

# 기상조건에 따른 손상 교량 바닥판의 상대유전율 변화 고찰

이지영<sup>1\*</sup>, 최재진<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국도로공사 도로교통연구원, <sup>2</sup>공주대학교 건설환경공학부

## Relative Permittivity of Damaged Concrete Bridge Deck According to the Weather Conditions : A Case Study

Ji-Young Rhee<sup>1\*</sup>, Jae-Jin Choi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Research Institute, Korea Expressway Corporation

<sup>2</sup>Department of Civil & Environmental Engineering, Kongju National University

**요약** 지하투과레이더(GPR)를 이용하여 아스팔트 포장에 있는 교량 바닥판의 상태를 평가할 때, 현재는 포장면에 접한 콘크리트의 상대유전율이 12이상일 때를 손상위험이 높은 곳으로 판단하고 있다. 그러나 콘크리트의 상대유전율은 공극률과 수분율에 따라 변화하는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 고속도로 상에 공용 중인 아스팔트 포장 교량 바닥판을 대상으로 다양한 시기에 걸쳐 GPR 조사를 실시하였으며 이로부터 손상평가 기준으로 활용되는 교량 바닥판 콘크리트의 상대유전율 변화에 대해 고찰을 실시하였다. 조사 결과, 손상이 발생되지 않은 경우 포장층 하면에 접한 바닥판 상면 콘크리트의 상대유전율은 보통 콘크리트의 상대유전율 범위로 정규분포에 가깝게 나타났다. 그러나, 열화 손상이 발생된 콘크리트 바닥판의 상대유전율은 조사가 이루어지는 시기와 기상조건의 영향을 받으며, 그 값은 우수의 유입 여부와 콘크리트의 손상 상태에 따라 변화할 가능성이 높은 것으로 나타났다. 콘크리트 교량 바닥판의 상태평가를 위해 GPR을 이용하는 경우, 그 조사는 우기 또는 비가 온 이후에 실시함으로써 손상범위를 폭넓게 확인하는 것이 가능하다고 판단된다.

**Abstract** Ground Penetrating Radar (GPR) was applied to an evaluation of the concrete condition of bridge decks with asphalt concrete. Deterioration was considered to have occurred when the relative permittivity of a concrete-faced asphalt concrete overlay showed more than 12. The relative permittivity of concrete varied considerably with the levels of porosity and water. In this study, GPR tests were carried out to determine the influence of weather and concrete condition on the relative permittivity for the research subject of an overlaid concrete bridge deck in public service. According to the test results, if bridge decks are in good condition, the relative permittivity of the top concrete of a bridge deck exhibited a normal distribution. After the deck concrete deteriorated, the relative permittivity varied with the amount of penetrated water according to the weather condition and deteriorated status of deck concrete.

**Keywords** : Bridge Deck, Evaluation, GPR, Relative Permittivity, Weather

### 1. 서론

지하투과레이더(Ground Penetrating Radar, GPR)는 다양한 주파수 대역의 레이더를 지반이나 구조물 내로 전파하고 내부에서 반사되는 신호를 분석하여 층리의 위치, 내부 매설물 등을 찾는 데 이용되는 비파괴시험법이다.

이 기술을 이용하면 육안으로 점검이 불가능한 내부의 넓은 범위를 빠르게 조사할 수 있으므로 최근 국내·외로 각광받고 있다.

국내에서는 1990년대를 전후로 GPR 장비가 도입되었으며, 교량 바닥판의 진단분야에서는 한국도로공사를 중심으로 연구개발이 이루어졌다[1,2]. 한국도로공사는

\*Corresponding Author : Ji-Young Rhee(Korea Expressway Corp.)  
Tel: +82-31-8098-6368 email: need@ex.co.kr

자체 개발한 기술을 이용하여 2010년부터 고속도로 교량 바닥판의 상태평가 업무에 적극 활용 중에 있으나 오랜 실무적용에도 불구하고 현행 교량 바닥판에 대한 상태평가 방법은 2000년에 개발한 ‘콘크리트의 상대유전율’ 기준을 그대로 적용 중에 있다.

