

터널 굴착면 전방의 이상지반 예측을 위한 전기비저항 기반 하모니서치 (HS) 역해석 알고리즘

박진호¹ · 이강현² · 신상훈³ · 이성원⁴ · 이인모^{5*}

¹비회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정

²정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사수료

³비회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정

⁴정회원, 한국건설기술연구원 SOC 성능연구소 Geo-인프라 연구실 연구위원

⁵정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수

Harmony search algorithm to predict anomalous zone ahead of tunnel face utilizing electrical resistivity survey

Jin-Ho Park¹, Kang-Hyun Lee², Sang-Hoon Shin³, Seong-Won Lee⁴, In-Mo Lee^{5*}

¹Ph. D Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

²Ph. D candidate, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

³Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

⁴Research Fellow, SOC Research Institute, Korea Institute of Construction Technology

⁵Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

ABSTRACT: The objective of this study is the application of the harmony search (HS) algorithm and verification of the accuracy of inverse analysis to predict the location, thickness and electrical properties of anomalous zone ahead of tunnel face when utilizing the electrical resistivity survey using electrical resistivity of the ground. The relationship correlating the characteristic values of the anomalous zone with the electrical resistance values was derived using Gauss' laws and Ohm's laws. Inverse analysis program was developed to predict anomalous zone by using electrical resistivity based on HS algorithm. Electrical resistance measuring system is devised to obtain the electrical resistivity of the ground, and laboratory tests were performed on anomalies to verify the proposed HS algorithm. The test results show that the characteristics of the anomalies are predicted reasonably well resulting in less than 5% error when predicting the location and thickness of the anomaly.

Keywords: Harmony search, Electrical resistivity survey, Prediction method

초 록: 본 연구의 목적은 전기비저항을 사용한 터널 굴착면 전방의 이상지반 탐사 시 이상지반의 위치와 두께 및 전기적 특성을 예측하기 위한 하모니서치(Harmony Search, HS) 알고리즘의 적용과 역해석 정확성의 검증이다. 가우스법칙(Gauss' laws)과 옴의 법칙(Ohm's laws)으로부터 이상지반 존재 시 암반의 전기저항과 이상지반 특성 변수를 연관 짓는 관계식을 유도하고, 전기저항을 사용하여 이상지반 특성 변수를 예측하도록 HS 알고리즘 기반의 역해석 프로그램을 개발하였다. 지반의 전기비저항을 측정하기 위한 저항 측정 시스템을 제작하였으며, 제안된 HS 알고리즘을 검증하기 위해 실내실험으로 모사한 이상지반의 전기저항을 측정하여 역해석을 수행하였다. 그 결과, 이상지반의 위치와 두께에 대한 예측은 5% 이하의 낮은 오차율을 나타내어 이상지반의 특성을 높은 정확도로 예측함을 보였다.

주요어: 하모니서치 알고리즘, 전기저항, 전기비저항, 이상지반 예측

*Corresponding author: In-Mo Lee

E-mail: inmolee@korea.ac.kr

Received February 19, 2014; Revised March 3, 2014;

Accepted March 7, 2014

1. 서론

터널 시공 중 설계단계의 지반조사에서 예측하지 못한 이상지반이나 파쇄대가 나타나는 경우 발생할 수 있는 공사기간 지연, 공사비용 증가 등의 문제는 시공성을 저해하는 요인으로 작용한다. 이상지반을 미리 파악하고 적절히 대처하는 경우 시간적, 경제적 손실을 방지할 수 있다. 따라서 터널 시공 중 막장 전방의 지반상태를 예측하여 적절한 대처를 수행할 수 있는 예측 기술에 대한 요구가 증대됨에 따라 막장 전방 예측을 위한 다양한 기술개발이 시도되었다. 그 결과 최근 터널 시공현장에는 일반적으로 TSP (Tunnel Seismic Prediction), 직접 막장전방 지반을 천공하여 판별하는 선진보링, 전자송수신 안테나를 이용하는 전자기파 탐사 등의 기법을 통해 막장 전방의 지반조건을 예측하고 있다. 또한 이러한 기술의 정확성 및 편의성을 향상시키기 위해 다수의 연구가 수행되었다 (이강현 등, 2011).

여러 예측 기법 중에서도 지반의 전기저항과 전기비저항을 이용하여 막장 전방의 연약대 및 파쇄대를 예측하기 위해 류희환(2008)은 터널 전기비저항 탐사 시스템(Tunnel Electrical Resistivity Prospecting System)을 개발하고 실내실험과 현장실험을 수행하여 적용성을 평가하였다. 이 시스템은 지반의 전기적 정보를 바탕으로 이상지반의 특성을 역해석 하기 위한 알고리즘으로 몬테 카를로(monte carlo) 분석과 유전 알고리즘(genetic algorithm)을 사용하였는데 몬테 카를로 분석의 경우 터널 전방에 존재하는 이상지반 특성에 관한 변수를 신뢰성 있게 예측하기 위해 많은 시간이 소요되며 정확한 주변 지반의 정보가 있을 경우에 한해 적용이 가능하다. 유전 알고리즘을 사용한 역해석은 정확한 예측결과를 얻기 위해 세대수와 개체수를 경험적으로 파악하여 해석 수행을 위한 초기값으로 입력을 해야 하며 약 30여분의 해석시간이 소요된다. 본 연구에서는 이와 같은 점을 개선하고자 역해석 기법으로써 하모니서치(Harmony Search, HS)

알고리즘을 적용하여 이상지반 특성 변수의 역해석 시 예측의 정확성 측면에서 본 알고리즘의 효과를 검증하였다.

