

3차원 터널해석에 의한 강관보강형 다단계그라우팅의 보강효과

Improved Effects of Steel Pipe Reinforced Multi-Step
Grouting Method Using the Nonlinear 3-D Tunnel Analysis

이 봉 렬*1

Lee, Bong - Yul

김 형 탁*2

Kim, Hyung - Tak

김 학 문*3

Kim, Hak - Moon

Abstract

In this study it was analyzed by 2-D FEM and 3-D FEM to evaluate the ground-reinforcing effect of steel pipe reinforced multi-step grouting (SPRG) technique and the behavior of ground in the vicinity using the nonlinear FEM program for the ground condition of alluvium located on the top of tunnel applied by SPRG technique.

It was found that the nonlinear 3-D analysis performed better than 2-D analysis in evaluating the usefulness of the SPRG technique, and it was also found that the safety was relatively secured by the stiffness of steel pipe to distribute the concentrated stress in the tunnel facing.

It was reported that the change of settlement on the top of tunnel becomes about 40% of the total expected settlement before tunnel facing reaches tunnel gauging point, and 60% of the total expected settlement while tunnel facing passes tunnel gauging point and takes a distance about tunnel diameter.

With the aid of the SPRG technique the control range of displacement and stress of the ground in the vicinity could be reached up to tunnel top, namely depth ratio from 0.38 to 0.83 or 2D (D : tunnel diameter) before the tunnel facing, and about 20% of settlement control in this particular case was possible.

요 지

본 논문은 비선형 유한요소 프로그램을 이용하여 강관보강형 다단계그라우팅의 지반보강효과와

*1 정회원, 단국대학교 대학원 박사과정수료

*2 시설안전기술공단 지하구조진단본부

*3 정회원, 단국대학교 공과대학 토목공학과 부교수

주변지반의 거동을 검토하기 위하여 지반조건이 터널천단부에 층적층이 분포하여 강관다단그라우팅을 적용한 현장을 대상으로 유한요소 2차원과 3차원 모델로 나누어 해석하였다.

해석결과 강관보강효과를 분석하기 위해서는 2차원해석보다는 3차원해석이 필수적임을 알 수 있었으며, 그 효과는 막장부근의 응력집중현상을 골고루 분포시켜주는 강관의 강성에 의하여 안전율이 상대적으로 높아짐을 확인할 수 있었다.

한편 터널천단의 침하량 변화는 터널막장위치가 측정지점에 도달하기 이전에 총예상변위의 40%정도가 발생되며, 막장위치가 측정지점을 통과하여 터널직경정도의 거리에 도달하는 동안 전체예상변위의 60%가 발생될 수 있는 것으로 나타났다.

또한 강관보강으로 인하여 주변지반의 변위 및 응력의 억제범위는 터널 천단부 측 깊이비 0.83에서 0.38범위와 터널막장전방 2d(d: 터널직경)지점까지 나타나며, 변위억제효과는 총 예상변위량의 약 20%정도임을 알 수 있었다.

Keywords : SPRG(Steel Pipe Reinforced Grouting), 3-D and 2-D Nonlinear FEM Analysis, Settlement, Depth ratio.

1. 서론

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 연구가 더욱 요구되고 있으며, 특히 이에 대한 정확한 수치해석기법의 개발과 현장 측정자료들에 대한 비교, 분석이 활발히 진행될 경우 도심지 연약지반에서 NATM의 적용성에 새로운 의미를 부여하게 될 것이다.

강관다단 그라우팅공법은 70년대 중반 이탈리아에서 개발된 것으로 국내의 경우 80년대 초에 지하철 일부구간에 시공된 이래 NATM 공법에서 연약대구간의 보강공법으로 일반화되고 있는 추세이다. 본 연구에서는 강관보강형 다단그라우팅공법의 지반보강효과와 주변지반의 거동을 규명하기 위하여 2차원 및 3차원 터널해석을 수행하였으며, 이러한 해석을 통하여 중, 횡방향 지반거동, 막장굴착에 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 빔작용에 의해 터널에 가해지는 상재하중, 토압 등의 분산효과 및 경감효과를 얻고자하는 것으로 파이프루프 공법 및 일반 그라우팅 공법을 단일 공정으로 묶어 활용할 수 있는 공법으로서 터널 굴착전에 지보재를 설치하여 상부의 토압 및 이완영역의 경감효과를 얻고 또한 주입을 강관속에서 수행하는 주입재에 의한 지반의 보강으로 각 강관 사이의 간격을 충전시킴으로써 흙의 전단강도를 증대시킬 수 있는 열악한 지반조건에서 효율성이 높은 공법이다. 시공단계는 표 2.1, 개략도는 그림 2.1과 같다.(한국건설기술연구원, 1994)

표 2.1 강관보강형 다단그라우팅공법의 시공순서

단 계	공 종
1 단계 (천공)	<ul style="list-style-type: none"> · 장비 : 터널전용 Drilling Machine · 천공직경 : $\phi 100\text{mm}$ 이상 casing ROD의 2중 구조 · 천공장 : 수평 16~21m(경사길이 16.3m) · 간격 : C.T.C. 0.4~0.6m · 각도 : 상향 1:1.5, · 공수 : 20~30공
2 단계 (강관삽입)	<ul style="list-style-type: none"> · 규격 : $\phi 50.8\text{mm}$(T=4mm) · 분사공 : $\phi 5\text{mm}$, · 연결 : Coupling · 분사공 간격 : 0.5~0.75mm
3 단계 (Corking 및 Sealing)	<ul style="list-style-type: none"> · 강관과 천공면 사이에 Corking(역류방지) · Corking 압결시멘트 또는 발포제 사용, · 최대주입압력 : $20\sim 40\text{kg/cm}^2$에 지탱 · Corking 상부에 Sealing 호스설치 · Sealing은 1.0 Shot 주입
4 단계 (Grouting)	<ul style="list-style-type: none"> · 방법 : 1.5 Shot, · 주입제 : 정수압에 3~4배 지층별 설정 · 주입시간 : 주입속도가 $10\ell/\text{min}$에서 주입압 10kg/cm^2로 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 · 인발 : 1 Setp 당 3m

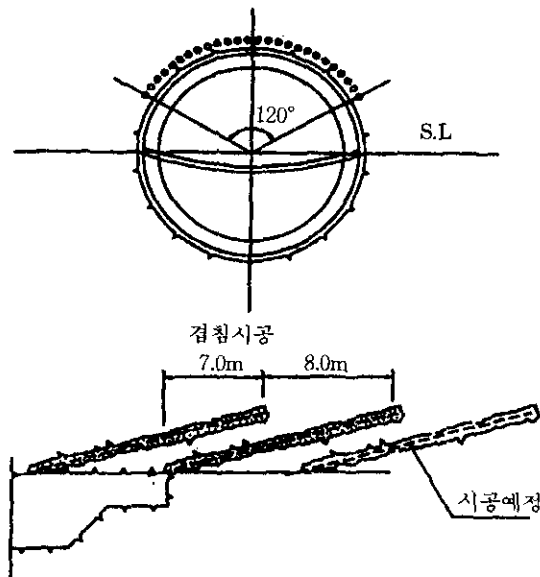


그림 2.1 보강공법의 개략도

3. 해석조건과 해석방법

3.1 해석 대상지반 조건

해석 대상은 서울지하철 공사구간으로 강관

보강형 다단그라우팅 공법이 적용된 현장을 선정하였다. 지반조건은 오랜기간 퇴적 및 지각 변동의 순환을 거듭한 변성암지역으로 주로 편마암(흑운모)이 주종을 이루고 있으며, 격심한 지각변동작용으로 파쇄대와 풍화대가 존재하고 풍화의 진행으로 거의 토사에 가까운 연약대가 많이 출현하는 특성을 갖는 지반으로 이루어져 있다.(삼부토건, 대덕공영, 1995)

지층구성은 지표면으로부터 층적토 10m, 풍화토 20m, 풍화암이 터널 인버트 하부 9m에 분포하고 있다.

