



# 재생혼합물의 바인더 GPC특성과 역학적 특성과의 상관성 연구

## Correlation of Binder GPC Characteristics and Mechanical Properties of Hot-Mix Recycled Asphalt Mixtures

김 광 우\*      홍 상 기\*\*      조 문 진\*\*\*      도 영 수\*\*\*\*  
Kim, Kwang Woo    Hong, Sang Ki    Cho, Mun Jin    Doh, Young Soo

### Abstract

This study examined the correlation between mechanical properties and LMS(Large molecular size) of binders in hot-recycled asphalt mixtures. Hot-recycled asphalt mixtures were manufactured by various mixing methods. Laboratory tests including indirect tensile strength, wheel tracking test and Kim test were performed for each recycled mixture. Gel-permeation chromatography (GPC) analysis was performed for the binders coated on virgin and old (RAP) aggregates separately. For the purpose of binder aging analysis, a round-shaped virgin coarse aggregates (13mm gravel) were introduced in recycled mixtures. This makes possible to distinguish the virgin aggregates from RAP aggregates in recycled mixtures for GPC sampling. Results of GPC showed that there was significant difference in aging level between the binder coated on RAP and that of virgin aggregates in the same recycled mixture. Regression analysis was performed to correlate mechanical properties to LMS ratio. Results showed that most of the mechanical properties had relatively good correlation with LMS. This trend agree with LMS increase up to some degree, but fails for further LMS increase.

*Keywords : hot-recycled asphalt mixture, aging, GPC, RAP, LMS, correlation analysis*

### 요 지

본 연구는 재활용 아스팔트 혼합물의 역학적 특성과 재생혼합물 내 바인더의 대형분자(Large molecular size : LMS)와의 상관성을 조사하였다. 재생 혼합물은 여러 가지 혼합 방법으로 제작하여 역학적 강도 시험을 수행하였고 재생혼합물 내의 RAP 굵은골재(R), 매트릭스(M) 및 신규 굵은골재(V) 시료에 코팅된 바인더의 노화 상태를 gel-

\* 정회원 · 강원대학교 지역기반공학과 교수 · 공학박사  
 \*\* 정회원 · 강원도 양구군청 · 공학석사  
 \*\*\* 정회원 · 강원대학교 대학원 석사과정  
 \*\*\*\* 정회원 · 강원대학교 석재복합신소재연구센터 전임연구원 · 공학박사



permeation chromatography(GPC)를 통해 조사하였다. 재생혼합물 내 바인더의 노화상태 분석을 위한 혼합물 제조에는 원형골재(13mm 강자갈)가 굵은골재로 사용되었다. GPC를 통한 재생혼합물 내 바인더의 노화상태를 분석한 결과 신·구 바인더의 노화 정도에 차이를 확인했으며, 혼합 방법에 따라 재생혼합물의 바인더 노화 상태가 서로 상이함을 확인하였다. 역학적 강도 특성과 R, M, V 시료의 LMS에 대한 상관성분석결과 재생혼합물의 역학적 특성이 혼합물 내의 재료 중 어느 특정 재료의 바인더 LMS와 더 밀접한 상관관계를 보였다. 또한 LMS가 어느 정도 증가될 때까지는 강도특성이 향상되나 LMS가 보다 더 커지면 강도성능이 저하되는 경향을 보여 혼합물 제조시 제대로 회복되지 못한 노화된 아스팔트가 향후 노화가 더욱 진행되면 재생혼합물의 강도 성능이 저하될 것으로 판단되었다.

**핵심용어 : 가열 재활용 아스팔트 혼합물, 노화, GPC, 대형분자, RAP, 상관성분석**

## 1. 서론

최근 들어 많은 양의 폐아스팔트 콘크리트의 발생으로 회수된 아스팔트 포장재료(reclaimed asphalt pavement: RAP)를 재활용한 아스팔트 포장이 적극 추진되고 있는 추세이다. 국내의 많은 도로들은 대부분 조기에 소성변형(Rut), 구혈(Pot hole), 밀림(Shoving) 및 균열 등이 발생하여 포장의 가용수명이 3~4년도 안될 정도로 짧다. 이러한 지역에서 수거된 RAP은 노화가 덜 진행되었으므로 이를 그대로 매립하는 것은 재생 가능한 좋은 자원을 버리는 것과 같다. 따라서 이의 재활용은 반드시 필요한 사업이나 재생재료를 사용하면 신규재료보다도 수명이 더 짧을 수도 있다는 우려 때문에 재생혼합물의 사용에 대한 의심이 많다.

이에 본 연구진은 재생혼합물내의 신·구 골재를 싸고 있는 바인더의 노화상태를 분석하고 재생혼합물 사용이 역학적 특성상 우려할 만한 것인지를 바인더의 노화상태에 따라 규명코자 하였다(김광우 등 2003, 홍상기 2004, 김광우 등 2004). 재생혼합물은 노화재료가 섞임으로서 바인더의 노화상태가 신규재료와 다르므로 그 바인더의 물성이 혼합물의 특성에 미치는 영향을 파악하는 것은 아스팔트 재활용 연구에서 중요한 부분이다. 그러나 일반 혼합물의 인공 노화에 따른 역학적 특성 변화에 대한 연구(김광우 등 2003)는 수행된 바는 있어도, 이러한 재생혼합물의 바인더 노화 상태가 혼합물의 역학적 특성에

어떠한 영향을 미치는지는 아직까지 규명되어 있지 않다.

