

터널굴착변형을 고려한 현장계측관리 방안

- 굴착시 기본적인 터널 거동을 중심으로 -

이현범¹⁾, 강현성²⁾, 유일형³⁾

1. 서 론

최근 토목구조물의 대형 참사로 인하여 안전에 대한 경각심이 높아진 가운데, 계측의 필요성과 활용에 대한 요구는 더욱 높아지고 있는 실정이다. 이러한 현실적인 요구에 따라 설계·감리자 및 현장에서 시공에 직접 시공에 참여하고 있는 현장 기술자들의 계측에 대한 인식도 많이 개선되고 있다.

그러나 국내 터널계측에 있어서는 그 중요성과 필요성에 대한 인식의 변화도 많이 있었고, 지하철, 도로, 공동구, 수로터널 등의 설계와 시공실적은 상당함에도 불구하고, 현장에서 시행되고 있는 계측관리 방법 및 분석에서는 아직도 미비한 점이 많이 있는 것이 현실이다. 이러한 현상은 계측관리가 현장위주로 시행되어 계측관리 및 분석에 대한 기술자의 부재 및 이해부족으로 기인된 것으로 생각된다. 이 때문에 계측이 행정적인 요식 행위로 끝나는 경우가 많은 실정이다. 이에 따라 터널 계측은 현장 단위의 일과성으로 끝나 계측이 갖는 중요한 역할을 살리지 못하고, 자료로서의 보존가치를 상실하여, 계측현장 자체는 물론 향후 설계와 시공에서도 사용되지 못함으로써 국가적으로도 막대한 비효율성을 노정시키고 있는 실정이다.

이러한 상황을 어느 정도 개선하는 것이 본 세미나의 목적으로, 여기서는 도심지에서 건설되고 있는 도시터널을 중심으로 지금까지 연구된 터널의 일반적인 거동특성을 살펴보고, 이를 참고로 하여 현장에서 수행하고 있는 터널계측에 대한 현장 관리방안과 그 분석방법에 대한 기본적인 이해를 돕고자 한다.

2. 터널 굴착에 의한 지반의 3차원 거동특성

2.1 하중전이(Arching Effect) 특성

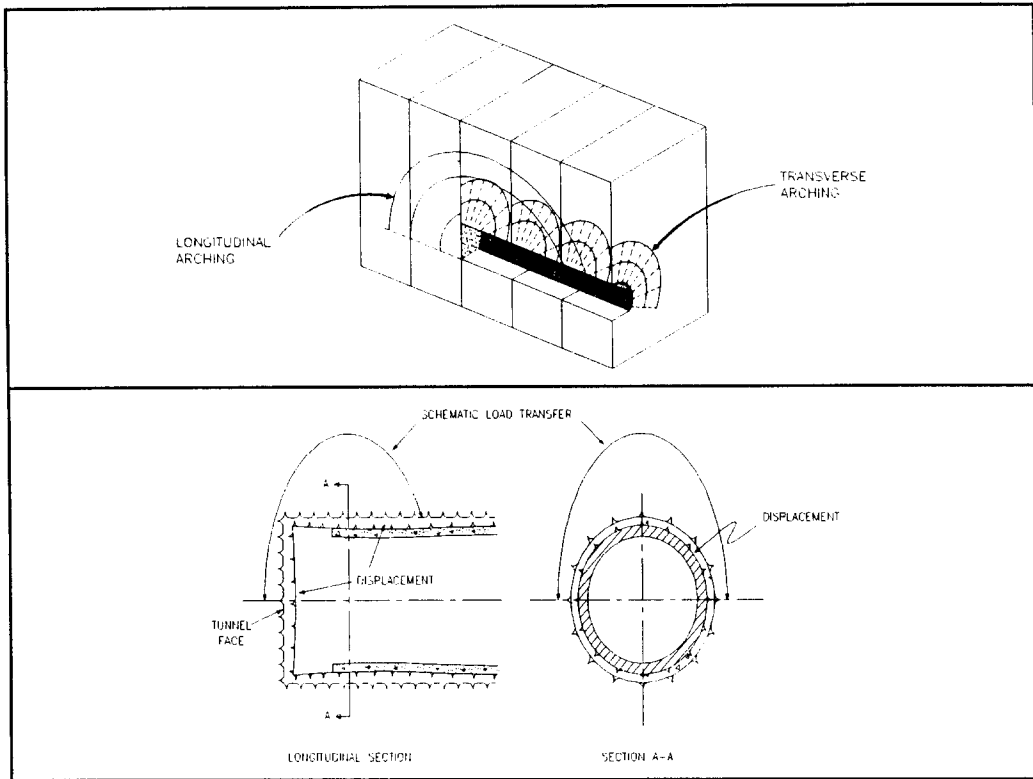
터널 굴착으로 인해 발생하는 터널주변 지반의 거동의 주요한 특성은 터널 굴착면(막장)에서 3차원적 구조가 형성되어 이에 따라 <그림 2.1>과 같이 응력과 변형이 3차원적으로 변화하게 된다.

즉 터널 굴진과 함께 막장을 중심으로 터널축과 직각방향으로 아칭(Arching) 현상이 발생되고, 또한 여기에 추가하여 터널 축과 평행한 아칭현상도 발생한다. 이러한 두개 이상의 평면안에 발생하는 아칭현상은 지반손실하중(굴착에 의한 내부평형력 제거)을 3차원으로 분산시켜 터널 막장전후면과 터널축 주변에서도 변위를 발생시킨다.

1) 삼안건설기술공사, 이사

2) 삼안건설기술공사, 차장

3) 삼안건설기술공사, 대리



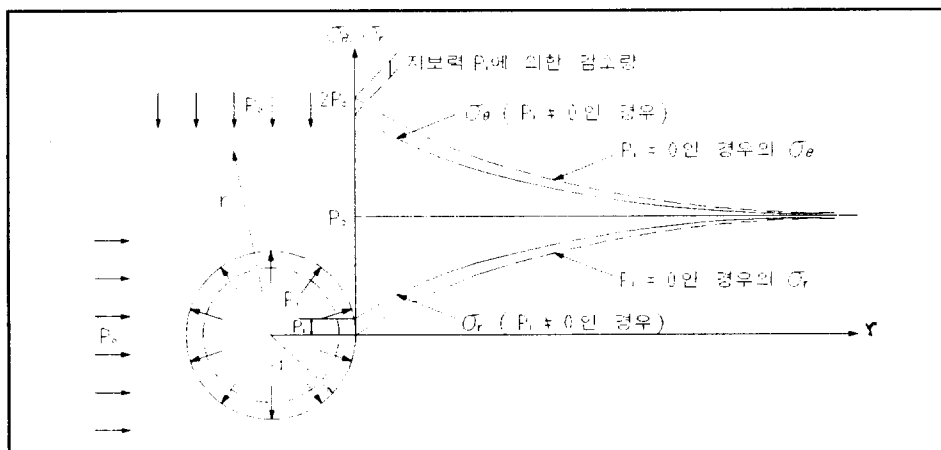
<그림 2.1> 터널 막장 주변에서의 3차원 거동(Sinha, 1989)

2.2 지중응력 특성

지반내 터널을 굴착하면 굴착면 주변의 지반은 원래의 3축 응력상태에서 2축 응력상태가 된다(평면 변형율 조건). 소멸되는 지중응력 때문에 <그림 2.2>와 같이 굴착면의 접선응력은 크게 증가하고 굴착면의 변위가 굴착공동 내측으로 발생하며

- 이때, 굴착으로 인해 증가된 접선응력이 지반의 강도보다 적으면 터널 주변 지반은 적은 변위와 함께 조기에 안정되나

- 발생하는 접선응력이 지반의 고유강도보다 크면, 큰 변위가 발생되고 지보재로 지반을 지지 하지 않으면 터널은 결국 파괴된다.



<그림 2.2> 탄성지반 등방응력상태와 원형터널

2.3 지반변위 특성

지반내 터널을 굴착하게 되면 터널내부 지반이 제거되고 동시에 내부지지력이 상실되어 터널주변에서 전단변형을 유발시키고 또한 소성영역을 확장시키게 되는데 이러한 영향들은 점차 터널상부 지표까지 전달되어 침하의 형태로 나타나게 된다.

터널굴착에 따른 지반변위에 대한 연구는

- 경험적 방법
- 이론적 해석방법
- 모형실험 또는 현장계측 방법

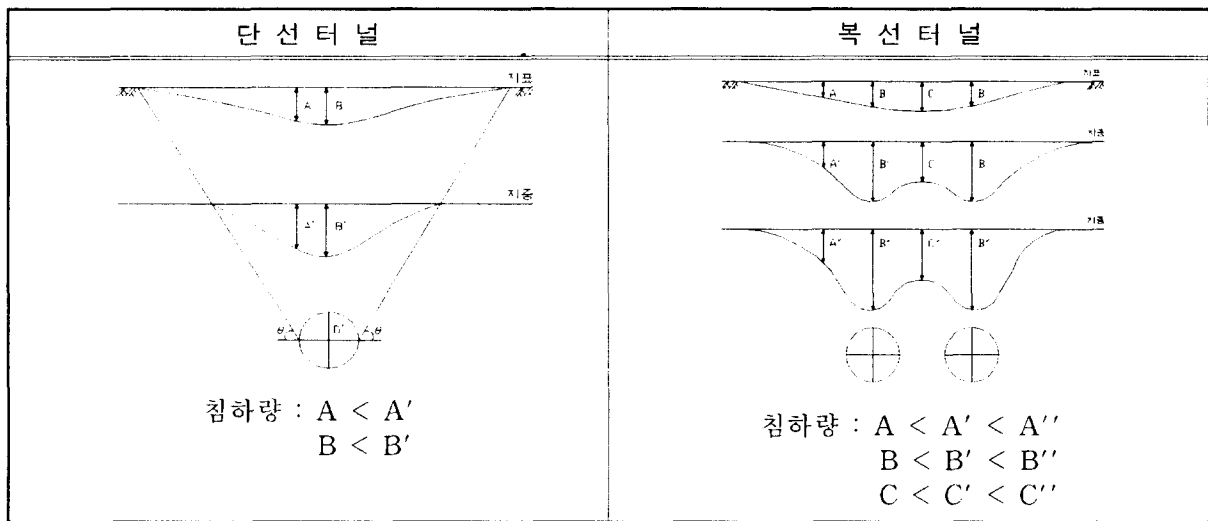
등의 여러 가지 방법으로 수행되어 왔으나, 침하변위 형태에 있어서 횡방향 침하는 추계학적 모형(Stochastic Model)인 가우스 정규분포곡선으로, 종방향 침하변위는 누적 정규분포 곡선에 가까운 형태로 나타나고 있는 것으로 밝혀지고 있다.

여기서는 실제 터널굴착시 수집된 현장계측 자료를 분석하여 통계처리한 예측방법에 대하여 소개하고자 한다.

2.3.1 횡방향 침하

1) 횡방향 침하형태

터널굴착시 횡방향 침하형태는 <그림 2.3>와 같은 형태로 나타나며, 현장계측자료를 분석하여 터널상부의 횡방향 거리에 따른 침하량 예측에 대한 연구결과를 소개하면 <표 2.1>과 같다.



<그림 2.3> 터널 굴착시 심도에 따른 횡방향 침하형태

2) 횡방향 최대침하량 예측

터널상부의 최대 지표침하량은 함수해석이나 유한요소법과 같은 이론적 해석방법과 모형실험 및 현장계측에 의해 추론된 방법 등이 있으며, 이는 터널주변의 침하분포의 추정 및 현장계측 계획시 필요한 요소라 할 수 있다.

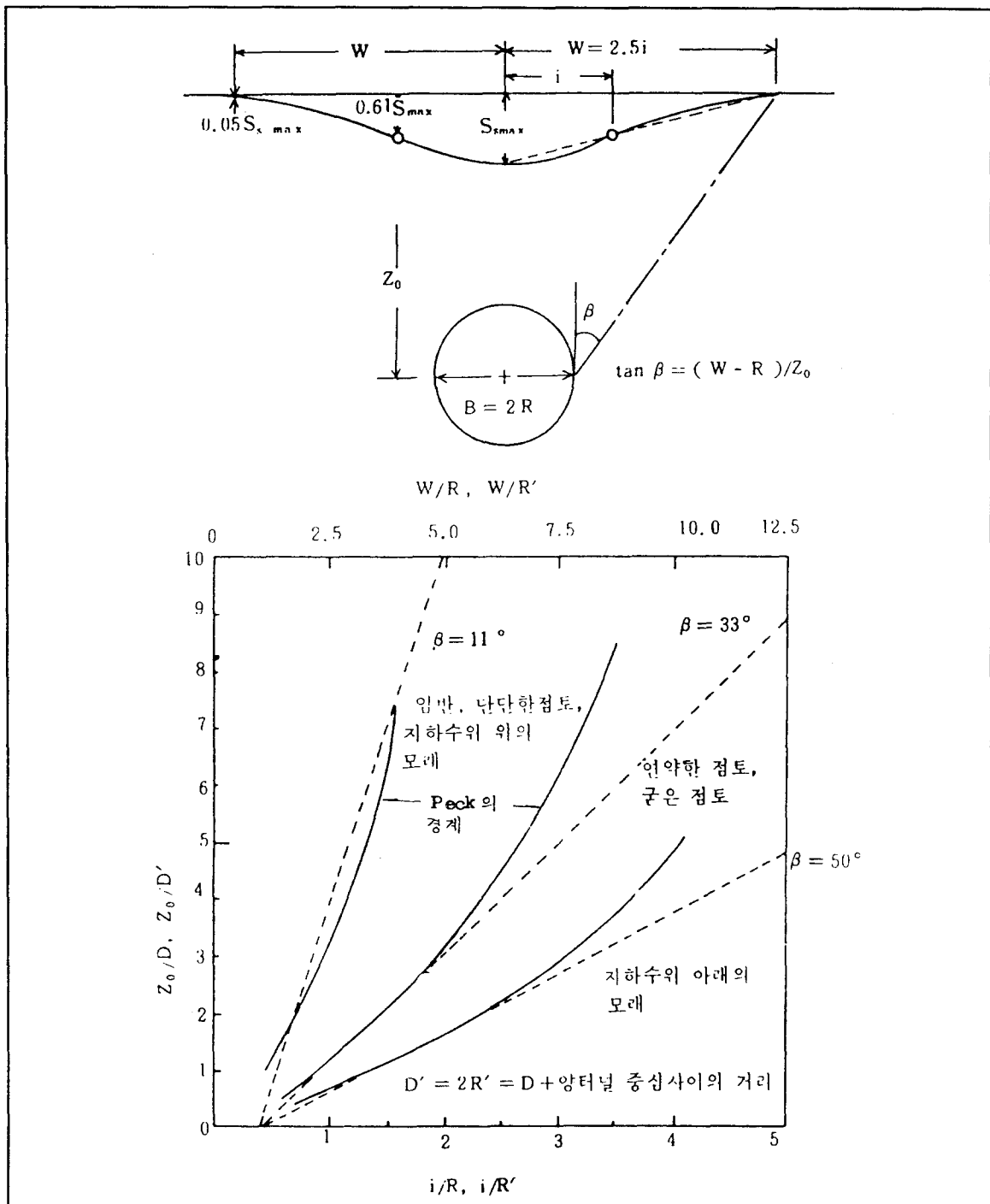
여기서 도심지 터널 계측관리시 근사적으로 이용할 수 있는 예측식을 소개하면 <표 2.2>와 같다.

