Int. J. Highw. Eng. Vol. 20 No. 4 : 7-13 AUGUST 2018
https://doi.org/10.7855/IJHE.2018.20.4.007

고속축중기 시스템의 도입을 위한 고기능 아스팔트 혼합물 및 에폭시의 내구성 평가

Evaluating Rutting Performance of High-Durability Asphalt Concrete Mixtures and Epoxy Used for Installation of High-Speed Weigh-In-Motion System

권 홍 준 Kwon, Hong Jun | 정회원 · 한국도로공사 도로교통연구원 박사후연구원 (E-mail : hj_kwon@ex.co.kr)
이 종 섭 Lee, Jong Sub | 정회원 · 한국도로공사 도로교통연구원 선임연구원 (E-mail : jlee@ex.co.kr)
권 오 선 Kwon, Oh Sun | 정회원 · 한국도로공사 도로교통연구원 선임연구원 (E-mail : pooh2461@ex.co.kr)
권 순 민 Kwon, Soon Min | 정회원 · 한국도로공사 도로교통연구원 책임연구원 · 교신저자 (E-mail : soonmini2@ex.co.kr)

ABSTRACT

PURPOSES : In order to apply high-speed weigh-in-motion (HS WIM) systems to asphalt pavement, three high-durability asphalt concrete mixtures installed with a WIM epoxy are evaluated.

METHODS : In this study, dynamic stability, number of loading repetitions to reach the rut depth of 1 mm, and rut depth measurements of three asphalt mixtures at 60℃ were compared using an Asphalt Pavement Analyzer (APA). Laboratory-fabricated material and field core samples were prepared and tested according to KS F2374.

RESULTS : Through the laboratory tests, it was found that all three modified asphalt mixtures (stone-mastic, porous, and semi-rigid) with WIM epoxy showed favorable permanent deformation results and passed the dynamic stability criterion of 3000 loading repetitions per 1 mm. In addition, it was confirmed that the modified SMA mixtures cored from the field construction yields satisfactory rutting testing results using the APA. Finally, the epoxy used for the HS WIM installation shows good adhesion with the three asphalt mixtures and permanent deformation resistance.

Keywords
high-speed WIM, asphalt pavement, epoxy, asphalt pavement analyzer test, rutting performance

Corresponding Author : Kwon, Soon Min, Deputy Research Director, Ph. D.
Transportation Research Division, Research Institute, Korea Expressway Co.,
208-96 Dongbu-daero 988beon-gil, Dongtan-myeon, Hwaseong-si,
Gyeonggi-do, 18489, Korea
Tel : +82.31.8098.6337 Fax : +82.31.8098.6339
E-mail : soonmini2@ex.co.kr

International Journal of Highway Engineering
http://www.ksre.or.kr/
ISSN 1738-7159 (Print)
ISSN 2287-3678 (Online)
Received May. 28. 2018 Revised May. 28. 2018 Accepted Jul. 27. 2018

1. 서론

고속도로의 구조물 보호 및 차량 통행의 안전을 위해 한국도로공사는 도로법 제 77조 및 시행령 제 80조 2항에 근거하여 고속도로에 진입하는 차량의 중량을 측정할 수 있는 다양한 단속 장비들을 도입하여 과적 차량을 규제하고 있다. 저속축중기를 비롯한 이동식축중기, 계중기 등 단속 장비들은 고속도로의 역사와 함께 기술적으로 끊임없이 발전해왔다. 과적 차량의 대표적인 단속

장비인 저속축중기는 1979년 7월 경주영업소에 최초로 도입한 이래 현재까지 전국 300여개 영업소의 400여 차로에 설치되어 운영 중이다.

