

전기비저항탐사에 의한 제당의 누수구간 탐지

Delineation of water seepage in earth-fill embankments by electrical resistivity method

정 승 환 (Chung, Seung Hwan)	한국자원연구소
김 정 호 (Kim, Jung Ho)	한국자원연구소
양 재 만 (Yang, Jae Man)	농어촌진흥공사
한 규 언 (Han, Kyu Eon)	농어촌진흥공사
김 영 웅 (Kim, Young Woong)	농어촌진흥공사

요약/Abstract

파쇄대 및 균열대를 따라 비교적 심부에 분포하는 우리나라 암반 지하수 탐지를 위한 효과적인 물리탐사방법과 농업용 제당의 누수구간 탐지를 위한 소위 비파괴적 탐지방법의 개발을 위한 연구를 실시하였다. 이를 위해 종래 사용하던 1차원적인 수직 비저항탐사(Vertical electrical sounding)보다 2차원적인 수평-수직 탐사를 동시에 수행할 수 있는 쌍극자 비저항배열(dipole-dipole array)탐사법을 이용하는 야외탐사방법의 확립과 획득된 자료의 정량해석을 위한 computer program을 개발하였다.

본 연구에서 쌍극자배열탐사법과 정량해석 program의 효율성을 검증하기 위해 이미 지질 및 시추 조사가 종료된 두 곳의 누수 제당에 대하여 야외탐사를 하였다. 야외조사를 통해 획득된 자료들에 대하여 본 연구를 통해 개발된 program을 활용하였던바, 제당누수구간 및 파쇄대 내지는 단층대내에 발달되는 암반지하수 탐지에 효율적임이 입증되었다.

본 연구에서 개발된 쌍극자 비저항탐사법과 해석 program은 암반지하수 탐지는 물론 누수제당의 누수구간 탐지 및 안전성 진단 등에 적극 활용할 수 있으리라 판단된다.

Geophysical methods applied to water seepage problem in earth-fill embankment attempt to detect and map the estimate of size and depth of the seepage path. Seepage zones generally produce low resistivity anomalies due to high saturation of water. Dipole-dipole resistivity surveying technique, which is actually a combined sounding-profiling procedure, was used to delineate the seepage path through this study.

In this study, the finite difference methods to solve the electric potential distribution in 2 1/2 dimension, was adopted as the numerical scheme for the forward problem. Second order Marquart's method, one the iterative damped least square methods, was selected for the automatic inversion. The computer program was implemented in FORTRAN 77 for 16-bit personal computer.

In this paper, we present a case history which illustrates the application of dipole-dipole resistivity method to the delineation of water flow in earth-fill structures.

Also the automatic two-dimensional resistivity inversion was applied to a field data where the interpretive advantages of the program become evident.

서 언

근자에 농업용 제당(堤塘)의 노후화 내지는 시공시 잘못된 시공등으로 제

당에서의 누수사례가 많이 보고되고 있다. 이러한 누수제당의 보수유지를 위한 누수구간 탐지를 시추조사등을 통한 표준 관입시험, 투수시험 등에 의존하였으나

경비가 많이 소요될 뿐만 아니라 원인구간 규명에 비효율성이 많다. 소위 비파괴적 탐지에 의하여 누수구간 규명을 위한 시도의 하나로 2차원적 전기비저항(電氣比抵抗)탐사를 적용하고자 한다. 일반적으로 파쇄대 또는 단층대는 점토광물 및 지하수가 많이 함유되어 있어 주위보다 전기비저항이 낮다. 이러한 전기적 성질의 이상을 이용하여 지표에 노출되어 있지 않은 파쇄대 및 균열대 탐지에 2차원적인 수평-수직 탐사를 행하는 것이 1차원적인 수직비저항(垂直比抵抗)탐사를 행하는 것보다 더 효율적이다. 농업용 제당의 누수구간은 주위보다 물이 많이 포화되어 있어 전기 전도도(傳導度)가 높다. 그러므로 농업용 제당의 누수구간 탐지는 지표 천부(淺部)에 발달된 파쇄대 탐지와 같은 문제로 볼 수 있으므로 2차원적 비저항탐사로 탐지 가능한 문제로 파악될 수 있다.

본 연구에서는 2차원적 전기비저항 탐사법의 하나인 쌍극자배열(dipole-dipole array)법을 이용하여 농업용 제당 누수구간 탐지와 암반 지하수 탐지에 효율적인 야외 탐사방법 및 자료해석 방법을 확립하고자 한다. 지표에서 획득된 비저항 탐사자료로부터 지하하부 전기전도도 구조를 자동적으로 해석할 수 있는 해석프로그램을 개발하여 파쇄대 및 누수구간 탐지능력을 제고하고자 한다. 본 연구에서는 쌍극자 비저항탐사 방법과 해석프로그램의 효율성을 검토하기 위해 이미 시추등을 통하여 누수구간이 알려진 두 지역의 농업용 제당에서 탐사를 행하여 탐지 능력과 프로그램의 효율성을 시험하였다.

