

전기비저항 수직탐사를 이용한 저수지 그라우팅 구간 평가

Electrical resistivity survey for evaluation of reinforced region by cement grouting in dike

송성호 (Song Sung-Ho)	농업기반공사 농어촌연구원
장의용 (Jang Eui-Woong)	농업기반공사 농어촌연구원
김진호 (Kim Jin-Ho)	농업기반공사 농어촌연구원
김진성 (Kim Jin-Sung)	농업기반공사 농어촌연구원
김진춘 (Kim Jin-Chun)	(주) 한국지오테크

요약 / Abstract

누수 보강 저수지의 그라우팅 개선 구간 평가를 목적으로 물-시멘트 배합비별로 제조된 그라우트에 대하여 재령 변화에 따른 전기비저항과 압축강도 변화를 측정하였다. 동일 조건 하에서 그라우트의 농도가 증가할수록 전도도는 높아지고, 대상 매질에 그라우트가 주입되는 경우 주입 이전에 비해 비저항이 상대적으로 낮아지는 효과가 나타나므로 이를 이용한 주입 구간의 판정이 가능함을 확인하였다.

대상 매질이 서로 다른 세 지구에 대한 그라우팅 이후 전기비저항 수직탐사 결과 겘보기 비저항은 수십~수백 ohm-m 이하로 낮아졌으며, 주입 이후 수 일이 지난 후부터는 점차 증가된 상태로 일정하게 유지되는 것으로 나타나는데, 이는 그라우트가 주입된 이후 대상 지층 내에서 굳어짐에 따른 강도 증가의 결과로 밝혀졌다.

주요어 : 그라우팅, 누수 저수지, 전도도, 전기비저항 수직탐사, 겘보기 비저항

To evaluate reinforced region of dike by cement grouting, we investigated both the electrical resistivity and the strength of cement grout having various water-cement ratio with curing time. These investigation results showed that the electric conductivity of grout is much higher than that of water and that the apparent resistivity of grouted region is much lower than that of unoccupied region by grout. It was founded that electrical resistivity survey might be quite effective to detect grout region in dike.

As the results of electrical resistivity sounding at three dikes, apparent resistivities after grouting showed several tens to several hundreds of ohm-m which were lower than those of pre-grouting and showed stabilizing trend with curing time. From these results, we could estimate that this behavior of apparent resistivity is due to increasing strength with curing time.

key words : grouting, dike, electric conductivity, vertical electric resistivity, apparent resistivity

서론

최근들어 시멘트 그라우트를 비롯한 다양한 주입 재료와 공법에 대한 연구가 지속적으로 진행되고 있으며, 시공성과 경제성이 상대적으로 우수한 것으로 알려진 초미립자 주입재가 지반의 개량이나 저수지 누수구간 보강을 위하여 부분적으로 적용되는 추세이다 (김진춘, 1999). 저수지 제체 누수구간에 대한 그라우팅 이후 개선 효과를 규명하는 방법은 투수시험을 이용한 결과 비교가 주로 이용되어 왔다. 그러나 검사공을 이용한 투수시험은 그라우팅 이후 시험 시기 결정, 위치 및 검사 구간 선정 등에 대한 체계적인 기준이 없기 때문에, 이 방법의 적합성에 대한 객관적인 검토가 필요한 현실이다.

일반적으로 저수지 제체의 누수 구간 파악은 시추조사가 정확하지만, 과도한 소요 비용과 시추에 의한 불안정성 증대 등의 단점이 지적됨에 따라, 최근에는 간접적인 방법으로 다양한 지구물리 탐사법이 널리 이용되고 있는 추세이다 (정승환 등, 1992; 송성호 등, 2000; 송성호 등, 2001). 그러나 지구물리 탐사 중 저수지 누수 현상과 관련하여 가장 많이 적용되는 쌍극자배열 전기비저항 탐사는 경제성과 비파괴적인 검사 방법이라는 장점에 불구하고, 저수지 제체를 통한 누수 현상과 직접적인 관계가 없는 전기비저항을 이용한 역산 결과를 영상화하기 때문에 누수 여부와의 연관성에 대하여는 시추 및 검증 자료에 의한 검증을 통해야만 신뢰성을 얻을 수 있다. 따라서 이 연구에서는 1차원 수직탐사를 이용하여 그라우팅 지점 직하부의 전기비저항 변화를 확인하기 위하여 현장에서 측정된 값에

거리계수를 곱한 겹보기 비저항을 이용하여 그라우팅 전후의 결과를 비교코자 하였다.

이에 따라 일차적으로 제체 보강용 그라우트에 대한 다양한 실내시험을 통하여 현장 적용의 기초자료를 얻기 위하여 물-시멘트 배합비별 그라우트 (grout)를 이용하여 재령별 전기비저항과 강도시험을 통한 결과를 비교하였다. 또한 실험 결과를 기초로 대상 매질의 입도 분포가 서로 다른 3 곳의 누수 보강 저수지에서 실제 그라우팅을 실시하였고, 각 지구별로 동일 지점에 대하여 1차원 전기비저항 탐사를 통해 대상 매질별로 제체의 개선 구간과 효과에 대한 분석을 수행하였다.

