



LMS(%)와 S_D 에 의한 노화 아스팔트 혼합물의 소성변형 추정

Estimation of Rutting Property of Artificially-Aged Asphalt Mixtures Based on LMS(%) and S_D

정재현* 박태원* 도영수** 김광우***
 Jung, Jae Hun Park, Tae Won Doh, Young Soo Kim, Kwang Woo

Abstract

This study was carried out for evaluating correlation of aging level and deformation resistance of asphalt mixtures conditioned by artificial aging treatment. The specimens were made of the short-term aged loose asphalt mixture which was kept in a convection oven at 154 °C for 2 hours, and then were artificially aged at 110 °C for 24, 48, 72 and 96 hours for long-term aging. Deformation strength (S_D) and large molecular size ratio (LMS(%)) were measured after short-term and each long-term aging treatment to evaluate aging extents of each mixture with aging time using GPC(Gel-permeation chromatograph) test. It is shown that the S_D and LMS(%) were increased with aging time increment, and that LMS(%) quantity and S_D have relatively good correlation each other. This study found that the aged asphalt mixture had better resistance against rutting and it was possible to estimate rutting characteristics of asphalt mixtures by using LMS(%) without a binder recovery.

Keywords : GPC, Kim test, LMS, long-term aging, short-term aging

요 지

본 연구는 154°C로 2시간의 단기노화를 거친 혼합물로 제작한 공시체를 110°C에서 24, 48, 72, 96시간 동안 장기노화를 시켜 아스팔트 혼합물의 노화와 소성변형 저항성을 평가하였다. 혼합물의 노화 시간이 증가함에 따라 강성의 증가로 인한 소성변형 저항성이 증가할 것을 고려하여 변형강도를 이용해 단기노화와 장기노화를 거친 공시체에 대해 소성변형특성을 측정하였다. 또한 노화 시간의 증가에 따른 바인더의 노화 정도를 측정하기 위하여 GPC(Gel-permeation chromatograph) 분석을 통하여 대형분자비율(LMS(%))을 측정하였다. 노화 시간이 길어짐에 따라 LMS(%)가 증가하고 혼합물의 변형강도 값이 커지는 것을 확인하였다. 또한 상관성 분석으로부터 LMS(%)와 변형강도가 상관성이 높은 것으로 나타나 이를 통해 혼합물이 노화되면 소성변형 저항성이 증가됨을 확인하였다. 따라서 LMS(%)의 측정으로 아스팔트 혼합물의 바인더 추출 없이도 소성변형특성을 추정 가능함을 확인하였다.

핵심용어 : 아스팔트 노화, GPC, Kim test, 대형분자, LMS, 변형강도, 단기노화, 장기노화,

* 정회원 · 강원대학교 지역기반공학과 박사과정

** 정회원 · 강원대학교 석재복합신소재연구센터 연구교수 · 공학박사

*** 정회원 · 강원대학교 지역기반공학과 교수 · 공학박사

1. 서론

노화는 아스팔트 혼합물 내 바인더 stiffness의 변화를 초래하여 균열 및 소성변형 저항성과 같은 혼합물의 주요성질을 변화시킨다. 가열 혼합물 제조 시 바인더는 고온의 골재와 접촉에 의해 급속히 산화되기 시작하여 운반 및 대기과정(1-2시간 정도)에서 고온이 유지되며 산화가 심화되는 초기노화 과정을 거친다. 이러한 초기노화는 포설 후 공용 중에 증장기적으로 대기 중에서 서서히 산화되며 발생하는 후기노화와 구분된다. 초기노화는 단기노화(Short-term aging: SA)로, 포설 이후 노화는 장기노화(Long-term aging: LA)로 명명하며 이를 모사하기 위한 표준시험법으로 회전박막오븐(Rolling thin film oven (RTFO)) 시험과 압력노화시험기(Pressure aging vessel (PAV)) 시험법이 개발되어 있다(Bell 1989). 하지만 이는 바인더 만에 대한 시험방법으로 혼합물 상태에서의 바인더 노화를 모사하는 것은 아니다. 바인더는 고온의 골재와 혼합·운반 되면서 단기노화되고 혼합물 내에서 골재와 결합된 상태로 존재하며 장기노화도 진행되므로 혼합물에 대한 노화연구가 중요하나 바인더자체의 노화연구에 비해 적은 편이다.

대부분 실내노화 모사실험 연구는 아스팔트 혼합물을 노화시킨 후 추출한 바인더의 침입도와 점도 측정 등의 바인더 실험에 국한되었다. 그러나 Kim et al (1993)은 혼합물에서 추출된 바인더의 Gel-permeation chromatograph (GPC) 시험으로 대형분자비율(Large molecular size ratio: LMS(%))을 측정하고 이 값으로 각 혼합물의 역학적 특성을 추정할 수 있음을 보였다. 김광우 등(2001)은 개질아스팔트 바인더의 노화가 진행됨에 따라 혼합물의 회복탄성계수 및 간접인장강도가 증가함을 확인하였다. 또한 LMS(%)는 바인더의 $G^*/\sin\delta$ 와도 상관관계가 높음을 확인하였다(Kim et al. 2006b).

따라서 바인더 LMS(%) 증가가 혼합물의 강성을

증가시켜 소성변형 특성을 향상시킴을 예측할 수 있지만 이를 노화와 연결하여 구체적으로 규명된바가 없다. 하지만 전술한 연구에서 LMS(%)로 바인더의 강성변화에 관련된 혼합물의 특성을 추정할 수 있고 소성변형도 바인더 강성과 관련된 특성이므로 LMS(%)의 측정으로도 혼합물의 소성변형특성을 추정할 수 있을 것임을 암시한다. 다시 말해 아스팔트 혼합물의 바인더에 대한 LMS(%)를 통해 혼합물의 소성변형 특성을 상대적으로 추정할 수 있을 것이다.

