

2019



Office



Research



Farming



International

농업기반시설 정밀안전진단 평가기준 및 기법개선 연구(최종) - 3과제 -

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



**수리시설물 안전진단을 위한
물리탐사 실무지침서 개발
- 3과제 -**

Ministry of Agriculture, Plant and Fisheries
Quarantine and Inspection Agency

< 목 차 >

제1장 연구 개요	1
제1절 연구 배경	3
제2절 연구 범위	3
제2장 수리시설물 물리탐사 적용방법	5
제1절 체체 상태에 대한 목적별 물리탐사 적용방법	7
제2절 수리시설물 정밀안전진단 물리탐사 수행 현황 분석	8
제3장 정밀안전진단 지구 물리탐사 수행 체계	11
제1절 저수지 물리탐사 수행 체계	13
제2절 방조제 물리탐사 수행 체계	14
제4장 물리탐사 이론	17
제1절 전기비저항 탐사	19
제2절 자연전위 탐사	25
제3절 탄성과 탐사	28
제5장 물리탐사 지침 개선방향	39
제1절 전기비저항 탐사 개선방향	41
제2절 자연전위 탐사 개선방향	63
제3절 탄성과 탐사 개선방향	67

제6장 제체에서의 물리탐사 적용 대표사례	77
제1절 전기비저항 탐사 적용사례 1	79
제2절 전기비저항 탐사 적용사례 2	82
제3절 전기비저항 탐사 및 자연전위 탐사 분석사례 1	84
제4절 전기비저항 탐사 및 자연전위 탐사 분석사례 2	96
제5절 전기비저항 탐사와 시추공영상의 융합 분석사례	99
제6절 전기비저항 탐사와 지반조사 자료의 복합 분석사례	103
제7절 전기비저항 탐사와 온도 모니터링 자료의 복합 해석사례 ..	109
제8절 저수지 누수탐지를 위한 자연전위 탐사 적용사례들	115
제7장 결론 및 향후전망	119
※ 참고문헌	123

< 표 목차 >

<표 2.1> 체체 상태에 대한 목적별 물리탐사 적용방법	8
<표 2.2> 최근 3년간 정밀안전진단 지구수 및 물리탐사 적용 지구수	9
<표 4.1> 전기비저항 탐사 배열법 및 거리 계수 공식	21
<표 4.2> 대표적인 암석의 P파 속도 (m/s)	32
<표 5.1> 체체 높이에 따른 전극 간격과 N값에 따른 최대 탐사 심도	43
<표 5.2> 굴절과 탐사변수의 예	68
<표 6.1> Line 1의 탐사변수	80
<표 6.2> Line 2의 탐사변수	80
<표 6.3> 그라우팅 전후 Line 1의 자연전위 탐사변수	85
<표 6.4> 그라우팅 전후 Line 2의 자연전위 탐사변수	85
<표 6.5> 그라우팅 전후 Line 3의 자연전위 탐사변수	85
<표 6.6> 그라우팅 전 Line 1의 전기비저항 탐사변수	86
<표 6.7> 그라우팅 전 Line 2의 전기비저항 탐사변수	86
<표 6.8> 그라우팅 전 Line 3의 전기비저항 탐사변수	87
<표 6.9> 그라우팅 후 Line 1의 전기비저항 탐사변수	87
<표 6.10> 그라우팅 후 Line 2의 전기비저항 탐사변수	88
<표 6.11> 그라우팅 후 Line 3의 전기비저항 탐사변수	88
<표 6.12> 각 측선들의 전기비저항 탐사변수	96
<표 6.13> Line 1의 전기비저항 탐사변수	99
<표 6.14> Line 2의 전기비저항 탐사변수	99
<표 6.15> DC-1 측선의 전기비저항 탐사변수	104
<표 6.16> DC-2 측선의 전기비저항 탐사변수	104
<표 6.17> DC-3 측선의 전기비저항 탐사변수	105
<표 6.18> DC-4 측선의 전기비저항 탐사변수	105
<표 6.19> Dpline-1 측선의 전기비저항 탐사변수	110
<표 6.20> Dpline-2 측선의 전기비저항 탐사변수	110
<표 6.21> Dpline-3 측선의 전기비저항 탐사변수	111
<표 6.22> Dpline-4 측선의 전기비저항 탐사변수	111

< 그림 목차 >

<그림 2.1> 최근 3년간 정밀안전진단 지구별 물리탐사 적용 지구 변화 추이	9
<그림 3.1> 저수지 물리탐사 수행 체계 모식도	13
<그림 3.2> 방조제 물리탐사 수행 체계 모식도	15
<그림 4.1> 두 지점 사이의 전위차 측정 모식도	20
<그림 4.2> 웨너 배열의 종류	22
<그림 4.3> 슐림버저 배열	23
<그림 4.4> 단극 배열	23
<그림 4.5> 쌍극자 배열	24
<그림 4.6> 변형된 단극 배열	24
<그림 4.7> 자연전위 발생 모식도	26
<그림 4.8> 임계굴절과 선두파	29
<그림 4.9> 여러가지 파들의 파선 경로	30
<그림 4.10> 굴절과 탐사 모식도	31
<그림 5.1> 저수지에서 전기비저항 탐사측선 모식도	42
<그림 5.2> 체체의 3차원 요소분할 예시	42
<그림 5.3> 전기비저항 탐사 순서 모식도	44
<그림 5.4> 모델변수 입력 예시	45
<그림 5.5> 재질별 전기비저항 재설정 단계	46
<그림 5.6> 정모델링 측선 설정단계	47
<그림 5.7> 모델링 자료에 의한 역산결과 대비 현장자료 역산결과 비교 사례	48
<그림 5.8> 중심점토가 있는 경우 담수와 체체의 요소분할 (제고 9 m, 저수위 8 m)	48
<그림 5.9> 중심점토가 있는 경우 3차원 효과를 가정한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과 (제고 9 m, 저수위 8 m)	49
<그림 5.10> 3차원 효과를 배제한 수평 무한 지층에 대한 2차원 전기비저항 탐사결과	49
<그림 5.11> 중심점토가 있는 경우 담수와 체체의 요소분할 (제고 9 m, 저수위 7 m)	49
<그림 5.12> 중심점토가 있는 경우 3차원 효과를 가정한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과 (제고 9 m, 저수위 7 m)	50

<그림 5.13> 중심점토가 있는 경우 담수와 제체의 요소분할 (제고 9 m, 저수위 6 m) -----	50
<그림 5.14> 중심점토가 있는 경우 3차원 효과를 가정한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과 (제고 9 m, 저수위 6 m) -----	50
<그림 5.15> 중심점토가 있는 경우 담수와 제체의 요소분할 (제고 9 m, 저수위 5 m) -----	51
<그림 5.16> 중심점토가 있는 경우 3차원 효과를 가정한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과 (제고 9 m, 저수위 5 m) -----	51
<그림 5.17> 중심점토가 있는 경우 담수와 제체의 요소분할 (제고 9 m, 저수위 4 m) -----	51
<그림 5.18> 중심점토가 있는 경우 3차원 효과를 가정한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과 (제고 9 m, 저수위 4 m) -----	52
<그림 5.19> 중심점토가 있는 경우 담수와 제체의 요소분할 (제고 9 m, 저수위 3 m) -----	52
<그림 5.20> 중심점토가 있는 경우 3차원 효과를 가정한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과 (제고 9 m, 저수위 3 m) -----	52
<그림 5.21> 중심점토가 있는 경우 담수와 제체의 요소분할 (제고 9 m, 저수위 2 m) -----	53
<그림 5.22> 중심점토가 있는 경우 3차원 효과를 가정한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과 (제고 9 m, 저수위 2 m) -----	53
<그림 5.23> 중심점토가 있는 경우 담수와 제체의 요소분할 (제고 9 m, 저수위 1 m) -----	53
<그림 5.24> 중심점토가 있는 경우 3차원 효과를 가정한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과 (제고 9 m, 저수위 1 m) -----	54
<그림 5.25> 중심점토가 있는 경우 담수와 제체의 요소분할 (제고 9 m, 저수위 0 m) -----	54
<그림 5.26> 중심점토가 있는 경우 3차원 효과를 가정한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과 (제고 9 m, 저수위 0 m) -----	54
<그림 5.27> 중심점토가 있는 경우 저수위 8 m 대비 7 m에서의 전기비저항 변화비---	55
<그림 5.28> 중심점토가 있는 경우 저수위 8 m 대비 6 m에서의 전기비저항 변화비---	55
<그림 5.29> 중심점토가 있는 경우 저수위 8 m 대비 5 m에서의 전기비저항 변화비---	56
<그림 5.30> 중심점토가 있는 경우 저수위 8 m 대비 4 m에서의 전기비저항 변화비---	56
<그림 5.31> 중심점토가 있는 경우 저수위 8 m 대비 3 m에서의 전기비저항 변화비---	56

<그림 5.32> 중심점토가 있는 경우 저수위 8 m 대비 2 m에서의 전기비저항 변화비---	57
<그림 5.33> 중심점토가 있는 경우 저수위 8 m 대비 1 m에서의 전기비저항 변화비---	57
<그림 5.34> 중심점토가 있는 경우 저수위 8 m 대비 0 m에서의 전기비저항 변화비---	57
<그림 5.35> 중심점토가 없는 경우 담수와 제체의 요소분할	
(제고 9 m, 저수위 8 m) -----	58
<그림 5.36> 중심점토가 없는 경우 3차원 효과를 가정한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과 (제고 9 m, 저수위 8 m) -----	58
<그림 5.37> 중심점토가 없는 경우 담수와 제체의 요소분할	
(제고 9 m, 저수위 6 m) -----	59
<그림 5.38> 중심점토가 없는 경우 3차원 효과를 가정한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과 (제고 9 m, 저수위 6 m) -----	59
<그림 5.39> 중심점토가 없는 경우 담수와 제체의 요소분할	
(제고 9 m, 저수위 4 m) -----	59
<그림 5.40> 중심점토가 없는 경우 3차원 효과를 가정한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과 (제고 9 m, 저수위 4 m) -----	60
<그림 5.41> 중심점토가 없는 경우 담수와 제체의 요소분할	
(제고 9 m, 저수위 2 m) -----	60
<그림 5.42> 중심점토가 없는 경우 3차원 효과를 가정한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과 (제고 9 m, 저수위 2 m) -----	60
<그림 5.43> 중심점토가 없는 경우 담수와 제체의 요소분할	
(제고 9 m, 저수위 0 m) -----	61
<그림 5.44> 중심점토가 없는 경우 3차원 효과를 가정한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과 (제고 9 m, 저수위 0 m) -----	61
<그림 5.45> 중심점토가 없는 경우 저수위 8 m 대비 6 m에서의 전기비저항 변화비---	61
<그림 5.46> 중심점토가 없는 경우 저수위 8 m 대비 4 m에서의 전기비저항 변화비---	62
<그림 5.47> 중심점토가 없는 경우 저수위 8 m 대비 2 m에서의 전기비저항 변화비---	62
<그림 5.48> 중심점토가 없는 경우 저수위 8 m 대비 0 m에서의 전기비저항 변화비---	62
<그림 5.49> 절대 전위법 (기준점법) 모식도 -----	63
<그림 5.50> 상대 전위법 (차분법) 모식도 -----	64
<그림 5.51> 단위 전극 간격과 전체 전극 간격 사이의 전위차 관계 -----	64
<그림 5.52> 자연전위 변화량 산정 예시 -----	65
<그림 5.53> 자연전위 변화량 산정 예시 -----	66

<그림 5.54> 굴절과 탄성파탐사 자료처리 과정	68
<그림 5.55> 초동 선택 예제	69
<그림 5.56> 관측 주시와 모델 주시의 비교	70
<그림 5.57> 10개의 층을 가정한 초기모델	70
<그림 5.58> 체체 피복상태에 따른 각각의 수진기 방식을 이용한 탐사전경	71
<그림 5.59> 지오폰 및 송신기 위치 모식도	72
<그림 5.60> 표면과 탐사 자료처리 순서도	73
<그림 5.61> 자료변환 단계	73
<그림 5.62> 지오메트리 작성 단계	74
<그림 5.63> 측정 좌표 생성결과	75
<그림 5.64> 분산분석 예시	75
<그림 5.65> 특정 지점에 대한 역산결과 예시	76
<그림 6.1> 댐의 상류사면 좌안부 전경	79
<그림 6.2> 척치댐의 평면도 및 측선위치도	79
<그림 6.3> Line 1의 전기비저항 탐사결과(댐마루)	81
<그림 6.4> Line 2의 전기비저항 탐사결과(하류사면 소단부)	81
<그림 6.5> 대야댐과 전기비저항 탐사 측선 모식도	82
<그림 6.6> 체체마루 상부 측선의 전기비저항 탐사결과	83
<그림 6.7> 여수로 상부 측선의 전기비저항 탐사결과	84
<그림 6.8> 후평저수지 탐사 측선 모식도	84
<그림 6.9> 그라우팅 이전 자연전위 탐사결과 (Line 1)	89
<그림 6.10> 그라우팅 이전 자연전위 탐사결과 (Line 2)	89
<그림 6.11> 그라우팅 이전 자연전위 탐사결과 (Line 3)	90
<그림 6.12> 그라우팅 이후 자연전위 탐사결과 (Line 1)	91
<그림 6.13> 그라우팅 이후 자연전위 탐사결과 (Line 2)	91
<그림 6.14> 그라우팅 이후 자연전위 탐사결과 (Line-3)	91
<그림 6.15> 그라우팅 이전의 전기비저항 탐사결과 (Line 1)	92
<그림 6.16> 그라우팅 이전의 전기비저항 탐사결과 (Line 2)	93
<그림 6.17> 그라우팅 이전의 전기비저항 탐사결과 (Line 3)	93
<그림 6.18> 그라우팅 이후의 전기비저항 탐사결과 (Line 1)	94
<그림 6.19> 그라우팅 이후의 전기비저항 탐사결과 (Line 2)	94
<그림 6.20> 그라우팅 이후의 전기비저항 탐사결과 (Line 3)	95
<그림 6.21> 전기비저항 탐사와 자연전위 탐사 측선 모식도	96

<그림 6.22> 각 측선에 따른 2차원 전기비저항 탐사 역산 결과	97
<그림 6.23> 자연전위 탐사 측정 지반의 풍화 지역	98
<그림 6.24> 자연전위 탐사 결과 평면도	98
<그림 6.25> 2011년과 2012년의 전기비저항 탐사 단면도 (No.6 ~ 25)	100
<그림 6.26> 2011년과 2012년의 전기비저항 탐사 단면도 (No.25 ~ 45)	100
<그림 6.27> 2011년과 2012년의 전기비저항 탐사 단면도 (No.45 ~ 65)	101
<그림 6.28> No.8 (BH-1) 시추공영상 촬영결과	101
<그림 6.29> No.37 (BH-2) 시추공영상 촬영결과	102
<그림 6.30> No.43 (BH-3) 시추공영상 촬영결과	102
<그림 6.31> 탐사 대상 댐의 및 시추공 위치 모식도	103
<그림 6.32> 전기비저항 탐사 2차원 역산결과 (DC-1)	105
<그림 6.33> 전기비저항 탐사 2차원 역산결과 (DC-2)	106
<그림 6.34> 전기비저항 탐사 2차원 역산 결과와 시추공의 위치	107
<그림 6.35> BH-1 시추공 위치에 해당되는 전기비저항 분포와 N값	107
<그림 6.36> BH-2 시추공 위치에 해당되는 전기비저항 분포와 N값	108
<그림 6.37> BH-3 시추공 위치에 해당되는 전기비저항 분포와 N값	108
<그림 6.38> 전기비저항 탐사 측선 모식도	109
<그림 6.39> 각 측선에서 측정된 전기비저항 탐사 2차원 역산결과	112
<그림 6.40> Dpline-4 측선의 2차원 역산결과	112
<그림 6.41> 취수탑에서 온도 측정결과	113
<그림 6.42> 시추공 S1, S2 에서 온도 측정결과	114
<그림 6.43> 댐체 하부에서의 온도 모니터링 결과	114
<그림 6.44> 양안 접합부를 통한 누수 유형에서의 자연전위 탐사결과	115
<그림 6.45> 제체마루와 하류사면의 음의 이상대 위치	116
<그림 6.46> 파이핑 형태의 누수 유형에서의 자연전위 탐사결과	116
<그림 6.47> 복합적 요인에 의한 누수 유형에서의 자연전위 탐사결과	117

제 1 장

연구 개요

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, 탄성과 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 탄성과 탐사 방법과 해석 기준 등에 대한 표준안을 제시하고자 한다. 또한 제체를 대상으로 물리탐사 방법에 대한 타당성 검토와 국내외 사례들을 정리하였다. 사례로, 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.

제 2 장

수리시설물 물리탐사 적용방법

Ministry of Plant and Fisheries
Quarantine and Inspection Agency

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.

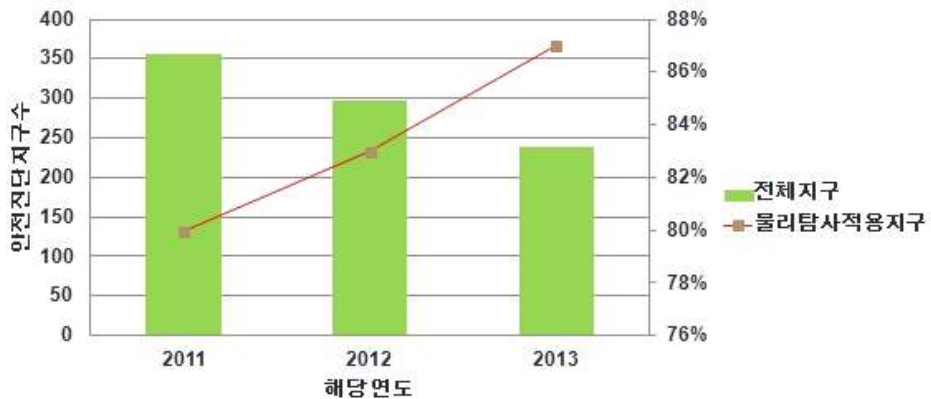
제2절 수리시설물 정밀안전진단 물리탐사 수행 현황 분석

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. 탐사축선은 저수지의 경우 지구당 각각 제체 마루부 1 축선과 소단 1 축선이 적용되었으며, 방조제의 경우 제체 마루부에서 1 축선이 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

제 3 장

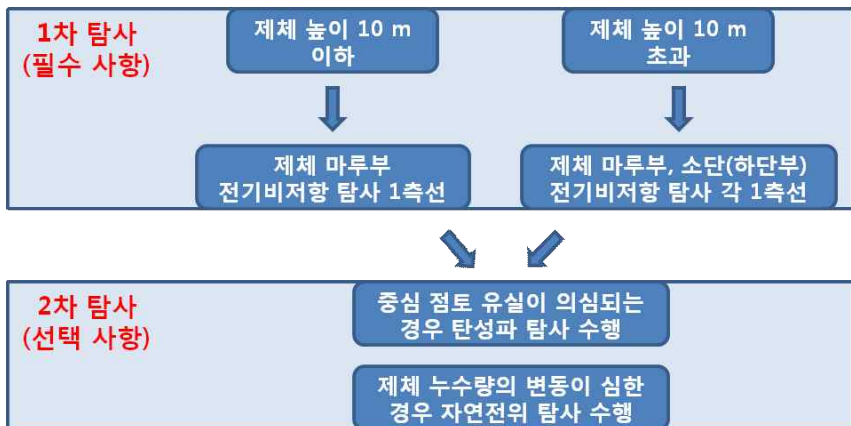
정밀안전진단 지구 물리탐사 수행 체계

Ministry of Agriculture, Plant and Fisheries
Quarantine and Inspection Agency

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 측선설정 등의 문제점을 해소하고자 하였다. 저수지와 마찬가지로 1차 탐사는 전기비저항 탐사로 일원화하였으며, 제체 높이에 따른 측선의 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 측선을 수행하도록 하며, 5 m 초과인 지구는 각각 제체 마루 1 측선, 소단 또는 하단부 1 측선을 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 측선설정이 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

제 4 장

물리탐사 이론

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.

