현장가열 재생아스팔트 혼합물의 특성 평가

An Evaluation of Property on In-Situ Hot Recycled Asphalt Mixtures

정은광* · 진정훈** · 조규태*** · 손원표**** · 남영국*****
Chung, Eun Kwang · Jin, Jung Hoon · Cho, Gyu Tae · Shon, Won Pyo · Nam, Young Kug

1. 서 론

국내 아스팔트 포장의 대부분은 일반 밀입도 아스팔트 포장이 주종을 이루고 있으며, 개·보수공사가 잦은 국내 도로 여건상 많은 양의 폐아스콘이 발생되고 있으며 매년 증가하고 있는 추세이다. 폐아스콘의 양이 증가하면서 재활용에 대한 관심도 높아지게 되었고 그 결과 폐아스콘의 재활용에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 그중의 하나가 현장가열 표층재생공법으로 현장의 폐아스콘을 재활용하여 아스팔트 포장으로 사용하는 공법이며 지역적 한계성 문제를 벗어나 표층절삭 및 포장을 연동하여 빠르게 진행할 수 있는 장점이 있는 반면, 오랜 공용기간과 잦은 유지보수에 따른 절삭 및 덧씌우기로 인하여 노후포장의 아스팔트에 대한 정확한 물리적 특성 파악이 어렵고 시공과정에서 혼합물의 배합에 상당한 기술을 필요로 하는 등 품질관리 및 시공과정에서 많은 경험이 요구된다.

본 연구에서는 현장가열 표층재생공법의 현장 적용에 따른 문제점을 파악하여 개선 방안을 제시하고 포장의 종방향 이음부 코어공시체에 대한 전단강도시험을 통해 이음부의 종방향 균열문제에 대한 기초자료제시 및 LCC 분석을 통하여 재생포장의 성능을 평가하고자 한다.

2. 재료

2.1 현장 수거 폐아스팔트 혼합물

본 연구에서 사용한 폐아스팔트 콘크리트는 현장가열 표층재생공법을 적용한 시공현장(전라북도 전주시

표 1 추출아스팔트의 함량 및 물리적 특성치

구분	결과	비고
추출 아스팔트 함량(%)	5.89	
침입도(1/100cm)	37	25℃
신도(cm)	7	15℃
비중	1.041	25℃
점도(cP)	1,448,000	60℃

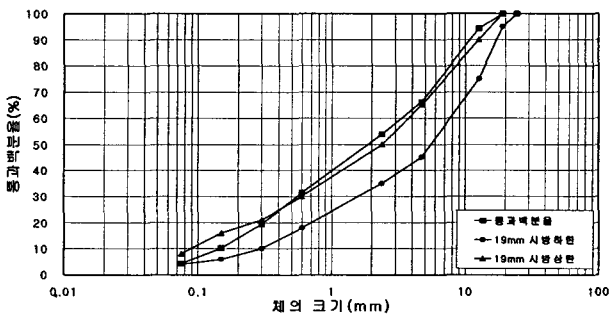


그림 1 추출골재의 입도분포곡선

* 정회원 · 인천대학교 토목환경시스템공학과 석사과정 · 공학사 · 032-770-8179(E-mail : silver_light@incheon.ac.kr)
** 정회원 · 인천대학교 토목환경시스템공학과 박사과정 · 공학석사 · 032-770-8915(E-mail : jinrino@kornet.net)
*** 정회원 · 인천대학교 ITS연구센터 책임연구원 · 공학박사 · 032-770-8915(E-mail : ichogt@yahoo.co.kr)
**** 정회원 · 인천대학교 토목환경시스템공학과 박사수료 · 공학석사 · 032-770-8915(E-mail : wpshon@samaneng.com)
***** 정회원 · 인천대학교 토목환경시스템공학과 교수 · 공학박사 · 032-770-8461(E-mail : yknam@incheon.ac.kr)

완산교~효자파출소사거리 구간 4차로)에서 시공 공정에 따라 기존 포장면을 절삭하여 생성되는 폐아스콘을 수거한 것이다. 기존 포장면은 심한 소성변형과 국부적인 포트홀 및 잦은균열 등 전반적으로 포장파손이 심각한 상황이었다. 수거된 폐아스팔트 혼합물의 추출·분리 후 물성시험 결과는 표 1 및 그림 1과 같다.

