

# 박리방지제의 사용에 따른 아스팔트 혼합물의 수분민감도 특성에 관한 연구

## Effect of Anti-Stripping Agent on Moisture Susceptibility Characteristics of Asphalt Mixtures

이석근\*, 천상현\*\*, 전종명\*\*\*

Suk-Keun Rhee, Sang-Hyun Chun, Jong-Myung Jeon

### 1. 서 론

아스팔트 포장의 수분 손상은 우리나라 뿐 만 아니라 미국 전 지역 및 세계 여러 다른 지역들에 시공된 아스팔트 포장에 있어서도 주된 문제점으로 계속 지적되고 있으며, 그 문제의 심각성은 지난 10~15년간 미국 내에서 수행된 많은 연구들을 통해서 입증되고 있다. 이러한 연구결과들에 의하여 미국 및 유럽의 여러 나라들은 아스팔트 혼합물의 수분 손상을 최소화 하거나 완전히 제거하기 위한 방법의 하나로 소석회(Hydrated Lime) 또는 액상 박리방지 첨가제(Liquid Anti-Stripping Agent)와 같은 각종 박리방지 첨가제의 사용이 제기되었으며, 실제로 도로포장 시공 시 이러한 박리방지 첨가제의 사용에 대한 내용을 지방규정으로 지정하고 있다. 그러나 국내에는 아직까지 박리방지 첨가제에 대한 소개가 되어있지 않고 박리방지 첨가제의 국가 품질 기준 미비로 인하여 적용하는데 있어서 기준이 불분명하며, 국가 시방 지침에 규정이 되어 있지 않아 아스팔트 포장에 적용하기가 어렵다. 또한, 포트홀과 같은 문제에 있어서 기존의 응급보수 방법이 문제가 많음에도 불구하고 그대로 계속 사용되어 이러한 문제가 악순환 되고 있는 실정이다. 따라서 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 아스팔트 혼합물의 수분민감도 특성을 비교·평가하는데 그 목적이 있다.

본 연구에서는 현재 대표적인 박리방지 첨가제로 사용되고 있는 소석회 및 액상 박리방지첨가제를 사용하고 일반 AP5 및 SBS 개질 아스팔트를 사용하여 아스팔트의 종류 및 박리방지제의 첨가에 따른 아스팔트 혼합물의 수분민감도 평가를 수행하였다. 본 연구에 사용된 공시체는 아스팔트의 종류를 일반 AP5 및 SBS 개질 아스팔트로 구분하였고, 박리방지제의 첨가에 따른 수분민감도 평가를 수행하기 위하여 채움재(Filler)의 종류를 생석회(Lime) 및 소석회로 각각 구분하여 제작하였으며 또한 액상 박리방지 첨가제를 사용한 공시체를 제작하여 이들에 대한 박리방지제의 효과 및 수분민감도 특성을 비교·평가하였다. 따라서 본 연구에서는 총 6종류의 아스팔트 혼합물이 비교·평가되었다.

실험 방법은 기존에 제안된 아스팔트 혼합물의 수분민감도 시험의 분석을 통해 가장 널리 사용되고 있는 AASHTO T-283 (Modified Lottman Test)의 규정에 의거하여 공시체의 수분처리를 하였고, AASHTO TP-9에 규정된 간접인장시험법(Indirect Tensile Test, IDT)을 통한 크리프시험(Creep Test), 회복탄성계수시험(Resilient Modulus Test) 및 강도시험(Strength Test)을 실시하였으며 실험 온도는 25℃에서 실험을 실시하였다.

\* 정회원 · 경희대학교 토목건축공학부정교수 공학박사 · 031-201-2900 (E-mail : skrhee@khu.ac.kr)

\*\* 정회원 · 경희대학교 토목건축공학부 공학석사 · 031-201-2923 (E-mail : acechoco@hotmail.com)

\*\*\* 정회원 · 경희대학교 토목건축공학부 공학석사과정 · 031-201-2923 (E-mail : jjm5352@hotmail.com)



실험결과 분석은 미국 플로리다 대학의 Roque에 의해 제안된 Energy Ratio(ER) 개념을 사용하여 박리방지제의 사용에 따른 효과 및 수분민감도 특성을 평가하였다.

