



# 박리방지제의 첨가에 따른 아스팔트 혼합물의 수분민감성 평가

## Evaluation of Moisture Susceptibility on Asphalt Mixtures mixing Anti-Stripping Agent

양 성 린\*      황 성 도\*\*      김 영 민\*\*\*      정 규 동\*\*\*\*  
 Yang, Sung Lin      Hwang, Sung Do      Kim, Yeong Min      Jeong, Kyu Dong

### Abstract

This study is to evaluate the property for the moisture susceptibility of asphalt mixtures using anti-stripping agent. Asphalt mixtures using lime, hydrated lime and liquid anti-stripping agent are evaluated through the three types of modified moisture conditioning ( $H_c$ ,  $V_s$ , F-T). Indirect Tensile Test, that is recommended by AASHTO TP-9, which includes creep test, resilient modulus test and strength test is used to estimate moisture susceptibility. Analysis method through Energy Ratio (ER) that is proposed by Roque at University of Florida is used to evaluate moisture susceptibility and moisture resistance effects of asphalt mixtures using anti-stripping agent. As a test result, material property of asphalt mixtures was changed by moisture conditioning methods and the types of anti-stripping agent. Also, cracking resistance of accumulated moisture damage was changed by moisture conditioning methods and the types of anti-stripping agent. Based on test result, it was found that cracking resistance using Energy Ratio was differed from 10% to 30%.

**Keywords :** moisture susceptibility, cracking resistance, moisture damage, anti-stripping agent, energy ratio

### 요 지

본 연구는 박리방지 첨가제를 혼입한 아스팔트 혼합물의 수분민감성에 대한 특성 평가 방안을 제시하고자, 기존의 수침 시험을 개선한 3가지 종류( $H_c$ ,  $V_s$ , F-T)의 수침 방법을 통하여 생석회, 소석회, 1종의 액상 박리방지 첨가제를 혼입한 각 아스팔트 혼합물에 대한 수분민감성의 거동 특성을 분석하였다. 실험방법은 AASHTO TP-9에 규정된 간접인장시험 (Indirect Tensile Test, IDT)을 통한 크리프시험 (Creep Test), 회복탄성계수시험 (Resilient Modulus Test) 및 강도시험 (Strength Test)을 수행하였다. 분석방법으로는 미국 플로리다 대학의 Roque에 의해 제안된 에너지비 (Energy Ratio, ER) 개념을 사용하여 박리방지제의 사용에 따른 효과 및 수분민감도 특성을 평가하였다 (Roque, 2004). 시험결과, 수분처리 방법에 따른 아스팔트 혼합물의 물성 변화뿐만 아니라 박리 방지 첨가제에 따른 물성 변화가 현저하게 나타났다. 또한 누적 수분 손상에 의해 발생하는 균열에 대한 저항성이 각 첨가제 및 수분처리 방법에 따라 변화됨을 나타내었다. 이를 토대로 Energy Ratio를 분석한 결과 약 10~30% 정도의 균열 저항성 변화가 나타났다.

**핵심용어:** 수분민감성, 균열 저항성, 수분손상, 박리방지 첨가제, 에너지비

- \* 정회원 · 한국건설기술연구원 도시시설연구실 연구원 · 공학석사
- \*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 도시시설연구실 선임연구원 · 공학박사
- \*\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 도시시설연구실 연구원 · 공학석사
- \*\*\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 도시시설연구실 연구원 · 박사수료



# 1. 서론

아스팔트 혼합물의 수분민감성은 도로 포장의 수분 손상에 직간접적인 영향을 미치면서 표면결함 및 포트홀 등과 같은 포장 파손을 유발하는 원인이 되기도 한다. 국내·외의 경우, 이러한 아스팔트 혼합물의 수분민감성을 최소화하거나 억제하기 위한 방안의 하나로 소석회(Hydrated Lime) 및 액상 박리방지 첨가제(Liquid Anti-Stripping Agent) 등과 같은 첨가제를 사용하고 있다. 특히 미국과 유럽 등 구미 선진국에서는 아스팔트 혼합물 박리방지 첨가제의 의무 사용에 대한 시방기준을 가지고 있다. 그러나 국내에는 아직까지 아스팔트 혼합물의 수분민감성을 억제하기 위한 박리방지 첨가제의 효과에 대한 관련 실험 연구가 미진하고, 관련 국가 품질 기준이 마련되어 있지 않아 현장 적용에 어려움이 있는 실정이다.

이에 본 연구는 박리방지 첨가제를 혼입한 아스팔트 혼합물의 수분민감성에 대한 특성 평가 방안을 제시하고자, 기존의 수침 시험을 개선한 3가지 종류의 수침 방법과 간접인장시험 및 분석 물성을 사용하여 생석회, 소석회, 1종의 액상 박리방지 첨가제를 혼입한 각 아스팔트 혼합물에 대한 수분민감성의 거동 특성을 분석하였다.

# 2. 연구 방법

아스팔트 혼합물이 수분에 의해 받는 영향은 각 재료원과 수분과의 친수성에서부터 환경 및 교통하중까지 다양한 변수들과 관련되어 있어 매우 복잡한 양상을 보인다. 일반적으로 빗물 등에 의해 아스팔트 포장에 유입된 물이 아스팔트 혼합물 층에 침투하여 발생하는 수분손상은 골재와 아스팔트 피막 사이의 점착력(cohesion)과 부착력(adhesion)에 영향을 주어 발생하는 것으로 Scott(1978)와 Terrel 등(1989)은 보고하였다. 이에 반해 만약 아스팔트 혼합물의 내부 공극에 존재하는 수분이 감소하는 경우

에는 수분에 의해 변화된 물리적 특성은 원래의 상태로 회복되는 특성을 나타내기도 한다. Graf(1986)는 아스팔트 혼합물이 원래의 특성을 유지하는 한 공극 내 존재하는 수분만으로는 아스팔트 혼합물에 손상을 끼치지 않는다고 하였으며, Schmidt와 Graf(1972)는 아스팔트 혼합물의 공극을 약 80%로 물로 채워 포화시킨 후의 회복탄성계수의 변화는 수분의 감소에 따라 원상태로 회복이 가능하다고 보고하였다. 이에 본 연구에서는 아스팔트 혼합물의 수분에 따른 가역적인 물성변화를 측정하기 위하여 수분 손상에 대한 수분 처리 방법을  $H_c$ (Humidity Condition),  $V_s$ (Vacuum Saturation), F-T(Frozen and Thaw)로 나누어 다짐 공시체에 적용한다.  $H_c$ 는 절단과정에서 유입되는 수분을 제거하지 않고 3일동안 20℃, 30%의 상대습도에서 거치한 방법이며,  $V_s$ 는 AASHTO T-283에 규정되어 있는 방법으로 혼합물을 진공 포화시킨 후  $H_c$ 와 동일한 방법으로 3일동안 거치시킨 방법이다. F-T는 1회의 동결 - 융해과정을 거친 상태로서 AASHTO T-283에 규정되어 있는 방법이다. 또한 기존에 상용화되어 사용되고 있는 2종의 박리방지 첨가제(소석회/액상 박리방지첨가제)를 이용하여 수분처리 방법에 따른 수분 손상 저항성 효과를 파악하고 박리방지 첨가제 사용에 따른 아스팔트 혼합물의 수분민감도 특성을

