

터널내 탄성과 탐사의 3차원 구조보정기법 개발 및 현장적용

Development and application of 3D migration techniques for tunnel seismic exploration

최상순*¹, 한병현², 김재권³, 이인모⁴

Choi, Sang-Soon · Han, Byeong-Hyeon · Kim, Jae-Kwon · Lee, In-Mo

Abstract

Two 3-dimensional data processing techniques to predict the fractured zone ahead of a tunnel face by the tunnel seismic survey were proposed so that the geometric formation of the fractured zone could be estimated. The first 3-dimensional data processing technique was developed based on the principle of ellipsoid. The input data needed for the 3D migration can be obtained from the 2-dimensional tunnel seismic prediction (TSP) test where the TSP test should be performed in each sidewall of a tunnel. The second 3-dimensional migration technique that was developed based on the concept of wave travel plane was proposed. This technique can be applied when the TSP is operated with sources in one sidewall of a tunnel while the receivers are installed in both sidewalls. New migration technique was applied to an in-situ tunnelling site. The 3-dimensional migration was performed using measured TSP data and its results were compared with the geological investigation results that were monitored during tunnel construction. This comparison revealed that the proposed migration technique could reconstruct the discontinuity planes reasonably well.

Keywords: TSP, migration, seismic exploration, fractured zone, wave travel plane

요 지

본 연구에서는 터널내 탄성과 탐사로부터 터널막장 전방 파쇄대를 예측하기 위한 두 가지의 3차원 구조보정 기법을 제안하였다. 첫 번째 해석기법은 타원체의 원리에 기초한 것으로 터널 양쪽 벽면에서 각각 독립적으로 탄성과 탐사를 수행하여 얻은 2차원 해석 결과를 이용하여 3차원 구조보정을 수행할 수 있다. 두 번째 해석기법은 파전과 평면의 개념을 도입한 것으로 터널내 탄성과탐사를 터널 한쪽 벽면에서만 송신을 수행한 반면, 수신기는 양쪽 벽면에 설치한 경우에 적용할 수 있는 기법이다. 새로운 구조보정 기법을 현장 터널내 탄성과 탐사 자료에 적용해 보았다. TSP 시험자료를 이용하여 3차원 구조보정을 수행한 후, 그 결과를 터널 굴착과정 중 조사된 지질정보와 비교해 보았다. 그 결과 제안된 구조보정 기법을 통하여 불연속면의 형상을 비교적 정확히 예측할 수 있음을 확인하였다.

*1 (주)청석엔지니어링 지반공학부 부장 (sschoi@cse.co.kr)

2 삼성물산(주) 건설부문 토목기술팀 과장

3 삼성물산(주) 건설부문 토목기술팀 상무

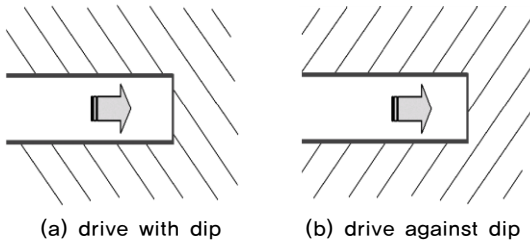
4 고려대학교 사회환경시스템공학과 교수

주요어: 터널내 탄성파탐사 (TSP), 구조보정, 탄성파탐사, 파쇄대, 파전파 평면

1. 서론

최근의 터널 시공이 대단면, 장대터널의 건설 추이를 보임에 따라 터널 건설기술의 신뢰도와 시공속도 향상이 요구되고 있는 실정이다. 이러한 안정성과 효율의 측면에서 터널 전방의 지반정보 특히, 파쇄대 및 지질 이상대에 대한 정보를 아는 것은 매우 중요하다.

불연속면의 경사방향은 터널 굴진방향과의 상관성에 따라 터널 시공의 난이도에 많은 차이를 보이게 된다. 즉, 그림 1(b)와 같이 불연속면의 경사방향이 터널 굴진방향과 반대되는 경우 (“drive against dip”)가 그림 1(a)와 같이 같은 방향 (“drive with dip”)인 경우보다 터널 굴착에 불리한 지반조건이 된다.



(a) drive with dip (b) drive against dip

그림 1. 터널굴진 방향과 불연속면 방향과의 관계

Bieniawski (1976, 1989)에 의해 제시된 RMR 분류법에는 암반상태를 분류하기 위한 6가지 요소 중 불연속면의 방향성의 영향을 고려하기 위한 보정이 표 1과 같이 제시되어 있다. 표 1에서 불연속면의 경사각뿐만 아니라 불연속면의 주향과 터널축과의 방향성에도 영향 받음을 알 수 있다. 이것은 불연속면의 상태를 평가하는 기준인 불연속면의 길이 (연속성), 틈새, 거칠기, 충전 물질 및 풍화정도 등의 평점범위 (0~6)에 비하여 상대적으로 매우 큰 범위 (0~12)를 갖는다 (표 1. 참조). 또한, 불연속면의 3차원적 형상 규명은 터널 지보재 설계시 터널 양측벽에 작용하는 토압차에 의한 편토압 발생여부, 단선 병렬 터널인 경우 한쪽 터널내에서의 시험결과로 다른 한쪽 터널내에서 불연속면이 나타나는 지점을 개략파악할 수 있다는 점 등을 감안할 때 매우 중요한 의미를 갖는다고 할 수 있다. 따라서 불연속면의 방향성 (주향, 경사)을 정확히 파악하는 것은 암반분류 및 터널 지보시스템 설계에 있어서 매우 중요하다.

그러나 특수한 3성분 (3-components) 수진기를 적용하지 않는 일반적인 터널내 탄성파 탐사자료의 2차원 구조보정 결과에서는 불연속면의 방향성에 대한 정보는 주어지지 않는다. 따라서 본 논문에서는 터널내 탄성파 탐사결과를 이용하여 막장 전방에 위치한 불연속면의

표 1. RMR 분류 시스템 (Bieniawski, 1989)

(a) Effect of discontinuity strike and orientation in tunnelling

Strike perpendicular to tunnel axis		Strike parallel to tunnel axis	
Drive with dip-Dip 45-90°	Drive with dip-Dip 20-45°	Dip 45-90°	Dip 20-45°
Very favourable	Favourable	Very favourable	Fair
Drive against dip-Dip 45-90°	Dip 20-45°	Dip 0-20°	Irrespective of Strike
Fair	Unfavourable	Fair	

(b) Correction values according to the condition of discontinuity

Condition of discontinuity	Very favourable	Favourable	Fair	Unfavourable	Very Unfavourable
Tunnel	0	-2	-5	-10	-12
Foundation	0	-2	-7	-15	-25
Slope	0	-5	-25	-50	-60

공간적 기하형상을 예측할 수 있는 3차원 구조보정 기법을 제안하고, 이것을 현장 시험자료에 적용하여 제안된 구조보정기법의 활용 가능성을 확인하고자 하였다.

