

퇴적암 지역에서의 교각 기초 하중을 받는  
기존터널의 안정성에 대한 해석적 고찰  
Stability Analysis of Existing Tunnel in Stratified  
Sedimentary Rocks Subjected to Bridge Pier Load

김 교 원 (Gyo Won Kim)

경북대학교 자연과학대학 지질학과

요약 / ABSTRACT

경상계 퇴적암은 층리가 잘 발달하고 있어 강도 및 변위 특성은 이방성을 띄기 때문에 터널 등 지반 특성과 밀접하게 관계되는 건설공사 시에 지반의 이방성 특성을 고려한 설계가 필요하다. 경상계 퇴적암을 기반암으로 하여 건설 중인 대구 지하철 2호선은 운영 중에 지하철 노선 상부에 건설되는 것으로 계획된 동서고가도로의 하중을 추가로 받게 된다. 교각 기초에 작용하는 76.2 MN의 고가도로 하중이 하부의 지하철 터널에 미치는 영향을 수치해석으로 검토하였다. 검토결과 지하철 터널 주변 지반은 추가 하중으로 인하여 5~6 MPa의 응력을 받게되며 콘크리트 라이닝은 8~10mm의 추가 변위를 받게되어 라이닝의 손상 가능성이 큰 것으로 나타났다. 따라서, 지하철 운영시의 안전을 위하여 고가도로 교각 기초 부근의 터널은 지하철 공사 시에 적절히 보강되어야 할 것으로 판단된다.

An anisotropic characteristics of stratified sedimentary rocks should be considered in the design of tunnel. The second line of Taegu subway is under construction through the sedimentary rocks which is stratified by alternation of shale and sandstone, and Tongsoe over bridge road is planned to be constructed along the subway line. Thus the subway twin tunnels will be subjected by the bridge load of 76.2 MN per pier that will be placed in between the twin tunnels of the subway line. A numerical analysis is carried out for the stability of the twin tunnel, and the result shows that the maximum principal stress of surrounding ground is increased by 5~6 MPa and the additional displacement of concrete lining is reached up to 8~10mm due to the external bridge load. For the safety operation of the subway, reinforcement of the tunnel structure is highly recommended.

## 서 언

대구-진주를 잇는 경상남북도 일원에 분포하는 중생대 백악기의 경상계 퇴적암은 주로 셰일과 사암의 호층으로 구성되어 있으며 층리의 발달이 뚜렷하다. 이 지역 퇴적암은 층리의 횡적 연속성이 탁월하기 때문에 공학적으로 평면 이방성 매질로 볼 수 있다. 따라서, 이 퇴적암 층에서의 건설 공사 시에는 지반의 이방성을 고려한 설계가 필수적으로 요구된다.

현재 건설 중인 대구지하철 2호선은 대구시의 중심부를 가로질러 동서 교통 축을 만드는 노선으로서 본선구간은 주로 쌍굴 터널로 계획되어 있으며, 추후에 건설예정인 동서고가도로의 노선도 지하철 노선과 동일하며 고가도로의 기초는 쌍굴 터널의 중간에 계획되어 있다. 따라서, 지하철 정거장 구조물은 추후 설치 예정인 고가도로 기초의 하중을 고려하여 설계되었으며, 터널의 설계 시에도 추가 하중을 고려하여 수치해석을 수행하였다. 그러나, 터널 수치해석 시에 대구 지방의 퇴적암의 특성인 지반 이방성에 대한 고려가 무시되었으며, 터널 완공 후 지하철 운영 시에 두 터널 중앙 상부에 설치되는 76.2 MN에 달하는 고가 도로의 기초 하중은 지하철 터널에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 보고 터널 설계 시에 단면 보강 등의 특별한 배려가 간과되었다.

본 연구는 대구지역의 퇴적암의 공학적 이방성을 고려한 경우에 지하철 2호선이 완공된 후에 건설되는 동서고가도로의 추가하중이 하부의 지하철 터널에 미치는 영향을 수치 해석적인 기법으로 검토하여 현재 시공중인 2호선 터널설계의 적정성을 확인하기 위하여 수행하였다.

