

# GPR탐사와 시추조사를 통한 경부고속철도 노반상태평가

## Evaluation of Subgrade State in the Gyeongbu High Speed Railway through GPR tests and Drilling Boreholes

박준오\*1)  
Park, Jun-O

민형기\*\*  
Min, Hyeong-Gi

전일식\*\*\*  
Jeon, Il-Sik

### ABSTRACT

When evaluating the general subgrade states such as geology, stiffness, underground water, compaction and deformation in the Gyeongbu high speed railway, some applicable testing methods should be selected because lots of trains are currently running. The applicable methods includes not only non-destructive tests such as GPR test, electricity resistivity test, MASW proving, but also standard penetration test (SPT), core test, elastic wave tomography through drilling boreholes and measurements using settlement measuring system or inclinometer, etc.

In order for evaluating the subgrade states in the Gyeongbu high speed railway, this study performed GPR test in several sections and drilling boreholes whose locations were chosen after comparing GPR test results and track maintenance history. Furthermore, the progress of subgrade deformations was analysed by comparing previous and this time GPR test results. The results of this study shall be used to understand the general states of currently operating Gyeongbu high speed railway.

### 1. 서론

경부고속철도 1단계구간의 노반에 대한 지질, 강도, 지하수, 다짐도 및 노반변형 등의 전반적인 노반상태평가를 위해서는 운용중인 선로상인 점을 고려하여 적용이 가능한 시험방법을 강구하여야 한다. 노반상태평가의 방법으로는 GPR탐사, 전기비저항탐사, MASW탐사 등의 비파괴 물리탐사법과 노반 보링을 통한 표준관입시험, 코어채취, 탄성파 토모그래피, 침하계 또는 경사계 매설에 따른 계측 등의 직·간접적인 방법이 있다.

본 연구에서는 운용중인 고속선 1단계구간의 노반상태 평가를 위하여 일부구간에 대하여 GPR탐사를 실시하였고, 이 탐사결과와 선로유지보수이력을 비교하여 직접 확인이 필요한 개소를 선별하여 시추조사를 실시하였다. 또한 과거의 GPR탐사결과와의 비교를 통하여 노반의 변형추이를 분석하였다. 이러한 분석결과를 바탕으로 현재 운용중인 고속선 노반에 대하여 전반적인 상태를 평가하고자 한다.

### 2. 노반 상태 조사

고속선 1단계구 10개의 구간을 선정하였다. 선정된 구간은 각 구간별로 400~700m 정도이고, 8구간은 1.5km로 가장 긴 간의 노반상태평가를 위하여 코레일의 협조하에 고속철도 개통이후 2007년까지의 선로유지보수빈도가 높은구간이며, 광명~대전간 4개소, 대전~동대구간 6개소이다(그림1).

\* 코레일테크, 기업부설연구소, 부장

E-mail : railway@hanafos.com

Tel : (042)257-9486 (502) FAX : (042)257-9481

\*\* 코레일, 시설기술단 선로관리팀, 팀장

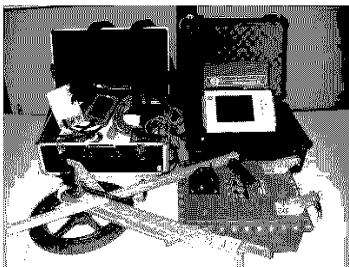
\*\*\* 코레일, 시설기술단 선로관리팀, 차장

## 2.1 노반 GPR 탐사

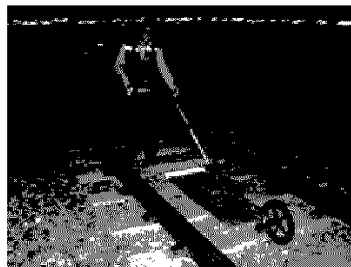
레이더(Radar: Radio Detecting and Ranging)는 원래 비행기나 군함 등 공간에 위치해 있는 물체의 존재를 파악하고 거리를 알아내기 위해 군사적 목적으로 만들어진 장비이다. 레이더 기술을 지상이 아닌 지하에 적용하여 지표연구, 매설물 탐사 등에 응용하는 것을 GPR(Ground Penetrating Radar) 탐사법이라고 한다.

### 2.1.1 GPR 탐사 및 분석 방법

고속선 노반에 대한 GPR탐사를 위하여 강화노반층 및 상부노반층의 층다짐 상태 등 비교적 심도가 낮은 구간에 대한 상세한 조사를 위하여 심도 0~2.5m 정도에서 투과율이 가장 우수한 400MHz 안테나를 선정하였고, 침목과 자갈도상의 불규칙한 면으로부터 안정적인 데이터를 취득 할 수 있도록 안테나 바닥에 넓은 패널을 연결하였다. GPR탐사의 주장치는 TerrsSIRch사의 Sir3000 2대를 운용하여 각각 Time Range 30ns/sec, 70ns/sec로 동시에 측정할 수 있도록 하여 측정 시 점차에 의한 오차범위를 줄이고자 하였으며, 이 두 대의 GPR 주장치는 약 1.5m, 다른 한 대는 약 3.0m 깊이까지 탐사할 수 있도록 설정하였다(그림2).



(a) 탐사장비



(b) 바닥패널 부착현황

그림2. GPR탐사 장비 및 분석소프트웨어

GPR탐사자료에 대한 분석은 디지털 신호처리기법을 응용한 다각적인 데이터분석 및 관독을 위하여 Radan 6.5버전과 Prism 2.5버전을 이용하였으며 데이터 길이에 대한 보정, 콘크리트 침목에 의한 데이터 Loss 부분에 대한 자료처리, 매질종류에 따른 유전상수값 등의 적용을 위하여 그림3과 같은 데이터처리 과정을 거치게 된다. 이러한 데이터처리과정에서 기반내의 Layer 및 지장물 등의 심도를 결정하는 기반의 유전상수는 각 매질의 물성적 특성을 고려하여 Sample 채취후 실험치를 적용시켜야 하지만 고속선 노반에 대해서 도상자갈층의 경우 화강의 대표적 유전상수값이 4~6인 것과 실제 두께 등을 고려하여 '4'로 적용하였고, 노반에 대한 상수값은 일반적인 토양의 대표값인 '9'를 원용하여 적용하였다. 매질 경계층(Layer)에 대한 신호는 준공도면을 참조하여 유사 심도에서 나타난 반사파에 대해 각 경계층 신호(도상자갈층, 강화노반층 등)로 추정하여 분석하였다.

### 2.1.2 GPR탐사자료 분석

조사대상구간 10개소에 대한 GPR탐사자료에 대한 분석결과는 내용이 방대하여 본고에서는 몇 가지만 대표적으로 선별하여 수록하고자 한다.

