



골재의 입도와 SBS 개질재가 아스팔트 혼합물의 점탄성 물성 및 피로 공용성에 미치는 영향

The Effects of Aggregate Gradations and SBS Modifier on the Viscoelastic Properties and Fatigue Performance of Asphalt Mixtures

이 현 중* · 최 지 영** · 차 순 만***

Lee, Hyun Jong · Choi, Ji Young · Cha, Soon Man

ABSTRACT

This paper presents the characteristics of viscoelastic properties and fatigue performance of SBS modified asphalt mixtures depending on the aggregate gradation. Dynamic shear rheometer (DSR) and uniaxial tensile creep tests are performed to analyze the thermomechanical behavior of asphalt binders and mixtures, respectively. Uniaxial tensile fatigue tests for seven different asphalt mixtures are conducted to evaluate the effects of aggregate gradations and SBS modifier on the fatigue performance of the mixtures. DSR and uniaxial tensile creep tests results show that the SBS modified asphalt mixtures have better rutting resistance than the unmodified mixtures at high temperatures regardless of the aggregate gradations used. Fatigue factor $G^*\sin\delta$ in Superpave binder specification may not be adequate for evaluating the fatigue performance of asphalt mixtures.

It is observed from uniaxial tensile fatigue tests that SBS modified asphalt mixtures compared to unmodified mixtures have ten times longer fatigue lives regardless of the aggregate gradations(dense, SMA, and Superpave gradations) used in the mixtures. The better fatigue performance of the SBS modified mixtures is observed even after long-term aging process. The effect of aggregate gradations on the fatigue performance is not as significant as the SBS modifier. The cellulose fiber added in the SMA mixture has negligible effects on the viscoelastic properties and fatigue performance of the mixture, but is effective in reducing draindown. Although the SBS modified asphalt binder is used, it may be necessary to add the cellulose fiber into the SMA mixture to prevent the draindown.

Keyword : SBS modified asphalt, SMA, aggregate gradation, viscoelastic property, fatigue performance,

*정회원, 강릉대학교 토목공학과 조교수
(hlee@knusun.kangnung.ac.kr/Tel:033-640-2419)

** 강릉대학교 토목공학과 석사과정

***정회원, SK(주) 대덕기술원 수석연구원



요 지

골재의 입도에 따른 SBS 개질 아스팔트 혼합물의 점탄성 물성 및 피로공용 특성을 소개하였다. 아스팔트 바인더와 혼합물의 열역학적 거동분석을 위해 DSR 시험과 일축인장 크립시험을 실시하였다. 골재의 입도와 SBS 개질재가 피로공용성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 7종의 아스팔트 혼합물에 대해 일축인장 피로시험을 실시하였다. DSR 및 일축인장 크립시험결과, 골재의 입도에 관계없이 SBS 개질 아스팔트 혼합물이 일반 아스팔트 혼합물에 비해 고온에서 소성변형에 대한 저항성이 큰 것으로 나타났다. Superpave 아스팔트 바인더 규격의 피로인자 $G^* \sin \delta$ 는 아스팔트 혼합물의 피로 공용성 평가에 사용하기에는 부적절한 것으로 사료된다.

일축인장피로시험결과, 골재의 입도(밀입도, Superpave입도, SMA입도)에 관계없이 SBS 개질 아스팔트 혼합물이 일반 혼합물에 비해 약 10배 이상 피로수명이 큰 것으로 나타났다. 장기노화후의 경우에 있어서도 SBS 개질 혼합물의 피로수명이 일반 혼합물에 비해 높게 나타났다. 골재의 입도변화는 SBS 개질재에 비해 피로공용성에 미치는 영향이 적었다. SMA 혼합물에 첨가한 셀룰로오스 섬유는 혼합물의 점탄성 물성이나 피로공용성에 미치는 영향이 미미하였으나, Draindown을 방지하는 데는 효과적이었다. SMA입도에 SBS 개질 아스팔트를 사용할지라도 Draindown 방지를 위해서는 셀룰로오스 섬유를 첨가할 필요가 있을 것으로 사료된다.

핵심용어 : SBS 개질 아스팔트, SMA, 골재입도, 점탄성 물성, 피로 공용성,

1. 서 론

아스팔트 포장의 피로균열에 영향을 미치는 요소에는 포장단면구조의 조합, 아스팔트 바인더의 물성, 골재의 물성 및 공극률, 포장의 하부구조, 온도, 교통 등 많은 요소가 있다. 이 들 요소 중 아스팔트 포장의 피로균열에 대한 저항성을 향상시키기 위한 일반적인 방법은 아스팔트 바인더나 골재의 물성 혹은 이들 혼합물의 물성을 개선 시키는 것이다.

아스팔트 바인더의 물성을 개선시키는 방법 가운데 가장 일반적으로 사용되는 방안은 아스팔트 바인더에 개질재를 첨가하는 것이다. 현재 다양한 종류의 개질재가 이러한 목적으로 개발되어 사용되고 있으며, 가장 널리 사용되는 개질재로는 폴리머를 들 수 있다. 폴리머는 많은 단위분자(monomer)를 화학적으로 반응시켜 긴

체인이나 덩어리로 이루어진 고분자 재료로서 수 많은 종류가 있으며, 국내에서는 SBS (styrene-butadiene-styrene) 및 SBR (styrene-butadiene rubber) 계통의 폴리머가 주로 사용되고 있다.

SBS 개질 아스팔트는 1990년대 초 몇몇 시험 시공이 실시되었으나, 90년대 중반 이후 그 사용량이 큰 폭으로 증가되었다. SBS 개질 아스팔트에 대한 외국의 연구결과는 많이 접할 수 있으나 국내에서 개발된 SBS 개질 아스팔트에 대한 연구는 제한된 수준에서 진행되어 공용성에 대한 자료가 충분하지 않다. 또한, 현장 공용성에 있어서도 소성변형과 같은 초기 공용성은 양호한 것으로 평가되었으나⁽²⁾ 아직까지 공용기간이 충분하지 않아 피로균열과 같은 장기 공용성에 대한 자료는 전무한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 일반 및 SBS 개질 아스팔트 혼합물의



장기 공용성에 대한 비교평가를 목적으로 다양한 실내시험을 수행하였으며, 본 논문은 그 중 피로 공용성과 관련된 연구결과를 정리한 것이다.

현재까지 SBS 개질 아스팔트 혼합물에는 밀입도와 Superpave입도가 주로 적용되어왔으나 최근에는 SMA 혼합물에 SBS 개질 아스팔트를 적용하는 경우도 있어 각 골재의 입도별 공용특성을 분석할 필요가 있다. 동일한 아스팔트 바인더를 사용한 혼합물일지라도 골재의 입도에 따라 그 피로 공용성이 달라질 수 있어 각 입도별 혼합물의 피로 공용특성을 파악하는 것은 아스팔트 포장의 내구성 증진에 있어 매우 중요한 사항이라 할 수 있다.

본 연구에서는 온도변화에 따른 일반 및 SBS 개질 아스팔트 바인더의 점탄성 거동 특성을 비교 분석하기 위하여 DSR 시험을 실시하였다. 입도가 다른 골재(밀입도, Superpave입도, SMA 입도)에 일반 및 SBS 개질 아스팔트를 각각 사용하여 제조한 혼합물에 대한 일축인장 크립시험을 통하여 하중주기별 동탄성계수의 변화를 비교 분석하였다. 또한, 일축인장 피로시험을 실시하여 골재의 입도와 SBS 개질재가 피로공용성에 미치는 영향을 평가하였다.

2. SBS 개질 아스팔트에 대한 기존의 연구결과

SBS 개질 아스팔트 바인더 및 혼합물의 물성과 공용성에 대해 현재까지 많은 연구가 수행되어졌으며^(1,3,6,13,15,18), 본 논문에서는 1990년대 이후 수행된 연구결과를 간략히 소개한다. Srivastava 등⁽¹⁸⁾은 실내시험과 네델란드에서의 현장시험시공 등을 통하여 SBS 개질 아스팔트는 소성변형 및 균열에 대해 높은 저항성이 있다고 평가하였으며, 특히 덧석우기에 적용할 경우 두께를 최

대 50% 까지 줄일 수 있고, 전체 공사비 측면에서는 약 15내지 20%의 감소효과가 있다고 평가하였다.

