파쇄대에 접근하는 터널의 내공변위 변화 해석

Convergence change in a tunnel face approaching fault zones

이인모*1, 이승주*2, 이주공*3,이대혁*4
Lee, In-Mo · Lee, Seung-Ju · Lee, Joo-Gong · Lee, Dae-Hyuck

Abstract

The purpose of this study is to figure out the tendency of tunnel convergence during excavation and to present a methodology for the prediction of a fault zone ahead of a tunnel face by analyzing three dimensional displacements in various ways. 3-D numerical analysis was performed to investigate changes of tunnel convergence vectors near a fault zone and to propose a flow chart for predicting fault zones. Results of the site investigation and results of trend line analysis of in-situ data were compared to verify the usefulness of a trend line analysis. It is concluded that the orientation of faults can be predicted by using stereonets and the direction of initial stresses can be predicted from the arm length of a displacement vector as a tunnel approaches fault zones. The results of the trend line analysis coincided with those of the site investigation, and a methodology for the prediction of a fault zone was proposed.

Keywords: Fault, 3-D displacement, trend line, stereonet

요 지

본 연구는 터널 굴착시 막장 전방의 지반변화를 사전에 예측할 수 있는 방법을 제시하고자 하였다. 이를 위하여 막장 전방에 파쇄대가 방향성을 가지고 존재 할 때 터널의 3차원 해석을 통하여 터널의 내공변위의 변화 경향을 살펴보았으며, 이를 통하여 막장전방의 지반 변화를 파악하고자 하였다. 이러한 터널의 내공변위의 변화는 경향선과 영향선을 이용하여 표현할 수 있으며 이를 이용하여 막장 전방에 존재하는 파쇄대를 예측하고자 하였다. 수치해석 결과에 의하면 막장전방에 파쇄대가 존재 할 경우 막장이 파쇄대에 접근할 수록 급격한 경향선의 변화가 나타난다. 또한 파쇄대가 방향성을 가지고 있는 경우에는 경향선의 급격한 변화 외에 측벽부의 변위 경향이 비대칭을 이루므로 인하여 평사투영도 상에 나타난 변위가 비대칭을 형성하는 것으로 파악되었다. 이러한 수치해석결과에 의한 내공변위 해석결과를 현장 계측 자료와 비교하였으며, 현장에서 계측한 오차를 줄일 수 있도록 계측데이터가 정규분포 한다고 가정하여 현장데이터를 분석한 결과 막장전방의 파쇄대의 존재 유무를 파악할 수 있는 것으로 나타났다.

주요어: 경향선, 영향선, 파쇄대, 막장전방

*1 정회원, 고려대학교 토목환경공학과 교수
*2 고려대학교 토목환경공학과 석사과정 졸업
*3 정회원, 고려대학교 토목환경공학과 박사과정 수료
*4 정회원, SK건설(주) 연구소 선임연구원

1. 서론

최근 고속도로, 철도, 고속전철, 지하철 터널등의 지하공간 활용에 대한 요구가 지속적으로 증가하고 있으며, 터널의 건설기술 또한 비약적인 발전을 이루어 왔다. 그러나 터널의 시공중에는 여러 가지 불확실한 요인으로 인하여 시공중인 터널의 안전성을 저해하는 것이 사실이다. 이러한 불확실한 요인으로는 여러 가지가 있을 수 있으나, 파쇄대 등과 같은 불연속면의 존재는 시공중인 터널의 붕괴 및 붕락을 유발 할 수 있는 가장 위험한 요인으로 파악되고 있다.

터널 굴진시 막장전방에 파쇄대가 존재할 경우 파쇄대의 존재를 사전에 파악하지 못하고 터널이 계속 굴진된다면 아칭현상에 의하여 막장면과 파쇄대 사이에는 응력의 집중이 발생하여 경우에 따라서는 막장면의 붕괴를 유발 할 수 있다.

현재 터널 굴착방법으로 널리 사용되는 NATM 공법의 가장 큰 장점은 시공방법의 유연성에 있다. 즉, 터널의 형상, 지반조건 및 시공조건에 따라 터널의 굴착방법과 지보체계를 즉각적으로 변경하여 최적의 터널시공이 이루어 지도록 하는 것이다. 그러나 기존의 재래식 2차원 터널 계측방법으로는 즉각적인 피드백 (feed back)이 불가능하고, 초기치 측정의 한계, 측정방법 간의 불일치 등으로 인하여 정밀한 터널의 거동을 파악하는데 한계가 있다. 따라서, 이러한 단점을 보완하기 위하여 터널의 3차원 절대내공변위 계측이 도입되고 있다. 터널의 3차원 절대내공변위 계측은 기존의 계측 방법과 달리 터널의 시공성을 저해하지 않으면서 보다 정밀한 계측결과의 확보가 가능할 뿐만 아니라 측정결과로부터 막장 전방의 지반변화 예측이 가능하게 되므로 터널의 시공관리와 안전관리에 적극적으로 활용될 수 있을 것이다.