교량 바닥판의 상태평가 인자로 활용되는 매질의 상대유전율은 콘크리트 내를 전파하는 레이더파의 전달속도, 감쇠, 반사위치(깊이) 등을 결정하는 주요인자이다. GPR을 이용하여 교량 바닥판의 상태평가 시 결과분석의 정확도를 높이기 위해서는 콘크리트 상대유전율의 특성에 대한 명확한 이해가 필요하다.

또한 최근의 보고[3,4]에서는 공용 중인 교량 바닥판을 대상으로 GPR 조사를 실시하였을 때 콘크리트의 상대유전율이 내부 함수비에 따라 증감하며, 아스팔트 포장에 있는 교량 바닥판의 손상 기구와 환경을 고려하면 현행 임계상대유전율 값에 대해 재고가 필요한 것으로 나타났다.

본 논문에서는 기존의 연구결과에 의거하여, 공용 중인 포장 교량 바닥판을 대상으로 교량의 상태 및 조사 시기에 따른 바닥판 콘크리트의 상대유전율 변화를 고찰하였다.

## 2. 콘크리트의 상대유전율에 대한 고찰

다양한 매질의 종류와 상태에 따른 상대유전율 표준값은 ASTM D 6432에 제시되어 있다[5]. 일반적으로 고체물질의 상대유전율은 주재료에 따라 대략 3~8의 범주에 있으며, 기체인 공기의 상대유전율은 1로 가장 작고, 액체인 물의 상대유전율은 81로 구성 요소 중에서 가장 큰 값이다. 콘크리트의 경우 표준값은 5~10으로 나타나 있다.

국내 교량 바닥판에 대한 상대유전율 평가 기준은 한국도로공사에서 수립하여 보고하였다[1]. 보고서에서는 아스팔트 포장을 갖는 교량 바닥판의 상태가 양호한 것과 노후된 교량의 GPR 신호를 비교하여 포장 하부에 있는 바닥판 콘크리트의 상대유전율이 12 이하인 경우에는 바닥판을 ‘건전’, 12 이상인 경우에는 ‘불량’한 것으로 설정하였다.

서진원 등(2009)은 고속도로 교량 바닥판에 대한 노면촬영, GPR, 코어 조사 등을 실시하고 콘크리트의 상

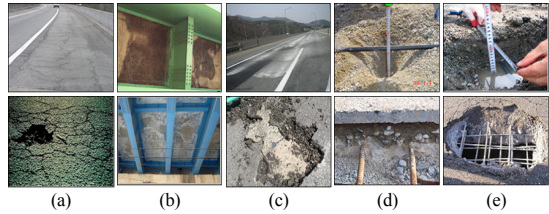


Fig. 1. Deterioration procedures of concrete decks at recent times[2]

(a)Stage 1 : Initial defect occurs in a overlay (b)Stage 2 : Harmful chemicals and water penetrate (c)Stage 3 : Deteriorated cement paste leaks on the overlay (d)Stage 4 : Internal deterioration progresses (e)Stage 5 : Concrete bridge deck punches out

태와 교통량 및 동결기 제설환경(강설일, 강설량, 제설염 화물 살포량 등)과의 상관성 분석을 통해 2000년대에 발생하고 있는 국내 콘크리트 교량 바닥판의 주손상원인은 ‘염소이온을 함유한 수분이 유입된 상태에서 동결융해의 반복 작용에 의해 발생’된 것으로 정의하고 손상단계를 Fig. 1과 같이 제시하였다[6].

이지영 등(2016a)은 매질의 상대유전율을 공극율과 함수율의 함수로 정의하고 국내 교량 바닥판의 설계공기량과 우리나라의 연평균 상대습도를 고려하여 상대유전율의 하한값으로 5.7을 제시하였다[3].

이지영 등(2016b)은 실제 공용 중인 일체식 (노출) 교량 바닥판 58개소를 대상으로 콘크리트의 상대유전율을 측정하여 공기 중에 노출되어 있는 콘크리트는 대기의 상대습도에 따라 계절별로 증감하는 것을 밝히고 상대습도와 콘크리트의 상대유전율에 대한 상관식을 제안하였다[4]. 이때, 측정된 콘크리트의 상대유전율은 5.7~12.0 범위 내에 있었다.