3.2 해석터널 표준단면도

해석에 적용된 터널의 표준단면도는 그림 3.1로서 터널굴착후 두께 20cm의 Shotcrete타설과 H-100×100의 steel-rib를 종방향 1m간격으로 설치되었으며, 터널굴착전에 지반보강을 위하여 터널 천단부 2m까지 지반보강 그라우팅이 시행되었다.

보강공법의 적용은 터널천단부에 터널 수직축을 중심으로 좌우측 60° 총 120°에 대하여 약 2m두께 이상으로 실시되었으며, 특히 연약한

지역에서는 강관보강형 다단그라우팅공법이 추가로 적용되었다.

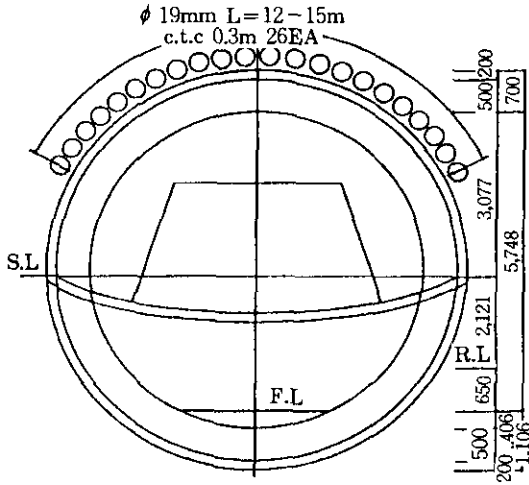


그림 3.1 해석터널의 표준단면도

3.3 해석방법

3.3.1 해석 프로그램의 소개

2차원 및 3차원 해석에 사용된 SMAP-S2, SMAP-3D 프로그램은 터널설계시 터널단면의 라이닝 구조해석 및 터널굴착에 의한 지반의 거동을 해석하기 위한 유한요소 해석프로그램이다.(Kim, Kwang-Jin, 1992, 1995) 4~8 절점요소의 연속체요소를 2차원 및 3차원 평면 변형, 평면응력, 축대칭으로 해석가능하며, beam요소 및 truss요소를 추가할 수 있다. 본 프로그램에 대한 상세한 이론은 참고문헌 10)에 상세히 기술하였다.(이봉렬, 1995)

본 연구에서는 콘크리트 또는 암석, 흙 등의

지반에 대해서 일반적으로 널리 사용되고 있는 Mohr-Coulomb 파괴기준을 사용하였으며, 안전율(FS)의 정의는 그림 3.2와 같다.

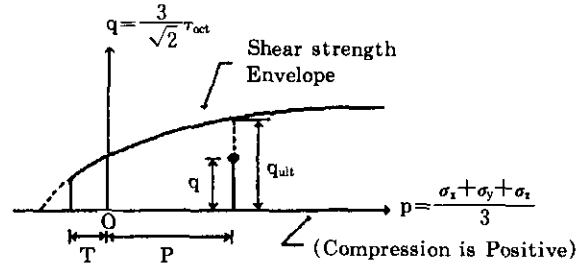


그림 3.2 안전율의 정의

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.

3.3.2 지반의 물성치 및 해석형태

2차원 및 3차원 해석을 위한 지반의 물성치는 표 3.1과 같다.

지반의 물성치는 현장 공내재하시험을 통한 지반조사자료와 터널굴착시 관찰한 막장지질 관찰기록을 참고하여 설정되었으며, 물성치 결정을 위한 현장조사결과는 참고문헌 9), 11)에 상세히 기술되었고, 현장지반조건에 근사한 물성치 선정에 유의하였다.(삼부토건, 대덕공영 1995, 이봉렬, 1994)

터널보강에 따른 2차원 및 3차원 보강효과를 확인하기 위하여 표 3.2와 그림 3.3과 같은 조건 및 형태에 따라 해석을 수행하였다.

표 3.1 지반의 물성치

	탄성계수(t/m^2)	포아송 비(ν)	단위중량(t/m^3)	점착력(t/m^2)	내부마찰각($^\circ$)
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

CASE 1,2,3의 해석형태는 실제시공조건과 동일하게 선정하였으며, 그라우팅 및 강관보강의 효과확인을 위하여 해석형태를 구분하였다. 또한 2차원해석의 경우 강관의 3차원적인 형태를 모델링할 수 없으므로 3차원해석에서만으로 적용한 해석결과로 강관보강 효과를 확인하였다.

표 3.2 보강효과의 확인을 위한 해석형태

해석형태		2차원 해석	3차원 해석
Case1	원지반	○	○
Case2	원지반+ Grouting	○	○
Case3	원지반+ Grouting+ 강관보강	-	○

