

자갈도상 상태평가를 위한 GPR기법의 적용성 분석

A study on availability of GPR in estimating the condition of ballast

이춘길* 김남홍** 우병구*** 김관형****
Lee, Choon-Kil Kim, Nam-Hong Woo, Byoung-Koo Kim, Kwan-Hyung

ABSTRACT

The ballast, one of a track components, plays an essential role as intermedium in transmitting train traffic-load to subgrade safely, and deterioration of ballast caused by cumulative load effects growth of track irregularity. Especially in the case of Gyeongbu high-speed railway, the deteriorating speed of ballast by dynamic vibration is faster than conventional line because KTX is longer than normal trains in length and it's velocity is very fast with high speed of 300km/h as well. In addition, ballast is a nonlinear material contrary to ordinary metal which has homogeneous property and this property of ballast may cause transformation of ballast. Therefore the theoretical modeling of ballast is quite complicated and it is hard to ensure the reliability of the result.

The objective of this paper is to examine the availability of GPR(Ground Penetrating Radar) in estimating the thickness and the degree of deterioration of ballast. First, We figured out the principle of GPR which is the technique of evaluating the condition of ballast and then analyzed data which were measured at Gyeongbu high-speed railway where KTX is running now.

1. 서 론

자갈도상 궤도는 부설이나 보수가 용이하고 저렴한 건설비 때문에 전 세계적으로 광범위하게 사용되고 있으며, 국내의 선로 또한 대부분 이 궤도형식으로 구성되어 있다. 그러나 차량의 고속화와 더불어 동적진동의 영향과 궤도구성품의 노후화로 인하여 유지보수에 많은 인력과 비용이 소요되고 있고, 인력수급의 문제로 인하여 과거의 인적노동력을 전제로 한 보수체계를 유지하는 것도 점점 어려워지고 있다. 따라서 적은 인력과 최소비용으로 필요한 선로품질을 유지할 수 있는 시스템 구축이 시급히 요구되며, 자갈도상 궤도의 점진적 손상 및 구조적 특성에 의해 발생되는 보수비용을 줄이는 것이 전체 유지보수비용을 절감하는 방안일 것이다. 자갈도상 궤도는 충격흡수의 효율성과 궤도틀림 정정의 용이성 등의 면에서 장점을 갖지만, 침하 및 궤도틀림 발생이라는 측면에서 지속적인 유지보수 작업을 필요로 한다. 도상자갈의 마모/파쇄로 인하여 사용 중인 선로의 도상 내에 바람직하지 못한 세립자가 축적되면 배수불량, 도상저항력의 저하, 충격흡수불량, 궤도틀림진전 가속화 등의 악영향을 미친다.

궤도구성품 중 도상은 레일과 침목으로 전달되는 열차하중을 노반으로 전달하는 중간매개체 역할을 하며, 누적 통과 하중으로 인한 자갈의 열화는 궤도틀림 진전에 직접적으로 영향을 미친다. 특히, 경부고속철도 KTX의 경우 20량 편성으로 일반열차에 비해 길게 편성되어 있을 뿐만 아니라, 300km/h의 고속으로 주행하게 되므로 동적 진동에 의한 자갈의 열화속도는 일반철도 구간에 비해 매우 클 것으로 판단된다. 그러나 자갈 자체가 가지고 있는 거동 특성이 일반금속과 같은 균질한 재

* 한국철도공사 철도연구원 기술연구팀, 공학박사, 비회원

E-mail : cklee@korail.com

TEL : (042)609-4934 FAX : (042)609-3720

** 한국철도공사 철도연구원 기술연구팀, 비회원

*** 한국철도공사 철도연구원 기술연구팀, 비회원

**** 한국철도공사 철도연구원 기술연구팀장, 기술사, 정회원

료와는 달리 비선형 재료일 뿐만 아니라 장기적으로는 대변형 문제이므로, 이론적인 모델링이 매우 복잡하며 그 결과에 대한 신뢰성도 보장하기 어려운 실정이다.

본 연구에서는 이러한 자갈도상의 두께와 열화정도를 평가하기 위하여 상태평가 기술개발에 있어 GPR(Ground Penetrating Radar)기법의 적용성을 검토하고자 한다. GPR기법의 원리를 이해하고, 실제 KTX가 운행 중인 경부고속선 구간에서 측정한 실측 결과값을 바탕으로 데이터를 분석하여 향후 활용가능성을 판단하고자 한다.

