

장수명 아스팔트 포장용 고강성 혼합물의 실내 공용성 평가

Laboratory Performance Evaluation of the High Modulus Asphalt Mixes for Perpetual Asphalt Pavements

이현종* · 강민균** · 이정훈***

Lee, Hyun Jong · Kang, Min Gyun · Lee, Jung Hun

1. 서론

현재 우리나라 도로의 유지관리비용의 대부분이 도로포장의 파손에 따른 유지보수에 사용되고 있으나 국내 아스팔트포장은 조기파손이 자주 발생하여 선진국에 비해 공용기간이 50% 이상 짧아 막대한 예산의 손실로 이어져 유지보수주기를 증대시키는 방안을 수립하는 것이 절실히 요구된다. 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 대한 저항성을 평가하여 고강성 아스팔트 혼합물의 우수성을 검증하였다.

2. 장수명 아스팔트 포장 공법 개요

장수명 포장이란 설계연한 동안 주기적으로 표층만 재시공하고 재건설이나 대대적인 보수 없이 40년 이상을 견딜 수 있는 공용성이 기존 아스팔트 포장의 2배 이상 되는 포장이다. 기존의 아스팔트 포장은 반복되는 차량하중으로 인해 그림 1과 같이 아스팔트층의 반복하중에 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) 아스팔트층의 하단에 발생하는 인장변형률을 감소시킨다. 현재 영국에서 제안한 장수명 포장의 설계방식은 기본적으로 아스팔트 기층의 두께를 증가시키거나 또는 강성을 증가시켜 아스팔트층 하단에 발생하는 인장변형률이 피로파괴를 유발시키지 않는 범위 이내로 제한하는 방식이다.

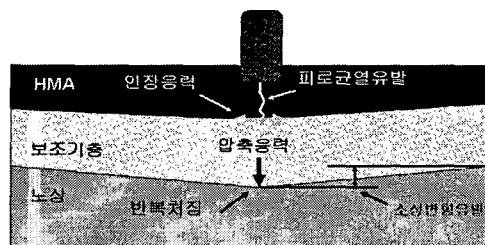


그림 1. 기존 아스팔트포장의 일반적인 파손 메카니즘

* 정회원 · 세종대학교 토목환경공학과 부교수 · 공학박사 · 02-3408-3812(E-mail:hlee@sejong.ac.kr)

** 학생회원 · 세종대학교 토목환경공학과 석사과정 · 02-2205-3812(E-mail:gyunida@hanmail.net)

*** 정회원 · 세종대학교 토목환경공학과 박사과정 · 02-2205-3812(E-mail:ugg97@korea.com)

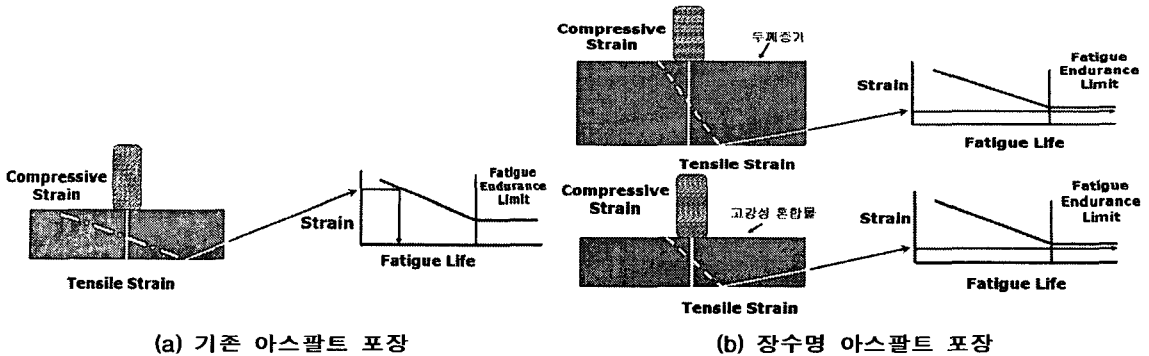


그림 2. 장수명 포장의 피로저항 개념

3. 고강성 아스팔트 혼합물 개발을 위한 예비 물성 시험

장수명 아스팔트 포장의 기본 설계 개념은 아스팔트 기층의 두께를 증가시키거나 강성을 증가시켜 차랑 하중에 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.

