

연성포장용 섬유보강 아스팔트 콘크리트의 피로저항성 Fatigue Resistance of Fiber-Reinforced Asphalt Concrete in Flexible Pavement.

김낙석* / 추상혁** / 이석홍***
Kim, Nak Seok* / Choo, Sang Hyuk** / Lee, Suck Hong***

Abstract

The main purpose of this paper is to evaluate the possibility of improvement in fatigue resistance of asphalt concrete mixture using the industrial waste material of K fiber. In this research, as an experimental equipment, the MTS with Closed-Loop Servohydraulic System was used and it was designed according to the U.S. standard testing procedure of ASTM D 4123. According to the test results, the optimum content of fiber with the length of 8mm was about 0.2 percent of total mixture weight. The optimum asphalt content for the fiber-reinforced asphalt concrete was about 5.5 percent of total mixture weight. Fatigue resistance of fiber-reinforced asphalt concrete was noticeable compared to the conventional dense-graded 20 asphalt concrete. In addition, the resilient moduli of fiber-reinforced asphalt mixture were 1.15~1.18 times higher than those of conventional asphalt concrete.

Key words : fatigue cracking, industrial waste, fiber-reinforced, resistance, asphalt mixture

요 지

본 연구는 산업폐기물인 D사의 K 섬유를 사용하여 아스팔트 콘크리트 혼합물의 피로파괴에 대한 저항성 향상의 증진가능성을 평가하고자 수행되었다. 본 연구에서는 MTS사의 CLSS (Closed-Loop Servohydraulic System)와 미국 표준시험법인 ASTM D 4123에 따라 MTS사가 개발한 시험장치를 사용하여 피로시험을 수행하였다. 본 연구 결과에 의하면 적정 섬유첨가량은 전체 혼합물 중량기준 약 0.2%의 길이 8mm 섬유가 가장 우수한 성능을 발휘함을 보였고, 이 때의 적정 아스팔트 함량은 전체 혼합물 중량기준 5.5%로 나타났다. 폐섬유를 재활용하여 생산된 섬유보강 아스팔트 혼합물이 기존의 밀입도 20 아스팔트 혼합물보다 피로파괴에 대한 저항성면에서 월등히 우수한 것으로 나타났다. 또한, 섬유보강 아스팔트 혼합물의 회복 탄성계수값은 일반 밀입도 20 아스팔트 혼합물보다 약 1.15~1.18배 높게 평가되었다.

핵심용어 : 피로파괴, 산업폐기물, 섬유보강, 저항성, 아스팔트 혼합물

* 정회원, 경기대학교 토목환경공학부 부교수

** (주) 드림테크 연구소 선임연구원

*** 정회원, (주) 현대건설 기술연구소 재료기술부 팀장

1. 서 론

아스팔트 콘크리트 도로포장은 최근 교통량의 급격한 증가로 공용수명 이전에 소성변형(permanent deformation, rutting)이나 피로파괴(fatigue failure) 등 여러 형태의 파괴가 일어나고 있는 실정이다. 특히, 피로파괴는 반복 축 하중작용으로 피로수명까지 반복 응력을 받았을 때 이러한 파손이 일어난다. 이러한 피로파괴에 영향을 미치는 요소로는 포장의 구조적 조직, 아스팔트의 강도, 아스팔트 함량, 혼합물의 공극률과 골재의 특성, 쇄석 기층과 시멘트 처리기층의 현장특성과 노상토질의 현장특성, 온도, 교통량 등 여러 요인으로 발생한다(Roberts 등, 1996; 아스팔트 포장 연구회1999).

본 연구에서는 D사에서 제공한 K 섬유를 아스팔트 콘크리트 혼합물에 첨가하여 생산되는 섬유보강 아스팔트 콘크리트 혼합물의 반복하중에 대한 연성(ductility)의 증진 가능성을 평가하고자 한다. 이 때 반복하중에 대한 저항성은 예상 파괴면에서 발생하는 미세한 섬유의 저항으로 인하여 개선될 수 있을 것으로 예상된다. 한편 국내에서 도입해서 사용하고 있는 SMA(Stone Mastic Asphalt) 포장에서는 실제로 혼합물 중량기준으로 약 0.2%의 셀룰로우스 섬유를 사용하여 혼합하고 있다. 그러나, 이때 사용되는 섬유의 주요 기능은 SMA 혼합물내의 아스팔트 시멘트가 도로 하부로 흘러내림을 방지하기 위한 것이다. 본 연구에서 사용하고자 하는 섬유의 주목적은 SMA 혼합물내의 섬유와 달리, 혼합물내에서 피로파괴에 대한 저항성 증진을 주목적으로 하고 있다.