아스팔트 교면포장이 있는 콘크리트 교량 바닥판에 손상이 발생하는 경우에는, 먼저 포장 내부 바닥판 상면 콘크리트에 수분이 다량 유입되어 상대유전율 값이 크게 되므로 현행 평가기준이 적절하다. 그러나, 균열, 재료분리 등의 손상이 발생된 콘크리트는 공극율이 커지는 경향이 있으므로 상대유전율 값이 작아져 현행 평가기준이 부적절할 것으로 예상된다.

국내 공용 중인 바닥판 콘크리트의 상대유전율 표준 범위는 5.7~12.0에 있을 것으로 판단되며, 손상부를 통한 수분의 유입과 유출은 바닥판 콘크리트의 상대유전율 변화를 일으키고 이는 교량 바닥판의 손상단계와 더불어 다양한 기상조건에 따라 달라질 것으로 예상된다.

### 3. 포장 교량 바닥판의 상대유전율

#### 3.1 대상교량 및 조사방법

대상교량은 고속도로 상에 공용 중인 교량으로 세부 현황은 Table 1과 같다. 현장조사는 2004년, 2011년, 2012년 및 2013년에 이루어졌으며, 조사한 날을 기준으로 교량의 공용연수는 11년, 18년, 19년과 20년이였다. 조사장비는 GSSI 사의 Sir 시리즈와 중심주파수 1GHz 인 공기접촉식(air-coupled) 안테나를 사용하였다.(Fig. 2)

Table 1. Details of the surveyed bridge

Route (expressway)	Name	Super structure	Completion year
Yeongdong	JJ	PSCB <sup>1)</sup>	1994
Location	Length (m)	No. of lanes	Strength (MPa)
Wonju	780	2	40

1) Prestressed Concrete Box Girder



Fig. 2. GPR system used for bridge deck survey

샘플링은 교량의 갓길을 포함하여 각 차로별로 80 ~ 120km/hr로 주행하면서 4채널씩 조사를 실시하였으며 교량주행방향으로 10~12scans/m로 데이터를 수집하였다. 분석에 사용된 소프트웨어는 장비제조사에서 제공한 Radan 시리즈이다.

#### 3.2 기상조건

Table 2는 조사 시기별 기상관측데이터를 정리한 것이다. 먼저, 2004년, 2011년 및 2012년의 조사시기는 6~8월로 연평균 기온과 상대습도가 높은 기간이다. 표를 살펴보면, 2004년과 2011년은 교량이 위치한 원주 지역에 7일간 많은 비가 내린 후에 조사가 이루어졌다. 2012년은 초여름에 조사가 이루어졌으며 조사 3일 전에 소량

Table 2. Weather Condition

Survey day	R.H.(%)	Weather	Note
July 20, 2004	76	Summer (monsoon)	Rain (during 7 days)
August 1, 2011	86	Summer (monsoon)	Rain (during 7 days)
June 15, 2012	66	Summer	a small amount of rain (3 days ago)
February 13, 2013	48	Winter	a small amount of snow (3 days ago)

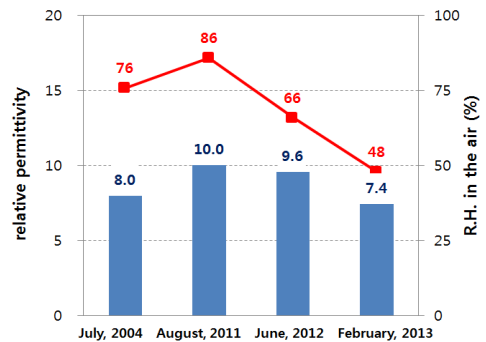


Fig. 3. R.H. in the air and relative permittivity of concrete of bridge deck

의 비가 내렸다. 2013년은 춥고 건조한 겨울에 조사가 이루어졌으며 조사 3일 전에 소량의 눈이 내렸다.

#### 3.3 조사결과

##### 3.3.1 교량 바닥판의 손상 추이

본 교량에 최초로 GPR 조사가 실시된 2004년도에는 부분적인 패칭 등을 제외하고 전반적으로 양호한 상태에 있었다. 2010년 이후로 교량 바닥판 하면에 관통균열이 관찰되고 교면에 백태가 나타나기 시작하여 내부 바닥판 콘크리트의 손상이 우려되었다.

