

응력집중을 고려한 터널의 3차원 거동에 관한 연구

—하중분담률 중심으로—

The 3-Dimensional Tunnel Analysis Considering Stress
Concentration : Load-Distribution Ratio

이 인 모*1	김 동 현*2
Lee, In-Mo	Kim, Dong-Hyun
최 항 석*3	최 수 일*4
Choi, Hang-Seok	Choi, Soo-Il

Abstract

To simulate the three-dimensional effect occurring near the tunnel face in a two-dimensional model, empirical load-distribution ratio concept is frequently used in tunnel design. In this paper, three-dimensional analysis is performed and its results are compared with those of two-dimensional analysis to investigate the applicability of the load-distribution ratio concept. Especially, stress concentration near the tunnel face is investigated in depth. A parametric study is performed to investigate the effect of each factor on the load-distribution ratio. The factors considered here include unsupported span length, initial stress, rock quality, tunnel size and the depth of tunnel location.

Moreover, the load-distribution ratios for the typical tunnel sections in Seoul Subway to be used in the tunnel design are suggested.

요 지

터널굴착시, 막장부근의 3차원 효과를 반영하기 위해 주로 경험적인 하중분담률 개념을 도입한 2차원 유한차분법 수치해석이 수행된다. 본 논문에서는 3차원 수치해석을 수행하고, 그 해석결과와 2차원 수치해석 결과를 비교함으로써 합리적인 하중분담률의 적용 가능성 및 막장 부근의 응력집중 문제를 규명하고자 하였다. 무지보 굴착길이, 초기지중응력, 지반종류, 단면크기와 터널심도등의 하중분담률에 주된 영향을 미치는 인자들에 대한 매개변수 연구를 수행하고, 그 결과를 토대로 서울지하철의 대표적인 단면에 대해 적용가능한 하중분담률을 추천하였다.

Keywords : Tunnel, Stress Distribution, Two-dimensional, Three-dimensional

*1 정희원, 고려대학교 토목환경공학과 부교수

*2 정희원, 고려대학교 토목환경공학과 박사과정 수료

*3 고려대학교 토목환경공학과 공학 석사

*4 코오롱 건설 기술연구소 소장

1. 서론

터널 구조물의 설계와 안정성 검토에는 3차원 해석에 의한 실제상황 재현이 필요하나, 터널의 3차원 해석은 시간적, 경제적인 문제로 실무 적용에 제약을 받게 되므로 실용적인 2차원 해석에 의한 단면 검토가 불가피한 실정이다. 3차원 거동을 2차원 수치해석으로 표현하기 위해서는 합리적인 하중분담률 개념의 도입이 필요하다. 하중분담률이란 2차원 해석시 굴착이 진행되는 시간적 경과에 따라 천정부의 변위를 기준으로 굴착단계, 1st Shotcrete (soft shotcrete) 단계, 2nd Shotcrete (hard shotcrete) 단계로 나누어 해석하여 3가지 단계에 대응하는 변위를 최종 버위에 대한 백분율로 나타내는 것을 의미한다.

현재 실무에서 사용하는 하중분담률은 터널의 천단변위의 변화경향을 고려한 방법을 주로 이용하는데 이 방법으로는 굴착으로 인한 터널 주변의 응력변화를 추정하기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 2차원 수치해석 방법과 3차원 해석결과를 비교 검토하여 터널의 변형과 응력의 3차원 효과를 동시에 고려할 수 있는 2차원 해석방법을 제시하고자 한다. 이를 위하여 무지보 굴착길이, 초기지중응력, 지반종류, 단면크기와 터널심도등의 하중분담률에 영향을 미치는 인자들에 대한 매개변수 연구를 수행하고, 그 결과를 토대로 서울지하철의 대표적인 단면에 대해 적용가능한 하중분담률을 추천하였다.

2. 하중분담률의 고찰

2.1 하중분담률 적용 배경

지반 굴착으로 발생하는 터널의 응력과 변형, 그리고 주변지반과 지보재의 거동은 터널의 기하학적 형상과 무지보 굴착거리 등의 설계, 시공 조건 및 초기 지중응력과 지반정수등의 지반자체 조건에 따라 다양한 양상을 보인다. (한국지반공학회, 1991) 특히, 터널은 3차원

구조이므로 평면 변형을 조건으로 해석할 경우는 지반의 불균질성 및 이방성등의 주변 지반 조건을 제외한 응력 및 변형의 관계만으로도 3차원 실제 거동과 차이가 날 수 있다. (Hoek and Brown, 1980) 즉, 터널이 진행하면서 터널의 횡방향은 물론, 축방향으로 하중전이효과 (arching effect)가 발생하므로 굴착과 지보 설치 단계에서 터널에 작용하는 응력은 횡방향 하중전이만 고려하는 평면변형을 조건의 2차원 해석과는 다른 양상을 보인다. (Eisenstein, 1984) 축방향 하중전이를 2차원 평면상에서 적절히 고려해 주기 위해서는 굴착에서부터 지보재가 설치되는 시간까지의 터널 진행 과정을 지중응력 상태에 따라 굴착단계, 1st Shotcrete 단계, 2nd Shotcrete의 3 단계로 나누어 터널의 3차원 거동을 표현할 수 있도록 점진적으로 이완시키는 하중분담률개념의 도입이 필요하다.

본 연구의 주된 관심은 이러한 하중전이 현상이 무지보 굴착길이, 지반 정수, 초기지중응력, 단면형상, 터널 심도 등의 영향인자에 따라 실무에 적용 가능한 하중분담률을 결정하는데 있다. 이를 위해서 2차원 해석과 3차원 해석결과를 비교한 후, 터널 천정부 변위 및 응력집중 현상을 적절히 고려할 수 있는 하중분담률을 결정하고자 한다.

2.2 하중분담률 모델링 방법의 비교 연구

터널 막장의 진행에 따라 터널 주변에서 발생하는 응력 재배열을 2차원 해석으로 적절하게 묘사하는 하중분담률 모델링 방법에는 다음과 같은 3가지 방법이 있다.

(1) 다중요소법 (Stiffness Variation Method) (Sinha, 1991)

터널 굴착시 주변응력의 3차원 배열은 지반의 강성과 직접 관계된다고 보고 지반의 탄성계수(E)를 하중분담률에 따라 적절히 줄여주는 방법이다. 즉, 터널 굴착 및 지보 설치 단계 별로 터널 내부의 강성(stiffness)을 감소시키

는 방법으로, 구체적인 적용방법은 그림 1에 나타냈다.

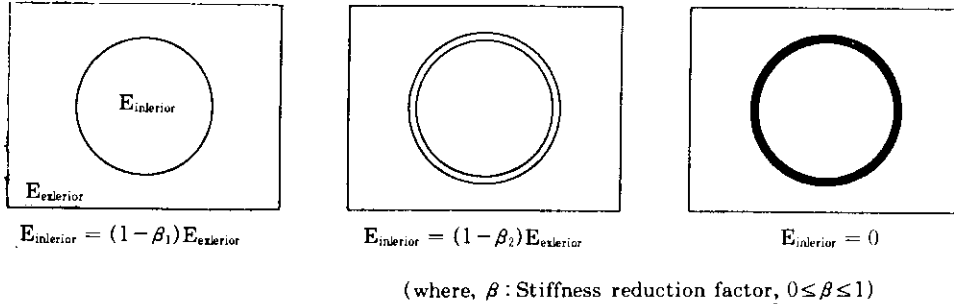


그림 1. 다중요소법 모델링

(2) 응력 분배법(Stress Distribution Method)(Sinha, 1991)

터널 막장의 진행에 따른 응력상태의 재배열을 직접 터널에 가해서 3차원 효과를 고려하는

방법으로, 각 하중분담물마다 응력 가속도를 줄여주는 방법이다. 해석방법은 그림 2에 도식했다.

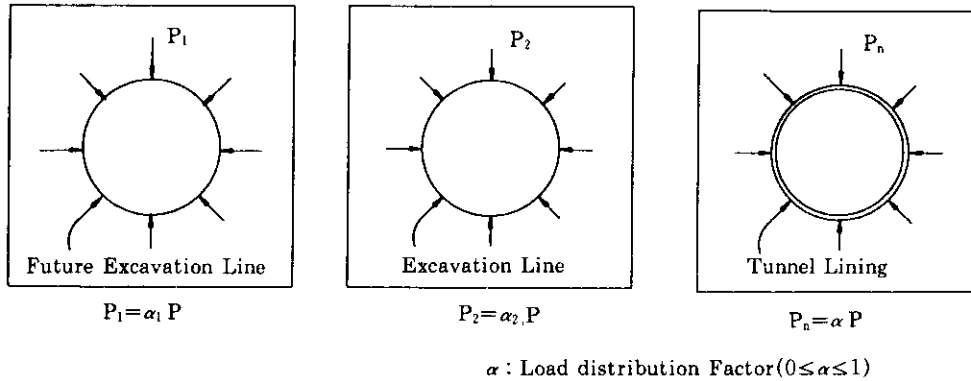


그림 2. 응력분배법 모델링

(3) 내부압력으로 하중분담물을 조절하는 방법(FLAC-2D, 1991)

터널 굴착시 발생하는 초기 최대 불평형력을 각 절점으로 부터 구한 후, 이 값의 분담물에 해당하는 Factor를 곱해 경계면에 반대 방향으로 압력을 가하여 하중분담물로 이용하는 방법으로 적용방법은 다음과 같다.

- a. 초기 평형상태에서 초기응력을 구한다.
- b. 굴착으로 인해 공동주위에 발생하게 되는

불평형력을 유도해 낸다.

- c. 불평형력이 발생한 경계면에서 $\alpha\%$ 의 분배율을 적용하고 적절한 지보재를 설치한다.

ex.) 40% 하중분담률 $\alpha=0.6$

앞에서 언급한 3가지 방법으로 원형터널에 대해 탄성해석을 수행하여 이를 탄성론적 이론 해인 Kirsch 공식(Hoek and Brown, 1980)과 비교하여 모델링 방법의 적합성을 검토하였으

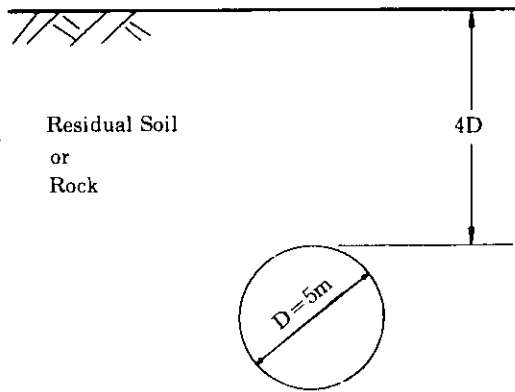


그림 3. 해석단면

표 1. 지반 물성치

	E (t/m ²)	γ (t/m ³)	c/ (t/m ²)	φ (deg)	ν	K ₀
풍화토	8,000	2.0	2.0	25	0.286	0.4
암	500,000	2.4	10.0	40	0.2	0.5

며, 이를 위한 해석 단면은 그림 3과 같다.

