

3次元 터널解析에 의한 鋼管 多段 그라우팅의 補強效果

The Application of Nonlinear 3-D Tunnel Analysis Program for the Improved Effects of Steel Pipe Reinforced Multi Step Grouting Method

* 김 형 탁 Kim Hyung-Tak, ** 이 봉 렬 Lee Bong-Yul, *** 김 학 문 Kim, Hak-Moon

* 단국대학교 토목공학과 공학석사, Master of Engineering, Department of Civil Engineering, Dan-Kook University.

** 단국대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Department of Civil Engineering, Dan-Kook University.

*** 단국대학교 토목공학과 부교수, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Dan-Kook University.

Synopsis :

The effect of steel pipe reinforced multi-step grouting (SPRG) technique to improve the ground far ahead of the excavation face was investigated by means of numerical analysis.

It was found that the nonlinear 3-D FEM program performed well to evaluate the usefulness of the SPRG technique in soft ground tunnelling, and about 20% of settlement control in this particular case was possible.

Therefore in urban subway tunnel construction, the New Austrian Tunnelling Method can be satisfactorily applied even in poor ground condition with aid of the SPRG technique.

1. 서 론

도심지에서 터널굴착시 인접구조물의 손상과 붕괴사고는 막대한 시간과 경제적 손실을 가져올 수 있고 인명사고로까지 연결될 심각한 사회문제로 대두될 수 있으며, 이로 인해 지반조건이 열악한 곳에서는 터널굴착의 안전성 확보를 위한 보조공법의 선택이 중요한 의미를 갖게 된다. 이와 관련하여 터널의 보강과 차수효과를 동시에 얻을 수 있는 강관다단그라우팅공법에 관한 많은 연구가 요구되고 있으며, 정확한 수치해석기법의 개발과 현장 계측자료들이 비교, 분석이 활발히 진행될 경우 도심지 연약지반에서 NATM의 적용성의 의미가 있을 것이다.

본 연구에서는 현재 시공중인 터널현장을 선정하여 지반보강을 실시하지 않은 경우와 실시한 경우에 대하여 비선형 유한요소기법에 의한 수치해석을 실시하고, 지반보강에 따른 터널주변지반의 거동역제효과를 지표침하, 심도별 지중변위, 터널천단 상부지반의 횡방향 및 종방향변위 등에 대하여 비교, 분석하였다. 또한 70년대 중반 이탈리아에서 개발되어 80년대 초에 국내 지하철 일부 구간에 시공된 이래로 NATM공법에서 연약대 구간의 보강공법으로 일반화되고 있는 강관보강형 다단그라우팅공법 일명 UMBRELLA공법의 지반보강효과와 주변지반의 거동에 대하여 2차원 해석을 수행하였다. 그리고 지반보강에 대한 터널의 3차원 거동 및 보강효과를 확인하기 위하여 3차원터널해석을 아울러 수행하였다. 이러한 해석을 통한 결과에 대하여 터널주변의 2차원 및 3차원적인 중, 횡방향 지반거동, 막장 굴착에 따른 천단침하특성, 보강효과 및 선행변위에 대하여 분석, 평가하였다.

2. 강관보강형 다단그라우팅공법의 기본원리

본 공법의 기본원리는 주로 NATM공법 적용시 터널굴착전에 소구경강관을 적절한 형상으로 배열, 설치하고 그 강관의 내측으로 패커를 설치하여 그라우팅재를 주입함으로써 주입재에 의한 지반의 고결로 인하여 강관과 지반을 일체로 만들고 강관 및 주변지반의 빔(Beam)작용에 의해 터널에 가해지는 상재하중, 토압 등의 분산효과 및 경감효과를 얻을 수 있다. 또한 파이프루프 공법 및 일반 그라우팅 공법을 일련의 단일 공정으로 시공하는 공법으로서 터널 굴착전에 지보재를 설치하여 상부의 토압 및 이완영역의 경감효과를 얻고 또한 주입재에 의한 지반의 보강으로 각 강관사이의 간격이 있다 할 지라도 흙의 전단강도를 증대시켜 지지할 수 있으며 주입을 강관속에서 수행하는 공법이다. 시공단계는 표 2.1, 개략도는 그림 2.1과 같다.

표 2.1 강관보강다단그라우팅의 시공순서

단계별	공 종
1 단계 천 공	<ul style="list-style-type: none"> - 장 비 : 터널전용 Drilling Machine - 천공직경 : ϕ 100m/m 이상 casing ROD의 2중 구조 - 천공장 : 수평 16-21m (경사길이 16.3m) - 각도 : 상향 1:1.5, - 간격 : C.T.C. 0.4-0.6m, - 공수 : 20-30공
2 단계 강관삽입	<ul style="list-style-type: none"> - 규 격 : ϕ 50.8m/m (T=4m/m), - 연 결 : Coupling - 분사공 : ϕ 5m/m, - 분사공 간격 : 0.5-0.75mm
3 단계 Corking 및 Sealing	<ul style="list-style-type: none"> - 강관과 천공면 사이에 Corking (역류방지) - Corking 급결시멘트 또는 발포제 사용, - 최대주입압력 : 20-40kg/cm²에 지탱 - Corking 상부에 Sealing 호스설치, - Sealing은 1.0 shot 주입
4 단계 Grouting	<ul style="list-style-type: none"> - 방 법 : 1.5 SHOT, - 인 발 : 1 Step 당 3m - 주입제 : 정수압에 3-4배 지층별 설정 - 주입시간 : 주입속도가 10l/min에서 주입압 10kg/cm²로 10분간 주입 - 배합비 : 주입압과 주입량의 변화에 따라 빈배합에서 부배합으로 조절 - 지하수 용출량 및 수압에 따라 Chemical Grouting제 사용 (Gel Time 20-25sec) - Chemical Grouting, L/W 및 Cement Milk의 혼합병용 주입

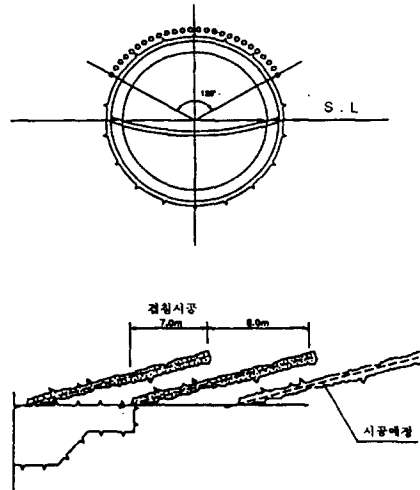


그림 2.1 보강공법의 개략도

3. 해석조건과 방법

3.1 해석 대상지반 조건

해석 대상지반은 지하철 공사구간으로 강관다단 그라우팅 공법이 적용된 현장의 지반조건을 적용하였다. 본 적용현장의 지반조건은 오랜 기간 퇴적 및 지각변동의 순환을 거듭한 변성암 지역으로 주로 편마암(흑운모)이 주종을 이루고 있으며, 격심한 지각변동작용으로 파쇄대와 풍화대가 많다. 또한 풍화의 진행으로 거의 토사에 가까운 연약대가 많이 출현하는 특성을 갖는 지반으로 하였다.