하모니서치는 Geem et al. (2001)에 의해 처음 제안되었으며, 연주자가 청중에게 감동을 주기위해 현장에서 좋은 harmony를 찾아 연주하는 즉흥 연주를 모방한 알고리즘이다. 몇 명의 연주자가 악보 없이 연주를 하는 과정에서 서로 조화를 이루는 규칙이 존재하는데 하모니서치는 이 규칙을 모방해 아름다운 조화를 찾아가듯이 해를 탐색한다(김종우 등, 2007). 음악의 최적화음이 공학의 최적해에 해당한다는 새로운 개념의 발견적 탐색법(heuristic algorithm)으로 기존의 최적화기법에 비해 최적해 탐색에 있어 우수한 역해석 성능을 나타내는 것으로 알려져 있다.

본 논문은 암반에 이상지반이 위치하는 경우 가우스 법칙(Gauss's law)과 옴의 법칙(Ohm's law)을 바탕으로 지반의 전기저항과 이상지반 특성에 관한 변수를 포함하는 이론식을 유도하였다. 이론식을 기반으로 HS 알고리즘을 구현하여 전기저항으로부터 이상지반 특성 변수를 탐색하도록 역해석 프로그램을 개발하였다. 이를 검증하기 위해 실내실험에서 이상지반을 모사하고 이상지반의 위치와 두께를 변화시키면서 전기저항을 측정하고, 이를 기반으로 역해석을 수행하여 이상지반 특성 변수를 탐색하였다. 역해석을 통해 도출된 결과가 실제로 모사된 이상지반의 정보와 일치하는지 비교하였다. 지반의 전기저항을 측정하기 위해 저항 측정 시스템을 제작하여 실내실험에 사용하였다.

2. 이상지반 존재 시 전기장 이론

2.1 전기비저항

전기저항 및 전기비저항은 모두 전류의 흐름에 저항하는 특성을 나타낸다. 그러나 전기저항은 특정한 물체의 특성을 나타내고 전기비저항은 물체를 구성하

는 물질의 특성을 나타낸다(Halliday et al., 1996).
 그러므로 동일한 물질로 구성된 여러 가지 형상의
 물체들은 각기 서로 다른 전기저항을 가지나 물질은
 동일하기 때문에 전기비저항은 모두 같다. 단면적이
 A 이고 길이가 L 인 임의의 도선에서 전기저항(R)과
 전기비저항(ρ)의 관계식은 식 (1)과 같다.

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (1)$$

전기비저항은 전기전도도의 역수가 되며 $\Omega\text{-m}$ 단
 위를 가진다. 암석의 경우 전기비저항은 간극률, 포화
 도, 지하수의 전기전도도, 점토의 함유량 등에 의해
 변화된다. 신선한 암반일수록 간극률이 작고, 점토
 함유량이 작기 때문에 전기비저항이 크게 나타난다
 (Table 1). 반면에 파쇄대나 절리 등이 발달한 암반은
 풍화가 많이 진행되었기 때문에 간극률이 크고 간극
 사이에 점토 등의 충전물질로 인하여 전기비저항이
 작게 나타난다.

2.2 이상지반 존재 시 전기장

가우스의 법칙(Gauss's law)은 전하분포를 포함하
 는 가상의 닫힌 폐곡면(가우스 면) 상에서 한 점의
 전기장과 가우스 면이 포함하고 있는 알짜 전하 간의
 관계를 나타낸다. 가우스의 법칙에 의해 임의의 한
 표면 영역인 S 를 통한 전류는 다음의 식 (2)와 같이
 표현할 수 있다.

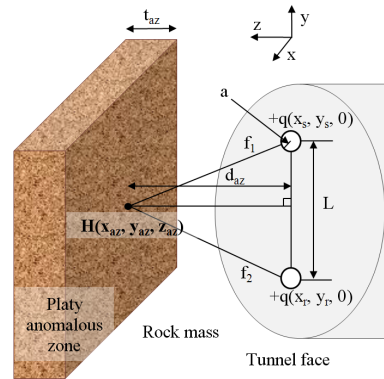


Fig. 1. Platy anomalous zone located vertically ahead of a tunnel face

$$I_{r,m} = - \oint_s \vec{J} \cdot n da = - \oint \sigma_{r,m} \vec{E} \cdot n da \quad (2)$$

여기서 \vec{J} 는 벡터로 표시된 전류밀도, n 은 극소면적
 da 에 수직인 단위벡터이다. $\sigma_{r,m}$ 은 암반(rock mass)의
 전기전도도이며 \vec{E} 는 전기장을 나타낸다. Fig. 1과
 같이 터널 굴착방향에 수직으로 판형 이상지반(platy
 anomalous zone)이 존재하는 경우 이상지반의 평면방
 정식은 식 (3) 및 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$z = D \quad (3)$$

$$z' = D + t_{az} \quad (4)$$

D 는 상수이며 t_{az} 는 이상지반의 두께이다. 식 (2)로
 부터 Fig. 1과 같이 굴착면 전방에 이상지반이 존재하

Table 1. The relationship between electrical resistivity and rock condition (KSEEG, 2002)

