

## 도심지 천부 터널의 변형거동제어를 위한 계측시스템 적용연구

김 태영<sup>\*1</sup>, 장 정범<sup>\*1</sup>, 김 용일<sup>\*1</sup>, 김 영근<sup>\*2</sup>

\*1 : (주) 대우 건설기술연구소, 주임연구원

\*2 : (주) 대우 건설기술연구소, 선임연구원, 공학박사

### 1. 서론

산업발전과 국민경제의 활성화로 인하여 차량이 급격히 증가함에 따라 차량으로 인한 소음, 환경공해와 더불어 교통체증 등 부작용적인 요소가 많이 나타나게 되었다. 이에 따라 대중교통수단을 지하철로 대체하자는 요구가 증가하게 되었고 이와 더불어 지하공간에 대한 관심이 높아지게 되었다.

현재 서울시에 건설되고 있는 지하철 터널의 경우 도심지에 위치하고 있는 관계로 지표에 건물이 밀집되어 있는 경우가 많으며 또한, 터널 천단부와 건물 기초하부가 매우 인접하여 있어 터널 시공시 주변 건물의 안정성 확보 및 공사 관련 민원을 최소화하기 위하여 세심한 계측관리가 절실히 요구되고 있다. 이에 본 연구에서는 본사에서 시공, 계측한 바 있는 지하철 5-45 공구의 계측시스템에 대하여 소개하고자 한다.

### 2. 현장개요

#### 2.1 공사구간

본 공사는 서울시 강동구 길동과 천호동을 연결하는 지하철 5호선 노선중 길동 사거리에서 북서 방향으로 근접하여 통과하며, 터널 노선을 따라 복합상가건물, 오피스빌딩, 병원 등 상가 및 주거용 건물이 밀집되어 있다. 특히 동성빌딩과 영안빌딩은 터널 천단부와 건물 기초 하부 사이의 거리가 불과 3 ~ 7 m 정도로 상당히 인접해 있어 터널 시공시 특별히 주의를 요하는 난공사이다. 본 구간 터널 노선에 따른 주변 건물 현황 및 지층 단면을 도시하면 그림 1 과 같다.