2.2 신규 아스팔트 혼합물

(1) 골재

신규골재는 국내 D사에서 생산하고 있는 화강암계 쇄석으로 25, 19, 13mm, 스크리닝스 및 채움재을 사용하였고 골재입도는 그림 2와 같다.

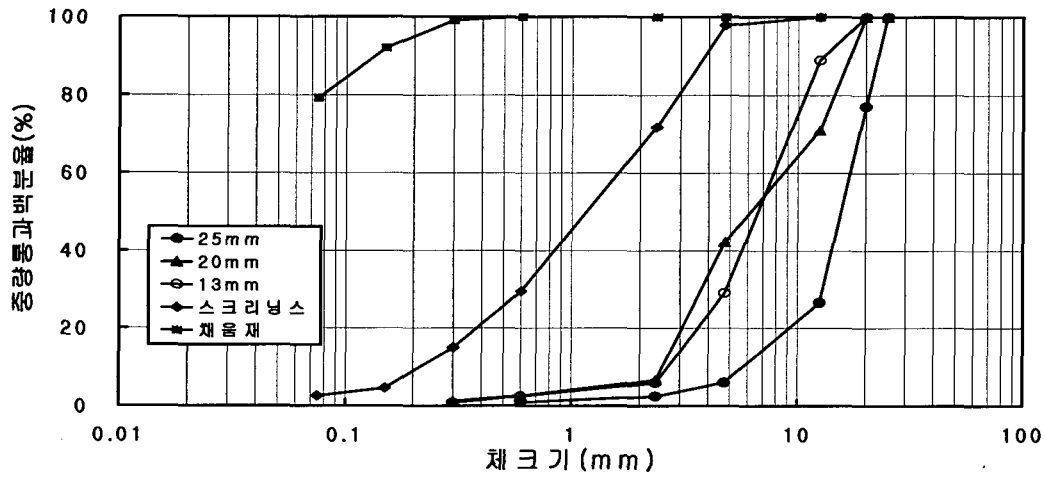


그림 2 신규 골재의 입도분포곡선

(2) 아스팔트 바인더

국내에는 다양한 등급범위의 아스팔트 바인더의 생산품이 없고 2개종류로 한정되어 있어서 AC60-80(AP-5)의 범위를 갖는 신규 아스팔트 바인더를 사용하였다.

2.3 재생첨가제

재생첨가제는 노화된 아스팔트와 혼합시 아스팔트 바인더의 점도를 회복시키는 작용을 하며, 워커빌리티를 개선하는 효과를 가지고 있다. 본 연구에서 사용된 재생첨가제의 제원은 표 2와 같다.

표 2 재생첨가제 제원

구 분	품질값
점도 (60℃ cSt)	884
인화점 (℃)	304
세츄레이트 (wt, %)	36.47
RTFO (또는 TFO) 후의 점도비	1.09
RTFO (또는 TFO) 후의 중량변화율(±, %)	1.14

3. 폐아스팔트 혼합물의 성상회복시험

3.1 재생아스팔트 혼합물의 입도 결정

폐아스팔트 콘크리트의 골재는 절삭과정에서 파손되어 일반 밀입도 시방규정에서 벗어나게 된다. 따라서 굵은골재 최대치수를 19mm로 상향조정하고 입도조정을 위해서는 신규혼합물의 추가과정이 필요하다. 본 연구에서는 폐재와 신재의 혼합비를 7:3과 8:2로 나누어 두가지 경우에 대한 입도합성을 실시하였으며 각 혼합비에 대한 최종합성입도는 그림 3, 4와 같다.

