

# 아스팔트 혼합물의 개질재로서 Sulfur의 이용

## The Use of Sulfur to modify Asphalt Mixture

양성린\* · 김부일\*\* · 김남호\*\*\*

Yang, Sung Lin · Kim, Booil · Kim, Nam Ho

### 1. 서론

현재 국내에서는 매년 막대한 양의 원유를 해외에서 수입하고 있으며, 이를 자동차 및 산업용 에너지원으로 사용하기 위해 다양한 석유 제품들을 생산하고 있다. 이러한 석유 제품의 생산을 위해서는 정유 플랜트에서 정제과정을 거치게 되고, 이 과정에서 탈황과정을 통해 산업부산물의 하나인 황(sulfur)이 발생하고 있다. 현재 전 세계에서 발생되거나 생산되는 황의 양은 2003년을 기준으로 약 650억 톤에 이른다. 그 중 미국과 캐나다가 약 55%를 차지하는 것으로 나타났으며, 앞으로 더 증가될 것으로 추정된다. 또한 원유 생산을 할 수 없는 국내에서도 황의 생산량은 막대하여 2001년을 기준으로 70만 톤이 생산되었으며, 2005년에는 약 80만 톤에 이를 것으로 추정된다. 이러한 탈황 물질은 다양한 산업 분야에 활용되고 있으나, 대량 수요처의 확보와 활용성 증대에 한계가 있는 상황이다. 따라서 대량 물량이 투입되는 건설 분야의 새로운 활용 기술 개발의 필요성이 제기되고 있는 실정이다.

이에 본 연구에서는 원유의 정제 과정에서 발생하는 산업부산물인 황(sulfur)에 폴리머 성분의 첨가제를 혼입한 SPC(Sulfur Polymer Cement ; 가칭) 분말을 아스팔트 혼합물의 개질재로서 활용하기 위한 기초적인 실험과 실용화 가능성을 검토하고자 한다. 이를 위해 SPC를 첨가한 아스팔트 혼합물의 개질 특성과 성능 향상 효과를 실내 실험 등을 통하여 평가하고, 이러한 연구 결과를 바탕으로 아스팔트 포장 재료의 개질재로서 SPC의 실용화 가능성을 평가한다.

### 2. 아스팔트 바인더 실험

본 연구에서는 SPC의 실내 공용 특성과 현장 적용성 등을 평가하기 위해 SPC 첨가 비율별 4종류의 아스팔트 바인더를 제조하였다. 제조된 아스팔트 바인더의 명칭은 편의상 Type 1~Type 4로 명명 하였으며, SPC 첨가 비율은 10, 30, 50, 70%로 결정하였다. 또한 Control 바인더로서 일반 아스팔트 바인더(AP5)를 이용하였다. 첨가 비율별 4종류의 바인더에 대하여 SHRP(Strategic Highway Research Program)의 연구 결과인 Superpave(Superior Performance Asphalt Pavement) 시방 규정을 기본으로 아스팔트 바인더의 공용특성을 평가하였다.

#### 2.1 DSR(Dynamic Shear Rheometer) 실험

Superpave 시방 규정에 의하면 아스팔트의 단기노화를 모사하기 위하여 RTFO(Rolling Thin Film Oven) 실험을 실시하여 시공단계에서의 아스팔트의 노화 저항성을 측정한다. 본 연구에서는 ASTM D 2872 규정에

\* 비회원 · 경희대학교 토목공학과 대학원석사과정 · 공학사 · 031-910-0175 (E-mail : siyang@kict.re.kr)  
\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구부 선임연구원 · 공학박사 · 031-910-0240 (E-mail : bikim@kict.re.kr)  
\*\*\* 정회원 · 한국기술교육대학교 건축공학부 부교수 · 공학박사 · 041-560-1332 (E-mail : nhkim@kut.ac.kr)

따라 RTFO를 사용하여 163°C에서 85분간 단기노화시키는 방법을 사용하였다.

