

RBM 굴착에 따른 수직구의 3차원적 거동 연구

A study on the 3-dimensional behavior of shaft by the RBM reaming

조만섭¹⁾, Man-Sup Cho, 이석원²⁾, Seok-Won Lee, 마상준²⁾, Sang-Joon Ma

¹⁾ (주)유니백 토목사업2본부 과장, Manager, Geotechnical & Tunnelling Div., UNIVeC Corporation

²⁾ 한국건설기술연구원 토목연구부 선임연구원, Senior Researcher, Civil Engineering Divi., KICT

SYNOPSIS : To investigate the behavior of air-shaft and existing tunnel by excavating the small-diameter shaft into the existing tunnel, prototype air-shaft was constructed and analyzed in this study. Geotechnical characterization was conducted by boring and rock cores obtained were tested in the laboratory. Field monitoring including radial and tangential stresses and displacements was conducted with the 3-dimensional numerical analysis of prototype air-shaft. Results of field monitoring were compared with the numerical results. The results showed that maximum displacement of 2.11mm and maximum tangential stress of 54.0 kg/cm² were obtained during shaft excavation near the right shoulder of the existing tunnel. The comparison of these field measurements with 3-dimensional numerical analysis showed that much more higher stress was measured during excavation compared to the numerical results even though the trends of stress and displacement were similar.

Key words : Shaft, RBM, 3-dimensional analysis, Monitoring, TPMS

1. 서론

터널에서의 3차원 기하학적 구조는 특별히 본선과 연결되는 작업사갱 및 분기갱, 수직구 등에서 나타나며, 그중 수직구의 시공은 도심지에 건설되는 지하철의 작업구 및 환기구, 광업소의 환기용 수직갱, 장대 철도 및 도로터널의 작업구 및 환기구 등의 목적으로 최근 설계에 반영되는 사례가 증대되고 있다. 이와 같은 수직구의 3차원 기하학적 구조는 수평방향 터널과 연직으로 시공되기 때문에 접속부에서의 굴착에 따른 거동규명의 연구가 필요하며, 접속부의 거동에 따라 지보방식과 지보량이 결정되므로 변형거동과 근사 변위량, 지보재에 작용하는 응력수준 등의 파악은 설계에 매우 중요한 요소가 된다.

기존의 국내에서 시공된 수직구 굴착방식은 하향굴착방식이 대부분이었기 때문에 수직구 주변의 지중 응력 및 내공변위, 지보재 계층 등을 수행하여 지반거동에 대한 대책수립이 가능하였다. 하지만 최근 설계가 완성된 혹은 준공된 터널 중에서는 상향굴착과 하향굴착을 병행하는 방식을 다수 채용하고 있지만 상향굴착 시 발생하는 하부터널에서의 변형거동에 대한 계층사례 및 연구결과들이 발표된 바가 없었다. 따라서 본 연구에서는 여러 가지 수직구의 굴착공법 중에서 상향굴착공법인 RBM(Raise Boring Machine)을 이용한 수직구의 시험시공을 통하여 하부갱도의 변위 및 변형에 대한 특성을 파악하고자 하며, 아울러 1차 지보재의 접선방향 및 반경방향의 응력을 측정하여 RBM 시공에 대한 지반의 종합적인 거동평가를 수행하였다. 이와 함께 본 시험시공의 실내시험으로부터 구한 현장 지반의 물성치를 이용하여 3차원 유한요소해석을 실시하여 실제 계층에 의한 변형 및 응력거동과 수치해석으로부터 구한

지반거동을 상호 비교하여 보았다.

2. 시험시공 개요 및 지질조건

본 연구의 시험시공을 위한 현장은 해발 445.0m의 강원도 삼척시 도계읍 상덕리에 위치한 (주)경동의 S 광업소에서 수행하였고, 그림 1에 시험시공 현장의 정면도를 나타내었다. 수직구의 상단은 사갱입구로부터 약 270m 하부에 있는 1 level(G.L. 160m)에 위치하며, 하단은 3 level(G.L. 60m)에 위치하고 있다. 따라서 수직구의 거리는 약 100m이며, 순 RBM 리밍 거리는 상부 작업갱과 하부 작업갱의 높이를 제외한 약 90m이다. 본 시험시공에서 사용된 RBM장비는 스웨덴의 Atlas Copco사에서 제작한 83RM-DC type이며, 직경 3.05m의 수직구 단면을 굴착하기 위해서 총 22개의 커터를 장착하였다(그림 2 참조).