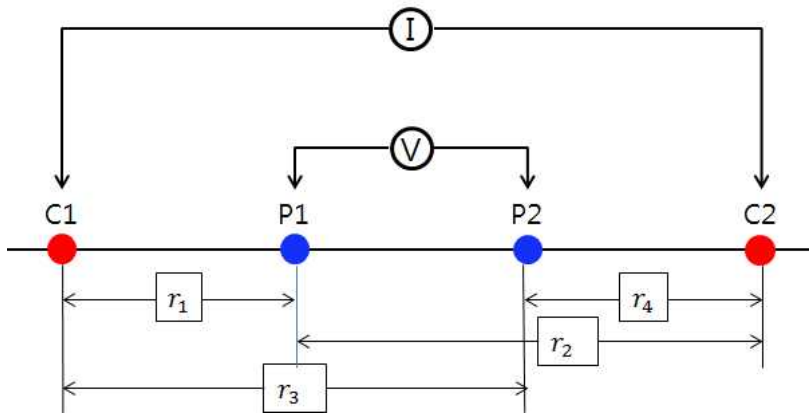
전기비저항에 대한 물리적인 특성은 다음과 같다. 저항 (resistance)은 매질이 직류 전류의 흐름을 방해하는 것을 의미한다. 여러 가지 매질은 각기 다른 저항을 가지고 있는데, 이는 전기적 특성 뿐만 아니라 기하학적 특성에 의해서도 달라진다. 길이가 l 이고, 단면적이 A 인 저항기에서 전류는 단면적이 넓을수록, 길이가 짧을수록 더 잘 흐른다. 전류가 잘 흐른다는 것은 저항이 낮다는 것을 의미하게 된다. 그러므로 식(4.1)과 같이 저항기의 저항 (R)은 단면적과 길이, 저

항기의 고유성질인 전기비저항 (electrical resistivity) ρ 에 좌우된다.

$$R = \rho \frac{l}{A}, \quad \text{or} \quad \rho = R \frac{A}{l}$$

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.

$$\Delta V = V_{P_1} - V_{P_2} = \left(\frac{\rho i}{2\pi r_1} - \frac{\rho i}{2\pi r_2} \right) - \left(\frac{\rho i}{2\pi r_3} - \frac{\rho i}{2\pi r_4} \right)$$

식(4.2)

즉,

$$\Delta V = \frac{\rho i}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right)$$

식(4.3)

이 되고, 위 식을 전기비저항에 대한 식(4.4)와 같이 바꾸면,

$$\rho = G \cdot \frac{V}{i}$$

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)	$2\pi a$
슬럼버저 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), 슬럼버저 (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 고정된 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.

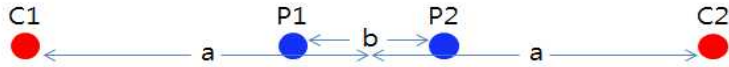
전극배열의 중앙점에 대해 전류 및 전극간격을 대칭적으로 전개하는 배열로서 웨너 배열 외에 슬럼버져 배열이 있다. 그러나 전위전극의 간격 (b)이 전류전극의 간격 (2a)에 비해 훨씬 좁다. 전극간격은 통상 $2a > 5b$ 를 유지하도록 선택한다. 이러한 기하학적 배열 때문에 전류전극 간격이 수 배 이상 증가하면 탐사기의 민감도 (sensitivity)가 떨어진다. 그러면 전위전극 간격을 그 다음 큰 값으로 증가시킨다. 예를 들면 앞의 예에서 $b=10$ m이면, 그 다음은 $b=14.7$ m로 한다. 이 때 전류전극 간격 a는 앞선 측정시 사용된 최대 a에서 두 단계 낮은 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 슬럼버져 배열을 나타낸 것이다.

(α 배열)

(β 배열)

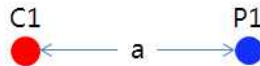
(γ 배열)

<그림 4.2> 웨너 배열의 종류



<그림 4.3> 슬림버저 배열

단극배열은 일반적으로 사용하는 웨너, 쌍극자, 슬림버저 배열과 달리, 전류전극과 전위전극이 각각 하나씩 존재한다. 단극배열을 근사화하기 위해서는 C2, P2를 C1, P1 거리의 20배 이상의 거리에 위치해야한다. 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.



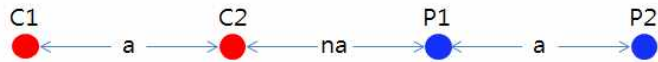
<그림 4.4> 단극 배열

<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.

슬림버저 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

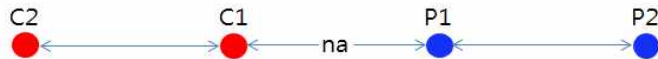
전기비저항 정보를 얻을 수 있다. 물론 슬럼버저 및 웨너 배열을 이용한 수직탐사를 여러 지점에서 수행함으로써 2차원적인 전기비저항 분포를 파악할 수 있으나 이런 경우 쌍극자배열 탐사에 비해 탐사기간과 비용이 많이 소요되며, 더욱이 각 측점 사이에 존재하는 국부적인 이상대 (local anomaly)의 탐지는 사실상 어려워진다.

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 가까울 정도의 높은 전위측정이 가능하다.



<그림 4.6> 변형된 단극 배열

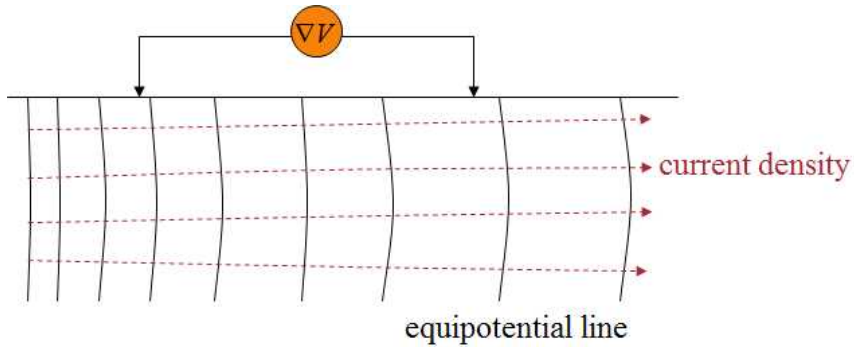
제2절 자연전위 탐사

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.

$$J = \sigma_r \nabla V - C_s \sigma_r \nabla P$$

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).

$$C = \frac{\nabla V}{\nabla P} = \frac{\varepsilon \zeta}{\eta \sigma_f}$$

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.

$$\nabla \cdot J = \nabla \cdot (\sigma_r \nabla V) - \nabla \cdot (C \sigma_r \nabla P) = 0$$

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.

$$\nabla \cdot (\sigma_r \nabla V) = \sum_k I_k \delta(r - r_{s_k})$$

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 수신기로 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.

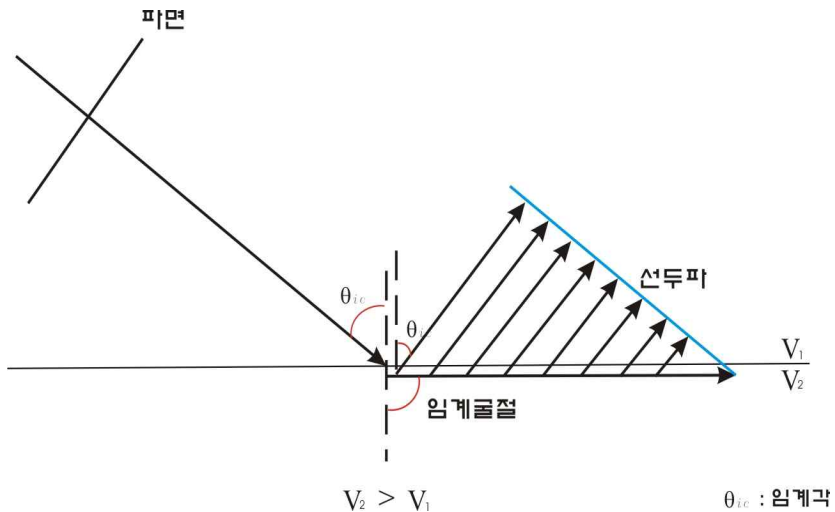
굴절파 탐사는 다음의 식(4.10)과 같은 매질의 경계면에서 탄성과의 굴절 특성을 나타내는 스넬의 법칙을 따른다. 이 법칙은 지하구조를 유추하기 위한 반사법 및 굴절파 탐사에서 다른 식을 유추하는 기본적인 관계식이다.

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{V_1}{V_2}$$

(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 증가

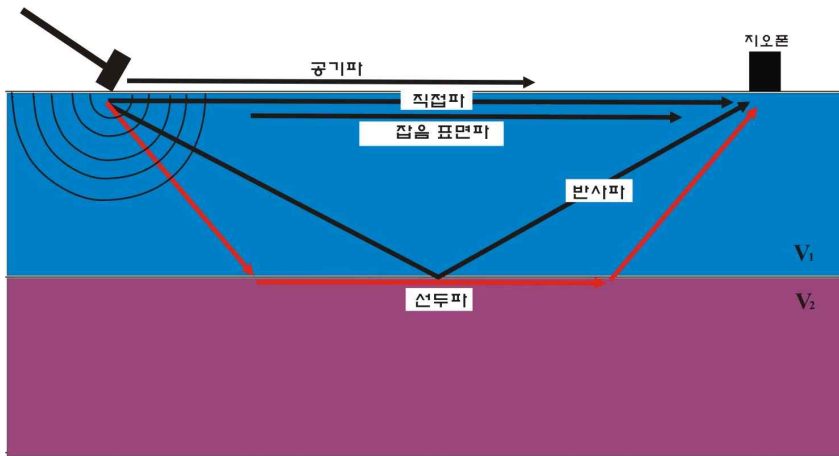
하여 $\theta_2 = 90^\circ$ 가 되면 $\sin\theta_1 = V_1/V_2$ 이 된다. 이때 파선이 두 매질의 경계면과 평행하게 되는데, 이때를 임계굴절 (critical refraction) 이라고 하며, 굴절각이 90° 일 때의 입사각을 임계각 (critical angle) 이라고 한다. 입사각이 임계각보다 더 크게 된다면 굴절은 발생하지 않고 전반사가 일어나게 된다. 굴절과 탐사는 임계각과 임계굴절을 이용하는 방법이다. 임계굴절된 파선은 V_2 의 속도로 경계면에 파동을 만들면서 진행하며, 이러한 파동은 다시 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

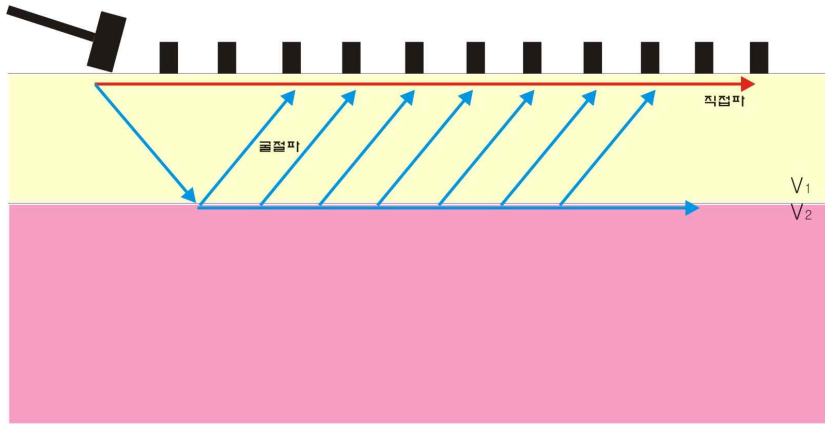
<그림 4.9>는 지표면의 어느 한 지점에서 에너지를 발생시켰을 때 나타나는 여러가지 파와 그 파들의 파선 경로를 나타낸 것이다. 지표 위 한 지점에서 타격했을 때, 우선 공기 중을 전파하는 공기파 (air wave)와 지층의 최상부를 따라 전파하는 직접파가 발생한다. 또한 타격 시 땅의 진동으로 인한 표면 잡음파도 발생한다. 한편, 지층이 서로 다른 속도를 갖는 여러 층으로 구성되어 있다면, 각 지층의 경계에서 반사파와 굴절파 (선두파, 임계굴절파)가 발생해 수신기 (geophone)

에 감지된다.



<그림 4.9> 여러가지 파들의 파선 경로

굴절과 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 굴절과 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; Cervený 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 해결할 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 탄성파 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, 탄성파 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.

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

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 표면과 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.

$$C_f = \frac{dx}{\Delta t_f}$$

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-Salinerо et al., 1987; Rix and Leipski, 1991).

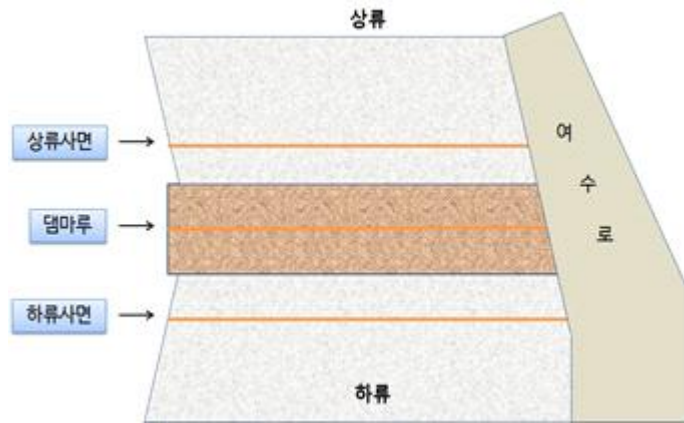
제 5 장

물리탐사 지침 개선 방향

제5장 물리탐사 지침 개선방향

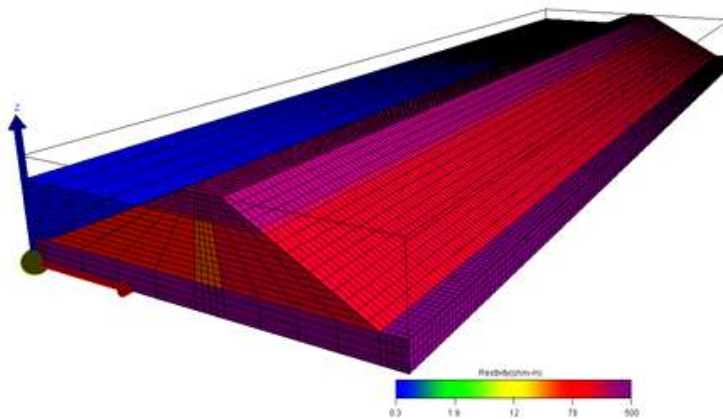
제1절 전기비저항 탐사 개선방향

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 높고 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 사석으로 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

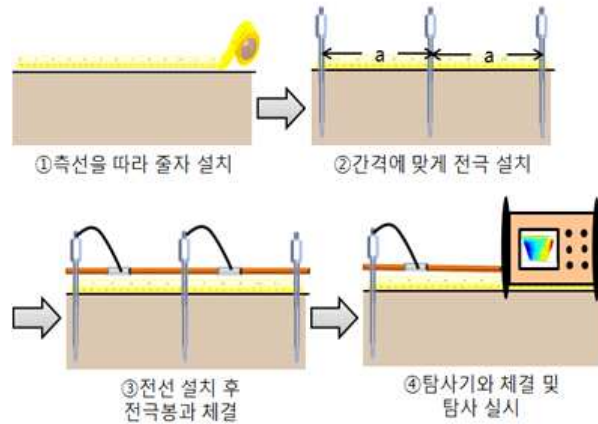
제체의 성토재 하부는 기초지반으로 구성되어 있으므로 전극 간격

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

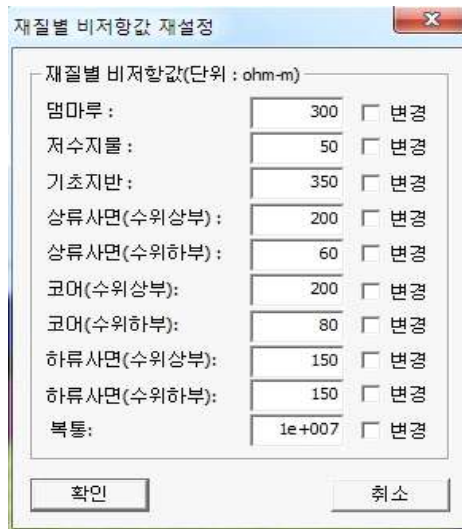
소분할시 메시의 크기와 관련이 된다. 즉, 메시의 간격을 조절할 수 있는데, 메시의 간격이 조밀할수록 모델링의 정밀도는 향상될 수 있으나, 모델링에 소요되는 시간이 길어진다. 반면, 메시의 간격이 조밀하지 않을 경우 모델링 소요시간은 단축될 수 있으나, 모델링 결과의 해상도는 낮아질 우려가 있다. 이와 같은 두 장점들을 모두 받아들일 수 있도록 <그림 5.4>에서는 기본 간격의 50% 정도로 메시의 조밀도를 선택한 경우이다.

<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.

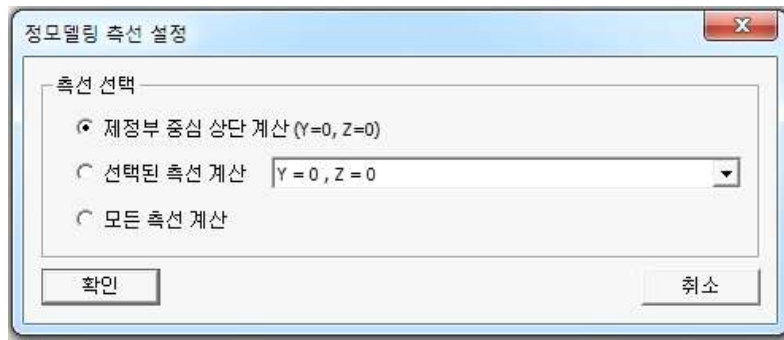
또한 기존에 선택되었던 복통을 제거할 수도 있으며, 복통 주변의 취약범위를 별도로 설정할 수도 있다. 복통의 위치 및 구경을 재설정할 수 있으며, 복통 주변에 손상이 있는 경우 손상 범위를 지정할 수 있다. 물론, 손상 부위의 전기비저항 값의 재설정도 가능하다. 체체의 침윤선 하단 전기비저항의 수정도 가능한데, 이 과정에서 저수지의 물 높이를 고려하여 저수지의 물과 상류 중심점토와 만나는 높이, 하류 중심점토와 만나는 높이, 하류사면과 만나는 높이를 결정할 수 있다. 침윤선 하부의 전기비저항 값 설정 방식은 단일 전기비저항 값을 적용하는 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.



