

폴리머 개질아스팔트 콘크리트의 저온 인장강도 특성

Tensile Strength of Polymer-Modified Asphalt Concrete at Low-Temperature

도 영 수* · 권 승 준** · 김 광 우***
 Doh, Young Soo · Kwon, Seung Zoon · Kim, Kwang Woo

Abstract

Many temperature-related problems are created in asphalt pavement due to the low temperature. In particular, loss of tensile strength due to low temperature is known to be responsible for thermal failure of pavements in cold regions under -20°C . The objective of this study is to evaluate characteristics of resistance against low-temperature cracking of polymer asphalt concrete mixtures modified with LDPE and SBS. The test results showed that the mixtures had the maximum indirect tensile strength(ITS) at low temperature ranging from -10°C ~ -20°C . It was proved through ITS test that the stress due to differential thermal contraction over the tensile strength did generate internal damage at the temperature below -20°C . It was shown that the asphalt mixtures modified with polymer had better ITS than the normal asphalt mixture at the temperature below -20°C . Thus the effect of modification was revealed as tensile strength improvement. From the results of this study, it was recommended that Polymer-modified asphalt should be used in order to prevent low-temperature cracking in cold region.

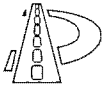
keywords : *polymer-modified asphalt, differential thermal contraction, indirect tensile strength, low-temperature cracking.*

요 지

본 연구는 동절기에 많이 발생하는 포장의 저온균열에 대한 폴리머 개질 아스팔트 혼합물의 저항 특성을 알아보기 위하여 수행하였다. 저온에서의 간접인장강도를 측정 분석한 결과 혼합물들이 -10°C ~ -20°C 의 저온 대에서 최대 인장강도를 나타냈다. 최대 인장강도를 보이는 온도 이하에서는 시차열 응력이 인장강도 이상으로 발생하여 내부에 손상이 발생하기 때문에 나타나는 인장강도 저하현상을 ITS 시험으로 증명하여 보였다. 저온의 시험 결과는 폴리머 개질 아스팔트 혼합물이 일반 아스팔트 혼합물에 비하여 보다 낮은 온도에서까지도 강도가 높게 나타나 폴리머 개질에 따른 효과를 보였으며, 바인더가 저온균열에 대한 저항에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서 추운 지역에서는 저온균열을 예방하기 위하여 폴리머 개질 아스팔트의 사용이 추천된다.

핵심용어 : 폴리머 개질 아스팔트, 시차열 응력, 간접인장강도, 저온균열,

* 정회원 · 고속도로관리공단 기술개발팀 포장연구과장
 ** 정회원 · 삼척대학교 토목공학과 교수
 *** 정회원 · 강원대학교 지역기반공학과 교수



1. 서론

무재하 균열의 대표적인 형태인 저온균열은 포장 공학자들이 많은 관심을 갖고 있다. 저온균열은 아스팔트 포장층에서 횡방향 수축균열로 발생한다. 저온균열은 많은 현장조사와 측정결과에서 포장표면에서 발생되어 시간의 경과에 따라 점차 포장 층 아래로 진전되는 것으로 밝혀졌다. 그 이유는 온도가 아래로 떨어질 경우 포장 층의 표면온도가 가장 먼저 차가워지기 때문이다. 아스팔트 포장체가 매우 추운 기후에 놓이게 되면 시차열수축 (differential thermal contraction, DTC)으로 인한 인장응력이 발생되어 이 인장응력이 포장 층의 인장강도를 초과하게 되면 포장체에 횡방향 균열이 발생하게 된다. 또한 아스팔트 층의 두께와 노상토의 종류 등이 주로 저온균열 폭의 확장이나 발생 빈도 수에 영향을 미친다. 아스팔트 혼합물의 저온균열은 동절기 추운 지방에서 주로 발생되며 가열 아스팔트 혼합물의 저온균열은 골재보다는 주로 아스팔트 바인더의 저온 특성에 의해 영향을 받는다. 그러므로 바인더의 적절한 선택이 저온균열을 최소화할 수 있다. 많은 연구자들은 현장시험에 근거한 특정 온도 범위에 대하여 아스팔트나 아스팔트 혼합물의 스티프니스($S = \sigma / \epsilon$) 값을 제한할 것을 권장하였다(2,3,4).

