

## 시험도로 아스팔트 포장의 공용성 변화 분석

### Performance Evaluation of Asphalt Concrete Pavements at Korea Expressway Corporation Test Road

서영국\* · 권순민\*\*

Seo, Youngguk · Kwon, Soon-Min

#### Abstract

This paper mainly deals with the performance evaluation of 33 asphalt sections of Korea Expressway Corporation Test Road (KECTR) during the past four years. Since the construction of the KECTR in December 2002, key performance indicators of asphalt pavements have been collected five times with an Automatic Road Analyzer (ARAN), and have been analyzed for permanent deformation, surface distress, and road roughness. Linear viscoelastic characteristics of four dense graded HMAs used in KECTR were investigated with a series of complex modulus test. The effect of air void in HMAs on dynamic modulus was investigate at two air void contents for a surface course HMA (19 mm Nominal Maximum Size of Aggregate). Layer densification due to traffic was estimated from air void contents of field cored samples, and was correlated with pavement distresses and performances. One of findings of this study was that both permanent deformation and cracking were susceptible to pavement temperatures, rather than traffic. However, it was found that road roughness was mostly affected by traffic loading.

Keywords : test road, asphalt, ARAN, permanent deformation, vehicle speed

#### 요 지

본 연구는 지난 4년간 한국도로공사 시험도로 아스팔트 포장의 주요 손상인자의 정량화와 그 변화를 다루고 있다. 포장상 태조사 장비인 ARAN(Automatic Road Analyzer)을 이용하여 준공 직후인 2002년 12월부터 2006년 10월까지 총 5차례에 걸쳐 아스팔트 전단면에 대해 노면상태를 측정하고 소성변형, 균열손상, 그리고 종단평탄성을 중심으로 그 결과를 분석하였다. 실내시험을 통해 시험도로의 아스팔트 혼합물의 온도와 하중 재하속도에 대한 선형점탄성 거동을 비교하고, 표층용 혼합 물인 ASTM 19mm에 대해서는 동탄성계수에 미치는 공극률의 영향도 검토하였다. 일반 밀입도 표층 단면의 차륜부에서 추 출한 시편의 공극률을 측정하여 시험도로 포장의 다짐도 변화를 추정하였으며 이를 바탕으로 다짐도-포장 손상의 관계를 검 토하였다. 교통하중과 포장 손상과의 연관성 분석 결과 소성변형과 균열을 포함한 노면 손상의 증가는 교통하중이 재하되는 시기와 바로 일치하지는 않았으며 오히려 온도와 같은 환경에 더 영향을 받는 것으로 관측되었다. 반면에 노면 평탄성은 공 용년수가 증가 하면서 교통하중에 민감하게 반응하였으며 환경인자와의 상관성은 매우 낮은 것으로 나타났다.

핵심용어 : 시험도로, 아스팔트, ARAN, 소성변형, 재하속도

#### 1. 서 론

아스팔트 콘크리트 포장(이하 아스팔트 포장)의 손상 및 공용성 모형 개발을 위한 실험적 수단으로 크게 가속시험을 포함한 실내시험과 실물현장시험을 들 수 있다. 실내시험은 비교적 엄격하게 제어된 조건(온도, 수분, 하중, 압력 등)에서 포장 재료의 거동 및 관련 예측 모형 개발이 가능하지만 실제 도로의 교통하중 및 환경 변화를 반영하기 어려워 중 중 현실과는 다른 결과를 도출한다. 따라서 이러한 실내시험 결과를 실물현장시험으로 재검증하고 필요한 경우 모형 자체를 보정하는 작업이 필요하다. 도로포장연구에서의 실물현

장시험은 크게 하중재하방식에 따라 분류할 수 있는데, 하나는 이상화된 하중을 단기간에 반복 재하 하여 가속시험의 성격을 갖는 시험주로(Test Track)이고 나머지는 일반도로와 동일한 교통하중을 받는 시험도로(Test Road)이다. 우리나라에서는 두 시험 모두 포장설계변수의 유효성 검증과 포장의 증장기 공용성 평가를 위해 활용되고 있다.

지난 2002년 12월에 준공된 한국도로공사의 시험도로는 한국의 도로환경을 현실적으로 모사하여 아스팔트와 콘크리트 포장의 손상 및 공용수명을 예측하고 한국형 포장 설계 법 개발(건설교통부, 2004)을 위한 포장 응답 자료의 생성과 각 포장 형식별 성능비교가 가능한 국내 유일의 실물현장시

\*정회원 · 교신저자 · 한국도로공사 도로교통연구원 책임연구원 · 공학박사 (E-mail : seoyg89@ex.co.kr)

\*\*한국도로공사 도로교통연구원 전임연구원 · 공학석사 (E-mail : soomini2@ex.co.kr)

협시설이다. 영동고속도로 여주 분기점에서 충주방향으로 중부내륙고속도로와 나란하게 위치하고 있는 시험도로에는 온도계, 토압계, 변형률계를 포함하여 총 1900여개의 센서가 33개 단면의 아스팔트 포장과 25개 단면의 콘크리트 포장에 매설되어 있다. 준공직후 초기계측과 2004년 3월부터 매년 정기계측을 통해 정·동재하시험, 충격하중시험 등을 실시하여 포장의 주요 응답을 측정하고 있으며 주기적으로 시험도로 포장의 손상 및 공용성 평가를 위한 노면조사도 수행하고 있다.

본 연구는 2002년 말부터 약 4년간 시험도로 아스팔트 포장의 주요 손상과 그 변화를 분석하여 중·장기 공용성 예측에 활용하는 것을 목적으로 하고 있다. 자동 노면상태조사 장비인 ARAN(Automatic Road Analyzer, Roadware)을 이용하여 아스팔트 포장의 소성변형과 중·횡방향 균열, 피로균열 그리고 종단 평탄성을 정량화하고, 이를 바탕으로 새롭게 제안된 고속도로 포장상태평가지수(HPCI)를 산정하였다. 또한 아스팔트 포장의 각 층별 다짐 특성과 교통하중에 의한 다짐도 변화를 관찰하기 위하여 일반 밀입도 표층을 갖는 모든 단면에서 각각 준공 직후, 29개월, 그리고 57개월이 지난 시점에서 공시체를 추출하고 실내시험으로 공극률을 측정하였다. 공용기간 중에 시험도로를 통과한 일일교통량은 매설형 축중계(WIM, Weigh-In-Motion)를 이용하여 분석하였으며 이를 포장의 다짐도 및 손상도 변화와 비교하였다.

본 논문은 시험도로 아스팔트 포장의 거동 분석 및 장기 공용성 예측 연구의 중간결과로서 주요 포장 손상에 대한 정량화와 그 변화를 중심으로 기술하였다. 본 논문에서 제시하는 결과를 기초로 한국형 포장 설계법 개발은 물론이고 성능 중심의 지불규정 제시(건설교통부, 2006)를 위한 아스팔트 포장의 손상 예측 모형 개발에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 2. 시험도로 아스팔트 혼합물의 물성

본 장에서는 시험도로에 적용된 일반 밀입도(이후 밀입도) 아스팔트 혼합물의 구성에 대하여 간단하게 소개하고 각 혼합물에 대한 동탄성계수 측정결과를 정리하였다. 특히, 시편의 공극률이 동탄성계수에 미치는 영향을 조사하기 위하여 시험도로 표층용 혼합물(ASTM 19mm)에 대해서는 두 개의 서로 다른 공극률 - 기준 설계 공극률 4.0%와 비교용 공극률 6.2% - 을 갖는 시편을 제작하였다. 이를 바탕으로 혼합물의 동탄성계수와 포장의 다짐도의 상관관계를 이해하고 각각이 포장의 손상 및 공용성에 미치는 영향을 검토하고자 하였다.