	무 보 강	Grouting 보강	강관Grouting 보강
2차원			-
3차원			

그림 3.3 2차원과 3차원에서 각 해석별 형태

3.3.3 2차원 해석을 위한 기하학적 모델링
연구대상 지반에 대한 모델링은 그림 3.4와 같이 터널굴착으로 인한 영향 범위거리인 터널

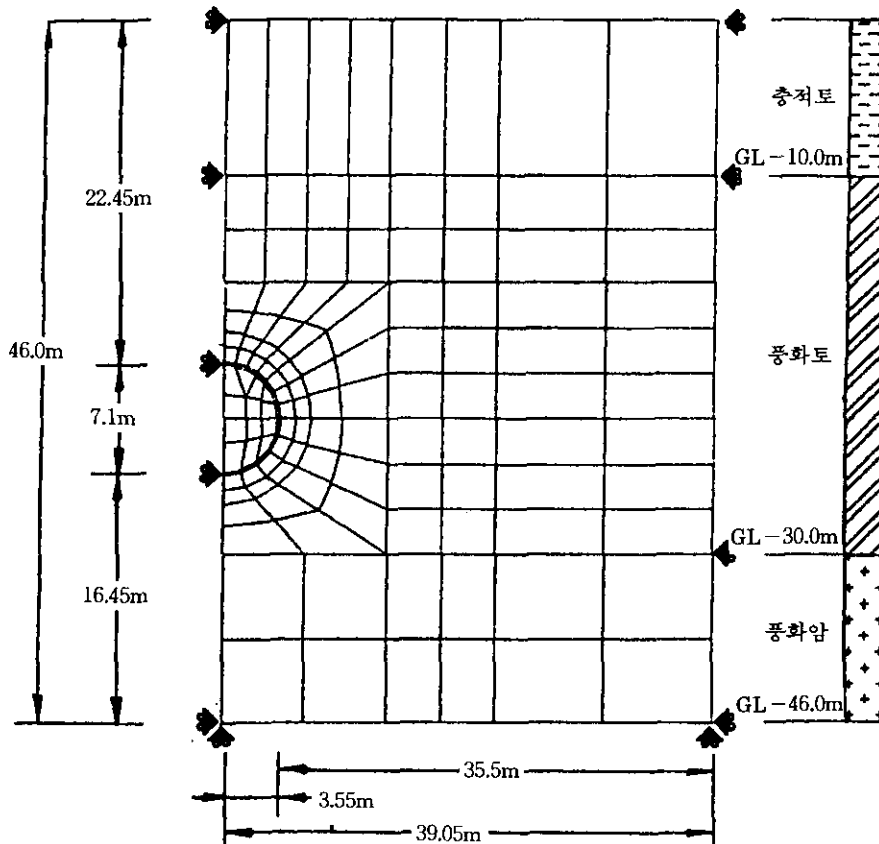


그림 3.4 2차원 유한요소망과 경계 및 지반조건

측벽부에서 터널직경의 5d(d=터널직경)범위 까지를 포함할 수 있도록 충분한 영역을 설정하였다. 또한 터널하부는 터널 인버트부에서 풍화암 하부 16.0m까지 모델링하였으며, 총연속체 요소수는 145개, 절집수 156개로 유한요소망을 형성하였다.

한편 터널의 굴착에 따라서 터널주변의 응력이 재분배되며 이는 터널막상에 의한 효과로 인하여 3차원적인 강성분배를 따르게 된다. 따라서 본 해석에 적용된 강성분배율은 W.H. Ward에 의하여 연구된 원형단면의 터널에 이

표 3.3 굴착단계와 굴착단계별 강성분배율

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

론적으로 해석된 터널의 변위를 고려하여 최종 변위에 대한 비율이 강성분배율과 동일하다고 산정하여 터널 굴착단계와 해석에 있어서 굴착 단계별 강성분배율은 표 3.3과 같이 결정하였다.(Ward, 1978)

3.3.4 3차원 해석을 위한 기하학적 모델링

본 연구에서 수행한 3차원 해석의 목적은 지반내 터널굴진시 지반의 거동상태가 그림 3.5와 같이 3차원으로 중, 횡단방향 아칭효과가 발생되므로 터널굴진에 따른 3차원터널거동을 보다 정확히 파악하기 위함이다. 또한 2차원 해석에서 확인할 수 없는 터널천단부강관보강 효과를 3차원적으로 평가하기 위함이다.

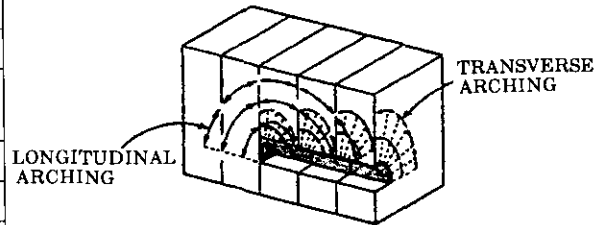


그림 3.5 터널굴진시 3차원 거동에 의한 중, 횡단 아칭효과

보강공법의 3차원 효과를 확인하기 위하여 2차원 평면요소망, 지반물성치 및 굴착단계를 3차원 모델에서도 동일하게 적용하였으며, 이외

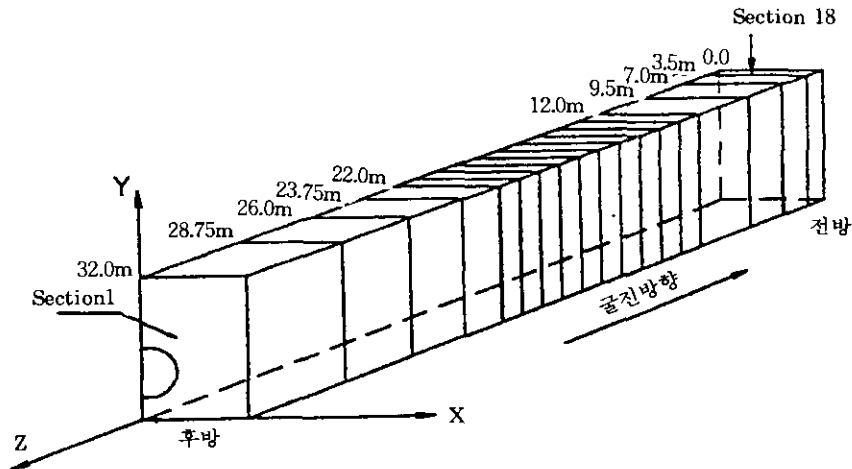


그림 3.6 3차원 해석을 위한 종방향분할도

에 종방향 요소분할은 그림 3.6과 같다. 전체 8 절점 brick 요소수는 2498개, 절점수는 2964개로 3차원 유한요소망을 구성하였으며, 강관보강효과의 확인을 위하여 보요소 72개를 추가로 분할하였다.

4. 해석결과에 대한 분석 및 고찰

4.1 주변지반 거동 분석

4.1.1 지중침하량 및 이완영역

터널굴착으로 인한 지표면 침하량 및 지중변

위에 의한 이완영역은 2차원 해석의 경우 그림 4.1에서 나타난 바와 같이 이완영역을 나타내는 변곡점 i 까지의 거리가 그라우팅보강시 $i=13.5\text{m}$, 무보강시 $i=15.5\text{m}$ 로 보강에 따른 이완영역 감소비는 12.9%로 나타났다.

3차원 해석의 경우 그림 4.2에 나타난 바와 같이 그라우팅보강시 $i=14.5\text{m}$, 무보강시 $i=17\text{m}$ 로 이완영역 감소비는 약 14.7%, 강관다단 그라우팅보강시 $i=13.5\text{m}$ 로 최종보강효과로 인한 이완영역 감소비는 20.6%로 나타났다.

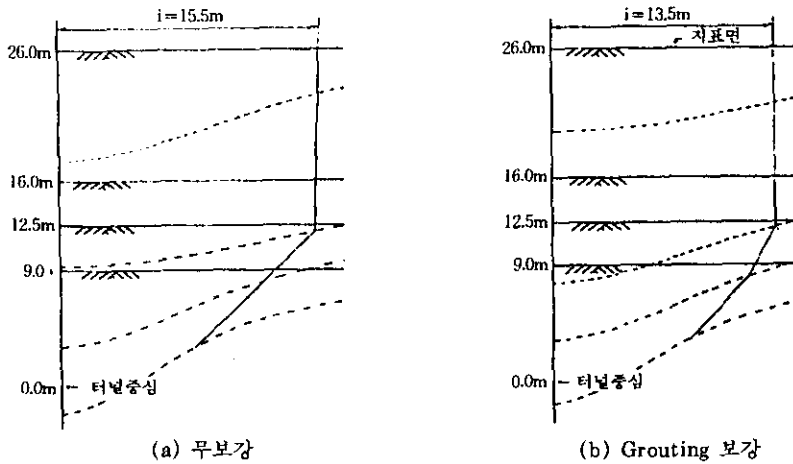


그림 4.1 지표 및 지중침하량에 의한 이완영역(2차원해석)

