

# 아스팔트 혼합물의 노화에 따른 변형강도의 변화

Change of Deformation Strength due to Aging of Asphalt Mixture

정재현\* · 박태원\*\* · 이종섭\*\*\* · 김광우\*\*\*\*

Jung, Jae Hun · Park, Tae won · Lee Jong Sup · Kim, Kwang Woo

## 1. 서론

아스팔트 혼합물의 강도관련 특성치로 마찰 안정도가 전 세계적으로 널리 사용되나 근간의 많은 연구에서 안정도가 아스팔트 혼합물의 공용성과 상관성 없음을 지적하고 있다. 즉, 배합설계에서 제시된 기준치보다 월등히 높은 안정도를 가진 혼합물에서 소성변형이 심하게 발생하는 등의 문제가 있어 안정도의 무용론이 제기되고 있으며 대체 특성치의 개발이 필요한 시점에 있다. 개선된 시험법으로 회복탄성계수시험 등 여러 방법 등이 개발되고 있지만 실용성이 떨어진다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 지난 3-4년간의 연구 결과 Kim Test를 통한 변형강도(Deformation Strength:  $S_D$ )를 개발하여 현재 실용화 연구를 수행 하고 있다. 그간의 연구에서 변형강도는 반복주행(Wheel tracking : WT) 시험과  $R^2 > 0.90$ 를 보여 높아 그만큼 변형강도 값이 소성변형과 상관성을 갖고 있음을 알 수 있었다.

본 논문은 진행 중인 연구의 일환으로 아스팔트 혼합물의 노화에 따른 변형강도의 변화를 연구하였다. 아스팔트 혼합물은 노화를 거치면서 강성의 증가를 가져오고 이는 소성변형에 저항성의 향상을 가져온다. 따라서 본 연구의 목적은 노화가 변형강도 값에 어떠한 영향을 미치는지 실험을 통해 확인하는 것이다. 이를 위하여 노화의 정도에 따라 변형강도 값의 측정하였으며, 혼합물의 노화 정도를 파악하기 위하여 GPC 실험을 병행하였다. 변형강도 측정에서 얻어진 값과 GPC 실험값을 상관 분석을 통해 노화가 변형강도에 어떠한 영향을 미치는지를 구명하였다.

## 2. 사용재료 및 시험방법

### 2.1 사용 재료

본 연구에서 사용된 기본 아스팔트 바인더는 국내에서 가장 널리 사용되는 AP-5(침입도 60~80) 바인더이었으며, 개질 아스팔트는 수년간의 연구 및 실제 포장에서 많이 사용되어 우수한 성능이 입증된 Low-density polyethylene(LDPE) 개질아스팔트와 Styrene-butadiene-styrene(SBS)로 개질·상용화되어 있는 PG76-22 아스팔트 바인더를 사용하였다. 골재는 전국적으로 널리 분포되어 있고 일반적으로 많이 사용되는 화강암 채석을 굵은골재와 부순

\* 강원대학교 지역기반공학과 석사과정 · 033-250-7284 (humsang@hanmail.net)

\*\* 강원대학교 지역기반공학과 석사과정 · 033-250-7284(qkfookd@hanmail.net)

\*\*\* 강원대학교 지역기반공학과 석사과정 · 033-250-7284(jura\_79\_@hanmail.net)

\*\*\*\* 강원대학교 지역기반공학과 교수 · 공학박사 · 033-250-6467(asphaltech@hanmail.net)

모래(Screenings)로 사용하였으며, 채움재(Mineral filler)는 석회석분을 사용하였다. 굵은골재 최대치수는 13mm와 19mm 2종류를 사용하였다. 입도는 건설교통부 밀입도 규정에 맞도록 혼합 조정하여 사용하였다. Figure1은 시험용 혼합물 제조에 사용된 입도를 나타낸다.

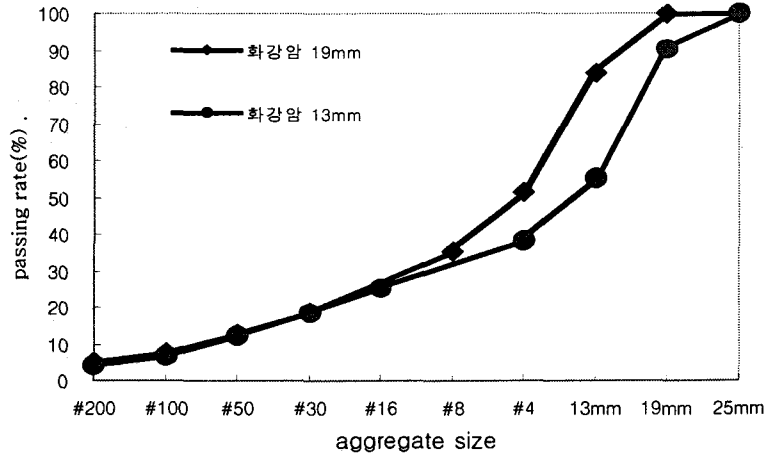


Figure 1. Gradation curves of aggregates.