따라서 본 논문에서는 현장에서 계측된 터널의 3차원 절대 내공변위를 이용하여 막장전방에 파쇄대가 존재하는 경우에 이를 사전에 파악 할 수 있도록 지반의 거동양상을 파악하고, 이를 통하여 터널의 시공관리와 안전관리에 적극적으로 활용될 수 있는 기준을 마련하고자 하였다. 이를 위하여 막장전방 지반조건의 변화에 따라 터널내공변위의 변화 양상과 그 해석방법에 대하여 연구를 수행하였다.

2. 터널의 3차원 변위 해석방법

2.1 터널 천단부의 축방향변위/수직변위 비

Schubert 등 (1996)은 터널 천단부의 절대 변위 측정 결과로부터 새로운 계측 결과의 활용 기법을 제시하였다. L값을 천단부 (crown)에서의 터널 종방향 변위라 하고, C값을 터널 내부로의 수직 변위라 하면 다음의 그림 1과 같이 L과 C의 비를 이용하여 변위 양상이 막장면과 이루는 각도, 내공경사각 (α)을 정의할 수 있다. 막장전방에 파쇄대나 공동이 존재하는 경우 천단부의 침하량 C값에 비해 L값이 크게 증가하므로 내공경사각 (α= L/C)이 증가하게 된다. 그러므로 계측된 3차원 변위 데이터로부터 L/C 비의 변화를 구하면 막장 전방에 상대적으로 불량한 지반이 존재하는 지 파악할 수 있다. 다음의 그림 2에서는 경암에서 연암으로 굴착이 진행될 때의 L/C 값의 변화를 나타내고 있다.

2.2 영향선과 경향선

터널의 천단 침하량을 같은 시간에 각기 다른 측정지점에서 측정한 변위를 하나의 선으로 연결한 것을 영향선 (influence line)이라 정의하고, 영향선의 시작점에서 같은 거리만큼 떨어진 값들을 연결한 선을 경향선 (trend line)이라고 정의할 수 있다.

이때, 그림 3에서 볼 수 있듯이 파쇄대층에 막장이 접근해 감에 따라 천단의 축방향 변위나 수직 변위가 증가하여 영향선과 경향선의 모양에 변화가 생김을 볼 수 있다. 그러므로 영향선과 경향선을 이용하면 터널의 막장면 전방에 파쇄대층이 접근하고 있음을 파악할 수 있다.

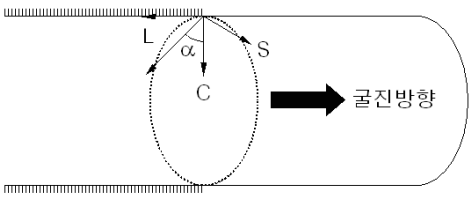


그림 1. 내공경사각 (α)의 정의

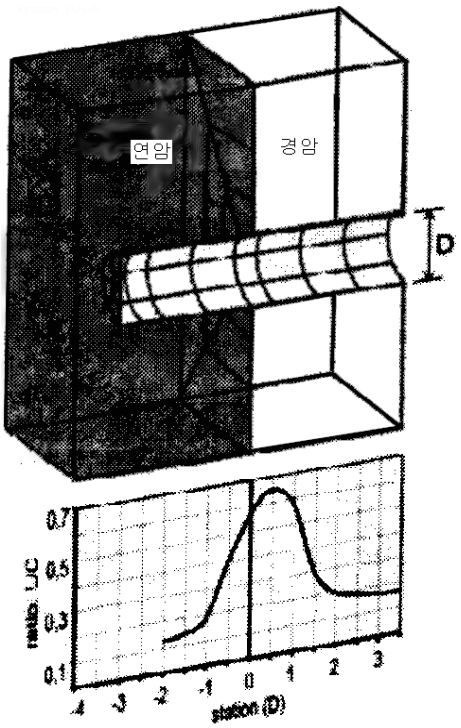


그림 2. 경암층에서 연암층으로 막장면이 접근할 때 L/C 비의 변화

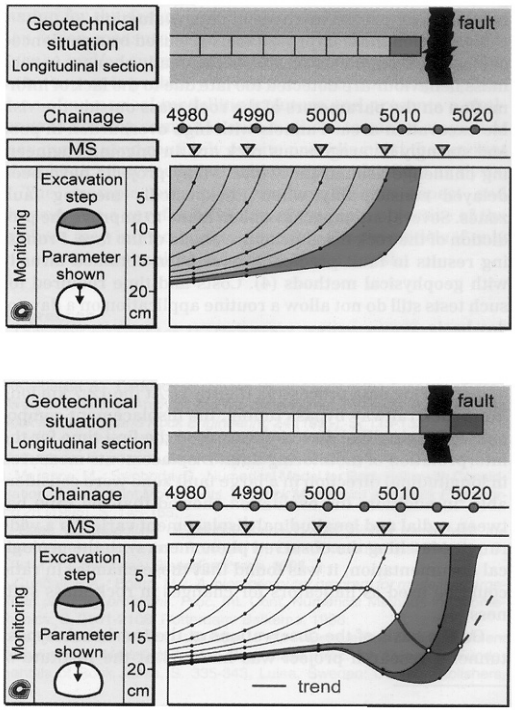


그림 3. 막장면이 파쇄대층에 접근할 때 영향선과 경향선의 변화

2.3 평사투영법

3차원 상의 절리를 2차원 평면에 모사하기 위하여 많이 사용하는 평사투영법을 이용하면 변위 벡터로부터 터널 막장 전방의 지반 변화를 예측할 수 있다.