### 2.1 시험도로 아스팔트 혼합물

그림 1은 현재 시험도로에 적용된 4가지 밀입도 아스팔트 혼합물의 - 표층(ASTM 19mm), 중간층(BB5), 그리고 기층(BB1 혹은 BB3) - 설계 입도 곡선이다. 입도 분포 곡선에 나타난 바와 같이, BB3와 ASTM 19mm는 조골재 부분에 서만 다소 다르며, 전반적으로는 중간 또는 세립의 입도 분포이고, BB5는 조립에 가까운 입도분포를 보이고 있다. 기

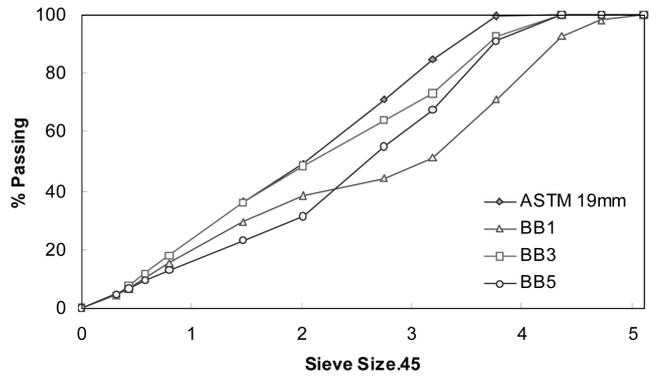


그림 1. 시험도로 밀입도 아스팔트 혼합물의 입도분포

층으로 사용된 BB1은 9.5mm와 2.36mm체 사이에서 약간의 갭입도를 보이는 구성이다. BB5와 BB3는 골재의 공칭 최대 입경이 25mm이고 BB1은 40mm 골재를 최대입경으로 사용하고 있다. 골재의 품질 시험 결과 일부 굵은 골재의 편장석 함유량이 기준을 약간 상회하는 것을 제외하고는 전반적으로 양호한 것으로 나타났다.

BB5입도는 소성 변형의 원인이 되는 전단응력에 효과적으로 저항하기 위한 내유동성 입도이며, 표층용 혼합물의 입도도 기존의 WC-3의 중간입도를 사용하지 않고 WC-3기준의 하한선에 근접한 입도를 가진 ASTM 19mm의 중간입도를 선정하여 소성변형에 대한 저항성을 증진시키고자 하였다.

모든 밀입도 포장에 사용된 아스팔트 바인더는 침입도 60~80의 AP-5를 사용하였으며 KS 규격시험 및 공용성 등급시험 결과는 참고 문헌(한국도로공사, 2002)에 자세히 기술되어 있다. 슈퍼페이브(Superpave) 배합 설계법 기준을 적용하면 ASTM 19mm, BB3와 BB5는 모두 19mm 공칭 최대 입경의 혼합물로 분류되며 BB1은 37.5mm 혼합물로 구분될 수 있다.

### 2.2 동탄성계수

동탄성계수(Dynamic Modulus, DM)는 선형-점탄성 조건에서 아스팔트 혼합물의 강성이 갖는 온도와 시간에 대한 종속성을 정의하는 역학적 물성으로 포장 구조 해석이나 주요 손상예측 모형의 입력변수로 사용되고 있다. 최근의 AASHTO 설계법(AASHTO 2002)을 비롯하여 점차 많은 역학-경험적 설계에서도 기존의 회복탄성계수 대신에 동탄성계수를 아스팔트 혼합물의 기본물성으로 사용하도록 하고 있다.

시험도로 밀입도 혼합물에 대한 동탄성계수는 기본적으로 AASHTO TP-62(AASHTO TP-62, 2003)에서 규정하는 복소수계수 시험(Complex Modulus Test)으로 구하였다. 다만 시험의 효율성을 높이기 위해 온도와 하중주파수는 각각 4개의 온도(-10, 10, 35, 54°C)와 8개의 하중주파수(25, 10, 5, 1, 0.5, 0.1, 0.05, 0.01Hz) 조건을 적용하였다. 각각의 혼합물에 대하여 슈퍼페이브 선회다짐기를 이용하여 직경 150mm, 높이 200mm의 원주형 시편을 제작하였고 모든 혼합물의 평균 공극률은 4.0%로 하였으며 ASTM 19mm 혼합물에 대해서는 6.2% 혼합물을 추가로 제작하여 동탄성계수에 미치는 공극률의 영향을 간단하게 살펴보았다. 시험 및 시편 제작 편차를 고려하여 각 혼합물 별로 최소 3개의 시

편에 대하여 반복실험을 실시하였다. 자세한 실험과정과 결과 분석은 다른 연구(Seo et al., 2007; Kim et al., 2005)에서 다루고 있다.

그림 2(a)와 2(b)는 시험도로에 적용된 혼합물의 동탄성계수의 주곡선(DM Master Curve)으로 각각 로그-로그 좌표계와 일반-로그 좌표계에 나타내었다. 이렇게 동일한 결과를 다른 좌표계에 도식하는 이유는 각 혼합물간의 물성을 모든 온도-주파수 영역에서 자세하게 비교할 수 있기 때문이다. 예를 들면, 고온-저주파수에서의 혼합물의 물성은 일반-로그 좌표계(그림 2(a))에서, 저온-고주파수에서의 물성은 로그-로그 좌표계(그림 2(b))에서 검토하기가 용이하다. 동탄성계수의 주곡선을 분석한 결과 전반적으로 모든 조건에서 기층재료인 BB1을 제외한 대부분의 혼합물이 서로 유사한 물성과 시간-온도 중속성을 가지고 있는 것으로 나타났다. 일반적으로 혼합물의 시간-온도 중속성은 로그-로그 좌표계에서 주곡선의 중간영역에서의 기울기로 판단할 수 있다.

기층재료로 사용된 BB1과 BB3의 동탄성계수를 비교해보면 BB1이 고온(혹은 저속하중)에서 소성변형에 대한 저항능력이 상대적으로 낮고 저온(혹은 고속하중)에서도 피로균열에 취약한 혼합물로 보여 진다. 물론 동탄성계수와 포장의

공용성과의 상관관계를 밝히기에는 아직은 검토해야 할 요소들이 많지만, 본 연구에서와 같이 시공조건이 유사하고 교통하중 및 환경변화가 동일한 시험도로에서는 적어도 두 기층용 혼합물의 물성이 포장 손상에 미치는 영향에 대한 상대적 평가는 가능하다고 판단되었다. 이에 관련된 내용은 뒤에서 자세하게 다루기로 한다.

그림 2(b)와 같이 동일한(ASTM 19mm) 혼합물에서 공극률이 증가하면 거의 모든 온도-주파수 영역에서 동탄성계수가 작아지는 것을 알 수 있다. 골재의 최대입경이 다른 밀입도 혼합물에 대한 측정 결과(Seo et al., 2007; Kim et al., 2005)도 본 연구와 매우 유사하다는 것을 확인하였다. 이와 같은 현상을 혼합물 내부에 공기가 차지하는 부피가 증가하면 일반적으로 혼합물의 강성이 저하되는 효과 때문이다.

