

경부고속철도 토공부에 대한 변형상태 계측 및 분석  
**Measurements and Analysis of Deformation States in Roadbed  
in Gyeongbu High Speed Railway**

진남희\*1)  
Jin, Nam-Hee

김남혁\*\*  
Kim, Nam-Hyuk

심현우\*\*\*  
him, Hyun-Woo

ABSTRACT

The function of subgrade in the railway is to support track load on the subgrade as well as train load. Unlike the traditional railway, the uppermost subgrade layer in the Gyeongbu high speed railway was constructed as the reinforced road bed. The reinforced road bed comprises sub-ballast in the upper part and grade ballast in the lower part. The filling material such as soil and rocks in the subgrade can be settled by consolidation of original ground, compression due to self weight, plastic displacement due to train operation, and unequal settlement due to embankment material or improper compaction, therefore many efforts have been given for sufficient compaction and use of proper filling materials in the construction stage. The purpose of this study is to investigate the deformation state of subgrade in the Gyeongbu high speed railway. The investigation on the subgrade settlement was performed by choosing representative sections suspected to be settled based on the previous GPR test results and track maintenance history, measuring the settlement for some time period after installing settlement measuring instruments on and under the reinforced road bed. and analyzing the long-term subgrade settlement data from monitoring system which was installed at the construction stage of the high speed railway.

1. 서 론

철도에 있어서 노반은 노반상부의 하중인 궤도하중과 열차하중을 지지하는 기능을 갖는다. 특히 경부고속철도 1단계구간의 노반은 기존선과는 달리 노반의 최상층에 강화노반이 적용되었다. 강화노반층은 상부의 보조도상층과 하부의 입도조정층으로 구분되어진다. 노반을 구성하는 흙과 암 등의 성토재는 본래 압축성을 갖고 있으므로 원지반의 압밀침하, 자중에 의한 압축침하 및 열차운행에 따른 소성침하가 발생할 수 있을 뿐만 아니라 성토재료 또는 다짐불량에 의한 부등침하도 발생할 수 있으므로 노반시공에 있어서 충분한 다짐과 양질의 성토재를 사용하는 노력을 기울이고 있다.

본 연구에서는 개통후 약 5년 가까이 경과한 경부고속철도 1단계구간의 노반에 대하여 노반의 변형상태를 조사하고자 하였다. 조사방법은 선로보수이력 등을 참고하여 침하되었다고 의심되는 노반과 선로보수가 잦은 노반을 대표적으로 선정하고, 선정된 노반에 대하여 강화노반상의 지표침하계와 지중침하계 등을 매설하여 일정기간 노반의 변형상태를 측정하였고, 구조물 준공초기에 설치되어 운용중인 고속선 상시계측시스템의 장기노반변형 데이터를 분석하여 노반의 침하에 대하여 고찰하고자 한다.

\* 코레일테크, 기업부설연구소, 연구소장  
E-mail : nhjin70@hanmail.net TEL : (042)257-9486 (501) FAX : (042)257-9481  
\*\* 코레일, 시설기술단 선로관리팀, 차장  
\*\*\* 코레일테크, 기업부설연구소, 과장

## 2. 토공부 조사개소 선정

일반적으로 토공에서는 성토체 침하를 시공 중 침하가 완료되는 즉시 침하로 간주하고 개통이후 잔류 침하량 산정시 성토체 침하를 고려하지 않고 원지반 침하만을 고려한다. 성토체의 장기침하 특성은 하중 조건, 사용재료의 특성, 다짐정도, 기후조건 등과 관계되어 즉시침하 이외에 압밀침하와 같은 장기침하가 발생하게 된다. 현재 건설 중인 고속선 2단계구간에서의 토공에 대한 침하계측결과에서는 원지반의 압밀 침하는 시공 중에 완료되었고 유효응력 증가로 인한 압축침하 이외에도 강우 및 사용재료 특성에서 기인하는 크리프침하를 볼 수 있는데 강우시 침하가 빠르게 진전되는 경향이 관찰되었다고 한다.

고속선 1단계구간의 토공부에 대한 변형상태 파악을 위해서 코레일의 협조하에 고속철도 개통이후 2007년까지의 선로유지보수빈도가 높은 10개의 구간을 선정하였다. 선정된 구간은 각 구간별로 400~700m정도이며, 광명~대전간 4개소, 대전~동대구간 6개소이다(그림1).