<표 2.1> 횡방향 침하예측식

연구자	횡방향 예측식	비고
Aversin	<ul style="list-style-type: none"> ○ $S_x = S_{max} \left(1 - \frac{X}{L}\right)^{\left(\frac{L}{\ell}\right)^2} \cdot \exp \frac{L}{\ell^2} X$ - X : 터널 중심선부터 임의 점까지 횡방향거리 - S_{max} : 터널중심에서의 최대침하량 - ℓ : 변곡점까지 거리(m) - L : 침하영향범위($L = 2.13 \ell$) 	소련 채광연구소의 실측자료 분석
Martos	<ul style="list-style-type: none"> ○ $S_x = \frac{km}{k+H} (1 - \delta_t) \exp\left(-\frac{x^2}{2\ell}\right)$ - k : local condition에 관한 상수 - H : 터널 깊이 - δ_t : backfilling의 효율성 	헝가리 채광연구소의 실측자료분석
Peck	<ul style="list-style-type: none"> ○ $S_x = S_{max} \exp\left(\frac{x^2}{2i}\right)$ - i : 곡선의 변곡점까지의 수평거리(m) <li style="margin-left: 40px;">$\left(\frac{i}{R}\right) = \left(\frac{Z_0}{2R}\right)^{0.8}$ 	계측자료분석 <그림 2.4> 참조
Simada	<ul style="list-style-type: none"> ○ $S_x = S_{max} \exp(-\alpha \chi)$ - χ : $\left(\frac{x}{Z}\right)^2$ - Z : 터널 깊이 - α : 지질상수 (풍화암, 단단한 홍적사 경우는 4~9, 느슨한 홍적사, Silt 경우는 2~6, 점토, 팽창성 지질경우는 0~4) 	모형실험 및 실측자료분석

<표 2.2> 횡방향 최대 침하량 예측식

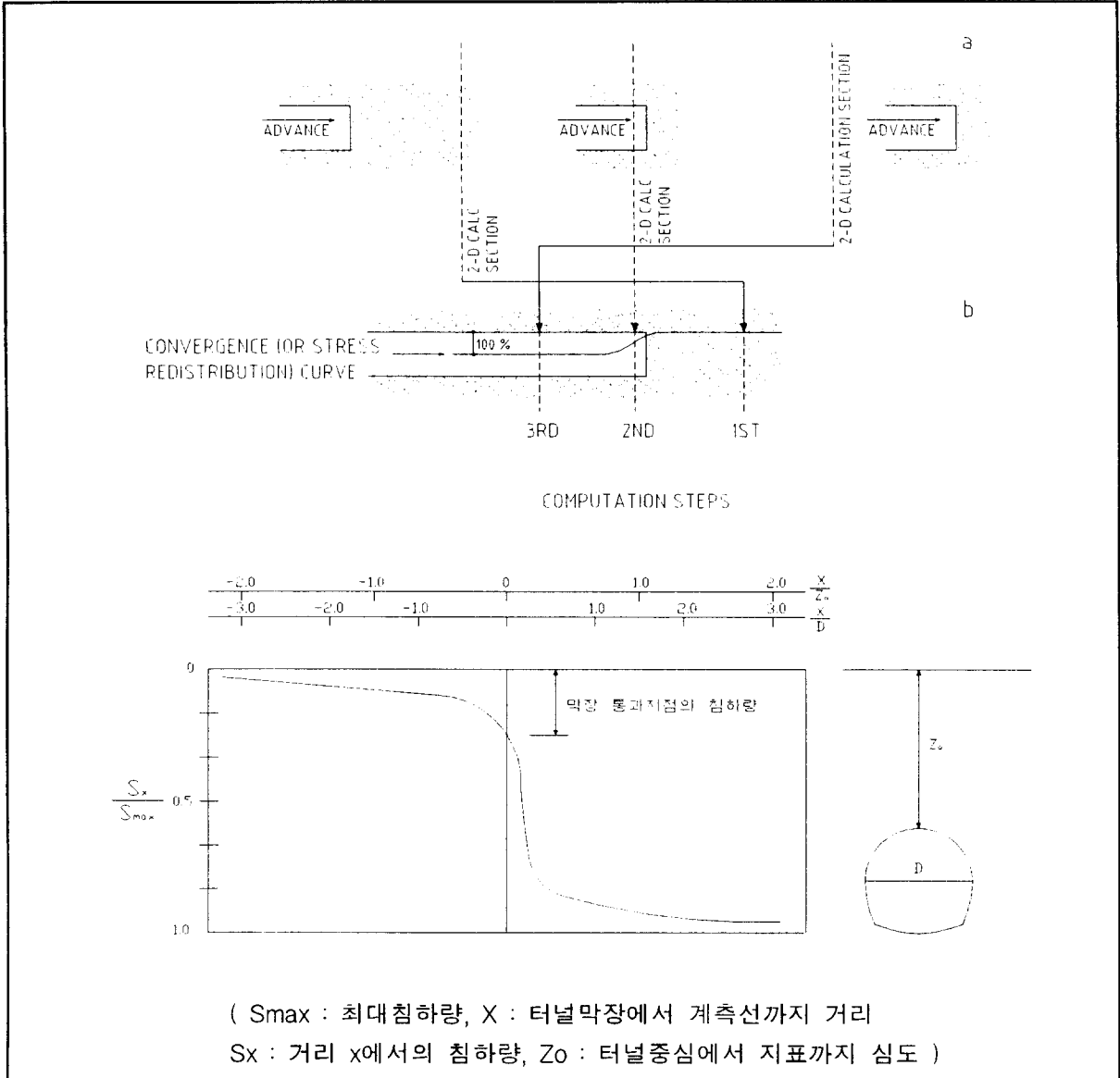
연구자	최대 침하량 예측식	비고
Limanov	<ul style="list-style-type: none"> ○ $S_{max} = (1 - \mu^2) \frac{P}{E} \frac{4\gamma_0^2 h_0}{h_0^2 - \gamma_0^2}$ - μ : 지반의 포아손비 - E : 지반의 탄성계수(t/m^2) - γ_0 : 터널 반경(m) - h_0 : 터널 깊이(m) - P : 연직토압($= \gamma_0 \cdot h_0$) 	반무한 탄성지반의 함수해석



<그림 2.4> 터널깊이와 침하 Trough의 폭과의 관계 (Cording & Hansmire)

2.3.2 종방향 침하

터널 굴진에 따라 발생하는 지반내 종방향 침하형태는 현장계측자료, 3차원 유한요소해석 등을 통하여 추론할 수 있는 기본적인 형태는 <그림 2.5>와 같이 누적 정규분포곡선과 유사한 형태로 나타나고 있다.



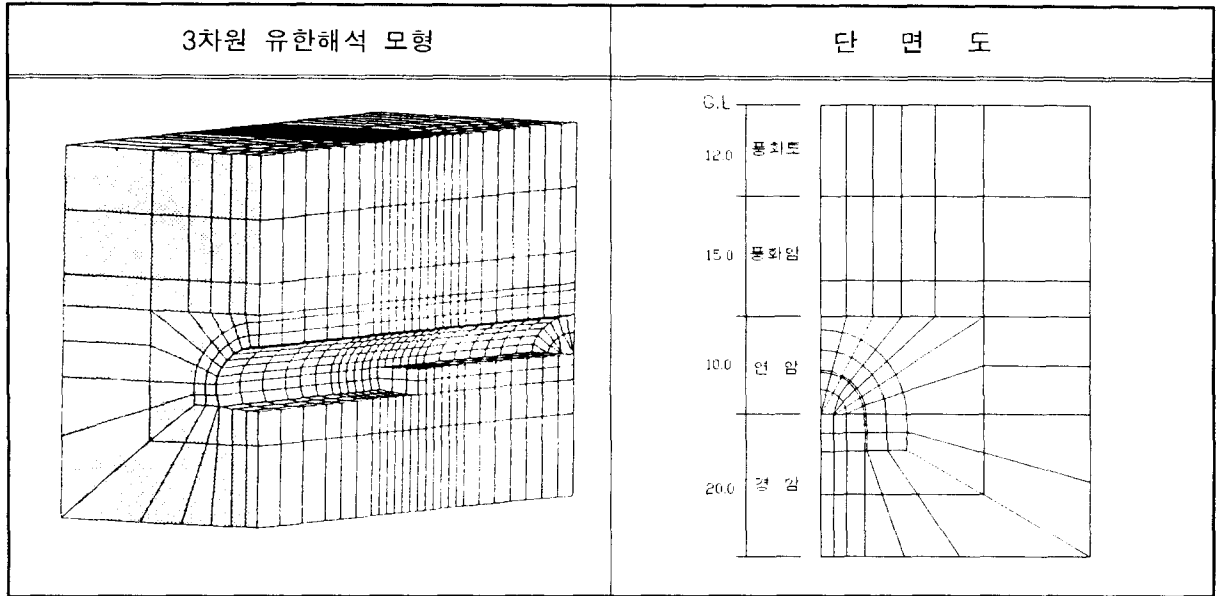
<그림 2.5> 터널 굴진에 따른 종방향 침하형태

여기서 종방향 침하 영향 범위는 도심지 터널을 기준으로 현장계측 및 3차원 수치해석 결과를 토대로 하면, 근사적으로 터널 직경의 3배, 계획심도의 2배 정도로 나타나고 있으며, 이 정도의 범위를 현장계측 관리에 적용하여도 큰 문제점은 없는 것으로 알려져 있다.

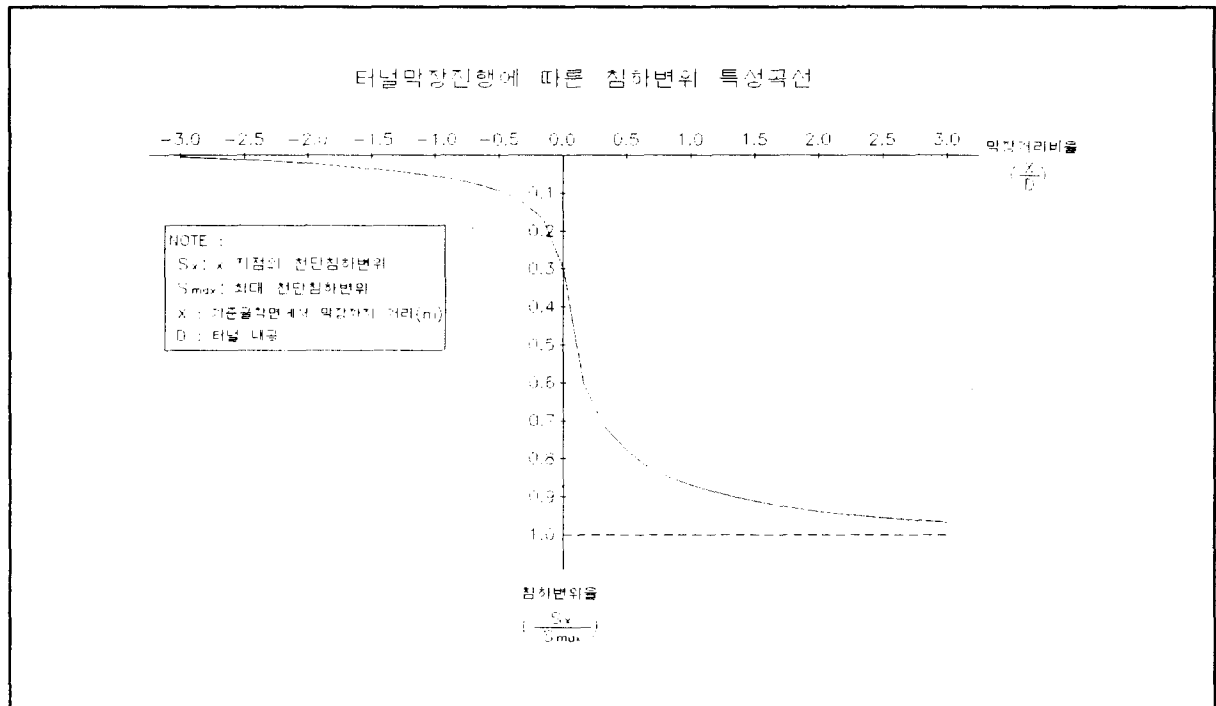
1) 3차원 해석에 의한 종방향 침하형태

3차원 유한요소해석법으로 동일 지반조건에서 지하철 단면의 굴착형태별로 막장거리에 따른 침하량을 최대침하량(S_{max})으로 정규화시킨 침하곡선의 예는 다음과 같다.

○ 해석모형 (예)

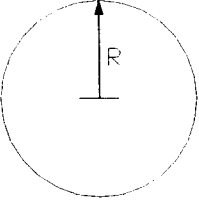
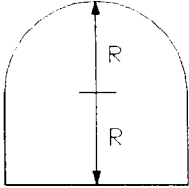
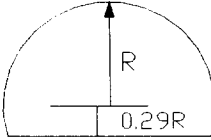
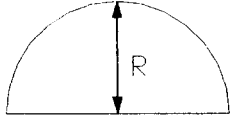


○ 정규화 침하곡선 형태 (예)



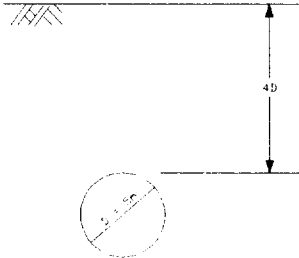
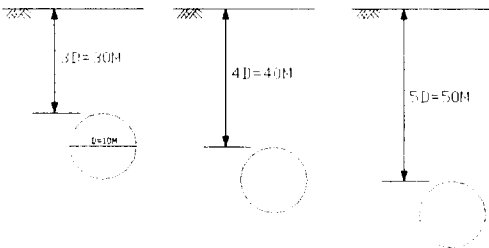
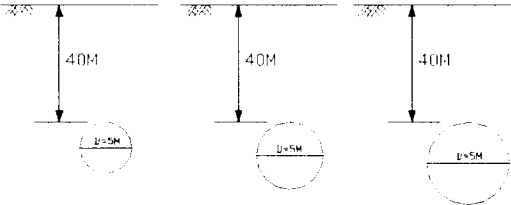
2) 막장면에서의 침하비율

터널 굴착시 막장통과지점(계측점)에서의 최종침하량에 대한 초기 침하변위 비율은 단면 조건이나 심도, 지반조건, 터널크기에 따라 다소 차이가 나고 있으나 현장계측결과 또는 수치해석을 통해 볼 때 대부분 <그림 2.6> 및 <표 2.3>과 같이 30~40%정도 범위에 있는 것으로 추정하여도 현장계측분석에는 큰 문제점은 없는 것으로 볼 수 있다.

구분	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4
굴착 단면 형태				
침하비	m = 28%	m = 32%	m = 31%	m = 30%

<그림 2.6> 굴착단면 형상에 따른 막장면 변위비율(Vassilev & Hristov) ($m=S_0/S_{max}$)

<표 2.3> 3차원 해석에 의한 막장면 변위비율

막장 면의 침하변위 비율				해석조건																									
<ul style="list-style-type: none"> 굴착장 조건 <table border="1"> <tr> <td>구 분</td> <td>0.1D</td> <td>0.2D</td> <td>0.25D</td> </tr> <tr> <td>침하비율</td> <td>28%</td> <td>32%</td> <td>40%</td> </tr> </table> <ul style="list-style-type: none"> 측압계수(K_0) 조건 <table border="1"> <tr> <td>구 분</td> <td>0.5</td> <td>1.0</td> <td>2.0</td> </tr> <tr> <td>침하비율</td> <td>35%</td> <td>28%</td> <td>40%</td> </tr> </table> <ul style="list-style-type: none"> 탄성계수(E) 조건 <table border="1"> <tr> <td>구 분</td> <td>500,000t/m² (경암)</td> <td>100,000t/m² (연암)</td> <td>300,000t/m² (풍화암)</td> </tr> <tr> <td>침하비율</td> <td>29%</td> <td>32%</td> <td>44%</td> </tr> </table>				구 분	0.1D	0.2D	0.25D	침하비율	28%	32%	40%	구 분	0.5	1.0	2.0	침하비율	35%	28%	40%	구 분	500,000t/m ² (경암)	100,000t/m ² (연암)	300,000t/m ² (풍화암)	침하비율	29%	32%	44%		
구 분	0.1D	0.2D	0.25D																										
침하비율	28%	32%	40%																										
구 분	0.5	1.0	2.0																										
침하비율	35%	28%	40%																										
구 분	500,000t/m ² (경암)	100,000t/m ² (연암)	300,000t/m ² (풍화암)																										
침하비율	29%	32%	44%																										
<ul style="list-style-type: none"> 터널심도 조건 <table border="1"> <tr> <td>구 분</td> <td>3D</td> <td>4D</td> <td>5D</td> </tr> <tr> <td>침하비율</td> <td>30%</td> <td>32%</td> <td>32%</td> </tr> </table>				구 분	3D	4D	5D	침하비율	30%	32%	32%																		
구 분	3D	4D	5D																										
침하비율	30%	32%	32%																										
<ul style="list-style-type: none"> 터널단면 크기 조건 <table border="1"> <tr> <td>구 분</td> <td>D=5.0m</td> <td>D=10.0</td> <td>D=15m.0</td> </tr> <tr> <td>침하비율</td> <td>32%</td> <td>32%</td> <td>33%</td> </tr> </table>				구 분	D=5.0m	D=10.0	D=15m.0	침하비율	32%	32%	33%																		
구 분	D=5.0m	D=10.0	D=15m.0																										
침하비율	32%	32%	33%																										