혼합물의 동탄성계수와 공극률의 관계는 실제 도로에서 포장의 손상 및 공용성과 아스팔트 포장의 다짐도와의 관계로 유추 해석할 수 있다. 최근 연구에 의하면 아스팔트 포장의 급격한 다짐도 증가는 대부분 초기교통하중에 의한 것으로 보고 있다. 미국 노스캐롤라이나 주 I-85 고속도로에서 추출한 시편에 대한 공극률 변화를 측정된 결과에 따르면, 준공 후 약 2년 내에 대부분의 시편에서 초기 공극률의 약 20~40% 정도의 공극률 감소가 발생하였다. 이러한 현상은 초기 공극률이 클수록 두드러지게 나타났다(Seo et al., 2007). 공용 후 2년이 지나면서 교통하중에 의한 공극률 감소는 거의 발생하지 않았으며 그 감소율도 매우 작은 것으로 나타났다. 더군다나 이 시기에 -다짐이 거의 발생하지 않는 -측정한 혼합물의 여러 가지 물성(예: 간접인장강도, 파괴시 인장 변형률, 회복탄성계수 등)에도 거의 변화가 없었다(Hanson et al., 1994). 이와 같은 결과는 아스팔트 포장의 손상 및 공용성이 혼합물의 초기 공극률과 그 변화에 매우 높은 관련이 있음을 시사하고 있다. 따라서 우선 시험도로 아스팔트 포장에서의 다짐도와 교통하중의 변화를 살펴보고 이를 포장의 손상과 비교하기로 하였다.

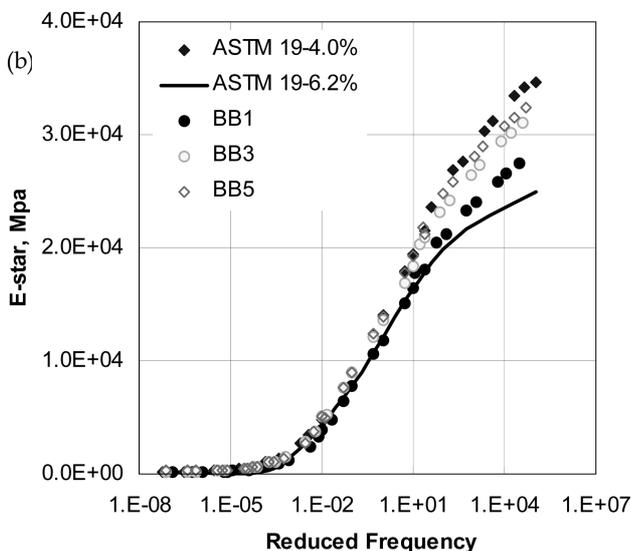
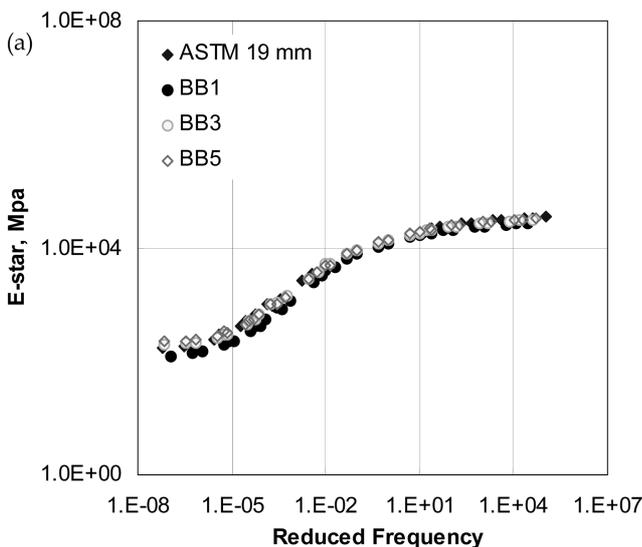


그림 2. 동탄성계수 주곡선: (a) 로그-로그 좌표계; (b) 일반-로그 좌표계

### 3. 시험도로 교통특성과 아스팔트 포장의 다짐도 변화

#### 3.1 시험도로 일일 총교통량

시험도로 포장의 손상에 영향을 미치는 차종 및 축하중, 차량 속도 등 각종 교통자료를 수집하고 이를 바탕으로 교통하중에 따른 포장 거동의 변화 검토, 과적차량의 고속도로 주행에 따른 포장손상 분석 등에 활용할 목적으로 축중계(WIM, Weigh-In-Motion)를 설치, 운영하고 있다. 계측의 정확성과 내구성 등을 고려하여 Quartz식 센서(LINEAS WIM Sensor Type 9195C)를 사용하였다. LINEAS Type 9195C는 ±3%의 비교적 높은 계측 정확성을 갖는데, 이는 전하를 방출하는 Quartz 자체가 전기적으로 매우 안정적인 형태를 취하고 있기 때문이다. 또한 구조상 교통하중에 의한 수직압만 받도록 설계되어 있어, 축압에 의한 데이터의 오류 발생 가능성을 낮춘다. 고속 축중계의 측정가능속도는 5~200 km/h이고, 포장의 재질과 거의 동일한 패드가 상부에 설치되어 포장의 마모와 거의 동일하게 변형이 일어나며, 패드를 갈아낼 수 있도록 되어 있어 평탄성 유지가 용이하다(한국도

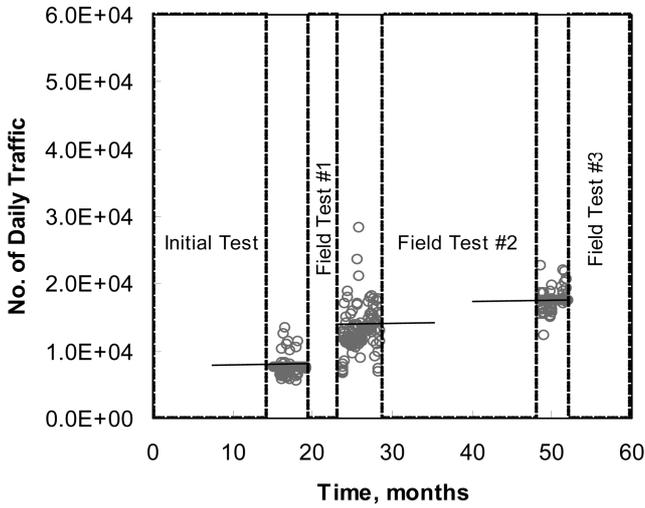


그림 3. 시험도로 일일 총 교통량 분포도

로공사, 2003).

그림 3은 시험도로에 교통하중이 최초로 재하되기 시작한 2004년 3월 24일부터 2007년 4월 9일 중 시험도로가 교통하중에 개방된 총 379일 동안의 일일 총 교통량이다. 계측기가 매설된 1, 2차로에서 수집한 모든 차량대수가 포함되어 있다. 계측자료가 존재하지 않는 시기는 초기계측과 정기계측이 수행된 기간으로 교통흐름을 인근 중부내륙고속도로 본선으로 유도하여 시험도로에는 시험차량 외에는 차량하중이 재하되지 않았음을 의미한다. 준공이후 수집된 자료를 보면 1차 정기계측 전, 후에 일일 평균 교통량이 각각 7,669대와 13,171대로 점차 증가하고 있음을 알 수 있다. 2차 정기계측이후의 일일 평균 교통량은 17,646대로 조사되었으며 일반적으로 주중 교통량이 주말보다 크게 분포하였다. 2004년 4월 1일부터 2005년 4월 30일 사이에 시험도로 차종의 특성 분석결과 총 101,372대 중에서 총중량 약 1톤의 1종 차량이 약 60%를 차지하고 있었다. 포장의 손상과 관련이 있는 축하중이 가장 큰 3종 차량(총 중량 약 12톤)은 전체 교통량의 약 7.7% 정도 차지하는 것으로 조사되었다.