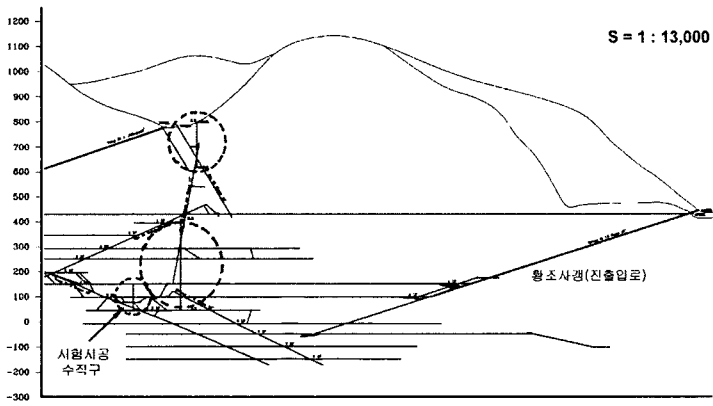


그림 1. 시험시공 현장주변 지형도

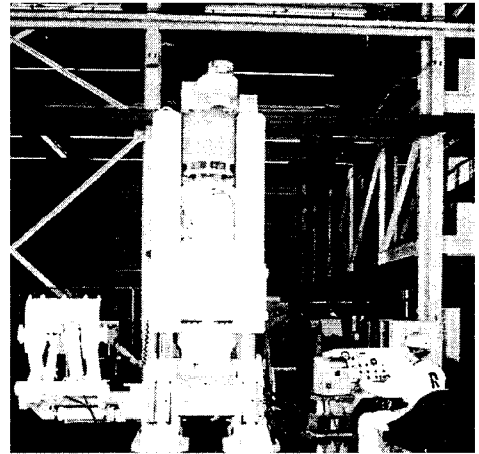


그림 2. RBM(83RM-DC type)

본 연구의 시험시공을 수행한 S 광업소 지역의 지질은 쥘라백악기 신라통의 도계동층과 제4기 충적층으로 구성되어 있으며, 도계동층은 경상계지층들 중에서 최상위에 속하는 지층으로서 도계동을 중심으로 서남부 일대에 폭넓게 분포하고 있다. 본 시험시공 전구간의 암종은 역암으로서 역암의 기질은 알코스질 또는 응탄질로 갈색 내지 담홍색으로 역(礫)의 입도가 높고 크기가 5cm이내의 것들이다.