Maccarrone 등⁽¹⁴⁾이 실시한 빔피로시험(*beam fatigue test*)의 결과에 의하면 SBS 개질 혼합물이 일반 혼합물에 비해 약 14배 이상 피로수명이 증가하는 것으로 평가되었다. Corte 등⁽⁶⁾은 프랑스 LCPC에서의 휠트래킹 시험과 원형 시험주로부터의 시험을 통하여 SBS 개질 혼합물이 소성변형에 대한 저항성이 우수한 것으로 확인하였다.

SBS 개질 아스팔트의 노화에 대한 연구는 상대적으로 많지 않다. 최근 Airey and Brown⁽³⁾은 일반 아스팔트 및 EVA 개질 아스팔트와 SBS 개질 아스팔트의 노화 전후의 물성변화를 10~70°C의 온도범위에서 하중재하속도를 달리 하여 복소전단계수(G^*)와 위상각 (δ)를 측정하여 분석하였다. 그의 연구결과에 의하면 세 가지 아스팔트 모두 노화가 진행될수록 복소전단계수가 증가하였으며, 개질 아스팔트의 노화는 일반 아스팔트와 유사하게 진행되는 것으로 평가하였다. SBS 개질 아스팔트의 경우 일반아스팔트에 비해 저온에서는 복소전단계수의 변화가 미미한 반면 고온(40°C 이상)에서는 5배에서 8배 정도 복소전단계수가 증가되었다. 이는 앞서 언급한 휠트래킹 시험에서 SBS 개질 아스팔트가 일반 아스팔트에 비해 소성변형에 강한 저항성을 보여준 결과와 유사한 결과임을 알 수 있다.

Lee 등⁽¹³⁾은 인천국제공항 시험도로에 사용된 5종류의 개질 아스팔트 혼합물에 대해 실내시험을 통한 공용성 평가를 실시하였다. 시험결과, Gilsonite, Chemcrete, SBR 등의 개질재에 비해 SBS 개질재가 피로균열에 대한 저항성이 높은 것으로 나타났다.

한편, 국내에서도 폴리머 개질 아스팔트에 대



한 연구가 몇몇 진행되었으며, 김남호 등⁽¹⁾이 수행한 고무계열 개질 아스팔트의 거동특성 연구에 의하면 이러한 개질재들은 고온에서의 강성을 향상시키며, 아스팔트의 취급온도인 135°C에서 제품의 품질에 큰 이상이 없는 것으로 판단하였다. 또한 저온(-20°C 근방)에서는 일반 아스팔트와 거의 비슷한 거동을 내는 것으로 파악되었으며, 이는 앞서 언급한 Airey and Brown⁽³⁾의 연구결과와 유사함을 알 수 있다.

3. 시편준비 및 시험방법

3.1 시편준비

시험재료

현재까지 국내에서 사용되는 아스팔트는 침입도 기준으로 추풍령 이북은 AP-3, 추풍령 이남은 AP-5를 사용하고 있으나 소성변형의 발생이 증가되어 최근에는 AP-5를 선호하는 경향이 있다. 따라서, 본 연구에서는 AP-5 아스팔트를 기본으로 하여, SBS 고분자를 첨가한 개질 아스팔트를 사용하였다. Superpave의 공용성 등급 기준에 의하면 AP-5 아스팔트는 PG 64-22에, 그리고 SBS 개질 아스팔트는 PG 76-22에 해당하는 바인더를 사용하였다.

본 연구에서는 충남 아산사에서 생산된 한 종류의 골재를 사용하였으며, 골재의 입도는 3종의 다른 입도를 사용하였다. 그림 1은 본 연구에서 사용한 골재의 입도분포로서 그림에서 보는 바와 같이 최대 입경 19mm의 밀입도와 Superpave에서 제안한 최대 입경 19mm 골재, 그리고 SMA 혼합물에서 사용되는 최대 입경 13mm 골재 3 종류를 사용하였다.

목표로 하는 골재의 입도를 얻기 위해서 일반적으로 사용되는 방법은 3내지 4 종류의 최대입

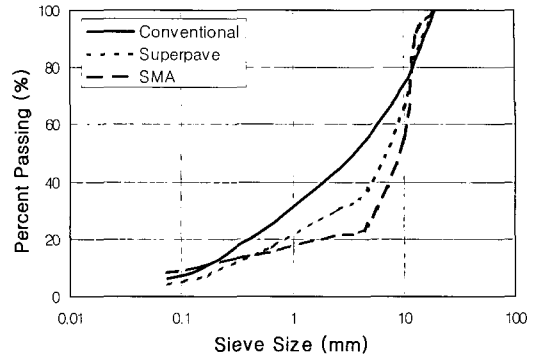


그림 1. 골재의 입도

경 및 입도가 다른 골재를 합성하는 것이나 이러한 방법은 항상 동일한 골재입도를 얻기가 힘들다는 문제점이 있다. 이는 결국 혼합물의 시편 제작시 시편과 시편간의 물성변화를 초래할 우려가 있기 때문에 본 연구에서는 각 골재를 체 크기별로 세분하여 체가름을 실시한 다음 이를 다시 합성하여 사용하였다.

앞서 언급한 2종의 아스팔트 바인더와 3종의 골재입도를 조합하여 다음과 같이 7종의 혼합물을 생산하여 점탄성 물성 및 피로 공용성을 평가하였다.

- 혼합물 A: 밀입도 + AP-5
- 혼합물 B: Superpave 입도 + AP-5
- 혼합물 C: 밀입도 + SBS 개질 아스팔트
- 혼합물 D: Superpave 입도 + SBS 개질 아스팔트
- 혼합물 E: SMA 입도 + AP-5 + Fiber
- 혼합물 F: SMA 입도 + SBS 개질 아스팔트
- 혼합물 G: SMA 입도 + Fiber + SBS 개질 아스팔트

혼합물 A, B 그리고 C, D의 시험결과는 각각 동일한 아스팔트 바인더에 대해 골재의 입도가 피로공용성에 미치는 영향을 분석하는데 사용하



였고, 혼합물 A, C 그리고 B, D는 각각 동일한 골재입도에 대해 일반 아스팔트와 SBS 개질 아스팔트의 피로 공용성 비교를 위해 사용되었다.

혼합물 E는 현재 국내에 적용되고 있는 일반적인 SMA 혼합물로서 이를 기준으로 셀룰로오스 섬유와 AP-5 대신 SBS 개질 아스팔트를 사용하였을 때(혼합물 F)와 그리고 셀룰로오스 섬유와 SBS 개질 아스팔트를 동시에 사용하였을 때(혼합물 G) 각각이 피로공용성에 미치는 영향을 비교하는데 사용되었다.

배합설계

각 혼합물별 최적 아스팔트 함량은 미국 NAPA(National Asphalt Pavement Association)에서 제안한 방법으로 마샬배합설계를 실시하여 산정하였으며, 결과를 요약하면 표 1과 같다. 표에서 혼합물 A, B, C, D의 최적 아스팔트 함량은 공극률 4%에서 결정하였고 SMA 입도의 경우 공극률 3.3%에서 아스팔트 함량을 결정하였다. 그러나 혼합물 F의 경우 공극률 3.3%에서 실시한 Draindown 시험결과 시방에서 규정한 최대값 0.3%보다 훨씬 상회하여 Draindown을 줄이기 위하여 공극률 4%에서 최적 아스팔트 함량을 결정하였다. 미국 메릴랜드주에서 실시된 여러 건의 SMA 시공 프로젝트에서는 폴리머 개질재를 셀룰로오스 섬유 대신 사용할 경우 공극률 4%에서 아스팔트의 최적함량을 결정하는 예가 다수 있었으며, 이때 아스팔트 함량은 대략 6% 정도 되었다⁽¹⁵⁾.

