



재생 아스팔트 콘크리트 혼합물의 혼합방법 개선에 따른 피로저항 특성

Characteristics of Fatigue Resistance of Recycled Asphalt Concretes by Modified Mixing Process

도 영 수* 고 태 영** 김 광 우***
Doh, Young Soo Ko, Tae Young Kim, Kwang Woo

Abstract

This study evaluated the fatigue resistance characteristics of hot-mix recycled asphalt mixtures which were prepared by a new blending method. Since the binder of RAP shows higher viscosity without being rejuvenated in the ordinary recycled mixture, this new (modified) blending method was developed for obtaining more uniform level of binder viscosity in the recycled mixture. Cold-planned RAP was collected and mix design was performed using 15% RAP content for two virgin aggregate, gneiss and granite. Penetration grade of 60-80 asphalt was used in mixing recycled mixture together with a polymer modifier, LDPE. Indirect tensile fatigue tests were carried out to evaluate characteristics of fatigue resistance of performance of recycled asphalt mixtures. The recycled mixtures with LDPE 6% showed higher repeated loading fatigue life. Fatigue life ratio of new (N) mixing method mixtures was approximately 0.6-0.7 before aging and 0.8-1.0 after aging treatment of ordinary (O) mixing method mixture. This means the N mixture becomes stronger with aging process increase. If further aging is treated, N mixture may be showing stronger resistance than O mixture.

Keywords : hot-mix recycled asphalt mixture, fatigue resistance, new blending method, RAP, LDPE, fatigue life

요 지

본 논문은 가열 재생아스팔트 혼합물의 공용성능 향상을 위한 혼합방법 개발 연구의 일부분이다. 기존 재생혼합물 혼합방법은 재생혼합물 내에서 기존의 노화된 바인더가 균등히 회생되지 않다는 것을 확인하였다. 따라서 새로이 개발된 혼합방법은 회수 아스팔트 포장의 기존 바인더를 기존 재생 혼합방법보다 회수 아스팔트 포장 재료에 묻어있는 노화된 바인더를 훨씬 많이 회생시켜 재생 혼합물에서 보다 더 균일한 바인더의 점도상태가 되도록 한다. 본 연구의 목적은 새로이 개발된 혼합 방법으로 제조된 재생아스팔트 혼합물의 피로저항 특성을 평가하는 것이다. 두 종류 골재(편마암, 화강암), RAP 15%, LDPE의 두 가지 첨가량(0, 6%)를 이용하였으며, 혼합방법은 바인더의 불균등 상태를 개선하기 위한 두 가지 방법, 즉 일반적인 기존의 O 방법과 새롭게 개발한 N 방법을 이용하였다. 혼합방법에 따른 피로저항성을 평가하기 위하여 혼합방법에 따라 제작한 재생 혼합물의 피로시험을 수행하였다. 그 결과, 피로수명은 O 방법 혼합물이 가장 길고 그 다음이 N 방법이고 control이 가장 낮았다. 또한 장기노화 후 N 방법 혼합물의 균열에 대한 저항성이 O 방법 혼합물에 비해 상대적으로 높아지고 있음을 알 수 있었다.

핵심용어 : 재생아스팔트 콘크리트, 피로수명, 혼합방법, 피로저항성, RAP, LDPE

* 정희원 · 강원대학교 석재복합신소재센터 연구교수 · 공학박사

** 정희원 · 한국도로공사 도로교통기술원 연구원

*** 정희원 · 강원대학교 지역기반공학과 교수 · 공학박사



1. 서론

환경부의 '2004년 전국 폐기물 발생 및 처리 현황'을 보면 아스팔트 폐기물은 1996년에 3,398(톤/일)이던 것이 2004년에는 20,162(톤/일)로 증가하였다. 아스팔트 콘크리트 포장에 전체 도로의 약 90%를 차지하고 있는 국내의 실정을 고려하면 앞으로 폐아스팔트 콘크리트의 양은 더욱 늘어날 것으로 예상된다.

폐아스팔트 콘크리트는 재활용의 방법이나 연구에 따라 기존의 일반아스팔트 혼합물과 유사하거나 우수한 품질을 낼 수 있다. 이에 미국이나 유럽 그리고 가까운 일본에서도 이미 폐아스팔트 콘크리트 재활용의 실용화 단계에 접어들어 있다.

기존의 여러 폐아스팔트 콘크리트 재활용 연구에 의하면, 재생 아스팔트 콘크리트 혼합물은 회수 아스팔트 포장재료(Reclaimed Asphalt Pavement: RAP)를 15% 이내로 첨가할 경우에는 별도의 가열 장치가 없이 플랜트에서 직접 적정 출하온도의 확보가 가능하고, RAP의 함량이 30~50% 정도로 높아졌을 때도 일반 도로포장용 규격을 만족하므로 현 기준으로 현장 적용에 문제가 없다고 판단된다.

