

계측단면중심 벡터를 이용한 터널 막장전방 단층대 예측



김 광 염
한국건설기술연구원
국토지반연구부, 연구원
(kimky@kict.re.kr)



김 창 용
한국건설기술연구원
국토지반연구부,
책임연구원



이 정 인
서울대학교,
명예교수

1. 서론

단층대 구간에서의 안전하고 경제적인 터널 시공을 위해서는 변위 거동에 대한 예측을 통해 적절한 굴착방법과 지보방법 등을 강구해야 한다. 특히, 막장 전방의 연약한 단층대 구조에 대하여 가능한 빨리 예측을 하여 대비를 하는 것이 중요하다.

터널의 내공 변위를 이용하여 굴착 전방의 단층대를 예측하기 위한 시도는 80년대 말부터 지속적으로 연구되고 있다. 터널 축방향으로의 변위의 경향선(trendline)과 영향선(influence line) 등에 대한 분석을 통한 방법, 반경방향 변위와 진행방향 변위의 비인 벡터방향성(vector orientation)의 변화 추이를 분석하는 방법, 변위함수 파라미터(function parameter)를 이용하여 전방의 막장 암반상태 변화를 예측하는 방법 등 다양한 시도가 이루어지고 있

다. 이와 같은 터널의 내공변위를 통한 전방 단층대 예측에 관한 대부분의 연구는 터널의 변위 계측 지점에서의 변위의 굴착에 따른 변형 거동 양상을 파악하기 위한 것이었다. 그러나 특정 지점에서의 일방향 및 이방향 변위만을 분석하였기 때문에 전방의 단층대에 의한 변위의 3차원 거동을 충분히 반영하기 힘들다는 문제점이 있다.

본고에서는 단층대 통과구간에서 나타나는 암반의 거동양상을 효율적으로 표현할 수 있는 새로운 3차원 변위 분석방안을 소개하고자 한다.

2. 계측단면중심점 벡터 개념

기존의 모든 3차원 변위 벡터의 분석방법은 천단과 좌우 측벽 한점에서의 일방향(변위량, 변위 경향

계측단면중심 벡터를 이용한 터널 막장전방 단층대 예측

선) 또는 이방향 변위(벡터방향성, L/S)만으로 표현된다. 막장 전방의 단층대에 의한 터널 변형거동은 3차원적으로 발생하기 때문에 전방의 단층대의 위치와 기하형상 등을 예측하기 위해서는 한 지점의 일차원, 이차원적인 분석만으로는 단층대에 대한 보다 많은 정보를 확보하기가 쉽지 않다는 단점이 있다.

따라서 하나의 계측지점에서의 개별적인 거동 분석이 아닌 변위 계측 지점(천단, 좌·우 측벽)을 연결하여 생성되는 평면의 중심점 좌표의 굴착에 따른 변화양상을 파악해 보았다. 계측단면중심점 (monitoring cross-section center, MCC)의 굴착에 따른 변화에 의해 생성되는 벡터(monitoring center vector, MCV)의 방향성이 전방의 단층대의 특성을 어떻게 반영하는지를 분석하였다. 새롭게 고안한 MCV의 개념은 Fig. 1과 같다. 일반적인 터널의 계측 위치를 천단, $P_1(x_1, y_1, z_1)$, 좌측벽, $P_2(x_2, y_2, z_2)$, 우측벽, $P_3(x_3, y_3, z_3)$ 라 했을때 MCC는 세 점의 중심(center of gravity)을 나타내며, C의 위치좌표는 (1)과 같이 계산되어진다. 또한, 추가 굴착에 의해 MCC가 이동한 C' 의 위치좌표는 (2)와 같이 계산되어진다.

$$C(x, y, z) = \left(\frac{x_1+x_2+x_3}{C}, \frac{y_1+y_2+y_3}{C}, \frac{z_1+z_2+z_3}{C} \right) \quad (1)$$

