

## 전기비저항 토모그래피를 이용한 저수지 제체 그라우팅 효과 검증

송성호<sup>1)</sup>, 용환호<sup>2)</sup>, 이규상<sup>1)</sup>, 우명하<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>한국농촌공사 농어촌연구원, [shsong@ekr.or.kr](mailto:shsong@ekr.or.kr)

<sup>2)</sup>한국농촌공사 환경지질사업처

## Verification of Reinforcement with Grouting Materials in Reservoir Dike using Electrical Resistivity Tomography

Sung-Ho Song<sup>1)</sup>, Hwan-Ho Yong<sup>2)</sup>, Gyu-Sang Lee<sup>1)</sup>, Myung-Ha Woo<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Rural Research Institute, KRC

<sup>2)</sup>Office of Environmental Geology, KRC

**요약** : 저수지 누수구간에 대한 지수를 목적으로 저수지 제체를 대상으로 시멘트 그라우트를 이용한 그라우팅을 수행하였으며, 효과 검증을 위하여 그라우팅 전후에 다양한 수리시험과 전기비저항 탐사를 수행하였다. 효과 검증을 위한 쌍극자배열 전기비저항 탐사 결과 그라우팅 이후 전극 전개별 겉보기 비저항 이상곡선이 양호한 연속성과 주입 구간 전체에서 저비저항대가 수평적으로 발달되는 결과가 나타났다. 또한 장기간의 전기비저항 수직탐사를 이용한 결과 겉보기 비저항을 이용하는 경우 주입 이전에 비해 낮아지는 구간으로 주입 구간 확인이 가능하였다. 검사공을 이용한 전기비저항 토모그래피 탐사 결과 제체 상부에서 수행한 기존의 탐사 결과와 일치됨에 따라 향후 검사공을 이용한 그라우팅 효과 판정 시 이 방법을 병행하는 경우 제체의 그라우팅 효과에 대한 공간적인 검증이 가능함을 확인하였다.

**주요어** : 그라우팅, 수리시험, 전기비저항 탐사, 검사공, 전기비저항 토모그래피

**Abstract** : To verify reinforcing effect of grouting materials on the water leakage region in dike, we performed various hydraulic test and we also applied electric resistivity survey including electrical resistivity tomography(ERT) to see resistivity variation before and after grouting. As the results of dipole-dipole array survey along dike, resistivity distribution after grouting was without noticeable spatial variation. Long term resistivity monitoring results at dike with Schlumberger array electric resistivity survey showed that the decreasing region of apparent resistivity and one dimensional inversion results were the occupied region by grout after grouting. From the ERT using check holes to inspect the effect of grouting, we could find that the ERT is quite effective to evaluate spatially grout region in dike.

**Keywords** : grouting, hydraulic test, electrical resistivity survey, check hole, ERT

### 1. 서론

우리나라의 경우 저수지 제체를 통한 누수의 지수와 제체의 보강을 목적으로 한 시멘트 그라우팅은 일반화된 방법으로, 지금까지 월댐의 그라우팅 시공 구간의 지반개선 효과를 규명하는 방법은 그라우팅 시공 전후에 현장 투수시험을 통한 투수계수의 비교 방법이 주로 이용되고 있다. 그러나 검사공의 위치, 시험시기 선정, 검사공의 시추 비용 증가 및 검사공 시추에 의한 제체의 안정성 문제 등으로 인하여 많은 공에 대한 투수시험을 할 수 없는 어려움이 있다. 이에 따라 최근에는 투수시험 이외에 그라우트 주입 지점에 대하여 주입 전후에 전기비저항 수직탐사를 이용한 겹보기 비저항의 변화 측정으로 이용한 주입 구간 확인 방법이 적용되고 있다(송성호 등, 2003). 이 연구에서는 주입구간 별로 그라우팅 효과를 검증하기 위하여 기존의 전기비저항 수직탐사법과 더불어 검사공을 이용한 전기비저항 토모그래피 탐사법을 추가하여 해석하였다.