쌍극자배열(Dipole-dipole array) 전기비저항 탐사의 원리

Fig.1에서와 같이 지표면에 매설한 한쌍의 정,부(正,負) 전류전극 C₁(+I)와 C₂

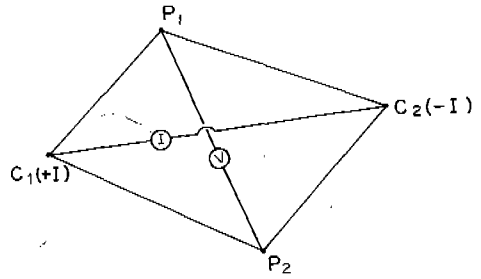


Fig.1 General current and potential electrode configuration.

(-I)를 가정하고 임의의 점 P₁, P₂에서의 전위를 생각하여 보자. 이때 P점의 전위는 C₁과 C₂에 의한 전위차 ΔV로 나타나며

$$\Delta V = V_{p1} - V_{p2} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{C_1 P_1} - \frac{1}{C_2 P_1} - \frac{1}{C_1 P_2} + \frac{1}{C_2 P_2} \right)$$

이로부터 비저항 ρ를 구하면

$$\rho = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{C_1 P_1} - \frac{1}{C_2 P_1} - \frac{1}{C_1 P_2} + \frac{1}{C_2 P_2} \right)} \frac{\Delta V}{I}$$

이며, 상기식에서

$$K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{C_1 P_1} - \frac{1}{C_2 P_1} - \frac{1}{C_1 P_2} + \frac{1}{C_2 P_2} \right)}$$

를 기하학적 계수(Geometric factor)라고 하며 각종 전극배열 방식에 따라 계산하면 구할 수 있다. 균질등방성 대지에서의 전기비저항치는 어떤 전극배열방법의 경우에도 일정할 것이다. 그러나 만일 대지가 불균질할 때 얻어진 비저항치는 그 자체가 대지 진비저항치(眞比抵抗値)를 나타내는 것은 아니다. 따라서 전극배열형태에 따라 전기비저항치도 달라지게 된다. 이때 이 전기비저항치를 겉보기 비저항(apparent resistivity)이라고 부른다. 쌍극자

배열은 Fig.2와 같이 전위 및 전류전극 간격이 모두 a이므로 기하학적 계수

$$K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{(n+1)a} - \frac{1}{na} - \frac{1}{(n+2)a} + \frac{1}{(n+1)a} \right)}$$

$$= n(n+1)(n+2)\pi a$$

가 되어 쌍극자 배열에 의한 겉보기 비저항 (apparent resistivity)은

$$\rho_a = n(n+1)(n+2)\pi a \frac{\Delta V}{I}$$

가 된다.

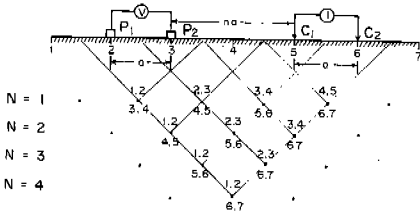


Fig.2 The dipole-dipole array and an apparent resistivity pseudosection from expanding the array.

쌍극자 비저항탐사는 Fig.2와 같이 전류, 전위전극 간격 a를 탐사목적, 정밀도 등을 고려하여 결정하고 a, 2a, 3a, ... na간격으로 단계적으로 이동하면서 전위차를 측정하여 겉보기 비저항치를 계산한다.

야외탐사 결과는 Fig.2와 같이 전위전극 중심과 전류전극의 중심을 연결하는 선을 밑변으로 하는 직각 이등변 삼각형의 꼭지점에 겉보기 비저항값을 기입하여 수평 및 수직적 변화를 탐지할 수 있다. 이와같은 쌍극자배열 탐사 결과 획득된 겉보기 비저항 도면을 가단면도(pseudo-section)라고 한다. 이 가단면도(假斷面圖)에 나타난 겉보기 비저항값은 암석의 전기비저항치를 나타내는 것이 아니고, 아울러 표시된 수직점이 얻어진 비저항값을 유지시키는 진짜 심도를 표시하는 것도

아니다. 그러므로 이를 해석하기 위해서는 컴퓨터에 의한 해석 프로그램이 필요한 것이다.

쌍극자 배열방법은 신속하게 2차원적 수직-수평탐사를 행할 수 있어 비교적 광역적으로 지하 2차원 구조, 특히 전기전도도 구조(Geoelectric structure)를 파악할 수 있으며 전극간격 전개수(number of separation) n을 조정하므로써 수직변화 양상을 신속하게 탐지할 수 있다. 그러나 쌍극자 배열방법에 의한 비저항 탐사시 지표 천부의 수평적 전기전도도 변화(lateral conductivity variation)에 대단히 민감하므로 그로부터 야기되는 이상대(異常帶)를 정확히 해석할 수 없는 어려움이 있다. 이러한 난점을 해결하기 위해서 본 연구에서는 임의의 지하구조에 대한 이론치를 계산할 수 있는 컴퓨터에 의한 수치 Modeling방법 및 자동역산(Automatic inversion)방법을 개발하였다. 컴퓨터에 의한 수치 Modeling과 자동역산에 관한 설명을 부록 A-1, A-2에서 약술한다.