전기비저항 측정 실내시험

이 연구에서는 두가지 종류의 물-시멘트 배합비의 그라우트를 대상으로 별도로 제작된 실험 장치를 이용하여 시간 경과에 따른 전기비저항의 변화를 측정하였으며, 동일 시료에 대하여 KS 규정에 의하여 재령별 1축 압축강도의 변화를 실험하였다.

1) 배합비에 따른 전기전도도 측정

물-시멘트 배합비 변화에 의한 전기비저항은 일반 포트랜드 시멘트 (ordinary portland cement)로 제조된 그라우트에 대하여 측정 가능 범위인 200:5로부터 300:1 까지의 경우에 대하여 25 °C 온도 기준으로 측정하였다. 측정 결과 시멘트비가 상대적으로 높은 200:5의 경우는 배합에 이용된 물의 전도도 0.046 S/m에 비하여 약 30 배 높은 1.54 S/m, 가장 낮은 300:1의 경우는 약 10 배 높은 0.417 S/m로 나타났으며 (Table 1)

<Fig. 1>, 이러한 결과는 매질의 공극에 그라우트

Table 1 Electric conductivity with water-cement ratio (w/c) variation

w/c by volume %	Electric conductivity (S/m, ho/m)	Resistivity (ohm-m)	Temperature (°C)
300:1	0.417	2.39	18.3
200:1	0.536	1.87	18.2
200:2	0.848	1.17	18.2
200:3	1.034	0.97	18.1
200:4	1.360	0.74	18.2
200:5	1.540	0.65	18.3

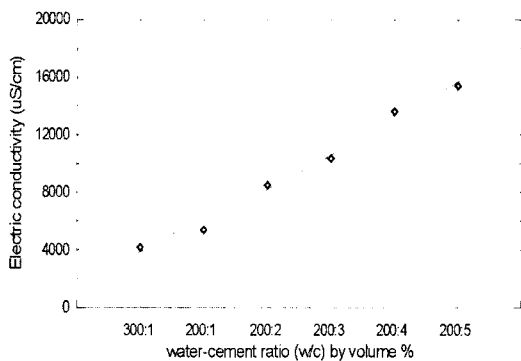


Fig. 1 Electric conductivity with w/c by volume %

가 주입되는 경우 전기비저항을 상대적으로 낮추어 주는 효과를 발생시키므로 이를 이용한 주입 구간의 판정이 가능하다는 것을 지시한다. 또한 Komine et al. (1996)은 각 입경별 모래 시료에 대하여 그라우트 주입 후 토모그래피를 이용 전기비저항을 측정 한 결과 그라우트 주입 구간의 경우 주입 이전에 비하여 수십 배 감소한 실험 결과를 제시한 바 있다.

2) 재령변화에 따른 배합비별 실내시험 결과

이 실험에서는 배합비별로 3 회의 재령별 압축강도와 동일 시료에 대한 30 일간의 전기비저항을 측정하였고, 이 결과와 앞선 배합비별 전기전도도 측정 결과를 종합하여 현장 적용에 대한 정량적 기초 자료로 이용하였다.

압축강도 실험

그라우트의 압축강도와 전기비저항 변화의 상관성 파악을 목적으로, 배합비별로 제작된 그라우트에 대하여 3, 7, 14 일 경과 이후의 압축강도를 측정하였다. 이때 표준양생 조건과 저수지 누수 구간 개선을 위한 현장조건이 매우 다르므로, 이에 따른 차이를 확인하기 위하여 KS 규격의 표준양생 조건과 현장 주입조건을 각각 구분하여 실험을 실시하였다. 현장조건 실험은 현장 주입상태를 고려하여 제작된 시료를 함수율 100%의 모래 실험장치에서 보관하여 1축 압축강도 실험을 실시하였다. 압축강도는 KS L 5105 규정으로 조건별 3 개씩 측정한 후, 측정된 압축강도 평균의 10%를 벗어나는 측정값은 제외하였다.

분석 결과 양생방법별 강도 차이는 크지 않지만 현장조건 압축강도가 w/c 2:1의 3 일 경과 후를 제외하고 KS 규격의 표준양생 조건보다 약 103~108% 높은 것으로 나타났다. 이와 같이 현장조건 압축강도가 표준양생 조건의 강도보다 높게 나타난 결과는 현장조건 경우 함수비 100%의 압력이 작용함에 의한 것으로 판단된다 (Table 2)<Fig. 2>.

Table 2. Strength variation with time due to each curing condition and w/c

curing condition	w/c	Strength with curing time (kgf/cm ²)		
		3 day	7 day	14 day
KS standard	1:1	365	402	538
	2:1	120	167	210
field condition	1:1	377	417	553
	2:1	112	181	215

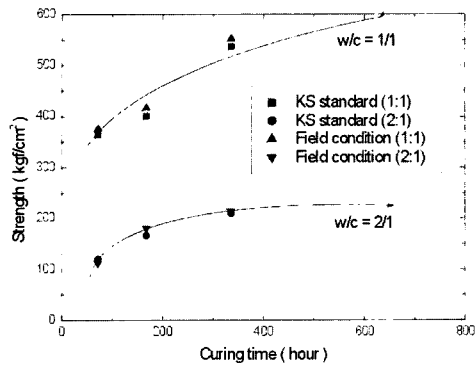


Fig. 2 Strength variation diagram with time due to each curing condition and w/c

전기비저항 측정

전기비저항 측정을 위한 실내 시험은 Park et al. (1999)에 의해 제시된 실험장치를 개량 제작하여 이용하였으며, 압축강도 실험과 동일 조건의 그라우트에 대한 비저항 변화 측정을 위하여 매 1~2 일 간격으로 30 일 동안 실시하였다 <Fig. 3>.