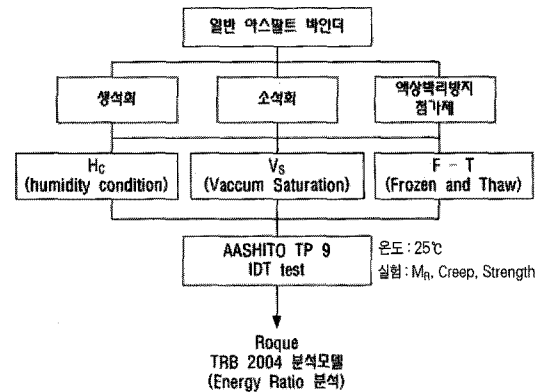


그림 1. 연구 흐름도



평가한다. 이에 본 연구에서는 AASHTO TP-9에 규정된 간접인장시험(Indirect Tensile Test, IDT)으로 25℃의 크리프시험(Creep Test), 회복탄성계수시험(Resilient Modulus Test) 및 강도시험(Strength Test)을 실시하고, 실험 결과는 미국 플로리다 대학의 Roque(2004)에 의해 제안된 Energy Ratio(ER) 개념을 사용하여 분석한다. 그림 1은 전체적인 연구 계획의 흐름도이다.

### 3. 실내 실험 재료 및 방법

#### 3.1 아스팔트 및 골재

본 연구에 사용된 골재는 국내 S사에서 생산된 화강암 종류의 쇄석 골재를 사용하였으며, 채움재는 박리방지 첨가제인 생석회 및 소석회로 대체하여 사용하였다. 아스팔트는 국내 S사에서 생산된 스트레이

트 아스팔트를 사용하였다. 표 1과 표 2는 사용 골재 및 아스팔트의 품질시험 결과를 정리한 것이다.

#### 3.2 박리방지 첨가제

##### 3.2.1 소석회(Hydrated lime)

수화 반응이란 생석회가 물(H<sub>2</sub>O)과 반응하면서 열 발생과 함께 부피가 팽창되는 현상을 말하며, 소석회는 이러한 반응과정으로 얻어진다. 소석회 제조 시 화학 반응식은 다음과 같이 CaO+H<sub>2</sub>O→Ca(OH)<sub>2</sub>+15.6 kcal/mol의 발열 반응으로 나타나며, 입자의 크기는 작아지고 pH 값은 11로서 강알칼리성을 나타낸다. 이러한 소석회는 이미 아스팔트 혼합물의 수분에 의한 박리에 높은 저항성을 나타내는 첨가 재료로 알려져 있으며, 배수성 포장 등의 수분의 영향을 많이 받는 혼합물의 첨가 재료로 폭넓게 사용되고 있다. 본 실험에서 사용된 소석회는 채움재로서, KS F 3501에 준하는 품질기준을 만족하는 재료를 선정하여 사용하였다.

표 1. 골재 품질시험 결과

| 시험 구분  | 규격     | 시험결과  |      |      |
|--------|--------|-------|------|------|
|        |        | 굵은 골재 | 잔골재  | 채움재  |
| 비중     | 2.5 이상 | 2.64  | 2.70 | 2.75 |
| 흡수율(%) | 3.0 이하 | 0.75  | 0.66 | -    |
| 마모율(%) | 35 이하  | 22.92 | -    | -    |

표 2. 아스팔트 품질시험 결과

| 시료구분               | 시험항목                             | 아스팔트    |        |    |
|--------------------|----------------------------------|---------|--------|----|
|                    |                                  | 결과      | 온도     |    |
| Original<br>(노화이전) | 침입도(0.1mm)                       | 73      | 25     |    |
|                    | 인화점(℃)                           | 316     | -      |    |
|                    | 연화점(℃)                           | 42      | -      |    |
|                    | 135℃ 점도(cP)                      | 385     | -      |    |
|                    | 동적전단 탄성계수, G*/sin $\theta$ (kPa) | 1.149   | 64     |    |
| RTFO<br>(단기노화)     | 동적전단 탄성계수, G*/sin $\theta$ (kPa) | 2.338   | 64     |    |
| PAV<br>(장기노화)      | 크리프<br>스티프니스                     | S(MPa)  | 113.31 | -6 |
|                    |                                  | m-value | 0.33   | -6 |
| PG 등급              |                                  | 64-16   |        |    |

##### 3.2.2 액상 박리방지 첨가제(Liquid anti-stripping agent)

일반적으로 액상 박리방지 첨가제는 아스팔트 시멘트와 혼합하였을 때 표면 장력을 줄여줌으로써 골재와 아스팔트 사이의 부착력을 증진시키는 작용을 하는 표면활성 촉진제(표면활성제)이다. 대다수의 액상 박리방지 첨가제는 아민(Amines)을 함유한 화합물로서 열에는 안정적이어야 하며 장기간 높은 온도에서도 박리방지제로서의 효능을 상실해서는 안 된다. 또한 액상 박리방지제는 골재와 아스팔트 바인더의 종류 및 특성에 따라 사용되는 박리방지 첨가제의 효과가 달라지기 때문에 사용하기 전에 적절한 박리방지제를 선택하고 수분민감성 시험을 통하여 사용량을 결정하는 것이 무엇보다도 중요하다. 본 연구에 사용된 액상 박리방지 첨가제는 다음의 표 3과 같은 국외 제품(미국 2종, 스웨덴 4종, 프랑스 1종) 7종을 우선 선정한 후, 예비 품질 실험을 통하여 상대



적으로 수분민감성에 대하여 높은 저항성을 나타내는 1종의 첨가제를 본 실험의 재료로 선정하였다. 그림 2는 예비 품질 실험인 수정 Lottman 시험의 인장강도비(TSR) 결과이며, E제품의 인장강도비가 타사에 비해 가장 높은 값을 나타내어 이를 본 실험 재료로 결정하였다.

