

막장 전방 파쇄대 예측을 위한 터널의 3차원 모델링

3-Dimensional Simulation for the Prediction of Fault Zones Ahead of the Tunnel Face

이인모¹⁾, In-Mo Lee, 김돈희²⁾, Don-Hee Kim, 박영진³⁾, Young-Jin Park, 안형준⁴⁾, Hyung-Jun An

¹⁾ 고려대학교 토목환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engrg., Korea Univ.

²⁾ 고려대학교 대학원 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Korea Univ.

³⁾ 코오롱건설(주) 기술연구소 차장, Deputy Manager, Institute of Kolon Const. Co., LTD

⁴⁾ 코오롱건설(주) 기술연구소 대리, Senior Researcher, Institute of Kolon Const. Co., LTD

SYNOPSIS : An analytic method to predict the existence of fault zones ahead of a tunnel face by analyzing absolute displacements of a tunnel in 3-dimension is presented with the condition of initial stress changes. The excavation of the tunnel in a stable rock mass causes a 3-dimensional arching effect around the excavation face. The fact, that the existence of fault zones will make a typical displacement tendency, is observed by the 3-dimensional analysis. The ratio of L/C (longitudinal displacement divided by settlement at crown), S/C (horizontal displacement at sidewall divided by settlement at crown) and (Ll-Lr)/C (difference between L values in left and right sidewalls divided by settlement at crown) can be used for predicting the existence of fault zones ahead of the tunnel face. In addition, the stereonet plotting of displacement vectors brings a better understanding of geomechanical profiles ahead of the tunnel face.

Key words : 3-dimensional absolute displacements, 3-dimensional arching effect, L/C, S/C, influence line, trend line, stereonet, fault zones

1. 서론

지하암반은 여러 가지 지구 물리학적 활동에 의해 많은 불연속면을 갖고 있으며, 여러 가지 지질학적 활동으로 불규칙한 초기 지압이 내재되어 있는 불균질한 이방성의 매질이다. 지반에 인위적인 지하공간(터널)을 형성하게 되면 새로운 평형을 찾으려는 응력의 재배치가 발생하게 되는데 불연속면의 영향으로 터널주위 암반의 안정성에 위험을 줄 수도 있다. 막장 전방에 파쇄대등의 불연속면이 존재할 경우, 이를 미리 예측하지 못한채로 굴진을 하게 되면 파쇄대로 인해 종방향 아칭에 영향을 주어 터널의 안정성에 심각한 문제를 야기할 수 있다. 터널 및 지하공간의 설계시에는 불확실한 설계요소를 과다하게 내포하고 있으므로 경제적이고 안정성이 확보된 터널 시공을 위해서는 터널 막장면에서의 정확한 계측으로 막장 전방의 파쇄대를 예측하여 터널 지보체계에 신속히 대비함이 필요하다. 근래에 도입된 터널의 3차원 절대좌표계측에 의하면 터널의 시공성을 저하시키지 않으면서 기존방법보다 정밀한 계측 결과의 확보가 가능하고, 2차원 평면상에서 발생하는 변위뿐만 아니라 3차원적인 터널축방향 변위측정이 가능하여, 터널의 시공시 굴진에 따라 지반의 강도차이로 인해 발생된 3차원 절대내공변위의 변화양상으로부터 막장 전방의 불연속면을 미리 예측할 수 있다고 연구되었다(이 등, 1997, Schubert 등, 1996).

따라서, 본 연구는 유한요소(Finite Element)와 경계요소(Boundary Element)를 이용한 혼합법(Hybrid

Method)에 의해 3차원 수치해석을 수행함으로써, 지반의 강성차이가 큰 파쇄대가 막장전방에 존재할 때에 대하여 여러 가지 초기 지중응력 분포의 변화에 따른 3차원 절대내공 변위의 양상을 여러 가지 방법으로 분석하여 파쇄대를 예측함으로써 터널시공에 있어 효율적인 정보화 시공을 위한 근간을 마련하고자 한다.

2. 3차원 절대 변위 계측의 모델링 및 해석방법

2.1 3차원 절대 변위 계측의 모델링

본 연구에서는 지반조건이 균질한 경암지역에 파쇄대가 존재할 때로 가정하였으며 터널 직경은 10m이고 1회 굴진장은 2.5m(1/4D)로 하였다. 터널 굴착에 있어서 막장면이 위치하는 곳에서보다 전방에서 즉, 굴착이 되지 않은 위치에서도 변위가 발생하기 시작한다. 수치해석 모델링시 타겟 설치전에 지반에 발생한 선행변위를 제거하여야 실제 계측과 동일한 조건을 부여할 수 있으므로, 계측점을 터널 막장면에서 1회 굴진장(2.5m)뒤의 위치로 잡고 그때까지 누적된 변위를 소거하여 이 점을 영점으로 삼았다. 이 점을 시작으로 굴착이 진행함에 따라 누적되는 변위를 읽어나갔다.

