



특정 개질아스팔트 혼합물의 노화, 균열 및 변형 특성

Aging, Cracking and Deformation Characteristics of Selected Polymer-modified Asphalt Concretes

이 학 일*
Lee, Hak I.

김 현 환**
Kim, Hyun H.

박 남 원***
Park, Nam Won

김 광 우****
Kim, Kwang W.

Abstract

The polymers, low-density polyethylene (LDPE) and styrene-butadiene-styrene(SBS) -modified asphalt mixtures are advanced asphalt pavement materials in which 3 ~ 6% of them, and/or some other additive, by weight of total binder are added. The purpose of modifying asphalt material is to improve typical weakness such as rutting and cracking resistance of normal asphalt mixtures. These materials have been proved to show many advantages and practical applicability in the plant and field. Wet processed PMA binder and/or dry processed asphalt mixtures are developed as field products for many years. The objective of this paper is to show the characteristics of the LDPE and SBS-modified asphalt mixtures by comprehensive evaluation and comparison with those of normal asphalt mixtures.

Keywords : asphalt, LDPE, SBS, rutting, cracking, tensile strength, reflection crack, lime

요 지

Low-density polyethylene (LDPE)와 Styrene-butadiene-styrene (SBS)를 넣은 개질 아스팔트 혼합물은 바인더에 중량 비로 3~6% 첨가하여 여러 가지 특성을 획기적으로 향상시킨 아스팔트 재료이다. 아스팔트 재료의 개질목적은 일반 혼합물의 균열저항과 소성 변형과 같은 전형적인 약점을 향상시키기 위해서 이다. 이 재료들은 많은 장점들을 가지고 있으며 플랜트 적용이 간편하고 현장적용성이 우수한 특징을 가지고 있다. 여러 해 동안의 경험을 통해 습식 개질 아스팔트와 건식 아스팔트 혼합물이 현장에서 실용화할 수 있게 발전되었다. 본 연구에서는 이를 종합적으로 평가하여 그 장단점을 일반 아스팔트 혼합물과 비교 평가하여 LDPE, SBS 개질 아스팔트 혼합물의 특성을 체계적으로 밝히는 것을 본 연구의 목적으로 한다.

핵심용어 : 아스팔트, LDPE, SBS, 소성변형, 균열, 인장강도, 반사균열, 소석회

* 정회원 · 강원대학교 지역건설공학과 석사과정
** 정회원 · 강원대학교 지역건설공학과 석사과정
*** 정회원 · 강원대학교 지역건설공학과 석사과정
**** 정회원 · 강원대학교 지역건설 · 생물산업공학부 교수



1. 서론

아스팔트 콘크리트는 노령 경화(age hardening) 되거나 저온에서 고체화 되며 유리화 온도(glass transition temperature) 이하에서는 교통 하중, 충격이나 포장체 자체의 과다 수축으로 인해 균열이 발생한다. 전자를 취성 균열 (brittle crack), 후자를 저온 균열 (thermal crack)이라한다. 또한 정밀 분석을 통해 보면 골재를 에워싸고 있는 아스팔트 바인더와 골재 간의 시차열 수축 (differential thermal contraction)에 의해 약 -25°C 전후에서 아스팔트 피막이 자체적으로 갈라져 마이크로 균열이 발생한다(El Hussein et al 1998, Kim and El Hussein 1995, 1997, Kim et al 2003).

저온에서 탄성, 상온에서는 점탄성 거동을 하던 아스팔트 콘크리트는 결합재의 감온성 때문에 온도가 높아지면 연화되며 준 소성거동(semi-plastic behavior)을 한다. 이로 인해 주행 노면에 궤적을 따라 골이 패이듯 소성변형(rutting)과 신호대기 지역에 주름변형 (corrugation) 등의 영구변형(permanent deformation)이 발생하게 된다. 이러한 고온 손상은 저온 손상과 함께 아스팔트의 감온성에 기인하며 이를 방지하기 위해서 폴리머재료의 첨가가 효과를 보고 있다. 비극성 포화 탄화수소에서 극성 고분자 방향족 고리에 이르는 매우 복잡한 혼합물질인 아스팔트의 감온성을 줄여 고온에서도 강성을 유지하며 저온에서는 취성거동이 최소화되도록 하는 것이다. 여기에 사용되는 폴리머는 다양하지만 국내에서는 대개 저밀도 폴리에틸렌 (low-density polyethylene: LDPE), SBS (styrene-butadiene-styrene), SBR (styrene-butadiene-rubber) 등이 사용된다.

이중 본 연구에서는 고온에서 감온성 저하는 물론 저온에서의 감온성 저하로 아스팔트 콘크리트의 소성변형저항성 및 파괴인성을 크게 향상시키기 위해 국내에서 많이 사용되는 LDPE와 SBS 개질아스팔트의 특성을 그간의 여러 연구를 통해 비교 고찰하였다. 이를 통해 국내 개질 아스팔트혼합물이 일반 아스팔트 혼합물과 비교하여 어떠한 장단점을

가지는지를 체계적으로 구명·제시하여 활용에 도움을 주고자 하는 것이 본 연구의 목적이다.

2. 재료 및 방법

2.1 재료

저밀도 폴리에틸렌 (LDPE)은 1933년 영국에서 발견된 에틸렌 중합체(polyethylene)중 밀도가 약 0.91 - 0.93 정도인 semi-crystalline polymer이다. 이는 우수한 열접착성과 내한성으로 -50°C 에서도 거의 연성을 잃지 않는다. 일단 용융상태에서는 점도에 큰 변화가 없어 가공과 성형성이 좋아 화학적 안정성과 높은 인장력을 가지는 5대 범용수지(LDPE, HDPE, PVC, PP, PS) 중 하나로 주로 비닐의 원료로 많이 쓰이며 아스팔트 개질시 인장력 향상에 크게 도움을 준다(Hoare and Hesp 2000). 폴리에틸렌의 화학 구조는 Fig. 1과 같다. 상용화된 LDPE는 결정체의 작은 알맹이로 이를 더 잘게 부수어 사용한다.

한편 SBS는 "Triblock"copolymers라고도 하며 styrene-butadiene-styrene으로 알려져 있고 이는 각각의 끝 부분에 Polystyrene 시퀀스 (또는 블록)와 중앙에 isoprene 시퀀스로 이루어져있다(Fig. 2). 인접 사슬(chain)의 polystyrene 끝 블록들은 작은 도메인에 모여 있어서 폴리스티렌 클러스터는 폴리부타디엔 매트릭스에 분산되어있다. 이는 산업용 열가소성 탄성중합체 (thermoplastic elastomer)로서 아스팔트 개질제 외에 타이어, 다층 루핑이나 방수 멤브레인 제조 등에 사용되는 등 용도가 다양하다.

SBS는 주로 premix type으로 아스팔트에 미리 섞어서 폴리머 개질아스팔트 (polymer-modified asphalt: PMA)로 사용한다. LDPE를 아스팔트에 사용하기 위해서는 크게 두 가지 방법이 사용된다. 한 가지는 SBS와 마찬가지로 아스팔트에 미리 섞어 premix 형태의 PMA로 사용하는 것이다. 이때 PE 입자가 고르게 아스팔트 내에 분산되어 상 분

리를 방지하고 저장성이 좋게 하기 위해서 종종 분산제 (dispersant)가 사용된다. 두 번째는 LDPE를 곱게 부셔서 파우더 형태로 만들어 가열된 골재가 바인더와 섞일 때 믹서에 넣어 사용하는 것이다. 이때도 LDPE가 잘 분산되어 가공온도를 낮출 수 있도록 분산제를 넣을 수 있다(Shenoy 2000). 전자를 습식방법이라 하며 두 폴리머 모두 특정 상표로 상용화된 것이 있고 후자는 건식방법으로 LDPE에 대해 상용으로 개발된 것이 있다(특허청 2004).

