

지하주입 물질 거동 규명을 위한 4차원 전기비저항 영상화

김정호¹⁾, 이명종¹⁾

Application of 4-D resistivity imaging technique to visualize the migration of injected materials in subsurface

Jung-Ho Kim¹⁾, Myeong-Jong Yi¹⁾

Abstract: Dc resistivity monitoring has been increasingly used in order to understand the changes of subsurface conditions in terms of conductivity. The commonly adopted interpretation approach which separately inverts time-lapse data may generate inversion artifacts due to measurement error. Eventually the contaminated error amplifies the artifacts when reconstructing the difference images to quantitatively estimate the change of ground condition. In order to alleviate the problems, we defined the subsurface structure as four dimensional (4-D) space-time model and developed 4-D inversion algorithm which can calculate the reasonable subsurface structure continuously changing in time even when the material properties change during data measurements. In this paper, we discussed two case histories of resistivity monitoring to study the ground condition change when the properties of the subsurface material were artificially altered by injecting conductive materials into the ground: ① dye tracer experiment to study the applicability of electrical resistivity tomography to monitoring of water movement in soil profile and ② the evaluation of cement grouting performed to reinforce the ground. Through these two case histories, we demonstrated that the 4-D resistivity imaging technique is very powerful to precisely delineate the change of ground condition. Particularly owing to the 4-D inversion algorithm, we were able to reconstruct the history of the change of subsurface material property.

Keywords: Resistivity monitoring, 4-D inversion, dye tracer experiment, grouting effect

1. 서론

물리탐사 모니터링은 시간의 흐름에 따른 지하 물성의 변화를 이해하기 위한 목적으로 환경, 토목 등 다양한 분야에서 응용되어 오고 있다. 특히 지하의 전기비저항은 염수 주입 실험 등을 이용하여 쉽게 변화시킬 수 있기 때문에 전기비저항 모니터링은 오염 확산, 지하수문학 연구 등을 위해 활발하게 응용되고 있다(Slater *et al.*, 2000; Alpak *et al.*, 2004). 모니터링 탐사의 궁극적인 목적은 지하의 변화를 정량적으로 평가함에 있다. 통상적인 모니터링 자료의 해석 방법은, 서로 다른 시간대에 획득한 탐사자료를 독립적으로 역산하여 각 시간대의 영상을 얻은 후, 그들을 비교함으로써 시간에 대한 지반의 변화를 해석하고 관찰하는 접근 방법을 취하고 있다. 그러나 이러한 접근은 대부분의 경우 지반 물성의 변화 정도가 그다지 크지 않기 때문에 역산 잡음 (inversion artifacts)이 게재될 가능성이 매우 높다. 지반 변화를 정량화하기 위해 변화량을 계산하여야 하며 이 때에

¹⁾ 한국지질자원연구원 지반안전연구부(Geotechnical Engineering Dept., KIGAM)
E-mail: jungho@kigam.re.kr

역산잡음이 증폭되어 정량적인 지반 변화의 평가는 물론 정성적으로도 잘못된 해석을 유발할 가능성이 높다 (Kim 2005). 필자들은 이와 같은 점에 주목하여 지하구조가 매우 빠르게 변화하여 측정 도중에 지하구조가 무시할 수 없을 정도로 변화하는 경우에도 신뢰할 만한 영상을 제공할 수 있는 새로운 4 차원 역산법을 개발하였다(Kim, 2006). 4 차원 역산의 기본은 지하구조를 단순한 공간 모델이 아닌 시간에 따라 연속적으로 변화하는 시공간 모델로 정의함에 있다. 또한 공간영역뿐만 아니라 시간축을 따른 제한 또한 도입함으로써 역산의 안정성은 물론 역산잡음의 최소화를 기할 수 있다.

이 논문에서는 인위적으로 지하에 유체를 주입함으로써 발생된 지하 물성 변화 연구에 적용한 두 사례에 대하여 논의하고자 한다. 첫 번째 사례는 전기전도도 높은 염료를 지하에 주입하여 염료의 이동경로를 추적하기 위한 것이며, 두 번째는 지반보강을 위해 주입한 시멘트 모르타르의 이동 위치를 파악함으로써 전기비저항 토모그래피를 지반보강 평가에 응용한 사례이다. 이 두 사례를 통해 전기비저항 4 차원 탐사와 4 차원 역산법이 지하구조의 변화를 연구하고 평가하는 데에 매우 유용함을 보이고자 한다.

2. 4차원 역산 알고리즘

2.1 수치 모델링

시간에 따라 연속적으로 변화하는 지하구조를 일정한 시간간격으로 샘플링하면 지하구조는 다음과 같이 시공간 벡터 \mathbf{P} 로 정의될 것이다.

$$\mathbf{P} = \{\mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_i, \dots, \mathbf{p}_n\} \quad (1)$$

여기서 \mathbf{p}_i 는 시간 i 에 대한 공간 모델 벡터이다. 시공간 벡터 \mathbf{P} 를 구성하는 공간 모델 벡터 \mathbf{p}_i 의 수가 대단히 많으므로 이를 줄이기 위하여 다음과 같이 m ($m \ll n$) 개의 미리 선정된 시각 τ_k 에 대한 기준 공간 모델 벡터 \mathbf{u}_k 로 구성되는 새로운 시공간 모델을 정의한다.

$$\mathbf{U} = \{\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_k, \dots, \mathbf{u}_m\} \quad (2)$$

동일한 공간좌표에 대한 지하 물성이 시간에 대해 선형적으로 변화한다고 가정하면 우리는 두 개의 시각 τ_k 와 τ_{k+1} 사이에 발생하는 물성변화 속도 벡터를 다음과 같이 정의할 수 있으며,

$$\mathbf{v}_k = \frac{d\mathbf{u}}{dt} = \frac{\mathbf{u}_{k+1} - \mathbf{u}_k}{\tau_{k+1} - \tau_k}, \quad (3)$$

