

혼합 방법에 따른 가열 재생혼합물의 역학적 특성

Evaluation of Mechanical Properties of Hot-Recycled Asphalt Mixture based on Modified Mixing Method

권오선* · 이기호** · 도영수*** · 김광우****

Kwon, Oh-Sun · Lee, Gi-Ho · Doh, young-Soo · Kim, Kwang-Woo

1. 서론

최근 국내에서는 건설폐기물 중에서도 페아스팔트 콘크리트가 차지하는 비중이 상당히 높고 2002년 건설폐기물 발생량 총 120,141톤(/일) 중에서 페아스팔트 콘크리트가 14,729톤(/일)(환경부, 2003)으로 상당량 차지하고 있어 도로의 확장, 굴착 및 노면 절삭 등에서 발생하는 페아스팔트 콘크리트의 재활용은 시급히 해결해야 할 중요한 문제로 인식되고 있다.

최근의 연구에 의하면 일반적으로 제작되는 재생혼합물내의 바인더에 대하여 GPC 분석을 수행한 결과 혼합물내의 신·구 바인더가 불균등한 상태로 존재하는 것으로 나타났다. 이 연구에서는 RAP을 첨가한 재생혼합물을 RAP에 있었던 굵은골재(이하 RAP 굵은골재)와 매트릭스(Binder와 세립자의 혼합물), 신규로 투입된 굵은골재로 구분하여 이질적인(Heterogeneous) 재료로 보고 각 재료의 바인더의 노화상태를 별도 분석하였다. 그 결과 RAP 굵은골재에 코팅된 바인더가 가장 많이 노화된 상태를 보였고 신규 굵은골재에 코팅된 바인더가 가장 낮은 노화상태를 보였다. 즉, RAP에 존재하는 노화된 아스팔트가 새로이 추가되는 신규 아스팔트에 의해 제대로 회생(Rejuvenating)되지 못하고 높은 노화상태를 유지하는 것으로 나타났다.(김광우, 2003)

이런 경우 혼합 과정에서 제대로 회생되지 못한 노화 혼합물이 다시 다져지고 나면 바인더의 유동이 제한되므로 기존의 노화 바인더는 더 이상 점도 회복이 되지 못한 채로 다시 노화가 시작되면서 취성이 증가하게 된다. 그러므로 포장 초기에는 강성이 높고 일반 규격을 만족하는 성능을 보이지만 조기에 균열 및 손상이 발생하게 될 것이다. 따라서 본 연구의 목적은 재생혼합물 내의 바인더가 보다 균등하게 회생되거나 또는 RAP의 노화 바인더의 점도를 회복시킬 것으로 예상되는 여러 가지 혼합방법을 제시하여 각 방법에 따른 재생혼합물이 어떠한 특성의 차이를 나타내는지 파악해보는 것이다.

2. 재료 및 방법

2.1 사용재료

본 연구에서는 경기도 용인지역에서 회수아스팔트 포장재료를 수거하여 실험에 사용하였다. 수집된 RAP은 직접 사용할 수 있도록 13mm이하로 파쇄하여 각종 실험에 사용하였고, 아스팔트는 침입도 등급이 60-80, 80-100인 국내산 아스팔트를 사용하였다. 침입도 등급 AC60-80인 아스팔트는 비교용(Control) 일반혼합물 제조에 사용하였고, AC80-100은 국내에서 생산되는 아스팔트 중 가장 절대점도가 낮은 평균 1,000ps 이하이므로 (AC60-80의 점도 약 1,500~2,000ps) 재생아스팔트 혼합물의 제조시 신규바인더로 사용하였다. 또한 노화된 아스팔트의 점도를 회복시키는 재생첨가제는 국내 S사에서 개발한 YKS-2(고분자 재생 첨가제)를 사용하였다.

