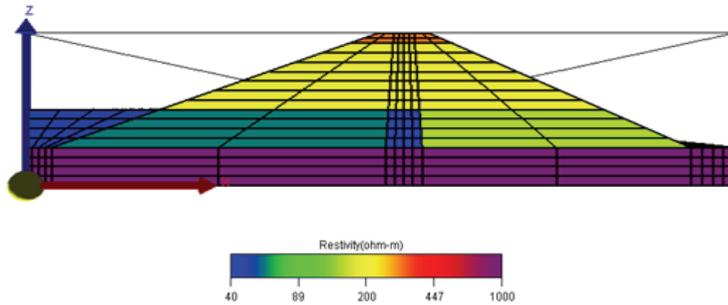
<그림 5-17> 중심점토가 있는 경우 담수와 체체의 요소분할 (제고 9 m, 저수위 4 m)

<그림 5-18>은 제고가 9 m, 저수위가 4 m인 경우 3차원 효과를 고려한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과를 나타낸 것이다.



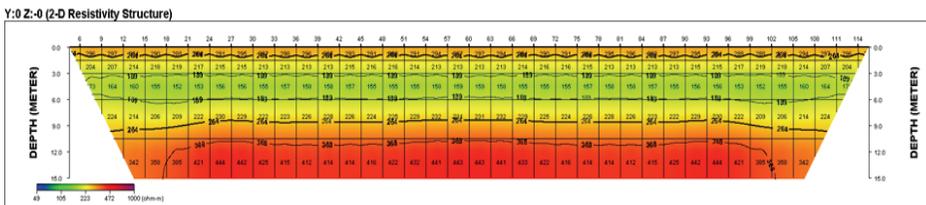
<그림 5-18> 중심점토가 있는 경우 3차원 효과를 가정한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과(제고 9 m, 저수위 4 m)

<그림 5-19>는 제고 9 m, 저수위 3 m를 가정하여 요소분할 한 체체의 횡단면을 보여주고 있다.



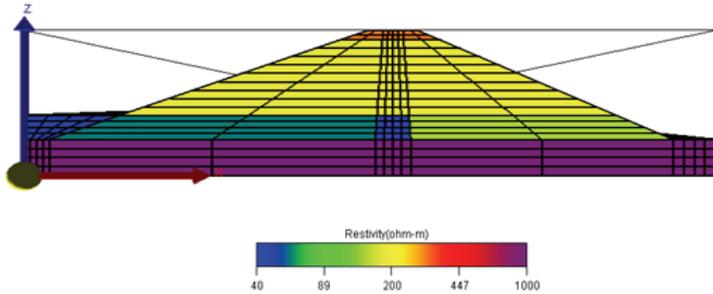
<그림 5-19> 중심점토가 있는 경우 담수와 체체의 요소분할 (제고 9 m, 저수위 3 m)

<그림 5-20>은 제고가 9 m, 저수위가 3 m인 경우 3차원 효과를 고려한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과를 나타낸 것이다.



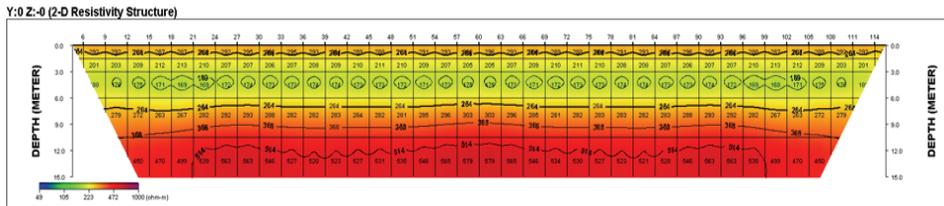
<그림 5-20> 중심점토가 있는 경우 3차원 효과를 가정한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과(제고 9 m, 저수위 3 m)

<그림 5-21>은 제고 9 m, 저수위 2 m를 가정하여 요소분할 한 체체의 횡단면을 보여주고 있다.



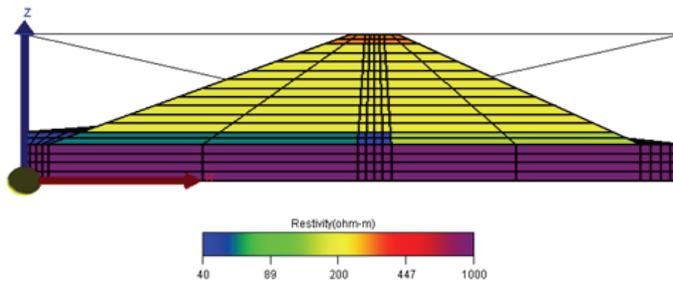
<그림 5-21> 중심점토가 있는 경우 담수와 체체의 요소분할 (제고 9 m, 저수위 2 m)

<그림 5-22>는 제고가 9 m, 저수위가 2 m인 경우 3차원 효과를 고려한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과를 나타낸 것이다.



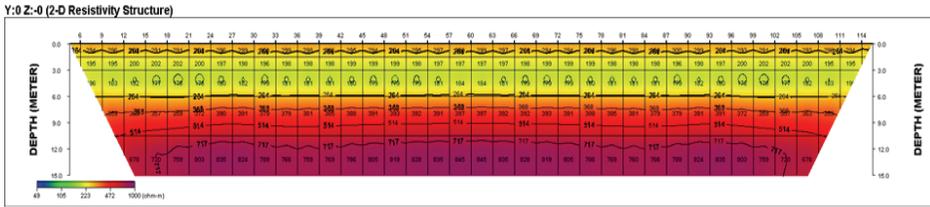
<그림 5-22> 중심점토가 있는 경우 3차원 효과를 가정한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과(제고 9 m, 저수위 2 m)

<그림 5-23>은 제고 9 m, 저수위 1 m를 가정하여 요소분할 한 체체의 횡단면을 보여주고 있다.



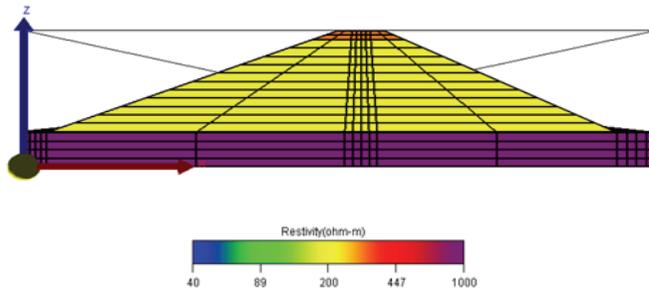
<그림 5-23> 중심점토가 있는 경우 담수와 체체의 요소분할 (제고 9 m, 저수위 1 m)

<그림 5-24>는 제고가 9 m, 저수위가 1 m인 경우 3차원 효과를 고려한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과를 나타낸 것이다.



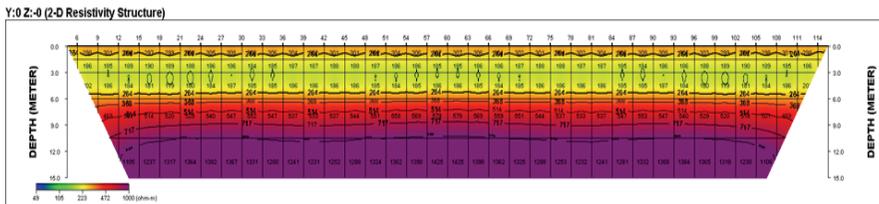
<그림 5-24> 중심점토가 있는 경우 3차원 효과를 가정한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과(제고 9 m, 저수위 1 m)

<그림 5-25>는 제고 9 m, 저수위 0 m를 가정하여 요소분할 한 체체의 횡단면을 보여주고 있다. 이 경우는 담수되어 있는 물이 전혀 없는 경우에 해당된다.



<그림 5-25> 중심점토가 있는 경우 담수와 체체의 요소분할 (제고 9 m, 저수위 0 m)

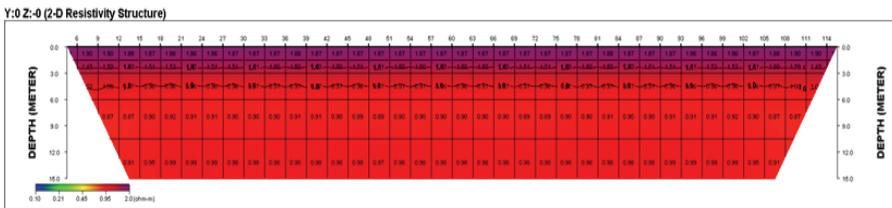
<그림 5-26>은 제고가 9 m, 저수위가 0 m인 경우 3차원 효과를 고려한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과를 나타낸 것이다.



<그림 5-26> 중심점토가 있는 경우 3차원 효과를 가정한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과(제고 9 m, 저수위 0 m)

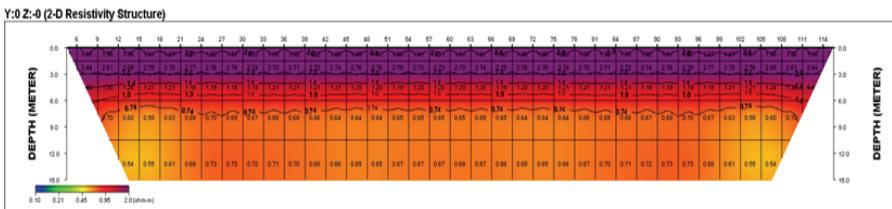
이상과 같이 저수위에 따라 전기비저항의 분포가 차이가 있는 것을 확인할 수 있다. 즉, 모든 경우에 수평적인 전기비저항 분포를 보이지만 저수위에 따라 전기비저항의 높낮이가 수평 층별로 서로 다르게 나타남을 확인할 수 있다. 이 결과로 저수지 현장에서 전기비저항 탐사를 수행할 때, 저수위의 높낮이에 따라 현장 탐사결과에 민감한 영향을 줄 수 있음을 알 수 있다.

다음은 만수위에 해당되는 저수위 8 m인 경우의 역산결과를 기준으로 각각의 저수위에 대한 비교 단면을 제시하였다. <그림 5-27>은 만수위 8 m를 기준으로 저수위 7 m인 경우의 전기비저항 탐사결과 변화비를 나타낸 것이다. 결과의 차이가 없다면 color index의 노란색 부분에 해당되는 1에 근접할 것이다. 그러나 저수위가 1 m 하강하며, 제체 상부의 변화비가 1 보다 큰 값을 나타내는 것을 확인할 수 있다.



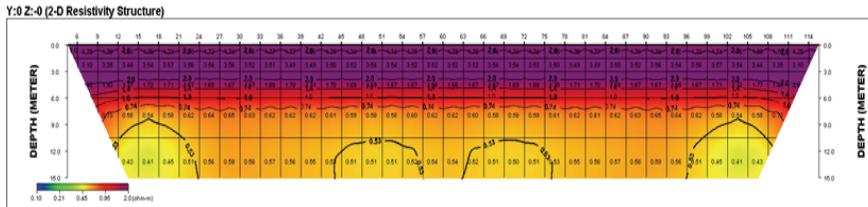
<그림 5-27> 중심점토가 있는 경우 저수위 8 m 대비 7 m에서의 전기비저항 변화비

<그림 5-28>은 만수위 8 m를 기준으로 저수위 6 m인 경우의 전기비저항 탐사결과 변화비를 나타낸 것으로, 마찬가지로 저수위 2 m 하강에 따라 제체 상부의 변화비가 2 이상 크게 나오는 부분들이 나타나고 있다.



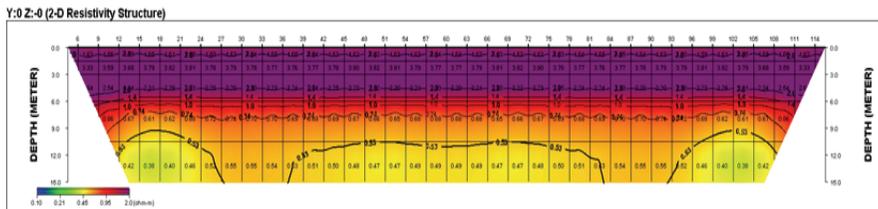
<그림 5-28> 중심점토가 있는 경우 저수위 8 m 대비 6 m에서의 전기비저항 변화비

<그림 5-29>는 만수위 8 m를 기준으로 저수위 5 m인 경우의 전기비저항 탐사결과의 변화비를 나타낸 것으로, 점차적으로 전기비저항 변화비가 2 이상되는 부분들이 상부에 확대되고 있다.



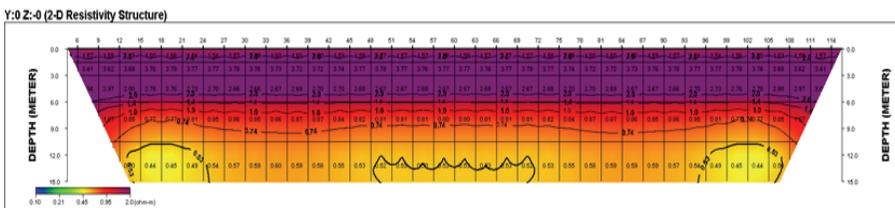
<그림 5-29> 중심점토가 있는 경우 저수위 8 m 대비 5 m에서의 전기비저항 변화비

<그림 5-30>은 만수위 8 m를 기준으로 저수위 4 m인 경우의 전기비저항 탐사결과의 변화비를 나타낸 것으로, 마찬가지로 전기비저항 변화비가 2 이상되는 부분들이 체체 상부에 영향을 주고 있다.



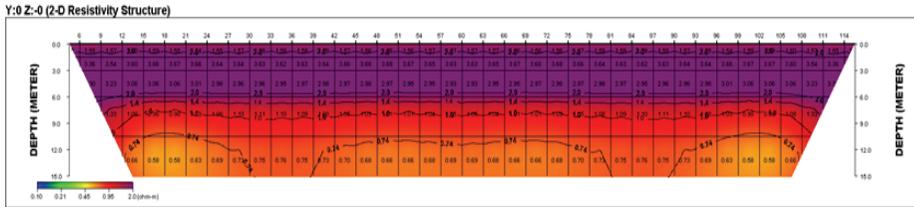
<그림 5-30> 중심점토가 있는 경우 저수위 8 m 대비 4 m에서의 전기비저항 변화비

<그림 5-31>는 만수위 8 m를 기준으로 저수위 3 m인 경우의 전기비저항 탐사결과의 변화비를 나타낸 것이다.



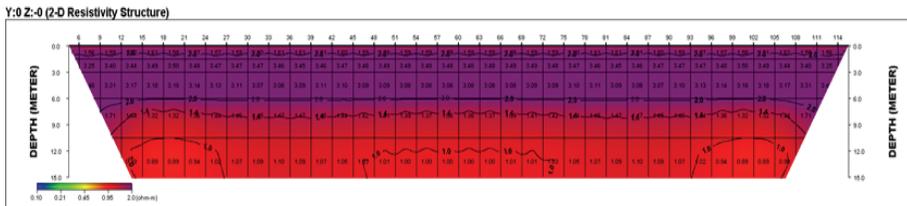
<그림 5-31> 중심점토가 있는 경우 저수위 8 m 대비 3 m에서의 전기비저항 변화비

<그림 5-32>는 만수위 8 m를 기준으로 저수위 2 m인 경우의 전기비저항 탐사결과의 변화비를 나타낸 것이다.



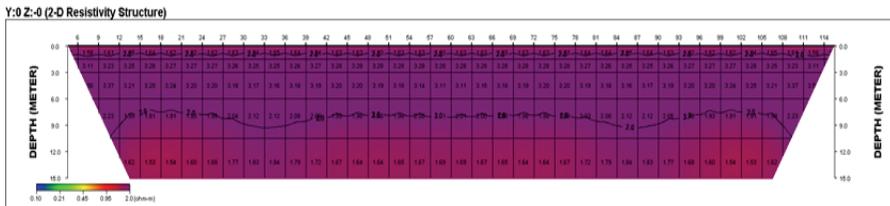
<그림 5-32> 중심점토가 있는 경우 저수위 8 m 대비 2 m에서의 전기비저항 변화비

<그림 5-33>은 만수위 8 m를 기준으로 저수위 1 m인 경우의 전기비저항 탐사결과의 변화비를 나타낸 것이다.



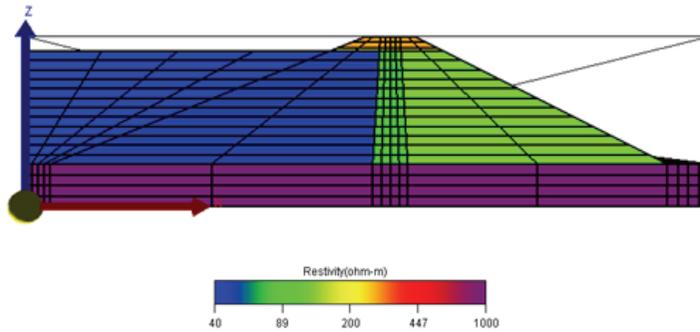
<그림 5-33> 중심점토가 있는 경우 저수위 8 m 대비 1 m에서의 전기비저항 변화비

<그림 5-34>는 만수위 8 m를 기준으로 저수위 0 m인 경우의 전기비저항 탐사결과의 변화비를 나타낸 것이다. 거의 모든 심도에서 전기비저항 변화비가 2에 가깝게 형성되어 나타났다.



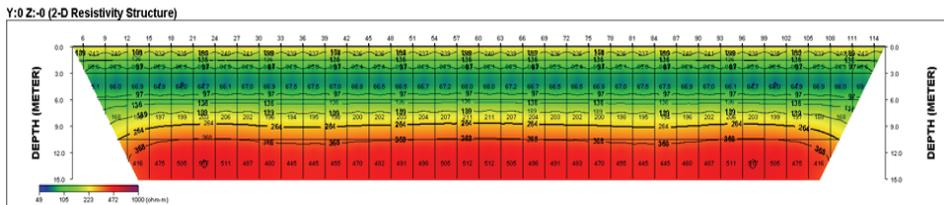
<그림 5-34> 중심점토가 있는 경우 저수위 8 m 대비 0 m에서의 전기비저항 변화비

다음은 중심점토가 없는 경우에 대해서 살펴보고자 한다. <그림 5-35>는 중심점토가 없는 경우, 제고 9 m, 저수위 8 m를 가정하여 요소분할 한 제체의 횡단면을 보여주고 있다.



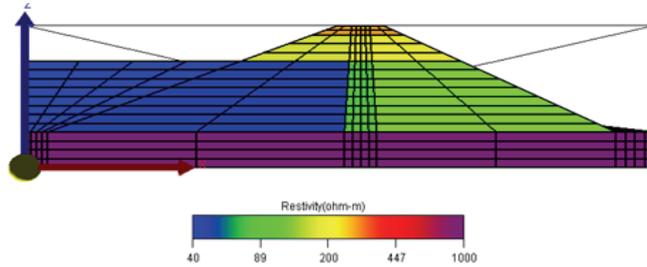
<그림 5-35> 중심점토가 없는 경우 담수와 제체의 요소분할
(제고 9 m, 저수위 8 m)

<그림 5-36>은 중심점토가 없는 경우 제고가 9 m, 저수위가 8 m 인 경우 3차원 효과를 고려한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과를 나타낸 것이다. 역시 정상적인 건전한 저수지로 가정되어 전기비저항 구조가 수평 다층구조를 보이는 것을 확인할 수 있다.