시험도로에서 실시한 두 번째 정기계측(그림 3의 Field Test #2)에서는 시험장비의 수선 및 장마, 폭설과 같은 시험에 부적절한 환경 등 예상하지 못한 현장여건으로 첫 번째 계측(Field Test #1)에 비하여 많은 시간이 소요되었다. 두 번째 계측이 끝나는 시점인 2006년 12월 21일(준공 후 약 48개월)에 인근 중부내륙고속도로(하행선)에서 시험도로로의 교통전환이 이루어 졌으며 2007년 4월 9일에 다시 시스템 점검을 위한 교통제한(중부내륙고속도로로의 교통전환)이 실시되었다.

### 3.2 아스팔트 포장의 다짐도 변화

시험도로 아스팔트 포장의 초기 다짐도와 공용후 약 29개월과 약 57개월이 경과된 시점에서의 다짐도 변화를 조사하였다. 각 시험단면에서의 다짐도는 현장에서 추출한 시편에 대하여 측정된 공극률로 추정하였다. 시험법은 KS F 2446 (다져진 역청 혼합물의 겉보기 비중 및 밀도 시험 방법)규정에 의거하였다. 모든 시편은 150mm 직경을 갖는 원주형으로 각 포장 단면별로 최소한 차륜부에서 2개, 차선 중앙에서 1개씩을 추출하였으며 다짐변화가 심한 차륜부에서 측정된 값만을 분석하였다. 또한, 각 포장의 층별 다짐도 측정을 위하여 추출한 모든 시편은 각 층의 경계면을 따라 절삭하였다.

표 1은 시험도로 아스팔트 단면에 대한 각 층별 평균 다짐도와 그 변화를 나타내고 있다. 중간층을 제외하고는 모든 단면에서의 초기 공극률이 품질기준인 3%~8% 조건(도로공사표준시방서, 2003)을 크게 벗어나지 않았으며 전반적으로 공극률 감소가 매우 완만하였다. 이는 시험도로가 정기계측 및 계측기 유지보수 등으로 인하여 교통하중에 노출된 기간이 비교적 짧았기 때문으로 판단된다. 실제로 준공 후 약 5년(57개월)이 경과된 시점에도 평균 공극률이 5.0%이하로는 저하되지 않았다.

표 1의 설계값은 배합 설계시 공극률로서 시험도로 포장의 준공직후 초기 공극률은 대부분 설계값보다 크고 중간층의 경우 이 차이는 6.0% 이상이었다. 아울러 총 교통량은 준공직후 각각 29개월과 57개월에 측정된 일일 총 교통량이 누적된 값이고 괄호안의 변화율은 식 1과 같이 정의하였다.

$$\text{다짐도 변화율}(\%) = \frac{(\text{초기공극률} - \text{현재공극률})}{(\text{초기공극률} - \text{설계공극률})} \times 100 \quad (1)$$

현재 공극률이 설계 공극률과 같으면 식 (1)의 다짐도 변화율은 100이다. 표 1과 같이 층별 다짐도 변화율은 중간층이 가장 높았으며 표층과 BB1 기층이 그 뒤를 따랐다. 각 층의 초기 공극률이 공용중 공극률 변화에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 그림 4와 같이 대상 단면을 A2, A7, 그리고 A8로 제한하여 공극률 변화를 분석하였다. 단, 각 계측 시점별(29개월과 57개월)로 측정값의 개수가 동일하지 않아 평균값 대신에 최대값을 사용하였다. 그림에서 보는 바와 같이 초기 공극률이 클수록 - 시공직후 다짐도가 낮을수록 - 포장의 다짐도 증가(공극률 감소)가 높게 일어나는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 포장의 다짐도 변화가 차량하중으로부터 얼마나 가까운 층에 존재하느냐 보다는 시공직 후 초기 공극률에 더 민감할 수 있음을 보여주고 있다. 기층을 포함한 일부 포장층에서는 다짐도가 오히려 약간 감소하는

표 1. 시험도로 아스팔트 포장의 층별 평균 공극률 변화

측정시점	층별 평균 공극률				총교통량	비고
	표층(ASTM19)	중간층(BB5)	기층(BB3)	기층(BB1)		
설계값	4.2	4.8	5.5	5.1	-	평균 (변화율)
시공직후	6.2	10.4	8.1	6.0	-	
29개월	5.9(15.0)	8.1(41.1)	8.0(3.8)	-	2,831,193	
57개월	5.4(40.0)	7.5(51.8)	7.6(19.2)	5.7(33.3)	4,785,488	

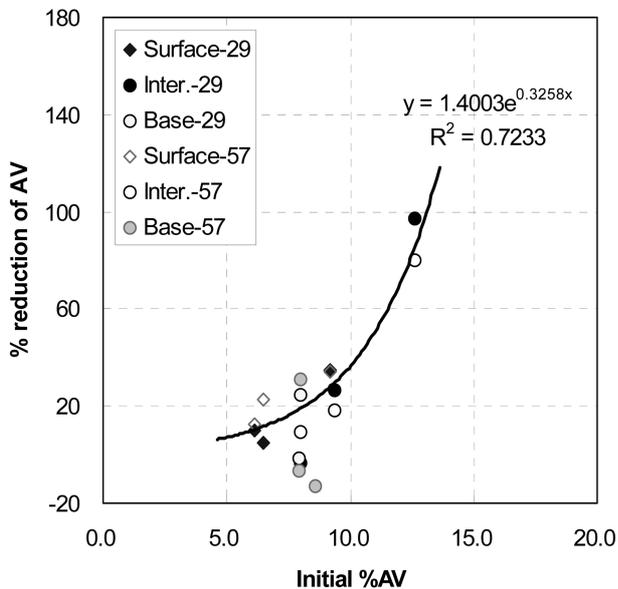


그림 4. 표층, 중간층, 기층의 초기 공극률이 다짐도 변화에 미치는 영향(범례의 수는 개월 수)

결과를 보이나 이는 교통하중에 의한 차륜부 주변 혼합물의 국부적 유동에 의한 영향으로 추정되며 대부분 57개월에 측정된 데이터가 이에 해당되었다. 그림 4의 회귀분석은 다짐도가 증가하는 측정값에 대해서만 국한하였다.

#### 4. 공용성 변화 관측을 위한 노면조사

본 연구에 사용한 포장상태조사장비는 캐나다 ROADWARE사에서 제작한 ARAN(Automatic Road Analyzer)-4900C로 주행 중에 전면영상, 노면영상, 소성변형 등을 측정할 수 있다. 구성 시스템은 크게 아스팔트 포장의 소성변형 측정을 위한 소성변형측정 시스템(Smart Rutbar), 노면영상촬영을 위한 2대의 2차원 스캔 카메라, 종단평탄성 측정을 위한 2가지 보조시스템으로 구성되어 있으며, 이들은 모두 차량이 동거리 측정기(DMI)와 연동되어 동일한 위치에서 동시에 데이터를 획득할 수 있도록 되어있다. 또한 측정구간의 개략적인 선형이나 주변상황 등의 파악을 위해 전방영상촬영 카메라가 장착되어 있으며, 최대 조사속도는 약 80km/h이다.

##### 4.1 노면영상촬영

차량 후방에 장착된 2대의 고해상도 카메라를 이용하여 측정된 노면영상은 폭 3.6m 이상, 길이 10m의 JPG 형태의 파일로 측정과 동시에 저장된다. 후처리프로그램인 WiseCrax을 이용하여 계측된 이미지에 분석자가 표시한 포장손상이 자동적으로 정량화되어 집계된다. 본 연구에 적용된 카메라의 최소 균열 인식 폭은 약 3mm이다.

