한국도로학회 논문집
第8券1號 2006年 3月
pp. 1 ~ 13

바인더 회생방식을 개선한 재생 아스팔트 콘크리트의 소성변형 특성 연구

Evaluation of Permanent Deformation Characteristics of Recycled Asphalt Concretes Made by Improved Binder-Rejuvenation

김 광 우* 권 오 선** 도 영 수***
Kim, Kwang Woo Kweon, Oh Sun Doh, Young Soo

Abstract

This paper is one of the studies for developing new methodologies for improving performance of hot-mix recycled asphalt mixtures. The objective of this study is to evaluate rut-resistance characteristics of recycled asphalt mixture which was prepared by newly developed mixing method. The new mixing method provided more sufficient rejuvenation of old binder of reclaimed asphalt pavement (RAP), making homogeneous binder viscosity level in a recycled mixture. Two aggregates (gneiss and granite), two RAP contents (15% and 30%) and two contents (none and 6%) of polymer modifier (LDPE) were used. Recycled mixture was prepared with two methods; method A and method F. To examine difference of binder oxidation level by type of material within a recycled mixture, Gel-permeation chromatography(GPC) analysis was performed on the binders mixed with coarse aggregates and matrix separately. Laboratory tests were performed for evaluation of rut resistance characteristics of each recycled mixture and these includes wheel tracking (WT) test and Kim test. Rut depth and dynamic stability were obtained from WT test and deformation strength (S_D) was obtained from Kim test. The results of regression analysis was shown that correlation (R^2) of F mixing mixtures was higher than one of A mixing mixtures. Therefore, F mixing mixtures showed more consistent rut resistance than A mixing mixtures.

Keywords : RAP, GPC, Kim test, S_D, rejuvenator, rut depth, polymer modifier

요 지

본 논문은 가열 재생아스팔트 혼합물의 성능을 향상시키기 위한 방법을 개발하기 위한 연구의 일부분이다. 새로이 개발된 혼합 방법은 회수 아스팔트 포장의 기존 바인더를 훨씬 많이 회생시켜 재생 혼합물에서 균일한 바인더의 정도를 갖게 한다. 본 연구의 목적은 새로이 개발된 혼합 방법으로 제조된 재생아스팔트 혼합물의 소성변형 저항 특성을 평가하는 것이다. 두 종류 골재(편마암, 화강암), RAP의 두 가지 함량(15, 30%), LDPE의 두 가지 첨가량(0, 6%)를 이용하였으며, 혼합방법은 바인더의 불균등 상태를 개선하기 위한 두 가지 방법, 즉 일반적인 기존의 A 방법과 새롭게 개발한 F 방법을 이용하였다. 재생 혼합물 내의 바인더 산화 정도의 차를 조사하기 위하여 GPC 분석을 실시하였고, 혼합 방법에 따른 소성변형 저항성을 평가하기 위하여 각 혼합 방법에 따라 제작한 재생 혼합물을 휠 트랙킹 시험과 변형강도를 측정하였다. 소성변형 저항 특성과 변형강도와의 상관관계는 기존의 A 방법보다 새롭게 개발된 F 방법이 더 높게 나타나, F 방법으로 제조된 혼합물의 품질이 보다 일관성 있는 소성변형 저항성을 나타내는 것을 알 수 있었다.

핵심용어 : 재생아스팔트 콘크리트, GPC, Kim test, 변형강도, 재생첨가제

* 정회원 · 강원대학교 지역기반공학과 교수 · 공학박사
** 정회원 · 한국도로공사 도로교통기술원 포장연구실 연구원
*** 정회원 · 강원대학교 석재복합신소재연구센터 책임연구원 · 공학박사

1. 서 론

환경부의 '2003년 전국 폐기물 발생 및 처리 현황' 을 보면 아스팔트 폐기물은 1996년에 3,398(톤/일)이던 것이 2003년에는 18,351.5(톤/일)로 증가하였다. 국내 전체 포장 도로의 85%가 아스팔트 콘크리트 포장인 우리나라의 실정으로 비추어 보면 앞으로 이 양은 점점 늘어날 것으로 예상된다.

기존의 아스팔트 재활용 연구에 의하면, 재생 아스팔트 혼합물은 회수 아스팔트 포장재료(Reclaimed asphalt pavement: RAP)를 15% 이내로 첨가할 경우에는 별도의 가열장치가 없이 플랜트에서 직접 적정 출하온도의 확보가 가능하다. 그리고 RAP 함량이 30~50% 정도로 높아졌을 때도 아스팔트 혼합물의 마샬 안정도가 높게 나타나며 일반 도로포장용 규격을 만족하므로 현 기준으로 현장 적용에 문제가 없다고 판단된다.

하지만 최근의 연구에 의하면, 일반적으로 제조되는 재생혼합물 내의 바인더를 GPC(gel- permeation chromatography)로 분석한 결과 신 · 구 재료 바인더의 노화상태가 불균등한 것으로 나타났다. 이 연구에서는 RAP을 첨가한 재생혼합물을 RAP에 있었던 굵은골재(이하 RAP 굵은골재), 매트릭스(Binder와 세립자의 혼합물)와 신규 굵은골재로 구분하여 각 재료의 바인더의 노화상태를 별도 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 높은 노화상태를 상당히 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 추가 노화가 시작되면서 취성이 증가하게 된다. 그러므로 포장 초기에는 강성이 높고 일반 규격을 만족하는 성능을 보이지만 조기에 균열 및 손상이 발생하게 될 것이다. 이러한 점이 재생혼합물이 초기에는 규격을 모두 만족하여도 중장기적으로 안전한지에 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 개질제인 LDPE(Low-density polyethylene)를 첨가하여 그에 따른 재생혼합물이 어떠한 소성변형 특성 차이를 나타내는지 파악하는 것이다. 이를 위하여 본 연구에서는 일반적인 방법(A 방법)과 개선된 방법(F 방법)별로 재생혼합물을 제조하여 GPC 시험을 통해 재생혼합물 내의 재료별 노화상태를 비교 분석하고, 각 재생혼합물의 소성변형 저항 특성을 측정하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 재 료

본 연구에서는 경기도 용인지역에서 평면 절삭하여 얻어진 RAP을 수집하여 실험에 사용하였다. 수집된 RAP은 중간 공정 과정을 거치지 않고 실험에 바로 사용할 수 있도록 13㎜ 이하로 파쇄하였다(그림 1). 아스팔트는 침입도 등급이 60~80과