Rock condition	Resistivity variation of the rock and soil (low → high)
Resistivity of ground water	low → high
Degree of saturation	high → low
Void ratio	large → small
Clay content	a lot → small amount
Degree of weathering	high → low
Temperature	high → low

는 경우의 전류(I_{r_m-az})에 관한 식을 유도하면 식 (5)와 같다.

$$I_{r_m-az} = \int_0^\infty \sigma_{r_m} \overline{E_{r_m}} \cdot dz + \int_z^{z'} \sigma_{az} \overline{E_{az}} \cdot dz - \int_z^{z'} \sigma_{r_m} \overline{E_{r_m}} \cdot dz \quad (5)$$

점 $H(x_{az}, y_{az}, z_{az})$ 는 이상지반 평면 상 임의의 위치 좌표이며, σ_{az} 는 이상지반의 전기전도도이다. 암반 및 이상지반 내 형성된 전기장은 각각 식 (6) 및 식 (7)과 같다.

$$\overline{E_{r_m}} = \frac{aV}{2} \left(\frac{\sqrt{f_1^2 - z_{az}^2}}{f_1^3} - \frac{\sqrt{f_2^2 - z_{az}^2}}{f_2^3} \right) \cdot i \quad (6)$$

$$\overline{E_{az}} = \frac{\overline{E_{r_m}}}{k_{az}} \quad (7)$$

여기서 k_{az} 는 암반의 유전율에 대한 이상지반의 유전율 비이며, f_1 과 f_2 는 각각 식 (8) 및 식 (9)과 같이 표현할 수 있다.

$$f_1 = \sqrt{(x_{az} - x_s)^2 + (y_{az} - y_s)^2 + z_{az}^2} \quad (8)$$

$$f_2 = \sqrt{(x_{az} - x_r)^2 + (y_{az} - y_r)^2 + z_{az}^2}$$

$$f_2 = \sqrt{(x_{az} - x_r)^2 + (y_{az} - y_r)^2 + z_{az}^2} \quad (9)$$

여기서 x_s, y_s 는 소스 전극, x_r, y_r 은 리시버 전극의 위치좌표이며, 두 전극 사이의 중심에서 터널 굴착방향으로 나가는 선 상에 수직으로 존재하는 이상지반을 고려하는 경우 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$x_{az} = \frac{x_s + x_r}{2}, y_{az} = \frac{y_s + y_r}{2}, z_{az} = d_{az} \quad (10)$$

2.3 이상지반 존재 시 전기저항

옴의 법칙을 나타내는 식 (11)에 식 (5)~식 (10)을 대입하면,

$$R = \frac{V}{I} \quad (11)$$

판형 이상지반을 포함한 암반에서의 전기저항 (R_{r_m-az})을 식 (12)과 같이 표현할 수 있다.

$$R_{r_m-az} = \frac{1}{a(f_3 + f_4)} \quad (12)$$

여기서, a 는 원형 전극의 반지름이며 f_3, f_4 는 다음의 식 (13), 식 (14)과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_3 = \int_0^\infty \frac{\sigma_{r_m}}{2} \left(\frac{\sqrt{f_1^2 - z_{az}^2}}{f_1^3} + \frac{\sqrt{f_2^2 - z_{az}^2}}{f_2^3} \right) dz \quad (13)$$

$$f_4 = \int_{z_{az}}^{z_{az} + t_{az}} \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_{az} - \sigma_{r_m}}{k_{az}} \right) \left(\frac{\sqrt{f_1^2 - z_{az}^2}}{f_1^3} + \frac{\sqrt{f_2^2 - z_{az}^2}}{f_2^3} \right) dz \quad (14)$$

식 (12)~식 (14)을 바탕으로 이상지반을 포함하는 암반의 전기저항과 이에 영향을 미치는 변수들과의 함수관계를 나타내면 식 (15)와 같다.

$$R_{r_m-az} = f(d_{az}, t_{az}, k_{az}, \sigma_{az}, \sigma_{r_m}, x_s, y_s, x_r, y_r, a) \quad (15)$$

2.4 변수 민감도 분석

이상지반이 존재하는 암반에 대한 전기저항을 나타낸 식 (15)에서, 이상지반에 관한 특성을 나타내는 변수인 이상지반이 굴착면으로부터 떨어진 거리(d_{az}), 이상지반의 두께(t_{az}), 암반의 유전율에 대한 이상지반

의 유전율 비(k_{az}), 이상지반의 전기전도도(σ_{az}) 및 암반의 전기전도도(σ_{rm})의 변화가 전기저항에 미치는 영향을 파악하기 위해 변수 민감도 분석(parametric study)을 수행하였다. 각 변수에 초기 변수값(V_{ref})을 대입(Table 2)하여 이론식을 바탕으로 계산된 전기저항(R_{ref})에 대해서 각 변수의 초기 변수값 대비 10% 간격으로 증감(V)시켜 가면서 계산되는 전기저항(R)을 비율로 도시하여 나타내었다(Fig. 2).

