

3아치터널의 지표면 침하에 관한 연구

Study on Ground Surface settlement of a 3-Arch-shaped Tunnel

신강호*
Shin, Kang Ho

박두성**
Park, Tu Sung

박오성***
Park, O Sung

김재권****
Kim, Jae Kwon

ABSTRACT

A three-arch NATM tunnel with a total length of 53.5m has been constructed for a metropolitan subway station in Daejeon, Korea. The tunnel, whose crown is located 22m below the ground, crosses the old Daejeon station underneath. Since the tunnel comprises a very large section (10×28 m; largest in Korea), it shows complicated mechanical behaviors, especially near portal, due to its short length relative to width.

As far as its construction step is concerned, the center tunnel is excavated with pre-excavated pilot tunnel, which is a unique feature of this tunnel (first in Korea) to secure safety during construction and prevent excessive settlements. The both side tunnels are then excavated along with the center tunnel.

Since significant amount of settlement was predictable from the design stage, extensive monitoring was performed during construction. During excavation of the side tunnels, unexpected large settlements up to ~140mm (estimated 41.8 mm at design stage) was measured at the center tunnel. In this paper, we study the causes of this unusually large ground settlement. We believe that the extra-wide tunnel excavation increases the stress influence zone of portal in longitudinal direction and consequently add more settlements to the existing due to excavation and consolidation.

1. 서론

2002 ~ 2004년 삼성물산에 의해 시공된 대전 지하철 1호선 5공구 104 정거장은 78.8m 연장의 개착식 지하 구조물과의 개착부 및 이와 연결된 53.5 m 연장의 3아치 터널로 시공되었다. 본 3아치 터널 구조물은 지하철 승강장으로 사용되는 관계로 높이 10m에 비하여 폭이 28m 정도로 매우 넓어서 국내 최대 폭의 3아치형태의 단면으로 이루어져 있다. 이 터널은 낡은 대전역사 및 광장을 통과하는 위치에 있으며 터널의 끝은 경부선 선로에 인접한다. 이 터널은 전체적으로 풍화암 층에 설치되었으

* 삼성물산 토목기술팀 담당차장

** 삼성물산 대전지하철 1-5공구 현장소장

*** 삼성물산 토목영업팀 담당부장, 정회원

**** 삼성물산 토목기술팀 팀장, 정회원

며, 천단 심도는 23 m로서 터널 폭에 비해 얇은 관계로 지표침하가 큰 저 토피 터널의 특성을 보이고, 또한 터널의 길이도 상대적으로 짧아서 터널은 전체적으로 갱구의 영향 많이 받는 특성을 갖는다.

당초 이 터널은 최초 파이프 루프와 동바리를 이용한 굴착 및 현장타설 Box 구조물로 계획되었으나, 시공성, 안정성 등의 문제로 2001년 11월경 다단계 분할 형태의 3아치 NATM 터널로 설계 변경되었다. 이 3아치 터널은 1개의 중앙터널 그리고 2개의 확폭 터널의 기본 구성 외에 시공중 안정성 증대, 지표침하 방지 등의 목적으로 중앙터널과 확폭 터널의 사이에 2개의 선진터널을 추가한 것으로 국내 최초의 형태이다. 주요한 시공단계는 초기단계로 2개 선진터널의 순차시공 및 기둥설치 단계, 중기단계로 중앙터널 시공 및 중앙부 슬래브 타설 단계, 말기 단계로 좌우 확폭 터널 병행굴착 및 확폭부 라이닝 타설로 구분된다. 각 단계는 상·하반으로 분할하여 굴착 시공되었으며 각 상반굴착 단계에서는 터널 전장에 걸쳐 강관다단 그라우팅이 시공되었다. 본 터널은 계획단계에서부터 터널의 안정성과 함께 역사 및 선로 등 지표구조물의 영향을 최소화하는 것에 목적을 두었기에 다단계 굴착 및 다양한 터널 내부 보강공법이 적용되었다. 그러나 터널 설계변경 이 정거장의 어스앵커 흠막이 형태의 개착부가 이미 시공된 상태에서 진행되어 그라우팅 등 터널 상부의 지반 보강은 수행되지 않았다.

