

# 개선된 혼합방법을 이용한 재활용 아스팔트 혼합물의 피로 및 변형특성 분석

## Evaluation of Deformation and Fatigue Resistance Characteristics of Recycled Asphalt Mixtures Prepared by Modified Mixing Process

고태영\* · 이종섭\*\* · 도영수\*\*\* · 김광우\*\*\*\*

Ko, Tae Young · Lee, Jong Sup · Doh, Young Soo · Kim, Kwang Woo

### 1. 서론

환경부의 '2003년 전국 폐기물 발생 및 처리 현황'에서 보면 아스팔트 폐기물은 1996년에 3,398(톤/일)이던 것이 2003년에는 18,351.5(톤/일)로 증가하였다. 아스팔트 포장에 전 도로의 약 90%를 차지하고 있는 우리나라의 실정으로 미루어 보아 앞으로 아스팔트 폐기물의 양은 점점 늘어날 것으로 예상된다. 국내에서도 폐아스팔트 콘크리트의 재활용에 대한 연구가 10년 이상 계속 이루어지고 있으며 국내의 자원 및 환경여건을 고려하였을 때, 폐아스팔트 콘크리트의 재활용은 당연히 실용화되어야 하며 정부 및 기업체에서도 폐아스팔트 콘크리트에 대한 연구의 필요성을 인식하고 있어 재활용에 대한 연구는 앞으로도 계속 이루어질 것으로 판단된다. 기존의 여러 아스팔트 재활용 연구에 의하면 재생 아스팔트 혼합물은 회수 아스팔트 포장재료(Reclaimed asphalt pavement: RAP)를 15% 이내로 첨가할 경우에는 별도의 가열장치 없이 플랜트에서 직접 적정 출하온도의 확보가 가능하다. 그리고 RAP 함량이 30~50% 정도로 높아졌을 때도 아스팔트 혼합물의 기본적인 물성시험 결과인 마찰안정도가 높게 나타나며 국내 신규 아스팔트 포장용 각종 기준을 만족하므로 현장 적용에 규격상의 문제는 없다고 판단된다. 하지만 기존 재생방법으로는 강성이 높은 RAP의 아스팔트가 재생혼합물내에 그대로 존재하여 안정도 등 강도 특성치가 높게 나타나는 것으로 추정된다. 게다가 이를 그대로 현장에 포설할 경우 일반혼합물보다 노화진행속도가 빨라질 수 있으므로 이를 개선하기 위한 방안을 최근 연구(김광우 등 2005)에서 제시하였다. 즉, 기존의 제조방법보다 혼합초기에 RAP의 오래된 바인더가 더 잘 녹어나도록 하여 재생혼합물을 제조함으로써 초기 강성을 다소 낮추어 주는 개선된 배합 방법을 개발하였다. 또한 일반 재생혼합물보다 수명증진을 위해 폴리머를 첨가하여 개질하는 연구도 아울러 수행하였다. 따라서 본 연구의 목적은 개선된 방법으로 제조된 재생 아스팔트 혼합물의 피로 저항 특성과 현재 연구가 활발히 진행되고 있는 Kim Test를 이용한 변형강도 특성을 조사하는 것이다. 이를 위하여 본 연구에서는 도로 표면에서 평면절삭된 RAP을 사용한 재생혼합물을 제조하여 그의 물성을 측정하고, 피로시험 및 Kim test를 수행하여 분석하였다.

### 2. 재료 및 방법

#### 2.1 사용재료

##### 2.1.1 아스팔트 혼합물

본 연구에 사용된 아스팔트는 국내에서 가장 널리 이용되는 일반 아스팔트인 AP-5(침입도 60~80)를 기

\* 정희원 · 한국도로공사 교통기술연구원 포장연구그룹 · 공학석사 · 031-371-3362(E-mail : babytoki1@hanmail.net)

\*\* 정희원 · 강원대학교 지역기반공학과 석사과정 · 공학사 · 033-250-7284 (E-mail : jura\_79\_@hanmail.net)

\*\*\* 정희원 · 강원대학교 석재복합신소재연구센터 책임연구원 · 공학박사 · 033-250-7284(E-mail : youngsdoh@hanmail.net)

\*\*\*\* 정희원 · 강원대학교 지역기반공학과 교수 공학박사 · 033-250-6467(E-mail : asphalttech @hanmail.net)

본 바인더로 사용하였다. 그리고 바인더 개질제는 Low-density polyethylene( LDPE ) 사용하였으며 아스팔트 함량의 6%를 첨가하여 개질 아스팔트를 제작하였다.

