

첨가제를 이용한 중온형 폴리머 개질 아스팔트  
콘크리트 혼합물의 실용화 연구

김 낙 석 (경기대학교 토목공학과 교수)

이 진 구 (경기대학교 토목공학과 박사과정수료)

박 석 순 (공학박사, 용마엔지니어링 전문)

**A Study on Field Applications of Polymer-Modified  
Warm Asphalt Concrete Mixture using Admixture**

Kim, Nak-seok

Lee, Jin-goo

Park, Seo-ksoon

## Abstract

This paper presents the field applications of polymer-modified warm asphalt mixture which can reduce the temperature during the production and field constructions. The amount of fuel consumptions and CO<sub>2</sub> diffusions can be reduced by much using the polymer-modified warm asphalt mixture instead of the conventional polymer-modified asphalt mixture. According to the research results, the polymer-modified warm asphalt mixture can be utilized without additional temperature increasement and performance sacrifice during the plant production and public service, respectively. As a result, it is considered that the application of the polymer-modified warm asphalt mixture has the potential of convenience in constructions management and reducing the environmental damages.

[*Key word* : Polymer-Modified Asphalt, Warm Asphalt, Admixture, Environmental Damage]

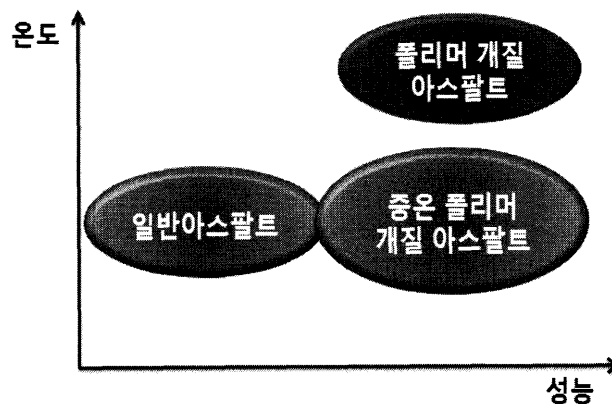
## I. 서 론

국내에서 현재와 같은 아스팔트 포장에 본격적으로 사용되기 시작한지 불과 40여년이 지났지만 사회는 눈부신 발전을 거듭해 왔으며, 이에 따라 차량 무게와 교통량의 증가로 도로 포장은 더욱 다양한 요구를 받게 되었다. 도로에 요구되는 기본적인 이동의 편리성을 위한 평탄성과 안전을 위한 미끄럼저항성 뿐만 아니라, 초기 건설비용과 유지 관리비용을 고려한 경제성의 문제 역시 중요한 문제로 고려되었다. 더 나아가 도로 포장에 환경적인 측면이 부각되기 시작하면서, 어두운 검정색 또는 회색의 포장에 색상을 입히는 시각적 효과와 같은 미관적인 부분부터, 도로 주변부의 소음을 감소하기 위한 노력뿐만 아니라 재료의 생산과정과 시공과정에서 발생하는 환경 유해 요소의 저감에 노력하는 데까지 이르게 되었다.

도로 포장 재료 중 가장 대표적인 아스팔트 콘크리트의 경우, 국제 유가의 상승, 골재의 수급 불안 및 기타 인건비 및 제반 비용의 상승으로 시공 및 유지관리비용의 상승이 계속 되어 왔다. 초기 비용의 증가를 상쇄하기 위해 우수한 내구성을 통한 유지 관리 비용의 절감으로 장기적 관점에서의 도로 건설 유지비용의 절감을 필요로 하게 되었다. 또한, 교통량의 증가로 잦은 유지보수는 차량 정체로 인한 에너지 및 시간의 손실과 같은 사회적 비용을 발

생시킴기 때문에 가급적 유지 보수를 적게 할 수 있는 뛰어난 내구성을 가진 도로 포장 재료를 필요로 하게 되었다.

아스팔트의 성능을 개선하여 공용성능을 향상시키기 위한 개질 아스팔트의 가장 대표적인 유형은 고분자 화합물을 첨가한 폴리머 개질 아스팔트(polymer modified asphalt : PMA)이다. 오랜 기간 동안 국내외에서 아스팔트 포장의 내구성 향상을 위해 사용된 PMA 아스팔트의 경우 우수한 성능과 내구성이라는 장점에도 불구하고 스트레이트 아스팔트(straight asphalt)를 사용한 일반 아스팔트 콘크리트에 비해 높은 점도에 따른 높은 생산 및 시공 온도로 인해 생산비의 증가와 어려운 시공 관리로 하자 발생의 위험이 높은 단점이 있었다. 또한 가열과정에서 발생하는 이산화탄소(CO<sub>2</sub>), 이산화황(SO<sub>2</sub>), 휘발성 유기화합물(VOC) 및 일산화탄소(CO), 질소산화물(NO<sub>x</sub>)과 같은 환경 유해물질을 상당량 배출하게 된다. 이를 해결하기 위해 PMA 아스팔트에 중온형 개질제를 첨가하여 PMA 아스팔트의 우수한 공용성능은 유지하면서 기존 일반 아스팔트 콘크리트 수준의 생산 및 시공온도가 가능하다면 도로 포장의 내구성 향상과 골재 가열에 필요한 에너지 절감 및 시공관리의 편리함을 얻을 수 있을 것이다. 혼합 및 다짐 온도를 낮추기 위한 중온 개질제의 사용이 폴리머 개질 아스팔트의 성능을 저해하지 않는 것 또한 중요하다. 중온형 개질제를 적용한 중온 폴리머 개질 아스팔트의 공용성능은 일반 아스팔트 혼합물보다 우수하여야 하며, 기존의 폴리머 개질 아스팔트에 비해 낮은 온도에서 혼합 및 다짐작업을 수행하였을 때 비슷한 수준의 공용성능을 확보하여야 한다. 다양한 실내 실험을 통해 일반 아스팔트 혼합물과 기존 폴리머 개질 아스팔트 혼합물과 중온 폴리머 개질 아스팔트의 공용성능을 비교 평가 하고자 한다. <그림 1-1>은 중온 폴리머 개질 아스팔트의 기술적 목표를 나타낸 것이다. 일반아스팔트와 동일한 혼합 및 다짐 온도에서 폴리머 개질 아스팔트 수준의 공용성능을 얻고자 하는 것이다.