하지만 최근의 연구에 의하면, 기존 방법으로 제조되는 재생혼합물 내의 바인더를 GPC(Gel-Permeation Chromatography)로 분석한 결과 신규 재료 바인더의 노화상태가 불균등한 것으로 나타났다. 이 연구에서는 재생혼합물을 RAP에 있었던 굵은골재(이하 RAP 굵은골재), 매트릭스(binder와 세립자의 혼합물)와 신규 굵은골재로 구분하여 각 재료의 바인더의 노화 상태를 분석하였다. 그 결과 RAP 굵은골재에 코팅된 바인더(이하 RAP 굵은골재 바인더)가 가장 많이 노화된 상태를 보였고 신규 굵은골재(이하 신규 굵은골재 바인더)에 코팅된 바인더가 가장 낮은 노화상태를 보였다. 즉, RAP에 존재하던 노화된 아스팔트는 새로이 추가되는 신규 아스팔트에 의해 제대로 회생(rejuvenating)되지 못하고 상당히 높은 노화 상태를 유지하고 있는 것으로

나타났다(김광우 등, 2003).

혼합 과정에서 노화가 제대로 회생되지 못한 혼합물은 포설 후 다져지고 나면 바인더의 유동이 제한되므로 더 이상 점도 회복이 되지 못한 채로 그때부터 추가 노화가 시작되면서 취성이 증가하게 된다. 그러므로 포장 초기에는 강성이 높고 규격을 만족하는 성능을 보이지만 조기에 균열 및 손상이 발생하게 될 것이다. 이러한 점이 재생혼합물이 초기에는 규격을 모두 만족하여도 중장기적으로 안전한 지에 대한 우려의 원인이 될 것이고 실제로 기존의 재생포장 일부에서 이러한 이유로 추정되는 문제점들이 관측이 되고 있다 (김광우 등, 2004).

따라서 본 연구의 목적은 재생혼합물 내의 바인더가 보다 균등한 노화상태를 유지하게 할 수 있도록 개선된 혼합방법을 제시하고 그에 따른 재생혼합물이 피로저항 특성 변화를 분석하는 것이다. 이를 위하여 본 연구에서는 일반적인 방법(Ordinary:O 방법)과 개선된 방법(New:N 방법) 별로 재생혼합물을 제조하여 GPC 시험을 통해 재생혼합물 내의 재료별 노화 상태를 비교 분석하고, 각 재생혼합물의 피로저항 특성을 측정하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 재료

본 연구를 위한 회수 아스팔트 포장재료(RAP)는 경기도 용인지역에서 평면 절삭한 것을 사용하였다. 수집된 RAP은 중간 공정 과정을 거치지 않고 혼합에 바로 사용할 수 있도록 13mm 이하로 된 것이다. 그리고 신규골재는 강원 영서지역의 편마암(Gneiss) 쇄석과 경기 중부 지역의 화강암(Granite)을 굵은골재, 잔골재, 석회석분을 채움재로 사용하였다. 이들을 각기 KS F에 규정된 방법에 따라 품질 시험한 결과는 표 1과 같다. 또한 굵은골재 최대치수를 13mm로 하여 잔골재, 채움재와 혼



합하여 건설교통부 13mm 표층용 밀입도 규격에 적합한 입도로 조정하여 사용하였다. 아스팔트는 침입도 등급 60~80인 AP-5를 사용하였다.

표 1. Properties of aggregates

Classification	Specification limit	Gneiss			Granite		
		13mm aggregate	Fine aggregate	Filler	13mm aggregate	Fine aggregate	Filler
Apparent specific gravity	> 2.45	2.686	2.696	2.75	2.714	2.724	2.75
Absorption	< 3.0%	1.143	1.297	-	0.749	0.533	-
Abrasion	< 35%	22.44	-	-	17.11	-	-

개질제는 아스팔트의 물성 및 그를 첨가한 혼합물의 특성을 개선할 목적으로 사용하는데, 본 연구에서는 국내에서 생산되는 가루 형태의 폴리머로 No. 50체에 거의 다 남고 No. 8체를 거의 다 통과하는 입자 형태의 저밀도 폴리에틸렌(Low-Density Polyethylene, LDPE)을 사용하였다.

