

PCI를 고려한 아스팔트 포장 잔존 수명 예측

The Estimation of Remaining Lives of Asphalt Pavement based on PCI

신경엽* · 송재혁** · 이정훈*** · 이현중****

Shin, Kyoung Yub · Song, Jae Hyuk · Lee, Jung Hun · Lee, Hyun Jong

1. 서론

도로의 연장이 증가하고 수명이 더해갈수록 포장 유지관리의 중요성이 더욱 부각되고 있음에도 우리나라의 사회간접자본시설 투자 방법이 초기건설비 절감에 치중되는 형식으로 이루어져 도로포장 유지관리를 시행하는데 어려움이 있다.

본 연구에서 대상구간 도로포장은 크게 일반포장, 개질 아스팔트포장 그리고 SMA포장으로 구성되어 있다. 또한 일반포장은 5년으로 총 6회, 교량1구간 중 개질아스팔트 포장부는 7년으로 총 4회, SMA 포장은 15년으로 총 2회 주기로 유지보수가 계획되어 있다. 그러나 이러한 유지보수주기는 고속도로나 국도 등의 경험에 비추어 보면 다소 과대 또는 과소하게 보수주기가 결정되어 있어 이를 합리적으로 재 산정할 필요가 있다. 따라서 본 연구의 대상구간은 보수주기가 일률적으로 하나의 포장공법에 대해 동일 년 수의 보수주기가 책정되어 있어 이에 대하여 검토할 필요가 있다.

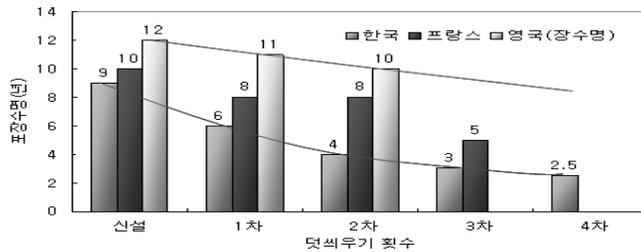


그림 1.1 국내 국도포장 및 유럽 고속도로포장의 평균 보수주기 비교

그림 1.1은 과거 10년 이상 국도의 일반 아스팔트포장의 공용성 자료를 수집하여 분석한 결과(건설교통부, 2006)로서 그림에서 보는 바와 같이 신설포장일 경우 평균 수명은 약 5년 이상으로 나타나고 포장이 노후화 될수록 보수주기가 짧아지는 특성이 있다. 이는 앞서 언급한 대상구간의 고속도로 보수주기는 일률적으로 하나의 포장공법에 대해 동일 년 수의 보수주기가 책정되어 있어 이에 대하여 검토할 필요가 있다.

본 연구에서는 대상구간인 고속도로의 포장상태를 조사하여 현재 조사 구간의 포장상태를 파악하고 이를 통하여 잔존수명을 예측하였다. 또한 조사된 도로 포장상태에 관한 D/B는 현재까지 구축된 국내 고속도로나 국도의 D/B와 비교를 실시하여 경향을 분석하였다.

이를 위해 포장조사장비를 사용하여 대상구간의 균열 및 러팅 등과 같은 포장파손 현황에 대한 조사와 포장의 구조적 손상여부를 분석하여 PCI(Pavement Condition Index)을 산정하였다. 또한 현장 코어채취를 실

* 정희원 · 세종대학교 토목환경공학과 석사과정(E-mail : yub1982@nate.com)

** 정희원 · 세종대학교 토목환경공학과 석사과정(E-mail : cetus00@hotmail.com)

*** 정희원 · 세종대학교 토목환경공학과 공학박사(E-mail : jlee11@sejong.ac.kr)

**** 정희원 · 세종대학교 토목환경공학과 부교수 · 공학박사(E-mail : hlee@sejong.ac.kr)

시하여 포장조사장비를 통한 조사시 중요시 되는 포장의 두께를 확인하였으며, 채취된 시료는 동탄성계수 측정 시험과 피로시험 등을 실시하였다. 이를 통하여 현재 대상구간 고속도로의 각 공구별 포장상태와 파손 발생 구간에 대한 파손원인 분석하고 포장의 잔존수명을 예측하였다.