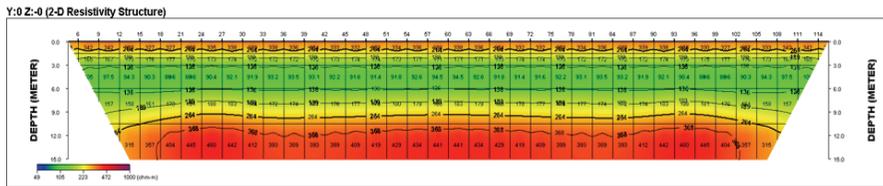
<그림 5-36> 중심점토가 없는 경우 3차원 효과를 가정한 전기비저항
모델링에 의한 역산결과(제고 9 m, 저수위 8 m)

<그림 5-37>은 중심점토가 없는 경우, 제고 9 m, 저수위 6 m를 가정하여 요소분할 한 제체의 횡단면을 보여주고 있다.



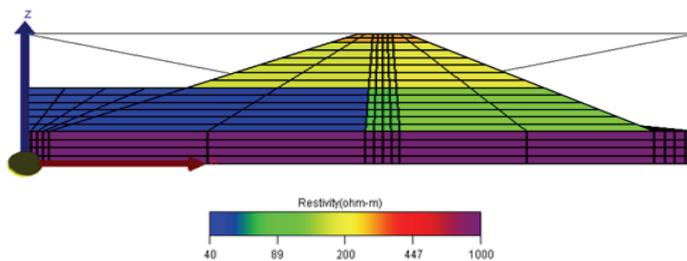
<그림 5-37> 중심점토가 없는 경우 담수와 제체의 요소분할
(제고 9 m, 저수위 6 m)

<그림 5-38>은 중심점토가 없는 경우 제고가 9 m, 저수위가 6 m인 경우 3차원 효과를 고려한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과를 나타낸 것이다.



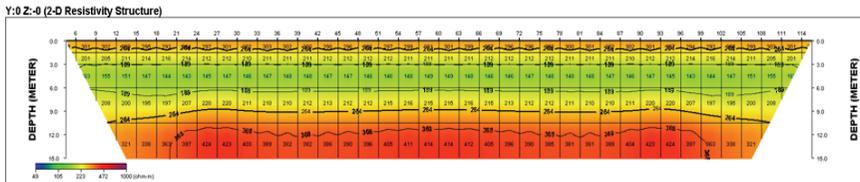
<그림 5-38> 중심점토가 없는 경우 3차원 효과를 가정한
전기비저항 모델링에 의한 역산결과(제고 9 m, 저수위 6 m)

<그림 5-39>는 중심점토가 없는 경우, 제고 9 m, 저수위 4 m를 가정하여 요소분할 한 제체의 횡단면을 보여주고 있다.



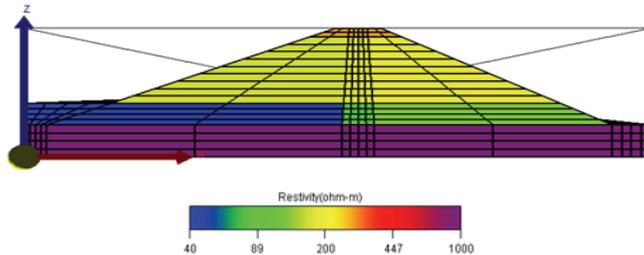
<그림 5-39> 중심점토가 없는 경우 담수와 제체의 요소분할
(제고 9 m, 저수위 4 m)

<그림 5-40>은 중심점토가 없는 경우 제고가 9 m, 저수위가 4 m 인 경우 3차원 효과를 고려한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과를 나타낸 것이다.



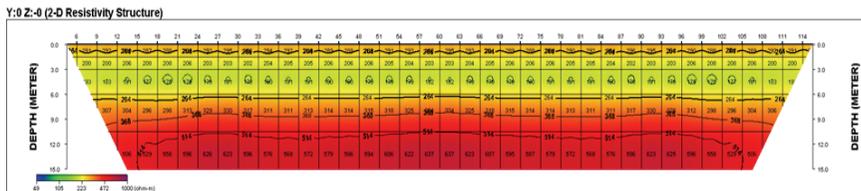
<그림 5-40> 중심점토가 없는 경우 3차원 효과를 가정한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과(제고 9 m, 저수위 4 m)

<그림 5-41>은 중심점토가 없는 경우, 제고 9 m, 저수위 2 m를 가정하여 요소분할 한 체체의 횡단면을 보여주고 있다.



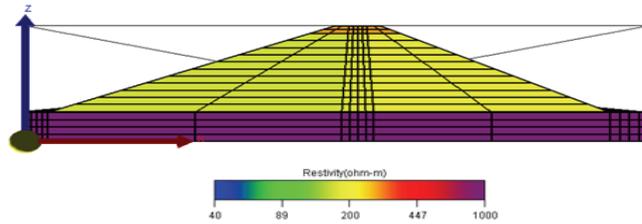
<그림 5-41> 중심점토가 없는 경우 담수와 체체의 요소분할 (제고 9 m, 저수위 2 m)

<그림 5-42>는 중심점토가 없는 경우 제고가 9 m, 저수위가 2 m 인 경우 3차원 효과를 고려한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과를 나타낸 것이다.



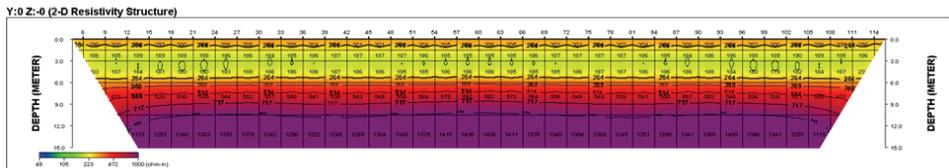
<그림 5-42> 중심점토가 없는 경우 3차원 효과를 가정한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과(제고 9 m, 저수위 2 m)

<그림 5-43>은 중심점토가 없는 경우, 제고 9 m, 저수위 0 m를 가정하여 요소분할 한 제체의 횡단면을 보여주고 있다.



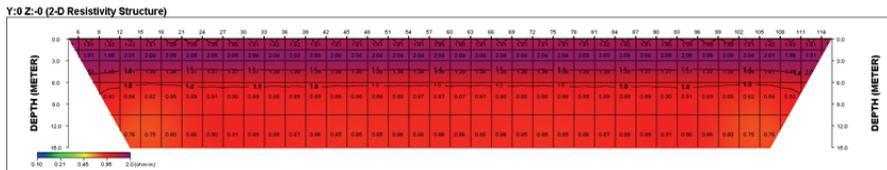
<그림 5-43> 중심점토가 없는 경우 담수와 제체의 요소분할 (제고 9 m, 저수위 0 m)

<그림 5-44>는 중심점토가 없는 경우 제고가 9 m, 저수위가 0 m인 경우 3차원 효과를 고려한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과를 나타낸 것이다.



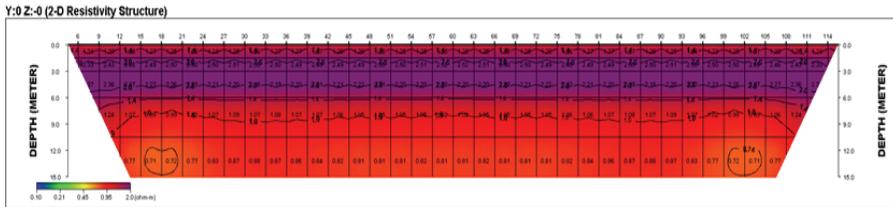
<그림 5-44> 중심점토가 없는 경우 3차원 효과를 가정한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과(제고 9 m, 저수위 0 m)

다음은 중심점토가 없는 경우 만수위에 해당되는 저수위 8 m를 고려한 역산결과를 기준으로 각각의 저수위에 의한 전기비저항 역산결과와의 비교 단면을 제시하였다. <그림 5-45>는 만수위 8 m를 기준으로 저수위 6 m인 경우의 전기비저항 탐사결과와의 변화비를 나타낸 것이다.



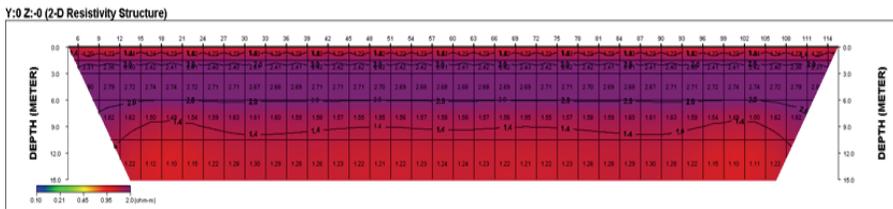
<그림 5-45> 중심점토가 없는 경우 저수위 8 m 대비 6 m에서의 전기비저항 변화비

<그림 5-46>은 만수위 8 m를 기준으로 저수위 4 m인 경우의 전기비저항 탐사결과의 변화비를 나타낸 것이다.



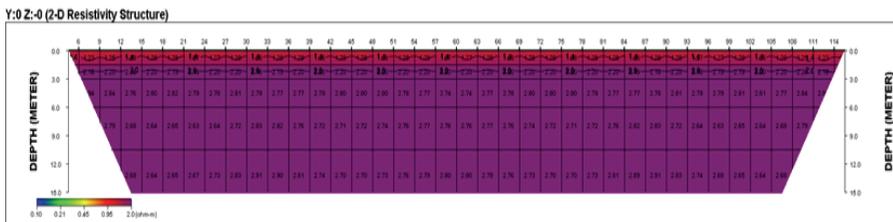
<그림 5-46> 중심점토가 없는 경우 저수위 8 m 대비 4 m에서의 전기비저항 변화비

<그림 5-47>은 만수위 8 m를 기준으로 저수위 2 m인 경우의 전기비저항 탐사결과의 변화비를 나타낸 것이다.



<그림 5-47> 중심점토가 없는 경우 저수위 8 m 대비 2 m에서의 전기비저항 변화비

<그림 5-48>은 만수위 8 m를 기준으로 저수위 0 m인 경우의 전기비저항 탐사결과의 변화비를 나타낸 것이다.

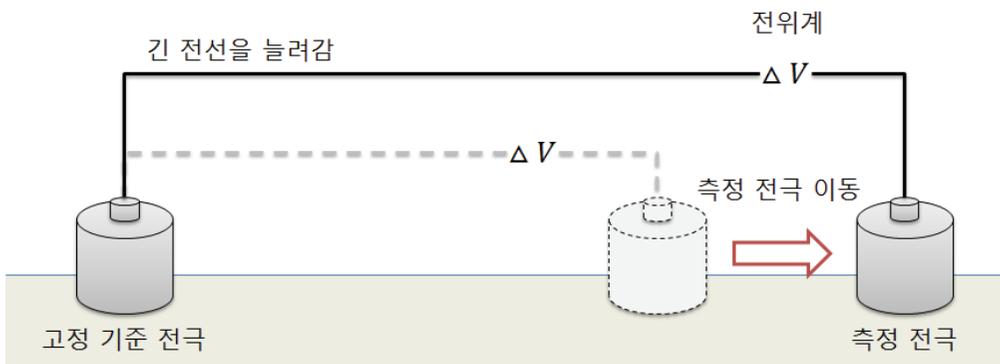


<그림 5-48> 중심점토가 없는 경우 저수위 8 m 대비 0 m에서의 전기비저항 변화비

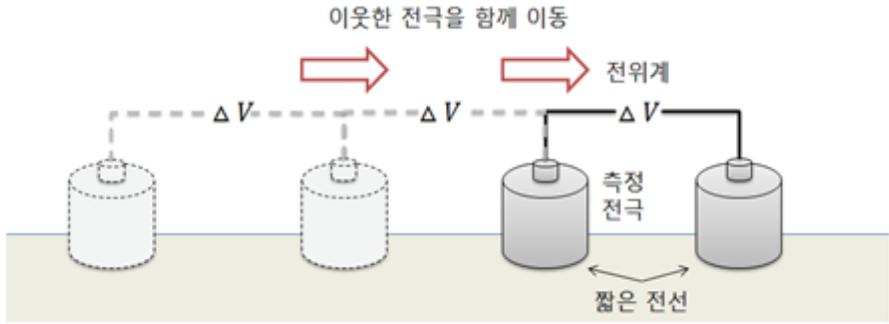
이상과 같이 중심점토가 없는 경우는 중심점토가 있는 경우에 비해 전기비저항의 변화비가 높은 영역이 심도까지 나타나는 것을 확인할 수 있다.

제2절 자연전위 탐사 개선방향

자연전위 탐사는 2차 탐사방법으로 제체의 누수가 심한 경우 부분적으로 적용한다. 탐사계획 수립은 첫째, 기존 조사자료 검토부터 시작된다. 조사 자료는 1차 탐사자료인 전기비저항 탐사결과도 포함된다. 둘째, 탐사방법 중 절대 전위법 또는 상대 전위법을 선택한다. 좁은 지역을 탐사하기에는 상대 전위법이 유리하지만, 절대 전위법에 비해 상대적으로 오차가 큰 단점이 있다. 절대 전위법은 기준 전극을 설치한 후, 기준 전극과 측정하고자 하는 위치의 전극간의 전위차를 측정하는 방법이며 <그림 5-49>, 상대 전위법은 두 개의 전극 간격을 고정한 채 두 전극의 전위차를 측정하는 방법이다 <그림 5-50>. 통상적으로 상대 전위법의 경우 측정된 전위차를 전극 간격으로 나누어 단위 길이 당 전위차 (mV/m)를 구한다.

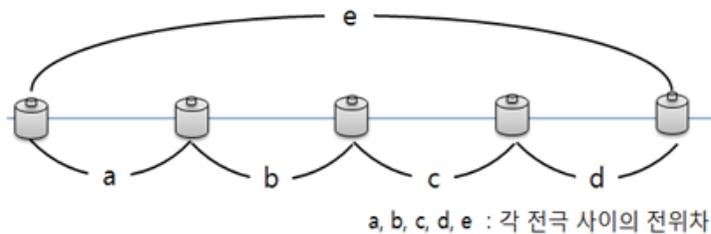


<그림 5-49> 절대 전위법 (기준점법) 모식도



<그림 5-50> 상대 전위법 (차분법) 모식도

절대 전위법은 기준 전극 위치 설정이 무엇보다 중요하다. 매 측정 때마다 기준 전극에 의한 자료가 획득되기 때문이다. 다만, 상대 전위법은 그와 같은 문제를 갖고 있지 않지만, 단위 전극 간격에 대한 값을 중간에 보정해야 한다. 즉, <그림 5-51>과 같이 단위 전극 간격별 전위차의 합은 해당 거리 전극 간격에 따른 전위차와 값이 같아야 한다. 셋째, 전극 간격을 설정해야 한다. 전극 간격은 1차 탐사방법인 전기비저항 탐사의 전극 간격과 동일하게 설정한다. 전극은 통상적으로 비분극 전극 (non-polarized electrode)을 제작하여 사용한다. 일반 금속으로 제작된 전극봉의 경우 분극현상이 자료에 영향을 미치게 된다.

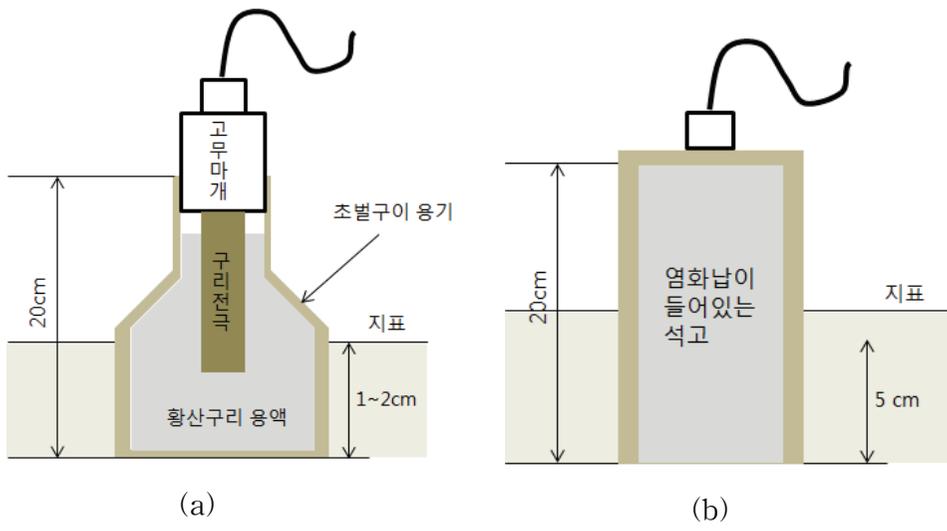


a, b, c, d, e : 각 전극 사이의 전위차

$$e = a + b + c + d$$

<그림 5-51> 단위 전극 간격과 전체 전극 간격 사이의 전위차 관계

이와 같이 탐사계획 수립이 완료되면 본격적으로 탐사를 수행한다. 자연전위 탐사 순서는 다음과 같다. 첫째, 설정한 측선 위치에 맞게 줄자를 설치한다. 둘째, 설정한 간격에 맞게 측정 위치를 결정한다. 셋째, 측정 시작 전, 측정용 두 전극을 직접 접촉시켜 두 전극 사이의 전위차를 시각과 함께 기록하여 측정한다. 넷째, 전극을 토양에 매설한다. 이때, 전극은 <그림 5-52>와 같은 비분극 전극을 제작하여 사용한다. 비분극 전극은 측정과정에서 자료의 안정성에 영향을 주는 분극 현상을 사전에 방지할 수 있다. 대표적인 비분극 전극은 (a)의 구리-황산구리 전극과 (b)의 석고 전극이 있다.

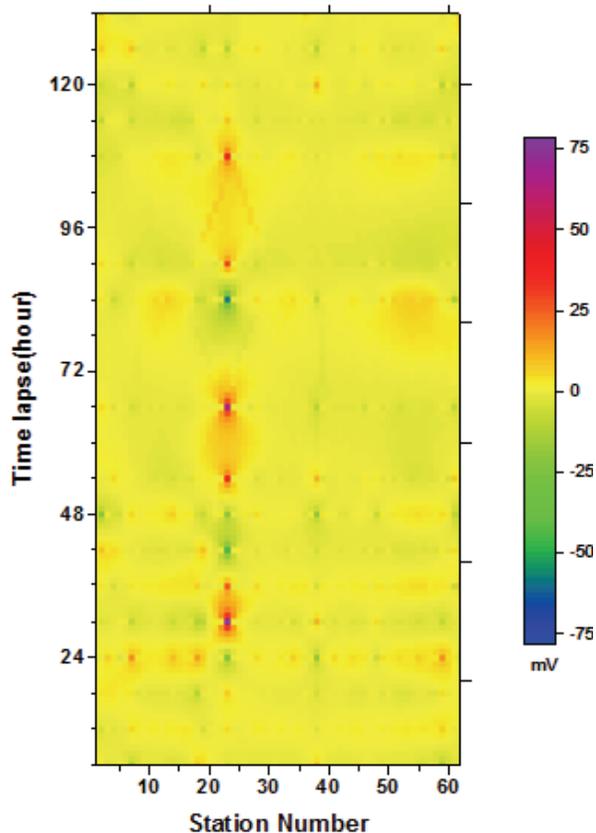


<그림 5-52> 자연전위 변화량 산정 예시
 (a) 구리-황산구리 전극, (b) 석고 전극

다섯째, 두 전극 사이의 전위차를 측정한 후 측정 시각과 함께 기재한다. 여섯째, 측정 도중에 황산구리 용액 등이 부족하지 않도록 측정 시작 전에 양을 확인한다. 일곱째, 전극에 번호를 표시하여 같은 전극을 사용할 수 있도록 한다. 여덟째, 이동할 때는 전극이 손상되지 않도록 주의한다. 아홉째, 측정값에 영향을 줄 수 있는 주변 잡음 요소에

대한 정보를 기록한다. 이와 같이 모든 준비가 완료되면 본격적인 측정에 들어간다.