하지만 저속축중기는 중량 측정 시 차량의 정지 또는 서행이 필요하며 이로 인해 본선에서는 운영이 어려운 한계를 가지고 있다. 반면, 고속축중기는 정상운행속도로 달리고 있는 차량의 중량을 고속도로 본선에서 바로 측정할 수 있는 장치이다. 이를 위한 고속축중기의 구성은 12종의 화물 차종의 정보와 속도를 처리하는 루프센서, 축하중과 총중량 정보를 처리하는 축중센서, 센서의 측정값을 보정하는 원더링 센서, 차량번호를 자동으로 인식할 수 있는 차량번호인식시스템(AVI 카메라), 그리고 차량의 초과 중량과 번호 정보 등을 표출할 수 있는 도로전광표지(VMS)로 이루어져 실시간으로 과적 차량을 단속하는 시스템이다.

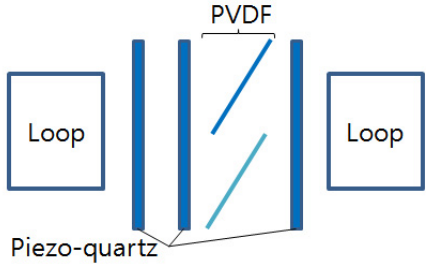
고속축중기는 포장체 내에 매설되어 단일체로 거동하는 구조로 설치 시 센서 응답신호의 균질성, 포장의 공용성능, 그리고 센서와 포장 사이 에폭시의 내구성 및 접착력 등을 고려한다. 국내에서는 강성 포장(무근 콘크리트 포장)을 권장하고 있는데, 2010년 이후 시범설치 및 운영되고 있는 고속도로 무인 과적 시범시스템 7개소는 모두 콘크리트 포장에 설치되어 있다. 또한 FHWA에서는 콘크리트 포장이 아스팔트 포장에 비해 축중기 운용에 유리하다고 알려져 있으나 실내 및 현장 시험을 통해 비교한 결과, 아스팔트 포장의 축중기 신호의 표준편차가 콘크리트 포장에 비해 적은 것으로 보고되었다(P. Szary & A. Maher, 2009).

또한 국내 고속도로 구간의 1/3 이상이 아스팔트 포장으로 되어 있으며 그 비율은 증가하고 있다. 강성포장과 달리 아스팔트 포장은 소성변형에 취약한데, 근래에는 SMA 등의 소성변형에 강한 재료가 확대되고 있는 추세이다. 이러한 포장 환경의 변화에 대응하여 고속축중기의 활용범위를 넓히고자 아스팔트 포장에 대한 적용성(소성변형 저항성)을 평가하고자 하였다.이를 위한 동적안정도 시험(Asphalt Pavement Analyzer Test)을 위해 소성변형에 강한 대표적인 아스팔트 표층재료 3종에 대해 실내시편을 제작하였다. 또한 현장의 고속축중기 시공 위치로 선정된 구간의 아스팔트 표층 코어를 채취하여 지그를 이용한 시편을 제작하였다.

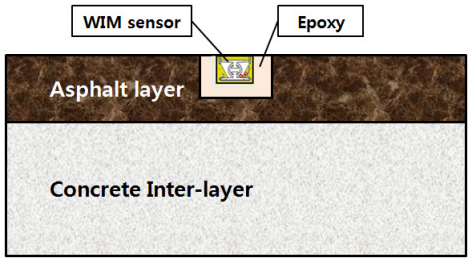
2. 고속축중기 시스템 구성 및 설치

본 연구에서 검토한 고속축중기 시스템의 구성과 설치방식은 Fig. 1과 같다. 센서 구성은 축중센서(Piezo-quartz), 루프센서, 차륜위치판독센서(PVDF)로, 축중센서는 차량의 하중에 의한 포장체의 변형량을 측정하여 하중으로 변환한다. 또한 루프센서는 차량의 진출입을 감지하고, 차륜위치판독센서는 통과하는 차량의 차선 내 횡방향 이동을 감지하는 기능을 한다.

시스템 설치는 Fig. 1(b)와 같이 표층의 일정 깊이를 절삭한 후 센서를 에폭시와 함께 매설하며, 이 때 포장 표면에 센서의 한 단면이 드러나도록 하여 검측 차량의 타이어와 닿도록 한다.