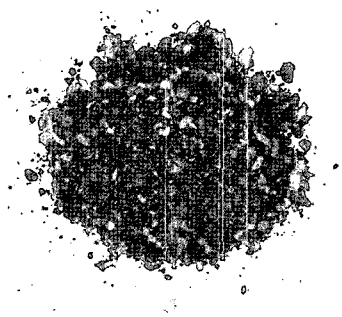


그림 1. 13㎜ 체를 통과한 회수 아스팔트 포장 재료

표 1. 회생제의 물리적 성질

Properties	YKS-2
점도 @ 60℃, cSt	900~1100
인화점, COC, ℃	230 이상
포화탄화수소 함량	10% 이하
방향족화합물 (Total)	90% 이상
박막가열후 @ 163℃ 점도비	1.0~2.0%
박막가열후 @ 163℃ 증발감량	3 wt.% 이하
비중, @ 60℃	1.0~1.1

표 2. LDPE의 물리적 특성

Material	Volatility	Viscosity (cps)	Color	Tensile st. (kgf/cm²)	Extendability
LDPE	0.62	4,840	White	233	1,020

80~100인 국내산 AP-5와 AP-3을 사용하였다. 아스팔트 AP-5는 비교용(Control) 일반혼합물 제조에 사용하였고, AP-3은 국내에서 생산되는 아스팔트 중 가장 절대점도가 낮은 평균 1,000ps 이하이므로 재생아스팔트 혼합물의 제조시 신규바인더로 사용하였다. 노화된 아스팔트의 점도를 회복시키는 재생첨가제인 Rejuvenator는 국내 S사에서 개발한 YKS-2(고분자개질 첨가제, Polymer modified recycling agent)를 사용하였다. 주요 성상은 표 1과 같다. 개질제로는 국내산 LDPE를 건식혼합 방식으로 6% 사용하였다. 표 2는 LDPE의 물리적 성질을 보여주고 있다. 그리고 골재는 강원 영서 지역의 편마암(Gneiss) 쇄석, 경기 중부 지역의 화강암 쇄석(Granite), 잔골재(Screenings), 채움재(Mineral filler)를 사용하였다. 한편 GPC 실험용 재생혼합물의 신규 굵은골재로서 13mm 원형골재(자갈)을 사용하였는데, 이는 재생혼합물 내 바인더의 노화상태 평가를 위한 시료 채취시 RAP의 굵은골재와 신규 굵은골재를 구분하기 위한 것이다(그림 2). 잔골재는 No. 8체 이하의 Screenings을 사용했으며 석회석분을 채움재로 사용하였다.

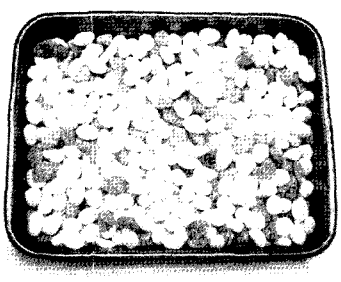


그림 2. 노화 정도 시험에 사용된 13mm 원형자갈

2.2 실험방법

2.2.1 GPC 시험

아스팔트가 노화되면 아스팔틴의 함량이 증가되어 이를 크로마토그램(GPC)으로 분석하면 아스팔트 내에 LMS(Large Molecular Size)의 증가로 나타난다. 따라서 RAP 굵은골재 바인더와 신규 굵은골재 바인더의 LMS 차이가 적게 나타나는 것은 재생혼합물 내의 신 · 구 바인더가 골고루 혼합된 것이라 볼 수 있을 것이고, 그 차이가 큰 혼합물은 바인더가 골고루 섞이지 못하여 재생혼합물 내의 신 · 구 바인더가 불균등하게 존재하는 것으로 판단할 수 있다.

GPC는 아스팔트 바인더뿐만 아니라 고분자 재료를 용매에 녹여 투과성 젤이 채워져 있는 칼럼을 통과시킴으로서 분자 크기의 입도분포(그림 3)를 볼 수 있는 시험 방법이다. 본 연구에서는 각 골재에 코팅된 바인더의 노화상태를 파악하기 위하여 GPC 분석용 재생혼합물을 표 3의 혼합 방법에 따라 각각 제조

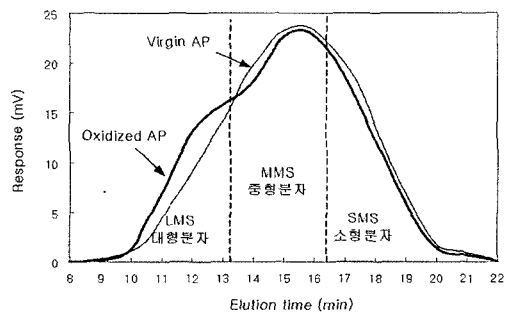


그림 3. 일반아스팔트와 노화된 아스팔트의 전형적인 GPC 도해

표 3. 재생 아스팔트 콘크리트의 혼합 방법

구 분	Mix Method
A	신규재료와 RAP에 신규 바인더를 투입하고 일정한 비율로 1분간 비벼 가열재생혼합물을 제조(일반적인 재생혼합물 혼합방법)
F	같은 비율의 재생혼합물 제조 시 RAP에 신규 바인더와 필요시 Rejuvenator를 소요량 넣고 30초간 1차 비빈 후 신규골재 투입하고 30초간 추가 비빔

한 후 바인더를 추출하지 않고 바인더가 묻어있는 원하는 골재입자를 그대로 THF(Tetrahydrofuran)에 녹여 GPC 샘플을 채취하여 GPC시험을 수행하고 각 시료의 LMS를 구하여 그 값들을 비교 분석하였다.

2.2.2 혼합 방법에 따른 재생혼합물 제조

본 연구에서는 표층용으로 15, 30%의 RAP을 사용하여 실험을 수행하였으며 RAP 함량별로 첨가량 15% 재생혼합물 제조는 RAP을 25℃에 24시간 이상 보관한 후 바로 사용하였으며, 첨가량 30% 재생혼합물은 혼합하기 전 오븐에서 1시간 정도에 약 100℃가 되도록 예열을 한 후 사용하였다.