일반적으로 자연전위 탐사자료는 1회성 자료만으로 전위차의 높낮이에 따라 특정 지점의 값이 크게 차이가 나면 누수와 관련되는 것으로 해석한다. 그러나 자연전위는 측정 시기별로 값이 매우 민감할 뿐만 아니라 방조제의 경우 조석에 의한 영향이 매우 크므로 시간적인 변화량 측정이 수반되어야 한다. 적어도 6시간 간격의 측정이 이루어지면 자연전위의 변화량에 대한 해석이 용이하다. 동일 위치에 대한 자료를 최소 4회 (1일 기준) 얻게 되면, 자연전위의 일변화를 확인할 수 있게 된다. <그림 5-53>은 서로 연속된 두 측정시기 간의 자연전위 시간적 변화량을 산정한 예이다.



<그림 5-53> 자연전위 변화량 산정 예시

식(5.1)은 자연전위 변화량 측정방법을 나타낸 것으로 Δs 는 자연전위의 변화량을 의미하며, s_i 는 i 번째 자연전위 자료를 뜻한다.

$$\Delta s = s_i - s_{i-1} \quad (i = 1, 2, \dots, N-1) \quad \text{식(5.1)}$$

이와 같이 시간 경과에 따른 자연전위 변화량은 누수 지점의 누수량 변화를 간접적으로 지시할 수 있다.

제3절 탄성과 탐사 개선방향

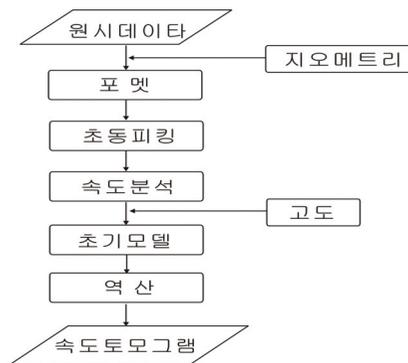
탄성과 탐사를 수행함에 있어 기본적으로 필요한 장비는 인공적으로 탄성파를 발생시키기 위한 파원, 탄성파 신호를 수신하는 수신기, 수신된 신호를 기록하는 기록계, 케이블, 트리거로 구성된다. 수신기는 굴절과 탐사 기록이 저주파 특성이 강하므로 고유 주파수 (natural frequency)가 낮은 것을 사용하는 것이 바람직하다. 굴절과 탐사의 수신기는 통상적으로 주파수 10 Hz 내외를 사용한다. 인공 지진파를 발생시키기 위한 파원으로 낙하 추 (weight drop), 망치 (hammer)를 통상적으로 이용하는데, 신호의 강도는 낙하 추가 유리하지만, 이 동성이 망치에 비해 불리하다.

신호원의 끝부분에는 트리거를 부착하여 알루미늄 판에 타격하는 방식으로 소규모 인공 지진파를 발생시키며, 트리거 스위치와 기록계는 케이블로 연결한다. 자료획득 시에는 주변 도로의 자동차 소음과 바람에 의한 잡음요인이 발생하여 잡음을 최소화하여 측정한다. 자료획득 시 전개 방식은 수신기 전개와 타격 위치가 동일선상에 위치하는 동일선 전개방식이 주로 이용되며, 수신기는 그라운드 롤 (ground roll)이 최소가 되게 땅에 잘 결합시킨다. 인공지진파를 발생시키기 위한 타격은 필요한 위치에 등간격으로 실시하는 것이 좋다. 또한 각 타격점에서 신호를 알루미늄 판에 수회 발생시켜 중첩함으로써 신호 대 잡음비를 높이는 것이 좋다. 신호 수신은 통상적으로 24채널이 이용되며, 아

날로그 신호를 0.125 ms의 샘플비율로 250 ms 동안 기록한다. (표 5-2)는 굴절과 탐사변수의 예를 보여주고 있다. 자료처리는 포맷 변환, 파원-수진기 배치정보 입력, 초동선택, 속도분석, 고도자료입력, 초기모델 작성, 역산, 속도 토모그램 산출 등의 순서로 진행한다 <그림 5-54>.

(표 5-2) 굴절과 탐사변수의 예

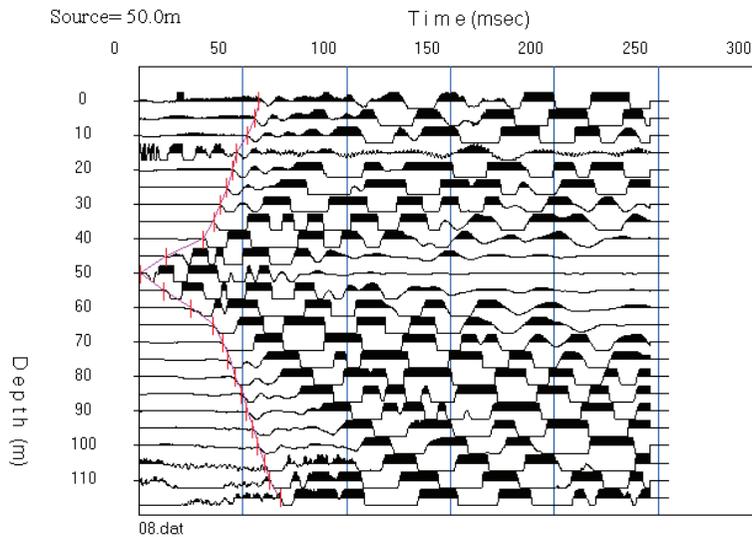
Element	Refraction survey
Source	Weigh drop(낙하 추)
Vertical Stack	300 %
Receiver Type	10 Hz geophone
Receiver Spacing	5 m
Shot Spacing	10 m
Number of Channel	24 ch
Record Length	250 ms
Sampling Interval	125 μ s
Analog Filter	not applied
Number of Record	31
Number of Spread	2
Number of Shot	16/15 per spread



<그림 5-54> 굴절과 탄성파탐사 자료처리 과정

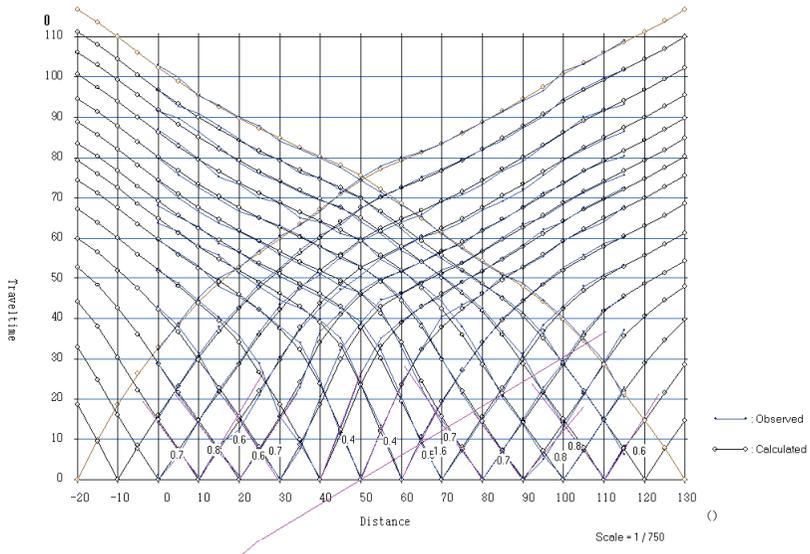
먼저 기록계에 수치형태로 저장된 원시자료에 수신기 및 타격점의 위치를 입력한다. 이 후 자료처리용 소프트웨어의 내부 포맷 형식으로 변환한 후 포맷된 데이터를 이용해 초동 (first arrival)을 선택한다. 굴절과 탐사는 초동만을 이용하여 자료를 처리하기 때문에, 초동 선택이 결과에 직접적인 영향을 끼치므로 양단주시와 주시곡선의 평행선에 유의하여 신중하게 선택해야 한다.

<그림 5-55>는 5 m 간격으로 배열한 24개 지점의 지오폰 (geophone)에서 측정된 초동을 선택한 결과의 한 예를 보여주는 것이다. 이때 타격 위치는 매 지오폰 지점을 이용하는 경우도 있지만, 대개 지오폰 2개 당 1개씩의 빈도로 타격하는 것이 일반적이다.



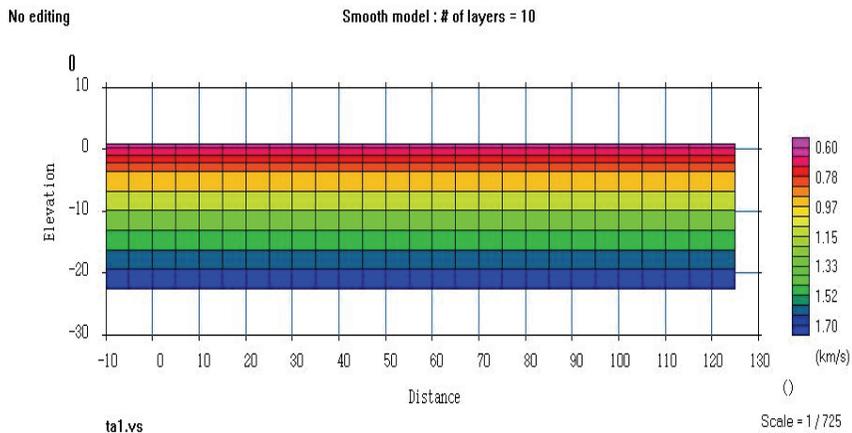
<그림 5-55> 초동 선택 예제

다음으로 각 타격점에 대한 모든 초동 선택 자료를 하나의 파일로 저장한 후, 주시곡선을 작성한다. 또한 이러한 주시곡선을 이용하여 표층부와 하부층의 개략적인 속도분석을 실시하는데, 표층 속도는 주시곡선의 첫번째 기울기로부터, 하부층의 속도는 양단주시곡선에서 각각 구한다 <그림 5-56>.



<그림 5-56> 관측 주시와 모델 주시의 비교

이렇게 산출된 속도정보는 역산 초기모델의 속도 범위를 정하는 데 사용한다. 이때 역산을 수행하기에 앞서 고도 보정을 위한 상대 고도를 입력한다. 역산수행을 위한 초기모델은 측선 양끝에 추가해 나타내며, 깊이에 따라 속도가 단순히 증가하는 10개의 층 모델을 사용한 결과는 <그림 5-57>과 같다.



<그림 5-57> 10개의 층을 가정한 초기모델

역산에 사용한 셀의 크기와 모양이 함께 표시되면, 각 셀의 넓이가 수신기 간격과 동일한지 확인하고, 감도가 큰 천부는 셀 간격이 좁게, 감도가 작은 심부는 셀 간격이 넓게 설정되었는지 확인한다.

이러한 초기 모델을 대상으로 페르마 원리 (Fermat's principle)를 이용한 파선추적을 실시하여 주시를 계산한 후 (Saito, 2001), 역산방법을 이용하여 P파의 속도를 구현한다.

표면과 탐사는 전기적 잡음이 심한 지점 (가로등, 신호등, 양배수장 주변 등)에서도 적용이 가능하여 앞서 제기한 전기비저항 탐사가 불가능한 지구에서 유용하다. 또한 평판식 지오폰을 사용하면 피복된 지점에서 적용이 가능하다. <그림 5-58>은 (a)의 일반적인 스파이크식 수신기를 이용한 탐사와 (b)의 평판식 수신기를 이용한 탐사의 전경을 보여주고 있다. 스파이크식 수신기는 피복되어있지 않은 일반적인 제체에 유리하며, 평판식 수신기는 피복재로 포장된 제체의 상부에서 사용될 경우 유리하다.



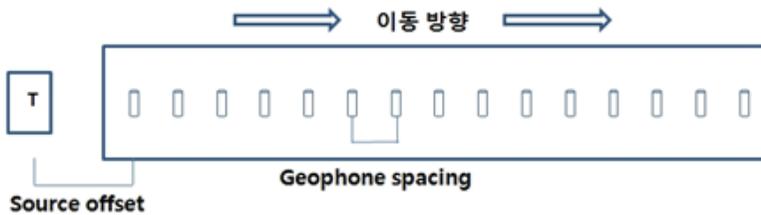
(a)

(b)

<그림 5-58> 제체 피복상태에 따른 각각의 수신기 방식을 이용한 탐사전경 (a) 스파이크식 수신기, (b) 평판식 수신기

이 방법은 다중채널 프로세스를 통해 신속한 조사가 가능하며, 지층의 연약지점 확인에 효율적이다. 특히, 제체와 같은 토사 및 미고결 퇴적층에 유리하다. 탐사계획 수립 및 탐사순서는 다음과 같다. 첫째, 고출력 저주파수 (4.5 Hz 이하) 지오폰을 준비한다. 둘째, 설정한 측선

위치에 맞게 줄자를 설치한다. 셋째, 송신기 역할을 하는 탄성과 소스(저주파 해머 등)를 준비하여 위치시킨다. 넷째, 지오폰 간격을 설정한 후, 위치별로 설치한다. 다섯째, 지오폰과 확장케이블을 체결한다. 여섯째, 탄성과 소스와 트리거(신호용) 전선을 체결한다. 일곱째, 트리거 전선과 확장케이블을 본체에 연결한다. 여덟째, 전원과 출력장치를 연결 후, 장비 프로그램에 접속한다. 아홉째, 각 지오폰의 수신 확인을 한다. 이와 같이 준비가 완료되면, 측정자의 신호에 따라 지오폰을 이동하면서 자료를 획득할 수 있다. <그림 5-59>는 지오폰 및 송신기 위치에 대한 모식도를 나타낸 것이다.



<그림 5-59> 지오폰 및 송신기 위치 모식도

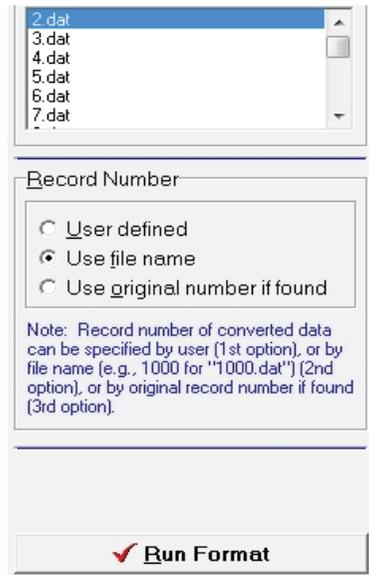
자료처리는 다음과 같은 순서로 진행한다 <그림 5-60>.



<그림 5-60> 표면파 탐사 자료처리 순서도

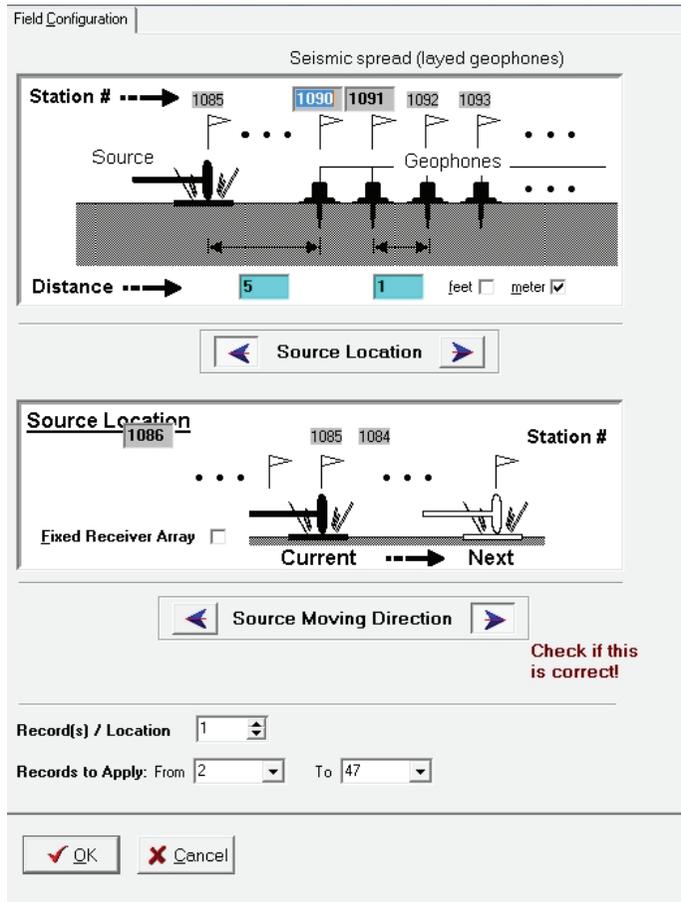
자료처리 프로그램은 Surfseis 3.0을 예로 설명하였다.

첫 번째 단계로 획득된 각각의 자료를 하나의 측선 자료로 인식할 수 있도록 자료 형식을 변환한다. <그림 5-61>은 각각의 점 (point) 자료를 선 (line)자료로 변환하는 과정을 나타낸 것이다.



<그림 5-61> 자료변환 단계

두 번째 단계로 송신기의 위치, 지오폰의 간격 등을 결정하는 지오메트리를 작성한다. 이 과정에서는 탐사의 진행 방향을 정확히 선택해야 하며, 탐사 최종 단면의 좌표를 결정할 수 있는 과정이다. 송수신기의 위치는 가탐 심도에도 큰 영향을 미친다. <그림 5-62>는 지오메트리 작성과정을 나타낸 것으로 송신기와 첫 번째 수신기와의 거리 (source offset)은 5 m, 수신기인 지오폰 간격은 1 m로 설정한 예이다.



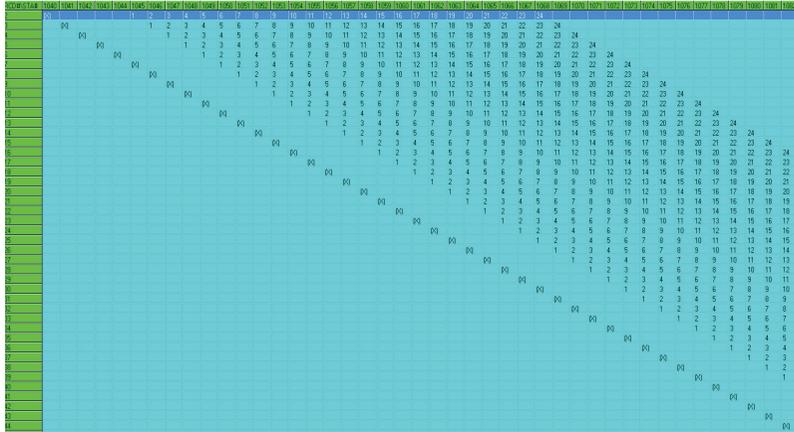
<그림 5-62> 지오메트리 작성 단계

지오메트리 작성이 완료되면 <그림 5-63>과 같이 측점별 송신기와 수신기의 좌표가 설정된다.

