



V. 터널계측

1. 서언

터널기술은 '경험공학'이라고 일컬어 질 정도로 터널공사는 개략적인 설계와 현장기술자의 경험적인 판단에 의해서 수행되어 오고 있다. 그러나, 지반조건이나 터널의 규모에 따라 터널의 거동양상이 다르므로 기술자의 개인적 경험에 의한 판단에 의존하는데는 한계가 있기 때문에 합리적인 공학적 판단을 할 수 있는 정량적인 측정자료가 요구된다. 따라서, 터널계측은 굴착에 따른 주변지반의 거동 및 각 지보재의 역학적 거동특성을 파악하여 설계시 예측한 기본 거동이 시공시에도 안전측의 범위내에서 이루어지는지를 검토함으로써 안전하고 경제적인 터널시공을 도모하는데 그 목적이 있다.

터널계측은 여러 가지 목적을 갖고 적용되고 있으나, 그 중에서도 공사중 터널구조물의 안정성 평가는 가장 중요한 항목이다. 따라서, 이제까지 많은 현장에서 터널계측이 과대변위나 붕괴의 징후를 사전에 감지하여 터널이 최종적으로 붕괴되는 것을 방지한 사례는 무수히 많았다. 그러나, 기존의 2차원적인 터널계측은 붕괴의 위험성이 상대적으로 낮은 막장 후방에서의 상대변위와 안정상태로 들어선 응력값을 측정하기 때문에, 굴착중인 터널 막장의 거동을 정확하게 파악할 수 없을 뿐만 아니라, 막장전방의 지질

* 정희원, 대정컨설턴트 대표이사

정보도 제공하지 못하여 실질적인 터널시공에 큰 기여를 못하고 있는 실정이다.

본 강좌에서는 먼저 현재 국내에서 광범위하게 적용되고 있는 2차원적인 터널계측에 대해서 간략히 살펴보고, 다음에 최근 유럽에서 적용하고 있는 3차원 계측시스템에 대해서 설명하기로 한다.

2. 터널계측의 문제점

2.1 설계시의 문제점

설계단계에서는 지반 조사의 한계성, 장비 선정의 제한성, 그리고 관리 기준치의 부재등이 계측설계를 어렵게 하고 있다. 터널계측의 설계상 문제점을 살펴보면 다음과 같다.

- (1) 설계 단계에서는 충분한 지반조사가 이루어지지 못하기 때문에 경제성 등의 이유로 A계측과 B계측으로 구분하여 일정간격으로 계측 계획을 수립한다. 설계자의 의도는 지반조건 및 하중조건이 충분히 파악되지 않은 상태이므로 일단 일정 간격으로 계측단면을 설정해 놓고 시공시 현장여건에 따라 변경하여 적용할 것으로 생각하고 있으나, 현장에서는 설계대로 경직되게 이를 준수하려는 경향이 있다.
- (2) 설계시에는 터널 구조물을 Plane Strain 조건으로 가정하여 횡단면 설계에만 의존하고 있는데, 터널계측 역시 일정간격의 횡단면에 대

한 내공변위 및 응력측정만 계획하고 있다. 그러나, 실제의 터널 구조물은 계속되는 지반조건 및 하중조건에 변화로 완전한 Plane Strain조건에 거동을 보이지 않고 있기 때문에 설계단계의 가정치와 실제 거동치 사이에는 많은 차이가 있게 마련이다. 따라서, 터널 횡단면 뿐만 아니라 종단방향의 거동도 측정할 필요가 있다.

- (3) 설계단계에서 제시하기 어려운 사항중의 하나가 관리 기준치이다. 실제의 터널계측 사례를 보면, 수십cm까지 내공변위가 진행되어도 터널이 붕괴되지 않는 경우가 있는 반면, 수mm밖에 측정되지 않았음에도 곧바로 붕괴로 이어지는 경우가 있다. 따라서, 터널 계측의 관리 기준치는 현장에서 지반조건별로 결정하는 것이 바람직하며, 절대치에 의존하기 보다는 진행되는 추이를 관찰하여 거동의 경향성으로부터 안전성 여부를 판단하는 것이 바람직하다.
- (4) 설계단계에서 계측기의 종류, 설치방법, 측정방법, 그리고 설치위치에 대해서는 상세히 제시하고 있으나, 그 결과를 Plotting하는 방법 및 분석하는 기법에 대한 예시가 없는 경우가 대부분이다. 물론, 측정치의 시간별 변화 추이가 일정하게 발생하지 않고 매우 복잡할 뿐만 아니라, 이상치도 많이 측정되기 때문에 전형적인 분석기법을 제시하는 것도 한계가 있다. 따라서, 설계시에는 전형적인 경향에 대해서만 예시하고, 이상치나 과대치가 발생하였을 경우에는 별도의 분석을 할 수 있는 체계가 수립되어야 한다.

2.2 시공시의 문제점

터널 시공에 있어서의 계측은 일반 사회에서 화재나 자동차 보험을 들어놓는 것과 같은 개념이다. 물론, 계측을 더 적극적으로 활용하면 공사비를 절감하

고 공사기간을 단축시킬 수도 있다. 다음은 터널 시공시 계측의 문제점을 살펴본 것이다.