2. 터널내 탄성파 탐사

2.1 터널내 탄성파 탐사

TSP 탐사는 연직보링공에서의 VSP (Vertical Seismic Profiling) 탐사법을 응용한 탄성파 탐사의 일종으로서, 터널 막장부근 측벽에 다수의 발진점에서 소량의 화약을 터트려 순차방출된 파동이 막장 전방에 존재하는 단층, 파쇄대 등과 같은 임피던스의 변화점 (경계)에서 파동의 일부가 반사하여 수신기에서 그 반사파를 감지,

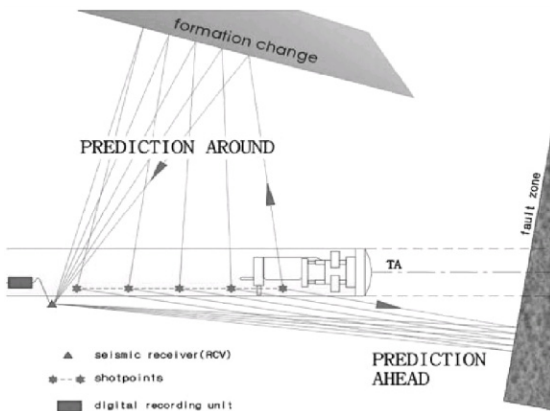


그림 2. 터널내 탄성파 탐사의 측정개요도

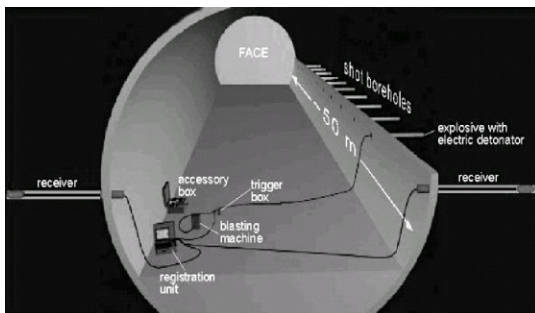


그림 3. 탄성파 탐사를 위한 시험 준비

기록, 해석 등의 과정을 거쳐 터널 전방의 지질특성을 분석·예측하며 측정 개요는 그림 2와 같다.

TSP 측정방법은 『수진공 및 발파공 위치 표시 → 천공 →수진공에 보호관 및 수신기 삽입 →수진기와 TSP 본체 연결 →발파공에 장약 및 전색 →발파후 탄성파 수신 및 기록 →측정자료 분석』 순으로 진행되며, TSP 시험의 구성장비 및 연결방법은 다음 그림 3과 같다.

2.2 터널내 탄성파 탐사자료의 구조보정기법

어떤 탄성파 트레이스 상에 나타난 정보는 반사점의 실제 위치를 알려주지 못한다. 단면상의 겹보기 경사 (apparent dip)를 실제 지하반사면으로 바꾸어 주는 작업을 구조보정 (migration)이라 한다. 이러한 구조보정 방법으로는 파면법, 원호 스윙법 (swinging of arc), 회절법, geometric migration method 등의 고전적인 2차원 구조 보정과 회절중합 구조보정, 파면 구조보정 (wavefront smearing) 등의 전산 구조보정 및 유한차분 구조보정, 주파수-파수 (frequency-wavenumber) 구조보정 등의 파동방정식을 이용한 구조보정 등 여러 가지 방법이 있다 (민병덕 외, 1994). 터널내 탄성파 탐사는 시험을 수행하기 위한 공간이 제한받기 때문에 시험방법 및 구조보정 기법 등에 제약이 따른다. 최근에 터널내 탄성파 탐사 자료의 구조보정 기법들이 국내외에서 발표되기 시작하였으며 그 내용을 간략히 기술하면 다음과 같다.

이광호 (1997)는 타원의 원리를 이용하여 터널막장 전

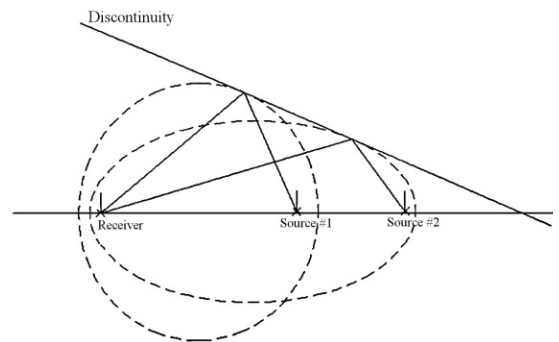


그림 4. 타원의 성질을 이용한 파쇄대 예측 (이광호, 1997)

방지반의 불연속면을 2차원적으로 예측하는 기법을 제안하였다. 먼저 매질의 탄성과 속도를 진원으로부터 수신기에 직접 전달되는 직접파로부터 구하여 주시곡선상의 반사파의 주행시간을 주행거리로 환산한다. 각 진원들에 대한 반사파의 주행거리를 진원과 수신점을 초점으로 하는 타원으로 작도하고 타원들의 공통접선(평균 기울기 적용)을 불연속면의 형상으로 결정한다.

2차원 구조보정은 기본적으로 터널축과 파쇄대의 주향(strike)이 직교한다는 가정 하에 경사(dip angle)만을 파악하는 방법이다. 그러나 터널축과 파쇄대 주향이 직교하지 않는 경우 2차원 구조보정에 의해 결정된 경사는 실제 파쇄대의 경사와 차이가 난다. 또한, 이러한 차이는 터널축과 파쇄대 주향 사이각의 변화에 영향을 받으며 변한다. 그림 5에서 보는 바와 같이 2차원적 파쇄대 예측은 $x-z$ plane에서의 해석 결과이며 실제로는 동일한 형태의 주행시간을 나타내게 하는 파쇄대의 기하구조는 원추형(cone)에 접하는 무수한 평면들이 존재할 수 있다.