(a) Layout of HS-WIM Sensor



(b) Installation of WIM Sensor

Fig. 1 Installation Method of HS-WIM on AC Pavement

3. 아스팔트 혼합물 내구성 평가

3.1. 내구성 평가 대상

본 연구에서는 소성변형에 강한 것으로 알려진 고기능 아스팔트 혼합물 3종(개질 SMA, 배수성, 반강성 재료)에 대해 동적안정도 시험을 실시하여 소성변형 저항성을 비교하였다. 이를 위해 재료별 시편을 제작(개질 SMA의 경우 실내시편 외에 현장재료 추가 시험)하였고, 재료별 바인더 등급 및 아스팔트 함량은 Table 1과 같다.

Table 1. High Durable AC Mixes Used in This Study

Content	AP Binder / %	Note
Stone-mastic	PG 76-22 / 7%	Field Core test
Porous	PG 82-22 / 5%	
Semi-rigid	PG 82-22 / 5%	Cement Milk

SMA(Stne Mastic Asphalt)는 골재의 맞물림 효과를 최대로 하여 고온 및 중차량 조건에서 소성변형에 대한 저항성이 우수한 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 PG 76-22 바인더에 폴리머 계열 개질제를 첨가하여 더 높은 내구성 및 소성변형 저항성을 확보하고자 하였다.

배수성 재료는 포장의 투수성능을 높여 우천 시 주행 안정성을 확보하기 위한 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 PG 82-22 바인더를 사용하여 10mm 골재 87%, 잔골재 9%, 필러 4%의 입도분포와 아스팔트 함량 5%, 공극률 23.2%인 혼합물을 적용하였다.

반강성 재료는 아스팔트 포장의 연성과 시멘트 콘크리트 포장의 강성 및 내구성을 복합적으로 활용하기 위한 것으로 알려져 있다. 일반적으로 공극이 큰 포장체에 시멘트를 주 성분으로 하는 특수 에폭시를 주입하는 방식으로 본 연구에서는 배수성 재료와 같은 아스팔트 혼합물(동일한 입도, 바인더 사용)에 속경성 시멘트 바인더와 물의 혼합으로 사용되는 시멘트 밀크 주입재를 활용하였다.

3.2. 아스팔트 혼합물의 동적안정도 시험

시험 방법은 KS F2374에 의거하여 실시하였고, 이를 통해 최대 변형량과 동적안정도를 산출하였다. 시험 전에 시편을 항온실에 넣어 시편 중심의 온도를 60±0.5℃에 맞춘 후 시험 차륜 하중을 686N으로 맞추어 적용하였고, 하중을 직진으로 왕복 주행시켜 시간에 따른 변형량을 측정하였다.

Fig. 2와 같이 동적안정도 시험 중 변형량은 레이저 프로파일을 통해 차륜의 주행 범위에서 측정하였으며 최초 중심부를 통과한 시점을 기준으로 통과 횟수가 2,520회(60분 소요)에 이르기까지 침하 깊이를 mm단위로 기록하였다.

동적안정도(DS, Dynamic Stability)는 침하 깊이가 1mm 발생하는데 소요되는 시험 차륜의 통과 횟수로서 Eq. (1)을 통해 구하였다.

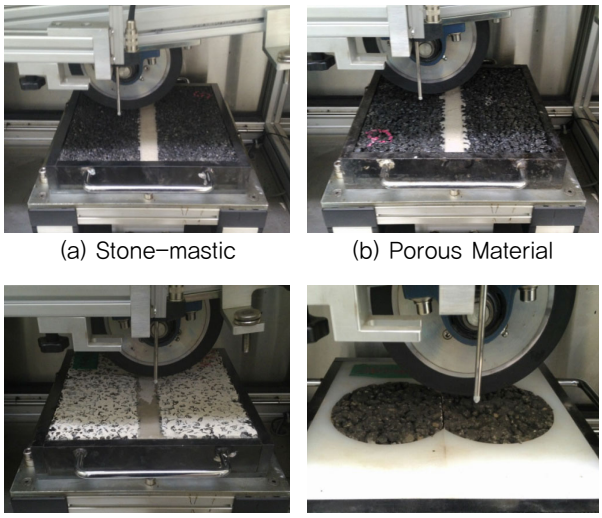
$$DS = 42 \times \frac{t_{60} - t_{45}}{d_2 - d_1} \times C \qquad (1)$$

