

# GPC를 이용한 재생 아스팔트 혼합물내의 바인더 불균등노화 상태 분석

## Analysis of Nonuniform Binder Condition in Recycled Asphalt Mixture using GPC

김광우\* · 홍상기\*\* · 김민수\*\* · 이기호\*\*\*  
Kim, K. W. · Hong, S. K. · Kim, M. S. · Lee, G. H.

### 1. 서론

아스팔트 포장은 결합재로 사용된 아스팔트(개질아스팔트 포함)의 노화로 강성 및 취성이 증가하여 균열 등에 의한 파손의 원인이 된다. 현재까지의 연구에 따르면 재생아스팔트 혼합물은 일반 신규혼합물보다 인장강도 및 강성이 높고 피로 수명은 길게 나타나는 반면 반복주행(Wheel tracking)에서 소성변형 저항성은 다소 낮게 나타난다. 또한 재생혼합물은 포장 초기에는 국내 도로포장용 규격을 만족하지만 공용 기간이 얼마 지나지 않아 초기에 균열 및 손상이 발생하여 중장기적인 안전성에 대한 우려가 있다. 따라서 체계적인 재생혼합물에 대한 추적자료와 오류 발생시 이를 해결하는 경험과 기술의 축적이 필요하다.

재생혼합물은 일반혼합물에 비해 높은 강성을 나타내는데 이는 회수아스팔트 포장재료(Reclaimed asphalt pavement : RAP)의 노화된 바인더가 신규 재료와 혼합되면서 신규바인더에 의해 제대로 점도가 회복되지 못하고 노화상태를 그대로 유지하기 때문인 것으로 판단된다. 즉 재생혼합물 제조시 RAP과 신규재료가 혼합되는 과정에서 RAP의 잔 입자에 묻어있는 노화바인더는 신규바인더와 어느 정도 잘 섞여 점도회복이 되지만 RAP의 굵은골재에 묻어있는 노화바인더는 신규바인더와 제대로 혼합되지 못하여 높은 노화상태를 계속 유지하게 되므로 재생혼합물 내부의 바인더가 불균등한 상태로 분포할 것으로 가정하였다.

따라서 본 연구의 목적은 재생혼합물을 하나의 동질적인(Homogeneous) 재료로 보는 것이 아니라 굵은골재 부분과 매트릭스(바인더와 세립자) 부분으로 구분하여 이질적인(Heterogeneous) 재료로 보고 젤 투과 크로마토그램(Gel-permeation chromatogram: GPC) 분석을 통하여 각각의 부분에 대한 바인더의 노화상태를 파악함으로써 재생혼합물 내의 바인더의 불균등 상태 여부를 규명하고자 하는 것이다.

### 2. 재료 및 시험방법

#### 2.1 사용재료

본 연구에서는 다양성을 고려한 회수아스팔트 혼합물(RAP)로부터 무작위로 채취한 샘플 RAP 6종류의 상태를 아스팔트 함량과 노화상태 단계 별로 나누어 직접 사용할 수 있도록 13mm이하로 파쇄 하였다. 아스팔트는 침입도 등급이 AC80-100인 국내산 아스팔트로 재생아스팔트 혼합물의 제조시 신규바인더로 사용하였다. 골재는 경기 지역의 화강암 세석을 사용하였으며, 이중 굵은골재로 재생혼합물을 혼합 후 RAP 굵은골재와 신규 굵은골재를 구분하기 위하여 13mm 원형골재(강자갈)를 신규골재로 사용하였다.

#### 2.2 시험 방법

##### 2.2.1 노화된 아스팔트의 추출·회생 및 바인더 특성 시험

\* 정회원 · 강원대학교 지역기반공학과 교수 · 공학박사 · 033-250-6467 (E-mail : kwkim@kangwon.ac.kr)  
\*\* 정회원 · 강원대학교 대학원 지역기반공학과 석사과정 · 공학사 · 033-250-7284  
\*\*\* 정회원 · 강원대학교 대학원 지역기반공학과 박사과정 · 공학석사 · 033-250-7284 (E-mail : lghused@hanmail.net)

재생아스팔트 혼합물의 제조에 사용될 RAP에 포함되어 있는 노화 아스팔트의 침입도와 점도를 조사하고 추출 골재의 입도를 조사하기 위해 KS F 2354에 따라 아스팔트 및 골재를 추출·분리하고 아스팔트 용액으로부터 KS F 2381(Abson 방법에 의한 아스팔트 회수 시험 방법)에 따라 아스팔트를 회수(Recover)하였다. RAP으로부터 회수한 아스팔트의 침입도와 점도, GPC 분석을 하였다. 침입도 시험은 KS M 2252에 의하여, 점도는 점도등급(Viscosity grade)에서 쓰이는 절대점도를 ASTM 2170에 의하여 60°C에서 측정하였다.