이를 이용하여 임의의 시간 t 에 대한 지하 공간 벡터를 정의할 수 있다.

$$\mathbf{p}(t) = \mathbf{u}_k + (t - \tau_k)\mathbf{v}_k, \quad (4)$$

이와 같은 가정을 통하여 공간영역 지하공간 모델의 수를 줄였다고 하더라도 시간의 흐름에 따른 지하구조의 반응을 계산하기 위한 수치 모델링은 원래의 다수의 지하공간 모델에 의거 계산하여야 한다. 그러나 이는 대단히 긴 계산시간을 필요로 한다. 이 문제를 해결하기 위해 임의의 시각 $\tau_k \leq t \leq \tau_{k+1}$ 의 지하구조에 대한 수치 모델링을 다음과 같이 두 기준 시각의 수치 모델링 결과, $\mathbf{F}(\mathbf{u}_k)$, $\mathbf{F}(\mathbf{u}_{k+1})$ 의 Taylor 1차 급수 전개로 근사하여 이를 역산에 이용한다.

$$\mathbf{G}(t); \frac{\tau_{k+1}-t}{\tau_{k+1}-\tau_k} \{\mathbf{F}(\mathbf{u}_k) + (t-\tau_k)\mathbf{J}_k \mathbf{v}_k\} + \frac{t-\tau_k}{\tau_{k+1}-\tau_k} \{\mathbf{F}(\mathbf{u}_{k+1}) + (t-\tau_{k+1})\mathbf{J}_{k+1} \mathbf{v}_k\}, \quad (5)$$

여기서 \mathbf{J}_k 는 기준 공간 모델 \mathbf{u}_k 에 대한 모델 반응의 편미분, 즉 자코비안 (Jacobian) 행렬이다.

2.2 역산

위에서 논의한 바와 같은 가정과 근사를 채택하면 시공간 전체에 걸친 4차원 지하구조를 찾는 역산은 수 개의 기준 공간 모델, 즉 벡터 \mathbf{U} 를 구하는 문제로 단순화된다. 다음과 같이 측정자료를 벡터 \mathbf{d} 로 표시하고 오차 벡터 \mathbf{e} 와 예측오차 벡터 \mathbf{e}' 을 정의하자.

$$\mathbf{e} = \mathbf{d} - \mathbf{G}(\mathbf{U}), \quad \mathbf{e}' = \mathbf{d} - \mathbf{G}(\mathbf{U} + \Delta\mathbf{U}). \quad (6)$$

이 연구에서는 시공간 영역의 지하구조를 역산하는 알고리즘을 개발하고자 하며, 이를 위해 통상적으로 채택하는 역산 제한, 즉 공간 영역의 제한 뿐만 아니라 시간 축을 따른 제한 또한 도입한다. 제안하는 최소자승 역산은 다음의 목적함수를 최소화하는 문제로 정의된다.

$$\Phi = \|\mathbf{e}\|^2 + \lambda\Psi + \alpha\Gamma. \quad (7)$$

여기서 Ψ 와 Γ 는 각각 공간 영역과 시간 영역에서 역산에 제한을 가하는 함수이며, λ 와 α 는 이들 두 제한의 정도를 제어하는 라그랑지 곱수(Lagrangian multiplier)이다. 공간영역 제한으로는 평활화 제한(Yi *et al.*, 2003)을 도입하며, 시간 영역의 제한으로 시간적으로 인접하는 두 기준 공간 모델, \mathbf{u}_k 와 \mathbf{u}_{k+1} 사이에는 큰 변화는 발생하지 않는다(Kim, 2005)는 가정을 도입한다. 이와 같은 제한은 다음과 같은 함수로 정의될 수 있다.

$$\Psi = (\partial^n \Delta\mathbf{U})^T (\partial^n \Delta\mathbf{U}), \quad (8a)$$

$$\Gamma = \sum_{i=1}^{m-1} \|(\mathbf{u}_k + \Delta\mathbf{u}_k) - (\mathbf{u}_{k+1} + \Delta\mathbf{u}_{k+1})\|^2 = \{\mathbf{M}(\mathbf{U} + \Delta\mathbf{U})\}^T \mathbf{M}(\mathbf{U} + \Delta\mathbf{U}) \quad (8b)$$

여기서 행렬 \mathbf{M} 은 대각열과 한 개의 부대각열(sub-diagonal elements)이 각각 1과 -1로 구성된 정방행렬이다. 목적함수를 증분 벡터 $\Delta\mathbf{U}$ 에 대해 미분하면 다음과 같은 증분 벡터에 대한 해를 얻을 수 있다.

$$\Delta\mathbf{U} = (\mathbf{A}^T \mathbf{W}_d \mathbf{A} + \mathbf{C}^T \mathbf{\Lambda} \mathbf{C} + \alpha \mathbf{M}^T \mathbf{M})^{-1} (\mathbf{A}^T \mathbf{W}_d \mathbf{e} - \alpha \mathbf{M}^T \mathbf{M} \mathbf{U}), \quad (9)$$

여기서 \mathbf{W}_d 는 자료 가중행렬이며 \mathbf{A} 는 기준 공간모델 벡터로 구성된 시공간 모델 \mathbf{U} 에 대한 편미분 행렬, 그리고 \mathbf{C} 는 공간 영역에서의 평활화 제한 연산자이다. 공간영역 제한의 경우, Yi 등(2003)이 제안한 ACB (Active Constraint Balancing) 법을 도입하였으므로 공간영역 제한을 제어하기 위한 라그랑지 곱수는 대각행렬 $\mathbf{\Lambda}$ 로 정의되어있다.

3. 염료의 지하 이동 경로 규명

토양층에서의 지하수 유동 경로 모니터링을 위한 전기비저항 토모그래피의 적용성을 연구하기 위하여, 소규모 염료 주입 실험을 시추공간 전기비저항 토모그래피 모니터링과 병행하여 실시하였다. 염료를 이용한 것은 실험 이후 지하단면을 절개하여 염료가 착색된 부분을 관찰함으로써 용액의 이동 경로를 용이하게 파악하기 위한 것이다.

