

# 장수명 아스팔트 포장용 고강성 혼합물의 실내 공용성 평가

## Laboratory Performance Evaluation of High Modulus Asphalt Mixes for Long-Life Asphalt Pavements

강민균\* · 이정훈\*\* · 이현종\*\*\* · 최지영\*\*

Kang, Min Gyun · Lee, Jung Hun · Lee, Hyun Jong · Choi, Ji Young

### Abstract

A major purpose of this study is to develop high modulus asphalt mixtures for perpetual asphalt pavements which can save maintenance cost by increasing the design and performance periods of the pavements. Various physical and mechanical laboratory tests are performed for the high modulus asphalt binder developed in this study. The test results show that the properties of the high modulus binder are similar to those of the French high modulus binders. In addition to the binder tests, various performance tests are conducted for the high modulus and conventional mixtures. The dynamic modulus test results indicate that the dynamic modulus values of the high modulus mixtures are higher than those of the conventional mixtures by 10~15% at 5°C, 20~25% at 15°C and 100% at 30°C. It is observed from the performance tests that the high modulus mixtures yield better fatigue, rutting and moisture damage performance than the conventional mixtures.

**Keywords** : perpetual asphalt pavement, performance, high modulus asphalt binder, fatigue, rutting

### 요 지

본 연구의 목적은 포장의 설계수명과 공용년수를 증대시켜 아스팔트 포장의 유지보수비용을 감소시킬 수 있는 장수명 아스팔트 포장용 고강성 혼합물을 개발하는데 있다. 따라서 본 연구에서는 고강성 아스팔트 바인더를 개발하였으며 다양한 실내 물성시험을 수행하였다. 실내 물성시험 결과 새롭게 개발된 고강성 아스팔트 바인더가 프랑스의 고강성 아스팔트 바인더와 유사하다는 것을 알 수 있었고, 바인더 외에 혼합물의 공용성을 평가하기 위해 기존의 일반아스팔트 혼합물과 새롭게 개발된 고강성 아스팔트 혼합물의 비교 시험을 수행하였다. 공용성 시험 결과 동탄성계수 측정시험에서는 고강성 아스팔트 혼합물이 일반 아스팔트 혼합물보다 강성에 있어 5°C에서는 10~15%, 15°C에서는 20~25%, 30°C에서는 거의 2배가 증가함을 알 수 있었다. 또한 수분손상시험 및 휠트래킹시험, 피로시험을 수행한 결과 일반 아스팔트 혼합물에 비해 고강성 아스팔트 혼합물의 공용성이 우수한 것으로 평가되었다.

**핵심용어** : 장수명 아스팔트 포장, 공용성, 고강성 아스팔트 바인더, 피로, 러팅

### 1. 서 론

현재 우리나라 도로의 유지관리비용의 대부분이 도로포장의 파손에 따른 유지보수에 사용되고 있으나 국내 아스팔트 포장은 조기파손이 자주 발생하여 선진국에 비해 공용기간이 50% 이상 짧아 막대한 예산의 손실로 이어져 유지보수 주기를 증대시키는 방안을 수립하는 것이 절실히 요구된다.

설계수명 20년을 기준으로 실시하는 기존의 아스팔트포장 설계개념은 공용년수 20년 이후에 재시공을 전제로 하지만 실제로 재시공을 하기에는 막대한 비용이 소모되어 단순히 5cm 덧씌우기를 실시하고 있고 이는 덧씌우기 효과를 현저히 감소시켜 막대한 보수비용의 손실을 초래하므로 이를 근

본적으로 해소할 수 있는 공법의 개발이 필요하다. 선진국의 경우 덧씌우기 보수주기는 평균 10년 이상이나 국내 일반국도의 경우 보수주기는 약 5년 미만인 것으로 나타나고 있다. 따라서 현재 20년 주기의 아스팔트포장 설계기간을 40년 이상으로 증가시켜 아스팔트포장의 잦은 유지보수를 근본적으로 줄여 사회 및 경제적 손실을 최소화할 수 있는 첨단 아스팔트포장 공법의 개발이 필요하게 되었다.

따라서 본 연구에서는 아스팔트 포장 기층에 적용하기 위해서 새롭게 개발된 고강성 아스팔트 바인더와 일반 아스팔트 바인더의 물성시험을 수행하였고 고강성 아스팔트 바인더로 생산된 혼합물과 기존에 주로 적용되었던 일반 아스팔트 혼합물의 실내 시험을 통하여 피로손상과 소성변형 등에

\*세종대학교 토목환경공학과 석사과정(E-mail:gyunida@hanmail.net)

\*\*세종대학교 토목환경공학과 박사과정(E-mail:ugg97@korea.com)

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

\*\*\*\*정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구부 연구원(E-mail:legion@kict.re.kr)

대한 저항성을 평가하여 고강성 아스팔트 혼합물의 적합성을 검증하였다.

## 2. 장수명 아스팔트 포장 공법 개요

장수명 포장이란 설계연한 동안 주기적으로 표층만 제시공하고 재건설이나 대대적인 보수 없이 40년 이상을 견딜 수 있는 공용성이 기존 아스팔트 포장의 2배 이상 되는 포장이다(Nunn, 1997). 기존의 아스팔트 포장은 반복되는 차량하중으로 인해 그림 1과 같이 아스팔트층의 반복휨에 의해 하단에서부터 피로균열이 발생하여 노면으로 진전되고 노상의 상부에 작용하는 압축응력에 의해 노상의 침하(소성변형)가 발생되어 파괴된다. 반면 장수명 아스팔트 포장의 경우 기본적인 설계개념은 기존 아스팔트포장의 피로균열과 노상의 소성변형을 완전히 또는 거의 억제하여 포장의 설계수명을 증대시키는 것이다.