골재는 경기도 용인에서 생산한 화강암과 강원 영서 지역의 편마암 13mm와 잔골재를 사용하였고, 채움재(Mineral filler)는 석회석분을 사용하였다.

이들 상기 골재와 바인더를 사용하여 마샬 배합설계를 통해 기준을 건설교통부 13mm 밀입도 혼합물로 양면 50회 다짐하여 최적 아스팔트함량(Optimum asphalt content: OAC)을 결정하였고, 혼합물의 공극을  $8\pm 0.5\%$ 로 제작하기 위하여 양면 12회 다짐을 하여 혼합물을 제작하였다.

### 2.1.2 회수 아스팔트 포장재료(RAP)

본 연구에서는 경기도 용인지역에서 평면 절삭한 회수 아스팔트 포장재료(Reclaimed Asphalt Pavement : RAP)를 수집하여 실험에 사용하였다. 수집된 RAP은 중간 공정을 거치지 않고 실험에 바로 사용할 수 있도록 13mm이하로 파쇄하여 사용하였다.(Figure 1)

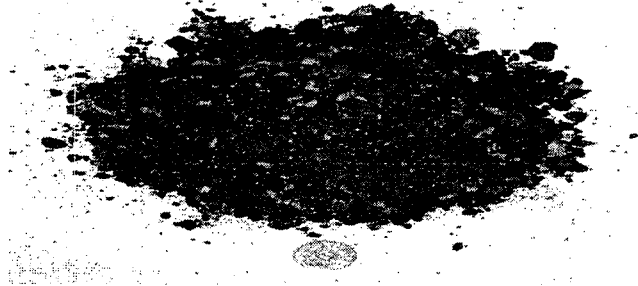


Figure 1. RAP passing 13mm sieve

### 2.2 혼합방법에 따른 재생혼합물 제작

본 연구에서는 일반적으로 제조되는 재생혼합물 제조방법(O방법)과 재생혼합물 내의 바인더가 보다 균등하게 하거나 또는 RAP의 노화된 바인더의 점도를 보다 잘 회복시킬 것으로 예상되는 새로운 방법(N방법)을 사용하여 각각 배합설계를 수행하였다. 재생혼합물 제조 시 RAP 첨가 비율은 15%이며 RAP 온도는 상온상태였다. 그리고 비교용 혼합물로써 일반 표준용 밀입도 아스팔트 혼합물(신규재료 혼합물: Control)의 배합설계를 수행하였다. Table 1은 본 연구에서 제시한 재생혼합물의 혼합방법을 설명해 준다.

Table 1. Mix method of recycled asphalt concrete

구 분	Mix Method
O	신규재료와 RAP에 신규 바인더를 투입하고 일정한 비율로 1분간 비벼 가열 재생혼합물을 제조(일반적인 재생혼합물 혼합방법)
N	같은 비율의 재생혼합물 제조 시 RAP과 신규 바인더와 필요시Rejuvenator를 소요량 넣고 30초간 1차 비빈 후 신규골재 투입하고 30초간 비빔

### 2.3 아스팔트 혼합물의 노화

아스팔트 혼합물의 노화는 제조와 포설, 그리고 공용중에 ① 산화작용(Oxidation) ② 휘발작용(Volatilization) ③ 중합작용(Polymerization) ④ 의액성(擬液性:Thixotropy) ⑤ 상승작용(Syneresis) ⑥ 분리작용(Separation) 등의 의하여 노화가 진행된다. 아스팔트 혼합물은 혼합물의 제조와 포설 시 플랜트와 시공 현장에서 노화되고(단기노화), 시공 후 공용중에 여러 가지 요인에 의해 노화가 진행된다(장기노화).