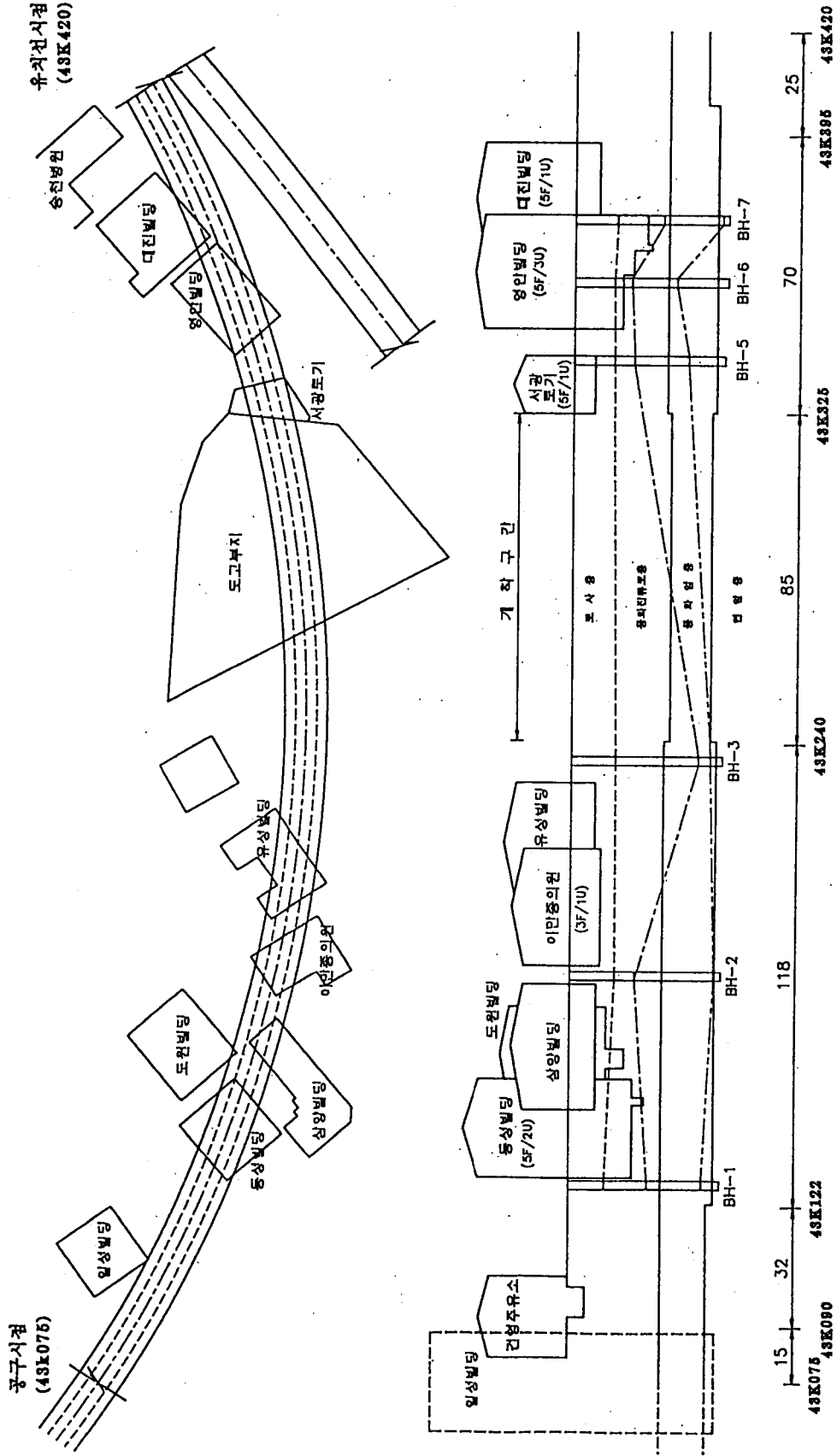


그림 1 주변 건물현황 및 지층단면

## 2.2 지질상황

본 지역의 지질은 선캠브리아기 경기 육괴의 경기 변성암 복합체에 속하는 호상편마암이 주류를 이루고 있으며, 매립토층, 퇴적토층, 풍화대층, 기반암층의 순으로 분포하고 있다

매립토층은 1 ~ 3 m 정도의 두께로 N 치가 4 ~ 9 정도인 대체적으로 느슨한 상태로 분포되고 있다. 매립토층의 하부 퇴적토층은 3.8 ~ 5.2 m 두께로 점성토 층과 자갈 섞인 실트질 모래층으로 나뉘며, 점성토층은 통일분류법으로 ML, CL 로 분류되고, N 치가 7 ~ 25 인 중간 내지 견고한 연경도를 나타낸다. 퇴적토층의 하부 지층인 자갈 섞인 실트질 모래층은 통일 분류법으로 SP, SM, SG, GM 등으로 분류되며 N 치가 20 ~ 25 정도인 중간 내지 매우 조밀한 상대 밀도를 나타내고 있다.

풍화대층은 차별 풍화작용에 의해 위치에 따라 출현 심도 및 지층 두께에 많은 차이가 있으며, 층 두께는 8 m ~ 17 m 정도로 풍화토층과 풍화암층으로 구분된다. 풍화토층은 통일 분류법에 따라 SM 으로 분류되고 깊이에 따라 상대밀도는 매우 조밀해지는 경향을 보이며, 풍화암층은 실트 섞인 세립 내지 중립의 모래와 부분적으로 암편이 협재되어 있다. 지반의 팽창성을 검토한 결과 팽창성은 미미하게 나타나 특별한 고려는 불필요하며, 터널은 Invert 부분의 일부를 제외하고 전반적으로 풍화대층을 통과하도록 계획되어 있다.

기반암층은 호상 편마암이 그 주류를 이루고 있으며, 절리의 발달이 매우 심하여 거의 파쇄대로서 TCR 은 50 이하이고, RQD 는 0 을 나타냈다.

본 지층의 공내재하시험 결과 풍화암층의 탄성계수는 2,850 ~ 16,100t/m<sup>2</sup>, 연암층은 12,200 ~ 28,700t/m<sup>2</sup> 의 분포를 나타내고 있다.

## 3. 설계 및 시공

### 3.1 설계개념

본 공사구간은 양호하지 못한 풍화토층 및 풍화암층을 통과하도록 터널이 계획되어 있으며, 터널 상부에 건물이 좁은 간격으로 밀집되어 있고, 터널 굴착시 터널 천단부 상부 지반이 이칭 현상을 발휘할 만큼 충분한 두께로 지층이 분포되어 있지 못한 관계로 지반의 강도를 최대한 발휘시켜 터널 자체의 안정을 유도하는 NATM 공법을 적용하기에는 무리가 있다.

