

레이더 신호의 감쇠특성을 고려한 일체식 콘크리트 교량 바닥판의 상태평가 방법 고찰

이지영^{1*}, 최재진², 김홍삼³, 박고은⁴, 최명진⁵

A Study on the Integrity Assessment of Bare Concrete Bridge Deck based on the Attenuation of Radar Signals

Ji-Young Rhee^{1*}, Jae-Jin Choi², Hong-Sam Kim³, Ko-Eun Park⁴, Myeong-Jin Choi⁵

Abstract: The signal characteristic of radar wave on concrete decks is determined by the attenuation of the radar due to the conversion of EM(Electromagnetic) energy to thermal energy through electrical conduction, dielectric relaxation, scattering, and geometric spreading. In this study, it is found that the attenuation of radar signal received on top rebars in bare deck concrete with 2 way travel time shows a general decreasing linear trend because of its same relative permittivity and conductivity. The radar signal after depth-normalization, can then be interpreted as being principally influenced by the content of chlorides penetrating cover concrete, which caused corrosion of rebars in bridge decks.

Keywords: Radar, Attenuation, Concrete, Deck, Normalization

1. 서 론

교량의 주부재 중에서 바닥판은 공용기간 동안 차량하중 및 다양한 환경조건에 직접적으로 노출되어 있어 다른 부재에 비하여 결함 및 손상이 빈번한 부재이다. 이러한 이유로 바닥판의 보수비는 전체 비용의 50% 이상을 차지하고 있어 비용절감을 위한 체계적인 관리가 요구되고 있다.

한국도로공사에서는 2000년대부터 GPR(Ground Penetrating Radar) 장비를 도입하여, 교량 바닥판의 상태를 교통차단 없이 신속하게 평가하기 위한 기술개발을 실시하여 왔다. 그 결과, 포장이 있는 교량 바닥판의 경우 포장면에 접한 콘크리트의 상대유전율을 차량탐재형 GPR로 측정하여 그 값이 12 이상일 때는 손상위험이 높은 곳으로 판단하고, 포장이 없는 일체식(노출) 콘크리트 교량 바닥판은 차량탐재형 GPR을 이용하여 상부철근의 피복두께를 조사하고 두께가 상대적으로 작은 부위를 손상취약구간으로 설정한 후 이 부위에 대해 부식전위 및 염화물 함량 분석 결과에 따라 손상발생 여부를 판

단하도록 자체 기준을 수립하고 이를 실무에 적극 반영하고 있다.

현장추적조사 결과, 포장이 있는 바닥판의 경우에는 교면 포장의 손상에 따른 A/C 경계면의 체수 및 동결융해에 의한 콘크리트의 열화 손상과 연계하여 신뢰도가 높은 것으로 평가되고 있다. 그러나 포장이 없는 일체식 교량 바닥판의 경우는 차량탐재형 GPR으로는 상부철근의 피복두께만 조사가 가능하고 콘크리트의 품질에 대해서는 별도의 실험이 필요하므로 이에 대한 개선이 필요하다.

본 연구에서는 매질의 특성에 따라 GPR, 즉, 레이더 수신파의 감쇠가 변화되는 것에 착안하여 이를 이용한 일체식 교량 바닥판의 상태평가 방안을 도출하고 공용 중인 교량에 시험적으로 적용하여 기존 상태평가방법과 비교·평가하였다.

2. GPR을 이용한 바닥판의 상태평가 개요

2.1 시스템 구성 및 원리

GPR 시스템은, Fig. 1과 같이, 일반적으로 송신안테나와 수신안테나, 컨트롤 장치, 데이터 저장장치, 그리고 디스플레이로 구성되어 있다. GPR 시험은 송신안테나로부터 전자기파를 지표에 방사한 후 전자기적 물성이 다른 매질의 경계면에서 반사된 레이더파를 수신안테나에서 받은 수신파의 형상이나 지연시간을 이용하여 내부의 물질과 상태를 평가하는 비

¹정회원, 한국도로공사 책임연구원, 교신저자

²정회원, 공주대학교 건설환경공학부 교수

³정회원, 한국도로공사 책임연구원

⁴정회원, 한국도로공사 선임연구원

⁵정회원, 한국도로공사 주임

*Corresponding author: need@ex.co.kr

Korea Expressway Corporation Research Institute

•본 논문에 대한 토의를 2016년 8월 1일까지 학회로 보내주시면 2016년 9월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

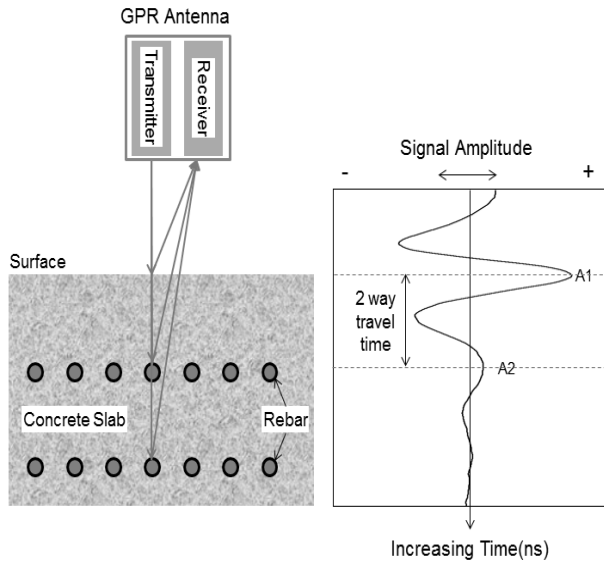


Fig. 1 An Example Scan of GPR on a Bare Concrete Bridge Deck

Table 1 Approximate Electromagnetic Properties of Various Materials

Material	Relative Permittivity, K	Pulse Velocities, m/Ns	Conductivity, mS/m
Air	1	0.3	0
Fresh water(f,t)	81	0.033	0.10~30
Sea water(f,t,s)	70	0.033	400
Sand(dry)(d)	4~6	0.15~0.12	0.0001~1
Sand(saturated)(d,w,f)	25	0.055	0.1~1
Silt(saturated)(d,w,f)	10	0.095	1~10
Clay(saturated)(d,w,f)	8~12	0.106~0.087	100~1000
Dry sandy coastal land(d)	10	0.095	2
Fresh water ice(f,t)	4	0.15	0.1~10
Permafrost(f,t,p)	4~8	0.15~0.106	0.01~10
Granite(dry)	5	0.134	0.00001
Limestone(dry)	7~9	0.113~0.1	0.000001
Dolomite	6~8	0.122~0.106	
Quartz	4	0.15	
Coal(d,w,f, ash content)	4~5	0.15~0.134	
Concrete(w,f, age)	5~10	0.134~0.095	
Asphalt	3~5	0.173~0.134	
Sea ice(s,f,t)	4~12	0.15~0.087	
PVC, epoxy, polyesters	3	0.173	
Vinyls,rubber(f,t)			

Note 1

d = function of density, w = function of porosity and water content, f = function of frequency, t = function of temperature, s = function of salinity, and p = function of pressure.