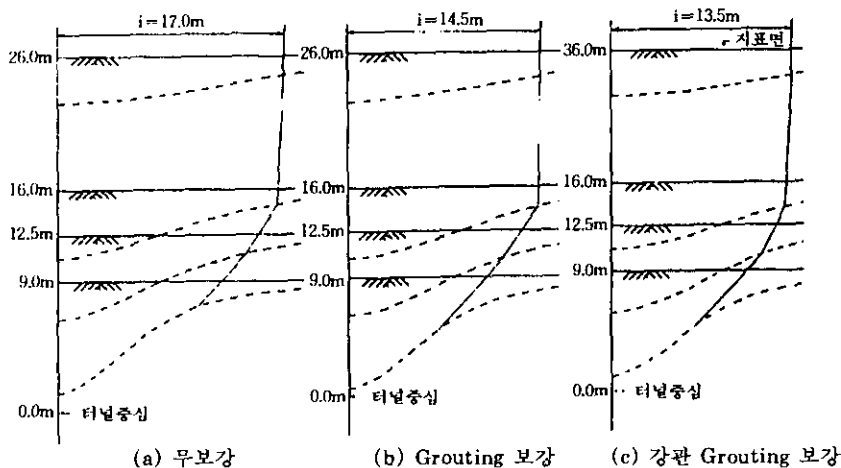


그림 4.2 지표 및 지중침하량에 의한 이완영역(3차원해석)

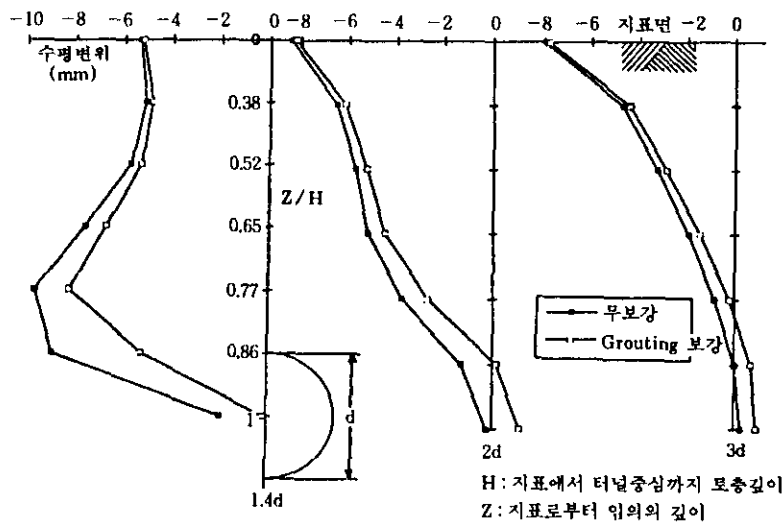
4.1.2 수평방향변위

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

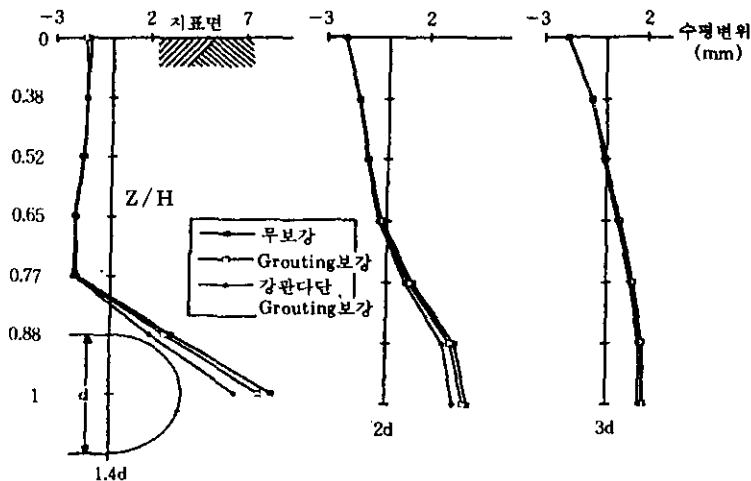
터널중심에서 횡방향으로 2d되는 위치의 수평방향변위는 전체심도를 통하여 증가되는 경

향을 보이고 있다.

3차원 해석에서 수평방향변위는 그림 4.3(b)와 같이 깊이비 0.77에서 1까지 현저히 감소하는 결과를 보임으로서 터널중심축에서 3d이후는 터널굴착으로 인한 영향이 적은 것으로 나타났다. 보강효과에 대해서는 1.4d에서 3d까지는 보강으로 인한 효과가 나타나고 있으며, 특히 천단부 측방보강에 있어서는 횡방향거리 1.4d에서 3d와 깊이비 0.88에서 0.38까지 크게 나타나고 있다.



(a) 2차원해석시 수평방향변위



(b) 3차원해석시 수평방향변위

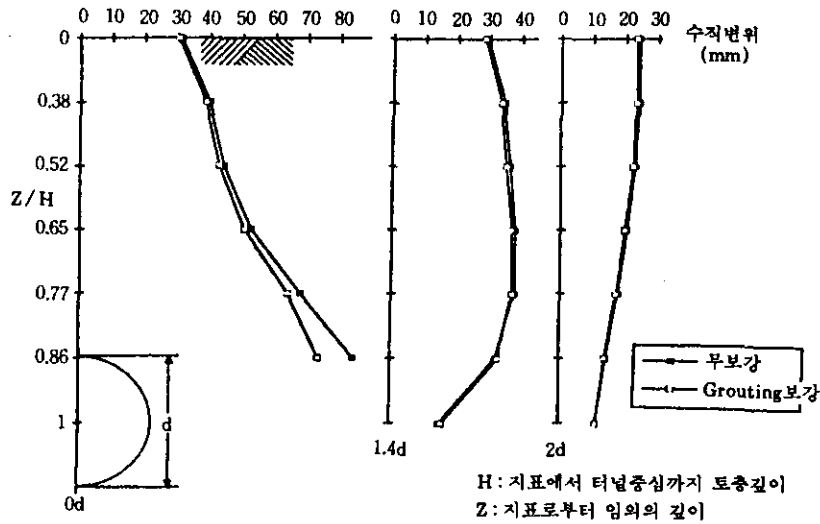
그림 4.3 터널지경에 따른 횡방향 수평변위

4.1.3 수직방향 변위

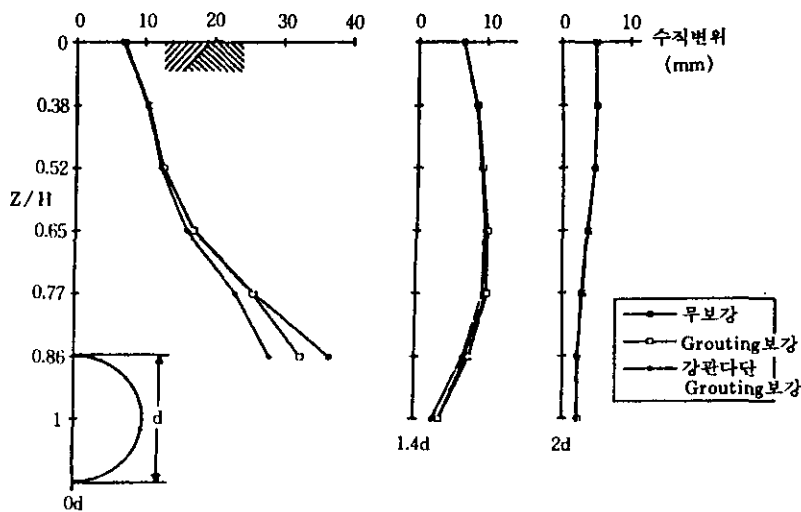
터널굴착시 천단부 지반에 대한 거동은 터널의 안정성에 큰 영향을 미치므로 터널 천단부의 수직방향변위에 대하여 분석하였다. 그림 4.4와 같이 터널 직상부의 천단변위량이 가장 크게 나타나고 있으며, 지표면에 가까워지면서 보강시나 무보강시의 수직방향변위에 있어서 차이가 없음을 알 수 있다. 그러므로 본 현장의 경

우에서는 보강에 의해 지표침하까지 억제되는 것이 아니라 터널 직상부에서 깊이비가 0.38인 지점까지 보강에 의해 지반거동이 억제되는 효과가 있음을 알 수 있었다.