제당누수 조사에 대한 적용

쌍극자 탐사방법 및 본 연구에서 개발된 탐사자료 해석 소프트웨어를 이용하여 현재 문제가 되고 있는 농업용수 제당의 누수구간 탐지 가능성에 대한 연구를 수행하였다. 1988년 농진공에서 시추조사까지 완료된 전북 부안지역과 충남 청양지구 소재의 두 저수지 제당을 연구 대상으로 채택함으로써, 이미 조사된 결과와 본 연구에서 획득된 탐사자료 및 계산결과를 비교하여 오차정도 및 적용성을 검토할 수 있도록 하였다(농진공(1),1987; 농진공(3),1988). 대개의 경우 기반암의 심도가 최대 20m 내외이므로 쌍극자 배열탐사의 가탐(可探)심도를 $na \times 0.5$ 로 간주하여, 좀 더 자세한 조사를 목적으로 쌍극자 간격 a를 5m, n=10으로 하였다. 충남

청양지역 화암 저수지의 경우만 설명하기로 한다.

조사제당에 대한 지질조사는 1988년 농진공에 의해 4공의 시추조사를 비롯한 표준관입시험, 투수시험 등에 걸쳐 실시된바 있다. 본 저수지 및 제당에 관한 개요는 다음과 같다.

소재: 충남 청양군 화성면 화암리
 몽리(蒙利)면적: 67ha
 유역면적: 170ha
 제당길이 (토언제): 128m
 제당높이: 평균 13m
 여수토(餘水土: 콘크리트) 길이: 10.7m

본 제당은 상기한 128m의 중심점토를 사용한 토언제와 함께 좌, 우단부의 구릉지로 형성된 자연제방으로 형성되어 있다. 제당의 우안부에 여수토가 위치하며 토언제 E.P로 부터 여수토까지의 자연제방의 길이는 약 50m로서 화강편마암으로 구성된다. 좌안부 자연제방은 퇴적암류로 구성되며 세일 및 세립질 사암으로 화강편마암과 1m폭으로 교대하여 나타난다(농진공(2), 1988).

쌍극자 탐사의 측선(測線)은 좌안부의 퇴적암류로 구성된 자연제방이 끝나는 지점을 기점으로 하여 총연장 160m에 걸쳐 쌍극자의 간격을 5m로 하여 실시하였다. 측정번호는 0에서 32까지이며 1988년 농진공 조사의 시추공 BH-1은 본 조사의 측정 No.15에 BH-2는 측정 No.20+2m에, BH-3은 No.29+2m에 해당된다.

본 제당의 누수현상은 농진공 보고서에 의하면 토언제당 우안부와 구릉지 자연제방의 접촉부, 본 측정 번호 No.20+3m~No.24+3m 구간 외제(外堤) 사면 하단부에서 누수현상이 발견된다. 또한 본 탐사시 인근에 거주하는 주민의 설명에 의하면 만수위 때는 상기한 누수구간뿐 아니라 측정 번호 No.5~No.15 사이에 누수가 발생된다

고 한다.

Fig.3은 쌍극자 간격이 5m 일때 야외 조사 자료를 보여주는 것으로 비저항치의 고저에 따라 등고선으로 나타낸 것이다. 가단면도를 관찰할 때에 측정6에서 19까지는 500-1200 ohm-m 정도의 고비저항(高比抵抗)과 300 ohm-m 내외의 저비저항(低比抵抗), 그리고 그 하부의 상대적으로 높은 고비저항의 층서구조가 발달함을 알수 있다. 이는 최상부의 물에 포화되지 않은 표토층, 내지는 사질 점토암, 그 하부의 물에 포화된 점토층, 그 하부의 기반암 내지는 원지반의 구조를 나타내는 것으로 유추된다. 한편 측정 0에서 5에 걸쳐 n=1에서 5까지 및 측정 5에서 10까지 n=6에서 10에 걸쳐 나타나는 고비저항대는 제당 좌안부의 퇴적암류로 구성된 자연제당의 하부의 연장으로 유추된다. 또한 측정 24번을 중심으로 n=1에서 10까지 사선 형태로 대상으로 발달되는 높은 고비저항대는 화강편마암류로 구성되는 자연제당을 의미하는 것으로 추정된다. 한편 측정 27에서 32까지 상대적으로 낮은 겉보기 비저항치를 나타내는 것은 측정 27에서 32까지 자연제당위에 개간된 밭의 토양층을 의미한다. 그러나 그 하부에 겉보기 비저항값이 점차 높아지는 현상은 화강편마암류가 그대로 연장되어 발달함을 알수 있다. 가장 흥미로운 사실은 측정 24에서 26까지 n=7에서 10에 걸쳐 나타나는 저비저항 이상대이다. 이는 이미 조사된 화강편마암류의 자연제당과 토언제당의 경계부위 하단부 누수와 관계 있을 것으로 유추된다. 이와 아울러 측정 9에서 12까지 n=5에서 7에 걸쳐 나타나는 저비저항 이상대는 만수위때의 그 부근의 누수와 관계가 있을 것으로 사료된다.

