

TECHNOLOGY

구조물 포장 유지관리 기준 개발

이진욱 오한진 이기세 박준용 김종욱 마경훈



구조물 포장 유지관리 기준 개발



연구책임

이진욱 도시인프라연구실 수석연구원

연구진

오한진 도시인프라연구실 수석연구원

이기세 도시인프라연구실 연구위원

박준용 도시인프라연구실 전임연구원

김종욱 도시인프라연구실 전임연구원

마경훈 도시인프라연구실 전임연구원

이 보고서의 내용은

서울특별시 정책과 다를 수 있습니다.

서울시 구조물 포장의 과학적이고 체계적인 유지관리 방안 도입을 위하여, 구조물 포장 관리현황 및 기준 분석, 현장 조사를 통한 상태평가방안을 도출하고, 구조물 포장의 상태특성을 고려한 유지관리 의사결정 체계(안) 제시

서울시 토공부 도로포장의 경우 포장관리시스템(PMS) 등 체계적인 기법으로 유지관리를 수행하고 있으나, 구조물 포장은 바닥판 열화상태 등을 고려한 상태 평가방법 및 관리기준 부재로 육안조사에 근거한 포장상태 유지관리 수행 중

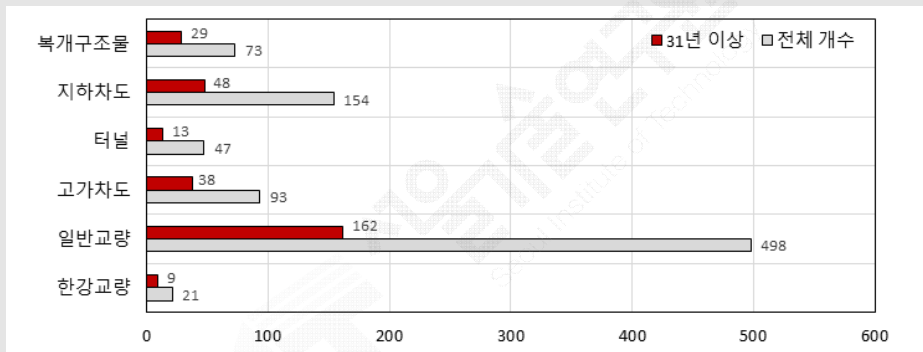
구조물 포장이란 교량 및 고가차도, 지하차도, 하천 복개구조물, 터널 등 다양한 구조물에 직접 시공되는 포장을 의미한다. 구조물 포장은 토공부에 비해 포장두께가 얇고, 교통하중에 의한 진동 및 충격을 크게 받는다. 또한 급격한 온도변화, 강수 및 강설 등의 환경적 악조건에 직접 노출되어 포장 손상이 발생하기 쉬우며, 유지보수 후 장기공용성을 기대하기 어렵다. 특히 배수 및 방수 조건이 일반 토공부 포장에 비해 까다롭기 때문에 누수, 염화물계 제설제 침투, 동결융해 등에 의한 바닥판 열화 손상이 발생하기 쉽다. 바닥판 열화 손상은 상부에 시공된 포장의 조기파손을 일으키는 원인이 된다. 따라서 구조물 포장은 토공부 포장과 달리 구조물 형식 및 특성을 반영한 과학적이고 체계적인 유지관리 방안 도입이 필요한 실정이다.



【그림 1】 바닥판 열화로 인한 교면포장 조기파손 사례(성산대교)

최근 10년간 서울시 구조물 포장 신설 건수는 점차 감소, 공용연수 31년 이상의 노후 구조물 포장 지속적으로 증가하여 효과적 유지관리 기준개발이 시급한 실정

2019년 기준 서울시가 관리하고 있는 교량의 전체 개수는 337개소(한강, 일반, 고가차도 총 연장 189km)이며 터널은 36개소, 지하차도 109개소, 복개구조 49개소(총 연장 120km)이다. 종별로는 1종 구조물이 105개소, 2종 구조물이 171개소, 3종 구조물이 93개소이며, 법정 외 구조물은 162개소가 존재한다. 이 중 31년 이상 공용된 구조물의 개소 수는 299개소로 전체의 33.7%의 구조물이 노후화가 진행되었음을 알 수 있다. 재령 증가에 따라 서울시 구조물의 노후화 비율은 지속적으로 증가하여, 2028년에는 전체의 61%, 2038년에는 85%에 이를 것으로 추정하고 있다.



[그림 2] 19년도 구조물 전체 개소 대비 공용 31년 개소 수(서울특별시, 2020)

교량을 제외한 터널 등 구조물 포장의 경우는 국내외를 막론하고 유지관리 기준이 전무하며, 토공부 포장 기준을 준용하여 유지관리를 수행하는 실정

국내 구조물은 시설물 안전 및 유지관리 실시 세부지침을 통해 관리되고 있으나, 구조물 포장의 경우 지침별 내용이 상이하거나, 또는 포장에 대한 유지관리 지침이 전무한 경우가 대부분이다. 국외에서도 구조물 포장에 대한 기준은 찾기 어려운 실정이며, 이로 인해 토공부 포장의 기준을 준용하거나 육안조사에 의한 유지관리를 주로 수행하고 있다. 따라서 구조물 포장의 구조적·환경적 특성을 고려할 수 있는 별도 유지관리 기준의 개발이 시급하며, 이를 통해 서울시 구조물 포장의 근본적 품질향상과 장수명화를 도모할 필요가 있다.

구조물 포장의 바닥판 설치 및 단면 구조 형식을 고려하여 교량, 고가차도, 복개구조 및 지하차도 포장은 ‘교면포장’으로, 터널포장은 ‘터널포장’으로 분류 교면포장 바닥판 종류는 콘크리트 바닥판 약 94%, 강바닥판은 6%로 구성

구조물 포장의 바닥판 설치 및 단면 구조 형식을 고려하여, 교량 및 고가차도 포장과 복개구조 및 지하차도 포장의 경우 ‘교면포장’으로 분류하였으며, 터널의 포장의 경우 ‘터널포장’으로 분류하였다. 서울시 교면포장 바닥판은 콘크리트 바닥판이 전체의 94.4%이며 강상판은 불과 5.6% 수준으로 분석되었다. 강바닥판이 사용된 교량은 한강교량과 일반교량에 각각 6개소가 있는 것으로 파악되었다. 한강교량의 경우 강바닥판의 면적 비율은 19.9%, 일반교량은 0.6%, 고가차도와 복개구조의 경우 강바닥판 형식을 사용하지 않는 것으로 분석되었다. 한편, 지하차도 및 터널포장의 경우는 현재 포장 재료, 방수층 공법, 바닥판 형식 등에 대한 통합이력 정보가 구축되지 않은 것으로 확인되었다. 따라서 향후 구조물 포장의 체계적 유지관리를 위해서는 지하차도 및 터널포장도 꾸준한 데이터 확보를 통해 빅데이터 분석시스템을 구축할 필요가 있을 것으로 판단된다.

서울시 '18년, '19년도 PMS 데이터를 활용하여 구조물 포장상태지수 분석 수행, 구조물 포장 고유 상태지수 모형 개발 및 빅데이터 시스템 지속 업데이트 필요

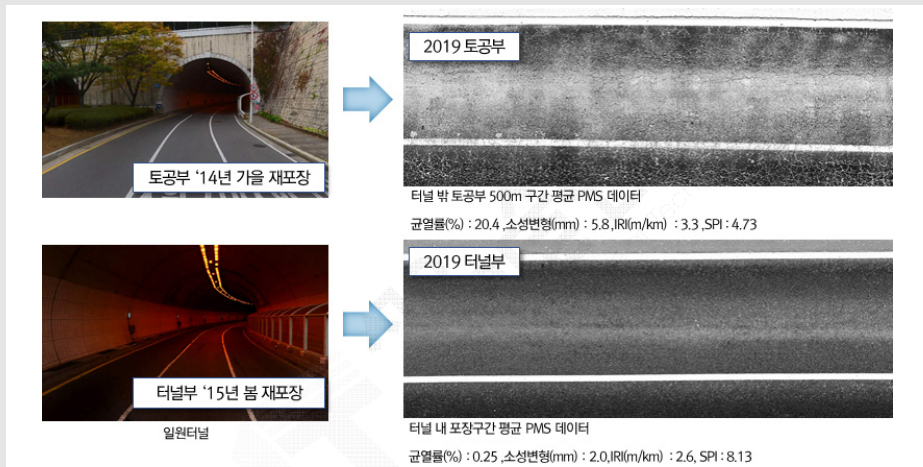
서울시 구조물 포장의 2018년, 2019년 포장상태를 분석하고, 포장상태 평가를 위해 활용되는 대표적 인자인 균열률, 종단평탄성, 소성변형을 수집하였다. 이를 통해 구조물 포장 및 토공부 포장의 상태지수(SPI; Seoul Pavement Index) 비교분석을 수행하였다. 여기서 구조물 포장 SPI는 토공부 SPI 산출방식을 적용하여 계산되었기 때문에, 직접적인 수치 비교분석보다 각각의 변화 추이를 비교분석하는 것이 합리적이다. 표 1은 각 구조물 포장과 토공부 포장의 포장상태지수를 정리한 것이다. 교량, 지하차도, 복개구조의 경우 토공부보다 상대적으로 SPI가 높게 산출되었지만, 이는 바닥판 상태를 고려하지 못하므로 추가적인 분석이 필요하다.

【표 1】 구조물 포장 및 토공부 포장의 표면결함 비교

구분	2018년				2019년				증감
	균열률 (%)	소성변형 (mm)	IRI (m/km)	SPI	균열률 (%)	소성변형 (mm)	IRI (m/km)	SPI	
교량전체 평균	2.92	5.21	2.81	7.29	3.88	4.89	2.58	7.15	-0.14
터널 평균	2.04	4.33	2.29	7.78	2.66	3.93	2.32	7.51	-0.27
지하차도 평균	3.74	5.43	3.19	7.09	3.51	5.15	2.91	7.14	+0.05
복개구조 평균	4.36	5.60	4.11	6.56	3.61	5.11	4.02	6.69	+0.13
토공부 평균	6.20	5.80	3.40	6.64	6.20	5.20	3.20	6.66	+0.02

터널포장은 바닥판이 설치되지 않으며, 포장 상태변화가 인접 토공부 포장보다 우수한 공용성능을 나타내어, 토공부 유지관리 기준 적용이 가능한 것으로 판단

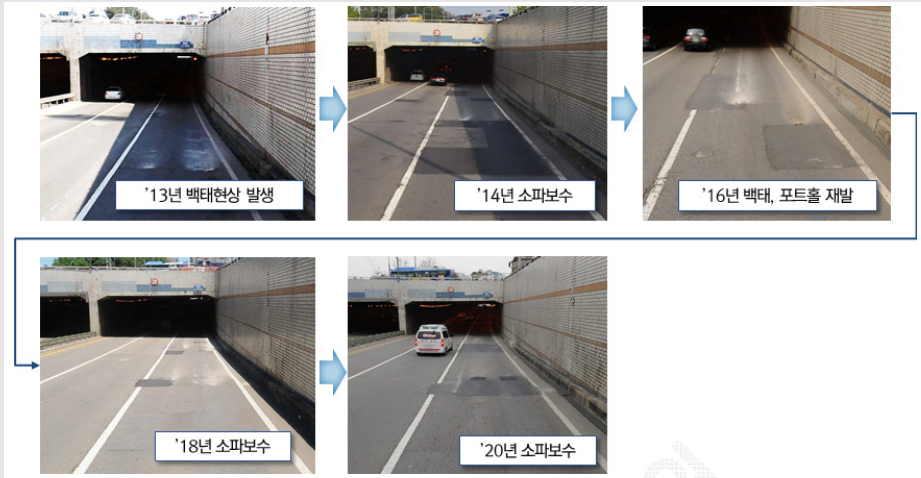
바닥판 구조가 설치되지 않는 터널포장의 경우 토공부와 유사한 기준으로 평가가 가능한 것으로 분석되었다. 토공부 포장은 SPI 지수가 매우 높았으며, 실제 사례조사 결과 그림 3과 같이 인근 토공부에 비해 터널 내부 포장 공용성 상태가 양호하였다. 따라서 터널포장의 경우 별도의 포장 관리기준을 제시하기보다 현행 토공부의 포장 상태평가 기준을 준용하거나, 현행 육안조사 방법을 유지하여도 무방할 것으로 판단하였다.



[그림 3] 일원터널 포장 상태변화 분석

지하차도 포장은 콘크리트 바닥판이 설치되며, 포장 상태변화 분석 결과 인접 토공부 포장보다 우수한 공용성능을 나타내나, 파손형태가 교면포장과 유사한 형태로 발생하여 교면포장 관리기준에 준하여 관리가 필요한 것으로 판단

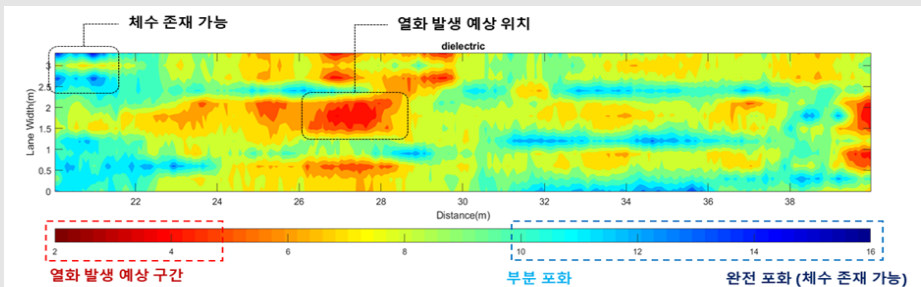
지하차도 포장은 토공부 포장 대비 포장상태는 전반적으로 유사하거나 양호한 수준으로 분석되었다. 그러나 그림 4와 같이 교면포장과 유사한 형태로 파손이 발생하며, 바닥판 열화가 발생할 경우 파손의 발생속도가 매우 빠르며, 특히 열화 손상 부위를 완벽히 제거하지 못할 경우 반복적인 재파손이 발생할 수 있다. 따라서 지하차도 포장은 교면포장의 관리기준에 준하여 관리가 필요하며, 특히 진출입구간의 손상에 유의해야 할 것으로 판단되었다.



[그림 4] 일원지하차도 포장 상태변화 분석

콘크리트 바닥판을 사용하는 교면포장의 효율적인 바닥판 열화상태 조사를 위해 차량형 지표투과레이더(GPR)를 이용한 조사방법 선정, GPR을 통해 바닥판 상부를 탐지하여 상대유전율을 통한 콘크리트 바닥판 열화 손상 추정

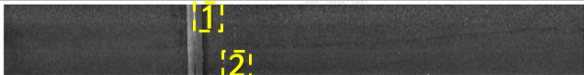
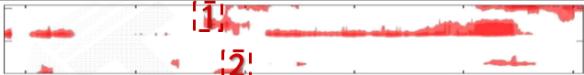

구조물 포장 바닥판의 열화는 포장 표층의 파손까지 발생시키는 원인이 되지만, 기존의 바닥판 조사방법으로는 기포장된 도로에서 바닥판 열화 손상 여부를 판단하기 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 효과적 바닥판 열화 손상 검사를 위한 비파괴 검사방법의 종류와 특징을 조사 및 분석하였으며, 3D GPR 탐사기법을 선정하였다. 본 연구에서는 3D GPR 및 로드스캐너를 통해 서울시 구조물 포장을 대상으로 현장 조사를 수행하였으며, 바닥판의 열화 정도 측정 및 표면 상태조사를 실시하였다. 바닥판의 열화 손상은 3D GPR을 통해 측정되는 상대유전율에 따라 판단할 수 있다. 바닥판의 상대유전율이 5 이하로 나타날 경우 열화 손상이 발생한 것으로 판단하였으며, 정상범위를 초과하여 측정될 경우 체류수가 존재하거나 습도가 높아 발생한 것으로 판단하였다.



[그림 5] 상대유전율에 따른 바닥판 열화 및 체수 존재 여부 판단 예시

GPR 및 포장상태 조사 결과를 이용하여 교면포장 표면손상 및 바닥판 열화 상태 분석 수행, 포장층 절삭 후 바닥판 노면 마무리 미흡으로 열화 손상 매칭에 어려움 발생, 일부 구간에서는 열화 손상을 발견하여 GPR 분석 결과 효용성 확인

교면포장 표면손상 상태는 균열량, 소성변형량, 평탄성으로 구분하여 분석하여 정량적인 값을 도출하였고, 열화 손상의 경우 3차원 GPR 데이터 분석을 통해 상대유전율을 계산하고 2차원 영상으로 매핑하여 발생 위치를 나타내었다. 콘크리트 바닥판의 상대유전율이 5 이하인 경우 열화 손상이 발생한 것으로 판단하였다. 그림 6은 압구정고가의 420~480m 구간의 조사결과를 예시로 나타낸 것이다. 해당 구간은 표층 절삭이 시행되지 않았기 때문에 바닥판 노면영상을 수집하지 못하였지만, 그림 7에 명시한 1번 지점의 경우 바닥판이 열화 손상 여부를 확인하기 위해 부분 절삭을 실시하였다. 이를 통해 바닥판 열화 손상을 발견할 수 있었으며, GPR 검사의 신뢰성을 검증하였다.

시설물명	차로	분석구간(m)	연장(m)	방향				
압구정고가	2	420 ~ 480	60	육수 방향				
아스팔트 노면영상				3m				
표면결함	균열률(%)	소성변형(mm)	IRI(m/km)	SPI				
	9.06	3.46	3.59	6.23				
바닥판 상대유전율 맵 (5.0 이하)				3m				
바닥판 상대유전율 맵 (15.0 이상)				3m				
바닥판 상대유전율 평가결과	구분	열화 예상	열화 우려	건전			채수 예상	상대유전율 평균
		4 이하	4 ~ 5	5 ~ 8	8 ~ 11	11 ~ 15		
	비율 (%)	9.39	6.78	55.72	20.62	7.50	0	7.04

【그림 6】 압구정고가 2차로 420~480m 구간 조사결과 예시(바닥판 노면조사 미실시)



【그림 7】 압구정고가 2차로 420~480m 구간 부분절삭 결과

구조물 포장 및 바닥판 형식에 따른 맞춤형 유지관리 의사결정방안 도출, 구조물의 포장상태 데이터를 장기적으로 축적해나가며 지속적인 상태평가지수 고도화를 통해 과학적이고 효율적인 구조물 포장 유지관리 구현 가능

토공부와 동일한 균열률, 소성변형 깊이, 국제평탄성지수를 활용한 네트워크 레벨 PMS 운영을 바탕으로 상대유전율 적용 여부와 수준(프로젝트 레벨 또는 네트워크 레벨)에 따라 구조물 포장 형식에 따른 4가지 맞춤형 유지관리 의사결정방안을 제안하였다. 기존 SPI 지수를 기초로 도로의 기능(포장특성)과 보수연장에 따라 보수 우선순위를 차등 적용하는 보정 SPI를 기초로 하여, 4가지 유지관리 의사결정방안을 제시하였다. 이를 바탕으로 구조물의 포장상태 데이터를 장기적으로 축적해나가며 지속적인 상태평가지수 고도화를 통해 과학적이고 효율적인 구조물 포장 유지관리 체계 구축이 가능할 것으로 판단하였다.

【표 2】 구조물 포장 형식(교면포장, 터널포장)에 따른 맞춤형 유지관리 의사결정방안

구조물 포장 형식	바닥판 형식	유지관리 의사결정방안	활용지수
교면포장	콘크리트	1안) 프로젝트 레벨 GPR(상대유전율 측정) 운영	보정 SPI+열화도지수
		2안) 네트워크 레벨 GPR(상대유전율 측정) 운영	SBPI
	강	3안) 토공부 PMS 관리기준(SPI) 수정 후 사용	보정 SPI
터널포장	-	4안) 토공부 PMS 관리기준(SPI) 사용(터널포장)	SPI

서울시 현장실무를 고려한 구조물 포장 관리방안 제언

본 연구에서는 구조물 포장의 실제 유지보수 시행 기준은 SPI 지수를 활용하고, 콘크리트 바닥판을 갖는 구조물 포장의 열화상태를 추정하기 위해 상대유전율지수(DI)를 별도 적용하는 것이 효율적일 것으로 판단하였다(1안: 보정 SPI+열화도지수 활용). 우선, 보수 우선순위 선정을 위해 구조물 포장의 현재 상태는 SPI 지수에 도로 특성(도로등급, 보수 규모) 등을 반영하여(보정 SPI) 평가하고, 바닥판 상태 등을 고려하여 보정계수(열화도 지수)를 적용하는 방안을 제시할 수 있다. 또한 구조물 포장의 장래 유지보수 소요예산과 유지보수 후 구조물 포장의 전반적인 상태(포장상태 및 바닥판 열화상태)를 예측하기 위해 SBPI 모형이(2안: SBPI) 활용될 수 있다. 다만 이에 대한 영향 정도를 정량화하기 위해서는 구조물 포장과 바닥판의 열화상태에 대한 상관관계 연구를 추가적으로 수행할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서 개발한 모형은 공용기간의 경과에 따라 서울시 도상의 전반적인 구조물 포장 상태변화 추정과 대응 유지보수에 따른 소요예산 추정에 활용될 수 있도록 제시하고자 한다.



| 목차

목차

01 연구 개요

1. 연구 배경	2
2. 연구 목적	4
3. 연구 구성	5

02 구조물 포장 개요 및 기준 조사

1. 구조물 포장 형식 및 분류	8
1-1. 교면포장	8
1-2. 터널포장	11
1-3. 구조물 포장 분류기준	14
2. 국내 구조물 포장 관리기준 현황	16
2-1. 구조물 유지관리 관련 법령 및 지침	16
2-2. 구조물 포장의 정비기법 관련 지침	23
3. 국외 구조물 포장 관리기준 현황	36
3-1. 국외 교면포장 및 바닥판 관리기준	36
3-2. 국외 터널포장 관리기준	40

03 서울시 구조물 포장 관리기준 현황

1. 서울시 구조물 포장 관리현황	46
1-1. 일반현황	46
1-2. 관리주체 및 점검현황	50
1-3. 서울시 구조물 포장 노후화 추이	54
2. 서울시 구조물 포장 보수 및 예산현황	58
2-1. 서울시 구조물 포장 보수현황	58
2-2. 서울시 구조물 포장 공법별 기술적 특성분석	60
2-3. 서울시 구조물 포장 보수예산 현황	64

3. 서울시 구조물 포장상태지수 분석	67
3-1. 구조물 포장상태지수 개요	67
3-2. 교면포장 및 고가차도 포장상태지수 분석 결과	69
3-3. 터널 포장상태지수 분석 결과	75
3-4. 지하차도 포장상태지수 분석 결과	79
3-5. 복개구조 포장상태지수 분석 결과	82
3-6. 재포장 구간 공사 전 포장상태 분석	83
04 구조물 포장 현장 조사	
1. 현장 조사 및 분석방법	86
1-1. 기존 바닥판 열화 손상 검사방법	87
1-2. 서울시 구조물 포장 현장 조사 방법	92
1-3. 서울시 구조물 포장 현장 조사 결과 분석방법	97
2. 현장 조사 대상구간 선정 및 분석 결과	106
2-1. 현장 조사 대상구간 선정	106
2-2. 현장 조사 데이터 분석 결과	108
2-3. 현장 조사 결과 검증	110
05 구조물 포장 관리기준(안) 개발	
1. 구조물 포장 현장 조사 데이터 통계분석	116
2. 구조물 포장 손상추정모형(안) 및 상태평가지수(안) 개발	122
2-1. 구조물 포장 손상추정모형	122
2-2. 구조물 포장 상태평가지수	126
3. 구조물 포장 유지관리를 위한 의사결정방안(안) 제시	131
3-1. 통계적 기법을 통한 유지관리 의사결정방안	131
3-2. 서울시 유지관리 시나리오에 따른 유지관리 의사결정방안	133
3-3. 구조물 포장 유지관리 의사결정방안 도출	136
4. 구조물 포장 관리방안 제언	138
참고문헌	143
Abstract	146

표 목차

[표 1-1] 연구 목표 및 세부 내용	4
[표 2-1] 구조물 포장 분류	14
[표 2-2] 구조물 유지관리 관련 제도, 법령의 변화	16
[표 2-3] 시설물안전법 시행령에 제시된 구조물 점검방법	17
[표 2-4] 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침의 판정기준	17
[표 2-5] 구조물 포장 관련 국내 관리지침 및 매뉴얼 조사	18
[표 2-6] 교량 구조물 부재별 안전점검·진단 적용 범위	18
[표 2-7] 구조물 세부시설별 조사사항	18
[표 2-8] 교면포장 상태안전성능평가 기준 및 방법	19
[표 2-9] 바닥판 상태안전성능평가 기준 및 방법	19
[표 2-10] 구조물 사용성능 적용 범위	20
[표 2-11] 구조물 포장 상태 사용성능 등급 기준	20
[표 2-12] 제3종 구조물 교면포장의 균열 및 손상상태 기준	22
[표 2-13] 제3종 구조물 거더, 바닥판 균열 및 손상상태 기준	22
[표 2-14] 제3종 터널포장 노면 균열 및 손상상태 기준	23
[표 2-15] 구조물 포장 관련 국내 정비기법 지침 및 매뉴얼 조사	23
[표 2-16] 교면포장 시공 시 다짐관리 유의사항	25
[표 2-17] 교면포장 바닥판 방수재 선정 시 고려사항	28
[표 2-18] 바닥판 방수재 선정 시 분류 및 특징	29
[표 2-19] 교면포장 바닥판 방수층 재료 선정기준	30
[표 2-20] 교면포장 바닥판 방수층 역학적 품질기준	30
[표 2-21] 도로교 교면포장 아스팔트 혼합물 적용기준	31

[표 2-22] 교면포장 아스팔트 혼합물 배합설계 기준	31
[표 2-23] 교면포장 상태평가 시 조사항목	32
[표 2-24] 미국의 교면포장 상태평가 기준	36
[표 2-25] 콘크리트 바닥판 상태평가 기준	37
[표 2-26] 교면포장 콘크리트 노면 상태평가 기준	37
[표 2-27] 일본의 교면포장 상태평가 기준	38
[표 2-28] 일본건설성 교량 바닥판 균열 상태평가 기준	39
[표 2-29] 일본도로공단 교량 바닥판 균열 상태평가 기준	39
[표 2-30] 캐나다의 교면포장 상태평가 기준	40
[표 3-1] 서울시 도로구조물 현황 총괄	50
[표 3-2] 교면포장 공법(재료)별 특성분석	60
[표 3-3] 방수층 공법(재료)별 특성분석	61
[표 3-4] 한강교량 및 교면포장 보수비용 분석 결과	66
[표 3-5] 2018~2019년 구조물 포장 PMS 데이터 분석현황	68
[표 3-6] 한강교량, 일반교량, 고가차도 SPI 비교(구조물별)	69
[표 3-7] 한강교량, 일반교량, 고가차도 SPI 비교(종별)	71
[표 3-8] 교면포장, 인근 토공부, 도시고속 SPI 비교	72
[표 3-9] 터널포장 및 토공부 포장의 표면결함 비교	76
[표 3-10] 터널 구간별 표면결함 비교	77
[표 3-11] 터널포장 및 토공부 포장의 표면결함 비교	79
[표 3-12] 지하차도 구간별 표면결함 비교	81
[표 3-13] 복개구조 포장 및 토공부 포장의 표면결함 비교	83
[표 3-14] 현장 조사 구간 재포장 직전 포장상태	84
[표 4-1] 바닥판의 상태평가에 적용 가능한 비파괴시험 방법 비교	92
[표 4-2] 차량형 현장 조사 장비의 센서 구성	93
[표 4-3] 차량형 현장 조사 장비의 센서별 주요사양	93
[표 4-4] 상대유전율 및 전자파의 속도	98
[표 4-5] 물질에 따른 상대유전율	103

[표 4-6] 콘크리트 상대유전율에 따른 손상판정 방법	103
[표 4-7] 결함유형별 분석 항목	105
[표 4-8] 두무개다리가가 상세현황	106
[표 4-9] 현장 조사 대상구간	107
[표 4-10] 전체 조사구간 GPR, 표면결함 분석 결과 요약	110
[표 4-11] 재포장 구간 GPR 데이터 분석 결과와 교면포장 절삭 후 바닥판 열화 손상 면적과 비교	111
[표 4-12] 굳은 콘크리트의 최대 수용성 염소이온 비율	111
[표 4-13] 교면포장 바닥판 콘크리트 열화구간 염화물 함유량 시험결과	113
[표 5-1] 기술통계분석 결과	118
[표 5-2] 공분산 행렬	119
[표 5-3] 상관관계 분석 결과	119
[표 5-4] 선형회귀분석 모형의 결과	120
[표 5-5] 선형회귀분석 모형의 계수 결정 결과	120
[표 5-6] 모형개발 결과	130
[표 5-7] 구조물 포장 형식(교면포장, 터널포장)에 따른 맞춤형 유지관리 의사결정방안	136

그림 목차

[그림 1-1] 구조물 포장 구조와 파손 발생 원리	2
[그림 1-2] 구조물 포장 파손사례	3
[그림 1-3] 바닥판 열화 손상이 상부 포장에 미치는 영향	3
[그림 2-1] 교면포장의 구조	8
[그림 2-2] 교면포장의 구조	10
[그림 2-3] 교면포장의 형식	11
[그림 2-4] 터널 내 아스팔트 포장	12
[그림 2-5] 터널 내 콘크리트 포장	13
[그림 2-6] 배수관 및 유공관의 구성	13
[그림 2-7] 교면포장 분류	14
[그림 2-8] 방수층 불량으로 인한 교면포장 파손사례	26
[그림 2-9] 비트 간격에 따른 교면포장 절삭 후 바닥판 표면 상태	28
[그림 2-10] 교면포장의 보수공법 결정체계	32
[그림 2-11] 절삭 덧씌우기식 아스팔트 콘크리트 교면포장 유지보수 절차	33
[그림 2-12] 덧씌우기식 시멘트 콘크리트 교면포장 유지보수 절차	34
[그림 2-13] 터널 내에서 발생하는 파손 종류 예시	34
[그림 2-14] 터널포장의 파손 메커니즘	35
[그림 2-15] 터널포장의 동상방지층 설치기준	35
[그림 2-16] 오스트리아의 터널 내 아스팔트 포장 카탈로그 설계	41
[그림 2-17] 동상방지층이 필요 없는 터널포장	42
[그림 2-18] 동상방지 터널포장	42
[그림 3-1] 서울시 구조물별 개소 수 및 포장면적 비교	46

[그림 3-2] 서울시 교면포장 재료별 면적	47
[그림 3-3] 한강교량 교면포장 재료별 누적사용빈도	47
[그림 3-4] 서울시 교면 방수 공법별 면적	48
[그림 3-5] 한강교량 교면 방수 재료별 누적사용빈도	49
[그림 3-6] 서울시 교면포장 바닥판 형식별 면적	49
[그림 3-7] 서울시 도로시설물 관리체계	51
[그림 3-8] 정밀안전진단 프로세스	51
[그림 3-9] 정밀안전진단 현장 조사(육안) 및 평가결과 예시	52
[그림 3-10] 정밀안전진단 후 포장 보수 수행과정 예시(교면포장)	53
[그림 3-11] 서울시시설공단 교면포장 보수기간	53
[그림 3-12] 최근 10년간 구조물 포장 개소 수 변화	54
[그림 3-13] 2019년도 구조물 전체 개소 대비 공용 31년 개소 수	55
[그림 3-14] 서울시 구조물 노후화 예상비율	55
[그림 3-15] 열화 손상 보수 여부 및 제설제 사용량에 따른 교면포장 공용성 분석	56
[그림 3-16] 교면포장 조기 파손 사례(성산대교)	57
[그림 3-17] 교면포장 조기 파손 사례(옥수고가 L램프)	57
[그림 3-18] 바닥판 상부 보수 물량 변경에 따른 설계 변경 사례	58
[그림 3-19] 구조물 포장 표면 육안조사 방법	58
[그림 3-20] 포장상태 조사장비	59
[그림 3-21] 교량, 고가차도, 복개구조 연도별 보수보강비용	64
[그림 3-22] 터널 및 지하차도 연도별 보수보강비용	65
[그림 3-23] 한강교량 연도별 교면포장 및 방수층 보수면적	66
[그림 3-24] 한강교량 연도별 교면포장 및 방수층 보수비용	66
[그림 3-25] 서울시 토공부 PMS 빅데이터 시스템	67
[그림 3-26] 2018~2019년도 교량구조물 PMS 분석 결과	69
[그림 3-27] 2018~2019년도 교량구조물 종별 PMS 분석 결과	71
[그림 3-28] 2018~2019년도 교량 전체 평균, 인근 토공부 평균, 도시고속 평균 SPI 비교분석 결과	72
[그림 3-29] 한강교량 및 토공부 포장 단위면적당 보수비용 및 SPI 변화	73

[그림 3-30] 바닥판 형식별 교면포장 PMS 분석 결과	74
[그림 3-31] 교면포장 및 토공부의 공용연수에 따른 개별결함 변화 비교	75
[그림 3-32] 교면포장 및 토공부의 공용연수에 따른 개별결함 변화 비교	75
[그림 3-33] 터널포장 및 토공부 포장 PMS 비교분석 결과	76
[그림 3-34] 터널 진출입부와 일반구간 개념도	77
[그림 3-35] 지하문터널(하행 2차로) 조사 결과	78
[그림 3-36] 일원터널(하행 2차로) 조사 결과	78
[그림 3-37] 터널포장 및 토공부 포장 PMS 비교분석 결과	79
[그림 3-38] 지하차도 구간 구분	80
[그림 3-39] 등촌지하차도(하행 1차로) 사례조사	81
[그림 3-40] 일원지하차도 사례조사	82
[그림 3-41] 복개구조포장 PMS 분석 결과	83
[그림 4-1] 음향기법	87
[그림 4-2] 충격반사파 측정 장비와 수신 센서	88
[그림 4-3] 초음파 프로브 배열과 측정 장비	88
[그림 4-4] 표면초음파법 현장 조사 모습	89
[그림 4-5] 3차원 GPR의 데이터 구조와 명칭	90
[그림 4-6] 적외선 열화상법	91
[그림 4-7] 바닥판에서 채취된 코어 시편	92
[그림 4-8] 차량형 교면포장 현장 조사 장비	94
[그림 4-9] 구조물 포장 현장 조사 수행절차	95
[그림 4-10] 차량형 교면포장 GPR 조사방법	96
[그림 4-11] 조사장비로 획득되는 노면 상태 항목	96
[그림 4-12] 조사장비로 획득된 표면결함 영상 예시	96
[그림 4-13] GPR 장비의 원리	98
[그림 4-14] GPR 탐사의 영상화 방법	99
[그림 4-15] 교면포장 GPR 영상데이터 예시	99
[그림 4-16] Extended CMP(XCMP) 방법	100
[그림 4-17] 철근에서 반사된 전자기파의 이동 경로(XCMP)	100

[그림 4-18] 콘크리트 바닥판 상대유전율 측정 알고리즘	102
[그림 4-19] 콘크리트 바닥판 상대유전율 측정 프로그램	102
[그림 4-20] 상대유전율에 따른 바닥판 열화 및 체수 존재 여부 판단 예시	103
[그림 4-21] 인공지능을 활용한 자동 균열 분석 과정	104
[그림 4-22] 균열의 자동분석 결과 및 정량화 결과 예시	104
[그림 4-23] 두무개다리고가 조사구간	106
[그림 4-24] 두무개다리고가 1차로 0~60m 구간 조사 결과 예시	108
[그림 4-25] 압구정고가 2차로 420~480m 구간 조사 결과 예시	109
[그림 4-26] 압구정고가 1차로 420~480m 구간 부분 절삭 결과	109
[그림 4-27] 두무개다리고가 염화물 함량측정 시료채취 위치	112
[그림 4-28] 홍제천고가 염화물 함량측정 시료채취 위치	112
[그림 4-29] 염화물 함량과 상대유전율 비교결과	114
[그림 5-1] 입력변수별 데이터 분포 및 밀도 분석	118
[그림 5-2] 종속변수(SPI)에 대한 히스토그램	121
[그림 5-3] 회귀표준화 잔차 정규 P.P도표	121
[그림 5-4] 도로포장의 공용수명 개념	122
[그림 5-5] 균열률에 대한 모형 비교평가	124
[그림 5-6] 소성변형에 대한 모형 비교평가	124
[그림 5-7] IRI 및 상대유전율에 대한 시간별 손상 예측 결과	126
[그림 5-8] SPI에 대한 시간별 손상 예측 결과	127
[그림 5-9] SPI 및 SBPI 모형의 비교 평가	129
[그림 5-10] SBPI 지수에 대한 상대유전율 분포	132
[그림 5-11] 확률밀도에 따른 SBPI 지수	133
[그림 5-12] 서울형 최적 유지보수공법 결정체계	134
[그림 5-13] 서울형 교면포장 유지공법 선정 시나리오	135
[그림 5-14] 보수 우선순위 산정방식 예시	139



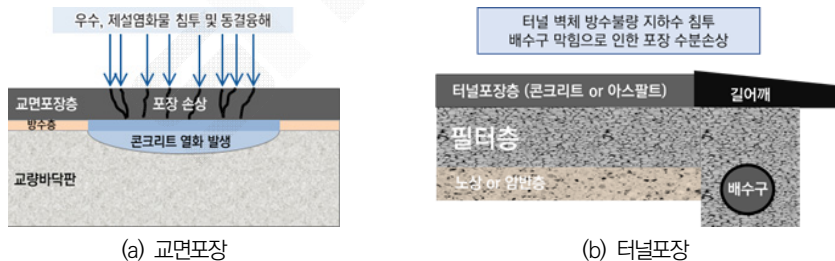
| 01 연구 개요

1. 연구 배경
2. 연구 목적
3. 연구 구성

01. 연구 개요

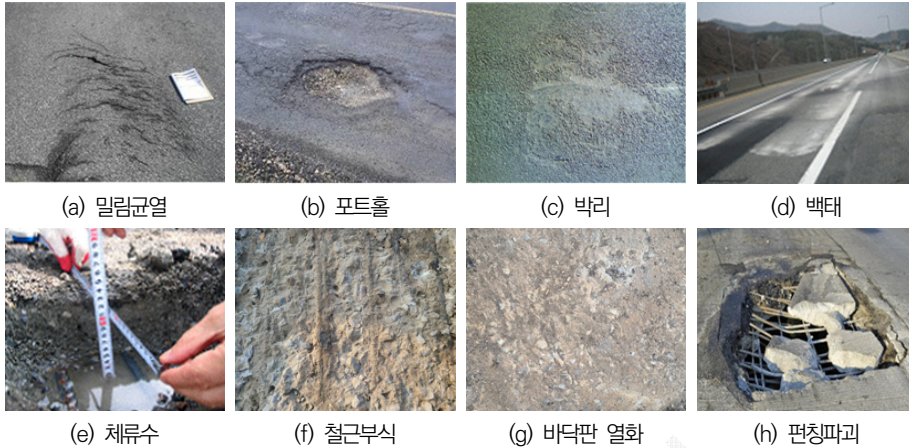
1. 연구 배경

구조물 포장이란 교량, 고가차도, 지하차도, 하천 복개구조 및 터널 등 다양한 도로 구조물에 시공되는 포장을 의미한다. 구조물 포장은 토공부에 비해 포장두께가 얇고, 교통하중에 의한 진동 및 충격을 크게 받는다. 또한 급격한 온도변화, 강수 및 강설 등의 환경적 악조건에 직접 노출되어 포장 손상이 발생하기 쉬우며, 유지보수 후 장기공용성을 기대하기 어렵다. 특히 그림 1-1과 같이 배수 및 방수 조건이 일반 토공부 포장에 비해 까다롭기 때문에 누수, 제설염화물 침투, 동결융해 등에 의한 바닥판 열화 손상이 발생하기 쉽다. 바닥판 열화 손상은 상부에 시공된 포장의 조기 파손을 일으키는 원인이 된다.



[그림 1-1] 구조물 포장 구조와 파손 발생 원리

열화 손상이란 콘크리트 내부의 염화물 함량 증가로 인한 내구력 약화, 철근 부식 등에 의한 박리 및 박락, 방수층 접착 불량 등의 손상을 통칭한다. 구조물 포장의 바닥판이 열화되었을 경우, 그림 1-2와 같이 손상이 크게 진전되어 표면에 파손이 발생하기 이전에는 육안점검 등의 외관조사로 손상을 탐지하기 어렵다. 구조물 포장의 파손은 주행차량 및 운전자의 안전을 위협하는 원인이며, 구조물의 내구성능 저하로 인해 보수비용을 증가시킨다.



[그림 1-2] 구조물 포장 파손사례

바닥판 열화 손상에 의한 도로포장 파손은 그림 1-3과 같이 총 5단계의 과정으로 진행된다. 균열 등 구조물 포장의 손상은 우수 및 제설 염화물이 포장체 내부를 통해 바닥판으로 침투하여 철근을 부식시킨다. 부식된 철근은 부피가 증가하기 때문에 콘크리트의 박리, 박락과 같이 방수층을 손상시켜 아스팔트 포장층과 층분리 현상을 발생시킨다. 층 분리된 아스팔트 포장은 지지력이 저하되어 외부 충격에 쉽게 영향을 받기 때문에 포트홀, 균열, 백태 현상 등의 표면손상으로 이어지게 된다. 이러한 열화 손상은 구조물의 사용연한이 증가할수록 심화되기 때문에 구조물의 노후화가 심할수록 이에 대한 유지관리를 철저히 수행하여야 한다.



[그림 1-3] 바닥판 열화 손상이 상부 포장에 미치는 영향

2. 연구 목적

서울시는 생애주기 관리체계(1년, 5년, 10년, 30년 관리주기)를 도입하여 노후 포장 해소, 안전·쾌적·장수명 유지관리를 목표로 도로포장 유지관리 기본계획(서울특별시, 2018)을 수립하였다. 그러나 이는 토공부 포장에 대한 관리기준이며, 구조물(교량, 고가차도, 터널, 지하차도, 복개구조) 포장의 경우는 방수층 및 바닥판 상태까지 고려할 수 있는 별도의 기준을 수립할 필요가 있다.

1960년대 이후 급속한 경제발전과 더불어 건설되었던 수많은 구조물 포장 및 바닥판은 재령 증가에 따라 이미 노후화가 상당히 진행된 상태로 추정된다. 따라서 시민의 안전 확보는 물론, 잦은 보수로 인한 사용상 불편 해소와 유지보수 비용 절감을 위해 체계적인 구조물 포장 유지관리 기준 마련이 시급하다.

따라서 본 연구는 기존 서울시의 구조물 포장 관련 유지관리 기준, 유지보수 예산, 보수이력 등의 현황을 분석하고, 바닥판 열화 등의 손상 측정을 위한 현장 조사 및 분석기법과 이를 활용한 정비기법을 개발하기 위해 수행되었다. 또한 이를 통해 과학적·합리적인 유지관리 기준 및 의사결정 체계를 개발하여, 서울시 구조물 포장의 근본적인 품질향상과 장수명화를 도모하고자 하였다.

본 연구의 목표 및 세부 내용을 표 1-1에 나타내었다.

[표 1-1] 연구 목표 및 세부 내용

연구 목표	세부 내용
구조물 포장 관리현황 분석	- 국내외 구조물 포장 유지관리 현황 조사 - 국내외 구조물 포장 유지관리 관련 법령 및 지침 조사 - 국내외 구조물 포장 정비기법 관련 지침 조사
서울시 구조물 포장 상태평가 기준 개발	- 서울시 구조물 포장 보수현황 조사 - 서울시 구조물 포장 보수공법 및 보수예산 현황 조사 - 서울시 구조물 포장 공용성 분석자료 구축 및 상태평가 기준(안) 개발
서울시 구조물 포장 현장 조사 및 상태 분석	- 기존 구조물 포장 현장 조사 방법 조사 - 서울시 구조물 포장 현장 조사 수행 - 서울시 구조물 포장 표면 및 바닥판 손상 조사분석
서울시 구조물 포장 유지관리를 위한 의사결정 방법 개발	- 기존 구조물 포장 유지관리 의사결정 체계 분석 - 구조물 포장 상태평가지수 및 손상추정모형 도출 - 구조물 포장 유지관리 전략 수립 방안 도출

3. 연구 구성

본 연구는 서울시 구조물 포장의 체계적 유지관리 기준을 수립하기 위해 수행되었다. 이를 위해 현재 국내외에서 시행되고 있는 구조물 포장의 유지관리 현황, 관련 기준 및 지침을 조사하고, 특히 구조물 포장 유지관리에서 문제가 되는 바닥판 열화 손상의 유지관리 현황과 개선방안을 도출하고자 하였다. 또한, 체계적인 구조물 포장 유지관리 시스템을 구축하기 위해 서울시 빅데이터 분석시스템을 적극적으로 활용 및 개선하고자 하였으며, 효율적 유지관리를 위한 자료 수집 및 활용방안을 제시하고자 하였다. 이와 함께 서울시 구조물 포장의 현장 조사를 수행하여 표면 및 바닥판 손상의 관리 방안을 분석하였으며, 향후 구조물 포장 유지관리를 위한 의사결정 체계 개선방안을 도출하고자 하였다. 본 연구의 구성 및 내용은 다음과 같다.

제1장은 본 연구의 수행 배경과 목적, 추진체계를 요약하여 서술하였다.

제2장은 구조물 포장의 형식 및 구조적 특성에 따른 분류기준을 제시하고, 국내외 구조물 포장 관리기준 및 관련 법령, 지침을 비교 분석하였다. 본 연구에서는 구조물 포장의 종류를 크게 교면포장과 터널포장으로 분류하였으며, 교면포장은 다시 표층포장과 바닥판으로 구분하여 유지관리 지침을 분석하였다.

제3장은 서울시 빅데이터 분석시스템을 활용하여 구조물 포장의 관리현황, 보수이력 및 보수예산을 조사하였으며, 포장상태지수 분석을 수행하여 구조물 종류별 포장의 특징과 유지관리 취약구간을 도출하였다. 또한, 바닥판 열화에 따른 보수 부위의 재파손 사례를 분석하여 구조물 포장 바닥판의 유지관리 필요성을 검토하였다.

제4장은 구조물 포장의 표면과 바닥판 조사 방법을 조사하고, 서울시 교면포장을 대상으로 현장 조사를 수행하였다. 바닥판 열화도 조사 및 분석 방법을 도출하였으며, 재포장 직전 포장을 대상으로 현장 조사를 수행하여 유지관리 기준점 수립방안을 도출하였다.

제5장은 구조물 포장 관리기준(안)을 개발하기 위해, 서울시 빅데이터 분석시스템 자료와 현장 조사 결과를 바탕으로 구조물 포장 상태평가지수(안)를 도출하였으며, 이를 활용하여 구조물 포장 정비기법의 의사결정방안을 제시하였다.



02 구조물 포장 개요 및 기준 조사

1. 구조물 포장 형식 및 분류
2. 국내 구조물 포장 관리기준 현황
3. 국외 구조물 포장 관리기준 현황

02. 구조물 포장 개요 및 기준 조사

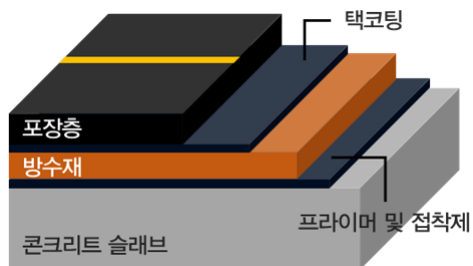
1. 구조물 포장 형식 및 분류

구조물 포장은 토공부 포장과 달리 구조물의 내부 또는 상부에 설치되는 것이 특징이며, 포장층의 구성요소 등 형식에 따라 적절한 유지관리 방법을 적용하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 구조물 유형별 포장의 효과적인 유지관리 방안을 도출하기 위해, 각 구조물 유형에 대한 포장의 구성 방식을 분석하여, 구조물 포장 형식의 분류기준을 도출하였다.

1-1. 교면포장

1) 교면포장의 구조

교면포장은 일반적으로 그림 2-1과 같이 포장층, 방수층 및 접착층, 바닥판(콘크리트 또는 강) 등으로 구성된다.



[그림 2-1] 교면포장의 구조

포장층은 다시 표층과 텍코팅, 하부층으로 구성된다. 표층은 차량 주행성, 미끄럼 저항성 등 기능적 요소와 함께 소성변형 저항, 마모나 균열에 대한 피로저항성 등을 가져야 한다. 텍코팅이란 표층과 하부층을 접착시키는 공정으로, 일반적으로 아스팔트 유제나 고무 혼입 아스팔트 유제를 이용하여 시공한다. 하부층은 바닥판의 요철을 평탄하게 하여 포장의 안정성이나 내구성을 높이는 역할을 하며, 하부층 혼합물의 성능은 포장의 내구성에 직접적인 영향을 미친다.

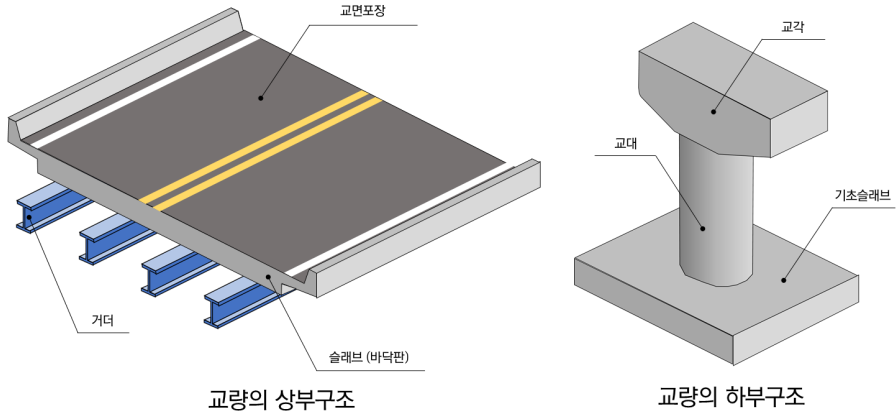
방수층은 교면포장의 내구성을 향상하기 위해 시공되는 층으로, 우수 및 제설제 등이 표층 균열이나 연석 경계 등을 통하여 침투하는 현상을 방지한다. 수분 및 이물질의 침투는 콘크리트 바닥판 상면의 열화 또는 강바닥판의 부식을 촉진하여 표층의 수명을 단축한다. 강바닥판을 사용한 교면포장의 경우 하부층에 불투수성 구스 아스팔트 혼합물을 이용할 경우는 방수층 설치를 생략할 수 있다.

