

## 경사계를 이용한 토립자 유출 관련 피해 시공 관리 사례 연구 Case Study of Construction Management in Damage due to Soil Particle Migration Using Inclinator Incremental Deflection

김성욱<sup>1)</sup>, Sung-Wook Kim, 한병원<sup>2)</sup>, Byung-Won Han

<sup>1)</sup> (주)바이텍코리아 계측기술부 전무이사, Executive Director, Baytech Korea Inc.

<sup>2)</sup> (주)바이텍코리아 기술연구소 연구소장, Chief, Institute of Technology, Baytech Korea Inc.

**SYNOPSIS** : Excavation works of cylindrical shafts and tunnels for the construction of a variety of infrastructures have been frequently going on in the urban areas. When ground excavations of cylindrical shafts and shallow tunnels proceed in the ground condition of high water level and silt particle component, ground water drawdown involving soil particle migration causes loosening of ground around tunnels and shafts, causes settlement and deformation of ground. Damages due to ground sinking and differential settlement can occur in the adjacent ground and structures. The extent and possibility of damage relevant to ground water drawdown and soil particle migration can't be so precisely expected in advance that we will face terrible damages in case of minor carefulness. This paper introduces two examples of construction management where using incremental deformation graph of inclinometer, we noticed the possibility of soil migration due to ground water drawdown in the excavation process of vertical shaft and shallow tunnel, analysed a series of measurement data in coupled connection, properly prepared countermeasures, so came into safe and successful completion of excavation work without terrible damages. The effort of this article aims to improve and develop the technique of design and construction in the coming projects having similar ground condition and supporting method.

**Key words** : Cylindrical shafts and shallow tunnels, Water drawdown, Soil particle migration, Construction management, Incremental deformation graph, Technique of design and construction

### 1. 서 론

도심지에서 지하철, 철도, 공동구, 통신구, 고속철도 등의 시공을 위하여 원형 수직갱을 포함한 터널의 굴착이 빈번히 이루어지고 있다. 지반조건이 실트질 성분의 토사나 풍화암인 상태에서 지하수위가 높은 경우에는 수직갱이나 얇은 터널 굴착시 지하수위 저하 및 이에 수반된 토립자 유출현상으로 수직갱이나 터널 주위의 지반이 이완되어 침하 및 변형을 유발하게 되고 이 때문에 주변 지반 및 주변 구조물에서 지반 함몰 및 부동침하에 의한 사고나 피해가 일어날 수 있다. 지하수위 저하 및 토립자 유출과 관련하여는 사전에 피해의 가능성 및 범위를 정확하게 예측하기 어려워 시공시 주의를 기울이지 않으면 큰 피해나 사고를 당할 수 있다.

본 논문은 지반공학 분야에서 가장 많이 사용되는 지중경사계를 이용하여 수직갱 및 터널 굴착시 지하수위 저하에 따른 토립자 유출의 가능성을 파악하고 타 계측항목과의 연계분석 및 사전대비로 큰 피해나 사고 없이 안전하게 시공 관리한 두 가지 사례를 소개함으로써 향후 유사지반 및 동일공법 적용 Project들의 설계, 시공과정에서 개선, 보완해야할 사항들을 제안하고자 한다.

## 2. 토립자 유출 시공관리 사례 연구 1(원형 수직구 구간)

### 2.1 공사개요 및 시공현황

- 토류공법 : H-Pile(H-300x305x15x15, C.T.C. 1.734m) + 토류벽 Con'c (t=30cm) 및 Shotcrete(t=15cm)
- 지지공법 : Ring Beam(H-300x300x10x15) 및 Earth Anchor (Φ12.7 x 4Ea), Rock Bolt(D=25, L=3.0M)
- 지반보조공법 : S.G.R. Grouting(Φ1000, C.T.C 800)
- 지반상태 :
  - 충적층(상부 : 실트질 세립모래, 느슨내지 보통조밀, N=8 ~ 12, SM)
  - 충적층(하부 : 실트질 점토, 견고, N=9 ~ 10, CL)
  - 풍화토층(실트질 세립 내지 조립모래, 보통조밀내지 매우조밀)
  - 풍화암층(실트섞인 세립내지 조립모래, 매우조밀)
  - 연암층(약한강도의 화강암, 부분적 보통 강한 강도, 심한풍화, 부분적 보통풍화, 전반적 파쇄대, T.C.R. = 9 ~ 23%, R.Q.D.=0%)
- 투수계수 :
  - 충적층(상부 :  $1.197 \times 10^{-4}$  cm/sec)
  - 풍화토층( $7.947 \times 10^{-5}$  cm/sec)
- 지하수위 : G.L.-1.8M