3. 계측 개요 및 장비

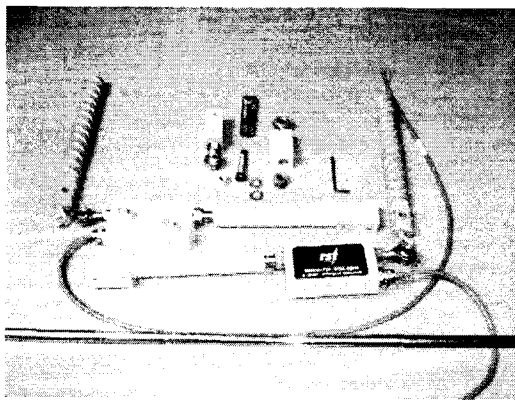
3.1 계측 개요

본 시험시공에서는 이미 안정화된 하부 작업갱의 지보재에 수직구를 굴착함에 따라 발생하는 지보재의 응력수준을 측정하기 위하여 접선방향과 반경방향의 쏫크리트 응력계를 좌·우측벽 및 천단부에 3set을 설치하였다. 그리고 수직구 굴착에 따른 하부 작업갱의 내공변위량과 변형거동을 정량적으로 도출하기 위하여 TPMS (Tunnel Profile Monitoring System)를 좌측벽 하단에서 우측벽 하단까지 총 8 set을 설치하였다. 또한 하부 작업갱의 축방향 변형거동을 측정하기 위하여 천단부에 축방향으로 1 set의 TPMS를 추가로 설치하였다. RBM 굴착에 의한 지반의 거동은 일반적으로 drill & blast에 의한 거동에 비해 적은 것으로 알려져 있다. 그리고 본 시험시공의 수직구 직경이 3.05m로 비교적 소규모에 속하기 때문에 작업자에 의한 오차영향을 최소화하고자 자동화 계측을 적용하였다. 계측기기의 설치 위치는 RBM굴착에 따른 버력의 적재범위와 반출장비의 작업반경 등을 고려하여 결정하였고, 가능한 수직구와 인접하여 수직구 벽면으로부터 4m 이내에 모든 계측기기를 설치하였다.

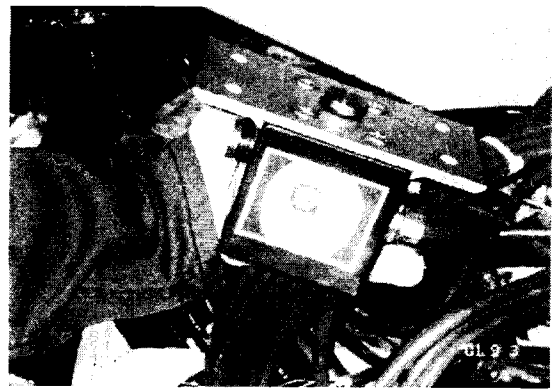
3.2 계측 장비의 특성

RBM을 이용한 수직구 굴착시 하부갱도의 내공변위 및 내공형상을 파악하기 위하여 TPMS(RST Instrument LTD, Canada)를 사용하였고, 길이변위 센서와 기울기 센서를 포함하고 있어 터널의 변위량과 변형 형상을 정량적으로 측정할 수 있다. 또한 정밀도가 taper에 의한 내공변위 측정에 비해 매우 높기 때문에 본 시험시공의 목적에 가장 적합한 장비로 선정되었다. 쏿크리트 응력계는 수직구 굴착에 따른 1차 지보재의 응력변화를 파악하기 위하여 하부 작업갱도의 쏿크리트 타설과 함께 설치하였고, 본 시험시공에서는 진동현식(V/W type) 쏿크리트 응력계를 사용하였다.

그림 3에는 각각 본 시험시공 현장에서 사용된 TPMS 및 쏿크리트 응력계의 외관을 나타내었고, 그림 4에는 하부 작업갱도에 설치된 TPMS를 보이고 있으며, 횡단면 상으로 8set을 설치하였고 작업갱도 종방향으로 1set을 설치하였다.



(a) TPMS



(b) 쏿크리트 응력계

그림 3. 시험시공에 적용한 계측기기

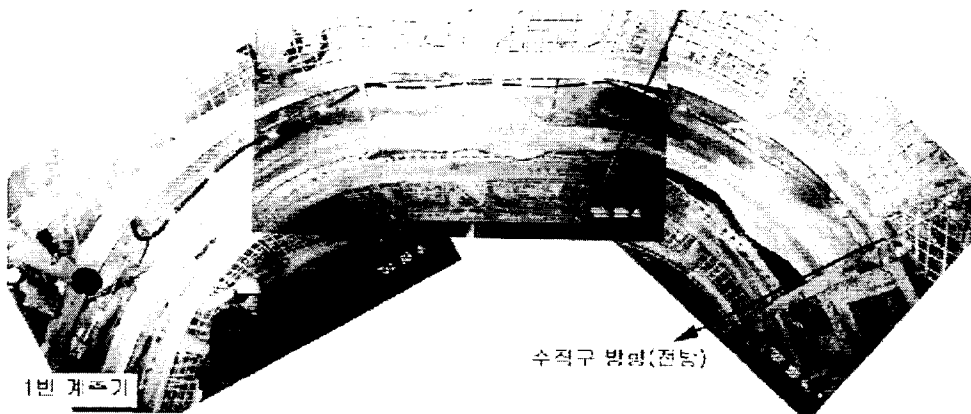


그림 4. 하부 작업갱 TPMS 설치 전경

4. 계측결과 및 분석

본 시험시공 현장에 설치된 전단면 내공변위계(TPMS) 및 Shotcrete 응력계에 대하여 2001년 9월27일~2001년 11월22일까지 실시한 계측결과를 살펴보면 다음과 같다.