폴리에틸렌 구조

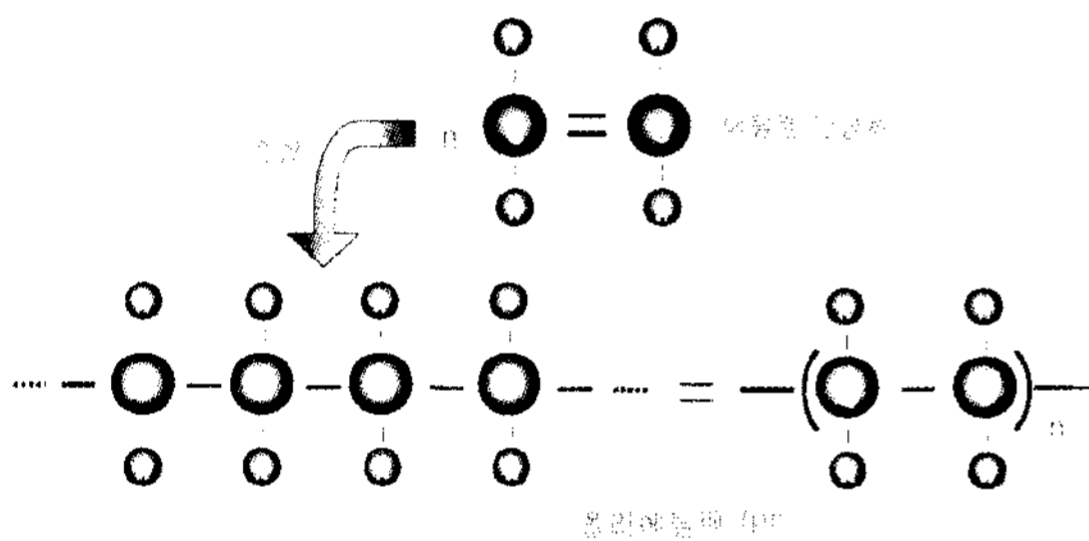


Fig. 1. Description of PE structure

Styrene butadiene styrene copolymer (SBS) 구조

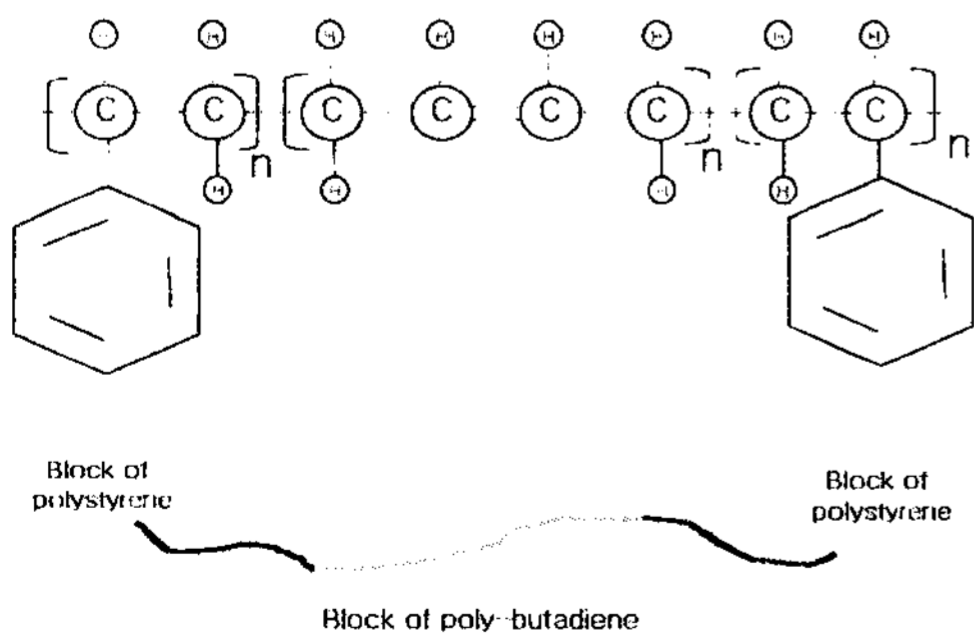


Fig. 2. Description of SBS structure

LDPE 폴리머의 성질은 Table 1과 같다. 본 연구에서는 LDPE를 #30체에 대부분 통과하고 50번체에 대부분 남도록 곱게 부수어 건식방법으로 아

스팔트에 사용한 것들을 주로 고찰하였다(김광우 1996, 김광우등 1996, 권승준 1999). 하지만 바인더의 특성(점도, PG등급 등) 측정을 위해서는 소요량을 가열된 아스팔트에 조금씩 서서히 넣으며 고속전단믹서 (homogenizer)을 이용하여 6,000rpm으로 약 30분간 혼합한 습식 샘플을 사용하였다.

Table 1. LDPE Property

Polymer	Volatility (%)	Density (g/cm ³)	Color	Tensile strength (MPa)	Extendability (%)
LDPE	0.62	0.93	white	23	1,020
SBS	0.018	0.967	white	-	-

개질 아스팔트 혼합물은 일반 아스팔트 혼합물의 배합설계 방식과 마찬가지로 마샬 배합설계 방법을 통해 제조하였다. SBS나 LDPE 양은 전체 중량비로 3-6%가 사용되며 필요에 따라 양을 조정하여 첨가한다. LDPE 첨가방법은 건식혼합이며 이 경우에도 LDPE를 바인더 량에 포함시켜 계산하였다. SBS는 함량별로 실험 시에는 실험실에서 제조하여 사용하고 혼합물에서는 대부분 상용화된 SBS PG76-22(약칭 SPG76)를 사용하였다. 비교용으로 제조된 AP3, AP5도 같은 방법으로 제조되었다.

사용된 골재는 편마암과 화강암이며 최대치수 13mm, 19mm가 사용되었고 잔골재로는 해당골재의 Screenings를, 채움재로는 석회석분을 사용하였다. 개질 밀 입도 아스팔트 혼합물은 건교부의 밀 입도 분포규정에 맞는 13mm 및 19mm 골재를 사용하여 배합설계를 통해 제조한 각종 특성을 고찰하였다.

2.2. 방법

2.2.1 노화 시험

PMA는 아스팔트의 stiffness 증대를 가져와 고온변형에 강하도록 하는 것이 중요 기능 중 하나이다. 하지만 일부 PMA는 소성변형에는 강하나 공용중 시간이 경과하면서 아스팔트가 노령 경화



되어 깨어지므로 균열이 발생하는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 아스팔트 바인더와 혼합물의 노화 특성을 파악하기 위하여 바인더와 아스팔트 혼합물을 각각 인공노화 처리하고 이를 gel-permeation chromatograph (GPC)를 이용하여 분석하였다.

PMA 특성은 폴리머를 아스팔트에 함량별로 첨가하여 측정한 Table 2에서 보여주는 바와 같다. 바인더 침입도는 LDPE가 첨가되면서 AP5의 초기 침입도 65가 LDPE 4% 이상의 경우 20 이상 낮아졌으나 함량에 따라서는 큰 차이가 없었다. 반면 SBS는 함량별로 어느 정도 차이가 났다. 두 가지 점도는 모두 폴리머 함량에 따라 증가되는 경향을 보였다. 하지만 AP5+SBS에 비해 LDPE는 폴리머 함량이 높아도 절대점도가 크게 높아지지 않았고 게다가 동점도의 경우 SBS에 비해 훨씬 낮아 포설시 작업성에 유리함을 예측케 한다(Kim et al 1997).

도로 포장의 공용중의 노화 상태를 평가하기 위해 AP5 아스팔트를 LDPE와 SBS로 3가지 함량씩 첨가하여 PMA를 제조 후 Rolling thin film oven (RTFO)과 Pressure aging vessel (PAV)을 이용하여 표준방법으로 장기 노화처리 후 GPC를 이용해 노화에 따라 증가되는 대형분자비율 (LMS: large molecular size)을 측정하였다(Kim et al 1995, 2006). Fig. 3에서 보듯이 LMS는 한 GPC 커브를 13개로 나눈 slice 중 1부터 5번째 면적비율을 더한 값이다(Kim et al 1995).

Table 2. Fundamental properties of PMA

특성	함량 (%)	침입도 (0.1mm)	절대점도 (p, 60°C)	동점도 (cP, 135°C)
AP5+LDPE	0	65	1,856	432
	4	42	4,934	953
	5	41	5,620	1,143
	6	41	6,535	1,275
AP5+SBS	0	65	1,865	432
	3	50	5,496	932
	4	40	11,818	1,455
	5	36	11,807	1,680

바인더의 GPC 시험은 각각의 노화 처리 후 소량의 샘플을 무작위로 채취하여 이를 tetrahydrofuran (THF) 용액에 400배 (0.25%)로 희석하고 0.45mm의 주사기용 filter로 걸러낸 후 GPC 시험기에 주입하여 측정하였다. 한 번의 시험은 30분 걸리며 약 10분경부터 21분 사이에서 샘플이 검출된다.

아스팔트 혼합물은 플랜트에서 제조 시 가열에 의해, 고온의 골재와 비벼지면서 그리고 운반포설도중 뜨거운 상태에서 노화가 진행된다. 또한 도로에 포설되고 나서는 장기간 공용중에 서서히 노화가 진행된다. 전자를 단기노화(short-term aging), 후자를 장기노화(long-term aging)라 한다. 하지만 노화의 정도는 골재의 종류, 환경여건, 바인더의 종류에 따라 다르다. 따라서 이를 평가하기 위해 인공 노화시킨 혼합물을 THF에 녹인 후 샘플링하여 GPC를 이용하여 LMS를 측정하는 방법으로 노화정도를 추정하였다(Kim et al. 2006).

현장조건을 모사하기 위하여 아스팔트 혼합물은 비빈 후 2시간 동안 154°C의 환풍 오븐에 보관하며 단기 노화시켰다. 이렇게 단기 노화된 혼합물을 사용하여 공극률 4% 전후의 직경 10cm 공시체를 제조하였다. 그 후 이 공시체를 110°C 환풍 오븐에서 소정의 시간동안(24, 48, 72, 96시간) 장기노화 시켰으며 지정 시간마다 공시체를 무작위로 꺼내어 변형강도 시험 후 혼합물 샘플을 약 10g 씩 채취하여 GPC 시험으로 LMS를 측정하였다.(정재현 등 2007)

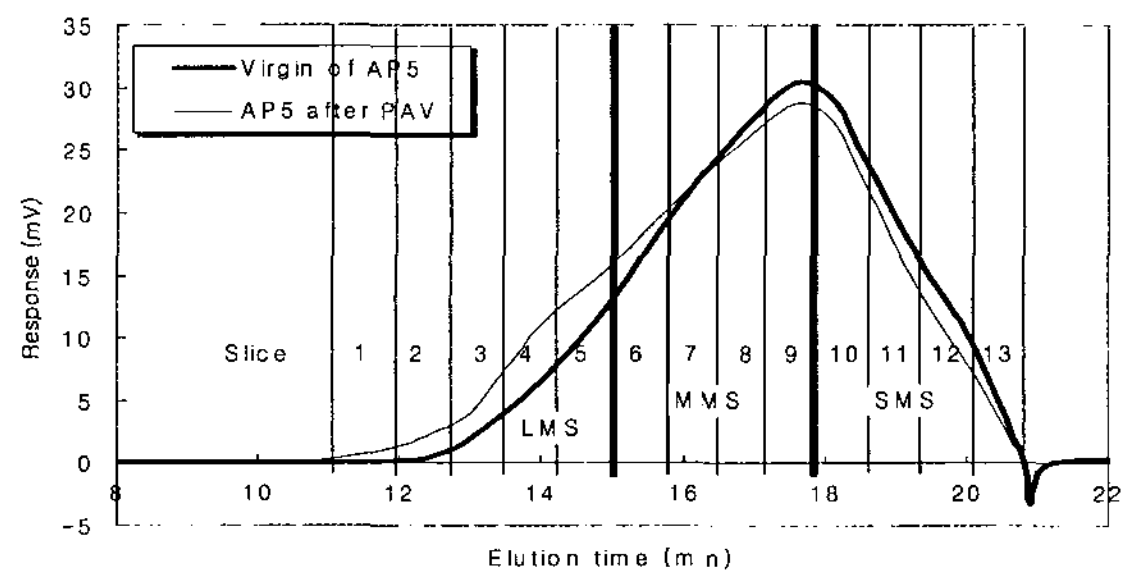


그림 3. GPC profiles and illustration of LMS, MMS (medium molecular size) and SMS (small molecular size)