아스팔트 혼합물의 강성을 증가시키는 방법에는 바인더의 강성을 증가시키거나 골재의 입도를 조절하여 강성을 증가시킬 수 있다. 따라서 본 연구에서는 표 1에서 보는 바와 같이 기존의 일반 아스팔트 바인더에 강성을 크게 증가시킨 새로운 바인더를 개발하였고 이에 대한 기본적인 물성시험을 수행하였다. 또한 아스팔트 혼합물의 강성을 평가하기 위하여 일반 아스팔트 바인더와 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 시험온도는 5℃, 15℃, 30℃이고 하중주파수는 20Hz, 10Hz, 0.5Hz, 0.1Hz에서 시험을 실시하였다.

표 1. 일반 및 고강성 아스팔트 바인더의 물성비교

| | 일반AP (AC60~80) | PMA | 고강성 | 프랑스(EME) | |
|------------------------------------|-------------------|-------|------|----------|-------|
| | | | | 35/50 | 10/20 |
| 침입도, 25℃, (dmm) | 70 | 63 | 28 | 35/50 | 10/20 |
| 연화점 (℃) | 48 | 100.3 | 89 | | 62~70 |
| 프라스 취하점 (℃) | -11 | -18 | -8 | | +3~-8 |
| G^* , 15℃ (MPa) | 7.1 | 7 | 21 | 34.5 | 40~90 |
| $G^*/\text{Sin}\delta$, 70℃ (kPa) | | | | | |
| $G^*/\text{Sin}\delta$, 76℃ (kPa) | | 1802 | | | |
| 점도 | 135℃ cSt | 417 | 3715 | | |
| | 150℃, cSt | 202 | 1415 | | |
| | 170℃, cSt | 82 | 740 | | |
| | 190℃, cSt | 52 | 390 | | |

동탄성계수 측정 시험을 수행하여 그림 3과 같이 Shift Factor를 산정하였다. 산정된 Shift Factor를 사용하여 마스터커브를 그리게 되고 각 온도와 하중주파수 대역별로 동탄성계수를 구할 수 있다. 각 혼합물의 마스터커브를 비교하면 그림 4와 같다. 그림 4에서 보는 바와 같이 하중주파수가 증가할수록 동탄성계수는 증가하였다. 일반 혼합물에 비해 새롭게 개발된 고강성 아스팔트 바인더를 사용한 혼합물의 경우 5℃에서는 1



0~15%, 15℃에서는 20~25%, 30℃에서는 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(fillle)를 50% 더 첨가

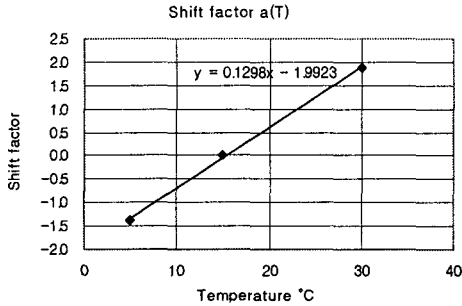


그림 3. Shift Factor

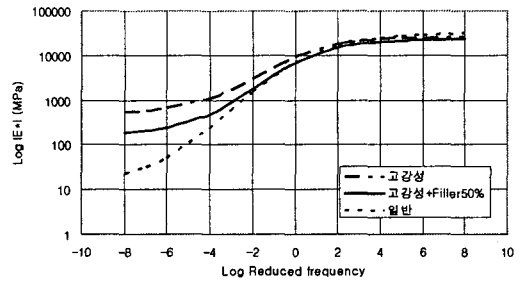


그림 4. 마스터커브(Reference Temperature 15℃)

시킨 혼합물의 경우는 일반 혼합물과 비슷한 값을 보여 채움재의 양의 변화에 따른 입도 변화가 혼합물의 강성 증가에 영향을 미치지 못한다는 것을 확인하였다. 따라서 본 연구에서 개발된 고강성 아스팔트 혼합물이 일반 혼합물에 비해 만족할 만한 수치를 보여주고 있으며 강도 측면에서 장수명 포장의 적용에 적합하다고 판단되었다.