2.2 3차원 절대 변위의 해석방법

터널이 굴진해 감에 따라 계측점이 설치되는 곳이 많아지고 같은 시간에 측정한 각 계측점에서의 변위를 연결한 것이 영향선이다. 이 영향선들의 원점에서 일정거리 떨어진 곳의 값들을 연결한 것이 경향선이며, 본 연구에서는 원점에서 2.5m 뒤의 경향선을 이용하였다. L은 천단부에서의 종방향변위이며 반굴진방향을 양(+)으로 하였고, C는 천단부의 침하량이며 하방향을 양(+)으로 하였다. 그리고 S는 측벽부에서의 내공변위를 나타내고 터널중심방향을 양(+)으로 하였다. L, C, S와 같은 값들은 이러한 경향선에서부터 얻어진 값이다. 즉, L/C는 천단의 종방향 변위에 대한 경향선의 각 위치에서의 값을 천단의 종방향 변위에 대한 각 위치에서의 값으로 나눈 값이다.

3. 여러 가지 초기 지중응력조건에서 파쇄대 예측을 위한 터널의 3차원 수치해석

3.1 해석 Program

본 연구에서는 초기지중응력조건이 다를 때, 막장전방에 존재하는 파쇄대로 인한 터널의 굴진에 따른 변위양상을 고려하기 위해 유한요소법(Finite Element Method), 경계요소법(Boundary Element Method) 및 혼합법(Hybrid Method)을 모두 적용할 수 있는 수치해석 프로그램인 BEFE를 이용하였다. 본 프로그램은 특수한 형상의 지반 및 복잡한 시공단계의 모델링이 가능하며, 탄성 및 점-소성해석이 가능하다. 경계요소를 이용하여 불연속면을 자유롭게 묘사할 수 있고, 초기 지중응력을 여러 가지 형태로 입력할 수 있다. 본 논문에서는 혼합법을 사용하여 터널에서 2.5D 영역까지 유한요소로 모델링하고 유한요소 주위는 경계요소로 모델링하여 무한한 영역의 지반을 묘사했다. 이로 인해 경계조건은 입력할 필요가 없고 작은 수의 요소로 모델링할 수 있었다. 지반은 2200여개의 절점과 900여개의 요소로 이루어진 3차원 연속체로 모델링하였고 응력-변위특성은 탄소성(Mohr-Coulomb)모델을 사용하였다.

3.2 지반 모델링

본 연구에 적용된 터널 심도는 50m이며 일반적인 변위의 경향을 파악하기 위해 직경(D) 10m의 원형

단면으로 하였다. 1회 굴진장은 2.5m(1/4D)로써 전단면 굴착을 수행하였고 파쇄대의 두께는 1/4D로 가 정하여 초기 지중응력이 다른 경우에 대하여 해석을 실시했다. 본 연구에 사용된 3차원 수치해석 요소 망은 다음 그림 1과 같다.

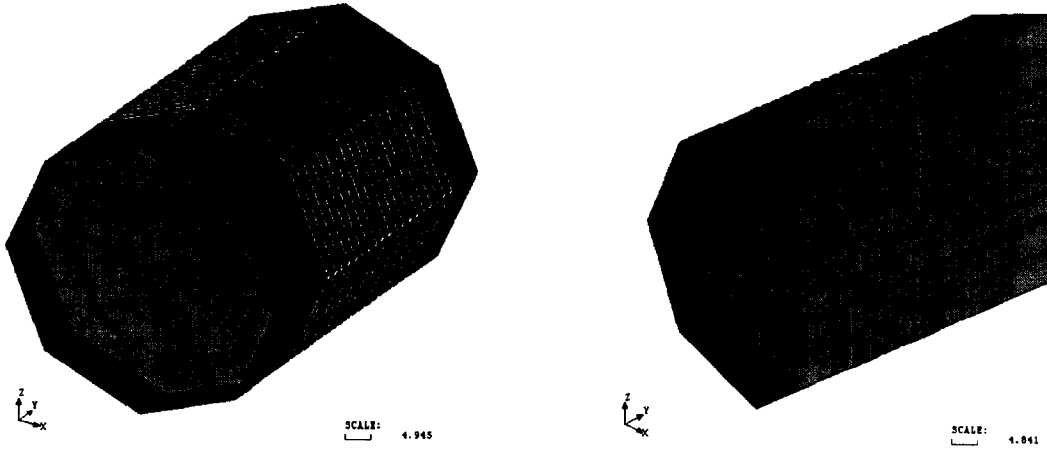


그림 1. 해석에 사용된 3차원 요소망 (유한요소-경계요소 조합)

3.3 지반 특성치

수치해석에 사용된 지반 특성치는 아래의 표 1과 같으며, 이는 서울지하철 및 한국지반공학회 터널분 과 위원회에서 추천하는 값을 이용하였다. 파쇄대의 탄성계수는 주변지반의 1/10으로 하였고 포아슨 비 는 두배로 가정하였다.