<그림 1-1> 중온 폴리머 개질 아스팔트의 목표

## II. 중온 폴리머 개질 아스팔트

### 1. 폴리머 개질 아스팔트(polymer modified asphalt)

개질아스팔트란 포장용 아스팔트를 포장목적에 맞도록 아스팔트 품질을 변화시킨 아스팔트의 총칭으로 제조 방식에 따라 습식(pre mix type)과 건식(plant mix type)으로 대별할 수 있으며, 사용되는 재료에 따라 다양한 방식을 적용 할 수 있다. 개질아스팔트는 일반적으로 혼합방식 및 결합방식에 따라 분류할 수 있으며, 주로 고분자계통의 SBS, SBR Latex와 페타 이어분말(CRM), 화학축매제의 Chemcrete, 아스팔트 안정제를 사용하는 PBS 등이 국내에 알려져 있다.(신현술, 2006)

### 2. 중온 아스팔트(warm mix asphalt)

황성도(2008) 등의 연구와 조사에 따르면 온실가스의 배출은 지구 온난화를 비롯한 세계 곳곳에서 발생하고 있는 기상 이변의 중요한 원인 중 하나라는 것이 일반적인 의견이다. 온실가스 배출을 저감하기 위한 사회적 노력이 점점 커져가고 있으며, 이에 따라 교토 기후협약에서는 CO<sub>2</sub> 등의 유해가스 배출량을 억제하고 보다 친환경적인 기술을 개발하고 적용하도록 권장하고 있다. 중온 아스팔트는 이와 같은 추세를 반영하여 아스팔트 혼합물을 생산하기 위해 소모되는 연료의 사용을 줄이고, 유해가스 배출을 절감하기위한 기술로서 국내외에서 활발한 연구가 진행되고 있다. 연구결과 중온 아스팔트 포장이 일반 가열 아스팔트 포장에 비해 약 30℃의 아스팔트 혼합물 생산온도를 낮출 수 있다면, 이 차이에 따라 가열 연료 소모량이 약 32.3% 절감되고, 이에 따라 아스팔트 혼합물 1톤당 3,000원의 단가가 절감되는 것으로 나타났다. 그리고 유해가스는 18~33% 절감되며, 공극률은 가열 아스팔트 포장에 비해 87~117% 이었으며, FWD를 이용하여 25m간격으로 시험한 결과 치짐값 등은 전반적으로 우수한 것으로 평가되었다.(국토해양부, 2008)

가열 아스팔트 포장과 비교하여 혼합물의 생산과 시공 가능 온도만 차이가 있고 시공 절차는 동일한 방법을 적용한다. 중온 아스팔트 혼합물은 가열 아스팔트 혼합물보다 제조 및 시공 온도를 약 20~60℃ 저하시켜 도로포장 시공에 사용할 수 있는 기술이다. 하지만 "중온"의 명확한 온도 범위는 아직까지 정해지지는 않고 있다. 중온 아스팔트 포장 기술의 핵심은 기존 가열 아스팔트 포장에 비해 고온(100℃ 이상의 혼합 및 시공이 가능한 온도 영역)에서 아스팔트 바인더가 부드러워지는 개질첨가제를 추가하거나, 수분을 이용한 폼드(foamed) 아스팔트 생산 기술을 적용하는 방법 등이며, 기존 가열 아스팔트 포장과 비교하여 낮아진 혼합 및 다짐 온도의 효과는 다음<표2-1>과 같다.

<표 2-1> 중온 아스팔트의 기대 효과

혼합 온도	용도 / 목적	효과
온도 저감	제조시의 온도 저감화	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 제조시의 CO<sub>2</sub> 배출량 감소</li> <li>• 자원절약, 에너지 절약</li> </ul>
	포장시의 온도 저감화	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 교통 통제 시간의 단축(공사정체의 완화)</li> <li>• 초기 소성변형의 억제(보수 사이클의 연장)</li> <li>• 시공 효율의 개선(하절기 시공 등)</li> </ul>
	칼라 아스콘	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 색 바램 방지</li> </ul>
종래와 동일 온도	포장 장비의 간략화	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 환경보전(CO<sub>2</sub> 배출량의 저감 등)</li> <li>• 시공효율의 개선</li> </ul>
	야간 및 동절기 시공	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 포설 가능 기온 확대, 품질확보</li> </ul>
	특수 아스콘 소규모 포장 공사	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 품질의 확보, 시공성의 개선</li> </ul>

### 3. 사용 재료

본 연구에서는 중온 아스팔트 콘크리트 혼합물의 공용성능을 평가하기 위하여 배합설계와 공시체를 제작하여 혼합물 실험을 수행하였으며, 이를 위해 사용된 재료는 스트레이트 아스팔트 바인더, 골재, 중온 폴리머 개질제, 폴리머 개질 아스팔트 바인더를 사용하였다.

#### 1) 스트레이트 아스팔트

스트레이트 아스팔트는 S사의 침입도 60~80 등급을 사용하였으며, KS M 2201의 기준을 만족하는 제품을 사용하였다.