### 2. 전기비저항탐사 적용

연구대상지역은 충남 청양군에 위치한 농업용 저수지로 길이 92m, 제체 높이 14.5m, 폭 3m로, 제체 기울기는 내, 외측이 각각 2.5와 2.0인 전형적인 월댐이다(Fig. 1). 이 저수지에 대한 1차적인 외관조사에 의하면 댐마루의 경우 저수지 횡단방향으로 끝단 변형이 나타나고 있으며, 직접적인 토사의 유출 등은 관찰되지 않았다.

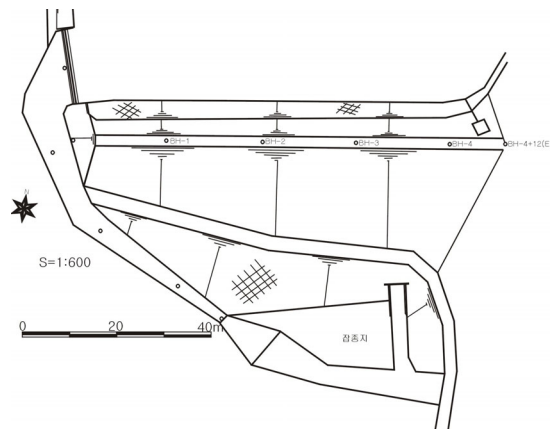


Fig. 1. Study area.

#### (1) 쌍극자배열 전기비저항탐사

쌍극자탐사 결과 이 저수지의 경우는 탐사 결과 기점인 여수토 주변부의 퇴적암인 기반암의 풍화대 영향으로 댐마루 표면으로부터 약 10 m 이하로부터 150 ohm-m 이하의 저비저항대 구간이 발달하며, 이 구간은 주입공 시추에서 굴진수의 누수가 나타나는 구간과 일치된다. 또한 기점과 반대쪽인 abutment 부분의 경우는 심도 증가에 따라 1000 ohm-m 이상의 고비저항대가 넓게 나타나는 결과가 나타남에 따라 이는 기반암의 경계부가 하부로 확장되어 나타남을 알 수 있다. 그라우팅 이후의 탐사 결과는 그라우팅 주입 구간인 좌측부에서 비교적 균질한 비저항의 분포가 나타남에 따라 제체 하부에 고르게 그라우트가 침투한 결과로 판단되며, 제체 중앙부로부터 우측부로는 그라우트 주입 이후에 제체 직하부로부터 약 5 m 까지 약 100 ohm-m 내외의 상대적으로 저비저항대

가 나타나는데, 이는 본 구간이 그라우팅 주입의 최종구간으로 본 탐사가 주입 이후 1일 경과 시점에 이루어진 결과로 판단된다.

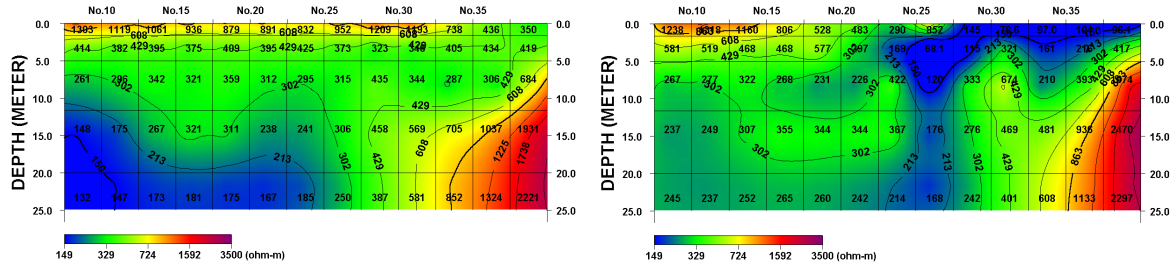


Fig. 2. Comparison results of dipole-dipole array electrical resistivity survey: (left) before grouting (right) after grouting.