2.2 시험방법

2.2.1 재료 시험

RAP을 녹인 용액으로부터 Abson 방법으로 아스팔트를 회수하여 침입도, 점도 및 GPC 시험을 수행하였다. 추출된 골재와 RAP의 중량차이로부터 아스팔트 함량을 구하였다. RAP과 신규 골재의 배합을 통한 골재의 입도가 표준규격 범위에 적합하도록 조정하였다.

본 연구에서는 표층용으로 15%의 RAP을 25℃에 24시간 이상 보관 후 바로 사용하였다. 그리고 비교용으로 RAP을 첨가하지 않고 신규골재만으로도 배합설계를 하였다.

2.2.2 재생혼합물의 제조방법

본 연구에서는 일반적으로 제조되는 재생혼합물 제조방법(O방법)과 재생혼합물 내의 바인더가 보다 균등하게 RAP의 노화된 바인더의 점도를 보다 잘

회복시킬 것으로 예상되는 새로운 방법(N방법)을 사용하여 각각 배합설계를 수행하였다. 재생혼합물 제조 시 RAP의 온도는 상온상태였다. 그리고 비교용 혼합물로서 일반 표층용 밀입도 아스팔트 혼합물(신규재료 혼합물: control)의 배합설계를 수행하였다. 표 2는 본 연구에서 제시한 재생혼합물의 혼합방법을 설명해 준다.

표 2. Mix method of recycled asphalt concrete

구분	Mix method
O	신규재료와 RAP에 신규 바인더를 투입하고 일정한 비율로 1분간 비벼 가열재생혼합물을 제조(일반적인 재생혼합물 혼합방법)
N	같은 비율의 재생혼합물 제조 시 RAP과 신규 바인더(필요시 rejuvenator)를 소요량 넣고 30초간 1차 비빈 후 신규골재 투입하고 30초간 추가 비빈

재생혼합물의 제조시 개질제의 첨가는 일반 플랜트에서 별도의 프리믹싱 시설이 없이 적용할 수 있는 건식방법으로 기존 연구에서 소성변형 저항성이 가장 우수하게 나타내는 LDPE 6% 첨가하여 혼합물을 제조하였다.

2.2.3 배합설계

두 가지 신규골재(A: 편마암, B: 화강암)를 사용하여 RAP의 첨가량(15%), 혼합 방법 두 가지(O, N방법), 개질제 유무(none, L6)에 따라 8가지(2골재×2혼합×2개질) 재생혼합물의 배합설계를 수행하였다. 이를 장기노화 유무(none aging, long-term aging)에 따라 구분 처리하여 총 16가지 재생혼합물과 비교용(control)으로 4가지 신규골재 혼합물(2노화×3골재)을 포함하여 총 20가지의 혼합물을 제조하였다. 모든 혼합물에서 골재별 입도는 동일한 조건으로 수행하였다.

배합설계를 통하여 결정된 각각의 최적아스팔트 함량으로 피로시험용 공시체를 제작하였다. 피로시험용 공시체는 공극률 8%±0.5%로 제작하기 위하여 양면을 각각 12회 다짐하였다.



2.2.4 아스팔트 혼합물의 노화

아스팔트 혼합물은 혼합물의 제조와 다짐 시, 즉 플랜트와 시공 현장에서 노화되고(단기노화), 시공 후 공용 중에 여러 가지 요인에 의해 노화가 진행된다(장기노화).

공시체 제작은 현장의 다짐 공극 8%로 제조하기 위해 마샬 다짐을 12회로 다짐하였다. 혼합물의 노화는 외국 문헌 및 연구 결과를 토대로 다음과 같은 방법을 이용하였다.

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

나. 단기노화 - 혼합물을 제조하여 다짐을 실시하기 전의 흐트러진 상태로 강제 송풍되는 135℃오븐에서 4시간 동안 인공적으로 노화시켰다. 또한 현장과 비슷한 조건을 주기 위해서 1시간에 1회 교반시켰다. 이 후 각 혼합물들을 공극 8%로 제조하기 위하여 공시체를 제작한 후 공극을 확인하고 적합하면 장기노화 처리를 하였다.

다. 장기노화 (Long Term Oven Aging) - 장기노화는 현장에서 아스팔트 포장을 건설하고, 수년 정도의 공용을 거친 후의 노화 상태를 모사한다. 단기노화를 거친 아스팔트 혼합물을 다짐하여 공시체를 제작한 후에 85℃를 유지하는 노화 오븐 속에 48시



그림 2. Specimens for long term oven aging

간 동안 노화시켰다. 또한 48시간 후 노화가 끝나면 공시체의 손상을 방지하기 위해 최소 12시간 이상 25℃에서 보관하였다.

그림 1과 2는 각각 단기노화 교반과 장기노화 과정을 보여준다.