본 연구에서는 단기노화 단계를 거친 아스팔트 바인더를 DSR(Dynamic Shear Rheometer) 실험을 실시하여 단기노화 후, 바인더의 특성을 평가하였다. DSR실험은  $G^*$ (Complex modulus)와  $\delta$ (Phase angle)를 측정함으로써 아스팔트 바인더의 하중재하 시간과 온도에 따른 물성을 측정 할 수 있다. 본 연구에서는 TA Instrument 사의 장비를 사용하였다.

Superpave 시방 규정에 의하면 노화전·후의 고온(60°C)에서의 소성변형에 대한 저항성으로  $G^*/\sin\delta$ 가 1.0kPa과 2.2kPa 이상으로 규정하고 있다. 소성변형은 고온에서 발생하므로 60°C에서의  $G^*/\sin\delta$  값이 이 규정을 만족해야 한다.

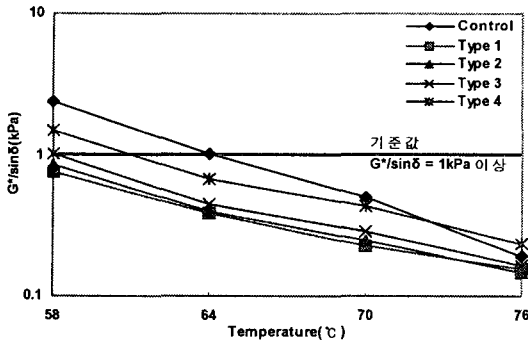


그림 1. DSR 실험 결과(노화 전)

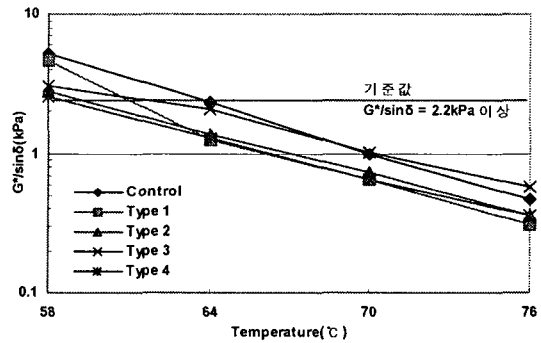


그림 2. DSR 실험 결과(단기노화 후)

그림 1에서와 같이 노화 이전의 아스팔트 바인더는 58°C에서 일반 아스팔트 바인더를 포함한 SPC Type 3과 Type 4 첨가제를 첨가한 아스팔트 바인더만이 Superpave 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 그러나 단기노화 후 개질 첨가제 모두가  $G^*/\sin\delta$ 가 급격한 증가현상을 나타내어 모든 바인더가 58°C에서 Superpave 규정을 만족하는 것으로 나타났다. 그러나 전체적인 실험 결과, 일반 아스팔트 바인더에 비해 SPC 개질 첨가제를 첨가한 아스팔트 바인더의 성능 증진 효과는 고온 등급에서 감소하는 것으로 나타났다.

