

NDT 기반 교면포장 및 바닥판 열화손상 점검기술 동향분석

김기덕*, 송재준*

*한국건설기술연구원 구조연구본부

e-mail:paestum3@kict.re.kr

Trends in NDT-Based Inspection Technologies for Pavement and Deterioration of Bridge Decks

Ki-Deok Kim*, Jae-Joon Song*

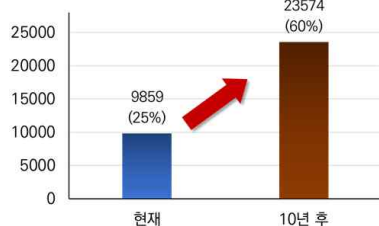
*Dept. of Structural Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

요약

국내 교량의 노후화가 가속화됨에 따라 교면포장 및 바닥판의 열화 손상은 교량 안전성에 중대한 위협으로 부각되고 있다. 이에 본 연구에서는 차량탐재형 GPR, 열화상 카메라, 초음파 및 충격파 기반 등 주요 비파괴검사(NDT) 기술의 동향을 종합적으로 고찰하였다. 본 연구는 향후 국내 교면포장 및 바닥판 열화 손상 점검 NDT 조사체계 구축에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

1. 서론

국내 교량은 현재 급격히 노후화되고 있다. 국토교통부 발행 ‘2025년 도로 교량 및 터널 현황조사’에서 제공되는 국내 교량 준공연도 분석 결과, 공용년수가 30년 이상 교량은 현재 9,859 개소로 전체에 약 25%를 차지하고 있으며, 10년 후에는 23,574 개소로 약 60%를 초과할 것으로 전망된다.



[그림 1] 공용 30년 이상 국내 교량 개소 수

특히, 교량의 상부구조 주요부재인 교면포장과 바닥판은 차륜 하중, 강우, 강설, 제설염화물, 온도차 등 열악한 외부환경에 직접적으로 노출되어 노후화가 타 부재에 비해 가속화되고 있다. ‘24년 기준 공용 30년 이상 일반국도 교량의 부재별 d등급 비율을 분석한 결과 교면포장, 바닥판은 각각 11.6%, 8.8%로 나타났으나, 거더, 교대/교각의 경우 1.5%, 3.9% 수준에 머물러 상부구조의 노후화가 상대적으로 빠르다는 사실을 확인할 수 있었다. 실

제로 지난 2023년 5월 분당 정자교 붕괴사고 및 인명피해 사례와 바닥판 편칭파괴 등의 사고가 이러한 사실을 뒷받침하고 있다.

교량의 교면포장 및 바닥판 점검은 일반적으로 육안 점검 방식에 의존해 왔다. 교면포장과 바닥판 하면에 백태, 관통 균열, 부식과 같은 손상이 직접적으로 확인되는 경우 바닥판 콘크리트의 열화가 이미 상당히 진행된 상태임을 의미한다. 이러한 심각한 열화 손상은 편칭 파괴나 교량 붕괴와 같은 구조적 위험으로 이어질 수 있으며, 교량 이용자의 안전을 심각하게 위협한다. 또한 이 단계에서는 적절한 유지관리의 시점을 놓치게 되어 전단면 복구나 개축 등 고비용 공법을 적용해야만 구조 성능을 회복할 수 있다. 따라서 교량을 장기간 안전하게 사용하기 위해서는 바닥판 열화 손상을 조기에 진단하고 선제적 유지관리를 적용하는 것이 중요하다. 그러나 교량은 바닥판 상면에 아스팔트 또는 콘크리트 교면포장이 시공되기 때문에 바닥판 내부의 열화 손상 상태를 조기에 검출하기 매우 어렵다.

이러한 한계로 인해 국내외 다양한 기관에서는 교량 바닥판 상면의 열화를 정확하게 평가하기 위한 다양한 비파괴 검사기술(Non-Destructive Testing, 이하 NDT)의 도입을 고려하고 있다. 따라서 교면포장 및 바닥판 열화도 분석을 위한 NDT 기술 동향을 종합적으로 고찰하는 것은 매우 중요한 과제라 할 수 있다. 교량 점검 관련 최신 NDT 기술의 연구 현황을 분석하고, 각 기법의 장단점 및 활용도를 비교함으로써 교량 NDT 기술적용 방향성을 설정해야 할 시점이다. 이에 본 연구에서는 교면포장 및 바닥판을 대상 NDT 기술동향을 분석하고자 한다.