표 3. 예비 품질 실험에 사용한 액상 박리방지 첨가제의 특성

| 구분             | 스웨덴  |      |      |      | 미국   |      | 프랑스  |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|
|                | A    | B    | C    | D    | E    | F    | G    |
| 외형 20℃         | 갈색   | 갈색   | 투명   | 갈색   | 갈색   | 갈색   | 갈색   |
| 밀도 20℃ (kg/m³) | 961  | 980  | 950  | 975  | 954  | 997  | 930  |
| Pour Point (℃) | <0   | <0   | 5    | <0   | 7    | 7    | <0   |
| 연화점(℃)         | <160 | >160 | >160 | >160 | <250 | <250 | >160 |
| 점착성 20℃ (cP)   | 1000 | 3000 | 300  | 1000 | 800  | 1200 | 1000 |

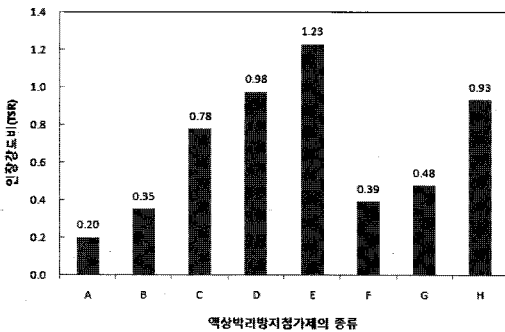


그림 2. 수정 Lottman 시험에 의한 인장강도비(TSR) 결과

### 3.3 아스팔트 혼합물 배합설계

본 실험에 사용한 아스팔트 혼합물의 배합설계는 마살 배합설계법을 적용하였다. 표 4는 배합설계 결과이며, 실험에서는 채움재 골재를 대체하여 생석회와 소석회를 사용하여 공시체를 제작하였다. 또한 소석회를 사용하지 않는 아스팔트 혼합물은 생석회 채움재에 추가적으로 액상 박리방지 첨가제를 혼합물

중량의 0.5%를 혼입하여 제작하였다.

표 4. 마살 배합설계 결과

| 구분       | AP (%) | 공극률 (%) | 안정도 (kgf) | 흐름값 (1/100cm) | 포화도 (%) | 다짐 횟수 |
|----------|--------|---------|-----------|---------------|---------|-------|
| 기준       | 4.5~7  | 3~6     | 750 이상    | 20~40         | 65~80   | 75    |
| OAC 및 결과 | 5.1    | 3.9     | 1327      | 40            | 75.1    | -     |
|          | 통과     | 통과      | 통과        | 통과            | 통과      | -     |

### 3.4 실험 공시체의 수분처리 방법

본 연구에서는 박리방지 첨가제의 사용에 따른 아스팔트 혼합물의 수분민감도 특성을 평가하기 위하여 다음 그림 3과 같은 3가지의 아스팔트 혼합물 내의 수분 상태와 온도 및 습도에 따른 혼합물 내의 수분 건조 효과를 정량화시키기 위하여 표준 건조 환경을 설정하였다.

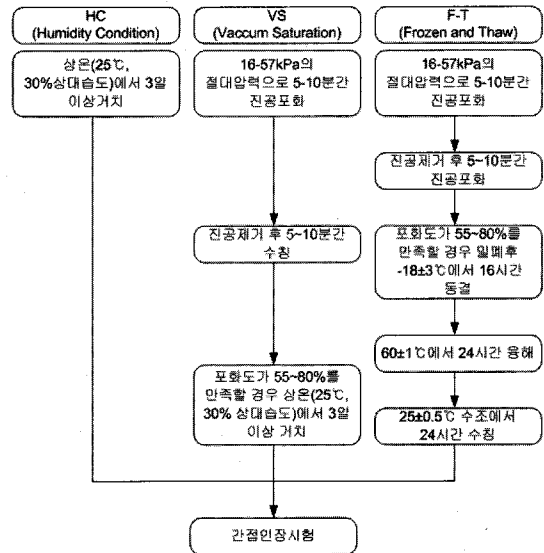


그림 3. 실험 공시체의 수분처리 방법

#### 3.4.1 H<sub>c</sub> (Humidity Condition)

H<sub>c</sub> 수분처리 방법은 아스팔트 혼합물의 공시체가 수분처리를 거치지 않은 상태로써, 시험을 위한 공시



체의 절단 과정에서 물이 필연적으로 유입되기 때문에 20℃, 30% 상대 습도 환경에서 3일 이상 거치하여 표면에 유입된 수분이 자연스럽게 제거된 상태를 말한다.

### 3.4.2 $V_s$ (Vacuum Saturation)

$V_s$  수분처리 방법은 아스팔트 혼합물의 공시체가 젖어 있는 상태를 정량화한 것으로서, AASHTO T-283(Modified Lottman Test)에 규정되어 있는 방법으로 혼합물을 물로 진공 포화시킨 뒤 20℃, 30% 상대 습도 환경에서 3일간 거치하여 진공 유입된 수분이 자연스럽게 제거된 상태를 말하며, 적용시킨 진공 수준은 예비 실험을 통하여 결정한다.

### 3.4.3 F-T (Freeze and Thaw)

F-T 수분처리 방법은 아스팔트 혼합물의 공시체가 1회 동결-융해 과정을 거친 상태로, AASHTO T-283(Modified Lottman Test)에 규정되어 있는 방법을 적용한다. 아스팔트 혼합물 공시체를 진공 포화시킨 뒤, 진공 상태를 제거하고 5~10분 동안 수침한 후 밀폐하여  $-18 \pm 3^\circ\text{C}$ 로 16시간 이상 동결하고, 동결 과정을 거친 공시체를  $60 \pm 1^\circ\text{C}$ 에서 24시간 동안 수침하여 융해 시킨 후,  $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 의 수조에서 24시간동안 수침 시킨 상태를 말한다.

## 3.5 실험 방법

본 연구에서는 박리방지 첨가제에 따라 제작된 아스팔트 혼합물에 대해 간접인장시험(Indirect Tensile Test, 이하 IDT)을 실시하여 각 혼합물의 회복탄성계수(resilient modulus), 크리프 컴플라이언스(creep compliance), 인장강도(tensile strength), 파괴변형률(fracture strain), 파괴에너지(fracture energy) 및 파괴 시 소산된 크리프 변형 에너지(DCSE<sub>p</sub>)를 결정하였다.

### 3.5.1 회복탄성계수(Resilient Modulus ; $M_R$ ) 시험

회복탄성계수는 반복하중이 적용될 때 회복변형에서 적용된 강도의 비율로써 정의한다. 본 시험은 0.1초의 재하기간>Loading Period)과 0.9초의 휴지기간>Rest Period)을 갖는 반복 Haversine 파형의 하중을 공시체에 재하하면서 수행된다. 여기에 적용하는 하중은 점탄성 범위안의 수평변형인 150~350 micro strain을 유지할 수 있는 값으로서, 10kg의 선하중과 100kg의 재하하중을 선정하였다. 그리고 본 시험은 25℃의 상온 상태에서 실시하였다.