2. 도로포장의 상태 평가

2.1 대상 구간 도로포장 현황

본 연구의 대상구간인 고속도로는 표 2.1과 같이 본선 36.5km, 지선 3.7km으로 구성되어 있으며, 총 연장은 40.2km, 차로수는 6~7차로이며 주요 구조물은 교량1구간 4,420km(현수교 550m포함), 교량2구간 2,559m(아치트러스교 540m 포함), 터널(상행 630m, 하행 635m)로 구성되어있다. 시공시에 계획된 보수주기는 30년 동안 일반포장은 6회, SMA포장은 2회, 개질아스팔트포장은 4회로 계획되었다.

표 2.1 대상구간 고속도로 포장개요도

공구	도로 1공구	교량1구간			도로 2공구	도로 3공구	도로 4공구	
	토공	강합 성교	현수+ 트러스 교	강합 성교	토공	토공	토공	교량2 구간
포장종류 (표층)	SMA		개질		일반	SMA	SMA	

2.2 ARAN을 이용한 포장상태 평가

2.2.1 조사장비 개요 및 측정 방법

본 연구에서 조사대상구간의 포장상태를 조사하는 ARAN 장비는 주행 중에 포면상태를 자동으로 측정할 수 있는 장비이다. ARAN의 조사기능은 포장균열길이와 폭, 종방향 평탄성, 릿팅 등의 노면상태 조사 기능이 있다. ARAN의 조사 구간은 고속도로 전 구간에 걸쳐 양방향 가장 외측차로(3차로 또는 4차로)였다. 전 차로에 대한 포장상태를 조사하는 것이 가장 바람직하나 시간과 비용이 많이 소요되므로 각 방향별 1개 차로만 조사를 수행하였다. 본 고속도로의 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 현장 코어 채취 등 모든 조사는 동일한 차로에 대해 수행되었다.

2.2.2 ARAN을 사용한 포장노면 평가 결과

포장상태 평가를 위한 요소로는 평탄성, 소성변형, 균열, 미끄럼저항성, 구조적 건전도, 소음, 표면조도 등 여러 가지 항목이 있으나 포장의 공용성 측면에서 종단 평탄성, 소성변형, 균열 등을 주된 요소로 사용하고 있다. 따라서 본 연구에서는 ARAN을 통해 계속된 결과를 포장상태평가지수의 하나인 HPCI(Highway Pavement Condition Index)로 포장상태평가를 실시하였다. ARAN을 통해 측정된 종단 평탄성, 균열, 소성변형의 결과는 먼저 10m 간격으로 정리하였고, 이를 다시 공구별로 평균값을 산정하였다. 더불어, 2006년도 포장평가를 통해 얻어진 D/B와 비교하였다.

종단 평탄성을 측정하는 방법은 장비, 측정지수 등에 따라 상당히 많은 측정법들이 존재하는데 이중에서 IRI(International Roughness Index)가 주로 사용되고 있다. 현재 고속도로의 IRI는 3.5이상에서 보수하는 것으로 관리하고 있다. 그림 2.1와 같이 공구별 종단평탄성은 모든 공구에서 관리기준 이하의 건전한 상태를 유지하는 것으로 확인되었다.

공구별 종단평탄성

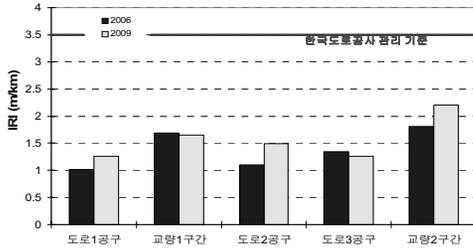


그림 2.1 공구별 종단평탄성

공구별 소성변형량

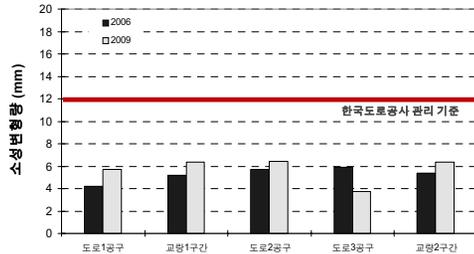


그림 2.2 공구별 소성변형량

공구별 소성변형량은 그림 2.2와 같이 측정되었으며 한국도로공사의 소성변형량 관리기준인 12mm 이하의 수치인 것을 확인하였다. 2006년도에 비하여 소성변형이 증가하기는 하였지만, 소성변형이 공용개시 이후 2~3년 내에 집중적으로 발생하는 것을 감안하면 현재의 포장상태는 양호한 것으로 사료된다.