2. NDT 기술현황 분석

2.1 개요

교량의 교면포장 및 바닥판 상면 NDT 조사는 교통흐름을 크게 방해하지 않는 차량형 점검기술과 교통을 완전히 통제하고 휴대형 장비를 통해 상세히 점검하는 기술로 구분된다. 차량형 교량 점검 NDT 기술은 전자기파를 활용하는 차량형 지표투과레이더(Ground Penetrating Radar, 이하 GPR) 조사와 적외선 온도데이터를 활용하는 열화상 카메라로 구성되며, 휴대형 교량 점검 NDT 기술은 초음파, 충격파, 음파 등을 활용한 기술로 구성된다.

2.2 차량탑재형 교량점검 NDT기술 현황

2.2.1 차량탑재형 GPR

GPR은 전자기파를 시설물에 투과하고 되돌아온 반사파 특성을 이용하는 장비이다. ASTM D6087 등에서 명시한 바와 같이 반사파 감쇠, 층별 상대유전율을 통해 교면포장 및 바닥판 열화손상을 점검할 수 있다. 차량탑재형 GPR이란 송수신 안테나를 차량에 탑재하여 별도의 교통차단 없이 교량을 조사할 수 있는 기술을 말한다. 다음 [표 1]은 국내외에서 교면포장 및 바닥판 NDT점검에 활용 중인 차량형 GPR 기술과 특징에 대해 정리하였다.

[표 1] 교량점검용 차량탑재형 GPR

장비명	장비전경	제조국	특징
RoadScan30		미국	채널 : Single 형식 : Air-coupled 안테나 : Horn 주파수 : Impulse 대역 : 1, 2GHz 조사속도 : 60km/h 이상
IRIS		미국	채널 : Single 형식 : Air-coupled 안테나 : Horn 주파수 : Impulse 대역 : 0.5 - 2.5GHz 조사속도 : 최대 100km/h
RIS Hi-Pave		이탈리아	채널 : Single 형식 : Air-coupled 안테나 : Horn 주파수 : Impulse 대역 : 1, 2GHz 조사속도 : 최대 130km/h
RIS Hi-BrigHT		이탈리아	채널 : Multi(3D) 형식 : Ground-coupled 안테나 : 16ch 주파수 : Impulse 대역 : 2GHz 조사속도 : 최대 6.3km/h

장비명	장비전경	제조국	특징
AIR		노르웨이	채널 : Multi(3D) 형식 : Air-coupled 안테나 : 12~36ch 주파수 : 가변(SFCW) 대역 : 0.1~4.5GHz 조사속도 : 50km/h 이상
GROUND		노르웨이	채널 : Multi(3D) 형식 : Ground-coupled 안테나 : 8~28ch 주파수 : 가변(SFCW) 대역 : 0.03~4.5GHz 조사속도 : 20km/h 미만
KERBEROS™		호주	채널 : Multi(3D) 형식 : Ground-coupled 안테나 : 30ch 주파수 : 가변(NM) 대역 : 0.1~4.0GHz 조사속도 : 최대 100km/h

교량의 교면포장 및 바닥판 점검에 활용할 수 있는 차량탑재형 GPR의 공통적 특징은 안테나 형식과 개수와 관계없이 1GHz 이상의 주파수대역을 적용할 수 있어야 한다는 점을 꼽을 수 있다. 해당 주파수대역 미만의 GPR의 경우 해상도가 낮아 교면포장, 바닥판, 상부철근층을 영상에서 구분하기 어려워 열화손상 점검이 어렵다.