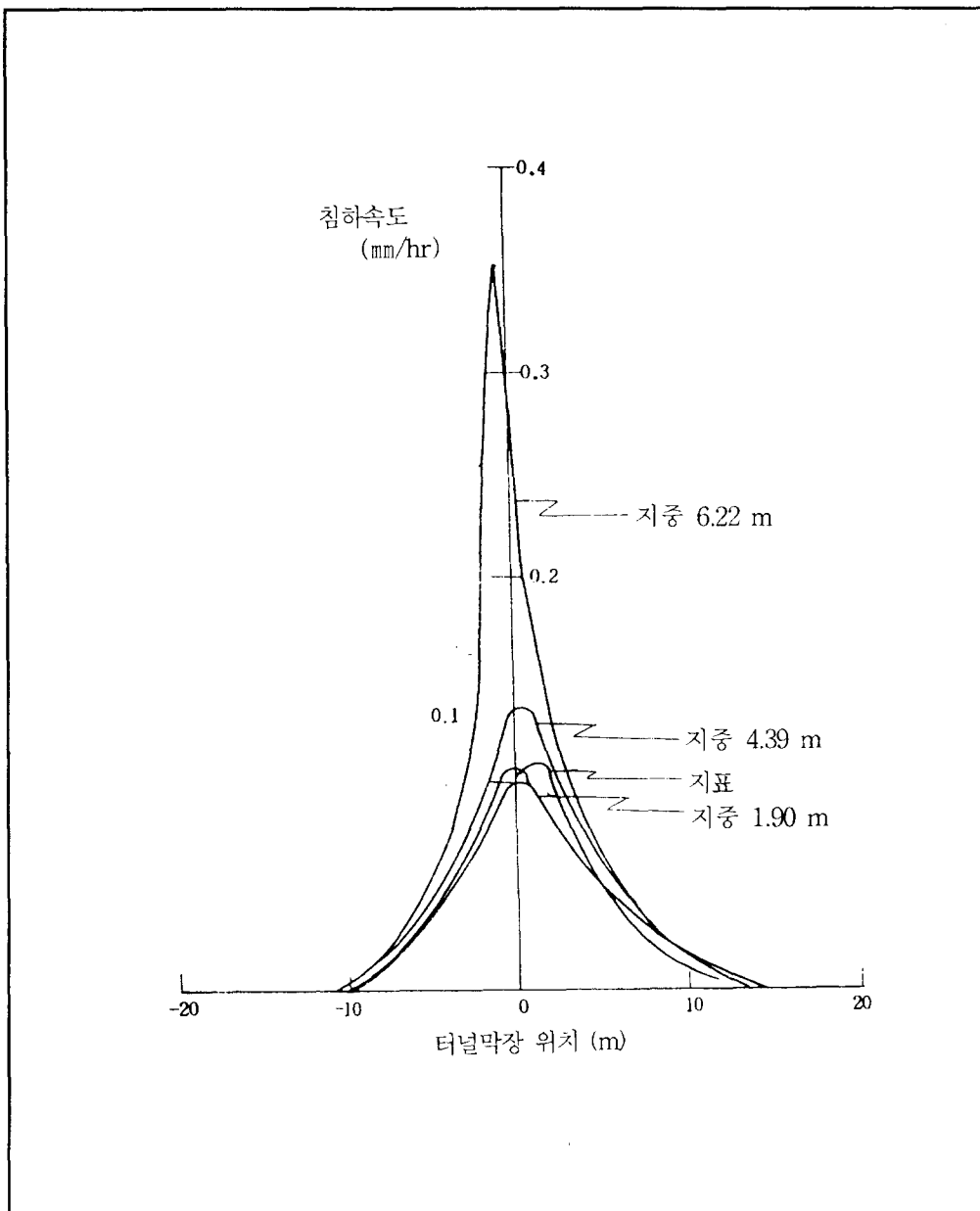
<“응력집중을 고려한 터널의 3차원 거동에 관한 연구”, ‘지반공학회’ 제12권 제1호, ‘96, pp87-108>

2.4 지중침하 형태 및 침하속도

터널굴진거리에 따른 지중침하곡선은 도심터널 깊이 정도에서는 침하형태가 지표침하와 비슷하게 발생되므로 지중침하도 누적정규분포곡선과의 비교가 가능하다고 볼 수 있다.

터널 굴착시 막장위치에 따라 지중침하속도는 <그림 2.7>과 같이 지중심도의 증가에 따라 일반적으로 크게 나타나며 또한 계측점 통과 직후에 제일 크게 나타나는 것으로 측정되고 있다.

이는 터널 굴착에 따른 지반손실의 영향을 터널에서 가장 가까운 직상부가 먼저 받게 되고, 또한 계측점 통과시에 지반손실이 가장 크게 발생되기 때문이다.

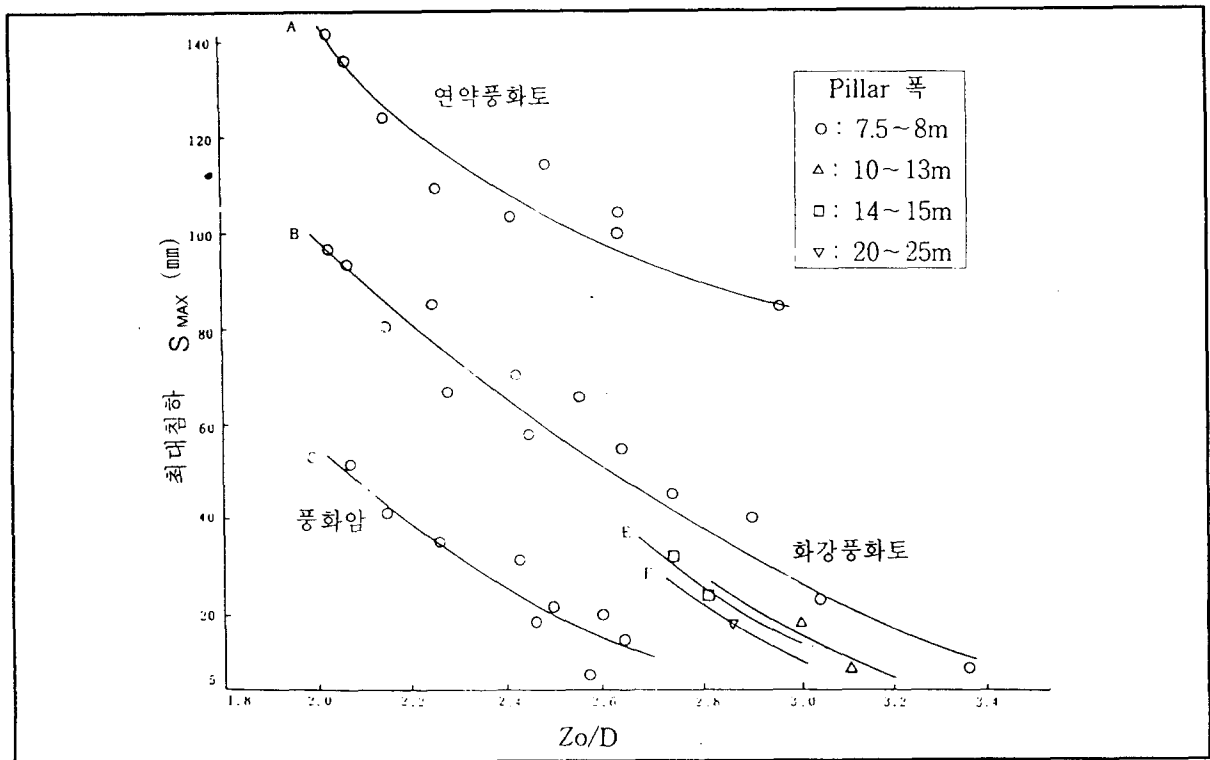


<그림 2.7> 터널막장위치에 따른 침하속도(Tyneside Hebburn)

2.5 쌍굴 터널의 침하변위관계

2.5.1 터널깊이, 터널간격(Pillar폭)의 영향

일정한 터널깊이에서 쌍굴 터널의 Pillar폭 증가는 최대침하량을 감소시키게 되나 <그림 2.8>과 같이 최대침하량의 영향은 Pillar폭 보다는 지반조건 및 터널깊이에 더 큰 영향을 받는다.

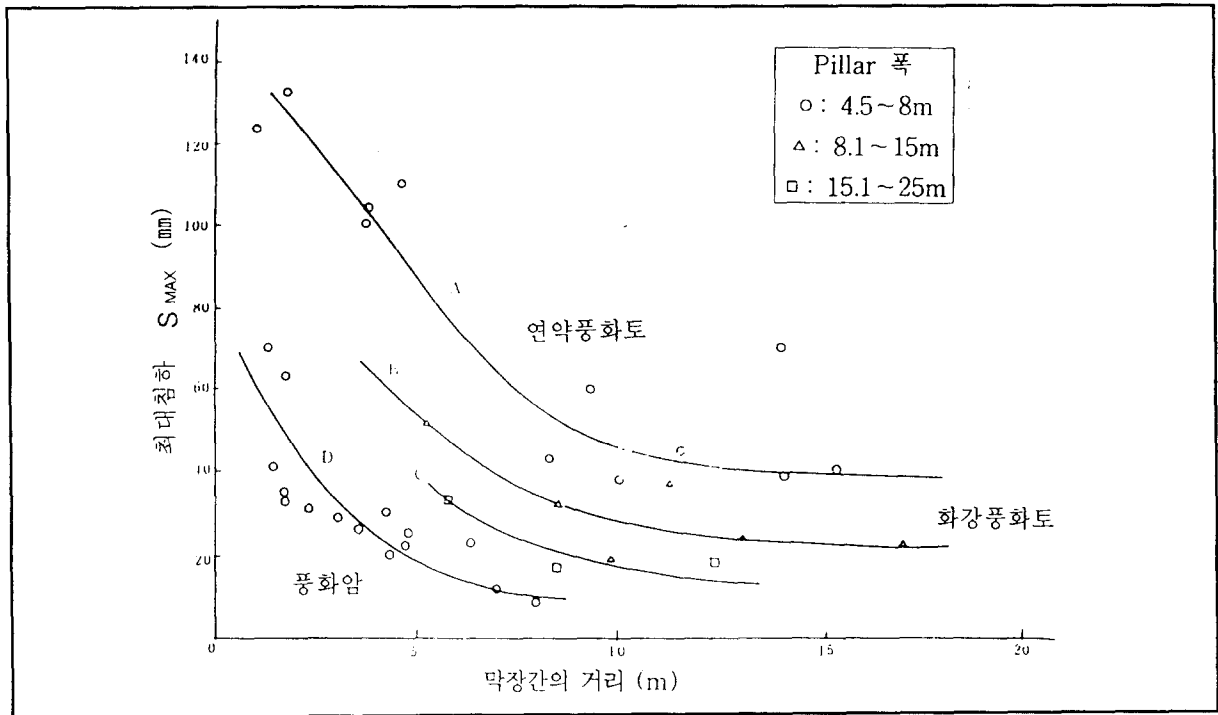


<그림 2.8> 터널깊이와 Pillar폭에 따른 침하량

2.5.2 막장간 거리의 영향

쌍굴터널에서는 Pillar폭의 영향 외에 막장간의 거리에 따라 침하량 영향을 많이 받게 되며, <그림 2.9>와 같이 1차 및 2차 터널의 굴진간격차(Bench Cut 거리)가 증가할수록 지반침하의 감소효과가 크다.

1차 및 2차 터널의 굴진 간격 차가 좁은 경우에 침하량이 증가하는 것은 1차터널의 굴착으로 교란된 지반이 응력회복을 갖기도 전에 2차터널에 의한 Arching 응력이 중첩되어 추가적인 지반교란과 소성영역이 확대되기 때문이다.



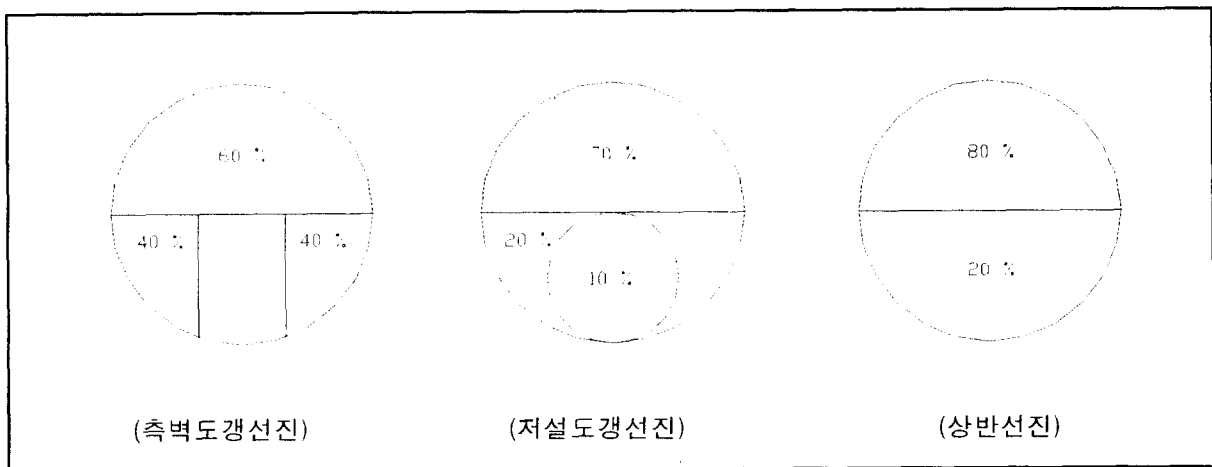
<그림 2.9> 막장간의 거리와 Pillar폭에 따른 침하량들의 비교

2.5.3 분할단면 굴착시 침하비율 및 전체침하량 비교

분할단면 시공시 분할단면의 막장부가 가까울 경우에는 분할단면 시공조건보다는 전 단면 굴착조건에 근접하게 된다.

분할단면 굴착의 경우 분할단면의 막장거리가 충분할 경우에 각각의 굴착에 대한 침하량이 최종침하량에 점유하는 비율을 알 수 있다.

이에 같은 지반조건 및 동일 단면 조건에서 분할단면 굴착시 발생하는 침하량과 최종 침하량에 대한 비율은 개략적으로 다음과 같다.



☞ 그러나 분할단면 시공완료시 총 침하량은 상반도갱공법 침하량 < 저설도갱공법 침하량 < 측벽도갱공법 순으로 분할단면 횡수가 많을 수록 커지게 된다.

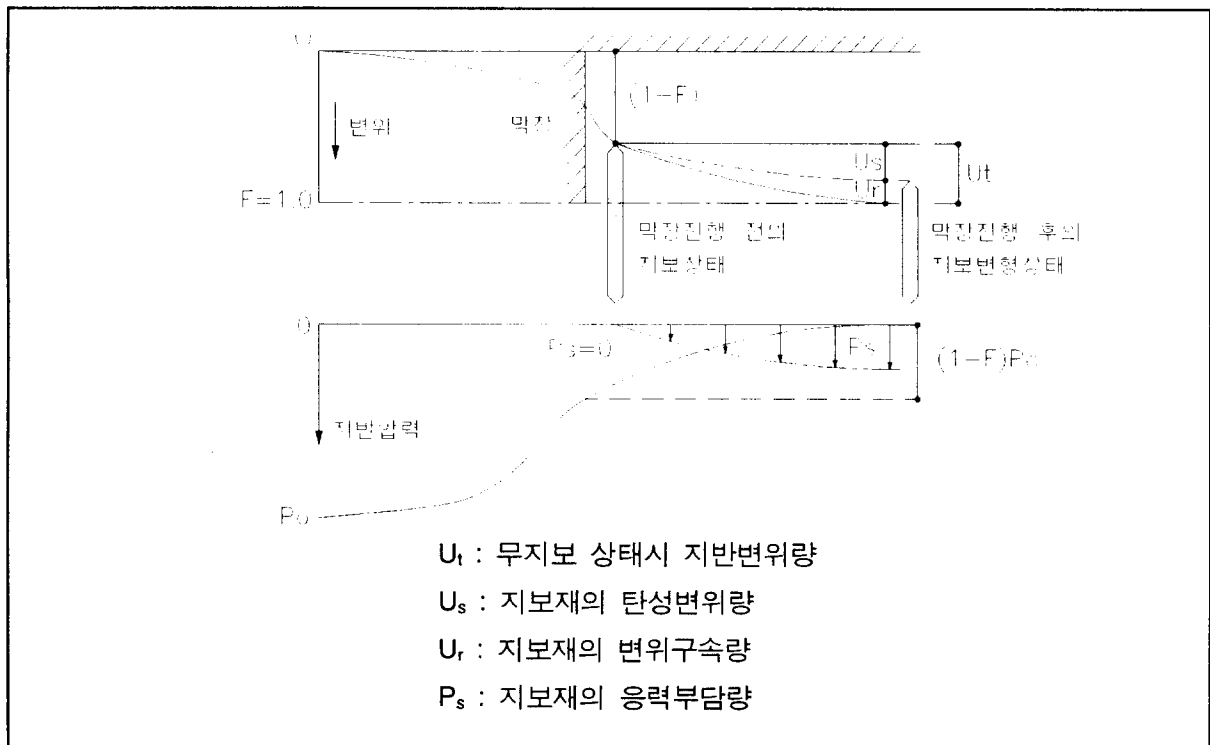
3. 터널굴착에 따른 지보재 응력부담 특성

터널 굴진은 지반굴착과 지보재 설치의 공정이 교대로 반복되는 연속 작업공정을 이룬다. 지보재(숏크리트, R/B)가 터널굴착후 막장후방에 설치된 후 터널굴착이 계속 진행되면 터널막장부가 지지하고 있던 하중의 일부가 지보재에 전달되게 된다.

