

## 변위벡터방향성을 이용한 터널 전방 단층대 예측에 관한 연구

김광염<sup>1\*</sup> · 임성빈<sup>1</sup> · 김장겸<sup>2</sup> · 서용석<sup>3</sup> · 김진웅<sup>4</sup>

<sup>1</sup>한국건설기술연구원 지하구조물연구실, <sup>2</sup>단우기술단 터널부  
<sup>3</sup>충북대학교 지구환경과학과, <sup>4</sup>한국도로공사 홍천양양건설사업단

### Prediction of a Fault Zone ahead of a Tunnel Face based on the Orientation of Displacement Vectors

Kwang-Yeom Kim<sup>1\*</sup>, Sung-Bin Yim<sup>1</sup>, Jang-Kyeom Kim<sup>2</sup>, Yong-Seok Seo<sup>3</sup>, and Jin-Woung Kim<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Geotechnical Engineering & Tunnelling Research Div., Korea Institute of Construction Technology (KICT)

<sup>2</sup>Tunnel Dept., Danwoo Engineering & Construction Co.

<sup>3</sup>Department of Earth & Environmental Sciences, Chungbuk National University

<sup>4</sup>Hongcheon Yangyang Construction Office, Korea Expressway Corporation

본 연구에서는 3차원 유한요소해석을 통해 터널 굴착 전방에 위치한 단층대를 내공변위 계측결과를 이용하여 예측하기 위한 방안을 고찰하였다. 이를 위하여 터널과 단층대의 기하학적 위치변화에 따른 수치해석 모델을 구성하였다. 단층대의 경사는 각각 90°, 터널 진행 반대방향 45°, 터널 진행방향 45°의 3가지로 구분하였으며, 각 경사별로 주향을 15° 간격으로 변화시켜 총 15개의 해석 모델에 대하여 분석하였다. 각 모델별 내공변위의 변화양상은 천단부와 측벽부에서의 벡터 방향성을 이용하여 분석하였다. 최종적으로, 총 9가지 조건의 단층대 분포 특성에 해당하는 굴착면 전방 예측 경향선을 도식화 하였으며, 이를 기반으로 일상 계측 데이터 분석을 통한 전방 단층대 출현 및 배향의 예측 방안을 제시하였다.

**주요어** : 3차원 수치해석, 내공변위, 벡터 방향성, 경향선, 단층대

A three-dimensional finite element analysis was performed to predict the location of a fault zone ahead of a tunnel face based on convergence displacement. Geometrical models for the numerical analysis were developed based on the possible geometric intersection between the fault zone and the tunnel. Fifteen fault models were generated from combinations of faults with five different strikes (at 15° intervals) and three dips (vertical, 45° and -45°) relative to the tunnel route. The displacements on the crown and side walls were calculated and analyzed using a vector orientation approach. As a result, nine representative prediction charts were developed, showing location and orientation of the fault zone based on convergence displacement.

**Key words**: Three-dimensional analysis, Convergence displacement, Vector orientation, Trend line, Fault zone

## 서 론

터널의 효율적이고 안전한 설계 및 시공을 위해 지반의 역학적 특성과 지질 구조를 파악하는 것은 매우 중요하다. 이를 위해 설계 단계에서 지표지질조사, 시추조사, 물리탐사 등의 예비조사를 수행한다. 하지만 가늘고 긴 터널의 기하학적 특성상 굴착 전 획득한 정보만으로는 노선을 따른 복잡한 지질변화 특성을 정확히 예측하여

안정성을 평가하기는 매우 어렵다. 따라서 터널 굴착 중 굴착면에 대한 지질조사(face mapping)를 수행하여 현재의 지반 상태를 평가하고, 또한 계측을 통해 터널을 구성하는 지반의 거동을 정량적으로 평가한다.

NATM 터널 시공의 핵심기술인 계측 분야에서는 다양한 분석 및 활용을 위한 연구가 수행되어 왔으며, 이에 따른 체계적인 계측 수행의 중요성이 강조되고 있다 (Schubert and Vavrovsky, 1994; Rabensteiner, 1996).

\*Corresponding author: kimky@kict.re.kr

하지만 국내에서는 대부분 계측이 형식적으로 수행되고 있으며, 이로 인해 계측 결과치의 신뢰도 저하 및 계측 관리의 전문성이 떨어지는 등 많은 문제점이 발생하고 있다(한국건설기술연구원, 2005). 특히, 외국에서는 3차원 절대변위 측정 결과가 안정성 평가 및 굴착면 전방 예측 등에 다양하게 활용되는데 비해, 국내에서는 현장에서의 직접적인 활용이 거의 이루어지지 않고 있는 실정이다.

3차원 절대변위의 활용 사례를 살펴보면, Schubert and Steindorfer (1996)는 각기 다른 지점에서 측정된 터널의 천단변위를 하나의 선으로 연결한 영향선(influence)과 경향선(trend line)의 변화 추이를 분석하여 굴착면 전방의 단층대 및 파쇄대 등의 터널 안정성에 영향을 미치는 연약대를 예측하는 연구를 수행하였다. 이러한 3차원 절대변위 활용 기술은 Steindorfer (1998), Sellner (2000), Grossauer (2001) 등에 의해 검증을 거쳐 지속적으로 발전해 왔으며, 국내에서는 김기선 등(2003), 김창용 등(2004), 김광엽 (2007)에 의해 소개되어 상당한 성과를 도출하고 있다.

본 연구에서는 터널 시공 중의 필수 공정인 계측 결과의 합리적인 분석방안을 마련하기 위해, 다양한 기하구조를 가지는 단층대 분포 지반 모델을 가정하여 3차원 수치해석을 수행하였다. 수치해석을 통한 이론적인 모형 터널의 3차원 절대 내공변위를 분석을 통해 굴착면 전방의 단층대 구조와 특성에 따른 벡터방향성 경향선의 변화양상을 파악하였다. 최종적으로 터널 거동 양상을 사전에 예측하고, 나아가 전방의 단층대 출현 및 배향을 예측할 수 있는 기법을 제안하였다.