이를 위해서는 혼합물의 소성변형특성을 파악해야 하고 그 혼합물로부터 바인더 노화를 측정해야 한다. 혼합물의 소성변형 특성은 소성변형과 상관성이 높은 시험을 수행하여 추정하며 반복주행시험(Wheel tracking (WT))이나 변형강도(Deformation strength: S_D) 등이 비교적 상관성이 높은 시험이다. 인공노화 혼합물이 아닌 현장의 경우 노화된 포장체에 대한 WT 시험은 슬래브 판공시체를 떼야 하므로 어려움이 있다. 그에 비해 S_D 측정은 직경 100mm 이상의 원형코어를 채취하면 가능하므로 비교적 쉽지만 전자 후자 모두 상당한 시간과 노력이 필요하다. 또한 포장체 바인더의 노화상태는 일반적으로 혼합물로부터 바인더를 추출·회수하여 평가하지만 새로운 GPC 기법(Kim et al. 2006a)은 혼합물로부터 바로 LMS(%)를 측정할 수 있다.

이렇게 새로운 GPC 시험을 적용할 경우 소량(10여 그램)의 혼합물 샘플만으로도 바인더의 LMS(%)를 측정하여 노화상태를 추정할 수 있고 이로부터 혼합물의 소성변형특성을 상대추정할 수 있다. 그러므로 본 연구의 가설은 "LMS(%)는 바인더의 강성도(stiffness)와 상관성이 크므로 어떤 혼합물의 바인더에 대한 LMS(%)를 안다면 그 혼합물의 노화정도를 알 수 있고 이로부터 소성변형특성의 상대추정도 가능하다"는 것이다.

따라서 인공노화 혼합물의 S_D 값과 LMS(%)의 상관성 분석을 통해 두 값이 상당한 관계가 있음을 보인다면 LMS(%) 만으로 S_D 를 추정할 수 있고, 이는

곳 그 혼합물의 소성변형특성을 추정하는 것이 될 것이다. 이에 본 연구의 목적은 아스팔트 혼합물을 여러 시간대로 인공노화시켜 노화시간 변화에 따른 바인더의 노화 상태변화와 혼합물의 변형강도를 통해 소성변형 저항성의 추정 가능성을 보여주는 것이다.

2. 사용재료 및 시험방법

2.1 사용재료

본 연구에서는 AP-5 (침입도 60~80)를 기본 아스팔트로 사용하였다. 개질아스팔트는 수년간의 연구와 현장의 포장에서 많이 사용되어 개질효과가 우수한 Low-density polyethylene (LDPE) 6%의 건식 개질아스팔트와 Styrene-butadiene-styrene (SBS)로 개질하여 상용화되어 있는 PG 76-22 아스팔트 바인더를 사용하였다. 표 1은 사용된 아스팔트 바인더들의 기본 특성들을 나타낸다.

표 1. Fundamental properties of binders used

Binder	Penetration 25°C(0.1mm)	Kinematic Viscosity 135°C (cP)	PG Grading (°C)	LMS ¹⁾ (%)	Note
Pen60-80	71	425	64-22	12.39	
LDPE 6%	52	1275	76-22	12.00	
PG 76-22	47	1325	76-22	13.00	

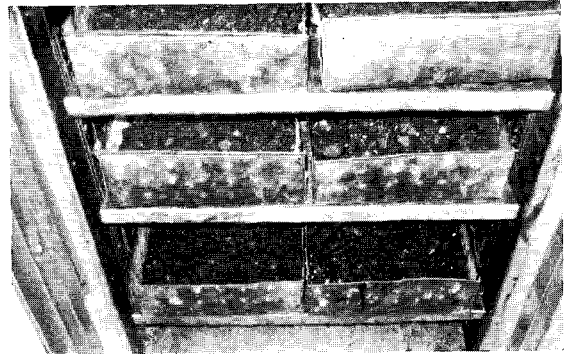
1) LMS : Large Molecular Size

골재의 품질이나 입도는 아스팔트 혼합물의 특성에 중요한 영향을 미친다. 그러므로 골재는 생산지 별로 그 조건이 다르기 때문에 시방규정에 적합한지를 반드시 검토하여야 한다. 본 연구에서는 국내에 전국적으로 널리 분포되어 있고 일반적으로 많이 사용되는 편마암, 화강암 쇄석을 굵은 골재와 잔골재(screenings)로 사용하였으며, 채움재(mineral

filler)는 석회석 석분을 사용하였다. 굵은 골재 최대 치수는 13mm와 19mm 2종류를 사용하였다. 입도는 건설교통부 밀입도 규정에 맞도록 입도를 혼합 조정하여 사용하였다.

2.2 실내노화

본 연구에서는 개질아스팔트가 포함되므로 함부르크 휠 테스트 장비 및 조지아 로드 휠 테스트의 단기 노화방법(Collins et al. 1996)을 이용하였다. 이 두 방법에서는 PG 70이나 PG 76 혼합물의 경우 154°C의 강제 공기순환 오븐에서 매시간 1회의 교반을 하며 2시간을 단기노화시킨 혼합물로 공시체를 제조한다. 본 연구에서는 배합설계에서 결정된 최적아스팔트 함량(Optimum asphalt contents:OAC)으로



(a)



(b)

그림 1. (a)Loose asphalt mixtures during short term oven aging and (b)specimens for Kim test during long term oven again

12가지 혼합물을 비벼서 상기 방법으로 단기노화 과정을 거친 후 선화다짐기로 75회 다짐하여 직경 10cm 공시체를 공극률을 $4 \pm 1\%$ 로 제작하였다.

장기노화(LA)는 이렇게 단기노화를 거친 혼합물로 제조한 공시체를 강제 공기순환식 오븐에서 110°C 로 각각 24, 48, 72, 96시간을 노화시켰다. 장기노화 온도를 기존 연구의 85°C 나 100°C 보다 더 높게 110°C 로 한 이유는 공시체 공극률을 4%로 다지므로 기존연구의 8%로 제조한 공시체보다 내부까지 노화가 덜 될 것을 우려해 택한 것이다. 그림 1(a)는 혼합물의 단기노화 과정을 보여주며 (b)는 공시체의 장기노화 광경을 보여 준다.

