

전기검증과 전자탐사를 이용한 2차원 투수계수분포 특성 분석

Analysis of two dimensional coefficient of permeability using Electrical logging and AMT Survey

고성일¹⁾, 이종호¹⁾, 이태종²⁾, 박남윤²⁾, 추석연¹⁾

¹⁾(주)삼보기술단, ²⁾(주)지오멕스

Abstract. The estimation of the coeff. of permeability is a major process that influenced in very large portion to the changing of ground water movement and estimation of the outflow's quantity in the ground water movement modelling. To overcome the error caused by difficulty of the ground investigation for the hydraulic parameter's estimation, in this paper, we study of correlation between electric resistivity and coeff. of permeability, and analyse of coeff. of permeability from electric resistivity. To accomplish this purpose, we carry out electrical logging, AMT survey as an in-situ test, and measure electric resistivity, porosity, permeability for the intact rock as a laboratory test. Based on the results of this research, it can be applied that estimation of the coeff. of permeability using electrical logging and AMT survey is a effective method for the impossible area of the ground investigation caused by geographical condition and petition.

개요. 지하수 유동 모델링에 있어서 투수계수의 평가는 지하수 유동 및 유출량의 변화에 가장 큰 영향을 미치는 주요한 과정이다. 본 연구에서는 대상구간의 현지여건으로 인한 지반조사의 어려움으로 인한 수리특성 평가의 오차한계를 극복하기 위하여 전기비저항과 투수계수의 상관관계에 대한 고찰을 수행하였으며, 전기비저항탐사 혹은 전자탐사로부터 얻어지는 전기비저항으로부터 투수계수의 분포특성을 구하고자 하였다. 이를 위하여 현장시험으로 전자탐사, 전기비저항 수직탐사 및 전기비저항 검증등을 수행하였으며, 실내시험으로 암석코아에 대한 전기비저항, 공극율, 투수율 및 지하수 전기비저항등을 측정하여 상관관계를 분석하였다. 본 연구를 통해 지형조건 및 민원으로 인한 조사 불가능 구간에 대한 수리특성 평가에 효율적으로 적용 가능할 것으로 판단된다.

1. 서 론

터널의 굴착, 시공에 따른 지하수위의 변화, 용출량의 예측 및 감시는 환경문제와 결부되어 터널의 설계에 있어서 매우 중요한 요소 중 하나이다. 이를 위한 지하수 유동 모델링에는 터널 굴착 이전 지하수 유동 양상 변화 분석, 터널 굴착 과정에 있어서의 용수량 예측, 터널 굴착 완료 후 터널 내로의 지하수 유입량 변화분석 및 터널 방수공사 이후의 터널주변 지하수의 회복양상 예측 등이 포함된다(Matsui, 1995; Matsui et al., 1997; Matsuura et al., 1999). 지하수 유동 모델링 해석에 있어서 주요한 입력변수로는 지하수의 주된 통로역할을

하는 단층 및 파쇄대의 존재와 절리의 특성 및 터널굴착예정구간에서의 투수계수 등이 있으며, 여기에 경계조건이 되는 하천이나 강, 분수령 등이 포함되도록 모델 영역을 선정하여 모델링을 수행하게 된다.

이들 주요 입력변수의 결정은 대부분 지표지질조사나 물리탐사에 의해 이루어지고 있다. 즉, 단층 및 파쇄대의 파악은 지표지질조사, 지표물리탐사 및 시추조사에 의해, 절리의 특성은 지표지질조사와 시추공을 이용한 BIPS(Borehole Image Processing System) 혹은 시추공 텔레뷰어(Borehole Televiwer) 등에 의한 절리망 해석에 의해 결정되는 것이 일반적이다.

지하수 유동모델링에 필요한 입력 상수 중 투수계수는 터널 굴착시 발생하는 지하수 유동 및 유출량의 변화에 가장 큰 영향을 미치는 수리상수이다. 투수계수는 시추공내에서 투수 및 수압시험, 혹은 양수시험으로 현장 암반 상태에서 측정하거나 최근에는 암석코아를 이용하여 실내투수시험으로 투수계수를 측정하는 방법도 적용되고 있다(정교철 et al., 2001).