본 연구를 통하여 정확한 혼합비율을 결정하고, 적절한 Batch Plant 배합기술이 뒷받침될 수 있다면 산업 폐기물의 재활용, 소성변형 및 조기 피로파괴에 대한 저항성 향상이라는 복합적인 이점을 얻을 수 있을 것으로 사료된다. 본 연구에서는 먼저 섬유와 아스팔트의 양을 결정하기 위하여 각각 혼합물의 혼합상태와 마샬 배합설계방법을 통하여 적절한 최적 양을 결정하였다. 배합설계에 따라 마샬시험 공시체를 제작한 후 피로시험을 통하여 그 물성을 측정하여 기존의 아스팔트 혼합물과 섬유를 아스팔트 혼합물에 첨가한 섬유보강 아스팔트 혼합물과의 피로에 관련된 물성을 비교·분석하고자 한다.

2. 사용재료 및 시험방법

2.1 사용재료

2.1.1 아스팔트 시멘트

우리나라에서 사용되는 아스팔트는 침입도, 연화점 및 점도를 기준으로 분류한다. 대체적으로 일반 밀입도 아스팔트 혼합물과 SMA 혼합물은 소성변형에 대한 저항성을 고려하여 아스팔트 침입도가 60~70인 AP-5를 사용하도록 권장되고 있다. 따라서 본 연구에서도 L사의 AP-5를 사용하였다. 본 연구에서 사용된 AP-5의 침입도(KS M 2252), 인화점(KS M 2010), 비중(KS M 2202), 신도(KS M 2254), 트리클로르에탄 가용분시험(KS M 2256) 등에 대한 시험결과는 Table 1과 같다(Roberts 등, 1996; 아스팔트 포장 연구회, 1999).

2.1.2 골재와 섬유

굵은골재는 골재의 최대치수가 19mm와 13mm인 I사의 부순 모래를 사용하였고, 잔골재는 골재의 최대치수가 6mm이하인 I사의 부순 모래와 Y사의 자연사를 사용하였으며, 채움재는 굵은골재 최대치수가 0.6mm인 K사의 채움재를 사용하였다. 골재의 체가름시험(KS F 2502), 골재의 비중 및 흡수량시험(KS F 2503, KS F 2504), 골재의 단위중량시험(KS F 2505), 굵은골재의 마모시험(KS F 2508), 골재의 Na₂SO₄에 의한 안정성시험(KS F 2007)으로 얻어진 각 골재의 물리적 성질에 대한 시험결과는 Table 2와 같다. 또한, 각 골재의 적절한 혼합함성입도는 시방기준을 만족하였다.

섬유는 D사에서 생산된 K섬유를 아스팔트 콘크리트 혼합물에 혼합하였으며, 사용시 섬유는 8mm 길이를 가진 staple 상태에서 사용되었다. 사용전 섬유의 물리적 성질에 대한 시험결과는 Table 3와 같다(Dupont, 1999).

2.2 배합설계 및 시료제작

본 연구를 수행하기 위하여 우선적으로 할 일은 섬유의 첨가량을 결정하는 것이다. 섬유의 첨가량을 결정하기 위하여 아스팔트 표준용 포장(밀입도 20 아스팔트 콘크리트,

Table 1. Properties of asphalt cement(AP-5)

Asphalt Type	Specific Gravity, 25°C	Penetration, 25°C, 100g, 5sec	Ductility, (cm)	Flash Point (°C)	Pen. Ratio after TFOT, (%)	Ductility after TFOT, (cm)	Solubility in Trichlorethylene, (%)
Spec. of KS	min. 1.01	60~70	min. 100	min. 230	min. 52	min. 50	min. 99.0
AP-5	1.030	68	150 +	347	68	145	99.7

팔트 함량에 대한 각 9개씩의 공시체를 제작하여

Table 2. Physical properties of aggregates

Aggregate Type	Item	Specific Gravity	Absorption (%)	Unit Weight (kg/m ³)	Abrasion Loss (%)	Stability Na ₂ SO ₄ (%)
Coarse Aggregate	Specification	min. 2.54	max. 3.0	min. 1250	max. 35	max. 12
	19 mm	2.65	0.64	1501	21.9	3.27
	13 mm	2.62	0.74	1371	31.4	3.06
Fine Aggregate	Item	Specific Gravity	Absorption (%)	Unit Weight (kg/m ³)	Stability Na ₂ SO ₄ (%)	
	Specification	min. 2.45	max. 3.0	min. 1250	max. 10	
	6 mm	2.60	0.93	1697	2.93	
	Natural Sand	2.57	1.08	1292	2.94	
Filler	Item	Specific Gravity		Moisture Content (%)		
	Specification	min. 2.6		max. 1.0		
	Result	2.708		0.4		

Table 3. Physical properties of K-fiber

Tensile strength(kgf/cm ²)	Modulus(kgf/cm ²)	Density(g/cm ³)	Elongation at Break(%)
29,876	632,201	1.44	3.6