표 1에서 보는 바와 같이 혼합물 F의 경우 Draindown을 감소시키기 위하여 공극률을 증가시켜 최적 아스팔트 함량을 감소시켰으나 Draindown 값이 0.8%로서 여전히 규정값 0.3%를 초과 한다. 그러나 셀룰로오스 섬유를 사용한 혼합물 E, G의 경우에는 시방규정을 잘 만족함을 알 수 있다. 이로 미루어 볼 때 셀룰로

오스 섬유가 SBS 고분자 보다 Draindown을 억제하는 데 보다 효과적인 것으로 판단되며, 이는 Brown 등⁽⁵⁾이 실시한 연구결과와도 유사하다.

표1. 아스팔트 혼합물의 마샬배합설계결과

혼합물	안정도 (kg)	흐름값 (.01cm)	공극률 (%)	VFA (%)	VMA (%)	Drain Down (%)	최적 아스팔트 함량(%)
기준	Min750	20-40	3-5	70-85	Min13	-	-
A	1650	25	4.0	76.0	14.25	-	5.10
B	1470	33	4.0	76.0	14.54	-	5.20
C	1900	30	4.0	76.0	14.57	-	5.20
D	1760	37	4.0	75.0	14.56	-	5.25
기준	Min500	-	2.5-4	Min75	Min17	Max0.3	-
E	870	-	3.3	81.8	16.81	0.06	6.60
F	1100	-	4.0	82.0	16.80	0.8	6.10
G	1120	-	3.3	82.0	17.67	0.09	6.90

다짐 및 코어채취

실내시험에 사용될 시편은 모두 선회다짐기 (gyratory compactor)를 사용하여 제작하였다. 혼합물의 다짐에는 Superpave에서 제안한 방식으로 다짐각은 1.25°, 압축응력은 600kPa, 다짐속도는 분당 30회를 적용하였다⁽⁴⁾.

일축인장 피로시험용 시편은 직경 150mm, 높이 170mm의 원통형 시편을 선회다짐기로 다진 후 시편의 온도가 실내온도로 낮아졌을 때 공극률을 측정하고 연직방향으로 직경 75mm의 코어를 채취하여 양단을 10mm씩 절단하여 길이 150mm의 시편을 시험에 사용하였다. 본 연구에서는 일축인장 피로시험을 실시하기 때문에 층다짐 때 발생하는 층과 층의 경계면에서 균열이 쉽게 발생될 우려가 있어 여러 층으로 나누어 다짐을 실시하지 않고 한 층으로 다짐을 완료하였다.

모든 시편은 다짐후의 공극율이 A, B, C, D, F 혼합물은 4±0.5% 이내에 들도록, 그리고 E와



G 혼합물은 $3.3 \pm 0.5\%$ 이내에 들도록 다짐을 실시하였는데, 동일한 높이의 시편을 만들기 위하여 한 시편당 소요되는 혼합물의 량을 시행착오적으로 산출하였으며, 이를 개략적으로 설명하면 다음과 같다. 먼저, 아스팔트 혼합물의 최대이론밀도를 ASTM D2041의 규정에 따라 실측을 하고, 시편의 체적은 3002.6cm^3 (직경 150mm, 높이 170mm)로 동일하게 두고 공극율이 각각 2, 4, 6, 8%인 경우에 해당되는 혼합물의 중량을 최대이론밀도를 사용하여 산정하였다. 각각의 계산된 혼합물의 중량만큼 사용하여 4개의 시편을 제작한 다음 공극율을 측정하고, 측정된 공극율과 혼합물의 중량관계를 그래프로 그린 다음 목표 공극율에서 혼합물의 중량을 결정하였다. 이와 동일한 방법으로 모든 혼합물에 대해 목표 공극율을 가진 시편을 제작하는데 필요한 혼합물의 중량을 산출하였다.

시편의 노화

아스팔트 바인더의 노화는 혼합물의 공용성에 많은 영향을 미친다. 아스팔트는 노화가 진행될수록 강성이 증가하기 때문에 혼합물의 소성변형에 대한 저항성은 증대되나 피로균열에 대한 저항성은 아스팔트 층의 두께나 기온에 따라 그 영향이 달라지는 복잡한 거동을 하게 된다. 혼합물의 강성이 증가되면 아스팔트 층의 두께가 두꺼울 경우에는 피로수명이 증대되지만, 아스팔트 층의 두께가 얇고, 온도가 낮을 경우에는 오히려 균열에 대한 저항성은 떨어진다⁽¹⁹⁾. 특히, 고분자 개질 아스팔트의 경우에는 점도가 일반 아스팔트에 비해 현저히 높기 때문에 혼합물의 생산온도가 일반 혼합물에 비해 약 10내지 20°C 높으며, 따라서 혼합물의 생산시 보다 많은 노화가 진행될 것으로 예상된다. 본 연구에서 사용된 아스팔트 혼합물 시편은 모두 단기노화(short-term aging, STA)를 실시하였으며, 아스

팔트 바인더의 장기노화(long-term aging, LTA)가 피로공용성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 밀입도 혼합물 A와 C에 대해서는 장기노화를 실시한 다음 피로시험을 수행하였다.

피로시험용 시편의 노화는 Tayebali 등⁽²⁰⁾이 SHRP 연구를 통하여 제안한 방법을 채택하였다. 즉, 실내에서 아스팔트 혼합물의 다짐을 실시하기 전 135°C의 온도를 유지하는 오븐 속에 혼합물을 4시간동안 양생하여 아스팔트 혼합물의 생산 및 시공과정에서 발생하는 단기노화를 모사하였다. 또한, 다짐을 완료한 시편을 85°C의 온도를 유지하는 오븐 속에 4일 동안 양생하여 아스팔트 포장이 공용중 발생하는 장기노화(7년 이상)를 모사하였다.

3.2 시험방법

골재입도에 따른 SBS 개질 아스팔트 혼합물의 피로 공용특성을 분석하기 위하여 3종류의 시험을 실시하였다. 먼저 아스팔트 바인더에 대해 DSR 시험기를 사용하여 여러 온도에서 복소전단계수와 위상각을 측정하여 피로 공용특성을 분석하였다. 아스팔트 혼합물의 피로 공용성 비교를 위하여 일축인장 피로시험을 실시하였으며, 혼합물의 점탄성 물성을 측정하기 위하여 피로시험을 실시하기 전에 모든 시편에 대해 일축인장 크립시험을 실시하였다.

아스팔트 바인더의 점탄성 물성시험으로 원시료 및 장기노화시료에 대해 고온 및 중간온도에서 DSR시험을 실시하였다. DSR시험은 1.6Hz (10rad/sec)의 하중주기에서 시편의 온도를 10°C 부터 70°C까지 15°C 간격으로 변화 시키면서 아스팔트의 G^* 와 δ 를 측정하였다. 시험은 응력제어(controlled-stress)의 방법으로 실시하였고, 각 온도에서의 하중진폭은 Stress Sweep Test를 통하여 선형 점탄성 거동을 나타내는 범위 내에서 결정하였다. DSR 시험에서 시편의 지름은 원시



료 및 장기노화 시료가 각각 25mm 및 8mm 이며, 시료의 두께는 원시료 및 장기노화 시료가 각각 1mm 및 2mm 이다.

장기노화시료는 원시료를 RTFO(rolling thin film oven) 장비로 163℃에서 85분간 회전박막 가열하여 열과 공기에 의해 노화를 시킨 다음 이를 다시 PAV(pressure aging vessel) 장비로 2,070kPa 압력과 100℃ 고온에서 20시간동안 노화 시킨 시료로서 현장에서 장기간 공용된 아스팔트의 노화를 모사한다.