파괴시험법이다. 즉, GPR은 전자기파를 쏘고 반사되어 되돌아온 수신파의 (1) 지연시간(2 Way Travel Time)과 (2) 신호의 세기(Amplitude)를 이용하여 데이터를 분석하는 방법이다.

전자기파의 지연시간을 깊이로 환산하기 위해서는, 매질 내 전자기파의 속도를 알아야 한다. ASTM D 6432에 따르면 전파속도는 주로 전자기파가 통과하는 매질의 상대유전율(ϵ_r)에 의해 결정되며, 다음 식(1)과 같다. 다양한 재료에 따른 상대유전율(ϵ_r)과 전파속도 등의 표준값은 Table 1과 같다.

$$V_m = c / \sqrt{\epsilon_r} \quad (1)$$

여기서, c 는 진공에서의 전파속도($3 \times 10^8 \text{ m/s}$), V_m 은 매질 내에서의 전파속도, ϵ_r 는 매질의 상대유전율이다.

편평한 강판에서 레이더파의 반사실험은 매질의 상대유전율을 계산하는데 사용될 수 있다. 덧씌우기가 없는 일체식 교량 바닥판에서 콘크리트의 상대유전율은 다음 식(2)에 의해 계산되며, 반사면(체)의 심도를 계산하는 방법은 다음 식(3)과 같다.

$$\sqrt{\epsilon_c} = \frac{A_p + A}{A_p - A} \quad (2)$$

$$d = \frac{cT}{2\sqrt{\epsilon_c}} \quad (3)$$

여기서, ϵ_c 는 콘크리트의 상대유전율, A_p 는 입사 레이더파의 진폭(강판으로부터 나온 반사파의 진폭), A 는 공기/콘크리트 경계면에서의 반사 진폭, d 는 반사체(여기서는 상부철근)의 심도, T 는 지연시간으로 Fig. 1과 같은 경우 정점 $A1$ 과 정점 $A2$ 간의 시간차이다.

2.2 레이더파 감쇠의 영향인자

매질이 이상적인 유전체인 경우 송신안테나에서 방사된 레이더파는 감쇠하지 않지만, 일반적인 매질에서는 에너지 손실 메커니즘에 의해 감쇠가 발생하게 된다. 매질을 통과하는 레이더 신호의 감쇠를 일으키는 요인은 다음과 같이 크게 세 가지로 알려져 있다.

2.2.1 상대유전율

미네랄 물질의 표면에서 이루어지는 액상수 분자와 화학적 전하의 이동에 따른 유전적 완화 손실은 전자기파의 에너지를 열에너지로 전환시킴으로써 감쇠를 일으킨다. 이 손실은 매질의 상대유전율에 따라 다르게 나타난다.

2.2.2 지리적 산란 손실

지리적 산란 손실이란, 매질 내의 골재와 같이, 비균질성이 존재할 때 레이더 파장은 산란하여 감쇠를 일으킨다. 이것은 신호 감쇠에 가장 지배적인 인자로 작용하며, 일반적으로 투과 깊이가 깊을수록 커지게 된다. 손실은 콘크리트의 배합특성(골재크기, 공기량 등)에 따라 달라진다.

2.2.3 전도도

미네랄 타입의 점토질, 그리고 용액 내에 있는 자유이온과 같은 전도성 물체는 전자기파의 에너지를 열에너지로 전환시킴으로써 감쇠를 일으키며, 감쇠량은 매질의 전도도에 따라 다르다.

이와 같이 레이더파의 감쇠는 매질의 상대유전율과 전도도에 영향을 받고, 매질 내를 전파하는 투과깊이에 따라 감쇠량이 커지게 된다. 따라서, 일체식 교량 바닥판을 구성하는 콘크리트의 상태에 따라 레이더파의 감쇠량이 변화할 것으로 예측되며, 이에 근거하여 본 연구에서는 차량탐재형 GPR을 이용하여 일체식 교량 바닥판의 손상평가지표로 상부철근의 피복두께와 더불어 콘크리트 상태를 평가할 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

3. 레이더 감쇠특성을 고려한 상태평가 방법

3.1 콘크리트 특성과 감쇠의 관계

기존의 연구결과에 따르면, 콘크리트 바닥판과 같이 약전도성을 갖는 매질에서의 감쇠상수는 다음 식(5)와 같이 간소화할 수 있다고 하였다.

$$\alpha_R = 60\pi\sigma / \sqrt{\epsilon_r} \quad (5)$$

여기서, α_R 은 감쇠상수이고, σ 은 전도도이다.

교량 바닥판을 구성하고 있는 콘크리트는 동종의 재료를 이용하여 일체로 타설하여 시공되므로, 특별한 경우를 제외하고 균질한 매질로 가정할 수 있다. 따라서, 바닥판 콘크리트는 동일한 상대유전율 ϵ_r 과 전도도 σ 를 가지게 되므로 감쇠상수 α_R 은 상수값 C 가 된다. 다시 말하면, 바닥판이 초기의 상태를 유지하고 있는 건전한 경우에, 레이더파의 감쇠는 콘크리트 내를 전파하는 시간(깊이)에 따라 선형적으로 감소하는 경향을 나타내게 될 것으로 생각된다.