여기서, DS : 동적 안정도(회/mm)

d_1 : t_{45}(45분)에서의 변형량(mm)

d_2 : t_{60}(60분)에서의 변형량(mm)

C : 크랭크에 의한 변속 구동형 시험기를 사용한 경우 보정계수=1.0, 크랭크 방식



(a) Stone-mastic (b) Porous Material

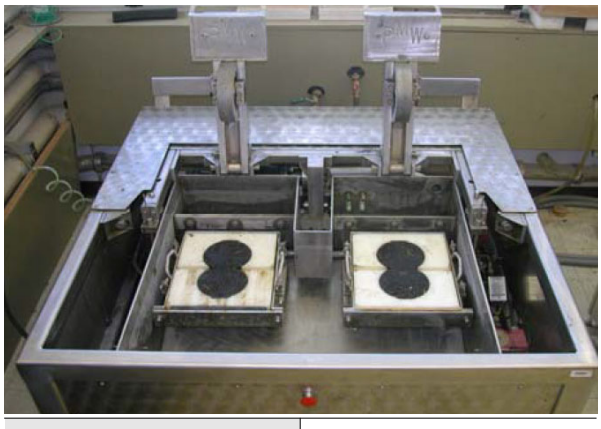
(c) Semi-rigid Material (d) Field Core (SMA)

Fig. 2 APA Test without Water Submersion

3.3. 해외 사례

미국의 TTI(Texas Transprtatin Institute)에 따르면, 고속축중기를 신설 또는 기존 포장에 설치할 경우 필요한 가이드를 제시하기 위해 다양한 검토를 하였다. 그 중 포장 재료에 대한 연구내용을 살펴본 결과, 대상 아스팔트 포장구간의 코어를 채취하여 휠 트래킹 시험 등을 통해 재료의 내구성을 비교하였다(E. G. Fernand et al., 2009).

TTI의 휠 트래킹 시험 방법은 50℃로 온도를 맞춘 시편에 차륜하중(705N)의 통과횟수 20,000회 동안의 소성변형량(Rut Depth, mm)을 비교하였다. 소성변형량이 임계치인 12.5mm에 도달하거나 일정 이상의 하중에도 임계치에 도달하지 않을 경우 시험을 종료하였는데 아스팔트 바인더별로 제시된 통과횟수 기준은 Fig. 3과 같다(T. Scullin, 2006).



Number of load repetition	• PG 76-xx : 20,000 • PG 70-xx : 15,000 • PG 64-xx : 10,000

Fig. 3 Wheel Tracking Test Device in TTI (T. Scullion, 2006)

해당 연구에서는 현장에서 코어링을 통해 시편을 채취하였으며, 채취한 현장코어를 Fig. 4와 같은 고정 지그와 결합시켜 휠 트래킹 시험에 활용하였다. 본 연구에서도 이와 같은 지그를 현장재료의 시험에 활용하였다.