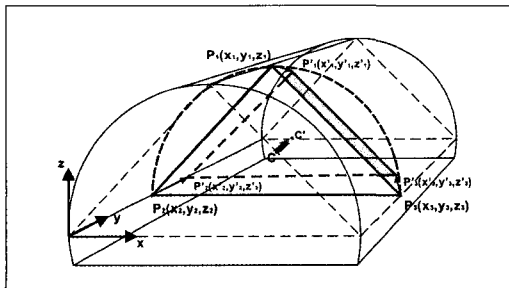


Fig. 1. Concept of new advanced monitoring of cross-section center vector

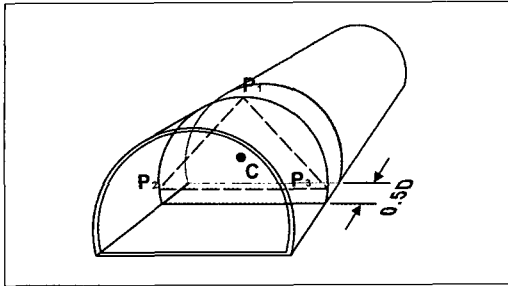
$$C'(x', y', z') = \left(\frac{x'_1+x'_2+x'_3}{C}, \frac{y'_1+y'_2+y'_3}{C}, \frac{z'_1+z'_2+z'_3}{C} \right) \quad (2)$$

이 경우 굴착에 의한 MCV는 (3)과 같이 계산된다.

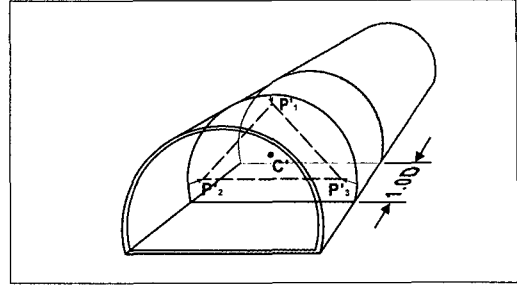
$$MCV = \vec{CC'} = C' - C = \left(\frac{(x'_1-x_1) + (x'_2-x_2) + (x'_3-x_3)}{C}, \frac{(y'_1-y_1) + (y'_2-y_2) + (y'_3-y_3)}{C}, \frac{(z'_1-z_1) + (z'_2-z_2) + (z'_3-z_3)}{C} \right) \quad (3)$$

Fig. 2는 MCV를 계산하기 위한 굴착에 따른 막장 위치와 MCC 계측 지점의 관계를 나타내고 있다. Fig. 2(a)는 MCC의 초기계측 위치를 나타내고 있다. 본 연구에서는 초기 계측 시점을 실제 터널에서의 계측 여건을 고려하여 막장에서 0.5D 떨어진 지점에서 초기 계측이 이루어지는 경우에 대하여 분석하였다. Fig. 2(b)는 초기계측이 이루어진 후 0.5D의 추가 굴착이 이루어진 경우에 MCC의 변화를 나타내고 있다. 즉, MCC의 측점에서 막장까지의 거리는 1.0D 가 되는 지점이다.

터널의 굴착 진행방향을 090이라 했을 때 균질한 암반에서의 MCV와, 수직 단층대가 존재할 경우 단층대 경사방향별 MCV의 선주향(trend)과 선경사(plunge)를 분석하였다. 기준방위는 Fig. 3과 같다. 단층대 구간에서의 MCV의 선주향이 090보다 큰 경우는 막장면의 우측방향으로 090보다 작은 경우는 막장면의 좌측으로 향함을 의미한다.