2.2.2 인장강도시험

아스팔트 콘크리트의 인장강도는 혼합물이 운하중에 의해 야기되는 휨 인장에 저항하는 척도이며 이 값이 크면 포장 체의 균열 저항성이 크다(Kim 1988, 김광우 등 1998). 아스팔트 콘크리트의 인장강도는 간접인장강도(Indirect tensile strength: ITS)로 측정하며 온도는 25℃, 하중은 50mm/min의 속도로 Lottman loading head를 통해 가하였다. 공시체는 시험 전 25℃ 항온기에 2시간 이상 보관하여 내부까지 25℃가 되게 한 후 시험 직전 꺼내어 신속히 시험에 사용되었다.

국내 아스팔트 혼합물은 화강암계의 골재가 많아 박리현상으로 인한 손상이 많으며 따라서 동결융해 (freezing-thawing: F-T) 처리 후 인장강도의 유지비율이 낮은 경우가 많다. 이의 대책으로 외국에서는 혼합물 제조 시 각종 박리방지제 (Anti stripping agent: ASA)를 사용한다. 이에 비해 동결기 동결융해현상과 장마철 수분손상에 노출이 심한 국내에서는 아직 이에 대한 규정이 없지만 본 연구에서는 박리방지제로 소석회를 혼합물중량에 1%를 넣고 그 효과를 비교하여 효용성을 평가하였다.

F T처리는 공시체를 24시간 동안 -18℃ ~ 25℃로 1 사이클을 처리 후 꺼내어 60℃ 물에 22시간 수침시키는 것이다. 이어서 25℃ 물에 2시간 넣어서 공시체 온도가 25℃ 되게 한 후 꺼내어 불기를 닦고 ITS를 측정했다. 이렇게 하여 얻은 간접인장강도와 무 처리 공시체에 대한 간접인장강도의 유지비(Tensile strength ratio: TSR)는 식 (1)에 의해 구한다.

$$TSR = \frac{ITS_{wet}}{ITS_{dry}} \times 100(\%) \quad (1)$$

2.2.3 균열저항성 시험

아스팔트 포장체는 공용상태에서 운하중에 의한 휨 인장 균열, 하부 콘크리트의 균열이 덧씌운 표

층으로 올라오는 반사균열 및 저온균열 등이 발생한다. 본 연구에서는 이중에서 인장 균열과 반사균열 저항성에 대하여 고찰 하였다.

휨 균열 저항성은 마샬 타입 공시체에 25℃에서 Fig. 4와 같은 간접인장 피로시험 모드로 1.52kN (155kgf)의 수직 하중과 10N의 유지하중을 반복적으로 가하여 피로수명을 측정하였다. 여기서의 반복하중 수준 1.52kN은 무 개질 아스팔트 혼합물의 간접인장강도가 약 755kPa (7.7kgf/cm²)이므로 이 값의 20% 수준의 응력을 야기하는 값을 계산하여 정한 것이다. 하중 형식은 Fig. 5와 같이 1Hz로서 0.1초의 재하와 0.9초의 휴지기간을 반복하여 공시체가 10mm의 수직변형에 도달하거나 갑자기 깨지면 파괴되는 것으로 간주했다.

노후된 시멘트 콘크리트 포장위에 아스팔트 콘크리트로 덧씌우기를 했을 경우에 발생하는 반사균열은 크게 2가지로 나눌 수 있다. 하나는 수직하중에 의해 포장하단에 야기되는 휨 응력과 온도수축으로 발생하는 인장응력에 의해 야기되는 Mode I 균열이며, 다른 하나는 운하중의 이동으로 야기되는 전단응력에 의한 Mode II 균열이다.

각 개질재 혼합물별로 배합설계에서 결정된 최적 아스팔트 함량으로 슬래브 공시체를 제조하였다. 가로, 세로 높이 305×305×50mm의 슬래브 공시체를 롤러 콤팩터로 제조하여 이를 길이 방향으로 절단하여 필요한 크기의 보 공시체로 만들어 Mode I 및 Mode II 시험에 사용하였다.

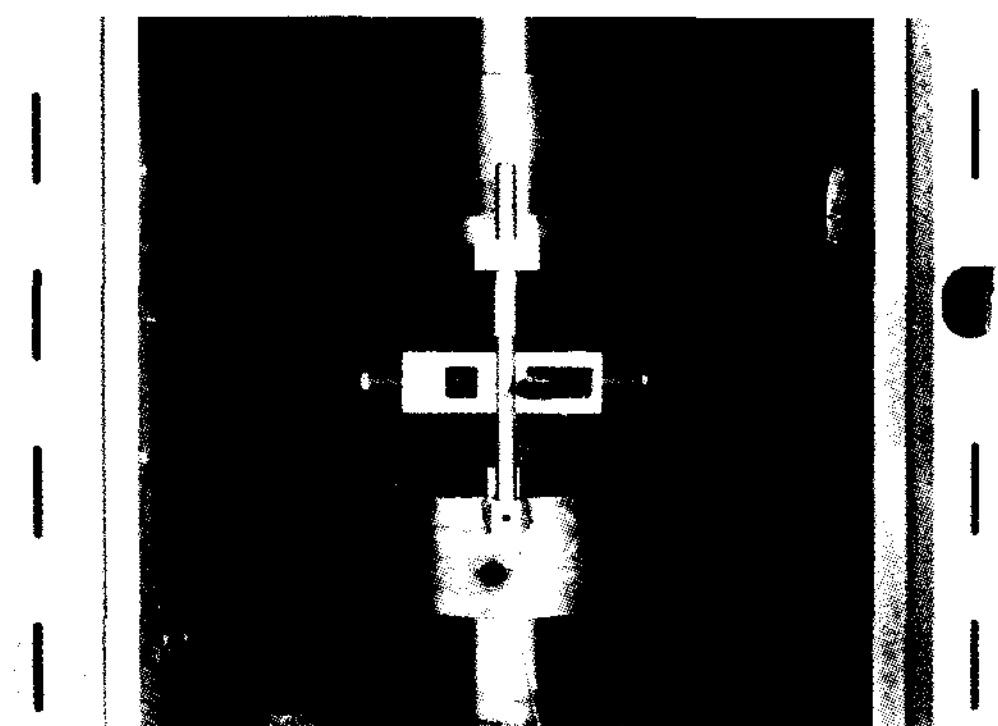


Fig. 4. Indirect tensile fatigue test setup

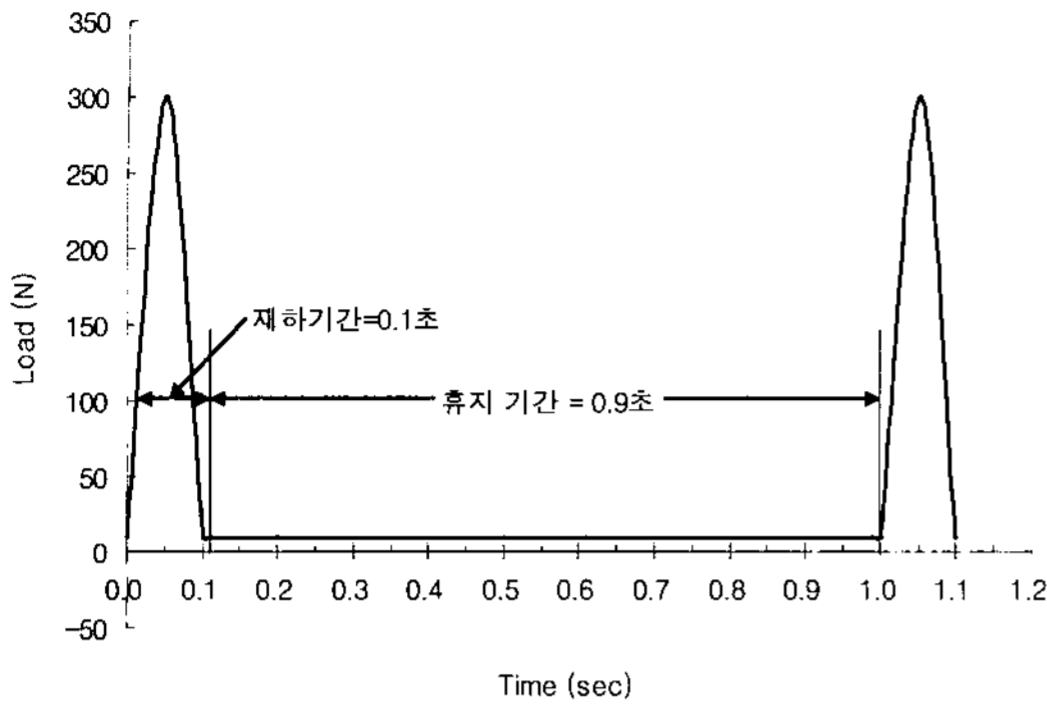


Fig. 5. Illustration of loading and rest period

① Mode I 반사균열 모사시험

콘크리트 포장의 줄눈 위에 아스팔트 포장 상태를 모사하기 위하여 두께 100mm, 폭 100mm, 길이 340mm의 콘크리트 블록 위에 아스팔트 보 공시체를 덧씌우기 형태로 부착하였다. 콘크리트에는 상면으로부터 1/3 깊이 까지 10mm폭의 초기균열을 주었으며, 10mm두께의 고무 패드를 바닥에 깔아 탄성지지를 모사 하였다. 주기적인 Haversquare 하중을 유압식 재료시험기(Instron 8516)를 이용하여 10Hz 속도로 아스팔트 보 공시체에 재하 하였다. 타이어와 포장 표면의 접촉 상태를 모사하기 위하여 얇은 고무 패드를 하중 판과 공시체 사이에 삽입하였다. 최대 하중은 3.45kN을 적용하여 타이어 압력 687kPa(7kgf/cm² 또는 100psi)이 발생토록 하고 최소하중 0.2kN을 유지하였다. 시험 온도는 25°C를 유지하며 챔버 내에서 수행하였다.