본 터널은 설계단계에서부터 터널의 시공과 관련하여 상당한 지표침하가 예상되었기에 시공 중 안정관리 및 인근 구조물의 영향 정도 등을 파악하기 위하여 다양한 계측이 다양한 계측이 수행되었다. 이 중 특히 지표침하량은 최대 140 mm 정도로 매우 크게 측정되어 설계 예상치 42mm를 크게 상회하였다. 시공 중 지표침하는 주로 선진터널 단계와 확폭터널 단계에서 발생하였는데 전체 지표침하량은 이 두 단계에서 약 95 % 정도를 차지하였다. 반면 터널의 천단침하는 선진 터널과 중앙 터널단계에서는 10 mm 이내의 작은 값으로 대체로 일정한 반면, 확폭 터널 단계에서의 천단침하는 갱구부에 가까울수록 크게 나타나 갱구부 위치에서의 천단침하량은 최대 약 28 mm 정도로 나타났다. 한편 지하수위는 터널 굴진이전 개착부 굴착단계에서 이미 GL-22m 로 상당히 저하된 상태로 풍화암에 위치하였으며, 선진터널을 굴착함에 따라 잔여수위도 GL-27m 까지만 추가로 저하되었을 뿐 이후 단계에서는 사실상 일정한 수위를 유지하였다. 시공 중 특기할 사항은 터널의 굴진 도중 갱구부 흠막이 가시설이 터널의 종단 방향으로 상당히 전진한 것이 확인되어 가시설의 보수보강을 실시하였다. 본 갱구부의 종단거동은 3아치 터널 설계시 특별한 고려가 없었던 부분으로서 계측기기에 의한 변위 측정은 이루어지지 않았으나, 무시할 수 없을 정도로 관측되었다.

이에 본 고에서는 대전 지하철 1호선 5공구 아치 터널의 설계 및 시공의 과정과, 지표면 침하를 포함한 시공 중 계측 및 관측 자료를 통해 3아치 터널의 거동을 간략히 소개코자 한다.

2. 본 론

2.1 현장 여건

본 3아치 터널은 그림 1과 같이 대전지하철 104정거장 구간 중 대전역사 하부를 통과하는 연장 53.5m 구간으로 터널의 갱구부로부터 약 30m 떨어진 지점에 대전역사가 위치하고 터널의 끝 부근에는 경부선 선로가 위치한다. 본 터널 상부에 위치한 대전역사는 최초 준공이후 43년이 경과된 지상3층 라멘조 노후 구조물로서, 대전역사에 대한 정밀 안전진단 보고서에 의하여 3아치 터널 시공 중 부등침하에 의한 허용 각변위는 1/500 ~ 1/600 으로 설정되었다. 참고로 이 건물의 터널 상부 부위는 동서관통도로 건설 및 대전역사의 전체 remodelling 계획에 따라 2004년에 철거되었다

한편 경부선 선로에 대한 허용 침하량은 철도 보선기준에 의하여 7mm/10m 이하가 제시되었으나, 현실적으로 만족시키기 어려운 조건이었다. 따라서 시공사에서는 철도의 부등침하가 최소화 되도록 터널의 설계 및 시공을 시행하되, 선로가 본 구간에서 비교적 보선이 용이함을 감안하여 철도청에서는 시공 중 선로보선 등의 유지관리 하는 것으로 계획되었다.

지반조건으로는 터널 상·하반 모두가 풍화암에 위치하고 있으며, 지표면으로부터 매립토, 충적토, 풍화토, 풍화암, 연암 순으로 분포한다. 터널 천단에서 지표까지의 토피는 약 23m이며, 지하수위는 터널굴진에 선행한 정거장 개착부의 굴착으로 인해 터널 천단보다 약 1~2 m 상부에 위치하고 있었다. 변경설계시 시행한 투수계수시험에 의하면 터널주변 풍화암의 투수계수는 $7.17 \times 10^{-5} \sim 1.17 \times 10^{-4}$ cm/sec 로 비교적 투수성이 높게 나타났으며, 공내 재하시험 결과에 의하면 풍화암의 변형계수는 평균 1.3×10^{-4} t/m² 으로 나타났다.