수직구의 굴착에 따른 지반의 이완과 기하학적 구조에 의해 발생하는 지반의 변형거동으로부터 1차 지보재인 슛크리트에 작용한 접선방향 및 반경방향 응력은 그림 5에 나타난 천단부의 예와 같고, 그림 6에는 No.6 TPMS센서의 최대 길이 변형량과 최대 기움 정도를 예로서 나타내었고, 각각의 시간에 따른 변위 및 각도의 변화로 표시하였다. 수직구의 굴착시 시작된 10월 4일부터 서서히 응력이 증가한 후 임의의 시점에서 수렴 혹은 감소하고 있으며, 10월 9일에는 모든 응력과 변위가 갑작스런 증가현상을 보이고 있어 작업일지에 기록이 되지 않은 외적요인이 발생된 것으로 사료되므로 이 시점의 증가분은 분석 시 제거하였다.

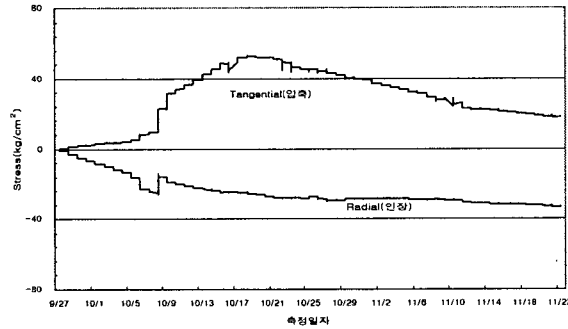
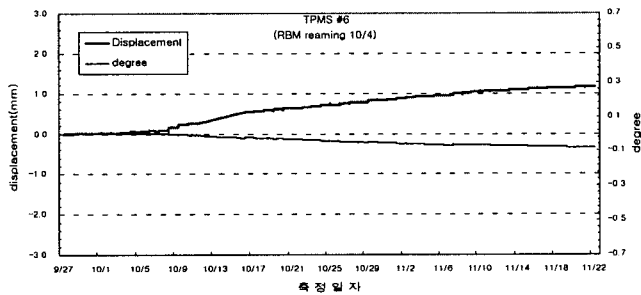


그림 5. 슛크리트 응력 측정결과 예 (천단부)