(a) zero reading



(b) after short term behaviour

Fig 2. Monitoring of the cross-section center at every 0.5D of tunnel advance

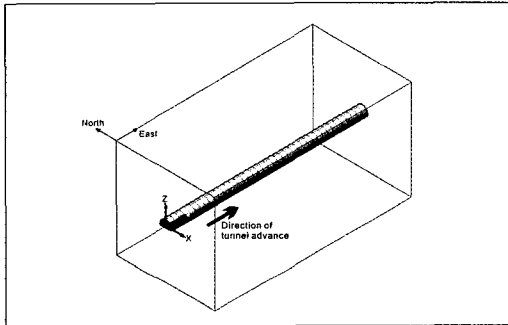


Fig 3. Numerical model of a tunnel with axis orientation of 090/00 (trend/plunge) for checking MCV

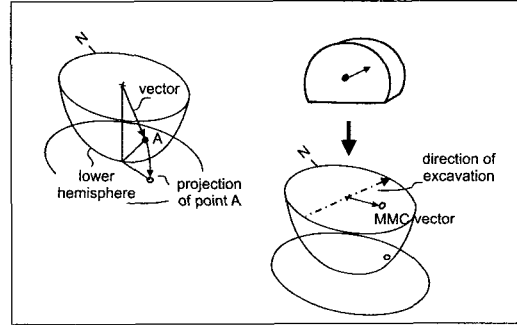


Fig 4. Displaying of MCV orientation onto a longitudinal plane (stereonet)

3. MCV 변화의 평사투영 방안

단층대 통과구간의 3차원 해석결과로부터 계측위치를 막장면에서 0.5D 떨어진 지점으로 가정하여 천단과 좌우 측벽에서 나타난 3차원 변위 좌표를 구하였다. 이 좌표를 통해 계측단면중심(MCC) 좌표를 계산하였으며, 앞 절에서 언급한바와 같이 굴착에 따른 MCV의 선주향(trend)과 선경사(plunge)를 계산하였다. 해석에 수행된 단층대 모델과 방향성은 Table 1에 나타나 있다.

3차원 절대변위의 계측의 장점은 원하는 지점의 공간상에서의 움직임을 표현할 수 있다는 점이다. MCV는 이러한 공간상에서의 움직이는 점을 연결하

여 만든 가상의 면의 중심으로 여러점을 분석해야 하는 번거로움을 해결하기 위한 방안이다. 적절한 지질학적 정보와 함께 MCV 방향성의 분석을 통해 암반의 변형 양상과 암반의 구조에 대한 보다 합리적인 평가를 내릴 수 있게 된다. 앞서 살펴본 MCV를 선주향과 선경사 개념으로 나누어서 분석하는 것은 각각의 정보를 개별적으로 분석해야하는 복잡함이 있기 때문에 두 가지 성분을 공간상에서 표현하기 위해서는 절리의 방향성을 나타낼 때 주로 사용하는 평사투영법을 사용하여 도시할 수 있다.

Fig. 4는 평사투영법에 의한 공간상의 방향 벡터의 표현방법과 본 연구에서 제한한 MCV의 평사투영을 나타내고 있다. 터널의 굴착 방향의 선주향, 선

계측단면중심 벡터를 이용한 터널 막장전방 단층대 예측

Table 1. Design parameters for geometry of fault and tunnel

Tunnel		Fault Zone				Stereonet display
Trend	Plunge	Dipdir/Dip	Geometry	Dipdir/Dip	Geometry	
090	00	270/45		280/45		lower hemisphere (equal area) Direction of Tunnel advance →
		300/45		315/45		
		330/45				
		270/90		285/90		lower hemisphere (equal area) Direction of Tunnel advance →
		300/90		315/90		
		330/90				
		090/45		075/45		lower hemisphere (equal area) Direction of Tunnel advance →
		060/45		045/45		
		030/45				

경사를 각각 090, 00°로 정의하여 MCV의 선주향, 선경사를 도시하는 방법을 나타낸 것이다.

4. MCV의 평사투영 결과를 이용한 단층대 예측

각 모델별 MCV 계산 결과를 토대로 각 모델별 단층대로 접근하는 경우와 단층대를 지난 경우의 MCV 방향의 평사투영도 상의 변화양상을 분석해 보았다. 평사투영도 상에 균질한 암반의 경우의 MCV 방향성(normal, 평사투영도 상의 “□”로 표시)과 단층대의 경사방향/경사(pole, 평사투영도 상의 “▲”로 표시)를 같이 나타냈다. 대표적 단층모델