##### 3.3.2 평균 상대유전율

Fig. 3은 조사시기별 대기의 상대습도와 바닥판 콘크리트의 상대유전율 관계를 도식한 것이다. 시기별 상대유전율 값은 조사순서에 따라 각각 8.0, 10.0, 9.6, 7.4이고, 관측된 대기의 상대습도는 76%, 86%, 66%, 48%로 나타났다. 이는 기존의 연구결과[4]와 일치하는 것으로 콘크리트의 상대유전율은 상대습도에 따라 대체로 증감하는 경향을 보이고 있어 상대습도는 내부 바닥판의 상대유전율에 어느 정도 영향을 주는 것을 알 수 있었다.

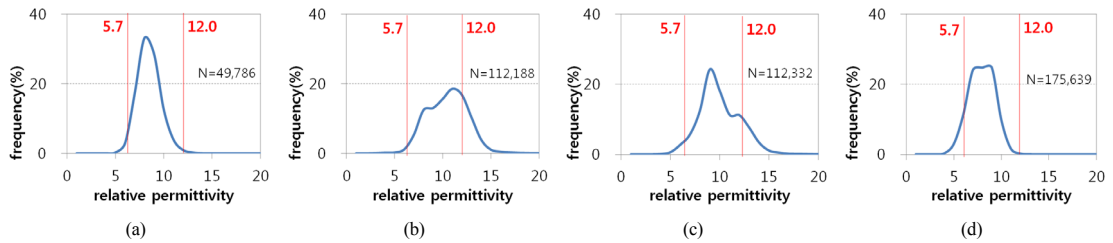


Fig. 4. Distribution of relative permittivity of concrete of bridge deck by survey time  
(a)July, 2004 (b)August, 2011 (c)June, 2012 (d)February, 2013

### 3.3.3 상대유전율 분포

Fig. 4는 조사 시기에 따른 콘크리트의 상대유전율 분포를 각 상대유전율의 계급값에 대한 빈도율로 나타낸 것이다.

교량 바닥판이 대체로 양호한 상태였던 2004년도에는, Fig. 4 (a)와 같이, 콘크리트 상대유전율이 5~11 범위로 표준 콘크리트의 상대유전율 범위에서 정규분포에 가까운 모습을 보이고 있으며 분산도 작게 나타났다.

교량 바닥판에 손상이 나타나고 비가 온 이후에 조사가 실시된 2011년과 2012년에는, Fig. 4 (b)와 (c)에 나타난 바와 같이, 상대유전율 분포가 2004년도에 비해 전체적으로 값이 큰 오른쪽으로 중심이 이동되었으며 분산은 더 크게 나타났다. 특히 기존 손상평가 기준인 임계값 12이상으로 높게 나타나는 부분이 많아진 것을 알 수 있다. 두 기간의 결과를 비교하면, 상대유전율은 5~15로 분포 범위는 유사하였지만 우기인 8월에 조사된 2011년의 결과가 우기가 아닌 6월에 조사된 2012년 결과에 비해 상대유전율이 12이상으로 크게 나타난 범위가 더 많은 것을 알 수 있다.

건기인 겨울에 조사가 이루어진 2013년도는, Fig. 4 (d)와 같이, 2004년도와 비교할 때 분포도의 중심이 값이 작은 왼쪽으로 이동하였다. 교량 바닥판의 상태가 전년인 2012년과 크게 다르지 않을 것으로 가정하면, 기존의 손상임계값인 12이상으로 평가되는 범위가 거의 없어 바닥판의 상태를 건전한 것으로 평가하는 오류가 발생한다. 이에 반해, 새롭게 제안된 임계상대유전율의 하한값인 5.7을 적용하면 공극율이 높은 부위를 손상으로 평가하는 것이 가능하였다.

콘크리트의 상대유전율 표준범위에 비하여 물의 상대유전율은 81로 상당히 큰 반면 공기는 1로 상대적으로 차이가 작다. 이러한 이유로 건전한 상태의 조사결과에 비해 우기에 조사된 결과가 평균값과 분포범위에서 차이

가 크게 발생한 반면 건기에 조사된 결과의 중심이동 범위와 분산이 작게 나타난 것으로 판단된다.

Fig. 5는 조사결과를 평면도로 나타낸 것으로 X축은 교량연장, Y축은 교폭을 의미하고, 0점은 교량의 시점과 중앙분리대 위치를 나타낸 것이다. 평면도에서 노란실선은 차로와 경간의 구분선이며, 임계상대유전율은 5.7과 12.0을 적용하였다.

