

# 개선된 혼합방법으로 제작한 재생 아스팔트 콘크리트의 소성변형 특성 연구

## Evaluation of Permanent Deformation Characteristics of Recycled Asphalt Concretes made by Improved Mixing Method

김광우\* · 도영수\*\* · 권오선\*\*\* · 고태영\*\*\*\*

Kim, Kwang Woo. · Doh, Young. Soo. · Kwon, Oh Sun, · Ko, Tae Yong.

### 1. 서 론

#### 1.1 연구배경

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. 폐아스팔트 콘크리트는 재활용의 방법이나 연구에 따라서 기존의 일반 아스팔트 혼합물과 같거나 월등히 좋은 수준의 품질을 낼 수 있다. 이에 따른 경제적·산업적 이윤이 점점 증가하는 추세로써, 미국이나 유럽, 그리고 가까운 일본에서도 이미 폐아스팔트 콘크리트의 재활용을 실용화 단계에 접어들었다.

기존의 여러 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. RAP 함량이 30~50% 정도로 높아졌을 때는 아스팔트 혼합물의 기본적인 물성 시험 결과인 마찰 안정도가 높게 나타나며 국내 도로포장용 규격을 만족하고 표준값 이상을 나타내므로 현장 적용에 문제가 없다고 판단된다. 하지만 반복주행(Wheel tracking)시험에서 소성변형 저항성은 다소 낮게 나타난다. 이는 강성은 크고 피로에는 약하다는 탄성재료의 기본 특성에 상반되는 현상이므로 앞으로 연구가 계속적으로 이루어져 할 것이다.

#### 1.2 연구목적

아스팔트 혼합물의 노화는 결합재인 바인더(아스팔트)의 노화에 의한 것이며 혼합물 내의 골재는 거의 노화되지 않는다. 재생 아스팔트를 첨가한 재생 혼합물의 경우 신·구재료의 혼합이 잘된 재생 혼합물은 노화 아스팔트와 신규 아스팔트가 골고루 섞여 일반 아스팔트 혼합물과 유사한 포장성능을 발휘한다. 하지만 잘 못된 재생 혼합물은 투입된 신규 바인더가 노화 바인더를 제대로 회생(Rejuvenating) 시키지 못하고 신·구재료가 부분적으로 물려 있게 된다. 이런 경우 혼합 과정에서 제대로 회생되지 못한 상태로 재생 혼합물이 다시 다져지고 나면 바인더의 유동이 제한되므로 기존의 노화 바인더는 더 이상 침도 회복이 되지 못한 채로 추가 노화가 시작되면서 취성이 증가할 것이다. 그러므로 포장 초기에는 강성이 높고 일반적인 규격을 만족하는 성능을 보이지만 조기에 균열 및 손상이 발생할게 될 것이다.

따라서 본 연구의 목적은 재생혼합물 내의 바인더가 보다 균등한 노화상태를 유지하게 할 수 있도록 개선된 혼합방법을 제시하고자한다. 그리고 일반적인 혼합방법과 개선된 혼합방법을 비교하였으며 각 방법에 따라 개질제인 LDPE를 첨가하여 그에 따른 재생혼합물이 어떠한 소성변형 특성 차이를 나타내는지 파악하

\* 정회원 · 강원대학교 지역기반공학과 교수 · 공학박사 · 033-250-6467 (E-mail : kwkim@kangwon.ac.kr)  
\*\* 정회원 · 강원대학교 석재신소재연구센터 연구원 · 공학박사 · 033-250-7284 (E-mail : ysdoh@kangwon.ac.kr)  
\*\*\* 정회원 · 강원대학교 지역기반공학과 · 공학석사 · 033-250-7284 (E-mail : kos2461@hanmail.net)  
\*\*\*\* 정회원 · 강원대학교 지역기반공학과 · 석사과정 · 033-250-7284 (E-mail : xoduddia@hanmail.net)



는 것이다. 이를 위하여 본 연구에서는 일반적인 방법(A 방법)과 개선된 방법(F 방법)별로 재생혼합물을 제조하여 각 재생혼합물의 소성변형 저항 특성을 측정하였다. Table 1은 혼합방법에 대한 설명이다.

Table 1. Mix method of recycled asphalt concrete

Classification	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 Rejuvenator를 소요량 넣고 30초간 1차 비빈 후 신규골재 투입하고 1분간 비빈