### 벡터 방향성 이론

벡터 방향성(vector orientation) 이론은 터널의 변위 분석을 위해 Schubert and Schubert (1993)에 의해 최초로 제안되었으며, 벡터 방향성은 Fig. 1과 같이 일반적으로 천단에서 수직변위에 대한 진행방향 변위의 비( $L/S$ , Longitudinal displacement/Settlement displacement)로 표현된다. Steindorfer (1998)는 나아가 좌측부와 우측부에서의 벡터 방향성을 각각 수평방향 변위에 대한 진행방향의 변위비( $L/H$ , Longitudinal displacement/Horizontal displacement)로 정의하고, 천단 및 좌·우측부 세 지점에서의 벡터 방향성을 분석하였다.

일반적으로 벡터 방향성을 이용하여 변위 양상을 분석하기 위해서는 굴착면에서 일정하게 떨어진 지점에서의 변위 벡터값을 이용하게 되며(Steindorfer, 1998), 굴착이 이루어진 후 초기의 양상을 나타내기 위해 굴착면으로부터

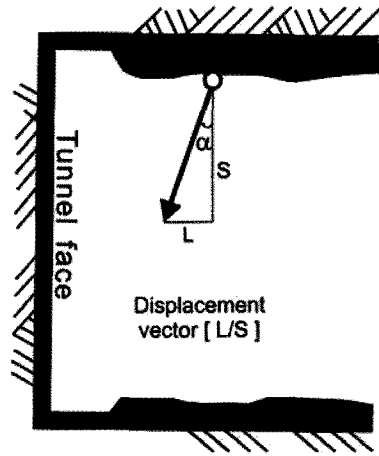


Fig. 1. Concept of vector orientation at the crown (after Schubert and Riedmüller, 1995).

터 0.5D 또는 1D 떨어진 지점의 값을 이용할 수 있다. 보통 0.5D나 1D에서의 벡터 방향성의 경향성은 유사하며, 본 연구에서는 초기의 양상을 더 잘 표현할 수 있다고 판단되는 0.5D 떨어진 지점에서의 벡터 방향성을 이용하였다. 굴착면으로부터 0.5D 떨어진 지점 천단부의 벡터 방향성은 Fig. 2와 같이 정의된다.

서로 다른 계측지점에서 측정된 변위를 한 그래프 상에서 비교하기 위해서는 초기 계측값(zero reading) 이전에 발생한 선행변위의 결정이 중요하다. 하지만 터널 공사의 특성상 초기 계측값 측정 시간이나 거리가 항상 일정할 수는 없으며, 굴착 이전과 굴착 이후 초기 계측 이전의 발생 변위는 측정할 수 없기 때문에 계측 데이터를 비교하기 위해서는 일반적으로 선행변위는 무시된다.

Schubert and Budil (1995)는 터널이 굴착되면서 상대적으로 연약한 지반에서 진행방향 변위(L)는 증가하고, 이에 따라 벡터 방향성( $L/S$ )이 증가하는 것으로 분석하였다. 반대로 견고한 지반에서는 진행방향 변위(L)의 감소에 따라 벡터 방향성( $L/S$ )이 감소한다. 굴착면 전방에 단층대가 존재하는 경우 단층대에 근접할수록 진행방향 변위(L)는

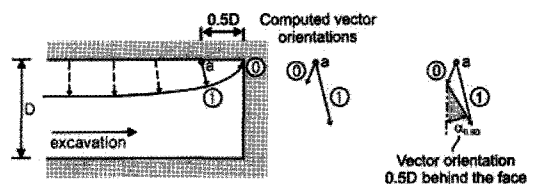


Fig. 2. Vector orientation at the crown, at a distance of 0.5 D from the face (after Steindorfer, 1998).

수직변위(S)에 비해 상대적으로 증가하여 벡터 방향성(L/S)이 변화하게 되며, 이러한 변화는 단층대로부터 2D-3D 이전 지점에서 나타나기 시작하는 것으로 알려져 있다(Schubert and Budil, 1995; Steindorfer, 1998; 김창용 등, 2004). 특히 균질한 지반에서의 벡터 방향성을 기준으로 한 벡터 방향성 차이(differential vector orientation)의 변화 양상은 전방의 강성 변화에 더 많은 영향을 받는 것으로 연구되었다(Steindorfer, 1998; 김창용 등, 2004).

### 3차원 수치해석 모델

연약대가 존재하는 지반에서의 터널의 3차원 내공변위 거동 및 응력변화 특성을 분석하기 위하여 유한요소 해석 프로그램인 MIDAS/GTS를 이용하였다. 본 연구에서는 직경이 10m인 도로터널 형상을 가정하였으며, Mohr-Coulomb 파괴기준에 의한 탄소성해석을 수행하였다. 모델 경계에 의한 영향을 최소화하기 위하여 해석범위는 Fig. 3과 같이 직경의 5배가 되도록 설정하였다. 경계조건은 대칭성을 이용하여 측면은 수평방향, 하부는 연직방향, 전면과 후면은 축방향 변위를 구속하였다. 연약대의 두께는 1D (10m) 두께로 하였으며, 1회 굴진장은 0.5D로 전단면 굴착을 가정하였다.

해석 지반은 3등급 상태를 가정하였으며, 변형계수는 RMR에 의한 경험식(Sonmez et al., 2006)을 이용하여 결정하였다.

단층대의 배향에 따른 3차원 거동 양상을 분석하기 위하여, 단층대의 주향과 경사를 다양하게 설정한 모델을 작성하였다. 단층대의 경사는 90°, 터널 진행 반대방향 45°, 터널 진행방향 45° 등 3가지로 구분하였으며, 각 경사별로 15° 간격으로 주향을 변화시켜 총 15개의 해석 모델을 작

성하였다(Table 1). 단층대와 원지반의 물성비는 20, 즉 압계수( $K_0$ )는 1.5로 하여 해석을 수행하였다.

### 벡터 방향성 분석

#### 단층대 경사가 90°인 경우

단층대의 경사가 터널 진행방향에 수직인 모델에서 굴착면 0.5D지점의 천단부 벡터 방향성 분석 결과는 Fig. 4(a)와 같으며, 단층대가 없는 균질한 지반에서의 벡터 방향성(L/S)과 단층대가 존재하는 모델에서의 벡터 방향성(L/S)을 비교하여 나타내었다. 균질한 지반에서의 벡터 방향성(L/S)은 약 31° 정도를 유지한다. 하지만 단층대가 270/90의 배향을 가지는 모델은 10° 정도의 벡터 방향성(L/S)을 유지하다가 단층대 중심으로부터 1D 이전 지점에서 -4° 정도로 감소하여 나타나며, 단층대를 통과하면서 53°로 급격히 증가하고, 단층대를 통과하면서 22°로 수렴한다. 단층대의 배향이 285/90으로 경사방향이 터널 진행방향에서 15° 기울어진 모델의 벡터 방향성(L/S)은 12° 정도를 유지하다가 단층대 2.5D 이전에서 감소하기 시작하여 1D 이전 지점에서 1°가 된다. 이후 단층대 중심부에서 39°로 커졌다가 점차 감소하여 22°로 수렴한다.