2.2.5 피로시험

피로파괴는 재료에 하중이 반복 작용할 때 피로 때문에 정적 파괴하중보다 작은 하중으로 파괴되는 현상이다. 파괴과정은 초기 압밀(primary state), 균열의 진전(균열성장: steady state), 파괴(failure)의 3과정으로 이루어진다.

재생아스팔트 혼합물의 피로저항 특성을 평가하기 위하여 간접인장모드의 피로시험을 수행하였다. 실험온도는 20℃에서 수행하였으며, 반복하중은 일반적으로 우수한 아스팔트 콘크리트의 간접인장강도가 10kgf/cm²일 때의 최대 정하중인 1,000kgf의 20% 수준인 200kgf로 정하였다.

피로시험 장비는 Instron 사의 만능 재료시험기를 사용하였고, 공시체 측면에 extensometer를 설치하여 수평변형량을 측정하였고, 수직변형량은 하중이 재하될 때의 load cell 위치 값을 읽어 측정하였다. 수평변형량은 아스팔트 혼합물의 피로수명을 추정하는데 사용되고, 수직변형량은 아스팔트 콘크리트의 유효하중에 의한 수직변형 저항성 예측에 사용된다.



그림 1. Loose asphalt mixtures during short term oven aging



공시체를 그림 3과 같이 하부 프레임에 올려놓고 중심을 잡은 후 공시체의 측면에 50mm extensometer를 장착하고 load cell을 천천히 내려 하중띠가 공시체의 표면에 닿게 하였다. 실험중에 공시체의 이동을 방지하기 위해 20kg의 최소하중을 적용시켰다. 그림 4는 피로시험 장비전경을 보여준다.

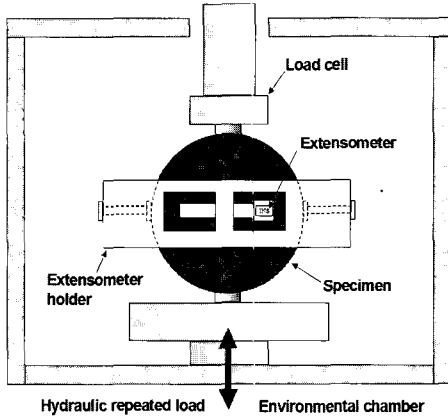


그림 3. Schematic diagram of experimental setup for fatigue test

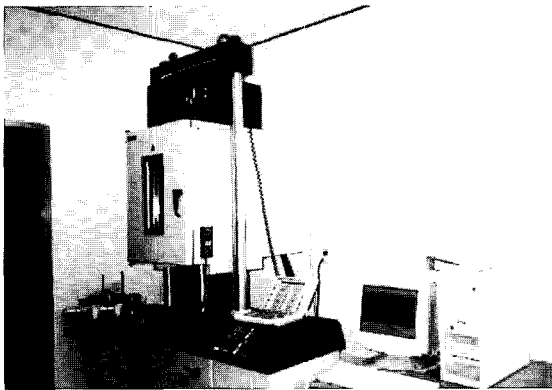


그림 4. Instron test system

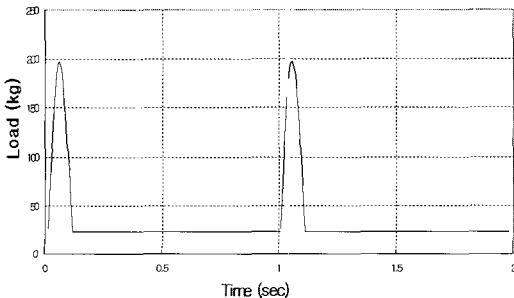


그림 5. Load-time pulse applied for ITS-mode fatigue test

하중 형태는 그림 5과 같이 Haversine 곡선을 나타내는 모양의 반복하중을 가하였다. 이때 하중의 진동수는 1.0Hz로 하중재하시간과 휴지시간을 1:9의 비율로 하였다. 노화 처리된 공시체는 20℃의 항온기 안에 72시간 보관한 후 피로시험을 하였고, 시험 chamber 내의 온도도 또한 20℃로 유지하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 RAP의 추출·회생 바인더 특성

회수 아스팔트 포장재료(RAP)에서 무작위로 소정량의 샘플을 채취하여 회수시험에 사용하였다. 표 3에서 보듯이 RAP 바인더의 점도는 13,751 poise로 pen 60-80과 비교하여 상당히 노화가 되어 포설한지 4-5년 정도 지난 재료인 것으로 추정되었다.