표 1. 수치해석에 사용된 지반의 특성치

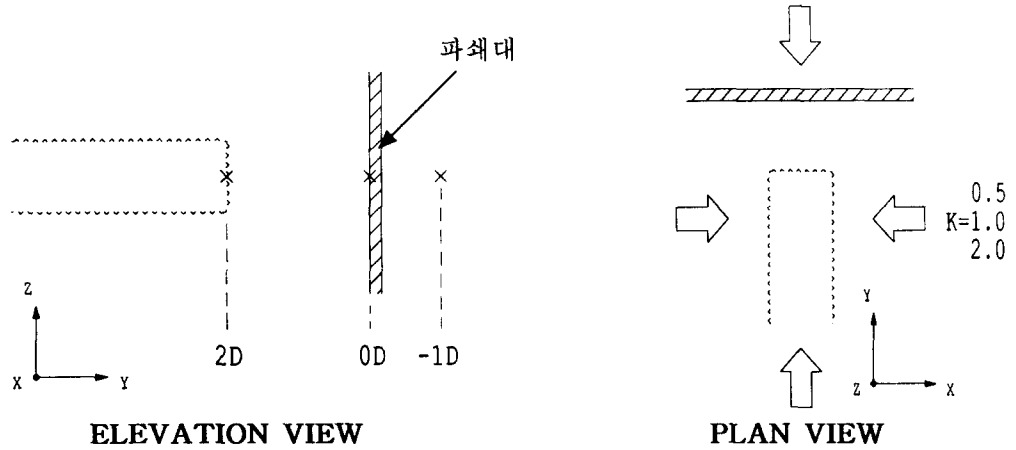
	경암	파쇄대
탄성계수, $E(t/m^2)$	500,000	50,000
포아슨비, ν	0.15	0.30
점착력, $c (t/m^2)$	50	10
내부마찰각, $\varphi (^{\circ})$	45	30

3.4 해석 조건

그림 1과 같이 Y를 터널축방향, X를 터널축에 직각인방향 그리고 Z를 연직방향으로 정했다. 그리고 X, Y방향의 초기 수평응력계수는 각각 K_x, K_y 로 나타내었다. X, Y, Z방향의 응력은 각각 횡방향응력, 축방향응력, 연직응력으로 나타내었으며 각 방향의 변위는 횡방향변위, 종방향변위, 침하라 하였다. 이 때 다음 4가지의 경우에 대하여 수치해석을 실시하였다(그림 2 참조).

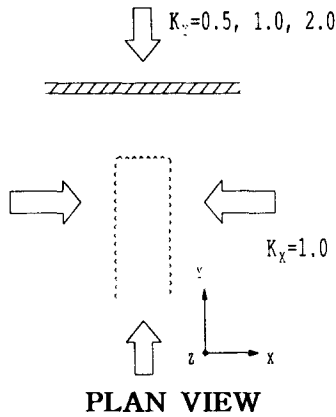
- 파쇄대의 두께가 다른 경우 - 파쇄대 두께의 영향을 알아보기 위하여 양방향 수평방향 지중응력비가 동일하게 0.5일 경우에 대해서 파쇄대의 두께가 각각 터널직경(D)의 1/4, 1/2, 1의 크기로 존재할 경 우에 대해서 해석을 실시하였다.
- 초기 지중응력비가 동일할 경우 - 초기지중응력비의 크기에 따른 영향을 알아보기 위하여 양방 향 초기 지중응력비가 서로 같고 그 크기가 각각 0.5, 1.0, 2.0일 경우에 대해서 해석을 실시하였다.
- 양방향 초기 지중응력비가 서로 다를 경우 - 수평방향 초기 주응력 분포가 터널축과 일치할 때 양방 향 응력의 크기가 서로 다를 경우 즉, K_x (X방향 수평응력계수)는 1.0이고 K_y (Y방향 수평응력계수) 가 각각 0.5, 1.0, 2.0일 경우에 대해서 해석을 실시하였다.
- 초기 지중응력이 터널축과 경사져 있을 경우 - 초기 수평방향 최대 주응력이 작용하는 방향과 터널 축방향(Y)과 이루는 예각을 β 라 정의하고, β 가 각각 0, 15, 30, 45, 60, 75, 90° 일 경우에 대해서

해석을 실시하였다. 이때 양방향 수평응력계수는 각각 1.0과 2.0이다.