접착층은 바닥판 상면과 방수층, 포장층을 접착시켜 교면포장의 합성효과를 높이고 피로저항성 및 내구성을 향상하기 위해 설치하는 층이다. 바닥판과 포장의 접착강도는 교면포장의 내구성에 큰 영향을 준다. 접착층에 이용하는 접착재는 바닥판, 방수층, 포장층 혼합물의 종류를 고려하여 선정한다.

교면포장 접속부에서 바닥판으로 침투한 우수는 콘크리트 바닥판의 염해와 내부 철근의 부식을 유발하여 내구성을 저감한다. 또한 방수층을 설치한 경우에도 침투수가 고여 있는 상태에서 교통하중이 반복될 경우 바닥판 박리에 의한 파손이 발생할 수 있다. 이를 방지하기 위해 구조물 접속부의 방수 기능 유지에 주의해야 하고, 침투한 물이 고여 있을 가능성이 있는 경우 배수처리가 필수적이다. 원활한 배수처리를 위해서는 연석, 길어깨, 신축이음장치 등에서 배수파이프 또는 배수 유도시설 설치를 고려할 필요가 있다.

2) 교면포장의 형식

교량은 일반적으로 슬래브(Slab)와 거더(Girder)로 이루어진 상부구조와 교대, 교각, 기초슬래브로 이루어진 하부구조로 구성된다. 교면포장은 그림 2-2에 나타난 바와 같이 교량의 슬래브(바닥판) 위에 시공되는 포장을 의미한다. 교량은 상부구조와 하부구조의 형식에 따라 다양하게 분류될 수 있으나, 교면포장의 유지관리 측면에서는 바닥판 슬래브가 콘크리트 또는 강판 중 어떤 재료로 시공되었는지가 중요하다.

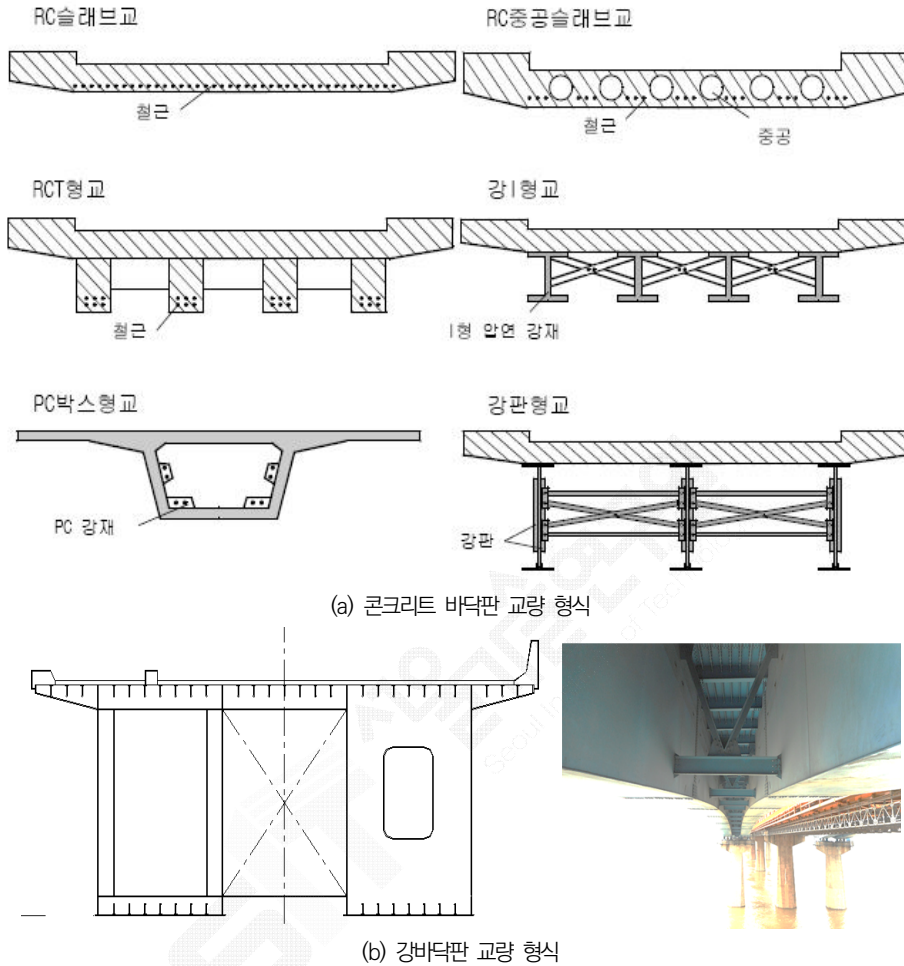


[그림 2-2] 교면포장의 구조

콘크리트 바닥판이란 그림 2-3(a)에 나타난 것과 같이 거터의 형태나 재료와 관계없이 바닥판이 철근콘크리트(Reinforced Concrete) 또는 프리스트레스 콘크리트(Prestressed Concrete), 프리캐스트(Precast) 등 시멘트 콘크리트로 시공된 모든 형식을 의미한다.

콘크리트 바닥판 교량은 포장층과 방수층의 시공상태가 양호할 경우 최대 100년의 공용수명을 기대할 수 있다. 그러나 이를 위해서는 화물 교통량의 증가, 급격한 온도 변화, 동결융해와 같은 환경하중에 의해 발생하는 균열에 대한 저항성이 요구되며, 제설제에 의한 염화물 침투에 대한 높은 화학적 저항성능도 요구된다. 일반적으로 콘크리트 바닥판 교량에 사용하는 교면포장의 하부층 재료는 SMA(Stone Mastic Asphalt) 또는 개질 아스팔트로 시공하며 아스팔트 표층은 하부층보다 강성이 높은 아스팔트 혼합물로 시공하게 된다.

강바닥판 교량은 그림 2-3(b)와 같이 바닥판과 거터가 일체형으로 구성된 교량이다. 강바닥판 교량은 슬래브를 콘크리트가 아닌 강판으로 제작하기 때문에 자중이 감소되어 지간장을 길게 설계할 수 있으나, 현장에서 용접을 하여야 하는 시공상 어려움으로 상대적으로 자주 사용하지 않는다. 강바닥판 교량은 바닥판이 강재이므로 우수 침투에 의한 부식 손상을 특히 주의하여야 한다. 강바닥판 교량은 진동이 크고, 유연성이 높기 때문에 교면포장 시공 시 변형과 피로균열에 저항성이 높은 개질 아스팔트와 같은 아스팔트 혼합물을 적용해야 한다.



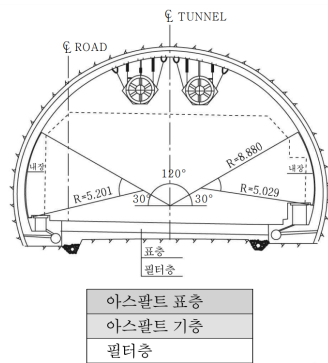
[그림 2-3] 교면포장의 형식

1-2. 터널포장

터널포장은 일반 토공부 포장에 비하여 노상을 이루고 있는 암반의 지지력이 크고, 온도의 변화가 적으며, 우천 시 강우의 영향을 적게 받는 등 포장 유지관리 측면에 있어 구조적·환경적 장점을 가지고 있다. 건설교통부에서는 터널포장의 경우 토공부 포장의 설계법을 적용하되, 보조기층을 생략하고 필터층을 사용하는 효율적인 설계방법을 제시한 바 있다(건설교통부, 2005). 본 연구에서는 해당 지침에서 제시하고 있는 터널 포장의 기본적인 단면을 조사하였다.

1) 터널 내 아스팔트 포장

건설교통부 지침에 따르면 터널 내 아스팔트 포장은 아스팔트 혼합물로 이루어진 표층(중간층 포함)과 기층을 본선의 토공부 포장과 동일하게 시공하고, 보조기층은 생략하는 대신 필터층을 적용한다(그림 2-4(a)). 일반적으로 아스팔트 포장의 보조기층은 하중의 일정 부분을 지지하는 역할을 하지만, 터널 내 포장은 노상이 암반으로 구성되어 있어 해당 기능을 고려하지 않는다. 대신 암반 또는 벽면으로 침투된 지하용출수의 배수가 필요하므로, 배수 및 여굴에 따른 조정층의 역할을 위해 필터층을 설치한다.



(a) 터널 내 아스팔트 포장의 구성

(b) 터널 내 아스팔트 포장 예시

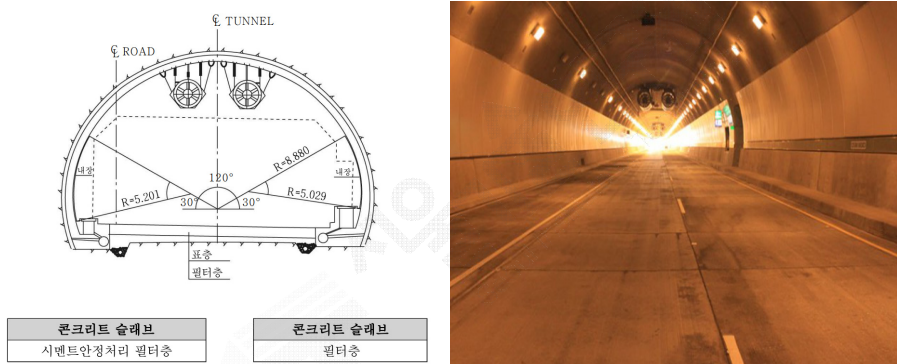
[그림 2-4] 터널 내 아스팔트 포장(건설교통부, 2005)

터널포장은 일반적으로 콘크리트 포장으로 되어 있다. 그러나 터널 연장이 500m 이하인 도심지 터널의 경우에는 지역 여건과 시공성을 고려하여 터널 전후 구간의 포장 형식과 동일하게 적용할 수 있다. 서울시의 경우 일부 터널을 제외하고 대부분의 터널포장은 아스팔트 포장으로 시공되어 있다.

터널 내 포장은 습윤상태가 되기 쉬우며, 아스팔트 혼합물은 콘크리트 혼합물보다 수분에 취약한 특성이 있다. 친수성골재는 수분을 흡수하여 아스팔트 피막과 골재를 분리시켜 박리현상을 일으킨다. 박리현상은 일반적으로 아래층부터 위로 진행할 경우, 밀립, 소성변형, 포트홀 등의 파손을 가져올 수 있으며, 위에서 아래로 진행할 경우 라벨링 등의 파손을 가져올 수 있다. 따라서 아스팔트 포장을 시공할 경우 수분에 대한 저항성이 강한 아스팔트 혼합물을 사용하여야 한다. 또한, 아스팔트 혼합물용 골재로 이암, 세일 등을 사용할 경우 수분에 대한 저항성이 매우 취약하므로 사용을 지양해야 하며, 모든 골재는 굵은 골재의 안정성 시험 결과가 12% 이하를 만족하여야 한다. 수침잔류 안정도가 75% 이하일 경우 골재를 개선하거나 박리방지제 등을 첨가하여야 한다.

2) 터널 내 콘크리트 포장

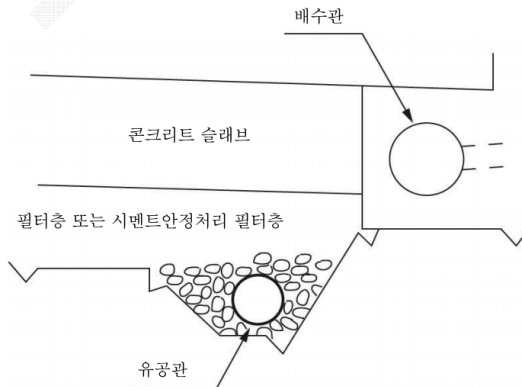
콘크리트 포장은 그림 2-5와 같이 콘크리트 슬래브와 하부층에 시멘트 안정처리 필터층 또는 일반 필터층을 적용하여야 한다. 불투수 기층을 적용할 경우는 용수의 배수를 위하여 반드시 하부에 필터층을 설치하여야 한다. 터널 내 콘크리트 포장은 유지관리가 어려우므로 콘크리트 슬래브와 줄눈재료는 공용기간 동안 받게 되는 교통 하중과 환경영향에 의한 손상을 충분히 지지할 수 있는 강도와 내구성을 가져야 한다. 콘크리트 슬래브의 기본 구성요소는 시멘트 콘크리트, 하중 전달장치, 타이바 및 줄눈재로 이루어진다. 이들은 비틀림, 풍화작용에 의해서 받게 되는 손상을 극소화할 수 있는 재료이어야 한다.



(a) 터널 내 콘크리트 포장의 구성

(b) 터널 내 콘크리트 포장 예시

[그림 2-5] 터널 내 콘크리트 포장(건설교통부, 2005)



[그림 2-6] 배수관 및 유공관의 구성(건설교통부, 2005)

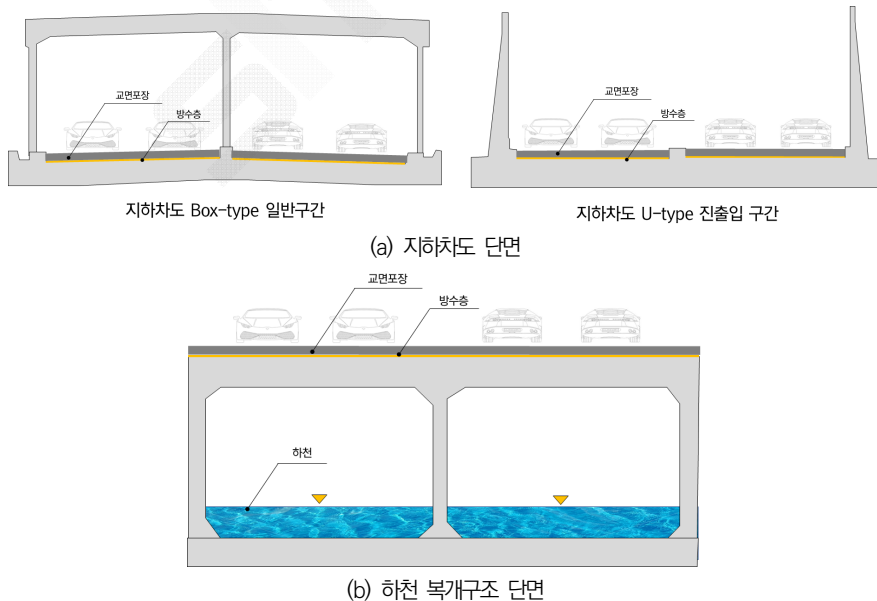
일반적으로 터널 벽면에서 발생하는 용출수는 그림 2-6의 배수관으로 배수되지만, 노상에서 발생하는 용출수는 필터층을 따라 유공관으로 배수를 한다. 배수불량으로 생기는 펌핑(Pumping)을 방지하기 위하여 투수성 입도의 필터층 또는 시멘트 안정처리 필터층을 설치한다. 시멘트 안정처리 필터층은 펌핑 현상이 발생했을 경우 필터층의 침식을 방지하고, 필터층의 내구성을 증대시킬 수 있다.

1-3. 구조물 포장 분류기준

본 연구의 대상 구조물은 서울시의 교량, 고가차도, 복개구조, 지하차도, 터널에 시공된 포장이며, 표 2-1은 각 구조물 포장의 특성을 고려하여 형식을 분류한 것이다. 교량 및 고가차도, 복개구조 및 지하차도의 포장은 ‘교면포장’으로 분류하였으며, 터널포장의 경우 ‘터널포장’으로 분류하였다. 그림 2-7에 교면포장의 단면도와 예시를 나타내었다.

[표 2-1] 구조물 포장 분류

구분	교면포장	터널포장
구조물	교량 고가차도 지하차도 복개구조	터널



[그림 2-7] 교면포장 분류



(c) 지하차도 예시



(d) 하천 복개구조 예시

[그림 2-7] 교면포장 분류(계속)

복개구조는 하천 등을 복개하여 도로의 용도로 사용하는 모든 구조물을 의미하며, 보통 콘크리트 박스 형태의 구조물로 하천 위에 건설된다. 상부에는 도로포장이 시공되고, 하부에는 하천이 흐르도록 설계된다. 복개구조는 교량의 교면포장과 동일하게 방수층, 신축이음 등의 구조적 특성을 갖기 때문에 교면포장으로 분류하였다.

지하차도 포장의 경우 U-type 진출입로, Box-type의 일반구간 모두 콘크리트 구조물에 방수층을 설치한 후 포장을 시공하기 때문에 교면포장으로 분류하였다.

터널 내 포장은 암반 및 필터층 위에 포장이 시공되며, 교면포장에 비해 환경적 영향이 매우 적기 때문에 별도로 분류하였다.

2. 국내 구조물 포장 관리기준 현황

2-1. 구조물 유지관리 관련 법령 및 지침

우리나라는 1990년대 중반 공용 중인 사회기반시설물의 붕괴사고를 겪었고, 이로 인해 많은 인명피해와 막대한 사회·경제적 비용이 발생하였다. 이러한 사태의 재발을 방지하기 위해 1995년 구조물의 안전점검 및 유지관리에 관한 사항을 규정한 “시설물의 안전관리에 관한 특별법”(이하 “시설물안전법”)이 제정되었다. 시설물안전법은 표 2-2에 기술된 바와 같이 제정 이후 최근 2020년도까지 개정을 거듭해왔으며, 국내에 존재하는 모든 구조물에 대한 점검에 적용되고 있다. 본 연구의 대상이 되는 교량, 고가차도, 지하차도, 복개구조, 터널에 시공되는 포장은 이러한 구조물의 구성 부재 중 하나로서 시설물안전법의 적용을 받고 있다.

[표 2-2] 구조물 유지관리 관련 제도, 법령의 변화

구분	공포일자	법령 및 행정규칙	비고
제정	1995.01.05.	시설물의 안전관리에 관한 특별법	법률 제4922호
	1995.04.20.	시설물의 안전관리에 관한 특별법 시행령	대통령령 제14631호
	1995.06.03.	시설물의 안전관리에 관한 특별법 시행규칙	건설교통부령 제19호
	1995.07.07.	시설물의 안전점검 및 정밀안전진단 지침	건설교통부고시 제1995-245호
최근 개정	2020.12.10.	시설물의 안전관리에 관한 특별법	법률 제17447호
	2021.01.05.	시설물의 안전관리에 관한 특별법 시행령	대통령령 제31380호
	2020.12.11.	시설물의 안전관리에 관한 특별법 시행규칙	국토교통부령 제914호
	2020.12.10.	시설물의 안전 및 유지관리 실시 등에 관한 지침	국토교통부고시 제2020-869호

구조물 각 구성 부재의 상태등급 및 안전성 평가 관련 사항은 시설물안전법에서 상세하게 규정하고 있다. 표 2-3과 같이 정기점검, 정밀점검, 긴급점검 및 정밀안전진단으로 점검의 종류를 구분하고 있으며, 안전점검 및 정밀안전진단, 성능평가 세부지침에서 작성된 판정 기준을 따르고 있다. 각 점검은 표 2-4의 구조물의 안전등급에 따라 점검 주기가 달라진다.

【표 2-3】 시설물안전법 시행령에 제시된 구조물 점검방법

점검종류	점검내용	구조물 안전등급	점검주기
정기점검	외관상태를 육안으로 개략점검하는 것으로 점검내용에 대한 상세는 관련지침에서 정함	-	1회/6월
정밀안전점검	외관상태를 관련지침에서 정하는 양식 및 기준에 의해 점검함	A등급	1회/3년
		B, C등급	1회/2년
		D, E등급	1회/1년
정밀안전진단	정밀한 외관조사와 구조적 안전 및 결함의 원인 등을 분석·평가하여 보수 및 보강방법을 제시함	A등급	1회/6년
		B, C등급	1회/5년
		D, E등급	1회/4년
긴급점검	정밀점검 수준의 안전점검	-	필요시
성능평가	시설물의 성능을 종합적으로 평가	-	1회/5년

【표 2-4】 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침의 판정기준

안전등급	상태
A	문제점이 없는 최상의 상태
B	보조부재에 경미한 결함이 발생하였으나 기능 발휘에는 지장이 없으며, 내구성 증진을 위하여 일부의 보수가 필요한 상태
C	주요 부재에 경미한 결함 또는 보조부재에 광범위한 결함이 발생하였으나 전체적인 시설물의 안전에는 지장이 없으며, 주요 부재에 내구성, 기능성 저하 방지를 위한 보수가 필요하거나 보조부재에 간단한 보강이 필요한 상태
D	주요 부재에 결함이 발생하여 긴급한 보수·보강이 필요하며 사용제한 여부를 결정하여야 하는 상태
E	주요 부재에 발생한 심각한 결함으로 인하여 시설물의 안전에 위험이 있어 즉각 사용을 금지하고 보강 또는 개축을 하여야 하는 상태

각 구조물은 시설물안전법에 의해 관리주체가 지정되어 있으며 일반적으로 관리주체 내에 유지관리 담당 조직 또는 부서가 설치되어 있다. 관리주체는 관계법령에 의하여 해당 시설물의 관리자로 규정된 자 또는 해당 시설물의 소유자를 의미하며, 공공관리주체와 민간관리주체로 구분할 수 있다. 공공관리주체는 국가·지방자치단체, 정부투자기관 및 지방공기업, 기타 시설물안전법 시행령 등에 의해 정해지며, 민간관리주체는 공공관리주체 외의 관리주체를 의미한다.

시설물안전법에 명시된 1종, 2종 시설물의 안전점검 지침은 표 2-5와 같이 성능평가편, 안전점검·진단 편 2권으로 구성되며, 3종 시설물의 경우 안전등급 평가 매뉴얼이 별도로 제시되어 있다. 그러나 터널포장의 경우 시설물안전법 성능평가편 지침 외에 별도의 관리지침이나 상태평가 기준은 존재하지 않는다.

[표 2-5] 구조물 포장 관련 국내 관리지침 및 매뉴얼 조사

구분	지침 및 매뉴얼	발행기관	연도	주요내용
안전점검	시설물 안전 및 유지관리 실시 세부지침 (성능평가 편)	국토교통부	2019	구조물 포장은 기타부재로서 안전성능평가 실시 ※ 사용성은 포장상태평가지수 (HPCI, NHPCI)로 관리
	시설물 안전 및 유지관리 실시 세부지침 (안전점검, 진단 편)	국토교통부	2019	안전점검 및 안전진단 시 교면포장 점검항목 및 기준 제시
	제3종 시설물 안전등급 평가 매뉴얼	국토교통부	2018	제3종 교량에서의 교면포장 체크리스트 및 평가항목 제시

※ 포장상태평가지수(HPCI, NHPCI) 산정방식은 부록에 첨부

성능평가 편은 1, 2종 구조물의 구성 부재별로 안전성능, 내구성능, 사용성능을 평가하는 기준 및 방안이 수록된 지침이다. 안전점검·진단 편은 구조물의 물리적·기능적 결함을 발견하기 위한 조사 방법과 평가 방법 보수·보강 방법을 제시하는 기준 및 방안이 수록된 지침이다. 교면포장 및 바닥판의 경우 안전성능(안전점검·진단), 사용성능으로 구분하여 관리하고 있으며, 터널포장은 사용성능만 관리하고 있다. 본 절에서는 세부지침에서 명시하고 있는 구조물 포장 관련 기준을 설명하였다.

1) 안전성능평가/안전점검/안전진단 기준

표 2-6은 교량 구조물의 부재별 상태의 안전성능 적용 범위를 구분한 사항에 대해 정리한 것이다. 교량의 안전에 직접적인 영향을 미치는 바닥판은 평가 기준을 a~e로 범위를 적용하고, 내구성능에 영향을 미치는 교면포장은 a~d로 범위를 적용하고 있다. 세부 시설별 조사 방법은 표 2-7과 같이 대부분 육안조사 방법을 제시하고 있다.

[표 2-6] 교량 구조물 부재별 안전점검·진단 적용 범위(국토교통부, 2019)

주요부재의 분류	적용 범위	점검 및 진단 실시범위			
		정기안전점검	정밀안전점검	정밀안전진단	
상부구조	바닥판, 거더 등	a, b, c, d, e	○	○	○
기타부재	신축이음, 배수시설, 교면포장 등	a, b, c, d	○	○	○

[표 2-7] 구조물 세부시설별 조사사항(국토교통부, 2019)

부재구분	진단부위		진단방법
상판부	교면포장(아스팔트, 콘크리트)		육안
	배수시설(배수구, 배수관)		육안
	바닥판	손상(균열, 탈락)	비파괴장비 및 육안
		열화(누수, 백태)	육안

교면포장과 바닥판의 안전성능평가 기준은 아래 표 2-8로부터 표 2-9에 명시된 기준에 따라 수행한다. 여기서 교면포장의 불량률을 나타내는 손상의 종류는 아스팔트의 경우 균열, 함몰, 단차 요철, 블리딩, 마모, 평탄성, 백태 등이고, 콘크리트의 경우는 균열, 마모, 박리, 파손, 평탄성 등이 있다. 포장 불량률은 손상된 포장의 면적을 전부 더한 값을 경간 면적으로 나눈 비율이다. 교면포장의 평가 기준 범위는 a~d이며, 평가 기준 “d”는 균열률을 포함하여 포장 불량률이 10% 이상인 상태로, 전반적인 재포장이 필요한 상태를 의미한다. 바닥판 평가 기준에서 균열률은 균열 발생면적을 조사 단위면적으로 나눈 값이며, 표면 손상면적도 동일하게 산정된다. 또한, 안전점검·진단 편에서 명시하고 있는 교면포장과 바닥판의 상태평가 기준은 표 2-8, 표 2-9와 동일하며, 바닥판 상태안전성능평가 기준의 대상은 바닥판 하면에 국한된다.

[표 2-8] 교면포장 상태안전성능평가 기준 및 방법(국토교통부, 2019)

기준	포장불량		배수
	미세균열	없음	
a	미세균열	없음	없음
b	포장불량률 2% 미만	포장손상이 미미하여 주행에 영향 없음	배수구배 및 배수시설 불량에 의한 부분적 물고임
c	포장불량률 2% 이상 10% 미만	포장손상으로 인하여 차량의 통행에 영향 있음	배수구배 및 배수시설 불량에 의한 물고임 발생으로 주행성 저하
d	포장불량률 10% 이상	전반적인 재포장이 필요한 상태	배수불량에 의한 물고임으로 통행차량의 안전성능 저하

[표 2-9] 바닥판 상태안전성능평가 기준 및 방법(국토교통부, 2019)

기준	균열		열화 및 손상
	1방향 균열	2방향 균열	
a	균열 폭 0.1mm 미만	망상균열 폭 0.1mm 미만	없음
b	균열 폭 0.1mm 이상 0.3mm 미만 균열률 2% 미만	망상균열 폭 0.1mm 이상 0.3mm 미만	표면 손상면적 2% 미만
c	균열 폭 0.3mm 이상 0.5mm 균열률 2% 이상 10% 미만	망상균열 폭 0.3mm 이상	표면 손상면적 2% 이상 10% 미만 철근부식 손상면적 2% 미만 데크플레이트 박리 및 누수 발생
d	균열 폭 0.5mm 이상 1.0mm 미만 균열률 10~20% 미만	망상균열의 진전으로 인한 콘크리트 박리 발생	표면 손상면적 10% 이상 철근부식 손상면적 2% 이상 데크플레이트 박리가 심하고 누수로 인한 부식 발생
e	균열 폭 1.0mm 이상 균열률 20% 이상	망상균열에 의한 박리가 심하여 편칭파괴 발생 가능성 있음	부식으로 인한 철근의 단면감소가 심하여 바닥판의 안전성능이 저하되는 경우

한편, 터널의 안전점검 및 정밀안전진단 대상시설 조사 결과 포장의 경우 대상 부재로 고려되지 않아 터널포장은 평가 및 관리기준이 없는 실정이다.

2) 사용성능평가 기준

구조물의 각 부재는 성능평가의 정의에 따라 사용성과 기능성으로 구분한다. 사용성능이란 서비스에 직접적인 영향을 미치는 시설물의 성능으로 사용자의 만족도 측면에서의 분류 기준이다. 교량의 포장과 터널의 포장은 표 2-10과 같이 a~e의 5개 등급으로 차등 구분된다.

【표 2-10】 구조물 사용성능 적용 범위(국토교통부, 2019)

구조물	특징	세부지표의 분류	등급 범위
교량	사용성	포장상태	a, b, c, d, e
		교량조명	
		진동사용성	
터널	주행성	포장상태	
		터널 내 휘도	

포장상태 평가등급 범위는 고속국도의 경우 고속도로 포장상태지수(HPCI; Highway Pavement Condition Index)를 관리기준으로 적용하고, 일반국도의 경우 일반도로 포장상태지수(NHPCI; National Highway Condition Index)를 적용하여 산정한다(표 2-11). 평가 시 고속국도, 일반국도의 PMS(Pavement Management System) 정보를 활용하며, 평가된 자료가 없을 시 책임기술자의 판단에 따라 장비를 활용하여 실제 측정값을 적용하여 평가등급을 산정할 수 있다.

【표 2-11】 구조물 포장 상태 사용성능 등급 기준(국토교통부, 2019)

등급	고속국도 등급 기준	
	HPCI 범위	설명
a	4.0 초과	매우 양호
b	3.5~4.0	양호
c	3.0~3.5	보통
d	2.0~3.0	불량
e	2.0 이하	매우 불량

【표 2-11】 구조물 포장 상태 사용성능 등급 기준(국토교통부, 2019)(계속)

등급	일반국도 등급 기준	
	NHPCI 범위	설명
a	6.0 이상	매우 우수
b	5.5~6.0	우수
c	4.0~5.5	보통
d	2.0~4.0	불량
e	0.0~2.0	매우 불량

구조물의 관리주체는 안전점검 및 성능평가 결과에 따라 발생된 결함의 종류 및 정도, 중요도, 경제성 등을 검토하여 보수·보강 방법을 결정한다. 교량의 경우 구성 부재 중 교면포장의 중요도는 바닥판, 교각, 받침, 신축이음 다음 순이며, 터널포장의 경우는 중요도에 대하여 명시되어 있지 않다.

구조물 구성 부재의 보수 및 보강을 위해서는 상기의 상태안전성능평가, 내구성능, 사용성능평가 결과 등을 종합한 성능등급을 산정하여야 하며, 각 부재의 결함 발생원인 등에 대한 정확한 분석 후 적합한 공법을 선정하도록 하고 있다.

3) 제3종 시설물 안전등급 평가 매뉴얼

제3종 시설물 또는 구조물이란 제1종, 제2종 구조물 외에 안전관리가 필요한 소규모 시설물을 의미한다. 20~100m 연장의 교량, 300m 미만의 터널 등이 여기에 해당된다. 제3종 시설물 안전등급 평가 매뉴얼(이하 “매뉴얼”)의 목적은 제3종 시설물의 정기안전 점검 시 안전등급평가를 위한 점검 방법과 요령을 제시하기 위함이다. 해당 매뉴얼은 교량 및 육교의 교면포장과 바닥판, 지하차도 포장, 터널포장의 균열 및 손상상태 분류 기준을 제시하였다.

각 평가항목은 1종, 2종 시설물의 세부지침과 달리 양호, 주의, 불량 3가지의 조건으로 비교적 정성적인 기준으로 구분하고 있다. 양호는 10점, 주의는 7점, 불량은 0점으로 계산되며 부재별 점수산정 합산을 통해 A~E등급의 종합 상태등급을 부여하고 보수 및 보강을 실시한다.

표 2-12, 표 2-13은 교량 및 육교의 교면포장과 바닥판 균열 및 손상상태 분류기준을 정리한 것이다. 또한, 표 2-14는 터널 및 지하차도의 포장 노면에 발생한 균열 및 손상상태 분류기준에 대해 명시하였다. 해당 기준은 교면포장의 기준과 동일하다.

[표 2-12] 제3종 구조물 교면포장의 균열 및 손상상태 기준(국토교통부, 2018)




평가항목		교면포장의 균열 및 손상 상태	
평가등급	양호		- 포장손상이 미미하여 주행에 영향이 없는 경우
	주의		- 포장불량률이 10% 미만인 경우 - 포장손상으로 차량의 통행에 영향이 있는 경우 - 물고임 발생으로 주행성이 저하된 경우
	불량		- 포장불량률이 10% 이상인 경우 - 전반적인 재포장이 필요한 경우 - 배수불량으로 통행차량의 안전성 저하가 우려되는 경우

※ 포장불량률 : 균열발생부, 표면이 노화되어 마모된 부분, 기보수된 부분 등의 면적을 전부 더한 값을 경간면적으로 나눈 비율

[표 2-13] 제3종 구조물 거더, 바닥판 균열 및 손상상태 기준(국토교통부, 2018)

평가항목		교면포장의 균열 및 손상 상태	
평가등급	양호		- 균열이 없거나 0.3mm 미만의 미세균열이 있는 경우 - 표면손상(파손, 박락, 층분리 등) 면적이 2% 미만이고 철근노출이 없는 경우
	주의		- 0.3mm 이상 0.5mm 미만의 균열이 발생하거나 균열면적률이 10% 미만인 경우 - 표면손상 면적이 2% 이상이고 10% 미만인 경우 - 철근부식 손상면적이 2% 미만인 경우
	불량		- 0.3mm 이상 0.5mm 미만의 균열이 발생하거나 균열면적률이 10% 미만인 경우 - 표면손상 면적이 2% 이상이고 10% 미만인 경우 - 철근부식 손상면적이 2% 미만인 경우

【표 2-14】 제3종 터널포장 노면 균열 및 손상상태 기준(국토교통부, 2018)

평가항목		교면포장의 균열 및 손상 상태	
평가등급	양호		- 포장손상이 미미하여 주행에 영향이 없는 경우
	주의		- 포장불량률이 10% 미만인 경우 - 포장손상으로 차량의 통행에 영향이 있는 경우 - 물고임 발생으로 주행성이 저하된 경우
	불량		- 포장불량률이 10% 이상인 경우 - 전반적인 재포장이 필요한 경우 - 배수불량으로 통행차량의 안전성 저하가 우려되는 경우

2-2. 구조물 포장의 정비기법 관련 지침

국내 구조물 포장의 품질관리, 정비기법 관련 지침은 표 2-15에 기술하고 있다. 교면포장에 대한 정비기법, 품질관리 등에 관한 지침 또는 매뉴얼은 총 4가지로 구성된다. 2007년 건설교통부에서 발행한 교면포장 품질관리 매뉴얼, 2011년 국토해양부에서 발행한 아스팔트 콘크리트 포장 시공 잠정지침, 2013년 국토해양부가 발행한 도로포장 유지보수 실무편람, 2017년 국토교통부에서 발행한 아스팔트 콘크리트 포장 시공지침이 있다. 현재 교면포장의 신규공사, 재포장공사에서 적용되는 방수층 재료 품질기준, 교면포장 재료 품질기준은 2017년 시공지침을 따르도록 하고 있다. 터널의 경우 2005년에 건설교통부에서 발행된 터널 내 포장설계 지침이 정비기법 관련 자료로 유일하다.

【표 2-15】 구조물 포장 관련 국내 정비기법 지침 및 매뉴얼 조사

지침 및 매뉴얼		연도	주요내용
건설교통부	교면포장 품질관리 매뉴얼	2007	교면포장의 설계, 재료, 시공품질에 대한 관리기준 제시
국토해양부	교면포장 설계 및 시공 잠정지침	2011	
국토교통부	아스팔트 콘크리트 포장 시공지침	2017	
국토교통부	도로포장 유지보수 실무편람	2013	교면포장 유지보수 의사결정방안 제시, 유지보수를 위한 교면포장 조사항목 제시
건설교통부	터널 내 포장설계 지침	2005	터널내 포장 설계 방법, 재포장 설계기준은 없음

1) 교면포장 품질관리 매뉴얼(건설교통부, 2007)

교면포장 품질관리 매뉴얼은 아스팔트 콘크리트 교면포장의 파손을 최소화하기 위하여 주요 파손 특성에 대한 문제점과 대책, 품질기준을 제시하였다. 또한 아스팔트 콘크리트 교면포장의 설계 및 시공 시의 유의사항을 기술하였다.

교면포장은 바닥판 상면과 충분히 부착되어 균열손상, 열화 손상, 마모, 부식을 견딜 수 있어야 하기 때문에 다음과 같은 성질의 포장 재료를 사용하여야 한다.

- 균열 또는 이탈작용(debonding), 교량상판의 수축·팽창 작용을 수용할 수 있도록 충분한 연성(ductility)을 가져야 함
- 상판의 반복적인 휨거동에 의한 균열작용에 저항할 수 있도록 충분한 피로강도를 가져야 함
- 바퀴자국 패임, 표면밀립(shoving) 그리고 마모작용에 저항할 수 있도록 내구성(durability)을 가져야 함
- 표층면에 떨어지는 빗물, 자동차 연료 또는 기름에 대하여 불투수성이어야 함
- 제설용 염화물 또는 통행차량에서 떨어진 기름 등과의 화학적 작용에 의한 손상에 저항할 수 있어야 함

일반적으로 교면포장 재료는 밀도가 높고 공극률과 투수성이 낮도록 특별 배합설계된 시멘트 콘크리트 또는 아스팔트 콘크리트 혼합물이어야 한다. 일반적인 교면포장 두께인 5~10cm에서 두께를 더 증가시키는 방법은 상판과 교면포장과의 합성작용으로 인해 중립축이 상승하고, 전단파괴에 의한 교면포장의 이탈 작용을 촉진하므로 지양하여야 한다.

한편, 교면포장 방수공은 시공 시 주변 온도의 영향을 크게 받는다. 기온이 너무 높거나, 너무 낮아도 방수재가 성능을 발휘하는 데 악영향을 미치므로 방수층은 기온 5℃ 이하에서는 원칙적으로 시공을 하지 않는 것이 바람직하다. 또한 햇볕이 있고 대기 온도가 30℃ 이상일 때에는 시공을 지양하여야 한다.

교면포장은 소성변형 및 밀림에 대한 저항성을 갖추어야 하고, 우수가 침투하지 못하도록 다짐관리 및 이음부 관리가 잘 되어야 하며, 방수층과의 접착이 잘 되어야 한다. 따라서 종방향 이음부 다짐에 대한 시공 관리가 필요하며, 표층과 레벨링층 시공 과정에서 평탄성을 지속적으로 확인하는 배수 조건 등의 관리가 필요하다. 표 2-16은 교면포장 품질관리 매뉴얼의 시공 시 다짐관리 유의사항을 요약한 것이다.

[표 2-16] 교면포장 시공 시 다짐관리 유의사항(건설교통부, 2007)

시공 사진	유의사항
	<p>교면 레벨링층 포설 시의 종방향 이음부와 표층 포설 시의 종방향 이음부를 15cm 이상 이격</p>
	<p>2차 표층 포설 후 마카담 롤러를 통해 이음부위를 선다짐하여 충분한 면마무리 필요</p>
	<p>방호벽 단부 접속부 하단에는 인력 포설 후 피니셔 포설 및 롤러 다짐 그리고 콤팩터에 의한 추가다짐으로 수밀성 확보</p>
	<p>토공부와 접속구간은 경사확인 후 포설을 실시하여야 하며, 인력 포설을 통해 정밀시공이 필요</p>

교면 방수재는 시트식, 도막식, 복합식, 침투식으로 구성된다. 시트식 방수는 부직포 또는 합성고무나 수지, 플라스틱, 아스팔트 등을 주원료로 하여 적층 성형한 시트를 접착제 및 가열로 용착시키는 공법이다. 도막식 방수는 우레탄, 아크릴, 클로로프렌과

같은 고무계, 고무아스팔트계, 수지계 등의 재료로 직접 도포하는 방식으로 시공된다. 복합식 방수공법은 도막과 시트 공법을 합성한 공법이다. 침투식 방수공법은 삼투성을 응용한 것으로 방수재가 석회 및 수분과 화합하여 콘크리트의 수산화칼륨과 화학 반응하여 불용성 규산질칼슘 방수막 겔을 형성시키는 공법이다.

방수층의 불량은 제설 염화물의 침투, 우수의 침투 등을 유발하여 교면포장 및 바닥판의 파손을 가속한다. 따라서 교면 방수의 설계 및 시공 시 주의를 기울여야 한다. 시트식 방수공법의 경우 아스팔트 혼합물 온도가 저하되면 융착이 되지 않아 방수층 불량을 유발하고, 체류수, 열화 손상 등을 야기할 수 있다. 시트식 방수 불량을 막기 위해서는 공사 시 부착강도를 증진하기 위하여 롤러 다짐을 시행하거나 기계식 접착방식을 통한 시공이 필요하다. 도막방수 역시 부착강도의 저하가 파손의 주요 원인이다.

교면포장은 토공부에 비해 상대적으로 얇은 포장이기 때문에 차량 하중의 진행방향으로 수평 전단응력이 발생하며, 부착강도가 낮을 경우 그림 2-8(a)와 같은 분리현상이 발생한다. 도막방수는 반드시 접착강도를 확보할 수 있도록 고무계 개질유화아스팔트로 텍코팅을 실시하여야 한다. 침투식 방수는 슬래브 표면에 별도의 방수막 분리층을 형성하지 않기 때문에 염화물이 용해된 침투수가 슬래브에 체류하게 되면 열화가 가속화될 수 있다. 따라서 제설량이 많은 지역의 교량의 경우 침투식 방수의 사용을 지양할 필요가 있다.



(a) 바닥판 상면과 방수층의 분리

(b) 방수층 불량에 의한 밀림, 포트홀

[그림 2-8] 방수층 불량으로 인한 교면포장 파손사례(건설교통부, 2007)

교면포장의 두께는 반드시 8cm 이상 확보할 수 있도록 하며, 다짐 완료 후 초기공극률은 8%, 최종공극률은 3% 이상이 되도록 시공하여야 한다. 교면포장용 혼합물은 반드시 2층으로 시공하여야 하며, 하부층은 수밀성을, 상부층은 내유동성을 확보할 수 있도록 한다. 다짐밀도는 기준밀도의 96% 이상으로 하고, 시공균열(Cold Joint)은 최소화하여야 한다.

교면포장의 유지보수를 위해서는 바닥판의 열화된 부분은 완전히 제거하여 바닥판을 보호하여야 한다. 열화된 부분이 국부적일 경우에는 초속경 콘크리트 또는 에폭시 콘크리트를 사용하여 보수하고, 전면적으로 열화되었을 경우는 콘크리트 노출 바닥판, LMC, 초속경 LMC 등을 사용하여 전면 보수한다. 또한, 시공 전 바닥판과 방수층이 잘 접착될 수 있도록 이물질은 확실히 제거하여야 한다.

한편, 교면 방수 재시공 시에는 부득이한 경우를 제외하고 칩투식 방수로 시공하는 것을 지양하여야 한다. 시트나 도막방수로 시공하였을 때 방수상태가 양호하면 방수막은 보호 조치하며, 교면 방수 재시공 시 층간 접착을 위해 품질관리를 철저히 하여야 한다. 유지보수 시에는 방수막의 양생 속도가 빠른 복합식 방수공법을 고려할 필요가 있다.

2) 교면포장 설계 및 시공 잠정지침(국토해양부, 2011)

교면포장 설계 및 시공 잠정지침은 도로교 교면포장에 적용되는 아스팔트 콘크리트 교면포장의 조기 파손 방지와 내구성 향상을 위한 교면포장의 설계 및 시공 관련 적용 기준 정립이 목적이다. 본 지침에 규정되어 있지 않은 사항은 도로공사 표준시방서(국토교통부, 2016), 아스팔트 혼합물의 생산 및 시공 지침(국토교통부, 2015), SMA 포장 생산 및 시공 지침(국토해양부, 2011) 및 해당 기관의 「전문 시방서」를 따른다(국토해양부, 2011).

교면포장의 포장/재포장 두께는 어떤 교통조건에서도 8cm를 표준으로 한다. 부족한 포장두께로 인한 균열 등의 파손 발생 가능성과 과도한 두께로 인한 도로교 사하중을 저감하기 위한 방안으로 표준두께를 8cm로 적용하였다. 교면포장의 종류와 배합설계를 달리하여 시공할 수 있도록 상부층 4cm와 하부층 4cm로 구성한다.

교량 형식과 연장에 관계없이 설계 교통량이 8.2톤 등가단축하중(ESAL) 기준으로 1000대/Lane/일 이하일 경우나, 비교적 도로교 연장이 짧은 라멘교 또는 슬래브교 경우에는 시트식 또는 도막식(단일층 개념) 방수를 적용할 수 있다. 설계 교통량이 8.2톤 등가단축하중(ESAL) 기준으로 1000대/Lane/일 이상으로 도로교 연장이 100m 이상일 경우는 도로교 바닥판으로 우수가 침투하는 것을 완전히 방지하기 위해 1.5층과 2층의 방수층을 적용할 수 있다. 방수층의 구성은 하부에서 상부의 순으로 칩투식+프라이머+시트식 또는 도막식(1.5층 개념), 프라이머+도막식+시트식(2층 개념), 프라이머+시트식+시트식(2층 개념)으로 구성할 수 있다. 상기 1.5층 개념의 방수층은 1차 칩투식 보조 방수재를 적용하고, 2차 시트식 또는 도막식 방수재를 적용하여 시트 또는 도막 방수층 파손 발생 시 포장체를 통하여 침투한 우수와 염화물에 의한 열화를 방지할 수 있도록 한 것이다.

[표 2-17] 교면포장 바닥판 방수재 선정 시 고려사항(국토해양부, 2011)

선택조건		방수재 선택 요령
교면	방수재 시공 후의 양생	공정상 충분한 시간을 가질 수 없는 경우가 많으므로 양생 시간이 짧은 것을 선택
재포장 시	바닥판 표면의 상태	포장의 재포장 시에는 시멘트 콘크리트 바닥판 상면에 열화나 요철이 생겨 있는 경우가 많음. 따라서 바닥판 상면의 요철에 대한 시공성이 좋은 것을 선택
교통조건	중(重)교통 노선	방수재의 인장강도가 높은 것을 선택 방수 시스템의 전단접착강도가 높은 것을 선택
도로구조	곡선부 오르막 구간	차량에 의한 원심력이나 가속, 제동에 따른 전단력이 큰 것을 고려하여 인장강도 및 전단접착강도가 높은 것을 선택
기상조건	온난지	여름철 노면온도를 고려하여 전단접착강도 및 인장강도 모두 높은 것을 선택
	한랭지	겨울철 노면온도를 고려하여 저온에서 인장강도 및 인장 접착강도가 높은 것을 선택

교면포장의 파손으로 인하여 하부층까지 절삭할 경우 신설 교면포장 설계 방법과 동일하게 적용한다. 또한, 교면포장 보수를 위한 절삭 작업 시 바닥판 손상을 최소화 하는 방법을 강구하여야 한다. 절삭 작업 시 바닥판에 손상을 줄 수 있고, 상부층만을 절삭 시에도 하부층에 교란이 올 수 있다. 기존 하부층에 물의 침투 등으로 박리 현상이 진전된 경우 하부층 아스팔트 혼합물이 떨어져 나오는 현상과 방수층의 성능 저하를 야기할 수 있기에 유지보수 계획단계에서 교면포장의 현장 시료 채취 조사를 통하여 보수범위를 미리 계획하여야 한다.

노후된 아스팔트 포장층 절삭 시 기존 15mm 비트 간격 드럼에서 8mm 비트 간격 드럼을 사용하여 바닥판 평탄성을 확보하여 방수재의 부착강도 품질기준을 만족시킨다. 15mm 비트 간격 드럼 사용으로 10mm 이상의 종방향으로 요철이 발생하면, 방수재의 접착 불량 발생하며, 우수의 교면포장 침투 시 종방향 골을 따라 물이 흘러 방수재의 파손이 급속히 진행될 수 있다. 또한 횡단 경사를 따라 물이 흘러 배수처리되지 않고 요철에 고인 물이 장기적으로 체류하여 교면포장의 조기 파손을 유발할 수 있다.



(a) 15mm 간격 드럼 사용 절삭 시



(b) 8mm 간격 드럼 사용 절삭 시

[그림 2-9] 비트 간격에 따른 교면포장 절삭 후 바닥판 표면 상태

3) 아스팔트 콘크리트 포장 시공지침(국토교통부, 2017)

아스팔트 콘크리트 포장 시공지침은 아스팔트 포장 전반에 대한 재료선정, 시공기준, 품질관리기준을 제시하고 있으며, 교면포장에 대한 최신 지침도 포함하고 있다. 그러나 본 지침에서 토공부 포장에 대한 유지보수 방법에 대한 사항은 제시하고 있으나, 교면 포장의 유지관리를 위한 정비기법에 대한 사항은 별도로 제시하고 있지 않다. 다만, 방수층까지 재포장하는 교면포장의 정비기법은 신설포장에 준하기 때문에 시공지침의 각 기준을 따라야 한다.

2017년 시공지침부터 방수재는 시트식 및 도막식 2종류로 한정하였다. 그러나 1.5층 개념의 방수층의 경우 침투식+도막/시트식 방수를 고려할 수 있다. 표 2-18에는 교면포장 바닥판의 방수재 분류 및 특징을 나타내었다.