표 3. Properties of RAP binder and virgin asphalt

Classification	AP Contents (%)	PEN (0.1 mm)	AVS (ps)	LMS (%)
RAP	5.3	25	13,751	18.67
pen 60-80	-	67	2,075	13.54

3.2 RAP의 추출·신규 골재 체가름 시험

그림 6의 RAP은 회수아스팔트포장 재료에서 추출된 골재의 입도이며, 본 연구에서 사용된 신규골재

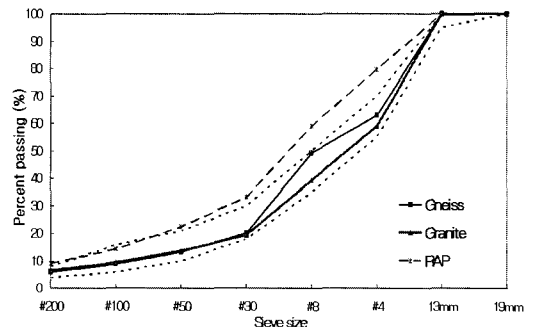


그림 6. Gradation curves of combined aggregates (Gneiss, Granite and RAP)



인 편마암(gneiss)과 화강암(granite)의 골재입도를 같이 나타내었다. 추출골재는 현장에서 평삭되고 13mm 이하로 파쇄되는 과정에서 어느 정도 입도가 작아져 입도규격을 벗어남을 알 수 있고, 나머지 신규골재는 적당한 입도를 가진다. 따라서 이들을 적절히 조절하여 합성입도가 규격에 적합하도록 하였다.

3.3 재생 혼합물의 배합설계

두 가지 신규골재(A 편마암, B 화강암), RAP 첨가량 15%, 혼합 방법 두 가지 (O, N방법) 및 개질제 유무(none, L6)에 따른 총 8가지 [2 골재×1 RAP 함량×2 혼합방법×2개질(유, 무)] 재생 혼합물의 배합설계를 수행하였다. 그리고 비교용(control)으로 2가지 (2 골재) 신규골재 혼합물의 배합설계를 수행하여 총 10가지 혼합물을 제조하였다.

표 4는 실험에 사용된 혼합물들에 대한 구분과 설명이다. 표 5는 배합설계를 통한 최적아스팔트 함량에서의 안정도와 간접인장강도의 시험결과를 나타낸다. 안정도는 모든 혼합물이 1,000kgf 이상으로서 모두 규정을 만족하였고 공극률, 흐름값, 포화도는 모두 표층용 혼합물의 기준치에 만족하였다. 신규혼합물(control) 보다 재생혼합물의 안정도 및 간접인

표 4. Mixture designation

Agg.	Designation	Description
편마암 (Gneiss)	A5R0	Gneiss dense grade, AC60-80, RAP 0%
	A5R15-O	Gneiss dense grade, AC60-80, RAP 15%, method O
	A5R15-N	Gneiss dense grade, AC60-80, RAP 15%, method N
	A5L6R15-O	Gneiss dense grade, AC60-80, LDPE 6%, RAP 15%, method O
	A5L6R15-N	Gneiss dense grade, AC60-80, LDPE 6%, RAP 15%, method N
화강암 (Granite)	B5R0	Granite dense grade, AC60-80, RAP 0%
	B5R15-O	Granite dense grade, AC60-80, RAP 15%, method O
	B5R15-N	Granite dense grade, AC60-80, RAP 15%, method N
	B5L6R15-O	Granite dense grade, AC60-80, LDPE 6%, RAP 15%, method O
	B5L6R15-N	Granite dense grade, AC60-80, LDPE 6%, RAP 15%, method N

표 5. Marshall properties and indirect tensile strength of each mixture at OAC

Agg.	Designation	OAC (%)	Air void (%)	VFA (%)	Flow (0.1mm)	Stability (kgf)	ITS (kgf/cm ²)
편마암 (Gneiss)	A5R0	5.6	4.40	74.19	35	986	6.6
	A5R15-O	5.6	4.05	75.81	36	1,073	9.0
	A5R15-N	5.4	4.17	74.57	31	1,002	7.3
	A5L6R15-O	5.7	4.32	74.99	33	1,267	12.5
	A5L6R15-N	5.7	3.57	78.41	34	1,200	10.8
화강암 (Granite)	B5R0	5.5	4.19	75.55	35	1,136	7.4
	B5R15-O	5.3	3.69	77.11	28	1,087	9.9
	B5R15-N	5.6	3.62	78.46	33	1,179	7.8
	B5L6R15-O	5.7	3.65	78.43	34	1,470	12.8
	B5L6R15-N	5.5	3.68	77.63	35	1,327	11.3

장강도가 크게 나타났고 같은 재생혼합물 중에서는 LDPE를 첨가한 O 방법의 재생혼합물이 높은 값을 나타냈다. 이는 일반 재생혼합물(O)의 초기 강성이 커서 나타나는 현상으로 판단되었다. 그리고 N 방법으로 제조한 재생혼합물의 안정도와 간접인장강도는 O 방법보다는 다소 낮지만 일반혼합물(A5R0, B5R0) 보다는 높거나 유사하게 나타나 중간 정도의 강성을 보이는 것으로 나타났다.