##### 4.2 소성변형

소성변형은 도로 양측 차륜부에 대한 측정을 중심으로 최대 가능한 측정폭이 약 3.6m이지만 시험도로 계측에서는 측정폭을 약 3m로 고정하였다. 소성변형 측정 시스템의 기본 모듈은 초음파 센서이고 횡방향으로 약 37개의 센서가 10cm 간격으로 장착되어 있으며 이중에서 19개 센서는 모

듈박스에 그리고 나머지 18개 센서는 ARAN 정방의 확장 프레임에 각각 8개씩 설치되어있다. 개별 센서의 측정 정밀도는 1mm이다.

소성변형 영향 깊이는 각 계측위치에서의 줄자에 의한 측정원리와 동일한 개념으로 산정하였다. 현재 소성변형 분석 소프트웨어를 이용하면 직선법(Wired Method)에 의한 방법과 줄자(Straight Edge Method)에 의한 방법 모두 적용이 가능하나 일반적으로 줄자에 의한 방법이 직선자에 의한 방법보다 약간 큰 계측값을 얻는다는 점을 감안하여 비교적 안전측인 줄자에 의한 방법으로 소성변형을 측정하였다.

#### 4.3 종단평탄성 측정

종단평탄성의 측정은 소성변형과 마찬가지로 매 10m 간격으로 수행되며, 도로 양측 차륜부에 대한 측정이 가능하다. 측정 장비는 크게 캘리포니아 프로파일로 그래프와 같이 인력에 의해 측정하는 형태와 장비에 탑재하여 주행 중 종단평탄성을 측정하는 형태로 나눌 수 있는데, 후자에 의한 방법은 다시 측정방식에 따라 반응형 방식(Response Type)과 관성형 장비(Inertial Profilometer)로 구분할 수 있다. 각각의 방식의 가장 큰 차이점은 관성형 장비가 실제 노면의 요철량을 측정하는 반면 반응형 장비는 차량의 상하 진동을 측정한다는 점이다. 따라서 관성형 장비가 차량의 특성에 관계없이 일정한 종단평탄성을 확보하는데 비해 반응형 장비는 차량의 서스펜션 특성, 차량중량, 타이어공기압 등 차량 종류 및 특성에 따라 측정결과가 달라지므로 적용시 주의를 기울여야 한다. 자세한 ARAN의 측정원리는 최근의 보고서(로드코리아, 2007)에서 다루고 있다.

#### 5. 결과 분석

##### 5.1 소성변형 깊이

그림 5와 6은 지난 2004년 9월(시험도로 준공 후 약 22개월)부터 2006년 10월(약 49개월)까지 모든 아스팔트 단면에서 측정된 소성변형 깊이의 변화를 보여주고 있다. 소성변형은 1, 2차로에서 모두 측정하였으나 중차량이 주로 통행하고 손상이 주로 발생한 2차로를 중심으로 분석하였다. 2006

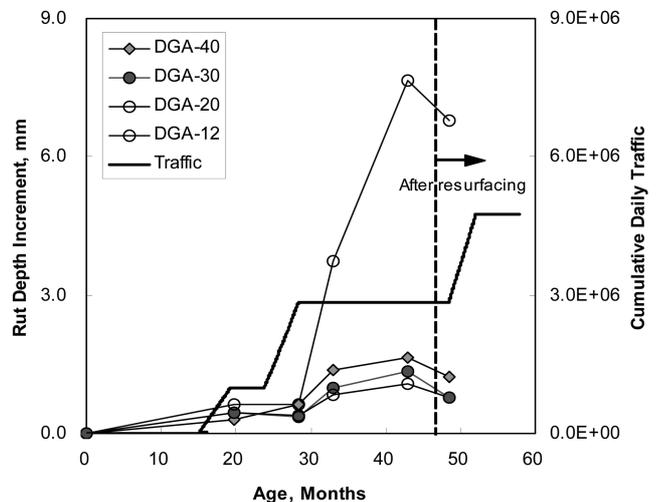


그림 5. 밀입도 단면의 두께별(12, 20, 30, 40cm) 소성변형 증가량의 변화

년 10월경에는 손상이 심한 단면(주로 12cm 두께의 얇은 포장)에 대한 노면보수(절삭 후 덧씌우기, 부분재료 치환 등)가 시행되었다.

그림 5는 밀입도(이하 밀입도) 표층을 갖는 단면에서의 아스팔트 층의 두께별 소성변형 증가량이다. 시험도로 준공직후의 소성변형 측정값을 기준으로 하여 각 시기별 소성변형의 증가량을 산정하였으며 일별 누적교통량과 비교하여 연관성을 찾아보고자 하였다. 가장 두께가 얇은 12cm 두께 포장(DGA-12)에서는 소성변형 증가량이 거의 8mm까지 기록되었지만, 포장의 두께가 20cm 이상이 되면서 부터는 소성변형의 증가량에는 큰 차이가 없었으며 최대 증가 폭도 2mm 미만이었다.

첫 번째와 두 번째의 교통개방일수는 각각 126일과 141일로 교통개방일수가 비슷하였음에도 불구하고 두 번째 교통개방 직후(그림에서 공용 후 약 28개월에 측정된 데이터) 밀입도 단면에서의 소성변형의 증가는 첫 번째 교통개방 직후(약 20개월)에 비하여 상대적으로 작았다. 이는 포장 온도가 낮고 포장하부의 강성이 계절적으로 높은 시기(2004년 12월 08일~2005년 4월 28일)의 영향이고, 첫 번째 교통개방 직후 소성변형의 증가는 높은 포장 온도 때문인 것으로 판단되었다. 실제로 정기계측시기인 30개월(2005년 4월 29일)부터 49개월(2006년 12.20일) 사이에는 교통개방이 없었는데도 불구하고 꾸준한 소성변형의 증가가 관측되고 있다. 물론 포장의 초기 다짐도 어느 정도는 영향을 있었을 것이다. 앞에서 언급한 바와 같이 49개월 인근의 소성변형의 감소는 주로 노면 보수에 의한 결과로 판단되었다. 단, 대부분

의 포장 보수는 얇은 포장 위주로 수행되었기 때문에 비교적 두꺼운 포장(30cm 혹은 40cm)에서의 소성변형의 영향 깊이는 측정오차에 기인하는 것으로 보아야 할 것이다.

그림 6은 서로 다른 표층 재료로 구성된 단면 중에서 각각 최소(12cm), 최대(40cm) 두께를 갖는 포장에서 측정된 소성변형의 변화이다. 여기서 주목할 만한 사실은 시험도로 SMA 포장의 소성변형에 대한 상대적 취약성이다. 시험도로에 적용된 토공부 SMA와 PMA 혼합물은 최대입경이 모두 13mm이고 PG76-22의 SBS 개질 아스팔트 바인더를 사용하였다. 시험도로 SMA 포장은 표층 5cm만 SMA 혼합물로 시공되어 있고 중간층과 기층은 밀입도로 구성되어 있는데, 그림 6(a)와 같이 얇은 SMA 포장에서는 소성변형 증가량이 최대 8mm 이상 관측되었다. 그림 6(b)와 같이 가장 두꺼운(약 40cm) SMA 포장의 경우에도 얇은 포장에 비하여 소성변형의 영향 깊이는 상대적으로 얕았지만 밀입도 표층과 비교하여 보면 그 절대값은 물론이고 증가율도 크다는 것을 알 수 있었다. 대체적으로 가장 얇은 포장에서는 PMA 포장이 다른 포장 보다는 소성변형에 대한 저항성이 높았으며 포장이 두꺼워지면서 PMA도 밀입도 포장과 유사한 소성변형에 대한 저항성을 보였다.