## 2. 아스팔트 혼합물의 박리방지 첨가제 특성

박리방지 첨가제는 아스팔트 혼합물 내에서 골재로부터 아스팔트 시멘트의 박리를 최소화 하거나 완전히 제거하기 위하여 사용된다. 박리 방지 첨가제는 크게 두 가지 형식으로 분류할 수 있는데 한 가지는 액상 박리방지 첨가제로써 골재와 아스팔트 바인더를 혼합하기 전에 아스팔트 바인더에 박리 방지 첨가제를 혼합하는 형식이고 다른 하나는 석회 첨가제로써 골재와 아스팔트 바인더를 혼합하기 전에 골재에 살포하여 혼합하는 형식이다. 지금까지 대부분의 기술자들은 소석회가 아스팔트 혼합물의 수분 손상을 최소화하기 위해 가장 효과적인 첨가제라고 생각해왔다. 그러나 최근에 소석회가 생산량의 감소, 비용의 증가 및 시공 상의 각종 문제점들을 야기하게 되면서 가격 경쟁력이 있고 적용이 간단한 액상 박리방지 첨가제의 사용이 제기되었다. 그러나 여전히 이들 두 가지 박리방지 첨가제에 대한 시험과 관련된 문제, 적용의 정도 및 장기적인 효과에 대한 여러 의문점들이 남아있는 실정이다.

### 2.1 소석회(Hydrated Lime)

소석회는 생석회에 물을 가하여 수화시킨 것으로 백색 또는 회백색을 나타내며 알칼리성이 강하다. 알칼리 성분이 60%이상이고 0.15mm체에 98%이상 통과하며 주로 토질 개량제로 많이 사용되고 있다. 국내에서 소석회의 최대수요를 나타내고 있는 것은 농업용 소석회로써 주로 소석회 비료이며 화학·공업용 중에서 대부분의 수요는 피혁공업에서 사용되고 있다.

일반적인 아스팔트 혼합물의 채움재로 사용되는 석분의 비중이 2.69정도인데 반해 소석회의 비중은 0.52정도로 매우 낮은 값을 갖으며, 소석회의 국내 평균 유통가격은 일반적인 채움재의 약4.5배 정도 고가이다.

이러한 소석회는 이전부터 박리에 대한 저항성이 뛰어난 재료로 인정받아 배수성 포장에서는 필수적으로 사용되고 있다. Kennedy and Ping(1991)은 소석회의 박리 저항성과 더불어 우수한 Rutting 저항성을 여러 공학적인 실험을 통해 증명하였다.

일반적으로 액상 박리방지 첨가제와는 달리 소석회는 골재와 아스팔트 바인더를 혼합하기 전에 골재에 첨가한다. 다음과 같은 세 가지 방법으로 골재에 소석회를 첨가하고 있으며, 실험실 및 플랜트에서의 각종 연구에 의하면 슬러리의 형태로 시공된 소석회 첨가제는 특히 효과적인 작용을 하는 것으로 나타났다.

### 2.2 액상 박리방지 첨가제 (Liquid Anti -Stripping Agent)

일반적으로 액상 박리방지 첨가제는 아스팔트 시멘트와 혼합하였을 때 표면장력을 줄여줌으로써 골재와 아스팔트 사이의 부착력을 증진시키는 작용을 하는 표면활성 촉진제(표면활성제)이다. 대부분 상업용으로 제조되는 화학적 혼합물인 액상 박리방지 첨가제는 특허품으로 지정되어있다. 그러나 최근 사용되고 있는 대다수의 액상 박리방지 첨가제는 아민(Amines)을 함유한 화합물이다. 이러한 액상 박리방지 첨가제는 열에 안정적이어야 한다. 즉, 개질된 아스팔트 바인더가 장기간 높은 온도에서 저장될 때 박리방지제로써의 효능을 상실해서는 안 된다.