## 2.2 BBR(Bending Beam Rheometer) 실험

실제 공용중인 아스팔트 포장에 고온과 중간온도는 물론이고 방점 이하의 낮은 온도조건의 영향도 받고 있으며, 이때의 아스팔트는 매우 단단하여 탄성체와 유사한 거동을 하게 된다. BBR 실험은 이러한 저온조건 하에서의 아스팔트 특성을 평가하기 위하여 빔 이론을 기초로 개발된 장치로서 아스팔트의 물리적 경화에 대한 참고자료의 제공이 주된 목적이다. 실제 실험에서는 포장이 경험하게 될 가장 낮은 온도조건 하에서 빔의 형태로 제작된 아스팔트 시료에 creep 하중(일정하중)을 240초 동안 가하며 처짐을 측정하고 Creep하중에 대한 저항능력인 크리프 강성( $S_t$ )과 강성의 변화율( $m$ -value)을 계산한다. 계산되어진 강성이 300MPa 이상이거나  $m$ -value가 0.304이하 이면, 아스팔트 바인더는 상당히 brittle(취성적)하다고 볼 수 있으며, 이러한 아스팔트 바인더는 저온조건에서의 성능이 나쁠 가능성이 크다고 볼 수 있다. 따라서 수퍼페이브 시방서는 크리프 강성 값이 300MPa 이하,  $m$ -value가 0.304이상 되도록 권고하고 있다. 만일 그 이상인 경우에는 추가적인 Direct Tension Test를 실시하여, 파괴시 인장변형률이 1% 이상이 되는지를 확인할 필요가 있다. 본 연구에서는 아스팔트 바인더의 장기노화를 모사하기 위하여 PAV(Pressure aging vessel)를 사용하였으며 ASTM D 2872에 준하여 RTFO에서 단기노화를 거친 시료를 100°C의 온도에서 2,070kPa의 압력을 가한 상태에서 20시간을 경과시켰다.

그림 3은 BBR 실험 결과  $m$ -value를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 일반 아스팔트 바인더만이 -12°C에서 Superpave 기준 값인 0.304를 만족하지 못하는 결과를 나타내고 있다. 또한 그림 4에서도 일반 아스팔트 바인더만이 Superpave 기준인 300kPa 이하를 만족하지 못하는 결과를 나타내어 개질 첨가제가 개질



제로서 저온 균열에 대한 저항성 증진 효과를 가지는 것으로 판단된다.

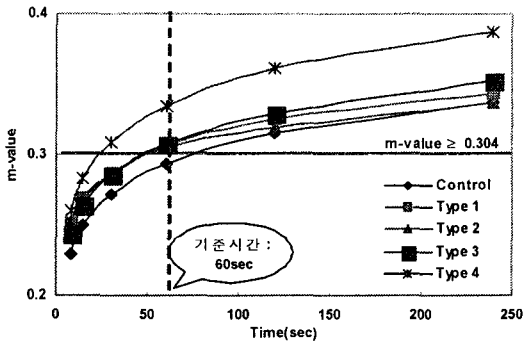


그림 3. BBR 실험 결과(m-value)

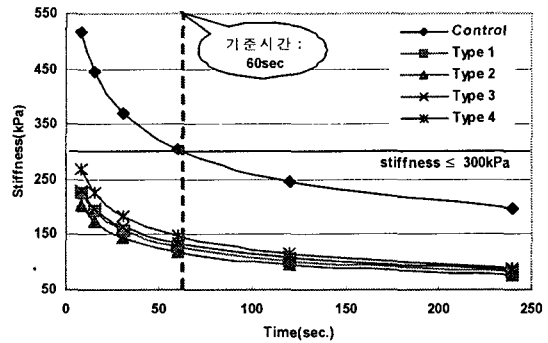


그림 4. BBR 실험 결과(Stiffness)

### 2.3 RV(Rotational Viscosity) 실험

회전점도실험(RV)은 펄핑하고 혼합할 때 고온(135℃)에서의 아스팔트의 점도를 측정하기 위하여 SHRP에서 채택한 실험법이다. 본 연구에서는 Brookfield Thermosel 장비를 사용하였으며 ASTM D 4402에 준하여 실험을 수행하였다. 스피ndl은 No. 27을 사용하였으며, 회전속도 20rpm을 적용하였다. 측정된 점도 값은 3Pa·s(3000centiPoise) 이하가 되어야 하며 플랜트에서 아스팔트 바인더의 작업성을 평가하기 위한 것이기 때문에 노화되지 않은 시료에 대해서만 측정한다. RV실험 결과, 4종의 SPC 개질 바인더가 모두 135℃에서의 동점도가 일반 아스팔트 바인더에 비해 현저히 낮음을 알 수 있었다. 표 1은 총 5종의 아스팔트 바인더에 대한 공용성 등급 실험 결과 및 PG 등급을 정리한 것이다.

