



아스팔트포장 잔존수명 예측 사례 연구

A Case Study for the Estimation of Remaining Lives of Asphalt Pavements

이 정 훈*
Lee, Jung Hun

이 현 종**
Lee, Hyun Jong

박 희 문***
Park, Hee Mun

김 인 태****
Kim, In Tai

Abstract

This study presents a case study of condition evaluation of various asphalt pavement sections to estimate performance lives. The pavement surface conditions including cracking and rutting are first evaluated using a automatic pavement analyzer, ARAN. HPCI(Highway Pavement Condition Index) values are estimated using the pavement surface distress data. It is observed from the pavement distress survey that the major distress type of the sections is top-down cracking. The modulus value of each pavement layer is back-calculated from the deflection data obtained from a FWD(Falling Weight Deflectometer) and compared with the laboratory measured dynamic modulus values. Remaining lives of the various pavement sections are estimated based on a mechanistic-empirical approach and AASHTO 1993 design guide. The structural capacities of the all pavement sections based on the two approaches are strong enough to maintain the pavement sections for the rest of design life. Since the major distress type is top-down cracking, the remaining lives of the pavement sections are estimated based on HPCI and existing performance database of highway pavements. To evaluate the causes of premature pavement distress, various material properties, such as air void, asphalt binder content, aggregate gradation, dynamic modulus and fatigue resistance, are measured from the field cores. It is impossible to accurately estimate the binder contents of field samples using the ignition method. It is concluded from the laboratory tests that the premature top down cracking is mainly due to insufficient compaction and inadequate aggregate gradation.

Keywords : ARAN, HPCI, FWD, remaining life, top-down cracking

요 지

본 연구에서는 다양한 아스팔트포장의 공용수명을 예측하기 위한 포장상태 평가의 사례를 제시하였다. ARAN(Automatic Road Analyzer)을 이용하여 균열 및 소성변형 등과 같은 포장의 표면파손 현황에 대한 조사를 실시하고 HPCI(Highway Pavement Condition Index)를 산정하였다. 포장 파손현황을 분석한 결과 가장 빈번한 형태의 파손은 Top-down 균열로 나타났다. FWD(Falling Weight Deflectometer)로부터 측정된 처짐데이터를 사용하여 포장의 탄성계수를 역산정하여 실내에서 구한 동탄성계수와 비교하였다. 그 결과를 역학적-경험적 방법과 AASHTO 93 설계법에 적용하여 포장의 지지력을 평가하였으며, 지지력은 설계수명 동안 충분한 것으로 평가되었다. 현재 포장의 주된 파손은 표층부의 Top-down 균열이므로 포장상태 평가로 계산된 HPCI와 기존 공용성 자료에 근거하여 포장의 잔존수명을 예측하였다. 포장상태 평가와 함께 포장의 조기파손 원인분석을 위해 대상구간의 코어 시편을 채취하여 공극률, 입도, 아스팔트 함량, 피로저항성 등의 물성을 측정하였다. 바인더를 태워 아스팔트 함량을 측정하는 방법은 현장시료의 경우 부정확한 것으로 나타났다. 실내시험결과 조기 균열이 발생한 가장 큰 이유는 다짐 부족과 골재의 입도 부정확 등 시공시의 품질관리가 미흡한 것이 주된 원인으로 나타났다.

핵심용어 : ARAN, HPCI, FWD, 잔존수명, 표면균열

* 정회원 · Univ. of Nebraska Lincoln Dept. of Civil Eng. Post-doc. · 공학박사 · 402-472-8068(E-mail:jlee11@unl.edu)
 ** 정회원 · 세종대학교 토목환경공학과 부교수 · 공학박사 · 02-3408-3812(E-mail:hlee@sejong.ac.kr)
 *** 정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구부 선임연구원 · 공학박사 · 031-910-0323(E-mail:hpark@kict.re.kr)
 **** 정회원 · 명지대학교 교통공학과 조교수 · 공학박사 · 031-330-6505(E-mail: kit1998@mju.ac.kr)



1. 서론

포장도로는 교통하중과 기후조건에 따라 계속해서 노면상태가 변하고 포장구조체가 노후하게 되어 주행성, 안정성, 쾌적성이 저하되며 결국에는 원활하고 안전한 교통에 지장을 주게 된다. 그러나 포장상태를 정기적으로 평가하여 적절한 시기에 보수를 실시한다면 포장의 공용성을 향상시킬 뿐만 아니라 도로의 수명을 연장시킬 수 있다. 따라서 포장도로의 유지관리를 효율적이고 과학적으로 수행하는 것은 도로를 신설하는 것 못지않게 중요한 일이다.

현재 국내 도로포장은 과거 경험에 의해 주관적으로 유지보수가 계획되고 예산이 분배되고 있으며 객관적인 자료가 결여된 채 유지보수가 계획되고 있다. 최근에는 전산처리와 조사장비의 활발한 개발에 따라 과학적이고 체계적인 포장의 조사와 평가가 가능하게 되어 포장상태의 객관적인 평가와 보수주기를 합리적으로 산정할 수 있게 되었다.

그림 1은 과거 10년 이상 국도의 일반 아스팔트 포장의 공용성 자료를 수집하여 분석한 결과(임영환, 2003)로서 그림에서 보는 바와 같이 신설포장일 경우 평균 수명은 약 5년 이상으로 나타나고 포장이 노후화 될수록 보수주기가 짧아지는 특성이 있다. 이는 전형적인 보수주기를 나타내는 것으로서 대부분 포장의 보수주기는 일률적으로 하나의 포장공법에 대해 동일 년 수의 보수주기가 책정되어 있어 이에 대하여 검토할 필요가 있다.

따라서, 본 연구에서는 포장조사장비(표면조사, 구조진단)를 이용해 현재의 포장상태를 평가하고 실내시험 및 구조해석을 통해 각 공법에 대한 보다 정확한 잔존수명을 예측해 현재 계획된 각 포장공법의 보수주기에 대한 재검토 및 합리적인 개선방안을 제시하였다. 또한 일반포장의 일부구간에서 균열 등과 같은 조기파손이 발생하는 특이구간이 존재하고 있어 이 구간에서 포장표면 상태에 대한 육안 조사를 수행하고 유지보수 자료를 바탕으로 상세한 현장조사 및 시험을 통해 파손 원인을 분석하였다.

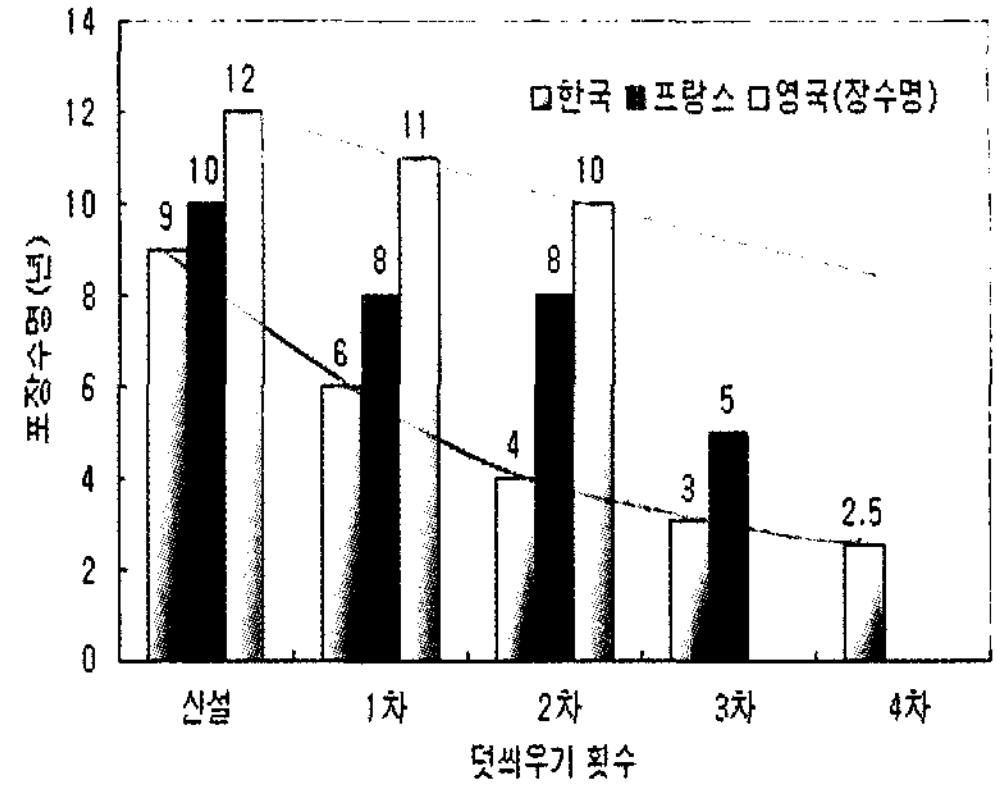


그림 1. 도로포장의 평균 보수주기 비교

표 1. 대상구간의 포장 개요도

Section	Section 1	교면 포장	Section 2	Section 3	Section 4	
연장(km)	7.9	10	10.6	7.3	2.6	
포장종류 (표층)	SMA	SMA/개질	일반	일반	SMA	
포장 두께 (cm)	표층	4	5/7.5	5	5	4
	기층	27		25	21	22

2. 포장상태 평가

2.1 포장 현황

대상구간은 표 1과 같이 2000년 11월에 개통된 후 약 5년이 경과한 현재 도로포장의 노후화가 점점 가속화 하고 있어 경제적인 도로의 유지 및 관리를 위해서는 적절한 포장의 공용성 평가 및 예측이 필수이다.

포장의 총 연장은 28.4km, 차로수는 6~7차로이며 표층은 일반포장과 SMA포장으로 시공되었다. 포장 상태 평가의 용이함을 위해 표층의 종류와 포장의 두께에 따라 표 1과 같이 동질성구간을 구

분하였다. 각 구간의 교량부는 일반포장, SMA포장, 구스+개질아스팔트포장 공법이 구간별로 다양하게 적용되었다. 이처럼 적용된 포장 종류 및 단면두께가 다양하기 때문에 적용된 공법들에 대한 포장의 공용성 분석 및 포장상태를 다각도로 평가할 필요성이 있다.

2.2 ARAN을 이용한 포장상태 평가

포장 노면 파손 정도는 AASHTO 93 가이드에서 나와 있는 바와 같이 포장의 기능적 상태 평가를 위해서는 반드시 필요한 과정이다(AASHTO 93 III-84). 구조적 잔존 수명과 더불어 향후 포장의 잔존 수명과 유지보수 시점 산정에 파손 정보가 사용되리라 사료된다. 본 구간에서는 장기 공용성 자료가 부재하여 포장 파손 자료를 직접 향후 잔존수명 예측에 사용하지 못하고 ARAN을 이용한 포장상태 평가 결과를 대상구간과 구조 및 재료적으로 유사한 도로의 공용자료를 이용하여 포장수명을 예측하고 유지보수 기법 선정에 활용할 수 있도록 하였다.