그림 4는 터널 막장 전방에 파쇄대가 터널굴진 방향과 비스듬하게 존재할 경우 터널의 굴진에 따라 나타나는 3차원 변위벡터를 평사투영도 상에 나타낸 결과이다. 여기서 터널 굴진방향은 N(북쪽)으로 가정하였으며, D는 파쇄대로부터 막장면까지의 거리를 나타낸다.

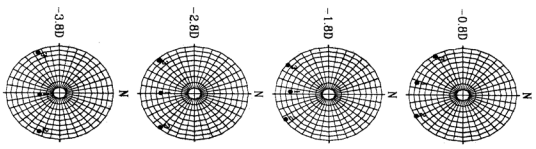


그림 4. 평사투영법을 이용한 3차원 내공 변위 투영 방법

그림 4에서 알 수 있듯이 막장이 파쇄대에 접근할수록 터널의 절대 내공변위는 증가하는 경향을 나타내며, 또한 파쇄대와 터널 굴진방향의 교차각 영향으로 인하여 내공변위의 방향이 변화 함을 알 수 있다. 이는 터널 굴착에 따른 축방향 하중전이 효과에 의해 보다 연약한 파쇄대쪽의 지반이 굴착면 안쪽으로 밀려들어와서 L/C 비가 커지는 동시에, 변위들의 방향도 터널 굴진 방향과 파쇄대의 교차각의 영향으로 부분적으로 아칭(arching)이 작아지는 구간이 발생하게 되어 동일한 위치에서의 변위량이 다르게 나타나기 때문이다. 따라서 평사투영법을 통해 3차원 변위벡터 방향의 변화를 파악한다면 파쇄대의 방향성을 예측할 수 있다.

그림 5는 각 지점에서 측정한 3차원 내공 변위를 식 (1)과 (2)를 이용하여 평사투영도 상에 나타낸 것이다 (Priest 1993).

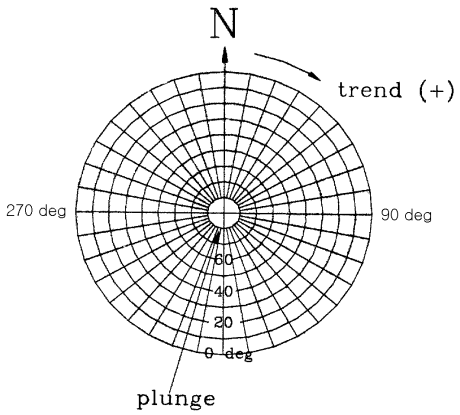


그림 5. 평사투영도를 이용한 3차원 변위 투영

$$trend = \tan^{-1}\left(\frac{u_x}{u_y}\right) + Q \quad (1)$$

$$plunge = \tan^{-1}\left(\frac{u_z}{\sqrt{u_x^2 + u_y^2}}\right) \quad (2)$$

u_x, u_y, u_z는 x, y, z 방향 변위 벡터의 성분이다. x는 수평방향, z는 연직방향, y는 터널축방향을 나타낸다. 여기서 Q값은 u_y, u_x에 의해 아래와 같이 결정된다.

Q	u_y	u_x
0°	≥0	≥0
180°	〈0	≥0
180°	〈0	〈0
360°	≥0	〈0

3. 터널굴착과 파쇄대의 모델링

3.1 해석조건과 해석망

터널 굴착시 막장이 파쇄대에 접근함에 따라 터널의 내공변위의 변화 양상을 파악하고 이를 이용하여 막장전방에 존재하는 파쇄대의 존재 및 방향성을 예측하기 위하여 컴퓨터 프로그램 BEFE - FEM과 BEM의 혼합모델 -를 사용하였다. 이 프로그램은 복잡한 형상의 지반조건과 시공단계를 모델링 할 수 있고 불연속면과 초기