상기한 바와 같이 이상대 및 구조의 유추를 정량 해석하기 위해 역산 프로그램 RS2DINV로써 역산을 수행하여 비저항분포를 나타낸 것이 Fig.4이다.

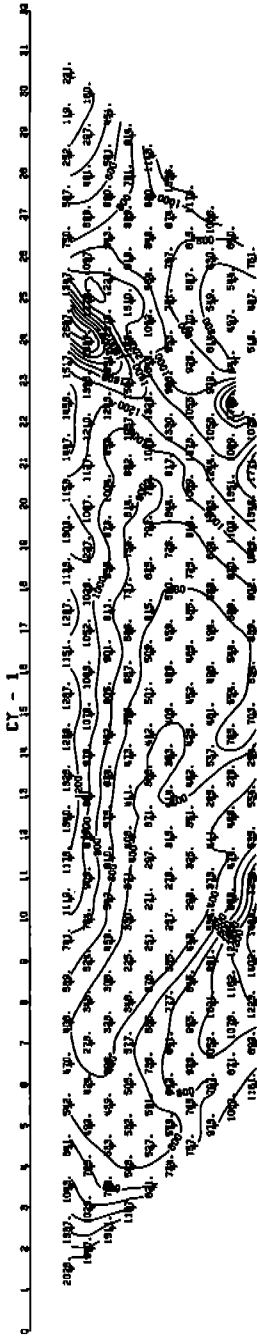


Fig.3 Dipole-dipole resistivity field data pseudosection from the earth fill embankments of Hwaam reservoir, Chungyang, Chungchungnamdo.

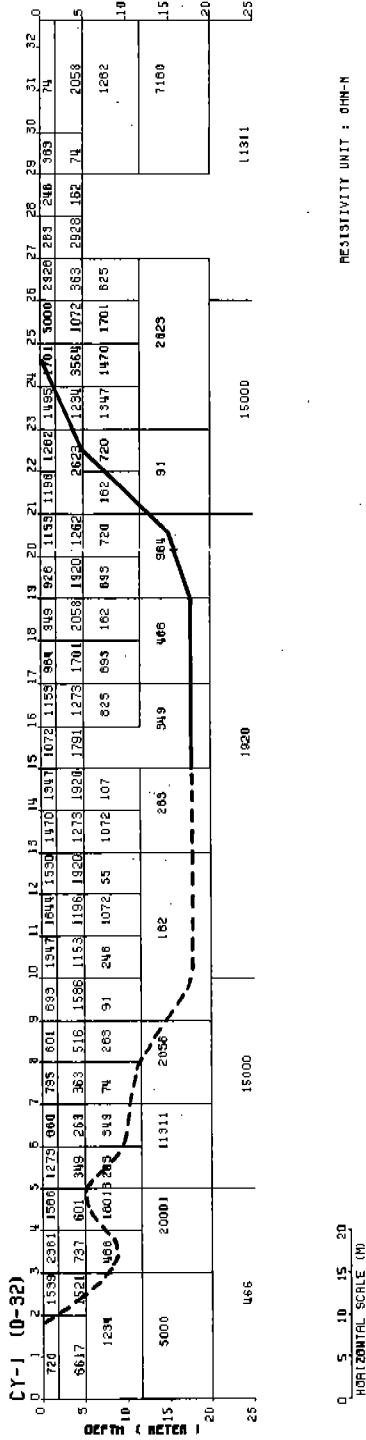


Fig.4 The resistivity distribution interpreted by two-dimensional inversion program, RS2DINV. The solid line indicates the excavated base confirmed by drill. The dotted line is inferred by the dipole-dipole resistivity inversion result.

Fig.5는 비저항의 고저에 따라 명암을 16 단계로 구분하여 도시한 것이다. 명도가 큰 것일수록 저비저항에 해당되고 암도가 클수록 고비저항치를 나타낸 것이다. Fig.6은 역산 결과 계산된 2차원 비저항 분포 Fig.4를 입력으로 하고, modeling 프로그램을 이용하여 계산한 이론 비저항 가단면도이다. 이론자료인 Fig.6과 현장 조사자료인 Fig.3을 비교하면 위에서 설명한 현장자료의 특성이 전반적으로 잘 부합될 뿐 아니라 자세한 등고선의 형상까지도 대단히 유사함을 알 수 있다. 이는 역산결과 획득된 2차원 비저항분포인 Fig.4의 정확성을 증명하는 것이다.