지층구성은 지표면으로부터 층적토, 풍화토, 풍화암으로 구성되어 있으며 각 지층의 두께는 층적토 10 m, 풍화토 20 m, 풍화암은 터널 Invert 하부 9 m에 위치하고 있다. 2차원 및 3차원 해석을 위한 입력지반물성치는 표 3.1과 같다.

표 3.1 입력지반의 물성치

	탄성계수 (t/m ²)	포아슨 비 (ν)	단위중량 (t/m ³)	점착력 (t/m ²)	내부마찰각 (°)
층적토	1500.0	0.35	1.9	3.0	25.0
풍화토	2500.0	0.34	2.0	10.0	30.0
개량풍화토	4736.7	0.30	2.0	15.0	35.0
풍화암	8000.0	0.28	2.2	20.0	35.0

지반물성치는 현장공내재하 시험을 통한 지반조사자료와 터널굴착시 관찰한 막장 지질관찰기록을 참고하여 설정되었으며, 지반조건에 근사한 물성치 선정에 주의하였다.

3.2 보강효과 확인을 위한 해석형태

터널보강에 따른 2차원 및 3차원 보강효과를 확인하기 위하여 표 3.2와 그림 3.1과 같은 형태에 따라 해석을 수행하였다.

표 3.2 보강효과의 확인을 위한 해석형태

해석형태		2차원 해석	3차원 해석	선형탄성해석
CASE 1	원지반	o	o	o
CASE 2	원지반+ Grouting	o	o	-
CASE 3	원지반+ Grouting+ 강관보강	-	o	-

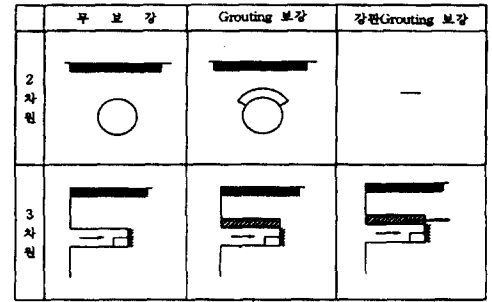


그림 3.1 2차원과 3차원에서 각 해석별 형태

3.3 해석방법

3.3.1 해석 프로그램의 개요

2차원 및 3차원 해석에 사용된 SMAP-S2, SMAP-3D 프로그램은 터널설계시 터널단면의 Lining 구조해석 및 터널굴착에 의한 지반의 거동을 해석하기 위한 유한요소 해석프로그램이다. 4 ~ 8절점요소의 연속체요소를 2차원 및 3차원 평면변형, 평면응력, 축대칭으로 해석가능하며, BEAM요소 및 TRUSS요소를 추가할 수 있다.

3.3.2 해석재료 모델

본 연구에서는 콘크리트 또는 암석, 흙 등의 지반에 대해서 일반적으로 널리 사용되고 있는 Mohr - Coulomb 파괴기준을 사용하였으며, 안전율(F.S.)의 산정은 그림 3.2와 같다.

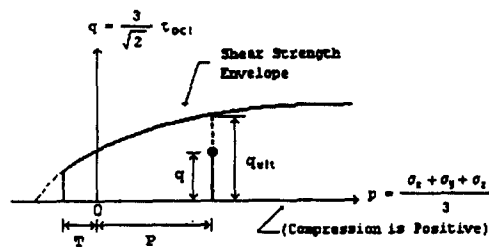


그림 3.2 안전율의 정의

본 프로그램에서는 탄성재료의 경우 $FS = 10$, 탄소성재료의 경우 $P \leq -T$ 일때 $FS = 1$, $P > -T$ 일때 $FS = q_{ult}/q$, 안전율의 한계는 $1 \leq FS \leq 10$ 이다.

3.4 2차원 해석과 경계조건

3.4.1 해석모델

연구 대상 지반에 대한 모델링은 그림 3.3과 같이 터널굴착으로 인한 영향 범위거리인 터널 측면부에서 터널직경의 $5d$ ($d =$ 터널직경) 범위까지를 포함할 수 있도록 충분한 영역을 설정하였다. 또한 터널하부는 터널 Invert부에서 풍화암 하부 16.0m 까지 횡단방향으로 모델링하였으며, 총 연속체 요소수는 145개, 절점수 156개로 유한요소망을 형성하였다.

3.4.2 해석터널 표준단면도

그림 3.4는 해석에 적용된 터널의 표준단면도로서 터널굴착후 두께 20 cm의 Shotcrete 타설과 H-100×100의 Steel-Rib를 종단방향 1 m 간격으로 설치되며, 터널굴착전에 지반보강을 위하여 터널 천단부 2 m까지 지반보강 Grouting이 시행되었다.

보강공법의 적용은 터널천단부에 터널 수직축을 중심으로 좌우측 60° 총 120° 에 대하여 약 2m두께 이상으로 실시되었으며, 특히 연약한 지역에서는 강관보강다단 그라우팅공법이 추가로 적용되었다.