일반적으로 제조되는 재생혼합물과 RAP의 노화된 바인더의 점도를 보다 균등하게 회복시켜 재생혼합물 내의 바인더가 보다 균등해지도록 혼합 방법을 개발하고 각 혼합 방법에 따라 배합설계를 실시하였다(표 3). 재생혼합물 제조 시 RAP 첨가 비율은 15%, 30%로 각각 상온첨가와 가열첨가로 나누었다. 그리고 비교용 혼합물로써 일반 표층용 밀입도 아스팔트 혼합물(Control)의 배합설계도 수행하였다.

배합설계는 Marshall 방법을 사용하였다(가열아스팔트..., 1998). 본 연구에서 적용된 혼합물은 건설교통부에서 제시한 표층용 13mm 밀입도 혼합물을 기준으로 하여 최적아스팔트 함량(Optimum asphalt content:OAC)을 구하였다. 이 OAC를 이용하여 마샬안정도 및 간접인장강도 그리고 Wheel tracking과 변형강도 시험을 위한 슬래브를 제조하였다.

2.2.3 반복주행(wheel tracking) 시험

본 연구에서는 반복주행 시험을 위하여 305×305×62mm의 슬래브 공시체를 배합설계를 통한 OAC로 롤러 다짐기(Roller press compactor)를 이용하여 공극율 4±0.5%로 다짐하여 제조하였다. 제조된 공시체는 24시간 상온 양생 후 60℃에 6시간 보관후 시험에 사용되었다. 시험은 60℃에서 수행되었고, 재하된 윤하중 압력은 700kPa(100psi)이며 왕복 40cycle/min.로 90분간 총 3,600cycle 반복주행에 따른 침하량을 측정하였다. 휠 트랙킹 시험기의 바퀴 재질은 강재이며, 직경 200mm, 폭 50mm이고 1회 왕복거리(stroke)는 200mm이다.

혼합물이 1mm 침하하는데 요구되는 반복횟수를 의미하는, 즉, cycle/mm로 나타내는 동정안정도(Dynamic stability:DS)는 600cycle과 3,400cycle 사이에서 회귀분석을 통해 구하였다.

2.2.4 변형강도 시험(Kim test)

변형강도 시험은 하중을 혼합물이 다져진 방향과 같은 방향으로 가하고 재하에 의해 혼합물은 소성변형과 유사하게 압밀 · 전단에 의한 변형이 유발되도록 하중봉을 사용하였다(그림 4). 시험 온도는 60℃에서 수행하였고 그림 5와 같이 마샬 시험기에 하중봉과 몰드를 이용하여 수직으로 하중을 가하도록 하였다. 직경 D인 하중봉의 양 하단을 반경 r만큼 원형절삭하고 하중에 의해 바닥으로부터 y만큼 하중봉이 눌러 들어갈 경우를 고려할 때, 파괴시 하중(P)을 접지면에서 바닥에 투영한 원의 면적(A)으로 나누어 산정한 강도를 변형강도(Deformation strength: S_D)라 정의하였다.

현재까지의 연구결과에 의하면, 골재의 크기(최대치수 10~19mm)에 관계없이 하중봉 직경(D)과 원형절삭 반경(r)이 각각 40mm, 10mm인 하중봉(40(10))이 변형강도의 특성을 가장 잘 나타내었으므로 이를 본 실험에서 사용하였다(김광우 등, 2002a, b, c, 김광우 등 2003, 홍준표 등 2005). 변형강도 계산식은 식(1)과 같다.

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

여기서, P = maximum deformation load (N),
y = vertical deformation (㎜) 이고
S_D의 단위는 MPa이다.

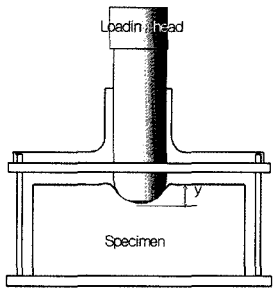
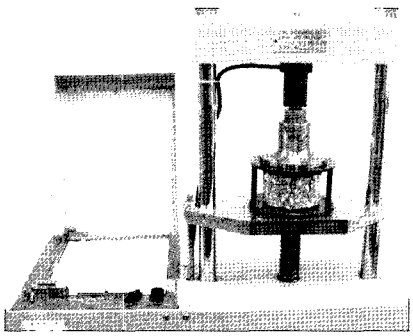
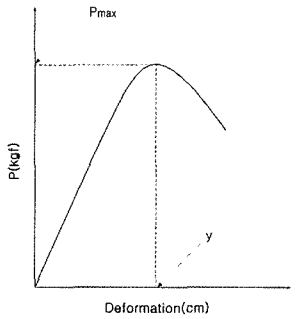


그림 4. Kim tester와 하중 재하 메카니즘



(a)



(b)

그림 5. (a) 마샬 시험기에 세팅한 Kim tester
(b) Kim test로 얻어진 하중 - 변형 곡선

그림 6. 슬래브의 코어 채취와 휠트랙킹 시험 후의 사진

하중봉을 편심없이 수직으로 재하하기 위하여 그림 4와 같은 몰드를 개발하고 이를 Kim tester라고 명명하였으며 이 시험법을 Kim test라고 하였다. 그림 5는 Kim tester를 마샬안정도 시험기에 얹어 놓고 시험을 하는 모습과 이로부터 얻어지는 하중-변형 곡선을 나타낸다.

본 연구에서는 305×305×62㎜의 슬래브를 제조하여 슬래브를 17:13으로 자른 후 13cm 슬래브는 휠트랙킹 시험을 실시하고, 다른 한쪽인 17cm 슬래브는 100㎜ 코어를 3개 채취하여 Kim test를 수행하였다. 그림 6은 슬래브에서 코어의 채취와 휠트랙킹 시험 후의 사진을 보여준다.

3. 결과 및 고찰

3.1 RAP의 특성 시험

3.1.1 RAP의 추출 · 회생 바인더 특성

실험에 바로 사용할 수 있도록 13㎜ 이하로 파쇄한 회수 아스팔트 포장 재료를 무작위로 선택하여 소정 양의 샘플을 채취하여 실험에 사용하였다. 표 4는 RAP의 바인더와 일반아스팔트의 기본적인 물리적

표 4. RAP 바인더와 일반아스팔트의 물리적 특성

Classification	AP contens(%)	Pen.(0.1mm)	AVS (ps)	LMS (%)
RAP	5.3	25	13,751	18.67
AP-3	-	84	1,349	12.94
AP-5	-	67	2,075	13.54

특성을 보여준다. RAP 바인더의 점도가 13,751 poise로 상당히 노화가 되어 포설한지 4~5년 정도 지난 재료인 것으로 추정된다.