## 2. 재료 및 실험

### 2.1 재료

본 연구에서는 경기도 용인지역에서 평면 절삭하여 얻어진 회수아스팔트 포장재료(Reclaimed Asphalt Pavement : RAP)를 수집하여 실험에 사용하였다. 수집된 RAP은 중간 공정 과정을 거치지 않고 실험에 바로 사용할 수 있도록 13mm이하로 파쇄하였다. 아스팔트는 침입도 등급이 60~80과 80~100인 국내산 AC60-80, AC80-100 아스팔트를 사용하였다. 침입도 등급 AC60-80인 아스팔트는 비교용(Control) 일반혼합물 제조에 사용하였고, AC80-100는 국내에서 생산되는 아스팔트 중 가장 절대점도가 낮은 평균 1,000ps 이하이므로 (AC60-80의 점도 약 1500~2000ps) 재생아스팔트 혼합물의 제조시 신규바인더로 사용하였다. 그리고 노화된 아스팔트의 점도를 회복시키는 재생첨가제는 Rejuvenator 또는 Recycling agent라 하는데, 본 연구에서는 국내 S사에서 개발한 YKS-2(고분자개질 첨가제, Polymer modified recycling agent)를 사용하였다. 개질제는 국내에서 생산되어 구입이 가능한 가루 형태의 폴리머로 No. 50체에 거의 다 남고(통과량 약 1%) No. 8체를 거의 다 통과하는(통과량 99.5%) 입자 형태의 LDPE(Low-Density Polyethylene)를 사용하였다. 그리고 골재는 강원 영서 지역 편마암(Gneiss), 경기 중부 지역의 화강암 쇄석(Granite), 잔골재(Screenings), 채움재(Mineral filler)를 사용하였다.

### 2.2 실험방법

#### 2.2.1 RAP 함량 조사

본 실험에서는 표층용으로 15, 30%의 RAP을 사용하여 실험을 수행하였으며 RAP 함량별로 첨가량 15% 재생혼합물 제조용은 RAP을 25℃에 24시간이상 보관 후 바로 사용하였으며, 첨가량 30%용은 혼합하기 전 오븐에서 1시간 정도에 약 100℃가 되도록 예열을 한 후 사용하였다. 그리고 비교용으로 RAP을 첨가하지 않고 신규골재만으로도 배합설계를 하였다.

#### 2.2.2 혼합방법에 따른 재생혼합물 제작

본 연구에서는 일반적으로 제조되는 재생혼합물과 함께 재생혼합물 내의 바인더가 보다 균등하게 하거나 또는 RAP의 노화된 바인더의 점도를 회복시킬 것으로 예상되는 두 가지 혼합방법을 제시하여 각 혼합방법에 따라 배합설계를 실시하였다. 재생혼합물 제조 시 RAP 첨가 비율은 15%, 30%로 각각 상운첨가와 가열첨가로 나누었다. 그리고 비교용 혼합물로서 일반 표층용 밀입도 아스팔트 혼합물(Control)의 배합설계 또한 수행하였다.

### 2.3 혼합물의 역학적 특성 시험

#### 2.3.1 배합설계

본 연구에서는 국내 표층용 13mm 밀입도를 적용하여 우리나라 건설교통부에서의 마찰시험에 대한 표층

용 아스팔트 콘크리트의 마찰 특성을 기준으로 Marshall 방법을 사용하여 배합설계를 수행하였고, 마찰안정도와 간접인장강도 시험을 각각 실시하였다.

### 2.3.2 변형강도 시험(Kim test)

마찰안정도의 재하 베커니즘은 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 하중봉을 사용하였다. 시험온도는 소성변형 저항성을 측정하는 반복주행(Wheel tracking) 시험에서와 같은 60℃에서 수행하고 Figure 8과 같은 장치를 통해 수직으로 하중을 가하도록 하였다. 직경 D인 봉의 양 하단을 반경 r만큼 원형절삭하고 하중에 의해 바닥으로부터 y만큼 하중봉이 아스팔트 콘크리트로 눌러 들어갈 경우를 고려할 때, 파괴시 하중(P)을 접지면에서 바닥에 투영한 원의 면적(A)으로 나누어 산정한 강도를 변형강도(Deformation strength: SD)라 정의하였다.

현재까지의 연구결과에 의하면 골재의 크기(최대치수 10~19mm)에 관계없이 하중봉 직경과 원형절삭 반경비 (r/D)는 0.25가 가장 우수한 결과를 나타내고 D = 40mm이고 r = 10mm로 절삭한 하중봉 [40(10)] 이 변형강도의 특성을 가장 잘 나타내었으므로 이를 본 실험에서 사용하였다(김광우 등 2002 a,b,c). 변형강도 계산식은 식(1)과 같다.

$$S_D = \frac{4P}{\pi(D - 2(r - \sqrt{2ry - y^2}))^2} \quad (1)$$

여기서, P = maximum deformation load (N)

D = diameter of loading head (mm)

r = radius of round cut (mm)

y = vertical deformation (mm) 이고 SD의 단위는 MPa이다.

하중봉을 편심없이 수직으로 재하하기 위하여 Figure 1과 같은 몰드를 개발하고 이를 김테스터(Kim tester)라 명명하였으며 이 시험법을 김테스트라 하였다. Figure 2는 이를 마찰안정도 시험기에 얹어 놓고 시험을 하는 모습이며 이로부터 얻어지는 하중-변형곡선은 Figure 3과 같다.