본 연구에 투입된 그림 2의 ARAN 장비는 노면의 균열과 종방향 평탄성, 소성변형 등을 고속으로 주행하면서 측정할 수 있는 장비이다. 차량에는 소성변형 측정을 위한 Smart Rutbar, 노면영상촬영을 위한 2대의 area scan camera, 종단평탄성 측정을 위한 의 2가지 서브시스템이 장착되어 있으며, 이들 시스템은 차량이동거리 측정기(DMI, Distance Measuring Instrument)와 연동되어 동일한 위치에서 동시에 데이터를 획득할 수 있도록 되어있다. 전방에 영상촬영 카메라가 장착되어 있으며, 최대 조사속도는 80km/h이다(건설교통부, 2006).

본 연구에서는 ARAN을 이용하여 대상 전 구간에 걸쳐 양방향 가장 외측차로(3차로 또는 4차로)의 포장상태를 조사하였다. 전차로에 대한 포장상태를 조사하는 것이 가장 바람직하나 시간과 비용이 많이 소요되므로 각 방향별 중차량이 주로 통행하는 1차로 1개 차로만 조사를 수행하였다. 통행차량은 대부분 승용차와 버스가 주를 이루고 있어

특별히 어떤 특정차로에 교통하중이 집중되고 있지는 않으므로 조사의 편의를 위해 가장 바깥차로를 조사대상으로 선정하였다. ARAN에 의한 노면상태 조사뿐만 아니라 FWD에 의한 지지력 조사, 현장 코어 채취 등 모든 조사는 동일한 차로에 대해 수행되었다.

포장상태 평가를 위한 요소로는 여러 가지 항목이 있으나 포장의 공용성 측면에서 종단 평탄성, 소성변형, 균열 등을 주된 요소로 사용하고 있다. 따라서 본 연구에서는 ARAN을 통해 계측된 결과를 포장상태평가지수의 하나인 HPCI(Highway Pavement Condition Index)로 포장상태평가를 실시하였다. ARAN을 통해 측정된 종단 평탄성, 균열, 소성변형의 결과는 먼저 100m 간격으로 정리하였고, 이를 다시 Section별로 평균값을 산정하였다.



그림 2. 포장상태조사장비 ARAN

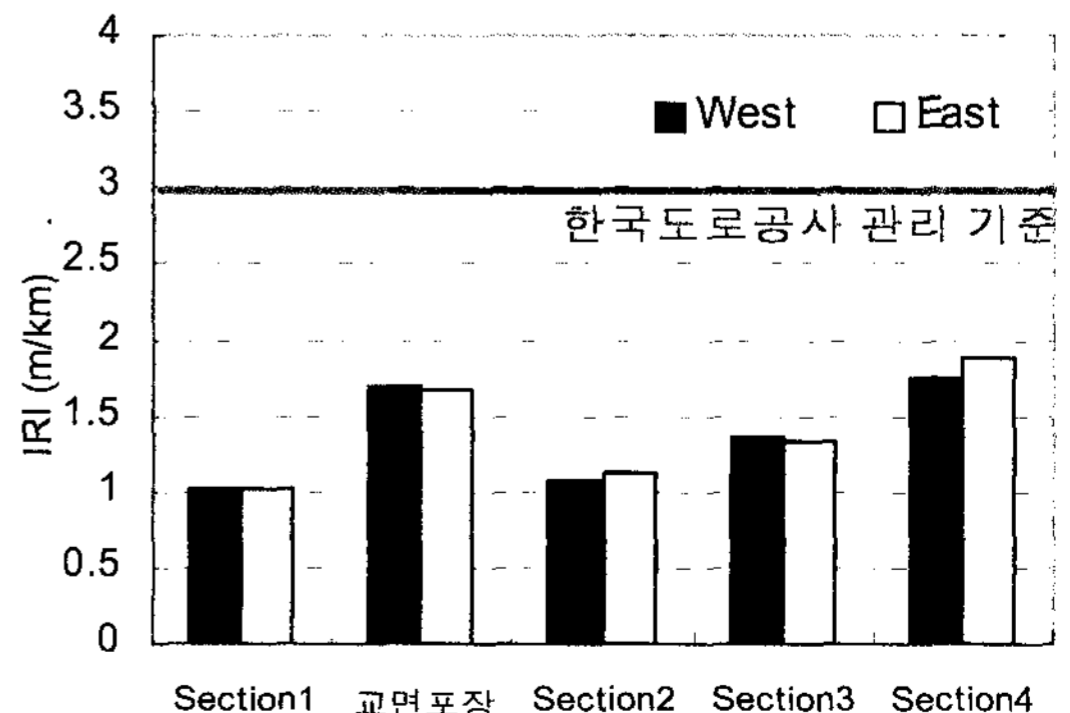


그림 3. Section별 종단평탄성



중에서 IRI(International Roughness Index)가 주로 사용되고 있다. IRI는 1982년 세계은행에 의한 국제도로평탄성연구(IRRE:International Road Roughness Experiment)결과에서 발표되어 1987년 FHWA의 HPMS(Highway Performance Monitoring System)에 표준으로 채택되었다. IRI는 m/km 또는 mm/m의 단위로 포장상태에 따라 0.5~10으로 측정되며 이 수치가 클수록 포장의 종단 평탄성이 불량함을 의미한다.

ARAN을 이용해 산정한 IRI는 그림 3과 같고 현재 대상구간의 포장 평탄성을 평가하기 위해 한국도로공사의 IRI 관리기준인 3.5m/km와 비교하면 모든 Section에서 건전한 상태를 유지하는 것으로 확인되었으며 교량부의 경우에는 토공부에 비해 상대적으로 높은 수치를 보이고 있다. 교량의 경우에는 교량상판의 평탄성이 포장노면의 평탄성에 영향을 미치기 때문에 일반적으로 토공부에 비해 상대적으로 평탄성이 불량하다. Section별 소성변형량을 정리하면 그림 4와 같으며 한국도로공사의 소성변형량 관리기준인 12mm와 비교하면 모든 Section에서 관리기준이하의 수치를 확인하였다. 특히 소성변형은 대표적인 아스팔트 포장의 초기 파손 중의 하나로 공용개시 이후 2~3년 내에 집중적으로 발생하는 것을 감안하면 현재의 포장상태는 양호한 것으로 사료되며 추가적인 소성변형 발생은 미미할 것으로 판단된다. Section별 균열률과 한국도로공사의 균열률 관리기준(10%)을 비교하면 그림 5와 같이 모든 Section에서 관리기준이하의 수치를 나타내어 균열 발생 측면에서 포장상태가 양호함을 알 수 있다. 그러나 이는 현 대상구간에서 시행된 팻칭을 제외한 조사 결과로 실제 Section3의 경우는 균열률이 다소 상승할 것으로 예상된다.

그림 6은 Section별 HPCI와 한국도로공사의 HPCI 기준(3.0)을 비교한 결과이다. 여기서 HPCI는 고속국도에 적용하기 위해 AASHO의 PSI를 기본 모델로 하여 개발한 식이다. HPCI는 식 (1)과 같이 포장의 다양한 파손을 종합하여 하나의 공용성 평가 지수로 나타낸 것으로 고속국도 포장상태

를 정량화하기 위해 다양한 구간에 대한 파손조사와 평가단의 평가에 의해 도출된 모델이다.