[표 2-18] 바닥판 방수재 선정 시 분류 및 특징(국토교통부, 2017)

종류		시공방법	최소 두께	형태	준수사항
시트식	가열 용착식	방수재 하면에 불이나 고온의 열을 가하여 접착	4mm	폴리에스테르 부직포에 고무 혼합 아스팔트를 합침	기계식 시공 장비 사용 (현장 여건상 인력시공 가능)
	부착식	시트와 동일한 재질의 접착재를 고온으로 가열하여 도포하면서 바로 시트를 접착	2mm		
	자착식	시트 하면에 접착성분이 있어서 필름을 벗겨내면서 중량을 가하여 접착	2mm		
도막식	용제형	프라이머 도포 양생 후 주재료와 휘발성 용제가 혼합된 상온의 용액을 약 3회 이상 도포	2mm	클로로프렌 고무를 톨루엔이나 크실렌 등의 용제에 용해한 액상 상태	부직포나 직포 등의 중심 기재 없이 사용 불가
	가열형	프라이머 도포 양생 후 고무아스팔트계라고도 불리며 약 이상의 고온으로 190℃ 가열하여 도포	2mm	아스팔트를 합성고무 등으로 품질을 개선한 고체 상태	
	수지형	프라이머 도포 양생 후 자기반응형 합성수지를 현장에서 상온으로 혼합하여 도포	1mm	합성수지로 구성되고 화학반응에 의해 경화하는 액상 상태	
	수지 슬러리형	프라이머 도포 양생 후 자기반응형 합성수지와 규사 등을 상온에서 혼합하여 도포	2mm	12액 또는 액형 수지와 직경 이하의 2mm 규사가 혼합된 슬러리 상태	

다음은 교면 방수재의 품질 시험 기준 및 항목을 정리한 것이다.

- 교면포장 바닥판용 방수재 품질기준(시트식, 도막식)(표 2-19)
- 교면포장 바닥판용 방수재 역학적 품질 기준(표 2-20)

[표 2-19] 교면포장 바닥판 방수층 재료 선정기준(국토교통부, 2017)

항목			품질기준		시험기준
			시트식	도막식	
인장 성능	인장강도 (N/mm ²) 23°C, 40°C	무처리	4.0 이상		KS F 3211
		알카리처리	무처리의 80% 이상		
		가열처리	무처리의 80% 이상		
	최대하중 시 신장률(%) 23°C, 40°C	무처리	20~60		
		알카리처리	무처리의 80% 이상		
		가열처리	무처리의 80% 이상		
비휘발분(%)			-	표시 값 ± 3% 이내	KS M ISO 3251
내투수성			투수되지 않을 것		KS F 4931
염화이온 침투 저항성(Coulombs)			100 이하		KS F 2711
내음폭 패임			구멍이 생기지 않을 것		KS F 4917
내열차수 안정성(%)	150°C, 30분	± 2.0 이내		KS F 4931	
저온 굴곡성	-10°C	균열이 없을 것		KS F 4917	
접합강도(N/mm ²)			3.0 이상	-	KS F 4931
내피로성			잔금, 찢김 및 파단이 생기지 않을 것		KS F 4917
내균열성			-10°C 잔금, 찢김 및 파단이 생기지 않을 것		KS F 4931

[표 2-20] 교면포장 바닥판 방수층 역학적 품질기준(국토교통부, 2017)

항목			품질기준		시험기준
인장 접착강도(N/mm ²)	-10°C		1.5 이상		KS F 4931 KS F 4931
	23°C		0.8 이상		
전단 접착 성능	전단 접착강도(N/mm ²)	-10°C	1.0 이상		
		23°C	0.2 이상		
	전단 접착변형률(%)	-10°C	0.5 이상		
		23°C	1.0 이상		
수침 인장접착시험		23°C	수침 전의 70% 이상		
피로 균열 시험		-10°C	잔금, 찢김, 파단이 생기지 않을 것		

교면포장용 아스팔트 혼합물은 표 2-21로부터 표 2-22와 같이 최대 13mm 밀입도 아스팔트 혼합물(WC-1, WC-6)과 SMA 혼합물, 구스 아스팔트 혼합물을 교량의 특성을 감안하여 적용하며 재료 및 승인 시험은 가열 아스팔트 혼합물과 동일하게 적용한다. 교면포장 시공방법은 2011년 교면포장 설계 및 시공 잠정지침, 2013년 도로포장유지보수실무편람에 명시된 사항과 동일하다.

[표 2-21] 도로교 교면포장 아스팔트 혼합물 적용기준(국토교통부, 2017)

시멘트 콘크리트 바닥판		강 바닥판(Steel Deck Plate)
WC-1, WC-6입도(13mm) 아스팔트 혼합물	10mm SMA (8mm SMA)	10mm SMA(8mm SMA), PG 76-22 이상 개질 아스팔트 혼합물(WC-1, WC-6)
WC-1, WC-6입도(13mm) 아스팔트 혼합물 구스 아스팔트	10mm SMA (8mm SMA) 구스 아스팔트	8mm SMA (5mm SMA, 구스 아스팔트)
교통하중 등급에 따라 아스팔트 바인더의 PG 등급 적용 PG 76-22 이상의 아스팔트 적용 권장	하부층에 10mm SMA를 적용할 경우에는 상부층에도 10mm SMA 적용 교통하중 등급에 따라 아스팔트 바인더의 PG 등급 적용	SMA 혼합물에 PG 76-22 이상의 아스팔트 적용 5mm SMA 적용 시 반드시 PG 82-22 이상 사용

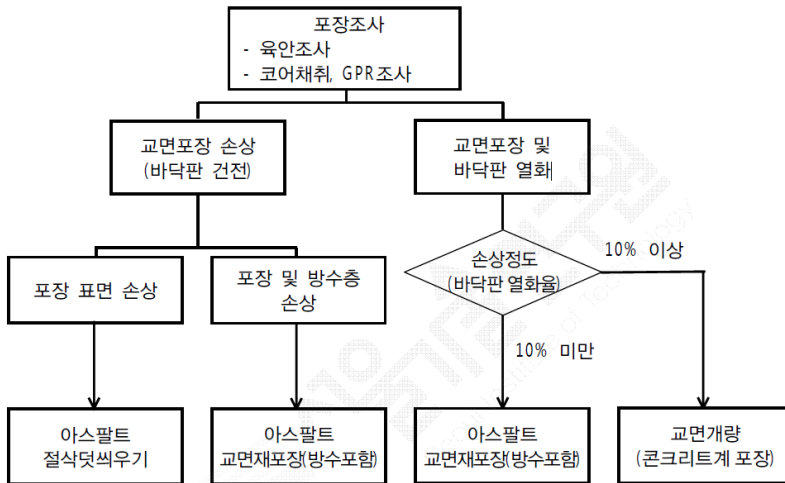
[표 2-22] 교면포장 아스팔트 혼합물 배합설계 기준(국토교통부, 2017)

항목	개질 아스팔트 (WC-1, WC-6)		SMA	
	상부층	하부층	상부층	하부층
아스팔트 함량(%)	5.0 이상	5.0 이상	6.8 이상	6.9 이상
공극률(%)	3.0~4.0	2.0~3.0	2.0~3.0	1.0~2.0
골재 간극률(%)	13.0 이상	12.0 이상	18.0 이상	17.0 이상
포화도(%)	70 이상	75 이상	75 이상	80 이상
동적안정도(회/mm)	2,000 이상		2,000 이상	
다짐횟수(양면)	마살 75회		마살 75회	
드레인다운 시험값(%)	-		0.3 이하	
인장강도비(TSR)	-		0.85 이상	
구스 아스팔트				
류엘 유동성 시험	관입량 시험	휠트래킹 시험 (동적안정도)	힘 시험 (파단 변형)	
20초 이하 (240℃ 이하)	1~4mm (30분, 40℃, 52.5kg/5cm ²)	300회/mm 이상	8×10 ⁻³ 이상	

4) 도로포장 유지보수 실무편람(국토교통부, 2013)

도로포장 유지보수 실무편람에는 교면포장의 정비를 위한 유지보수공법으로 조건에 따른 전면 절삭 덧씌우기식 방법, 소파보수 형태 등의 공법을 제시하며 각각 시공 절차에 따른 시공재료의 적용기준을 함께 제시하고 있다. 시공 절차에 따른 시공재료의 적용기준의 경우 아스팔트 콘크리트 포장 시공지침(국토교통부, 2017)을 따른다. 덧씌우기 공법의 경우 아스팔트 콘크리트 또는 시멘트 콘크리트를 사용할 수 있다.

실무편람은 교면포장 노면의 손상이 발생한 경우와 하부의 바닥판까지 열화 손상이 발생한 경우 보수 방법을 달리할 수 있는 체계를 그림 2-10과 같이 제시하고 있다. 해당 체계는 교면포장 및 교량 바닥판의 손상 정도에 따라 적용될 수 있는 보수공법을 분류하였다. 표면손상만 발생한 경우 아스팔트 절삭 덧씌우기, 방수층까지 손상된 경우 방수층 재시공을 포함한 아스팔트 재포장, 교량 바닥판의 열화 손상 정도가 10% 이상일 경우 바닥판을 포함한 콘크리트 재포장을 실시하도록 제시하고 있다.



[그림 2-10] 교면포장의 보수공법 결정체계(국토교통부, 2013)

실무편람에서는 교량 바닥판의 열화 손상 정도를 분석하기 위해 코어채취와 GPR 장비를 이용한 평가를 하도록 제시하고 있다. 표 2-23은 교면포장의 노면 평가 시 수행되어야 하는 조사항목을 제시하고 있다. GPR 장비를 이용한 바닥판의 손상 정도(바닥판 열화율)는 조사면적 대비 열화 면적의 비율로 계산한다.

[표 2-23] 교면포장 상태평가 시 조사항목(국토교통부, 2013)

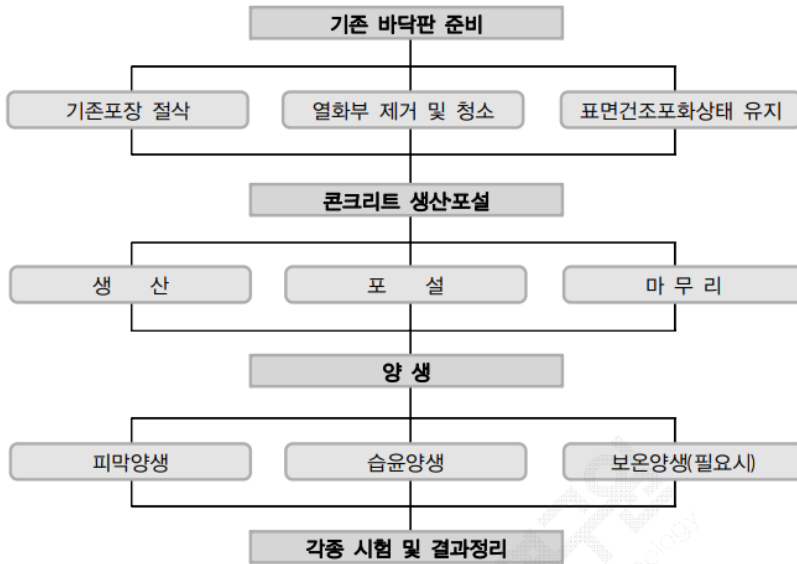
육안조사	코어채취	GPR 조사	노면상태조사 (장비조사)
포장균열, 파손, 백태 발생 여부 (외관망도 작성)	바닥판 열화 여부 및 깊이 확인	바닥판 열화율 측정	평탄성, 파손, 소성변형률

교면포장 상태 분석 결과 균열, 소성변형 등의 파손이 하부층까지 진전되지 않았을 경우 상부층만 절삭하여 덧씌우기하고, 하부층 이하까지 파손되었을 경우 방수층을 포함하여 재포장하여야 한다. 교면포장의 파손은 방수층과 배수 문제로 발생하는 경우가 많으므로 재포장 시 해당 공종에 대하여 면밀히 검토하여 시공하여야 한다. 특히 포장의 파손이 조기에 발생하는 구간은 내유동성을 향상시킨 개질 아스팔트를 이용하는 것을 우선적으로 검토하여야 한다. 이 기준은 재포장 시의 유지보수 방법이며, 상부층 절삭 덧씌우기 시에는 하부층 이하의 처리 방법 이외에는 같은 방법을 적용한다(국토교통부, 2013). 편람에서 제시하고 있는 상세한 유지보수 절차는 그림 2-11에 제시하였다.



[그림 2-11] 절삭 덧씌우기식 아스팔트 콘크리트 교면포장 유지보수 절차(국토교통부, 2013)

공용 중인 교량의 덧씌우기식 시멘트 콘크리트 교면포장 공사 시, 조기 교통개방이 요구되는 경우 감독자의 승인을 얻어 충분한 조기강도와 내구성을 확보할 수 있는 재료를 사용하여야 한다. 차량의 통행은 표면마무리 후 최소 양생기간이 끝난 후에 허용되며, 이때의 시멘트 콘크리트 압축강도는 21MPa 이상이어야 한다(국토교통부 2013). 실무 편람에서 제시하고 있는 시멘트 콘크리트 교면포장에 대한 상세한 유지보수 절차는 그림 2-12에 나타내었다.



【그림 2-12】 덧씌우기식 시멘트 콘크리트 교면포장 유지보수 절차(국토교통부, 2013)

5) 터널 내 포장설계 지침(건설교통부, 2005)

터널 내에서는 용출수에 의하여 터널 내 포장은 습윤상태가 되기 쉬우므로 일반적으로 아스팔트 포장보다는 콘크리트 포장이 내수성 측면에서 유리하다. 하지만 지하 용수와 지하수가 발생하는 터널 주변 지반의 풍화 열화에 의한 지반 강도 저하 및 흡수 팽창에 의한 터널 주변의 토압 증가로 인해 노면의 용기 및 복공의 균열 등의 손상이 발생할 수 있다. 터널 내에서 발생하는 파손 종류는 그림 2-13과 같다.

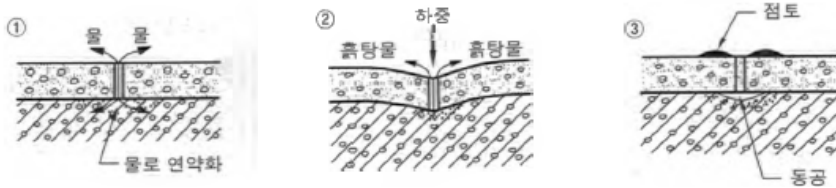


(a) 노면 용기에 의한 균열

(b) 노면 용기에 의한 단차

【그림 2-13】 터널 내에서 발생하는 파손 종류 예시(건설교통부, 2005)

터널포장 파손의 한 종류인 펌핑 현상은 노상에서 발생하는 용출수가 유공관으로 빠져나가지 못하고 표면으로 용출되는 것이다. 펌핑 현상은 육안조사를 통한 표면 탐지를 어렵게 하는 문제가 있다.



[그림 2-14] 터널포장의 파손 메커니즘(건설교통부, 2005)

터널 전후 사정 등을 고려하여 아스팔트 포장으로 설계 시에는 아스팔트 혼합물은 수분에 대한 민감성이 적은 혼합물인 내수성 혼합물이 요구된다. 골재 자체가 내수성이 부족할 시 소석회, 시멘트 등의 박리방지제를 첨가하여 내수성을 높여야 할 필요가 있다. 소석회나 시멘트를 박리방지제로 첨가 시, 투입량은 채움재의 설계 투입량만큼을 치환하여 첨가한다.

입출구부의 일정 구간을 제외하고는 터널 내부 온도는 외부보다 높아 동결 관입 효과가 상당히 감소한다. 그러나 터널 갱구부는 동상방지층을 설치하여 바닥의 요철면에서 물 고임에 의한 포장층 동결융해 작용과 펌핑 현상을 방지해야 한다. 터널의 동상방지층 설치 검토를 위한 연구결과에 따르면 터널의 입구부는 차량의 진입으로 인해 외기온도의 영향을 많이 받기 때문에 토공부 포장과 유사하게 동상방지층의 설치를 고려할 필요가 있다. 연구 결과 입구부의 50m 구간의 경우 터널 내부 평균온도의 변곡점이 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 일조량이 적어 결빙 현상이 발생하는 터널의 경우 입구부 50m에 대한 동상방지층 설치가 필요하다(건설교통부, 2005).



[그림 2-15] 터널포장의 동상방지층 설치기준(건설교통부, 2005)

3. 국외 구조물 포장 관리기준 현황

3-1. 국외 교면포장 및 바닥판 관리기준

1) 미국

미국의 경우 교면포장에 적용하는 아스팔트 포장은 변형 및 균열에 강해야 하며 우수한 평탄성을 제공할 수 있도록 하고 있다. 우수한 교면포장용 아스팔트 포장을 시공하지 못할 경우 균열 파손이 급격하게 발생하는 것으로 보고되고 있다. 교면포장용 아스팔트 포장은 높은 미끄럼 저항성과 우수한 평탄성을 제공하기 위해서는 다음과 같은 내구성능을 확보해야 한다.

- 노화에 저항하는 성능
- 오일이나 물로부터 저항성
- 기후조건에 민감하지 않도록 설계
- 방수 역할 및 교량상판 보호
- 높은 안정도, 피로 저항성, 소성변형 저항성
- 하중분산 기능

미국의 교면포장 평가등급은 손상면적을 중심으로 5단계로 구분된다(표 2-24).

【표 2-24】 미국의 교면포장 상태평가 기준(한국도로공사, 2014)

평가항목	상태평가
양호	양호
↓	손상면적 2% 미만
	손상면적 10% 미만
	손상면적 10~25%
파손	손상면적 25% 이상

미국 교면포장의 경우 아스팔트 덧씌우기 포장이 되어 있지 않은 콘크리트 노출 형식의 바닥판이 많아 교면포장의 상태평가 기준 대비 바닥판 평가 기준이 비교적 상세하게 구분되고 있다. 다음 표 2-25는 미국 연방도로청 FHWA가 1979년에 제시한 콘크리트 바닥판의 상태평가 기준이다. 총 9단계 등급으로 구분한다(FHWA, 1979).

[표 2-25] 콘크리트 바닥판 상태평가 기준(FHWA, 1979)

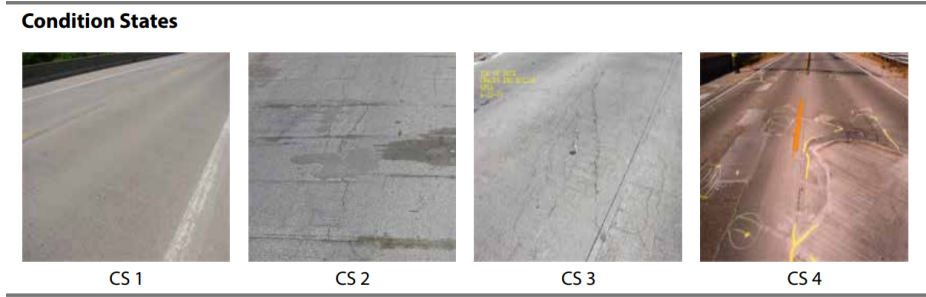
등급분류	상태등급	상태평가 기준(% 바닥면적)			
		박락	층 분리	부식전위	염분함량
경미한 열화	9	없음	없음	0	0
	8	없음	없음	없음 < -0.35	없음 > 1.0
	7	없음	< 2%	45% < -0.35	없음 > 2.0
중급 열화	6	< 2% 박락 또는 열화 및 오염 바닥판 콘크리트 전체의 합 < 20%			
	5	> 5% 박락 또는 열화 및 오염 바닥판 콘크리트 전체의 합 20~40%			
광범위한 손상	4	> 5% 박락 또는 열화 및 오염 바닥판 콘크리트 전체의 합 40~60%			
	3	> 5% 박락 또는 열화 및 오염 바닥판 콘크리트 전체의 합 > 60%			
구조적으로 부적합 판단	2	바닥판의 구조적 내력이 전체적으로 불충분			
	1	바닥판이 완전히 손상, 교체에 의해서만 보수 가능			
	0	바닥판 함몰 - 다른 부위의 바닥판 손상 위험			

표 2-26은 미국 AASHTO Bridge Element Inspection Manual(2010)에서 제시한 콘크리트 교면포장의 상태평가 기준이다. 총 4단계의 등급으로 구분되며, 5가지 손상종류로 구분한다. 해당 매뉴얼은 단계별로 취해야 하는 간략한 보수전략을 함께 제시하고 있다.

[표 2-26] 교면포장 콘크리트 노면 상태평가 기준(AASHTO, 2010)

손상	1등급	2등급	3등급	4등급
균열	없음, 미미함	소규모	중규모	상태등급 3 이상의 파손이 발생한 경우
스폴링, 열화, 패칭	없음	보통 수준의 스폴링, 패칭부 건전	심각한 스폴링, 패칭부 파손	
풍화	없음	보통, 부식 없음	심각, 부식존재	
침하	없음	40mm 미만	40mm 이상	
내하력	감소 없음	감소 없음	감소 없음	
보수방법	Do Nothing Protect	Do Nothing Protect Repair	Do Nothing Protect Repair Rehab.	Do Nothing Rehab. Replace
파손 심각도 정의	경미	~보통		보통~심각
균열	< 1.6mm	1.6~3.2mm		> 3.2mm
스폴링, 열화	N/A	25mm 깊이, 6in 직경 미만		25mm 깊이, 6in 직경 이상
균열 밀도	1.0m 간격 이상	0.33~1.0m 사이		0.33m 간격 이하
풍화	N/A	백태		부식, 얼룩, 백태

[표 2-26] 교면포장 콘크리트 노면 상태평가 기준(AASHTO, 2010)(계속)



2) 일본

일본의 교면포장의 경우 손상 면적 비율이 아니라 개별 손상 항목을 중심으로 평가를 수행하고 있다. 손상의 항목은 포장의 균열 폭, 교축방향의 요철, 수직방향의 요철, 포트홀 등이 있다(표 2-27).

[표 2-27] 일본의 교면포장 상태평가 기준(한국도로공사, 2014)

평가항목	상태평가
양호	양호
↓	포장균열 5mm 미만 교축방향요철 10~20mm 수직방향요철 20~30mm 깊이 30~50mm, 직경 20cm 미만의 포트홀
파손	포장균열 5mm 이상 교축방향요철 20mm 이상 수직방향요철 30mm 이상 깊이 50mm, 직경 20cm 이상의 포트홀

일본 교량의 바닥판 상태평가 기준은 각 도로 관리기관마다 별도의 교면포장 관리기준을 보유하고 있다. 또한 국내 기준과 유사하게 바닥판의 균열과 열화도에 따라 상태등급이 구분된다. 표 2-28과 표 2-29는 일본건설성과 일본도로공단의 교량 바닥판 균열상태 판정 기준을 정리한 것이다.

[표 2-28] 일본건설성 교량 바닥판 균열 상태평가 기준(한국도로공사, 1999)

단계	균열간격 형상	균열 폭	균열 밀도
0	1.0m 이상 1방향	1.0~0.5m 이상 1방향 직각방향	-
1	1.0~0.5m 이상 1방향 직각방향	1.0~0.5m 이상 1방향 직각방향	2~4m ² /m ²
2	1.0~0.5m 이상 1방향 직각방향	1.0~0.5m 이상 1방향 직각방향	4m ² /m ² 정도
3	1.0~0.5m 이상 1방향 직각방향	1.0~0.5m 이상 1방향 직각방향	4~8m ² /m ²
4	1.0~0.5m 이상 1방향 직각방향	1.0~0.5m 이상 1방향 직각방향	8m ² /m ² 정도

[표 2-29] 일본도로공단 교량 바닥판 균열 상태평가 기준(한국도로공사, 1999)

단계	균열	누수 및 백태
0	균열 밀도 0~1m/m ² 1방향 균열	백태 없음
1	균열 밀도 1~3m/m ² 균열간격 2~0.7m 균열폭 0.1mm 이상 1방향 균열	백태 발생(1방향)
2	균열 밀도 3~5m/m ² 균열간격 0.7~0.4m 균열폭 0.1mm 이상 2방향 균열	백태 발생(2방향)
3	균열 밀도 5~7m/m ² 균열간격 0.4~0.3m 균열폭 0.1mm 이상 2방향 균열, 모서리 탈락	일반부 2방향 백태 발생 시공이음부 백태 발생
4	균열 밀도 7m/m ² 이상 균열간격 0.3m 이하 균열폭 0.1mm 이상 2방향 균열, 모서리 탈락 현저	일반부 2방향 백태 발생, 시공이음부 누수, 철근 녹 발생

3) 캐나다

캐나다 교면포장의 경우 손상의 면적비율로 상태를 5단계로 구분하여 관리하고 있다(표 2-30).

【표 2-30】 캐나다의 교면포장 상태평가 기준(한국도로공사, 2014)

평가항목	상태평가
양호	포장면 손상 5% 미만, 약간의 요철
	포장면 손상 5~10%, 요철로 조정성에 영향
↓	포장면 손상 10~15%, 요철로 조정이 다소 힘들
	포장면 손상 15~20%, 요철로 조정이 힘들
파손	포장면 손상 20% 이상, 요철로 조정이 매우 힘들

4) 유럽

2013년 EAPA(유럽 아스팔트 포장 연합회)는 교면포장용 아스팔트 포장에 대한 가이드라인을 마련하였다. 대부분의 유럽 국가는 수분이나 재설제 등으로부터 강상판 및 콘크리트 상판을 보호하기 위해 아스팔트 포장으로 교량 표면을 덧씌우기하고 있다(EAPA 2013). 유럽은 일반적으로 교면포장을 4개(실링/본딩층(프라이머), 방수층, 보호층, 아스팔트 표층) 층으로 나누어 구분하고 있다. 일반적으로 교면포장의 표층에는 밀입도 아스팔트 포장과 SMA(Stone Mastic Asphalt) 포장을 주로 사용하고 있다.

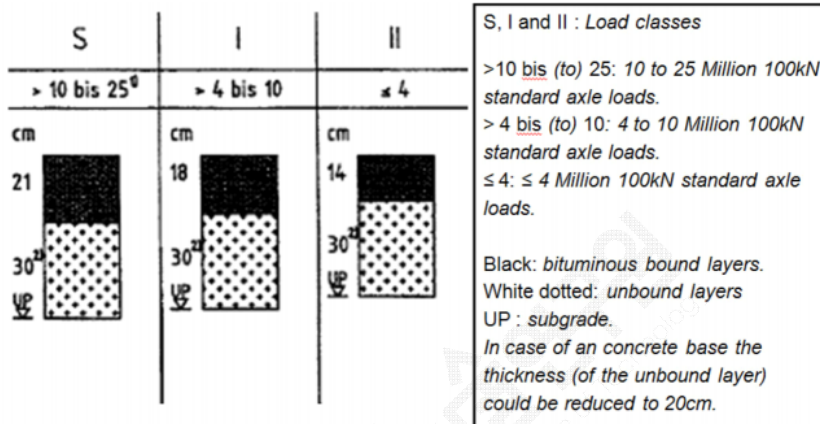
3-2. 국외 터널포장 관리기준

국외 터널포장의 관리기준과 정비기법에 대한 정보는 국내와 마찬가지로 매우 드문 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 국외의 터널 내 포장의 설계를 위한 고려사항을 활용하여 이를 대체하고자 한다.

2008년 유럽 아스팔트 포장 협회(EAPA; European Asphalt Pavement Association)에서는 터널 내 아스팔트 포장의 적용에 관해 자료집을 발간한 바 있다. 해당 자료집에 따르면 터널 내 포장 설계를 위해서는 다음과 같은 조건들을 고려하여 아스팔트 포장층 및 개별 포장층의 두께를 산정한다(EAPA, 2008).

- 터널 종류
- 포장의 설계 수명
- 등가 표준 차축 하중으로 표현된 예측 교통량
- 현장에서 사용 가능한 재료
- 터널 내 온도 등

또한 몇몇 유럽 국가들은 터널 내 아스팔트 포장 층의 두께에 대한 설계 규정을 가지고 있으며, 오스트리아 규정에 따르면 터널의 교통량에 따라 140~210mm의 아스팔트 층을 그림 2-16의 카테고리에서 선택할 수 있다. 이때 기층은 300mm의 골재층으로 구성한다.



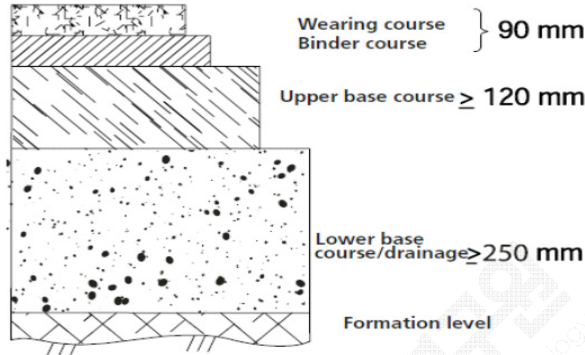
[그림 2-16] 오스트리아의 터널 내 아스팔트 포장 카탈로그 설계(FSV, 2009)

노르웨이 교통국(Statens Vegvesen)에서 발간한 도로 터널 표준 매뉴얼은 동상방지 여부에 따른 포장 및 보조기층의 단면 기준을 다음과 같이 더 상세하게 제시하고 있다 (Statens Vegvesen, 2004).

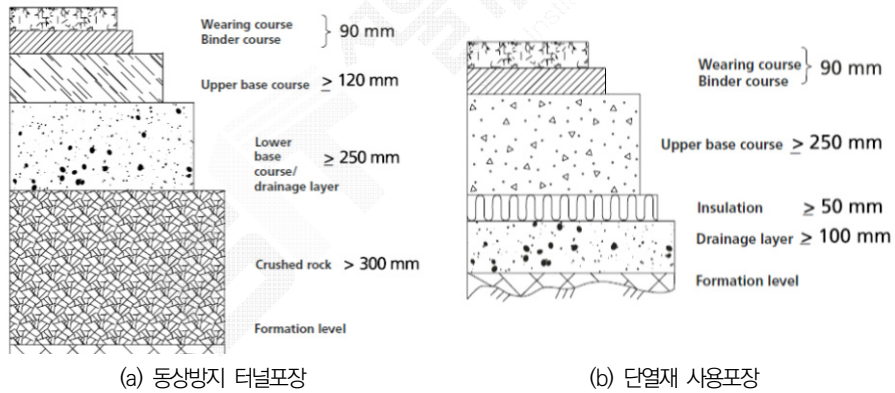
동상방지가 필요 없는 터널의 경우 시공면(formation level)에서부터 250mm 이상의 하부 기층, 120mm 이상의 상부 기층, 90mm의 (결합층 포함한) 표층이 필요하다(그림 2-17). 터널의 하부 기층은 기층이 인버트에서 필터 역할을 할 수 있도록 개립도 및 양입도를 가지는 재료로 구성되어야 한다. 하부 기층은 최소 두께 250mm의 쇄석 또는 칩핑으로 구성한다. 혼합물은 2mm 미만의 재료를 최대 15% 포함해야 한다. 하부 기층은 쇄석 또는 역청질 덩어리로 수평을 이룬다. 자갈의 입도 및 양은 하부 기층이 포화되고 상단 표면에 맞출 수 있도록 조정한다. 상부기층 및 표층은 노르웨이 교통국 매뉴얼 018의 시방대로 구성된다. 만약 시멘트 안정처리 기층을 상부 기층에 사용한다면, 100mm의 단일 필터층만 적용한다.

노르웨이 교통국의 동상방지 기준에 따르면 터널의 동결 지수가 1000h℃를 초과하면 터널 인버트는 동상방지가 되어야 한다. 심한 동상이 발생했었던 지역에서는, 터널 입구에서 동상방지를 위한 특별한 주의가 필요하다. 동상방지 포장이 적용된 구간과 개활 도로의 완화구간에서는 결빙이 발생하지 않도록 보호해야 한다. 동상방지층을

적용하는 경우, 쇄석을 300mm 이상 적용한 층을 하부 기층과 시공 기면 사이에 추가한다(그림 2-18(a)). 단열 시트와 시멘트 안정처리 기층을 사용한 동상방지 포장은 그림 2-18(b)와 같이 단면을 구성한다.



[그림 2-17] 동상방지층이 필요 없는 터널포장(Statens Vegvesen, 2004)



(a) 동상방지 터널포장

(b) 단열재 사용포장

[그림 2-18] 동상방지 터널포장(Statens Vegvesen, 2004)

배수층은 시공 기면 상단에 배치되며 최소 두께는 100mm이다. 배수층의 재료는 배수성과 동시에 적절한 입경을 가져야 한다. 분류된 재료는 2mm 이하의 골재를 최대 15%까지 포함해야 한다. 동상방지를 위한 단열보드는 플랜지가 있는 압출 폴리스티렌(XPS)으로 만들어져야 하며, 최소 두께는 50mm이고, 단기 압축강도는 최소 700kPa이어야 한다. 다른 단열 재료를 사용할 경우 별도 승인을 받아야 한다. 단열 보드 상부의 시멘트 안정처리 기층은 최소 250mm의 단일층으로 시공되어야 하며, 시멘트 안정처리 기층이 시공되기 전까지 단열 보드 위 시공에 수반되는 하층을 제외한 다른 하층은 재하되지

않아야 한다. 시멘트 안정처리 기층의 배합 구성은 필요 압축강도인 15MPa 이상을 만족해야 하며 시멘트 안정처리 기층의 자중은 단열보드에 파손을 주지 않아야 한다. 터널 라이닝 전에 시멘트 안정처리 기층이 타설되는 경우, 천정 누수로부터 타설된 기층을 보호하기 위해 추가 조치가 필요하다.

호주의 터널에서 가장 일반적인 유형의 포장 구성은 무라이닝 터널의 무세 골재 콘크리트(NFC; No-fine Concrete) 보조기층 또는 라이닝 터널의 빈배합 콘크리트(LMC; Lean-mix Concrete) 보조기층 위에 연속 철근 콘크리트 포장(CRCP; Continuously Reinforced Concrete)이다. 터널에 적용할 수 있는 노면 포장은 다음과 같다(NSW, 2018).

- 밀입도 아스팔트(Dense Graded Asphalt)
- 쇄석 매스틱 아스팔트(Stone Mastic Asphalt)
- 타이닝 또는 기존 다이아몬드 그라인딩 처리가 된 콘크리트

미국의 고속도로 관련 시설물 연구 프로그램에 따르면, 1950년 이전에 지어진 미국의 오래된 터널의 콘크리트는 일반적으로 AE 감수제 없이 만들어졌다(NCHRP, 2010). 콘크리트에는 자연적인 공기 혼입이 있지만 AE 감수제가 사용되지 않았다면 반복적인 동결/해동 주기로 인한 손상을 적절히 견디기에 충분하지 않을 수 있다. 따라서 추운 지역에 있는 터널 내 일부 슬래브는 지난 60년 이상 반복적인 수많은 동결/해동으로 인해 콘크리트를 구성하는 골재 및 시멘트 간의 분리가 발생하여 구조적 강도가 저하되어 있을 수 있다. 추운 기후에서 터널 입구 근처는 얼음이 형성되는 것을 방지하기 위해 인버트 슬래브에 제설용 소금을 살포하는 경우가 많다. 하지만 제설용 소금 속의 염화물 이온이 인접한 콘크리트 구조물로 스며들면 철근 부식을 가속하여 콘크리트 파편 또는 포트홀의 발생을 증가시킬 수 있고, 슬래브를 대대적으로 보수하거나 교체해야 할 수 있다.

미연방도로국(FHWA)의 터널 유지보수(TOMIE) 매뉴얼에 따르면 터널 내 노면을 검사할 때 표면의 미끄럼 저항을 검사하고 노면에 그루빙과 소성변형이 있는지 확인해야 한다. 광택이 있는 표면 또는 골재가 확인될 경우 마모를 고려하여야 하고, 표면에서 물이 제대로 배수되는지 확인해야 한다. 노면에서 제대로 배수가 되지 않으면 조기에 마모되어 포트홀이 생기고 운전자에게 안전 위험을 초래할 수 있다. 또한 터널 경사로의 도로 표면은 높은 지하수위의 영향을 받을 수도 있다(FHWA, 2015).



| 03 서울시 구조물 포장 관리기준 현황

1. 서울시 구조물 포장 관리현황
2. 서울시 구조물 포장 보수 및 예산현황
3. 서울시 구조물 포장상태지수 분석

03. 서울시 구조물 포장 관리기준 현황

1. 서울시 구조물 포장 관리현황

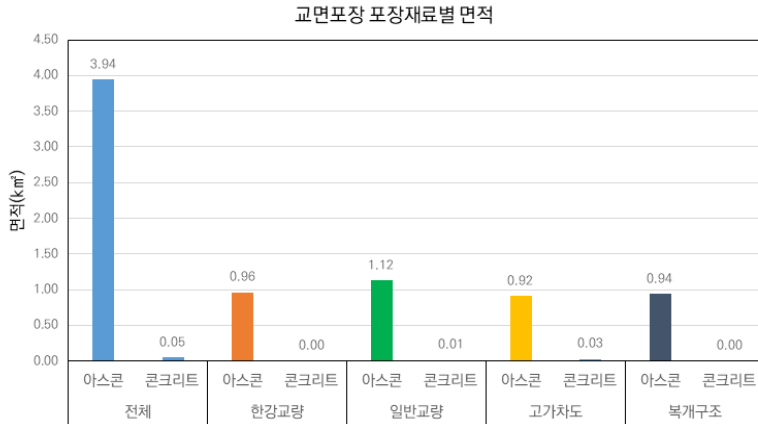
1-1. 일반현황

그림 3-1은 서울시 구조물별 개소 수와 포장면적을 나타낸 것이다. 고가차도의 포장면적이 1.34km²로 가장 넓었으며, 터널의 포장면적이 0.43km²로 가장 좁은 것으로 나타났다. 본 연구는 교량 및 고가차도, 복개구조, 지하차도 포장을 교면포장으로 분류하였으며, 터널포장의 경우 별도로 분류하였다. 이에 따라 서울시 구조물 포장의 면적을 다시 비교하면, 교면포장의 면적(5.07km²)이 터널 포장면적(0.43km²)에 비해 매우 넓다.



[그림 3-1] 서울시 구조물별 개소 수 및 포장면적 비교

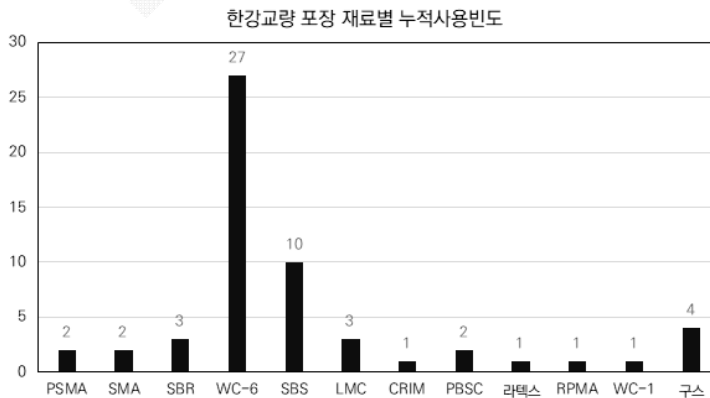
2021년 서울시 빅데이터 분석시스템의 DB에는 한강교량, 일반교량, 고가차도, 복개구조의 경간별 포장 재료를 아스팔트, 콘크리트, 대리석, 보도블럭, 목재, 화강석의 6가지 재료로 구분하고 있다. 다음 그림 3-2는 교면포장 재료 중 아스팔트와 콘크리트 포장의 면적을 분석하여 비교한 결과이다.



[그림 3-2] 서울시 교면포장 재료별 면적(서울시 빅데이터 분석시스템)

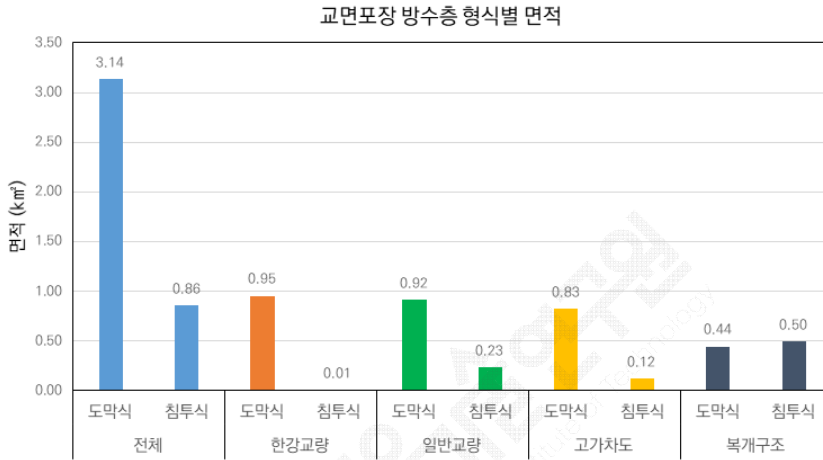
보도를 제외한 서울시 교면포장 중 98.9%는 아스팔트 포장, 1.1%가 콘크리트 포장으로 나타났다. 한강교량과 복개구조의 경우 아스콘 포장이 100%로 나타났으며 일반교량과 고가차도에 각각 1.3%, 3.2%의 콘크리트 교면포장이 존재하는 것으로 확인되었다.

또한, 서울시 빅데이터 분석시스템 DB에는 아스팔트 및 콘크리트 포장 카테고리는 구분되고 있으나 각 포장의 재료에 대한 상세한 정보는 기록되고 있지 않다. 다만 한강교량의 경우는 2018년도에 발행된 한강교량 일상유지보수 백서에서 포장재료의 정보를 확인할 수 있다. 분석 결과 한강교량의 포장 재료는 13mm 내 유동성 표층 재료인 WC-6가 가장 보편적으로 사용되었다(47%). PSMA, SMA 공법의 경우 최근 2015년 이후로 사용이 증가하고 있다(그림 3-3).



[그림 3-3] 한강교량 교면포장 재료별 누적사용빈도(서울특별시, 2018)

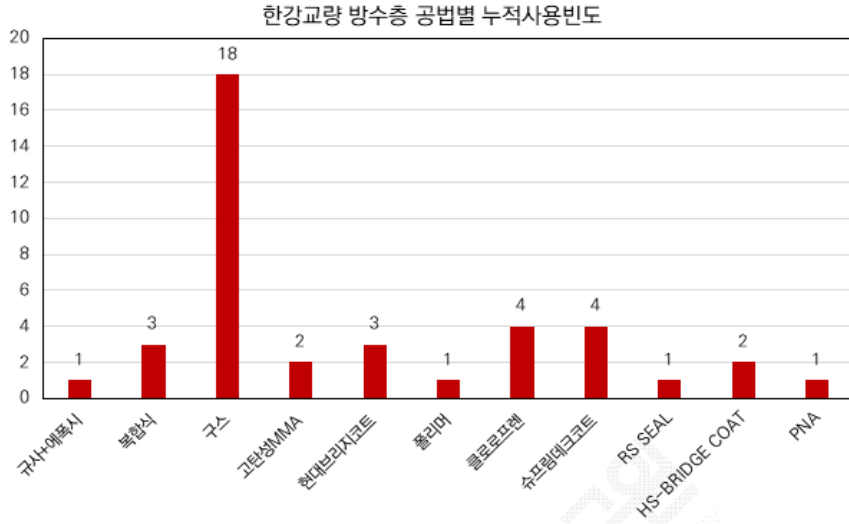
그림 3-4는 2021년 서울시 빅데이터 분석시스템 DB를 통하여, 교량별 방수층 공법별 면적을 분석하여 비교한 것이다. 서울시 빅데이터 분석시스템에서는 한강교량, 일반교량, 고가차도, 복개구조의 경간별 방수층 공법을 도막식과 침투식 2가지로 분류하고 있다.



[그림 3-4] 서울시 교면 방수 공법별 면적(서울시 빅데이터 분석시스템)

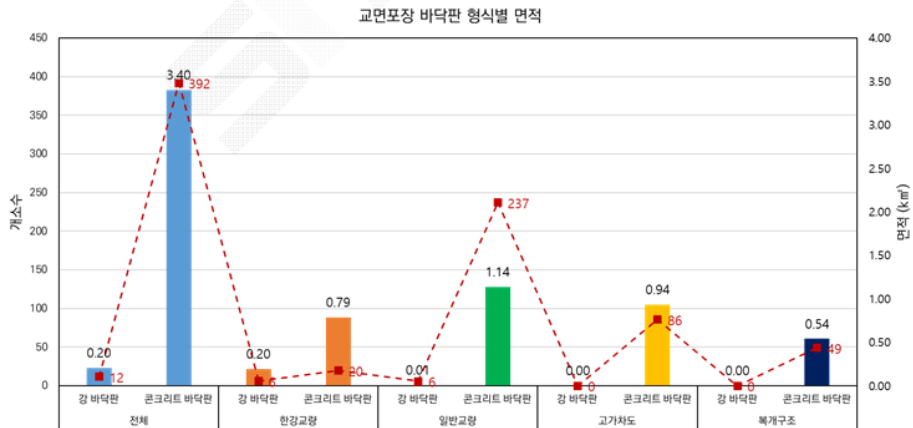
서울시 교면포장의 방수공법은 78.5%가 도막식이며 21.5%가 침투식 방수층으로 나타났다. 보통 침투식 방수재는 단독으로 사용되지 않기 때문에 상기의 침투식 방수층이란 1.5층 방수공법으로 흡수 방지식 보조 방수재(침투식)와 시트식, 도막식, 복합식 방수재를 혼합한 공법으로 판단된다. 한강교량의 경우 도막식 방수가 99%로 나타났으며 일반교량과 고가차도는 각각 20.0%, 12.7%의 침투식 교면포장이 존재하는 것으로 나타났다. 복개구조의 경우 도막식이 47.1%, 침투식이 52.9%로 분석되었다.

또한, 한강교량 일상유지보수 백서에서는 한강교량에 한정하여 방수층 사용재료에 대한 상세한 정보를 확인할 수 있다. 그림 3-5와 같이 한강교량의 교면 방수 재료는 도막식 공법인 구스가 가장 보편적으로(45%) 사용되었으며, 도막식 공법인 슈프림 데크코트, 브리지코트가 다음으로 누적 사용 빈도가 높은 것으로 조사되었다. 한강교량은 대부분 도막식 방수공법을 사용하고 있으며, 2015년 이후 브리지코트 등의 재료 다양화가 발생하고 있다(그림 3-5).



[그림 3-5] 한강교량 교면 방수 재료별 누적사용빈도(서울특별시, 2018)

그림 3-6은 한강교량, 일반교량, 고가차도, 복개구조의 바닥판 형식과 면적 비율을 비교 분석한 것이다. 빅데이터 시스템 DB에 명시된 교량의 바닥판 형식은 대표적으로 콘크리트 바닥판을 사용하는 강판형교, RC교, PSC교, 강거더교 등과 강바닥판을 사용하는 강상판 교량으로 구분할 수 있다.



[그림 3-6] 서울시 교면포장 바닥판 형식별 면적(서울시 빅데이터 분석시스템)

서울시 교면포장 바닥판은 콘크리트 바닥판이 전체의 94.4%이며 강상판은 불과 5.6% 수준으로 집계되었다. 강바닥판이 사용된 교량은 한강교량과 일반교량에 각각 6개소가 있는 것으로 파악되었다. 한강교량의 경우 강바닥판의 면적 비율은 19.9%, 일반교량은 0.6%, 고가차도와 복개구조의 경우 강바닥판 형식을 사용하지 않는 것으로 분석되었다.

한편, 지하차도 및 터널포장의 경우는 현재 포장 재료, 방수층 공법, 바닥판 형식 등에 대한 통합이력 정보가 구축되지 않은 것으로 확인되었다. 따라서 향후 구조물 포장의 체계적 유지관리를 위해서는 지하차도 및 터널포장도 꾸준한 데이터 확보를 통해 빅데이터 분석시스템을 구축할 필요가 있을 것으로 판단된다.

1-2. 관리주체 및 점검현황

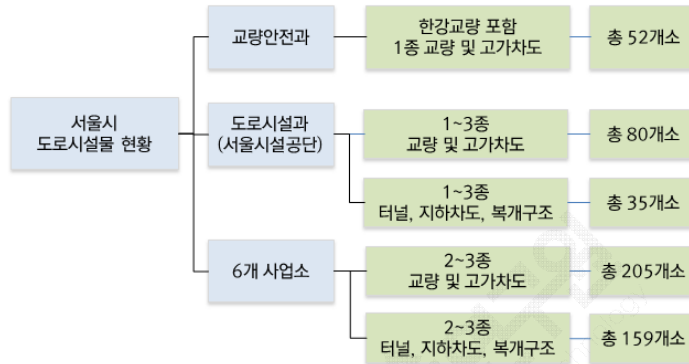
2019년 기준 서울시가 관리하고 있는 교량의 전체 개수는 337개소(한강, 일반, 고가차도 총 연장 189km)이며 터널은 36개소, 지하차도 109개소, 복개구조 49개소(총 연장 120km)이다. 종별로는 1종 구조물이 105개소, 2종 구조물이 171개소, 3종 구조물이 93개소이며, 법정 외 구조물은 162개소가 존재한다.