이에 본 논문에서는 Chromatogram을 이용하여 각종 재생혼합물 내 바인더의 노화특성을 분석하고 그 특성과 재생혼합물의 역학적 특성과의 관계를 연구하였다. 본 연구의 목적은 Chromatogram 분석으로 나타난 재생혼합물내의 바인더의 노화특성이 재생혼합물의 역학적 특성과 어떤 관계를 가지는지 파악하는 것이다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 사용재료

본 연구에서는 경기도 용인지역에서 평면 절삭하여 얻어진 회수아스팔트 포장재료(RAP)를 수거하여 13mm이하로 파쇄한 후 무작위로 소정량의 시료를 채취하여 각종 시험에 사용하였다. RAP 바인더의 기본 특성은 표 1과 같으며 침입도 25, 점도 13,751ps로 AC 80-100을 PAV 노화시킨 것과 비교시 다소 덜 노화된 것을 알 수 있다. PAV 노화가 현장에서 5년 이상 노화를 모사한 것이라고 한다면 이 RAP은 포설한지 5년 이내의 재료인 것으로 추정된다.

신규 아스팔트는 AC 60-80, AC 80-100을 사용하였다. AC 60-80인 아스팔트는 비교용 일반혼합물



표 1. Properties of RAP binder and Virgin asphalt

Properties	Binder	AC 80-100			
		RAP	Virgin	RTFO'	PAV'
AP Contents (%)		5.4	-	-	-
Penetration (0.1 mm), 25℃		25	84	52	18
Absolute viscosity (ps), 60℃		13,751	1,349	3,032	65,688
LMS (%)		18.7	12.94	14.25	17.42

\* Average value of four asphalt binders (김광우 등 1999)

제조에 사용되었고, AC 80-100은 재생아스팔트 혼합물의 제조시 신규바인더로 사용되었다. RAP의 노화된 아스팔트의 점도를 회생시키기 위해 국내 S사에서 개발한 YKS-2 고분자 개질첨가제(Polymer modified recycling agent)를 사용하였다.

강도 측정용 재생혼합물에 사용할 신규골재로는 경기 지역의 화강암 쇄석과 강원 영서 지역의 편마암 쇄석 굵은골재(13mm)와 잔골재를 사용하였다. 또한 GPC 분석용 재생혼합물은 RAP 굵은골재와 신규 굵은골재를 구분하기 위하여 쇄석 대신 13mm 이하의 원형골재(강자갈)를 신규 굵은골재로 사용하였고 잔골재는 일반아스콘용 No. 8체 이하의 잔골재를 사용했다. 즉, 이 원형 굵은골재 혼합물은 GPC를 이용한 골재 종류별로 코팅된 바인더의 노화상태 분석에만 사용되었으며, 강도측정용 재생혼합물은 13mm 쇄석 골재가 사용되었고 두 가지 혼합물 모두 석회석분을

채움재로 사용하였다.

## 2.2 시험 방법

### 2.2.1 RAP 바인더의 추출·회수 및 물성시험

재생아스팔트혼합물 제조에 사용될 RAP에 포함되어 있는 노화 아스팔트에 대한 침입도와 점도를 측정하고 추출된 골재의 입도와 비중을 얻기 위하여 KS F 2354에 따라 아스팔트 및 골재를 Trichloroethylene 용액을 이용하여 추출·분리하였다. 분리된 골재는 110℃ 이하의 온도로 오븐에 건조시켜 KS F 규정에 따라 입도 분석과 비중시험을 수행하였고 최초 혼합물과의 중량비로부터 아스팔트 함량을 구하였다. 그리고 아스팔트가 용해된 용액으로부터 ASTM D 1856의 Abson recovery 방법으로 아스팔트를 회수하였으며, 이렇게 회수된 아스팔트 바인더에 대하여 점도(KS M 2247), 침입도(KS M 2252) 시험을 수행하였다.

### 2.2.2 재생혼합물 혼합

재생 혼합물의 혼합 방법은 A,C,D,E 네가지로 하였으며, 이는 재생혼합물의 품질을 개선하기 위해 시도된 것이다(가열 재생..., 2004, 홍상기 2004).

표 2는 RAP을 30% 첨가하여 제조한 2가지 골재별 혼합물의 명칭과 내용을 보여준다.