2.2.2 차량탑재형 열화상 카메라

열화상 카메라 기술은 교면포장 적외선 영상으로 분석된 온도 데이터로 바닥판의 열화손상을 점검하는 기술이다. ASTM D4788에 명시된 바와 같이 건전부와 열화손상부의 온도차를 분석하여 바닥판의 박리 위치를 찾는 데 활용된다. 교면포장 및 바닥판 열화손상 탐지 기술을 위한 열화상 카메라는 [표 2]와 같이 특정 회사의 제품군이 지배적으로 활용되고 있다. IR 해상도, 온도 검출 감도(Noise Equivalent Temperature Difference, 이하 NETD)가 중요한 기술 성능 지표로써 고려된다.

[표 2] 교량점검용 차량탑재가능 열화상 카메라

장비명	장비전경	제조국	특징
T640		스웨덴	IR 해상도 : 640x480 NETD : <35mK 온도범위 : -40 to 2000℃ 영상주파수 : 30Hz
S60		스웨덴	IR 해상도 : 640x480 NETD : <60mK 온도범위 : -40 to 120℃ 영상주파수 : 60Hz
SC5600		스웨덴	IR 해상도 : 640x512 NETD : <25mK 온도범위 : -20 to 55℃ 영상주파수 : 100Hz
A6701		스웨덴	IR 해상도 : 640x512 NETD : <20mK 온도범위 : -20 to 350℃ 영상주파수 : 60Hz

교량의 교면포장 및 바닥판 점검을 위한 차량탑재형 열화상 카메라 기술 연구 사례를 검토한 결과 사용된 카메라의 NETD 성능이 20~60mK 사이로 나타났다. 그 이상의 NETD를 갖는 장비의 경우 감도가 부족하여 0.1~0.2℃의 미세한 온도차가 발생하는 얇은 박리는 탐지가 어렵다. 열화상 카메라 조사는 저녁에 일몰 후 몇 시간이 지나 주변 온도가 떨어지고 콘크리트 내부에서 열이 외부로 흐를 때 온도 차이를 관찰하는 것이 가장 효과적인 것으로 보고되었다.

2.3 휴대형 교량점검 NDT기술 현황

2.3.1 초음파 기반 NDT기술

초음파를 통한 교면포장 및 바닥판 열화상 평가 기술은 ASTM 기준은 없으나 FHWA의 Bridge Inspector's Reference Manual(2022)에 UPV(Ultrasonic Pulse Velocity), UPE(Ultrapulse Pulse Echo), USW(Ultrasonic Surface Waves) 등 초음파 기술이 제시되어 있다.

여기서, USW는 초음파 발생원에서 일정 거리 떨어진 수신 센서로 파의 전달 속도를 측정하여 바닥판 강도저하를 평가하는 방법이나 1점 측정 방식으로 현장 적용성이 매우 부족하다. UPV는 바닥판 상면에 초음파 발생기를 놓고, 하면에 수신기를 달아 측정해야 하는 방식이기 때문에 바닥판 점검용으로 활용이 어렵다. UPE는 바닥판 상면에서 센서를 접촉하여 초음파를 발생시키고 내부 계면에서 반사되는 초음파 신호를 동일 센서에서 수신하는 방식이기 때문에 적용성이 좋아 현장에서 주로 사용된다. 이에 따라, [표 3]에는 교면포장 및 바닥판 연구 및 실제 점검에 활용되는 UPE 적용장비 및 사양에 대해 정리하였다.

[표 3] 교량점검용 휴대형 UPE 기술

장비명	장비전경	제조국	특징
Pundit PD8000 등 Seires		스위스	채널 : Multi(3D) 안테나 : 3x8 Array 대역 : 20~80kHz 방식 : UPE
A1040 MIRA		독일	채널 : Multi(3D) 안테나 : 4x12 Array 대역 : 25~85kHz 방식 : UPE

2.3.2 충격과 기반 NDT기술

충격과 기반 NDT 기술은 대표적으로 충격반향법 (Impact-Echo, 이하 IE)이 있다. ASTM C1383 기준에서 명시한 바와 같이 P파의 속도를 측정하여 교면포장 및 바닥판의 두께, 균열성, 공극 또는 박리 의심구간을 판별한다. 상기 기준에 따르면 IE는 노출 콘크리트 포장에 적합하고 아스팔트 또는 콘크리트 교면포장이 시공된 바닥판의 경우 부적합하다고 명시하고 있다. 그러나 최근에도 다양한 연구에서 교면포장이 있는 교량에 대한 적용 연구가 수행되고 있다. 기본적으로 1점 측정 방식의 제품이 다수지만 물

리 형태로 충격원과 계측기를 구성하여 이동식으로 IE를 적용하는 연구들이 수행되고 있다. [표 4]에 IE 적용장비 및 사양에 대해 정리하였다.