아스팔트 혼합물의 점탄성 물성은 피로공용성 예측모델의 입력변수로 사용되는 혼합물의 기본적인 물성으로써 일축인장하에서 피로시험을 실시하기전 크립시험을 실시하여 측정하고, Dynamic Modulus는 Creep Compliance로부터 선형 점탄성 이론에 기초하여 역산정하였다. 크립시험은 25℃의 온도에서 670초 동안 하중을 재하하여 실시하였다. 시편에 가해진 인장하중은 혼합물의 강성을 고려하여 시편에 발생 가능한 손상을 최소화 하고 혼합물이 선형 점탄성 거동을 나타내는 범위내에 들 수 있는 하중을 선택하였다. 하중을 선택하기 위하여 각 혼합물에 대해 실제 크립시험에 앞서 하중의 크기를 달리하여 크립시험을 실시한 다음 Creep Compliance를 계산하고 이를 하중재하시간과의 관계곡선으로 그린 다음 중첩되는가를 확인하여 결정하였다. 단기노화 시킨 아스팔트 혼합물은 15kg, 개질 아스팔트 혼합물과 장기노화 시킨 혼합물은 20kg의 하중을 적용하였다.

크립시험은 점탄성 재료의 물성을 직접 측정하는 시험방법중 가장 간단한 시험이라 할 수 있다. 그러나, 일반적으로 크립시험의 초기 하중 재하시간(0.01~0.1초) 동안에는 동적효과로 인하여 정확한 시험 값을 얻기가 매우 힘들다⁽⁷⁾.

Creep Compliance는 즉시하중(정하중) σ_0 에 대한 임의의 시간에서의 변형률 $\epsilon(t)$ 의

비율로 정의 된다. 일반적으로 크립시험에서는 무한히 짧은 시간에 원하는 크기의 하중을 재하하기가 불가능하기 때문에 Ramp 하중을 가하게 된다. 따라서, Creep Compliance의 원래 정의대로 계산을 하면 초기 하중재하시간 동안의 Creep Compliance의 값이 부정확하게 된다. 이러한 문제를 극복하기 위한 하나의 방법으로 Quasi-Elastic 방법을 적용하며, 이 방법에 의한 Creep Compliance의 정의는 다음과 같다.

$$D(t) = \frac{\epsilon(t)}{\sigma(t)} \quad (1)$$

여기서, $D(t)$ 는 Creep Compliance이고 $\sigma(t)$ 는 임의의 시간에서 응력이다. 원래의 Creep Compliance 정의와 비교해볼 때 위식은 정하중 σ_0 대신 $\sigma(t)$ 를 사용함으로써 초기 짧은 하중재하 동안 발생하는 응력의 변화를 고려할 수 있다. 이러한 근사적 접근법은 상당히 실제 값과 잘 일치하는 것으로 시험을 통하여 평가되었다⁽¹⁰⁾. 따라서, 본 연구에서는 모든 Creep Compliance의 값은 식 (1)을 사용하여 계산하였다.

일축인장시험에 사용된 장비는 서보유압 조절 방식(servo hydraulic closed-loop)의 시험기로서 일본의 Shimazu사 모델이다. 일축인장 재하시편에 작용하는 편심을 최소화하기 위하여 구형 조인트(ball joint)를 사용하였으며, 철제 플레이트와 시편을 에폭시 접착제로 접착할 때 시편을 고정시키고 하중 중심선을 따라 정확한 배열을 목적으로 그림 2에서 보는 바와 같이 시편 접착 지지대를 개발하였다. 철제 플레이트는 시험기와 시편을 연결하는 역할을 담당하며, 그림 3은 시편을 시험기에 장착하는 모습이다.

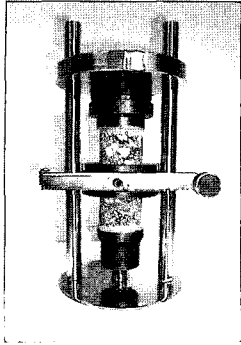


그림 2. 아스팔트 혼합물의 시편과 에폭시 접착시 사용되는 시편 지지대

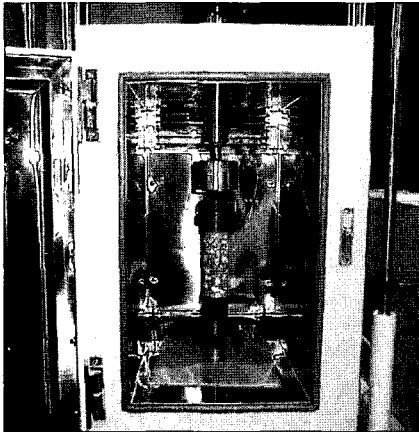


그림 3. 피로시험기에 시편을 장착하는 광경

피로시험은 25°C에서 실시하였고, 시험을 실시하는 동안 정밀한 온도조절을 위하여 온도조절챔버를 사용하였다. 하중은 10Hz의 주기를 갖는 Haversine 하중을 변형률 제어(controlled-strain) 방법으로 시편이 피로에 의한 파괴가 발생할 때 까지 하중을 가하였다. 3개의 다른 하중단계(load level)에서 피로시험을 실시하였고, 각 하중단계별 최소 2회 이상 시험을 실시하였으며, 시험에 적용된 하중의 크기는 표 4에 주어져 있다. 피로시험동안 휴지기(rest period)는 적용하지 않았다. 일축인장 피로시험은 크립시

험을 실시한 시편을 사용하여 실시하였으며, 크립시험에서 발생된 변형이 완전히 회복될 수 있도록 충분한 시간동안(2시간 이상) 기다린 다음 시험을 실시하였다.

4. 시험결과분석 및 고찰

4.1 아스팔트 바인더의 역학적 시험결과

표 2는 DSR을 사용하여 10~70°C 의 온도대역에서 복소전단계수와 위상각의 변화를 측정할 결과이다. 온도에 따른 복소전단계수와 위상각의 거동을 각각 그림 4와 5에 나타내었다. 그림 4에서 보는 바와 같이 온도가 증가할수록 바인더의 강성은 감소하며, 원시료의 경우 20°C 이후에서는 SBS 개질 아스팔트가 AP-5에 비해 강성이 크다는 것을 알 수 있고, 70°C에서는 그 차이가 약 3~4배 정도 되는 것으로 나타났다. 일반 및 SBS 개질 아스팔트 모두 노화가 진행될수록 복소전단계수가 증가하였으며, 개질 아스팔트의 노화는 일반 아스팔트와 유사하게 진행되는 것으로 사료된다. 장기노화시료의 경우 일반 및 개질 아스팔트 모두 비슷한 강성을 보여주고 있으나 40°C 이후에서는 SBS 개질 아스팔트가 AP-5에 비해 강성이 약간 큰 것으로 판단된다.

이상의 결과는 Airey and Brown⁽³⁾이 실시한 시험결과와 상당히 유사한 것으로서, 그의 연구결과에 의하면 일반 및 SBS 개질 아스팔트 모두 노화가 진행될수록 복소전단계수가 증가하였으며, 개질 아스팔트의 노화는 일반 아스팔트와 유사하게 진행되는 것으로 평가하였다. SBS 개질 아스팔트의 경우 일반아스팔트에 비해 저온에서는 복소전단계수의 변화가 미미한 반면 고온(40°C 이상)에서는 5배에서 8배 정도 복소전단계수가 증가되었다.