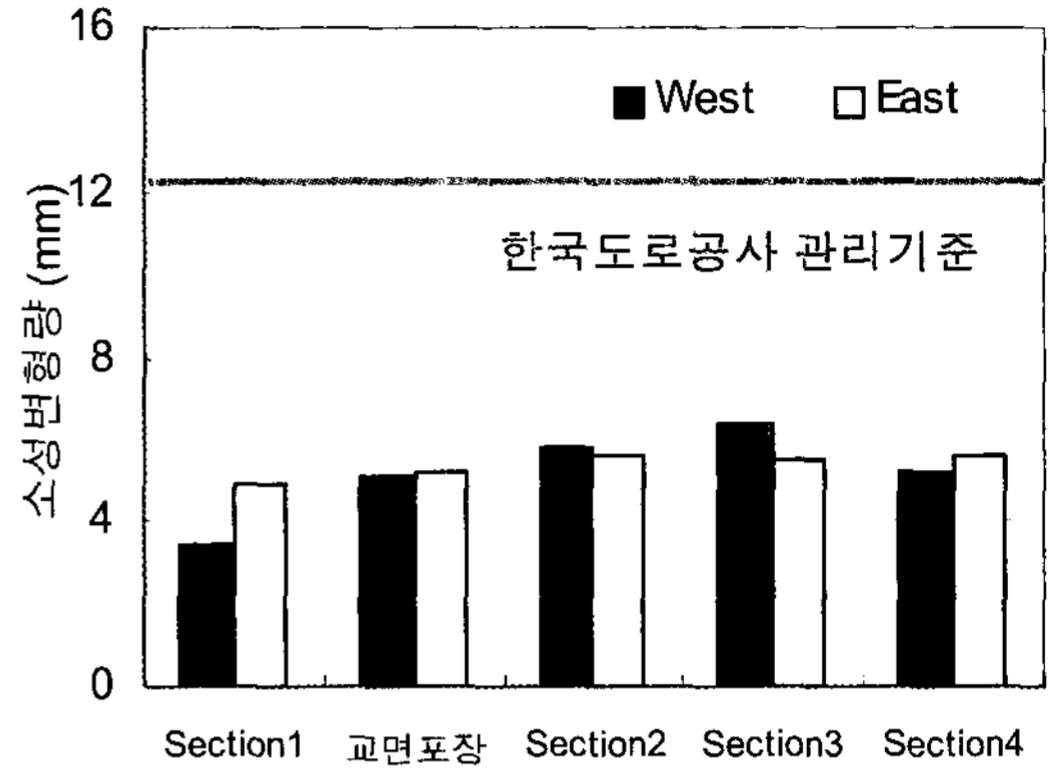


그림 4. Section별 소성변형량

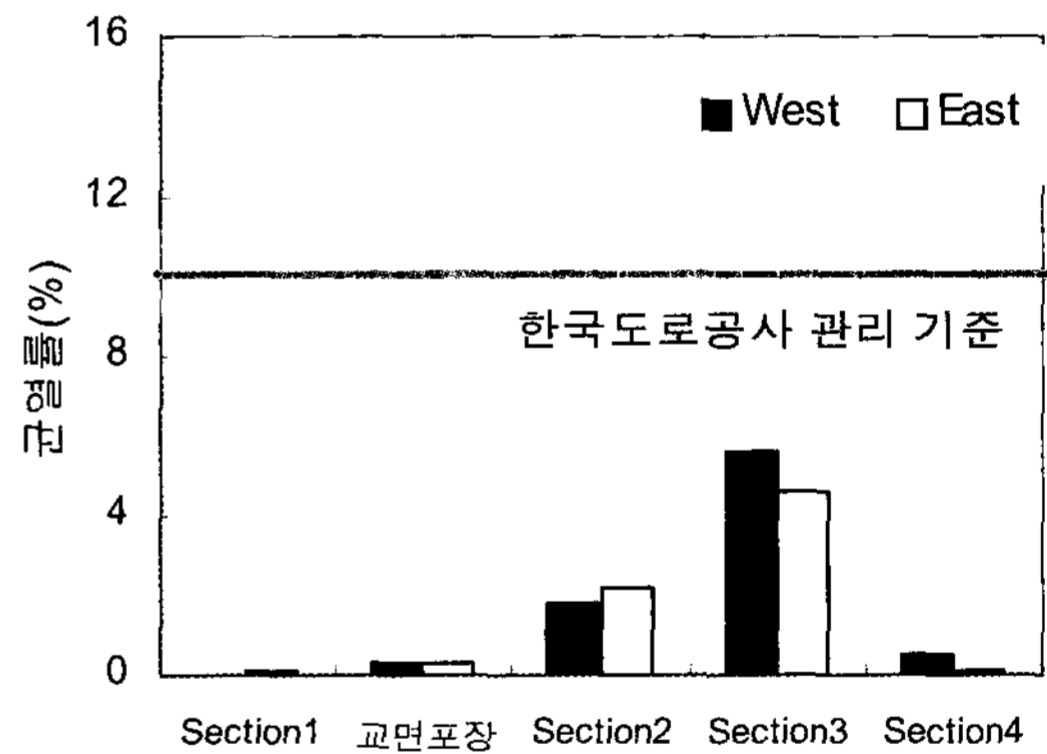


그림 5. Section별 균열률

$$HPCI = 4.564 - 0.348 \times IRI - 0.36 \times RD - 0.01 \sqrt{5(TC + AREA)} \quad (1)$$

여기서, IRI = 종단평탄성지수(m/km)

RD = 소성변형량(cm)

TC = 온도균열량(m/100m)

AREA = 거북등균열 및 팻칭량(m²/100m)

한국도로공사가 제시하는 HPCI 관리기준은 3.0으로 만약 이보다 적은 수치로 평가될 경우 보수



가 필요하다. 본 연구에서 조사된 각 Section의 HPCI는 한국도로공사의 관리기준 이상으로 양호한 것으로 평가되었으나 Section3의 경우 HPCI가 3.0에 근접하여 집중적인 관리 및 보수가 필요한 것으로 판단된다.

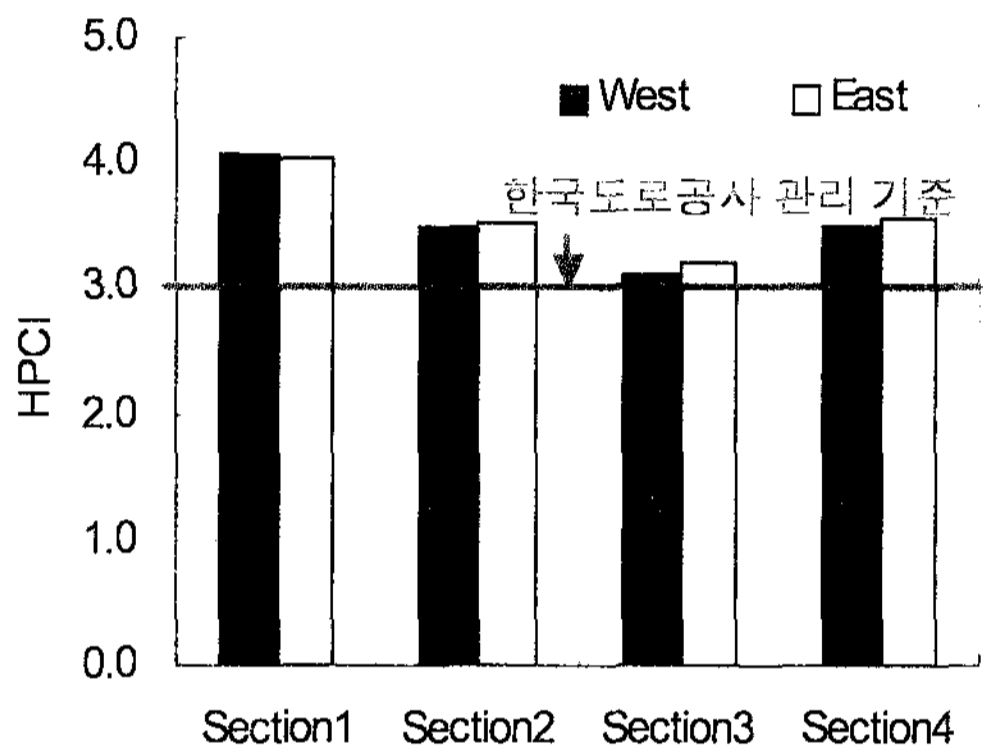


그림 6. Section별 HPCI

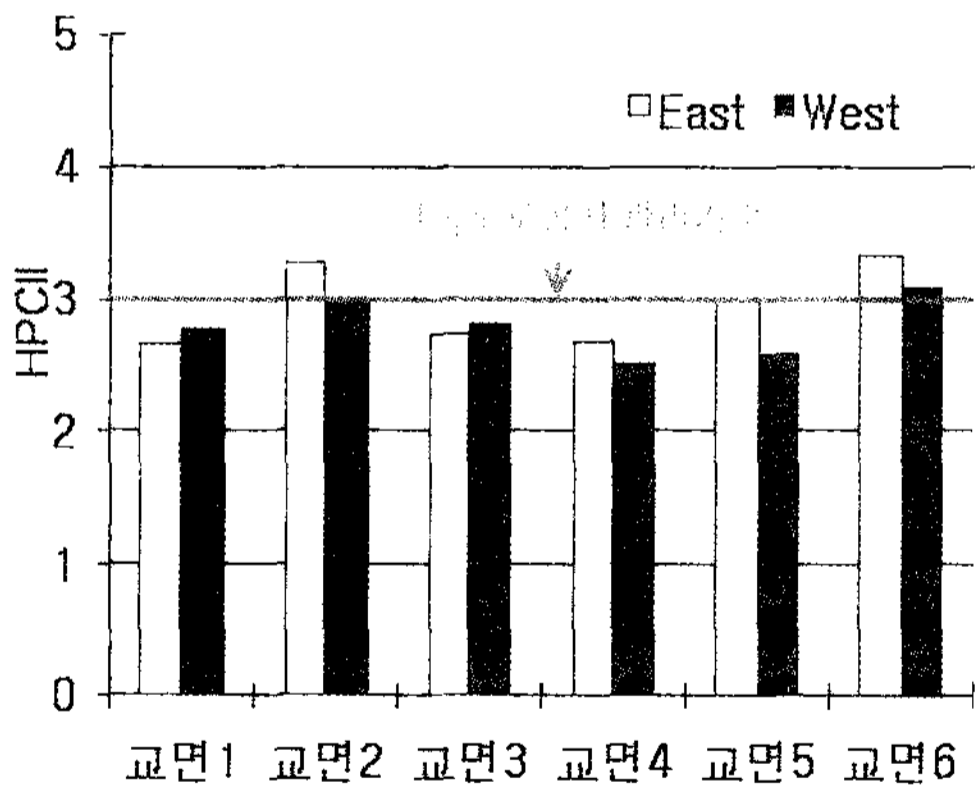


그림 7. 교면포장의 HPCI 비교(Section3)

포장의 파손이 상대적으로 많이 발생한 Section3의 경우 교면포장 또한 조기파손이 발생하였다. Section3 내에 위치한 교면포장의 균열률과 한국도로공사의 균열률 관리기준(10%)을 비교하면 Section3 교면포장의 50%에 해당하는 구간에서 기준치 보다 높은 수치를 나타내어 균열 발생 측면에서 포장의 파손이 많이 진전되었다는 것을 알 수 있다. 또한

이는 현 대상구간에서 시행된 팻칭을 제외한 조사 결과로 실제 Section3 교면포장의 균열률은 더욱 상승할 것으로 예상된다. 그림 7은 본 연구에서 조사된 Section3 교면포장의 HPCI이며 한국도로공사의 HPCI 기준(3.0)을 비교하면 한국도로공사의 관리기준에 근접하거나 그 이하의 낮은 상태를 나타내고 있어 집중적인 관리 및 보수가 필요한 것으로 판단된다.

그림 6과 그림 7을 비교해 보면 Section3 토공부 포장의 경우 현시점에서의 HPCI 값은 약 3.1~3.2로서 그림 7에 제시된 교면포장에 비해 상대적으로 양호하다. 이는 교면포장의 경우 토공부 포장에 비해 처짐 및 진동이 많이 발생되고 차량의 집중화, 포장체내의 체류수, 보다 급격한 온도변화 등으로 인하여 포장의 파손이 보다 빠르게 진행된다고 볼 수 있다.

2.3 FWD를 이용한 포장상태 평가

FWD는 포장의 구조적 지지력 및 적정성을 측정하는 장비로서 하중을 자유낙하시켜 그 때의 충격하중에 의한 포장체의 처짐량을 측정하는 장비이다. 그림 8은 현장에서 FWD로 포장상태 평가를 하는 모습이다. 충격하중은 하버싸인(harversine) 형태를 사용하여야 하며, 일반적인 표준 재하하중은 40kN 정도이며, 하중이 재하되는 시간은 30m초이다. 직경 300mm의 하중 재하판을 주로 사용하며 포장표면의 최대 수직변형을 측정한다. 약 500m 간격으로 61개 지점에서 FWD 시험을 수행하였으며, 하중수준은 2단계(40kN, 62kN)로 하였다. 포장체의 처짐은 포장층의 두께에 따라 매우 민감하게 반응함으로 정확한 포장 두께 파악을 위해 아스팔트 코어를 채취하였다. FWD 처짐값은 표준하중과 표준 온도 20°C를 기준으로 보정하였다.

FWD를 통해 Section별로 아스팔트 포장체 전체 지지력을 대표하는 최대처짐값(D1)을 계산한 결과 Section3에서 가장 높았으며, Section2에서의 처짐값이 가장 낮게 계측되었다. 또한 노상층의 지지력을 대표하는 처짐값(D6)도 D1값과 유사하게 Section3에



서 높았으며, Section1와 Section2는 유사한 처짐값을 보였다.

현장에서 수행한 FWD 시험결과와 현장코어를 통해 얻어진 아스팔트층 두께, 시공자료에서의 보조기층 두께를 이용하여 포장층의 탄성계수를 계산하였다. 포장층의 탄성계수는 각 층의 현재 상태와 지지력 평가시에 사용되며, 또한 도로의 향후 잔존수명 예측의 입력변수로 이용된다. 본 연구에서는 도로포장층의 탄성계수를 역산하기 위하여 미국 텍사스 교통연구소에서 개발한 MODULUS 5.0 프로그램을 사용하였다. 현장시험결과로 추정된 아스팔트층의 탄성계수는 기준온도에서의 탄성계수로 보정할 필요가 있기 때문에 FWD현장 시험시 측정된 표면온도를 활용하여 탄성계수를 보정하였다.