교량 바닥판의 상태가 비교적 양호했던 2004년의 경우, Fig. 5 (a)와 같이, 교면포장에 손상이 발생한 차로의 일부 구간을 제외하고 전반적으로 표준 콘크리트의 상대유전율 분포를 보이고 있었다. 조사시기는 장마기간으로 조사일 이전에 많은 양의 비가 내렸으나 교면포장과 내부 방수층의 기능이 양호하여 바닥판 콘크리트로 수분이 침투하지 못하였으며 결과적으로 양호한 콘크리트의 상대유전율 분포를 보인 것으로 판단된다.

교량 바닥판에 손상이 발생하고 비가 온 이후에 조사가 이루어진 Fig. 5 (b) 2011년과 (c) 2012년의 조사결과를 비교하면 콘크리트의 상대유전율 분포에서 큰 차이를 나타냈다. 조사시기가 장마기간으로 많은 양의 비가 내려 수분 유입량이 많았던 2011년에 비해 적은 양의 비가 내려 수분 유입량이 상대적으로 적었던 2012년의 조사 결과에서는 기존의 손상 임계상대유전율 값인 12이상으로 평가되는 면적이 전년도에 비해 오히려 감소한 것으로 나타났다. 따라서, 교량 바닥판에 손상이 발생되면 조사가 이루어진 시기와 유입된 수분량의 차이에 의해 콘크리트의 상대유전율 분포가 크게 달라지며 이로 인해 손상면적의 산정에 큰 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 5 (d)는 2013년도 겨울에 조사가 이루어진 결과로 건조한 시기에 조사가 이루어져 콘크리트의 상대유전율이 작은 부위를 찾아낼 수 있었다. 우기인 2011년 및 2012년 결과와 비교하면, 주행차로 차륜부는 우기에는

