

도심지 NATM 터널에서의 계측관리시스템 적용 연구

장정범¹⁾ · 김용일¹⁾ · 김영근²⁾ · 정한중³⁾

Application of the Measurements Control System to NATM Tunnel Constructed in Urban Area

Jung-Bum Jang, Yong Il Kim, Young-Geun Kim, Han-Jung Jeong

ABSTRACT Since the significance of measurements during tunnel construction is not recognized, measurements have not been implemented except for a few very important construction site. As the tunnel construction by NATM increases, the importance of measurements is being emphasized. But, due to the lack of practical experiences and theoretical background in measurements techniques, systematic measurements control system has not yet been established. In this study a measurements control system, successfully used in the urban tunnel construction, is introduced.

1. 서 론

지반공학과 관련된 문제의 대부분은 지반에 관한 정보에 있어서 많은 불확실성을 내포하고 있다. 이러한 불명확한 조건하에서 터널거동을 예측하기 위한 수치 해석은 그 정확도 (Accuracy)가 낮다. 따라서, 설계단계에서의 해석과 시공 중 실제의 거동이 다르므로 시공 중 터널의 거동을 관찰, 계측하여 얻은 정보로부터 설계와 시공법의 타당성을 검토하고 필요시 설계단면을 변경, 수정하게 된다. 즉, 현장 계측결과를 설계시공에 반영하여 안전하고 경제적이며 합리적인 터널을 시공할 수 있다.

그러나, 국내의 경우 계측의 중요성에 대한 인식도가 낮아 일부 중요 공사를 제외하고는 거의 계측을 시행하여 오지 않았다. 근래에 와서 NATM 방식에 의한 지하철의 건설이 증가하면서 계측의 중요성이 부각되기 시작하였으나, 계측수행의 경험부족과 계측관련 연구미비 등으로 인하여 아직은 체계적인 계측관리가 수행되고 있지 못하다.

특히, 서울시에 건설되고 있는 지하철 터널의 경우는 도심지에 위치하고 있는 관계로 지표에 건물이 밀집되어 있는 경우가 많으며, 또한 터널 천단부와 건물 기초

하부가 매우 인접하여 있어 터널 시공시 주변 건물의 안정성 확보 및 공사 관련 민원을 최소화하기 위하여 세심한 계측관리가 절실히 요구되고 있다. 이에 본 연구에서는 건물이 밀집한 도심지에서 성공적으로 수행된 도심지 지하철 터널의 계측관리시스템에 대하여 소개하고자 한다.¹⁾

2. 연구 대상의 개요

2.1 연구대상 구간

본 연구구간은 지하철 5호선 노선 중 한 구간으로서, 터널 노선을 따라 복합상가건물, 오피스빌딩, 병원 등 상가 및 주거용 건물이 밀집되어 있다. 그림 1은 본 연구구간 터널노선에 따른 주변 건물현황 및 지층단면을 도시한 것이다. 특히, D빌딩과 Y빌딩은 터널 천단부와 건물 기초 하부사이의 거리가 불과 3~7 m 정도로 상당히 인접해 있어 터널 시공시 특별히 주의를 요하는 난공사 구간이다.

*1995년 5월 15일 접수

- 1) (주) 대우 건설기술연구소, 주임연구원
- 2) (주) 대우 건설기술연구소, 선임연구원, 공학박사
- 3) (주) 대우 건설기술연구소, 선임연구원, 토목연구실장

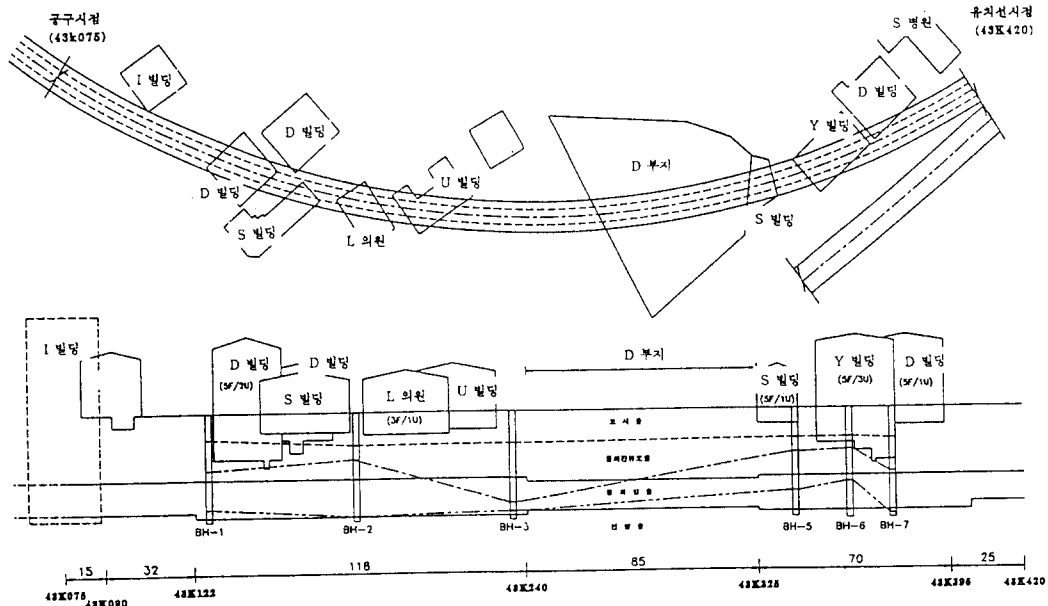


그림 1. 연구구간 및 주변건물 현황.

2.2 지질상황

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

매립토층은 1~3 m 정도의 두께로 N치가 4~9 정도인 대체적으로 느슨한 상태로 분포되고 있다. 매립토층의 하부 퇴적토층은 3.8~5.2 m 두께로 점성토층과 자갈 섞인 실트질 모래층으로 나뉘며, 점성토층은 통일분류법으로 ML, CL로 분류되고, N치가 7~25인 중간 내지 견고한 연경도를 나타낸다. 퇴적토층의 하부 지층인 자갈 섞인 실트질 모래층은 통일분류법으로 SP, SM, SG, GM 등으로 분류되며 N치가 20~25정도인 중간 내지 매우 조밀한 상대밀도를 나타내고 있다.

풍화대층은 차별 풍화작용에 의해 위치에 따라 출현심도 및 지층두께에 많은 차이가 있으며, 층 두께는 8~17 m 정도로 풍화토층과 풍화암층으로 구분된다. 풍화토층은 통일분류법에 따라 SM으로 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 풍

화대층을 통과하도록 계획되어 있다.