<그림 5.5> 재질별 전기비저항 재설정 단계

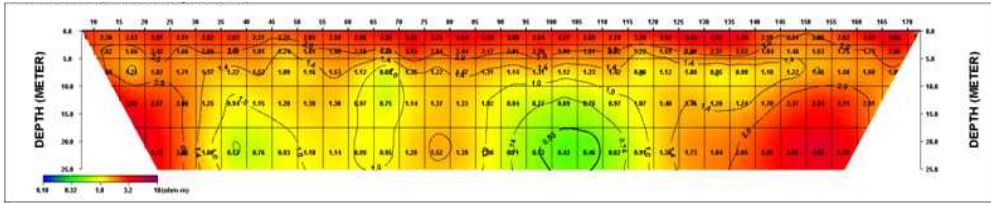
또한 제체와 기초지반 연결부위의 누수 설정도 가능하다. 기초지반 접합부의 전기비저항 값으로 이 부분의 누수가 의심된다면 보다 낮은 전기비저항 값을 입력해야 한다. 손상범위의 두께와 손상부위를 지정할 수도 있다. 즉, 손상부위의 경우 제체와 기초지반 중 하나를 선택하거나 모두를 선택할 수도 있다. 만일, 이와 같은 수정 사항을 반영하지 않는다면, 매우 건전한 저수지의 상황을 모사할 수 있게 된다. 그러므로 모델링 대상지구의 경우 사전 현장조사를 통해 제체의 취약 부분을 사전에 인지할 필요가 있다.

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

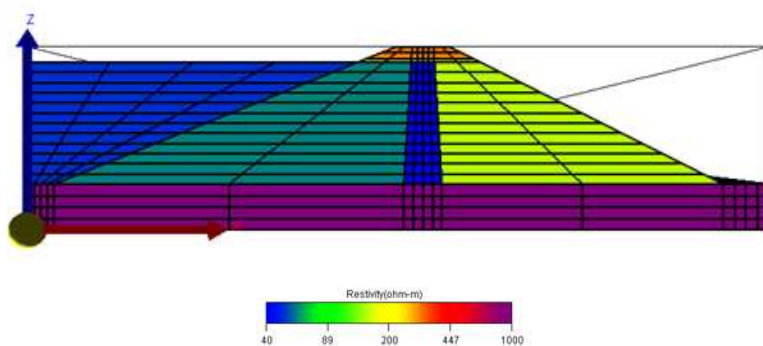
넷째, 모델링 자료를 역산한다. 다섯째, 현장자료를 입력하고 역산한다. 여섯째, 각각의 역산 결과를 비교하여 전기비저항 감소율을 산정한다. 향후, 전기비저항 감소율 자료가 많이 확보되면 통계 분석을 통해 전기비저항 감소율 기준을 설정할 수 있게 될 전망이다. 그렇게 되면 상태평가에도 반영이 가능하게 된다. <그림 5.7>은 모델링에 의한 역산결과와 현장자료의 역산결과를 비교한 예를 나타낸 것이다.



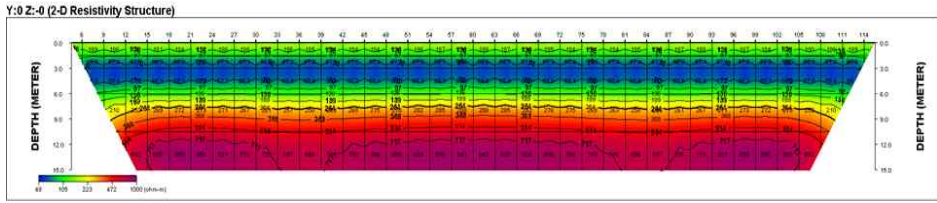
<그림 5.7> 모델링 자료에 의한 역산결과 대비 현장자료 역산결과 비교 사례

이와 같은 방법으로 중심점토 유무에 따라 저수위가 탐사결과에 미치는 영향을 확인하였으며, 담수와 제체의 매질에 대한 지오메트리 및 전기비저항 값은 모두 동일한 값을 사용하였다.

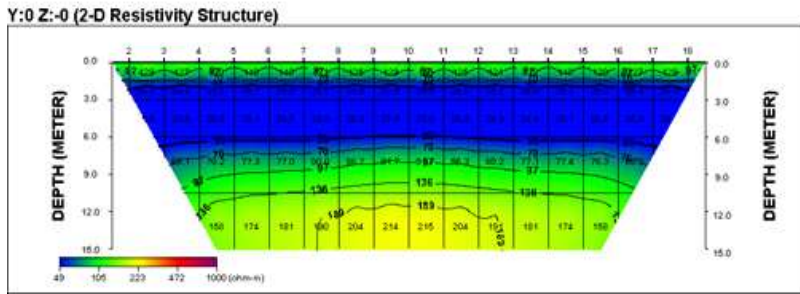
중심점토가 있는 경우를 가정하면 다음과 같다. <그림 5.8>은 제고 9 m, 저수위 8 m를 가정하여 요소분할 한 제체의 횡단면을 보여주고 있다. <그림 5.9>는 제고가 9 m, 저수위가 8 m인 경우 3차원 효과를 고려한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과를 나타낸 것이다. 정상적인 건전한 저수지로 가정되므로 전기비저항 구조가 수평 다층구조를 보이는 것을 확인할 수 있다. <그림 5.10>의 3차원 효과를 배제한 수평 무한 지층에 대한 2차원 탐사와는 많이 구분된다.



<그림 5.8> 중심점토가 있는 경우 담수와 제체의 요소분할 (제고 9 m, 저수위 8 m)

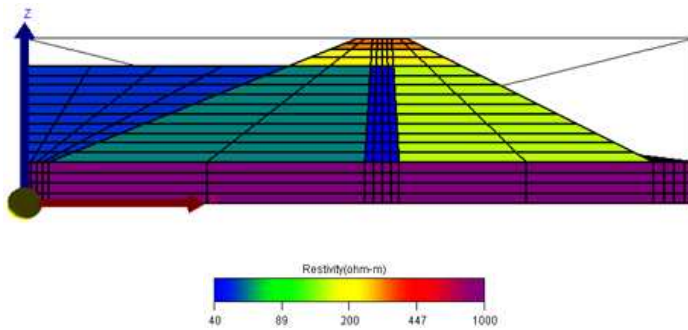


<그림 5.9> 중심점토가 있는 경우 3차원 효과를 가정한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과(제고 9 m, 저수위 8 m)



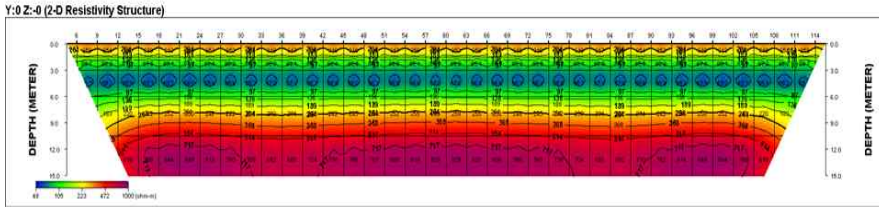
<그림 5.10> 3차원 효과를 배제한 수평 무한 지층에 대한 2차원 전기비저항 탐사결과

<그림 5.11>은 제고 9 m, 저수위 7 m를 가정하여 요소분할 한 제체의 횡단면을 보여주고 있다.



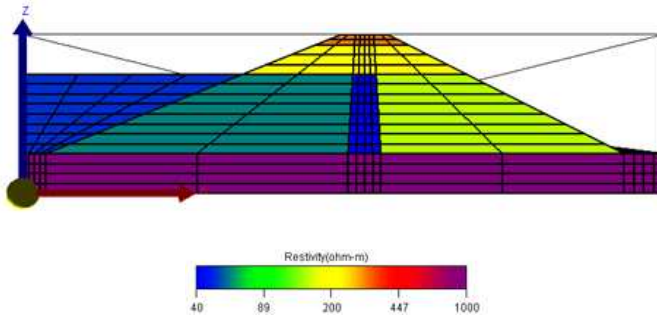
<그림 5.11> 중심점토가 있는 경우 담수와 제체의 요소분할 (제고 9 m, 저수위 7 m)

<그림 5.12>는 제고가 9 m, 저수위가 7 m인 경우 3차원 효과를 고려한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과를 나타낸 것이다.



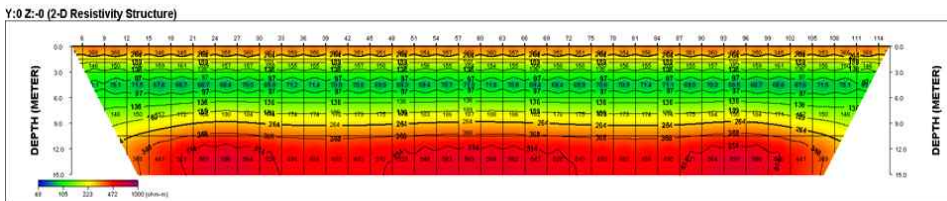
<그림 5.12> 중심점토가 있는 경우 3차원 효과를 가정한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과(제고 9 m, 저수위 7 m)

<그림 5.13>은 제고 9 m, 저수위 6 m를 가정하여 요소분할 한 제체의 횡단면을 보여주고 있다.



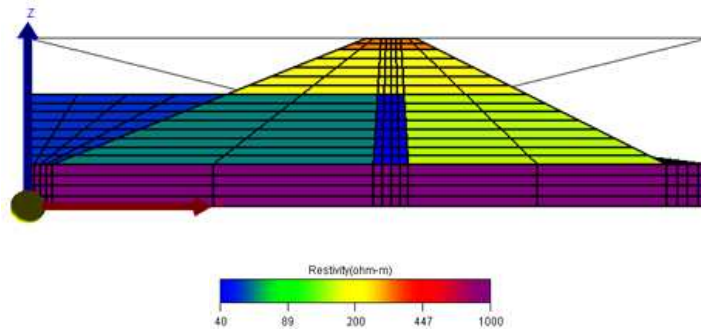
<그림 5.13> 중심점토가 있는 경우 담수와 제체의 요소분할(제고 9 m, 저수위 6 m)

<그림 5.14>는 제고가 9 m, 저수위가 6 m인 경우 3차원 효과를 고려한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과를 나타낸 것이다.

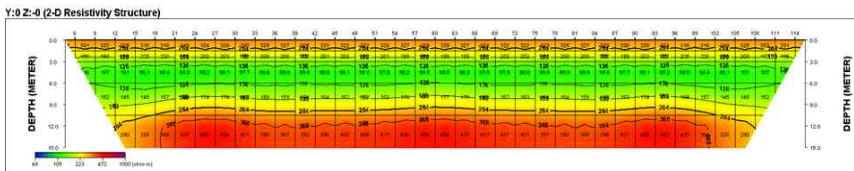


<그림 5.14> 중심점토가 있는 경우 3차원 효과를 가정한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과(제고 9 m, 저수위 6 m)

<그림 5.15>는 제고 9 m, 저수위 5 m를 가정하여 요소분할 한 제체의 횡단면을 보여주고 있다. <그림 5.16>은 제고가 9 m, 저수위가 5 m인 경우 3차원 효과를 고려한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과를 나타낸 것이다.

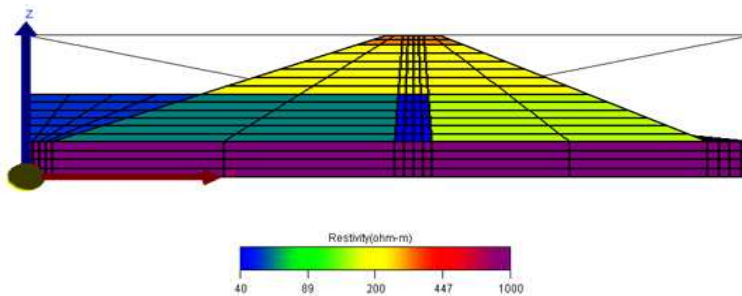


<그림 5.15> 중심점토가 있는 경우 담수와 제체의 요소분할 (제고 9 m, 저수위 5 m)



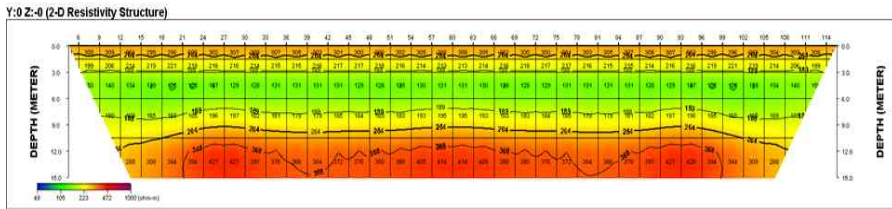
<그림 5.16> 중심점토가 있는 경우 3차원 효과를 가정한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과(제고 9 m, 저수위 5 m)

<그림 5.17>은 제고 9 m, 저수위 4 m를 가정하여 요소분할 한 제체의 횡단면을 보여주고 있다.



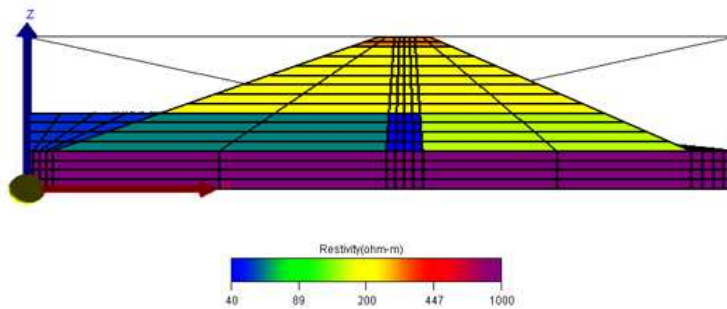
<그림 5.17> 중심점토가 있는 경우 담수와 제체의 요소분할 (제고 9 m, 저수위 4 m)

<그림 5.18>은 제고가 9 m, 저수위가 4 m인 경우 3차원 효과를 고려한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과를 나타낸 것이다.



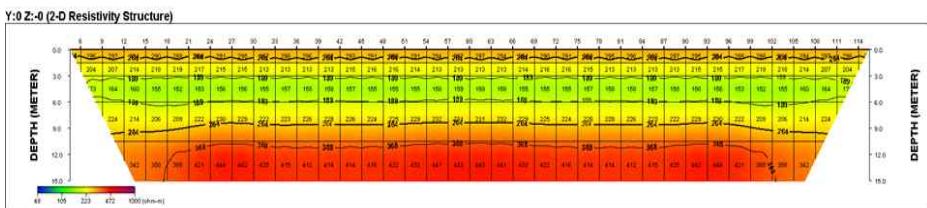
<그림 5.18> 중심점토가 있는 경우 3차원 효과를 가정한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과(제고 9 m, 저수위 4 m)

<그림 5.19>는 제고 9 m, 저수위 3 m를 가정하여 요소분할 한 제체의 횡단면을 보여주고 있다.



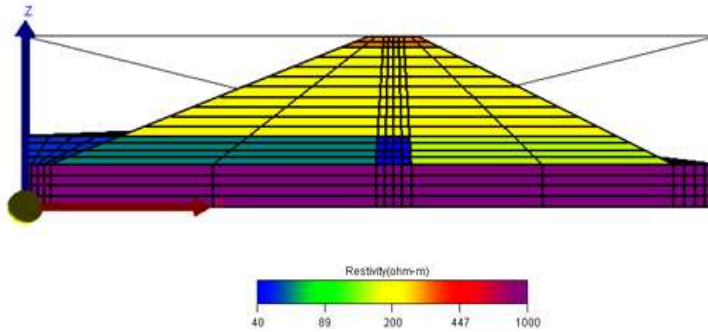
<그림 5.19> 중심점토가 있는 경우 담수와 제체의 요소분할(제고 9 m, 저수위 3 m)

<그림 5.20>은 제고가 9 m, 저수위가 3 m인 경우 3차원 효과를 고려한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과를 나타낸 것이다.



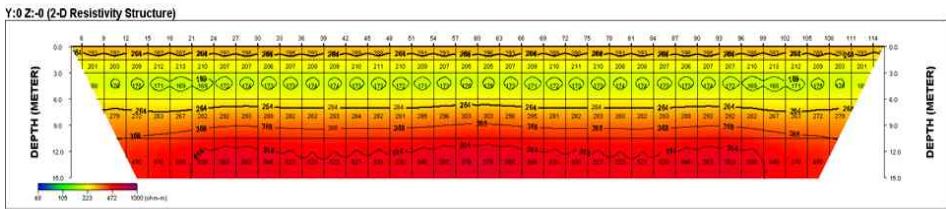
<그림 5.20> 중심점토가 있는 경우 3차원 효과를 가정한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과(제고 9 m, 저수위 3 m)

<그림 5.21>은 제고 9 m, 저수위 2 m를 가정하여 요소분할 한 제체의 횡단면을 보여주고 있다.



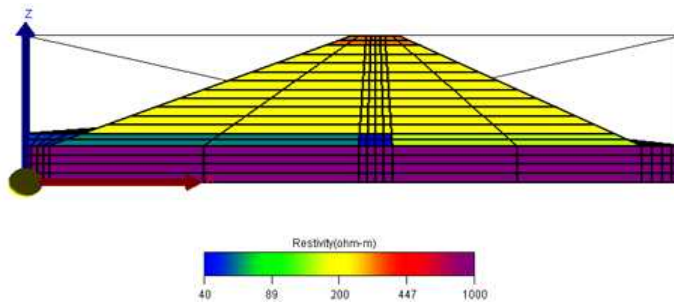
<그림 5.21> 중심점토가 있는 경우 담수와 제체의 요소분할
(제고 9 m, 저수위 2 m)

<그림 5.22>는 제고가 9 m, 저수위가 2 m인 경우 3차원 효과를 고려한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과를 나타낸 것이다.



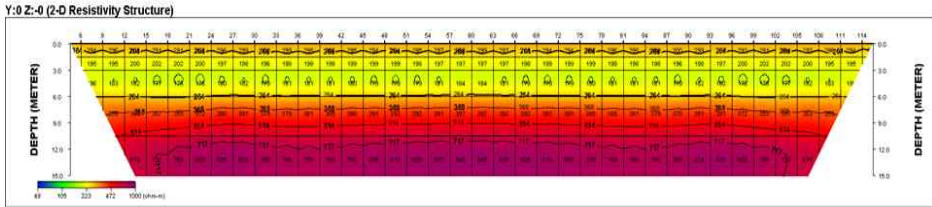
<그림 5.22> 중심점토가 있는 경우 3차원 효과를 가정한 전기비저항
모델링에 의한 역산결과(제고 9 m, 저수위 2 m)

<그림 5.23>은 제고 9 m, 저수위 1 m를 가정하여 요소분할 한 제체의 횡단면을 보여주고 있다.



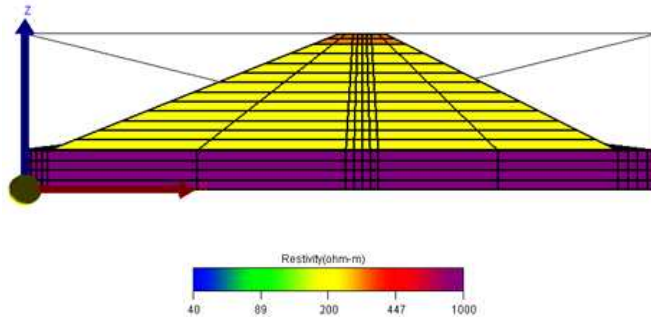
<그림 5.23> 중심점토가 있는 경우 담수와 제체의 요소분할
(제고 9 m, 저수위 1 m)

<그림 5.24>는 제고가 9 m, 저수위가 1 m인 경우 3차원 효과를 고려한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과를 나타낸 것이다.