본 연구는 각각의 혼합물(20가지)에 대한 최적 아스팔트 함량으로 공시체를 제작하였다. 실험실에서의 공시체 제작은 현장에서 포설 시 공극 8%를 만들기 위해 12회 다짐하였다. 또한 현장에서의 노화 상태를 실



험실에서 모사하기 위해서 여러 연구 결과를 참고하여 다음과 같은 방법을 이용하였다.

가. **No-Aging** - 노화를 시키지 않은 과정으로 공시체를 제작하여 물성 측량 후에 25℃에서 24시간 양생 후 피로시험과 변형강도 시험을 수행하였다.

나. **단기노화 (Short Term Oven Aging)** - 아스팔트 혼합물의 제조와 포설 시의 노화를 모사하기 위한 과정으로, 실험실에서 혼합물을 제조하여 다짐을 실시하기 전의 호트러진 상태로 강제 송풍되는 135℃ 오븐에서 4시간동안 인공적으로 노화시켰고, 현장과 비슷한 조건을 주기 위해서 1시간에 1회 교반 시켰다. 이후 다짐을 실시하여 공시체를 제작 한 후 공극을 확인하고 25℃에서 24시간 양생 후 피로시험과 변형강도 시험을 수행하였다.(Figure 2)

다. **장기노화 (Long Term Oven Aging)** - 실험실에서의 장기노화는 현장에서 아스팔트 포장을 건설하고, 5년 정도의 공용을 거친 후의 노화 상태를 모사하기 위한 것이다. 단기노화를 거친 아스팔트 혼합물을 다짐하여 공시체를 제작한 후에 85℃를 유지하는 노화 오븐 속에 48시간 동안 노화 시켰다. 또한 48시간 후 노화가 끝나면 공시체의 손상을 방지하기 위해 최소 12시간 후에 다음 실험에 사용하였다. 이후 25℃에서 24시간 보관 후 피로시험과 변형강도 시험을 수행하였다.(Figure 3)



Figure 2. Short term oven aging

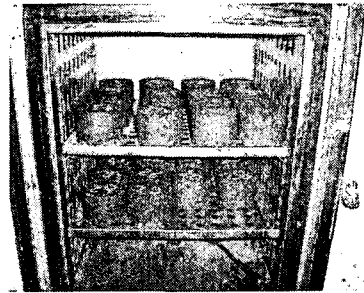


Figure 3. Long term oven aging

### 3. 피로시험

부재의 피로파괴는 제조과정에서 내부에 존재하던 미소 균열, 또는 사용 중에 발생한 미소균열이 외력 또는 환경에 의하여 점차로 또는 급속도로 성장하는 결과로서 일어난다. 파괴과정은 초기 압밀(Primary), 균열의 진전(균열성장: Steady state), 파괴(Failure)의 3과정으로 이루어진다 (김상철 1985).

재생 혼합물의 피로 특성을 평가하기 위하여 간접인장모드의 피로시험을 수행하였다. 원통형 공시체를 시편으로 사용하는 장점 때문에 다른 피로시험에 비해 널리 쓰이는 시험방법이다. 실험온도는 20℃로 정하였으며 반복하중은 일반적으로 우수한 아스팔트 콘크리트의 간접인장강도가 10kgf/cm<sup>2</sup>일 때의 최대 정하중인 1,000kgf의 20% 수준인 200kgf로 정하였다.

Instron 사의 만능 재료시험기를 시험에 사용하였고, 소프트웨어로 Max 2.0을 사용하였다. 공시체 측면에 Extensometer를 설치하여 수평 변형량을 측정하였고, 수직 변형량은 하중이 재하될 때의 Load cell 위치값을 읽어 측정하였다. 수평변형량은 아스팔트 혼합물의 피로수명을 추정하는데 사용되고, 수직변형량은 아스팔트 콘크리트의 유효하중에 의한 수직변형 저항성 예측에 사용된다.