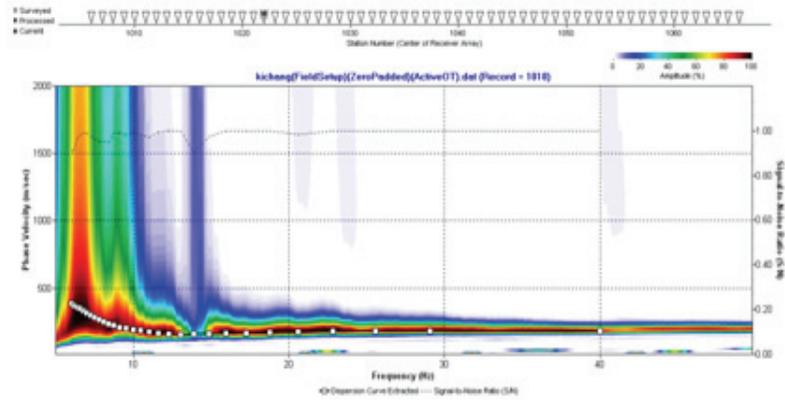
셋째, 탄성파의 여러 신호 중 표면파 성분만을 추출한다.

넷째, 추출된 표면파를 대상으로 주파수와 위상속도의 상관성을 분석한다 <그림 5-64>.

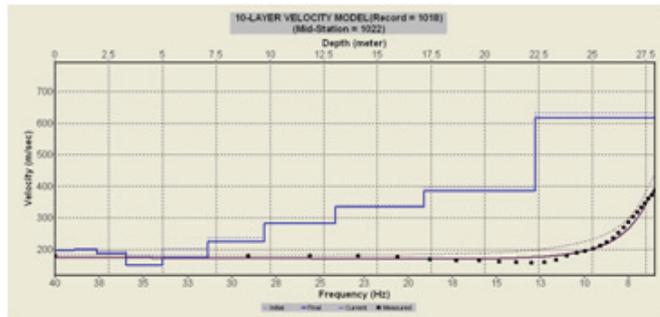
다섯째, 분석된 자료를 다시 1차원으로 역산하여 심도별 전단파 속도를 계산한다 <그림 5-65>. 이 과정에서 각각의 지점들에 대한 층이 구분되어 각각의 결과를 종합하여 2차원 단면으로 영상화한다.



<그림 5-63> 측정 좌표 생성결과



<그림 5-64> 분산분석 예시



<그림 5-65> 특정 지점에 대한 역산결과 예시

이와 같이 표면과 탐사 자료처리 과정이 완료되면, 전단파 속도로
체체의 강도를 간접적으로 추정할 수 있다. 동일 지점의 표준관입시험
자료가 있으면, 특정 지점뿐만 아니라 측선 하부 지층에 대한 체체의
다짐정도를 보다 정밀하게 파악할 수 있다.

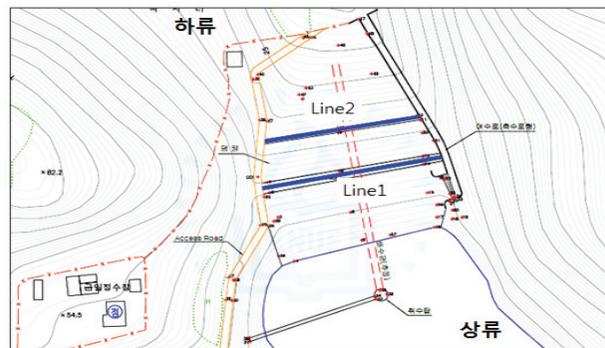
제6장 제체에서의 물리탐사 적용 대표사례

제1절 전기비저항 탐사 적용사례 1

탐사 대상지는 전남 완도군 평일도 척치담으로 비교적 균질하게 나타날 것으로 예상되는 댐의 중심코어 부분에서 누수 취약 구간을 파악하고 제체 내부나 통관부 주위에서의 누수 가능성 파악을 목적으로 전기비저항 탐사가 진행된 사례이다. <그림 6-1>은 댐의 상류사면 좌안부의 전경을 보여주고 있다. <그림 6-2>는 대상지의 평면도로 제체마루와 하류사면 소단부 (Line-1, Line-2)에 서로 평행하게 설정된 전기비저항 탐사 측선을 나타내고 있다. 측선의 전개방향 및 단면의 방향은 측선위치도와 동일하다.



<그림 6-1> 댐의 상류사면 좌안부 전경



<그림 6-2> 척치담의 평면도 및 측선위치도

Line 1의 경우 전극 배열은 쌍극자 배열이 사용되었으며, 측선 길이는 70 m, 전극 간격은 3.5 m 전극전개수는 10으로 탐사 심도는 17.5 m까지 가능하다 (표 6-1). Line 2의 경우 전극 배열은 동일하게 쌍극자 배열이 사용되었으며, 측선 길이는 60 m, 전극 간격은 3 m 전극전개수는 10으로 탐사 심도는 15 m까지 가능하다 (표 6-2).

(표 6-1) Line 1의 탐사변수

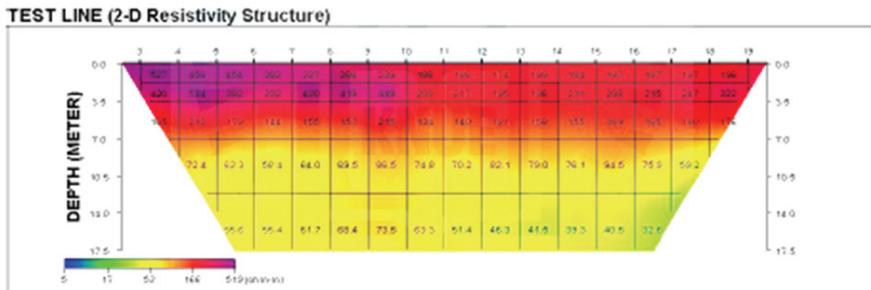
Line 1(체체마루)	
항목	내용
전극 배열	쌍극자 배열
측선 길이	70 m
전극 간격	3.5 m
전극전개수(n)	10
탐사 심도	17.5 m

(표 6-2) Line 2의 탐사변수

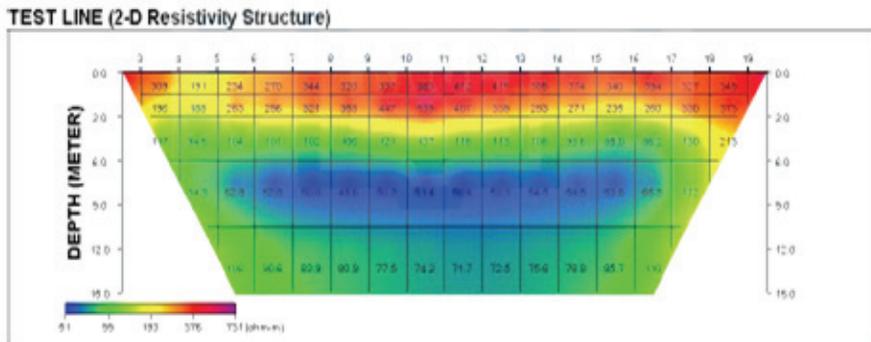
Line 2(하류사면 소단부)	
항목	내용
전극 배열	쌍극자 배열
측선 길이	60 m
전극 간격	3 m
전극전개수(n)	10
탐사 심도	15 m

제체마루의 상부에서 측정된 Line 1의 탐사결과, 좌안 상부에 400 ohm-m 이상의 고비저항대가 나타나는데, 이는 기반암의 영향으로 해석되었다. 또한 우안 하부에 40 ohm-m 이하의 약한 저비저항값이 나타나는데, 이는 물에 포화되어 나타난 영향으로 해석되었다 <그림 6-3>.

제체 소단 상부의 측선인 Line 2의 탐사결과, 수평적으로 비저항이 균일하게 발달하고, 수직적으로는 높이에 따라 고, 중, 저 비저항대가 구분되어 나타나는데, 전형적인 수평 전기비저항 분포를 보이고 있다. 제체의 양 끝단을 제외한 전 구간의 아래쪽으로는 60 ohm-m 이하의 저 비저항대가 매우 균일한 분포를 보이는데, 이는 물로 포화된 구간으로 해석되었다. 이 부분의 전기비저항은 제체마루에서 침투수에 포화된 부분보다 비저항이 더 낮게 나타나는 특성을 보였다 <그림 6-4>.



<그림 6-3> Line 1의 전기비저항 탐사결과(댐마루)

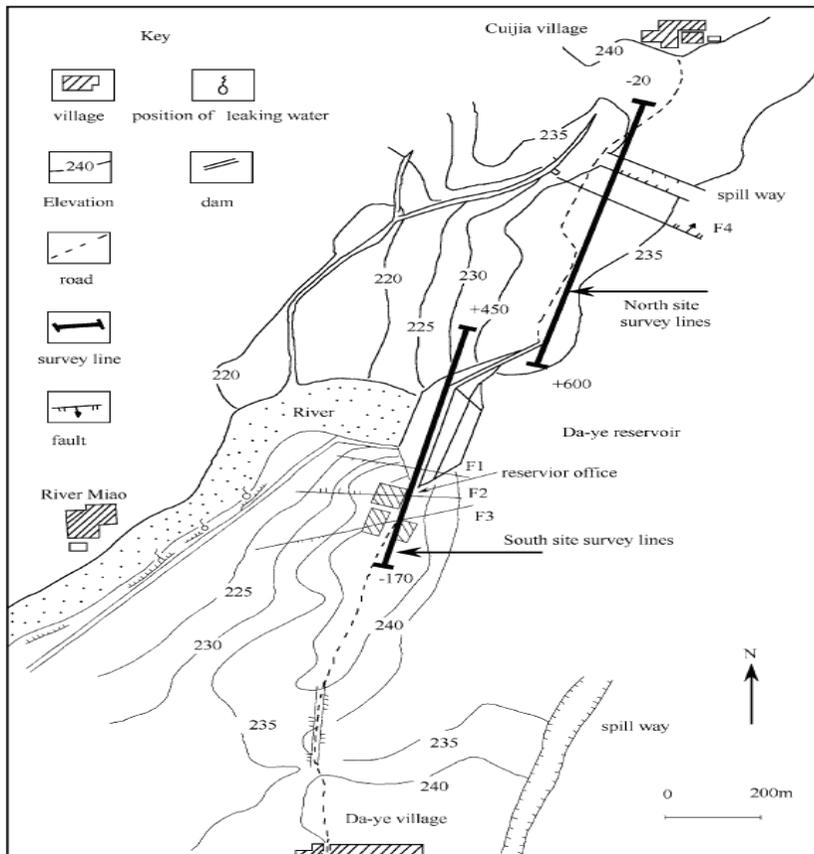


<그림 6-4> Line 2의 전기비저항 탐사결과(하류사면 소단부)

결과적으로 비교적 안정성을 갖는 제체의 전기비저항 분포는 수평적으로 전기비저항이 균일하게 발달하는 특성을 가지고 있다. 제체는 충분한 안정성을 유지하고 있는 것으로 파악되었다.

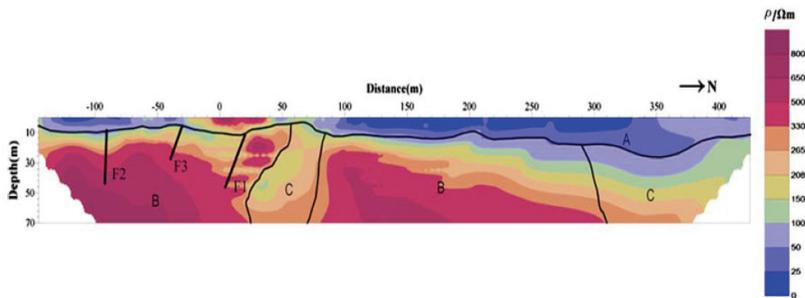
제2절 전기비저항 탐사 적용사례 2

이번 전기비저항 탐사 적용사례는 중국 산둥 대야댐에서 진행되었던 사례이다. 탐사 목적은 제방의 누수 구역 탐지이다. <그림 6-5>와 같이 각각의 측선은 대야댐의 댐마루와 여수로가 통과하는 상부 두 지점을 측선으로 설정하였다. 아래쪽에 있는 측선이 댐마루의 측선이며, 위쪽에 있는 측선이 여수로를 가로지르는 측선에 해당된다.



<그림 6-5> 대야댐과 전기비저항 탐사 측선 모식도

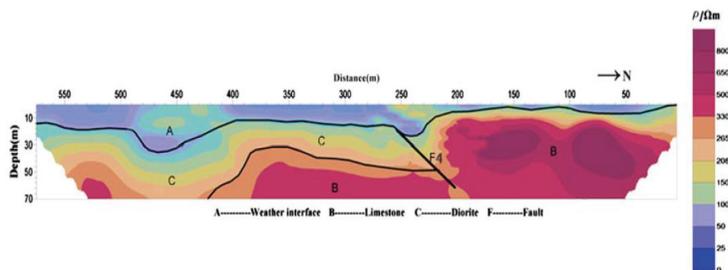
전극 배열은 쌍극자 배열이 사용되었다. 탐사결과, <그림 6-6>에서 보여지는 바와 같이 A 구역은 저비저항대를 보이는 구간으로 지표 부근에 수평으로 분포함을 확인할 수 있다. B 구역은 붉은색과 노란색으로 보여지는 비교적 고비저항대에 해당되며, C구역은 A와 B 구역 사이의 전기비저항을 보이는 지역에 속한다. 단면에 기울어진 수직방향으로 나타나는 F1, F2, F3의 각각의 굵은선은 이전에 관측된 단층대로 측선의 수평거리 -30 m ~ +30 m 부근은 단층대로 인해 누수가 일어나고 있는 것으로 예상되었다.



<그림 6-6> 제체마루 상부 측선의 전기비저항 탐사결과

<그림 6-7>에서도 F4는 이전에 관측된 단층선으로 측선의 수평거리 +270 m 부근에서 단층에 의해 누수가 일어나고 있는 것으로 추측되었다.

결과적으로 대야댐의 전기비저항 탐사가 실시된 두 측선에서 모두 이상대가 발견되었으며, 이상대의 위치는 단층의 위치와 일치하는 것으로 나타났다. 즉, 전기비저항 탐사결과 of 이상대 위치는 단층으로 인한 누수구간으로 예상되었다.

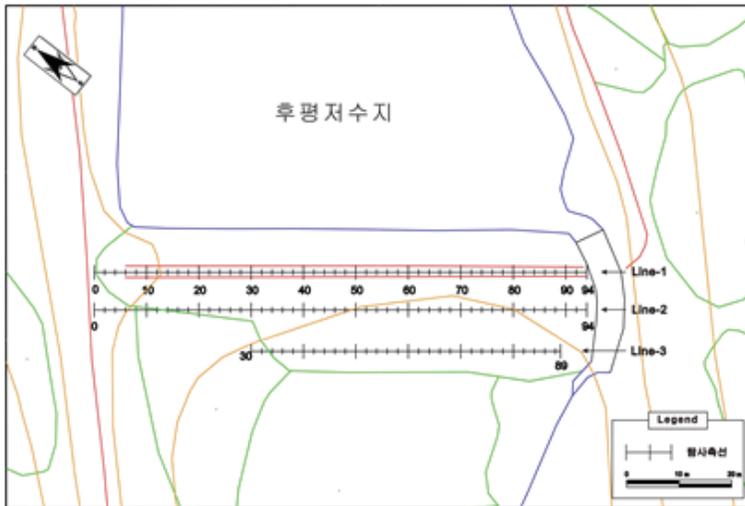


<그림 6-7> 여수로 상부 측선의 전기비저항 탐사결과

제3절 전기비저항 탐사 및 자연전위 탐사 분석사례 1

다음은 경상북도 의성군 단촌면 후평리에 위치하는 후평 저수지에서 자연전위 탐사와 전기비저항 탐사가 동시에 수행된 사례이다. 이 저수지는 제당길이가 97 m이며, 제고는 8 m로 비교적 소규모 제체에 해당된다. 본 사례는 그라우팅 전후의 누수 양상을 확인하고 누수예상 구간 및 취약 구간의 판단을 목적으로 진행되었다.

그라우팅 전후의 자연전위 탐사는 댐마루에 한 측선 (Line-1), 하류사면에 두 측선 (Line-2, Line-3)에서 실시되었다 <그림 6-8>.



<그림 6-8> 후평저수지 탐사 측선 모식도

제체마루에 위치한 Line 1의 그라우팅 전후의 자연전위 탐사방법은 절대 전위법이 적용되었으며, 측선 길이는 94 m, 전극 간격은 1 m이다 (표 6-3). 하류사면의 상단부에 위치한 Line 2의 탐사방법은 마찬가지로 절대 전위법이 적용되었으며, 측선 길이와 전극 간격은 Line 1과 동일하다 (표 6-4). 하류사면의 하단부에 위치한 Line 3의 탐사방법은 절대 전위법이 적용되었으며, 측선 길이와 전극 간격은 각각 59 m와 1 m이다 (표 6-5).

(표 6-3) 그라우팅 전후 Line 1의 자연전위 탐사변수

Line 1 (제체마루)	
항목	내용
탐사 방법	절대 전위법
측선 길이	94 m
전극 간격	1 m

(표 6-4) 그라우팅 전후 Line 2의 자연전위 탐사변수

Line 2 (하류사면 1)	
항목	내용
탐사 방법	절대 전위법
측선 길이	94 m
전극 간격	1 m

(표 6-5) 그라우팅 전후 Line 3의 자연전위 탐사변수

Line 3 (하류사면 2)	
항목	내용
탐사 방법	절대 전위법
측선 길이	59 m
전극 간격	1 m

한편, 그라우팅 전후의 전기비저항 탐사는 자연전위 탐사 측선과 동일한 측선을 이용하여 진행되었다. 다만, 그라우팅 전과 후의 탐사변수들이 서로 상이하게 설정되었다. 전기비저항 탐사의 전극 배열은 모두 쌍극자 배열을 이용하였다.

Line 1의 그라우팅 전의 전기비저항 탐사의 측선 길이는 94 m, 전극 간격은 2 m, 4 m로 모두 측정되었으며, 전극전개수는 8, 탐사 심

도는 전극 간격에 따라 각각 8 m, 16 m까지 가능하였다 (표 6-6). Line 2는 측선 길이, 전극 간격, 전극전개수, 탐사 심도 모두 Line 1과 동일하다 (표 6-7). Line 3는 측선 길이가 59 m이며, 전극 간격, 전극전개수, 탐사 심도 모두 Line 1, Line 2와 동일하다 (표 6-8).