(2) 전기비저항 수직탐사

전기비저항 수직탐사는 그라우트가 주입된 공번 R 4, R 7, F 17 및 F 23 지점에 대하여 그라우트 주입 이후 채령에 따른 현장 전기비저항을 측정하였다(Fig. 3).

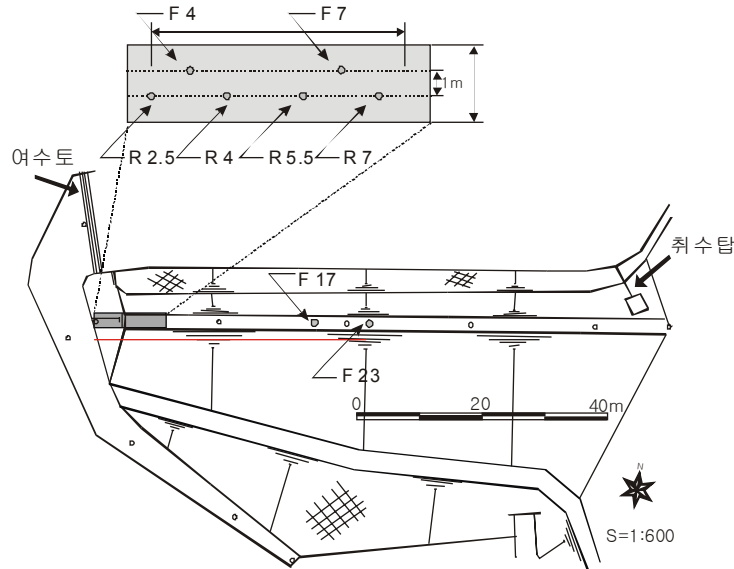


Fig. 3. Location map of VES.

공번 F 17 및 F 23 지점에 대하여 그라우트 주입 3일 전과 주입 이후 1일 경과 후 및 약 3주 경과 후에 동일지점에 대하여 슬림버저 배열 전기비저항 수직탐사를 실시하였다. F 17 지점은 탐사 결과 그라우팅 이후 1일 경과 후 동일 심도의 전기비저항값은 초기 값보다 약 100~150 ohm-m 정도까지 낮아지는 것으로 나타났으며, 3주 이후에서도 전기비저항값이 안정되게 결과가 나타난다(Fig. 4). 이때 그라우트의 주입효과가 나타나는 심도는 그라우팅 이전에 비하여 전기비저항의 값이 낮아지는 구간으로 설정할 수 있으며, 본 지점의 경우는 그라우팅 전체 구간에서 그라우트의 주입 효과가 나타남을 알 수 있다(Fig. 5). F 23 지점은 그라우팅 이후 1일 경과 후 동일 심도의 전기비저항값은 초기 값보다 약 200 ohm-m 이상까지 낮아지는 것으로 나타났으며, 3주 이후에서도 전기비저항값이 안정되게 결과가 나타난다(Fig. 6). 이 지점의 경우도 F 17지점과 마찬가지로 그라우팅 전체 구간에서 그라우트의 주입 효과가 나타남을 알 수 있다(Fig. 7).

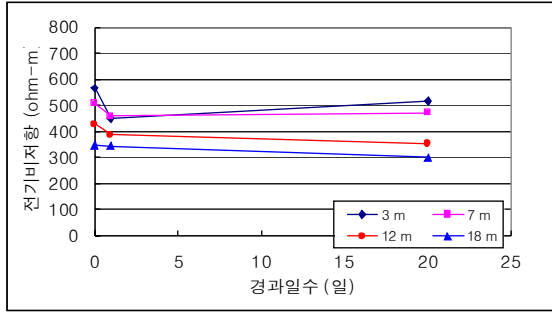


Fig. 4. Resistivity variation in injection interval with time at F17.