일체식 콘크리트 교량 바닥판에 손상이 발생하게 되는 경우, “주손상원인은 상부철근의 피복두께가 작은 부위에서 염화물 침투에 의한 철근의 조기 부식에 의한 것”으로 알려져 있

다. 즉, 콘크리트의 품질이 좋지 않거나 균열 등의 손상이 발생된 경우에 콘크리트 내로 수분과 염소이온의 침투가 용이하게 되고, 시간이 경과됨에 따라 염소이온이 확산되며 특히 상부철근의 피복두께가 작은 부위에서 우선적으로 부식손상이 발생하게 된다. 이때 손상인자가 되는 수분과 이온량의 증가는 콘크리트의 전도도 σ 를 높게 하여 감쇠상수 α_R 을 크게 한다. 다시 말하면, 이러한 손상이 우려되는 부위는 건전한 부위에 비해 감쇠상수가 클 것으로 예상되므로 상대적으로 큰 감쇠가 일어날 가능성이 매우 높다. 이러한 이유로 실무에서는 레이더파의 감쇠가 상대적으로 크게 나타나는 구간에 대해서 특별한 기준없이 손상이 발생된 구간으로 판단하는 사례도 빈번하게 이루어지고 있다.

3.2 레이더파의 감쇠특성을 고려한 상태평가 방안 제시

일체식 교량 바닥판의 상부철근에서 반사된 레이더 수신파를 입사파와 비교한 총감쇠량은 콘크리트의 상태를 간접적으로 평가할 수 있을 것으로 판단된다. 총감쇠량은 건전한 상태에서 반사체의 깊이, 즉, 지연시간에 따라 일정 비율로 발생하는 (1) 기본감쇠(선형적 감쇠)와 전도도 증가에 따른 (2) 추가감쇠로 나눌 수 있다. 따라서, 총감쇠량에서 회귀분석식의 값을 빼면 깊이에 대한 영향이 제거된 보정된 감쇠량을 얻을 수 있다. 보정된 감쇠량은 손상에 따라 증가된 감쇠상수의 영향으로 발생한 추가감쇠량으로 교면에서부터 상부철근까지의 콘크리트 상태를 간접적으로 추정하는 상태평가인자로 사용될 수 있다. 이러한 내용을 바탕으로, 레이더파의 감쇠특성을 고려한 바닥판의 상태평가 방법을 Fig. 2와 같이 제안하고자 한다.

- (1) 레이더 수신과 입력
- (2) 수신파에서 지연시간(x)와 총감쇠량(y)를 계산
- (3) 분석하고자 하는 시간단위(n), 선형적 감쇠량을 나타내는 데이터 범위(r), 현장조사 오차(error) 입력 : 사용자 입력
- (4) 지정범위(r) 데이터 추출 : 시간단위별 ①~③항 반복
 - ① 일정 지연시간 범위에서 감쇠값을 크기별로 정렬
 - ② ①에서 극값(최대, 최소값) 제외
 - ③ ②에서 지정범위(r)에 따라 데이터 추출
- (5) 지연시간과 (4)의 값으로 선형 회귀분석 실시
- (6) (5)의 선형 회귀식에서 절편과 기울기 추출
- (7) 총감쇠값에서 선형회귀식 결과를 뺀 보정감쇠값 계산
- (8) (7)이 오차보다 크거나 같으면 → ‘손상’, 작으면 → ‘양호’ 판정

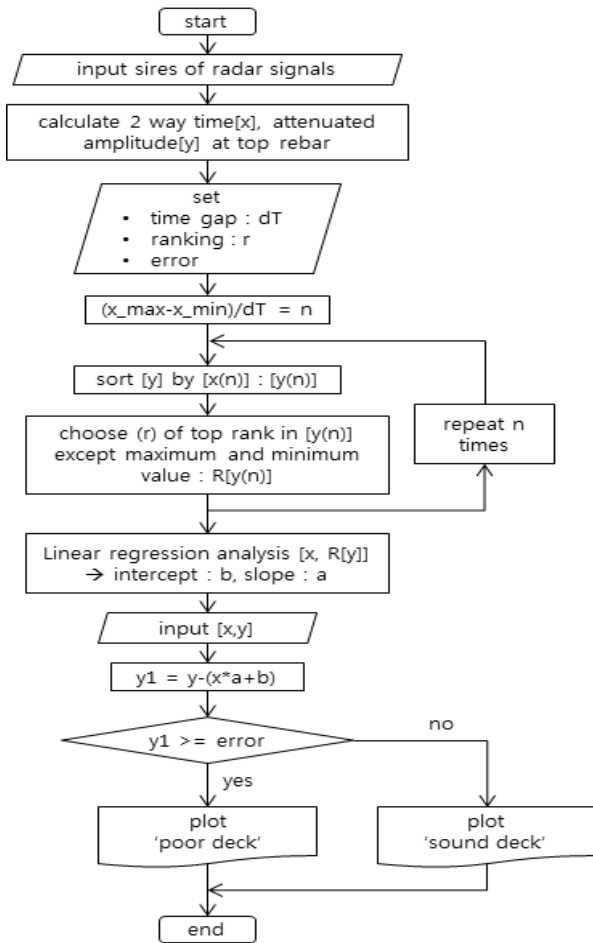


Fig. 2 A Flow Chart of the Condition Evaluation Method for Bare Concrete Bridge Decks using GPR

4. 현장적용

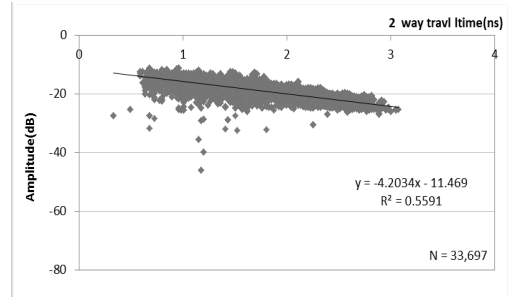
앞 장에서 제안된 상태평가 방안을 공용 중인 일체식 교량 바닥판에 적용하여 콘크리트 상태와 레이더파의 감쇠량과의 연관성을 확인하고 기준방법과 비교평가하였다. 사용된 GPR 장비는 GSSI의 Sir 시리즈를 사용하였으며 Radan 소프트웨어를 이용하여 분석하였다.