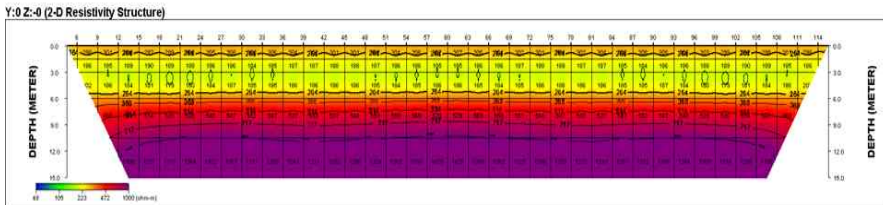
<그림 5.24> 중심점토가 있는 경우 3차원 효과를 가정한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과(제고 9 m, 저수위 1 m)

<그림 5.25>는 제고 9 m, 저수위 0 m를 가정하여 요소분할 한 제체의 횡단면을 보여주고 있다. 이 경우는 담수되어 있는 물이 전혀 없는 경우에 해당된다.



<그림 5.25> 중심점토가 있는 경우 담수와 제체의 요소분할 (제고 9 m, 저수위 0 m)

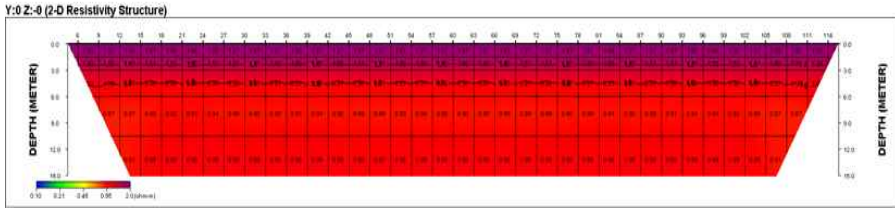
<그림 5.26>은 제고가 9 m, 저수위가 0 m인 경우 3차원 효과를 고려한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과를 나타낸 것이다.



<그림 5.26> 중심점토가 있는 경우 3차원 효과를 가정한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과(제고 9 m, 저수위 0 m)

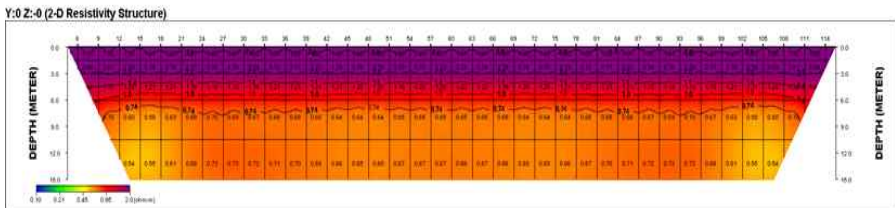
이상과 같이 저수위에 따라 전기비저항의 분포가 차이가 있는 것을 확인할 수 있다. 즉, 모든 경우에 수평적인 전기비저항 분포를 보이지만 저수위에 따라 전기비저항의 높낮이가 수평 층별로 서로 다르게 나타남을 확인할 수 있다. 이 결과로 저수지 현장에서 전기비저항 탐사를 수행할 때, 저수위의 높낮이에 따라 현장 탐사결과에 민감한 영향을 줄 수 있음을 알 수 있다.

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 탐사결과와 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.



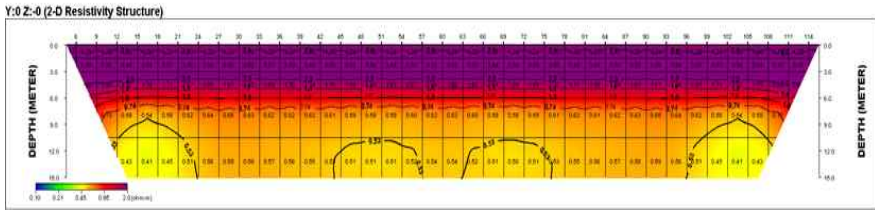
<그림 5.27> 중심점토가 있는 경우 저수위 8 m 대비 7 m에서의 전기비저항 변화비

<그림 5.28>은 만수위 8 m를 기준으로 저수위 6 m인 경우의 전기비저항 탐사결과와 변화비를 나타낸 것으로, 마찬가지로 저수위 2 m 하강에 따라 제체 상부의 변화비가 2 이상 크게 나오는 부분들이 나타나고 있다.



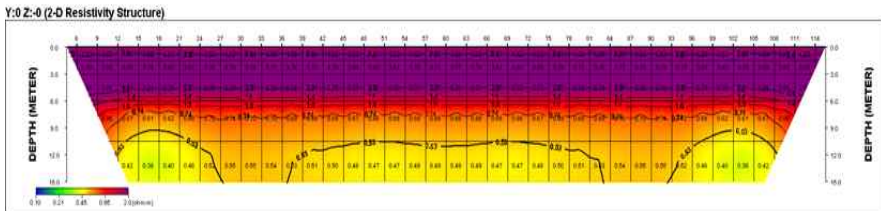
<그림 5.28> 중심점토가 있는 경우 저수위 8 m 대비 6 m에서의 전기비저항 변화비

<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.



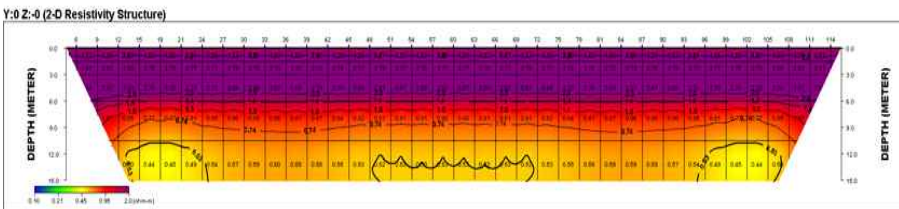
<그림 5.29> 중심점토가 있는 경우 저수위 8 m 대비 5 m에서의 전기비저항 변화비

<그림 5.30>은 만수위 8 m를 기준으로 저수위 4 m인 경우의 전기비저항 탐사결과의 변화비를 나타낸 것으로, 마찬가지로 전기비저항 변화비가 2 이상되는 부분들이 제체 상부에 영향을 주고 있다.



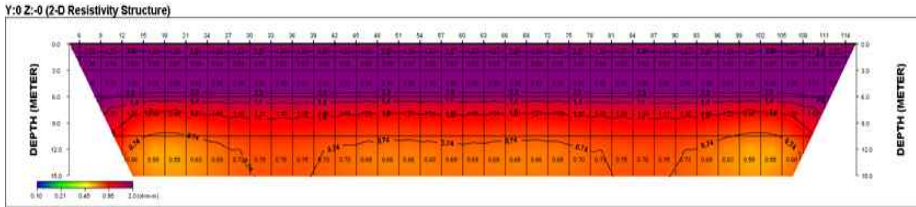
<그림 5.30> 중심점토가 있는 경우 저수위 8 m 대비 4 m에서의 전기비저항 변화비

<그림 5.31>는 만수위 8 m를 기준으로 저수위 3 m인 경우의 전기비저항 탐사결과의 변화비를 나타낸 것이다.



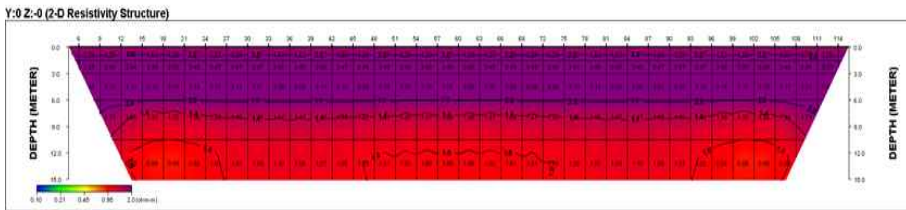
<그림 5.31> 중심점토가 있는 경우 저수위 8 m 대비 3 m에서의 전기비저항 변화비

<그림 5.32>는 만수위 8 m를 기준으로 저수위 2 m인 경우의 전기비저항 탐사결과의 변화비를 나타낸 것이다.



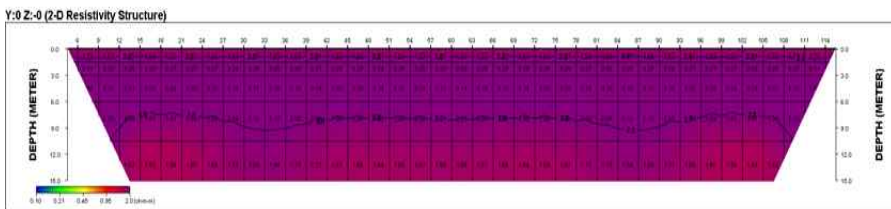
<그림 5.32> 중심점토가 있는 경우 저수위 8 m 대비 2 m에서의 전기비저항 변화비

<그림 5.33>은 만수위 8 m를 기준으로 저수위 1 m인 경우의 전기비저항 탐사결과의 변화비를 나타낸 것이다.



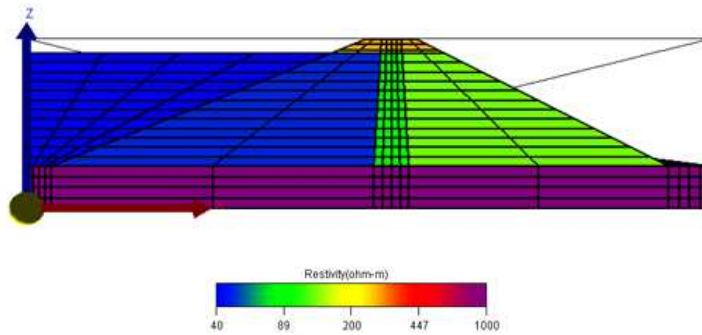
<그림 5.33> 중심점토가 있는 경우 저수위 8 m 대비 1 m에서의 전기비저항 변화비

<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.



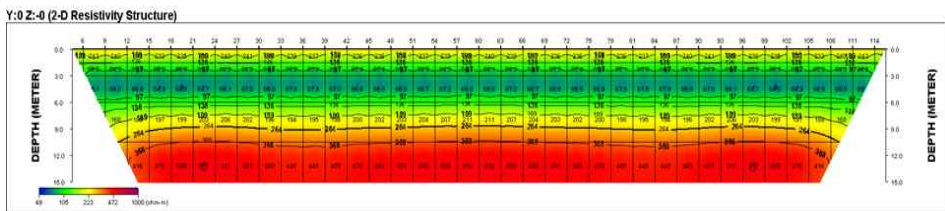
<그림 5.34> 중심점토가 있는 경우 저수위 8 m 대비 0 m에서의 전기비저항 변화비

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.



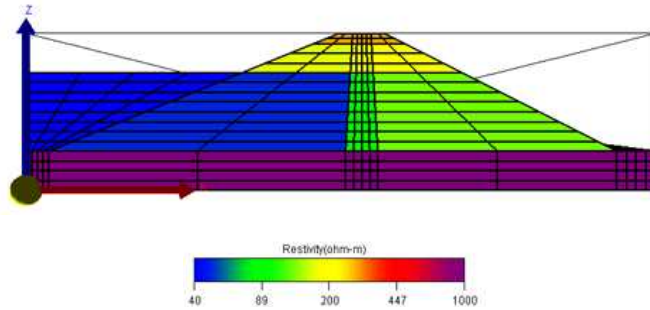
<그림 5.35> 중심점토가 없는 경우 담수와 제체의 요소분할
(제고 9 m, 저수위 8 m)

<그림 5.36>은 중심점토가 없는 경우 제고가 9 m, 저수위가 8 m인 경우 3차원 효과를 고려한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과를 나타낸 것이다. 역시 정상적인 건전한 저수지로 가정되어 전기비저항 구조가 수평 다층구조를 보이는 것을 확인할 수 있다.



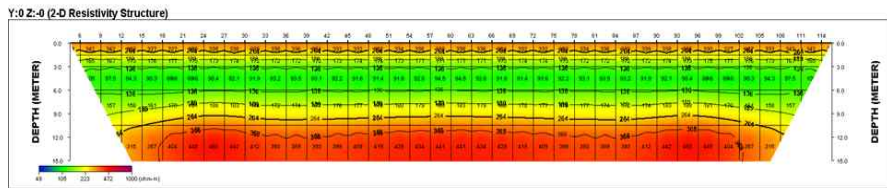
<그림 5.36> 중심점토가 없는 경우 3차원 효과를 가정한
전기비저항 모델링에 의한 역산결과(제고 9 m, 저수위 8 m)

<그림 5.37>은 중심점토가 없는 경우, 제고 9 m, 저수위 6 m를 가정하여 요소분할 한 제체의 횡단면을 보여주고 있다.



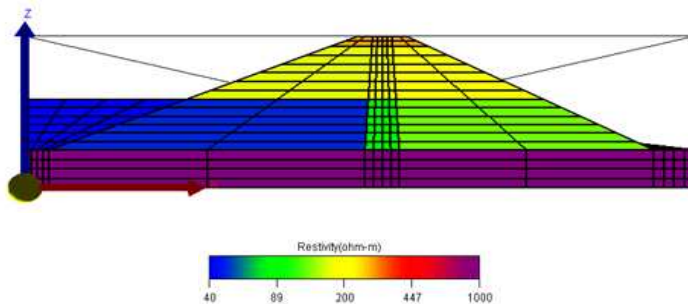
<그림 5.37> 중심점토가 없는 경우 담수와 제체의 요소분할
(제고 9 m, 저수위 6 m)

<그림 5.38>은 중심점토가 없는 경우 제고가 9 m, 저수위가 6 m인 경우 3차원 효과를 고려한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과를 나타낸 것이다.



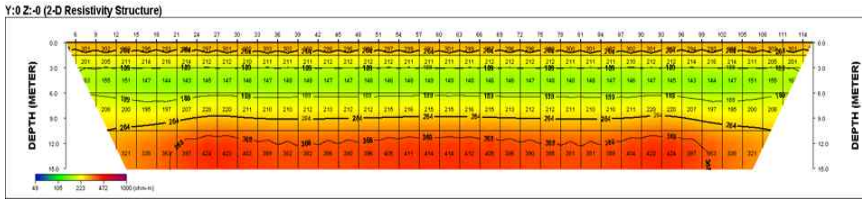
<그림 5.38> 중심점토가 없는 경우 3차원 효과를 가정한
전기비저항 모델링에 의한 역산결과(제고 9 m, 저수위 6 m)

<그림 5.39>는 중심점토가 없는 경우, 제고 9 m, 저수위 4 m를 가정하여 요소분할 한 제체의 횡단면을 보여주고 있다.



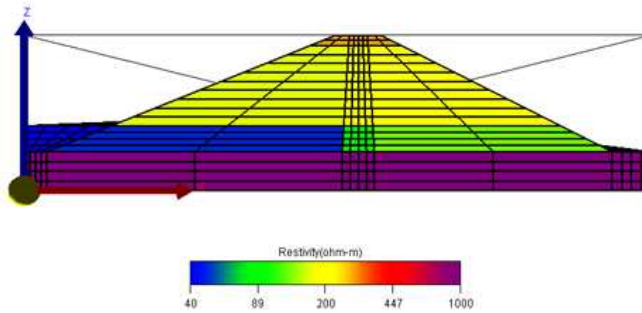
<그림 5.39> 중심점토가 없는 경우 담수와 제체의 요소분할
(제고 9 m, 저수위 4 m)

<그림 5.40>은 중심점토가 없는 경우 제고가 9 m, 저수위가 4 m인 경우 3차원 효과를 고려한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과를 나타낸 것이다.



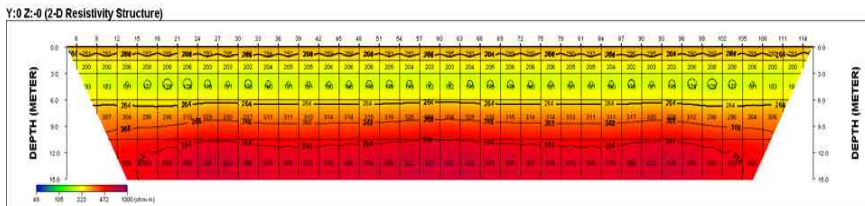
<그림 5.40> 중심점토가 없는 경우 3차원 효과를 가정한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과(제고 9 m, 저수위 4 m)

<그림 5.41>은 중심점토가 없는 경우, 제고 9 m, 저수위 2 m를 가정하여 요소분할 한 제체의 횡단면을 보여주고 있다.



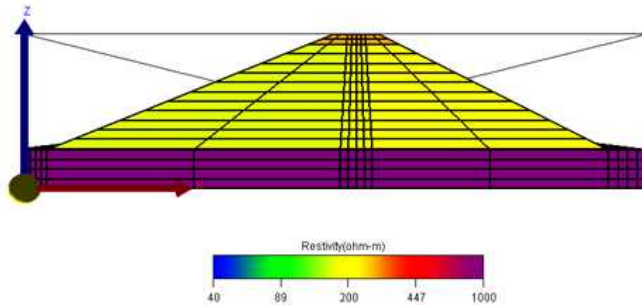
<그림 5.41> 중심점토가 없는 경우 담수와 제체의 요소분할 (제고 9 m, 저수위 2 m)

<그림 5.42>는 중심점토가 없는 경우 제고가 9 m, 저수위가 2 m인 경우 3차원 효과를 고려한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과를 나타낸 것이다.



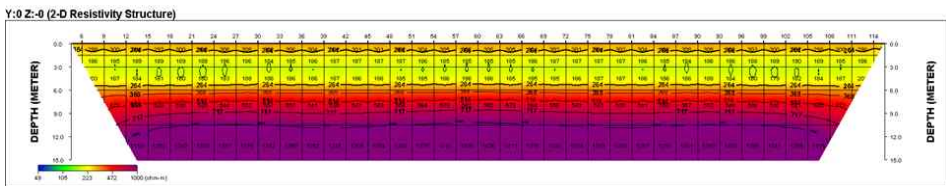
<그림 5.42> 중심점토가 없는 경우 3차원 효과를 가정한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과(제고 9 m, 저수위 2 m)

<그림 5.43>은 중심점토가 없는 경우, 제고 9 m, 저수위 0 m를 가정하여 요소분할 한 제체의 횡단면을 보여주고 있다.



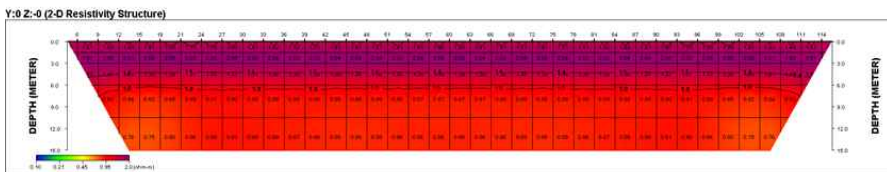
**<그림 5.43> 중심점토가 없는 경우 담수와 제체의 요소분할
(제고 9 m, 저수위 0 m)**

<그림 5.44>는 중심점토가 없는 경우 제고가 9 m, 저수위가 0 m인 경우 3차원 효과를 고려한 전기비저항 모델링에 의한 역산결과를 나타낸 것이다.



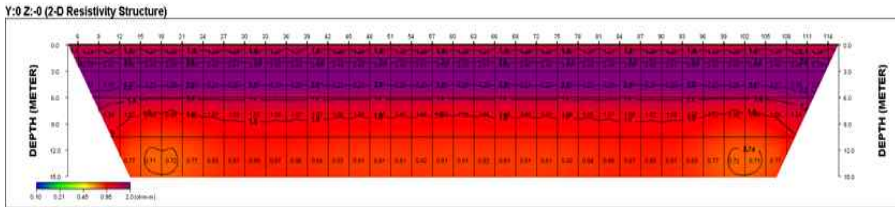
**<그림 5.44> 중심점토가 없는 경우 3차원 효과를 가정한
전기비저항 모델링에 의한 역산결과(제고 9 m, 저수위 0 m)**

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.