본 연구에서는 305×305×62mm의 슬래브를 제작하여 17:13으로 자른 후 13cm 슬래브는 휠트래킹 시험을 실시하고, 다른 한쪽인 17cm 슬래브는 100mm 코어를 3개 채취하였다. Figure 4는 김테스트용 슬래브의 모습이다. 기존연구에서 변형강도와 소성변형과의 상관성이 가장 높은 하중봉인 40(10)을 사용하여 Kim-test를 수행하여 다음과 같이 단순화된 식을 본 연구에서 사용하였다.

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

여기서 P는 최대하중(N), y는 수직변형(mm)이다.

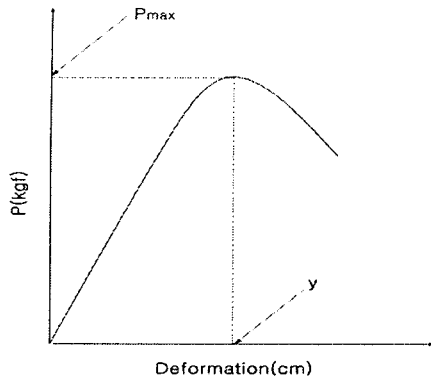


Figure 1. Schematic of Kim tester and its loading mechanism

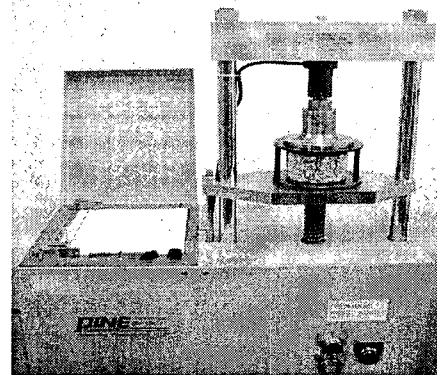


Figure 2. Kim tester setting on a Marshall press

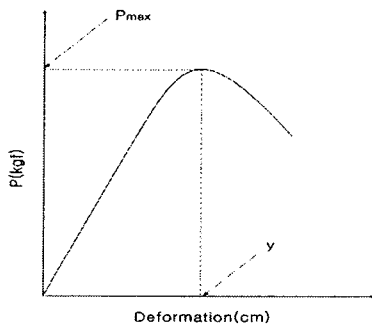


Figure 3. A typical load-deformation curve from Kim test

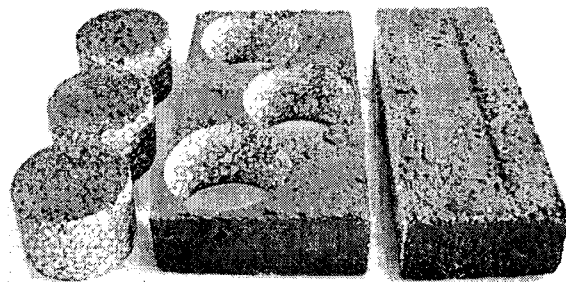


Figure 4. Photo showing a slab after coring and wheel tracking

### 2.3.3 반복 주행(Wheel tracking) 시험

회전하는 차륜에 의해 재하되는 포장체 내의 응력상태는 매우 복잡하며 실내시험에서 아스팔트 콘크리트 혼합물의 현장 거동에 대한 모사는 거의 불가능하다. 따라서 아스팔트 혼합물의 실내시험은 주로 재료에 대한 상대적 비교를 통하여 포장체의 응력상태를 추정하고 있다.

본 연구에서는 반복주행 시험을 수행하기 위하여 305×305×62mm의 슬래브 공시체를 Cooper사의 롤러 압축 다짐기(Roller press compactor)로 공극률 4±0.5%로 다짐하여 제작하였다. 제작된 공시체는 24시간 상온 양생 후 60℃에 6시간 보관후 시험에 사용되었다. 시험은 60℃에서 수행되었고 재하된 운하중은 50kgf이며 왕복 40cycle/min로 1.5시간(5,400Sec) 동안 총 3,600cycle 반복주행에 따른 침하량을 측정하였다. 바퀴의 재질은 강재, 직경 200mm, 폭 50mm이고 1회 왕복거리(stroke)는 200mm이며 반복주행시험기 시스템은 Figure 5와 같다.

반복주행시험을 통하여 각 혼합물의 동적안정도(Dynamic stability : DS)와 최종 침하량을 구하였다. 반복주행시험 중 LVDT로 읽어들이는 침하량은 컴퓨터를 통하여 자동 기록되었으며 초기 일정횟수가 지난 후 반복재하에 따른 누적 침하량은 Figure 6과 같이 기울기로 나타나게 되는데 이 값은 600cycle과 3400cycle사이에서 회귀분석을 통하여 구했다. 또한 동적안정도는 혼합물이 1mm 침하하는데 요구되는 반복횟수를 나타내며 이를 같은 구간 내에서 cycle/mm로 구하였다.