저온균열 평가에는 여러 가지 방법들이 있으나 수퍼페이브의 Level 2와 3 배합설계법에서는 아스팔트 혼합물의 저온균열 평가를 저온에서 간접인장강도를 측정하여 판단할 것을 제안하였다.

이 시험절차를 간단히 요약하면 1) 아스팔트 혼합물을 단기 노화시킨 후 마샬 공시체를 제작하여 장기 노화시켜, 2) 시편을 -10°C 에서 12.5mm/min의 속도로 하중을 재하하여 간접인장강도를 측정한다. 그러나 본 연구에서는 혼합물을 장단

기 노화를 시키지 않고 0°C 부터 -35°C 사이에서 5 또는 10°C 간격으로 저온에서 간접인장강도를 측정하여 폴리머 개질 아스팔트 혼합물의 저온 파괴 특성을 평가하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 사용재료

2.1.1. 바인더와 골재

본 연구에는 우리나라 중부지역에서 널리 사용되고 있는 AC 85~100 아스팔트 시멘트를 기본 바인더로 하였다. 아스팔트 콘크리트의 강도는 바인더인 아스팔트 시멘트와 더불어 골재의 품질이나 입도에 크게 영향을 받는다. 골재는 생산지 별로 그 조건이 다르기 때문에 사용 전에 각 지방 규정에 적합한지를 반드시 검토하여야 한다.

본 연구에서는 세 종류 골재의 사전 시험을 통하여 그중에서 비중이 높고 견고한 영서지역에서 생산되는 편마암을 사용하였으며 잔골재는 굵은 골재를 생산하는 과정에 발생하는 부순모래(screenings)를 사용하였다. 골재는 건설교통부 19mm 밀입도 시방 규정(8)에 적합한 입도로 조정하였으며 입도분포곡선은 그림 1과 같고, 이 입도는 본 연구를 위하여 제조된 모든 혼합물에 적용되었다.

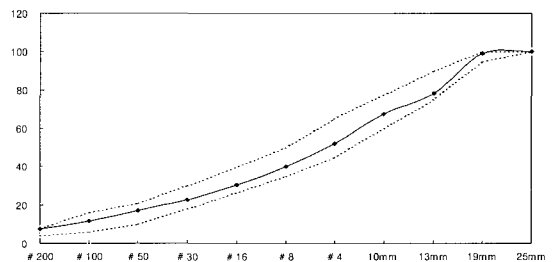
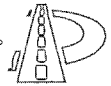


그림 1. Gradation curve of combined aggregates



2.1.2. 폴리머

본 연구에 사용된 폴리머는 개질 효과가 우수한 것으로 판명되고 외국에서도 많이 사용된 두 가지를 이용하였는데 이는 LDPE (low-density poly- ethylene)와 SBS (styrene-butadiene-styrene)이며, 이는 국내에서 생산되어 구입이 가능한 가루 형태의 폴리머들이다. 이중 LDPE는 No.50 체에 거의 다 통과 (통과량 99.5%) 하는 비교적 고운 분말이고 SBS는 그 보다 입자가 훨씬 큰 No.50 체에 거의 다 남고 (통과량 약 1%) No.8 체에 거의 다 통과하는 (통과량 99.5%) 입자 형태의 폴리머이다.

상기의 두 폴리머와 병행하여 카본 블랙 (carbon black)을 사용하였다. 이는 페타이어로부터 추출된 것으로 국내에서 생산되는 외형이 고운 분말이고 검은 색이다. 이것의 사용은 폴리머와의 결합에 의한 역학적 특성 상승 효과와는 별도로 자외선에 약한 폴리머의 보호를 통한 내구성 증진과 혼합물의 강성 향상에 도움이 된다⁽⁹⁾.