장수명 포장의 피로저항을 향상시키는 기본 개념은 그림 2에서 보는바와 같이 아스팔트 기층 두께를 증가시켜(또는 강성을 증가시켜) 아스팔트층 하단에 발생하는 인장변형률을 감소시킨다. 현재 영국에서 제안한 장수명 포장의 설계방식

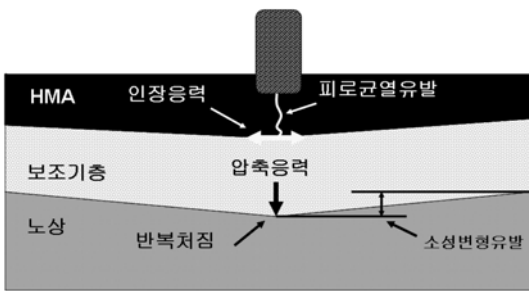


그림 1. 기존 아스팔트포장의 일반적인 파손 메카니즘

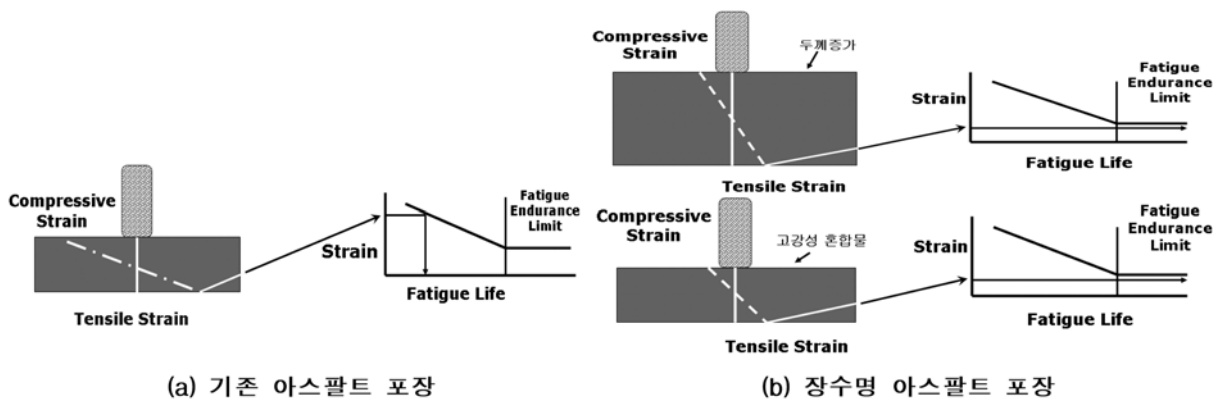


그림 2. 장수명 포장의 피로저항 개념

표 1. 각국의 장수명 포장의 개념별 분류

| 개념                                | 영국                      | 프랑스                     | 미국   |
|-----------------------------------|-------------------------|-------------------------|--|
| 장수명 포장의 접근방법                      | 두께 조절과 바인더의 강성 증진       | 바인더 강성 증진               | 기층하부에 연성기층 사용  |
| 피로파괴 억제를 위한 아스팔트층 하단의 인장변형률 제한 기준 | Bending $70\mu\epsilon$ | Bending $70\mu\epsilon$ | California $70\mu\epsilon$<br>Michigan $70\mu\epsilon$<br>Kentucky $70\mu\epsilon$<br>Illinois $60\mu\epsilon$ |
| 장수명 포장의 기준 설정                     | 실제 시공되어진 포장으로부터의 실측자료   | 실내시험 결과에 의해 설정된 기준      | 각 주별로 환경에 맞는 기준 설정   |

은 기본적으로 아스팔트 기층의 두께를 증가시키거나 또는 강성을 증가시켜 아스팔트층 하단에 발생하는 인장변형률이 피로파괴를 유발시키지 않는 범위 이내로 제한하는 방식이다.

장수명 아스팔트포장에 대한 체계적인 연구는 영국에서 시작되었으나 이미 프랑스에서는 고강성 혼합물을 사용한 포장이 20년 전부터 시공되고 있다(TRB Circular, 2001). 또한 최근에는 미국의 여러 주정부에서 본 공법에 대한 연구를 활발히 진행하고 있다. 다음은 각 나라별 장수명 포장공법에 대한 설계개념을 간략히 정리하였다.

영국의 장수명 포장 설계 개념은 기본적으로 포장체의 두께를 기존 포장에 비해 증가시켜 변형률을 제어한다는 것이다. 이러한 포장체 두께의 증가는 비록 초기 건설비가 일반 포장에 비해 증가되지만 유지보수비용이 감소되어 생애주기 비용 측면에서는 유리하다고 할 수 있다. 또한 아스팔트층의 단면두께 증가로 인한 초기 공사비의 증가는 일반 밀입도 혼합물이 아닌 고강성 기층재(HMB : High Modulus Base)를 적용함으로써 어느 정도 비용을 줄일 수 있다. 영국에서는 현재 프랑스에서 생산된 고강성 바인더를 사용하여 다양한 시험시공을 수행하여 공용성 평가를 진행하고 있다(Nunn, 1997).

프랑스의 장수명 포장은 기본적으로 침입도가 낮은 아스팔트 바인더를 아스팔트 기층에 적용하여 기층의 강성을 증가시켜 아스팔트층 하단에 발생하는 인장변형률을 억제하는 개념을 적용하고 있다(LCPC, 1997).