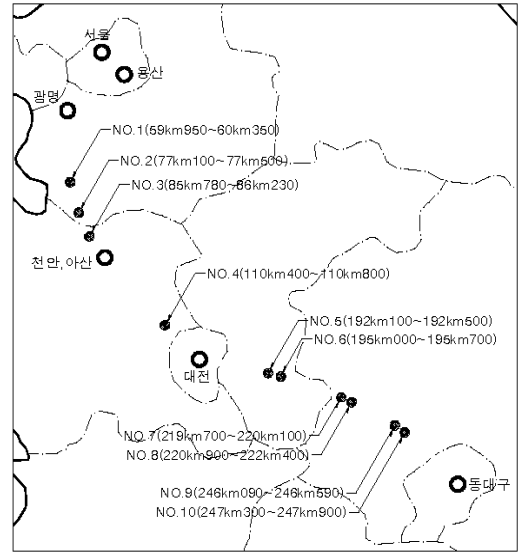


그림1. 고속철도 GPR 및 시추조사 대상구간 위치  
주장치는 도상자갈의 상면으로부터 약

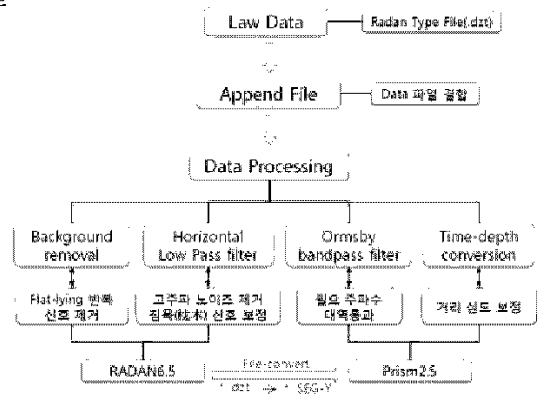
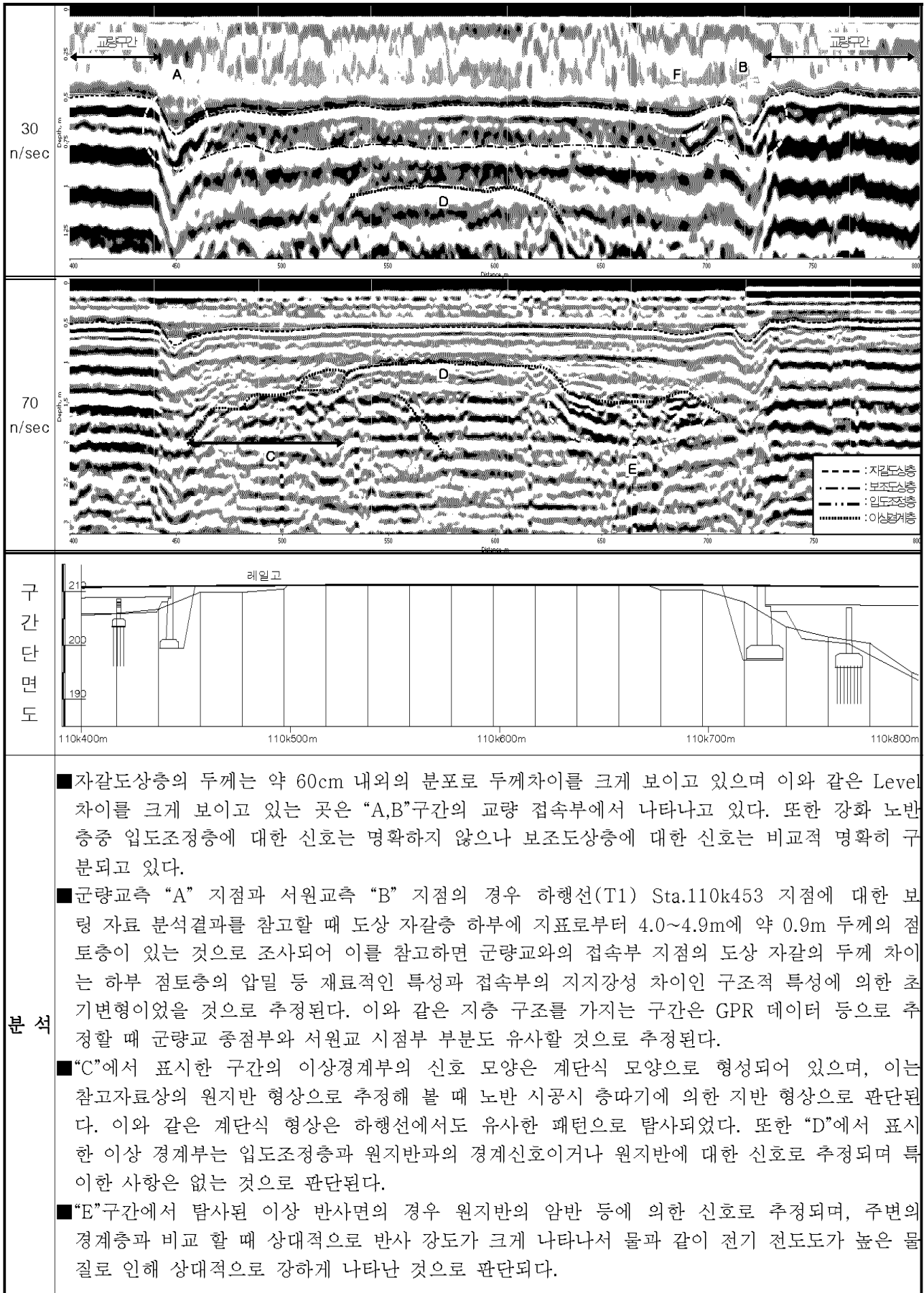


그림3. GPR 데이터 처리 수행도



**분석**

- 자갈도상층의 두께는 약 60cm 내외의 분포로 두께차이를 크게 보이고 있으며 이와 같은 Level 차이를 크게 보이고 있는 곳은 “A,B”구간의 교량 접속부에서 나타나고 있다. 또한 강화 노반 층중 입도조정층에 대한 신호는 명확하지 않으나 보조도상층에 대한 신호는 비교적 명확히 구분되고 있다.
- 군량교측 “A” 지점과 서원교측 “B” 지점의 경우 하행선(T1) Sta.110k453 지점에 대한 보링 자료 분석결과를 참고할 때 도상 자갈층 하부에 지표로부터 4.0~4.9m에 약 0.9m 두께의 점토층이 있는 것으로 조사되어 이를 참고하면 군량교와의 접속부 지점의 도상 자갈의 두께 차이는 하부 점토층의 압밀 등 재료적인 특성과 접속부의 지지강성 차이인 구조적 특성에 의한 초기변형이었을 것으로 추정된다. 이와 같은 지층 구조를 가지는 구간은 GPR 데이터 등으로 추정할 때 군량교 종점부와 서원교 시점부 부분도 유사할 것으로 추정된다.
- “C”에서 표시한 구간의 이상경계부의 신호 모양은 계단식 모양으로 형성되어 있으며, 이는 참고자료상의 원지반 형상으로 추정해 볼 때 노반 시공시 층따기에 의한 지반 형상으로 판단된다. 이와 같은 계단식 형상은 하행선에서도 유사한 패턴으로 탐사되었다. 또한 “D”에서 표시한 이상 경계부는 입도조정층과 원지반과의 경계신호이거나 원지반에 대한 신호로 추정되며 특이한 사항은 없는 것으로 판단된다.
- “E”구간에서 탐사된 이상 반사면의 경우 원지반의 암반 등에 의한 신호로 추정되며, 주변의 경계층과 비교 할 때 상대적으로 반사 강도가 크게 나타나서 물과 같이 전기 전도도가 높은 물질로 인해 상대적으로 강하게 나타난 것으로 판단된다.