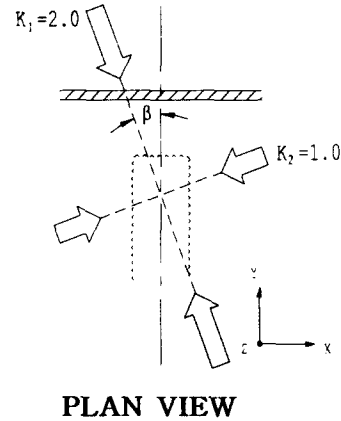


(a) 파쇄대의 위치

(b) 초기지중응력비가 동일한 경우



(c) 양방향 초기지중응력비가 다른 경우



(d) 초기지중응력이 터널축과 경사진 경우

그림 2. 해석 조건

4. 3차원 수치해석결과의 고찰

4.1 파쇄대의 두께가 다른 경우

굴착을 하게되면 아칭에 의해 막장전방에 응력이 집중되고, 막장면에서 멀어질수록 그 크기는 감소하게 되지만 일정 구간까지는 응력이 증가하게 된다. 파쇄대가 존재하게 되면 파쇄대 뒤쪽에서의 응력전 이량이 급격히 감소하고 막장 전방과 파쇄대 사이의 응력이 더욱 커지게 되어 종방향 변위가 증가한다.

그림 3은 파쇄대의 두께가 1/4D, 1/2D, 1D 로 다를 경우에 대하여 L/C를 나타낸 것이다. 파쇄대가 위치하는 곳을 점선으로 표시하여 0D로 하고 막장면과 파쇄대와의 거리를 터널직경으로 나누어서 station을 표시하였다. 파쇄대의 두께가 커질수록 파쇄대 뒤쪽 지반으로 아칭에 의해 전달되는 응력이 작아져서 파쇄대와 막장면 사이의 지반에 응력이 집중되므로 이로인해 종방향 변위가 더욱 크게 변화하여 L/C의 변화정도가 크다. 균질한 지반의 경우 L/C가 약 0.17정도로 일정하게 나타나는 반면 파쇄대가 존재할 경우 파쇄대가 존재하는 위치보다 약 2.0D전에서부터 증가하는 양상을 보인다. 또, 파쇄대의 두께가 1/4D, 1/2D, 1D로 존재할 경우에 L/C가 각각 0.283, 0.355, 0.420으로 파쇄대의 크기가 커질수록 뚜렷한 증가를 나타냈다. 반면에 그림 4에 나타낸 S/C는 터널이 파쇄대에 근접해갈수록 약간 감소하는

경향을 나타내었으나 균질한 지반에 비하여 변화가 크지않고 파쇄대의 두께에 대한 영향도 거의 없음을 알 수 있다.

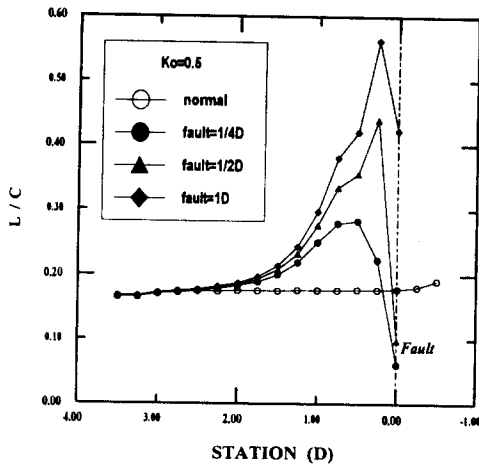


그림 3. 파쇄대 두께가 다를 경우의 L/C

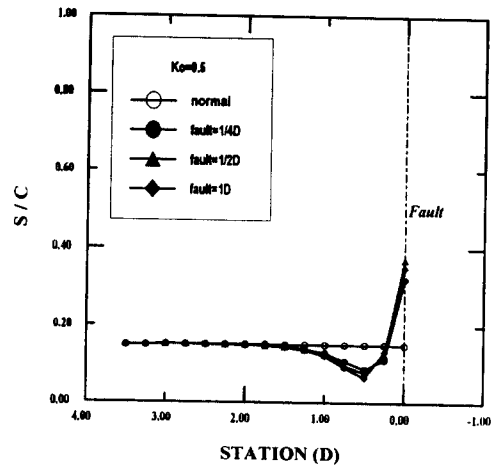


그림 4. 파쇄대 두께가 다를 경우의 S/C

4.2 초기 수평지중응력이 동일할 때

L 및 C의 경향선을 해석해보면 K_x 가 클수록 횡방향 응력이 큰 경우이므로 침하(C)가 줄어든다. 그리고, 굴착전부터 누적된 천단부의 총 침하량은 K_y 의 크기에 관계없이 거의 일정하다. 그러나, 초기 축방향 응력이 클수록(K_y 가 클수록) 막장면에서부터 누적되는 침하량은 크다(Pelli 1991). 이러한 영향으로 K_0 가 커짐에 따라 C는 조금 줄어드는 경향을 보인다. 이에 비해 경향선에 의한 종방향 변위(L)는 K_y 가 클수록 감소하는 경향을 나타내어서 K_0 가 커짐에 따라 L/C의 절대적인 크기가 줄어드는 양상을 보인다.

