Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection
Vol. 18, No. 1, January 2014, pp.119-127
http://dx.doi.org/10.11112/jksmi.2014.18.1.119

pISSN 2234-6937
eISSN 2287-6979

Sulfur Polymer Emulsion 및 보강용 섬유를 활용한 반강성 포장재의 공학적 특성

Engineering Properties of Semi-rigid Pavement Material Produced with Sulfur Polymer Emulsion and Reinforcing Fibers

이 병 재[1)] 서 지 석[2)] 노 재 호[3)] 김 윤 용[4)*]
Byung-Jae Lee Ji-Seok Seo Jae-Ho Noh Yun-Yong Kim

Abstract

The application of sulfur polymer emulsion (SPE) as an acrylate substitute for semi-rigid pavement grout was evaluated, and the performance improvement by employing PVA fibers were also evaluated. The result indicated that the filling ratio of semi-rigid pavement material decreased as the fiber content increased, but it was measured to be 92~94% in every mixing condition, which satisfies the target performance, 90%. The maximum Marshall stability value of semi-rigid pavement material was measured to be 25.4 kN, which is about 4.7 times higher than the Korean Standard required for semi-rigid pavement material, 5.0 kN. The dynamic stability evaluation of semi-rigid pavement material indicated that the resistance to deformation from the wheel tracking test was improved by an SPE substitution, and in every mixing condition, the deformation converged to a constant value after 45 minutes with the same dynamic stability of 31,500 times/mm. The strain at the flexural failure was about 0.53%, which shows superior rigidity to asphalt pavements. The examination of abrasion resistance and impact resistance showed that the loss ratio was 9.8~6.0% in every mixing condition, which indicates a good abrasion resistance. Also, when fiber content ratio was 0.3%, the impact resistance was 2.82 times higher compared to plain (i.e., when fibers were not added). In the limited range of this study, an SPE substitution ratio of 30% was found to be an optimal level considering the mechanical and durability performance. In addition, it is thought that semi-rigid pavement material with superior performance could be manufactured if fiber content ratio up to 0.3% is applied depending on the purpose of use.

Keywords : Semi-rigid pavement, Sulfur Polymer Emulsion, PVA fiber, Durability

1. 서 론

국내 도로의 총 연장은 105,931km로서 포장률은 80.4% (비포장 9.0%, 미개통 10.6%)에 이르며 이중 아스팔트 포장이 대부분인 86.8% (73,874km)를 차지하고 콘크리트 포장은 13.2% (11,246km)를 점유하고 있다 (MLTM, 2012).

이렇게 건설된 도로포장의 대부분을 차지하는 아스팔트 포장의 경우, 포장체가 가지고 있는 연성의 특징 때문에 중차량의 통행이 빈번하고 급제동 및 정차구간이 많은 구간에서는 소성변형이 유발된다. 또한 이상기온으로 잦은 겨울철 폭설은 많은 양의 제설제가 살포되고 이로 인하여 아스팔트 포장면의 내구성이 저하되어 표면이 변형되고 탈락되는 포트홀 (pot hole)이 생성됨으로서 주행성 저하 및 잦은 교통사고가 발생된다. 이러한 문제들로 인하여 구조물의 수명 단축 및 유지보수 비용 증가 등의 사회적인 문제로 대두되고 있다 (Park et al., 2010; Lee et al., 2013). 이를 극복하기 위한 방법으로서 아스팔트 모체에 시멘트 페이스트를 침투시켜 아스팔트의 강성을 보완할 수 있는 반강성 포장공법에 대한 연구가 국내·외에서 활발히 연구되어 적용되고 있다 (Park, 2008; Baek, 2010).

1) 정회원, 충남대학교 토목공학과 박사후 연구원
2) 정회원, 충남대학교 토목공학과 석사과정
3) 정회원, (주)제이엔티아이엔씨 대표이사
4) 정회원, 충남대학교 토목공학과 부교수, 교신저자

* Corresponding author : yunkim@cnu.ac.kr
• 본 논문에 대한 토의를 2014년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 2014년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

Copyright Ⓒ 2014 by The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0)which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

반강성 포장은 공극이 큰 개립도 타입의 반강성 포장용 아스팔트 혼합물에 시멘트 주입재를 충전한 포장방법이다. 이 포장방법은 아스팔트 포장의 연성과 콘크리트 포장의 강성 및 내구성을 복합적으로 활용하는 장점이 있다 (Setyawan, 2013). 하지만, 중차량이 통행하거나 급제동 및 급가속이 주로 이루어지는 교차로 등의 구간에 주로 포장되는 반강성 포장재의 경우 마모저항성 및 충격저항성 등의 고내구성능이 요구되지만 이에 대한 연구와 보강공법에 대한 검토가 없는 실정이다. 따라서 반강성 포장을 현장에 적용하기 위해서는 성능을 정량적으로 평가한 결과와 필요할 경우에 보강할 수 있는 성능 향상 기법에 대한 연구가 필요하다.

현재 반강성 포장공법 사용되는 주입재는 균열억제 등의 목적으로 아크릴레이트를 혼합하여 제조되는데, 아크릴레이트의 높은 비용으로 인하여 경제성이 낮은 단점을 가진다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 아크릴레이트를 대체할 수 있는 경제적인 재료로서 정유산업에서 연간 120만톤 이상 부산 (MKE, 2012)되는 유황을 에멀젼화한 유황폴리머에멀젼 (sulfur polymer emulsion, SPE)에 대한 연구가 수행된 바 있다 (Lee et al., 2013). 그러나 이 연구의 범위는 시멘트 주입재로서 성능 평가에 국한되어 있으므로 반강성 포장재의 공학적 특성 분석이 필요하다. 따라서 본 연구의 목적은 SPE를 주입시킨 반강성 포장재의 역학적 성능과 내구 성능을 평가하고, PVA (Ployvinylalcohol) 섬유를 혼입하였을 때에 향상되는 성능을 정량적으로 평가하는 것이다.