4. 실내 공용성 시험을 위한 배합설계

이 배합설계의 목적은 실내 공용성 시험에 사용될 아스팔트 혼합물을 생산하기 위한 것으로서 실제 현장 플랜트에서 혼합물을 생산하기 위한 것이다. 일반 아스팔트 혼합물과 고강성 아스팔트 혼합물에 대한 예비물성 시험을 통하여 고강성 아스팔트 혼합물의 적용 타당성을 검증하였고 이를 바탕으로 실내 시험에 적용하기 위해서 최종적으로 배합설계를 실시하였다.

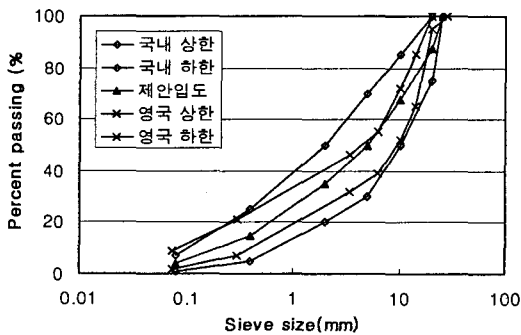


그림 5. 국내 및 영국의 입도 비교

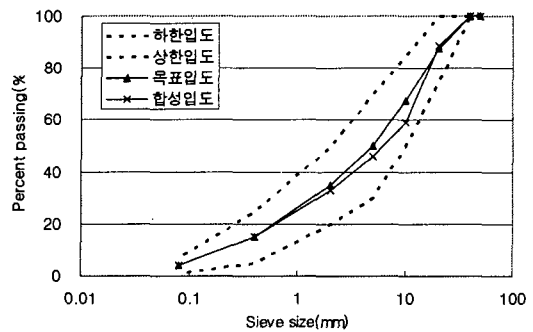


그림 6. Hot Bin 입도 비교

예비 실내 시험에서 사용한 기층용 골재의 입도는 현재 장수명 포장이 활발히 시공되어 지고 있는 영국에서 적용되고 있는 기층용 입도를 사용하였으나 현재 우리 나라 실정을 고려해 볼 때 골재의 입경이 서로 상이하고 현장 합성입도의 경우 영국 기층용 입도를 생산하기가 힘들기 때문에 우리 나라 현장 여건에 잘



맞는 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 4.3%, 고강성 혼합물은 4.8%를 적용하여 실내시험의 혼합물을 제작하였다. 그림 6은 현장플랜트의 하트빈(Hot bin)에서의 합성입도를 나타낸 것이다.

5. 실내 공용성 평가

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 SK(주)에서 개발한 유럽식 고강성 아스팔트 바인더로 생산된 혼합물과 기존에 주로 적용 되었던 일반 아스팔트 혼합물의 실내 시험을 통하여 피로손상과 소성변형 등에 대한 저항성을 평가하였다.

5.1 수분손상 시험

각 혼합물의 수분민감성을 측정하기 위하여 마샬 공시체에 대한 건조 인장강도 및 수침 인장강도를 간접 인장시험을 통해 측정하였으며 중요 결과를 요약하면 다음 표 2와 같다. 아스팔트 혼합물의 수분손상에 대한 저항성은 TSR이 높을수록 유리한 것으로 알려져 있으며, 미국의 경우 대부분의 주에서는 TSR이 75~80% 이상이 되도록 배합설계에 규정하고 있다(NCAT).

표 2에서 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. 따라서 고강성 아스팔트 혼합물이 일반 아스팔트 혼합물 보다 수분손상에 대한 저항성이 우수한 것으로 나타났다.