그림 5는 파쇄대가 존재할 경우 동일한 지중응력에서 K_0 가 0.5, 1.0, 2.0으로 변할 때의 L/C를 그린 것이다. 파쇄대가 존재할 경우 L/C가 터널 막장면에서 약 2.0D 전에서부터 커짐을 알 수 있다. K_0 가 커짐에 따라 L/C의 절대적인 값은 작아지나 파쇄대의 존재에 의한 L/C의 상대적인 변화의 크기는 더욱 커져서 그 경향을 뚜렷하게 파악할 수 있고, 그 변화도 2.5D 정도에서 발생하여 파쇄대의 존재를 보다 일찍 파악할 수 있다.

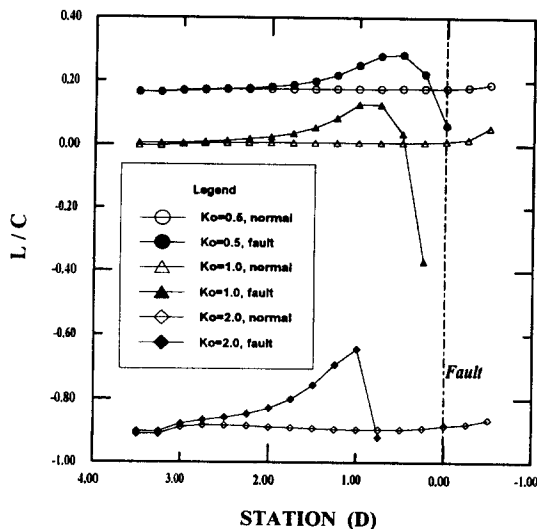


그림 5. 수평방향 초기지중응력의 크기가 동일할 경우의 L/C

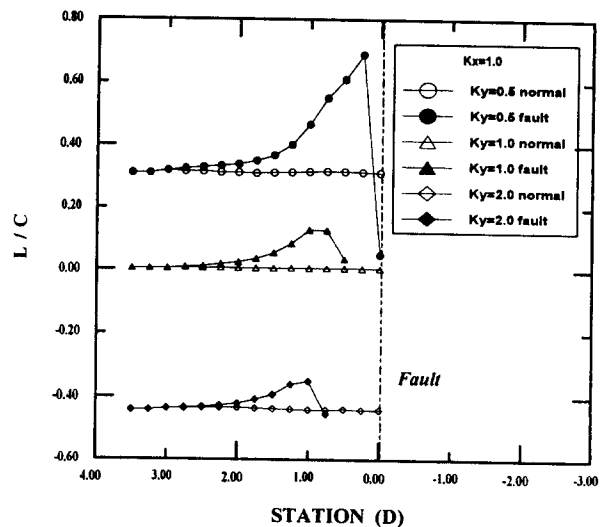


그림 6. 양방향 초기지중응력의 크기가 서로 다를 경우의 L/C

4.3 양방향 초기 수평지중응력의 크기가 다를 때

앞에서 설명한 것과 같은 원인으로 균질한 지반에서 K_Y 에 비해 K_X 가 클수록 L/C 값은 크다. 반대로, K_X 에 비해 K_Y 가 클수록 균질한 지반에서 L/C 값은 작다. 축방향 응력의 크기에 따른 종방향 변위의 차이는 다음 그림에서 알 수 있다. 그림 7은 K_X 는 1.0이고 K_Y 가 각각 1.0, 2.0일 경우에 균질한 지반에서 막장면이 0.75D와 0.5D로 진행했을 때 터널 굴착전부터 누적된 천단부 선상의 종방향 변위의 총합을 나타낸 것이고, 그림 8은 천단부의 축방향 응력을 나타낸 것이다. K_Y 가 클 경우 그림 8의 (b)에서처럼 터널굴착시 막장면에서 일정거리 뒤까지 큰 압축응력이 산출되고, 이 영향으로 막장면에서 일정거리 뒤쪽까지는 그림 7의 (b)에서처럼 굴진방향 즉 음의 L 이 발생할 수 있다. 하지만, 여기서도 종방향 변위의 총합은 반굴진 방향(+)으로 발생한다. L 값은 2.5m 경향선에 의해 구해졌으므로 L 의 값이 굴진방향 즉, 음으로 발생할 수도 있다. 따라서, K_Y 가 클수록 L/C 의 값이 전체적으로 작은 값을 가지게 되고, K_Y 가 2.0보다 커지게 되면 L 이 오히려 터널 굴진방향으로 발생하여 음의 값을 가지게 된다.