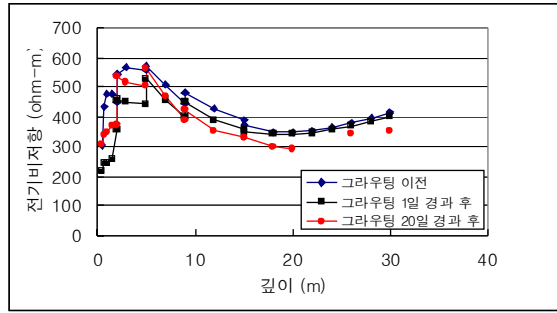


Fig. 5. Resistivity variation by depth with time at F17.

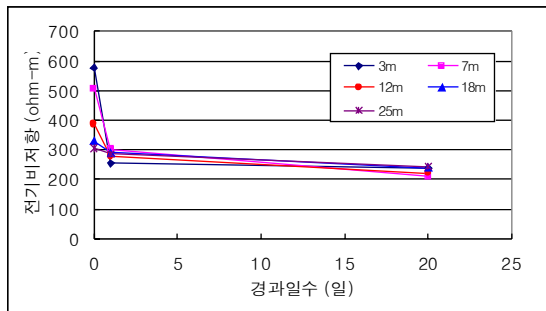


Fig. 6. Resistivity variation in injection interval with time at F23.

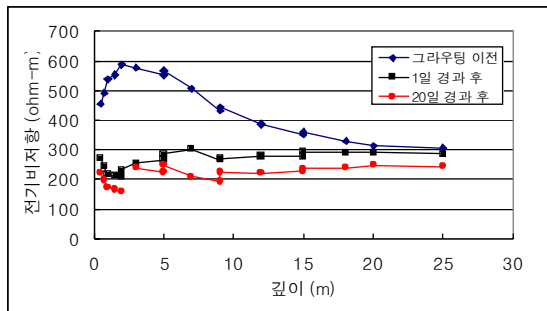


Fig. 7. Resistivity variation by depth with time at F23.

### (3) 전기비저항 토모그래피 탐사

시추공을 이용한 전기비저항 토모그래피는 그라우트 주입 구간에 대하여 주입 전후에 각각 적용하였다(Fig. 8). 본 연구에서는 시추공 간격을 깊이의 약 2/3로 설정하여, 시추공의 깊이가 약 9 m 내외인 경우에는 6 m 간격, 시추공 깊이가 22 m 내외인 경우에는 15 m 간격으로 시추하였다. 그러나 전극 설치 시 시추공의 함몰로 전극의 설치가 어려워 실제적으로는 시추공 깊이에 비해 시추공 간격이 상대적으로 멀게 설정된 효과가 나타나 탐사 결과 해석에 어려움이 많았다. 이 연구에서의 토모그래피의 전극배열은 약 200여 개의 전극배열이 필요한 변형된 단극-쌍극자배열법을 이용하였으며, Tx지점에 전류원이 위치되는 경우 지표 전류원은 Rx까지 거리의 2/3 지점에 위치시켰다. 또한 전극배열의 비대칭성을 극복하기 위하여, Rx지점에 전류원을 위치시키는 역변형된 단극-쌍극자배열법과 동일 시추공 탐사법을 병행하여 해석하였다.

그라우트 주입공에 대한 시추공 전기비저항 토모그래피는 그라우트 주입 이전에는 No.4~No.7, 그라우트 주입 이후에는 No.2.5~No.5.5와 No.3.5~No.6을 각각 이용하였으며, 각 경우마다 상부 약 3 m 구간은 공벽 유지를 위한 케이싱을 설치하였다(Fig. 9). 탐사 자료처리는 변형된 단극-쌍극자 배열의 시추공 대 시추공, 역변형된 단극-쌍극자 배열법의 시추공-시추공, 각 시추공의 동일선 배열법 자체에 대하여 각각 측정된 전위값을 이용한 동일 송신점 취합 비저항 곡선을 이용하여, 동일 송신점 자료에 대한 측정값의 변화 양상에서 크게 벗어난 자료는 처리과정에서 제외하였다.