기반암층은 호상 편마암이 그 주류를 이루고 있으며, 절리의 발달이 매우 심하여 거의 파쇄대로서 TCR은 50이하이고, RQD는 0을 나타냈다.²⁾

3. 설계 및 시공

3.1 설계개념

본 연구구간은 역학적으로 불량한 풍화토층 및 풍화암층을 통과하도록 터널이 계획되어 있으며, 터널 상부에 건물이 좁은 간격으로 밀집되어 있고, 굴착시 터널 천단부 상부지반이 아칭현상을 발휘할 만큼 충분한 두께로 지층이 분포되어 있지 못한 관계로 지반의 강도를 최대한 발휘시켜 터널 자체의 안정성을 유도하는 NATM 공법을 적용하기에는 한계가 있는 것으로 판단되었다.

따라서, 본 구간의 터널은 NATM 공법과 재래식 터널공법을 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 좌우 60° 구간에

piperoof 를 시공하여 상부 하중을 균일하게 전달할 수 있도록 하고 가장 큰 응력이 발생하는 측벽 상단에 rockbolt 를 타입하여 다소의 arching 을 유도하며, 전 단면이 굴착 완료되었을때 steel rib 자체만으로 터널 단면의 안정성을 확보하도록 설계되었다. 본 곡선부 터널에 대한 설계 표준단면 및 지보패턴은 그림 2와 같으며 굴착공정 순서도는 그림 3과 같다.

3.2 수치해석

표준지보 설계단면에 대하여 설계제원에 대한 타당성을 검토하고, 굴착에 따른 지반거동 파악, 안정성 검토, 소성영역 범위, 지보재에 작용하는 응력검토 등을 통해 시공법의 타당성, 안정성 및 거동예측을 위하여 수치해석을 수행하였다. 해석 프로그램은 유한차분법을 이용하는 미국 ITASCA Consulting Group에서 개발한 FLAC 을 사용하였으며 해석에 사용된 모형은 그림 4와

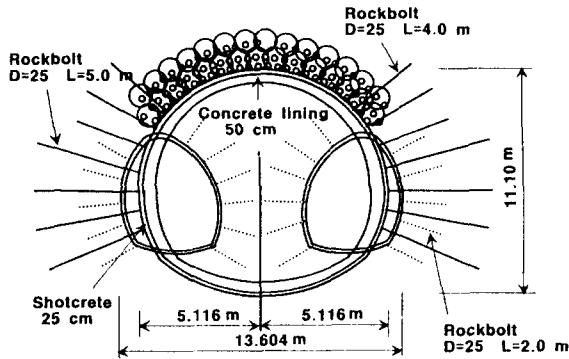


그림 2. 터널 표준 지보패턴도.

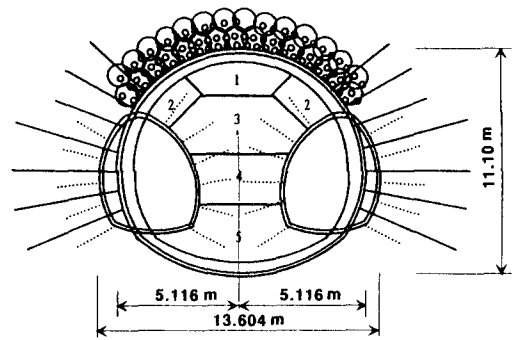


그림 3. 굴착공정 순서도.

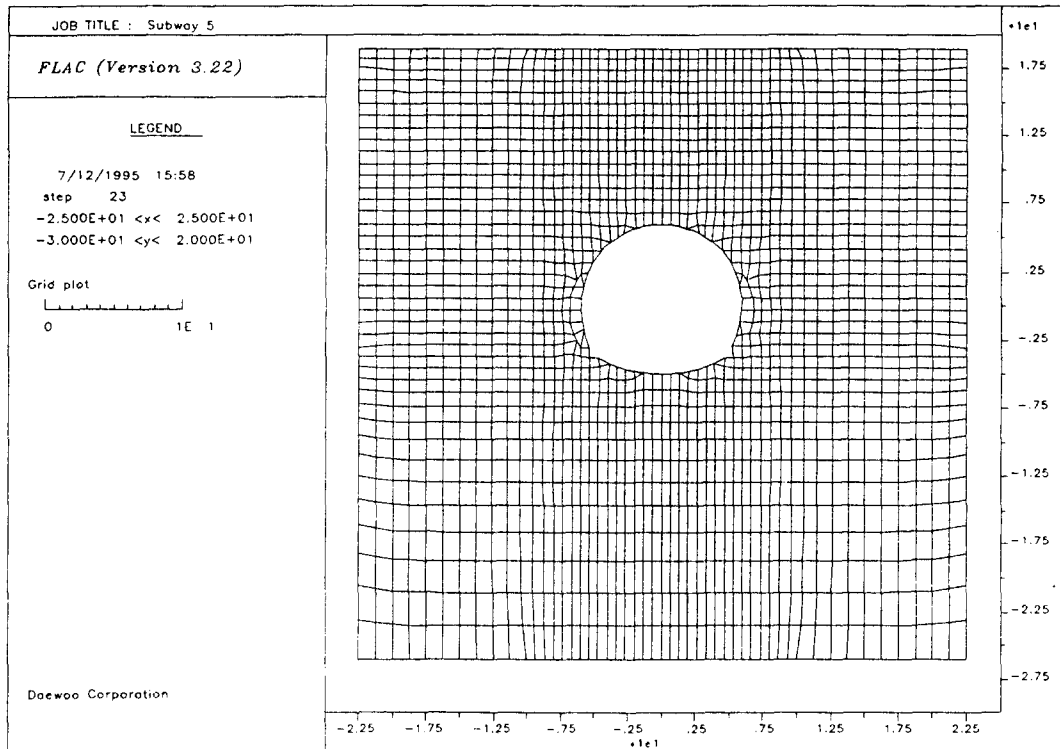


그림 4. 해석모형.

같으며, 지반물성 및 굴착단계는 표 1, 표 2와 같다.