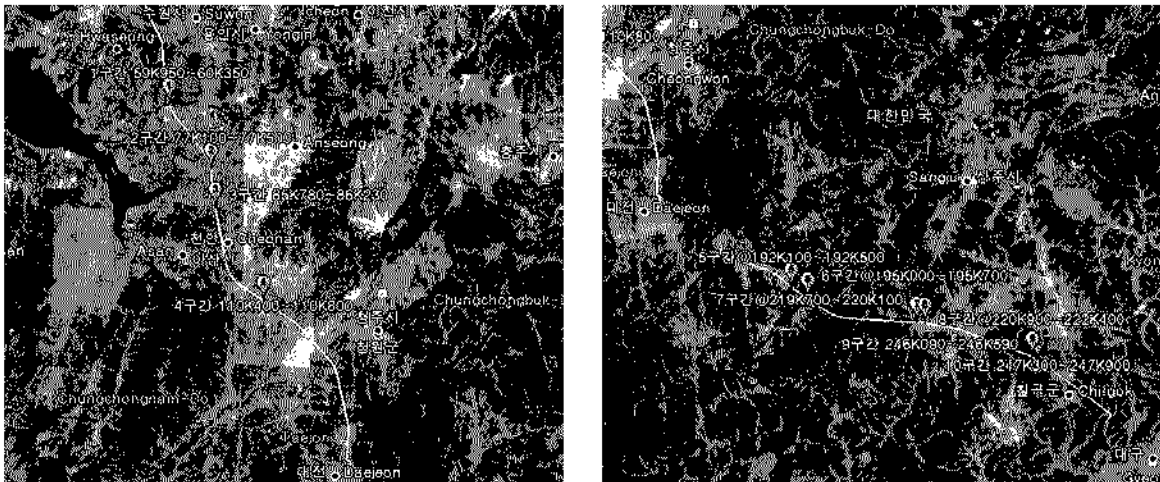


그림1. 고속철도 토공부 변형상태 조사대상구간 위치

## 3. 지표침하계를 이용한 노반변형상태 조사

경부고속선 1단계 구간 of 노반변형상태를 판별하기 위하여 앞에서 선정한 10개 구간에 대하여 각 구간마다 T1, T2 선별로 선로유지보수이력을 참고하여 10~30m 간격으로 4~8개의 측점을 설정하여 총 52측점을 대상으로 지표침하계를 매설하였다. 지표침하계의 매설작업은 도상자갈을 인력으로 굴착하고 측량용 말뚝을 강화노반층까지 관입하여 설치하고 외부오염으로부터 보호를 위해 보호캡으로 마감하였다(그림2).