본 연구에서 카본 블랙은 아스팔트함량의 중량비에 10%로 하여 혼합물 제조시 골재와 함께 섞어 사용하였다. 카본 블랙은 사전 시험에서 LDPE에는 효과적이나 SBS의 경우 인장강도는 물론 강성의 증진에도 효과적이지 못한 것으로 나타났다.

따라서 본 연구의 혼합물중 각 폴리머의 혼합 비율은 아스팔트 함량의 중량비로 LDPE 6% + Carbon black 10%, LDPE 4% + SBS 3%, SBS 5%를 사용하였다. 각 혼합물의 용어 정의는 표 1에 표시하였고 이 폴리머들에 대한 물리적 성질은 표 2와 3과 외형은 그림 2와 같다.

표 1. Definition of Mixtures

Abbreviation	Description
AP	Normal asphalt mixture without any polymer(control)
LC	Asphalt mixture with LDPE 6% plus Carbon block 10%
LS	Asphalt mixture with LDPE 4% plus SBS 3%
S	Asphalt mixture with SBS 5%

표 2. Physical properties of low density polyethylene

Material	Volatility (%)	Viscosity (cps)	Color	Tensile strength (kg/cm2)	Extendability (%)
LDPE	0.62	4,840	White	233	1,020

표 3. Physical properties of SBS

Material	Solubility (%)	Density (g/cm3)	Color	Foreign substance	Volatility (%)	Lime (%)
SBS	0.31	0.957	White	NIL	0.018	0.024

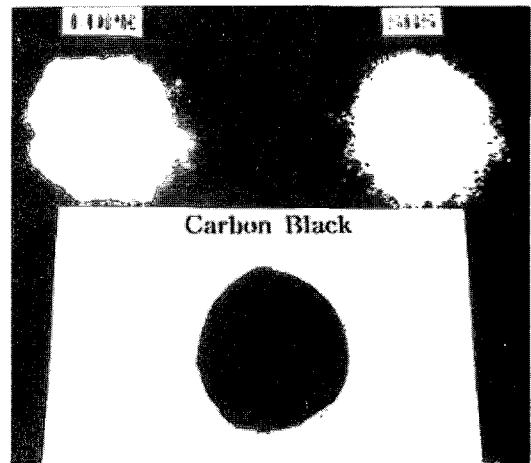
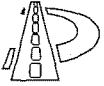


그림 2. Photographs showing LDPE, SBS and carbon black polymers



2.1.3. 폴리머 개질아스팔트의 제조

본 연구에서는 사용된 아스팔트에 대한 폴리머 별 중량비는 (LDPE 6%, LDPE 4% + SBS 3%, SBS 5%) 사전의 연구(9) 결과를 통하여 개질 효과가 우수하게 나타난 비율을 취한 것이다.

혼합 방법은 아스팔트를 먼저 오븐(oven)속에 넣어 180~190°C로 충분히 가열한 후, 소정량의 폴리머를 아스팔트에 서서히 넣고 같은 온도를 유지하면서, 고성능 전단을 일으키는 homogenizer를 이용하여 6,000rpm의 속도로 혼합하여 한번에 1리터 정도씩을 제조하였다. 혼합시에는 여타 첨가제를 넣지 않았으며, 아스팔트 내의 폴리머가 완전히 혼합되도록 충분한 시간 동안 혼합시켰다.