미국에서는 각각의 주별로 활발하게 장수명 도로에 대한 연구가 진행되고 있다. 미국의 경우에는 영국 및 프랑스와 달리 아스팔트층의 두께는 약간 증가시키는 대신 개질 아스팔트 바인더를 사용하여 포장의 공용년수를 증대시키고 있다. 즉, 아스팔트층의 가장 하단에 피로균열에 대한 저항성을 높이고 수분침투를 억제하기 위한 연성의 기층을 시공하

는 특징이 있다(TRB Circular, 2001).

장수명 아스팔트포장 공법에 대한 각 국의 설계개념을 정리하면 표 1과 같다. 하지만 이러한 분류는 장수명 포장공법에 대한 개략적인 것으로 실제로는 대부분의 국가에서 포장체의 두께조절과 고강성 바인더의 적용에 대한 연구를 동시에 진행하고 있다.

### 3. 고강성 아스팔트 혼합물 개발

앞서 2장에서 언급한 바와 같이 장수명 아스팔트 포장의 기본 설계 개념은 아스팔트 기층의 두께를 증가시키거나 강성을 증가시켜 차량하중에 의해 발생하는 인장 응력을 감소시켜 피로균열의 발생을 억제시키는 것이다. 따라서 기층에 사용될 아스팔트 혼합물의 강성을 증가시키는 것은 경제적인 장수명 포장을 위해 매우 중요한 사항으로서 기본적으로 아스팔트의 강성을 증가시키되 균열에 대한 저항성 등은 일반 아스팔트 바인더와 유사하거나 우수하도록 유지시키는 것이 중요하다.

#### 3.1 고강성 아스팔트 바인더 개발

프랑스는 약 30년 전부터 아스팔트포장의 소성변형을 억제하기 위하여 아스팔트 바인더의 침입도를 저감시키는 방안에 대한 연구를 진행하였으며 1980년대 이후 본격적인 상용화 제품을 생산하고 있다. 프랑스에서 매년 생산 판매되는 고강성 아스팔트 바인더는 1990년에는 39,000톤에 불과하였으나 2000년도에는 100,000톤으로 증가하였다(Corte, 2001). 당초 고강성 바인더의 사용목적은 주로 아스팔트 포장의 소성변형을 억제하는 것이었으나, 고강성 바인더를 사용함으로써 포장의 두께를 감소할 수 있는 부수적인 효과도 얻게 되어 그 사용량이 점차 확대되고 있다. 고강성 바인더를 생산하는 방법에는 여러 가지 방안이 있으나 과거 프랑스의 경험에 의하면 아스팔트를 산화시키는 블로운 아스팔트는 균열에 취약한 것으로 나타나 최근에는 다른 방법(vacuum distillation and propane-precipitated-asphalt)으로 고강성 아스팔트 바인더를 생산하고 있다.

본 연구에서는 고비점 유분(high boiling point petroleum)을 사용하여 바인더의 침입도를 감소시키는 방법을 통해 고강성 바인더를 생산하였다. 먼저 일반 아스팔트 바인더에 다양한 량의 고비점 유분을 첨가시켜 침입도 저감 효과를 분석하였다. 분석결과 침입도가 감소함에 따라 강성이 증가하는 효과를 검증할 수 있었다. 하지만 일반적으로 바인더의 강성이 증가하면 피로균열에 대한 저항성이 감소하기 때문에 이를 보완할 수 있는 방안이 필요하다. 본 연구에서는 그에 대한 방안으로 Styrene-Butadiene-Styrene(SBS) 계열의 폴리머를 첨가하여 고강성 바인더의 균열에 대한 저항성을 강화하였다. 바인더에 폴리머를 첨가함으로써 균열에 대한 저항성뿐만 아니라 소성변형에 대한 저항성 향상효과도 기대할 수 있다. 장수명 포장의 설계수명은 일반적으로 40년 이상이기 때문에 이러한 장시간 동안 아스팔트 혼합물의 내구성을 확보하기 위해서는 수분손상에 대한 저항성을 확보하는 것도 중요한 사항이다. 따라서, 골재와 아스팔트 바인더의 결합력을 유지하기 위한 액상의 박리저감제를 첨가하였다.

표 2. 일반 및 고강성 아스팔트 바인더의 물성비교

|                    | 일반AP<br>(AC60~80) | PMA   | 고강성  | 프랑스(EME) |       |
|--------------------|-------------------|-------|------|----------|-------|
|                    |                   |       |      | 35/50    | 10/20 |
| 침입도, 25°C, (dmm)   | 70                | 63    | 28   | 35/50    | 10/20 |
| 연화점 (°C)           | 48                | 100.3 | 89   |          | 62~70 |
| 프라스 취하점 (°C)       | -11               | -18   | -8   |          | +3~8  |
| G, 15°C (MPa)      | 7.1               | 7     | 21   | 34.5     | 40~90 |
| G/Sinδ, 70°C (kPa) |                   |       |      |          |       |
| G/Sinδ, 76°C (kPa) |                   | 1802  |      |          |       |
| 점도                 | 135°C cSt         | 417   | 3715 |          |       |
|                    | 150°C, cSt        | 202   | 1415 |          |       |
|                    | 170°C, cSt        | 82    | 740  |          |       |
|                    | 190°C, cSt        | 52    | 390  |          |       |