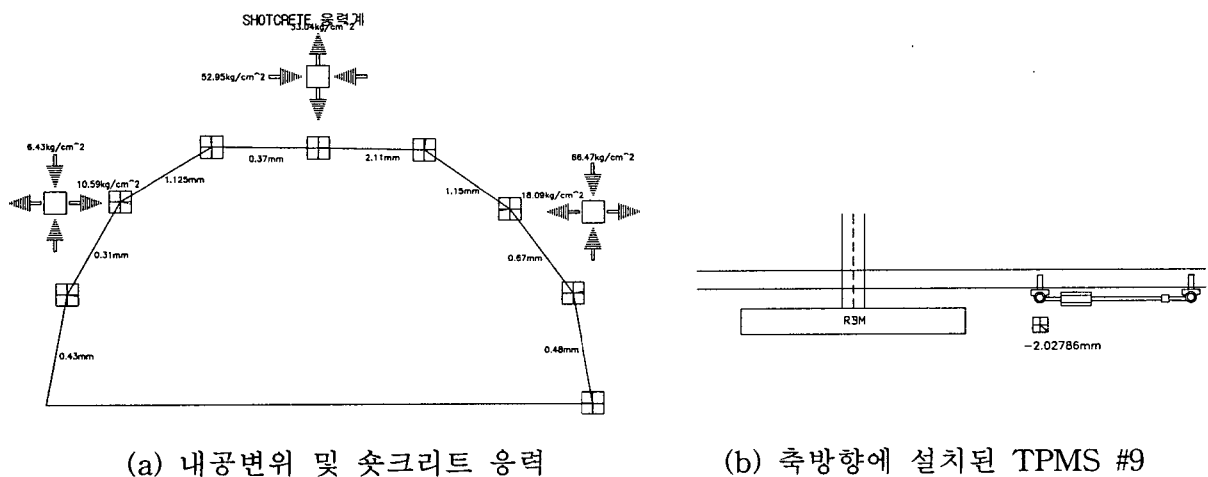
※ 참고

- 변위 : (+)인장, (-)압축

- 각도 : (+)∩, (-)∪

그림 6. TPMS 내공변위 측정결과 예 (No. 6)

그리고 본 시험시공에서 수행한 하부 작업경에서의 슛크리트 응력과 내공변위 계측결과를 그림 7에 종합적으로 표시하였고, 세부적인 분석결과는 다음과 같다.



(a) 내공변위 및 슛크리트 응력

(b) 축방향에 설치된 TPMS #9

그림 7. 내공변위 및 슛크리트 응력의 계측결과

4.1 슛크리트 응력의 분석결과

스틁크리트 응력계 의 모든 경우에서 반경방향으로는 인장력(-)이 작용하고 있으며, 접선방향으로는 압축력(+)이 발생하는 것으로 측정되었고, 각 부위별 응력 의 크기는 천단부와 우측벽부에서 비교적 크게 나타났다. 최대응력은 하부 작업갱의 우측부에 설치된 응력계의 접선방향에서 66.47kg/cm² 로 나타났으나, 10월 9일 경에 장비의 충돌 혹은 대규모 버력 의 낙하와 같은 외적 요인으로 추정되는 급증가(약 8kg/cm²) 현상이 발생되었다. 따라서 외적요인에 의한 응력증가분을 제외한 접선방향의 최대응력은 약 54.0kg/cm² 정도로 추정할 수 있으며, 일반적인 슛크리트 응력 의 관리기준치인 항복응력(0.4 σ_{ck})의 80% 를 적용할때 0.4×210kg/cm²×0.8 = 67.2kg/cm²으로써 관리기준치 내에 분포하고 있음을 알 수 있다.

4.2 내공변위 분석결과

RBM 리밍이 시작된 10월 4일 경에서부터 하부 작업갱의 변위가 증가하는 경향을 보이고 있으며, 변위량은 전체 형상에 비하여 극히 미소하지만, 상대적으로 좌측벽보다 우측 어깨부에서 큰 변위량이 발생되었다. 이러한 경향은 슛크리트의 응력 의 분석결과에서도 동일한 경향으로 나타났는데 즉, 좌측벽과 천단부의 경우 내부로 축소되는 변형을 보이며, 우측 어깨부에서는 외부로 밀려 나가는 변형을 보이고 있으나 거의 미미한 정도인 것으로 판단할 수 있다. 최대 변위량은 우측 어깨부에 설치된 #5에서 2.11mm로 발생하였으나 시간이 경과할수록 수렴되는 경향을 보이고 있어 하부 작업갱은 안전한 것으로 판단된다. 또한 축방향으로 설치된 #9의 경우에는 수직구 쪽에서 천단침하의 경향을 나타내고 있으나 변위량이 적고 시간이 경과할수록 수렴되는 경향을 보이고 있다.

5. 시험시공 3차원 탄소성 유한요소해석

본 연구에서는 진술한 바와 같이 수직구의 RBM굴착에 따른 하부 작업갱도의 역학적 거동을 파악하기 위하여 슛크리트 응력 및 내공변위 계측을 수행하였고, 수직구의 굴착에 따른 1차 지보재의 응력이 증가하며 천단부의 침하경향을 확인할 수 있었다. 이와 같은 실측에 의한 거동과 수치해석적인 거동을 상호 비교하고자 본 절에서는 3D-sigma FEM program을 이용하여 수직구의 3차원 해석을 수행하였다.