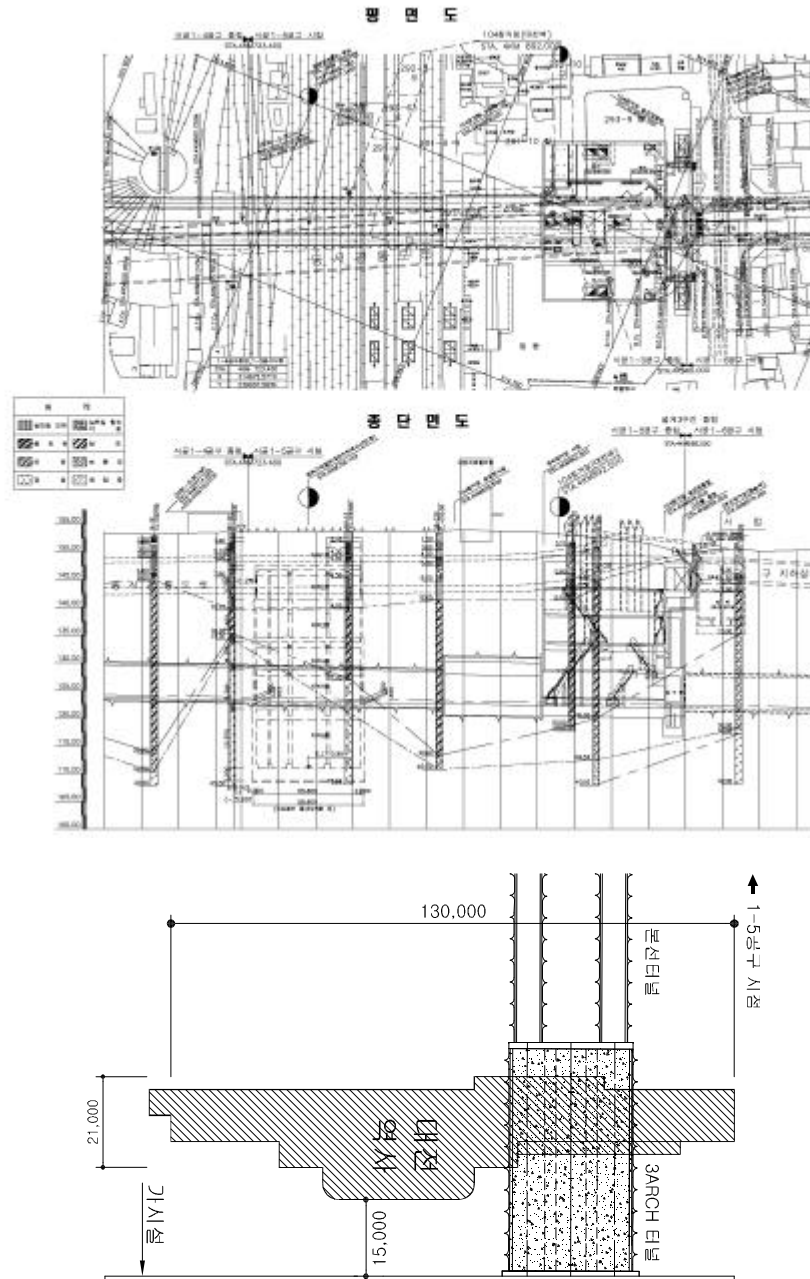


그림 1. 상 : 3 아치터널 현장 종평도, 하 : 3 대전역사 위치도

2.2 3아치터널의 설계 및 시공

당초 본 터널 구간은 강관 Pipe Roof와 동바리를 이용한 현장타설 Box 로 설계되었으나, 반력벽 안정성 문제, 시공성 공기 등의 문제로 2001.11 NATM 터널로 설계변경 되었다. 변경된 NATM 터널단면은 폭이 28m 정도로 넓은 대단면인 관계로 3아치 터널로 결정되었고, 안정성 추가 및 지표침

하 역제를 위하여 중앙터널과 좌우 확폭터널 사이에 선진터널을 추가하였다. 본 3아치 터널은 풍화암에 설치되는 것으로 단면 규모에 비해 굴착심도가 낮고 기존 대전역사 하부를 통과하므로 터널의 안정성 확보와 함께 특히 지표침하를 억제 하는 것에 주력하였다.