Fig.4에서 실선은 시추조사 결과 확인된 원지반선을 나타낸 것이며, 파선은 이에 연결하여 계산된 2차원 비저항으로부터 유추한 지반선을 그린 것이다. 실선과 Fig.4의 20m 하부의 1000ohm-m 이상의 고비저항대와 비교할 때 2m 정도의 오차를 갖는 상당히 정확한 결과를 보여줌을 알 수 있다. 또한 우안부의 자연 제방을 형성하는 화강편마암과 좌안부의 퇴적암류로 구성된 자연제방과의 원지반선에서의 경계를 알 수는 없으나 Fig.4의 심부에서의 고비저항대 발달상황으로 미루어 유추한 원지반선으로 보아, 측정점 9에서 측정점 20까지는 20m 내외에 심도로 기반암이 발달되며, 측정점 9에서 측정점 0으로 가면서 점차 그 심도가 알아짐을 유추할 수 있다. 기반암에서의 화강편마암과 퇴적암류의 경계부위가 잘 나타나지 않음은 기반암에서의 두 암석이 모두 신선하여 Fig.4에서와 같이 상당히 높은 비저항을 갖기 때문으로 사료된다.

본 역산결과가 보여주는 가장 흥미로운 점은 측정점 21과 측정점 23 하부의 심도 약 12m 와 20m 사이에 발달하는 92 ohm-m 저비저항대이다. 이 저비저항 이상대의 위치 및 심도는 현장에서 관찰할 수 있는 제당 하단부의 주 누수지

점과 대단히 잘 일치한다. 또한 이 저비저항 이상대는 현장자료 겹보기 비저항 가단면도인 Fig.3의 측정점 24에서 26까지 $n=7$ 에서 10에 걸쳐 발달하는 400ohm-m 이하의 겹보기 비저항 이상대에 대응된다고 생각되며, 실제 누수원의 위치를 생각할 때에 겹보기 비저항 가단면도가 갖는 부정확성을 본 연구에서 개발된 역산을 통하여 해결할 수 있음을 보여준다. 그러나 역산결과가 정확성을 갖기 위해 무엇보다도 필요한 것은 정확한 현장자료의 획득이다. 한편 본 저비저항 이상대를 관통하는 시추공 BH-2의 시추자료에 의하면 심도 4.9m까지는 중심점토(풍화점토)로 구성되며, 4.9~15.4m까지는 풍화된 화강편마암으로 구성된다. 역산결과가 보여주는 BH-2에서의 비저항은 심도 5m까지 1000-2500 ohm-m, 심도 5~12m까지 720 ohm-m, 12~20m까지 92 ohm-m의 저비저항 이상대, 그 하부의 10000 ohm-m 이상의 고비저항대로 나타난다. 시추자료와 역산결과를 비교하면 심도 5m까지의 고비저항은 물에 포화되지 않은 점토층, 그 하부의 720 ohm-m의 저비저항은 풍화된 화강암에 대응된다고 생각되며, 측정점 24~32에 나타나는 같은 심도의 고비저항과 비교할 때, 같은 암종이라도 그의 풍화정도나 균열정도에 따라 비저항이 달라지며 비저항의 고저에 따라 그 정도를 어느 정도 유추할 수 있으리라 기대된다.

Fig.3 및 Fig.4의 측정점 7~8 사이의 심도 5~10m 구간에 나타나는 74 ohm-m, 측정점 9~10 사이의 동일 심도에 나타나는 55 ohm-m의 저비저항대는 만수위 때의 누수원과 관련이 있을 것으로 유추된다.

토의 및 결론

누수제당의 보수,유지를 위한 누수구간 탐지를 시추조사 등을 통한 표준관입시

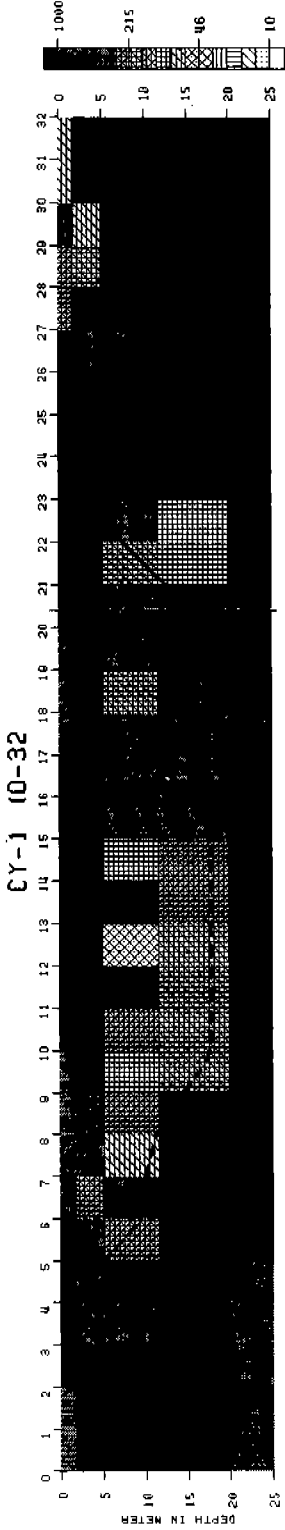


Fig.5 16 grey scale image display of the resistivity distribution in Fig.4.