2.2 실험방법

2.2.1. 배합설계

아스팔트 혼합물의 배합설계는 마샬 방법을 사용하여 아스팔트 함량을 골재 총 중량의 5%를 기준으로 $\pm 0.5\%$ 와 $\pm 1.0\%$ 로 하여 최적 아스팔트함량(optimum asphalt contents: OAC)을 결정하였다. 공시체는 KSF 2337과 ASTM D 1559의 마샬식 아스팔트 혼합물 제조 방법에 따라 제조하였다. 먼저 준비된 골재를 오븐에 넣어 175°C로 최소 5시간 이상 충분히 가열하였다. 그리고 약 $180 \pm 5^\circ\text{C}$ 의 온도에서 60~80분간 가열된 아스팔트를 넣은 다음 소정의 온도에서 손 비빔으로 혼합하여 몰드에 넣고 마샬 자동 다짐기를 이용하여 공시체 상하를 각각 75회씩 다짐하였다.

2.2.2. 마샬 안정도 시험

배합설계를 통하여 얻어진 OAC로 공시체를 제작하여 마샬 안정도를 구하였다. 마샬 안정도는 몰드에서 탈형한 공시체를 24시간 공기 중에 놓아두었다가 60°C의 수조에 30분 동안 수침시킨

후 수조에서 꺼내어 표면의 물기를 마른 수건으로 제거한 후 자동기록장치가 있는 마샬 시험장비를 이용하여 측정하였다.

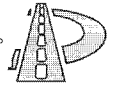
2.2.3. 간접인장강도 시험

아스팔트에 폴리머를 첨가함으로써 기대되는 가장 큰 효과는 아스팔트 혼합물의 인장강도 향상이다. 인장강도는 아스팔트 포장이 윗하중에 의한 하중 영향을 견디어 내는 가장 중요한 특성으로 이의 향상은 포장의 기대 수명을 증진시키는 효과를 가져온다⁽⁵⁾. 슈퍼패이브의 level 2와 3 배합 설계법에 의하면 아스팔트 혼합물의 저온균열 평가를 저온에서 간접인장강도를 측정하여 판단할 것을 제안하였다. 이 방법은 다짐되지 않은 혼합물에 대하여 단기노화 시킨 후 공시체를 제작하여 장기노화를 시켜 -10°C에서 간접인장강도를 측정하는 것이다. 그러나 본 연구에서는 혼합물의 단기노화 및 장기노화 없이 간접인장강도 시험으로 개질아스팔트 혼합물의 저온균열에 대한 저항 특성을 평가하기 위하여 기본적으로 25°C 이외에 0°C, -5°C, -10°C, -20°C, -30°C, -35°C에서 각각 수행하였으며, 공시체 상하에 직경 101.6mm인 마샬 공시체의 반경과 같은 곡률의 모퉁한 표면을 가진 폭 13mm의 금속 하중 띠를 통해 50mm/min의 속도로 하중을 재하하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 개질아스팔트 콘크리트의 기본 성질

개질 아스팔트의 침입도 및 절대 점도(absolute viscosity)를 폴리머 함량에 따라 3 회 측정하여 그 수치를 산술 평균하였고 그 결과는 표 4 와 같다. 침입도는 25°C의 수조 속에 샘플을 넣어서 측정하였고, 절대점도는 60°C의 오일 배스(oil bath)에서 측정하였다. 개질 아스팔트는



개질 전 보다 모두 침입도가 낮아짐을 알 수 있는데 이는 폴리머 첨가로 인한 아스팔트의 경도 (hardness) 변화가 원인인 것으로 판단된다. 폴리머를 첨가하지 않은 아스팔트 (AP-3)의 점도가 952 ps인데 비하여 개질 아스팔트의 점도는 그 보다 높아 폴리머 첨가가 아스팔트를 고 점도화 시켰음을 보여주고 있다. 그 중 SBS가 LDPE보다는 다소 더 높은 점도를 유발하는 것으로 나타났다.