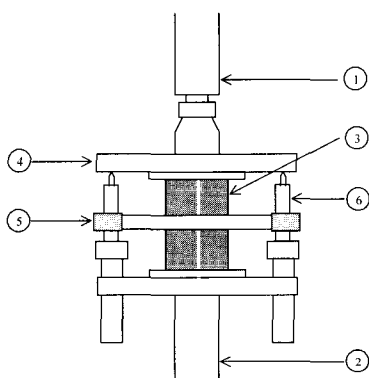
아스팔트 함량 5.1%)을 사용하여 첨가량을 전체 아스팔트 콘크리트 혼합물 중량기준 0.0%, 0.1%, 0.2%, 0.3%, 0.4%, 0.5%의 섬유를 첨가한 후 아스팔트 혼합물과 섬유의 혼합상태를 비교분석한 후 최적 섬유 첨가량을 결정하였다. 혼합물의 혼합상태를 비교분석한 결과 섬유를 약 0.2% 첨가하였을 때에 혼합상태가 비교적 양호하였다. 이러한 사실은 SMA(Stone Mastic Asphalt) 포장에서도 약 0.2%의 섬유량이 사용되고 있다는 사실과 유사한 결과를 보여주고 있다. 특히, 안정도에 있어서는 기존 밀입도 20 아스팔트 혼합물보다 0.2%의 섬유량을 첨가한 아스팔트 혼합물이 약 117%가 우수한 것으로 나타났다. 따라서, 본 연구에서는 전체 혼합물 중량비 0.2%를 최적 섬유량으로 결정하였다.

또한 최적 섬유 첨가량에 대한 최적 아스팔트 함량을 결정하기 위하여 5.0%, 5.5%, 6.0%의 아스

역시 마샬 배합설계를 시행하였다(Asphalt Institute, 1995; 아스팔트 포장연구회, 1998). 따라서, 최적 아스팔트 함량을 결정하기 위하여 총 27개의 추가 공시체를 제작하였다. 마샬 배합설계 결과 함량이 5.5%일 때 안정도와 공극률 등 마샬 배합설계 기준에 가장 적합한 것으로 나타났기 때문에 최적 아스팔트 함량을 5.5%로 결정하였다(김낙석, 2002). 섬유 첨가량과 최적 아스팔트 함량을 결정하기 위하여 사용된 공시체의 시험계획은 Table 4에 나타내었다. Table 4에서 볼 수 있듯이 MTS를 이용한 피로시험을 수행하기 위하여 기존의 밀입도 20 아스팔트 혼합물은 11개(별도로 400kgf에 대해 추가 시험(2개) 실시), 섬유보강 아스팔트 혼합물은 9개의 공시체를 각각 제작하여 총 20개의 공시체를 추가로 만들었다. 공시체에 혼합된 골재의 온도와 아스팔트 가열온도는 150°C로 관리하였고, 다짐온도

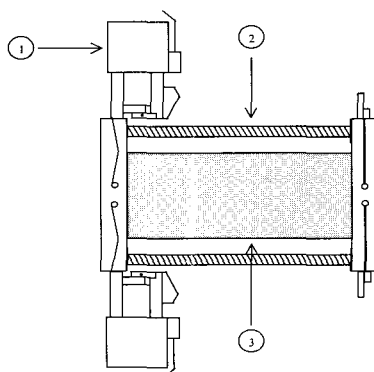
Table 4. Experimental Design

Mashall Mix Design	Fiber Content (%)	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
	Number of Trial Mixing	2	2	2	2	2	2
	Fiber Content(%)	0.2					
	Asphalt Content (%)	5.0		5.5		6.0	
	Number of Specimens	9		9		9	
Fatigue Test	Load (kgf)	800		600		500	
	Mix Type	Dense-Graded 20 Asphalt Concrete		Fiber-Reinforced Asphalt Concrete			
		3		3		3	



- 1. Upper extension rod
- 2. Lower extension rod
- 3. Asphalt specimen
- 4. Loading strips
- 5. Horizontal deformation extensometer
- 6. Vertical deformation extensometer

(a) Schematic of test set-up for MTS



- 1. Extensometer
- 2. Spring
- 3. Asphalt specimen

(b) Horizontal deformation extensometer

Fig. 1 Schematic of test set-up for MTS and Horizontal deformation extensometer

는 140~147°C를 유지하였다.

2.3 피로시험 방법

본 연구에서는 아스팔트 혼합물의 피로파괴시험을 MTS(Material Testing System)사의 CLSS (Closed-Loop Servohydraulic System)와 미국 표준 시험법인 ASTM D 4123에 따라 MTS사가 개발한 회복 탄성계수(Resilient Modulus) 시험장치를 사용하여다.