앞서 언급한 일련의 과정을 통해 시험적으로 개발한 고강성 바인더에 대한 다양한 물성시험을 수행하였다. 시험결과 개발된 고강성 바인더의 침입도는 28인 것으로 나타났고 상세한 시험결과는 표 2와 같다. 표 2에는 바인더에 대한 물성을 비교하기 위해 프랑스에서 생산되는 고강성 바인더의 일반적인 물성을 함께 수록하였다(Corte, 2001). 표에서 보는 바와 같이 본 연구에서 개발한 고강성 아스팔트 바인더의 복소전단계수 G\*(complex modulus)가 일반 아스팔트 바인더(PG64-22)와 PMA에 비해 3배정도 높은 것으로 평가되었으며 침입도가 낮을수록 강성이 증가하는 것으로 나타났다. 저온에서의 균열발생 온도를 모사하는 시험법인 프라스 취하점은 침입도가 70인 일반 아스팔트 바인더가 -11°C 인 반면 고강성 아스팔트 바인더는 -8°C로 확인되었으며 침입도가 낮을수록 저온균열 저항성은 저하되는 것으로 평가되었다. 또한, 프랑스(EME)에서 적용되고 있는 바인더와 비교하였을 때 침입도, 연화점, 프라스 취하점 등에서 만족할 만한 결과를 얻을 수 있으며 이는 새롭게 개발된 바인더가 프랑스에서 적용되고 있는 바인더와 근접한 물성을 갖는 것을 알 수 있다. 그러나 고강성 아스팔트 바인더의 복소전단계수는 프랑스에서 적용되고 있는 바인더 보다 다소 낮은 것으로 나타났다.

#### 3.2 아스팔트 혼합물의 동탄성계수 측정시험

아스팔트 혼합물의 강성을 평가하기 위하여 일반 아스팔트 바인더(PG64-22)와 고강성 바인더를 사용하여 아스팔트 혼합물의 동탄성계수 측정시험을 수행하였으며 혼합물의 강성을 증가시키기 위한 하나의 방안으로 채움재의 양을 증가시킨 골재 입도에 대한 동탄성계수 측정시험도 병행하여 수행하였다. 시험을 위한 변수로는 온도와 하중주파수이며 시험 온도는 5°C, 15°C, 30°C이고 하중주파수는 20Hz, 10Hz, 0.5Hz, 0.1Hz에서 시험을 실시하였다(NCHRP 1-37A).

각 온도별 동탄성계수 시험을 통해 산정한 동탄성계수와 하중주파수의 관계 곡선을 하나의 그래프로 나타낸 다음 15°C의 온도를 기준온도로 하여 기준온도의 동탄성계수 곡선은 원위치에 고정하고 저온에서 구한 데이터 곡선은 왼쪽으로, 고온에서 구한 데이터 곡선은 오른쪽으로 이동하여 기준 데이터 곡선과 중첩이 되어 하나의 완만한 곡선이 되

도록 연결하였다. 이렇게 구한 곡선을 마스터커브(master curve)라고 하는데 이는 소위 시간-온도 중첩원리(time-temperature superposition principle)에 기초한 것이다. 마스터커브에서의 시간은 실제 시험시간이 아닌 Reduced Time으로 전환되며 각각의 데이터 곡선을 기준 곡선과 중첩이 되도록 이동하는데 사용되는 시간 함수를 Shift Factor라 한다.

각 혼합물의 동탄성계수 시험을 통해 산정한 동탄성계수의 마스터커브를 비교하면 그림 3과 같고 이 때 산정된 Shift Factor는 그림 4와 같다. 3에서 보는 바와 같이 하중주파수가 증가할수록 동탄성계수는 증가하였다. 일반 아스팔트 혼합물에 비해 새롭게 개발된 고강성 아스팔트 바인더를 사용한 혼합물의 경우 5°C에서는 10~15%, 15°C에서는 20~25%, 30°C에서는 거의 2배 가까이 동탄성계수가 증가함을 알 수 있다. 이것은 고강성 아스팔트 혼합물의 폴리머 성질에 의해서 저온에서의 온도 감온성은 거의 차이가 없고 고온에서의 온도 감온성이 고강성 아스팔트 바인더가 우수하기 때문인 것으로 사료된다. 하지만 채움재(fill)를 50% 더 첨가 시킨 혼합물의 경우는 일반 혼합물과 비슷한 값을 보여 채움재의 양의 변화에 따른 입도 변화가 혼합물의 강성 증가에 영향을 미치지 못한다는 것을 확인하였다. 이상의 시험결과를 바탕으로 본 연구에서 개발된 고강성 아스팔트 혼합물이 강성 측면에서 장수명 포장에 적용 가능할 것으로 사료된다.

### 3.3 실내 공용성 시험을 위한 배합설계

일반 아스팔트 혼합물과 고강성 아스팔트 혼합물에 대한 예비물성 시험을 통하여 고강성 아스팔트 혼합물의 적용 타당성을 검증하였고 이를 바탕으로 실내 공용성 시험에 적용