그림4. 4구간 110K400~110K800 (T1) GPR탐사결과

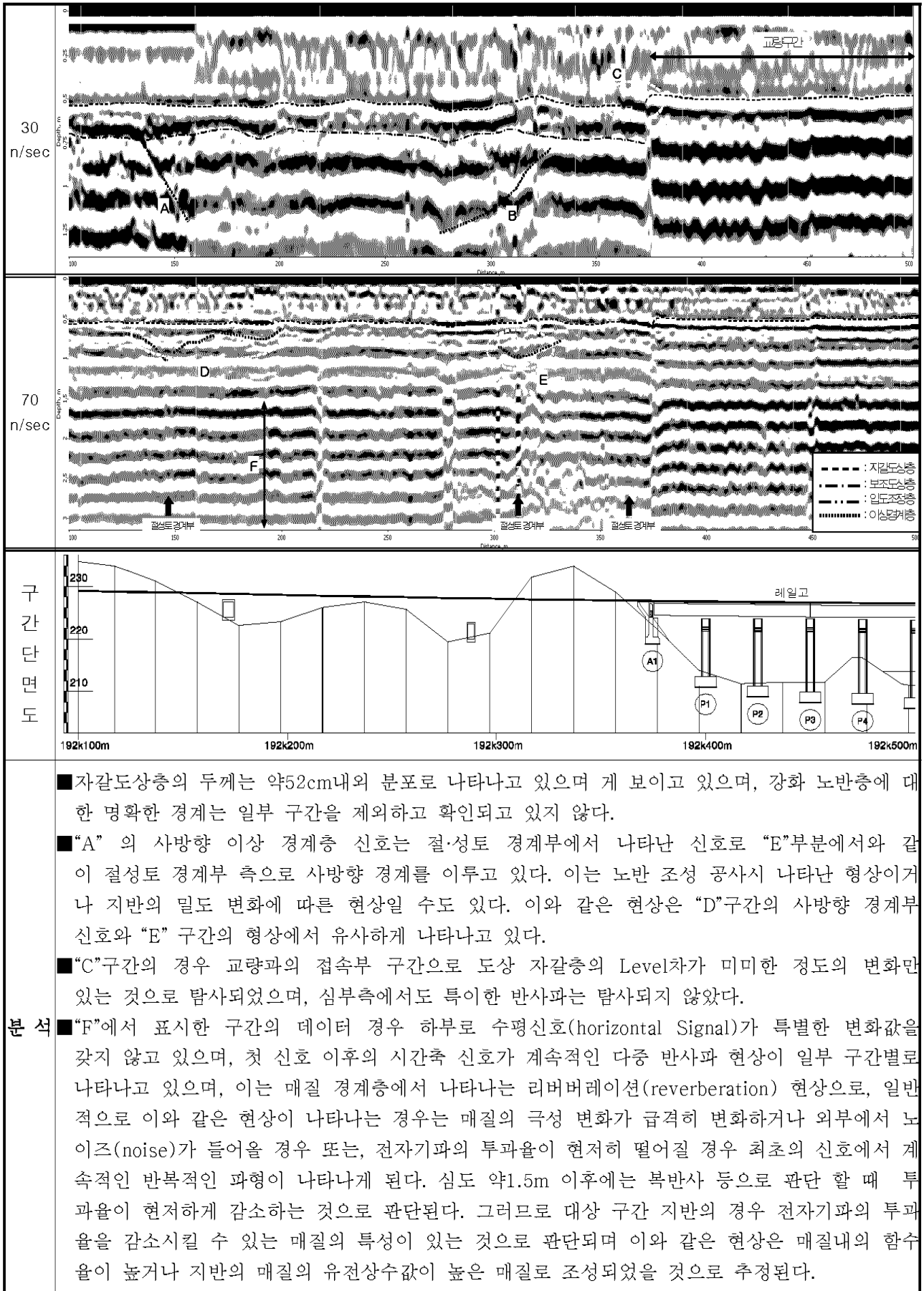


그림5. 5구간 192K100~192K500 (T2) GPR탐사결과

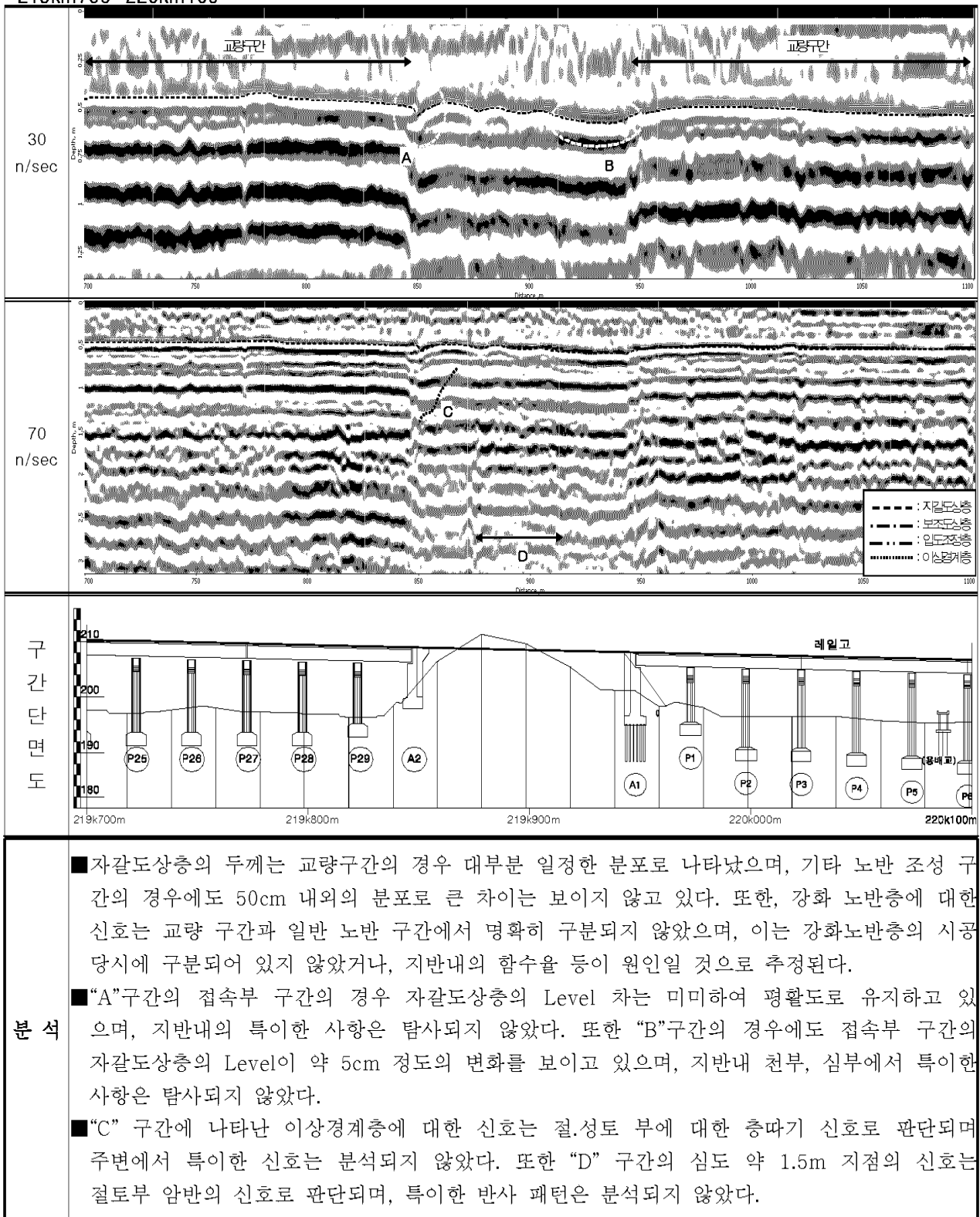


그림6. 7구간 219K700~220K100 (T2) GPR탐사결과

이상과 같이 10개소에 대한 GPR탐사결과분석을 요약하면 자갈도상층에 대한 두께를 확인하였으며, 대부분의 구간에서 설계두께(50cm) 이상을 확보하고 있는 것으로 분석되었다. 그러나 일부 개소에서 국부적으로 50cm 이하의 구간도 존재하였으며, 이 구간의 경우 보수이력 등과 비교한 결과 규칙적인 상관관계는 없는 것으로 분석되었다.