- (1) 터널계측은 터널시공의 연속성을 저해하는 장애물로 인식되고 있는 실정이다. 터널시공의 주공정이 매우 조급하게 짜여져 있는 관계로 계측기 설치와 측정이 시공사의 도움 없이 별도로 끼여들 틈을 주지 않고 있다. 따라서, 계측기 설치시기가 지연되고, 초기치 측정시점을 놓치게 되어 정확한 초기거동을 파악할 수 없는 경우가 대부분이다.
- (2) 기존의 2차원적인 터널계측의 가장 큰 문제점은 터널 붕괴와 붕락이 가장 빈번하게 발생하는 막장면의 안정에 관한 사전 예보기능을 제공하지 못하고, 단지 터널의 1차 지보설치가 완료된 배후지역의 사후정보만 제공하기 때문에 공사비 절감 및 공사기간단축에 전혀 기여를 하지 못한다는 데 있다. 터널은 1차 지보재 설치가 완료되면 대부분 안정화 단계로 들어가기 때문에 이 구간에서의 계측은 이미 안정화된 상태의 확인 절차 밖에는 더 이상의 효과는 기대할 수 없게 된다.
- (3) 터널계측이 매일 이루어지고는 있지만, 그 결과를 종합적으로 분석할 수 있는 기술자가 현장에 상주하지 않기 때문에 즉각적인 조치가 불가능하다. 터널의 거동은 시간에 따라 변화하기 때문에 대책을 적절한 시기에 강구하지 못하고 실기하였을 경우에는 더 많은 복구비용이 소요되는 경우가 많다. 따라서, 당일의 계측결과는 당일 내로 분석되어 시공에 반영될 수 있는 체계와 조직이 구비되어야 한다.
- (4) 터널 현장은 작업공간이 협소하고 어둡기 때문에 이동장비나 인부 등에 의해서 설치된 계측기가 손실 또는 망실되는 경우가 많다. 손·망실된 계측기는 즉시 복구하여 지속적인 계측이 이루어지도록 하여야 함에도 불구하고, 책임소재를 전가하는 이유 등으로 인하여 복구시기가 지연되거나 아예 배제시켜 버리는

경우까지도 있다.

- (5) 터널 구조물은 중요한 기간산업 시설물의 일부이기 때문에 구조물이 완공된 후에도 지속적인 유지관리 계획이 이루어져야 한다. 일부 중요한 터널 구조물에는 유지관리 계획이 적용되고 있지만, 구조물이 완공된 이후에 별도로 계획을 세워 설치 운영하기 때문에 공사중의 거동 이력정보를 전혀 알지 못한 상태에서 이루어지고 있는 실정이다. 따라서, 유지관리 계획은 공사 단계에서부터 계획하여 공사 중 문제가 되었던 구간에 대해서 추가의 장기 계획 자재를 설치하여 향후 유지관리 계획시까지 이용할 수 있도록 계획되어야 한다.
- (6) NATM 터널은 그 기본원리상 지반정보와 구조물 거동정보를 가장 많이 확보하고 있는 계획기술자에 의해서 탄력적으로 굴착과 보강이 이루어져야 하기 때문에 계획기술자의 시공참여 기회가 많아져야 한다. 이렇게 되기 위해서는, 현행의 시공사 산하에 위치한 계획업무를 발주처 직속 하에 두고 현장의 모든 공사업무를 관리할 수 있는 권한이 부여될 수 있도록 제도가 개선되어야 한다.
- (7) 현장에는 아직도 20~30년 전부터 사용하고 있는 기계식 또는 인력식 계획장비를 사용하고 있는데, 최근에 많이 개발된 전자기식 또는 광파식 장비로 개선하여 정확도 및 정밀도를 높이고 측정 및 분석 업무의 환경을 개선하도록 노력하여야 한다.

3. 계획계획

3.1 개요

계획계획은 사전조사 및 해석결과를 기초로 하여 시공중 터널의 거동을 파악할 수 있도록 수립하여야 하며, 특히 계획의 목적, 터널의 용도, 규모, 원지반 조건, 주변환경, 그리고 시공방법 등을 충분히 고려

하여야 한다. 일반적인 계획계획 절차는 그림1의 흐름도와 같다.

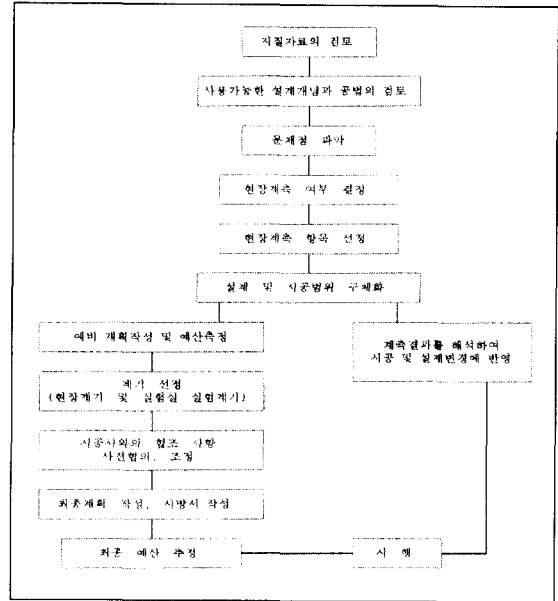


그림1. 계획계획 절차 흐름도

3.2 계획항목의 선정

터널 계획항목의 선정에 있어서는 터널굴착 후 터널의 안정성과 터널굴착이 주변환경에 미치는 영향을 평가할 수 있는 항목을 선정하여야 한다.

시공중 터널 계획은 일상관리계획(A계획)과 대표단면계획(B계획)으로 구분된다. 일상관리계획은 전 구간에서 시행되는 주로 터널 시공안정성 확인을 위한 계획이며, 대표단면계획은 대표적 지반조건이나 초기 굴착구간에서의 소성영역의 분포 및 지보재(Shotcrete, Rockbolt)의 응력 등의 거동을 파악하여 지보재의 안정성과 설계타당성 및 미 굴착구간의 설계 및 시공법 개선을 위한 계획이다.

표 1 및 2에서는 일상관리계획과 대표단면계획 항목을 나열하고 있다.