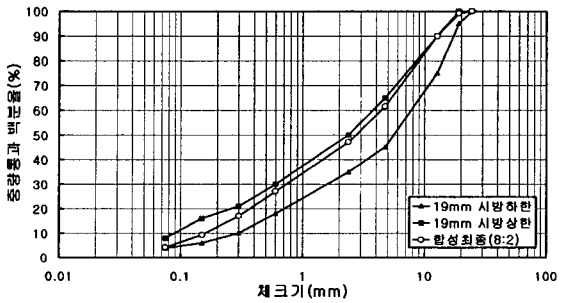


그림 3 최종합성입도곡선(폐재 8 : 신재 2)

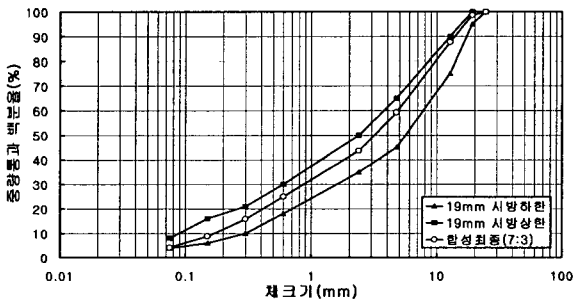


그림 4 최종합성입도곡선(폐재 7 : 신재 3)

3.2 재생첨가제 첨가에 따른 설계침입도 조정

따라서 본 연구에 사용된 침입도 37의 폐아스팔트와 침입도 72(AC60-80)의 신규아스팔트의 조합에 따른 침입도 조정범위는 본 연구에서 적용한 배합설계(8:2)에 의해 나온 폐아스팔트 대 신규아스팔트의 중량비인 84.1:15.9를 적용할 경우 설계침입도가 42로 약간 상향되지만, AC60-80 등급의 하한선인 침입도 60으로 상향조정하기 위해서는 신규아스팔트의 비율이 69%까지 증가하여야 한다. 따라서 폐아스팔트 혼합물에 비해 신규아스팔트 혼합물의 비율이 높을 경우 이외에는 신규아스팔트 첨가에 따른 침입도 조정은 다소 무리가 있다고 사료된다(그림 5). 재생첨가제를 첨가함에 따라 침입도 37의 폐아스팔트의 성상회복정도를 실험한 결과를 나타내면 그림 6과 같다.

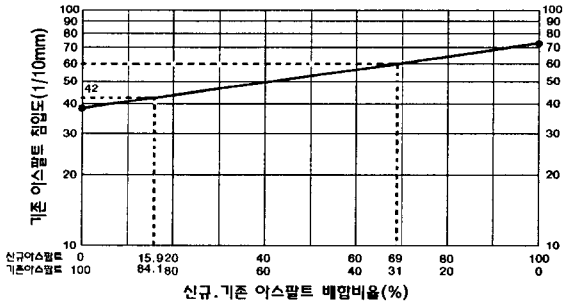


그림 5 신규아스팔트를 이용한 침입도 조정 결과

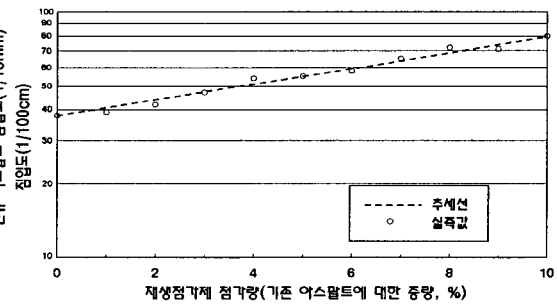


그림 6 재생첨가제를 이용한 침입도 조정 결과

그림 6은 기존아스팔트 중량에 대해서 1% 간격으로 재생첨가제를 첨가했을 때의 침입도 변화 실험결과이다. 본 연구에서 사용한 침입도 72의 신규아스팔트 수준의 성상회복을 위해서는 폐아스팔트에 약 8%의 재생첨가제를 첨가할 때 신규아스팔트와 비슷한 수준의 침입도로 회복될 것으로 기대된다. 따라서 배합설계에서 적용한 재생첨가제의 사용량은 8%로 결정하였다.