굴착방법은 상하 반단면 분할에 링 컷 및 가인버트 공법이 적용 되었으며, 굴진장은 0.8m로 하고 굴착공법은 로드헤더와 브레커를 이용한 기계 굴착공법이었다. 지보방법은 강성이 높은 지보재인 H-150 강지보재, 두께 25cm의 슛크리트와 SD35의 록볼트를 주재로 하되, 천단부의 지반보강을 위하여 길이 12m 직경 115mm의 강관을 상향각 10° 종방향 4m 간격으로 중첩하여 설치하였다. 이 와 관련하여 터널의 굴착선을 이 강관 끝선으로 맞출에 따라 강지보는 터널 종방향 위치에 따라 크기를 바꾸었고 슛크리트의 두께는 두께를 변화시켰다. 한편 막장면의 안정을 위하여 막장전면 볼트를 추가하였으며, 2개의 선진터널 사이 필라부는 록볼트를 체결함으로써 필라부의 안정성을 향상시켰다.

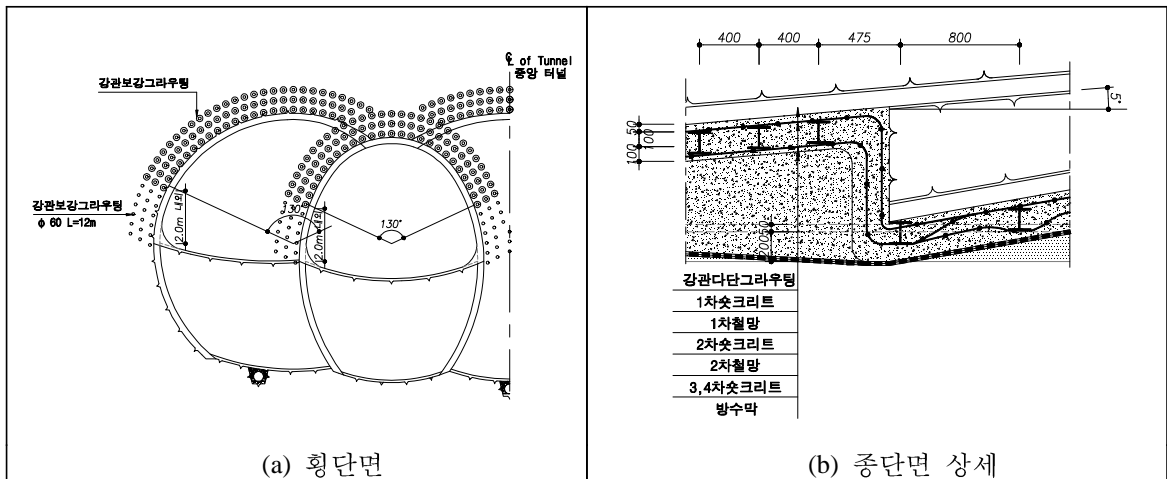
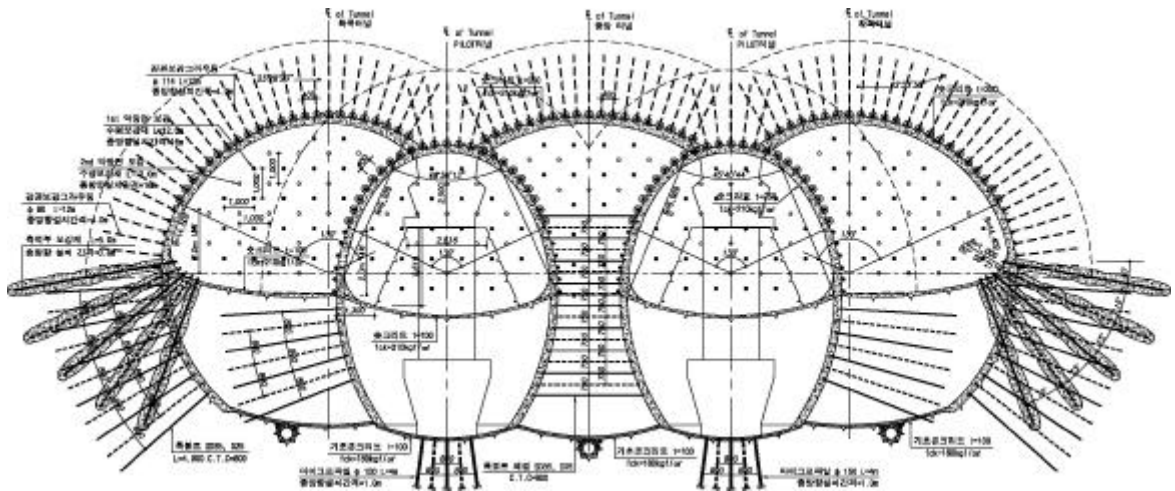