표 1 일상관리계측(A계측) 항목

계측항목	조사항목
경내 관측 조사	막장의 자립성, 암질, 단층파쇄대, 구조 변질대의 정상 파악 지보공의 변상 파악 설계시 지반구분의 평가
내공 변위 측정	변위량, 변위속도, 변위수렴상태를 파악하여 주변지반의 안정성 확인 1차 지보에 대한 설계 및 시공의 타당성 파악 2차 복공의 실시 시기 등을 판단
천단 침하 측정	터널 천장부 지반 및 지보재의 안정성 판단
지표 침하 측정	터널 굴착에 따른 지표침하 영향파악 주변 구조물의 안전도 분석, 침하방지대책 수립 및 효과 파악
R/B 인발시험	Rockbolt의 인발내력, 정착상태 판단

표 2 대표단면계측(B계측) 항목

계측항목	조사항목
Shotcrete 응력측정	Shotcrete의 배면토포입 및 축방향응력 측정
Rockbolt 축력측정	Rockbolt에 작용하는 축력을 심도별로 측정 Rockbolt의 지보효과, 유효설계길이 판단
지중 침하 측정 (지침 설치)	심도별 지중수직변위량을 측정, 터널이완영역의 범위 등을 판단 지중매설물 안전성 파악
지중 변위 측정 (터널 내부 설치)	터널 주변의 이완영역의 범위, 지반 안정도 판단 Rockbolt 길이의 타당성 등을 판단
지중수렴변위측정	수평방향의 지반이완영역 및 절리 경사 방향 등을 판단
지하수위 측정	굴착에 따른 지하수위 변동 파악(차수 Grouting 효과 등)
간극수압 측정	지중에 작용하는 수압측정(차수 Grouting 주입 압력 판단)

3.3 계측위치 및 축선계획

계측위치는 구조물의 구조적·재료적 취약부와 구조물 및 지반의 거동특성을 사전에 조사·분석하여 과도한 응력 및 변위 발생 부위와 외력 및 내부응력 변화에 따른 영향 범위를 명확하게 파악한 뒤, 계측 목적을 고려하여 선정하는 것이 바람직하다. 일반적으로, 계측위치는 중요한 지점, 예를 들어, 교차로 부근, 중요한 구조물 부근, 지반상태와 설계가 변화되는 지점, 변단면 지점, 그리고 과도한 변위가 우려되는 지점 등에 선정하는 것이 보통이나 공사현장이 광범위한 경우에는 전체 시공현장의 대표적인 장소를

시험구간으로 선정하고 집중적으로 계측, 관리하여 그 결과를 잔여구간에도 적용할 수 있도록 하는 것이 바람직하다.

지반과 지보재의 거동을 종합적으로 파악하고, 계측의 신뢰성 향상을 도모하기 위해서는 각 계측항목 상호간의 연관성을 분석하는 것이 중요하다. 이를 위해서는, 터널의 용도, 규모, 지반조건, 시공방법, 그리고 시공구간의 계측결과 등 터널의 여러 상황을 고려하고 계측목적에 부합하도록 터널의 종단 및 횡단 방향별로 계측위치 및 배치간격을 적절히 선정하여야 한다.

표 3. 일반계측 계획

계측항목	계측간격	배 치	빈도				설치시기	
			-20일 (-3D)	0-15일 (0-2D)	15일-30일 (2D-3D)	30일- (3D이상)		
일상 관리 계측 (A계측)	경내관찰 조사	전연장	각막장	-	1회/일	1회/일	1회/일	-
	지표침하 측정	20~40m	터널상부 3~5개소	1회/일	1회/일	1회/2일	1회/주	터널전방 3D 이상
	내공변위 측정	20~40m	터널상부 단면 및 하부단면	-	1-2회/일	1회/2일	1회/주	막장후방 s/c 타설 후, 굴진전설치 및 초기치 측정
	천단침하 측정	20~40m	천단부	-	1-2회/일	1회/2일	1회/주	
	Rockbolt 인발시험	50본당 1본 정도	1단면 5본	-	-	-	-	정착효과 발생 후 즉시
대표 단면 계측 (B계측)	지중침하 측정	200~300m	터널상부 3~5개소	1회/일	1회/일	1회/2일	1회/주	터널전방 3D 이상
	지중수평 변위측정	200~300m	터널상부 양측	1회/일	1회/일	1회/2일	1회/주	터널전방 3D 이상
	Shotcrete 용력측정	200~300m	접선, 반경방향의 3~5개소	-	1회/일	1회/2일	1회/주	막장후방 굴진 전 설치 및 초기치 측정
	지중변위 측정	200~300m	3~5개소/단면 (3~5개소의 다른 심도)	-	1회/일	1회/2일	1회/주	
	Rockbolt 용력측정	200~300m	3~5개소/단면 (3~5점이상/심도)	-	1회/일	1회/2일	1회/주	

※ 빈도란중 ()은 계측기 설치 위치로부터 터널 막장까지 거리임(D : 터널직경)

그림 2는 터널계측의 표준단면도를 나타낸 것이고, 그림 3은 내공변위 및 천단침하 측정의 측선배치 예를 나타냈으며, 그림 4와 5는 지표침하의 측선배치와 측정구간 설정의 예를 나타낸 것이다.

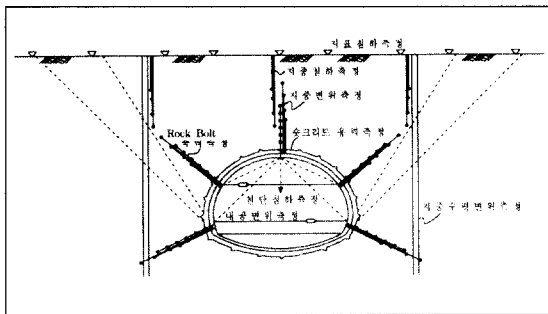


그림 2. 터널계측 표준단면도

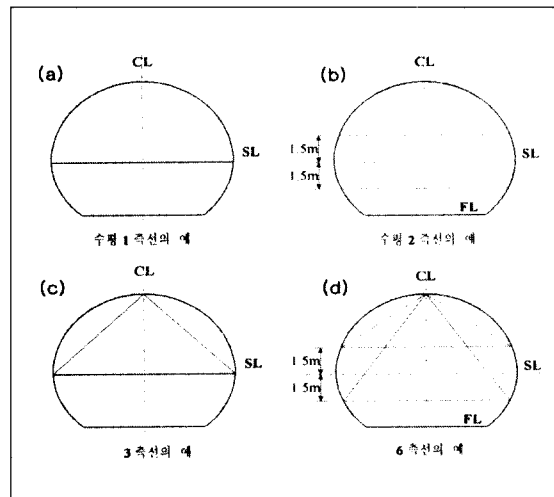


그림 3. 내공변위 및 천단침하 측정의 측선배치 예(복선터널의 경우)