2. 사용재료 및 배합조건

2.1 아스팔트 모체

2.1.1 아스팔트

이 연구에 사용된 아스팔트는 국내 S사의 스트레이트 아스팔트인 AP-5를 사용하였으며, 물리적 특성은 Table 1과 같다.

2.1.2 골재

이 연구에서는 화강암질 부순골재를 아스팔트 혼합용 굵은골재 및 잔골재로 사용하였으며, 굵은골재는 최대치수 (G_{max})가 13mm인 것을 사용하였다. 굵은골재 및 잔골재의 물리적 특성은 Table 2와 같다.

2.1.3 채움재

아스팔트 혼합물에는 안정성과 내구성 향상의 목적으로 약 3~5%의 채움재가 사용되며, 이 연구에서는 국내 D사의 석회석 미분말을 사용하였으며, 물리적 특성은 Table 3과 같다.

2.1.4 아스팔트 배합조건

반강성 포장용 아스팔트 모체의 제조를 위하여 목표공극률 20%, 마샬안정도 5,000N 이상, 흐름값 30mm을 기준으로 하고, 개립도 아스팔트에 대한 마샬시험, 휠 트래킹시험, 칸타브로시험, 흐름시험 등의 사전실험을 통하여 배합을 설정하였다. 사전실험결과 최적배합 조건은 다음 Table 4에 나타낸 바와 같다.

2.2 시멘트 주입재

2.2.1 시멘트

이 연구에 사용된 시멘트는 반강성 포장재의 주입재로 제조시 조기강도 확보를 위하여 국내 J사에서 생산되는 밀도 2.7g/cm^3, 분말도 4,480cm^2/g의 초속경시멘트를 사용하였으며 초속경시멘트의 화학적 특성은 Table 5에 나타내었다.

2.2.2 아크릴레이트

이 연구에서는 반강성 포장재 주입재로 사용시 균열억제 등의 목적으로 시멘트 혼화용 제유화제 수지로서 아크릴공

Table 1 Properties of asphalt

Item	Softening point (℃)	Penetration (1/10mm)	Ductility (mm)	Density (g/cm^3)
AP-5	48.60	70	1,500 over	1.03

Table 2 Properties of aggregate

Item	Density in oven-dry condition (g/cm^3)	Absorption ratio (%)	Soundness ratio (%)	Fineness modulus (%)
coarse agg.	2.65	0.90	3.20	6.08
fine agg.	2.64	0.90	2.80	3.02

Table 3 Properties of filler

Item	Density (g/cm^3)	Flow (%)	Swelling ratio (%)	Water content (%)
lime powder	2.72	36	2	0.20

Table 4 Mix proportions of asphalt

Mix No.	Asphalt (%)	Coarse agg. (%)	Fine agg. (%)	Filler (%)
A-1	4.50	74.50	18.10	2.90

Table 5 Chemical composition of cement

Item	NaO_2	MgO	Al_2O_3	SiO_2	SO_3	K_2O
component ratio(%)	0.3	1.1	16.1	11.7	15.3	0.5
Item	TiO_2	Fe_2O_3	P_2O_5	CaO	Ig.loss	Total
component ratio(%)	0.8	2.4	0.1	47.2	4.5	100

Table 6 Properties of acrylate

Item	Appearance	Solid contents (%)	Viscosity (cps)	pH	Ionicity	Density (g/cm^3)
Acril emulsion	White liquid	45.3	360	8.5	Anionic	1

Table 7 Properties of sulfur polymer emulsion

Item	Appearance	Solid contents (%)	Viscosity (cps)	pH
SPE	Brown liquid	42.8	35	10.9

Table 8 Properties of fiber

Item	Length (mm)	Diameter (μm)	Density (g/cm^3)	Tensile strength (GPa)
PVA	6	40	1.30	1.56

중합체를 주성분으로 하는 아크릴레이트를 사용하였으며, 그 특성은 Table 6과 같다.

2.2.3 SPE

이 연구에서 아크릴레이트의 대체재로서 활용가능성을 검토하기 위하여 정유공정에서 부산되어 생산된 SPE를 사용하였다. SPE는 2차에 걸친 중합 과정에 의하여 제조되었으며 (Lee et al., 2013), 그 특성은 Table 7에 나타내었다.

2.2.4 PVA섬유

이 연구에서는 반강성 포장재의 휨인성 및 내구성능 향상을 목적으로 PVA섬유를 사용하였으며, 물리적 특성은 Table 8과 같다.

2.3 시멘트 주입재 배합조건

반강성 포장용 시멘트 주입재의 최적 혼입조건을 도출하기 위하여 유하시간 11~14초, 3시간 강도 21MPa을 목표로 하고, 유하시간측정, 압축 및 휨강도 등의 사전실험을 통하여 시멘트 주입재의 최적 배합비율을 도출하였다 (Lee et al., 2013). 최적 배합 조건에 대하여 반강성 포장재용 주입재의 아크릴레이트에 대한 SPE의 대체율을 최대한 높게 시도하기 위하여 대체비율을 50%까지 증가시키고, 반강성 포장재의 성능향상을 위하여 보강용 PVA 섬유의 혼입율을 시멘트에 대한 질량비 0.1, 0.2, 0.3%로 변화시켜 배합을 실시하였으며, 조건에 따른 배합표는 Table 9와 같다.

