

지하철 구조물 하부 인접 터널 굴착의 안정성에 관한 분석

A Study on the stability of passing Construction Method under the Station Structure

박동룡*, 엄기영**, 조국환†

Dong-Ryong Park*, Ki-Young Eum*, Kook-Hwan Cho†

Abstract Because of the population concentration in capital area, Demand for public transport is increasing these days. To solve this problem, the Seoul government is extending or constructing a subway line. To make these lines, Seoul city has no choice but to make a new subway line under the existing structures. The more the city makes or extends a new subway lines, the more study on the stability of passing construction method under the existing station goes off. In this study, the stability of passing construction method under the station structure. Was analyzed by using numerical method. According to comparison between numerical analysis results and measure data, the reliability of numerical analysis and the safety of construction method are satisfied and suggested.

Keywords : Station structure, Method of passing under the construction method, Tunnel, Stability

초 록 최근 수도권 인구 집중으로 인한, 수도권 대중교통수요가 폭발적으로 증가하고 있다. 이를 해결하기 위하여 서울시는 지하철노선을 연장하거나 증설하고 있으며, 이에 따라 수도권에 지하철노선이 거미줄처럼 놓이게 되었다. 따라서 기존 지하철이나 정거장 하부를 통과하게 되는 터널이 늘어나게 되었으며 하부통과 관련 연구 역시 활발하게 진행되고 있다. 본 연구에서는 기존 지하철 하부 인접 터널 굴착의 시공에 따른 안정성을 분석하였다. 시공 단계에 따른 안정성 검토를 3D 모델링을 통하여 수치해석을 실시하였다. 수치해석 결과와 시공 중 계측된 결과를 비교함으로써 수치해석의 신뢰성을 확보하였으며, 지하철 구조물 인접공사 시 안정성 확보 방안을 제시하였다.

주요어 : 지하철 정거장, 하부통과, 터널, 안정성

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

도시의 발전에 따라 사회간접자본 인 도로, 철도, 및 지하철, 통신 및 전력시설, 수로시설 등 과 같은 기반시설의 건설이 대두되면서 토지의 효율적인 이용과 환경훼손의 최소화, 도시경관과의 조화 등을 고려한 시설물 계획 및 민원문제에 대한 대책이 요구되고 있다.

이로 인하여 기존에 시공된 지하철 터널 등과 상하부로 근접 교차하는 지하구조물의 시공사례가 급증함으로 인해서 시공시 안정성의 확보는 신설구조 공사정도가 일반 공사에 비해 상대적으로 어렵고 신설구조물의 굴착 시 지반이완에 따라 기존 시설물의 손상발생 가능성이 높아 지반 침하·융기 발생에 따른 구조물의 균열, 누수 및 선로변형에 따른 열차운행에 문제점을 야기 시킬 수 있다. 그러므로 지하철 교차부와 주변부를 굴착할 때에는 기존 구조물의 안정성을 확인하는 것이 필요하다.

* 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 석사과정

** 한국철도기술연구원 차세대고속철도기술개발사업단TFT 수석연구원

† 교신저자: 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 교수(khcho@seoultech.ac.kr)

이에 따라서 본 논문은 수치해석 및 계측을 통하여 도시철도 6호선 보문정거장 하부통과 사례를 제시하여 추후 유사한 조건의 도심터널 계획 시, 최적설계와 안전시공을 위한 참고 자료로서 활용할 수 있도록 하고자 한다.

1.2 연구동향

기존 터널에 인접한 터널이나 접속부 또는 교차터널을 건설하는 경우에 기존터널의 안정성에 관한 문제가 발생한다. 특히, 도심지에서는 국가 중요한 기간 시설물들이 지하에 건설되어 다양한 형태의 구조물들이 기존 구조물과 접속 및 교차하는 사례가 많아지고 있다. 여기서 교차구조물은 기존 구조물에 수직, 수평 및 임의의 각도로 교차하는 직접 교차하는 시설물과 기존 구조물에 영향을 미칠 수 있을 만큼의 거리를 두고 평행 혹은 수직 및 임의의 각도로 인접한 경우로 정의한다. 교차 구조물의 안정성 및 계측에 관한 연구 등은 다음과 같다.