표 1. 공용성 등급 실험 결과

공용성 등급 기준 물성		일반 아스팔트 바인더	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4
135℃ 동점도(cP), 5000cP 이하		385	320	275	240	250
G*/sinδ (kPa)	노화이전 1.0 kPa이상	1.02 (64)	0.75 (58)	0.86 (58)	1.02 (58)	1.49 (58)
	단기노화 2.2 kPa이상	2.33 (64)	4.68 (58)	2.81 (58)	3.06 (58)	2.57 (58)
BBR, S	장기노화 300 kPa이하	305 (-12)	129 (-12)	119 (-12)	134 (-12)	147 (-12)
BBR m-value	장기노화 0.3이상	0.293 (-12)	0.306 (-12)	0.304 (-12)	0.307 (-12)	0.335 (-12)
등급기준		64-16	58-22	58-22	58-22	58-22

### 3. 아스팔트 혼합물 실험

본 연구에서는 앞서 수행한 아스팔트 바인더의 결과에 따라 성능이 가장 우수한 첨가 비율(Type 3)을 선정하여 개질 아스팔트 혼합물을 제작하였다. 또한 개질 아스팔트 혼합물의 비교 성능을 평가하기 위해 일반 및 타 개질 아스팔트를 첨가한 2종류의 혼합물을 제작하였다. 개질재(A)는 일반 아스팔트 바인더에 고무계열의 열가소성 탄성 중합체인 SBS를 첨가하여 물리·화학적으로 배합시킨 고분자 아스팔트이며 골재 입도는 19mm 밀입도 골재 합성입도를 사용하였다. 개질재(B)는 일반 아스팔트 바인더에 페타이어 고무분말을 혼합, 반응시킨 개질 아스팔트이며, 골재 입도는 제조사에서 권장하는 입도를 사용하였다. 표 2는 온도 영역별 아

아스팔트 혼합물의 실험 방법을 나타내고 있다.

표 2. 온도 영역별 실험 물성

온도 영역	실험온도(°C)	실험 물성	실험 방법
저온	-10	M <sub>R</sub> 인장강도	간접인장실험
상온	25	M <sub>R</sub> 인장강도, 반복재하횟수	간접인장실험, 4-point 휨피로 실험
고온	60	M <sub>R</sub> , 인장강도, 동적안정도, 마찰 안정도	간접인장실험, 휠트래킹 실험, 마찰 안정도 실험

### 3.1 마찰 안정도(Marshall Stability)

마찰 실험법은 아스팔트 혼합물의 경험적인 물성을 측정하는 것으로, 본 연구에서는 KS F 2337의 기준에 따라 실험을 실시하였다. 마찰 실험의 목적은 표준 실험실 다짐도로 다져진 아스팔트 혼합물의 강도를 측정하기 위한 것이다. 또한, 마찰 실험은 아스팔트 혼합물의 최적 아스팔트 함량을 결정하기 위한 마찰 배합 설계법의 일부 물성 항목으로 사용되며, 아스팔트 혼합물의 품질 관리에도 적용한다.

그림 5에서와 같이 Type 3의 SPC 개질 첨가제를 첨가한 혼합물이 가장 높은 안정도 값을 나타내었다. 실험 결과에서 Type 3의 개질 첨가제를 첨가한 혼합물은 국내 시방을 만족하고 흐름에 대한 저항 특성이 우수한 것으로 나타났다.