4. 품질시험

4.1 실내역학시험

폐아스팔트 콘크리트의 품질특성을 분석하고 성상회복시킨 후 재생아스팔트 혼합물의 성능을 평가하기 위하여 역학시험을 수행하였다. KS F 2349(마샬배합설계)의 방법에 의한 마샬안정도 시험을 하여, 시방기준에 대하여 적합여부를 판단하였으며, 마샬안정도 시험이외에 간접인장강도비(TSR) 시험, 휠트랙킹 시험 및 각 혼합비간의 상대적인 강도비교를 위한 압축강도시험, 전단강도시험을 실시하였다.

(1) 폐재와 신재의 배합비 8:2

재생첨가제의 비율을 폐아스팔트 중량의 8%로 첨가하고 혼합물의 아스팔트 함량을 5.0~6.5%까지 0.5% 간격으로 설정하여 마샬배합설계에 의한 최적아스팔트 함량을 산정하고 최적아스팔트 함량에 따른 시험공시체를 제작하여 역학시험을 수행하였다. 배합비 8:2에 대한 최적아스팔트 함량은 5.6%로 결정하였고, 이에 따라 시험공시체를 제작하여 역학시험을 실시하였다(표 3).

(2) 폐재와 신재의 배합비 7:3

배합비 7:3에 대해서는 재생첨가제의 비율을 폐아스팔트 중량의 8%로 첨가하고 혼합물의 아스팔트 함량을 4.5~6.5%까지 0.5% 간격으로 설정하여 4.1의 (1)과 동일한 과정으로 역학시험을 수행하였다. 배합비 7:3에 대한 최적아스팔트 함량은 5.2%로 결정하였고, 이에 따라 시험공시체를 제작하여 역학시험을 실시하였다(표 3).

표 3 폐재와 신재의 혼합비별 재생아스팔트 혼합물의 역학시험 결과

구 분		폐재 8 : 신재 2				폐재 7 : 신재 3			
		1	2	3	평균	1	2	3	평균
마샬안정도	안정도 (kg)	1336	1334	1287	**1319**	1306	1290	1198	**1265**
	흐름값 (1/100cm)	35.7	32.6	33.9	**34.1**	32.9	29.4	35.4	**32.57**
건조간접인장강도 (kg/cm^2)		5.52	6.24	6.43	**6.06**	6.39	6.38	6.15	**6.30**
수침간접인장강도 (kg/cm^2)		4.99	5.08	4.56	**4.88**	5.00	4.92	5.13	**5.01**
TSR (%)		**80.53**				**79.52**			
압축강도 (kg/cm^2)		52.11	50.48	48.80	**50.47**	51.20	51.60	53.23	**52.01**
전단강도 (kg/cm^2)		3.76	3.92	4.07	**3.92**	3.82	3.61	4.23	**3.89**
비 고		마샬공시체의 공극율 = 4.10% 배합비 8:2 아스팔트 함량 5.6%				마샬공시체의 공극율 = 4.31% 배합비 7:3 아스팔트 함량 5.2%			

(3) 배합비에 따른 시험결과 비교

신재와 폐재 혼합비에 따른 시험결과를 비교하면 표 4와 같다. 시험결과 마샬안정도 및 흐름값은 규정범위를 만족하였으며, 폐재와 신재 혼합 8:2 비율이 성능 개선 효과가 가장 큰 것으로 나타났다. 여기서 가장 큰 증가를 보이는 것은 압축강도값으로 골재크기 증가에 따른 혼합물의 굵은골재 최대치수 증가에서 그 이유를 찾을 수 있으며 폐아스콘에 비해 높은 압축강도값을 가지므로 입도조정에 따른 폐아스콘의 재생시 소성변형에 대한 저항성이 우수할 것으로 사료된다.