2. GPR 탐사법

2.1 탐사원리

전자파 탐사법의 일종인 GPR탐사법은 도로포장 상태 및 두께 조사, 터널라이닝 두께, 구조물 안전 진단, 하상 퇴적물조사, 지장물 탐사 등에 유용하게 사용된다. 이 방법을 이용하여 도상자갈층의 두께와 두께변화를 측정하여 도상자갈이 노반으로 관입하는 정도를 파악할 수 있으며, 세립분 함량 및 함수비 변화에 따른 도상 열화정도를 파악할 수 있다.

GPR의 장점은 궤도를 교란하지 않는 비파괴검사법이라는 점과, 짧은 시간에 긴 거리의 선로에 대한 자료를 수집할 수 있다는 점이다. GPR은 전자파를 이용하여 층 사이의 경계를 파악하며, 전체시스템이 간단하여 소형차량 혹은 트rolley(trolley)로 운반이 가능하다.

GPR은 송신안테나(Transmitter)로부터 수 MHz~GHz 범위의 전자파를 대상 매질에 입사시킨 후, 전자기적 물성이 다른 매질을 만나 반사되어 돌아온 신호를 수신안테나(Receiver)에 받아 이를 시간축(Time domain)에 기록하는 원리이다. 이러한 과정을 미리 계획된 탐사축선을 따라 안테나를 이동시키며 계속적으로 반복함으로써, 시간을 표시하는 수직축과 수평거리를 나타내는 수평축 위에 아래의 그림 1과 같은 반사강도를 표시하는 단면도를 얻을 수 있다.

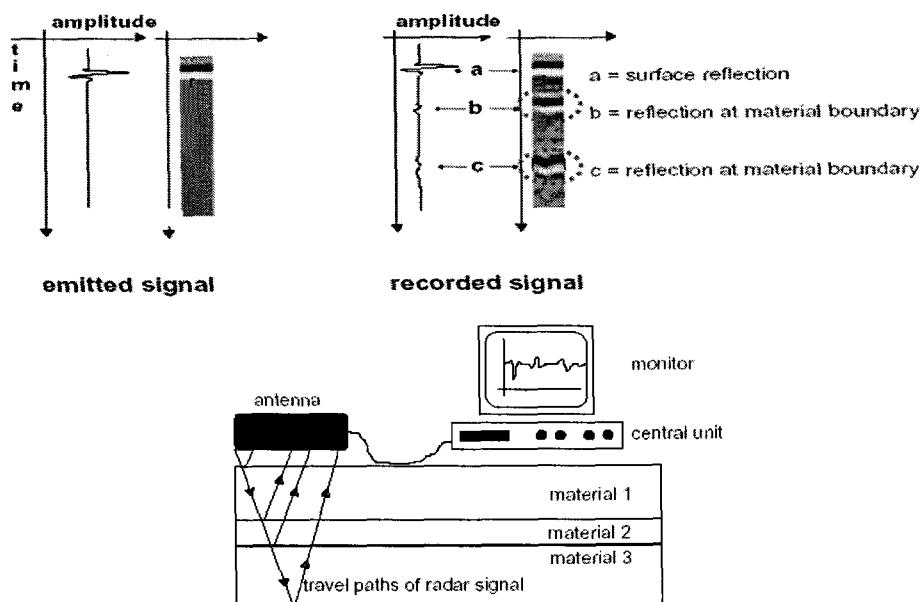


그림 1. GPR 개념도

2.2 국내·외 기술개발 현황

도로분야에서는 약 10년 전부터 비파괴검사를 이용한 도로포장 상태분석을 실시하여 왔다. 한국도로공사 도로교통기술원의 경우, 60km/h 이상의 속도로 주행하며 아스팔트 콘크리트 포장의 두께를 평가함으로써, 개통 후 발생하는 잔류침하량을 측정하는데 GPR탐사법을 활용하고 있다.

또한, 구조물 안전진단 분야에서는 GPR을 활용하여 제방 배수통문의 철근부식 정도와 배면 공동·균열 정도를 파악하였으며, 지질자원 분야에서는 지하의 유전을 해석을 위한 기초연구로서 주파수 영역에서의 1차원 GPR모델링 알고리즘을 완성하였다.