그림 2.3은 공구별 균열률과 한국도로공사의 균열률 관리기준(10%)을 비교한 것이다. 2006년도에 비하여 도로 3공구를 제외한 모든 공구에서 증가세를 보였으나, 관리기준이하의 수치를 나타내어 균열 발생 측면에서 포장 상태가 양호함을 알 수 있다.

공구별 균열율

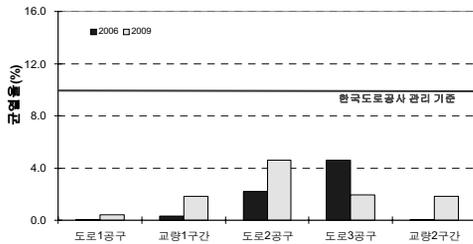


그림 2.3 공구별 균열률

공구별 HPCI

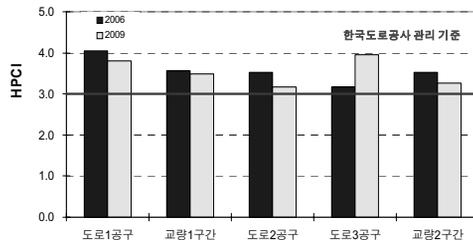


그림 2.4 공구별 HPCI

그림 2.4는 공구별 HPCI와 한국도로공사의 HPCI 기준(3.0)을 비교한 결과이다. 여기서 HPCI는 고속국도에 적용하기 위해 AASHO의 PSI를 기본 모델로 하여 개발한 식이다. HPCI는 식 (2.1)과 같이 포장의 다양한 파손을 종합하여 하나의 공용성 평가 지수로 나타낸 것으로 고속국도 포장상태를 정량화하기 위해 다양한 구간에 대한 파손조사와 평가단의 평가에 의해 도출된 모델이다(한국도로공사, 2009).

$$HPCI_{10m} = 5 - 0.78 \times IRI^{0.7} - 0.5 \times RD^{1.5} - 0.65 \times \log(1 + SDA \times 10) \quad (2.1)$$

여기서, IRI = 종단평탄성지수(m/km)

RD = 소성변형량(cm)

SDA = 균열 및 패칭의 환산면적(m²)

각 공구별 HPCI의 수치가 한국도로공사가 제시하는 HPCI 관리기준인 3.0보다 적을 경우 보수가 필요하다. 각 공구에서 조사된 HPCI는 2006년도에 비하여 감소한 것으로 확인되었으나 한국도로공사의 관리기준 이상으로 양호한 것으로 평가되었다. 그러나 도로 2공구의 경우 2006년도의 도로 3공구와 같이 HPCI가 3.0에 근접하여 집중적인 관리 및 보수가 필요한 것으로 판단된다. 또한 도로 3공구는 재포장을 실시한 결과 HPCI가 큰 폭으로 회복되었다.

2.3 잔존수명 예측 및 보수주기 산정

2.3.1 포장의 잔존수명 예측

본 연구에서는 2006년도에 예측한 잔존수명에 현재의 HPCI값을 연계시킴으로서 더욱 정확한 잔존수명을 예측하였다. 앞서 언급한 ARAN을 통한 포장상태 평가로 계산된 대상구간 고속도로의 HPCI를 2006년도에서 예측한 포장수명과 함께 그 경향을 살펴보면 그림 2.5, 2.6과 같다(한국도로공사, 2005).

그림 2.5는 도로 2공구의 HPCI 및 포장수명을 나타낸다. 2009년 현재 도로 2공구의 HPCI는 국도와 고속도로 평균 HPCI의 가운데 정도에 위치하며 도로 2공구의 잔존수명은 2006년도의 HPCI와 2009년도의 HPCI를 연결하여 경향을 분석한 결과 10년~11년으로 나타났다.

그림 2.6은 도로 1공구와 도로 3공구의 SMA포장의 포장수명을 예측한 결과이다. 도로 1공구의 포장도 다른 공구의 경우와 마찬가지로 2006년도의 HPCI와 현재의 HPCI의 경향을 통하여 포장수명을 예측하였다. 그러나 동해선의 SMA포장의 경우 약 13년 정도 공용될 것으로 예상된 것과 비교하여 도로 1공구의 경우 약 15년 정도 공용될 것으로 예상된다. SMA포장은 품질관리에 의해 공용성이 매우 차이가 크기 때문에 지속적인 모니터링이 반드시 필요하다.