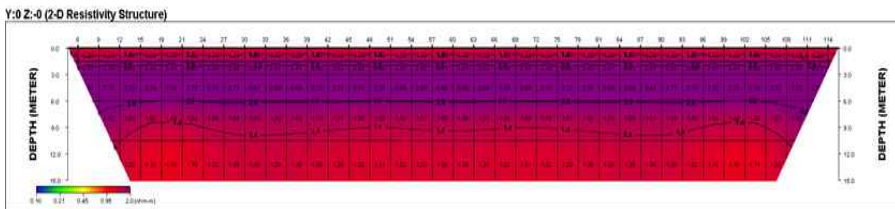
<그림 5.45> 중심점토가 없는 경우 저수위 8 m 대비 6 m에서의 전기비저항 변화비

<그림 5.46>은 만수위 8 m를 기준으로 저수위 4 m인 경우의 전기비저항 탐사결과의 변화비를 나타낸 것이다.



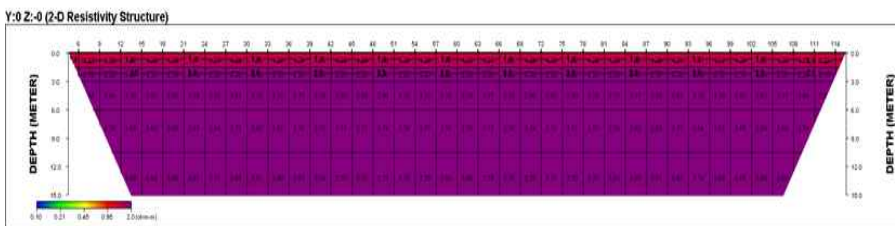
<그림 5.46> 중심점토가 없는 경우 저수위 8 m 대비 4 m에서의 전기비저항 변화비

<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.

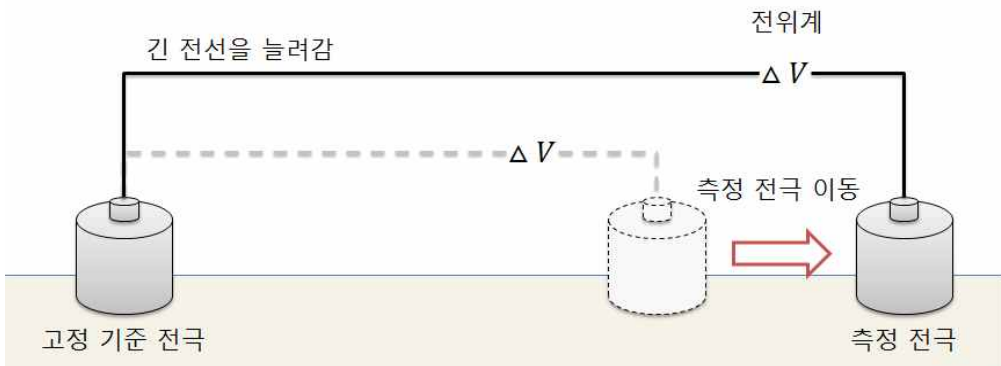


<그림 5.48> 중심점토가 없는 경우 저수위 8 m 대비 0 m에서의 전기비저항 변화비

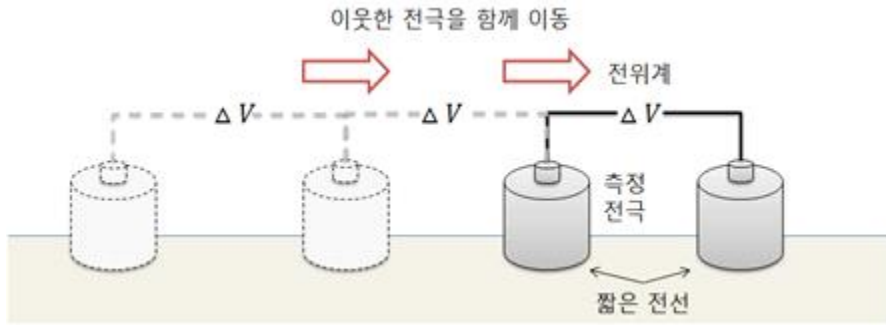
이상과 같이 중심점토가 없는 경우는 중심점토가 있는 경우에 비해 전기비저항의 변화비가 높은 영역이 심도까지 나타나는 것을 확인할 수 있다.

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.

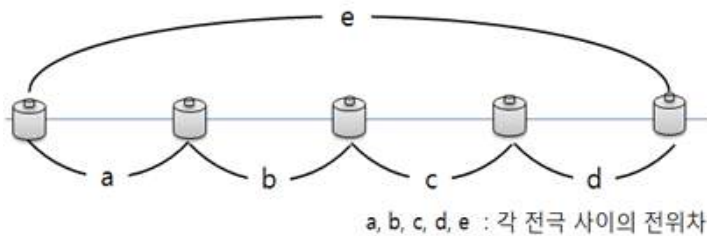


<그림 5.49> 절대 전위법 (기준점법) 모식도



<그림 5.50> 상대 전위법 (차분법) 모식도

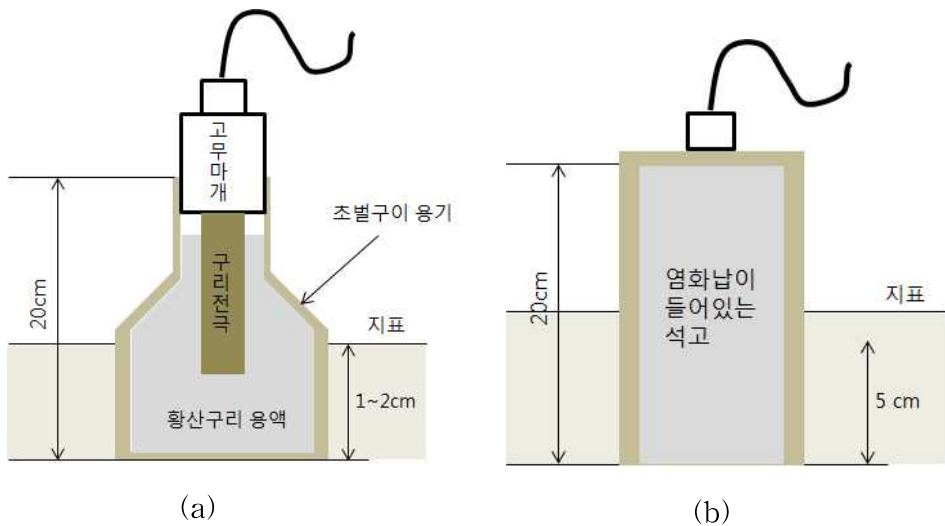
절대 전위법은 기준 전극 위치 설정이 무엇보다 중요하다. 매 측정 때마다 기준 전극에 의한 자료가 획득되기 때문이다. 다만, 상대 전위법은 그와 같은 문제를 갖고 있지 않지만, 단위 전극 간격에 대한 값을 중간에 보정해야 한다. 즉, <그림 5.51>과 같이 단위 전극 간격별 전위차의 합은 해당 거리 전극 간격에 따른 전위차와 값이 같아야 한다. 셋째, 전극 간격을 설정해야 한다. 전극 간격은 1차 탐사방법인 전기비저항 탐사의 전극 간격과 동일하게 설정한다. 전극은 통상적으로 비분극 전극 (non-polarized electrode)을 제작하여 사용한다. 일반 금속으로 제작된 전극봉의 경우 분극현상이 자료에 영향을 미치게 된다.



$$e = a + b + c + d$$

<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.

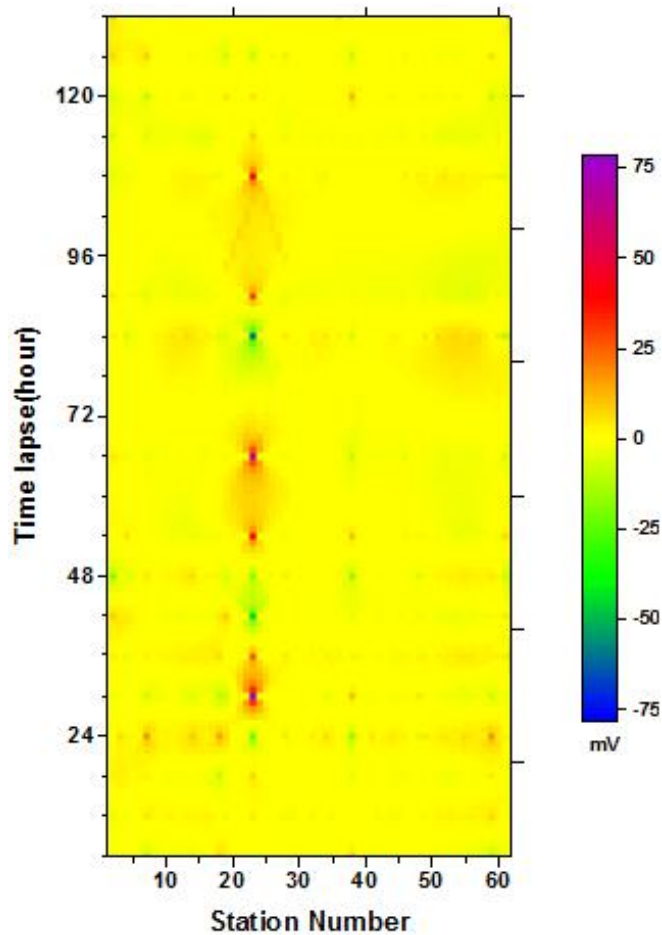


<그림 5.52> 자연전위 변화량 산정 예시
 (a) 구리-황산구리 전극, (b) 석고 전극

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 측

정에 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.

$$\Delta s = s_i - s_{i-1} \quad (i = 1, 2, \dots, N-1)$$

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, 이동성이 망치에 비해 불리하다.

신호원의 끝부분에는 트리거를 부착하여 알루미늄 판에 타격하는 방식으로 소규모 인공 지진파를 발생시키며, 트리거 스위치와 기록계는 케이블로 연결한다.

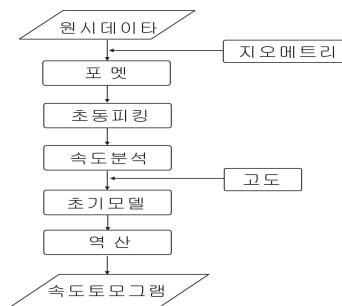
자료획득 시에는 주변 도로의 자동차 소음과 바람에 의한 잡음요인이 발생하여 잡음을 최소화하여 측정한다. 자료획득 시 전개 방식은 수신기 전개와 타격 위치가 동일선상에 위치하는 동일선 전개방식이 주로 이용되며, 수신기는 그라운드 롤 (ground roll)이 최소가 되게 땅에 잘 결합시킨다. 인공지진파를 발생시키기 위한 타격은 필요한 위

치에 등간격으로 실시하는 것이 좋다. 또한 각 타격점에서 신호를 알루미늄 판에 수회 발생시켜 중첩함으로써 신호 대 잡음비를 높이는 것이 좋다. 신호 수신은 통상적으로 24채널이 이용되며, 아날로그 신호를 0.125 ms의 샘플비율로 250 ms 동안 기록한다. <표 5.2>는 굴절과 탐사변수의 예를 보여주고 있다.

<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

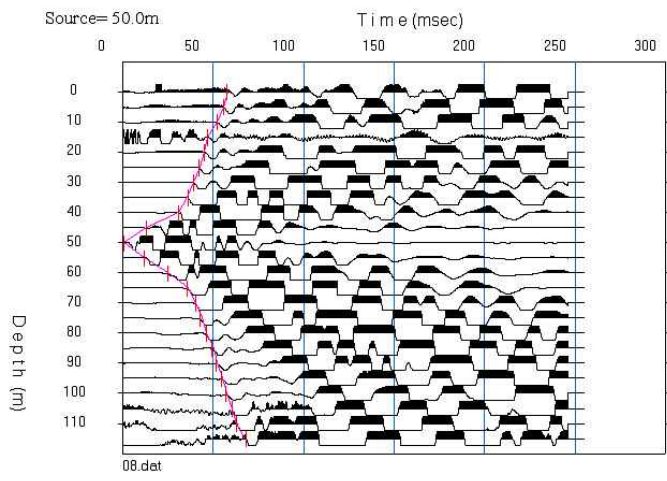
자료처리는 포맷변환, 파원-수진기 배치정보 입력, 초동선택, 속도 분석, 고도자료입력, 초기모델 작성, 역산, 속도 토모그램 산출 등의 순서로 진행한다 <그림 5.54>.



<그림 5.54> 굴절과 탄성파탐사 자료처리 과정

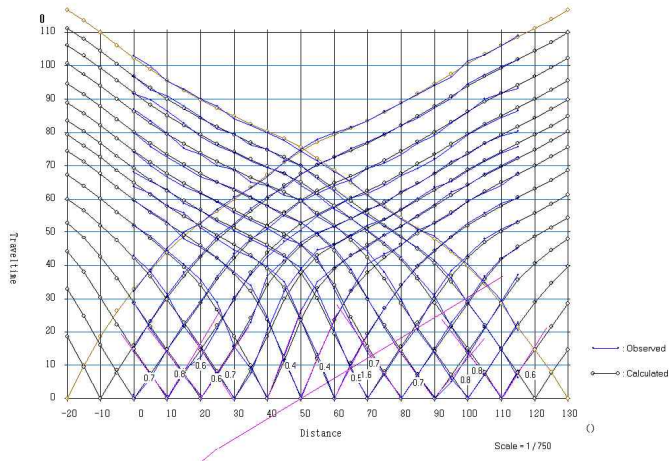
먼저 기록계에 수치형태로 저장된 원시자료에 수신기 및 타격점의 위치를 입력한다. 이 후 자료처리용 소프트웨어의 내부 포맷 형식으로 변환한 후 포맷된 데이터를 이용해 초동 (first arrival)을 선택한다. 굴절과 탐사는 초동만을 이용하여 자료를 처리하기 때문에, 초동 선택이 결과에 직접적인 영향을 끼치므로 양단주시와 주시곡선의 평행선에 유의하여 신중하게 선택해야 한다.

<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.



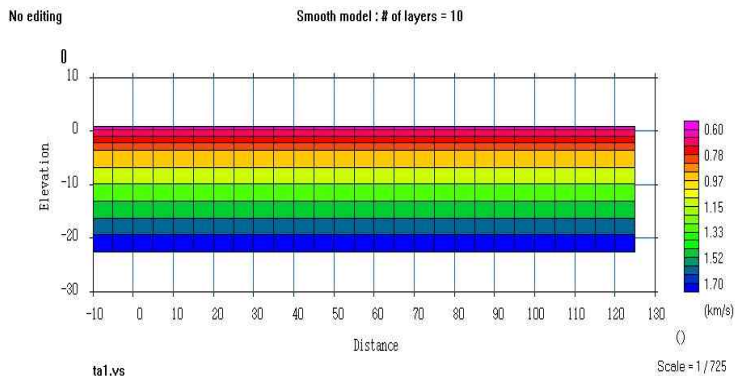
<그림 5.55> 초동 선택 예제

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 축선 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 수진기 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.

표면파 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 수진기를 이용한 탐사와 (b)의 평판식 수진기를 이용한 탐사의 전경을 보여주고 있다. 스파이크식 수진기는 피복되어있지 않은 일반적인 제체에 유리하며, 평판식 수진기는 피복재로 포장된 제체의 상부에서 사용될 경우 유리하다.



(a)

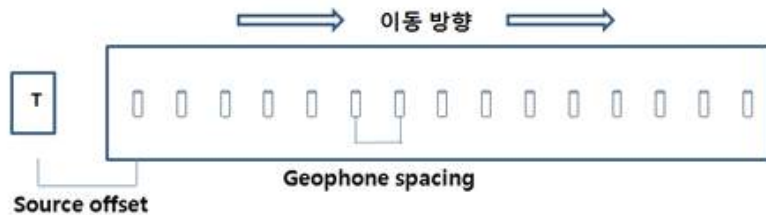


(b)

<그림 5.58> 제체 피복상태에 따른 각각의 수진기 방식을 이용한 탐사전경

(a) 스파이크식 수진기, (b) 평판식 수진기

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

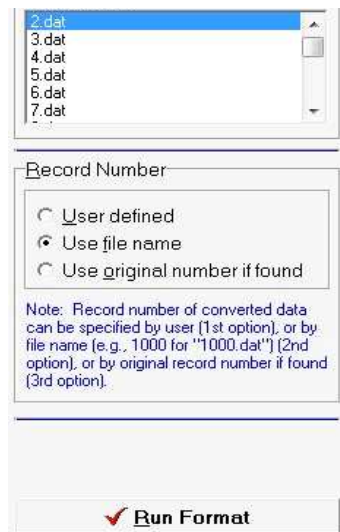
자료처리는 다음과 같은 순서로 진행한다 <그림 5.60>.



<그림 5.60> 표면파 탐사 자료처리 순서도

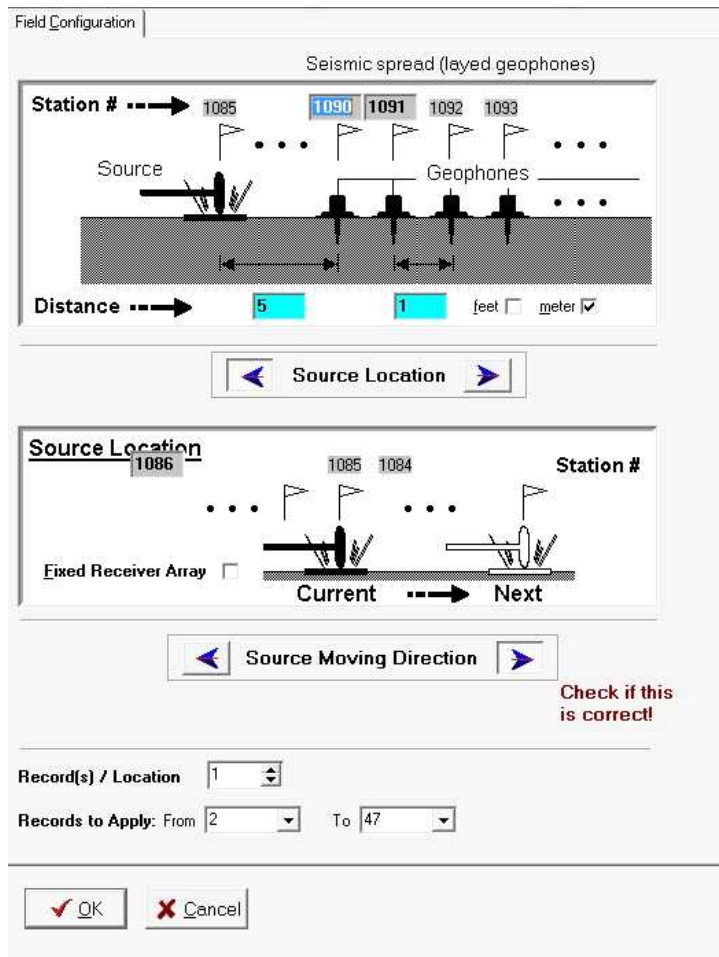
자료처리 프로그램은 Surfseis 3.0을 예로 설명하였다.

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.