4.1 건전한 콘크리트 바닥판에서의 레이더파의 감쇠

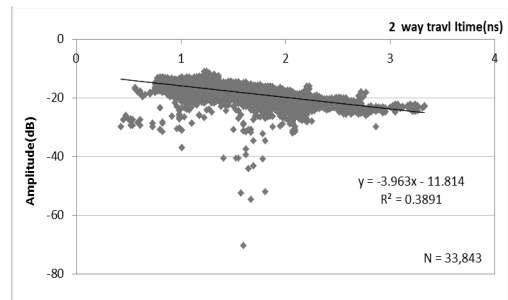
앞에서 언급한 바와 같이 콘크리트의 상대유전율과 전도도가 일정한 상태에서는 반사면(체)의 깊이에 따른 지리적 산란 손실이 지배적으로 나타나게 된다. 최근에 준공한 일체식 교량 바닥판의 경우, 정밀한 시공으로 상부철근의 피복두께가 일정하여 반사체의 위치(깊이)에 따른 감쇠 경향을 확인하기 어렵다. 따라서, 고속도로에 일체식 콘크리트 바닥판이 최초로 적용된 1980대에 시공된 교량 중에 교면 및 내부 상태가 양호한 것으로 판정된 교량을 대상으로 현장조사를 실시하였

Table 2 A Status of the Surveyed Bridge(Sound)

Item	Bridge 1
Super Structure	PSCI
Bridge Length(m)	234(7@33.5)
Completion Year	1987
Survey Year	2012



(a) Bridge 1(Hanam)



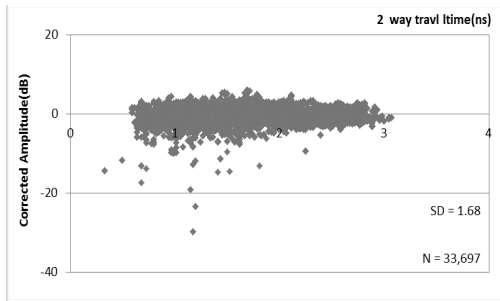
(b) Bridge 1(Tongyeong)

Fig. 3 A Relationship between 2 Way Travel Time and Radar Amplitudes of Top Radars on Sound Concrete Decks

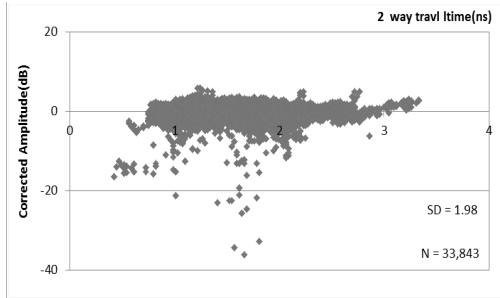
다. 대상 교량은 중부선에 위치한 교량으로 현황은 Table 2와 같다. 조사는 건조한 날이 일정기간 지속된 후 한낮에 실시하였으며, 양방향(하남, 통영)을 동시에 조사하였다.

바닥판의 상부철근에서 반사된 레이더 수신파를 입사파의 에너지와 비교하여 총감쇠량을 계산하고 이를 Fig. 3에 나타내었다. 여기서 x축은 지연시간(ns)이고 y축은 총감쇠량(dB)이다. 각 그림에는 조사된 샘플수와 선형 회귀방정식, 그리고 결정계수(R^2)도 함께 표기하였다.

그림을 살펴보면, Bridge 1의 양방향 모두 지연시간이 증가함에 따라 감쇠량이 일정한 비율로 증가하는 경향을 보였다. 선형 회귀방정식은 하남방향이 'y=-3.963x-11.814' 통영방향 이 'y=-3.963x+11.814'이며, 결정계수 R^2 은 각각 0.5591과 0.3891으로 나타났다. 즉, 지연시간과 감쇠량은 'y=-ax+b'의 선형관계로 어느 정도 신뢰성이 있는 것을 알 수 있다. 따라서, 상태가 양호한 일체식 교량 바닥판에서는 상부철근의 피복두께(지연시간)에 따라 감쇠량은 일정한 비율로 증가하며, 이때 비율, 즉 회귀곡선의 기울기는 콘크리트의 상대유전율과 전



(a) Bridge 1 (Hanam)



(b) Bridge 1 (Tongyeong)

Fig. 4 A Relationship between 2 Way Travel Time and Depth Corrected Radar Amplitudes of Top Radars on Sound Concrete Decks

도도에 의해서 결정된 감쇠상수로 교량이 가진 콘크리트의 배합특성 등에 따라 서로 다른 값을 가진 것으로 나타났다.

선형 회귀방정식의 수식값을 기본감쇠량으로 가정하여, Fig. 3의 데이터에서 회귀방정식의 값을 제거한 결과를 Fig. 4에 도식하였다. 기본감쇠량이 제거된 추가감쇠량은 시간축을 중심으로 대칭적으로 분산되어 피복두께에 따른 영향이 제거되었음을 알 수 있다. 또한, 분산이 크게 나타난 곳이 많지 않아 전체적으로 바닥판 콘크리트의 상태가 서로 유사(건전)한 것으로 판단된다.

4.2 손상된 콘크리트 바닥판에서의 레이더파의 감쇠

조사대상 교량은 중부선과 호남선에 공용 중인 일체식 바닥판으로 현황은 Table 3과 같다. 조사당시 교량의 공용연수는 각각 16년, 24년, 25년이었으며, 교면에 균열, 박락, 철근노출 등의 손상을 보이고 있었다.

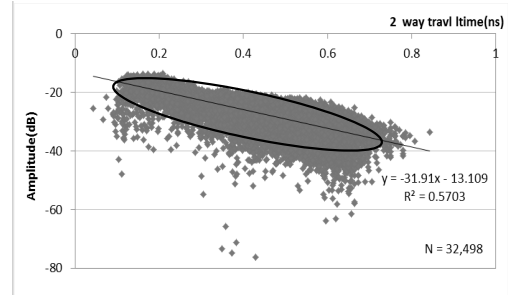
손상된 콘크리트 바닥판의 상부철근에서 반사된 레이더 수신파를 앞의 Fig. 3와 동일한 방법으로 Fig. 5에 도식하였다.

그림을 살펴보면, 바닥판이 양호한 경우인 Fig. 3에 비해 동일 지연시간대에서 감쇠량이 크게 나타난 곳이 많고 데이터 분산도 넓게 분포하고 있어 손상부위에서 감쇠상수 증가에 따른 추가감쇠량의 영향에 의한 것으로 추정된다.