### 2.2.2 GPC 시험

절대점도와 함께 아스팔트의 노화 특성을 비교분석하기 위하여 GPC 분석을 하였다. 아스팔트가 노화되면 아스팔틴(Asphaltene)함량이 증가되며 따라서 점도가 증가하고 침입도가 낮아지는 현상으로 나타나게 된다. 이를 크로마토그램으로 분석하면 아스팔트 내에 대형분자(Large Molecular Size: LMS)의 증가로 나타난다(그림 1). 따라서 대형분자의 증가 정도와 노화상태는 밀접한 상관관계가 있다. 또한 기존의 연구에 의하면 LMS와 절대 점도의 상관성이 매우 높아  $R^2$ 가 0.94 이상도 나타났다.

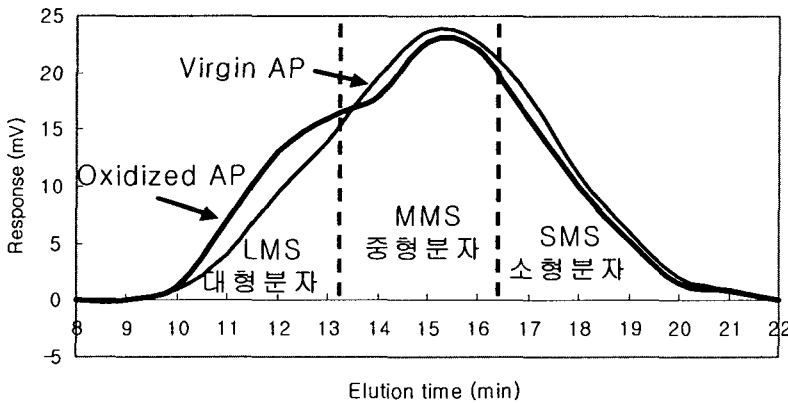


그림 9. Illustration of typical GPC for virgin and old asphalts

일반적으로 아스팔트의 GPC 분석은 바인더를 Tetrahydrofuran(THF)에 녹여 샘플을 만들고 이를 GPC 분석기에 넣어 시험한다. 따라서 GPC 시험전 혼합물로부터 바인더를 추출하는 것이 선행되어야 한다. 그러나 원하는 해당골재 만으로부터 바인더를 얻을 수 없고 굵은골재와 Matrix도 같이 섞인 혼합물로부터 바인더를 회수하게 되므로 회수된 바인더가 원하는 골재만에 코팅된 바인더 특성을 나타내지 못한다. 이러한 GPC 결과는 재생 혼합물 전체의 평균바인더 특성으로 부분적인 바인더 특성을 나타내는 것이 아니다. 따라서 본 연구에서는 각 골재에 코팅된 바인더의 노화상태를 파악하기 위하여 혼합물로부터 바인더를 추출하지 않고 바인더가 묻어있는 원하는 골재를 바로 THF에 녹여 이로부터 GPC 샘플을 만들어 분석기에 넣었다.

### 2.2.3 재생혼합물의 제작

혼합물내의 바인더 노화상태를 확인하기 위하여 6종류의 RAP을 사용하여 일반 현장 재생플랜트에서 처럼 1분 이내의 혼합 시간으로 재생혼합물을 제작하였다. 재생혼합물의 RAP 첨가 비율은 성능상 가장 대표적인 30%로 고정하였으며 GPC 분석을 위한 RAP의 굵은골재 및 Matrix, 신규 굵은골재 부분의 시료를 채취하기 위하여 신규 굵은골재로 13mm 이하의 원형골재(강자갈)를 사용하였다.

혼합물로부터 채취한 골재시료에는 잔 입자들이 붙어 있어 순수하게 굵은골재에 코팅된 아스팔트의 특성이 희석되는 실험 오차를 유발하게 된다. 그러므로 이를 미연에 방지하기 위하여 뜨거운 상태의 혼합물일 때 잔 입자를 최대한 제거 후에 굵은골재시료를 채취하고, 식힌 뒤 THF에 녹여 GPC 샘플을 취하였다. 이로부터 GPC 분석을 통해 LMS를 구하여 재생혼합물 내 각각의 부분에 대한 바인더의 노화 상태를 파악하였다.



### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 RAP의 추출·회생 바인더 특성

각 노화단계별로 수거한 회수 아스팔트 포장재료(RAP-1~RAP-6)로부터 13mm 이하의 RAP만을 사용하여 무작위로 소정량의 샘플을 채취하여 실험에 사용하였다. 각 RAP으로부터 추출·회생한 바인더의 기본 특성들은 표 1과 같다.

표 1. Properties of RAP binders

Classification	Asphalt Contents (%)	PEN (0.1 mm)	AVS (ps)	LMS (%)
RAP-1	5.2	21	18,769	20.21
RAP-2	6.2	24	12,390	18.56
RAP-3	5.3	27	11,093	17.91
RAP-4	5.4	25	13,751	18.67
RAP-5	5.2	46	5,230	16.59
RAP-6	6.0	26	12,407	18.35
Virgin mix	-	62	2,485	14.87

※ PEN: penetration, AVS: absolute viscosity, LMS: large molecular size

RAP 바인더의 점도가 높아짐에 따라 침입도는 낮아지고 LMS가 높아지는 것이 일반적이다. 본 연구에서 도 같은 현상이 나타나 점도 또는 침입도와 LMS 간에 상관성이 있음을 확인하였다.

#### 3.2 혼합물 내의 노화상태 GPC 분석

재생혼합물은 6종류의 RAP을 사용하였고 신규 굵은골재로는 13mm 이하의 원형골재(강자갈)를 사용하였다. 잔골재는 시료 채취시 RAP과 신규골재의 구분을 위해서 NO. 8체 이하의 골재를 사용했으며 석회석분말을 채움제로 사용하였다. 재생혼합물은 6종류의 RAP을 첨가하여 제작하였고 각각의 혼합물로부터 RAP 굵은골재시료(NR), Matrix 시료(NM) 및 신규 굵은골재시료(NV)를 채취하였다. 채취한 각 골재시료들은 추출·회생 과정을 거치지 않고 골재시료 자체를 직접 THF에 넣어 묻어있는 아스팔트를 추출하여 LMS를 구하였다. 표 2는 구분 채취된 각 시료의 GPC 분석 결과를 보여준다.

표 2. GPC results of distinguished aggregates

Classification	LMS from 표 1 (%)	LMS using each RAP (%)					
		from RAP agg. (NR)		from Matrix (NM)		from Virgin agg. (NV)	
		②	②/① ratio	③	③/① ratio	④	④/① ratio
RAP-1	20.21	17.89	0.885	17.16	0.849	15.69	0.776
RAP-2	18.56	16.72	0.901	15.78	0.850	14.44	0.778
RAP-3	17.91	17.78	0.993	16.35	0.913	16.24	0.907
RAP-4	18.67	16.17	0.866	15.21	0.815	14.42	0.772
RAP-5	16.59	16.66	1.004	16.18	0.975	14.72	0.887
RAP-6	18.35	16.83	0.917	16.29	0.888	15.32	0.835
Mean	18.38	17.01	<b>0.928</b>	16.16	<b>0.882</b>	15.14	<b>0.826</b>
Virgin mix	14.87	-	-	14.81	0.996	14.23	0.957

재생혼합물내의 Matrix 부분 시료 및 신규 굵은골재, RAP 굵은골재시료를 각각 골라내어 그 노화상태를 GPC 분석한 결과 RAP 굵은골재시료의 LMS가 가장 높았고 다음 Matrix, 신규 굵은골재 순으로 나타났다. 이는 재생혼합물 내의 바인더가 전체적으로 균일한 노화상태가 아니고 RAP의 노화된 바인더가 신규 바인더에 의해 제대로 회복되지 못하고 불균등하게 분포하고 있음을 보여주는 것이다. LMS 수준을 통해 점도를 추정해보면 NR의 경우 모두 16-17% 이어서 절대점도가 5,000~10,000ps 수준이라 할 수 있다. 이는 NV의



LMS가 14-15%로 절대점도 5,000ps 훨씬 이하인 수준과 비교하면 매우 높은 상태라 할 수 있다.