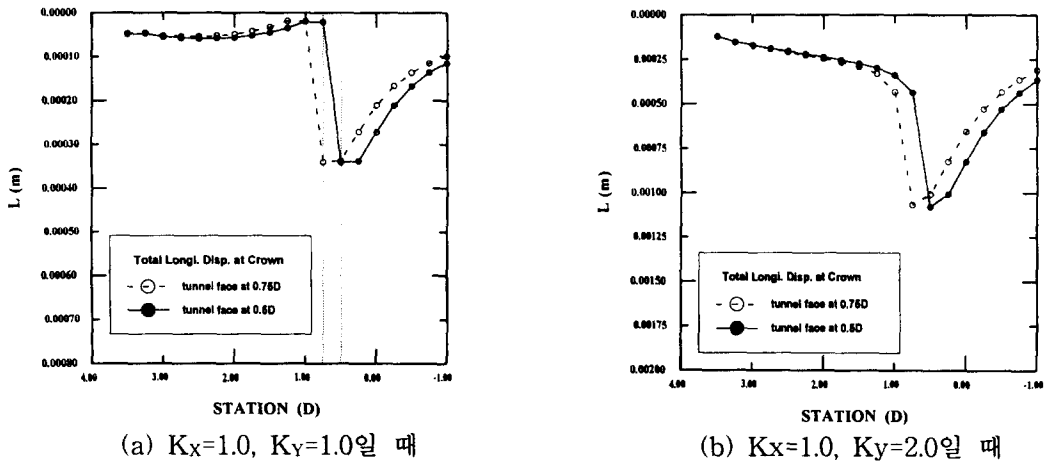


그림 7. 터널 천단부의 종방향 총변위의 변화 (터널이 0.75D에서 0.5D의 위치까지 굴진했을 때)

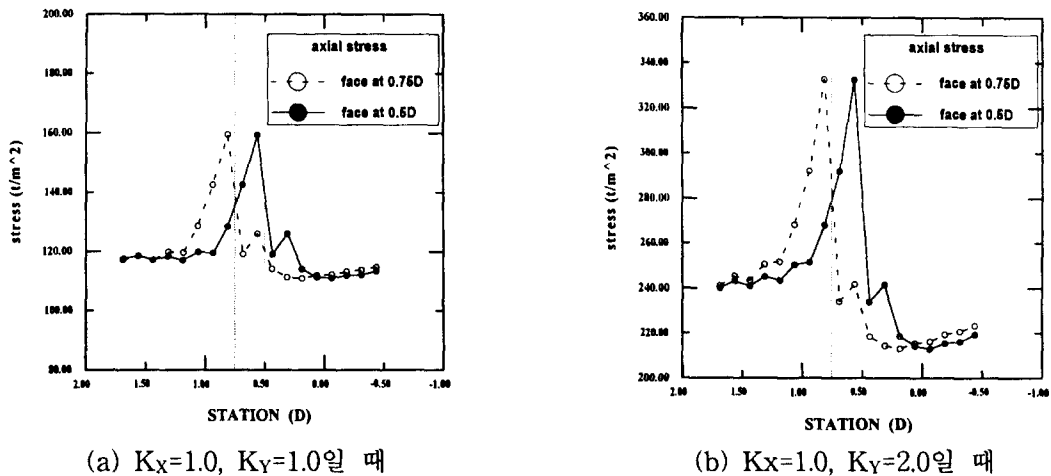


그림 8. 터널 천단부의 종방향 응력의 변화 (터널이 0.75D에서 0.5D의 위치까지 굴진했을 때)

파쇄대가 존재할 경우는 막장면 앞의 지반에 횡방향 응력과 연직 응력이 집중되므로 L 의 값이 증가하게 된다. 이 영향으로 음(-)의 L 이 산출되는 경우에도 작은 음의 값으로 변하게 되어 파쇄대에 의한 영향으로 인해 L/C 의 변화가 파악된다. 그림 6에서 보이듯이 각각의 경우에서 L/C 의 변화량은 0.371, 0.135, 0.104로써 L/C 에 의한 파쇄대의 예측이 가능하고, 이때 터널축방향(Y) 초기 지중응력이 작을수록 파쇄대에 의한 L/C 의 변화가 더욱 뚜렷하여 그 예측이 용이하다.