3.1.2 RAP의 추출 · 신규 골재 체가름 시험

그림 7은 RAP으로부터 추출된 골재의 입도이며, 본 연구에서 사용된 신규골재인 편마암과 화강암의 골재입도를 나타낸다. RAP에서 추출된 골재는 현장에서 평삭되고 13mm 이하로 파쇄되는 과정에서 어느 정도 입도가 작아졌음을 알 수 있었고, 신규골재는 적당한 입도를 가짐을 알 수 있었다.

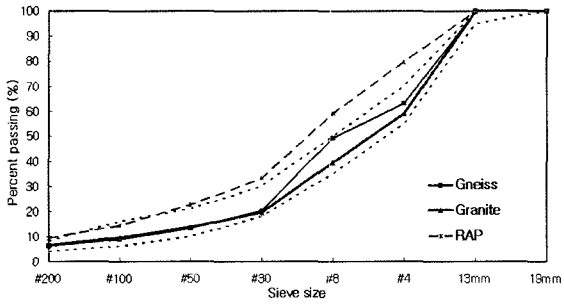


그림 7. 합성된 골재의 입도 곡선(편마암, 화강암, RAP)

3.2 혼합 방법에 따른 혼합물 내의 노화상태 GPC 분석

노화상태 분석용 재생혼합물은 2가지 혼합 방법(A, F)에 따라 제작하였고 각각의 혼합물로부터 RAP 굵은골재 시료(R)와 Matrix 시료(M), 원형 굵은골재 시료(V)를 채취하였다. 각 골재시료 자체

(a) 천연 굵은골재 (b) 매트릭스 (c) RAP 굵은골재

그림 8. 노화 정도 시험을 위한 세 종류의 골재 형상

를 THF에 넣어 묻어있는 아스팔트를 용해시켜 LMS를 구하였다. 그림 8은 재생혼합물로부터 채취된 각 골재에 대한 GPC 분석용 시료의 세부 형상을 나타낸다. 표 5는 혼합 방법별 각 시료의 GPC 분석 결과를 보여주고 있다.

F 방법의 경우, RAP과 신규골재 시료의 LMS가 유사해져 다른 방법에 비해 차이가 월등히 적어지는 것으로 나타났다. 이는 RAP과 신규아스팔트만이 사전 혼합되면서 노화아스팔트와 신규아스팔트가 비교적 잘 섞여 혼합물 내의 바인더 점도가 균등하게 되었다는 의미이다. 또한, 재생첨가제는 그 양이 너무 적어 일반 비빔시는 고루 섞이는데 문제가 있었으나 RAP의 노화가 심하여 재생첨가제가 필요하면 이를 신규아스팔트에 미리 넣어 섞은 후 비비는 것이 F 방법의 또 다른 장점이다.

시험결과 일반 재생혼합물 혼합 방법(A 방법)으로는 RAP 골재에 붙어있는 바인더가 제대로 회생되지 못하여 재생혼합물내의 바인더가 불균등하게 존재하고 있음을 검증할 수 있었다. 즉, RAP의 굵은골재에 묻어 있는 바인더는 재생혼합물 내에서 제대로 회생

표 5. 세 종류 골재 유형의 GPC 분석 결과

Mixing method	LMS (%) using RAP-SW3			Ratio (①/②)
	from RAP agg. (R)①	from Matrix (M)	from Virgin agg. (V)②	
A	16.17	15.21	14.42	1.121
F	15.74	15.20	15.36	1.025
Virgin mix	-	14.81	14.23	-

되지 못하고 노화상태가 유지되는 상태로 존재하는 것으로 나타났다.

이와 같이 재생혼합물 내에 바인더가 고르게 회생되지 못한 부분이 존재하면 그곳이 여타부분보다 더 빠르게 노화되므로 결국 균열발생의 시점이 될 것으로 사료된다. 이 점이 바로 재생혼합물의 장기 공용성이 좋지 못하게 되는 원인이 될 것이다.

3.3 재생 혼합물의 역학적 특성

3.3.1 배합설계

두 가지 신규골재(A : 편마암, B : 화강암)를 사용하여 RAP을 첨가량 2가지(15, 30%), 혼합 방법 두 가지(A, F 방법) 및 개질제 유무(none, L6)에 따른 총 16가지[2골재×2RAP 함량×2혼합방법×2개질(유, 무)] 재생 혼합물의 배합설계를 수행하였다. 그리고 비교용(Control)으로 2 신규골재 혼합물의 배합설계를 수행하여 총 18종류의 혼합물을 제조하였다. 모든 혼합물에서 골재별 입도는 동일한 조건에서 배합설계를 수행하였다.

표 6은 실험에 사용된 혼합물들에 대한 명칭과 설명을 나타낸다. 표층용(13mm 밀입도) 혼합물의 입도에 맞게 조정한 합성입도와 배합설계를 통한 최적 아스팔트함량은 표 7과 같다.

3.3.2 혼합물의 마샬 특성 및 간접인장강도 특성

배합설계로부터 결정된 최적아스팔트함량으로 각 혼합물별 공시체를 제작하여 마샬안정도와 간접인장

표 6. 혼합물의 명칭

Agg.	Designation	Description
Gneiss	AD5R0	Gneiss dense grade, AC60-80, RAP 0%
	AD5R15-A	Gneiss dense grade, AC60-80, RAP 15%, method A
	AD5R15-F	Gneiss dense grade, AC60-80, RAP 15%, method F
	AD3R30-A	Gneiss dense grade, AC80-100, RAP 30%, method A
	AD3R30-F	Gneiss dense grade, AC80-100, RAP 30%, method F
	AD5L6R15-A	Gneiss dense grade, AC60-80, LDPE 6%, RAP 15%, method A
	AD5L6R15-F	Gneiss dense grade, AC60-80, LDPE 6%, RAP 15%, method F
	AD3L6R30-A	Gneiss dense grade, AC80-100, LDPE 6%, RAP 30%, method A
	AD3L6R30-F	Gneiss dense grade, AC80-100, LDPE 6%, RAP 30%, method F
Granite	BD5R0	Granite dense grade, AC60-80, RAP 0%,
	BD5R15-A	Granite dense grade, AC60-80, RAP 15%, method A
	BD5R15-F	Granite dense grade, AC60-80, RAP 15%, method F
	BD3R30-A	Granite dense grade, AC80-100, RAP 30%, method A
	BD3R30-F	Granite dense grade, AC80-100, RAP 30%, method F
	BD5L6R15-A	Granite dense grade, AC60-80, LDPE 6%, RAP 15%, method A
	BD5L6R15-F	Granite dense grade, AC60-80, LDPE 6%, RAP 15%, method F
	BD3L6R30-A	Granite dense grade, AC80-100, LDPE 6%, RAP 30%, method A
	BD3L6R30-F	Granite dense grade, AC80-100, LDPE 6%, RAP 30%, method F