그림 2. 상 : 3 아치터널 굴착 및 보강 단면도 , 하 : 강관다단 그라우팅 상세도

상세한 시공순서는 좌측 선진터널 굴착 완료된 후 우측 선진터널을 굴착하고, 양측 선진터널 사이에 기둥설치 후 중앙터널을 시공하고 그 후 좌우측 확폭터널을 동시 시공하는 것으로 하였다.

3아치 터널의 설계는 주로 FLAC 2D를 이용하여 각 시공단계를 추종하여 터널 단면방향 평면 변형을 해석결과를 이용한 것으로 터널의 종단방향 분포나 거동에 대한 3차원 효과에 대한 검토가 수행되지는 않았다. 한편 본 설계에서는 침투해석만을 시행하였을 뿐, 지하수위 저하에 따른 지표침하량은 영향이 작은 것으로 판단하였다.

시공은 대체로 3아치터널 설계와 거의 차이 없이 수행되었으며, 시 공중 터널 내부에서의 특기

할 만한 사항은 발생하지 않았다. 그러나 터널 굴진 중 갱구부 흠막이 가시설이 종단방향으로 상당히 전진한 것이 관측되었으며, 이와 관련하여 갱구 가시설에 대하여 수차례 보수 보강을 실시하였다. 또한 지표면 침하는 설계치 42mm을 크게 상회하여 최대 140 mm 정도까지 측정되었으나, 부등침하량이 그다지 크지 않아서 한 두 차례의 대전역사 균열보수와 경부선 선로 보선이 있었을 뿐이다.

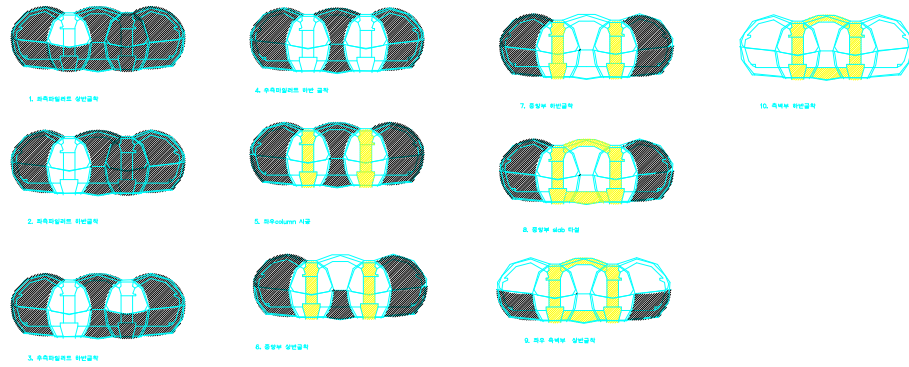


그림 3. 3아치터널 시공순서도

2.3 시공 중 계측

전술한 바와 같이 시공 중 다양한 계측이 시행되었으나, 본 고에서는 주로 침하와 관련한 측정 결과만을 정리하였다.