4.4 초기 수평지중응력의 터널축과 경사져 있을 때

실제 터널시공에 있어서는 수평방향 초기 지중응력의 분포가 터널축과 일치하지 않고 일정한 경사를 이루고있는 경우가 대부분이므로, 이러한 조건에 대한 해석을 실시하여 터널 굴착에 의한 변위를 파악하는 것이 필수적이다. 그림 9와 같이 터널축방향과 수평방향 최대 주응력이 이루는 각(β)이 45° 보다 클 경우는 터널축방향 응력이 보다 작은 경우이므로 L/C의 변화로부터 파쇄대의 예측이 용이하다. 그러나, β 가 45° 보다 작은 경우는 터널축방향 응력이 크게 작용하게 되므로 L/C의 변화가 뚜렷하지 못하다.

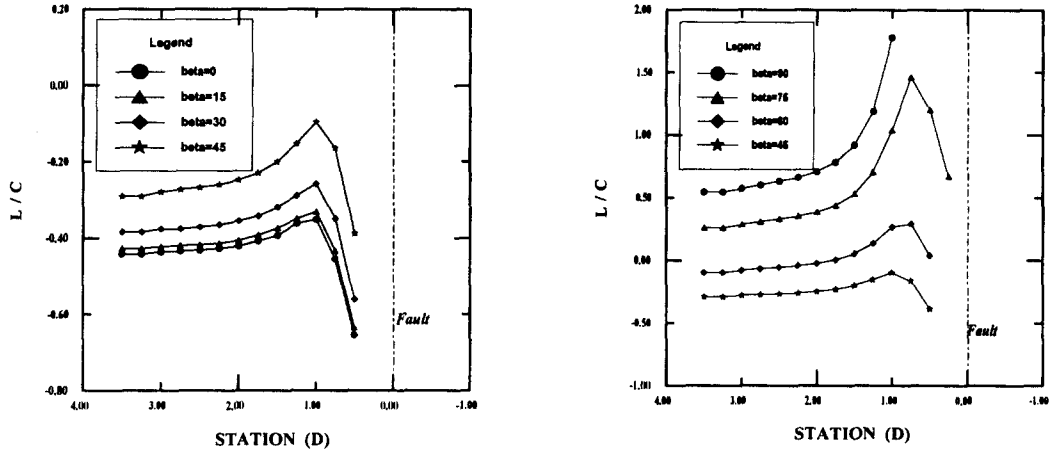


그림 9. 수평방향 주응력이 터널축과 경사져있을 경우의 L/C

이런 경우 파쇄대의 예측을 보다 용이하게 하기위해서 좌우 측벽부의 종방향 변위차와 천단의 침하량과의 비를 다음 그림 10에서 보였다. 주응력이 경사져 있을 경우 같은 station에서 좌우 측벽부의 응력은 서로 다르게 되고 이로인해 종방향 변위의 변화도 서로 다른 양상을 띄게 된다. 따라서, 수평주응력이 터널축과 경사져 있을 경우는 L/C와 $(L_l - L_r)/C$ 를 동시에 고려하면 보다 용이하게 파쇄대를 예측할 수 있게 된다.

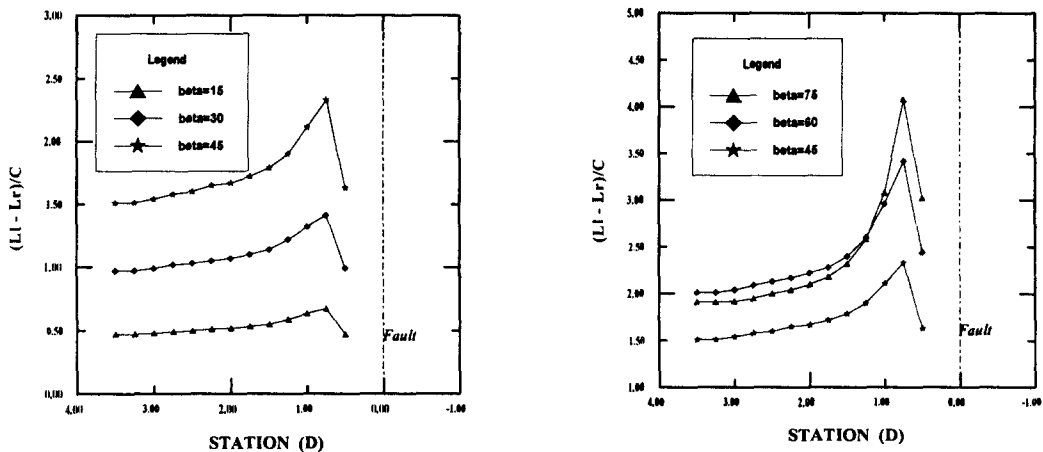


그림 10. 수평방향 주응력이 터널축과 경사져있을 경우의 $(L_l - L_r)/C$

다음 그림 11은 β 가 15° 일 경우에 대하여 파쇄대와외의 거리가 각각 3D, 2D, 1D일때의 천단 및 좌우측벽부의 변위를 평사투영한 그림이다. 여기서 1은 천단 2와 3은 각각 좌·우측벽부의 변위벡터이고 N은 터널의 굴진방향을 나타낸다. 이 경우 천단부 변위벡터의 변화보다 좌측벽 변위벡터의 변화가 크다. 그러므로, 초기지중응력이 경사져 있을 경우는 천단부 변위와 함께 측벽부의 종방향 변위를 분석함으로써 더욱 정확한 판단을 할 수 있다.