표 2. DSR 시험결과

Original			
Asphalt Binder	Temperature(°C)	δ (°)	G^* (MPa)
Unmodified	10	60.6	10,141.0
	25	78.7	609.8
	40	82.3	35.8
	55	88.1	4.5
	70	89.9	0.6
SBS Modified	10	54.5	10,164.4
	25	68.1	725.3
	40	65.7	68.4
	55	68.8	11.7
	70	76.1	2.5
RTFO + PAV Residue			
Unmodified	10	29.4	25,732.1
	25	52.0	3,052.0
	40	72.9	241.7
	55	77.4	21.3
	70	87.6	3.1
SBS Modified	10	28.9	20240.5
	25	51.5	3227.7
	40	67.1	272.5
	55	74.1	28.6
	70	77.6	5.1

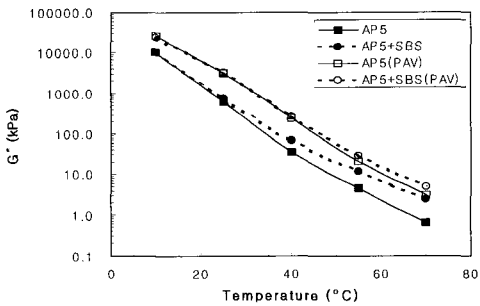


그림 4. 온도에 따른 아스팔트 바인더의 복소전단계수 거동

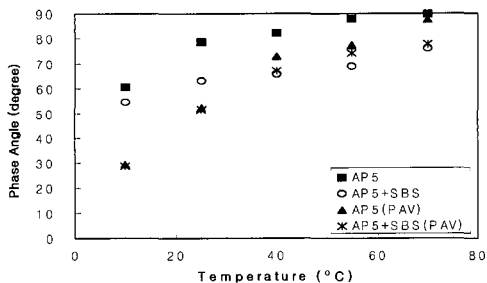


그림 5. 온도에 따른 아스팔트 바인더의 위상각 거동

위상각은 그림 5에서와 같이 저온에서 고온으로 진행할수록 증가하였다. 이는 온도가 증가하면 아스팔트 바인더가 보다 점성에 가까운 거동을 나타내는 것으로서 AP-5의 경우 70°C의 온도에서 위상각은 90°로 완전한 점성 거동을 하는 것으로 나타났다. 원시료의 경우 일반 아스팔트가 개질 아스팔트에 비해 위상각이 큰 것으로 나타났으나 장기노화시료의 경우 그 차이가 많이 감소하였다. 또한, 원시료에 비해 장기노화시료의 위상각이 적어 보다 탄성에 가까운 거동을 하는 것으로 판단된다.

그림 6은 Superpave에서 제안한 아스팔트 바인더의 공용성 규격에서 피로수명 인자 $G^* \sin \delta$ 의 온도에 따른 거동특성을 분석한 것이다. 장기노화시료의 경우 온도가 15°C 이상에서는 $G^* \sin \delta$ 의 값이 5000kPa 이하로 규정을 만족한다. 그러나 일반 및 개질 아스팔트의 경우 50°C 까지 $G^* \sin \delta$ 의 값이 거의 차이가 나지 않아 어느 바인더가 보다 피로균열에 대한 저항성이 좋은가를 판단하기가 어려운 것으로 판단된다. 외국에서 실시된 공용성 등급 규격의 검정시험결과^(9,16,17)에 의하면 피로인자 $G^* \sin \delta$ 와 아스팔트 혼합물의 피로 공용성과는 상관성이 높지 않은 것으로 보고하였다. 실제 본 연구에서 실시한 피로시험에 의하면 SBS 개질 아스팔트 혼합물이 일반 아스팔트 혼합물에 비해 피로수명이 10배 이상 큰 것으로 나타났으나 일반 및 SBS 개질 아스팔트의 $G^* \sin \delta$ 값은 50°C 이하의 저온에서 거의 동일하기 때문에 $G^* \sin \delta$ 값만으로 혼합물간의 피로 공용성 우열을 가리기가 힘들다. 따라서, 아스팔트 바인더의 $G^* \sin \delta$ 를 사용하여 아스팔트 혼합물간의 피로 공용성을 비교할 경우 보다 세심한 주의가 필요한 것으로 사료된다.

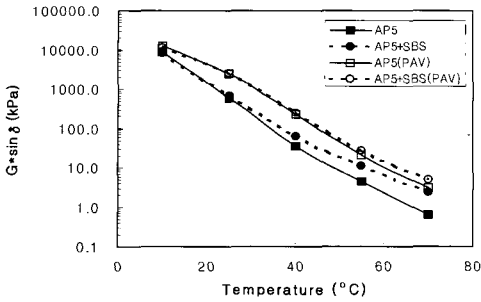


그림 6. PG 규격에서 아스팔트 바인더의 피로 공용성과 관련된 피로인자($G \cdot \sin \delta$)의 거동

4.2 아스팔트 혼합물의 점탄성 물성

아스팔트 혼합물의 점탄성 거동특성을 비교 분석하기 위하여 25°C에서 일축인장 크립시험을 실시하였다. 크립시험은 피로시험에 사용될 시편에 대해 실시하였고, 피로시험은 한 혼합물 당 6개 이상의 시편을 사용하기 때문에 크립시험도 6개의 시편에 대해 각각 시험을 실시하였다. 크립시험에서 얻어진 응력과 변형률 값을 사용하여 식 (1)을 통해 Creep Compliance, $D(t)$ 를 계산하였다. $D(t)$ 와 하중재하시간 t 와의 관계는 그림 7(a)의 예와 같이 전형적인 S자형 곡선형태를 띄고 있다. 선형 점탄성 이론을 사용하여 Creep Compliance로부터 동탄성계수를 역산정하기 위해서는 크립 데이터를 수학적으로 표현하여야 하는데 이를 위해 몇 가지 모델이 사용가능하며, 본 연구에서는 다음 식과 같은 Modified Power Law(MPL)를 사용하였다.

$$D(t) = D_0 + \frac{D_\infty - D_0}{\left(1 + \frac{\tau_0}{t}\right)^n} \quad (2)$$

여기서,

D_0 = creep compliance ($t=0$),

D_∞ = creep compliance ($t=\infty$),

τ_0 = 시간정수,

t = 하중재하시간,

n = $D(t)-t$ 대수관계 곡선에서 직선구간의 기울기.

식 (2)의 계수를 구하는 방법은 먼저 회귀분석을 통하여 n 값을 구하고, $D(t)$ 데이터로부터 D_0 , D_∞ 값을 추정한 다음 실험 데이터와 모델식의 에러를 최소화 하는 방법으로 τ_0 를 산정하였다. 그림 7(a)의 MPL선은 식 (2)를 사용하여 실측한 $D(t)$ 데이터를 수학적으로 표현한 것이다. 이와 동일한 방법으로 각 시편에 대한 모델 계수를 구하고 이들의 평균값을 취하여 특정 혼합물의 $D(t)$ 를 표현할 수 있는 MPL 모델식의 계수 값 들을 결정하였으며, 표 3과 같다. 그림 7(b)는 특정 혼합물의 6개 시편에 대한 크립시험의 결과를 사용하여 산정한 Creep Compliance (그림에서 기호로 표시된 데이터)와 위에서 언급한 방법으로 산정한 MPL을 나타낸 것으로서 MPL이 혼합물의 대표적인 크립거동을 비교적 잘 묘사함을 알 수 있다.

표3. 각 혼합물의 Creep Compliance를 표현하는 MPL 모델 식(2)의 계수값

단기노화	D_0	D_∞	τ_0	n
Mix A	3.7×10^{-5}	0.02	7,600	0.55
Mix B	3.6×10^{-5}	0.012	900	0.65
Mix C	3.5×10^{-5}	0.0065	17,000	0.46
Mix D	3.0×10^{-5}	0.007	70,000	0.43
Mix E	4.0×10^{-5}	0.021	600	0.70
Mix F	3.3×10^{-5}	0.0045	3,000	0.46
Mix G	3.2×10^{-5}	0.004	2,300	0.42
장기노화	D_0	D_∞	τ_0	n
Mix A	3.2×10^{-5}	0.003	1,350	0.53
Mix C	3.0×10^{-5}	0.001	6,500	0.36