단층대의 경사 및 경사방향이 서로 다른 각 모델에 대한 천단에서의 벡터 방향성(L/S)을 분석해 본 결과, 동일한 폭을 가진 단층대라도 경사방향이 변화함에 따라 터널과의 교차 폭이 달라지며(Fig. 5), 따라서 각 모델별 벡터 방향성 경향성(trend line)은 다른 양상을 보인다. 이러한 변화양상을 보다 정량적으로 나타내기 위해서 단층대가 없는 균질한 지반과 단층대가 존재하는 지반 모델의 동일 단면에서의 벡터 방향성의 차이인 개념을 활용하며, 는 식 (1)과 같이 계산될 수 있다.

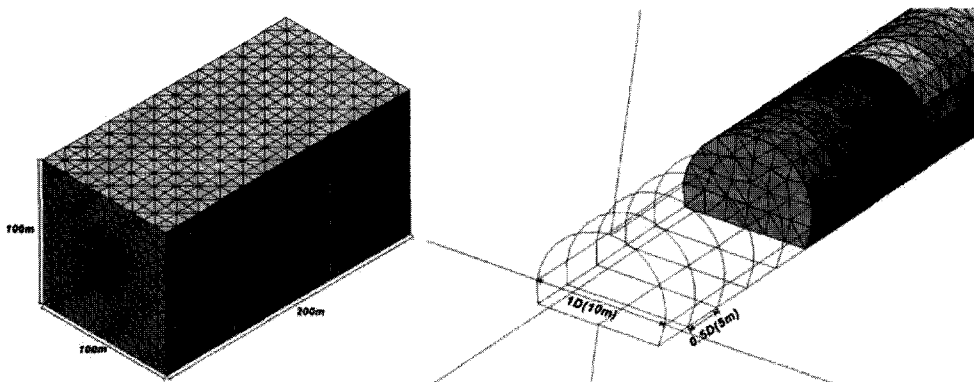
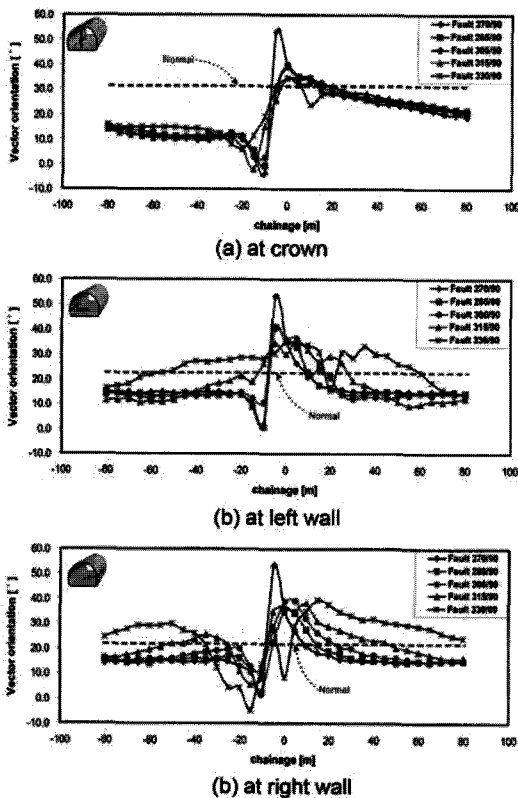


Fig. 3. Mesh diagram of the tunnel used for three-dimensional numerical analysis.

**Table 1.** Geometry of fault zones used in the three-dimensional numerical models.

Tunnel	Trend	090				
	Plunge	00				
Dip direction/Dip		270/45	285/45	300/45	315/45	330/45
Geometry						
Dip direction/Dip		270/90	285/90	300/90	315/90	330/90
Geometry						
Dip direction/Dip		090/45	075/45	060/45	045/45	030/45
Geometry						



**Fig. 4.** Trend lines of vector orientation for fault models with a dip of 90°.

$$\Delta\alpha = \alpha_{fault} - \alpha_{normal} \quad (1)$$

여기서,  $\alpha_{fault}$ 는 단층대 구간 통과시의 벡터 방향성이며,  $\alpha_{normal}$ 은 단층대가 없는 균질한 지반에서의 벡터 방향성이다.  $\Delta\alpha$ 의 방향성에 따른 부호의 특성은 Fig. 6과 같이 정의된다.

좌·우측부에서의 벡터 방향성(L/H)의 경우, 단층대가 없는 균질한 모델에서는 23° 정도로 나타난다. Fig 4(b)와 (c)에서와 같이 좌우측부에서의 벡터 방향성 차이( $\Delta\alpha$ )는 단층대 경사방향이 터널 축과 같은 경우 천단에서의 같이 양의 값을 일정하게 보이다가, 단층대가 터널과 교차하는 지점의 2D 이전에서 점차 증가하여 단층대 출현 직전에 최대값을 가진다. 이후 단층대 구간 내에서 최소값을 나타낸 후 일정한 값으로 수렴한다. 좌측부에서  $\Delta\alpha$ 의 최대값은 단층대의 경사방향이 터널축에서 30° 차이가 날 때까지는 감소하다가 다시 증가한다.

**단층대 경사가 45°이며 경사방향이 굴착 반대방향인 경우**

단층대의 경사가 터널 축과 45°인 경우는 경사방향이 터널의 진행방향과 반대방향 두 가지 경우가 있다. 본 논문에서는 터널 진행방향 경사를 +45°, 진행 반대방향 경사를 -45°로 정의하였다.