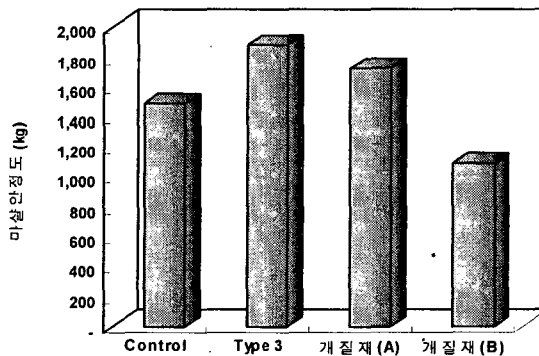


그림 5. 마찰 안정도 실험 결과

### 3.2 간접인장실험(Indirect Tensile Test)

#### 가. 회복탄성계수

반복하중을 사용하여 영구변형이 제거된 상태의 탄성계수를 측정하는 실험으로서 반복적인 하중 조건하에서 아스팔트 혼합물의 탄성 거동 특성을 파악하기 위해 수행되었다. 실험 방법은 0.1초의 재하기간(Loading Period)과 0.9초의 휴지기간(Rest Period)을 갖는 방식으로 반복 Haversine 파형의 하중에 의한 하중 조절을 통해 수행되어진다. 또한, 실험에 적용하는 하중은 점탄성 범위안의 수평변형을 유지할 수 있도록 선택되고, 수평변형은 150~350 micro-strain이 되도록 하였다. 그림 6에서 보는 바와 같이 SPC Type 3은 일반 아스팔트 혼합물과 유사한 탄성 거동을 보이고 있다. 또한 개질제(A)를 제외한 각 개질 아스팔트 혼합물은 일반 아스팔트 혼합물과 비교해 볼 때 온도감온성이 낮은 것으로 나타났으며, 온도 균열을 억제하는데 효과적인 역할을 하는 것으로 나타났다.



나. 간접인장강도

유하층은 포장층 하단에 인장응력을 유발하기 때문에 아스팔트 혼합물에 대한 인장강도 값은 아스팔트 혼합물의 강도를 파악하는데 가장 중요한 요소 중의 하나라고 할 수 있다. 이러한 인장강도 값은 간접인장강도 실험으로 측정될 수 있으며, 이 실험을 통하여 구한 간접인장강도는 포장의 균열 저항성을 평가하는데 중요한 물성 중의 하나로 사용된다. 본 연구에서는 저온(-10℃)과 상온(25℃) 및 고온(60℃)에서의 온도 조건 하에서 각각의 개질 아스팔트 혼합물과 일반밀입도 아스팔트 혼합물의 파괴 하중 값과 파괴 변위량을 측정하였다. 그림 7은 아스팔트 혼합물의 온도 변화에 따른 간접인장강도를 나타낸 것이다. 그림 7에서 보는 바와 같이 SPC Type 3은 다른 3종의 아스팔트 혼합물에 비해 저온과 상온에서 인장 강도가 더 높게 나타났다.

다. 저온 크리프

저온에서의 공용성을 평가하기 위한 방법으로 각 개질 아스팔트 혼합물별로 저온크리프 실험을 -10℃에서 수행하였으며, 그에 대한 결과를 그림 8과 같이 크리프 컴플라이언스(Creep compliance)의 변화로 나타내었다. 일반적으로 바인더의 물성과 마찬가지로 혼합물에 대해서도 크리프 실험에 대한 m-value가 클수록 저온 균열에 대한 저항성이 크다고 알려져 있다. 따라서 저온에서 크리프 실험에 대해 크리프 컴플라이언스와 m-value를 이용하여 저온 균열에 대한 저항성을 일반밀입도 혼합물과 비교 평가하였다. 그림 8에서 보는 바와 같이 일반 아스팔트 혼합물과 비교하여 볼 때, Type 3을 첨가한 아스팔트 혼합물은 일반 아스팔트 혼합물보다 크리프 컴플라이언스가 큰 것으로 나타났다. 그림 9는 크리프 컴플라이언스와 m-value를 나타낸다. 그림에서와 같이 Type 3은 일반 아스팔트 혼합물에 비해 큰 크리프 컴플라이언스와 높은 m-value를 나타냈으며 이를 토대로 일반 아스팔트 혼합물과 비교하여 볼 때 저온 균열에 대한 저항성이 우수한 것으로 평가되었다.