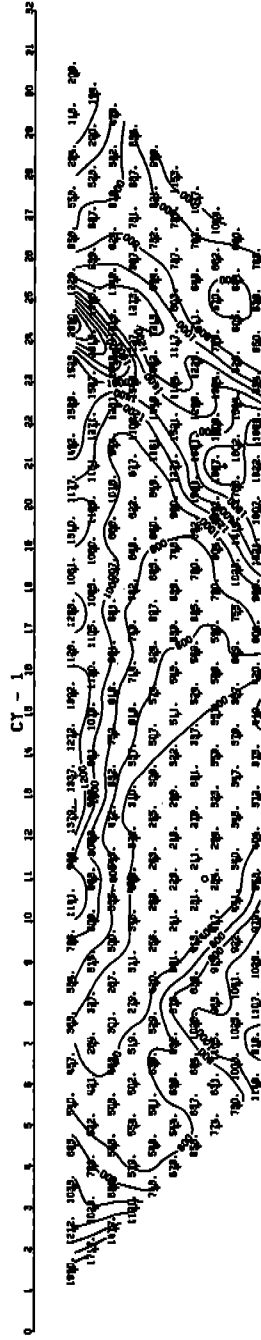


Fig.6 Theoretical resistivity pseudosection calculated from two-dimensional resistivity model shown in Fig.4 compared with field data in Fig.3.

험, 투수시험 등에 의하였다. 이는 소요경비가 과다할뿐 아니라 원인구간 규명에 비효율성이 많이 내재되어 있다. 이러한 기술적 난점을 해결하기 위한 연구의 일환으로 물리탐사방법 중 전기비저항 쌍극자배열 탐사법을 적용하였다. 본 연구를 통하여 누수구간, 심도 및 크기 등을 정확히 해석하기 위하여 2차원 탐사자료의 역산 프로그램을 개발하였다.

본 연구를 통하여 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 충남 청양 화암리 제당에 대해 쌍극자 탐사를 실시하여 2차원 정량해석 결과와 시추결과를 비교 해석하였다. 그 결과 2차원 정량해석을 통한 쌍극자배열 조사는 누수구간 뿐만 아니라 2차원 전기비저항 구조를 잘 나타내 줄수 있음이 확인되었다. 이는 누수구간 확인에 소요되는 시추경비 절감 및 정확한 원인구간 규명구간 규명을 기대할수 있다.

2) 누수제당 조사를 위한 쌍극자 탐사의 쌍극자 간격을 5m, 전극 전개수(number of separation) n 을 10으로 하는 것이 지하의 2차원 비저항 분포를 자세히 파악할 수 있다. 그러나 신속한 탐사 또는 좀더 심부의 탐사가 요청될 경우 쌍극자 간격을 10m, n 을 6 또는 8로 하여 탐사함도 가능하다.

3) 본 연구에서 적용된 쌍극자 배열 비저항탐사법과 개발된 해석 프로그램은 누수제당의 누수구간 탐지와 암반지하수 탐사 또는 제당의 안전성 진단 등에 적극 활용할 수 있다.

4) 누수제당에 대한 쌍극자 비저항 탐사 자료가 많이 축적되고, 한편 제당을 구성하는 물, 점토, 암반 등의 물성연구가 진행된다면 전기비저항치와 공극률 및 수리전도도(水理傳導度) 간의 상관관계를 정량적으로 규명할 수 있을 것으로 사료

된다. 누수제당에 대한 지수(止水) 처리시 주입 grout의 양을 상관관계를 이용하여 계산할 수 있을 것으로 판단된다.

5) grout 공사시 비저항치를 알고 있는 액체를 주입하여 주입 전후의 상대적 변화를 비교하므로써 누수구간의 grouting 효과를 판정하는데 본 연구방법을 적극 활용할 수 있다.

참고문헌

김정호, 1978, 2차원 電氣比抵抗探查 자료의 逆算, 공학박사 학위논문, 서울대학교.

농업진흥공사(1), 1987, 수리시설 개보수 표준지구(문산, 풍산저수지) 보고서, 미발간.

---(2), 1988, 화암지구 지질조사 보고서, 미발간

---(3), 1989, 지하지질 및 누수조사 電探研究, 연구기관 한국동력자원연구소, p. 105.

정승환, 김정호, 1987, Dipole-dipole 비저항 탐사자료의 대화식 2차원 해석연구, 광역탐사연구, KR-86-2-4, 한국동력자원연구소, pp.89-106.

Dey, A. and Morrison, H.F., 1979, Resistivity modeling for arbitrary shaped two-dimensional resistivity structure, Geophysical Prospecting, v.27, pp. 106-136.

Jackson, D. D., 1972, Interpretation of inaccurate, insufficient and inconsistent data, Geophysical Journal of Royal Astronomical Society, v.28, pp. 97-109.

Parker, L.R., 1977, Understanding inverse theory, Annual Review of Earth Planetary Science, v.5, pp. 35-64.