표 2. Mixture designation

Aggregate	Designation	Description
Gneiss	A5R0	Gneiss dense grade, AC60-80, RAP 0%
	A3R30A	Gneiss dense grade, AC80-100, RAP 30%, method A
	A3R30C	Gneiss dense grade, AC80-100, RAP 30%, method C
	A3R30D	Gneiss dense grade, AC80-100, RAP 30%, method D
	A3R30E	Gneiss dense grade, AC80-100, RAP 30%, method E
Granite	B5R0	Granite dense grade, AC60-80, RAP 0%
	B3R30A	Granite dense grade, AC80-100, RAP 30%, method A
	B3R30C	Granite dense grade, AC80-100, RAP 30%, method C
	B3R30D	Granite dense grade, AC80-100, RAP 30%, method D
	B3R30E	Granite dense grade, AC80-100, RAP 30%, method E

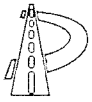


표 2의 방법(method) A는 일반적인 혼합방법, B는 A 방법으로 비빔후 2시간동안 150℃ 오븐에 보관하는 방법, C는 A방법과 같으나 비빔시간을 6배 증가시킨 방법, D는 RAP을 신규 아스팔트와 1차적으로 30초간 비비고 신규골재를 넣고 추가로 60초 더 비빔방법, E는 RAP에 재생첨가제만을 넣고 1차적으로 30초간 비비고 신규 아스팔트와 신규골재를 넣고 추가로 60초간 더 비빔 방법이다. 이에 대한 자세한 사항은 문헌(김광우 등 2003)에 자세히 제시되어 있다.

### 2.2.3 GPC 시험

그림 1은 대표적인 아스팔트 절대점도와 LMS의 상관관계를 보여주는 예이다(Kim and Burati 1993). 여기서 알 수 있듯이 LMS의 증가는 점도의 증가를 의미한다. GPC 분석 방법에 대한 일반적인 사항은 타 문헌 (Kim et al 1993, 2004a, 2004b)에 상세히 수록되어 있다.

본 연구에서는 신·구 골재별로 그것을 코팅하고 있는 아스팔트의 노화 특성을 비교·분석하기 위하여 GPC(Gel-permeation chromatography) 분석을 수행하였다. 이를 위해 각 방법별로 제조된 재생 혼합물로부터 바인더를 추출하지 않고 바인더가 코팅되어있는 원하는 골재입자를 채취하여 바로 THF에 녹여 이로부터 GPC 샘플을 만들어 분석하는 새

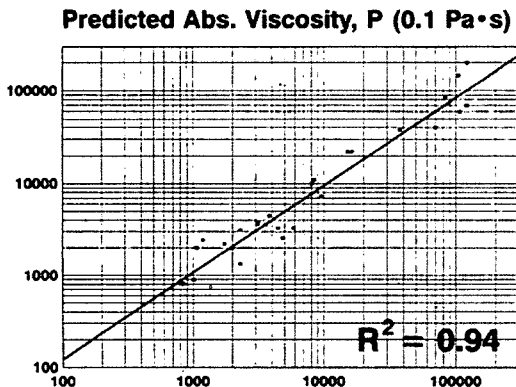
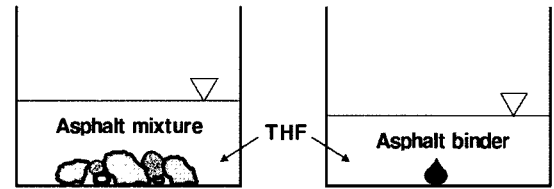


그림 1. Relation of typical asphalt viscosity versus LMS (Kim and Burati 1993)

로 고안된 방법(Kim 2004)을 사용하였다(그림 2). 따라서 이 방법에 의해서는 각 골재에 코팅된 바인더별 노화 특성을 GPC 분석을 통해 파악할 수 있었다. 이에 대한 자세한 사항은 타 문헌(김광우 등 2003, 2004)에 수록되어 있다.



(a) new method developed in this study (b) typical method in this study

그림 2. Illustration of GPC sampling method

## 2.3 혼합물의 역학적 특성 시험

### 2.3.1 배합설계 및 간접인장강도 시험

재생아스팔트 혼합물의 배합설계를 위해 공시체 제조는 KS F 2337과 ASTM D 1559의 마샬식 아스팔트 혼합물 제조방식에 의해 제조하였으며, 배합설계는 Asphalt Institute의 MS-20(Asphalt Hotmix Recycling)방법에 의해 수행하여 최적아스팔트 함량(Optimum Asphalt Content: OAC)을 구했다. 간접인장강도(indirect tensile strength: ITS)는 25℃에서 Lottman 재하 헤드를 이용하여 마샬 공시체에 직경방향으로 50mm/min의 속도로 하중 재하하여 측정하였다. ITS 시험시 얻어진 하중-변위 곡선에서 강성지수(Stiffness index: SI)를 구했으며 이는 재하된 최대하중에 대한 변형량의 비로써 나타낸다. 아스팔트와 같은 점탄성재료에서는 상온에서 탄성계수의 측정이 매우 어려우므로 최대하중시의 변형량의 비율을 그 재료의 강성지수로 보고 이를 측정하여 사용하였다(김광우 등 1997).

### 2.3.2 반복 주행(Wheel tracking) 시험

아스팔트 포장의 소성변형 발생 메커니즘을 모사한 시험이 반복주행(Wheel tracking)시험이다. 본



시험에서는 배합설계를 거쳐 결정된 최적아스팔트 함량으로 제조된 혼합물로 305mm×305mm×62mm의 슬래브 공시체를 공극률 4±0.5%가 되도록 틀러 가압 다짐으로 제조하였다. 제조된 공시체는 24시간 양생 후 소요 크기로 절단하여 시험온도 60℃에서 6시간 이상 저장 후 반복주행시험기로 시험을 수행하였다.