Table 9 Mix proportions of cement grout

Mix No.	W/C (%)	A/C (%)	SPE Content[1] (%)	PVA Content[2] (%)
C-1 (Plain)	40	22	-	-
C-2			10	-
C-3			30	-
C-4			50	-
C-5			30	0.1
C-6			30	0.2
C-7			30	0.3

[1] substitution ratio in terms of the weight fraction of acrylate
[2] addition ratio in terms of the weight fraction of cement

3. 실험방법 및 시험체 제작

3.1 실험방법

3.1.1 충전률

충전률은 반강성 포장재 제작시 시멘트 주입재의 충전성능을 의미한다. 충전률은 개립도 아스팔트 모체에 시멘트 주입재를 충전한 후 전공극률을 측정하여 전체 용적에서 전공극률을 빼는 방법으로 산출하였다. 전공극률 계산은 식 (1)에 의해 계산하였다.

$$\text{전공극률}(\%) = \left[1 - \frac{W_2 - W_1}{V}\right] \times 100 \qquad (1)$$

여기서, W_1 : 공시체의 수중질량
W_2 : 24시간 자연방치 후의 기건질량
V : 공시체의 용적

3.1.2 마샬안정도

반강성 포장재의 마샬안정도시험은 KS F 2337「마샬시험기를 사용한 역청 혼합물의 소성흐름에 대한 저항력시험 방법」에 준하여 측정하여 분석하였다.

3.1.3 동적안정도

반강성 포장재의 변형량 평가를 위하여 KS F 2374「아스팔트 혼합물의 휠 트래킹 시험방법」에 준하여 300×300×50mm의 공시체를 제작하고, 강철 휠 타이어에 의한 차륜 주행에 따른 변형량을 측정하여 동적안정도 및 변형속도를 다음 식 (2)와 식 (3)에 의해 계산하였다.

$$동적안정도(DS) = 42 \times \frac{t_{60} - t_{45}}{d_2 - d_1} \times C(회/mm) \quad (2)$$

$$변형속도(RD) = \frac{d_{60} - d_{45}}{15}(mm/min) \quad (3)$$

3.1.4 휨강도 및 파단변형률

반강성 포장재의 배합조건에 따른 균열저항성 및 휨 내력 평가를 위하여 KS F 2395「아스팔트 혼합물의 휨 시험방법」에 준하여 30ton 유압식 만능시험기를 사용하여 휨강도와 파단변형률을 측정하고 다음 식 (4) 및 식 (5)에 의해 계산하였다.

$$휨강도(\sigma) = \frac{3l}{2bh^2}P(MPa) \quad (4)$$

$$파단변형률(\epsilon) = \frac{6h}{l^2}d(\%) \quad (5)$$

3.1.5 마모저항성

배합조건별에 따른 공시체의 마모저항성 평가는 KS F 2492「배수성 아스팔트 혼합물의 칸타브로 시험방법」에 준하여 마샬시험용 공시체를 로스엔젤레스 마모시험에 투입하고 강구를 사용하지 않은 상태에서 300회 회전시킨 후 발생한 질량의 변화율을 측정하여 평가하였다.

3.1.6 충격저항성

충격저항성 시험은 포장재에 가해질 수 있는 충격에 대한 저항성을 평가하기 위하여 실시하였다. 반강성 포장재의 충격저항성 평가를 위하여 300×300×50mm 크기의 휠 트래킹 시험체를 제작하고, Fig. 1의 개요도와 같은 시험용 틀에 반강성 포장재를 설치한 후 높이 800mm에서 3kg (직경 100mm)의 강구를 자유낙하시켜 초기균열 및 파괴균열시의 낙하 횟수를 측정하여 충격저항성을 평가하였다.

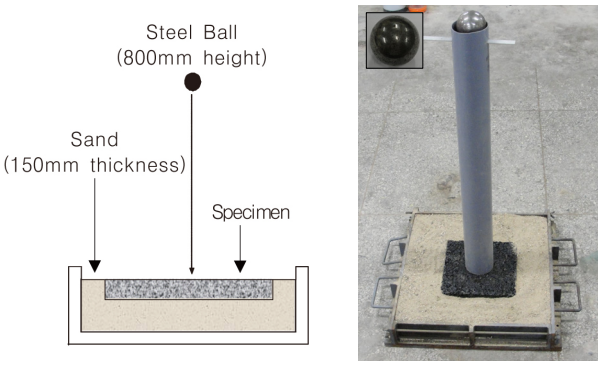


Fig. 1 Impact resistance test

3.2 시험체 제작

3.2.1 개립도 아스팔트 시험체 제작

반강성 포장용 아스팔트 모체는 Table 4에 제시된 배합비율에 따라 120℃ 이상 가열된 재료를 계량하여 믹싱을 실시하였으며, 마샬안정도시험용 공시체는 직경 101.6mm의 몰드에 투입한 후 해머를 450mm의 높이에서 자유낙하 시켜 한면에 50회씩 양면을 다짐하여 시험체를 제작하였다. 또한 휠 트래킹 시험용 공시체는 300×300×50mm의 몰드에 시료를 넣고 가열된 휠 트래킹 시험체 다짐기에 투입하여 롤러 가압다짐을 실시하여 제작하였다.