표 1에 나타난 각 지층의 지반물성치는 “지하철 0-00 공구 곡선부 터널 건물하부 통과구간 지반조사 보고서” 및 국내 지반의 현장 및 실내시험결과 등을 참고하여 결정하였다.²⁾ 또한, 표 2의 하중분담률은 막장거리에 따라 일정한 패턴을 가지는 지반특성곡선을 이용하여 각 굴착단계별로 분담되는 하중분담률로서 고려하였다. 보통, 하중분담률은 지반별로 나소의 범위를 가지고 있으나 단면형상, 굴착순서, 지반특성, 시공법 등을 고려하여 산정하였다.³⁾

3.2.1 Silot 터널

터널 굴착단계에 따라 silot 터널의 변위 및 지보재에 작용하는 응력을 검토한 결과는 표 3 및 표 4와 같다. silot 터널의 수치해석 결과에서 계측 1차 관리치로 활용하기 위한 변위량은 지표침하 6.42 mm, 천단침하 5.

54 mm, 내공변위 2.9 mm 로 나타났다. 또한, 지보재 응력도 shotcrete 응력은 최대 44.41 kg/cm², rockbolt 축력은 2.6 ton 로 모두 허용치보다 작은 값을 보여 본 지보패턴은 타당한 것으로 분석되었다.

3.2.2 본 터널

터널 굴착단계에 따라 본 터널의 변위 및 지보재에 작용하는 응력을 검토한 결과는 표 5 및 표 6 과 같다. 본 터널의 경우 최대 변위량은 지표침하 25.23 mm, 천단침하 19.92 mm로 나타났다. 본 터널의 경우는 시공 시 막장 core 를 남기기 때문에 내공변위 측정이 늦어져 계측분석에서 제외하고 천단침하 및 지표침하를 위주로 계측관리치를 설정하였다. 또한, 지보재응력도 shotcrete 응력은 최대 19.51 kg/cm², rockbolt 축력은 1.3 ton로 지보재 응력이 전반적으로 허용치보다 상당히 작은값을 보여 과다설계로 생각될 수 있으나,

표 1. 지반물성

| 구분 | 지층 | 탄성계수 (ton/m ²) | 단위중량 (ton/m ³) | 포아송비 | 점착력 (ton/m ²) | 내부마찰각 (degree) | 정지토압 계 수 | 깊이 (m) |
|------------------|----------------|----------------------------|----------------------------|------|---|----------------|----------|-----------|
| 지반 | 퇴적토 | 1,000 | 1.8 | 0.35 | 2.0 | 20.0 | 0.5 | 0~5.9 |
| | 풍화토 | 4,100 | 2.0 | 0.35 | 5.0 | 33.0 | 0.5 | 5.9~13.0 |
| | 풍화암 | 12,200 | 2.2 | 0.33 | 10.0 | 35.0 | 0.5 | 13.0~22.0 |
| | 연 암 | 50,000 | 2.5 | 0.30 | 50.0 | 40.0 | 0.5 | 22.0~ |
| 지보재 | Soft Shotcrete | 500,000 | | | A=0.05 m ² | | | |
| | Hard Shotcrete | 1,500,000 | | | A=0.15 m ² | | | |
| | Rockbolt | 21,400,000 | | | 직경 : 2.5 cm, 단면적 : 4.91 cm ² | | | |
| 보강지반 (Pipe Roof) | | 15,000 | 2.2 | 0.33 | 12.8 | 35.0 | 0.5 | |

표 2. 굴착단계 및 하중분담률.

| 굴착단계 | 굴착 및 지보내용 | 하중분담률(%) |
|------|--|----------|
| 1 | 선진도갱 상부 반단면 굴착 | 50 |
| 2 | 선진도갱 상부반단면 1st soft shotcrete 타설 | 25 |
| 3 | 선진도갱 상부반단면 2nd hard shotcrete 및 rockbolt 타설 | 25 |
| 4 | 선진도갱 하부반단면 굴착 | 50 |
| 5 | 선진도갱 하부반단면 1st soft shotcrete 타설 | 25 |
| 6 | 선진도갱 하부반단면 2nd hard shotcrete 및 rockbolt 타설 | 25 |
| 7 | 본선터널 ① zone 굴착, 측벽 concrete 시공 | 70 |
| 8 | 본선터널 ① zone 1st soft shotcrete 타설 | 30 |
| 9 | 본선터널 ② zone 굴착 | 70 |
| 10 | 본선터널 ② zone 1st soft shotcrete 타설 | 30 |
| 11 | 본선터널 ③ zone 굴착 | 70 |
| 12 | 본선터널 ③ zone 2nd hard shotcrete 및 rockbolt 타설 | 30 |
| 13 | 본선터널 ④ zone 굴착 | 100 |
| 14 | 본선터널 ⑤ zone 굴착 | 70 |
| 15 | 본선터널 2nd hard shotcrete 타설 | 30 |

터널 상부에 건물이 밀집되어 있고 지반 및 건물의 안정성 확보가 필수적이므로 타당한 지보패턴으로 판단된다.

3.3 시공

본 곡선부 터널구간은 건물이 밀집된 상가지역인 관계로 주변 지반 및 구조물에 대한 영향을 최소화하기 위하여, 먼저 좌 우 silot 터널을 굴착하여 지질 상태 확인 및 지하수를 배수하고 본 터널을 다단으로 분할 굴착하는 silot 공법을 채택하였다.

굴착과정은 silot 터널과 본 터널이 5m 간격으로 반복적으로 시공되었고, 단계별 시공특성을 살펴보면 다음과 같다.

3.3.1 Silot 터널

Silot 터널은 본 터널 좌 우측을 각각 A, B 공구로 나누어 상 하반 분할 굴착을 실시하였다. 건물 밀집지역이므로 기계굴착으로 silot 터널 상반을 굴착한 후 하부가 invert 를 타설하였고, 하반을 굴착한 후 invert 시공시 터널 측벽이 내부로 활동이 일어나지 않도록 연직

하향 3.0 m 깊이로 rockbolt 를 타입하였다.

본 터널은 재래식 터널개념으로 상부하중을 터널 측벽에서 지지하도록 설계되었기 때문에 silot 터널 하반 시공 후, 본 터널을 중심으로 좌 우측 silot 터널 측벽에 콘크리트를 타설하고 본 터널 굴착 후 rockbolt를 타입하였다. 사진 1은 silot 터널 시공전경을 나타내고 있다.

3.3.2 본 터널

본 터널 시공은 silot 터널이 완료된 후, 터널 천단부를 중심으로 좌 우 60°구간에 터널 상부 상재하중을 분포시키고 터널 시공 중 막장 안정성을 확보하기 위하여 piperroof 공법을 적용하였다.