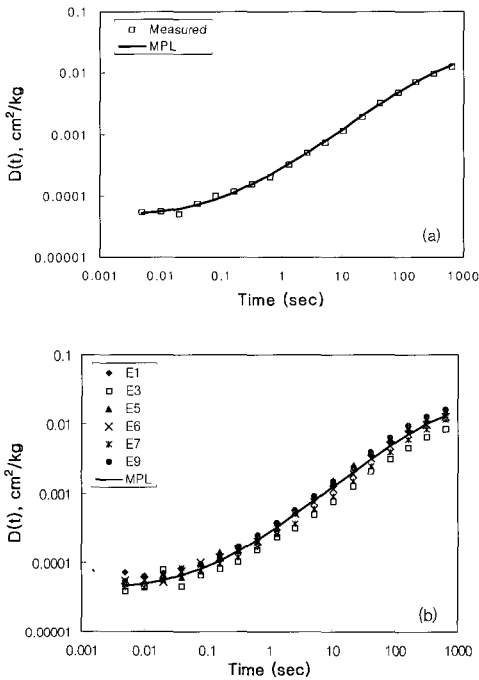


그림 7. 시간에 따른 아스팔트 혼합물의 Creep Compliance 거동과 이를 수학적 나타내는 MPL: (a) 하나의 크립시험결과; (b) 한 혼합물에 대한 6회의 크립시험결과

그림 8은 Creep Compliance[식 (2)와 표 3]로부터 선형 점탄성 이론을 바탕으로 동탄성계수 (IE^*)를 역산정한 것이다. 이러한 해석과정에 대한 이론적 배경은 참고문헌^(11,12)에 수록되어 있다. 이 그림에서 보듯이 골재의 입도에 관계없이 하중주기가 느릴 경우 일반 아스팔트에 비해 개질 아스팔트 혼합물의 강성이 거의 2배 이상 크다는 것을 알 수 있다. 또한, 셀룰로오스 섬유 첨가유무에 관계없이 SBS 개질 아스팔트를 사용한 SMA 혼합물은 AP-5를 사용한 SMA 혼합물에 비해 2배 이상 강성이 큰 것을 알 수 있다. SBS 개질 아스팔트를 사용한 SMA 혼합물은 섬유를 첨가한 경우(혼합물 G)와 첨가하지 않은 경우(혼합물 F) 혼합물의 동탄성

계수가 거의 일치하여 섬유의 유무에 관계없이 두 혼합물의 점탄성 물성은 거의 동일한 것으로 나타났다.

느린 하중속도에서 일반 혼합물과 SBS 개질 혼합물간의 강성의 차이는 하중주기가 증가할수록 감소하였으며, 하중주기가 10Hz 이상일 때 각 혼합물의 강성은 거의 동일하였다. 또한, 10Hz 이상의 하중주기에서 모든 혼합물은 거의 탄성에 가까운 거동을 보이고 있다. 시간-온도 중첩원리(time-temperature superposition principle)의하면 아스팔트 혼합물의 거동은 느린 하중주기는 고온에서의 거동과 유사하고 빠른 하중주기에서는 저온에서의 거동과 비슷하므로⁽⁷⁾ 고온에서는 SBS 개질 아스팔트 혼합물이 일반 아스팔트 혼합물에 비해 강성이 2배 이상 크다고 말할 수 있다. 이러한 결과로 볼 때 고온에서 SBS 개질 아스팔트 혼합물의 소성변형에 대한 저항성이 일반 혼합물에 비해 크다고 볼 수 있다. 또한, 그림에서는 동일한 아스팔트 바인더 일 경우 Superpave입도, 밀입도, SMA입도의 순으로 강성이 큰 것으로 나타났다.

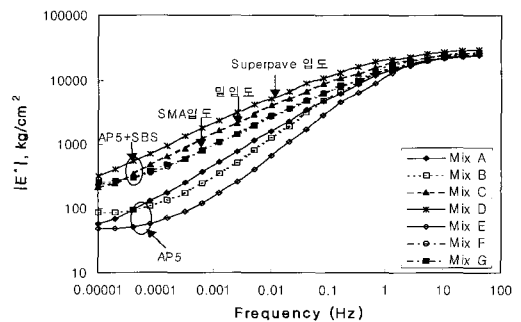


그림 8. 골재의 입도와 SBS 개질재가 아스팔트 혼합물의 동탄성계수에 미치는 영향

그림 9는 일반 및 개질 아스팔트 바인더의 노화에 따른 물성변화를 살펴보기 위하여 밀입도 골재에 일반 및 개질 아스팔트를 첨가한 혼합물



A와 C를 단기 및 장기노화 시켜 동탄성계수의 거동을 비교하였다.

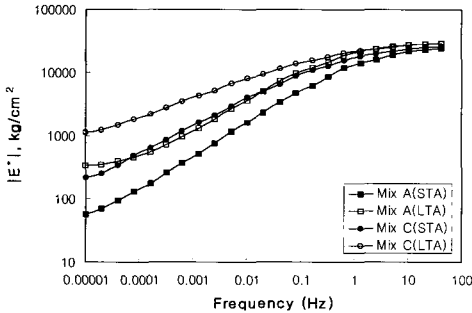


그림 9. 아스팔트 혼합물의 노화단계에 따른 동탄성계수의 거동변화

그림에서 보면 일반적으로 고온조건에 해당하는 대부분의 낮은 하중주기에서 단기노화의 경우 SBS 개질 아스팔트 혼합물의 강성이 일반 아스팔트 혼합물보다 3내지 5배 이상 크다는 것을 알 수 있고, 장기노화된 혼합물의 경우에도 단기노화와 거의 유사한 거동 특성을 볼 수 있다.

1×10^5 Hz의 낮은 하중주기에서 일반 및 개질 아스팔트 혼합물은 모두 장기노화 후 강성이 약 10배 이상 증가하였다. 그러나 하중주기가 빨라질수록 그 차이는 감소하였으며 10Hz 이상에서는 그 차이는 미미하였다. 또한, 일반이나 개질 아스팔트 모두 노화전후의 강성 변화가 유사함을 알 수 있다. 즉, 노화에 따른 강성의 증가 폭은 일반이나 개질 아스팔트 혼합물 둘 다 거의 동일하였다.

4.3 피로시험결과

골재의 입도와 아스팔트의 바인더가 혼합물의 피로수명에 미치는 영향을 파악하기 위하여 7종의 아스팔트 혼합물에 대해 일축인장 피로시험을 실시하였으며, 결과는 표 4와 같다. 표에서 각 혼합물의 피로수명은 시편의 강성이 초기 강

성의 50%에 도달하는데 소요되는 하중재하회수를 기준으로 산정하였다⁽²¹⁾. 각 혼합물의 피로시험 데이터를 사용하여 변형을 진폭과 피로수명에 대해 아래 식 (3)과 같은 일반적인 피로수명 모델식을 사용하여 회귀분석을 실시하였다.

$$N_f = a(\epsilon_0)^b \quad (3)$$

여기서, N_f 는 아스팔트 혼합물의 피로수명이고, ϵ_0 는 초기 인장 변형률이다. a 와 b 는 회귀분석을 통하여 얻어지는 상수 들이며, 각 혼합물에 대한 값 들을 표 4에 수록하였다.

식 (3)과 표 4에 주어진 계수 값들을 사용하여 혼합물 G를 제외한 6종 혼합물의 피로수명을 그림 10에 비교하였다. 그림 10에서 보는 바와 같이 6종 혼합물은 일반 아스팔트를 사용한 그룹과 개질 아스팔트를 사용한 그룹으로 대별되고 있다. 골재의 입도에 관계없이 동일한 변형을 진폭에서 SBS 개질 아스팔트 혼합물이 일반 혼합물에 비해 피로수명이 약 10배 이상 증가하였다. 이는 Maccarrone 등⁽¹⁴⁾이 실시한 빔피로시험에서 SBS 개질 혼합물이 일반 혼합물에 비해 피로수명이 약 14배 증가하였다는 시험결과와 유사하다.