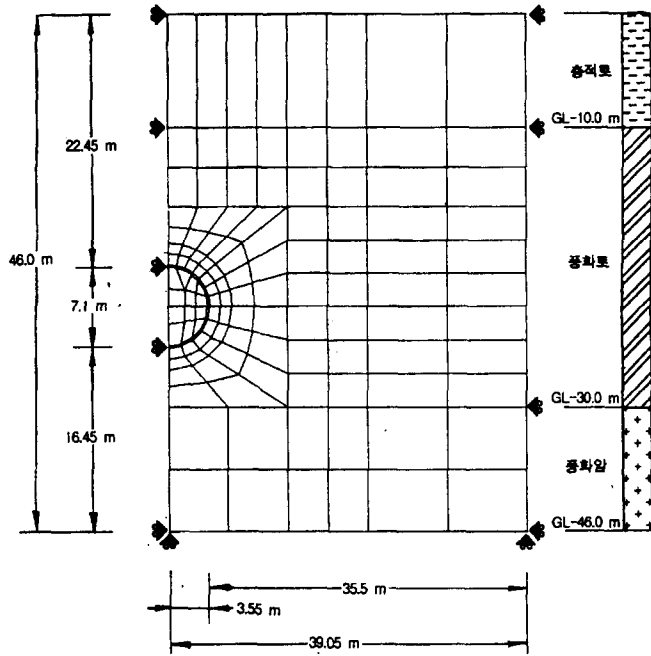


그림 3.3 2 차원 유한요소망과 경계 및 지반조건

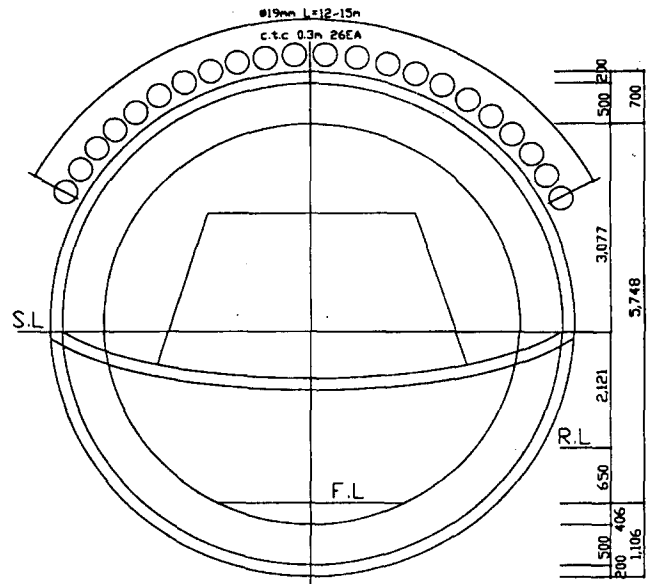


그림 3.4 해석터널의 표준단면도

3.4.3 터널굴착단계 및 강성분배율

터널 굴착단계와 해석에 있어서 굴착단계별 강성분배율은 표 3.3과 같다.

표 3.3 굴착단계와 굴착단계별 강성분배율

Step No.	시공상황	터널단면 형상	강성분배	Step No.	시공상황	터널단면 형상	강성분배
0 - 2	초기단계		100 %	7	제거 중		25 %
3	Grouting 시공 Ring Cut		50 %	8	Bench 제거 완공		0 %
4	상부shotcrete 설치		25 %	9	하부굴착		50 %
5	Ring Cut 굴착 완공		0 %	10	하부shotcrete 설치		25 %
6	Bench 제거		50 %	11	하부굴착 완공		0 %

3.5 3차원 해석

3.5.1 터널 종단방향거동 분석을 위한 3차원 수치해석모델

본 연구에서 수행한 3차원 해석의 목적은 지반내 터널굴진시 지반의 거동상태가 그림 3.5와 같이 3차원으로 종, 횡단방향 아칭효과가 발생되고 그림 3.6에서 막장진행에 따른 종단방향 및 횡단방향거동에 영향을 미치게 되므로 터널굴진에 따른 3차원터널거동을 보다 정확히 파악하기 위함이다. 또한 2차원 해석에서 확인할 수 없는 터널천단부 강판보강 효과를 3차원적으로 평가하기 위함이다.

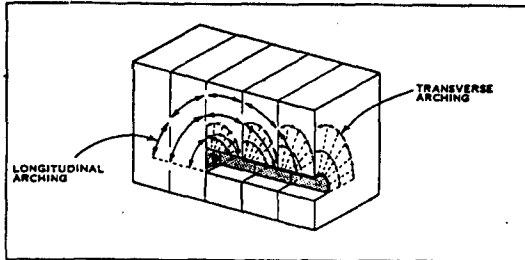


그림 3.5 터널굴진에 따른 3차원 거동(종, 횡단 아칭효과)

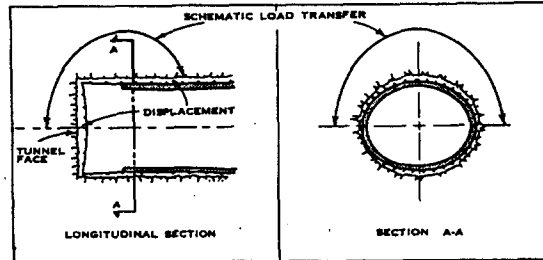


그림 3.6 종, 횡방향 3차원 하중전달(재분배) 개념도

보강공법의 3차원 효과를 확인하기 위하여 2차원 평면요소망, 지반물성치 및 굴착단계를 3차원 모델에 동일하게 적용하였으며, 종방향 요소분할은 그림 3.7과 같다. 전체 8절점 Brick 요소수 2498개, 절점수 2964개로 3차원 유한요소망을 분할하였으며, 또한 강판보강효과와 확인을 위하여 보요소 72개를 추가로 분할하였다.

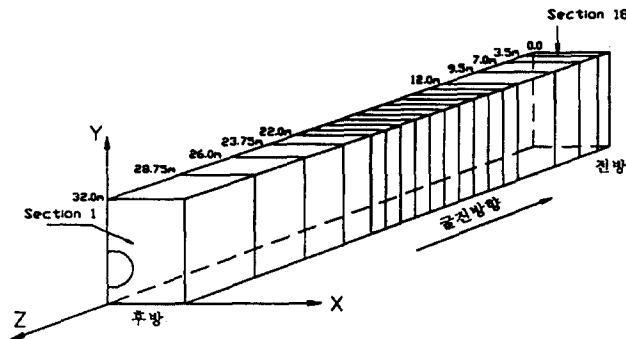


그림 3.7 3차원 해석을 위한 종방향Section

4. 해석결과에 대한 분석 및 고찰

터널굴착시 보강공법에 의한 보강효과를 평가하기 위한 2차원 해석 및 3차원 해석 그리고 선형탄성이론식으로 예상침하량 계산을 수행하고 그 결과에 대하여 비교, 분석하였다.

4.1 주변지반 거동 분석

4.1.1 지중침하량 및 이완영역

터널굴착으로 인한 지표 및 지중침하량에 의한 이완영역은 2차원 해석의 경우 그림 4.1에서 나타난 바와 같이 이완영역을 나타내는 변곡점 i까지의 거리가 Grouting보강시 $i = 13.5m$, 무보강시 $i = 15.5m$ 로 보강에 따른 이완영역 감소비는 약 12.9%로 나타났다.

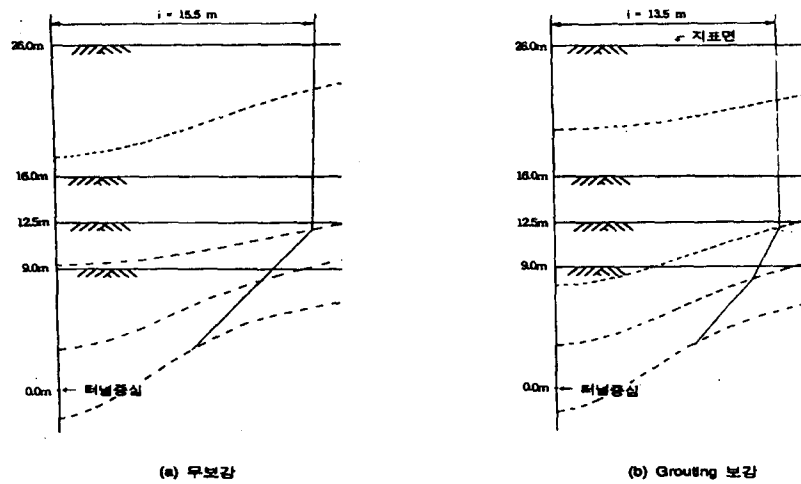


그림 4.1 지중 침하량 분석 및 이완영역 (2차원 해석)

3차원 해석의 경우 그림 4.2에 나타난 바와 같이 Grouting보강시 $i = 14.5\text{m}$, 무보강시 $i = 17\text{m}$ 로 이완영역 감소비는 약14.7%, 강관단단 Grouting보강시 $i = 13.5\text{m}$ 로 최종보강효과로 인한 이완영역 감소비는 20.6%로 나타났다.