Ashida (2001)는 터널 막장에 진원을 설치하고 터널 양쪽 벽면에 수신기를 설치하여 터널 막장 전방의 파쇄대를 3차원적으로 예측하는 기법(A variation of the look-ahead VSP technique)을 소개하였다. 그림 6에서 보는 바와 같은 좌표체계에서 진원과 수신점을 기준축으로 축변환을 하고 두 점을 초점으로 하는 타원체를 작도한다. 이와 같이 양쪽 터널 벽면에 설치된 수신점에 대하여 각각의 타원체를 작성한 후 그림 7에 나타난 바와 같이 두 타원체에 공통으로 접하는 평면을 반사면으로 추정하였다. 또한, 이러한 해석기법의 신뢰성을 제

고하기 위하여 Three-component records를 이용하였다.

Br ckl (2001)도 터널 막장에 진원을 설치하고 터널의 두 횡단면에 그림 8과 같이 각각 4개의 수신기를 설치하여 막장 전방지반을 예측하는 Tunnel VSP 기법을 제안하였다.

앞서 기술한 두 가지의 터널내 탄성파탐사 방법은 터널 막장 전방에 발파진원을 설치하는 형식을 채택하여 터널 굴착 작업효율을 떨어뜨리며 특히, TBM이나 Shield

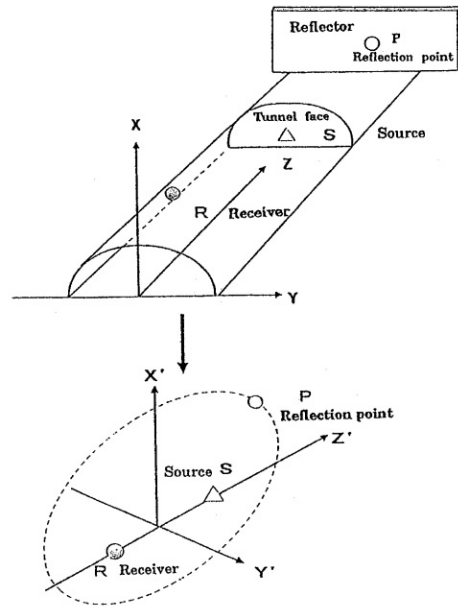


그림 6. 좌표 변환 (Ashida, 2001)

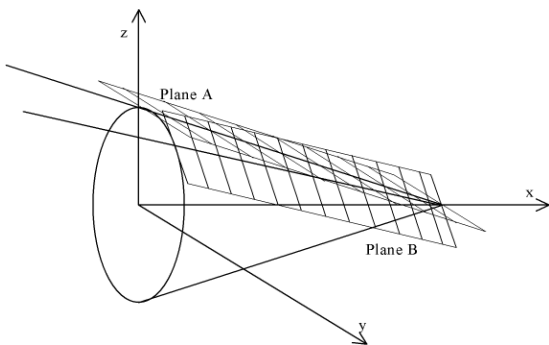


그림 5. 동일한 주행시간을 나타낼 수 있는 파쇄대 평면

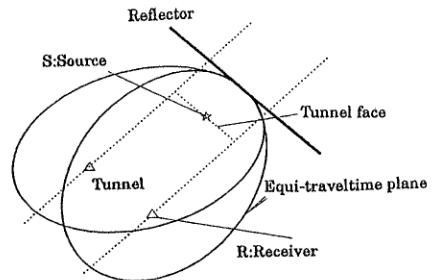


그림 7. 두 개의 타원체에 접하는 반사면 (Ashida, 2001)

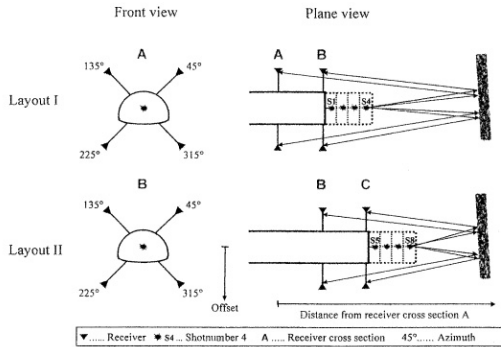


그림 8. Br ckl (2001)이 제안한 터널 탄성파탐사

공법과 같은 기계식 굴착의 경우 진원 설치가 매우 곤란하다. 또한, 터널마장과 벽면의 경계부에서 직접파가 회절에 의한 영향을 받으며, 수신기를 터널 벽면에 고정시키기 위한 전색이 곤란하다는 단점이 있다.

2.3 터널내 탄성파 탐사자료의 3차원 구조보정기법

이인모 외 (2002)는 터널 양 쪽 벽면에서 각각 독립된 탄성파 시험 (TSP)을 수행하여 이로부터 타원체의 성질을 이용한 3차원적 구조보정 기법을 발표하였다. 즉, 각

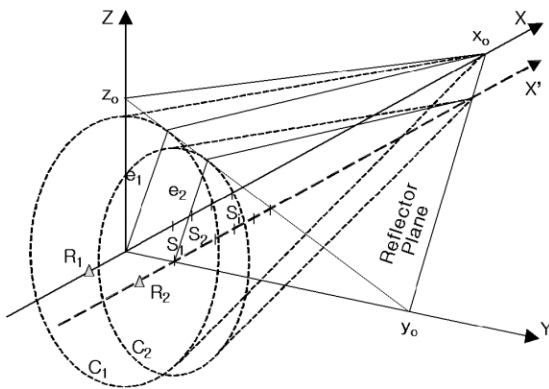


그림 9. 2개의 타원면에 공통으로 접하는 평면

벽면으로 얻은 탄성파 기록을 이용하여 2차원 구조보정을 수행하고, 이로부터 결정된 경사 line을 각 터널 벽면 중심축을 기준으로 회전시켜 동일한 주행시간을 갖는 반사점들의 집합인 콘을 작도한다. 결국 3차원 공간상에 불연속면의 기하구조는 그림 9에 나타난 바와 같이 두 콘에 공통으로 접하는 평면이 된다.

터널내 탄성파 시험은 현장 여건에 따라 신속히 시험을 수행하여야 할 경우가 많다. 이에 따라 제한된 시간 내에 탄성파 시험을 수행하기 위하여 터널 한 쪽 벽면에만 진원콘을 설치하고 수신기를 양 쪽 벽면에 설치한 경우에 두 수신기의 탄성파 자료를 이용한 3차원 구조보정 기법을 개발하였다.

진원콘과 다른 벽면에 설치된 수신기에 전달되는 파에 대하여는 진원점들과 반사점들 및 수신점을 한 평면상에 나타낼 수 없으므로 3차원의 좌표체계를 이용하여 표현하여야 한다. 진원콘과 동일한 벽면에 설치된 수신기를 수신기 R_1 , 반대쪽 벽면에 설치된 수신기를 수신기 R_2 로 명명하고 수신기 R_1 을 좌표계 원점으로 한 좌표체계를 그림 10과 같다.