반복주행시험은 강재(鋼材) 바퀴를 사용하였고 지름 200mm, 너비 53mm로서 왕복거리 200mm, 속도는 30cycle/min으로 하였다. 시험은 60℃에서 수행되었고 재하된 윤하중은 70kgf로 왕복 2,700cycle(5,400sec)동안의 최종 침하량(Depth of rut:DR)과 동적안정도(Dynamic stability:DS)를 측정하였다. 동적안정도는 혼합물이 1mm 침하하는데 요구되는 반복횟수(cycle/mm)로 나타내며, 반복주행시험 중 LVDT로 읽어 들인 반복재하에 따른 누적 침하곡선에서 500cycle과 2,500cycle사이에서 회귀분석을 통하여 구했다.

### 2.3.3 변형강도 시험

변형강도(Deformation strength:  $S_D$ ) 시험은 혼합물의 다짐방향으로 공시체에 하중을 재하하여 혼합물이 소성변형과 유사하게 압밀·전단에 의한 변형과 파괴가 유발되도록 개발된 것으로 Kim Test로 측정한다. 공시체는 직경 100mm 원주형이고 직경 40mm에 10mm 반경의 원형절삭을 한 하중봉을 사용한 변형강도 계산식은 식 (1)과 같다. 이에 대한 시험법 및 변형강도 계산의 자세한 내용은 참고문헌에 제시한 문헌들에 수록되어 있다 (김광우 등 2002a, b, 2004).

$$S_D = \frac{P}{\pi[10 + \sqrt{20y - y^2}]^2} \quad (1)$$

여기서, P=maximum deformation load (N),

y=vertical deformation(mm)이고

얻어지는  $S_D$ 의 단위는 MPa이다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 혼합 방법에 따른 혼합물 내의 노화상태 GPC 분석

노화상태 분석용 재생혼합물은 2.2절에 설명하였듯이 원형 굵은골재를 신규골재로 사용하여 5가지 혼합방법(A~E)에 따라 제작하였다. 각각의 혼합물로부터 RAP 굵은골재 시료(R), Matrix 시료(M), 원형 신규(Virgin) 굵은골재 시료(V)를 구분 채취하여 GPC 분석을 하였다. 표 3은 혼합 방법별 각 시료의 GPC 분석 결과를 보여주고 있다.

재생혼합물을 골재와 매트릭스 부분으로 구분하여 각각의 부분에 대한 바인더 노화상태를 분석한 결과 RAP에 있었던 굵은골재(R)를 코팅하고 있는 바인더의 노화 상태가 가장 높고 매트릭스(M), 신규 굵은골재(V)의 순으로 낮은 것을 알 수 있었다. 또한 일반적인 재생혼합물의 제조방법(A방법)으로는 노화된 RAP 내의 굵은골재에 붙어있는 바인더가 제대로 회생되지 못하고 전체적으로 재생혼합물 내의 바인더가 불균등하게 분포함을 알 수 있었다.

점도회복 기간을 주기 위해 150℃에서 다치지 않은 혼합물(Loose mixture)을 2시간 보관(B 방법)하는 방법은 표 3에서 보듯이 LMS가 23%대로 크게 높아져 본래 RAP의 노화 정도(표 1에서 18% 수준)보다도 더 높게 나타나 비교 연구에서 제외하였고, C~E 방법의 재생혼합물은 어느 정도 바인더 노화상태의 개선효과를 보였으며 그 중에서 C와 D 방법이 큰 효과를 나타냈다.

### 3.2 가열재생혼합물의 역학적 특성

#### 3.2.1 OAC에서 혼합물의 마찰 및 간접인장강도 특성

표 4에서 보듯이 배합설계로부터 결정된 최적아스팔트함량으로 각 혼합물별 공시체를 제작하고 마찰안정도 및 간접인장강도를 시험하여 그 성능을 확인하였다. 표에 제시하지는 않았으나 신규혼합물은 물

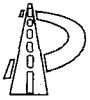


표 3. GPC results for the binders from three types of aggregates (김광우 등 2004, 홍상기 2004)

Mixing method	Large molecular size : (%)			Ratio (①/②)
	from RAP agg. (R) <sup>ⓐ</sup>	from Matrix (M)	from Virgin agg. (V) <sup>ⓑ</sup>	
Virgin mix	-	14.81	14.23	-
A	16.17	15.21	14.42	1.121
B	23.04	-	23.59	-
C	15.24	15.00	14.84	1.024
D	14.95	15.10	14.62	1.022
E	16.58	16.42	15.58	1.064

표 4. Mechanical properties and wheel tracking test result of each mixture

Designation	OAC (%)	ITS (kgf/cm <sup>2</sup> )	SI (kgf/mm)	S <sub>D</sub> (kPa)	Wheel tracking	
					DR (mm)	DS (cycle/mm)
A5R0	5.6	6.6	428	2,804	25.0	128.3
A3R30A	5.5	8.8	481	3,250	16.8	211.4
A3R30C	5.7	11.7	582	3,054	14.7	232.6
A3R30D	5.5	9.4	486	3,202	17.1	194.7
A3R30E	5.7	10.0	514	2,982	22.5	152.6
B5R0	5.5	7.4	410	2,877	19.4	166.7
B3R30A	5.1	10.0	557	3,388	15.3	228.8
B3R30C	5.2	12.2	612	3,011	16.3	217.6
B3R30D	5.1	9.3	500	3,201	12.7	304.4
B3R30E	5.4	10.3	546	2,881	20.6	177.5

론 재생혼합물의 안정도는 모두 규정치인 500-750kgf를 크게 넘어서 안정도는 모두 만족하였다.

