Int. J. Highw. Eng. Vol. 20 No. 1 : 97-105 FEBRUARY 2018
https://doi.org/10.7855/IJHE.2018.20.1.097

믹싱기 추가에 따른 현장가열 재생 아스팔트 혼합물의 물성평가

Evaluation of the Properties of a Hot In-Placement Recycled Asphalt Mixture as an Adding Mixer

이 강 훈	Lee, Kanghun	정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구소 신진연구원 (E-mail : kh83lee@kict.re.kr)
박 재 영	Park, Jaeyoung	정회원 · 전북대학교 토목공학과 석사과정 (E-mail : 0709hjyp@naver.com)
이 화 선	Lee, Hwasun	정회원 · 중원산업 전무 (E-mail : lhs3302@naver.com)
김 용 주	Kim, Yongjoo	정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구소 수석연구원 (E-mail : yongjook@kict.re.kr)
이 재 준	Lee, Jaejun	정회원 · 전북대학교 토목공학과 부교수 · 교신저자 (E-mail : lee2012@jbnu.ac.kr)

ABSTRACT

PURPOSES : Asphalt concrete pavement is damaged by various causes such as traffic and environmental loads. The distressed pavement should be maintained by various methods to provide a comfortable and safe pavement for the driver. This study evaluates the effect of adding a mixing procedure to enhance the mixture quality in the hot in-placement recycled asphalt pavement method, which is an asphalt-pavement maintenance method.

METHODS : Various test methods such as Marshall stability and dynamic stability, were employed to estimate the recycled asphalt mixture with and without an additional mixing, using the hot in-placement recycled asphalt pavement method.

RESULTS : The mixture samples used in this study were taken before and after the addition of the mixer in the hot in-placement recycled asphalt pavement method (HIR) at field construction sites in GongJu and JinJu in South Korea. The test results of both mixtures satisfied the asphalt-mixture standard specifications.

CONCLUSIONS : This study confirmed that adding a mixer in the HIR method results in a well-mixed new asphalt mixture, rejuvenator, and reclaimed asphalt mixture.

Keywords
Hot in-placement recycle asphalt mixture, Marshall stability, toughness, dynamic stability, tensile strength ratio

Corresponding Author : Lee, Jaejun, Associate Professor
Department of Civil Engineering, Chonbuk National University
567 Baekje-daero, Deokjin-gu, Jeonju-si, Chonbuk, 54896, Korea
Tel : +82.63.270.2427 Fax : +82.63.270.2421
E-mail : lee2012@jbnu.ac.kr

International Journal of Highway Engineering
http://www.ksre.or.kr/
ISSN 1738-7159 (Print)
ISSN 2287-3678 (Online)
Received Jan. 11. 2018 Revised Jan. 16. 2018 Accepted Feb. 02. 2018

1. 서론

2016년 국토교통부 도로현황조서에 살펴보면, 우리나라의 총 도로연장은 108,780km이며, 포장율은 93.01%이다. 이 중 일반국도와 광역시도는 포장율이 100%이며, 이 중 90% 이상의 도로가 아스팔트 콘크리트 포장으로 구성되어 있다. 아스팔트 콘크리트 포장은 주행차량의 차량하중, 날씨에 의한 환경하중 등 다양한 메커니즘에 의하여 포트홀, 소성변형 및 균열 등과 같은

다양한 도로파손이 발생하게 되며, 파손이 발생된 도로는 도로 파손 정도에 준하여 보수 보강이 진행된다.

일반적으로 파손된 아스팔트 콘크리트 포장은 아스팔트 플랜트에서 새롭게 생산된 아스팔트 혼합물을 이용한 덧씌우기 공사가 널리 사용되고 있다. 파손된 도로의 재포장 시 폐 아스팔트가 발생하게 되며, 이때 발생하는 폐 아스팔트 콘크리트는 중간처리업체 또는 재활용 시설이 되어 있는 아스팔트 플랜트로 운반되어 새로운 아스팔트 생산에 사용되고 있다. 환경부에서는 환경보호 차원에서 "건설폐기물 재활용 촉진에 관한 법률"을 통하여 건설폐기물 재활용을 권고하고 있으며, 총 공사 물량의 40% 이상 사용을 의무화하고 있다.

최근 건설현장에서 발생하는 폐 아스콘의 재활용을 적극적으로 추진하고 자원을 절약함과 동시에 환경도 보호하기 위하여 2016년에 익산지방국토관리청, 아스콘협회 그리고 한국순환아스콘협회는 '건설폐아스콘 재활용 촉진을 위한 업무협약(MOU)를 체결하였다. 이번 MOU를 순환아스콘협회에서는 기술개발지원을, 아스콘업체는 품질관리 및 기술력 확보를 통하여 현장에서 많은 폐아스콘이 재활용 될 것으로 기대되고 있다.