2.3 Kim test

노화에 따라 아스팔트 혼합물은 강성이 증가되므로 소성변형 저항성이 증가될 것으로 예측된다. 본 연구에서는 다년간의 연구(김광우 등, 2002, 2004a, 2004b, 이문섭 등 2004d, Kim et al. 2004, Kim et al. 2005, Young S. Doh et al. 2006)를 통해 소성변형 저항성과 상관성이 높은 Kim test의 변형강도(S_D)를 노화아스팔트 혼합물의 소성변형 저항치로 측정하였다.

Kim test 시험은 직경 (D) 40mm, 하단의 원형 절삭반경 (r) 10mm의 하중봉을 사용하여 혼합물에 압밀·전단에 의한 변형이 유발되도록 그림(a)에서와 같이 채하 하였다. 시험 온도는 60°C 이며, 이를 위하여 공시체를 60°C 항온수조에서 30분간 수침시킨 후 Kim tester mold에 공시체를 거치하였다. 하중은 50mm/min의 속도로 가하였으며 공시체별 하중-변형곡선(그림 2(b))에서 최대하중 P_{\max} 과 이때 표면으로부터 내려 들어간 변형(y)을 식(1)에 대입하여 변형강도를 계산하였다.

$$S_D = \frac{4P_{\max}}{\pi(D - 2(r - \sqrt{2ry - y^2}))^2} \quad (1)$$

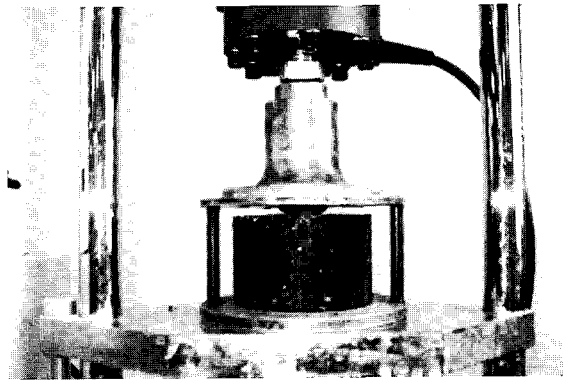
여기서 S_D = 변형강도 (MPa)

P_{\max} = 최대하중(N)

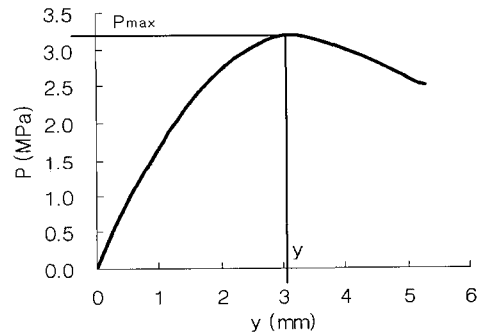
D = 하중봉의 직경(mm)

r = 하중봉의 원형절삭반경(mm)

y = 수직변형(mm)이다.



(a)



(b)

그림 2. (a)Kim test setting and (b) a typical load-deformation curve from Kim test

2.4 GPC 시험

일반적으로 GPC (Gel-permeation chromatograph) 시험의 샘플은 바인더를 사용하므로 혼합물의 바인더 노화상태를 측정하려면 먼저 바인더를 추출·회수해야 한다. 하지만 Kim et al. (2006a)은 아스팔트 혼합물에서 Abson 방법 등으로 바인더를 추출·회수하지 않고도 바로 GPC를 측정하는 새로운 방법을 개발하였다. 그림 3은 일반(그림에서 Conventional)

GPC 샘플링 방법과 새로운 방법을 도식적으로 비교하여 보여준다. 새로운 GPC 방법으로 혼합물에서 측정된 LMS(%)는 동일 혼합물에서 추출·회수한 바인더에서 측정된 LMS(%)와 유의차가 없음이 확인되었다. GPC로 얻어지는 대형분자(Large molecular size:LMS) 비율(%)은 그 바인더의 점도, 침입도 등과 밀접한 관계가 있다(Jennings 1980, Kim and Burati 1993, Price 1988). 따라서 새로운 GPC 방법을 사용하면 혼합물 내의 바인더 노화상태를 바인더의 추출이나 점도시험 등의 수고없이 쉽게 파악할 수 있다. 본 연구에서는 이 방법을 적용하여 노화된 혼합물의 바인더 노화상태를 파악하는 기법을 사용하였다.

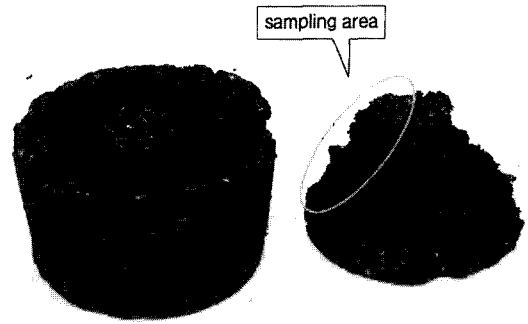


그림 4. A photograph showing sampling location for GPC test

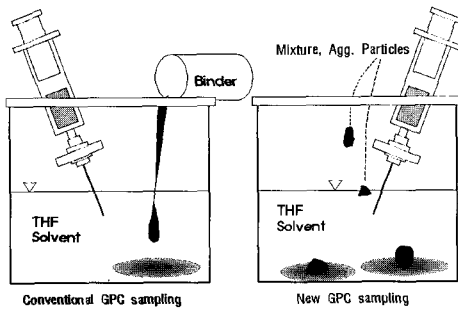


그림 3. Schematic illustration of GPC sampling by conventional and new method (Kim et al. 2006)

단기노화 후 제조하여 장기노화 처리하지 않은 공시체와 각 시간별 장기노화를 거친 공시체로 변형강도를 측정하고 각 공시체의 노화정도 판정을 위하여 해당 혼합물에서 직접 샘플을 채취하여 GPC 시험을 수행하였다. 이를 위해 파괴된 공시체의 파단면에서 무작위로 소량(약 10g)의 시료를 채취하여 이를 Tetrahydrofuran (THF) 용액에 녹여 GPC 시험기에 주입하여 아스팔트의 대형분자(Large molecular size:LMS) 량(%)을 분석하였다. 이의 측정결과와 공시체 변형강도와의 상관성을 분석하였다. 그림 4는 변형강도 시험이 완료된 혼합물에서 시료를 채취한 위치를 나타낸다.