따라서, 본 구간의 터널은 NATM 공법과 재래식 터널 공법을 병용하여 설계하는 복합적인 개념을 적용하였다. 즉, 선진 도갱의 경우는 NATM 공법을 적용하여 터널 좌·우측에 도갱을 굴착하고 측벽 콘크리트를 타설하여 지반의 측방 거동을 제어하며, 동시에 본 터널 상부

Steel Rib의 지지점으로 이용하도록 하였다.

본 터널은 터널 천단부를 중심으로 좌·우 60° 구간에 Pipe Roof를 시공하여 상부 하중을 균일하게 전달할 수 있도록 하고 가장 큰 응력이 발생하는 측벽 상단에 Rockbolt를 타설하여 다소의 Arching을 유도하며, 전단면이 굴착 완료되었을때 Steel Rib 자체만으로 터널 단면의 안정을 확보하도록 설계 되었다. 본 곡선부 터널에 대한 설계 표준 단면 및 지보 패턴은 그림 2 와 같다.

### 3.2 시공

본 곡선부 터널 구간은 건물이 밀집된 상가 지역인 관계로 주변 지반 및 구조물에 영향을 최소화하기 위하여 먼저 좌·우 Silot 터널을 굴착하여 지질 상태 확인 및 지하수를 배수하고 본 터널을 다단으로 분할 굴착하는 Silot 공법을 채택하였다. 굴착 과정은 Silot 터널과 본 터널이 5 m 간격으로 반복적으로 시공되었고, 단계별 시공특성을 살펴보면 다음과 같다.

#### 1) Silot 터널

Silot 터널은 본 터널 좌·우측에 각각 A, B 공구로 나누어 상·하반 분할 굴착을 실시하였다. 건물 밀집지역이므로 기계 굴착으로 Silot 터널 상반을 굴착한 후 하부 가 Invert를 타설하였고, 하반을 순서대로 굴착 시공한 후 Invert 시공시 터널 측벽이 내부로 활동이 일어나지 않도록 연직방향 3.0m 깊이로 Rockbolt를 타입하였다.

재래식 터널개념으로 본 터널 상부하중을 터널 측벽에서 지지하도록 설계되었기 때문에 Silot 터널 하반 시공후 본 터널을 중심으로 좌·우측 Silot 터널 측벽에 CON'C를 타설하고 본 터널 굴착후 Rockbolt를 타입하였다.

#### 2) 본 터널

본 터널 시공은 Silot 터널 시공이 완료된 후 터널 천단부를 중심으로 좌·우 60° 구간에 대하여 터널 상부 상재하중을 분포시키고 터널 시공중 막장 안정성을 확보하기 위하여 Pipe Roof 공법을 적용하였다.

시공된 Pipe 는 길이 15 m, 직경 100 mm 강관으로서 터널 종방향으로 5 m 간격, 상방향 5° 각도로 총 단면당 27 공을 타입, 시공하였으며, Pipe 내·외부는 시멘트 밀크 Grouting을 실시하고 Pipe 와 Pipe 사이에 지반보강 및 차수를 위하여 우레탄 Grouting 을 실시하였다. 터널 S.L. 상부에 Pipe Roof 가 시공,완료되면 본 터널시공에 착수하여 그림 3 에 나타난

