

지표투과레이더(GPR)에 의한 도로포장의 전자기적 특성값 고찰

이지영* · 심재원** · 이상래*** · 이강현****

Rhee, Jiyoung*, Shim, Jaewon**, Lee, Sangrae***, Lee, Kang-Hyun****

A Consideration on the Electromagnetic Properties of Road Pavement Using Ground Penetrating Radar (GPR)

ABSTRACT

This study investigated the use of Ground Penetrating Radar (GPR) over a two-decade period on public roads, focusing on the electromagnetic characteristics of the pavement dielectrics and attenuation. From the results, a typical range of characteristic value, influencing factors, and a correction method were suggested. The typical dielectrics of asphalt pavements were 4-7, as measured by an air-coupled 1 GHz GPR antenna. The dielectrics of concrete pavements were very large in the early age, but were drastically reduced with ageing. Ten years on, collection was in the range of 6-12. The dielectrics were proportional to the relative humidity (R.H.) of the atmosphere. The effects were reduced to one eighth with an overlay. Attenuation generally increased with thickness of the road layer, and also increased where there was damage. The GPR results could also vary depending on the weather conditions as well as on the characteristics of the GPR equipment, even at the same frequency. Therefore, GPR surveys should be performed on road surfaces without debris on a single, fine day. The reliability of the GPR analysis could be improved by cores and equipment calibration with other non-destructive test surveys.

Key words : GPR, Road pavement, Electro-magnetic characteristics, Dielectric constant, Attenuation

초 록

본 연구는 실제 공용 중인 도로에서 약 20년에 걸쳐 지표투과레이더(GPR) 조사하고 도로포장의 전자기적 특성값인 유전상수와 감쇠에 대해 분석하였다. 그 결과로부터 도로포장의 일반적인 특성값 범위, 영향인자, 그리고 보정방법을 제시하였다. 비접촉식(Air-coupled) 1 GHz GPR 안테나로 조사한 아스팔트 포장의 일반적인 유전상수 범위는 4~7이었다. 콘크리트 포장의 경우 초기 재령에서는 유전상수가 매우 큰 값을 보였으나 재령이 경과할수록 급격하게 작아졌다. 재령 10년 이후에는 6~12 범위에 수렴하였다. 공기 중에 노출된 포장의 유전상수는 대기의 상대습도에 따라 증감하였으나 덧씌우기 포장층이 있는 경우 영향성은 1/8 수준으로 감소하였다. 레이더 파의 감쇠는 일반적으로 포장층의 두께가 증가할수록 커지게 되며, 손상 구간에서도 증가하였다. GPR 조사 시 기상조건에 따라서 포장의 전자기적 특성값이 달라질 수 있음을 확인하였으며, 특히 포장상태가 양호한 경우보다 손상이 발달한 상태에서 영향성이 크게 나타났다. 이밖에 동일한 주파수의 GPR 안테나로 조사한 경우에도 장비의 특성이 달라지면 결과값에 차이가 발생할 수 있었다. 따라서 GPR 조사는 도로에 대한 이해를 바탕으로 날씨의 변화가 거의 없고 도로표면이 깨끗한 상태에서 숙련자에 의해 실시하는 것이 필요하다. 또한 보정코어, 장비 보정 등을 통해 해석결과의 신뢰도를 향상하는 것이 요구된다.

검색어 : GPR, 도로포장, 전자기적 특성값, 유전상수, 감쇠

* 중신회원 · 한국도로공사 도로교통연구원 수석연구원 (Korea Expressway Corporation Research Institute · need@ex.co.kr)

** 중신회원 · 한국도로공사 도로교통연구원 연구위원 (Korea Expressway Corporation Research Institute · this2pass@ex.co.kr)

*** 한국도로공사 도로교통연구원 수석연구원 (Korea Expressway Corporation Research Institute · lsr8898@ex.co.kr)

**** 중신회원 · 교신저자 · 한국도로공사 도로교통연구원 수석연구원

(Corresponding Author · Korea Expressway Corporation Research Institute · tunnelslope@ex.co.kr)

Received November 12, 2019/ revised November 21, 2019/ accepted November 24, 2019

1. 서론

최근 노후 도심지를 중심으로 도로함몰 및 침하 사고가 사회적 이슈로 등장하면서 지하안전관리에 관한 특별법(이하 지하안전법)이 제정(2016.1.7.) 및 시행(2018.1.1.)되었다(KMGL, 2019). 이에 따라 신규 굴착공사는 물론 도로하부에 있는 지하시설물과 주변지역에 대해 지표투과레이더(Ground Penetrating Radar; GPR)를 이용한 조사가 요구되고 있다. GPR은 다양한 주파수 대역의 레이더를 도로 내부로 전파된 후 반사되는 신호를 분석하여 내부상태를 파악하는 비파괴시험법(NDT, Non-Destructive Testing Method)이다. GPR 안테나를 차량에 탑재할 경우 넓은 범위를 신속하게 조사할 수 있어 국내의 도로조사 분야에 활발하게 이용되고 있다(Baek and Choi, 2014; Pajewski et al., 2015; Gucunski et al., 2016; Yoon et al., 2016; Kim and Choi, 2018; Lee, 2018; Lee et al., 2019).

비파괴시험의 특성 상 GPR 조사는 매질의 가정조건에 따라 결과값에 상당한 오차를 유발할 수도 있다(ASTM, 2011; Rhee et al., 2019). 그러나 대부분의 실무에서는 조사자의 경험을 바탕으로 도로매질의 특성값을 임의로 설정하여 분석하고 있다. 본 연구는 실제 공용 중인 고속도로에서 지난 20년간 실시한 GPR 조사 결과를 분석하여, 도로의 주매질인 아스팔트와 콘크리트 포장의 전자기적 특성값인 유전상수와 감쇠의 특성을 고찰하였다. 그 결과를 바탕으로 포장종류에 따른 표준범위를 설정하고, 영향인자를 도출하였으며, 결과의 신뢰도를 향상할 수 있는 방안을 제시하고자 하였다.

2. 도로포장의 전자기적 특성값

2.1 GPR의 개요

GPR은 비교적 빠르고 비파괴적으로 도로를 진단할 수 있는 기술로 대상 매질과 조사방법에 따라 특별히 설계된 레이더 안테나를 사용한다. Fig. 1과 같이 GPR 조사는 일련의 레이더 펄스인 전자기파(EM wave, electromagnetic wave)를 송신안테나로부터 지하로 방사한 후, 매질 내로 전파된 레이더파가 전자기적 물성이 다른 매질의 경계면(포장층, 지하시설물, 공동 등)에서 반사된다. 이를 수신안테나에서 받게 되며, 수신파의 형상이나 전달시간 등을 분석하여 내부 매질의 종류와 상태를 평가하게 된다.