[표 4] 교량점검용 휴대형 IE 기술

장비명	장비전경	제조국	특징
Pundit PI8000		스위스	방식 : 1점 측정방식 주파수범위 : > 35kHz 공진주파수 : > 50kHz
CTG-2		미국	방식 : 1점 측정방식 주파수 해상도 : 10Hz
FPrimeC Impact-Echo		캐나다	방식 : 1점 측정방식 주파수범위 : ~ 25kHz
Impact-Echo Scanning Device		독일	방식 : 3점 이동식 물리형 측정방식(연구장비)
Olson IE/SASW Scanning System		미국	방식 : 3점 차량탑재형 측정방식(연구장비)

3. NDT 기술성능 및 적용성 비교

한국도로공사의 교량 보수·보강 장기공용성 구축을 위한 기획연구(2024)에서는 다양한 교량 NDT 기술에 대한 적용성을 검토하고 기술별로 결함 판별 가능 요소를 정리하였다. [표 5]에는 상기 연구 중 GPR, 열화상(Infrared Thermography, IT), 초음파, 충격과 NDT기술에 대한 내용을 발췌하였다.

[표 5] NDT 판별요소(한국도로공사, 2024)

NDT	균열	박리	공극	철근부식
GPR	—	○	—	○
IT	—	○	○	—
UPE	○	○	○	—
IE	○	○	○	—

상기 연구에 따르면, IE기법은 균열, 공극 등의 결함 위치를 정확하게 식별할 수 있으나, 복잡한 주파수 분석이 필요하고, 넓은 면적을 검사하는데 장시간이 소요된다. UPE는 결함 위치, 깊은 결함까지 분석 가능하나, 불명확한 포장 계면에서는 해석이 어렵다. 열화상 기법은 전체적 결함 위치를 빠르게 파악할 수 있으나 결함 성질 파악이 어렵다. GPR은 철근 위치, 공극 등 깊은 결함까지 검사가 가능하나 해석이 복잡하며, 촘촘한 철근 하부의 데이터 분석이 어렵다.

TRB의 Nondestructive Testing to Identify Concrete Bridge Deck Deterioration(2013) 연구보고서에서는 교면포

장 및 바닥판의 결합 종류별로 NDT기술 활용성을 점수로 나타내고, 기술별 Overall Value와 순위를 비교하였다. [표 6]에는 상기 연구 중 GPR, 열화상, 초음파, 충격과 NDT기술에 대한 내용을 발췌하였다.

[표 6] NDT 기술가치와 등급순위(TRB, 2013)

NDT	박리	부식	균열	열화	Overall Value	Ranking
IE	4.7	1.0	2.5	3.1	3.0	1
UPE	3.6	1.0	2.6	3.4	2.6	1
GPR	3.0	1.0	1.0	3.1	2.1	2
IT	3.2	1.0	0.0	1.0	1.8	3
육안점검	1.0	1.0	3.7	1.0	1.3	3

상기 연구에서는 콘크리트 교량에 대한 NDT기술 성능 비교결과로 초음파, 충격과 NDT기술에 대해서 가장 높은 기술가치 등급을 부여하였고, GPR, 열화상 기술 순으로 순위를 부여하였다. 그러나 충격과 NDT기술인 IE의 경우, 아스팔트 교면포장 및 바닥판에 적용하기 위해서는 노면 온도가 충분히 낮아 포장이 점탄성 거동을 하지 않아야 한다.

FHWA Nondestructive Evaluation of Concrete Bridge Decks with Overlays(2021) 연구에서는 열화손상을 모사한 아스팔트 및 콘크리트 교량 시험체에 대해 다양한 NDT기술을 적용하고 성능을 비교하였다. [표 7]에는 상기 연구 중 GPR, 열화상, 초음파, 충격과 NDT기술에 대한 분석 결과를 발췌하였다.