Fig. 1은 MTS 기계장치와 수평변형량을 측정하기 위한 Extensometer를 나타낸 그림이다. 이 장치는 시험하는 동안 자동온도 조절장치가 되어 있어서 정해진 온도의 약 $\pm 0.56^{\circ}\text{C}$ 이내로 시험장치와 시료를 유지시켜 준다. Fig. 1의 (a)에서 MTS의 상층부의 재하대는 공시체와 같은 곡률을 갖고 있을 뿐 아니라 고정되어 있지 않아서 공시체의 접촉 부분이 밀착할 수 있게 돕는다. 또한, Fig. 1의 (b)에서 Extensometer는 스프링에 의해 공시체와 밀착할 수 있게 되어 있고, Pin으로 Extensometer 양쪽의 길이를 같게 고정시킬 수 있다. 본 연구에서는 MTS를 이용하여 하중을 0.1초 작용하고 휴지 시간을 0.5초를 두어 시험을 하였다. 시험온도는 20°C에서 반복 Haversine 하중을 공시체에 수직하게 작용시켜 피로특성을 측정하였다. 잔류하중(seating load)은 5kgf를 주어 공시체와 재하대가 밀착할 수 있게 하였다.

실내 시험에서는 파괴의 정의에 따라 피로수명이 정해진다. 본 연구에서는 수평변형이 2.0mm에 이르렀을 때 재료가 파괴된 것으로 간주하였다. 본 연구에서 사용된 수평변형 2.0mm라는 파괴기준은

Kim(김낙석등, 1996)에 의하여 이미 발표된 연구결과에 의한 값이며 본 연구 수행 중 관찰된 시료의 파괴상태로 보아 간접인장 피로파괴시험을 수행할 경우 적절한 파괴기준으로 평가된다. 파괴기준에 대한 상세한 정보는 Kim(김낙석등, 1996)의 연구 결과에서 찾아볼 수 있다.

3. 시험 결과 및 분석

본 연구는 회복탄성계수를 측정하는 MTS 장치를 이용하여 피로시험을 수행하였다. 잔류하중(seating load)은 5kgf를 작용시켜 시험을 실시하였다. 밀입도 20 아스팔트 혼합물(아스팔트 함량 5.1%)은 작용하중을 400kgf, 500kgf, 600kgf, 800kgf를 가하였고, 섬유보강 아스팔트 혼합물(섬유 0.2%, 아스팔트 함량 5.5%)은 500kgf, 600kgf, 800kgf의 하중을 공시체에 수직하게 작용시켜 피로시험을 실시하였다. 하중주기는 0.1초의 작용하중과 0.5초의 휴지시간을 두어 1회 시험수행 시간은 0.6초가 걸렸다. 이때의 시험 온도는 20°C이고, Haversine 파형의 하중을 작용하여서 200번째에서 수직변형과 수평변형의 값을 얻었다. 또한 공시체가 파괴될 때의 파괴횟수를 기록하여 log-log 단위로 회복 수평변형률 및 총 수평변형률과의 관계를 각각 분석하였다.

Table 5는 밀입도 20 아스팔트 혼합물과 섬유보강 아스팔트 혼합물의 피로시험 결과를 도표로 나타낸 것이고, Fig. 2는 각 작용하중별로 파괴횟수를 나타내는 그림이다. Table 5와 Fig. 2에서 하중이 800kgf일 때 섬유보강 아스팔트 혼합물의 파괴횟수가 평균 2,475회이고 밀입도 20 아스팔트 혼합물이

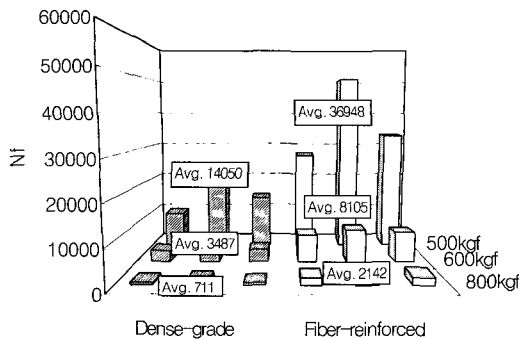


Fig. 2 Number of failure(Nf) comparison at different stress level

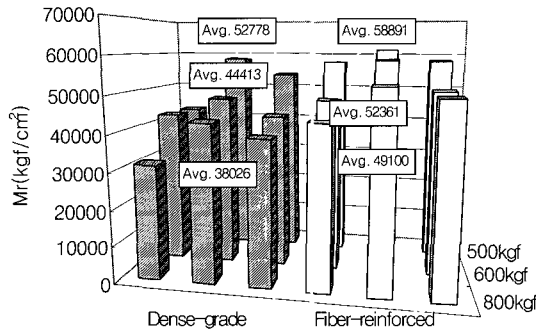


Fig. 3 Resilient modulus comparison at different stress level

711회로 약 3.48배 높은 저항성을 보였다. 그리고, 600kgf일 때는 약 2.32배, 500kgf일 때는 약 2.62배의 높은 저항성을 가짐을 알 수 있다. 그림을 통해서도 섬유보강 아스팔트 혼합물이 밀입도 20 아스팔트 혼합물보다 피로파괴에 대한 저항성이 월등히 우수함을 밀입도 20 및 섬유보강 아스팔트 혼합물의 피로시험 결과 잘 나타내고 있다. Fig. 3의 각 작용하중별 파괴횟수에서 특히, Low stress level (500kgf)의 섬유보강 아스팔트 혼합물에서 시료에 따른 파괴횟수의 차이가 크게 나타난 것은 손비빔으로 인하여 섬유 분산정도에 따른 변동률 때문인 것으로 사료된다. 그러나 공시체내의 변동상황을 고려한다 할지라도 밀입도 20 아스팔트 혼합물보다 섬유보강 아스팔트 혼합물의 파괴횟수가 월등히 높게 나타났다.