분석 결과 이상지반의 두께(t_{az})와 전기전도도 (σ_{az}) 및 암반의 전기전도도(σ_{rm})가 증가할수록 전기저항이 감소하며, 이상지반이 떨어진 거리(d_{az}), 유전율 비(k_{az})는 값이 증가할수록 전기저항이 증가한다. 이상지반의 전기전도도와 두께 및 거리의 변화가 전기저항 변화에 미치는 영향은 매우 크며, 유전율 비 및 암반의 전기전도도의 변화가 전기저항 변화에 미치는 영향은 상대적으로 작다. 각 변수가 전기저항 변화에 미치는 영향의 상대적인 크기를 나타내면 식

(16)과 같다.

$$\sigma_{az} > t_{az} > d_{az} > k_{az} > \sigma_{rm} \quad (16)$$

3. 하모니서치 알고리즘

3.1 이상지반 특성 변수의 역해석

식 (15)에서 이상지반 특성 변수를 제외한 나머지 변수인 전기저항(R), 암반의 전기전도도(σ_{rm}), 소스 전극과 리시버전극의 위치좌표(x_s, y_s, x_r, y_r) 및 원형 센서의 반지름(a)은 측정을 통해 그 값을 알 수 있지만 이상지반 특성 변수인 거리(d_{az}), 두께(t_{az}), 유전율 비(k_{az}), 전기전도도(σ_{az})는 측정되어 값을 아는 변수를 바탕으로 역해석을 통해 탐색을 수행해야 하며 (Table 3), 이러한 탐색의 문제를 최적화문제로 보고 이를 효율적으로 해결하기 위한 메타휴리스틱 알고리

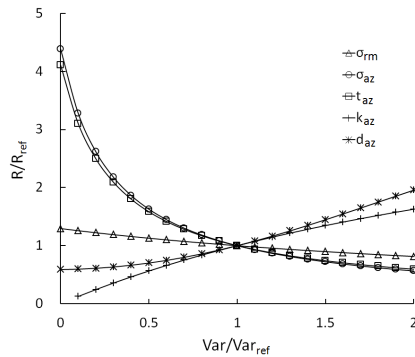


Fig. 2. The Parametric study of the characteristic values of the anomalous zone

Table 2. Initial values (V_{ref}) for parametric study

Anomalous zone				Rock
Distance (d_{az})	Thickness (t_{az})	Permittivity ratio (k_{az})	Conductivity (σ_{az})	Conductivity (σ_{rm})
1 (m)	0.1 (m)	2	$0.02 (\Omega m)^{-1}$	$0.0002 (\Omega m)^{-1}$

Table 3. The Object of HS inverse analysis

Known values	HS Analysis	Unknown values
$R, \sigma_{rm}, x_s, y_s, x_r, y_r, a$	→	$d_{az}, t_{az}, k_{az}, \sigma_{az}$

즘으로 하모니서치(HS) 알고리즘을 적용하였다.

복잡해진 최적화문제를 전통적인 방법보다 효율적으로 해결하기 위해 유전 알고리즘(Genetic Algorithm, GA) (Holland, 1975)이나 개미군집화 알고리즘(Ant Colony Optimization ACO) (Dorigo et al., 1996) 하모니서치 알고리즘(Harmony Search, HS) (Geem et al., 2001)과 같은 자연현상을 모방한 다양한 메타휴리스틱 알고리즘이 개발되었다. 이와 같은 메타휴리스틱 알고리즘은 주어진 현상을 모델링하여 목적함수를 만들고 한정된 시간 안에 목적함수를 만족하는 최적해를 탐색하는 것을 목적으로 한다.

그 중에서 하모니서치 알고리즘은 아름다운 소리를 내는 하모니를 찾는 과정을 모방한 알고리즘으로 다른 메타휴리스틱 알고리즘보다 좋은 결과를 보이고 있다(이상경 등, 2011). 각 악기(각 변수)가 어떤 음(어떤 값)을 가짐에 있어서 기존의 많은 경험들이 영향을 미치게 되고 이는 바로 이전의 화음만이 영향을 미치는 것이 아니라 과거부터 축적된 상당량의 화음집합이 새로이 만들어 내는 화음에 영향을 미치게 되는 것이 특징이다. 과거의 경험을 축적하고 있다는 측면과 해가 꼭 최적이지 아니어도 좋은 범위에 들면 경험 집합인 하모니 메모리(harmony memory)에 추가한다는 점에서 두 가지 특징을 지니고 있는 탐색기법이다. 같은 군탐색의 특징을 가지고 있는 유전 알고리즘과 비교해보면, 유전 알고리즘의 경우 새로운 해를 생성할 때 오직 부모세대의 두 유전자만이 새로운 유전자에 영향을 주며 양 부모의 경험만이 새로운 유전자의 정보가 된다. 그러나 하모니서치는 과거의 모든 화음에서부터 경험을 얻기 때문에 새로운 해가 보다 풍부한 정보를 얻게 된다.

3.2 하모니 메모리

하모니 메모리(Harmony Memory, HM)이란 이제까지 경험했던 화음 중에서 좋은 화음들을 모은 집합으로 새로운 화음이 기존에 저장된 하모니 메모리의 화음보다 좋다면 기존 화음이 제거되고 새 화음이

메모리에 추가된다. 하모니 메모리의 구조도는 Fig. 3과 같다.