3.1 현장 실험 및 전기비저항 토모그래피 모니터링

실험지역의 토양층은 주라기 화강암의 풍화로 형성된 잔여 토양층이다. 염료는 Fig. 1 과 같이 실험 지역 중앙부 1m x 1m 사각형 내부에 지표면에서 염료를 부어 자연적으로 지하로 침투되도록 하였다. 주입한 염료는 전기전도도 0.09 S/m 인 Brilliant Blue FCF 용액이다. 주입 회수는 총 3 회이다. 3 일 간에 걸친 모니터링 탐사 이후, 실험 지역을 10 cm 간격으로 수직으로 절개하여 염료로 착색된 부분을 기록 함으로써 용액의 지하 침투 경로를 조사하였다.

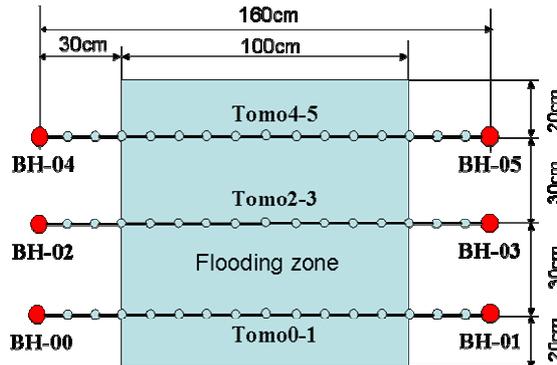


Fig. 1. Plan view of tomography sections and flooding zone.

소규모 전기비저항 토모그래피 모니터링을 위하여 10 cm 간격으로 전극이 설치된 1m 길이의 6 조의 시추공 전극 시스템을 제작하여 Fig. 1 과 같이 설치하였으며, 이를 이용하여 모니터링 phase 당 3 개의 토모그래피 단면에 대한 자료를 획득하였다. 전기비저항 탐사기기는 미국 AGI 사의 SuperSting R8/IP™ 시스템이며, 측정 간격은 10 cm 이다. 모니터링 탐사 및 염료 주입 내역은 Table 1 과 같다. 한 세트의 토모그래피 탐사자료의 획득 순서는 1) 동일시추공 탐사, 2) 시추공간 탐사, 3) 지표-시추공간 탐사, 4) 시추공-지표간 탐사, 5) 지표 탐사의 순이었다. 전극 배열은 단극-쌍극자 배열, 쌍극자 간격은 0.2 m, 측정간격은 0.1 m 이다. 단극-쌍극자 배열은 비대칭 배열이므로, 시추공간 탐사자료는 전류원 시추공과 전위 측정 시추공을 서로 반대로 하여 두 종류의 시추공간 탐사자료를 측정하였다 (Yi *et al.*, 2003). 각 phase 당 전체 자료, 즉 3 개의 단면에 대한 자료의 측정에는 약 85 분 정도의 시간이 소요되었다.

3.2 탐사 결과와 염료의 유동

획득한 총 6회의 탐사자료 중 염료 주입 이전인 phase 1 자료의 신호대 잡음비(S/N 비)가 불행히도 지하 영상을 구성할 수 없을 정도로 대단히 낮았다. 따라서 phase 1 자료를 제외한 나머지 phase 2에서 6까지 5 회에 걸친 자료를 이용하여 한 세트의 시공간 측정자료를 구성하였다. 결과적으로 시공간자료는 염료 주입 이후의 자료만으로 구성되며, 역산 결과 획득되는 시공간, 4차원 지하구조 또한 염료주입 이후 시점부터이다. 기준 시각은 각 phase의 측정 시작 및 종료 시각으로 설정하였으며 따라서 한 토모그래피 단면당 기준시각의 수는 총 10 개가 된다.

Table 1. History of dye tracer flooding and tomography monitoring.

Survey step	Elapsed time (min.)	Description
Phase 1	0~85	Before flooding
Flooding 1	85~105	100 l flooding
Phase 2	105~195	
Flooding 2	195~230	100 l flooding
Phase 3	230~315	
Flooding 3	315~363	100 l flooding
Phase 4	363~448	
Phase 5	1,002~1,087	
Phase 6	1,087~1,585	

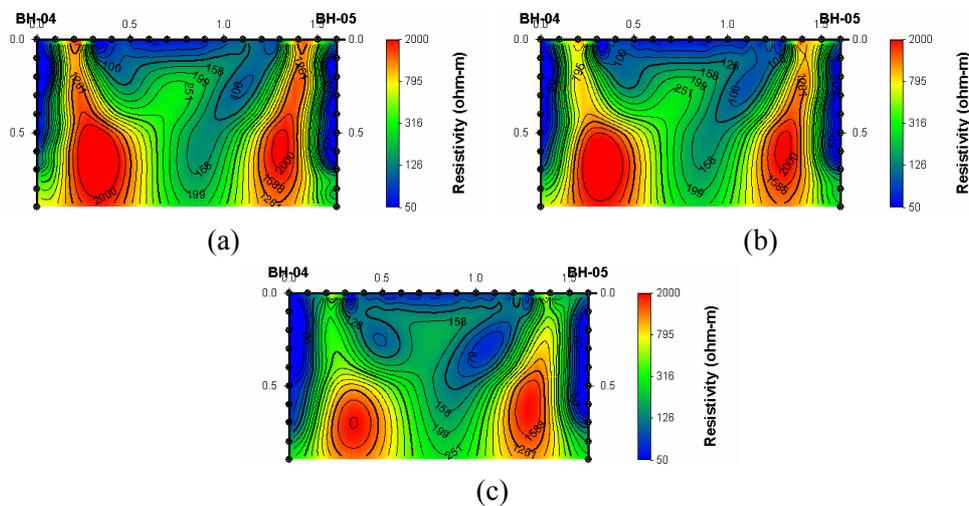


Fig. 2. Time-lapse tomograms of Tomo4-5 at the moment of starting (a) and ending (b) the measurement of Phase 2, and when Phase 6 measurement was completed (c).