노선상의 다수의 시추공에서 투수 및 수압시험에 의해 얻은 투수계수를 풍화암, 연암, 경암에 대한 평균값을 대표값으로 입력하여 지하수 거동해석을 수행한다. 그러나 지반 내부는 균질하지 않고 같은 연암이라 하더라도 그 풍화정도 및 균열의 특성에 따라 투수계수가 크게 달라지기 때문에, 모델링 영역 전체에 걸쳐 단 하나의 대표값으로 표현하는 것은 위험한 가정이라 할 수 있다. 따라서, 공간적으로 다양하게 변화하는 지질조건을 반영할 수 있도록 수리정수의 공간적 분포 파악이 필요하다(Matsuura et al., 1999).

본 연구에서는 전기비저항과 투수계수가 이들을 좌우하는 인자들이 대부분 공통되어 매우 밀접한 상관관계를 보이는 연구결과를 토대로 (Yamaguchi, 1960), 우선 여러 시추공에서 수행된 전기비저항검증자료와 수압시험결과 얻어진 투수계수의 상호 관계를 고찰하고자 하였다. 또한, 이로부터 얻어진 전기비저항-투수계수의 상관관계식을 터널예정구간에서 수행된 전자탐사결과에 적용하여 투수계수의 2차원적 분포를 구하고자 하였다.

2. 지질 개요

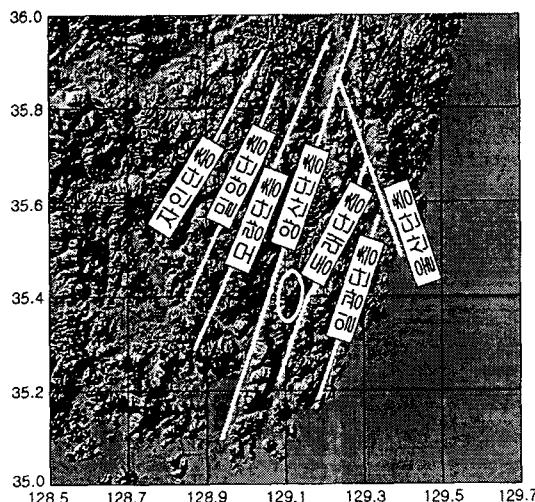


Fig 1. 광역 지질구조도

대상지역은 경상남도 양산시 용상읍 소주리와 평산리에 걸쳐 펼쳐진 원효산 및 천성산 일대이며 경상분지의 동남부에 위치하며 경상분지 동남부의 현저한 NNE-SSW 방향의 단층계 가운데 대표적인 양산단층과 동래단층 사이에 위치한다.

중생대 말 ~ 고제3기에 걸친 수차례의 격렬한 화산활동과 반복단층운동에 기인된 취성변형(brittle deformation)의 산물로 다수의 균열대를 수반하고 있다. 기반암은 백악기 후기의 불국사 화강암류와 이를 백악기 말기 ~ 제3기초에 분출한 (원효산)화산암류로 구성된다.

기반암 가운데 불국사 화강암류는 흑운모 화강암, 화강섬록암이 주를 이루며 (원효산)화산암류로는 안산암, 유문암질 응회암, 안산암질 응회암이 주종을 이룬다.

지질구조특성으로 과업구간은 경상분지 동남부의 양산단층계의 중심부인 양산단층과 동래단층의 사이에 위치하여 두 단층과 평행한 법기단층과 좌수향 전단이동 감각에 따른 2차 전단계열의 단층파쇄대가 산재하는 지역이다.