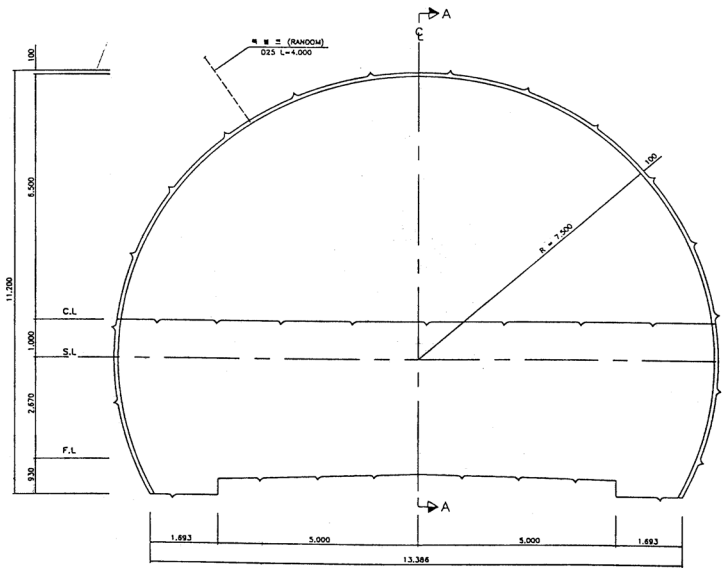


그림 6. 표준단면

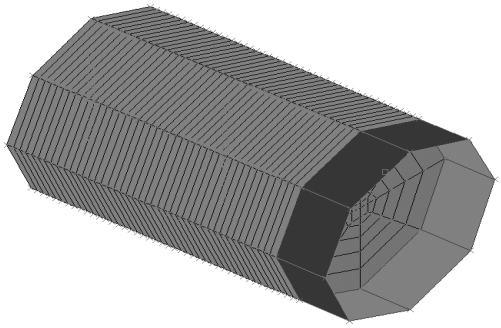


그림 7. 해석망

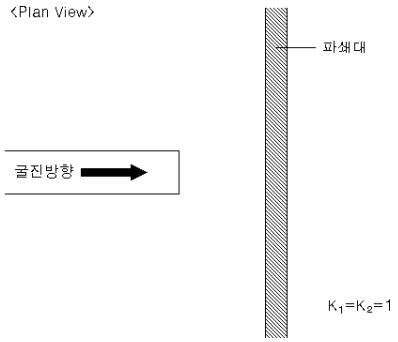


그림 8. 해석 조건 (K1=K2=1, strike = 90 °)

응력의 다양한 입력이 가능하다. 이 모델은 경계조건의 입력이 필요 없으므로 유한요소법에 비해 더 작은 수의 요소로도 좋은 결과를 얻을 수 있다. 지반은 약 2160개의 노드와 1890개의 요소들로 이루어진 3차원의 연속체로 모델링 하였으며, Mohr-Coulomb 파괴규준을 사용하였다. 본 연구에서 사용된 해석망은 그림 7과 같다.

4. 3차원 수치해석 결과

막장전방에 존재하는 파쇄대의 조건을 변화시켜 해석을 수행하였으며, 해석조건에 따라 3차원 내공변위의 변화 양상을 파악하였다.

4.1 파쇄대의 영향

균질한 등방성 지반에서 파쇄대가 터널축과 수직으로 교차할 경우 3차원 변위벡터의 변화를 파악하기 위하여 그림 8과 같은 경우에 대해 수치해석을 실시하였다. 이 경우에 대한 해석결과를 살펴보면 L/C 비의 변화는 막장전방 약 3R 되는 지점에 파쇄대가 존재할 때 급격히 증가하는 경향을 나타내었으며 평사투영도에 나타난 변위를 살펴보면 막장이 파쇄대에 접근할수록 내공경사각의 증가로 인하여 벡터진행선은 평사투영도의 외부로 이동함을 알 수 있다. 이러한 해석결과는 다음의 그림 9와 그림 10에 나타내었다.

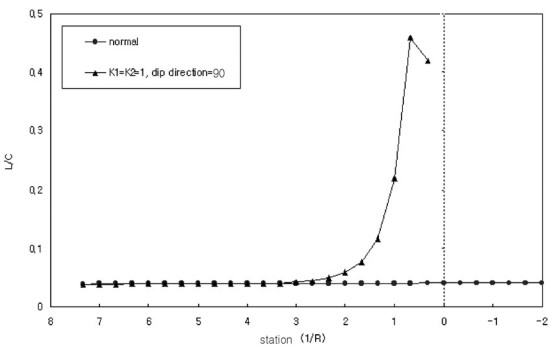


그림 9. L/C 비 (K1=K2=1, strike = 90 °)

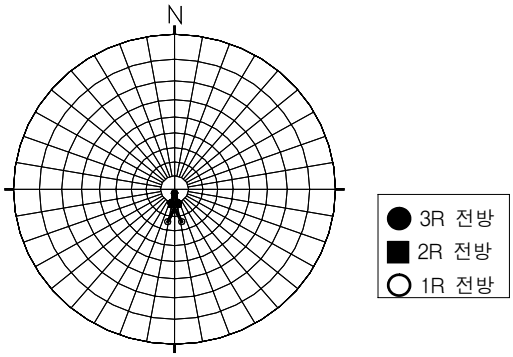


그림 10. 평사투영도 (K1=K2=1, strike = 90 °)

4.2 파쇄대 방향의 영향

파쇄대가 터널축과 비스듬히 만나는 경우 터널의 3차원 변위의 변화 양상을 파악하기 위하여 다음의 그림 11에 나타낸 바와 같은 단면에 대하여 해석을 수행하였다.