### 대구지역의 지질특성

#### 지질개요

팔공산 화강암 체의 남서부에 접하는 대구지역은 다데이와(1929)에 의하여 최초로 지질 도폭 조사가 수행되었으며, 경상분지의 지사와 층서에 대하여서는 Chang(1988), Chang *et al.*(1990) 등 많은 연구가 있어 왔다. 최근 장과 박(1997)은 경상분지

중앙부의 지질도를 Figure 1과 같이 정리하였는데, 이 연구결과에 따르면 대구지하철 2호선 노선구간은 하양층군을 기반암으로 하고 있다.

Chang *et al.*(1997)에 따르면, 중생대 백악기에 퇴적된 하양층군은 셰일, 사암 및 역암으로 구성되며 암석학, 시준층 및 암석 색도에 따라 하부로부터 칠곡층, 신라역암층, 학봉화산암층, 함안층 및 진동층으로 구분된다. 최 하부 층인 칠곡층은 지하철 2호선 노선구간에서 층후 약 650m로 저색이 우세한 사암, 셰일, 역암, 고회암 및 응회암으로 구성되어 암회색을 띠는 하부의 진동층군의 진주층과 구별된다. 신라역암층은 역암, 사암 및 이암으로 구성되며 편마암, 화강암, 현무암 및 안산암 등으로 구성된 원마도가 양호한 역을 포함하고 있으며 층후는 240m 정도이다. 학봉화산암층은 지하철 2호선 노선 인근 지역에서 국부적으로 분포하나 노선 상에서는 노출되지 않으며, 현무암, 집괴암 및 응회암질 사암으로 구성되며 층후는 200m 정도이고 분포는 연장 15km에 불과하다. 함안층은 저색의 셰일과 장석질 사암으로 구성되며 노선구간에서의 층후는 800m 정도이다. 하양층군의 최상위 층인 진동층은 암회색이 우세한 셰일과 사암으로 구성되며 층후는 1,100m에 달하고 성서IC 부근에서 종점까지의 노선구간은 이 층을 기반암으로 하고 있다. 지질도에서 보듯이 남북 주향의 단층이 용산역, 반고개역, 반월당역 및 삼덕역 부근 등 4개소에서 노선을 가로지르고, 북동-남서 주향의 단층은 이곡역 및 수성역 부근에서 노선과 사교하게 될 것으로 추정된다.

#### 지반의 공학적 특성

대구 지역의 퇴적암은 풍화심도가 얇아서 지표에서 수 m 심도에서부터 신선한 암석이 노출된다. 김 등(1997)이 함안층 및 진동층의 신선한 퇴적암의 공학적 이방성 특성을 측정하기 위하여 층리면의 경사각을 변화시키면서 시료를 성형하여 일련의 3축 압축시험을 실시하였다. 이 결과를 바탕으로 탄성계수 및 포아송 비를 층리면의 경사각에 따라 표시하면 Figure 2와 같이 된다. 그림에서 보듯이 이들 특성치는 동일한 층리 경사각에서 상당한 범위로 분산되는데 이는 구속압의 차이, 시료의 불균일성 및 잠재된 미소결합 등 다양한 인자의 영향



LEGEND

~ ~ ~ ~ ~	Alluvium	▬	Jindong Formation
^ ^ ^ ^ ^	Bulguksa Intrusive Group	▬	Hannan Formation
▬	Granitic Rocks	▬	Hakbong Volcanic Formation
▬	Felsite (Porphyry)	▬	Silla Conglomerate Formation
^ ^ ^ ^ ^	Intrusion	▬	Chilgok Formation
▬	Volcanic Rocks	▬	Jinju Formation
∨ ∨ ∨ ∨ ∨	Extrusion	▬	Hasandong Formation
~ ~ ~ ~ ~	Hayang Group	- - -	
▬	Sindong Group	▬	

Figure 1. Geologic Map of Taegu and Vicinity (after Chang and Park, 1997).