2.2 상대유전율(유전상수)

GPR 조사에서 상대유전율은 매질 내 전자기파의 전파속도를 결정하는 주요인자이다. 진공에서의 전파 속도는 약 300 mm/ns이므로 매질의 전파속도는 Eq. (1)을 사용하여 근사계산할 수 있다(ASTM, 2011). 따라서, 매질의 두께는 Eq. (2)에 따라 계산할 수 있다(Balanis, 1989).

$$V_m = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_r}} \tag{1}$$

$$D = \frac{T \cdot V_m}{2} = \frac{T \cdot C}{2\sqrt{\epsilon_r}} \tag{2}$$

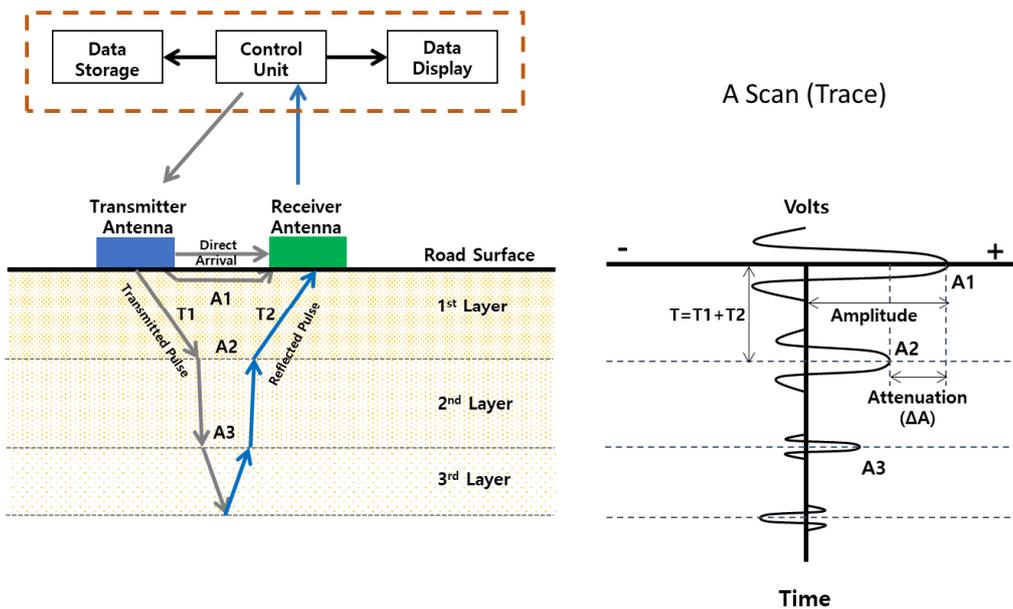


Fig. 1. Illustration of GPR Scanning on a Road and a POSSIBLE PATH of EM Waves

여기서, V_m 는 매질 내에서의 전파속도(m/s), C 는 자유공간에서의 전파속도(3×10^8 m/s), ϵ_r 는 매질의 상대유전율, D 는 반사깊이(m), T 는 전자기파의 양방향 이동시간(s)이다(Fig. 1 참조).

매질의 상대유전율을 결정하는 전통적인 방법은 기준 코어를 사용하여 값을 역계산하는 것이다. 이 방법은 일반적으로 접촉식(Ground) GPR 시스템을 사용할 때 적용되며 실무에서 주로 활용된다. 또 다른 방법은 표면반사법(Maser and Scullion, 1991)으로, 비접촉식(Air-coupled) 안테나 시스템과 함께 사용할 수 있다. 이 방법에서 매질의 상대유전율은 표면입사파의 진폭 대비 반사파의 진폭 비율로 산정할 수 있다. Eqs. (3) and (4)는 공기면에 노출된 포장의 표면과 내부 포장층의 상대유전율을 나타낸다(Saarenketo, 2006).

$$\sqrt{\epsilon_{1st}} = \frac{1 + A_1/A_p}{1 - A_1/A_p} \quad \text{for 1st layer} \quad (3)$$

$$\sqrt{\epsilon_{2nd}} = \sqrt{\epsilon_{1st}} \times \left[\frac{1 - (A_1/A_p)^2 + (A_2/A_p)^2}{1 - (A_1/A_p)^2 - (A_2/A_p)^2} \right] \quad \text{for 2nd layer} \quad (4)$$

여기서, ϵ_{1st} 는 첫번째 포장층의 상대유전율, ϵ_{2nd} 는 두번째 포장층의 상대유전율, A_p 는 입사 레이더파의 진폭(강판에서의 반사파 진폭), A_1 는 공기/노면에서의 반사 진폭, A_2 는 첫번째와 두번째 포장층 경계면에서의 반사 진폭이다(Fig. 1 참조).

상대유전율은 복소수이다. 상수인 유전상수는 공기는 1, 물은 81이며, 대부분의 고체나 액체에서 1보다 큰 값을 보인다(ASM, 2011). 허수인 loss factor는 일반적으로 유전상수에 비해 아주 작은 값을 가진다(Daniels, 2004). GPR 분석에 사용되는 대부분의 상용 프로그램들에서는 허수부를 제외한 유전상수(dielectric constant) 값을 제공한다(GSSI, 2009; GSSI, 2017).

2.3 감쇠

매질이 이상적인 유전체인 경우 송신안테나에서 방사된 레이더파의 에너지는 감소하지 않는다. 일반 매질에서는 유전체 및 자기 이완, 산란과 거리, 전기 전도도에 따른 전파 손실에 의해 감쇠가 발생하는 것으로 알려져 있다(Olhoef, 1984). 점도 함량이 높은 토사, 습지, 폐기물 처리장과 같이 낮은 비저항을 갖는 지반이나 비가 온 뒤에 비저항이 낮은 도로에서는 심한 감쇠 현상이 발생한다. 이로 인해 GPR의 가탐심도가 낮아지며 수신된 전자기파의 세기가 약하므로 상대적으로 주변 전자기파 잡음의 영향이 커져 해석 정밀도 또한 저하되는 경향이 있다(KSEG, 2002). 본 연구의 또다른 목적은 도로매질에서 GPR 파의 감쇠 특성을 규명하는 것이다. 이를 위해 우선 도로를 구성하는 각 매질에서의 감쇠가 분리되어야 한다. 또한, 두께(geometric condition)와 손상(전도도)