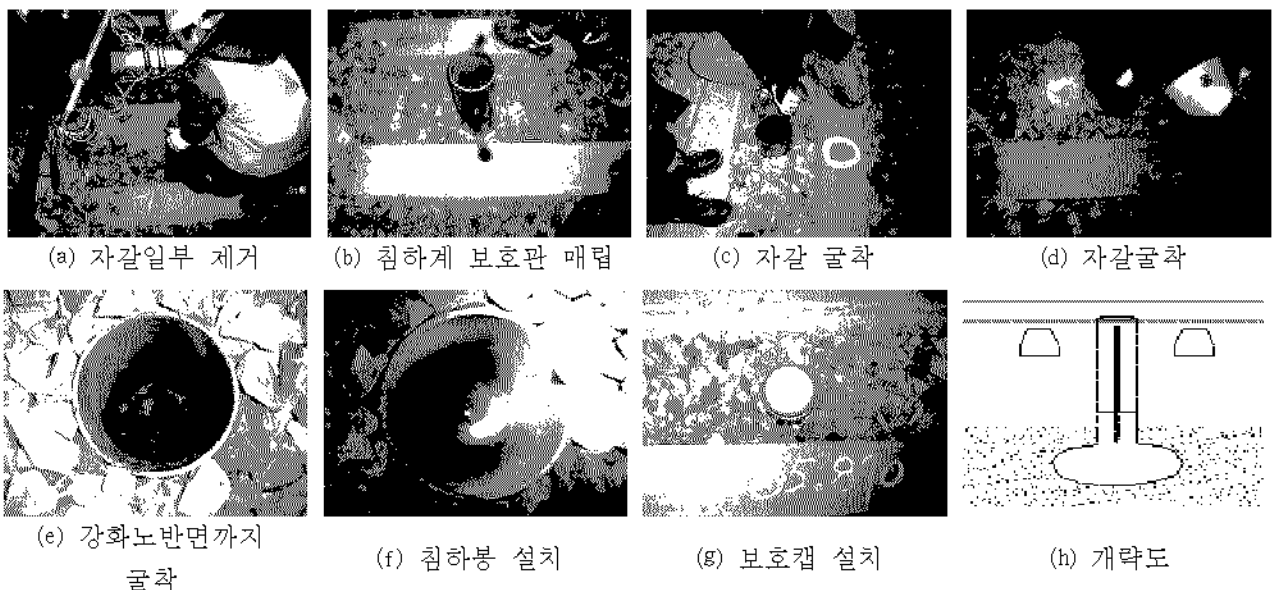


그림2. 지표침하계 매설작업 사진

도표 1. 지표침하계 측정

№	구간	선로 측정위치(km)		구조물	№	구간	선로 측정위치(km)		구조물
		T1	T2				T1	T2	
1	화성 ~ 고덕	60.150	60.150	사창고가 ~ 용소고가	6	영동 ~ 김천	195.335	195.335	오탄T ~ 설계교 ~ 영동T
		60.175	60.175				195.345	195.345	
		60.185	60.185				195.360	195.360	
2	고덕 ~ 천안	77.109	-	팽성1고가 ~ 팽성2고가	7	김천	219.870	-	태화고가 ~ 봉산고가
		77.124	77.124				219.890	219.890	
		77.139	-				219.910	-	
3	고덕 ~ 천안	85.870	85.870	신희고가 ~ 쌍암교	8	김천	221.950	-	봉산고가 ~ 봉산천교
		85.880	85.880				221.959	221.960	
		85.910	85.910				221.969	-	
		86.167	-						
		86.177	-						
4	천안 ~ 오송	-	110.480	군량교 ~ 서원교	9	칠곡	-	246.260	금요T ~ 금곡고가 ~ 복삼T
		110.500	110.500				246.280	246.280	
		-	110.520				-	246.300	
5	영동 ~ 김천	192.333	192.333	각계교 ~ 영동1고가	10		247.708	247.710	복삼T ~ 인평고가
		192.353	192.353				247.723	247.725	
		192.363	192.363				247.735	247.738	

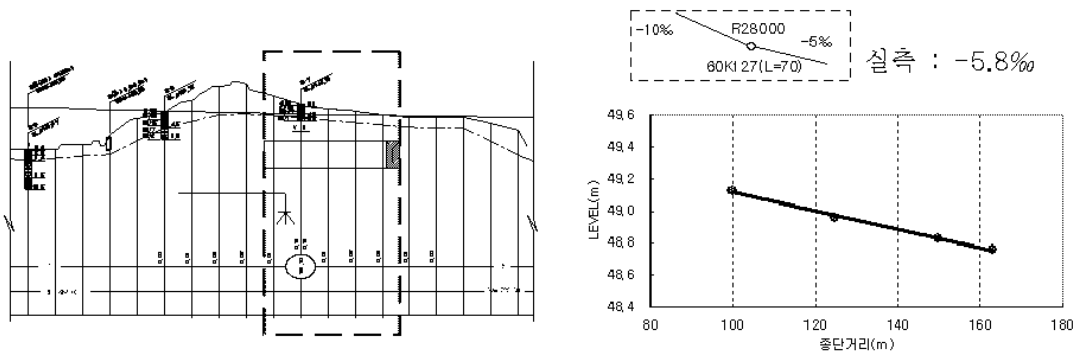
각 구간별 지표침하계의 위치는 도표1과 같으며 매월 1회씩 11개월간 레벨측량을 실시하여(그림3) 일정기간 노반상태의 변화를 조사하는 방법으로 토공부의 변형상태를 분석하였다.



그림3. 지표침하계 레벨측량

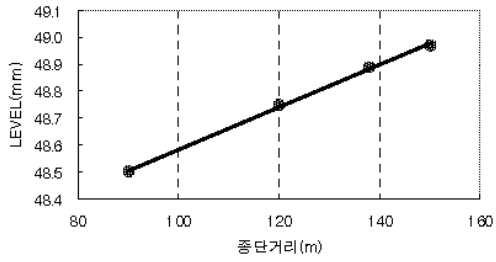
지표침하계 설치직후 최초 측량시 해당구간의 중단선형을 확인하기 위하여 선로변에서 중단선형에 대한 측량을 실시하였다. 중단선형에 대한 측량결과는 그림 4와 같다.