으로 추정된다. 검은 점으로 표시된 평균치를 기준으로 볼 때, 층리면의 경사각이 약 30° 일 때 탄성계수는  $1.1 \times 10^5 \text{MPa}$ 을 보였고 약 60°일 때 최소  $3.8 \times 10^4 \text{MPa}$ 을 보여서 탄성계수의 이방성은  $E_1/E_2=3$ 이었고, 포아송 비는 층리면의 경사각이 크질 수록 작아지는 경향을 보였다. 또한 일축 압축강도에 대한 탄성계수의 비로 정의되는 계수 비(Modulus

Ratio)의 평균치는 층리면의 경사각 15~50° 범위에서 1,500 이상을 보여서 이 범위에서의 일축압축 강도가 상대적으로 작아짐을 보여주고 있다. 본 연구에서는 김 등(1997)의 연구결과를 바탕으로 퇴적암의 최대 변형계수에 대한 최소 변형계수의 비를 30%로 결정하였다.

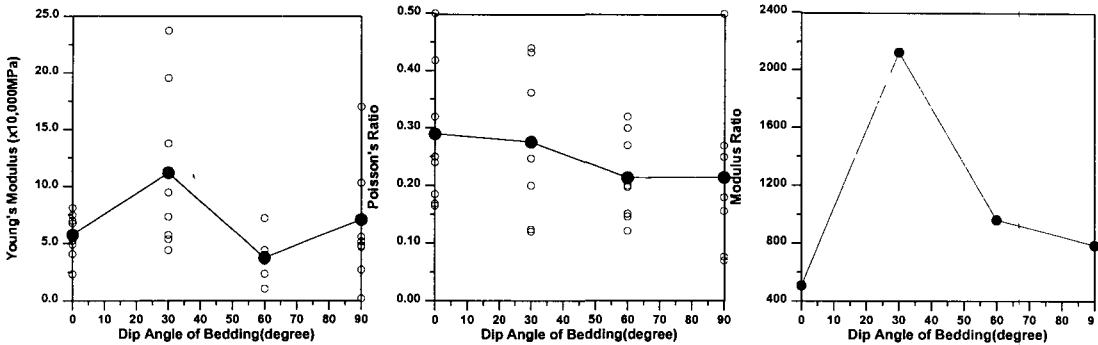


Figure 2. Variation of Young's Modulus, Poisson's Ratio and Modulus Ratio of Sedimentary Rocks in Respect to Dip Angle of Bedding Plane (Reproduced based on the Data after Kim et al., 1997)

## 수 치 해 석

### 사용 프로그램

수치해석에 사용된 프로그램은 캐나다 토론토대학교 암반공학연구팀(Rock Engineering Group)에서 작성한 유한요소 프로그램 Phase2 인데, 이 프로그램은 단계굴착을 고려한 재료의 탄소성 문제를 해석할 수 있으며 Mohr-Coulomb 파괴기준 및 Hoek-Brown 파괴기준을 도입하고 있다. 이 프로그램과 현재 우리 국내에서 널리 사용되고 있는 유한 차분 요소법에 기초한 프로그램 FLAC과의 비교검증은 동 연구팀(J.H. Curran and B.T. Corkum, 1997)에 의하여 수행되었으며, 그 결과는 매우 만족스러운 것으로 나타났다. 현재 이 프로그램은 세계적으로 약 1,500여 기관의 사용자 집단을 가지고 있으며, 입력이 매우 간편하고 요소망을 자동으로 형성할 수 있어서 사용에 편리하다.

### 해석 입력치

김 등(1997)의 시험결과는 경암급으로 분류된 신선한 암석시료에 대한 시험 결과로서 암석의 강도 및 변형특성이 층리면의 경사각과 밀접한 관계가 있음을 보여주고 있다. 암반의 강도특성은 대형 현장시험을 통하여 근사적으로 결정할 수 있지만, 암석 시료에 대한 시험 결과에서 암반의 강도특성을 경험적으로 유추할 수도 있다. 본 연구에서는 대상 구간과 유사한 조건의 대구 지역의 지하철 1호선 계측결과, 터널 상부에서의 추가 하중이 없는 경우의 단선 병렬터널에서의 천정부 침하는 평균 3~5mm의 변위를 보였기 때문에 이와 유사한 변위가 유발되도록 암반 탄성계수를 암석 시료 시험치의 약 10%로 가정하였다. 현장 경암층의 층리면에 평행한 방향의 최대 변형계수를 10,000MPa로 보았으며 최소 변형계수는 3,000MPa로 결정하였고, 그에 대응되는 포아송 비는 각각 0.27 및 0.21로 가정하

퇴적암 지역에서의 교각 기초 하중을 받는 기존터널의 안정성에 대한 해석적 고찰

였다. 보통암층의 변형계수는 경암층의 50%로 하였고, 층적층은 균질한 사질토로 보고 이방성을 고

려하지 않았다. 해석에 사용된 지반의 공학적 특성은 다음 표와 같다.