그림 8. FWD를 이용한 포장상태 평가

그림 9는 아스팔트층 탄성계수의 역산정 결과로서 전반적으로 양방향 아스팔트 탄성계수는 유사한 경향을 보이고 있으며, Section2의 아스팔트층 탄성계수값이 가장 높게 나타났다. 보다 효율적인 분석을 위하여 상대적으로 짧은 구간인 Section4를 제외한 본선구간을 총 5개 동질구간으로 구분하여 평균 탄성계수값을 계산하였다. 동질성구간은 구간별 포장두께, 아스팔트층, 보조기층, 및 노상층의 탄성계수 변화를 파악하여 결정하였다. 2_1구간과 2_2구간을 제외하고는 다른 구간에서의 아스팔트층의 탄성계수는 3,000~5,000MPa 범위에 있다. 여

기서 SMA 포장구간(Section1)에서의 아스팔트 탄성계수값이 일반 밀입도 구간보다 낮은 경향을 보였다. 동질성구간별 보조기층의 탄성계수값은 최소 350MPa에서 최대 900MPa 이었으며 동질성구간별 노상층의 탄성계수값은 구간과 상관없이 60~100MPa을 범위로 균일하였다. 이렇게 산정된 탄성계수를 바탕으로 역학적-경험적 방법, AASHTO 덧씌우기 설계법을 이용하여 포장의 지지력을 평가하였다.

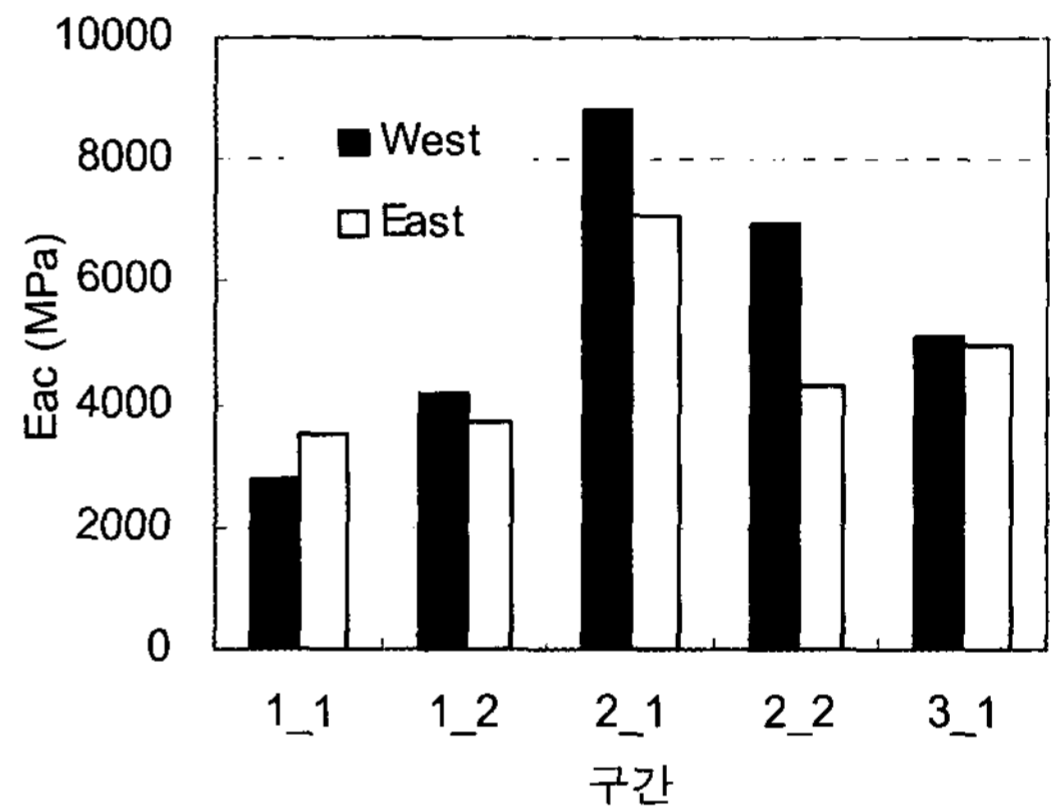


그림 9. 아스팔트층 탄성계수

먼저, AASHTO 덧씌우기 포장 설계법을 이용하여 현재 포장 상태와 향후 잔존수명을 예측하였다. 도로포장체는 시간이 경과하고 하중재하 횟수가 누적되면 구조적 지지력이 떨어져 도로포장의 유지보수가 필요하게 된다. 총 구조적 지지력 계수(SNf)는 정해진 공용기간동안 도로의 보수없이 유지하는데 필요한 지지력을 의미하는데 만약 현재 구조적 지지력 계수(SNeff)가 총 구조적 지지력 계수보다 클 경우에는 덧씌우기 공법을 적용할 필요가 없다. SNf 값의 계산을 위해서는 예상 미래 교통량, 설계 신뢰도, 표준편차, 노상토의 유효 탄성계수, 그리고 설계 서비스 이력 감소값의 입력변수가 필요하며 앞에서 산정된 탄성계수를 이용하여 현재 구조적 지지력을 예측할 수 있다.

교통량 예측은 설계기간동안 공용중인 도로에 반복되는 축하중 횟수를 AASHTO 설계법에 제시한 등가단축하중 개념(Equivalent Single Axle

Load, ESAL)을 도입하여 계산하였다. 등가단축하중개념은 설계기간동안 발생할 모든 축하중을 40kN 축하중으로 환산한 값이다. 본 해석은 공용기간을 근거로 하여 보다 보수적인 접근을 하였으며 본 구간의 교통량은 개통이후 5년간 실측한 자료를 사용하였으며 분석결과, 중차량 비율이 일반고속도로보다 매우 낮은 것으로 확인되었다. 등가단축하중을 계산하기 위하여 교통량 증가율을 매년 4%로 가정하였으며 트럭계수값은 AASHTO에서 제시한 0.52를 사용하였다. 본 연구에서 20년 동안 발생할 총 등가단축하중은 26,696,222회로 계산되었다.

다양한 입력변수를 고려하여 현재의 구조적 지지력 계수를 산정하면 그림 10과 같으며 모든 구간에서 현재 구조적 지지력 계수가 8이상으로 확인되었다. 반면에 장래 교통량을 고려한 향후에 요구되는 구조적 지지력 계수는 3.5로 나타났다. 현재 구조적 지지력 계수값이 향후에 필요한 구조적 지지력 계수보다 작으면 구조적 지지력 보강이 필요하게 되지만 현재 지지력 계수값이 필요 지지력 계수값보다 크기 때문에 현재는 구조적인 지지력 보강이 필요하지 않는 것으로 판단된다.

포장의 잔존수명을 역학적-경험적 개념을 사용하여 예측하였다. FWD 시험을 통해 산정된 포장층의 탄성계수를 이용하여 포장체의 현재 구조적 상태를 규명하고, 구조해석 프로그램으로 응력과 변형률을 계산하고 이렇게 계산된 응력과 변형률로 설계기간동안 허용되는 교통량을 산정하게 된다. 만약에 허용교통량이 예측교통량 보다 클 경우에는 현재 구조적으로 보수가 필요 없으나, 반대의 경우에는 아스팔트층 덧씌우기 공법을 이용하여 허용교통량을 증가시켜야 한다. 포장체 내부 응력과 변형률 계산을 4계절로 나누어서 수행하였으며 각 계절별로 탄성계수를 표준온도에 대하여 보정하여 아스팔트층 하부의 인장변형률과 노상층 상부의 압축변형률을 포장체 구조해석 프로그램을 이용하여 계산하였다(건설교통부, 2004).

그림 11은 각 구간별로 계산된 20년 동안 허용교통량을 등가단축하중으로 나타낸 것이다. 잔존수명 산정 결과, 3구간에서의 허용교통량이 타 구간

보다 낮으나 예측교통량 보다 상회하는 것으로 나타났다. 20년 동안 허용할 수 있는 교통량은 모든 구간에서 허용교통량이 설계기간동안 발생할 예측교통량보다 크게 나와 구조적 보수 및 보강은 필요 없는 것으로 사료된다.