그림 10에서 한 진원에 의한 탄성파의 전파경로인 $S_1-P_1-R_2$ 를 살펴 보면 진원 (S_1), 반사점 (P_1) 및 수신점 (R_2)의 세 점을 포함하는 평면을 파전파 평면 (wave travel plane)이라 명명할 때 이것은 파쇄대 평면과 일정한 관계성을 갖는다. 이러한 특성을 이용하여 파쇄대

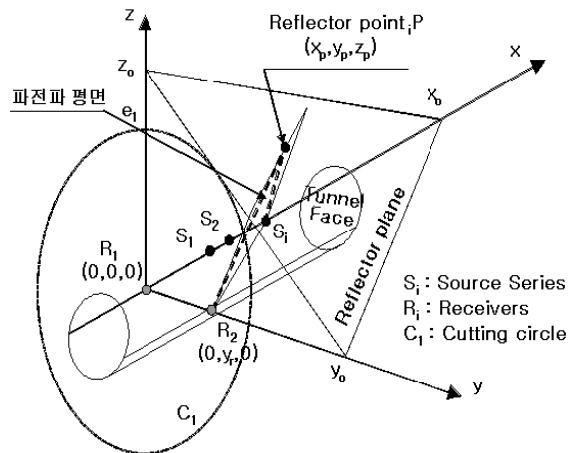


그림 10. 파전파 평면을 이용한 구조보정의 좌표계

평면의 3차원적 기하형상을 결정할 수 있으며, 파전파 평면을 이용한 3차원 구조보정 기법의 유도를 위한 탄성파 원리들은 다음과 같다.

- ① 반사파의 이동거리는 매질 (암반)의 탄성과 속도와 반사파 주행시간의 곱으로 나타낼 수 있다.
- ② R₂에 도달한 반사파의 반사점 P_i는 R₁의 수신자료 (S_i-R₁) 해석으로 결정된 Cone에 접하는 평면상에 존재한다.
- ③ 반사점의 이동궤적 (S_i-P_i-R₂)를 포함하는 평면 (wave travel plane)은 반사면과 직교한다.
- ④ 반사면 (파쇄대)에 대한 탄성파의 입사각과 반사각이 같다.

반사파의 이동거리는 직접파로부터 구한 파속과 트레이스상에 나타난 반사파의 주행시간으로부터 산정하며 수신기 R₂에 대하여 원리 ①을 수식으로 기술하고 정리하면 다음과 같다.

$$T \cdot v = D = d_1 + d_2 = \overline{SP} + \overline{PR_2}$$

$$(x_s^2 - D^2)x_p^2 + (D^2x_s - x_s^3 + x_s y_r^2)x_p$$

$$+ (y_r^2 - D^2)y_p^2 + (D^2y_r - y_r^3 + x_s^2 y_r)y_p$$

$$- 2x_s y_r x_p y_p - D^2 z_p^2 + \frac{1}{4}(x_s^2 - y_r^2)^2$$

$$+ \frac{D^2}{4}(D^2 - 2x_s^2 - 2y_r^2) = 0 \quad (1)$$

여기서,

T : 반사파의 주행시간

v : 매질의 탄성파 속도

x_p, y_p, z_p : 반사점 (reflection point) P의 좌표

x_s, y_s, z_s : 진원 (Source) S의 좌표

x_r, y_r, z_r : 수신점 R₂의 좌표

원리 ②에 의하여 반사점의 좌표 (x_p, y_p, z_p)는 수신기 R₁의 수신자료로부터 결정된 Cone에 접하는 평면의 방정식 (2)를 만족한다.

$$\frac{x}{x_0} + \frac{y}{y_0} + \frac{z}{z_0} = 1 \quad (2)$$

$$y_0 z_0 x_p + x_0 z_0 y_p + x_0 y_0 z_p - x_0 y_0 z_0 = 0 \quad (3)$$

여기서 x₀, y₀, z₀는 R₁의 수신자료 (S_i-R₁) 해석으로 결정된 Cone에 접하는 평면의 절편이다 (그림 9).

또한, 식 (2)의 y절편 및 z절편은 y-z 평면에서 보면 다음과 같은 관계에 있다.

$$y_0 = \pm \frac{e_1 z_0}{\sqrt{z_0^2 - e_1^2}} \quad (4)$$

여기서 e₁은 수신기 1의 수신자료로부터 결정된 Cone을 y-z 평면으로 절단하였을 때 나타나는 원의 반지름에 해당된다.

한편, 반사면과 파전파 평면과의 관계를 그림 11에서 보면 진원, 반사점 및 제 2수진기를 포함하는 평면은 반사면과 직교한다는 원리 (원리 ③)를 수식으로 기술하면 다음과 같다. 먼저 진원, 반사점 및 제 2수진기를 포함하는 평면의 방정식은 다음과 같다.

$$y_r z_p (x - x_s) + x_s z_p y + \{(x_s - x_p)y_r - x_s y_p\}z = 0 \quad (5)$$

식(5)의 평면에 직교하는 직선의 direction numbers (L₁, M₁, N₁) 및 direction cosines (l₁, m₁, n₁)은 다음과 같다.

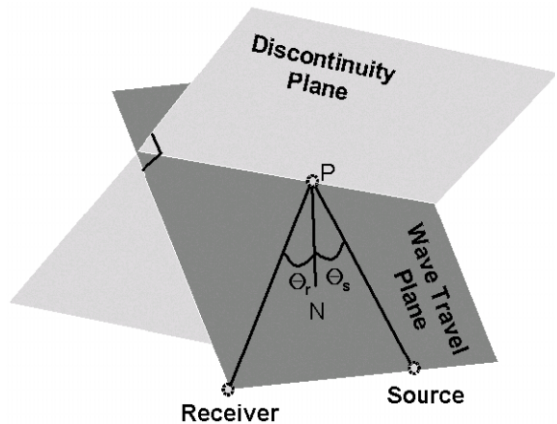


그림 11. 반사면과 파전파 평면과의 관계

$$\begin{aligned}
 L_1 &= y_r z_p \\
 M_1 &= x_s z_p \\
 N_1 &= \{(x_s - x_p)y_r - x_s y_p\} \\
 l_1 &= \frac{L_1}{\sqrt{L_1^2 + M_1^2 + N_1^2}} = \frac{y_r z_p}{\sqrt{L_1^2 + M_1^2 + N_1^2}} \\
 m_1 &= \frac{M_1}{\sqrt{L_1^2 + M_1^2 + N_1^2}} = \frac{x_s z_p}{\sqrt{L_1^2 + M_1^2 + N_1^2}} \\
 n_1 &= \frac{N_1}{\sqrt{L_1^2 + M_1^2 + N_1^2}} = \frac{(x_s - x_p)y_r - x_s y_p}{\sqrt{L_1^2 + M_1^2 + N_1^2}}
 \end{aligned}$$