본 연구에 사용된 신규골재로는 경기 지역의 화강암 쇄석과 강원 영서 지역의 편마암 쇄석의 굵은골재(13mm), 잔골재, 채움재를 사용하였다. 또한 굵은골재로서 13mm 원형골재(강자갈)를 사용하였는데, 이는 재

* 정회원 · 강원대학교 지역기반공학과 석사과정 · 공학사 · 033-250-7284
** 정회원 · 강원대학교 지역기반공학과 박사과정 · 공학석사 · 033-250-7284
*** 정회원 · 강원대학교 석재복합신소재연구센터 연구원 공학박사 · 033-250-7284
**** 정회원 · 강원대학교 지역기반공학과 교수 공학박사 · 033-250-6467 (E-mail : kwkim@kangwon.ac.kr)



생혼합물로부터 GPC 분석용 시료를 구분 채취하는데 있어서 RAP의 굵은골재와 신규골재의 혼동을 막기 위하여 쇄석 골재 대신 원형골재를 사용하였다. 잔골재는 시료 채취시 RAP과 신규골재의 구분을 위해서 No. 8체 이하의 골재를 사용했으며 석분을 채움재로 사용하였다.

2.2 시험 방법

가. RAP 바인더의 추출·회생 및 물성시험

재생아스팔트 제조에 사용될 회수 아스팔트 혼합물(RAP)에 포함되어 있는 노화 아스팔트에 대한 침입도와 점도를 조사하고 추출된 골재의 입도와 비중을 얻기 위하여 KS F 2354에 따라 아스팔트 및 골재를 추출·분리하였다.

이 과정에서 입도분석과 비중시험을 수행하였고 최초혼합물과의 중량비로부터 아스팔트 함량을 구하였다. 그리고 아스팔트가 용해된 용액으로부터 ASTM D 1856의 Abson Recovery 방법으로 얻어진 아스팔트 바인더에 대하여 점도(KS M 2247, ASTM D 2171), 침입도(KS M 2252) 등을 수행하였다.

나. 혼합방법에 따른 재생 혼합물의 제작

본 연구에서는 일반적으로 제조되는 재생혼합물과 함께 재생혼합물 내의 바인더를 보다 균등하게 하거나 또는 RAP의 노화된 바인더의 점도를 회복시킬 것으로 예상되는 여러 가지 혼합방법을 제시하여 각 혼합방법에 따라 배합설계를 실시하였다. 재생혼합물 제조시 RAP 첨가 비율은 가장 대표적인 30%로 하였고 비교용 혼합물로서 일반 표층용 밀입도 아스팔트 혼합물의 배합설계 또한 수행하였다. Table 1은 본 연구에서 제시한 재생혼합물의 혼합방법을 설명해 준다.

Table 1. Mix method of recycled asphalt concrete

Classification	Mix Method
A	신규재료 70%와 RAP 30%의 비율로 1분간 비벼 가열재생혼합물을 제조 (일반적인 재생혼합물 혼합방법)
C	같은 비율의 재생혼합물 제조시 비빔 시간을 A방법의 6배 증가
D	같은 비율의 재생혼합물 제조시 1차적으로 RAP과 AC80-100만을 넣고 30초 비빔 후 신규골재를 투입하여 1.5분 추가 비빔
E	같은 비율의 재생혼합물 제조시 RAP에 Rejuvenator만을 소요량 넣고 30초간 1차 비빔 후 신규골재와 AP80-100 투입하고 1.5분간 비빔

2.3 혼합물의 역학적 특성 시험

가. 배합설계 및 간접인장강도 시험

아스팔트 혼합물의 배합설계를 위해 공시체 제조는 KS F 2337과 ASTM D 1559의 마찰식 아스팔트 혼합물 제조방식에 의해 제조되었다.

간접인장강도(indirect tensile strength, ITS)는 25℃에서 Lottman 재하 헤드를 이용하여 측정되었으며, 강성지수(Stiffness index : SI)는 재하된 최대 하중에 대한 변형량의 비로써 나타낸다.

나. 반복 주행(Wheel tracking) 시험

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

시험은 60℃에서 수행되었고 재하된 유효중은 70kgf로 왕복 2,700cycle(5,400sec)동안의 최종 침하량과 동적안정도(Dynamic stability, DS)를 측정하였다.