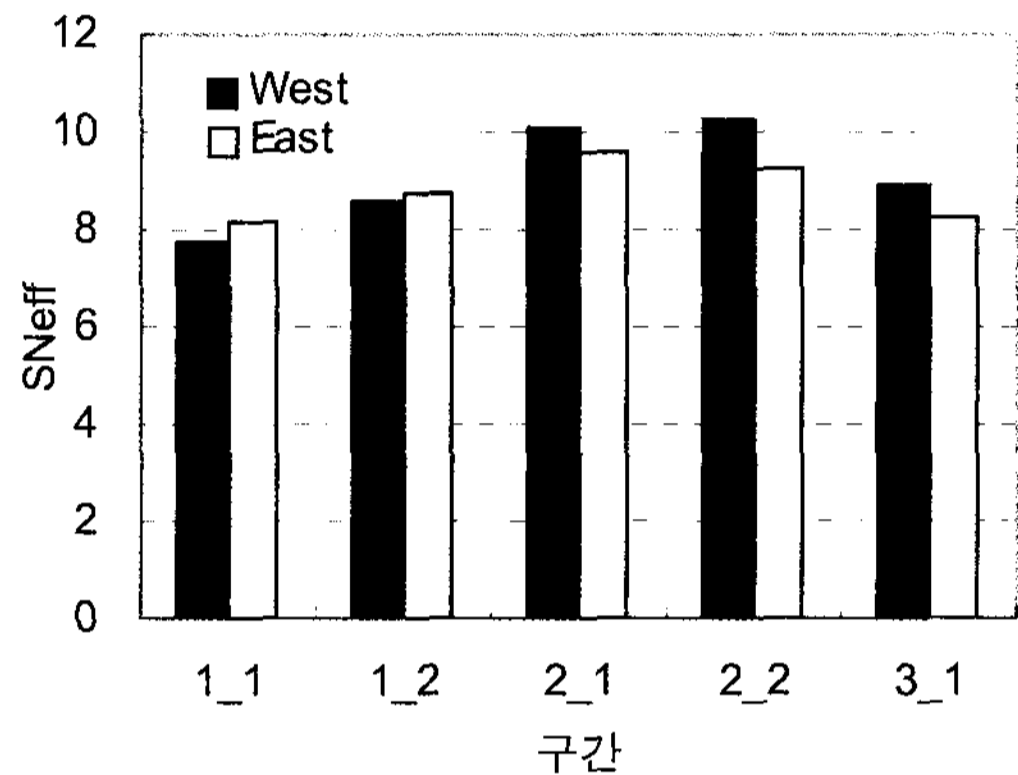


그림 10. 유효 구조적 지지력 계수

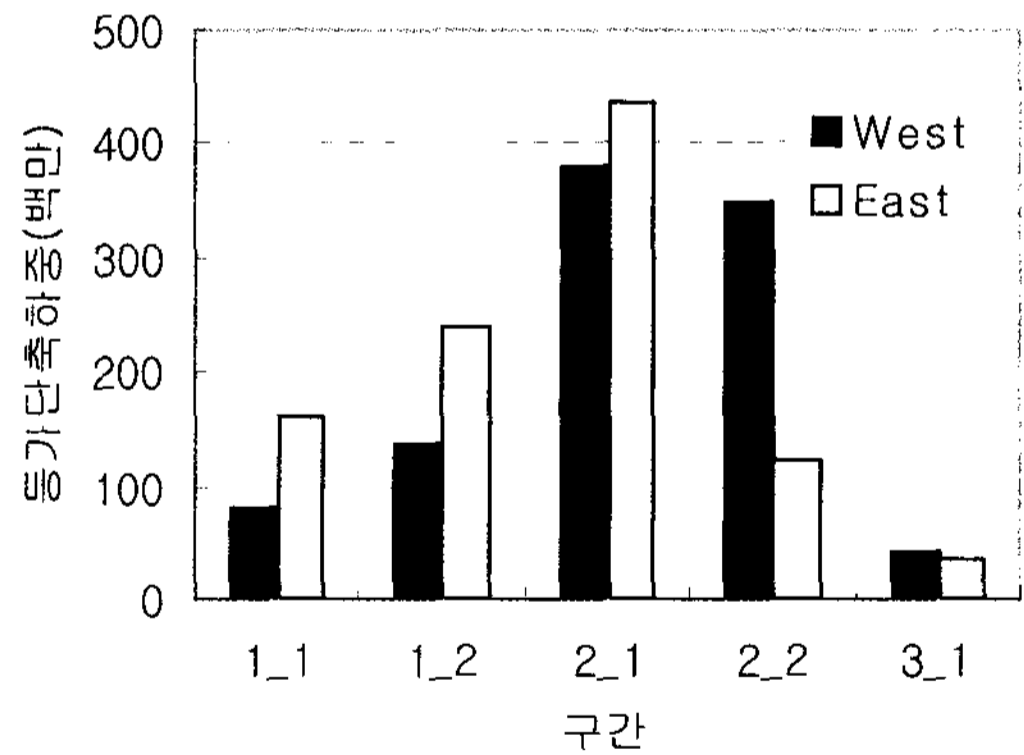


그림 11. 구간별 허용교통량

2.4 기존 공용성 자료에 근거한 잔존수명 예측

FWD에 의한 포장의 지지력 평가 및 잔존수명 예측은 포장의 구조적 지지력 측면에서의 검토이다. 이와는 별도로 도로의 노면에 발생하는 파손에 의해 아스팔트 표층의 잔존수명을 예측할 필요가 있다. 이는 주로 아스팔트 표층을 제거하고 재포장



하기 위한 대책을 수립하기 위한 것이 주된 목적이라 할 수 있다. ARAN을 통한 포장상태 평가로 계산된 HPCI와 한국도로공사의 공용성 자료에 근거하여 일반포장 구간과 SMA 포장구간의 포장수명을 예측하면 그림 12, 그림 13과 같다(로드코리아, 2005). 포장의 잔존수명 예측은 특정 포장의 공용개시 이후의 공용성 자료가 축적된 경우 이를 사용하여 어느정도 정확한 예측이 가능하다. 그러나 대상구간의 경우 과거 공용성 자료가 구축되어 있지 않아 대상구간과 구조 및 재료적으로 유사한 고속도로의 D/B와 국도의 일반적인 공용특성 등을 이용하여 포장수명을 예측하였다.

Section2, Section3의 HPCI는 현재 그림 12와 같이 위치하며 2년, 3년, 5년에 위치한 박스형태의 표식은 품질관리나 교통량에 따라 공용기간에 나타날 수 있는 HPCI의 변화 범위이다. 고속도로의 공용성 자료에 근거하여 포장수명을 예측하면 Section2의 경우 국도와 유사한 9년, Section3의 경우 5.5년으로 나타났다. 특히, Section3의 경우는 현재 6개월 이내 보수가 시급한 실정이다.

그림 13은 Section1 SMA포장의 포장수명을 예측한 결과이다. Section1의 포장도 다른 Section의 경우와 마찬가지로 과거 공용성 자료가 부족하기 때문에 고속도로의 공용성 자료에 근거하여 포장수명을 예측하였다. 그러나 SMA포장은 현재 국내 도입기간이 짧아 장기 공용성 자료가 부족한 실정으로 과거 공용성 자료에 근거하여 포장수명을 15년으로 가정하였다. 그러나 최근 개통된 동해선의 SMA포장의 경우 약 13년정도 공용될 것으로 예상되고 있어 공용수명의 단축이 발생할 가능성을 배제할 수 없다. SMA포장은 품질관리에 의해 공용성이 매우 차이가 크기 때문에 그림에서와 같이 각 공용년도에서 HPCI의 분포 범위가 매우 크다. 따라서 현 단계에서의 포장수명은 단순히 기존 고속도로의 공용성 자료에 근거하여 추정된 결과이기 때문에 지속적인 모니터링이 반드시 필요하다.

그림 1은 과거 10년 이상 국도의 일반 아스팔트 포장의 공용성 자료를 수집하여 분석한 결과(임영환, 2003)로서 그림에서 보는 바와 같이 신설포장일 경우 평균 수명은 약 5년 이상으로 나타나고

포장이 노후화 될수록 보수주기가 짧아지는 특성이 있다. 이는 전형적인 보수주기를 나타내는 것으로서 대부분 포장의 보수주기는 일률적으로 하나의 포장공법에 대해 동일 년 수의 보수주기가 책정되어 있어 이에 대하여 검토할 필요가 있다.

따라서, 본 연구에서는 포장조사장비(표면조사, 구조진단)를 이용해 현재의 포장상태를 평가하고 실내시험 및 구조해석을 통해 각 공법에 대한 보다 정확한 잔존수명을 예측해 현재 계획된 각 포장공법의 보수주기에 대한 재검토 및 합리적인 개선방안을 제시하였다. 또한 일반포장의 일부구간에서 균열 등과 같은 조기파손이 발생하는 특이구간이 존재하고 있어 이 구간에서 포장표면 상태에 대한 육안 조사를 수행하고 유지보수 자료를 바탕으로 상세한 현장조사 및 시험을 통해 파손 원인을 분석하였다.

한편, Section3에 위치한 일반 교면포장의 평균 HPCI로 포장의 수명을 예측하면 그림 12와 같이 약 4년으로 나타났다. 교면포장은 토공부 포장에 비해 처짐이 크고 혹독한 기후에 노출되어 있어 토공부 포장에 비해 파손이 빨리 진행되어 포장수명이 약 30% 감소한 것으로 사료된다.

앞에서 예측된 각 Section별 초기 공용수명은 Section1 SMA 포장이 15년, Section2 일반 포장이 9년, Section3 일반 포장이 약 5년으로 나타났다. 이러한 초기 공용수명에 근거하여 보수주기를 산정하면 그림 14와 같다. 현재 국도의 유지보수회수별 공용년수는 보수회수가 증가할수록 9년, 6년, 4년, 3년으로 감소하게 되어 25년간 총 6회의 보수가 필요하다. 현재 우수한 공용성능을 보이고 있는 SMA포장은 25년간 단 2회의 보수만 필요하며 국도의 공용상태와 동일한 Section2는 국도와 동일한 보수주기를 적용하면 6회의 보수가 필요한 것으로 예상된다. 공용성능이 가장 나쁜 Section3의 경우 25년간 약 8회의 보수가 필요할 것으로 예상된다.