Table 1. Rock Properties used in Analysis.

지층구분	$\gamma$ (MN/m <sup>3</sup> )	$c$ (MPa)	$\phi$ (°)	$E$ (MPa)	$G$ (MPa)	$\nu$
층적층	0.02	0.0	35	$E_1= 60$ $E_2= 60$	22	$\nu_1=0.35$ $\nu_2=0.35$
보통암층	0.0256	1.0	40	$E_1= 5,000$ $E_2= 1,500$	1,260	$\nu_1=0.30$ $\nu_2=0.25$
경암층	0.0262	2.0	42	$E_1= 10,000$ $E_2= 3,000$	2,590	$\nu_1=0.27$ $\nu_2=0.21$

주)  $E_1$  및  $\nu_1$ 은 수평에서 30° 각도로 경사진 층리면에 평행한 방향의 특성치이고,  $E_2$  및  $\nu_2$ 는 층리면에 수직 방향의 특성치임.

해석방법

해석 대상 구간은 지하철 2호선의 신천 통과구간으로 신설예정인 수성교의 하중도 고려하였다. 해석은 Figure 3과 같이 좌우로는 두 터널의 중심간격의 1배 이상, 하부로는 0.5배 이상, 상부로는 지표까지의 영역을 대상으로 하였다. 지층의 분포는 지질조사 결과에 따라 상부로부터 층적층, 경암층, 보통암층 및 경암층이 해석영역에 포함되는 것으로 보았다. 또한, 지층의 층리면의 경사는 30°로

하였고(요소망에서 좌측으로 경사), 해석영역의 수직 경계부는 수직변위만 허용하고 하부 수평 경계부는 수평변위만 허용하였다. 해석순서는 굴착과정을 반영하여 총 9단계로 구분하고 초기 상태의 해석 시에 수성교 교량 하중을 적용하였으며, 김과이(1996)를 참고하여 3차원적인 굴진의 영향으로 굴착 직후 30%의 응력이 해방되는 것으로 가정하였다.

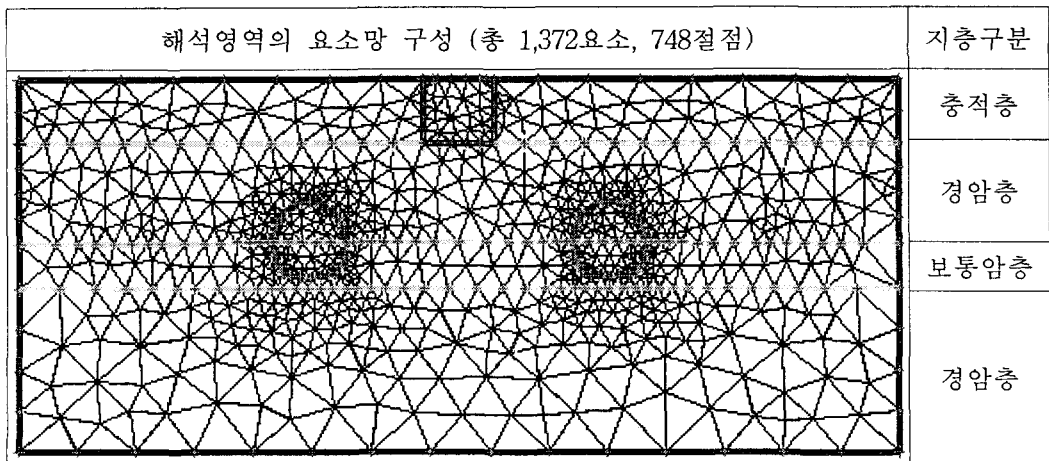


Figure 3. Geometry of Finite Element Mesh with Rock Layers.