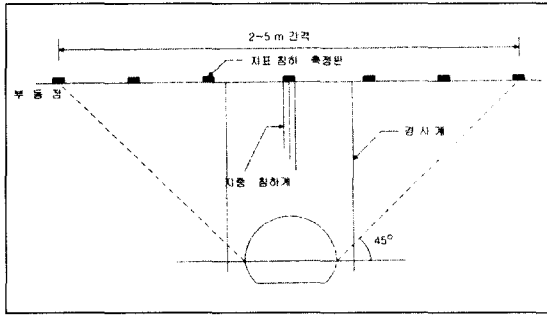


그림 4. 지표침하 측정대상 및 지중침하 측정의 측정배치 예

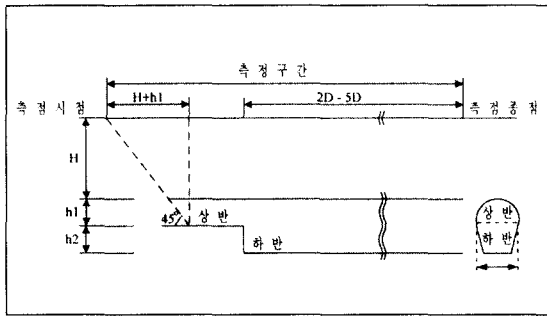


그림 5. 지표침하의 측정구간(종단방향)

3.4 터널계측 관리

터널계측 관리는 터널 굴착중 획득한 관찰·계측 결과를 계측관리 기준과 비교하여 주변 구조물 및 터널의 장·단기적 안전을 예측·평가하고, 지반 보강 및 설계·시공법의 타당성을 확보하기 위한 수단으로 정의할 수 있다.

(1) 계측관리 기준치의 설정

근접구조물을 포함한 지반의 안정을 위해 변위 허용량을 설정하여 변위속도, 변위 가속도, 허용 가속도, 그리고 허용 응력도 등의 기준치를 설정하여야 하며, 경우에 따라서는 작업 실행기준, 주의기준, 그리고 정지기준 등을 정할 필요가 있다. 미국 토목학회(ASCE) 관리기준은 다음과 같다.

표 4. 천단침하의 관리기준치(터널 반경:5.00m)

(단위: cm)

지반 레벨	A(경암)	B(연암)	C(풍화암)
I	0.3~0.5	0.5~1	1~3
II	1~1.5	1.5~4	4~9.5
III	3~4	4~11	11~27

표 5. ASCE 관리기준 및 처리방안

주의 Level	관리기준	처치
I	내공변위의 속도가 막장에서 5mm/day 이상이거나 슛크리트에 부분적인 Crack이 발생한다. 지하수가 침투한다.	책임기술자에게 보고한다.
II	내공변위의 속도가 막장에서 10mm/day 및 후방에서 5mm/day 이상이며 슛크리트에 상당한 Crack이 발생한다. 지하수의 침투 있음.	책임기술자에 보고함과 동시에 지보공, Rock Bolt, Shotcrete 를 추가 시공한다.
III	변위가 가속된다. Crack이나 지하수의 침투가 Level 2를 더욱더 넘는다.	책임기술자에게 보고한다. 굴착을 정지하고, 잠정적으로 강지보공과 긴 길이의 Rock Bolt를 시공한다.

- 주의레벨 I : 지반은 안정해 있지만 이완영역의 발생한계에 달하기 때문에 굴착에 약간의 주의를 요함.
- 주의레벨 II : 이완 영역이 발생하는 것으로 간주함
- 주의레벨 III : 명확하게 이완영역이 발생하기 때문에 안전의 문제와 시공의 곤란이 예상되므로 굴착방법, 지보공법 등의 변경을 요함

3.5 계측결과 역해석에의 적용

시공중에는 현장 계측 결과를 이용한 역해석(Back Analysis)을 수행한다. 역해석은 설계 해석과 역해석 과정을 보여주는 그림6에서 보이는 바와 같이 설계 해석의 역순으로 수행되며 계측된 응력 및 변위를 이용하여 지반의 역학적 특성치를 재평가하는데 적용된다. 또한, 재평가된 지반의 특성치를 이용하여 당초 설계의 타당성을 검토하고, 필요한 경우 지보패턴 및 굴착공법을 조정하는 과정을 거친다.

역해석에 적용되는 수치 기법의 종류는 다음과 같다.

- (1) 역 정식화법(Inverse Formulation Method)
계측 변위를 기지량으로 하여 통상의 구조해석을 역으로 정식화하여, 초기응력, 하중 및 재료정수를 얻는 방법으로 비선형 문제에는 적용하기가 어렵다.
- (2) 직접 정식화법(Direct Formulation Method)
계측 변위를 기지량으로 하여 아래와 같은 오차함수가 최소가 되도록 초기응력이나 재료정수를 Simplex 법 등의 최적화 기법을 이용하여 반복계산하여 결정하는 방법으로 비선형 문제에도 적용할 수 있으나 연산시간이 많이 소요된다.

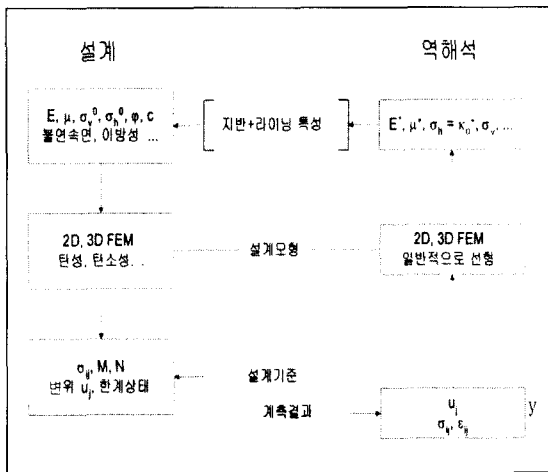


그림6. 설계 및 역해석 과정

4. 3 차원 계측

4.1 개요

기존에 적용해오던 2차원적인 재래식 터널계측방법에 의해서는 횡단면 방향의 상대변위를 기계식 또는 인력에 의해서 측정하고 있기 때문에 초기치 측정의 한계성, 측정방법간의 불일치, 즉각적인 Feed Back의 곤란, 막장면 또는 막장 전방에 대한 예측기능의 부재 등으로 인하여 터널 거동을 3차원적으로 정밀하게 파악하는데는 한계가 있었다. 따라서, NATM의 원조격인 오스트리아에서는 터널계측에

대한 연구를 오랜 기간동안 수행하여 재래식 계측을 대부분 폐기하고, 3차원 계측시스템으로 전환하여 경제적이고 안전한 터널을 시공하고 있다.