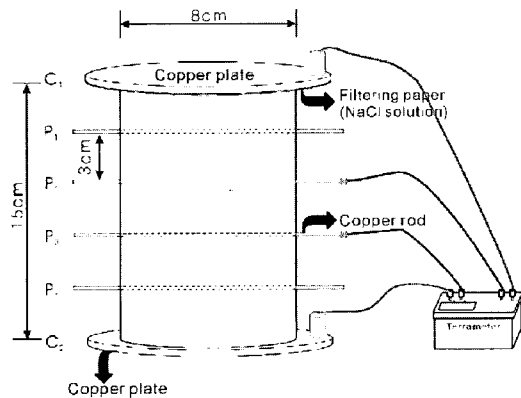


Fig. 3 Schematic diagram of resistivity measurement system

비저항은 단위 체적당 물질의 저항으로 위의 방법으로 직접 측정하였으며, 측정 원리는 다음과 같은 Ohm의 법칙을 이용하였다.

$$\rho = A \frac{R}{L} = A \frac{\Delta V}{L \cdot I} \text{ ----- (1)}$$

여기서 A는 매질 시료의 단면적 (m²), R는 매질의 저항 (ohm), L는 시료 길이 (m), ΔV는 측정 단면적의 전위차 (volt), I는 전류 (ampere)이다.

실험용 비저항 측정 장치는 8×15 cm의 원통형 관에 3 cm 간격으로 관을 관통하는 Φ2 mm 구리 전극봉 4 개, 관의 양단에 설치한 구리판 등 총 6 개의 전극으로 구성되며, 측정 방법은 양단의 구리판을 전류전극, 4 개의 전극봉을 전위전극으로 이용하여 6 가지 측정값의 평균을 이용하였다. 이때 상부의 구리판은 표면에서 발생하는 막분극 영향을 최소화하기 위하여 매 측정 시 세척하였으며, 시간 경과에 따라 그라우트의 수축으로 발생하는 전류전극의 간극을 최소화하기 위하여 매 측정 시 묽은 소금물을 적신 여과지를 삽입하여 측정 오차를 최소화하였다.

비저항 측정 결과는 압축강도와 마찬가지로 재령에 따라 증가되는데, w/c가 2:1인 경우는 배합 후 약 3~4 일 동안은 증가하다가 이후부터는 5 ohm-m 내외에서 안정되는 것으로 나타났다. 이에 비하여 w/c가 1:1의 경우는 약 4 일 경과 시까지는 약 13~14 ohm-m로 급격하게 상승하다가 이후 점차 안정되지만 그 변화폭은 상대적으로 크게 나타났다 <Fig. 4>. 이는 그라우트 시료의 측정 결과로 저수지의 경우 수백 ohm-m

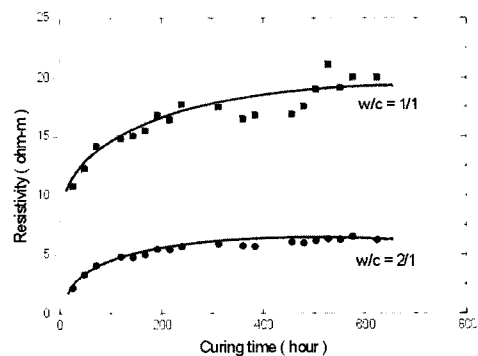


Fig. 4 Resistivity variation diagram with time due to w/c

정도의 비저항을 나타내는 제체 매질로 구성되어 있어 실험 결과로 제시된 5~14 ohm-m 범위의 그라우트가 주입되는 경우는 주입 구간에 대한 전기비저항 탐사의 적용성이 상대적으로 크게 나타날 것으로 판단된다.

또한 제령에 따른 전기비저항의 변화 양상은 Fig. 2에서 제시된 압축강도 결과와 유사하며, w/c가 1:1의 경우는 높은 점성으로 상대적으로 초결시간이 빠름에 따라 초기에 급격하게 변화하는 압축강도의 영향이 반영된 것으로 판단된다. 압축강도 결과와 비저항 분포를 최소자승법으로 구한 대표곡선과 상관시킨 결과는 두 결과가 높은 상관성이 있음을 보여준다.

전기비저항 탐사의 현장적용

현장에서 적용된 전기비저항 탐사는 슬립버저 배열법으로 그라우팅 전후에 동일 지점에 대한 비교를 용이하게 하기 위하여 현장 측정값에 거리계수를 곱한 결과의 비저항을 이용하였다. 또한 제체에 주입되는 그라우트의 범위를 측정하기 위하여 현장 측정 시 전류전극 간격의 절반을 편의 상 심도로 설정하였으며, 제체 하부의 주입 효과 파악을 위하여 전류전극 간격을 넓혀가며 측정하였다.