3.2.2 시멘트 주입재 제작

시멘트 주입재의 믹싱은 스탠드형 믹서를 사용하여 먼저 물, 아크릴레이트, SPE를 투입하고 750rpm으로 60초간 혼합한 후 초속경시멘트를 투입한 후 다시 120초 동안 혼합하는 분할투입방법으로 혼합을 실시하였다.

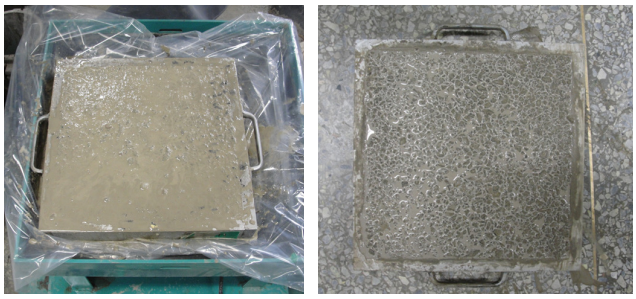
3.2.3 반강성 포장재 제작

제작된 개립도 아스팔트 모체의 온도가 50℃ 이하로 된 이후에 시멘트 주입재를 충전하였으며, Photo 1에 도시한 바와 같이 충전시 1,200 rpm의 진동을 120초 동안 가하였다. 충전 후 남은 시멘트 주입재를 브러쉬로 완전히 제거한 다음 온도 25℃, 습도 60%의 조건에서 기건 양생을 실시하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 충전률

반강성 포장재의 충전특성인 충전률은 아스팔트 모체에 시멘트 주입재를 충전하여 전공극률을 구함으로서 계산하였



(a) Vibration compacting (b) Specimen

Photo 1 Preparation of semi-rigid pavement specimen

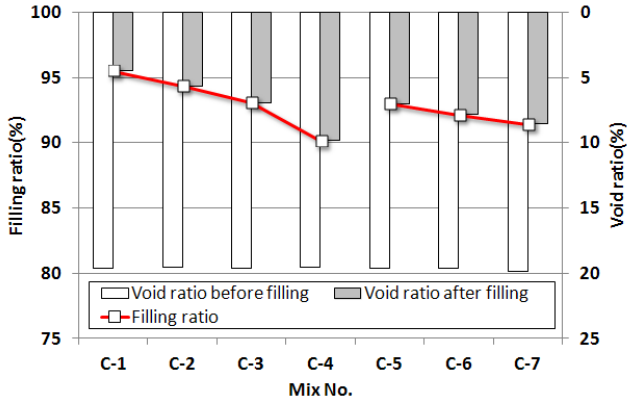


Fig. 2 Result of filling ratio test

으며, 그 결과는 Fig. 2와 같다.

아스팔트 모체의 전공극률은 평균 19.6%로 나타나 목표로 한 공극률 20%를 만족하는 것으로 나타났다. 시멘트 주입재를 충전한 후 전공극률은 4.49~9.84% 범위로 나타나 모든 배합조건에서 충전률 90% 이상을 만족하는 것으로 나타났다.

SPE의 대체율에 따른 충전특성을 분석해보면, 아크릴레이트만 사용한 시험체의 경우 충전률이 95.5%로 우수한 충전특성을 나타내었으나, SPE의 대체율이 증가함에 따라 충전률은 저하되어 최대 SPE의 대체율 50%인 C-4 배합에서는 충전률이 90.2%까지 낮아지는 것으로 나타났다. 이는 SPE의 대량 사용으로 인하여 시멘트 주입재의 유동성이 저하되고, 응결이 빨라져 작업성능이 나빠짐으로서 충전이 잘 이루어지지 못한 것으로 판단된다.

또한, 반강성 포장재의 성능향상을 목적으로 혼입한 PVA 섬유의 혼입률에 따른 충전률은 혼입률이 증가함에 따라 충전률이 저하되는 것으로 나타났으며, 이는 시멘트 질량비로 첨가된 섬유가 개질아스팔트 모체에 형성된 연속 공극을 막음으로서 충전률이 미소하지만 저하된 것으로 판단된다.

하지만, 전체 배합조건에서 본 연구의 목표인 충전률 90%를 만족하여, 사용조건에 따라 SPE의 대체율 및 보강용 섬유의 혼입률은 조정 가능할 것으로 판단된다.

4.2 마샬안정도

배합조건에 따른 반강성 포장재의 마샬안정도를 평가한 결과는 Fig. 3에 나타내었다. 이를 고찰해 보면, 아스팔트 모체 (A-1)의 마샬안정도는 5,430~5,820N 정도의 안정도를 나타내어 반강성 포장용 아스팔트 모체의 마샬안정도 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 한편, 반강성 포장재의 마샬안정도 값은 19,450~25,354N의 범위에서 측정되어 A-1 대비하여 약 4.67배 정도 증가하였다. 따라서 반강성 포장재는 아스팔트 모체에 비하여 소성흐름에 대하여 4.67배 안정한 것으로 나타났다.

시멘트 주입재 제조시 SPE의 대체율에 따른 마샬안정도를 평가한 결과, SPE를 혼입하지 않은 Plain에 비하여 10%혼입시 약 15.1% 정도 마샬안정도가 증가하는 경향을 나타내었으며, 대체율 30% 이상에서는 오히려 안정도가 감소되어 50%대체시 Plain보다 마샬안정도가 낮아지는 결과를 나타내었다. 이는 아크릴레이트보다 고형분량이 적은 SPE를 대량 대체함으로서 시멘트 주입재의 강도가 낮아져 반강성 포장재의 마샬안정도 역시 감소된 것으로 판단되며, 기존의 시멘트 주입재의 강도특성평가 시험결과와 동일한 경향이다 (Lee et al., 2013).