Adachi 등(1993)은 단면을 축소하는 방법으로 터널굴착을 모사한 2차원 평면변형조건의 모형실험을 수행하여 터널간 이격거리에 대한 영향과 주변지반의 거동 등에 관한 연구를 수행하였다. 교차 및 접속터널은 구조물의 특성상 3차원적인 형태를 취하고 있으며, 단일 터널에서와 같이 평면 변형 조건을 갖는 2차원 구조물로서의 해석이 어려운 3차원 구조물이다. 또한 기하학적 형상이 2차원으로 구현하기가 매우 어렵고, 거동양상도 매우 복잡해서 3차원적인 연구가 필요하였다.

김상환(2003)은 원통형 시험토조를 이용하여 점토지반에서의 모형실험을 수행하였다. 기존 터널과 인접하여 건설되는 상하 수직교차터널에 대한 실험으로서 기존 터널 및 기존 터널의 상·하부에 신설된 터널과의 상호거동을 연구·고찰 하였다.

유영현과 배규진(1997)은 교차터널의 상호 영향인자 중 교차터널간의 이격거리, 터널 크기, 교차터널의 변화 등 3가지 항목에 대한 수치해석 연구를 수행하여 교차부에서의 각각의 결과를 상호 비교·검토했다. 교차각 변화에 따른 상부터널 라이닝 하단부의 연직방향 변위는 교차각 0°의 경우에 누적 정규분포의 침하 경향성을 보이며, 교차각 45°, 90°의 경우에 가우스 정규분포의 변위경향을 보인다. 또한, 교차각 90°인 경우에 비해 45°인 경우가 수직변위가 더 많이 발생하는 경향을 보이고 있으며, 교차부와 외곽부와의 변위 경향 차이가 뚜렷하게 나타나고 있다.

1.3 시공사례

국내외적으로 토지의 효과적인 활용이나 터널 건설입지 조건이 어렵게 됨에 따라 교차터널과 같은 특수한 구조의 터널을 불가피하게 시공하여야 하는 경우가 발생되고 있다. 이러한 경우 단일터널의 설계 및 시공법으로는 적합하지 않은 경우가 많고, 주변 지반과 인접구조물에 미치는 영향을 고려하여 계측과 안정성 평가가 이루어져야 한다. 국내에서도 구조물 종류별로 도로, 철도, 지하상가, 지하저장시설 등에서 시공되고 있는 복합적인 교차터널의 형태를 나타내고 있으며, 터널 및 지하구조물의 교차 형태를 보면 수평방향 또는 수직방향 병렬터널이거나, 직각 또는 임의각도를 갖는 상하 교차터널 등 여러 형태를 갖는다.

교차터널의 사례는 국내외에서 많이 조사 되고 있다. 대표적으로 일본의 헤나산터널, 지하철 4호선 남태령 구간 파배기터널, 영동선 통리~도계간 동백산터널, 남해고속도로 진영터널, 성남~여주 복선전철 경안터널, 경부고속철도 금정터널, 안천국제공항철도 공덕구간, 지하철 9호선 고속버스터미널 구간 등이 있다. 본 연구 구조물과 같이 상부 구조물에 인접하여 터널이 굴착되어 간섭되는 기초파일을 절단하고 본선터널을 시공한 사례는 다음과 같다. 지하철 723공구 도림천 통과구간, 지하철 912공구 이수입체교차로 통과구간 등이 있다

2. 연구 구조물

2.1 보문정거장 현황

본선터널 상부에 기존 지하철 6호선 보문정거장 및 정화조가 약 1.7m, 하부에는 통신구 터널이 3.4m 정도 이격되어 위치하고 있으며, 지층분포는 토사 6.6m, 연암 8.8m 그 밑으로는 경암으로 이루어져 있으며, 하부통과 구간은 경암으로 이루어져 지반조건은 양호하였다. 도시철도 6호선 보문정거장 건설시 구조물의 부력에 대한 대책으로 하부에 부력방지 앵커가 약 10m 시공되어있다.