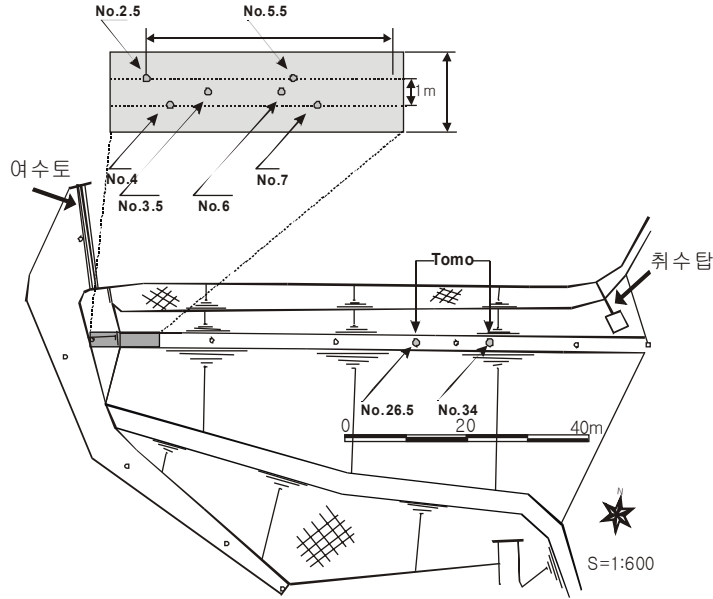


Fig. 8. Location map of ERT survey.

Fig. 9는 전기비저항 토모그래피에서 얻은 자료를 2차원 역산법을 이용하여 얻어진 결과로, 역산에 이용된 방법은 ACB 법이다(Yi and Kim, 1998). 2차원 역산법을 동원하여 그라우트 주입 이전에 탐사한 No.4~No.7 구간의 토모그래피 결과는 체체 하부 3 m 이하에서 약 1,000 ohm-m 내외의 고비저항대가 나타나지만, 그라우트 주입 이후에 No.2.5~No.5.5와 No.3.5~No.6 구간에서 실시한 결과는 약 250 ohm-m 내외로 낮게 나타남에 따라 이는 전기비저항 수직탐사 결과에서 나타난 바와 같이 그라우트의 주입에 의한 영향으로 판단된다.

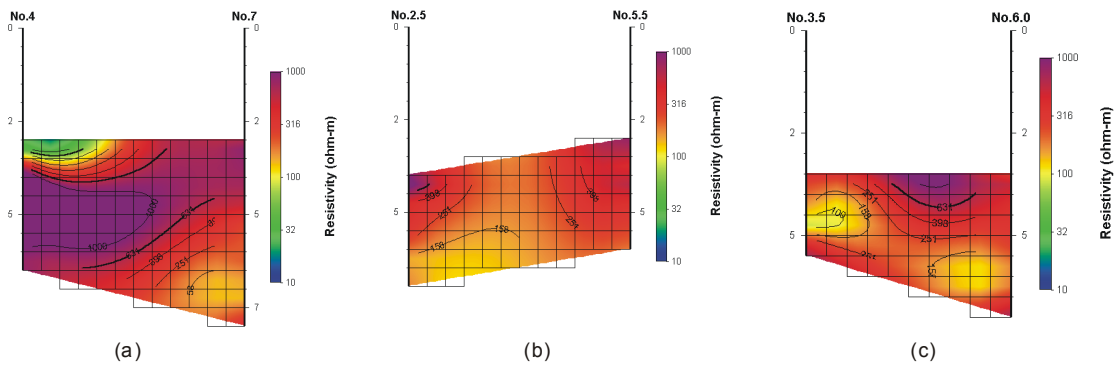


Fig. 9. Inversion results of ERT: (a) before grouting(No.4~No.7), (b) after grouting(No.2.5~No.5), (c) after grouting(No.3.5~No.6).