본 현장은 서울 지역 ○○○○ 시공현장으로 원형수직갱이 G.L.-41.0M 깊이까지 시공된 후 횡갱을 굴착하고 이어서 본선터널이 시공되었다. 원형 수직갱 굴착과정에서 높은 지하수위 및 지반특성에 기인하여 G.L.-18.0M의 풍화토층 굴착시 경사계 위치 부근의 지표면이 국부적으로 침하, 함몰되었으며 이어서 추가로 강우후마다 2차, 3차 추가 함몰이 원형 수직구 주변에서 발생하였다. 원형수직구 배면에 설치된 경사계 계측은 1차 지표면 함몰 발생 이전까지 시행되었는데 경사계의 Incremental Deflection(지점변형) 분석에서 토립자 유출에 의한 지표면 침하 및 함몰의 가능성이 타 현장의 계측경험에서 인지되었으며 대형사고를 방지하기 위해 원형수직갱 주위의 시기 적절한 되메움 및 계측시행으로 안전하게 굴착을 완료할 수 있었다. 본 사례를 통하여 원형수직갱 주변 지표 및 지중에 주요 구조물이 있는 경우는 대형사고의 발생 가능성도 예상되는바 향후 유사 Project의 설계 및 시공과정에서 본 사례의 분석 경험은 사고 예방을 위한 좋은 지침이 될 수 있을 것이다.

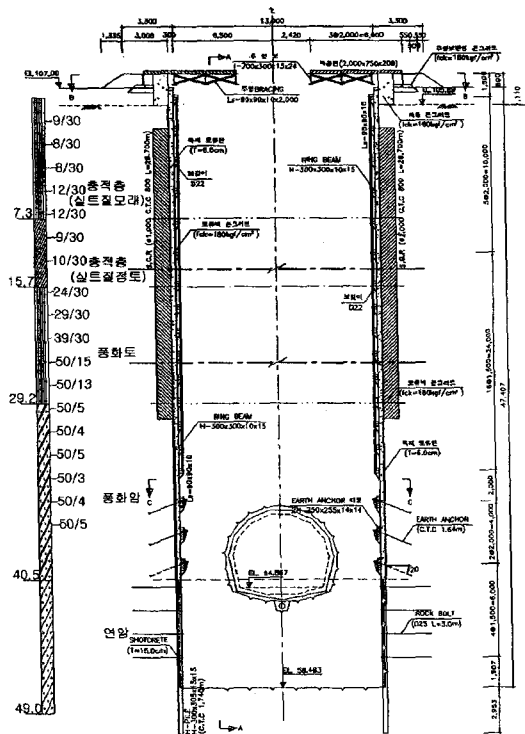


그림 1. 원형수직구 종단면도

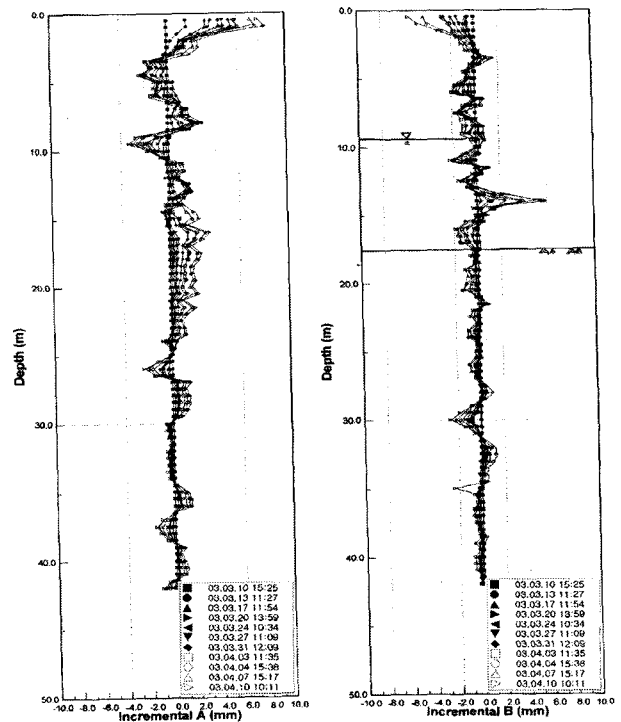


그림 2. 원형수직구 Incremental Deflection Graph

## 2.2 계측결과 분석

### 2.2.1 지중경사계

- 경사계는 3월 10일 초기치 측정 후 수직구 굴착에 따라 초기에는 지표면에서 G.L.-3.0M 구간에 걸쳐 주된 Incremental Deflection이 생겼으며(전체 구간에서의 불규칙한 미세변형 포함)이후에는 굴착에 따른 굴착면 방향으로의 Incremental Deflection과 지하수위 저하에 수반된 원형 수직구 주변 지반에서의 토립자 유출에 따른 전형적인 불규칙한 Incremental Deflection 양상을 나타냄.
- 경사계 변형 방향은 A+, B- 방향이 주된 변형방향으로 나타남.(1차 및 2차 함몰 발생 방향)
- G.L.-18M지점까지 굴착이 진행된 4월 15일 계측시 G.L.-10M지점 하부로 경사계 Probe 삽입이 불가하여 계측이 중단됨.(그림 2 참조)

### 2.2.2 지하수위계

- 지하수위계는 2월 27일 G.L.-3.18M의 초기치에서 굴착진행에 따라 지속적으로 굴착면 상부에서 수위를 유지하며 저하하는 양상을 나타냄.
- 3월 31일 이후는 지하수위 저하속도가 커지는 양상이 나타남.(0.5m/day정도)
- 4월 21일 계측 후 2차 지반 함몰 발생의 영향으로 지하수위계가 파손됨.