공시체를 Figure 4와 같이 하부 프레임에 올려놓고 중심을 잡은 후 공시체의 측면에 50mm Extensometer를 장착하고 Load cell을 천천히 내려 하중띠가 공시체의 표면에 닿게 하였다. 실험중에 공시체의 이동을 방지하고 안정된 반복하중을 가하기 위해 20kg의 최소하중을 적용시켰다. 하중 형태는 Figure 6과 같이 Haversine 곡선을 나타내는 모양의 반복하중을 가하였다. 이때 하중의 진동수는 1.0 Hz로 하중재하시간과 휴지시간을 1 : 9의 비율로 하였다. 공시체는 20℃의 항온기 안에서 72시간 보관 후에 시험하였고, Chamber내의 온도도 20℃로 유지하면서 실험을 수행하였다.(Figure 5)

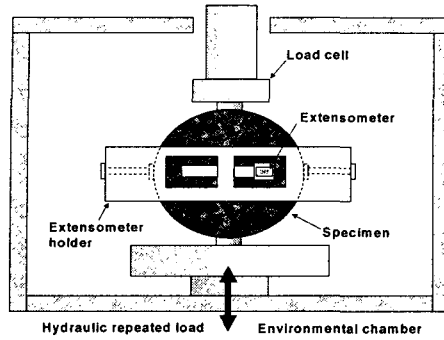


Figure 4. Schematic diagram of experimental setup for fatigue test

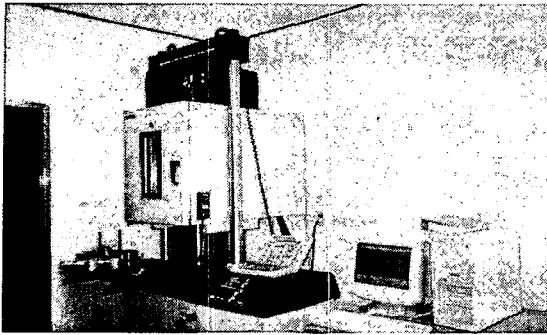


Figure 5. Instron test system

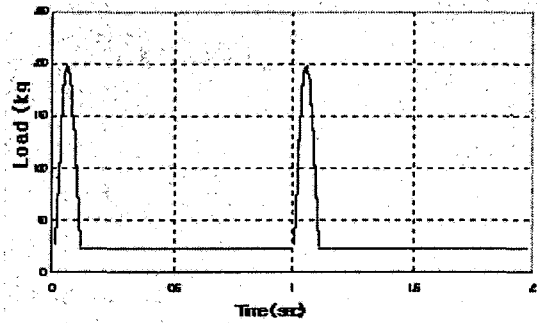


Figure 6. Load-time pulse applied for ITS-mode fatigue test

#### 4. 변형강도시험

마살안정도의 재하 메커니즘은 Figure 7과 같이 실제 현장에서의 재하 형식과 다르다. 즉, 공시체를 축방향으로 다져놓고 하중은 옆 방향에서 쥐어짜듯 가하므로 현장에서 골재가 배열되어 있는 방향과 다르게 하중이 작용할 뿐만 아니라 파괴시 변형의 형태도 다르다. 따라서 본 시험에서는 하중을 혼합물이 다져진 방향과 같은 방향으로 가하고 재하에 의해 혼합물은 소성변형과 유사하게 압밀·전단에 의한 변형이 유발되도록 Figure 8에서와 같이 바닥이 둥근 하중봉을 사용하였다.

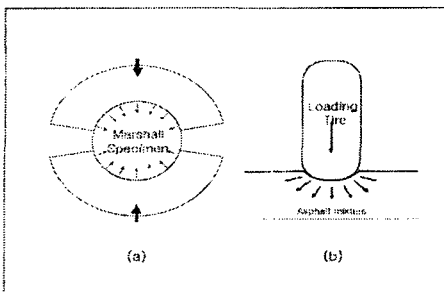


Figure 7. Schematic illustration of loading mechanism of (a) Marshall test and (b) tire loading (Kim et al 2004)