표 4. Penetration and viscosity of polymer modified asphalts

Property	AP	LC	LS	S
Penetration 25°C (0.1mm)	90	63	59	62
Viscosity 60°C (poise)	952	5,229	5,687	6,966

3.2. 마샬특성

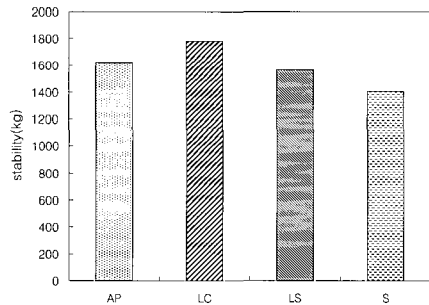
아스팔트 혼합물에 있어서 배합설계의 목적은 적절한 골재 입도를 설정하여 그 입도를 사용한 혼합물의 최적아스팔트 함량을 결정하고 이로 제조한 혼합물이 공용중의 하중에 충분히 저항하도록 하는데 있다. 일반적으로 아스팔트 콘크리트의 하중 저항능력은 마샬 안정도 시험에서 구한 안정도와 흐름값이 일정 수준 이상의 값이 나오면 양호하다고 표현하고 있다. 세계 여러 나라에서는 이와 같은 관점으로 시방서를 규정하고 있다.

배합설계를 통하여 결정되어진 최적 아스팔트 함량을 사용하여 제조한 혼합물의 마샬특성치는 표 5와 같다. 최적아스팔트 함량은 LC가 AP보다 더 낮아졌으나 나머지 두 폴리머는 다소 높아지는 현상을 보였다. 공극률은 LC가 AP에 비하여 다소 높게 나타났고 나머지 두 폴리머는 다소 낮게 나타났다. 채움율은 AP에 비하여 LC는 다소 낮았으며 나머지 두 폴리머는 다소 높게 나타났다. 그림 3은 일반 및 개질아스팔트의 최적 아스팔트 함량으로 제조한 혼합물의 마샬 안정도와

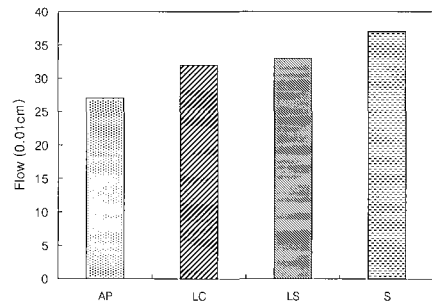
흐름치 특성을 비교한 것이다. 안정도에 있어서는 S 및 LS가 AP에 비하여 다소 낮은 값을 보인 반면에 LC의 값은 10%정도 AP에 비하여 높은 값을 보여 주었다. 하지만 그 수준은 모두 1,000kgf가 넘는 높은 값이었다. Flow치는 PMA 혼합물의 경우가 AP에 비하여 전반적으로 20% 이상의 높은 값을 보여주었다.

표 5. Physical & mechanical properties of each mixtures at OAC

Property	Spec.	AP	LC	LS	S
OAC(%)	-	4.8	4.5	5.1	5.1
Air Void(%)	3 - 5	3.78	4.49	3.11	3.14
VFA(%)	70 - 85	74.86	69.9	79.35	79.28

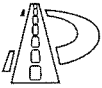


(a)



(b)

그림 3. Comparison of (a)stability and (b) flow of 4 mixtures



3.3. 간접인장강도

도로 위의 윤택층은 포장 층 하단에 인장응력을 유발하기 때문에 아스팔트 혼합물에 대한 인장강도 값은 아스팔트 콘크리트의 강도를 파악하는데 가장 중요한 요소 중의 하나이다. 이러한 인장강도 값은 간접인장강도 (indirect tensile strength, ITS) 시험으로 측정할 수 있으며, 이 실험을 통하여 구한 인장강도 데이터는 윤택층에 의한 수평 인장응력으로 발생하는 균열 저항의 척도로 이용된다. 본 연구에서 기준이 되는 25°C에서의 간접인장강도와 강성지수의 결과는 그림 4와 같다. ITS의 경우, AP에 비하여 LC 및 S는 비슷하거나 다소 높은 수치를 나타냈으며, LS는 40% 이상 높은 값을 보여 주었다. 강성지수 (stiffness index)도 역시 AP에 비하여 LC 및 S는 비슷한 수치를 나타냈으나, LS는 40% 이상 높은 값을 보여 주었다. 따라서 PMA 혼합물의 개질 효과 면에서 보면 LS를 제외하고는 별로 ITS가 향상되지 않는 것으로 나타났다.