이와 같은 막장제거에 의하여 발생하는 하중에서 지보재가 부담할 응력의 변화를 도시하면 <그림 3.1>과 같다.

<그림 3.1>에서 터널막장 전방의 원지반 압력(P_0)과 변위(F)의 변화형태는 거울영상(Mirror Image)과 같게 되어 굴착후 막장 후방에 떨어져 지보재를 설치할 수록 지보재가 부담할 응력은 감소하게 되나 지반변위는 커지게 된다. 이 경우 지반강도가 작은 지반조건에서 지보재 설치가 늦어지게 되면 지반소성화 및 전단파괴가 발생되어 터널이 붕괴하는 경우로까지 진전될 수가 있다.

이에 따라 터널굴착후 설치되는 지보재는 설치위치 및 막장 전진에 따른 응력부담 비율은 <그림3.1>과 같이 달라지게 되므로 터널이 설치되는 지반조건, 예를 들면 대심도 산악 터널의 지중응력이 큰 곳에서는 굴착후 즉시 지보재를 설치하게 되면 터널굴진에 따라 지보재가 부담해야 할 응력이 상대적으로 크게 되어 지보재 자체의 강도를 상회할 수도 있으므로 굴착에 따른 하중전이와 지반강도를 최대로 고려하여 지보재 설치시기를 조정할 필요가 있다. 현재 터널해석에서 3차원적인 거동특성을 2차원적으로 해석할 수 있는 것도 이러한 막장전진에 따른 지보재에 응력전이를 표현하는 응력분배율의 도입으로 가능한 것이다.



<그림 3.1> 막장굴진에 따른 지보재 응력 부담형태 <Ward, 1978>

4. 터널굴착 거동을 고려한 현장계측관리 방안

4.1 터널계측의 목적

터널 굴착에 의하여 발생하는 주변지반의 응력과 지반강도 크기에 관심을 두고 지반이 가지고 있는 강도를 최대한으로 활용하는 것이 NATM이론의 특성이나, 터널주변 지반의 정보를 사전조사로부터 얻는 데는 한계가 있고 또 발생응력이나 지반의 강도는 지질조건외에 굴착방법이나 시공정도에 따라서도 변화되므로 사전에 적절하게 예측하기는 매우 어렵다.

따라서 시공 시에 터널주변 지반 및 구조물의 거동을 계측하고 이 결과를 기초로 하여 지보구조물의 적합성 및 지반의 안정성을 역으로 추정하여 필요시 공법의 변경이나, 지보부재의 변경 등의 적절한 대책을 수립할 수 있도록 하는 것이 계측의 목적이라 할 수 있다.

이에 구체적인 계측의 목적을 요약하면 다음과 같다.

1) 안정성 확보

- 터널 주변지반의 움직임 파악
- 각 지보부재의 효과 파악
- 구조물로서 터널의 안정성 확인
- 주변구조물에 미치는 영향 파악

2) 경제성 도모

- 계측결과를 설계 및 시공에 반영하여 공사의 적정성과 경제성 도모
- 장래 공사를 위한 자료 획득

4.2 터널계측의 종류

1) 일상관리 계측

일상관리 계측은 시공대상 전 구간의 지반거동을 일상적으로 관리하기 위한 기본적인 중요한 관리계측으로 변위를 측정하여 터널 주변지반의 안정성을 파악하기 위한 계측이다.

<표 4.1> 일상관리 계측의 종류

계 측 항 목	계 측 목 적
갱내 관찰 조사	<ul style="list-style-type: none"> ○ 막장의 자립성, 암질, 단층파쇄대, 구조 변질대의 성상 파악 ○ 지보공의 변상 파악 ○ 설계시 지반구분의 평가
지표 침하 측정	<ul style="list-style-type: none"> ○ 터널 굴착에 따른 지표 영향을 측정 ○ 주변 구조물의 안전도 분석, 침하방지대책 등의 효과 파악
내공 변위 측정	<ul style="list-style-type: none"> ○ 변위량, 변위속도, 변위수렴상태를 파악하여 주변지반의 안정성 확인 ○ 1차 지보에 대한 설계 및 시공의 타당성 평가 ○ 2차복공의 실시 시기 등을 판단

2) 대표위치 계측

대표위치 계측은 터널노선중 대표적인 지반조건에 각종 계측 기기를 동일축선에 배치후 응력과 변위를 종합 분석하여 터널주변지반 및 지보부재의 안정성과 설계타당성을 검토하여 잔여구간의 시공에 반영하기 위한 정밀계측이다.

<표 4.2> 대표위치 계측의 종류

계 측 항 목	계 측 목 적
Shotcrete 응 력 측 정	○ 슛크리트의 내부응력 및 배면토압 측정
Rock Bolt 축 력 측 정	○ Rock Bolt에 작용하는 축력을 심도별로 측정 ○ Rock Bolt의 지보효과, 유효설계길이 판단
지중 침하 측정 (지상 설치)	○ 심도별 지중 수직변위량을 측정, 터널 이완영역의 범위 등을 판단 ○ 지중매설물 안전성 파악
지중 변위 측정 (터널 내부 설치)	○ 터널 주변의 이완영역의 범위, 지반 안정도 판단 ○ Rock Bolt 길이의 타당성 등을 판단
지중수평변위측정	○ 수평방향의 지반이완영역 및 절리 경사 방향 등을 판단
지하 수위 측정	○ 굴착에 따른 지하수위 변동파악(차수 Grouting 효과 등)

4.3 계측기 설치시기

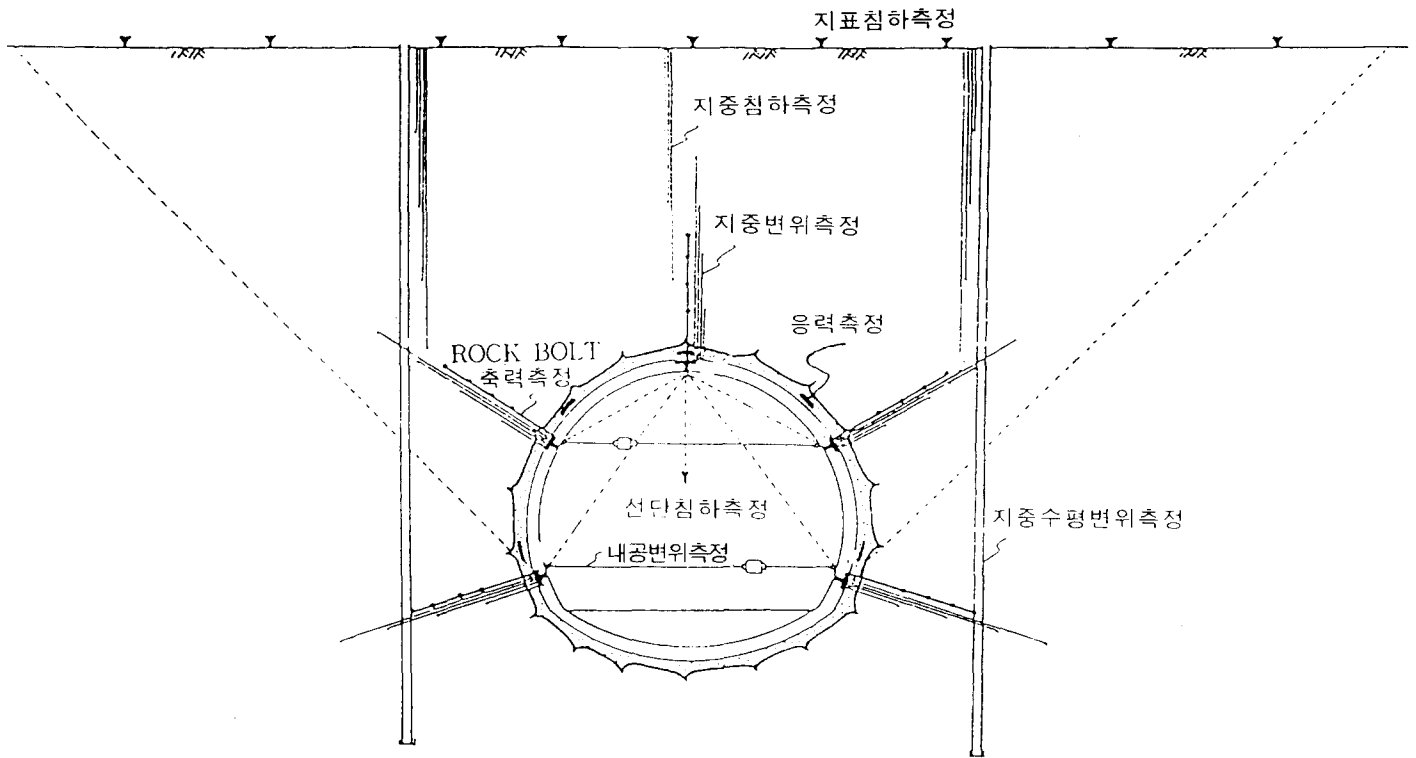
터널굴착시 발생하는 지중응력과 변위는 3차원적으로 굴착단면 주변의 넓은 범위에서 변화되며, 굴착진행거리에 따라 크기도 영향을 많이 받게되므로 계측기 설치후 초기치 측정이 매우 중요하다. 따라서 계측대상 지점의 초기치 측정을 위하여 계측 종류별로 설치시기에 대하여 상당한 주의를 기울여야 한다. 일반적인 계측계획 및 설치시기는 <그림 4.1> 및 <표 4.3>과 같다.

☞ 실제 대부분의 터널 현장에서는 설치시기에 대한 개념 부족(막장 후방 5-10m에 설치하는 경우가 많음)으로 초기치 측정에 대한 중요성을 인지하지 못하고 있으며, 또한 대표단면의 계측종류도 동일 축선상에 배치되고 있지 않는 사례가 상당히 있는 실정이다.

4.4 계측자료 분석의 기본요건 이해

1) 터널굴착에 의한 변이 벡터

지반(암반)내에 터널을 굴착하게 되면 <그림 4.2>와 같이 지반 내에 존재하던 초기지압의 해방으로 굴착면 주변에서 터널내부로 변형이 발생되면서 굴착면 주변 방향으로 3차원적인 응력의 재분배가 발생하게 된다.



<그림 4.1> 대표단면 계측 계획(동일측선상의 배치)

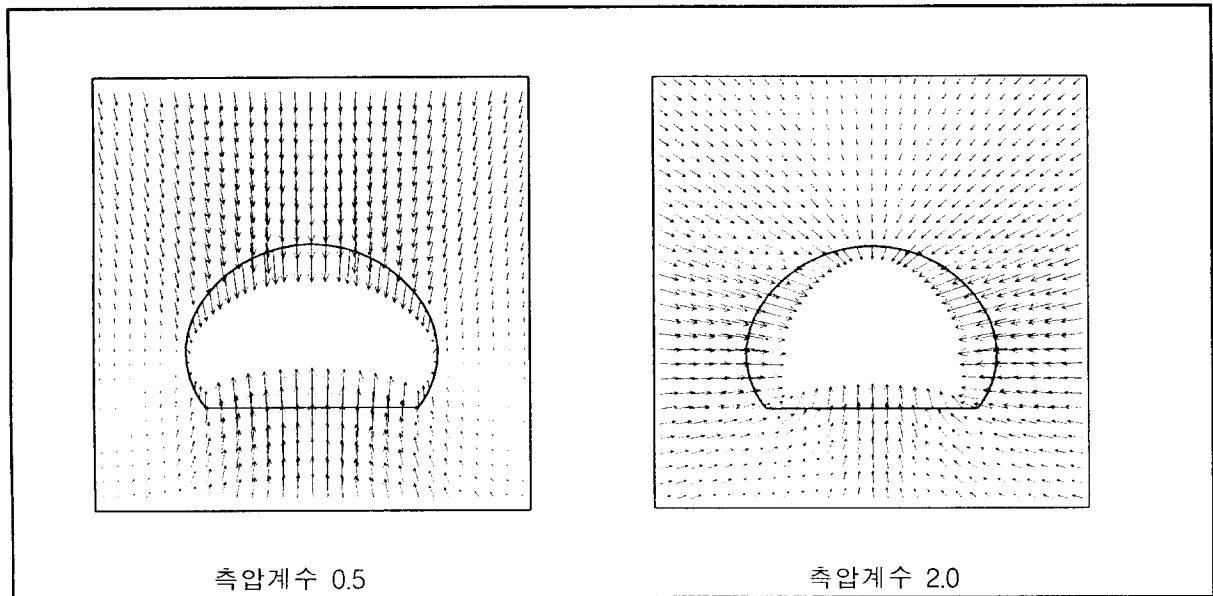
<표 4.3> 대표위치 계측의 설치시기

구 분	종 류	설 치 시 기	비 고
터널 내부 설치	천단침하 내공변위 지중변위 숏크리트 응력 Rock Bolt 축력	<ul style="list-style-type: none"> ○ 터널 굴착후 1차 지보가 완료된 후 막장에 근접하여 설치 (통상 1회굴진장의 중앙부에 설치) ○ 반드시 계측기 설치가 완료된 후 터널굴착 개시 	동일 측선 상에 배치
터널 외부 설치	지표침하 지중침하 지중 수평변위	<ul style="list-style-type: none"> ○ 종방향 및 횡방향 변위영향 범위를 예측하여 사전에 설치 - 횡방향 : 터널 S.L에서 20~45° 측 선 범위 - 종방향 : 막장전방 3D 또는 터널 심도 2배 이상 	

초기지압은 중력에 의한 응력(Gravitational Stress), 지각 활동에 의한 응력(Tectonic

Stress), 지각 침식 후에 잔류된 잔류응력(Residual Stress) 등으로 크게 분류할 수 있으며, 그 크기 또한 지반생성 조건과 상태에 따라 다르게 된다.

☞ 여기서는 초기지압의 조건과 크기와는 별도로 굴착에 의한 터널주변의 변위 Vector는 <그림 4.2>과 같이 터널 중심으로 향한다는 것이고, 이에 따라 각 지반 및 지보재에 발생하는 변위 및 응력 발생조건의 기본적인 유추가 가능하며, 계측 종류별로 측정된 계측치 평가의 기본 사항이 된다.

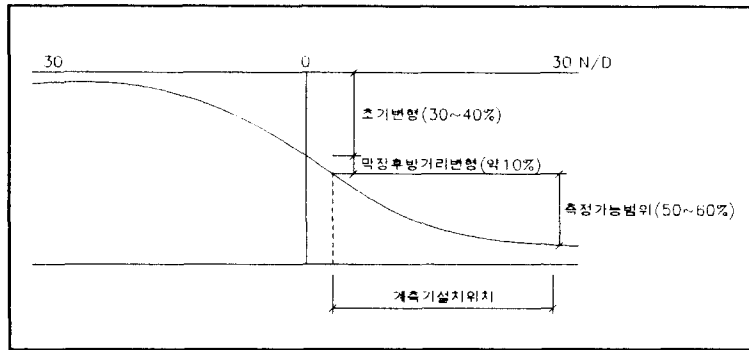


<그림 4.2> 측압계수에 의한 변위 벡터

2) 계측종류별 변위 및 응력의 측정가능 범위

터널 굴착에 의한 변위 벡터는 3차원적으로 응력 재분배를 발생시키게 되며 이러한 응력 재분배의 영향범위 및 크기는 <그림 4.3>과 같이 막장위치에 따라 변화되므로 현장 계측 계획 시는 이를 반드시 숙지할 필요가 있다.