Figure 5. Wheel tracking test system

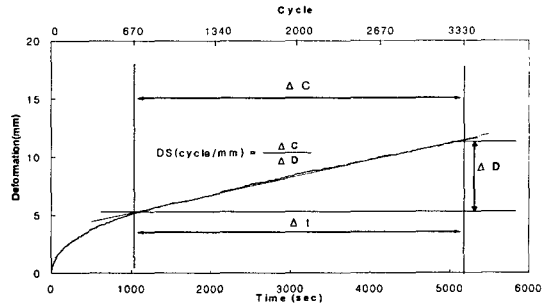


Figure 6. Illustration of dynamic stability (DS) in a WT curve

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 RAP의 특성시험

##### 3.1.1 RAP의 추출·회생 바인더 특성

실험에 바로 사용할 수 있도록 13mm이하로 파쇄한 회수 아스팔트 포장재료를 무작위로 선택하여 소정량의 샘플을 채취하여 실험에 사용하였다. RAP 바인더의 점도가 13,751 poise로 상당히 노화가 되어 포설한지 5년 정도 지난 재료인 것으로 나타났다.

##### 3.1.2 RAP의 추출·신규 골재 체가름 시험

Figure 7에서 RAP은 폐아스팔트 포장재료로부터 추출된 골재의 입도이며, 본 연구에서 사용된 신규골재인 편마암과 화강암의 골재입도를 나타낸다. 추출골재는 현장에서 평삭되고 13mm 이하로 파쇄되는 과정에서 어느 정도 입도가 작아졌음을 알 수 있었고, 나머지 신규골재는 적당한 입도를 가짐을 알 수 있었다.

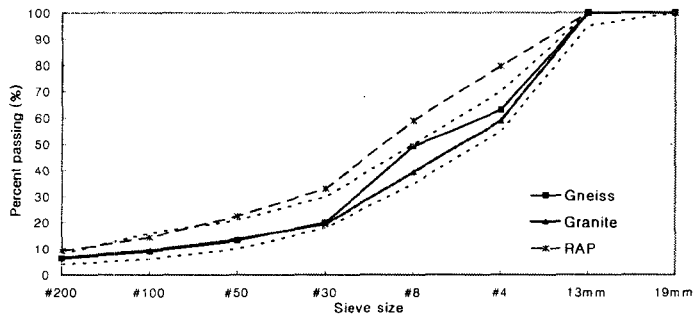


Figure 7. Gradation curves of combined aggregates(Gneiss, Granite and RAP)

#### 3.2 재생 혼합물의 역학적 특성

##### 3.2.1 배합설계

두 가지 신규골재(A 편마암, B 화강암)를 사용하여 RAP을 첨가량 2가지 (15, 30%), 혼합 방법 두 가지 (A, F방법) 및 개질제 유무(none, L6)에 따른 총 16가지 재생 혼합물의 배합설계를 수행하였다. 그리고 비교용(Control)으로 2 신규골재 혼합물의 배합설계를 수행하여 총 18혼합물을 제조하였다. Table 2는 실험에 사용된 혼합물들에 대한 구분과 설명이다.



Table 2. Mixture designation

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

Table 3. Marshall and ITS properties of each mixture at OAC

Agg.	Designation	OAC (%)	Air void (%)	Stability (kgf)	Flow (0.1mm)	Air Void (%)	ITS (kgf/cm <sup>2</sup> )	SI (kgf/mm)
편마암 (Gneiss)	AD5R0	5.6	4.40	986	35	4.38	6.6	428
	AD5R15-A	5.6	4.05	1,073	36	4.07	9.0	435
	AD5R15-F	5.4	4.17	1,002	31	4.07	7.3	348
	AD3R30-A	5.6	4.17	1,172	42	4.16	11.1	522
	AD3R30-F	5.6	3.77	1,152	40	4.37	8.6	345
	AD5L6R15-A	5.7	4.32	1,267	33	4.29	12.5	601
	AD5L6R15-F	5.7	3.57	1,200	34	3.62	10.8	566
	AD3L6R30-A	5.8	3.64	1,315	36	3.58	14.0	552
	AD3L6R30-F	5.7	4.40	1,073	35	4.32	10.9	562
화강암 (Granite)	BD5R0	5.5	4.19	1,136	35	4.21	7.4	410
	BD5R15-A	5.3	3.69	1,087	28	3.65	9.9	500
	BD5R15-F	5.6	3.62	1,179	33	3.65	7.8	383
	BD3R30-A	5.1	4.04	1,219	35	4.07	10.0	577
	BD3R30-F	5.5	3.78	1,207	39	3.57	9.4	410
	BD5L6R15-A	5.7	3.65	1,470	34	3.63	12.8	577
	BD5L6R15-F	5.5	3.68	1,327	35	3.80	11.3	522
	BD3L6R30-A	5.7	3.51	1,438	34	3.52	12.8	577
	BD3L6R30-F	5.7	3.51	1,423	34	3.60	12.6	577