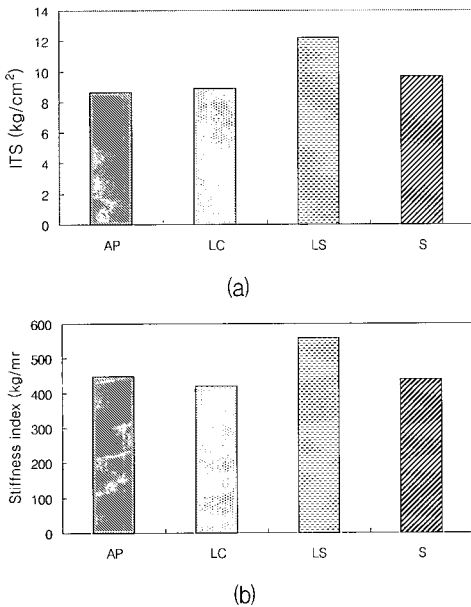


그림 4. Comparison of (a) Indirect tensile strength and (b) Stiffness index of mixtures

3.4. 저온에서의 간접인장강도

저온균열에 대한 저항 특성 평가를 위하여 저온의 여러 온도에서 각 혼합물별로 구한 간접인장강도 결과를 회귀분석한 결과를 그림 5에 나타내었다.

각 아스팔트 혼합물의 인장강도는 상온(25°C)에서의 값에 비하여 저온에서 약 4.2~6.0배까지 높게 나타남을 알 수 있었다. 특히 모든 혼합물들은 -10°C에서 최대치를 나타내었으며 -20°C를 지나면서 오히려 떨어지는 경향이 나타났다.

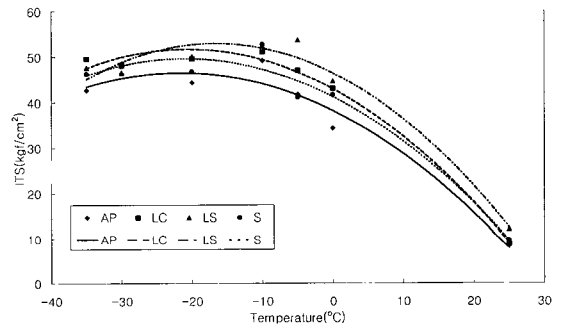
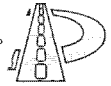


그림 5. Regression analysis of ITS(kg/cm²) of 4 mixtures by temperature gradient

그림 5의 온도 변화에 따른 인장강도의 변화를 회귀 분석한 결과, 혼합물 별로 보면 LS를 제외한 모든 혼합물은 -20°C사이에서 정점을 보였으나 LS는 -15°C에서 정점을 보였고 게다가 최대치도 다른 혼합물보다 높게 나타났다. AP는 모든 폴리머 개질 혼합물에 비하여 최대치가 낮았으며, LS는 최고치 이후 AP에 비하여는 높지만 다른 혼합물에 비하여 급격히 떨어지는 경향을 나타냈다. LC는 저온의 여러 온도에서 LS의 정점까지를 제외하고 모든 혼합물에 대하여 높은 인장강도 추세를 나타냈다. 이것은 LC 개질 아스팔트가 저온균열에 대한 저항성이 다른 폴리머 개질 아스팔트보다 우수한 것을 보여준 것으로 판



단된다.