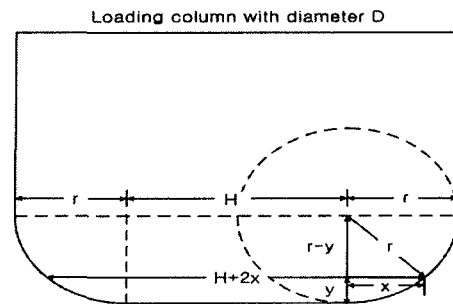


Figure 8. Details of the bottom of loading head



시험온도는 반복주행 (Wheel tracking) 시험 및 마찰 안정도시험과 같은 온도인 60℃가 되도록 30분간 수침을 통해 공시체 온도를 올렸다. 그리고 Figure 9와 같은 장치를 통해 하중봉이 움직이지 않도록 고정하면서 수직으로 하중을 가하도록 하였다. 변형강도의 계산은 Figure 8과 같은 직경 D에 하단을 반경 r만큼 원형절삭 한 하중봉이 재하하중에 의해 표면으로부터 y만큼 아스팔트 콘크리트로 눌러 들어갈 경우의 최대하중과 들어간 변형을 고려하여 식(1)로 계산하였다.

$$S_D = \frac{40P}{\pi\{D - 2(r - \sqrt{2ry - y^2})\}^2} \quad \text{----- (1)}$$

- 여기서 P = 최대하중 (KN)
- D = 하중봉의 직경 (mm)
- r = 하중봉의 원형절삭반경 (mm)
- y = 변형값 (mm)

이고, SD의 단위는 MPa이다.

Figure 9과 같은 몰드와 하중봉은 개발자의 성을 따라 김테스터(Kim tester)라 명명하고 이 시험법을 김테스트(Kim test)라 명명하였다. 본 연구에서는 기존 연구결과(김광우 등, 2003)를 분석하여 상관성이 가장 우수한 것으로 나타난 직경 D=4cm, 절삭반경 r=1.0cm인 하중봉을 사용하였다. Figure 10은 직경 10cm 마샬식 공시체와 김테스터를 마찰 안정도 시험기에 얹어 놓고 시험을 하는 모습이며 이로부터 얻어지는 하중-변형곡선은 Figure 11과 같다.

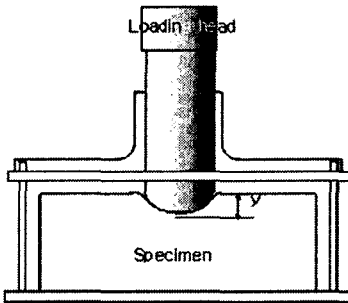


Figure 9. Schematic of Kim tester and its loading mechanism

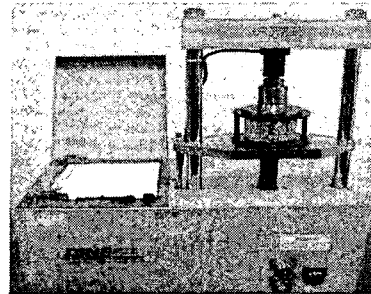


Figure 10. Kim tester setting on a Marshall press

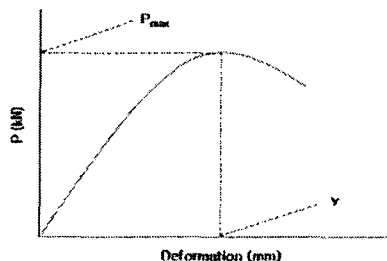


Figure 11. A typical load-deformation curve from Kim test



4. 결과 및 고찰

4.1 변형강도 특성

Table 2와 3은 Kim test로 측정된 최대하중(P), 변형값(y), 변형강도(S<sub>D</sub>)를 나타내고 있다. Table 2는 공극이 8±0.5%인 재생혼합물의 변형강도를 나타낸다. 변형강도를 비교시 재생혼합물은 종류에 따라 다소 차이는 있으나 개질 여부에 따라 값들이 더 차이가 나는 것을 볼 수 있다. 또한 장기노화 후 그 값들이 더 높아진 것을 알 수 있다.