표 4 신재와 폐재 배합비에 따른 역학시험결과 비교

구 분		폐재 10 : 신재 0	폐재 8 : 신재 2	폐재 7 : 신재 3
아스팔트 함량 (%)		5.89	5.6	5.2
마샬안정도	안정도 (kg)	1312	1319	1265
	흐름값 (1/100cm)	33.53	34.1	32.57
건조간접인장강도 (kg/cm^2)		6.19	6.06	6.30
수침간접인장강도 (kg/cm^2)		4.71	4.88	5.01
TSR (%)		76.1	80.53	79.52
압축강도 (kg/cm^2)		34.84	50.47	52.01
전단강도 (kg/cm^2)		3.07	3.92	3.89

(4) 휠트랙킹 시험 결과

휠트랙킹 시험은 60℃에서 총 5400회(2700cycle) 반복주행 후 동적안정도 및 바퀴패임깊이를 추정하는 방법으로 아스팔트 혼합물의 동적안정도를 결정할 수 있다. 표 5는 폐재와 신재의 배합비 8:2인 재생아스팔트 혼합물의 휠트랙킹 시험결과이다.

표 5 재생아스팔트 혼합물(배합비 8:2)의 휠트랙킹 시험결과

시험항목 / 구 분	변형속도(mm/분)	동적안정도(회/mm)
결 과	**0.0533**	**790**
시험방법	KS F 2374	

4.2 현장 종방향 시공이음부의 코어공시체 전단강도 시험

절삭 덧씌우기를 포함한 포장의 종방향 이음부에서 발생하기 쉬운 종방향 균열의 원인은 포설 및 다짐공정에서 신·구 포장간의 온도차이로 알려져 있다. 따라서 현장 재생포장 시공과정에서 시공이음부에 추가가열을 한 현장 및 그렇지 않은 현장을 선정하여 종방향 시공이음부에서 코어채취를 한 후 코어공시체에 대한 전단강도 시험을 하였다. 선정된 현장의 제원은 표 6과 같다.

표 6 현장조사 선정 구간 현황

지역	공사명	공사구간	공사면적(a)	공사기간	발주청
종방향 시공이음부 가열 현장					
합천	문림-영전리간 (국도 24호선)	문림-영전리간	222	01.9.12~01.9.18	진주국도유지건설사무소
목포	영산로	동원예식장-제일중	98.75	01.5.8~01.5.11	목포시청
종방향 시공이음부 비가열 현장					
광주(1)	무등로	광주역-무등경기장	182.1	99.10.27~99.11.4	광주광역시 건설안전관리본부
광주(2)	우치로	전대후문-일곡지구	210.05	00.11.14~00.11.25	광주광역시 건설안전관리본부

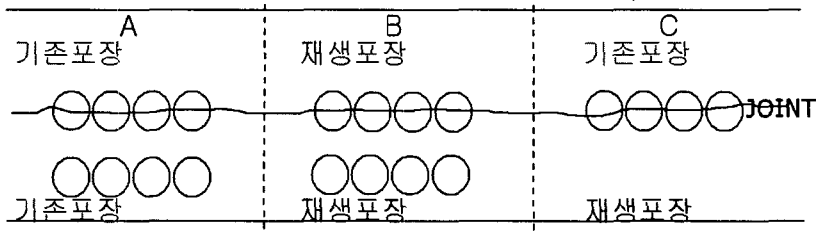
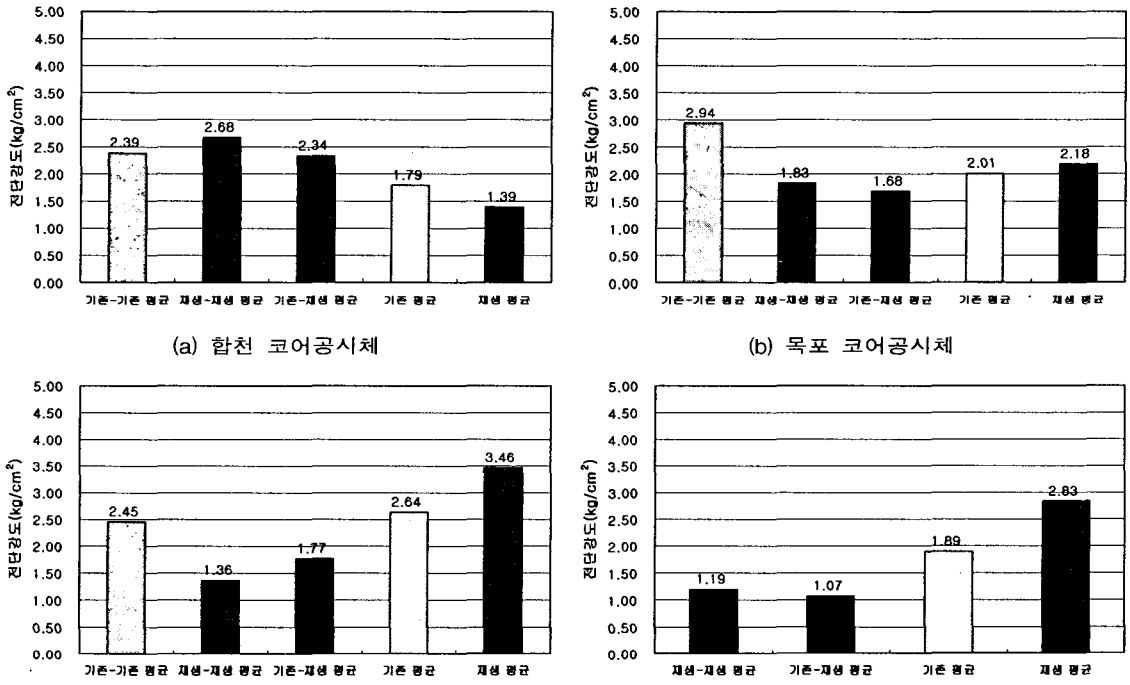