Fig. 3에서 기타, 드럼, 베이스, 키보드의 4개 악기가 내는 소리로 만드는 화음 중(C, E, G, C)가 가장 좋은 화음이며, 하모니 메모리 안에서 좋은 것부터 순차적으로 배열된다.

본 연구에서는 하모니 메모리에서 탐색하고자 하는 각 악기가 이루는 화음이 이상지반 특성 변수의 집합 $\{d_{az}, t_{az}, k_{az}, \sigma_{az}\}$ 에 해당하고 화음의 어울림 정도는 전기저항을 바탕으로 적합도함수로부터 판단하게 된다. 적합도함수는 임의로 구성된 이상지반 특성 변수의 집합 $\{d_{az}, t_{az}, k_{az}, \sigma_{az}\}$ 을 이론식에 대입하여 계산된 전기저항과 지반에서 실제로 측정하여 획득한 전기저항 간 오차를 기반으로 그 크기에 따라 적합성을 판단한다(Fig. 4).

	d_{pf} (Guitar)	t_{pf} (Drum)	k_{pf} (Bass)	σ_{pf} (Keyboard)	
Rank 1	C	E	G	C	⇨ Excellent
Rank 2	C	F	A	F	⇨ Good
Rank 3	B	D	G	G	⇨ Fair

Fig. 3. The Conceptual diagram of Harmony memory

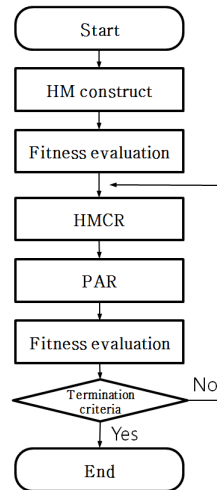


Fig. 4. Flow chart of HS algorithm process

3.3 하모니서치 연산자

하모니서치 연산자(HMCR, PAR, HMS)는 좋은 화음으로 HM을 개선하기 위해 HM을 수정하여 화음을 생성하는 방법을 제어한다.

3.3.1 기억회상(Harmony Memory Considering Rate, HMCR)

HM에 기록된 음을 하나 선택해 그대로 가져다 사용하는 방법이 기억회상이다. HM에서 값을 가져와 변수 값으로 사용한다. HM에 기록된 좋은 음을 조합해 더 좋은 화음을 만드는 원리이다. 선택될 확률은 HMCR에 의해 결정되며 0부터 1사이의 값을 갖는다. 랜덤선택 문제 때문에 주로 선택되는 값은 보통 0.7에서 0.95 사이의 값을 사용한다. 랜덤선택은 음의 범위 내에서 모든 영역을 탐색을 하는 것은 비효율적이므로 랜덤하게 검색해서 찾은 좋은 해를 바탕으로 HM을 구성한다. 지역해에 빠졌을 경우 다른 영역으로 유도한다. 랜덤선택 확률은 HM을 사용할 확률(HMCR)을 뺀 나머지 확률로 1-HMCR이 된다.

3.3.2 피치 조정(Pitch Adjustment Rate, PAR)

악보에서 선택된 음을 위나 아래로 조정해 사용하는 방법이다. 가장 좋은 값의 주변도 검색할 수 있으므로 더 좋은 해의 발견 가능성을 높여준다. 랜덤함수는 최적해의 가능성이 높은 지역을 구분할 수 있는 기준 없이 해를 생성하고 결정하지만 피치조정은 현재 가장 좋은 화음의 집합인 HM을 기준으로 한다. 이 값들의 일부 또는 전부는 최적해에 가까운 값일 가능성이 높다. 따라서 가능성 높은 해의 근처도 탐색할 수 있어 발견 가능성도 같이 커지고, 탐색 범위도 축소되므로 효율성이 좋아진다.

하나의 HM뿐이지만 피치 조정된 2개의 가상 HM이 생성되어 실제로는 3개의 HM을 사용하는 것이 되어 적은 공간으로 가능성 높은 해집합을 많이 확보할 수 있다. 피치조정이 선택될 확률은 PAR (Pitch

Adjusting Rate)에 의해 결정된다. 기억 회상 중 일부가 피치 조정되므로 1-PAR로 표현되며 0부터 1까지의 값을 가진다. 비율이 높으면 랜덤선택과 비슷하게 의미 없는 해를 많이 생성하므로 보통 0.01에서 0.3사이의 값으로 설정한다.

3.3.3 하모니메모리사이즈(Harmony Memory Size, HMS)

HM에 최대 저장 가능한 하모니의 개수를 나타낸다. 초기 해는 주어진 범위 내에서 랜덤하게 생성해 구성한다.

3.4 역해석 프로그램

하모니서치 알고리즘을 구현하여 역해석을 수행할 수 있도록 역해석 프로그램을 제작하였다. 역해석 프로그램은 5개 전극의 위치좌표와 각 전극에서 측정된 전기저항, 암반의 전기비저항을 입력정보로 한다. 해석을 통해 예측하고자 하는 이상지반 특성 변수인 거리(d_{az}), 두께(t_{az}), 유전율 비(k_{az}), 전기전도도(σ_{az}) 각각에 대한 해석 범위를 설정하면 범위 내에서 주어진 알고리즘으로 역해석을 수행한다.