표 1. 지하수위 계측결과

날짜	경과일수	지하수위 (G.L.-M)	지하수위 변화량(M)	변화속도 (M/day)	굴착심도 (G.L.-M)	날짜	경과일수	지하수위 (G.L.-M)	지하수위 변화량(M)	변화속도 (M/day)	굴착심도 (G.L.-M)
2003년 2월 27일	0	-3.180	0			2003년 4월 07일	39	-8.870	2.080	0.52	-17.5
2003년 3월 03일	4	-3.340	0.160	0.04		2003년 4월 10일	42	-9.750	0.880	0.293	
2003년 3월 10일	11	-2.570	-0.770	-0.11		2003년 4월 14일	46	-12.480	2.730	0.682	-18.0
2003년 3월 13일	14	-2.740	0.170	0.056	-8.7	2003년 4월 15일	47				1차 함몰
2003년 3월 17일	18	-3.180	0.440	0.11	-10.7	2003년 4월 17일	49	-12.590	0.110	0.036	
2003년 3월 20일	21	-3.440	0.260	0.086	-12.7	2003년 4월 20일	52				-20.5
2003년 3월 24일	25	-3.790	0.350	0.0875	-12.7	2003년 4월 21일	53	-11.560	-1.030	-0.257	2차 함몰
2003년 3월 27일	28	-4.480	0.690	0.23	-14.7	2003년 4월 23일	55				3차 함몰
2003년 3월 31일	32	-5.360	0.880	0.22		2003년 4월 28일	60				굴착계
2003년 4월 03일	35	-6.790	1.430	0.476	-16.7						

### 2.2.3 지표면 침하 진전 사항

- 지중경사계는 4월 10일까지 계측이 시행되었으며 4월 15일 지중경사계 인접에서 1차 함몰이 발생함.(되메움 시행)
- 4월 18일 저녁에서 4월 19일 오전, 4월 19일 오후에서 4월 20일 점심까지 강우가 있는 후 4월 21일 2차 지표면 함몰이 1차 함몰 부위 인접에서 범위가 확대되어 나타남.
- 4월 22일 저녁에서 4월 23일 아침까지 강우가 있는 후 4월 23일 3차 지표면 함몰이 발생함(함몰 부위와 인접지표 1M 정도의 단차 발생)
- 함몰부위의 되메움 시행 후 4월 28일 굴착이 재개되었으며 4월 29일 아침에서 저녁까지 강우가 있는 후 4월 30일에는 수직구 주변에 1, 2, 3차 함몰부위를 포함하는 추가 침하가 나타남.(그림 3 참조)

## 2.3 계측결과에 대한 종합적인 고찰

본 현장에서 원형 수직구 시공과정에서 현장조사 및 계측결과 분석을 통하여 다음과 같은 사항들을 파악할 수 있었다.

- 실트질 성분의 충적층 및 실트질 성분의 풍화토층 지반에서 지하수위가 높은 경우 원형 수직갱 굴착과정에서 지하수위 저하에 수반된 토립자 유출현상으로 굴착면 주변지반이 이완, 침하되어 함몰

현상이 발생할 수 있으며 지하수위계 Data 및 경사계의 Incremental Deflection Graph를 이용하여 초기에 이러한 가능성을 발견할 수 있음.

- 본 현장 및 타 현장의 시공사례에서 실트질 성분의 지층에서 토립자가 유출될 때에는 유사한 형태의 경사계 Incremental Deflection 양상을 보여 이를 현장의 안전을 위한 시공 관리용 수단으로 사용할 수 있음을 확인함.(그림4 ~ 6참조)
- 본 현장에서와 같이 토립자 유출 Pattern의 경사계 Incremental Deflection이 나타나고 이어서 큰 지반변형에 기인하여 경사계 계측이 불가하게 되는 경우, 또한 지하수위 저하 속도가 갑자기 커지는 경우는 정밀 현장조사를 통한 지반 침하 및 함몰의 가능성 파악이 필요하며, 더불어 발생 가능한 현상 및 사고에 대하여 사전준비를 할 경우 큰 사고 없이 현장 시공이 가능하게 됨.(인접지반 및 인접 구조물의 안정을 위한 시공관리용 대책수립 가능 : 되메우기, Grouting, 시공방법 변경 등의 계획수립)
- 상기 상황에서 우기철 강우가 빈번한 경우는 토립자 유출에 따른 지반이완 진전, 지반침하가 가속화 되어 큰 규모의 지반 함몰 등이 갑자기 나타날 수 있으므로 시공 계획시 유의할 필요가 있음.
- 본 현장의 사례를 통하여 현재 통용되고 있는 설계방식에 의한 원형 수직구의 시공에 있어서는 원형 수직구 자체의 안정성 보다 인접지반 및 인접 구조물이나 시설물의 안전 관리에 더욱 유의할 필요가 있는 것으로 판단됨.