Mode I 시험에서 아스팔트 공시체의 수평변위는 보의 한 면에 설치된 Extensometer를 이용하여 하중의 반복횟수에 따라 측정하였다. 반사균열을 육안으로 용이하게 관찰하기 위하여 보의 한쪽 면을 백색 수성 페인트로 칠하였다. 수직균열이 아스팔트 보 공시체의 전체 높이에 도달할 때까지 시험을 수행하였으며 시험 과정에서 수평변위와 수직균열 진전은 누적하중 주기수로서 측정하였다. 각각의 혼합물에 대하여 두개의 공시체를 반복 시험하였으며 시험장비에 시험체를 설치한 모습은 Fig. 6과 같다.

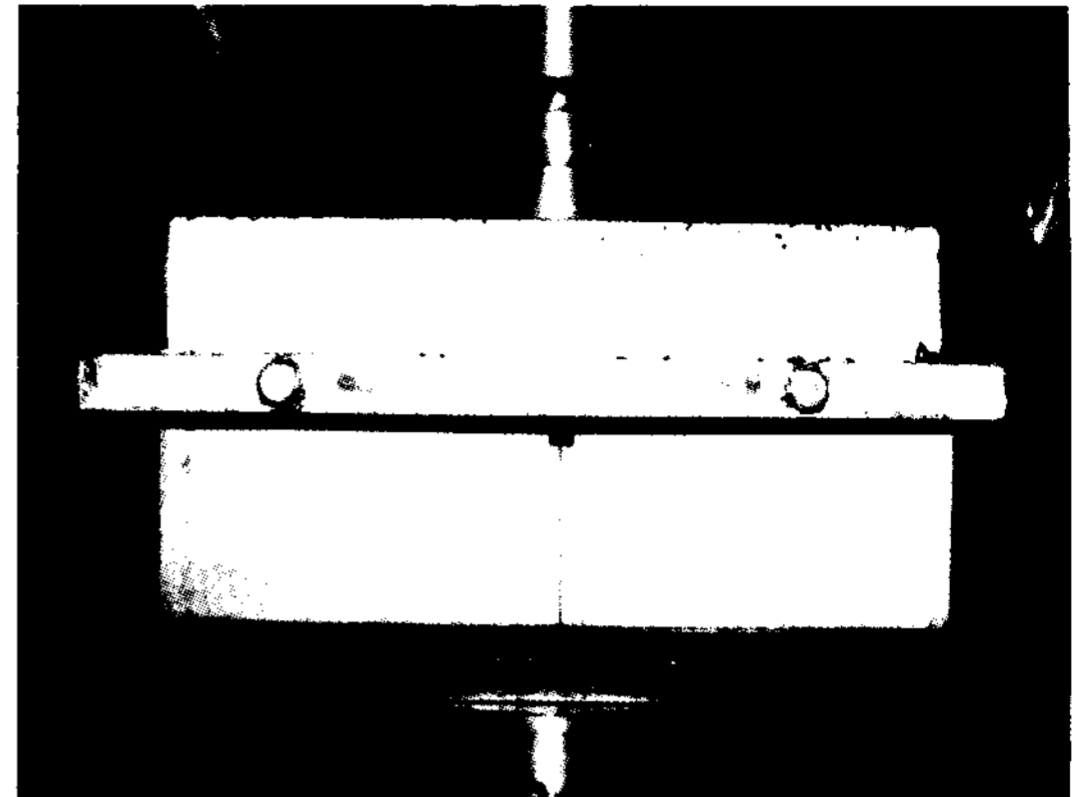


Fig. 6. Mode I test setup

② Mode II 반사균열 모사시험

전단 (Mode II) 반사균열 시험체는 PCC 포장의 줄눈 위에 덧씌우기 포장상태를 모사하기 위하여 Fig. 7과 같이 두께 30mm, 폭 80mm, 길이가 148mm인 두 개의 콘크리트 블록 중앙에 10mm의 간격을 두고 텍코팅으로 아스팔트 보 공시체와 부착하였다. 이 시험체를 실내에서 2일간 보관 후 시험 5시간 전에 25°C의 항온실에 넣었다가 같은 온도의 챔버 내에서 시험에 사용하였다.

콘크리트 하부의 탄성지지를 모사하기 위하여 10mm두께의 고무패드를 콘크리트 바닥에 깔았다. 시험 장치는 직경 200mm의 강재 바퀴가 200mm의 거리를 왕복하는 반복주행(Wheel tracking) 시험기를 이용하였으며 운하중은 1Hz의 속도로 687kPa 이 발생토록 재하 하였다. 아스팔트 보의 수평변위는 Demec guage를 이용하여 매 500cycle 마다 측정하였다. 수직균열 길이의 관찰을 용이하게 하기 위하여 보 공시체의 한 쪽 면을 흰색 페인트로 칠하여 하중 반복에 따른 수직방향 균열 성장을 500cycle 마다 육안으로 측정하였다. 실험은 수직균열이 공시체의 전체 높이에 도달할 때까지 수행하였다.