그림 5(a)는 본 연구에 사용된 GPC 시스템을 보여준다. 한 샘플의 GPC 시험은 30분 걸리며 3번 반

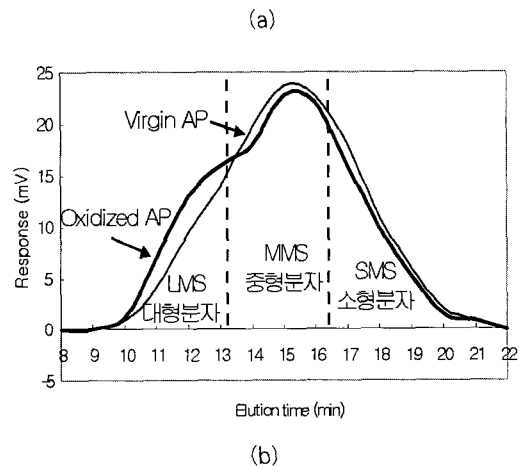
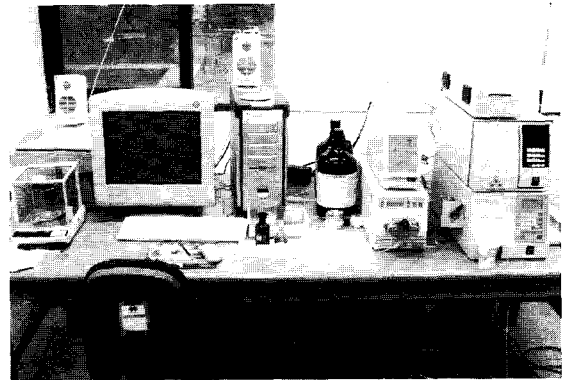


그림 5. (a)GPC system and (b)Illustration of typical GPC profiles for virgin and old asphalt binders

복시험의 평균을 분석에 사용하였다. 얻어진 크로마토그램은 그림 4(b)와 같이 대형분자 (LMS), 중형분자 (Medium molecular size:MMS)와 소형분자

(Small molecular size:SMS)로 나눈다. 나누는 방법은 문헌(Kim et al. 1995)에 근거하였으며 이 중에서 바인더의 각종 특성과 가장 관계가 큰 LMS 만을 분석에 사용하여 변형강도와 상관성 분석에 사용하였다. 동일한 GPC 방법은 타 문헌(Kim et al. 2006a, 2006b, 정재현 2007)에 상세히 설명되어 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 Kim test

혼합물별로 단기노화 후 직경 10cm 공시체 20개를 75회 선회다짐으로 제작하고, 무작위로 4개(SA 용)를 제외한 16개의 공시체를 강제 공기 순환식 노

표 2. Kim test result

Mixture type	Aging level	S _b (MPa)	Increment of S _b (%)	Mixture type	Aging level	S _b (MPa)	Increment of S _b (%)
Gneiss 13mm Pen 60-80	SA ¹⁾	4.121	1.00	Gneiss 19mm Pen 60-80	SA	3.669	1.00
	LA ²⁾ 24 hr	4.391	6.55		LA 24 hr	4.013	9.38
	LA 48 hr	5.056	22.69		LA 48 hr	3.749	2.18
	LA 72 hr	5.283	28.20		LA 72 hr	4.457	21.48
	LA 96 hr	4.785	16.11		LA 96 hr	4.836	31.81
Gneiss 13mm LDPE 6%	SA	5.027	1.00	Gneiss 19mm LDPE 6%	SA	4.609	1.00
	LA 24 hr	5.721	13.81		LA 24 hr	4.947	7.33
	LA 48 hr	5.927	17.90		LA 48 hr	5.107	10.80
	LA 72 hr	6.263	24.59		LA 72 hr	5.432	17.86
	LA 96 hr	6.791	35.09		LA 96 hr	5.254	13.99
Gneiss 13mm PG 76-22	SA	4.102	1.00	Gneiss 19mm PG 76-22	SA	4.860	1.00
	LA 24 hr	4.708	14.77		LA 24 hr	5.450	12.14
	LA 48 hr	4.796	16.92		LA 48 hr	5.831	19.98
	LA 72 hr	5.231	27.52		LA 72 hr	6.032	24.12
	LA 96 hr	5.973	45.61		LA 96 hr	6.968	43.37
Granite 13mm Pen60-80	SA	3.673	1.00	Granite 19mm Pen60-80	SA	4.234	1.00
	LA 24 hr	4.012	9.23		LA 24 hr	4.673	10.37
	LA 48 hr	3.756	2.26		LA 48 hr	4.837	14.26
	LA 72 hr	4.485	22.11		LA 72 hr	5.038	18.99
	LA 96 hr	4.843	31.85		LA 96 hr	4.516	6.66
Granite 13mm LDPE 6%	SA	4.698	1.00	Granite 19mm LDPE 6%	SA	3.632	1.00
	LA 24 hr	4.875	3.77		LA 24 hr	3.922	7.98
	LA 48 hr	5.105	8.66		LA 48 hr	4.151	14.29
	LA 72 hr	5.000	6.43		LA 72 hr	4.847	33.45
	LA 96 hr	5.415	17.38		LA 96 hr	4.473	23.16
Granite 13mm PG 76-22	SA	5.094	1.00	Granite 19mm PG 76-22	SA	6.015	1.00
	LA 24 hr	4.676	-8.21		LA 24 hr	8.113	34.88
	LA 48 hr	5.663	11.17		LA 48 hr	7.616	26.32
	LA 72 hr	5.902	15.86		LA 72 hr	7.822	30.04
	LA 96 hr	6.363	24.91		LA 96 hr	8.473	40.86

