

파쇄대가 터널 주변 암반의 변형 거동에 미치는 영향에 대한 수치해석적 연구

김창용¹⁾, 김광염²⁾, 백승한^{3)*}, 문현구⁴⁾, 이승도⁵⁾

Numerical Analysis on the Effect of Fractured Zone on the Displacement Behavior of Tunnel

Kim, Chang-Yong, Kim, Kwang-Yeom, Baek, Seung-Han, Moon, Hyun-Koo
and Lee, Seung-Do

Abstract Anisotropic/heterogeneous rock mass shows various deformation behavior types due to tunnelling because deformation behavior is largely controlled by the spacial characteristics of geological factors such as faults, joints and fractured zone in rock mass. In this paper 2-dimensional numerical analysis on the several influencing factors is performed considering fractured zone located near tunnel. This numerical analysis shows that deformation behavior of tunnel are very different according to the width and the location of fractured zone and support method. However, 3-dimensional analysis is necessary to consider 3-dimensional geometrical characteristics sufficiently since discontinuity and fractured zone have 3-dimensional geometry. Also flexible design/construction guidelines for tunnelling are required to cope with uncertain ground condition and circumstance for technically safe and economic tunnel construction.

KeyWords Fractured zone, Tunnel displacement, Support design, Heterogeneity

초 록 이방성/비균질 암반은 터널 굴착에 의해 매우 다양한 변형거동을 나타내며, 이는 암반 내 존재하는 단층 및 절리 그리고 파쇄대 등과 같은 지질학적 요소들의 공간적인 특성에 의해 크게 좌우된다. 본 논문에서는 파쇄대가 존재할 경우 2차원 수치해석을 통해 여러 가지 영향인자들에 대한 매개변수 분석을 수행하였다. 그 결과 파쇄대 폭 및 위치 그리고 지보 등에 따라 터널 변위는 분석 위치마다 매우 상이하게 나타났다. 그러나 불연속면 및 파쇄대는 3차원적 기하구조를 나타내므로 3차원 지반 구조적 특성을 고려할 수 있는 3차원 해석이 필수적이라고 판단된다. 또한 기술적으로 안전하고 경제적인 터널 건설을 위하여 불확실한 지반조건 및 환경여건에 매우 유연하게 대처할 수 있는 설계/시공 기술이 필요하다고 판단된다.

핵심어 파쇄대, 터널 변위, 지보 설계, 비균질성

1. 서 론

암반은 일반적으로 절리, 층리, 단층 등과 같은 다양한 불연속면을 포함하고 있으며, 때로는 연약대와 파쇄대를 포함하는 경우도 다수 발생하고 있다. 이러한

불연속면 및 연약대/파쇄대 등은 구조적 이방성과 비균질성을 야기하여 터널 굴착에 따른 상이한 지반거동을 나타낸다. 또한 터널 굴착에 의해 발생하는 변위는 터널의 안정성과 단면유지에 영향을 미치는 주요인자이며, 이는 굴착 주변 암반의 하중이력에 대응한 암반의 변형특성과 지반보강의 특성에 의해 결정된다. 이러한 관점에서 설계단계에서 예측된 터널 변위거동을 시공 중 터널 변위거동과 비교/분석하여 최적의 지보를 결정하는 과정을 통해 사전에 터널의 붕괴/붕락을 예방하여 안전하고 경제적인 터널 건설을 이룰 필요가 있다.

국내에서는 일반적으로 RMR 분류법 등을 이용한 획일적인 표준패턴화 설계가 이루어지고 있다. 파쇄대 등

¹⁾ 한국건설기술연구원 지반연구부 수석연구원

²⁾ 한국건설기술연구원 국토지반연구부 연구원

³⁾ 한양대학교 산업과학연구소 연구교수

⁴⁾ 한양대학교 지구환경시스템공학과 교수

⁵⁾ 삼성건설 토목사업본부 토목기술팀 과장

* 교신저자 : shbaek@hanyang.ac.kr

접수일 : 2006년 3월 20일

심사 완료일 : 2006년 5월 15일

의 연약대가 터널 굴착 대상 암반 주변에 존재할 경우 그 위치에 따라 터널의 거동이 매우 상이하게 나타남에도 불구하고 암반등급이 같다는 이유로 패턴화된 표준 설계를 동일하게 적용하고 있는 실정이다. 연약대/파쇄대 등이 존재할 경우 이러한 패턴화된 설계로는 상이한 지반거동에 적절히 대처하기 힘들며, 터널의 불안정성과 심지어 붕괴/붕락과 같은 극한 상황을 야기할 수도 있다. 이러한 불안정성에 대처하기 위한 추가적인 지보와 보조공법 등의 적용으로 인해 공사비의 증가 및 공기의 지연이 예상된다.

따라서 기술적으로 타당한 설계와 경제적이고 안정적인 시공을 위해서 가능한 실제 터널 거동을 최대한 반영한 분석을 통하여 적절한 터널 굴착과 지보/보강공법을 평가하여야 한다. 본 연구에서는 파쇄대 존재 암반에서 파쇄대 위치, 두께, 경사 등이 터널 거동에 미치는 영향을 분석하고 지보의 영향을 고찰하였다.

2. 터널 과대변형 특성

터널에서 붕괴/붕락 및 과대변형 등의 불안정성을 야기시키는 요인은 크게 암반의 특성과 시공의 영향으로 구분할 수 있으며, 구체적인 요인들은 Table 1에 정리한 바와 같다.

지하 터널 주위 암반의 파괴는 초기응력 수준과 암반 특성, 터널의 형상 및 크기에 좌우된다. 소수의 절리가 존재하는 괴상 암반의 경우 취성의 스폐링(spalling)이나 슬래빙(slabbing) 현상을 보여주며, 절리가 심하게 발달한 절리암반의 경우에는 더욱 연성인 파괴형태로 발전되는 것을 보여준다. 후자의 경우, 암반내에 많은 불연속면들이 교차하고 있기 때문에 각 개별블럭들은 미끄러짐이나 회전이 상당히 자유스럽다. 점토 충전물이나 단층 마찰면이 존재하면 암반은 더욱 약해지고,

파괴형태도 연성 혹은 소성적 특징을 보인다. 중간적인 경우는 지질구조적 원인에 의한 파괴와 무결암의 파괴가 결합되어 일련의 복잡한 파괴 메커니즘을 나타낸다. 얇은 층상, 습곡 또는 엇리성 암반과 같이 강도 이방성이 뚜렷한 상황에서는 좌굴(buckling)과 같은 취성 변형이 발생할 수 있다(Hoek et al., 1995).

절리가 심하게 발달한 암반내 시공되는 터널에서는 중력에 기인한 표면붕괴 혹은 응력에 기인한 압착현상에 의해 파괴가 발생할 수 있는 경우가 있다. 이러한 유형은 주변 암반에 작용하고 있는 응력수준이 낮고 중력에 의한 표면붕괴(ravelling)의 한 형태로 초기 파괴가 발생하는 경우와 압착이나 반팽창을 발생시킬 정도로 주변 암반에 작용하고 있는 응력수준이 높은 경우에 주로 나타난다. 이러한 경우 터널의 경계면에서 미끄러지거나 낙반될 수 있는 잠재적인 썩기 또는 블록들을 확인하는 것이 중요하다.

굴착에 의한 터널 주변의 변형이나 응력의 재분배는 지반조건이 불량하거나, 대심도에서의 굴착, 상대적으로 큰 터널의 직경 등에 기인하는 경우가 많다(Hoek and Brown, 1980, Szechy, 1973). 굴착 후 터널 단면의 축소는 이러한 변형을 잘 나타내는 요인이며, 굴착 안정성의 가장 중요한 요소이다. 또한 2%이상의 터널 내 공변형률이 발생할 경우 특수한 지보설계가 필요하게 되며, 보다 큰 변형률이 발생할 경우 터널의 단면을 축소시켜 추가 굴착 등으로 인한 공기 지연과 공사비의 엄청난 증가를 야기하게 된다. 따라서 터널 시공 중 관찰되는 다양한 형태의 과대변형을 사전에 예측하기 위해서는 이를 적절히 파악할 수 있는 예측기법이 필요하며, 아울러 시공 중 막장관찰 등을 통하여 이러한 과대변형 특성을 예측하고 적절한 지보/보강 대책을 수립해야 터널의 붕괴를 예방할 수 있다.