3.2.2 최적 아스팔트 함량에서의 혼합물의 마찰안정도 특성

배합설계로부터 결정된 최적아스팔트함량으로 각 혼합물별 공시체를 제작하여 마찰 안정도 시험을 수행하였다. Table 3은 그 결과를 보여준다. 안정도는 모든 혼합물에서 1,000kgf나 그 이상의 값이 나와 모두 규정을 만족하였고 공극률, 흐름값, 포화도는 모두 표준용 혼합물의 마찰시험 기준치에 만족하였다. 신규혼합물(Control) 보다 재생혼합물의 안정도가 크게 나타났고 같은 재생혼합물 중에서는 LDPE를 첨가한 A혼합방법의 재생혼합물이 높은 안정도 값을 나타냈다. 일반적인 방법으로 제조되는 재생혼합물(A)의 초기 강성이 커서 나타나는 현상으로 판단되었고, 장시간의 혼합으로 바인더와 골재, 신재와 구재가 골고루 섞이면서 치밀한 혼합물이 제조되어 높은 성능을 보인 것으로 판단되었다. 그리고 F방법으로 제조한 혼합물의 안정도



는 A방법보다는 다소 낮지만 일반혼합물(AD5R0, BD5R0) 보다는 높거나 유사하게 나타나 중간정도의 강성을 보이는 것으로 나타났다.

### 3.2.3 최적 아스팔트 함량에서의 혼합물의 간접인장강도 특성

혼합물별 간접인장강도 시험결과 Control 혼합물(AD5R0, BD5R0) 보다 재생 혼합물이 더 높은 간접인장강도와 강성지수를 보였다(Table 3). 재생 혼합물간에는 편마암의 경우 A혼합방법의 혼합물이 ITS, SI가 크게 나타났고 화강암의 경우도 A혼합방법의 혼합물이 높은 ITS, SI를 나타내어 공통적인 차이를 보기는 힘들었다. LDPE를 첨가한 혼합물들에서도 같은 결과 값을 나타냈다. 안정도 및 ITS, SI 모두 일반 Control 혼합물 보다 재생 혼합물이 높은 강도를 보였고, A혼합방법의 혼합물이 F방법의 혼합물 보다 안정도 및 인장강도성능이 다소 높게 나타났다. 이는 현장 재활용플랜트에서 적용하고 있는 일반적인 혼합방식인 A방법의 혼합물의 경우 노화가 제대로 회복되지 못해 굵은골재와 접하고 있는 혼합물의 강성이 상대적으로 높으므로 초기에 높은 강도특성을 보이는 원인중의 하나일 것으로 사료된다. 따라서 F방법이 초기의 강성을 낮추는 효과가 있어서 강도상으로도 다소 낮게 나타나는 바람직한 결과를 나타내는 것으로 예상된다.

## 3.3 재생 혼합물의 소성변형 저항 특성

### 3.3.1 반복주행시험

본 연구에서는 RAP이 첨가되지 않은 일반혼합물과 각 혼합방법으로 제조된 재생혼합물에 대한 반복주행 시험을 통하여 비교 분석하였다. 60℃의 온도에서 반복주행 시험을 통해 총 5,400sec(3,600cycle) 반복 주행 후 동적안정도(Dynamic stability) 및 바퀴자국 침하 깊이(Rut depth)를 측정하였으며 그 결과는 Table 4와 같고, 반복주행에 따른 침하 깊이의 변화 추이는 Figure 8, 9와 같다.

반복주행 시험 결과, 재생혼합물이 일반혼합물에 비해 침하 깊이는 작고 동적안정도는 크게 나와 소성변형 저항성이 우수한 것으로 나타났다. 게다가 LDPE를 첨가한 재생혼합물은 그렇지 않은 재생혼합물보다 더 우수한 결과를 보여주었다. 또한 재생혼합물 배합 방법간에 다소 차이가 나타났다. 골재별로 다소 차이는 있지만 같은 재료 내에서 전반적으로 F방법 혼합물이 A 방법의 혼합물에 비해 다소 소성변형 저항이 낮게 나타났다. 이는 RAP의 노화 바이더가 1차 비빔과 Rejuvenator에 의해 효과적으로 점도회복이 되어 강성이 낮아짐으로 인해 소성변형 저항성이 더 낮아진 것으로 판단되었다. 즉, A 혼합물의 강성이 높기 때문에 소성변형특성 시험에서는 F방법이 더 좋은 효과를 내지 못하는 것으로 나타났다. 하지만 혼합물 제조 초기부터 높은 강성은 시간이 감에 따라 취성 증가로 발전 가능성이 크므로 중장기 노화를 통해 균열이나 취성을 파악하는 연구를 수행하는 것이 필요한 것으로 보인다.

### 3.3.2 변형강도시험(Kim test)

Kim test 결과 모든 재생혼합물의 최대하중 및 변형강도가 Control 혼합물(AD5R0, BD5R0)에 비해 큰 값을 나타내었다(Table 4). 그리고 골재 간에는 미세하지만 편마암보다는 화강암이 높은 변형강도(SD)를 보여주었다.