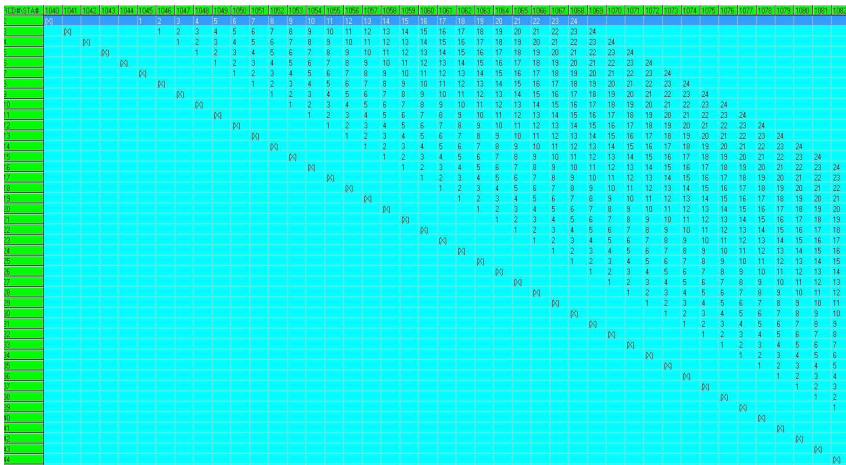
<그림 5.62> 지오메트리 작성 단계

지오메트리 작성이 완료되면 <그림 5.63>과 같이 측정별 송신기와 수신기의 좌표가 설정된다.

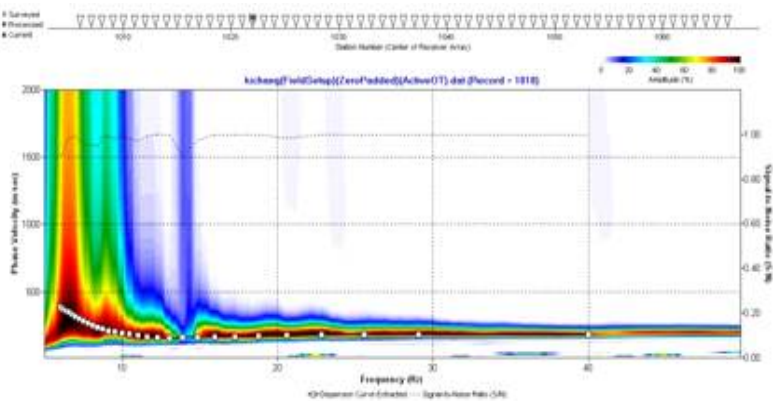
셋째, 탄성파의 여러 신호 중 표면파 성분만을 추출한다.

넷째, 추출된 표면파를 대상으로 주파수와 위상속도의 상관성을 분석한다 <그림 5.64>.

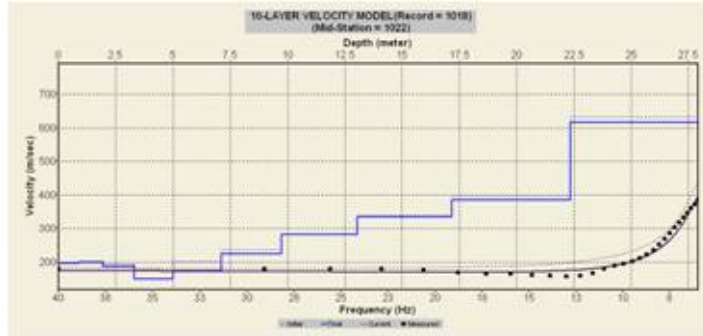
다섯째, 분석된 자료를 다시 1차원으로 역산하여 심도별 전단파 속도를 계산한다 <그림 5.65>. 이 과정에서 각각의 지점들에 대한 층이 구분되어 각각의 결과를 종합하여 2차원 단면으로 영상화한다.



<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 지체의 강도를 간접적으로 추정할 수 있다. 동일 지점의 표준관입시험 자료가 있으면, 특정 지점뿐만 아니라 측선 하부 지층에 대한 지체의 다짐정도를 보다 정밀하게 파악할 수 있다.

제 6 장

제체에서의 물리탐사 적용 대표사례

Ministry of Agriculture, Plant and Fisheries
Quarantine and Inspection Agency



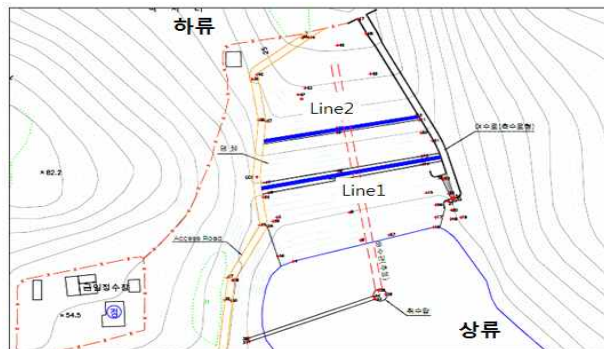
제6장 제체에서의 물리탐사 적용 대표사례

제1절 전기비저항 탐사 적용사례 1

탐사 대상지는 전남 완도군 평일도 척치담으로 비교적 균질하게 나타날 것으로 예상되는 담의 중심코어 부분에서 누수 취약 구간을 파악하고 제체 내부나 통관부 주위에서의 누수 가능성 파악을 목적으로 전기비저항 탐사가 진행된 사례이다. <그림 6.1>은 담의 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> 담의 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

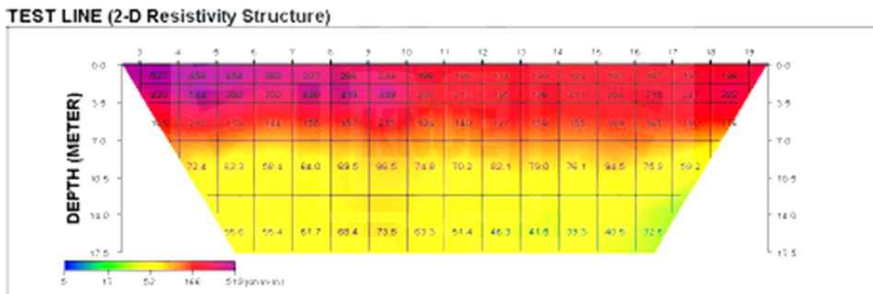
Line 1(체체마루)	
항목	내용
전극 배열	쌍극자 배열
측선 길이	70 m
전극 간격	3.5 m
전극전개수(n)	10
탐사 심도	17.5 m

<표 6.2> Line 2의 탐사변수

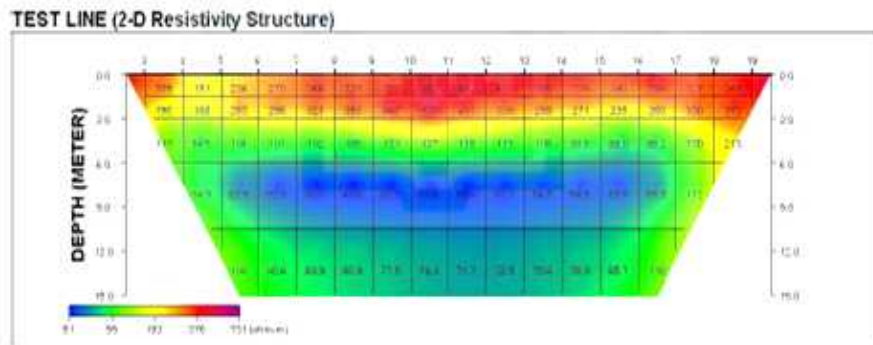
Line 2(하류사면 소단부)	
항목	내용
전극 배열	쌍극자 배열
측선 길이	60 m
전극 간격	3 m
전극전개수(n)	10
탐사 심도	15 m

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)

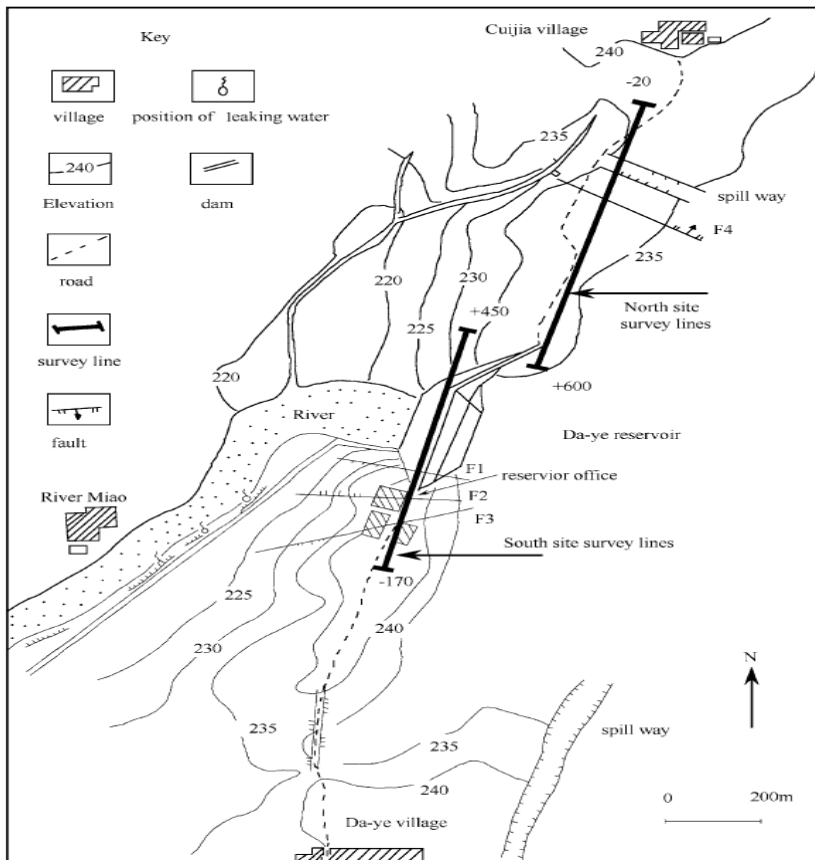


<그림 6.4> Line 2의 전기비저항 탐사결과(하류사면 소단부)

결과적으로 비교적 안정성을 갖는 제체의 전기비저항 분포는 수평적으로 전기비저항이 균일하게 발달하는 특성을 가지고 있다. 제체는 충분한 안정성을 유지하고 있는 것으로 파악되었다.

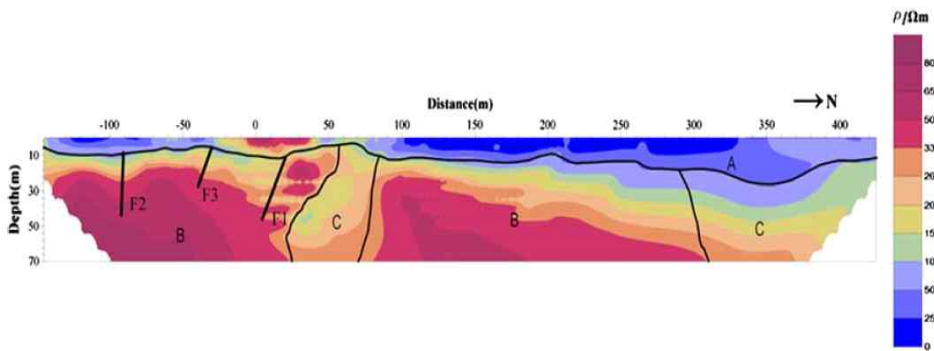
제2절 전기비저항 탐사 적용사례 2

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.

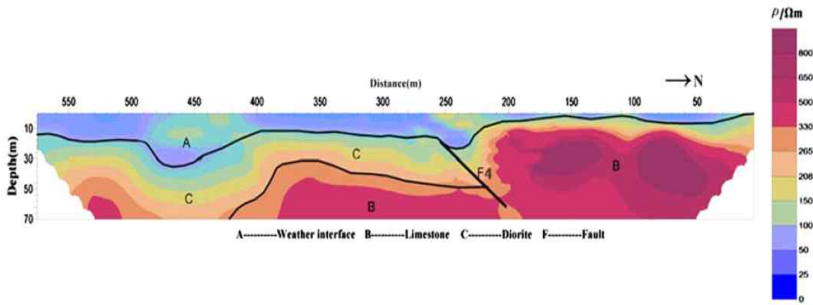


<그림 6.6> 제체마루 상부 측선(south site survey lines)의 전기비저항 탐사결과

<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 탐사결과의 이상대 위치는 단층으로 인한 누수구간으로 예상되었다.

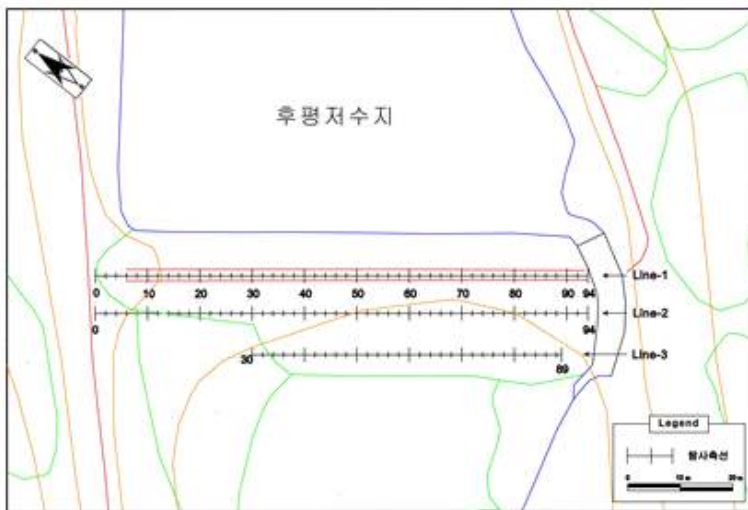
제3절 전기비저항 탐사 및 자연전위 탐사 분석사례 1



<그림 6.7> 여수로 상부 측선(north site survey lines)의 전기비저항 탐사결과

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>. 하루사면의 상단부에 위치한 Line 2의 탐사방법은 마찬가지로 절대 전위법이 적용되었으며, 측선 길이와 전극 간격은 Line 1과 동일하다 <표 6.4>. 하루사면의 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 심도는 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

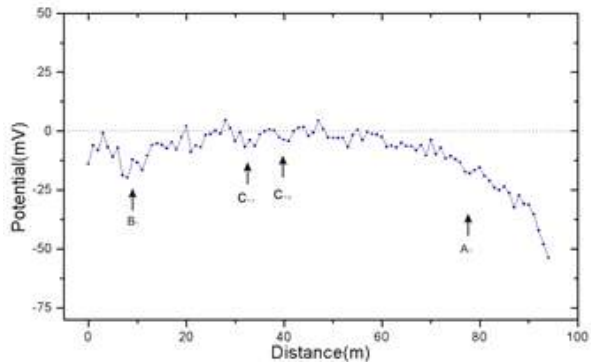
<표 6.10> 그라우팅 후 Line 2의 전기비저항 탐사변수

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

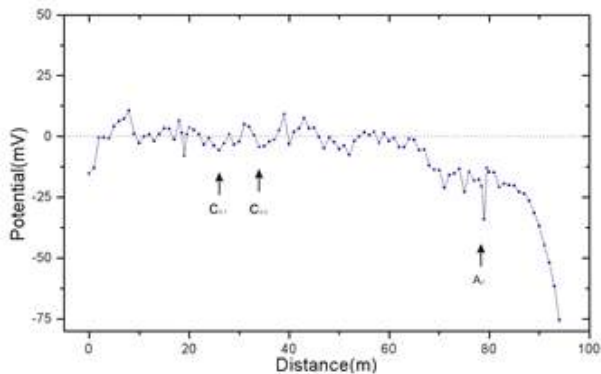
Line 3(하류사면2)	
항목	내용
전극 배열	쌍극자 배열
측선 길이	59 m
전극 간격	3 m, 6 m
전극전개수(n)	8
탐사 심도	12 m, 24 m

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.

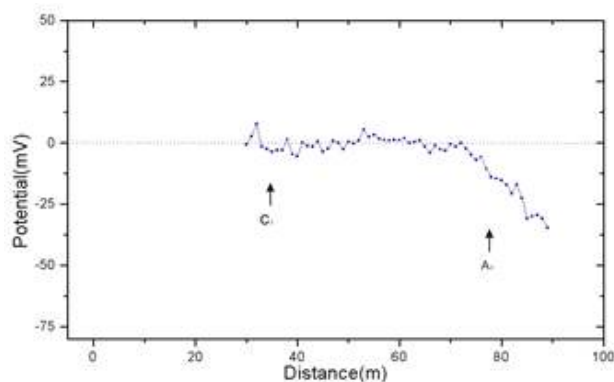


<그림 6.10> 그라우팅 이전 자연전위 탐사결과 (Line 2)

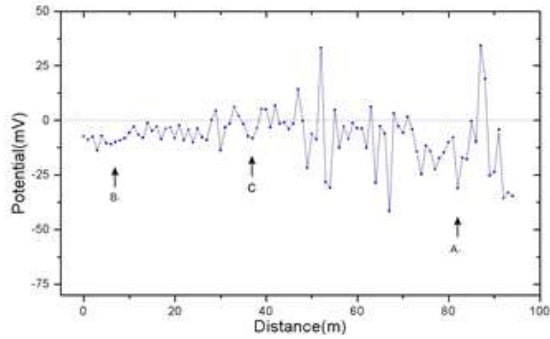
Line 3의 결과는 <그림 6.11>과 같이 수평거리 35 m 지점에 작은 전위차가 있는 음의 이상대(C3) 나타났다. 또한 수평거리 76~94 m 구간에 35 mV 이상의 전위차가 있는 음의 이상대(A3)가 나타났다.

결과적으로 <그림 6.9>~<그림 6.11>에서 A형의 경우 전위차가 크고 측선간의 연속성과 이상대 위치의 연속성이 양호한 것으로 나타났는데, 이는 여수로 방향으로 집중되어 흐르는 물의 흐름에 의한 누수 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.

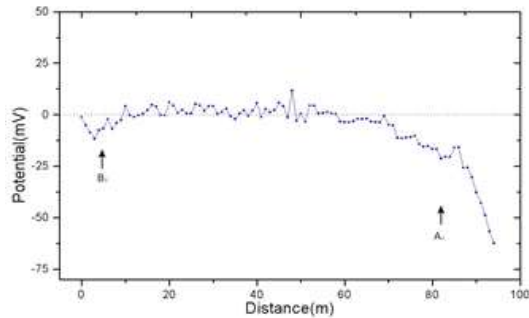


<그림 6.11> 그라우팅 이전 자연전위 탐사결과 (Line 3)



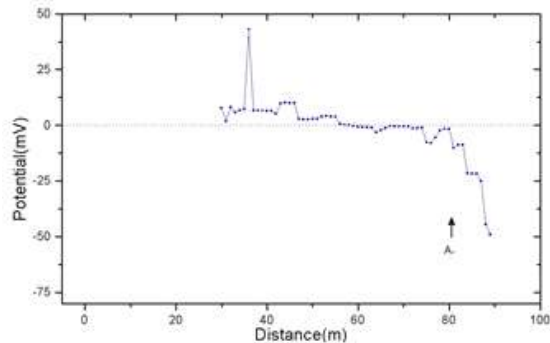
<그림 6.12> 그라우팅 이후 자연전위 탐사결과 (Line 1)

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)

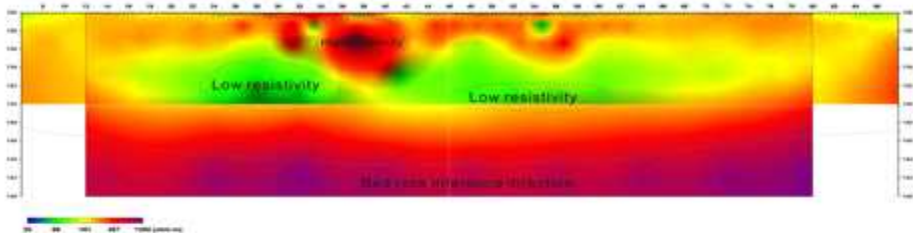
Line 3에서의 결과는 <그림 6.14>와 같이 수평거리 80~94 m 구간에 50 mV 이상의 전위차가 있는 음의 이상대 (A3)가 나타났다.