## 2.2 실험방법

혼합물의 최적 아스팔트 함량(Optimum asphalt content: OAC)을 결정하기 위하여 마샬 배합설계와 유사한 방법으로 변형강도를 이용하여 아스팔트 함량을 결정하였다. 즉, 아스팔트 함량에 따른 공극 변화를 주기 위하여 AP 함량을 4.0%, 4.5%, 5.0%, 5.5%, 6.0%, 6.5%까지 6단계로 변화시켜가며 선회다짐 75회로 혼합물을 제조하여 공극률, VFA, VMA 및  $S_D$ 를 통해 최적아스팔트 함량을 결정하였다.

배합 설계에서 결정된 OAC로 각 혼합물을 제조하여 단기노화(Short-term Aging: SA)를 모사할 수 있도록 135°C의 강제 공기 순환식 오븐에서 매시간 1회의 교반을 하며 4시간을 노화시킨 후 75회 선회 다짐으로 직경10cm 공시체를 제작하였다. 장기 노화(Long-term aging: LA)는 단기노화를 거친 혼합물로 제조한 공시체를 같은 오븐에서 110°C로 소요 시간만큼씩 노화 시켰다. 노화정도의 차이를 주기 위하여 각 공시체는 24, 48, 72, 시간 동안 노화를 거쳤으며 극한의 노화를 모사하기 위하여 96시간 동안 노화도 시켰다.

변형강도는 다년간의 연구를 통해 개발 중인 Kim-test를 이용하여 측정하였다. 본 연구의 변형 강도 값은 노화를 거친 공시체를 60°C의 항온 수조에서 30분 안정화를 시킨 후 Figure2와 같이 Kim-test 몰드에 거치 후 50mm/min 으로 하중 붐을 재하 하여 아래의 식(1)을 통해 변형강도 ( $S_D$ )를 산출하였다. Figure3는 Kim-test로부터 얻어지는 하중-변형 곡선이다.

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

여기서 P = 최대하중(N)

D = 하중붕의 직경(mm)

r = 하중붕의 원형절삭반경(mm)

y = 변형값(mm)

이고,  $S_D$ 의 단위는MPa이다.

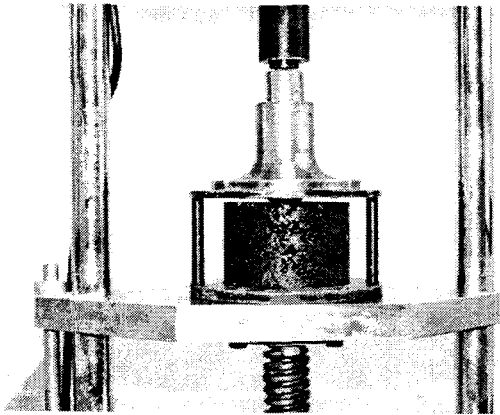


Figure 2. Kim Test setting

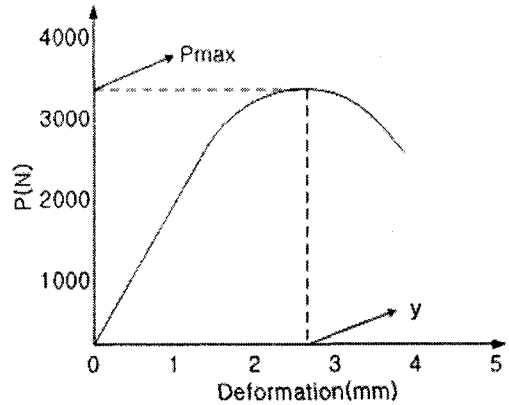


Figure 3. a typical load-deformation curve from Kim-test

아스팔트의 변형강도와 노화 특성을 비교·분석하기 위하여 변형강도 실험 후 공시체에서 혼합물 시료를 무작위로 채취하여 GPC(Gel-permeation chromatography) 분석에 사용하였다. 아스팔트가 노화되면 아스팔틴(Asphaltene) 함량이 증가되며 이를 크로마토그램으로 분석하면 아스팔트 내에 대형분자 (Large molecular size : LMS)의 증가로 나타나 LMS 변화와 노화상태는 밀접한 관계가 있다.