에 의한 감쇠가 구별되어야 한다. Eq. (5)는 다층으로 구성된 도로포장에서 발생하는 총감쇠를 나타낸 것이다. GPR 파의 에너지 손실은 포장층의 상면과 하면에서 얻은 수신진폭의 감소율로 계산할 수 있으며, 이는 국제단위인 데시벨(decibel; dB)로 표현할 수 있다. 환산식은 Eq. (6)과 같다.

$$Att_{layer_n} = Att_{th.1} + Att_{th.2} \dots + Att_{th.n} + Att_{cond.1} + Att_{cond.2} \dots + Att_{cond.n} \quad (5)$$

$$Att_{dB} = 20 \log_{10}(\Delta A) \quad (6)$$

여기서, Att_{layer_n} n번째 포장층에서의 총감쇠량(dB), $Att_{th.1}$ 첫번째 포장층에서 두께 영향에 의한 감쇠량(dB), $Att_{th.2}$ 두번째 포장층에서 두께 영향에 의한 감쇠량(dB), $Att_{th.n}$ n번째 포장층에서 두께 영향에 의한 감쇠량(dB), $Att_{cond.1}$ 첫번째 포장층에서 상태(전도도) 영향에 의한 감쇠량(dB), $Att_{cond.2}$ 두번째 포장층에서 상태(전도도) 영향에 의한 감쇠량(dB), $Att_{cond.n}$ n번째 포장층에서 상태(전도도) 영향에 의한 감쇠량(dB), Att_{dB} 는 데시벨(decibel) 단위로 환산한 감쇠량(dB), ΔA 는 감소된 진폭의 차이이다(Fig. 1 참조).

3. 조사 대상 및 방법

본 연구에서는 실제 도로포장에서의 전자기적 특성값을 살펴보기 위해, 공용 중인 고속도로를 대상으로 GPR 조사를 실시하였다. 조사는 연장범위와 공용기간이 비교적 명확한 교량을 대상으로 하였다. 콘크리트 포장 57개교와 아스팔트 덧씌우기 콘크리트 포장 890개교에 대해서 총 1,200회 GPR 조사를 실시하였다. 획득된 데이터는 장비 제작사에서 제공하는 RADAN 소프트웨어를 이용하여 분석을 수행하였다. 데이터 분석 시 이상치(조인트 및 후타 콘크리트 부위 등)는 제외하였다. GPR 장비는 비접촉식(Air-coupled)으로 중심주파수 1 GHz 안테나를 사용하였다. 4조의 안테나는 차량후면에 부착하여 교통차단없이 주행속도로 조사가 가능하다. 2014년부터는 내부에 필터가 장착된 신규 안테나를 도입하여 시범운영 후 2015년부터 도로조사에 투입하고 있다. 장비특성에 따른 GPR 결과값의 차이를 확인하기 위해 아스팔트 덧씌우기 콘크리트 포장 589개교를 대상으로 총 608회의 추가조사를 실시하였다. Table 1 및 Fig. 2는 조사대상의 개요를 나타낸 것이고 기존(2nd generation) 및 신규(3rd generation) 장비의 모습은 Fig. 3과 같다.

GPR 조사 시 도로포장에 대한 함수율의 영향을 간접적으로 평가하기 위해 대기의 상대습도를 이용하였다. 관측치는 GPR 조사가 이루어진 날에 대상교량의 인접한 기상관측소에서 측정된 자료를 이용하였다. 이때 지역별 상세관측자료를 우선적으로 활용

Table 1. Survey Details (GPR = Ground Penetrating Radar)

Division	2 nd generation GPR		3 rd generation GPR	
	No. of pavement	Survey times	No. of pavement	Survey times
Subtotal	947	1,200	589	608
Asphalt pavement	890	1,132	589	608
Concrete pavement asphalt-covered				
Concrete pavement	57	68	-	-
Survey period	1999~2013		2015~2018	
Analysis software	RADAN® ver. 6		RADAN® ver. 7	
Note	Noise rejection filter			



Fig. 2. Pavement Types in This Study



(a) 2nd Generation



(b) 3rd Generation

Fig. 3. Images of GPR Survey Vehicles using 4-Channel 1-GHz Air-Coupled Antennas

하였으며, 상세값이 없는 경우 지상관측자료를 보조적으로 이용하였다(KMA, 2019).

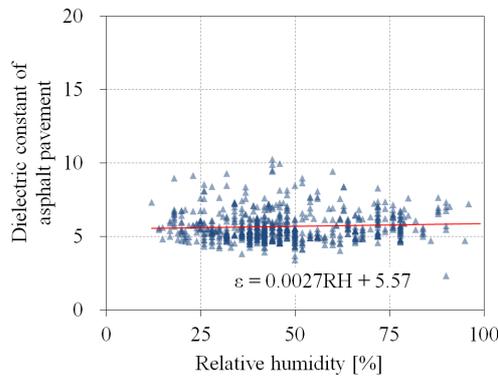
4. 조사결과 및 토의

4.1 유전상수

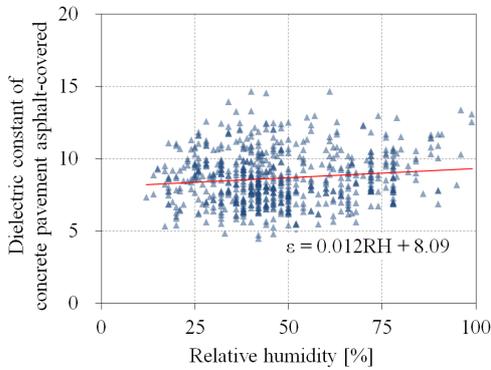
Fig. 4는 도로포장의 종류별로 상대습도에 따른 분포도를 나타낸 것이다. 유전상수의 분포는 아스팔트 포장에 3~10, 콘크리트 포장에 5~13 수준으로 콘크리트 포장에 더 큰 값을 보였다. 전반적으로 대기의 상대습도가 증감함에 따라 도로포장의 유전상수도 증감하는 경향을 나타냈다. 이러한 이유는 일반적으로 물의 유전상수는 81로 다른 매질에 비해 매우 크기 때문에, 도로포장 내 공극의 포화도에 따라 유전상수도 증감한 것으로 판단된다. 포장체 종류별로 살펴보면 상대습도와 유전상수의 선형비례에 대한 기울기는 콘크리트 포장 0.097 > 아스팔트 덧씌우기 콘크리트 포장 0.012

> 아스팔트 포장 0.0027로 나타났다. 아스팔트 포장(Fig. 4(a))은 기울기가 가장 작아 상대습도의 영향이 가장 작은 것으로 나타났다. 아스팔트 포장은 콘크리트 포장에 비해 설계공극률이 매우 크나, 공용 중에 발생한 다양한 손상(균열, 포트홀, 패칭보수 등)으로 상대습도의 영향이 상대적으로 미미하게 나타난 것으로 추정된다. 아스팔트가 덧씌우기 콘크리트 포장(Fig. 4(b))은 공기 중에 노출된 콘크리트 포장(Fig. 4(c))에 비해 기울기가 1/8 수준으로 나타나 상대적으로 상대습도의 영향이 작은 것을 알 수 있다. 덧씌우기가 있는 경우 내부 콘크리트는 외기에 차단되어 상대습도의 영향을 직접 받는 콘크리트 포장에 비해 영향성이 상대적으로 작아진 것으로 판단된다.