예제해석을 위한 지반은 풍화토와 암의 2경우에 대해 실시했으며, 각 지반의 물성치는 표 1에 나타냈다.

해석은 굴착단계에 30%, 1st Shotcrete 단계에 40% 그리고 2nd Shotcrete 단계에 30%의 임의의 하중분담률을 적용해서, 각 단계마다 터널천정부의 연직변위를 Kirsch 공식과 비교

표 2. 결과비교

(단위 : mm)

구 분	단 계	다중요소법	응력분배법	내압을 이용 하는 방법	Kirsch eq.
풍화토	excav. (30%)	0.047	100.60	7.58	6.06
	1st S.C. (70%)	0.13	244.70	12.94	14.14
	2nd S.C. (100%)	8.55	313.60	16.10	20.20
암	excav. (30%)	0.00046	-3.09	0.12	0.13
	1st S.C. (70%)	0.00152	-0.88	0.30	0.29
	2nd S.C. (100%)	0.415	0.75	0.45	0.42

하였으며, 그 결과는 표 2에 수록하였다.

표 2에서 알 수 있듯이 하중분담률을 적용하는 방법중에서 다중요소법은 2nd Shotcrete 단계에서 굴착을 완료시키므로 굴착 단계와 1st Shotcrete 단계에서의 변위는 탄성론적 이론해와 비교해서 과소 평가되고 응력분배법은 이론치보다 과다하게 평가되었다. 불평형력을 이용해 내압을 주는 방법은 변위양상이 탄성론에 의한 이론적인 해석과 유사하게 나타나서, 3방법 중에서 가장 현실성있는 방법으로 평가된다. 따라서 본 연구에서는 내압을 주는 방법을 이용하였다.

2.3 3차원 조건의 2차원 모델링 방법

본 연구에서는 지반공학 범용 프로그램인 FLAC-2D와 FLAC-3D를 사용하여 2차원 및

3차원 수치해석을 수행하였으며, 구성방정식은 Mohr-Coulomb 모델을 사용하였다. 본 연구의 목적이 지반조건 및 굴착방법에 따른 2차원과 3차원 해석결과의 비교 분석에 있으므로, 연구의 기본적인 절차는 지정된 지반조건, 터널단면 및 굴착과정에 대해서 시공과정을 고려한 3차원 해석을 수행한 후, 여기서 얻어진 결과와 터널 진행에 따른 천정부의 법선 변위와 임의의 하중분담률을 가지고 해석한 2차원 해석의 굴착, 1st Shotcrete, 및 2nd Shotcrete 단계의 천정부의 법선 변위를 비교하여 일치할 때까지 하중분담률을 바꾸어가며 2차원 해석을 실시한다. 결국 두해석 결과가 일치할 때 사용된 하중분담률을 주어진 해석 조건에서의 하중분담률로 정할 수 있다.

변위 발생 양상을 토대로 하중분담률이 정해

지면 3차원 해석시 천정부의 중심 방향 응력의 소산곡선과 천정부와 측벽부에서 점선방향 응력 집중을 2차원 해석결과와 비교하여 응력을 고려한 하중분담률 적용방안을 검토하였다.

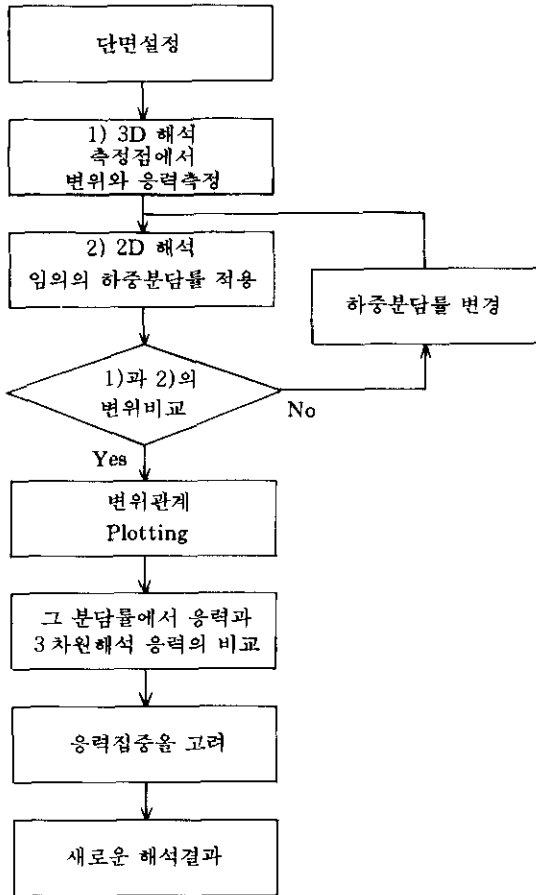


그림 4. 해석 흐름도

-2차원 해석의 개요(FLAC-2D, 1991)

그림 5는 해석에 적용된 대표적인 2차원 해석 요소망이다. 요소망의 수는 각 해석에서 크게 차이하지 않도록 했으며, 경계조건은 터널 측벽부에서 우측 경계까지 그리고, 터널 바닥면에서 하부 경계까지를 각각 4D 이상으로 모델링하였으며, 하부 경계는 연직방향 변위를,

좌우측 경계는 수평방향의 변위를 구속하였다.

실제 시공시에는 지반종류에 따라 지보패턴을 달리 적용시키나, 본 연구에서는 동일 조건 하에서 2차원과 3차원의 비교에 관심이 있으므로, 지보재를 단순화 시켜 모델링 했다. 2차원 해석시 지보재는 적용이 용이한 Beam Element를 사용하여 1st Shotcrete는 두께 5cm, 탄성계수는 $5 \times 10^5 \text{t/m}^2$ 으로, 2nd Shotcrete는 두께 10cm, 탄성계수는 $1.5 \times 10^6 \text{t/m}^2$ 으로 모델링 했다. 실제 지반에서 Shotcrete를 적절히 표현할 수 있다고 보는 Solid Element로 지보재를 재현한 값들과 Parametric Study로 비교한 결과, 논문의 관심인 터널의 천정부와 측벽부의 변위와 지보재 안쪽 원지반의 응력 경향이 같으므로 2차원 해석시, Beam Element로 지보재를 나타내어도 무방하다고 판단된다.

-3차원 해석 개요(FLAC-3D, 1994)

본 연구에 사용된 3차원 해석은 원칙적으로 변위나 응력에 대한 현장계측과정을 그대로 수치해석상에 재현한 것이다. 즉, 막장 도달 전과 후의 변위와 응력을 얻기위해 터널 내의 천정부와 측벽부에 각각 1개의 관측점(Reference Point)을 정해 굴착과정을 해석에 반영시킨 후, 각 굴착단계 마다 관측점에서 기록된 변위와 응력을 얻어내는 기법으로 해석을 수행했다. 물론, 지보재 설치도 시공조건과 유사하게 “굴착단계-1st Shotcrete단계-2nd Shotcrete단계”로 해석에 반영하였다.

지보재의 모델링은 2차원 해석조건과 일치시키는 것을 원칙으로 했으나, 수치해석 기법상의 문제로 3차원 해석에서는 Solid Element를 사용하였다. 1st Shotcrete는 두께 5cm, 탄성계수는 $5 \times 10^5 \text{t/m}^2$ 으로, 2nd Shotcrete는 두께 10cm, 탄성계수는 $1.5 \times 10^6 \text{t/m}^2$ 으로 2차원과 일치하도록 적용했다.

그림 6은 해석에 사용된 대표적인 요소망으로 y방향은 터널의 굴착방향을 나타낸다. 해석 경계는 터널 측벽부에서 우측 경계까지 그리고, 터널 바닥면에서 아래 경계까지 4D로 하고 각 경계는 Roller로 지지한다.