한국행정연구원에서는 건설폐기물의 재활용 촉진에 관한 법률 개정에 따른 규제의 영향에 대한 연구를 수행하였다. 한국행정연구원에서는 폐 아스팔트 콘크리트를 포함한 건설폐기물의 경우, 배출 당시의 물성 또는 재료의 종류 구분 정도가 폐기물의 처리 및 재생의 효율과 비용에 대해 큰 영향을 주기 때문에 건설폐기물의 효율적인 재활용을 위해서는 건설폐기물의 배출지에 대한 정보에 준하여 분리 배출하는 것이 중요하다고 강조하였으며, 기름이 함유된 폐 아스팔트를 고부가가치로 재활용하기 위해서는 폐 아스팔트를 다른 건설폐기물과 분리하는 것이 중요하다고 보고하였다. 폐 아스팔트가 혼합된 후에 일반 순환골재로 재활용되고 있는 현실적인 문제점에 대하여 지적하기도 하였다(KIPA, 2008). 또한, 건설폐기물 재활용 산업의 육성 지원을 위하여 건설폐기물 재활용 산업의 지출경비 중 상당한 부분이 부지확보와 시설투자에 소요되므로 재생업체들에게 정부의 금융지원 및 세제지원을 위한 방안 마련의 필요성이 제시되기도 하였다(Jang et al., 2003).

Fig. 1은 건설폐기물 발생량과 총 폐기물 발생대비 점유율을 나타내고 있다. 2014년도 건설폐기물 발생량은 1일 185,382톤으로 전년(183,538톤/일) 대비 1.0% 증가하였으며, 전체 폐기물 발생대비 약 48%를 차지하고 있음을 알 수 있다. Table 1은 발생된 건설폐기물 발생 중 폐기물의 종류별 발생량을 나타내고 있다. Table 1에서 설명하고 있는 것과 같이 폐 아스팔트 발생량은 전체 폐기물 중에서 18.2%를 차지하고 폐 콘크리트 발생량이 62.0%로써 가장 큰 비중을 차지하고 있음을 설명해 주고 있다. 정부에서는 건설 폐기물 재활용을 높이기 위하여 2011년 환경부, 국토교통부, 한국건설자원협회에서 공동으로 순환골재·재생아스콘 우수사례집 발간을 통하여 건설폐기물 재활용에 대한 인식 전환과 재생아스팔트 콘크리트를 안심하게 사용할 수 있도록 기술개발과 품질확보를 통하여 고부가가치 재활용이 활성화되기를 노력을 기하고 있다(ME, 2011). 환경부에서는 2016년 5월 "건설폐기물의 재활용촉진에 관한 법률 시행령" 개정을 통하여 폐 아스팔트 사용의무구간이 기존의 신설 및 확장구간에서 모든 아스팔트포장구간으로 변경이 됨으로써 폐 아스팔트 재활용 적용구간이 확대될 것으로 기대된다(ME, 2016).

아스팔트 포장공법에서 폐 아스팔트를 재활용하는 공법으로는 플랜트 재생공법과 현장가열 표층 재생공법이 현재 국내에서 운영되고 있다. 그 중 현장가열 표층 재생공법은 노후된 기존 포장을 가열 후 절삭하여 혼합, 포설 및 다짐작업을 연속적으로 시공하는 공법이다. 현장가열 표층 재생공법은 노후 포장 파쇄와 동시에 포설이 진행되기 때문에 공사시간이 단축되며, 운반비용 절감과 함께 이물질이 혼합되지 않는 장점이 있으나, 곡률

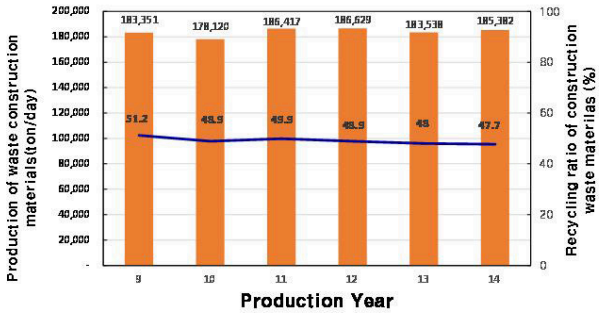

Fig. 1 Production and Share of Waste Construction Material

Table 1. State of Produced Waste Construction Materials

(Unit:Ton/day)

Classify	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Total	149,715	148,969	158,765	156,448	150,331	151,026
Waste concrete	115,424	114,302	121,181	117,754	111,653	114,908
Waste asphalt concrete	32,612	32,535	35,245	35,738	35,398	33,725
Others	1,679	2,132	2,339	2,957	3,280	2,393

이 심한 도로 및 도심지 등에서는 교통체증 유발로 인하여 적용이 불가능한 단점도 지니고 있다.

본 연구에서는 국내에서 현재 운영되고 있는 현장가열 표층 재생공법의 품질 평가를 통하여 현재 적용되고 있는 현장가열 표층 재생공법으로 생산된 아스팔트 혼합물 품질에 대한 부정적인 인식개선과 재생아스팔트 콘크리트 활성화에 기여하고자 한다. 이를 위하여 본 논문에서는 일반국도 덧씌우기 포장 공사현장에 적용되는 현장가열 표층 재생 공법에서 생산되는 혼합물을 현장에서 채취한 후 실내에서 마샬안정도, 터프니스, 동적안정도, 변형강도 및 수분민감도 등 실내 품질 평가를 실시하였다. 또한 최근 현장 가열 표층 재생 공법의 품질향상을 위해 믹서를 현장가열 표층 재생 장비에 추가하여 생산된 혼합물에 대한 평가도 병행하였다. 추가된 믹서는 재생첨가제의 혼합 효과 향상을 위해 추가되었다.