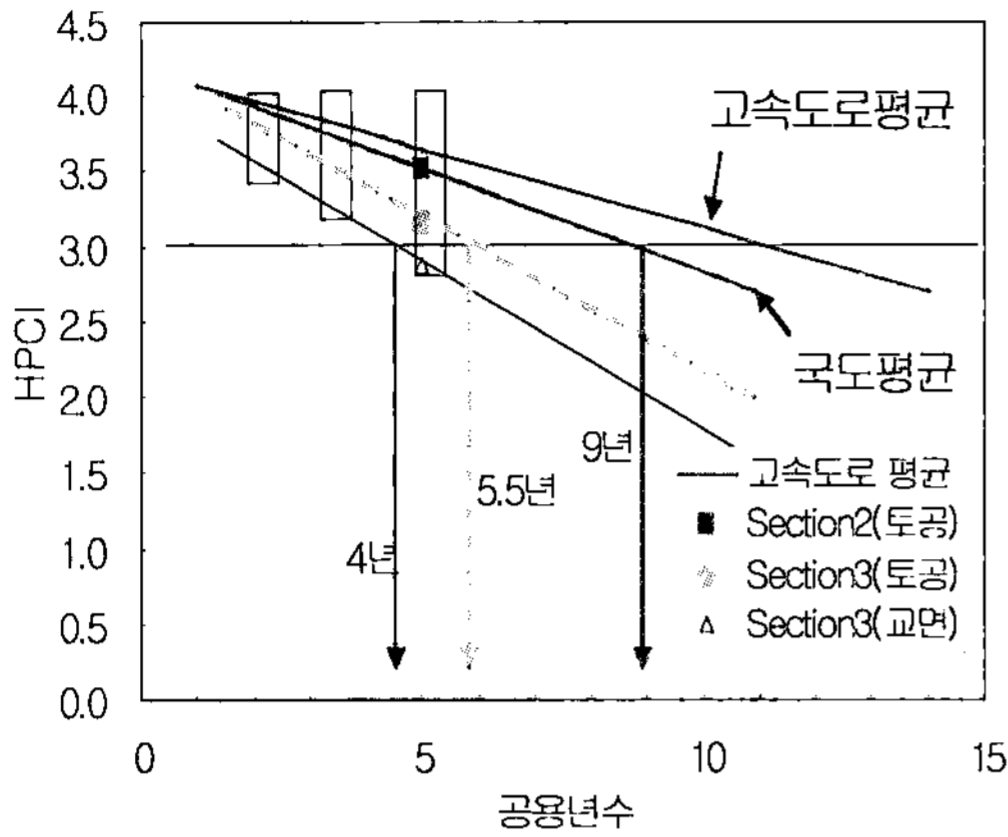


그림 12. 일반포장의 포장수명 예측

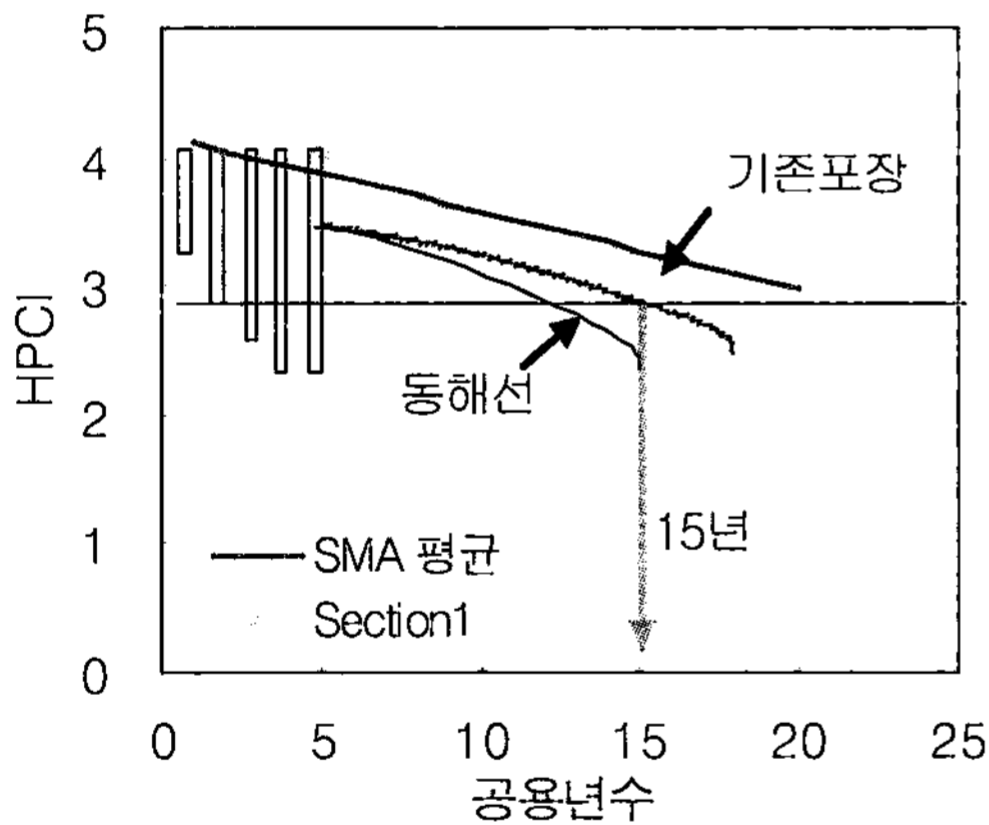


그림 13. SMA포장의 포장수명 예측

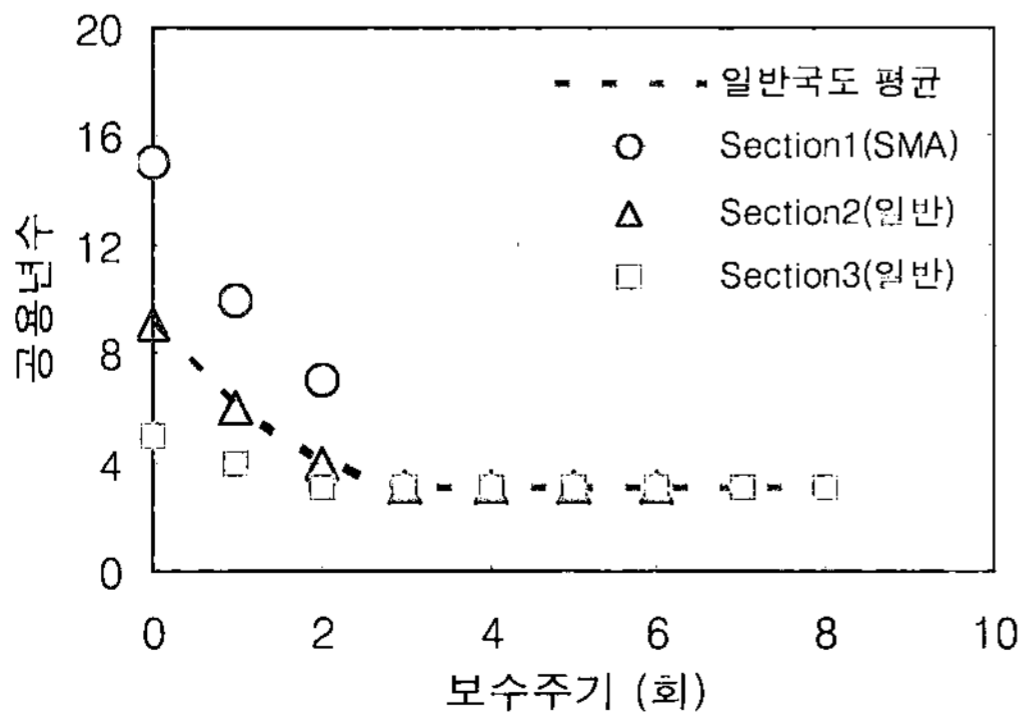


그림 14. 보수주기에 따른 예상 공용년수

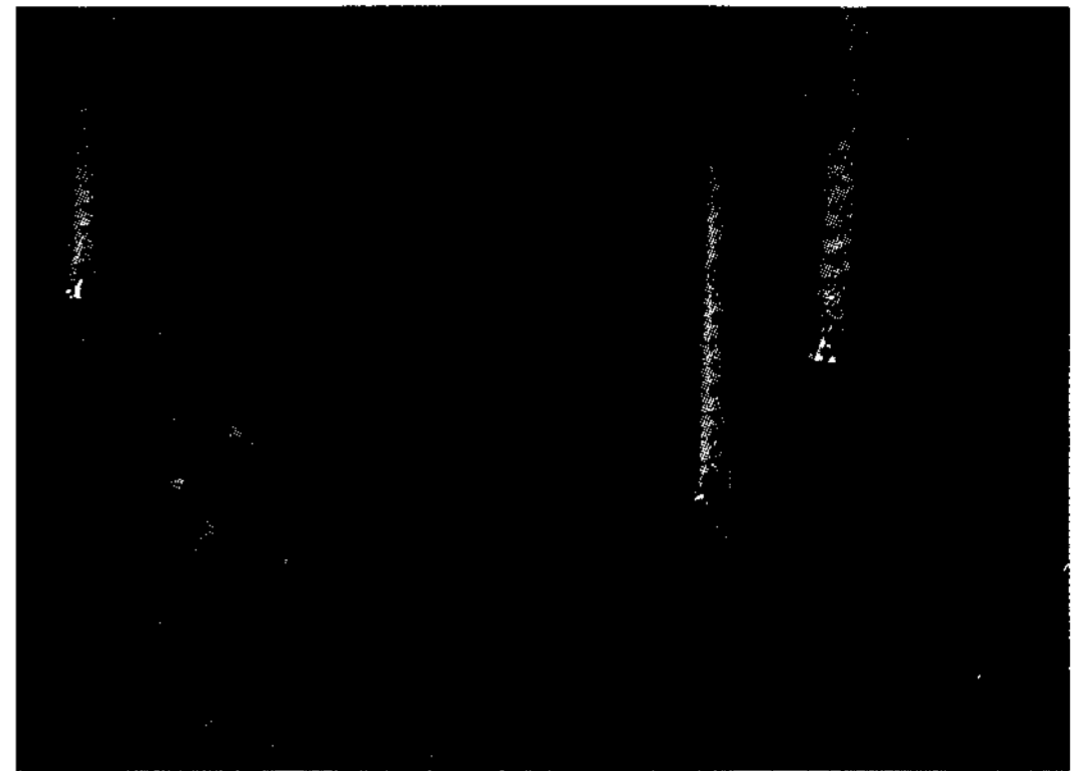


그림 15. 균열부의 코어 시편(Section3)

또한, Section1의 교면포장과 SMA 교면포장은 11년의 보수주기로 보수가 필요한 것으로 예상되며 교면포장은 포장이 위치한 특수한 환경조건을 고려하여 지속적인 모니터링과 함께 처음 공용기간을 근거로 보수주기를 조정할 필요가 있다.

2. 포장파손 원인 분석

3.1 현장시료 채취 및 물성 측정

자동화된 조사장비를 이용한 포장 상태 평가를 통해 지지력에 문제가 없음이 확인되어 현장시편을 직접 채취하여 포장파손의 원인을 분석하였다. 포장층의 두께확인, 실내공용성 시험과 균열진전 깊이, 물성 측정, 교면포장 방수층 문제를 확인하기 위하여 35개 지점에 걸쳐 현장 시편을 채취하였다. 토공부의 경우 각Section별로 건전구간과 파손구간에서 시편을 채취하였으며 교량구간의 경우 현장에서 포장파손구간을 선택하여 시편을 채취하였다. 교면포장에서 시편을 채취할 경우에는 사전에 교면포장의 두께를 인지하고 교면의 손상이 없도록 주의하여 채취하였으며 시편채취 후에는 긴급보수용 아스콘으로 다짐을 하여 구멍을 메웠다. 채취된 시편으로 설계포장 두께와 실제로 시공된 두께를 비교하였으며 균열부에서 채취한 시편으로 균열진전 두께를 확인하였다. 대부분의 구간에서 설계두



계와 실제 시공두께가 유사하였다.

SMA 표층으로 시공된 Section1의 경우 현재까지 건전한 상태를 유지하고 있었으며 Section2의 경우 표층까지 균열이 진전된 것을 확인하였다. Section3는 그림 15와 같이 Top-down 균열이 상부에서부터 평균 10cm이상 진전되어 포장상태가 매우 취약하였다. 또한, Section3에 위치하고 있는 교면포장의 경우 균열이 이미 하부층까지 진전되었으며 일부 교면포장에서는 균열을 통해 물이 침투하여 골재와 바인더를 분리시키는 스트리핑 현상이 확인되었다.

현장에서 채취된 시편을 공극률, 바인더 함량, 입도분석, 공용성 평가를 위한 시편으로 분류하고 각각의 시험을 위해 시편의 절단작업을 수행하였다. 공극률 측정을 위해 준비된 시편을 이용하여 겉보기 밀도를 측정하였으며 시공 당시 혼합물의 최대이론밀도 자료를 구할 수 없기 때문에 시편을 가열하여 시료를 채취하였다. 시험에서 발생하는 오류를 최소화하기 위해 시편 채취시 발생한 절단면 근처의 혼합물은 제외하고 시료를 준비하였다. 이렇게 준비된 시료를 이용하여 이론최대밀도를 ASTM D2041의 규정에 따라 실측하였다.

일반적으로 아스팔트 포장은 시공 후 5년이 경과하면 공극률이 약 3~4%가 되도록 초기 공극률을 설정하게 된다. 그러나 Section3의 경우 목표 공극률에 비해 약 1.5~2% 상회하였으며 이것은 시공초기의 다짐부족에 기인한 것으로 시공초기의 공극률이 9~10%에 달한 것으로 사료된다. 일반적인 밀입도 아스팔트 포장의 경우 시공 초기 공극률이 8% 이상 되어서는 안 된다는 많은 연구 자료들이 있다(Zube, 1962). 이는 공극률이 높을 경우 혼합물 내로 물과 공기가 침투하게 되어 아스팔트와 골재의 결합력을 약화시키고 수분손상, 산화, 밀림, 포트홀, 균열 등이 조기에 발생할 수 있기 때문이다. 따라서 Section3의 조기파손은 시공초기의 다짐부족이 하나의 원인이라 할 수 있다.