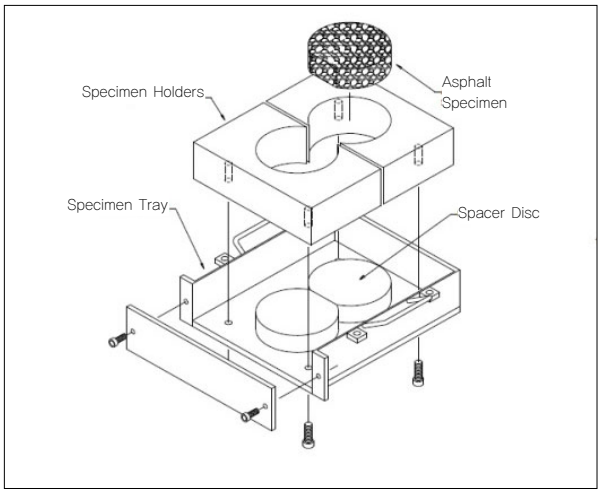


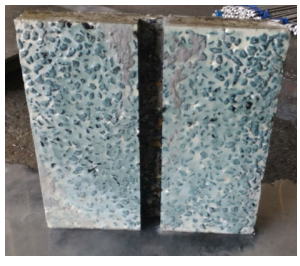
Fig. 4 Mold of APA Test for Field Core (AASHTO T324)

TTI에서는 고속축중기 설치 대상구간의 아스팔트 포장으로 SMA를 검토하였는데, 이를 위해 여러 곳의 코어를 채취하여 현장재료의 내구성을 비교하였다. 휠 트래킹 시험 결과, PG 76-22 바인더를 사용한 모든 현장의 재료가 20,000회의 차륜하중에도 12.5mm 이하의 소성변형이 발생하여 통과횟수 기준을 만족하였다고 언급하였다.

3.4. 실내시편 시험

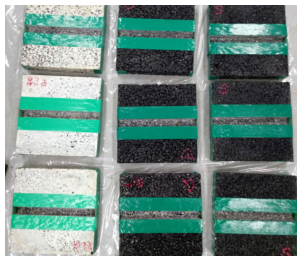
3종의 고기능 아스팔트 혼합물에 대한 동적안정도 시험을 위해 Fig. 5와 같이 시편을 재료 당 3개씩 제작하였다. 사각형 모판 형태(가로 300mm, 세로 300mm, 두께 50mm)로 제작하였고, 고속축중기 매설상태를 모사하기 위하여 재료 다짐 후 시편 상부 중앙에 폭 30mm, 길이 300mm, 두께 30mm로 정밀 커팅하여 센서용 에폭시를 주입하였다. 본 실험에서는 국내 고속축중기 현장에 적용된 것과 동일한 재료를 사용하였다.

(a) Cutting



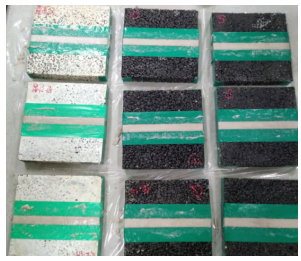
(b) After Cutting

(c) Mixing Epoxy



(d) Before Filling

(e) Fill the Gap with Epoxy



(d) Final Fabricated Specimen

Fig. 5 Specimen Fabrication Procedure

본 연구에서의 시편은 3.2절에서 언급한 KS F2374에 준하여 제작하였으나 시편 중앙에 에폭시가 주입되어 있다. 이로 인해 소성변형이 최대로 발생한 지점이 일반적인 차륜하중 주행 위치의 중심이 아닌 에폭시 좌우측 면으로 분산되었으며, 이러한 패턴은 Fig. 6과 같이 나타나는 것으로 확인되었다.