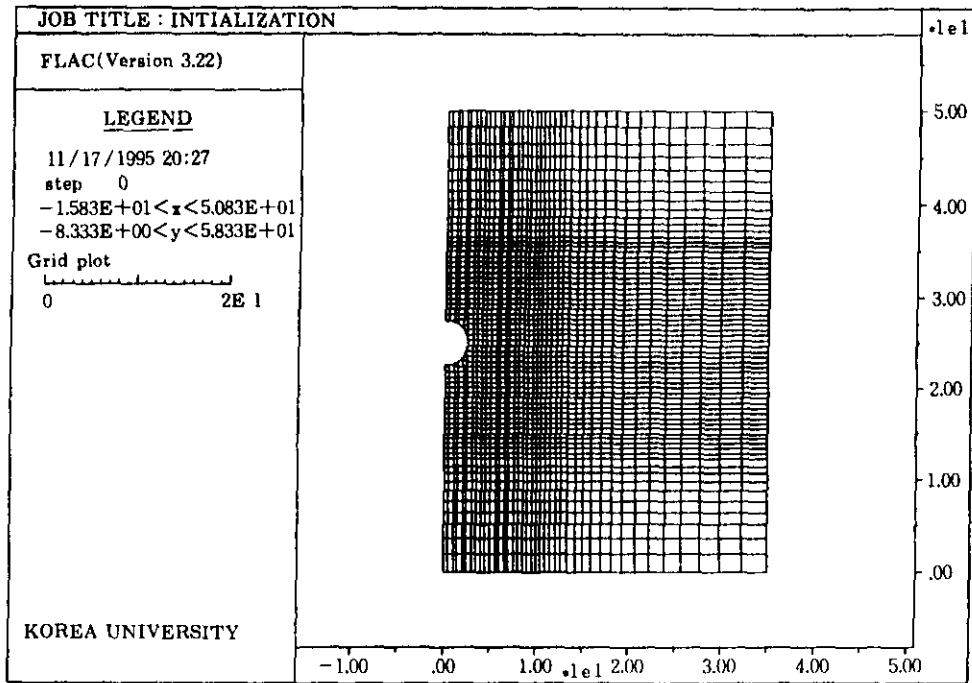


그림 5. 2차원 해석 요소망

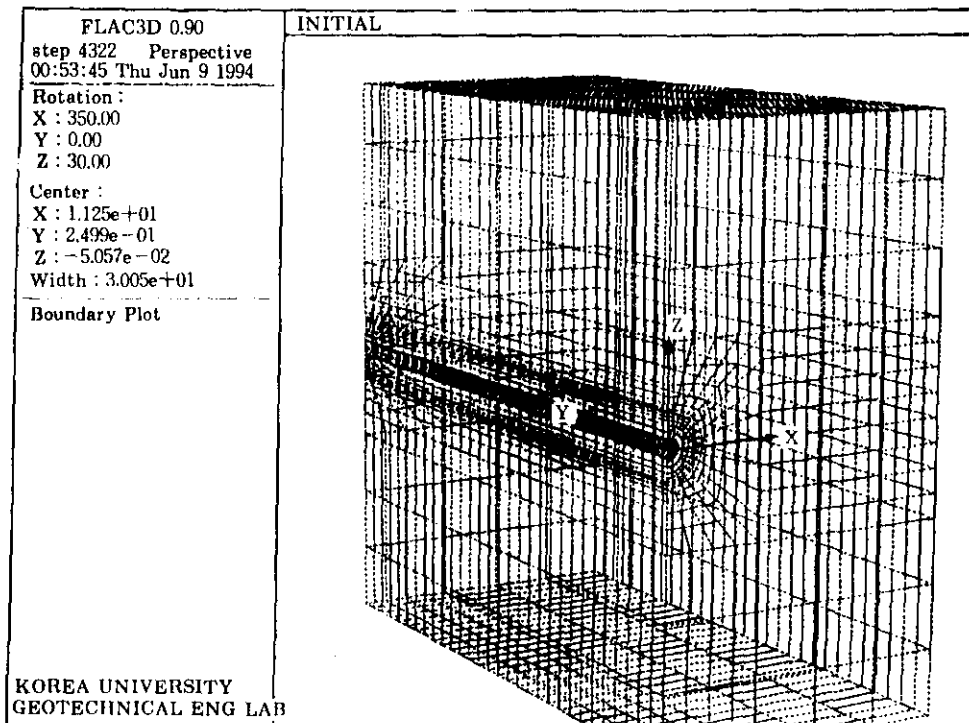


그림 6. 3차원 해석 요소망

3. 3차원 해석과 2차원 해석의 비교검토

3.1 무지보 굴착길이에 따른 비교해석

본 장에서는 터널거동의 주요 영향인자중에 하나인 무지보 굴착길이 즉, 막장거리가 3차원 거동에 미치는 영향을 검토하였다. 해석은 표 3과 같은 지반조건 및 단면 형상에 대해 무지보 굴착길이 및 1st Shotcrete와 2nd Shotcrete사이의 이격거리를 각각 0.1D(1.0m), 0.2D(2.0m), 0.25D(2.5m)로 변화시켜 3차원과 2차원의 비교해석을 수행하였다. 이는 실제 터널 시공과정에서 일어나는 굴착과 지보재 설치 과정을 모델링한 것으로서, 해석 CASE는 그림 7에 나타내었다.

표 3 해석단면 조건

지반특성치	탄성계수 (t/m ²)	100,000
	단위중량 (t/m ³)	2.4
	접착력 (t/m ²)	10.0
	내부마찰각 (deg.)	40.0
	토압계수 (K ₀)	0.7
터널단면	형 태	원 형
	직 경 (m)	10.0
터널 심도 (m)		40.0

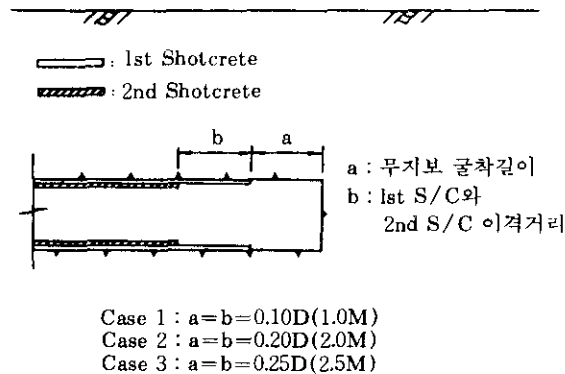


그림 7. 무지보 굴착길이에 영향에 대한 해석 CASE

3.1.1 변위에 의한 하중분담률 결정

3차원 수치해석 결과 무지보 굴착길이에 따른 터널 천정부 변위는 그림 8과 같은 양상으로 기존의 연구결과(Baudendistel, 1985)와 유사함을 알 수 있다. 3가지 경우의 각 변형곡선에 2차원해석 결과를 일치시켰을 때의 하중분담률은 표 4와 같다. 결과에서 보듯이 변위 양상은 3가지 Case 모두 막장 도달 전까지는 일치함을 보이다가 그 이후에는 무지보 굴착길이 가 길 수록 변위가 크게 발생한다.

표 4에서 보듯이 무지보 굴착길이가 증가될 수록 굴착초기에 더 큰 변위를 유발하므로 무지보 굴착길이가 0.1D에서 0.25D로 증가됨에 따라 하중분담률은 굴착단계에서 약 12%, 1st Shotcrete단계에서 약 30% 까지 커짐을 알 수 있다. 표 4와 그림 8의 결과는 터널 천정부 변위를 기준으로 1회 굴진장과 지보재를 설치하는 시기를 결정할 때 참고가 될 수 있다.

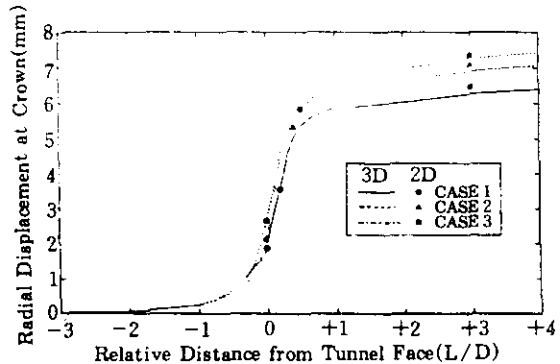


그림 8. 3차원과 2차원 해석의 천정부 변위

표 4 굴착장에 따른 하중 분담률

	굴착장	각 단계의 하중분담률		
		굴착단계	1st Shotcrete 단계	2nd Shotcrete 단계
CASE1	0.10 D	28%	53%	100%
CASE2	0.20 D	32%	78%	100%
CASE3	0.25 D	40%	83%	100%

3.1.2 3차원과 2차원 해석의 응력비교

(1) 천정부 법선방향 응력

3가지 경우에 대한 천정부의 법선응력은 막장의 진행에 따라 탄성론과 유사하게 분포한다. 즉, 터널막장 도달 1D전 부터 응력의 증가가 시작되어 막장도달 직전에 최대값을 가지며, 막장진행이 지속되면 응력은 급격히 줄어들어 1.5D이상 진행한 경우에는 응력이 수렴된다.(Eisentein, 1984) 그러나, 유한차분법에서는 계산된 응력의 수치가 변위와 같이 요소점에서 생성되는 것이 아니고, 천정부 축점을 포함하는 요소의 Integration Point에서의 평균 의미를 갖는 값이므로 탄성론의 해석적 방법과 같이 완전히 0으로 수렴하지는 않는다.

3차원 막장 진행에 따른 무지보 굴착길이별 초기 지중응력에 의해 정규화된 응력이완의 분포는 그림 9에 나타냈으며 터널 천정부 법선방향 변위로 부터 구한 하중분담률에 대응하는 2차원 해석의 응력을 초기응력에 대해 정규화시킨 값을 그림 10에 도식화 하였다. 2차원 해석의 법선응력은 굴착단계, 1st와 2nd Shotcrete단계에서만 관측되어 응력집중이 유발되는 막장도달 직전 단계를 표현할 수 없고, 막장통과 후 굴착이 진행됨에 따라 응력이 급격히 감소되는 경향은 3차원 해석과 일치한다. 다만, 굴착직후는 2차원 해석의 경우가 법선응력이 더 많이 이완되고, 굴착이후에는 3차원 해석의

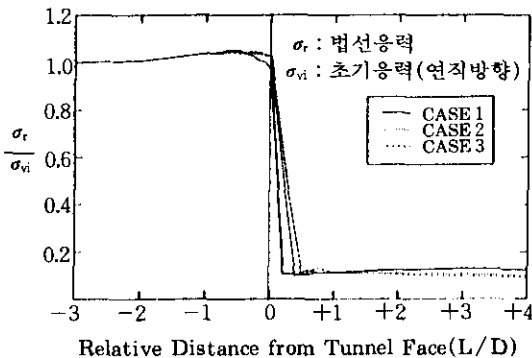


그림 9. 터널 천정부 법선방향 응력분포 (3차원 수치해석)

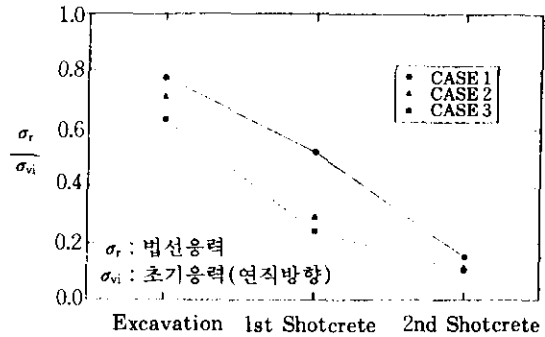


그림 10. 터널 천정부 법선방향 응력분포 (2차원 수치해석)

법선응력이 2차원 해석 결과보다 급한 기울기로 이완되는 차이가 나타난다. 2nd Shotcrete 단계 이후에는 두가지 해석결과 법선응력이 모두 초기응력의 약 10%정도로 수렴한다.