5.1 입력물성치 및 경계조건

본 시험시공의 시추조사 결과를 토대로 수직구 전구간의 암반상태를 평가한 결과, 대부분 연암으로 조사되었으나 부분적으로 25m ~ 37m, 73m ~ 82m 구간에서 풍화암이 산출되었다. 따라서 본 해석에서는 실내실험을 통하여 직접 구한 입력물성치들을 해석에 적용하였고, 표 1에 나타내었다.

표 1. 수치해석 입력변수(단위 : ton/m²)

| 심도 (m) | 수직구 직경(m) | SFRC | | |
|--------|----------------|-------|---------|------|
| | | 두께(m) | 탄성계수 | 포아송비 |
| 0 - 90 | 3.05 | | | |
| 하부갱도 | 4.8(W)× 3.5(H) | 0.1 | 680,000 | 0.28 |

| 심도(m) | 지반 종류 | 단위중량 | 일축강도 | 인장강도 | 탄성계수 | 포아송 비 | 점착력 | 내부 마찰각 | 축압 계수 |
|-------|-------|------|-------|-------|-----------|-------|-----|--------|-------|
| 00-25 | 연암 | 2.70 | 4,240 | 619.0 | 4,820,000 | 0.2 | 924 | 42.4 | 1.0 |
| 25-37 | 풍화암 | 2.74 | 1,768 | 498.4 | 1,355,910 | 0.22 | 678 | 15.7 | 1.0 |
| 37-73 | 연암 | 2.70 | 4,240 | 619.0 | 4,820,000 | 0.2 | 924 | 42.4 | 1.0 |
| 73-82 | 풍화암 | 2.74 | 1,768 | 498.4 | 1,355,910 | 0.22 | 678 | 15.7 | 1.0 |
| 82-90 | 연암 | 2.70 | 4,240 | 619.0 | 4,820,000 | 0.2 | 924 | 42.4 | 1.0 |

본 해석에서는 그림 8과 같이 수직구의 전체 심도(약 90m)를 모델링하였고, 대상 수직구는 지표로부터 약 200m 하부에 위치하므로 모델의 상부에 상재하중을 540ton/m^2 로 가하였으며, RBM의 굴착특성상 bit force(thrust)를 수직구의 굴착면에 대해 약 10ton/m^2 로 가하였다. 본 현장의 축압계수(K_0)를 파악할 수 없었으므로 $K_0 = 1.0$ 으로 가정하였고, 아래와 같이 총 20개의 step으로 수직구의 굴착을 모델링하였다.

- 1step : 자중에 의한 지중응력발생 → 2step : 하부 접속횡갱 굴착 →
- 3step : 접속횡갱 슛크리트 타설 → 4step : 수직갱 reaming 1.4m →
- 5step : 수직갱 reaming 4.0m (total 5.4m) →
-
- 16step : 수직갱 reaming 8.0m(total 54.4m) →
-
- 20step : total 89.6m