1구간의 경우 중단선형이 서울방향에서 60K127지점을 중심으로 -10%에서 -5%로 변화하는 구간으로 측량결과 약 -5.8%로 나타났는데 이는 중단선형이 변화하는 완화구간의 영향인 것으로 판단된다. 3구간의 경우 중단선형이 +8%인 구간으로 측량결과 약 7.9%로 거의 일치하고 있었다. 5구간의 경우 중단선형이 -10%인 구간으로 실측에서는 -10.1%, 6구간의 경우 중단선형이 +3%인 구간이지만 실측에서는 +3.1%로 거의 일치하고 있다. 10구간의 경우 247K666지점을 중심으로 -25%에서 -12%로 변화하는 구간으로 이에 따른 영향으로 측량결과에서는 약 -17.3%로 분석되었다. 이와 같이 지표침하계의 초기측정에서 중단선형은 거리오차와 시준오차를 고려한다면 준공도면과 거의 일치하였으며 횡단선형 또한 3%의 횡단구배를 계산해보면 준공도면과 거의 일치하는 것으로 조사되었다.



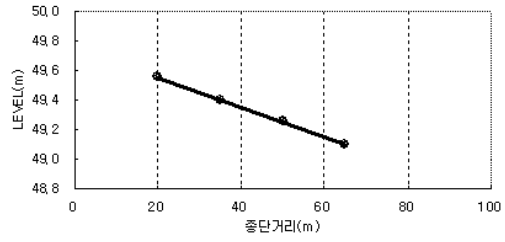
(a) 1구간 측량구간 및 중단선형 결과

선형 : 8.0%, 실측 : 7.9%



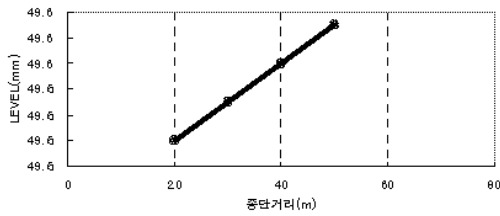
(b) 3구간 종단선형 결과

선형 : -10%, 실측 : -10.1%

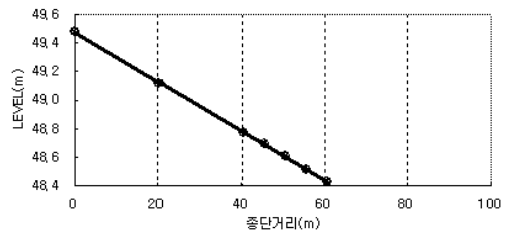
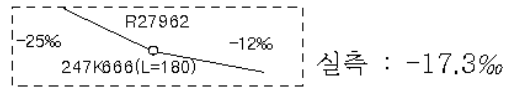


(c) 5구간 종단선형 결과

선형 : +3%, 실측 : 3.1%



(d) 6구간 종단선형 결과



(e) 10구간 종단선형 결과

그림4. 종단선형 검토

노반침하를 판별하기 위한 지표침하계의 측량은 2월 설치일을 기준으로 매월 1회씩 11월까지 측량하였으며 52개의 측점중 세측점에 대한 결과를 그림5와 같이 나타내었다. 최초 측량값을 초기 기준값으로 비교하면 10개소의 모든 측점에서 레벨 변화량은 0~2mm 이내로써 측량시 시준오차가 약 ±2mm인 점과 야간측량이라는 외부적인 오차를 감안한다면 위 기간 동안 노반의 변형은 없는 것으로 판단된다.

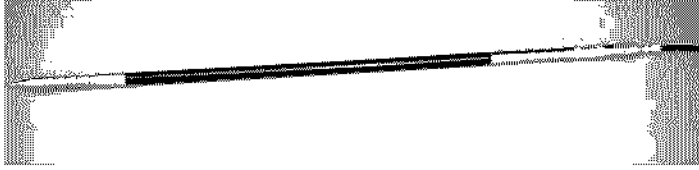
T1			
	60K187	85.880km	192.333km
T2			
	60.187km	85.880km	192.353km

그림5. 지표침하계 분석결과(시간-변화량)

#### 4. 지중침하계를 이용한 노반변형상태 조사

앞에서의 지표침하계는 강화노반층 상부에만 국한하여 노반변형여부를 조사한 것이었으나 지중침하계는 시추조사 직후 시추공 내에 매설하여 일정 깊이별 노반의 변형여부를 측정하는데 효과적이다. 따라서 보다 정밀한 노반변형의 진행여부를 조사하기 위하여 선로유지보수빈도가 높고 GPR탐사결과에서 의심되는 측정위치 7개소를 선정하여 지중침하계를 매설하였다. 지중침하계의 계측형식은 진동형식이며 침하계 하나에 최대 4포인트에서의 침하량을 측정할 수 있는 침하계를 선정하여 침하계의 총 길이를 3.0m로 계측센서의 포인트는 0.75, 1.50, 2.25 및 3.0m 깊이로 계획하였으며 케이블의 길이는 선로변에서 열차의 운행이나 시간에 관계없이 측정할 수 있도록 5m로 비교적 넉넉히 제작하였다. 지중침하계의 사양은 도표2와 같다.