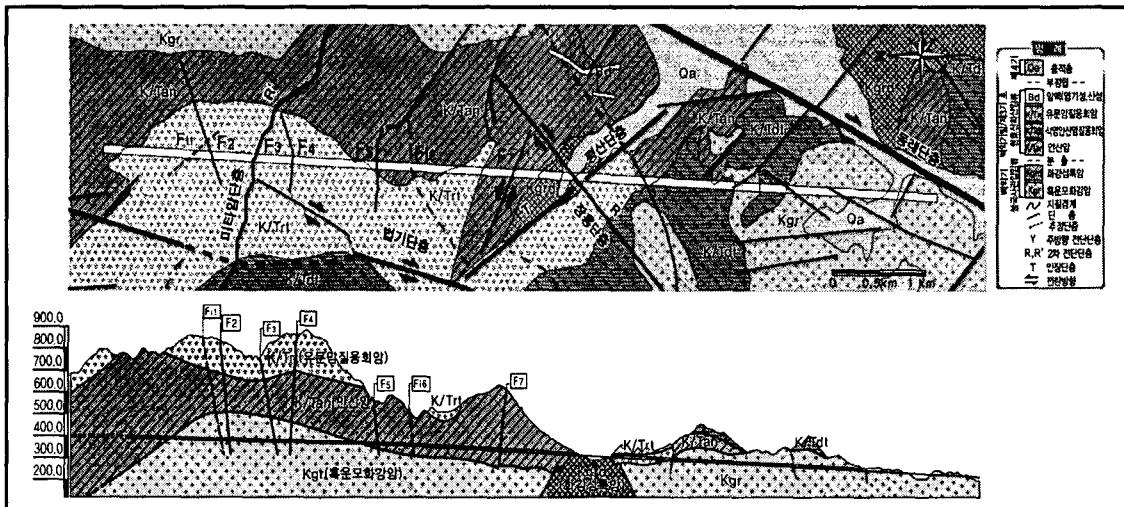


Fig. 2. 대상구간 지질개요

이 지역은 특히, 천성산의 정상부에 위치한 화암늪, 밀밭늪, 무제치늪 등의 습지가 발달되어 있고 이중 화암늪은 노선에서는 약 2km 떨어져 있어 계획된 터널과 수계는 다르지만 습지 보전지구로 지정되어 있으며, 밀밭늪은 터널계획노선에서 약 200미터 이내에 위치해 터널굴착에 따른 영향을 가장 크게 받을 것으로 예상되는 곳이기도 하다.

3. 전기비저항 및 투수계수간 상관성 분석

암석의 투수계수와 전기비저항은 그 지배하는 물리적인 조건이 매우 유사하여 풍화정도, 점토광물의 존재 유무, 절리의 발달, 파쇄대의 유무 및 공극률에 주로 좌우된다. 예를들어, 파쇄대부근에서 전기비저항은 주변보다 낮고 투수계수는 신선한 암반보다 높다. 그러나 모든 요소들이 공통되는 것은 아니여서, 예를들어, 공극수의 양 및 분포형태, 공극수의 전기비저항은 암반의 전기비저항에는 크게 영향을 미치나 투수계수와는 거의 관계가 없는 인자들도 있다.

이들 공극수의 전기비저항은 대상지역의 평균적인 전기비저항의 높고 낮음을 좌우하게 되며, 따라서 이것이 특정지역에서 얻어진 전기비저항-투수계수의 상관관계를 다른 지역으로 일반화시키기 어렵게 하는 요인이 되기도 하다.

Yamaguchi(1960)는 공극수의 영향을 배제한 형태, 즉 암반의 전기비저항과 지하수의 전기비저항의 비인 전기비저항계수(formation resistivity factor: F)를 이용하여 표현하여 일반화를 꾀하였다. 즉,

$$k' = (d_m e)^2 \frac{1360}{F} \quad \text{--- (1)}$$

여기서, k' 는 투수계수(cm/sec), d_m 은 구성암석의 평균입경, e 는 공극비로 $(1-\phi)/\phi$ 이다. 양변에 log를 취하면

$\log(k') = -A \log(F) + B$ --- (2)의 형태가 되며, 여기서 전기비저항과 투수계수는 log-log 그래프에서 음의 기울기를 갖는 직선으로 나타나며 서로 반비례 관계임을 알 수 있다. 그러나 Yamaguchi의 식도 유도과정에서 많은 가정들이 도입되고 특히, 점토광물이 존재할 경우 전기비저항과 투수계수가 모두 낮아져 만족하지 않는 경우가 발생하게 된다.