표 2. 수분손상 시험결과

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

5.2 휠트래킹 시험

휠트래킹 시험 결과를 동적안정도로 비교하면 표 3과 같으며 소성변형에 대한 상대적인 비교를 용이하게 하기 위하여 하중을 통상적인 휠트래킹 시험에 적용하는 하중보다 2배로 증가시켜 시험을 실시하였다. 일반 혼합물의 경우 반복 윤하중이 20000회 통과하였을때 8mm정도의 러팅(rutting) 깊이가 생겼으며 고강성 아스팔트 혼합물의 경우는 윤하중이 5000회 이상부터는 약 2~3mm정도로 거의 변화가 없었다.



표 3. 동적안정도 비교 (윤하중 통과회수 20000회)

| | 일반 혼합물 | 고강성 혼합물 |
|----------------------|--------|---------|
| 러팅 깊이 (mm) | 7.28 | 2.79 |
| 윤하중 통과 회수 (회) | 20000 | 20000 |
| 윤하중(kg) (기본 70kg) | 140 | 140 |
| 동적안정도 (회/mm) | 2747 | 7168 |

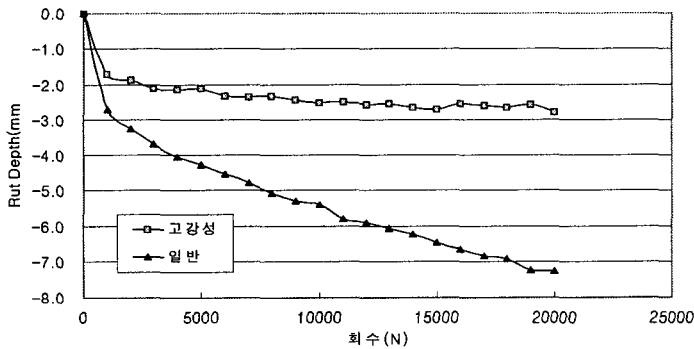


그림 7. 휠트래킹 시험결과

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 시험의 결과를 나타낸 것이다.

5.3 피로시험

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. 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.

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 벗어날 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 않음으로써 비교적 빠른 시간내에 혼합물간의 상대적인 피로공용성을 평가하기 위해서 시험을 수행하였다.

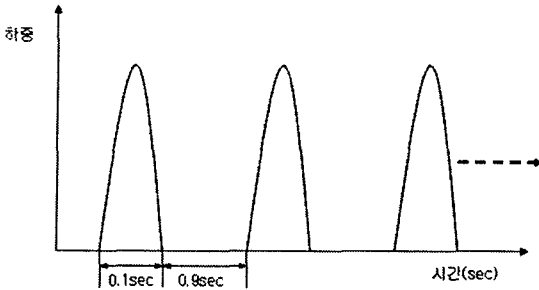


그림 8. 피로시험의 하중재하 형태

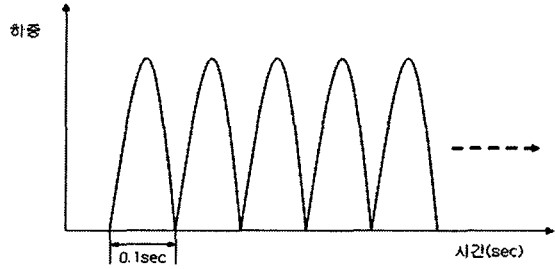


그림 9. 피로시험의 하중재하 형태(휴지기 없음)

각 혼합물의 피로시험 데이터를 사용하여 100번째 하중재하시의 변형을 진폭과 피로수명에 대해 식 (2)와 같이 일반적인 피로수명 모델을 사용하여 회귀분석을 하였다. 그림 10은 휴지기를 두지 않고 피로시험을 수행한 결과이고 그림 11은 휴지기를 두고 피로시험을 수행한 결과이다.

$$N_f = a(\epsilon_0)^b \tag{2}$$

여기서, N_f =아스팔트 혼합물의 피로수명

ϵ_0 =초기 인장 변형률

a, b=회귀분석을 통하여 얻어지는 상수

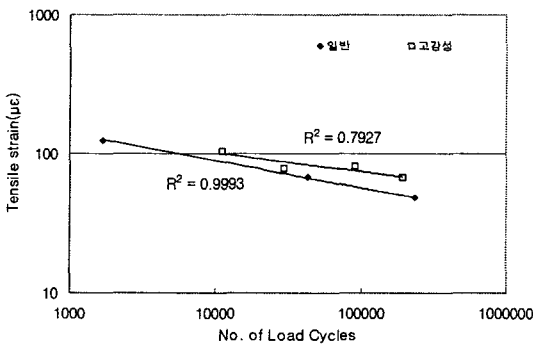


그림 10. 피로시험 결과(휴지기 없음)