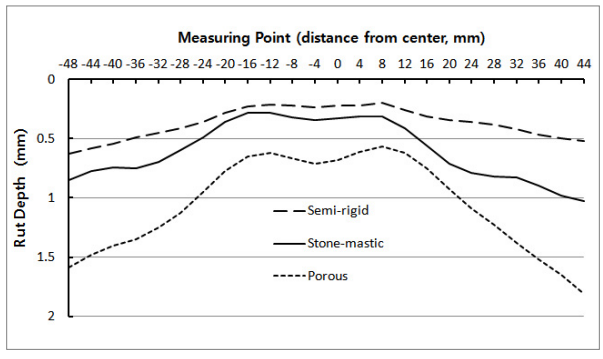


Fig. 6 Surface Profile After APA Test

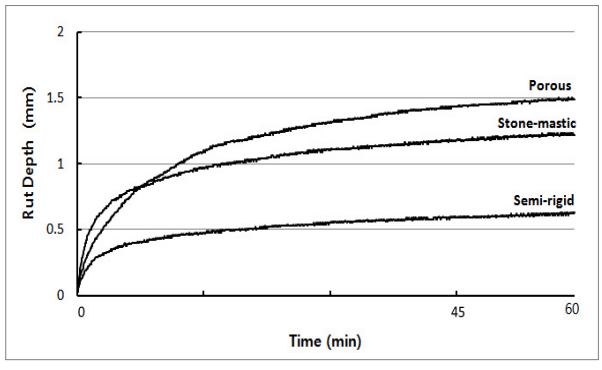


Fig. 7 Rut Depth Results of AC Mixes with Epoxy

시편의 최대 변형량 발생지점을 감안한 소성변형량 측정은 Fig. 7과 같은 방식으로 이루어졌다. 이러한 추세로 발생한 시편 별 소성변형을 이용하여 동적안정도를 산출하였고, 그 결과는 Table 2와 같다. KS F2374에 의하면 평균 동적안정도가 높을 경우 '6,000회 이상'으로 표시하나, 본 연구에서는 상대적인 비교를 위해 실제 횟수를 표시하였다. 단, 재료별 3개의 시편 중 안정적으로 시험이 완료된 각 2개의 결과를 비교하였다.

Table 2. DS and Rut Depth Results of Three Mixes with Epoxy

Content		DS (No. of pass/mm)		Rut depth (mm)
		Result	Average	
Stone -mastic	1	15,750	14,175	1.03
	2	12,600		1.22
Porous	1	7,875	8,438	1.81
	2	9,000		1.49
Semi -rigid	1	21,000	26,250	0.63
	2	31,500		1.29

3.5. 현장코어 시험

현장재료 시험을 위한 시편은 호남선과 당진영덕선의 연구용 고속축중기 설치 구간에서 채취하였다. 두 지점 모두 개질 SMA 재료를 표층으로 사용하고 있으며, 고속축중기의 아스팔트 포장 적용을 검토하기 위한 시험 시공 구간이다.

현장코어는 차로의 중앙과 차륜부에서 채취하였다. Fig. 8과 같이 시험을 위한 1개의 시편은 2개의 코어를 필요로 한다. 코어를 지그에 고정시킨 시편을 호남선 A현장 4개(중앙 2, 차륜부 2), 당진영덕선 B현장 3개(중앙 1, 차륜부 2) 제작하였다.

현장코어 시편은 실내시편과 구조가 달라 중앙에 에폭시로 인한 프로파일의 변수는 없으나 코어 2개 사이의 경계로 인해 소성변형이 시편의 중앙에서 최대로 발생하지는 않는 것으로 나타났다. 이러한 상황을 감안하여 소성변형을 측정하였고, Table 3과 같이 시편 별 소성변형을 이용하여 동적안정도를 산출하였다.

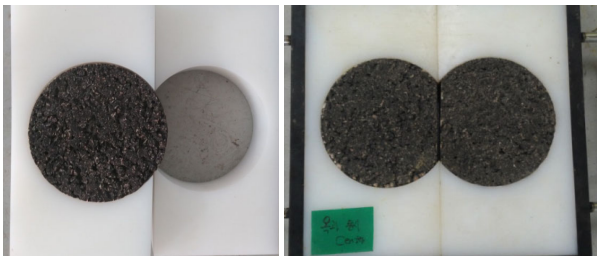


Fig. 8 Field Core Sample Fitted in APA Mold

Table 3. APA Test Results with Field Cores of SMA Mixes

Content (C# : Center, W# : Wheel path)			DS (No. of pass/mm)		Rut depth (mm)
			Result	Average	
SMA	A	C1	6,300	6,037	1.53
		C2	6,300		1.48
		W1	5,250		2.08
		W2	6,300		1.74
	B	C1	5,727	6,342	1.60
		W1	7.000		1.64
		W2	6,300		1.82

4. 내구성 평가 결과

4.1. 재료간 비교

동적안정도 시험 결과를 통해 고기능 아스팔트 혼합물간의 소성변형 저항성을 비교한 결과는 다음과 같다.