4차원 역산에 의해 한 개의 단면에 대해 1 개의 시공간 지하 모형을 계산할 수 있으므로, 임의의 시간에 대한 공간 지하 모델을 구성할 수 있다. 각 시간대의 영상은 염료가 주입된 부분을 저비저항대로 잘 보여주고 있다(Fig. 2). 시추공 축을 따라 수직으로 발달하는 저비저항 이상은 전극과 토양과의 접촉저항을 감소시키기 위해 시추공 전극을 따라 주입한 염수에 의한 것이다. 염수 주입 영역 직하부에는 낮은 전기비저항의 매우 얇은 수평층이 발달하는 것으로 나타나며 그 하부에는 상대적으로 좀 더 불규칙한 전기비저항 분포를 보이고 있다. 이러한 사실로부터 최상부의 얇은 지층에서 발생한 용액의 흐름은 homogeneous matrix flow로 해석할 수 있다. 그러나 단순한 각 시간대의 지하 영상만으로는 각 모니터링 시간 사이에서 발생한 변화를 유추하기가 매우 힘들다. 뿐만 아니라 각 시간대 영상 Fig. 2와 실제 지하 염료 착색 상태를 촬영한 영상 Fig. 3 사이의 유사성을 확인하기가 매우 힘들다. 이러한 사실들은 전도성 용액의 이동을 해석하기 위해서는, 지하구조의 변화를 보여주는 지하 영상이 필요하며, 다시 말해 정확한 차이 영상(difference image)이 매우 중요함을 말해주는 것이다.

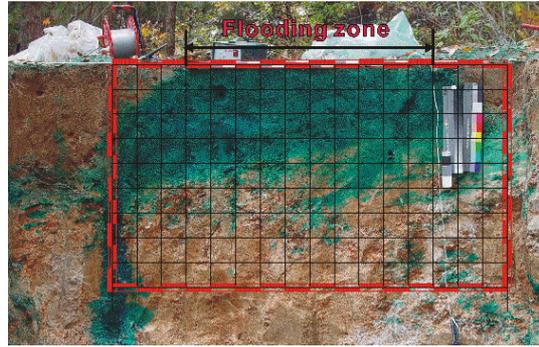


Fig. 3. The stain image taken over the vertically excavated tomographic section, Tomo4-5, after completing the dye tracer experiment. The grid pattern overlapped on the image represents tomography section

Fig. 4는 4차원 역산을 이용하여 구성된 차이 영상들이다. 이에 반해 Fig. 5는 정적인 지하구조 가정하에 각 시간대에 측정된 자료를 따로 역산하여 차이 영상을 구성하는 재래적인 방법에 의한 영상이다. 두 종류의 영상들의 단순 비교에 의하여서도 4차원 역산 알고리즘이 역산잡음이 현저히 적을 뿐만 아니라, 훨씬 더 합리적인 지하구조를, 차이 영상을 계산하여 줄 수 있음을 알 수 있다. 나아가서, 4차원 역산에 의한 차이 영상이 염료 착색 사진인 Fig. 3에 훨씬 더 유사한 형태를 나타내고 있음을 쉽게 인식할 수 있다.

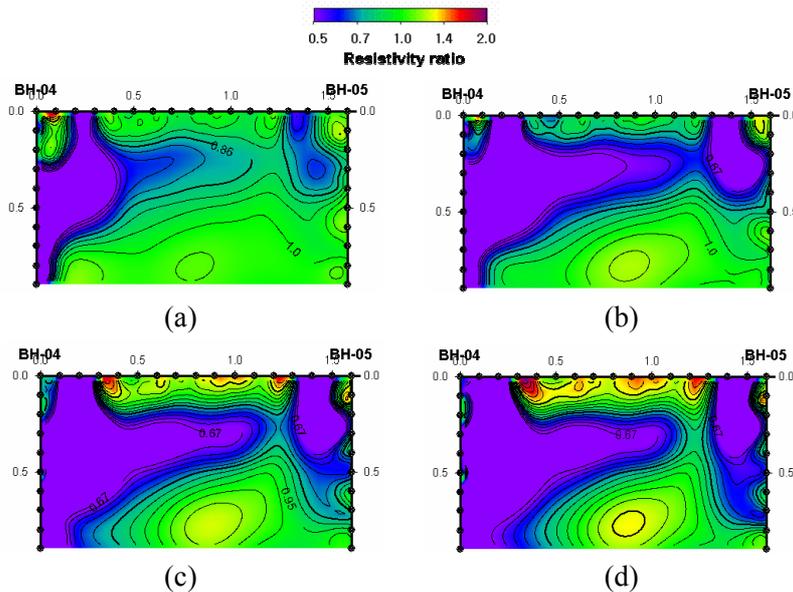


Fig. 4. Resistivity changes of Phase 3 (a), Phase 4 (b), Phase 5 (c), and Phase 6 (d) expressed in terms of the resistivity ratio between each phase and Phase 2. Time-lapse subsurface models for calculating these images correspond to the ones when the data acquisition started at each Phase.