최근, 영국을 중심으로, 운행 중인 선로에서의 도상 상태평가를 위하여 GPR탐사법이 활용되고 있

다. 원래 GPR은 지표면에 매설되어 있는 지뢰나 배수구의 탐지 등을 위해 사용된 기법으로서 철도 분야에서는 자갈의 깊이, 입도분포, 습윤층 탐지 등에 적용되고 있다. 영국의 경우, 약 10년 전부터 관련 연구를 활발히 진행하여 왔고 초기에는 주요 대학에서 주도적으로 연구를 수행하였으나 최근에는 기업들로 그 기초기술이 이전되면서 상업화를 위한 노력을 기울이고 있다. 그 대표적인 기업으로 영국의 Zetica社를 들 수 있으며, 아래의 그림 2에는 GPR장비와 Zetica社의 ZARR 프로그램을 이용한 도상자갈 상태평가 시스템 예시 화면을 보였다.

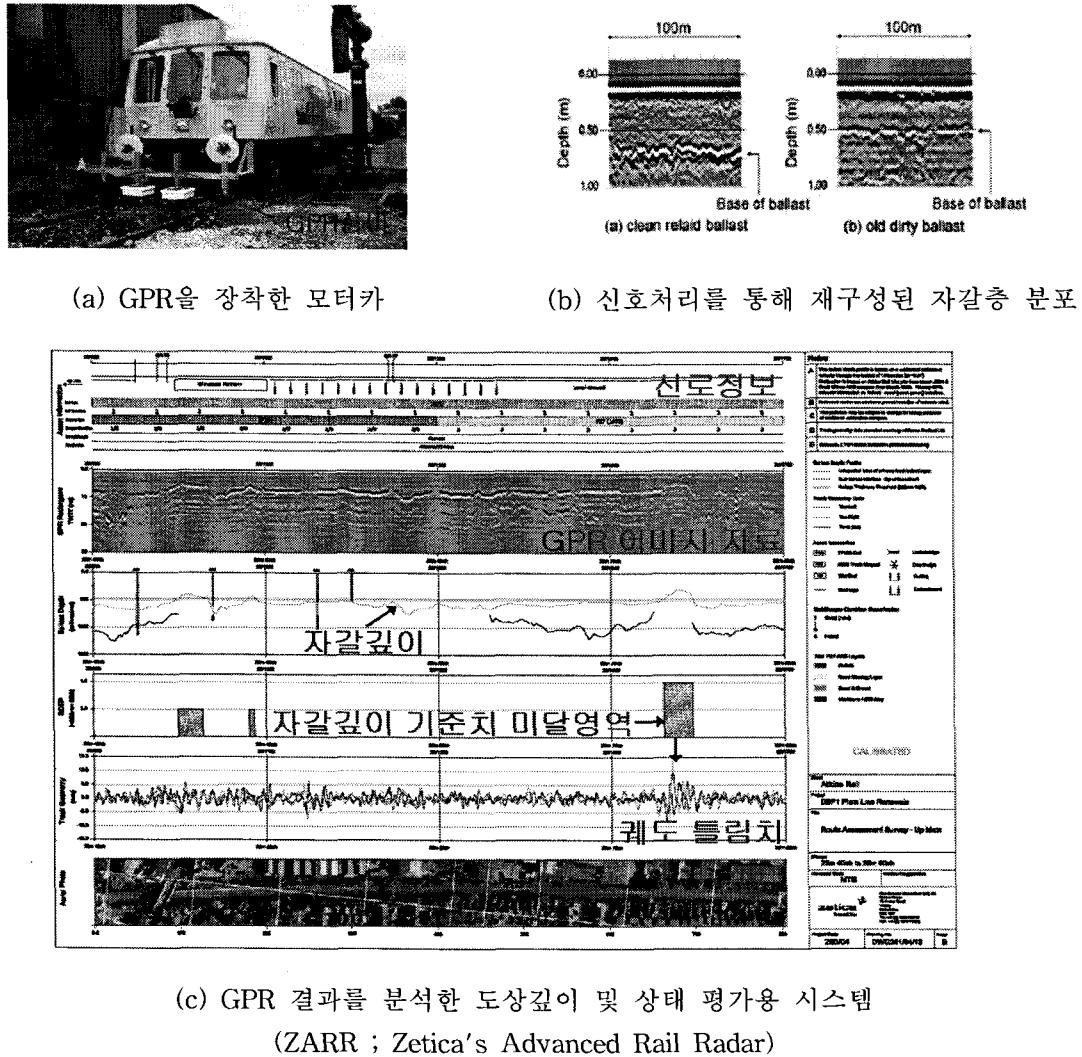


그림 2. GPR을 이용한 도상의 상태 평가 시스템 예시

3. 데이터 프로세싱

데이터 처리의 주된 목표는 raw 데이터로부터 background 노이즈를 제거하고 하부 표면을 통하여 전송된 신호의 감쇠를 보상하는 것이다. 목적은 층 경계면과 하부 표면 물체를 좀 더 명백하게 확인하기 위함이다. Zetica社의 ZARP 소프트웨어는 이 목적을 달성하기 위한 프로세싱 툴의 범위를 제공하며, 실제 경부 고속선 T1(하선)에서 측정된 데이터에 적용된 프로세싱 단계는 다음과 같다.

- Drift Removal

레이다 안테나(송·수신기)는 흔히 추가 프로세싱을 복잡하게 하고 신호 진폭 분포의 범위를 벗어나는 'drift'를 받아들인다. 이것은 데이터를 flattening하는 효과를 가지고 있으며, 이후에 실시할 어떠한 프로세싱 이전에 꼭 제거되어야만 한다.

- Background Removal

시스템 전자노이즈와 관련된 수평밴드들이 경계면으로부터의 반사시간과 일치할 때 경계면의 명확성은 상당히 감소하며, 수평 밴드패스필터를 이용하는 background removal 알고리즘을 통하여 이러한 노이즈를 제거한다.