Table 1. Instability factors of tunnel

| 요 인 | 내 용 |
|-------|---|
| 암반 특성 | <ul style="list-style-type: none"> - 굴착에 불리한 방향의 절리 및 절리군 조합 - 잘게 파쇄된 암석이나 점토 등으로 구성된 연약대나 단층대 - 자립시간의 감소를 야기하는 영역 내에 팽창성 점토의 존재 - 수분함유나 포화상태에 의한 암반 구성물의 슬레이킹이나 강도저하 |
| 시공 영향 | <ul style="list-style-type: none"> - 굴착에 의한 지반침하 및 인접구조물의 손상 - 발파에 의한 동식물 및 구조물의 피해 - 자립시간의 감소를 야기하는 영역 내에 팽창성 점토의 존재 - 수분함유나 포화상태에 의한 암반 구성물의 슬레이킹이나 강도저하 |

3. 원형 공동 모델

터널 내공변위는 암반의 변형특성과 굴착 및 지보 특성에 의해 직접적인 영향을 받고, 굴착이 중지된 상태에서는 암반의 시간 의존성(time dependent characteristics)에 영향을 받는다. 특히 대규모로 파쇄대나 단층대 등 연약대가 존재할 경우 내공변위는 암반의 변형특성과 굴착 및 지보 특성 외에 추가로 연약대 특성의 영향으로 균질/등방 암반 굴착시의 변위거동 특성과 동일하게 볼 수 없음이 이미 밝혀졌다(Schubert and Budil, 1996, Kim, 2003, 김창용 등, 2004).

본 논문에서는 먼저 Fig. 1과 같이 원형 공동을 대상으로 불연속 암반의 이방성 및 파쇄대 존재를 모델링하여 그 영향을 분석하였다. 원형 공동의 직경은 10m이고 해석영역은(100×100m)이다. 본 해석에 사용된 유한요소 코드는 이방성 암반 특성을 고려할 수 있는 U2 코드로서, 이는 절리 및 파쇄대가 임의의 두께 및 방향성을 갖고 분포할 경우 요소 개별적으로 절리 및 파쇄대의 특성을 반영할 수 있다(백승환과 문현구, 2001). 본 원형 공동 해석에서는 지보의 영향을 고려하지 않았으며, 암반의 탄성계수와 전단계수 그리고 축압계수는 각각 1GPa, 0.4GPa 그리고 1로 가정하였다. 또한 연약대/파쇄대의 체적분율은 0.2로 설정하고 물성은 암반의 1/2, 1/5, 1/10, 1/50, 1/100로 설정하여 계산하였으며, 그 결과는 Table 2와 같다.

3.1 이방성 모델

본 절에서는 점판암, 편암, 천매암 등과 같이 편리와 엇리 등 암석의 불연속 특성으로 인해 암반이 전체적으로 이방성 특성을 나타낼 경우를 가정하여 Table 2의 물성을 이용하여 수치해석을 수행하였다.

Fig. 2(a)에서 보는 바와 같이 X축과 이방성 1축 사이 각이 증가함에 따라서 전단변위는 감소하고 축변위

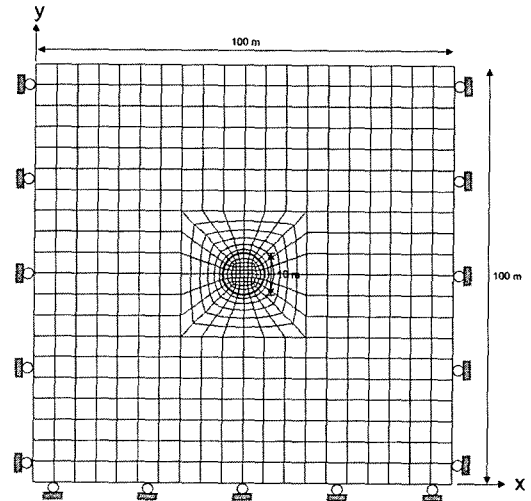


Fig. 1. FE Mesh used in 2-D anisotropic analysis

Table 2. Properties used in anisotropic analysis

| Modulus Contrast (MC) | Material Properties | Transverse Isotropy | |
|-----------------------|---------------------|---------------------|--------------------------------------|
| | | transverse isotropy | perpendicular to transverse isotropy |
| 2 | Young's modulus | 900 MPa | 843 MPa |
| | Shear modulus | 360 MPa | 333 MPa |
| | Poisson's ratio | 0.25 | 0.23 |
| 5 | Young's modulus | 840 MPa | 589 MPa |
| | Shear modulus | 336 MPa | 222 MPa |
| | Poisson's ratio | 0.25 | 0.18 |
| 10 | Young's modulus | 820 MPa | 394 MPa |
| | Shear modulus | 328 MPa | 143 MPa |
| | Poisson's ratio | 0.25 | 0.12 |
| 50 | Young's modulus | 804 MPa | 109 MPa |
| | Shear modulus | 322 MPa | 37 MPa |
| | Poisson's ratio | 0.25 | 0.04 |
| 100 | Young's modulus | 802 MPa | 57 |
| | Shear modulus | 320 MPa | 19 MPa |
| | Poisson's ratio | 0.25 | 0.02 |

는 증가하며, X축과 이방성축 사이각이 0°일 때 천단변위가 가장 많이 발생하고, 90°일 때 측벽 변위가 가장 많이 발생함을 알 수 있다. 또한 연약대/파쇄대의 물성과 Intact Rock의 물성비가 클수록 변위차이도 많이 생김을 볼 수 있다.

Fig. 2(b)는 X축과 이방성 1축 사이각과 내공변위벡터 방향의 관계를 보여준다. 이 그림에서 X축과 이방성 1축 사이각이 천단변위는 45°~60°일 때, 좌측벽 변위

는 15°~30°일 때, 우측벽 변위는 30°~45°일 때 가장 큰 변위벡터 방향의 변화를 보이고 있다.

Fig. 3은 MC가 각각 2, 10, 100일 때, X축과 이방성축 사이각에 따른 내공변위 벡터를 보여주고 있다. 터널 내공변위 벡터는 MC가 2일 경우 변위의 이방성 양상이 잘 나타나지 않으며, MC가 클수록 물성 차이의 영향으로 이방성축에 따라 뚜렷한 변위 양상을 볼 수 있다. 또한 이방성 각도에 따라 이방성 축에 수직인 방