4. 2 터널거동의 이론적 배경

(1) 아칭효과

터널을 굴착하기 이전의 자연지반은 오랜시간에 걸쳐 정역학적 평형상태(Static Equilibrium State)를 유지하고있다. 이러한 안정된 지반에 터널을 굴착하게되면 새로운 평형을 찾기위한 응력의 재배치가 이루어진다. 이때, 지중응력은 부등변위가 상대적으로 작게 발생하는 곳으로 전이되는 특성을 갖고 있으므로, 변위발생이 큰 터널 굴착면 보다는 상대적으로 변위가 작은 터널주변의 지반으로 응력이 집중되기 때문에 굴착된 터널은 안정상태를 유지할 수 있게된다. 이와같이, 터널굴착시 굴착면 주변으로 응력이 전이되는 현상을 아칭효과(Arching Effect)라 한다. 이때, 경암반에서의 터널 굴착시와같이 주변 암반의 강성이 커서 추가로 전이되는 응력을 충분히 지탱할 수 있을 경우에는, 굴착면 주변의 경암반층에 바로 아칭현상이 발생되나, 연암 또는 풍화암층의 경우에는, 굴착면 주변의 일정거리에 소성영역이 형성되고, 그 배면에 아칭현상이 발생된다. 그러나, 토사지반에서는 굴착면 주변의 지반이 연약하여 추가로 전이되는 응력을 견디지 못하기 때문에 아칭이 발생할 수 없으며, 터널을 굴진하기 위해서는 추가의 지반보강이나 지보재보강이 필요하다.

아칭효과(하중전이 효과)는 그림7과 8에 나타낸 바와 같이, 3차원 상으로 터널의 종방향과 횡방향으로 발생하게 된다

(2) 불연속면에서의 하중전이 효과

Schubert등(1994)은 그림9와 같이 막장 전방에 파쇄대가 존재할 때, 축방향 하중전이 효과에 의해서 종방향 변위가 달라질 수 있음을 보여주고 있다. 터널 막장 전방에 파쇄대와 같은 불연속면이 존재할 시

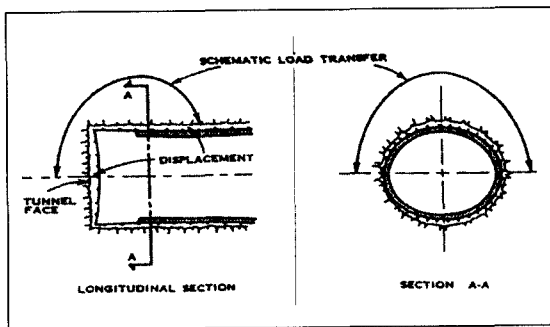


그림 7. 터널의 횡, 축방향 하중전이 효과

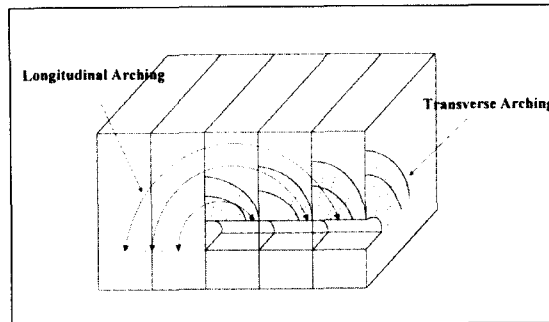


그림 8. 터널굴착에 따른 응력해방 및 변위발생 양상

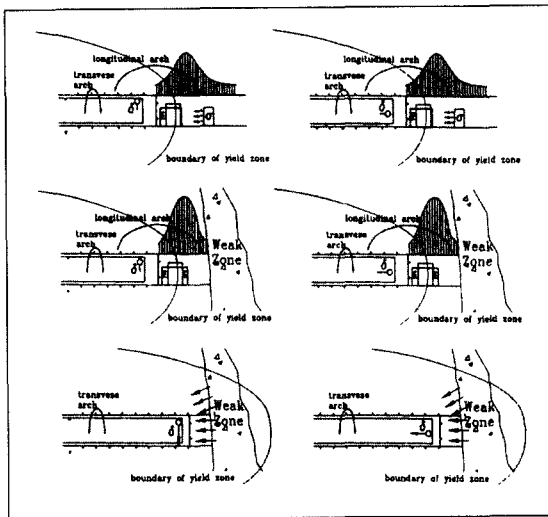


그림 9. 불연속면에 접근시의 아칭효과에 따른 천단부의 수직·종방향 수평 변위의 변화(Schubert, 1996)

에 하중전이 효과에 의해 터널 막장의 바로 앞에는 응력이 증가된다. 이로 인해서, 터널의 천단부에서 수직 변위가 증가하며, 터널 막장이 불연속면에 더욱 근접할 시에는 하중전이 효과가 매우 작게 발휘되어 불연속면을 구속하는 하중이 매우 작아지게 된다. 따라서, 불연속면의 지반 특성치가 상대적으로 터널 주위의 암반보다 작아서 하중변화에 대하여 거동이 커지게 되며, 터널의 천단부에서 수직 변위가 더욱 크게 증가하게 된다. 종방향 변위의 양상도 이와 비슷하여서, 균질한 암반에서의 터널 막장 전방의 응력은 축방향 하중전이 효과에 의해 증가하게 되고, 이 증가된 응력에 의해 막장 전방에서 터널 안쪽으로 축방

향 변위가 발생하게 된다. 그러나, 막장 전방에 불연속면이 존재하면 응력이 집중되어 종방향 변위도 커진다. 그리하여, 수직 변위의 변화량에 비해 종방향 변위의 변화량이 더욱 뚜렷하게 나타난다. 이와 같은 원리로 인하여, 터널 막장면의 종방향 변위로부터 불연속면 존재를 확인할 수 있는 강력한 수단이 될 수 있음을 보여준다.