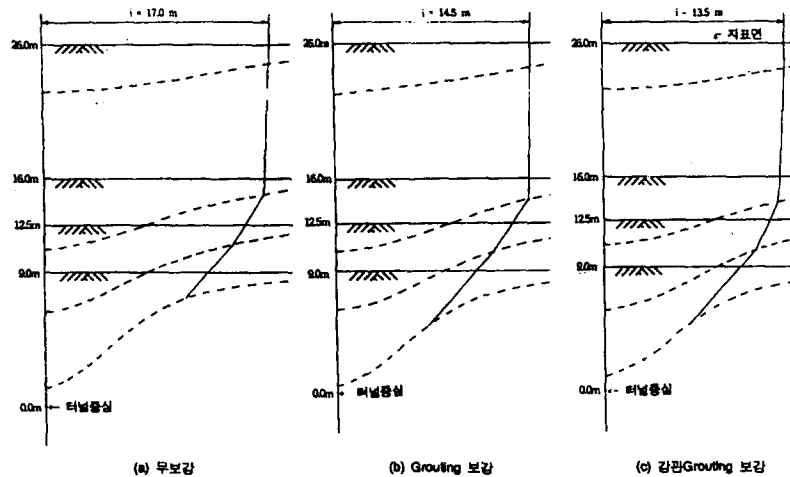


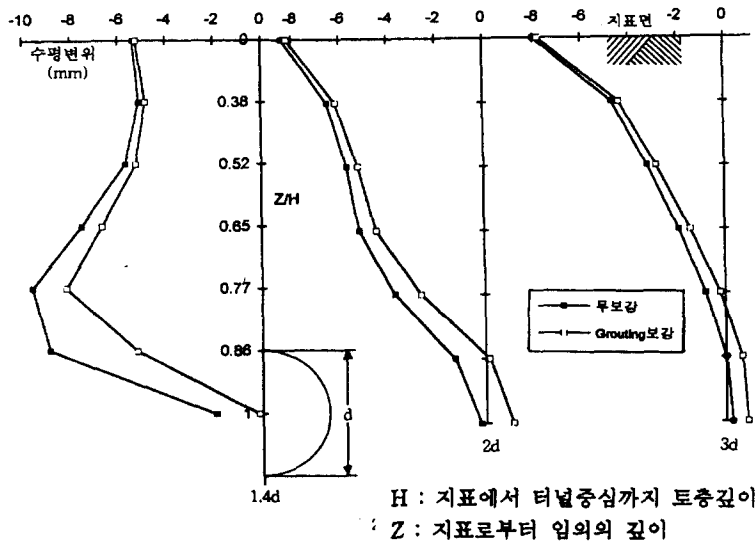
그림 4.2 지중 침하량 분석 및 이완영역 (3차원 해석)

4.1.2 수평방향변위

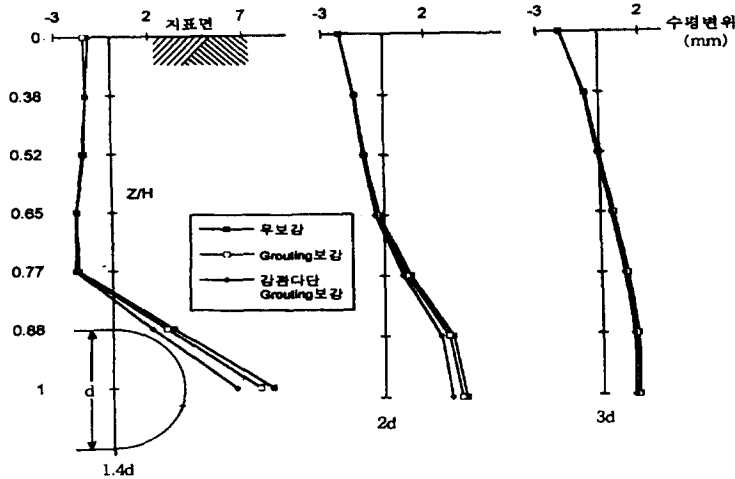
터널굴착에 따른 터널천단부의 수평방향거동에 대하여 해석결과를 분석고찰하면 그림 4.3(a)에서 나타난 바와 같이 2차원 해석은 터널 중심에서 횡방향으로 1.4d되는 위치에서 깊이비 Z/H 가 0.77되는 지점에서 최대값을 나타내고, 깊이비 Z/H 가 0.77에서 0.38까지 감소되는 경향을 나타내고 있다.

터널중심에서 횡방향으로 2d되는 위치의 수평방향변위는 깊이비 Z/H 가 1에서 0까지 전체적으로 증가되는 경향을 나타내고 있다.

3차원에서는 그림 4.3(b)에서 나타난 바와 같이 수평방향변위는 깊이비 0.77에서 1까지 현저히 감소하는 결과를 나타내어 터널중심측에서 3d이후는 터널굴착으로 인한 영향이 적은 것으로 나타났다. 보강효과에 대해서는 1.4d에서 3d까지는 보강으로 인한 효과가 나타나고 있으며, 특히 천단부 축방보강에 있어서는 횡방향거리 1.4d에서 3d와 깊이비 0.88에서 0.38까지 크게 나타나고 있다.



(a) 2차원 수평방향변위



(b) 3차원 수평방향변위

그림 4.3 터널 직경비에 따른 횡방향 수평변위

4.1.3 수직방향 변위

터널굴착시 천단부 지반에 대한 거동은 터널의 안정성에 큰 영향을 미치므로 터널 천단부의 수직방향변위에 대하여 분석하였다. 그림 4.4에서 나타난 바와같이 터널 직상부의 천단변위량이 가장 크게 나타나고 있으며, 깊이비 z/H 가 0으로 즉 지표면에 가까워지면서 본 현장의 경우에는 보강시나 무보강시나 수직방향변위에 있어서 차이가 없음을 알 수 있다. 이는 보강에 의해 지표침하까지 억제되는 것이 아니라 터널 직상부에서 깊이비 z/H 가 0.38인 지점까지 보강에 의해 지반거동이 억제되는 효과가 있음을 알 수 있었다.

또한 횡방향으로 터널 직경비 1.4d, 2d까지 보강시와 무보강시 수직방향변위를 분석해 보면 터널 중심 축에서 횡방향으로 2d까지 수직방향거동을 억제해 줄 수 있음을 확인할 수 있었다.