다. 변형강도 시험

본 시험에서는 하중을 혼합물이 다져진 방향과 같은 방향으로 가하고 재하에 의해 혼합물은 소성변형과 유사하게 압밀·진단에 의한 변형이 유발되도록 하중봉을 사용하여 60℃의 시험온도에서 수행하였다. 양 하단을 반경 r만큼 원형절삭한 직경 D인 하중봉으로 수직 재하하여 그때의 파괴하중(P)과 바닥으로부터 y만큼 하중봉이 눌러 들어간 변형을 측정하여 변형강도(Deformation strength, S_D)를 계산하였다.

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

여기서, P = maximum deformation load (kN)

D = diameter of loading head (cm)

r = radius of round cut (cm)

y = vertical deformation (cm) 이고 S_D 의 단위는 Mpa이다.

현재까지의 연구결과에 의하면 하중봉 직경과 원형절삭 반경비 (r/D)가 0.25인 D = 4cm, r = 1.0cm 하중봉이 가장 소성변형 추정에 효율적인 것으로 나타났으므로 이를 본 실험에서 사용하였다(김광우 등 2003a,b,c). 하중봉을 편심 없이 수직으로 재하하기 위하여 개발한 볼드를 김 테스터(Kim tester; Figure 1)라 명명하였으며 이 시험법을 김테스트라 하였다.

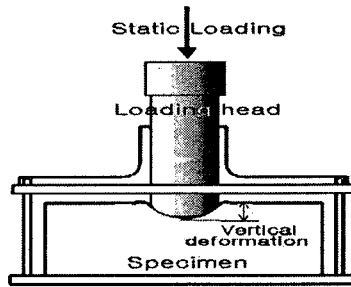


Figure 1. Kim tester

본 연구에서는 305×305×62mm의 슬래브를 제작하여 17:13으로 자른 후 13cm 슬래브는 휠트래킹 시험을 실시하고, 다른 한쪽인 17cm 슬래브는 100mm 코어를 3개 채취하여 Kim test를 수행하였다.

라. 회복탄성계수(M_R) 시험

회복탄성계수로 해석되는 Resilient modulus(M_R)를 측정하는 시험방법으로 ASTM D 4123에 따라 수행하였다. 회복탄성계수 시험에서 공시체는 간접인장강도의 5~20% 사이 수준의 응력이 발생토록 하중을 가한다. 본 연구에서 0.1초 동안의 하중을 가하고 0.9초의 휴지기간을 주었으며 0.98kN(100kgf)의 하중으로 105cycle 재하하여 그 중에서 마지막 5회 동안의 값을 평균하여 회복탄성계수를 구하였다. 시험장치는 공기압력 제어 방법으로 작동되는 Load cell을 통하여 하중을 재하하였다.

실험온도를 변화시켜가며 시험을 수행하였으며 이때의 Poisson's ratio는 온도에 따라 변화하므로 본 연구에서는 -5℃(0.2), 5℃(0.25), 25℃(0.35), 40℃(0.4)의 실험온도와 Poisson's ratio를 실험에 사용하였다(김광우 등, 1999).

마. 수분취약성 시험

본 연구에서는 여러 가지 혼합물의 수분취약성(Moisture susceptibility) 시험을 수행하여 수분침투에 대한 저항성을 측정하였다. 각각의 혼합물별로 OAC에 따른 공시체를 제작하여 AASHTO 규정을 약간 변형하여 Tunicliff와 Root가 제시한 동결 및 수분취약성 시험을 수행하였다.



3. 결과 및 고찰

3.1 RAP의 추출·회생 바인더 특성

수거한 회수 아스팔트 포장재료로부터 13mm 이하의 RAP만을 사용하여 부작위로 소정량의 샘플을 채취하여 실험에 사용하였다. RAP 바인더의 기본 특성은 Table 2와 같다. RAP 바인더의 점도가 13,751 poise로 상당히 노화가 되어 포설한지 4~5년 정도 지난 재료인 것으로 판단되었다.