저수지 제체에 대한 전기비저항 탐사는 그라우트 주입 대상 매질의 물리적 성질이 서로 다른 세 곳의 저수지에 대하여 각각 적용하였다. A 저수지는 sand 함량이 20% 미만인 silty clay 영역에 속하는 매질로 통일흙분류 (unified soil classification system, U.S. Department of the Interior, 1974) 기준에 의하면 CL로, B 저수지는 sand 함량이 약 30% 정도인 clay loam에 해당되며 CL로 구분되지만, A 저수지에 비해 silt의 함량이 약 10% 정도 적게 나타난다. C 저수지는 sand 함량이 약 60%에 해당되는 sandy loam에 해당되며, 통일흙분류에 의하면 SM으로 구분된다 <Fig. 5>.

시추조사 결과 각 저수지별 주입 대상 매질에 대한 입도 분석을 실시하였는데, A와 B 저수지

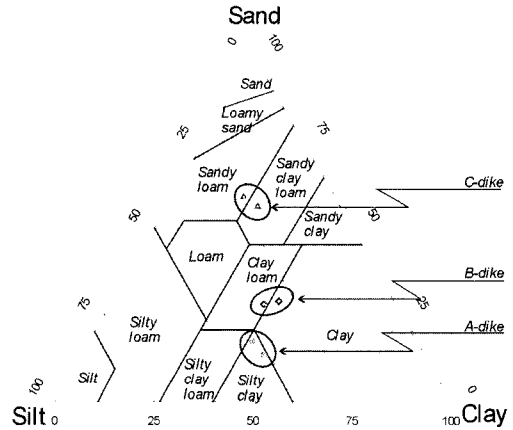


Fig. 5 Particle-size distribution of each soil at 3 dikes according to U.S. Department of Agricultural textural classification

는 대상 매질의 입경이 0.074 mm 이하로 KS F 2302 방법에 의한 비중계분석 (hydrometer analysis)을, C 저수지 시료는 체분석 (sieve analysis)을 이용하여 도시하였다 <Fig. 6>. 분석 결과를 기초로 Fetter (1994)가 제시한 균등 계

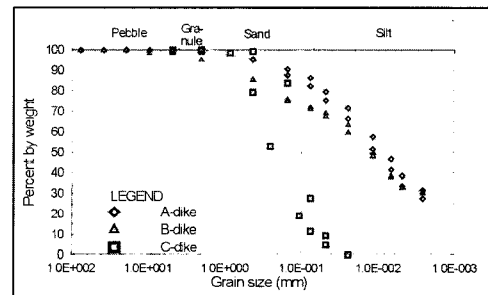


Fig. 6 Grain size distribution curve for each soil at 3 dikes using hydrometer analysis to medium of both A - and B - dike and sieve analysis to that of C - dike

수 (uniformity coefficient, $C_u = d_{60}/d_{10}$)에 따라 계산하면, A와 B 저수지의 경우 d_{10} 의 입자 크기가 10^{-3} 보다 작으므로, 균등계수가 매우 커 분급이 불량 (poorly sorted)한 퇴적물로 분류되며, C 저수지의 경우는 계산된 균등계수가 2~3으로 분급이 양호 (well sorted)한 퇴적물로 분류된다.

각 저수지별로 적용된 전기비저항 수직탐사는 주입공 상부 지점에 대하여 그라우팅 전후에 각각 실시하여 심도별 겉보기 비저항을 비교하였으며, 이 중 모래함량이 약 60 % 내외로 상대적으로 투수성이 높은 C 저수지에 대하여는 동일 지점에 대하여 약 21 일 동안 일정 간격으로 탐사하여 겉보기 비저항의 변화를 관찰하였다.

일반적으로 전기비저항 수직탐사의 목적은 지표면 상의 한 점에서 그 하부의 심도에 따른 전기비저항을 측정하고, 그 결과를 다른 수리지질학적인 정보와 상호연관을 통해 지하의 구조를 더 상세히 파악하는데 있다. 이 연구에서 이용된 슬럼버저 배열법은 전위전극 간격을 일정하게 고정 (a)하고, 전류전극 간격을 전위간격에 따라 증가 (na)시키면서 측정을 하는데 이때 측정되는 겉보기 비저항은 다음과 같은 식으로 계산된다 <Fig. 7>.

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



Fig. 7 Schematic diagram of Schlumberger array for vertical electric sounding

1) A 저수지

이 저수지는 제체 길이 165 m, 폭 3 m, 높이 6 m의 흙댐으로 댐마루의 평균 표고는 해발 9.91 m이며, 제체 전체구간에서 소량의 누수가 나타난 지구이다. 이 저수지에 대한 그라우팅 보강 공사는 전체 구간에 대하여 전열과 후열 각 2 m 간격으로 시행되었고, 그라우팅 효과 파악을 위한 전기비저항 수직 탐사는 20 m 간격으로 네 지점에 대해 그라우팅 직전, 종료 직후 및 10 개월 경과 후에 수행되었다.