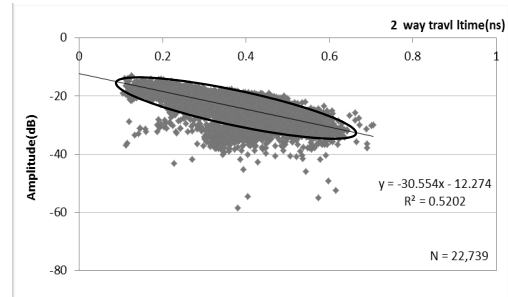
회귀방정식을 살펴보면 조사교량 모두 지연시간이 증가함에 따라 감쇠량이 일정한 비율로 증가하는 선형적인 경향을

Table 3 A Status of the Surveyed Bridges(Poor)

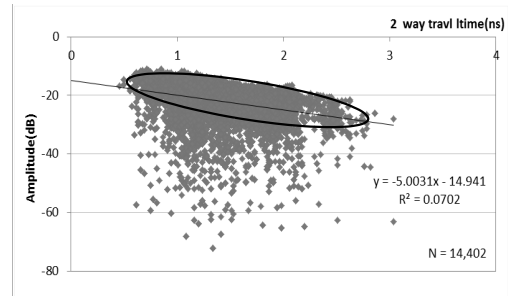
Item	Bridge 2	Bridge 3	Bridge 4
Super Structure	PSCI	PSCI	SBG
Bridge Length(m)	120	180	75
Completion Year	1987	1987	1986
Survey Year	2003	2011	2012



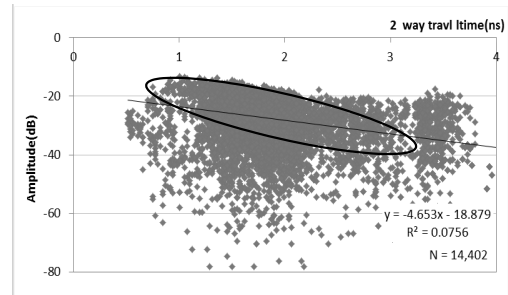
(a) Bridge 2 (Hanam)



(b) Bridge 2 (Tongyeong)



(c) Bridge 3 (Hanam)



(d) Bridge 4

Fig. 5 A Relationship between 2 Way Travel Time and Radar Amplitudes of Top Radars on Poor Concrete Decks

보였으나, 추가감쇠량이 더 많은 범위에서 나타나고 있는 Bridge 3,4에서는 결정계수 R^2 이 0에 가깝게 나타나 상관관계가 거의 없었다.

즉, 손상이 발생한 일체식 교량 바닥판에서도 상부철근의 피복두께가 두꺼울수록 감쇠량은 일정한 비율로 증가하며(기본감쇠량), 이때 손상에 따라 추가감쇠(추가감쇠량)가 발생되며 손상정도가 클수록 그 상관관계는 저하되는 것으로 추정할 수 있다.

손상된 교량 바닥판에서 상부철근의 깊이에 따른 영향을 제거하기 위해서는 건전한 상태에서 얻은 데이터, 즉 지연시간과 감쇠량이 선형관계에 있는 데이터의 추출이 필요하다. 그러나, 콘크리트의 특성에 따른 감쇠상수는 개별 교량에 따라 다르므로 초기치가 없는 경우에는 가급적 각 바닥판의 데이터를 이용하는 것이 바람직하다. Fig. 5를 살펴보면, 동일시간대에서 감쇠량의 상위 범주(그림에서 붉은 타원 안)의 데이터는 지연시간과 총감쇠량이 선형관계를 유지하는 경향을 보이고 있다. 따라서, 감쇠량의 상위값을 건전한 상태에서 수신된 데이터로 가정하여 선형회귀분석을 실시하면, 절편과 기울기(감쇠상수)가 추출되고, 이를 기본감쇠량으로 가정하여 총감쇠량에서 회귀분석식의 값을 빼면 깊이에 대한 영향이 제거된 보정된 감쇠량을 얻을 수 있다.

4.3 기존결과와의 비교평가

교량 2에 대해서 기존의 조사결과를 바탕으로 레이더파의 감쇠량 분석을 추가하여 상태평가 결과를 비교·평가하였다(Shu et al., 2004).

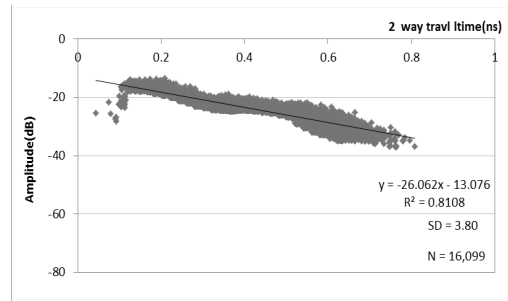
4.3.1 기본감쇠량 추출

앞의 Fig. 4에서 동일지연시간 대 감쇠량 상위값은 어느 정도 선형관계를 유지하는 것으로 보인다. 따라서, 이에 대해 선형 회귀분석을 실시하고 그 결과를 Fig. 6에 도식하였다. 사용자 입력값은 시간단위 0.02 ns, 추출한 데이터 범위는 상위 50%이다.

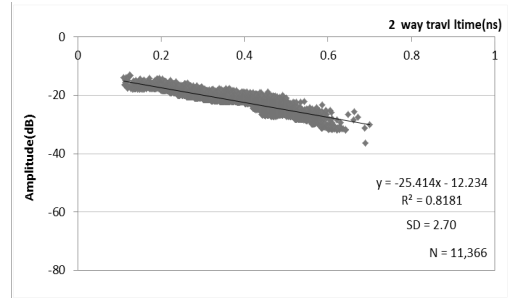
나타난 바와 같이, Bridge 2의 상위 50% 데이터값과 지연시간과의 선형 회귀분석 결과식은 'y=-ax+b'의 형태로 나타났으며, 결정계수는 양방향 모두 0.8이상으로 기존의 0.5보다 크며 1.0에 가깝게 나타나, 지연시간에 따른 감쇠량 간의 상관관계 신뢰도가 높은 것으로 평가된다. 따라서, Bridge 2에 대해 기본 감쇠량 산정을 위한 데이터 추출이 잘 이루어진 것으로 판단되어, 이 회귀분석식을 기본감쇠량으로 적용하였다.

4.3.2 현장조사 결과 분석

다음 Fig. 7~10은 기존조사와 제시된 방법에 의한 분석된 결과를 평면도로 나타낸 것으로 x축은 교량의 연장이고 y축



(a) Bridge 2(Hanam)



(b) Bridge 2(Tongyeong)

Fig. 6 A Relationship between 2 Way Travel Time and Top 50% Data among Radar Amplitudes on Top Rabars

은 교폭을 의미한다. 평면도는 맨 위에서부터 교면의 외관망도, 상부철근 피복두께, 총감쇠량, 그리고 깊이영향이 제거된 보정 감쇠량(추가감쇠량)을 나타냈다. 각 평면도의 상단은 하남, 하단은 통영 방향의 데이터이다. 손상평가기준은 피복두께가 작은 곳(순피복두께 5.2 cm)과 감쇠량이 큰 곳(총감쇠량 -24 dB 이하, 보정감쇠량 -3 dB 이하)을 손상부위로 추정하였다.