구 분	계 측 종 류	측 정 범 위
터널외부계측	지 표 침 하 지 중 침 하 지중수평변위	○ 최대 측정가능 범위 : 100% 단, 초기치는 굴착의 영향범위 밖에서 설치후 측정되어야 함.
터널내부계측	천 단 침 하 내 공 변 위 지 중 변 위 숏크리트 응력 록볼트 축력	○ 최대 측정가능 범위 : 50-60%정도 계측기 설치 위치가 막장에서 멀어질수록 측정가능 범위가 감소되며, 초기 설치 위치가 약 0.5D이상 되면 계측기 설치가 무의미하게 된다.



<그림 4.3 > 막장위치에 따른 응력의 영향범위 및 크기

3) 계측종류별 측정치 분석방법

터널굴착에 따라 발생된 변위 및 응력의 측정치는 도심지 터널을 고려할 때 다음과 같은 측정자료가 계측되어야 하며 각각의 측정치는 서로 상관성이 유지되어야 분석이 가능하게 된다.

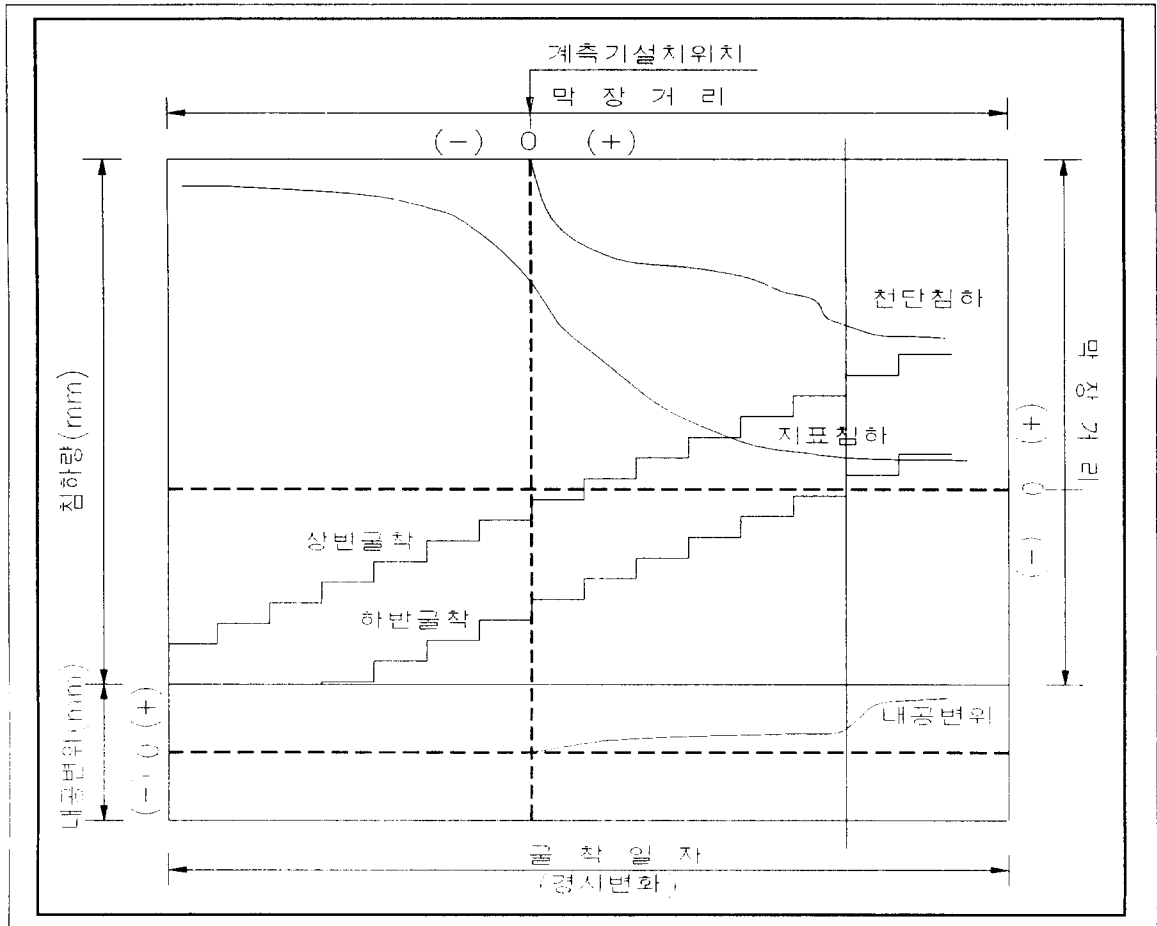
계측종류	기본 측정개념	비고
지표침하	<ul style="list-style-type: none"> 하향 침하 형태 	연약지층에서 막장붕괴전 터널 전방에서는 융기현상 발생가능
지중침하	<ul style="list-style-type: none"> 터널 굴착방향으로 지중침하량 측정 터널중심축에서는 심도증가에 따라 침하량이 증가하나 측벽부에서는 지표 측이 크게 측정 	지중침하와 지중변위는 상관성이 높게 나타나게 됨.
지중변위	<ul style="list-style-type: none"> 터널내측 방향의 변위 측정 좌우 측벽부의 지중변위 설치지점의 변위량과 내공변위와의 관계 분석 	지중변위의 고정 점은 소성영역 밖에 설치되는 것을 기준함.
록볼트 축력	<ul style="list-style-type: none"> 터널내부로의 변형 제어에 대한 인장력 측정 터널축으로 Peak 인장력이 발생되어야 하며, 압축응력 발생시 주변 계측자료(특히 지중변위)와 상관분석 요함. 	록볼트의 선단은 소성영역밖에 설치되는 것을 기준함.
숫크리트 응력	<ul style="list-style-type: none"> 원주(Tangential)방향 및 배면(Radial)방향의 압축응력 측정 이론적으로 원주방향 > 배면방향의 응력의 관계가 있음 	인장력이 측정될 경우는 계측기 설치위치 및 주변계측자료와 상관분석 요함.
천단침하 내공변위	<ul style="list-style-type: none"> 터널내공방향으로 발생하는 변위 측정 내공의 변위 형태중 산악 경사지형에서는 상·하반 굴착시 하반 지반의 강도가 작을 때 터널 상부 편토압 하중에 의하여 단면 변형 자체가 비대칭을 일으키는 경우에 내공이 확대될 수 있음. 	천단이 융기되거나 내공이 확대되는 경우가 측정될 때에는 주변계측자료와 상관분석요함.

☞ 상기 기본 측정개념에 따른 터널거동이 나타나지 않을 경우 우선 계측기 설치 상태를 점검하고, 지형 및 지반조건 등 현장 특성을 재검토하여 반듯이 서로 상관성이 깊은 계측치를 상호 비교하여 종합적인 분석을 하여야 한다. (필요시 계측기 재설치 검토)

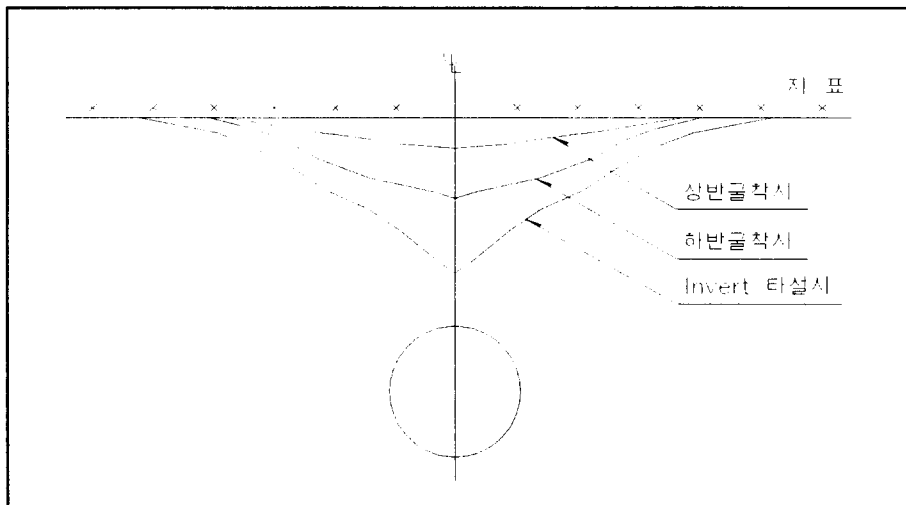
5 주요 현장 계측 관리도 작성방법

1) 변위 경시변화 관리

- 지표침하, 천단침하 및 내공변위 : 같은 관리도에 Plot하여 관리

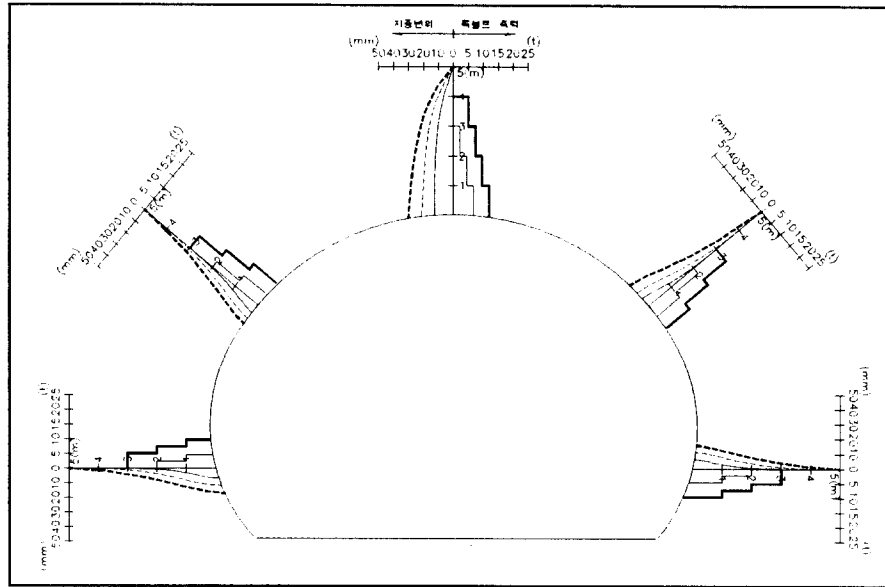


- 지표 횡단침하



2) 지중변위/록볼트 축력 관리

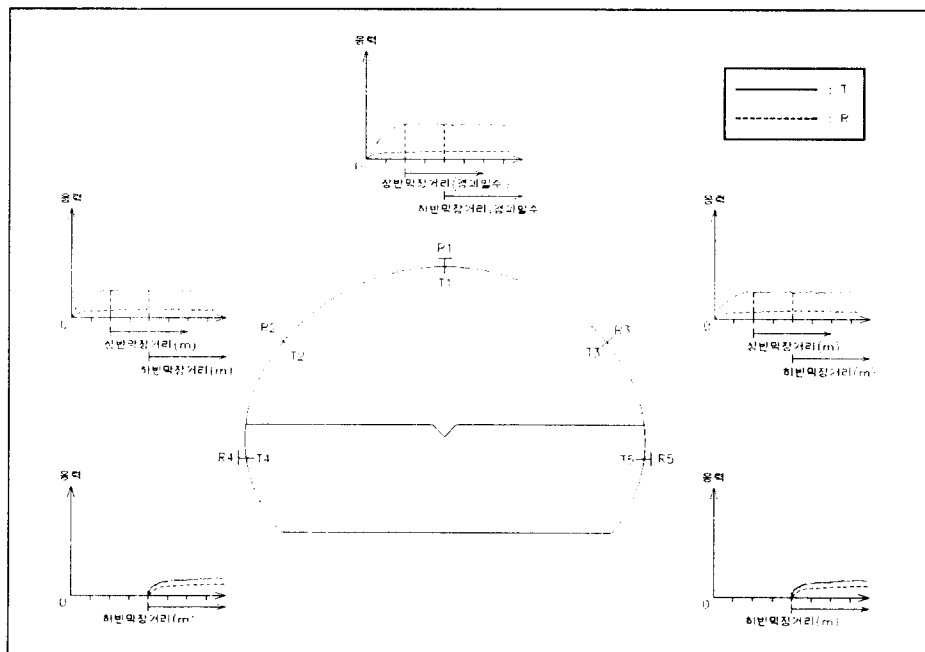
대표위치 계측결과중 지중변위, 록볼트 축력, 경시변화는 서로 상관관계가 밀접하므로 같은 관리도에 Plot하여 관리



<그림 5.1> 지중 변위와 록볼트 축력의 기본적인 상관관계

3) 슛크리트 응력 관리

스�크리트 응력은 원주방향과 반경방향의 측정치를 동시에 Plot하여 관리하며 측정치는 지중변위량 및 록볼트 축력변화와 연관하여 분석한다.

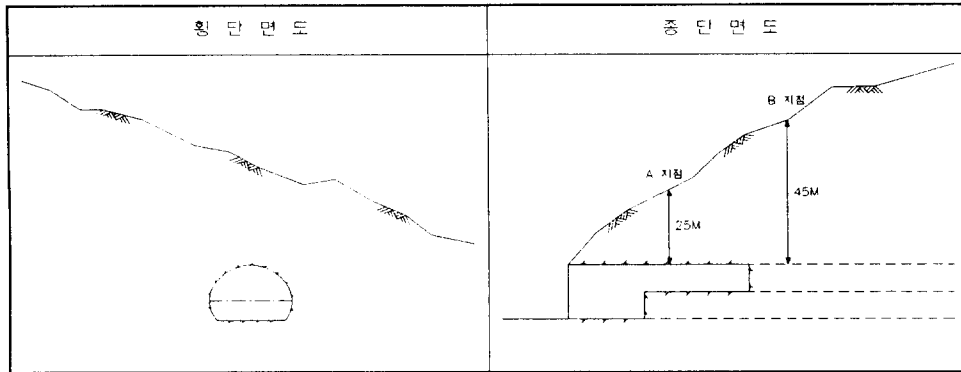


<그림 5.2> 슛크리트 응력 관리 (Tangential > Radial 방향)