시공된 pipe는 길이 15 m, 직경 100 mm 강관으로서 터널 종방향으로 5 m 간격, 상방향 5°각도로 총 단면당 27공을 타입, 시공하였으며, pipe 내·외부는 시멘트 밀크 grouting 을 실시하고 pipe와 pipe 사이에 지반보강 및 차수를 위하여 우레탄 grouting 을 실시하였다.

터널 S.L. 상부에 piperroof가 시공, 완료되면 본 터널 시공에 착수하여 그림 3의 굴착공정순서도에서 알 수 있는 바와 같이 먼저 zone 1을 굴착하고, steel rib 및 shotcrete를 시공한다. 그 다음 zone 2를 굴착하고, 지보재를 시공한 후 silot 터널 측벽 콘크리트 상단과 본 터널 arch 부의 steel rib를 연결 jack을 이용하여 용접 연결하고, shotcrete를 타설한다. 그 다음 단계로 zone 3, 4를 차례로 굴착하며, 이와 같은 시공과정이 반복된다. 한편, 터널 시점부에서는 중벽식 굴착공법을 채택하여 터널시공을 완료하였다.

본 터널 하반굴착 완료후, invert 시공시 본 터널 측벽 콘크리트가 활동을 일으키지 않도록 측벽 하부 경사

표 3. Silot 터널 굴착시의 변위 해석 결과

(단위 : mm)

| 굴착단계 항 목 | 굴착단계 | | | | | |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 지 표 침 하 | -3.20 | -4.14 | -4.74 | -6.42 | -6.26 | -6.02 |
| 천 단 침 하 | 0 | -2.06 | -3.16 | -5.54 | -5.36 | -5.05 |
| 수평내공변위 | 0 | 1.19 | 1.87 | 2.90 | 2.87 | 2.81 |

표 4. Silot 터널 굴착시의 지보재 응력 해석결과

| 굴착단계 | 구분 | Shotcrete 응력 (kg/cm ²) | | | Rockbolt 축력 (ton) |
|------|-----|------------------------------------|----------------|------------------------------|-------------------|
| | | $\frac{P}{A}$ | $\frac{M}{I}y$ | $\frac{P}{A} + \frac{M}{I}y$ | |
| 상반시공 | 천단부 | 13.80 | 3.42 | 17.22 | 1.032 |
| | 측벽부 | 18.17 | 1.73 | 19.90 | |
| 하반시공 | 천단부 | 14.79 | 29.62 | 44.41 | 2.603 |
| | 측벽부 | 14.30 | 13.19 | 27.49 | |

표 5. 본 터널 굴착시의 변위 해석결과

| 항목 | 굴착단계 | 굴착단계 | | | | | | | | | |
|-------|----------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| 지표 침하 | 본터널 | -6.58 | -13.93 | -13.62 | -24.16 | -25.16 | -25.23 | -25.23 | -25.22 | -25.28 | -24.74 |
| | Silot 터널 | -6.02 | -11.74 | -11.44 | -20.39 | -21.35 | -21.41 | -21.41 | -21.40 | -21.49 | -20.97 |
| 천단침하 | | 0 | -0.23 | -19.12 | -19.84 | -19.91 | -19.91 | -19.92 | -19.78 | -19.26 | |

표 6. 본 터널 굴착시의 지보재 응력 해석결과

| 굴착단계 | 구분 | Shotcrete 응력 (kg/cm ²) | | | Rockbolt 축력 (ton) |
|------|-----|------------------------------------|----------------|------------------------------|-------------------|
| | | $\frac{P}{A}$ | $\frac{M}{I}y$ | $\frac{P}{A} + \frac{M}{I}y$ | |
| 시공완료 | 천단부 | 14.42 | 5.09 | 19.51 | 1.325 |
| | 측벽부 | 9.25 | 0.69 | 9.94 | |

방향으로 nailing을 실시하였으며, 이 작업이 종료되면 invert 굴착, shotcrete 타설, invert 콘크리트 타설이 반복적으로 수행된다. Invert 시공이 완료되면 filter 및 방수포를 설치하고, 철근 조립 및 concrete lining을 타설하여 공사를 완료하게 된다. 사진 2는 본 터널 시공이 완료된 전경을 보여주고 있다.

4. 계측

터널 계측의 목적은 굴착에 따른 주변 지반의 움직임과 각 지보재의 효과를 파악하여 공사의 안정성 및 경제성을 확보하는데 있다. 따라서 시공에 앞서서 사전조사결과, 터널의 규모를 고려해서 설계, 시공에 적용할 계측계획을 세워야 한다. 아울러 효과적이고 경제적인 계측항목, 방법, 기기를 선정하여 공사에 가능한한 지장이 없도록 실시되어야 한다.^{5,6,7,8)} 본 연구 적용구간은 터널굴착에 따른 안정성 평가 및

안전시공을 목표로 하여 계측계획을 수립하였다. 본 연구구간에 적용된 계측계획 및 계측현황을 살펴보면 다음과 같다.

4.1 계측계획

4.1.1 계측항목

본 연구에서 터널계측은 일상관리계측과 대표단면계측으로 구분하여 실시하였다. 일상관리계측은 터널 주변지반의 안정확보와 설계시공의 반영을 위하여 행하는 계측이며, 대표단면계측은 지반, rockbolt 및 concrete lining의 거동, 미굴착구간과 장래 계획설계 및 시공을 위한 계측이다. 표 7은 터널에서 수행되는 계측항목을 분류, 정리한 것이다.

4.1.2 계측빈도

국내외 참고문헌 및 계측결과를 근거로 하여 본 연구구간에서 수행한 일상관리계측과 대표단면계측의 계측빈도를 살펴보면 다음과 같다.