두 가지 혼합방법(A, F)방법으로 제작한 무개질 혼합물의 경우에는 A 혼합방법의 F 혼합방법보다 큰 변형강도(SD)를 나타내었고, RAP 함량이 15%인 것보다는 30%인 것이 더 높은 값을 나타내었다. 이는 반복주행시험 결과와도 같은 경우로써, A 혼합방법이고, RAP 함량이 30%일 때 높은 변형강도(SD)를 보여주고 있다. 그리고 두 가지 혼합방법(A, F)방법으로 제작한 개질 혼합물의 경우에도 같은 결과가 나타났다. LDPE를 첨가한 재생혼합물은 그렇지 않은 혼합물보다 모두 높은 변형강도(SD)값을 나타내고 있어 재생혼합물이라도 개질 효과가 잘 나타나 것을 알 수 있었다. 또한 전반적으로 반복주행 시험에서 좋은 성능을 보인 혼합물들이 SD 값도 높은 경향을 보여 두 시험치 간의 어떤 상관성이 있음을 엿볼 수가 있었다. 앞에서 언급된 바와 같이 A방법으로 제작된 혼합물이 F방법보다 초기 강성이 높다는 것으로 판단되었다. 하지만 개질에 따른 효과를 비교해 보면 F방법이 도 좋은 것으로 나타났다. A방법보다 균등노화가 발생하는 F방법에 LDPE를 첨가함으로써 소성변형 저항 특성이 상당히 개선되는 것을 알 수 있었다.

Table 4. Result of wheel tracking test and Kim test

Designation	Rut depth (mm)	Dynamic stability (cycle/mm)	P (KN)	y (mm)	S <sub>D</sub> (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

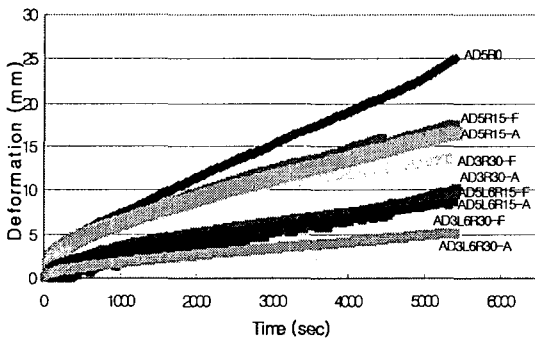


Figure 8. Result of wheel tracking test (Gneiss)

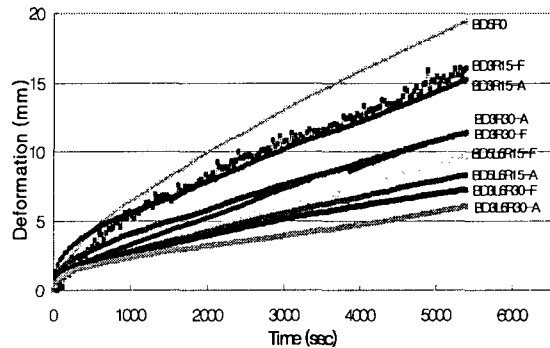


Figure 9. Result of wheel tracking test (Granite)

### 3.3.3 소성변형 저항성과 변형강도의 상관성 분석

Figure 10, 11는 전체 혼합물에 대한 변형강도와 반복주행시험의 침하 깊이(DR) 및 동적안정도(DS)와의 상관관계를 나타내고 있다. 두 소성변형 관련 변수 모두 변형강도와  $R^2 > 0.65$  이상의 양호한 상관관계를 보이고 있다. Figure 12, 13은 A 혼합물만을 선별하여 같은 상관성 분석을 수행한 것이다. 이 결과는 전체 혼합물의  $R^2$ 보다 더 낮은  $R^2$  값을 보여 상관성이 오히려 낮아지는 것을 알 수 있었다. 반면 Figure 14, 15의 F 혼합물만을 선별하여 상관성 분석을 수행한 결과는  $R^2$ 이 0.75 이상 높게 나타나 훨씬 좋은 상관관계를 보이고 있다. 이는 F 혼합물이 보다 고른 품질특성을 가지고 있어 일률적인 소성변형 저항특성을 나타내기 때문에 얻어진 결과라 할 수 있다. Figure 16, 17은 혼합물을 골재의 종류별로 나누어 같은 방식으로 상관성을 분석한 것이다. 골재 종류에 따라 다소 차이가 나지만 결정계수( $R^2$ )가 비교적 높은 0.79 이상을 보이고 있다. 이 분석에 사용된 자료가 혼합 방법을 달리하고 LDPE를 첨가하여 얻어진 혼합물에 대한 것이라는 점을 고려한다면 상당히 양호한 결과라고 볼 수 있다. 만일 혼합방법이 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 혼합방법이 서로 다르긴 해도 얻어진 변형강도는 소성변형 저항성과 상당한 상관관계가 있음을 재생혼합물을 통해서도 보여주는 결과라 할 수 있다.