(2) 천정부와 측벽부의 접선방향 응력

계측에 의하면 터널굴진에 따른 접선응력 변화는 막장도달 직후까지 증가하다 응력이 급격히 감소하고 지보재가 완결된 후(약 2D정도) 부터 다시 응력이 증가함을 보인다.(Lo, 1984) 해석결과 천정부의 접선방향 응력분포는 그림 11에, 측벽부의 접선방향 응력분포는 그림 12에 나타냈다. 무지보 굴착길이에 대한 응력집중 정도를 비교하기 위해 초기 접선방향 응력을 기준치(100%)로 하고 3차원 해석결과는 최대 집중응력(maximum peak stress), 응력의 소산으로 나타나는 최소 이완응력(minimum relaxant stress)과 수렴응력(residual stress)의 비를 각각 초기 법선방향 응력에 대한 백분율로 나타내고 여기에 2차원 해석의 최대 접선응력을 같은 방법으로 표시하면 표 5와 같다. 여기서, 최대 집중응력은 굴착부에서 급격히 발생되는 응력집중을 의미하고, 최소 이완응력은 응력집중 이후에 급격히 감소되어 아래로 첨점을 이룰 경우의 응력을, 수렴응력은 굴착이 상당히 진행된 후에 응력이 일정한 값에 도달할 때의 수렴치를 의미한다. 3차원 해석의 최대 접선응력은 그림 11과 그림 12에 나타낸 바와 같이 천정부와 측벽부 모두 굴착직

후에 나타남을 알 수 있고, 2차원 해석의 경우는 그림 13과 그림 14에 나타낸 바와 같이 1st Shotcrete에서 최대 접선응력이 발생함을 알 수 있다. 두 해석간의 최대 접선응력 크기의 차이는 표 5에서와 같이 무지보 길이가 길어질수록 2차원 해석이 3차원 해석보다 과대평가되어지고, 천정부보다는 측벽부에서 이 차이는 더욱 커진다. 천정부에서 무지보 굴착길이에 따른 차이는 무지보 굴착길이가 길수록 변위가 많이 유발되고 응력이 더 많이 이완되므로 막장에서의 응력집중은 적어진다. 그리고 탄소성 모델에서 나타나는 축점 통과후 접선 방향응력의 급격한 감소와 그 이후의 수렴되는 응력수준의 경우도 무지보 길이가 긴 경우에 더 낮은

경향을 나타낸다.

표 5의 두 해석간의 최대 접선응력의 크기 차이를 보면 굴진장이 0.1D인 경우는 천정부에서 거의 같고, 측벽부에서 약 1.15배, 그리고 0.25D의 경우는 천정부에서 약 1.1배, 측벽부에서 1.32배 정도로 무지보 굴착길이가 증가할수록 2차원 해석이 더 크게 평가되었다. 이는 2차원 해석에서 1st Shotcrete까지의 분담률이 무지보 굴착장의 증가에 따라 커지는 경향과 일치한다. 2차원 해석은 하중분담률에 따라 지반을 이완시키는 과정이므로 최대 접선응력이 발생하는 1st Shotcrete의 분담률이 커지면 이 단계에서 지반상태의 급격한 변화를 유발하므로 응력 집중이 커진다.

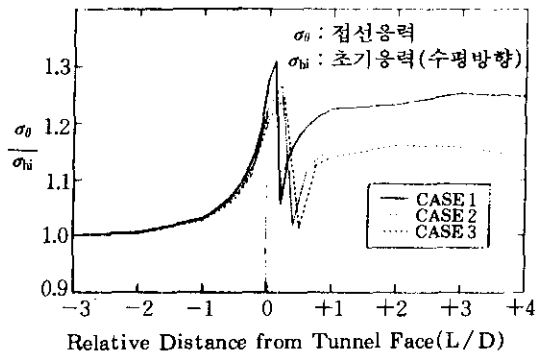


그림 11. 터널 천정부 접선방향 응력분포 (3차원 수치해석)

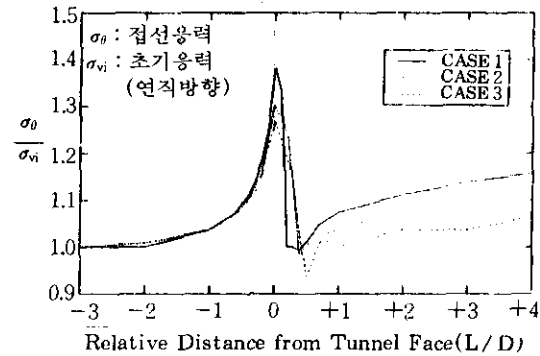


그림 12. 터널 측벽부 접선방향 응력분포 (3차원 수치해석)

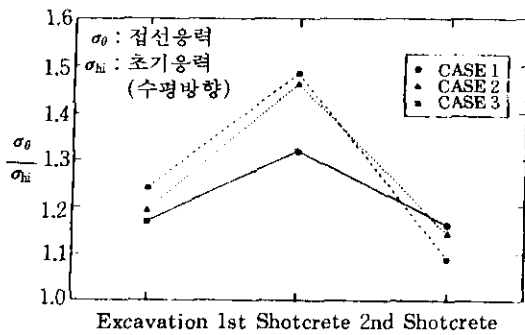


그림 13. 터널 천정부 접선방향 응력분포 (2차원 수치해석)

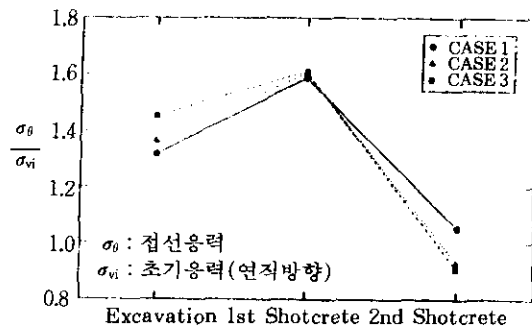


그림 14. 터널 측벽부 접선방향 응력분포 (2차원 수치해석)

표 5 접선응력 경향비교

구 분			3차원 해석 결과				2차원 해석 결과
CASE	굴착장	측 점	Initial Stress(%)	Peak Stress(%)	Min. Relaxant Stress(%)	Residual Stress(%)	Max. Stress(%)
CASE 1	0.10 D	천정부	100	131.0	105.5	124.8	131.8
		측벽부	100	138.5	99.1	115.6	158.9
CASE 2	0.20 D	천정부	100	127.0	101.8	116.4	146.3
		측벽부	100	130.3	98.2	111.9	160.5
CASE 3	0.25 D	천정부	100	124.5	101.3	114.3	148.4
		측벽부	100	126.6	93.6	106.4	161.0

3.2 초기지중응력에 따른 지반거동 비교해석

초기지중응력은 심도와 지반조건에 따라 측압계수(K_0)가 변화하므로 지반거동 해석시 중요한 요인이나 현재는 초기지중응력 측정이 미비하여 수치해석시에 암질에 따라 경험적인 값을 입력자료로 사용하는 실정이다. 측압계수

영향에 대한 해석을 하기위한 지반조건은 표 6과 같고 해석은 표 7과 같은 4가지 CASE에 대하여 앞절과 같은 방법으로 3차원 해석과 2차원 해석을 실시하여 이를 비교검토 하였으며, 상세한 사항은 최(1995)의 논문에서 수록되어 있다.

표 6 해석단면 조건

지반특성치	탄성계수 (t/m^2)	100,000
	단위중량 (t/m^3)	2.4
	점착력 (t/m^2)	10.0
	내부마찰각 (deg.)	40.0
	토압계수 (K_0)	0.7
터널단면	형 태	원형
	직 경 (m)	10.0
터널 심도 (m)		40.0
무지보 굴착길이		0.2D (2m)

3.2.1 변위에 의한 하중분담률 결정

그림 15와 16을 동시에 비교하면, K_0 가 1 이 아닌 CASE 1, CASE 2, CASE 3의 경우 천정부 변위를 기준(그림 15)한 하중분담률의 적용 시에도 2차원 해석의 측벽부 변위(그림 16)가 3차원 해석결과와 유사하였으나, K_0 가 2인 CASE 4의 경우는 측벽부에서 2차원 해석 결과가 3차원 해석 결과보다 다소 과대 평가되었다. 따라서 측압계수가 1이상인 경우에는 천정부 변위를 기준으로 하중분담률을 결정하는 것은 다소 무리가 있다고 본다.

측압계수가 2인 경우(CASE 4)에 측벽부 변위를 기준으로 하중분담률을 결정한 결과를 표 8의 CASE 4*에 수록하였다. 여기서 하중분담률이 측압계수가 0.5인 경우(CASE 1)와 유사한 값을 갖음을 알 수 있다. 즉, 측압계수가 1보다 큰 경우는 측벽부의 변위 기준으로 하중분담률을 결정함이 더 합리적인 것으로 판단된다.

표 7 측압계수에 따른 해석 CASE

	측압계수
CASE 1	0.5
CASE 2	0.7
CASE 3	1.0
CASE 4	2.0

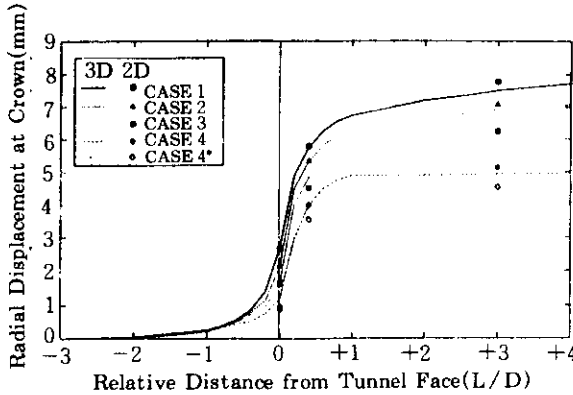


그림 15. 3차원과 2차원 해석의 천정부 변위

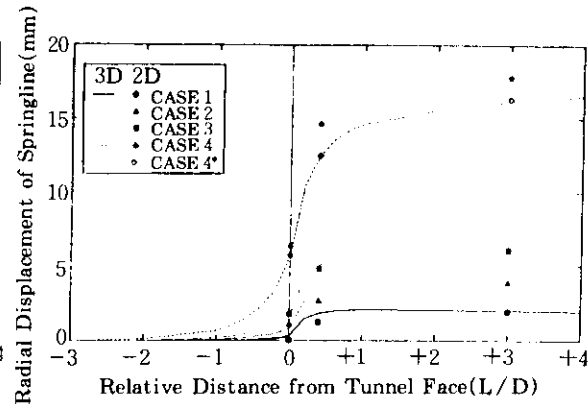


그림 16. 3차원과 2차원 해석의 천정부 변위

표 8 측압계수에 따른 하중 분담률

	측압계수	굴착단계	1st Shotcrete 단계	2nd Shotcrete 단계
CASE 1	0.5	35%	75%	100%
CASE 2	0.7	32%	78%	100%
CASE 3	1.0	28%	73%	100%
CASE 4	2.0	40%	85%	100%
CASE 4*	2.0	36%	76%	100%

*: 측벽부 변위에 근거한 하중분담률

3.2.2 3차원 해석과 2차원 해석의 응력비교

(1) 천정부 법선방향 응력

3차원 해석에서 응력이완 경향은 그림 17, 18과 같이 천정부와 측벽부에서 측압계수에 따

라 수렴되는 응력수준이 정반대로 천정부는 측압계수가 0.5인 CASE 1인 경우에, 측벽부는 측압계수가 2.0인 CASE 4(CASE 4*)인 경우에 가장 많이 이완되어 수렴된다. 이것은 그림 19, 20의 2차원 해석 결과에서도 유사한 경향을 보인다.