표 7. 각 혼합물의 최적아스팔트 함량(OAC)과 각 골재의 첨가 비율

Agg.	Designation	OAC (%)	RAP (%)	Virgin materials		
				13mm (%)	Fine Agg. (%)	Filler (%)
Gneiss	AD5R0	5.6	0	45	52	3
	AD5R15-A	5.6	15	36	45	4
	AD5R15-F	5.4	15	36	45	4
	AD3R30-A	5.6	30	37	30	3
	AD3R30-F	5.6	30	37	30	3
	AD5L6R15-A	5.7	15	36	45	4
	AD5L6R15-F	5.7	15	36	45	4
	AD3L6R30-A	5.8	30	37	30	3
	AD3L6R30-F	5.7	30	37	30	3
Granite	BD5R0	5.5	0	35	61	4
	BD5R15-A	5.3	15	32	50	3
	BD5R15-F	5.6	15	32	50	3
	BD3R30-A	5.1	30	30	37	3
	BD3R30-F	5.5	30	30	37	3
	BD5L6R15-A	5.7	15	32	50	3
	BD5L6R15-A	5.5	15	32	50	3
	BD3L6R30-A	5.7	30	30	37	3
	BD3L6R30-F	5.7	30	30	37	3

강도 시험을 수행하였다. 표 8은 그 결과를 보여준다. 안정도는 모든 혼합물에서 10,000N 또는 그 이상의 값이 나와 모두 규정을 만족하였고 공극률, 흐름값, 포화도는 모두 표층용 혼합물의 마샬시험 기준치에 만족하였다. 일반 신규골재의 혼합물(Control)보다 재생혼합물의 안정도가 크게 나타났고 같은 재생혼합물 중에서는 LDPE를 첨가한 일반적인 A 방법의 재생혼합물이 높은 안정도를 나타냈다.

간접인장강도(Indirect tensile strength : ITS)는 일반 신규골재의 혼합물(AD5R0, BD5R0)보다 재생혼합물이 더 높은 값을 보였고, 재생혼합물 내의 ITS와 강성지수(Stiffness index : SI)는 일반적인 A 방법의 재생혼합물이 F 방법의 재생혼합물보다 높은 값을 보였다. 또한 LDPE를 첨가한 재생혼합물의 ITS와 SI도 대체로 A 방법의 재생혼합물이 높게 나타났다. 이 현상은 현장 재활용 플랜트에서 적용하고 있는 일반적인 A 방법의 재생혼합물의 경우 노화가 제대로 회복되지 못해 굵은골재와 접하는 경계면에서의 강성이 높아 상대적으로 높은 강도특성을 보이는 것으로 판단된다. 따라서 F 방법이 초기의 강성을 낮추는 효과가 있어서 강도상으로도 다소 낮게 나타나는 바람직한 결과를 나타내는 것으로 사료된다.

표 8. 각 혼합물의 마샬 특성치 및 ITS 특성치

Agg.	Designation	OAC (%)	Air void (%)	Stability (N)	Flow (0.1mm)	Air Void (%)	ITS (kPa)	SI (N/mm)
편마암 (Gneiss)	AD5R0	5.6	4.40	9,860	35	4.38	660	4,280
	AD5R15-A	5.6	4.05	10,730	36	4.07	900	4,350
	AD5R15-F	5.4	4.17	10,020	31	4.07	730	3,480
	AD3R30-A	5.6	4.17	11,720	42	4.16	1,110	5,220
	AD3R30-F	5.6	3.77	11,520	40	4.37	860	3,450
	AD5L6R15-A	5.7	4.32	12,670	33	4.29	1,250	6,010
	AD5L6R15-F	5.7	3.57	12,000	34	3.62	1,080	5,660
	AD3L6R30-A	5.8	3.64	13,150	36	3.58	1,400	5,520
	AD3L6R30-F	5.7	4.40	10,730	35	4.32	1,090	5,620
화강암 (Granite)	BD5R0	5.5	4.19	11,360	35	4.21	740	4,100
	BD5R15-A	5.3	3.69	10,870	28	3.65	990	5,000
	BD5R15-F	5.6	3.62	11,790	33	3.65	780	3,830
	BD3R30-A	5.1	4.04	12,190	35	4.07	1,000	5,770
	BD3R30-F	5.5	3.78	12,070	39	3.57	940	4,100
	BD5L6R15-A	5.7	3.65	14,700	34	3.63	1,280	5,770
	BD5L6R15-F	5.5	3.68	13,270	35	3.80	1,130	5,220
	BD3L6R30-A	5.7	3.51	14,380	34	3.52	1,280	5,770
	BD3L6R30-F	5.7	3.51	14,230	34	3.60	1,260	5,770

표 9. 휠트랙킹 시험과 Kim test의 결과

Designation	Rut depth (mm)	Dynamic stability (cycle/mm)	P (KN)	y (mm)	S_D (MPa)
AD5R0	25.0	169.4	2.743	3.560	2.803
AD5R15-A	16.8	279.7	2.833	3.933	2.799
AD5R15-F	17.5	252.6	2.767	3.167	2.942
AD3R30-A	10.3	408.0	3.000	3.933	2.964
AD3R30-F	13.7	379.5	2.967	3.733	2.983
AD5L6R15-A	9.7	504.7	3.067	3.800	3.065
AD5L6R15-F	10.2	416.3	3.833	3.033	3.058
AD3L6R30-A	5.2	836.5	3.100	3.733	3.177
AD3L6R30-F	8.7	544.0	3.100	3.900	3.071
BD5R0	19.4	220.7	2.891	3.850	2.877
BD5R15-A	15.3	300.6	2.813	3.815	2.806
BD5R15-F	16.1	271.7	2.623	3.531	2.752
BD3R30-A	11.4	391.8	3.267	3.500	3.214
BD3R30-F	11.5	351.4	3.100	3.721	3.013
BD5L6R15-A	8.3	518.5	3.301	3.611	3.451
BD5L6R15-F	9.7	415.0	3.216	3.694	3.209
BD3L6R30-A	6.1	791.7	3.833	3.767	3.843
BD3L6R30-F	7.3	628.8	3.211	3.667	3.357

3.4 재생 혼합물의 소성변형 저항 특성

3.4.1 반복주행(wheel tracking) 시험

본 연구에서는 RAP이 첨가되지 않은 일반혼합물과 각 혼합 방법으로 제조된 재생혼합물에 대한 반복주행 시험을 통하여 비교 분석하였다. 반복주행 시험 후 동적안정도(Dynamic stability) 및 최종침하깊이(Rut depth)를 구했으며 그 결과를 표 9에 나타내었고, 반복주행에 따른 침하깊이의 변화 추이는 그림9, 10과 같다.