#### 2) 골재

실험에 사용된 골재는 경기도 남부의 화강암 부순 골재를 사용하였다. 굵은 골재로 골재번호 #67과 #78 그리고 잔골재를 사용하였다. 골재는 KS F 2357의 기준에 부합하는 것을 사용하였다.

#### 3) 중온 폴리머 개질제

중온 폴리머 개질제는 아스팔트 바인더의 성능을 개선하기 위해 SBS(styrene butadiene styrene) 및 SBR(styrene butadiene rubber) 폴리머와 고온에서의 생산 및 시공온도 저감을 위한 중온 첨가제 및 기타 혼합물로 이루어진 백색의 분말이다.

#### 4) 폴리머 개질 아스팔트

중온 폴리머 개질 아스팔트 혼합물과의 성능 비교를 위해 사용된 폴리머 개질 아스팔트는 국내외에서 가장 널리 사용되고 있는 SBS를 첨가한 폴리머 개질 아스팔트를 사용하였다.

### III. 실험 방법 및 배합 설계

#### 1. 혼합물 실험 방법

##### 1) 마샬 안정도 실험(Marshall test)

마샬 실험법은 아스팔트 혼합물의 경험적인 물성을 측정하는 것으로, 본 연구에서는 KS F 2337-2002(마샬 실험기를 사용한 역청 혼합물의 소성 흐름에 대한 저항력 실험 방법)의 기준에 따라 실험을 실시하였다. 마샬 실험의 목적은 표준 실험실 다짐도로 다져진 아스팔트 혼합물의 강도를 측정하기 위한 것으로서 아스팔트 혼합물의 최적 아스팔트 함량을 결정하기 위한 마샬 배합설계법의 일부 물성 항목으로 사용되고 아스팔트 혼합물의 생산과 시공 품질 관리에도 적용한다.

실험 방법은 60℃의 수조에 30분 동안 수침 한 혼합물 시료를 분당 50.8 mm/분 속도의 압축 하중을 가하여 공시체가 파괴될 때까지 실시하며, 이때의 최대 하중(마샬안정도)과 변형량(흐름값)을 구한다. 실험 온도인 60℃는 여름철 포장체의 대략적인 최고 포장 온도를 가정한 것으로, 아스팔트 혼합물에 대한 가장 열악한 온도 조건을 모사하기 위함이다.

##### 2) 간접인장강도 실험(indirect tensile strength test, IDT)

간접인장강도 실험은 1953년에 Akazawa에 의해 시멘트 콘크리트의 인장 강도를 측정하기 위한 실험법으로 처음 소개되었고, 이 후 1965년에 Hadley 등에 의하여 실험 방법이 정립되었다(Roberts 외, 1996). 간접인장강도 실험은 수직인 직경면을 따라 평행하게 작용하는 압축 하중을 원통형 공시체에 작용시킴으로써 수행되며, 재하 하중의 응력 분포가 일정하게 이루어지도록 하기 위하여 일정폭의 곡률을 갖는 재하대가 사용되는데, 직경이 101.6 mm인 공시체를 사용할 경우 폭이 12.7 mm인 재하대를 사용한다.

##### 3) 수분 민감성 실험(moisture susceptibility test)

수분에 의한 박리현상으로 아스팔트 혼합물의 파손사례가 발생하기 때문에 이를 평가하기 위해 수분 민감성 실험을 실시하였다. 박리현상은 골재와 아스팔트의 점착력이 약해 발생하는 것으로 주로 수분의 작용에 의해 골재에서 아스팔트가 분리된 곳과 혼합물의 점착력이 상실된 곳 등에서 급격하게 발생한다. 수분 민감성에 대한 실험 방법은 국내, 외에 여러 가지가 있으나 현재까지 현장조건과 실험실에서 실시한 결과와의 상관관계가 규명되어 있지 않아 실험 결과에 대한 신뢰성을 확신할 수 없는 실정이다. 본 연구에서는 마샬 실험을 통한 잔류안정도와 Superpave 배합설계에서도 채택하고 있는 AASHTO T 283에 의한 로트만 실험을 실시하여, 실험을 통해 얻어진 결과로 수분에 의한 박리 저항성을 평가 하였다.

(1) 로트만 실험(Lottman test)

수분민감성을 측정하기 위한 방법인 AASHTO T 283-2002(standard method of test for resistance of compacted moisture induced damage)의 수정 로트만 실험을 실시하였다. 수정 로트만 실험은 Kandhal에 의해서 개발되었고 1985년에 AASHTO에 의해서 표준 실험법으로 채택되었다. 이 실험방법은 25℃ 수조에 2시간 수침하여 25℃에서 간접인장강도 실험을 수행하고 얻은 실험결과를 기준시료로 하고, 수분의 영향을 측정하기 위한 비교시료는 수증진공포화기를 이용, 상온 25℃ 물에 수침 시킨 후 진공처리(55~80%의 포화)하고 온도 챔버를 이용하여 로트만이 제안한 -18℃에서 최소 16시간 동안 1회 동결시킨다. 동결실험을 마친 시료는 60℃의 항온수조에서 24시간 수침하여 용해를 거친 후, 다시 25℃ 수조에 2시간 수침하여 25℃에서 간접인장강도 실험을 실시하는 것으로 비교 시료를 기준시료로 나누어 인장강도비를 구하게 된다. 보통 인장강도비는 0.7 이상으로 규정 된다 (Roberts 외, 1996).