도표 2. 지중침하계 사양

		모델명	GKB-RE-01
		적용센서	Vibrating Wire Type
		측정양카수	4 point
		측정범위	0~50mm
내장온도센서	NTC Thermistor(3KD-ATF)	정확도	±0.2% F.S
온도센서 동작범위	Thermistor (-30~80℃)	동작온도	-29℃ ~ 100℃
최소 천공 직경	Φ 40mm 이상	분해능	-29℃ ~ 100℃
신호케이블	Φ10mm, 0.25mm <sup>2</sup> ×7 core cable	센서수량	4BA

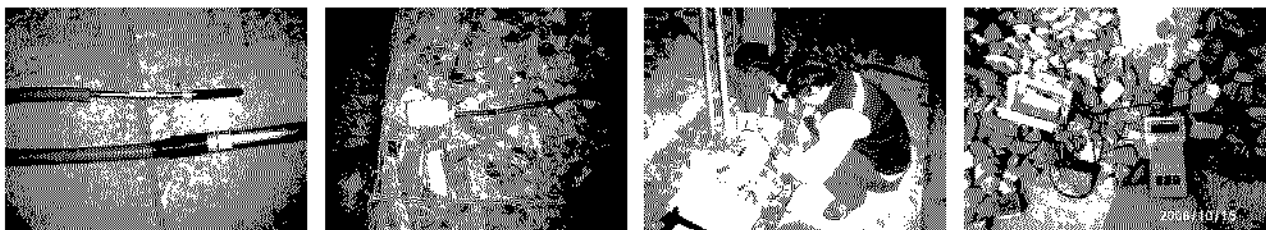
지중침하계의 설치위치는 도표3과 같으며 지중침하계의 측정은 계측기 설치시 보령으로 인한 교란의 영향을 없애고 자노반에 대한 안정화 기간을 고려하여 설치하고 7일이 경과한 이후부터 측정을 시작하였다(그림6). 지중침하계의 변화량을 약 130일간 구간별 8~11회씩 측정한 결과를 그림 7로 나타내었다.

도표 3. 지중침하계 설치 현황

구간 No	설치위치	구간 No	설치위치
1	T1 60k180	8	T2 221k200
	T1 60k280		T2 221k350
3	T1 86k167	10	T2 247k820
5	T1 192k270		

노반변형의 진행여부에 대하여 보다 정밀한 조사를 위하여 설치한 지중침하계의 측정결과 1구간 60K180과 60K280 지점의 지중침하계는 최초 측정일을 기준으로 약 130일 동안 측정값을 분석한 결과 0.5mm 이하의 변동폭이 있었다. 이

는 계측당시 기온이나 습도 또는 다른 영향에 따른 것으로 판단되며 침하의 진전은 측정되지 않았다. 3구간 86K176지점의 지중침하계의 측정값 분석 결과 3.0m지점에서 신뢰할 수 없는 신호로 측정되었으며 나머지 측정점은 미세한 변동은 있으나 침하의 진전은 측정되지 않았다. 5구간 192K270지점의 지중침하계에 대한 측정값을 분석한 결과 3.0m지점에서의 센서가 작동불능으로 신뢰할 수 없는 신호로 측정되었고



(a) 지중침하계 설치

(b) 지중침하계 측정

그림6. 지중침하계 설치 및 측정

나머지 3포인트에서는 침하의 진전이 없는 일정한 값으로 측정 되었다. 8구간 221K200, 221K350의 지중 침하계에 대한 측정 결과 침하가 없는 일정한 값을 유지하고 있었다. 10구간 247K820지점의 지중침하계에 대한 측정결과 1.50m, 2.25m 지점에서 침하량의 변화가 없는 일정한 값으로 측정되었으며, 0.75m와 3.0m지점의 센서가 작동불능으로 신뢰할 수 없는 신호가 측정되었다.

노반 10개소 중 시추조사를 실시한 5개소에 대하여 7개의 진동현식 지중침하계를 매설하여 각 개소별 4포인트에 대하여 약 4달 정도 노반침하의 변동여부를 측정하였다. 일부 측정개소의 포인트에서 작동불능에 의해 신뢰할 수 없는 신호가 측정된 4포인트를 제외한 24포인트는 정상적으로 작동하였다. 정상적으로 작동중인 24포인트에서의 측정값은 거의 변화가 없는 상태로서 약 130일 정도의 측정결과를 종합해 보면 노반에 대한 침하진행은 없는 것으로 판단되며, 본 연구용역 이후에도 지속적인 측정을 할 수 있으므로 매설된 지중침하계의 유지관리가 필요하다.