그림 11에 나타낸 단면에 대하여 해석을 수행한 결과를 살펴보면 L/C비의 경우 앞에서 언급한 수직으로 교차하는 경우와 마찬가지로 막장이 파쇄대에 접근함에 따라 급격하게 증가하는 경향을 나타내고 있다. 또한, 해석결과에서 얻은 변위를 평사투영도에 나타내면 교차각이 135°일 경우에는 변위 벡터들의 trend가 90°이상이 되어 막장면이 파쇄대에 접근할수록 벡터 진행선이 서쪽으로 돌아가고 있음을 확인할 수 있다. 또한, 교차각이 45°일 경우는 그림 13에 나타낸 바와 같이 변위 벡터들의 trend가 90°보다 작아지게 되어 막장면이 파쇄대에 접근할수록 벡터 진행선이 동쪽으로 돌아가게 된다. 이는 교차각이 135°인 경우에 천단과 양 측벽 변위의 x축 성분이 파쇄대에 가까워질수록 (-)방향으로 크게 증가하고, 교차각이 45°인 경우에 변위의 x축 성분이 (+)방향으로 크게 증가하기 때문이다.

지금까지의 해석 내용을 정리하면 다음과 같다.

1) 파쇄대에 접근할수록 L/C 비는 뚜렷이 증가한다.

2) 평사투영도를 이용하면 파쇄대의 방향을 예측할 수 있다. 벡터 진행선이 서쪽을 향해 돌아가면 이는 strike이 90°~180° 사이인 파쇄대가 전방에 존재하는 것이고, 동쪽을 향해 돌아가면 이는 strike이 0°~90° 사이인 파

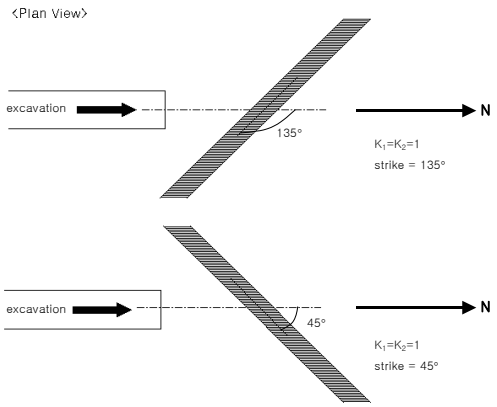


그림 11. 해석 조건 (K1=K2=1)

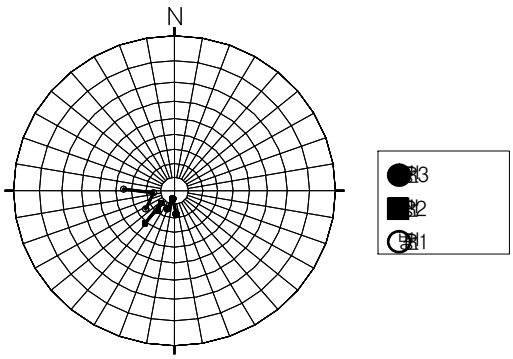


그림 12. 평사투영도 (strike = 135 °)

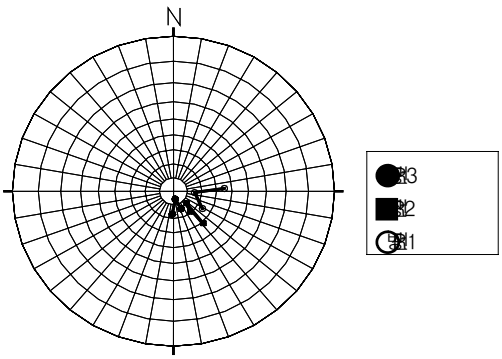


그림 13. 평사투영도 (strike = 45 °)

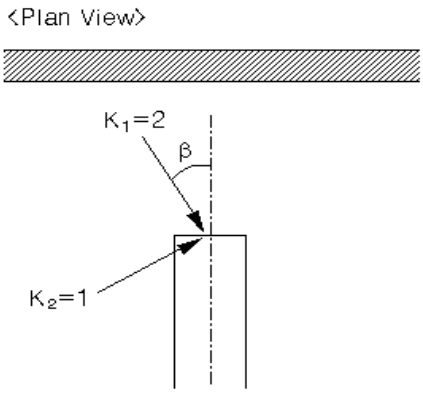


그림 14. 해석조건 (strike = 90 °)

쇄대가 존재하는 것이다.

5. 현장 데이터의 경향선 분석

5.1 현장 데이터의 경향선과 지반조사결과의 비교

본 연구에서 수행한 터널의 절대내공변위 분석기법을 실제 현장에서 얻어진 계측 결과와 비교분석을 실시하였다. 이를 위하여 실제 터널이 시공되고 있는 3구간의 지반조사 결과와 계측 데이터에 대한 분석을 실시하였다. 분석은 앞에서 제안한 바와 마찬가지로 계측데이터에 대한 경향선 및 영향선을 작도하고 해석결과와 비교하여 지반조사 결과와 일치하는 지를 파악하였다.