$$\text{인장강도비} = \frac{\text{비교 시료의 인장강도}}{\text{기준 시료의 인장강도}}$$

(2) 잔류안정도 실험

일반적인 마찰안정도 실험과 함께 잔류안정도를 측정하는데, 이 잔류안정도는 아스팔트 혼합물의 박리특성을 실험하기 위한 것으로 물속에 일정시간 수침하여 아스팔트 혼합물이 수분의 영향을 충분히 받게 한 후, 실시하는 실험이다. 60℃의 항온수조에 48시간 동안 수침 후 안정도를 측정하고 습윤 처리 전 안정도 값과 비교하여 잔류안정도를 구하게 되며 이때 얻어진 결과 값으로 아스팔트 혼합물의 수분민감성을 예측한다. 다음 식으로 잔류 안정도를 구하여 수분 민감성을 판단하며, 일반적으로 잔류안정도가 75% 이상이 될 것을 요구하고 있다.

$$\text{잔류 안정도(\%)} = \frac{\text{60℃, 48시간 수침 후의 안정도(kg)}}{\text{안정도(kg)}} \times 100$$

4) 동적안정도 실험

아스팔트 포장 표면 위를 통행하는 차량으로 재하 되는 포장체 내의 응력 상태는 매우 복잡하므로, 이를 아스팔트 혼합물의 시편에 대해 실내 실험으로 정확히 재현시키기는 거의 불가능하여 외국의 경우에는 주로 다른 재료에 대한 거동의 상대적 비교를 위해 포장가속 실험기(accelerated pavement tester)를 통한 모사 실험을 수행하고 있다. 실내 실험인 휠 트랙킹(wheel tracking) 실험은 동적 반복 크리프 실험의 일종으로, 실제 도로가 고온 환경 조건

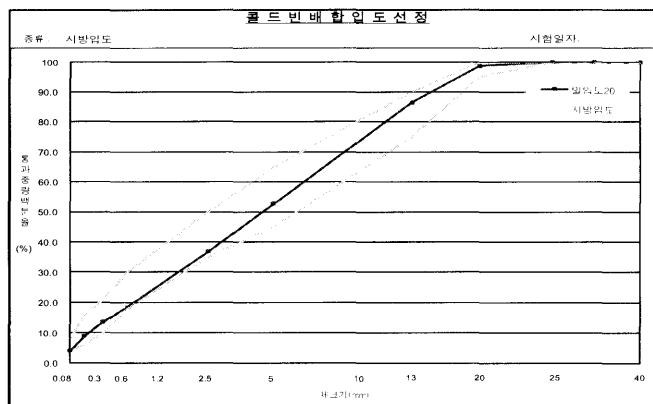
일 때 중차량의 주행으로 인한 소성변형이나 니딩 작용(kneading)을 시뮬레이션 시킴으로써, 아스팔트 혼합물의 내유동성을 평가하는데 사용된다. 실험절차는 KS F 2374(역청포장 혼합물의 휠 트랙킹 시험방법)에 따라 수행한다.

### 5) 선회 다짐을 이용한 다짐성 시험

선회 다짐기(gyratory compactor)는 교통하중에 의해 발생하는 아스팔트 혼합물의 현장밀도를 실내에서 재현하기 위해 제작된 다짐기이며, 현장에서 얻어지는 골재입자의 배열과 유사하게 다진다. 슈퍼페이브 선회다짐기는 기존의 선회다짐기를 바탕으로 개발되었고 다른 선회다짐기와 유사성이 많지만 다짐용으로만 사용된다. 슈퍼페이브 선회다짐기에 의해 다져진 다짐결과를 조절하는 요소에는 수직압력, 선회각, 선회다짐횟수의 3가지 방법이 있다. 슈퍼페이브 방법에서 수직압력은 600kPa(87psi)이고, 선회각은 1.25°, 선회속도는 분당 30회전에 맞추어진다. 선회수는 교통량에 유사하도록 다양하게 분포된다. 슈퍼페이브 선회다짐기는 직경 150mm, 또는 직경 100mm 인 시료를 다질 수 있다. 일반적으로 시료는 직경 150mm를 사용하지만 어떤 배합조건에서는 100mm 시료의 사용도 가능하다.

### 3. 배합설계

중온 폴리머 개질 아스팔트 혼합물의 공용 성능을 평가하기 위해서 우선적으로 제작할 아스팔트 혼합물의 배합 설계를 수행하였다. 배합설계는 KS F 2349의 밀입도 20을 기준으로 하였으며, 경기도 남부지역에서 구한 골재와 스트레이트 아스팔트(AC 60-80)를 사용하였다. 배합 설계는 건설교통부의 “가열 아스팔트 혼합물 배합설계 지침”에 따라 실시하였다. 체가름 실험을 통해 구한 각 골재의 입도를 바탕으로 합성 입도를 결정하였다. 준비된 골재를 사용한 합성입도는 <그림 3-1>과 같다. 배합설계에서 측정된 혼합물의 물성은 <표 3-1>과 같다.



<그림 3-1> 골재의 합성입도



<표 3-1> 아스팔트 함량별 기초 물성 측정 결과

AP함량 (%)	밀도 (ton/m <sup>3</sup> )	안정도 (N)	흐름값 (0.1mm)	포화도 (%)	간극율 (%)	공극율 (%)
4.2	2.346	8365	26	59.08	17.7	4.8
4.6	2.383	10457	28	68.08	16.7	4.2
5.0	2.414	12251	30	76.3	16.4	3.9
5.4	2.44	12745	35	82.76	16.55	3.5
5.8	2.487	7245	41	93.2	17.32	2.8

배합설계를 통해 최적 아스팔트 함량을 5.0%로 결정하였으며, 중은 폴리머 개질 아스팔트 제조를 위해 폴리머와 왁스 그리고 기타 첨가제로 이루어진 중은 폴리머 개질제를 제조 하였으며, 첨가량에 따른 특성을 살펴보기 위해 스트레이트 아스팔트 중량의 4.5%를 첨가한 것(K-1)과 5.2%를 첨가한 것(K-2)으로 실험을 수행 하였다. 비교 실험을 위해 SBS를 주재료 로 한 PMA 아스팔트를 검토 하였다.