<그림 6.14> 그라우팅 이후 자연전위 탐사결과 (Line-3)

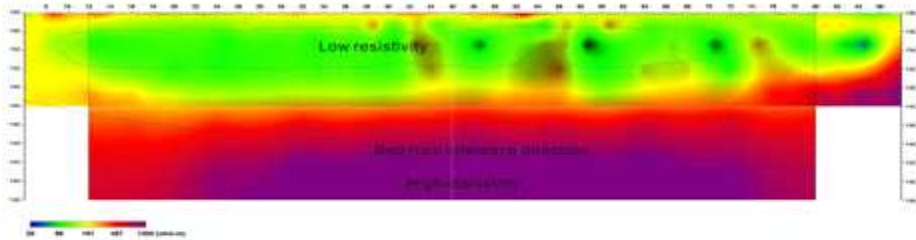
결과적으로 <그림 6.12>~<그림 6.14>에서 A형의 경우 Line 1에서 전위차의 변화가 있었으며, Line 2와 Line 3에서는 크기와 연속성이 양호한 것으로 나타났는데, 이는 전위분포가 불안정한 것으로 보아 그라우팅 이후 차수에 의한 것으로 해석되었다. 또한 Line 2와 Line 3에서의 이상대는 차수 이후 잔류하는 수분의 영향인 것으로 해석되었다. B형의 경우 Line 1과 Line 2에 분포하며, Line 3에는 B형이 나타날 것으로 예상하였지만, 현장 여건상 자료를 획득하지 못하였다. 다만, 전위차가 감소한 것으로 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.



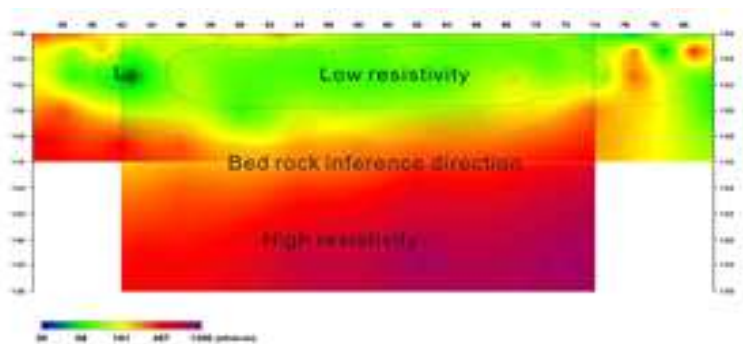
<그림 6.15> 그라우팅 이전의 전기비저항 탐사결과 (Line 1)

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)

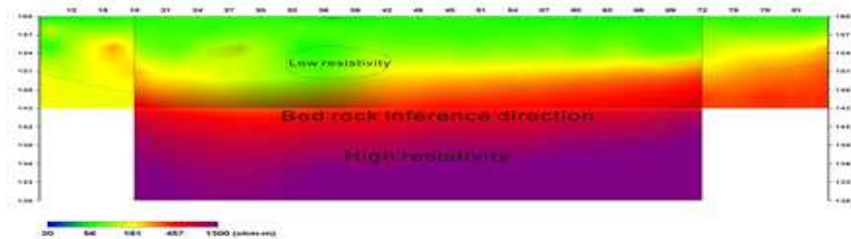
Line 3에서는 수평거리 40~44 m 구간의 해발고도 150~154 m 부근과 수평거리 45~75 m 구간의 해발고도 150~155 m 부근에 폭넓은 저비저항대가 분포하는 것으로 나타났는데, 이는 Line 1 선상에서 생긴 누수가 Line 2를 거쳐 나타나는 저비저항대로 판단되었다. 해발고도 151 m 이하에는 고비저항대 분포하는 것으로 나타났다.



<그림 6.17> 그라우팅 이전의 전기비저항 탐사결과 (Line 3)

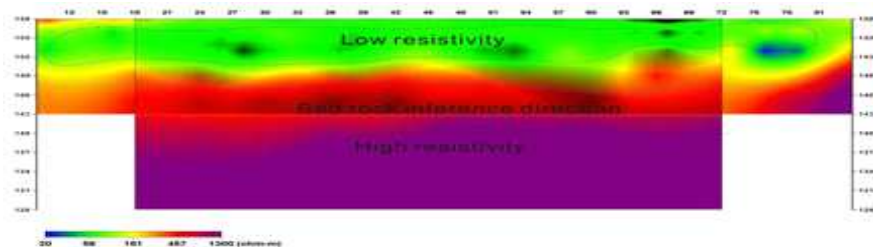
결과적으로 Line 1의 저비저항대는 Line 2에서 점점 넓어지며, Line 3도 같은 양상을 보이므로 연속성이 있는 것으로 해석되었다.

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.



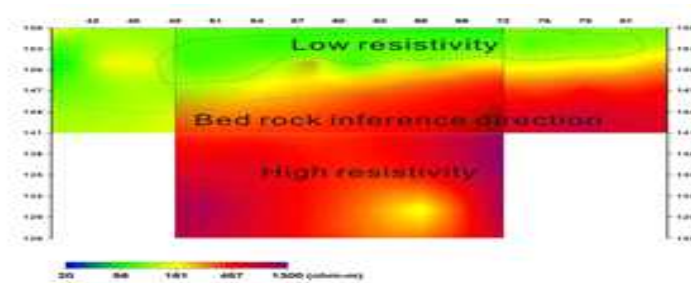
<그림 6.18> 그라우팅 이후의 전기비저항 탐사결과 (Line 1)

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.



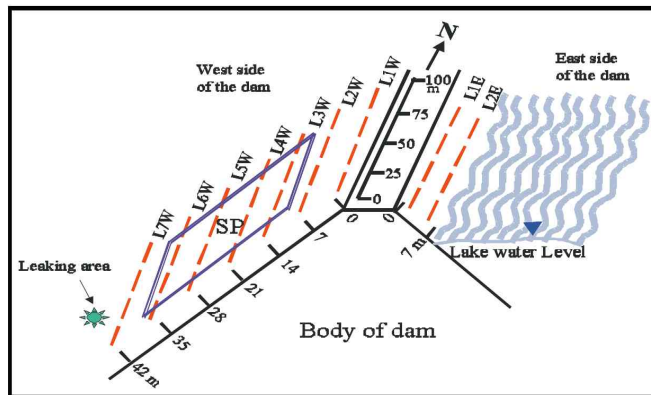
<그림 6.20> 그라우팅 이후의 전기비저항 탐사결과 (Line 3)

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 구역 탐지를 목적으로 전기비저항 탐사와 자연전위 탐사를 수행한 사례이다. <그림 6.21>은 조사 지역 내 전기비저항 탐사와 자연전위 탐사 측선의 모식도를 나타낸 것이다.



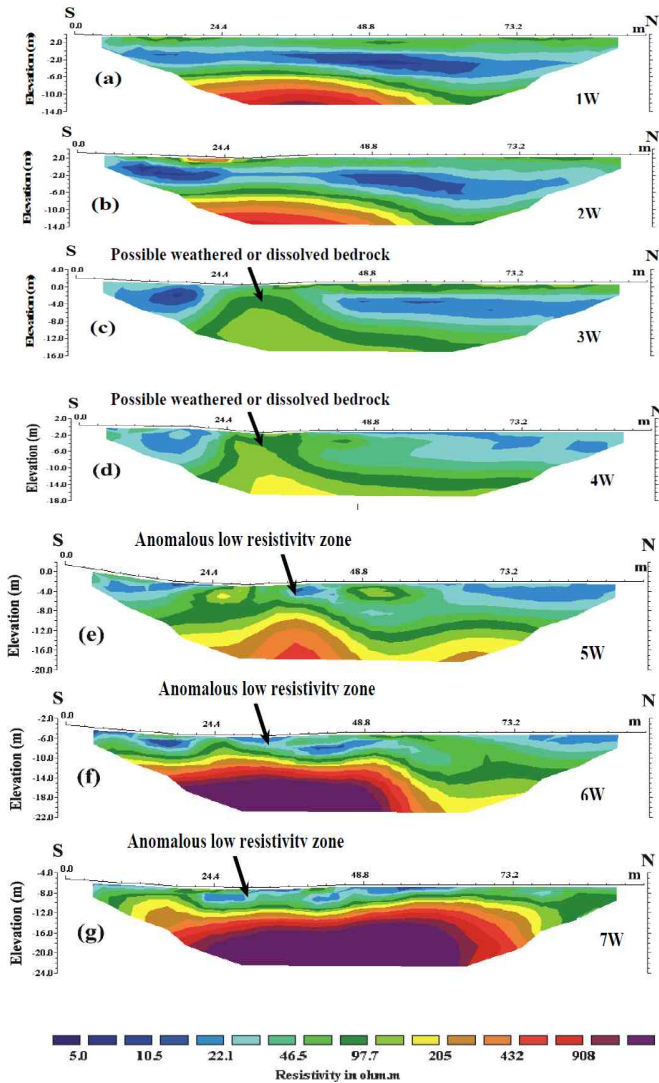
<그림 6.21> 전기비저항 탐사와 자연전위 탐사 측선 모식도

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

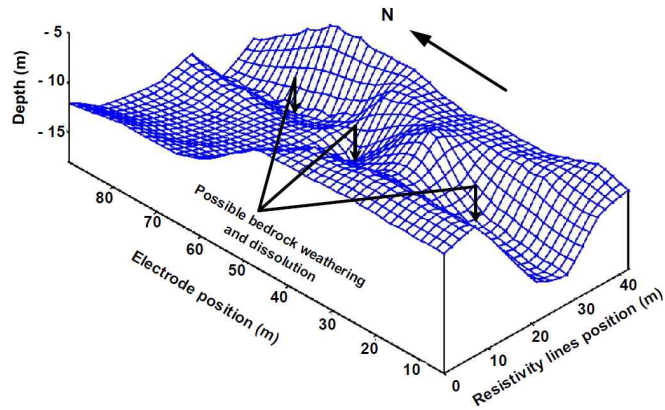
모든 측선	
항목	내용
전극 배열	쌍극자 배열
측선 길이	100 m
전극 간격	3 m

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>.



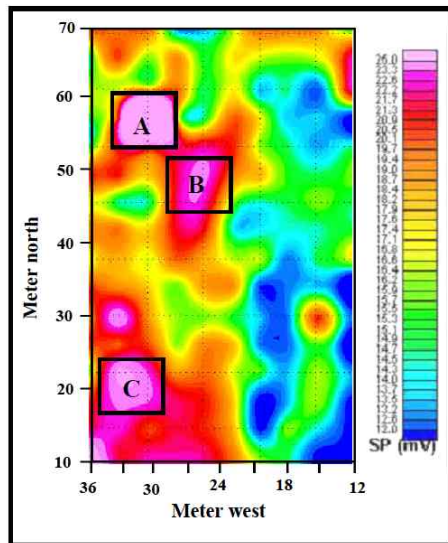
<그림 6.22> 각 측선에 따른 2차원 전기비저항 탐사 역산 결과

자연전위 탐사는 하류부 전기비저항 탐사 측선 L3W~L6W에 걸쳐 grid 형태로 탐사를 수행되었다 <그림 6.23>.



<그림 6.23> 자연전위 탐사 측정 지반의 풍화 지역

<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 6.24> 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.

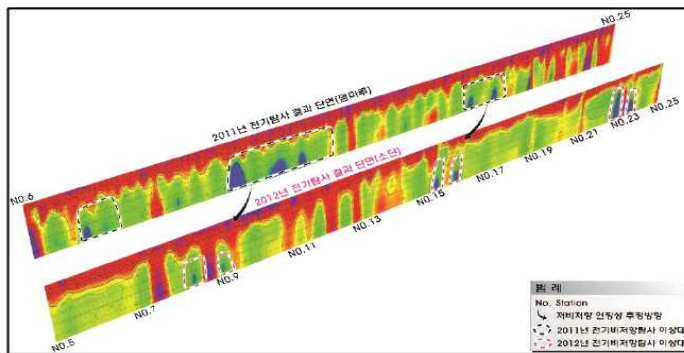
<표 6.13> Line 1의 전기비저항 탐사변수

Line 1 (제체마루)	
항목	내용
전극 배열	쌍극자 배열
측선 길이	2,750m

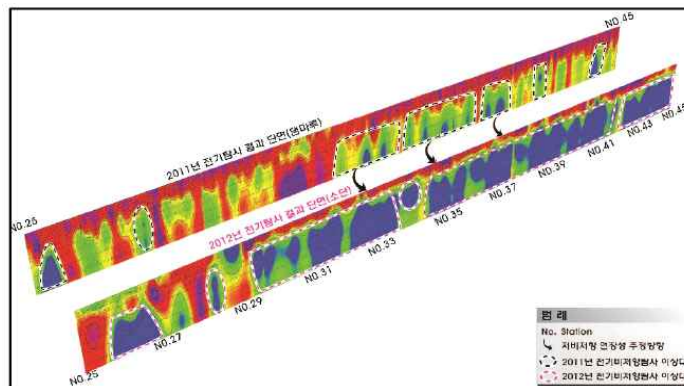
<표 6.14> Line 2의 전기비저항 탐사변수

Line 2 (소단)	
항목	내용
전극 배열	쌍극자 배열
측선 길이	2,750m

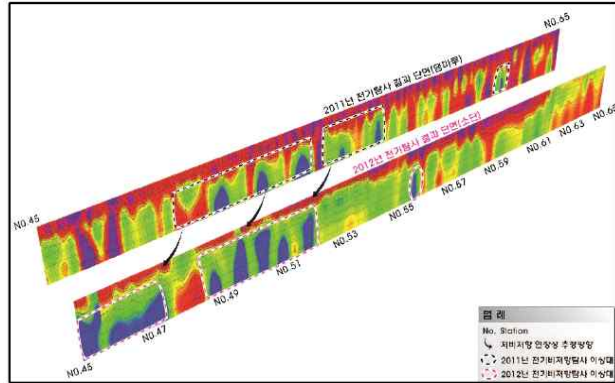
2011년 제체마루 측정 자료와 2012년 소단 측정 자료는 이상대 구간이 제체마루에서 소단의 방향으로 연장성을 갖고 비슷한 양상으로 나타났으며, 소단으로 갈수록 이상대 범위가 넓어지는 현상이 나타났다. 특히, <그림 6.25>와 같은 No.6~25 구간의 결과에 비해 <그림 6.26>과 같은 No.25~45 구간의 경우 더 심화된 현상이 확인되었다. <그림 6.27>의 No.45~65 구간은 상대적으로 측선의 전반부인 No.45~52 구간이 이상대 범위가 확장되는 것으로 나타났다. 참고로 각각의 그림에서 화살표의 방향은 저비저항 연장성 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)

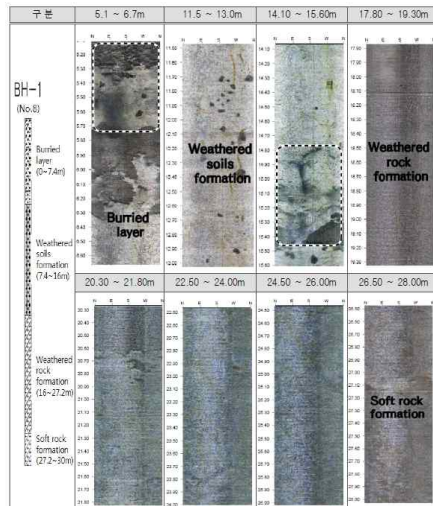


<그림 6.26> 2011년과 2012년의 전기비저항 탐사 단면도 (No,25 ~ 45)



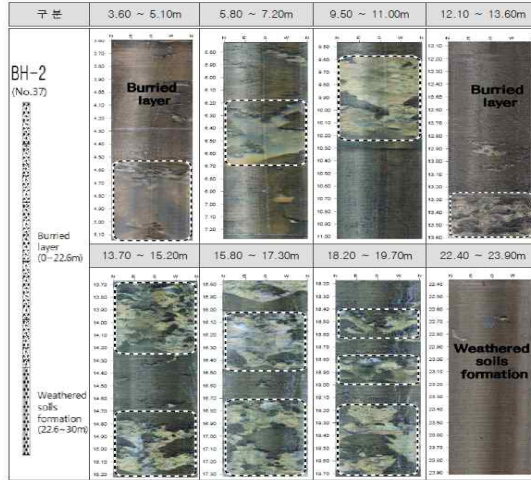
<그림 6.27> 2011년과 2012년의
전기비저항 탐사 단면도 (No.45 ~ 65)

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.

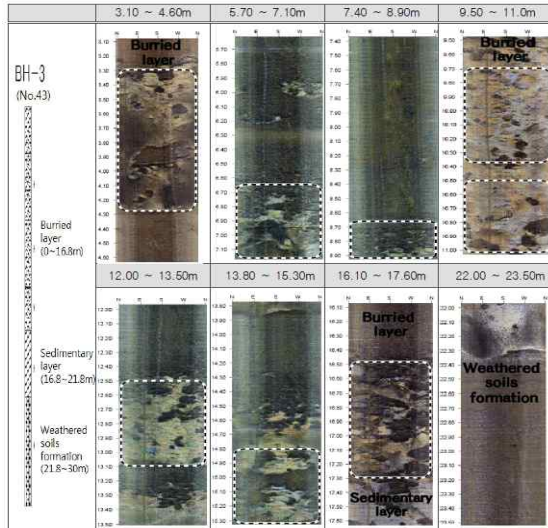


<그림 6.28> No.8 (BH-1)
시추공영상 촬영결과

<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

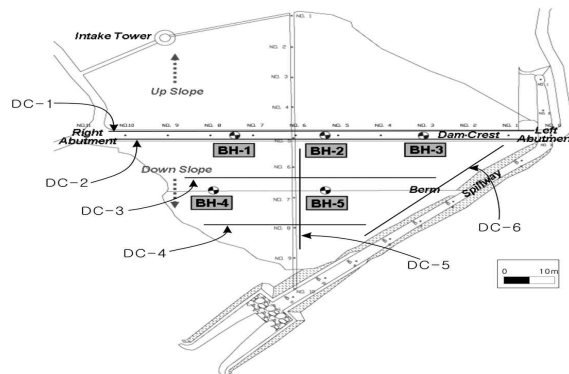


<그림 6.30> No.43 (BH-3)
시추공영상 촬영결과

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

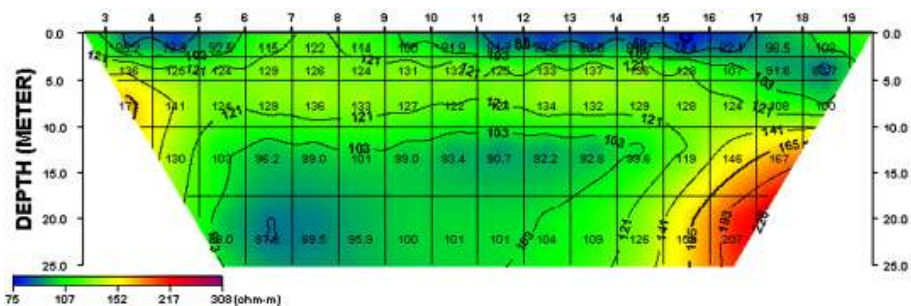
<표 6.17> DC-3 측선의 전기비저항 탐사변수

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

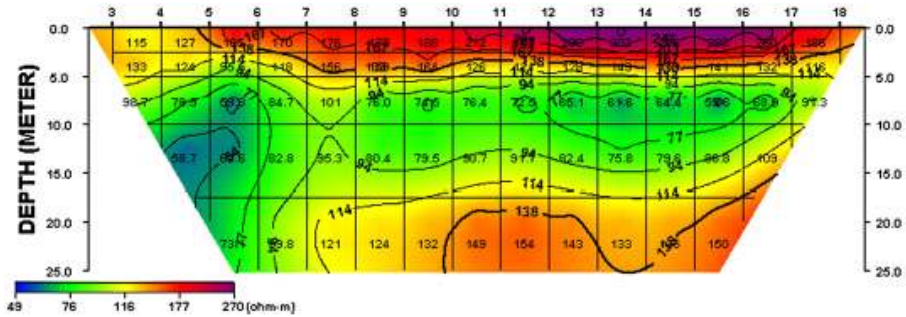
DC-4 (하류사면2)	
항목	내용
전극 배열	쌍극자 배열
전극 간격	7 m
전극전개수(n)	8
탐사 심도	28 m

<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)

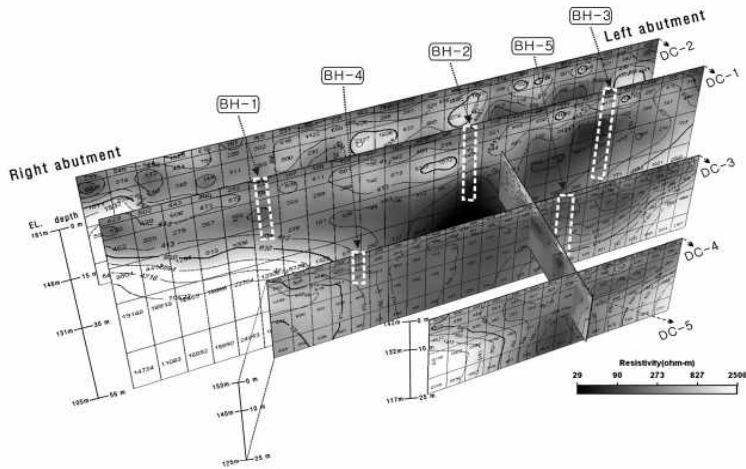
<그림 6.33>은 DC-2 측선의 전기비저항 탐사 2차원 역산결과를 나타낸 것이다. 이 결과에서도 좌측 하단부의 낮은 전기비저항이 나타났다. DC-2 측선은 DC-1 측선과 서로 평행한 측선으로 체체의 성토재 경계부가 상대적으로 취약한 것으로 해석되었다.