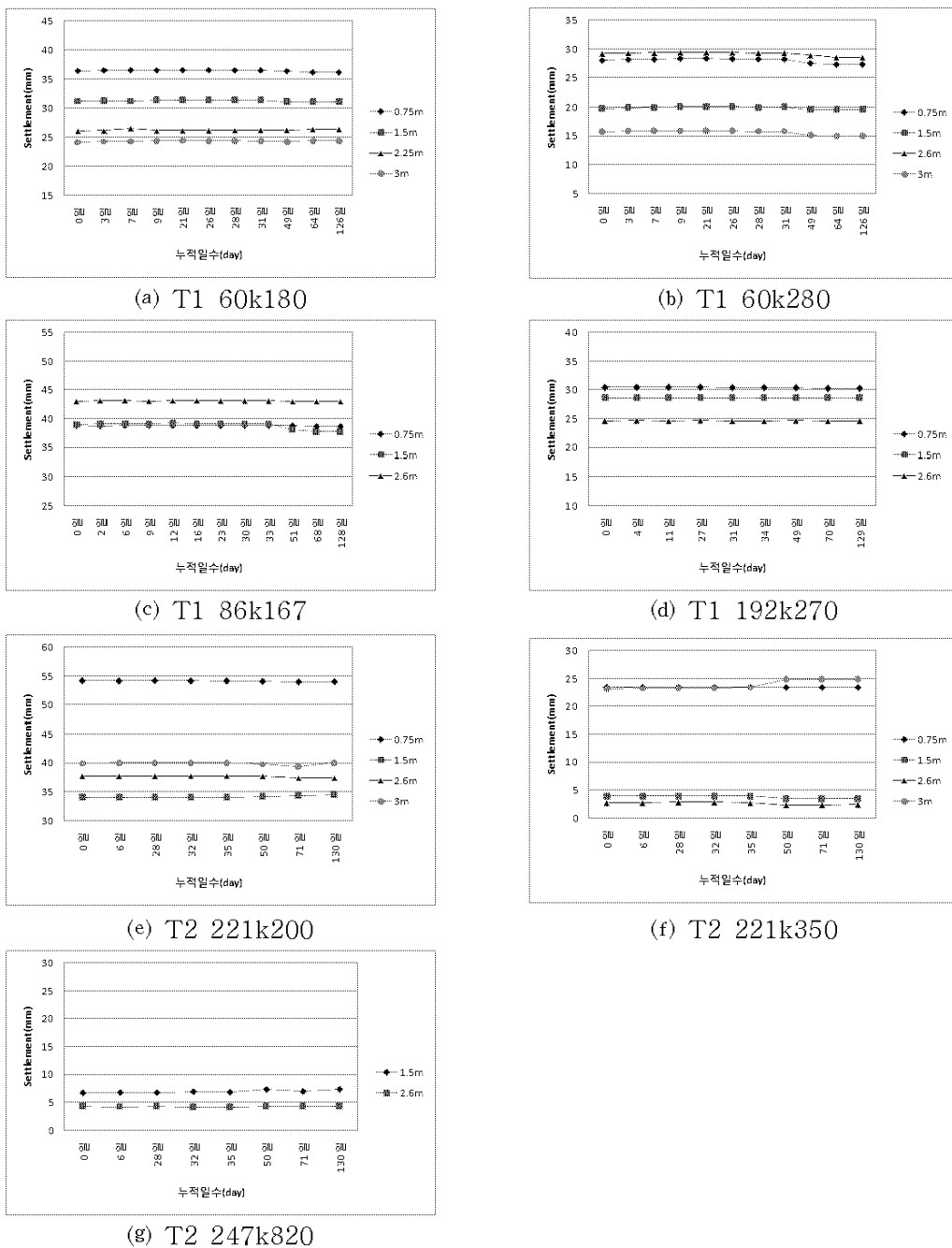


그림7. 지중침하계 분석결과(시간-변화량)