3.4 피로수명

그림 7은 재료의 동적 크리프 거동을 나타낸 것으로 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, 식 (1)과 (2)를 이용하여 초기 변형치를 제외한 cycle에서 파괴시의 cycle 사이의 선형구간의 기울기를 공시체 직경으로 나누어 creep rate를 구



하였다(Fritz 1990). 만일 두 혼합물의 거동을 비교하였을 때 피로수명이 상대적으로 낮은 혼합물은 동적하중 하에서 빠른 변형과 균열을 보일 것이다.

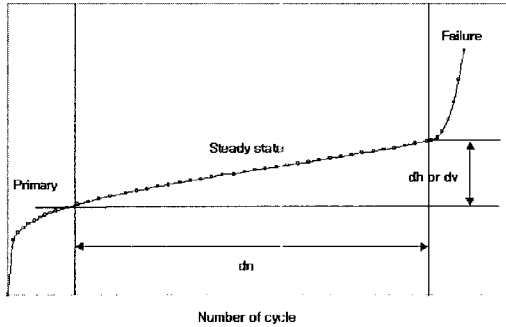


그림 7. Schematic diagram of creep rate

표 6. Fatigue test results (None aging)

Mixture	Type	Linear domain dn (sec)	Deformation (mm)	Creep rate ϵ (μ /sec)	Number of cycle to failure	Fatigue ratio*
A5R0	Horizontal	970	1.707	17.321	1,170	0.492
	Vertical	990	1.706	16.961	1,190	0.504
A5R 15-O	Horizontal	2,180	1.86	8.398	2,380	1
	Vertical	2,160	1.863	8.489	2,360	1
A5R 15-N	Horizontal	1,520	1.8	11.656	1,720	0.723
	Vertical	1,510	1.799	11.726	1,710	0.725
A5L6R 15-O	Horizontal	4,710	1.9	3.97	4,910	1
	Vertical	4,690	1.9	3.987	4,890	1
A5L6R 15-N	Horizontal	4,940	1.918	3.821	5,140	1.047
	Vertical	4,930	1.929	3.851	5,130	1.049
B5R0	Horizontal	637	1.8111	28.558	837	0.743
	Vertical	610	1.6997	27.256	810	0.777
B5R 15-O	Horizontal	927	1.8829	20.163	1,127	1
	Vertical	843	1.4218	16.888	1,043	1
B5R 15-N	Horizontal	553	1.7206	31.459	753	0.668
	Vertical	470	1.2394	26.563	670	0.642
B5L6R 15-O	Horizontal	1,897	1.8857	9.818	2,097	1
	Vertical	1,880	1.6241	8.645	2,080	1
B5L6R 15-N	Horizontal	1,210	1.911	15.892	1,410	0.672
	Vertical	1,083	1.4891	13.668	1,283	0.617

* calculated based on number of cycle to failure of the O mixture

표 7. Fatigue test results (Aging)

Mixture	Type	Linear domain dn (sec)	Deformation (mm)	Creep rate ϵ (μ /sec)	Number of cycle to failure	Fatigue ratio*
A5R0	Horizontal	3,380	1.923	5.599	3,580	0.665
	Vertical	3,370	1.915	5.593	3,570	0.666
A5R 15-O	Horizontal	5,180	2.026	3.849	5,380	1
	Vertical	5,160	2.017	3.847	5,360	1
A5R 15-N	Horizontal	4,320	1.871	4.263	4,520	0.840
	Vertical	4,290	1.878	4.308	4,490	0.838
A5L6R 15-O	Horizontal	36,790	1.941	0.52	36,990	1
	Vertical	36,770	1.938	0.519	36,970	1
A5L6R 15-N	Horizontal	26,320	1.929	0.721	26,520	0.717
	Vertical	26,340	1.929	0.721	26,540	0.718
B5R0	Horizontal	14,170	1.8599	1.292	14,370	0.777
	Vertical	14,180	1.8591	1.29	14,380	0.777
B5R 15-O	Horizontal	18,290	1.9414	1.045	18,490	1
	Vertical	18,290	1.9157	1.031	18,490	1
B5R 15-N	Horizontal	17,680	1.9079	1.062	17,880	0.967
	Vertical	17,690	1.9087	1.062	17,890	0.968
B5L6R 15-O	Horizontal	29,730	1.9788	0.655	29,930	1
	Vertical	29,760	1.9829	0.656	29,960	1
B5L6R 15-N	Horizontal	26,320	1.93	0.722	26,520	0.886
	Vertical	26,330	1.9333	0.723	26,530	0.886