염료 주입 구간 직하부 20 cm 두께의 최상부 층의 전기비저항은 phase 3까지는 거의 변화가 없다가 최종 염료 주입 이후인 phase 4부터 증가하기 시작한다. Fig. 4의 차이 영상은 모두 phase 2, 즉 1차 염료 주입 이후의 지하 전기비저항 분포를 기준으로 한 차이 영상이므로 이 최상부의 얇은 지층은 1차 염료 주입 이후에는 완전히 포화된 상태임을

쉽게 이해할 수 있다. 이러한 사실로부터 이 최상부 지층은 homogeneous matrix flow 영역에 해당하는 것으로 해석하였다. homogeneous matrix flow 영역을 통과한 염료는, 주입 이후부터 phase 3까지에는, 주입구간으로부터 좌측 시추공 (BH-04) 방향으로 완만한 경사를 갖는 경로를 따라 이동하였던 것으로 해석하였다. 이러한 사실은 Fig. 4a, b 두 차이 영상에서 전기전도도가 높아진 부분이 좌측 시추공 방향으로 확장되는 양상으로 쉽게 알 수 있다. Phase 3 이후에는 이 전기전도도가 높은 부분이 약간 줄어들기는 하나 전기전도도는 계속적으로 증가하는 현상을 관찰할 수 있다. 이러한 차이 영상에서 관찰되는 현상들은 전도성 염료의 유동 방향이 수직이 아닌 우측에서 좌측 방향이었음을 시사하고 있다. 이러한 유체의 이동은 경사진 지층의 경계면을 따른 lateral flow에 해당된다(Walter *et al.*, 2000; Kim *et al.*, 2004). 차이 영상 Fig. 4a는 초기 단계에서는 전도성 염료가 lateral flow 영역을 따라 매우 빠른 속도로 좌측으로 이동하여, 최종적으로는 시추공 BH-04를 따라 흘렀음을 시사하고 있다. 이러한 사실은 시추공 주변의 토양은 시추 이후 인위적으로 충전한 흙이므로 주변 토양보다 훨씬 더 투수성이 높다는 사실로부터 쉽게 이해할 수 있다.

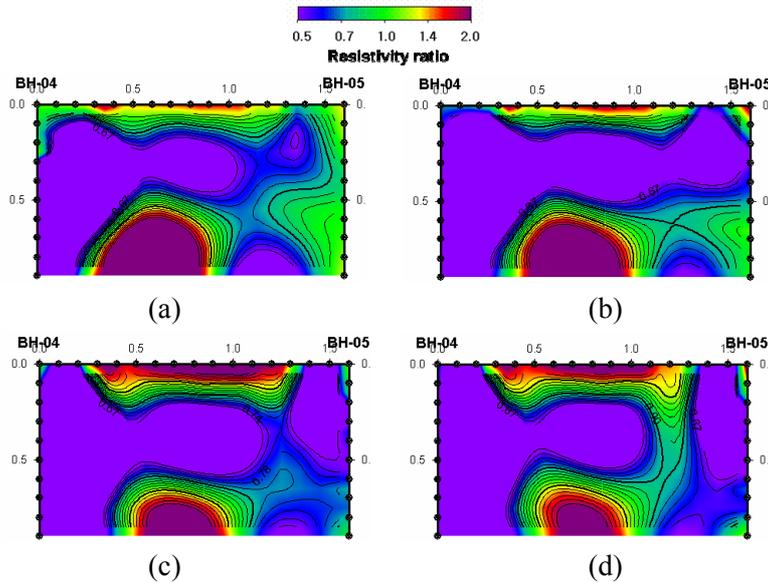


Fig. 5. Resistivity changes of Phase 3 (a), Phase 4 (b), Phase 5 (c), and Phase 6 (d) expressed in terms of the resistivity ratio between each phase and Phase 2. Time-lapse subsurface models for calculating these images are the ones by inverting the time-lapse data individually based on the time-invariant static model.

실험 지역이 화강암의 풍화에 의한 잔여 토양으로 구성되어 있으나 실험 영역이 1m x 1m x 1m 정도의 매우 좁은 영역이므로, 염료가 이 좁은 영역을 이동하는데는 많은 시간이 소요되지 않았을 것이다. 따라서 자료 측정 도중에도 지하의 전기비저항 구조가 무시할 수 없을 정도로 변화하였을 가능성이 높다. Fig. 6은 측정도중 발생한 지하 전기비저항의 변화, 즉 측정 시작시점과 종료시점 사이의 차이 영상들이다. 이 각 단계별 차이 영상은 phase 2 자료 획득 동안에는 지하구조가 매우 심하게 변화하였음에 반해, 최종 모니터링 단계인 phase 6 자료 획득 동안에는 거의 변화하지 않았음을 잘 보여준다. 뿐만 아니라

phase 2 자료측정 동안의 지하구조의 변화는 주로 시추공과 그 주변에서 발생하였다는 사실을 알 수 있다.

이와 같은 실험을 통하여 전기비저항 4차원 탐사가 지하 유체의 유동 경로뿐만 아니라 시간의 흐름에 따라 발생하는 유동경로의 변화까지도 잘 보여줄 수 있음을 알 수 있었다. 뿐만 아니라 4차원 역산은 자료측정도중에 지하구조가 심하게 변화하는 할 때에도 지하 구조의 변화를 잘 반영해 주는 시공간 지하구조 모델을 계산할 수 있음을 알 수 있었다.

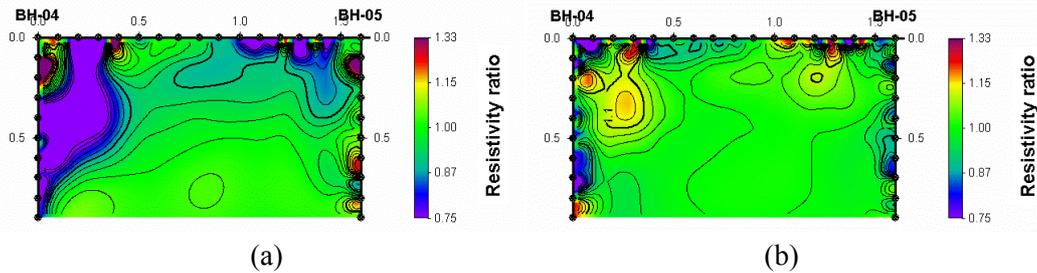


Fig. 6. Difference of the resistivity distribution between starting and ending the measurement of Phase 2 (a) and Phase 6 (b).