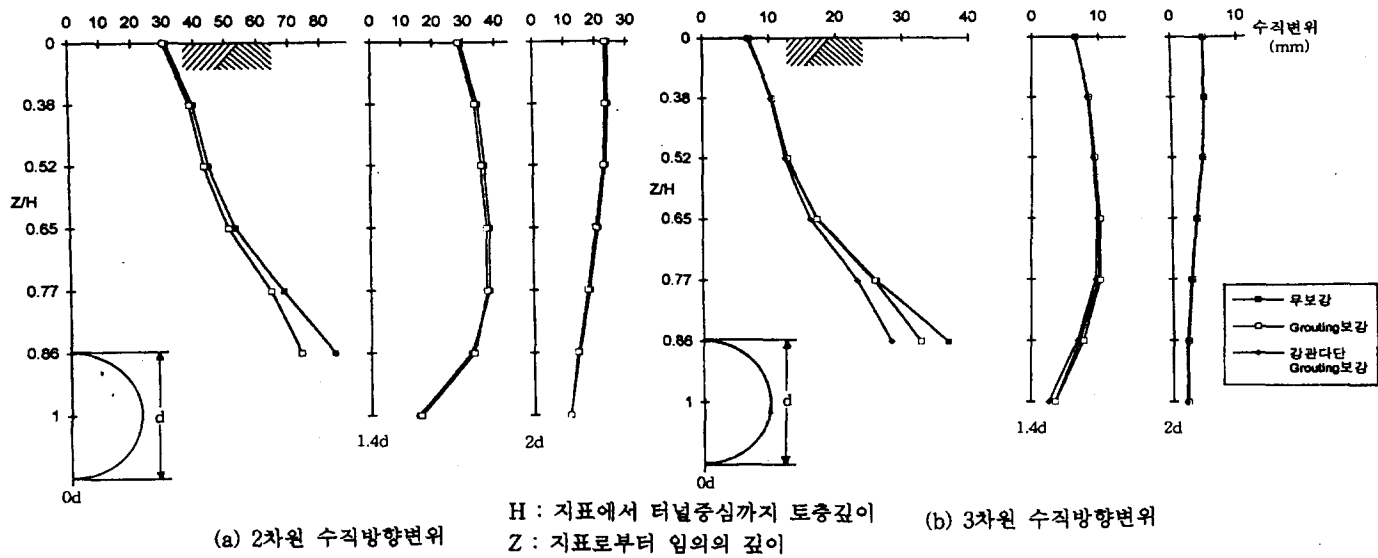


그림 4.4 터널 직경비에 따른 평방향 수직변위

4.1.4 지표침하 특성곡선에 대한 비교분석

터널굴진에 따른 지표침하 특성곡선에 대한 제안식중 Hansmire와 Cording에 의해 제안된 특성곡선식은 다음과 같다.

$$S = S_{max} \exp - \frac{x^2}{2i^2}$$

상기 식은 터널중심에서 이격거리 x에 따라 정규확률분포곡선을 나타내는 침하식이며, 변곡점 i에 의해 이완영역이 결정된다. 2차원 및 3차원해석에 의하여 나타나는 지표침하량을 도시하여 기존에 제안된 지표침하곡선식과 비교하면 그림 4.5와 같다.

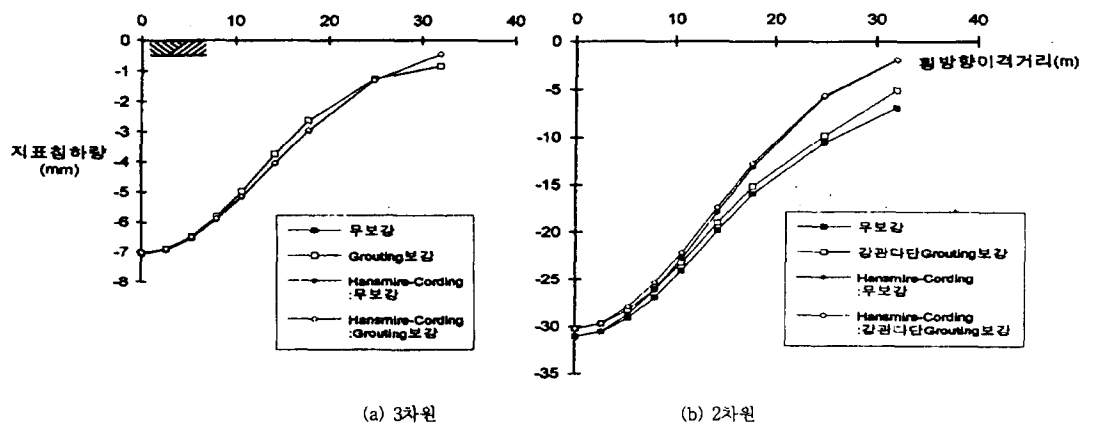


그림 4.5 Hansmire - Cording의 제안식과 해석치의 비교(지표침하특성곡선)

그림에서 나타난 바와 같이 2차원해석의 무보강시와 보강시 Hansmire와 Cording의 제안식에 의한 지표침하량이 일치되고 있음을 알 수 있었다.

2차원 해석에 의한 지표침하곡선은 터널 중심축에서 횡방향으로 15m지점까지는 Hansmire와 Cording의 특성곡선과 유사한 경향을 나타내었으나 15m이후 35m지점까지는 무보강시 5mm, 보강시 3mm의 차이를 나타내었다. 따라서 무보강시 지표침하 영향폭이 보강시 침하 영향폭보다 넓어지고 있음을 알 수 있었다.

3차원 해석의 경우 무보강시와 보강시 Hansmire-Cording의 특성곡선은 보강시와 무보강시 모두 일치되는 경향을 나타내었으며, 3차원 해석결과 지표침하특성곡선도 동일한 결과를 나타내었다. 제안된 지표침하량특성곡선과 3차원 해석에 의한 지표침하량곡선 역시 거의 유사한 경향을 나타내었다. 따라서 연약지반에서 강관보강효과는 지표침하까지 영향이 미치지 않음을 알 수 있었고 터널 천단부에서 상부로 깊이비 $Z/H=0.83$ 에서 0.33까지 보강효과가 있음을 알 수 있다.

4.2 2차원 및 3차원 해석에 의한 천단변위 억제효과

2, 3차원 해석결과중 터널의 천단침하량을 무보강시와 보강시에 대하여 비교하여 보강효과에 대하여 고찰하였다. 2, 3차원 해석에서 2차원 무보강시 최대천단침하량은 84.24mm, 보강시 73.74mm, 3차원 무보강시 최대천단침하량은 35.7mm, 보강시 28.8mm로서 보강효과는 2차원 12.5%, 3차원 19.3%로 나타났다.

표 4.1 2, 3차원 해석에 의한 보강효과

	보강시	무보강시	보강효과
2D	73.74mm	84.24mm	12.5%
3D	28.8mm	35.7mm	19.3%

터널의 변위 거동은 지반물성치와 터널형상 그리고 측압에 의해서 결정되고, 강관보강에 의한 효과는 일반적으로 약 12% ~ 20%범위인 것으로 나타났다.