* calculated based on number of cycle to failure of the O mixture

$$\epsilon_v = \frac{dv / D}{dn} \quad (1)$$

여기서,

ϵ_v = 수직 Creep rate(μ /cycle)

dv = 선형구간에서 공시체의 수직변위(mm)

D = 공시체의 직경(mm)

dn = 선형구간에서 cycle 수

$$\epsilon_h = \frac{dh / D}{dn} \quad (2)$$

여기서,

ϵ_h = 수평 creep rate(μ /cycle)



dh = 선형구간에서 공시체의 수평변위(mm)

본 시험에서는 공시체가 파괴될 때까지의 하중횟수와 수평·수직 변형량을 측정하였으며 이를 이용하여 피로수명을 계산하였다. 각 혼합물에 대한 대표적인 피로시험 결과 곡선을 그림 8에서 보여주며, creep rate와 피로수명에 대한 결과는 노화되지 않은 재생 혼합물에 대하여 표 6 그리고 노화된 혼합물에 대하여 표 7에 나타내었다.

표에서 보듯이 피로수명은 O 방법 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 N 혼합물의 피로수명이 O 혼합물의 0.6 - 0.7 수준이던 것이 장기노화 후에는 그 비율이 0.8 - 1.0 가까이 향상되었다. 이는 혼합물이 노화되면서 O 방법 혼합물의 노화상태가 심화되면서 나타나는 현상으로 균열에 대한 저항성이 N 방법 혼합물에 비해 상대적으로 낮아지고 있음을 의미한다. 그 이유는 혼합 과정에서 노화가 제대로 회생되지 못한 혼합물이 더 이상 점도 회복이 되지 못한 채로 추가 노화가 시작되면서 취성이 증가하기 때문이다. 따라서 만일 노화가 더 많이 진행된다면 O 방법과 N 방법의 차이는 더 적어지거나 반대로 N 방법 혼합물이 더 길어질 것으로 추정되나 현재 노화정도의 데이터로는 이를 확인하기가 어렵다.

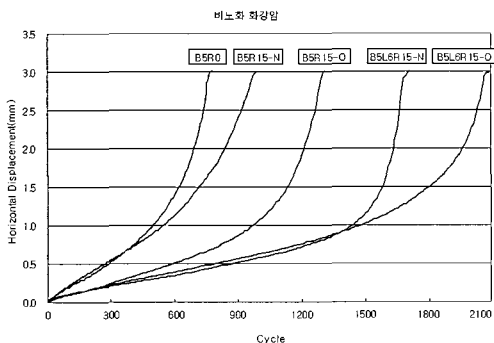


그림 8. Relation of fatigue creep displacement and number of cycle

4. 결론

본 논문은 재생 아스팔트 혼합물의 혼합방법 개선에 따른 피로저항 특성을 비교한 연구이다. 4가지 혼합물(신규, 개질, 노화, 비노화)을 제조하여 시험을 수행하였고 본 연구를 통하여 혼합방법을 개선한 재활용 아스팔트 콘크리트의 피로저항 특성을 분석하였다.

1. 재생혼합물의 마찰안정도와 간접인장강도시험을 수행한 결과 신규혼합물보다는 재생혼합물이 높게 나왔고, 재생혼합물 간에는 N 혼합방법보다는 O 혼합방법에 의한 재생혼합물이 높았으며 LDPE 6%를 건식으로 첨가한 재생혼합물이 높게 나타났다.
2. 피로시험 결과, 신규 혼합물보다는 재생 아스팔트 혼합물의 피로수명이 증가하였고, N 혼합방법보다는 O 혼합방법의 피로수명이 크고 LDPE 6%를 건식으로 첨가하여 개질한 혼합물이 개질을 하지 않은 혼합물보다 큰 피로수명을 나타냈다.
3. 노화 이전에는 A5L6R15-N 혼합물을 제외하고는 O 혼합물에 비하여 N 혼합물의 피로 수명이 크게 낮았으나 이것이 장기노화 후에는 그 비율이 0.8 - 1.0로 향상되었다. 이는 시간이 지나면서 O 혼합물의 노화상태가 상대적으로 심화되면서 균열 저항성이 N 혼합물에 비해 상대적으로 낮아짐을 의미한다. 이는 O 혼합물이 혼합과정에서 노화가 제대로 회생되지 못해 더 이상 점도 회복이 못한 채로 노화가 시작되면서 취성이 증가하기 때문이다. 만일 노화가 더 많이 진행된다면 O와 N의 차이는 더 줄어들거나 반대로 N 혼합물이 더 길어질 것으로 추정된다.