보수 집중구간 등과 탐사 데이터를 비교한 결과 데이터상의 이상 반사대 발생 구간과 보수 집중구간의 규칙적인 상관관계는 없었으나, 보수가 잦은 일부구간에서 자갈도상층의 두께가 일정하지 않게 나타나는 것으로 분석되었다. 이는 자갈의 밀도변화 또는 기타 원인 등에 의한 것으로 판단되며, 기타 이상 반사대의 경우 대부분 매질내의 함수율 변화에 따른 반사강도차이, 절토부 원지반 및 층따기 경계부, 성토부 층다짐 경계부 신호인 것으로 판단된다.

## 2.2. 노반 시추조사

앞에서의 GPR탐사는 간접조사방법인 비파괴 탐사법이므로 직접적인 시추조사를 실시함으로써 보다 신뢰성 있는 조사결과를 얻을 수 있을 것이다. 시추조사개소는 선로유지보수 이력 중 보수빈도가 높은 곳과 GPR탐사결과로부터 추측되는 여러 가지 신호패턴들을 분류하여 유사한 패턴의 신호에 대해서는 대표적인 개소들을 선정하는 방식으로 매질의 불균질성, 반사강도 차이, 교량접속부, 경계층 이상반사대, 경계층 level차이 등을 확인하기 위하여 도표1과 같이 시추조사개소를 선정하였다.

도표 1. 시추조사 10개소

구간 No	공번	보링 위치	시추조사 위치 선정사유
1	BH-1	T1 60k180	보수이력이 많은 지점
	BH-2	T1 60k280	노반 경계층 반사강도 정보 취득
3	BH-3	T1 86k050	자갈경계층 높이차 확인
	BH-4	T1 86k167	절토부 강반사대 구간 정보취득 (함수율관계)
4	BH-5	T2 110k510	자갈경계층, 이상경계부 확인
	BH-6	T1 110k453	교량 접속부 침하부 정보취득
5	BH-7	T1 192k270	매질 경계부 이상 반사대 정보취득
8	BH-8	T2 221k200	주변지반보다 반사율이 큰 것에 대한 정보취득
	BH-9	T2 221k350	보수이력이 많은 지점
10	BH-10	T2 247k820	보수이력이 많은 지점

### 2.2.1 시추조사 방법

고속선에서의 시추조사는 선로위의 전차선 높이 및 고압전류와 같은 현장제약조건을 고려하여 시추장비 선정시 중대형장비보다는 소형장비를 선정하였다. 시추조사방법은 주간시간에 인근지에서 모터카에 연결된 트로리에 시추장비일체를 적재하여 작업준비를 완료하고 새벽차단시간에 현장으로 이동하여 일일 1개소씩 회전수세식(Rotary Wash Type) 시추기를 이용하여 표준관입시험(Standard Penetration Test, SPT, KSF2318기준)과 병행하고, 굴진은 BX(φ65mm) 구경을 사용하고 공벽 붕괴가 없는 견고한 지층까지 Casing을 삽입하는 Casing방식을 채택하였다(그림7).

표준관입시험은 지층의 상대밀도(Relative Density), 연경도(Consistency Index)와 구성성분을 파악하기 위하여 지층이 변화하는 경우 또는 동일지층의 경우라도 1.5m 간격으로 표준관입시험을 연속성 있게 실시하였으며, 이 때 구성성분을 파악하기 위해서 교란된 시료도 함께 채취하였다. 지층이 매우 조밀하여 타격을 50

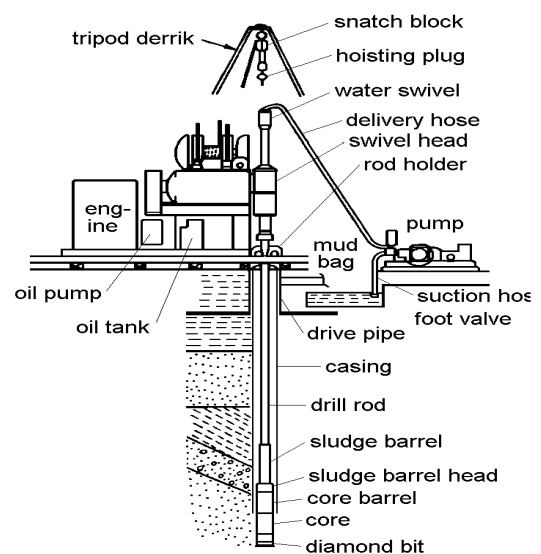


그림7. 시추조사 모식도

회 이상 타격을 가하여도 30cm 관입이 불가능한 지층에서는 50회 타격에 의한 관입량을 측정하여 주상도에 기록하였다(그림8). 표준관입시험은 Split Spoon Sampler로 채취하였으며, 함수비의 변화가 없도록 시료병에 넣어 필요한 사항(조사명, 조사일자, 공번, 시료채취심도, N치, 토질명 등)을 기재하여 시료표본 상자에 정리 보관하였다. 표준관입시험에 의한 N치는 중량 63.5kgf 해머를 76cm 높이에서 자유낙하 시켜 표준외경 50.8mm의 Split Spoon Sampler가 30cm 관입하는데 소요되는 타격횟수를 말하며 때 15cm씩, 총 45cm에 관입에 대한 관입저항치를 구하였으며, 그 중 2, 3번째 관입저항치를 합하여 기록하였고 조사심도는 7.5~10.0m 까지 굴진하였다(그림9).