혼합물별 간접인장강도 시험결과 일반혼합물보다 재생 혼합물이 더 높은 간접인장강도(Indirect tensile strength: ITS)와 강성지수(Stiffness index: SI)를 보였다. 재생혼합물간에는 C혼합방법의 혼합물이 높은 간접인장강도와 강성지수를 보인데 반해 높은 안정도 값을 나타내었던 A방법의 혼합물은 다소 낮은 ITS, SI를 나타냈다. 일반적으로 인장강도는 바인더의 점도가 높으면 크게 나타나게 되는데 RAP이 섞인 재생혼합물이 신규혼합물보다 점도 수준이 높다. 따라서 신규혼합물보다는 재생혼합물의 인장강도가 높게 나타나게 되며 그 중에서도 C

방법의 혼합물이 제일 높은 것은 전체적으로 높은 점도 때문에 잘 혼합되기가 어려운 혼합물을 혼합시간을 많이 하여 점도를 더 높였기 때문이다. 바인더의 높은 점도는 혼합물의 ITS와 SI를 크게 하지만 균열이 쉽게 발생될 문제가 있다.

안정도 및 ITS, SI 모두 일반혼합물보다 재생혼합물이 높게 나타나 RAP의 노화된 바인더에 의하여 재생혼합물의 강도 특성이 높게 나타남을 알 수 있었다. 하지만 D방법의 혼합물이 재생혼합물 중에서 비교적 낮은 인장강도 특성을 보이고 있는데 이는 혼합방법의 개선으로 혼합물 내부 바인더의 점도와 밀접한 관계가 있는 LMS 비율이 표 3에서 보듯이 상대적으로 낮아지기 때문에 나타난 현상으로 판단된다.



또한 재생첨가제가 첨가된 E방법의 혼합물의 경우 재생첨가제에 의해 점도가 회복되어 안정도 및 ITS가 다른 재생혼합물에 비해 낮을 것으로 예상되었으나 유사한 안정도와 ITS를 보였다. 이는 노화 바인더의 점도를 회복시키기 위해 첨가한 재생첨가제량이 너무 적어 골고루 섞이지 못했기 때문인 것으로 사료되므로 재생첨가제와 RAP만을 비비는 것은 지양하고 다른 방법을 모색해 보아야 할 것으로 보인다.

### 3.2.2 반복주행 시험

반복주행 시험 결과는 표 4의 소성변형 최종 침하 깊이(Depth of rut:DR)와 동적안정도(Dynamic stability: DS)로 나타내었다. 재생혼합물이 E방법의 혼합물을 제외하고는 신규혼합물에 비해 침하깊이가 작고 동적안정도가 크게 나타나 소성변형 저항성이 더 나은 것으로 나타났다. 또한 E방법을 제외하고는 재생혼합물 간에 현저한 차이는 나타나지 않았다. 재생첨가제를 첨가한 E방법 재생혼합물의 침하깊이가 특히 크고 동적안정도가 매우 낮게 나타났는데, 이는 표 3에서 보듯이 E의 경우 R에서 LMS가 가장 높아 재생첨가제가 제대로 효과를 내지 못하기 때문에 소성변형 저항성이 더 낮아진 원인이 된 것으로 판단되었다.

### 3.2.3 변형강도 시험

Kim test 시험결과, 재생혼합물의 변형강도( $S_D$ )가 일반혼합물에 비해 큰 값을 나타냈고 E혼합물을 제외하고는 재생혼합물 간에는 큰 차이가 나타나지 않았다. 또한 E방법의 혼합물은 신규혼합물과 유사한 값을 나타내었고 편마암과 화강암 혼합물간에는

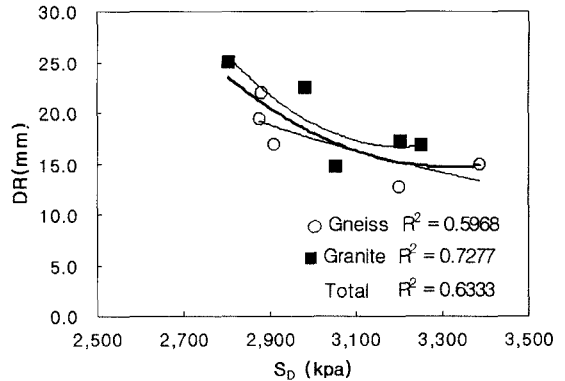


그림 3. Relationships of DR vs.  $S_D$  at 60°C using 4(1.0) loading head

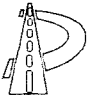
별 차이가 발견되지 않았다.  $S_D$  값은 일반 혼합물의 경우 반복주행시험결과와 높은 상관관계를 나타낸다(김광우 등 2002a, b, c, Kim 등 2004c). 본 재생혼합물에서도  $S_D$  값이 낮은 E 혼합물이 반복주행시험에서도 제일 저조한 점은 일반혼합물의 시험결과와 일치하는 바라고 할 수 있다.