No.26.5~No.34 구간에 대한 전기비저항 토모그래피는 그라우트 주입 이전의 경우는 앞서의 No.4~No.7 구간의 결과를 배경치로 설정하였다(Fig. 10). 역산 결과 그라우트 주입 이후에 No.26.5~No.34 구간에서 실시한 결과는 약 100 ohm-m 이하로 낮게 나타남에 따라 이는 앞선 주입 구간에서의 결과와 일치되게 나타나므로, 그라우트의 주입에 의한 영향으로 판단된다.

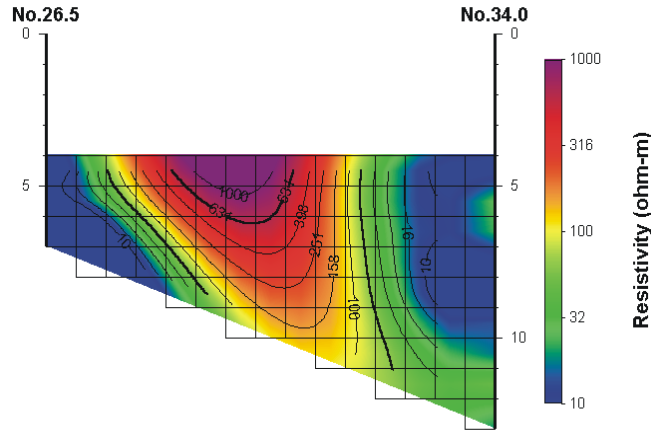


Fig. 10. Inversion results of ERT: after grouting(No.26.5~No.34).

### 3. 결론

지금까지 시멘트 그라우트를 사용한 저수지 체체 보강과 누수구간 지수에 대한 효과 규명은 주로 검사공을 이용한 투수시험이 이용되어 왔지만, 검사공의 위치 선정과 시험 방법 등에 대한 객관적인 검토가 필요한 현실이다. 이 연구에서는 누수 저수지의 보강 구간에 대하여 그라우팅을 실시하였으며, 효과 확인을 위하여 검사공을 이용한 기존의 수리시험 방법 이외에 전기비저항 탐사 방법을 추가함으로써, 현장에서의 체계적인 확인 방법을 제시하였다. 쌍극자배열 전기비저항 탐사 결과 그라우팅 이후 전극 전개별로 겉보기 비저항 이상곡선이 양호한 연속성이 나타나는 것과 그라우팅 이전에 비해 주입구간이 전체적으로 수평적인 발달이 나타나는 결과 등은 그라우트의 주입에 의한 개선 결과로 판단된다. 또한 그라우트 주입구간에서 실시한 전기비저항 수직탐사 결과 주입 직후 겉보기 비저항이 급격하게 감소한 후 시간이 경과함에 따라 점차 안정된 결과가 나타남에 따라, 향후 그라우트 주입 구간 판단에 적용성이 매우 높음을 알 수 있다. 그라우트 주입 구간에 대한 시추공 전기비저항 토모그래피 적용 결과 그라우트 주입 구간을 확인하는데 적합한 방법으로 밝혀졌으며, 특히 그라우팅 이후 투수시험을 위한 검사공을 이용하는 경우 시추비용 절감 효과가 기대된다.

### 참고문헌

- 송성호, 용환호, 장의웅, 2003, 주입재별 저수지 체체 그라우팅 개선 효과 평가, 한국지구시스템공학회, 40, 69-77.
- Yi, M.J., and Kim, J.H., 1998, Enhancing the resolving power of the least-squares inversion with active constraint balancing, *68th Annual International Meeting, Society of Exploration Geophysicist*, Expanded Abstract, 485-488.