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



(a) 2차원해석시 수직방향변위



(b) 3차원해석시 수직방향변위

그림 4.4 터널직경비에 따른 횡방향 수직변위

4.1.4 지표침하 특성곡선에 대한 비교분석

터널굴진에 따른 지표침하 특성곡선에 대한 제안식중 일반적으로 많이 적용되고 있는 Hansmire와 Cording의 특성곡선식은 다음과 같다.

$$S = S_{max} \exp - \frac{x^4}{2l^2}$$

이 공식은 터널중심에서 이격거리 x에 따라 정규확률분포곡선을 나타내는 침하식으로 변곡점 i에 의해 이완영역이 결정된다.

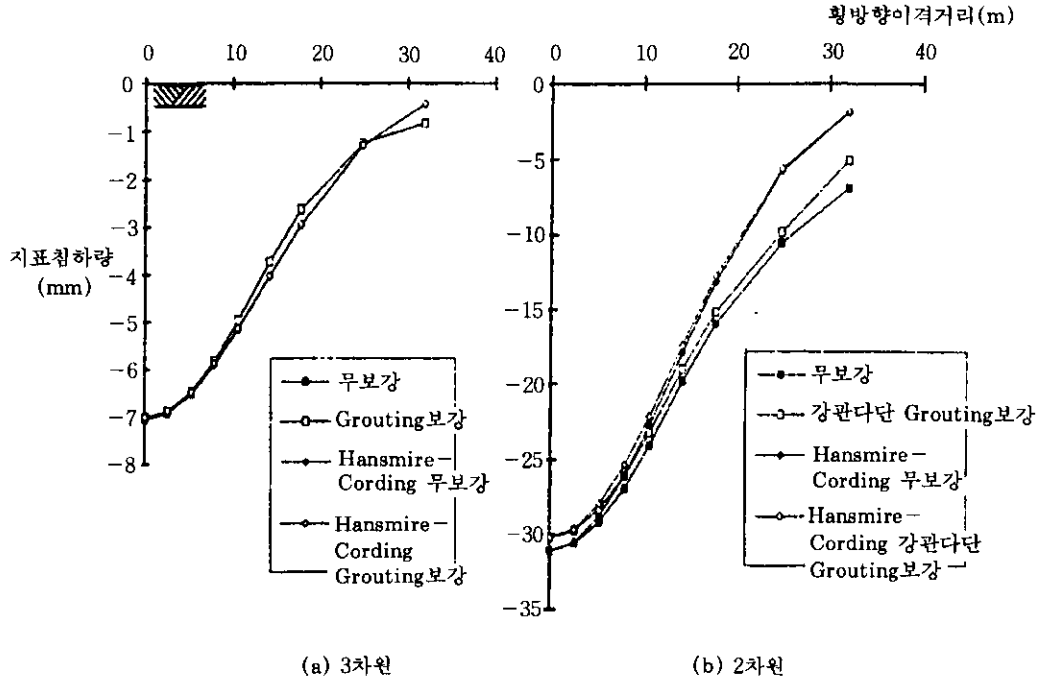


그림 4.5 Hansmire-Cording의 제안식과 해석치의 비교 (지표침하특성곡선)

2차원 및 3차원해석의 결과인 지표침하량을 도시하여 기존에 제안된 지표침하곡선식과 비교하면 그림 4.5와 같다.

그림에서 나타난 바와 같이 2차원해석의 무보강시와 보강시 Hansmire와 Cording의 제안식에 의한 지표침하량은 비교적 잘 일치되고 있음을 알 수 있다.

2차원해석에 의한 지표침하 곡선중 터널 중심측에서 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.

3차원해석의 경우 무보강시와 보강시 Hansmire-Cording의 특성곡선은 보강시와 무보강시 모두 일치되는 경향을 나타내었으며, 3차원해석결과 지표침하특성곡선도 동일한 결과를 나타내었다.

4.2 3차원 해석에 따른 주변지반 거동분석

터널의 굴진에 따라서 주변지반의 거동은 3차원적인 거동을 나타내게 되며 이는 터널의 종방향거동에 영향을 미치게 된다. 결국 종방향 거동은 막장의 안정에 영향을 주게 되므로

3차원 해석에 의한 보강효과 및 종방향 거동을 분석하였다.

4.2.1 터널 종방향 천단침하

터널 막장의 굴진시 3차원 해석에서 발생하는 천단침하량에 대한 천단침하분포 곡선을 그

림 4.6에 나타내었다. 터널 막장이 기준점(0지점)에 도달되기전 -7.0m지점에서 최대천단침하값을 비교해보면 무보강시 35.7mm, grouting보강시 32.6mm, 그리고 grouting+강관보강시 28.8mm를 나타내었다.