(2) 천정부와 측벽부 접선방향 응력

접선방향 응력은 그림 21의 천정부에서 $K_0=2$ 인 CASE 4의 경우에 응력집중이 크게 발생되어 초기 접선응력에 대한 비가 1.50까지 되었다가 급격히 감소하여 가장 낮은 응력 수준에서 수렴하고, $K_0=0.5$ 인 CASE 1의 경우는 오히려 탄성해석과 유사한 모양을 나타내며, 초기 접선응력의 1.22배 정도의 응력 수준으로

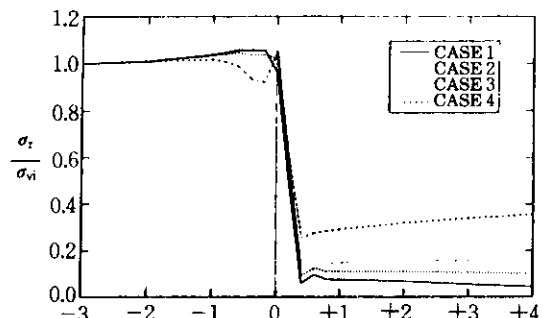


그림 17. 터널 천정부 법선방향 응력분포 (3차원 수치해석)

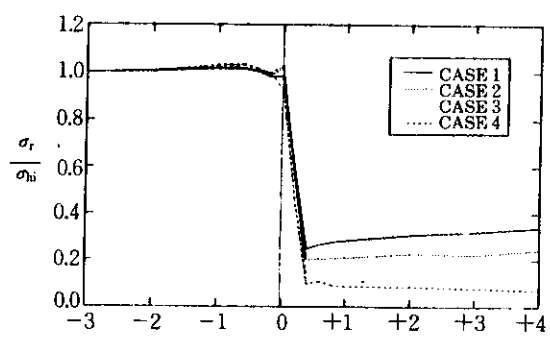


그림 18. 터널 측벽부 법선방향 응력분포 (3차원 수치해석)

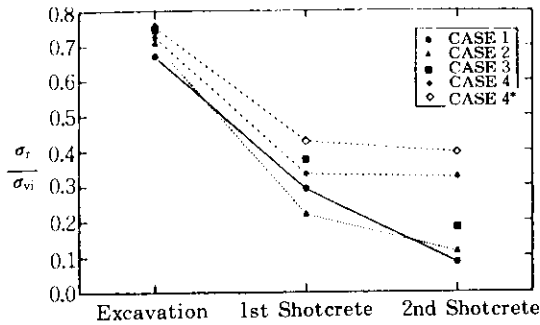


그림 19. 터널 천정부 법선방향 응력분포 (2차원 수치해석)

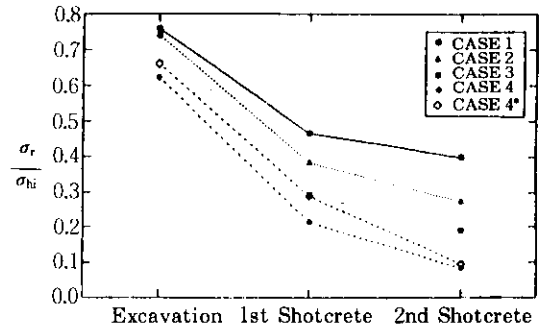


그림 20. 터널 측벽부 법선방향 응력분포 (2차원 수치해석)

수렴한다. 그림 22의 측벽부 접선응력은 천정부와는 반대 경향을 나타낸다.

$K_0=0.5$ 인 CASE 1인 경우에 최대 응력집중이 초기 접선응력의 1.36배까지 생기고 $K_0=2.0$ 인 CASE 4의 경우는 응력집중이 크게 발생하지 않고 수렴응력만 커지는 탄성거동 경향을

보인다. 나머지 CASE는 천정부와 측벽부에서 이들 경향의 중간형태를 갖는다. 이들 응력집중을 초기 접선응력을 100%로 하여 최대 집중응력, 최소 이완응력, 수렴응력의 백분율로 나타내면 표 9와 같다.

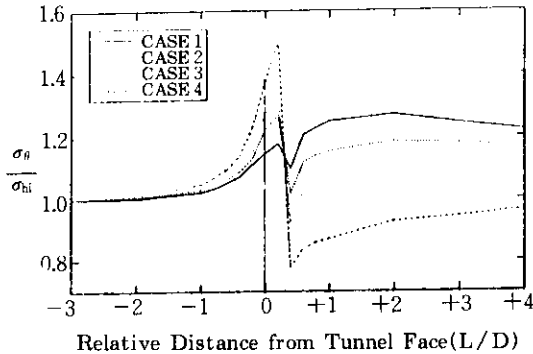


그림 21. 터널 천정부 접선방향 응력분포 (3차원 수치해석)

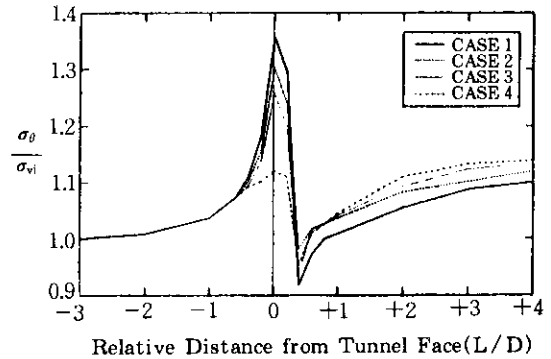


그림 22. 터널 측벽부 접선방향 응력분포 (3차원 수치해석)

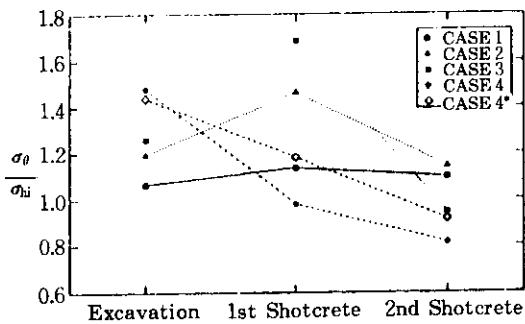


그림 23. 터널 천정부 접선방향 응력분포 (2차원 수치해석)

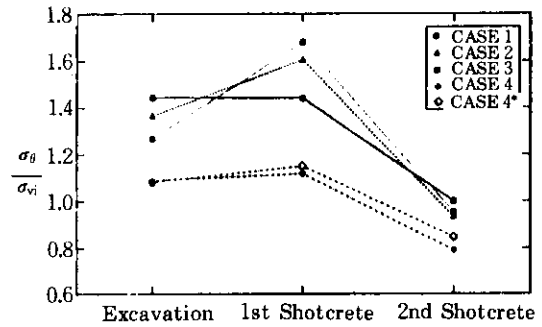


그림 24. 터널 측벽부 접선방향 응력분포 (2차원 수치해석)

표 9 접선응력 경향비교

구 분			3차원 해석 결과				2차원 해석 결과
CASE	K_0	측 점	Initial Stress (%)	Peak Stress (%)	Min. Relaxant Stress (%)	Residual Stress (%)	Max. Stress (%)
CASE 1	0.5	천정부	100	117.6	109.8	122.1	113.5
		측벽부	100	135.8 [#]	91.7	110.0	144.4
CASE 2	0.7	천정부	100	127.0	101.8	116.4	146.3
		측벽부	100	130.3	98.2	111.9	160.5
CASE 3	1.0	천정부	100	132.1	92.6	110.4	168.8
		측벽부	100	125.7	93.6	113.2	168.1
CASE 4	2.0	천정부	100	150.0 ^{##}	77.8	96.5	147.8
		측벽부	100	111.9	95.4	113.8	111.7
CASE 4*	2.0	천정부	CASE 4와 동일				143.8
		측벽부					115.1

: 측벽부에서 최대집중

: 천정부에서 최대집중

표 9에서 $K_0=0.5$ 의 천정부와 $K_0=2.0$ 의 측벽부는 굴착직후 응력집중값보다 수렴응력값이 더 큰것을 알 수 있고, 또한 $K_0=0.5$ 인 경우는 측벽부에서 최대집중응력이 발생하는 반면에 $K_0=2.0$ 인 경우는 천정부에서 최대 응력집중이 발생한다. 이는 3차원 해석결과가 측압계수가 커짐에 따라 응력집중의 위험은 천정부로 갈수록 증가됨을 의미한다. 그러나, 2차원 해석결과인 그림 23,24는 천정부에서 K_0 가 1이하인 경우, 1st Shotcrete단계에서 최대 응력집중이 발생하지만, K_0 가 2인 경우는 굴착단계에서 응력의 집중이 최대를 이루고, 이후 단계에서는 감소한다. 따라서, 표 9에서의 Max. Stress의 값들은 그것이 발생한 위치에 관계없이 최대치만을 표시한 것이다.

3.3 암질에 따른 지반거동 비교해석

이 장에서는 풍화암, 연암, 경암의 3가지 암질에 대한 탄성계수를 영향인자로 하여 해석을 수행하였다. 이 때 내부마찰각, 점착력과 단위중량들의 토질정수는 각 암질에 따라 경험적으로 적용하는 값을 사용하였다. 해석에 사용된 조건은 표 10과 같고, 해석 CASE는 표 11에 나타내었다.

표 10 해석단면 조건

지반특성치	측압계수	0.7
터널단면	형 태	원형
	직 경 (m)	10.0
터널 심도 (m)		40.0
무지보 굴착길이		0.2D (2m)

표 11 암질에 따른 해석 CASE

	암종	탄성계수 (t/m^2)	단위중량 (t/m^3)	내부마찰각 (deg.)	점착력 (t/m^2)
CASE 1	경 암	500,000	2.6	42.0	20.0
CASE 2	연 암	100,000	2.4	40.0	10.0
CASE 3	풍화암	30,000	2.2	35.0	5.0

3.3.1 변위에 의한 하중분담률 결정

천정부 법선방향 변위 발생경향은 그림 25에서 보듯이 탄성계수가 작은 경우에 변위가 상대적으로 크게 나타났으며, 특히 풍화암(CASE 3)의 경우는 해석경계부(+40m 지점)에 도달해서도 완전히 수렴하지 않고 계속 변위가 발생한다. 3차원과 2차원 변위 해석결과에서 구해진 하중분담률은 표 12와 같이 암질이 좋지 않을수록 굴착단계의 분담률이 커지고, 1st Shotcrete 단계까지의 분담률은 작아진다. 따라서, 탄성계수가 작은 경우는 지보 설치 이전에 전체 변형량 중 많은 부분이 발생함을 알 수 있다.