2. 문헌고찰

친환경 정책으로 새로운 골재 생산에 제약을 받으면서 골재의 가격 상승과 함께 골재의 품질관리에 어려움이 발생하고 있으며, 석유가격의 상승으로 인해 경제성을 고려한 고품질의 새로운 아스팔트 콘크리트 재료가 필요한 시점이다. 도로교통전문가들은 교통정체를 최소화하고 포장공사 중 환경피해를 최소화 할 수 있는 현장 재생공법들을 제안하고 있으며, 현장가열 재생공법으로는 상온, 전단면 보수, 현장가열 표층 재생공법이 있다. Fig. 2는 포장상태에 따른 현장재생공법 적용가이드를 나타내고 있다. Fig. 2에서 나타내고 있는 것처럼 포장상태가 양호한 경우에는 현장가열 표층 재생포장공법을 추천하고 있으며, 포장상태가 매우 좋지 않은 경우(Poor)에는 전단면보수를 권장하고 있다(NCHRP, 2011).

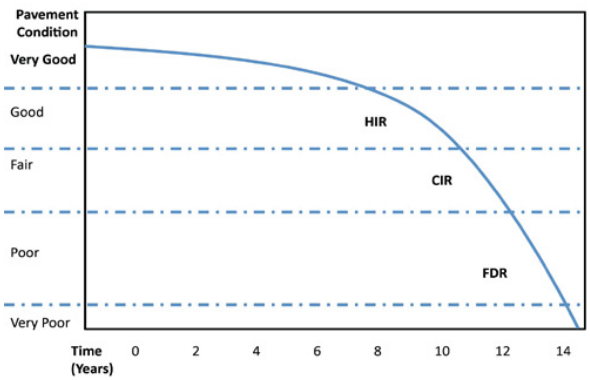

Fig. 2 Pavement Condition and Type of In-place Recycling Method (NCHRP, 2011)

Fig. 3, 4는 해외에서 일반적으로 널리 사용되고 있는 현장가열 표층 재생공법의 시공단계를 도식화하여 설명해 주고 있다. 현장가열 표층 재생공법은 일반적으로 2단계의 히팅작업이 진행된다. 1차 히팅작업에서는 기존 포장을 가열하여 표면 밀링 시 골재파손을 최대한 줄이기 위하여 1차 가열 후 2.5cm 절삭을 진행한다. 1차 절삭을 한 후 2차 히팅을 진행한 후 2차 밀링(2.5cm)을 진행하여 일반적으로 전체 두께 5cm를 절삭한 후 현장에서 포설을 하는 시스템으로 운영되고 있다. 그리고 2차 밀링 후 재생첨가제가 첨가되어 믹싱을 하게 된다. 이후 추가로 약 10% 정도의 새로운 아스팔트 혼합물을 투입한 후 페이버 전단계에서 혼합을 한 후 포장을 하게 된다(Terrel et al., 2008).

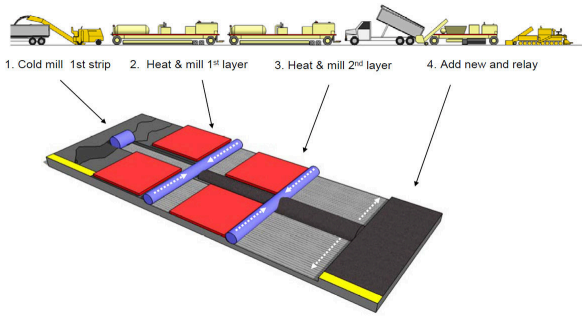

Fig. 3 The Concept of Pre-milling and Removing RAP from the Pavement to Make Room for Additional HMA Admix (pat. pend.) (P.C. Wiley) (Terrel et al., 2008)

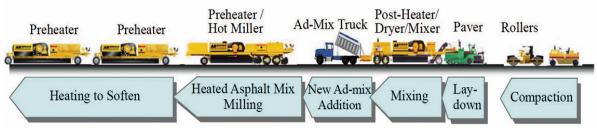

Fig. 4 The Concept of Hot-in Place Recycling Pavement Sequence (P.C. Wiley) (Terrel et al., 2008)

Fig. 5는 현장가열 재생공법에서 기존 노후된 아스팔트 포장 표면을 가열할 때 발생되는 문제점과 문제점 해결 방안을 나타내고 있다. 일반적으로 현장가열 재생공법에서는 가열방식이 직접가열 방식이기 때문에 기존 포장체의 표면을 고열로 가열할 때 유해가스가 다량으로 발생하게 된다. 이를 해결하기 위하여 최근 가열 방식을 적외선 또는 열풍 시스템으로 노후된 아스팔트 포장 표면을 가열하는 방식이 개발되었다.

Table 2는 캐나다에서의 현장가열 표층 재생공법의 발전과정을 나타내고 있다. 캐나다에서는 1985년 처음 현장가열 표층 재생공법을 현장에 적용한 이후 꾸준히 기술개발을 진행하고 있다.