액상 박리방지 첨가제를 적용하는 가장 간편하고 경제적인 방법은 골재와 아스팔트 바인더를 혼합하기 전에 액체 상태로 아스팔트 바인더에 액상 박리방지 첨가제를 혼합하는 방법이다. 이 방법이 가장 일반적으로 사용되지만, 박리방지제의 일부만이 골재와 아스팔트의 계면에 접하기 때문에 비효율적이다. 따라서 박리방지제를 골재표면에 직접 작용시키는 것이 가장 효율적이고 효과적일 것이다. 그러나 액상 박리방지 첨가제의 경우 박리방지제의 사용량이 통상적으로 너무 적고(일반적으로 중량비로 아스팔트 함량의 0.5%를 사용함) 또한 아스팔트 혼합물이 많은 양의 세립분을 함유하고 있기 때문에 균일한 분산이 실제적으로 불가능하다.

액상 박리방지 첨가제의 경우 박리방지제의 첨가량이 무엇보다 중요하다. 첨가량이 너무 적을 경우 박리방지제로써의 효과가 나타나지 않을 수 있으며, 반대로 첨가량이 너무 과량일 경우 아스팔트 혼합물에 유해할 수 있다. 또한 액상 박리방지 첨가제를 적용한 아스팔트 포장의 공용수명기간동안 박리방지제의 장기적인 효과



는 아직 완전하게 규명되지 않고 있다.

또한 골재와 아스팔트의 종류 및 특성에 따라 각각 사용되는 박리방지제의 효과가 달라지기 때문에 박리방지제를 사용하기 전에 사용되는 아스팔트와 골재의 종류 및 특성에 따라 그에 적절한 박리방지제를 선택하고 규정된 수분민감성 시험을 통하여 사용량을 결정하는 것이 무엇보다 중요하다.

### 3. 실험 방법

#### 3.1 실험 계획

본 연구에서는 현재 대표적인 박리방지 첨가제로 사용되고 있는 소석회 및 액상 박리방지첨가제를 사용하고 일반 AP5 및 SBS 개질 아스팔트를 사용하여 아스팔트의 종류 및 박리방지제의 첨가에 따른 아스팔트 혼합물의 수분민감도 평가를 수행하고자 한다. 실험을 위한 시편은 마샬배합설계로 OAC(최적아스팔트 함량)를 구한 후 선회다짐기(Gyratory Compactor)로 다짐을 실시하여 제작하였다. 시험 방법으로는 AASHTO T-283 Modified Lottman의 방법으로 수분처리를 한 후, AASHTO TP-9에 규정된 간접인장시험을 실시하였다.

#### 3.2 공시체 제작

본 연구에서는 골재, 다짐방법, 공극률(공극률 4%)등의 조건은 동일하게 적용한 상태에서 아스팔트의 종류를 일반 AP5 및 SBS 개질 아스팔트로 구분하였으며 채움제는 생석회 및 소석회로 각각 구분하여 공시체를 제작하였다. 또한 액상 박리방지 첨가제를 첨가한 공시체를 제작하였으며 이때 액상 박리방지 첨가제는 아스팔트 함량의 0.4%의 중량비로 첨가하였다. 아스팔트 함량은 배합설계 결과에 따라 AP5를 사용한 공시체는 최적아스팔트함량 5.1%를, SBS 개질 아스팔트를 사용한 공시체는 최적아스팔트함량 4.9%를 각각 적용하였다.

본 연구에 사용된 공시체는 모두 선회다짐기를 사용하여 제작하였고 혼합물의 다짐에는 슈퍼페이브에서 제안한 방식으로써 다짐각은 1.25°, 압축응력은 600kPa, 다짐속도는 분당 30회를 적용하였다.

#### 3.3 시험 시편의 수분처리 방법

본 연구에서는 박리방지제의 사용에 따른 아스팔트 혼합물의 수분민감도 특성을 평가하기 위하여 3가지의 아스팔트 혼합물 내의 수분상태를 설정하였다. 그림 1은 각각의 수분상태 별로 수분처리 과정을 나타낸 그림이다.