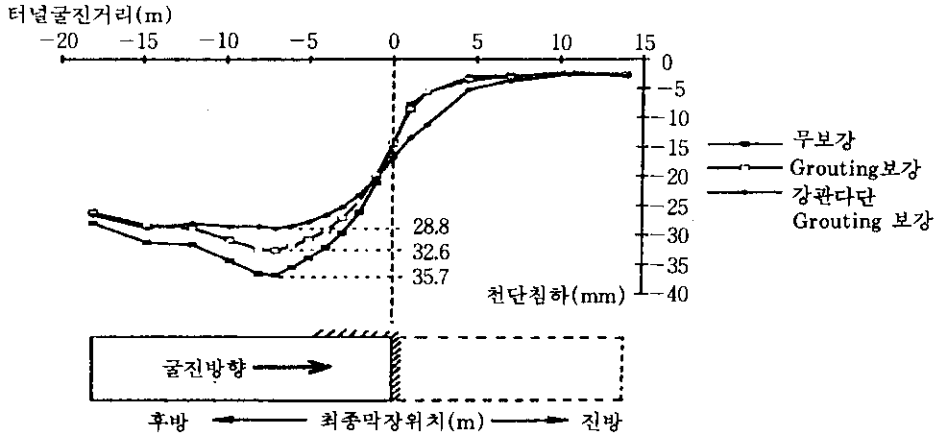
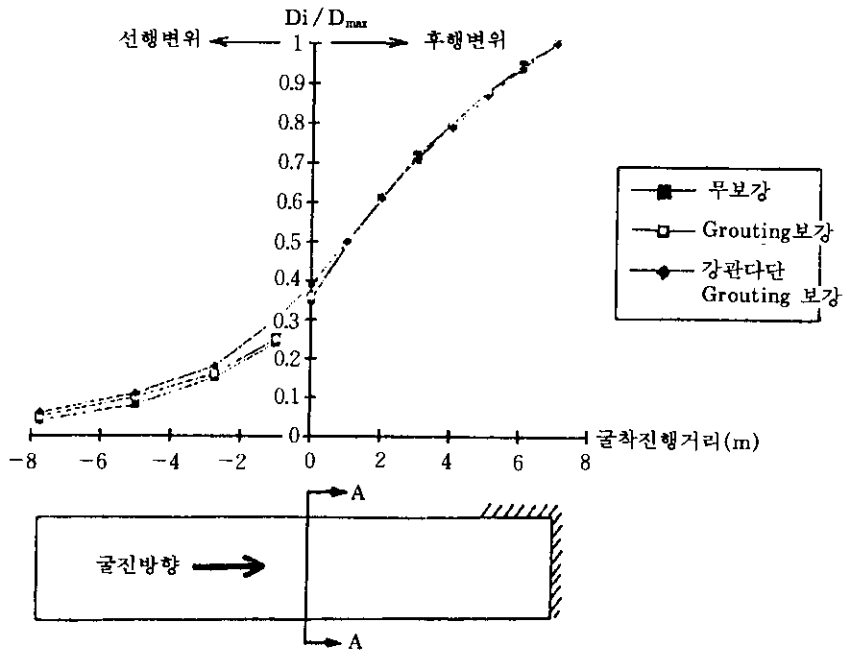


그림 4.6 터널 종방향 천단침하량



D_{max} : 최종굴착 후 막장통과시 A-A위치의 침하량(mm)
 D : 각 지점의 막장 통과시 A-A위치의 침하량(mm)
 $A-A'$: 최종천단침하 발생지점

그림 4.7 터널 종방향 천단침하특성곡선

막장이 기준점에 도달하였을 때 막장전방 14.0m지점에서는 3mm의 선행변위가 발생되는 것으로 나타났다. 이는 터널막장을 기준으로 후방 1d지점에서는 최대값이 발생되어 수렴되고 있는 반면에 터널막장에서 전방 약 2d지점까지는 막장의 거동에 의한 영향이 선행변형으로 나타나는 것을 알 수 있었다.

한편 터널 종방향 굴진에 따른 최대 천단침하량 D_{max} 와 막장진행에 따라 발생하는 임의 지점에서의 천단침하량 D_i 의 비로서 나타내는 천단침하 특성곡선은 그림 4.7에 나타내었다. 천단침하 특성곡선을 살펴보면 터널막장이 기준점에 도달되기 전에 발생하는 선행변위는 각각의 경우 모두 약 35%~39%의 범위를 나타내었고, 기준점을 통과하여 터널막장이 1d되는 지점에 이르는 동안에 후행변위는 계속증가하여 65%~69%가 발생되면서 수렴되었다.

이는 그림 4.7에서 나타난 것과 같이 무보강시와 보강시의 침하특성곡선은 공통적으로 같은 경향을 보이고 있으며, 계측시점이나 위치에 따라서 천단침하량의 변화가 심하다는 것을 알 수 있었다.

4.2.2 심도별 터널 종방향변위

터널 막장의 굴진에 따른 심도별 종방향변위 거동은 막장의 안정 및 지반의 거동을 파악하는데 중요한 요소가 된다.

그림 4.8은 3차원터널 해석에서 굴진에 따른 심도별 종방향변위를 무보강시와 천단부 그라우팅 보강시 그리고 강관그라우팅 보강시로 나누어 지반의 거동을 나타내었다.

무보강시 막장전방 수평방향변위는 막장이 위치하는 천단상부 2.5m지점에서 최대변위를 나타내고 있으며, 터널천단 상부 15m지점까지 점차 감소하는 형태이다. 이러한 경향은 터널 막장 전방 2m, 4.5m, 6.5m 지점에서도 공통적인 현상이므로 보강이 되지 않은 지반에서 막장의 진행에 따른 지반거동의 영역은 터널상부 2d되는 지점과 터널막장 전방 1d되는 지점으로 추정할 수 있다.

반면에 보강 그라우팅이나 강관그라우팅이 이루어진 경우에 보강이 되지 않은 지반과는 상이한 거동을 보이고 있고 강관 보강효과로 인하여 막장전방 6.5m까지 종방향 아아칭효과를 나타내므로서 터널 종방향 수평변위가 무보

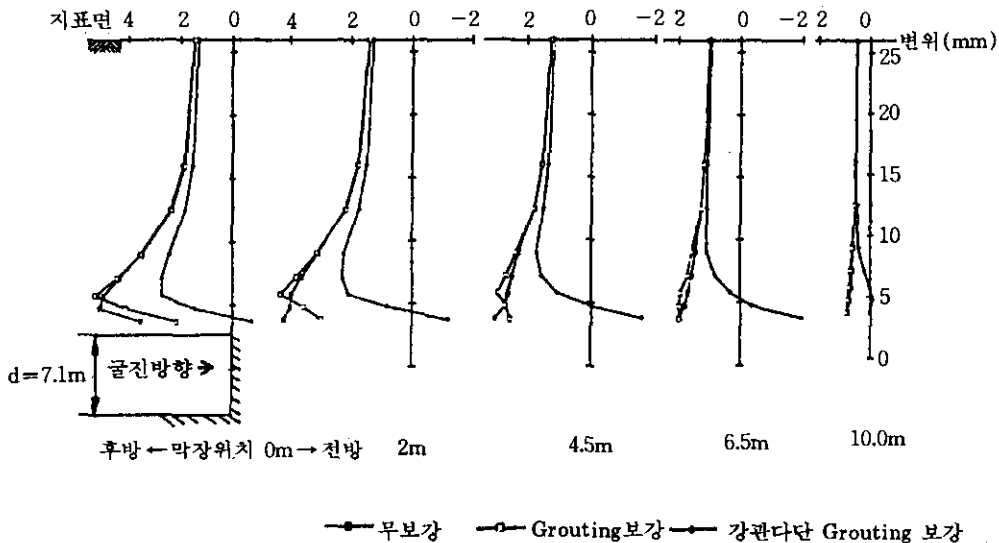


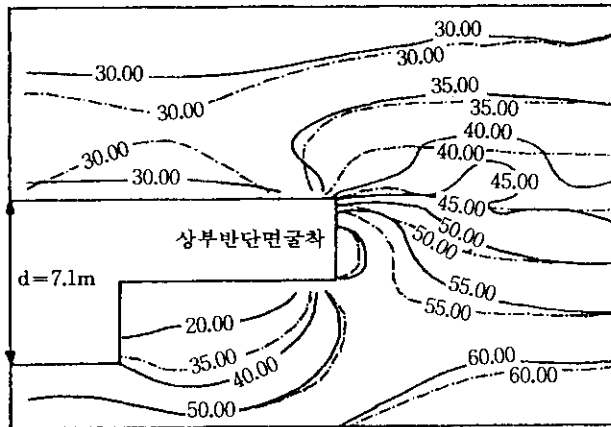
그림 4.8 터널 굴진에 따른 심도별 터널종방향 변위

강시보다 상당히 억제되어 있음을 알 수 있다. 또한 터널천단 상부 15m(2d)지점까지 강관보강에 의한 종방향 수평변위가 억제되어 있음을 알 수 있다.