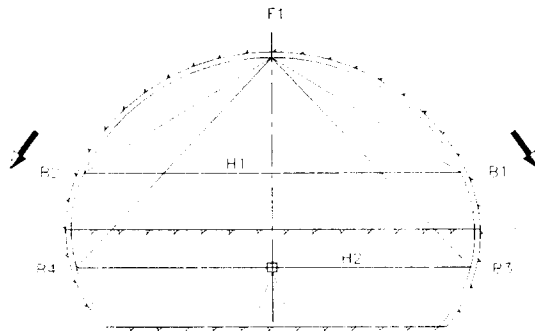
6 현장 계측관리 사례

6.1 CASE 1 (일본, 경사지 산악터널)

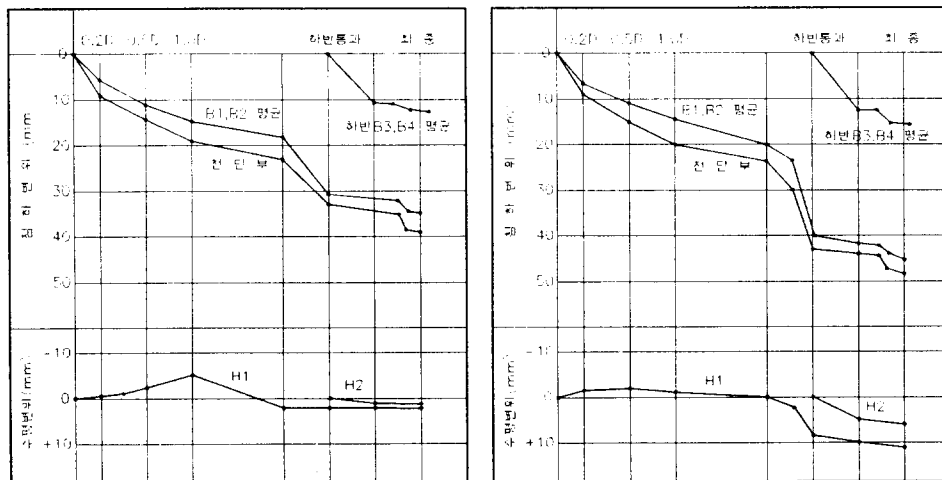
1) 단면형태



2) 계측단면도

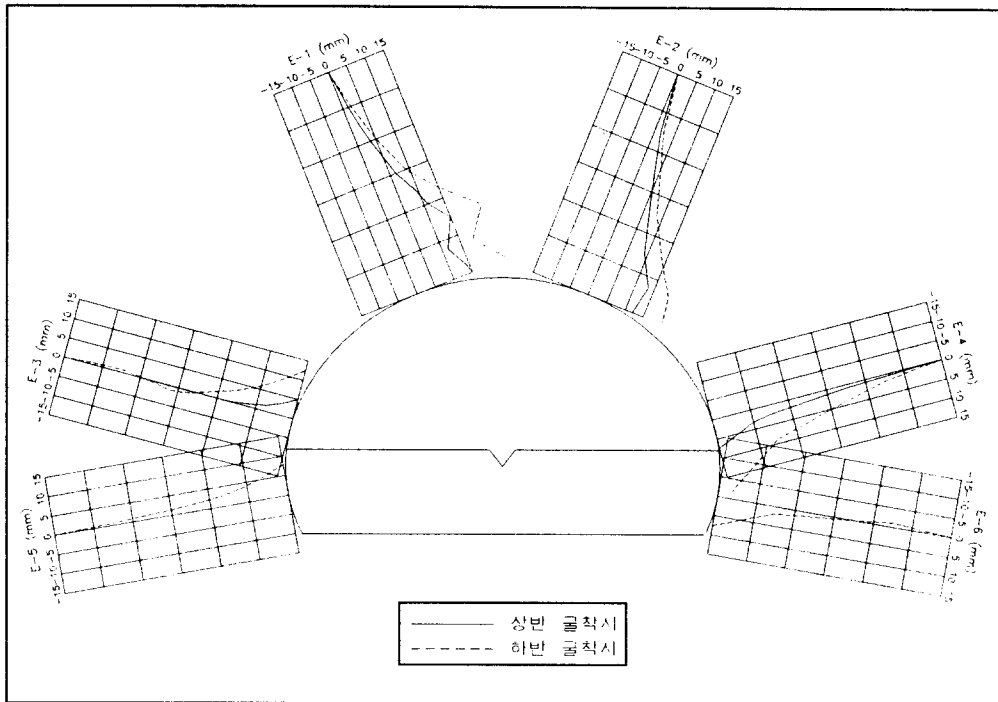


3) 변위 측정 결과

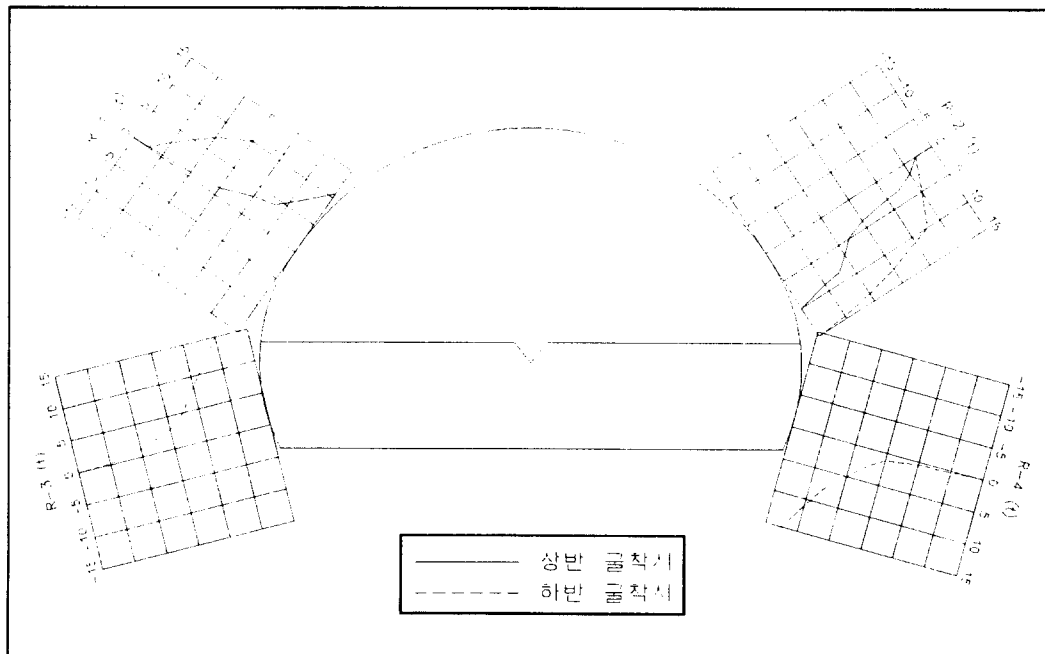


4) 터널굴착 후 최종 계측치의 상관관계 예

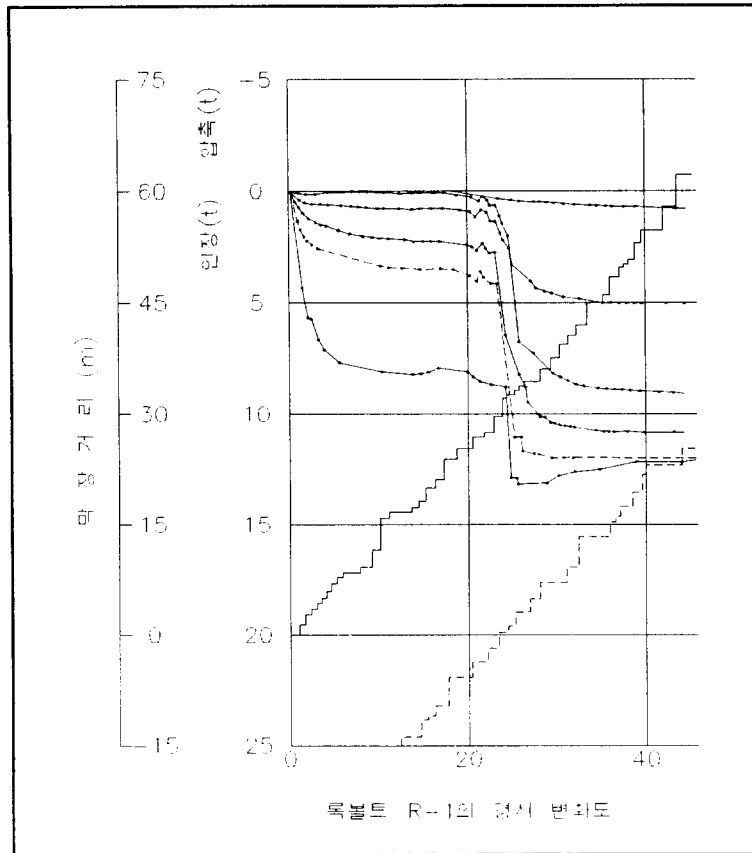
▷ 지중변위



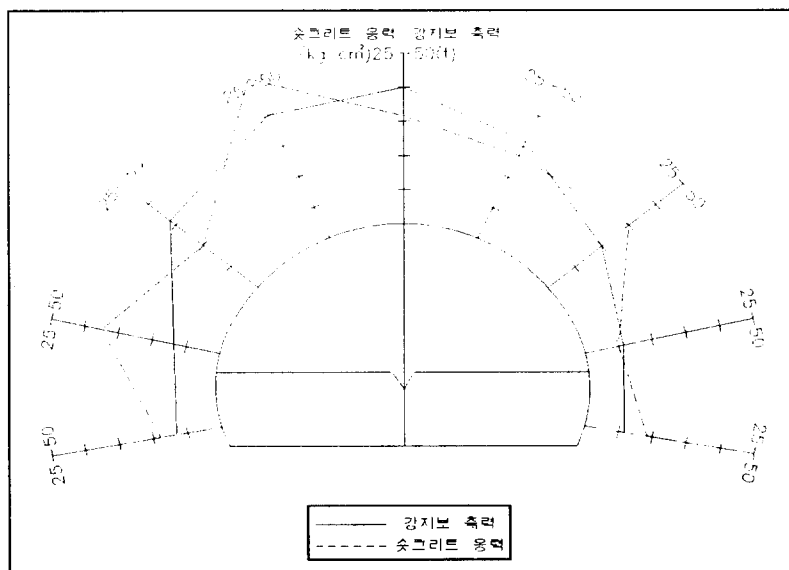
▷ 변위 측정



▷ 록 볼트 축력의 심도별 경시변화 관리 예

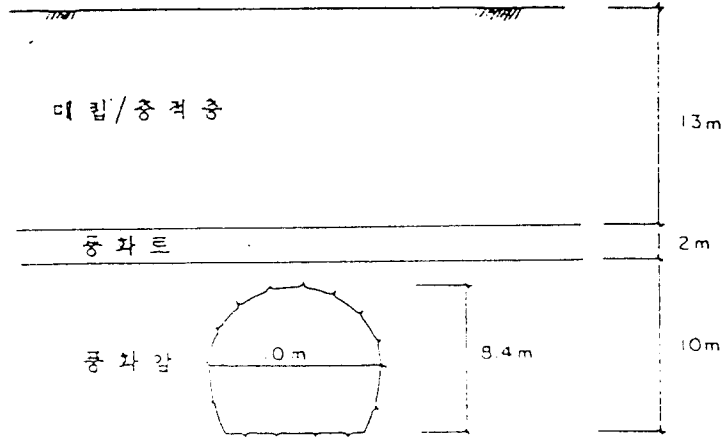


▷ 슛크리트 응력

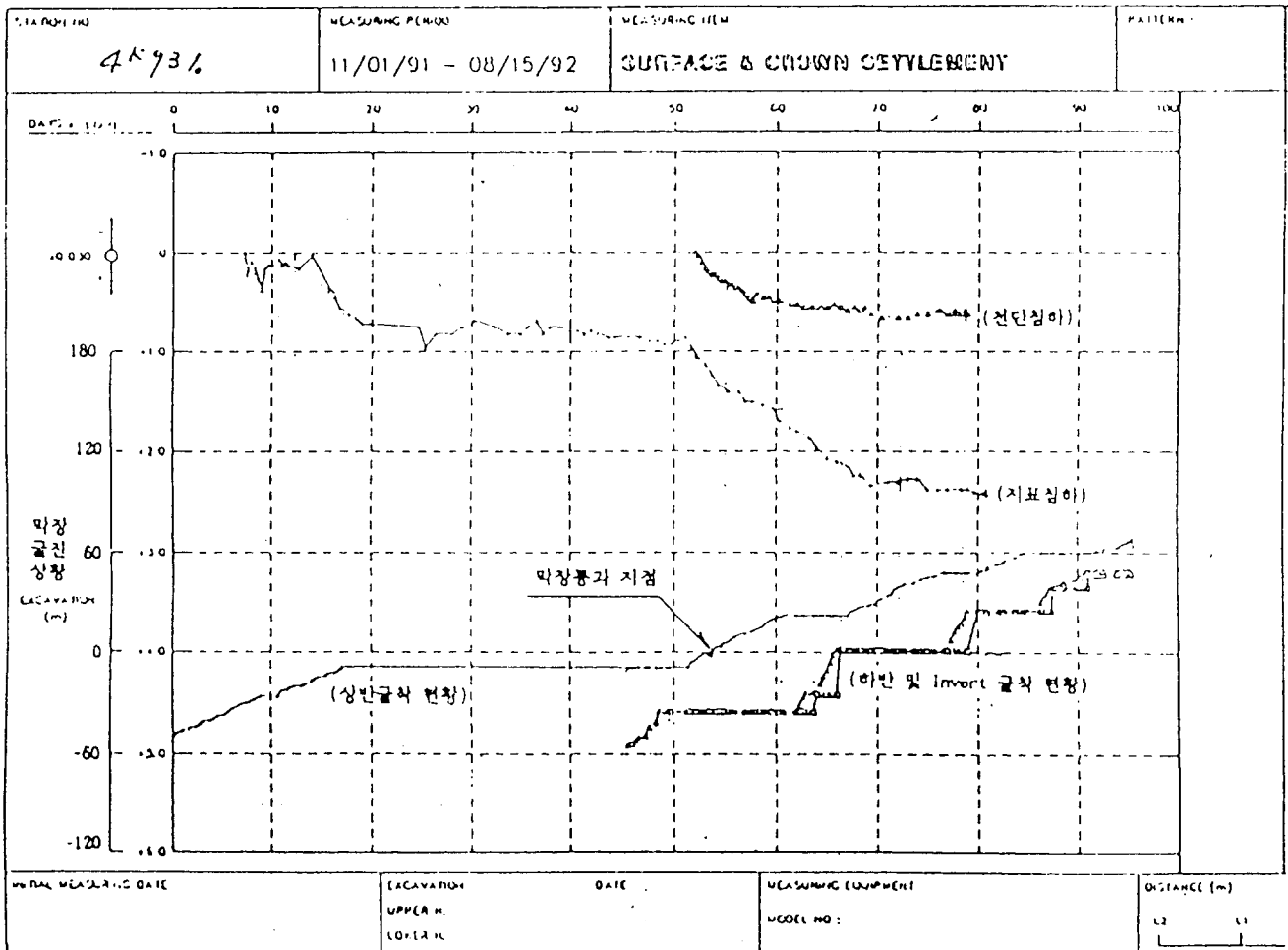


6.2 CAES 2 (서울지하철 2호선 ○○ 공구 계측관리 사례)

▷ 지반조건

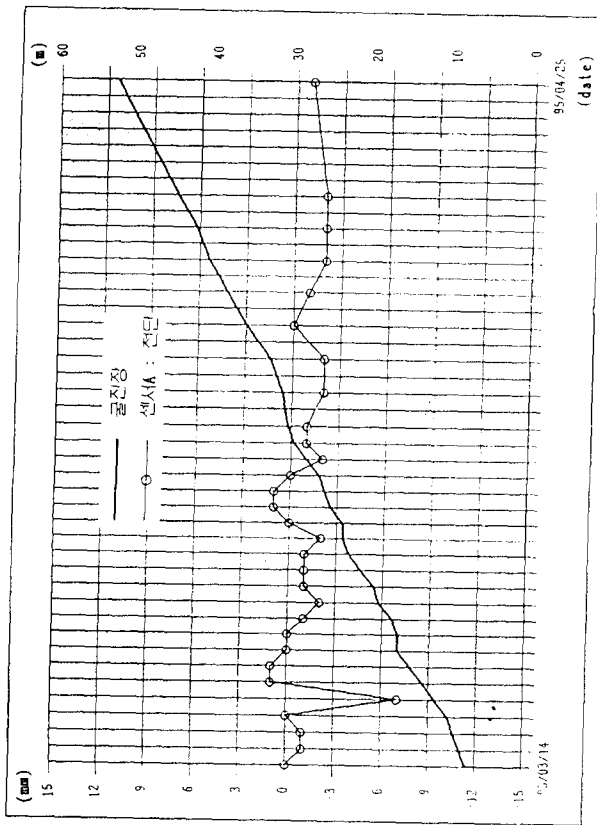


▷ 지표·천단 침하측정

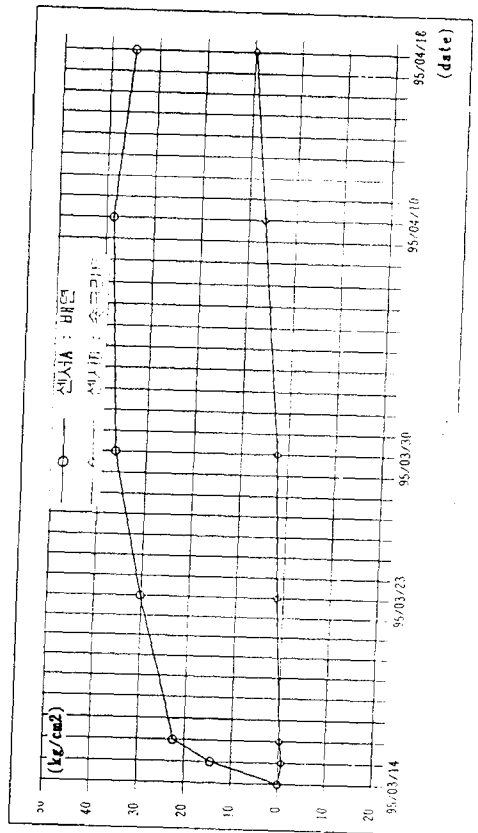