(1) 일상관리계측 (A 계측)

- 내공변위 및 천단침하



사진 1. Silot 터널 시공전경

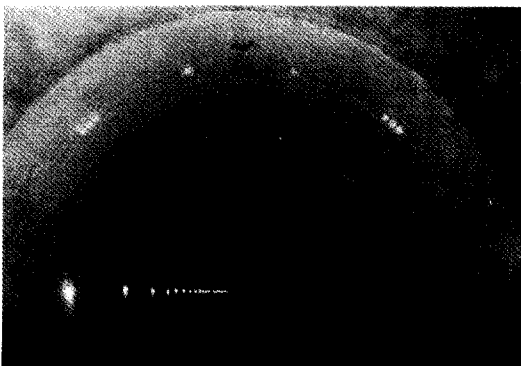


사진 2. 본 터널 시공완료 전경

표 7. 계측항목

| 분 류 | 항 목 | 내 용 |
|----------|-----------------|---|
| 일상 관리 | 갱내관찰 | 막장의 안정성, 지질상황, 용수상태, 기시공구간의 상황을 판단하여 지반구분의 재평가 및 지반상황과 지반거동의 상관성, 막장이후의 지반상황을 추정. |
| | 내공변위 | 터널벽면간 거리변화, 변위속도를 파악하여 주변 지반의 안정 및 지보재의 효과를 검정하고, concrete lining의 타설시기를 판단. |
| 계측 | 천단침하 | 천단침하를 측정하여 터널 천단부 및 주변 지반의 안정을 판단. |
| | 지표침하 | 지표면의 침하 및 용기를 측정하여 터널굴착의 영향범위, 터널 상부지반의 안정성, 주변 구조물에의 영향을 평가. |
| 대표 단면 | 지중변위 | 터널 갱내에서 측정하는 변위로 터널 주변지반의 이완영역, rockbolt 길이의 타당성, 지중변형분포를 판단. |
| | 지중침하 | 지상에서 측정하는 터널 주변지반의 연직변위로 지반거동의 안정을 판단. |
| 계측 | rockbolt 축력 | rockbolt 축력을 측정하여 rockbolt의 길이, 갯수, 위치, 정착방법의 타당성을 판단. |
| | shotcrete 응력 | shotcrete의 접선 및 반경방향의 응력을 측정하여 shotcrete의 두께, 시공시기의 타당성 및 단면폐합에 의한 효과를 판단. |

| | | | |
|-----|------|-------|--------|
| 일 수 | 0~7일 | 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: 측점과 막장의 거리
- rockbolt 인발시험: rockbolt 설치, 충전재 경화후 인발시험 실시

(2) 대표단면계측 (B 계측)

지질변화와 측정결과에 따라 조정가능하나, 다음 빈도를 원칙으로 하였다.

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

4.2 계측 현황

본 연구구간에 설치된 계측기기의 현황을 살펴보면 다음과 같다.

4.2.1 일상관리계측 (A 계측)

터널 일상계측은 굴착시 터널의 안정성 평가 및 안전 시공을 목적으로 시행하는 것으로 본 연구구간은 터널 굴착이 막장 중앙부에 core 를 남기고 굴착하는 Mini Bench Ring Cut 공법으로 시공되었다. 따라서, 터널 내공변위는 core 로 인하여 초기치 측정이 늦어져 천단침하를 위주로 계측관리를 실시하였다. 각 구간별 계측기 설치현황은 표 8과 같다.

4.2.2 대표단면계측 (B 계측)

대표단면계측은 본 연구구간이 도심지 건물 밀집지

표 8. 일상계측기 설치현황

| 구분 | Sta. No. | 계측위치 | 계측항목(내용) |
|------------|--------------|---|----------------------------------|
| 건물 | Sta. 43K+125 | 터널 Station | 갱내관찰조사(일상 막장관찰) |
| | | ~+240 10m마다 1개소, | |
| 지하 | | 총 11개소 | |
| 통과 | Sta. 43K+325 | 터널 Station | 내공변위(5측점/개소) |
| | | ~+400 10m 마다 1개소, 총 8개소 | |
| D 부지 통과 | Sta. 43K+260 | 터널 Station ~+325 20 m마다 1개소, 총 4개소 | 천단침하(1측점/개소) 지표침하(7측점/개소) |

역인 관계로 터널 시공 중 터널 및 주변 지반의 안정성과 터널 노선이 통과하는 상부 건물의 안전관리에 초점을 두고 계측을 실시하였다. 각 항목별 설치위치 및 수량은 표 9와 같다.

5. 계측관리시스템의 현장적용

5.1 계측시스템의 구성

본 연구에서 구축한 계측시스템은 크게 터널현장과 연구소로 구분되며, 이들 사이는 전화선을 통한 모뎀에 의하여 통신이 가능하여, 현장의 계측기에서 측정된 데이터를 연구소에 전송하여 처리하는 On-Line 시스템이 구축되어 있다(그림 5).

계측기는 반자동계측기와 수동계측기로 구분된다. 반자동계측항목으로는 지반 수평변위와 주변건물의 경사도이며, 반자동계측기로는 GK-601을 사용하였다. 지반수평변위 측정에는 한개의 센서를 여러측점으로 부터 이동하면서 측정이 가능한 삼입식 반자동 시스템을 선택하였다.

수동계측항목으로는 Strut 응력, Shotcrete 응력, Rock bolt 축력, 지중변위, 지중침하, 내공변위, 천단침하, 지표침하 등이다. 이들 요소는 수동측정하여 현장 PC에 입력된다. 그림 6에는 본 연구에서 구축한 계측시스템의 구성도가 나타나 있다.

측정된 데이터 중 반자동계측기의 데이터는 GTILT S/W에 의해, 수동계측데이터는 계측데이터 처리 S/W

표 9. 대표단면계측기 설치현황

| Sta. No. | 계측항목 | 수 량 | 선 정 사 유 |
|----------|--------------|-----|-----------------|
| 43K+140 | Shotcrete 응력 | 5측점 | D 빌딩 하부통과 |
| | 지중수평변위 | 2측점 | |
| | 지중침하 | 2측점 | |
| | 건물기울기 | 2측점 | |
| 43K+160 | 지중침하 | 2측점 | 5층 건물 하부통과 |
| | 건물기울기 | 4측점 | |
| 43K+190 | 지중침하 | 1측점 | L의원 건물 하부 통과 |
| | 건물기울기 | 2측점 | |
| 43K+220 | 지중수평변위 | 2측점 | U빌딩 하부통과 |
| | 지중침하 | 2측점 | |
| | 건물기울기 | 6측점 | |
| 43K+330 | 지중침하 | 1측점 | S건물 하부통과 |
| | 건물기울기 | 2측점 | |
| 43K+360 | Shotcrete응력 | 5측점 | Y빌딩 하부통과 |
| | 지중수평변위 | 2측점 | |
| | 지중침하 | 2측점 | |
| | 건물기울기 | 2측점 | |