(표 6-6) 그라우팅 전 Line 1의 전기비저항 탐사변수

Line 1 (제체마루)	
항목	내용
전극 배열	쌍극자 배열
측선 길이	94 m
전극 간격	2 m, 4 m
전극전개수(n)	8
탐사 심도	8 m, 16 m

(표 6-7) 그라우팅 전 Line 2의 전기비저항 탐사변수

Line 2 (하류사면 1)	
항목	내용
전극 배열	쌍극자 배열
측선 길이	94 m
전극 간격	2 m, 4 m
전극전개수(n)	8
탐사 심도	8 m, 16 m

(표 6-8) 그라우팅 전 Line 3의 전기비저항 탐사변수

Line 3 (하류사면 2)	
항목	내용
전극 배열	쌍극자 배열
측선 길이	59 m
전극 간격	2 m, 4 m
전극전개수(n)	8
탐사 심도	8 m, 16 m

Line 1의 그라우팅 후의 전기비저항 탐사의 측선 길이는 94 m, 전극 간격은 3 m, 6 m로 모두 측정되었으며, 전극전개수는 8, 탐사 심도는 전극 간격에 따라 각각 12 m, 24 m로 그라우팅 전의 탐사 심도보다 더 깊게 설정되었다 (표 6-9). Line 2는 측선 길이, 전극 간격, 전극전개수, 탐사 심도 모두 Line 1과 동일하다 (표 6-10). Line 3는 측선 길이가 59 m이며, 전극 간격, 전극전개수, 탐사 심도 모두 그라우팅 후에 측정된 Line 1, Line 2와 동일하다 (표 6-11).

(표 6-9) 그라우팅 후 Line 1의 전기비저항 탐사변수

Line 1 (제체마루)	
항목	내용
전극 배열	쌍극자 배열
측선 길이	94 m
전극 간격	3 m, 6 m
전극전개수(n)	8
탐사 심도	12 m, 24 m

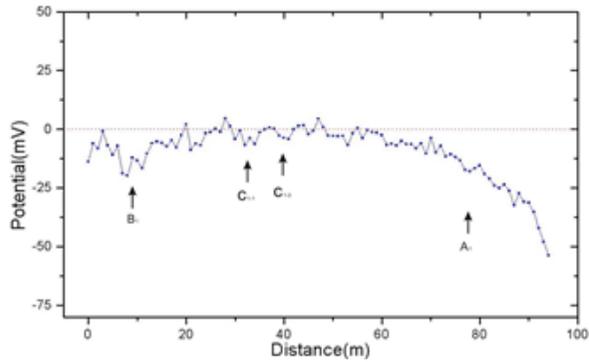
(표 6-10) 그라우팅 후 Line 2의 전기비저항 탐사변수

Line 2 (하류사면1)	
항목	내용
전극 배열	쌍극자 배열
측선 길이	94 m
전극 간격	3 m, 6 m
전극전개수 (n)	8
탐사 심도	12 m, 24 m

(표 6-11) 그라우팅 후 Line 3의 전기비저항 탐사변수

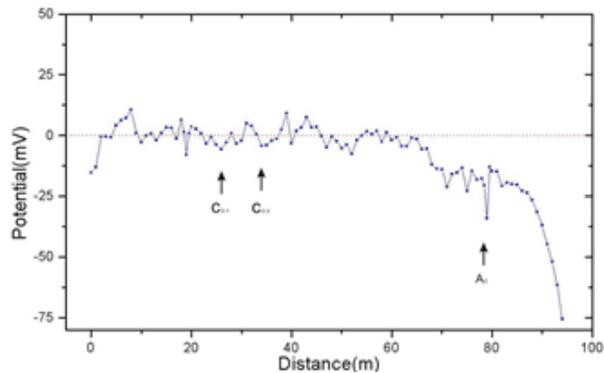
Line 3(하류사면2)	
항목	내용
전극 배열	쌍극자 배열
측선 길이	59 m
전극 간격	3 m, 6 m
전극전개수 (n)	8
탐사 심도	12 m, 24 m

그라우팅 이전의 자연전위 탐사결과, <그림 6-9>와 같이 Line 1의 수평거리 5~10 m 구간에 15 mV 정도의 전위차가 있는 음의 이상대 (B1)가 발견되었으며, 수평거리 32 m지점 (C1-1), 40m 지점 (C1-2)에서 각각 작은 전위차의 음의 이상대가 나타났다. 또한 수평거리 70~94 m구간에 50 mV 이상의 큰 전위차가 있는 음의 이상대 (A1)가 나타났다.



<그림 6-9> 그라우팅 이전 자연전위 탐사결과 (Line 1)

Line 2의 결과는 <그림 6-10>과 같이 수평거리 26 m 지점 (C2-1)과 35 m 지점 (C2-2)에 작은 전위차의 음의 이상대가 나타났다. 또한 수평거리 67~94 m 구간에 75 mV 이상의 큰 전위차가 있는 음의 이상대 (A2)가 나타났다.



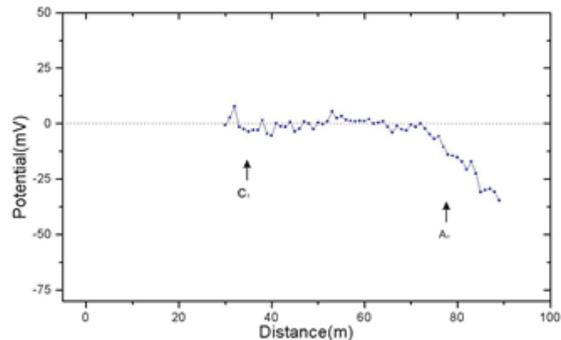
<그림 6-10> 그라우팅 이전 자연전위 탐사결과 (Line 2)

Line 3의 결과는 <그림 6-11>과 같이 수평거리 35 m 지점에 작은 전위차가 있는 음의 이상대(C3) 나타났다. 또한 수평거리 76~94 m 구간에 35 mV 이상의 전위차가 있는 음의 이상대(A3)가 나타났다.

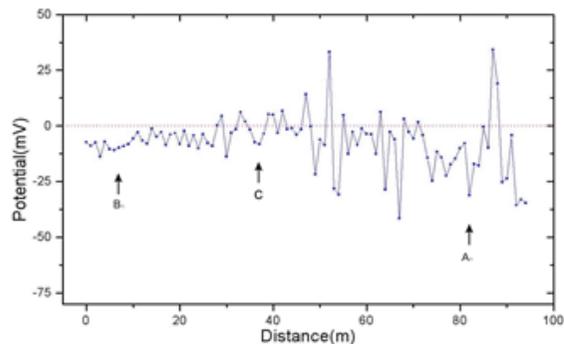
결과적으로 <그림 6-9>~<그림 6-11>에서 A형의 경우 전위차가 크고 축선간의 연속성과 이상대 위치의 연속성이 양호한 것으로 나타났는데, 이는 여수로 방향으로 집중되어 흐르는 물의 흐름에 의한 누

수 취약지점으로 해석되었다. 또한 B형의 경우 Line 1에서는 구분이 가능하였으며, Line 2에서는 구분이 쉽지 않은 것으로 나타났다. Line 3에서는 현장 여건상 진입이 어려워 측선 길이를 확보하지 못하여 모호한 부분이 있지만, 원지반과 제체의 접합부 누수 취약지점으로 생각되었다. C형의 경우는 소규모 음의 이상대들이 나타나는 구간들로 측선간의 연속성과 이상대 위치의 연속성이 뚜렷하지 않으나, 다소의 일관성이 존재하는 것으로 해석되었다. 이와 같은 결과들은 소규모의 누수 발생지역에서 나타날 수 있는 현상으로 판단된다.

그라우팅 이후의 자연전위 탐사의 결과에서 Line 1에서의 결과는 <그림 6-12>와 같이 수평거리 7 m 지점에 전위차가 있는 음의 이상대 (B1)가 나타났다. 또한 수평거리 38 m 지점에 10 mV 정도의 전위차가 있는 음의 이상대 (C)가 나타났다. 수평거리 71~94 m구간에서는 30 mV 이상의 전위차가 있는 음의 이상대 (A1)가 나타났다.

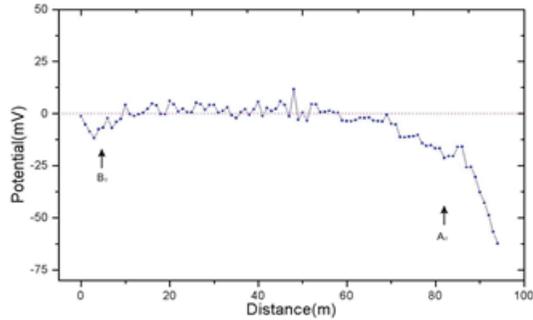


<그림 6-11> 그라우팅 이전 자연전위 탐사결과 (Line 3)



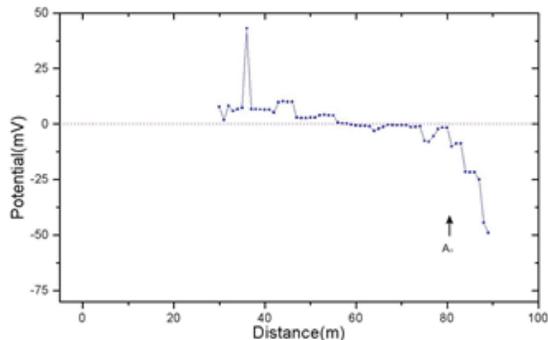
<그림 6-12> 그라우팅 이후 자연전위 탐사결과 (Line 1)

Line 2에서의 결과는 <그림 6-13>과 같이 수평거리 5 m 지점에 작은 전위차가 있는 음의 이상대 (B2)가 나타났으며, 수평거리 70~94 m 구간에서도 70 mV 이상의 전위차가 있는 음의 이상대 (A2)가 나타났다.



<그림 6-13> 그라우팅 이후 자연전위 탐사결과 (Line 2)

Line 3에서의 결과는 <그림 6-14>와 같이 수평거리 80~94 m 구간에 50 mV 이상의 전위차가 있는 음의 이상대 (A3)가 나타났다.

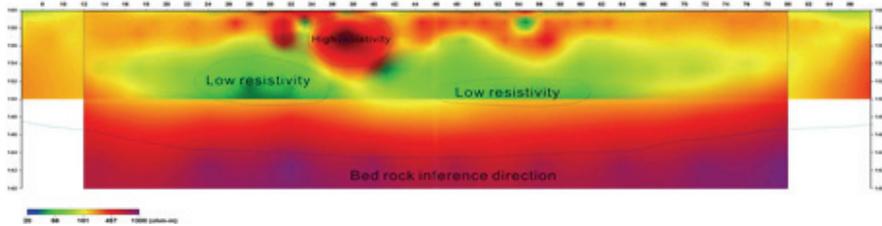


<그림 6-14> 그라우팅 이후 자연전위 탐사결과 (Line-3)

결과적으로 <그림 6-12>~<그림 6-14>에서 A형의 경우 Line 1에서 전위차의 변화가 있었으며, Line 2와 Line 3에서는 크기와 연속성이 양호한 것으로 나타났는데, 이는 전위분포가 불안정한 것으로 보아 그라우팅 이후 차수에 의한 것으로 해석되었다. 또한 Line 2와 Line 3에서의 이상대는 차수 이후 잔류하는 수분의 영향인 것으로 해석되었다. B형의 경우 Line 1과 Line 2에 분포하며, Line 3에는 B형이

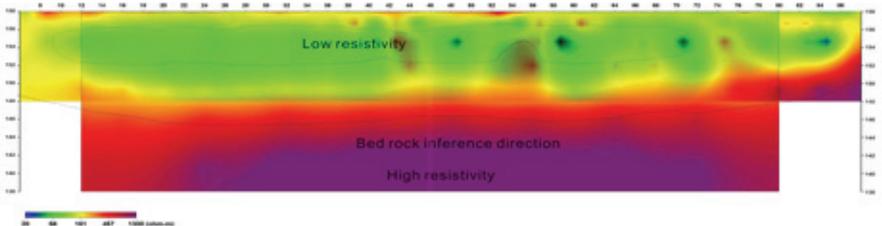
나타날 것으로 예상하였지만, 현장 여건상 자료를 획득하지 못하였다. 다만, 전위차가 감소한 것으로 보아 차수에 의한 전위차의 감소로 판단되었다. C형의 경우는 Line 1에서는 구분이 가능하나, 측선간의 연속성은 나타나지 않았다. 측선간의 연장성이 없는 것으로 보아 차수에 의해 사라진 것으로 해석되었다.

그라우팅 이전의 전기비저항 탐사결과에서 Line 1에서는 <그림 6-15>와 같이 수평거리 22~36 m의 해발고도 150~154 m 부근과 수평거리 46~60 m의 해발고도 150~153 m 부근에 저비저항대가 분포하는데, 이는 제체와 기반암의 경계부에서 생길 수 있는 누수의 영향으로 해석되었다. 또한 수평거리 34~42 m 구간의 해발고도 154~159 m 부근에 고비저항대가 나타났다.



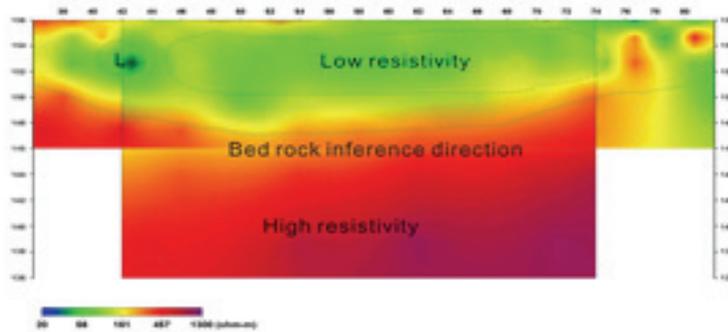
<그림 6-15> 그라우팅 이전의 전기비저항 탐사결과 (Line 1)

Line 2에서는 <그림 6-16>과 같이 수평거리 9~72 m 구간의 해발고도 152~156 m 부근에 폭넓은 저비저항대가 분포하는 것으로 나타났는데, 이는 전 구간에 분포하는 저비저항대가 Line 1의 두 구간의 누수구간에서 생긴 수분의 유입에 의한 영향으로 해석되었다. 그 속에 여러개의 작은 고비저항대가 연속되어 분포하는 것으로 나타났으며, 해발고도 149 m 이하에는 고비저항대 분포하는 것으로 나타났다.



<그림 6-16> 그라우팅 이전의 전기비저항 탐사결과 (Line 2)

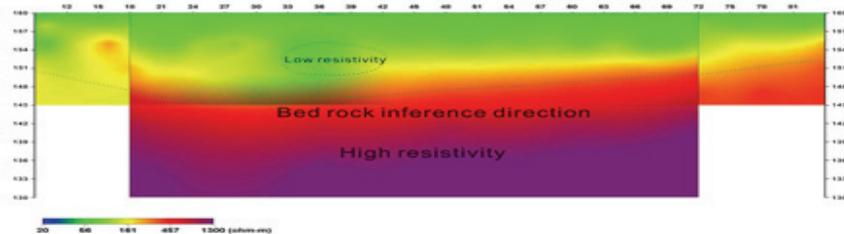
Line 3에서는 수평거리 40~44 m 구간의 해발고도 150~154 m 부근과 수평거리 45~75 m 구간의 해발고도 150~155 m 부근에 폭 넓은 저비저항대가 분포하는 것으로 나타났는데, 이는 Line 1 선상에서 생긴 누수가 Line 2를 거쳐 나타나는 저비저항대로 판단되었다. 해발고도 151 m 이하에는 고비저항대 분포하는 것으로 나타났다.



<그림 6-17> 그라우팅 이전의 전기비저항 탐사결과 (Line 3)

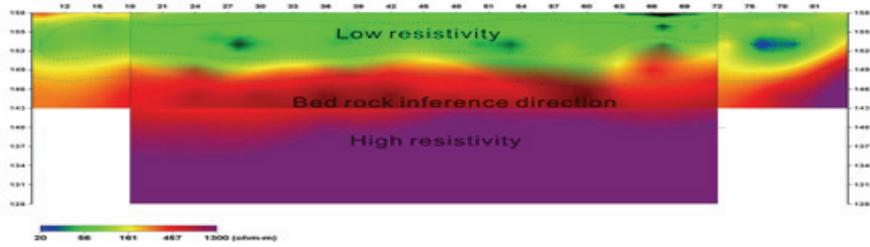
결과적으로 Line 1의 저비저항대는 Line 2에서 점점 넓어지며, Line 3도 같은 양상을 보이므로 연속성이 있는 것으로 해석되었다.

그라우팅 이후 전기비저항 탐사결과에서 Line 1의 결과는 <그림 6-18>과 같이 수평거리 31~42 m 구간의 해발고도 150~154 m 부근에 저비저항대가 분포하는 것으로 나타났는데, 이는 그라우팅 이후 그 범위가 줄어든 효과로 판단되며, 시간이 지남에 따라 점차 줄어들 것으로 예상하였다. 해발고도 149~152 m 이하에는 고비저항대가 분포하는 것으로 나타났다.



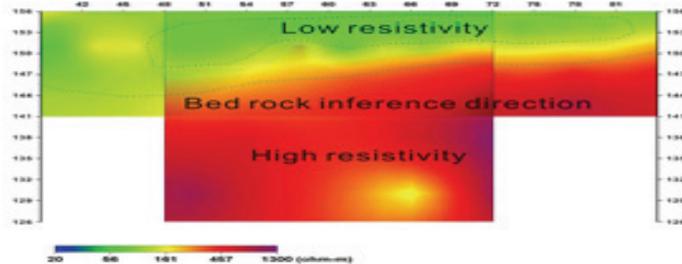
<그림 6-18> 그라우팅 이후의 전기비저항 탐사결과 (Line 1)

Line 2의 결과는 <그림 6-19>와 같이 수평거리 10~81 m 구간의 해발고도 151~157 m 부근에 폭넓은 저비저항대가 분포하는 것으로 나타났다. 또한 해발고도 148~151 m 이하에는 고비저항대가 분포하는 것으로 나타났다.



<그림 6-19> 그라우팅 이후의 전기비저항 탐사결과 (Line 2)

Line 3의 결과는 <그림 6-20>과 같이 수평거리 47~82 m 구간의 해발고도 148~155 m 부근에 폭넓은 저비저항대가 분포하는 것으로 나타났으며, 해발고도 144~150 m 이하에는 고비저항대가 분포하는 것으로 나타났다.



<그림 6-20> 그라우팅 이후의 전기비저항 탐사결과 (Line 3)

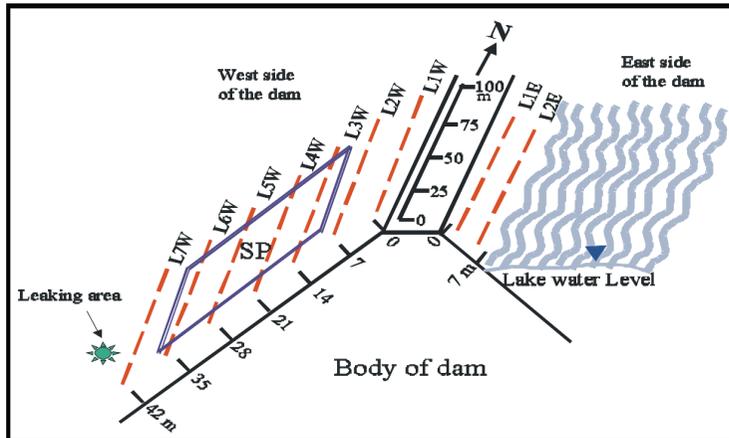
결과적으로 Line 2와 Line 3의 전 구간에 분포하는 저비저항대는 차수 이후 잔존하는 수분의 영향으로 해석되었다.