Table 2. Properties of RAP binder and Virgin shphalt

Binder Properties	RAP	AC80-100
AP Contents (%)	5.4	-
Penetration (0.1 mm), 25°C	25	84
Absolute viscosity (poise), 60°C	13,751	1,349
LMS (%)	18.67	12.94

3.2 가열재생 혼합물의 역학적 특성

가. OAC에서 혼합물의 마찰 및 간접인장강도특성

마찰 안정도 및 간접인장강도를 시험하여 그 성능을 확인하였다. 신규혼합물(Control) 보다 재생혼합물의 안정도가 크게 나타났고 같은 재생혼합물 중에서는 A, C 혼합방법의 재생혼합물이 높은 안정도 값을 나타냈다. 재생혼합물(A 혼합방법)의 초기 강성이 커서 나타나는 현상으로 판단되었고, 장시간의 혼합으로 바인더와 골재, 신재와 구재가 골고루 섞이면서 치밀한 혼합물이 제조되어 높은 성능을 보인 것으로 판단되었다. D, E방법의 혼합물 안정도는 A방법보다는 다소 낮지만 일반혼합물(AD5R0, BD5R0) 보다는 높거나 유사하게 나타나 중간 정도의 강성을 보이는 것으로 나타났다.

혼합물별 간접인장강도 시험결과 일반 혼합물(A5R0, B5R0) 보다 재생 혼합물이 더 높은 간접인장강도와 강성지수를 보였다. 재생 혼합물간에는 C혼합방법의 혼합물이 높은 간접인장강도와 강성지수를 보인데 반해 높은 안정도 값을 나타내었던 A방법의 혼합물은 다소 낮은 ITS, SI를 나타냈다.

안정도, ITS 및 SI 모두 일반 Control 혼합물 보다 재생 혼합물이 높은 강도를 보여 RAP의 노화 바인더에 의하여 재생혼합물의 강성이 증가함을 알 수 있었고, D방법의 혼합물이 재생혼합물 중에서는 낮은 인장강도 특성을 보여 어느 정도 점도회복 효과가 있는 것으로 판단되었다. 또한 재생첨가제가 첨가된 E방법의 혼합물의 경우 재생첨가제에 의해 점도 회복되어 안정도 및 ITS가 다른 재생혼합물에 비해 낮을 것으로 예상되었으나 유사한 안정도, ITS를 보여 노화 바인더의 점도를 회복시키기에는 그 양이 적어 효과를 나타내지 못한 것으로 사료되었다. Table 3은 각 혼합물의 역학적 특성 시험에 대한 결과를 보여주고 있다.

Table 3. Mechanical Properties of each Mixture

Designation	OAC (%)	Stability (kgf)	ITS (kgf/cm ²)	TSR (%)	SI (kgf/mm)	RD (cm)	DS (cycle/mm)	So (Mpa)	M _R (Mpa)			
									-5°C	5°C	25°C	40°C
A5R0	5.6	986	6.6	61.3	428	2.50	128.3	2.80	4,224	3,776	1,939	593
A3R30A	5.5	1,347	8.8	71.0	481	1.68	211.4	3.25	6,112	4,112	3,893	1,141
A3R30C	5.7	1,254	11.7	92.9	582	1.47	232.6	3.05	5,192	4,100	2,685	665
A3R30D	5.5	1,107	9.4	75.4	486	1.71	194.7	3.20	5,679	3,728	3,622	883
A3R30E	5.7	1,128	10.0	95.0	514	2.25	152.6	2.98	5,151	4,262	3,619	870
B5R0	5.5	1,136	7.4	80.4	410	1.94	166.7	2.88	4,027	3,919	2,149	443
B3R30A	5.1	1,219	10.0	85.8	577	1.53	228.8	3.39	5,922	4,525	3,901	1,857
B3R30C	5.2	1,367	12.2	94.2	612	1.63	217.6	2.91	5,373	4,600	3,493	842
B3R30D	5.1	1,164	9.3	86.4	500	1.27	304.4	3.20	5,693	4,479	3,883	1,208
B3R30E	5.4	1,121	10.3	96.4	546	2.06	177.5	2.88	4,935	4,293	2,494	588



나. 반복주행 시험

반복주행 시험 결과, 재생혼합물이 일반혼합물에 비해 침하 깊이는 작고 동적안정도는 크게 나와 소성변형 저항성이 우수한 것으로 나타났고 이는 기존의 연구결과와 동일한 것이다.