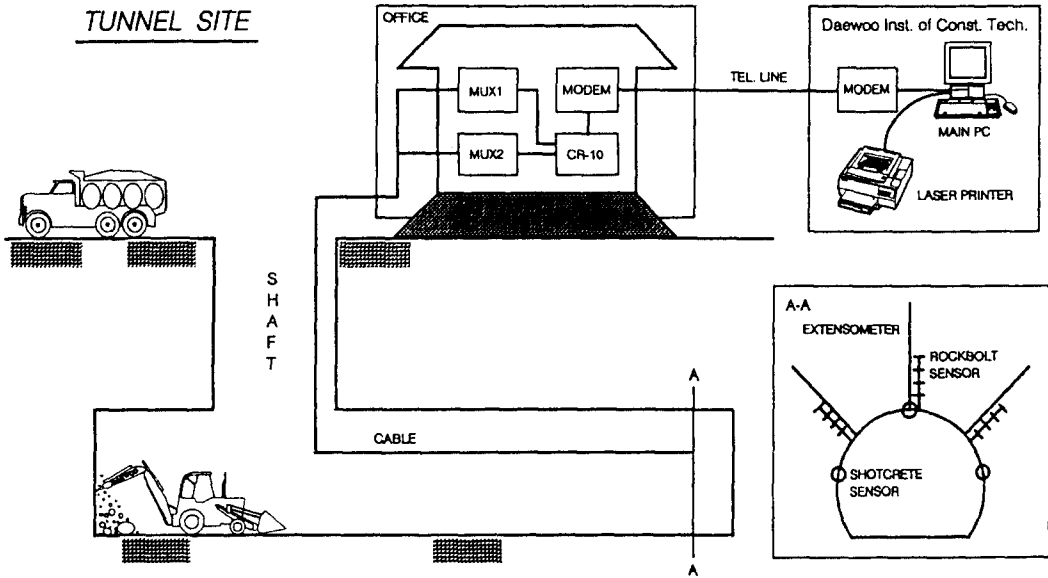


그림 5. 계측시스템의 개요도.

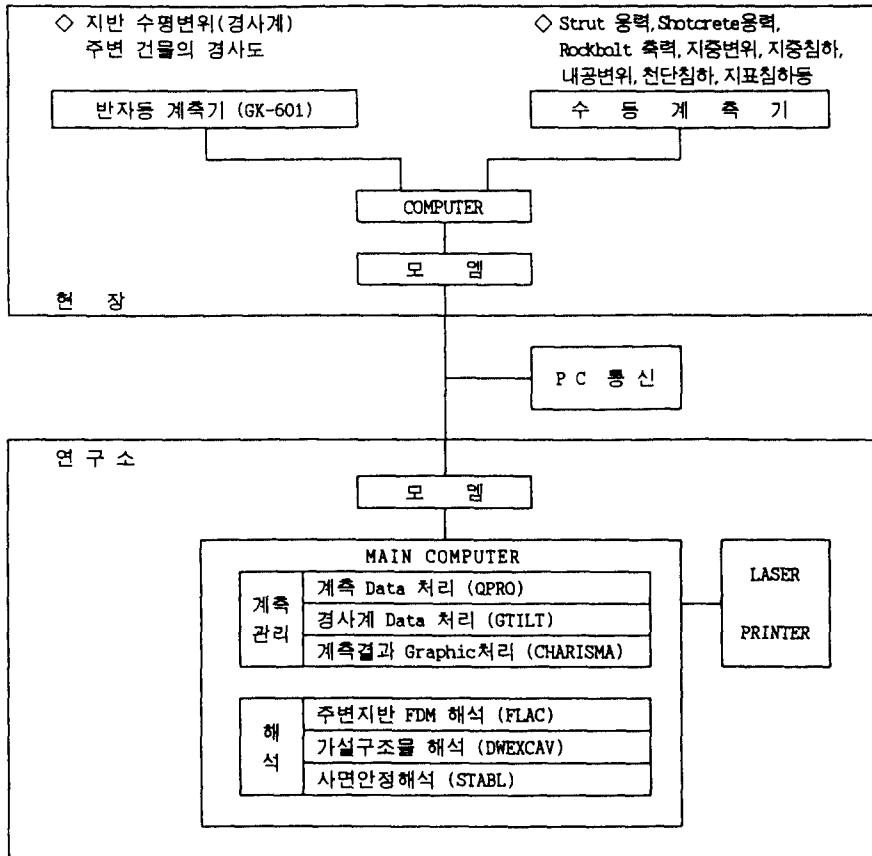


그림 6. 계측시스템의 구성도.