(a) Fume Problem at Heater

(b) No Fume at Heater

Fig. 5 Fume Problem of Heating in HIR Sequence

Table 2. Summary of the Chronological Development of HIR in British Columbia (Terrel et al., 2008)

Year technology	Developing company	Current Mfr. model name	Technical positives	Technical negatives
1985 Single-stage infrared heat	Rorison-Wiley blacktop	No longer produced	None	Smoke 1 in max depth
1987 Two-stage infrared heat	Rorison-Wiley blacktop	No longer produced	Good heat transfer 1st 2inch achieved	Variable smoke Variable quality Max 25% admix large size
1990 Four-stage infrared heat	Artec equipment	No longer produced ARC operates on in BC	Optimized heat transfer 2inch depth	Variable smoke Variable quality Max 25% admix large size
1990 Two-stage infrared with emissions incinerator	Pyrotech asphalt equipment	Pyrotech asphalt equip. pyropaver 300E		Variable smoke Variable quality Max 25% admix large size
1995 Single-stage Hot air/infrared	Artec equipment	Martec recycling AR 2000	Less smoke at depths up to 40mm diesel fuel	Variable smoke at depth> 40mm Max 25% admix very large size

국내에서도 현장가열 재생공법이 현재 운영 중에 있다. 국내에서 운영 중인 현장가열 표층 재생공법은 4단계로 나뉘어지며, 1단계는 기존 아스팔트 포장 절삭를 위한 가열, 2단계는 가열된 기존 표층 아스팔트 포장의 절삭, 3단계에서는 절삭된 아스팔트 콘크리트와 신 아스팔트 콘크리트와의 혼합, 마지막 4단계는 혼합된 아스팔트 콘크리트의 포설과 다짐 공정으로 구분할 수 있다. Fig. 6 은 국내에서 운영 중인 현장가열 재생포장공법의 작업 공정을 설명해주고 있다

(a) Entire Construction Procedure (b) Preheating Existing Pavement

(c) Milling of Existing Pavement (d) Milled Existing Asphalt Pavement

(e) Delivery New Asphalt Mixture (f) Input Mixture into Paver after Mixing RAP and New Asphalt Mixture

(g) Paving the RAP (h) Compaction

Fig. 6 Hot In-Place Recycling Asphalt Construction Sequence in Korea (Kwon, S et al., 2013)

Fig. 6(a)는 전체 공정을 나타내고 있으며, Fig. 6(b)는 기존 아스팔트 히팅과정, Fig. 6(c)와 Fig. 6(d)는 1차 가열된 노면 아스팔트의 2차 가열과 1차 절삭 및 혼합물을 설명하고 있다. Fig. 6(e)는 신재 아스팔트 혼합물이 교반기에 투입하기 전이며, Fig. 6(f)는 투입된 신재 아스팔트 혼합물의 투입과 현장 혼합물 및 최종 아스

팔트 혼합물이 페이버 호퍼로 운송되는 과정을 설명해주고 있다. Fig. 6(g)와 (h)는 마무리로 페이버로 포장하고 롤러로 다짐하는 과정을 설명해주고 있다(Kwon, et al., 2013).

Kwon, S. et al.(2013)는 현장가열 표층 재생공법 혼합물을 실내에서 40초 추가 믹싱 후 동적안정도의 결과 값 개선과 함께 분포 폭이 좁아지는 것을 확인하였으며, 이러한 현상은 현장가열 표층 재생포장공법에서 믹싱시간이 충분하지 않아 생산된 혼합물의 물성의 변동폭이 크게 발생하는 것을 문제로 제시하였다. 이에 믹싱시간을 확보하기 위한 공정 추가가 필요하다는 연구결과를 도출하였다. 이후 2014년도에 국내 현장가열 표층 재생공법을 시공하는 A사에서는 포장 장비에 믹서기를 추가로 설치하였으며, 2016년도에는 혼합물의 품질개선을 위하여 Fig. 7과 같이 추가적으로 혼합 믹서기를 하나 더 추가를 하였다. 2013년 이후 2개의 믹서기가 추가 설치됨에 따라 현장가열 재생 아스팔트 포장공법 품질관리가 개선되었으리라 판단된다.

본 연구에서는 Fig. 7(a)에서 설명하고 있는 믹서기 추가로 인한 현장가열 표층재생 아스팔트 혼합물의 물

(a) New Mounted Mixer

(b) Sampling of Loose Mixture at the Field Construction

Fig. 7 New Mounted Mixer and Sampling of Loose Mixture at the Field Construction

성평가를 평가하고자 한다. 현장에서 loose mixture를 채취하여 실내에서 마샬안정도, 간접인장강도, 휠트랙킹 시편을 제작 후 평가를 실시하였다.

3. 실험방법

3.1. 변형강도 시험

아스팔트 혼합물이 파괴되기 전까지 발생하는 최대하중과 이 때 발생하는 수직변형량을 계산하여 교통하중에 의한 아스팔트 혼합물의 유동 변형에 대한 저항성을 평가하기 위하여 변형강도 시험을 실시하였다. 변형강도는 아스팔트 혼합물의 고온변형 저항성을 측정하기 위하여 아스팔트 혼합물을 60℃에서 30분간 수침 후 꺼내어 평면 중앙에 하중봉을 통해 수직 정하중을 가하여 변형강도를 측정한다(MOLIT, 2017).