4. 역해석 정확성 평가

4.1 지반 저항 측정 시스템

모사된 지반의 전기저항을 측정할 수 있도록 저항 측정 시스템을 제작하였다(Fig. 5). 본 시스템의 구성은 전압을 주는 전원공급기와 지반을 통해 흘러들어온 전류를 측정하는 디지털 멀티미터를 포함하며, 지반과 접촉하여 전류를 흘려보내는 다수의 전극과 전기저항의 측정 방식을 제어하는 프로그램이 설치된 랩탑, 그리고 모든 기기를 하나로 연결하여 허브역할을 수행하도록 제작된 회로기판을 포함한다.

지반과 접촉하여 전류를 흘려보내는 전극은 접촉면

(한쪽 밑면)이 직경 3 cm인 원기둥형 금속으로 접촉면을 제외한 면은 절연체로 감싸 전류의 흐름이 차단되도록 하였다. 다른 한쪽 밑면은 전선으로 회로기판과 연결된다. 본 연구에서는 총 5개의 전극을 사용하였다.

제어프로그램은 전압의 크기를 설정하는 기능, 소스전극과 리시버전극의 변경과 선택적 측정을 수행하는 기능 및 소스전극을 차례대로 자동 변환하면서 나머지 전극을 리시버전극으로 하여 자동으로 측정을 수행하는 기능, 측정 결과의 저장기능을 가진다.

Fig. 6은 표준저항체를 사용하여 지반 저항 측정 시스템의 전기저항 측정 정확도를 평가한 결과로, 표준저항체의 전기저항에 가깝게 높은 정확도로 전기저항을 측정하였다.

4.2 실험 과정

이상지반을 포함하는 암반지반을 모사하고 전기저항을 측정하기 위해 Fig. 7과 같이 너비 0.9 m, 폭

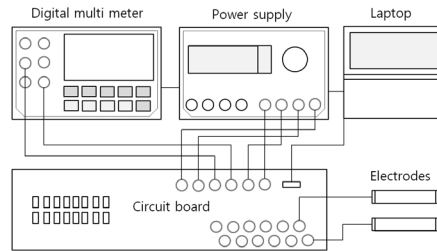


Fig. 5. Devised electrical resistance measuring system

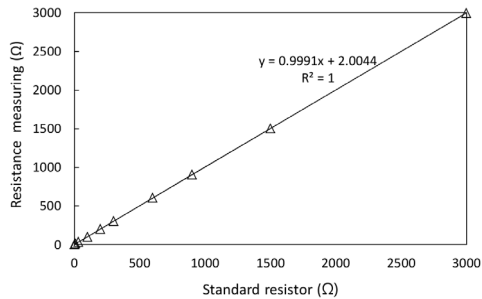


Fig. 6. The test of accuracy of the system by using standard resistor

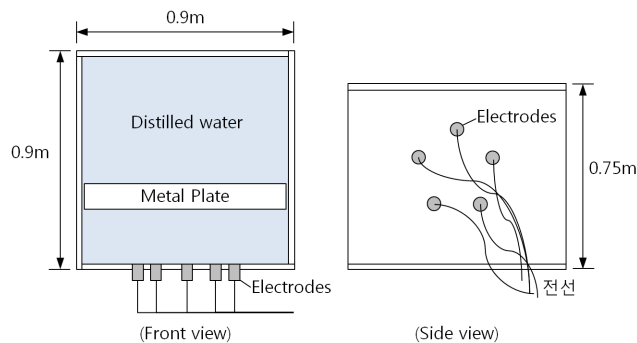


Fig. 7. Laboratory experiment setting

0.9 m, 높이 0.75 m인 목재토조를 제작하였다. 토조의 한쪽 측벽의 중심에 5개의 구멍을 내어 위치좌표를 기록하고 전극을 부착하였다. 암반지반의 높은 전기비저항을 모사하기 위해 증류수로 토조를 채우고, 이상지반은 두께가 0.02 m, 0.04 m, 0.06 m인 직사각형 금속판을 토조 내에 수직으로 세워 모사하였다. 5개의 전극을 사용하여 측벽에서부터 떨어진 거리(0.2 m, 0.4 m, 0.6 m)에 따른 지반의 전기저항을 측정하였다.

4.3 역해석 과정

이상지반이 떨어진 거리(d_{az})인 0.2 m, 0.4 m, 0.6 m와 두께(t_{az})인 0.02 m, 0.04 m, 0.06 m를 고려한 총 9가지 경우(Table 4)에 대해 측벽에 설치한 전극을 사용하여 전기저항을 측정하였다. 역해석 프로그램에 전기저항, 전극의 좌표, 암반지반의 전기전도도를 입력하고 4가지 이상지반 특성 변수의 해석 범위를 각각 설정하면 하모니서치 알고리즘을 기반으로 역해석을 수행하여 4가지 이상지반 특성 변수를 탐색한다. 각 변수에 대해 주어진 해석 범위는 Table 5와 같다. 금속으로 모사된 이상지반의 전기전도도는 실제 금속의 전기전도도와 가깝게 상대적으로 좁은 해석 범위를 입력하였다. 실제 현장에 적용하여 터널 굴착면 전방에 존재하는 이상지반을 예측하는 경우 이상지반

이 나타내는 전기전도도 범위의 파악이 가능하면 좁은 해석범위를 설정하여 역해석의 효율을 높일 수 있다. 이에 따라 전극 간격에 따른 전기저항-전기비저항 상관관계를 도출하는 실내실험을 수행하였으며 도출된 상관관계를 바탕으로 현장에서 측정된 전기저항 범위로부터 전기비저항 범위를 추정할 수 있다.