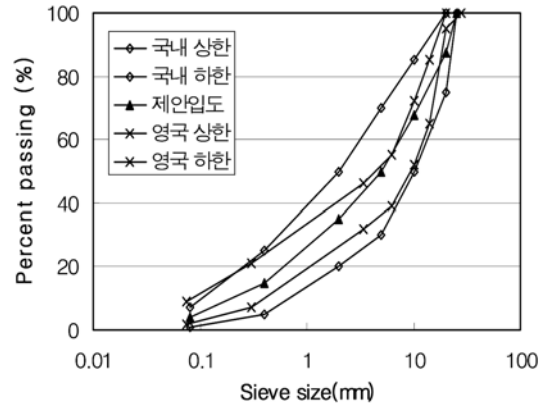


그림 5. 국내 및 영국의 입도 비교

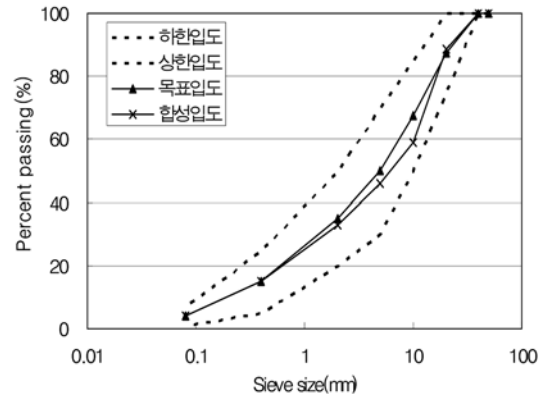


그림 6. 목표 및 합성 입도 비교

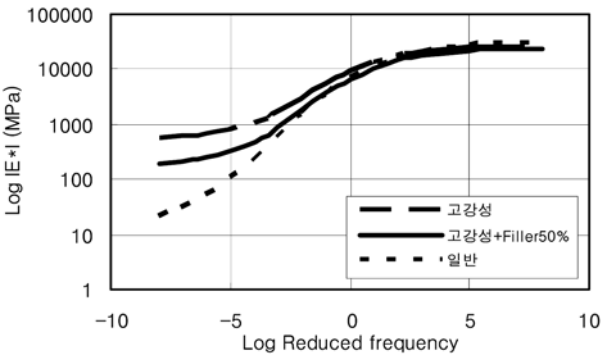


그림 3. 마스터커브(Reference Temperature 15°C)

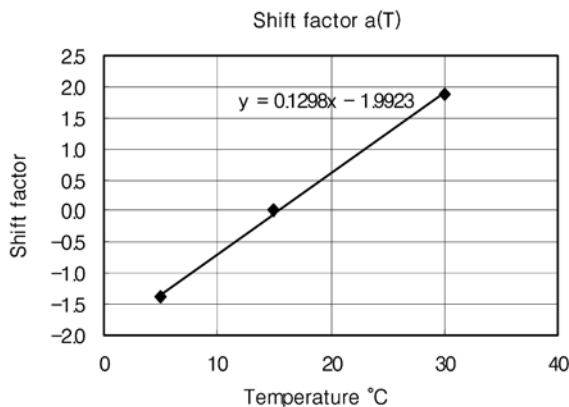


그림 4. Shift Factor

하기 위해서 최종적으로 배합설계를 실시하였다.

예비 실내 시험에서 사용한 기층용 골재의 입도는 현재 장수명 포장이 활발히 시공되어 지고 있는 영국에서 적용되고 있는 기층용 입도를 사용하였으나 현재 우리나라 실정을 고려해 볼 때 골재의 입경이 서로 상이하고 현장 합성입도의 경우 영국 기층용 입도를 생산하기가 힘들기 때문에 우리나라 현장 여건에 적합한 국내의 기층용 입도인 BB-3 입도를 적용하였다. 그림 5는 영국의 입도와 국내 기층용 입도(BB-3)를 비교한 것이다. 그림 5에서 영국의 입도는 국내 입도의 범위 내에 속하고 BB-3입도의 중간입도도 어느 정도 만족하는 것으로 보인다. 따라서 본 연구에서는 골재 입도를 국내 기층용 입도인 BB-3 입도를 적용하였으며 바인더 함량의 경우 일반 혼합물은 4.5%, 고강성 혼합물은 4.7%를 적용하여 실내시험용 혼합물을 제작하였다. 그림 6은 국내 기층용 입도의 목표 및 합성입도를 나타낸 것으로 목표입도는 국내 기층용 입도의 중앙 입도로 설정하였다.

### 4. 실내 공용성 실험결과 및 분석

새로운 혼합물을 개발함에 있어 최종 목표는 실제 현장에서 새로운 혼합물을 시공하였을 때 만족할 만한 공용성을 가지는 혼합물을 개발하는데 있다. 따라서 현장 시험시공은 새로운 혼합물의 공용성을 평가하는데 있어 거의 필수 불가결한 과정이라 할 수 있다. 그러나 현장 시험시공의 경우 외부 환경조건이나 교통조건, 기존 포장의 구조적 성질이 완전히 동일한 구간에 시험시공을 실시하기가 거의 불가능한

실정이며, 공용성을 확인하기 위해서는 적어도 4년 내지 5년의 기간이 필요한 단점이 있다. 하지만 실내시험을 통한 공용성 평가는 단기간에 가능하며, 시험조건을 동일하게 할 수 있는 장점이 있다.

따라서 본 연구에서는 아스팔트 포장 기층에 적용하기 위해 개발한 유럽식 고강성 아스팔트 바인더로 생산된 혼합물과 기존에 주로 적용되었던 일반 아스팔트 혼합물의 실내시험을 통하여 피로손상과 소성변형 등에 대한 저항성을 평가하였다.

#### 4.1 수분손상 시험

아스팔트 혼합물의 수분 민감성을 측정하는 데에는 여러 종류의 시험이 있으나 현재 가장 많이 적용되고 있는 ASTM D4867-92의 규정에 따라 시험을 실시하였다. 각 혼합물의 수분민감성을 측정하기 위하여 마샬 공시체에 대한 건조 인장강도 및 수침 인장강도를 간접인장시험을 통해 측정하였으며 중요 결과를 요약하면 다음 표 2와 같다. 아스팔트 혼합물의 수분손상에 대한 저항성은 TSR(Tensile Strength Ratio)이 높을수록 유리한 것으로 알려져 있으며, 미국의 경우 대부분의 주에서는 TSR이 70~80% 이상이 되도록 배합설계에 규정하고 있다(Brown et al, 1998).