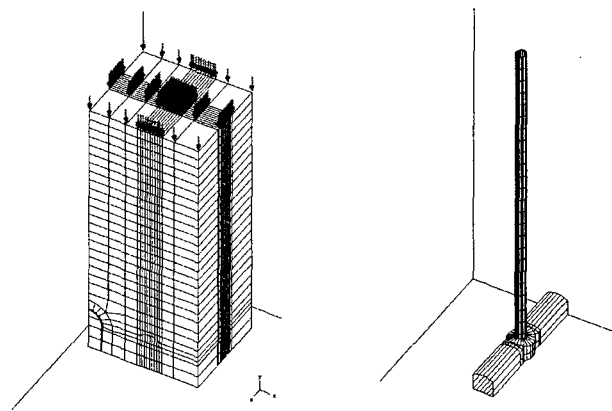


그림 8. 수직구의 단계별 굴착 해석을 위한 3차원 모델

5.2 해석결과 및 계측치와의 비교 분석

수직구의 RBM굴착에 따른 하부 작업갱도의 역학적 거동을 파악하기 위하여 슛크리트 응력 및 내공 변위 계측을 수행하였고, 수치해석적인 거동과 실제 계측에 의한 거동을 상호 비교하여 보았다. 그림 9에는 수직구로부터 작업갱의 축방향으로 3m 정도 이격된 지점에서의 y-방향 슛크리트 응력을 나타내었다. 그림 9에서 보는 바와 같이 터널의 양 측벽부에서는 접선방향 응력이 압축응력으로 작용하고 있으며, 천단부에서는 인장응력으로 나타나고 있다. 그리고 최대 응력은 좌측벽에서 약 5.3ton/m^2 (약 0.53kg/cm^2)로 나타났으며, 계측결과에 의한 최대 접선방향응력 54.0kg/cm^2 에 비해 매우 적은 응력수준을 보이고 있다. 또한 수직구가 굴착된 4step에서 y-방향 응력은 크게 증가하였고, 이후 6step(천단에서부터 9.4m)까지 굴착하는 동안 응력이 증가하다가 약 13m 지점까지 굴착한 이후부터는 응력이 감소하는 경향을 보이고 있다. 즉 수직구의 굴착에 의한 응력증가 현상은 약 10m 내외의 범위인 것으로 추정할 수 있으나, 이 범위는 해당 수직구 및 터널 규모와 지반의 물리적, 역학적 특성에 따라 상이할 것으로 사료된다.

그림 10은 슛크리트 응력을 조사한 동일 지점에서의 y-방향 변위를 나타낸 것이며, 대칭성을 고려하여 우측벽에서 천단까지의 범위를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 y-방향 변위는 하반에서 (+)방향의 융기가 발생되었고, 천단부로 이동할수록 (-)방향의 내공축소 경향을 보이고 있다. 이 경향은 절대적인 변위량에서는 차이를 보이고 있으나 실제 내공변위를 측정된 TPMS #9의 결과와 일치하는 경향임을 알 수 있으며, 현장 계측에 의한 결과와 유한요소해석에 의한 결과가 비교적 유사한 경향임을 알 수 있었다.