Table 2. Kim test results (None aging 8% air void)

Mixture types	P (N)	Deformation (mm)	S <sub>D</sub> (MPa)
A5R0	1750	2.2	2.118
A5R15-O	1383	2.0	1.720
A5R15-N	1460	2.7	1.633
A5L6R15-O	1560	2.8	1.730
A5L6R15-N	1800	3.0	1.950
B5R0	1400	2.4	1.637
B5R15-O	1350	2.3	1.609
B5R15-N	1433	2.6	1.638
B5L6R15-O	1567	2.8	1.731
B5L6R15-N	1450	2.6	1.657

Table 3. Kim test results (Long term aging 8% air void)

Mixture types	P (N)	Deformation (mm)	S <sub>D</sub> (MPa)
A5R0	2200	2.1	2.691
A5R15-O	2600	3.2	2.775
A5R15-N	2350	2.7	2.658
A5L6R15-O	3425	3.8	3.439
A5L6R15-N	2600	3.4	3.062
B5R0	1450	2.5	1.672
B5R15-O	2200	3.6	2.257
B5R15-N	1750	3.6	1.781
B5L6R15-O	2200	3.3	2.307
B5L6R15-N	1650	2.8	1.830

4.2 피로수명

크리프는 지속적인 응력수준 하에서 시간에 따라 재료의 변형이 증가되는 현상을 말한다. 아스팔트 혼합물에 하중이 작용하면 초기에는 변형이 급속히 증가하고 다음엔 일정한 비율로 변형이 천천히 진전되다가 종단에 가서는 빠른 속도로 파괴에 이르게 된다. 따라서, 파괴시의 cycle을 측정하여 피로수명을 구하였고, 초기변형치를 제외한 cycle에서 파괴시의 cycle 사이의 선형구간으로 식을 이용하여 Creep rate를 구하였다 (Fritz 1990). 만일 두 혼합물의 거동을 비교하였을 때 피로수명이 상대적으로 낮은 혼합물은 동적하중하에서 빠른 변형과 균열을 보일 것이다. 본 시험에서는 공시체가 파괴될때까지의 하중횟수와 수평·수직 변형량을 측정하였으며 이를 이용하여 피로수명을 계산하였다. 각 혼합물에 대한 대표적인 피로시험 곡선을 Figure 12에서 보여주며 Creep rate와 피로수명에 대한 결과는 Table 5, 6과 같다.

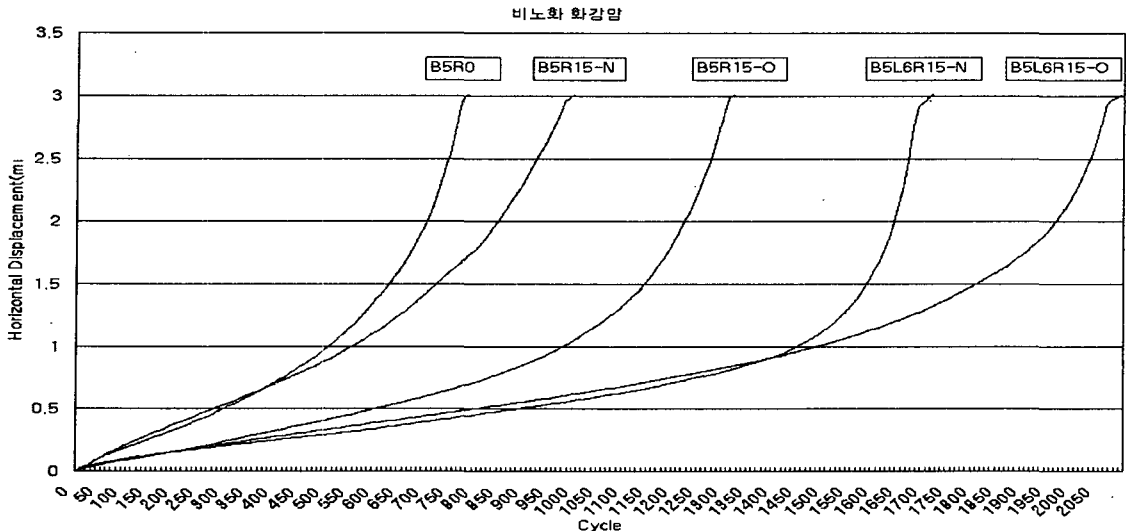


Figure 12. Relation of fatigue creep displacement and number of cycle



Table.5 Fatigue test results (None aging)