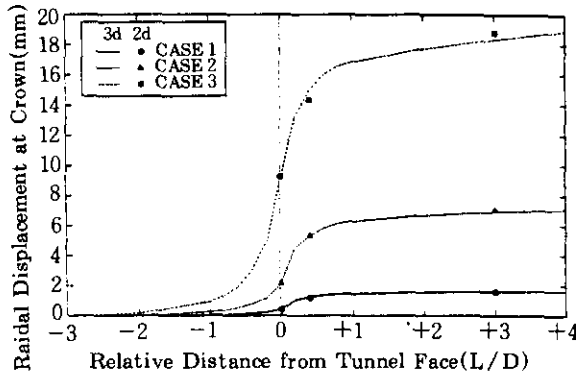


그림 25. 3차원과 2차원 해석의 천정부 변위

표 12 암질에 따른 하중 분담률

	암 종	굴착단계	1st Shotcrete 단계	2nd Shotcrete 단계
CASE1	경 암	29%	79%	100%
CASE2	연 암	32%	78%	100%
CASE3	풍화암	44%	69%	100%

3.3.2 3차원과 2차원 해석의 응력비교

(1) 천정부 법선방향의 응력

응력이완 경향은 그림 26과 같이 탄성계수가 작은 경우에 많은 변위를 유발시키므로 수렴되는 응력수준이 가장 낮게 나타났다. 그림 27의 2차원 해석결과도 모든 해석 CASE에서 응력

이 이완됨을 뚜렷이 보인다.

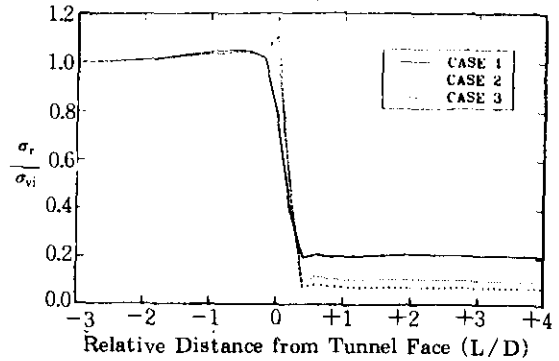


그림 26. 터널 천정부 법선방향 응력분포 (3차원 수치해석)

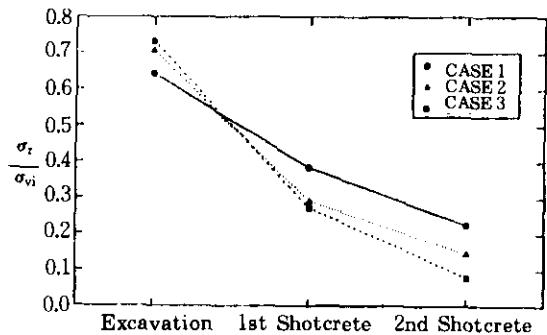


그림 27. 터널 천정부 법선방향 응력분포 (2차원 수치해석)

(2) 천정부와 측벽부 접선방향 응력

그림 28, 29에서 보듯이 천정부와 측벽부의 접선응력은 응력의 집중과 급격한 이완, 그리고 다시 상승 후 수렴되는 일련의 과정이 탄소성 모델과 일치하나, 경암(CASE 1)의 경우는 탄성계수가 500,000 t/m²으로 소성영역에 도달하지 못하는 탄성거동을 보였다. 이 사실은 그림 30, 31의 천정부의 2차원 해석결과에서도 보여진다. 초기 접선응력을 기준으로 최대 집중응력, 최소 이완응력 및 수렴응력의 비율 백분율로 나타내면 표 13와 같다.

표 13을 보면, 풍화암의 측벽부는 3차원 해석보다 2차원 해석이 약 1.10배 크게 평가되었

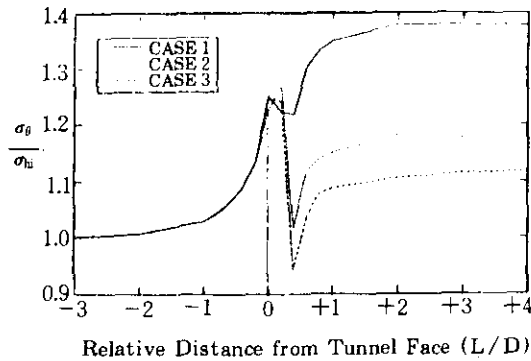


그림 28. 터널 천정부 접선방향 응력분포 (3차원 수치해석)

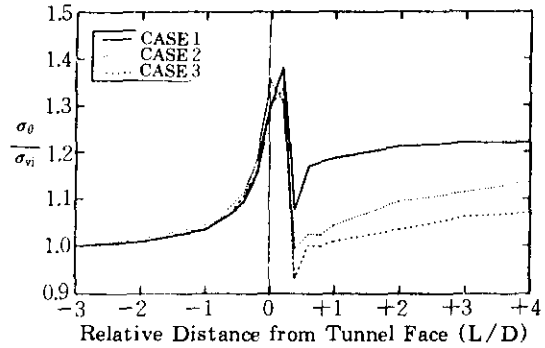


그림 29. 터널 측벽부 접선방향 응력분포 (3차원 수치해석)

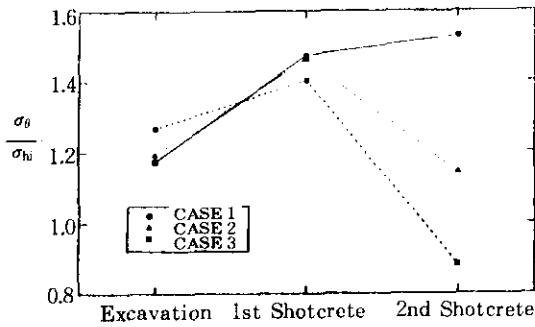


그림 30. 터널 천정부 접선방향 응력분포 (2차원 수치해석)

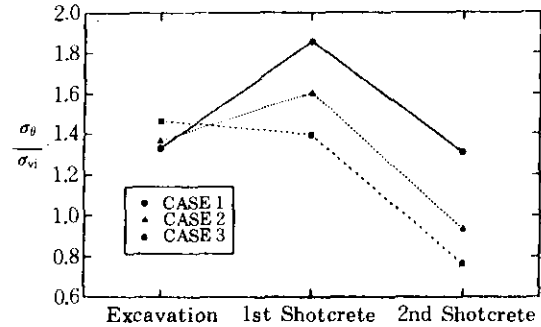


그림 31. 터널 측벽부 접선방향 응력분포 (2차원 수치해석)

표 13 접선응력 경향비교

구 분			3차원 해석 결과				2차원 해석 결과
CASE	암 질	측 점	Initial Stress(%)	Peak Stress(%)	Min. Relaxant Stress(%)	Residual Stress(%)	Max. Stress(%)
CASE 1	경 암	천정부*	100	125.1	121.8	137.8	147.4
		측벽부	100	138.1	107.6	122.0	185.8
CASE 2	연 암	천정부	100	127.0	101.8	116.4	146.3
		측벽부	100	130.3	98.2	111.9	160.5
CASE 3	풍화암	천정부	100	124.7	94.3	111.8	140.4
		측벽부	100	133.6	90.3	107.1	146.6

*는 탄성거동과 유사한 경향임을 표시

으며 경암의 경우는 1.35배 과대평가 되었다. 이는 3.1절에서 언급한 바와 같이 2차원 해석에서 1st Shotcrete단계까지의 하중분담률이 커질

수록 3차원 해석에 대한 2차원 해석이 과대평가 된다는 사실과 일치한다. 따라서 본 해석결과로 부터 암질이 풍화암에서 경암으로 갈수록

3차원 응력거동에 대해 2차원 해석치가 과대평가됨을 알 수 있다.

3.4 터널단면 크기에 따른 지반거동 비교해석

이 장에서는 터널의 크기에 따른 지반거동 특성을 분석하기 위해 그림 32에 나타낸 바와 같은 해석조건을 선정하였다. 단, 굴착장은 굴착장에 따른 영향을 포함시키지 않기 위해 터널 직경에 대해 일정한 비로 균일하게 맞추지 않고 1회에 2m씩 굴착한다고 보았다. 해석에 적용된 지반조건은 표 14와 같다.

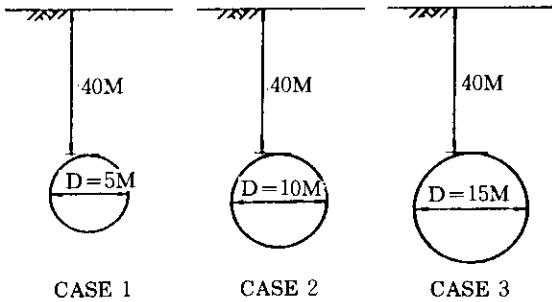


그림 32. 해석 CASE

표 14 해석단면 조건

지반특성치	측압계수	0.7
	탄성계수 (t/m^2)	100,000
	단위중량 (t/m^3)	2.4
	점착력 (t/m^2)	10.0
	내부마찰각 (deg.)	40.0
터널 단면		원형
터널 심도(m)		40.0
무지보 굴착길이		2m

해석결과 터널의 단면적이 커질수록 많은 변위를 유발시키는 양상을 보이거나 하중분담률은 표 15와 같이 각 CASE에 대해서 유사한 값을 갖는 것을 알 수 있다.

표 15 터널 단면의 크기에 따른 하중 분담률

CASE	단면 크기	굴착단계	1st Shotcrete 단계	2nd Shotcrete 단계
CASE1	D=5m	32%	82%	100%
CASE2	D=10m	32%	78%	100%
CASE3	D=15m	33%	83%	100%

3.5 터널 심도에 따른 지반거동의 비교분석

터널이 위치한 심도에 의한 영향을 검토하기 위해 표 16과 같은 지반조건으로 그림 33과 같이 3가지 CASE에 대하여 해석을 수행했다.