Figure 4는 샘플이 검출되어 나타난 크로마토그램을 상징적으로 보여주고 있다. 크로마토그램은 분자입자의 분포를 보여주는 하나의 곡선이며, 이 곡선이 수평기선(Base line)과 이루는 전체면적을 100%로 하여 필요한 구간에서의 면적비를 구한다. 하나의 크로마토그램은 분자 크기에 따라 초기에 대형분자가 검출되기 시작하여 서서히 작은 분자들이 검출되므로 시간상으로 앞부분은 대형 분자를 나타낸다. 따라서 샘플 검출 시작과 끝 시간을 동일한 13구간으로 나누고 그 중 앞의 5구간을 대형분자입자 (LMS), 다음 4구간을 중형분자입자 (Medium molecular size :MMS), 나머지 4구간을 소형분자입자(Small molecular size: SMS)로 구분하였다. 이 중 앞부분의 LMS가 아스팔트의 각종 특성과 상관관계가 높으며 특히 전체를 13구간으로 나눈 것 중에서 앞 5구간의 비율을 LMS로 했을 때가 가장 그 상관성이 우수한 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 LMS 값을 각 시료마다 구하고 이 값을 변형강도와 연관지어 분석에 사용하였다.

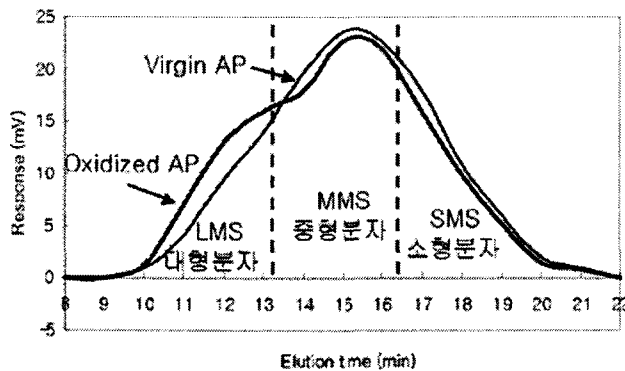


Figure 4. Illustration of typical for virgin and old asphalt.



3. 결과 및 고찰

단기 노화된 혼합물을 선회다짐기로 75회로 다짐하여 20개의 공시체를 제작하고 단기 노화용 공시체 4개를 제외한 16개의 공시체는 110℃의 오븐에서 장기 노화를 거쳐 노화 시간 단위별 4개씩 무작위 선택하고 4개의 공시체중 공극의 4±0.5% 범위를 만족하지 못하는 공시체는 폐기한 후 변형강도를 측정 하였다. 변형강도 실험이 끝난 공시체에서 무작위 추출로 GPC 실험용 시료 채취하였다. Table 1과 Table 2는 각 혼합물 노화 시간대별 공시체 3개의 변형강도 평균과 대형분자량을 나타내고 있다. 장기노화의 시간이 길어질수록 대분자량의 증가와 변형 강도가 증가한 것을 알 수 있다.

Figures 5~6은 각 공시체별 노화 시간에 따른 LMS 양의 변화를 보여주고 있다. 노화시간의 증가에 따라 대형분자의 증가가 나타나고 있으며 LMS의 증가를 노화와 관련하여 볼 때 SBS 개질 바인더인 PG76-22(PG76)의 노화가 가장 빨리 진행됨을 알 수 있고, LDPE 개질(PE6)는 일반 바인더보다도 LMS의 양이 적었다.

Table 1. Relationship between LMS(%) and S<sub>D</sub>(MPa)(Granite 13mm)

Mixture Aging hr		Granite, AP5 (control) OAC = 5.4%		Granite, LDPE 6% OAC = 5.6%		Granite, PG76-22 OAC = 5.6%	
		LMS	S <sub>D</sub> (MPa)	LMS	S <sub>D</sub> (MPa)	LMS	S <sub>D</sub> (MPa)
SA	4	19.947	3.673	18.970	4.698	24.467	5.094
	24	20.530	4.012	18.787	4.870	25.317	4.676
LA	48	20.487	3.756	19.780	5.105	25.140	5.663
	72	21.480	4.485	19.850	5.000	26.273	5.902
	96	21.357	4.843	19.423	5.514	26.360	6.363

Table 2. Relationship between LMS(%) and S<sub>D</sub>(MPa)(Granite 19mm)