성능향상재료인 PVA섬유의 혼입률에 따른 경향은 혼입률이 증가됨에 따라 마샬안정도 값이 미소하지만 증가하는 경향을 나타내었다. 하지만, 각 시험편의 표준편차는 섬유를 혼입하지 않은 배합조건 (C-3)에 비하여 섬유가 혼입된 (C-5~7) 배합에서 편차가 증가하였으며, 섬유혼입률이 가장 큰 C-7배합은 C-3 대비 약 2배의 편차를 나타내었다. 이는 섬유의 혼

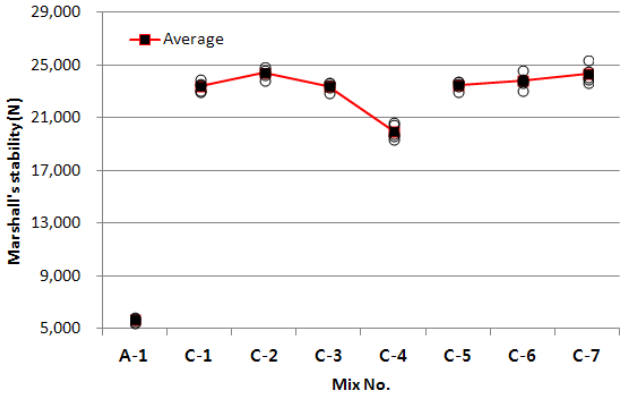


Fig. 3 Result of Marshall's stability test

입으로 인하여 반강성 포장재의 안정도는 증가 되지만 섬유의 혼입량이 일정량을 초과하게 되면, 섬유의 뭉침현상 (Fiber ball)과 섬유가 시멘트 주입재의 충전을 막는 현상 등으로 인하여 반강성 포장재의 품질상태가 나빠졌기 때문으로 판단된다.

4.3 동적안정도

반강성 포장재의 동적안정도를 평가하기 위해 휠 트래킹 시험을 실시하였으며, 그 결과에 대하여 아스팔트의 시간-변형량 곡선을 Fig. 4에 나타내었으며, Table 10에 각 시험조건에서의 동적안정도 및 변형속도를 나타내었다.

휠 트래킹 시험을 통하여 아스팔트 및 반강성 포장재의 시간에 따른 변형률을 평가한 결과 모든 배합조건에서 약 5분까지는 급격히 중앙부 처짐량이 증가하였고, 그 후 60분까지는 서서히 처짐량이 증가하고, 약 30분 이후에는 변형량이 수렴되는 경향을 나타내었다.

각 시험체에 따른 휠 트래킹 시험 후 경향을 살펴보면, 아스팔트 모체 (A-1)의 경우 60분 경과 후 처짐량이 일정한 값에 수렴하지 못하고 계속 증가되는 경향을 나타내었다. 하지만, 반강성 포장재는 배합조건에 따라 0.21~0.41mm 값으로 수렴하는 경향을 나타내었다.

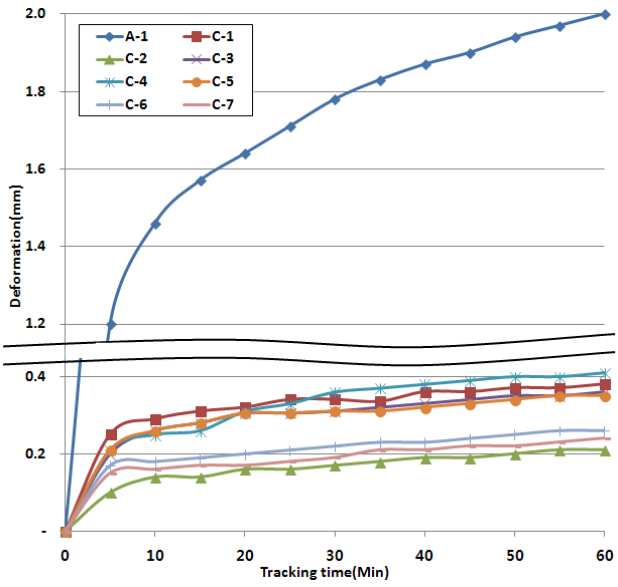


Fig. 4 Result of wheel tracking test

Table 10 Dynamic stability and rate of deformation

	Dynamic stability	Rate of deformation
A-1	6,300.00 cycle/mm	0.0067 mm/min
C-1 ~ C-7	31,500.00 cycle/mm	0.0013 mm/min

각 배합조건에 따른 변형량의 속도는 아스팔트 모체가 0.00667 mm/min인 것에 비해 반강성 포장재는 0.00133 mm/min으로 나타나 반강성 포장재의 변형되는 속도가 약 5배 정도 감소되는 것으로 나타났으며, 동적안정도 역시 아스팔트 모체가 6,300회/min로 측정된 것에 비하여 반강성 포장재는 31,500회/min으로 나타나 약 5배 정도 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 연성의 아스팔트를 측정하는 시험방법으로 강성인 시멘트 페이스트가 충전된 반강성 포장재를 시험하였기 때문으로 판단되며, 모든 시험조건에서 동적안정도는 우수한 것으로 평가 되었다.