1) SA : Short - term aging 2) LA : Long - term aging



화 오븐에 넣고 110℃에서 24, 48, 72, 96 시간대 별로 장기노화를 시켰다. 각 노화 시간별로 무작위로 4개의 공시체를 꼬집어내어 공극률 4±1% 범위에 만족되는 공시체만 변형강도를 측정하였다. 표 2는 각 노화 시간별로 노화된 공시체의 변형강도와 SA를 기준으로 한 변형강도의 증가율을 나타낸다. 각 S_D는 공시체 3개에 대한 평균치이다.

표 2에서 알 수 있듯이 모든 혼합물의 변형강도는 노화시간이 길어질수록 증가되는 것으로 나타났다. 이는 노화시간이 길어짐에 따라 바인더 노화가 커져서 혼합물의 강성이 증가됨을 의미한다. 따라서 이렇게 변형강도가 증가되는 것은 소성변형 저항성도 향상되는 것을 의미한다. 또한 그림 6의 곡선의 모양에서 알 수 있듯이 혼합물은 단기노화 후 24시간 만에 변형강도가 보다 많이 증가하고 그 이후는 완만하게 증가하였다. 따라서 실내시험용 공시체 제조시는 반드시 단기노화를 시켜야 현장과 유사한 혼합물이 될 것으로 사료된다.

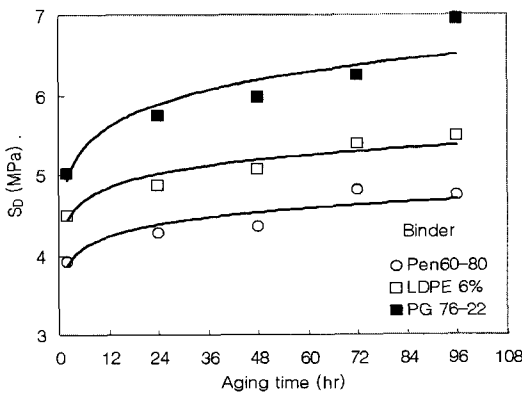


그림 6. S₀ change due to long-term aging (mean value of 4 for each binder in Table 2)

또한 단기 노화 혼합물의 96시간 노화 후 변형강도 증가율의 평균은 Pen 60-80과 LDPE 혼합물이 약 21%로 비슷하나 SBS로 개질한 PG 76-22 혼합물은 약 38%로 훨씬 크게 나타났다. 또한 그림 6에서도 PG 76-22는 혼합물은 타 바인더 혼합물에 비해 노화가 96시간 까지 크게 진행되면서 변형강도가 월등히 커지는 것으로 나타났다. 이는 바인더 특성상

노화로 인해 SBS 바인더의 강성이 크게 높아지기 때문인데 이와 같은 큰 강성증가가 균열발생의 원인이 되는지는 별도의 연구를 통해 확인이 필요하다.

3.2 GPC

표 3의 시험결과에 의하면 혼합물이 단기노화를 거치고 장기노화의 시간이 길어질수록 대형분자량이 증가하는 것을 볼 수 있다. 즉, 노화시간의 증가에 따라 아스팔트 바인더의 노화가 더욱 심화되며 이것이 대형분자 비율의 증가로 나타난다는 것을 의미한다. 각 혼합물 조합의 특성에 따라 다르지만 단기노화를 거친 혼합물의 대형분자량은 18~24% 정도로 나타났고, 장기노화 96시간을 거친 혼합물의 대형분자량은 약 20~27%로 나타났다. 골재 크기별로는 편마암 골재의 경우 19mm 골재의 LMS(%) 수준이 13mm 보다 다소 낮아 노화가 덜 되는 것으로 보이나 화강암 골재에서는 그 차이가 거의 없는 것으로 나타났다.

3.3 상관성 분석

가. 노화시간 증가에 따른 LMS(%)의 변화

그림 7은 각 바인더별 혼합물별 노화시간 증가에 따른 LMS(%)의 변화를 보여 준다. 모든 골재의 조합에서 SBS로 개질된 PG 76-22 혼합물의 LMS(%)가 가장 높게 그리고 가장 많이 증가되는 것으로 나타

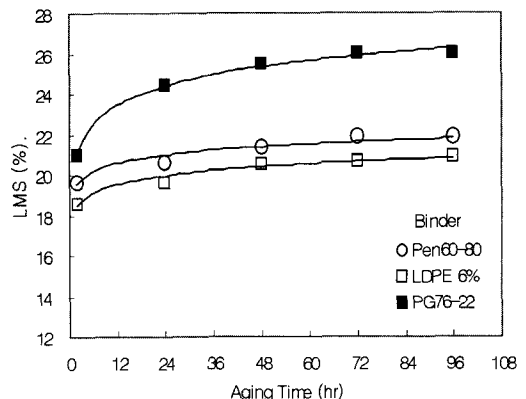


그림 7. LMS(%) increase due to long-time aging (mean value of 4 for each binder in Table 2)