해석결과

1. 지반응력 및 라이닝 변위

해석결과는 Figure 4에 도시된 바와 같이 지하철 터널이 완공되는 시점에서의 터널주변 지반의 최대 주응력이 1.0~1.2 MPa 정도이고 터널 천정부 침하 약 3~4mm, 벽면 변위는 1~2mm 정도로서 안정성을 유지할 것으로 보이나, 동서 고가 도로의 건설에 따른 교각 하중 76.2 MN이 두 터널의 중앙 상부에 가하여 지는 경우 지반응력은 5~6 MPa로 증가하고 변위는 8~10mm로 증가하는 것으로 나타났다. 특히, 각 터널에서의 최대 변위는 고가 도로 하중의 크게 영향을 미치는 좌측 터널의 우 상부 및 우측 터널의 좌 상부에서 발생하며 우측터널의 변위가 좌측 터널의 변위보다 크게 나타났다. 즉, 지반의 이방성의 영향으로 좌측 터널 주변 지반에 더 큰 응력이 집중되나 변위는 우측 터널에서 다소 크게 발생하고 있다. 라이닝 배면에 설치되는 방수막이 어느 정도의 변위는 수용할 것으로 보이나 이러한 크기의 변위가 콘크리트 라이닝 측 상부에 비대칭적으로 작용하는 경우 라이닝의 손상 가능성을 클 것으로 보인다.

2. 지보공

해석 결과 동서 고가 도로의 하중이 적용된 최종 단계에서의 슛크리트의 모멘트 분포는 약 -0.8~0.05kN-m의 범위이고 록볼트 축력은 최대 30kN 정도이었다. 특히, 우측터널 좌 상부의 록볼트는 고가도로의 하중으로 약 30kN, 좌측 터널 우 상부의 록볼트는 15kN의 압축력을 받는 것으로 나타나서, 지반의 이방성 특성으로 인한 영향을 받고 있음이 확인되었다.

3. 지반강도 안전율

터널굴착 및 추가하중으로 발생하는 지반내의 응력에 대한 지반의 전단강도의 비로 정의되는 지반강도 안전율은 지하철 공사 완료 시점인 제 7단계에서 Figure 5와 같이 3 이상이었으나 고가도로의 하중이 재하된 제 8단계에서는 두 터널 사이의 지반의 안전율이 1~2로 현저하게 낮아지고 있다. 터널 측 하부에도 록볼트를 설치하여 안전율을 증가시킬 필요가 있을 것으로 판단된다.

결 론

퇴적암 지역에 건설되는 대구 지하철 2호선 운영 중에 건설계획인 동서고가도로의 기초 하중에 의하여 지하철 쌍굴 터널이 어떠한 영향을 받게 될 것인가를 수치 해석을 통하여 검토하였다.

1. 지하철 쌍굴터널 중앙 상부에 위치하는 고가도로 피어 기초 하중은 퇴적암의 이방성 특성으로 인하여 양 터널에 서로 다른 영향을 주고 있다. 즉, 층리면 경사 내림방향의 좌측 터널에서 지반 응력은 5~6MPa에 달하나 우측 터널에서는 3~4MPa이며, 라이닝의 변위는 우측 터널에서 약 9mm, 좌측 터널에서 약 8mm로서 우측 터널의 변위가 약간 크게되는 것으로 나타났다. 터널의 콘크리트 라이닝이 완성된 후 이와 같은 추가적인 응력 및 변위가 발생하는 경우 라이닝의 손상 가능성이 높다. 특히, 라이닝 배면에 공극 등이 존재하는 경우에는 응력집중현상에 의한 지반파괴가 수반될 수도 있을 것이다.

2. 터널 지보재인 록볼트 및 슛크리트는 고가도로에 의한 추가 하중으로 인하여 허용치 이내의 추가축력을 받게되나, 터널 주변 지반의 강도 안전율이 현저하게 낮아지므로 터널 하부 측벽에도 천정부와 동일한 간격으로 록볼트를 설치하고 터널 하부의 인버트 아치를 슛크리트로 폐합 함이 바람직하다. 추가로 설치되는 록볼트는 퇴적암의 절리나 층리면을 결속시켜서 지반이 연속체로 거동하는데 기여하게 될 것이고, 터널 하부의 폐합은 슛크리트 라이닝과 일체 구조가 되어 주변 지반을 3축 압축 상태로 구속하므로 지반 강도의 저하를 방지하게 될 것이다.