아스팔트 바인더 함량을 확인하기 위해 아스팔트 바인더 추출 장비를 이용하여 측정하였으나 대부분의 바인더함량이 일반적인 배합설계 함량보다 높게 나타났다. 이는 바인더를 고온에서 태울 때

바인더만 타지 않고 골재에 함유된 유기물 등이 같이 타기 때문에 바인더 함량이 높게 측정된 것으로 판단된다. 이를 보정하기 위해서는 골재 원시료를 별도로 태워 손실량을 측정해서 보정하여야 하는데 본 연구에서는 기존의 현장 시료를 확보할 수 없기 때문에 정확한 바인더 함량을 산정하기가 불가능 하였다. 또한, 골재의 세립자 함량이 많을 경우 바인더 함량이 과다하게 산출되기도 한다.

골재의 입도를 확인하기 위하여 바인더를 태우고 남은 골재로 체가름 시험을 수행하였다. No. 200체를 통과하는 세립분을 완전히 제거하기 위하여 각 체에 남아있는 골재를 물로 씻은 다음 건조로에서 완전히 건조하고 통과중량백분율을 구하여 시공당시 사용되었을 것으로 예상되는 입도와 비교하였다. 골재를 태울때 세립분에 함유된 유기물 성분이 함께 타기도하여 그림에서 0.5mm이하의 세립골재 입도는 신뢰성이 떨어져 입도곡선에서 제외하였다. 그림 16은 시공당시에 사용되었을 것으로 예상되는 기층의 입도와 체가름 시험을 수행한 결과를 비교한 결과이다.

Section1 표층의 체가름시험 결과 SMA 13mm의 입도와 다소 차이가 있으나 거의 유사한 결과를 확인하였으며 Section2표층의 경우 WC-3(19mm 밀입도)입도 범위에 포함되었다. Section1~3의 기층은 그림 16과 같이 BB3(25mm)로 확인되었으며 SMA교면포장 또한 실제 계획되었던 SMA 10mm와 유사한 입도를 보였다. 포장상태가 가장 취약한 Section3 표층과 Section3에 위치하고 있는 교면포장은 WC-3로 설계가 되었으나 시공시 잔골재의 함량이 많아져 WC-1에 가까운 입도를 보였다. 혼합물에 잔골재량이 많아지면 상대적으로 바인더 함량이 부족하게 되어 포장의 내구성을 취약하게 한다. 게다가 Section3의 경우 앞선 공극률 측정에서 확인되었듯이 시공초기의 다짐불량이 포장의 내구성을 더욱 저하시키는 요인이 되고 있다. 실제로 Section3의 경우 포장의 표면에 바인더가 떨어져나가는 미세한 라벨링이 확인되었다. 라벨링은 아스팔트 함량 부족, 다짐 부족에 의한 과다한 공극률 등에 의해 야기되는 아스팔트 포장의 대표적인 파손 유형이다.

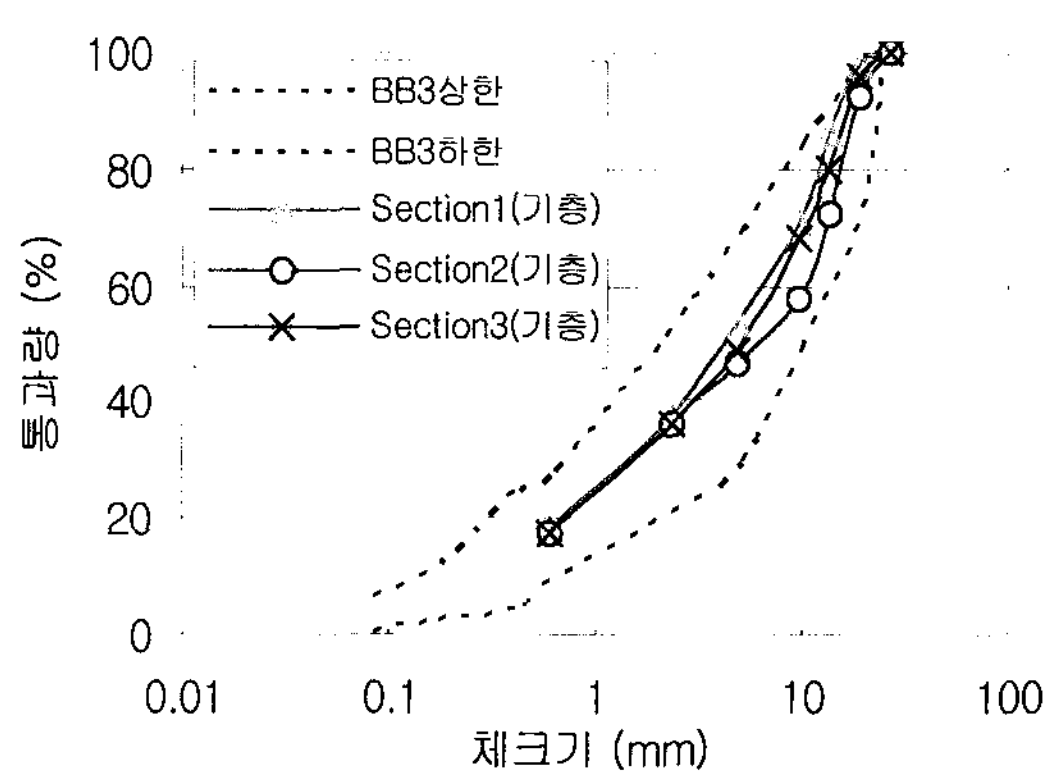


그림 16. 기층의 입도 분포(BB3)

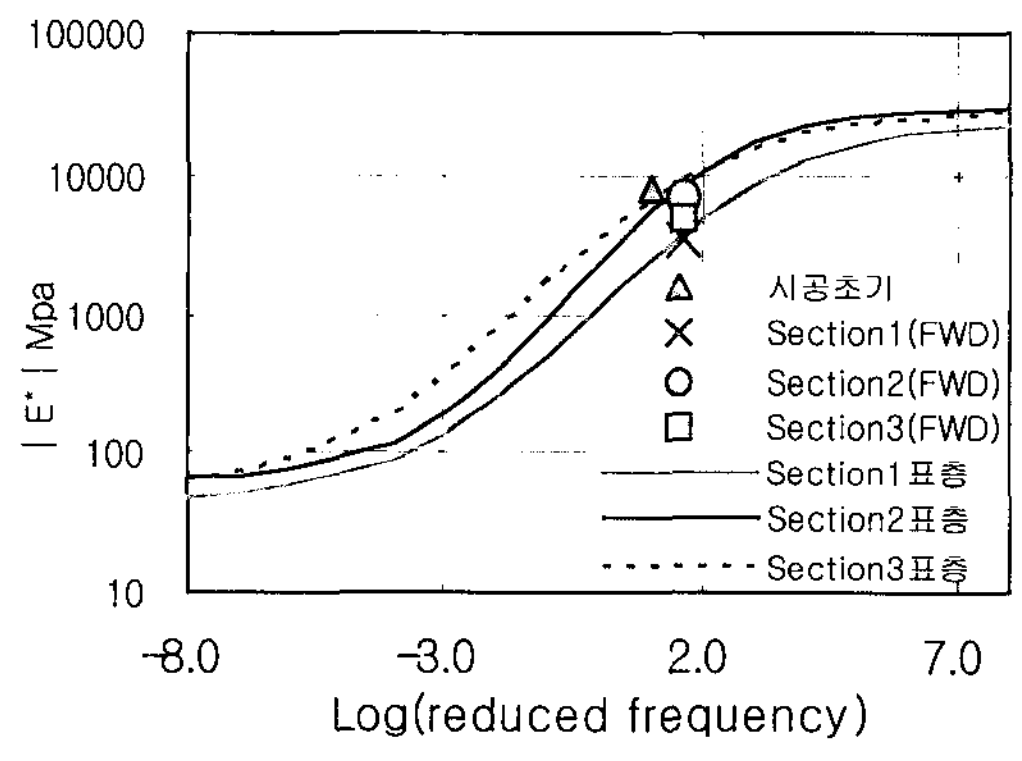


그림 17. 표층의 마스터커브(@25°C)

면 그림 18과 같다. 표층의 경우 20°C에서 Section1 SMA 표층의 탄성계수가 가장 작고 Section3의 표층이 가장 큰 탄성계수를 나타낸다. 일반적으로 동일한 바인더를 사용할 경우 SMA의 탄성계수가 일반포장에 비해 작은 것으로 알려져 있다(이현중, 2000). Section3의 경우 다른 표층에 비해 공극률이 커서 물과 공기에 의한 노화가 촉진되었으며 그로 인해 재료의 강성이 커진 것으로 판단된다. 기층의 경우는 상부의 표층에 비해 건전한 상태로 그림 18에서 보는바와 같이 모든 Section의 탄성계수가 유사한 경향을 나타낸다.

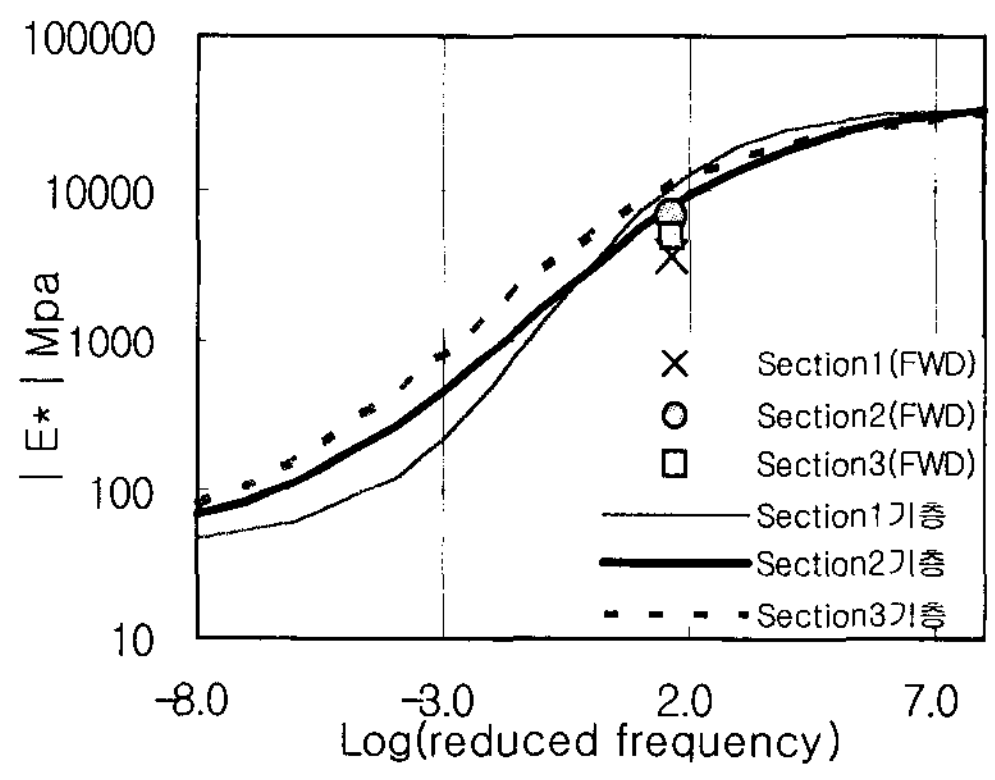


그림 18. 기층의 마스터커브(@25°C)

3.2 실내공용성 시험

본 연구에서는 앞에서 언급한 Section1~3의 표층 및 기층 혼합물의 강성을 평가하기 위하여 현장에서 채취한 시편을 커팅하여 직경 150mm, 높이 50mm 원통형 공시체를 사용하였다(건설교통부, 2003). 아스팔트 혼합물의 동탄성계수 측정시험을 위한 변수로는 온도와 하중주파수이며 시험온도는 -5°C, 5°C, 15°C, 30°C이고 하중주파수는 20Hz, 10Hz, 5Hz, 1Hz, 0.5Hz에서 시험을 실시하였다(NCHRP 1-37A).