탐사 결과 네 지점 모두에서 그라우팅 이전에 약 300~1,000 ohm-m 범위의 겉보기 비저항이 그라우팅 이후 300 ohm-m 이하로 낮아졌으며, 이러한 결과는 시추 조사에서 밝혀진 기반암 상

부 구간 전체 범위에 해당된다 <Fig. 8>. 또한 그라우팅 이후 10 개월 경과 시점의 탐사 결과는 직후에 측정된 겉보기 비저항과 마찬가지로 이전에 비해 낮은 값을 보이지만 점차 상승하는 결과를 보여 실내 시험 결과에서 제시된 것과 마찬가지로 주입 이후 시간 경과에 따른 압축강도 증가 결과를 반영하는 것으로 판단된다.

2) B 저수지

이 저수지는 제체 길이 137 m, 높이 11.4 m로 제체 전체구간에서 나타나는 누수를 지수하기 위하여 전열과 후열 각 2 m 간격의 그라우팅을 시행하였으며, 이 구간에 대한 전기비저항 수직 탐사는 10 m 간격의 네 지점에 대하여 그라우팅 전후에 수행하였다.

탐사 결과 네 지점 모두에서 그라우팅 이전에 약 600~1,100 ohm-m 범위의 겉보기 비저항이 그라우팅 이후 600~700 ohm-m 이하로 낮아져 동일한 방법을 적용한 A 저수지와 유사한 결과가 나타났다 <Fig. 9>. 이는 Fig. 5와 Fig. 6에서 나타난 것처럼 두 지구 구성 매질의 상대적인 함량과 입도 분석 결과가 비슷하기 때문으로 판단된다.

3) C 저수지

이 저수지의 크기는 제체 길이 230 m, 폭 3.0 m, 높이 3.5 m로 전체구간에서 나타난 누수를 지수하기 위하여 전열과 후열 각 2 m 간격의 그라우팅을 실시하였으며, 이 구간 중 그라우팅 개시 구간 파악을 위한 전기비저항 수직 탐사는 76 m, 124 m, 136 m의 세 지점을 대상으로 하였다. 이 구간 중 124 m와 136 m 지점을 포함한 24 m 구간의 그라우팅은 일반 포틀랜드 시멘트를 현장에서 습식 분쇄한 콜로이드 입경의 시멘트를, 76 m 지점은 일반 포틀랜드 시멘트를 각각 이용하였으며, 전기비저항 탐사는 그라우팅 이전과 이후 21 일 동안 일정 간격으로 수행하였다.

탐사 결과 그라우팅 대상 구간의 겉보기 비저항은 전체적으로 약 100 ohm-m 내외로 나타났으며, 그라우팅 이후에는 80~100 ohm-m 정도

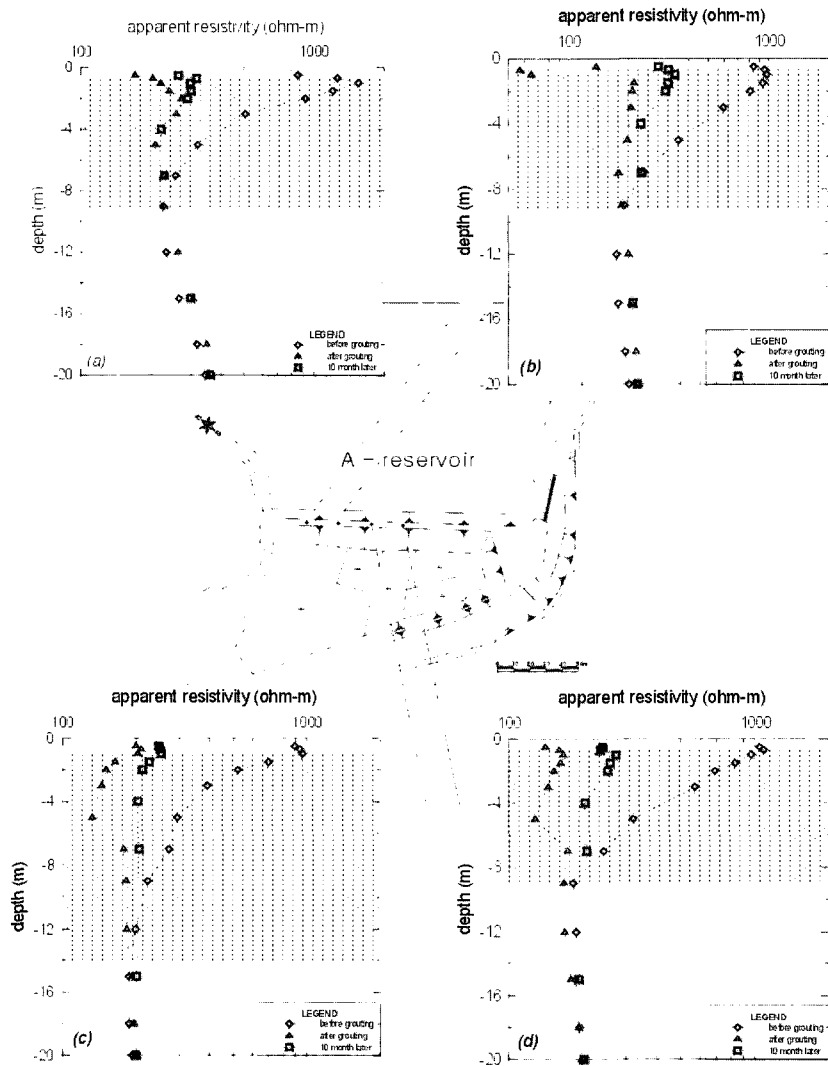


Fig. 8 Vertical electric sounding curves for each point 20 m(a), 40 m(b), 60 m(c), and 80 m(d) at A-dike. Depth means AB/2 at each diagram.