㉠ 2. Result of GPC test

Mixture type	Aging level	LMS(%)	Increment of LMS(%)	mixture type	Aging level	LMS(%)	Increment of LMS(%)
Gneiss 13mm Pen 60-80	Original ¹⁾	12.4	-	Gneiss 19mm Pen 60-80	Original	12.4	-
	SA ²⁾	20.1	62.1		SA	18.7	50.9
	LA ³⁾ 24 hr	21.8	75.7		LA 24 hr	20.1	62.2
	LA 48 hr	22.7	83.8		LA 48 hr	20.8	67.9
	LA 72 hr	23.1	86.4		LA 72 hr	21.4	72.7
	LA 96 hr	22.1	78.4		LA 96 hr	22.2	78.9
Gneiss 13mm LDPE 6%	Original	12.0	-	Gneiss 19mm LDPE 6%	Original	12.0	-
	SA	20.1	67.5		SA	17.5	45.8
	LA 24 hr	21.8	81.9		LA 24 hr	18.9	57.5
	LA 48 hr	24.2	101.7		LA 48 hr	18.5	54.2
	LA 72 hr	23.7	97.5		LA 72 hr	19.1	59.2
	LA 96 hr	24.0	100.0		LA 96 hr	19.6	63.3
Gneiss 13mm PG 76-22	Original	13.0	-	Gneiss 19mm PG 76-22	Original	13.0	-
	SA	20.9	60.8		SA	20.3	56.2
	LA 24 hr	25.2	93.8		LA 24 hr	22.0	69.2
	LA 48 hr	25.3	94.5		LA 48 hr	25.6	96.9
	LA 72 hr	26.1	100.5		LA 72 hr	25.5	96.2
	LA 96 hr	26.01	100.0		LA 96 hr	24.7	90.0
Granite 13mm Pen 60-80	Original ¹⁾	12.4	-	Granite 19mm Pen60-80	Original	12.4	-
	SA ²⁾	19.9	30.6		SA	19.9	60.6
	LA ³⁾ 24 hr	20.5	65.5		LA 24 hr	20.1	62.2
	LA 48 hr	20.5	65.5		LA 48 hr	21.3	71.9
	LA 72 hr	21.5	73.5		LA 72 hr	21.5	73.5
	LA 96 hr	21.4	72.7		LA 96 hr	21.7	75.1
Granite 13mm LDPE 6%	Original	12.0	-	Granite 19mm LDPE 6%	Original	12.0	-
	SA	17.9	49.2		SA	18.7	55.8
	LA 24 hr	18.8	56.7		LA 24 hr	19.1	59.2
	LA 48 hr	19.8	65.0		LA 48 hr	19.6	63.3
	LA 72 hr	19.9	65.8		LA 72 hr	20.1	67.5
	LA 96 hr	19.4	61.7		LA 96 hr	20.6	71.7
Granite 13mm PG 76-22	Original	13.0	-	Granite 19mm PG 76-22	Original	13.0	-
	SA	24.5	88.5		SA	18.2	40.0
	LA 24 hr	25.3	94.6		LA 24 hr	25.2	93.8
	LA 48 hr	25.1	93.1		LA 48 hr	26.1	100.8
	LA 72 hr	26.3	102.3		LA 72 hr	26.2	101.5
	LA 96 hr	26.4	103.1		LA 96 hr	27	107.7

1) Original : fresh binder, 2) SA : Short-term aging, 3) LA : Long-term aging



났다. 이는 앞서 변형강도의 증가율에서도 SBS 개질 혼합물이 가장 높았던 점과 일치한다. 반면 LDPE 개질 아스팔트 혼합물은 일반 아스팔트(AP) 혼합물보다도 적게 노화되는 것으로 나타났으며 LMS(%)의 변화도 가장 낮았다.

이는 LDPE가 바인더의 노화억제와 어떤 관계가 있는 것으로 보이며 기존의 연구(김광우 등 2004) 결과와 유사한 것이다. 또한 앞서 단기노화 후 변형강도가 높기는 하지만 그 증가율이 일반 AP혼합물과 유사하게 96시간 후 약 22%인 점과 관련하여 향후 LDPE와 바인더 노화와 관련해서 보다 체계적인 규명이 필요한 것으로 사료된다.

나. 대형분자비율(LMS(%))과 변형강도의 상관성 분석
 앞서 언급하였듯이 바인더의 노화는 바인더의 LMS(%) 증가를 가져오고, LMS(%)이 높은 바인더는 stiffness가 크다. 따라서 이 바인더의 stiffness의 증가는 아스팔트 혼합물의 강성증가를 유발하여 소성변형 저항성이 향상된다. 따라서 본 연구에서는 Kim test를 통하여 측정된 변형강도 값과 GPC의 LMS(%)에 대한 상관성을 분석을 통해 아스팔트 혼합물의 소성변형 저항성과 바인더 LMS(%)와의 관계를 분석하였다.

바인더는 3가지이므로 이를 구분하여 변형강도 값과 LMS(%)의 회귀분석을 수행하고, 모든 바인더를 합한 전체 data에 대한 회귀분석을 수행하였다. 그림 8~11은 바인더별 혼합물의 노화에 따른 LMS(%)의