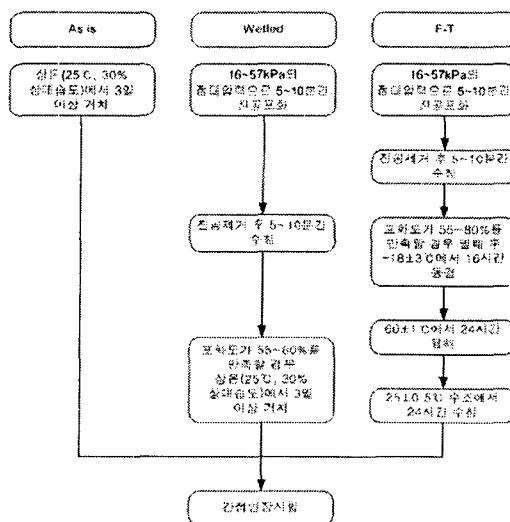


그림 1. 혼합물의 수분처리 방법

### 3.4 간접인장시험법(Indirect Tensile Test, IDT)

본 연구의 모든 시험들은 간접인장시험법을 사용하여 수행되었다. HMA Fracture Mechanics Model에서 예측되어진 균열 거동은 IDT시험으로부터 얻어진 소산된 크리프 변형에너지(DCSE)에 근거를 두고 있다. 그리고 이것은 본 연구에서 박리방지제의 사용에 따른 아스팔트 혼합물의 수분민감도 특성을 평가하는데 사용되어진다.

간접인장 시험법은 1953년에 Akazawa에 의해 시멘트 콘크리트의 인장 강도를 측정하기위한 시험으로 처음 소개되었고, Messina와 Breen이 아스팔트 혼합물의 시험에 적용하였다. 이 후 1965년에 Hadley 등에 의하여 시험 방법이 정립되었다. 간접인장시험법은 회복탄성계수, 크리프 컴플라이언스, D1, m-value, 인장강도, 피로변형, 파괴에너지 및 소산된 크리프 변형에너지(DCSE)를 결정하는 데에 적용된다. 본 연구에서 이 시험들은 시험온도 25°C에서 수행되었다.

본 연구의 간접인장 시험에 사용한 시험 장비는 미국 Instron 사의 25ton 유압 재하 장비 8502를 사용하였으며, 정확한 하중 조절을 위해 회복탄성계수 및 크리프 시험 시에는 최대재하하중 1ton 및 25ton의 로드셀을 사용하여 실험을 수행하였다.

## 4. 실험결과 및 분석

### 4.1 간접인장시험(ITLT Test) 결과분석

#### 4.1.1 회복탄성계수시험 결과분석

다음의 그림 2, 3은 박리방지제의 사용 및 아스팔트 종류에 따른 시험시편들의 회복탄성계수시험 결과를 나타낸 것이다.

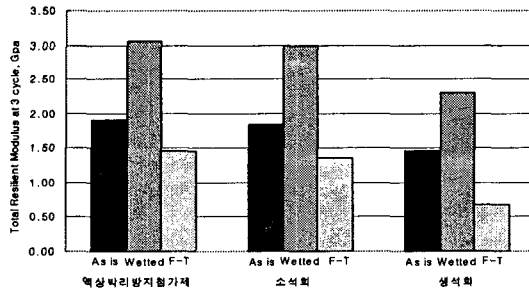


그림 2. 다양한 수분상태에서 AP5 아스팔트 혼합물 시편의 회복탄성계수 (Cycle 3)

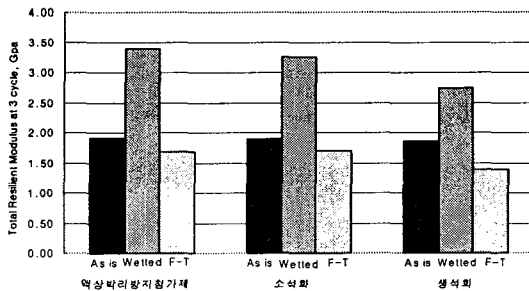


그림 3. 다양한 수분상태에서 SBS 아스팔트 혼합물 시편의 회복탄성계수 (Cycle 3)

결과에서 알 수 있듯이 각 수분상태 별로 전체적인 경향을 보면 As is 상태를 기준으로 Wetted 상태의 경우



강성의 증가현상이 나타났으며 Freeze and Thaw(F-T) 상태의 경우 As is 상태의 물성과 비교하여 강성이 현저하게 감소되는 것으로 나타났다. 또한 액상 박리방지 첨가제 및 소석회를 첨가한 혼합물과 비교하여 생석회를 첨가한 혼합물의 경우 이러한 강성 저하 현상이 현저하게 크게 나타났으며 일반 AP5 아스팔트를 사용한 혼합물이 SBS 개질 아스팔트를 사용한 혼합물보다 더 큰 강성저하 현상을 나타내었다.