주입재의 배합조건 (SPE 대체율 및 섬유혼입률)에 따른 휠 트래킹 시험의 시간에 따른 변형량 측정결과를 검토해 보면, SPE를 약 30%까지 아크릴레이트 대체재로 사용하면, SPE를 사용하지 않은 Plain (C-1)보다 우수한 변형저항성을 나타내었으며, 30% 초과의 시험결과에서는 오히려 변형량이 증가되는 것으로 나타났다. 또한, 섬유보강재를 혼입한 배합에서는 혼입률이 증가됨에 따라 변형저항성이 미미하지만 증가되는 것으로 나타나 섬유혼입에 따라 반강성 포장재의 트래킹에 대한 변형저항성이 증가하는 것으로 볼 수 있다.

4.4 휨강도 및 파단변형률

반강성 교면포장재의 외부하중에 의한 균열저항성 및 휨내력을 평가하고, SPE 및 PVA섬유의 배합조건이 반강성 포장재의 휨강도에 미치는 영향을 검토하기 위하여 휨강도 시험을 실시하였다. 시험결과, 반강성 포장재의 휨강도 및 파단변형률은 배합조건별로 2.85~3.46MPa 및 0.488~0.675%로 각각 측정되었다. 아크릴레이트의 대체재로서 SPE의 대체량에 따라 측정된 휨강도는 대체율 30%까지는 오차 범위내에서 동등한 결과를 나타내었다.

파단변형률은 SPE의 대체율 조건에 상관없이 0.488~0.525% 정도로 나타나 아스팔트 모체 (A-1)의 파단변형률 1.36% 보다 높은 강성의 파단변형률을 나타내어 반강성 포장의 특성을 만족하였다.

섬유보강재의 혼입에 따른 경향은 혼입률 (0, 0.1, 0.2, 0.3%) 증가에 따라 휨강도가 3.10~3.31MPa까지 증가하는 경향을 나타내었다. 일반적인 섬유보강 콘크리트에 비해 휨강도 향상효과가 뚜렷하지 못한 것은 단위용적당 섬유의 혼입량이 많지 않고 주입재의 충전률 향상을 위하여 단섬유 (6mm)를

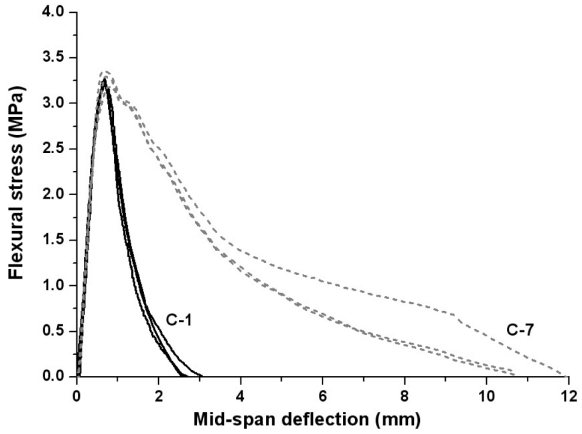


Fig. 5 Comparison of flexural stress-mid span deflection curves exhibiting the effects of reinforcing fibers

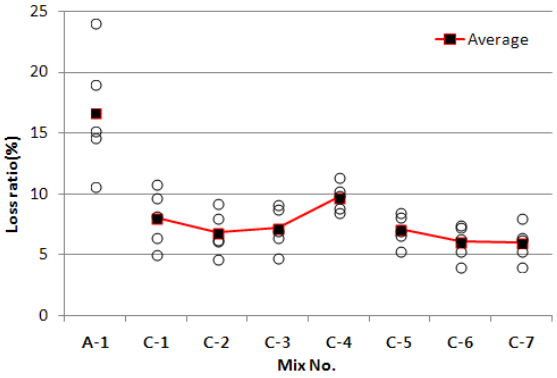


Fig. 6 Result of cantabro test

사용하였기 때문으로 판단된다.

Fig. 5는 반강성 포장재 배합 C-1과 C-7의 휨강도-중앙부 처짐량 곡선을 각각 나타낸 것이다. 보강용 섬유를 0.3% 혼입함으로써 파단변형률이 약 4배 이상 증진되는 것을 알 수 있다. 이는 혼입된 PVA섬유가 시멘트 주입재와 아스팔트 모체의 결합력 증진에 기여를 하였기 때문인 것으로 판단된다.

4.5 마모저항성

반강성 포장재의 마모저항성에 대한 평가를 수행하기 위하여, 아스팔트 모체는 ϕ100×100 mm인 마샬시험용 공시체를 제작하여 배합조건에 따른 시멘트 주입재를 충전하여 시험체를 제작하였다. 마모저항성은 칸타브로시험에 준하여 각 시험체를 로스앤젤레스 골재마모시험기에 넣고 강구를 사용하지 않은 상태에서 300회 회전시켜 투입 전·후의 질량을 측정함으로서 그 손실률 계산하여 마모저항성을 평가하였다.

평가결과는 Fig. 6에 나타내었으며, 아스팔트 모체의 손실률은 평균 16.67%로 측정되었고, 시험체간의 편차가 최대 13.45%로 크게 나타났다. 이는 개립도 아스팔트 모체는 공극을 함유하고 있어 골재와 골재사이가 아스팔트 결합력이 약하고 연성이 크기 때문에 아스팔트 모체의 골재가 쉽게 탈락되어 손실률이 큰 것으로 판단된다.

시멘트 주입재의 배합조건별 특성은 SPE의 아크릴레이트에 대한 대체율 0~30%까지는 유사한 손실률을 나타내었으나, 대체율 30% 초과시 손실률이 증가되어 10% 이상 탈락되는 것으로 나타났다. 이는 아크릴레이트에 비하여 고형분량이 작은 SPE가 대량 혼입되어 시멘트 주입재의 강도가 낮아졌기 때문으로 판단된다.