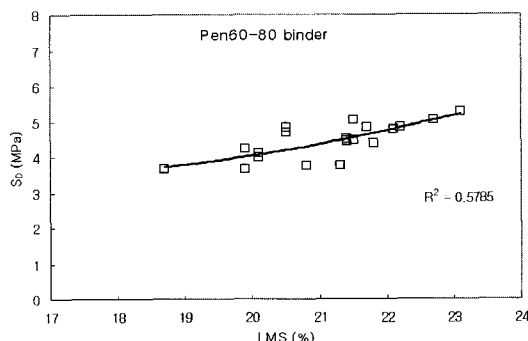


그림 8. Relationship S_D vs. LMS(%) of Pen 60-80 binder mixtures

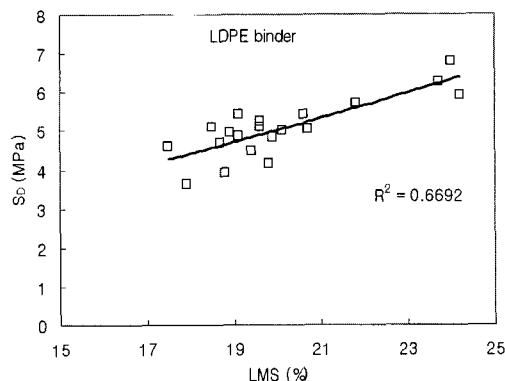


그림 9. Relationship S_D vs. LMS(%) of LDPE-modified binder mixtures

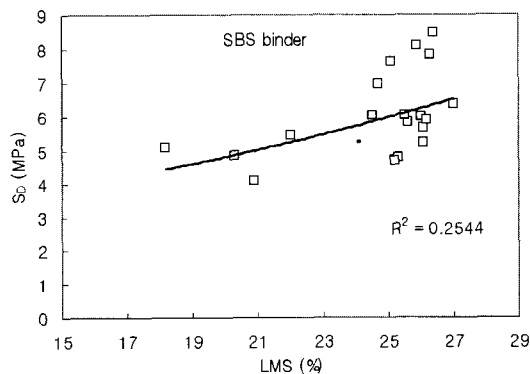


그림 10. Relationship S_D vs. LMS(%) of SBS binder mixtures

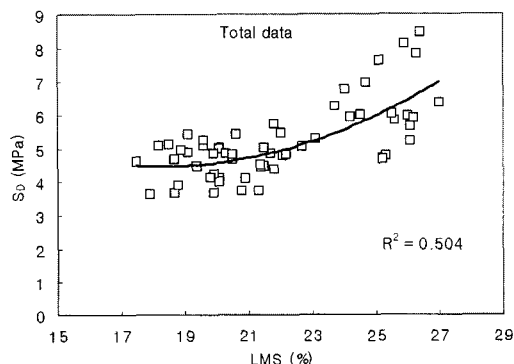


그림 11. Relationship S_D vs. LMS(%) of all 3 binder mixtures

변화와 변형강도 증가의 상관성을 분석한 결과이다.

그림에서 보면 LMS(%)의 증가는 S_D 의 증가를 가져오므로 아스팔트의 노화는 소성변형 저항성의 증



가를 유발함을 알 수 있다. 일반아스팔트(Pen 60-80)와 LDPE 개질 아스팔트 혼합물에서 변형강도와 LMS(%)의 R^2 은 0.58, 0.67 (평균 R^2 = 0.625)로 비교적 양호하게 나타나 노화시간 증가에 따른 LMS(%)의 증가와 변형강도 변화의 상관성이 양호한 것으로 나타났다. 이는 LMS(%) 변화로 변형강도의 예측이 가능하고 나아가 LMS(%)를 통해 혼합물의 소성변형 추정이 가능함을 보여주는 것이다.

또한 앞 절에서 보았듯이 모든 바인더는 단기노화와 초기 24시간까지 LMS(%)가 급속히 증가하고 그 이후 증가율이 줄어들며 이 LMS(%)의 증가가 소성변형 저항성 변화를 가져오므로 실험실의 소성변형 시험용 공시체는 단기노화과정을 거쳐서 제조해야 현장과 유사한 결과를 얻을 것으로 추정된다.

또한 전체 data의 R^2 은 0.504로 비교적 양호하지만 SBS 개질아스팔트에서는 R^2 이 0.25로 매우 낮게 나타났다. 이는 SBS 개질아스팔트 혼합물이 그림 6에서 보듯이 단기노화부터 급속하게 노화가 증가되며 LMS 양이 늘어나므로 변형강도와 상관성이 떨어지는 요인인 것으로 보여 진다. 이는 SBS 재료 자체가 아스팔트와 결합되어 있는 상태로 가열되면서 어느 정도 이상 노화되면 고분자화가 너무 많이 진행되어 강성이 과다해지기 때문에 나타나는 현상으로 보여 진다. 반면에 LDPE는 입자가 큰 폴리머로서 GPC 시험시에 filter로 모두 걸러지고 순수 아스팔트 바인더만이 GPC 시험 시에 사용되므로 아스팔트 고유의 노화특성이 GPC 시험에 그대로 나타난 것이라 보여 진다.

4. 결론

본 연구에서는 아스팔트 혼합물의 인공노화에 따른 바인더의 노화상태 변화와 혼합물의 소성변형특성 변화를 비교고찰 하였다. 혼합물 내 바인더의 노화상태는 대형분자비율(Large size molecule:LMS(%))로 나타낼 수 있으므로 GPC 시험을 통해 LMS(%)를

구하고 이를 혼합물의 변형강도와 상관성 분석을 통해 혼합물의 소성변형 저항성 변화를 평가하였으며 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 혼합물의 단기 및 장기노화에 따라 아스팔트 바인더가 산화되어 LMS(%)가 증가되며 장기노화시간이 길어짐에 따라 LMS(%)가 더 증가되었다. 또한 노화는 혼합물의 변형강도 증가를 유발하므로 소성변형 저항서의 향상을 가져오고 이를 LMS(%)로 추정할 수 있으므로 혼합물의 추출·회수 없이도 GPC로 혼합물의 소성변형 특성을 추정가능성을 확인할 수 있었다.
2. 노화정도가 커지면서 변형강도도 증가하며 이를 통해 혼합물의 소성변형 저항성이 향상됨을 알 수 있었다. 따라서 아스팔트 혼합물은 현장에서 포설된 후 공용기간에 따라 소성변형 저항성이 증가되므로 시간이 지날수록 소성변형의 진행이 자연스럽게 둔화됨을 추정할 수 있었다.
3. 모든 바인더는 단기노화 등 노화초기에 LMS(%)가 급속히 증가하고 LMS(%)의 증가는 소성변형 저항성 변화를 가져오므로 실내 소성변형시험 시는 반드시 단기노화과정을 거쳐야 현장과 유사한 시험결과를 얻게 될 것으로 사료된다.
4. LMS(%)와 변형강도의 상관성 분석을 통해 대형 분자비율이 증가함에 따라 변형강도가 증가됨을 확인하였고 바인더의 종류에 따라 차이는 있으나 노화에 예민한 SBS 개질아스팔트 혼합물을 제외하면 R^2 의 평균이 0.62 이상으로 나타났다.
5. 바인더별로는 SBS 개질 혼합물이 일반 아스팔트(Pen 60-80)와 LDPE 개질 혼합물보다 매우 심하게 노화되는데 이는 SBS가 아스팔트와 결합되어 가열되면서 어느 정도 이상 노화되면 고분자화가 너무 많이 진행되기 때문에 나타나는 현상으로 보여 진다. 특히 SBS 개질아스팔트 혼합물은 노화에 매우 민감하여 LMS(%)가 크게 변하므로 변형강도와 상관성이 떨어지는 요인인 것으로 보여 진다.