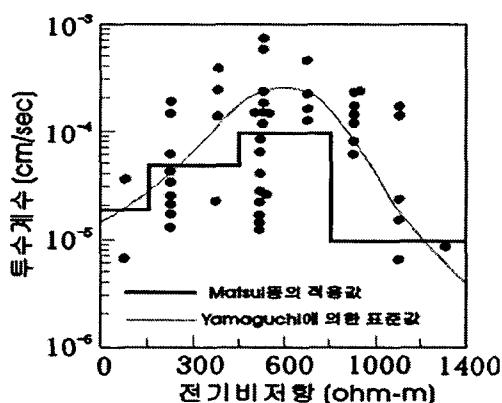


Fig. 3. 전기비저항-투수계수 상관성
(Matsui et al., 1997)

Matsui et al.(1997)은 점토광물이 존재하는 경우 전기비저항과 투수계수의 상관관계를 현장실험을 통하여 구하고 이를 터널굴착시 용수량의 예측에 활용한 바 있다. 점토광물이 존재하는 경우 특정 전기비저항에서 투수계수는 최대치를 보이며 전기비저항이 그보다 낮거나 높아짐에 따라 투수계수는 점점 작아지는 양상을 보인다(Fig. 3.).

본 연구의 대상지역은 화강암, 화강섬록암 및 안산암이 주종을 이루어 조암광물은 석영, 장석 및 흑운모가 주를 이루어 (1)식으로부터 전기비저항과 투수계수는 서로 반비례관계를 보일 것으로 예상할 수 있다.

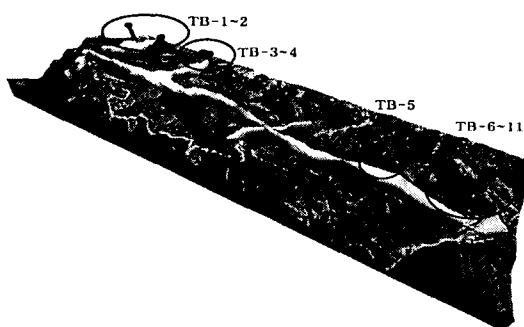


Fig. 4. 시추조사 및 전자탐사 위치도

수리상수를 구하기 위해서는 터널 노선 직상부에서 시추 및 현장시험들이 이루어지는 것이 가장 이상적이나 본 연구에서는 환경단체와 종교단체에 의한 민원때문에 노선 직상부에서의 시추가 불가능한 관계로 Fig. 4.에 보인 바와 같이 노선 주변에 총 5개소의 시험정을 굽착하고 각각에 대하여 투수 및 수압시험과 전기비저항 검증을 실시하였으며, Fig. 5.에 전기비저항 검증결과를 도시하였다.

분석과정은 동일 시추공 및 심도에서 수행된 수압시험자료와 동일 심도구간의 전기비저항 검증자료의 평균값을 산출하여 대비하는 과정으로 수행하였다. 이중, TB-3, TB-5는 안산암이, TB-1, TB-2, TB-4는 화강암이 기반암을 이루고 있다.