동일한 방법으로 접평면 (파쇄대 평면)의 법선에 대한 direction numbers (L_2, M_2, N_2) 및 direction cosines (l_2, m_2, n_2)을 산정할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 L_2 &= y_0 z_0 \\
 M_2 &= x_0 z_0 \\
 N_2 &= x_0 y_0 \\
 l_2 &= \frac{L_2}{\sqrt{L_2^2 + M_2^2 + N_2^2}} = \frac{y_0 z_0}{\sqrt{L_2^2 + M_2^2 + N_2^2}} \\
 m_2 &= \frac{M_2}{\sqrt{L_2^2 + M_2^2 + N_2^2}} = \frac{x_0 z_0}{\sqrt{L_2^2 + M_2^2 + N_2^2}} \\
 n_2 &= \frac{N_2}{\sqrt{L_2^2 + M_2^2 + N_2^2}} = \frac{x_0 y_0}{\sqrt{L_2^2 + M_2^2 + N_2^2}}
 \end{aligned}$$

두 평면에 대한 방향 코사인을 결정하였으므로 두 평면의 내각은 다음과 같이 산정된다.

$$\begin{aligned}
 \cos \phi &= l_1 l_2 + m_1 m_2 + n_1 n_2 \\
 &= \frac{y_r z_p y_0 z_0 + x_s z_p x_0 z_0 + \{(x_s - x_p)y_r - x_s y_p\}x_0 y_0}{\sqrt{(L_1^2 + M_1^2 + N_1^2)(L_2^2 + M_2^2 + N_2^2)}}
 \end{aligned}$$

앞서 정의한 바와 같이 두 평면은 직교하여야 하므로 평면을 직교하는 직선의 내각은 90° 이며 따라서 위 식으로부터 다음과 같이 정리된다.

$$y_r z_p y_0 z_0 + x_s z_p x_0 z_0 + \{(x_s - x_p)y_r - x_s y_p\}x_0 y_0 = 0 \quad (6)$$

파쇄대 평면에 대한 탄성파의 입사각과 반사각 크기는 같다는 원리 (원리 ④)로부터 마지막 방정식을 수립할 수 있다. 먼저 입사파 (\overline{SP})에 대한 방향 코사인(l_3, m_3, n_3)

및 반사파 (\overline{PR})에 대한 방향 코사인 (l_4, m_4, n_4)을 수립하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 l_3 &= \cos \alpha_3 = \frac{x_s - x_p}{d_1} \\
 m_3 &= \cos \beta_3 = -\frac{y_p}{d_1} \\
 n_3 &= \cos \gamma_3 = -\frac{z_p}{d_1} \\
 l_4 &= \cos \alpha_4 = -\frac{x_p}{d_2} \\
 m_4 &= \cos \beta_4 = \frac{y_r - y_p}{d_2} \\
 n_4 &= \cos \gamma_4 = -\frac{z_p}{d_2}
 \end{aligned}$$

파쇄대 평면의 법선과 입사파 (\overline{SP})와의 사이각 ϕ_1 및 반사파 (\overline{PR})와의 사이각 ϕ_2 은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \cos \phi_1 &= l_2 l_3 + m_2 m_3 + n_2 n_3 \\
 &= \frac{(x_s - x_p)y_0 z_0 - y_p x_0 z_0 - z_p x_0 y_0}{d_1 \sqrt{L_2^2 + M_2^2 + N_2^2}} \\
 \cos \phi_2 &= l_2 l_4 + m_2 m_4 + n_2 n_4 \\
 &= \frac{-x_p y_0 z_0 + (y_r - y_p)x_0 z_0 - z_p x_0 y_0}{d_2 \sqrt{L_2^2 + M_2^2 + N_2^2}}
 \end{aligned}$$

입사각과 반사각이 같아야 한다는 명제로 인하여 상기 두 식으로부터 다음을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \frac{d_1}{d_2} &= \frac{(x_s - x_p)y_0 z_0 - y_p x_0 z_0 - z_p x_0 y_0}{-x_p y_0 z_0 + (y_r - y_p)x_0 z_0 - z_p x_0 y_0} \\
 z_o &= \frac{(d_2 - d_1)x_o y_o z_p}{d_2 \{(x_s - x_p)y_o - y_p x_o\} + d_1 \{(x_p y_o + (y_p - y_r)x_o)\}} \quad (7)
 \end{aligned}$$

한편, 식(3)과(6)을 이용하여 $x_p = f(z_p), y_p = f(z_p)$ 관계를 유도해 보면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 x_p &= \frac{x_o y_o^2 x_s + x_o z_o^2 x_s + y_o z_o^2 y_r}{x_o y_o z_o y_r - y_o^2 z_o x_s} \cdot z_p \\
 &+ \frac{x_o y_o x_s - x_o x_s y_r}{y_o x_s - x_o y_r} \quad (8a)
 \end{aligned}$$

$$y_p = \frac{x_o^2 y_o y_r + x_o z_o^2 x_s + y_o z_o^2 y_r}{x_o y_o z_o x_s - x_o^2 z_o y_r} \cdot z_p + \frac{x_o y_o y_r - y_o x_s y_r}{x_o y_r - y_o x_s} \quad (8b)$$

이상의 유도과정을 통하여 결정된 5개의 방정식을 이용하여 파쇄대 평면 방정식을 계산하는 과정은 다음과 같다.