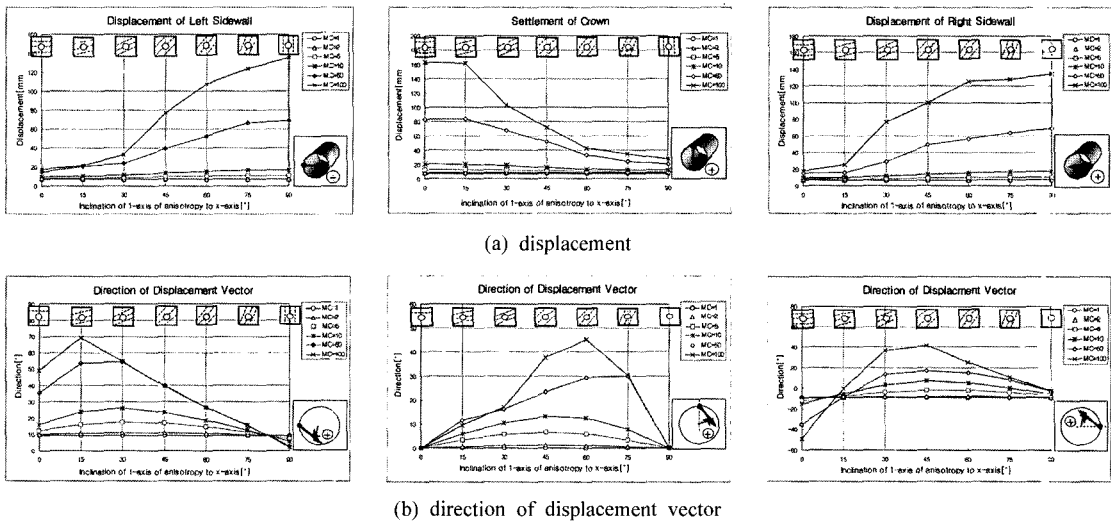


Fig. 2. Influence of anisotropy

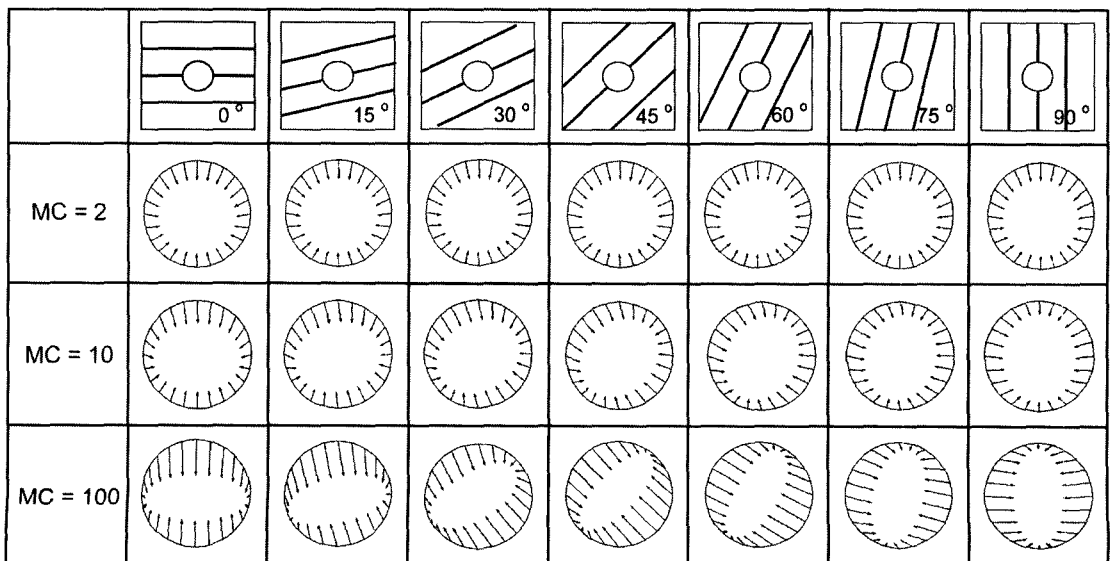


Fig. 3. Displacement vector of tunnel with the change of MC and anisotropy

향으로의 변위가 축방향에 비해 매우 크게 나타남을 볼 수 있으며, 따라서 변성암 및 퇴적암 등의 이방성 암반의 특성 및 방향성 등을 사전에 평가하여 터널 굴착시 나타나는 이방성 거동에 대비하여야 한다.

3.2 비균질 모델

여기서는 연약대/파쇄대 두께와 위치 및 경사에 따른 영향을 분석하였다. Fig. 4(a)에서 보는 바와 같이 터널 우측에 연약대가 있을 때, 연약대가 터널에서 멀어질수록 내공 변위에 미치는 연약대의 영향이 감소하며, 또한 연약대/파쇄대의 물성과 Intact Rock의 물성비가 클수록 변위차이도 많이 생김을 볼 수 있다.

연약대/파쇄대의 두께가 증가할수록 천단변위와 우측벽 변위는 증가하며 좌측벽 변위는 감소함을 볼 수 있다. 연약대/파쇄대 위치에 대한 분석에서와 같이 연약대/파쇄대 물성과 Intact Rock의 물성비가 클수록 변위차이도 커짐을 알 수 있다(Fig. 4(b)).

Fig. 4(c)는 연약대/파쇄대의 물성과 Intact Rock의

물성비가 10일 때, 연약대/파쇄대 두께 변화에 따른 연약대/파쇄대 방향과 변위, 변위벡터 방향사이의 관계를 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 내공변위는 좌우측에서 비슷한 모양으로 연약대/파쇄대와 X축 사이각이 0°일 때, 천단변위는 90°에서 가장 큰 변위를 보이며, 연약대의 두께가 클수록 변위도 크게 나타남을 알 수 있다.

4. 파쇄대 위치별 영향 분석

원형 공동은 전력구 또는 기계식 굴착에 의한 터널을 모사할 수 있지만 실제 교통 터널과 같은 형상의 영향을 반영하지 못한다. 따라서 실제 NATM 터널을 가정하여 파쇄대의 위치와 폭 그리고 지보 및 굴착공법에 대하여 Pentagon2D를 이용하여 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 5와 같이 터널 단면은 폭과 높이가 각각 12m와 8m로 환산직경이 약 10m이며, 좌우 및 상하 해석영역은 직경의 5배를 적용하였다.

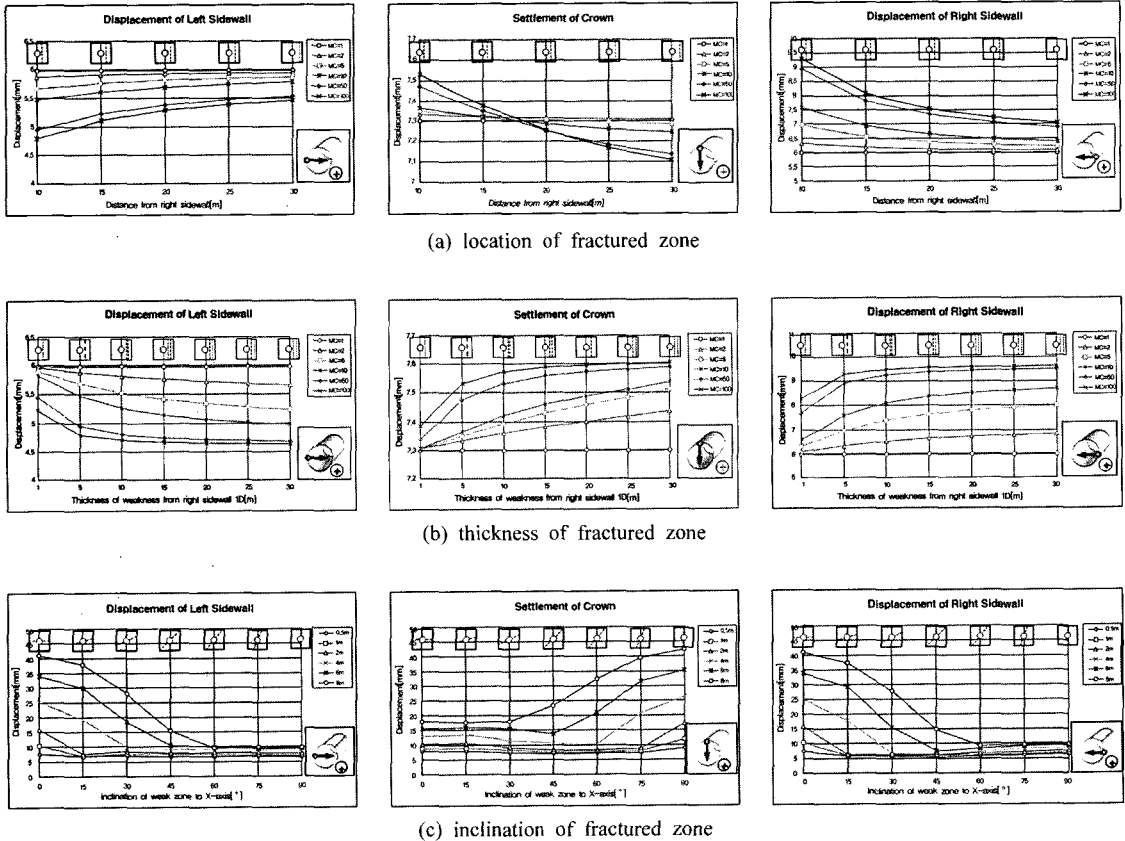


Fig. 4. Influence of fractured zone on tunnel displacement

Fig. 5는 파쇄대가 수직 또는 수평으로 터널 상부, 하부 또는 우측에 존재하는 경우로서 874개의 8절점 요소와 2729개의 절점으로 이루어져 있다. 파쇄대와 터널간의 이격거리는 10m로 가정하였으며, 파쇄대 폭을 1m, 2m, 3m, 5m, 10m 그리고 15m일 경우에 대하여 해석을 수행하였다.