[표 3-1] 서울시 도로구조물 현황 총괄(서울특별시, 2019)

구분		계	한강교량	일반교량	고가차도	터널	지하차도	복개구조
시 관 리	시설수 (개소)	531	21	234	82	36	109	49
	연장 (km)	307.6	53.4	53.1	81.4	23.6	40.0	56.1
	포장면적 (km ²)	5.50	1.02	1.14	1.34	0.43	0.68	0.90
종 별	1종 (개소)	105	21	25	22	16	4	17
	2종 (개소)	171	-	58	24	20	49	20
	3종 (개소)	93	-	26	10	-	47	10
	법정 외 (개소)	162	-	125	26	-	9	2

그림 3-7은 서울시 관리주체별 도로구조물 분류현황을 나타낸 것이다. 서울시 도로 구조물을 관리하는 주체는 총 3개로 서울시 본청의 도로시설과, 교량안전과 그리고 도로사업소이다. 교량안전과의 경우 한강교량 대부분과 1종 일반교량, 1종 고가차도를

관리하고 있으며, 도로시설과는 1~3종 교량을 비롯하여 터널, 지하차도, 복개구조 등을 직접 관리하고 있다. 도로시설과 관할 구조물의 경우 서울시설공단에서 권한을 위임받고 관리하고 있다. 2~3종, 법정 외 도로구조물의 경우 동부, 서부, 남부, 북부, 성동, 강서 6개 도로사업소에서 관리하고 있다.



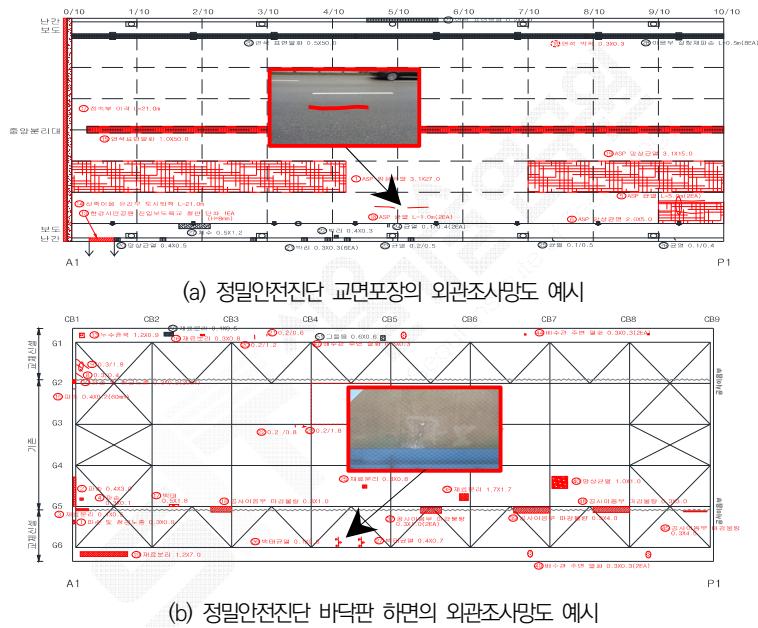
[그림 3-7] 서울시 도로시설물 관리체계(서울특별시, 2019)

서울시의 구조물과 구조물 포장도 시설물안전법의 적용을 받으며, 정기 및 정밀점검, 정밀안전진단에 의해 상태평가 및 유지관리가 수행되고 있다. 그림 3-8은 구조물의 정밀점검 및 안전진단 프로세스를 간략화한 것이다.



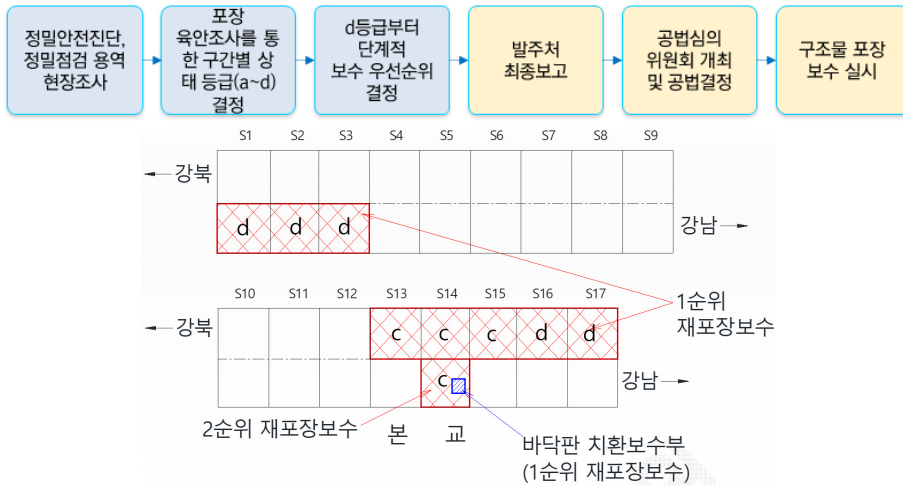
[그림 3-8] 정밀안전진단 프로세스

포장상태는 현장 조사 단계에서 평가된다. 포장의 상태평가와 바닥판 하면의 상태평가는 육안에 의한 외관조사로 수행되지만, 바닥판 상면의 경우는 육안평가가 불가하여 시설물안전법의 평가대상으로 분류되지 않고, 조사 또한 실시하지 않는다. 육안조사를 통해 그림 3-9와 같이 외관조사망도를 작성하여, 포장불량 면적 및 바닥판 하면의 손상면적을 계산한다. 포장불량 면적이 산정되면 상태평가 기준에 따라 경간별 a~d 등급으로 측정결과를 평가하고, c, d 등급으로 판정된 경간의 포장을 유지보수 대상구간으로 선정한다. 끝으로 안전진단/점검 보고서 후반부의 유지관리 방안 제시 단계에서 포장의 상태등급 및 파손종류 등에 따른 보수공법을 제안한다.



[그림 3-9] 정밀안전진단 현장 조사(육안) 및 평가결과 예시

서울시 교면포장에 대한 보수공법과 보수 우선순위를 결정하고 보수를 실시하는 과정은 그림 3-10과 같다. 안전진단/점검을 통해서 경간별로 상태등급을 a~d로 구분한 뒤, 보수 우선순위를 결정한다. 가장 파손이 심한 d구간을 1순위로 보수하고, 보수예산 및 우선순위 등 실정을 고려하여 c구간까지 보수한다.



[그림 3-10] 정밀안전진단 후 포장 보수 수행과정 예시(교면포장)

안전진단/점검 후 결정된 보수계획에 대해 예산이 확보되면, 최종적인 보수공법을 선정하여 보수를 수행한다. 보수기간의 경우 교통량이 매우 많은 한강교량은 당일 굴착 및 당일 복구를 기본으로 하고 있으나, 한강교량 대비 상대적으로 교통량이 적고 규모가 작은 교량을 관리하는 서울시설공단의 경우는 2015년 1월 이후 교면포장 품질향상의 목적으로 공종별 작업시간을 확보하기 위해 보수기간을 6~7일로 연장하였다.

기 존		현 행	
<ul style="list-style-type: none"> ◆ 당일 굴착, 당일 복구 - 열화수 부족, 교면방수, 포장 양생시간 부족으로 교면포장 품질확보 어려움 		<ul style="list-style-type: none"> ◆ 공종별 작업시간 확보(공사 6~7일) - 작업일별로 노면질삭, 열화부 보수, 교면방수, 포장공사 등 충분한 작업시간 확보로 교면포장 품질확보 및 내구성 강화 	
1~2일차	2~4일차	4~6일차	6~7일차
노면질삭 상태조사	열화부 보수 비방면 정리	교면방수 중층포장	표층포장 일괄시공
◦ 작업 효율성 제고 (장비설치, 운반시간 감소)	◦ 정밀시공, 이력관리 (구조물 취약부 확인)	◦ 방수, 포장품질관리 (자재확인, 양생시간 확보)	◦ 연속시공, 평탄성확보 (다짐강화, 포장이음 최소화)

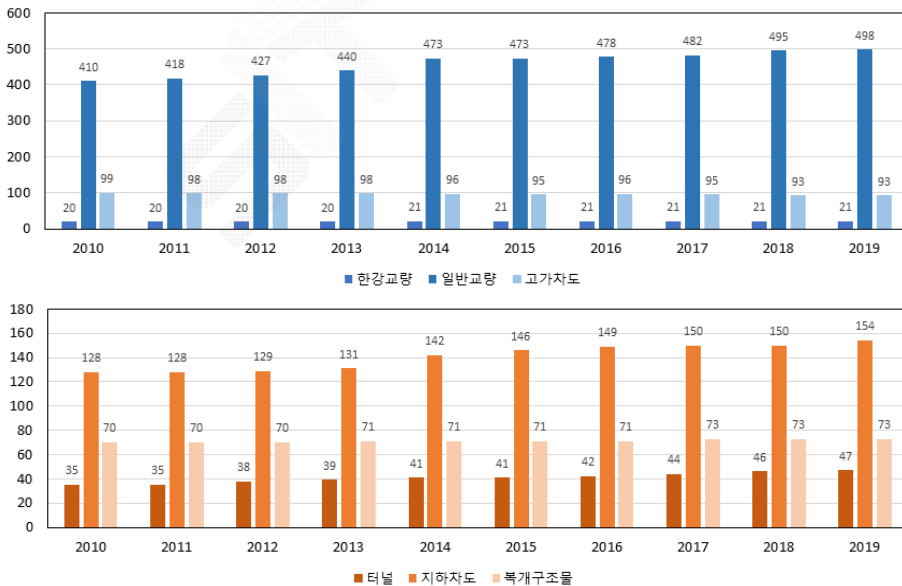
[그림 3-11] 서울시설공단 교면포장 보수기간(서울시설공단, 2016)

1-3. 서울시 구조물 포장 노후화 추이

1) 재령증가에 따른 노후화

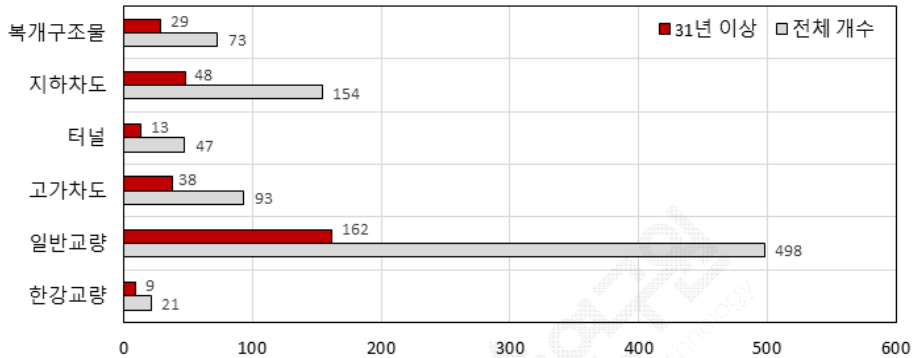
서울시의 교량 및 고가차도는 1997년도에 366개소(총 연장 71.7km)였으나 2000년대 초반까지 매년 증가하여 2019년 기준 612개소(총 연장 200.8km)로 약 1.7배가량 증가하였다. 또한 1997년도 총 103개소(총 연장 46.6km)였던 서울시의 터널, 지하차도 포장의 경우 2002년도에 대폭 증가하여 2019년 기준 201개소(총 연장 72.6km)로 약 2배 증가하였다.

그러나 그림 3-12에 나타난 바와 같이 최근 10년간 구조물 포장의 개소 수는 증가하지 않거나, 소폭 증가만 확인되었다. 일반교량의 경우 10년간 88개소 증가하였음에도 불구하고 일반교량의 교면포장 관리면적은 2010년도 1.15km²에서 매우 소폭(0.1km²)으로 증가한 1.25km²(2019) 정도로 집계되어, 대부분 소규모 교량만 시공된 것으로 판단된다. 또한 터널 및 지하차도 포장은 최근 10년간 38개소 증가한 것을 확인하였으나, 이는 1997년도에서 2010년도 사이 증가량에 대비 절반 수준으로 조사되었다. 복개구조의 경우 2009년 69개소로 기록된 이후 4개소 정도만 증가하여 2019년도에는 73개소로 집계되었다.



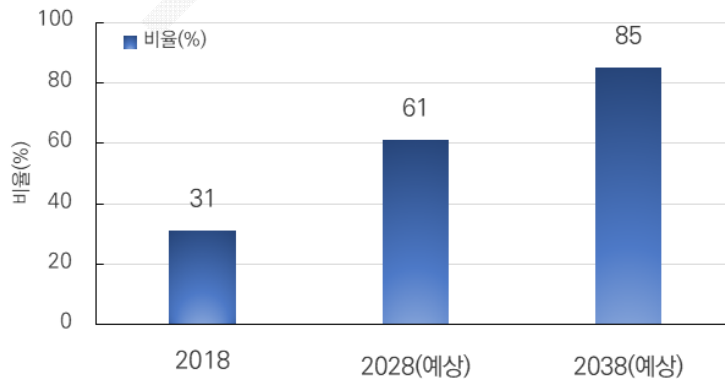
[그림 3-12] 최근 10년간 구조물 포장 개소 수 변화

이처럼 서울시 구조물의 신규 건설 건수는 점점 감소하고 있으며 기존 구조물의 공용 기간은 지속적으로 증가하고 있기 때문에 향후 노후화 구조물의 숫자가 급격히 증가할 예정이다. 그림 3-13은 2019년도 서울시 구조물 종류별 개수와 31년 이상 공용된 구조물별 개수를 비교한 그래프이다.



[그림 3-13] 2019년도 구조물 전체 개소 대비 공용 31년 개소 수(서울특별시, 2020)

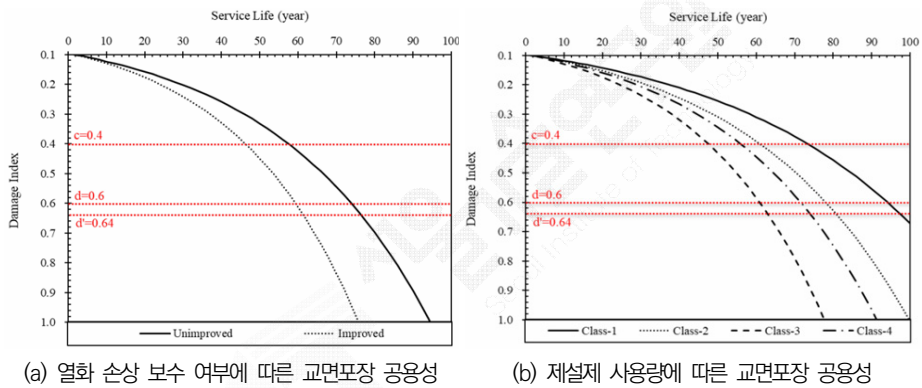
상기 그림에서 서울시 교량, 고가차도, 터널, 지하차도, 복개구조의 총 개수는 886개소, 이 중 2019년 기준 31년 이상 공용된 구조물의 개소 수는 299개소로 전체의 33.7%의 구조물이 노후화가 진행되었음을 알 수 있다. 또한 그림 3-14에 나타난 것과 같이 서울시 구조물의 노후화 비율은 점차 증가하여 2028년에는 전체의 61%, 2038년에는 85%에 이를 것으로 추정하고 있다.



[그림 3-14] 서울시 구조물 노후화 예상비율(서울특별시, 2019)

2) 바닥판 열화 손상의 영향으로 인한 조기노후화

그림 3-15(a)는 바닥판 열화 손상이 발생하여 유지보수 이력이 존재하는 교량(Improved)과 손상이 적어 유지보수 이력이 없었던 교량(Unimproved)의 공용성을 비교한 결과이다. 바닥판 열화 손상이 있었던 교량이 그렇지 않았던 교량에 비해 심각한 파손($d'=0.64$)에 이르는 시간이 약 16년 빠르게 분석되었다. 그림 3-15(b)는 적설량 및 제설제 사용량에 따른 교면포장의 공용성 분석 결과이다. 적설량이 많고(30cm 이상) 제설제 사용량이 많아 바닥판 열화 손상이 높을 가능성이 있는 지역의 교량(Class 3, 4)이 적설량이 적은(30cm 이하) 지역의 교량(Class 1, 2)에 비해 공용 수명이 20~30년 정도 낮은 것을 확인할 수 있다(Kim et al., 2020).



(a) 열화 손상 보수 여부에 따른 교면포장 공용성

(b) 제설제 사용량에 따른 교면포장 공용성

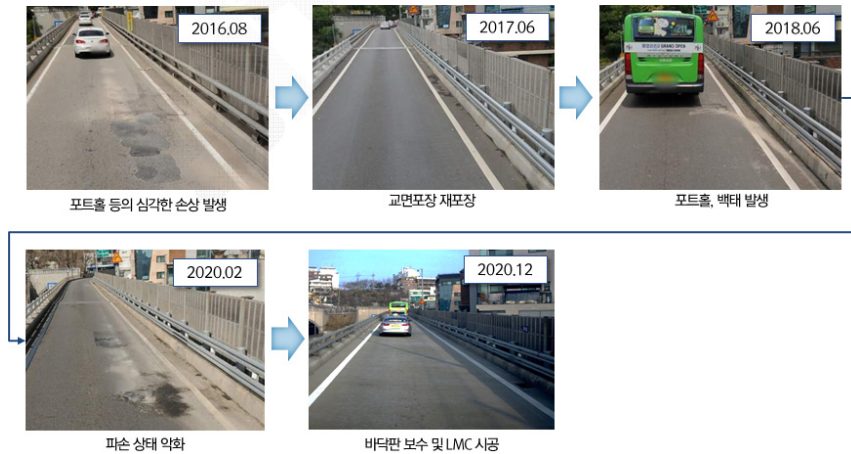
[그림 3-15] 열화 손상 보수 여부 및 제설제 사용량에 따른 교면포장 공용성 분석(Kim et al., 2020)

서울시의 경우 구조물 노후화로 인한 콘크리트 바닥판 상부의 심각한 열화 손상은 교면포장의 공용수명에 상당한 영향을 주고 있다. 그림 3-16은 성산대교(한강교량)의 바닥판 열화로 인한 교면포장 손상 사례를 나타낸다. 성산대교는 지난 2011년 정밀안전진단 상태평가 결과, 바닥판의 열화 손상이 매우 심각하여 편칭 파괴가 우려되는 구간이 다수 존재하였으며 이에 따라 C등급으로 판정되었다. 2012년에는 바닥판 열화로 인해 포장에 심각한 파손이 발생하였으며, 2013년에 재포장되었다. 그러나 공용 4년 만에 균열이 발생하였으며, 2018~2020년간 백태, 요철 등의 포장 파손이 증가한 것을 확인하였다. 이와 같이 바닥판의 심각한 열화 손상은 상부 교면포장의 공용수명을 단축시키는 원인이 된다.



[그림 3-16] 교면포장 조기 파손 사례(성산대교)

그림 3-17은 동호대교 북단 접속교인 옥수고가 L램프의 사례를 나타낸 것이다. 2016년 포트홀 등 파손이 발생하여 2017년도에 재포장 공사가 수행되었으나, 2018년도에 포트홀 및 백태가 다시 발생하였다. 이후 2020년에 파손이 악화되었고, 그해 가을에는 바닥판 보수와 교면포장 재포장 공사가 함께 수행되었다.



[그림 3-17] 교면포장 조기 파손 사례(옥수고가 L램프)

2. 서울시 구조물 포장 보수 및 예산현황

2-1. 서울시 구조물 포장 보수현황

구조물 포장은 바닥판의 열화 손상을 고려해야 하므로 표면손상 분석 방법만으로는 정확한 진단 및 유지관리를 수행하기 어렵다. 실제로 교면포장 재포장 공사를 수행할 때, 공사 중 드러난 바닥판의 열화 손상면적이 당초 예상보다 넓어 그림 3-18과 같이 보수 물량 변경에 따른 설계 변경 사례가 종종 발생한다.

공사명	현저고가차도 보수공사				
교량명	현저고가차도				
교량 재원	교폭	B=15.0m (왕복 4차로)			
	연장	본선 330.0m (8경간), 진입부용벽 192.0m (시점부: 125.0m, 종점부: 67.0m)			
시공 위치	서대문구 현저동 233~종로구 행촌동 41-1				
발주기관	서울특별시 도로사업소 서부도로사업소				
공사기간	2020.06.02~2020.12.31				
물량변경안					
공종명	규격	수량	단위	금액	비고
당초	상판보수 T=50mm	700	m ²	374,343,900	22% 증가
변경	상판보수 T=50mm	871	m ²	455,155,809	

【그림 3-18】 바닥판 상부 보수 물량 변경에 따른 설계 변경 사례(서울특별시, 2020)

현재 시설물 안전 및 유지관리 실시 세부지침(국토교통부, 2019)에 명시된 교면포장 상태평가 기준은 균열, 마모, 패칭 등 오직 포장 표면의 불량률을 기준으로 a~d 등급으로 나누고 보수공사의 의사결정을 수행하도록 되어 있다. 그러나 표면의 불량률 평가는 정밀안전진단 및 점검 시 육안조사로 수행되고 있기 때문에 객관적·정량적이지 못한 한계가 있다.

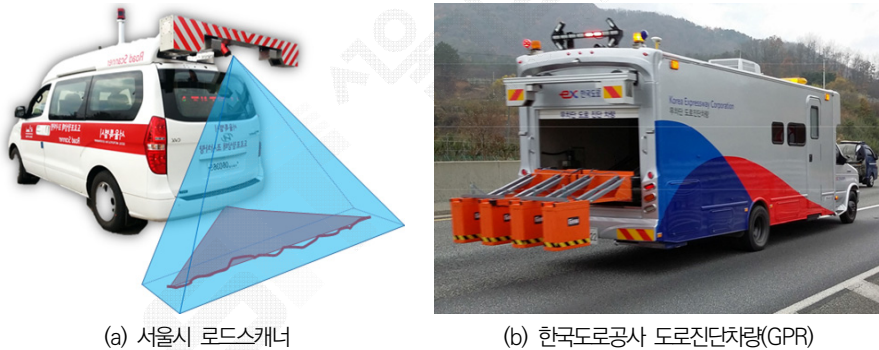


【그림 3-19】 구조물 포장 표면 육안조사 방법(국토교통부, 2019)

해당 지침에 바닥판 하면에 대한 열화 손상에 대한 평가방법은 명시되어 있으나, 포장 상태에 지대한 영향을 미치는 바닥판 상면의 열화에 대한 평가방법은 부재하고, 육안 점검도 불가능하기 때문에 사실상 별다른 기준이 없는 실정이다. 또한 터널 구조물의 경우 구조물의 평가 기준은 있지만, 포장의 상태평가를 위한 기준은 찾기 어렵다.

서울시 구조물 포장의 경우도 기본적으로 상기의 지침을 따르고 있기 때문에, 포장표면의 상태는 육안점검을 기준으로 수행되고 있으며, 바닥판 상면의 열화 손상 상태는 유지관리에 고려하지 못하고 있는 실정이다.

반면 미국의 각 DOT, 한국도로공사, 한국시설안전공단 등은 지표투과레이더(Ground Penetrating Radar, GPR) 및 다양한 장비를 활용한 비파괴 검사법을 통해, 구조물 포장 표면 손상과 바닥판 상면의 열화 손상을 측정 및 정량화하여 유지관리에 적용하고 있다. 서울시의 경우에도 토공부 포장에서는 자동포장상태 조사장비인 로드스캐너(그림 3-20(a))와 같은 첨단 장비를 활용한 전수조사를 통해 정량적인 포장상태 분석을 토대로 체계적인 유지관리 및 보수를 수행하고 있다.



(a) 서울시 로드스캐너

(b) 한국도로공사 도로진단차량(GPR)

【그림 3-20】 포장상태 조사장비

따라서 이제는 서울시 구조물 포장 종류에 따른 특성을 파악하고, 적합한 유지관리 방안 마련을 통한 선제적 관리기준의 도입이 필요한 시점이다. 이를 위해 구조물 포장 표면손상과 바닥판 상면의 열화 손상 상태를 평가할 수 있는 현장 조사 및 분석 기법과 과학적 유지관리 절차 그리고 구조물 포장의 파손 유형별 정비기법의 결정체계를 확립할 필요가 있다. 구조물 포장의 정비기법 및 관리기준이 정립된다면 향후 구조물 포장의 파손을 절감하고 공용수명을 증대시킬 수 있을 것으로 판단된다.

2-2. 서울시 구조물 포장 공법별 기술적 특성분석

교면포장의 경우 가혹한 기상 조건과 교통 여건에 노출되며 구조적인 특성상 포트홀 발생 위험이 높다. 따라서 일반 토공부 포장보다 높은 등급의 아스팔트를 사용하는 것이 좋다. 또한 소성변형에 저항하기 위해 내유동성이 좋고, 마모나 균열에 대한 피로저항성, 내구성 등을 갖는 아스팔트 혼합물을 배합하여 시공하여야 한다.

본 연구에서는 서울시 아스팔트 교면포장에 사용되는 아스콘 혼합물의 재료별 특징 및 장단점에 대해 분석한 결과를 정리하였다. 표 3-2는 서울시를 비롯하여 국내에서 사용되고 있는 교면포장용 아스팔트 재료의 분석 결과이며, 표 3-3은 교면포장 방수층 재료의 분석 결과이다.

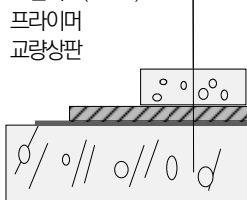
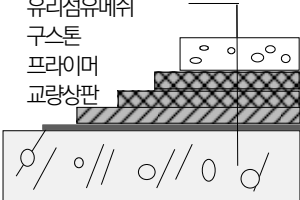
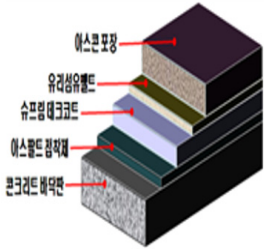
【표 3-2】 교면포장 공법(재료)별 특성분석

구분	WC-6	SMA 아스팔트	SBS 아스팔트	SBR LATEX 아스팔트
개요	불투수 아스팔트 혼합물로 내유동성 아스팔트 콘크리트, 대형차의 교통량이 많은 도로포장의 표층에 사용됨, 교면포장에도 사용됨	일반아스팔트인 AP-5를 BASE 아스팔트로 하여 조골재 및 Bitumen과 섬유를 보강한 Mastic을 혼합하여 생산 기존의 아스팔트 믹스플랜트에서 생산	일반아스팔트인 AP-5를 BASE아스팔트로 하여 정유공장에서 고무제품인 SBS를 물리화학적으로 개질시켜 생산	고무제품인 SBR을 물과 50:50으로 분산시켜 현탁액형태(LATEX)로 생산, 아스콘 공장에서 현장배합
특징	대형차의 교통량이 많은 도로의 표층이나 교면포장에 사용	굵은 골재가 다량으로 사용되어 바리 및 균열 저항을 위해 많은 양의 아스팔트 사용	분자 결합형 SBS PMA는 사전배합 형태의 제품으로 일반 아스콘과 생산이 동일하여 시공성 우수	아스콘 믹서 내에서 수분 증발 과정으로 인한 고무 고형분 발생이 우려되므로 혼합에 세심한 주의 필요
장단점	- 내구성과 내유동성이 우수 - 소성변형 발생가능성이 높은 지역에 사용됨	- 과중한 교통량과 높은 온도에 의한 소성변형에 대하여 저항력이 좋음 - 유연성이 좋아서 낮은 온도에서 균열이 없음 - 소음이 적고 내구성 우수 - 교량상의 진동에 의한 균열 발생 우려 적음	- 소성변형 저항성 우수 - 저온/피로균열 방지 효과 - 노화 방지 - 방수효과 우수 - 탄성이 우수 - 진동 저항성 우수 - 국내의 시공실적이 적음	- 소성변형 저항성 우수 - 노화 방지 - 접착력 우수 - 저온균열 저항성 우수 - 교량상 시공실적이 우수

[표 3-3] 방수층 공법(재료)별 특성분석

구분	BAS 공법	아스팔트계 도막방수(도막식)	CR계 도막방수(도막식)
단면도			
개요	양면 샌드가 부착된 교면시트(BAS시트)를 시트와 동질의 재료인 개량아스팔트 콤파운드(BAS썬)로 도포하며 부착시키는 공법	양면 샌드가 부착된 교면시트(BAS시트)를 시트와 동질의 재료인 개량아스팔트 콤파운드(BAS썬)로 도포하며 부착시키는 공법	양면 샌드가 부착된 교면시트(BAS시트)를 시트와 동질의 재료인 개량아스팔트 콤파운드(BAS썬)로 도포하며 부착시키는 공법
시공법	면처리-프라이머 도포-BAS썬 및 시트깔기-아스콘 포장	면처리-프라이머 도포-개량아스팔트 도막방수-펠트깔기-아스콘 포장	면처리-1차 프라이머-2차 프라이머-도막방수제(클로로프렌)
주성분	폴리에스터 부직포로 보강한 양면 샌드가 부착된 교면시트, 개량아스팔트	개량아스팔트, 유리섬유 펠트	CR계 합성고무
장점	<ul style="list-style-type: none"> - 바탕면의 요철이나 일기에 관계없이 균일 시공 - 기존 4mm 토치공법의 시트 방수와 도막방수의 품질기준을 모두 만족하며 에어포켓을 원천적으로 제거하고 현장에서 3mm 시트방수로 복원됨 - 도막도포와 시트용착을 기계화로 전환하여 항상 일정한 품질유지 	<ul style="list-style-type: none"> - 바탕면의 요철이나 일기에 관계없이 균일시공 - 도막방수재로 에어포켓을 최소화할 수 있음 	<ul style="list-style-type: none"> - 불연속적인 방수막 형성 - 콘크리트 층과의 접착력 우수
단점	<ul style="list-style-type: none"> - 시공 시 장비투입 필수 - 소규모 교량, 급커브 교량에 대한 시공성 떨어짐 - 아스콘 포설온도 관리 필요 	<ul style="list-style-type: none"> - 도막방수에 기본을 두고 있으며 숙련도에 따라 두께 관리 필요함 - 1X 2폭의 펠트로 보호층을 두며 인장 및 신장율이 약하고 연속으로 연결되지 않아 차량의 진행방향에 저항하는 전단력이 부족하여 아스콘의 밀림에 대한 저항력이 약함 - 바탕면의 돌출부나 아스콘 골재에 의한 집중하중 부위는 보호층을 제외하고 편칭의 가능성이 있음 	<ul style="list-style-type: none"> - 균일한 도막두께 형성이 곤란하고 양생시간이 장시간 소요 - 아스콘 다짐 시 골재에 의한 편칭현상으로 인하여 방수층이 손상됨 - 휘발성 용제를 사용하므로 화재의 위험성 내포 - 기포 발생
작업성	1m 폭으로 세팅된 썬 공급기에 의해서 원하는 두께로 썬을 도포하는 동시 200m 이상 탑재가 가능한 자동 시트 부착기로 부착되어, 시공시간이 현저히 단축되며 양생시간이 필요 없음	개량아스팔트 도막재를 1차 수동으로 도포하고 펠트를 부착하는 공법으로 인력투입이 많아짐	아스콘 포장 전 택코팅을 하여야 하고 각 공정마다 양생시간이 필요하여 최종 도막층 형성까지 작업시간이 많이 소요됨

[표 3-3] 방수층 공법(재료)별 특성분석(계속)

구분	자착식 시트방수(시트식)	구스톤(OAT)(도막식)	슈프림 데크코트 M6 공법(복합식)
개요	<p>아스콘 교면시트(2mm) 프라이머 교량상판</p> 	<p>아스콘 규사도포 유리섬유메쉬 구스톤 프라이머 교량상판</p> 	
개요	부직포의 양면에 개량아스팔트를 도포하여 상부층은 샌드로 마감하고 하부층을 필름으로 마감하여 하부필름층을 벗겨내고 부착하는 공법	구스아스팔트를 도포하고 전단력을 강화하고자 유리섬유 메쉬를 깔고 상부에 규사를 도포하여 마감하는 공법	슈프림 데크코트 공법은 아스콘 포설 시 다짐 온도에 의해 유리섬유 펠트에 코팅되어 있는 고무아스팔트가 용융되어 아스콘 포장과 방수층이 일체화되는 교면 방수 공법
시공법	면처리-프라이머도포-시트부착-아스콘 포장	면처리-메쉬깔기-구스콘도포-규사살포-아스콘 포장	면처리-접착제도포-방수막-펠트시공-아스콘 포장
주성분	폴리에스타 부직포로 보강한 필름 마감을 한 교면시트	아스팔트, 유리섬유메쉬, 규사	고무아스팔트, 유리섬유 펠트
장점	<ul style="list-style-type: none"> - 시공이 용이하며 방수층이 균일 - 작업성이 좋음 	<ul style="list-style-type: none"> - 소규모 보수용이 - 연결부 없는 연속시공 가능 	<ul style="list-style-type: none"> - 양생시간이 짧아 공기 단축을 할 수 있음 - 기존 작업기열에 의한 방수층의 열화를 방지하고 하자 원인인 이음매가 없는 방수층을 형성 - 일체화 거동으로 유지보수 비용 절감 - 방수재 흘러내림 없음 - 진동에 대한 내구성 확보
단점	<ul style="list-style-type: none"> - 바닥판과의 접착력 부족 - 바닥판 그루밍 자국 충전 불가 - 종단 구배가 심한 교량 아스콘밀림 가능성 큼 - 시공 후 장비 투입 시 방수재 밀림현상 발생 	<ul style="list-style-type: none"> - 두께 관리가 필요함 - 아스콘 골재에 의한 집중하중 부위는 방수층의 편칭가능성 있음 - 고온의 아스콘 포설 시 아스콘의 다짐력에 의한 모세관 현상으로 방수막이 아스콘으로 유입되어 아스콘의 성분을 변화시킬 수 있음 - 아스콘 포설 후 방수층 두께확보가 어려움 	<ul style="list-style-type: none"> - 시공 시 간접기열용융장치 필요 - 특수 면처리장비 사용 필요 - 시공비가 비쌈
작업성	교면시트의 이형필름을 벗겨내고 부착하는 공법으로 작업성은 양호하나 인력투입이 많아짐	다단계 공정으로 작업성이 떨어지며 인력 투입이 많아짐	자재 생산 및 조달이 용이, 접착성이 우수하여 요철, 곡선부위 두께형성에 용이

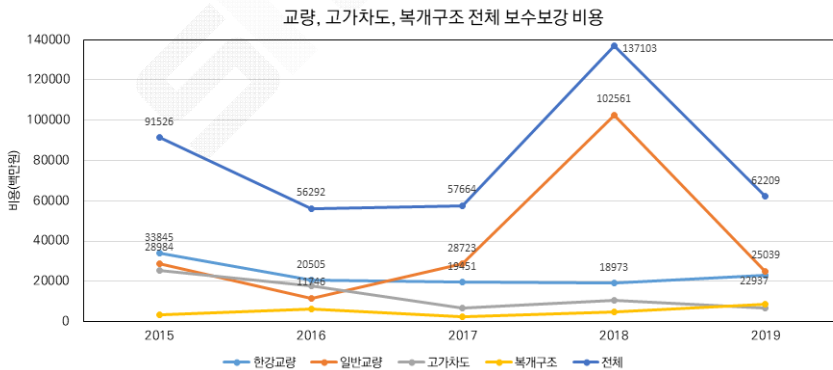
[표 3-3] 방수층 공법(재료)별 특성분석(계속)

구분	HS 브리지코트(도막식)	고탄성 아크릴(도막식)	프로 코트(도막식)
단면도			
개요	<p>개질고무와 특수 고분자 개질 Asphalt가 첨가된 HS Birdge Coat 씬 및 강력한 폴리부직포에 아라미드섬유 및 화이버글라스를 주원료 제조 가공된 도막형 토목 도막접착 방수재료</p>	<p>기존 포장 및 열화된 콘크리트를 제거한 후 MMA 프라이머와 초속경의 고탄성 아크릴론(MMA 수지, 탄산칼슘, 규사에 경화개시제를 첨가한 후 상온에서 혼합)을 이용해 기존 바닥판의 단면보수와 방수를 동시에 수행</p>	<p>수용성 특수 기능성 하이브리드계 도막 방수 접착제</p>
시공법	<p>면처리-고무아스팔트도포-HS Bridge Coat 씬포설-부직포+메쉬설치</p>	<p>면처리-MMA수지 프라이머 도포-방수재 도포-택코팅-아스팔트 포장</p>	<p>면처리-청소-프라이머도포-프로 실 도포-부직포 시공</p>
주성분	<p>개질고무, 특수 고분자 아스팔트, 부직포, 섬유</p>	<p>MMA 프라이머, 초속경성 고탄성 아크릴론, 아크릴레이트, 경화제(BPO)</p>	<p>프로코트, 프라이머, 부직포</p>
장점	<ul style="list-style-type: none"> - 구조물에 강력한 접착력과 탄성을 유지하여 균열이나 부식이 없으며 전기에 전도되지 않고 염분이나 오염된 산성비에도 견딜 수 있는 소재 - 인장강도와 신장능력의 개선과 건조수축이 감소하여 반사 균열에 대한 저항력이 매우 뛰어남 - 내충격성, 접착성, 내산성, 내알칼리성 확보 	<ul style="list-style-type: none"> - 상판 열화부 보수 및 방수를 동시 시공, 1시간 이내 경화가 가능 - 소성변형 및 피로균열 저항성 확보 - 화학적 저항성 보유(염소이온 투과율 낮음) 	<ul style="list-style-type: none"> - 수용성 특수 기능성 수지 및 무기계 접착화제를 주성분하여 대부분의 바탕면에 부착성이 양호 - 탄성 도막방수재로 크랙보수 및 진동제거에도 양호한 성능을 발휘 - 건조 후 도막은 신장성과 탄성을 보유하며, 영하 및 영상의 기온 변화에도 균열 추중성이 우수
단점	<ul style="list-style-type: none"> - 저온 시(5℃ 이하) 시공이 어려움 - 두께관리 필요함 - 시공비가 비쌌 	<ul style="list-style-type: none"> - MMA 수지의 경화조건을 현장에서 제어하는 데 어려움이 있음 	<ul style="list-style-type: none"> - 건조되기 전에 물기와 접촉 불가, 우기철 회피 필요 - 외기온도 5℃ 이하 및 상대습도 85% 이상에서는 건조가 지연
작업성	<p>부분보수에도 적용 가능</p>	<p>부착성 확보, 고온 포장 시공 가능, 부분보수 가능, 교면의 건조 필요</p>	<p>양생시간이 별도로 필요하지 않으므로 공기단축 가능</p>

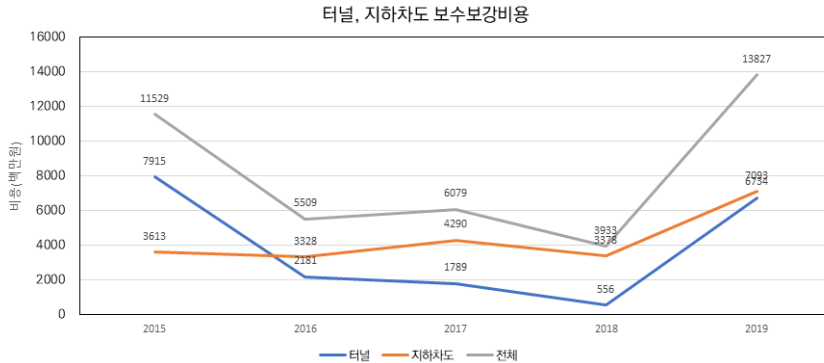
2-3. 서울시 구조물 포장 보수예산 현황

서울시 빅데이터 분석시스템의 DB와 각 기관의 이력 정보를 분석한 결과, 구조물의 보수·보강 기록과 그에 따른 실행 비용은 포장 및 방수 비용을 비롯한 상판 보수, 철거, 신축이음 보수, 콘크리트 보수, 강재 보수, 난간 보수, 도장 비용, 차선도색 비용, 교통안전 비용을 모두 포함하고 있었다. 이에 따라 DB에 존재하는 보수보강 비용에서 구조물 포장 관련 보수비용을 별도로 구분하는 것은 어려운 실정이다. 따라서 본 연구에서는, 서울시 구조물의 5년간의 보수·보강 비용을 분석하고, 비교적 이력 정보가 명확한 한강교량에 대해서는 포장 관련 보수 이력 및 비용을 추가적으로 분석하였다.

그림 3-21, 그림 3-22는 서울시 빅데이터 분석시스템에 기록된 교량, 고가차도, 복개구조, 터널, 지하차도의 최근 5년간 연도별 보수·보강 비용 추이이다. 한강교량은 평균적으로 231억 원 정도의 보수비용을 매년 투입하고 있다. 일반교량의 경우 유사한 수준이었으나 2018년도에 약 1,026억 원의 보수보강비용이 발생하여 평균 394억 원으로 나타났다. 고가차도는 평균 135억 원, 복개구조는 평균 51억 원 수준의 보수보강 비용이 사용되는 것으로 분석되었다. 터널은 평균적으로 38억 원 정도의 보수비용을 매년 투입하고 있으며, 지하차도의 경우 평균 43억 원 정도의 비용이 소요되고 있다. 터널과 지하차도 모두 2018년까지 보수비용이 감소하는 추세였으나 2019년도에 보수비용이 가파르게 상승하였다.



[그림 3-21] 교량, 고가차도, 복개구조 연도별 보수보강비용



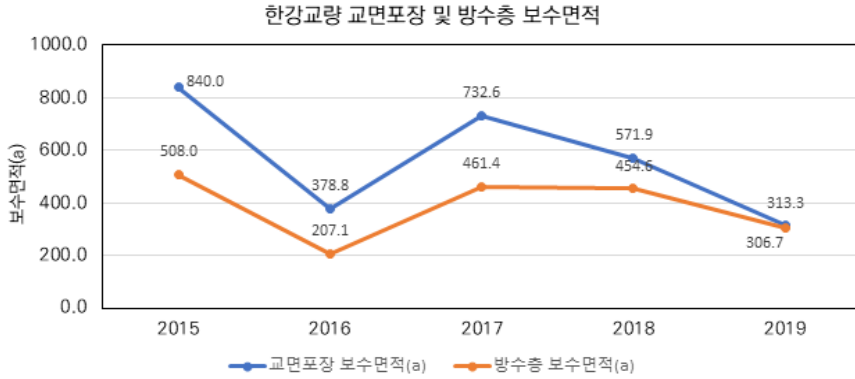
[그림 3-22] 터널 및 지하차도 연도별 보수보강비용

한편, 본 연구에서는 한강교량과 교면포장 및 방수층의 연도별 보수예산을 추정하였다. 앞서 언급한 바와 같이 서울시 구조물의 전체 보수·보강 비용에서 포장 관련 보수비용을 산정하는 것은 매우 어렵다. 그러나 한강교량의 경우 2018년도 일상유지보수 백서와 나라장터에서 발주하는 보수 용역의 공사설명서에 교면포장의 보수면적과 방수층 시공 면적이 명시되고 있다. 본 연구에서는 2015년부터 2019년까지 발주된 교면포장 및 방수층 공사면적에 개략 보수단가를 반영하여 연도별 보수비용을 추정하였다. 개략 보수단가는 서울시 도로기반시설 빅데이터 통합관리 시스템의 일부공사의 산출내역을 참조하여 다음과 같이 결정하였다.

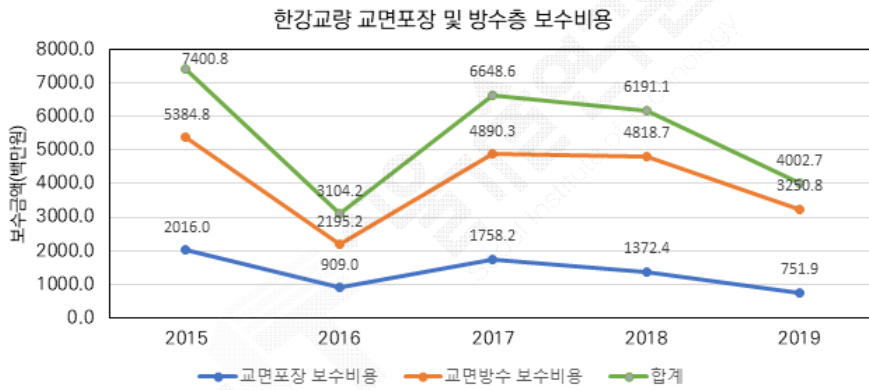
- 교면포장 보수단가 : 2,400천 원/a
- 방수층 재포장 단가 : 10,600천 원/a

그림 3-23에는 한강교량의 연도별 교면포장 및 방수층의 보수면적을 조사한 결과를 나타내었다. 한강교량 교면포장의 연평균 보수면적은 567.3a이며, 방수층 보수면적은 평균 387.5a이다. 최근 바닥판 상면의 열화 손상을 제거하고 교면포장의 재포장 품질을 향상시키기 위해 교면포장 보수 시 방수층까지 재포장하고 있는 추세이다. 실제로 2018년도와 2019년도의 교면포장 및 방수층의 재포장면적을 보면 유사하다.

그림 3-24는 상기 개략단가를 활용하여 보수비용을 추정한 결과이다. 교면포장의 경우 연평균 13.6억 원의 보수비용이 소요되었으며, 방수층의 경우 41.1억 원의 보수비용이 소요되었다.



[그림 3-23] 한강교량 연도별 교면포장 및 방수층 보수면적



[그림 3-24] 한강교량 연도별 교면포장 및 방수층 보수비용

표 3-4의 한강교량 전체 부재의 연평균 보수·보강 비용은 약 231억 원이었으며, 이 중 교면포장 관련 보수비용은 약 54.7억 원으로 전체 비용에서 약 23.6%가 포장 관련 보수비용으로 소요되고 있는 것으로 분석되었다.

[표 3-4] 한강교량 및 교면포장 보수비용 분석 결과(단위: 백만 원)

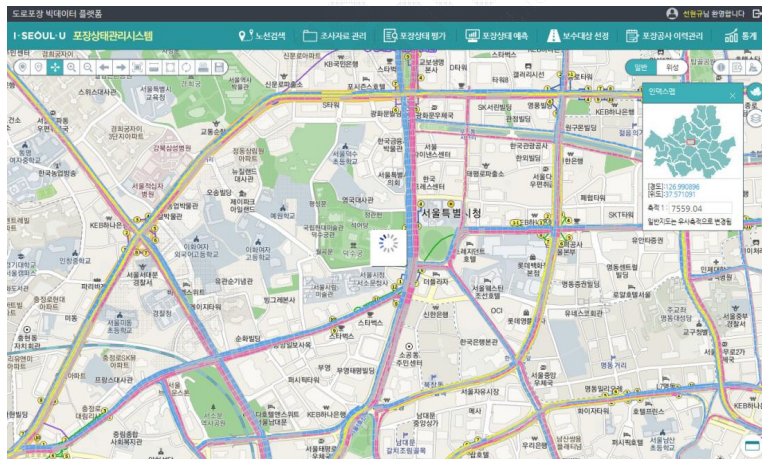
구분	2015	2016	2017	2018	2019	연평균	
한강교량 전체	33,845	20,505	19,451	18,973	22,937	23,142	
교면 포장 관련	교면 포장	2,016	909	1,758	1,372	751	1,361
	교면 방수	5,385	2,195	4,890	4,819	3,251	
							5,469

3. 서울시 구조물 포장상태지수 분석

3-1. 구조물 포장상태지수 개요

구조물 포장의 유지관리 기준을 개발하기 위해서는 구조물 포장의 전반적 상태와 파손량의 변화 등을 주기적으로 분석할 필요가 있으나, 현행 구조물 포장의 유지관리는 육안조사에 의존하여 실시되고 있으므로 개선이 필요한 실정이다.

한편, 서울시 토공부 포장의 경우 도로포장 유지관리체계(PMS; Pavement Management System)를 도입하였으며, 이를 통해 첨단 조사차량을 이용한 과학적 상태조사, 정량적 파손량 분석, 서울시 포장상태지수(SPI; Seoul Pavement Index) 기반의 정량적 상태평가, 보수예산 수립 및 유지보수 등 일련의 과정을 매년 수행하고 있다. 2016년에는 그동안 개별로 구축되어왔던 도로관리 정보시스템의 취득 데이터에 대한 표준화와 고도화를 위해 도로관리 빅데이터 시스템을 구축하였다(그림 3-25).



[그림 3-25] 서울시 토공부 PMS 빅데이터 시스템

토공부 포장은 그동안 3년 간격으로 실시했던 도로 전수조사 방식을 개선하여, 2018년 이후로는 1년 간격으로 약 7,000km의 도로를 전수조사하고 유지관리 전략을 수립하고 있다. 전수조사는 서울시가 관리하는 도시고속도로, 주간선도로, 보조간선도로를 대상으로 하는데, 이때 구조물 포장 또한 조사대상에 포함되었다. 결과적으로, 서울시 도로관리 빅데이터 시스템에서는 2018년 이후로 구조물 포장의 현장 조사 데이터 또한 함께 확인할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 서울시 PMS 데이터를 활용하여 서울시 구조물 포장의 2018년, 2019년도 포장상태를 분석하였다. 표 3-5는 본 연구에서 분석한 구조물 포장 개소 수(민자, 타 자치구 관리시설 포함)를 나타낸 것으로, 데이터가 존재하지 않는 구간 등을 제외하면 전체 구조물 포장 중 80% 구간을 분석 완료하였다. 포장상태 평가를 위해 필요한 대표적 인자인 균열률, 종단평탄성, 소성변형을 수집하였으며, 이를 통해 구조물 포장별 SPI를 도출하여 연도별, 포장종류별 비교분석을 수행하였다. 교량 구조물의 경우는 한강교량과 일반교량의 교통특성 및 보수기간 등의 차이가 현저한 점을 고려하기 위해 서로 구분하여 분석하였다.