3.2. 간접인장강도

일반적으로 아스팔트 콘크리트 포장은 교통하중에 의해 발생하는 인장응력으로 인하여 균열이 발생하게 된다. 교통하중에 의한 균열발생 저항성을 평가하기 위하여 본 연구에서는 KS F 2382에 규정된 아스팔트 혼합물의 간접인장강도 시험방법 절차에 준하여 현장가열 재생아스팔트 공시체의 간접인장강도를 측정하였다.

3.3. 터프니스 측정

피로균열 특성을 평가하기 위하여 아스팔트 혼합물의 터프니스를 측정하였다. 터프니스는 간접인장강도 측정 시 측정되는 하중-변위곡선 하부면적을 계산을 통하여 계산한다. 폐 아스팔트 콘크리트 혼합물용 순환골재를 25% 이상 사용한 재활용 가열 아스팔트 혼합물을 도로의 표층에 사용하기 위해서는 재활용 가열 아스팔트 혼합물 품질표준(GR F 4005)를 만족해야 하며, GR F 4005에서는 8000(N*mm) 이상 터프니스를 만족해야 한다. 본 연구에 사용되는 재활용 아스팔트 혼합물은 폐 아스팔트가 100% 재활용되기 때문에 터프니스 측정하였다.

3.4. 수분민감성 평가(TSR)

아스팔트 혼합물의 수분저항성을 평가하기 위하여 미국에서는 AASHTO T 283이 개발되었으며, 국내에서는 KS F 2398에 규정되어 있어 본 연구에서는 국내 KS F 2398에 규정된 아스팔트 혼합물의 수분저항성

시험방법에 따른 인장강도비(TSR)시험을 적용하였다. 수분 민감성 시험(TSR)은 아스팔트 혼합물 공시체의 공극률을 7±0.5%가 되도록 다짐횟수를 조절하여 공시체를 제작하며, 제작된 공시체는 60℃ 온도의 수조에 24시간 수침시킨 뒤 25℃에서 2시간 수침을 진행한 수분처리 공시체와 25℃의 수조에 2시간 물에 접촉하지 않도록 한 무처리 공시체로 인장강도를 각각 측정하여 두 값 사이의 비를 수분민감도(TSR)로 도출하게 된다.

3.5. 마샬안정도 측정

마샬 안정도 측정 시험은 KS F 2337에 준하여 마샬 안정도를 측정하였으며, 공시체를 60℃ 수조에 30분간 수침시킨 후 꺼내어 50.8mm/분의 속도로 하중을 재하하여 마샬 안정도를 측정하였다.

3.6. 휠 트래킹 시험

휠 트랙킹 시험은 여름철과 같은 고온의 포장조건 하에 실제 차량하중이 통과함에 따라 발생하기 쉬운 소성변형을 실내에 재현하여 평가하는 시험방법이다. 바퀴의 반복주행으로 발생하는 소성변형 깊이의 변화를 측정함으로써 아스팔트 혼합물의 동적안정도를 결정하고 있다. 본 연구에서는 KS F 2374의 휠 트랙킹 시험 방법에 준하여 혼합물에 대한 소성변형 저항성 평가를 실시하여 동적안정도를 산출하였다. 공시체는 실내에서 제작한 혼합물로 공극률 4±0.5%의 가로 30cm, 세로 30cm, 높이 5cm인 공시체를 제작하여 24시간 양생 후 60℃에서 휠 트랙킹 시험을 수행하였다.

4. 실험결과

4.1. 마샬안정도 시험 결과

믹서 추가에 따른 현장가열 재생 아스콘의 품질 개선 효과를 평가하기 위해 아스팔트 혼합물의 강도 기준인 마샬안정도를 측정하였다. 사용된 재료는 공주와 진주 시공 현장에서 아스팔트 혼합물을 채취하여 시험을 수행하였으며, 추가된 믹서의 효과를 비교 분석하기 위해 현장 가열 재생 아스팔트 포장 장비에 추가된 믹서를 통과한 시료와 통과하지 않은 시료로 구분하여 시험을 수행하였다. 국토교통부 아스팔트 콘크리트 포장 시공 지침에 따르면 국내 아스팔트 혼합물 마샬안정도 기준은 7,500N 이상으로 정해져 있다(MOLIT, 2017). Fig. 8은 추가 믹서를 통과하기 전후 공시체의 마샬안정도 시험결과를 보여준다. Fig. 8에서 나타낸 것과 같이 진주와 공주 현장에서 채취한 시료는 추가 믹서를 통과 여부와 관계 없이 모두 국토교통부 아스팔트 혼합물 마샬안정도 기준을 만족하였다.

또한 믹서기 추가로 인한 마샬안정도의 변화를 살펴보면, 추가된 믹서를 통과한 아스팔트 혼합물의 마샬안정도가 다소 증가한 경향을 보였다. 이는 믹서 추가로 인해 재생첨가제 및 신규 아스팔트 혼합물이 충분히 혼합된 결과로 판단된다.