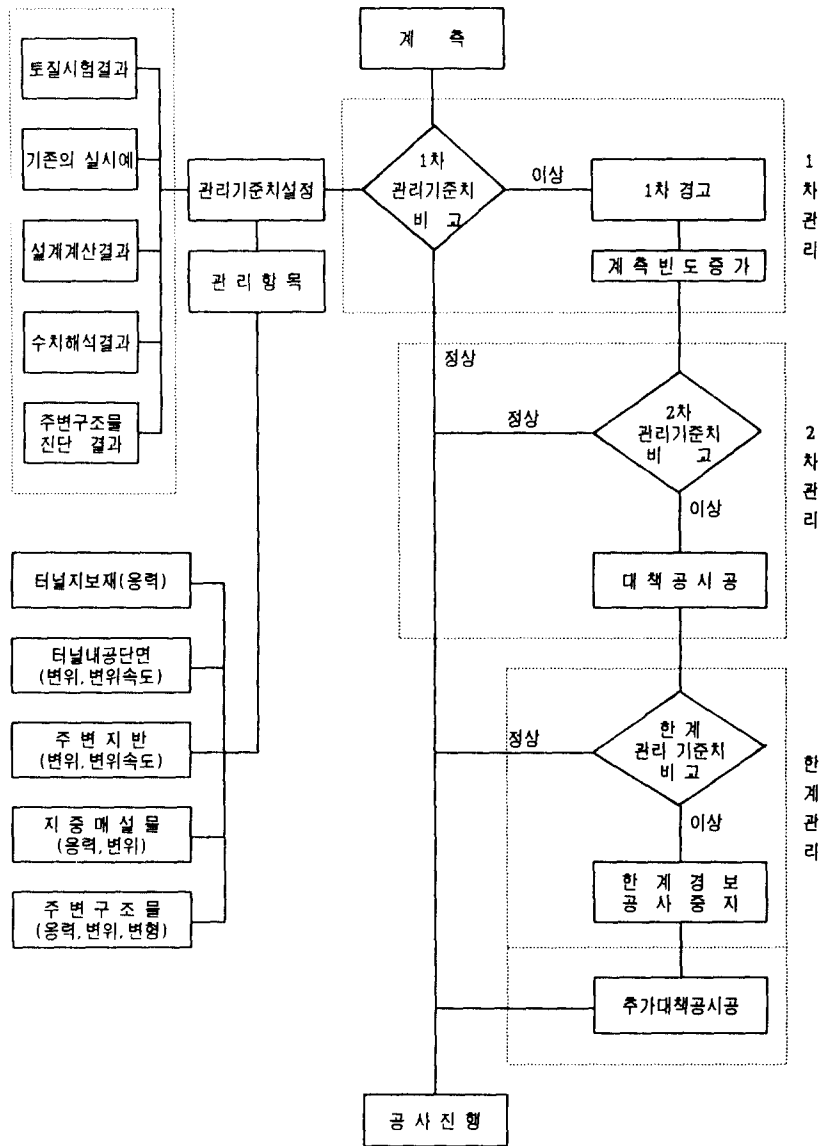


그림 7. 계측관리 흐름도.

에 의해 처리되어 데이터의 경시변화 및 위치에 따른 분포를 검토 판단한다.

현장 PC에서 검토한 결과 데이터의 변화가 위험한 경향을 보이면 모뎀과 전화선에 의하여 측정된 데이터를 연구소의 컴퓨터에 전송하며, On-Line 관리를 한다.

본 계측시스템은 연구소에서 데이터를 전송받아 터널해석 S/W 및 역해석 S/W를 이용하여 터널 및 주변지반의 안정성해석을 수행하여 현 상태의 터널 구조물의 안전 및 차후 공사 진행시의 안전을 평가하고, 그 결

과 터널 구조물의 안전이 확보되지 않으면, 보강대책을 수립하여 현장의 계측담당자에게 모뎀 및 전화선을 사용하여 해석결과 및 지시사항을 통보해 보강조치하도록 지시하도록 되어 있다.

5.2 계측 관리

계측관리는 먼저 계측항목을 설정하고 그에 따른 지반시험결과 및 수치해석결과를 기준으로 하여 관리기준치를 설정한다. 터널시공과 함께 계측이 수행되면 계

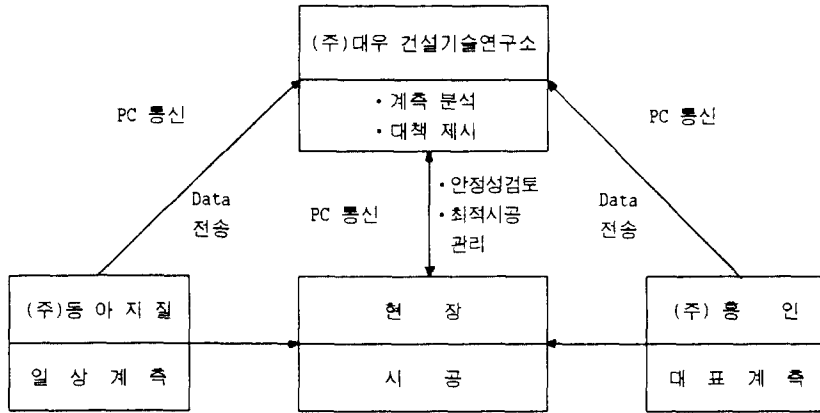


그림 8. 계축 관리 조직도.

측결과와 계축관리기준치의 비교로 터널의 안정성을 판단하여 공사의 진행여부를 판단한다. 그림 7은 계축 관리의 흐름을 보여주고 있다.

본 터널은 터널 노선 상부에 주거 및 상가 건물이 밀집되어 있기 때문에 특별히 주의하여 계축을 수행하였다. 터널 내부의 막장관찰, 내공변위 및 천단침하, 지표침하 등 터널 굴착중 안정 검토를 위한 일상 계축은 (주)동아지질에서, 터널내부 및 지표에서의 대표 계축은 계축기기 전문회사인 (주)흥인에서 각각 수행하였다. 계축 결과는 PC 통신을 Data송·수신 수단으로 활용하여 (주)대우 건설기술연구소로 전송하면 당 연구소에서는 계축과 막장관찰 결과 및 경과일수, 막장거리, 용수상황, 지보 상태 등을 종합적으로 분석하여 현재 시공 상태의 안전성을 판단하고 결과를 현장에 Feedback하는 체계를 정립하여 운영하였으며, 일주일에 1회씩 계축 담당자 사이에 계축 회의를 실시하여 현장에서 발생하는 계축 및 시공시 주의점, 문제점, 대책 등을 논의하여 시공에 반영하였다. 수행된 계축 관리 조직을 제통적으로 나타내면 그림 8과 같다.

5.3 계축관리기준

NATM 터널의 계축관리 기준은 통상 설계시 수치해석 결과나 유사 지반에서의 계축 결과 등을 토대로 설정하며 시공중 기준치와 비교하여 불안정시 대책을 강구하게 된다.

본 연구구간은 터널 중앙부에 core 를 남기고 다단으로 분할 굴착하는 공법이 적용되었으므로 내공 변위는 초기치 측정이 늦어져 천단침하를 위주로 계축관리를

수행하였다.

일상계축에 대해서는 수치해석결과를 1차 계축관리 기준치로 설정하였고, 계축결과가 시공방법, 지보공 시공시기 및 크기, 지하수량, 보조공법 등에 따라 다양한 변화를 보이므로 변위속도 및 지보재 시공 전·후의 형상, 주변지반 및 건물 이상 유무 등을 검토하여 변위속도는 3 mm/일 이상, 지보재 균열, 건물 균열 발생시 2차 계축기준으로서 대책을 수립하여 시공에 반영되도록 관리하였다.

주변 건물의 경사는 철근 콘크리트 구조물의 균열 허용한계인 0.002 를 한계치로 설정하였고, shotcrete 응력은 허용 휨압축응력으로 84 kg/cm² (설계기준강도 210 kg/cm²), rockbolt 축력은 rockbolt 인발내력을 고려하여 10 ton/본을 관리기준으로 설정하였다.

터널 노선상 건물이 밀집되어 있고, 터널 천단부와 건물 기초하부가 인접해 있는 난공사 구간이므로 모든 계축관리 기준은 현장 계축분석 및 관리책임자, 시공책임자의 상황 판단에 의해 항상 유동적으로 현장에 반영하였으며, 주변 건물의 안전 유무에 특히 주의하여 계축관리를 실시하였다.