【표 3-5】 2018~2019년 구조물 포장 PMS 데이터 분석현황

구분	계	한강교량	일반교량	고가차도	터널	지하차도	복개구조
대상시설수(개소)	535	21	234	82	40	109	49
DB 없는 구간	89	1	31	9	2	28	18
검색불가	20	0	16	2	0	2	0
분석시설수(개소)	427	20	187	71	38	80	31
분석율(%)	80	95	80	87	95	73	63

* 서울시 1, 2, 3종, 법정 외 구조물 대상, DB 없는 구간 및 검색불가 구조물 제외

* 터널포장의 경우 서울시 소재의 비관리시설 4개소 포함

본 연구에서 실시한 구조물 포장상태지수 평가는 빅데이터 시스템 구축 시기상의 한계로 인해 2018년, 2019년 조사 결과로 한정되었다. 또한, 현행 포장상태지수는 구조물 포장을 대상으로 개발된 모형이 전무하며, 본 연구에서 도출한 SPI 또한 서울시 토공부 포장상태지수 모형을 준용하여 계산하였다. 따라서 본 연구에서 도출한 구조물 포장 SPI 및 토공부 SPI는 서로 의미하는 바가 다를 수 있음을 주의하여야 하며, 직접적인 수치 비교분석보다 각각의 변화 추이를 비교분석하는 방향이 합리적이다. 본 연구에서는 현행 토공부 포장상태지수 모형을 준용하여 구조물 포장상태지수를 도출하였지만, 향후 구조물 포장 고유의 상태지수 모형이 개발되면 구조물 포장 거동특성을 보다 정확하게 반영하여 유지관리 체계를 고도화할 수 있을 것으로 판단된다. 이를 위해서는 주기적인 구조물 포장 현장 조사를 실시하여 현행 빅데이터 시스템을 꾸준히 업데이트하여야 할 것이다.

3-2. 교면포장 및 고가차도 포장상태지수 분석 결과

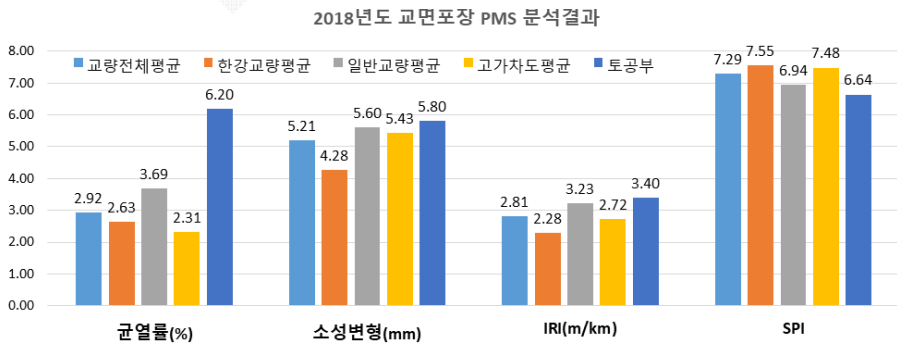
1) 포장상태조사 데이터 비교

표 3-6과 그림 3-26은 한강교량, 일반교량, 고가차도의 교면포장에 대한 균열률과 소성변형, IRI, SPI 분석 결과를 토공부와 비교한 것이다. 여기서 제시한 교면포장의 분석 결과는 교면포장 관련 별도의 기준이 없어 서울시의 토공부 산출방식을 적용한 결과이다.

교면포장의 2018년도 SPI 값은 한강교량이 7.55로 가장 높았으며, 고가차도, 일반교량 순서로 나타났다. 2019년도 SPI 값은 고가차도가 7.39로 가장 높았고, 한강교량, 일반교량 순으로 뒤를 이었다. 2018년 대비 2019년의 SPI 값을 비교하면, 한강교량은 0.46 감소하였고, 일반교량은 0.02 증가하였으며, 교량 전체 평균은 0.14 감소하였다. 고가차도는 0.09 감소, 토공부는 0.02 증가한 것으로 나타났다.

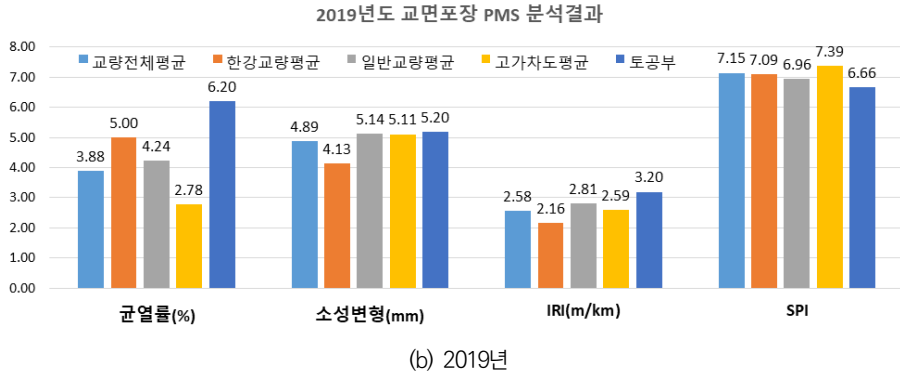
【표 3-6】 한강교량, 일반교량, 고가차도 SPI 비교(구조물별)

구분	2018년				2019년				증감
	균열률 (%)	소성변형 (mm)	IRI (m/km)	SPI	균열률 (%)	소성변형 (mm)	IRI (m/km)	SPI	
교량 전체 평균	2.92	5.21	2.81	7.29	3.88	4.89	2.58	7.15	-0.14
한강교량 평균	2.63	4.28	2.28	7.55	5.00	4.13	2.16	7.09	-0.46
일반교량 평균	3.69	5.60	3.23	6.94	4.24	5.14	2.81	6.96	+0.02
고가차도 평균	2.31	5.43	2.72	7.48	2.78	5.11	2.59	7.39	-0.09
토공부 평균	6.20	5.80	3.40	6.64	6.20	5.20	3.20	6.66	+0.02



(a) 2018년

【그림 3-26】 2018~2019년도 교량구조물 PMS 분석 결과



【그림 3-26】 2018~2019년도 교량구조물 PMS 분석 결과(계속)

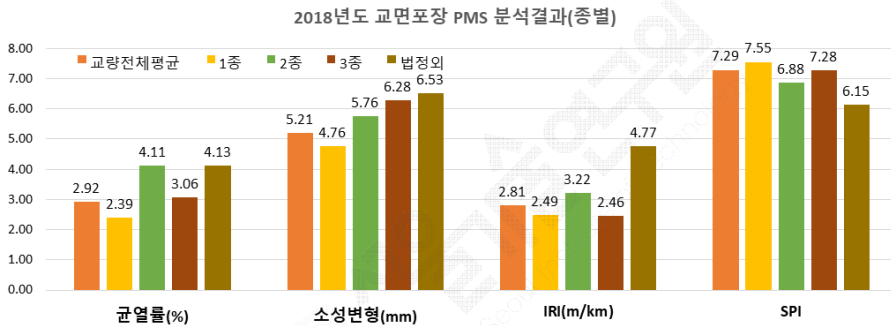
2) 종별 비교

서울시는 도로시설물을 1종, 2종, 3종, 법정의 등급으로 분류하여 관리하고 있다. 특수교량(현수교, 사장교, 아치교 및 트러스인 교량, 최대 경간 길이 50m 이상의 교량)이나, 연장 500m 이상의 교량을 1종으로 규정하고, 연장 100m 이상의 교량으로서 1종 시설에 해당하지 않는 교량, 최대 경간장 50m 이상인 한경간 교량을 2종으로 분류한다. 준공 후 10년이 경과한 교량으로 도로법상 도로교량 연장 20m 이상 100m 미만 교량, 농어촌 도로정비법상 도로교량 연장 20m 이상 교량, 비법정 도로상 도로교량 연장 20m 이상 교량, 연장 100m 미만 철도 교량을 3종으로 분류한다. 이외의 교량은 법정외로 분류한다.

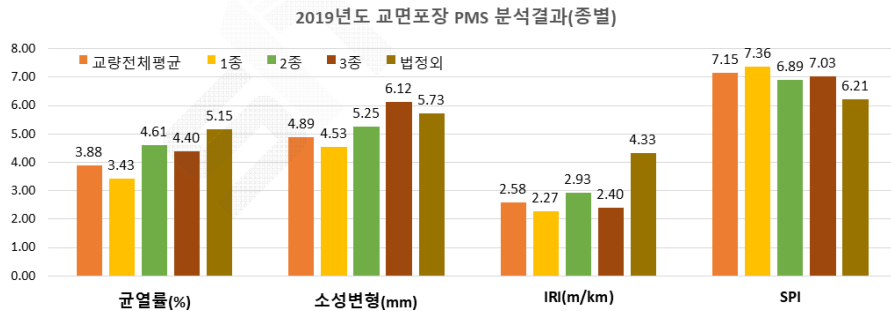
표 3-7과 그림 3-27은 한강교량, 일반교량, 고가차도의 SPI를 구조물 종별로 분류하여 비교한 표이다. 2018년도 SPI 값은 1종 교량이 7.55로 가장 높았으며, 3종 교량(7.28)과 2종 교량(6.88), 법정의 교량(6.15)의 순으로 나타났다. 2018년 대비 2019년의 SPI 값은 1종 교량의 경우 0.19 감소, 2종 교량은 0.01 증가, 3종 교량은 0.25 감소, 법정외 교량은 0.06 증가하였다.

[표 3-7] 한강교량, 일반교량, 고가차도 SPI 비교(종별)

구분	2018년				2019년				증감
	균열률 (%)	소성변형 (mm)	IRI (m/km)	SPI	균열률 (%)	소성변형 (mm)	IRI (m/km)	SPI	
교량 전체 평균	2.92	5.21	2.81	7.29	3.88	4.89	2.58	7.15	-0.14
1종 교량 평균	2.39	4.76	2.49	7.55	3.43	4.53	2.27	7.36	-0.19
2종 교량 평균	4.11	5.76	3.22	6.88	4.61	5.25	2.93	6.89	+0.01
3종 교량 평균	3.06	6.28	2.46	7.28	4.40	6.12	2.40	7.03	-0.25
법정의 교량 평균	4.13	6.53	4.77	6.15	5.15	5.73	4.33	6.21	+0.06
토공부 평균	6.20	5.80	3.40	6.64	6.20	5.20	3.20	6.66	+0.02



(a) 2018년



(b) 2019년

[그림 3-27] 2018~2019년도 교량구조물 종별 PMS 분석 결과

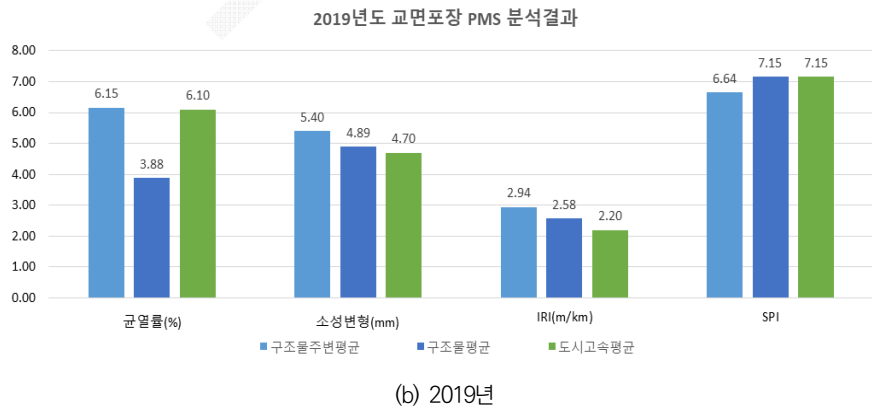
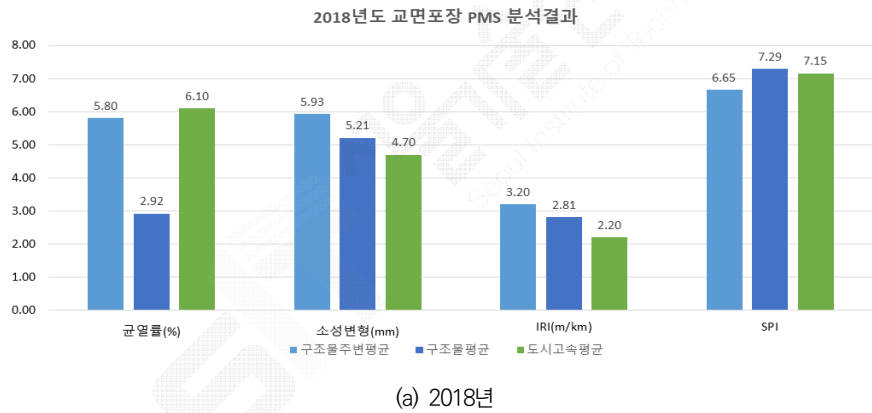
3) 교면포장, 교량 인근 토공부 포장, 도시고속 평균 SPI 비교

표 3-8과 그림 3-28은 교면포장, 교량 인근 토공부, 도시고속의 평균 SPI 값을 비교한 것이다. 교량 인근 토공부 평균 SPI 값은 교량 인근 각 500m 구간의 토공부 표면 결함을 조사하여 분석한 값이다.

2018년도 SPI 값을 비교하면, 교량 전체 평균이 7.29로 가장 높았고, 도시고속 평균(7.15), 인근 토공부 평균(6.65)의 순서로 확인되었다. 2018년 대비 2019년의 SPI 값을 비교하면, 교량 전체는 0.14 감소, 인근 토공부는 0.01 감소하였으며, 도시고속은 동일 수치를 유지하였다.

[표 3-8] 교면포장, 인근 토공부, 도시고속 SPI 비교

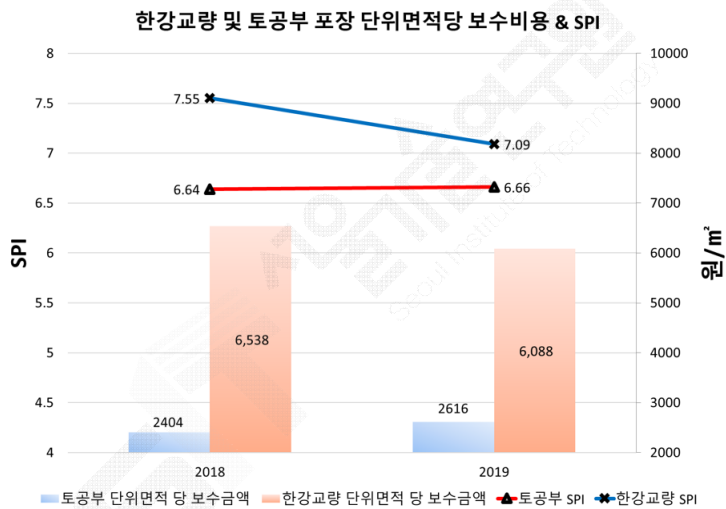
구분	2018년				2019년				증감
	균열률 (%)	소성변형 (mm)	IRI (m/km)	SPI	균열률 (%)	소성변형 (mm)	IRI (m/km)	SPI	
교량 전체 평균	2.92	5.21	2.81	7.29	3.88	4.89	2.58	7.15	-0.14
인근 토공부 평균	5.80	5.93	3.20	6.65	6.15	5.40	2.94	6.64	-0.01
도시고속 평균	6.10	4.70	2.20	7.15	6.10	4.70	2.20	7.15	0



[그림 3-28] 2018~2019년도 교량 전체 평균, 인근 토공부 평균, 도시고속 평균 SPI 비교분석 결과

4) 한강교량 및 토공부 포장 단위면적당 보수비용 및 SPI 변화 분석

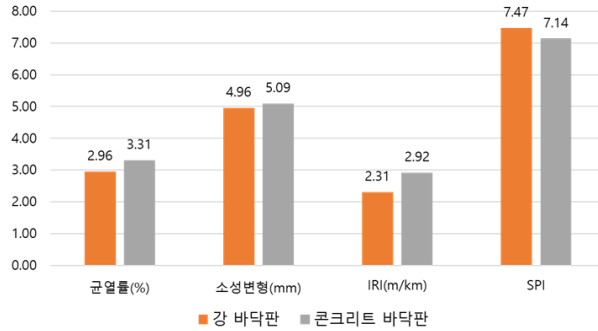
본 연구에서 한강교량 포장의 보수비용 조사 결과와 토공부의 2018~2019년 포장도로 보수예산을 활용하여 보수비용을 비교하였다. 그림 3-29는 SPI 지수와 단위면적당 보수비용을 비교한 것이다. 교면포장이 토공부 대비 단위면적당 약 3배의 보수비용이 투입되는 것으로 확인되었으나, 2018년 대비 2019년 SPI 지수는 감소하였다. 이는 교면포장이 토공부에 비해 유지관리의 측면에서 열악한 환경에 놓여 있음을 시사한다. 앞서 제시한 것과 같이 토공부와 교면포장의 SPI 수치를 직접적으로 비교하는 것은 어렵지만, 교면포장의 공용성 증대 및 비용 절감을 위해 교면포장 특성을 고려한 효과적 유지관리 체계의 도입이 반드시 필요한 것으로 판단된다.



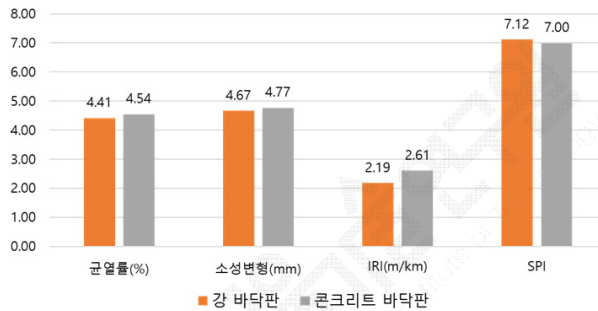
【그림 3-29】 한강교량 및 토공부 포장 단위면적당 보수비용 및 SPI 변화

5) 바닥판 형식에 따른 PMS 데이터 분석 결과

서울시 교면포장의 바닥판 종류는 콘크리트 바닥판이 약 94.4%에 달하고, 강바닥판은 약 5.6%로 구성된다. 그림 3-30은 콘크리트 바닥판 교면포장과 강바닥판 교면포장의 PMS 분석 결과를 비교한 것이다. 2018년에는 강바닥판 교량(7.41)이 콘크리트 바닥판 교량(7.14)보다 높은 SPI를 보였으며, 2019년에도 강바닥판 교량(7.12)이 콘크리트 바닥판 교량(7.00)보다 SPI가 높게 측정되었다. 그러나 조사 데이터가 2개년으로 충분하지 않고, 강바닥판 교량의 경우 개소 수가 매우 적기 때문에 현재로서는 콘크리트 바닥판과 강바닥판의 성능을 비교하기는 어려울 것으로 판단된다. 따라서 향후 지속해서 데이터를 누적하여 분석 결과의 신뢰성을 향상할 필요가 있다.



(a) 2018년



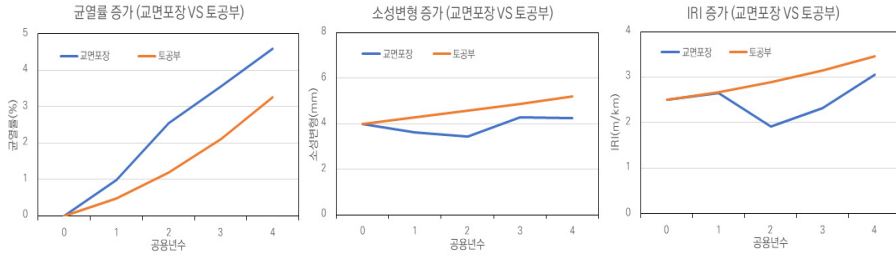
(b) 2019년

[그림 3-30] 바닥판 형식별 교면포장 PMS 분석 결과

6) 교면포장 공용연수에 따른 개별결함 변화 비교

본 연구에서는 과거 2014년으로부터 2017년 중 측정된 보수공사 구간의 균열, 소성변형, 종단평탄성을 각각 초기값으로 설정한 뒤, 동 구간에서 2018년, 2019년 PMS 데이터를 활용하여 개별결함의 증가율을 분석하였다(그림 3-31). 한강교량 재포장 구간 이력 정보를 참조하여 총 17개소(10km)의 데이터를 활용하였으며, 토공부 포장의 개별결함 증가량은 그림 3-32에 제시한 서울시 2018년도 PMS 보고서의 개별결함 증가식을 활용하여 계산하였다.

비교 결과 공용연수 증가에 따른 교면포장의 균열 발생 속도가 비교적 빠른 것으로 나타났으며, 소성변형이나 IRI의 경우 유사한 수준으로 분석되었다. 이는 교면포장의 두께가 토공부 대비 얇은 점과 온도변화 및 체류수 등에 취약한 구조적 특성에 의한 것으로 판단된다. 또한 앞서 제시한 바와 같이, 본 연구에서는 분석에 활용된 데이터의 양에 한계가 있으므로 결과를 단정지을 수 없으며, 향후 지속적인 데이터 확보를 통해 개별결함 변화에 대한 장기공용성을 추적조사해야 한다.



[그림 3-31] 교면포장 및 토공부의 공용연수에 따른 개별결함 변화 비교

구분		모형(개월)	
균열률	도시고속	$y = 0.001004x^2 - 0.000167x$	
	주간선	$y = 0.000775x^2 + 0.03101x$	
	보조간선	$y = 0.001357x^2 + 0.017219x$	
소성 변형	도시고속	$y = 7.21x^2 - 05x^2 + 0.003423x + 4$	
	주간선	$y = 4.594x^2 - 05x^2 + 0.0228953x + 4$	
	보조간선	$y = 0.000273x^2 + 0.00738x + 4$	
종단 평탄성	도시고속	$y = -7x^2 - 05x^2 + 0.030015x + 2.5$	
	주간선	$y = 0.000173x^2 + 0.011844x + 2.5$	
	보조간선	$y = 0.0001357x^2 + 0.015965x + 2.5$	

[그림 3-32] 교면포장 및 토공부의 공용연수에 따른 개별결함 변화 비교(서울특별시, 2018)

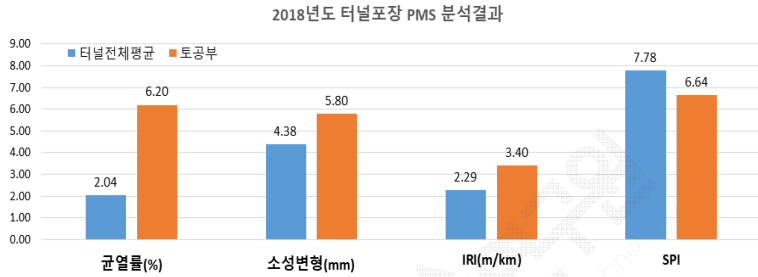
3-3. 터널 포장상태지수 분석 결과

1) 터널포장 및 토공부 포장의 PMS 분석 결과 비교

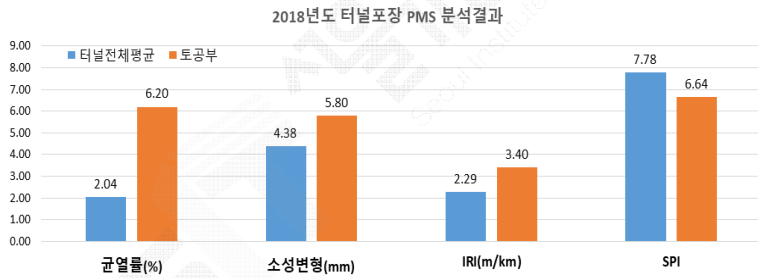
표 3-9와 그림 3-33은 터널포장과 토공부 포장의 PMS 분석 결과이다. 터널포장의 2018년도 SPI는 7.78로 토공부 포장 6.64에 비해 높았으며, 2019년도에도 7.51로 토공부 6.66보다 높게 분석되었다. 이는 터널 내 포장이 토공부에 비해 상대적으로 기후 영향을 적게 받기 때문으로 판단된다. 터널포장의 연도별 SPI는 조금 감소하였으나, 공용성에는 지장이 없는 것으로 분석되었다.

[표 3-9] 터널포장 및 토공부 포장의 표면결함 비교

구분	2018년				2019년				증감
	균열률 (%)	소성변형 (mm)	IRI (m/km)	SPI	균열률 (%)	소성변형 (mm)	IRI (m/km)	SPI	
터널 평균	2.04	4.33	2.29	7.78	2.66	3.93	2.32	7.51	-0.27
토공부 평균	6.20	5.80	3.40	6.64	6.20	5.20	3.20	6.66	+0.02



(a) 2018

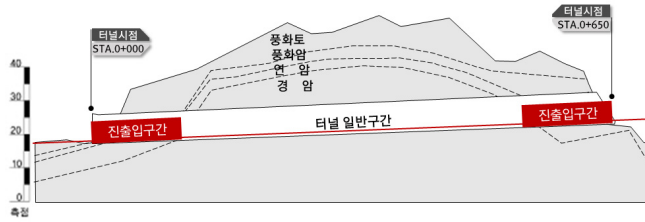


(b) 2019

[그림 3-33] 터널포장 및 토공부 포장 PMS 비교분석 결과

2) 터널포장 진출입부 및 일반구간 비교

터널포장의 경우 기후 영향을 받을 수 있는 진출입구간에서는 토공부 포장과 같이 동상방지층을 설치하고 있다. 본 연구에서는 서울시 터널포장의 진출입부 각 50m 구간과 일반구간의 파손상태를 비교하고, 진출입구간에서 별도로 포장 관리를 수행하는 것에 대한 필요성을 검토하였다. 그림 3-34는 터널포장의 진출입구간과 일반구간의 개념도를 나타낸 것이다.



[그림 3-34] 터널 진출입부와 일반구간 개념도

표 3-10은 터널포장 진출입부 50m와 일반구간의 PMS 분석 결과이다. 2018년의 경우 일반구간의 SPI는 7.85, 진출입구간의 SPI는 7.44로 진출입구간이 일반구간에 비해 낮았다. 2019년은 진출입구간 7.60, 일반구간 7.64로 계산되어 차이가 크지 않았다. 2018~2019년의 조사 결과로부터, 터널포장의 진출입구간과 일반구간은 포장상태가 큰 차이를 보이지 않았고, 따라서 진출입구간과 일반구간의 포장에 대하여 동일한 포장 관리기준을 적용할 수 있을 것으로 판단하였다. 다만, 추후 추가적 데이터 수집을 통한 지속적 추세 확인이 수행되어야 할 것이다.

[표 3-10] 터널 구간별 표면결함 비교

구분	2018년				2019년				증감
	균열률 (%)	소성변형 (mm)	IRI (m/km)	SPI	균열률 (%)	소성변형 (mm)	IRI (m/km)	SPI	
터널 진출입부	2.51	4.58	2.73	7.44	2.06	4.06	2.59	7.60	+0.16
터널 내부	2.04	4.25	2.26	7.85	2.37	4.16	2.21	7.64	-0.21

3) 터널포장 사례조사

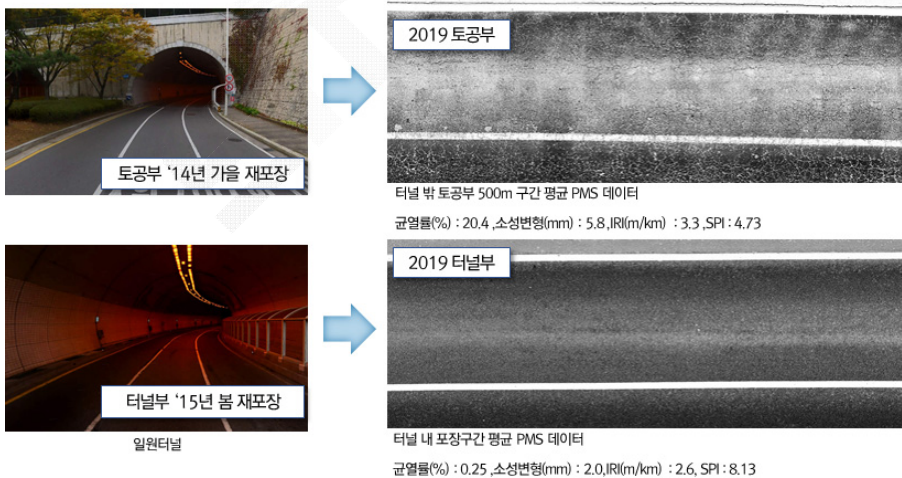
터널포장의 포장상태 데이터 분석 결과 일반 토공부 포장에 비해 상당히 양호한 것을 확인하였다. 이와 더불어 본 연구에서는 실제 터널포장의 유지보수 사례를 조사하여 터널포장과 인근 토공부 포장의 파손 발생 추이를 검토하였으며, 터널포장 관리기준을 개발을 위한 참고자료로 사용하고자 하였다.

그림 3-35는 자하문터널 하행 2차로의 포장상태를 나타낸 사진이다. 터널포장의 경우 2013년도에 재포장된 뒤 2019년까지 균열률이 1.8%, SPI가 7.80로 나타나 파손발생량이 매우 낮았다. 반면 인근 토공부 포장의 경우 2011년도에 재포장된 이후 2019년도에 균열률 20.5%, SPI는 4.74로 나타나 터널보다 토공부의 파손 발생 속도가 매우 빠른 것을 확인하였다.



[그림 3-35] 자하문터널(하행 2차로) 조사 결과

그림 3-36은 일원터널 하행 1차로의 사례조사 결과이다. 터널포장은 2015년 재포장 이후 2019년까지 균열률 0.25%, SPI 8.13으로 매우 양호한 상태를 보였다. 반면 인근 토공부 포장은 2014년 재포장 이후 2019년도에 균열률 20.4%, SPI 4.73으로 조사되어 터널포장 대비 파손발생 속도가 매우 빠르게 나타났다.



[그림 3-36] 일원터널(하행 2차로) 조사 결과

터널포장의 경우 교면포장과 달리 바닥판 열화 손상에 의한 영향을 고려하지 않아도 되기 때문에 유지관리 측면에서 매우 유리한 구조를 가지고 있으며, 토공부 대비 기후의 영향도 적게 받기 때문에 파손의 발생이 매우 더딘 것으로 파악되었다.

따라서 터널포장의 경우, 별도의 포장 관리기준을 제시하기보다 현행 토공부의 포장 상태평가 기준을 준용하거나, 또는 현행 정밀안전점검 및 진단에서 수행하고 있는 육안조사 방법을 유지하여도 무방할 것으로 판단된다.

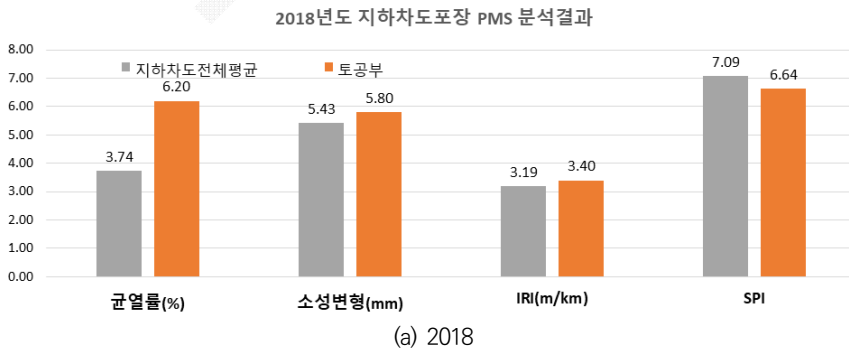
3-4. 지하차도 포장상태지수 분석 결과

1) 지하차도 포장 및 토공부 포장의 PMS 분석 결과 비교

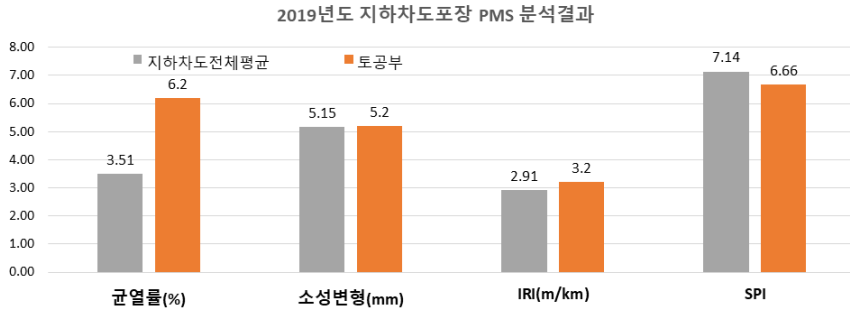
표 3-11과 그림 3-37은 지하차도 포장과 토공부 포장의 PMS 분석 결과이다. 지하차도 포장의 2018년 SPI는 7.09, 토공부 포장의 SPI는 6.64로 계산되었으며, 2019년에도 지하차도(7.14)가 토공부(6.66)보다 높았다. 터널포장과 달리 SPI의 차이는 상대적으로 크지 않았으며, 연도별 증감도 크지 않았다. 지하차도의 경우 U-type 진출입 구간과 Box-type 구간으로 구분되며, 모두 콘크리트 구조물 위에 아스팔트 포장이 시공된다. 따라서 교면포장과 같이 방수층 손상, 염화물 침투로 인한 바닥판의 열화 손상이 상부 포장까지 영향을 줄 수 있음을 고려하여야 한다.

【표 3-11】 터널포장 및 토공부 포장의 표면결함 비교

구분	2018년				2019년				증감
	균열률 (%)	소성변형 (mm)	IRI (m/km)	SPI	균열률 (%)	소성변형 (mm)	IRI (m/km)	SPI	
지하차도 평균	3.74	5.43	3.19	7.09	3.51	5.15	2.91	7.14	+0.05
토공부 평균	6.20	5.80	3.40	6.64	6.20	5.20	3.20	6.66	+0.02



【그림 3-37】 터널포장 및 토공부 포장 PMS 비교분석 결과

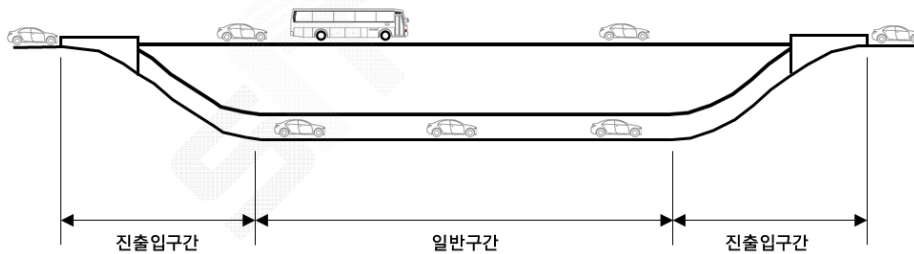


(b) 2019

[그림 3-37] 터널포장 및 토공부 포장 PMS 비교분석 결과(계속)

2) 지하차도 포장 U-type, Box-type 구간 포장상태 비교

지하차도 포장은 기후영향을 직접적으로 받는 U-type 진출입구간과 상대적으로 기후영향이 적은 Box-type 구간의 포장으로 구분된다(그림 3-38). 본 연구에서는 서울시 지하차도 포장의 진출입구간과 Box-type 구간의 파손상태를 비교하였으며, 진출입구간에서 별도의 포장관리를 수행하는 것에 대한 필요성을 검토하였다.



[그림 3-38] 지하차도 구간 구분

표 3-12는 지하차도 포장 진출입부와 일반구간의 PMS 분석 결과이다. 2018년 지하차도 진출입구간의 SPI는 6.91, 일반구간의 SPI는 7.26으로 진출입구간이 일반구간보다 낮았다. 2019년에도 진출입구간(6.93)이 일반구간(7.11)보다 낮았으며, 각각 소폭으로 증감하였지만 진출입 구간의 SPI가 일반구간보다 낮은 추세는 지속되었다. 따라서 지하차도의 경우 U-type 진출입구간의 포장상태가 일반구간 대비 상대적으로 좋지 않은 것으로 분석되었다.

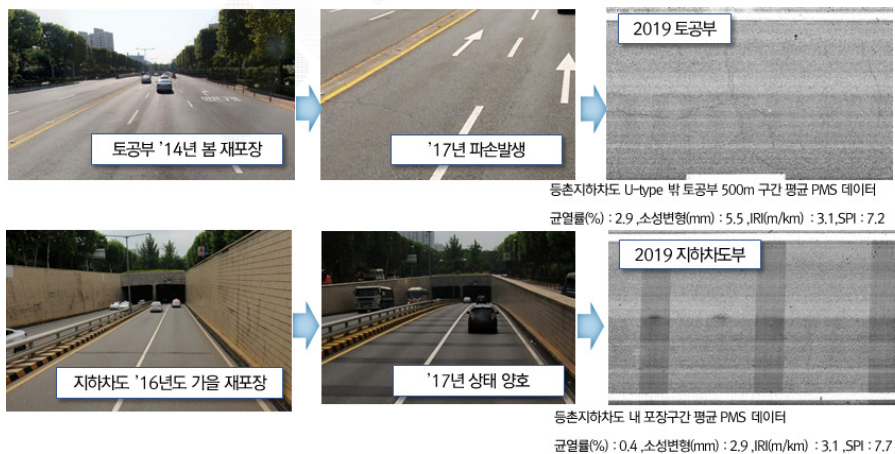
[표 3-12] 지하차도 구간별 표면결함 비교

구분	2018년				2019년				증감
	균열률 (%)	소성변형 (mm)	IRI (m/km)	SPI	균열률 (%)	소성변형 (mm)	IRI (m/km)	SPI	
박스(일반)	2.88	4.85	3.14	7.26	3.78	4.74	2.85	7.11	-0.15
U타입(진출입)	4.23	5.81	3.36	6.91	4.23	5.42	3.11	6.93	+0.02

3) 지하차도 포장 사례조사

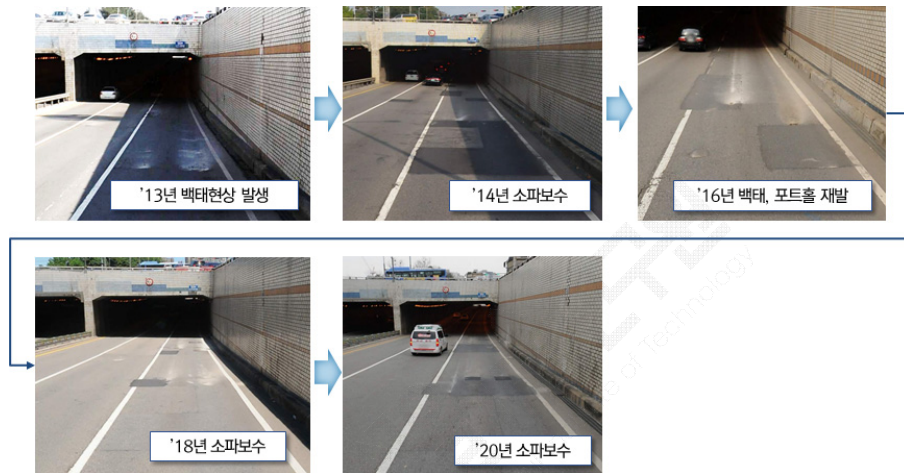
지하차도의 경우 2018~2019년 동안 SPI의 변화는 크지 않았지만, U-type 진출입 구간의 유지관리가 상대적으로 취약한 구조임을 확인하였다. 본 연구에서는 실제 지하차도 포장의 유지보수 사례를 조사하여, 진출입구간 및 일반구간, 인근 토공부 포장의 파손 발생 추이를 검토하였다.

그림 3-39는 등촌지하차도 하행 1차로의 사례조사 결과이다. 지하차도 포장의 경우 2016년 재포장 후 2019년까지 균열률이 0.4%, SPI가 7.70으로 계산되어 파손발생량이 매우 낮은 것을 확인하였다. 인근 토공부 포장의 경우 2014년 재포장된 후 2017년에 파손이 발생하였고, 2019년에는 균열률 2.9%, SPI 7.20으로 확인되었다. 해당 구간은 교통량이 비교적 적어 포장상태의 뚜렷한 변화가 관찰되지 않았으며, 지하차도 일반구간은 토공부 포장 대비 파손발생 속도가 유사하거나 양호한 것으로 판단된다.



[그림 3-39] 등촌지하차도(하행 1차로) 사례조사

그림 3-40은 일원지하차도 하행의 사례조사 결과이다. 2013년 U-type 진출입구간의 바닥판 열화로 인해 균열 및 백태 현상이 발생하였으며, 2014년에는 소파보수를 수행하였다. 그러나 바닥판의 열화 손상을 제거하지 않았기 때문에 공용 2년 만에 백태와 포트홀이 재발한 것을 확인하였다. 해당 구간은 2018년 다시 소파보수를 시행하였고 파손이 발생하여 2020년에도 소파보수를 실시하였다.



[그림 3-40] 일원지하차도 사례조사

지하차도 포장의 경우 토공부 포장 대비 포장상태는 전반적으로 유사하거나 양호한 수준이다. 그러나 지하차도 포장은 교면포장과 동일한 형태로 파손이 발생하며, 바닥판 열화가 발생 시 파손의 발생 속도가 매우 빠르다. 특히 열화 손상 부위를 완벽히 제거하지 못할 경우 반복적인 재파손이 발생할 수 있다. 따라서 지하차도 포장은 교면포장의 관리기준에 준하여 관리가 필요하며, 특히 진출입구간의 손상에 유의해야 한다.

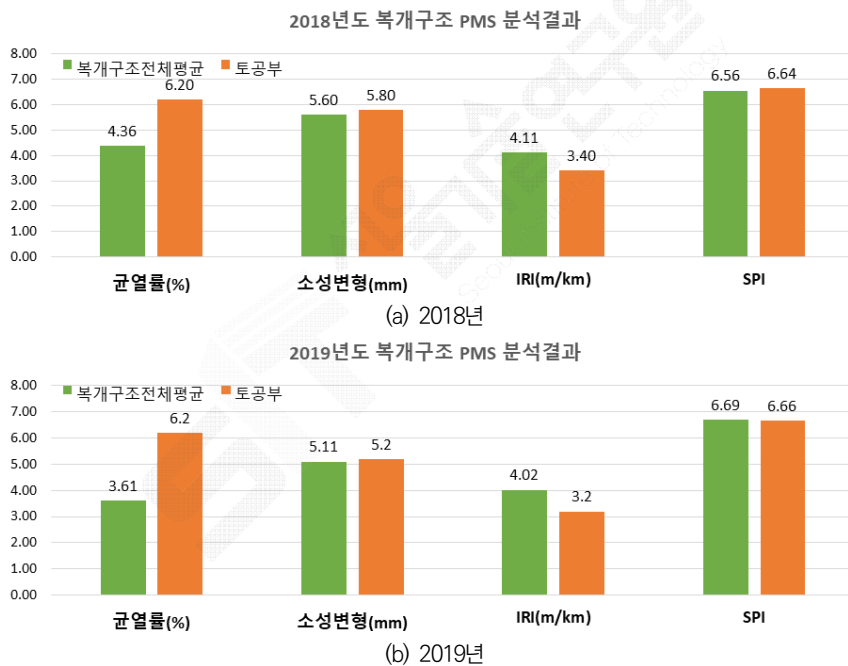
3-5. 복개구조 포장상태지수 분석 결과

표 3-13과 그림 3-41은 복개구조 포장과 토공부 포장의 PMS 분석 결과이다. 복개구조 포장의 2018년 SPI는 6.56으로 토공부 포장(6.64) 대비 소폭 낮았고, 2019년 SPI는 6.69로 토공부 포장(6.66) 대비 소폭 높았다. 복개구조 포장 또한 모두 콘크리트 구조물 위에 아스팔트 포장이 시공되어 교면포장으로 분류할 수 있기 때문에 방수층 손상 및 염화물 침투로 인한 바닥판의 열화 손상에 주의하여야 한다. 또한 복개구조

포장의 경우, 표 3-5에 나타난 바와 같이 개소 수 대비 DB가 확보되지 않은 구간의 비율(약 34%)이 다소 높기 때문에, 향후 체계적 데이터 확보를 수행하며 포장상태의 변화 추이를 지속적으로 확인할 필요가 있다.

[표 3-13] 복개구조 포장 및 토공부 포장의 표면결함 비교

구분	2018년				2019년				증감
	균열률 (%)	소성변형 (mm)	IRI (m/km)	SPI	균열률 (%)	소성변형 (mm)	IRI (m/km)	SPI	
복개구조 평균	4.36	5.60	4.11	6.56	3.61	5.11	4.02	6.69	+0.13
토공부 평균	6.20	5.80	3.40	6.64	6.20	5.20	3.20	6.66	+0.02



[그림 3-41] 복개구조포장 PMS 분석 결과

3-6. 재포장 구간 공사 전 포장상태 분석

본 연구에서 재포장을 실시한 구간에서 공사 직전의 포장상태를 조사 및 평가하였으며, 교면 포장상태지수의 보수기준을 수립하기 위한 사례분석을 수행하였다. 표 3-14는 각 재포장 구간별, 차로별 공사 직전의 포장상태 조사 결과이다.

【표 3-14】 현장 조사 구간 재포장 직전 포장상태

항목	구분	구조물명	차로	재포장 구간연장 (m)	균열률 (%)	소성변형 (mm)	IRI (m/km)	SPI
1	고가차도	두무개다리고가	1	360	28.5	6.1	2.6	4.04
2	고가차도	두무개다리고가	2	360	13.8	12.3	2.7	5.29
3	교량	서호교	3	310	10.5	6.2	3.7	5.77
4	교량	서호교	4	310	7.2	6.4	3.8	6.17
5	고가차도	옥수고가 L램프	1	180	1.9	4.1	4.0	6.72
6	고가차도	홍제천고가	1	500	14.5	5.0	2.6	5.38
7	고가차도	홍제천고가	2	500	7.8	4.8	2.5	6.32
8	고가차도	홍제천고가	3	500	8.8	4.3	2.1	6.18
평균					12.1	6.1	2.8	5.73
토공부 SPI 보수기준					10.0%	15.0mm	5.0m/km	6.0

평균적으로 균열률 12.1%, 소성변형 6mm, IRI 2.8m/km에서 보수가 이루어졌으며, 토공부의 보수기준과 유사한 범위에서 보수가 되고 있는 것으로 나타났다. 현행 시설물 안전법 안전진단 지침에서는 교면포장 포장불량률 10%의 경우 d등급(보수대상)의 상태로 분류되며, 이는 SPI 보수기준과 유사하다. 또한 시설물안전법 성능평가 지침에서는 포장상태지수를 활용하여 구조물 포장의 상태평가를 하도록 제시하고 있기 때문에, 토공부 아스팔트 포장상태지수(SPI) 보수기준(균열 10%, 소성변형 15mm, IRI 5~6m/km) 적용이 가능할 것으로 판단된다.



| 04 구조물 포장 현장 조사

1. 현장 조사 및 분석방법
2. 현장 조사 대상구간 선정 및 분석 결과

04. 구조물 포장 현장 조사

1. 현장 조사 및 분석방법

서울시 구조물 포장 및 방수층은 교통량 및 재량이 증가함에 따라 점차 노후화되고 있다. 이와 더불어 최근에는 기후변화로 인한 동결기 염화물계 제설제 사용량 증가, 하절기 집중호우로 인한 우수 침투 등 환경적 요인에 의해 바닥판 상면까지 열화 손상이 발생하고 있다. 이는 결국 포트홀 및 반사균열을 비롯하여 각종 포장파손 사례를 유발하고 있다.

바닥판 상면의 열화는 포장 표층의 파손까지 발생시키는 원인이 되지만, 기존의 바닥판 조사방법으로는 기 포장된 도로에서 바닥판 열화 손상 여부를 판단하기 매우 어렵다. 바닥판의 정밀한 상태평가가 필요할 경우 코어를 채취하거나 포장을 걷어낸 뒤 염화물 함량 시료를 직접 채취할 수 있으나, 이러한 파괴검사 방법은 시간과 비용은 물론 교통체증을 초래하여 문제가 된다. 따라서 상대적으로 손쉬운 검사가 가능한 비파괴 검사방법을 활용하고 있으나, 현재로서는 대부분 조사원의 육안에 의존하여 포장상태를 기록 및 평가하기 때문에 바닥판의 정밀한 상태조사는 어려운 실정이다. 이에 따라 국내외 다양한 기관에서는 비파괴 검사방법을 활용한 열화 손상 측정 연구를 개발 및 적용하고 있다.

본 연구에서는 바닥판 열화 손상을 평가할 수 있는 검사방법의 종류와 특징을 조사 및 분석하였다. 또한 서울시 구조물 포장 상태조사를 위한 검사항목 및 검사방법을 선정하고, 교면포장을 대상으로 현장 조사를 수행하였다. 바닥판 열화도뿐만 아니라 포장 표면 결함조사를 함께 수행하여 상태 분석 자료로 활용하고, 바닥판 열화도 측정결과와의 신뢰성 검증 연구를 수행하였다.

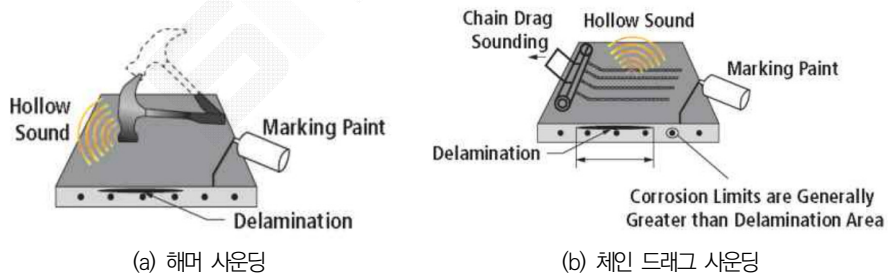
1-1. 기존 바닥판 열화 손상 검사방법

1) 음향기법

음향기법은 해머 사운딩 및 체인 드래그 사운딩 검사방법이 대표적이다. 음향기법은 작업자의 청각과 숙련에 의존하므로 여러 요인이 조사의 정확성에 영향을 미칠 수 있다.