이에 비해 LS는 본래 상온에서부터 인장강도 값이 제일 높고 저온 -10°C 에서 전체 온도 중에 최대값을 보였으나 -15°C 전·후를 기점으로 급격히 강도가 떨어지는 경향을 보였다. 이는 온도가 크게 내려가면서 시차열수축에 의한 손상이 그대로 나타나는 증거라 할 수 있다^(6,7). 반면 LC와 S는 LS보다 최대강도는 다소 낮지만 정점 이후 강도저하가 더 적게 나타나 AP나 LS에 비해 -30°C 이하의 저온에서 DTC손상을 덜 받는 것으로 판단된다.

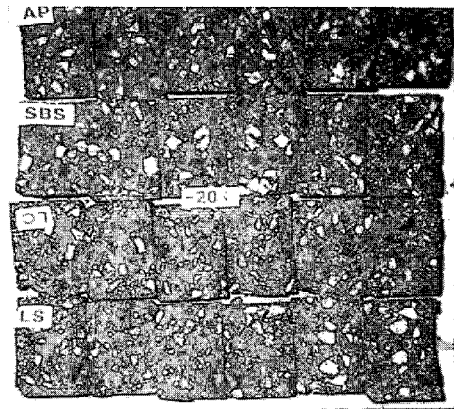
저온에서의 인장강도 분석 결과, 아스팔트의 폴리머 개질 효과는 LC, S, LS 순으로 저온에서의 인장강도의 향상 효과가 나타났다. 본 연구에서 사용한 골재의 한 가지 입도의 관점에서 볼 때, 바인더가 저온균열에 대한 저항에 큰 영향을 미치는 것을 본 연구에 통하여 증명되었다.

3.5. 파괴 단면 분석

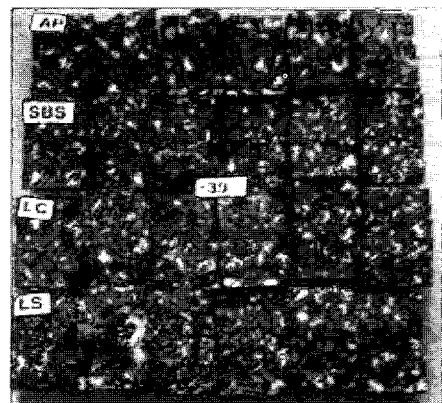
그림 6은 저온에서 3점 시험 후 공시체의 파괴된 단면을 보여준다. -20°C 에서 파괴된 공시체 파 단면에는 골재가 파괴되어 흰색을 띠는 부분들이 많은데 비해 -30°C 에서는 매우 적어 골재가 박리된 것을 나타낸다. 즉, -20°C 정도까지는 혼합물 내에서 매트릭스(채움제와 바인더의 혼합물)가 강하게 골재를 결속하여 인장에 취약한 골재들이 3점 휨시험시 파괴되는 것이다. 반면 -30°C 에서는 시차열 수축에 의해 골재와 매트릭스의 접촉면(Interface)에 손상이 생겨 쉽게 분리되므로 골재가 깨어지지 않고 파괴가 접촉면을 따라 일어난 것이며 이는 기존의 연구에서와 유사한 형상임을 알 수 있다^(1,6,7).

4. 결론

본 연구는 일반아스팔트 바인더에 폴리머(LDPE, SBS)를 첨가하여 제조한 폴리머 개질아스팔트 혼합물에 대한 저온균열 저항에 관한 연구이다. 폴리머 개질아스팔트 혼합물의 저온균열에 대한 저항성을 평가하기 위하여 상기 폴리머를 첨가하여 일반아스팔트를 개질하고, 이것으로 개질아스팔트 혼합물을 제조하여 기본 특성 시험 및 저온에서의 간접인장강도시험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

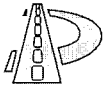


(a)



(b)

그림. 6. Failure surfaces of specimen tested at (a) -20°C and (b) -30°C



1) 상온 (+25°C)에서의 간접인장강도의 경우, 일반아스팔트 혼합물에 비하여 개질아스팔트 혼합물이 비교적 더 높은 것으로 나타났다. 강성지수 (SI)는 AP에 비하여 LC 및 S 개질 혼합물에서는 거의 유사하게 나타났으나, LS 개질 혼합물에서는 40% 이상 높아 전반적으로 인장강도 특성이 향상된 것으로 나타났다.