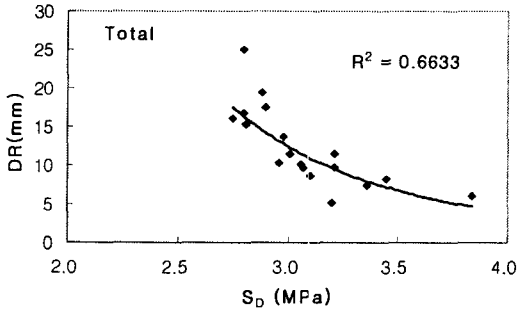


Figure 10. Relationships of DR vs. SD for total recycled mixtures

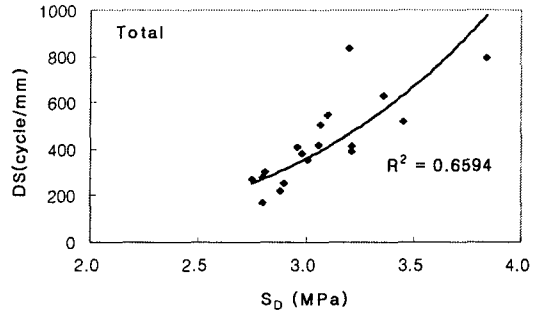


Figure 11. Relationships of DS vs. SD for total recycled mixtures

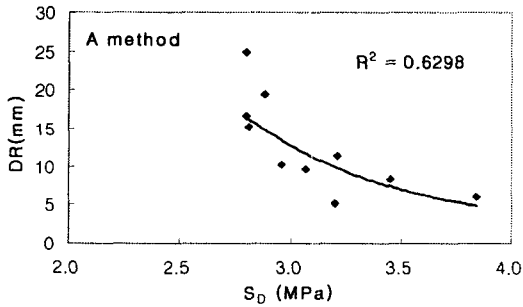


Figure 12. Relationships of DR vs. SD for recycled mixture by method A

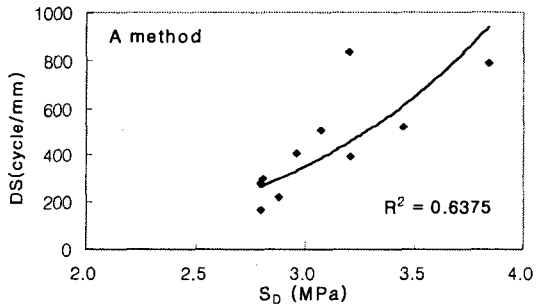


Figure 13. Relationships of DS vs. SD for recycled mixture by method A

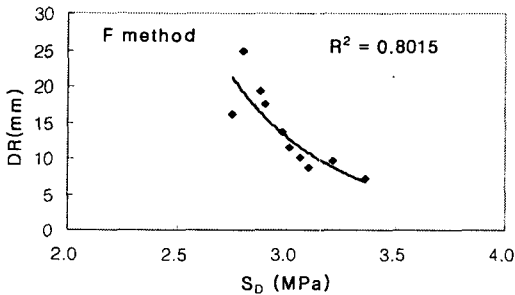


Figure 14. Relationships of DR vs. SD for recycled mixture by method F

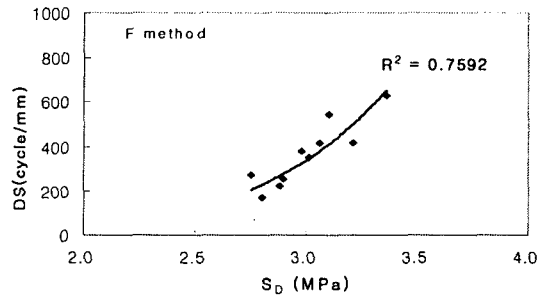


Figure 15. Relationships of DS vs. SD for recycled mixture by method F

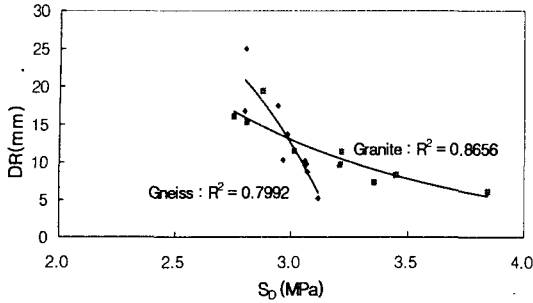


Figure 16. Relationships of DR vs. SD for recycled mixture by aggregate

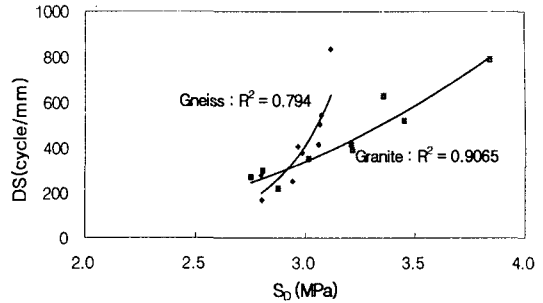


Figure 17. Relationships of DS vs. SD for recycled mixture by aggregate

#### 4. 결론

본 연구에서는 혼합방법에 따라 재생혼합물을 제작 후 이로부터 간접인장강도 및 반복주행, 변형강도시험을 수행하여 노화 및 강도특성을 알아본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 두 가지(A, F) 방법으로 제조한 재생혼합물의 반복주행(Wheel tracking) 시험결과 F방법 보다는 A방법으로 제작된 혼합물에서 침하깊이가 적게 나타났다. 이 경향은 LDPE를 첨가하거나 그렇지 않은 혼합물에서, 그리고 골재에 관계없이 같게 나타났다. 이는 A방법으로 제작된 혼합물이 F방법보다 초기 강성이 높기 때문에 얻어지는 결과로 판단되었다.