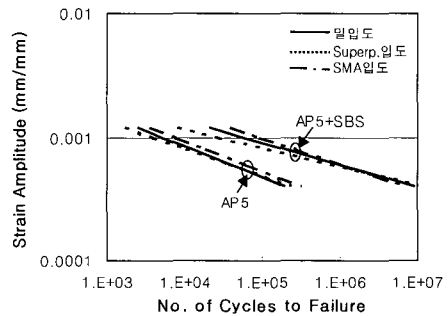


그림 10. 골재의 입도와 SBS 개질재가 아스팔트 혼합물의 피로수명에 미치는 영향



표4. 일축인장 피로시험 및 해석결과

Mix	Average Air Void (%)	Strain Amplitude (mm/mm)	Average Nr	피로모델 [식 (1)]의 계수		
				a	b	R ²
A (STA)	4.57	0.00053	111,000	6.1 × 10 ⁹	-3.976	0.668
		0.00067	23,000			
		0.00087	14,750			
B (STA)	4.32	0.00053	71,300	2.0 × 10 ⁹	-4.435	0.863
		0.00067	39,000			
		0.00087	9,300			
C (STA)	4.31	0.00067	511,500	1.7 × 10 ¹⁰	-5.508	0.954
		0.00087	162,300			
		0.001	54,350			
D (STA)	4.40	0.00067	558,900	6.0 × 10 ⁹	-6.556	0.761
		0.00087	88,600			
		0.001	27,500			
E (STA)	3.15	0.00053	136,850	5.2 × 10 ⁹	-4.056	0.814
		0.00067	67,500			
		0.001	11,200			
F (STA)	3.22	0.00073	369,700	9.0 × 10 ⁹	-4.672	0.870
		0.00093	180,900			
		0.0011	46,100			
G (STA)	3.44	0.00073	539,701	3.0 × 10 ¹¹	-5.165	0.905
		0.00093	143,700			
		0.0011	116,000			
A (LTA)	4.54	0.00053	161,200	6.0 × 10 ⁹	-6.230	0.846
		0.00067	47,100			
		0.00087	8,000			
C (LTA)	4.35	0.00073	154,500	1.0 × 10 ⁹	-7.453	0.545
		0.00087	233,200			
		0.001	15,100			

밀입도, SMA입도, Superpave입도 등 골재의 입도변화는 바인더의 개질재 사용여부에 비해 피로수명에 미치는 영향이 미미한 것으로 나타났고, 동일한 바인더를 사용하였을 경우, 동일한 변형률 진폭에서 혼합물의 피로수명은 SMA입도, 밀입도, Superpave입도의 순으로 피로수명이 큰 것으로 나타났다. 이는 여러 가지 요인이 있을 수 있으나 골재의 입도 및 아스팔트의 함량에 그 원인이 있다고 할 수 있다. 밀입도 및 Superpave입도를 적용한 혼합물의 최적 아스팔트 함량은 그 차이가 0.1% 이내로서 거의 동일하며 공극률도 4±0.5% 내외로 동일하다. 그러나 혼합물의 피로수명은 아스팔트 바인더의 종류에 관계없이 밀입도가 Superpave입도보다 큰 것으로 나타났다. 아스팔트 함량은 두 혼합물이

거의 동일하기 때문에 이는 순전히 골재의 입도가 다른 것에 그 원인이 있는 것으로 판단된다. 그러나, 이러한 결과만 가지고 Superpave입도가 밀입도에 비해 항상 피로저항성이 불리하다고 말할 수는 없다. 그 이유는 Superpave입도는 시방규정상의 상한 및 하한입도의 폭이 크기 때문에 제한구역의 위를 통과하는가 혹은 아래를 통과하는가에 따라 피로거동에 많은 차이가 날 수 있으며, 실제 최근 미국에서 실시된 Westrack 프로젝트의 연구결과⁽⁹⁾에 의하면 제한구역의 위를 통과하는 입도가 아래를 통과하는 입도에 비해 피로 공용성이 우수한 것으로 나타났다.

SMA 혼합물의 경우 최적 아스팔트 함량과 골재의 입도가 밀입도나 Superpave입도 혼합물에 비해 차이가 많이 나기 때문에 어떤 요인이 피로수명에 얼마나 영향을 미치는가를 정량적으로 명확히 구분하기가 어렵다. 그러나, 일반적으로 아스팔트 함량이 골재의 입도에 비해 피로수명에 보다 많은 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며⁽¹⁹⁾, SMA 혼합물의 경우 많은 석분 함량과 셀룰로오스 섬유 첨가, 낮은 공극률 등으로 인하여 일반 밀입도 혼합물에 비해 최적 아스팔트 함량이 높게 설계된다. 본 연구에서도 SMA 혼합물은 다른 두 혼합물(밀입도 및 Superpave입도 혼합물)에 비해 최적 아스팔트 함량이 약 1.5% 많고, 시편의 공극률이 3.3%로 설계되어 이러한 요인이 피로수명의 증대에 많은 영향을 미친 것으로 판단된다.

그림 11은 동일한 SMA입도를 사용하였으나 첨가재 및 개질재가 각기 다른 경우를 비교한 것으로서, 그림에서 점선으로 표기한 것은 일반 아스팔트에 셀룰로오스 섬유를 첨가한 혼합물이며, 실선은 셀룰로오스 섬유 대신 SBS개질 아스팔트만을 사용한 혼합물, 그리고 1점 쇄선은 셀룰로오스 섬유와 SBS 개질 아스팔트를 모두 사용한 혼합물이다. 셀룰로오스 섬유의 첨가 유무



에 관계없이 SBS 개질 아스팔트를 사용한 혼합물은 사용하지 않은 혼합물에 비해 피로수명이 약 10배 정도 증가한 것을 알 수 있고, 이는 SBS 고분자의 개질 효과에 기인한 것으로 판단되며, 셀룰로오스 섬유는 혼합물의 피로수명에 거의 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다. 이는 셀룰로오스 섬유의 주된 역할이 혼합물의 생산 및 시공시 아스팔트가 흘러내리는 것(draindown)을 방지한다는 기존의 연구결과⁽⁵⁾와 일치하는 것으로서 본 연구에서 실시한 혼합물의 점탄성 물성 시험도 이러한 사실을 뒷받침하고 있다. 즉, 그림8에서 보는 바와 같이 동일한 SMA입도의 경우 셀룰로오스 섬유를 첨가한 경우(혼합물 G)와 첨가하지 않은 경우(혼합물 F) 혼합물의 동탄성계수가 거의 일치하여 셀룰로오스 섬유의 유무에 관계없이 두 혼합물의 점탄성 물성은 거의 동일한 것으로 나타났다.

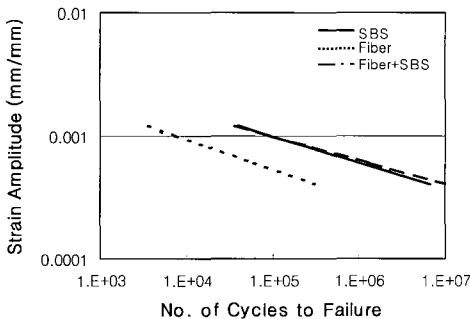


그림11. SMA 혼합물에서 셀룰로스 섬유와 SBS 개질재가 피로공용성에 미치는 영향

일반 및 SBS 개질 아스팔트 혼합물의 장기노화 후 피로 거동특성을 평가하기 위하여 밀입도 혼합물 두 종(A, C)에 대해 장기노화를 시킨 다음 피로시험을 실시하였고, 그 결과를 그림 12에 비교하였다. 그림에서 보는 바와 같이 장기노화의 경우에도 SBS 개질 아스팔트 혼합물

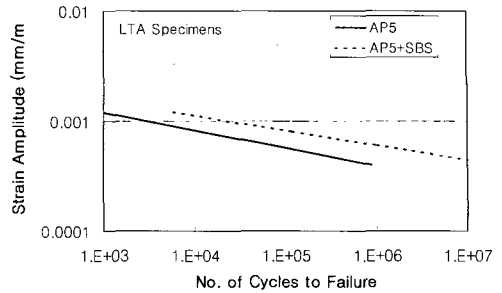


그림 12. 장기노화된 일반 및 SBS 개질 아스팔트 혼합물의 피로수명 비교

이 일반 아스팔트 혼합물에 비해 피로수명이 큰 것으로 나타났으나 그 차이는 단기노화(그림 10 참조)에 비해 크지 않은 것으로 판단된다. 즉, 피로수명에 있어 SBS의 개질효과가 장기노화에 의해 약간 감소되었다고 할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 골재의 입도가 SBS 개질 아스팔트 혼합물의 점탄성 물성 및 피로공용성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 아스팔트 바인더 및 혼합물에 대한 점탄성 물성 측정을 실시하였고, 일축인장 피로시험을 통하여 얻어진 피로수명을 비교 분석하였다. 본 연구에서 얻어진 중요한 결론은 다음과 같다.