각 혼합물의 동탄성계수 시험을 통해 산정한 동탄성계수의 Section별 표층의 마스터커브를 비교하면 그림 17과 같으며 기층의 마스터커브를 비교하

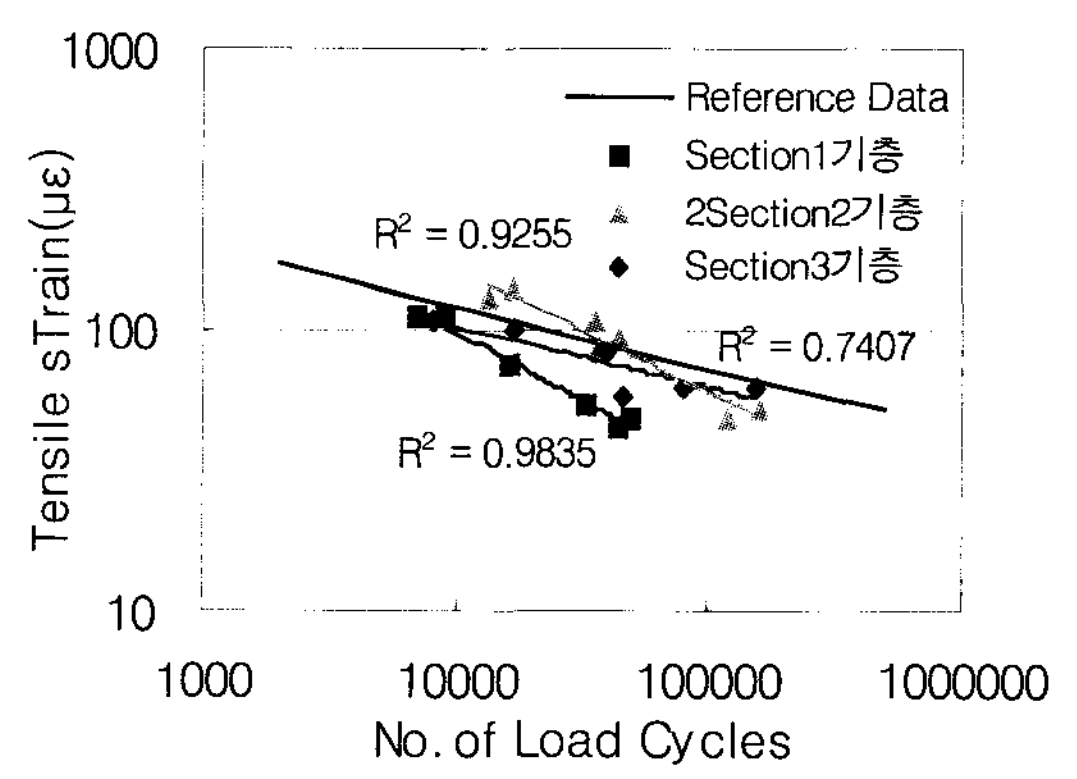


그림 19. 피로수명 비교

실내시험을 통해 계산된 표층의 동탄성계수 마스터커브와 FWD시험의 처짐결과를 역산정하여 계



산된 탄성계수를 비교하면 그림 17과 같이 유사한 결과를 보인다. 기층의 탄성계수는 그림 18과 같이 역산정 결과와 큰 차이를 보이지 않으며 20°C에서 기존 실내시험결과에 비해 다소 낮은 탄성계수를 나타낸다. 기존 동한편, 탄성계수 시험 결과는 실내에서 제작된 공시체를 이용하여 수행되어 현장의 공용성과 다소 차이가 있을 것으로 예상된다.

피로시험은 간접인장방식에 의해 20°C에서 수행되었고 10Hz의 주기를 갖는 Haversine 하중을 0.1초의 하중재하 및 0.9초의 휴지기로 시편에 가하였다. 아스팔트 혼합물의 피로수명은 시편의 강성이 초기 강성의 50%에 도달할 때까지 적용된 하중회수로 결정하였다. 각 혼합물의 피로시험 데이터를 사용하여 100번째 하중재하시의 변형률 진폭과 피로수명에 대해 식 (2)와 같이 일반적인 피로수명 모델식을 사용하여 회귀분석을 수행하였다.

$$N_f = a(\epsilon_0)^b \quad (2)$$

여기서, N_f = 아스팔트 혼합물의 피로수명

ϵ_0 = 초기 인장 변형률

a, b = 회귀분석을 통하여 얻어지는 상수

각 Section의 기층에 대한 피로시험 결과 그림 19와 같이 Section2 기층의 피로수명이 상대적으로 우수한 것으로 나타났으며 Section1 기층의 피로수명이 가장 취약한 것으로 확인되었다. 기존에 수행된 일반 혼합물의 실내시험 결과는 시공 초기의 피로수명을 의미하기 때문에 공용기간이 5년이 지난 대상구간의 피로수명은 대부분 이보다 적은 수치를 나타내는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 공용자료가 전무한 노후화된 도로의 포장상태를 자동화된 포장상태 평가 장비 ARAN, FWD를 통해 평가하고 시편을 채취하여

실내 물성 시험 및 공용성 평가를 통해 파손원인분석 및 잔존수명을 예측할 수 있는 활용 예를 제시하였다. 연구결과를 간략히 요약하면 다음과 같다.

ARAN에 의한 포장표면 상태조사를 수행하여 종단평탄성, 소성변형량, 균열률, HPCI를 산정하고 한국도로공사 관리기준을 근거로 보수여부를 판단하였다. 그 결과 일부구간에서 관리 기준 이하의 수치를 보여 시급히 보수가 이루어져야 할 것으로 판단되었다. FWD로부터 측정된 처짐데이터를 사용하여 탄성계수를 산정한 결과를 역학적-경험적 방법과 AASHTO 93 설계법에 적용하여 포장의 지지력을 평가하였으며 그 결과 모든 구간에서 양호한 수준을 보여 구조적 지지력이 우수하여 단면 두께의 보강은 현 시점에서 필요가 없는 것으로 사료되며 지지력은 설계수명 동안 충분한 것으로 평가되었다. 현재 포장의 주된 파손은 표층부의 Top-down 균열이므로 포장상태 평가로 계산된 HPCI와 기존 공용성 자료에 근거하여 포장의 잔존수명을 예측하였다. ARAN에 의한 포장표면조사로 산정된 HPCI와 기존 고속도로 공용성 자료에 근거하여 포장수명을 예측하여 Section2의 경우 9년, Section3의 경우 5.5년, Section1의 경우 15년의 공용수명을 산정할 수 있었다. 이렇게 산정된 공용수명은 현재 포장상태의 자료만으로 산정된 것으로 향후 지속적인 포장상태조사가 수반되어야 할 것이다.

포장의 파손원인을 분석하기 위해 35개 지점에서 현장 시편을 채취하여 균열진전 깊이, 공극률, 입도, 아스팔트 함량을 확인하고 동탄성계수 시험과 피로 시험을 실시하였다. 균열은 대부분 Top-down 균열로 확인되었으며 일부 문제 구간의 경우 평균 10cm 까지 진전되었고 일부 교면포장은 하층까지 균열이 진전되었다. 이 구간에서의 공극률 측정 결과 목표 공극률에 비해 약 1.0~1.5% 상회하였으며 그 원인은 시공초기의 다짐부족에 기인하는 것으로 판단된다. 이 구간에서의 과도한 공극은 아스팔트 혼합물의 노화를 촉진시켜 보다 이른 시기에 Top-down 균열을 발생하게 하는 것으로 사료된다. 골재 입도를 확인한 결과 대부분의 구간에서 계획된 입도와 유사한 결과가 나타났으며 문제 구간의 표층은 WC-3(19mm 밀입도)로 설계가 되었



으나 시공시 잔골재의 함량이 많아져 WC-1(13mm 밀입도)에 가까운 입도가 나타났다. 잔골재의 함량이 많아지면 상대적으로 바인더 함량이 부족하게 되어 포장의 내구성을 취약하게 하며 시공초기의 다짐불량과 함께 포장의 내구성을 더욱 저하시켜 Section3의 조기파손을 초래한 것으로 판단된다.

참고문헌

건설교통부, (2004), “한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구”, 1단계 최종보고서

건설교통부, (2006), “한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구”, 2단계 2차년도.

로드코리아, (2005), “고속도로 포장 시험시공구간 현장 공용성 평가 및 추적조사 시스템 구축 용역”

이현종, 최지영, 차순만, (2000), “골재입도와 SBS 개질재가 아스팔트 혼합물의 점탄성 물성 및 피로 공용성에 미치는 영향,” 한국도로포장공학회논문집, 제2권, 3호, pp129-144, 2000.

임영환, (2003) “일반국도 PMS의 Project Level 개선과 Network Level 개발연구”

Hyun Jong Lee, Jung Hun Lee, and Hee Mun Park, (2007) “Performance Evaluation of High Modulus Asphalt Mixtures for Long Life Asphalt Pavements”, *Journal of Construction & Building Materials*.

NCHRP 1-37A Draft Test Method A1, “Standard Test Method for Dynamic Modulus of Asphalt Concrete Mixtures and Master curves”.

Zube, E., (1962) “Compaction Studies of Asphalt Concrete Pavement as Related to the Water Permeability Test”, Paper presented at 41st Annual Meeting of Highway Board, Washington D.C.

접 수 일: 2007. 5. 9
 심 사 일: 2007. 5. 10
 심사완료일: 2008. 3. 7