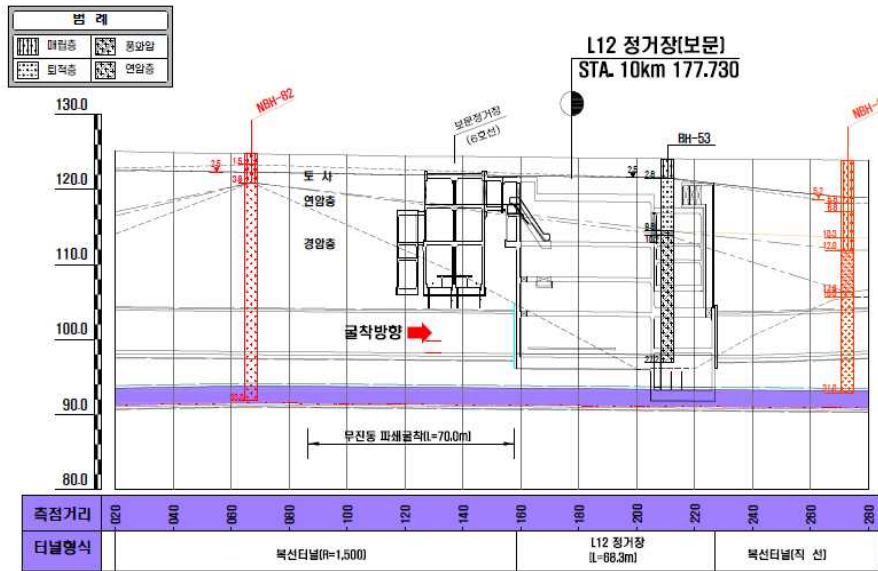


Fig. 2.1 보문정거장 현황

2.2 굴착공법

터널 상부 원지반 손상을 최소화하기 위해 소구경 강관보강을 적용하는 대신 링컷굴착 및 굴진장을 축소 적용하여 근접 통과구간의 터널 및 구조물 안정성을 추가로 확보하였으며, 미진동 굴착방법은 기계굴착 혹은 파쇄굴착을 적용하여 만일 주변 구조물에 영향이 작도록 허용진동치이내 제어발파가 가능할 경우에도 적용하여 굴착하였다.

Table 2.1 하부통과 공법

구분	보조공법	굴착공법	굴진장	천공각도	굴착방법
PD-2A-2	소구경 강관보강 (L=6m, CTC=3.0m)	링컷	0.6m	9° (길이1/2축소→미간섭)	상하반 미진동 굴착방법

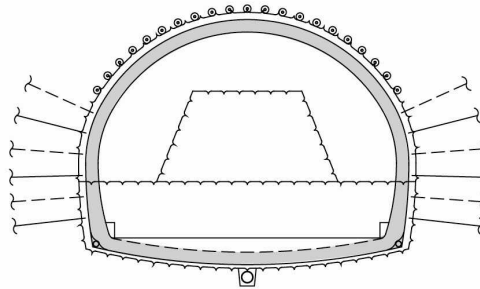


Figure 2.2 하부통과 공법 단면

3. 수치해석

3.1 개요

○ 우이~신설 도시철도 제4공구 중 L12 정거장 구간은 본선터널이 기존 지하철 6호선 보문 정거장 하부와 KT 통신구 사이를 근접하여 통과하는 것으로 계획되어 터널 굴착으로 인한 구조물 안정성 검토가 필요하였다. 해석 프로그램은 지반 FLAC 3D를 이용하였으며, 요소의 크기 및 배열의 영향을 최소화하기 위하여 터널 및 터널 주변영역의 요소망은 등간격으로 충분히 작게하여 지반을 모델링 하였다. 경계조건에 의한 구속영향을 배제하기 위하여 좌·우 및 하부 경계거리를 4.0D 이상 모델링하고 상부는 지표면까지 모델링하였으며, 지반은 Mohr-Coulomb 탄소성 모델, 모델링에 사용된 요소는 정거장에서 가시설 벽체 및 정거장 구조물은 Shell요소, 기둥은 Pile 요소, 본선터널 및 KT통신구에서 슛크리트, 라이닝은 Shell 요소, 강관다단은 Pile 요소, 록볼트는 Cable요소로 모델링하였다. L12 정거장 및 본선터널의 시공방법 및 시공순서를 모사하여 시공단계별 변위 및 응력의 변화를 관찰하여 기존구조물, L12 정거장 및 본선터널의 안정성 및 굴착공법의 적정성을 종합적으로 검토하였다.