부록

A-1. 有限差分法(finite difference method)을 이용한 forward modeling

Forward modeling은 획득된 물리탐사 자료의 특성으로부터 해석자가 지하구조 모형을 가상하고 가상의 지하구조에 대한 이론자료(theoretical data)를 계산하는 것이다. 계산된 이론자료와 실제의 현장자료(field data)를 비교 검토하므로써 새로운 지하구조 모형을 가정하고, 이에 대한 이론자료를 또다시 계산한다. 이러한 과정을 반복하여 현장자료와 어느정도 근접되는 이론자료를 나타내는 지하구조 모형을 추출하므로써 달성된다. 따라서 forward modeling에 의한 해석은 반복적 시행착오방법(trial-and-error)의 성격을 갖는다. 컴퓨터에 의한 수치 모델링을 이용한 해석은 이미 알려진 지질학적 정보 내지는 해석자의 뚜렷한 주관의 가미가 가능한 장점이 있는 반면 시간과 노력이 대단히 많이 소요된다. 이러한 정량해석 방법은 국내에서는 아직 거의 사용되지 못하고 있는 실정이나, 외국에서는 정밀한 해석을 요하는 부분에 대한 2차원 탐사자료 해석에 사용된다. 본 연구에서는 개발한 임의의 2차원 정보에 대한 수치 모델링 프로그램을 이용하여 해석의 정량화를 기하였다.

본 연구에서는 상대적으로 적은 기억용량과 계산시간, 그리고 용이한 모형 설정, 상대적으로 높은 정확도의 해를 갖는 유한차분법을 이용하여 2차원적 지질구조에 대한 비저항 응답을 계산한다. 본 연구에서 채택된 지하구조는 주향방향인 y축에 평행하며 x,z 좌표에만 의존하는 2차원 구조이나 電源은 3차원적 점(點)전원이므로 전체적으로는 2.5차원 문제이다. 이러한 2.5차원 전기 포텐셜 문제의 해를

구하기 위하여 지질구조의 주향방향인 y에 대해 Fourier 변환을 수행하여 y방향의 공간파수(spatial wave number) k 영역에서 응답을 계산한 후 그 결과를 공간영역으로 Fourier 역변환 시키는 방법을 채택한다. 따라서 실제적인 대부분의 계산은 y방향의 공간파수 영역인 (x,k,z) 영역에서 수행된다. Fig.7은 이러한 2.5차원 전기 포텐셜 문제를 풀기 위한 모식도와 (x,y,z)의 공간 영역 및 (x,k,z)의 공간파수 영역에서의 방정식을 나타낸 것이다. 이 2.5차원 전기 포텐셜 문제에 관한 雙極子 配列 比抵抗 탐사의 16비트 PC를 이용한 수치모델링 기법은 이미 정승환과 김정호(1987)에 의해 자세히 논의되었으므로 본 논문에서는 간단히 약술하며, 수식의 기호는 정승환과 김정호(1987)를 따른다.

2차원 전기 포텐셜 방정식을 수치적으로 계산하기 위하여 (x,z)평면상에서의 반무한공간으로, z방향으로 $j=1, \dots, Nz$ 개의 절점(nodal point)으로 분할한다.

중앙차분법(central difference scheme)으로 근사하면 다음과 같은 연립방정식으로 표시된다.

$$\begin{aligned} & C_L^{ij} \phi_{i-1,j} + C_R^{ij} \phi_{i+1,j} + C_T^{ij} \phi_{i,j-1} \\ & + C_B^{ij} \phi_{i,j+1} + C_P^{ij} \phi_{ij} \\ & = \frac{I}{2} \delta(X_s) \delta(Z_s) \end{aligned} \quad \text{---(1)}$$

여기서 C_L^{ij} , C_R^{ij} , C_T^{ij} , C_B^{ij} , C_P^{ij} 는 절점(i,j)와 그 주위 절점 사이의 결합계수(coupling coefficient)로서 전기전도도 분포 및 표준분할방법에 대한 일차 함수로써 표시된다.

식(1)의 차분식으로써 구성되는 전(全)절점에 대한 연립방정식은 다음과 같은 행렬형태(matrix form)로 표시된다. 총 절점수를 N 이라 할때 $N=N_x \times N_z$ 가 되며