#### IV. 실험결과 및 분석

##### 1. 아스팔트 혼합물 실험 결과 및 분석

중은 폴리머 개질 아스팔트의 공용성능을 평가하기 위해 앞서 수행한 배합설계에 따라 마샬 공시체를 제작하여 아스팔트 혼합물의 공용 특성을 평가할 수 있는 다양한 실험을 수행하였다. 시료는 스트레이트 아스팔트 바인더(AC 60-80)를 사용한 일반 아스팔트 콘크리트와 중은 폴리머 개질 아스팔트는 개질제를 스트레이트 아스팔트 바인더 중량의 4.5% 첨가한 K-1, 5.2%를 첨가한 K-2 아스팔트를 검토 하였다. 그리고 개질제로서의 성능 비교를 위한 폴리머 개질 아스팔트는 국내외에서 많이 사용되고 있는 SBS(styrene butadiene styrene)를 주재료 로 하는 제품을 사용하였다. 제작 시료를 정리하면 <표 4-1>과 같다. 실험은 각각의 아스팔트 혼합물 별로 3개의 공시체를 1조로 하여 실시하였으며, 3개 공시체의 평균으로 결과 값을 나타내었다.

<표 4-1> 공시체 제작 조건

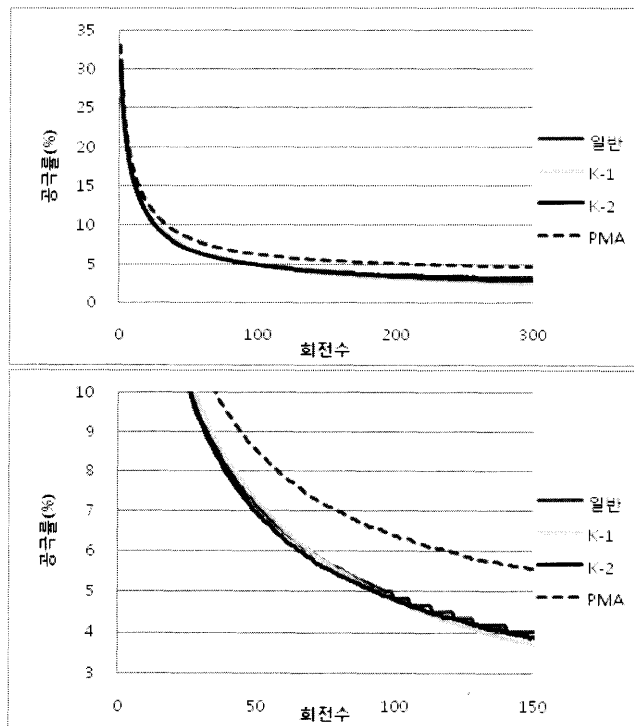
구분	AP함량	개질제	다짐온도
일 반(AC60-80)	5.0%	-	135℃
K-1	5.0%	4.5% of AP	130℃
K-2	5.0%	5.2% of AP	130℃
PMA	5.0%		145℃

1) 선회 다짐기 실험

슈퍼페이브의 선회다짐기(gyratory compactor)를 사용하여 각각의 혼합물의 다짐 효율을 측정하였다. 실험은 동일한 무게의 핫트러진 시료를 준비하여 선회다짐기에서 동일한 온도 135℃에서 다짐을 수행하였으며, 다져진 두께를 측정하여 밀도와 공극률을 계산하였다. 총 300회 회전하여 시료를 다짐하였다. 다짐온도 135℃는 앞서 수행한 점도 실험을 통해서 다짐 온도를 결정하는 아스팔트 바인더의 점도 범위인 250~310cP에 해당하는 온도로서 일반 아스팔트와 중온 폴리머 개질 아스팔트 그리고 PMA 아스팔트가 동일한 온도에서 시공 되었을 때를 비교하고자 하였다. 실험결과는 <그림 4-1>과 <표 4-2>와 같다. <그림 4-1> 상단의 그래프는 300회 회전 전체에 대한 공극률 변화 그래프이다. 점선으로 표시된 PMA 아스팔트 혼합물을 제외하고 K-1, K-2 로 구분된 중온 폴리머 개질 아스팔트와 일반 아스팔트 혼합물은 비슷한 다짐도를 나타내는 것을 알 수 있었다. 포설과 다짐 그리고 공용중의 공극률인 3~10%에 해당되는 부분을 확대한 것이 <그림 4-1> 하단의 그래프이다.