Fig. 7(a)는 단층대 경사가 45°이며, 경사방향이 굴착

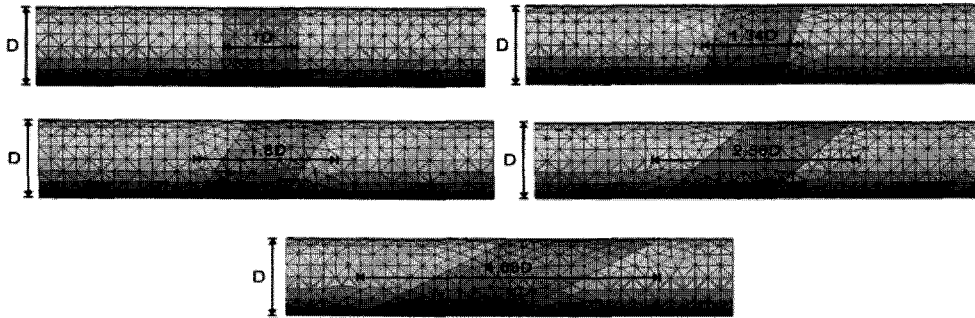


Fig. 5. Plan view of five tunnel models with different fault strikes.

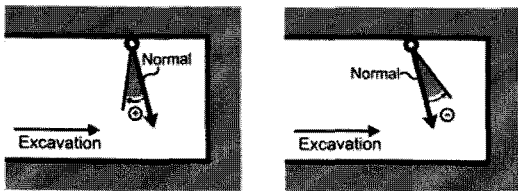


Fig. 6. Definition of vector orientation for  $\Delta\alpha$ .

반대방향인 경우의 천단부 벡터 방향성(L/S) 분석 결과를 나타낸 것이다. 굴착 이후 변위벡터가 증가하다가 단층대 중심으로부터 1.5D 이전 지점에서 감소하기 시작하며, 단층대를 통과하기 직전인 0.5D 지점에서 40°로 최대값을 보인다. 이후 단층대를 통과하면서 감소하기 시작하여 통과 이후 1D 후방 지점에서 수렴한다. 단층대 경사가 45°이며, 경사방향이 각각 15° 간격으로 굴착 반대방향인 5개 모델 모두에서 단층대 중심부까지 굴착 반대방향으로의 변위 없이 벡터 방향성(L/S)이 증가하다가 단층대 중심부에 가까워질수록 굴착 방향으로 급격하게 벡터 방향성(L/S)이 발생하는 양상을 보인다.

좌측부에서의 벡터 방향성(L/H)은 단층대의 구조 특성상 천단에서보다 변화가 시작되는 시점이 빠르며, Fig. 7(b)에서와 같이 변화가 서서히 누적되어 단층대 부근에서의 급격한 변화가 나타나지 않는다. 굴착이 시작된 후 변위벡터는 증가하는 추세를 보이며, 이후 단층대 중심으로부터 2.5D 이전 지점에서 벡터 방향성(L/H)이 감소하기 시작하여 1D 이전 지점에서 16°의 벡터 방향성을 가진다. 굴착이 시작될 때는 진행 반대방향으로 벡터 방향성(L/H)이 증가하다가 단층대 출현 직전에는 굴착 진행방향으로 벡터 방향성(L/H)이 증가하는 것으로 나타난다.

Fig. 7(c)는 우측부에서의 벡터 방향성(L/H) 변화를 나타낸 것이다. 천단과 좌측부에 비해 단층대에 의한 경향성이 가장 강하게 나타난다.  $\Delta\alpha$ 는 점차 양의 값으로 일정하게 유지되다가 단층대 출현 2D 이전 막장에서 급격하게 증

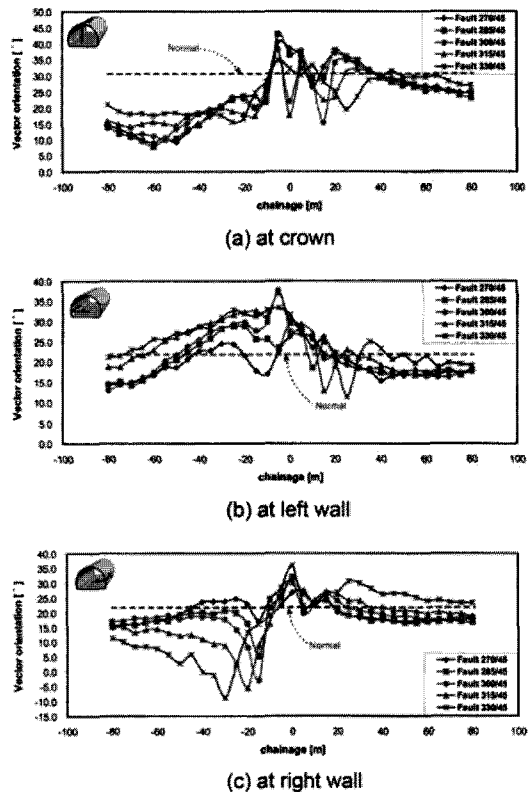


Fig. 7. Trend lines of vector orientation for models with faults dipping at 45° away from the tunneling direction.

가하여 단층대 출현 직전에 최대값을 가지고, 이후 급격히 감소한다. 단층대를 통과하면서 음의 값을 가진 후, 다시 양의 값으로 일정하게 수렴한다. 단층대의 경사방향이 270°부터 15°씩 증가함에 따라 단층대 출현 2D 이전에 나타나는  $\Delta\alpha$ 의 최대값은 감소하는 경향을 보인다.

상기 내용들을 요약하면, 경사방향이 굴착 반대방향인 경우에는 단층대의 중심을 통과하기 직전까지 측점위치와

단층대가 교차하지 않으며, 벡터 방향성이 감소하는 시점과 최소값을 나타내는 지점 모두 뚜렷하게 나타나지 않는다. 또한 단층대에 근접했을 때 천단에서의 변위 벡터는 굴착방향으로 급격하게 증가하는 양상을 보인다.