그림 7 현장코어채취 위치

각 현장에서 그림 7과 같이 각 조건에 대한 코어공시체를 4개씩 채취하였다. 채취된 코어는 시험실로 이동하여 표층두께 이내로 절단하였으며, 코어채취 및 시료절단과정에서 파손된 코어공시체는 시험항목에서 제외되었다. 그림 8은 코어공시체 채취위치별 전단강도 결과치를 비교한 것이다.



(a) 합천 코어공시체

(b) 목포 코어공시체

(c) 광주 무등로 코어공시체

(d) 광주 우치로 코어공시체

그림 8 코어공시체 채취 위치별 전단강도 결과 비교

코어공시체의 전단강도 결과는 1.07~3.46kg/cm^{2}까지 시험결과의 폭이 넓었다. 실내에서 제작된 페아스팔트 혼합물 및 재생아스팔트 혼합물의 전단강도(3.07~3.92kg/cm^2)보다 낮은 강도값이 나온 것은 코어채취과정에서 공시체에 충격이 가해질 수 있으며 코어공시체의 특성상 아스팔트 미피복 표면이 발생하는 이유로 60℃ 항온수조에서 강도저하가 발생했을 수도 있다고 사료된다.

전반적인 결과 재생포장면에서의 전단강도가 가장 크다는 것을 알 수 있으며 합천 현장의 재생-재생 조인트부의 전단강도 결과가 상대적으로 높은 것을 알 수 있다.

5. 현장가열 표층재생 아스팔트 포장공법의 LCC 분석

도로의 유지보수공법에 대한 LCC 분석은 표 9와 같다. 분석기간은 5년을 기준으로 하였으며, 할인율 4% 적용, 연장은 1km(왕복4차로)를 기준으로 하였다. 분석기준연도는 2002년 기준으로 적용했으며, 유지보수비용과 사용자비용은 1998년의 기준으로 하였다. LCC분석에서는 현장 덧씌우기 공법만 적용하였다. 환경에 대한 비용을 재화로 환산하기에는 기초자료의 부족으로 어려움이 있으며 다만 재활용폐기물 처리비용 정도만 계산을 할 수 있을 정도이다. 환경에 대한 비용이 재화로 계상이 된다면 절삭과정에서의 비산, 먼지 발생에 따른 환경피해비용, 페아스콘의 매립에 따른 환경적 악영향에 따른 비용, 그리고 건설공사에서 필요한 골재자원의 고갈 등을 고려할 수 있으며 이에 따라 현장가열 표층재생공법의 환경적·경제적 가치가 다소 상승할 것으로 사료된다.