- ① $S_i - R_1$ 의 데이터를 분석하여 2차원상에서 파쇄대 (직선)를 구한다.
- ② 이 직선을 $S_i - R_1$ 축을 기준으로 회전시켜 콘의 방정식을 구하고 이 콘에 접하는 접평면 (파쇄대)의 방정식을 수립한다. 접평면의 방정식에서 x_o 는 2차원 구조보정시 결정된 기지의 값이며 y_o, z_o 는 미지값이다.
- ③ $z_o = z_{oa}$ 로 가정한다. z_{oa} 는 한 진원에 대한 수진기 R_1, R_2 에서의 주행시간을 비교하여 적절히 가정한다. 만약 두 주행시간이 큰 차이가 없으면 이는 파쇄대의 경사방향 (dip direction)과 터널축 사이각이 크지 않다는 의미이므로 z_{oa} 를 절단원 C_1 (그림 7)의 반지름보다 약간 크게 가정한다.
- ④ 식 (4)에 의하여 y_o 를 계산한다.
- ⑤ 식 (8)에 기지값 x_s, y_r, x_o 와 계산값 y_o, z_o 를 대입하여 $x_p = f(z_p), y_p = f(z_p)$ 관계를 간단하게 정리한다.
- ⑥ 정리된 식(8)을 식(1)에 대입하여 z_p 를 구하고, 이를 식(8)에 대입하여 x_p 와 y_p 를 구한다.
- ⑦ 계산된 (x_p, y_p, z_p) 로부터 d_1, d_2 를 구한다.
- ⑧ 모든 기지값 및 계산값 (z_o 제외)을 식 (7)에 대입하여 $z_o = z_{oc}$ 를 계산하고 처음 가정한 z_{oa} 와 비교한다.
- ⑨ 허용치 이내로 $z_{oa} \approx z_{oc}$ 가 될 때까지 ④~⑧ 과정을 반복한다.

상기에 기술한 일련의 계산과정은 간단히 프로그램화하여 시행착오법으로 간단히 그 해를 산정할 수 있으며, 본 논문에서는 실무에서 간단히 적용할 수 있도록 프로그램화하였다.

2.4 구조보정기법에 의한 예제 해석

그림 12에서 보는 바와 같이 3차원 공간상에서 반사면 상의 최단 반사경로를 주는 반사점의 위치는 반사면을 하나의 거울면으로 보았을 때 수진점의 거울속 가상원 (IP: image point)과 진원을 연결한 직선이 반사면과 만나는 점이 된다. 이러한 최단거리에 상응하는 반사파의 신호강도는 다른 전파경로에 해당되는 반사파 성분의 신호강도에 비하여 가장 크다. 이와 같은 원리를 적용하여 최대의 반사파 신호강도를 주는 반사파 전파경로를 역으로 찾아내어 반사면의 공간적 위치 및 경사를 결정하는 방법이 영상점법이다. 본 연구에서는 이러한 가상원법 (Image point method)에 의하여 인위적으로 탄성과 주행기록을 만들고, 이를 이용하여 3장에서 제안한 3차원 구조보정 기법의 타당성을 검증하기 위해 2차원 및 3차원 구조보정 과정을 수행하였다.

인공적 탄성과 기록 (seismogram) 작성을 위한 터널과 지반 (파쇄대) 특성 및 터널내 탄성과 시험자료는 다음과 같다. 먼저, 터널 양쪽 벽면에 설치된 수진기 간 거리는 10m, 수진기 R_1 과 첫 번째 진원간의 거리는 20m, 각 진원간의 거리는 1.5m로 하였으며, 해석 편의상 진원은 5개로 제한하였다. 또한, 파쇄대 평면이 본 논문에서 적용한 좌표체계에서 각 축과 만나는 절편은 $x_o = 160m, y_o = 87m, z_o = 81m$ 이며, 탄성파의 속도를 2500m/sec로 가정하였다.

시험조건 및 파쇄대 특성에서 수진기 R_1, R_2 에 대한

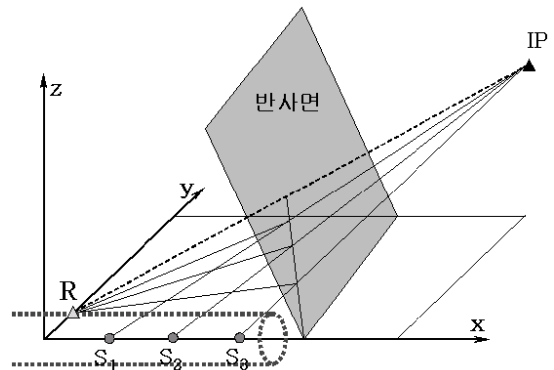
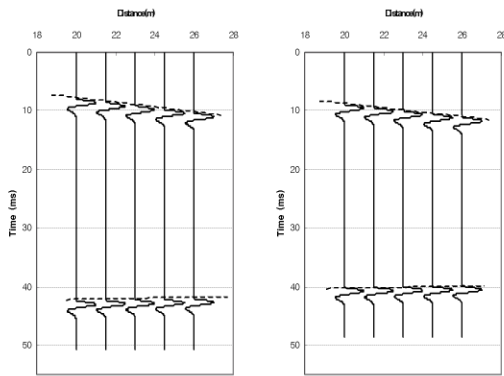


그림 12. 최단 전파경로, 가상원, 반사면의 상관관계

영상점 좌표는 (38.63, 71.04, 76.30), (37.74, 71.08, 67.41)이다. 이로부터 「진원-반사점-수진점」을 경유하는 최단 반사경로가 결정되었으며 반사파의 주행거리와 암반의 탄성과 속도로부터 그림 13과 같은 탄성과 기록을 작성하였다.



(a) 수진기 1 자료 (b) 수진기 2 자료

그림 13. 수진기별 탄성과 주행시간

이 자료를 이용하여 2차원 및 3차원 구조보정을 수행한 과정 및 결과를 표 2에 정리하였다. 3차원 구조보정 결과 불연속면의 기하형상은 $x_0 = 160m$, $y_0 = 85.54m$, $z_0 = 82.55m$ 로 나타나 영상점법에 의한 주행시간 작성시 가정된 불연속면의 기하형상 ($x_0 = 160m$, $y_0 = 87m$, $z_0 = 81m$)과 잘 일치하는 것으로 나타났다. 또한, 시행착오법에 의한 해석시 허용오차 기준을 엄격히 할수록 실제 형상과 더욱 잘 일치하는 것으로 나타났다.

3. 현장 시험 적용

전장에서 기술한 3차원 구조보정 기법으로 터널현장에서 수행한 탄성파 자료를 해석한 후 터널 굴착시 막장면에서 실측한 불연속면 자료와 비교하였다. 터널내 탄성파 탐사를 수행한 OO터널은 직경이 9.0m이고 중심간격이 약 30m 정도 되는 병렬터널이다. 터널시공은 먼저 직경 4.0m의 TBM으로, 나머지 단면은 발파공법에 의하여 굴착되었다. 본 터널의 개략적 지반상황은 그림 14에 나타난 바와 같다.