Fig. 3은 각 작용하중에 따른 회복탄성계수를 나타내었다. 본 연구에서는 피로시험이기 때문에 일반적으로 회복탄성계수에서 가하는 하중(간접인장 강도의 5~20%)보다 과한 하중이 가하여졌다. 회복탄성계수는 총 회복탄성계수와 순간 회복탄성계수가 있다. 두 계수간의 상관성은 아주 높은 것으로 알려져 있다(한국 건설기술 연구원, 1998). 따라서 본 연구에서는 20°C에서의 포아손 비인 0.39를 사용한 식 (1)을 사용하여 회복탄성계수를 구하였다.

$$M_r = \frac{0.6634 P}{H t} \quad (1)$$

- 여기서, Mr : 회복탄성계수
- P : 작용하중
- t : 공시체 두께
- H : 회복수평변형

Table 5와 Fig. 3에서 알 수 있듯이 밀입도 20 아스팔트 혼합물보다 섬유보강 아스팔트 혼합물의 회복탄성계수가 높게 나타났다. 800kgf에서는 약 1.29배, 600kgf에서는 약 1.18배, 500kgf에서는 약 1.12배 높은 결과를 보였다. 이것은 섬유보강 아스팔트 혼합물의 하중에 대한 인장변형 복원력이 재래식 아스팔트 혼합물보다 높다는 것을 나타내며, 피로파괴에 대한 저항성이 더 우수할 수 있다는 사실을 암시하고 있다.

아스팔트 혼합물의 피로특성은 공학적인 요소들과 파괴에 이르기까지의 반복된 하중 횟수와와의 관계로 표현되어 왔다. 대부분은 파괴의 반복하중 횟수와 초기응력 또는 변형과의 관계를 통해서 피로수명을 밝혀 내려고 접근하였다. 시험 중 총 수평응력 또는 변형율과 피로파괴횟수 관계를 log-log 단위로 그렸다. log 단위인 총 수평응력 또는 변형율과 피로수명과의 선형적 관계는 다음의 현상학적인 피로파괴 모델로 정의된다.

$$N_f = K_1 \left(\frac{1}{\epsilon_i} \right)^{K_2} \quad (2)$$

- 여기서, N_f : 피로수명
- ϵ_i : 총 수평변형율
- K_1, K_2 : 상수

최근 연구결과(Kim, N., 1994)에 의하면 총 인장 변형율 대신에 아스팔트 혼합물의 회복변형율이 더 중요한 요소로 주장되었다. 같은 접근 방법으로 도면의 횡축에 총 수평응력이나 변형율 대신에 200번째 사이클에서의 회복 수평변형율을 사용하였다. 회복 수평변형율과 피로수명과의 log 단위 선형적

Table 5. Diametral fatigue test results of dense-graded 20 and fiber-reinforced asphalt concrete

(a) Dense-graded 20 asphalt concrete

Item Load (kgf)	Thickness t (mm)	Recoverable horizontal stain $\epsilon_{rec} \times 10^{-3}$	Maximum total horizontal stain $\epsilon_{tot} \times 10^{-2}$	Resilient modulus Mrtot (kgf/cm ²)	Numbers of failure N _f
800	63.8	13.879	11.6168	31378	532
	62.3	11.283	11.1157	39525	548
	62.2	10.346	5.4345	43174	1,053
Average	62.8	11.836	9.3890	38026	711
600	62.5	7.787	4.2476	42814	3,416
	62.0	7.859	4.5729	42769	3,018
	62.0	7.029	4.1043	47657	4,026
Average	62.2	7.558	4.3083	44413	3,487
500	62.4	6.002	2.8895	42365	9,582
	62.1	4.794	2.4677	58325	18,067
	62.3	5.196	2.6433	53645	14,501
Average	62.3	5.331	2.6668	52778	14,050
400*	62.1	4.614	2.8787	48481	32,181
	61.5	3.749	1.6711	60254	33,212
Average	61.8	4.182	2.2749	54368	32,696

*Table 4에 나타난 시료의 추가시험을 실시하였음.