→ to Gangneung

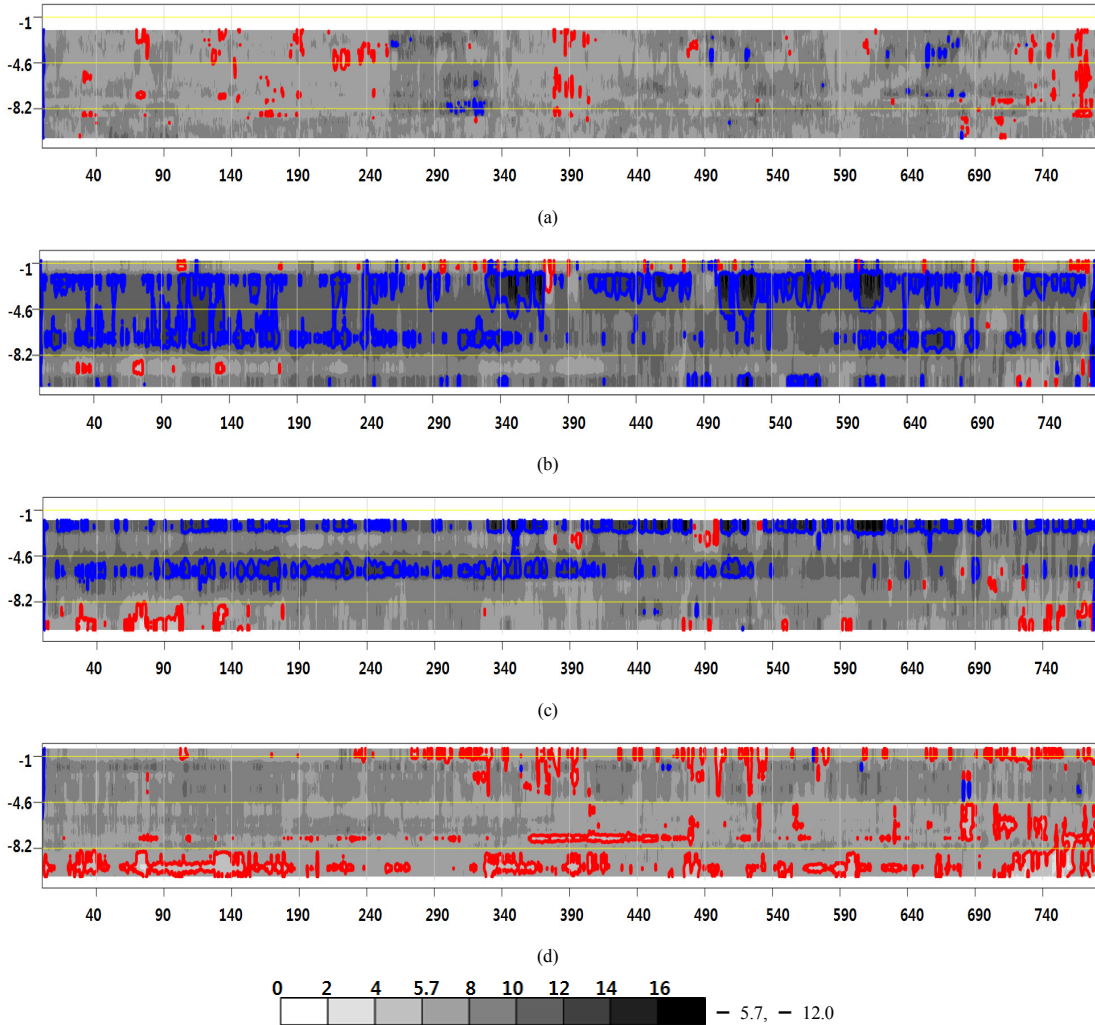


Fig. 5. Plan view of relative permittivity of concrete of bridge deck by survey time  
(a)July, 2004 (b)August, 2011 (c)June, 2012 (d)February, 2013

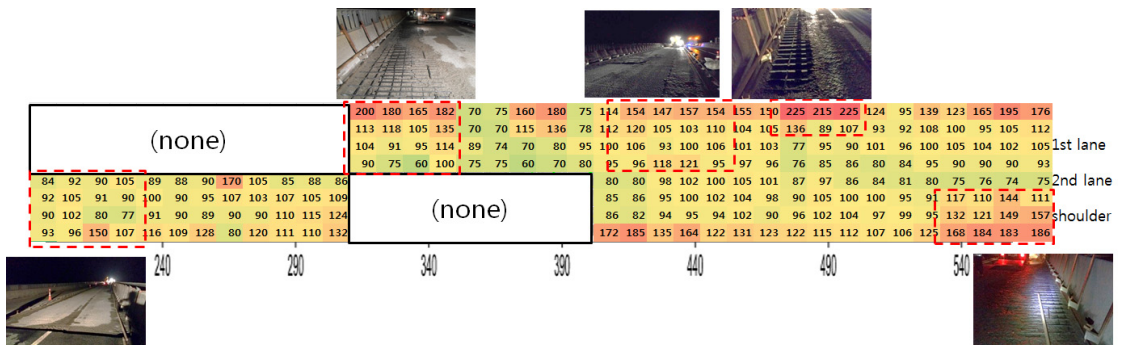


Fig. 6. Deteriorated depth on the surveyed bridge deck



상대유전율이 매우 크게 나타났으나 건기에는 표준값에 근사하거나 오히려 작게 나타났다. 갓길부의 경우 상대유전율이 대체로 작게 나타났다. 우기에 비해 건기에 조사한 결과에서 손상으로 평가되는 부위가 현저하게 감소하여 손상면적의 산정에 오류가 발생할 우려가 높았다.

### 3.3.4 콘크리트 열화상태 비교 평가

Fig. 6은 2013년 교면개량을 위해 연장 190~590m 구간에 대해 교면포장과 바닥판 콘크리트의 열화부를 제거한 후 교면에서부터 측정된 깊이를 나타낸 것이다. 열화 깊이는 60~225mm의 범위로 평균 108mm, 표준편차 31mm로 나타났다. 포장층의 평균두께 90mm를 제외하면 콘크리트 바닥판의 평균 열화깊이는 18mm였다.