표 2. 예제 단면의 2차원 및 3차원 구조보정

Description		Contents					Note	
진원 좌표	진원 No.	1	2	3	4	5		
	x-coord. (m)	20.0	21.5	23.0	24.5	26.0		
주행시간	수진기 1	t1d (sec)	0.0080	0.0086	0.0092	0.0098	0.0104	직접파
		T1r (sec)	0.04242	0.04232	0.04222	0.04214	0.04206	반사파
	수진기 2	T2r (sec)	0.04017	0.04009	0.04002	0.03996	0.03990	반사파
Wave Vel.	(m/sec)	2500	2500	2500	2500	2500	평균 2500	
반사파 주행거리 (m)	Si - R1	106.05	105.80	105.55	105.35	105.15		
	Si - R2	100.44	100.23	100.05	99.90	99.76		
2차원 구조보정 ($S_1 - R_1$)								
x-z 평면	x_0 (m)	160	160	160	160	160	평균 160	
	e1 (m)	59.4	59.4	59.4	59.4	59.4	평균 59.4	
3차원 구조보정 ($S_1 - R_2$)								
Assume z_0	z_{0a} (m)	82.36	82.37	82.38	82.38	82.39	평균 82.38	
	y_0 (m)	85.75	85.74	85.73	85.73	85.72	평균 85.54	
반사점 좌표	z_p (m)	33.10	32.92	32.73	32.55	32.36		
	x_p (m)	27.09	27.81	28.53	29.27	30.01		
	y_p (m)	36.77	36.57	36.38	36.18	35.97		
주행거리	d1 (m)	49.98	49.61	49.25	48.90	48.55		
	d2 (m)	50.48	50.63	50.81	51.00	51.21		
Calculate z_0	z_{0c} (m)	82.98	82.80	82.42	82.26	82.30	평균 82.55	

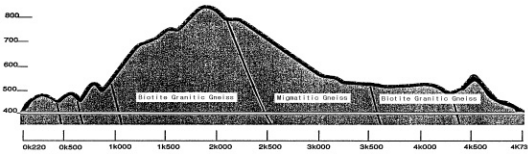


그림 14. 터널의 지질 단면도

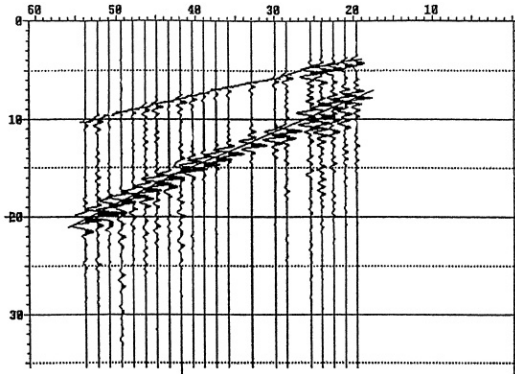


그림 15. 직접파 분석을 포함한 raw data

발파 진원에 의한 탄성파 신호는 터널 벽면에 설치한 2-방향 수신기로 수신하였으며, 2-방향 수신기의 방향은 각각 터널축과 연직방향이다. TSP 자료분석은 raw data로부터 반사파를 추출하기 위한 탄성파 처리과정(wave field processing)과 추출된 반사를 시각화하기 위한 event 영상화 과정으로 대별할 수 있다. 탄성파 처리과정은 1) 잡음(noise)을 제거하고 탄성파를 증폭하는 단계, 2) 반사파만을 남기기 위한 직접파 제거 및 filtering 단계, 3) 전 단계에서 제거하지 못한 noise와 secondary wave 제거 단계, 4) 반사파 증폭 단계(Q-filtering)의 과정을 거쳤다.

그림 15는 탄성파의 침투파 picking을 포함한 field data이며, 그림 16은 잡음을 일차 제거하고 탄성파를 증폭시키는 pre-processing 후의 결과이다. 그리고 그림 17은 잡음을 포함한 수신자료에서 진원에 의한 탄성파 신호만을 추출하는 필터링 과정을 수행한 결과이다.

탄성파의 에너지 감쇠는 기하감쇠와 재료감쇠에 의해 발생하며, 특정 주파수 대역의 고주파수 성분에서는 에너지 감쇠가 크게 발생한다. 이로 인하여 탄성파 해석이 제한을 받으며, 특히 장거리 탐사의 경우 이러한 경향은

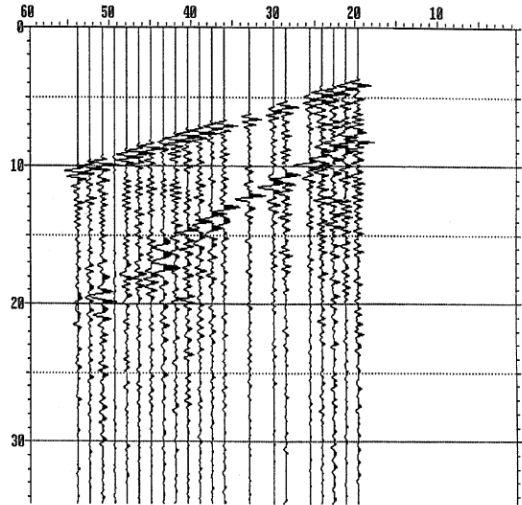


그림 16. Pre-processing 후의 결과

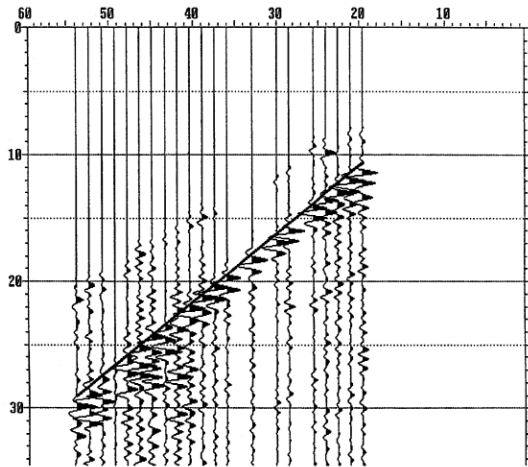


그림 17. 직접파 제거 및 필터링 수행 결과

증가한다. 따라서 암질에 따라 에너지 복원을 수행하여 진폭을 증가시켜 주는 작업(Q-filtering)을 수행하였으며, 모든 처리과정을 마친 탄성파 기록을 그림 18에 나타내었다.