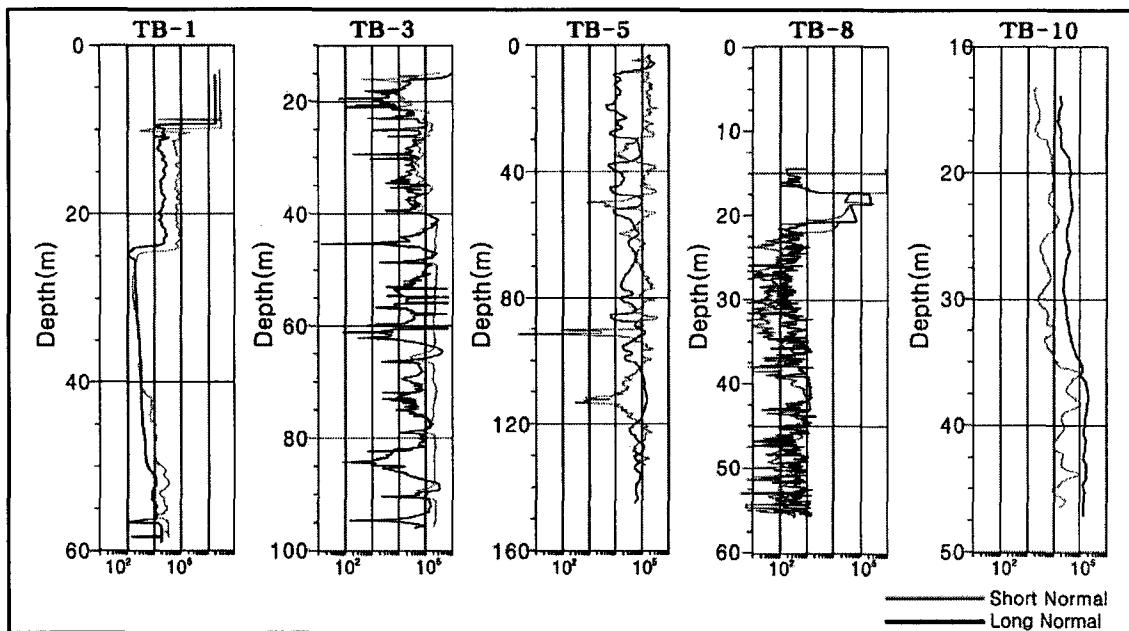


Fig. 5. 시추공 전기비저항 검증결과

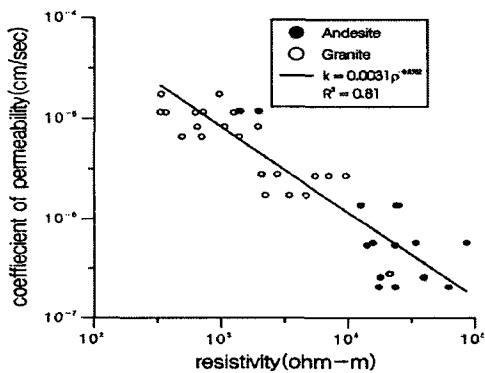


Fig. 6. 전기비저항-투수계수 상관관계분석

전기비저항의 평균값과 투수계수를 log-log 축에 도시한 것이 Fig. 6.이다. 검은점으로 표시된 자료는 기반암이 안산암인 TB-3 과 TB-5로부터, 흰점은 화강암에서 얻어진 자료이다. 비록 현장 여건상 시추공이 충분하지 못하여 각각의 암종별에 대한 충분한 자료를 얻지 못하여 암종별로 상관관계를 구하기는 어렵지만, 일반적으로 안산암과 화강암의 투수계수와 전기비저항이 서로 반비례관계에 있음을 보여준다.

이를 최소자승법을 이용해 fitting하면 전기비저항과 투수계수는

$$\log(k') = -0.8562 \log(\Omega \cdot m) + 0.0031 \quad (3)$$

으로 표현되며, 여기서 k' 는 전기비저항으로부터 추정된 투수계수이다.

대상구간의 전기비저항치 산출은 심부탐사를 위한 전자탐사 및 천층부 탐사를 위한 전기비저항탐사를 복합적으로 수행함으로써 심도에 따른 오차발생이 최소화되도록 하였다. 따라서 전자탐사-전기비저항 탐사결과의 복합해석단면 및 전기비저항-투수계수의 상관 관계식을 이용하여 터널예정구간의 2차원적 투수계수 분포를 추정하였다.