표 3에서 보는 바와 같이 각 아스팔트 혼합물의 TSR은 모두 80% 이상을 상회하였다. TSR의 경우 국내 기층용 입도(BB-3)에서의 일반 아스팔트 혼합물(88.5%)보다 고강성 아스팔트 혼합물(98.3%)을 사용하였을 경우 약 10% 증가하는 효과를 볼 수 있었다. 이는 고강성 아스팔트 바인더에 첨가된 액상 바리 저감제의 효과에 기인한 것으로 사료된다.

표 3. 수분손상 시험결과

| 혼합물 | Dry          |                                 | Wet          |                                 | TSR (%) |
|-----|--------------|---------------------------------|--------------|---------------------------------|---------|
|     | Air Void (%) | Strength (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Air Void (%) | Strength (kgf/cm <sup>2</sup> ) |         |
| 일반  | 6.19         | 10.92                           | 6.24         | 9.67                            | 88.54   |
| 고강성 | 6.36         | 15.45                           | 6.35         | 15.19                           | 98.32   |

#### 4.2 휠트래킹 시험

아스팔트 혼합물의 소성변형 특성을 측정하는 데에는 여러 가지 시험이 사용되고 있으며 본 연구에서는 국내에서 쉽게 활용 가능한 휠트래킹 시험기를 사용하여 아스팔트 혼합물의 소성변형에 대한 저항특성을 평가하였다. 시험방법은 KS F2374의 규정에 따라 시험을 실시하였다. 휠트래킹 시험 결과를 동적안정도로 비교하면 표 4와 같다. 소성변형에 대한 상대적인 비교를 용이하게 하기 위하여 하중을 통상적인 휠트래킹 시험에 적용하는 하중(70kg)보다 2배로 증가시켜 시험을 실시하였다. 일반 혼합물의 경우 반복 윤하중이 20,000회

표 4. 동적안정도 비교 (윤하중 통과회수 20000회)

|               | 일반 혼합물 | 고강성 혼합물 |
|---------------|--------|---------|
| 소성변형 깊이 (mm)  | 7.28   | 2.79    |
| 윤하중 통과 회수 (회) | 20000  | 20000   |
| 윤하중(kg)       | 140    | 140     |
| 동적안정도 (회/mm)  | 2747   | 7168    |

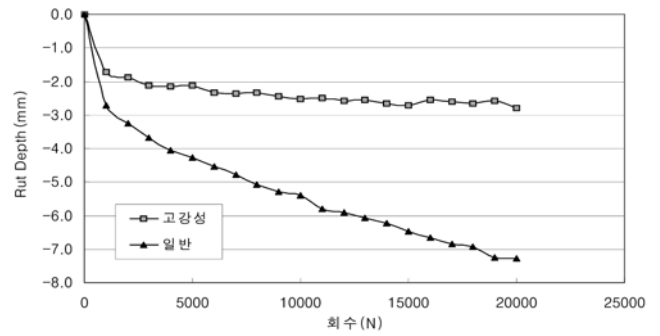


그림 7. 휠트래킹 시험결과

회 통과하였을 때 8mm정도의 러팅(rutting) 깊이가 발생하였으며, 고강성 아스팔트 혼합물의 경우는 윤하중이 5,000회 이상부터는 약 2~3mm정도로 거의 변화가 없었다.

일반 아스팔트 혼합물과 고강성 아스팔트 혼합물의 휠트래킹 시험결과를 비교하면 시험 종료시 총 러팅(rutting) 깊이에 있어서 일반 아스팔트 혼합물이 고강성 아스팔트 혼합물에 비해 약 2.5배의 러팅(rutting) 깊이를 확인할 수 있었다. 그림 7은 휠트래킹 시험 결과를 나타낸 것이다.

#### 4.3 피로시험

시험에 사용된 장비는 Servo-Hydraulic Closed Loop 시스템의 장비로서 MTS사의 모델 810(10Ton)이다. 시험은 간접인장방식에 의해 수행되었고, 시편의 상부 및 하부에 하중을 재하할 수 있는 재하장치는 LTPP Protocol P07(2000)에서 제안한 방식으로 제작하여 사용하였다.

간접인장 피로시험의 경우 시편에 일정한 크기의 진폭을 가진 압축하중을 반복 재하하는 방식이지만 2축 응력 상태이기 때문에 식 (1)에서 보는 바와 같이 포아송비에 따라 응력이 변하게 된다. 시편이 선형 점탄성 범위내에 존재할 경우에는 포아송비가 일정하지만 선형 점탄성 범위를 벗어난 경우에는 시편에 발생하는 손상에 의해 포아송비가 증가하게 된다. 그러나 포아송비를 정확히 실험을 통하여 실측하기는 굉장히 어렵기 때문에 본 연구에서는 포아송비를 0.35로 가정하여 강성을 계산하였다.

$$Stiffness = \frac{\sigma_x - \nu\sigma_y}{\epsilon_x} \quad (1)$$

피로시험의 경우 하중은 10Hz의 주기를 갖는 Haversine 하중을 시편에 가한다. 그림 8과 같이 0.1초의 하중재하 및 0.9초의 휴지기를 갖는 피로시험을 순차적으로 진행하게 되는데 그림 9는 휴지기를 두지 않은 피로시험의 하중재하 형태를 보여주고 있다. 이 같은 방법은 순수한 피로수명을 예측하기보다는 휴지기를 주지 않음으로 해서 비교적 빠른 시간내에 혼합물간의 상대적인 피로공용성을 평가하기 위해서 시험을 수행하였다.