모든 탄성파 처리과정을 마친 탄성파 기록을 이용하여 속도분석(velocity analysis)과 구조보정(migration)을 수행하였으며, 그림 19는 구조보정의 의하여 추출된

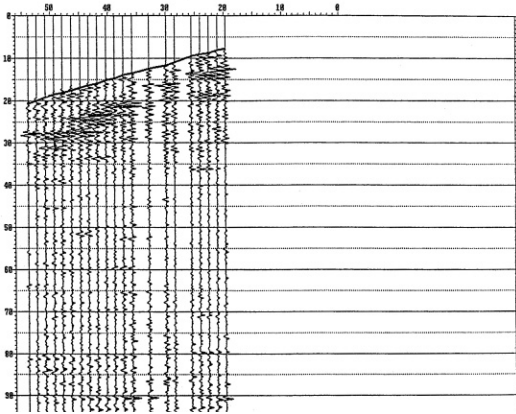


그림 18. Q-filtering 후의 탄성파 기록

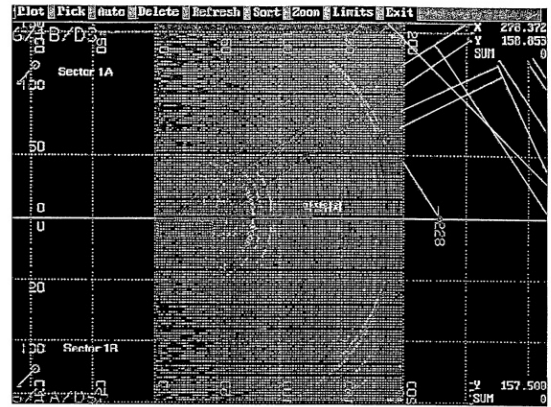


그림 19. 반사면 추출

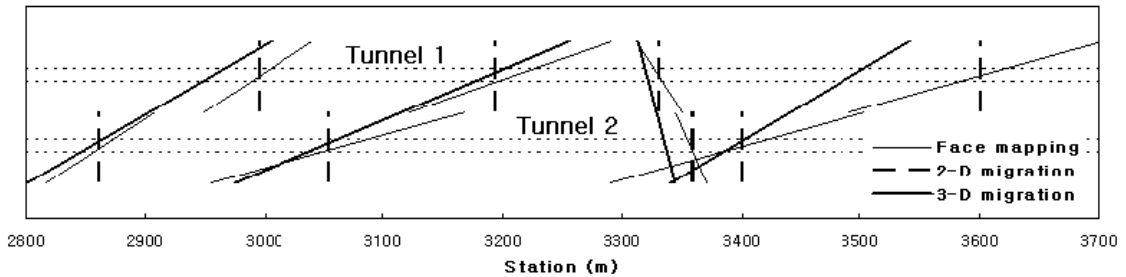


그림 20. 2, 3차원 구조보정 결과 및 불연속면의 실측자료 평면도

반사면을 보여주고 있다. 이러한 전 과정을 거쳐 얻어진 반사면 자료를 이용하여 3차원 구조보정을 수행하였으며, 이를 터널 굴착중 조사한 지반조사 자료와 비교하였다.

그림 20은 터널 굴착중 조사된 불연속면들과 터널내 탄성파 시험 자료를 통하여 결정된 2차원 및 3차원 불연속면을 함께 도시한 것이다. 그림 20에서 2차원 구조보정 결과가 불연속면의 위치를 비교적 정확하게 예측하였으나, 불연속면의 주향은 실측값과 많은 차이가 있음을 알 수 있다. 반면에 3차원 구조보정에 의한 결과는 실측치와 매우 근사하게 나타났다. 또한, 불연속면의 경사(dip angle)의 예측에 있어서도 큰 차이가 발생하였다. 2차원 및 3차원 구조보정에 의한 불연속면의 경사값은 각각 55-80°와 70-85°인 반면, 실측치는 70-90°로 나타났다. 이것은 2차원 구조보정에서는 반사면과 터널축은 직교한다는 가정이 전제하는데 기인한다.

결과적으로, 터널축과 실제 반사면은 직교하지 않고 있었으며, 3차원 구조보정 결과는 실제 불연속면의 기하구조와 비교적 잘 일치하였다.

4. 결론

탄성파 탐사를 이용하여 터널막장 전방지반에 위치하는 불연속면의 기하구조를 예측하는 3차원 구조보정 기법을 제안하였으며, 이를 현장 시험자료와 비교해 보았다. 타원체의 성질을 이용한 3차원 구조보정기법은 타원의 성질을 이용한 2차원 구조보정기법을 발전시킨 것으로 해석방법이 비교적 간단하고 효율적이다. 제안된 3차원 구조보정기법의 적용성을 실제 터널현장에서 굴착시 조사한 지반자료와 비교하여 검토하였다. 터널축과 불연

속면의 주향이 직교하지 않는 경우 2차원 구조보정 결과는 실제 불연속면의 기하구조와 많은 차이를 보인 반면, 3차원 구조보정 결과는 비교적 잘 일치하는 것으로 나타나 본 구조보정 기법의 적용성을 확인하였다.

참고문헌

1. 민경덕, 서정희, 권병두 (1994), 응용지구물리학, 도서출판 우성.
2. 이광호 (1997), “반사탄성파를 이용한 지층불연속면 탐지와 이의 공학적 응용에 관한 연구”, 인하대학교 대학원 석사학위논문.
3. 이인모, 최상순, 김시탁, 김창기, 전제성 (2002), “반사탄성파를 이용한 터널막장 전방 파쇄대의 3차원적 예측”, 터널기술 제4권 제4호, pp. 301-317.
4. Ashida, Y. (2001), “Seismic Imaging Ahead of a Tunnel Face with Three-Component Geophones”, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 38, pp. 823-831.
5. Bieniawski, Z.T. (1976), “Rock Mass Classifications in Rock Engineering”, Proceedings Symposium on Exploration for Rock Engineering, A. A. Balkema Rotterdam, pp. 97-106.
6. Bieniawski, Z.T. (1989), “Engineering Rock Mass Classifications”, John Willy & Sons, pp. 251.
7. Brackl, E., Chwatal, W., Ditzmuller, J., Jöstl, W. (2001), “A Study of the Application of VSP to Exploration Ahead of a Tunnel”, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 38, pp. 833-841.



최상순

(주)청석엔지니어링 지반공학부 부장
sschoi@cse.co.kr



김재권

삼성물산(주) 건설부문 토목기술팀
상무
jkkim1@samsung.com



한병현

삼성물산(주) 건설부문 토목기술팀
과장
byeong.han@samsung.com



이인모

고려대학교 사회환경시스템공학과
교수
inmolee@korea.ac.kr