Table 2에 나타난 실내시편 시험 결과를 통해 반강성 포장의 소성변형 저항성이 가장 높게 나타났다. 공극이 20% 이상인 배수성 포장에 시멘트 밀크를 주입하여 제작한 반강성 포장의 시편은 강도와 내구성 측면에서 개질 SMA와 배수성 포장보다 좋은 결과가 도출된 것으로 판단된다.

또한 개질 SMA와 배수성 포장은 반강성 포장에 비해 상대적으로 낮으나 고속도로 전문시방서(2012)에 제시된 신설 포장의 각 재료별 동적안정도 기준인 3,000회/mm보다 2배 이상 높은 결과가 도출되었다. 이를 통해 세 가지의 재료가 모두 충분한 소성변형 저항성을 가진 것으로 판단된다.

4.2. 현장재료 소성변형 검토

현장에서 코어(직경 150mm)를 채취하여 실내에서 동적안정도 시험을 실시하였다. A현장과 B현장의 아스팔트 표층은 개질 SMA로 같은 혼합물이며, 두 현장 모두 동적안정도와 소성변형량에서 유사한 평가 결과가 도출되었다. 코어를 채취한 중앙부와 차륜부 재료의 소성변형 저항성에 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

개질 SMA의 경우 폴리머 계열 개질제를 첨가하여 일반 밀입도, 일반 SMA보다 더 높은 내구성 및 소성변형 저항성을 나타낸다. 현재, 국내 고속도로에서는 개질 SMA가 차지하는 비율이 점점 증가하는 추세이며 신설 구간이나 유지보수 구간에서는 거의 대부분 개질 SMA를 사용하고 있다. 반면, 위 실내시험에서 적용된

혼합물 중 배수성 포장의 경우는 현재 고속도로 중 150km 정도 적용되어 있으며 반강성 포장의 경우는 경제성 및 시공성 뿐만 아니라 적용하게 되는 현장여건 측면에서 제약이 많은 상태이다.

고속도로 전문시방서(2012)에 의하면, SMA 포장(PG 76-22)의 동적안정도 기준은 2,500회/mm 이상이어야 한다. Table 3의 현장코어 시험 결과와 비교해 보았을 때, 기준의 2배 이상으로 동적안정도 값이 높게 나타났다. 이러한 결과로 보아, 개질 SMA 포장의 소성변형 저항성이 일반 SMA 포장보다 높은 것을 확인할 수 있었으며 개질 SMA 포장에 고속축중기를 적용하는데 소성변형 측면에서 양호할 것으로 판단된다.

4.3. 에폭시 소성변형 검토

HS-WIM 센서 매설에 사용되는 에폭시를 동적안정도 시험을 통해 소성변형 측면에서 검토한 결과는 다음과 같다. Fig. 9와 같이 시편 중앙에 30mm 폭으로 위치한 에폭시는 재료와 함께 변형이 발생하였는데, 에폭시 자체의 변형은 주변 재료에 비해 작은 것으로 나타났다. 이러한 경향은 모든 재료에서 동일하게 나타났으며, 실험 후 에폭시와 포장간의 접착상태가 양호하여 에폭시가 충분한 내구성을 가진 것으로 판단된다.

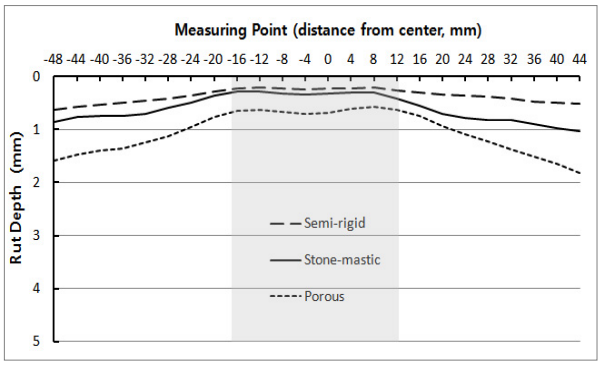


Fig. 9 Rut Depth Results of Epoxy with Three Mixes

에폭시와 포장 재료 간 소성변형의 크기에 차이가 있어 인접부의 소성변형 형태를 Fig. 9를 통해 검토하였다. 음영으로 표시한 에폭시 영역(30mm)에서 벗어날수록 변형이 커지는 형태이나 그 깊이가 1mm 이하로 충분한 내구성을 가진 포장에 적용한다면 센서 설치로 인한 단차의 우려나 승차감에 영향을 줄 가능성은 적다고 판단된다.