2) 저온 영역에서의 온도변화에 따른 간접인장강도 분석 결과, 모든 혼합물은 -10°C ~ -20°C에서 최대치를 보였다. 이는 -20°C 미만의 낮은 온도에서 시차열 응력이 인장강도 이상으로 발생하여 내부에 손상이 발생하기 때문에 나타나는 현상인 것으로 보여진다. 그리고 개질아스팔트 혼합물은 일반아스팔트 혼합물에 비하여 더 낮은 온도에서 강도가 유지되어 폴리머 개질에 따른 효과가 상당히 나타나 보였다.

3) 본 연구에 한 가지 입도의 같은 골재만 사용되었다는 관점에서 볼 때, 바인더가 저온균열에 대한 저항에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

4) 저온에서 간접인장강도 시험 후 파괴단면은 온도에 따른 차이를 나타냈다. 즉, 비교적 높은 저온인 -10°C와 -20°C에서는 파괴시 많은 굵은골재들이 파괴되고 골재와 아스팔트 매트릭스와의 접합면(interface)의 파괴를 보기가 드물었으나 -30°C에서는 골재의 파괴 대신 많은 접합면의 파괴를 볼 수 있었다.

5) 따라서 겨울철 포장온도가 -10°C 이하로 내려가면, 일반아스팔트 포장에서는 저온균열 (low temperature crack)이 발생할 것으로 예상되나 폴리머 개질 아스팔트를 사용하면 -20°C 이하의 기온에서까지 저온균열 저항성이 향상될 것으로 기대된다. 따라서 동절기 추운 지방에서 저온균열을 예방하기 위해서는 폴리머 개질아스팔트의 사용이 권장된다.

하지만 본 연구는 한 종류의 아스팔트와 골재로 제조한 실험실 연구에 근거한 것이다. 보다

일반화된 결과의 도출을 위해서는 국내에서 생산되는 다른 정유사의 아스팔트와 다른 등급 (AP-3 및 AP-5 등)의 아스팔트, 다른 종류의 골재를 사용한 실험을 수행하여 객관성을 확보하여야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 지정 강원대학교 석재복합 신소재 연구센터의 부분적 지원에 의해 이루어진 것입니다.

참고문헌

1. El Hussein, M. Kim, K. W. and Ponniah, J. (1988), "Asphalt concrete damage associated with extreme low temperatures," *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 10, No. 4. ASCE New York, NY, 269-274
2. Fromm, H. J. and W. A. Phang., (1971), "Temperature susceptibility control in asphalt cement specifications," HRB, Highway Research Record 350.
3. Gaw, W. J., (1977), "Measurement and prediction of asphalt stiffness and their use in developing specifications to control low-temperature pavement transverse cracking," ASTM, Special Technical Publication 628.
4. Kandhal, P. S., (1980), "Evaluation of low temperature pavement cracking on Elk county research project," TRB, Transportation Research Record 777.
5. Kim, K. W., (1988), "Determination of critical tensile strength for bituminous concrete surface course," Dissertation in partial fulfillment of Ph.D in Civil Engineering, Clemson University, Clemson, SC.
6. Kim, K. W. and El Hussein, H. M., (1995), "Effect of differential thermal contraction on fracture properties of asphalt materials," *Journal of AAPT*, Vol. 64.
7. Kim, K. W. and El Hussein H. M., (1997), "Fracture toughness of asphalt materials at low temperatures," *Construction & Building Materials*.
8. 건설교통부, (1996) "도로표준설계 시공지침."
9. 권승준, (1999) "폴리머 개질 역청 콘크리트의 저온 파괴거동," 강원대학교 박사학위논문.

(접수 : 2002. 7. 12)