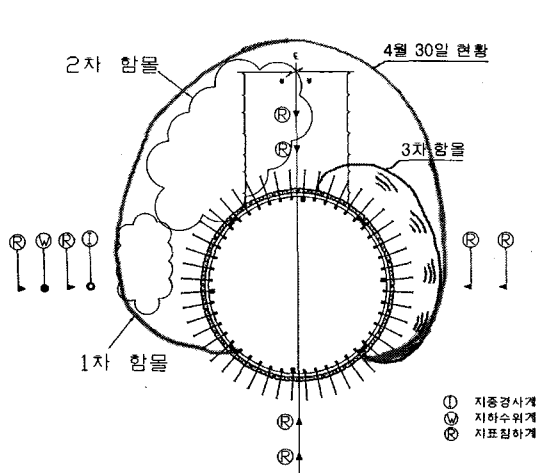


그림 3. 지반 함몰 현황

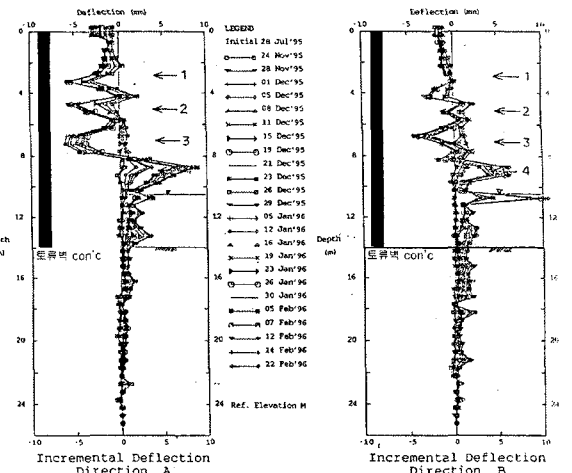


그림 4. 지점변형 그래프(서울 지하철 6-5공구)

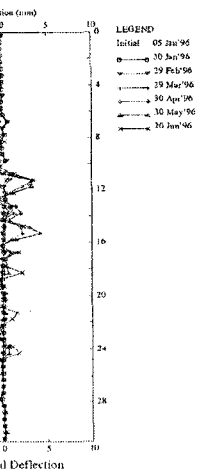
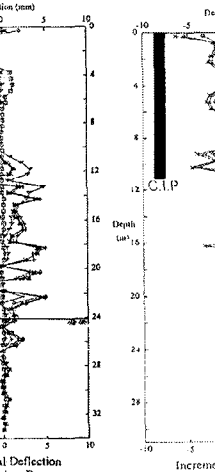
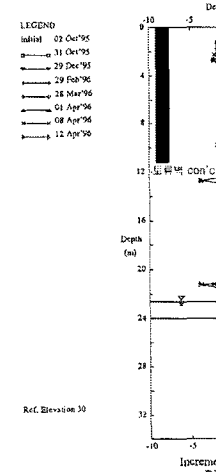
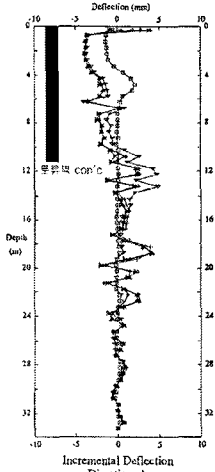


그림 5. 지점변형 그래프(인천 지하철 1-8공구)

그림 6. 지점변형 그래프(인천 지하철 1-9 공구)