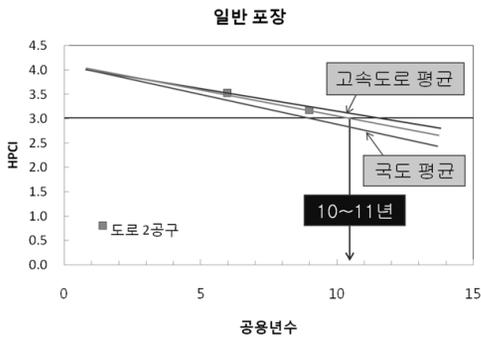


그림 2.5 공용성 자료에 근거한 일반포장의 포장수명 예측

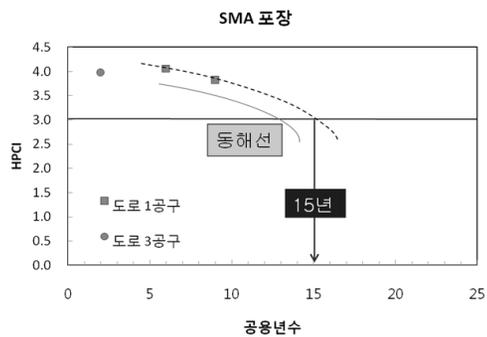


그림 2.6 공용성 자료에 근거한 SMA포장의 포장수명 예측

한편, 도로 3공구의 경우 2007년도에 재포장이 되었기 때문에 기존포장과 도로 1공구를 근거하여 공용년수를 알아보았다. 그 결과 동해선의 경향과 같아 포장수명은 13년 정도로 예측되나 정확한 포장의 공용수명을 예측하기 위해서는 앞에서도 언급하였듯이 SMA포장의 품질관리와 지속적인 모니터링이 동반되어야 한다.

2.3.2 보수주기 산정

앞 절에서 예측된 각 공구별 초기 공용수명은 도로 1공구 SMA 포장이 15년, 도로 2공구 일반 포장이 10년, 도로 3공구 SMA 포장이 약 13년으로 나타났다. 이러한 초기 공용수명에 근거하여 보수주기를 산정하면 그림 2.7과 같다. 현재 국도의 유지보수회수별 공용년수는 보수횟수가 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 도로 2공구는 국도와 동일한 보수주기를 적용하면 6회의 보수가 필요한 것으로 예상되었다.

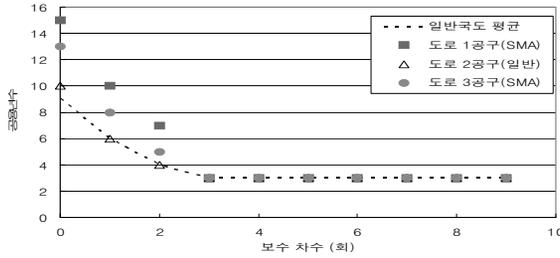


그림 2.7 포장의 보수주기에 따른 예상 공용년수

3. 포장 파손의 원인분석

3.1 현장 시료채취 및 균열깊이 측정

현장의 코어작업을 통한 시편 채취는 48개 지점에서 채취되었다. 채취된 시편은 실험실에서 포장층의 두께와 균열진전 깊이, 물성 측정, 교면포장 방수층 문제를 확인하고 실내공용성 시험을 실시하였다. 채취된 시편으로 표 3.1과 같이 설계포장 두께와 실제로 시공된 두께를 비교하였으며 균열부에서 채취한 시편으로 균열진전 두께를 확인하였다. 또한 2006년 당시에 균열진전 깊이와 비교하였다.

표 3.1 공구별 포장두께 및 균열진전 깊이

	설계포장두께(cm)	포장두께(cm)	균열진전 깊이(cm)	
			2006년	2009년
			범위	범위
도로 1공구	31.0	28.3~30.7	-	-
도로 2공구	30.0	27.8~32.2	4.2~5.4	10~15
도로 3공구	26.0	24.8~28.1	4.5~16.0	재포장*

대부분의 구간에서 설계두께와 실제 시공두께가 유사하였으며 도로 3공구의 경우 재시공이 실시되어 균열이 발견되지 않았다. SMA 표층으로 시공된 도로 1공구의 경우 표면은 육안상으로 건전하게 보였으나 코어 채취 결과 기층부분에 골재와 바인더가 분리되는 스트리핑 현상이 일부 확인되었다.