5.1.1 현장 No.1 (STA 230K+510~950)

지반조사 보고서에 의하면 지표지질조사결과 STA 230K+750 지점에 단층이 존재하는 것으로 파악된다. 따라서, 본 구간에서 실시한 계측결과를 해석결과와 비교하여 막장전방 지반변화 예측가능성을 살펴보았다.

계측결과를 이용한 경향선 및 영향선은 다음의 그림 18에 나타내었다. 그림 18에서 알 수 있듯이 STA 230K 600~660 사이의 경향선 모양이 크게 변화 하는 것으로 나타났으며, 이는 단층의 경사의 영향으로 인하여 지표지질조사 결과보다 조금 더 빨리 경향선 및 영향선의 변화가 발생한 것이라 판단된다.

5.1.2 현장 No.2 (STA 234K+520~980)

터널 탄성파 탐사의 결과에 의하면 234K +845~945 지점에 파쇄대가 존재하며, 전기비저항 탐사의 결과에

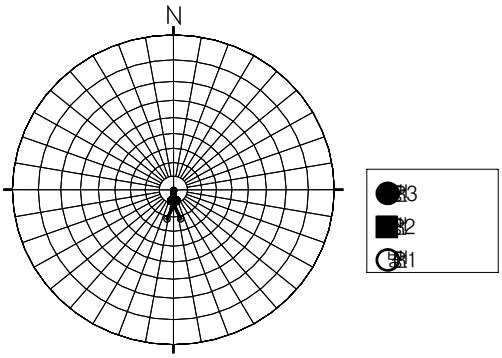


그림 15. 평사투영도 (K1=2, K2=1, β =0 ° , strike=90 °)

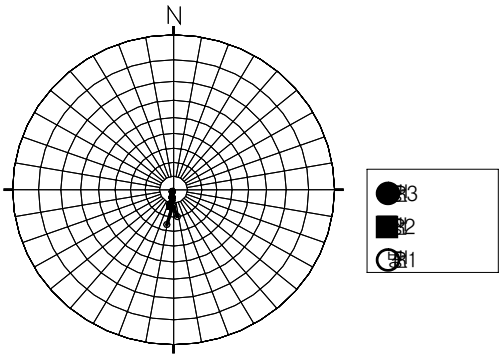


그림 16. 평사투영도 (K1=2, K2=1, β =30 ° , strike=90 °)

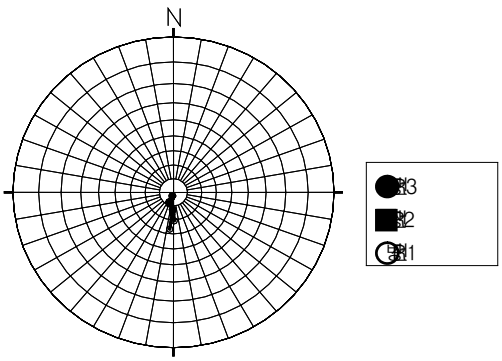


그림 17. 평사투영도 (K1=2, K2=1, β =60 ° , strike=90 °)

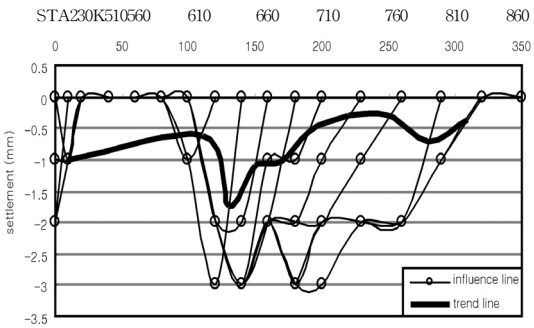


그림 18. 현장 1의 구간 230K 510-950의 영향선과 경향선

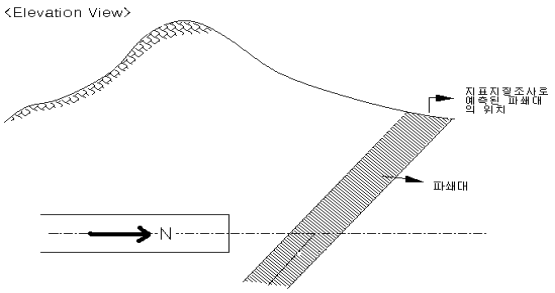


그림 19. 파쇄대의 경사가 남쪽(S)를 향할 때의 지반형상

의하면 234K+940 지점에 풍화대가 존재하는 것으로 조사되었다.

현장 계측 결과를 이용하여 작도한 경향선은 그림 20에 나타내었으며 그림 20에서 알 수 있듯이 약 STA 234K+800 지점부터 변위가 증가하여 경향선의 형태가 급격히 변화 함을 알 수 있다. 따라서, 이러한 경향은 수치 해석을 통하여 얻은 결과와 터널 탄성파 탐사, 전기비저항 탐사 결과와 일치함을 알 수 있다.