4.3 3차원 변위계측 소개

공학 기술과 전자 기술의 발달에 따라 그림 10과 같이 터널 내 계측기술도 광파기를 이용하여 얻은 계측자료를 컴퓨터에 의해 처리함으로써 정확하고 신속하게 계측결과를 얻을 수 있게 되었다(Rebensteiner, 1996). 이 과정을 보면, 현장에서 광파기로 계측한 결과를 PCMCIA Card에 자동으로 저장하고, 이를 현장 사무실에서 PC에 입력한 후 계측 Data로부터 3차원 절대 내공 변위를 계산해 낸다. 이 결과를 모뎀을 이용하여 현장이 아닌 다른 곳에 있는 기술자도 변위양상을 해석하여 이 결과를 차후 시공에 적용할 수 있게 한다.

터널의 3차원 계측은 레이저나 근적외선을 이용하여 거리를 측정하게 되는데, 먼저 터널의 변위가 종식되었다고 생각하는 지점을 선택(터널 갭문 근처)하여 여러 개의 기준점(Reference Point)을 잡아두고, 측정하고자 하는 지점에 반사표적(그림 11 참조)을 설치한 후 임의의 위치에 광파기를 세운다. 기준점에 광파를 조사하여 기준점의 절대 좌표로부터 광

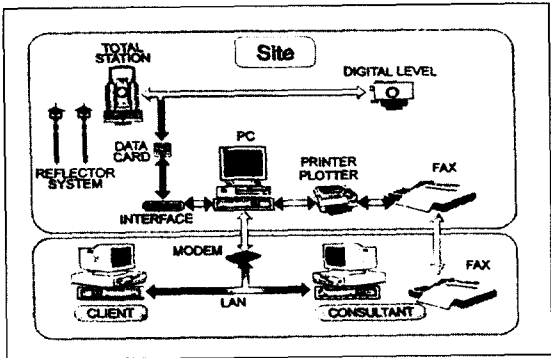


그림 10. 계측 자료 처리 과정(Rabensteiner, K., 1996)

파기의 절대좌표를 계산하고, 반사표적에 근적외선 광파를 조사(照射)한 후 반사 표적의 반사광을 받아서 조사광과 반사광의 위상차이로 거리를 측정한다. 계측기 내에서 측정된 수평각, 연직각을 이용하여 각 측정의 3차원 절대좌표를 계산할 수 있다.

광파기에 의한 측정 범위는 80~100m 정도이다. 터널 굴진이 얼마 이루어지지 않은 갱문 근처에서는 터널 외부에 기준점을 잡고 광파기에 의해 터널 외부에서 측정이 가능하다(그림 12 참조). 그러나, 터널이 굴진 함에 따라 타겟의 위치가 갱문에서 멀리 위치하게 되어 광파기의 측정 범위를 벗어나게 되고 계측 오차가 커지게 된다. 이에 따라, 막장에서 멀리 떨어진 내부의 더 이상 변위가 발생하지 않는 지점을 기준점으로 다시 설정하여 이를 기준으로 막장 근처의 변위를 측정하게 된다(그림 13 참조).

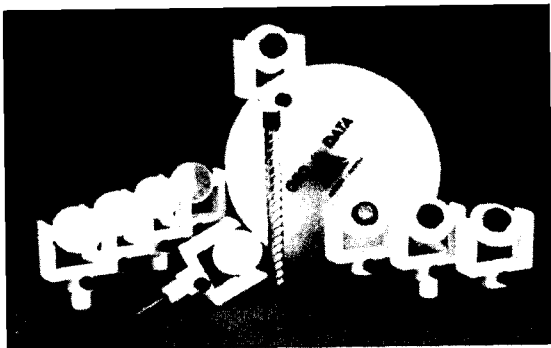


그림 11. 계측 반사표적 (Bireflex 와 Prism)(Rabensteiner, K., 1996)

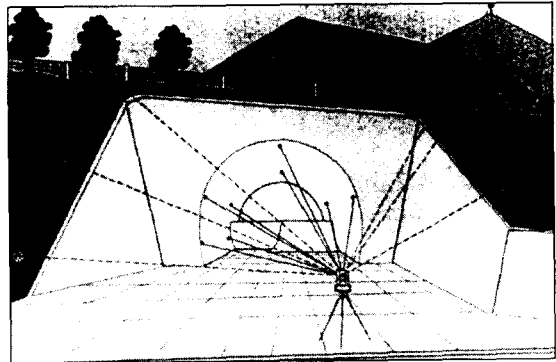


그림 12. 3차원 계측 모식도 (터널 외부에 기준점 위치) (Rabensteiner, K., 1996)

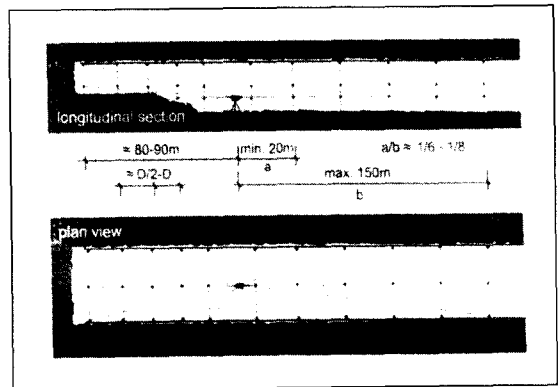


그림 13. 3차원 계측 모식도 (터널 내부에 기준점 위치) (Rabensteiner, K., 1996)

4.4 3차원 변위계측치의 해석기법

(1) 터널 천단부의 종 변위/수직 변위 비에 의한 막장 전방의 지반 변화 예측

Schubert 등(1996)은 터널 천단부의 절대 변위 측정결과로부터 새로운 계측 결과의 활용 기법을 제시하였다. 그림 14에서, L값은 터널의 천단부(Crown)에서 터널의 종방향 변위를 말하고, C값은 터널 내부로의 연직 변위(천단 침하)를 말한다. 각각의 변위를 3차원 절대 내공 변위의 계측을 통하여 구할 수 있으며, 터널의 종방향 하중전이 효과에 의해 변하는 터널 천단의 L/C 비에 의해서 터널 진행에 따른 막장 전방의 지반 상태 변화를 알 수 있다.