4. 터널구간 전자탐사 및 수리특성 분석

해발고도 804m에 이르는 천성산을 관통하는 터널은 계획심도 500m에 이르며 영남의 알프

스라 불리우리 만큼 험한 지형으로 지표 곳곳에 암반이 노출되어 있어 터널지반조사에 가장 많이 상용되는 전기비저항탐사는 적용이 불가능하였다. 따라서 심도 500m까지의 전기비저항 분포를 구할 수 있는 것은 (CS)AMT가 유일한 대안이라 할 수 있다.

이 연구에서 사용된 장비는 미국 EMI사의 IMAGEM system으로 장비의 이동성이 좋아 험준한 산악에서도 탐사가 가능하며, 국내와 같이 전기비저항이 높은 지역에서는 1km이상의 가탐심도를 갖는다. 전기장 측정시 쌍극자간격은 10m로 하고 경우에 따라서 가감을 두었으며, 측점간격은 50m로 하고 각 측점에 대하여 10Hz ~ 100kHz의 주파수대역에서 전기장과 자기장의 시계열을 측정하였다. 자료처리 과정은 일반적인 MT 자료처리와 동일하며, 측정된 전기장과 자기장의 시계열로부터 각각 자기상관과 상호상관을 통해 임피던스를 구하고 이로부터 결보기비저항과 전기장과 자기장의 위상차를 계산한 후, 보스틱변환과 공간필터링을 통하여 2차원 전기비저항단면을 얻는다.

Fig. 7은 Fig. 4의 측선을 따라 50m 간격으로 측정한 결과로 TM모드 결과에 지표지질조사 및 추가물리탐사에서 추정된 단층 및 파쇄대의 위치를 표시하였다.

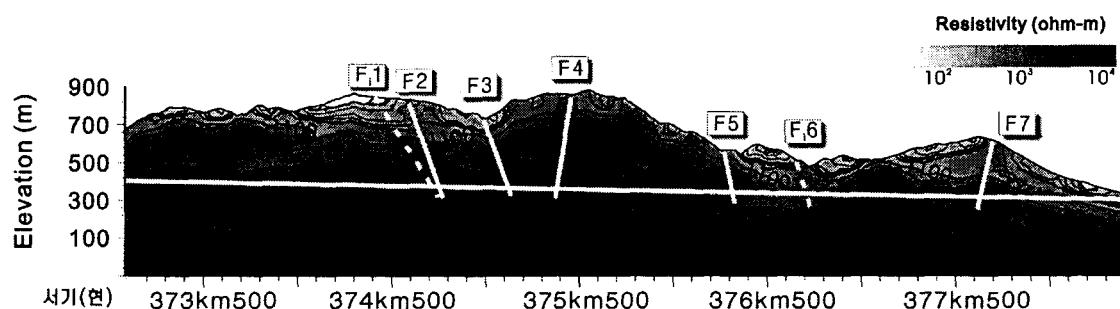


Fig. 7. 전자탐사-전기비저항탐사 복합해석 단면

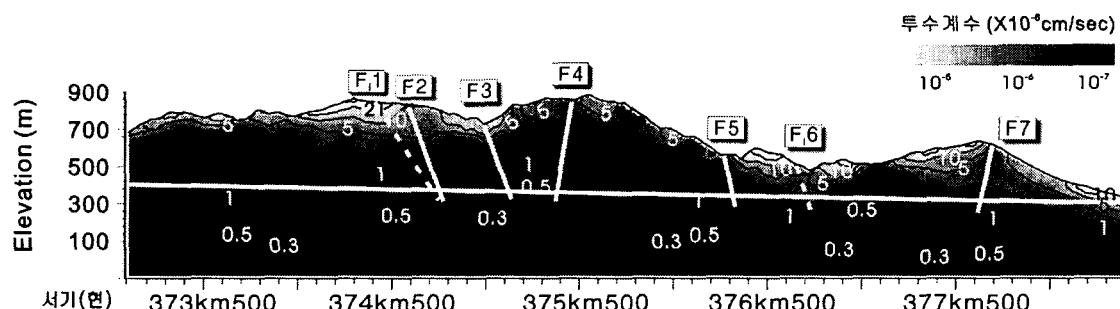


Fig. 8. 전기비저항-투수계수 복합해석 단면

Table 1. k 및 k' 결과 비교 (cm/s)