해석에 사용된 압반 탄성계수와 포아송비는 Table 3과 같이 5GPa과 0.25이고 점착력과 내부마찰각은 400kPa과 35°이다. 파쇄대의 변형계수는 각각 압반 변형계수의 1/10 그리고 1/50을 기본으로 하여 적용하였다. 지보는 NATM의 기본 지보재인 슛크리트와 록볼트를 적용하였으며, 하중분담율은 40-30-30으로 가정

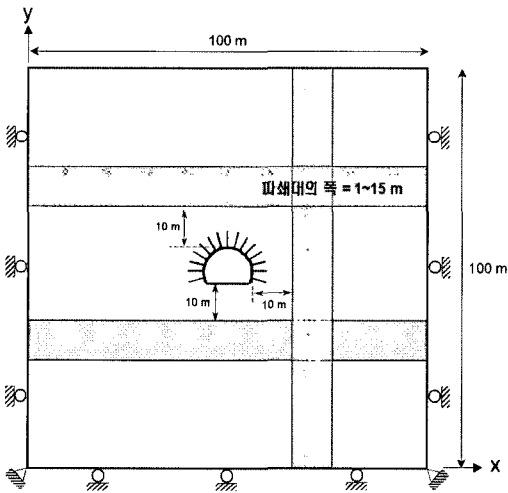


Fig. 5. The representation of model and boundary condition

하여 상하반단면 굴착① 상반 굴착 - ② 상반 연성 슛크리트 - ③ 상반 경성 슛크리트+ 록볼트 - ④ 하반 굴착 - ⑤ 하반 연성 슛크리트 - ⑥ 하반 경성 슛크리트+ 록볼트]으로 총 6단계로 해석단계를 설정하였다.

4.1 터널 상부에 파쇄대 존재

파쇄대가 터널 상부에 터널 천단부와 10m 이격거리를 두고 존재하는 경우 터널의 변형 거동은 모델이 좌우 대칭이므로 좌우 어깨부와 좌우 측벽부는 서로 같은 거동을 나타낸다. Fig. 6(a)는 터널 상부에 파쇄대가 존재할 경우 MC가 10일 때 터널의 변위를 나타낸 그래프이다. 파쇄대 폭이 증가함에 따라 터널의 천단부 변위는 증가하는 반면에 바닥부 변위는 오히려 감소함을 볼 수 있다. 파쇄대가 없는 경우를 기준으로, 천단부 변위는 파쇄대가 1m, 2m, 3m, 5m, 10m, 15m로 증가할 때 각각 약 10.1%, 15.9%, 19.8%, 25%, 31.2%, 33.8% 증가하였으며, 어깨부 변위는 8%, 12.2%, 15.5%, 19.6%, 24.9%, 27.1% 그리고 측벽부 변위는 5%, 6%, 6.9%, 8%, 9.5%, 10.4%로 증가하였고 반대로 바닥부 변위는 1.1%, 1.9%, 2.4%, 3.1%, 4%, 4.5% 정도 감소하였다.

Fig. 6(b)는 MC가 50일 경우의 그래프로서, 파쇄대의 물성이 불량하므로 그림 6(a)에 비해 큰 변위량을 보이고 있다. 파쇄대가 없는 경우를 기준으로, 천단부 변위는 파쇄대가 1m, 2m, 3m, 5m, 10m, 15m로 증가할 때 각각 약 26.8%, 34.1%, 37.9%, 41.7%, 45%, 46% 증가하였으며, 어깨부 변위는 21.1%, 27.2%, 30.5%, 33.5%, 36.5%, 37.7% 그리고 측벽부 변위는 8.4%, 10.2%, 11.5%, 12.5%, 13.2%, 13.9%로 증가하였고 반대로 바닥부 변위는 3.3%, 4.3%, 4.8%, 5.4%, 5.9%,

Table 3. Properties used in FE analysis

| 지 층 | 변형계수(MPa) | 포아송비 | 점착력(kPa) | 마찰각(°) | 단위중량(kN/m3) |
|------------|-----------|------|----------|----------|-------------|
| 압 반 | 5,000 | 0.25 | 400 | 35 | 25 |
| 파쇄대(MC=10) | 500 | 0.25 | 80 | 35 | 25 |
| 파쇄대(MC=50) | 100 | 0.25 | 40 | 35 | 25 |
| 구 분 | 변형계수(GPa) | | 두께(m) | 단면적(cm2) | 단위중량(kN/m3) |
| 스�크리트 | 연 성 | 5 | 0.08 | - | 2.3 |
| | 경 성 | 15 | 0.12 | - | 2.3 |
| 록볼트 | | 210 | - | 5 | 7.8 |

6.1% 정도로 변화의 폭이 MC=10일 때 보다 크게 나타났다.

터널 거동은 파쇄대의 영향으로 천단부 변위가 증가하였고 바닥부 변위는 감소하는 경향을 보여준다. MC의 영향은 MC가 클수록 즉 파쇄대의 물성이 나뉠수록 변형이 크게 나타남을 알 수 있다.

4.2 터널 하부에 파쇄대 존재

쇄대가 터널 하부에 위치하는 경우 MC가 10인 터널 변위를 Fig. 7(a)에 나타내었다. 파쇄대가 폭이 증가할수록 바닥부 변위와 측벽부 변위는 증가하는 반면에 천단부와 어깨부 변위는 감소하는 경향을 나타내었다. 파쇄대가 없는 경우를 기준으로, 천단부 변위는 파쇄대가 1m, 2m, 3m, 5m, 10m, 15m로 증가할 때 각각 약 2.1%, 4.4%, 6.5%, 10.6%, 19.9%, 28.4% 그리고 어깨부 변위는 2.6%, 5.2%, 7.6%, 11.9%, 20.9%, 28.2% 정도 감소하였다. 반대로 측벽부 변위는 2.6%, 1.9%, 1.7%, 1.7%, 2.9%, 6% 그리고 바닥부 변위는 14.6%,

25.6%, 30.2%, 39.6%, 53.9%, 63% 정도 증가하였다.

Fig. 7(b)는 MC가 50일 경우로 그 경향은 Fig. 7(a)와 유사하지만 변위량이 크게 나타났다. 파쇄대가 없는 경우를 기준으로, 천단부 변위는 파쇄대가 1m, 2m, 3m, 5m, 10m, 15m로 증가할 때 각각 약 11.4%, 21.4%, 30.5%, 48.1%, 90.3%, 68.2% 그리고 어깨부 변위는 11.2%, 22.3%, 30.1%, 42.5%, 50.2%, 23.9% 정도 감소하였다. 이와 반대로 측벽부 변위는 1.7%, 3.7%, 8.1%, 19.1%, 57.2%, 103.5% 그리고 바닥부 변위는 42.8%, 59.5%, 71.1%, 88.6%, 123.3%, 154.8% 정도 증가하였으며, 변화의 폭이 MC=10일 때 보다 크게 나타났다.

파쇄대가 터널 하부에 위치한 경우는 터널 하부 파쇄대의 영향으로 터널 천단의 변위보다 바닥부의 변위가 월등히 많이 발생하며, MC가 50이고 15m 폭을 가질 경우 터널의 천단 변위도 상부로 향하고 있다. 이 역시 MC가 클수록 큰 터널 변위를 나타내고 있다.