널굴진에 따른 응력분포를 살펴보면 터널 상, 하반굴착시 인버트부의 응력변화는 미소하게 변화하고 있으나 천단부와 터널막장면에서의 응력변화는 상당한 차이를 나타내고 있다. 이는 강관보강으로 천단부와 터널막장면에서 종, 횡방향 아아칭효과가 증대되고 주변지반 응력 집중을 감소시킴으로서 주변지반의 응력변화를 등분포시키는 효과가 있음을 알 수 있다.

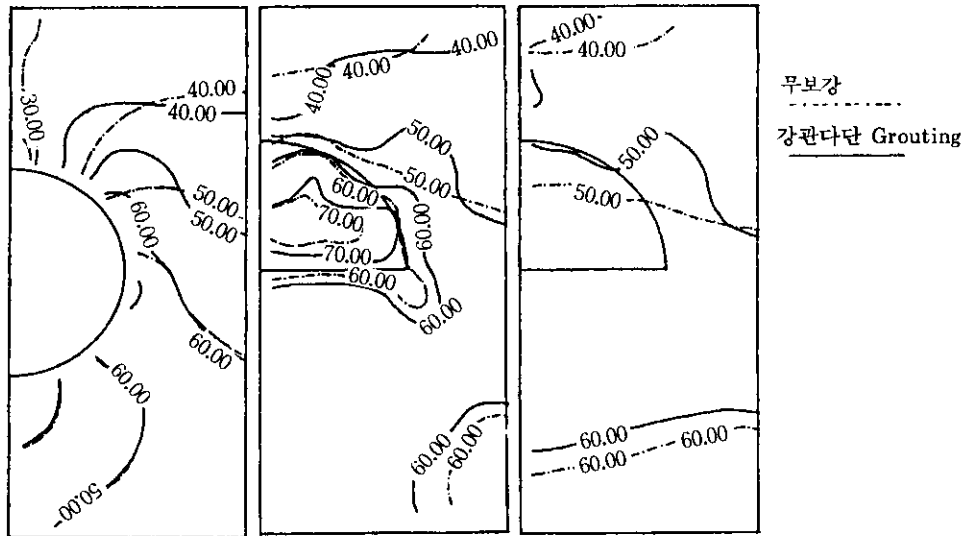
4.2.3 보강에 따른 터널주변지반 응력변화

강관보강으로 인한 터널주변지반의 응력변화는 그림 4.9와 같다. 보강시와 무보강시의 터



----- 무보강 ————— 보강

그림 4.9 보강에 따른 터널주변지반의 응력변화



(a) 막장후방 8m

(b) 막장

(c) 막장전방 2m

그림 4.10 보강에 따른 터널주변지반의 단면별 응력변화

한편 터널굴진에 따른 단면별 응력변화를 분석 고찰하기 위해서 3차원해석을 통한 단면별 응력변화를 그림 4.10에 나타내었다.

터널 전단면이 굴착완료된 경우(그림 4.10(a)) spring line을 중심으로 보강여부에 따라 하부에는 응력의 큰 변화가 없으나, 상부에서는 응력분포가 상이하게 나타나고 있다. 이는 천단부에 강관이 보강되므로 해서 터널주변의 응력을 강관이 분담하고 있음을 의미한다.

터널막장면(그림 4.10(b))에서의 응력분포는 전체 시공과정중 가장 취약부중의 하나인 만큼 응력이 집중되고 있음을 보여주고 있다.

그러나 그림 4.10(c)에서는 전체적으로 터널막장전방 2.0m지점까지 강관보강에 의해서 천

단부의 응력이 강관을 따라 균등하게 분배 및 재분배됨을 나타내고 있어 이로 인하여 터널의 주변지반응력 집중상태를 제거시킴으로서 안전성을 높이고 있다.

4.2.4 보강에 따른 터널주변지반의 안전율 변화

굴착이 진행됨에 따라 지반내 응력의 이완이 발생되며, 이 영향을 굴착된 터널 주변지반에 전달되게 된다. 응력의 전달시에 터널에 인접된 지반의 응력이 증가되고, 이로 인하여 터널 주변지반에 부분적으로 또는 상당부분에 소성영역 및 탄성에서 소성영역으로의 전이영역이 발생되게 된다.

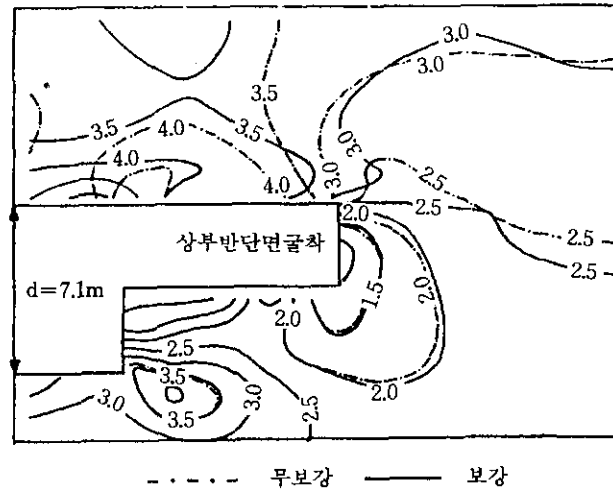


그림 4.11 터널주변지반의 안전율 변화

3차원 해석을 통하여 터널 천단부 보강에 따른 소성영역 및 전이영역을 구분할 수 있는 안전율의 산출방법은 그림 4.11과 같다.

터널주변지반의 안전율은 상반굴착이 완료된 경우 보강시나 무보강시에 하반과 인버트부에서는 변화를 보이지 않았지만, 굴착이 진행된 천단부에서는 안전율이 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 최하부모서리에 집중되어 나타났다. 전체적으로 3차원 해석결과 강관보강으로 인하여 터널막장전방 천단부의 안전율변화가 증가되는 것으로 나타났다. 이는 강관보강방법이 강관의 종방향 아치효과등을 유발시켜 터널막장의 안정을 높이고 주변지반의 거동을 효율적으로 억제시키고 있음을 알 수 있다.

한편 터널굴진에 따른 단면별 안전율 변화는 그림 4.12와 같다. 전단면 굴착이 완료되었을 때(그림 4.12(a)) 보강시와 무보강시에 터널단면 형상이 원형인 경우 소성영역(안전율=1)

이 발생되지 않는 것으로 보아 단면형상에 있어서 원형단면이 터널의 안정에 유용한 것으로 나타났다.