변위 경향으로부터 구한 하중분담률은 표 17에서 보듯이 터널 심도에 따라 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

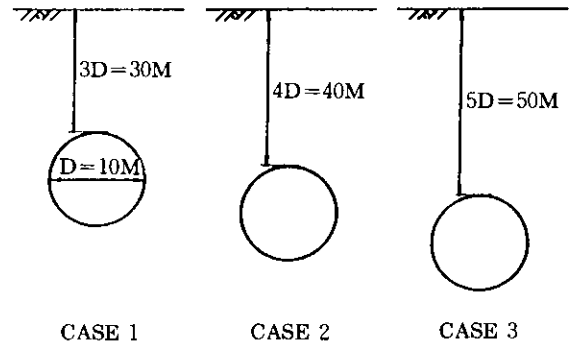


그림 33. 해석 CASE

표 16 해석단면 조건

지반특성치	측압계수	0.7
	탄성계수 (t/m^2)	100,000
	단위중량 (t/m^3)	2.4
	점착력 (t/m^2)	10.0
	내부마찰각 (deg.)	40.0
터널 단면	형 태	원 형
	직 경(m)	10.0
무지보 굴착길이		0.2D (2m)

표 17 터널 단면의 크기에 따른 하중 분담률

CASE	터널심도	굴착단계	1st Shotcrete 단계	2nd Shotcrete 단계
CASE1	3D	30%	77%	100%
CASE2	4D	32%	78%	100%
CASE3	5D	32%	77%	100%

3.6 하중분담률에 따른 최대 접선응력 비교

매개변수 해석결과를 보면, 2차원 해석의 결과가 3차원 해석보다 굴착부근에서 응력집중 현상이 더 크게 평가됨을 알 수 있다. 2차원의 1st Shotcrete단계에서의 접선응력값이 3차원 해석에서 굴착직후 응력집중보다 과대평가되는 이유는 지반 굴착에 따른 불균형 응력을 3차원 수치해석시 횡방향 뿐 아니라 터널 진행방향으로도 전달시켜 응력집중 정도를 줄여주나, 2차원 해석의 경우는 오직 횡방향의 응력전달만 이루어지므로 상대적으로 집중정도가 커지는데 있다.

이러한 영향으로 인하여 1st Shotcrete단계까지의 하중분담률이 증가할수록 2차원 해석의 과대평가 정도가 증가함을 알 수 있다. 이 경향은 그림 34에 잘 나타나 있다.

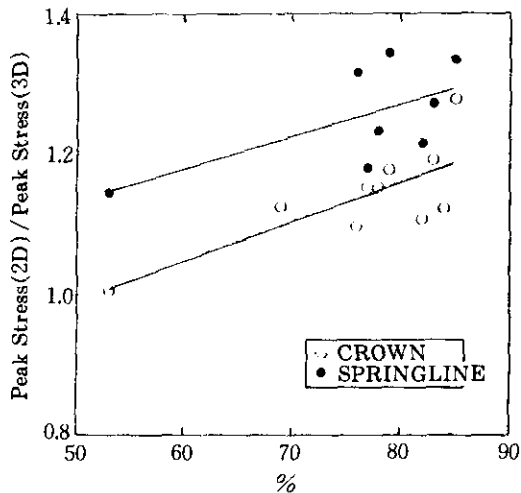


그림 34. 하중분담률에 따른 최대 접선응력 경향

4. 서울 지하철 대표단면에 대한 예제해석 결과

4.1 해석 조건

이번 장에서는 앞서 검토한 매개변수 해석의 실제 적용이 가능하도록 서울 지하철에서 추천한 터널 굴진장 및 단면 조건에 대하여 하중분담률을 제시하고자 한다. 암질과 터널단면은 대략 풍화암, 연암, 경암 정도의 강도를 갖는 경우와 단선 및 복선 각각에 대하여 원형으로 단순화하여 실시하였으며 굴착 방법은 전단면 굴착으로 해석하였다. 연암 및 풍화암 정도의 암질에서는 반단면 굴착이나 Bench Cut 등의 분할 굴착이 더 현실성 있으나 복선의 반단면이 단선의 크기와 비슷하면 전단면 굴착으로 인한 영향을 조사할 수 있을 것으로 평가하였다. 지보 패턴은 단면 및 암질에 따라 다양한 패턴이 추천되고 있으나 해석의 단순화를 위하여 3장에서 적용한 1st Shotcrete와 2nd Shotcrete만을 지보재로 설치하였다. 해석에 적용된 굴진장은 각 암질에 따라 서울지하철에서 추천된 값의 범위안에서 선택하여 사용하였다. 축압계수는 아직까지 서울 지역에 대해 정확히 계측된 자료가 미비하나, 풍화암은 응력이완이 많이 된 것으로 가정하여 0.5, 연암은 0.7, 경암의 경우는 1.0으로 가정하였다. 전체적인 해석조건 및 해석 CASE는 표 18과 같다.

4.2 변위에 의한 하중분담률

3차원해석과 2차원해석을 비교 검토하여 구한 하중분담률은 표 19와 같으며 초기 굴착단계의 하중분담률은 주로 암질에 따라서 결정되어 풍화암의 경우는 48~49%, 연암의 경우는 32~34%, 경암인 경우는 28~32%의 값을 갖는다. 각 암질에서 단선과 복선사이의 하중분담률의 차이는 크게 나타나지 않으므로 반단면 굴착으로 해석하지 않은 것으로 인한 영향은 크지 않을 것으로 판단된다.

표 18 해석 조건

해석 CASE		CASE 1	CASE 2	CASE 3	CASE 4	CASE 5	CASE 6
암 질	암 종	풍화암	풍화암	연암	연암	경암	경암
	탄성계수 (ton/m ²)	30,000	30,000	100,000	100,000	500,000	500,000
	점착력 (ton/m ²)	5.0	5.0	10.0	10.0	20.0	20.0
	내부마찰 (deg.)	35	35	40	40	42	42
	단위중량 (ton/m ³)	2.2	2.2	2.4	2.4	2.6	2.6
	측압계수	0.5	0.5	0.7	0.7	1.0	1.0
	포아송 비	0.231	0.231	0.2	0.2	0.2	0.2
단면 형태	원 형						
단면 크기	단선 (D=5m)	복선 (D=10m)	단선 (D=5m)	복선 (D=10m)	단선 (D=5m)	복선 (D=10m)	
굴착 심도	40.0 m						
굴 착 장	서울지하철 추천치(m)	1.2~1.8	1.2~1.8	1.35~2.0	1.35~2.0	1.5~2.0	1.5~2.0
	실제해석용	1.0m (0.2D)	1.0m (0.1D)	1.5m (0.3D)	1.5m (0.15D)	2.0m (0.4D)	2.0m (0.2D)

표 19 서울 지하철에서의 하중분담률(변위중심)

암 종류		CASE	분담률(%)		
			굴착단계	1st Shotcrete	2nd Shotcrete
풍화암	단 선	CASE 1	48	76	100
	복 선	CASE 2	49	67	100
연 암	단 선	CASE 3	32	85	100
	복 선	CASE 4	34	78	100
경 암	단 선	CASE 5	32	90	100
	복 선	CASE 6	28	82	100

4.3 3차원과 2차원 해석시 응력비교

4.3.1 천정부 법선방향 응력

응력의 소산이 야기되는 천정부 법선방향 응력의 분포는 Eisenstein등(1984)이 연구한 대로 막장의 급격한 응력이완을 2차원 해석으로는 완전히 표현하지 못하였다. 막장부근에서 3

차원 해석결과의 응력 소산곡선 기울기가 2차원 해석의 굴착단계와 1st Shotcrete단계사이의 기울기보다 현저히 급하였다. 특히, 풍화암의 경우는 3차원해석과 2차원 해석의 굴착단계의 응력수준이 비슷한데 반하여 연암과 경암은 굴착단계에서 2차원의 법선응력이 3차원해석보다 더 낮은 응력수준으로 산정되었다.

4.3.2 천정부와 측벽부 접선방향 응력

3차원 해석결과에 의한 접선응력 분포와 하중분담률에 의해 얻어진 2차원 해석결과를 중첩시키면 천정부의 접선응력은 각 CASE 별로 그림 35와 같고, 측벽부는 그림 36과 같다. 천정부 접선응력의 결과는 암질이 풍화암 조건인 CASE 1, CASE 2의 경우에 비교적 큰 변위가 발생하므로 굴착이후에 소성영역이 확대되어 그림 35(a)와 같이 접선응력이 뚜렷한 집중을 보이지 못하고 이완되는 경향을 보이나 지보재 설치후에는 지보재의 변형억제 효과에 의해 초기 접선응력의 1.25배 정도로 수렴된다. 연암정도의 암질인 그림 35(b)의 경우에서 단선인 경우(CASE 3)는 탄성거동을 하고, 복선인 경우(CASE 4)는 전형적인 탄소성 거동을 한다. 연암의 경우에 있어서는 단면 크기에 따라 응력의 경향이 바뀌므로 천정부의 접선응력이 문제 될 경우, 단면 크기는 중요한 요인이 된다. 경암정도의 암질은 그림 35(c)와 같이 단선인 경우(CASE 5)는 굴착 부근의 응력집중이 발생하지 않고 계속 증가해서 높은 응력수준에서 수렴하는 전형적인 탄성거동을 하나 복선인 경우(CASE 6)는 탄소성으로 거동한다. 2차원 해석결과는 다른 CASE에 비해 굴착단계에서 하중분담률이 30% 안팎으로 작게 적용한다. 따라서 굴착이후에 지보재 설치 단계에서 큰 분담률을 갖기 때문에 3차원 결과에 비해 응력의 집중이 크게 산출되었다.

측벽부 접선응력에 대한 결과는 천정부와는 달리, 풍화암정도의 암질인 그림 36(a)의 경우에는 단·복선 모두 탄소성거동과 유사하게 분포하며, 2차원 해석결과는 굴착이후의 3차원 거동과 비슷한 경향을 보인다. 연암정도의 암질인 그림 36(b)에서는 단선의 경우는 탄성거동에 가깝게, 그리고 복선의 경우는 탄소성 거동함을 보인다. 경암정도의 암질인 그림 36(c)의 경우는 단선의 경우는 완전 탄성거동을, 복선의 경우는 탄소성거동을 한다.