### 3. 토립자 유출 시공관리 사례 연구 2(단선 병렬 터널 구간)

#### 3.1 공사개요 및 시공현황

- Tunnel 제원 : NATM 난형단면(BxH=7.07Mx7.665M), Shotcrete(t=15cm), Rock Bolt(D=25, L=3M), Lining Con'c(t=40cm)
- 지반보강공법 : 강관 다단 공법(L=16M, C.T.C=400, 120범위, 20공)
- 지반상태 : ○ 매립토층(실트 및 잔자갈 섞인 모래, 느슨, N= 6 ~ 14, SM)
  - 충적층(실트 섞인 중립모래, 중간조밀, N= 12 ~ 27, SP)
  - 풍화토층(실트 섞인 세립내지 중립 모래, 매우 조밀, N= 23 ~ 32)
  - 풍화암층(실트질 모래, 엇리 따라 절리 발달)
  - 연암층(편마암, 균열 및 절리발달, 세립질, 파쇄심함, T.C.R. = 95 ~ 100%, R.Q.D.: 5%)
  - 보통암(편마암, 세립질, 균열 및 절리발달, T.C.R.=100%, R.Q.D.: 21~ 46%)
- 투수계수 : ○ 충적층( $4.68 \times 10^{-5} \sim 2.11 \times 10^{-4}$ cm/sec)
  - 풍화대층( $9.19 \times 10^{-6} \sim 1.03 \times 10^{-4}$ cm/sec)
  - 연암층( $2.77 \times 10^{-5}$ cm/sec) ○ 보통암층( $1.19 \times 10^{-5} \sim 1.24 \times 10^{-4}$ cm/sec)
- 지하수위 : G.L.-4.2 ~ 5.5M

본 현장은 서울 지하철 6-5공구 배수형 단선 병렬 터널 시공 구간으로 두 터널 사이의 Pillar부 폭은 7.0M이며, 터널 직상부에는 용산선 노반이 터널 천정부에서 18.4M의 토피로 터널과 교차하여 통과하고 있다. 터널은 종점측에서 시점측으로 A, B 터널이 병행하여 벤치굴착에 의하여 굴착이 진행되었으며, 용산선 노반을 터널 B 상반이 먼저 통과하여 8.4M 지점에 이르고, 터널 A 상반은 용산선 노반 전방 1.5M 지점에 이를 무렵, 막장의 지질상태가 나빠지고 용수도 많을 뿐더러 터널과 용산선 노반 교차지점 부근인 STA. 15k 490지점 일대의 계측치가 크게 변화하는 현상이 나타나 용산선 노반의 부등침하가 우려되었다. 이에 현장조사 및 정밀 계측 분석결과에 따라 터널의 안전 시공을 위한 조치를 취함으로써 안전하게 터널을 굴착 완료하였다. 본 사례를 통하여 높은 지하수위 및 지반 특성에 기인하여 터널 시공과정에서 지하수위 저하 및 이에 수반되는 토립자 유출현상 발생시에는 터널 상부 철도 노반의 안전에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 계측결과 분석 기법으로 경사계 Incremental Deflection(지점 변형) 분석에서 토립자 유출에 의한 부등침하의 가능성을 파악하였으며, 또한 지표 및 지중침하 계측치의 상관관계 파악, 터널내 Shotcrete 응력 및 Rock Bolt 축력의 이상 변화 감지를 통하여 이를 확인하였는데 향후 유사 Project의 설계 및 시공 과정에서 본 사례의 분석 경험은 사고 예방을 위한 좋은 지침이 될 수 있을 것이다.

#### 3.2 계측결과 분석

##### 3.2.1 지중경사계

- 경사계 계측결과 98년 7월 16일부터 29일까지 A, B 터널 중앙에 설치한 경사계 TN09에서 G.L.-12.M ~ G.L.-22M구간에 걸쳐 갑작스런 Incremental Deflection이 나타난 후 8월 8일에는 미세한 변화가 나타나고 있는 상태임. 터널 양측 Side에 설치된 경사계 TN08, TN10에서도 크기는 상대적으로 작으나 같은 변형 양상을 보였으며 8월 8일에도 변형이 나타나고 있음.(그림 8 ~10 참조)
- 터널 굴진은 A, B 터널이 병행되어 왔는데 A 터널이 STA. 15k 498.2 지점으로 계측지점과 약 8.2M 이격시 부터 변형이 나타났음. 지질주상도 및 터널의 위치를 감안할 때 변형이 발생한 구간은 주상도상 풍화암 구간으로 터널 막장 상반 및 터널 Crown부 직상에 위치하며, 지하수위 저하 및 이에 따른 토립자 유출이 발생하여 이러한 변형이 나타난 것으로 판단되었음. 또한 A, B 터널이 병행 굴착되어 양쪽 터널의 풍화암 구간 절리가 연결되어 더 많은 토립자 유실과 이에 따른 공극발생이 나타난 것으로 추정되었음.(그림 11 참조)