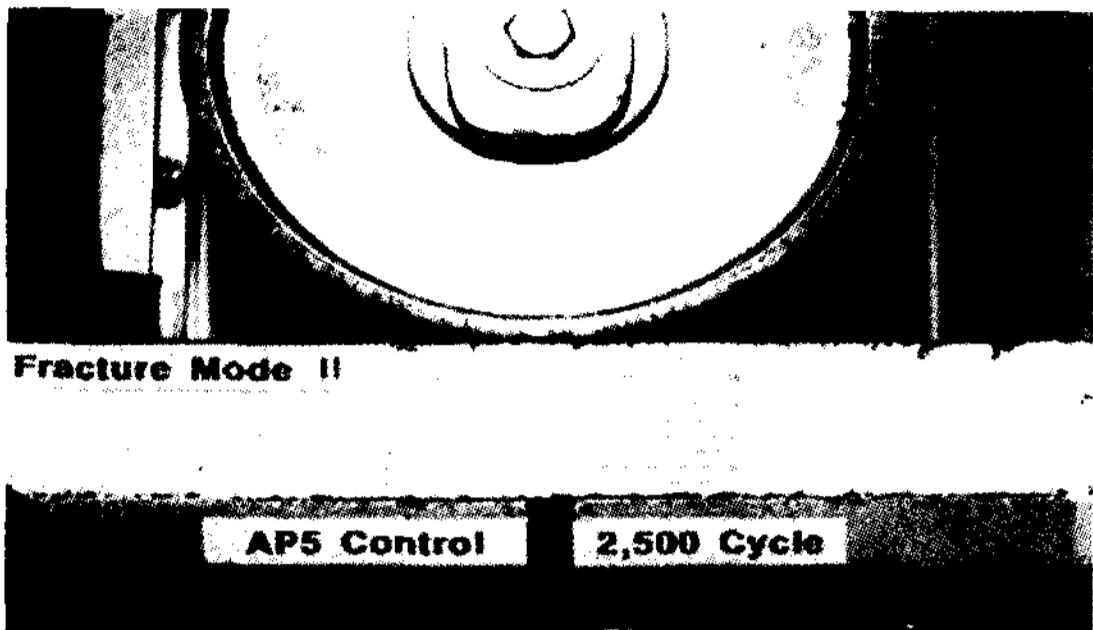


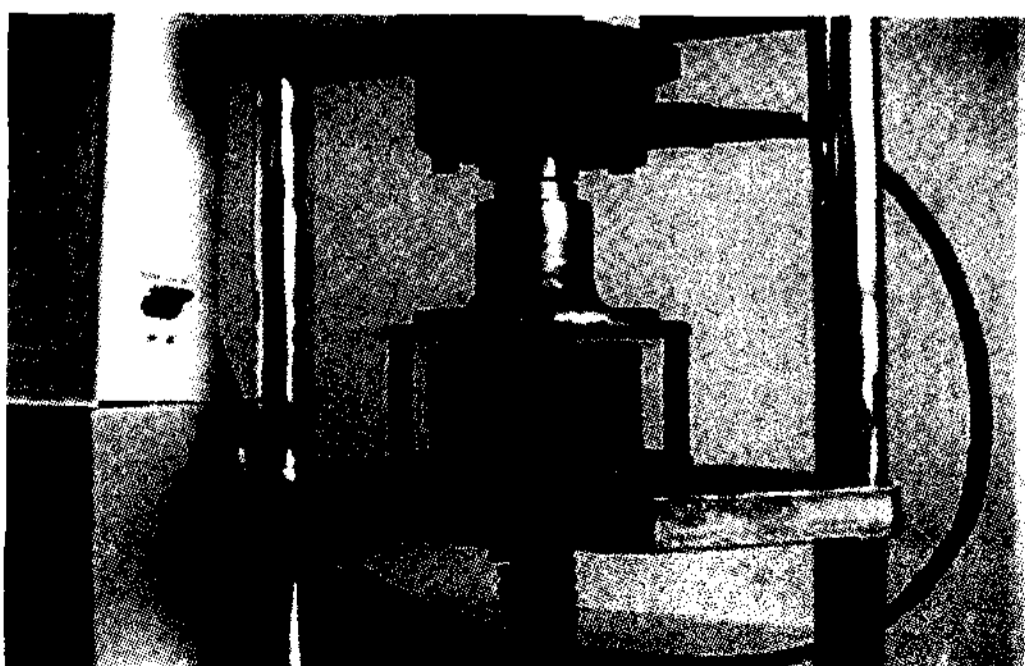
Fig. 7. Mode II test setup

2.2.4. 변형강도

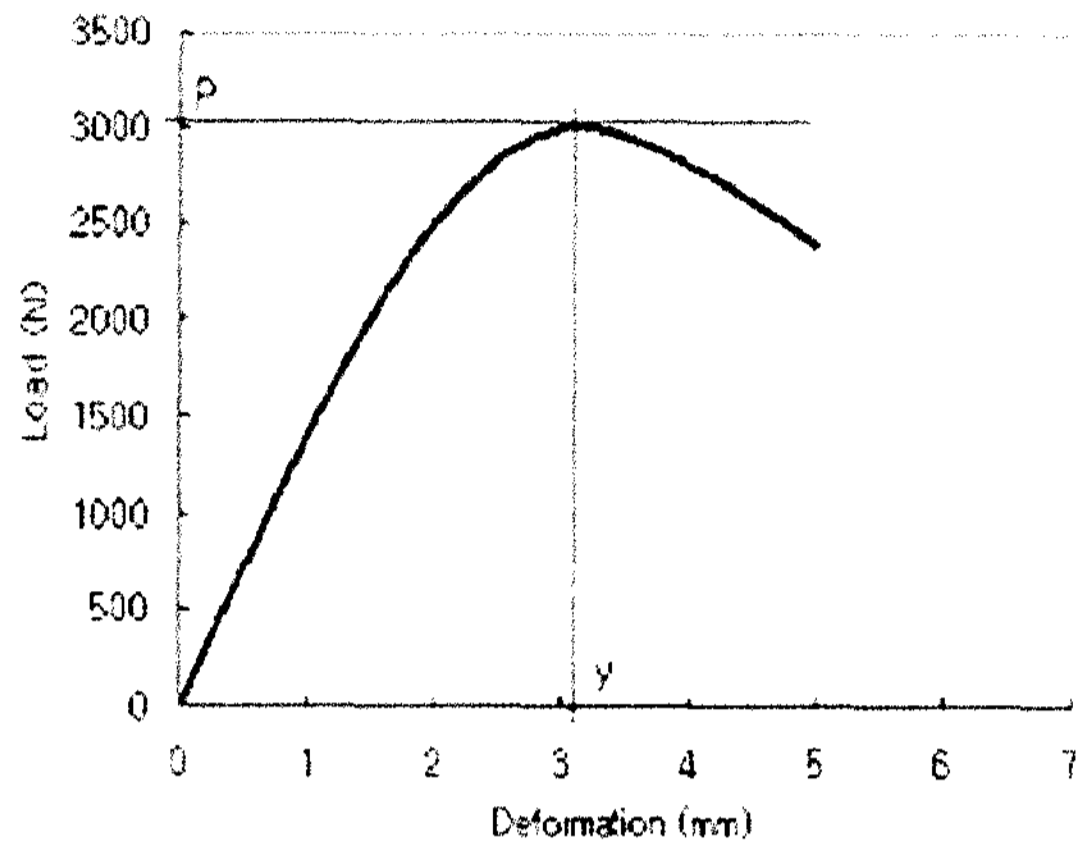
변형강도는 정하중으로 아스팔트 혼합물의 변형 저항성을 측정하는 기법으로 wheel tracking 시험과의 상관성이 높아 변형강도가 높은 혼합물이 도로에서 소성변형에도 강한 것으로 나타났다(김광우 등 2007, Doh et al 2007, Kim et al 2004). 시험은 60°C에서 수행하며 직경 100mm 높이 약 62mm의 마찰 시험용 공시체의 평면 중앙에 직경 (D) 40mm, 하단 원형절삭반경 (r) 10mm의 하중봉으로 수직 정하중을 50mm/min 속도로 가했다. 이때 Fig. 8과 같이 얻어지는 최대하중(P)과 수직 침하깊이 (y)로부터 변형강도를 식 (2)를 사용하여 구한다.

$$S_D = \frac{0.32 \cdot P}{[10 + \sqrt{20y - y^2}]^2} \quad (2)$$

여기서 SD= 변형강도(MPa), P = 최대하중(N), y = P에서의 수직변형(mm) 이다.



(a)

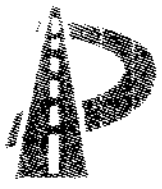


(b)

Fig. 8. SD test (a) setup and (b) output

2.2.5 회복탄성계수 시험

변형강도 평가에 이어 회복탄성계수(resilient modulus: M_R) 성능을 고찰하여 변형회복에 대한 특성을 고찰하였다. 회복탄성계수 시험은 25°C와 40°C에서 Fig. 4와 같이 공시체를 세팅하고 Fig. 5와 같은 방식으로 0.1초간 재하하고 0.9초 휴지기간을 주는 방식의 반복하중을 가했다. Wheel tracking이나 변형강도 등 시험은 60°C에서 측정되나 M_R 의 경우는 60°C에서의 측정이 거의 불가능하여 최고 온도를 40°C로 하였다. 25°C에서는 푸아송 비를 0.35, 최대하중 150kgf을 재하 하였으며 공시체가 이탈되지 안 토록 휴지기간에 잔여하중 5kgf를 유지시켰고, 40°C에서는 푸아송 비 0.5, 최대하중 50kgf와 잔여 하중 2kgf를 각각 적용하였다. 시험은 195cycle을 가한 후 공시체가 초기 압밀 등으로 안정화된 후 마지막 5cycle의 평균 변형 값을 M_R 계산에 사용하였다.



3. 결과 및 고찰

3.1.1 바인더 노화특성

바인더의 PG등급의 평가와 노화특성은 Table 3에 정리되어있다. Table에서 보듯이 세 바인더 모두 노화에 따라 LMS가 증가되나 LDPE 개질 바인더의 노화 후 LMS가 가장 낮았다. 즉, SBS는 물론 일반 바인더인 AP5 보다도 노화에 따른 LMS의 증가율이 낮게 나타났다. LMS와 절대점도의 관계는 $y = 0.0002x^{6.1364}$ 로 주어진다(Kim et al. 2007). 여기서 y는 60°C에서 절대점도로서 아스팔트의 노화가 진행되면 이 값이 증가되며, x는 LMS 값이다. 이 식을 이용하여 LMS로부터 노화처리 후 절대점도를 추정해보면 LMS=18.42인 AP5의 절대점도는 $2 \times 10^{-4} \times 18.42^{6.1364} = 11,624\text{ps}$, LMS=17.26%인 AP5+LDPE6%의 절대점도는 7,798ps 그리고 LMS=19.88%인 AP5+SBS5%의 절대점도는 18,562ps이다. 따라서 SBS 개질바인더는 PAV 처리 후 LDPE 개질 바인더보다 LMS 값이 단지 2.62% 포인트가 높지만 점도 상으로는 238% 이상이 높은 것으로 나타나 LDPE 첨가 바인더는 훨씬 덜 노화되는 것으로 나타났다. 이는 기존연구결과(Kim et al. 2004a)와도 일치하는 것이다.

Table 3. PG grading, LMS and predicted absolute viscosity

Binder	PG grading	Aging	LMS (%)	Predicted Abs. Viscosity (p)
AP5	64-22	Virgin	12.22	937
		Aged	18.42	11,624
AP5+LDPE6%	76-22	Virgin	12.28	966
		Aged	17.26	7,798
AP5+SBS5%	76-22	Virgin	12.49	1,071
		Aged	19.88	18,562

3.1.2 혼합물의 노화

Fig. 9, 10은 두 종류 골재로 제조한 혼합물을 인공노화 시킨 후 바인더 별 노화 상태를 LMS를 이용하여 노화시간에 따라 측정한 것이다. 그림의 한 점은 골재 모양의 종류별로 13, 19mm 2 가지 크기 골재와 각 골재별 3개 공시체, 공시체별 3 반복 GPC 샘플로 총 18번을 시험한 평균치이다. 단, 노화시간 0은 사용하기 전 초기바인더(virgin binder)의 LMS 값이다(정재현 등 2007).

그림에서 보듯이 같은 노화 시간에도 SBS로 개질한 SPG76-22는 두 골재 혼합물에서 모두 노화가 크게 많이 진행되었다. AP5와 LDPE는 유사하지만 LDPE 바인더가 다소 덜 노화되어 Table3의 결과와 선행 연구 결과(Kim et al 2004)와도 같다. 그림 9, 10의 LMS(%) 값에 따른 노화상태 분석에 의하면 현장에서 5-6년간의 혼합물 장기노화를 모사하기 위한 인공노화는 48시간이 적절한 것으로 제안되었다(정재현 등 2007). 따라서 0시간, 2시간 단기노화와 48시간 노화의 값을 $y = 0.0002x^{6.1364}$ 식(Kim et al 2007)을 이용하여 절대점도를 추정하였다(Table 4).