이상과 같이 자연전위 탐사에서 음의 전위차를 갖는 음의 이상대 부분들은 전기비저항 탐사 결과에서 나타나는 저비저항대의 위치와 대부분 일치하는 것으로 나타났다. 자연전위 탐사와 전기비저항 탐사에서

이상대로 예상되는 부분이 그라우팅 이후의 탐사결과에서 측정값의 변화가 있었으며, 자연전위 탐사와 전기비저항 탐사결과 제체의 누수 취약 구간을 확인할 수 있었다.

제4절 전기비저항 탐사 및 자연전위 탐사 분석사례 2

다음은 미국 미주리 워싱턴 크리스탈 호수의 댐 (Missouri Washington Dam) 사례로 제방의 누수 구역을 탐지를 목적으로 전기비저항 탐사와 자연전위 탐사를 수행한 사례이다. <그림 6-21>은 조사 지역 내 전기비저항 탐사와 자연전위 탐사 측선의 모식도를 나타낸 것이다.



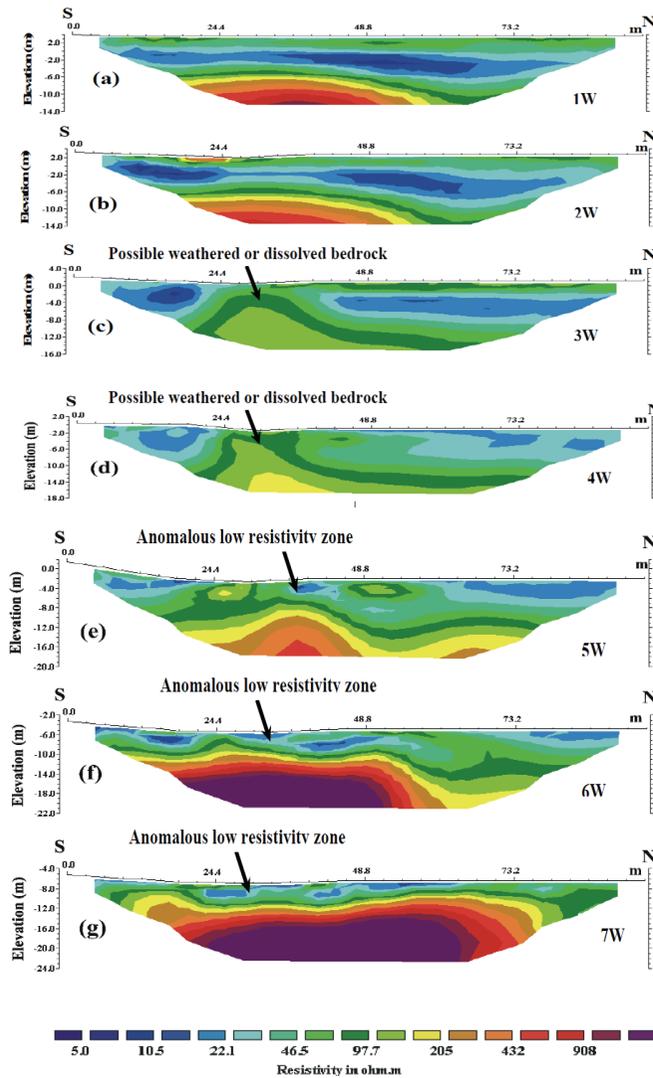
<그림 6-21> 전기비저항 탐사와 자연전위 탐사 측선 모식도

전기비저항 탐사는 상류부에 2 측선 (L1E, L2E), 하류부에 7 측선 (L1W~L7W)으로 총 9 측선에 대해 탐사를 실시하였다. 모든 측선에서 (표 6-12)와 같은 탐사변수들을 기본으로 하였는데, 단, 측선별로 전극전개수를 조절하여 탐사 심도가 서로 다르게 나타났다. 전극 배열은 공통적으로 쌍극자 배열을 사용하였으며, 측선 길이는 100 m, 전극 간격은 3 m로 설정하였다.

(표 6-12) 각 측선들의 전기비저항 탐사변수

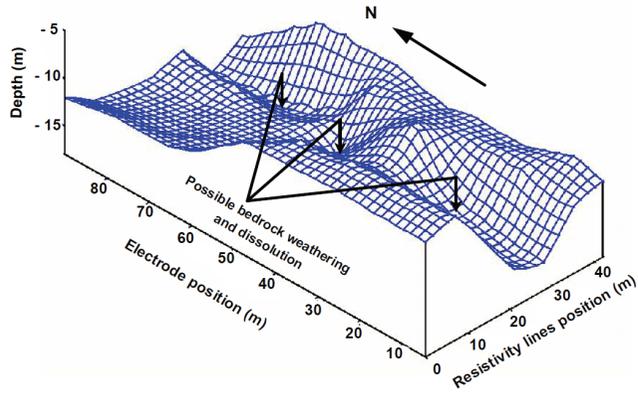
모든 측선	
항목	내용
전극 배열	쌍극자 배열
측선 길이	100 m
전극 간격	3 m

낮은 전기비저항을 보이는 이상대는 풍화가 많이 일어난 지역으로 L5W에서 L7W로 확장되어 누수의 영향이 있는 것으로 해석되었다. 상류보다는 하류에 이상대가 위치하는 것으로 나타났으며, 이상대의 위치는 지표면에 가까운 부분 (풍화지역)에 위치하였다. 전체적으로 수평거리 25~45 m 사이에서 이동하고 있는 것으로 나타났다 <그림 6-22>.

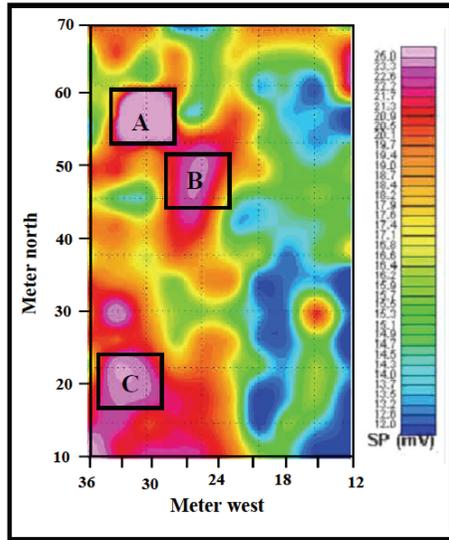


<그림 6-22> 각 측선에 따른 2차원 전기비저항 탐사 역산 결과

자연전위 탐사는 하류부 전기비저항 탐사 측선 L3W~L6W에 걸쳐 grid 형태로 탐사를 수행되었다 <그림 6-23>. <그림 6-24>는 자연전위 탐사 측정결과의 평면도를 나타낸 것으로 측정 구역에 총 3 영역의 풍화 지역이 존재하는 것으로 나타났다. 이 결과는 풍화 지역의 위치와 일치하는 곳에서 높은 이상대를 보이는 것으로 나타났다.



<그림 6-23> 자연전위 탐사 측정 지반의 풍화 지역



<그림 6-24> 자연전위 탐사 결과 평면도

결과적으로 전기비저항 탐사결과, 이상대는 하류부에서 수평거리 25~45 m 구간에 나타났다. 또한 자연전위 탐사와 전기비저항 탐사의 이상대는 암반의 풍화대와 일치하는 것으로 나타났으며, 두 탐사에서 확인된 이상대는 풍화에 의한 누수 영역으로 해석되었다.

제5절 전기비저항 탐사와 시추공영상의 융합 분석사례

다음은 방조제의 사례로 누수 구간의 발생위치 및 분포 양상을 수평적, 수직적으로 규명한 사례이다. 특히, 이 경우는 전기비저항 탐사와 시추공영상의 융합 분석이 이루어져 탐사결과의 신뢰도를 확보할 수 있었다.

총 연장 3 km 의 방조제 구간 중 갑문의 영향이 없는 No.5~60 구간에서 총 2,750 m 의 연장 구간에 대해 전기비저항 탐사가 수행되었으며, 2011년과 2012년에 각각 제체마루 (Line 1)와 소단 (Line 2)에서 취득한 자료를 2차원 역산을 통해 전기비저항 단면도를 작성하여 이를 비교 분석하였다. (표 6-13), (표 6-14)와 같이 두 측선 모두 전극 배열은 쌍극자 배열이었으며, 측선 길이는 2,750 m로 동일하였다. 또한 각각의 측선은 서로 평행하게 배치되었다.

(표 6-13) Line 1의 전기비저항 탐사변수

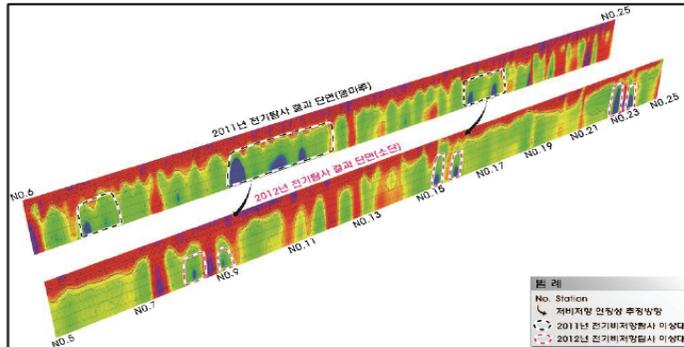
Line 1 (제체마루)	
항목	내용
전극 배열	쌍극자 배열
측선 길이	2,750m

(표 6-14) Line 2의 전기비저항 탐사변수

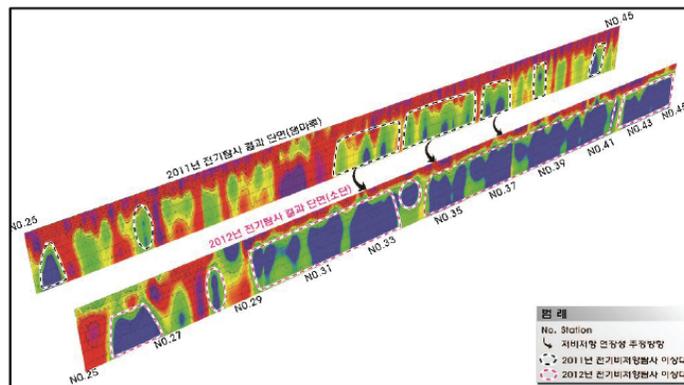
Line 2 (소단)	
항목	내용
전극 배열	쌍극자 배열
측선 길이	2,750m

2011년 제체마루 측정 자료와 2012년 소단 측정 자료는 이상대 구간이 제체마루에서 소단의 방향으로 연장성을 갖고 비슷한 양상으로 나타났으며, 소단으로 갈수록 이상대 범위가 넓어지는 현상이 나타났다. 특히, <그림 6-25>와 같은 No.6~25 구간의 결과에 비해 <그림 6-26>과 같은 No.25~45 구간의 경우 더 심화된 현상이 확인되었다.

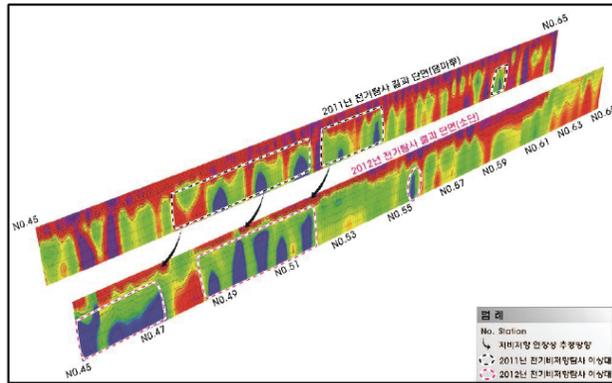
<그림 6-27>의 No.45~65 구간은 상대적으로 측선의 전반부인 No.45~52 구간이 이상대 범위가 확장되는 것으로 나타났다. 참고로 각각의 그림에서 화살표의 방향은 저비저항 연장성 추정방향을 나타내며, 파란색 점선은 2011년 전기비저항 탐사결과 이상대, 빨간색 점선은 2012년 전기비저항 탐사 결과 이상대를 의미한다.



<그림 6-25> 2011년과 2012년의 전기비저항 탐사 단면도 (No.6~25)

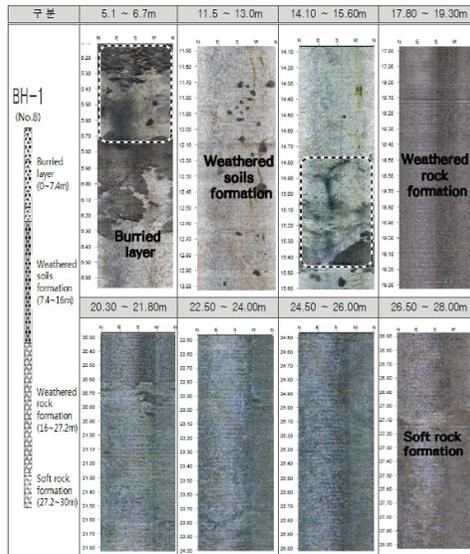


<그림 6-26> 2011년과 2012년의 전기비저항 탐사 단면도 (No.25~45)



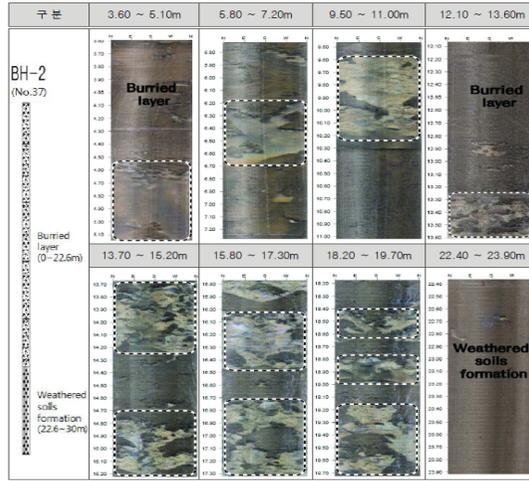
<그림 6-27> 2011년과 2012년의 전기비저항 탐사 단면도 (No.45~65)

No.8, No.37, No.43, No.50, No.54 지점에 각 1공씩 총 5공 (BH-1~BH-5)에서 시추조사가 수행되었다. 시추조사 결과, 5공의 시추공 중 누수에 가장 취약할 것으로 예상된 세 구간 (No.8, No.37, No.43)을 선정하여 각 시추공에서 시추공영상 촬영이 이루어졌다. 특히, No.8 지점의 경우 <그림 6-28>과 같이 심도 14.1~15.6 m에서 파쇄대가 나타났다. 이 결과로 퇴적층과 기초지반 경계부에서 누수 취약 구간이 확인되었다.

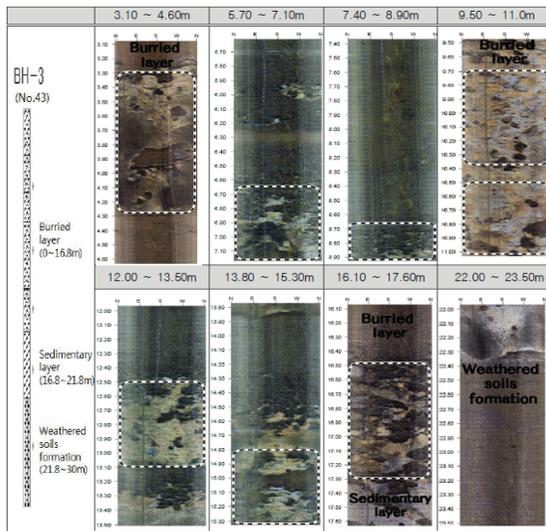


<그림 6-28> No.8 (BH-1) 시추공영상 촬영결과

<그림 6-29>의 No.37 지점과 <그림 6-30>의 No.43 지점은 낮은 심도에서부터 풍화대까지 불연속적인 영상들이 반복적으로 계속 출현하는 것으로 나타났다.



<그림 6-29> No.37 (BH-2) 시추공영상 촬영결과

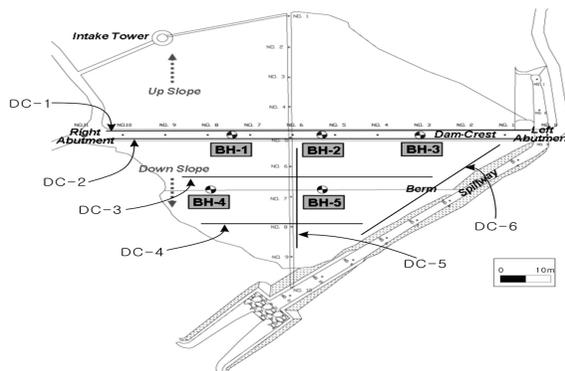


<그림 6-30> No.43 (BH-3) 시추공영상 촬영결과

이 결과는 No.8 지점보다 상대적으로 전기비저항 탐사결과에서도 나타났듯이 상대적으로 누수에 취약한 지점들인 No.37, No.43 지점들의 상황을 잘 반영하는 결과로 나타났다. 그러나 전기비저항 탐사에서 누수 구간으로 유추된 지역은 시추공 영상촬영결과 확인된 9.6 m의 누수 취약 구간 중 약 43%가 일치하였지만 전기비저항 탐사의 수직적 누수 취약 구간의 신뢰도는 상대적으로 높지 않은 것으로 나타났다.

제6절 전기비저항 탐사와 지반조사 자료의 복합 분석사례

다음은 중앙차수벽 토석담에서 수행되었던 전기비저항 탐사와 지반조사 자료의 복합 분석사례이다. 이 지구는 하류사면에서 일부 슬라이딩이 발생하여 이에 대한 보수보강 계획의 일환으로 안정성 조사를 수행할 목적으로 적용되었다. <그림 6-31>은 조사 지구의 평면도 상에 전기비저항 탐사측선의 위치와 지반조사를 위한 시추 위치를 나타낸 것이다. 전기비저항 탐사측선은 총 4개의 측선으로 DC-1 측선과 DC-2 측선은 제체마루에 설정되었고, DC-3 측선과 DC-4 측선은 하류사면에 평행하게 설정되었다. 또한 하류사면 측선들과 수직한 방향으로 DC-5 측선이 설정되었다. 지반조사를 위한 시추는 제체마루 상에 3공 (BC-1, BC-2, BC-3)과 하류사면의 소단 상부에 2공 (BC-4, BC-5)이 위치되었다.



<그림 6-31> 탐사 대상 댐의 및 시추공 위치 모식도

(표 6-15)는 DC-1 측선의 전기비저항 탐사변수를 나타낸 것이다. 전극 배열은 쌍극자 배열이 사용되었으며, 측선 길이는 147 m, 전극 간격은 7 m, 전극전개수는 8, 탐사 심도는 28 m가 되도록 하였다. DC-2 측선의 탐사변수는 서로 평행하고 측선의 길이도 동일한 DC-1 측선과 모두 같다 (표 6-16). DC-3 측선과 DC-4 측선의 탐사변수도 측선의 길이만 상이할 뿐, 모두 동일하다 (표 6-17)(표 6-18).