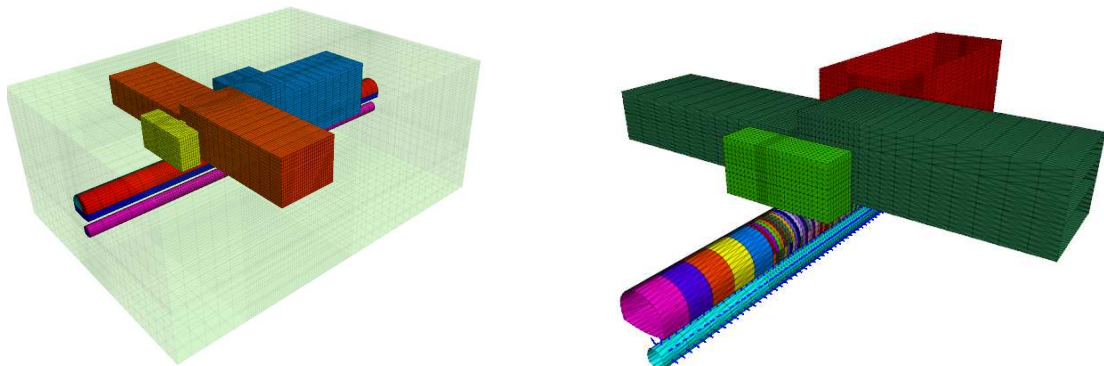
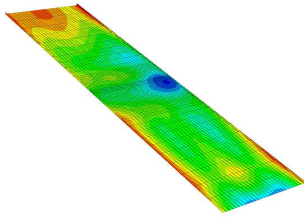
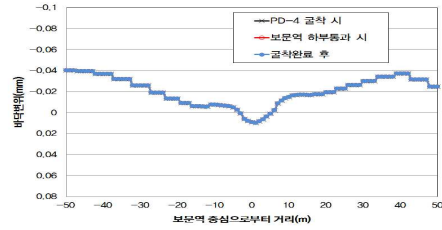