3.2 물성측정(공극률, 입도, 아스팔트 함량)

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.

혼합물의 아스팔트 바인더 추출시험은 용매를 이용하여 추출하는 방법과 아스팔트 바인더만을 태우는 시험장비를 이용하는 방법이 있다. 본 연구에서는 아스팔트 바인더 함량을 아스팔트 바인더를 태우는 장비를 이용하여 측정하였으며 그 결과는 표 3.2와 같다.

표 3.2 공구별 공극률 및 바인더 함량

공구	층구분	공극률(%)		바인더함량(%)	
		2006년	2009년	2006년	2009년
도로 1공구	표층 SMA(13mm)	3.4	2.4	7.9	6.3
	기층 밀입도(25mm)	2.9	2.8	5.5	4.7
도로 2공구	표층 밀입도(19mm)	2.0	2.8	6.3	6.3
	기층 밀입도(25mm)	4.0	3.3	7.2	5.6
도로 3공구	표층 SMA(10mm)	4.7	3.3	6.2	6.2
	기층 밀입도(25mm)	4.5	2.7	5.8	5.3
교량1구간	교면 SMA(10mm)	4.8	5.7	8.3	7.4

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 그림 3.1, 3.2와 같이 비교하였다. 골재를 태울 때 세립분에 함유된 유기물성분이 함께 타기도하여 그림에서 0.5mm이하의 세립골재 입도는 신뢰성이 떨어져 입도곡선에서 제외하였다. 체가름 시험 결과 모든 공구에서 시공당시 계획된 입도와 동일한 입도를 나타냈다.

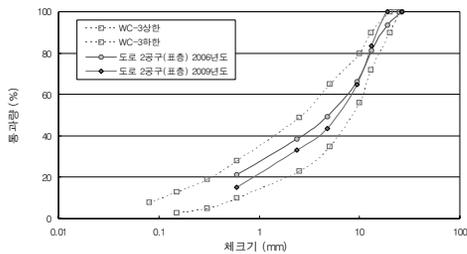


그림 3.1 입도 분포 비교
(도로 2공구 표층, WC-3)

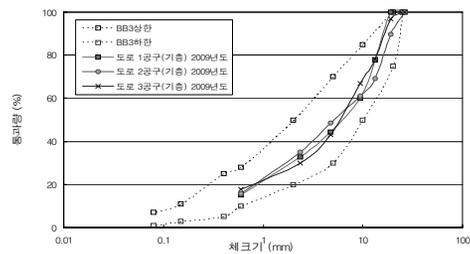


그림 3.2 입도 분포 비교
(도로 1~3공구 기층, BB3)

3.3 실내공용성 시험

3.3.1 시험 방법

동탄성계수 측정시험(Dynamic Modulus Tests)에 사용된 장비는 Servo-Hydraulic Closed Loop 시스템의 장비로서 MTS사의 모델 810(10Ton)이다. 시험은 간접인장방식에 의해 수행되었다. 시험에 이용된 시편은 현장에서 채취한 시편을 컷팅하여 직경 150mm, 높이 50mm 원통형 공시체를 사용하였다(건설교통부, 2003). 동탄성계수시험은 4개의 다른 온도 및 5개의 하중주파수를 이용하여 시험온도, 하중조건 및 변형량을 적용하였다.

피로시험(Fatigue Test)에 이용될 시편은 동탄성계수 측정시험과 동일한 과정을 통하여 시험용 시편을 제작하였다. 시험은 간접인장방식에 의해 수행되었고 시편의 상부 및 하부에 하중을 재하할 수 있는 재하장치는 LTPP(2001)에서 제안한 편심의 영향을 최소화할 수 있는 방법으로 제작하여 사용하였다.

3.3.2 시험 결과

현장에서 채취한 도로 1~3공구의 표층, 기층 시편으로 동탄성계수 시험을 수행하였다. 2006년도의 마스터 커브와 본 연구 영역의 동탄성계수 시험 결과를 통해 산정된 공구별 표층과 기층의 마스터커브는 그림 3.3, 3.4와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 하중주파수가 증가할수록 동탄성계수는 증가하였으며 2006년에 산정된 마스터커브 결과와 유사한 경향을 보인다.