4. 시멘트 그라우팅에 의한 지반개량 평가

그라우팅은 능동적으로 지반을 보강하는 방법 중의 하나이다. 지반보강이라는 소기의 목적을 달성하였는지 평가하기 위해서는, 보강 공사 이후에 그라우팅된 영역을 조사하여 실제로 원하는 지역의 지반이 보강되었는지를 조사하여야 한다. 보강 공사의 판정은 주로 시추에 의존한다. 시추에 의한 지반 보강의 평가는 용이한 방법이기도 하나, 상당한 비용이 소요될 뿐만 아니라, 획득할 수 있는 정보가 시추지점에 국한된다는 근본적인 문제점을 안고 있다. 이에 반해 지구물리 모니터링은 물리적인 특성으로 지하의 변화를 2차원 또는 3차원 영상으로 묘사할 수 있으므로, 대상지반 전체의 보강 영역을 비교적 비파괴적인 방법으로 평가할 수 있는 잠재력을 지니고 있다.

그라우팅 공사에 사용되는 지반보강 주입재 중, 시멘트가 가장 많이 사용된다. 시멘트 모르타르의 전기비저항은 상당히 낮으므로 (Wei & Li 2005), 전기비저항 모니터링이 시멘트 그라우팅에 의한 지반보강 판정에 효율적임을 원리적으로 쉽게 이해할 수 있다. 시멘트 그라우팅 공사 현장에서 전기비저항 모니터링 탐사를 수행하였다. 탐사는 그라우팅 이전, 공사 도중, 그리고 공사 완료 이후에 수회 수행되었으며, 공사의 목적은 석회암 공동의 보강이었다. 현장 모니터링 탐사와 병행하여, 시멘트 모르타르의 양생과정에서 발생하는 전기비저항의 변화를 알아보기 위해, 시간의 흐름에 따른 시멘트 모르타르의 전기비저항 변화를 실험실에서 관찰하였다. 공사 현장과 실험실, 두 종류의 전기비저항 모니터링을 통하여 전기비저항 모니터링의 시멘트 그라우팅에 의한 지반보강 평가 적용성을 검증하고자 하였다.

4.1 실내 실험 및 현장 탐사

양생과정에서 발생하는 시멘트 모르타르의 전기비저항 변화를 알아보기 위해, 현장에서 주입재로 사용한 동일한 시멘트를 이용하여 직경 80 mm, 길이 160 mm 인 시편을

제작하였다. 전기비저항 측정에 사용된 기기는 일본 Oyo 사의 Mini OHM™ 이다. 제작한 시편들은 두 종류의 서로 다른 환경, 즉 건조한 상태와 물에 완전히 포화된 상태의 두 종류로 나누어 전기비저항을 측정하였다.

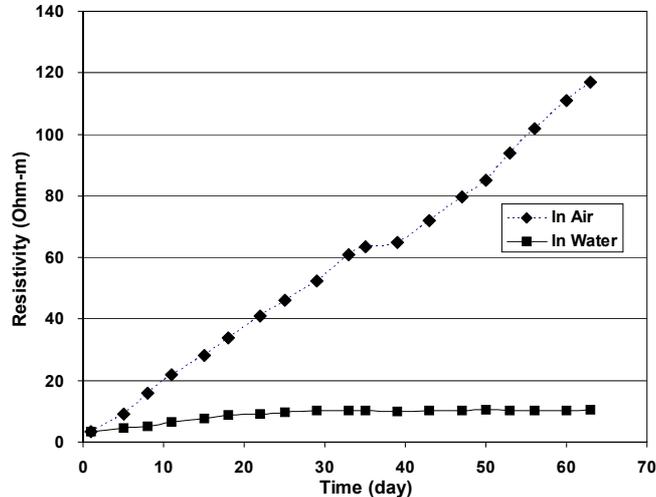


Fig. 7. Change of the resistivity of cement mortar specimen with curing time.

측정 자료의 일부를 도시한 Fig. 7과 같이, 모르타르의 상태, 즉 건조한 모르타르와 포화된 모르타르의 비저항 변화 양상은 판이하게 다르다. 공기 중에 노출시켜 건조한 상태를 유지시킨 시멘트 모르타르는 시간이 흐름에 따라 꾸준히 증가하는 양상을 보인다. 용기 속에 담겨 완전히 포화된 상태인 모르타르는, 비록 건조한 시편보다는 전기비저항 증가 속도가 느리기는 하나, 관찰 초기에는 전기비저항이 증가하는 양상을 보여준다. 그러나 시편 제작 이후 약 20 일이 경과된 이후에는 확인하기 힘들 정도로 전기비저항 증가 속도가 대단히 느리며, 60 일이 지난 이후에도 15 ohm-m 정도의 대단히 낮은 전기비저항을 보이고 있다. 그라우팅 영역은 대부분 지하수면 하부이므로, 지하에 주입된 시멘트 모르타르는 포화, 또는 최소한 습윤 상태로 존재한다고 가정하여도 무리가 없다. 또한 저항체보다는 전도체가 전기비저항 탐사로 탐지하기가 훨씬 용이하다. 그러므로 전기비저항 모니터링이 시멘트 그라우팅에 의한 지반 보강 평가에 효율적임을 알 수 있다.

Table 2. History of resistivity monitoring

Monitoring Phase	Acquisition date	Grout injection condition
Phase 1	04 Feb 2006	Pre-grouting
Phase 2	17 Feb 2006	Start of grouting
Phase 3	07 Mar 2006	During injection
Phase 4	04 Apr 2006	During injection
Phase 5	05 May 2006	Post-grouting
Phase 6	07 Jul 2006	Post-grouting

그라우팅 지역의 현장탐사는 Table 2에 표기한 바와 같이 공사 이전, 도중, 완료 이후의 총 6 회에 걸쳐 전기비저항 모니터링 탐사를 수행하였다. 도로와 나란한 측선길이 95 m인 9

개 측선(Fig. 8)에서 쌍극자, 변형된 단극 배열(김정호 등, 2001)의 두 종류의 탐사자료를 획득하였다. 사용한 전기비저항 탐사기는 미국 AGI 사의 SuperSting R8/IP™ 시스템이며, 측정 간격은 5 m이다.