5. 고속철도 계측설비 침하계의 계측이력 분석

경부고속선 1단계구간은 건설당시 국내 최초로 건설되는 고속철도 전용선이었기 때문에 교량, 터널 및 토공 구조물에 대한 초기거동을 포함하여 장기적인 거동특성을 분석하여 구조물 건전도를 양호하게 유지하기 위하여 1999년 10월30일부터 2000년 02월28일까지 천안~대전구간의 대표적인 교량과 터널 및 토공(사면포함)부에 약 80여개의 계측센서를 설치하였다. 이 계측설비는 24시간동안 정적 및 동적계측을 수행하는 상시계측시스템으로 운용중이며 고속선 구조물의 거동특성을 분석하고 이상거동이 발견될 경우 즉시 대처할 수 있는 고속선의 안전에 중요한 설비이다. 특히 운주터널 종점부 부근에 있는 대성토 구간인 116K016~116K376구간에는 성토고가 12m 이상 되며, 해당구간 내에 3.5m 두께의 연약층이 존재하고 있다. 이 대성토구간에서 연약노반의 침하정도를 파악하기 위하여 운주터널 종점부로부터 약 150m 떨어진 단면에서 지표면을 기준으로 지하로 0.5m(침하계4), 2.5m(침하계3), 10m(침하계2), 그리고 37m(침하계1) 깊이 지점에 침하계가 매립되어 있다.

대성토구간의 침하계의 장기분석결과에 따르면 도표4에서 보는 바와 같이 2001년 9월부터 2002년 5월까지의 침하량은 최대 11.62mm 정도였으나 계측설비의 침하계 판리기준에서 'A'등급이었으며, 2003년의 침하량은 최대 1.22mm로 양호하였다. 그러나 고속선 1단계 구간의 개통이후 2006년과 2008년의 계측값의 변화폭은 0.30~1.09mm로 나타나고 있으나 이는 상부노반과 하부노반의 침하에 의해 발생한 값이 아니며 그림8과 같이 2007년 및 2008년 동안의 장기거동이력을 볼 때 거의 '0'에 가깝게 작은 진폭으로 변하고 있는 것을 볼 수 있다. 즉 노반침하에 의한 값이 아닌 매설되어 있는 침하계의 센서형식이 전기저항식으로서 대기온도에 의한 영향으로 계측되는 값이다. 따라서 대성토구간의 침하는 더 이상 없이 수렴한 것으로 보고되고 있다.

도표 4. 대성토구간 침하계의 연간변화량

(단위 : mm)

구 분	설치위치 (m)	2001.09 ~ 2002.05	2003.01 ~ 2003.12	2006.01 ~ 2006.7	2007.04 ~ 2007.12	2008.04 ~ 2008.12
침하계 1	37.0	2.15	1.07	0.68	0.65	0.79
침하계 2	10.0	10.87	1.00	0.49	0.56	0.83
침하계 3	2.5	11.62	1.22	0.31	0.88	1.09
침하계 4	0.5	7.02	0.95	0.30	0.30	0.64