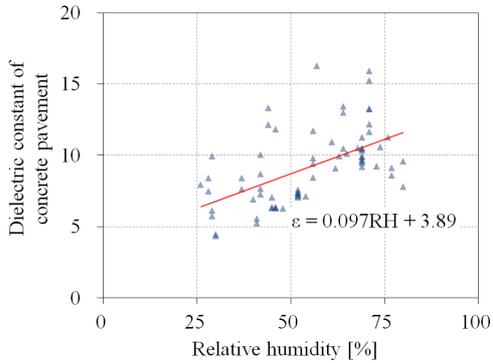
Fig. 5(a)는 영동선 A교에 대한 아스팔트 포장의 유전상수를 평면도로 나타낸 것이다. 그림에서와 같이, 도로포장의 유전상수는 동일한 값이 아니며 종류와 상태에 따라 서로 다른 값을 보일 것으로 예측된다. 공용 아스팔트 포장의 표준 유전상수를 구하기



(a) Asphalt Pavement



(b) Concrete Pavement, Asphalt-Covered

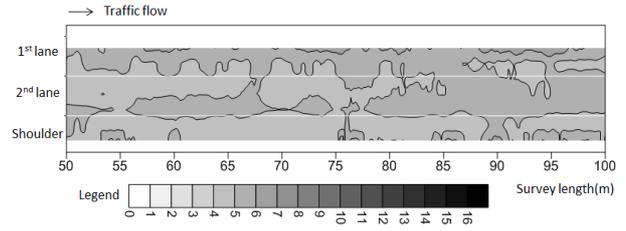


(c) Concrete Pavement

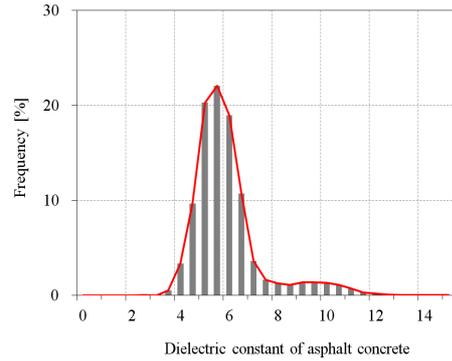
Fig. 4. Distribution of Dielectric Constants of Road Pavement according to Relative Humidity

위해 표면에 손상이 적은 14개교에 대해 유전상수의 누적 분포도를 Fig. 5(b)에 정리하였다. 조사범위에 내에서, 국내 공용 중인 아스팔트 포장의 유전상수 표준범위는 4~7로 나타났다.

콘크리트의 유전상수는 재령의 영향을 받는 것으로 알려져 있다 (ASTM, 2011). Fig. 6은 덧씌우기 포장 여부에 따른 재령별 콘크리트 포장의 유전상수 분포도를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이, 콘크리트 포장은 초기 재령에서 매우 값이 크고 이후 공용기간에 따라 급격하게 감소하였다가 공용 10년 이후에는 6~12의 범위에 수렴하는 경향을 보였다. 또한 덧씌우기가 있는 경우가 감소율이

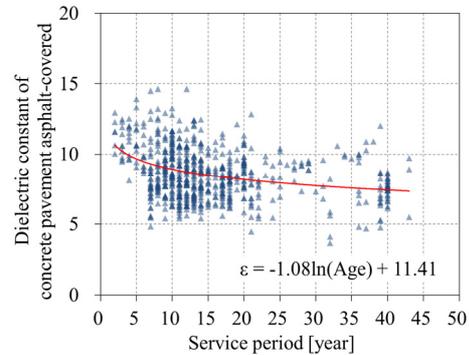


(a) Example of A Bridge

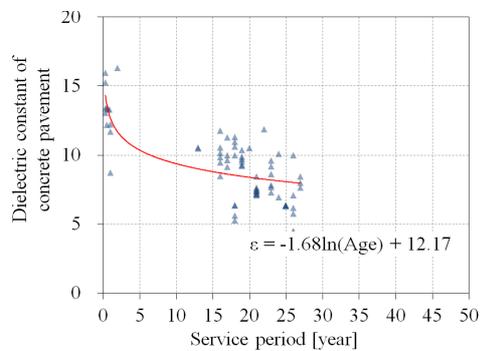


(b) Sound Asphalt Pavement

Fig. 5. Distribution of Dielectric Constants of Asphalt Pavement



(a) Concrete Pavement, Asphalt-Covered



(b) Concrete Pavement

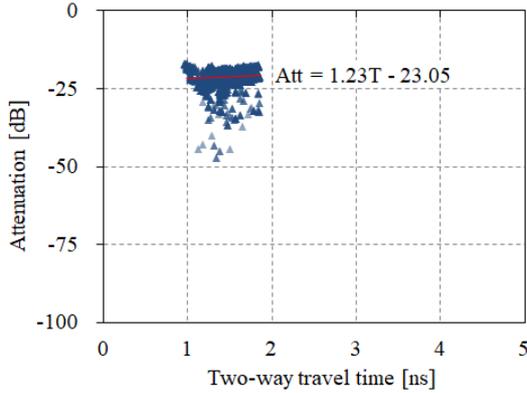
Fig. 6. Distribution of Dielectric Constants of Concrete Pavement according to the Service Period

상대적으로 작게 나타났다. 이는 덧씌우기가 있는 경우 콘크리트 내 수분의 증발속도와 변화가 상대적으로 느리기 때문으로 추정된다.