표 9 유지보수공법의 LCC분석

(단위 : 천원)

구 분		절삭 덧씌우기		현장가열 표층재생공법	
		불변가격	할인가격	불변가격	할인가격
초기투자비	공사비	187,612	187,612	160,014	160,014
	설계 및 감리비	15,721	15,721	13,409	13,409
유지관리비	유지보수비	109,450	86,034	109,450	86,034
	사용자비용	16,835	15,539	16,835	15,539
해체/폐기비	해체/폐기처분비	46,458	46,458	0	0
LCC 합계		376,076	351,364	299,708	274,996

6. 결론

(1) 재생아스팔트 혼합물의 배합설계는 추출아스팔트, 추출골재, 신규혼합물의 물성파악이 매우 중요하다. 본 연구에 사용된 폐아스팔트 혼합물은 시공구간 전반에 걸쳐 수거된 것으로 평균침입도 37인 아스팔트로, 추출골재 최대치수는 19mm로 파악되었다. 리몰딩을 통한 역학시험에서 마샬안정도와 흐름값이 규정범위에 포함되었으나 TSR 값이 76.1%로 권장수준인 80%에 못미치는 결과로 재생하기 위해서는 아스팔트의 성상회복 및 신규골재의 추가가 필요하다.

(2) 시공과정중에 현장에 포설되는 재생아스팔트 혼합물을 수거하여 리몰딩후 역학시험을 실시한 결과 폐아스팔트 혼합물과의 비교에서 마샬안정도를 제외한 다른 결과값은 재생아스팔트 혼합물이 더 높은 값이 나와 폐아스팔트 혼합물의 재생을 통해 성능개선된 품질을 얻을 수 있었으며 수분손상평가시험에서 권장수치인 80%를 상회하는 결과를 보였다.

(3) 신규아스팔트 첨가에 따른 성상회복은 한계성이 있어서 재생첨가제를 사용하였으며 실내시험에 사용된 신규아스팔트 수준(침입도 72, AC60-80)의 회복을 위한 재생첨가제의 첨가량은 폐아스팔트 중량비 8%로 실내시험을 통해 결정하였다. 마샬배합설계 후 세가지 종류의 역학시험결과 폐재와 신재의 배합비 8:2에서 성능개선 효과가 큰 것으로 나타났으며 우수한 품질의 재생아스팔트 혼합물은 신규혼합물의 비율을 높이는 것만이 방법이 되는 것은 아니며 적절한 배합이 필요하고 현장적용 이전에 충분한 실내품질시험이 요구된다.

(4) 절삭 덧씌우기와 현장가열 표층재생공법 대한 LCC 분석결과 현장가열 표층재생공법이 경제성 있는 것으

로 나타났으나 장기적인 추적조사가 선행되어야 정확한 LCC분석이 될 것으로 사료된다.

(5) 현장가열 표층재생공법 시공현장과 공용중인 현장 4개소에 대한 평가를 종합하면, 시공할 현장의 노후포장에 대한 철저한 조사 및 분석을 통하여 배합설계를 하고, 실험실에서 작성된 배합설계를 바탕으로 숙련된 기술자들의 현장 배합제어기술을 통하여 시공되어야만 우수한 품질을 유지할 수 있다는 것이다. 시공시 멘홀, 가스관, 밸브 등에 의해서 장비속도가 변하거나 멈출 때 첨가제 투입 및 히터온도제어관리 기술이 가장 어려운 것으로 판단되며 장기간에 걸친 현장에서의 장비운용을 통한 경험적인 시공기술 습득이 중요하다. 노후포장의 전량을 재활용한다는 환경적인 이점이 있어 향후 장기 공용성조사 및 추적조사를 통해 포장성능이 검증된다면 각광받는 공법이 될 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 건설교통부, 폐아스팔트 포장재료의 개질·재활용기법 개발에 관한 연구(II), 1999. 3.
2. 서울특별시, 폐아스팔트 콘크리트 재활용 실용화 방안 연구, 2000. 4.
3. National Center for Asphalt Technology, Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments, 1997. 12.
4. 건설교통부, 한국형포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구 건설폐자재 재활용 시방지침 개발, 2002. 9.