해머 사운딩은 해머를 노면에 직접 타격하였을 때 발생하는 소리와 타격 시 느껴지는 반동감을 통해 콘크리트 바닥판의 건전도를 평가하는 검사방법이다. 상태가 좋은 콘크리트에 해머를 타격하면 울리는 소리가 발생하는 반면, 박리가 발생한 곳에서는 드럼과 같은 소리가 발생한다. 숙련된 기술자는 콘크리트의 상태를 평가하기 용이할 수 있으나 주변 환경의 영향을 크게 받고, 심도가 깊거나 아스팔트 덧씌우기가 시공된 콘크리트에서는 바닥판의 결함을 찾는 데 한계가 있다.

체인 드래그 사운딩은 작업자가 노면에서 무거운 사슬을 끌고 지나가며, 이때 발생하는 소리를 녹음한 후 음파의 파장에 따라 콘크리트 바닥판의 건전도를 판단하는 검사방법이다. 해머 사운딩에 비해 시간당 더 많은 면적을 검사할 수 있다. 체인 드래그 사운딩 검사는 콘크리트 덧씌우기와 바닥판 콘크리트의 분리 및 박리를 모두 감지할 수 있지만, 부식과 박리를 구별하지 못해 부식에 의한 박리 유무를 판단하려면 추가적인 부식 검사를 수행해야 한다. 또한, 해머 사운딩과 마찬가지로 아스팔트 덧씌우기가 시공된 콘크리트 바닥판에서는 부정확하여 사용되지 않는 방법이다.



[그림 4-1] 음향기법(FHWA, 2015)

2) 충격반향기법(Impact Echo)

충격반향기법은 충격에 의해 생성된 탄성파가 수신기에 수신되는 데 걸리는 시간을 측정하여 건전도를 평가하는 방법이다. 이 방법은 콘크리트 슬래브의 두께를 결정하고, 콘크리트 구조물 내의 박리 및 공극과 같은 결함을 감지하기 위해 개발되었다. ASTM

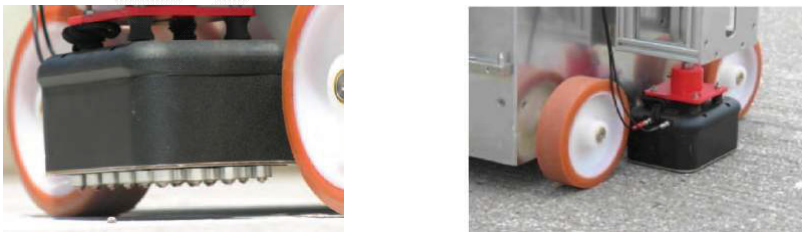
C 1383에 따라 표준화된 방법이며, 아스팔트 및 콘크리트 덧씌우기 아래에서 발생한 분리를 감지하는 방법으로도 활용할 수 있다.



[그림 4-2] 충격반사파 측정 장비와 수신 센서(한국도로공사, 2014)

3) 초음파반향기법(Ultrasonic Pulse Echo)

초음파반향기법은 충격반향기법과 달리 탄성파 대신 초음파를 이용하여 구조물 포장의 비정상적인 부위를 검출하는 방법이다. 초음파반향기법은 12개의 펄스 발진기, 12개의 수신기를 사용한다(한국도로공사, 2014). 송신된 초음파는 매질을 지나가고 일부는 반사되어 돌아오는데, 교면포장 및 바닥판의 균열이나 공동 등이 존재할 경우 반사파의 도달시간이 변화하는 것을 이용하여 이상 유무를 판별할 수 있다. 초음파반향기법은 한 번에 측정할 수 있는 범위가 매우 좁아 장시간의 조사시간이 필요하다는 단점이 있으며, 저주파를 사용할 경우 작은 손상을 검출하기 어려운 한계가 있다.



[그림 4-3] 초음파 프로브 배열과 측정 장비(한국도로공사, 2014)

4) 표면초음파법(Ultrasonic Surface Waves)

표면초음파법은 적절한 장비와 처리 소프트웨어를 활용할 경우 배합비, 설계, 다짐, 양생, 응력에 의한 균열 및 콘크리트 열화로 인한 강성의 변화 등 콘크리트의 물성을

빠르게 평가할 수 있는 검사방법이다. 표면초음파법은 콘크리트 바닥판에서 발생하는 탈락과 박리와 같은 열화를 검사하는 데 보조적인 역할을 할 수 있다.



[그림 4-4] 표면초음파법 현장 조사 모습(한국도로공사, 2014)

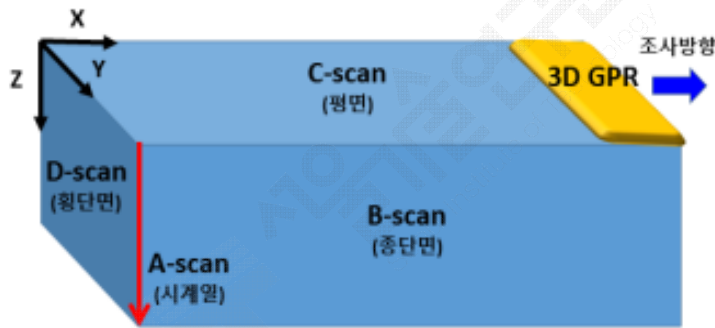
5) 지표투과레이더법(Ground-Penetrating Radar)

지표투과레이더(GPR; Ground Penetrating Radar) 방법은 전자기파를 사용하여 지하의 내부 구조를 이미지화하는 방법이다. 짧은 전자기 펄스를 바닥판에 투과한 뒤, 서로 다른 매질 사이에서 유전 특성의 차이로 인해 반사되는 신호를 재구성하여 이미지로 변환한다. GPR로 얻은 이미지로부터 철근 위치, 피복 두께, 아스팔트 덧씌우기 두께 및 포장 아래에 존재하는 공극을 탐사할 수 있다. GPR은 다른 비파괴 조사 방법들에 비해 더 넓은 면적을 빠르게 검사할 수 있어 시간과 비용을 절약할 수 있으며, 시각화가 가능하기 때문에 교면포장 아래의 내부 단면을 더 직관적으로 볼 수 있다. 데이터 해석을 위해 숙련된 작업자의 보정과 결과에 대한 해석이 필요하지만, 바닥판 하부 열화상태를 파악하여 정량화할 수 있는 방법이다.

ASTM D 6087(ASTM, 2015) 기준에 의하면 아스팔트 콘크리트 교면포장을 가지는 콘크리트 교량 바닥판의 상태평가를 위하여 GPR 시스템을 사용하고 있다. GPR 시스템을 이용하여 뉴욕에 있는 10개의 교량을 대상으로 정밀조사를 실시한 결과, 11.2% 오차 범위에서 열화로 인한 콘크리트 바닥판과 교면포장 사이의 층 분리 지역을 정확하게 탐지한 사례가 있다(Broomfield, 2007). GPR은 층 분리 구간의 위치나 크기를 정의하기에는 정확하지 않으나, 교량의 전반적인 상태조사나 상대적인 등급 산정에는 효과적인 것으로 알려져 있다(Alongi et al., 1992). 국내의 경우는 한국도로공사에서 10여 년 전부터 GPR 시스템을 이용하여 고속도로 교량의 바닥판 열화도를 평가하고 있다(서진원 등, 1999; 서진원 등, 2008).

3D GPR의 경우 안테나는 전자기파의 송신기와 수신기로 구성된다. 1개의 송신기와 수신기로 구성되어 있으면 단채널 GPR, 다수로 배치되어 있을 경우 다채널 또는 3차원 GPR이라고 한다. 3차원 GPR의 경우 조사데이터는 아래 그림과 같이 X축(조사방향 축), Y축(채널 축), Z축(시간 또는 깊이 축)의 공간좌표축을 갖는 방대한 3차원 데이터로 구성되며 표출하는 방향에 따라 그림 4-5와 같이 특정한 명칭으로 나타낸다.

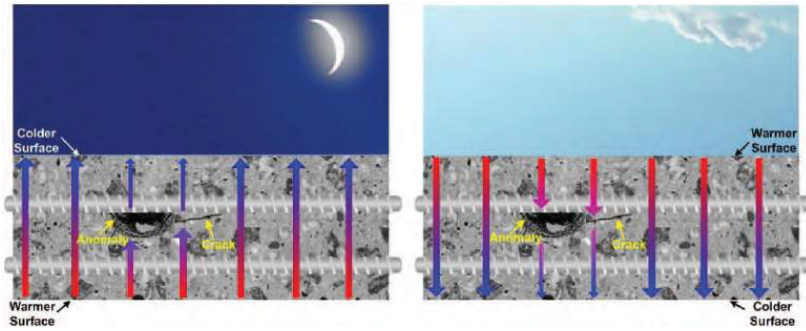
- A-scan : Z축 방향의 데이터를 시계열(1차원)로 나타낸 것
- B-scan : X-Z평면의 종단면 데이터(2차원)
- C-scan : X-Y평면의 평면 데이터(2차원)
- D-scan : Y-Z평면의 횡단면 데이터(2차원)



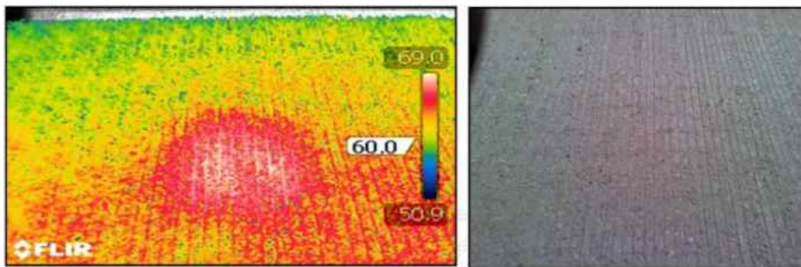
[그림 4-5] 3차원 GPR의 데이터 구조와 명칭

6) 적외선 열화상법(Infra-red Thermography)

적외선 열화상법은 열이 재료를 통과했을 때 적외선 감지기가 표면에 흐르는 열 패턴을 감지하는 검사방법이다. 바닥판 내부에 결함이 있는 경우, 열이 상부(외부)에서 하부(내부)로 흐를 때는 핫 스팟으로 나타나며, 열이 하부(내부)에서 상부(외부)로 흐를 때는 콜드 스팟으로 나타난다(그림 4-6(a)). 적외선 열화상법은 육안조사가 어려운 내부 박리를 감지하는 데 매우 유용하지만, 표면에 가까운 영역(표면으로부터 약 2인치 이내)에서 발생한 박리에 대해서만 정확도를 확보할 수 있고, 표면 상태가 검사결과에 영향을 미칠 수 있으며, 검사를 수행하기 위해서는 좋은 날씨와 적절한 시간이 필요하다는 제약조건이 있다. 그림 4-6(b)는 적외선 열화상 검사에서 표면 아래 결함이 발견된 열화상 사진과 해당 표면의 사진을 나타낸 것이다.



(a) 적외선 열화상법의 측정원리



(b) 적외선 열화상 검사 사진

[그림 4-6] 적외선 열화상법(한국도로공사, 2014)

7) 코어채취 검사

코어채취 검사는 콘크리트 바닥판에서 시편 코어를 회수하여 수행된다. 회수된 코어는 골재 품질, 공기량, 재료의 부적합성 또는 화학적 오염과 관련된 문제를 식별하는 현미경 분석 및 기타 실험들을 수행하는 데 사용될 수 있다. 코어채취 검사는 콘크리트의 압축강도를 측정하기 위해 사용될 수도 있지만, 기존 교량의 콘크리트 문제는 대부분 강도보다는 내구성과 관련이 있으므로 강도 측정을 위해 코어를 사용하는 경우는 드물다.

코어채취 검사는 코어 시편을 회수하기 때문에 그림 4-7과 같이 바닥판에 코어 이상의 구멍이 영구히 발생하며, 이로 인해 주변부에도 미세균열이 발생할 수 있다. 이와 같이 코어링은 기존 부재에 손상을 주는 파괴시험이므로, 일반적으로 다른 검사에서 추가적인 정밀조사가 필요하다는 근거가 도출되었을 경우 수행한다. 코어링이 완료되면 모든 코어 구멍을 적절한 재료로 채워야 한다. 코어가 교량 바닥판에서 회수된 경우, 채움용 재료는 최소 2,000psi의 강도나, 또는 교량 관리기관에서 요구하는 강도 중 최솟값 이상을 가져야 한다.



[그림 4-7] 바닥판에서 채취된 코어 시편

8) 염화물 검사

콘크리트의 염화물은 철근 부식, 콘크리트 박리 및 박락의 주된 원인으로 작용한다. 염화물 검사는 콘크리트 염화물 함량을 검사하는 방법으로, 콘크리트의 수용성 염화물 함량이 1.5lb/yd³를 초과하면 철근의 부식 가능성이 있다고 판단한다. 동일한 구멍의 서로 다른 깊이에서 시편 분말을 회수하며, 시편 분말을 회수할 때마다 추가 드릴링 전에 남은 잔류물을 제거한다. 결과의 신뢰도를 위해 여러 위치에서 시편을 채취한다. 일반적으로 염화물 함량은 표면 근처에서 더 높고 깊이에 따라 감소한다.

1-2. 서울시 구조물 포장 현장 조사 방법

본 연구에서는 서울시 구조물 포장의 바닥판 상태 분석을 위한 최적 현장 조사 방법을 분석하였다. 구조물 포장 콘크리트 바닥판의 대표적인 손상 유형은 층 분리, 철근 부식, 균열, 콘크리트 열화로 분류할 수 있다. 미국 도로교통연구위원회(TRB; Transportation Research Board)에서는 정확도, 정밀도, 편리성, 시간, 비용의 요소를 기준으로 교면포장의 콘크리트 바닥판 상태평가에 적용 가능한 비파괴 시험방법을 평가 및 비교하였다(TRB, 2014). 본 연구에서는 이를 참고하여, 아스팔트 포장 하부의 콘크리트 바닥판에서 사용할 수 있는 기술을 정리하여 표 4-1에 나타내었다.

[표 4-1] 바닥판의 상태평가에 적용 가능한 비파괴시험 방법 비교(TRB, 2014)

구분	층 분리	부식	균열	콘크리트 열화	효율성
충격반향기법	양호	불량	보통	보통	보통
초음파반향기법	보통	불량	양호	양호	불량
표면초음파법	보통	불량	양호	양호	불량
충격응답기법	양호	불량	보통	보통	보통
지표투과레이더	양호	양호	불량	보통	양호
음향기법	보통	불량	불량	불량	불량

본 연구에서는 서울시 구조물 포장 특성 및 손상의 심각도와 표 4-1의 평가기준을 고려하여 각각의 비파괴시험 방법을 평가하였다. 서울시 구조물 포장에서는 콘크리트 바닥판의 열화가 주요한 문제가 되고 있으므로, 콘크리트 열화 조사를 원활히 수행할 수 있어야 한다. 또한, 교통량이 매우 높은 서울시 특성상 빠르고 정확한 조사가 가능하여야 한다. 따라서 본 연구에서는, 효율성에서 양호한 지표를 나타내는 지표투과 레이더(GPR) 방법을 선정하여 서울시 구조물 포장 현장 조사에 적용하고자 하였다. 또한, 다수의 교면포장 및 바닥판을 교통차단 없이 신속하게 조사할 수 있는 차량탑재형 3D GPR 조사시스템을 활용하는 것으로 결정하였다.

1) 현장 조사 장비

본 연구에서는 구조물 포장 표면상태와 콘크리트 바닥판 열화상태를 동시에 조사할 수 있도록 복합센서가 탑재된 차량형 현장 조사 장비를 사용하였다.

현장 조사 장비 iScanner는 표 4-2와 같이 3D GPR, 포장표면 촬영장치, 소성변형 측정장치, 종단편탄성 조사장치, 도로현황 촬영장치, DMI(Distance Measurement Instrument), GPS로 구성된 계측기를 보유하고 있다. 계측센서별 주요사양은 표 4-3에 정리하였다. 각 센서는 그림 4-8(a)와 같이 상대유전율, 도로노면 균열영상, 소성변형 데이터, 종단편탄성(IRI) 데이터, 도로현황 영상, 위치 데이터를 측정할 수 있다.

【표 4-2】 차량형 현장 조사 장비의 센서 구성

측정데이터	바닥판 열화	도로균열	소성변형	승차감	도로현황	위치정보
센서명	지표투과레이더 (GPR)	포장표면 촬영장치	소성변형 측정장치	종단편탄성 조사장치	도로현황 촬영장치	GPS, DMI

【표 4-3】 차량형 현장 조사 장비의 센서별 주요사양

항목	주요사양
3차원 GPR (3D Radar DXG1820) (3D Radar DX1821)	- 주파수 범위 : 200~3,000MHz - 채널 수 : 20개 - 채널 간격 : 7.5m - 유효조사 폭 : 1.5m
포장표면영상 취득장치	- 조사속도 : 0~80km/h - 측정 폭 : 3.7m 이상 - 표면 영상 분해능 - 횡방향 Sampling : 1mm 이하 - 종방향 Sampling : 1mm 이하

[표 4-3] 차량형 현장 조사 장비의 센서별 주요사항(계속)

항목	주요사항
중단평탄성(IRI) 조사장치	- 조사속도 : 0~80km/h - 조사지점 수 : 1개 지점 - 종방향 Sampling : 25mm - 노면 측정 파장 영역 : 120m
소성변형 조사장치	- 조사속도 : 0~80km/h - 수직프로파일측정 최대깊이 : $\pm 75\text{mm}(150\text{mm})$ 이상 - 수직변위 정확도 : 2mm 이하 - 조사 폭 : 3.7m 이상
도로현황 조사장치	- 영상 해상도 : 5M Pixel - 거리연동 등 간격 영상 취득 - 디지털 칼라 영상취득
위치확인 조사장치 (GPS+DMI)	- 거리정보 연동 최대채널수 : 8개 - 거리오차 : 0.15%



(a) 현장 조사 장비를 통한 측정자료



(b) Air-coupled GPR

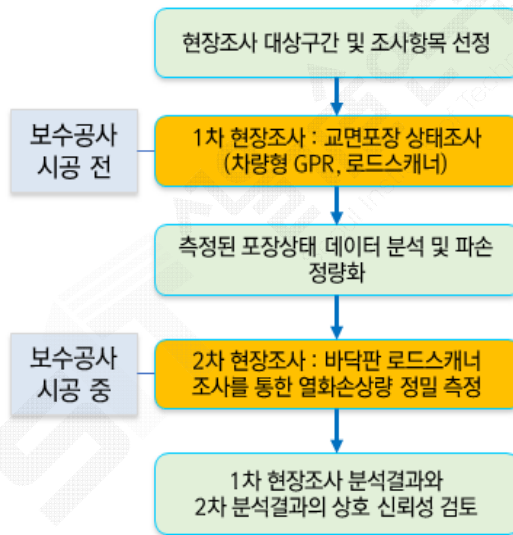


(c) Ground-coupled GPR

[그림 4-8] 차량형 교면포장 현장 조사 장비

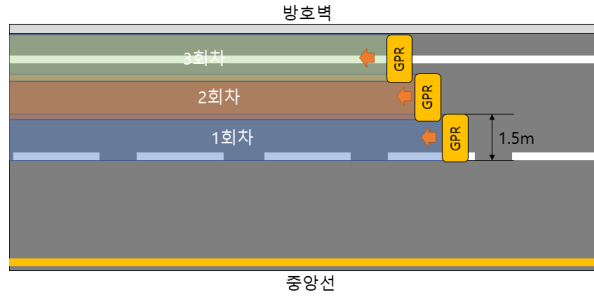
2) 현장 조사 방법

본 연구에서는 구조물 포장에 대한 현상 조사를 크게 2가지의 절차로 구분하였다(그림 4-9). 1차 현장 조사에서는 복합 포장상태 조사장비를 활용하여 구조물 포장의 표면 및 콘크리트 바닥판의 열화조사를 수행하였다. 로드스캐너로 포장 표면을 조사하고, 3D GPR을 통해 바닥판 상부를 탐지하였다. 2차 현장 조사는 교면포장 재시공 시점에 실시하였다. 공사 중 포장 표면을 걷어내었을 때, 로드스캐너를 통해 바닥판 열화 깊이를 조사하였다. 1차 현장 조사에서 3D GPR을 통해 확보한 바닥판 탐지결과와 2차 현장 조사에서 로드스캐너를 통해 실제로 발견된 열화 손상 발생위치 및 발생량을 비교분석하였다. 이는 1차 현장 조사의 3D GPR 탐지결과와 2차 현장 조사 결과의 신뢰도를 상호 검증하기 위함이다.



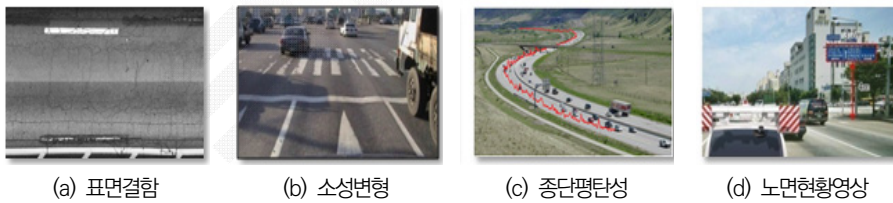
[그림 4-9] 구조물 포장 현장 조사 수행절차

현장 조사 장비에 탑재된 GPR은 다채널 안테나와 본체로 구성되어 있다. GPR 안테나의 채널수는 20개, 채널 간격은 75mm, 조사 폭은 1.5m이다. 한편 서울시 도로포장의 평균 폭은 3.2~3.5m 수준이므로 차선 전체를 탐지하기 위해서는 GPR 조사를 증첩하여 실시할 필요가 있다. 따라서 그림 4-10과 같이 차로의 좌편과 중간, 우편을 각각 1회씩 총 3회 조사하였으며, 상대적으로 좁은 도로의 경우 좌편, 우편 2회 조사를 수행하였다.

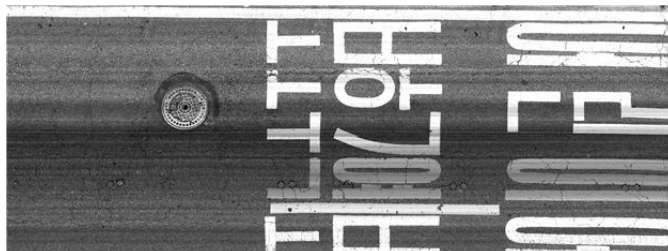


[그림 4-10] 차량형 교면포장 GPR 조사방법

한편, 교면포장 표면상태의 조사는 균열, 소성변형, 평탄성, 포트홀, 패칭 등을 정량적으로 측정하기 위해 해상도가 매우 높은 표면영상 및 프로파일 형태의 데이터가 측정되어야 한다. 본 연구에서는 차량 후미에 레이저 센서와 고성능 카메라가 장착된 장비를 사용하여 표면결함, 횡방향 굴곡(소성변형), 종단평탄성의 자료를 수집하였다. 탑재된 센서들은 약 20~80km/h의 속도에서도 조사가 가능하고, 조사 중 신호대기나 차량지체로 인한 정지 시에도 연속적인 조사가 가능하므로, 별도의 교통통제 없이 현장 조사를 수행할 수 있다. 구조물 포장의 노면상태 조사항목은 균열(Crack), 소성변형(Rutting), 종단평탄성(IRI)이다. 또한, 조사 시 각 조사항목에 대해 거리뿐만 아니라 위치자료(현황사진)가 기록된다.



[그림 4-11] 조사장비로 획득되는 노면 상태 항목



[그림 4-12] 조사장비로 획득된 표면결함 영상 예시

1-3. 서울시 구조물 포장 현장 조사 결과 분석방법

1) 바닥판 열화 손상 분석이론

GPR은 송신기에서 지면으로 방사된 10MHz~1GHz 주파수 대역의 전자기파가 탐사 대상을 통과하면서 굴절, 회절, 반사, 산란된 뒤 수신기에 돌아온 파의 특성을 분석하여 구조물의 내부 상태를 평가하게 된다. 전자기파는 파의 진행방향과 매질입자의 진동방향이 직각인 횡파의 일종으로 매질의 종류에 따라 어느 정도의 깊이까지 전파되며, 유전율이 다른 두 매질의 경계면에서는 반사와 회절현상이 발생하게 된다. 전자기파의 속도는 아래 식과 같이 정의되는데 진공 혹은 공기 중에서의 전자기파의 속도는 빛의 속도와 같은 $2.997 \times 10^8 \text{m/s}$ 이다. 진공이나 공기가 아닌 다른 매질의 경우 유전율과 투자율이 달라져 전자기파의 속도가 감소한다.

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (\text{식 4-1})$$

$$\text{진공에서의 유전율} : \epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \frac{C^2}{Nm^2} \quad (\text{식 4-2})$$

$$\text{진공에서의 투자율} : \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{N^2}{A^2} \quad (\text{식 4-3})$$

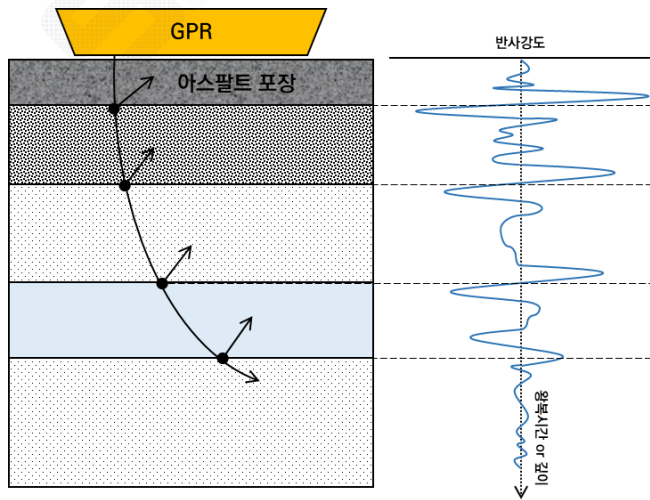
$$v = 2.997 \times 10^8 \text{m/s} \quad (\text{식 4-4})$$

여기서 유전율 혹은 유전상수란 진공에서의 전자기파 속도에 대한 매질을 통과하는 전자기파의 상대적인 속도의 비를 말한다. 물질의 구성재료, 함수량, 공극률 등에 따른 대표적인 유전상수는 표 4-4와 같다(Reynolds, 1997).

GPR 장비는 그림 4-13과 같이 지표상에서 안테나로부터 출발한 전자기파가 지하를 투과했다가 반사되어오는 파장을 저장한다. 전자기파는 땅속을 투과하는 중에 물리적 성질(유전상수 값)의 차이가 큰 토양에 도착하게 되면 처음에 진행하던 입사각도와는 다른 각도로 굴절되는 성질을 가진다. 수신된 신호에는 땅속에서의 전자기파 왕복시간과 진폭의 크기에 대한 정보를 가지고 있다. 시간정보를 이용하여 물체가 있는 곳의 깊이를 알 수 있으며, 진폭의 변화로 땅속의 물체 존재 여부를 알 수 있다.

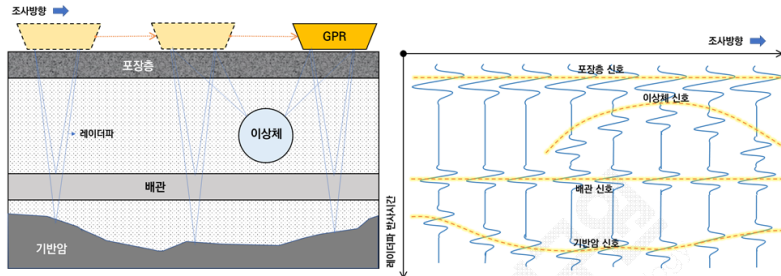
[표 4-4] 상대유전율 및 전자파의 속도(Reynolds, 1997)

매질	상대유전율 K	전자파 속도(mm/ns)
공기	1	300
담수	81	33
얼음	3.2	167
마른 해안모래	10	95
마른 모래	36	120~170
젖은 모래	25~30	55~60
젖은 실트	10	95
젖은 점토	8~15	86~110
마른 점토	3	173
일반 토양	16	75
화강암	5~8	106~120
석회암	7~9	100~113
돌로마이트	6.8~8	106~115
젖은 현무암	8	106
젖은 셰일	7	113
젖은 사암	6	112
석탄	4~5	134~150
석영	4.3	145
콘크리트	5~10	55~112
아스팔트	3~5	134~173
PVC, 에폭시	3	173

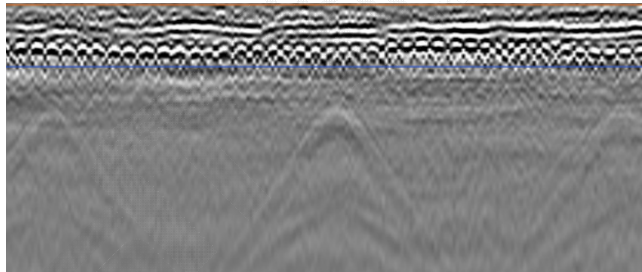


[그림 4-13] GPR 장비의 원리

GPR은 그림 4-14와 같이 송수신 안테나의 거리가 일정하며 탐사 시 차량 혹은 카트 등에 장착하여 지면과의 거리를 일정하게 유지시키면서 측선을 따라 데이터를 수집한다. 일정 거리마다 측정되는 연속 신호를 누적하여 바닥판의 철근, 포장 층과 같이 주변의 매질과 독립된 물체를 영상화한 결과를 볼 수 있게 된다. 그림 4-15는 교면포장의 GPR 영상데이터 예시이다.



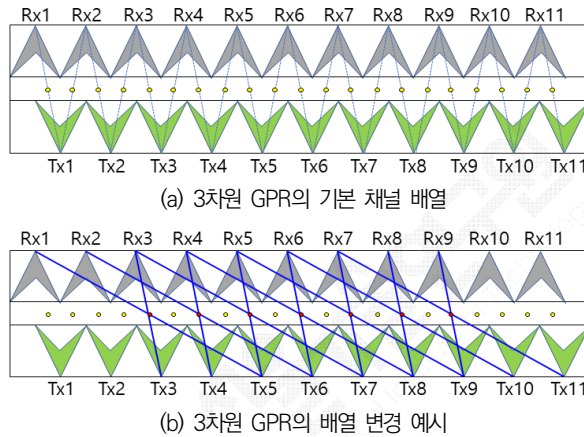
[그림 4-14] GPR 탐사의 영상화 방법



[그림 4-15] 교면포장 GPR 영상데이터 예시

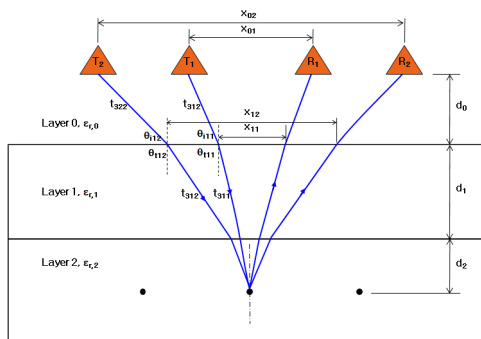
GPR 장비를 활용하여 구조물 포장 바닥판의 상대유전율을 분석하는 대표적인 방법은 반사계수 방법, Common Midpoint(CMP) 방법이 있다. 반사계수 방법은 금속판에서 반사되는 전자기파의 세기 대비 포장 층 혹은 바닥판에서 반사되는 전자기파의 세기를 비교하여 상대유전율을 추정하고, 이를 통해 포장 표면, 바닥판 표면의 손상을 추정하는 방법이다. CMP 방법은 2쌍의 GPR 송수신기가 한 곳의 측정점을 공유하도록 조정했을 때 발생하는 시간차를 활용하여 매질의 상대유전율을 측정하고, 이를 통해 포장의 두께나 바닥판의 열화 정도를 측정하는 방법이다. 본 연구에서는 CMP 방법을 통해 교면포장의 바닥판의 상대유전율을 분석하였다.

CMP 방법은 Leng(2011)이 제안한 1층 포장 구조체용 방법으로부터 Zhao(2015)가 제시한 2층 포장 구조체용 이론으로 확장되었으며, 본 연구에서는 이를 개선한 분석 알고리즘인 Extended CMP(XCMP) 방법을 활용하였다. XCMP 방법은 기본적으로 2쌍의 송수신기, 즉 2대의 GPR이 필요하다는 제약이 있다. 그러나 iScanner의 3차원 GPR의 경우 그림 4-16과 같이 송수신 채널의 배열을 변경하여 공통중심점을 다수 만들 수 있기 때문에, 여러 대의 GPR을 동시에 사용하는 효과를 확보할 수 있다.



[그림 4-16] Extended CMP(XCMP) 방법

본 연구에서는 구조물 포장 콘크리트 바닥판의 유전을 측정대상을 상부 철근 위쪽으로 선정하였다. 그림 4-17은 콘크리트 바닥판의 상부 철근에서 반사된 전자기파의 이동 경로를 나타낸다. 각 층의 반사시간, 송수신 안테나의 거리 등을 활용하여 XCMP 알고리즘이 구현된다.



[그림 4-17] 철근에서 반사된 전자기파의 이동 경로(XCMP)(Zhao, 2016)

각 층을 통과하는 데 걸리는 시간은 안테나의 높이(d_0), 교면포장의 두께(d_1), 송수신 안테나의 수평거리(x_{01}, x_{02}), 경계부에서 굴절지점간의 수평거리($x_{11}, x_{12}, x_{21}, x_{22}$)의 관계를 이용하여 계산할 수 있다. 그러므로 전자기파가 콘크리트 바닥판의 상부층을 통과하는 데 걸리는 시간(t_{31}, t_{32})은 다음과 같이 각각 계산할 수 있다.

$$t_{31} = \Delta t_1 + \Delta t_3 + \frac{\sqrt{4d_0^2 + x_{01}^2}}{c} - \frac{\sqrt{4d_0^2 + (x_{01} - x_{11})^2}}{c} - \frac{\sqrt{4d_1^2 + (x_{11} - x_{21})^2}}{c} \quad (\text{식 4-5})$$

$$t_{32} = \Delta t_2 + \Delta t_4 + \frac{\sqrt{4d_0^2 + x_{02}^2}}{c} - \frac{\sqrt{4d_0^2 + (x_{02} - x_{12})^2}}{c} - \frac{\sqrt{4d_1^2 + (x_{12} - x_{22})^2}}{c} \quad (\text{식 4-6})$$

여기서, $x_{11}, x_{21}, x_{12}, x_{22}$ 는 공기/교면포장 및 교면포장/콘크리트 바닥판 경계면에서의 굴절지점의 수평거리이다. 이 굴절지점의 수평거리를 계산하기 위해서는 다음 식과 같이 각 층 경계면에서의 유전율비와 입사각 및 굴절각의 관계(Snell's Law)를 이용하여 계산할 수 있다.

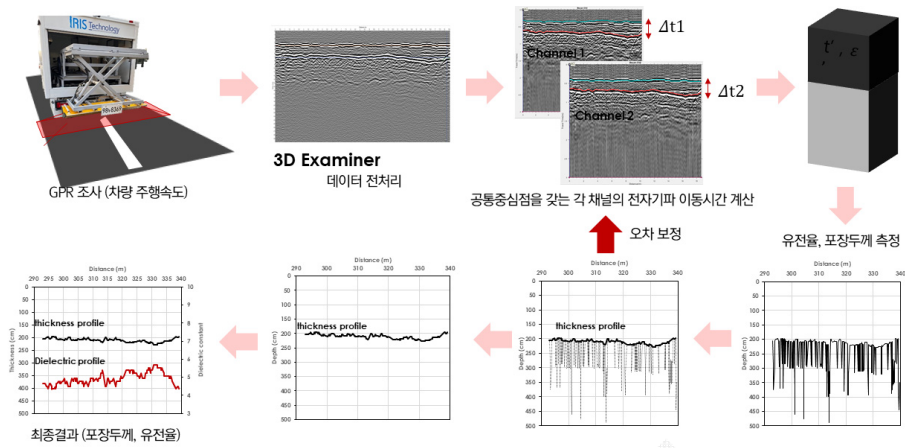
$$\frac{\sin\theta_{i11}}{\sin\theta_{t11}} = \frac{\sin\theta_{i12}}{\sin\theta_{t12}} = \frac{\sqrt{\epsilon_{r,2}}}{\sqrt{\epsilon_{r,1}}} = \frac{\sqrt{\epsilon_{r,AC}}}{1} \quad (\text{식 4-7})$$

$$\frac{\sin\theta_{i21}}{\sin\theta_{t21}} = \frac{\sin\theta_{i22}}{\sin\theta_{t22}} = \frac{\sqrt{\epsilon_{r,3}}}{\sqrt{\epsilon_{r,2}}} = \frac{\sqrt{\epsilon_{r,PCC}}}{\sqrt{\epsilon_{r,AC}}} \quad (\text{식 4-8})$$

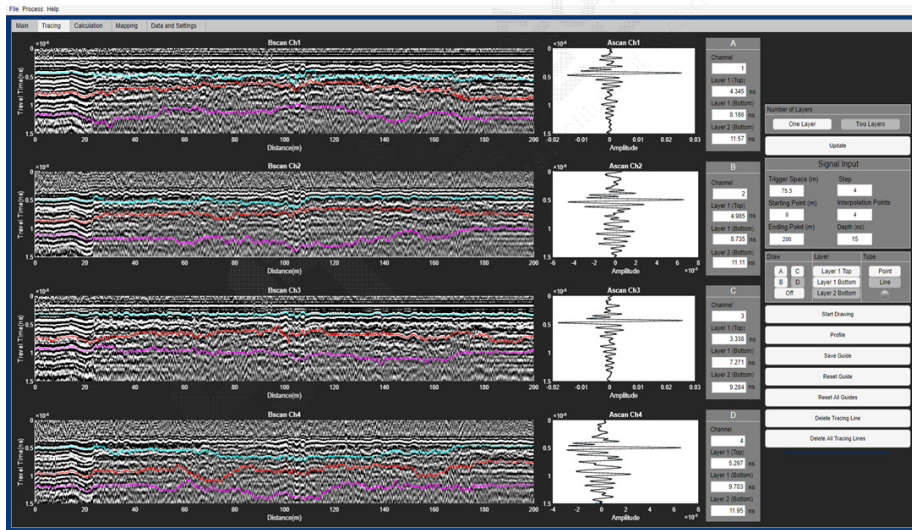
여기서, 첫 번째 층에서 굴절각과 두 번째 층으로의 입사각은 같고($\theta_{i11} = \theta_{i21}$), 1층 구조물에 대한 XCMP 방법을 통하여 아스팔트 콘크리트 층의 유전율($\epsilon_{r,AC}$)과 두께(d_1)를 결정할 수 있으므로, 2층에서의 굴절각($\theta_{i12}, \theta_{i22}$)도 순차적으로 계산할 수 있다. 최종적으로 콘크리트 바닥판 상부층을 통과하는 데 걸리는 시간과 수평거리를 이용하여, 콘크리트 바닥판의 유전율을 다음과 같이 계산한다.

$$\epsilon_{r,2} = \frac{c^2(t_{32}^2 - t_{31}^2)}{x_{22}^2 - x_{21}^2} \quad (\text{식 4-9})$$

그림 4-18로부터 그림 4-19는 본 연구에서 XCMP 방법을 적용한 콘크리트 바닥판의 상대유전율 측정 알고리즘과 측정 프로그램이다.



[그림 4-18] 콘크리트 바닥판 상대유전율 측정 알고리즘



[그림 4-19] 콘크리트 바닥판 상대유전율 측정 프로그램

2) 상대유전율을 통한 열화 손상 추정

표 4-5는 표 4-4의 결과를 요약한 것이다. 함수율이 낮고, 시공초기 건전 상태의 아스팔트의 유전율 범위는 3~5, 콘크리트의 유전율 범위는 5~10으로 분포한다. 건조 상태에서 열화 손상된 콘크리트의 경우 염화물과 높은 공극률에 의해 유전율이 5 이하로 측정되며, 비가 내린 뒤 체류수가 존재하거나 습도가 높을 경우 아스팔트와

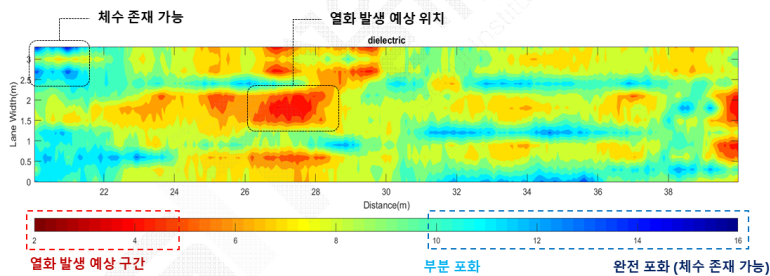
콘크리트가 포화상태가 되어 유전율이 정상범위를 초과하여 측정된다. 본 연구에서는 표 4-6과 같이 상대유전율에 따른 콘크리트 바닥판 손상 판정기준을 선정하였다. 그림 4-20은 상대유전율을 통해 바닥판 열화 및 체수의 존재 여부를 판단한 예시이다.

[표 4-5] 물질에 따른 상대유전율(Reynolds, 1997)

매질	상대유전율 K
공기	1
담수	81
콘크리트	5~10
아스팔트	3~5

[표 4-6] 콘크리트 상대유전율에 따른 손상판정 방법

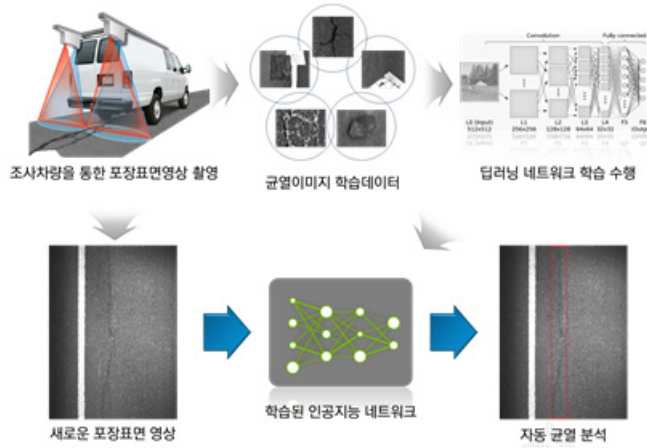
분석대상	열화구간	포화구간
콘크리트 바닥판	상대유전율 5.0 이하	상대유전율 10.0 초과



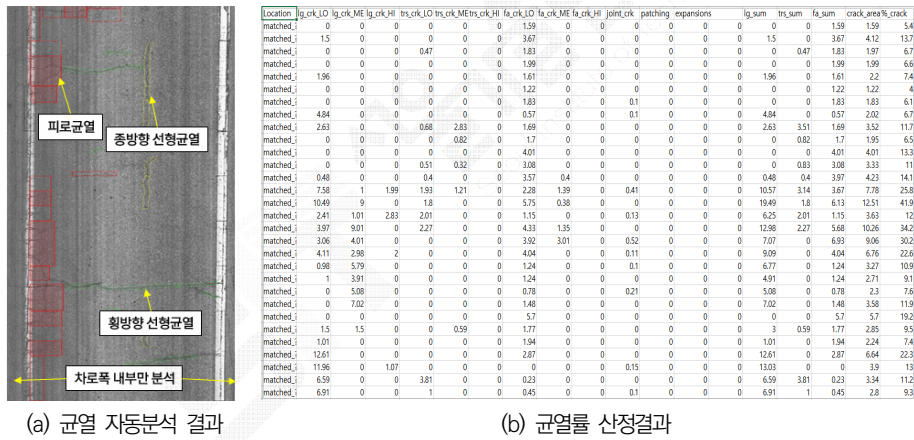
[그림 4-20] 상대유전율에 따른 바닥판 열화 및 체수 존재 여부 판단 예시

3) 노면균열 분석방법

본 연구에서는 포장상태 조사차량 iScanner로 촬영된 구조물 포장의 노면영상으로부터 도로포장에 발생한 결함의 종류 및 양을 정확하게 분석하기 위하여, 인공지능 기반 자동 균열 프로그램을 활용하였다. 본 프로그램은 인공지능에 의한 자동 분석방식으로 결과의 정확성과 객관성을 가지고 있으며(균열 오인식률 5% 이내), 1대의 GPU로 하루 170km 분석이 가능하다. 또한 균열의 형상을 인식하여 균열의 종류를 나누고, 균열의 폭을 인식하여 균열의 심각도를 분류할 수 있다. 그림 4-21은 조사단계로부터, 균열 이미지 학습 단계 및 새로운 포장영상에 대한 자동검출 과정을 나타낸 것이다. 그림 4-22는 균열의 탐지 및 표기방식, 정량화 결과 예시이다.



[그림 4-21] 인공지능을 활용한 자동 균열 분석 과정



[그림 4-22] 균열의 자동분석 결과 및 정량화 결과 예시

4) 소성변형 분석방법

도로포장상태 조사차량의 소성변형 조사모듈은 4m의 폭을 일시에 측정한 후 3점법 및 막대자 방식으로 소성변형량을 측정한다. 조사 시 측정자료를 즉시 확인할 수 있으므로 실제 소성변형 형태를 육안으로 확인하여 오류 여부를 판단할 수 있다. 측정 깊이의 정밀도는 ±1mm이며, 최대 ±75mm까지 측정할 수 있다.

5) 종단평탄성 분석방법

고정밀 레이저센서 및 가속도센서를 이용하여 노면의 종방향 굴곡을 측정한다. 고정밀 레이저 센서는 태양광, 물체의 재질, 색상 등에 영향을 받지 않는 제품을 적용하였으며 차량의 진동 및 떨림을 보정하기 위해 가속도 센서를 적용하였다. 종단평탄성(IRI)은 도로평탄성 분석 프로그램(PROVAL)을 이용하여 산출한다.

6) 결함의 정량화

노면의 포장상태 분석 결과는 통상적으로 20m를 기본단위로 균열, 소성변형, 종단평탄성을 통해 나타낸다. 균열의 경우 중·횡방향 선형균열, 시공이음부균열, 거북등균열, 소파보수, 포트홀 등으로 세분화하여 나타낸다. 또한 균열의 경우 선형균열과 면적균열을 분석면적에 대한 발생비율인 균열률(%)로 표현하는 것이 일반적이며 이때 선형균열은 길이에 0.3m를 곱하여 면적으로 환산하게 된다.

[표 4-7] 결함유형별 분석 항목

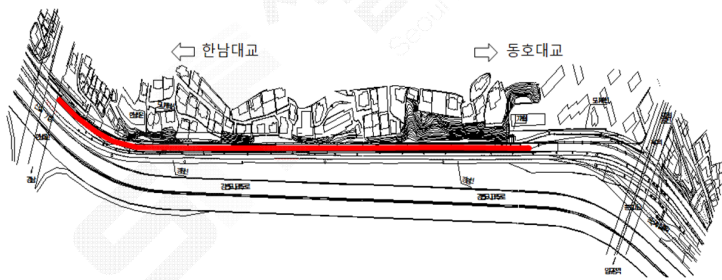
구분	세부항목	심각도	단위	정량화 방법
균열	선형균열 (중·횡방향 균열)	상	m	균열률 균열 길이
		중		
		하		
	시공이음부 균열		m	균열률 균열 길이
거북등균열		상	m ²	균열률 균열 면적
		중		
		하		
소성변형	소성변형 깊이		mm	
종단평탄성	국제평탄성지수(IRI)		m/km	

2. 현장 조사 대상구간 선정 및 분석 결과

2-1. 현장 조사 대상구간 선정

본 연구에서는 콘크리트 바닥판을 사용하는 교면포장을 대상으로 총 2회에 걸쳐 현장 조사를 수행하였다. 1차 현장 조사의 목적은 차량형 GPR과 포장상태 조사장비를 활용하여 구조물 포장의 노면결함 상태와 바닥 상면의 열화 손상을 측정하는 것이다. 2차 현장 조사의 목적은 교면포장의 재시공을 직전 포장을 절삭한 상태에서 바닥판 상면이 노출되었을 때, 현장 확인을 통해 1차 현장 조사 및 분석 결과를 검증하는 것이다.

교면포장 현장 조사 구간은 교량 9개소, 고가차도 3개소로 구분된다. 그림 4-23과 표 4-8 현장 조사 구간의 평면도상 위치와 구조물의 형식, 횡단면도, 포장층 두께 정보 등을 정리한 예시이다. 각 조사 구간별 상세 평면도와 형식 정보는 부록에 나타내었다. 표 4-9는 본 연구에서 수행한 현장 조사 대상구간의 상세정보를 정리한 총괄표이다.