<그림 6.33> 전기비저항 탐사 2차원 역산결과 (DC-2)

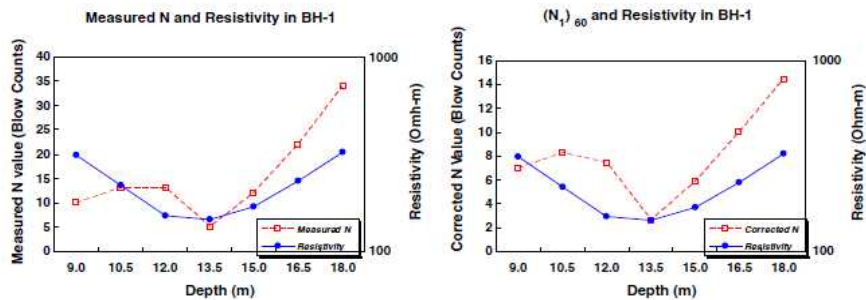
지반조사를 위한 표준관입시험 (SPT)은 시추공의 위치에서 수행되었다. 지표면 아래 1.5 m 간격으로 SPT를 병행하여 각각의 심도에서 단관 코어 배럴을 이용하여 교란 시료가 연속적으로 채취되었다. 전기비저항 분포가 체체의 성토재에 대한 물성과 상관관계가 있다면 SPT 결과인 N값과도 비례 관계를 가질 것으로 예상하였다. SPT의 정밀도를 향상시키기 위해 총 5공의 시추는 무수(無水) 시추조사로 수행되었다. 시추조사 결과, 코어는 실트질 점토, 필터는 실트질 모래, 토석재는 표면 부근의 자갈이나 전석과 하부의 실트질 모래, 그리고 체체마루 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.

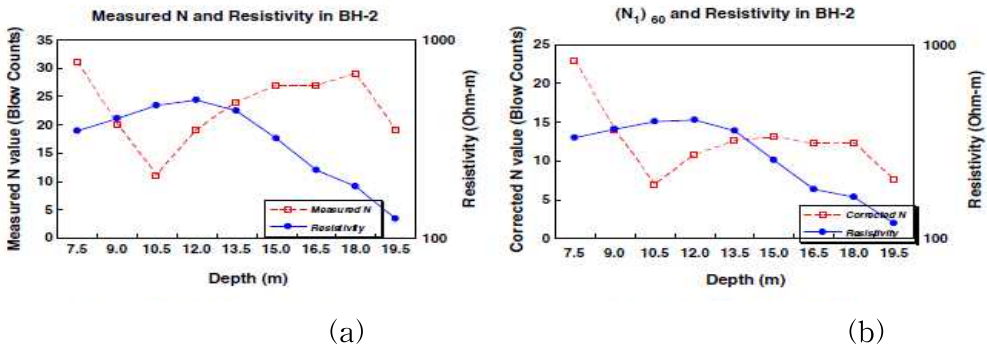


(a)

(b)

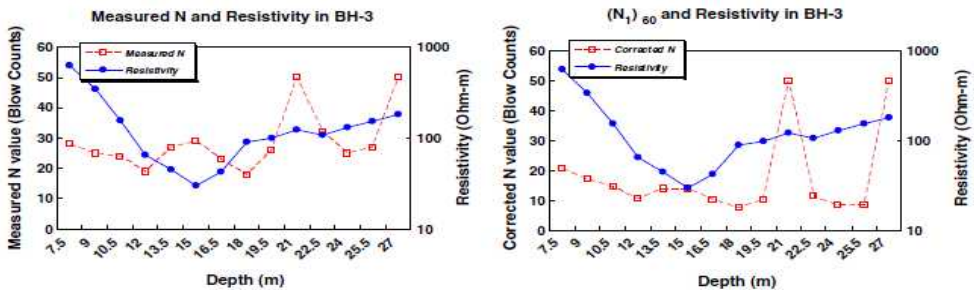
<그림 6.35> BH-1 시추공 위치에 해당되는 전기비저항 분포와 N값
 (a) 동일 지점의 전기비저항과 측정된 N값의 비교, (b) 동일 지점의 전기비저항과 보정된 N값의 비교

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.



<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.



<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

<표 6.19>는 Dpline-1 축선의 전기비저항 탐사변수를 나타낸 것이다. 전극 배열은 쌍극자 배열이 사용되었으며, 축선 길이는 248 m, 전극 간격은 8 m, 전극전개수는 8, 탐사 심도는 28 m가 되도록 하였다.

<표 6.19> Dpline-1 축선의 전기비저항 탐사변수

Dpline-1 (제체마루)	
항목	내용
전극 배열	쌍극자 배열
축선 길이	248 m
전극 간격	8 m
전극전개수(n)	8
탐사 심도	28 m

<표 6.20>은 Dpline-2 축선의 전기비저항 탐사변수를 나타낸 것이다. 전극 배열은 쌍극자 배열이 사용되었으며, 축선 길이는 220 m, 전극 간격은 8 m, 전극전개수는 8, 탐사 심도는 28 m가 되도록 하였다.

<표 6.20> Dpline-2 축선의 전기비저항 탐사변수

Dpline-2 (하류사면 1)	
항목	내용
전극 배열	쌍극자 배열
축선 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

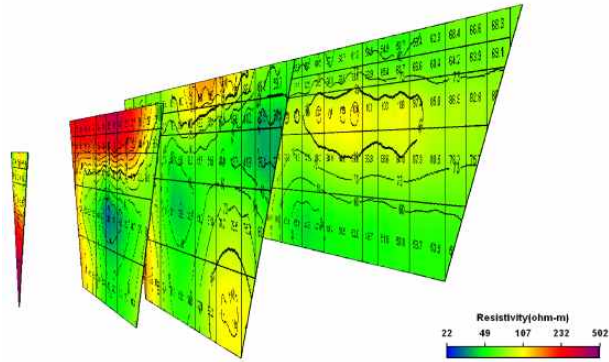
Dpline-3 (하류사면 2)	
항목	내용
전극 배열	쌍극자 배열
측선 길이	165 m
전극 간격	8 m
전극전개수(n)	8
탐사 심도	28 m

<표 6.22>는 Dpline-4 측선의 전기비저항 탐사변수를 나타낸 것이다. 전극 배열은 쌍극자 배열이 사용되었으며, 측선 길이는 측선의 양 끝단에 걸리는 원지반의 영향으로 83 m로 비교적 짧게 설정되었다. 전극 간격은 8 m, 전극전개수는 8, 탐사 심도는 28 m가 되도록 하였다.

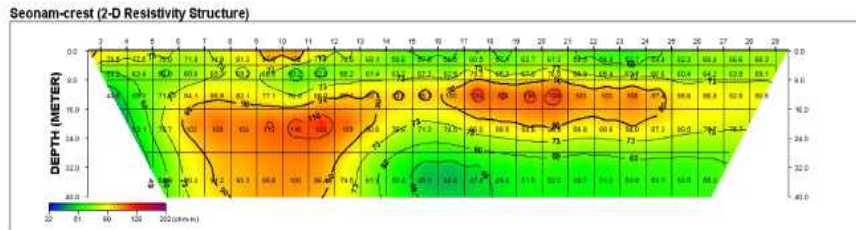
<표 6.22> Dpline-4 측선의 전기비저항 탐사변수

Dpline-3 (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.



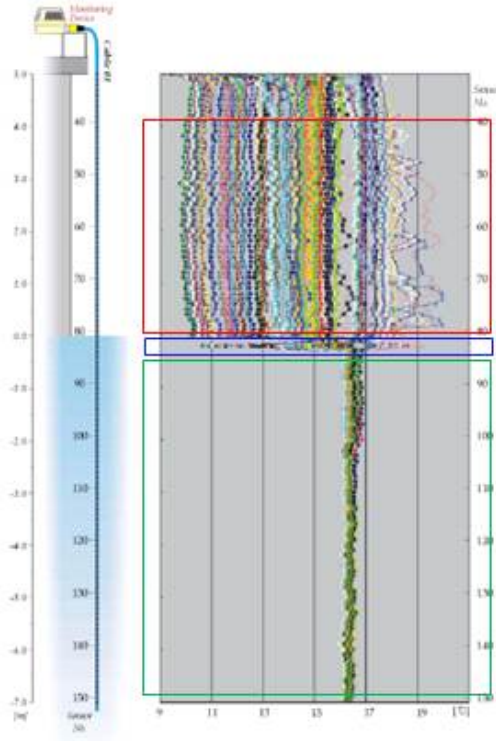
<그림 6.39> 각 측선에서 측정된 전기비저항 탐사 2차원 역산결과



<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 트렌치가 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>.

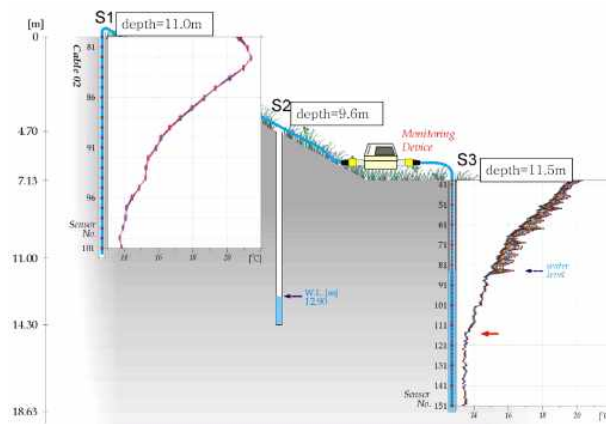


<그림 6.41> 취수탑에서 온도 측정결과

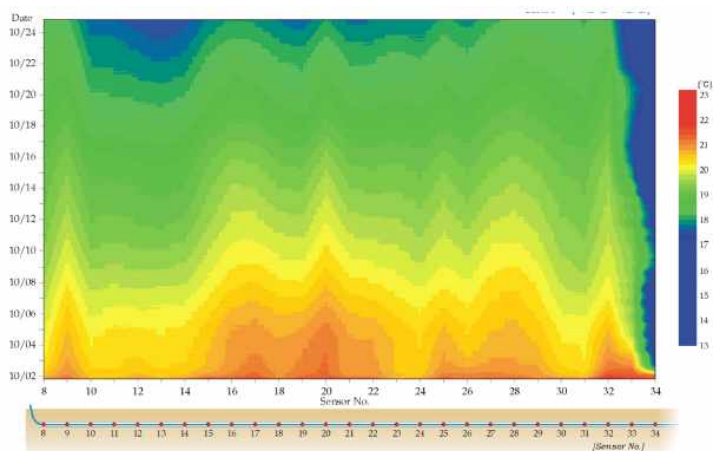
시추공 S1에서는 심도가 깊어짐에 따라 온도가 급격하게 낮아지고 있는 것으로 나타났으며, 시추공 S3에서는 지하수면을 만나는 위치 (<그림 6.42>의 청색 화살표) 상부구간에서는 시간대별 온도 변화 폭이 큰 반면, 지하수면 하부에서 상대적으로 대단히 작은 변화 폭을 보여주고 있어 지하수위 경계가 뚜렷하게 인식되는 것으로 나타났다. 센서 번호 85~115 구간에서는 심도에 따라 점차 온도가 낮아지는 것

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

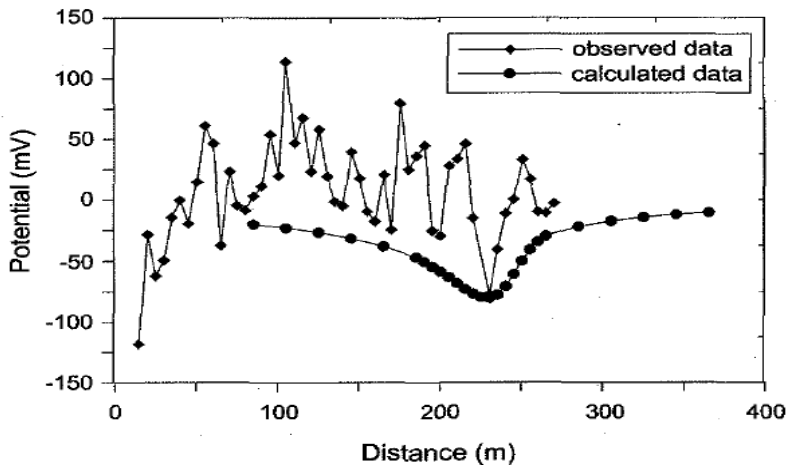


<그림 6.43> 댐체 하부에서의 온도 모니터링 결과

결과적으로 전기비저항 탐사결과의 저비저항대는 온도 모니터링 결과의 온도가 급격히 낮아지는 구간과 일치하는 것으로 나타났다. 이러한 구간들은 누수 취약 구간으로 예상되었다.

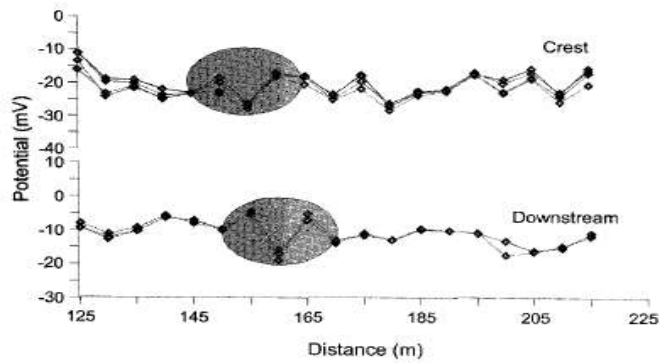
제8절 저수지 누수탐지를 위한 자연전위 탐사 적용사례들

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.

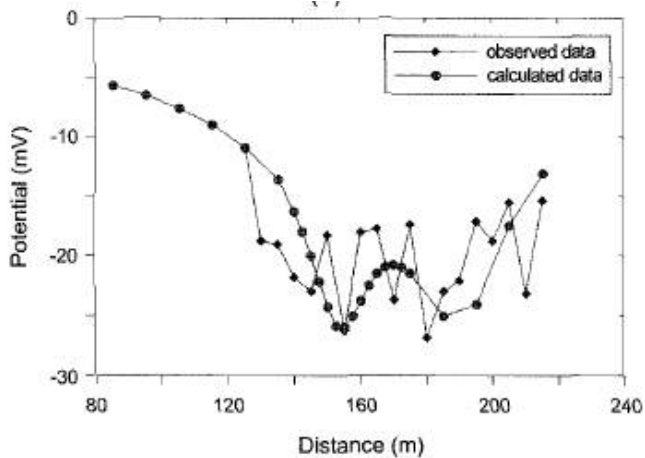


<그림 6.44> 양안 접합부를 통한 누수 유형에서의 자연전위 탐사결과

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 유로가 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.

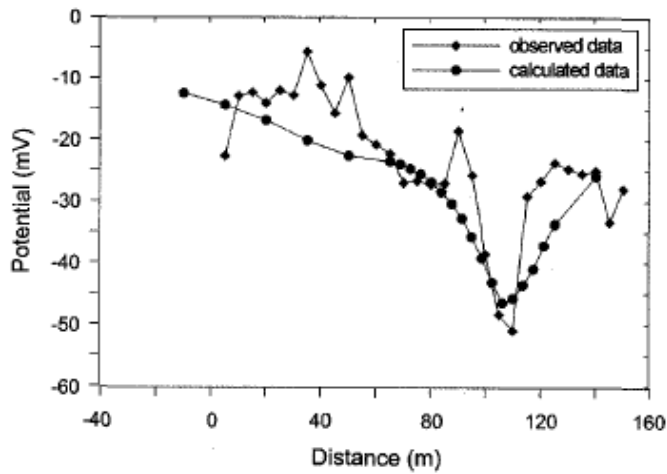


<그림 6.45> 제체마루와 하류사면의 음의 이상대 위치



<그림 6.46> 파이핑 형태의 누수 유형에서의 자연전위 탐사결과

복합적 요인에 의한 누수 유형으로는 저수지 전체 구간에서 사면의 활동과피와 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

제 7 장

결론 및 향후전망

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 축선 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 체체를 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 체체의 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 체체의 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 체체의 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
- 손호용, 김지수, 송영수, 윤왕중, 김이수, 서만철, 김기영, 조인기, 김학수, 2000, 지반환경 물리탐사. 시그마프레스.
- 송성호, 권병두, 양준모, 정승환, 2002, 수리시설물 누수탐지에 대한 자연전위법 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.

참여연구원

목 차	소 속	성 명
제1장 연구 개요	농어촌연구원	송성호
제2장 수리시설물 물리탐사 적용방법	농어촌연구원	용환호
제3장 정밀안전진단 지구 물리탐사 수행 체계	농어촌연구원	용환호
제4장 물리탐사 이론	농어촌연구원 강원대학교	송성호 오석훈
제5장 물리탐사 지침 개선방향	농어촌연구원	송성호 용환호
제6장 제체에서의 물리탐사 적용 대표사례	강원대학교	오석훈
제7장 결론 및 향후전망	농어촌연구원	송성호

주 의

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

■ 발 행 처

연구과제명 : 농업기반시설 정밀안전진단 평가기법 및 기준개선	
발 행 일	2015. 12
발 행 인	이 용 직
발 행 처	한국농어촌공사 농어촌연구원
주 소	경기도 안산시 상록구 사동 해안로 870 전 화 031 - 400 - 1700 FAX 031 - 409 - 6055
■ 이 책의 내용을 무단 전재하거나 복사하면 법에 저촉됩니다. 단, 이 책의 출처를 명시하면 인용이 가능합니다.	