### 3.5.2 크리프(Creep) 시험

크리프 컴플라이언스는 응력과 변형률에 대한 시간 종속적인 함수로서, 아스팔트 포장에서 온도에 의해 감소되는 응력을 예측하기 위해 개발되었다. 그러나 아스팔트 혼합물의 거동은 시간 종속적이기 때문에 이것은 아스팔트 혼합물의 누적된 손상의 비를 평가하는데 사용될 수 있다. 본 실험은 25℃의 상온에서 수행하며, 시험 시작 후 30초 내에 수평 변형률이 150~200 micro strain 사이의 값을 나타내도록 20kg의 재하 하중을 적용하였다.

### 3.5.3 간접인장강도(Strength Test ; $S_p$ ) 시험

인장강도, 파괴변형률, 파괴에너지와 같은 파괴 물성들은 간접인장강도 시험으로 산출한다. 본 시험은 공시체가 파괴될 때까지 50mm/min의 지속적인 변위를 적용하는 변위 조절 모드에 의해 수행한다.

### 3.5.4 Energy Ratio 방법

Roque 등(Roque, 2004)에 의하면 수분 손상은 아스팔트 혼합물의 파괴 저항력에 많은 영향을 미친다고 하였다. 이에 다수의 연구자들이 파괴 역학에 근거한 아스팔트 혼합물의 각 물성 기준을 수분 손상의 영향을 정량화하는데 사용하였다. Zhang 등은 아스팔트 혼합물의 소산된 크리프 변형에너지(DCSE) 한계와 파괴에너지(FE) 한계의 적절한 상



한 및 하한 값을 정의하였다. 이러한 아스팔트 혼합물의 에너지 한계 개념하에서 손상 진행의 비율은 혼합물의 크리프 특성에 의해 지배된다. 이러한 아스팔트 혼합물의 크리프 컴플라이언스(Creep Compliance)는 다음 식과 같은 함수로 나타낼 수 있다.

$$D(t) = D_0 + D_1 t^m$$

여기서,  $D(t)$  : Creep Compliance

$D_0, D_1, m$  : 크리프 시험으로부터 얻어진 변수

따라서, 미세 손상의 비율은  $m$ -value 와  $D_1$  값에 의해 결정되며, 아스팔트 혼합물의 파괴 모델 및 그 개념에 기초를 둔 다음의 주요 변수들은 혼합물의 균열 공용성을 평가하는데 사용할 수 있다.

- $DCSE$  limits( $DCSE_f$ )  
: 파괴 시까지 소산된 크리프 변형에너지
- $m$ -value : 크리프 변형률을 지배하는 변수
- $D_1$  : 크리프 변형률을 지배하는 변수

파괴에너지 및 소산된 크리프 변형에너지는 인장강도시험 및 회복탄성계수 시험으로부터 계산된다. 파괴에너지는 공시체가 파괴될 때까지 공시체에 작용된 총 에너지이며,  $DCSE$  (Dissipated Creep Strain Energy)는 공시체가 손상을 입을 때까지 공시체에 흡수된 에너지이다. 또한  $DCSE_f$  (Dissipated Creep Strain Energy to failure)는 파괴 시까지 공시체에 흡수된 에너지로 정의된다. 이 중에서 파괴에너지 및  $DCSE_f$ 는 다음 식으로 계산된다.

$$M_R = \frac{S_t}{\epsilon_f - \epsilon_0} \Rightarrow \epsilon_0 = \frac{M_R \epsilon_f - S_t}{M_R}$$

$$EE(\text{Elastic Energy}) = \frac{1}{2} S_t (\epsilon_f - \epsilon_0)$$

$$FE(\text{Fracture Energy}) = \int_0^{\epsilon_f} S(\epsilon) d\epsilon$$

$$DCSE_f(\text{Dissipated Creep Strain Energy to failure}) = FE - EE$$

여기서,  $S_t$  = tensile strength

$\epsilon_f$  = failure strain

상기의 각 물성 기준들을 이용하여 아스팔트 혼합물의 파괴저항력을 나타내는 인자로써 Jaiiardo(2003)에 의해 Energy Ratio( $ER$ )가 개발되었다. 이 인자는 포장체의 구조적인 특성 및 아스팔트 혼합물 특성의 통합을 통해 서로 다른 포장 구조체에 대한 균열 공용성의 평가를 가능하게 해주었다. 본 연구에서는 이러한 Energy Ratio 인자를 아스팔트 혼합물의 수분민감성 평가 기준으로써 사용하였으며, 다음 식을 이용하여 산출하였다.

$$ER = \frac{DCSE_f}{DCSE_{min}} = \frac{a \times DCSE_f}{m^{2.98} \times D_1}$$

여기서,  $DCSE_f$  : 소산된 크리프 변형에너지(KJ/m<sup>3</sup>)

$DCSE_{min}$  : 적절한 파손공용성을 갖기 위한 최소의 소산된 크리프 변형에너지(KJ/m<sup>3</sup>)

$D_1, m$  : 크리프 매개변수(1/psi)

$$a = 0.0229\sigma - 3.1(6.36 - S_t) + 2.46 \times 10^{-8}$$

$\sigma$  : 아스팔트 층의 인장응력(psi)

$S_t$  : 인장강도(MPa)

Jaiiardo(2003)는 연구를 통해 사용된 아스팔트 혼합물들에 대한  $DCSE_{min}$  값을 결정하였고, 이를 통해 다양한 교통 수준에서 요구되는 혼합물의 최소 값을 추천하였다. 또한 Roque(2004)는 적절한 균열 공용성을 갖기 위한 아스팔트 혼합물의 품질기준으로  $ER > 1$  및  $DCSE_f > 0.75$ 를 제시하였다.

#### 4. 실험 결과 및 분석

본 연구에서는 간접인장시험을 이용한 박리방지

첨가제의 수분민감성 특성을 평가하고자 채움재의 종류를 생석회 및 소석회로 각각 구분하여 제작하였으며, 액상 박리방지 첨가제를 사용한 공시체를 제작하여 이들에 대한 박리방지제의 효과 및 수분민감도 특성을 비교·평가하였다. 실험 방법은 AASHTO TP-9에 규정된 간접인장시험(Indirect Tensile Test, IDT)을 통한 크리프시험(Creep Test), 회복탄성계수시험(Resilient Modulus Test) 및 강도시험(Strength Test)을 25°C에서 수행하였다. 실험 결과 분석은 미국 플로리다 대학의 Roque에 의해 제안된 Energy Ratio(ER) 개념을 사용하여 박리방지제의 사용에 따른 효과 및 수분민감도 특성을 평가하였다(Roque, 2004).