[그림 4-23] 두무개다리고가 조사구간

[표 4-8] 두무개다리고가 상세현황

구분	내용	횡단면도
시설물명	두무개다리고가도로	
관리주체	서울특별시 교량안전과	
종별	1층	
상부구조 형식	Arch형 RC 라멘교	
바닥판	콘크리트	
포장두께	80~120mm	
조사차로	1~2차로	

[표 4-9] 현장 조사 대상구간

항목	구조물명	조사시점	조사종점	방향	GPR 조사일	비탁판 조사일	조사차로	차로당 조사연장 (m/lane)
고가 차도	두무개 다리고가	서울 용산구 한남동 773-17	서울특별시 용산구 유엔빌리지3길 2-24	한남대교	'19.12 (1차로) '20.06 (2차로)	'20.06 (표면, 염회물)	1~2	360
	광명고가	경기 광명시 철산동 626-3	경기 광명시 철산동 16	광명대교	'20.02	-	1~3	380
	옥수고가 램프	서울 성동구 옥수동 377-1	서울 성동구 옥수동 12-3	옥수	'20.09	'20.10 (표면)	1	260
	홍제천 고가	서울 서대문구 홍제동 4-5	서울 서대문구 홍제동 287-208	성산	'20.09	'20.10 (염회물)	1~3	540
	압구정 고가	서울특별시 강남구 논현로 847	서울 강남구 압구정동 374-1	양방향	'20.12	-	상행 1~2 하행 1~2	670
교량	영동대교 북단	서울 성동구 성수동2가 158-4	서울 성동구 성수동 2가 145-1	청담	'20.02	-	1~3	170
	영동대교 남단	서울 강남구 청담동 139-28	서울 강남구 청담동 340	성수	'20.12	-	1~3	270
	동작대교	서울 용산구 용산동 6가 452-1	서울 용산구 용산동 6가 69-163	한남	'20.03	-	1~3	310
	서천 과선교	충남 서천군 마서면 송내리 72-13	충남 서천군 마서면 송내리 69-10	상행	'20.06	'20.06 (표면)	1	98
	서호교	서울 마포구 합정동 355-25	서울특별시 마포구 토정로 112	성수	'20.09	'20.09 (표면)	3~4	1,510
	동호대교 북단	서울 성동구 옥수동 486	서울 성동구 옥수동 490-1	양방향	'20.12	-	상행 1~2 하행 1~2	170
	동호대교 남단	서울 강남구 압구정동 374-1	서울 강남구 압구정동 374	양방향	'20.12	-	상행 1~2 하행 1~2	530
총 조사연장 합계(m)								5,628

2-2. 현장 조사 데이터 분석 결과

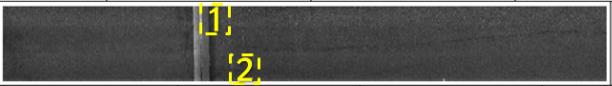

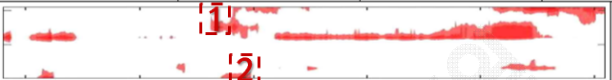
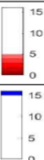


본 연구에서는 현장 조사를 통해 확보한 각 교면포장의 3차원 GPR 측정 데이터와 포장표면상태 데이터를 바탕으로 교면포장의 표면손상 상태와 바닥판 열화 손상상태를 분석하였다. 교면포장 표면손상 상태는 균열량, 소성변형량, 평탄성으로 구분하여 분석하여 정량적인 값을 도출하였고, 열화 손상의 경우 3차원 GPR 데이터를 통해 상대유전율을 계산하고 2차원으로 영상으로 매핑하여 발생 위치를 나타내었다. 앞서 언급한 바와 같이 콘크리트 바닥판의 상대유전율이 5 이하인 경우 열화 손상이 발생한 것으로 판단하였다.

현장 조사 대상구간의 분석 결과표는 아스팔트 노면에 대한 표면결함 분석 결과, 바닥판 상대유전율 맵, 상대유전율 범위에 따른 면적비율, 바닥판 노면영상, 바닥판의 열화면적 비율로 구성된다. 그림 4-24는 두무개다리고가 1차로 0~60m 구간의 결과를 예시로 나타낸 것이다. 해당 구간의 표면결함 분석 결과 균열률은 31.29%, 소성변형은 3.35mm, IRI는 1.89m/km로 나타났다. 상대유전율 5.0 이하 구간은 약 8.36%로 분석되었다. 그러나 해당 구간의 재포장 공사 시점에 실시했던 바닥판 노면 상태조사에서는 표층 절삭 후 표면 마무리가 충분히 수행되지 않으며, 이로 인해 기존 표층의 잔해가 남아 있어 바닥판 박리 등의 열화 손상을 발견하는 것은 어려움이 있었다.

시설물명	차로	분석구간(m)	연장(m)	방향			
두무개교가	1	0 ~ 60	60	한남대교 방면			
아스팔트 노면영상							
	표면결함	균열률(%) 31.29	소성변형(mm) 3.35	IRI(m/km) 1.89	SPI 3.83		
바닥판 상대유전율 맵 (5.0 이하)							
바닥판 상대유전율 맵 (15.0 이상)							
바닥판 상대유전율 평가결과	구분	열화 예상	열화 우려	건전		체수 예상	상대유전율 평균
		4 이하	4 ~ 5	건조	보통	습윤	
	비율 (%)	2.33	6.03	62.54	29.10	0	6.99
절삭 후 바닥판 노면영상							
바닥판 열화면적 평가	구분	열화 면적 비율					
	비율 (%)	0					

[그림 4-24] 두무개다리고가 1차로 0~60m 구간 조사 결과 예시(바닥판 노면조사 실시)

그림 4-25는 압구정고가의 420~480m 구간의 조사 결과를 예시로 나타낸 것이다. 해당 구간의 표면결함의 경우 균열률 9.06%, 소성변형 3.46mm, IRI 3.59m.km로 분석되었으며 상대유전율 5.0 이하의 면적비율은 약 16.17%로 나타났다.

시설물명	차로	분석구간(m)	연장(m)	방향			
압구정고가	2	420 ~ 480	60	육수 방향			
아스팔트 노면영상				3m 			
표면결함	균열률(%)	소성변형(mm)	IRI(m/km)	SPI			
	9.06	3.46	3.59	6.23			
바닥판 상대유전율 맵 (5.0 이하)				3m 			
바닥판 상대유전율 맵 (15.0 이상)				3m 			
바닥판 상대유전율 평가결과	구분	열화 예상	건전			채수 예상	상대유전율 평균
		열화 우려	건조	보통	습윤		
	비율 (%)	9.39	6.78	55.72	20.62	7.50	0

[그림 4-25] 압구정고가 2차로 420~480m 구간 조사 결과 예시(바닥판 노면조사 미실시)

해당 구간은 표층 절삭이 시행되지 않았기 때문에 바닥판 노면영상을 수집하지 못하였지만, 상기 그림 4-25에 명시한 1, 2번 지점의 경우 바닥판의 열화 손상 여부를 확인하기 위해 부분 절삭을 실시하였다. 이를 통해 그림 4-26과 같이 바닥판 열화 손상을 발견할 수 있었으며, GPR 검사의 신뢰성을 검증하였다.



[그림 4-26] 압구정고가 1차로 420~480m 구간 부분 절삭 결과

표 4-10은 본 연구에서 수행한 현장 조사 구간의 GPR, 표면결함 분석 결과를 요약한 총괄표이다.

【표 4-10】 전체 조사구간 GPR, 표면결함 분석 결과 요약

구분	구조물명	상대유전율 5 이하 면적비(%)	균열률 (%)	소성변형 (mm)	IRI (m/km)	SPI
고가차도	두무개다리고가	4.53	21.2	9.2	2.7	4.67
	광명고가	8.09	7.6	5.9	2.9	6.31
	옥수고가 L램프	22.10	1.9	4.1	4.0	6.72
	홍제천고가	12.18	9.4	5.6	2.3	6.07
	압구정고가	2.47	1.1	4.6	3.0	7.50
교량	영동대교 북단	2.75	20.2	6.9	3.8	4.70
	영동대교 남단	1.70	12.1	5.1	3.3	5.63
	동작대교	9.15	17.2	4.8	3.3	5.04
	서천과선교	0.06	14.8	3.6	3.1	5.32
	서호교	8.58	5.5	5.7	3.3	6.58
	동호대교 북단	3.11	2.1	5.4	3.0	7.4
	동호대교 남단	3.11	0.9	3.6	2.8	7.8

2-3. 현장 조사 결과 검증

표 4-10의 현장 조사 구간 중 두무개다리고가, 서호교, 옥수고가 L램프, 서천과선교의 경우 포장상태가 악화되어 조사구간 중 일부 구간의 재포장을 실시한 이력이 있다. 본 연구에서는 각 구간에서 표층 절삭 후 바닥판이 노출된 상태의 노면영상을 조사하고, 열화 손상 면적을 분석하여 표 4-11에 나타내었다. 두무개다리고가와 서호교의 경우, GPR로 예측한 결과보다 노면영상으로 분석한 열화 손상 면적비가 현저히 낮게 측정되었다. 이는 노면영상 수집 전 워터젯 또는 드릴 등을 이용한 표면처리 공정의 수행여부에 따른 것으로 판단된다. 해당 구간은 교면포장 절삭 후 표면처리 공정이 수행되지 않았다. 따라서 노면영상에서도 바닥판이 온전히 드러나지 않았고, 표층의 잔해물이 남아 열화 손상 면적을 정확히 반영하기 어려웠다. 반면 옥수고가 L램프, 서천과선교의 경우 표면처리 공정이 수행되었으며, GPR을 통한 열화 손상 예측결과가 상대적으로 높게 나타났다. 특히 바닥판이 양호한 상태에서의 GPR 시험결과 데이터는 매우 높은 정확도를 보이는 것으로 확인되었다.

【표 4-11】 재포장 구간 GPR 데이터 분석 결과와 교면포장 절삭 후 바닥판 열화 손상 면적과 비교

항목	구분	구조물명	차로	재포장 구간 연장 (m)	재포장 구간 상대유전율 5 이하 면적비(%)	재포장 구간 바닥판 열화 손상 면적비(%)	표면처리 여부
1	고가차도	두무개다리교가	1	360	7.34	0.23	X
2	고가차도	두무개다리교가	2	360	1.71	0.16	X
3	교량	서호교	3	310	13.00	0.55	X
4	교량	서호교	4	310	11.48	0.35	X
5	고가차도	옥수고가 L램프	1	180	22.10	10.90	O
6	교량	서천과선교	1	98	0.06	0.00	O

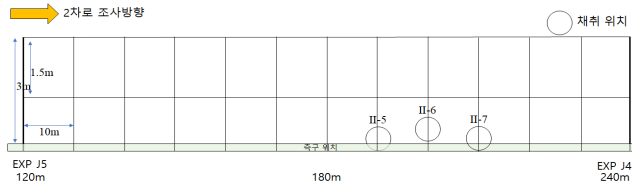
한편, 바닥판의 염화물 함량 또한 열화 손상을 판단하기 위한 지표가 될 수 있다. 바닥판 열화가 발생한 구간에서 항상 염화물 함량이 높은 것은 아니지만, 염화물 함량이 높게 측정된 구간은 포장층에 수분이 침투할 수 있다는 뜻이며, 이는 곧 바닥판의 열화가 발생할 확률을 증가시킨다. 이에 따라 국토교통부에서는 표 4-12와 같이 염소 이온량의 품질기준을 제한하고 있다.

【표 4-12】 굳은 콘크리트의 최대 수용성 염소이온 비율(국토교통부, 2016)

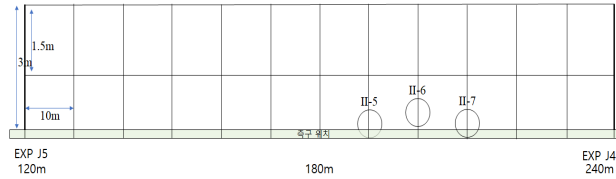
부재의 종류	콘크리트 속의 최대 수용성 염소이온량 (시멘트 질량에 대한 비율(%))
프리스트레스 콘크리트	0.06
염화물에 노출된 철근콘크리트	0.15
건조한 상태이거나 습기로부터 차단된 철근콘크리트 ¹⁾	1.00
기타 철근 콘크리트	0.30

¹⁾외부 대기조건에 노출되지 않고 습기로부터 차단된 건조한 상태의 실내 구조체의 콘크리트

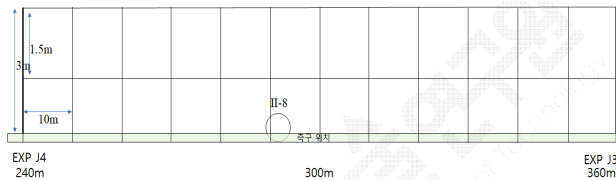
본 연구에서는 바닥판 콘크리트의 염화물 함량 시험을 통해 GPR 시험결과 데이터의 정확성을 검증하고자 하였다. 현장조건의 한계로 두무개다리교가 2차로, 홍제천고가 1차로의 시료만 채취 가능하였으며, 공용 중인 교량에서 코어채취가 불가하여 드릴을 통해 바닥판 표면을 일부 분쇄하여 채취하였다. 그림 4-26과 그림 4-27은 각각 두무개다리교가 2차로와 홍제천고가 1차로의 염화물 시료 채취 위치를 나타낸 것이다.



(a) 두무개다리가 2차로 0~120m 조사구간

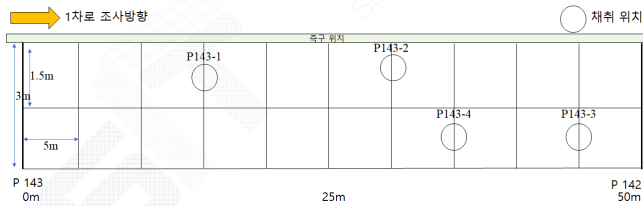


(b) 두무개다리가 2차로 120~240m 조사구간

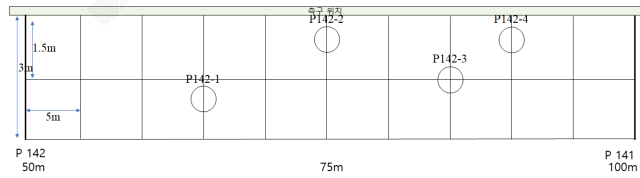


(c) 두무개다리가 2차로 240~360m 조사구간

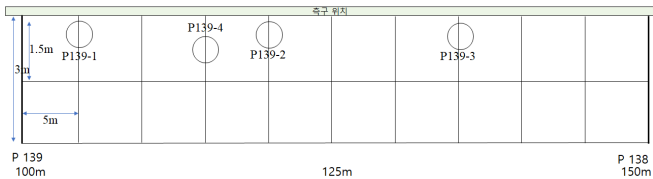
[그림 4-27] 두무개다리가 염화물 함량측정 시료채취 위치



(a) 홍제천고가 1차로 0~50m 조사구간



(b) 홍제천고가 1차로 50~100m 조사구간



(c) 홍제천고가 1차로 100~150m 조사구간

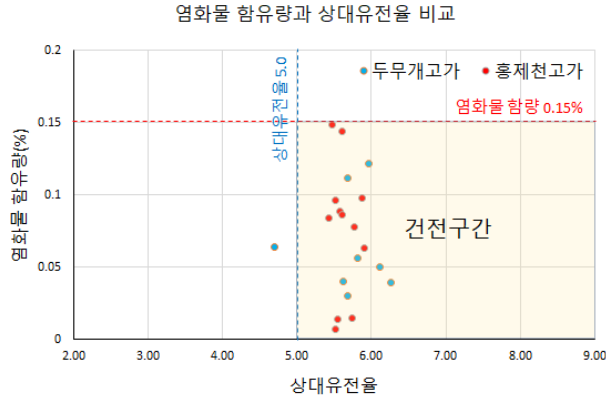
[그림 4-28] 홍제천고가 염화물 함량측정 시료채취 위치

콘크리트의 염화물 함량 시험은 KS F 2713의 지침을 준수하여, 한국화학융합시험연구원(KTR; Korea Testing & Research Institute)에서 수행되었다. 본 연구에서는 염화물 시험 결과와 해당 지점에서의 GPR 측정 결과를 비교하여 표 4-13에 나타내었다.

[표 4-13] 교면포장 바닥판 콘크리트 열화구간 염화물 함유량 시험결과

대상구간	시험결과			채취구간 상대유전율
	시료구분	염화물 함유량 (%)	시험방법	
두무개다리고가 2차로	II-1	0.112	KS F 2713	5.68
	II-2	0.050		6.11
	II-3	0.056		5.81
	II-4	0.064		4.70
	II-5	0.122		5.96
	II-6	0.039		6.27
	II-7	0.040		5.63
	II-8	0.030		5.69
홍제천고가 1차로	P142-1	0.098	KS F 2713	5.87
	P142-2	0.086		5.61
	P142-3	0.078		5.77
	P142-4	0.144		5.61
	P143-1	0.089		5.58
	P143-2	0.149		5.48
	P143-3	0.063		5.90
	P143-4	0.015		5.75
	PL39-1	0.007		5.52
	PL39-2	0.096		5.52
	PL39-3	0.084		5.43
	P139-4	0.014		5.55

표 4-12에 따르면, '염화물에 노출된 철근콘크리트'의 최대 염소이온량 기준은 0.15%를 초과하지 않도록 품질기준을 제시하고 있다(국토교통부, 2016). 본 연구에서 채취한 시료는 모든 지점에서 염화물 함량이 0.15% 이하로 측정되어 건전한 구간으로 확인되었다. 또한, 표 4-13으로부터 각 지점에서의 GPR 측정결과도 1개소를 제외한 전 지점에서 상대유전율이 5% 이상으로 측정되어 건전한 구간으로 예측되었다. 따라서 노면영상 분석 결과와 마찬가지로 GPR 시험이 건전한 바닥판 콘크리트에서 높은 정확도를 보이는 것으로 확인되었다. 그림 4-29는 염화물 함유량 시험과 GPR 측정 데이터 비교결과를 나타낸 것이다.



[그림 4-29] 염화물 함량과 상대유전율 비교결과

본 연구에서 수행된 현장 조사 결과, GPR을 통한 상대유전율 분석은 바닥판 열화 손상을 예측하는 데 효과적인 것으로 분석되었으며, 특히 건전한 바닥판에서 높은 정확도를 보이는 것으로 나타났다. 다만 열화 손상에 발생한 바닥판에서의 GPR 탐사 정확도는 다양한 현장에서 추가 조사가 요구되며, 노면영상 촬영 전 충분한 표면처리가 수행되어야 할 것으로 분석되었다.

SEOUL

INSTITUTE OF

서울과학기술대학교
Seoul Institute of Technology

TECHNOLOGY

05 구조물 포장 관리기준(안) 개발

1. 구조물 포장 현장 조사 데이터 통계분석
2. 구조물 포장 손상추정모형(안) 및 상태평가지수(안) 개발
3. 구조물 포장 유지관리를 위한 의사결정방안(안) 제시
4. 구조물 포장 관리방안 제언

05. 구조물 포장 관리기준(안) 개발

1. 구조물 포장 현장 조사 데이터 통계분석

본 연구에서는 서울시 구조물 포장의 체계적이고 효율적인 유지관리 방안을 도출하기 위해, 서울시 빅데이터 분석시스템 및 현장 조사 데이터를 활용하여 구조물 포장 상태평가지수(안)를 도출하고자 하였다. 앞서 구조물 포장을 크게 교면포장과 터널포장으로 분류하였으며, 콘크리트 바닥판을 가지고 있는 경우를 교면포장으로 분류하고, 이외의 경우를 터널포장으로 구분하였다. 터널포장의 경우 상태가 비교적 양호했던 반면, 교면포장의 경우 별도의 유지관리 기준 수립이 시급함을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 교면포장이 터널포장에 비해 유지관리 기준 수립이 시급한 점을 고려하고, 제4장에서 수행한 바닥판 열화도 측정결과를 반영하여 교면포장의 상태평가지수(안) (SBPI: Seoul Bridge Pavement Index)를 개발하고자 하였다.

SBPI 모형(안) 개발에 앞서 수집된 데이터는 균열률, 소성변형, IRI, SPI, 측정구간의 위도 및 경도, 상대유전율, 염화물함량, 측정시기, 유지관리 시기이다. 그러나 서울시 내에서의 위도 및 경도 변화는 포장상태에 미치는 영향이 없다고 간주할 수 있으므로 모형의 입력변수로부터 제외하였다. 또한 데이터 측정시기의 경우 데이터 수집 주기를 관리하기 위해서는 필수적인 정보이지만, 포장상태와는 연관 지을 수 없으므로 입력 변수로부터 제외하였다.

한편, 염화물 함량 및 유지관리 시기는 포장의 상태를 유추할 수 있는 지표로 활용할 수 있다. 그러나 염화물 함량의 경우 극히 일부 구간에서 수행된 코어시험으로 확보된 것이므로 데이터의 양이 불충분하여 변수에서 제외하였다. 유지관리 시기의 경우도 데이터의 양이 충분치 않으며, 유지관리의 빈도 및 보수규모, 보수공법, 보수 후 공용 기간 등을 통합적으로 고려하는 데 한계가 있기 때문에, 본 연구에서는 입력변수로부터 제외하였다.

균열률, 소성변형, IRI는 포장 상태를 정량적으로 표현하기 위해 전통적으로 사용되었던 지표이며, 본 연구에서도 이를 통해 PMS 분석을 실시한 바 있다. 또한, 서울시 토공부 포장에서도 해당 지표를 통해 SPI를 개발하여 사용하고 있는 점을 고려하여, 본 연구에서도 교면포장의 상태를 표현하기 위해 필요한 인자로 선정하였다. 상대유전율은 교면포장 바닥판의 열화 정도를 객관적으로 나타낼 수 있으며, 바닥판에서 발생한 열화가 표층까지 손상을 유발시키기 때문에 교면포장 상태를 표현할 수 있는 지표로 선정하였다. 결과적으로, 본 연구에서 SBPI(안) 개발을 위해 선정한 입력변수는 균열률, 소성변형, IRI, 상대유전율이다.

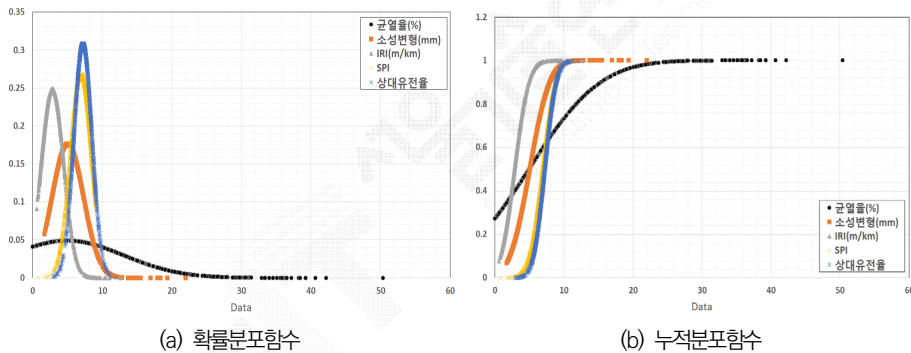
본 연구에서는 SBPI 모형(안)을 개발하기에 앞서, 기수집된 교면포장의 SPI 및 각 입력변수 데이터에 대한 통계분석을 통해 변수들의 특성을 파악하고자 하였다. 통계분석의 표본은 앞서 현장 조사를 통해 측정된 교면포장의 PMS 데이터 및 상대 유전율 데이터를 추출하였다. 대상 고가차도는 두무개다리고가차도, 홍제천고가차도, 압구정고가차도인 3개소를 선정하였고, 대상 교량은 서천과선교, 서호교, 동호대교인 3개소를 선정, 총 6개 구조물에 대하여 조사 분석을 실시하였다. 고가차도의 경우 서울시에 위치한 단방향의 성격을 가진 램프교량이 아닌 본선고가차도를 대상으로 두무개다리고가차도, 홍제천고가차도 및 압구정고가차도를 선정하였다. 교량의 경우 고가차도의 선정기준으로 압구정고가차도와 두무개다리고가차도와 연결되는 동호대교를 선정하였으며, 자동차전용도로로 교통량 유출입이 단순하며, 한강에 인접하여 염화물의 영향을 받을 것으로 예상되는 서호교를 선정하였다. 또한, 자동차전용도로로 도심지 고속화도로의 성격을 띠고 있는 국도4호선의 서천과선교를 추가로 선정하였다. 다만, 영동대교와 동작대교는 교량의 교통흐름이 남북방향의 연결로의 유출입으로 인해 불규칙적인 가변적 성격을 가지고 있어 대상에서 제외되었다. 대상 분석구간에서 차로별 10m 간격으로 포장상태 데이터를 추출하였으며, 이상치 등을 제외하여 총 1,312개의 표본 데이터를 확보하였다.

먼저 평균, 분산, 표준편차 등 개별 변량에 대한 특성을 분석하기 위해 기술통계량 분석을 실시하였으며, 표 5-1에 결과를 나타내었다. 또한 각 데이터에 대한 확률밀도 함수와 누적분포함수를 그림 5-1에 나타내었다. 확률밀도함수와 누적분포함수는 각각 데이터의 분포 정도와 데이터 밀도를 파악할 수 있는 척도로 활용할 수 있다. 균열률의 경우 타 지표에 비해 비교적 범위가 넓고 고르게 분포하였으며, 50% 이상인 데이터가 일부 존재하였으나, 전체 현장 조사 데이터 1,312개 중 일부에 불과하여 전체 통계 분석에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단되었다. 상대유전율의 경우 타 지표에 비해 범위가 좁고 집중적으로 분포하고 있는 것으로 확인되었다.

[표 5-1] 기술통계분석 결과

항목	N(통계량)	평균	최솟값	최댓값	표준편차	분산
균열률	1312	4.92	0.00	50.33	8.11	65.83
소성변형	1312	5.05	1.66	21.99	2.26	5.13
IRI	1312	2.88	0.57	22.64	1.79	3.21
SPI	1312	6.92	-6.46	9.18	1.58	2.50
상대유전율	1312	7.22	2.90	11.97	1.29	1.67

항목	왜도	왜도 표준편차	첨도	첨도 표준오차
균열률	2.10	0.07	4.28	0.14
소성변형	2.01	0.07	7.28	0.14
IRI	3.28	0.07	21.68	0.14
SPI	-1.44	0.07	5.85	0.14
상대유전율	-0.06	0.07	0.34	0.14



[그림 5-1] 입력변수별 데이터 분포 및 밀도 분석

각 데이터 간 상관관계를 분석하고, 측정된 데이터들의 신뢰도를 검토하고자 상관관계 분석 및 신뢰도 분석을 수행하였다. 표 5-2와 표 5-3은 각각 공분산 행렬과 상관관계 분석 결과를 정리한 것이다. SPI의 경우 균열률, 소성변형, IRI에 대해 음의 상관관계를 보여 서로 반대의 경향성을 가지는 것으로 확인되었고, 이는 각 결함지표가 SPI에 악영향을 준다는 통상적 이론과 일치하였다.

상대유전율의 경우 SPI에 대해 양의 상관관계를 나타냈는데, 이는 다양한 관점에서 해석이 필요하다. 먼저, 콘크리트 바닥판 상대유전율의 정상범위는 5~10이기 때문에, 해당범위 내에서는 단순 상대유전율의 증감으로 포장 상태의 변화를 예측하기 어렵다. 본 연구에서 수집된 상대유전율의 데이터 평균값은 7.22이고, 타 지표에 비해 데이터 밀집도가 가장 높은 것으로 조사되었다. 즉, 획득한 데이터의 상대수가 정상범위에

있어 해당 범위에서는 SPI와의 상관성이 떨어질 수 있다. 또한 SPI는 균열률, 소성변형, IRI 값을 바탕으로 계산되는 지표이기 때문에, 상대유전율과 SPI의 상관관계가 타 변수에 비해 불명확한 것은 자명한 현상으로 해석할 수 있다.

[표 5-2] 공분산 행렬

구분	균열률	소성변형	IRI	SPI	상대유전율
균열률	65.83	2.80	-0.45	-9.32	-2.07
소성변형	2.80	5.13	0.48	-1.12	-0.03
IRI	-0.45	0.48	3.21	-1.64	0.28
SPI	-9.32	-1.12	-1.64	2.50	0.24
상대유전율	-2.07	-0.03	0.28	0.24	1.67

[표 5-3] 상관관계 분석 결과

구분		균열률	소성변형	IRI	SPI	상대유전율
균열률	Pearson 상관계수	1.00	0.15	-0.03	-0.73	-0.20
	유의확률(양쪽)		0.00	0.26	0.00	0.00
	제공합 및 교차곱	86308.16	3664.94	-593.64	-12214.86	-2717.95
소성 변형	Pearson 상관계수	0.15	1.00	0.12	-0.31	-0.01
	유의확률(양쪽)	0.00		0.00	0.00	0.68
	제공합 및 교차곱	3664.94	6720.12	627.18	-1473.79	-43.53
IRI	Pearson 상관계수	-0.03	0.12	1.00	-0.58	0.12
	유의확률(양쪽)	0.26	0.00		0.00	0.00
	제공합 및 교차곱	-593.64	627.18	4203.39	-2153.47	360.07
SPI	Pearson 상관계수	-0.73	-0.31	-0.58	1.00	0.12
	유의확률(양쪽)	0.00	0.00	0.00		0.00
	제공합 및 교차곱	-12214.86	-1473.79	-2153.47	3282.72	314.77
상대 유전율	Pearson 상관계수	-0.20	-0.01	0.12	0.12	1.00
	유의확률(양쪽)	0.00	0.68	0.00	0.00	
	제공합 및 교차곱	-2717.95	-43.53	360.07	314.77	2190.67

결과적으로 데이터의 신뢰도 검증을 위해 활용되는 Cronbach의 α 값은 0.579가 도출되었다. 일반적으로 Cronbach의 α 값이 0.6 이상일 때 신뢰성을 수용할 수 있으며, 0.7 이상일 때 바람직한 신뢰도를 가진 것으로 판단할 수 있다. 따라서 본 연구에서의 상관관계 분석 결과는 데이터의 일관성이 다소 부족한 수준으로 나타났다. 그러나 이는 상대유전율과 SPI를 단순 선형적 관계로 정의할 수 없기 때문인 것으로 판단되며, SPI와 상대유전율 간 상관계수(0.12)가 매우 낮게 계산된 것을 통해 확인할 수 있다.

바닥판의 열화 정도가 교면포장의 상태에 영향을 미친다는 것은 앞서 사례조사를 통해 확인된 바 있다. 따라서 기존 SPI 모형은 교면포장에서 적용하는 데 한계가 있으며, 이를 적절히 개선하여 상대유전율을 충분히 고려할 수 있는 모형의 개발이 필요하다.

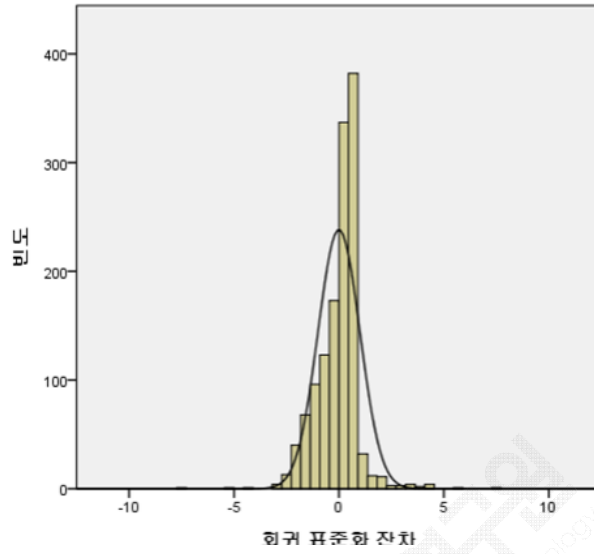
표 5-4와 표 5-5는 균열률, 소성변형, IRI, 상대유전율이 각각 독립변수로서 SPI에 미치는 영향을 분석하고, 각 독립변수들 간의 영향성 및 다중공선성을 검토한 것이다. 독립변수별 공차가 0.5보다 작거나, VIF가 2.0 이상일 경우 다중공선성에 문제가 있는 것으로 간주할 수 있다(유주호, 2015). 본 연구에서는 모든 독립변수의 공차가 0.9 이상이고, VIF는 1.1 미만으로 도출되어 독립변수 간 다중공선성의 문제는 없는 것으로 확인되었다. 결정계수는 0.909로 계산되어, SPI 데이터의 약 91%가 추정된 선형회귀분석 모형의 선상에 있음을 확인하였다. 예측결과에 대한 잔차의 P.P도표 및 종속변수의 히스토그램은 그림 5-2 및 그림 5-3에 나타내었다. 상대유전율은 SPI와 선형 관계로 정의할 수 없기 때문에, 추정된 SPI 모형의 독립변수 중 비표준화계수가 가장 낮게 계산되어 영향성이 가장 작은 것으로 확인되었다.

【표 5-4】 선형회귀분석 모형의 결과

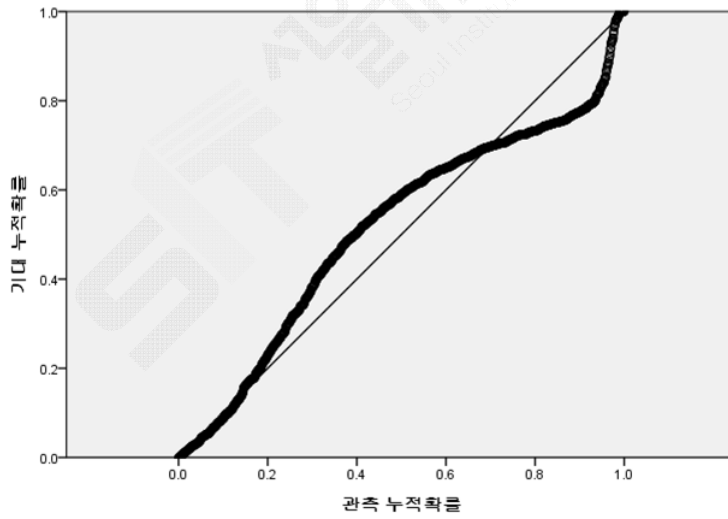
R	R ²	수정된 R ²	추정값의 표준오차	통계량 변화량					Durbin-Watson
				R ² 변화량	F 변화량	df1	df2	유의확률 F 변화량	
0.953	0.909	0.909	0.4779	0.909	3266.897	4	1307	0.000	1.316

【표 5-5】 선형회귀분석 모형의 계수 결정 결과

	비표준화계수		표준화계수	t	B에 대한 95.0% 신뢰구간		공선성통계량	
	B	표준오차	베타		하한값	상한값	공차	VIF
(상수)	9.188	0.083		110.067	9.024	9.351		
균열률	-0.139	0.002	-0.715	-82.987	-0.143	-0.136	0.938	1.066
소성 변형	-0.094	0.006	-0.135	-15.839	-0.106	-0.082	0.962	1.040
IRI	-0.523	0.007	-0.591	-69.871	-0.537	-0.508	0.971	1.030
상대 유전율	0.055	0.010	0.045	5.224	0.034	0.075	0.948	1.055



[그림 5-2] 종속변수(SPI)에 대한 히스토그램



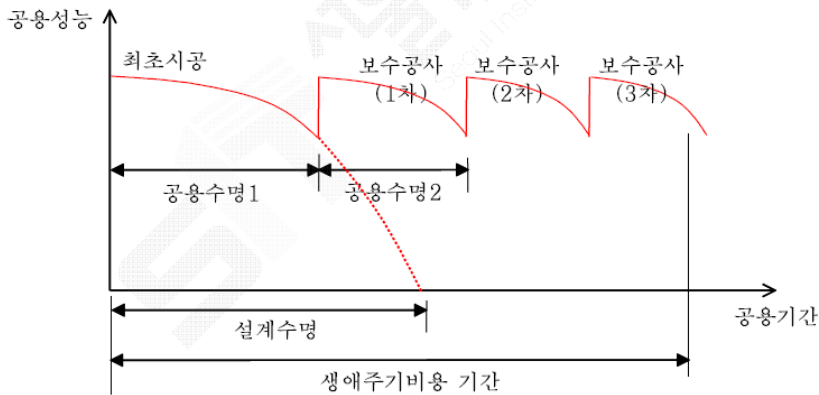
[그림 5-3] 회귀표준화 잔차 정규 P.P도표

2. 구조물 포장 손상추정모형(안) 및 상태평가지수(안) 개발

본 연구에서는 구조물 포장의 상태를 표현하기 위해 다음과 같이 4개 유형의 포장상태 지수를 도출하고, 유형별 비교분석을 실시하였다.

- 기존 서울시 토공부에서 활용하고 있는 SPI 모형
- 공용기간에 따른 포장상태지수를 exponential 함수로 표현한 모형(그림 5-4)
- 본 연구에서 분석한 PMS 및 상대유전을 데이터를 활용하여 도출한 SBPI 모형
- SBPI 모형을 보정하여 도출한 새로운 SBPI 모형

각각의 모형에 대해 RMSE 추정오차를 계산하고, 경험적 접근방법을 통해 최종 구조물 포장 손상추정모형(안) 및 상태평가지수(안)를 선정하였다. 예측함수에 활용되는 변수를 결정하기 위해 GRG의 비선형 최적화 기법을 활용하였다.



[그림 5-4] 도로포장의 공용수명 개념(국토교통부, 2015)

2-1. 구조물 포장 손상추정모형

본 연구에서는 구조물 포장 개통 후 또는 유지관리를 실시한 직후로부터, 시간에 따라 포장상태에 영향을 미치는 요소들이 어떻게 작용하는지 평가함과 동시에 포장상태지수의 변화를 함께 관찰했다. 시간에 따른 영향인자는 균열률, 소성변형, IRI 및 상대유전을 선정하였으며, 선행 문헌을 참고하여 각 인자를 시간에 따른 손상추정모형으로 표현하고, 미정계수를 도출하였다(국토교통부, 2015; 한국도로공사, 2018).

본 연구에서는 앞서 전체 교면포장에 대해 수집 및 분석한 데이터를 활용하였다. 또한 최근 유지관리 수행시점을 알고 있는 경우, 이 시점을 기준으로 포장상태가 모두 최고치의 상태(균열률 0%, 소성변형 0mm, IRI 1.18m/km)였음을 가정하여 모형을 개발하였다. 선행연구를 조사하여 손상추정모형을 선별하고, RMSE 오차 및 경험적 접근방법을 통해 구조물 포장의 최적 상태평가지수 모형을 결정하고자 하였다.

국토교통부(2015), 한국도로공사(2018)에서는 공용기간에 따른 균열률, 소성변형, IRI에 대한 모형을 아래 식(5-1)로부터 식(5-5)까지 제시하였다.

$$Cr_1(\%) = \alpha \cdot age + \beta \quad (\text{식 5-1})$$

$$Cr_2(\%) = \alpha \cdot age^\beta \quad (\text{식 5-2})$$

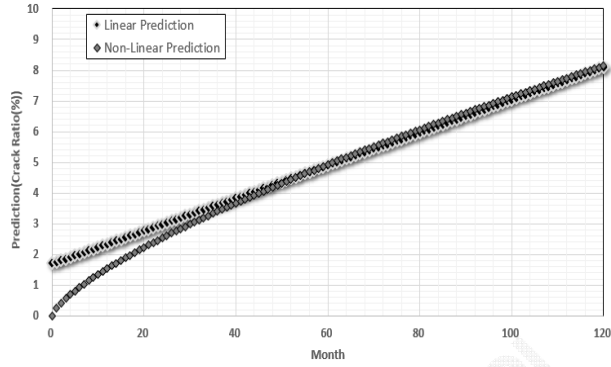
$$Rut_1(mm) = \alpha \cdot age + \beta \quad (\text{식 5-3})$$

$$Rut_2(mm) = \alpha \cdot age^\beta \quad (\text{식 5-4})$$

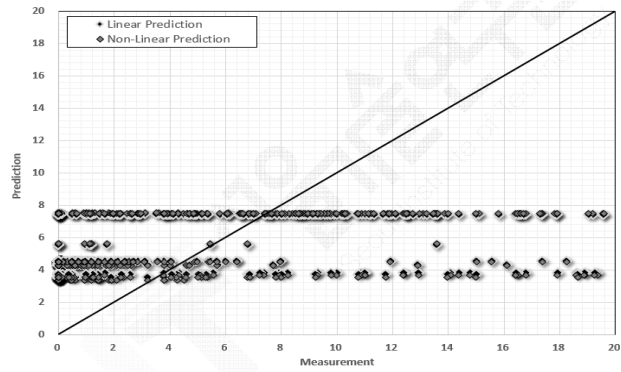
$$IRI(m/km) = \alpha \cdot age + \beta \quad (\text{식 5-5})$$

식(5-1)로부터 식(5-5)에서, 균열률과 소성변형은 각 2개의 모형이 제시되었으므로 보다 적합한 모형을 선별하기 위해 오차에 대한 비교평가를 실시하였다. 공용기간은 일반 포장의 경우에 따라 10년을 기준으로 적용하였으며(국토교통부, 2016), 이에 대한 결과는 그림 5-5로부터 그림 5-6과 같다. 역학적으로 균열률이나 소성변형은 초기 손상이 심하게 발생하며, 추후에는 그 손상이 일정하게 유지되는 비선형적 거동으로 판단하는 것이 합리적이다. 선행 연구(국토교통부, 2015 및 한국도로공사, 2018) 결과에 따르면, 공용 10년 이하인 경우 상대유전율의 변화와 변곡이 발생하는 지점이 2년과 5년으로 판단하고 있으며, 10년 이하에는 상대유전율의 변화가 크다는 결론을 내린 바 있다. 반면, 그림 5-5로부터 그림 5-6의 결과에서는 선형적인 모형과 비선형적인 모형 모두 큰 오차를 보이면서 측정-예측도표에 횡적인 일직선의 결과를 보였는데, 이는 공용기간에 의존하는 데이터로서 유지관리를 실시한 시점은 비슷하지만, 그 시점의 포장상태가 모두 상이한 데이터를 활용했기 때문으로 판단된다. 즉, 본 연구에서 수집한 데이터는 상기 다른 구간의 데이터가 아닌, 한 구간(한 교량의 10m) 중횡방향 단위의 데이터를 수집한 것으로써, 수치해석 시 같은 유지보수기간임에도 불구하고 포장상태는 일률적으로 같은 공용성을 나타내지 못하고 있는 점을 고려하였을 때, 시간에 따라 같은 구간일지라도 다른 소성변형, 균열율, 평탄성의 결과를 보이기 때문에 다소 오차가 발생할 수 있음을 확인할 수 있다. 단, 도로포장의 경우 앞서 언급한 선행연구를 참고하였을 때 비선형적으로 거동하기 때문에 비선형적인 모형을 선정하였다.

한편, IRI의 경우 1개의 모형만 제시되어 식(5-5)를 활용하였다.

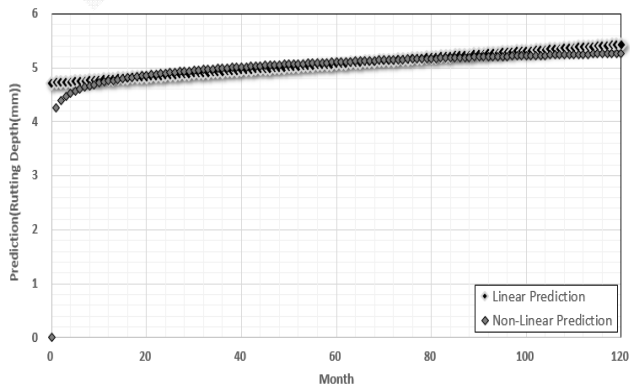


(a) 균열률에 대한 시간별 손상 예측 결과



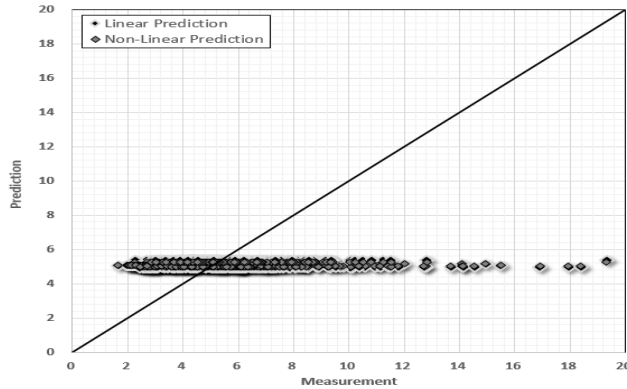
(b) 균열률에 대한 시간별 손상 오차 결과

[그림 5-5] 균열률에 대한 모형 비교평가



(a) 소성변형에 대한 시간별 손상 예측 결과

[그림 5-6] 소성변형에 대한 모형 비교평가



(b) 소성변형에 대한 시간별 손상 오차 결과

[그림 5-6] 소성변형에 대한 모형 비교평가(계속)

상대유전율의 경우 공용기간에 따라 다른 변화함수를 산정하였다. 식(5-6) 및 식(5-7)은 아스팔트 교량 바닥판의 상대유전율을 산정하는 모형을 나타낸 것이며, 식(5-8)로부터 식(5-10)은 콘크리트 교량 바닥판의 상대유전율 산정 모형을 나타낸 것이다.

$$\epsilon_{r,a}^{age} = -1.08 \cdot \ln(age) + 11.41 \quad (\text{식 5-6})$$

$$\epsilon_{r,a}^{age} = -1.63 \cdot \ln(age) + 12.17 \quad (\text{식 5-7})$$

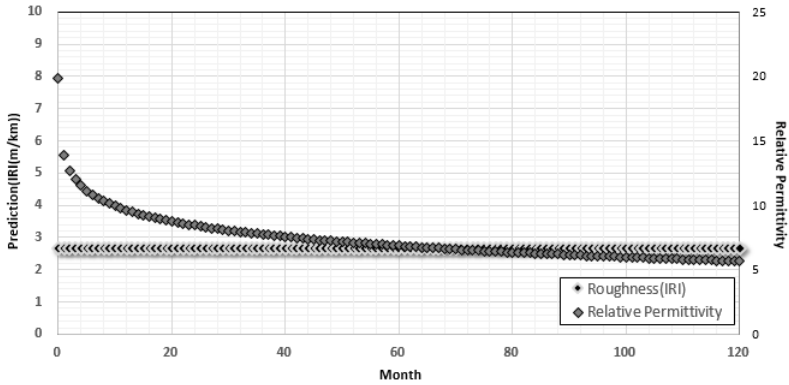
$$\epsilon_{r,a}^{age} = -0.40 \cdot \ln(age) + 12.63 \quad (\text{식 5-8})$$

$$\epsilon_{r,a}^{age} = -0.34 \cdot \ln(age) + 12.00 \quad (\text{식 5-9})$$

$$\epsilon_{r,a}^{age} = -0.027 \cdot \ln(age) + 8.76 \quad (\text{식 5-10})$$

위 식에서 아스팔트의 경우 10년을 기준으로 공용기간 10년 전후의 상대유전율 변화함수를 다르게 산정하였으며, 콘크리트의 경우 2~5년, 5~10년, 10~43년을 기준으로 변화함수를 다르게 산정하였다. 그러나 모든 식에서 상대유전율과 재령일 간의 관계는 선형적이라는 것을 고려하여, 식(5-11)과 같은 선형의 함수로 결정하여 GRG 비선형 최적화 알고리즘을 적용한 모형을 개발했다. IRI 및 상대유전율에 대한 시간별 손상 예측 결과는 그림 5-7과 같다.

$$\epsilon_{r,a}^{age} = -\alpha \cdot \ln(age) + \beta \quad (\text{식 5-11})$$



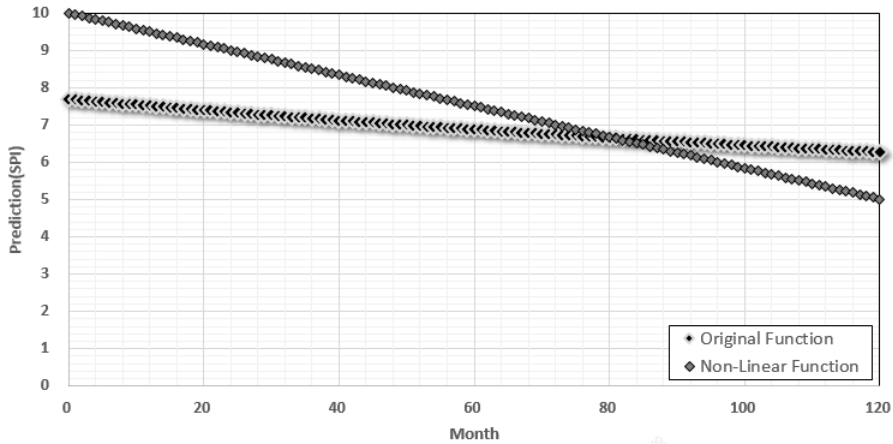
[그림 5-7] IRI 및 상대유전율에 대한 시간별 손상 예측 결과

IRI 역시 선형함수로 일정하게 손상이 발생하였고, 상대유전율은 공용 초기 급격한 변화를 보이다가 일정기간 이후 그 손상이 줄어드는 양상을 보였다. 이는 기존 SPI의 변화에 대하여 일반적인 포장공학적인 개념(그림 5-4)으로부터 최고점의 10점을 기준으로 하여 수식을 적용한 결과로써, 선행 연구 결과에서 제안한 함수의 미정계수만 본 연구에 맞게 결정한 것으로, IRI 및 상대유전율의 원데이터와의 RMSE 오차는 각각 1.56m/km 및 0.98로 평가되었다.

2-2. 구조물 포장 상태평가지수

공용기간에 따른 최적의 SBPI모형을 도출하기 위해, 본 연구에서는 조사된 SPI를 기준으로 앞서 선정한 손상추정모형 결과를 이용한 SPI 지수와의 오차를 평가하고자 하였다. 그림 5-4와 같은 추세에 포장상태지수의 변화를 파악하기 위해 식(5-12)와 같이 모형을 가정하였으며, GRG 비선형 최적화기법을 활용해 미정계수를 도출하였다. 조사된 SPI, 공용기간에 따른 균열률, 소성변형, 평탄성 예측모형을 적용한 SPI, 공용기간에 따른 SPI 예측모형에 대한 손상 예측 결과는 그림 5-8과 같다.

$$\begin{aligned}
 SPI_{prediction} &= \alpha - \beta \cdot e^{\gamma} && \text{(식 5-12)} \\
 &= (10 + \beta) - \beta \cdot e^{\gamma} \\
 &= (10 + \beta) - \beta \cdot e^{age \cdot \gamma} \\
 &= 10 + \beta(1 - e^{age \cdot \gamma})
 \end{aligned}$$



[그림 5-8] SPI에 대한 시간별 손상 예측 결과

이와 더불어 본 연구에서는 균열률, 소성변형, 평탄성 및 상대유전율을 도입하여 교면포장의 상태를 평가할 수 있는 SBPI를 식(5-13)과 같이 제안하였다.

$$SBPI = (\sqrt{SD^5 + RD^5 + IRI^5 + DI^5})^{0.2} \quad (\text{식 5-13})$$

여기서, SD, RD, IRI 및 DI는 각각 균열률지수, 소성변형지수, 평탄성지수 및 층간박리지수(Delamination Index)를 나타낸다. 이러한 개별지수는 식(5-14)로부터 식(5-17)을 통해 도출할 수 있다.

$$SD = 10 - [(10 - ACI) + (10 - LCI) + (10 - TCI) + (10 - PATI)] \quad (\text{식 5-14})$$

$$RD = 10 - (0.267 \cdot Rut) \quad (\text{식 5-15})$$

$$IRI = 10 - (0.8IRI) \quad (\text{식 5-16})$$

$$DI = 10 - (4 \cdot \left| \frac{\Delta \varepsilon - \varepsilon}{\Delta \varepsilon} \right|)^2 \quad (\text{식 5-17})$$

여기서, ACI, LCI, TCI, PATI, Rut, IRI, $\Delta \varepsilon$ 및 ε 은 각각 거북등 균열지수, 종축 균열지수, 횡축균열지수, 패칭지수, 소성변형량, 평탄성, 표준구간의 평균 유전체 및 횡구간의 유전체를 나타낸다.