**단층대 경사가 45°이며 경사방향이 굴착 방향인 경우**

단층대 경사방향이 굴착방향인 경우는 굴착 반대방향의 경우와는 다른 벡터 방향성의 변화 양상을 보인다. Fig. 8은 단층대의 경사가 45°이며, 경사방향이 굴착방향인 경우의 천단 및 좌·우측부에서의 벡터 방향성을 도시한 것이다. 단층대의 경사방향이 굴착 진행방향인 모델에서는 단층대의 구조상 천단 및 좌·우측부에서 변위벡터 변화가 빠르게 시작되며,  $\Delta\alpha$ 는 좌·우측부 보다는 천단부에서 더 크게 나타난다. Fig. 8(a)의 천단부에서의 벡터 방향성(L/S)을 살펴보면, 경사방향이 굴착방향과 동일한 090/45의 배향으로 단층대가 존재하는 경우에는  $\Delta\alpha$ 가 양의 값으로 일정하게 유지되다가 단층대와의 교차지점 2D 이전부터 점차 증가하여 0.5D~1D 이전 지점 부근에서 최대값을 가진다. 이후 단층대 중심에서 음의 방향으로 급격히 바뀌며, 단층대를 통과하고 나서 점차 균질한 지반 상태와 비슷하게 유지된다. Fig. 8(b) 및 Fig. 8(c)에서와 같이 좌·우측부에서의  $\Delta\alpha$ 는 거의 유사한 변화 양상 및 크기를 보인다.

단층대 경사방향이 075(터널 진행방향 우측 15°)인 모델의 경우, 단층대 경사방향이 090인 경우와 거의 비슷한 양상을 나타내지만,  $\Delta\alpha$ 의 최대값이 다소 크다. 또한  $\Delta\alpha$ 가 단층대의 영향으로 변화가 시작되는 지점은 0.5D~1D 정도 빠르며, 좌측부에서의  $\Delta\alpha$  변화 양상이 우측부보다 0.5D 정도 빠르게 나타난다. 단층대 진입 직전의  $\Delta\alpha$  최대값은 우측부에 비해 좌측부에서 다소 크게 나타난다.

단층대 경사방향이 060(터널 진행방향 우측 30°)인 모델은 095 및 075인 경사방향의 단층대 모델과 경향선은 비슷하게 나타나지만, 우측부에서의 변화 양상은 점점 둔화되어 단층대에 진입할 때까지 거의 변화가 없다. 이러한 경향은 굴착이 진행되면서 단층대의 기하구조상 좌측부에 먼저 단층대가 출현하여 변화가 보다 급하게 이루어지기 때문일 것으로 판단된다.

단층대 경사방향이 045인 경우(터널 진행방향 우측 45°)는 천단부에서  $\Delta\alpha$ 의 변화가 단층대 출현 5D 이전 지점부터 지속적으로 상승하며, 단층대 출현 직전에 최대값을 보인다. 이러한 경향은 터널의 상부에 위치하는 단층대의 영향으로 진행방향 변위보다 수직방향의 변위가 커서 벡터 방향성(L/S)이 터널 진행 반대방향으로 변화하기 때문인

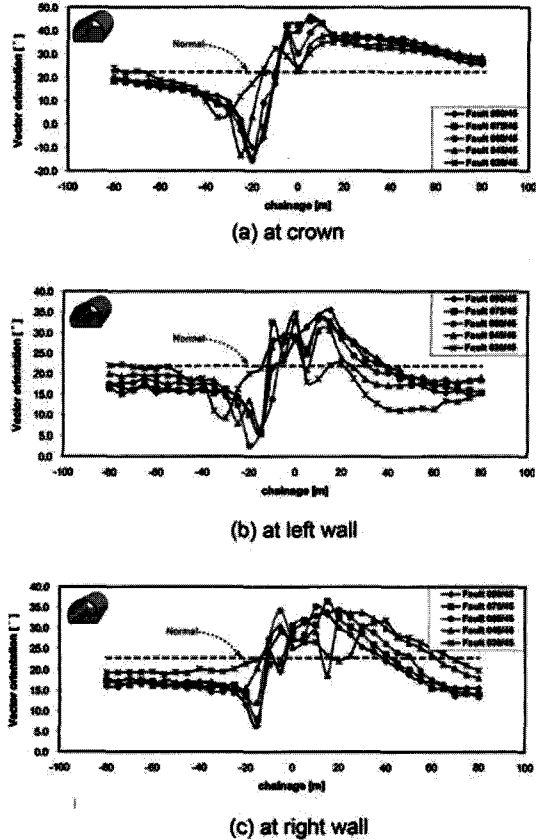


Fig. 8. Trend lines of vector orientation for models with faults dipping at 45° toward the tunneling direction.

것으로 판단된다. 우측부에서의 벡터 방향성(L/H)의 변화는 단층대 경사방향이 060인 경우보다 더욱 둔화되어 단층대에 진입한 이후에도 증가가 나타나지 않는다. 좌측부에서는 단층대 출현 1D 이전에  $\Delta\alpha$ 가 증가하다가 단층대 경계부에서 최대값을 나타내며, 이후 수렴한다.

**굴착면 전방 예측 방안**

**단층대 배향에 따른  $\Delta\alpha$  분석**

각 조건별 해석모델에서의 단층대 중심부 통과 전까지의  $\Delta\alpha$ 를 계산하여 변화 추이를 분석해 보면, 일반적으로 단층대 구간을 통과하기 이전에 벡터 방향성은 급격히 감소하여 굴착 반대방향으로 변화하다가, 단층대 통과 직전에 굴착방향으로 벡터 방향성이 증가하는 양상을 보인다. 또한 동일 굴착단면에서 터널과 단층대가 교차하는 시점이 빠른 측점 위치에서의  $\Delta\alpha$  감소 시점이 빠르게 나타나며, 반대로 교차 지점이 단층대 중심부 통과 이후인 측점 위치에서는

$\Delta\alpha$ 의 변화 양상이 완만하다. 본 연구에서는  $\Delta\alpha$  감소 시점을 분석하여 터널 굴착 시 굴착면 전방의 위험구간을 예측하는 방법을 검토하고자 한다.

Fig. 9는 단층대의 경사가  $90^\circ$ 이며, 주향이  $15^\circ$  간격인 5개 모델의  $\Delta\alpha$  경향선을 정리한 것이다. Fig. 9(a)는 터널 진행방향과 단층대의 주향이 수직인 경우로 단층대의 구조상 천단부와 좌·우측부의 동일 지점에서  $\Delta\alpha$ 가 감소하는 것으로 확인된다. 단층대의 주향이  $15^\circ$  간격으로 변화하면서 우측부의 감소시점이 빨라지며, 좌측부에서는  $\Delta\alpha$ 의 경사가 완만해 지는 경향을 보인다.