또한, 반강성 포장용 시멘트 주입재를 개립도 아스팔트에 충전한 뒤 손실률 평가에서는 시험체간의 편차가 아스팔트 모체에 비해 작은 것으로 나타났다. 이는 시멘트 주입재가 아스팔트 모체에 충전됨에 따라 포장재의 매트릭스가 치밀해져 내마모성이 증대되었기 때문으로 판단된다.

섬유혼입률에 따른 반강성 포장재의 손실률 측정결과는 혼입률이 증가함에 따라 마모저항성이 증가하였으나, 혼입률의 영향이 크지는 않은 것으로 나타났다.

4.6 충격저항성

반강성 포장재는 내구성능이 요구되는 도로에 주로 시공되는 포장공법으로서, 중·대형 차량에 의한 충격 등 외력의 복합적인 요인에 의한 충격작용이 예상된다. 따라서 본 연구에서는 반강성 교면 포장재의 충격저항성을 규명하기 위하여, 시험용 틀에 잔골재를 채우고 공시체를 설치한 후 3kg의 강구를 800mm에서 자유낙하 시켜 충격시험을 실시하였으며, 초기균열 및 파괴균열시의 낙하회수를 측정하였고, 그 결과는 그림 Fig. 7과 같다.

이를 고찰하여 보면 시멘트 주입재를 충전하지 않은 개립도 아스팔트 모체는 충격저항성능이 낮아 낙하 회수 약 3회 정도에 파괴을 나타내었다. 이는 내부공극 형성을 위하여 밀실하게 제작되지 못한 개립도 아스팔트의 특성이 반영된 결과로 판단된다.

시멘트 주입재를 충전한 반강성 포장재의 경우, 내충격성이 증가되어 배합조건에 따라 파괴균열 발생시점이 10~22회 정도로 나타났다. 하지만, 아크릴레이트에 대한 SPE의 대체율이 50% 이상에서는 파괴균열까지의 낙하횟수가 급격히 저하되어 SPE를 혼합하지 않은 Plain (C-1)의 55%까지 내충격성이 저하되는 것으로 나타났다.

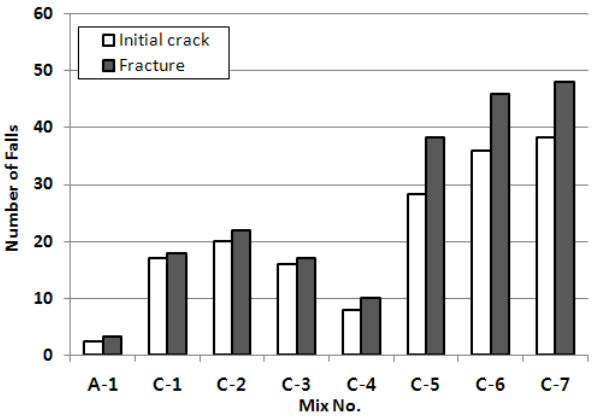


Fig. 7 Result of impact resistance test

보강용 섬유의 혼입에 따른 경향은, 혼입률이 0.1~0.3%까지 증가됨에 따라 충격저항성능은 급격히 증가되었다. 섬유를 혼입하지 않은 기본배합인 C-3에 비하여 0.1% 혼입된 C-5배합은 파괴균열 발생시까지의 낙하횟수가 2.25배정도 증가되었으며, 0.3% 혼입된 C-7배합과의 차이는 2.82배까지 증가되었다. 이는 반강성 포장용 시멘트 주입재 제조시 혼입된 섬유가 적절히 분산되어 시멘트 주입재의 강도가 증가 되었을 뿐만 아니라 아스팔트 모체와 주입재 사이의 결합력이 증대되었기 때문으로 판단된다. 또한, 섬유가 혼입된 C-5~7배합의 경우 초기 균열 발생 후에도 충격을 흡수해 충격을 받은 부분 주위의 부분만 손상을 입는 현상을 나타내고 시험체 전체에 대한 파괴는 많이 일어나지 않은 것으로 나타나 보강용 섬유의 혼입은 충격저항성에 대한 우수한 성능을 가지는 것으로 판단된다. PVA섬유를 보강하였을 때에 파단변형률과 충격저항성 등이 개선되어 포장재의 인성과 연성을 증진시키는 데에 주로 효과가 있는 것으로 나타났다.

5. 결 론

이 연구에서는 정유산업부산물인 유황을 에멀젼화한 SPE를 반강성 포장용 주입재의 아크릴레이트 대체재로서 활용가능성을 검토하고, 보강용 섬유를 적용한 반강성포장재의 역학적 성능 및 내구성능을 평가하였으며, 본 연구의 범위 내에서 얻어진 결과는 다음과 같다.

(1) 반강성 포장재의 충전률을 검토한 결과, 아스팔트 모체의 공극률은 19.6%로 나타나 목표공극률 20%를 만족하였으며, 충전 후 충전률은 섬유의 혼입률이 증가함에 따라 충전률이 저하되었지만, 모든 배합조건에서 90% 이상으로 나타났다.

(2) 아스팔트 모체의 마샬안정도는 5,677N의 안정도를 나타내어 반강성 포장용 아스팔트 모체의 마샬안정도 기준을 만족하였으며, 반강성 포장재의 마샬안정도 값은 최대 25,354N로 나타나 아스팔트 모체에 비해 약 4.67배 정도 우수한 것으로 나타났다.