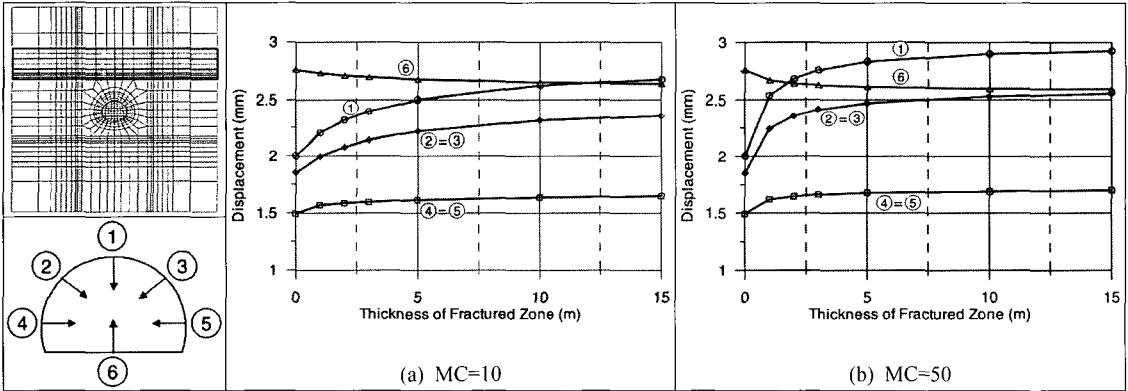


Fig. 6. Displacement when fractured zone is located above tunnel

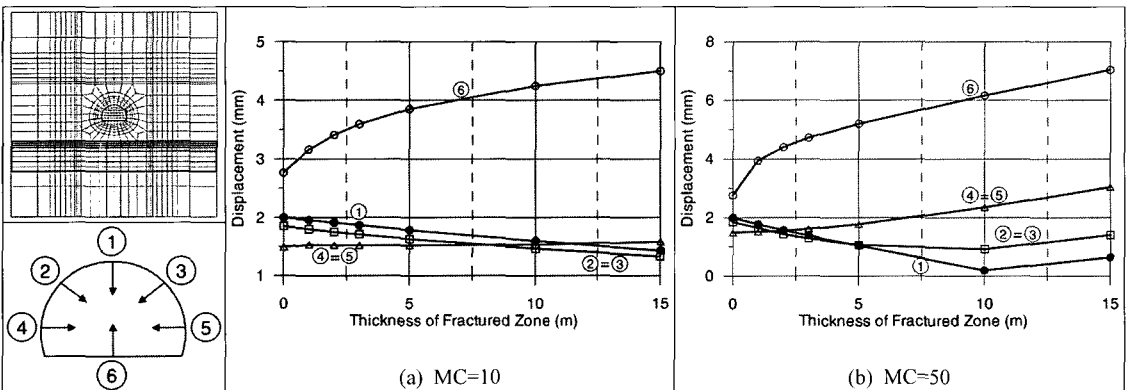


Fig. 7. Displacement when fractured zone is located below tunnel

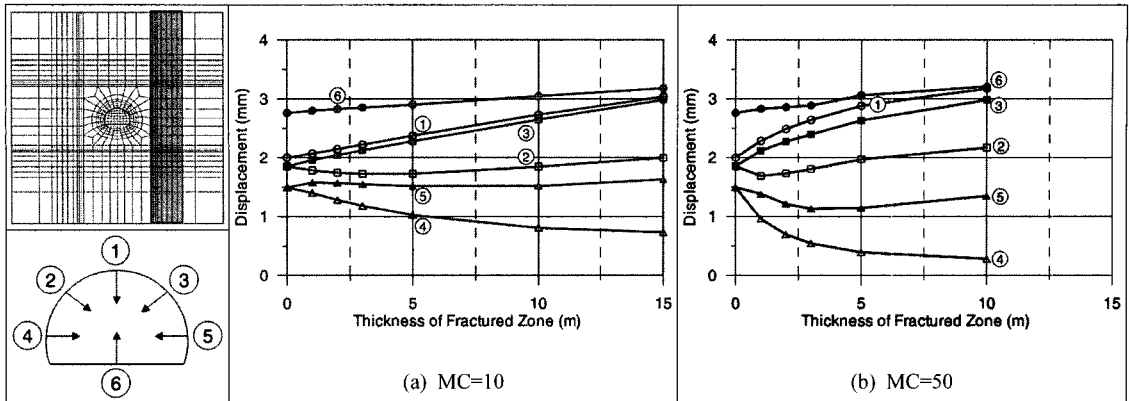


Fig. 8. Displacement when fractured zone is located in the right side of tunnel

4.3 터널 우측에 파쇄대 존재

Fig. 8(a)는 MC가 10이고 파쇄대가 터널 우측에 위치한 경우의 터널 변위로서 파쇄대의 폭이 증가할수록 천단부와 우측 어깨부 그리고 바닥부의 변위는 증가한 반면에 좌측벽부 변위는 감소하였다. 우측벽부 변위는 터널 내부로의 변위가 파쇄대의 영향으로 상쇄되어 파쇄대 폭과 상관없이 거의 일정하게 나타났다. 파쇄대가 1m, 2m, 3m, 5m, 10m, 15m로 증가함에 따라 천단부 변위는 3.5%, 7.3%, 11.1%, 18.7%, 36.5%, 51.9% 정도 증가하고 바닥부 변위는 1.4%, 2.4%, 3.4%, 5.2%, 10.3%, 15.3% 정도 증가하였다. 좌측 어깨부 변위는 5.6%, 10.3%, 14.7%, 22.9%, 42.8%, 61.3% 정도 증가한 반면에 우측벽부 변위는 6.3%, 14.2%, 21.1%, 31.3%, 45.7%, 51% 정도 감소하였다.

Fig. 8(b)는 MC가 50일 경우 파쇄대가 터널 우측에 있는 경우 변형 양상은 MC가 10인 Fig. 8(a)과 거의 유사하지만 변위의 크기는 크게 나타났다. 파쇄대 폭이 15m인 경우는 소성거동을 보여 터널 굴착에 따른 변위 분석이 불가능하였다.

파쇄대가 터널 우측에 위치한 경우는 터널 우측에 파쇄대의 영향으로 좌측보다 우측벽의 변위가 크며, 터널 형상에 기인하여 변위의 방향이 약 70° 정도 기울어져 있다.

5. 경사 파쇄대 영향 분석

Fig. 9는 파쇄대가 60°의 경사로 존재할 경우의 해석 모델이다. 이 경우 파쇄대가 터널의 좌측하부에 2m와 20m의 이격거리를 두고 존재하는 경우, 터널 우측 상부에 2m와 20m의 이격거리를 두고 존재하는 경우 그리

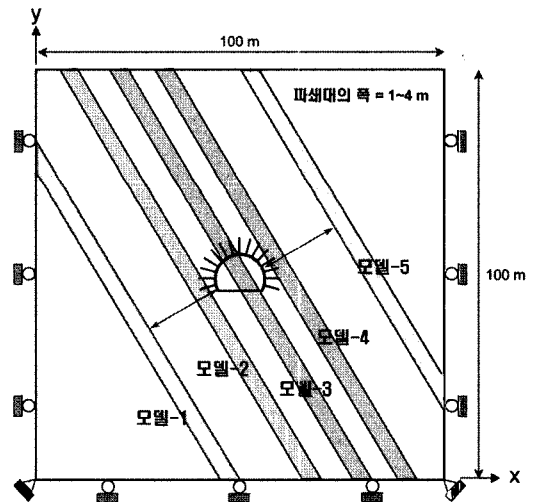


Fig. 9. Model of fractured zone with 60° dip

고 터널을 통과하는 경우에 대하여 각각 파쇄대의 폭을 1m에서 4m까지 1m씩 변화시켜가며 해석을 수행하였다. 파쇄대의 물성은 Table 3과 같다.

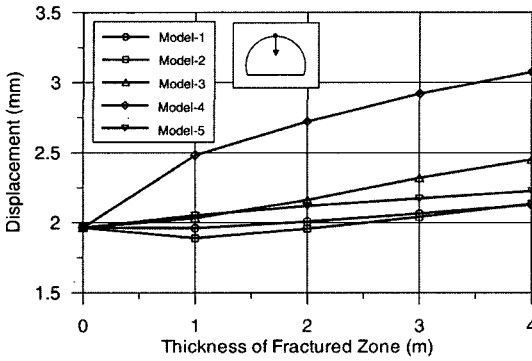
5.1 경사 파쇄대의 위치별 영향

Fig. 10은 터널의 변위 분석 위치별로 각 모델의 변위를 비교한 그래프이다. 천단부 변위는 파쇄대가 터널 우측 상부에 2m 이격거리를 두고 있는 model-4의 경우가 가장 큰 약 41%의 변위가 증가하였으며, 반면에 바닥부 변위는 파쇄대가 터널 좌측 하부에 2m 이격거리를 두고 있는 model-2에서 28% 증가하여 최대를 나타내었다.

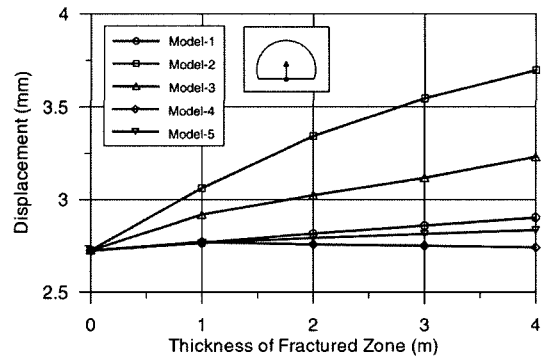
어깨부의 변위는 Fig. 10(c)와 (d)에서와 같으며, 좌측 어깨부는 model-2에서 우측 어깨부는 model-4에서 파

쇄대가 없을 경우에 비해 2배 이상으로 최대를 보인다. 좌측 어깨부에 비해 우측 어깨부의 변위가 크게 나타났으며, 이는 터널의 형상에 기인한 것으로 판단된다. 또한 Fig. 10(e)와 (f)와 같이 좌우 측벽부의 변위 양상도

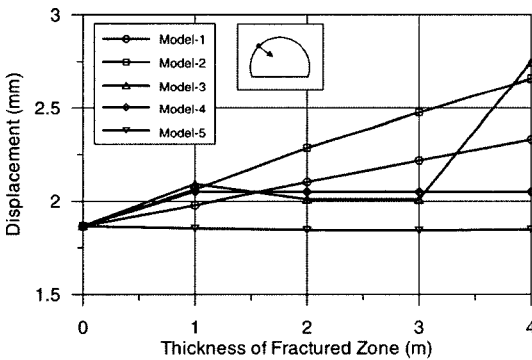
유사하게 나타났으며, 터널의 형상과 초기응력 및 경계 조건의 영향으로 우측 측벽부가 큰 변위를 보였다. Fig. 11은 각 모델별 파쇄대의 폭에 따른 터널 변위를 300배 확대하여 표현한 그림이다.