(표 6-15) DC-1 측선의 전기비저항 탐사변수

DC-1 (제체마루)	
항목	내용
전극 배열	쌍극자 배열
측선 길이	147 m
전극 간격	7 m
전극전개수(n)	8
탐사 심도	28 m

(표 6-16) DC-2 측선의 전기비저항 탐사변수

DC-2 (제체마루)	
항목	내용
전극 배열	쌍극자 배열
측선 길이	147 m
전극 간격	7 m
전극전개수(n)	8
탐사 심도	28 m

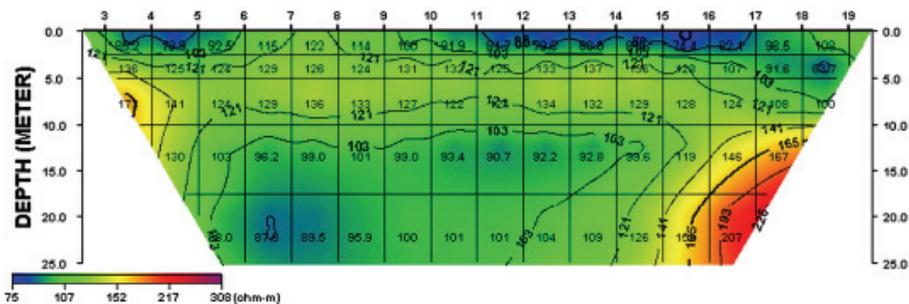
(표 6-17) DC-3 측선의 전기비저항 탐사변수

DC-3 (하류사면1)	
항목	내용
전극 배열	쌍극자 배열
전극 간격	7 m
전극전개수(n)	8
탐사 심도	28 m

(표 6-18) DC-4 측선의 전기비저항 탐사변수

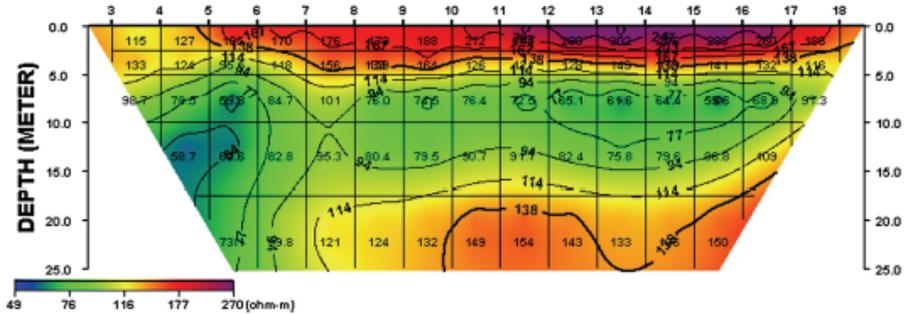
DC-4 (하류사면2)	
항목	내용
전극 배열	쌍극자 배열
전극 간격	7 m
전극전개수(n)	8
탐사 심도	28 m

<그림 6-32>는 DC-1 측선의 전기비저항 탐사 2차원 역산결과를 나타낸 것이다. 단면의 좌측 하단부에 낮은 전기비저항이 분포되었다.



<그림 6-32> 전기비저항 탐사 2차원 역산결과 (DC-1)

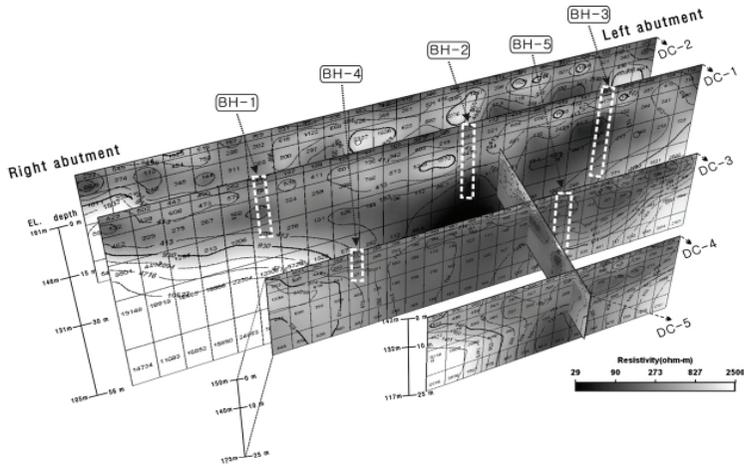
<그림 6-33>은 DC-2 측선의 전기비저항 탐사 2차원 역산결과를 나타낸 것이다. 이 결과에서도 좌측 하단부의 낮은 전기비저항이 나타났다. DC-2 측선은 DC-1 측선과 서로 평행한 측선으로 제체의 성토재 경계부가 상대적으로 취약한 것으로 해석되었다.



<그림 6-33> 전기비저항 탐사 2차원 역산결과 (DC-2)

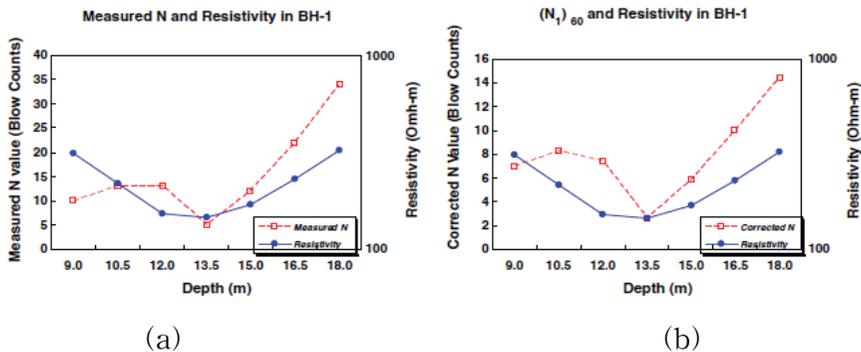
지반조사를 위한 표준관입시험 (SPT)은 시추공의 위치에서 수행되었다. 지표면 아래 1.5 m 간격으로 SPT를 병행하여 각각의 심도에서 단관 코어 배럴을 이용하여 교란 시료가 연속적으로 채취되었다. 전기비저항 분포가 제체의 성토재에 대한 물성과 상관관계가 있다면 SPT 결과인 N값과도 비례 관계를 가질 것으로 예상하였다. SPT의 정밀도를 향상시키기 위해 총 5공의 시추는 무수(無水) 시추조사로 수행되었다. 시추조사 결과, 코어는 실트질 점토, 필터는 실트질 모래, 토석재는 표면 부근의 자갈이나 전석과 하부의 실트질 모래, 그리고 제체마루 아래부터 코어재 사이를 구성하는 보조 기층은 자갈 섞인 실트질 모래로 확인되었다. 대상 지구의 기반암 정보와 대체로 일치하는 것으로 나타났다.

<그림 6-34>는 5개 측선 (DC-1, DC-2, DC-3, DC-4, DC-5)에 대한 전기비저항 탐사결과와 SPT가 수행되었던 시추공 위치이다.



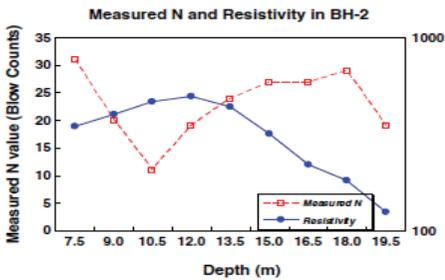
<그림 6-34> 전기비저항 탐사 2차원 역산 결과와 시추공의 위치

SPT 결과인 N값은 전기비저항 분포와 거의 일치하는 것으로 나타났다. 특히, <그림 6-35>와 같이 BH-1 (No.8 지점)은 수평거리 9 m 부근을 제외하고 매우 좋은 상관관계를 보였다. 여기서, 빨간색 점선은 N값을 나타내고, 파란색 실선은 전기비저항 값을 의미한다.

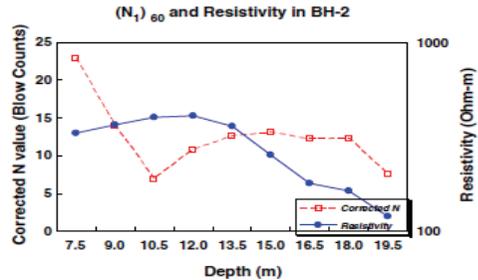


<그림 6-35> BH-1 시추공 위치에 해당되는 전기비저항 분포와 N값
(a) 동일 지점의 전기비저항과 측정된 N값의 비교, (b) 동일 지점의 전기비저항과 보정된 N값의 비교

BH-2 (No.37 지점)의 수평거리 9~13.5 m 부근은 <그림 6-36>과 같이 서로 음의 상관관을 보였다. 즉, 전기비저항과 N값이 비례관계가 아닌 곳은 체체의 안정성을 장담하지 못하는 결과가 나타났는데, 이는 전기비저항이 높아도 체체 코어의 구성 재료가 안정적이지 않을 수 있음을 의미한다. 그래도 (b)의 보정된 N값의 경우 전기비저항과의 상관성이 (a)의 측정된 N값보다는 다소 높은 것으로 나타났다.



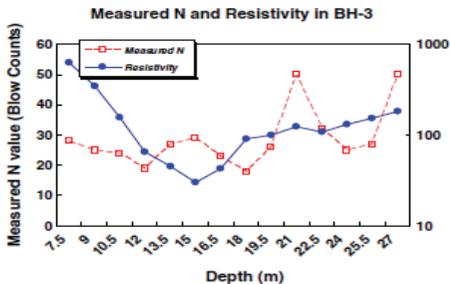
(a)



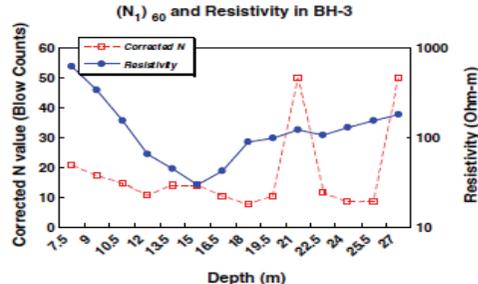
(b)

<그림 6-36> BH-2 시추공 위치에 해당되는 전기비저항 분포와 N값
(a) 동일 지점의 전기비저항과 측정된 N값의 비교, (b) 동일 지점의 전기비저항과 보정된 N값의 비교

<그림 6-37>과 같이 BH-3 (No.43 지점)의 수평거리 7.5~9 m 구간은 높은 비저항에 비해 N값은 평이하게 나타났다. BH-3도 수평거리 21 m 지점의 과도한 N값을 제외하고는 잘 일치하는 것으로 나타났다.



(a)



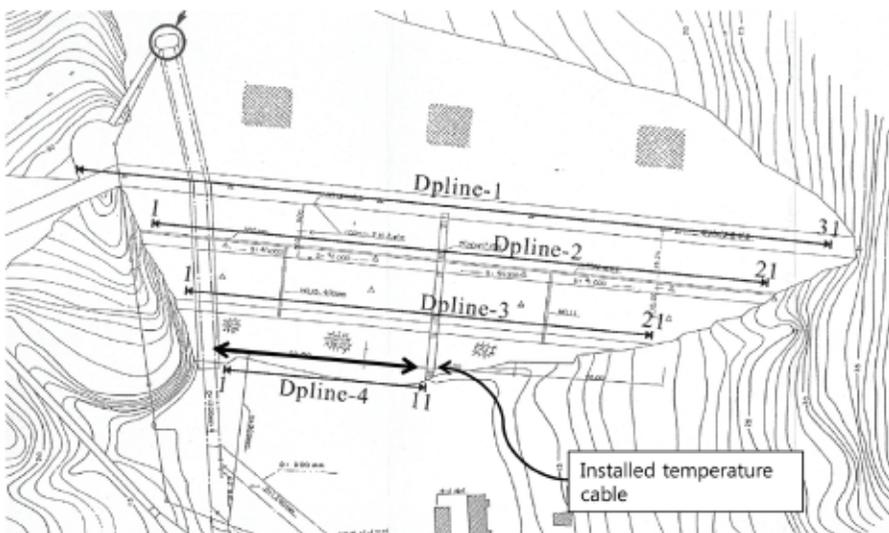
(b)

<그림 6-37> BH-3 시추공 위치에 해당되는 전기비저항 분포와 N값
(a) 동일 지점의 전기비저항과 측정된 N값의 비교, (b) 동일 지점의 전기비저항과 보정된 N값의 비교

이상의 결과를 종합해보면, 전반적으로 전기비저항이 낮은 곳은 N값도 낮은 값을 보이고 있어 좋은 상관관계를 가지는 것으로 해석되었다. 그러나 일부 구간에서 N값과 비저항이 일치하지 않는 양상을 보였는데, 이러한 구간에서는 전기비저항이 높은 곳에서 N값이 높게 나타나지 않은 것으로 확인되었다.

제7절 전기비저항 탐사와 온도 모니터링 자료의 복합 해석 사례

다음은 저수지에서 적용된 전기비저항 탐사결과와 온도 모니터링 결과의 복합 해석사례이다. 이 사례도 흙댐의 누수 구간 판별을 목적으로 수행되었다. 전기비저항 탐사는 <그림 6-38>과 같이 제체마루에 Dpline-1 측선이 설정되었고, 하류사면에 Dpline-2, Dpline-3, Dpline-4의 3개 측선이 서로 평행하게 위치되었다. 온도 모니터링 센서는 취수탑, 시추공 S1, S3, 주로 Dpline-4와 인접하여 설치되었다.



<그림 6-38> 전기비저항 탐사 측선 모식도

(표 6-19)는 Dpline-1 측선의 전기비저항 탐사변수를 나타낸 것이다. 전극 배열은 쌍극자 배열이 사용되었으며, 측선 길이는 248 m, 전극 간격은 8 m, 전극전개수는 8, 탐사 심도는 28 m가 되도록 하였다.

(표 6-19) Dpline-1 측선의 전기비저항 탐사변수

Dpline-1 (제체마루)	
항목	내용
전극 배열	쌍극자 배열
측선 길이	248 m
전극 간격	8 m
전극전개수(n)	8
탐사 심도	28 m

(표 6-20)은 Dpline-2 측선의 전기비저항 탐사변수를 나타낸 것이다. 전극 배열은 쌍극자 배열이 사용되었으며, 측선 길이는 220 m, 전극 간격은 8 m, 전극전개수는 8, 탐사 심도는 28 m가 되도록 하였다.

(표 6-20) Dpline-2 측선의 전기비저항 탐사변수

Dpline-2 (하류사면 1)	
항목	내용
전극 배열	쌍극자 배열
측선 길이	220 m
전극 간격	8 m
전극전개수(n)	8
탐사 심도	28 m

(표 6-21)은 Dpline-3 측선의 전기비저항 탐사변수를 나타낸 것이다. 전극 배열은 쌍극자 배열이 사용되었으며, 측선 길이는 165 m, 전극 간격은 8 m, 전극전개수는 8, 탐사 심도는 28 m가 되도록 하였다.

(표 6-21) Dpline-3 측선의 전기비저항 탐사변수

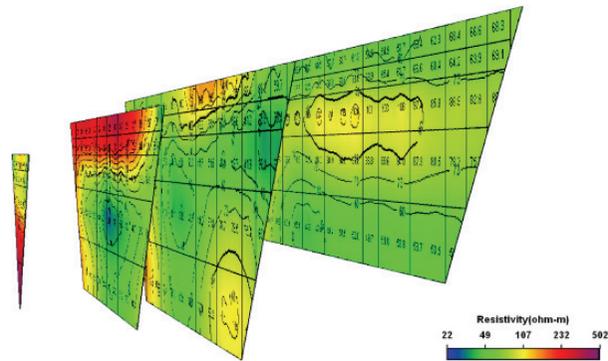
Dpline-3 (하류사면 2)	
항목	내용
전극 배열	쌍극자 배열
측선 길이	165 m
전극 간격	8 m
전극전개수(n)	8
탐사 심도	28 m

(표 6-22)는 Dpline-4 측선의 전기비저항 탐사변수를 나타낸 것이다. 전극 배열은 쌍극자 배열이 사용되었으며, 측선 길이는 측선의 양끝단에 걸리는 원지반의 영향으로 83 m로 비교적 짧게 설정되었다. 전극 간격은 8 m, 전극전개수는 8, 탐사 심도는 28 m가 되도록 하였다.

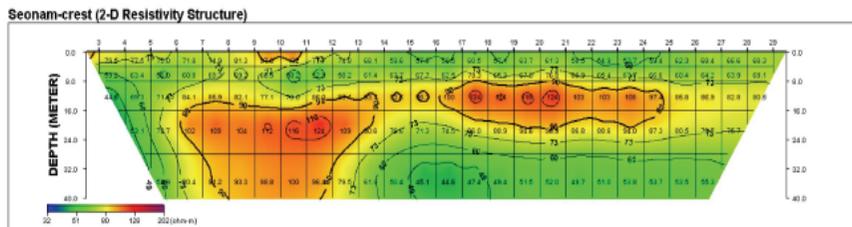
(표 6-22) Dpline-4 측선의 전기비저항 탐사변수

Dpline-4 (하류사면 3)	
항목	내용
전극 배열	쌍극자 배열
측선 길이	83 m
전극 간격	8 m
전극전개수(n)	8
탐사 심도	28 m

전기비저항 2차원 역산결과, 제체의 중심부 하부에서 저비저항대가 나타나고 있었으며, 4개의 측선에서 다음 측선으로 가면서 저비저항대의 영향이 커지고 있는 것으로 나타났다 <그림 6-39>. <그림 6-40>은 4개의 측선 중 가장 하류에 있는 측선의 단면을 나타낸 것이다.



<그림 6-39> 각 측선에서 측정된 전기비저항 탐사 2차원 역산결과

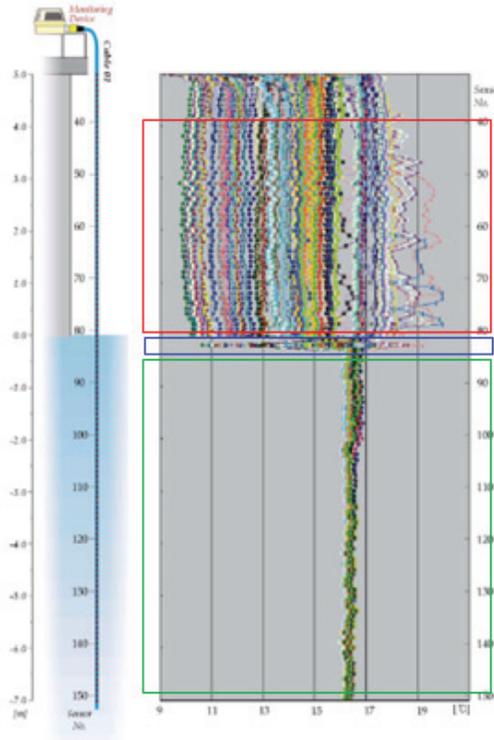


<그림 6-40> Dpline-4 측선의 2차원 역산결과

온도 모니터링은 취수탑에서 2일간 20분 간격으로 수행되었다. 취수탑 온도 센서 케이블은 10 cm 간격으로 약 151개 센서가 장착된 케이블이 사용되었으며, 시추공 S1에서는 센서 간격 50 cm의 케이블을 사용하여 1분 간격으로 6분간 측정되었다. 또한 시추공 S3에서는 센서 간격 10 cm의 케이블을 사용하여 1분 간격으로 14분간 측정되었다. 설치 위치는 앞서 설명된 바와 같이 제체 하단부에 제체와 평행하게 약 64 m로 온도 센서가 설치되었다 (Dpline-4와 인접). 설치 심도는 64 m 구간을 깊이 약 1.5 m 폭 약 1 m 가량 트랜치가 이루어졌으며, 센서 간격 2 m로 케이블이 매설되었다. 모니터링 기간은 총

24일 동안 20분 간격으로 수행되었다.