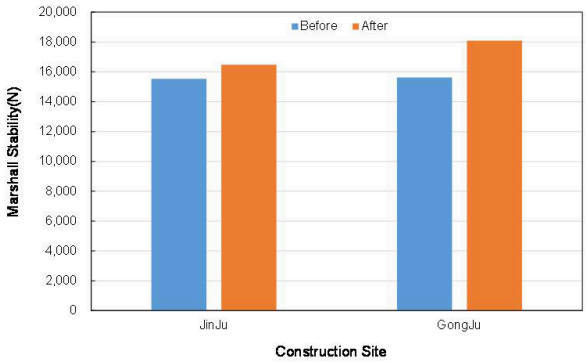

Fig. 8 Marshall Stability as Function of Mixing Procedure

4.2. 수분민감성 평가 결과

최근 국내에서는 아스팔트 포장에서의 포트홀 발생 증가로 인해 수분에 대한 저항성에 관심이 높아지고 있다. 포트홀은 강우 또는 강설과 같은 수분이 아스팔트 포장내에 침투하면서 골재와 아스팔트 피막 사이의 점착력 또는 접착력 등이 약해지거나, 골재를 덮고 있는 아스팔트가 벗겨져 나타나는 파손이기 때문이다. 이에 국토교통부에서도 2014년 수분저항성 평가를 위한 간접인장강도를 아스팔트 혼합물의 품질기준으로 추가하였으며, 현재에는 간접인장강도비 기준을 0.80으로 규정하고 있다. 본 연구에서도 현장 가열 재생 아스팔트 혼합물에 대한 수분손상 저항성 평가를 위해 간접인장강도비 시험을 수행하였다.

간접인장강도비 시험결과, Table 3에서 보여주고 있는 것과 같이 추가 믹서를 통과하기 전후 혼합물의 간접인장강도가 0.85로 국토교통부 기준인 0.80을 만족하

Table 3. Indirect Tensile Strength Ratio

Type of mixture	Criteria	Measured indirect tensile strength		Strength ratio
Before additional mixing	0.8	Dry condition	0.76	0.85
		Wet condition	0.65	
After additional mixing		Dry condition	0.73	0.85
		Wet condition	0.62	

였다. 다만, 추가 믹서 통과 여부와 관계없이 간접인장강도비는 0.85로 일정하였다. 이는 추가 믹서 설치 여부는 수분 저항성에 큰 영향을 미치지 않은 것으로 판단된다.

4.3. 터프니스 측정 결과

믹서 추가로 인한 현장 가열 재생 아스팔트 혼합물의 균열저항성 평가를 위해 진주 및 공주 시공현장에서 채취한 아스팔트 혼합물에 대하여 터프니스를 측정하였다. 일반적으로 아스팔트 혼합물의 균열저항성을 나타내는 기본적인 인자로 터프니스가 활용된다. 본 연구에서 수행한 터프니스 시험결과는 다음 Fig. 9와 같다. 현재 국토교통부 "아스팔트 콘크리트 포장 시공 지침"에서는 아스팔트 혼합물의 터프니스를 8,000N·m 이상으로 규정하고 있으며, 믹서 추가 여부와 관계없이 진주와 공주 현장의 현장 가열 재생 아스팔트 혼합물 모두 국토교통부 터프니스 품질기준을 만족하였다. 추가 믹서의 통과 여부에 따른 결과를 비교해 보면, 추가 믹서를 통과한 아스팔트 혼합물의 터프니스가 다소 낮은 값으로 측정되었다. 기존 문헌에 따르면 순환골재의 함량 증가는 파괴 에너지(fracture energy)를 감소시키고, 혼합물의 파괴 터프니스(fracture toughness)를 증가시키는 것으로 보고되고 있다(MnRoad, 2013). 이는 순환골재 노화에 따른 강성의 영향이라 판단된다. 따라서, 추가로 설치된 믹서기를 통하여 재생첨가제, 신규아스팔트 혼합물, 그리고 순환골재가 잘 혼합되면서 노화된 아스팔트 혼합물이 보다 회복이 원활히 이루어진 것으로 판단된다.

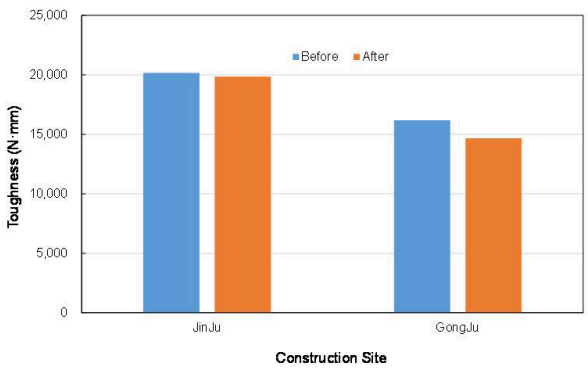

Fig. 9 Toughness Result

4.4. 간접인장강도 결과

교통하중으로 인하여 발생하는 인장력에 의한 균열 저항성 평가를 위해 간접인장강도를 측정하였다. 간접인장강도 측정결과는 Fig. 10과 같다. 국토교통부 아스팔트 콘크리트 포장 시공 지침에서는 간접인장강도의 기준을 0.8N/mm²으로 규정하고 있다. Fig. 10에서 보인 바와 같이 추가 믹서 통과 여부와 관계없이 모든 공시체가 국토교통부의 기준을 상회하는 것으로 분석되었다.