4.4 역해석 결과

Table 6은 9가지 실험조건에 대해서 실제조건에서의 이상지반 특성 변수 값과 역해석 예측 결과로 나타난 이상지반 특성 변수 값을 나타내며 예측 오차율을 보여준다. 이상지반의 이격거리(d_{az})와 두께(t_{az})에 대해서만 9가지 서로 다른 조건으로 나누어 실험을 수행하였고(Table 3), 유전율 비(k_{az})와 전기전도도(σ_{az})는 각각 실제 조건인 29.00 및 $14.13(\Omega^{-1}m^{-1})$ 에 대해서 역해석 결과와 오차율을 보여준다.

Fig. 8은 9가지 실험조건에 대해서 이상지반 특성 변수에 따라 나타난 오차율의 분포를 보여준다. 이상지반이 굴착면으로부터 떨어진 거리에 대한 예측은 실제 이상지반이 위치한 거리와 최대 3.5%의 오차율을 보였으며 평균적으로는 0.9%의 오차율을 보였다. 이상지반의 두께에 대한 예측은 실제로 모사한 이상지반의 두께와 최대 5.0%, 평균 1.1%의 오차율을 보였

Table 4. Experiment cases varying thickness (t_{az}) and distance (d_{az}) of anomalous zone

		Thickness (t_{az})		
		0.02 (m)	0.04 (m)	0.06 (m)
Distance (d_{az})	0.2 (m)	Test 1	Test 4	Test 7
	0.4 (m)	Test 2	Test 5	Test 8
	0.6 (m)	Test 3	Test 6	Test 9

Table 5. Set-up boundary condition for inverse analysis to predict the characteristic values

Variables	Distance (d_{az})	Thickness (t_{az})	Permittivity ratio (k_{az})	Conductivity (σ_{az})
(unit)	(m)	(m)	(dimensionless)	$(\Omega m)^{-1}$
Lower boundary	0.1	0.01	10	13
Upper boundary	1.0	0.10	30	15

Table 6. Prediction error of the characteristic values of the anomalous zone

Variables		Distance (d_{az})	Thickness (t_{az})	Permittivity ratio (k_{az})	Conductivity (σ_{az})
(unit)		(m)	(m)	(dimensionless)	(Ωm) ⁻¹
Test 1	Real values	0.200	0.020	29.000	14.130
	Predicted values	0.202	0.020	27.907	13.664
	Error	1.0	0.0	-3.8	-3.3
Test 2	Real values	0.400	0.020	29.000	14.130
	Predicted values	0.402	0.020	29.399	14.389
	Error	0.5	0.0	1.4	1.8
Test 3	Real values	0.600	0.020	29.000	14.130
	Predicted values	0.599	0.020	29.618	14.398
	Error	-0.2	0.0	2.1	1.9
Test 4	Real values	0.200	0.040	29.000	14.130
	Predicted values	0.203	0.041	28.724	13.718
	Error	1.5	2.5	-1.0	-2.9
Test 5	Real values	0.400	0.040	29.000	14.130
	Predicted values	0.401	0.042	26.572	13.467
	Error	0.3	5.0	-8.4	-4.7
Test 6	Real values	0.600	0.040	29.000	14.130
	Predicted values	0.602	0.041	29.669	14.248
	Error	0.3	2.5	2.3	0.8
Test 7	Real values	0.200	0.060	29.000	14.130
	Predicted values	0.207	0.060	26.599	13.241
	Error	3.5	0.0	-8.3	-6.3
Test 8	Real values	0.400	0.060	29.000	14.130
	Predicted values	0.403	0.059	28.527	14.165
	Error	0.8	0.0	-1.6	0.2
Test 9	Real values	0.600	0.060	29.000	14.130
	Predicted values	0.603	0.060	27.997	13.767
	Error	0.5	0.0	-3.5	-2.6

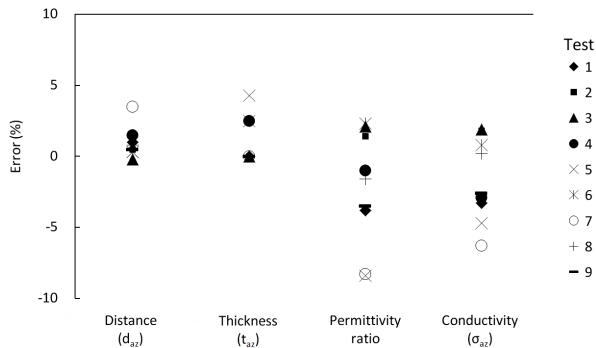


Fig. 8. Distribution of prediction error of the characteristic values

다. 유전율 비는 최대 오차율 8.4%, 평균 오차율은 -2.3%를 보였으며 전기전도도는 최대 6.3% 오차율과 평균 -1.7%의 오차율을 도출하였다.