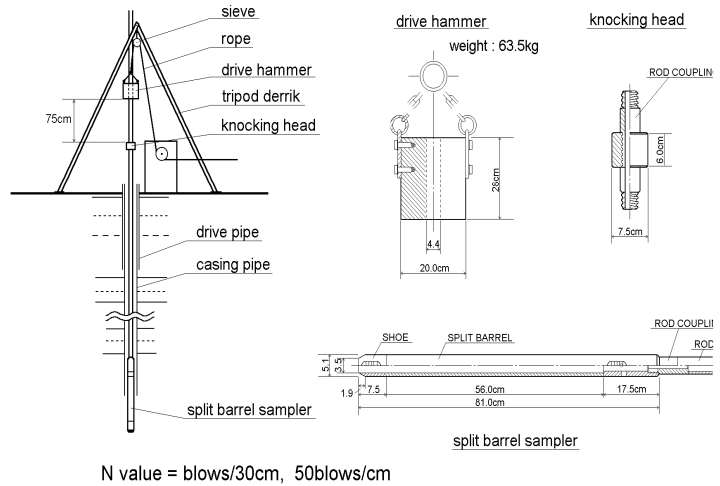


그림8. 표준관입시험 모식도

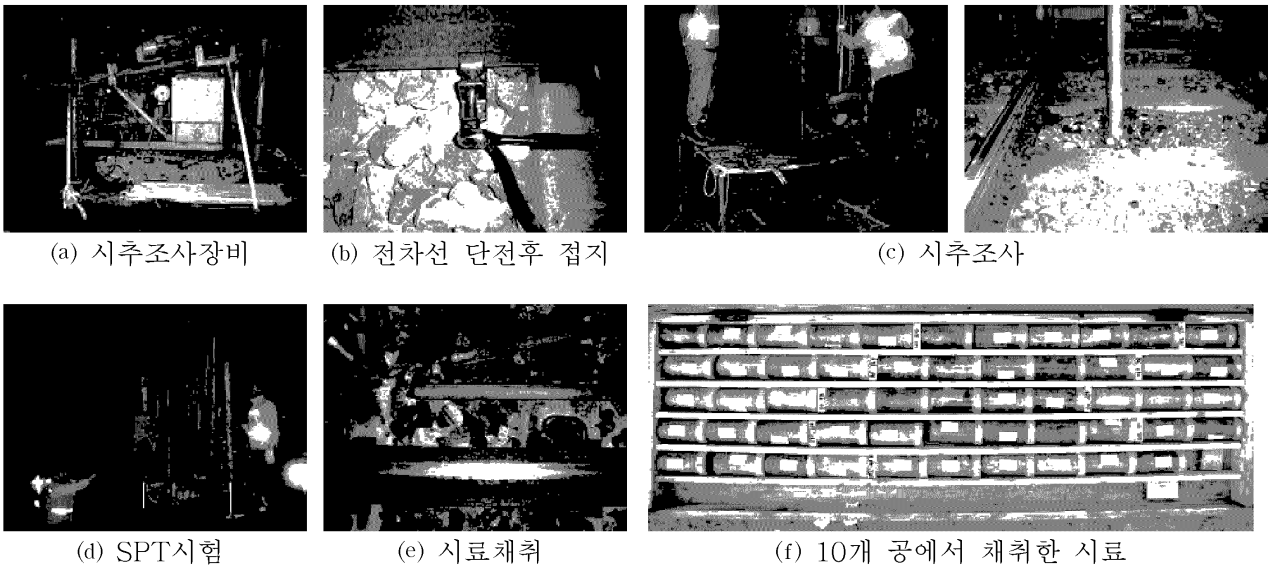


그림9. 노반 시추조사

### 2.2.2 시추조사 결과

10개 공에 대한 시추조사에서 코어는 심도 1.5m마다 채취하였으며 채취한 시료를 흙의 통일분류법 (ASTM D-2487, Unified Soil Classification System)으로 구분하면 도상자같은 GW로 구분되며, 노반의 대부분은 조립질의 모래 중 SW, SC에 해당하였다. 자갈도상층은 약 60cm로 조사되었고 대부분의 시추공에서 SPT결과 보통에서 매우 조밀한 상태였다. 그러나 일부구간에서 지표면에서부터 4.5m 부근의 코어에서 점토질 시료가 채취되었고 SPT결과 8회/30cm의 다소 약한 지층이 발견되었으나 SPT의 특성상 점토층에서의 N치는 신뢰하기 어려우며 실제의 강도보다 작게 나타나는 경향이 있기 때문에 상부노반과 레도에는 영향이 적을 것으로 판단된다. 각 시추공의 지질주상도는 BH-8공을 일례로써 그림10으로 나타내었으며 10개 공에 대한 지층층후와 표준관입시험결과는 각각 도표2와 3으로 정리하였다.

조사명	고속선 노반 및 궤도틀림 지감방안		공번	BH-8	조사자	김종운										
위치	STA	상행 221K 200M	표고	m	확인자											
조사일	2008년 10월 3일 금요일		지하수위	-	m	감리원										
층 적 적 (m)	지 반 고 (m)	상 도 (m)	층 후 도 (m)	주 상 도	지 질 분 류	Description 기 술	시 료 채 취 방 법	표준관입시험 (Standard Penetration Test)								
								N치	심도	10	20	30	40	50		
1		0.6	0.6		표층	0. 표층(도상자갈층) 사질자갈(사질성) 인위적 성토층	GW	50/28	1.5							
2					사 질 자 갈	층갈색 점토수 유입 조립질의 자갈	S.P.T	40/30	3.0							
3				0. 성토층		층갈색, 암회색		39/30	4.5							
4					연 암	층갈색, 암갈색 점성이 높음 실트질점토, 자갈, 점석층재	SP	49/30	6.0							
5		5.4	4.8	인위적 성토 지층		암갈색, 암갈색		50/20	7.5							
6					연 암	조립질사질, 자갈, 점석의 영향 S.P.T 부정확(누계동성)	SC	50/15	10.0							
7		7.5	2.1	0. 풍화암		층갈색, 적갈색 표면풍화(골리, 균열면) 중질, 민질, 민색 석영립이 우세, 풍화편모 기립암-화강암류 구조, 조각은 변질, 변색으로 확인적인 구분 곤란. 석영성으로 일면조각으로 채취										
8																
9																
10		10.0	2.5													
11																
12																

그림10. 지질주상도 (8구간 BH-8, 221K200 T2)

도표 2. 시추조사결과(지층층후)

공번	지층 층후(m)				계
	도상 자갈층	사질 자갈	풍화 점토	풍화암 (연암)	
BH-1	0.6	2.4	1.5	5.5	10.0
BH-2	0.6	2.4	6.0	1.0	10.0
BH-3	0.6	-	0.9	3.0(3.0)	7.5
BH-4	0.6	-	0.9	3.0(3.0)	7.5
BH-5	0.6	-	1.4	3.0(2.5)	7.5
BH-6	0.6	4.3	1.8	0.8	7.5
BH-7	0.6	-	4.4	2.5	7.5
BH-8	0.6	4.8	-	2.1(2.5)	10.0
BH-9	0.6	4.9	2.0	2.5	10.0
BH-10	0.6	-	2.6	4.3	7.5

도표 3. 표준관입시험결과

공번	심도 (m)	1.5	3.0	4.5	6.0	7.5	10.5	계
		BH-1	18/30	23/30	50/17	50/20	50/15	
BH-2	37/30	41/30	36/30	35/30	24/30	50/15	6	
BH-3	39/30	50/9	50/7	50/5	50/5	-	5	
BH-4	50/10	50/5	50/7	50/4	50/2	-	5	
BH-5	50/25	50/11	50/7	50/5	50/4	-	5	
BH-6	50/25	50/24	8/30	37/30	50/16	-	5	
BH-7	17/30	20/30	8/30	50/8	50/22	-	5	
BH-8	50/28	40/30	39/30	49/30	50/20	50/15	6	
BH-9	49/30	40/30	36/30	50/10	50/15	50/13	6	
BH-10	31/30	33/30	50/10	50/5	50/4	-	5	

본 조사지역의 토층은 대부분이 한 반도에 발달된 선캄브리아기의 화강암질 편마암류와 화강암류로 구성된 토층으로 지반구성을 요약하면 대체로 표층(도상자갈층)-사질자갈층-풍화점토-풍화암층-연암층의 순서로 구성을 이루고 있었으며, 토층 구성 중 하부의 풍화대는 조사시 기반암이 풍화작용을 받아 변색, 변질되어 풍화암이 구조적으로 분해된 영향으로 풍화점토와 풍화암의 경계를 뚜렷이 구별하는 것은 어려웠으며 점성은 보통에서 높은 것으로 추정된다.