접선방향의 응력집중 정도를 살피기 위해 초기 접선응력을 100%로 두고 최대 집중응력,

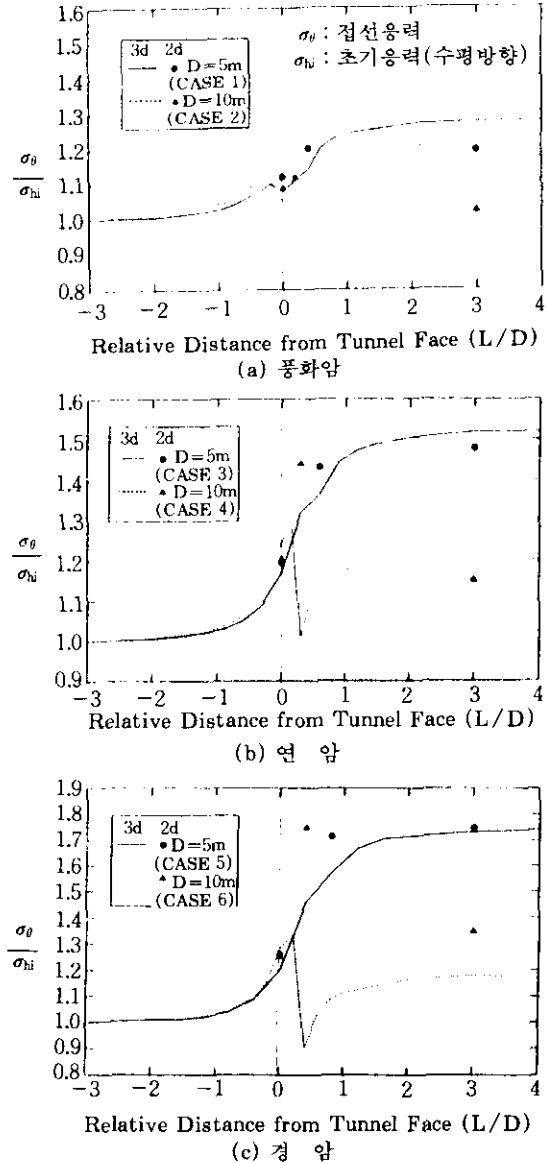


그림 35. 천정부 접선방향 응력비교

최소 이완응력, 수렴응력을 백분율로 나타내면 표 20과 같다. 이 결과로부터 경암인 경우는 측압계수가 1이므로 단선과 복선의 응력집중이 천정부와 측벽부에서 거의 같음을 알 수 있다. 또한, 연암 단선인 경우의 천정부와 경암 단선인 경우의 천정부, 측벽부에서는 거의 완전한 탄성거동을 보이며 이 때 3차원의 최대 접선응

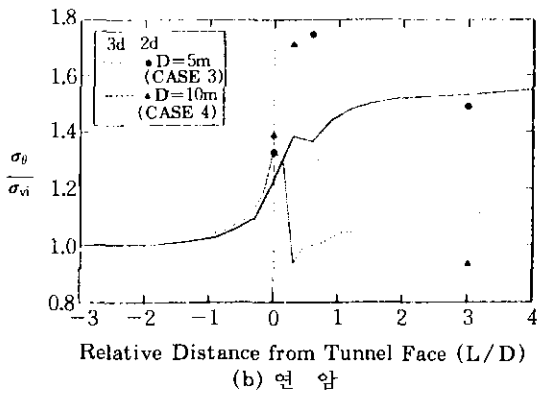
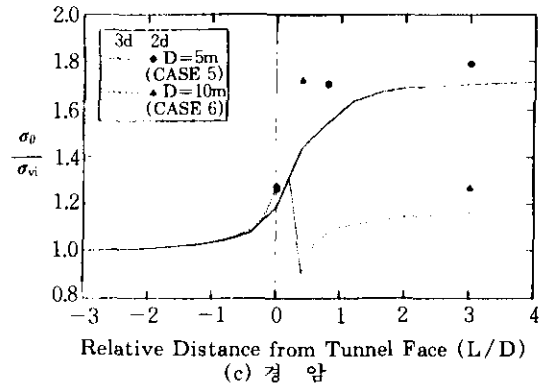
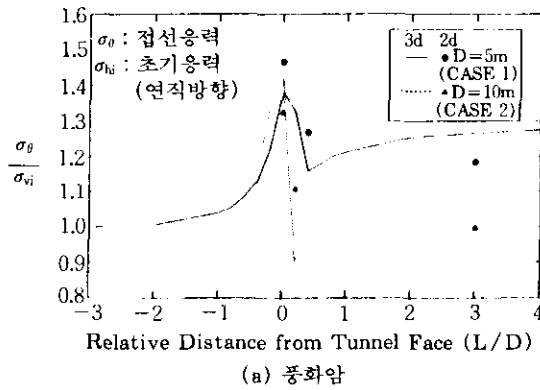


그림 36. 측벽부 접선방향 응력비교

력(수렴응력)과 2차원의 최대 접선응력(2nd Shotcrete단계 응력)이 거의 일치함을 볼 수 있다. 즉, 지반이 탄성거동을 할 경우 응력집중 현상은 2차원 해석으로 3차원 거동을 어느 정도 나타낼 수 있음을 의미한다.

표 20 접선응력 경향비교

			3차원 해석결과				2차원해석결과
			Initial Stress(%)	Peak Stress(%)	Min. Relaxant Stress(%)	Residual Stress(%)	Max. Stress(%)
CASE 1 (단선)	풍 화 압	천정부	100	109.7	107.7	127.3	120.0
		측벽부	100	138.2	116.0	127.6	146.7
CASE 2 (복선)	압	천정부	100	115.5	98.6	122.6	111.8
		측벽부	100	142.0	90.3	108.6	132.6
CASE 3 (단선)	연	천정부**	100	-	-	151.9	151.8
		측벽부*	100	138.5	136.5	154.8	174.7
CASE 4 (복선)	압	천정부	100	129.0	101.2	121.1	144.2
		측벽부	100	133.9	93.6	112.8	171.1
CASE 5 (단선)	경	천정부**	100	-	-	174.3	176.0
		측벽부**	100	-	-	171.4	178.0
CASE 6 (복선)	압	천정부	100	133.3	90.4	117.1	175.0
		측벽부	100	130.5	90.7	116.1	172.3

* : 탄성거동과 유사한 거동을 하는 경우

** : 완전 탄성거동을 하는 경우

- : 최대 집중응력과 최소 이완응력이 나타나지 않는 경우(완전 탄성거동)

5. 결론

본 연구에서는 터널의 3차원 효과를 고려하는 방법인 하중분담률의 합리적인 적용을 위하여 3차원 및 2차원 해석 결과를 비교 검토하였다. 특히, 각 영향인자에 대한 매개변수 분석을 통하여 설계에 사용할 수 있는 적절한 하중분담률을 제안하였다.

본 연구의 결론을 요약하면 아래와 같다.

1) 3차원 거동을 2차원으로 모델링하기 위한 하중분담률을 적용하는 방법으로 다중요소법, 응력분배법 및 내압을 이용한 방법이 있으나, 다중요소법과 응력분배법은 Kirsch 공식에 의한 해와 비교 검증한 결과, 실제 해와 큰 차이를 나타내었으며 내압을 이용한 하중분담률 적용법이 가장 근접한 결과를 보여, 이 방법을 설계에 사용할 것을 추천한다.

2) 하중분담률에 영향을 미치는 요인들 중에서 무지보 굴착길이나 지반탄성계수의 영향이 가장 큰 것으로 나타났다. 무지보 굴착길이가 0.1D에서 0.25D가 됨에 따라서 굴착단계에서는 12%, 1st Shotcrete 단계에서는 30%까지 증가되며, 탄성계수의 영향은 경암에서 풍화암쪽으로 갈수록 굴착단계에서 15%정도 큰 하중분담률을 적용해야 함을 알 수 있었다. 따라서 2차원 해석에 하중분담률을 적용할때 이 두 인자에 가장 비중을 두어야 한다.

3) 천정부 법선응력의 이완은 굴착직후는 2차원 해석결과가 응력이완을 더 크게 산정하나, 그 후에는 3차원 해석의 경우가 더 급한 기울기로 이완된다. 또한 천정부와 측벽부의 접선응력은 탄성거동할 경우만 제외하고 대부분 3차원 해석의 경우는 굴착직후에서 2차원 해석의 경우는 1st Shotcrete 단계에서 응력집중이 발생함을 보여, 2차원 해석으로 3차원 효과를 고려하는데 한계가 있음을 알 수 있다.

4) 최대 접선응력 산정시, 3차원 해석결과보다 2차원 해석결과가 다소 과대평가되며, 이 경향은 2차원 해석중 1st Shotcret 단계의 하중분담률이 커질 수록 증가한다. 따라서 접선응

력에 대해서는 2차원 해석으로는 적절하게 나타낼 수 없으나, 2차원 해석결과와 설계적용시 안전측이므로, 큰 문제는 없는 것으로 판단된다.

5) 초기지중응력에 대한 영향은 축압계수가 1보다 큰 지반에서는 천정부의 법선방향 변위에서 하중분담률을 구하는 일반적인 방법보다, 측벽부의 법선방향 변위를 기준으로 고려하는 것이 더 합리적이다.

6) 단면크기와 터널 심도가 하중분담률에 미치는 영향은 크지 않다.

7) 서울 지하철 추천 단면에 대한 예제 해석 결과 주어진 조건에 대해 2차원 해석시 적용할 수 있는 실제 하중분담률을 제안하였다. 이를 보면 평균적으로 굴착시-1st Shotcrete-2nd Shotcrete 단계에 대해서, 풍화암인 경우 49% - 72% - 100%, 연암은 33% - 82% - 100%, 경암은 30% - 86% - 100% 정도로서 이는 초기 설계시에 사용할 수 있을 것으로 추천할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 코오롱건설 기술연구소의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 연구수행에 많은 도움을 주신 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 최항석(1995), 응력집중을 고려한 터널의 3차원 거동에 관한 연구, 고려대학교 석사학위논문
2. 한국지반공학회(1991), '지반공학에서의 컴퓨터 활용', 91년도 추계 학술발표회 논문집
3. Baudendistel, M.(1985), 'Significance of the Unsupported Span in Tunnelling', Tunnelling '85, session 4, pp.103~108
4. Brown, E.T. and Bray, J.W.(1983), 'Ground Response Curves for Rock Tunnels', Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Jan., 15~39
5. Eisentein Zdenek et al.(1984), 'On Three

- Dimensional Ground Response to Tunneling', Proceedings of two sessions at Geotech '84, ASCE, pp. 107~127
6. FLAC-2D, Manual, Itasca Consulting Group, Inc., Minnesota, U.S.A., 1991
 7. FLAC-3D, Manual, Itasca Consulting Group, Inc., Minnesota, U.S.A., 1994
 8. Hoek E. and Brown, E.T.(1980), Underground Excavation in Rock, Institution of Mining and Metallurgy, London
 9. Lo, K.Y.(1984), 'Interpretation of Stress-Displacement Measurements', Proceedings of two sessions at Geotech '84, ASCE, pp. 128~155
 10. Sinha, R.S.(1991), Underground Structures -Design and Construction, Elsevier, U.S.A.

(접수일자 1995. 5. 4)