단층대 경사가  $45^\circ$ 이면서 경사방향이 굴착 반대방향인 경우에서 터널 중심부를 지나기 전까지의  $\Delta\alpha$  변화 양상은 Fig. 10과 같다. Fig. 10(a)와 같이 단층대의 배향이

270/45인 모델에서는 터널을 기준으로 단층대가 대칭이므로 좌·우측부의 감소 시점은 동일하며, 천단부에서는 뚜렷한  $\Delta\alpha$ 의 감소 없이 점차적으로 증가하는 양상을 보인다. 경사방향이 터널 진행 반대방향에서  $15^\circ$ 씩 바뀌면서 우측부에서의 감소 시점은 빨라지며, 좌측부에서의 경사는 완만해져서 감소 시점이 불명확해진다.

Fig. 11은 단층대 경사가  $45^\circ$ 이면서 경사방향이 굴착 방향인 모델의 분석 결과이다. 단층대가 090/45인 모델(Fig. 11(a))을 경사방향이 반대인 모델(Fig. 10(a))과 비교하면, 좌·우측부에서의 감소시점은 동일하지만 천단부에서의 감소시점은 더 빠르다. 단층대의 경사방향이 터널 굴착방향에서  $15^\circ$ 씩 바뀌면서 우측부에서의 경사는 완만해져서 감소시점이 점차 드러나지 않으며, 천단부와 좌측

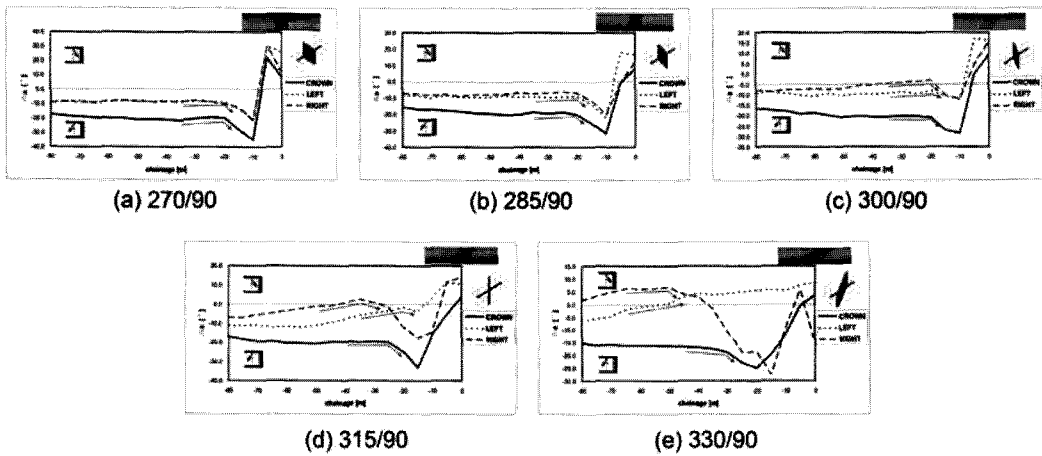


Fig. 9. Change in  $\Delta\alpha$  with measuring point (fault dip =  $90^\circ$ ).

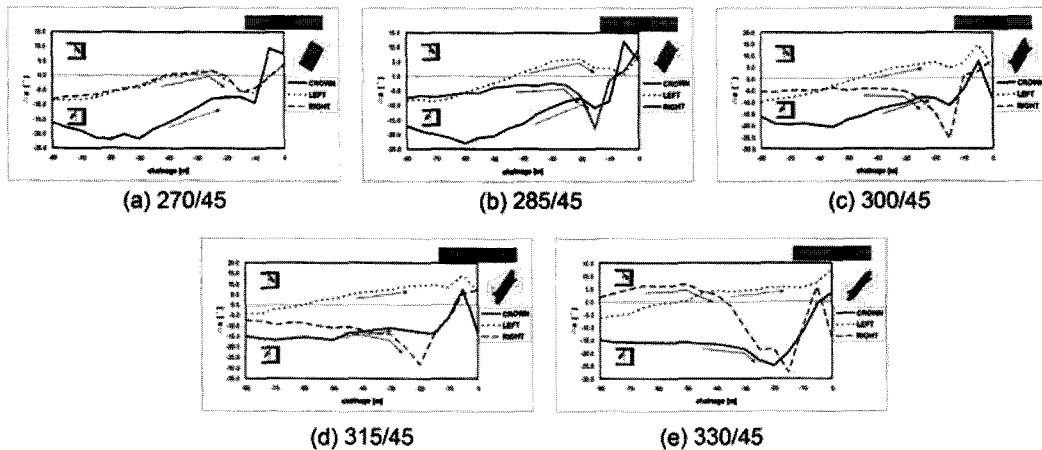


Fig. 10. Change in  $\Delta\alpha$  with measuring points (fault dip =  $-45^\circ$ ).

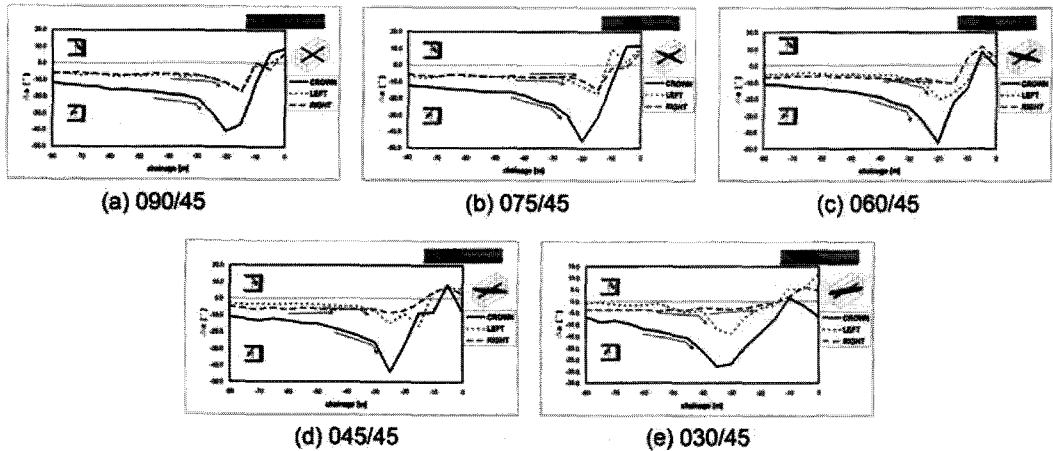


Fig. 11. Change in  $\Delta\alpha$  with measuring point (fault dip = 45°).