DSR 시험결과, SBS 개질 아스팔트가 일반 아스팔트에 비해 고온에서는 약 3~4배 정도 강성이 큰 것으로 나타났다. 일축인장 크립시험 데이터로부터 역산정한 아스팔트 혼합물의 동탄성계수는 골재의 입도에 관계없이 SBS 개질 아스팔트를 사용한 혼합물이 고온조건에 해당하는 느린 하중주기에서 일반 아스팔트 혼합물에 비해 높게 나타났다. 따라서, SBS 개질 아스팔트는 혼합물의 고온에서 내유동성 증진에 효과가 클 것으로 판단된다.

30℃ 이하의 온도에서 일반 및 SBS 개질 아



스팔트 바인더의 $G^* \sin \delta$ 값은 거의 동일하였으나, 실제 아스팔트 혼합물의 피로시험결과 골재의 입도에 관계없이 SBS 개질 아스팔트 사용시 일반 아스팔트에 비해 피로수명이 10배 이상 큰 것으로 나타나 바인더의 $G^* \sin \delta$ 값을 혼합물의 피로수명 비교를 위한 도구로 사용하는 것은 바람직하지 않은 것으로 판단된다.

장기노화를 시킨 혼합물에 대한 피로시험결과 SBS 개질 아스팔트 혼합물이 일반 아스팔트 혼합물에 비해 5배 이상 피로수명이 큰 것으로 평가되었으나 단기노화의 경우(약 10배)에 비해 피로수명 증대효과는 감소하였다.

밀입도, SMA입도, Superpave입도 등 골재의 입도 변화가 혼합물의 피로 공용성에 미치는 영향은 SBS 개질재가 피로 공용성에 미치는 영향에 비해 상대적으로 작은 것으로 나타났다. 동일한 아스팔트 바인더를 사용한 혼합물의 경우 SMA입도, 밀입도, Superpave입도의 순으로 피로 공용성이 우수한 것으로 평가되었다. SMA 혼합물의 경우 일반 밀입도나 Superpave입도를 적용한 혼합물에 비해 아스팔트 함량이 1.5% 정도 많고 배합설계 공극률도 3.3%로서 다른 혼합물에 비해 낮기 때문에 피로 공용성이 우수한 것으로 판단된다.

동일한 SMA입도에 SBS 개질 아스팔트를 사용한 혼합물이 사용하지 않은 혼합물에 비해 피로수명이 약 10배 정도 증가하는 것으로 나타났다. SMA 혼합물에 첨가한 셀룰로오스 섬유는 혼합물의 점탄성 물성이나 피로 공용성에 미치는 영향은 미미하였으나 Draindown을 방지하는 데는 효과적이었다. SMA입도에 SBS 개질 아스팔트를 사용할지라도 Draindown의 방지를 위해 셀룰로오스 섬유를 첨가할 필요가 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 SK(株)의 지원에 의해 수행되었으며, 연구비 지원에 감사를 표한다.

참고문헌

1. 김남호, 박용철, 황성도 (1999). "고무계열 개질 아스팔트의 거동 특성 연구." 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 19권, III-5호, 873-885.
2. 유인균, 유평준, 홍재청, 유형목, 이수형 (2000). "슈퍼팔트의 현장 공용성 및 효과분석 연구." 최종보고서, 한국건설기술연구원.
3. Airey, G. and S. Brown (1998). "Rheological performance of aged polymer modified binders." Jr. of the Association of Asphalt Paving Technologists, AAPT, Vol. 67, pp. 66-100.
4. Asphalt Institute (1995). Superpave level 1 mix design. Superpave Series No. 2 (SP-2), Asphalt Institute, Lexington, Kentucky.
5. Brown E.R., J.E. Haddock, R.B. Mallick, and T.A. Lynn (1997). Development of a mixture design procedure for stone matrix asphalt (SMA). Jr. of the Association of Asphalt Paving Technologists, AAPT, Vol. 66, pp. 1-30.
6. Corte, J.F., Y. Brosseau and J.P. Kerzreho (1998). Study of rutting of wearing courses on the L.C.P.C. test track. Proc. of the 8th International Conference on Asphalt Pavements, ISAP, Vol. 2, pp. 1555-1568.
7. Christensen, R.M. (1982). Theory of viscoelasticity: An introduction. Academic Press, New York.
8. Deacon, J.A., J.T. Harvey, A. Tayebali, and C.L. Monismith (1997). Influence of binder loss modulus on the fatigue performance of asphalt concrete pavement. Jr. of the Association of Asphalt Paving Technologists, AAPT, Vol. 66, pp. 633-685.
9. Epps, J., C.L. Monismith, S.B. Seeds, S.H. Alavi, S.C. Ashmore, R. Leahy, and T.M. Mitchell



- (1998). Westrack performance-interim findings. *Jr. of the Association of Asphalt Paving Technologists*, AAPT, Vol. 67, pp. 738-769.
10. Kim, Y.R., Y. Lee, and H.J. Lee (1995). Correspondence principle for characterization of asphalt concrete. *Jr. of Materials in Civil Eng.*, ASCE, 7(1), pp. 59-68.
 11. Kim, Y.R., H.J. Lee, and D.N. Little (1997). Fatigue characterization of asphalt concrete using viscoelasticity and continuum damage theory. *Jr. of the Association of Asphalt Paving Technologists*, AAPT, Vol. 66, pp. 520-569.
 12. Lee, Hyun-Jong (1996). Uniaxial constitutive modeling of asphalt concrete using viscoelasticity and continuum damage theory. Ph.D. Dissertation, Dept. of Civil Engineering, North Carolina State University, Raleigh, North Carolina.
 13. Lee, H.J., Y.R. Kim and J.S. Daniel (1999). "Performance evaluation of modified asphalt mixtures for Incheon airport pavement." *International Journal of Pavement Engineering*, (in press)
 14. Maccarrone, C., A. V. Ky, and G.P. Gnanaseelan (1997). Permanent deformation and fatigue properties of polymer modified asphalt mixes. *Proc. of the 8th International Conference on Asphalt Pavements*, ISAP, Vol. 2, pp. 1545-1554.
 15. Michael, L.L (1996). SMA in Maryland: Construction performance of stone matrix asphalt. Interim Report, Maryland Department of Transportation.
 16. Reese, R.E. and J.L. Goodrich (1993). California desert test road a step closer to performance based specification. *Jr. of the Association of Asphalt Paving Technologists*, AAPT, Vol. 62, pp. 1-30.
 17. Reese, R.E. (1997). Properties of aged asphalt binder related to asphalt concrete fatigue life. *Jr. of the Association of Asphalt Paving Technologists*, AAPT, Vol. 66, pp. 604-631.
 18. Srivastava, A., P.C. Hopman, and A.A. Molenaar (1992). SBS polymer modified asphalt binder and its implications on overlay design. ASTM PCN04-011080-08, ASTM, pp. 309-329.
 19. Tangella, S.R., J. Craus, J.A. Deacon, and C.L. Monismith (1990). Summary report on fatigue response of asphalt mixtures. TM-UCB-A-003A-89-3, University of California, Berkeley, California.
 20. Tayebali, A.A., J.B. Sousa, J. Harvey, and J.A. Deacon (1994). Accelerated performance-related tests for asphalt-aggregate mixes and their use in mix design and analysis system. SHRP-A-417, National Research Council, Washington, D.C.
 21. Yoder, E.J. and M.W. Witczak (1975). *Principles of Pavement Design*. 2nd Ed. John Wiley & Sons, Inc., New York.