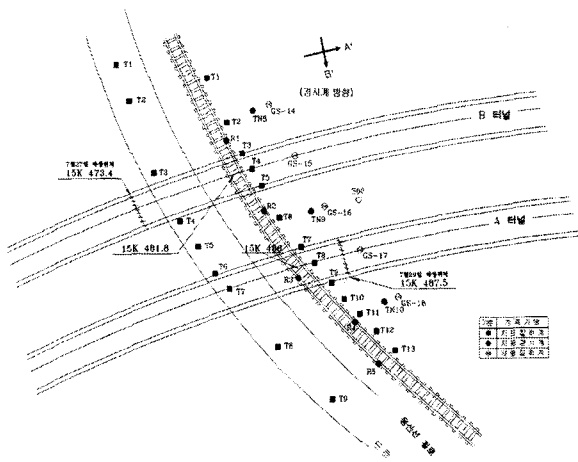


그림 7. 계획 계획 평면도

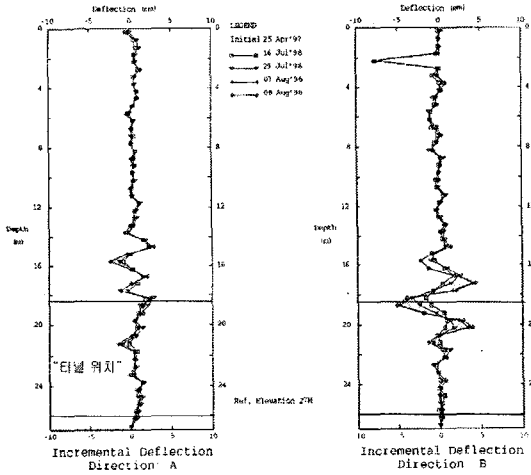


그림 8. Incremental Deflection Graph(TN08)

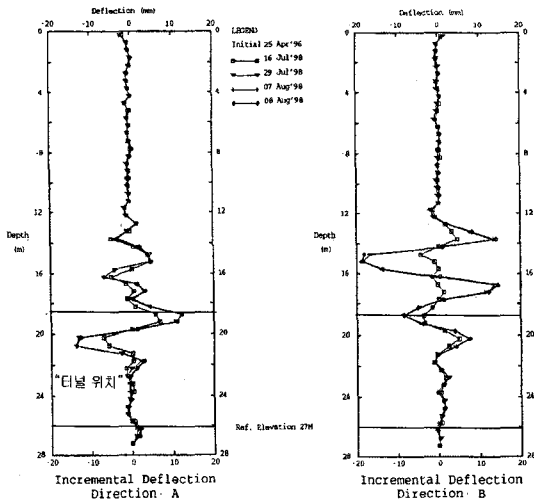


그림 9. Incremental Deflection Graph(TN09)

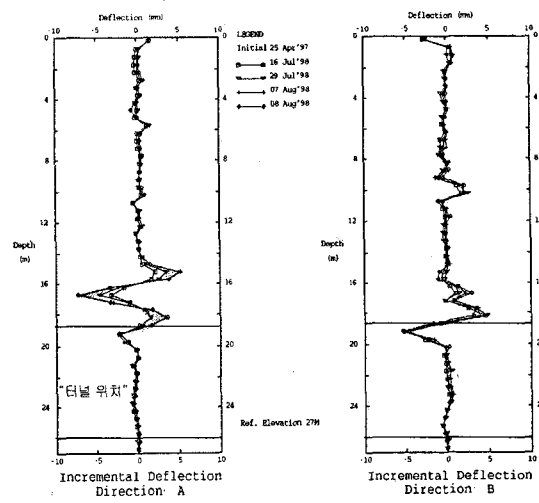


그림 10. Incremental Deflection Graph(TN10)

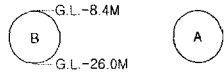
### 3.2.2 지표침하계

- STA. 15k 490 지점 지표침하 측정결과 경사계에서 변형이 발생한 직후인 7월 18일부터 전반적으로 침하량이 급증하는 양상을 보였으며, 7월 29일까지 지속적인 침하 증가 추세를 보인 뒤 굴착공사 중단상태에서 추가 침하 진전은 나타나지 않았음. 따라서 지중 경사계의 변형과 지표침하 계측치가 상호 연관되어 움직이는 것으로 나타났음.(그림 12 참조)
- STA. 15k 478 지점의 지표침하 측정결과도 7월 16일 이후 7월 29일까지 전반적으로 침하가 급증하는 양상을 보였으며 그 이후는 대체로 안정된 상태를 보였음. 또한 용산선 철도 Rail위의 측점에서 7월 24일 초기치 측정이후 A 터널쪽에서 7월 29일까지 침하가 나타났음.

### 3.2.3 지중침하계

- 지중침하계 계측결과도 7월 16일부터 7월 29일 사이에 B 터널쪽에서 상대적으로 큰 침하량을 보였으며 그 크기도 같은 기간의 지표침하량과 비슷한 크기를 나타내었음. 7월 29일 이후는 전반적으로 안정 상태이나 A, B 터널 중앙에 설치된 지중침하계는 8월 10일까지 침하진전이 지속되었음.(그림 12 참조)

계측기	TN08				TN09				TN10				
지표침하 측정	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
7월16일	7.5	5	7.5	5.5	5	7	5	3.5	8	6.5	4.5	3.5	0
	+1.5	+4	+5.5	+8.5	+11	+9	+10	+6.5	0	0	+1.5	+1.5	+1
7월18일	9	9	13	14	16	16	15	10	8	6.5	6	5	1
	+6	+9.5	+11	+12	+6.5	+5	+5	+8	+8	+8	+4.5	+1.5	+2
7월29일	15	18.5	24	26	22.5	22	20	18	16	14.5	10.5	6.5	3