- **Horizontal/Vertical Filtering**

필터링은 데이터에서 노이즈로써 포즈를 취하고 있는 높고 낮은 주기신호 성분을 평가하는데 이용되며, 그것에 의하여 clutter(어지럽게 흩어져 있는 것)감소에 도움을 준다. 수직 밴드패스필터와 수평 밴드패스필터의 두 가지 형태 밴드패스 필터링이 이용 가능하다.

- **Automatic Gain Control(AGC)**

AGC는 경계면의 명확성을 향상시키기 위하여 프로세싱단계 동안에 적용되며, 필요한 신호정보가 추출된 이후에 신호 이미지증대가 최적으로 형성되어진다.

- **Semi Automatic Interface Identification**

경계면 탐지 또는 식별은 완전자동 또는 반자동 방법으로 수행되어질 수 있다. 좋은 품질데이터(확실한 경계면)를 위한 자동식별 방법은 전체적인 파라미터들을 프리세팅 하는 것에 의해 수행되어질 수 있다. 복잡한 상황에서의 열악한 품질데이터 또는 양호한 데이터에 대하여, 경계면 식별은 부분적으로 컴퓨터 알고리즘에 의존하여야만 한다. 이는 경계면을 파악하는 관리자에게 도움을 주고 관리자에 의해 특정범위 이내의 최적의 위치를 계산하기 위한 것이다.

아래의 그림 3에는 데이터 프로세싱 적용 이후 궤도하부 층경계면 사이의 향상된 선명도를 설명하는 GPR데이터의 예시를 보였다. 위의 그림이 switch rail에서의 1GHz raw데이터이며, 아래의 그림이 processed데이터이다.

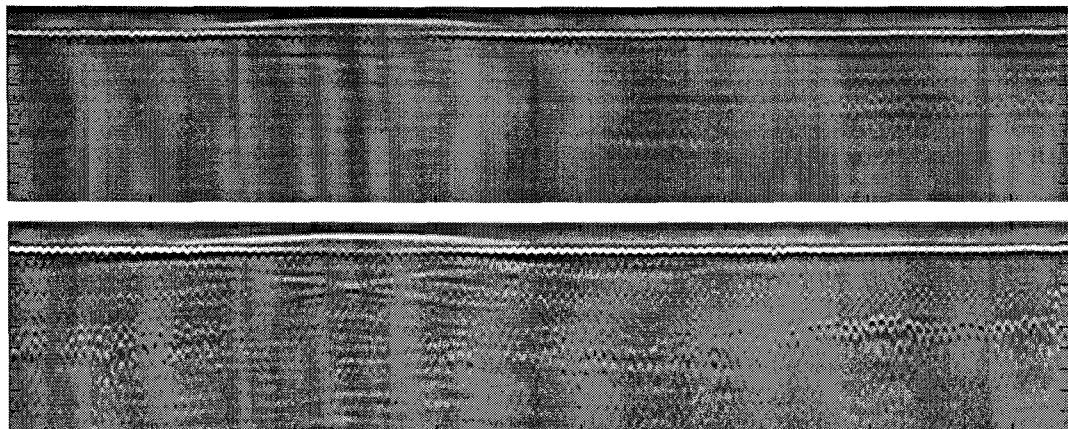


그림 3. 데이터 프로세싱 적용 이후 층경계면의 향상된 선명도를 설명하는 switch rail에서의 raw 1GHz(top) GPR데이터와 processed 1GHz(bottom) GPR데이터 예시