	(mm)				(mm)				(m)
	14	46	61	35	15.3	9	8	5	5
	7.3	4	8	2	15	8	5	2	0
	20.5	53	55	41.2	23.6	28	15	5	0
	41.8	103	124	78.2	-	-	-	-	

- 지표침하 특성

최대 지표침하 발생위치는 갱구로부터 약 30m 떨어진 터널의 중앙부근에서 나타났다. 최대값은 확폭 터널단계에서 약 140 mm로 최종 수렴되어 원설계 41.8mm에 비해 매우 크게 측정되었다. 각 단계에서 지표 침하량은 위치에 따라 약간 차이가 있으나 선진 터널 단계에서 전체 침하량의 45 ~ 50 % 확폭터널 단계에서 45 ~ 50 %로 주로 선진터널단계와 확폭터널 단계에서 지표 침하량이 크게 나타났다. 한편 터널의 갱구부가 터널의 중앙부위보다 침하량이 작았던 것은 토류벽 콘크리트가 포함된 흠막이 갱구가시설의 축방향 강성이 침하에 저항하는 특성으로 나타난 것으로 추정된다.

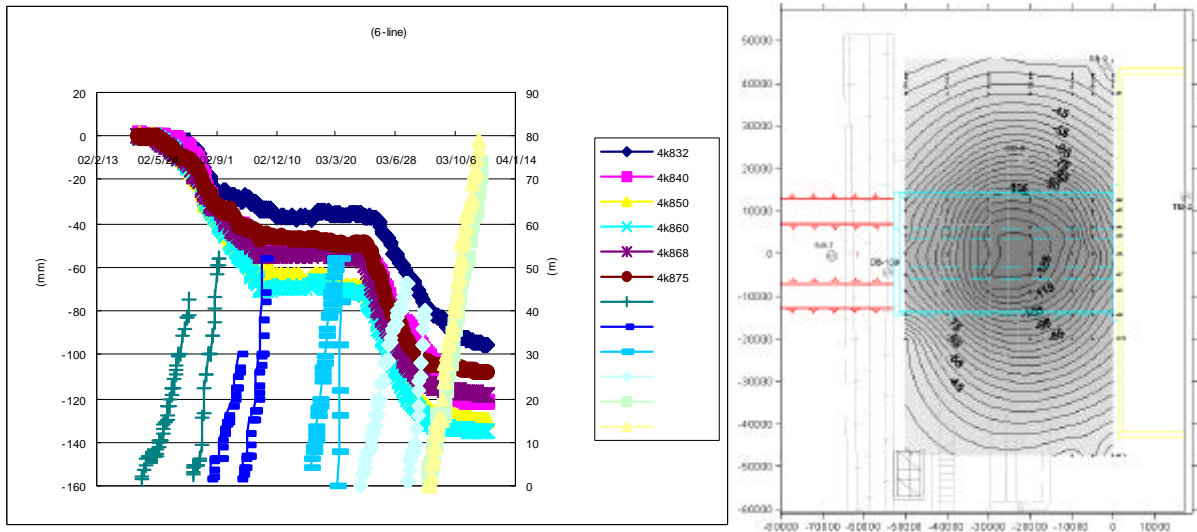


그림 4. 좌 : 지표침하 경시변화도, 우 : 지표침하량 분포 등고선도

- 천단침하

천단침하는 터널의 끝단부를 제외하면 5 ~ 28 mm 정도로 측정되어 설계 예측치 15 ~ 24 mm 와 대체로 유사하였으나, 중앙터널 단계에서는 상대적으로 작았으며, 확폭터널 단계에서는 특히 갱 구에 인접한 위치일수록 천단침하가 큰 것이 특징이었다.