또한 재생혼합물 간에 현저한 차이는 나타나지 않았고 Rejuvenator를 첨가한 E혼합방법의 재생혼합물이 침하 깊이가 크고 동적안정도가 작게 나타났는데 이는 RAP의 노화 바인더가 Rejuvenator에 의해 점도회복이 되었다고 하기보다는 신규바인더의 점도를 더 떨어뜨려 소성변형 저항성이 더 낮아진 것으로 판단되었다.

다. 변형강도 시험

김테스트 시험결과 재생혼합물의 최대하중 및 변형강도가 일반혼합물에 비해 큰 값을 나타냈고, 재생혼합물 간에는 A방법의 혼합물이 가장 큰 변형강도 값을 나타냈고 E방법의 혼합물은 일반혼합물과 유사한 값을 나타냈다. 또한 편마암 혼합물과 화강암 혼합물간에 방법상의 차이는 발견되지 않았다.

Figure 2, 3은 변형강도와 반복주행시험의 침하 깊이(DR) 및 동적안정도(DS)와의 상관관계를 나타내고 있다.

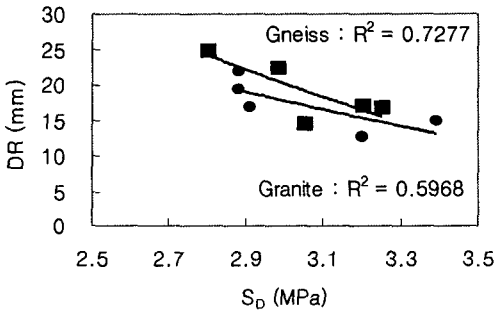


Figure 2. Relationships of DR vs. S_D at 60°C using 4(1.0)

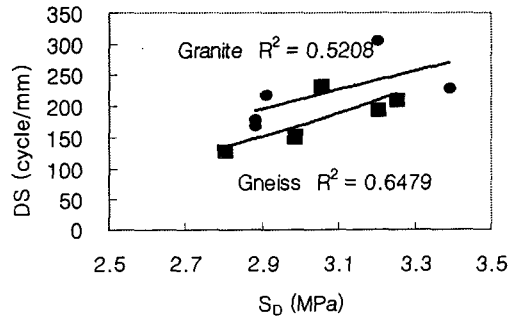


Figure 3. Relationships of DS vs. S_D at 60°C using 4(1.0)

라. 회복탄성계수(M_R) 시험

회복탄성계수 시험 결과 모든 혼합물에서 온도가 높아짐에 따라 회복탄성계수가 감소하였으며, RAP을 첨가한 재생혼합물의 회복탄성계수가 일반혼합물에 비해 높게 나타났다. 재생혼합물 간에는 A방법의 재생혼합물의 회복탄성계수가 가장 높았고 C, D, E방법 혼합물이 유사한 값을 보였다.

Figure 4, 5는 M_R과 S_D의 상관관계를 보여준다. Figure 4에서 보듯이 온도에 따라 R²에 차이가 나는데 두 골재 모두 40°C의 M_R값이 S_D와 가장 높은 관계를 보여준다. 이는 S_D가 고온 특성이므로 비교적 높은 온도인 40°C에서 측정된 M_R이 가장 높은 상관관계를 보이는 것으로 판단된다. 하지만 다른 온도에서도 5°C를 제외하고는 비교적 좋은 R²값을 보이며 M_R과 S_D에 상당한 상관관계가 존재하므로 향후 연구해 볼 가치가 있을 것으로 보인다.

Figure 5는 두 골재를 합한 M_R과 S_D의 상관관계를 보여주는데 R²=0.8669로 매우 높음을 보여준다.