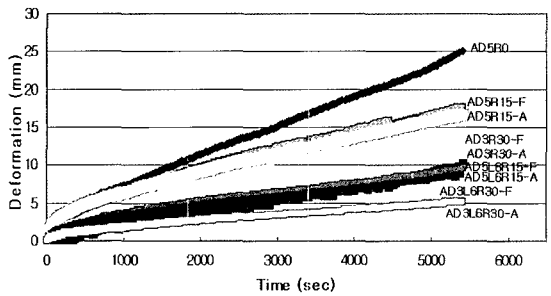


그림 9. 편마암 혼합물의 휠 트랙킹 시험 결과

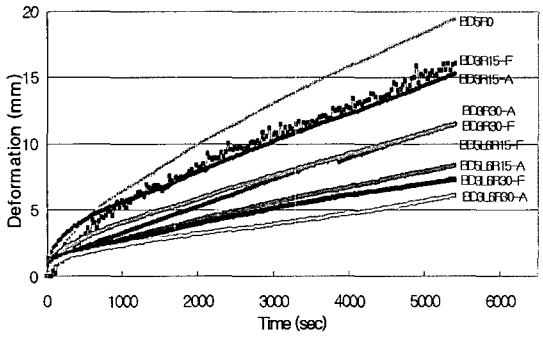


그림 10. 화강암 혼합물의 휠트랙킹시험 결과

반복주행 시험 결과, 재생혼합물이 일반혼합물보다 소성변형 저항성이 우수한 것으로 나타났다. 이는 기존의 연구결과와 동일한 것이다. 게다가 LDPE를 첨가한 재생혼합물은 첨가하지 않은 재생혼합물보다 더 우수한 결과를 보였다. 또한 재생혼합물의 혼합 방법 사이에도 다소 차이가 나타났다. 골재별로도 다소 차이는 있지만 같은 재료 내에서 전반적으로 F 방법의 혼합물이 A 방법의 혼합물에 비해 다소 소성변형 저항성이 낮은 것으로 나타났다. 이는 RAP의 노화된 바인더가 1차 비빔과 Rejuvenator에 의해 효과적으로 점도 회복이 되어 강성이 낮아짐으로 인해 나타나는 현상으로 판단된다. 즉, A 방법 재생혼합물의 강성이 높기 때문에 소성변형 저항성에서 F 방법 재생혼합물이 좋은 효과를 내지 못하는 것으로 사료된다. 하지만 혼합물 제조 초기부터 높은 강성은 시간의 경과에 따라 취성 증가로 발전할 가능성이 크므로 중·장기 노화를 통해 균열이나 취성을 파악하는 연구를 수행하는 것이 필요한 것으로 보인다.

3.4.2 변형강도 시험(Kim test)

표 9는 Kim tester를 이용하여 얻어진 최대하중(P)과 변형값(y)으로부터 계산된 변형강도(S_D)를 나타내고 있다. Kim test 결과, 모든 재생혼합물의 최대하중 및 변형강도가 일반혼합물(AD5R0, BD5R0)에 비해 크게 나타났다. 골재 사이에는 미세하지만 화강암이 편마암보다 높은 변형강도를 보였다.

두 가지 혼합 방법으로 제조한 무개질 혼합물의 경우, A 방법의 재생혼합물이 AD3R15와 AD3R30 두 혼합물을 제외하고 F 방법의 재생혼합물보다 큰 변형강도(S_D)를 나타냈고, RAP 함량이 15%인 것보다는 30%인 것이 더 높은 값을 나타냈다. 이는 반복주행 시험 결과와도 같은 경우로써, A 방법의 재생 혼합물이 초기 강성이 높기 때문인 것으로 판단된다.

그리고 두 가지 혼합 방법으로 제조한 폴리머 개질 재생혼합물의 경우에서도 LDPE를 첨가한 재생혼합물은 첨가하지 않은 재생혼합물보다 모두 큰 변형강도(S_D)값을 나타났다. 이는 재생혼합물에서도 LDPE의 개질 효과가 잘 나타나는 결과라 할 수 있다. 또한 전반적으로 반복주행 시험에서 좋은 성능을 보인 혼합물들이 S_D 값도 높은 경향을 보여 두 시험치 간의 어떤 상관성이 있음을 엿볼 수가 있었다.

3.4.3 소성변형 저항성과 변형강도의 상관성 분석

그림 11은 전체 혼합물에 대한 변형강도와 반복주행시험의 최종 침하깊이(DR) 및 동적안정도(DS)와의 상관관계를 나타낸다. 두 소성변형 관련 변수 모두 변형강도와 R^2〉0.65 이상의 양호한 상관관계를 보이고 있다. 그림 12는 A 방법의 혼합물만을 선별하여 같은 상관성 분석을 수행한 것이다. 이 결과는 전체 혼합물의 R^2보다 더 낮은 R^2 값을 보여 상관성이 오히려 낮아지는 것을 알 수 있었다. 반면 그림 13은 F 방법의 혼합물만을 선별하여 상관성 분석을 수행한 결과로서 R^2이 0.75 이상 높게 나타나 훨씬 좋은 상관관계를 보이고 있다. 이는 F 방법의 혼합물이 보다 균등한 품질 특성을 가지고 있어 일률적인 소성변형 저항특성을 나타내기 때문에 얻어진 결과라고 할 수 있다. 그림 14는 혼합물을 골재의 종류별로 나누어 같은 방식으로 상관성을 분석한 것이다. 골재 종류에 따라 다소 차이가 나지만 상관계수(R^2)가 비교적 높은 0.79 이상을 보였다. 이 분석에 사용된 자료가 혼합 방법을 달리하고 LDPE를 첨가하여 얻어진 혼합물에 대한 것이라는 점을 고려한다면 상당히 양호한 결과라고 볼 수 있다. 만일 혼합 방법이 모두 같다면 더 높은 결정계수가 얻어졌을 것이다.