5. 요약 및 결론

본 논문에서는 터널 굴착면 전방에 수직으로 존재하는 이상지반의 위치, 두께 그리고 전기적 특성을 예측하기 위하여 이상지반의 존재 시 암반의 전기저항과 이상지반 특성 변수 간의 관계를 나타내는 이론식을 제시하였으며, 각 변수가 전기저항 변화에 미치는 영향을 파악하기 위해 변수 민감도 분석을 수행하였다. 전기저항을 사용하여 이상지반 특성 변수를 역해석하기 위해 이론식을 바탕으로 하모니서치(HS) 알고리즘을 구현한 역해석 프로그램을 제작하였다. 이를 검증하고자 실내실험으로 이상지반을 모사하고 이상지반의 위치와 두께에 따라 지반의 전기저항을 측정하고 이를 바탕으로 이상지반 특성 변수에 대한 역해석을 수행하였다. 역해석을 통해 도출된 이상지반 특성 변수와 실제로 모사한 이상지반의 특성이 상호 일치하는지 비교하여 역해석의 정확성을 평가하였다. 이상의 연구로부터 얻어진 내용을 요약하면 다음과 같다.

1. 본 연구에서 유도된 전기저항에 관한 이론식을 바탕으로 변수 민감도 분석을 수행한 결과, 이상지반 존재 시 암반의 전기저항은 이상지반의 두께와 전기전도도가 증가할수록 감소하였고, 이상지반이 떨어진 거리와 유전율 비가 증가하면 전기저항도 증가하였다. 특히 이상지반의 전기전도도가 전기저항 변화에 미치는 영향이 가장 큰 것으로 나타났다.
2. HS 알고리즘을 사용한 역해석 수행 결과, 이상지반의 위치와 두께에 대한 예측의 경우 평균적인 오차율은 0.9%와 1.1%로 매우 높은 해석 정확도를 보였으며, 유전율 비 및 전기전도도에 대한 예측은

평균적인 오차율이 -2.31%와 1.7%로 나타나 상대적으로 다소 오차율이 크게 나타났으나 비교적 정확하였다.

3. 이상지반의 유전율 비에 대한 오차율이 상대적으로 크게 나타난 이유를 변수 민감도 분석 결과를 바탕으로 살펴보면, 유전율 비는 전기저항의 변화에 미치는 영향이 상대적으로 작아 전기저항을 바탕으로 적합도를 판단하는 과정에서 다른 변수에 비해 영향력이 작기 때문에 오차가 크게 나타났다고 판단된다.
4. 역해석 수행 과정에서 각 이상지반 특성 변수에 대한 해석범위의 설정이 해석결과에 미치는 영향은 매우 컸다. 4개의 이상지반 특성 변수 가운데 1개의 변수라도 실제로 모사한 이상지반의 물성치와 근접하도록 좁은 해석범위를 주는 경우, 지역해에 잘 빠지지 않으며 상당히 높은 정확성을 갖는 해석결과를 제시하였다.
5. 본 연구에서 개발된 저항 측정 시스템 및 하모니서치 알고리즘 기반의 역해석 프로그램을 사용하여 실내실험에서 모사한 이상지반의 특성을 높은 정확성을 가지고 예측하였으나, 실제의 터널 굴착면 전방에 존재하는 이상지반의 특성을 정확히 예측하기 위해서는 향후 실제 터널 현장에서 그 적용성을 평가하는 검증의 과정과 이에 따른 추가적인 개선이 필요할 것이라고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술 혁신사업의 “고수압 초장대 해저터널 기술자립을 위한 핵심요소 기술개발” 연구비지원(13SCIP-B066321-01)에 의해 수행되었습니다.

References

1. Geem, Z.W., Geem, W.B. (2007), “Cutting-edge

- optimization technique and its applications to the civil engineering”, Korea Society of Civil Engineers, Vol. 55, No. 2, pp. 155-171.
2. Rye, H.H., Cho, G.C., Lee, I.M. (2008), “Detection of anomalies in particulate material using electrical resistivity survey-enhanced algorithm”, Modern Physics Letters B, Vol. 22, No. 11, pp. 1093-1098.
 3. Lee, K.H., Park, J.H., Kim, D.H., Lee, I.M. (2011), “Technology for predicting ground condition ahead of a tunnel: A review in mechanized tunnelling”, Korea Tunnelling and Underground Space Association Symposium (November 11), pp. 107-115.
 4. Lee, S.K., Ko, K.E., Sim, K.B. (2011), “Study on improvement of convergence in harmony search algorithms”, Korean Institute of Intelligent Systems, Vol. 21, No. 3, pp. 401-406.
 5. Halliday, D., Resnick, W., Walker, J. (1996), Fundamental of Physics, Wiley, New York, pp. 840-841.
 6. Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists (2002), Practical Guideline of Geophysical Exploration for adapting to civil & environmental field, Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists, 2002, Daejeon, pp. 193-201.
 7. Holland, J.H. (1992), Adaptation in Natural and Artificial Systems, MIT Press Cambridge, USA.
 8. Dorigo, M., Maniezzo, V., Colomi, A. (1996), “The ant system: optimization by a colony of cooperating agents,” IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B, Vol. 26, No 1, pp. 29-41.
 9. Geem, Z.W., Kim, J.H., Loganathan, G.V. (2001), “New heuristic optimization algorithm: harmony search”, Simulation, Vol. 76, pp. 60-68.