부에서는 감소 지점이 점차 빠르게 나타난다.

**$\Delta\alpha$  분석을 통한 굴착면 전방예측 방안**

$\Delta\alpha$ 의 경향선을 분석한 결과, 동일단면의 천단부 및 좌·우측부 중 단층대 기하 특성상 가장 먼저 나타나는 측정 위치에서의  $\Delta\alpha$ 가 단층대 출현 이전에 급격하게 감소한다. 또한 단층대 중심부에 근접하는 구간에서는  $\Delta\alpha$ 가 굴착 방향으로 급히 증가하는 공통적인 특징을 보인다. 따라서 모델별  $\Delta\alpha$  분석결과는 각 측정위치에서의  $\Delta\alpha$  감소 시점을 이용하여 단층대의 기하구조를 예측할 수 있음을 보여준다. 물론, 실제 자연에서의 지질구조는 해석 모델과 많은 차이가 있다. 단층대, 파쇄대 등의 연약대가 서로 교차되어 복잡적으로 존재하며, 층리 및 엮리 등의 불연속면에 의한 비균질 이방성 등을 해석 모델에서 충분히 반영할 수 없다. 하지만 터널 공사시 수행되는 일상계측 데이터를 획득하여 벡터 방향성을 분석함으로써, 굴착면 전방의 대표적인 지질구조의 주방향을 예측할 수 있을 것으로 기대된다.

Fig. 12는 대표적인 단층대 구조 모델의 천단부(C), 좌측부(L), 우측부(R)에서의 전형적인  $\Delta\alpha$ 를 이용한 예측 모델을 요약한 것이다.

Fig. 12(a)에서는 C의 감소시점과 상관없이 L과 R은 동일한 지점에서 감소하며, 동일한  $\Delta\alpha$ 의 경향선을 보인다. 이러한 경우, 터널 진행방향을 중심으로 단층대의 구조는 대칭임을 추정할 수 있다. 단층대의 경사방향은 C의 경향선으로 파악할 수 있는데, C의  $\Delta\alpha$  경향선이 감소시점 없이 꾸준히 증가하는 추세를 보이면( $\downarrow L=R, C\uparrow$ ) 굴착 반대방향 경사이고, L과 R, C의 감소시점이 동일하게

나타나면( $\downarrow L=R=C$ ) 경사가 수직에 가까운 것으로 추정할 수 있다. 또한 C의 감소시점이 L과 R보다 먼저 시작되는 경우( $\downarrow C > L=R$ )라면 경사방향은 굴착 진행방향이 된다. 수치해석에 이용된 모델과 비교하면, Fig. 12(a)의 좌로부터 각각 270/45, 270/90, 090/45 배향의 단층대 모델에 해당된다.

Fig. 12(b)와 같이  $\Delta\alpha$  경향선이 좌측부와 천단부, 즉 L과 C가 동일한 지점에서 급격하게 감소하고 R이 증가하는 양상을 보이는 경우( $\downarrow L=C, R\uparrow$ )는 단층대의 경사방향이 터널 진행방향을 기준으로 좌측이며, 굴착 진행방향의 경사를 가지는 단층대의 출현이 예상된다. 또한 감소시점이 C보다 R에서 더 빠르게 나타나고, L이 증가하는 경우( $\downarrow R > C, L\uparrow$ )에는 단층대의 경사방향이 터널 진행방향 기준으로 우측이고 경사는 수직에 가까운 것으로 예측할 수 있다. L과 C가 감소 없이 완만하게 증가하면서 C의 감소시점이 나타나는 경우( $\downarrow R, L=C\uparrow$ )에는 굴착 반대방향으로 완만하게 누운 구조의 단층대를 예상할 수 있다. 수치해석에 이용된 모델 사례는 Fig. 12(b)의 좌측부터 045/45, 330/90, 330/45 배향의 단층대 모델에 해당된다.

Fig. 12(c)는 Fig. 12(b)에 적용된 단층대가 터널 노선 축을 기준으로 대칭인 경우의  $\Delta\alpha$  경향선이며, L과 R의 감소시점이 반대로 나타난다.

**결론**

일반적으로 굴착면 전방에 단층대가 존재할 경우 천단 침하 및 변위 경향선의 변화는 단층대에 근접해서 시작되



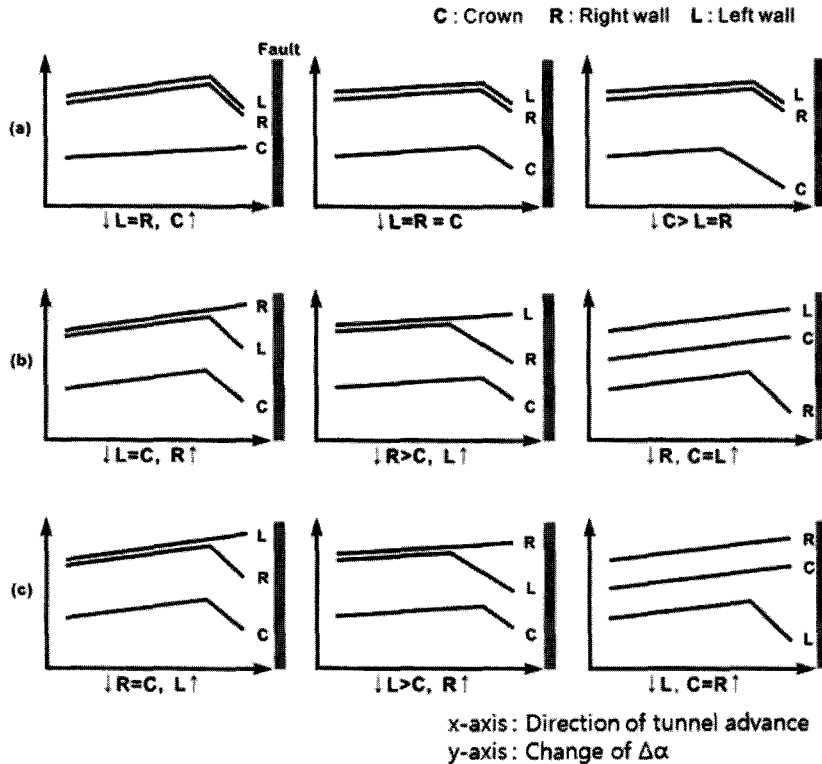


Fig. 12. Schematic trends of vector orientation on the crown (C), left wall (L), and right wall (R) when excavating toward the fault zone.