4.3 3차원 해석에 따른 주변지반 거동분석

터널의 굴진에 따라서 주변지반의 거동은 3차원적인 거동을 나타내게 되며 이는 터널의 종방향거동에 영향을 미치게 된다. 또한 종방향 거동에 의해 막장의 안정에도 영향을 주게 되므로 3차원 해석에 의한 보강효과 및 종방향 거동을 분석하였다.

4.3.1 터널 종방향 천단침하

터널 막장이 진행되어 나감에 따라 3차원 해석에서 발생하는 천단침하량에 대한 천단침하분포 곡선을 그림 4.6에 나타내었다. 터널 막장이 기준점(0지점)에 도달되기전 -7.0m지점에서 무보강시 최대천단침하값 35.7mm를 나타내었고, Grouting보강시 최대천단침하값 32.6mm, Grouting+강관보강시 최대천단침하값 28.8mm를 나타내었다.

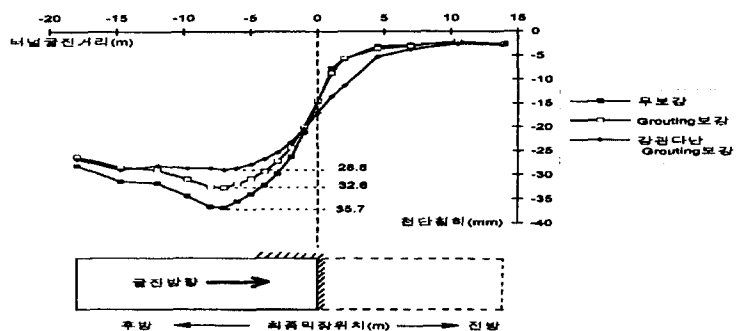


그림 4.6 3차원 해석에 의한 터널 종방향 천단침하량

막장이 기준점에 도달하였을 때 막장전방 14.0m지점에서 3mm의 초기변위가 발생되는 것으로 나타났다. 이는 터널막장을 기준으로 후

방 1d (d는 터널직경, d=7.10m)지점에서 최대값이 발생되어 수렴하고, 터널막장 전방 약 2d지점까지 막장의 거동에 의한 영향이 나타나는 것을 알 수 있었다.

4.3.2 터널 종방향 천단침하 특성곡선

터널 종방향 굴진에 따른 최대 천단침하량 D_{max} 와 막장진행에 따라 발생하는 임의 지점의 천단침하량 D_i 의 비로서 나타내는 천단침하 특성곡선을 그림 4.7에 나타내었다. 천단침하 특성곡선을 살펴보면 터널막장이 기준점(0지점)에 도달되기 전에 발생하는 선행변위는 각 경우 모두 약 35%에서 39%의 범위를 나타내었고, 기준점을 통과하여 터널막장이 1d(d는 터널직경, d=7.10m)되는 지점에 이르는 동안에 후행변위 65%에서 69%가 발생되어 수렴되었다.

이는 그림 4.7에서 나타난 것과 같이 무보강시와 보강시의 최대침하량은 차이를 갖고 있으나 침하특성곡선은 공통적으로 같은 경향을 나타내고 있음을 알 수 있었다.

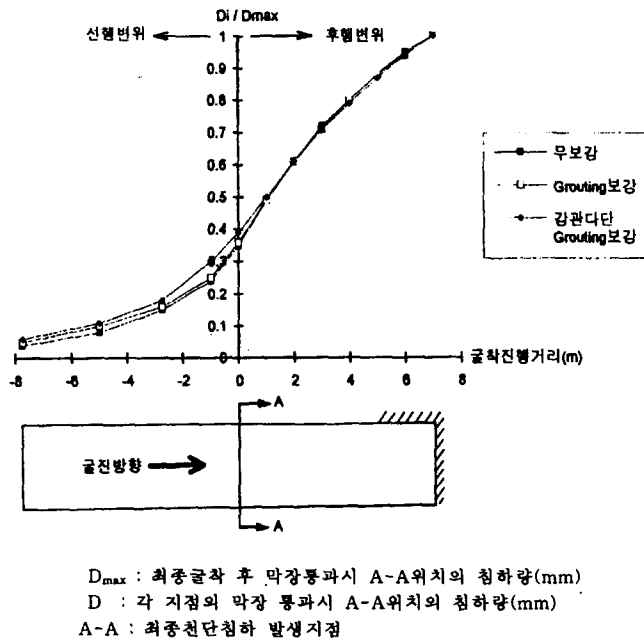


그림 4.7 3차원 해석에 의한 터널 종방향 천단침하량

4.3.3 심도별 터널 종방향변위

터널 막장의 굴진에 따른 심도별 종방향변위 거동은 막장의 안정 및 지반의 거동을 파악하는데 중요한 요소가 된다. 그림 4.8의 3차원 터널 굴진에 따른 심도별 종방향변위를 무보강시와 터널 천단부에 대한 Grouting 보강시, 강관Grouting보강시의 지반거동을 나타내고 있다.

무보강시 막장전방 수평방향변위는 막장이 위치하는 지점(0m)에서 토피 H의 중앙부의 상부 6.0m지점에서 최대수평방향변위를 나타내고 있으며, 터널천단 상부 15m지점까지 점차 감소하는 형태의 수평방향변위를 나타내고 있다. 이러한 경향은 터널막장 전방 2m, 4.5m, 6.5m 지점에서도 공통적으로 나타나고 있으므로 보강이 되지 않은 지반에서 막장의 진행에 따라 터널상부 2d되는 지점, 그리고 터널막장 전방 1d되는 지점까지 지반거동이 나타나고 있음을 알 수 있다.

반면에 보강(Grouting, 강관Grouting)이 이루어지는 경우 터널천단부 보강효과로 인하여 보강이 되지 않은 지반과 상이한 거동을 나타내고 있고 강관의 보강효과로 인하여 막장전방 6.5m까지 종방향 아아칭효과가 나타나므로 터널 종방향 수평변위가 무보강시와는 달리 억제되어 있음을 알 수 있다. 또한 터널천단 상부의 수평변위도 터널상부 약 15m(2d)지점까지 강관보강에 의한 터널 종방향 수평변위가 억제되어 있음을 알 수 있다. 이는 2차원 해석에서 수평 및 수직방향변위 분석에서도 깊이비 0.88 ~ 0.38까지 보강효과가 나타나고 있음을 확인할 수 있다(그림 4.2, 4.3 참조).