Mixture	Type	Linear domain $\Delta n(\text{sec})$	Deformation $\Delta(\text{mm})$	Creep rate $\epsilon$ ( $\mu/\text{sec}$ )	Number of cycle to failure	Fatigue ratio*
A5R0	Horizontal	970	1.707	17.321	1170	0.492
	Vertical	990	1.706	16.961	1190	0.504
A5R15-O	Horizontal	2180	1.86	8.398	2380	1
	Vertical	2160	1.863	8.489	2360	1
A5R15-N	Horizontal	1520	1.8	11.656	1720	0.723
	Vertical	1510	1.799	11.726	1710	0.725
A5L6R15-O	Horizontal	4710	1.9	3.97	4910	1
	Vertical	4690	1.9	3.987	4890	1
A5L6R15-N	Horizontal	4940	1.918	3.821	5140	1.047
	Vertical	4930	1.929	3.851	5130	1.049
B5R0	Horizontal	637	1.8111	28.558	837	0.743
	Vertical	610	1.6997	27.256	810	0.777
B5R15-O	Horizontal	927	1.8829	20.163	1127	1
	Vertical	843	1.4218	16.888	1043	1
B5R15-N	Horizontal	553	1.7206	31.459	753	0.668
	Vertical	470	1.2394	26.563	670	0.642
B5L6R15-O	Horizontal	1897	1.8857	9.818	2097	1
	Vertical	1880	1.6241	8.645	2080	1
B5L6R15-N	Horizontal	1210	1.911	15.892	1410	0.672
	Vertical	1083	1.4891	13.668	1283	0.617

Table.6 Fatigue test results (Aging)

Mixture	Type	Linear domain $\Delta n(\text{sec})$	Deformation $\Delta(\text{mm})$	Creep rate $\epsilon$ ( $\mu/\text{sec}$ )	Number of cycle to failure	Fatigue ratio*
A5R0	Horizontal	3380	1.923	5.599	3580	0.665
	Vertical	3370	1.915	5.593	3570	0.666
A5R15-O	Horizontal	5180	2.026	3.849	5380	1
	Vertical	5160	2.017	3.847	5360	1
A5R15-N	Horizontal	4320	1.871	4.263	4520	0.840
	Vertical	4290	1.878	4.308	4490	0.838
A5L6R15-O	Horizontal	36790	1.941	0.52	36990	1
	Vertical	36770	1.938	0.519	36970	1
A5L6R15-N	Horizontal	26320	1.929	0.721	26520	0.717
	Vertical	26340	1.929	0.721	26540	0.718
B5R0	Horizontal	14170	1.8599	1.292	14370	0.777
	Vertical	14180	1.8591	1.29	14380	0.777
B5R15-O	Horizontal	18290	1.9414	1.045	18490	1
	Vertical	18290	1.9157	1.031	18490	1
B5R15-N	Horizontal	17680	1.9079	1.062	17880	0.967
	Vertical	17690	1.9087	1.062	17890	0.968
B5L6R15-O	Horizontal	29730	1.9788	0.655	29930	1
	Vertical	29760	1.9829	0.656	29960	1
B5L6R15-N	Horizontal	26320	1.93	0.722	26520	0.886
	Vertical	26330	1.9333	0.723	26530	0.886

표에서 보듯이 피로수명은 O방법 혼합물이 가장 길다. 그 다음이 N방법이고 control이 가장 낮았다. 한편 피로수명 비 (Fatigue ratio)는 무개질과 개질을 구분하여 각각의 경우 해당 피로수명을 O 혼합물 피로수명으로 나눈 것이다. 노화 이전에는 A5L6R15-N 혼합물을 제외하고는 N혼합물의 피로 수명이 O 혼합물의



0.6 - 0.7 수준이던 것이 장기노화 후에는 그 비율이 0.8 - 0.9로 향상되었다. 이는 혼합물이 노화되면서 O 혼합물의 노화상태가 심화되면서 나타나는 현상으로 균열에 대한 저항성이 N 혼합물에 비해 상대적으로 낮아지고 있음을 의미한다. 만일 노화가 더 많이 진행된다면 O와 N의 차이는 더 적어지거나 반대로 N 혼합물이 더 길어질 것으로 추정되나 현재 노화정도의 데이터로는 이를 확인하기가 어렵다.