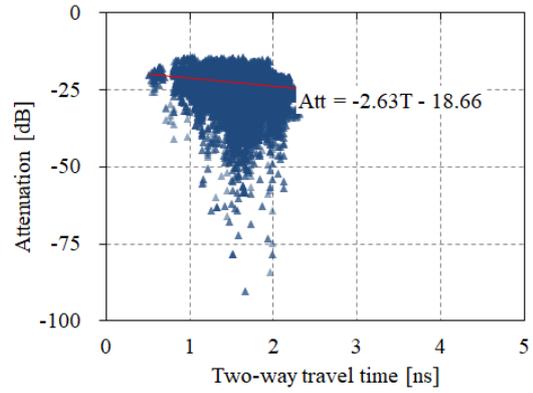
4.2 감쇠

Figs. 7 and 8은 전달시간(반사깊이)에 따른 도로포장의 종류별로 감쇠 분포도를 나타낸 것이다. 조사된 아스팔트 포장층의 설계두께는 약 80 mm 내외이고 콘크리트 층은 60 mm 내외였다. 전반적으로 두께가 클수록(전달시간이 길수록) 감쇠는 비례적으로 커지는 것으로 나타났다. 양방향 전달속도(Two-way travel time; TWTT)는 아스팔트 포장의 경우 1~2 ns, 콘크리트 포장은 1~3로 나타나

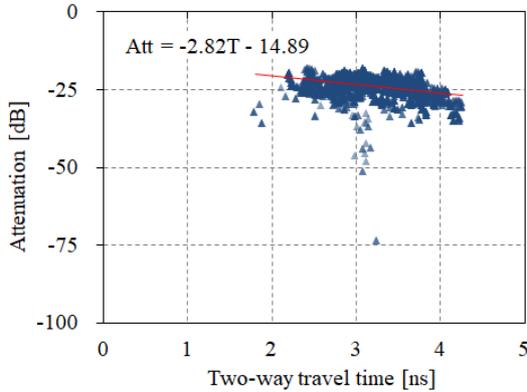
아스팔트 포장에서는 콘크리트 포장에 비해 레이더파의 전달시간(속도)가 빨랐다. 포장의 상태가 건전한 경우(Fig. 7) 포장체의 종류에 관계없이 감쇠는 25 dB 내외로 나타났다. 그러나 포장에 손상이 발생된 경우(Fig. 8) 감쇠의 분산이 크고 심한 경우 70 dB 이상의 큰 감쇠가 나타났다. 도로관리기관은 동절기 원활한 교통소통을 위해 제설염화물을 살포한다. 포장의 손상부를 통해 침투한 물과 염화물은 도로포장체의 전도도를 크게 하고 이는 전자기



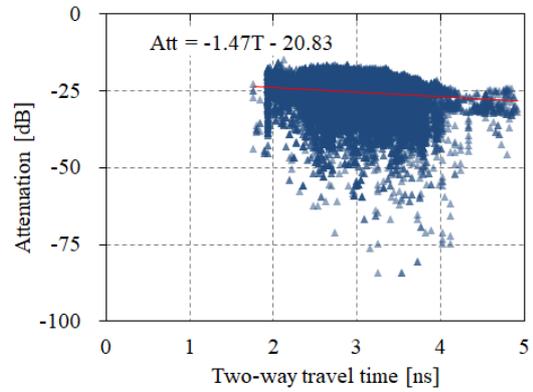
(a) Asphalt Pavement



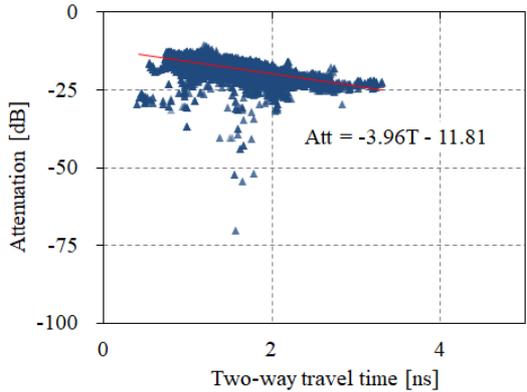
(a) Asphalt Pavement



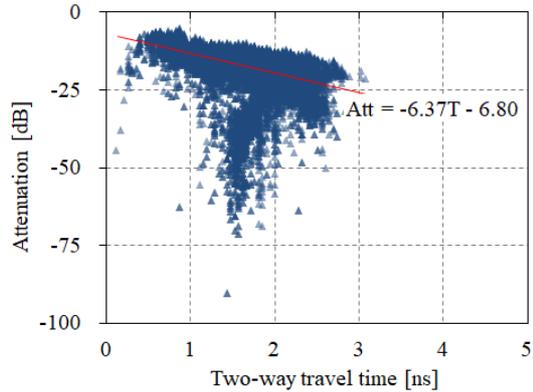
(b) Concrete Pavement Asphalt-Covered



(b) Concrete Pavement Asphalt-Covered



(c) Concrete Pavement



(c) Concrete Pavement

Fig. 7. Distribution of Attenuation of Sound Road Pavement according to the Two-Way Travel Time

Fig. 8. Distribution of Attenuation of Damaged Road Pavement according to the Two-Way Travel Time

파의 감쇠를 커지게 된 원인이 된 것으로 판단된다. 큰 감쇠는 포장내 부로 침투하는 레이더파의 에너지 감소를 의미한다. 따라서 조사대상 도로의 매질을 파악하여 목표심도까지 탐사가 이루어질 수 있는 적절한 주파수의 장비를 선택하는 것이 필요하다. 현장에서는 시범조사를 실시함으로써 탐사범위(Range)를 설정하는 것이 바람직하다. 또한 손상이 심한 도로에서는 GPR 탐사가 적절하지 않을 수도 있으며 이때에는 다른 탐사방법을 검토하는 것이 필요하다.

4.3 조사환경 및 경년변화

날씨와 경년에 따른 도로포장의 전기적 특성값 변화를 살펴보기 위해 영동선 B교를 대상으로 GPR 조사를 실시하였다. B교는 콘크리트 위에 아스팔트 덧씌우기가 있으며 도로 표면에 부분적으로 손상이 발생되어 2004년에 최초 조사가 이루어졌다. 이후 아스팔트 포장 및 내부 콘크리트에 손상이 심화되어 2011년부터 2013년까지 추가 조사가 이루어진 후 전체 포장층의 교체가 이루어졌다. Table 2는 각 조사시기별 날씨상태를 기상청의 관측자료를 이용하여 정리한 것이다.