각 평면도를 비교하면, 외관상 손상이 나타난 부위는 피복두께가 설계값인 9 cm에 크게 미치지 못하는 것으로 나타났다. 총감쇠량 평면도에서 손상으로 평가한 부위는 손상이 집중적으로 발생한 하남방향 3경간 2차로와 4경간 2차로와 위치가 일치하였으나, 교면에 손상이 없이 피복두께만 크게 나타난 연장 90, 120 m 전후도 손상으로 평가하여 상태평가의 오류가 발생하는 것을 알 수 있다. 상부철근의 피복두께가 보정된 감쇠량, 즉 추가감쇠량은 외관상 손상이 발생된 모든 부위(하남방향 3경간 1,2차로, 4경간 2차로, 5경간 1차로, 통영방향 5경간 2차로)를 손상으로 평가하였으며, 총감쇠에서 손상으로 평가하지 않았으나 보정된 감쇠에서 손상으로 평가한 하남방향 5경간 1차로와 통영방향 4경간 1,2차로, 5경간 2차로는 실제 교면의 손상과 연계되어 있어 제안된 방법이 상태평가 지수로 신뢰성이 있는 것으로 판단된다.

4.3.3 상부철근의 부식도 평가

앞에서 추가감쇠량이 큰 곳은 일체식 교량 바닥판의 손상

← To Hanam

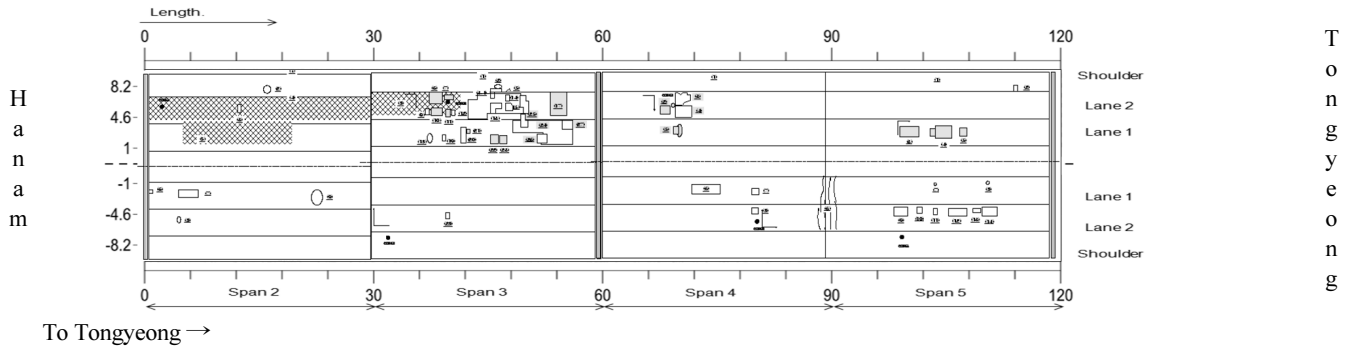


Fig. 7 Results of Visual Inspection on Deck Surfaces(~: 1 Way Crack, ⊠: 2 Way Cracks, ○: Spalling, □: Patching(Conc.), ▤: Patching(Epoxy), ⊥: Half-cell)

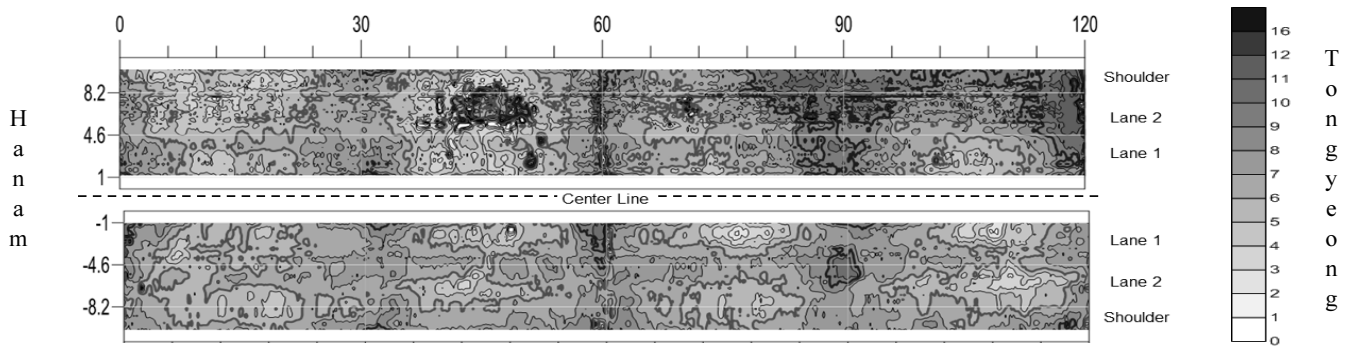


Fig. 8 Distributions of Cover Thickness of Top Rebars(Red Line-6cm, Blue Line-9cm)

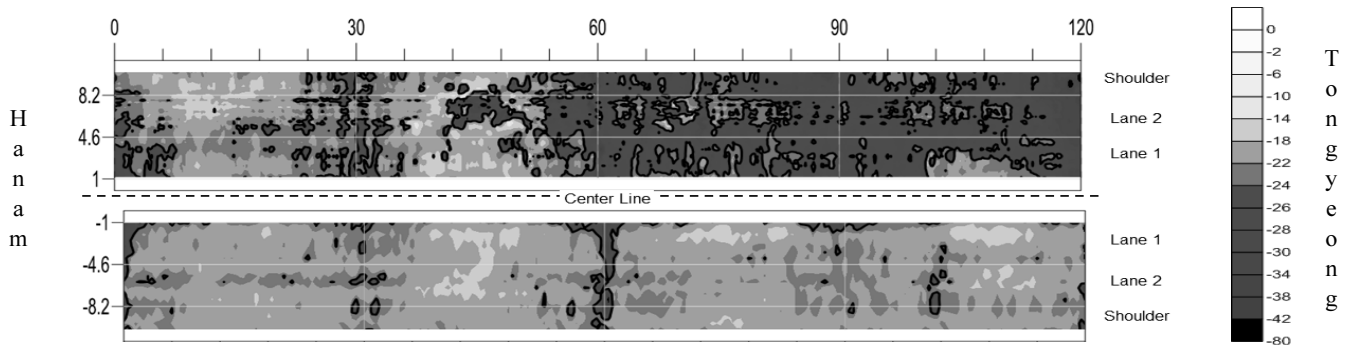


Fig. 9 Amplitudes of Radar Waves Reflected on Top Rebars(Black Line -24dB)