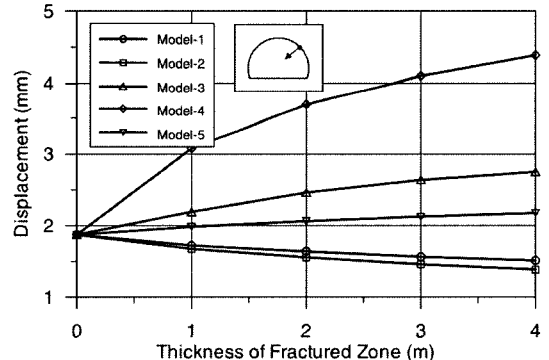
(a) crown



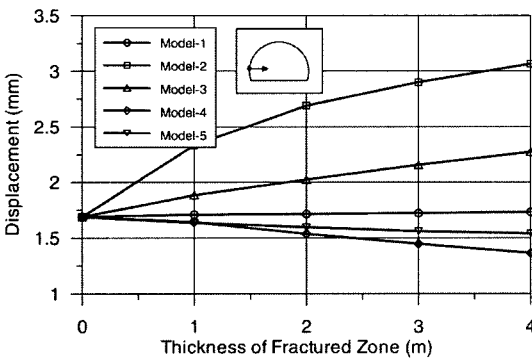
(b) bottom



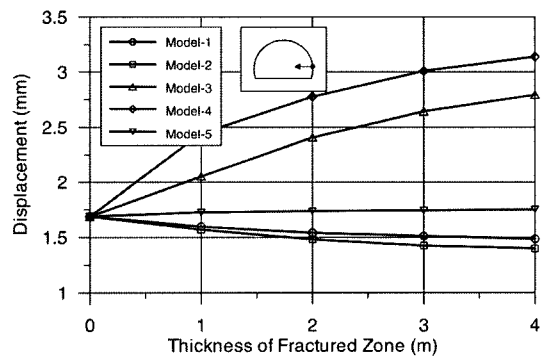
(c) left shoulder



(d) right shoulder



(e) left wall



(f) right wall

Fig. 10. Comparison of displacement of models with inclined fractured zones

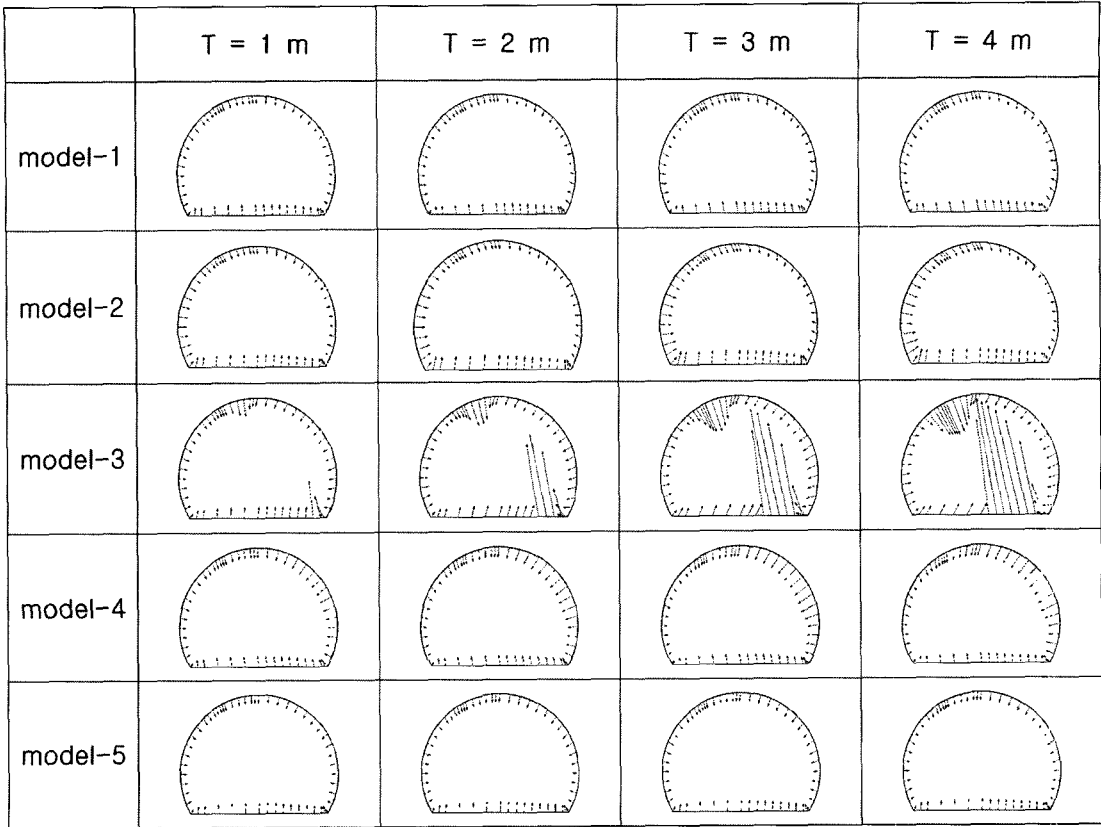


Fig. 11. Tunnel deformation of each model

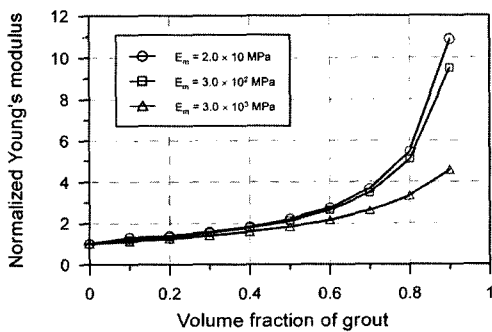


Fig. 12. Normalized equivalent Young's modulus to volume fraction of grout

5.2 터널 주변 지반 보강의 영향

본 절에서는 파쇄대가 터널 우측 상부 2m의 이격거리를 두고 존재하는 모델-4의 경우에 대하여 상반 우측 천단부 보강, 상반 천단부 지반보강 그리고 터널 주변 전체 보강한 경우에 대하여 변위 거동을 비교하였다.

강관과 주입재가 삽입된 지반은 복합체로 가정하여, 복합체의 등가물성은 변형률 에너지 이론(strain energy theory)에 의해 도출된 황방향 탄성계수의 연구 결과(김광진과 문현구, 2001)와 배규진 등(1997) 그리고 이준석(1998) 등의 주입효과 연구 결과를 참조하여 적용하였다.

주입재의 탄성계수와 포아송비를 21.7GPa과 0.2라고 가정한 경우, 변형률에너지 이론에 의해 주입재의 체적분율에 따른 보강지반의 등가물성 변화를 Fig. 12에 나타내었다. 주입재의 체적분율이 증가함에 따라 보강지반의 등가물성이 증가하며, 체적분율이 0.2~0.4 정도에서 보강지반은 원지반의 약 1.5배의 탄성계수를 나타내었다. 따라서 본 연구에서는 주입재의 평균적인 주입율(20~50%)과 물성치 증가에 대한 기존 연구결과를 참조하여 보강지반의 탄성계수는 원지반 탄성계수의 1.5배를 적용하였으며, 보강영역은 터널 벽면에서 2m로 가정하였다.

Fig. 13은 보강 적용 모델에 따른 터널 변위를 300배

확대하여 도시한 그림으로 보강 모델에 따른 변형 양상의 차이를 볼 수 있다. Fig. 13에서 알 수 있듯이 상반 우측만 보강한 경우가 가장 큰 변위를 보였으며, 파쇄대가 존재하는 우측 어깨부에서 최대 변위량을 나타내었다.