Table 3과 Fig. 9는 조사시기별로 아스팔트 덧씌우기 콘크리트 포장의 유전상수와 감쇠를 나타낸 것이다. 먼저 포장이 전반적으로 양호한 2004년도의 경우 유전상수는 평균 7.99, 표준편차 1.52로 분포도(Fig. 9(a))의 침도가 높고 분산이 적게 나타났다. 손상이 심화된 2011년의 경우 2004년도와 같이 많은 비가 온 조건에서 유전상수의 평균이 10.04로 커지고 표준편차는 2.40로 매우 크게 나타났다. 2012년의 경우 적은 비가 온 조건에서는 유전상수의 평균이 9.57로 다소 작아지고 표준편차는 2.75로 유사하였다. 두 경우의 분포도(Figs. 9(b) and 9(c))를 살펴보면 침도가 낮아지고 중심값은 값이 커지는 오른쪽으로 이동하였으며 유전상수가 큰

비율이 높았다. 반면 상대적으로 건조했던 2월에 조사한 2013년 (Fig. 9(c))은 유전상수 평균값 7.45, 표준편차 1.37로 포장이 양호했던 2004년도와 유사하였다. 분포도(Fig. 9(d))는 침도가 다소 낮아졌으나 분산은 우기에 비해 상대적으로 작았다. 이러한 원인은 함수조건에는 콘크리트의 공극 내에 유전상수가 81로 매우 큰 수분이 영향을 미쳐 유전상수가 증가하고, 반면 건조조건에는 유전상수가 1로 매우 작은 공기의 영향으로 상대적으로 유전상수가 감소한 것으로 판단된다. 다만 2004년도의 경우 장마기간으로 비가 많이 왔음에도 불구하고 아스팔트 덧씌우기 포장층과 내부 콘크리트 포장층 사이의 방수층이 전반적으로 양호하여 내부 콘크리트 내 함수율 변화에 큰 영향을 주지 못한 것으로 판단된다. 즉, 포장 상태가 양호한 경우 내부는 날씨조건에 영향을 적으나 손상이 발달한 상태에서는 날씨영향은 무시할 수 없는 것으로 판단된다.

감쇠의 경우, 도로포장이 상대적으로 양호한 2004년도의 경우 (Fig. 9(d)) 전달시간과 감쇠의 분포는 추세선을 중심으로 대칭인 분포를 보인 반면, 손상이 증가한 2011년도부터(Figs. 9(e)-9(g))는 추세선 아래측으로 감쇠가 증가한 부분이 두드러지게 나타난다. 이러한 현상은, 앞에서 언급한 바와 같이, 손상된 포장 내부로 침투한 물과 염화물의 영향으로 포장매질의 전도도가 증가한 영향으로 판단된다. 다만 함수조건(2011년 및 2012년)과 건조조건(2013년)으로 인한 전달시간 대비 감쇠량의 변화는 본 조사범위 내에서 확인하기 어려웠다.

4.4 GPR 장비특성

GPR 안테나의 중심주파수는 가탐심도에 큰 영향을 미친다 (Smith and Jol, 1995). 그러나 실제로는 주파수가 같은 경우에도 제조사에 따라 가탐심도를 다르게 추천하고 있다. 본 연구에서는 GPR 안테나의 중심주파수가 같고 동일한 제조사에서 제작한 경우에 결과값에 차이가 없는지 확인하고자 하였다. Fig. 2의 두 장비는 모두 GSSI (Geophysical Survey Systems, Inc.)사에서 제작되었으며 중심주파수는 1 GHz이다. 최신장비(Fig. 2(b))의 GPR 안테나 내부에는 내장필터가 장착되어 있다.

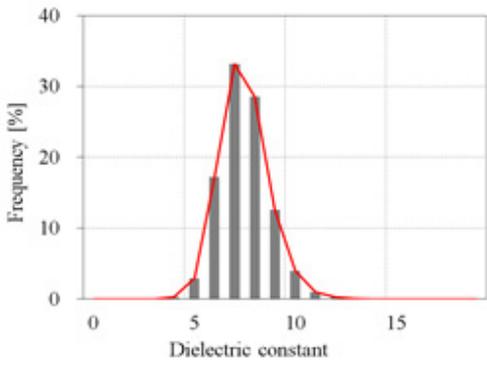
Fig. 10은 두 종류의 GPR 장비를 이용하여 얻은 아스팔트 덧씌우기 콘크리트 포장의 유전상수를 표준편차 및 공용연수와 연계한 결과이다. Fig. 10(a)에서 알 수 있듯이 신장비(3세대)는 구장비(2세대)에 비해 전반적으로 표준편차가 작은 것으로 나타나 내장필터에 의해 데이터의 분산이 작은 것을 알 수 있다. 공용연수에 따라서는, Fig. 10(b)와 같이, 공용기간에 따른 유전상수의 변화에 다소 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 즉, 동일 주파수 또는 같은 제조사의 GPR 장비라 할지라도 장비의 특성이 다른 경우에는 결과값에 영향을 미칠 수 있는 것을 확인하였다.

Table 2. Weather Condition on Survey Days

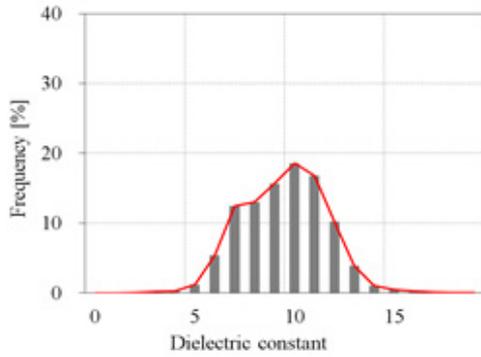
Survey day	R.H. (%)	Weather	Note
July 2004	76	Summer (monsoon) / Heavy Rain	Generally sound
August 2011	86	Summer (monsoon) / Heavy Rain	Expansion and deeping of damage
June 2012	66	Summer / Little rain (3 days ago)	
February 2013	48	Winter / Little snow (3 days ago)	

Table 3. Dielectric Constant of Road Pavement with Elapsing Time

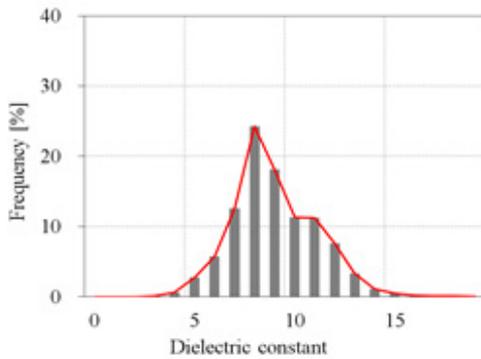
Survey day	July 2004	August 2011	June 2012	February 2013
Average	7.99	10.04	9.57	7.45
Standard deviation	1.52	2.40	2.75	1.37