(b) Fiber-reinforced asphalt concrete

Item Load (kgf)	Thickness t (mm)	Recoverable horizontal stain $\epsilon_{rec} \times 10^{-3}$	Maximum total horizontal stain $\epsilon_{tot} \times 10^{-2}$	Resilient modulus Mrtot (kgf/cm ²)	Numbers of failure N _f
800	63.5	9.985	5.0740	43887	1,845
	61.9	9.429	6.2446	50402	2,047
	62.4	10.671	6.5880	53011	2,533
Average	62.6	10.028	5.8689	49100	2,142
600	63.2	6.525	2.7669	50610	8,734
	63.2	5.624	2.1757	58724	8,108
	62.4	6.993	3.4482	47749	7,474
Average	62.9	6.381	2.7969	52361	8,105
500	62.5	4.794	1.3358	57952	27,432
	63.0	4.511	1.2499	61110	33,303
	62.5	3.929	0.7230	57610	50,108
Average	62.7	4.411	1.1029	58891	36,948

동은 피로파괴 모델 중 가장 일반적으로 사용되고 있다. 그 식은 다음과 같다.

$$N_f = K_3 \left(\frac{1}{\epsilon_r} \right)^{K_4} \quad (3)$$

여기서, N_f : 피로수명

ϵ_r : 회복 수평변형률

K_3, K_4 : 상수

Fig. 4는 200번째 하중에서의 총 수평변형률 및 회복 수평변형률과 피로파괴 횟수사이의 관계를 나타낸 그림이다. 그림에서 피로수명을 예측하는 중요한 상수인 K_1, K_2, K_3 와 K_4 값을 알 수 있다. Table 6은 피로파괴에 대한 총 수평변형률과 회복 수평변형률의 R^2 (적합계수)값을 나타내었다. 여기서, R^2 (적합계수)는 1에 가까울수록 그 상관관계가 서로 밀접한 것으로 볼 수 있다. 본 연구에서도 기존의 연구결과(Kim, N., 1994; 김낙석등, 1996)와 마찬가지로 회복 수평변형률이 밀입도 20 아스팔트 혼합물과 섬유보강 아스팔트 혼합물 모두에서 총 수평변형률보다 R^2 값이 높게 나타났다. 이것은 회복 수평변형률과 피로수명과의 상관관계가 총 수평변형률과 피로수명과의 상관관계보다 높다는 것을 나타내고 있다. 본 연구에서 밀입도 20 아스팔트 혼합물이 섬유보강 아스팔트 혼합물의 R^2 값보다 높게 나타났다. 이것은 손비빔으로 섬유를 혼합하기 때문에 혼합물내의 섬유의 분산정도에 따라 피로수명 결과치에 많은 영향을 주기 때문인 것으로 사료된다. 피로파괴에 대한 공용성 예측을 할 때, 총 수평변형률보다는 회복 수평변형률로 그 공용성을 예측하여야 한다는 최근 연구결과(Kim, N., 1994; 김낙석등, 1996)가 발표되었고, 본 연구에서도 유사한 결과를 얻을 수 있다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 섬유보강 아스팔트 혼합물이 재래식 밀입도 20 아스팔트 혼합물보다 피로 공용성면에서 우수함을 잘 보여주고 있다. 특히, Fig. 4의 (b)에서 회복 수평변형률이 0.01일 때 밀입도 20 아스팔트 혼합물의 파괴횟수는 약 2,000회 정도인 반면, 섬유보강 아스팔트 혼합물은 약 3,000~4,000회에 이르는 것을 알 수 있다. 또한 회복 수평변형률이 0.005일 때는 밀입도 20 아스팔트 혼합물의 파괴횟수는 약 18,000회 정도이고, 섬유보강 아스팔트 혼합물인 경우는 약 30,000회로 1.67배 높은 파괴횟수를 보이는

것을 알 수 있다. 즉, 섬유를 첨가한 아스팔트 콘크리트가 밀입도 20 아스팔트 콘크리트보다 피로파괴에 대한 높은 저항성을 갖으며 아스팔트 포장의 공용성에 보다 긍정적인 효과를 줄 것으로 판단된다.

피로파괴 시험 후 공시체를 강제로 완전히 분리시킬 때, 섬유보강 아스팔트 혼합물의 파괴면에서는 미세한 섬유의 저항으로 인하여 파괴면이 선명하게 나타나지 않았다. 이것은 무수히 많은 섬유가 파괴면에서 인장파괴에 대하여 저항함으로써 그 파괴면이 일정하게 나타나지 않고 있음을 보여줄 뿐 아니라 섬유보강으로 인하여 아스팔트 혼합물의 점착력이 보강된 것으로 보인다. 반면에 밀입도 20 아스팔트 혼합물은 그 파괴면이 비교적 선명하게 나타나 있었다. 이것은 밀입도 20 아스팔트 혼합물은 한계피로수명에 도달한 후 급격한 추가파괴가 일어나서 도로의 공용성을 저하시키는 포트홀(pothole)과 같은 현상이 일어날 것으로 보인다. 반면에 섬유보강 아스팔트 혼합물의 파괴면을 자세히 관찰하면 한계피로수명 이후에도 미세한 섬유의 저항으로 상당한 공용성 지연 효과를 보여줄 것으로 사료된다. Fig. 5는 피로파괴 시험시 혼합물에 따른 파괴면의 증가추세를 나타내고 있으며, 위의 사실들을 잘 설명하고 있다. 섬유류는 아스팔트 혼합물의 인장강도와 점착력을 보강하거나 증진시킬 수 있는 성질이 있다. 공학적 특성을 개선하기 위해, 일반적으로 폴리프로필렌 섬유를 아스팔트 혼합물에 사용할 경우 섬유가 변형되거나 용해되는 것을 방지하기 위하여 아스팔트 혼합물의 온도는 149℃를 초과해서는 안되며, 골재온도는 143℃를 초과해서는 안되는 단점이 있다. 그러나, 본 연구에서 사용된 K 섬유는 높은 온도(150℃ 이상)에서도 그 성능을 유지하며 연하게 되거나 용해되지 않는 장점을 갖고 있다.