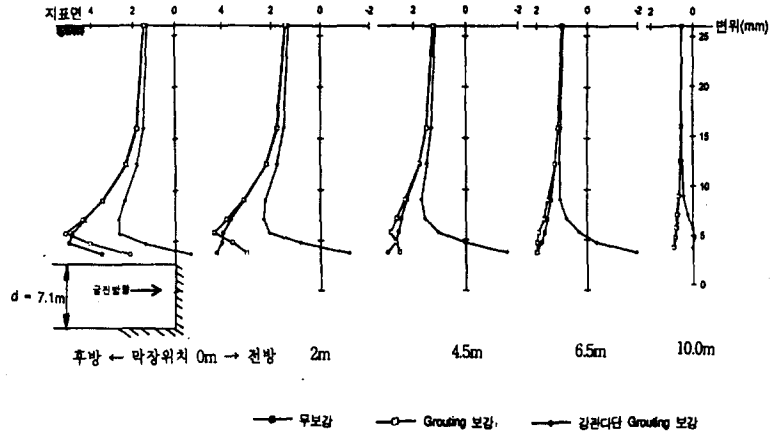


그림 4.8 3차원 터널굴진에 따른 터널 종방향 변위

4.3.4 보강에 따른 터널주변지반의 안전율 변화

터널굴착에 따라 지반내 응력의 이완이 발생되며 응력의 이완은 굴착된 터널 주변지반에 전달되게 된다. 응력의 전달로 인하여 터널에 인접된 지반의 응력이 증가되고, 응력증가로 인하여 터널주변지반에 소성영역 및 탄성에서 소성영역으로 전이영역이 발생되게 된다.

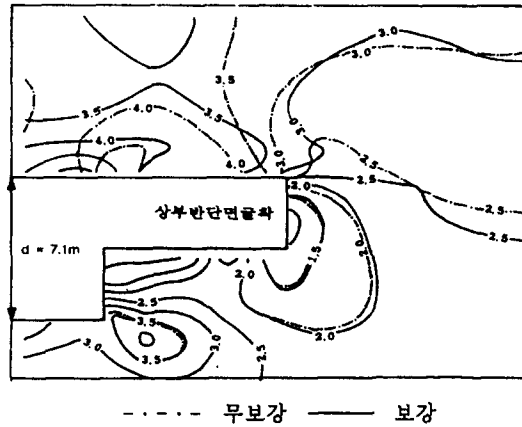


그림 4.9 터널주변지반의 안전율 변화(3차원 해석)

따라서 3차원 해석을 통하여 터널 천단부 보강에 따른 소성영역 및 전이영역을 나타내는 안전율은 그림 4.9 과 같다.

굴착진행에 따른 터널주변지반의 안전율이 상반굴착 완료의 경우 보강시나 무보강시에 하반과 Invert부에서는 변화를 보이지 않았지만, 굴착이 진행된 천단부에서 안전율의 변화가 나타났다. 반단면 굴착상태에서는 보강시나 무보강시 지보재(shotcrete)와 강관보강의 영향으로 터널 천단부에 소성 및 전이영역이 나타나지 않음을 알 수 있고, 소성 및 전이영역은 터널막장면과 막장 맨 하부모서리에 집중되어 나타났다. 전체적으로 3차원 해석결과 강관보강으로 인하여 터널막장전방 천단부의 안전율변화가 증가되는 것으로 나타났으며, 이는 강관보강이 강관의 종방향 아아칭효과로 터널막장의 안정에 유용함을 알 수 있다.

4.3.5 터널 종방향 단면별 안전율 변화

터널굴진에 따른 단면별 안전율 변화는 그림 4.10과 같다. 전단면 굴착이 완료되었을 때(그림 4.10(a)) 보강시와 무보강시에 터널단면 형상이 원형인 경우 소성영역(안전율=1)이 발생되지 않으므로 단면형상에 있어서 터널의 안정에 원형단면이 유용한 것으로 나타났다.

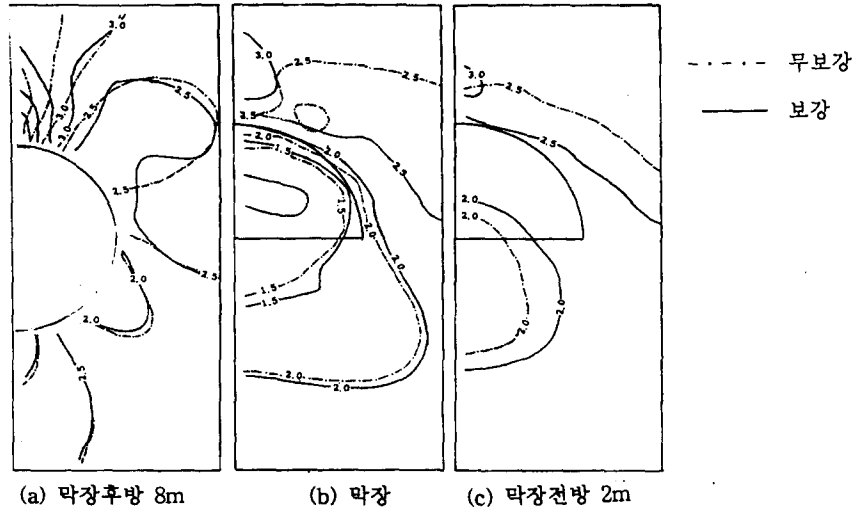


그림 4.10 보강에 따른 터널주변지반의 단면별 안전율변화 (3차원 해석)

그리고 안전율의 변화에 있어서 터널하부의 안전율은 보강시나 무보강시 모두 차이를 나타내고 있지 않으며, 보강이 이루어진 천단부와 터널 어깨부(shoulder)에서 보강으로 인하여 안전율의 변화를 보이고 있다.

터널막장면의 경우(그림 4.10(b)) 터널막장면 중심에서 소성 및 전이영역(안전율 1.0, 1.5)이 나타나고 있으며 보강으로 인한 효과가 나타나고 있다. 특히 막장면에서 천단부의 안전율에서 보강시와 무보강시에 명확한 차이를 보이고 있다. 터널막장면 전방 6.5m지점(그림 4.10(c))의 안전율변화의 경우도 보강시와 무보강시 차이를 보이고 있으며, 강관이 터널주변 및 막장 전방의 안정에 효과를 나타내고 있다.

4.3.6 보강에 따른 터널주변지반 응력변화

강관보강으로 인한 터널주변지반의 응력변화는 그림 4.11과 같다. 보강시와 무보강시의 터널굴진에 따른 응력분포를 살펴보면 터널 상, 하반굴착시 Invert부의 응력변화는 미소하게 변화하고 있으나 천단부와 터널막장면에서의 응력변화는 상당한 차이를 나타내고 있다. 이는 강관보강으로 천단부와 터널막장면에서 중, 횡방향 아아침효과가 증대되고 주변지반 응력집중을 감소시킴으로서 주변지반의 응력변화를 등분포시키는 효과가 있음을 알 수 있다.