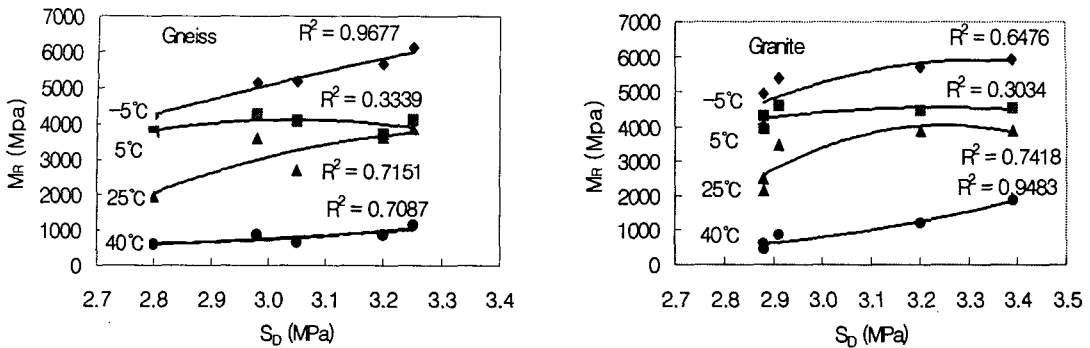


Figure 4. Relationships of M_R with S_D at various temperatures for (a) aggregate Gneiss mixture and (b) aggregate Granite mixture

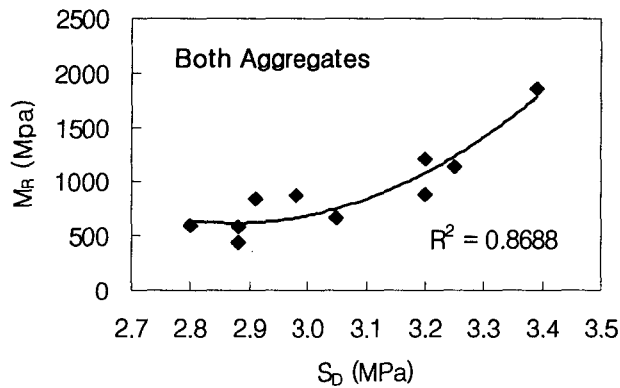


Figure 5. Relationships of M_R at 40°C with S_D for both aggregate mixtures

마. 동결융해에 따른 수분취약성 시험

Table 3에서 보면 RAP을 첨가하지 않은 일반혼합물의 수분취약성 시험 후 간접인장강도비는 편마암이 시험 전 혼합물의 61%를 나타냈고, 화강암이 80% 정도를 나타내었다. 재생혼합물의 경우 편마암이 70% 이상, 화강암이 85% 이상으로 일반혼합물에 비해 수분에 대한 저항성이 우수함을 알 수 있었다. 특히 재생혼합물 중에서 A방법의 혼합물이 가장 낮은 간접인장강도비를 나타냈다. 반면 C와 E방법에서 TSR값이 상대적으로 높게 나타났고 특히 E방법이 두 골재 모두에서 95%이상으로 아주 높게 나타났다. 이는 혼합물의 비빔 방법에 따라 수분민감 특성에 차이가 남을 나타내는 것이고 E방법이 가장 좋은 방법임을 보여 주는 것이다.

한편 C방법도 매우 좋은 TSR을 보여주나 이 방법은 실험실에서는 가능한 방법이나 현실적으로 현장에서는 적용이 어려운 방법이다. D방법의 경우는 ITS나 TSR에서 모두 A방법보다 더 좋은 결과를 나타냈으나 C, E방법 보다는 그 효과가 크지 못한 것으로 나타났다. 하지만 C방법이 현실성이 없고 E방법의 경우 재생 첨가제만을 넣고 1차 비빔하는데 그 양이 너무 적어 어려움이 있으므로 이 두 가지(D, E)를 종합한 새로운 방법을 모색하여 개선된 방법을 사용하는 것이 좋을 것으로 사료된다.