(3) 휠 트래킹 시험을 통한 동적안정도 평가결과, 휠 트래킹시험에 따른 변형저항성은 SPE를 10% 정도 대체한 배합조건에서 가장 우수하였고, 모든 배합조건에서 45분 이후에는 변형량이 일정한 값에 수렴되어 동적안정도가 31,500회/mm로 동일한 결과를 나타내었다.

(4) 휨강도 측정결과, SPE를 10% 대체한 C-2배합이 가장 우수한 강도를 나타내었으며, 섬유혼입률 증가에 따라 휨강도 역시 증가하는 경향을 나타내었다. 파단변형률은 최대 0.53% 정도로 나타나 아스팔트 포장재보다 우수한 강성의 파단변형률을 나타내었다.

(5) 마모저항성 평가결과, 손실률이 SPE의 대체율에 상관없이 9.8~6.9%로 나타나 우수한 내마모성을 나타내었다. 보강섬유를 혼입할 경우 내마모성이 증진하였으나, 이 연구의 혼입범위 내에서는 혼입률의 영향이 크지 않은 것으로 나타났다.

(6) 충격저항성을 검토한 결과, 보강용 섬유가 내충격성에 큰 효과를 보이는 것으로 나타났다. 섬유를 혼입하지 않은 C-3에 비하여 섬유를 0.3% 혼입한 경우 2.82배의 내충격성 향상을 나타내었다.

(7) 반강성 포장용 시멘트 주입재의 아크릴레이트 대체재료로서 SPE의 활용가능성과 보강용 섬유의 적정혼입률을 평가한 결과, 역학적 성능과 내구성능을 만족하면서 경제성을 확보할 수 있는 SPE의 최대 대체율은 30% 수준인 것으로 판단된다. 또한 높은 연성과 인성이 요구되는 포장재의 경우에는 보강섬유를 혼입률 0.3%의 범위에서 적용하여 충전률을 확보하면서 향상된 성능을 갖는 반강성 포장재의 제조가 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 한국연구재단 기초연구사업 (No.2011-002 4924)의 학술연구비 지원을 받아 수행된 연구이며, 이에 감사드립니다.

References

1. A. Setyawan (2013), Asessing the Compressive Strength Properties of Semi-Flexible Pavements, *Procedia Engineering*, 54, 863-874.
2. Baek, S. H. (2010), Fracture toughness of semi-rigid asphalt concrete, Kangwon National University Graduate School, 42-45 (in Korean).
3. Lee, B. J., Lee, J., Hyun, J. H., Kim, Y. Y. (2013), Properties of SPE-Based Cement Grout for Semi-Rigid Pavements, *Journal of the Korea institute for Structural Maintenance and Inspection*, 17(4), 57-65 (in Korean).
4. Ministry of knowledge economy (MKE) (2012), Supply and demand situation of mineral produce in 2011, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 119-120 (in Korean).
5. Ministry of land, transport and maritime affairs (MLTM) (2012), 2011 Yearbook of road statistics, 9-121 (in Korean).
6. Park, K. Y., Lee, J., Kwon, S. A., Jeong, J. H. (2010), Evaluation of Functional and Structural Performance of Semi Rigid Overlay Pavements, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 30(3D), 271-278 (in Korean).
7. Park, T. S. (2008), Evaluation of the Performance and Moisture Retaining Ability in Semi-Rigid Pavement, *Journal of the Korean Society of Road Engineers*, 10(2), 69-79 (in Korean).

Received : 08/05/2013
Revised : 09/10/2013
Accepted : 09/15/2013

요 지

본 연구에서는 유황폴리머에멀젼 (SPE)을 반강성 포장용 주입재의 아크릴레이트 대체재로서 활용가능성과 성능향상재료 (PVA섬유)에 대한 역학적 성능과 내구성능을 평가하였다. 평가결과, 반강성 포장재의 충전률은 섬유의 혼입률이 증가함에 따라 충전률이 저하되었지만, 모든 배합조건에서 평균 92~94%로 측정되어 목표 성능인 90%를 만족하였다. 반강성 포장재의 마샬안정도 값은 최대 25.4kN으로 측정되어 반강성 포장재의 국내 기준인 5.0 kN 보다 약 4.7배 우수한 것으로 나타났다. 반강성 포장재의 동적안정도 평가결과, 휠 트래킹시험에 따른 변형저항성은 SPE를 대체한 배합조건이 보다 우수하였고, 모든 배합조건에서 45분 이후에는 변형량이 일정한 값에 수렴되어 동적안정도가 31,500회/mm로 동일한 결과를 나타내었다. 파단변형률은 최대 0.53% 정도로 나타나 아스팔트 포장재보다 우수한 강성으로 나타났다. 마모저항성 및 충격저항성 검토결과 모든 배합조건에서 손실률이 9.8~6.0%로 나타나 우수한 내마모성을 나타내었으며, 섬유를 0.3% 혼입한 경우 혼입하지 않은 Plain에 비하여 2.82배의 내충격성 향상을 나타내었다. 역학적성능 및 내구성능 등을 모두 고려하여 볼 때, 이 연구 범위에서는 SPE 대체율 30%가 적정 수준이고, 혼입률 0.3% 범위에서 PVA 섬유를 적용하면 우수한 인성을 갖는 반강성 포장재 제조가 가능 할 것으로 판단된다.

핵심 용어 : 반강성포장재, 유황폴리머에멀젼, PVA 섬유, 내구성