Fig. 14는 보강지반의 영역 차이에 따른 변위를 비교한 그래프이다. Fig. 14(a)와 같이 천단부 변위는 상하반 전부 보강한 경우가 가장 작은 변위를 보이고 상반 우측만 보강한 경우가 가장 큰 변위를 보였다. 천단부 변위는 파쇄대가 4m이고 보강이 없는 경우를 기준으로 할 때 상반 우측만 보강, 상반 보강, 상하반 보강 각각의 경우 약 14%, 26%, 31%의 변위 감소를 보였다. 바닥부의 경우는 각각 약 1.9%, 2.5%, 7.5% 정도의 변위가 감소하였으며, 이는 터널 바닥부에 직접적인 보강을 하지 않았기 때문으로 판단된다.

어깨부의 변위는 Fig. 14(c)와 (d)에서와 같이 파쇄대가 4m일 때 좌측 어깨부는 각각 약 9%, 24%, 31% 변위 감소를 보였고 우측 어깨부는 21%, 26%, 32% 정도의 변위 감소를 보였다. 변위 감소율은 좌측 어깨부에 비하여 우측 어깨부가 크게 나타나므로 강관다단그라우팅의 보강효과를 직접적으로 보여주고 있다. 그러나 파쇄대의 영향으로 최대 변위는 좌측이 아니라 우측에서 발생하였으며, 보강의 효과는 보강영역 차이에 비해

비교적 크지 않음을 알 수 있다.

Fig. 14(e)와 (f)는 좌우 측벽부의 변위를 비교한 그래프로서 보강영역에 따른 좌우 측벽부 변위가 상당히 다른 값을 보이고 있다. 좌측벽부는 파쇄대의 영향에 따라 파쇄대가 증가할수록 변위가 감소하며, 파쇄대가 1m일 때 최대 1.89mm 변위를 나타내고 있다. 보강영역 차이에 따른 변위의 감소는 파쇄대가 4m일 경우 각각 1.6%, 23%, 39% 정도로 나타났으며, 파쇄대 폭의 영향은 거의 없다. 반면에 우측벽부는 보강영역의 영향으로 파쇄대 폭이 4m일 경우 각각 16%, 17%, 37% 정도로 큰 변위 감소 차이를 보였으나 변위 절대치는 2.6mm 이내로 큰 차이를 보이지 않고 있다.

본 해석의 경우는 원지반의 물성과 보강지반의 물성에 따라 최대변위가 파쇄대에서 가장 가까운 우측벽부에서 나타났으며, 최대 변위값은 파쇄대 폭이 4m이고 상반 우측만 보강한 경우 3.5mm 이내로 나타났다. 따라서 본 수치해석 분석 결과 보강영역의 차이에 의한 뚜렷한 변위 감소의 차이를 보이지만 터널의 안정성 측면에서는 3가지 경우 모두 만족하고 있다. 비록 수치해석 결과는 지반의 다양한 조건들을 충분히 고려할 수 없고, 불균질한 지반을 정확히 조사하는 것은 한계가 있어 지반특성치 산정에는 항상 불확실성을 내재하므로 현장 조건을 모두 만족시킬 만큼 신뢰성이 있다고

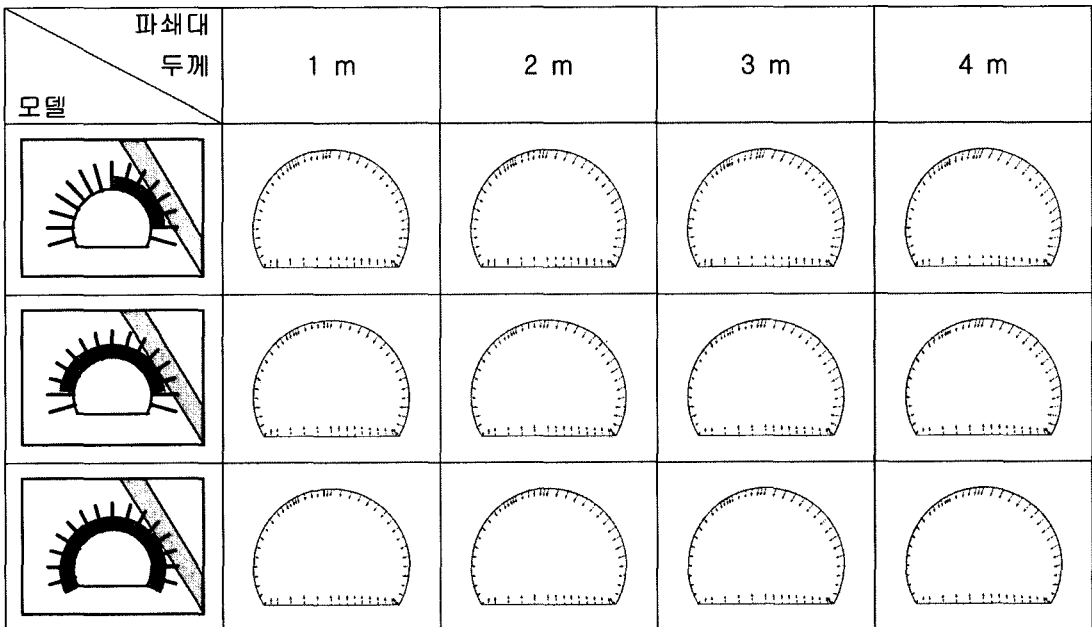
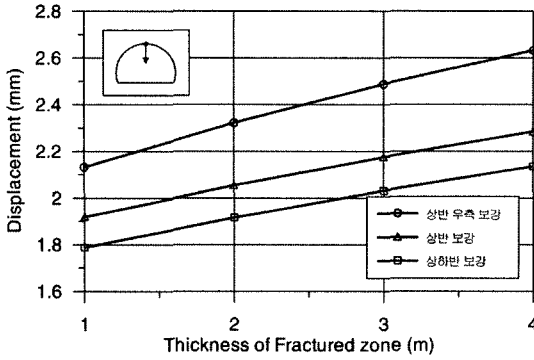
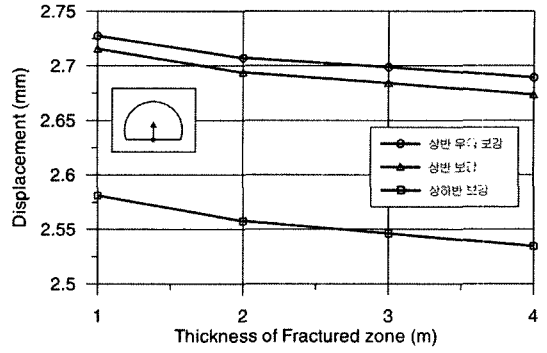


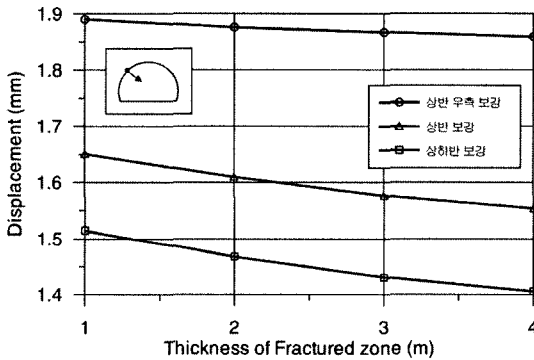
Fig. 13. Tunnel deformation to reinforced area in model-4