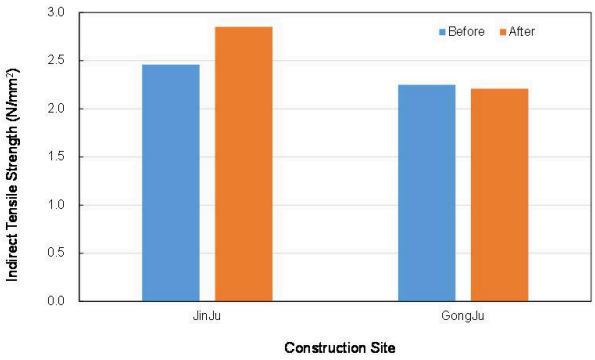

Fig. 10 Test Result of Indirect Tensile Strength

4.5. 변형강도 측정 결과

국토교통부 아스팔트 콘크리트 포장 시공 지침에는 아스팔트 혼합물의 강도기준으로 마샬안정도와 변형강도를 기준으로 제시하고 있다. 변형강도는 실제 타이어 모양의 하중 봉을 공시체에 가하여 소성변형을 예측하는 시험방법으로 알려져 있다. 본 연구에서는 현장 가열 재생 아스팔트 혼합물에 대한 소성변형 저항성을 예측하기 위해 마샬안정도 뿐 아니라 변형강도 시험도 병행하였다. 변형강도 시험 결과는 Fig. 11과 같다. Fig. 11에서 나타낸 바와 같이 공주, 진주 시공 현장에서 채취된 모든 공시체가 추가 믹서 통과여부와 관계 없이 모두 국토교통부 기준인 4.25MPa를 만족하는 것으로 나타났다. 또한 추가 믹서를 통과한 공시체가 통과하지 않은 믹서의 변형강도보다 상승하는 경향을 보였다.

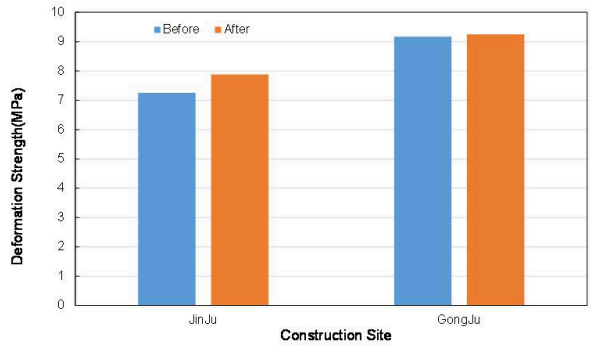

Fig. 11 Deformation Strength

4.6. 휠 트랙킹 시험 결과

차량하중에 의한 아스팔트의 소성변형 저항성을 평가하기 위하여 휠 트랙킹 시험을 통하여 소성변형(Rut

depth)와 동적안정도를 측정하였으며, 시간에 따른 소성변형 거동은 Fig. 12와 Fig. 13과 같다. Fig. 12는 진주현장에서 채취한 시료 샘플에 대한 소성변형 거동을 나타내고 있으며, Fig. 13은 공주현장에서 채취한 시료 샘플에 대한 소성변형 거동을 나타내고 있다. 전체 러팅 깊이는 2.5mm 이하로 발생하였으며, 추가 믹싱을 한 혼합물이 혼합전보다 최종 러팅 깊이가 다소 높게 나오는 경향을 확인할 수 있었다. 이는 재생첨가제 분산으로 인하여 열화되어 단단해진 아스팔트 바인더가 다소 부드러워짐으로 인하여 러팅 깊이는 다소 증가한 것으로 판단된다. Table 4는 동적안정도 계산 결과를 나타내고 있다. 국토교통부 시공지침에 따르면 내유동성 아스팔트 혼합물의 동적안정도는 3,000(회/mm) 이상으로 규정하고 있으며, 모든 혼합물의 동적안정도 기준인 3,000(회/mm)를 초과하였으며, 최종 러팅깊이 측정 결과와 다르게 추가 믹싱에 의하여 동적안정도가 개선되는 효과를 확인할 수 있었다. 공주 현장 공시체가 진주 현장 샘플보다 추가 믹싱 전에 우수한 경향을 나타내었으나, 믹서 이후에는 진주 현장 시료가 더 우수한 경향을 나타내었다. 하지만, 공주의 경우, 믹서 전후 동적안정도의 변화가 없었으나, 진주의 경우 동적안정도가 크게 개선됨을 확인하였다. 이는 추가 믹싱으로 인하여 부족했던 믹싱시간 확보를 통하여 혼합물의 동적안정도가 개선됨을 의미한다.