Figure 3.1 해석 요소망 및 모델링

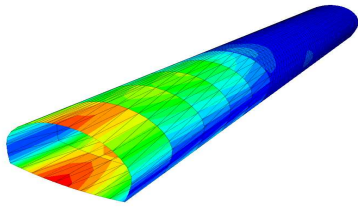


(a) 굴착완료 후 바다 변위



(b) 보문역 바다변위 발생경향

Fig. 3.2 보문역 정거장 침하영향 검토

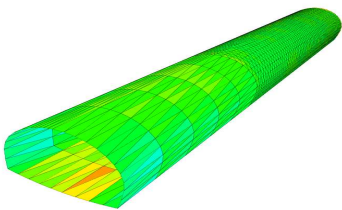


(a) 굴착완료 후 변위

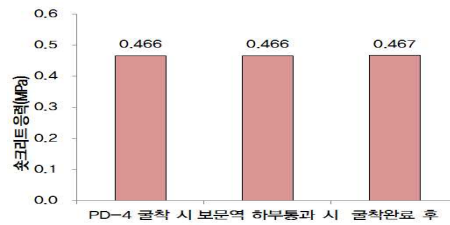


(b) 터널 변위 발생경향

Fig. 3.3 시공단계 별 변위 검토

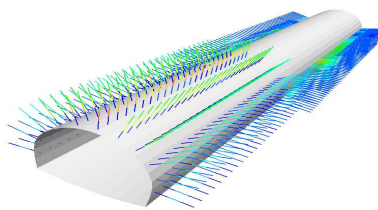


(a) 굴착완료 후 슛크리트 응력

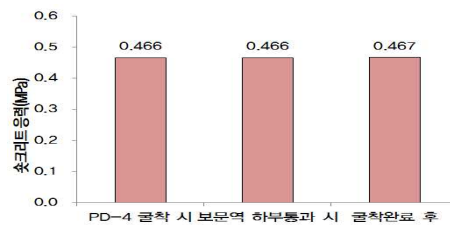


(b) 슛크리트 힘압축응력 발생경향

Fig. 3.4 시공단계 별 슛크리트 응력 검토



(a) 굴착 완료 후 록볼트 축력



(b) 록볼트 축력 발생경향

Fig. 3.5 시공단계 별 록볼트 응력 검토

3.2 3차원 수치해석에 의한 안정성 검토

- (1) 3차원 수치해석에 의한 안정성 해석결과, 본선터널의 최대 천단변위 0.34mm, 내공변위 0.077mm, 슛크리트 휨압축응력 0.467MPa(<8.4MPa), 록볼트 축력 2.34kN(<88.7kN)으로 발생하였으며, 변위가 작고 지보재 응력이 허용치 이내로 발생하여 터널에 대한 안정성을 충분히 확보하는 것으로 판단됨.
- (2) 보문정거장에 대한 침하영향 검토결과, 최대 침하량 0.04mm(철도청 관리기준치, 7mm), 부등침하량 0.034mm, 처짐비 1/2,108,000, 각변위 1/1,469,000로 발생하며, 모두 허용치 이내로 본선터널 굴착으로 인한 영향은 미소한 것으로 검토됨.
- (3) 정화조에 대한 침하영향 검토결과, 최대 침하량 0.0139mm, 부등침하량 0.014mm, 처짐비 1/1,216,000, 각변위 1/699,000로 발생하며, 모두 허용치 이내로 본선터널 굴착으로 인한 영향은 미소한 것으로 검토됨.
- (4) 통신구 터널에 대한 안정성 검토 결과, 천단변위 0.142mm(상향), 내공변위 0.0662mm, 콘크리트라이닝 휨압축응력 1.062MPa(<9.6MPa), 휨인장응력 0.026MPa(<0.64MPa)으로 발생하여 모두 허용치 이내로 통신구 터널의 안정성 확보가 가능할 것으로 판단됨.
- (5) 부력 안정성 검토결과, 현재수위 조건에 대해 앵커 절단시와 미절단시 안전율은 각각 1.484, 1.454로 기준 안전율(1.2)을 만족하며, 극한 수위조건(GL(-) 1.0m)에 대해서도 각각 1.374, 1.346으로 모두 기준 안전율(1.05)을 만족하여 안정한 것으로 판단됨. 3차원 구조해석으로 상시지하수위조건 일 때 하부 앵커의 절단 유무에 따른 안정성 검토결과, 앵커 절단전후 인장력의 변화는 최대 55kN 미만으로 발생하고, 극한지하수위조건 일 때 하부 앵커의 절단 유무에 따른 안정성 검토결과는 앵커 절단전후 인장력의 변화에서는 최대 60kN 미만으로 발생한다. 또한, 인장력 및 바닥 슬래브 단면력의 변화도 거의 없는 것으로 나타났으며 구조 검토결과 바닥 슬래브는 앵커 절단시에도 안정한 것으로 검토되었다.

4. 시공

4.1 시공 순서

보문역 하부통과 시공 단계는 Fig 3.1과 같으며 선대구경 천공 후 막장천공, 함암작업, 지보설치, Shotcrete 타설 순으로 진행되었다.



(a) 선대구경 천공



(b) 막장천공



(c) 함암작업



(d) 지보설치



(e) Shotcrete 타설

Fig. 2 Passing construction method under the station structure of the Bomun subway station

5. 계측

5.1 계측 항목

하부통과 구간 계측은 굴착에 따른 인접구조물(도시철도 6호선) 자동계측 시스템을 설치하여 계측을 실시하였으며 계측 항목으로는 EL BEAM을 이용하여 구조물의 기울기 및 변형상태를 파악하였고 균열측정계를 이용 구조물의 균열량 및 변형상태를 파악하였다. 또한, 진동측정계와 도상침하변위계를 이용 진동 및 균열량, 변형상태를 계측하였다.