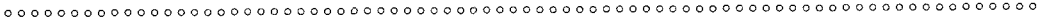


감사의 글

본 연구는 건설교통부의 지원과 교육부 BK21 친환경 건설전문가 양성사업의 후원으로 강원대학교 석재복합신소재연구센터의 장비를 활용하여 이루어진 것입니다.

참고 문헌

- 김광우, 안경애, 김성운, 이상범 이순제 (2001), "개질 결합재의 노화 특성이 아스팔트 콘크리트의 특성에 미치는 영향," 강원대학교 석재신소재제품연구센터 논문집 제6권.
- 김광우, 이문섭, 김준은, 최선주 (2002), "소성변형과의 상관성에 근거한 아스팔트 콘크리트의 강도특성 개발에 관한 기초연구," 한국도로학회논문집, 제 4권 4호, pp. 23-40.
- 김광우, 최선주, 이기호, 도영수 (2004a), "온도변화에 따른 아스팔트 콘크리트의 변형강도와 소성변형과의 상관성 연구," 대한토목학회 논문집, 제24권 5D호 pp. 37-46.
- 김광우, 김성태, 권오선, 도영수 (2004b), "수퍼페이브 혼합물의 소성변형저항성과 변형강도와의 상관성분석," 한국도로학회 논문집, Vol. 6, No 4, pp. 45-54
- 김광우, 도영수 Amirkhanian, S. N. (2004c), "Evaluation of aging characteristics of selected PMA using HP-GPC," 한국도로학회 논문집 제6권 2호, pp. 15-24.
- 이문섭, 최선주, 김광우, 도영수 (2004d), "공시체 크기가 변형강도를 이용한 소성변형 추정에 미치는 영향," 한국도로학회 논문집, 2004. 6. Vol 6, No. 2, pp. 1-14.
- 정재현 (2007), "인공노화 아스팔트 혼합물의 변형특성 연구," 석사학위논문, 강원대학교 대학원 지역기반공학과.
- Bell, C. A. (1989), "Summary report on aging of asphalt-aggregate systems," Report No. SHRP-A-305. *Strategic Highway Research Program*, National Research Council, Washington, D.C.
- Bell, C. A., Wieder, A. and Fellin, M. J. (1994). "Laboratory aging procedures for asphalt aggregate mixtures: field validation," Report No. SHRP-A-390. *Strategic Highway Research Program*, National Research Council, Washington, D.C.
- Collins, R., Shami, H. and Lai, J. S. (1996) "Use of Georgia Loaded Wheel Tester To Evaluate Rutting of Asphalt Samples Prepared by Superpave Gyrotory Compactor," In *Transportation Research Record 1545, TRB, National Research Council*, Washington, D.C., pp. 161-168.
- Jennings, P. W. (1980), "High Pressure liquid chromatography as a method of measuring asphalt composition," *Report No. FHWA-MT-7930*, Dept. of Chemistry, Montana St. Univ., Bozeman, Mt.
- Kim, K. W. and Burati, J. L. (1993), "Use of GPC Chromatogram to Characterize Aged Asphalt Cement," *Journal of materials in Civil Engineering, ASCE*, Vol. 5. No. 1., pp. 41-52
- Kim, K. W. and Burati, J. L. Park, J. S. (1995), "Methodology for Defining LMS Portion in Asphalt Chromatogram," *Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE*, Vol. 7. No. 1, pp. 32-40
- Kwang W. Kim, Youngs S. Doh, Serji N. Amirkhanian., (2004) "Feasibility of Deformation Strength for Estimation of Rut Resistance of Asphalt Concrete," *International Journal of Road Materials and Pavement Design*, Vol. 5, No 3, pp. 303-322.
- Kim, K. W., Cho, M. J., Ko, T. Y., Doh, Y. S., (2005). "Kim Test for Measure of Rut Resistance of Asphalt Concretes," *Proceedings, 5th International Conference on Road & Airfield Pavement Technology, Korean Society of Road Engineers*, Vol. 1, pp. 408-415
- Kim, K. W., Kim, K. K., Doh, Y. S. and Amirkhanian, S. (2006a), "Direct Estimation of asphalt viscosity in RAP using GPC without binder recovery," *Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE*, Vol. 18, No 4, pp. 561-567
- Kim, K. W., Lee, S. J., Amirkhanian, S. N. (2006b), "Estimation of rutting characteristics of waste tire rubber-modified asphalt binder using GPC," *Proceedings of Urban Transport XII*(ISBN:1-84564-179-5), Prague, July 2006.



pp. 463-473

Price, R. P. A. (1988). "Quantitative method to characterize asphalt using HP-GPC." *Dissertation in partial fulfillment of the requirements for Ph.D. in Civil Eng.*, Clemson University, Clemson, SC.

Von Quintas, H., Scherocman J., Kennedy, T. and Hughes, C. S. (1988), "Asphalt Aggregate Mixture Analysis System," Final Report to NCHRP.

Young S. Doh, Kyong K. Yun, Serji N. Amirkhanian, and Kwang W. Kim., (2006), "Framework for Developing a Static Strength Test for Measuring Deformation Resistance of Asphalt Concrete Mixtures," *The Journal of Construction and Building Materials*. 9. 8.

접 수 일: 2007. 7. 5

심 사 일: 2007. 7. 19

심사완료일: 2007. 9. 5