현재 미국 FHWA에서 제시하는 소성변형에 대한 보수기준은 약 12.5mm(0.5inch)로 이보다 크게 발생하는 경우 우천시 수막현상을 유발한다고 판단하여 보수를 권장하고 있다. 이 기준을 적용한다면 현재 시험도로 포장 단면중에서 12cm 두께의 SMA 포장(SMA-12)일부 구간이 보수대상이 해당될 것이다. 이와 같이 시험도로 SMA포장의 소성변형에 대한 상대적 취약성은 시공불량, 재료에 대한 품질관리 소홀 등 여러 가지 원인을 들 수 있겠으나 현재 논리적으로 증명할 방법은 없는 것으로 보고 있다.

### 5.2 아스팔트 포장의 노면손상(Surface Distress Area, SDA)의 변화

본 장에서는 시험도로 아스팔트 포장단면에서 발생한 노면손상을 정량화하고 포장 두께와의 상관관계를 검토하였다. 본 장에서 정의하는 노면손상은 선형균열(종방향 균열과 횡방향균열 포함), 피로균열, 그리고 패칭이며, 이와 같은 손상을 모두 아래의 식 (2)와 같이 면적(m<sup>2</sup>)으로 환산하여 정량화하였다

$$\begin{aligned} \text{노면손상(SDA)} \\ = (LC + TC) \times 0.3 + \text{Patching Area} + FC \end{aligned} \quad (2)$$

- 여기서, LC = 종방향 균열, m  
 TC = 횡방향 균열, m  
 Patching Area = 패칭면적, m<sup>2</sup>  
 FC = 피로균열 발생 면적, m<sup>2</sup>

그림 7은 두께가 다른 밀입도 포장과 12cm 두께의 SMA 그리고 PMA 포장에서 발생한 노면손상의 변화를 보여주고 있다. 12cm 두께의 얇은 포장에서 노면손상이 많이 발생하였으나 포장 두께가 20cm 이상에서는 노면손상이 많이 발생하지는 않았다. 특히 소성변형과는 달리 얇은 포장에서는 두 번째 교통하중 후에도 노면손상이 크게 증가하였다. 노면

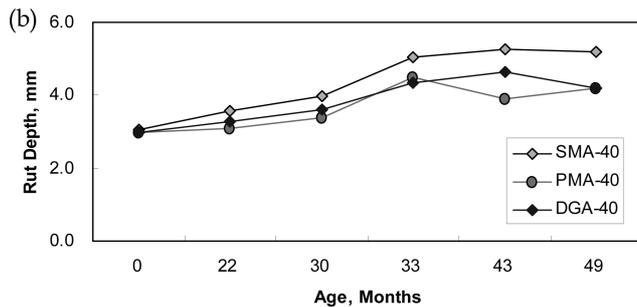
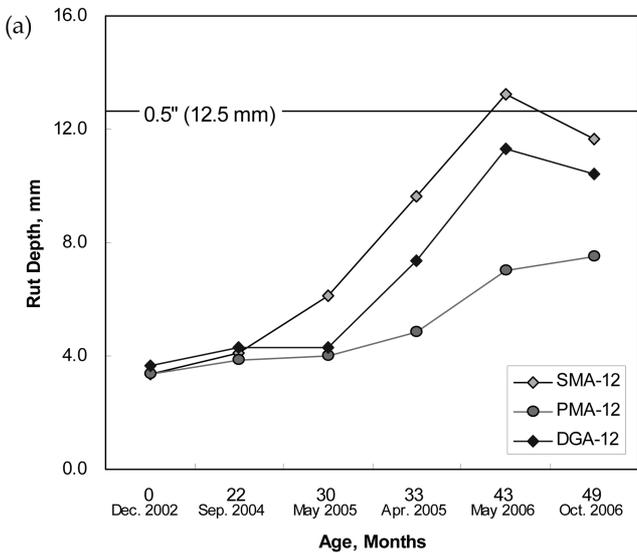


그림 6. 각 포장 재료별 소성변형 깊이 변화: (a) 12cm 두께; (b) 40cm 두께

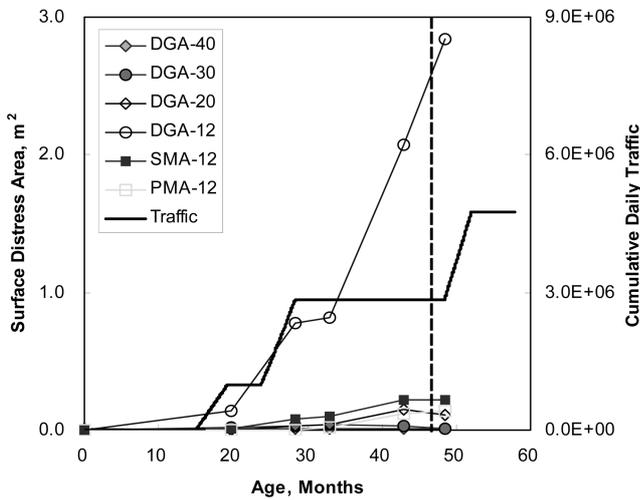


그림 7. 포장 노면손상의 변화

손상은 주로 균열을 정량화 하고 있기 때문에 포장 온도가 낮은 조건에서 차량 반복하중이 피로균열을 포함한 균열의 진전에 미치는 영향이 크게 부각될 것으로 예상할 수 있다. 실제로 두 번째 정기계측기간(그림 4의 Field Test #2)의 초반에는 포장이 고온에 장시간 노출된 시기로 균열과 같은 노면손상의 증가가 상대적으로 완화되었지만 다시 온도나 낮아지면서(약 43개월) 노면손상이 급격하게 증가하였다. 물론 이 시기(두 번째 정기계측)에 교통하중의 재하는 없었지만 만재한 시험차량의 빈번한 주행의 영향이 어느 정도는 손상에 기여하고 있었음을 추정할 수 있다.

가장 얇은 단면에서 표층의 종류에 따른 노면손상의 변화를 살펴보면, PMA와 SMA 포장 모두 밀입도 포장에 비하여 노면손상에 대한 저항성능은 우수한 것으로 조사되었다. 공용 후 4년이 경과한 시점에서 SMA 포장에 발생하는 노면손상의 규모는 밀입도 포장에 비해 약 10% 미만이었다. 그림의 수직점선은 일부 단면에 대한 유지보수가 시행된 시점을 표시하고 있다.

### 5.3 고속도로 노면 중단평탄성(IRI)의 변화

그림 8과 같이 밀입도 포장의 공용초기에 중단평탄성은 비교적 두께가 얇을수록 좋지 않았으나 가장 얇은 포장을 제

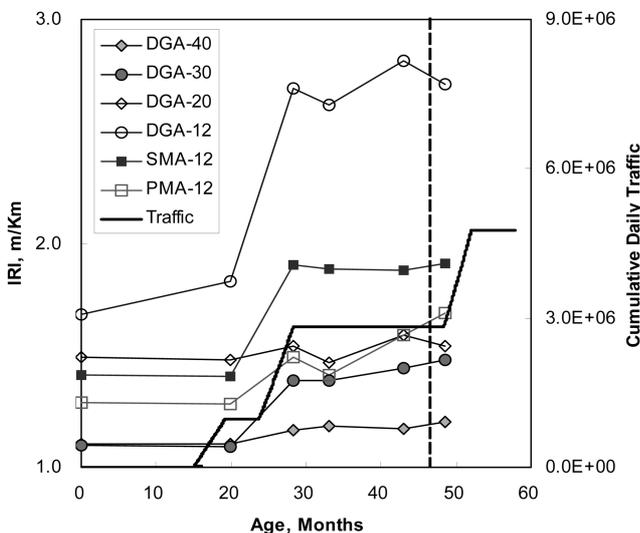


그림 8. 포장 평탄성 변화

외하고는 공용중 평탄성 변화가 크지는 않았다. 얇은 포장의 평탄성 저하는 두 번째 차량하중 재하 직후 두드러졌으며, 교통하중이 재하되지 않는 경우에는 평탄성 변화가 거의 없었다. 또한 평탄성은 앞의 소성변형이나 균열을 포함한 노면 손상과는 달리 포장 온도와 같은 환경에 영향을 받지 않는 것으로 판단되었다. 본 연구에서와 같이 포장의 구조적 혹은 기능적 성능변화가 평탄성과 무관한 결과를 보일 수 있기 때문에 아스팔트 포장의 평탄성만을 포장의 공용성 평가 지표로 사용하는 것은 매우 신중하게 고려해야 할 것으로 보인다.