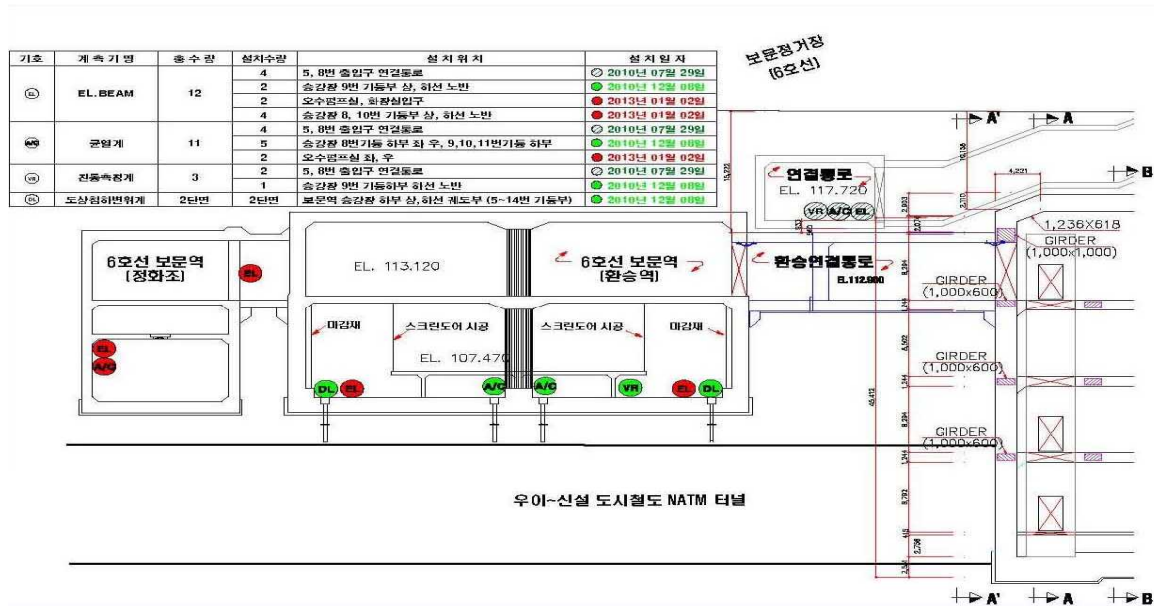


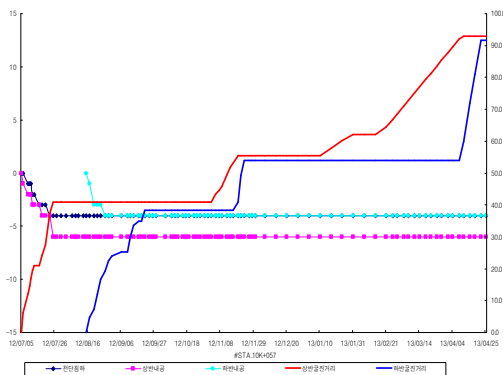
Fig. 5.1 Measuring cross section of the Bomun subway station

5.2 하부통과 계측 Data

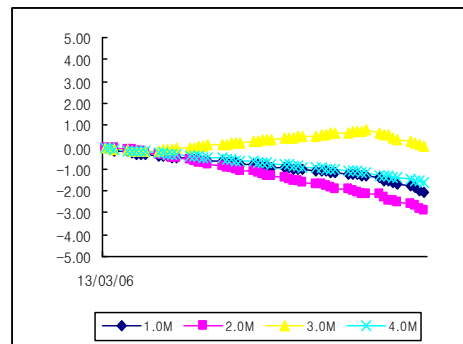
- (1) 본선 터널(하부통과구간) : 본선 터널(하부통과) 구간의 계측기기별 결과치를 측정된 결과 천단침하계에서는 (-)3.0 ~ (-)6.0mm의 침하량, 내공변위계에서는 (-)2.0 ~ (-)6.0mm의 내공축소 현상을 보였으며, 지표침하량은 (-)4.0 ~ (-)7.0mm 침하하였다. 또한 대표단면부의

계측결과 숏크리트응력계는 (-)0.72 ~ (+)0.60Mpa, 락볼트축력계에서는 (-)2.43 ~ (+)0.38Ton이 변화하였고, 암반의 이완변위를 측정하고자 하는 지중변위계에서는 (-)1.18 ~ (+)0.63mm 변화하였음.

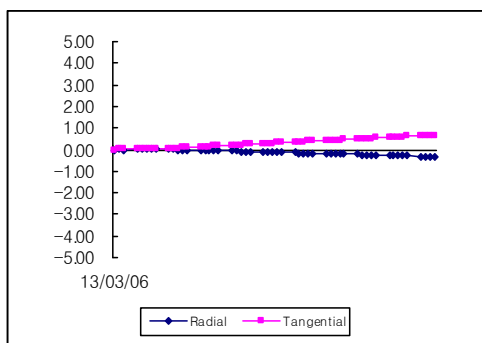
- (2) 위 계측 결과치중 지표면 침하계에서 일부구간(sta.10k+057 중앙부) 1차 관리기준치를 초과하여 지속적으로 계측관리를 수행하였으며, 추가 침하량이 발생하지 않고 수렴되어 안정적인 결과치를보여, “보문역” 하부 통과시 터널 계측 결과치는 초기에 변위 및 침하, 응력, 축력이 발생하였고, 하부 통과 후 전체적인 계측결과치가 기준치 안에 범주하여 수렴하였다.
- (3) 보문역 자동화 계측 : 도시철도 6호선 보문역사내 설치된 계측기별 결과는 균열측정계의 경우(-)0.0147 ~ (+)0.1417mm, 구조물경사계는 (-)0.2702 ~ (+)0.2458mm, 진동측정계는 0.686mm/sec이며, 도상침하계는 (-)1.43 ~ (+)01.78mm 침하하는 결과치로 기준치 안에 범주하여 수렴하였다.
- (4) 하부통과 기간중 계측기기를 통하여 정기적으로 계측값을 이용하여 도시철도 6호선 보문역사 및 터널에 대한 안정성을 검토한 결과 계측 관리치 및 연속변위 관리치 모두 기준치안에 범주하여 수렴되었으며, 이를 토대로 우이신설터널의 보문역 하부통과가 안정적으로 시공되었음을 알 수 있음.