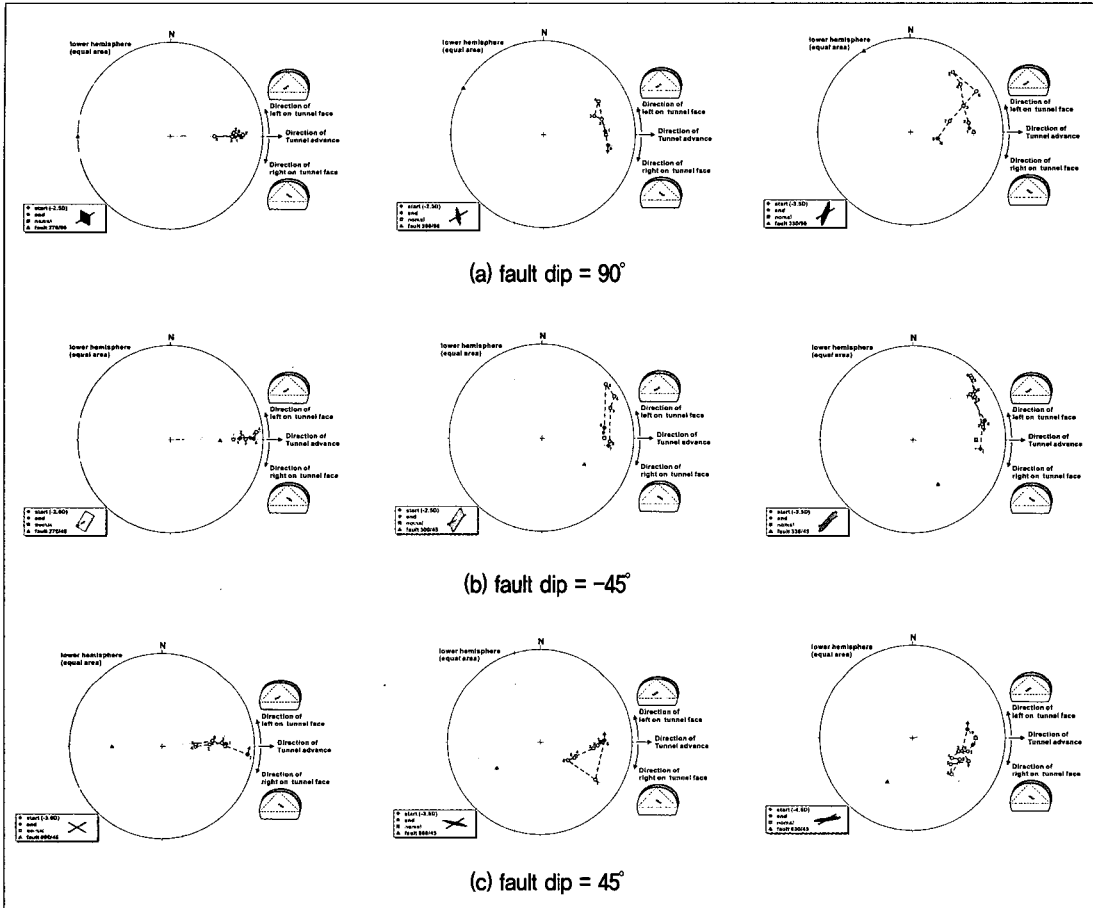


Fig 5. MCV orientation on stereonet in tunnelling through fault

에 대한 분석 결과는 다음과 같다.

Fig. 5는 단층대 경사가 90° 인 모델(270/90, 300/90, 330/90), 단층대 경사가 굴착진행 반대방향 45° 인 모델(270/45, 300/45, 330/45), 단층대 경사가 굴착진행 반대방향 45° 인 모델(090/45, 060/45, 030/45)의 단층대 통과 전후의 MCV의 평사투영 결과를 나타내고 있다. MCV는 단층대에 접근하면서 그 변화가 뚜렷이 시작되는 점에서 단층대 진입까지의 결과를 도시하였다.