3. 콘크리트 라이닝의 구조적인 안전에 대한 여유(Redundancy)를 확보하기 위하여 피어 기초의 추가 하중의 영향범위의 라이닝은 적절한 보강 방안이 터널 건설단계에서 강구되어야 한다. 라이닝 보강 범위, 방법 및 규모는 고가도로 각 피어 기초의 하중 크기와 터널과의 상대적인 위치뿐만 아니라 층리면의 방위 등을 종합적으로 고려하여 별도로 검토되어야 할 것이다.

끝으로, 주로 세일과 사암이 박층으로 교호하는 경상계 퇴적암 지반에서의 터널, 도로 절취 및 교

퇴적암 지역에서의 교각 기초 하중을 받는 기존터널의 안정성에 대한 해석적 고찰

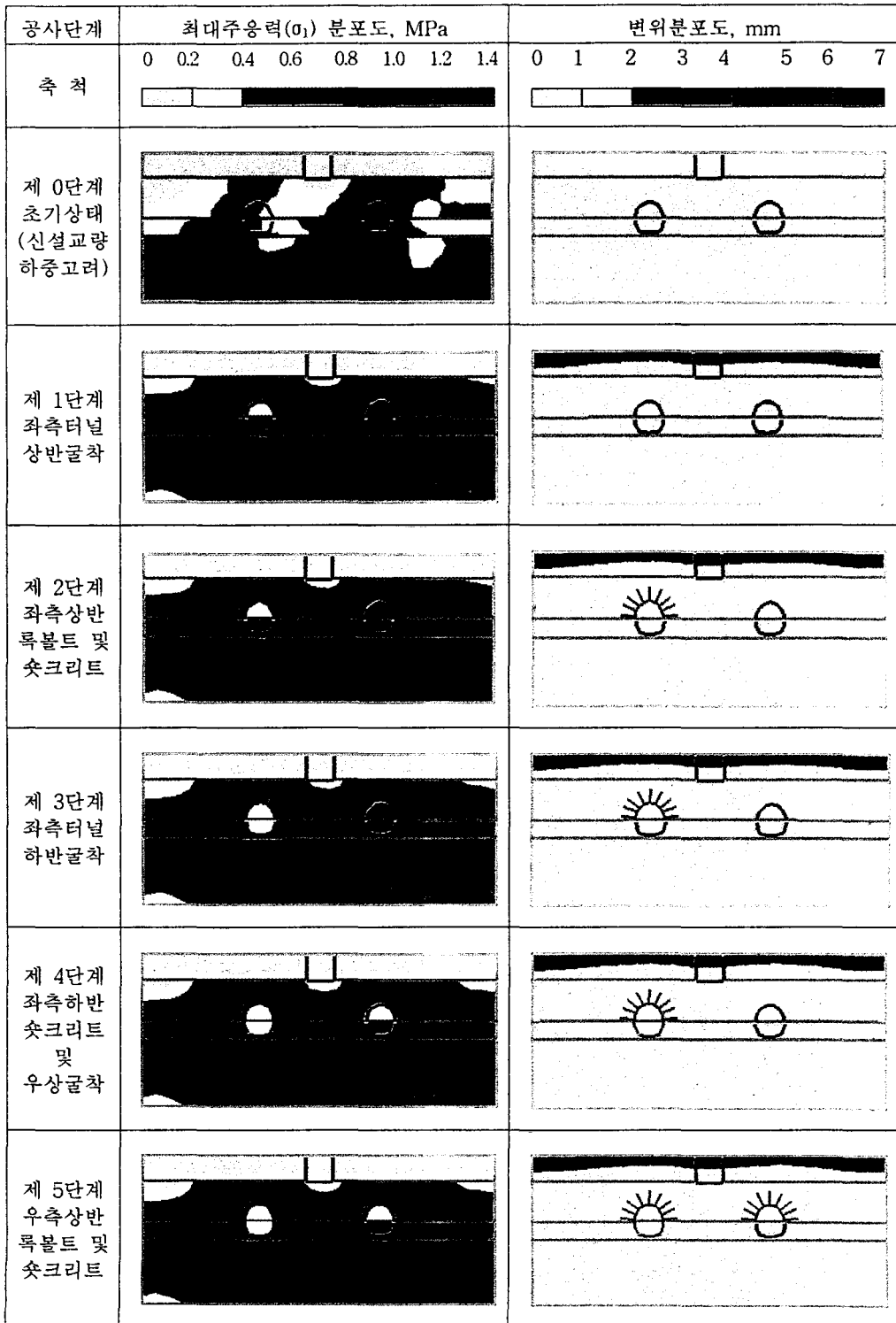


Figure 4. Analysed Results showing Maximum Principal Stress and Total Displacement.

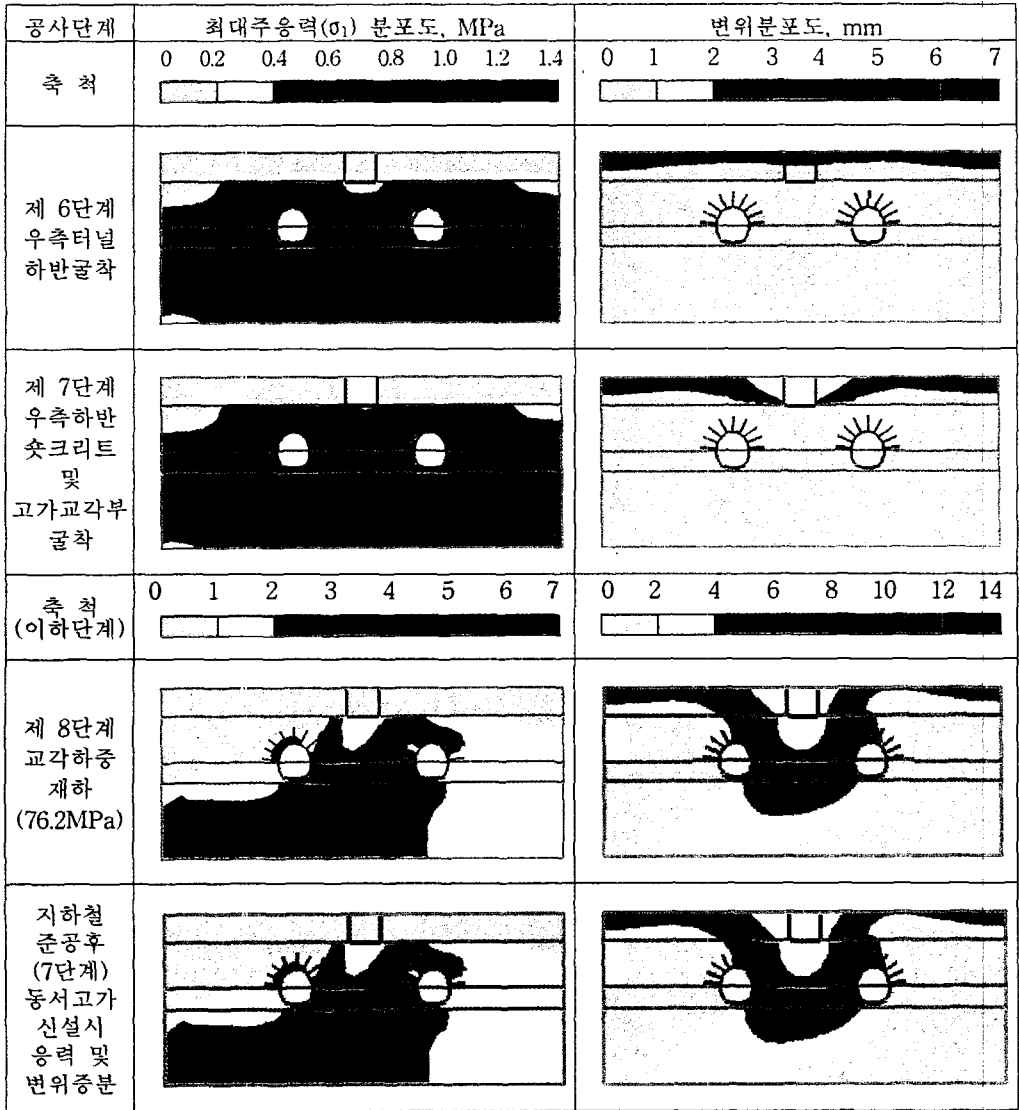


Figure 4. Analysed Results showing Maximum Principal Stress and Total Displacement(cont'd)