본 연구에서는 산업 폐기물인 K 섬유를 아스팔트 혼합물에 첨가함으로써, 피로파괴에 대한 저항성과 자원 재활용뿐 아니라 아스팔트 혼합물의 점착성도 어느 정도 효과가 있을 것으로 보인다. 이것은 피로파괴뿐 아니라 반사균열(reflection cracking)이나, 가열 아스팔트 표층과 기층(하부층)사이의 부실한 점착 때문에 발생하는 미끄럼 균열(slippage cracking), 골재입자가 아스팔트 혼합물에서 분리되는 박리(stripping) 또는 피로파괴에 의한 포트홀(pothole) 등에도 상당한 공용성 증대 효과를 얻을 수 있는

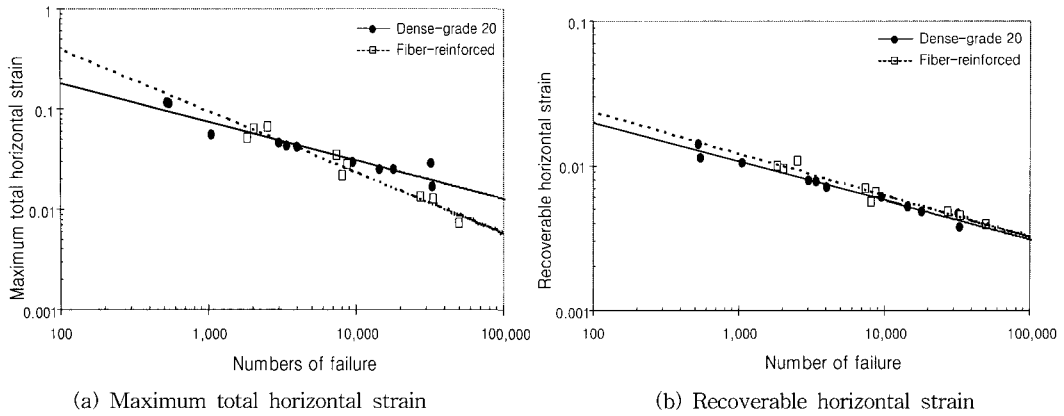


Fig. 4 Curves of diametral fatigue test results with maximum total horizontal strain and recoverable horizontal strain

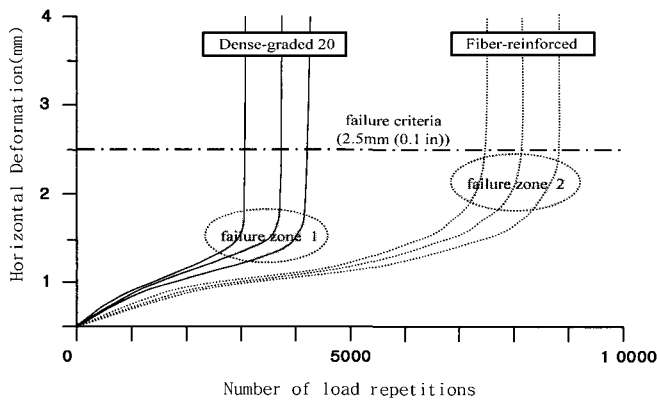


Fig. 5 Growth of horizontal deformation under intermediate stress level(600kgf)

Table 6. Summary of R2, K1, K2, K3 and K4 values determined using recoverable and maximum total horizontal strains

Item	Dense-grade 20 asphalt concrete		Fiber-reinforced asphalt concrete	
	Maximum total	Recoverable	Maximum total	Recoverable
R ²	0.90	0.97	0.93	0.95
K ₁ , K ₃	2.48	7×10 ⁻⁹	35.37	9×10 ⁻⁴
K ₂ , K ₄	2.36	3.64	1.49	3.64

것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 아스팔트 혼합물에 산업폐기물인 K 섬유를 첨가하여 아스팔트 콘크리트의 피로에 대한 공용성증진 가능성을 평가하기 위한 목적으로 수행되었다. 특히, 피로파괴(fatigue failure)에 대한 재래식 밀입도 20 아스팔트 혼합물과 섬유보강 아

스팔트 혼합물과의 공용성 비교를 통하여 산업 폐기물인 K 섬유를 재활용과 아스팔트 콘크리트 도로포장의 공용성에 큰 문제점 중 하나로 지적되고 있는 피로파괴에 대한 저항성을 분석평가하고자 수행되었다. 이러한 목적으로 수행된 본 연구의 결과는 다음과 같다.