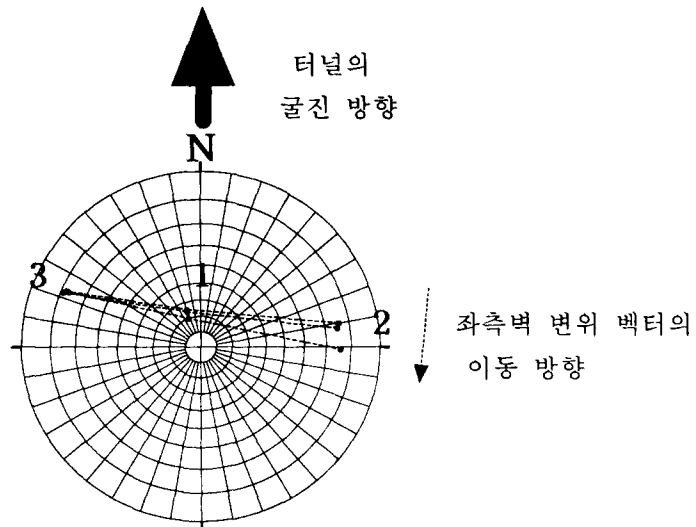


그림 11. 평사투영도에 의한 변위 벡터의 변화

5. 결론

- 1) 막장진방에 존재하는 파쇄대는 L/C의 변화를 파악함으로써 파쇄대가 존재하는 위치보다 약 2.0~2.5D 앞에서 미리 예측될 수 있는데 파쇄대의 두께가 클수록 그 변화가 뚜렷하다.
- 2) 양방향 수평지중응력의 크기가 동일할 경우 K_0 가 클수록 L/C의 변화가 더욱 크고 그 변화가 빨리 발생하여 파쇄대의 예측이 보다 용이하다.
- 3) 양방향 수평지중응력의 크기가 서로 다를 경우 터널축방향의 응력이 작을수록 파쇄대의 예측을 위한 L/C의 변화가 크다.
- 4) 수평방향 초기 주응력의 분포가 터널축과 일정한 각도를 이루고 있을 경우 파쇄대예측을 위해서는 측벽부의 종방향 변위에 대한 해석을 실시하여 L/C와 $(L_l - L_r)/C$ 를 동시에 고려하면 보다 효율적이다.

참고문헌

1. 이인모, 손영진, 박광준, 강기돈 (1997), " 터널막장진방의 지반변화예측에 관한 연구 ", 한국지반공학회지, '97 봄 학술발표회 논문집, pp.103~112.
2. 이인모, 박광준, 강기돈 (1997), " 터널막장진방의 지하공동 예측기법 개발 ", 한국지반공학회지, '97 가을 학술발표회 논문집, pp.161~170.
3. Lo, K. Y. (1984), " Interpretation of Stress-Displacement Measurements ", Proceedings, Geotech '84, ASCE, pp. 128~155.
4. Lunardi, P. (1995), " Preconfinement of an Excavation in Relation to New Orientations Towards the Design and Construction of Tunnels ", Periodico della Società Italiana Gallerie, Anno XVII-N. 45, pp. 16~37.
5. Pelli, F., Kaiser, P. K. and Morgenstern, N. R. (1991), " The Influence of Near Face Behaviour on Monitoring of Deep Tunnels ", Canadian Geotech. J., Vol. 28, pp. 226~238.
6. Pelli, F., Kaiser, P. K. and Morgenstern, N. R. (1991), " An Interpretation of Ground Movements recorded during Construction of the Donkin-Morien Tunnel ", Canadian Geotech. J., Vol. 28, pp. 239~254.
7. Rabensteiner, K. (1996), " Advanced Tunnel Surveying and Monitoring ", Felsbau, vol. 14, Nr. 2.
8. Schubert, W., and Budil, A. (1996), " The Importance of Longitudinal Deformation in Tunnel Excavation ", 8th International Congress on Rock Mechanics, Vol. 3.
9. Schubert, W., and Steindorfer, A. (1996), " Selective Displacement Monitoring during Tunnel Excavation ", Felsbau, Vol. 14, Nr. 2.