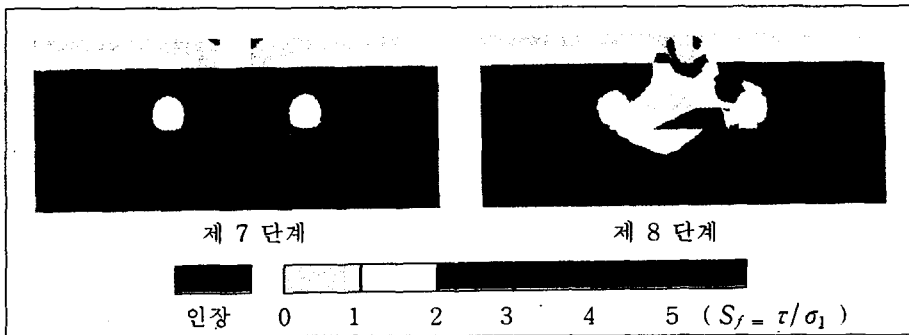


Figure 5. Comparison of Safety Factor between Steps 7 and 8.



량기초 등의 건설 공사 시에는 지반의 이방성 특성을 고려하여 설계하여야 안전하고 경제적인 적정 설계가 가능할 것으로 판단된다. 특히, 대구 지역은 지하철 및 지하공간개발 등 다양한 지하건설공사가 진행 중에 있기 때문에 이 지역 퇴적암의 공학적 이방성 특성과 층리면의 강도특성 등에 대한 보다 심도 있는 기초적인 연구가 절실히 요구된다. 본 연구에서는 한정된 자료에 근거하여 추정된 지반 특성치를 사용하여 안정성을 검토하였으나, 당면 문제인 동서교가도로 건설시의 2호선 지하철 터널의 안정성에 대한 정밀한 검토는 기본적으로 이와 같은 지반특성 평가에 근거하여 수행되어야 하며, 그 결과에 따라 대책방안이 강구되어야 할 것이다.

## 참 고 문 헌

- 김교원, 이현범, 1996. 터널굴진시의 3차원 지반거동의 2차원적 해석법 고찰, 대한지질공학회, v.8, no.3, 111-118.
- 김영수, 이상진, 허노영, 1997. 퇴적암 지반의 지하공동에 대한 비등방 해석, 환경과학논문집, v.11, 1-9.
- 장기홍, 박순옥, 1997. 경상분지 중앙부의 구조발달사와 화산활동사, 자원환경지질학회지, v.30, no.2, 143-151.
- 다데이와(立岩巖), 1929. 朝鮮地質圖(1:50,000), 倭館-大邱-永川, 地質調査所, 9.
- Chang, K.H., 1988. Cretaceous Stratigraphy and Paleo-current Analysis of Kyongsang Basin, Korea, Jour. of Geol. Soc. Korea, v.24, 194-205.
- Chang, K.H., B.G. Woo, J.H. Lee, S.O. Park and A. Yao, 1990. Cretaceous and Early Cenozoic Stratigraphy and History of Eastern Kyongsang Basin, S. Korea, Jour. of Geol. Soc. Korea, v.26, 471-487.
- Chang, K.H., S.O. Park and S.J. Seo, 1997. Sedimentary and Geohistorical Aspects of Kyongsang Basin(Cretaceous), S.E. Korea, Guide Book for Geological Excursion, 104th Annual Conference, Geological Society of

Japan.

Curran, J.H. and B.T. Corkum, 1997, Phase2 Verification Manual, Rock Engineering Group, Univ. of Toronto, Canada, 1.1-9.8.

---

김 교 원

경북대학교 자연과학대학 지질학과

대구광역시 북구 산격동 1370

Tel : (053) 950-5357 Fax : (053) 950-6344

E-mail : GeoDoc@chollian dacom.co.kr