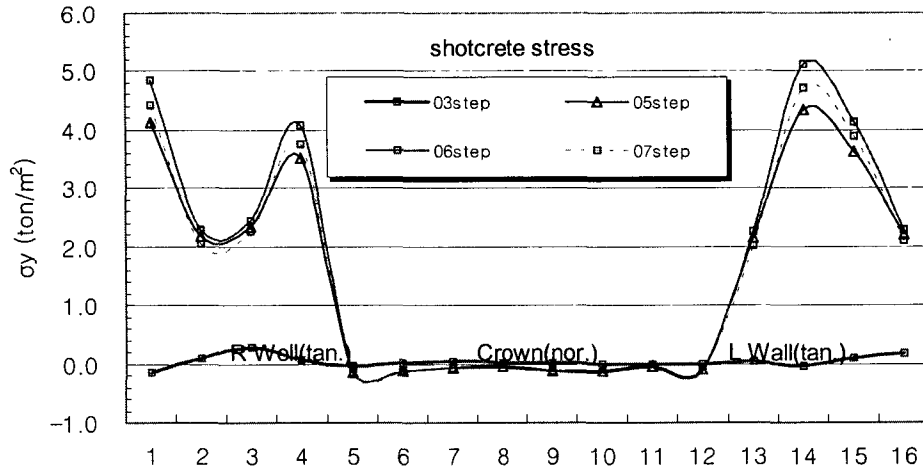


그림 9. 수직구 주변 슛크리트의 응력분포

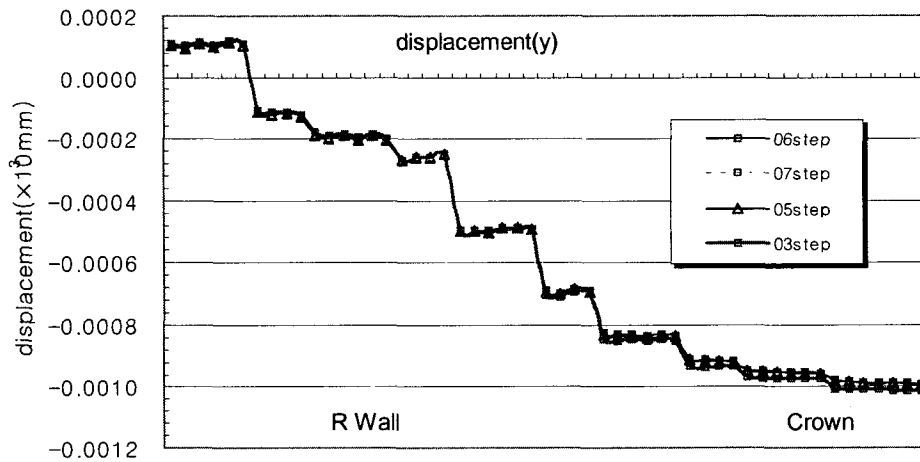


그림 10. 수직구 주변 내공변위 결과

6. 결론

본 연구에서는 RBM을 이용한 수직구의 시험시공을 통하여 하부갱도의 변위 및 변형에 대한 특성을 파악하였고, 아울러 1차 지보재의 접선방향 및 반경방향의 응력을 측정하여 RBM 시공에 대한 지반의 종합적인 거동평가를 수행하였다. 이와 함께 본 시험시공의 실내시험으로부터 구한 현장 지반의 물성치를 이용하여 3차원 유한요소해석을 실시하였으며, 수치해석적 결과와 실증적 결과의 상호 비교하여 보았다.

본 시험시공 계측 결과로부터 하부 작업갱의 최대 내공변위 및 슛크리트 응력은 우측 어깨부에서 각각 2.11mm(내공축소)와 54.0kg/cm²(접선방향응력)로 나타났다. 본 시험시공 대상지반이 연암 혹은 풍화암 수준의 강도와 3차원 기하학적 구조로 인하여 많은 변형이 예상되었으나, 관리 기준치 이하로 비교적 안정된 상태로 수렴되었다. 시험시공 대상을 모델로하여 3차원 유한요소해석을 수행한 결과, 실제 계측된 변위량에 비해 다소 적게 나타났으나 변형특성은 해석과 계측결과가 유사하게 나타났다. 또한 슛크리트에 작용하는 응력은 좌측벽에서 약 0.53kg/cm²로 계측결과에 의한 최대 접선방향응력 54.0kg/cm²에 비해 작게 나타났으며, 따라서 탄소성, beam model에 의한 해석적 결과와 실제 계측에 의한 결과와의 정량적인 비교에서는 다소 차이가 있음을 규명하였다.

감사의 글

본 연구는 99산학연연구개발사업과제의 일부로 수행되었으며 건설교통부 및 (주)경동, 대우엔지니어링, 삼보기술단, 한국철도기술공사의 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 장은식, 오인석 (2000), “고속도로 터널의 수직갱, 사갱 설계 및 시공”, 터널기술, Vol. 2, No. 1, pp. 42-52.
2. 한국건설기술연구원 (1998), “국내 터널설계 기술력향상을 위한 신기술 연구”, 수탁연구, pp. 55-80.
3. 한국건설기술연구원 (1999), “도로설계편람-터널편”, 건설교통부.
4. 한국건설기술연구원 (2000), “철도터널 내공단면적 저감을 위한 통풍공(Air-Shaft)의 공기역학 설계기술 및 수직구 굴착공법 개발”, 99산학연연구개발사업 1차년도 보고서, pp. 119~193.
5. 한국도로공사 (1999), “둔내터널 설계와 시공”, 터널기술, Vol. 1, No. 2, pp. 134-148.
6. 한국자원연구소 (1998), 1:250,000 삼척지질도폭 설명서, KR-98(S)-1, 과학기술.
7. The Robbins Company (1992), “The Raise Boring Handbook”, The Robbins Company, Washington.
8. U.S. Army Corps (1997), “Engineering and Design Tunnels and Shafts in Rock”, Engineering Manual 1110-2-2901, pp. C-1~C14.