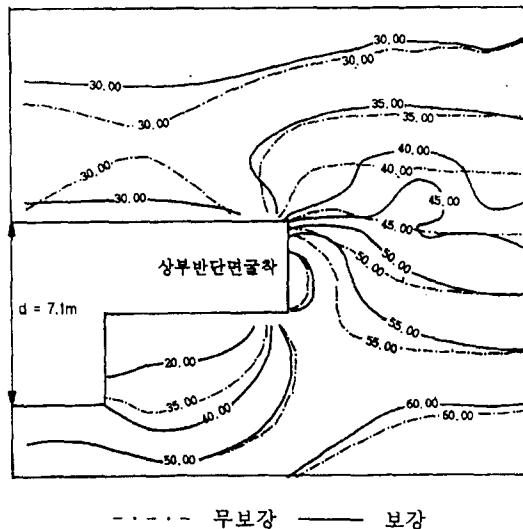


그림 4.11 보강에 따른 터널주변지반의 응력변화

4.3.7 터널 종방향 단면별 응력변화

터널굴진에 따른 단면별 응력변화를 분석 고찰하기 위해서 3차원해석을 통한 단면별 응력변화를 그림 4.12에서 나타내었다.

터널 전단면이 굴착완료된 경우(그림 4.12(a)) Spring Line을 중심으로 하부에는 보강시나 무보강에 응력의 변화가 없으며, 상부에서는 보강시와 무보강시의 응력분포가 상이하게 나타나고 있다. 이는 천단부에 강관이 보강되므로 해서 강관이 보강된 부위에는 응력이 집중되는 것을 나타내며 터널주변의 응력은 강관이 분담하는 것을 알 수 있다.

터널막장면(그림 4.12(b))에서의 응력분포는 터널막장면에 응력이 집중되고 있으며, 전단면 굴착완료시와 동일하게 천단부의 응력분포가 집중되는 것으로 나타났다. 터널막장 전방 6.5m지점(그림 4.12(c))의 경우 무보강시 터널주변의 응력분포는 일반적인 응력분포를 나타내고 있으나, 보강시 강관이 보강된 천단부로 응력이 집중되고 있음을 알 수 있다.

전체적으로 전단면 굴착면에서 터널막장 6.5m지점까지 강관보강에 의해서 천단부의 응력이 강관을 따라 균등하게 분배되는 것을 알 수 있다. 따라서 강관이 터널에 보강되므로써 터널천단부의 주변응력을 재분배시키고, 이로 인하여 터널의 주변지반응력을 안정 시킴을 알 수 있다.

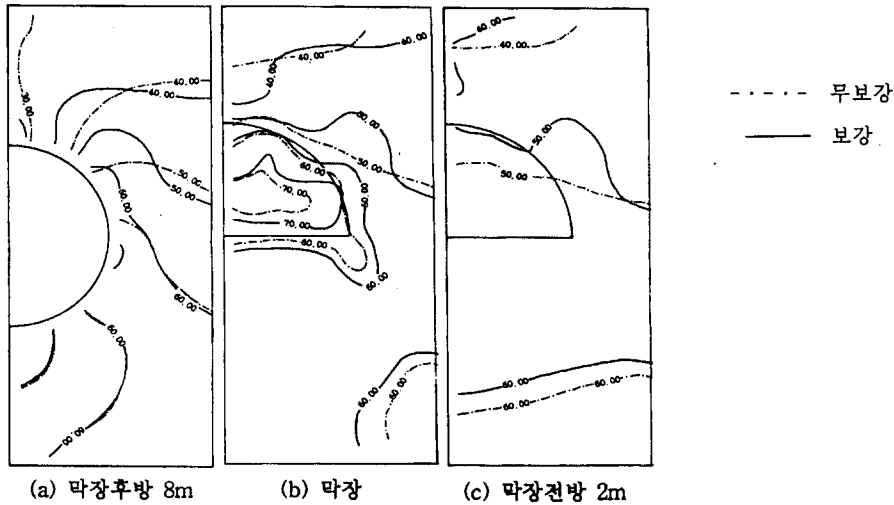


그림 4.12 보강에 따른 터널주변지반의 단면별 응력변화 (3차원 해석)

5. 결 론

터널 천단부 보강에 따른 지하철 하저터널의 연약대 구간에서 주변지반의 변위억제효과에 대하여 선형탄성식, 2차원 및 3차원 탄소성 유한요소해석 결과를 분석, 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 터널 천단부에 대한 보강효과는 2차원 해석에서는 12.5%, 3차원 해석에서는 19.3%를 나타내었다. 그러나 2차원 해석에서의 강관보강 효과는 정확한 해석이 불가능하므로 3차원 해석을 통하여 신뢰도가 높은 결과를 얻을 수 있다.

2. 천단부 보강으로 인한 변위 억제효과의 수직방향 범위는 터널 천단부에서 2d(d는 터널직경, d=7.1m)영역까지 효과가 나타났고, 수평방향 범위는 터널 중심에서 수평방향으로 2d영역까지 나타났다. 따라서 보강으로 인한 변위억제 효과의 영향범위는 터널 천단부에 일정한 영역을 이루고 있음을 알 수 있었다.

3. 3차원 해석 결과의 터널 종방향 분석을 통하여 막장 도달 이전에 발생하는 선행 변위비가 약 40%인 것으로 확인되었고, 막장 통과 이후 발생하는 후행변위는 60%인 것을 알 수 있었다. 따라서 3차원 해석 결과를 통하여 종방향 천단침하 특성곡선을 작성하므로써 굴착 전 발생하는 선행변위를 예측할 수 있을 것이다.

3차원 해석에서 강관보강으로 인한 안전율변화는 강관의 종방향 및 횡방향 아칭효과로 터널 천단부위의 안전율이 무보강시보다 증가됨을 알 수 있었다. 또한 응력분포 역시 강관의 종방향 아칭효과로 응력재분배를 이루어 터널천단부 응력이 터널굴착단면에서 막장전방까지 등분포됨으로서 터널의 안정을 이룸을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. F.O. Franciss, "Weak Rock Tunnelling", Butterworth-Heinemann, 1992.
2. K. Szechy, "The Art of Tunnelling", Akademiaikiado, pp.1034-1068, 1973.
3. Smap-s2 Version 2.0 User Mannual, Comtec Research, 1992.
4. Smap-3D User Mannual, Comtec Research, 1995.
5. Wang Moonshu, "The Application of Tunnelling Method in Shallow Embeddid Beijing Metro", International Academic Publishers, pp. 169-176. 1990
6. Ward, W.H., "Ground Suppors for Tunnels in Weak Rocks", Geotechnique28, No. 2, pp 133-171, 1978.
7. Z. T. Bieniawski, "Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling", A.A.Balkema, 1984.
8. 배규진, "토사터널 굴착에 따른 주변지반의 변위예측에 관한 연구", 박사학위논문, 1989.
9. 삼부토건주식회사, 대덕공영주식회사, "한강 하저터널 막장지반조사", 1995.
10. 이봉렬, 김광진, 김학문, "비선형 유한요소법을 이용한 터널해석 및 효용성평가", 한국토목학회논문집 제15권제3호, pp.699-714, 1994
11. 한국건설기술연구원, "강관보강형 다단그라우팅공법의 개발", (주)지오텍엔지니어링, 1994.