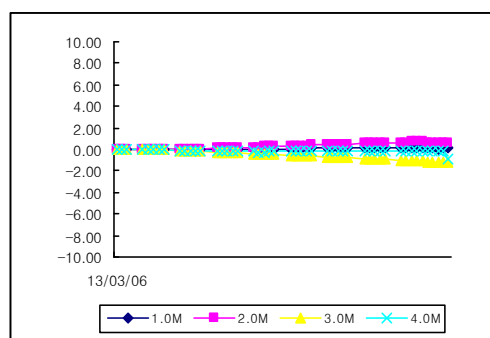
(a) 천단 및 내공변위 경사 Graph



(b) 축력계



(c) 응력계



(d) 지중변위

Fig. 5.2 하부 통과 계측 Data

7. 결 론

본 논문에서는 보문정거장 하부 통과구간에 대한 터널 굴착영향 및 대책수립을 위하여 본선 터널 굴착에 따른 인접구조물(지하철 6호선 보문정거장 및 정화조, 통신구 터널)에 미치는 굴착영향 및 터널 안정성, 터널 시공 시 부력방지 앵커 절단에 따른 보문정거장 구조물에 대한 안정성, 시공 중 계측 안정성 등에 대한 검토를 수행하였으며 그 결과 안정성이 확보되었음을 확인할 수 있었으며 이를 바탕으로 성공적으로 보문역 하부굴착을 시공하였다.

시공 후 계측 Data와 수치해석 비교 결과, 숏크리트 휨압축응력과 록볼트축력은 기존 수치해석과 유사한 경향을 보였다. 천단변위와 내공변위의 경우 수치해석과 침하량 차이가 발생하였으나 이는 기준치 안에 범주하였으며, 추가 침하량이 발생하지 않고 수렴되어 안정적인 결과치를 나타내었다.

추후, 많이 시공될 수 있는 기존구조물 하부통과와 관련하여 참고자료로써 활용 될 수 있으면 하는 바람이다.

참고문헌

- [1] 서울특별시도시철도공사(2001),“도시철도인접굴착공사관리실무”
- [2] 서울특별시도시철도공사(1998),“콘크리트도상 궤도유지관리 기술 지침서”
- [3] (사)한국지반공학회, 지반공학시리즈, “터널”도서출판 구미서관
- [4] 이상덕, 최수일과 구자갑(1994),“안정된 지하구조물의 설계 및 시공” 도서출판 새론
- [5] 신세영(2009), “지하철도 구조물 및 운행선 상부근접시공에 따른 안정성 검토 연구”, 서울과학기술대학교 석사학위논문
- [6] 김래현, 이기환, 이우진, 김대규, 김낙경 (2002) 현장시험에 의한 그라운드 앵커 시스템의 크립 및 단기거동 특성 연구, 대한토목학회 논문집, 제22권, 제6-C호, pp. 585~594.
- [7] 신방용 (1998) 지반특성에 따른 헬리컬 앵커의 극한인발력에 관한 연구, 대한토목학회 논문집, Vol.18, No.III-6, pp. 911~920.
- [8] 조용선, 권오엽 (1997) 단일 나선형 앵커의 인발 저항력에 관한 연구, 대한토목학회 논문집, Vol.17, No. III-3, pp. 275~283.
- [9] BSI. (1989) Ground Anchorages, BS 8081, British Standard Code of Practice, pp. 77~84.
- [10] DIN4125. (1990) Ground Anchorages Design, Construction and Testing, Deutsche Industrie Norm, pp. 341~389.
- [11] PTI. (1996) Recommendations for Prestressed Rock and Soil Anchors, Post-Tension Institute.