식(5-13)에서 제시한 SBPI는 이론적으로 포장이 완전무결하여 모든 지수가 10인 경우를 가정(엄격히 IRI와 상대유전율 값은 0의 값을 가질 수 없음)하면, SBPI는 10을 초과하게 된다. 또한, 실제 균열률을 측정하는 과정에서 거북등 균열률과 중·횡의 균열률 및 패칭지수를 상대적으로 빠르게 도출하기 어렵다는 현실적 문제점도 있으며, 상대유전율 데이터를 다른 지수로 변환하여 활용해야 한다는 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는, 이러한 단점을 개선하기 위해 식(5-18)과 같은 모형을 새롭게 개발하여 제안하고자 한다.

$$SBPI_{new} = \xi[(10 - \alpha Crack^\beta)^5 + (10 - (0.267 Rut))^5 + (10 - (0.8 IRI))^5 + (10 - (\gamma_1 RP + \gamma_2 RP^2))^5]^{0.2} \quad (\text{식 5-18})$$

여기서, ξ , α , β 및 γ 는 각각 미정계수이며, 나머지 변수는 각각 균열률, 소성변형, IRI 및 상대유전율이다. 식(5-18)에서 γ 가 포함된 항의 경우, 만약 상대유전율을 측정할 값이 일정 값 이상이던 DI를 음의 값으로 반환한다. 따라서 이에 대한 최댓값을 결정할 후, DI값을 음수로 반환시키지 않는 적절한 미정계수 값을 결정해야 하는 것이 관건이다. 따라서 그림 5-7에서 나타난 식(5-11)의 미정계수를 결정한 후, 1일 단위의 공용일수를 대입한 값을 상대유전율의 최댓값으로 선정했다.

결국, 식(5-11)의 최소 공용일은 0.03225(=1달/31일)을 대입하였으며, 최대 공용일은 포장의 역학적 공용수명 10년인 120개월을 반영하였다. 이에 따른 상대유전율의 최댓값은 19.8164, 최솟값은 5.6559로 계산된다(단, 최소 상대유전율 값은 공용기간이 길어짐에 따라 더 적은 수치가 될 수 있다). 결국 이론상 미정계수는 상대유전율이 최대일 때 DI지수를 최대점수인 10점으로 반환해야 하며, 5.6559인 경우 DI지수를 0으로 반환하도록 최적화시켰다.

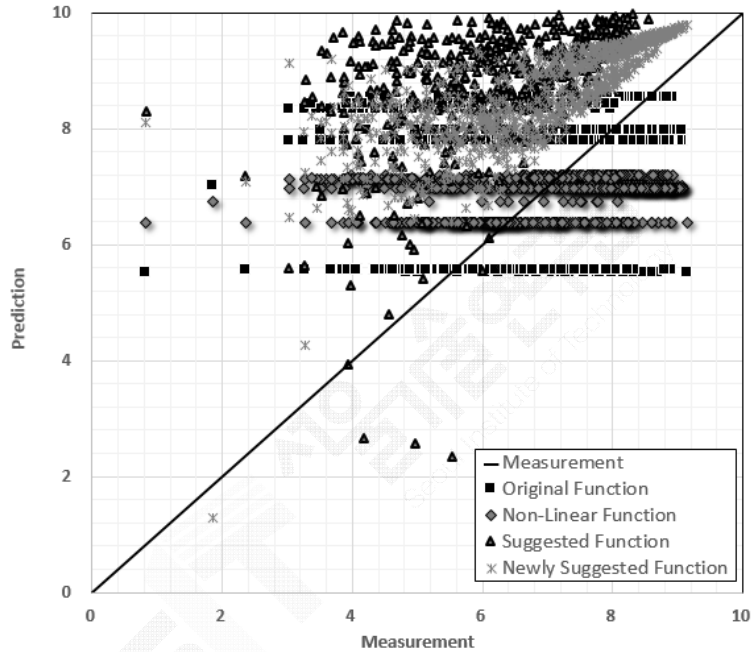
마찬가지로, 미정계수 ξ 의 경우, 이론상 IRI 1.18m/km 이하가 될 수 없는 점과 상대유전율이 19.8164 이상이 될 수 없다는 점을 고려하여, 포장의 상태가 최상인 경우(균열률 : 0%, 소성변형 : 0mm, 평탄성 : 1.18m/km, 상대유전율 : 19.8164)에 이 지수를 10으로 반환할 수 있는 값으로 최적화시켰다.

또한, 식(5-13)에서 기존 데이터를 활용할 경우 균열률지수를 식(5-19)와 같이 변경해서 사용해야 하며, 층간박리지수를 식(5-20)과 같이 변경하여 사용하여야 한다.

$$SD = 10 - \alpha Crack(\%)^\beta \quad (\text{식 5-19})$$

$$DI = 10 - (\gamma_1 RP + \gamma_2 RP^2) \quad (\text{식 5-20})$$

본 연구에서는 기존에 측정된 SPI를 기준으로 제시된 SBPI모형(Suggested Function)과, 새롭게 제시된 BPI모형(Newly Suggested Function)의 오차를 도출했다. 또한, 앞서 식(5-12)를 이용한 SPI 지수(Non-Linear Function) 및 SPI에 영향을 미치는 독립변수들을 예측하여 구한 SPI모형(Original Function) 역시 함께 그 차이를 확인했다. 이에 대한 결과는 그림 5-9와 같다.



[그림 5-9] SPI 및 SBPI 모형의 비교 평가

본 연구의 결과를 바탕으로 미정계수인 ξ 를 산정하면 그림 5-9의 새롭게 제시된 모형의 결과(Newly Suggested Function)가 자연스럽게 중방향으로 측정값 아래로 내려오게 된다. 이에 대한 전체적인 결론은 표 5-6과 같다.

[표 5-6] 모형개발 결과

구분		모형계수				RMSE	선정
		α	β	γ	ξ		
공용기간별 손상모형	균열률 식(5-1)	0.053372	1.703822	-	-	7.76882	
	균열률 식(5-2)	0.25372	0.724412	-	-	7.78186	●
	소성변형 식(5-3)	0.00597	4.719167	-	-	2.4298	
	소성변형 식(5-4)	4.256851	0.044524	-	-	2.4341	●
	IRI 식(5-5)	0.000154	2.646635	-	-	1.5660	●
	상대유전율 식(5-11)	3.965936	13.90175	-	-	0.9854	●
	비선형 SPI 지수 식(5-12)	47613.157	8.7E-07	-	-	1.7304	
	예측변수 반영 SPI 지수	식(5-2), 식(5-4), 식(5-6) 결과반영				1.4450	●
SBPI 모형	제안된 SBPI 모형 식(5-13), 식(5-19), 식(5-20)	16.2927	0.03193	1.7370	-	3.1879	
	새롭게 제안된 SBPI 모형 식(5-18)	1.40196	0.70177	2.2033	0.82547	1.9866	●

결과적으로, 균열률, 소성변형 및 IRI는 공용기간과 선형적인 관계를 갖는 모형이 가장 오차가 적지만, 균열률과 소성변형의 경우 비선형 모형과 오차가 크지 않으며, 역학적으로 포장상태지수가 비선형적 변화를 보이고(그림 5-5(a)), 소성변형과 균열률이 일정하지 않아 비선형적 모형의 활용성이 더 높은 것으로 판단되었다. 상대유전율은 비선형적 관계를 유지하는 모형의 미정계수를 선정했다.

이와 더불어 비선형적 SPI 모형보다 공용기간별로 각 요소들을 예측하여 평가하는 SPI 모형이 더 오차가 적은 것으로 파악되었다. 특히 SBPI 모형은 기존 지수가 10을 초과하는 단점과 측정 데이터를 바로 활용할 수 있는 장점을 함께 활용하여 개발된 새로운 제안 모형을 선별함으로써 오차를 크게 줄일 수 있다.

3. 구조물 포장 유지관리를 위한 의사결정방안(안) 제시

본 연구에서는 구조물 포장의 상태를 나타내는 SBPI가 특정 값 이하인 경우 유지관리를 실시해야 한다는 기준을 통계적으로 도출하고, 본 연구에서 조사한 교면포장을 대상으로 유지관리 기준을 적용하여 그 비용을 추정하는 것에 목적을 가지고 있다.

구조물 포장 유지관리 기준을 통계적으로 도출하기 위해 서울시의 토공부 유지관리 기준인 SPI 6.75를 준용하였으며, 따라서 SBPI 수치가 6.75가 되는 시점에서 유지보수를 실시하는 것으로 가정하였다(서울특별시, 2018). 이와 더불어 균열률과 소성변형, IRI는 각각 8%, 15mm, 6m/km로 보수기준을 가정하였다.

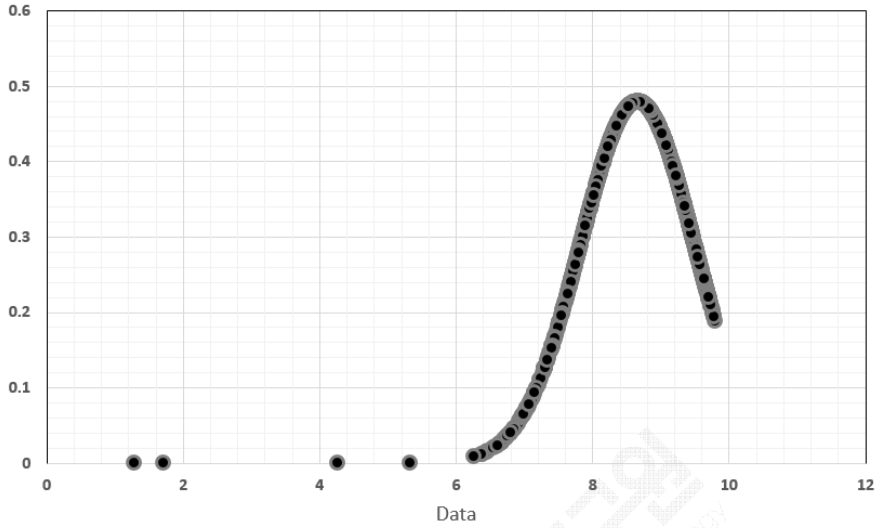
결국 본 연구에서는 서울시에서 현재 시행 중인 유지관리 시나리오 및 기준에 근거하고, 통계적인 기법을 활용하여 교면포장에 대한 유지관리 기준을 새롭게 정립했다. 따라서 결과적으로는 SBPI가 그 기준이 되어야 하지만, 균열률, 소성변형 및 IRI를 적절하게 고려해야만 한다는 전제를 가지고 있다.

한편, 본 연구의 결과로부터 상대유전율은 교면포장의 상태에 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 따라서 상대유전율의 유지관리 기준을 새롭게 선정할 필요가 있으며, 각 유지보수 기준에 부합하는 보수공법에 대한 결정체계(Decision Tree)를 수립해야 한다. 본 연구에서는 이러한 기준을 수립하기 위한 초기 단계로 통계적인 접근을 통해 유지관리 기준(안)을 제시하고자 하였으며, 이를 통해 교면포장 유지관리 소요예산을 추정했다.

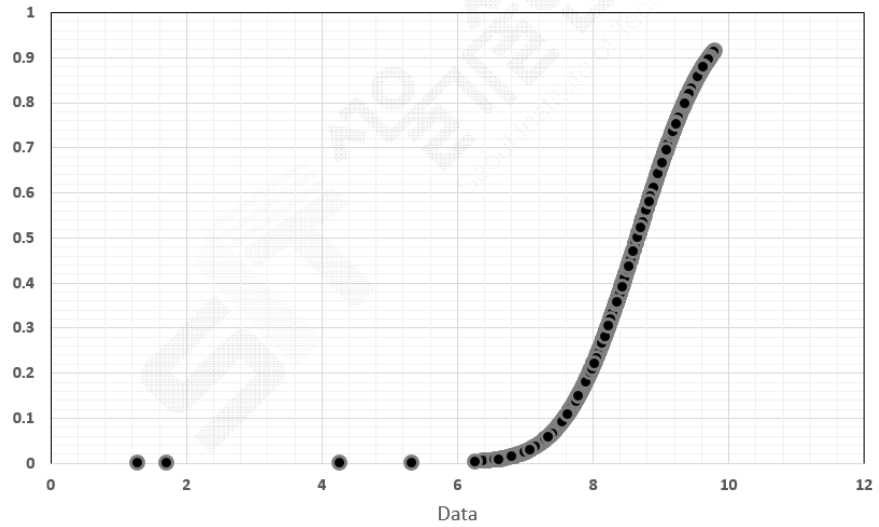
3-1. 통계적 기법을 통한 유지관리 의사결정방안

본 연구에서는 유지보수 공법을 선정 기준을 정립하기 위해 기존 서울시에서 개발한 유지관리 시나리오에 기초하였다. 다만, 상대유전율은 기존 토공부 포장의 시나리오에서 제외되어 있기 때문에, 이에 대한 기준을 통계적으로 산정하고자 하였다.

앞서 도출한 SBPI에 대하여 확률밀도함수를 구하고, SBPI가 6.75에 해당되는 밀도를 상대유전율에 적용시킴으로써 확률적 밀도를 동등하게 부과한 하한 상대유전율 값을 도출했다. SBPI 지수에 대한 상대유전율의 확률밀도함수 및 누적분포함수는 그림 5-10과 같다.



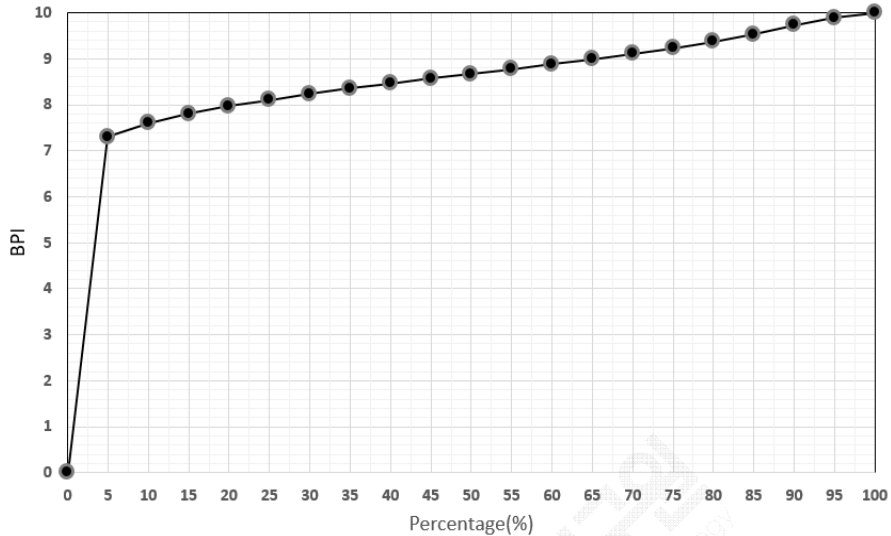
(a) SBPI에 대한 상대유전율의 확률밀도함수



(b) SBPI에 대한 상대유전율의 누적분포함수

[그림 5-10] SBPI 지수에 대한 상대유전율 분포

위 결과에서 SBPI 지수가 6.75 이상을 유지할 수 있는 밀도는 하위 3% 이내에서 발생하고 있었다. 확률밀도함수의 5% 단위 SBPI 지수로 변환한 결과는 그림 5-11과 같다.

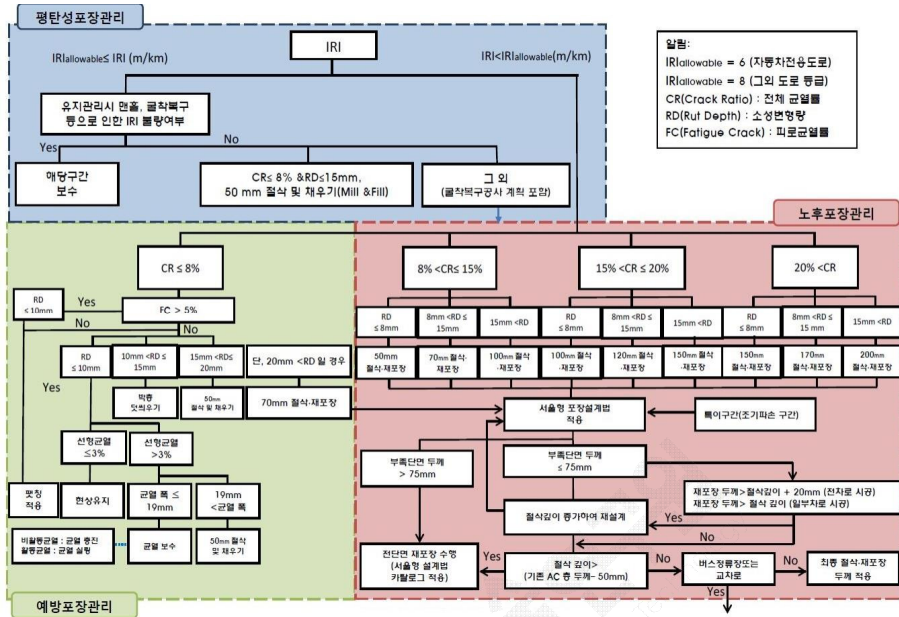


[그림 5-11] 확률밀도에 따른 SBPI 지수

그림 5-11의 그래프는 5% 단위로 확률밀도를 나타낸 것이며, 그림을 통해 SBPI가 3%의 누적밀도인 경우 6.75의 SBPI 지수를 유지하고 있다는 것을 근거로, 상대유전율의 3% 하한 경계의 값을 산정한 결과 4.8로 계산되어 이를 교면포장 바닥판의 유지보수 기준으로 산정했다.

3-2. 서울시 유지관리 시나리오에 따른 유지관리 의사결정방안

서울시에서는 2016년부터 2017년까지 도로포장 유지관리 기본계획 수립 용역을 실시하여 출간된 도로포장 유지관리 매뉴얼(서울특별시, 2018)에 근거한 유지관리를 실시하고 있다. 여기서 언급하는 포장의 파손형태 혹은 예산, 기준에 대한 내용은 대부분이 토공부 포장에 국한되어 있다. 그러나 본 연구에서 개발한 SBPI 지수 역시 토공부의 SPI의 개념 및 이론에 근간하여 개발된 것이기 때문에 이를 충분히 충족시킬 필요가 있으며, 이와 관련된 서울시의 목표 포장상태지수인 SPI 역시 충족을 시켜야만 한다. 따라서 서울시에서 목표하는 포장상태 지수를 유지하며, 이에 대한 유지보수 시나리오를 준수하는 일련의 기준을 정립해야만 서울시에서 제안한 사항을 교면포장에서도 만족시킬 수 있다. 아래 그림 5-12는 현재 서울시 토공부 포장의 유지보수에 활용되고 있는 유지관리공법 시나리오이다.



[그림 5-12] 서울형 최적 유지보수공법 결정체계(서울특별시, 2018)

그림 5-12로부터, 유지관리를 위해 가장 먼저 고려되는 사항은 평탄성이며, 다음으로 고려되는 사항이 균열률이다. 이후 균열률의 크기에 따라 세부적으로 소성변형량을 분석한 뒤 유지관리의 공법을 선정하게 되는 의사결정나무로 구성되어 있다. 결론적으로, 이 결정체계는 SPI 지수 자체로 기준이 되는 공법을 선정한 것이 아닌, SPI를 구성하는 요소들의 상태에 의존한 것이라 할 수 있다.

이와 관련하여 본 연구에서는, 서울시에서 목표로 하는 포장상태지수 이상으로 포장이 유지될 수 있는 최소 조건을 이용하였으며, 교면포장의 경우, 차도 내의 보행자 출입이 불허되는 서울시 한강교량의 조건(차로 내 보행자 이용 불가, 별도의 보도 구간 존재)을 가정하여 자동차전용도로로 가정한 후 기준을 결정하도록 하였다. 여기서 상대유전율의 제한은 위 통계분석의 결과로부터 4.8을 기준으로 하였으며, IRI의 한계는 6m/km로 설정했다. 또한, 균열률의 경우 서울시 시나리오의 최소 기준 균열률 8%를 적용했다. 소성변형의 경우, 토공부 유지관리 시나리오의 노후포장관리 중 재포장에 가장 하위 등급(균열률 8%(CR(15% 등급)의 중심 기준을 70mm로 보고 있으나, 토공부 포장과 교면포장의 두께에 차이가 있음을 고려했다. 이때, 토공부 포장의 두께는 교통량 및 도로의 등급 등에 의해 그 포장두께가 상이하지만, 국도설계실무요령(국토교통부, 3등급 포장 최상의 치수인 C6 형식으로 가정하여 52cm로 보면, 서울시에서 제한하고 있는 노후포장 관리의 부족 단면에 대한 하한 소성변형 크기는 C6 단면에 비해 약

14%를 허용하고 있어, 교면포장의 일반적인 8cm 두께에 이 허용 값을 적용하여 본 연구에서는 그 하한값을 12mm로 설정했다. 아래는 본 연구에서 기준을 선정하는 과정에서 고려한 사항을 순서대로 서술한 것이다.

첫째, SBPI 지수가 6.75 이하이고, 상대유전율이 5.65 이하일 경우 바닥판 보수와 함께 전단면 포장보수를 실시한다.

둘째, 상대유전율이 4.8 이하인 경우, SBPI 지수와 관계없이 하부 바닥판의 손상으로 인한 포장면 파손에 대비하여 바닥판 보수공사를 실시한다.

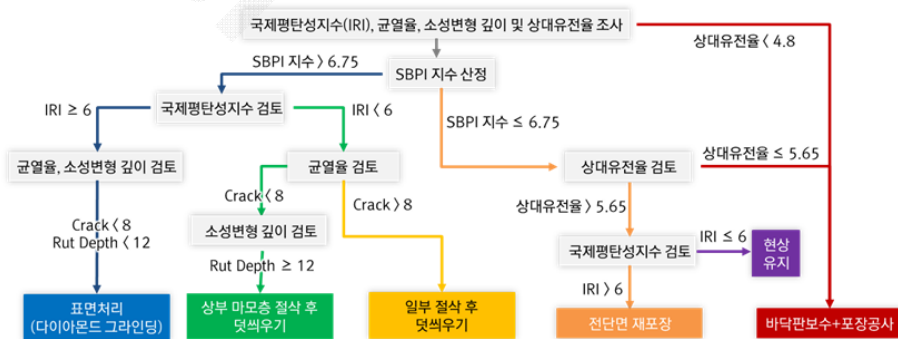
셋째, SBPI 지수가 6.75 이하이고 상대유전율이 5.65 이상이며, IRI가 6m/km를 초과하는 경우 전단면 재포장을 실시한다.

넷째, SBPI 지수가 6.75 이상이고 IRI가 6m/km 이하이며, 균열률이 8% 이상인 경우 일부 절삭 후 덧씌우기(4cm<H<8cm)를 실시한다.

다섯째, SBPI 지수가 6.75 이상이고 IRI가 6m/km 이하이며, 균열률이 8% 미만, 소성변형 12mm 이상인 경우, 상부 마모층(4cm)의 절삭 후 덧씌우기를 실시한다.

여섯째, SBPI 지수가 6.75 이상이고, 균열률과 소성변형 크기가 각각 8% 및 12mm 미만이며, IRI가 6m/km 이상일 경우 표면의 평탄성 처리를 위해 다이아몬드 그라인딩을 실시하도록 한다.

이러한 교면포장의 유지관리 공법을 적용한 시나리오는 그림 5-13과 같다.



[그림 5-13] 서울형 교면포장 유지공법 선정 시나리오

3-3. 구조물 포장 유지관리 의사결정방안 도출

PMS는 크게 네트워크 레벨 PMS와 프로젝트 레벨 PMS로 구분한다. 네트워크 레벨 PMS는 전체 도로망에 대한 포장 조사와 포장상태 분석, 공용성 예측을 통한 유지보수 우선순위 결정 등의 요소로 구성된다. 서울시는 토공부 도로관리를 위하여 SPI 지수를 활용하여 네트워크 레벨 PMS를 운영하고 있다. 앞서 언급한 바와 같이 균열률, 소성변형 깊이, 국제평탄성지수 3가지 인자를 활용하여 SPI를 산정한다. 또한, 서울시 토공부 도로관리를 위한 프로젝트 레벨 PMS의 경우, 보수 선정구간에 대하여 포장의 처짐량 및 지지력 측정을 통하여 포장의 구조적 상태를 평가하고 있으며, 최종적으로 네트워크 레벨 및 프로젝트 레벨 PMS의 평가 결과와 보수공법 결정 기준을 이용하여 보수구간의 최적 보수공법을 결정하고 있다.

토공부와 같이 구조물 포장도 네트워크 레벨 PMS 운영을 위해 균열률, 소성변형 깊이, 국제평탄성지수를 활용하여 포장상태를 평가하여야 한다. 다만, 구조물 포장 형식에 따라 상대유전을 활용법을 달리하여 유지관리 의사결정방안이 필요하다는 결론을 도출하였다. 본 연구에서 제시하는 구조물 포장 형식(교면포장, 터널포장)에 따른 맞춤형 유지관리 의사결정방안은 표 5-7과 같다.

[표 5-7] 구조물 포장 형식(교면포장, 터널포장)에 따른 맞춤형 유지관리 의사결정방안

구조물 포장 형식	바닥판 형식	유지관리 의사결정방안	활용지수
교면포장	콘크리트	1안) 프로젝트 레벨 GPR(상대유전을 측정) 운영	보정 SPI+열화도지수
		2안) 네트워크 레벨 GPR(상대유전을 측정) 운영	SBPI
	강	3안) 토공부 PMS 관리기준(SPI) 수정 후 사용	보정 SPI
터널포장	-	4안) 토공부 PMS 관리기준(SPI) 사용(터널포장)	SPI

표 5-7의 4가지 방안 모두 균열률, 소성변형 깊이, 국제평탄성지수를 활용한 네트워크 레벨 PMS 운영을 바탕으로 상대유전을 적용 여부와 수준(프로젝트 레벨 또는 네트워크 레벨)에 따라 구조물 포장 형식에 따른 맞춤형 유지관리 의사결정방안을 달리하였다.

콘크리트 바닥판이 있는 교면포장은 열화 손상 관리가 필수적이며 상대유전을(GPR 조사)을 활용한 관리가 가장 합리적인 유지관리 방안이다. 다만, GPR 운영 수준(1안 : 프로젝트 레벨, 2안 : 네트워크 레벨)에 대한 검토가 필요하다. 1안과 같이 프로젝트 레벨 운영을 통해 GPR 방법의 정확성을 높이는 동시에 장기 데이터 축적을 통해 SBPI를 개선해나가며 기준 적용 여부와 운영 수준을 결정하여야 한다.

강 바닥판이 있는 교면포장은 열화 손상 관리가 불필요하므로 SPI와 같이 균열률, 소성변형 깊이, 국제평탄성지수를 활용한 네트워크 레벨 PMS 운영이 적절하다. 다만, 토공부와 구조물 포장의 특성이 상이하므로 장기데이터 축적 후 강 바닥판 교면포장에 적합하도록 3안과 같이 SPI 지수를 수정하여 적용하는 것이 가장 합리적인 유지관리 방안이다.

터널포장은 열화 우려가 없으며 토공부 SPI를 활용한 PMS 분석 결과 토공부 포장 및 교면포장과 비교하여 포장의 내구연한이 가장 우수한 것으로 분석되었다. 그러므로 터널포장은 별도의 유지관리 기준을 개발하기보다 토공부 SPI를 적용하는 것이 가장 합리적인 유지관리 방안으로 판단하였다.

위의 4가지 유지관리 방안은 공통적으로 장기적인 관점의 접근방법이 필요하다. 데이터가 누적될수록 보다 정확한 구조물 포장의 공용성능 분석이 가능하다. 이를 통해 구조물 포장의 관리지수 고도화를 통해 더 합리적이고 체계적인 관리가 가능하다. 그러나 조사분석을 위해 투입되는 인력과 예산은 한계가 있기에 적절한 조사 주기, 방법 등을 후속 연구를 통해 결정해나가야 한다.

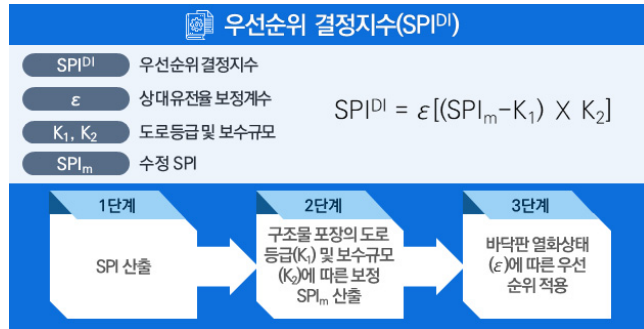
4. 구조물 포장 관리방안 제언

본 연구에서는 교량 등 구조물 포장에 영향을 미치는 요소에 대하여 조사 및 평가를 수행하였으며, 시간에 따른 구조물 포장의 손상모형과 SPI 지수의 변화를 추정할 수 있는 모형을 개발하였다. 또한, 교면포장 바닥판 상대유전율을 고려하여 열화도를 함께 평가할 수 있도록 SBPI 모형을 개발하였다. 이를 활용하여 손상 정도와 열화도에 따른 유지관리 기법을 선정하여 구조물 포장 유지보수 예산을 추정할 수 있는 모형을 개발하였다.

그러나 본 연구에서 개발한 모형은 서울시에서 2000년대 초반부터 이미 적극적으로 활용되고 있는 도로포장상태 평가 및 유지보수 기준인 SPI 지수와 별도로 구조물 포장 유지관리 기준을 산정해서 활용해야 한다는 실무적 한계가 있다. 따라서 본 연구에서 개발한 모형은 현재 상태를 평가하고 관리하기 위함보다는 전체 네트워크 수준의 구조물 포장 유지관리 차원에서 적용하고자 한다. 또한 시간의 경과에 따라 서울시도 상의 전반적인 구조물 포장 상태변화 추정과 대응 유지보수에 따른 소요예산 추정에 활용될 수 있도록 제시하고자 한다.

본 연구에서는 구조물 포장의 실제 유지보수 시행 기준은 SPI 지수를 활용하고, 구조물 포장의 열화상태를 추정하기 위해 상대유전율지수(DI)를 별도 적용하는 것이 효율적일 것으로 판단하였다.

우선, 보수 우선순위 선정을 위해 구조물 포장의 현재 상태는 SPI 지수를 활용하여 평가하고, 바닥판 상태 등을 고려하여 평가 결과와 함께 영향요소로서 보정계수를 적용하는 방안을 제시할 수 있다. 일반적으로 토공부의 보수 대상구간 선정은 포장상태와 시공성을 고려하여 일정 규모 이상의 보수구간을 결정하는 것이 중요하다. 서울시 포장유지관리시스템(PMS)에 따라 보수 대상구간이 선정되면, 각 보수 대상구간에 대하여 보수 우선순위를 결정해야 한다. 보수 우선순위 선정 시 가장 기본이 되는 것은 포장상태가 불량한 구간부터 우선적으로 보수하는 것이지만 교량 등 구조물 도로포장의 중요도와 교통량 및 정책적인 측면을 고려할 때 포장상태와 시공성만을 고려한 보수 우선순위 결정은 바람직하지 않다. 특히 구조물 포장의 경우는 바닥판의 열화상태가 포장의 상태에도 영향을 주지만, 구조물의 안전과도 밀접한 관계가 있기 때문에 포장상태 외의 열화상태도 함께 고려하여야 한다. 따라서 우선순위 결정은 관리자가 예산의 효율적인 사용을 위한 의사결정에 상당히 중요한 부분이라 할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 기존 SPI 지수를 기초로 도로의 기능(포장특성)과 보수연장에 따라 보수 우선순위를 차등 적용하되(보정 SPI), 구조물 바닥판 슬래브의 열화상태(열화도지수)를 고려하여 우선순위 산정방식을 개선하는 방안을 그림 5-14와 같이 제안하고자 하였다.



[그림 5-14] 보수 우선순위 산정방식 예시

다만 이에 대한 영향정도를 정량화하기 위해서는 구조물 포장과 바닥판의 열화상태에 대한 상관관계 연구를 추가적으로 수행할 필요가 있다.

다음은 바닥판 상태 추가 조사 후 보수공법 결정에만 활용하는 방안을 제시할 수 있다. 로드스캐너에 의해 조사된 구조물 포장상태 결과에 다음의 예시와 같이 일정 조건에 해당하는 경우 바닥판 상태에 대한 추가 조사를 수행하고 이에 대한 결과를 반영하여 보수공법을 제안하는 방법이다.

- 구조물 포장상태 조건
 - 균열율 17% 이상, 소성변형 18mm 이상, 평탄성 7.3m/km 이상
 - 조기파손구간(보수 후 3년 내 재보수요청 구간)
- 추가 조사내용 : GPR 바닥판 열화상태 조사 및 이상구간에 대한 코어채취 확인

한편, 앞서 개발된 SBPI 모형은 장래의 유지보수에 필요한 소요예산과 유지보수 후 구조물 포장의 전반적인 상태(포장상태 및 바닥판 열화상태)를 예측하기 위해 활용될 수 있다. 특히 선정된 보수 대상구간에 대하여 해당하는 주요 파손영향 요소에 따라 대응 유지보수 공법 적용 예산을 투입 관리하는 방안에는 다음과 같은 2가지를 고려해야 한다.

- 일정 목표기간 동안 관리자 측면의 관리수준을 정하여 관리하는 경우
- 동일 기간 대비 관리수준 대신 관리 예산이 결정되어있는 경우

전자의 경우는 목표연도까지 유지보수 목표 수준을 만족하는 최적의 예산 투입방안을 산정하기 위해, 보수 대상구간에 대해 다양한 보수공법 적용 시나리오를 개발하는 경우이다. 즉, 최적의 투자(최대 유지보수 면적과 이에 대한 최적 소요예산)를 통해 최대의 효과(목표 SPI 지수 확보)를 도출하는 방안을 수립하는 것이지만, 현실을 감안한 장기적인 예산산정이 필요하므로, 후자의 경우를 반드시 함께 고려하여야 한다.

따라서 한정된 예산으로 최대의 효과를 얻기 위해서는 다양한 연간 투입예산별 대응 유지관리 시나리오를 개발하여야 한다. 보수 대상구간 중 SPI 지수가 가장 낮은 구간부터 예산을 투입하는 방안이 좋을지, 또는 일정구간에서 SPI 지수가 낮은 곳보다도 예방적 유지보수공법 등을 통해 최소의 비용으로 최대 면적을 보수하도록 하여 구조물 포장의 시간 경과에 따른 노후 파손을 지연시켜 예산투자에 대한 시간적 여유를 확보할 수 있도록 하는 방안이 좋을지 결정해야 한다. 결론적으로는 구조물 포장의 공용수명 저하에 대한 예측모형이 최우선적으로 필요하다.

참고문헌

- 「시설물의 안전관리에 관한 특별법」
- 「시설물의 안전관리에 관한 특별법 시행령」
- 「시설물의 안전관리에 관한 특별법 시행규칙」
- 「시설물의 안전점검 및 정밀안전진단 지침」
- 「시설물의 안전 및 유지관리 실시 등에 관한 지침」
- 건설교통부, 2005, 터널 내 포장설계 지침
- 건설교통부, 2007, 교면포장 품질관리 매뉴얼
- 국토해양부, 2011, 교면포장 설계 및 시공 잠정지침
- 국토해양부, 2011, SMA 포장 생산 및 시공 지침
- 국토교통부, 2013, 도로포장 유지보수 실무편람
- 국토교통부, 2015, 아스팔트 혼합물의 생산 및 시공지침
- 국토교통부, 2015, 장수명 도로포장 활성화 방안 연구
- 국토교통부, 2016, 도시지역 지하도로 설계지침
- 국토교통부, 2016, 도로공사 표준시방서
- 국토교통부, 2016, 국도건설공사 설계실무 요령
- 국토교통부, 2016, 콘크리트 표준 시방서
- 국토교통부, 2017, 아스팔트 콘크리트 포장 시공지침
- 국토교통부, 2018, 제3종 시설물 안전등급 평가 매뉴얼
- 국토교통부, 2019, 시설물 안전 및 유지관리 실시 세부지침
- 서울시설공단, 2016, 자동차전용도로 교면포장 시공 품질관리기준 개선에 관한 기획연구
- 서울특별시, 2018, 서울특별시 도로포장 유지관리 매뉴얼

- 서울특별시, 2018, 서울시도 포장도로 조사 및 분석
- 서울특별시, 2018, 서울시 도로포장 유지관리 기본계획
- 서울특별시, 2018, 도로포장 유지관리 기본계획 추진 시행방안
- 서울특별시, 2018, 도로기반시설 빅데이터 통합관리 시스템 개발
- 서울특별시, 2018, 서울형 최적 유지보수공법 결정체계
- 서울특별시, 2018, 한강교량 일상유지보수 백서
- 서울특별시, 2019, 도로시설물 통계 현행화 결과보고
- 서울특별시, 서울 열린데이터 광장, 서울시 도로시설물 통계 홈페이지, <https://data.seoul.go.kr>
- 한국도로공사, 1999, 보수·보강 공법의 효과 및 개선 연구
- 한국도로공사, 2009, 콘크리트 바닥판의 내구수명 증진방안 연구
- 한국도로공사, 2014, 교면포장 및 바닥판 상태평가 방법과 보수보강공법 적용기준 개선 연구
- 한국도로공사, 2015, 교량 내구수명 100년을 위한 중장기 유지관리전략 개발
- AASHTO(American Association of State Highway and Transportation Officials), 2010, Bridge Element Inspection Guide Manual 1st Edition
- Alongi, A. J., G.G. Clemena, G. G., Cady, P. D., 1992, Condition Evaluation of Concrete Bridges Relative to Reinforcement Corrosion, Volume 3: Method of Evaluating the Condition of Asphalt-Covered Decks, Report SHRP-S-325
- ASTM(American Society for Testing and Materials), 2015, Standard Test Method for Evaluating Asphalt-Covered Concrete Bridge Decks Using Ground Penetrating Radar, ASTM D6087-08
- Benedetto, A., & Pajewski, L., 2015, Civil Engineering Application of Ground Penetrating Radar. Springer International
- Broomfield, J.P., 2007, Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation, and Repair, E & FN Spon, London, 1-15
- EAPA(European Asphalt Pavement Association), 2008, Asphalt Pavements in Tunnels
- EAPA(European Asphalt Pavement Association), 2013, Asphalt Pavements on Bridge Decks
- FHWA(Federal Highway Administration), 1979, Recording and coding guide for structure inventory and appraisal of the nation's bridges, U.S.Department of Transportation
- FHWA(Federal Highway Administration), 2015, Bridge Maintenance Reference Manual
- FHWA(Federal Highway Administration), 2015, Tunnel Operations, Maintenance, Inspection, and Evaluation(TOMIE) Manual

- FVS(Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr), 2009, Projektierungsrichtlinien – Bauliche Gestaltung – Tunnel Innenausbau, Bundesministerium für Verkehr, FVS 09.01.23
- John M. Reynolds, 1997, Introduction to Applied and Environmental Geophysics
- Kim, K. H., Nam, M. S., Hwang, H. H., and Ann, K. Y., 2020, Prediction of Remaining Life for Bridge Decks Considering Deterioration Factors and Propose of Prioritization Process for Bridge Deck Maintenance, *Substantiality*, 12(24), 10625
- Krysiński, L., & Sudyka, J. 2013, GPR abilities in investigation of the pavement transversal cracks. *Journal of Applied Geophysics*, 27–36
- L. Al-Qadi, I., Leng, Z., & Larkin, A., 2011, In-Place Hot Mix Asphalt Density Estimation Using Ground Penetrating Radar
- Leng, Z., 2011, Prediction of In-Situ Asphalt Mixture Density Using Ground Penetrating Radar: Theoretical Development and Field Verification
- NCHRP(National Cooperative Highway Research Program), 2010, Development of Guidelines for Rehabilitation of Existing Highway and Rail Transit Tunnels, NCHRP HR 20-07/TASK 276
- NSW(New South Wales Government), 2018, Roads and Maritime Supplement to Austroads Guide to Pavement Technology, RMS 11.050
- Statens Vegvesen, 2004, Road tunnels : Standard [Manual 021E]
- TRB(Transportation Research Board), 2013, Nondestructive Testing to Identify Concrete Bridge Deck Deterioration, SHRP 2 REPORT S2-R06A-RR-1
- Utsi, E. C., 2017, Ground Penetrating Radar. Butterworth-Heinemann
- Zhao, S., Shangguan, P., & L.Al-Qadi, I., 2015, Application of regularized deconvolution technique for predicting pavement thin layer thicknesses from ground-penetrating radar data. *NDT&E International*, 1–7
- Zhao, S., & Al-Qadi, I. L., 2016, Development of an analytic approach utilizing the extended common midpoint method to estimate asphalt pavement with 3-D ground-penetrating radar, *NDT & E International*, 78, 29–36
- Zhao, S., & L. Al-Qadi, I., 2016, Development of an analytic approach utilizing the extended common midpoint method to estimate asphalt pavement with 3-D ground-penetrating radar. *NDT & E International*, 29–36
- Zhao, S., & L. Al-Qadi, I., 2019, Super-Resolution of 3-D GPR Signals to Estimate Thin Asphalt Overlay Thickness Using the XCMP Method. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 893–901

Abstract

Development of Maintenance Standards for Pavement of Structures

Jinwook Lee · Hanjin Oh · Keesei Lee ·
Junyong Park · Jonguk Kim · Gyeonghoon Ma

This study was conducted to establish systematic and efficient maintenance standards for pavements constructed in various types of structures (bridges, overpasses, covered structures, tunnels, and underpasses) in Seoul. It was carried out to derive a condition evaluation plan through the analysis of the structure pavement management status and standards, and on-site investigation, and to present a maintenance decision-tree system that considers the condition characteristics of the structure pavement.

The pavement of general roads in Seoul is being maintained and repaired using systematic technology such as Pavement Management System (PMS). The pavement of a structure with a concrete deck must be managed so that there is no abnormality in drainage and waterproofing of the pavement because it is easy to cause deterioration damage due to leakage, penetration of chloride-based snow removal agents, freezing and thawing, etc. However, there is a need for a management system and evaluation method that can take into account the condition of the waterproof layer and the deck for the pavement of the structure, but it is not present. In order to select the current maintenance section, the paving of the structure is qualitatively performed only through visual inspection. Therefore, it is necessary to introduce a pavement management system that can reflect the type and characteristics of the structure.

In the last 10 years, the number of new structure pavements in Seoul has gradually decreased. The pavement of old structures over 31 years continues to increase, so it is necessary to develop effective maintenance standards.

Currently, the number of structures that have been in use for more than 31 years is 299, indicating that 33.7% of the structures are deteriorating. It is estimated that the rate of deterioration of structures in Seoul will continue to increase as the age increases, reaching 61% of the total in 2028 and 85% in 2038.

Worldwide, other types of structures other than bridges have been surveyed to have no pavement management standards. Therefore, the pavement of the structure is managed according to the general road pavement standard. In Korea, general pavement management standards are applied or management is mainly performed by visual inspection. Therefore, it is necessary to develop a separate maintenance standard that can take into account the structural and environmental characteristics of the structure pavement, and through this, it is necessary to improve the fundamental quality and extend the life of the structure pavement in Seoul.

The structure pavement was classified in consideration of the type of deck and the cross-section type. Bridges, overpasses, covered structures, and underpasses were classified as “bridge deck pavement”. Tunnels were classified as ‘tunnel pavement’. In Seoul, 94.4% of bridges are concrete decks and only 5.6% of steel decks are surveyed. On the other hand, it was confirmed that information on the current pavement material, waterproof layer construction method, and deck type has not been established for the underpass and tunnel pavement. Therefore, in order to systematically maintain the pavement of structures in the future, it is necessary to establish a big data analysis system to ensure continuous data acquisition for underpass pavements and tunnel pavements.

The pavement condition was evaluated by analyzing surface distresses (SD), rut depth (RD), and international roughness index (IRI) data in 2018 and 2019 on the pavement of structures managed by Seoul. Through this, the condition index (SPI; Seoul Pavement Index) of the pavement of the structure and the pavement of the general road was compared. The SPI for the pavement of the

structure was calculated in the same way as for a general road. Therefore, it is more reasonable to compare and analyze the trends of each change rather than a direct numerical comparative analysis. In the case of bridges, underpasses, and covered structures, the SPI was calculated relatively higher than that of general roads, but this does not take into account the condition of the deck, so additional analysis is required.

The tunnel pavement was found to have better performance than the adjacent general road pavement, so it was suggested to apply the general road management standard.

Underpass pavement was found to have better performance than adjacent general road pavement, but it was classified as 'bridge deck pavement' because the deck was made of concrete and the damage type was similar to that of bridge deck pavement.

The deterioration of the structure deck causes damage to the pavement surface layer, but it is very difficult to determine whether the deck is deteriorated or damaged in a previously overlay with the existing deck investigation method. In this study, the types and characteristics of non-destructive testing methods for effective deck deterioration damage testing were investigated. In addition, after using the 3D Ground Penetrating Radar (GPR) method, the chloride content test, and the light falling weight deflection) LFWD test among the deterioration damage test methods, the effectiveness was analyzed. In order to detect deterioration damage to the concrete deck of the bridge, GPR investigation is judged as the most effective method. In this study, the applicability of the method of estimating the deterioration damage of the concrete deck was analyzed by deriving the relative dielectric constant of the upper part of the deck through GPR.

The pavement condition of the bridge was evaluated using SD, RD, and IRI values. In the case of deterioration damage, the relative dielectric constant was derived by analyzing the GPR data. Deterioration damage was predicted when the relative dielectric constant of the concrete deck was 5 or less. After milling the pavement layer, it was difficult to match the deterioration damage due to insufficient road surface finish of the deck, but deterioration damage was

found in some sections, such as the Apgujeong-overpass, and the effectiveness of the GPR analysis result was confirmed.

As a result of GPR analysis, it was confirmed that the accuracy of the section in which the concrete deck is in good condition is very high. However, in some sections where deterioration damage occurred, the area of deterioration damage analyzed by road surface image was measured to be very lower than the result predicted by GPR. This was found to be an error due to the execution of the surface treatment process using a water jet or drilling before collecting the road surface image. Although the effect of the GPR analysis method could be confirmed as a deterioration damage prediction method, efforts such as increasing the accuracy of the prediction method through various case analysis are required to apply this.

By introducing pavement condition index (SD, RD, and IRI) and concrete deck deterioration degree (relative dielectric constant), we proposed a structure pavement condition evaluation index (SBPI) that can evaluate the condition of the bridge surface pavement. In addition, a decision-making method (proposal) for maintenance and management of the pavement using SBPI was proposed.

This study proposed four maintenance decision-making methods for pavement by structure type. Based on the network level PMS operation using SD, RD, and IRI as in general road PMS standards, four customizations according to the structure type depending on whether or not the relative dielectric constant is applied and the level (project level or network level) a maintenance decision-making plan was proposed.

Bridge pavement with concrete decks requires management of deterioration damage, so management using relative dielectric constant is the most rational maintenance method. However, it is necessary to review the GPR operation level (Plan 1: Project level, Plan 2: Network level). As shown in Plan 1, the accuracy of the GPR method should be improved through project-level operation, and SBPI should be improved through long-term data accumulation, and the application of the standard and operation level should be decided.

For the bridge pavement with a steel deck, it is proposed as a third proposal to modify the SPI of the existing general road and apply it. As bridge pavement

with steel decks does not require deterioration damage management, it is appropriate to operate network-level PMS using SD, RD and IRI like as SPI. However, since the characteristics of general road pavement and structure pavement are different, it is the most reasonable maintenance method to use the SPI index to be suitable for bridge pavement of steel deck.

Finally, in the fourth proposal, tunnel pavement uses the same SPI as general road pavement. Tunnel pavement has no fear of deterioration, and PMS analysis shows that the pavement has the best durability compared to general road pavement and bridge deck pavement. Therefore, it was determined that the SPI of the general road pavement was the most reasonable maintenance method for the tunnel pavement, rather than developing a separate maintenance standard.

The above proposals of four maintenance plans generally require a long-term approach. The more data is accumulated, the more accurate the analysis of the common performance of the structure pavement is possible. Through this, more rational and systematic management is possible through the advancement of the management index of the structure pavement.

구조물 포장 유지관리 기준 개발

2021-SR-02

발행인 고인석

발행일 2021년 03월 20일

발행처 서울기술연구원 / www.sit.re.kr

ISBN 979-11-90734-65-3 93530 비매품

03909 서울특별시 마포구 매봉산로 37(상암동) DMC산학협력센터 7층

이 출판물의 저작권은 서울기술연구원에 속합니다.

Development of Maintenance Standards for Pavement of Structures

Jinwook Lee Hanjin Oh Keesei Lee Junyong Park Jonguk Kim Gyeonghoon Ma

2021-SR-02

비매품



9 791190 734653
ISBN 979-11-90734-65-3