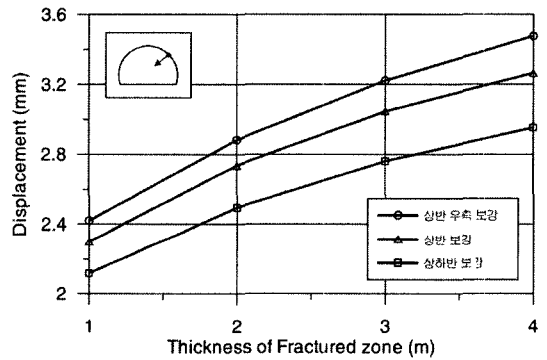
(a) crown



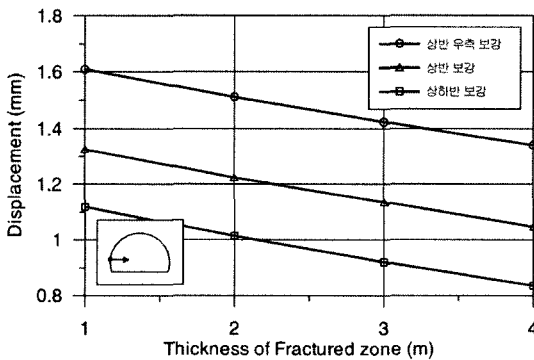
(b) bottom



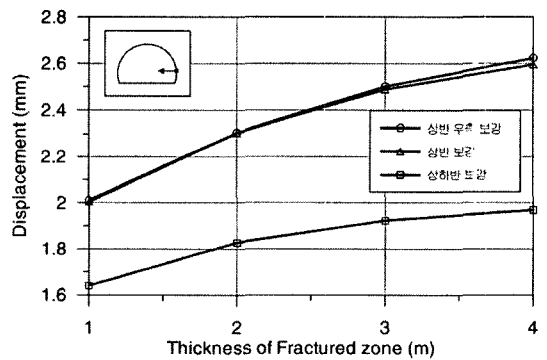
(c) left shoulder



(d) right shoulder



(e) left shoulder



(f) right shoulder

Fig. 14. Comparison of displacement to reinforced area in model-4

할 수 없지만 지반 조건과 시공 여건에 따라 보강영역 및 보조공법의 적용을 검토할 필요가 있다고 사료된다. 또한 시공 시 예상치 못한 지질구조적 조건 및 급격한 암반의 변화구간 등에서는 적절한 추가 보강이 필요할 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 논문에서는 파쇄대가 존재할 경우 파쇄대의 폭과 위치 그리고 지보 변경 및 보강 영역에 따른 영향을 2차원 유한요소해석을 통해 분석하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

천매암 또는 편암과 같이 전체적으로 이방성 특성을 보이는 암반은 단층이나 파쇄대 등이 존재하지 않아도 엽리와 편리 등과 같은 불연속 구조의 영향으로 뚜렷한 이방성 거동을 나타내고 있다. 일반적으로 이방성 축에 수직한 방향으로의 변위가 축방향에 비해 매우 크게 나타나므로, 변성암 및 퇴적암 등의 이방성 암반에서는 그 특성을 미리 조사 분석하여 시공 중 나타나는 이방성 거동에 대비하여야 한다.

터널 상부에 파쇄대가 존재하는 경우 파쇄대 폭이 증가함에 따라 터널 천단부를 비롯한 좌우 어깨부 및 측벽부의 변위는 증가하였지만 바닥부의 변위는 오히려 감소하였으며, 반면에 터널 하부에 파쇄대가 존재하는 경우는 반대의 경향을 나타내었다. 또한 터널 우측에 파쇄대가 위치한 경우는 터널 변형은 뚜렷한 이방성 변위 패턴을 보였으며, 파쇄대의 물성이 불량할수록 변위 절대량은 크게 나타났다.

경사 60°의 파쇄대가 존재할 경우 위치별 영향은 파쇄대가 터널을 관통할 경우 가장 큰 변위를 보이고 있으며, 모델-2에서는 좌측벽부의 변위가 그리고 모델-4에서는 우측 어깨부의 변위가 가장 크게 나타났다.

강관다단그라우팅으로 보강한 경우 우측 어깨부의 변위는 보강영역 범위에 따라 변위 감소가 각 21%, 26%, 32% 정도 감소하였으며, 최대 변위는 3.5mm 이내로 3가지 모델 모두 터널의 안정성 문제가 발생하지 않았다. 따라서 단층 및 절리 또는 파쇄대 등에 의해 터널내 국부적으로 과대 변형이 나타날 경우에는 전체 터널 주변 보강이 아니라 부분적 지보/보강만으로도 충분한 안정성 확보가 가능할 것으로 기대되지만, 실제/시공 변경을 위해서는 지질 조건 및 시공여건의 변화 등에 대하여 면밀한 검토가 필요할 것으로 사료된다.

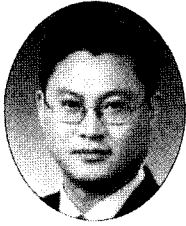
본 논문에서는 2차원 수치해석만으로 파쇄대의 영향을 살펴보았으나 실제로는 불연속면 및 파쇄대는 주향 및 경사로 표현되는 3차원적 분포를 나타내므로 2차원 해석만으로는 그 영향을 정확히 파악할 수 없다. 따라서 파쇄대의 기하 구조를 고려할 수 있는 3차원 해석을 통하여 횡방향뿐만 아니라 종방향 변위를 포함한 3차원 변위 벡터를 분석해야만 한다. 또한 경제적이고 안전한 터널을 위해서는 현장 조건 및 특성이 반영된 설계가 이루어져야 하므로 시공과정에서도 NATM의 기본 개념에 입각하여 계측을 통한 feedback의 지속적 실시 및 지보/보강공법의 최적화가 필요한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통기술혁신사업중 산학연공동연구 개발사업과 삼성건설 민간과제의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김광진, 문현구, 2001, 터널막장 선행보강 효과에 관한 이론적·수치해석적 연구, 터널과 지하공간(한국암반공학회지), 11(4), 328-338.
2. 김창용, 홍성완, 김광엽, 백승한, 2004, 터널 내공 변위 거동 분석에 관한 연구, 한국터널공학회 학술논문집 터널 기술, 6(3), 183-197.
3. 배규진, 김창용, 문홍득, 홍성완, 1997, Umbrella Arch 공법에 의한 터널 천단부 보강시 주변 지반의 거동에 관한 연구, 터널과 지하공간(한국암반공학회지), 7(4), 299-309.
4. 백승한, 문현구, 2001, 불연속 암반의 3차원 이방성 변형 특성의 평가, 한국자원공학회지, 38(5), 364-372.
5. 이준석, 1998, 복합 항복함수를 이용한 그라우팅 강화터널의 탄소성 해석에 관한 연구, 대한토목학회논문집, 18 (III-2), 207-215.
6. Hoek, E. and Brown. E.T., 1980, Underground Excavation in Rock, Institute of Mining and Metallurgy, 527p.
7. Hoek, E., Kaiser, P.K. and Bawden, W.F., 1995, Support of Underground Excavations in Hard Rock, Balkema, Rotterdam, 215p.
8. Kim, C.Y., 2003, Investigation of fault zones on displacements, Project report at the Institute for Rock Mechanics and Tunnelling, Graz University of Technology, Austria.
9. Schubert W. and Budil A., 1996, The Importance of Longitudinal Deformation in Tunnel Excavation, 8th International Congress on Rock Mechanics, Tokyo 1995, Vol 3, Balkema.
10. Szechy, K., 1973, The Art of Tunnelling, Budapest Akademiai Kiado, 1097p.



김창용

1990년 한양대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1992년 한양대학교 공과대학 자원공학과
공학석사
1999년 한양대학교 공과대학 자원공학과
공학박사

Tel: 031-910-0224
E-mail: cykim@kict.re.kr
현재 한국건설기술연구원 국토지반연구
부 수석연구원



김광염

1997년 서울대학교 공과대학 자원공학
과 공학사
1999년 서울대학교 공과대학 자원공학
과 공학석사
2005년 서울대학교 공과대학 지구환경
시스템공학부 박사수료

Tel: 031-910-0225
E-mail: kimky@kict.re.kr
현재 한국건설기술연구원 국토지반연구
부 연구원



백승한

1996년 한양대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1998년 한양대학교 공과대학 자원공학과
공학석사
2004년 한양대학교 공과대학 지구환경시
스템공학과 공학박사

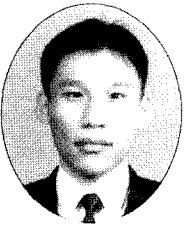
Tel: 02-2299-3012
E-mail: shbaek@hanyang.ac.kr
현재 한양대학교 산업과학연구소 연구조
교수



문헌구

1974년 서울대학교 공과대학 자원공학
과 공학사
1983년 Univ. of Utah 암석역학 공학석사
1987년 Univ. of Utah 암석역학 공학박사

Tel: 02-2220-0413
E-mail: hkmoon@hanyang.ac.kr
현재 한양대학교 공과대학 지구환경시
스템공학과 교수



이승도

1993년 한양대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1995년 한양대학교 공과대학 자원공학과
공학석사
2002년 Imperial College, Earth Sci. &
Eng., Ph.D.

Tel: 02-2145-6038
E-mail: rockeng.lee@samsung.com
현재 삼성물산(주) 건설부문 토목기술팀
과장