2. 변형강도 시험결과 재생혼합물의 변형강도가 일반혼합물보다 큰 값을 나타냈으며 재생혼합물 간에는 A방법의 혼합물이 F보다 큰 변형강도를 나타내어 반복주행시험결과와 일치하였다. 따라서 기존 방법으로 제조된 재생혼합물은 제조 초기부터 내재된 재료의 강성이 높아 변형에 다소 강한 성질을 가지고 있음을 의미한다.

3. LDPE 개질 재생혼합물의 반복주행시험(Wheel tracking) 시험결과에서 두 골재 모두 무개질 재생혼합물보다 침하깊이가 상당히 적게 나왔다. 이는 LDPE가 혼합물 내에서 개질제로서의 역할을 충분히 했다고 볼 수 있어 LDPE를 첨가한 재생혼합물은 소성변형에 큰 저항성을 가진 것으로 판단되었다. 또한 일반혼합물에서 사용되던 LDPE를 재생혼합물에서도 활용이 가능하다는 것으로 판단되며 그로 인해 소성변형 저항특성이 상당히 개선되는 것을 알 수 있었다. 그리고 LDPE첨가는 소성변형 저항성뿐만 아니라 인장강도에 서도 큰 향상효과를 나타내어 재생혼합물에서도 개질 효과가 좋게 나타남을 알 수 있었다.

4. 두 소성변형 저항성 특성치 간의 상관관계를 보기위한 분석에서 전체 혼합물로는  $R^2 > 0.65$  이상 양호한 상관성을 보였다. 그러나 재생 혼합물을 A와 F로 구분한 결과 F 방법에서 더 높은 상관관계( $R^2 > 0.75$ )가 나타나 이 방법으로 제조된 혼합물의 품질이 더 고른 소성변형 저항성을 나타내는 것을 알 수 있었다. 한편 혼합물을 골재 별로 구분할 경우 더 높은 상관관계( $R^2 > 0.79$ )를 얻었다.

5. 두 가지(A, F) 방법으로 제조한 재생혼합물은 모두 국내 표준 혼합물 규정에 만족하였으며, 안정도, ITS, SI 모두 일반혼합물 보다 재생혼합물이 높게 나타나 RAP의 노화 바인더에 의하여 재생혼합물의 강성이 높게 유지됨을 알 수 있었고, F방법의 혼합물이 재생혼합물 중에서는 낮은 인장강도 특성을 보여 점도회복을 통해 어느 정도 내부의 강성을 낮추는 효과가 있는 것으로 판단되었다.

6. 본 연구에서는 A 방법 혼합물의 강성이 높기 때문에 소성변형특성 시험에서는 F방법이 더 좋은 효과를 내지 못하는 것을 알 수 있었다. 하지만 재생혼합물의 초기 높은 강성은 공용시 취성 증가로의 발전 가능성이 크므로 중장기 노화를 통해 균열이나 취성을 파악하는 연구를 수행하여 보다 구체적인 평가를 하는 것이 필요한 것으로 보인다.



### 감사의 글

본 연구는 강원대학교 석재복합신소재 연구센터와 건설교통부 재활용 아스팔트 포장의 수명증진을 위한 품질향상 방안 연구의 연구비의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

### 참고문헌

1. "가열아스팔트 혼합물의 배합설계 지침," (1998), 아스팔트 포장연구회, 도서출판 정보나라.
2. 김광우, 이문섭, 김준은, 최선주(2002c). "소성변형과의 상관성에 근거한 아스팔트 콘크리트의 변형강도 개발을 위한 기초연구," 한국도로포장공학회 논문집, 제 4권 4호, pp. 23-39.
3. 김광우 등, (2004), "재활용 아스팔트 포장의 수명증진을 위한 품질향상 방안 연구," 2003년도 건설기술연구개발 2차년도 중간보고서.
4. Kim, K. W. and Ahn. K. A. (2002), "Direct estimation of LMS from solution of RAP," the Paper submitted to ASCE Journal of Transportation Engineering for possible publication.
5. "Mix design methods," (1993) Asphalt Institute, Manual series No. 2, Sixth edition.
6. Kim, K. W. and Ahn. K. A. (2002), "Direct estimation of LMS from solution of RAP," the Paper submitted to ASCE Journal of Transportation Engineering for possible publication.