풍화암의 경우는 기반암의 신선한 암편 조각이 혼재되어 있으며 표준관입시험시 N치가 높게 나타나 상대밀도가 조밀에서 매우 조밀한 상태로 나타났으며, 지지력이 높은 것으로 추정되지만 현장시험으로 실시한 표준관입시험시 풍화된 모암의 암편 및 자갈의 영향으로 일부분에서 N치가 실제보다 높게 측정됐을 것으로 판단된다.

### 3. 시추조사결과 및 과거GPR탐사자료와의 비교분석

고속선에 대한 과거의 GPR탐사는 “고속선 시설물 안정성 향상 및 유지관리 효율화 방안수립(2004~2005년)”, “5개소 GPR탐상보고서(2006년)” 및 “고속철도기술개발사업(고속선 유지관리 효율화 연구(2007년))”에서 실시한 사례가 있었다. 따라서 본 연구에서 실시한 GPR탐사구간과 중복되어 탐사된 구간에 대한 자료와 시추조사결과를 고려하여 비교분석의 기준을 도상자갈층과 강화노반층 두께, Layer의 변화, 상대적 반사강도의 변화 등을 중심으로 분석하였으며, 보링 자료를 통한 분석은 보링 지점에 대한 지질 주상도를 참조하여 기타 구간 중 유사한 반사 패턴을 가지는 구간에 대해서도 참조하여 노반변형상태를 비교분석하였다.