일반 AP5 아스팔트를 사용한 아스팔트 혼합물의 경우 액상 박리방지첨가제 및 소석회를 사용한 혼합물의 경우에는 동결융해 처리 시 As is 상태와 비교하여 약 25~28%의 강성저하를 보인 반면, 생석회를 사용한 혼합물의 경우에는 약 55%의 강성저하 현상을 보여 약 두 배 정도의 차이를 나타내었다. SBS 개질 아스팔트를 사용한 혼합물의 경우 액상박리방지첨가제 및 소석회를 사용한 혼합물의 경우에는 동결융해 처리 시 As is 상태와 비교하여 약 10~12%의 강성저하를 보인 반면, 생석회를 사용한 혼합물의 경우에는 약 25%의 강성저하 현상을 보여 AP5 혼합물의 경우와 같이 약 두 배 정도의 차이를 나타내었다. 그러나 SBS 개질 아스팔트를 사용한 혼합물의 경우 일반 AP5를 사용한 혼합물과 비교하여 절반 정도 수준의 강성저하 현상을 나타내었다.

#### 4.1.2 크리프시험 결과분석

다음의 그림 4, 5는 박리방지제의 사용 및 아스팔트 종류에 따른 시험시편들의 크리프시험 결과를 나타낸 것이다. 크리프 컴플라이언스는 강도의 역수를 나타내므로 값이 클수록 강성이 작은 것을 의미한다. 그림에서 알 수 있듯이 각 수분상태 별로 전체적인 경향을 보면 회복탄성계수시험 결과와 같이 As is 상태를 기준으로 Wetted 상태의 경우 강성의 증가현상이 나타났으며 Freeze and Thaw(F-T) 상태의 경우 As is 상태의 물성과 비교하여 강성이 현저하게 감소되는 것으로 나타났다. 또한 액상박리방지첨가제 및 소석회를 첨가한 혼합물과 비교하여 생석회를 첨가한 혼합물의 경우 이러한 강성 저하 현상이 현저하게 크게 나타났으며 일반 AP5 아스팔트를 사용한 혼합물이 SBS 개질 아스팔트를 사용한 혼합물보다 더 큰 강성저하 현상을 나타내었다.

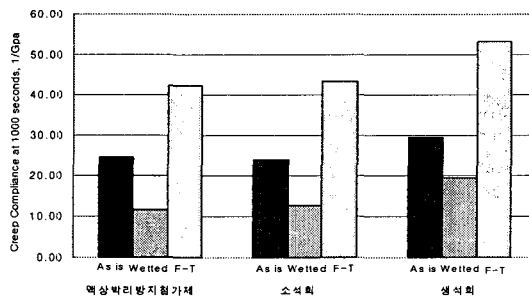


그림 4. 다양한 수분상태에서 AP5 아스팔트 혼합물 시편의 크리프 컴플라이언스 (하중시간 1000초)

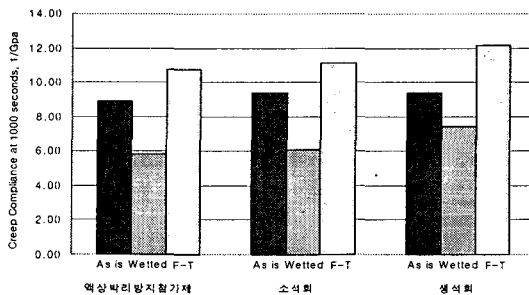


그림 5. 다양한 수분상태에서 SBS 아스팔트 혼합물 시편의 크리프 컴플라이언스 (하중시간 1000초)



#### 4.1.3 강도시험 결과분석

다음의 그림 6, 7은 박리방지제의 사용 및 아스팔트 종류에 따른 시험시편들의 강도시험 결과를 나타낸 것이다.