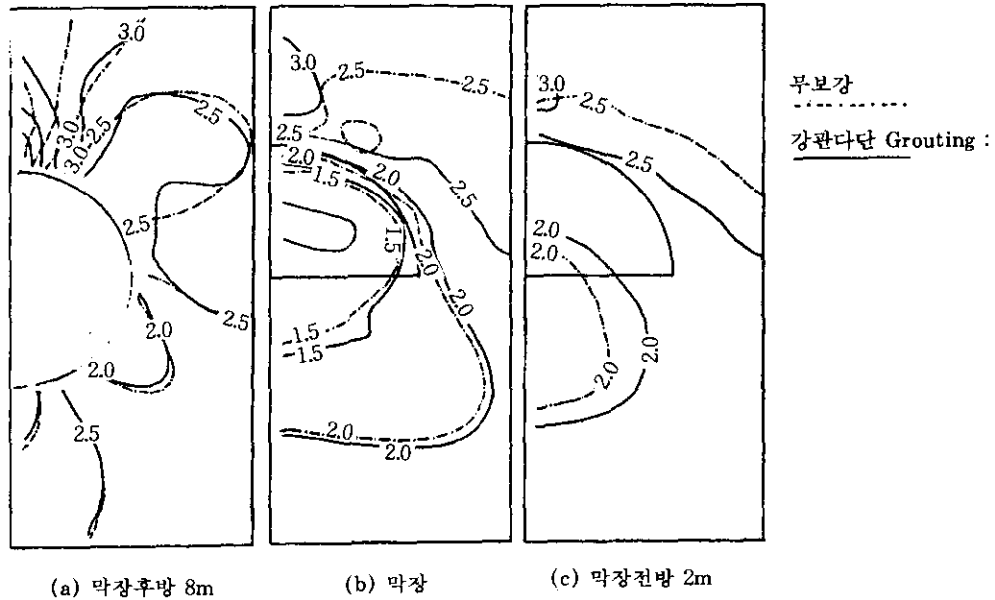


그림 4.12 보강에 따른 터널주변지반의 단면별 안전율 변화

안전율의 변화에 있어서 터널하부 반단면부근의 안전율은 보강시나 무보강시 큰 차이를 나타내고 있지 않고 있는 반면에 보강이 이루어진 천단부와 터널 어깨부(shoulder)에서는 보강으로 인한 안전율의 변화를 보이고 있다.

터널막장면의 경우(그림 4.12(b)) 막장면 중심부에서 소성 및 전이영역(안전율 1.0, 1.5)이 발생되어 가장 위험도가 높은 지역으로 판명되었고 특히 천단부에서 안전율은 보강시와 무보강시에 명확한 차이를 보이고 있다. 또한 터널막장면 전방 2.0m지점(그림 4.12(c))의 안전율 변화의 경우도 보강에 따른 영향을 보이고 있으므로 강관이 터널주변 및 막장 전방의 안정에 효과를 나타내고 있음을 알 수 있다.

4.3 2차원 및 3차원 해석에 의한 보강효과

2, 3차원 해석결과 중 터널의 천단침하량을

무보강시와 보강시에 대하여 비교하여 보강효과에 대하여 고찰하였다. 터널해석에서 2차원과 3차원을 비교할 수 있는 적합한 위치는 다르지만, 2, 3차원해석에서 2차원무보강시 최대천단침하량은 84.24mm, 보강시 73.74mm, 3차원무보강시 최대천단침하량은 35.7mm, 보강시 28.8mm로서 보강효과는 2차원 12.5%, 3차원 19.3%로 나타났다.

표 4.1 2, 3차원해석에 의한 보강효과

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

터널의 변위 거동은 지반물성치와 터널형상, 시공조건, 보강방법 그리고 측압등에 의해서 결정되지만 본 현장의 경우 강관보강과 그라우팅에 의한 효과는 약 12%~20%범위인 것으로

나타났다.

5. 결 론

지하철 연약대 구간에서 터널의 강관다단 그라우팅공법 적용시 주변지반의 거동을 파악하고 지반보강 효과를 평가하기 위하여 2차원 및 3차원 유한요소해석을 실시하였고, 그 결과를 분석, 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 터널의 보강효과를 천단부 침하량을 기준으로 평가하면, 2차원 해석의 경우 12.5%, 3차원 해석에서는 19.3%의 감소효과를 나타내었으며, 2차원 해석에서의 강관보강효과는 강관의 종방향형상 모델링이 불가능하므로 3차원 해석을 통하여야만 신뢰도가 높은 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

2. 천단부 보강으로 인한 변위 억제효과와 수직방향 범위는 터널 천단부에서 $2d$ (d 는 터널직경, $d=7.1m$) 그리고 수평방향으로 $1.4d$ 영역까지 나타났으며, 특히 터널 천단부에서 일정한 형태를 이루고 있음을 알 수 있었다.

3. 본 현장의 경우 3차원 해석 결과에 의하면 막장 도달 이전에 발생하는 천단부의 선행 변위가 최종변위의 40%에 이르는 것으로 확인되었고, 막장 통과 이후에 발생하는 후행변위는 60%인 것을 알 수 있었다. 따라서 3차원 해석 결과를 통하여 종방향 천단침하 특성곡선을 작성하면 굴착전 발생하는 선행변위량을 예측할 수 있으므로 정보화시공시에는 계획단계에서부터 고려되어야 함을 알 수 있었다.

4. 3차원 해석에서 강관보강으로 인한 안전율변화는 강관의 종, 횡방향 아칭효과로 터널 천단부위의 안전율이 무보강시보다 증가됨을 알 수 있었다. 또한 응력분포 역시 강관의 종방향 아칭효과로 막장방향의 응력재분배를 이루어 터널천단부의 응력집중현상을 억제하여 막

장전방까지 등분포시킴으로서 터널이 안정하게 됨을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 배규진(1989), "토사터널 굴착에 따른 주변지반의 변위예측에 관한 연구," 박사학위논문, 연세대학교.
2. 삼부토건주식회사, 대덕공영주식회사(1995), 한강 하저터널 막장지반조사.
3. 이봉렬, 김광진, 김학문(1995), "비선형 유한요소법을 이용한 터널해석 및 효율성평가", 한국토목학회논문집 제15권 제3호, pp. 699~714.
4. 이봉렬, 김광진, 김학문(1994), "Hoek-Brown 암반모델을 이용한 비선형 유한요소 터널해석 및 평가", 한국지반공학학회 창립 10주년기념 및 '94 가을 학술발표회 논문집, pp.235~244.
5. 이봉렬, 배규진의 4명(1994), "Umbrella공법에 의한 터널천단부 보강시 주변지반의 변위연구", 한국지반공학학회 창립 10주년기념 및 '94가을 학술발표회 논문집, pp.217~224.
6. 한국건설기술연구원(1994), 강관보강형 다단그라우팅공법의 개발, (주)지오텍엔지니어링.
7. F.O., Franciss(1992), Weak Rock Tunnelling, Butterworth-Heinemann.
8. K., Szechy(1973), The Art of Tunnelling, Akademiaikiado, pp.1034~1068.
9. Kim, Kwang J.,(1992), SMAP-S2 User Manual, Comtec Research.
10. Kim, Kwang J.,(1995), SMAP-3D User Manual, Comtec Research.
11. Wang, Moonshu(1990), The Application of Tunnelling Method in Shallow Embedd Beijing Metro, International Academic Publishers, pp.169~176.
12. Ward, W.H.(1978), Ground Supports for Tunnels in Weak Rocks, Geotechnique 28, No. 2, pp 133~171.
13. Z. T., Bieniawski(1984), Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling, A.A.Balkema.
(접수일자 1995. 8. 10)