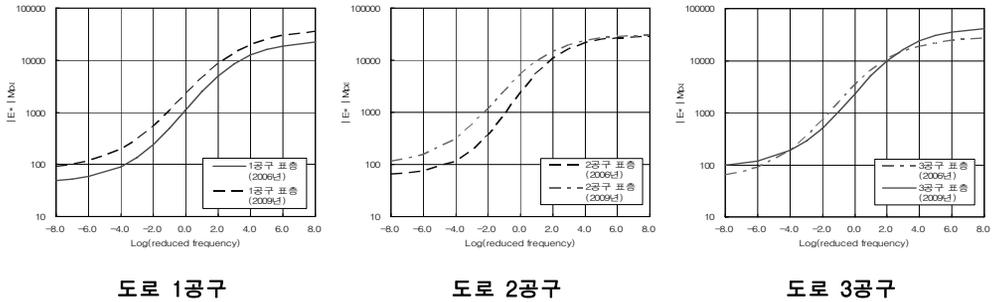


그림 3.3 표층의 마스터커브 (2009년, 2006년 비교)

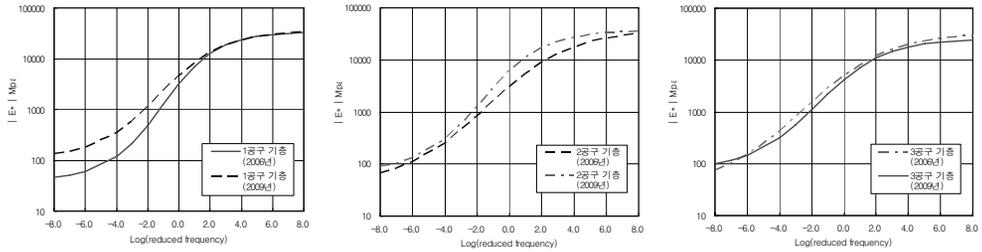


그림 3.4 기층의 마스터커브(2009년, 2006년 비교)

아스팔트 혼합물의 피로수명을 평가하는 가장 일반적인 방법은 혼합물에 대해 피로시험을 수행하여 얻어진 데이터로부터 강성(stiffness)을 계산하고 이를 통해 시편의 강성이 초기 강성의 50% 도달했을 때까지 시편에 가해진 하중재하회수를 피로수명으로 결정하는 방식, 그리고 하중재하회수에 따른 변형률 진폭의 변화를 그래프로 그린 다음 최소 곡률반경이 되는 지점의 하중재하회수를 피로수명으로 결정하는 방식이 있다(건설교통부, 2003). 하지만 변형률 진폭에 의한 방법은 최소 곡률반경 지점을 명확히 파악하기가 어렵기 때문에 본 연구에서는 시편의 강성이 초기 강성의 50%에 도달할 때까지 적용된 하중회수를 피로수명으로 결정하였다. 그림 3.5는 본 연구(2009년)와 2006년 당시 수행한 피로시험 결과이다.

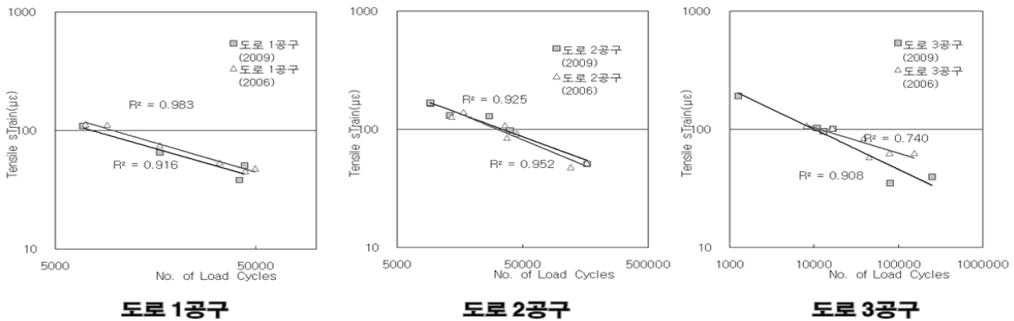


그림 3.5 피로수명 비교(2006년, 2009년)

2006년도에 실시한 피로수명의 결과와 유사하게 나타났으며, 도로 2공구 기층의 피로수명이 2006년도와 마

참가지로 상대적으로 우수한 것으로 나타났지만 도로 3공구의 경우 피로수명이 감소하는 것으로 확인된다.