Mixture Aging hr		Granite, AP5 (control) OAC = 5.4%		Granite, LDPE 6% OAC = 5.3%		Granite, PG76-22 OAC = 5.4%	
		LMS	S <sub>D</sub> (MPa)	LMS	S <sub>D</sub> (MPa)	LMS	S <sub>D</sub> (MPa)
SA	4	19.850	4.234	18.740	3.632	18.190	6.015
	24	20.100	4.673	19.113	3.922	25.237	8.113
LA	48	21.273	4.837	19.637	4.151	26.070	7.616
	72	21.517	5.038	20.053	4.847	26.240	7.822
	96	21.700	4.516	20.610	4.473	26.987	8.473

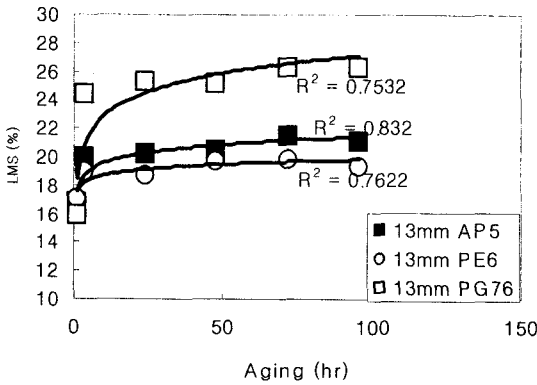


Figure 5. Relationship of LMS (%) with aging time for 3 granite 13mm aggregate mixtures

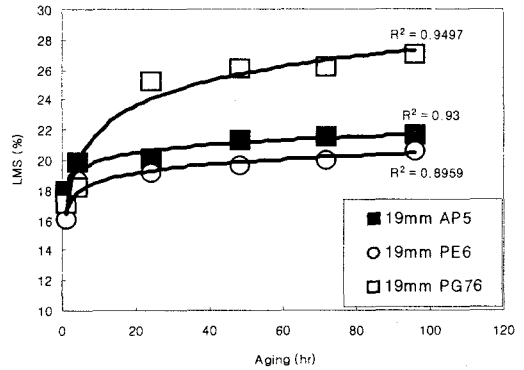
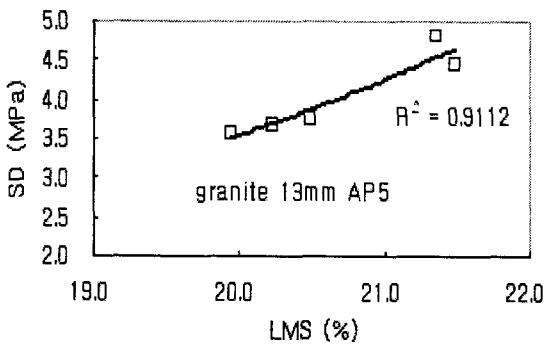
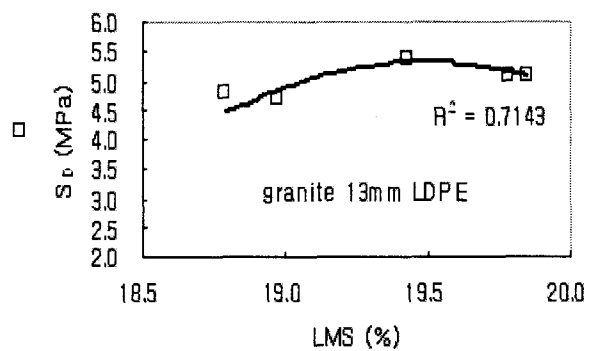


Figure 6. Relationship of LMS (%) with aging time for 3 granite 19mm aggregate mixtures

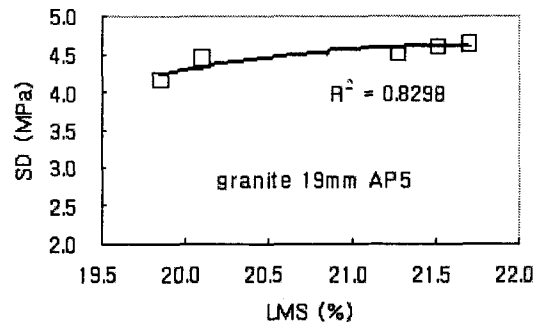
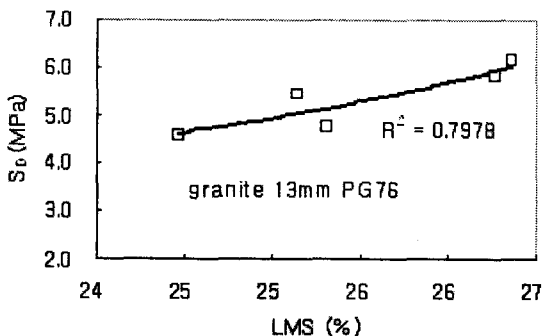
Figure 7.에서는 각 실험 혼합물의 변형강도와 LMS량의 상관관계를 나타낸 것이다. 각 바인더와 화강암 골재의 조합은 (a)는 AP-5와 13mm, (b)는 LDPE PMA와 13mm, (c)는 PG76-22와 13mm (d)는 AP-5와 19mm, (e)는 LDPE PMA와 19mm, (f)는 PG76-22와 19mm 이다. 이들 대부분이 LMS의 양의 증가에 따라 변형강도 값이 증가 하였으며 상관성도 좋은 것으로 나타났다.