그림 3은 변형강도와 반복주행시험의 침하깊이(DR)와의 상관관계를 보여주고 있다. 골재 종류에 따라 다소 차이가 나지만 결정계수가 0.73까지도 보이고 있고 두 골재를 모두 합쳐서 회귀분석을 한 결과는  $R^2=0.63$ 으로 양호하게 나타났다. 지금까지의  $S_D$ 와 DR의 상관성 연구에서는 다양한 신규 밀입도 혼합물에 대해서만 수행되어 왔는데  $R^2$ 가 0.9 이상까지도 나타났다(김광우 등 2002a, b, c, Kim 등 2004c). 본 연구에서는 비록 데이터 수가 적어서 신뢰성은 높지 못하지만 변형강도와 소성변형 저항성이 양호한 상관관계가 있음을 재생혼합물을 통해서도 어느 정도 보여주는 결과라 할 수 있다.

표 5.  $R^2$  values from regression of each property with 3 LMS values

LMS source	DR			$S_D$			ITS			SI		
	Gneiss	Granite	Avg.	Gneiss	Granite	Avg.	Gneiss	Granite	Avg.	Gneiss	Granite	Avg.
R	0.9872	0.7251	0.8562	0.7276	0.4764	0.6020	0.6583	0.7034	0.6809	0.5440	0.8325	0.6883
M	0.7044	0.8240	0.7642	0.9885	0.9523	0.9704	0.2572	0.2687	0.2630	0.1333	0.4315	0.2824
V	0.8825	0.7475	0.8150	0.4020	0.4240	0.4130	0.9406	0.7741	0.8574	0.8243	0.6931	0.7587

Note:R:RAP aggregate, M:matrix, V:virgin aggregate



### 3.3 아스팔트 혼합물의 역학적 특성과 LMS의 상관성

본 연구에서는 실험에 의해 측정된 역학적 특성 시험 결과와 혼합방법에 따른 각 재생혼합물 내에서 채취한 세 가지 GPC 샘플에서 구한 LMS와의 상관관계를 분석하였다. 구분 채취된 골재 시료의 LMS를 독립변수, 각 혼합물의 강도특성을 종속변수로 하여 상관성 분석을 통해  $R^2$  값을 구하였고 이를 표 5에 제시하였으며 특성별로 상관성이 가장 높은 회귀분석 결과를 그림 4~7에 보여주고 있다.

소성변형 침하깊이(DR)는 세 가지 GPC 샘플(R, M, V)에서 얻은 LMS와의  $R^2$ 가 모두 평균 0.76 이

상으로 높게 나타나고 있다. 하지만 그 중에서도 R 과의 상관성이 가장 높게 나타나 RAP 골재 바인더의 LMS와 가장 밀접한 관계를 갖는 것으로 나타났다(그림 4). 그림에서 보듯이 LMS의 증가는 어느 수준까지는 DR의 감소를 가져오지만 그 이상 더 증가하면 DR이 다시 증가되고 있다. 이는 소성변형 저항성과 관련하여 적정 LMS의 비율이 존재함을 시사하는 바이다.

변형강도  $S_b$ 는 매트릭스(M)의 LMS 값과 매우 높은 상관관계를 보여 혼합물 내의 잔골재 및 filler와 혼합된 바인더와 밀접한 관계가 있음을 보였다(그림 5). 변형강도는 압밀과 전단에 의해 파괴되는 특성이므로 매트릭스 부분의 결합 특성이 높은 상관성을 보