6.3 CASE 3 (서울지하철 6호선 00 공구 계측관리 사례)

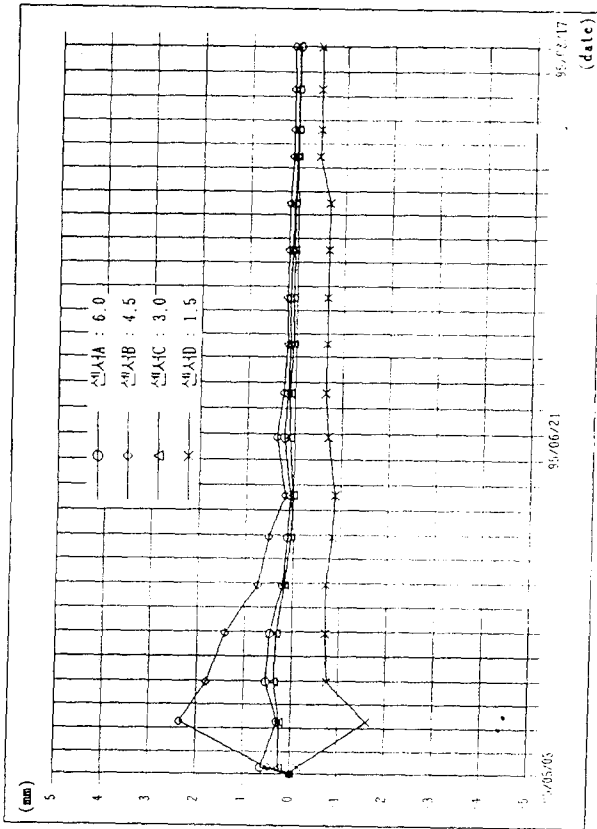
▷ 천단침하



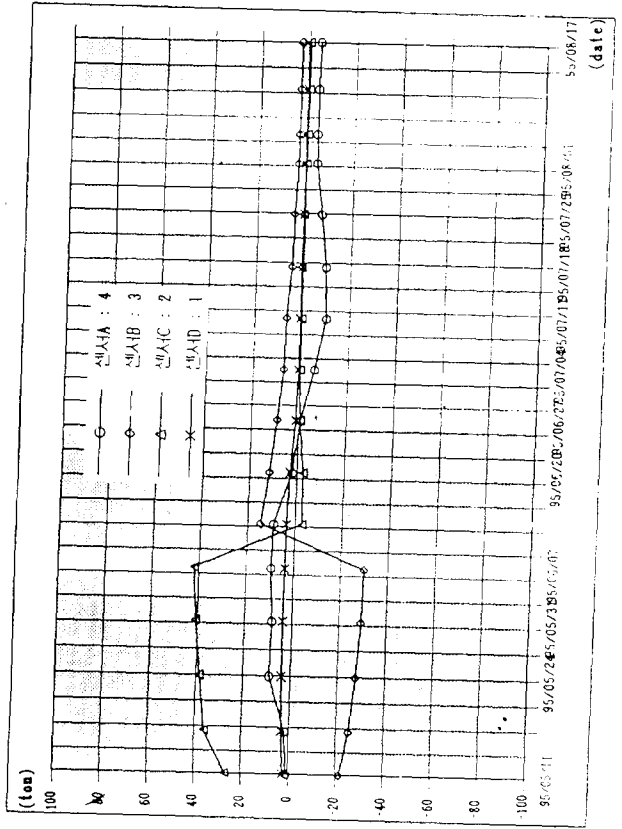
▷ 슛크리트 응력 (천단)



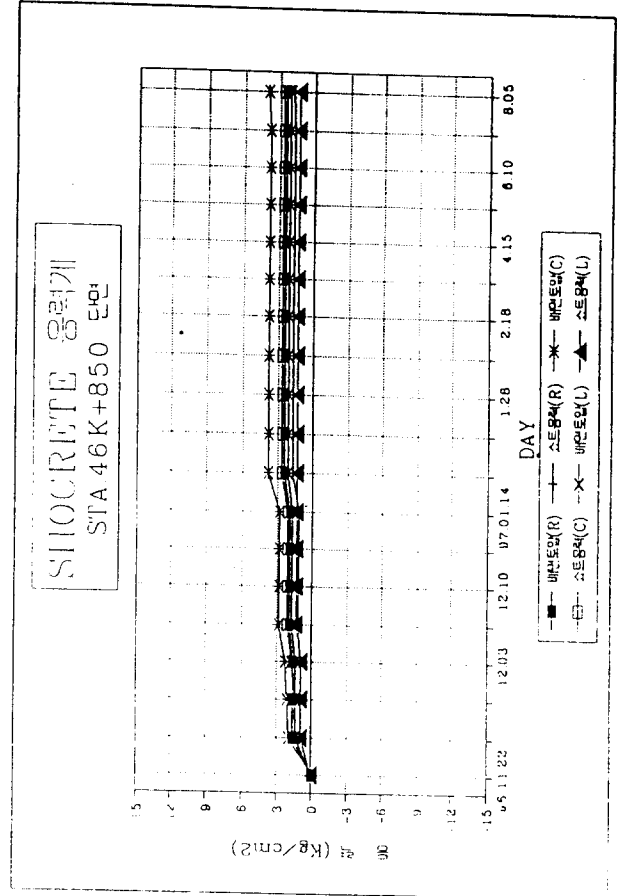
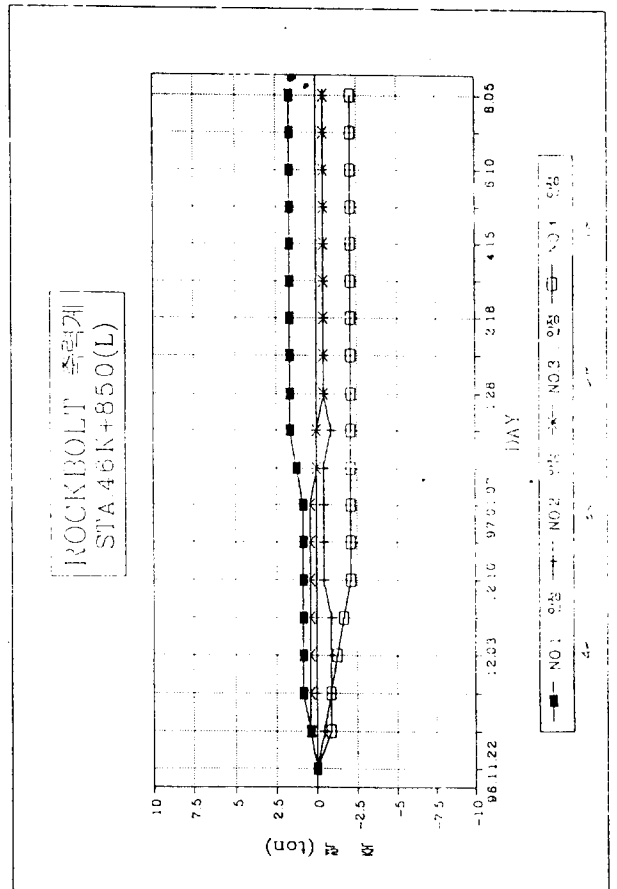
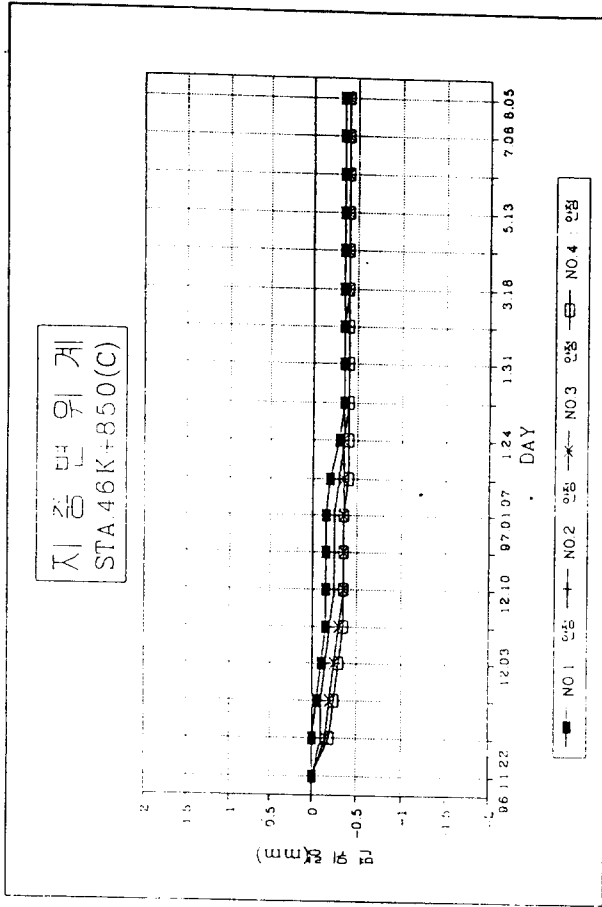
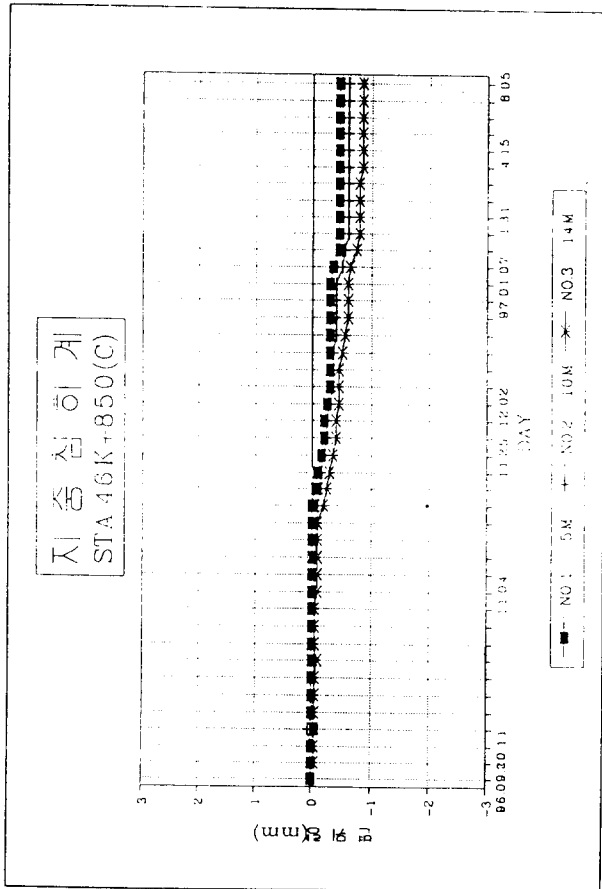
▷ 지중변위 (우측상단)



▷ 록볼트축력 (우측상단)

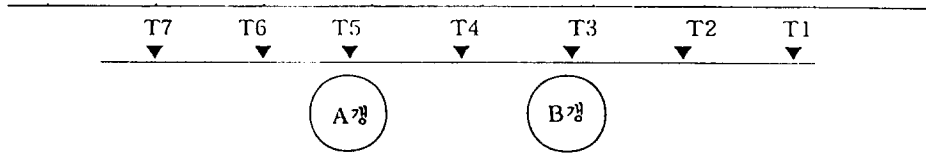


6.4 CASE 4 (서울지하철 7호선 00 공구 대표단면 계측관리 사례)

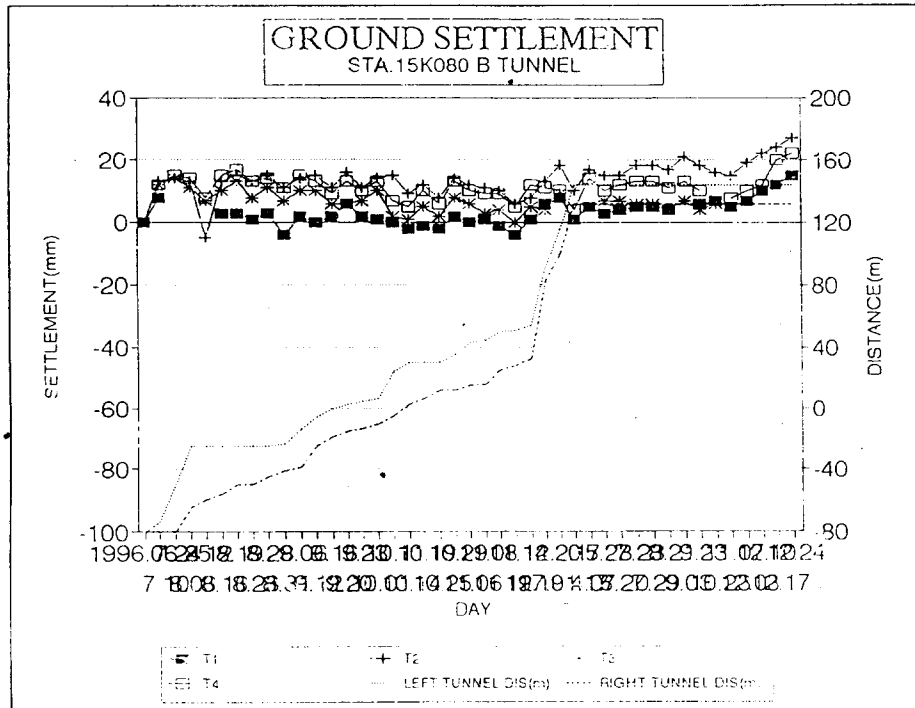


6.5 CASE 5 (인천지하철 1호선 ○○ 공구 계측관리 사례)

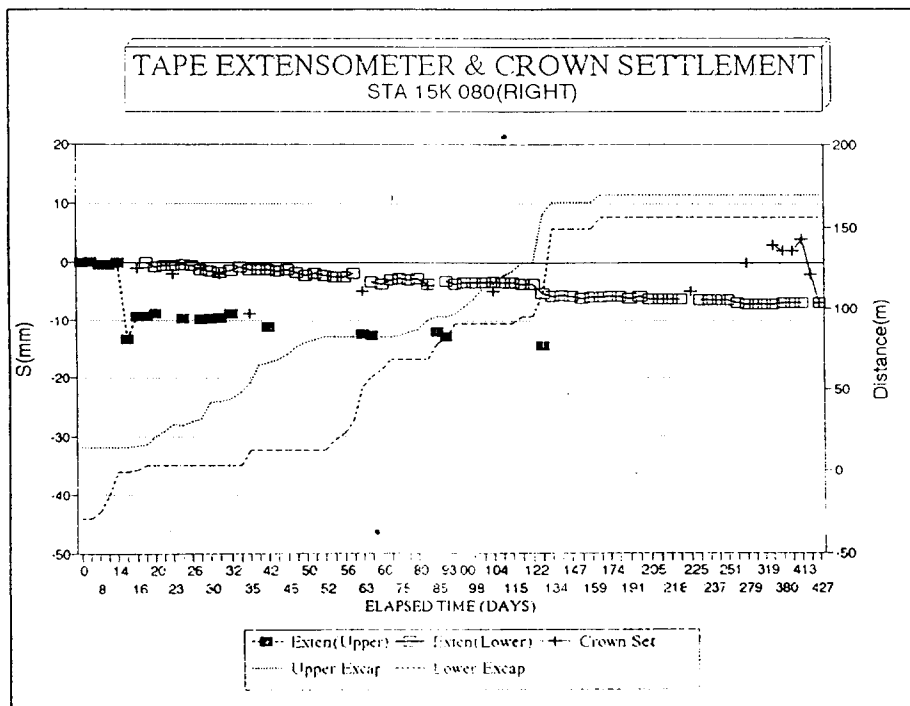
▷ 지표침하계 설치 위치



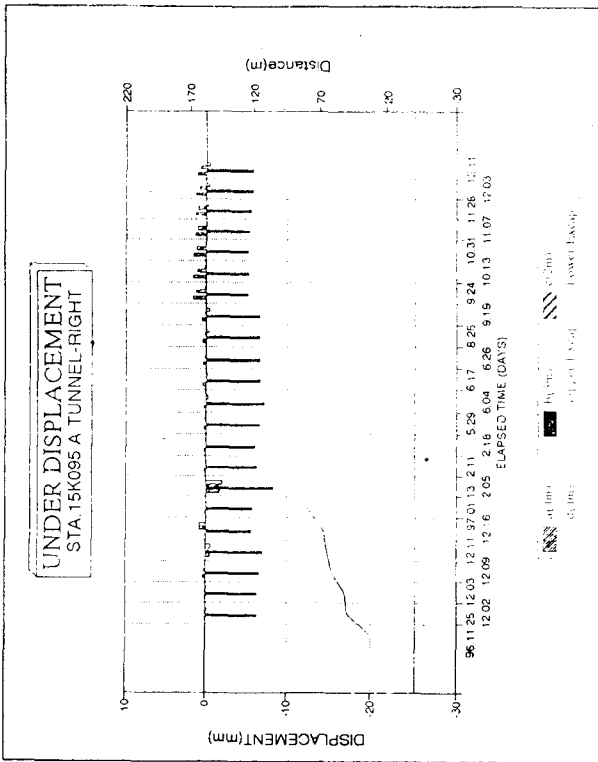
▷ 지표침하



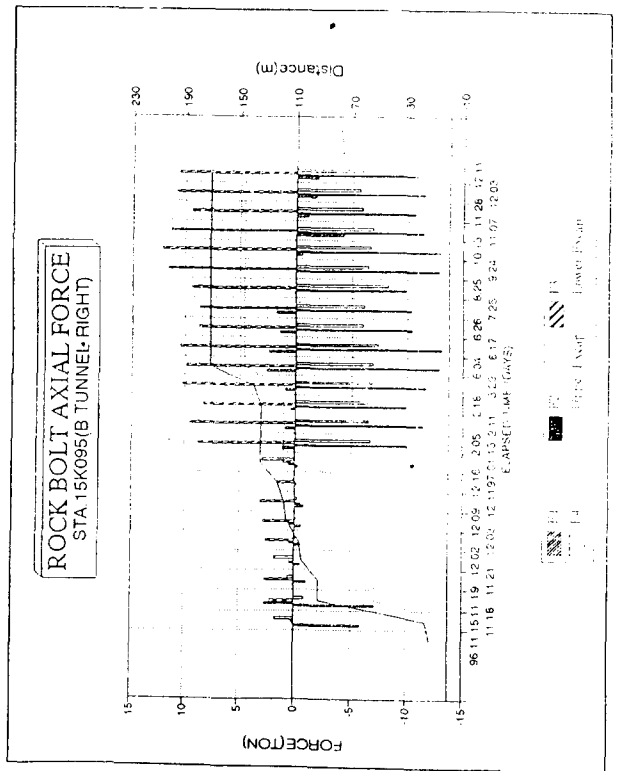
▷ 내공변위 (천단침하)