7월16일 대비 7월29일 침하 증가량	7.5	13.5	16.5	20.5	17.5	15	15	14.5	8	8	6	3	3
지중침하계	L/L				L/C		C	R/C		R/R			
총활판구간 : 12.0m - 22.0m													
지중침하량	(5.43~13.59)				(19.94~21.14)		(11.76~12.27)	(7.33~9.53)		(-0.7~3.01)			
측정 Point	15m~22m			11m~13m		15m~22m	11m~13m		15m~22m				

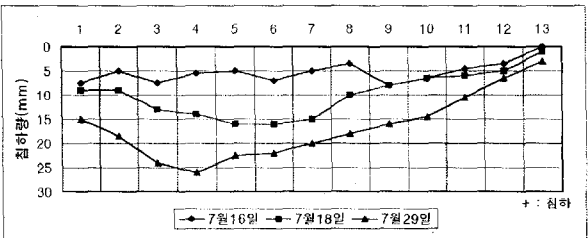


그림 12. 지표침하 및 지중침하 측정치(15k490지점)

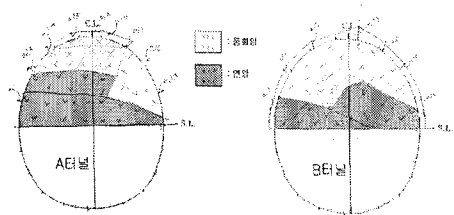


그림 11. STA. 15k 491지점 막장상태

S/C	(kg/cm <sup>2</sup> )		
구분	7 / 27 일	7 / 28 일	8 / 10 일
Radial	24.36	213.78	254.94
Tangential	-13.02	-58.59	-70.35
R/B	(Ton)		
구분	7 / 29	7 / 30	8 / 1 일
A 터널	0.60	8.67	8.59
B 터널	3.15	5.10	8.93

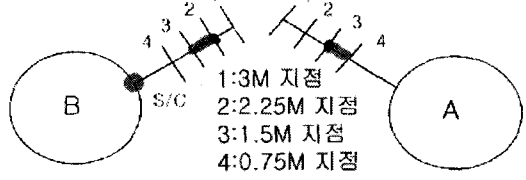


그림 13. S/C응력 및 R/B축력 측정치(15k490)

### 3.2.4 터널 내부 계측결과

- 내공변위 및 천단침하 측정(A 터널 : 15k 485, 500 지점, B 터널 : 15k 475, 500 지점) 결과는 초기치 측정 후 큰 변화가 없는 상태였음. STA. 15k 490 지점 B 터널 상반 우측의 Shotcrete 응력계는 7월 28일 계측시 Radial 방향의 압축응력이 급증하고 Tangential 방향의 인장응력도 증가하는 경향을 나타내었으며 8월 10일까지 지속적인 증가추세를 보였음. Rock Bolt 축력 측정 결과는 B 터널 상반 우측 1.5 M ~ 2.25M 구간에서 8월 1일 인장력 급증, A 터널 상반 좌측 0.75M ~ 1.5M 구간에서 7월 30일 인장력 급증 현상을 나타내었음. 지중변위 측정 결과는 큰 변위량을 나타내지 않았음.(그림 13 참조)

### 3.3 계측결과에 대한 종합적인 고찰

본 현장의 현장조사 및 계측결과 분석을 통하여 다음과 같은 사항들은 파악할 수 있었으며 터널의 안전시공을 위한 자료로 활용하였다.

- 현장의 지반조건을 감안시 터널 상부에는 매립층, 충적층, 풍화토층, 풍화암층이 존재하는데 터널 굴진에 따라 높은 지하수위 조건 및 취약한 지반조건으로 지하수위 저하 및 토립자 유출에 기인한 지반 이완이 발생하여 터널 상부 및 주변의 지반이 상당히 이완되었고 지속적인 이완진전이 예상되었음.(경사계 Incremental Deflection 변화에서 판단. (그림 8 ~ 10참조))
- 계측결과와 종합분석에서 판단할 때 B 터널이 용산선 철도를 횡단할 무렵부터 경사계, 지표침하계, 지중침하계의 변형 및 침하량이 급증하였고 지표침하량 및 지중침하량의 크기가 비슷하게 나타나 터널 상부지반이 상당히 이완되어 있는 것으로 판단되었음. 현장조사 결과에서도 터널 상부 철로 구간과 인접부에서 지반침하에 따른 현상이 나타났음. 또한 터널에서의 Shotcrete 및 Rock Bolt 축력 증가 지점 상부의 지표침하량이 큰 점을 감안할 때 터널 주위 및 상부지반의 이완 가능성을 배제할 수가 없는 것으로 판단되었음.
- B 터널 굴진시의 막장 관찰 결과와 막장전방의 Boring Log에서 판단시 잔여구간의 지질상태가

현재보다는 양호하지 않을 것으로 추정되었으며, 이에 따른 차수 및 지반 보강의 검토가 필요한 것으로 판단되었음.