5. 결론 및 향후 연구과제

5.1. 결론

본 연구에서는 국내 고속도로 현장에 적용되고 있는 고기능 아스팔트 혼합물 3종의 실내시편과 개질 SMA 현장코어에 대해 동적안정도 시험을 실시하였다. 이를 통해 고속축중기 적용을 위한 아스팔트 포장 재료 간의 소성변형 저항성을 비교하고 현장 적용 시 고려사항을 검토하였다.

본 연구의 연구범위 내에서 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 실내시편에 대한 동적안정도 시험 결과, 소성변형 저항성은 반강성 재료 > 개질 SMA > 배수성 재료 순으로 나타났다. 또한 모든 재료가 고속도로 전문시방서에 제시된 동적안정도 기준(SMA 포장 2,500회/mm, 배수성 포장 3,000회/mm)을 초과하는 결과를 보여 소성변형 측면에서 양호한 것으로 분석되었다.
2. 현장코어에 대한 동적안정도 시험 결과, 두 현장의 개질 SMA 재료 모두 동적안정도 기준(2,500회/mm)을 초과하여 소성변형 측면에서 양호한 것으로 분석되었다.
3. 현장에 시범적용하기 위한 아스팔트 포장의 선정에 있어 고속도로 포장 시공현황 및 장래 수요(경제성 및 시공성)를 고려하여 고속축중기를 개질 SMA 포장구간에 설치하였다.
4. 고속축중기 센서 설치 시 사용되는 에폭시의 내구성 및 아스팔트 재료와의 적합성을 검토한 결과, 에폭시 자체의 내구성과 아스팔트 재료와의 접착은 양호한 것으로 분석되었다.

5.2. 향후 연구과제

본 연구는 고속축중기의 적용을 위해 재료의 내구성 측면에서 실험을 통해 분석하였다. 현재 국내에서 권장되는 포장형식은 콘크리트 포장으로, 이러한 배경에는 포장의 내구성뿐만 아니라 센서를 통해 수집되는 신호의 균질성과도 관련이 있다. 따라서 향후 아스팔트 포장에 실제로 적용을 하기 위해서는 온도에 민감한 아스팔트 포장 내 WIM 센서 신호에 대한 분석이 필요하다. 이러한 과정을 통해 고속축중기의 적용범위를 넓히고 안정적인 운영을 위한 의미있는 연구가 될 것으로 판단된다.

REFERENCES

AASHTO (2016). *AASHTO T 324-16 Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Hot Mix Asphalt(HMA)*, American Society of State Highway and Transportation Officials.

Fernand, E. G., et al. (2009). *Deplying Weigh-In-Motion Installations on Asphalt Concrete Pavements*, Research Report 0-5551-1, Texas Transportation Institute, The Texas A&M University System, College Station, TX, USA.

KEC (2012). *Expressway Construction Guide Specification*, Korea Expressway Corporation (in Korean).

KS (2017). *KS F 2374 Standard Test Method for Wheel Tracking of asphalt mixtures*, Korean Standards (in Korean).

Scullin, T. (2006). *Perpetual Pavements in Texas: State of the practice*, Research Report 0-4822-1, Texas Transportation Institute, The Texas A&M University System, College Station, TX, USA.

Szary, P. J., Maher, A. (2009). *Implementation of Weigh-in-Motion (WIM) Systems*, Final Report FHWA-NJ-2009-001, New Jersey Department of Transportation, USA.