이 결과에서 보면 노화 전인 0시간의 값이 약 1,000p 전후이던 점도가 2시간 단기노화 후에는 11,000-29,000p으로 추정되었는데 두 골재 혼합물에서 모두 LDPE가 가장 낮았다. 게다가 48시간 노화 후에는 LDPE 6%와 SPG76-22의 차이가 화강암의 경우 17,555p와 87,610p로 5배나 차이가 났다. 이는 LDPE 개질 아스팔트 혼합물의 노화가 SBS 개질혼합물의 1/5 수준으로 매우 노화가 적게 되는 것을 보이는 것이며 이는 무 개질 아스팔트보다도 더 낮은 수준이다.

아스팔트 혼합물은 노화가 진행됨에 따라 취성 균열이나 저온균열 등의 발생이 증가 할 수 있다. 실험실 인공노화 시험은 포장 현장에서의 공용기간에 따른 노화 특성을 모사한 것으로서 포장체의 균열과 관련성이 높다. 따라서 본 연구 결과 LDPE 개질 혼합물은 온도 민감도도 낮은 반면 같은 PG76-22 등급임에도(Table 3) SBS 개질 혼합물보다 노화에도 강해 균열발생 가능성이 낮음을 확인한 것이라 할 수 있다.

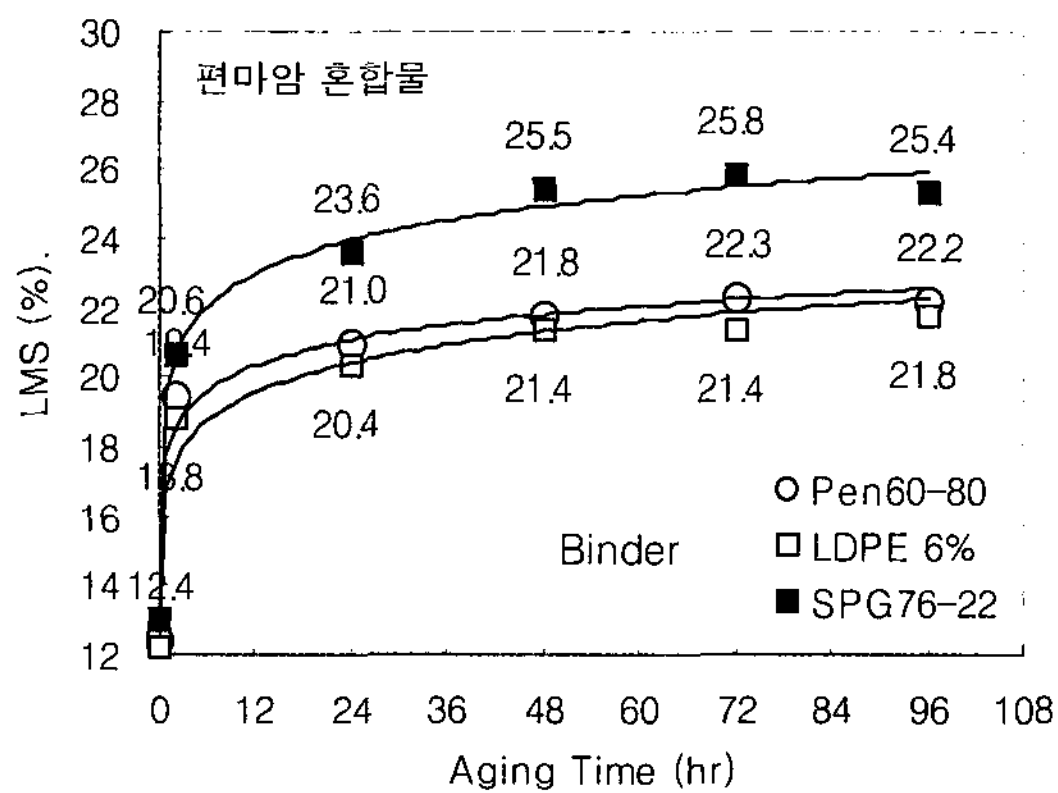


Fig. 9. Relation of aging time and binder aging level (Gneiss)

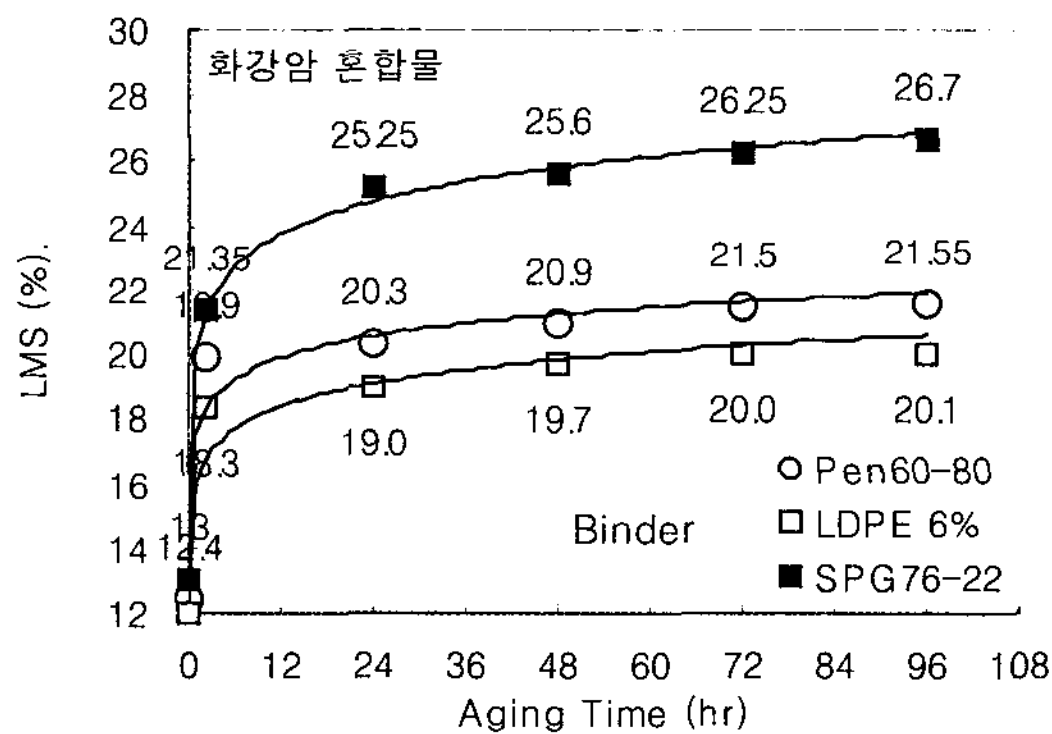


Fig. 10. Relation of aging time and binder aging level (Granite)

3.2.3. 인장강도

인장강도 시험 결과는 Table 5와 같다. ITS는 LDPE를 4-6% 첨가함에 따라 첨가 전 보다 24.5-33.9% 향상되었다. 한편 SBS 개질 혼합물의 경우는 약 14.5%내지 28.9%까지 향상되었다. 따라서 LDPE 6% 첨가가 강도증가율이 가장 커 4, 5% 보다 더 효율적인 비율임을 보여준다.

Table 6은 19mm 밀입도 혼합물의 간접인장강도 유지비율(TSR)을 나타낸다. 박리방지제를 사용하지 않은 AP5 혼합물은 34.3%, 개질혼합물은 58.6, 55.7%로 매우 나쁘거나 낮은 편이다. 이는 특히 화강암 골재 혼합물들이 Dry 상태에서는 양호하였으나 F-T 후에는 207kPa이나 592, 471kPa로 크게 낮기 때문이다. 즉, 화강암이 호수성 (hydrophilic) 골재이어서 수분을 잘 흡수하여 타 골재보다 더 심하게 박리(stripping)가 발생했음을 시사 하는 한 증거이다.

Table 6의 박리제(ASA)로는 소석회(Hydrated lime)를 골재량에 1% 추가한 것이다. 박리제를 넣지 않은 경우(ASA=0) 매우 낮은 TSR은 ASA 1% 처리 후 89~99%로 크게 높아졌다. 개질제 별로는 LDPE가 100% 가까우나 SBS도 95%이상으로 높다. 특히 화강암만 보면 박리제 첨가 전 AP5가 23.2%이던 것이 83.7%로 60% 포인트 이상 크게 향상되었다. 일반혼합물인 AP5가 이렇게 비율이 높게 향상된 것과 마찬가지로 LDPE와 SBS 개질

Table 4. Predicted absolute viscosity based on LMS(%) by aging time.

Aggregate	Binder	Aging time (hr)					
		0 hr		2 hr		48 hr	
		LMS (%)	Predicted AVS(p)	LMS (%)	Predicted AVS(p)	LMS (%)	Predicted AVS(p)
Gneiss	Pen 60·80	12.4	1,025	19.4	15,977	21.8	32,684
	LDPE 6%	12.0	838	18.8	13,176	21.4	29,173
	SPG76·22	13.0	1,370	20.6	23,091	25.5	85,531
Granite	Pen 60·80	12.4	1,025	19.9	18,677	20.9	25,233
	LDPE 6%	12.0	838	18.3	11,167	19.7	17,555
	SPG76·22	13.0	1,370	21.35	28,757	25.6	87,610



혼합물의 경우도 평균 TSR이 거의 100%에 육박하거나 95%로 수분손상이 거의 발생되지 않는 정도까지 향상되는 것을 알 수 있었다.

외국의 경우 TSR 기준이 70~75%인데 본 연구에서 ASA 사용을 통해 수분에 취약한 화강암과 편마암의 인장강도 유지비를 합격수준인 75% 이상까지 크게 향상시킬 수 있음을 보여주었다.

화강암 계열의 골재는 강도가 높고 비중은 크나 호수성 이므로 박리 때문에 봄철의 용해시나 장마철 포트홀 (Pot hole) 등에 취약하므로 이를 사용하는 반드시 박리 저감제 (anti-stripping agent)를 병용해야 함을 확인 할 수 있었다.