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 하중재하 회수를 피로수명으로 결정하는 방식, 그리고 하중재하회수에 따른 변형을 진폭의 변화를 그래프로 그린 다음 최소 곡률

반경이 되는 지점의 하중재하회수를 피로수명으로 결정하는 방식이 있다. 하지만 변형을 진폭에 의한 방법은 최소 곡률 반경 지점을 명확히 파악하기가 어렵기 때문에 본 연구에서는 시편의 강성이 초기 강성의 50%에 도달할 때까지 적용된 하중회수를 피로수명으로 결정하였다.

각 혼합물의 피로시험 데이터를 사용하여 100번째 하중재하시의 변형을 진폭과 피로수명에 대해 식 (2)와 같이 일반적인 피로수명 모델식을 사용하여 회귀분석을 수행하였으며, 각 혼합물에 대한 회귀분석 값은 표 5와 6에 나타내었다.

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

여기서,  $N_f$ =아스팔트 혼합물의 피로수명  
 $\epsilon_0$ =초기 인장 변형률  
 a, b=회귀분석을 통하여 얻어지는 상수

그림 10은 휴지기를 두지 않고 피로시험을 수행한 결과이고 그림 11은 휴지기를 두고 피로시험을 수행한 결과이다.

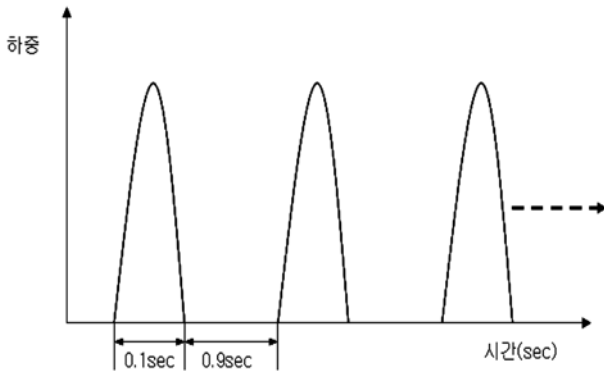


그림 8. 피로시험의 하중재하 형태

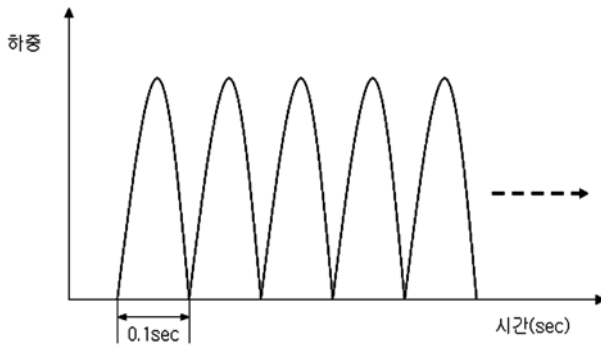


그림 9. 피로시험의 하중재하 형태(휴지기 없음)

표 5. 혼합물에 대한 회귀분석 결과(휴지기 없음)

| 혼합물 종류 | 공극율 평균(%) | 피로모델식의 계수           |         |                |
|--------|-----------|---------------------|---------|----------------|
|        |           | a                   | b       | R <sup>2</sup> |
| 일반     | 4.87      | 6×10 <sup>-18</sup> | -5.245  | 0.9993         |
| 고강성    | 5.45      | 1×10 <sup>-21</sup> | -6.2882 | 0.7927         |

표 6. 혼합물에 대한 회귀분석 결과(휴지기)

| 혼합물 종류 | 공극율 평균(%) | 피로모델식의 계수           |         |                |
|--------|-----------|---------------------|---------|----------------|
|        |           | a                   | b       | R <sup>2</sup> |
| 일반     | 4.72      | 8×10 <sup>-13</sup> | -4.1622 | 0.9005         |
| 고강성    | 5.91      | 3×10 <sup>-38</sup> | -10.823 | 0.9672         |

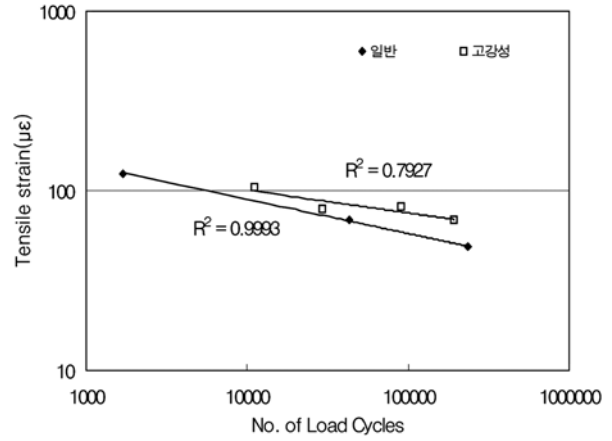


그림 10. 피로시험 결과(휴지기 없음)

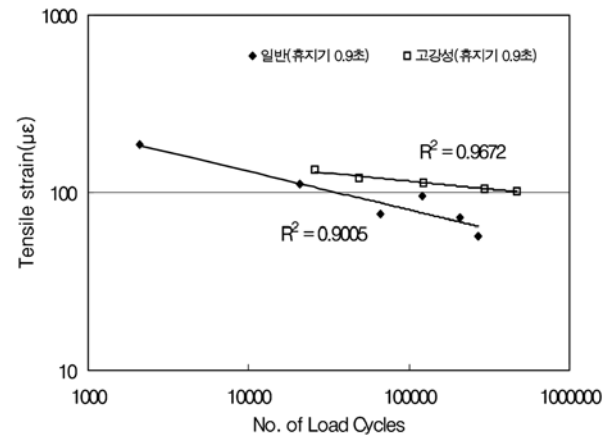


그림 11. 피로시험 결과(휴지기)