### 3.1 고속선유지관리 효율화 연구(2004~2005년)자료와의 비교

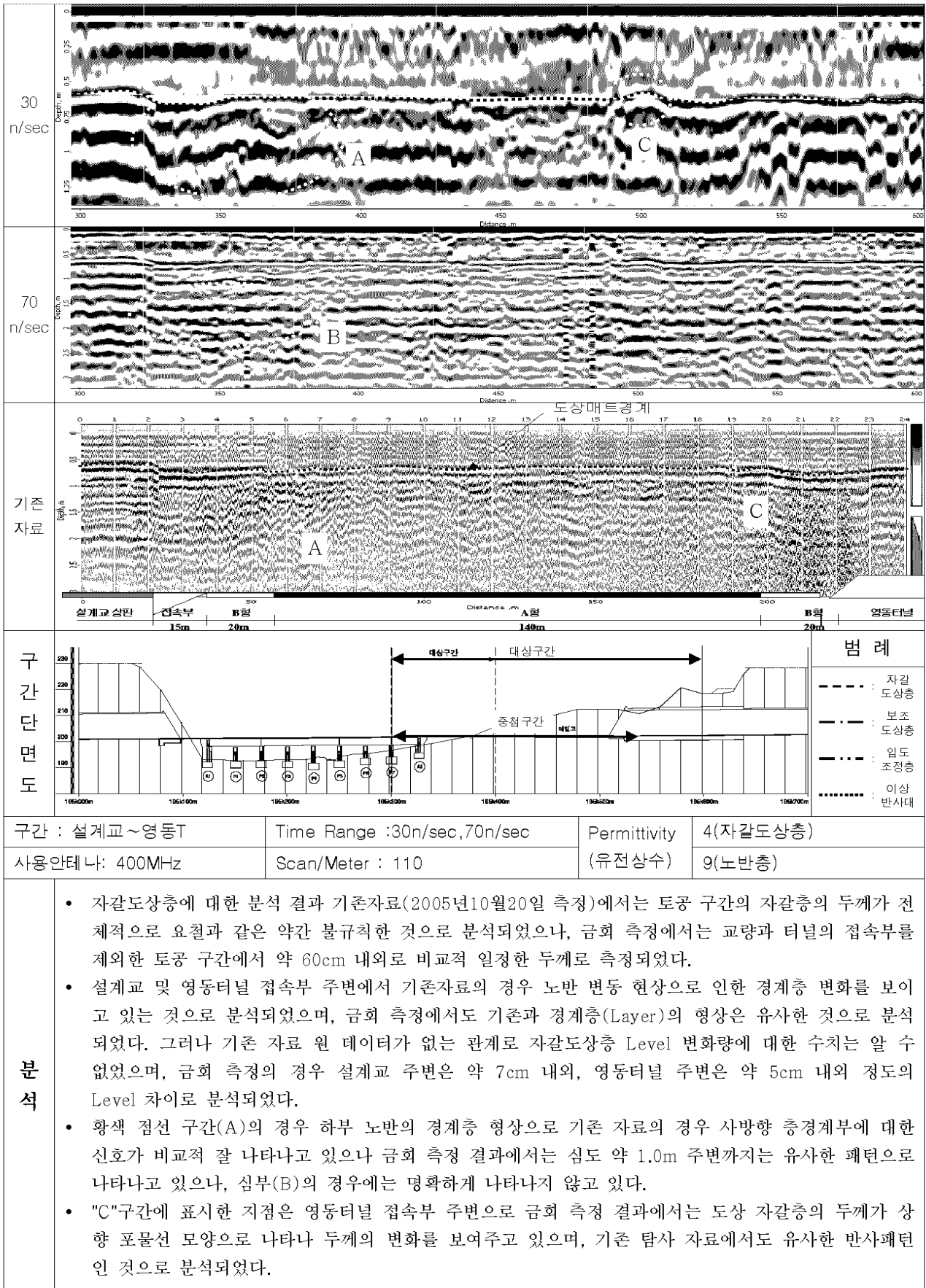


그림11. 6구간중 195k300~195k600 T2(상행선) GPR 비교

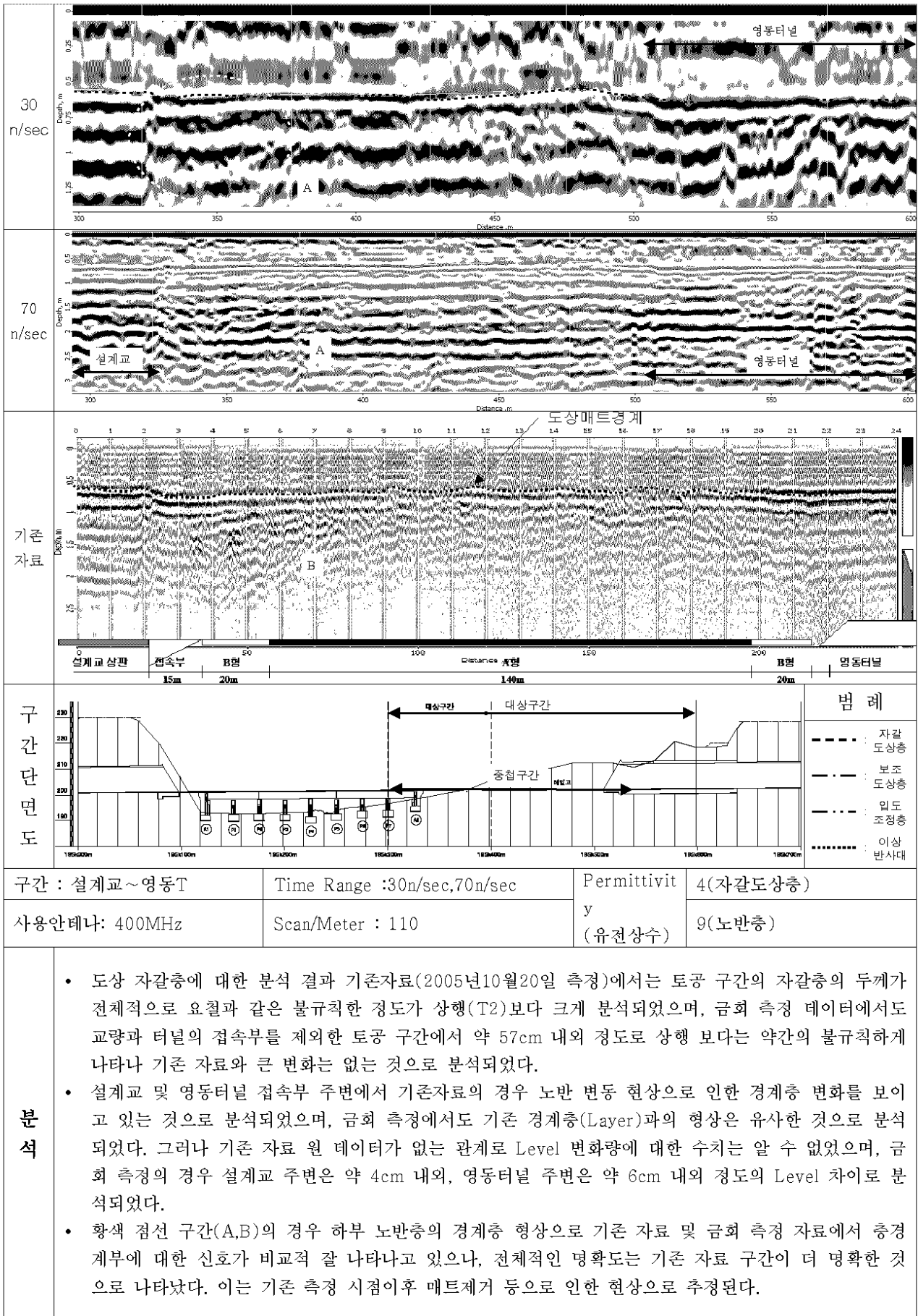


그림12. 6구간중 195K300~195K600 T1(하행선) GPR 비교

### 3.2 5개소 GPR 탐상보고서(2006년) 및 시추조사 10개소결과와의 비교분석

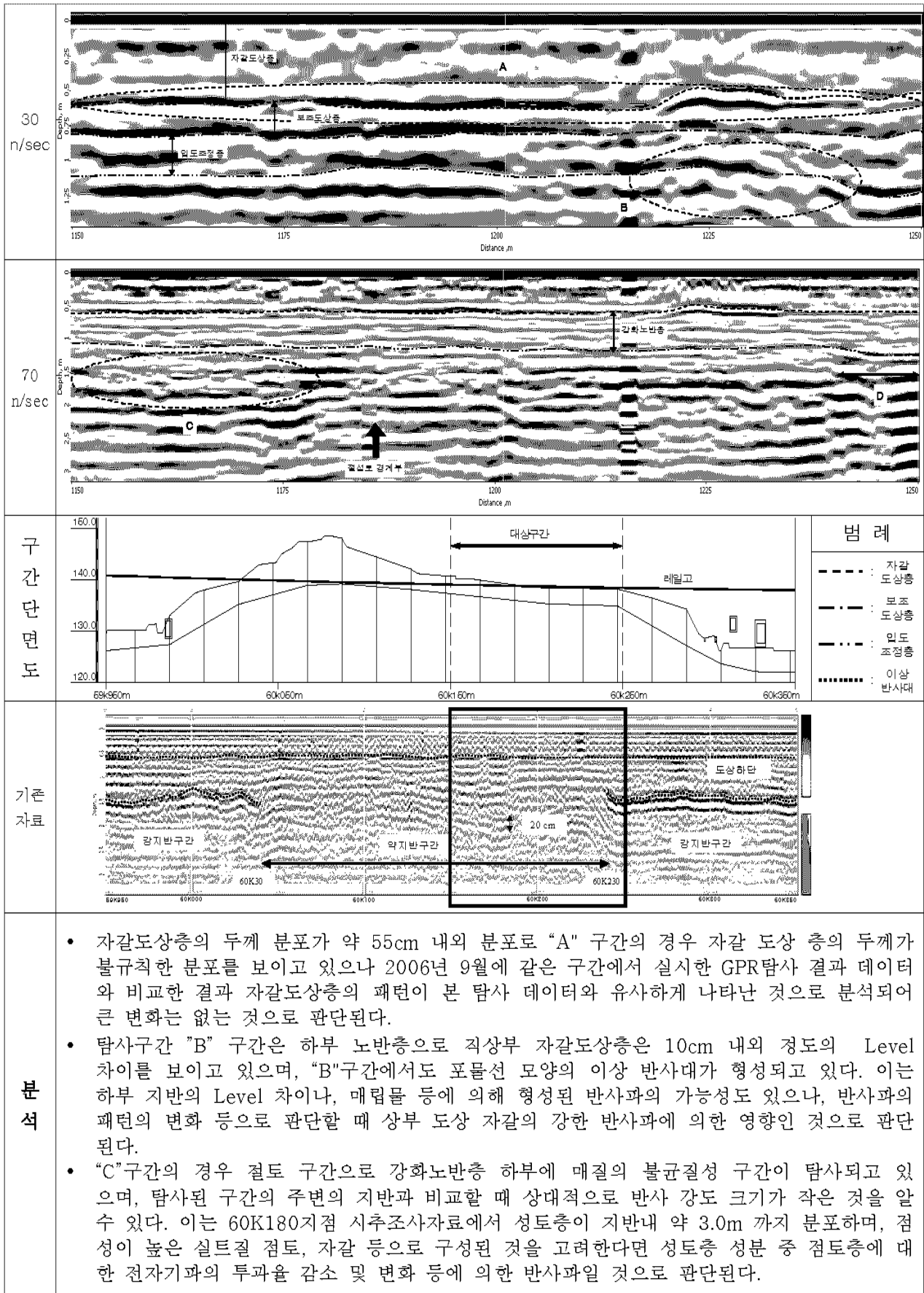
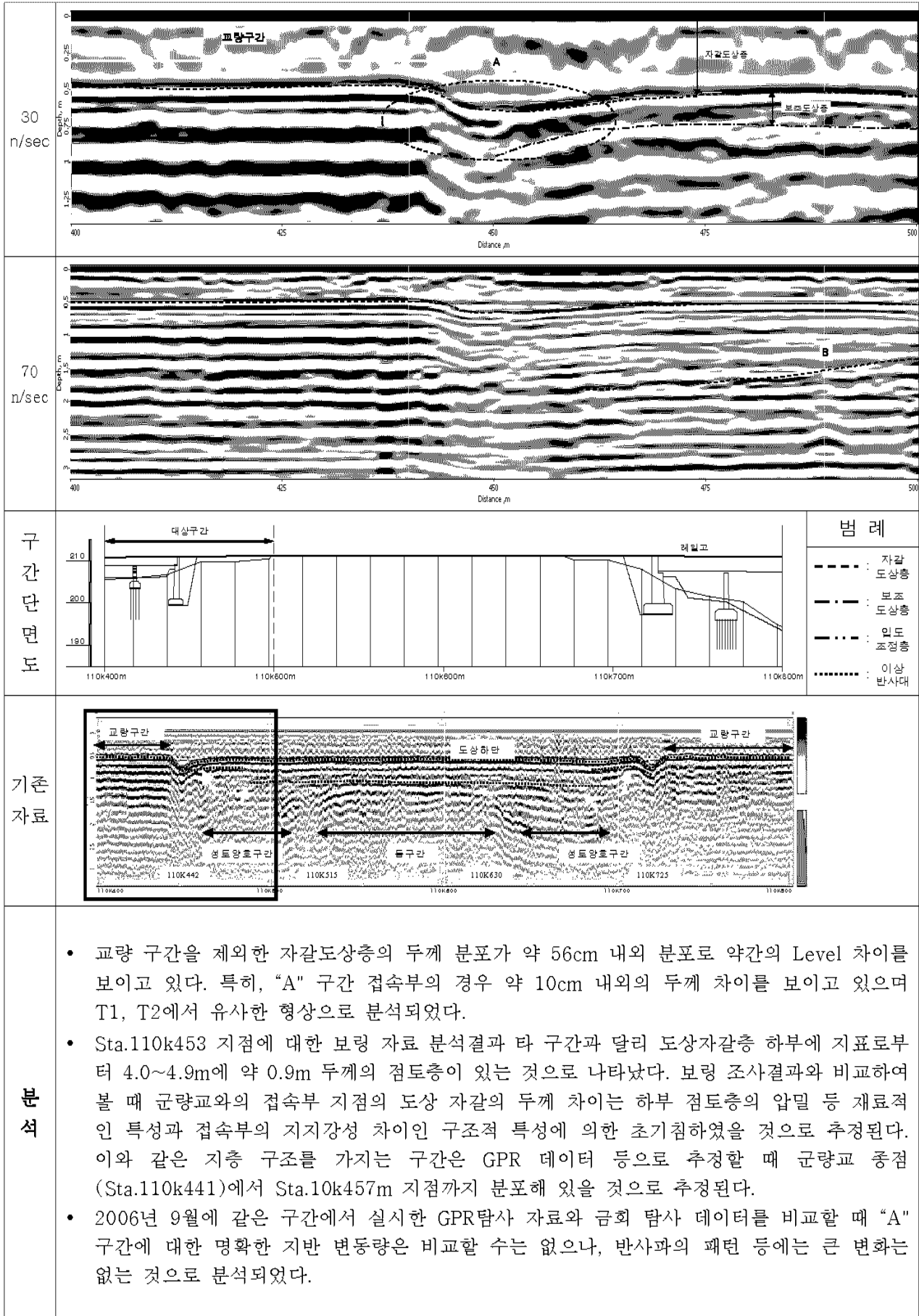