Table 5. 19mm 밀입도 혼합물 간접인장강도(ITS) (4)

Binder		ITS for dry condition (kPa)		Mean	Increment ratio (%)
Polymer	Content (%)	Gneiss	Granite		
LDPE	4	853	1,118	985.9	26.4
	5	932	1,010	971.2	24.5
	6	961	1,128	1,044.8	33.9
SBS	3	804	981	892.7	14.5
	4	893	1,118	1,005.5	28.9
	5	863	1,118	990.8	27.0
AP5		746	814	779.9	0

Table 6. 19mm 밀입도 개질아스팔트 혼합물의 간접인장강도 유지비율 (TSR)

Materials		ITS (kPa)				TSR (%)	
		Untreated (Dry)		F-T treated (Wet)		Gneiss	Granite
Binder	ASA*	Gneiss	Granite	Gneiss	Granite		
AP5	0%	816	892	370	207	45.3	23.2
	Mean	854.0		288.5		34.3	
	1%	754	842	708	706	93.9	83.8
	Mean	798.0		707.0		88.9	
LDPE 6%	0%	1,095	1,097	693	592	63.3	54.0
	Mean	1096.0		642.5		58.6	
	1%	1,100	1,122	1,048	1,159	95.3	103.3
	Mean	1,111.0		1,103.5		99.3	
SBS 5%	0%	863	1,118	598	471	69.3	42.1
	Mean	990.5		534.5		55.7	
	1%	943	1,055	924	973	98.0	92.2
	Mean	999.0		948.5		95.1	

* ASA: Anti-stripping agent

3.1.4. 균열저항성

균열시험을 위해서는 비교적 무른 바인더인 AP3를 개질하여 사용하였으며 각 혼합물별 3개의 공시체 시험결과의 평균 피로수명을 Table 7에 나타내었다(김광우 등 1999). 균열 저항성은 파괴직 전까지의 하중반복회수인 피로수명으로 나타내며 결과를 보면 LDPE 개질 혼합물은 무개질 AP3 혼합물에 비해 약 3배, SBS의 경우는 약 2배의 피로수명 증진 효과가 있는 것으로 나타났다.

Table 7. Comparison of fatigue life (19mm dense-grade mixtures)

Mixture	AP3		LDPE		SBS	
	N _f (cycle)	D _h (mm)	N _f (cycle)	D _h (mm)	N _f (cycle)	D _h (mm)
Fatigue life (ITS mode)	5,720		17,087		11,724	
Increment ratio	1		2.99		2.05	
reflection crack fatigue life (Mode I)	60,000	0.22	495,000	0.18	435,000	0.35
Increment ratio	1	1	8.25	0.82	7.25	1.59
reflection crack fatigue life (Mode II)	3,500	3.40	16,000	1.63	9,000	1.20
Increment ratio	1	1	4.57	0.479	2.57	0.353

* N_f: number of cycle to failure,
** D_h: horizontal deformation

두 가지 모드의 시험에 의한 혼합물별 반사균열 저항성 비교 결과를 보면(김광우 등 1999, Kim et al 1999) Mode I 반사균열 시험에서 일반 아스팔트에 비해 LDPE는 8배 이상, SBS는 7배 이상 피로수명이 향상된 것을 알 수 있다. Mode II에서는 LDPE는 4.5배 이상, SBS는 2.5배 이상 수명이 길어졌으며 이를 통해 LDPE가 SBS 보다도 균열저항성이 우수함을 알 수 있었다.

모드 I 시험에서 LDPE 개질 아스팔트는 피로수명이 가장 긴 것은 물론 수평변형도 AP3나 SBS 보다 적어 매우 변형에도 강한 것으로 나타났다. 모드 II에서는 피로수명이 월등히 길고 AP3 보다

는 변형이 적으나 SBS 보다는 다소 큰 변형을 보였다. 이는 SBS에 비해 1.78배의 피로수명 동안 완만하게 변형이 증가되었기 때문이며, 이를 통해 전단에 의한 변형 저항성에서는 두 가지 폴리머 다 유사하나 LDPE가 월등히 더 오래 견디는 것을 알 수 있었다.

3.1.5. 변형강도

Fig. 7은 두 가지 골재혼합물의 변형강도를 측정 한 것으로 각 골재, 굵은골재 최대치수 및 바인더별 변형강도 값과 바인더별 평균을 보여주고 있다. AP5의 변형강도는 평균 4.0MPa 이하인데 비해 두 개질 아스팔트 혼합물은 5.0MPa에 근접하게 향상되었다. 특히 LDPE 개질 혼합물은 4가지가 비교적 고르게 향상된 것에 비해 SBS는 화강암에서 더 강하고 편마암은 낮았다. 이와 같은 개질아스팔트 혼합물의 변형강도 향상 비율을 보면 LDPE 개질 혼합물의 증가율은 22.5%로 SBS 개질 SPG76-22 혼합물 28.4%보다 다소 낮지만 새로이 제정되는 국내 배합설계 기준(김광우 등 2007, 한국형... 2008)의 4.4 MPa보다는 충분히 높은 것을 알 수 있다.

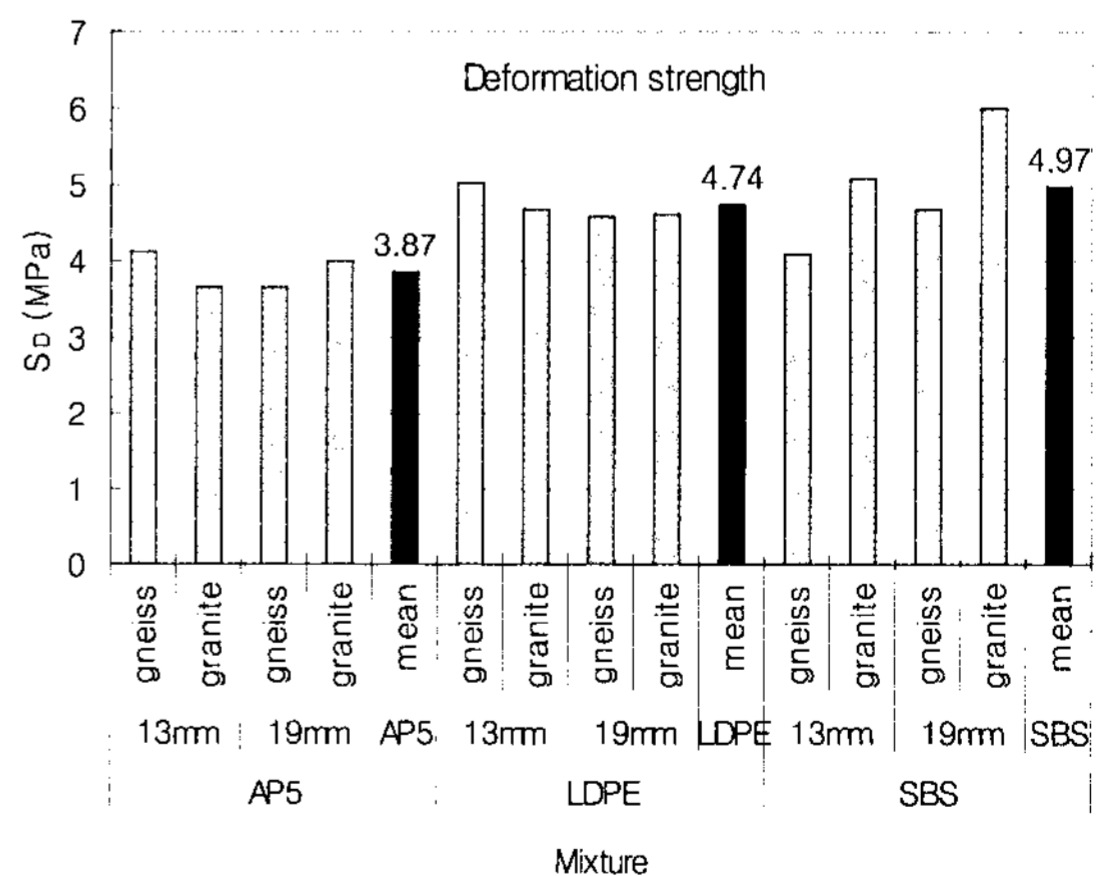


Fig. 21. Comparison of deformation strength

3.1.6. 회복탄성계수

골재 2종 (화강암, 편마암)×최대치수 2가지(13, 19mm)×바인더 2종(AP5, LDPE 6%)로 총 8종류



혼합물의 회복탄성계수(resilient modulus: M_R)를 25°C와 40°C에서 측정하였다. Wheel tracking 시험이나 변형강도 등 소성변형 관련 시험은 60°C에서 측정되나 M_R 의 경우는 60°C에서의 측정이 거의 불가능하여 최고온도를 40°C로 하였으며 그 결과는 Table 8과 같다.

LDPE 개질혼합물의 M_R 값은 AP5 혼합물에 비해 크게 향상되었다. 특히 상온인 25°C에서는 AP5에 비해 약 2.9~3.7배 향상된 것이 40°C로 높아지며 평균 7배 이상 향상되어 매우 우수한 것으로 나타났다. 이는 온도가 40°C로 올라가며 AP5 혼

합물의 M_R 이 25°C에 비해 약 1/5 수준 이하로 크게 낮아지는 것에 비해 LDPE 혼합물은 약 1/2 수준을 유지하기 때문인 것으로 판단된다.

한편 SBS로 개질된 SPG76-22 혼합물은 M_R 이 AP5보다는 각 온도별로 다 높게 나타나지만 LDPE 보다는 25°C에서는 약 1/2, 40°C에서는 약 1/3수준으로 나타났다. 이로부터 SBS보다는 LDPE 개질이 아스팔트의 감온성을 더 낮추어 온도가 높아져도 강성을 상당히 유지시키는 특성을 보이는 것으로 나타났다.