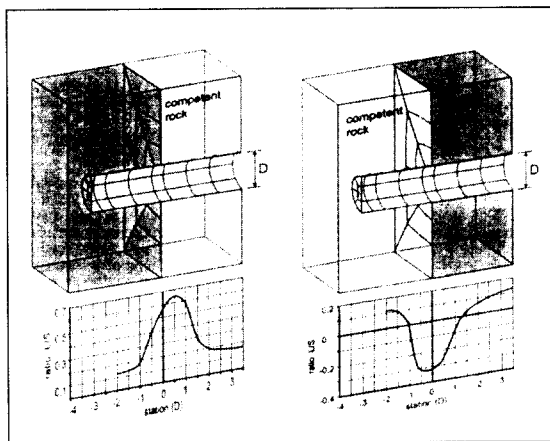


그림14. 불연속면에 근접할 시에 계산된 L/C 비의 경향 (Schubert, 1996)

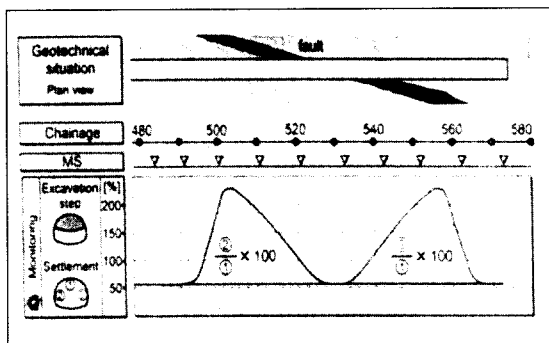


그림15. 파쇄대층의 접근에 따른 측벽부와 천단부 변위 비의 차이 (Schubert, 1996)

(2) 터널 측벽부 변위/천단부 변위 비에 따른 막장 전방의 지반 변화 예측

터널 측벽부(Spring Line)에서의 터널 내부로의 수평 변위와 터널 천단(Crown)에서의 수직 변위 비는 불연속면뿐만 아니라 지반 조건의 변화에 따라서 위의 그림 15와 같이 변화함을 알 수 있다. 이는 터널을 굴착함에 따라서 파쇄대 층이 터널에 접근해 오에 따라 생기는 횡방향 아칭효과(Transverse Arching Effect)에 의해서 측벽부의 횡방향 변위가 증가하기 때문이다.

그림 16은 터널내부의 변위량을 Plot한 것이고, 이로써 터널 주변의 지층 변화를 파악할 수 있다.

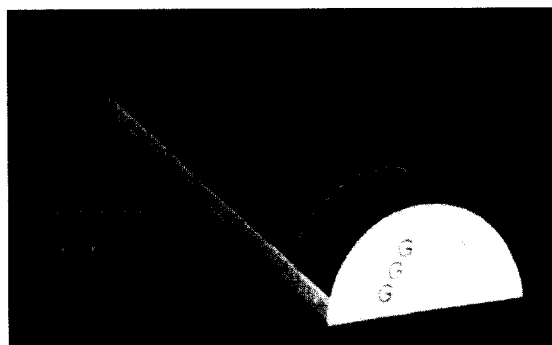


그림16. 터널 내부의 등변위도 (Schubert, 1996)

(3) 영향선과 경향선에 의한 막장 전방의 지반 변화 예측

터널의 천단 침하량을 같은 시간에 각기 다른 측정지점에서 측정된 변위를 하나의 선으로 연결한 것을 영향선(Influence Line)이라고 정의하고, 영향선의 시작점에서 같은 거리만큼 떨어진 값들을 연결한 선을 경향선(Trend Line)이라고 정의할 때, 그림 17과 같이 영향선과 경향선을 이용하면 터널의 막장면 전방에 파쇄대 층이 접근하고 있음을 파악할 수 있다.

(4) 평사 투영법을 이용한 터널 막장 전방의 지반 변화 예측

3차원 상의 절리를 2차원 평면에 묘사하기 위하여 많이 사용되는 평사 투영법을 이용하면 변위 벡터로부터 터널 막장 전방의 지반 변화를 예측할 수 있다.

그림 18에서 보듯이, 터널의 천단부에서 변위의 방향이 연암과 경암의 경계면에 근접할수록 경계면 쪽으로 움직이고 있다. 이는 터널 굴착에 따른 종방향 하중전이 효과에 의해서 L/C 비가 작아지기 때문이다. 즉, 터널 막장 전방 경암에 응력이 집중되고 막장면에서는 작은 구속응력에 의해 터널 굴진 방향으로의 변위(종방향 변위)가 발생하기 때문이다. 또한, 좌·우측 측벽부에서의 내공 변위를 보면, 우측 벽의 경우 아칭에 의해 강성이 큰 쪽으로 응력이 집중되어 천단과 비슷한 양상을 띠게되고 따라서, 평사 투영된

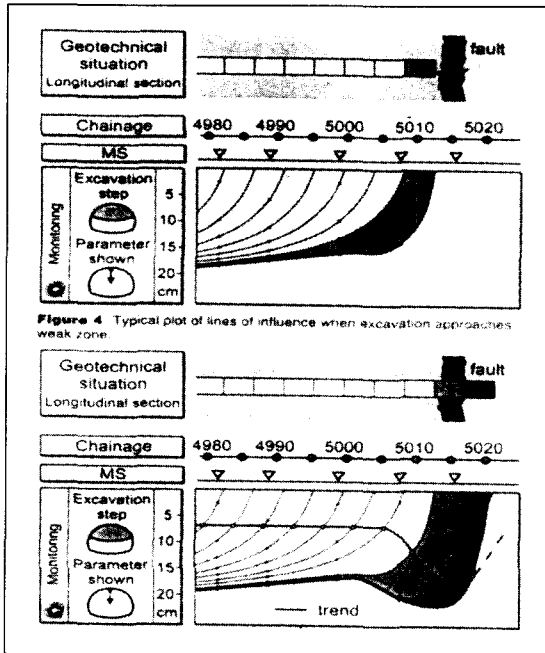


그림 17. 파쇄대층에 접근시와 관통 후의 영향선과 경향선 (Schubert, 1996)