	투수계수	평균 투수계수	비고
k	$4.40 \times 10^{-5} \sim 7.92 \times 10^{-8}$	3.93×10^{-6}	경암반 기준
k'	$1.95 \times 10^{-5} \sim 7.08 \times 10^{-7}$	-	

TM모드의 전기비저항 복합 해석단면으로부터 앞에서 구한 전기비저항-투수계수 상관 관계(Fig. 5)를 이용하여 Fig. 8과 같은 전기비저항-투수계수 복합단면으로 변환시켰으며, 현장수리특성 시험결과(k)와 비교하여 수리해석을 위한 구간별 적정 투수계수를 산정하였다.

5. 결 론

지형조건 및 민원으로 인한 지반조사 불가능 구간에 대한 수리특성평가를 위하여 기존에 일반적으로 사용되어오던 전기검증과 전자탐사 결과인 전기비저항치를 이용하여 수리특성을 평가하고자 하였다.

전기비저항-투수계수 상관관계 분석결과 $\log(k') = -0.8562 \log(\Omega \cdot m) + 0.0031$ 상관관계 보이며, 전자탐사-전기비저항 복합해석단면을 이용한 대상구간의 2차원적인 투수계수 $k' = 1.95 \times 10^{-5} \sim 7.08 \times 10^{-7}$ cm/sec의 범위를 보임으로써 시추공을 이용한 수리특성 평가결과와 유사한 결과를 보였다.

본 연구결과를 이용하여 지형조건 및 민원으로 인한 지반조사 불가능구간에 대한 수리특성 평가에 효과적이며, 1차원적인 시추공 수리특성 평가로 인한 공간적 변화양상 파악의 불합리성을 최소화하는 방안으로 활용 가능할 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 송성호, 용환호, 김진호, 송승엽, 정형재, 2002, 전기 및 CSMT 탐사를 이용한 초정지역의 수리지질 구조 해석: 물리탐사, 5, No. 2, 118-125.
2. 정교철, 채병곤, 김만일, 서용석, 2001, 화강암의 손상과정에 따른 투수계수 특성연구: 지질공학, 11, No. 3, 315-325.
3. Barton, N., Lien, R. and Lunde, J., 1974, Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support: Rock Mechanics, 6, no.4
4. Bieniawski, Z. T., 1974, Geomechanics Classification of Rock Masses and Application in Tunneling: Proc. 3rd Int. Cong. Rock Mech., 2, Part A
5. Matsuura, S., Park, S. G., Asano, S., and Okamoto, T., 1999, Flow Simulation of Groundwater in Volcanic Tertiary Landslide (in Japanese): Proc. of 29th Symp. Of Rock Mech., Japanese Soc. of Civil Eng., 161-165.
6. Matsui, T., Kamide, S., Park, S. G., 1997, An Applicability of Resistivity-Based High Density Prospecting to Ground Survey of Mountain Tunnel (in Japanese): Soils and Foundation, 45, No. 5, 20-22.
7. Yamaguchi, H., 1962, On the Relationship between the Formation Resistivity Factor and the Hydrological Constants of the Granular Aquifer (in Japanese): Butsuritanko, 13, No 4., 194-206.
8. Matsui, T., 1995, Needs and Application of Resistivity-Based High-Density Prospecting to Geotechnical Engineering: Butsuritansa, 48, No. 6, 530-538.
9. Hudson, J. A., 1989, Rock mechanics principles in engineering practice-CIRIA Ground Engineering Report: Underground Construction, 20-23, 66-67.