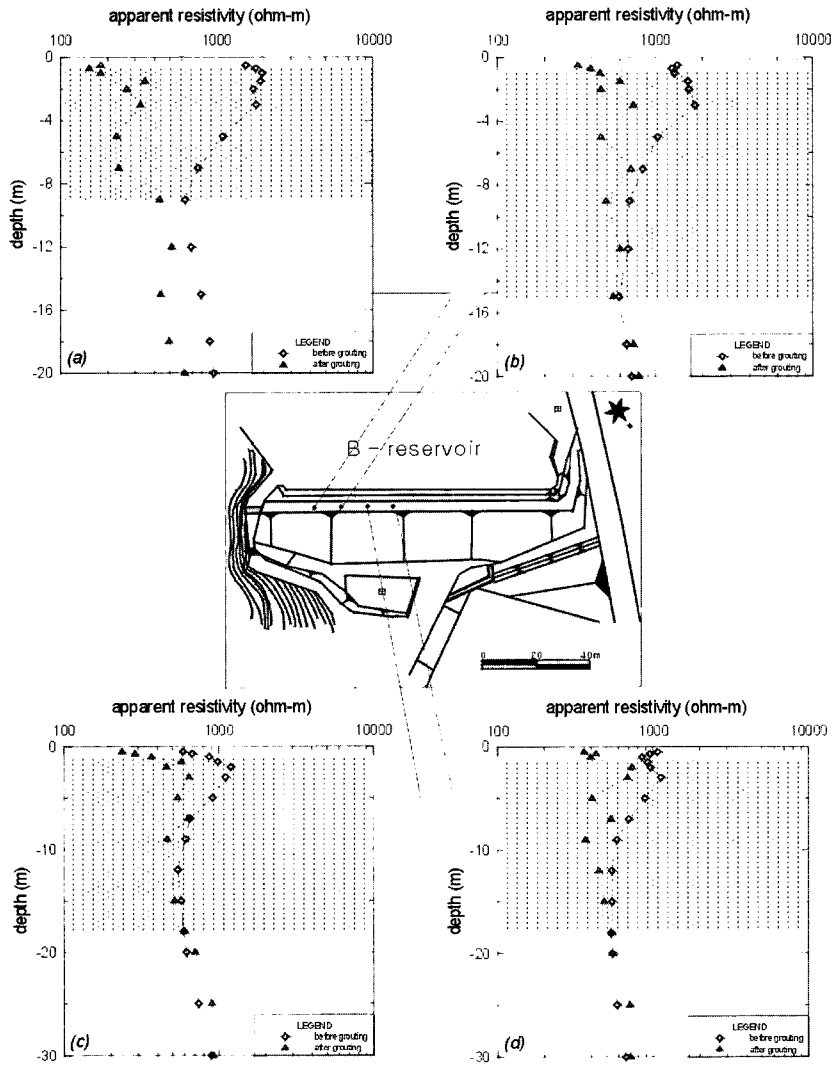


Fig. 9 Vertical electric sounding curves for each point 20 m(a), 30 m(b), 40 m(c) and 50 m(d) at B-dike. Depth means AB/2 at each diagram.

로 감소된 결과가 나타났다 <Fig. 10>. 이 저수지의 겉보기 비저항 분포는 전체적으로 약 100 ohm-m 내외로 A, B 저수지에 비해 약 10 배정도 낮은데, 이는 C 저수지 매질의 경우 공극수의 점토 성분이 빠져나가 sand 함량이 상대적

으로 다른 두 지구에 비해 높은 sandy loam에 해당되므로, Park et al. (1999)의 실험에서 제시된 바와 같이 공극수의 비저항이 일정한 경우 공극률이 증가함에 따라 비저항이 감소하는 결과를 보여준다.