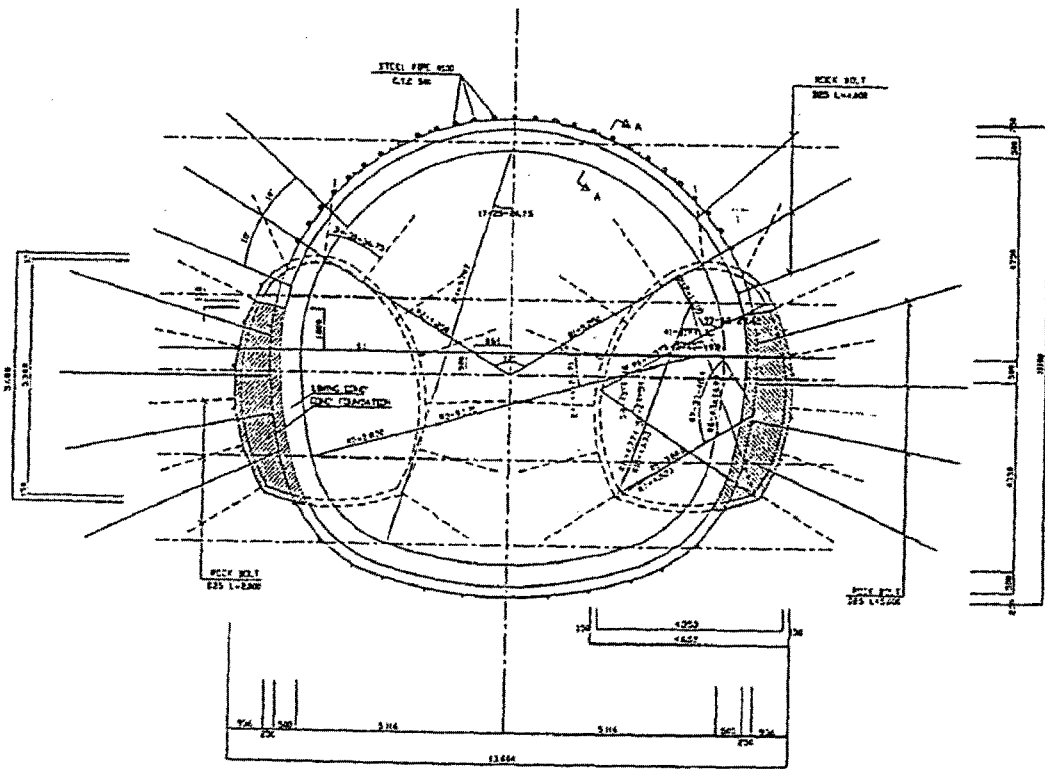


그림 2 터널 표준 지보패턴도

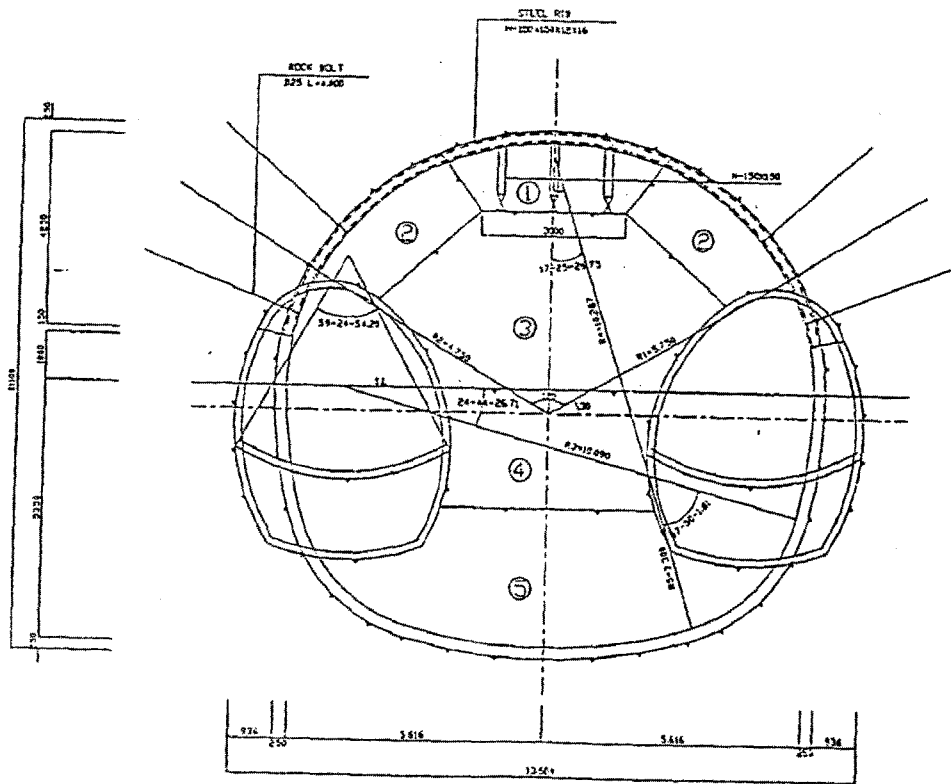


그림 3 굴착공정 순서도

굴착공정 순서도와 같이 먼저 Zone 1 을 굴착하고, Steel Rib 및 Shotcrete를 시공한다. 그 다음 Zone 2 를 굴착하고, 지보재를 시공한 후 Silot 터널 측벽 CON'C 상단과 본 터널 Arch부의 Steel Rib을 연결 Jack을 이용하여 용접 연결하고, Shotcrete를 타설한다. 그 다음 단계로 Zone 3, 4를 차례로 굴착하며, 이와 같은 시공 과정이 반복된다. 한편, 터널 시점부에서는 중벽식 굴착공법을 채택하여 터널시공을 완료하였다.