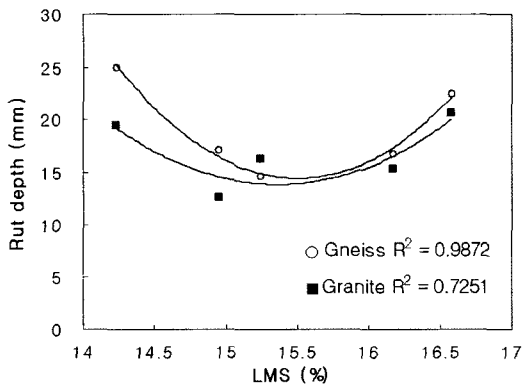


그림 4. Relationship between rut depth and LMS from RAP aggregate binder

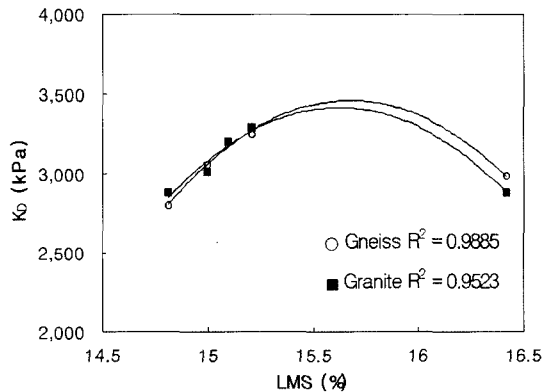


그림 5. Relationship between  $S_b$  and LMS from matrix binder

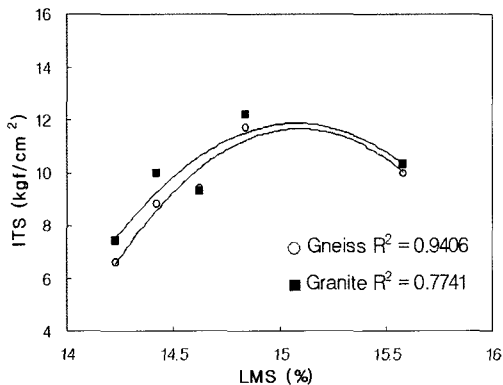


그림 6. Relationship between ITS and LMS from virgin aggregate binder

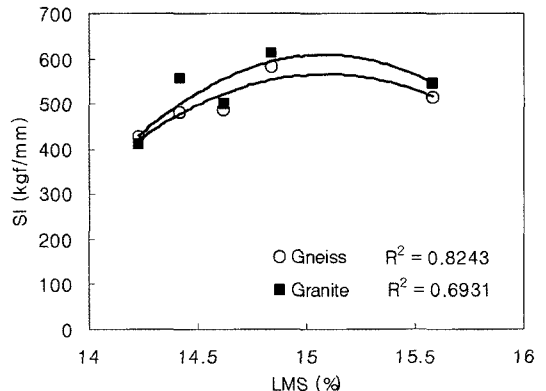
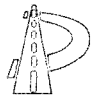


그림 7. Relationship between SI and LMS from virgin aggregate binder





이는 것으로 보인다.

반면 탄성에 근거한 값인 간접인장강도(ITS)와 강성지수(SI)는 신규골재 바인더(V)의 LMS와 가장 높은 상관관계를 보이고 있다(그림 6, 7). 이는 재생 혼합물의 역학적 특성이 혼합물 내의 재료 중 어느 특정 재료를 코팅하고 있는 바인더 대형분자량과 더 밀접한 상관관계를 가지고 있다는 새로운 발견이다.

그 중에서도 변형강도와 인장강도는 각각 잔골재 (filler 포함)와 신규 굵은골재 바인더의 LMS와 월등히 높은 상관관계를 보이고 있어 향후 이를 보다 정확히 파악하기 위한 더 깊은 연구가 필요하다고 판단된다. 만일 이 관계가 보다 확실히 확인되면 해당 특성의 개선을 위해서는 그 특성과 상관관계가 높게 나타난 재료의 바인더에 대한 LMS를 보다 깊이 연구함으로써 흥미로운 결과를 얻을 수 있을 것으로 추정된다.

앞서 언급하였듯이 그림에서 LMS가 어느 정도 증가될 때까지는 3가지 모든 역학적 성능이 대부분 향상되었으나 LMS가 더 커지면 저하되는 것을 알 수 있다. 이는 아스팔트가 노화되어 점도가 높아질 때 어느 정도까지는 혼합물의 역학적 특성 향상에 기여하나 그 이상의 노화가 되면 그 특성에 부정적 영향을 미친다는 의미라고 판단된다. 따라서 이는 신규혼합물보다 전반적으로 점도가 높아 LMS 비율이 높게 나타나는 재생혼합물들이 각종 특성에서 더 우수하게 나타났던 앞 절의 시험결과와 타당성을 확인해주는 근거라고 볼 수 있을 것이다.

하지만 이는 재생혼합물이 제조 초기에는 높은 강도특성을 보이나 공용중 추가 노화되면서 점도가 더 높아지며 LMS가 더 증가하게 되면 강도특성의 저하가 이루어질 수 있음을 시사하는 근거라 할 수 있다. 그리고 LMS와 역학적 특성의 상관성은 각 특성에 따라 다소 차이를 보이나 LMS가 약 15~15.6%에서 최고의 성능을 보이는 것으로 나타났다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 바인더의 불균등 상태를 개선하기 위한 여러 가지 혼합방법에 따라 재생혼합물을 제조하고 이로부터 GPC 분석을 통해 대형입자분자 (Large molecular size: LMS)를 구하고 혼합물의 간접인장강도(ITS), 강성지수 (SI), 반복주행시험의 침하깊이(DR), 변형강도( $S_D$ )를 측정 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 재생혼합물 바인더의 LMS가 어느 정도 증가될 때까지는 역학적 특성이 향상되나 LMS가 더 커지면 저하되는 것으로 나타났다. 이는 아스팔트가 어느 정도 노화될 때까지는 혼합물의 역학적 특성이 향상되나 그 이상 노화되면 그 특성에 부정적 영향을 미친다는 의미이다. 이 사실은 재생 혼합물이 제조 초기에는 좋은 강도특성을 보이나 공용중 추가 노화되면서 LMS가 더 증가하게 되면 강도특성이 저하될 수 있음을 시사하는 근거라 할 수 있다.
2. RAP 굵은골재(R), Matrix(세립자 혼합물 : M), 신규굵은골재(V) 부분으로 시료를 각각 채취하여 GPC 분석을 수행한 결과 바인더의 노화상태 변화와 혼합물의 강도특성이 큰 상관관계를 가지고 있음을 확인하였다. R, M, V 바인더의 LMS와 DR,  $S_D$ , ITS, SI와의 상관성을 분석한 결과 역학적 특성이 혼합물 내의 재료 중 어느 특정 재료의 바인더 LMS와 더 밀접한 상관관계를 가지고 있음을 발견하였다.
3. 기존의 재생혼합물 제조 방법(A 방법)보다 바인더의 노화상태가 크게 개선된 D방법 (RAP과 신규아스팔트를 미리 비빈 후 신규골재 투입)으로 제조된 재생혼합물 강성이 신규혼합물에 가까운 값을 보여 어느 정도 점도회생 효과가 있는 것으로 판단되었다. 즉, D 방법을 쓸 경우 바인더의 회생효과 개선으로 재생혼합물이라도 신규혼합물에 가까운 강성을 가지게 됨을 알 수 있었다.
4. 변형강도( $S_D$ )와 반복주행시험의 침하깊이(DR)와의 상관관계를 분석한 결과 결정계수( $R^2$ )가