<표 4-2> 공극률 도달 회전수

공극률	회전수			
	일반	K-1	K-2	PMA
15%	11	11	11	14
6%	69	70	66	120
4%	141	132	141	300이상



<그림 4-1> 회전수에 따른 혼합물의 공극률 변화 곡선

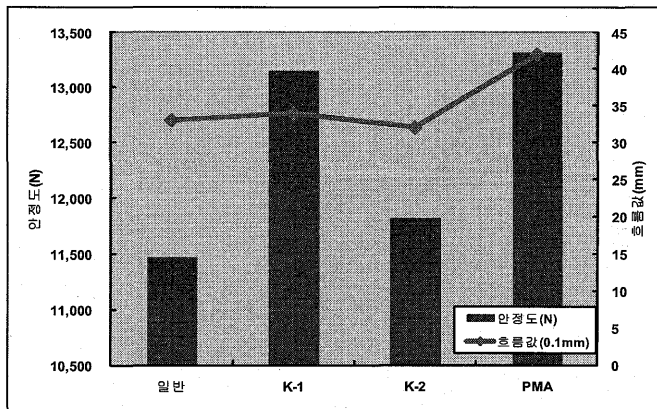
<표 4-2>에서 공극률 15%는 아스팔트 피니셔에서 포설 되었을 때의 공극률을 나타내며, 공극률 6%는 다짐 작업의 완료 후의 목표 공극률이다. 4%는 공용 후 차량 통행에 따른 공극률이 감소하였을 경우이다. <표 4-2>에 나타난 것과 같이 중온 폴리머 개질 아스팔트의 경우 K-1과 K-2가 공극률 15%에 도달 하는데 필요한 회전수가 11회이며, 공극률 6% 도달 횟수에서도 일반이 69회, K-1이 70회, K-2는 66회로 비슷한 값을 나타냈으나 PMA의 경우는 6% 도달 회전수가 120회로 약 2배의 회전수가 필요한 것으로 나타났다. 이 결과를 살펴보면 K-팔트의 경우 K-1과 K-2 모두 일반스트레이트 아스팔트를 사용하였을 경우와 동일한 온도에서 다짐했을 때 비슷한 수준의 다짐 효율을 얻을 수 있는 것으로 판단되었다. PMA의 경우는 더 높은 온도에서 다짐을 해야 하는 것으로 나타났다.

2) 마찰 안정도 실험

마찰 안정도 실험은 오랜 기간 동안 배합 설계과정에서 경험과 데이터가 축적되었기 때문에 아스팔트의 기초적인 상태를 평가하기 위해 수행하였다. 마찰 안정도 실험 결과는 다음 <표 4-3>과 같으며 도식화 하면 <그림 4-2>와 같다. 실험 결과에 의하면 일반 아스팔트와 K-1, K-2 아스팔트 혼합물이 모두 기준치인 안정도 7,500N, 흐름값 20~40을 만족하였으나 PMA의 경우 흐름값이 다소 높게 나타났는데, 이는 개질 아스팔트의 경우 높은 점도로 인해 파괴시 변형이 크기 때문이다. 마찰 안정도의 경우 일반(AC 60-80) 아스팔트 혼합물에 비해 두 종류의 중온 폴리머 개질 아스팔트(K-1, K-2)와 PMA 아스팔트 혼합물이 높은 값을 나타냈으며, 이 중 K-1과 PMA 아스팔트 혼합물이 각각 일반 아스팔트 혼합물과 비교하여 15%와 16% 증가한 값을 나타냈다.

<표 4-3> 마찰 안정도 실험 결과

	일반	K-1	K-2	PMA
안정도	11,463	13,144	11,818	13,318
흐름값	33	34	32	40



<그림 4-2> 마찰안정도와 흐름값

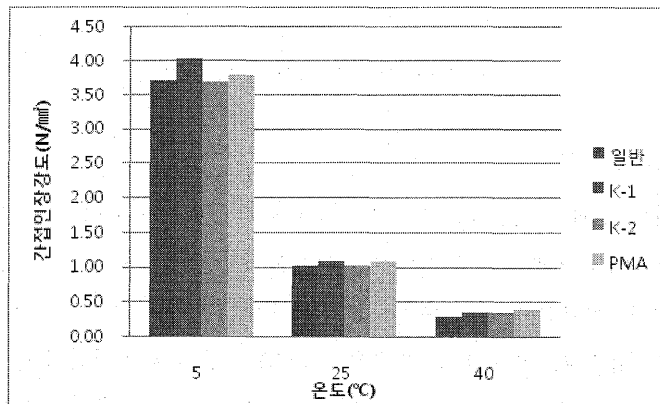
3) 간접인장강도 실험

아스팔트 혼합물의 균열 저항성 평가를 위해 5℃, 25℃, 40℃에서 간접 인장 강도 실험을 수행하였다. 시료는 각각의 혼합물과 실험 온도별로 3개씩 제작하여 실험하고 평균으로 결과를 정리하였다. 실험 결과는 <표 4-4>와 <그림 4-3>과 같다.

<그림 4-3>을 보면 중온 폴리머 개질 아스팔트 혼합물과 PMA 아스팔트 혼합물이 일반 아스팔트 혼합물에 비해 모든 온도 영역에서 높은 간접인장강도를 나타내어, 균열 저항성이 개선된 것으로 판단되었다. 이는 폴리머가 아스팔트 바인더에 첨가됨으로써 성능이 개선된 것으로 볼 수 있다. K-1 아스팔트 혼합물의 경우 고온(40℃)에서는 PMA 아스팔트 혼합물의 간접인장강도의 87.8%인 0.36N/mm<sup>2</sup>을 나타냈으나, 저온(5℃)에서는 PMA 아스팔트 혼합물의 106.6%인 4.03N/mm<sup>2</sup>을 나타내어 실험한 아스팔트 혼합물 중 가장 높은 간접 인장 강도를 나타내어 저온에서의 균열 저항성이 우수할 것으로 판단된다.