## 5. 결론

본 논문은 재생 아스팔트 혼합물의 피로저항 특성과 변형강도를 상대 비교한 연구이다. 4가지 혼합물(신규, 개질, 노화, 비노화)을 제조하여 시험을 수행하였고 본 연구를 통하여 혼합방법을 개선한 재활용 아스팔트 콘크리트의 피로 및 변형강도 특성을 분석하였다.

1. Kim test 결과 신규혼합물에 비해 재생아스팔트 혼합물의 변형강도가 높게 나타났고, N 방법보다는 O 방법의 변형강도가 높았다. 또한 LDPE 6%를 건식으로 첨가한 재생아스팔트 혼합물은 신규혼합물이나 개질을 하지 않은 재생아스팔트혼합물 보다 높은 변형강도 값을 나타냈다. 이는 재생아스팔트 혼합물의 피로수명에서도 비슷한 결과를 나타냈다.
2. 피로 시험 결과 신규 혼합물 보다는 재생 아스팔트 혼합물의 피로 수명이 증가하였고, N 방법보다는 O 방법의 피로수명이 크고 LDPE 6%를 건식으로 첨가하여 개질한 혼합물이 개질을 하지 않은 혼합물보다 큰 피로수명을 나타냈다.
3. LDPE로 개질한 재생아스팔트 혼합물의 성능향상은 정하중 시험인 변형강도 및 피로시험에서 높은 개질 효과를 보임을 알 수 있었다.
4. 본 연구에서 사용된 RAP 15%의 재생혼합물은 우수한 피로성능을 보여주어 사용자 자원절약뿐만 아니라 포장 혼합물의 성능향상 효과도 기대할 수 있을 것으로 보여진다. 하지만 재생혼합물의 품질은 RAP의 종류에 따라 다양하므로 보편화된 결론을 얻기 위해서는 다양한 종류의 RAP을 사용한 연구가 필요할 것으로 사료된다.
5. 노화 이전에는 A5L6R15-N 혼합물을 제외하고는 O 혼합물에 비하여 N혼합물의 피로 수명이 크게 낮았으나 이것이 장기노화 후에는 그 비율이 0.8 - 0.9로 향상되었다. 이는 시간이 지나면서 O 혼합물의 노화상태가 상대적으로 심화되면서 균열 저항성이 N 혼합물에 비해 상대적으로 낮아짐을 의미한다. 만일 노화가 더 많이 진행된다면 O와 N의 차이는 더 줄어들거나 반대로 N 혼합물이 더 길어질 것으로 추정되나 현재 노화정도의 상태에서는 이를 확인하기가 어렵다.

## 참고문헌

1. 김광우, 이문섭, 김성태, 이순제 (2002b), "소성변형과의 상관성 및 추정모델을 통한 변형강도 장치변수 분석," 한국도로포장공학회 논문집, 제 4권 4호, pp.41-52
2. 김광우, 이문섭, 이순제, 김중열 (2002d), "소성변형과의 상관성 및 추정모델을 통한 변형강도 시험장치 변수 분석," 한국도로포장공학회 논문. pp.41-52
3. 김광우, 이문섭, 최선주, 김준은 (2002e), "소성변형과의 상관성에 근거한 아스팔트 콘크리트의 강도특성 개발에 관한 기초연구," 한국도로포장공학회 논문집, 제 4권 4호, pp.23-40
4. 이문섭 (2003), "공시체 크기가 변형강도를 이용한 소성변형 추정에 미치는 영향," 강원대학교 석사학위논문.
5. 이순제 (1999), "재생아스팔트 혼합물의 피로저항 특성 연구", 강원대학교 대학원 석사학위논문
6. 김성운, "노화에 따른 아스팔트 혼합물 및 회수 바인더의 특성", 강원대학교 대학원 석사학위논문, 2002
7. 조문진, "바인더 Stiffness와의 상관성분석을 통한 아스팔트 콘크리트의 변형강도와 동적크리프특성 고찰", 강원대학교 대학원 석사학위논문, 2005
8. 권오선, "바인더 회생방식을 개선한 재생 아스팔트 콘크리트의 소성변형 특성 연구," 강원대학교 대학원 석사학위논문, 2005