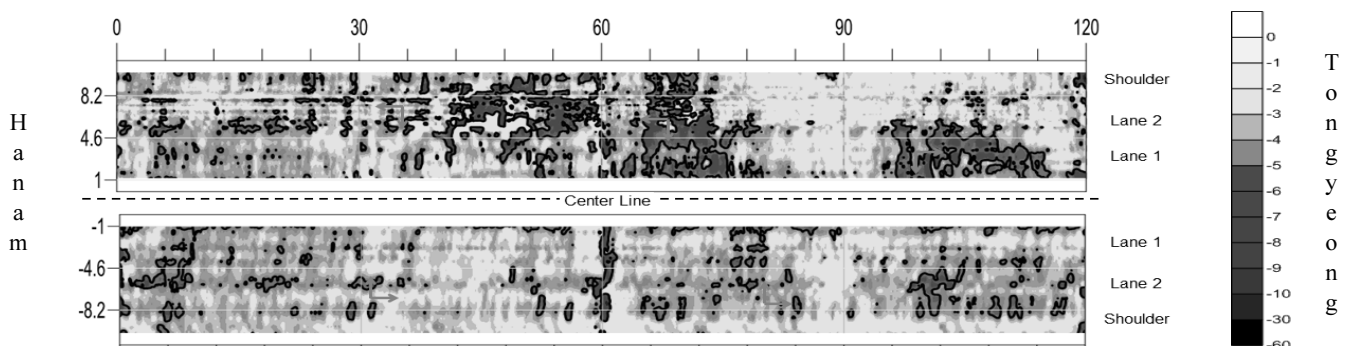


Fig. 10 Depth Corrected Amplitudes of Radar Waves Reflected on Top Rebars(Black Line -3dB)(⊥: Half-cell)

인자가 되는 수분과 염소이온량의 증가한 곳으로 추정하였다. 이는 상부철근의 부식환경과 밀접한 연관이 있으므로 기존의 조사방법인 전위차 측정법(ASTM C 876)에 의한 결과와 비교하였다. 조사위치는 Fig. 9의 화살표 ↑ 위치이며, 결과는

Table 4에 정리하였다.

표의 결과와 같이, 추가감쇠량이 크게 나타난 하남방향 4,5 경간에서 자연전위 값이 -350 mV 이하인 비율이 각각 28%, 14%로 부식우려가 큰 것으로 나타났으며, 추가감쇠량이 크

Table 4 Corrosion Results by Half-cell Method and Normalized Attenuations on Top Rebars

Location	Survey Area (cm)	Potential E(mV)(%)			Plan View	Evaluation	Normalized Attenuation(dB)		Surface Condition
		E<-350 ^{a)}	-350≤E≤-200 ^{b)}	-200<E ^{c)}			Plan View		
Span 3 Lane 2	1.8×1.8	0.0	0.2	99.8		good		3m from Harm	
Hanam Span 4 Lane 2	0.9×0.9	27.9	71.6	0.5		poor		Near Patching (Conc.)	
Span 5 Lane 1	1.8×1.8	14.0	48.3	37.6		poor		Near Patching (Poly.)	
Tong yeong	Span 3 Lane 2	1.8×1.8	0.0	0.0	100.0	good		No Harm	
Span 4 Lane 2	1.8×1.8	0.0	15.1	84.9		good		No Harm	

^{a)}Greater than 90% probability that reinforcing steel corrosion is occurring in that area at the time of measurement

^{b)}Corrosion activity of the reinforcing steel in that area is uncertain

^{c)}90% probability that no reinforcing steel corrosion is occurring in that area at the time of measurement(10% risk of corrosion)

Table 5 Evaluation Results on Concrete Decks by Various Survey of Bridge 2

Location	Visual Inspection				GPR										
	Survey Area (m ²)	Damage		Survey Area (m ²)	Clear Cover Depth of Top Rebar(below 5.2cm)			Total Attenuation (below -24dB)			Normalized Attenuation (below -3dB)				
		Area(m ²)	Ratio(%)	Rating	Area(m ²)	Area(m ²)	Ratio(%)	Rating	Area(m ²)	Ratio(%)	Rating	Area(m ²)	Ratio(%)	Rating	
Hanam	Span 2	336	2.35	0.70	b	271.8	88.7	32.6	e	28.9	10.6	d	19.87	7.31	c
	Span 3	336	65.89	19.61	d	271.8	103.2	38.0	e	74.4	27.4	e	60.61	22.30	e
	Span 4	336	16.83	5.01	c	271.8	11.7	4.3	c	210.3	77.4	e	60.43	22.23	e
	Span 5	336	8.85	2.63	c	271.8	15.2	5.6	c	219.9	80.9	e	48.27	17.76	d
	Total	1,344	93.92	6.99	c	1,087.2	218.8	20.1	e	533.5	49.1	e	189.18	17.40	d
Tong yeong	Span 2	336	2.95	0.88	b	274.5	23.7	8.6	c	10.3	3.7	c	23.15	8.43	c
	Span 3	336	0.33	0.10	b	274.5	26.8	9.8	c	12.0	4.4	c	11.23	4.09	c
	Span 4	336	5.73	1.71	b	274.5	29.1	10.6	d	11.4	4.1	c	21.20	7.72	c
	Span 5	336	8.68	2.58	c	274.5	45.7	16.6	d	6.6	2.4	c	23.71	8.64	c
	Total	1,344	17.69	1.32	b	1,098.0	125.3	11.4	d	40.2	3.7	c	79.29	7.22	c

지 않았던 하남방향 2경간과 통영방향 3,4경간에서는 자연전위 값이 -200 mV 이상인 비율이 80%이상으로 부식우려가 낮은 것으로 나타났다.