(a)



(b)



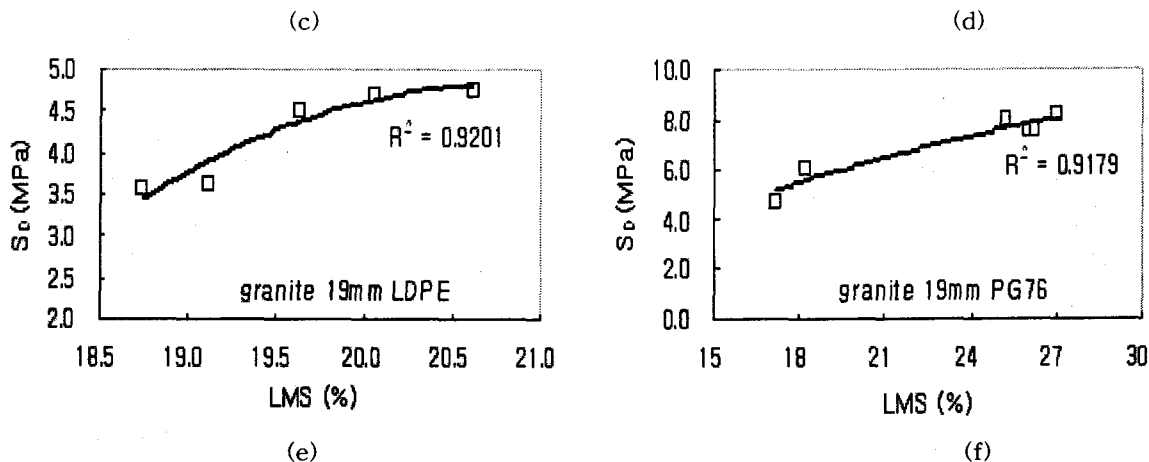


Figure 7. Correlationship curve of aged compositions consisted of granite and various binders

#### 4. 결론

혼합물의 소성변형 저항성 평가 시험법을 위해 개발·실용화 연구 중인 Kim-test를 이용해 혼합물의 노화에 따른 변형강도 측정과 GPC를 이용한 대형분자(LMS)의 측정으로 얻어진 값을 비교 분석한 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 노화의 시간이 길어질수록 혼합물의 강성이 증가하는데 이것이 바인더의 대형분자량 증가로 나타났다. 이와 함께 변형강도 값도 증가하였다. 이는 장기간 노화된 혼합물의 소성변형 저항성을 변형강도로 추정할 수 있음을 보여주는 결과이다.
2. LDPE 개질 혼합물이 SBS 개질 바인더와 일반 바인더와를 투입한 혼합물보다도 노화 속도가 느린 것으로 나타났다.
3. 대분자와 변형강도 특성은 높은 상관성을 가지고 있으며 Kim-test의 변형강도 값이 혼합물의 노화에 따른 소성변형 저항성을 평가할 수 있음을 확인하였다.

#### 감사의 글

본 연구는 건설교통기술 자유공모과제의 지원에 의하여 이루어졌습니다.

#### 참고문헌

1. 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(1)*, pp.41-52.
2. 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, ASCE, Vol. 7 ( 1 )*, pp. 31-40.
3. Kim, K. W. Moon, S. L. Choi, S. J. Lee, B. D. (2005) "Development of Deformation Strength as a Relative Index for Estimating Rut Resistance of Asphalt Concretes" *International Conference on Road & airfield ICPT Vol. 5*, pp. 864-879.
4. 김광우, 최선주, 이문섭, 홍상기, 안경애, 이순제 (2003), "개질아스팔트 콘크리트의 변형강도와 소성 변형 특성 연구"석재연 논문집, 제 8집, 강원대학교 석재복합 신소재센터. pp.71-88.