그림13. 1구간 BH-1, 60K150~60K250 T1(하행선) GPR 비교



구간 단면도

범례

- - - 자갈도상층
- · - 보조도상층
- · · · 입도조정층
- · · · · 이상반사대

기준자료

분석

- 교량 구간을 제외한 자갈도상층의 두께 분포가 약 56cm 내외 분포로 약간의 Level 차이를 보이고 있다. 특히, "A" 구간 접속부의 경우 약 10cm 내외의 두께 차이를 보이고 있으며 T1, T2에서 유사한 형상으로 분석되었다.
- Sta.110k453 지점에 대한 보링 자료 분석결과 타 구간과 달리 도상자갈층 하부에 지표로부터 4.0~4.9m에 약 0.9m 두께의 점토층이 있는 것으로 나타났다. 보링 조사결과와 비교하여 볼 때 균량교와의 접속부 지점의 도상 자갈의 두께 차이는 하부 점토층의 압밀 등 재료적인 특성과 접속부의 지지강성 차이인 구조적 특성에 의한 초기침하였을 것으로 추정된다. 이와 같은 지층 구조를 가지는 구간은 GPR 데이터 등으로 추정할 때 균량교 종점 (Sta.110k441)에서 Sta.10k457m 지점까지 분포해 있을 것으로 추정된다.
- 2006년 9월에 같은 구간에서 실시한 GPR탐사 자료와 금회 탐사 데이터를 비교할 때 "A" 구간에 대한 명확한 지반 변동량은 비교할 수는 없으나, 반사파의 패턴 등에는 큰 변화는 없는 것으로 분석되었다.

그림14. 4구간 BH-6, 110K400~110K500 T1(하행선) GPR 비교

#### 4. 결 론

본 연구에서는 고속철도 1단계구간의 노반상태를 평가하기 위하여 전체구간중 일부를 선정하여 GPR 탐사 및 시추조사를 실시하여 노반의 강화노반층과 원지반층을 확인할 수 있었으며, 과거 GPR자료와의 비교분석으로 노반의 변형여부를 판별하고자 하였다. 이러한 일련의 시험과 분석에 대한 결론은 다음과 같다.

1. 조사대상구간 10개소에 대한 GPR탐사에서 자갈도상층에 대한 두께를 확인하였으며, 보수이력과 도상층의 두께 또는 GPR탐사시의 이상반사대와 비교한 결과 두 인자 간에 특별한 상관관계는 없었다. 다만 보수가 잦은 일부구간에서 자갈도상층의 두께가 일정하지 않게 나타나는 것으로 분석되었다. 이는 자갈의 밀도변화 또는 기타 원인 등에 의한 것으로 판단된다.

2. 노반에 대한 직접조사를 위한 시추조사를 실시하여 대부분의 구간에서 SPT시험결과 보통에서 매우 조밀한 상태였으며, 한반도에 발달된 선캄브리아기의 화강암질 편마암류와 화강암류로 구성된 토층으로 지반구성을 요약하면 대체로 도상자갈층-사질자갈층-풍화점토-풍화암층-연암층의 순서로 구성되어 있었다.

3. 과거 GPR탐사자료와 중복되는 구간에 대한 자료 및 시추조사결과를 고려하여 비교분석한 결과 탐사 구간중 교량 접속부 주변에서 지반 침하 원인에 의해 발생되었을 것으로 추정되는 현상(자갈도상층 경계면이 아래로 처짐)이 다수의 구간에서 탐사되었다. 그러나 이와 같은 현상은 2006년의 탐사자료와 비교한 결과 탐사시기와 적용상수 값 등의 차이로 명확한 비교는 어렵지만 탐사된 형상이나 반사파 패턴에 변화가 없는 것으로 볼 때 추가적인 지반의 변화 등은 없었던 것으로 추정된다.

이상과 같이 고속철도 1단계구간의 노반에 대한 상태평가결과 개통초기에 일부 노반의 접속부 등에서 침하가 있었던 것으로 확인되었으나 현재에는 더 이상의 노반변형은 없는 것으로 조사되었으며, 향후 건설되는 선로의 경우 접속부와 같은 강성변화구간에 대한 침하방지를 위한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

#### 참고문헌

1. Hyslip, J. P., Smith, S. S., Olhoeft, G. R., and Selig, E. T. (2003). "Assessment of Railway Track Substructure Conditions Using Ground Penetrating Radar". Proceedings of the Annual Meeting of the American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association, Chicago, October.
2. 한국철도공사(2006), "경부선 5개소 GPR 탐사 보고서"
3. 한국철도기술연구원(2005), "고속선 시설물 안정성 향상 및 유지관리 효율화 방안수립", 한국철도공사
4. 이춘길, 김남홍, 우병구, 김관형(2007), "자갈도상 상태평가를 위한 GPR기법의 적용성 분석", 추계 학술대회 논문집, 한국철도학회.
5. 김대상, 박태순, 강승구(2004), "GPR/PBS/FWD를 이용한 도상/노반 상태평가 기술 개발", 추계 학술 대회 논문집, 한국철도학회.