5.1.3 현장 No.3 (STA 240K+260~STA 239K+810)

지표지질조사의 결과에 의하면 STA 239K+850 지점에 단층이 존재하는 것으로 조사되었다. 그림 21에 나타낸 경향선을 살펴보면 약 STA 239K+970 지점부터 경향선이 크게 변화하는 것으로 나타났다. 이는 지표지질조사의 결과와 합치한다고 할 수 있다.

5.2 파쇄대 예측을 위한 현장 데이터의 경향선 해석방법

앞에서 언급한 바와 같이 터널 막장이 파쇄대에 접근함에 따라 아칭 현상에 의하여 천단변위가 크게 증가하게 된다. 이러한 천단변위의 증가로 인하여 경향선의 모양이 변화하게 되므로, 현장의 계측 데이터에 대해 경향선 분석을 수행하면 전방 지반변화의 예측이 가능할 것으로 사료된다. 그러나 현장에서 수행한 계측결과는 계측 장비의 오차, 계측을 수행하는 기술자에 의한 계측 오차 등으로 인하여 수치 해석결과와는 다른 형태의 경향선 및 영향선을 나타내게 된다. 따라서, 이러한 오차를 제거하고 변동이 심한 계측결과를 합리적으로 평가하기 위한 방법이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 계측시 발생하는 오차가 정규분포한다고 가정하고 정규분포하는 계측 데이터의 평균과 표준편차를 이용하여 데이터의 변동 범위를 산정하였으며 이를 이용하여 해석방법을 제시하고자 하였다.

이러한 해석 방법을 이용하여 앞에서 언급한 실제 터널 현장 2, 3에 대하여 파쇄대 예측을 위한 경향선 분석을 실시하였다.

그림 22은 현장 2의 데이터를 분석한 것이다. 이 경우에 초기의 7점의 표준편차 σ를 구하면 0.445이므로 계측치 변동범위는 0.11~1.89 ($1\pm2\times0.445$)로 산정 할 수 있다. 따라서 경향선이 이 범위를 벗어나면 막장 전방에 이상대가 존재하는 것으로 간주할 수 있을 것이다. 따라서, 그림 22에 나타낸 바와 같이 현장 계측치에 대한

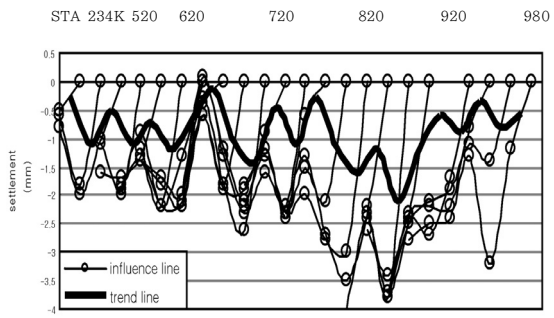


그림 20. 현장 2의 구간 STA 234K 520-980의 영향선과 경향선

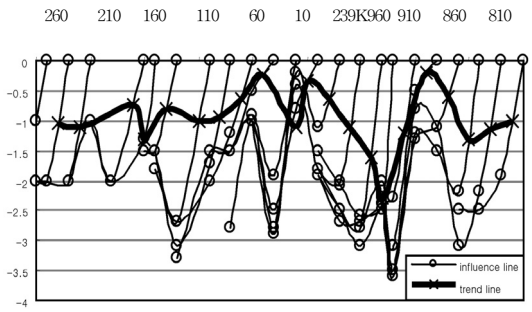


그림 21. 현장 3의 구간 STA 240K 260-239K 810의 영향선과 경향선

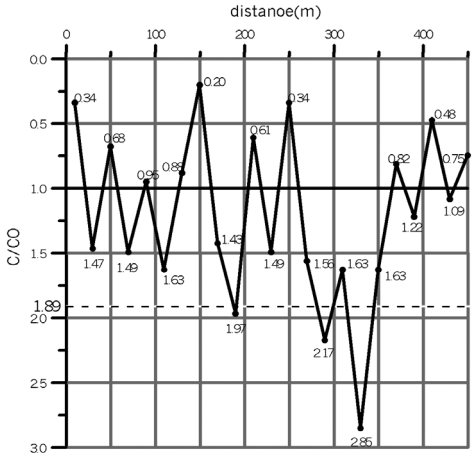


그림 22. 현장 2의 경향선 분석

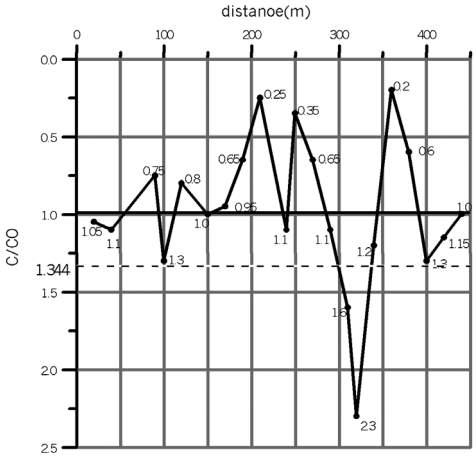


그림 23. 현장 3의 경향선 분석

경향선을 분석하면 STA 234K+820~910 지점에 파쇄대가 존재하는 것으로 분석할 수 있다.