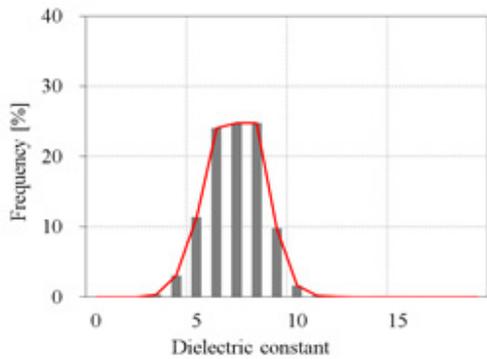
(a) Dielectric Constant in 2004



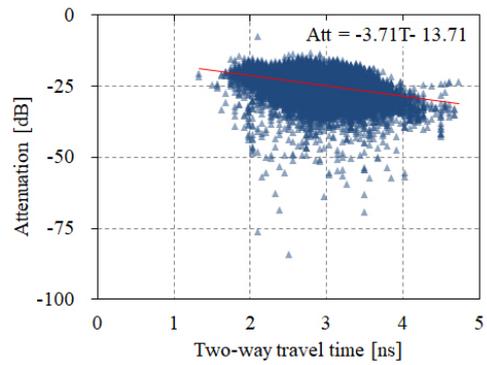
(b) Dielectric Constant in 2011



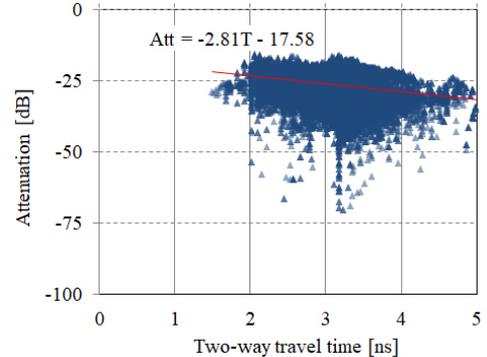
(c) Dielectric Constant in 2012



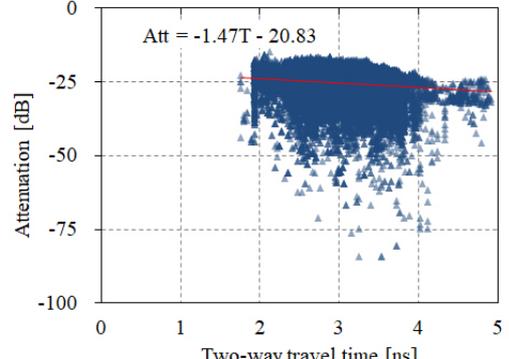
(d) Dielectric Constant in 2013



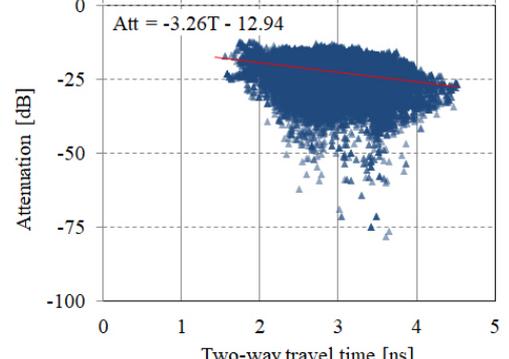
(e) Attenuation in 2004



(f) Attenuation in 2011

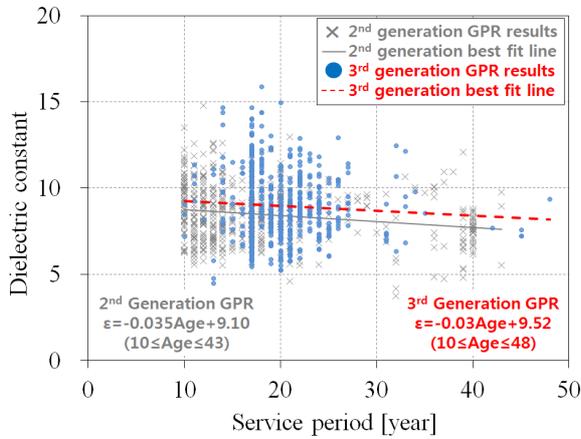


(g) Attenuation in 2012

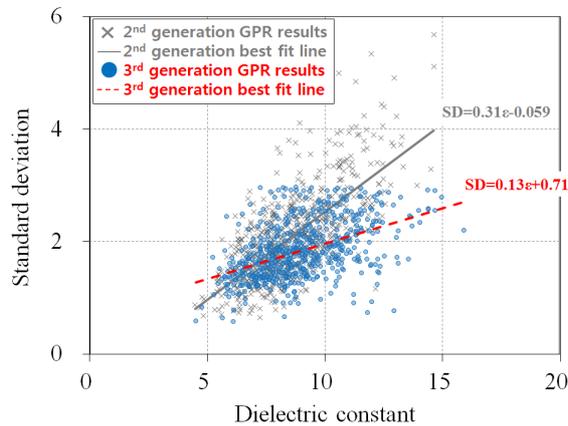


(h) Attenuation in 2013

Fig. 9. Distribution Changes of EM Characteristics of Road Pavement with Elapsing Time



(a) Dielectric Constant vs. Service Period



(b) Dielectric Constant vs. Standard Deviation

Fig. 10. Dielectric Constants of Road Pavement by 1 GHz GPR Antennas with Different Characteristics