4. 자갈 상태평가 적용성 분석

4.1 개요

도상자갈 상태평가 기술개발에 있어 GPR기법의 적용성을 평가하기 위하여 경부고속선 2개소에서 현장시험을 실시하였다. 영국 Zetica社와 직접 현장시험을 수행하였으며, 400MHz와 1GHz의 송·수신 안테나를 사용하였다. 시간적·공간적 제한사항으로 인하여, GPR장비를 트rolley(trolley) 위에 장착하였고 PBS(Portable Ballast Sampler)기법을 활용한 도상 보링작업은 생략하였다. 그림 4는 조립 완료 후, 트rolley 위에 장착된 GPR장비의 전경을 보여주고 있으며, 이를 이용한 현장 측정시험 상세 내용과 측정결과는 다음에 나타내었다.

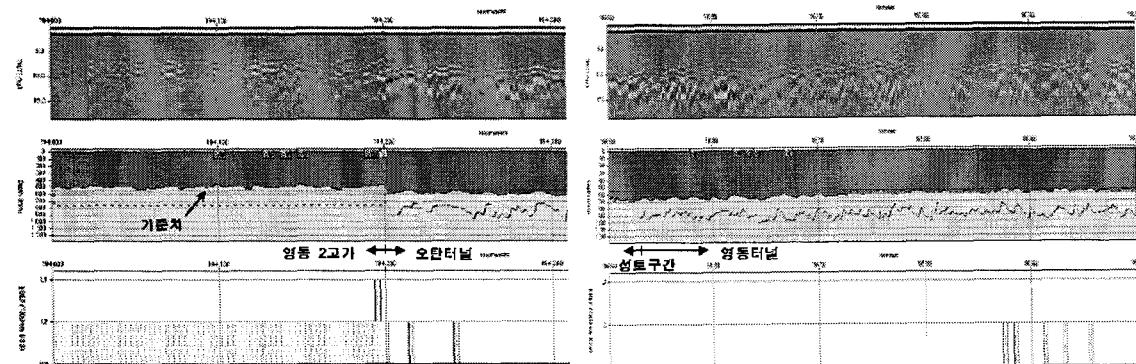


그림 4. GPR장비 전경

4.2 현장측정 시험 및 계측결과

도상자갈의 상태를 평가하기 위한 목적으로 GPR장비를 이용한 현장 측정시험을 실시하였다. 시험 장소는 경부고속선 영동시설사업소 관내 T1(하선) 191.700~197.800km구간이며, 측정시기는 고속선 운행 차단시간인 2007년 6월 25일 00:00~04:00(A.M)이다. 이 구간은 자갈도상으로 구성되어 있으며, 토공구간, 교량, 터널, 그리고 구조물 접속부(Approaches) 등에서 탐사를 시행하였다.

아래의 그림에는 194km~194.5km구간(영동 2고가, 오탄터널 구간)과 195.5km~196km구간(성토구간, 영동터널 구간)의 GPR 측정결과를 나타내었다.