$$[C][\phi] = [S] \quad \text{---(2)}$$

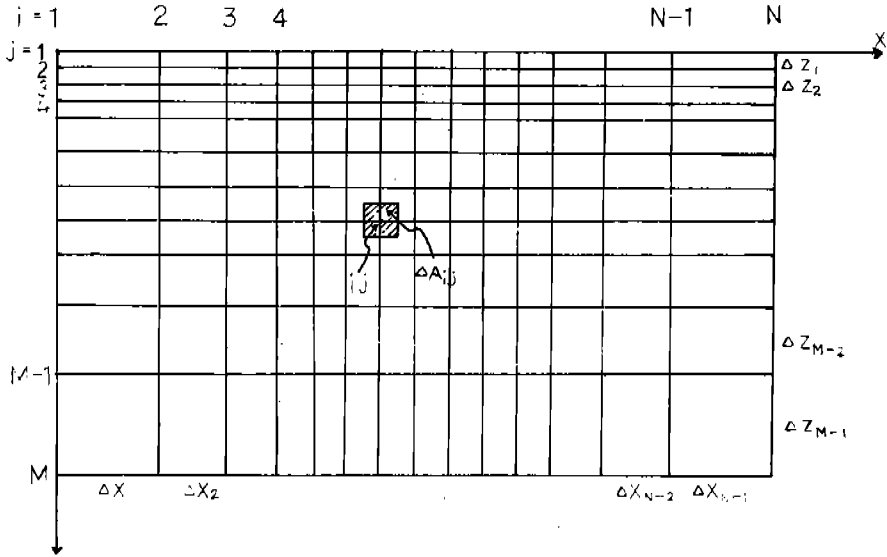


Fig.7 Rectangular discretization grid.

계수행렬 [C]는 $N_t \times N_t$ 인 상당히 큰 행렬로써 Capacitance matrix라고 불린다. 방정식(2)의 해를 위해 대칭 밴드형 행렬 (Symmetric Banded matrix)에 대한 Gauss 소거법의 변종인 Cholesky decomposition법을 사용한다. 본 방법은 밴드 폭에 대한 부분만을 사용하며, 따라서 $(N_z+1) \times N_t$ 만의 저장용량을 필요로 하므로 저장면에서나 계산속도면에서나 경제적이다. 이러한 방법으로 구한 ϕ 를 Fourier 역변환 (Inverse Fourier transform) 시키고 이로부터 걸보기 비저항치를 계산한다.

A-2. 전기비저항 탐사자료의 자동역산(automatic inversion)

역산을 이용하는 방법은 근본적으로는, forward modeling을 통한 해석에서 해석자가 이론자료와 현장자료를 비교함

으로서 새로운 지하구조를 가상하는 과정을 컴퓨터가 담당한다는 점에 그 차이가 있다. 즉 주어진 가상 지하구조로부터 이론자료를 계산하고, 그 이론자료와 현장 탐사자료 간의 오차로부터 그 오차를 최대한도 줄일수 있는 지하구조를 계산하며, 이러한 과정을 오차가 최소화될때까지 컴퓨터가 반복 수행한다. Forward modeling에 의한 해석에 비해 시간과 노력이 대단히 절약될 뿐 아니라 정확하다는 장점을 갖고 있다. 이에 반해 해석자의 주관에 배제된 순수한 수학적 방법이므로 알려진 지질학적 정보를 가미시키기 어려우며, 따라서 지질학적으로 의미없는 부분이 계산될 수 있다는 문제점을 갖는다.

본 연구에서 사용된 역산법은 2nd order Marquardt 법이며 상반성 (reciprocity)을 이용하여 역산에 효율성을 기함으로써 대형 고속 컴퓨터에서만 계산 가능한 비저항 탐사자료의 역산을 PC를 이용하여 계산할 수 있게 하였다. 이에 대한 이론

적 논의는 김정호(1987)에 자세히 유도되어 있으므로 본 논문에서는 간단히 요약하기로 한다.

본 연구에서는 N개의 블록(block)으로 구성되는 지하 2차원 구조가 그 모형이 되며, 구하려는 매개변수는 각 블록의 비저항치이다. 각 블록은 1개 이상의 차별화된 요소로 구성된다. M개의 측정결보기 비저항치로 구성된 측정자료 열벡터 d, 구하고자 하는 각 블록의 전도도로 구성된 변수 열벡터 p, 주어진 2차원 전기 전도도 분포에 대한 가상측정치, 즉 p에 대한 이론치로 구성된 열벡터 g를 각각 정의한다. g는 p에 대한 비선형 벡터함수로 정의된다. 변수인 전기전도도 및 결보기 비저항치는 모두 양의 부호를 갖으므로 역산의 안정화를 위해 모든 변수 및 계산치, 측정치에 대해 자연대수(natural logarithm)를 취하여 사용한다.

측정치와 이론치간의 RMS(root mean squared relative error)는 다음과 같이 F(p)로 주어진다.

$$F(p) = \left\{ \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \frac{(d_i - g_i)^2}{d_i} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad \text{---(3)}$$

비선형 벡터함수 g(p)의 Taylor 1차항 전개까지의 근사와 최소자승적 RMS 오차로부터, 구하고자 하는 p를 최적화하기 위한 증분벡터 δp 는 다음과 같이 표시된다(Jackson, 1972).

$$\delta p = ([J]^T [W] [J])^{-1} [J]^T [W] \varepsilon \quad \text{---(4)}$$

- 여기서
- W = (1/M di²)
- J : Jacobian
- ε : d-g

반복계산은 예측잔여오차(predicted residual error)가 주어진 한계오차(tolerance)보다 작아지거나 혹은 수행된 반복 계산회수가 주어진 총반복계산회수에 이르렀을때 완료된다.