#### 4.1 수분손상에 따른 기본 물성 변화

##### 4.1.1 회복탄성계수

박리방지 첨가제 종류와 수분처리 상태에 따른 아스팔트 혼합물의 강성 특성(stiffness-property)을 평가하기 위해 25°C에서의 회복탄성계수를 측정하였다. 여기서 AS(Anti-stripping agent)는 액상 박리 방지 첨가제를 첨가한 아스팔트 혼합물을 나타내며, HL(Hydrated lime)과 L(lime)은 각각 소석회와 생석회를 첨가한 혼합물을 나타낸다. 그림 4에서와 같이 전반적으로 수분처리 후 강성은  $H_C$  조건을 기준으로  $V_S$  조건이 상대적으로 가장 높은 강성 값을 나타냈으며 F-T 조건이 가장 낮은 강성 값을 나타내었다. 이는  $V_S$  조건인 경우, 수분에 의한 혼합물의 물성이 가역적인 변화를 보인 것으로 판단되며 F-T 조건인 경우에는 혼합물의 수분에 의한 물성 변화가 가장 크게 발생한 것으로 판단된다. 또한, 액상 박리방지 첨가제와 소석회를 첨가한 아스팔트 혼합물에 비하여 생석회를 첨가한 혼합물의 강성이 현저히 감소되는 것을 알 수 있었는데 특히, F-T 조건에서는  $H_C$  조건과 비교하여 약 55%의 강성저하 현상을 보여 약 두 배 정도의 차이를 나타내었다. 이는 박리 방지 첨가제로 사

용되는 재료가 소량을 사용하더라도 아스팔트 혼합물의 강성을 증진시키는 것으로 판단되며 아스팔트 바인더와 골재와의 부착력을 증진시키는 것으로 판단된다.

그림 5는 수분에 의한 가역적인 물성변화 부분인  $H_C$  조건과  $V_S$  조건과의 회복탄성계수비(Resilient Modulus Ratio, RMR)를 나타낸 것이다. 회복탄성계수의 경우  $H_C$  조건일 때에 비해  $V_S$  조건에서의 물성이 약 160% 정도(약 1.5배)의 가역적 변화를 보이는 것으로 나타났다.

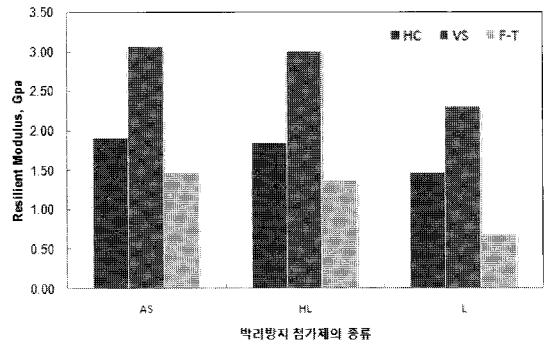


그림 4. 회복탄성계수 실험 결과

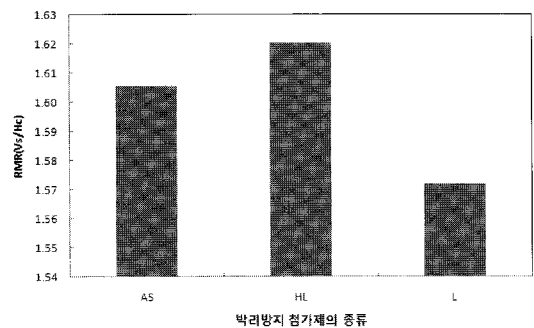


그림 5. 회복탄성계수( $V_S$ 조건 /  $H_C$ 조건)

##### 4.1.2 크리프 시험 결과

박리 방지 첨가제의 종류 및 수분처리조건에 따른 아스팔트 혼합물의 소성변형 저항성을 평가하기 위해 25°C에서 고정 하중 1000초 일 때의 크리프 실험을 수행하였다. 그림 6은 크리프 컴플라이언스



(creep compliance)를 나타내며 크리프 컴플라이언스는 정하중 상태에서의 변형량을 의미한다. 그림에서와 같이 동일한 수분 처리 조건에서의 크리프 컴플라이언스는 액상 박리방지 첨가제와 소석회가 첨가된 혼합물이 거의 유사한 결과를 나타냈으며 이에 비해 생석회를 첨가한 혼합물은 다소 높은 크리프 컴플라이언스 값을 나타내었다. 또한 박리방지 첨가제가 첨가된 모든 혼합물 중에서  $V_S$  조건이 가장 낮은 크리프 컴플라이언스 값을 나타내어 회복탄성계수와 동일한 물성 변화를 나타내었다. 그림 7은 수분처리 조건 및 박리방지 첨가제에 따른 시간&크리프 컴플라이언스를 나타낸다.

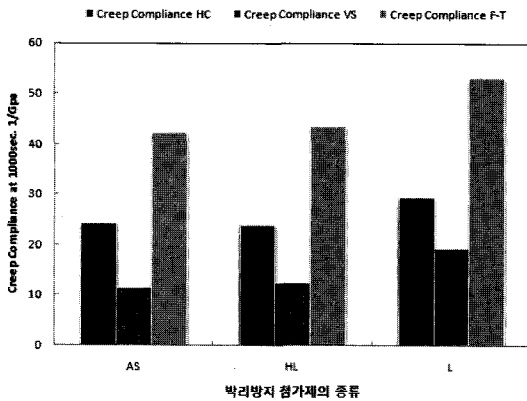
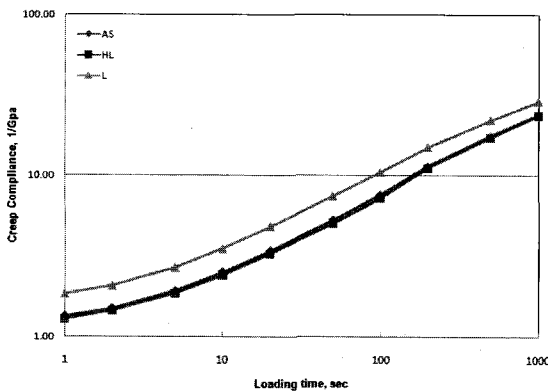
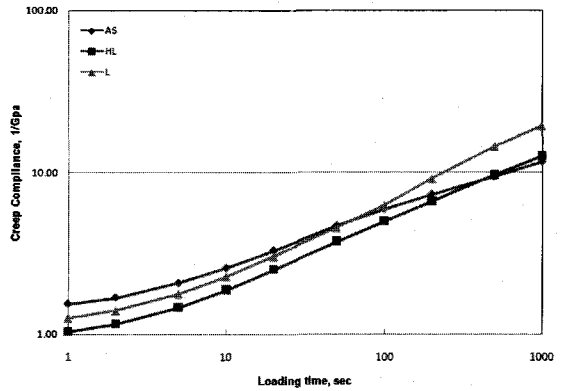