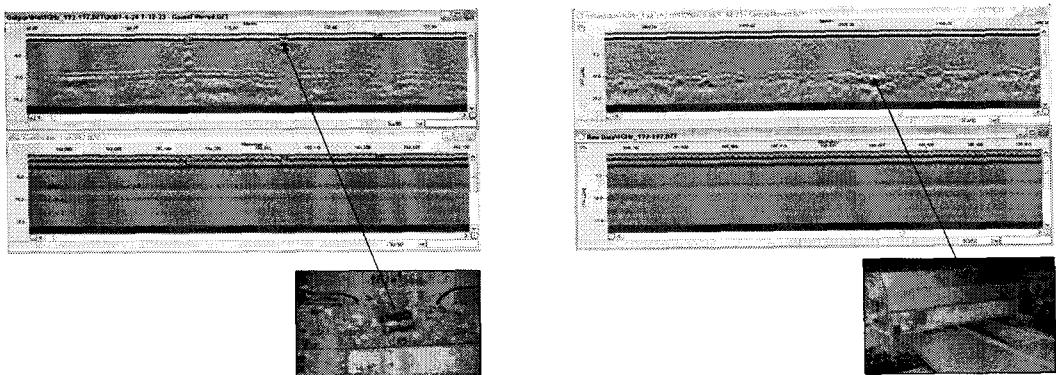
(a) 194km~194.5km 구간

(b) 195.5km~196km 구간

그림 5. GPR 측정 결과값

위의 그림 5(a)에 나타난 바와 같이 영동 2고가 구간에서는 고속철도 도상자갈두께 설계기준치인 350mm보다 다소 부족한 것으로 나타났으며, 오탄터널 구간에서는 기준치를 만족하는 전반적으로 양호한 상태를 보였다. 그림 5(b)의 성토구간과 영동터널 구간 역시 설계기준치를 만족하는 적정한 도상깊이를 보였으며, 터널구간의 경우 터널구조물 자갈도상 하부에 존재하는 2차 매질층(보조도상 콘크리트)의 존재와 매질층의 두께를 정확히 보여주고 있다.

또한, 아래의 그림과 같이 GPR 측정 결과 작은 스케일의 구조물들도 도상의 상부와 하부경계면에 분명히 나타났다. 데이터 내에 표시된 이러한 구조물들의 위치는 도상 상부의 경우 실제 구조물인 신호박스의 위치와 동일하였고, 하부경계면 부근의 경우 횡단배수구의 위치와 동일하였다. 이는 Data Processing 이후에 더욱 정확한 결과를 보였다.



(a) 신호박스 위치에서의 GPR 데이터 (b) 횡단배수구 위치에서의 GPR 데이터

그림 6. 구조물 위치에서의 processed 1GHz GPR 데이터(top)와 raw 1GHz GPR 데이터(bottom)

5. 결론

- 1) 고속철도 구간에서의 GPR 측정결과 토공, 교량, 구조물 접속부 등에서 도상두께를 비교적 정확히 측정할 수 있었다.
 - 2) 터널구조물 자갈도상 하부에 존재하는 2차 매질층(보조도상 콘크리트)의 존재와 층두께를 정확히 측정할 수 있었으며, 이러한 대형 구조물 외에도 데이터 내에 표시된 작은 스케일 구조물(신호박스, 횡단배수구 등)들의 위치 또한 실제 위치와 동일하였다. 이는 Data Processing 이후에 더욱 정확한 결과를 보였다.

이상과 같은 GPR을 활용한 자갈도상 상태평가 기법으로 얻어진 자료들은 궤도의 시공완료 시점에서 초기데이터의 축적 및 준공검사 용도로 활용할 수 있으며, 향후 유지관리를 수행하는데 있어 데이터 축적을 통한 자갈도상의 열화과정을 모니터링 할 수 있을 것이다. 또한, 일정한 주기를 갖는 궤도하부의 상태평가를 통하여 예기치 못한 하중이나 지반침하 등에 의한 사고를 사전에 감지하여 안정성을 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문은 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행하고 있는 2006년도 고속 철도기술개발사업(R&D / 06-고속철도III-1)의 지원으로 이루어 졌습니다. 이에 관련기관에 감사드립니다.

참고문헌

1. 건설교통부(2007), “고속선 궤도관리 의사결정지원 시스템 개발”, 2006년도 고속철도기술개발사업 1차년도 평가보고서, pp.138-146
 2. 한국도로공사 도로교통기술원(2005), “연약지반 구간 고속도로의 개통 후 침하평가 및 관리방안 연구”, pp.43-53
 3. 건설교통부(2005), “하천제방 배수통문의 설계 및 안정성 평가기법 연구”, 한국건설기술연구원, pp.250-253
 4. Carpenter, D. and Jackson, P.J., and Jay, A.(2004) Enhancement of the GPR method of railway trackbed investigation of radar detectable geosynthetics, NDT&E International, Vol.37, pp.95-103
 5. Suiker, A.S., Borst, R.(2003), “A numerical model for the cyclic deterioration of railway tracks”, International Journal for Numerical Methods in Engineering, VOI.57, pp.441-470
 6. Yelf, R. and Al-Nuaimy, W.(2004), “Classification system for GPR parameters”, Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar, Delft, The Netherlands.
 7. Zetica社 Project No. ZR024-07(2007), “Demonstration of ZARR”.