9년의 공용기간이 지난 대상구간 고속도로의 피로수명은 본 연구기간내의 실내시험만으로 예측하기에 어려움이 따른다. 따라서 향후 지속적인 모니터링을 통해서 다양한 시험결과가 누적되면 더욱 정확한 수명을 예측할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구는 고속도로의 포장상태를 평가하여 포장의 잔존수명을 예측하였다. 그 모델로서 대상구간 고속도로의 전구간을 ARAN을 통하여 PCI(Pavement Condition Index)를 산정하여 포장의 공용년수를 예측하였다. 더불어 균열구간과 건전구간의 코어를 채취하여 균열구간의 시편은 균열정도나 포장 깊이 등을 육안으로 직접 확인하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

1. 대상구간 고속도로의 포장노면 평가를 위하여 포장상태조사장비인 ARAN을 통하여 조사를 수행하였다. 그 결과, IRI와 균열율이 한국도로공사의 관리 기준인 3.5m/km, 10%에 크게 못 미쳐 문제점이 발견되지 않았다. 그러나 도로 2공구의 경우 2006년도 결과에 비하여 높은 수치를 보였다. 소성변형량의 경우 관리 기준이 12mm 이하의 수치를 확인하였으나 소성변형이 공용개시 이후 2~3년 이내에 집중적으로 발생하는 것을 감안할 때 추후에도 소성변형의 발생은 크게 증가하지 않을 것으로 사료된다. 위의 결과를 종합하여 HPCI를 도출하였다. 각 공구별 HPCI는 관리기준인 3.0 이상의 수치를 나타냈지만 도로 2공구의 경우 HPCI가 3.0에 근접하여 보수가 시급한 것으로 확인 되었다.
2. ARAN을 통한 포장상태 평가로 계산된 대상구간 고속도로의 HPCI와 한국도로공사의 공용성 자료에 근거하여 포장수명을 예측하였다. 도로 1공구와 도로 3공구의 SMA포장의 포장수명은 각각 15년, 13년으로 예측되었으며, 도로 2공구의 경우 10~11년으로 나타났다. 대상구간 고속도로가 2000년도에 개통된 것을 감안하였을 때 도로 2공구의 포장은 재포장 시기가 임박한 것으로 확인 하였다.
3. 포장파손의 원인을 분석하고 포장층의 두께확인, 균열진전 깊이 등을 분석하기 위해 코어링을 통한 현장 시료를 채취하여 실내시험을 실시하였다. 균열진전 깊이는 도로 2공구 이외의 구간에서 균열이 발견되지 않았다. 도로 2공구의 경우 10~15cm의 균열을 확인하였으며, 이는 2006년에 4.2~5.4cm에 비하면 2배 이상 늘어난 수치이다. 물성측정을 위하여 공극률, 입도분석, 아스팔트 함량을 측정해 본 결과 기준치에 크게 벗어나지 않는 것을 확인하였다. 이는 시공당시 전 공구에서 시공관리가 잘 이루어진 것을 의미한다.
4. 또한, 동탄성계수 측정 시험과 피로 시험을 실시하여 공용 성능을 조사하였다. 포장의 피로수명은 도로 2공구 기층의 피로수명이 상대적으로 우수하게 나타났으며 도로 1공구 기층의 피로수명이 가장 취약한 것으로 확인되었다.

참고 문헌

1. 강릉대학교 공학연구소, (2000), "SBS PMA의 공용성 및 경제성 평가연구"
2. 개질 및 특수아스팔트 포장 연구회, (2006), "개질 및 특수아스팔트 포장의 종류"
3. 건설교통부, (2003), "건설교통 통계연보"
4. 건설교통부, (2006), "한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구", 2단계 2차년도
5. 세종대학교 건설기술연구소, (2001), "SBS 개질 SMA 혼합물의 실용화 연구" 최종보고서
6. Zube, E., (1962) "Compaction Studies of Asphalt Concrete Pavement as Related to the Water Permeability Test", Paper presented at 41st Annual Meeting of Highway Research Board, Washington, D.C.
7. LTPP, (2001), "Test Method for Determining the Creep Compliance, Resilient Modulus and Strength of Asphalt Material Using the Indirect Tensile Test Device", Nersion 1.1, LTPP Test Protocol P07, FHWA.