이를 재생 혼합물에 사용되기 전 RAP에서 측정한 표 1의 LMS 값과 비교하면 NR②/① ratio의 평균이 0.928로 NV ④/① ratio의 0.826보다 0.1포인트 (10% 포인트) 이상 큰 것으로 나타났다. 특히 노화상태가 비교적 낮은 RAP-5의 경우는 거의 NR ratio가 1.0 이어서 노화상태가 전혀 회복되지 못하였다. 노화상태가 가장 심한 RAP-1의 경우는 그 비율이 0.885로 RAP-5보다 회복상태가 낮기는 하지만 NV의 0.776에 비하면 역시 0.1이 높은 상태이어서 노화된 RAP의 바인더가 제대로 회생(rejuvenating)되지 못한 상태로 재생혼합물 내에 존재하는 것을 확인할 수 있었다. 특히 RAP-2, RAP-4 등의 NV LMS는 15%로 Virgin mix와 유사하여 신규골재에는 거의 신규 아스팔트가 코팅되어있고 RAP에 있던 골재는 바인더 회생이 매우 적게 된 것을 알 수 있다.

한편 이 차이는 Matrix에서는 그 중간 정도의 값을 보였다. 이는 잔 입자와 바인더가 뒤섞여 있는 Matrix 부분의 경우 재생혼합물의 혼합과정에서 신·구 재료가 비교적 잘 섞이지만 RAP의 굵은골재에 묻어 있는 노화 바인더는 단기간의 혼합시간으로는 신규 바인더로 제대로 혼합되지 못하는 것이다. 즉, 재생혼합물 내 RAP의 노화된 아스팔트가 신규 아스팔트에 의해 제대로 점도회복이 되지 못하고 높은 노화 상태를 유지하는 것을 말하며 본 연구의 가정 사항과 부합되는 것이라 하겠다. 이와 같이 혼합물의 바인더 노화정도가 불균등한 상태로 출하되어 현장에 포설되면 아스팔트는 자체적인 유동성이 거의 없기 때문에 더 이상 신·구 바인더가 중화되지 못하고 공용중에 노화가 다시 시작된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 재생혼합물 내의 아스팔트가 불균등하게 분포할 것으로 판단하고 재생혼합물로부터 RAP 굵은골재 및 Matrix, 신규 굵은골재 부분으로 나누어 각 부분의 시료를 채취하여 GPC 분석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. RAP 굵은골재시료의 대형분자 (LMS)가 Matrix 및 신규 굵은골재시료의 LMS 보다 높게 나타나 재생 혼합물 내의 노화된 아스팔트가 신규 아스팔트에 의해 제대로 점도가 회복되지 못하고 혼합물 내에서 불균등하게 분포하고 있음을 확인할 수 있었다.
2. 또한 RAP 굵은골재의 LMS와 신규 굵은골재의 LMS 차이가 평균 10% 이상 크게 났는데 이는 재생 혼합물 제조 과정에서 단기간의 혼합으로는 RAP 굵은골재에 묻어있는 노화된 바인더가 신규 바인더와 골고루 섞이지 못하거나 신규바인더가 이를 충분히 회복시켜주지 못하기 때문인 것으로 사료된다.
3. 특히 일부의 재생혼합물의 신규골재에는 거의 신규아스팔트의 노화상태와 같은 바인더가 코팅되어있음이 확인되어 신규골재가 신규바인더를 거의 다 취하고있는 것으로 보여졌다.
4. 따라서 추후 재생혼합물 내의 바인더가 보다 균등하게 분포될 수 있는 방법을 모색하여 재생혼합물의 성능을 향상시킬 수 있는 방안의 개발이 이루어져야 할 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

본 연구는 2003년도 건설교통부 산·학·연 공동연구개발사업의 일환으로 이루어진 것입니다.

#### 참고문헌

1. "가열아스팔트 혼합물의 배합설계 지침" (1998), 아스팔트 포장연구회, 도서출판 정보나라.
2. Kim, K. W. and Burati, Jr. J. L (1993). "Use of GPC Chromatogram to Characterize Aged Asphalt Cement", Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol. 5. No.1.
3. 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. No.1.
4. Kim, K. W., Ahn, K. A. and Amirkhanian, S. N., "Direct Estimation of Asphalt Viscosity in RAP using GPC without Binder Recovery," Paper submitted to TRB for 2004 Annual Meeting.