단층대 통과구간에서 평사투영도상의 MCV는 단층대의 방향성에 따라 변화하게 된다. 이러한 변화상을 통해 실제 시공 현장에서 막장 전방에 있는 단층대의 위치와 방향성을 결정할 수 있다. 단층대에 의한 암반의 응력상태 변화가 MCV에 반영되는 시점은 단층대가 터널과 만나는 지점에서 약 2D~4D 정도 떨어진 단면인 것으로 나타났다. 즉, 현재 막장에서 2D~4D정도 전방에 단층대가 존재하게 되는 경우 MCV는 단층대에 의한 영향으로 변화를 시작하게 된

계측단면중심 벡터를 이용한 터널 막장전방 단층대 예측

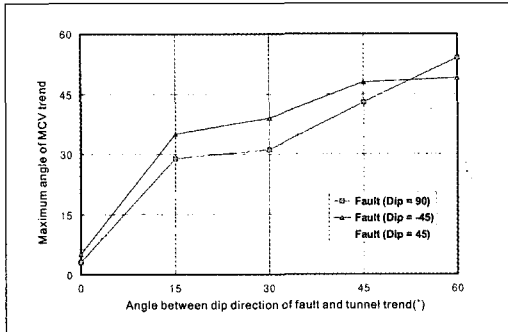


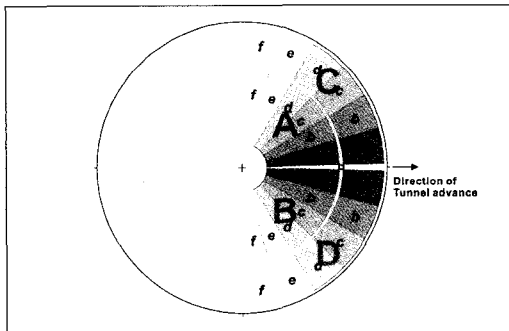
Fig 6. Maximum angle of MCV trend depending on fault orientation

다. MCV의 변화양상은 단층대의 방향성에 가장 큰 영향을 받게 된다. 균질한 암반에서의 MCV 방향성

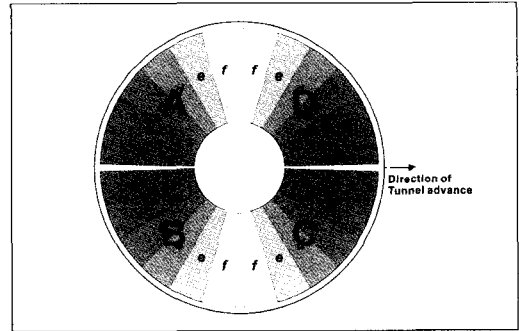
(normal)을 기준으로 한 변화양상을 살펴보면 단층대의 방향성과 MCV의 변화양상의 상관관계가 잘 나타나 있다. 단층대의 경사방향이 터널 축과 이루는 각도가 커질수록 단층대 통과 전의 MCV와 normal과의 선주향의 차(평사투영도상의 원주방향 각도)의 최대 값이 비례하여 증가함을 알 수 있다(Fig. 6).

MCV의 선주향의 방향은 단층대 경사방향에 따라 결정되어진다. 터널의 진행방향에 따른 단층대의 경사방향에 따라 단층대 통과 전 MCV의 방향은 Table 2와 같이 정해지게 된다.

단층대의 경사방향이 굴착 방향으로 향해 있는 경우는 MCV는 normal보다 큰 선경사를 나타내며, 반



(a) MCV orientation before fault zone



(b) Predicted fault pole

Fig 7. Chart for prediction of fault ahead of tunnel face using MCV orientation on stereonet projection

Table 2. MCV trend orientation depending on dip direction of fault

Dip direction of fault	Change of MCV
$0^\circ < \text{dip direction}_{\text{fault}} - \text{trend}_{\text{tunnel}} < 90^\circ$	MCV moves left on face
$180^\circ < \text{dip direction}_{\text{fault}} - \text{trend}_{\text{tunnel}} < 270^\circ$	
$90^\circ < \text{dip direction}_{\text{fault}} - \text{trend}_{\text{tunnel}} < 180^\circ$	MCV moves right on face
$270^\circ < \text{dip direction}_{\text{fault}} - \text{trend}_{\text{tunnel}} < 360^\circ$	