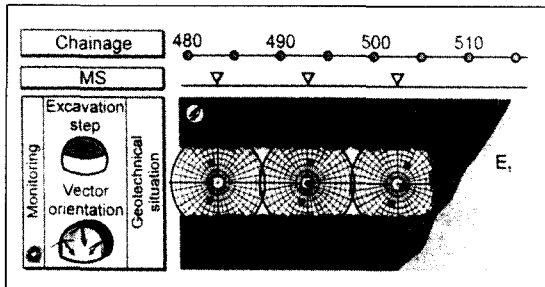


그림 18. 평사 투영법을 이용한 천단부와 측벽부의 변위 벡터 (Schubert, 1996)

그림에서 우측 벽의 변위가 투영된 좌측의 점이 굴진 방향으로 이동하게 된다.

그림 19는 터널의 천단부와 양 측벽부에서 측정된 변위를 평사투영도에 투영하는 원리를 설명한 것이다. 그림에서 1은 터널의 천단부(Crown)의 변위를 나타내는 것이고, 2, 3은 각각 좌·우측 측벽부(Side Wall)에서의 변위이다. 이를 이용하면 터널에서 측정된 3차원 내공 변위를 2차원 상에 나타낼 수 있다.

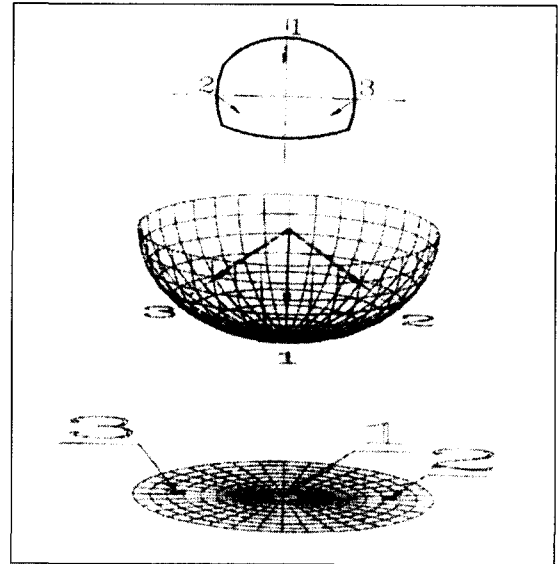


그림 19. 평사투영법을 이용한 3차원 내공변위 투영방법 (Schubert, 1996)

5. 결론

NATM 터널 시공에서 현장계측은 아무리 강조하여도 지나치지 않는다. NATM의 기본 원리상 터널 시공이 현장계측결과에 의해서 탄력적으로 지보패턴 변경과 보강대책이 이루어져야 한다. 그럼에도 불구하고, 현재 국내의 터널 현장에서 현장계측이 제 구실을 다하고 있지 못하고 있는 것은 계측된 결과가 터널의 안정성확인, 공사비 절감 및 공사기간 단축과 같은 시공관리 및 안전관리에 전혀 도움을 주지 못하고 있기 때문이다. 터널 선진국에서는 이미 이러한 문제점을 극복하기 위하여 많은 연구를 거쳐 3차원 계측 시스템을 개발하여 현장에 성공적으로 적용하고 있다. 따라서, 국내의 터널 현장에서도 계측이 터널의 시공관리와 안전관리의 수단으로 제자리를 찾기 위해서는 재래식 계측시스템을 과감히 폐기하고 3차원 계측 시스템의 도입이 하루빨리 이루어져야 하겠다.

터널계측이 본래의 취지대로 실질적인 시공관리와

안전관리를 위한 필수 불가결한 항목이 되기 위해서는 지속적인 계측장비 및 측정기술, 그리고 해석기법의 개발 등을 통하여 새롭게 전환될 필요가 있다. 한편, 기술의 개발이나 도입에 못지 않게 중요한 문제점중의 하나는, 현재 시공사가 발주하는 계측의 도급 관행이 개선되어 발주처가 직접 발주하여 지속 하에 두는 제도개선도 아울러 이루어져야 한다.

참고문헌

1. 이인모, 손영진, 박광준, 강기돈(1997), "터널막장 전방의 지반변화 예측에 관한 연구", 한국지반공학회지, '97 봄 학술발표회 논문집, pp.103-112
2. 이인모, 박광준, 강기돈(1997), "널막장 전방의 지하공동(폐광)예측 기법 개발" 한국지반공학회지, '97 가을 학술 발표회 논문집, pp.166-170
3. Rabensteiner, K.,(1996), "Advanced Tunnel Surveying and Monitoring", Felsbau, Vol., Nr.2
4. Schubert, W. and Budil, A, (1996), "The Importance of Longitudinal Deformation in Tunnel Excavation", 8th International Congress on Rock Mechanics, Vol.3
5. Schweiger, H., and Beer, G., (1996) "Numerical Simulation in Tunnelling", Felsbau, Vol. Nr.2
6. Sulem. J., Panet. M., and Guenot. A., (1987), "An Analytical Solution for Time-dependent Displacements in a Circular Tunnel", Int J. Rock Mech. Min. Sci, Vol., 24, No.3 pp. 155-164

터널 기술 위원회 원고모집 안내

터널 기술위원회(위원장:이인모)는 오늘 4월 27일(금) 「공사중 터널의 사고 사례 발표회」를 갖기로 하였습니다. 터널의 공사중 사고 사례와 관련한 원고를 모집하오니 회원 여러분의 많은 참여를 바랍니다.

☐ 주제 : 공사중 터널의 사고 사례

☐ 초록 마감 : 2001년 4월 1일

☐ 원고 접수 마감 : 2001년 4월 14일(토)

☐ 일자 : 2001년 4월 27일(금)

☐ 장소 : 고려대학교 공과대학 강당

☐ 문의 및 접수처

박광준(대정컨설팅)

tel : 02-449-8285 e-mail : cdaejung@unitel.co.kr