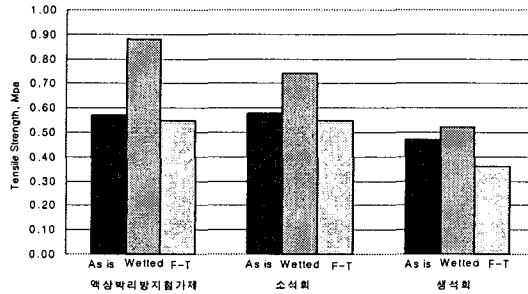


그림 6. 다양한 수분상태에서 AP5 아스팔트 혼합물 시편의 인장강도

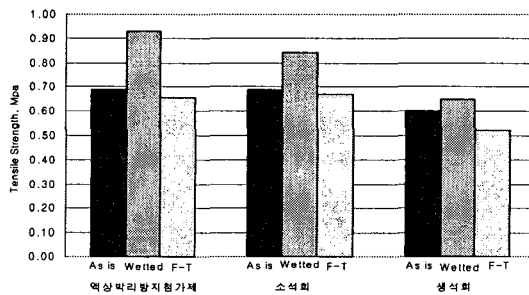


그림 7. 다양한 수분상태에서 SBS 아스팔트 혼합물 시편의 인장강도

또한 이러한 인장강도 값의 감소현상은 일반 AP5 아스팔트를 사용한 혼합물이 SBS 개질 아스팔트를 사용한 혼합물보다 약 10% 정도 더 크게 나타났다.

#### 4.2 Energy Ratio(ER) 결과분석

본 연구에서는 회복탄성계수시험, 크리프시험, 강도시험의 결과 값을 이용하여 미국 플로리다 대학의 Roque에 의해 제안된 Energy Ratio(ER) 개념을 사용하여 박리방지제의 사용에 따른 효과 및 수분민감도 특성을 평가하였다.

그림 8, 9는 박리방지제의 사용 및 아스팔트 종류에 따라 세 가지 수분상태(As is, Wetted, Freeze and Thaw)에서의 Energy Ratio 값을 나타낸 것이다.



그림 8. 다양한 수분상태에서 AP5 아스팔트 혼합물 시편의 Energy Ratio 값

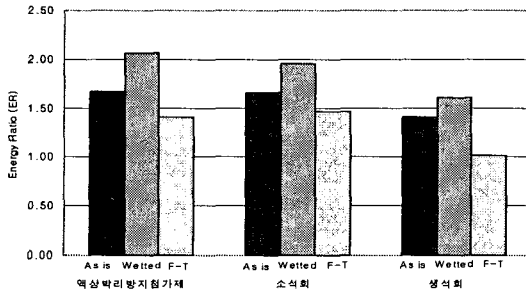


그림 9. 다양한 수분상태에서 SBS 아스팔트 혼합물 시편의 Energy Ratio 값

Energy Ratio 값의 경우 결과에서 알 수 있듯이 AP5 아스팔트 혼합물의 경우 As is 상태를 기준으로 Wetted 상태의 경우 전체적으로 약 20~25%정도 ER 값의 증가 현상이 나타났다. 그러나 Freeze and Thaw(F-T) 상태의 경우 액상박리방지 첨가제 및 소석회를 사용한 혼합물의 경우 As is 상태의 값과 비교하여 약 15~20% 정도 ER 값의 감소 현상이 나타난 반면 생석회를 사용한 혼합물의 경우에는 45% 정도의 감소현상을 나타내어 약 3배 정도의 차이를 보였다. 또한 SBS 혼합물의 경우 As is 상태를 기준으로 Wetted 상태의 경우 전체적으로 약 10~20%정도 ER 값의 증가 현상이 나타났다. 그러나 Freeze and Thaw(F-T) 상태의 경우 액상박리방지첨가제 및 소석회를 사용한 혼합물의 경우 As is 상태의 값과 비교하여 약 12~15% 정도 ER 값의 감소 현상이 나타난 반면 생석회를 사용한 혼합물의 경우에는 약 30% 정도 ER 값의 감소현상을 나타내어 약 2배 정도의 차이를 보였다. 이러한 ER 값의 감소현상은 일반 AP5 아스팔트를 사용한 혼합물의 경우가 SBS 개질 아스팔트를 사용한 혼합물보다 더 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