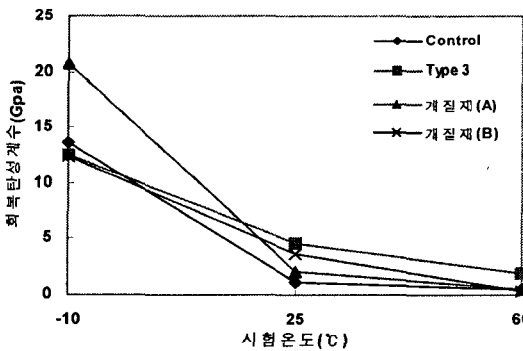


그림 6. 회복탄성계수 실험 결과

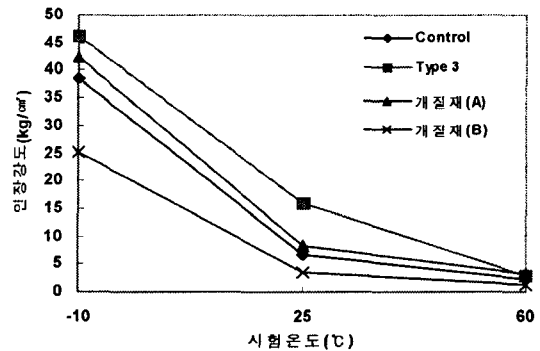


그림 7. 인장 강도 실험 결과

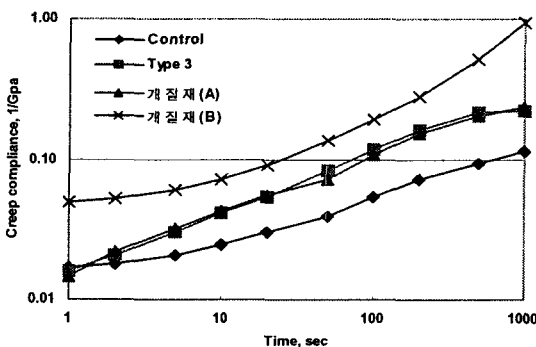


그림 8. 크리프 실험 결과(creep compliance)

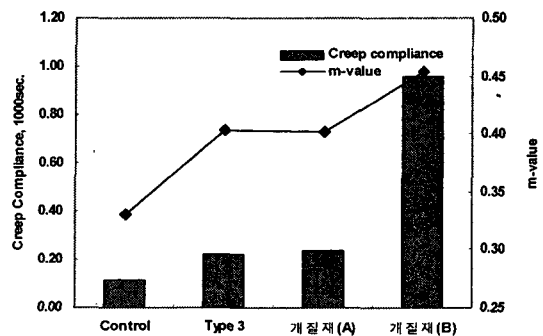


그림 9. 크리프 실험 결과(m-value)

### 3.3 휠트랙킹(Wheel-tracking) 실험

실내 실험인 휠트랙킹 실험은 동적 반복 크리프 실험의 일종으로 실제 도로가 고온 환경 조건일 때 중차량 주행으로 인한 소성 변형이나 니딩 작용을 시뮬레이션 시킴으로서 아스팔트 혼합물의 내유동성을 평가하는데 사용된다. 아스팔트 혼합물에 대해서는 마찰 안정도를 이용하여 유동 저항성을 어느 정도 평가할 수 있으며, 휠트랙킹 실험은 차륜을 주행시키는 보다 직접적인 평가 방법으로 간주되고 있다. 다음의 그림 10과 그림 11은 아스팔트 혼합물의 종류에 따른 동적 안정도와 변형률의 실험 결과를 나타낸 것이다.