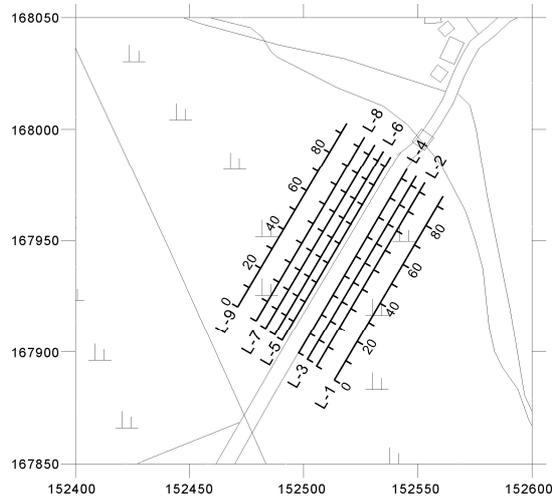


Fig. 8. Layout of the resistivity survey lines.

4.2 탐사결과

모든 모니터링 자료는 위에서 설명한 4 차원 역산 알고리즘을 이용하여 처리하였으며 이를 바탕으로부터 각 시간대에 발생한 지하구조 변화를 알아보기 위해 차이 영상을 구성하였다. 비교를 위해, 정적인 지하구조 가정하에 각 시간대에 측정한 자료를 따로 역산하는 재래적인 역산방법에 의한 차이 영상 또한 제작하였다. 비교 결과 4 차원 역산은 재래적인 접근에 비해 역산 잡음이 거의 없는 양질의 차이 영상을 구성할 수 있음을 알 수 있었다. Fig. 9는 이러한 사실을 잘 보여준다.

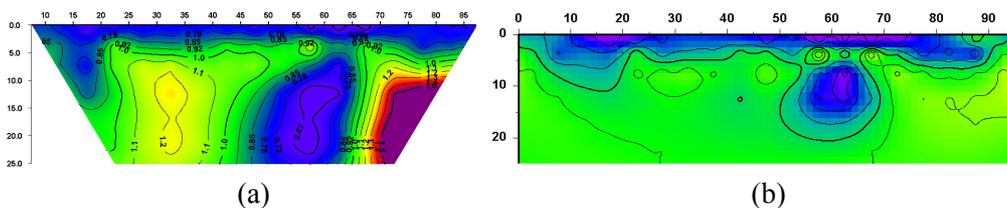


Fig. 9. Difference image of Phase 6. The difference image was reconstructed from conventional approach in (a), while 4-D inversion was used in (b).

그라우팅 이전의 지하 영상인 Fig. 10a 는 지하의 전기비저항이 20 ohm-m 이상임을 시사하고 있다. 위에서 논의한 실내 실험에 의하면 2 개월 이상 양생된 시멘트 모르타르의 전기비저항이 15 ohm-m 이하이다. 또한 이 지역의 지하수위는 약 1-2 m 심도에 불과할 정도로 얕으므로 주입된 시멘트 모르타르는 완전히 포화된 상태로 존재한다. 따라서 그라우팅 물질로 충전된 부분은 이들 보다 낮은 전기비저항을 보여 주어야 할 것이며, 차이 영상에서는 1 보다 적은 값을 나타내어야 할 것이다. 뿐만 아니라

그라우팅 물질의 주입이 이 지역의 지하 전기비저항 변화의 주 원천이며 계절적인 변화는 이에 비해 미미할 것이므로, 차이 영상에서 1 보다 큰 값을 나타내는 부분은 거의 없을 것 예상할 수 있다.

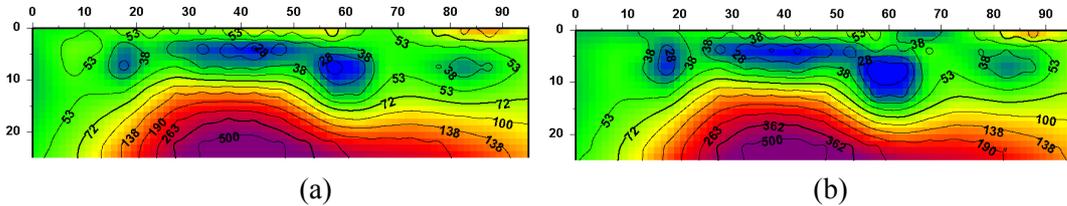


Fig. 10. Resistivity images of Phase 1 (a) and Phase 6 (b).

Fig. 11 은 4 차원 역산으로 구성된 Line-6 하부 지하의 차이 영상의 예이다. 각 차이 영상들은 전기비저항의 감소로써 그라우팅 물질이 이동하여 충전된 영역을 뚜렷하게 보여주고 있다. 나아가서 전기비저항이 증가된 부분은 거의 확인할 수 없으며, 4 차원 전기비저항 탐사와 4 차원 역산이 실제 보강된 영역의 판독, 즉 지반보강의 평가에 매우 탁월함을 알 수 있다. Phase 3 의 차이 영상(Fig. 11b) 만이 국부적으로 전기비저항이 증가된 부분을 보여주고 있으나, 이는 phase 3 에서 획득한 자료의 낮은 S/N 비에 주로 연유한 것이다.