본 터널 하반 굴착 완료후 Invert 시공시 본 터널 측벽 CON'C가 활동을 일으키지 않도록 측벽 하부 경사방향으로 Nailing을 실시하였으며, 이 작업이 종료되면 Invert 굴착, Shotcrete 타설, Invert CON'C 타설이 반복적으로 수행된다. Invert 시공이 완료되면 Filter 및 방수포를 설치하고, 철근 조립 및 Lining CON'C 를 타설하여 공사를 완료하게 된다.

#### 4. 계측

본 공구 곡선부 터널 Sta. 43K 75 ~ Sta. 43K 420 구간을 대상으로 터널굴착에 따른 안정성 평가 및 안전시공을 목표로 하여 터널 구조체 시공의 안전여부와 함께 터널 상부에 건물이 밀집되어 있는 관계로 과소 설계에 초점을 맞추어 계측계획을 수립하였다. 계획된 계측 항목 및 빈도, 시스템 구성, 관리흐름을 살펴보면 다음과 같다.

##### 1) 구간별 계측 계획

###### ① 일상 계측 (A계측)

구분	Sta. No.	계측 위치	계측 항목	내용
건물 지하 통과	Sta. 43K + 125 ~ + 240	터널 Station 10m 마다 1개소, 총 11개소	갱내관찰조사	일상막장관찰
	Sta. 43K + 325 ~ + 400	터널 Station 10m 마다 1개소, 총 8개소	내공변위 천단침하	5측점/개소 1측점/개소
도고 부지 통과	Sta. 43K + 260 ~ + 325	터널 Station 20m 마다 1개소, 총 4개소	지표침하	7측점/개소

② 터널부 대표계측단면 (B계측)

Sta. No.	계측 항목	수 량	선정 사유
43K + 140	Shotcrete 응력 지중수평변위 지중침하 건물기울기	5측점 2측점 2측점 2측점	동성빌딩 하부 통과
43K + 160	지중침하 건물기울기	2측점 4측점	5층 건물 하부 통과
43K + 190	지중침하 건물기울기	1측점 2측점	이만중의원 건물 하부 통과
43K + 220	지중수평변위 지중침하 건물기울기	2측점 2측점 6측점	유성빌딩 하부 통과
43K + 330	지중침하 건물기울기	1측점 2측점	서광도기 건물 하부 통과
43K + 360	Shotcrete 응력 지중수평변위 지중침하 건물기울기	5측점 2측점 2측점 2측점	영안빌딩 하부 통과

③ 개착부 계측

◇ 토류공법 : H-Pile 토류판 + Strut

◇ 굴착규모 : 15.5m x 22m x 23m (B x L x D)

계측 위치	계측 항목	내용
Sta. 43K + 240 ~ + 262	Strut 축력	48측점

2) 계측 빈도

① 터널부 일상계측 (A계측)

◇ 내공변위 및 천단침하

일 수	0 ~ 7	8 ~ 21일	22일 이후
빈 도	1회 / 일	1회 / 2일	1회 / 3일

◇ 갱내 관찰조사 : - 막장 관찰은 每 막장마다 실시

- 기시공 구간의 관찰 조사도 1회/1일 실시

◇ 지표침하 : 막장 前方 2D ≤ L ≤ 막장 後方 2D ~ 5D에서 1회/1일

D : 터널굴착幅, L : 축점과 막장의 거리

◇ Rockbolt 인발시험 : Rockbolt 설치, 충전재 경화후 인발시험 실시

② 터널부 대표계측단면 (B계측)