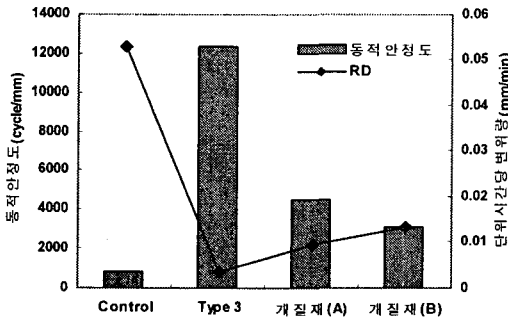


그림 10. 휠트랙킹 실험 결과(동적안정도)

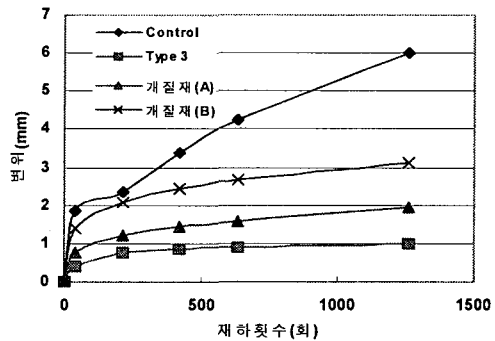


그림 11. 휠트랙킹 실험 결과(변형량)

그림 10에서 보는 바와 같이 각 아스팔트 혼합물의 종류에 따라 동적 안정도는 뚜렷한 변동 차이를 나타내고 있으며, 다른 개질 아스팔트 혼합물에 비해 개질 첨가제 Type 3을 첨가한 아스팔트 혼합물이 약 3~4 배의 큰 증가율을 보였다. 그림 11에서는 각 아스팔트 혼합물의 종류에 따라 변형량이 뚜렷한 차이를 나타내고 있으며, 이는 동적 안정도와 유사한 경향을 보이고 있다. 전반적으로 윤택중에 의한 치짐량 발생 정도를 판단할 때, SPC Type 3을 첨가한 아스팔트 혼합물이 타 혼합물에 비하여 소성 변형에 대한 저항성이 가장 큰 것으로 평가되었다.

### 3.4 4점 휨피로 실험(4-Point Bending Fatigue Test)

4점 휨 피로실험에 대한 실험 규정은 AASHTO TP8-94 "Standard Test Method for Determining the Fatigue Life of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) Subjected to Repeated Flexural Bending"로서 아래의 사항들을 규정하고 있다.

이 실험기준의 목적은 빗형태(50mm×63mm×380mm)의 아스팔트 혼합물에 반복하중을 주어 휨파괴가 일어나게 하여 피로수명과 피로에너지를 측정하는 것이다. 하중제하는 변형률제어로 5~10Hz의 사인파로 하며, 시편을 지지하는 4점은 회전이 자유로워야 한다. 실험온도는 20±0.5℃에서 수행하며, 2시간동안 시편의 온도를 안정화 시킨 후 실험을 수행한다.

재하하는 변형률은 250~750µε으로 하며, 초기 50사이클에서 측정된 결과들을 계산하여 초기강성을 계산한다. 시편의 파괴는 혼합물의 강성(Stiffness)이 초기 강성의 50%일 때의 하중재하횟수로 정의한다.

아스팔트 혼합물의 휨거동에 대한 저항성을 알아보기 위한 4점 휨피로 실험은 20±0.5℃에서 10kg의 하중을 0.1초의 재하기와 0.9초의 휴지기를 갖는 Haversine파로 재하하였다. 시편은 실험에 들어가기 전에 온도 챔버에서 4시간 이상 방치하여, 내부의 온도까지 균일하게 하였다.

그림 12는 시편이 파괴되었을 때까지의 하중재하 횟수이다. 개질재(A)의 하중재하횟수가 가장 크게 나타났다. Type 3을 첨가한 아스팔트 혼합물의 반복 재하 횟수가 개질재(A)와 개질재(B)에 대비하여 현저히 감소되는 것으로 나타났으며, 일반 아스팔트 혼합물과는 유사하게 나타나 피로 수명에 대한 연장 효과가 거의 없는 것으로 평가되었다.