지금까지의 변형강도 연구는 주로 신규 혼합물과 폴리머 개질 아스팔트 혼합물 또는 슈퍼페이브 바인더 혼합물에 대하여 이루어졌으며, 소성변형 저항성과 상당히 높은 상관관계를 보여 왔다. 본 연구는 비록 혼합 방법이 서로 다르긴 해도 얻어진 변형강도는 소성변형 저항성과 상당한 상관 관계가 있음을 재생혼합물을 통해서도 보여주는 결과라 할 수 있다.

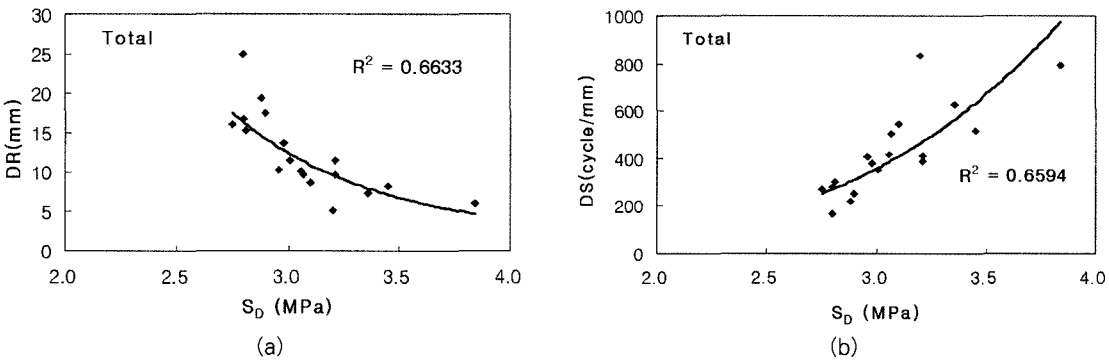


그림 11. 총 재생혼합물의 변형강도에 대한 (a) 최종침하깊이, (b) 동적안정도의 관계

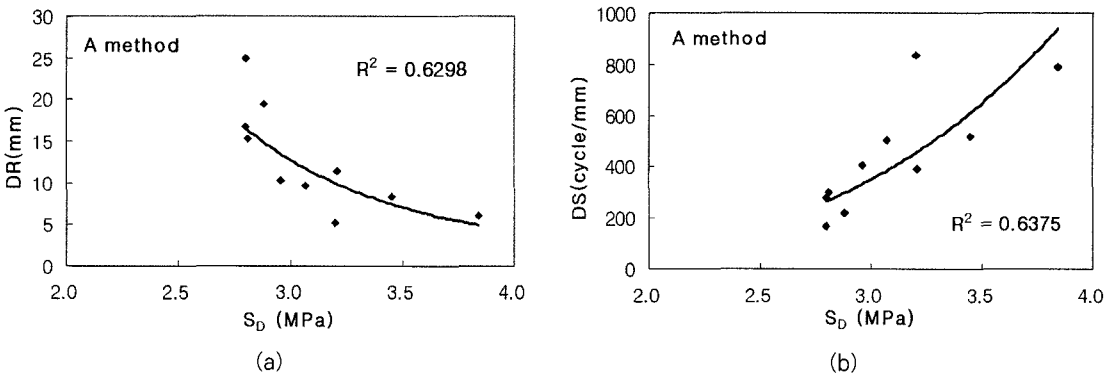
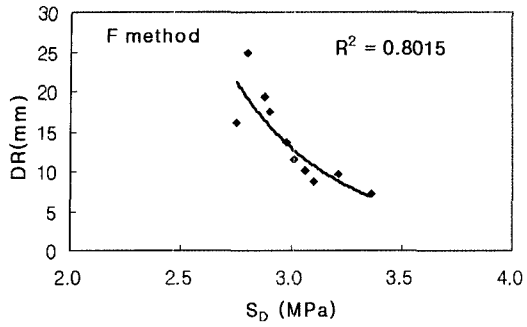
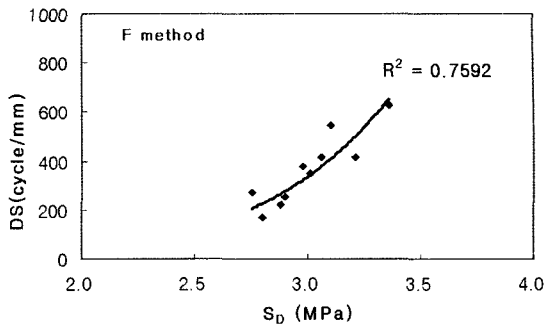


그림 12. A 방법에 의한 재생혼합물의 변형강도에 대한 (a) 최종침하깊이, (b) 동적안정도의 관계

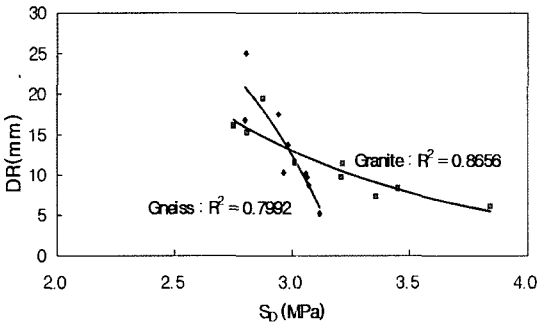


(a)

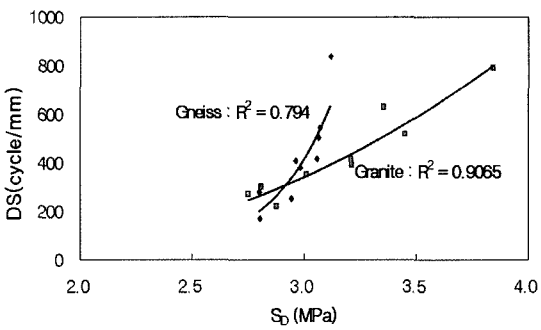


(b)

그림 13. F 방법에 의한 재생혼합물의 변형강도에 대한 (a) 최종침하깊이, (b) 동적안정도의 관계



(a)



(b)