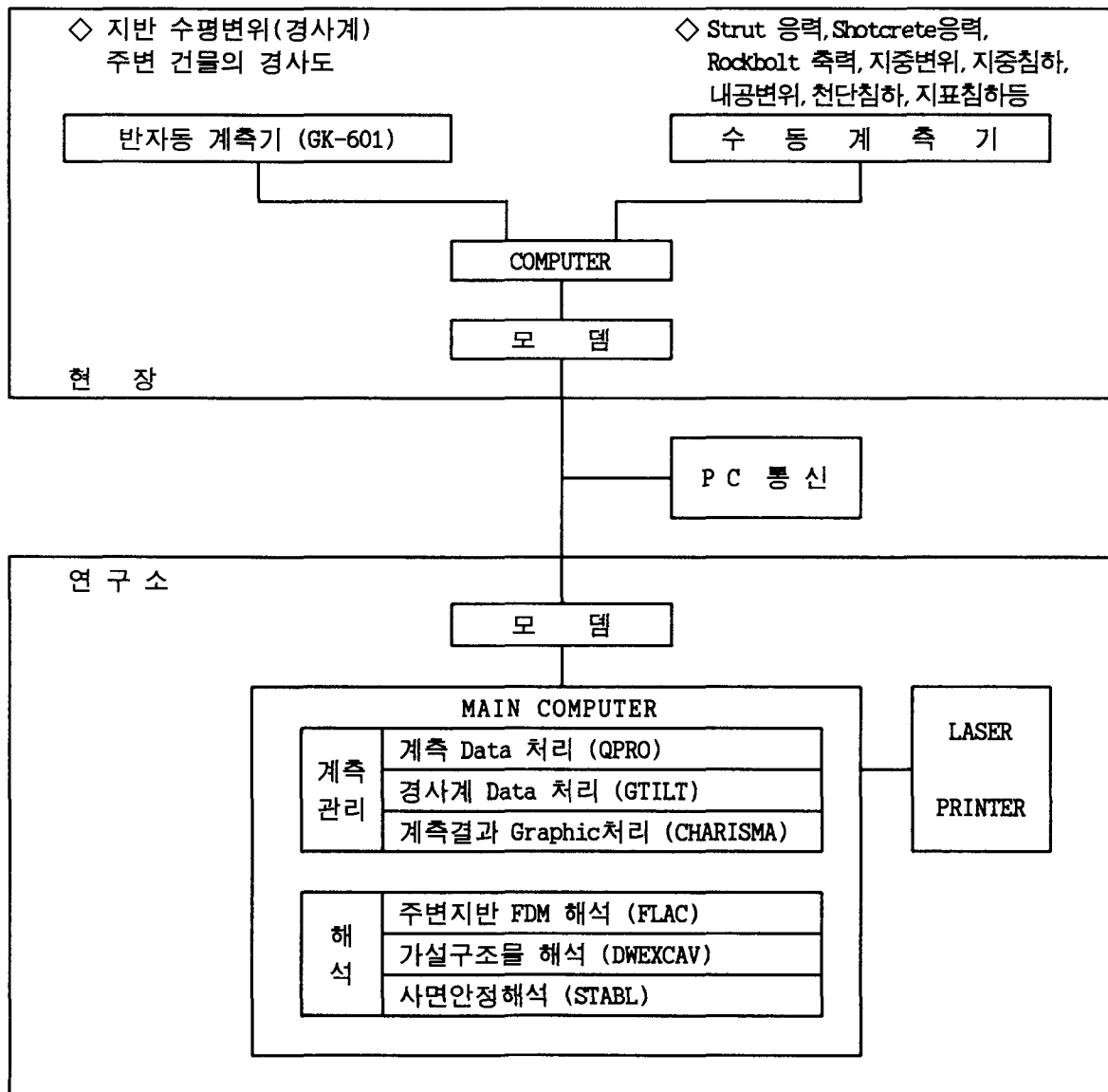
지질변화와 측정 결과에 따라 조정가능하나, 다음 빈도를 원칙으로 한다.