실제 교량의 손상유형과 상대유전율을 연계하여 살펴보면, 상대유전율이 높게 나타난 부위는 교면포장에 균열 등의 손상이 발생되어 표면으로부터 우수가 유입되는 차륜부를 중심으로 나타났으며 개삭조사 결과 표면열화가 광범위하게 발생하였다. 상대유전율이 작게 나타난 중분대와 갓길은 난간 방호벽의 시공조인트가 위치하고 있으며 동절기 동안 눈이 지속적으로 쌓인 곳으로 개삭조사 결과 바닥판 콘크리트의 재료분리는 물론 부분적으로 철근깊이 이상으로 열화가 진행된 것으로 나타났다. 따라서, 상대유전율이 높은 곳은 외부로부터의 우수가 유입되는 부위로 판단할 수 있으며 낮은 곳은 재료분리 등 열화가 진행되고 있는 곳으로 판단할 수 있다.

전반적으로 손상면적은 우기에 조사하여 손상면적이 가장 크게 평가된 2011년과 근사하였다.

## 4. 결론

본 연구에서는 고속도로 상에 공용 중인 포장 교량 바닥판을 대상으로 다양한 상태와 시기별로 GPR 조사를 실시하여 손상평가 기준으로 활용되는 바닥판 콘크리트의 상대유전율 변화에 대해 고찰을 실시하였다. 조사결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 교량 바닥판에 손상이 발생하지 않은 경우, 콘크리트의 상대유전율은 표준범위로 정규분포에 가깝게 나타났다.
- (2) 열화손상이 발생된 콘크리트 바닥판의 상대유전

율은 조사가 이루어지는 시기와 기상조건의 영향을 받으며, 그 값은 우수의 유입 여부에 따라 12보다 크거나 또는 5.7보다 작게 되는 경향을 나타냈다.

- (3) 콘크리트 교량 바닥판의 상태평가를 위해 GPR을 이용하는 경우, 그 조사는 우기 또는 비가 온 이후에 실시함으로써 손상범위를 폭넓게 확인하는 것이 가능하다고 판단된다.

교면포장을 갖는 콘크리트 교량 바닥판의 상태평가를 위해 GPR을 이용하는 경우, 콘크리트 바닥판의 정밀한 손상물량 산정을 위해서는 손상면적 산정기준으로서의 상대유전율에 대해 기상조건을 연계한 추가 검토 필요하며, 더불어 최적의 조사시기 선정 및 손상깊이평가 방법에 대한 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다. 또한, 금번 연구에서는 수분의 침투경로가 되는 교면포장층에 대한 검토는 생략되었기 때문에 향후 포장층의 상태와 연계하여 검토할 필요가 있는 것으로 판단된다.

## References

- [1] Shu, J., Lee, I., Rhee, J., *Condition Evaluation of Concrete Bridge Decks*. Highway Research Center, Korea Highway Corporation, Report No. 98-67-65, 1998.
- [2] Suh, J., Rhee, J., Lee, I., "Condition Evaluation of Concrete Bridge Decks by using GPR", Road Engineering Association of Asia and Australasia Conference, 10th, Tokyo, Japan, 2000.
- [3] Rhee, J., Choi, J., Kim, H., "A Study on the Relative Permittivity of Concrete for the Bridge Deck Condition Evaluation", 2016 Spring Conference of Korean Concrete Institute, 28(1), pp.177-178, 2016
- [4] Rhee, J., Choi, J., Kim, H., Kee, S., "The Effect of Relative Humidity of Atmosphere on the Dielectric Constant of Bare Deck Bridge Concrete", 2016b Conference of Korean Society of Civil Engineers, 2016, pp.199-200.
- [5] ASTM D 6432, *Standard Guide for using the Surface Ground Penetrating Radar Method for Subsurface Investigation*. ASTM International, American Society for Testing and Materials, PA, USA, 2011.
- [6] Suh, J., Rhee, J., *Prevention Manual for Deterioration of Bridge Deck*. Korea Expressway Corporation Research Institute, 2009.

---

**이 지 영(Ji-Young Rhee)**

[정회원]



- 1997년 2월 : 국민대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2016년 8월 : 공주대학교 대학원 건설환경공학과 (박사과정 수료)
- 1997년 1월 ~ 현재 : 한국도로공사 책임연구원

<관심분야>  
시설진단, 비파괴기술

---

**최 재 진(Jae-Jin Choi)**

[정회원]



- 1984년 2월 : 한양대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 1987년 8월 : 한양대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 1992년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 건설환경공학부 교수

<관심분야>  
시멘트, 콘크리트