0.63 이상을 보여 재생혼합물의 변형강도와 소성 변형 저항성이 양호한 상관관계가 있음을 알 수 있었다. 이는 신규 혼합물의  $R^2$ 보다는 낮은 값이나 재생혼합물도  $S_D$ 가 DR과 좋은 상관관계를 보이는 증거이라 할 수 있다.

### 감사의 글

본 연구는 산학연 공동연구개발사업(건설교통기술 혁신사업)의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

### 참고문헌

1. "가열아스팔트 혼합물의 배합설계 지침,"(1998), 아스팔트포장연구회, 도서출판정보나라.
2. 김광우 등, (2003), "재활용 아스팔트 포장의 수명증진을 위한 품질향상 방안 연구," 2002년도 건설기술 연구개발 1차년도 중간보고서.
3. 김광우, 안경애, 정일권, 도영수 (1999), "개질아스팔트의 노화특성 분석", 석재연 논문집, 제 4 집, 강원대학교 석재복합 신소재제품 연구센터. pp.81-96.
4. 김광우, 이기호, 홍상기, 김민수 (2003), "GPC를 이용한 재생 아스팔트 혼합물내의 바인더 불균등노화 상태 분석," 한국도로포장공학회 학술발표회 논문집, pp. 189~192.
5. 김광우, 이문섭, 김중열, 이순제 (2002a), "아스팔트 콘크리트의 고온변형저항 특성 측정방법 개발", 석재연 논문집, 제 7 집, 강원대학교 석재복합신소재 연구센터. pp.73-90.
6. 김광우, 이문섭, 김성태, 이순제 (2002b), "소성변형과의 상관성 및 추정모델을 통한 변형강도 시험장치 변수 분석," 한국도로포장공학회 논문집, 제 4권 4호, 2002. 12. PP. 41-52
7. 김광우, 이문섭, 김준은, 최선주 (2002c), "소성변형과의 상관성에 근거한 아스팔트 콘크리트의 변형강도 개발을 위한 기초연구," 한국도로포장공학회 논문집, 제 4권 4호, pp. 23-39.
8. 김광우, 도영수, 김성운 (2003), "아스팔트 콘크리트의 노화에 따른 인장강도 특성과 MR의 변화," 대한토목학회 논문집, 제 23권 1D호, pp. 43-52.
9. 김광우, 최선주, 이기호, 도영수, "온도변화에 따른 아스팔트 콘크리트의 변형강도와 소성변형과의 상관성 연구," 대한토목학회 논문집, 2004. 9. pp.743-748.
10. 김광우, 홍상기, 이기호, 도영수 (2004), "가열재생 혼합물의 노화특성 개선을 위한 연구," 한국도로포장 공학회 논문집, 심사중인 논문.
11. 홍상기 (2004), "혼합 방법에 따른 가열 재생혼합물의 노화수준과 역학적 특성의 상관성 연구," 강원대학교 대학원 공학석사학위 논문
12. "Asphalt hot-mix recycling," (2000), The Asphalt Institute, Manual series No. 20 MS-20), college pack, MD.
13. Kim, K. W., Ahn. K. A. and Amirkhanian, S. N. (2004a), "Direct estimation of LMS from solution of RAP," *the Paper submitted to ASCE Journal of Civil Engineering Materials for possible publication.*
14. 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. pp.41-52.*
15. Kim, K. W., Doh, Y. S. and Amirkhanian, S. N. (2004b), "Evaluation of aging characteristics of selected PMA using HP-GPC," *Journal of Korean Society of Pavement Engineers, Vol. 6, No. 2. pp. 15-24.*
16. Kim, K. W., Doh, Y. S. and Amirkhanian, S. N. (2004c), "Feasibility of deformation strength for estimation of rut resistance of asphalt concrete," In-press, *International Journal of Road Materials and Pavement Design.*

〈접수 : 2004. 5. 18〉