그림 14. 골재에 따른 재생혼합물의 변형강도에 대한 (a) 최종침하깊이, (b) 동적안정도의 관계

4. 결 론

1. 기존 연구에서 제시한 것과 같이 기존 방법에 의해서는 재생혼합물내의 RAP 노화바인더가 제대로 회생되지 못함을 확인할 수 있었다. 이를 개선하기 위해 본 연구에서 제시한 F 혼합방법에 따라 재생혼합물을 제작하고 이로부터 시료를 채취하여 GPC 분석을 수행한 결과 바인더의 불균등한 노화상태가 기존 방법(A)으로 제조시보다 균등해짐을 알 수 있었다.
2. 두 가지 혼합 방법으로 제조한 재생혼합물은 모두 국내 표층 혼합물 규정에 만족하였으며, 마샬안정도, ITS, SI 모두 일반혼합물보다 재생혼합물이 높게 나타나 RAP의 노화된 바인더에 의하여 재생혼합물의 강성이 높게 유지됨을 알 수 있었고, F 방법의 재생혼합물이 재생혼합물 중에서는 낮은 인장강도 특성을 보여 점도 회복을 통해 어느 정도 내부의 강성을 낮추는 효과가 있는 것으로 판단되었다.
3. 두 가지 혼합 방법으로 제조한 재생혼합물의 반복주행(Wheel tracking) 시험 결과, F 방법보다 A 방법으로 제조된 혼합물에서 최종 침하깊이가 적게 나타났다. 이 경향은 LDPE를 첨가하거나 첨가하지 않은 혼합물에서 또한 골재에 관계없이 같게 나타났다. 이는 A 방법으로 제조된 혼합물이 F 방법의 혼합물보다 초기 강성이 높기 때문에 얻

어지는 결과로 판단되었다.

4. 변형강도 시험 결과, 재생혼합물의 변형강도가 일반혼합물보다 큰 값을 나타냈으며 재생혼합물 사이에 A 방법의 혼합물이 F 방법보다 큰 변형강도를 나타내어 반복주행 시험 결과와 같게 나타났다. 따라서 기존 방법으로 제조된 재생혼합물은 제조 초기부터 내재된 재료의 강성이 높아 변형에 다소 강한 성질을 가지고 있음을 의미한다.
5. LDPE 개질 재생혼합물의 반복주행시험(Wheel tracking) 시험 결과, 두 골재 모두 무개질 재생혼합물보다 최종 침하깊이가 상당히 적게 나타났다. 이는 일반혼합물에서 사용되던 LDPE를 재생혼합물에서도 활용이 가능하다는 것으로 판단되며 그로 인해 소성변형 저항 특성이 상당히 개선되는 것을 알 수 있었다.
6. 휠 트랙킹 시험 결과와 변형강도 결과의 상관관계의 분석에서 전체 혼합물로는 R_2>0.65이상 양호한 상관성을 보였다. 그러나 재생 혼합물을 혼합방법으로 구분한 결과, F 방법에서 더 높은 상관관계(R_2>0.75)가 나타나 이 방법으로 제조된 혼합물의 품질이 보다 균등한 소성변형 저항성을 나타내는 것을 알 수 있었다. 한편 혼합물을 골재 별로 구분할 경우 더 높은 상관관계(R_2>0.79)를 얻었다.
7. 마지막으로 A 방법에 의한 재생혼합물의 초기 강성이 높기 때문에 소성변형 저항성 시험에서 F 방법이 더 좋은 효과를 내지 못하는 것을 알 수 있었다. 하지만 재생혼합물의 초기의 높은 강성은 공용시 취성 증가로의 발전 가능성이 크므로 중·장기 노화를 통한 균열이나 취성을 파악하는 연구를 수행하여 보다 구체적인 평가를 하는 것이 필요한 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 권승준(1999), "폴리머 개질 역청 콘크리트의 저온 파괴거동," 강원대학교 대학원, 공학박사 학위논문.
2. 김광우, 연규석, 안경애, 조희원(1996), "폴리머 개질 아스팔트 콘크리트의 강도 특성," 대한토목학회 학술발표회 논문집.
3. 김광우, 최영규, 조희원(1997) "국내 폴리머를 이용한 아스팔트 혼합물의 특성," 대한토목학회 논문집 vol. 17, No.Ⅲ-2.
4. "가열아스팔트 혼합물의 배합설계 지침"(1998), 아스팔트 포장연구회, 도서출판 정보나라.
5. 김광우, 이문섭, 김성태, 이순제(2002a), "소성변형과의 상관성 및 추정 모델을 통한 변형강도 시험 장치 변수 분석," 한국도로포장공학회 논문집, 제 4권 4호, 41-52.
6. 김광우, 이문섭, 김준은, 최선주(2002b), "소성변형과의 상관성에 근거한 아스팔트 콘크리트의 변형강도 개발을 위한 기초연구," 한국도로포장공학회 논문집, 제 4권 4호, 23-40.
7. 김광우, 이문섭, 김중열, 최선주(2002c), "소성변형과의 상관성을 향상시킨 변형강도측정법의 개발," 한국도로포장공학회 학술발표회 논문집, pp. 67~74.
8. 김광우, 최선주, 권오선, 이순제(2003), "실험오차를 최소화한 아스팔트 콘크리트의 변형강도와 소성변형의 상관성 연구." 한국도로포장공학회 학술발표회 논문집, pp29-34
9. 김광우, 이기호, 홍상기, 김민수(2003), "GPC를 이용한 재생 아스팔트 혼합물내의 바인더 불균등노화 상태 분석," 한국도로포장공학회 학술발표회 논문집, pp. 189~192.
10. 홍준표, 도영수, 김광우(2005), "역청 콘크리트 반복주행시험에서 고무바퀴와 강재바퀴의 비교연구," 한국도로학회. 6월호 게재 예정.
11. Kim, K. W. and Ahn. K. A. (2002), "Direct estimation of LMS from solution of RAP," *ASCE Journal of Transportation Engineering.*
12. *"Mix design methods,"* (1993) Asphalt Institute, Manual series No. 2, Sixth edition.
13. Kim, K. W. Lee, S. B., Jeong, K. D., Doh, Y. S., and Joh H. W. (1997), "Evaluation of Tensile Property Improvement of Polymer-Modified Asphalt Concretes," *Third Southern African Conference on Polymers in Concrete Rand African University, South Africa.*

〈접수 : 2005. 6. 1〉