감사의 글

본 연구는 산학연 공동연구개발사업(건설교통기술혁신사



업)과 강원대학교 석재복합 신소재연구센터의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

참고문헌

1. “2004년 전국 폐기물 발생 및 처리현황,” (2004), 환경부 .
1. 김광우, 조희원, 이상범, 이지용, 안경애, (1997), “폴리머(LDPE, SBS)개질 아스팔트 혼합물의 특성 연구,” 97 국제심포지엄 논문집, 강원대학교 석재복합 신소재제품 연구센터.
2. 김광우, 조희원, 이상범, 이지용, 안경애 (1997), “폴리머(LDPE, SBS) 개질 아스팔트 혼합물의 특성,” 아스팔트 포장공학의 첨단기술 심포지엄 논문집, 강원대학교 석재복합 신소재제품 연구센터, p. 252, 1997
3. 이순제, “재생아스팔트 혼합물의 피로저항 특성 연구”, 강원대학교 대학원 석사학위논문, 1999
4. 김광우, 이성훈, 도영수, 이순제 (2000), “아스팔트 콘크리트의 역학적 특성과 결합체 성능과의 관계구명,” 석재연 논문집, 제 5 집, 강원대학교 석재복합 신소재제품 연구센터, pp.63-74.
5. 김성운, “노화에 따른 아스팔트 혼합물 및 회수 바인더의 특성”, 강원대학교 대학원 석사학위논문, 2002.
6. 김광우, 도영수, 김성운, (2002) “아스팔트 콘크리트의 노화 후 추출한 바인더의 물리적 특성 변화,” 한국도로포장공학회 논문집 제 4권 4호, 2002. 12.
7. 김광우, 도영수, 김성운, (2003) “아스팔트 콘크리트의 노화에 따른 인장강도 특성과 MR의 변화,” 대한토목학회 논문집, 제23권 1호, pp43-52
8. Kwang W. Kim, Young S. Doh, Serji N. Amerkhanian, (2004) “Evaluation of aging characteristic of selected PMA using HP-GPC,” 한국도로학회 논문집, Vol 6, No. 2, pp15-24.
9. 김광우, 홍상기, 이기호, 도영수, (2005) “가열 재생 혼합물의 노화특성 개선을 위한 연구,” 한국도로학회 논문집, Vol.7, No. 1, pp 1-10

10. 김광우, 홍상기, 조문진, 도영수, “재생혼합물의 바인더 GPC특성과 역학적 특성과의 상관성 연구,” 한국도로학회 논문집, 2005. 3. Vol.7, No. 1, pp 11-20
11. 김광우, 도영수, 권오선, 고태영, (2005) “개선된 혼합방법으로 제작한 재생 아스팔트 콘크리트의 소성변형 특성연구,” 2005 한국도로학회 학술발표회논문집.
12. 김광우, 도영수, 고태영, 임동섭, (2005) “제조방법 개선한 재생혼합물의 역학적 특성 분석,” 대한토목학회 정기학술발표회논문집.
13. 김광우, 권오선, 도영수, (2006) “바인더 회생방식을 개선한 재생 아스팔트 콘크리트의 소성변형 특성 연구,” 한국도로학회 8권 1호,
14. “*Mix Design Methods*,” Asphalt Institute.(1996)
15. Jeffery R. Roesler, John T. Harvey, Jennifer, Fenella Long (1999), “*Investigation of Design and Construction Issues for Long Life Concrete Pavement Strategies*” University of California at Berkeley
16. Kim, K. W., Kwon, O. S. Tae Young Koh, Doh, Y. S., (2005) “Direct Estimation of Binder Viscosity of Asphalt Concrete Mixture Using GPC without Binder Recovery,” *Proceedings, 5th International Conference on Road & Airfield pavement technology (5th ICPT), Korean Society of Road Engineers, Vol. 1, pp 451-458.*
17. Kwang W. Kim, Kyongae A, Kim, Young S. Doh, and Serji N. Amirkhian, (2006) “Estimation of RAP’s Viscosity Using GPC without Binder Recovery” *The Journal of Material in Civil Engineering*. ASCE,

접 수 일: 2006. 11. 16
 심사 일: 2006. 11. 17
 심사완료일: 2006. 11. 28