일 수	0 ~ 7	8 ~ 21일	22일 이후
빈 도	1회 / 일	3회 / 주	1회 / 주

③ 개착부 계측

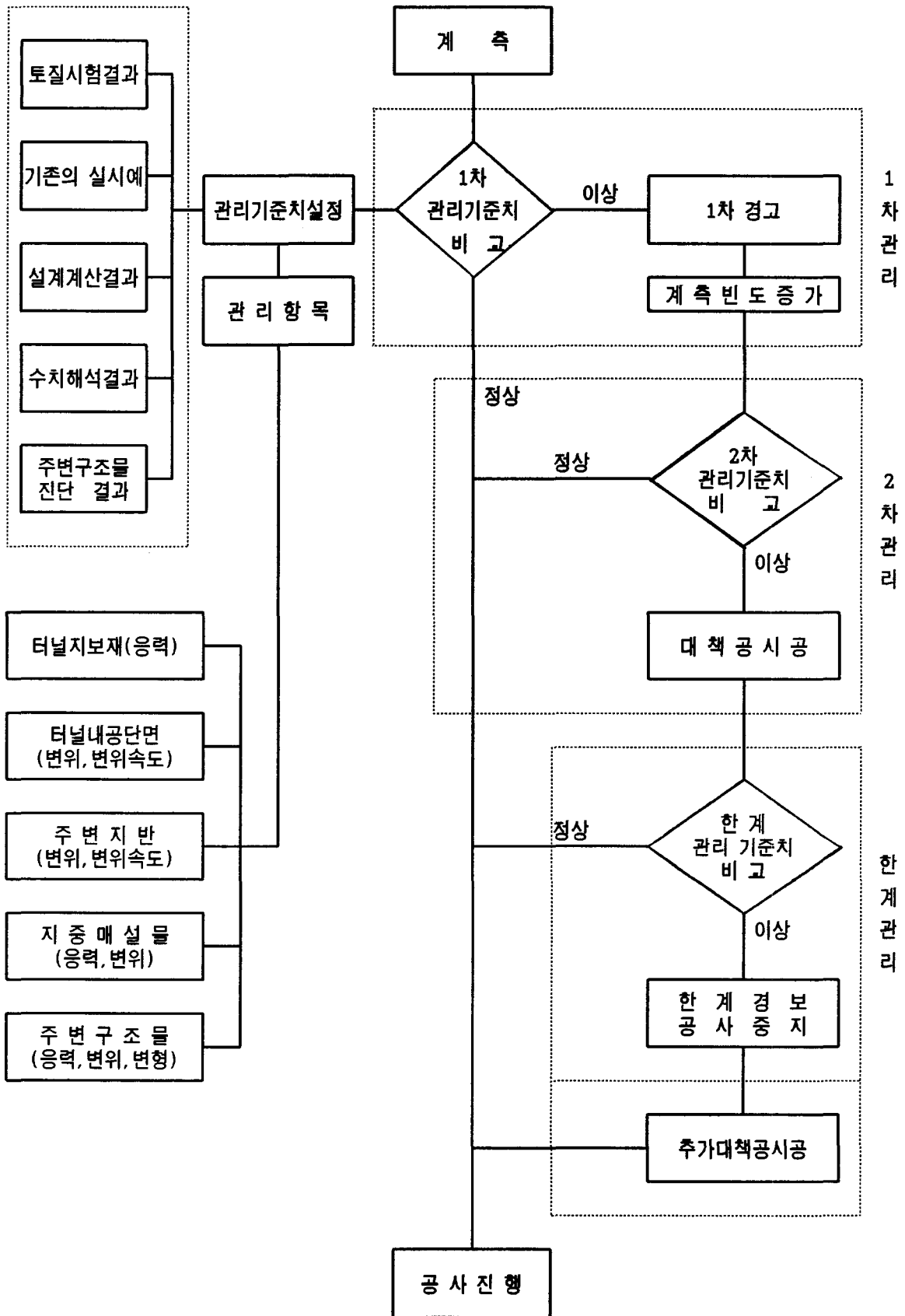
계 측 항 목	초기치 측정	계 측 빈 도		
		굴 착 전	굴 착 중	굴착완료후
지중수평변위 지중침하 건물기울기	굴착 개시전	1회 / 주	3회 / 2주	1회 / 주
Strut 응력	Strut 설치직후	-	3회 / 주	1회 / 주

3) 계측 System 구성





4) 계측관리 Flow



## 5) 계측관리기준

당 현장은 터널 중앙부에 Core를 남기고 다단으로 분할 굴착하는 공법이 적용되었으므로 내공 변위는 초기치 측정이 늦어져 천단 침하를 위주로 계측 관리를 수행하였다. 일상 계측에 대해서는 수치해석 결과를 1차 계측 기준치로 설정하였고, 계측 결과가 시공방법, 지보공 시공시기 및 크기, 지하수량, 보조공법 등에 따라 다양한 변화를 보이므로 변위속도 및 지보재 시공 전·후 형상, 주변지반 및 건물 이상 유무 등을 검토하여 변위속도는 3mm/일 이상, 지보재 Crack, 건물 Crack 발생시 2차 계측 기준으로서 대책을 수립하여 시공에 반영 되도록 관리하였다.