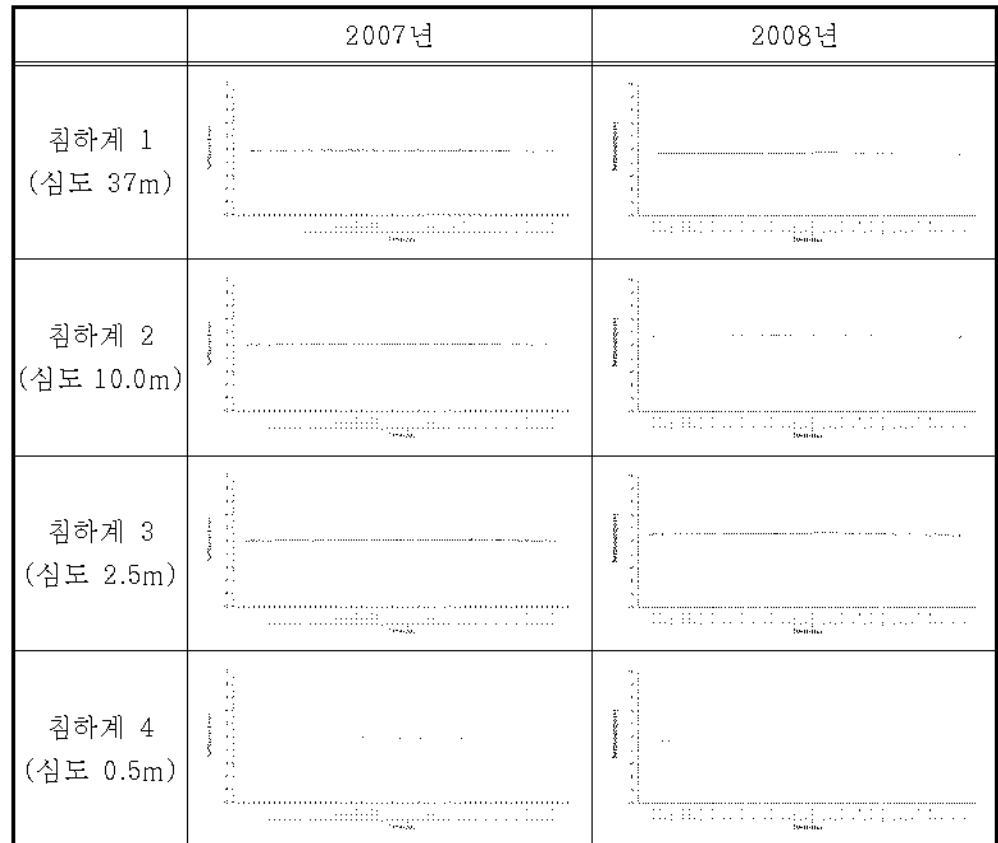


그림 8. 대성토구간 침하계별 장기거동이력(2007, 2008년)

## 6. 결 론

본 연구에서는 경부고속철도 1단계구간의 토공부에 대한 노반변형의 진행여부를 판정하기 위하여 지표침하계 및 지중침하계를 이용한 변화량측정과 고속선 계측설비 중 대성토구간에 설치된 침하계의 장기계측데이터를 분석하였으며 이에 따른 결론은 다음과 같다.

1. 경부고속선 1단계 구간중 토공부에서 선로유지보수빈도가 높은 10개소를 선정하고 강화노반 상면에 각 개소별 4~8측점씩 총 52측점을 대상으로 지표침하계를 설치한 후 주기적으로 11개월간 레벨측량을 수행하였다. 측량결과 레벨변화량은 시준오차와 야간측량인 점을 고려할 때 노반의 변형은 없는 것으로 판단되었다.

2. 지표침하계는 강화노반층 상부에만 국한하여 노반변형여부를 조사한 것이었으나 지중침하계는 시추조사 직후 시추공 내에 매설하여 일정 깊이별 노반의 변형여부를 측정하는데 효과적이다. 7개소에 대한 지중침하계측정은 설치일로부터 약 7일 경과 후 최초 측정값을 기준으로 약 130일 동안 측정하였고, 분석결과 미소한 변동폭이 있었으나 이는 계측당시 외부조건(기온, 습도 등)과 계측센서의 온도보정에 따른 변화량으로 노반에 대한 침하진행은 없는 것으로 판단되며, 향후에도 지속적인 측정을 할 수 있도록 하였다.

3. 경부고속선 1단계 구간중 토공부에 설치된 계측설비의 침하계에 대한 계측이력을 분석하여 노반에 대한 침하진행정도를 분석하였다. 2001년 9월부터 2002년 5월까지의 침하량은 최대 11.62mm 정도, 2003년의 침하량은 최대 1.22mm 였고, 고속선 1단계 구간의 개통이후 2006년부터 2008년의 계측값의 변화폭은 0.30~1.09 mm 로 나타나고 있다. 그러나 1mm정도 계측값이 변화하는 것은 침하계측센서에 대한 대기온도의 영향 때문으로 침하는 더 이상 없는 것으로 보고되고 있다.

본 연구결과로부터 고속선 1단계구간은 개통이후 5년의 시간이 경과되어 노반변형은 더 이상 진행되지 않는 것으로 판단되며, 향후 지속적인 관측을 위해서는 계측설비의 침하계와 본 연구에서 매설한 지중침하계를 활용하여 주기적인 계측을 수행하여 노반의 변형상태를 계속적으로 파악할 필요가 있을 것으로 사료된다.

## 참고문헌

1. 한국철도기술연구원(2002), “시험선 구간 안전계측설비 상시계측보고서”, 한국고속철도건설공단
2. 장선재, 임남형, 최진유, 이우철(2008), “케도침하 특성”, 춘계학술대회 논문집, 한국철도학회
3. 김대상 외(2007), “경부고속철도 콘크리트케도 토공 및 원지반 침하 (Ⅱ)”, 한국철도학회 논문집, 제 10권 5호, pp.457-462
4. 김대상, 박영곤, 하태욱, 신민호(2005), “수치해석을 통한 일반철도의 강화노반 침하량 및 수직응력 평가”, 춘계학술대회 논문집, 한국철도학회
5. 이일화, 양신추, 장승엽, “콘크리트케도 토공노반의 허용잔류침하량 결정에 관한 연구”, 추계학술대회 논문집, 한국철도학회