[표 7] NDT 기술별 손상 검출 성능 비교(FHWA, 2021)

NDT	아스팔트 교면포장						
	들뜸	얕은 박리	허나킴	공동	깊은 박리	수직 균열	부식 환경
IE	YES	NO	NO	NO	NO	NO	NO
UPE	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
GPR	NO	YES	YES	YES	YES	NO	YES
IT	YES	YES	NO	NO	NO	NO	NO
NDT	콘크리트 교면포장						
	들뜸	얕은 박리	허나킴	공동	깊은 박리	수직 균열	부식 환경
IE	YES	YES	YES	YES	YES	NO	NO
UPE	YES	YES	YES	YES	YES	NO	NO
GPR	NO	YES	YES	YES	YES	NO	YES
IT	YES	YES	NO	NO	NO	NO	NO

상기 연구에서 아스팔트 교면포장 교량의 경우 GPR은 들뜸과, 수직균열을 제외한 모든 손상을 검출할 수 있었으나 다른 기술은 아스팔트 포장층의 영향으로 측정이 어려웠다. 반면, 콘크리트 교면포장에 대한 시험결과 IE, UPE, GPR 기술은 균열 외 대부분의 손상유형을 검출할 수 있는 것으로 나타났으며, 열화상 기법의 경우 들뜸과 얕은 박리만 찾을 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 국내외에서 활용되고 있는 교면포장 및 바닥판

열화손상 점검 관련 NDT 기술을 조사하고, NDT 기술별로 교량 점검 성능과 적용성을 평가한 다양한 연구를 소개하였다. NDT 기술에 대한 동향분석 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

교면포장 및 바닥판 점검에 활용할 수 있는 GPR은 1GHz 이상의 주파수대역을 사용할 수 있어야 한다.

열화상 기법으로 결합을 측정하기 위해서는 카메라 NETD 성능이 20~60mK 수준이어야 한다. 열화상 기법은 저녁에 일몰 후 주변 온도가 떨어지고 바닥판 내부에서 열이 외부로 방출될 때 온도차를 관찰하는 것이 가장 효과적이다.

초음파 및 충격과 기반 NDT기술은 콘크리트 노출 또는 콘크리트 교면포장 점검에 적합하고 아스팔트 교면포장의 경우 포장의 점탄성 거동 특성, 방수층 등의 영향으로 적용성이 떨어진다. IE 기술의 경우 아스팔트 포장층의 온도가 0℃도 이하로 낮아지면 적용성이 증가한다.

감사의글

본 연구는 과학기술정보통신부 한국건설기술연구원 연구운영비지원(주요사업)사업으로 수행되었습니다. (과제번호 20250303-001, (25주요-대1-목적) AI-NDT Data Fusion 기반 노후교량 바닥판 손상 검출 기술 개발 (1/2))

참고문헌

- [1] 정진덕, 이진호, 신동훈, 김주연, “3D GPR 및 인공지능을 활용한 교량 바닥판 상태평가체계 구축“, 한국도로공사 도로교통연구원, 2023년
- [2] Nexco-West USA, Inc. “Comparison of Infrared Cameras for Concrete Bridge Deck Scanning: – Vol2 Field Test at Haymarket Bridge, 12월, 2014년
- [3] FHWA-HRT-21-023, “Nondestructive Evaluation of Concrete Bridge Deck with Overlays, 3월, 2021년
- [4] FHWA-NHI-23-024, “Bridge Inspector’s Reference Manual” 3월, 2022년
- [5] 최현호, 신유성, 유혁진, “교량 보수보강 장기공용성 구축을 위한 기획연구“, 한국도로공사 도로교통연구원, 2024년
- [6] Heitzman et. al., “Nondestructive Testing to Identify Delaminations between HMA Layers“, SHRP2, TRB, 1월 2012년
- [7] Gucunski et. al., “Nondestructive Testing to Identify Concrete Bridge Deck Deterioration“, SHRP2, TRB, 2013년