1. 적정 섬유 첨가량과 최적 아스팔트 함량을 결정하기 위하여 마찰 배합시험을 수행한 결과

섬유 0.2%, 아스팔트 함량 5.5%를 첨가하였을 때에 마찰 배합설계 규정에 적합하면서 아스팔트 혼합물의 작업성이 가장 우수한 것으로 나타났다. 특히, 안정도에 있어서는 재래식 밀입도 20 아스팔트 혼합물(아스팔트 함량 5.1%) 보다 섬유보강 아스팔트 혼합물(섬유 0.2%, 아스팔트 함량 5.5%)이 약 132% 우수한 것으로 나타났다.

2. 피로시험을 수행한 결과, 전체적으로 밀입도 20 아스팔트 혼합물보다 섬유보강 아스팔트 혼합물이 피로파괴에 대한 높은 저항성을 보였다. 특히, 하중이 800kgf일 때 섬유보강 아스팔트 혼합물이 밀입도 20 아스팔트 혼합물보다 약 3.48배, 600kgf일 때는 약 2.32배, 500kgf일 때는 약 2.62배의 높은 피로 파괴횟수를 각각 나타내었다.
3. 섬유보강 아스팔트 혼합물과 밀입도 20 아스팔트 혼합물 모두 총 수평변형량(균열폭)이 2.5mm에 이르렀을 때를 파괴기준으로 정하였다. 그러나 섬유보강 아스팔트 혼합물과 밀입도 20 아스팔트 혼합물의 피로 균열진행(crack propagation)을 비교하여 보면 섬유보강 아스팔트 혼합물은 매우 완만한 파괴진행 과정을 보인 반면, 밀입도 20 아스팔트 혼합물은 급격한 파괴를 보였다. 이러한 현상은 현장에서 미세한 피로균열 발생후 완전 파괴에 이를때까지의 균열진행(crack propagation)을 설명하고 있으며, 섬유보강 아스팔트 콘크리트사용 포장인 재래식 밀입도 20 아스팔트 혼합물사용 포장보다 미세균열 발생후 2차적인 균열진행 속도가 매우 느리게 진행될 수 있다는 사실을 설명한다.
4. 피로파괴 공용성에 영향을 미치는 중요한 인자로 사료되는 회복탄성계수값은 사용된 하중 Level에 따라 섬유보강 아스팔트 혼합물이 밀입도 20 아스팔트 혼합물보다 약 1.15~1.18 배 높게 측정되어 피로파괴에 대한 개선효과를 간접적으로 나타내고 있다.

위의 결과들을 종합해 볼 때 아스팔트 혼합물에

산업폐기물인 K 섬유를 첨가하여 사용함으로써 기존의 밀입도 20 아스팔트 혼합물에서 발생하는 피로파괴에 대한 저항성 증진 효과를 기대할 수 있으며, 폐섬유를 도로포장용 재료로 재활용함으로써 날로 심각해지고 있는 환경문제에 기여할 수 있을 것으로 사료된다. 하지만 섬유를 아스팔트 혼합물에 첨가할 때 균등한 혼합이 되도록 하기 위한 Batch Plant 기술에 관한 연구와 소성변형, 저온균열 및 실용화 방안이 추가적으로 연구되어야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 김낙석, Kim, Y. R., 임정순(1996), 회복 수평 변형을 이용한 아스팔트 혼합물의 피로예측, 대한토목학회 논문집, 제16권, 제III-3호.
2. 김낙석(2002), 섬유활용 아스팔트 콘크리트의 실험적 공용특성 평가, 한국도시방재학회 논문집, 제 2집 2호.
3. 아스팔트 포장연구회(1998), 가열 아스팔트 혼합물의 배합설계지침.
4. 아스팔트 포장 연구회(1999), 아스팔트 포장 공학 원론.
5. 한국 건설기술 연구원(1998), 비용절감을 위한 도로재료 연구사업.
6. Asphalt Institute(1995), SUPERPAVE Level 1 Mix Design, SP-2.
7. Dupont(1999), The Uncommon Material for Uncommon Solutions-Kevlar.
8. Kim, N.(1994), Development of Performance Prediction Models for Asphalt Concrete Layers, Ph. D. Dissertation North Carolina State University, Raleigh, NC.
9. Kim, N.(1991), Effect of Temperature and Mixture Variables on Fatigue and Permanent Deformation of Asphalt Concrete, Master Thesis, North Carolina State University.
10. Roberts, Kandhal, Lee and Kennedy(1996), Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction.