

확장형 공통중간점법 기반 지표투과레이더를 이용한 콘크리트 교량 바닥판 열화 상태 평가

Evaluation of Concrete Bridge Deck Deterioration Using Ground Penetrating Radar Based on an Extended Common Mid-Point Method

백 종 은¹⁾ 이 현 종^{2)*} 오 광 진³⁾ 엄 병 식⁴⁾
Baek, Jong Eun Lee, Hyun Jong Oh, Kwang Chin Eom, Byung Sik

Abstract

This study proposed a new non-destructive evaluation method for concrete bridge deck deterioration using ground penetrating radar (GPR). To calculate dielectric constant of the concrete bridge deck, an extended common mid-point (XCMP) method was developed for a two-layered structure using an air-coupled GPR antenna setup. The deterioration conditions of the concrete bridge deck such as deterioration depth was evaluated based on the dielectric constant and surface-to-average dielectric constant ratio of the concrete bridge deck. A GPR field test was conducted on an old concrete bridge with asphalt concrete surfacing to validate the new evaluation method. The test results showed that the newly proposed method estimated pavement thickness and deterioration depth of the concrete deck in a reasonable level.

Keywords : Concrete bridge deck, Concrete deterioration, Dielectric constant, Ground Penetrating Radar(GPR), Extended Common Mid-Point (XCMP) Method, Non-Destructive test

1. 서론

교량바닥판은 상부의 차량하중을 직접적으로 받는 부재로 교량 사용면에서 매우 큰 비중을 차지하고 있다. 바닥판은 통행차량의 쾌적하고 안전한 주행성 확보와 밀접한 관련이 있으며, 특히 교통하중의 충격 등에 의한 마모 및 전단에 저항하여 상부구조를 보호하는 역할을 한다. 교량 바닥판은 교량의 주부재 중 가장 먼저 손상이 발생하는 곳으로, 주행차량의 사고를 유발함과 동시에 특히, 노면은 사용자들에게 직접 노출되어 종종 언론에 보도되기도 한다. 또한, 주기적인 유지보수를 위해 교통차단이 발생하여 이용객들의 불편을 초래하고 있다. 2009년도에 고속도로를 대상으로 이러한 교량 바닥판의 손상·열화에 대해 분석한 결과, 아스팔트 포장에 시공되어 있는 콘크리트 교량 바닥판의 주요 손상·열화원인은 과거와 같

이 내하력 부족이 원인이 아니라, 제설염화물을 함유한 수분이 아스팔트와 콘크리트의 계면에 유입된 상태에서 동결융해의 반복 작용으로 발생된다(Part et al., 2011).

콘크리트 바닥판의 열화로 인하여 철근이 부식되고 이 과정에서 철근의 부피가 팽창함에 따라서 주변 콘크리트와의 부착강도가 감소하여 탈리, 균열, 또는 층분리가 발생하게 된다. 이로 인하여 철근이 노출될 정도로 심각하게 손상되고, 교면포장의 일부가 떨어져 나가는 포트홀(Pothole)이 발생된다. 교량 바닥판의 손상이 심각해질 경우 교량 바닥판 보수를 위하여 막대한 비용이 소요된다. 따라서 조기에 콘크리트 교량 바닥판의 열화 상태를 평가하는 것이 바람직하다. 하지만 전문 조사 인력 및 장비의 부족으로 적절한 시기에 교량 바닥판의 건전도를 평가하지 못하고 있는 실정이다.

따라서 콘크리트 바닥판의 효과적인 관리를 위해서는

1) 정회원, 세종대학교 건설환경공학과 연구교수
2) 정회원, 세종대학교 건설환경공학과 교수
3) 정회원, 한국시설안전공단 기술본부 시설안전연구소 차장
4) 정회원, 한국건설기술연구원 SOC성능연구소 도로연구실 연구원

* Corresponding author : hlee@sejong.ac.kr 02-3408-3812

• 본 논문에 대한 토의를 2012년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 2013년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

지속적으로 열화 상태를 점검하여야 한다. 교량바닥판의 열화 상태는 주로 점검자의 육안조사나 망치 타격법과 체인 드래그법과 같은 비파괴시험을 이용하여 관리하는 수준에 그치고 있다. 이러한 방법은 점검자의 경험에 의존하고 객관성이 떨어지고, 조사효율성도 낮은 단점이 있다.

최근 들어 교량 바닥판의 상태를 평가하기 위한 첨단기법들이 개발되고 있는 실정이다. 이러한 방법들 중 교통 통제 없이 신속하게 교량을 조사할 수 있는 지표투과레이더(ground penetrating radar, GPR) 시험이 2000년대 이후로 많이 활용되고 있는 실정이다(Tuttle, 2005; Hugenschmidt and Mastrangelo, 2006; Gucunski and Rascoe, 2008; Maser, 2009; Gucunski and Nazarian, 2010). GPR 시험은 지표로 방사된 전자기파가 전자기적 물성이 다른 매질과의 경계면에서 반사되어 수신된 파의 형상이나 경과시간을 이용하여 매질의 상태나 위치 등을 평가하는 비파괴시험이다.

GPR 시스템을 이용하여 뉴욕에 있는 10개의 교량을 대상으로 정밀조사를 실시한 결과 11.2% 오차 범위에서 열화로 인하여 콘크리트 바닥판과 교면포장 사이의 층분리 지역을 정확하게 탐지하였다(Broomfield, 2007). 또한 ASTM D 6087에 따르면 아스팔트 콘크리트 교면포장을 가지는 콘크리트 교량 바닥판의 상태평가를 위하여 GPR 시스템을 사용하고 있다. 국내의 경우 한국도로공사에서 10여 년 전부터 GPR 시스템을 이용하여 고속도로 교량의 바닥판의 열화도를 평가하고 있다(Seo et al., 1999; Seo et al., 2000; Suh et al., 2008). 한국도로공사에서 운영 중인 차량탐재형 GPR 시스템은 비접촉식 안테나 4개를 횡방향으로 장착하여 1개 차선 폭을 80km/h의 고속으로 이동하면서도 데이터를 측정할 수 있다. 하지만 GPR을 이용한 열화도 평가는 주로 콘크리트 바닥판 표면에서 측정된 유전상수를 근거로 하여 측정하여 유전상수에 따라 열화가 발생된 위치를 평가할 수 있는 반면에 콘크리트 보수 물량 계산을 위한 열화 깊이를 파악할 수 없는 한계가 있다.

본 연구에서는 콘크리트 교량 바닥판의 열화 상태를 GPR을 이용하여 보다 정밀하게 평가하기 위한 방법을 개발하였다. 이를 위하여 전파속도를 기반으로 하는 공통중간점법을 이용하여 교면포장 하부 콘크리트 바닥판의 유전상수를 추정할 수 있는 확장형 공통중간점 방법을 개발하였다. 콘크리트 바닥판의 유전상수와 표면대비평균 유전상수비를 이용하여 열화 상태 및 열화 깊이를 추정할 수 있는 방법을 제안하고 이를 현장시험을 통하여 검증하였다.

2. GPR을 이용한 콘크리트 바닥판 유전상수 측정

2.1 유전상수를 이용한 열화 상태 평가

GPR 시험을 이용한 콘크리트 바닥판의 열화상태 평가는 주로 측정된 콘크리트의 유전율(Permittivity) 또는 유전상수(Dielectric constant)를 근거로 한다. 여기서 유전율이란 전하 사이에 전기장이 작용할 때 매질이 전기장에 미치는 영향을 나타내는 일종의 물리적 단위를 말하고, 유전상수는 진공에서의 전자기파 속도에 대한 매질을 통과하는 전자기파의 상대적인 속도의 비를 말한다. 일반적인 시멘트 콘크리트의 유전상수는 4~6의 값을 가지며, 시멘트 콘크리트내의 열화도 및 공극, 골재, 시멘트 등 재료의 상태 및 특성에 따라서 3~18의 넓은 범위의 값을 가진다(Robert, 1998; Lahouar et al., 2002). 특히 교량 바닥판에 우수가 침투하여 체류수가 존재하거나 열화가 발생한 경우 유전상수가 증가하게 된다. 한국도로공사에서는 유전상수가 9이상인 경우 콘크리트 바닥판과 교면포장 사이에 체류수가 존재하여 콘크리트 바닥판에 열화가 발생할 가능성이 높은 것으로 진단한다(Suh et al., 2008). 또한 ASTM D 6087에서는 아스팔트 콘크리트 교면포장이 있는 콘크리트 교량 바닥판의 상태를 평가하는 표준화 절차를 제시한다(ASTM, 2008). 이에 따르면 콘크리트가 열화되거나 균열이 발생한 경우에는 상대적으로 많은 전자기파를 흡수하기 때문에 전자기파의 신호가 흡수되거나 강도가 약해지게 된다. 또한 철근의 경우 부식이 진행됨에 따라서 유전상수가 감소하게 되고, 이로 인하여 철근에서 반사된 전자기파의 크기가 작게 된다. 그러므로 콘크리트 바닥판 상부와 철근에서 반사된 전자기파의 상대적 크기를 이용하여 철근의 부식정도를 파악할 수 있다. 따라서 콘크리트의 열화 상태를 평가하기 위해서는 정확한 유전율 또는 유전상수의 추정이 필요하다.

2.2 반사계수를 이용한 유전상수 측정 방법

GPR 시험으로부터 유전상수를 측정하기 위한 대표적인 방법으로는 반사계수와 전파속도를 이용하는 방법이 있다. 반사계수는 층경계면에서 반사되는 전자기파의 강도를 나타내는 것으로 두 매질의 유전상수 제곱근의 차이에 비례한다. GPR 시험에서 수신된 전자기파의 강도의 비를 이용하여 반사계수를 측정할 수 있다. 따라서 측정

된 반사계수로부터 유전상수를 식 (1)과 같이 계산할 수 있다.

$$\gamma_{12} = \frac{\sqrt{\epsilon_{r,1}} - \sqrt{\epsilon_{r,2}}}{\sqrt{\epsilon_{r,1}} + \sqrt{\epsilon_{r,2}}} = \frac{1 - \sqrt{\epsilon_{r,2}}}{1 + \sqrt{\epsilon_{r,2}}} = -\frac{A_o}{A_p} \quad (1)$$

여기서, γ 는 층경계면에서의 반사계수, ϵ_r 은 유전상수, 아래첨자 1, 2는 각 층 번호, A_o 는 공기/1층 경계면에서 반사된 전자기파의 강도, 그리고 A_p 는 공기/금속판 경계면에서 반사된 전자기파의 강도로 입사된 전자기파의 강도를 나타낸다. 1층 포장구조체의 경우, 상부층(공기)의 유전상수는 1이므로, 전자기파의 강도비(A_o/A_p)를 이용하여 하부층(포장체)의 유전상수를 구할 수 있다.

반사계수를 이용하여 측정된 유전상수는 매질의 경계면에서의 물성 변화에 민감한 반면 깊이에 따른 물성 변화에는 영향을 받지 않는다. 따라서 대상 구조물의 매질이 깊이에 따라 변하는 경우 측정된 유전상수의 신뢰도가 낮아지게 된다. 콘크리트 바닥판의 경우 열화 발생 초기에는 바닥판 상부에 집중되어 분포하다가 차츰 하부로 진행하게 된다. 또한 상부 철근의 부식으로 인한 층분리로 인하여 콘크리트의 열화가 하부에서 상부쪽으로 진행할 수도 있다. 따라서 반사계수를 이용하여 측정된 유전상수를 기초로 하여 콘크리트 바닥판이 열화 상태를 평가하는 기존의 방법(Suh et al., 2008)으로는 콘크리트 바닥판 표면의 열화 존재 유무는 진단할 수 있으나 깊이별 열화 상태 또는 열화 깊이를 측정하기에는 한계가 있다.

2.3 전파속도를 이용한 유전상수 측정 방법

GPR 시험으로부터 유전상수를 측정할 수 있는 또 다른 방법으로는 매질을 통과하는 전자기파의 전파속도를 직접 측정하여 유전상수를 계산하는 방법이 있다. 현장에서 전파속도를 측정하는 다양한 방법 중 가장 대표적으로 이용되는 공통중간점(Common Mid-Point, CMP) 방법은 전자기파가 2개 이상의 이동경로로 특정 지점(공통중간점)을 통과하는데 걸리는 전파시간의 차로부터 유전상수를 측정하는 방법이다(Al-Qadi and Lahouar, 2005). CMP 방법을 이용하여 측정된 유전상수는 대상층을 통과하는 전파속도를 기반으로 하기 때문에 일부 구간이 아닌 대상층의 평균 물성을 나타낸다. 따라서 대상체의 물성이 깊이에 따라 변하는 경우 CMP 방법을 이용하여 측정된

유전상수를 기반으로 추정된 층두께 또는 거리의 신뢰도가 반사계수법을 이용한 경우보다 높아지게 된다(Leng, 2011).

2.3.1 2대의 접촉식 안테나를 이용한 CMP 방법

GPR 안테나의 종류에 따라 크게 두 가지 종류의 CMP 방법이 도로포장체에 적용되어 사용되고 있다. 접촉식 GPR 안테나를 이용하는 CMP 방법의 경우 전자기파가 Fig. 1과 같이 공통중간점인 P점을 지나는 두 가지 경로를 따라서 1층 포장체를 이동하게 된다. 각각의 경로를 따라 전파하는 전자기파의 이동시간과 이동거리와의 관계로부터 유전상수를 식 (2)와 같이 계산할 수 있다(Al-Qadi and Lahouar, 2005).

$$\epsilon_{r,1} = \frac{c^2}{x^2}(t_2^2 - t_1^2) \quad (2)$$

여기서, $\epsilon_{r,1}$ 은 1층의 유전상수, x 는 2번 송수신용 안테나의 이격거리, 그리고 t_1, t_2 는 1번과 2번 이동경로로 전파된 전자기파의 전파시간이다.

2.3.2 2대의 비접촉식 안테나를 이용한 CMP 방법

비접촉식 GPR 안테나를 사용한 경우에는 전자기파가 공기층을 통과한 후 도로포장층 표면에서 굴절 및 반사하므로 이동경로가 접촉식 안테나를 이용하는 CMP 방법과 상이하다. Leng(2011)은 기존의 CMP 방법을 개선하여 비접촉식 안테나에 적합한 확장형 CMP (Extended CMP, XCMP) 방법을 제시하였다. XCMP 방법에 사용되는 안테나의 구성 및 전자기파의 이동경로를 Fig. 2에 나타내었다. XCMP 방법을 이용한 유전상수 측정법의 순서는 다음과 같다.

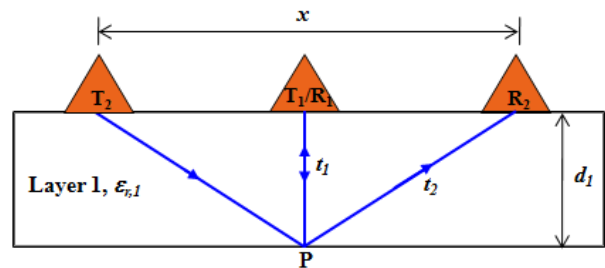
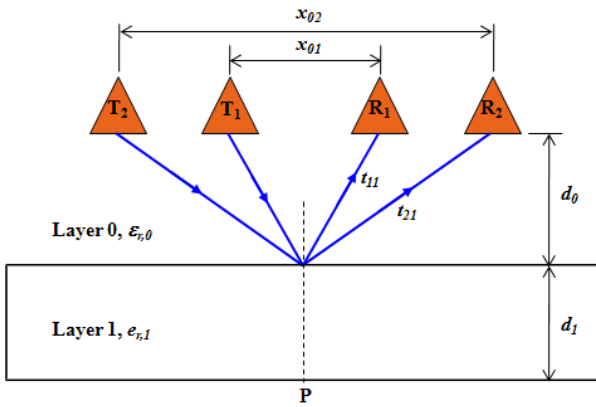
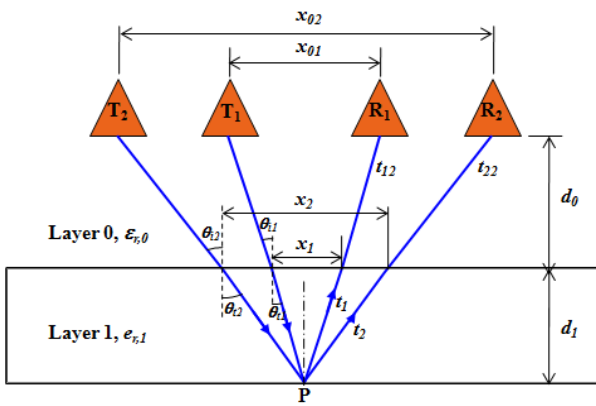


Fig. 1 Travel paths of EM waves in one layer structure for the CMP method using two ground-coupled antennae



(a) Reflection on the surface



(b) Reflection at the bottom

Fig. 2 Travel paths of EM waves in one layer structure for the XCMP method (Leng, 2011)

- ① 2개의 Bistatic 송수신용 안테나(T1/R1, T2/R2)를 각각 x_{01} , x_{02} 거리만큼 띄어 놓는다.
- ② 1층 포장구조체 표면에서 반사된 전자기파를 2개의 수신용 안테나에서 각각 수신된 전파시간(t_{11} , t_{21})을 측정한다.
- ③ 1층 포장구조체 바닥에서 반사되어 수신된 전파시간($t_1 + t_{12}$, $t_2 + t_{22}$)을 측정한다.
- ④ 1층 표면에서 굴절된 각은 Snell's 법칙과 삼각함수를 이용하여 GPR 송수신 안테나 사이의 수평 거리와 반사파의 경과 시간을 계산한다.
- ⑤ 전자기파가 첫 번째 층(Layer 1)을 통과하는데 걸리는 시간(t_1 , t_2)을 식 (3)~(4)를 이용하여 계산한다.



Fig. 3 2.0GHz air-coupled GPR antenna arrangement for the XCMP method (Leng, 2011)

$$t_1 = \Delta t_1 + \frac{\sqrt{4d_0^2 + x_{01}^2} - \sqrt{4d_0^2 + (x_{01} - x_1)^2}}{c} \quad (3)$$

$$t_2 = \Delta t_2 + \frac{\sqrt{4d_0^2 + x_{02}^2} - \sqrt{4d_0^2 + (x_{02} - x_2)^2}}{c} \quad (4)$$

여기서, t_1 , t_2 는 이동경로 1, 2를 따라 첫 번째 층을 통과하는데 걸리는 시간, t_{11} , t_{21} , t_{12} , t_{22} 은 첫 번째 층의 표면과 바닥에서 반사되어 이동경로 1, 2를 따라 공기층을 통과하는데 걸리는 시간, d_0 는 표면에서 안테나 송수신부까지의 높이, x_{01} , x_{02} 는 송수신 안테나의 이격거리, 1층 표면에서의 굴절된 지점간의 이격거리(x_1 , x_2)이다.

⑥ 최종적으로 첫 번째 층을 통과하는 데 걸리는 시간과 이격거리를 이용하여, 첫 번째 층의 유전상수를 다음과 같이 계산한다.

$$\epsilon_{r,1} = \frac{c^2(t_2^2 - t_1^2)}{x_2^2 - x_1^2} \quad (5)$$

Leng(2011)은 아스팔트 콘크리트 포장구조체의 밀도를 측정하기 위하여 2대의 비접촉식 2.0GHz GPR 안테나를 Fig. 3과 같이 구성하였다. 안테나는 차량진행 방향과 동일한 방향으로 설치하였다. XCMP 방법을 이용하여 다양한 두께를 가지는 아스팔트 포장에서 현장 모의 시험결과 포장층의 두께가 5cm 이상인 경우 XCMP 방법을 이용하여 유전상수를 측정하고 포장층의 두께를 예측한 것이 반사계수를 이용한 방법보다 보다 정확한 결과를 나타내었다. 이는 포장층의 두께가 얇은 경우 전파시간의 차이가 충분하지 않아서 측정오차가 유전상수에 미치는 영향이

큰 것으로 판단된다.

3. XCMP 방법을 이용한 콘크리트 바닥판의 열화 상태 평가 방법

3.1 XCMP 방법을 이용한 콘크리트 바닥판의 유전상수 측정

아스팔트 콘크리트 교면포장 하부 콘크리트 바닥판의 유전상수를 측정하기 위하여 기존의 Leng(2011)이 제안한 1층 포장구조체용 XCMP 방법을 개선한 2층 포장구조체용 XCMP 방법을 본 연구에서 제안하였다. 콘크리트 바닥판의 열화는 우수나 제설재가 교면포장을 투과하여 상부 철근 위쪽에 주로 발생하기 때문에 바닥판의 상부 열화의 평가가 더욱 중요하다. 본 연구에서 대상으로 하는 콘크리트 바닥판은 상부 철근 위쪽으로 이는 1.0GHz 나 2.0GHz와 같은 고주파의 전자기파는 상부 철근에서 대부분 반사되므로 상부 철근 하부로 투과하지 못하기 때문이다. 저주파 GPR 안테나를 이용할 경우 콘크리트 바닥판 바닥까지 투과할 수 있는 반면에 분해능이 낮아 5~10cm 정도 두께의 교면포장과 피복두께를 가지는 콘크리트 바닥판의 조사에는 적합하지 않는다.

XCMP 방법에서 유전상수는 전자기파가 층을 통과한 이동거리와 이동시간과의 관계를 이용하여 계산한다. 이동거리는 안테나의 배치와 교면포장과 콘크리트의 두께에 따라서 달라진다. Fig. 4는 교면포장을 가지는 콘크리트 바닥판을 통과하는 전자기파의 이동경로를 나타낸다. 송신용 안테나에서 방출된 전자기파가 공기(Layer0), 아스팔트 교면포장(Layer1), 콘크리트 바닥판(Layer2)을 차례로 통과 한 후 상부 철근에서 반사되어 다시 콘크리트/아스팔트/공기를 통과한 후 수신용 안테나에 도달하게 된다. 이때 각층의 경계면에서 입사 및 굴절되는 각도 (θ_i, θ_t)는 Snell의 법칙에 따라서 두 층의 유전상수의 sine값에 반비례한다. 예를 들어 공기와 교면포장의 층경계면에서 교면포장의 유전상수가 공기보다 크기 때문에 굴절각이 입사각보다 작게 된다. 이러한 입사각과 굴절각과 각 층의 두께(d)와 송수신용 안테나의 수평 이격거리(x)를 이용하여 전자기파의 이동경로를 계산할 수 있다. 이때 아스팔트 교면포장과 콘크리트 바닥판의 유전율은 모두 균일하며, 수평방향 길이는 무한대이며 서로 평행하다고 가정하였다. 만일 교면포장 또는 콘크리트 바닥판이

경사지거나 굴곡이 많은 경우 반사한 실체의 위치가 왜곡되게 나타날 수 있다. 이러한 경우 공간 디콘볼루션(spatial deconvolution), 유한차분법(finite difference)과 같은 구조보정(migration) 기법을 통하여 왜곡현상을 보정할 수 있다(Jol, 2009). 하지만 GPR 시험은 주로 교량의 종방향으로 실시하고 교량의 종방향 경사는 무시할 만큼 작으므로 XCMP 방법을 적용하기에는 크게 무리가 없을 것으로 판단된다.

전자기파의 이동시간은 수신된 데이터로부터 측정할 수 있다. 예를 들어 전자기파가 T_1 에서 방출되어 각 층의 경계면에서 반사되어 R_1 에 수신된 데이터를 Fig. 5에 나

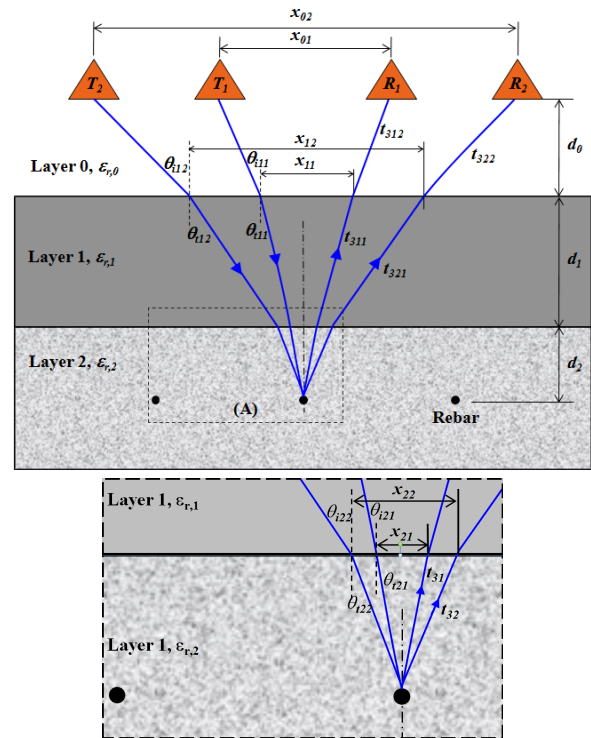


Fig. 4 Travel paths of EM waves in the concrete bridge deck with deck pavement for the XCMP method

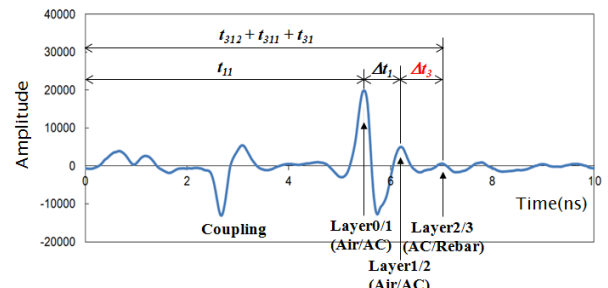


Fig. 5 GPR signal example obtained from R_1 receiver using the XCMP method

타내었다. 그림에서 나타난 바와 같이 4~8ns 사이에서 나타난 3개의 최고점들은 각각 공기/교면포장, 교면포장/콘크리트, 콘크리트/상부철근에서 반사된 전자기파를 나타낸다. 여기서 각 층을 통과한 후 상부철근에서 반사된 전자기파의 이동시간($t_{312} + t_{311} + t_{31}$)은 식 (6)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$t_{312} + t_{311} + t_{31} = t_{11} + \Delta t_1 + \Delta t_3 \quad (6)$$

여기서, t_{312}, t_{311}, t_{31} 은 T_1 에서 방출된 전자기파가 공기/교면포장/콘크리트 상부층을 통과하여 수신된 이동시간, t_{11} 은 T_1 에서 방출된 전자기파가 교면포장 표면에서 반사되어 수신된 이동시간, $\Delta t_1, \Delta t_3$ 은 두 번째와 세 번째 최고점의 차이를 나타낸다.

따라서 1번 경로를 따라서 전자기파가 콘크리트 바닥판의 상부층을 통과하는데 걸리는 시간(t_{31})은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$t_{31} = \Delta t_1 + \Delta t_3 + t_{11} - t_{312} - t_{311} \quad (7)$$

식 (7)에서 $\Delta t_1, \Delta t_3$ 은 GPR 데이터로부터 직접 구할 수 있고, t_{11}, t_{312}, t_{311} 은 안테나의 높이(d_0), 교면포장의 두께(d_1), 송수신 안테나의 수평이격거리(x_{01}), 경계부에서 굴절지점간의 수평이격거리(x_{11}, x_{21})와의 관계를 이용하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$t_{11} = \frac{\sqrt{4d_0^2 + x_{01}^2}}{c} \quad (8)$$

$$t_{312} = \frac{\sqrt{4d_0^2 + (x_{01} - x_{11})^2}}{c} \quad (9)$$

$$t_{311} = \frac{\sqrt{4d_1^2 + (x_{11} - x_{21})^2}}{c} \quad (10)$$

동일한 방법으로 2번 안테나에서 방출되어 콘크리트 바닥판을 통과한 이동시간(t_{32})을 계산하면 다음과 같다.

$$t_{32} = \Delta t_2 + \Delta t_4 + t_{21} - t_{322} - t_{321} \quad (11)$$

여기서,

$$t_{21} = \frac{\sqrt{4d_0^2 + x_{02}^2}}{c} \quad (12)$$

$$t_{322} = \frac{\sqrt{4d_0^2 + (x_{02} - x_{12})^2}}{c} \quad (13)$$

$$t_{321} = \frac{\sqrt{4d_1^2 + (x_{12} - x_{22})^2}}{c} \quad (14)$$

최종적으로 콘크리트 바닥판 상부층을 통과하는 데 걸리는 이동시간과 수평이격거리를 이용하여, 콘크리트 바닥판의 유전상수를 다음과 같이 계산한다.

$$\epsilon_{r,2} = \frac{c^2(t_{32}^2 - t_{31}^2)}{x_{22}^2 - x_{21}^2} \quad (15)$$

3.2 유전상수비를 이용한 열화 깊이 추정

위에서 기술한 XCMP 방법을 이용한 콘크리트 바닥판의 유전상수 측정법을 정리하면 Fig. 6과 같다. GPR 시험으로부터 안테나의 높이 및 수평이격거리를 측정하고, 1층 및 2층 포장구조체용 XCMP 방법을 이용하여 각각 아스팔트 교면포장 및 콘크리트 바닥판의 유전상수를 순차적으로 계산한다.

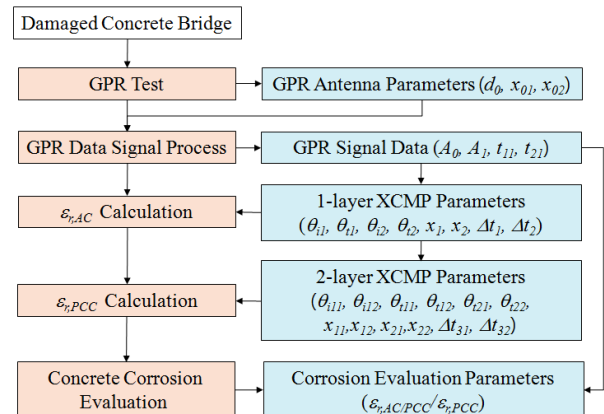


Fig. 6 Flowchart for concrete bridge deck concrete deterioration evaluation using the XCMP method

3.3 콘크리트 바닥판의 유전상수비에 의한 열화 깊이 평가

콘크리트 바닥판은 교면포장이나 갓길, 또는 바닥판 하부로 침투한 우수나 염분으로 인하여 열화가 발생한다. 이는 우수나 염분과의 접촉이 보다 자주 발생하게 되는 콘크리트 바닥판의 상부가 열화에 보다 취약할 수 있다. 일반적으로 열화가 발생한 콘크리트의 유전상수는 건전한 상태의 콘크리트 보다 크게 나타난다. 따라서 열화도 또는 유전상수는 콘크리트 바닥판의 깊이에 따라서 달라질 수 있다. 교면포장 하부 콘크리트 바닥판에서 발생할 수 있는 열화에 따른 유전상수의 분포를 Fig. 7에 나타내었다. 여기서 반사계수법에 의한 유전상수($\epsilon_{r,AC/PCC}$)는 콘크리트 바닥판의 표면 유전상수를 나타내고, XCMP 방법에 의한 유전상수($\epsilon_{r,PCC}$)는 콘크리트 바닥판의 평균 유전상수를 나타낸다. 만일 콘크리트 표면에 열화가 집중된 경우 표면 유전상수가 평균 유전상수에 비해서 크게 나타날 것이고, 반대로 바닥판 하부 상부 철근에서 열화가 집중될 경우 평균 유전상수가 표면 유전상수에 비해서 크게 나타날 것이다. 따라서 표면대비 평균 유전상수비(R_D)를 이용하여 콘크리트 바닥판의 열화 상태를 다음과 같이 3가지로 구분할 수 있다.

- ① $R_D > 1.0$: 콘크리트 바닥판 상부 열화
- ② $R_D < 1.0$: 콘크리트 바닥판 하부 열화
- ③ $R_D \approx 1.0$: 콘크리트 바닥판 전체 양호 또는 열화

특히 유전상수비가 1.0보다 상당히 크게 될 경우 열화가 콘크리트 바닥판의 상부에만 집중되어 있다는 것이고, 이는 열화 깊이가 깊지 않다는 것을 의미한다. 그러므로

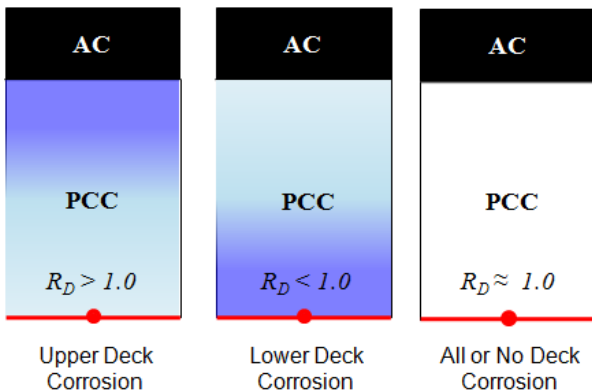


Fig. 7 Classification of bridge deck concrete deterioration status based on surface to average dielectric constant ratio ($\epsilon_{r,AC/PCC}/\epsilon_{r,PCC}$)

유전상수비와 열화 깊이와의 상관성을 분석하면 GPR 시험으로부터 열화 면적뿐만 아니라 열화 깊이까지도 추정하여 보다 정확한 열화된 콘크리트의 보수 물량을 추정할 수 있을 것이라고 판단된다.

4. GPR 현장 시험 및 결과

4.1 현장 시험

XCMP 방법을 이용한 유전상수 측정과 콘크리트 바닥판의 열화 상태 평가 방법을 검증하기 위하여 현장시험을 실시하였다. 현장시험은 경상북도 문경시에 위치한 진남2교에서 한국도로공사의 2.0GHz 비접촉식 GPR 시스템을 이용하여 실시하였다. 진남2교는 연장 158.9m, 폭 10m인 왕복 2차선으로 되어있으며, 공용기간은 34년이다. XCMP 방법을 적용하기 위하여 Fig. 8과 같이 2개의 2.0GHz 안테나를 조사차량 후미에 설치하였다. 현재 한국도로공사 GPR 시스템은 4개의 1.0GHz 안테나가 차량 후미에 고정 장치를 이용하여 설치되어 있으므로 2.0GHz 안테나는 끈을 이용하여 1.0GHz 안테나에 임시로 고정하여 사용하였다. 이때 맨 왼쪽의 안테나(T1/R1)는 송신 및 수신용으로 사용하고 나머지 위치에 있는 안테나는 수신(R_2)용으로만 사용하였다. 이때 안테나의 수평이격거리가 클수록 이동시간의 차가 크게 되어 해석이 용이하게 되는 장점이 있다. 반면에 여러 안테나에 의한 간섭이 크게 되므로 R_2 안테나의 위치를 변경하면서 예비시험을 실시한 후 최적인 위치에 시험을 실시하였다.

GPR 시스템을 Fig. 8과 같이 설치한 후, XCMP 방법

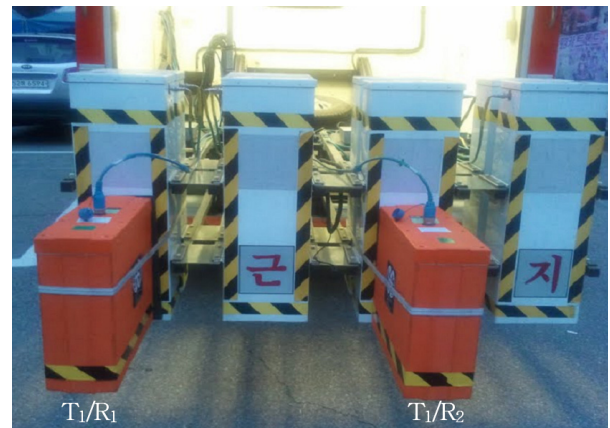


Fig. 8 GPR antenna configuration for the XCMP method

에서 필요한 GPR 시험 변수를 결정하였다. 지표에서 송수신용 안테나 초점위치까지의 거리(d_0)는 지표에서 안테나 케이스 바닥까지의 높이와 안테나 케이스 바닥에서 송수신부까지의 높이의 합으로 77.5cm로 측정되었다. 여기서 안테나 케이스 바닥에서 송수신부까지의 높이는 직접 측정할 수 없었으므로, 문헌(Leng, 2011) 자료를 이용하였다. 송수신기의 수평이격거리는 현장에서 측정된 결과 108.6cm로 나타났다.

4.2 현장 시험 결과

Fig. 6에 나타난 순서대로 1층 포장구조체에 대한 XCMP 방법의 매개변수를 계산하였다. 그리고 식 (3)~(5)를 이용하여 아스팔트 콘크리트 교면포장의 유전상수를 계산하고, 식 (7)~(15)를 이용하여 콘크리트 바닥판의 유전상수를 계산하였다. 이를 통하여 교면포장의 층두께(d_1)와 철근피복두께(d_2)를 다음과 같이 계산하였다.

$$d_1 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{c^2 t_1^2}{\epsilon_{r,AC}} - x_1^2} \quad (16)$$

$$d_2 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{c^2 t_{31}^2}{\epsilon_{r,PCC}} - x_{21}^2} \quad (17)$$

위와 같은 방법으로 콘크리트 바닥판의 두께와 유전상수를 계산하는 과정에 사용된 변수들 예를 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Example XCMP parameters used for the calculation of thickness and dielectric constant of the concrete bridge deck

T1 / R1	x_{01} (cm)	x_{11} (cm)	x_{21} (cm)	θ_{t11} (°)	θ_{t111} (°)	θ_{t21} (°)
		38.0	1.4	0.4	13.3	5.1
T1 / R2	t_{312} (ns)	t_{311} (ns)	t_{31} (ns)	t_{11} (ns)	Δt_1 (ns)	Δt_3 (ns)
	5.309	0.892	0.678	5.320	0.885	0.674
T1 / R2	x_{02} (cm)	x_{12} (cm)	x_{22} (cm)	θ_{t12} (°)	θ_{t112} (°)	θ_{t22} (°)
	108.6	3.4	1.1	34.2	12.6	9.9
T1 / R2	t_{322} (ns)	t_{312} (ns)	t_{32} (ns)	t_{21} (ns)	Δt_2 (ns)	Δt_4 (ns)
	6.244	0.911	0.686	6.309	0.867	0.666
d_0 (cm)		d_1 (cm)	$\epsilon_{r,AC}$	d_2 (cm)	$\epsilon_{r,PCC}$	
77.5		5.2	6.6	3.1	10.7	

4.3 콘크리트 열화 상태 평가 방법 검증

4.3.1 콘크리트 바닥판 유전상수 비교

본 연구에서 제안한 2층 포장구조체에 대한 XCMP 방법을 검증하기 위하여 XCMP 방법을 이용하여 측정한 유전상수 및 코어 두께를 반사계수법에 의한 GPR 시험 결과와 비교하였다. GPR 시험을 실시한 지점 중 5개 위치에 대하여 교면포장 및 콘크리트 바닥판 상부의 두께와 유전상수를 계산하여 Table 2에 나타내었다. 5개 위치에서 XCMP 방법을 이용하여 측정한 콘크리트 바닥판의 평균 유전상수가 반사계수법에 의한 표면 유전상수와 유사한 경향을 나타내고 있으나, 상대적으로 평균 18.5% 작게 나타났다. 이러한 차이는 콘크리트의 유전상수가 측정 방법의 차이, 즉 반사계수법은 표면 유전상수, XCMP는 평균 유전상수로 인한 것으로 사료된다.

4.3.2 교면포장과 콘크리트 바닥판 두께 비교

현장에서 채취한 코어를 이용하여 교면포장의 두께를 측정하고 이를 XCMP 방법으로 추정된 두께와 비교하였다. Table 2에 나타난 바와 같이 B와 E 지점에서 XCMP 방법으로 추정된 교면포장의 두께가 코어를 이용하여 측정한 교면포장의 두께와 비교하여 $\pm 0.5\text{mm}$ 이내의 오차 범위 안에 있다고 할 수 있다. 하지만 D 지점에서는 XCMP 방법에 의한 교면포장 두께가 4.7cm로 코어두께 (3.0cm) 보다 50% 정도 크게 나타났다. 동일한 지점에서 반사계수법에 의한 교면포장 두께도 4.0cm로 나타나

Table 2 Comparison of dielectric constant and thickness of the concrete bridge deck and asphalt pavement

Location	Condition	Layer	Thickness (cm)			ϵ_r	
			XCMP	Core	Refl.	XCMP	Refl.
A	OK	AC	4.7	-	4.5	6.3	-
		PCC*	5.0	-	4.0	7.7	10.7
B	NG	AC	4.5	4.0	4.0	6.8	-
		PCC	3.6	-	5.5	12.0	13.3
C	NG	AC	4.7	-	5.0	6.6	-
		PCC	3.7	-	5.0	9.2	11.4
D	NG	AC	4.7	3.0	4.0	6.8	-
		PCC	3.5	-	4.0	11.2	13.3
E	NG	AC	5.2	5.5	6.0	6.6	-
		PCC	3.1	-	5.0	10.7	13.3

* PCC means the upper part of the concrete bridge deck.

코어두께 보다 33% 크게 나타났다. 이러한 결과로부터 XCMP 방법으로 추정된 콘크리트의 유전상수와 교면포장의 두께를 비교한 결과로부터 XCMP 방법이 어느 정도 신뢰성을 가질 수 있음을 확인할 수 있었다. 하지만 본 연구에서 사용한 비교 데이터가 매우 한정되었기 때문에 XCMP 방법의 신뢰성을 논의하기에는 충분하지는 않은 것이 사실이다. 따라서 추후에 많은 현장 시험을 통하여 최적의 안테나 조합과 시험 방법을 보완하고 보다 신뢰성 높은 방법으로 이를 검증해야 할 것으로 사료된다.

4.3.3 콘크리트 바닥판 열화 상태 평가 비교

콘크리트 바닥판의 유전상수와 유전상수비(R_D)를 이용하여 콘크리트 바닥판의 열화 상태를 평가한 결과와 코어로부터 측정된 열화 상태를 비교하여 Table 3에 나타내었다. 콘크리트 바닥판의 유전상수와 유전상수비를 이용하여 5개 지점의 열화 상태를 평가하면 다음과 같다.

- ① A 지점 : R_D 는 1보다 크고 $\epsilon_{r,PCC}$ 는 9보다 작고, $\epsilon_{r,AC/PCC}$ 는 9보다 크다. 따라서 콘크리트 바닥판의 열화 상태는 전체적으로 양호하다. 단 바닥판 표면에 매우 얇은 깊이의 열화가 발생된 것으로 추정되는 열화초기 상태로 추정된다.
- ② B 지점 : $\epsilon_{r,PCC}$ 와 $\epsilon_{r,AC/PCC}$ 가 9보다 많이 크고, R_D 는 1에 가깝기 때문에 콘크리트 바닥판은 전체적으로 열화가 진행 중이므로 열화 깊이가 깊은 열화 심화 상태로 추정된다. 코어를 통한 열화 깊이는 최대 24mm로 열화가 하부로 상당히 진행되었음을 알 수 있다.
- ③ C 지점 : R_D 는 1보다 크고, $\epsilon_{r,PCC}$ 는 9에 가깝고, $\epsilon_{r,AC/PCC}$ 는 9보다 크다. 따라서 콘크리트 표면에

만 열화가 발생하였고, 하부는 양호한 상태로, 상부 열화 발생 상태로 추정된다.

- ④ D 지점 : B 지점과 유사하게 $\epsilon_{r,PCC}$ 와 $\epsilon_{r,AC/PCC}$ 가 9보다 많이 크고, R_D 는 1에 가깝기 때문에 콘크리트 바닥판은 전체적으로 열화가 진행 중이고, 표면에 발생한 열화 깊이가 깊은 열화 심화 상태로 추정된다. 코어를 통한 열화 깊이는 최대 25mm로 열화가 하부로 상당히 진행되고 있음을 나타낸다.
- ⑤ E 지점 : B와 D 지점과 유사하게 $\epsilon_{r,PCC}$ 와 $\epsilon_{r,AC/PCC}$ 가 9보다 상당히 크지만, R_D 가 1보다 20% 이상 크기 때문에 콘크리트 바닥판의 표면에 발생한 열화 깊이가 얇게 발생한 상태로 추정된다. 코어를 통한 열화 깊이는 최대 10mm로 열화가 하부로 어느 정도 진행되고 있음을 나타낸다.

위와 같은 열화 상태 평가 비교를 통하여 콘크리트 바닥판의 유전상수가 9이상인 경우 열화가 발생한 것으로 평가하는 것이 적절하다고 판단된다. 또한 유전상수비가 1.2보다 큰 경우(E 지점) 열화깊이가 10mm이하로 바닥판 상부 표면에 열화가 집중된 것을 알 수 있다. 반면에 유전상수비가 1.2보다 작은 경우(B, D 지점) 열화깊이가 20mm 이상으로 상부에서 발생한 열화가 콘크리트 하부로 진행되고 있음을 알 수 있다. 예를 들어 D 지점에서 채취한 코어 샘플을 Fig. 9에 나타내었다. 그림과 같이 콘크리트 바닥판의 상부 15~25mm 부위가 열화와 균열로 인하여 심각하게 손상된 것을 알 수 있다. 따라서 유전율비(R_D)를 이용한 열화 깊이 평가 방법이 어느 정도 신뢰성이 있다고 할 수 있다.

본 연구에서는 제한된 현장 시험 결과와 해석 결과로 인하여 열화 상태를 구분하기 위한 유전상수비를 명확하게 제안할

Table 3 Comparison of concrete bridge deck concrete deterioration evaluation based on the surface to average dielectric constant ratio

Location	Condition	ϵ_r		R_D	Concrete Deck Evaluation
		XCMP	Refl.		
A	OK	7.7	10.7	1.38	Upper part: deterioration initiated Overall: No deterioration
B	NG	12.0	13.3	1.10	Upper part: deterioration developed Overall: deterioration progressed (deterioration depth: 18~22mm)
C	NG	9.2	11.4	1.24	Upper part: deterioration developed Overall: deterioration initiated
D	NG	11.2	13.3	1.19	Upper part: deterioration developed Overall: deterioration progressed (deterioration depth: 15~25mm)
E	NG	10.7	13.3	1.24	Upper part: deterioration developed Overall: deterioration initiated (deterioration depth: 8~10mm)