취수탑 근처에서의 모니터링 결과, 센서 번호 30~80 지점들에 대응되는 온도값은 공기 중에 노출되어 있는 센서에 의해 측정된 것으로 온도 변화가 잘 관찰되었다. 센서 번호 81~84 지점들은 외부 기온의 영향을 받아 큰 폭으로 변화하고 있는 온도 분포를 보였으며, 센서 번호 85~151 지점들은 편차 약 0.5℃ 미만의 안정화된 온도 분포가 나타났다 <그림 6-41>.

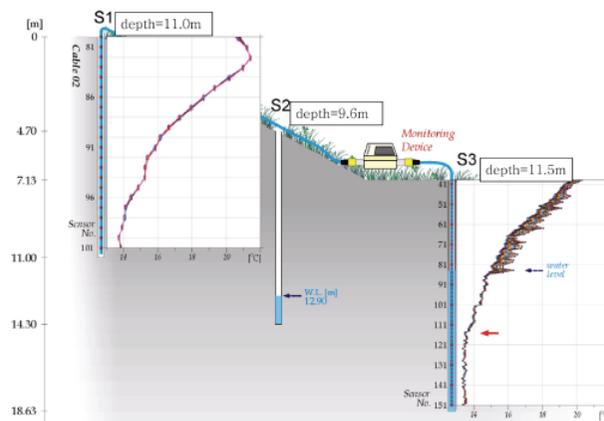


<그림 6-41> 취수탑에서 온도 측정결과

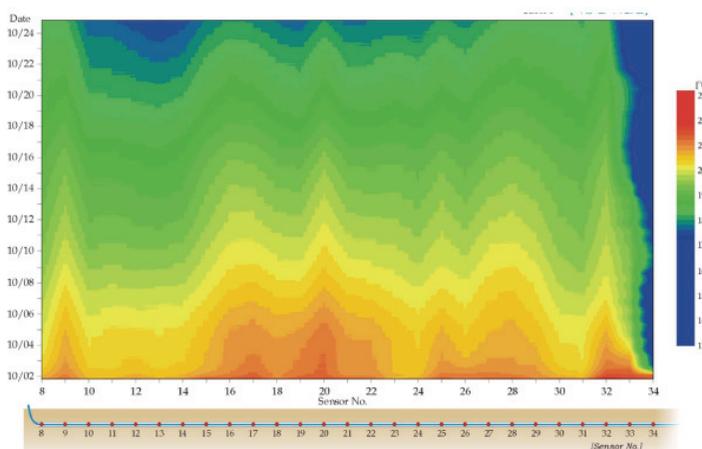
시추공 S1에서는 심도가 깊어짐에 따라 온도가 급격하게 낮아지고 있는 것으로 나타났으며, 시추공 S3에서는 지하수면을 만나는 위치 (<그림 6-42>의 청색 화살표) 상부구간에서는 시간대별 온도 변화 폭이 큰 반면, 지하수면 하부에서 상대적으로 대단히 작은 변화 폭을 보여주고 있어 지하수위 경계가 뚜렷하게 인식되는 것으로 나타났다. 센서 번호 85~115 구간에서는 심도에 따라 점차 온도가 낮아지는 것

으로 나타났으며, 센서 번호 116 이후에서 온도가 평형상태에 도달하는 것이 확인되었다. 이는 센서 번호 116 이후에서 매질의 투수 상태가 동일하다는 것을 의미한다.

Dpline-4 측선과 인접하여 설치된 온도 모니터링 결과를 보면, <그림 6-43>과 같이 센서 번호 33, 34번 지점들은 24일간 전체적으로 낮은 온도 분포를 보였다. 온도 센서 12 및 18번 주변에서는 주위와 다른 속도로 온도가 낮아지는 구간이 관찰되었다. 이 지점들은 누수 또는 투수 등의 이유로 미약한 온도 이상대가 형성된 것으로 해석되었다.



<그림 6-42> 시추공 S1, S2 에서 온도 측정결과

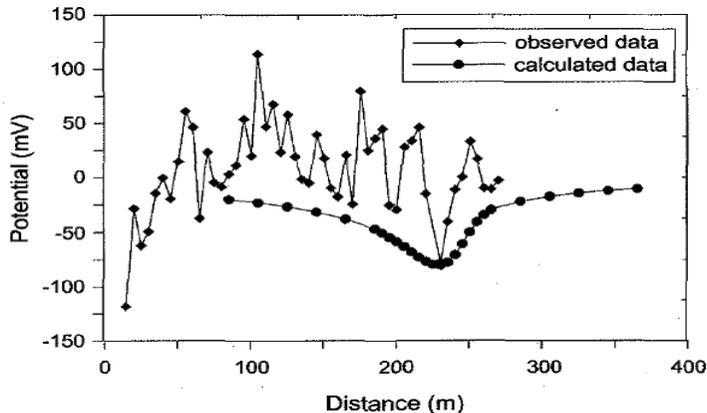


<그림 6-43> 댐체 하부에서의 온도 모니터링 결과

결과적으로 전기비저항 탐사결과의 저비저항대는 온도 모니터링 결과의 온도가 급격히 낮아지는 구간과 일치하는 것으로 나타났다. 이러한 구간들은 누수 취약 구간으로 예상되었다.

제8절 저수지 누수탐지를 위한 자연전위 탐사 적용사례들

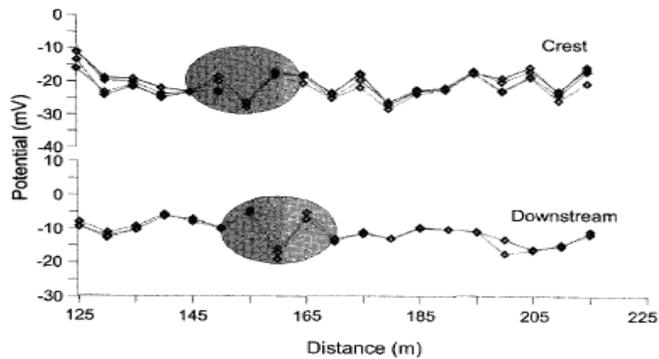
다음은 저수지 누수탐지를 위한 자연전위 탐사의 적용사례들을 소개한다. 먼저, 제체의 양안 접합부를 통한 누수가 의심되는 사례이다. 개략적인 누수 구간 파악을 위해 제체마루와 사면에 대해 자연전위 탐사가 적용되었다. <그림 6-44>와 같이 제체 우측 접합부를 따라 나타나는 강한 음의 이상구간이 하부로 갈수록 증가되는 결과로서 누수 유로가 추정되었는데, 이는 기반암과 제체의 경계에서 수평적인 물성의 변화에 의한 누수 영향으로 해석되었다.



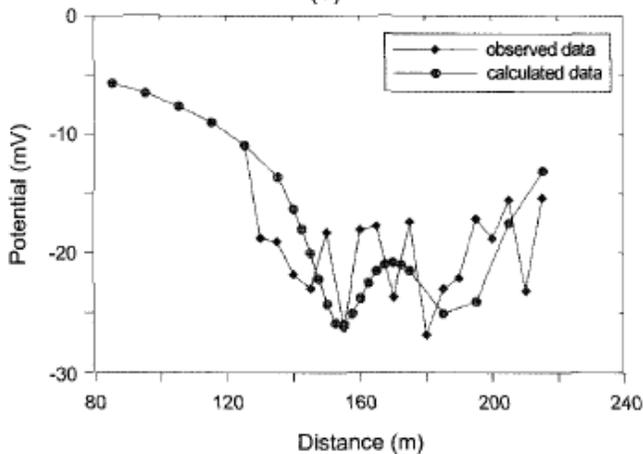
<그림 6-44> 양안 접합부를 통한 누수 유형에서의 자연전위 탐사결과

한편, 저수지 제체 외측사면에서 파이핑 형태의 누수가 발생된 사례가 있다. <그림 6-45>와 같이 제체마루에서 실시한 자연전위 탐사결과 155 m 지점을 전후로 음의 이상이 나타났다. 특히, 하류사면부에서 160 m 지점으로 연결되어 음의 이상이 나타났는데, 즉, 누수 유로

가 제체마루의 155 m 지점과 하류사면부 160 m 지점을 통과한 사선 방향으로 형성되었음이 예측되었으며, 제체 내의 수직적 물성 변화가 유동전위 발생에 주도적인 파이핑 형태의 누수로 발생된 것으로 해석되었다. <그림 6-46>은 전형적인 파이핑 유형의 누수가 있는 경우의 자연전위 탐사결과를 나타낸 것이다.



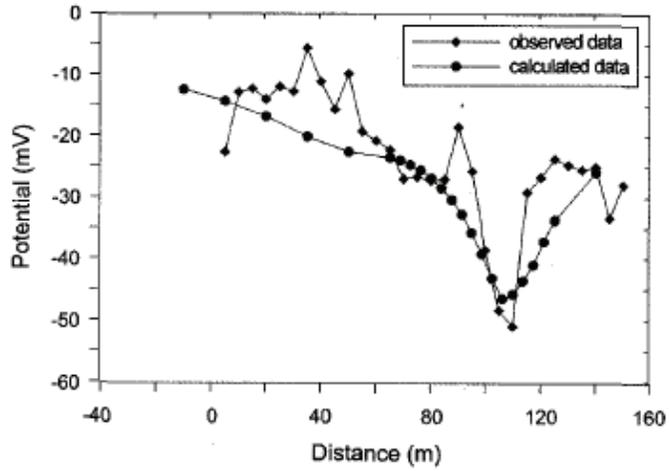
<그림 6-45> 제체마루와 하류사면의 음의 이상대 위치



<그림 6-46> 파이핑 형태의 누수 유형에서의 자연전위 탐사결과

복합적 요인에 의한 누수 유형으로는 저수지 전체 구간에서 사면의 활동과괴와 다짐불량에 의한 구조물 지체 변위가 복합적으로 나타난 사례가 있다. 자연전위 탐사결과, <그림 6-47>과 같이 제체 우측부의

수평거리 60~120 m 구간에서 제체마루로부터 하부까지 전반적인 음의 이상대가 나타났는데, 이 구간을 통한 누수 유로가 형성된 것으로 해석되었다.



<그림 6-47> 복합적 요인에 의한 누수 유형에서의 자연전위 탐사결과

제7장 결론 및 향후전망

지금까지 수리시설물 정밀안전진단 분야에서 적용된 물리탐사는 전기비저항 탐사가 주를 이루어 왔다. 그러나 수리시설물의 규모에 따른 표준화된 현장 탐사 방법이 전무하였고, 자료 해석단계에서도 단순히 전기비저항의 크기만으로 누수지점을 추정하는 제한적인 역할을 담당해왔다.

본 연구에서는 그동안 수리시설물 중 제체를 대상으로 사용되었던 물리탐사의 적용방법을 고찰하였으며, 한국농어촌공사가 관리하고 있는 수리시설물에 대한 정밀안전진단 물리탐사 수행 현황을 분석하였다. 분석 결과 물리탐사의 적용추세가 점차적으로 확대되고 있음에 따라, 수리시설물의 규모에 따른 물리탐사 방법 표준화 정립의 필요성이 보다 증대되고 있을 것으로 판단된다.

다음으로 정밀안전진단 지구의 물리탐사 수행 체계에 대하여 분석하였다. 농업기반시설 정밀안전진단 지구의 초기 탐사방법 (필수사항)으로 전기비저항 탐사를 제시하였으며, 2차 탐사방법 (선택사항)으로 자연전위 탐사와 탄성과 탐사를 제시하였다. 특히, 탄성과 탐사는 굴절과 탐사와 표면과 탐사를 제시하여 제체 특성에 따라 선택적으로 사용할 수 있는 방안을 모색하였다. 제시한 탐사방법들의 이론적 고찰을 통해 제체를 대상으로 적용할 수 있는 근거를 확보하였으며, 각각의 탐사방법들이 유용하게 사용될 수 있음을 확인하였다.

또한 기존의 농업기반시설 정밀안전진단의 시행요령과 지침에 대한 분석을 토대로 각각의 물리탐사의 개선방향을 제시하였다. 전기비저항 탐사의 경우 제체규모에 따른 측선 배치 및 전극 간격의 제시를 통해 제체 높이에 따른 탐사 심도를 사용자로 하여금 결정할 수 있도록 체계를 정립하였으며, 자료처리는 3차원 지형효과에 대한 왜곡현상을 최소화할 수 있는 해석 체계를 마련하였다. 자연전위 탐사는 제체의 특성에 따라 절대 전위법과 상대 전위법을 선택할 수 있도록 하였으며, 자료의 신뢰도를 확보하기 위해 비분극 전극의 필요성을 강조하였다. 자료처리는 시간에 따라 쉽게 변화하는 자연전위의 특성을 고려하여 시간적 변화를 분석할 수 있는 해석 체계를 마련하였다. 탄성과 탐사

는 굴절과 탐사와 표면과 탐사로 나누어 현장 운영방법 및 자료처리 순서에 따라 해석의 표준안을 제시하여 현장 적용성이 높아질 수 있도록 하였다.

마지막으로 제체를 대상으로 그동안의 국내외 물리탐사 적용 대표사례를 소개하였다. 전기비저항 탐사가 적용된 두 사례를 중심으로 전기비저항 탐사와 자연전위 탐사가 동시에 적용되어 분석된 두 사례를 소개하였다. 각각의 사례들은 제체의 일반적인 문제점들에 대해 구체적인 정보를 제공하는 역할을 담당하였다. 또한 전기비저항 탐사와 시추공영상의 융합 분석사례를 바탕으로 전기비저항 탐사결과를 특정 지점의 시추영상과 비교함으로써 탐사자료의 의미를 재해석하였다. 전기비저항 탐사와 지반조사 자료의 복합 해석사례에서는 전기비저항 탐사결과와 표준관입시험의 N값의 상관성을 분석하여 누수에 의해 영향을 받을 수 있는 제체의 강도를 간접적으로 추정하였다. 또한 저수지의 누수탐지를 위해 자연전위 탐사가 적용된 사례를 통해 자연전위의 이상대가 누수 취약 구간을 의미하는 유동전위에 의한 영향임을 확인할 수 있었다.

종합적으로 본 연구결과를 통해 저수지 및 방조제 규모에 따른 표준화된 방법으로 정밀안전진단 조사자로 하여금 제체의 상태에 따른 물리탐사의 구체적인 방법을 제시하였을 뿐만 아니라 정밀안전진단의 현장조사 부분에서 물리탐사의 역할을 강조하였다. 또한 1회성 조사의 단점을 극복하기 위해 3차원 모델링 방법을 도입하여 축조당시의 상태와 조사 시점의 상태를 비교할 수 있도록 하였으며, 낮은 등급의 시설물에 대해 2차 탐사의 필요성을 제시하였다. 향후 본 연구결과에서 제시한 방법에 의한 결과들이 축적되면, 전기비저항 감소율을 이용하여 시설물의 상태평가 지수에도 반영될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 지금까지 제시한 물리탐사 방법이 각 수리시설물 특성에 맞게 잘 반영되는 경우, 보다 효율적인 수리시설물 정밀안전진단이 가능할 것으로 기대된다.

참고문헌

- 권오성, 2007, 전남 완도군 평일도 척치댐의 안전점검을 위한 전기비저항 탐사, 한국교원대학교 교육대학원 석사학위 논문, pp.27-38
- 김기영 외, 2014, 지구물리탐사 개론, 시그마프레스, pp.188-216
- 김지수 외, 2009, 물리탐사의활용 : 원리 및 사례 중심으로, (주)시그마프레스, pp.416-441
- 김창호, 2008, 수리시설물의 누수탐사를 위한 지구물리학적 연구, 지구, 안동대학교 대학원 석사학위 논문, pp.22-32
- 손호웅, 김지수, 송영수, 윤왕중, 김이수, 서만철, 김기영, 조인기, 김학수, 2000, 지반환경 물리탐사. 시그마프레스.
- 송성호, 권병두, 양준모, 정승환, 2002, 수리시설물 누수탐지에 대한 자연 전위법 적용 및 수치 해석, 지구물리와 물리탐사 Vol.5 No.4, pp.257-261
- 송영수 외, 2011, 물리 탐사 길라잡이, 한국지구물리·물리탐사학회, pp.267-280
- 신은철 외, 2012, 소규모 농업용 저수지의 안전관리 개선 방향, 한국토목섬유학회논문집 제11권 3호 pp.53-58
- 오석훈, 서백수, 2008, 전기비저항 물성 분석을 통한 제체의 안정성 검토, 지질공학 Vol.18 No.3, pp.245-255
- 오석훈, 서백수, 김중열, 2010, 전기비저항 물성 분석을 통한 제체의 안정성 검토, 한국지구과학회 Vol.31 No.6, pp.563-572

홍성인, 2013, 원격탐사, 전기비저항탐사, 전기전도도탐사 및 시추공영상의 융합적 분석을 통한 서산지역 방조제의 누수구역 판별, 충남대학교 대학원 석사학위 논문, pp.24-36

Davis, J.A., James, R.O. and Leekie, J. 1978. Surface ionization and complexation at the oxide/water interface: *Journal of Colloid and Interface Science*, 63, 480-499.

Gamal Z. Abdel Aal, 2004, Geophysical Investigation of seepage from an earth fill dam, Washington county, MO.

Guichet, X., Jouniaux, L. and Catel, N. 2006. Modification of streaming potential by precipitation of calcite in a sand-water system: *Geophysical Journal International*, 166, 445-460.

Ishido, T. and Mizutani, H. 1981. Experimental and theoretical basis of electrokinetic phenomena in rock-water systems and its application to geophysics: *Journal of Geophysical Research*, 86(B3), 1763-1775.

Morgan, F.D., Williams, E.R. and Madden, T.R., 1989, Streaming potential properties of Westerly granite with applications: *Journal of Geophysical Research*, 94, 12449-12461.

Nazarian, S., Stokoe, K.H. and Hudson, W.R., 1983, Use of spectral analysis of surface waves method for determination of moduli and thicknesses of pavement systems: *Transport. Res. Record*, 930, 38-45.

Park, C.B., Miller, R.D. and Xia, J., 1999, Multichannel analysis of surface waves: *Geophysics*, 64, 800-808.

- Qingyun Di, 2010, Determining areas of leakage in the Da Ye Dam using multi-electrode resistivity, Bull Eng Geol Environ 69 : pp.105–109
- Reynolds J.M., 1997, An introduction to applied and environmental geophysics. Wiley.
- Rix, G.J. and Leipski, E.A., 1991, Accuracy and resolution of surface wave inversion, in Geotechnical special publication no. 29, Recent advances in instrumentation, data acquisition and testing in soil dynamics, edited by S. K. Bhatia, S. K. and G. W. Blaney, American Society of Civil Engineers, 17–32.
- Saito, H., 2001, Seismic traveltime tomography for shallow subsurface exploration. Ph.D. thesis, Hokkaido University, 126.
- Sanchez–Salinero, I., Roesset, J.M., Shao, K.Y., Stokoe II, K.H. and Rix, G.J., 1987, Analytical evaluation of variables affecting surface wave testing of pavements: Transportation Research Record No. 1136, 86–95.
- Stokeo II, K.H., Wright, S.G., Bay, J.A. and Rosset, J.M., 1994, Characterization of geotechnical sites by SASW method, Geophysical characteristics of sites: International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering. Technical 9 Committee 10 for XIII ICSMFE, International Science Publishers, New York, 15–25.