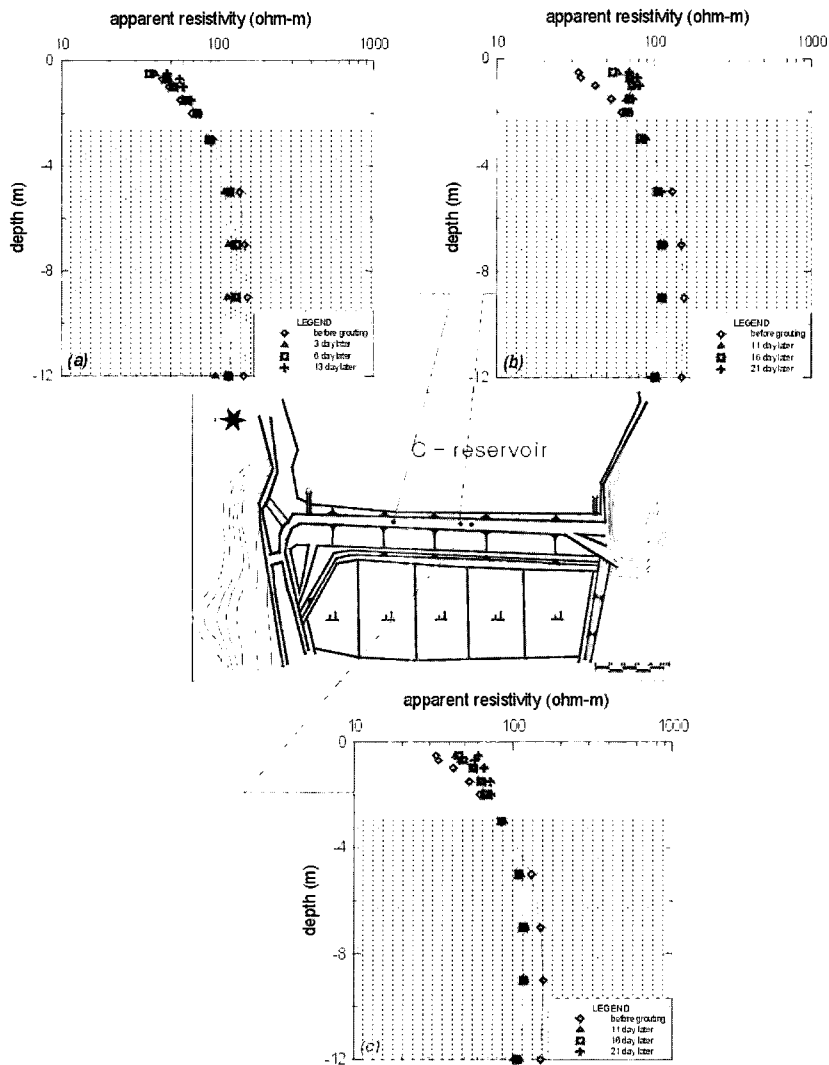


Fig. 10 Vertical electric sounding curves for each point 76 m(a), 124 m(b), and 132 m(c) at C-dike. Depth means AB/2 at each diagram.

결론

각 지점에 대한 재령별 겉보기 비저항 변화를 도시한 결과 그라우트 주입 이후에는 급격히 감소한 이후 점차 안정된 결과를 보여주는데 <Fig. 11>, 이러한 결과는 1축 압축강도변화에 대한 비저항 측정 실내 시험 결과에서 제시된 바와 같이 그라우트가 주입된 이후 대상 지층 내에서 굳어짐에 따라 나타나는 강도 증가의 결과로 판단된다.

이 연구에서는 누수 보강 저수지의 그라우팅 개선 구간과 효과에 대한 분석을 위한 전기비저항 탐사의 현장 적용성 연구를 위하여 두가지 종류의 물-시멘트 배합비별 그라우트에 대하여 시간 경과에 따른 전기비저항 측정 실험과 1축 압축강도시험을 수행하였다. 또한 누수 저수지의

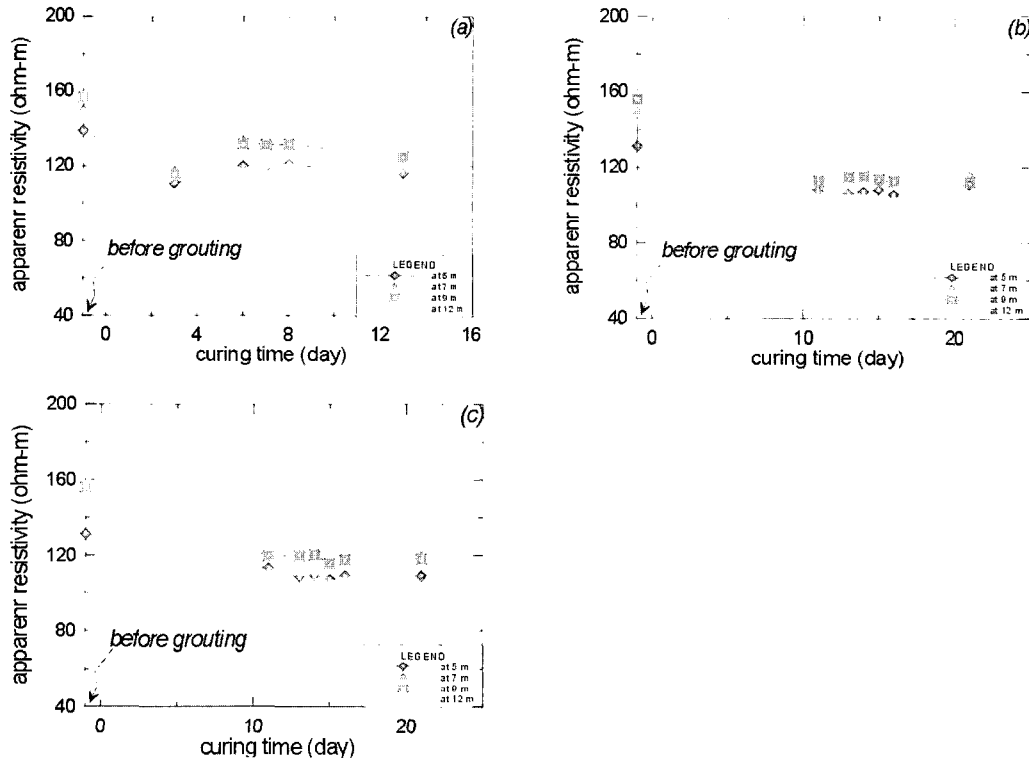


Fig. 11 Display of apparent resistivity variation with curing time for each point 76 m(a), 124 m(b), and 132 m(c) at C-dike