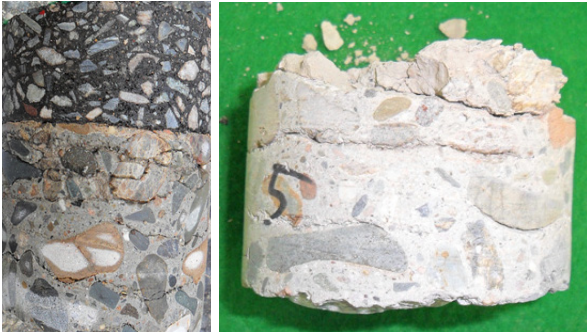


Fig. 9 Concrete deterioration in a core sample (location D)

수는 없었다. 열화 깊이 추정에 대한 신뢰성 제고를 위해서는 콘크리트의 유전상수, 유전상수비와 열화도, 열화 깊이와의 상관관계를 실험을 통하여 규명하여야 할 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 비파괴시험인 지표투과레이더(GPR)를 이용하여 아스팔트 교면포장을 가지는 콘크리트 바닥판의 유전상수를 측정하고 콘크리트의 표면대비평균 유전상수비를 근거로 하여 교량 바닥판의 열화 상태를 평가할 수 있는 방법을 제안하였다. 비접촉식 GPR 시험에 적합한 확장형 공동중간점(XCMP) 방법을 아스팔트 표층을 가지는 콘크리트 바닥판에 적용할 수 있도록 개선하였다. 이를 통하여 콘크리트 바닥판의 평균 유전상수를 반사계수가 아닌 전파속도를 이용하여 보다 정밀하게 추정할 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 또한 GPR 현장 시험 결과로부터 콘크리트 표면의 유전상수와 평균 유전상수와의 비가 콘크리트 바닥판의 열화 깊이와 상관성이 있음을 밝히고, 이를 이용하여 열화 깊이를 추정할 수 있는 방법을 제안하였다. 보다 신뢰성 있는 열화 상태 평가 방법 개발을 위하여 향후 많은 현장 시험을 실시할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 연구과제 “GPR 활용 교량 상태 평가시스템 구축방안 연구”와 2012년도 지식경제부 재원인 산업융합원천기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구결과임을 밝힙니다. 이이에 도움을 주신 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

1. Al-Qadi, I. L. and Lahouar, S., “Measuring Layer Thicknesses with GPR: Theory to Practice”, *Construction and Building Materials*, vol. 19, No. 10, 2005, pp.763–772.
2. ASTM D 6087–08, “Standard Test Method for Evaluating Asphalt-Covered Concrete Bridge Decks Using Ground Penetrating Radar”, American Society for Testing and Materials (ASTM), 2008.
3. Broomfield, J. P., *Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair*, E&FN Spon, London, 2007.
4. Gucunski, N. and Rascoe, C., “Advanced Ground Penetrating Radar Data Collection and Imaging of Bridge Decks Using 3-D Radar”, Report UVM-RU3757, Federal Highway Administration (FHWA), University of Vermont, Virginia, USA, 2008.
5. Gucunski, N., Nazarian, S., Wigenhauser, H. and Kutrubes, D., “Nondestructive Testing to Identify Concrete Bridge Deck Deterioration”, Presented at the SHRP 2 Workshop, Brussels, Belgium, June 10th, 2010.
6. Hugenschmidt, J. and Mastrangelo, R., “GPR Inspection of Concrete Bridges”, *Cement and Concrete Composites*, vol. 28, No. 4, 2006, pp.384–392.
7. Jol, H. M. *Ground Penetrating Radar Theory and Applications*, Elsevier, B. V., 2009, p.36.
8. Lahouar, S., Al-Qadi, I. L., Loulizi, A., Clark, T. M. and Lee, D. T., “Approach to Determining In Situ Dielectric Constant of Pavements-Development and Implementation at Interstate 81 in Virginia”, *Transportation Research Record*, No. 1806, 2002, pp.81–87.
9. Leng, Z., “Prediction of In Situ Asphalt Mixture Density Using GPR Theoretical Development and Field Verification”, Ph.D. Dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois, USA, 2011.
10. Maser, K. R., “Integration of Ground Penetrating Radar and Infrared Thermography for Bridge Deck Condition Evaluation”, Presented at Non-Destructive Testing in Civil Engineering Conference, Nantes, France, June 30th – July 3rd, 2009.
11. Park, J., Lee, S., Kim, J., Park, C. and Lee, D., “The Prediction of Remaining Life of Concrete Bridge Decks Using the Reliability Analysis”, *International Journal of Highway Engineering*, Korea Society of Road Engineers, vol. 13, No. 4, 2011, pp.71–79.
12. Robert, A., “Dielectric Permittivity of Concrete Between 50 MHz and 1 GHz and GPR Measurements for Building Materials Evaluation”, *Journal of Applied Geophysics*, vol. 40, No. 1–3, 1999, pp.89–94.
13. Seo, J., Lee, J. and Lee, I., “Condition Evaluation of Concrete Bridge Decks Using GPR”, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection*, vol. 4, 2000, pp.101–107.
14. Seo, J., Lee, J. and Lee, I., “Condition Evaluation of Concrete Bridge Decks Using Radar”, *Proceedings of 1999 KSCE Conference*, Seoul, Korea, 1999, pp.421–424.
15. Suh, J., Rhee, J., Ku, B., Park, C. and Shin, J., “The Proposal of Efficient Inspection for Concrete Bridge Decks has Asphalt Overlay”, *Proceedings of the KCI*

Fall Conference, 2008, pp.157-160.
16. Tuttle, R. S., "Condition Analysis of Concrete Bridge
Decks in Utah", M. S. Thesis, Brigham Young University,
Utah, USA, 2005.

Received : 07/23/2012
Revised : 09/18/2012
Accepted : 09/21/2012

요 지

본 연구에서는 콘크리트 교량 바닥판의 열화를 비파괴시험인 지표투과레이더(GPR)를 이용하여 평가하는 방법을 개발하였다. 콘크리트 교량 바닥판의 유전 상수를 계산하기 위하여 비접촉식 GPR 안테나를 이용하여 2층 구조체에 적용할 수 있는 확장형 공통중간점 방법을 개발하였다. 콘크리트 교량 바닥판의 열화 깊이와 열화 상태는 콘크리트 교량 바닥판의 유전 상수와 표면대비 평균 유전상수비를 이용하여 평가하였다. 제안된 방법을 검증하기 위하여 GPR 현장 시험을 공용수명이 오래된 콘크리트 교량에서 실시하였다. 시험 결과 새로 제안된 방법을 이용하여 추정된 두께와 열화 깊이가 어느 정도 신뢰성을 가지는 것으로 나타났다.

핵심 용어 : 콘크리트 교량 바닥판, 콘크리트 열화, 유전 상수, 확장형 공통중간점 방법, 지표투과레이더, 비파괴시험