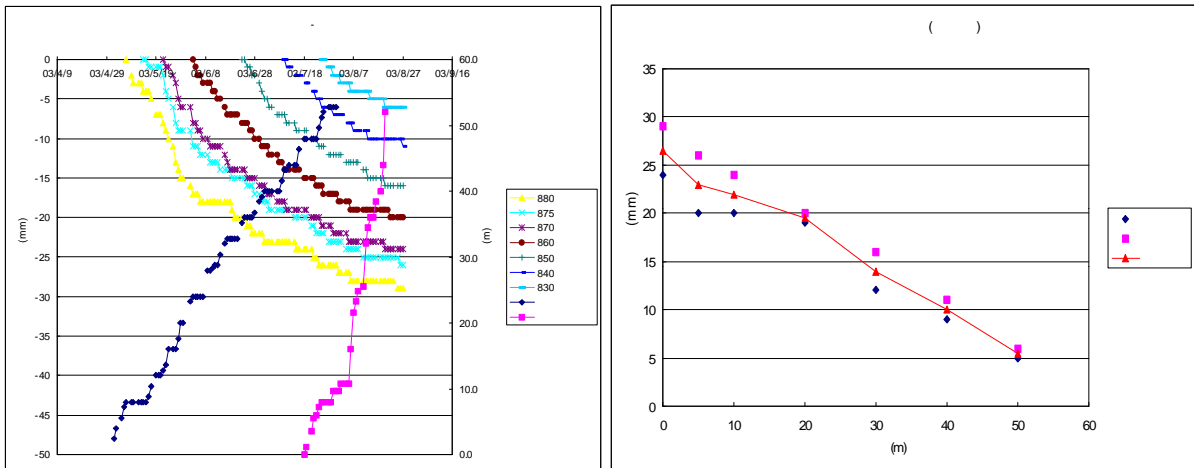


그림 5. 좌 : 확폭터널 천단침하 경시변화도, 우 : 확폭터널 천단침하 종단 분포도

- 지하수위

터널 굴진이전 단계인 정거장 개착부 굴착으로 터널 중간위치의 지하수위는 풍화암층 GL-23m 정도까지 이미 저하된 상태였으며, 선진터널 굴착 중 약 5m 정도 수위 저하가 발생한 후 괄목할 만한 지하수위 저하는 발생하지 않았다

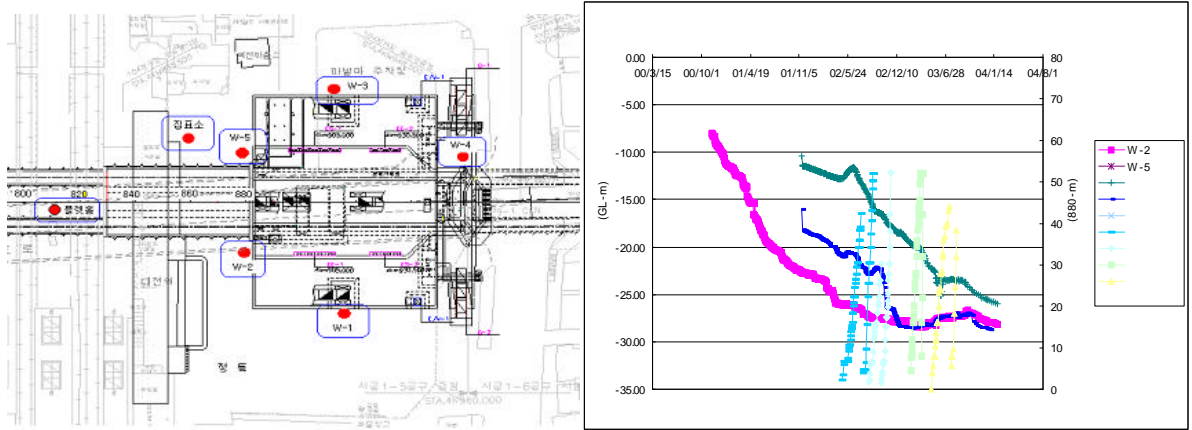


그림 6. 좌 : 지하수위계 설치위치도, 우 : 지하수위 경시변화도

3. 결 론

이상과 같이 계측결과를 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 대전지하철 1-5공구 3아치 터널의 전체 지표침하 140mm은 터널의 단면방향 변형 영향 이외에 선진터널 단계에서 지하수위 저하에 따른 압밀, 그리고 28m의 광폭 터널 굴착으로 인한 갱구 영향권의 확대로 갱구 가시설의 종단방향 변형 영향이 더해진 것으로 추정된다. 특히 광폭터널 단계에서 보여지 듯이 천단침하가 갱구에 인접할수록 크게 나타난 것은 3아치 터널과 같은 광폭터널의 경우 갱구의 종단방향 영향권이 확장된 것을 분명히 보여준 것으로 여겨진다.

참고문헌

- 1.대전광역시 지하철 건설본부(2001.11), “3아치 터널 해석보고서”