4.5 제언

상기 조사결과에 근거하면, 도로에서 GPR 조사 및 결과 분석은 포장매질의 종류, 설계 및 시공 정보, 공용상태와 더불어 콘크리트 포장은 재령(또는 공용기간)에 대한 정보를 바탕으로 숙련된 조사자 및 해석자에 의해 수행되는 것이 필요하다. 조사시키는 상대습도가 급변하는 일출과 일몰시에는 삼가하고 날씨가 일정한 한낮에 이루어지는 것이 바람직하다. 도로 표면에 이물질이나 체류수가 남은 경우, 유전상수와 감쇠에 영향을 줄 수 있으므로 깨끗이 청소된 후에 조사를 실시하도록 한다. 손상이 심화된 도로와 제설제가 살포되는 동절기 기간에는 가탐심도가 작아지고 수신파의 신뢰도가 저하될 수 있으니 주의하도록 한다. 필요시 육안조사, 보정코어, 기타 별도의 비파괴시험을 통해 보정하고 신규 장비 도입 시 반드시 테스트베드 등에서 보정을 실시함으로써 결과의 신뢰도를 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구는 실제 공용 중인 고속도로에서 지난 20년간 실시한 GPR 조사 결과를 분석하여, 도로의 주매질인 아스팔트와 콘크리트 포장의 전자기적 특성값인 유전상수와 감쇠의 특성을 고찰하였다. 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 1 GHz로 조사한 아스팔트 포장의 유전상수는 4~7이었다. 콘크리트의 경우 초기 재령에서는 매우 큰 유전상수 값을 보였다가 재령이 경과할수록 급격하게 작아져 재령 10년 이후에는 6~12 범위에 수렴하였다.
- (2) 공기 중에 노출된 도로포장의 유전상수는 대기의 상대습도에 따라 증가하였으나 덧씌우기 포장층이 있는 경우 영향성은 1/8 수준으로 감소하였다. 이는 덧씌우기가 있는 경우 내부 콘크리트는 외기에 차단되어 상대습도의 직접적인 영향이 상대적으로 작아진 것으로 판단된다.
- (3) 감쇠는 일반적으로 도로포장층의 두께가 증가할수록 커지게 되며, 손상 구간에서도 증가하였다.
- (4) GPR 조사 시 기상조건에 따라서 포장체의 전자기적 특성값이 달라지는 것을 확인할 수 있었다. 특히 도로상태가 양호한 경우보다 손상이 발달한 상태에서는 날씨의 영향이 큰 것으로 나타났다.
- (5) 이밖에 동일한 주파수로 조사한 경우에도 GPR 장비의 특성이 달라지면 결과값에 차이가 발생할 수 있는 것을 확인하였다.

그러므로 GPR은 도로에 대한 이해를 바탕으로 숙련자에 의해 조사 및 분석이 실시되는 것이 바람직하며, 날씨의 변화가 거의 없고 도로표면이 깨끗한 상태에서 수행하는 것이 필요하다. 또한 해석결과의 신뢰도를 향상시키기 위해서는 보정코어, 장비 보정, 별도의 비파괴조사를 병행하는 것은 요구된다.

References

ASTM D 6432. (2011). *Standard guide for using the surface ground penetrating radar method for subsurface investigation*, American Society for Testing and Materials (ASTM), ASTM International.

Baek, J. E. and Choi, J. S. (2014). "Investigation of substructure under the roads using ground penetrating radar (GPR)." *Road Engineers*, Vol. 16, No. 2, pp. 11-16 (in Korean).

Balanis, C. A. (1989). *Advanced engineering electromagnetics*, John Wiley & Sons, NY, USA.

Daniels, D. J. (2004). *Ground penetrating radar: IET radar, sonar, navigation and avionics series 15*, The Institution of Engineering and Technology, London, UK.

- Geophysical Survey Systems, Inc. (GSSI). (2009). *RADAN version 6.6. GSSI*.
- Geophysical Survey Systems, Inc. (GSSI). (2017). *RADAN version 7. GSSI*.
- Gucunski, N., Pailles, B., Kim, J. Y., Azari, H. and Dinh, K. (2016). "Capture and quantification of deterioration progression in concrete bridge decks through periodical NDE surveys." *Journal of Infrastructure Systems*, ASCE, Vol. 23, No. 1, pp. 1-11, DOI: 10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000321.
- Kim, J. Y. and Choi, C. H. (2018). "A Study on risk evaluation method of ground subsidence around sewer." *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*. Vol. 19, No. 7, pp. 13-18, DOI: <https://doi.org/10.14481/jkges.2018.19.7.13> (in Korean).
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2019). *The detailed meteorological measurement data by the Automatic Weather System (AWS)*, Available at: <http://www.kma.go.kr>. (Accessed: November 1, 2019).
- Korea Ministry of Government Legislation (KMGL) (2019). *Special act on underground safety management*, Available at: <http://www.law.go.kr/>. (Assessed: November 1, 2019)
- Korea Society of Earth and Exploration Geophysicists (KSEG). (2002). *Geophysical exploration guidelines for application in the civil engineering environment field*, Korea Society of Earth and Exploration Geophysicists (KSEG) (in Korean).
- Lee, C. M., Yoon, J. S., Baek, J. E. and Kim, S. T. (2019). "Evaluation of GPR application to survey utilities on sidewalks." *International Journal Highway Engineering*, Vol. 21, No. 1, pp. 35-41, DOI: <https://doi.org/10.7855/IJHE.2019.21.1.035> (in Korean).
- Lee, D. Y. (2018). "Analysis of sewer pipe defect and ground subsidence risk by using CCTV and GPR monitoring results." *Journal Korean Geosynthetics Society*, Vol. 17, No. 3, pp. 47-55, DOI: <https://doi.org/10.12814/jkgss.2018.17.3.047> (in Korean).
- Maser, K. R. and Scullion, T. (1991). *Automated detection of pavement layer thicknesses and subsurface moisture using ground penetrating radar*, TRB Paper, Washington, D.C., USA.
- Olhoeft, G. R. (1984). "Applications and limitations of ground penetrating radar. Expanded Abstracts." *54th Annual International Meeting and Exposition of the Society of Exploration Geophysicists*, Atlanta, GA, pp. 147-148.
- Pajewski, L., Benedetto, A., Loizos, A., Slob, E. C. and Tosti, F. (2015). "COST Action TU1208 "Civil engineering applications of ground penetrating radar" ongoing research activities and mid-term results." *EGU General Assembly 2015*, Geophysical Research Abstracts, 17, EGU2015, 13969, Vienna.
- Rhee, J. Y., Choi, J. J. and Kee, S. H. (2019). "Evaluation of the depth of deteriorations in concrete bridge decks with asphalt overlays using air-coupled GPR: A case study from a pilot bridge on korean expressway." *International Journal of Concrete Structures and Materials*, Vol. 13, No. 3, pp. 399-415, DOI: <https://doi.org/10.1186/s40069-018-0327-7>.
- Saarenketo, T. (2006). *Electrical properties of road materials and subgrade soils and the use of ground penetrating radar in traffic infrastructure surveys*, Doctoral dissertation, Department of Geosciences at University of Oulu: Oulu, Finland.
- Smith, D. G. and Jol, H. M. (1995). "Ground penetrating radar: antenna frequencies and maximum probable depths of penetration in Quaternary sediments." *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 33, No. 1-3, pp. 93-100. DOI: [https://doi.org/10.1016/0926-9851\(95\)90032-2](https://doi.org/10.1016/0926-9851(95)90032-2).
- Yoon, J. S., Lee, C. M. and Baek, J. E. (2016). "Comparison of multichannel ground penetrating radar equipment for detecting road cavities." *International Journal Highway Engineering*, Vol. 20, No. 6, pp. 101-108, DOI: <https://doi.org/10.7855/IJHE.2018.20.6.101> (in Korean).