4. 결 론

본 연구에서는 각기 다른 혼합방법에 따라 재생혼합물을 제조하고 이로부터 간접인장강도, 반복주행시험, 변형강도, 회복탄성계수, 수분취약성 시험을 수행하여 노화 및 강도특성을 알아본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 네 가지 방법으로 제조한 재생혼합물은 모두 국내 표준 혼합물 규정에 만족하였으며, 안정도, ITS 및 SI 모두 일반혼합물 보다 재생혼합물이 높게 나타나 RAP의 노화 바인더에 의하여 재생혼합물의 강성이 높게 유지됨을 알 수 있었고, D방법의 혼합물이 재생혼합물 중에서는 낮은 인장강도 특성을 보여 어느 정도 점도회복 효과가 있는 것으로 판단되었다.
2. 소성변형 저항성을 평가하기 위하여 반복주행 시험, Kim test를 수행한 결과 재생혼합물이 더 좋은 소성 변형 저항성을 보였으나 E방법의 재생혼합물은 침하 깊이가 크고 동적안정도가 낮게 나타났고 변형강도가 일반혼합물과 유사하게 나타났는데, 이는 재생첨가제가 노화 바인더의 점도를 회복시키기보다는 신규 바인더의 점도를 떨어뜨린 것으로 사료되었다.
3. 회복탄성계수 시험 결과 모든 혼합물에서 온도가 높아짐에 따라 회복탄성계수가 감소하였으며, RAP을 첨가한 재생혼합물의 회복탄성계수가 일반혼합물에 비해 높게 나타났다. 본 연구에서 사용된 두 골재 모두 40℃에서의 회복탄성계수 와 변형강도의 상관성을 산출하면 상당히 높은 관계를 보였다. 이는 변형강도가 고온의 특성이므로 40℃에서 측정된 회복탄성계수가 높은 상관관계를 보인 것으로 판단된다. 또한 5℃를 제외하고는 나머지 온도에서 상당한 상관관계가 존재하므로 향후 연구해 볼 가치가 충분히 있을 것으로 보인다.
4. 동결융해에 따른 수분취약성 시험 결과 C, E방법으로 제작한 재생혼합물의 간접인장강도비(TSR)가 일반 혼합물 및 기존 재생혼합물(A 혼합방법)보다 수분에 대한 저항성이 우수하게 나타났다. 이는 혼합물의 제작 방법에 따라 수분민감 특성에 차이가 남을 나타내는 것이고, E방법이 가장 좋은 값을 나타냈으나 이 방법의 경우 재생첨가제만을 넣고 1차 비빔하는 데 그 양이 너무 적어 어려움이 있다. 그리고 C방법은 실험실에서는 가능하나 현장에서 적용이 어려운 방법이다. 그러므로 A방법보다 좋은 결과를 나타낸 D와 E 방법을 종합한 새로운 방법을 모색하여 개선된 방법을 사용하는 것이 좋을 것으로 사료된다.

5. 참고문헌

1. 김광우 등, (2003), “재활용 아스팔트 포장의 수명증진을 위한 품질향상 방안 연구,” 2002년도 건설기술연구개발 1차년도 중간보고서.
2. 김광우, 이기호, 홍상기, 김민수 (2003), “GPC를 이용한 재생 아스팔트 혼합물내의 바인더 불균등노화 상태 분석,” 한국도로포장공학회 학술발표회 논문집, pp. 189~192.
3. 김광우, 이문섭, 김중열, 이순제(2002a). “아스팔트 콘크리트의 고온변형저항 특성 측정방법 개발,” 석재연 논문집, 제 7집, 강원대학교 석재복합 신소재제품 연구센터. pp. 73-90.
4. 김광우, 이문섭, 김성태, 이순제(2002b). “소성변형과의 상관성 및 추정모델을 통한 변형강도 시험장치변수 분석,” 한국도로포장공학회 논문집, 제 4권 4호, pp. 41-52.
5. 김광우, 이문섭, 김준은, 최선주(2002c). “소성변형과의 상관성에 근거한 아스팔트 콘크리트의 변형강도 개발을 위한 기초연구,” 한국도로포장공학회 논문집, 제 4권 4호, pp. 23-39.
6. Kim, K. W., Ahn, K. and S. Amirkhanian (2003), “Direct Estimation of asphalt viscosity in RAP using GPC without binder recovery,” Paper submitted to TRB for Annual Meeting in 2004.