세 곳의 silty clay, clay loam 및 sandy loam에 그라우팅 효과 판단을 위한 전기비저항 탐사는 제체의 물리적 성질인 입도 분포가 서로 다른 대하여 적용하였으며, 이러한 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 동일 조건 하에서 그라우트의 농도가 증가할수록 전기전도도는 높아지고, 대상 매질에 그라우트가 주입되는 경우 주입 이전에 비해 전기비저항이 상대적으로 낮아지는 효과가 나타나므로 이를 이용한 주입 구간의 판정이 가능하다.

2) 물-시멘트 배합비별 재령에 따른 전기비저항은 각 배합비별로 약 3~4 일 경과 후까지는 증가하지만 이후부터는 점차 안정되며, 변화폭은 배합비가 낮을수록 상대적으로 안정한 것으로 나타나며, 이는 1축 압축강도시험의 결과와 일치된다.

3) 각 저수지별로 그라우팅 이후의 겉보기 비저항은 대상 매질에 따라 이전에 비하여 수십~수백 ohm-m 이하로 낮아졌으며, 주입 이후 수일 경과 후부터는 점차 증가된 상태로 일정하게 유지되는 것으로 나타났다.

4) 각 지구별로 재령에 따른 겉보기 비저항 변화는 그라우트 주입 이후에는 급격히 감소한 이후 점차 안정된 결과를 보여주며, 이는 그라우트가 주입된 이후 대상 지층 내에서 굳어짐에 따른 강도 증가의 결과로 판단된다.

사 사

이 연구는 건설기술연구개발과제인 2000년 산·학·연 공동연구개발사업 (과제번호 : 목적 1-07)의 지원으로 수행된 연구 결과의 일부로, 연구비를 지원해 주신 한국건설기술연구원에 감사드립니다. 또한 심사 과정에서 유익한 의견을 주신 한국지질자원연구원의 김정호 박사님과 익명의 심사위원들께 감사드립니다.

참 고 문 헌

김진준, 1999, 지반개량용 초미립자 시멘트의 주입특성에 관한 연구. 한양대학교 박사 학위

논문.

송성호, 이규상, 김진호, 권병두, 2000, 방조제 누수지점 탐지를 위한 SP 및 단극배열 전기비저항 탐사의 적용. 자원환경지질, 33, 417-424.

송성호, 권병두, 최종학, 김정만, 2001, 저수지 누수문제에 대한 수리지질 및 지구물리 방법의 적용. 한국자원공학회지, 38, 292-300.

정승환, 김정호, 양재만, 한규언, 김영웅, 1992, 전기비저항탐사에 의한 제당의 누수구간 탐지. 지질공학, 2, 47-57.

Fetter C. W., 1994, Applied hydrogeology, 3rd ed. Macmillan college publishing company. New York. 99.

Komine H., 1994, Evaluation method of improvement effect by chemical grouting based on electrical resistivity-Evaluation of grout's ratio occupying void. 研究報告 U91066, 日本電力中央研究所報告, (in Japanese)

Komine H., Tanaka Y., Nishi K., and Suzuki K., 1996, Quantitative evaluation of ground improvement by chemical grouting using electrical resistivity (Part II) - Evaluation of improvement region by resistivity tomography. 研究報告U93035, 日本電力中央研究所報告, (in Japanese)

Park S.G., Fujiwara H., Park M.K., and Matsui T., 1999, Fundamental study on resistivity of soils, Butsuri-Tansa, 52, 299-306. (in Japanese)

U.S. Department of the Interior, 1974, Earth manual, A water resources technical publication, 2nd ed: U.S. Government Printing Office. Washington. 14-17.

송성호 (Song Sung-Ho)

농업기반공사 농어촌연구원 선임연구원
425-170 경기도 안산시 사동 1031-7

Tel : 031-400-1857

Fax : 031-409-6055

E-mail : shsong@karico.co.kr

송성호, 장의용, 김진호, 김진성, 김진춘

장 의 용

농업기반공사 농어촌연구원 지하수연구실장
425-170 경기도 안산시 사동 1031-7
Tel : 031-400-1707
Fax : 031-409-6055
E-mail : ewjang@karico.co.kr

김 진 호

농업기반공사 농어촌연구원 연구원
425-170 경기도 안산시 사동 1031-7
Tel : 031-400-1859
Fax : 031-409-6055
E-mail : kimjinho@karico.co.kr

김 진 성

농업기반공사 농어촌연구원 연구원
425-170 경기도 안산시 사동 1031-7
Tel : 031-400-1859
Fax : 031-409-6055
E-mail : geo-kjs@hanmail.net

김 진 춘

(주)한국지오택
138-170 서울특별시 송파구 송파동 90-18
Tel : 02-419-9861
Fax : 02-419-9912
E-mail : kig-2000@hanmail.net