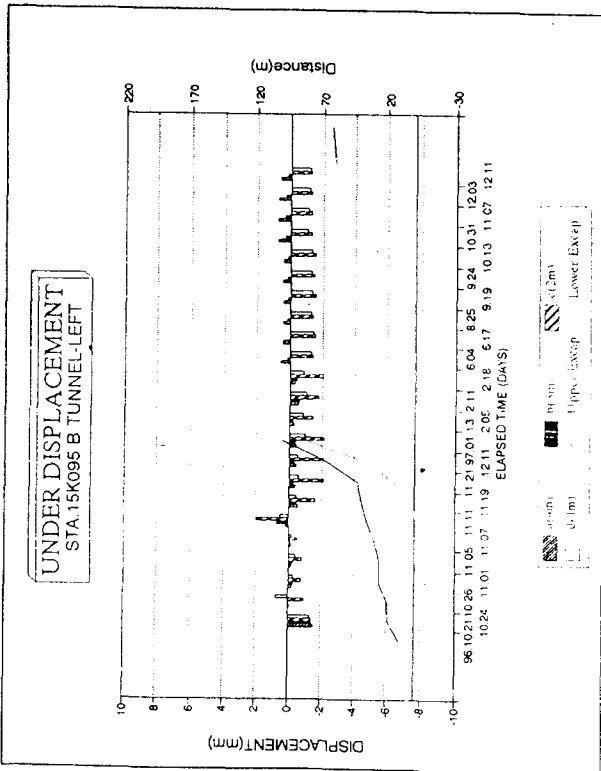
▷ 지중변위 (A터널)



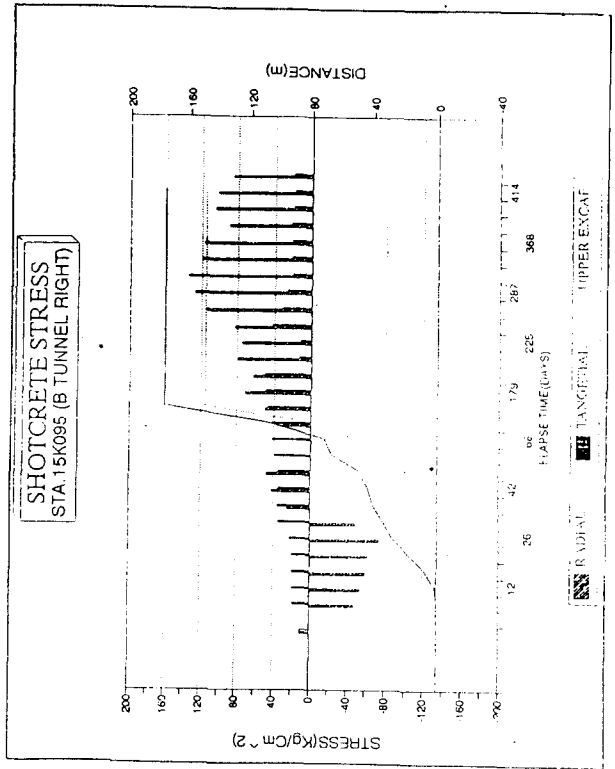
▷ 록볼트축력 (A터널)



▷ 지중변위 (B터널)



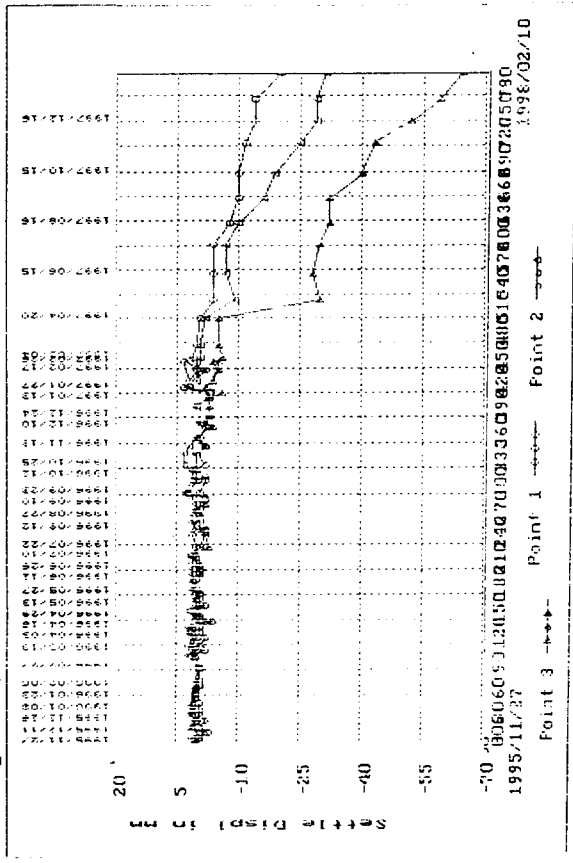
▷ 슛크리트축력 (A터널)



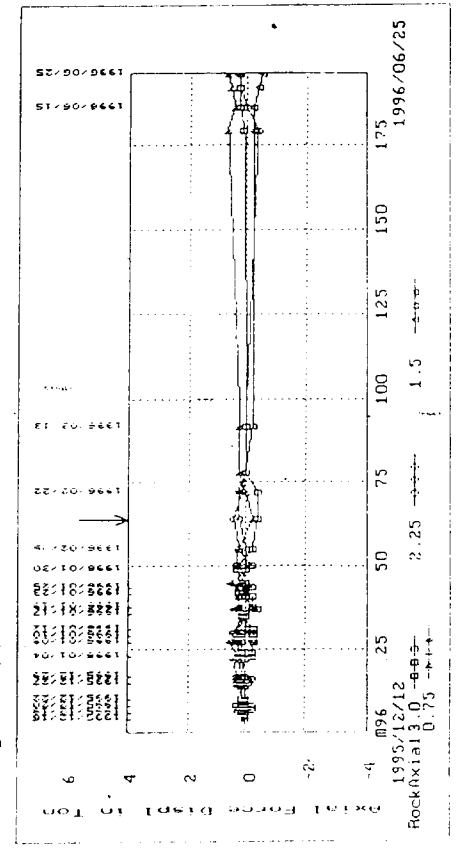
6.6 CASE 6 (서울지하철 7호선 00 공구 대표단면 계측관리 사례)

▷ 하반기통과후('96.2.12) 계측관리 사례

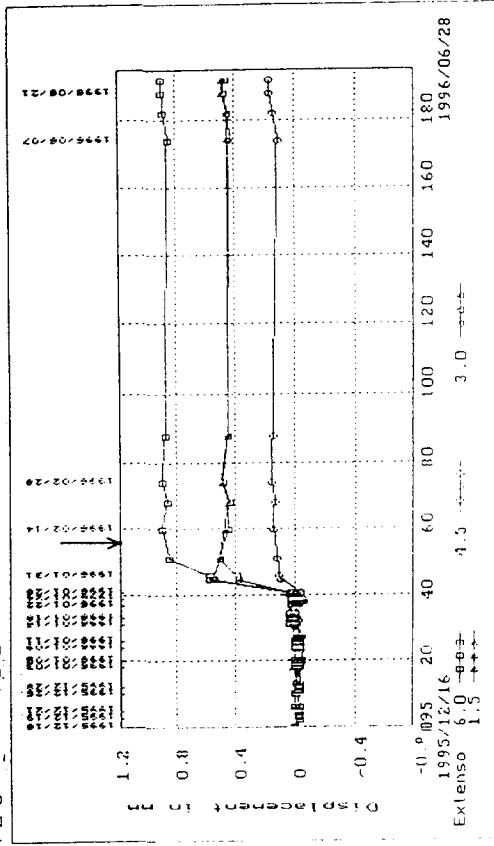
작업명: 0003 침하계



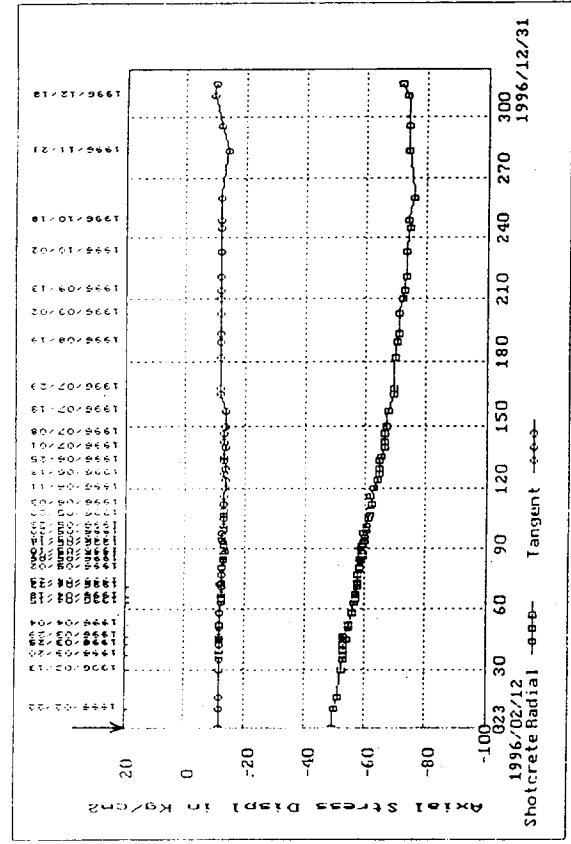
작업명: 0002 록볼트 축력측정



작업명: 0002 시중변위계 현장명: SEOUL SUBWAY 7



작업명: 0002 슛크리트 응력측정



6.7 현장계측관리 사례 고찰

구분	사 례 고 찰	비고
CASE 2	1. 비교적 관리 양호 2. 내공변위와 동시 Plotting 필요	
CASE 3	1. 천단침하 ▶ 계측기 설치 위치 부적절 (막장 후방 약 8m) 2. 지중변위 ▶ 터널 상단부에서 용기와 침하가 동시에 측정 ▶ 굴착 완료후 지중변위량 소멸 (?) 3. 슛크리트 응력 ▶ 배면토압 » 원주 방향 응력 4. 록볼트 축력 ▶ 인장력 구간내에서 압축력 측정 (?) ▶ 굴착 완료후 축력 소멸 (?)	
CASE 4	1. 터널상부 지중 침하량 > 지중변위량 2. 록볼트 하단부에서 압축력 측정 (용기 현상 ?) 3. 슛크리트 배면토압 > 슛크리트 응력	
CASE 5	1. 천단침하 발생시 지표는 용기로 측정 (?) 2. 지중변위에서 용기발생 측정 3. 록볼트 중간부에서 압축력과 인장력이 동시 발생 (?) 4. 배면토압 » 원주 방향 응력	
CASE 6	1. 지표침하 » 지중변위 (미소) 2. 슛크리트의 원주방향과 배면토압에서 인장응력이 발생 3. 미소한 지중 변위량에 대하여 배면토압 과대 (70 Kg/cm ²)	
분석 및 개선사항	1. 계측자료의 선별 → 계측기의 특성과 계측값의 변화(경향) 숙지 2. 동일측선상에 계측기 설치 → 변위에 따른 각 지보재의 응력변화를 동시에 파악 3. 계측자료의 종합관리 → 상호 연관성을 고려한 터널 전체 거동 파악 → 각 지보재의 응력 부담형태 파악	

7. 결 론

지금까지 굴착에 따른 기본적인 터널거동 및 응력부담특성을 알아보고, 현장계측 관리방안에 대한 몇 가지 방법에 대한 이해를 돕고자 하였다. 이러한 터널계측은 계측기의 설치, 운용, 계측자료의 관리라는 일련의 과정을 통하여 소기의 목적을 달성할 수 있다. 즉 터널외부에 설치되는 계측기는 터널막장의 영향권 밖에서부터 사전에 설치하고, 터널 내부에 설치되는 계측기는 막장개방후 후속 막장 굴진 전 가급적 막장에 가깝게 설치하여, 초기 치를 확보하여야 하며, 시공 중에도 계측기가 훼손되지 않고 소기의 자료를 획득할 수 있도록 유지하는 것

이 계측자료의 관리에 우선하여 고려해야 할 중요한 요소이다. 그러나 이러한 선행요소가 가장 중요한 것임에도 불구하고 다소 경시하는 경향이 있음을 부인하기는 어려운데 이는 현장 기술자들이 더욱 개선해야 할 부분이라 생각된다.

또한 대표단면 계측관리에 있어서는 유사 지반조건에서 터널의 전반적인 거동과 안전성을 한번에 파악할 수 있도록 관리하는 것이 기본적인 개념이다. 이러한 개념을 바탕으로 한다면, 터널 거동에 따라서 서로 연관성이 깊은 대표단면 계측기기는 동일 축선 상에 설치해야 한다는 것도 기본적인 상식이라고 할 수 있다. 그러나 이러한 기본적인 사항도 잘 지켜지지 않는 것도 또한 현실이며, 앞으로 개선되어야 할 부분이라고 할 수 있다.

이 외에 기술적인 문제와는 별도로 계측에 대한 일부 현장에서의 그릇된 시각도 문제가 되는 것 같다. 다시 말해서 감사나 기성에 관련된 행정적인 요식행위로만 인식하고 계측의 본질적인 역할을 외면하려는 경향이 아직까지도 남아 있는 것 같다. 터널 계측의 기본적인 역할에 대하여 충분히 인식한다면, 제도적인 측면에서도 기술적인 면과 함께 개선되어야 할 부분이 있는 것으로 생각된다.

지금까지는 현장 계측관리를 중심으로 살펴보았지만, 광의의 계측관리는 계측성과를 자료화하여 향후의 설계와 시공에도 활용이 가능하도록 하는 것까지라고 할 수 있다. 이러한 광의의 계측관리의 기본은 지역, 공법, 규모, 지반상황 등에 따라 자료를 수집, 정리하는 것이라고 생각된다. 이러한 자료화 작업을 위한 노력을 이미 시작했어야 함에도 불구하고 아직까지 구체적인 성과가 없다는 것은 우리 기술자 모두의 책임이라고 할 수 있으며, 지금이라도 이러한 노력을 시작해야 할 것이다. 이번 세미나와 같은 기술 토론의 장을 자주 마련하는 것도 구체적인 노력의 한 방법이 될 수 있을 것이다.

참고문헌

1. 이현범(1993), "터널굴진에 의한 3차원 지반거동의 2차원적 해석방법", 석사학위논문, 한국과학기술원
2. 유충식 외(1997), "점성토 지반에서의 실드 터널시공에 따른 지표침하 예측 기법", 지반공학회지, 제13권, 제6호, '97,12월
3. 이인모 외(1996), "응력집중을 고려한 터널의 3차원 거동에 관한 연구", 지반공학회지, 제12권, 제1호, '96,2월
4. "지반침하방지공법에 관한 연구", 한국건설기술연구원, 1985,12월
5. "지반공학시리즈7(터널)", 한국지반공학회, 1996, 2월
6. W.H.Ward, "Ground Supports for Tunnels in Weak Rocks", Geotechnical 28, 1978, No.2.
7. Vassilev, V.H. & Hristov, T.N., "Influence of the Heading Face and a Two-Dimensional Calculation Model of Tunnel Linings", Numerical Methods in Geomechanics (Innsbruck1988), Swoboda(ed.),
8. R.S. Sinha., "Underground Structures Design and Instrumentation", 1989, ELETSEVIER.