<표 4-4> 간접인장강도 실험 결과

종류 온도	일반		K-1		K-2		PMA	
	ITS (N/mm <sup>2</sup> )	변위 (mm)	ITS (N/mm <sup>2</sup> )	변위 (mm)	ITS (N/mm <sup>2</sup> )	변위 (mm)	ITS (N/mm <sup>2</sup> )	변위 (mm)
5℃	3.92	1.10	4.00	1.01	3.83	1.19	4.05	1.31
	3.96	1.08	4.21	1.05	3.61	1.14	3.60	1.08
	3.25	1.17	3.88	1.19	3.62	1.15	3.69	1.48
AVE.	3.71	1.09	4.03	1.08	3.69	1.16	3.78	1.29
25℃	1.01	1.51	1.05	1.20	0.99	1.40	1.08	1.92
	0.98	1.60	1.06	1.30	1.09	1.07	1.09	2.00
	1.08	1.54	1.11	1.03	0.97	1.69	1.05	2.06
AVE.	1.02	1.55	1.07	1.18	1.02	1.39	1.07	1.99
40℃	0.31	1.13	0.37	1.03	0.33	1.03	0.40	1.61
	0.31	0.95	0.37	1.00	0.37	1.04	0.40	1.64
	0.29	0.97	0.35	0.99	0.36	0.88	0.42	1.89
AVE.	0.30	1.02	0.36	1.01	0.35	0.98	0.41	1.71



<그림 4-3> 온도별 간접인장강도

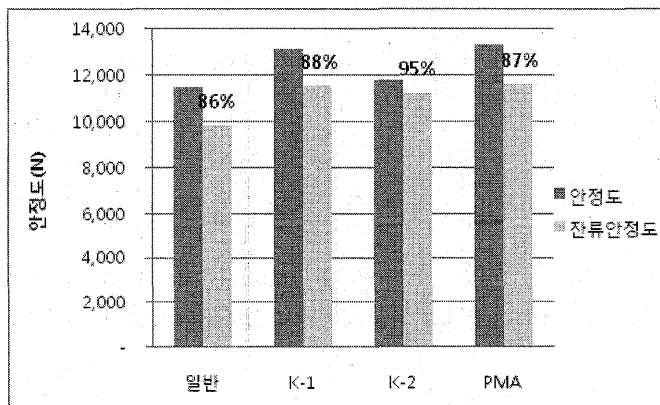
4) 수분민감성

(1) 잔류안정도

현재 국내에서 아스팔트 혼합물의 수분 민감성을 평가하는 가장 일반적인 방법은 KS F 2349의 잔류 안정도이다. KS 규정에서는 수분에 의한 영향을 고려하는 포장의 경우 잔류안정도 75% 이상을 요구하고 있다. 실험 결과는 <표 4-5>과 <그림 4-4>과 같다. 실험 결과 모든 아스팔트 혼합물이 잔류안정도 85%이상의 높은 값을 나타내 기준을 만족하였다. K-2 아스팔트 혼합물의 경우 잔류안정도가 95%로 매우 높지만 상대적으로 처리전의 안정도가 작기 때문인 것으로 보인다.

<표 4-5> 잔류 안정도 실험 결과

구 분	일반	K-1	K-2	PMA
처리전 안정도	11,463	13,144	11,818	13,318
처리후 안정도	9,832	11,566	11,218	11,587
잔류안정도 (%)	86	88	95	87



<그림 4-4> 잔류 안정도 실험 결과

(2) 수정 로트만 실험

수정 로트만 실험의 결과는 <표 4-6>과 같다. 국내에는 아직까지 간접인장강도비에 대한 기준은 없으나 현재 KS F 2349에서 간접인장강도비 0.7 이상으로 수분 민감성을 평가하는 기준이 검토되고 있다. 실험결과 일반 아스팔트 혼합물이 TSR 0.67로 가장 낮은 값을 나타냈으며, 나머지 개질 아스팔트인 K-1, K-2 그리고 PMA 아스팔트 혼합물의 경우 모두 0.7 이상의 값을 나타냈다. K-1의 경우 0.83으로 가장 높은 TSR 값을 나타냈으며 이는 일반 아스팔트 혼합물에 비해 124%의 값으로 수분으로 인한 파손에 대해 우수한 저항성을 나타낼 것

으로 예상된다.

<표 4-6> 수정 로트만 실험 결과

종류 온도	일반		K-1		K-2		PMA	
	ITS (N/mm <sup>2</sup> )	변위 (mm)	ITS (N/mm <sup>2</sup> )	변위 (mm)	ITS (N/mm <sup>2</sup> )	변위 (mm)	ITS (N/mm <sup>2</sup> )	변위 (mm)
25℃	1.01	1.51	1.05	1.20	0.99	1.40	1.08	1.92
	0.98	1.60	1.06	1.30	1.09	1.07	1.09	2.00
	1.08	1.54	1.11	1.03	0.97	1.69	1.05	2.06
AVE.	1.02	1.55	1.07	1.18	1.02	1.39	1.07	1.99
25℃ (처리후)	0.60	1.48	0.86	1.48	0.82	1.26	0.89	2.17
	0.64	1.92	0.83	1.31	0.90	1.13	0.73	1.91
	0.82	1.86	0.99	1.71	0.66	1.46	0.80	2.27
AVE.	0.69	1.75	0.89	1.50	0.79	1.28	0.81	2.12
TSR	0.67		0.83		0.78		0.75	

5) 동적 안정도

아스팔트 혼합물의 소성 변형 저항성을 평가하기 위해 널리 사용되고 있는 동적 안정도 실험을 수행하여 중온 폴리머 개질 아스팔트의 소성변형 저항성을 평가하였다. 실험군은 스트레이트 아스팔트를 사용한 밀입도 20 일반 아스팔트 혼합물과 중온 폴리머 개질 아스팔트 (K-1, K-2) 혼합물, 그리고 PMA 아스팔트 혼합물을 비교 실험하였다. 실험 결과는 <표 4-7> 과 같다.