### 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 아스팔트 혼합물의 수분민감도 특성을 비교·평가하는 연구가 수행되었으며, 본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

1) 일반 AP5를 사용한 아스팔트 혼합물의 경우, 동결 용해 처리에 따른 혼합물의 물성저하 현상이 현저한 것으로 조사되었다. 이러한 물성저하 현상은 박리방지첨가제에 의해 크게 개선되어, 약 2배 정도의 균열저항성 증가 효과를 가져오는 것으로 나타났다.



2) SBS 개질 아스팔트를 사용한 아스팔트 혼합물의 경우, 박리방지첨가제의 효과가 나타났으나 그 정도는 AP5 혼합물에 비해 다소 감소하는 것으로 조사되었다. 이는 SBS 개질 아스팔트 자체의 개질효과로 인하여 혼합물의 수분민감성이 크게 개선되기 때문이라고 판단된다.

3) 아스팔트 혼합물 내부의 수분변화, 즉 As is 상태부터 Wetted 상태까지의 수분함량 변화에 따라 아스팔트 혼합물의 물성은 민감하게 변화한다. 회복탄성계수, 크리프 컴플라이언스, 인장강도의 경우 혼합물 내부의 수분변화에 의해 약 10~80% 정도의 가역적인 물성변화를 나타내는 것으로 조사되었다. 이러한 물성변화는 Energy Ratio 분석결과 아스팔트 포장체 내에서 약 10~30% 정도의 균열저항성 변화를 초래할 것으로 판단된다.

4) 박리방지제의 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.

5) 박리방지제는 아스팔트 혼합물 내에 극히 적은 양이 사용되지만 그 효과는 매우 큰 것으로 조사되었다. 따라서 아스팔트 혼합물의 수분 손상을 최소화하기 위한 방법의 하나로 박리방지 첨가제의 국내 품질 기준 마련 및 국내 시방 지침 규정의 확립이 무엇보다 중요하다고 판단된다.

#### 감사의 글

부족한 점이 많은 저를 제자로 받아 주시고, 학문적으로 뿐만 아니라 인생의 가르침을 일깨워 주신 스승 이석근 교수님께 진심으로 감사의 말씀을 드립니다. 지난 1년간 박리방지 프로젝트를 통해서 그동안 접해보지 못했던 새로운 분야에 대해 자상하게 지도해 주신 한국기술교육대학교의 김남호 교수님께 머리 숙여 감사드립니다. 또한, 대학원 수업을 지도하셨던 한국도로공사의 이광호 박사님, 문성호 박사님, 현대건설 기술연구소의 이석홍 박사님, 한국건설기술연구원의 김부일 박사님께도 감사의 말씀을 드립니다.

#### 참고문헌

1. AASHTO, "Standard Test Method for Determining the Creep Compliance and Strength of Hot Mix Asphalt(HMA) Using the Indirect Tensile Test Device", AASHTO Designation : TP9-96 (1994)
2. Birgisson, B., Roque, R. and Page, G. C., "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 (2004)
3. Kim, N. H., Roque, R. and Hiltunen, D., "Effect of Moisture on Low-Temperature Asphalt Mixture Properties and Thermal Cracking Performance of Pavement," Transportation Research Board Record No. 1454, p.82-88 (1994)
4. Roque, R., "Damage and Fracture in Asphalt Concrete, Principles of HMA Fracture Mechanics", University of Florida (2004A)
5. Roque, R., "Energy-Based Criteria for Top-Down Cracking Performance of Hot Mix Asphalt", University of Florida (2004A)
6. Kennedy, T. W. and Virgil Ping, W., "An Evaluation of Effectiveness of Antistripping Additives in Protecting Asphalt Mixture from Moisture Damage", AAPT Vol. 60 (1991)
7. 아스팔트포장연구회, "아스팔트 포장공학 원론", 한국도로포장공학회, p.459-461, p.506-508 (1999)
8. AASHTO, "Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture-Induced Damage", AASHTO Designation : T283-89 (1993)