Table 3. MCV plunge orientation depending on dip direction of fault

Dip direction of fault	Change of MCV
$-90^\circ < \text{dip direction}_{\text{fault}} - \text{trend}_{\text{tunnel}} < 90^\circ$	MCV moves left on face
$90^\circ < \text{dip direction}_{\text{fault}} - \text{trend}_{\text{tunnel}} < 270^\circ$	

대의 경우에는 작은 선경사를 나타낸다(Table 3). 단층대가 수직 경사인 경우는 선경사가 normal과 크게 차이가 나지 않는 경향을 보인다.

단층대 통과 전 MCV의 위와 같은 방향성 변화를 통해 전방 단층대의 방향성을 예측하기 위한 도표를 Fig. 7에 나타냈다. Fig. 7(a)는 단층대 통과 전 MCV의 방향성 변화 구간을 4개의 대분류와 6개의 소분류를 통해 24개로 구분하였다. A, B, C, D는 균질한 암반에서의 MCV 방향성을 기준으로 단층대 통과구간의 MCV의 방향성 변화구간을 막장면의 좌, 우측과 선경사의 방향을 기준으로 크게 4가지로 분류한 것이며, a~e는 각각의 경우에 MCV의 선주향이 터널방향과 이루는 각도를 6단계로 분류한 것이다. Fig. 7(b)는 Fig. 7(a)의 MCV 구간을 통해 예측된 단층대 방향성을 나타내고 있다.

5. 결론

MCV를 통한 전방의 단층대 방향성 예측은 단층대 진입전의 암반상태가 균질한 경우를 가정하였기 때문에 실제 시공 현장에서는 MCV의 양상이 보다 복잡하게 나타날 수 있다. 상기의 결과는 암반과 단층대의 이방성은 고려하지 않았기 때문에 암반에 이방성이 심하게 나타나는 경우 본 결과의 수정된 적용이 필요할 것이다.

또한, 단층대의 경사를 수직인 경우와 45도 경사인 경우만을 고려하여 분석하였기 때문에 예측 도표상의 단층대의 경사 범위가 구분이 되어 있지 않다. 향후 단층대 경사에 대한 MCV 방향성의 변화양상을 분석한다면, 예측 도표의 단층대 경사가 보다 세분화 될 수 있을 것이다.

참고 문헌

1. 김창용, 홍성완, 김광염, 백승한, 2004, 터널 내공 변위 거동 분석에 관한 연구, 터널기술, 한국터널공학회논문집, 제6권 제3호, pp. 183~197.
2. Health and Safety Executive, 1999, Safety of New Austrian Tunnelling Method(NATM) Tunnels, HSE Health & Safety Executive Books, Sheffield, United Kingdom.
3. Schubert, W., Riedmuller G., 2000, Tunnelling in Fault Zones – State of the Art in Investigation and Construction. Felsbau, Vol. 18, No. 2, pp. 7~15.
4. Schubert, W., Steindorfer, A., 1998, Advanced monitoring data evaluation and display for tunnels, Proceedings of the International Symposium on Tunnels and Metropolises, Sao Paulo, Vol. 2, pp. 1205~1208.
5. Schubert, W., Steindorfer, A., Button, E.A., 2002, Displacement monitoring in tunnels—an overview, Felsbau, Vol 20, No. 2, pp. 7~15.
6. Steindorfer, A., Schubert, W., 1997, Application of new methods of monitoring data analysis for short term prediction in tunnelling, Proceedings of the International Symposium on Tunnels for People, pp. 65~70.
7. Vavrovsky, G.M., Schubert, P., 1995, Advanced analysis of monitored displacements opens a new field to continuously understand and control the geotechnical behaviour of tunnels, 8th Congress on Rock Mechanics, Proceedings of the Intern. Society for Rock Mechanics, Tokyo, Japan. Rotterdam: A. A. Balkema, pp. 1415~1419.