- 터널 굴진 재개시에는 A, B터널의 병진 굴착은 지반 침하를 촉진 할 것으로 예상되어 이에 대한 별도의 검토가 필요한 것으로 판단되었음.
- 후속 조치로 관계자 회의를 통하여 다음과 같이 터널의 안전시공을 위한 대책을 강구하였음.
  - 1) A, B 터널간에 막장 굴진 이격거리를 30M 이상 확보토록 함.
  - 2) A, B 터널 하반 굴착시 굴진장을 0.8M로 축소 조정하여 시공토록 함
  - 3) B터널 STA.15k 474 ~449 구간은 S.L. 상부를 폭 3.0M 범위로 S.G.R을 시공하고 터널굴진에 따른 막장관찰 및 계측 Data 추가 분석 후 지반보강 추가 시행 여부를 판단기로 함
  - 4) 계측 및 용산선 침하상태 현장 관찰을 강화하고 추가 침하 발생시 즉각 채움등의 보완조치를 시행토록 함.

#### 4. 결론

- 1) 본 원고의 사례들에서와 같이 높은 지하수위를 갖는 실트질 성분의 충적층, 풍화토층, 풍화암 지반에서 원형수직구나 터널 굴착이 진행될 때에는 지하수위 저하 및 이에 수반되는 토립자 유출이 발생하여 수직구나 터널 자체의 안전보다는 인접지반 및 구조물에서 부등침하에 의한 큰 피해가 발생 할 수 있는데 경사계 Incremental Deflection(지점변형) Graph를 잘 활용하여 이러한 가능성을 사전에 감지하고 대처시에는 안전한 시공이 가능함을 확인하였다.
- 2) 토립자 유출과 관련하여 원형수직갱 굴착에 있어서는 경사계와 지하수위계의 상관분석, 터널 굴착에 있어서는 경사계, 지하수위계, 지표침하계, 지중침하계등의 갱외 계측항목과 천단침하계, 내공변위측정계, Shotcrete응력측정계, Rock Bolt 축력측정계, 지중변위측정계등의 갱내 계측항목과의 상호 연계 분석이 중요함을 확인하였다.
- 3) 터널 Shotcrete 응력측정과 관련하여 계측기의 측정 원리상 변형률에서 응력으로 환산되는 Strain Gage Type은 초기치 측정 시점에 따라 수화열 및 건조수축, Creep의 영향이 포함되어 터널 굴착에 의한 토압증가만의 분리 측정이 불가능하므로 계측기 선정시 주의가 필요하다.
- 4) 토립자 유출과 관련된 문제는 사전 설계시 그 피해를 정확하게 예상, 파악하기 힘들므로 지반조건을 포함한 제반 시공사항을 고려하여 경험있는 기술자에 의하여 계측계획 및 시공 관리가 이루어질 필요가 있다.
- 5) 터널 직상부에 철도 노반등이 위치할 경우, 시공중 본 현장에서와 같이 토립자 유출에 의한 침하 문제가 발생시에는 면밀히 검토하여 필요시 유지관리 계측에 포함시켜야 하며 시공중 계측 및 분석자료는 향후 유지관리 계측 분석시에도 반드시 활용될 수 있도록 하여야 할 것이다.
- 6) 개착구간 및 터널구간에 있어 경사계의 용도는 예상 변형량에 따른 계측치의 관리에 머물지 말고, Incremental Deflection Graph의 변형 Pattern 파악에 따라 예상 문제점을 발견하고 이를 시공관리에 적극적으로 이용함으로써 안전하고 경제적인 시공을 위한 수단으로 확대되어야 할 것이다.(인접건물 부등침하 방지를 위한 보강 Grouting 계획, 인접지반 및 시설물 보호를 위한 되메움 작업 및 보강 Grouting 계획등에 이용)

#### 참 고 문 헌

1. 김성욱, 김주봉(1998), “경사계의 전반적 고찰과 굴착공사에서의 변형분석 사례연구”, 한국지반공학회, 98 가을 학술 발표회 논문집, pp.233~240.
2. 김성욱, 김주봉(1999), “깊은 굴착에서 근접시공에 따른 구조물 피해 사례연구”, 한국지반공학회, 99 봄 학술 발표회 논문집, pp.113~120.
3. 인천 광역시 지하철 건설본부, (주)대우건설(1996~1998), “인천도시철도 1호선 2 감리공구 토목공사 전면책임감리 계측 월간 보고서”
4. (주)흥인 E & I(1998), “서울 지하철 6호선 6-5공구 건설공사 월간 계측관리 보고서”