즉, 레이더파의 추가감쇠량은 상부철근의 부식환경과 밀접한 연관이 있으며, 이는 수분과 염분에 의해 감쇠상수가 커진다는 가설이 신뢰성 있음은 물론 상태평가방법으로도 충분히 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

4.3.4 상태등급의 산정

『시설물의 안전관리에 관한 특별법』에 따른 ‘안전점검 및 정밀안전진단 세부지침’(2003)에 의거, 기존의 조사법과 본 연구에서 제안한 방법에 의한 상태평가 결과를 Table 5에 비교하였다. 평가 결과, 육안점검에 의해서는 하남방향 3경간만을 보수가 시급한 d급으로 평가하였으나, 상부철근의 피복 콘크리트에 침투한 염화이온을 고려한 보정된 감쇠량으로 평가한 결과는 하남방향 3~5경간을 d,e급으로 평가하였으며 육안점검결과에 비해 손상비율이 전반적으로 높게 나타났다. 즉, 보정된 감쇠량은 육안으로는 알 수 없는 잠재적 손상가능성, 즉 철근의 부식과 연계한 염화이온 농도가 높은 곳을 찾는 데도 유용한 것으로 판단된다.

5. 결론 및 토의

본 연구에서는 차량탐재형 GPR을 이용한 일체식 콘크리트 교량 바닥판의 상태평가방법을 개선하고자, 콘크리트의 물성 변화에 따른 레이더 수신파의 감쇠특성을 고찰하고, 이를 실제 교량에 적용하여 기존 상태평가 방법과 비교평가하였다. 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 레이더파의 감쇠는 매질의 상대유전율과 전도도에 영향을 받고, 매질 내를 전파하는 투과깊이에 따라 감쇠량이 커지게 된다.
- 2) 건전한 콘크리트 교량 바닥판에서 레이더파의 감쇠는 반사체의 깊이(지연시간)에 따라 선형적으로 감소(기본감쇠)한다.
- 3) 손상된 콘크리트 교량 바닥판에서는 일체식 바닥판의 주손상원인인 콘크리트 내로 침투한 수분과 염소이온에 의해 감쇠상수가 커지게 되며 건전한 부위에 비해 상대적으로 큰 감쇠(추가감쇠)가 일어난다.
- 4) 따라서, 레이더 수신파의 입사파 대비 총감쇠량에서 기본감쇠량을 제거하면 손상영향에 따른 추가감쇠량이 남게 되고 이를 이용하면 일체식 콘크리트 바닥판의 상태평가에 유용할 것으로 판단된다.

- 5) 실제 일체식 콘크리트 교량 바닥판에 대한 시험적용 결과, 제안된 평가방법은 콘크리트가 약전도성인 경우 교면에 서부터 상부철근까지의 바닥판 콘크리트 상태를 신뢰성 있게 평가할 수 있으며, 특히, 일체식 바닥판의 주손상원인인 상부철근의 부식환경을 간접적으로 평가할 수 있는 것으로 판단된다.

본 연구는 제한된 현장조사결과를 기반으로 일체식(노출) 교량 바닥판의 콘크리트 상태를 레이더파의 감쇠와 연계하여 간접적으로 평가하는 방안을 제안한 것으로, 콘크리트의 수분 및 염소이온과 레이더파의 감쇠량과의 관계에 대한 실험적 연구와 더불어 폭넓은 현장적용을 통해 추가감쇠량에 대한 상태평가 기준 수립을 위한 연구가 지속되어야 할 것으로 판단된다.

References

- ASTM C 876 (2009), Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- ASTM D 6432 (2011), Standard Guide for using the Surface Ground Penetrating Radar Method for Subsurface Investigation, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- Park, J., Lee, S., Kim, J., Park, C., and Lee, D. (2011), The Prediction of Remaining Life of Concrete Bridge Decks using the Reliability Analysis, *International Journal of Highway Engineering*, Korea Society of Road Engineers, 13(4), 71-79.
- Parrillo, R., Roberts, R., and Haggan, A. (2006), Bridge Deck Condition Assessment using Ground Penetrating Radar, *Proceedings of the ECNDT*, Berlin, German, 2526, 112.
- Shu, J., Lee, I., and Rhee, J. (1998), Condition Evaluation of Concrete Bridge Decks, Highway Research Center, Korea Highway Corporation, Report No. 98-67-65, 13.
- Shu, J., Rhee, J., Jung, J., Lee, J., Choi, M., and Lee, J. (2013), A Study for Management Practice of Bridge Decks based on the Deterioration Factors, *Proceedings of the KCI Fall Conference*, Korea Concrete Institute, 25(2), 783-784.
- Shu, J., Rhee, J., Park, C., and Shin, J. (2005), Evaluation of Concrete Bridge Deck using GPR mounted on the Vehicle, *Journal of The Korea Institute for Structural Maintenance Inspection*, Korea Institute for Structural Maintenance Inspection, 9(3), 29-37.
- Shu, J., Rhee, J., Seo, S., and Shin, J. (2004), Condition Evaluation of Bare Concrete Bridge Decks, *A Journal of The Korea Institute for Structural Maintenance Inspection*, Korea Institute for Structural Maintenance Inspection, 8(3), 317-224.

Received : 03/15/2016

Revised : 04/28/2016

Accepted : 05/02/2016

요 지 : 전자기파가 콘크리트 교량 바닥판을 통과할 때 에너지 손실 메카니즘에 의해 신호의 감쇠가 발생하며, 이는 콘크리트의 상대유전율과 전도도, 그리고 지리적 산란 손실의 영향에 따른 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 건전한 콘크리트에 대해서는 레이더파의 감쇠가 상부철근의 깊이와 선형관계에 있다는 점에 착안하여, 일체식 콘크리트 교량 바닥판에서 상태평가 지표로서의 레이더파의 신호감쇠를 실 교량에 적용하여 그 유용성에 대해 검토하였다. 연구결과, 손상된 콘크리트 교량 바닥판에서는 건전한 상태에 비해 상대적으로 큰 감쇠가 일어나며, 레이더 수신파의 총감쇠량에서 반사체의 깊이에 대해 선형적 관계인 부분을 제거하고 난 보정감쇠량은 일체식 콘크리트 교량 바닥판의 상태평가에 유용한 것으로 나타났다. 실제 공용 중인 손상 교량 바닥판에 적용한 결과, 제안된 방법은 교면에서 상부철근까지의 콘크리트 상태를 신뢰성 있게 평가할 수 있으며, 특히, 일체식 바닥판의 주손상요인인 상부철근의 부식환경을 간접적으로 평가할 수 있는 것으로 판단된다.

핵심용어 : 레이더, 감쇠, 콘크리트, 바닥판, 상태평가