주변 건물의 경사는 철근 콘크리트 구조물 허용 한계인 0.002를 한계치로 설정하였고, Shotcrete 응력은 허용 휨 압축 응력으로  $84\text{kg/cm}^2$ (설계기준강도  $210\text{kg/cm}^2$ ), Rockbolt 축력은 Rockbolt 인발 내력을 고려하여 10ton/본을 관리 기준으로 설정하였다.

터널 노선상 건물이 밀집되어 있고, 터널 천단부와 건물 기초 하부가 인접해 있는 난공사 구간이므로 모든 계측관리 기준은 현장 계측분석 및 관리책임자, 시공책임자의 상황 판단에 의해 항상 유동적으로 현장에 반영하였으며, 주변 건물의 안전 유무에 특히 주의하여 계측 관리 하였다.

## 5. 결론

서울 지하철 5-45 공구에 계측시스템을 적용하여 분석한 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 계측관리 체계는 현장에서 측정된 계측 Data 를 PC 통신을 이용하여 연구소로 전송하면 현장상황을 종합, 분석하여 다시 현장에 Feedback 하는 체계를 정립, 운영하였고 1 회/주 빈도로 현장 및 계측담당자 회의를 운영하여 시공에 반영하였다.
- 2) 본 공구 계측관리는 터널굴착에 따른 안전시공 및 주변 건물의 안정성 확보를 목표로 하였으며 일상계측은 터널상부에 건물이 밀집되어 있는 관계로 초기치 측정이 늦은 내공변위 보다는 천단침하와 지표침하를 위주로 수행하였다.
- 3) 계측관리기준은 외국사례를 정리하여 참고로 하고 FDM 수치해석 결과를 1 차 기준치, 변위속도 및 건물 Crack, 지보재 이상 유무를 2 차 기준치로 설정하여 관리하였으며, 터널이 건물 하부와 인접한 난공사 구간이므로 현장 시공 및 계측책임자의 판단에 따라 건물안전에 특히 주의하여 유동적으로 적용하였다.

- 4) Silot 터널의 경우, 초기치 측정거리는 평균적으로  $0.5 D$  ( $D$  는 터널직경 ) 에서 수행되었고 최대 변위속도는 막장거리  $1.0 D$  에서 발생하는 것으로 분석되었다. 최대 변위속도는 내공변위는  $1.5 \sim 1.95 \text{ mm/日}$ , 천단침하는  $2 \sim 3 \text{ mm/日}$  의 분포를 보였으며 허용 계측관리치 범위내에서 안정된 거동을 나타냈다. 본 터널의 경우는 초기치 측정거리가 평균  $0.3 D$  ( $D$  는 터널직경 ), 최대 변위속도는  $0.5 \sim 1.0 D$  에서 발생하는 것으로 분석되었다.
- 5) 지표부 대표계측 결과 지중 수평변위, 지중침하는 터널굴착시 일정한 변형 후 수렴하여 안정된 거동특성을 보였으며, 건물기울기 측정결과도 대부분이  $1/1000$  기울기보다 작거나 근접한 결과를 보였다. Strut 응력 또한 작은 응력상태로 안정하게 거동하는 것으로 분석되었다. 터널부 대표계측의 경우는 Shotcrete 와 Steel Rib 에 작용하는 응력이 허용치보다 상당히 작은 범위에서 수렴하는 것으로 나타났고, Rockbolt 는 최대  $2 \text{ tonf}$ , 지중변위 최대  $1.0 \text{ mm}$  로 작은 응력, 변위상태로 수렴되어 현장상황을 종합하여 판단할 때 현 지보설계가 타당한 것으로 분석되었다.
- 6) 도심지에 건설되는 지하철의 경우와 같이 상부에 건물이 밀집하여 안전사고 발생시 막대한 인명과 재산피해를 일으킬 수 있는 구간이라 하더라도, 체계적인 계측관리시스템이 정립되고 현장계측자와 계측분석자간의 유기적인 협력체계가 이루어진다면 안전시공이 확보되리라고 판단된다.

#### 참고문헌

1. (주) 대우 건설기술연구소, “ NATM 지보공 및 계측연구 ”, 1993.
2. (주) 대우 건설기술연구소, “ 지하철 5-45 공구 지하굴착공사 종합계측보고서 ”, 1994.
3. (주) 대우 엔지니어링, “ 서울시 지하철 5-45 공구 지반조사보고서 ”, 1992.
4. 한국 전산구조공학회, “ 지하구조물의 해석 및 설계 ”, 1992.