이 경향은 표층의 종류가 다른 경우에도 그대로 적용되었다. 두 번째 교통하중이 재하된 직후(약 30개월), 평탄성이 악화되었으나 이 이후로는 지속적인 교통하중의 부재로 평탄성에 변화는 거의 없었다. 평탄성의 저하는 밀입도 포장이 가장 크고 그 뒤로 SMA, PMA 포장 순으로 관측되었다. 평탄성과 관련된 미국의 관리기준은 각 도로국마다 약간 차이가 있으나 일반적으로 3.2(인디애나주)에서 3.8(메인주)사이의 값을 기준으로 하고 있다. 우리나라의 경우 국도에서는 4.0을 IRI의 관리한계로 보고 있다.

### 5.4 고속도로 포장상태평가지수(HPCI)의 변화

국내 고속도로 포장은 Highway Pavement Condition Index(HPCI) 즉, 포장상태평가지수를 이용하여 포장 관리 및 유지보수 시기를 결정하고 있다. 1996년에 처음으로 제시된 HPCI는 미국의 AASHTO 시험도로(1950)에서 개발된 Pavement Serviceability Index(PSI)와 유사한 개념을 바탕으로 하고 있다. 하지만 개발 당시 사용한 30개 대표구간은 서로가 유사한 포장 상태여서 전체 고속도로를 대상으로 하는 공용기간 및 파손에 대한 객관적 평가가 어려웠다. 또한 그룹평가에 주관적인 승차감이 HPCI 산정에 미치는 영향이 지나치게 크다는 문제점이 제기되어 왔다. 식 (3)은 아스팔트 포장에 적용한 기존 HPCI 산정식이다.

$$HPCI = 4.567 - 0.384 \times IRI - 0.36 \times RD - 0.01 \sqrt{5 \times (TC + AREA)} \quad (3)$$

여기서, IRI = 중단평탄성지수, m/km

RD = 소성변형량, cm

TC = 온도균열량, m/km

AREA = 피로균열 및 패칭면적, m<sup>2</sup>

위 식에서와 같이 소성변형이 HPCI 지수에 미치는 영향이 가장 크지만 실제로는 민감도가 낮아 지수에 반영되는 폭이 상대적으로 작고 최근에는 개질아스팔트의 적용으로 소성변형 보다는 평탄성이나 균열과 같은 유형의 손상형태가 포장의 수명에 미치는 영향이 커지고 있다. 우리나라의 경우 온도균열이 일부 지역에서 발생하기는 하나 다른 균열에 비하여 발생 빈도가 매우 낮다. 또한 식 (3)은 최근에 변경된 소성변형 관리기준을 수용하지 못하고 있다(관리기준을 20mm에서 15mm로 변경).

최근에 제안된 수정 HPCI(2003)는 실제 계측자료를 충분히 활용하여 주관적인 영향요소를 최소화 하고자 하였으며 현실적인 포장상태평가가 이루어 질 수 있도록 평가항목을

개선하였다. 아래의 식 (4)는 수정된 아스팔트 포장의 HPCI 산정 공식이다.

$$HPCI = 5 - 0.78 \times IRI^{0.7} - 0.5 \times RD^{1.5} - 0.36 \times \log(1 + SDA) \quad (4)$$

여기서,

IRI = 100m 구간에서의 중단평탄성 평균, m/km

RD = 100m 구간에서의 소성변형량 평균, cm

SDA = 100m 구간에서의 균열 및 패칭의 환산면적, m<sup>2</sup>

위 식 (4)의 HPCI 산정식은 일반적인 포장 상태를 표현하기 위하여 사용하는 복합지수이기 때문에 각 개별손상의 특성에 따라 특이구간이 발생할 수 있다, 아울러, 평가연장이 100m로 일괄 적용됨에 따라 짧은 구간에서 발생할 수 있는 국부손상의 반영이 충분하지 않을 가능성이 있다. 따라서 본 연구에서는 시험도로 아스팔트 포장을 10m 단위로 축소하여 각 손상을 정량화 하고 이를 바탕으로 HPCI를 산정하였다.

그림 9는 각 포장 형식별로 시험도로 포장 전체에 대한 공용중 HPCI를 보여주고 있다. 범례의 숫자는 아스팔트 포장의 두께(cm)를 의미한다. 포장의 상태가 매우 좋은 경우는 5로 보고 상태가 나빠지면서 HPCI는 0에 가까워진다.

앞서 살펴 본 바와 같이 두께가 가장 얇은 포장에서 상태 지수가 급하게 감소하여 포장의 두께가 손상에 매우 민감한 요소임을 확인할 수 있었으며 시험도로에서의 HPCI의 감소율은 일반 밀입도가 가장 크고, SMA, 그리고 PMA 포장 순서이었다. 일반적으로 포장의 유지보수가 권장되는 HPCI의 기준인 3.0에 도달한 포장은 12cm 두께의 SMA 포장과 밀입도 단면이었다. SMA 포장의 경우 소성변형이 많이 발생한 영향이 크게 작용한 것으로 보인다. 다른 포장단면은 HPCI 산정결과로 보면 현재까지는 매우 양호한 상태를 유지하고 있는 것으로 판단되었다.

그림 9에서의 수직선은 포장 보수가 처음 시행된 시점을 의미하여 이를 기점으로 포장상태가 어느 정도 개선되고 있음을 보여주고 있다. 각 HPCI 곡선에서 점선부분은 이러한

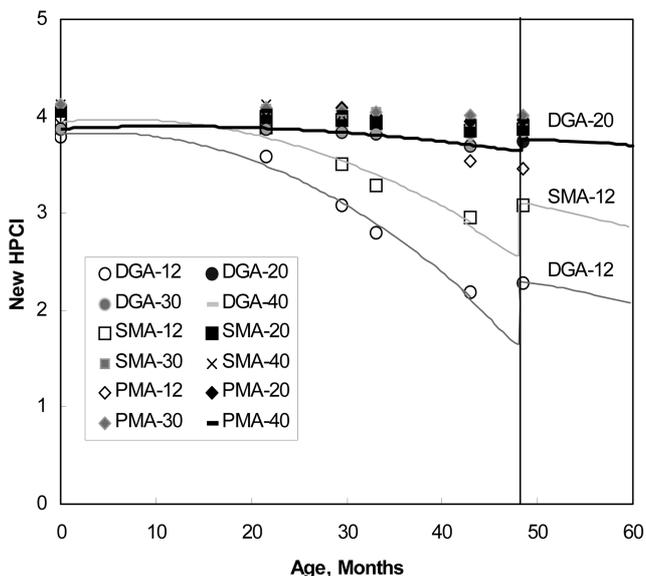


그림 9. 시험도로 아스팔트 포장상태평가지수(HPCI)의 변화

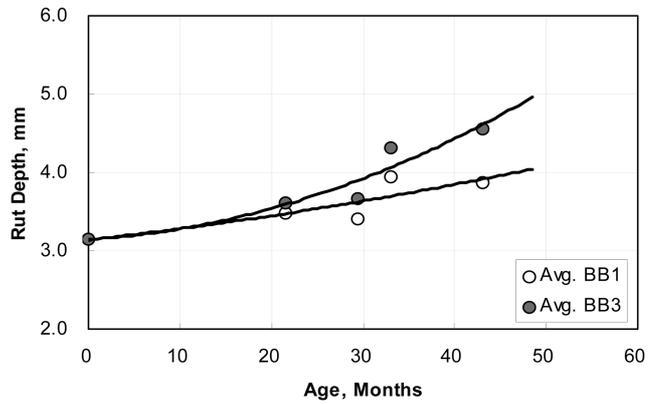


그림 10. 기층 혼합물에 따른 노면 관측 소성변형의 변화

상태개선효과를 반영하여 경험적으로 유추한 것이다.