또한, 그림 23은 현장 3의 계측데이터를 분석한 것으로써 STA 239K+950~860 지점에 연약대가 있는 것으로 분석 할 수 있다.

따라서, 상기한 바와 같이 현장 계측결과에 대한 영향선 및 경향선 분석을 통하여 막장 전방의 지반조건 변화를 예측할 수 있다. 그러나, 정규분포하는 계측치의 평균과 표준편차를 이용하는 경우 계측치의 변동범위를 결정하는 상수는 각각의 현장 계측시 발생하는 오차의 크기에 따라 달라지게 될 것이다.

6. 결론

터널 3차원 수치해석을 실시하여 막장 전방에 파쇄대가 존재할 때 변위 벡터의 변화와 해석 기법, 이를 이용한 전방 예측에 대하여 연구를 수행하였다. 수치해석에서는 파쇄대가 터널축과 비스듬히 만날 때와 초기지중응력의 주응력 방향이 터널축과 일치하지 않을 경우의 파쇄대에 의한 터널 내공변위 벡터의 변화를 살펴보았으며, 실제 현장 데이터에 대해 경향선 분석을 실시하였다. 이로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

표 1. 현장 계측 데이터의 분석

	지반조사 결과 연약대 위치	계측 결과	비고
현장1	230km 750	230km 640	dip이 남쪽을 향하는 파쇄대일 경우 **합치**
	231km 100-125	데이터 부족	
	231km 175-200	데이터 부족	
	231km 360	데이터 부족	
	231km 600-610	데이터 부족	
	231km 765	데이터 부족	
현장2	234km 940	234km 880	**합치**
	234km 845, 866, 877	234km 880	**합치**
	234km 906, 947, 955	234km 880	**합치**
현장3	239km 850	239km 900	**합치**

1. 파쇄대 strike의 변화나 초기지중응력 방향의 변화에 무관하게 파쇄대에 접근할수록 L/C 비는 뚜렷이 증가한다.
2. 평사투영도를 이용하면 파쇄대의 방향을 예측할 수 있다.
3. 현장 데이터의 경향선 분석 결과와 지반 조사 결과가 합치하였다.
4. 현장 데이터의 경향선 분석으로 전방의 지질 조건을 예측하는 것이 가능하다.

참고문헌

1. 이인모, 박광준, 강기돈, "터널 막장 전방의 지반 변화 예측에 관한 연구", 한국지반공학회 봄 학술발표회논문집, pp.161-170, 1997. 03.
2. 이인모, 손영진, 박광준, "터널 막장 전방의 지반 변화 예측을 위한 3차원 해석", 대한토목학회논문집, 18권, III-4호, pp.505-519, 1998. 04.
3. 이인모, 김돈희, 이석원, 박영진, 안형준, "파쇄대 예측을 위한 터널의 3차원 수치해석", 한국지반공학회 논문집, 15권, 4호, pp.99-112, 1999. 01.
4. Schubert, P. and Vavrovsky, G. M. (1994), "Interpretation of Monitoring Results", World Tunnelling, November.
5. Albert, F. S., Schubert, W., and Rabensteiner,K. (1995), "Problemorientierte Auswertung Geotechnischer Messungen", Felsbau, Vol.13, Nr. 6, pp.386-390.
6. Lunardi, P. (1995), "Preconfinement of an Excavation in Relation to New Orientations towards the Design and Construction of Tunnels", Periodico della Societå Italiana Gallerie, Anno XVII-N. 45, pp.16-37.
7. Schubert, W. and Budil, A. (1996), "The Importance of Longitudinal Deformation in Tunnel Excavation", 8th International Congress on Rock Mechanics, Vol.3.
8. Schubert, W. and Steindorfer, A. (1996), "Selective Displacement Monitoring during Tunnel Excavation", Felsbau, Vol. 14, Nr. 2.
9. Schweiger, H. and Beer, G. (1996), "Numerical Simulation in Tunnelling—An Overview of Different Computational Models with Emphasis on Practical Applicability", Felsbau, Vol.14, Nr. 2.
10. Steindorfer, A. (1998), Short Term Prediction of Rock Mass Behavior in Tunnelling by Advanced Analysis of Displacement Monitoring Data, Ph.D Thesis. Department of Civil Engineering, Technical University Graz.

이인모

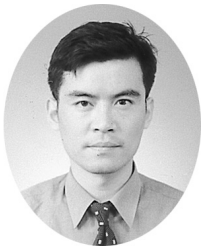
고려대학교 공과대학 토목환경공학과 교수
inmolee@korea.ac.kr

이승주

고려대학교 토목환경공학과 석사과정 졸업
pollini29@hotmail.com

이주공

고려대학교 토목환경공학과 박사과정 수료
jowhb@korea.ac.kr



이대혁

SK 건설(주) 연구소 선임연구원
dhlee-d@skec.co.kr