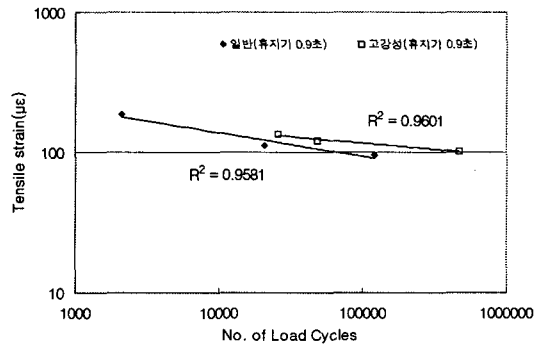


그림 11. 피로시험 결과

각 혼합물에 대한 회귀분석 값을 다음 표 4, 5에 나타내었다.



표 4. 혼합물에 대한 회귀분석 결과(휴지기 없음)

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

표 5. 혼합물에 대한 회귀분석 결과(휴지기)

| 혼합물 종류 | 공극율 평균(%) | 피로모델식의 계수 | | |
|--------|-----------|---------------------|---------|----------------|
| | | a | b | R ² |
| 일반 | 4.59 | 8×10^{-19} | -5.7208 | 0.9581 |
| 고강성 | 5.53 | 2×10^{-38} | -10.847 | 0.9601 |

일반 아스팔트 혼합물과 고강성 아스팔트 혼합물의 피로시험 결과 피로수명에 있어서 고강성 아스팔트 혼합물의 피로수명이 일반 아스팔트 혼합물의 피로수명보다 상대적으로 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 있다. 이는 휴지기 동안 미세손상의 회복에 기인한 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 장수명 아스팔트 포장 공법의 공용성을 평가하기 위하여 고강성 아스팔트 혼합물 개발을 위한 예비 물성 시험을 수행하였고 수행결과 장수명 포장에 가장 적합하다고 판단되는 고강성 아스팔트 혼합물을 개발하였다. 따라서 본 연구에서는 아스팔트 포장 기층에 적용하기 위해서 새롭게 개발된 고강성 아스팔트 바인더로 생산된 혼합물과 기존에 주로 적용되었던 일반 아스팔트 혼합물의 실내 시험을 통하여 피로손상과 소성변형 등에 대한 저항성을 평가하였다.

포장재의 수분민감성을 파악하기 위하여 수분손상시험을 수행하였고 내유동 특성을 분석하기 위하여 휠트래킹시험을 수행하였다. 또한 균열에 대한 피로저항성을 분석하기 위하여 피로시험을 수행하였다. 시험수행결과 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 피로저항성이 일반 혼합물에 비해 우수한 것으로 나타났다.

결론적으로 고강성 아스팔트 혼합물의 공용성이 일반 아스팔트 혼합물보다 우수한 결과를 나타냈고 장수명 포장재(기층재)로서 적합하다고 판단된다.

감사의 글

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



참고문헌

1. 강릉대학교 공학연구소. (2000. 8), “SBS PMA(슈퍼팰트)의 공용성 및 경제성 평가연구”, 최종보고서.
2. 건설교통부. (2003). “아스팔트 포장 설계법 개발”, 최종보고서
3. 세종대학교 건설기술연구소. (2002. 1), “SBS 개질 SMA 혼합물의 실용화 연구”, 최종보고서.
4. Asphalt Pavement Alliance (2001) Perpetual Pavement: Structured for the future.
5. Asphalt Pavement Alliance,(2002) “Perpetual Pavements” Order Number APA 101.
6. Terhi, Kristiina, Pellinen.(2001).“Investigation of the Use of Dynamic Modulus as an Indicator of Hot-mix Asphalt Performance”.
7. Transportation Research Circular No. 503,(2001).