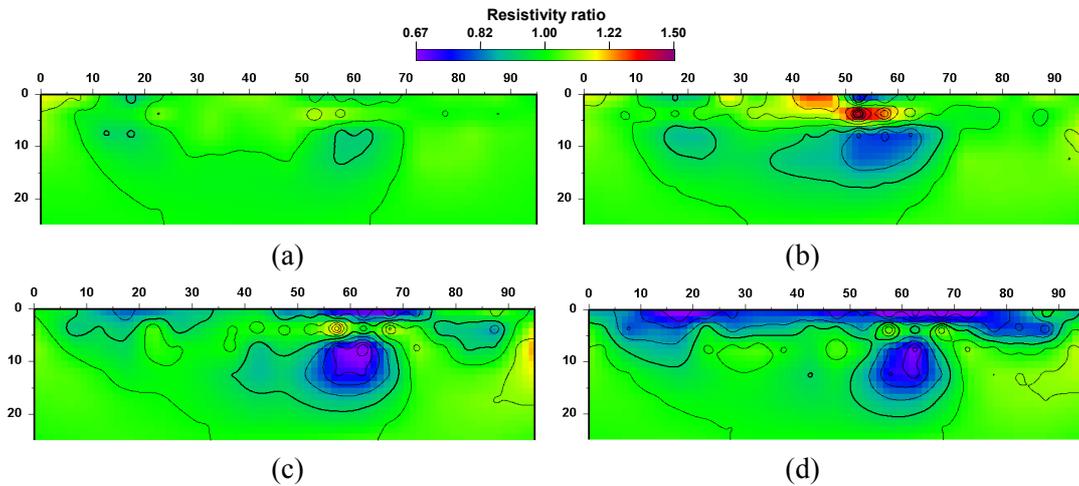


Fig. 11. Difference images of Phase 2 (a), Phase 3 (b), Phase 4 (c), and Phase 6 (d). Horizontal and vertical axes are the distance and depth in meter, respectively.

Fig. 12 는 측선 Line-4 의 지하전기비저항의 변화를 보여주고 있으며, Line-6 에 비해 지하 전기비저항의 변화가 매우 미미함을 나타낸다. 측정 50-60 m 구간에서 약간의 전기비저항 감소를 보이고 있으나 Line-6 에 비하면 미미한 정도이며, 이러한 사실은 Line-4 부근의 시추공을 통해 주입한 모르타르의 양이 Line-6 에 비해 매우 적다는 사실과 잘 부합된다.

5. 결론

지금까지 인위적으로 지하에 유체를 주입함으로써 발생된 지하 물성 변화 구명에 전기비저항 모니터링을 적용한 두 사례를 통하여 전기비저항 4차원 탐사가 지하구조의 변화를 정확하게 추적할 수 있음을 논의하였다. 지하구조의 변화를 정확하게 밝히기 위해서는 모니터링 자료의 역산 방법이 매우 중요하며, 두 사례 연구를 통해 4차원 역산이 매우 효율적일 뿐만 아니라 변화 과정까지 재구성할 수 있음을 알 수 있었다. 현장 자료에 함유되어 있는 잡음이 지하 구조 변화 영상의 오류를 증폭시킬 수 있기 때문에 높은 S/N 비의 모니터링 자료의 획득 또한 대단히 중요하다. 앞으로 오염확산, 지반 붕괴 등의 감시 등의 분야에 4차원 전기비저항 탐사의 적극 활용이 기대된다.

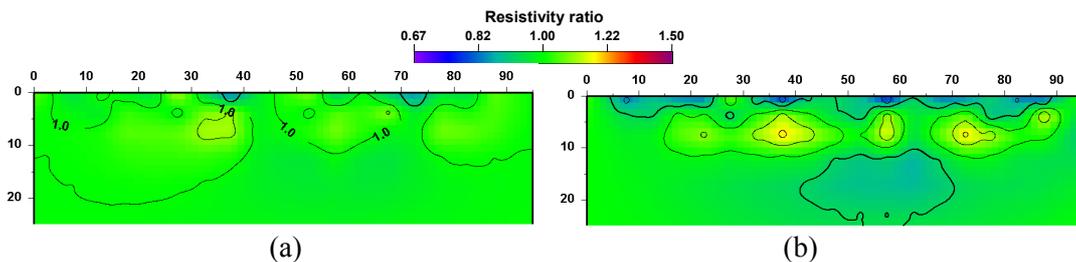


Fig. 12. Difference images of Phase 2 (a) and Phase 4 (b) of the Line-4.

감사의 글

이 연구는 한국지질자원연구원 전문연구사업인 ‘지하 정밀 영상화 융합기술 개발’ 과제의 일환으로 수행되었다.

참고문헌

- 김정호, 이명종, 송윤호, 정승환, 2001, 2차원 전기비저항 탐사를 위한 변형된 전극배열법에 관한 연구, 물리탐사, 4, 59-69.
- Alpak, F.O., Torres-Verdin, C., and Habashy, T.M., 2004, Joint inversion of transient pressure and dc resistivity measurements acquired with in-situ permanent sensors: A numerical study, *Geophysics*, **69**, 1173-1191.
- Kim, J. G., Chon, C.-H., and Lee, J.-S., 2004, Effect of structures and texture on infiltration flow pattern during flood irrigation, *Environmental Geology*, **46**, 962-969.
- Kim, J.-H., 2005, Four dimensional inversion of dc resistivity monitoring data, Proceedings of Near Surface 2005, the 11'th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, European Association of Geoscientists and Engineers, 5-8 Sep., Palermo, Italy, A006.
- Kim, J.-H., 2006, Least-Squares Inversion of DC Resistivity Data Acquired over Dynamically Changing Earth Model, Proceedings of Near Surface 2006, Helsinki, Finland, 4-6 September.
- Slater, L., Binley, A.M., Daily, W., and Johnson, R., 2000, Cross-hole electrical imaging of a controlled saline tracer injection, *Journal of Applied Geophysics*, **44**, 85-102.
- Walter, M.T., J.S. Kim, T.S. Steenhuis, J.Y. Parlange, A. Heiling, R.D. Braddock and J. Boll, 2000, Funneled flow mechanism in a sloping layered soil: laboratory investigation, *Water Resources Research*, **36**, 841-849.
- Wei, X. & Li, Z. 2005, Study on hydration of Portland cement with fly ash using electrical measurement, *Materials and Structures*, **38**, 411-417.
- Yi, M.-J., Kim, J.-H., and Chung, S.-H, 2003, Enhancing the resolving power of least-squares inversion with active constraint balancing, *Geophysics*, **68**, 931-941.