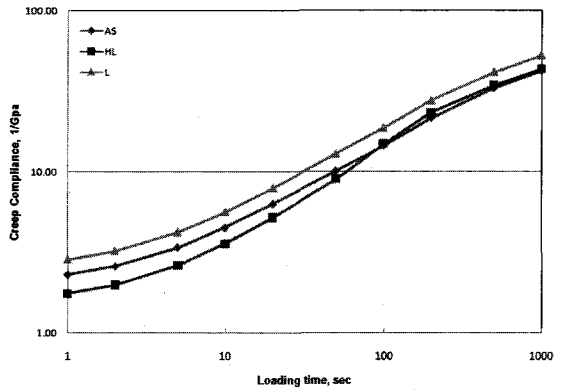
그림 6. 크리프 시험결과(1000초 크리프 컴플라이언스)



(a)  $H_C$  수분처리조건



(b)  $V_S$  수분처리조건



(c) F-T 수분처리조건

그림 7. 시간-크리프 컴플라이언스 시험 결과

#### 4.1.3 인장강도 시험결과

박리 방지 첨가제의 종류 및 수분처리조건에 따른 아스팔트 혼합물의 균열에 대한 저항성을 평가하기 위해서 간접인장강도를 25℃에서 수행하였다. 그림 8에서도 회복탄성계수와 크리프 시험은 거의 동일한 경향을 나타냈지만 액상 박리 방지 첨가제와 소석회를 첨가한 혼합물 중  $H_C$  조건과 F-T 조건에서의 인장강도가 거의 동일하게 나타났다. 또한 첨가제별 인장강도는 생석회가 첨가되어 있는 혼합물이 가장 낮은 값을 갖는 것으로 나타났으며 이는 생석회가 수분에 대한 저항성을 향상시키지 못하는 것으로 판단된다.

그림 9는 동결-융해 후 인장강도비(Tensile Strength Ratio)를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이



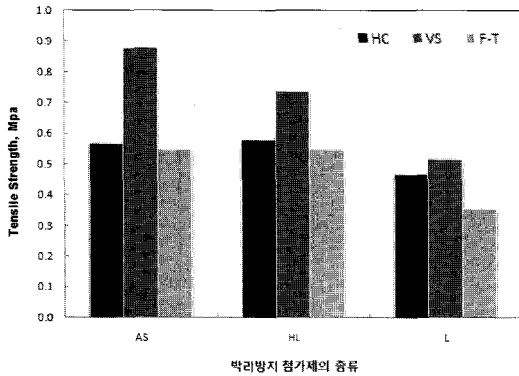


그림 8. 간접인장강도 결과

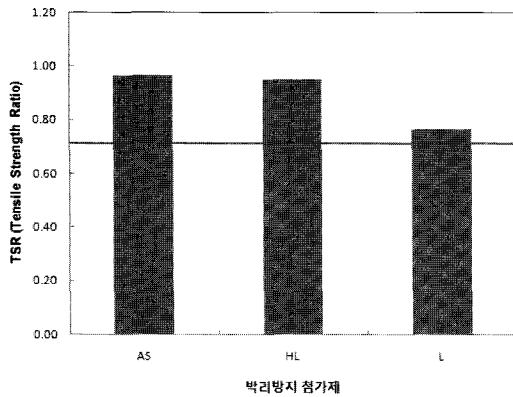


그림 9. 인장강도비(TSR) 결과

각각의 박리방지 첨가제를 첨가한 혼합물은 인장강도 비의 일반적인 기준인 0.7을 만족하는 결과를 나타내었다. 다만 생석회의 경우, 인장강도비의 값이 0.77로 기준 값을 겨우 만족시키는 결과를 나타내어 다른 첨가제에 비해 해빙기에 발생할 수 있는 균열에 대한 저항성이 감소되는 것으로 판단된다.

#### 4.2 수분 손상이 균열에 미치는 영향

본 연구에서는 재료의 기본 물성인 회복탄성계수 시험, 크리프시험, 강도시험의 결과 값을 이용하여 미국 플로리다 대학의 Roque(2004)에 의해 제안된 Energy Ratio(ER) 개념을 사용하여 수분이 균열에 미치는 영향을 평가하였다. 표 5는 간접인장시험 결과값을 정리한 것이다.

##### 4.2.1 수분 처리 조건에 따른 균열 저항성 평가

가열 아스팔트 혼합물의 역학적인 파괴 이론은 아스팔트 혼합물의 파괴 저항력을 이용하여 수분 손상의 영향을 정량화할 수 있으며 특히, 아스팔트 혼합물의 소산된 크리프 변형에너지(DCSE)와 파괴에너

표 5. 간접인장시험 결과

| 수분 상태          | 박리 방지제 | Property                |  |                        |                                    |                                    |                                     |                                      |         |                        |            |  |  |
|----------------|--------|-------------------------|--|------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|---------|------------------------|------------|--|--|
|                |        | Resilient Modulus (Gpa) | Creep compliance at 1000 seconds (1/Gpa) | Tensile Strength (Mpa) | Failure Strain (10 <sup>-6</sup> ) | ε <sub>0</sub> (10 <sup>-6</sup> ) | Elastic Energy (KJ/m <sup>3</sup> ) | Fracture Energy (KJ/m <sup>3</sup> ) | m-value | D <sub>1</sub> (1/psi) | a (psi)    | DCSE <sub>min</sub> (KJ/m <sup>2</sup> ) | DCSE <sub>f</sub> (KJ/m <sup>2</sup> ) |
| H <sub>c</sub> | AS     | 1.91                    | 24.38                                    | 0.57                   | 6704.66                            | 6704.36                            | 0.085                               | 4.40                                 | 0.47    | 2.96E-07               | 8.6671E-08 | 2.78                                     | 4.31                                   |
|                | HL     | 1.85                    | 24.00                                    | 0.58                   | 7688.65                            | 7688.34                            | 0.091                               | 3.88                                 | 0.47    | 3.24E-07               | 8.6564E-08 | 2.53                                     | 3.79                                   |
|                | L      | 1.46                    | 29.43                                    | 0.47                   | 5564.16                            | 5563.84                            | 0.076                               | 3.30                                 | 0.48    | 2.83E-07               | 8.7743E-08 | 2.76                                     | 3.22                                   |
| V <sub>s</sub> | AS     | 3.06                    | 11.65                                    | 0.88                   | 5751.02                            | 5750.73                            | 0.127                               | 4.31                                 | 0.32    | 1.10E-06               | 8.3348E-08 | 2.26                                     | 4.18                                   |
|                | HL     | 3.00                    | 12.68                                    | 0.74                   | 5296.67                            | 5296.42                            | 0.091                               | 3.74                                 | 0.40    | 6.27E-07               | 8.4848E-08 | 2.08                                     | 3.65                                   |
|                | L      | 2.00                    | 19.37                                    | 0.52                   | 5277.20                            | 5276.94                            | 0.068                               | 3.06                                 | 0.44    | 4.96E-07               | 8.7207E-08 | 2.03                                     | 2.99                                   |
| F-T            | AS     | 1.46                    | 42.34                                    | 0.55                   | 5929.37                            | 5928.99                            | 0.104                               | 3.62                                 | 0.51    | 2.28E-07               | 8.6885E-08 | 2.83                                     | 3.52                                   |
|                | HL     | 1.34                    | 43.47                                    | 0.55                   | 4785.40                            | 4784.99                            | 0.113                               | 3.20                                 | 0.52    | 2.48E-07               | 8.6885E-08 | 2.46                                     | 3.09                                   |
|                | L      | 0.68                    | 53.17                                    | 0.36                   | 4542.16                            | 4541.63                            | 0.095                               | 2.02                                 | 0.54    | 1.86E-07               | 8.8922E-08 | 3.00                                     | 1.92                                   |