5.4 계축 결과분석

본 연구구간의 막장관찰결과, 지질은 호상편마암 및 편암의 기반암과 중생대 쥐라기의 관입암체로 이루어지며, 불연속면의 분포는 N68W 32SW 방향성이 우세하며 N10E 78NW, N4E 90SE, N78W 48NE의 3개 절리군이 존재하는 것으로 나타났다.

Silot 터널 계축결과, 전 구간에 있어서 최대 내공변

위 및 천단침하는 각각 4.85~6.2 mm, 5~8 mm로 수치해석결과를 약간 상회하는 것으로 나타났으며, B공구는 갱구부 및 열악한 지질조건으로 silot 터널 하반굴착에 따라 최대 내공변위 17.2 mm, 천단침하 11 mm의 분포를 보였으나 적절한 보강 및 가 invert 시공으로 안정화되었다. silot 터널 계측관리시, 초기치 측정거리는 평균적으로 0.5 D (D는 터널직경)에서 수행되었고 최대 변위속도는 막장거리 1.0 D에서 발생하는 것으로 분석되었다. 최대 변위속도는 내공변위의 경우 1.5~1.95 mm/□, 천단침하는 2~3 mm/□의 분포를 보여 허용 계측관리치 범위내에서 안정된 거동을 나타냈다.

본 터널 계측결과, 내공변위는 최대 5.9~7.5 mm, 천단침하는 9.0~16.0 mm의 분포를 나타냈고, 최대 변위속도는 내공변위의 경우 0.6~1.85 mm/□, 천단침하는 3~4 mm/□의 분포를 보여 1차 계측관리치 허용범위내에서 거동하는 것으로 나타났다. 본 터널 계측관리시 초기치 측정거리는 평균 0.3 D, 최대 변위속도는 0.5~1.0 D에서 발생하는 것으로 분석되었으며, B공구 일부구간은 갱구조건 및 불량한 지질상태로 인하여 invert 굴착시 가장 큰 변위속도를 나타냈다.

지표침하 측정결과, 최대 변위속도는 2~4 mm/□로 막장거리 0.17~2.56 D 범위에서 발생하는 것으로 나타났다. 이는 계측기준치를 상회하는 침하량으로 터널 굴착시 지배적인 침하경향을 보이고, 지반 creep에 의해 지속적으로 침하가 발생된 것으로 판단되며, 주요 관리대상 건물인 동성빌딩과 영안빌딩 주변 침하는 상대적으로 작게 발생하여 굴착으로 인한 주변 건물에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 분석되었다.

지표부 대표계측결과, 지중수평변위, 지중침하는 터널굴착시 일정한 변형 후 수렴하여 안정된 거동특성을 보였으며, 건물기울기 측정결과 대부분 1/1000 기울기보다 작거나 근접한 결과를 보이고 주요 관리대상 건물인 동성빌딩과 영안빌딩은 안정 한계관리치 (1/500)에 일시적으로 근접하는 경향을 나타냈으나 점차 감소하여 안정된 거동을 나타냈다. 또한, strut 응력은 강재 허용기준 (1,400 kg/cm²) 보다 낮은 범위에서 안정하게 거동하는 것으로 분석되었다.

터널부 대표계측은 shotcrete와 steel rib에 작용하는 응력이 허용치보다 상당히 작은 범위에서 수렴하는 것으로 나타났고, rockbolt 는 최대 2 ton, 지중변위 최대 1.0 mm로 작은 응력, 변위상태로 수렴되어 현장상황을 종합하여 판단할 때 현 지보설계가 타당한 것으로

분석되었다.

6. 결 론

본 연구에서는 도심지에 NATM 공법으로 시공되는 터널에서 현장과 연구소가 On-line으로 연결된 계측관리시스템을 적용함으로써 터널의 안정성과 근접건물의 안전성을 최대한 확보할 수 있었다. 이상의 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 본 연구에서 적용한 계측관리체계는 현장에서 측정된 계측자료를 PC 통신을 이용하여 연구소로 전송하던 연구소에서 현장상황을 종합, 분석하여 다시 현장에 Feedback하는 체계를 정립, 운영하였고 또한, 1 회/주 빈도로 현장 및 계측담당자 회의를 운영하여 시공에 반영하였다.

2) 계측관리는 터널굴착에 따른 안전시공 및 주변 건물의 안정성 확보를 목표로 하였으며 일상계측은 터널 상부에 건물이 밀집되어 있는 관계로 초기치 측정이 늦은 내공변위 보다는 천단침하와 지표침하를 위주로 수행하였다.

3) 계측관리기준은 외국사례를 정리하여 참고로 하고 FDM 수치해석 결과를 1차 기준치, 변위속도 및 건물균열, 지보재 이상 유무를 2차 기준치로 설정하여 관리하였으며, 터널이 건물 하부와 인접한 난공사 구간이므로 현장시공 및 계측책임자의 판단에 따라 건물안전에 특히 주의하여 유동적으로 적용하였다.

4) 현장 계측자료를 분석한 결과, 터널 내부 및 지표부에서의 계측결과가 작은 응력, 변위상태로 수렴되어 현장상황을 종합하여 판단할 때 현 지보설계가 타당한 것으로 분석되었다.

5) 본 연구에서 활용하였던 PC 통신을 이용한 계측자료 및 결과의 Feedback이 터널의 안전시공 및 계측관리에 효율적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. (주) 대우 건설기술연구소, "지하철 0-00 공구 지하굴착공사 종합계측보고서", 1994.
2. (주) 대우 엔지니어링, "서울시 지하철 0-00 공구 지반조사보고서", 1992.
3. 한국 전산구조공학회, "지하구조물의 해석 및 설계", 1992.
4. (주) 대우 건설기술연구소, "NATM 지보공 및 계측연

- 子”, 1993.
5. 安藤弘基, 井島史一, 岡本賢治, “NATM における計測の意義と評価”, トンネルと地下, Vol. 9, No. 5, 1978, pp. 9-15.
 6. 櫻井春輔, 安藤弘基, “NATM 計測入門 (1)”, トンネルと地下, Vol. 17, No. 2, 1986, pp. 65-72.
 7. 櫻井春輔, 安藤弘基, “NATM 計測入門 (2)”, トンネルと地下, Vol. 17, No. 3, 1986, pp. 68-78.
 8. 櫻井春輔, 安藤弘基, “NATM 計測入門 (3)”, トンネルと地下, Vol. 17, No. 4, 1986, pp. 73 - 79.