며, 실제 터널에서 천단변위 경향선으로 단층대의 유무를 추정할 수 있다. 하지만 이러한 방법으로는 단층대의 방향 특성을 예측하기는 어렵다. 따라서 본 연구에서는 단층대의 구조를 다양하게 모델링하여 3차원 수치해석을 수행하였으며, 각 축점에서의 벡터 방향성을 분석하고 변화양상을 도표화하여 굴착면 전방에 위치한 단층대의 기하학적 구조를 예측하고자 하였다.

분석 결과, 굴착단면에서 단층대가 출현하는 시점이 빠른 축점위치에서 벡터 방향성의 변화가 가장 먼저 시작되었으며, 터널 중심부를 지난 후 축점위치에 단층대가 접하는 경우에는 벡터 방향성이 감소하지 않고 꾸준히 증가하는 양상을 보인다. 그리고 동일한 경사각을 가지는 단층대라도 경사방향과 터널 축과의 차이에 커질수록 벡터 방향성의 변화가 빠르게 나타나는 양상을 보인다.

그리고 균질한 임반과 단층대가 존재하는 모델의 동일 단면에서의 벡터 방향성의 차이를  $\Delta\alpha$ 라 정의하고, 단층대 중심부를 통과하기 전까지의 를 분석하여 전방의 단층대를 예측하였다. 단층대 구간을 통과하기 전 벡터 방향성은 급격히 감소하여 굴착 반대방향으로 변화하다가 단층대

통과 직전에 벡터 방향성이 증가하며, 이때의 감소 시점을 분석하여 전방의 단층대 예측 방안을 제시하였다. 총 9가지 경우에 해당하는 굴착면 전방 예측 경향선을 도시화하였으며, 이를 기반으로 일상계측 데이터 분석을 통해 굴착면 전방의 단층대 출현 및 배향을 대략적으로 예측할 수 있는 방안을 제시하였다.

### 참고문헌

김광염, 2007, 터널 막장 전방 단층대 예측을 위한 3차원 절대변위 계측 및 분석에 관한 연구, 서울대학교 대학원 공학박사 논문, 292p.  
 김기선, 김영섭, 유광호, 박연준, 이대혁, 2003, 터널 3차원 내공변위의 해석을 통한 막장전방 지반상대변화 예측, 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, 13(6), pp. 476-485.  
 김창용, 홍성완, 김광염, 백승한, 2004, 터널 내공변위 거동 분석에 관한 연구, 한국터널공학 학술논문집, 터널기술, 6(3), pp. 183-197.  
 한국건설기술연구원, 2005, SMART 터널 OBSERVATION EXPERT SYSTEM 개발 연구, 연구보고서, 480p.  
 Grossauer, K., 2001, Tunneling in Heterogeneous Ground-Numerical Investigation of Stress and Displacements, Master thesis, Graz University of Technology, Austria,

106p.

- Rabensteiner, K., 1996, Advanced Tunnel Surveying and Monitoring, Felsbau, 14(2), pp. 98-102.
- Schubert, P. and Vavrovsky, G. M., 1994, Interpretation of Monitoring Results, World Tunnelling, pp. 351-356.
- Schubert, W. and Budil, A., 1995, The Importance of Longitudinal Deformation in Tunnel Excavation, In: Fujii, T.(Ed), Proceeding of the 8th ISRM Congress on Rock Mechanics, Tokyo, 2, pp. 1411-1414.
- Schubert, W. and Reidmüller, G., 1995, Geotechnische Nachlese eines Verbruches-Erkenntnisse und Impulse Mitteilungsheft des Institutes für Bodenmechanik und Grundbau TU-Graz Heft 13, pp. 59-68.
- Schubert, W. and Schubert, P., 1993, Tunnels in Squeezing Rock: Failure Phenomena and Counteractions, Proceedings of Assessment and Prevention of Failure Phenomena in Rock Engineering, Istanbul, Turkey. Rotterdam: A. A. Balkema, pp. 479-484.
- Schubert, W. and Steindorfer, A., 1996, Selective Displacement Monitoring Tunnel Excavation, Felsbau, 14, pp. 93-97.
- Sellner, P.J., 2000, Prediction of Displacements in Tunnelling, Ph.D. thesis, Graz University of Technology, Austria, 140p.
- Sonmez, H., Gokceoglu, C., Nefeslioglu, H. A. and Kayabasi, A., 2006, Estimation of Rock Modulus: For Intact Rocks with an Artificial Neural Network and for Rock Masses with a New Empirical Equation, International Journal of the Rock Mechanics and Mining Sciences, 43, pp. 224-235.
- Steindorfer, A. F., 1998, Short Term Prediction of Rock Mass Behaviour in Tunnelling by Advanced Analysis of Displacement Monitoring Data, Ph.D. thesis, Graz University of Technology, Austria, 120p.

---

2010년 9월 8일 원고접수, 2010년 10월 12일 게재승인

### 김광엽

한국건설기술연구원 지반연구실  
411-712, 경기도 고양시 일산서구 시민대로 1190  
Tel: 031-910-0225  
Fax: 031-910-0211  
E-mail: kimky@kict.re.kr

### 임성빈

한국건설기술연구원 지반연구실  
411-712, 경기도 고양시 일산서구 시민대로 1190  
Tel: 031-910-0489  
Fax: 031-910-0211  
E-mail: sbyim@kict.re.kr

### 김장겸

단우기술단 터널부  
462-120, 경기도 성남시 중원구 상대원동 190-1  
Tel: 031-776-0070  
Fax: 031-776-0060  
E-mail: haomarujk@hanmail.net

### 서용석

충북대학교 지구환경과학과  
361-763, 충북 청주시 흥덕구 성봉로 410(개신동)  
Tel: 043-261-2765  
Fax: 043-273-9645  
E-mail: ysseo@cbu.ac.kr

### 김진웅

한국도로공사 홍천양양건설사업단  
250-812, 강원도 홍천군 화촌면 군업리 166  
Tel: 033-439-9273  
Fax: 033-439-9207  
E-mail: kimjw@ex.co.kr