일반 아스팔트 혼합물과 고강성 아스팔트 혼합물의 피로시험 결과 피로수명에 있어서 고강성 아스팔트 혼합물의 피로수명이 일반 아스팔트 혼합물의 피로수명보다 상대적으로 우수한 것으로 나타났으며 피로균열에 대한 저항성이 5~10배 정도 우수한 것으로 나타났다. 또한 휴지기의 영향을 파악하기 위한 시험에서도 고강성 아스팔트 혼합물의 피로수명이 일반 아스팔트 혼합물의 피로수명보다 훨씬 우수한 것으로 나타났다. 또한 그림 10과 11에서처럼 휴지기를 적용하므로 인해 혼합물의 피로수명이 상당히 증가하는 것을 볼 수 있는데 이는 휴지기 동안 미세손상의 회복에 기인한 것으로 판단된다.

### 5. 결론

본 연구에서는 장수명 아스팔트 포장용 고강성 아스팔트 바인더 및 혼합물을 개발하여 다양한 물리 역학적 실내시험을 수행하여 그 적용성을 평가하였다. 본 연구에서 수행된 연구결과를 간략히 요약하면 다음과 같다.

1. 기존의 폴리머 개질 아스팔트 바인더에 침입도 저감제를 혼합하여 침입도 30 이하의 고강성 아스팔트 바인더를 개발하였고, 개발된 바인더에 대한 물리 역학적 시험을 수행하였다. 시험결과 일반 아스팔트에 비해 강성이 증가되고 저온에서의 물성은 유사하게 유지되는 것으로 나타났으며 프랑스의 고강성 바인더와 유사한 물성을 가지는 것으로 나타났다.

2. 본 연구에서 개발된 고강성 바인더를 사용하여 다양한 혼합물을 생산해 예비 물성 시험을 수행하였다. 시험결과 고강성 혼합물의 동탄성계수가 일반 아스팔트 혼합물에 비해 온도에 따라 최소 10%에서 최대 100% 이상 증대되는 것으로 나타났다. 이를 바탕으로 장수명 포장에 가장 적합하다고 판단되는 고강성 아스팔트 혼합물을 개발하였다.
3. 고강성 및 일반 아스팔트 혼합물에 대해 실내 공용성 시험을 수행하여 피로손상과 소성변형, 수분손상 등에 대한 저항성을 평가하였다. 시험결과 수분손상시험에서는 고강성 아스팔트 혼합물의 수분손상에 대한 저항성이 일반 혼합물에 비해 10%가량 증가된 효과를 볼 수 있었고 휠트래킹 시험에서는 고강성 아스팔트 혼합물의 소성변형 저항성이 기존의 일반 아스팔트 혼합물보다 2배 이상 우수한 것으로 나타났다. 또한 피로시험에서도 고강성 아스팔트 혼합물의 피로균열에 대한 저항성이 일반 혼합물에 비해 5~10배 정도 우수한 것으로 나타났다.
4. 결론적으로 고강성 아스팔트 혼합물의 공용성이 일반 아스팔트 혼합물보다 우수한 결과를 나타냈고 장수명 포장용 기층재로서 적합하다고 사료된다. 그러나 개발된 고강성 바인더에 대한 장기 노화에 따른 물성 변화는 추가적인 연구를 통해 검증되어야 할 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 건설교통부의 2002년 건설핵심기술연구개발 사업지원(과제번호: 02산학연B01-02)으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

- 건설교통부(2003) 아스팔트 포장 설계법 개발, 1차년도 최종보고서, 건설교통부.
- 이현중 외(2000) SBS PMA(슈퍼팔트)의 공용성 및 경제성 평가 연구, 최종보고서, 강릉대학교 공학연구소.
- 이현중 외(2002) SBS 개질 SMA 혼합물의 실용화 연구. 최종 보고서, 세종대학교 건설기술연구소.
- Asphalt Pavement Alliance (2001) *Perpetual Pavement: Structured for the Future*.
- Asphalt Pavement Alliance (2002) *Perpetual Pavements*, Order Number APA 101.
- ASTM D4867, Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures.
- Brown et al. (1998) *Design Stone Matrix Asphalt Mixtures*. NCAT, USA.
- Corte, J. F. (2001) *Development and Uses of Hard Grade Asphalt and High Modulus Asphalt Mixes in France*, LCPC, draft paper prepared for TRB annual meeting.
- KS F 2374, 역청 포장 혼합물의 휠 트래킹 시험 방법.
- Laboratoire Central des Ponts et Chaussees (1997) *French Design Manual For Pavement Structures*. Paris, France.
- LTPP Protocol P07 (2000) Test Method for Determining the Creep Compliance, Resilient Modulus and Strength of Asphalt Materials Using the Indirect Tensile Test Device. *FHWA-LTPP Technical Support Services Contractor*, LAW PCS, FHWA, USA.
- NCHRP 1-37A Draft Test Method A1, Standard Test Method for Dynamic Modulus of Asphalt Concrete Mixtures and Master curves.
- Nunn, M., A. Brown, D. Weston, and J. C. Nicholls (1997) Design of Long-Life Flexible Pavements for Heavy Traffic, *TRL Report 250*, Transport Research Laboratory, Crowthorne, U.K.

(접수일: 2005.2.22/심사일: 205.8.26/심사완료일: 2005.10.4)