Table 8. Resilient modulus test results

Temp (°C)	Aggregate		Binder	Load (kgf)	deformation (mm)	Poisson's ratio	Resilient modulus (MPa)	Ratio
	Max size	Source						
25	13mm	Gneiss	AP5	150.1	0.0051	0.35	2956.4	1
		Granite		149.7	0.0052	0.35	2925.4	
		Gneiss	LDPE6%	150.7	0.0019	0.35	8268.1	2.9
		Granite		151.5	0.0017	0.34	8776.3	
		Gneiss	SBS PG76-22	148.8	0.0022	0.35	6852.1	1.74
		Granite		148.5	0.0045	0.35	3395.2	
40	13mm	Gneiss	AP5	48.3	0.0207	0.5	419.3	1
		Granite		51.0	0.0108	0.5	593.6	
		Gneiss	LDPE6%	55.0	0.0021	0.5	3213.2	7.92
		Granite		54.2	0.0014	0.5	4852.1	
		Gneiss	SBS PG76-22	51.6	0.0058	0.5	1096.4	2.27
		Granite		38.8	0.0040	0.5	1198.2	
25	19mm	Gneiss	AP5	149.0	0.0094	0.35	1567.7	1
		Granite		150.0	0.0121	0.35	1232.7	
		Gneiss	LDPE6%	153.2	0.0026	0.35	5767.9	3.67
		Granite		153.1	0.0035	0.35	4498.2	
		Gneiss	SBS PG76-22	150.2	0.0050	0.35	2976.4	1.79
		Granite		147.8	0.0072	0.35	2048.8	
40	19mm	Gneiss	AP5	49.0	0.1568	0.5	400.6	1
		Granite		45.2	0.1482	0.5	374.8	
		Gneiss	LDPE6%	50.6	0.0273	0.5	2322.3	6.38
		Granite		51.8	0.0301	0.5	2626.3	
		Gneiss	SBS PG76-22	51.6	0.0697	0.5	906.4	2.66
		Granite		51.0	0.0683	0.5	1154.7	



4. 요약 및 결론

본 연구에서는 에틸렌 중합체 (Polyethylene) 중 밀도가 약 0.91-0.93 정도인 저밀도 폴리에틸렌(LDPE)과 열가소성 탄성중합체(Thermoplastic elastomer)인 SBS로 개질한 아스팔트 혼합물의 특성에 대하여 비교 고찰하였다. 개질아스팔트의 기본 특성 및 골재와 혼합물의 특성을 다양하게 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) LDPE를 첨가한 개질아스팔트는 절대점도가 높아지나 동점도는 크게 높아지지 않아 타 개질 바인더에 비해 혼합물의 작업성이 양호할 수 있음을 알 수 있었다.
- 2) LDPE 바인더는 바인더 자체의 노화는 물론 혼합물 내에서의 장기 노화도 SBS보다 느리게 진행되어 취성화가 더더 균열에 강해 혼합물의 장기 수명에 유리할 것으로 판단된다.
- 3) 아스팔트 혼합물의 간접인장강도는 LDPE의 첨가로 약 25-34% 향상되었으며 그 비율은 SBS 개질 혼합물보다 다소 더 높았다. 또한 박리저항제로 소석회를 첨가한 개질아스팔트 혼합물은 동결융해 처리 후 인장강도유지비가 95%이상으로 향상되었다.
- 4) LDPE 개질 혼합물은 휨 균열 및 반사균열저항성이 일반 아스팔트에 비해 각각 3배와 8배 이상 까지도 높았으며 이 역시 SBS 개질 혼합물보다 더 높은 것이다.
- 5) 변형강도에 의한 개질아스팔트 혼합물의 소성변형저항성 추정결과, 바인더는 같은 PG76-22 등급이었지만 SBS 혼합물이 LDPE보다는 더 우수한 것으로 나타났다. 하지만 두 가지 다 배합 설계 규격으로 제시예정인 기준에는 만족하였다.
- 6) 회복탄성계수 (M_R) 시험에서 25°C 에서 40°C 로 온도 증가에도 두 개질재 모두 강성을 적게 잃어 M_R 의 유지율이 일반아스팔트에 비해 월등히 높았으며 LDPE가 다소 더 높았다.
- 7) 결론적으로 두 개질 개질아스팔트 혼합물은 일

반아스팔트의 단점을 잘 개선하고 있다. 그러나 LDPE가 바인더의 동점도가 상대적으로 낮아 작업성이 좋고 각종 균열관련 특성에는 보다 나았고, SBS는 변형강도가 높아 소성변형에는 더 유리함을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 강원대학교 석재복합신소재센터의 각종 자료 및 시설을 활용하여 이루어진 것입니다.

References

- 권승준 (1999), "폴리머 개질 역청 콘크리트의 저온 파괴 거동," 박사학위논문, 강원대학교 대학원.
- 김광우 (1996), "폴리머 개질 아스팔트 포장재료의 특성," 아스팔트 포장공학의 첨단기술 심포지엄 논문집, 강원대학교.
- 김광우, 도영수, 임성빈, 이석근, 엄주용 (1999), "개질 보강재를 이용한 덧씌우기 아스팔트 포장의 반사균열 지연효과," 한국도로포장공학회 논문집, 1(1).
- 김광우, 안경애, 조희원, 이상범 (1998), "폴리머 개질 아스팔트 콘크리트의 인장강도 특성," 대한토목학회 논문집 Vol. 18, No. III-1, 1998. 1. pp. 53-59
- 김광우, 연구석, 안경애, 조희원 (1996), "폴리머 개질 아스팔트 콘크리트의 강도 특성," 대한토목학회 학술발표회 논문집 (III).
- 특허청 (2004), "Hyperphalt," 상표등록증, 등록제 0570816호, 특허청장
- 정재현, 조병진, 박남원, 김광우(2007), "아스팔트 혼합물의 인공노화방안 연구," 한국도로학회 논문집, 9(4), 45-54.
- 김광우, 조병진, 이순제, 도영수 (2007), "고온내변형 아스팔트혼합물 선정을 위한 변형강도 임계치의 결정방안," 한국도로학회 논문집, 9(4), 193-204.



- “한국형 포장설계법 개발과 포장성능개선방안 연구,” (2008), KPRP-B-07, 2단계 4차년도 중간보고서, 건설교통부
- Doh, Y. S., Yun, K. K., Amirhanian, S. N. and Kim, K. W. (2007), "Framework for developing static strength test for measuring deformation resistance of asphalt concrete mixtures," *Construction and Building Materials*, 21(12).
- El Hussein M. Kim, K. W. and Phonia, J. (1998), "Assessment of localized damage associated with exposure to extreme low temperatures," *Journal of Materials in Civil Engineering*, 10(4), ASCE, 269-274.
- Hoare, T.R., and S.A.M. Hesp (2000), "Low-temperature fracture testing of asphalt binders: regular and modified systems," *Transportation Research Record 1728, TRB*, 36-42.
- Kim, K. W. (1988), "Determination of critical tensile strength of bituminous concrete surface course," Dissertation for Partial fulfillment of Ph.D., Clemson University, SC, USA.
- Kim, K. W., Amirhanian, S. N., Doh, Y. S. and Jung, J. H. (2007), "Reducing Stiffness of Oxidized Binder in Recycled Asphalt Mixture by Stage Mixing," *Journal of AAPT*, 78.
- Kim, K. W., Burati, J. L. and Park, J. S. (1995), "Methodology for Defining LMS Portion in Asphalt Chromatogram," *Journal of Materials in Civil Engineering*, 7(1), ASCE, 31-40
- Kim, K. W., Doh, Y. S. and Amirhanian, S. N. (2004a), "Evaluation of aging characteristics of selected PMA using HP-GPC," *Journal of Korean Society of Road Engineers*, 6(2), *Korean Society of Road Engineers*, 15-24.
- Kim, K. W., Doh, Y. S. and Amirhanian, S. N. (2004b), "Feasibility of deformation strength for estimation of rut resistance of asphalt concrete," *International Journal of Road Materials and Pavement Design*, 5(3), 303-322.
- Kim, K. W., Doh, Y. S., and Lim, S. B. (1999), "Mode I reflection cracking resistance of strengthened asphalt concretes," *Construction and Building Materials*, 13, 243-251.
- Kim, K. W. and El Hussein, M. (1995), "Effect of differential thermal contraction on fracture properties of asphalt materials at low temperatures," *Journal of AAPT*, 64, 474-496
- Kim, K. W. and El Hussein, M. (1997), "Variation of fracture toughness of asphalt concrete under low temperatures," *Construction and Building Materials*, 11(7-8), Dec 1997, 403-411
- Kim, K. W., Kim, K. A., Doh, Y. S. and Amirhanian, S. N. (2006), "Estimation of RAP's binder viscosity using GPC without binder recovery," *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, 18(4), 561-567.
- Kim, K. W., Kweon, S. J., Doh, Y. S. and Park, T. S. (2003), "Fracture Toughness of Polymer-modified asphalt concrete at low Temperatures," *Canadian Journal of Civil Engineering*, 30(2), pp. 406-413.
- Kim, K. W. Lee, S. B., Jeong, K. D., Doh, Y. S. and Joh, H. W. (1997), "Evaluation of tensile property improvement of polymer-modified asphalt concretes," *Proceedings, 3rd South African Conference on Polymers in Concretes*, Rand African University, Johannesburg, South Africa.
- Shenoy, A. (2000), "Effect of using dispersants during mixing of aggregates with poly-



mer-modified asphalts: A case study for
Novophalt," *Journal of Dispersion Science
and Technology*, 21(5), 589-604.

접 수 일: 2008. 4. 8

심 사 일: 2008. 4. 22

심사완료일: 2008. 5. 26