지(FE)로써 정의할 수 있다. DCSE는 수분에 의해 공시체가 손상을 입을 때까지 공시체에 흡수된 에너지이며, DCSE<sub>F</sub>는 파괴 시 공시체에 흡수된 에너지를 나타낸다. 에너지 개념에서의 손상 발전 비율은 m-value와 D<sub>1</sub> 값에 의해 지배되며 이 변수를 기준으로 혼합물의 균열 공용성을 평가할 수 있다. m-value 값은 아스팔트 혼합물의 손상 누적 속도와 깊은 관계를 가지며 m-value 값이 작을수록 누적 손상을 덜 받는 것을 의미한다(Kim, 2003). 그림 10은 m-value와 DCSE<sub>F</sub> 값을 나타내며 그림 11은 파괴에너지를 나타낸다. 그림에서와 같이 생석회를 첨가한 혼합물의 m-value 값이 0.54로 다른 박리 방지 첨가제에 비해 높은 값을 나타냈으며, 파괴 시 소산된 에너지는 1.92로 가장 낮은 결과 값을 나타내었다. 수분처리별 아스팔트 혼합물의 m-value는 F-T 조건

이 상대적으로 가장 높은 값을 나타냈으며 V<sub>s</sub> 조건이 가장 낮은 결과를 나타내었다. 이는 수분에 의한 누적 손상이 가속화되어 균열 발생률이 증가될 것으로 판단된다. 또한 파괴 시 소산된 에너지는 박리 방지 첨가제의 종류에 상관없이 H<sub>c</sub>와 V<sub>s</sub> 수분처리 방법이 거의 유사한 결과 값을 나타냈으며 F-T 수분처리 방법이 현저히 낮은 결과 값을 나타내어 균열에 대한 저항성이 감소된 것으로 판단된다. 파괴에너지(FE)는 액상 박리 방지 첨가제가 첨가된 혼합물이 상대적으로 가장 높은 값을 나타냈으며 소석회, 생석회 순으로 나타났다. 또한 수분처리 조건에 따른 파괴 에너지는 H<sub>c</sub> 수분처리 방법이 높은 값을 나타냈으며 F-T 조건이 가장 낮은 결과 값을 나타내었다. 이는 액상박리 방지 첨가제가 다른 2종의 첨가제에 비해 수분에 의한 누적 손상 비율을 현저히 감소시킬뿐만 아니라 파괴 시까지 공시체에 흡수된 에너지를 증가시켜 회복되지 않는 균열 발생 한계점에 도달되는 시간이 증가된 것으로 판단된다.

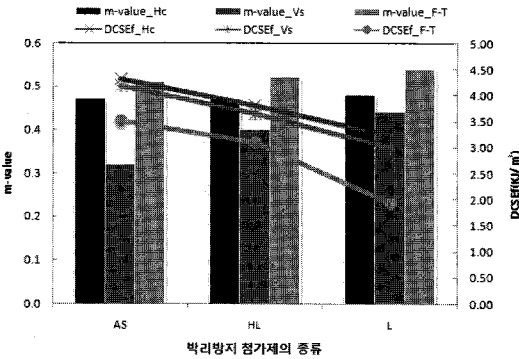


그림 10. 누적손상비율에 따른 DCSE<sub>F</sub>의 변화

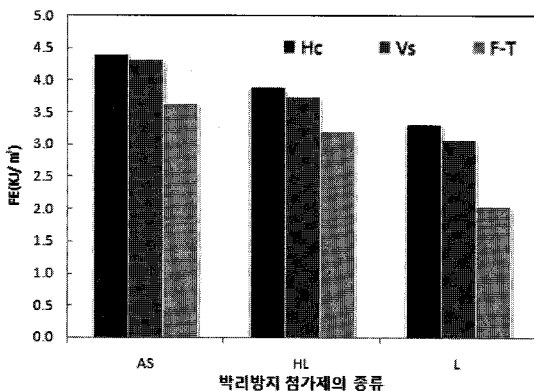


그림 11. 파괴에너지(FE)의 변화

4.2.2 수분손상에 따른 Energy Ratio 결과 분석  
본 연구에서는 아스팔트 혼합물의 파괴 저항력을 나타내는 인자인 Energy Ratio(ER)를 이용하여 현장 포장을 수행하였을 경우, 포장체의 구조적인 특성 및 혼합물 물리적 특성을 통해 서로 다른 포장 대한 균열에 대한 공용성 평가를 수행하였다. 그림 12는 박리방지 첨가제 및 수분처리 조건에 따른 Energy Ratio 값을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 Energy Ratio 값의 경우 H<sub>c</sub> 수분처리 조건을 기준으로 V<sub>s</sub> 수분처리 조건에서의 Energy Ratio 값은 전체적으로 약 20~25% 증가 현상을 나타내었다. 그러나 F-T 수분처리 조건에서는 액상박리방지 첨가제와 소석회를 첨가한 혼합물은 약 15~20% Energy Ratio 값이 감소하는 경향이 나타났다. 또한 생석회를 첨가한 혼합물의 경우에는 45% 정도의 감소현상을 나타내어 약 3배정도의 차이를 나타내었다. 이는 잠정적으로 수분에 의해 발생될 수 있는 균열에 대한 저항성이 생석회가 가장 낮은 결과를 나타



내며 F-T 수분조건을 거친 혼합물의 경우, 수분에 의한 조기 균열 발생 가능성이 높은 것으로 판단된다. 그림 13은  $H_C$  수분조건과  $V_S$  수분조건에 따른 Energy Ratio 비를 나타낸 것이며 그림에서와 같이 각각의 혼합물은 잠정적으로 약 10~30% 정도의 균열 발생 가능성을 가지고 있는 것으로 나타났다.