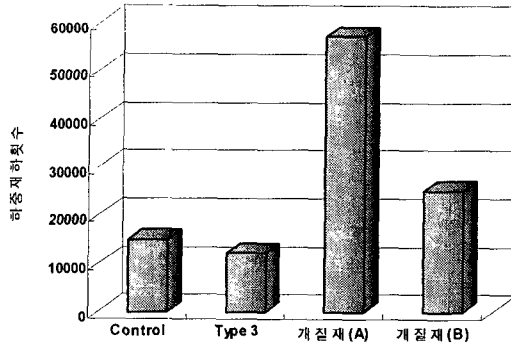


그림 12. 파괴시 하중 재하 횟수

#### 4. 결론

원유의 정제 과정에서 발생하는 산업부산물인 황(sulfur)에 폴리머 성분의 첨가제를 혼입한 SPC(Sulfur Polymer Cement ; 가칭) 분말을 아스팔트 혼합물의 개질제로서 활용하기 위한 실내 실험 결과 총 4가지의 SPC 개질 아스팔트 바인더 중 Type 3(sulfur 첨가율 50%)이 가장 우수한 것으로 평가되었다. SPC Type 3을 이용한 아스팔트 혼합물 실험 결과, 다음과 같은 실험 결론을 얻을 수 있었다.

○ 휠트래킹 실험결과를 종합한 결과, Type 3를 첨가한 아스팔트 혼합물이 타 혼합물 보다 약 3~4배 정도 큰 동적안정도를 나타냈고, 아스팔트 혼합물 중에서 가장 낮은 변위량을 나타내어 소성 변형에 대한 저항성이 우수한 것으로 평가되었다.

○ 빗 피로 실험 결과, Type 3를 첨가한 아스팔트 혼합물의 반복 재하 횟수가 개질제(A)와 개질제(B)에 대비하여 현저히 감소되는 것으로 나타났으며, 일반 아스팔트 혼합물과는 유사하게 나타나 피로 수명에 대한 연장 효과가 거의 없는 것으로 평가되었다.

○ 저온 크리프 컴플라이언스 실험결과, Type 3를 첨가한 아스팔트 혼합물은 일반 아스팔트 혼합물보다 저온균열에 대한 저항성이 다소 우수한 것으로 나타났다.

고온에서의 아스팔트 바인더 특성인  $G^*/\sin\delta$  값과 혼합물 특성인 휠트래킹 실험값이 일관되지 않은 결과를 보여주고 있다. 특히 황이 포함된 개질 아스팔트 바인더의 경우는 이러한 경향이 더욱 뚜렷하게 나타나는 것을 알 수 있었다. 이러한 개질 첨가제에 대한 아스팔트 바인더 물성과 혼합물 물성의 불일치는 Deme(2004) 등에 의해 이전에도 보고된 바 있다. 따라서 황과 같은 개질제가 첨가된 바인더의 경우는 고온에서의 DSR과 같은 실험이 혼합물의 공용성을 표현하는데 부적절할 수도 있을 것으로 판단된다.

실험 결과 분석을 토대로 Sulfur를 첨가한 개질 아스팔트 혼합물의 실내 물성은 전반적으로 우수한 것으로 나타났다. 다만, 피로실험에서는 일반 아스팔트 혼합물과의 실험 결과와 비교하여 유사하거나 다소 낮아지는 결과를 나타내어 피로균열에 대한 개질 성능은 개선의 여지가 있다고 판단되며, 이에 대한 보완 연구가 추진되어야 할 것으로 사료된다.



### 참고문헌

1. 이현종 등, SBS PMA(슈퍼팔트)의 공용성 및 경제성 평가연구, 최종보고서, 강릉대학교 공학연구소 2000
2. Buttlar W. and R. Roque, "Development and Evaluation of the SHRP Measurement and Analysis System for Indirect Tensile Testing at Low Temperatures" Presented at the 1994 Transportation Research Board Meeting, 1994
3. Standard Test Method for Determining the Fatigue Life of Compacted Hot Mix Asphalt(HMA) Subjected to Repeated Flexural Bending, AASHTO Designation : TP 8-94, 1996
4. Deme I. and B. Kennedy "Use of Sulfur in Asphalt Pavement" Presented in 5th Symposium on Pavement Surface Characteristics, 2004