소성변형 저항성을 평가할 수 있는 동적 안정도의 경우 PMA 아스팔트 혼합물이 6221회/mm로 소성변형 저항성이 우수한 것으로 나타났으며, 중온 폴리머 개질 아스팔트 혼합물도 비교적 우수한 동적안정도를 나타냈다. K-1 혼합물의 경우 일반 아스팔트 혼합물에 비해 3.4배, K-2 혼합물의 경우는 3.1배의 동적안정도 증가를 보였다. 이러한 값들은 건설교통부의 아스팔트 포장의 소성변형 저감지침(2005)에서 소성 변형이 우려되는 구간에 요구하는 동적안정도 3000회/mm를 상회하는 값으로 소성변형 저항성이 우수한 것으로 판단된다.

<표 4-7> 휠트래킹 실험결과

종류	동적안정도(DS) 회/mm	최종침하깊이 (mm)
일반	1501	3.12
K-1	5120	2.19
K-2	4623	2.63
PMA	6221	0.69

## V. 결 론

도로포장 재료에도 친환경적 부분이 중요시되는 시점에서 기존 폴리머 개질아스팔트(PMA)의 단점인 높은 혼합온도(mixing temperature)와 다짐온도(compact temperature)로 인한 가열 연료의 소비와 CO<sub>2</sub> 등의 유해가스의 발생이 증가하고 있다. 또한, 높은 온도에서 다짐을 수행하여야 하기 때문에 발생하는 시공 관리의 어려움 및 교통개방의 지연 등의 문제를 해결하기 위한 방안으로 중온 아스팔트(warm mix asphalt) 기술을 접목한 중온 폴리머 개질 아스팔트 혼합물의 공용 성능을 평가 하였다.

중온 폴리머 개질제의 최적 첨가량을 확인하기 위해 스트레이트 아스팔트 중량의 4.5% 첨가한 것(K-1)과 5.2% 첨가한 것(K-2)으로 실험을 실시하였으며, 일반 아스팔트와 PMA 아스팔트와 비교 실험을 수행하였다. 선회다짐기를 사용한 135℃에서의 다짐 효율 실험결과 중온 폴리머 개질 혼합물이 폴리머가 사용되었음에도 불구하고 스트레이트 아스팔트를 사용한 일반아스팔트 혼합물과 유사한 정도의 다짐 효율을 나타내었다.

마찰 안정도 및 간접인장강도 실험결과 중온 폴리머 개질 아스팔트 혼합물이 일반 아스팔트 혼합물보다 높은 안정도와 간접인장강도를 가지며, 폴리머 개질 아스팔트 혼합물과 비슷한 수준의 공용성능을 나타내는 것을 알 수 있었다. 저온에서의 간접인장강도 결과에서도 폴리머 및 기타 첨가제의 영향으로 저온 균열 저항성이 우수한 것으로 나타났다. 중온 폴리머 개질제의 첨가량은 5.2%보다 4.5%가 높은 마찰안정도와 간접인장강도를 나타내었다.

수분 민감성을 평가하기 위한 잔류안정도 실험과 수정로트만 실험을 통한 잔류인장강도 실험 결과 K-1 아스팔트 혼합물이 잔류안정도 88%, 잔류인장강도 0.83으로 폴리머 개질 아스팔트(PMA)의 잔류안정도 87%, 잔류인장강도 0.75에 비해서 높은 값을 나타내 수분민감성이 우수할 것으로 평가되었다. 소성변형 저항성을 평가하기 위한 휠 트래킹 실험 결과 K-1 아스팔트 혼합물의 동적안정도가 일반 아스팔트 혼합물의 1501회/mm의 3.4배가 넘는 5120회/mm로 측정되어 소성변형 저항성이 향상되었음을 알 수 있었다.

연구 결과 중온 개질 첨가제의 적정 첨가량은 4.5%로 판단되며, 중온 개질 첨가제를 사용한 중온 폴리머 개질 아스팔트는 일반 아스팔트 혼합물과 비슷한 생산 및 시공온도를 확보하며 공용성능 면에서는 일반 아스팔트 혼합물 보다 우수하고, 기존의 폴리머 개질 아스팔트와 유사한 수준인 것으로 나타났다. 중온 폴리머 개질 아스팔트 기술은 개질 아스팔트의 성능을 유지하면서 일반 가열 아스팔트 수준의 혼합 및 다짐온도를 나타내는 것으로 나타나 현장 적용시 환경 유해 요소의 발생 억제 및 시공 관리의 편리성을 얻을 수 있을 것으로 판단되었다.

## [참 고 문 헌]

1. 황성도, “중온화 아스팔트 포장의 국내외 기술 현황”, 한국도로학회지, 2008.
2. 국토해양부, 『장수명 · 친환경 도로포장 재료 및 설계시공기술 개발 연구보고서』, 2008.
3. 박희문, 김부일, 김제원, 엄병식, 최지영, 안덕순, 이현종, 김지원, “고내구성 교면포장 기술 개발 연구(4차년도)”, 한국건설기술연구원, 2005.
4. 건설교통부, 『가열 아스팔트 혼합물 배합설계 지침』, 2005.
5. 건설교통부, 『아스팔트 포장의 소성변형 저감지침』, 2005.
6. Graham C. Hurley and Brian D. Prowell, "Evaluation of Sasobit for Use in Warm Mix Asphalt", National Center for Asphalt Technology, 2005.
7. Freddy L. Roberts, Prithvi S., Kandhal, E., Ray Brown, Dah-Yinn Lee, and Thomas W. Kennedy, 『Hot mix asphalt materials, mixture design, and construction』, 1996.

논문접수일 : 2010년 3월 28일

심사의뢰일 : 2010년 3월 30일

심사완료일 : 2010년 6월 1일