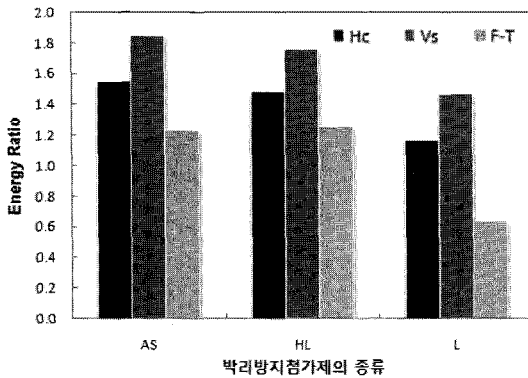


그림 12. Energy Ratio 결과

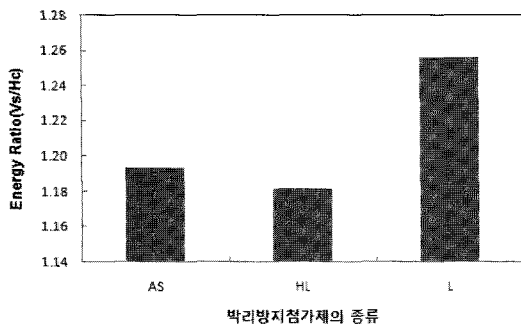


그림 13. ER Ratio( $V_S$  수분조건 /  $H_C$  수분조건)

## 5. 결론

본 연구는 국내에 적용 가능한 아스팔트 혼합물의 수분민감도 평가에 대한 분석체계를 정립하기 위한 기초적인 연구로써, 국내에서 일반적으로 사용되고 있는 아스팔트 혼합물에 대하여 각종 박리방지제의 효과를 파악하고 박리방지제의 사용에 따른 아스팔

트 혼합물의 수분민감도 특성을 비교·평가하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

간접인장 시험결과, 동결 용해 처리(F-T수분처리 조건)에 따른 아스팔트 혼합물의 물리적 특성은 다른 수분처리( $H_C$ ,  $V_S$ )에 비해 현저하게 감소되는 경향을 나타내었다. 또한 이러한 감소 현상은 박리방지 첨가제에 의해 크게 개선되는 것으로 나타났으며 특히, 액상 박리방지 첨가제와 소석회는 일반적으로 채움재로 사용되는 생석회에 비해 약 2배 정도 높은 결과를 나타내어 박리방지 첨가제를 이용한 균열에 대한 저항성을 증진시킬 수 있을 것으로 판단된다.

누적 손상 비율에 따른 분석 결과, 박리 방지 첨가제를 첨가한 혼합물을 현저히 감소시키는 경향을 나타내었다. 특히, 소량이 첨가되는 액상 박리 방지 첨가제가 가장 낮은 누적 손상 비율을 나타냈으며 에너지 흡수를 또한 가장 높은 결과를 나타내었다. 이는 균열 발생 한계점에 도달되는 시간을 증가시켜 균열 발생을 감소시키는 것으로 판단되며 수분에 의해 발생할 수 있는 균열에 대한 저항성을 증가시키는 것으로 판단된다.

아스팔트 혼합물 내부의 수분변화, 즉  $H_C$  수분조건과  $V_S$  수분조건의 물성은 수분함량 변화에 따라 매우 민감하게 변화한다. 회복탄성계수, 크리프 컴플라이언스, 인장강도의 경우 혼합물 내부의 수분변화에 의해 약 10~80% 정도의 가역적인 물성변화를 나타내는 것으로 나타났다. 이러한 물성변화는 Energy Ratio 분석결과와 유사하게 아스팔트 포장체 내에서 약 10~30% 정도의 균열저항성 변화를 초래할 것으로 판단된다.

박리방지 첨가제의 효과는 아스팔트 혼합물의 구성요소, 즉 골재 및 아스팔트의 종류 및 특성에 따라 그 효과가 매우 큰 차이를 나타낸다. 따라서 박리방지제를 사용하기 전에 물성평가를 통하여 혼합물 구성요소에 따라 그에 적절한 박리방지제를 선택하는 것이 매우 중요할 것으로 판단된다.

박리방지 첨가제는 아스팔트 혼합물 내에 극히 적은 양이 사용되지만 그 효과는 매우 큰 것으로 분석



되었다. 따라서 아스팔트 혼합물의 수분 손상을 최소화하기 위한 방법의 하나로 박리방지 첨가제의 국내 품질 기준 마련 및 국내지방 지침 규정의 확립이 무엇보다 중요하다고 판단된다.

본 연구에서는 상온에서 시험을 수행한 결과를 나타냄으로써 채움재의 종류에 따른 저온 특성을 평가하지 못하였으며, 채움재의 첨가비율에 따른 혼합물의 거동 특성을 평가하지 못하였다. 따라서, 향후 연구로서는 채움재 종류에 따른 혼합물의 저온 특성과 채움재의 첨가비율에 따른 혼합물의 거동 특성 평가를 수행해야 할 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

아스팔트포장연구회(1999), "아스팔트포장공학 원론", 한국도로포장공학회, p.459-461, p.506-508

AASHTO(1993), "Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture-Induced Damage", AASHTO Designation : T283-89

Birgisson, B., Roque, R. and Page, G. C.(2004), "The Use of a Performance-Based Fracture Criterion for the Evaluation of Moisture

Susceptibility in Hot Mix Asphalt", *Transportation Research Board Record No. 04-3431*

Kim, B. I.(2003), "Evaluation of the Effect of SBS Polymer Modifier on Cracking Resistance of Superpave Mixtures", University of Florida

Kim, N. H., Roque, R. and Hiltunen, D.(1994), "Effect of Moisture on Low-Temperature Asphalt Mixture Properties and Thermal Cracking Performance of Pavement," *Transportation Research Board Record No. 1454*, p.82-88

Roque, R., Z. Zhang, and B. Sankar(1999), "Determination of Crack Growth Rate Parameter of Asphalt Mixtures Using the Superpave IDT," *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol.68, pp. 404-433

접 수 일 : 2008. 3. 18  
 심 사 일 : 2008. 3. 21  
 심사완료일 : 2008. 12. 2