### 5.5 기층 재료의 변화에 따른 소성변형의 영향 분석

앞의 2.2절에서 언급된 바와 같이 기층재료로 사용되는 BB1과 BB3이 동일한 포장 단면에 사용될 경우 그 성능이 다를 것이라는 가정은 두 혼합물이 보이는 동탄성계수의 확연한 차이에 근거를 두고 있다. 특히 두 혼합물 모두 균열 손상 보다는 소성변형에 대한 저항성을 높일 수 있도록 배합설계를 하였기 때문에 두 혼합물을 기층으로 하는 모든 밀입도 포장에서 발생한 소성변형을 중심으로 성능을 비교하였다. 아스팔트 기층이 없는 12cm 포장을 제외하고 각 두께별로 측정된 소성변형을 평균하였다.

그림 10과 같이 동탄성계수를 통한 분석과는 달리 골재입경이 상대적으로 큰 BB1 혼합물(최대입경 : 40mm)이 소성변형에 대한 저항성이 오히려 우수한 것으로 나타났다. 물론 여기서 제시한 소성변형은 노면(표층상단)에서 측정된 값으로 기층에서만 발생한 소성변형과는 다른 것이다. 하지만 시험도로에서 발생한 소성변형의 형태가 각 포장층에서 각각 발생한 변형(다짐에 의한 수직변화와 소성변형)이 중첩된 결과로 판단되어 - 과도한 전단흐름(shear flow)이 일부 층에 국한된 소성변형이 없었음 - 이와 같은 비교가 가능하다고 보았다.

아스팔트 혼합물의 동탄성계수와 포장의 성능 및 공용성과의 연관성을 찾는 문제는 실제 고려해야 할 변수가 다양한 만큼 그 해석도 신중해야 할 것이다. 본 연구에서와 같이 혼합물의 동탄성계수가 상대적으로 큰 경우라도 포장에서의 소성변형에 대한 저항성은 오히려 낮을 수 있기 때문이다. 좀 더 많은 연구가 수반되어야 하겠지만 BB1의 다짐도 변화를 BB3에 비하여 거의 두 배에 가까운 다짐도 변화율을 보이며 상대적으로 안정이 빨리 진행된 것도 소성변형에 영향을 준 것으로 판단된다.

### 6. 결론 및 추가연구 제안

본 연구를 통해서 다음과 같은 결론을 도출 할 수가 있었다.

시험도로의 노면 평탄성 저하는 교통하중의 재하 이력과 밀접한 관련이 있으며 소성변형이나 균열과는 다르게 환경 요인에 영향을 덜 받았다. 특히, 소성변형이 심하게 발생하

더라도 실제 종단평탄성에는 그 영향을 주지 않는 경우가 있어 포장의 기능성 평가기준(NCHRP 1-37A, 2001)인 평탄성만을 포장을 대표하는 성능 지표로 삼는 것에는 신중을 기해야 할 것이다.

수정 포장상태평가지수(HPCI)에 의한 상태평가결과 포장의 두께가 상태지수의 감소에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 조사되었다. 시험도로에서의 HPCI의 감소율은 동일 두께의 포장에서 밀입도가 가장 크게 나타났다.

혼합물의 동탄성계수를 통한 포장의 손상 및 공용성 예측은 포장의 시공성과 같이 일반화하기 어려운 변수도 다양한 각도에서 검토해야 한다고 판단되며, 포장의 다짐도 변화는 이러한 변수 중 하나가 될 수 있음을 알 수 있었다.

시험도로는 포장의 응답해석과 모형개발을 위한 다수의 정기측정이 무엇보다 우선적으로 시행되어 준공 직후부터 지금까지 교통하중의 재하는 매우 제한적으로 이루어졌다. 또한 초기교통하중에 의한 포장의 다짐이 거의 없었기 때문에, 아스팔트 혼합물의 과도한 노화로 인한 취성과파괴가 포장 파손을 촉진한 것으로 사료된다. 일반 도로포장과는 다른 시험도로 포장의 손상원인 및 향후 장기공용성의 예측은 그동안 시험도로에 재하된 교통하중에 대한 특성 분석을 통해 가능할 것으로 판단, 이를 본 연구의 연속으로 수행하고 있다.

### 감사의 글

본 논문은 한국도로공사 도로교통기술원의 과제인 “시험도로 계측시스템을 이용한 포장 거동 및 공용성 데이터 베이스 구축과 활용에 관한 연구”의 주요 성과이고 일부는 건설교통부 건설교통R&D정책·인프라사업인 “성능중심의 건설기술 표준화 연구”의 수행결과임을 밝힙니다.

### 참고문헌

- 건설교통부(2003) 도로공사표준시방서.  
 건설교통부(2004) 한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구, 중간연차보고서.  
 로드코리아(2007) 고속도로 포장상태 조사 및 분석, 한국도로공사, 2차 최종보고서.  
 한국도로공사 도로교통기술원(2002) 시험도로 건설과 운영에 관한 연구, 중간연차보고서.  
 한국도로공사 도로교통기술원(2003) 시험도로를 이용한 포장 공용성 데이터뱅크 구축 및 포장수명주기비용 절감방안에 관한 연구, 연구보고서.  
 American Association of State Highway and Transportation Officials (2003) *TP-62 Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt Concrete Mixtures*. Washington D.C.  
 Development of the 2002 Guide for the Design of New and Rehabilitated Pavement Structures: Phase II, NCHRP1-37A, 2002.  
 Hanson, D.I., Mallick, R.B., and Brown, E.R. (1994) Five-year evaluation of HMA properties at the AAMAS test projects, *Transportation Research Recors, 1454*, Transportation Research Board, Washington, D.C. pp. 134-143.  
 Kim, Y.R., Lee, S., Seo, Youngguk, and El-Haggan, O. (2005) *Impact of Price Reductions on the Long-Term Pavement Performance of HMA Mixes in North Carolina*, Final Report Submitted to North Carolina State DOT.  
 Loulizi, A., Al-Qadi, I.L., Flintsch, G.W., and Freeman, T.E. (2001) Using field measured stresses and strains to quantify flexible pavement responses to loading, *Ninth International Conference on Asphalt Pavements*. Vol. II, No. 3, pp. 4-5  
 Seo, Youngguk, El-Haggan, O, King, M., Lee, S., and Kim, Y.R. (2007) Air void models for the dynamic modulus, fatigue cracking, and rutting of asphalt concrete, ASCE, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 19, No. 10, October, pp. 1-10.

(접수일: 2007.10.22/심사일: 2007.12.4/심사완료일: 2007.12.4)