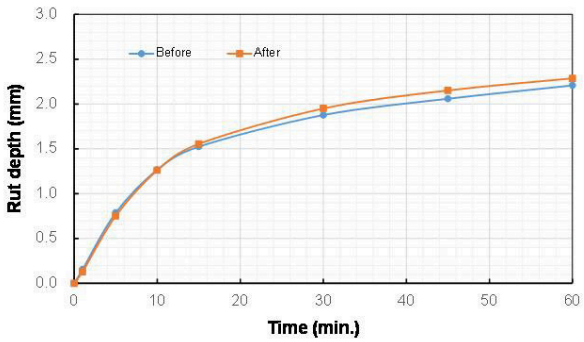

Fig. 12 Behavior of Wheel Tracking Test Result at JinJu

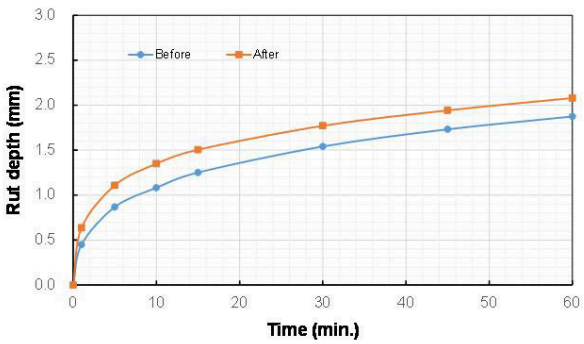

Fig. 13 Behavior of Wheel Tracking Test Result at GongJu

Table 4. Test Resutl of Dynamic Stability

Site	Criteria (cycle/mm)	Before	After
JinJu	3,000	3,658	5,063
GongJu		4,437	4,661

5. 결론

본 논문에서는 국내에서 적용되고 있는 현장가열 표층 재생공법 공정 중 재생첨가제 및 신재 아스팔트와 폐 아스팔트와의 혼합정도를 개선하기 위한 목적으로 믹서기 추가에 따른 현장 가열 재생 아스팔트 혼합물 물성의 성능 개선 효과를 분석하기 위해 공주와 진주 두 현장에서 채취한 시료를 활용하여 마샬안정도, 간접인장강도, 터프니스, 변형강도 및 동적안정도 등 실내 평가를 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1. 진주와 공주 두 시공 현장에서 추가로 설치된 믹서기를 통과하기 전 시료와 통과한 시료에 대한 마샬안정도, 변형강도, 동적안정도 등 모두 국내 기준을 만족하는 결과를 확인하였다.
2. 추가로 설치된 믹서를 이용한 추가 믹싱 전 혼합물과 믹싱 후 혼합물에 대한 혼합물 성능 개선 정도는 크지 않았다. 다만, 변형강도와 마샬안정도의 경우 추가로 설치된 믹서기로 추가 혼합을 한 혼합물의 측정값이 다소 향상되는 경향을 나타내었다.
3. 현장에 따라서 동일 실험에 대한 추가 믹싱에 따른 실험결과 값의 경향이 반대로 나타나는 경향을 나타내었다. 이를 통해 기존 포장의 노화도의 차이와 동일하지 않고 다소 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 현장 시료를 바탕으로 수행한 연구결과로 샘플의 변화에 대한 영향도 있다고 판단된다.
4. 추가 믹싱을 한 혼합물에 대한 동적안정도는 모두 개선되는 경향을 나타내었으나, 최종 소성변형 깊이는 추가 믹싱한 혼합물이 다소 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 실제 발생하는 최종 소성변형 깊이와 동적안정도의 경향이 상이함으로 향후 소성변형 평가에 이러한 문제점을 반영할 방안 마련이 필요하다고 판단된다.
5. 현장가열 재생 포장공법에 추가로 설치된 믹서기는 재생첨가제, 신규 혼합물 그리고 현장 재생 아스팔트 혼합물에 대한 최종 도로에 포설되는 현장가열 재생 혼합몰의 성능을 다소 개선하는 효과가 있다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 교통물류연구사업 "온실가스 배출 최소화를 위한 친환경 포장도로 연구"의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 분들께 감사드립니다.

REFERENCES

Jang, Jae-Moung., Choi, Hee-Bok., Kang, Kyung-In. (2003). A Study on the Method Applying Construction Wastes of Construction in Korea, *Journal of the Architectural Institute of Building Construction*, Vol. 3, No. 1, pp.147-154.

Korea Environment Corporation (KEC) (2014). *Status of waste generation and disposal nationwide.*

Korea Institute of Public Administration (KIPA) (2008). *Analysis on the Regulatory Impact of the Revision of the Act on the Promotion of Recycling of Construction.*

Kwon, Sooahn., Yang, sunglin. Lee, Jaejun., Hong, Jaecheong. and Lim, Jaekyu (2013). A Case Study of Hot In-Place Recycling Asphalt Mixture in Korea, *International Journal of Highway Engineering*, Vol. 15 No. 1 : 57-63.

Ministry of Environment (ME) (2016). E*nforcement of the Act on the Promotion of Recycling of Construction Waste.*

Ministry of Environment (ME) (2011). *Excellent utilization casebook of Recycle aggregate and recycled asphalt.*

Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2017). *Guidelines for Asphalt Concrete Pavement Construction.*

MnRoad (2013). *Recycled Asphalt Pavement: Study of High RAP Mixtures for County Roads*, MnRoad, USA.

NCHRP (National Cooperative Highway Research Program) (2011). *Recycling and Reclamation of Asphalt Pavements Using in-Place Methods*, National Cooperative Highway Research Program, Report 421.

Terrel, L. Ronald and Hicks, R. Gary. (2008). *Viability of Hot In-Place Recycling as a Pavement Preservation Strategy*, California Pavement Preservation Center.