



하이브리드 섬유로 보강된 콘크리트 포장의 역학적 특성 실험연구

박종섭¹⁾ · 최성용¹⁾ · 정우태¹⁾ · 박영환^{1)*}

¹⁾한국건설기술연구원 인프라구조연구실

An Experimental Study on Mechanical Properties of Hybrid Fiber Reinforced Concrete Pavement

Jong-Sup Park,¹⁾ Sung-Yong Choi,¹⁾ Woo-Tai Jung,¹⁾ and Young-Hwan Park^{1)*}

¹⁾Structural Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Thchnology, Goyang 411-712, Korea

ABSTRACT Cement concrete pavement offers long-term service life and excellent applicability for heavy traffic. It is easier to purchase and more durable and economical than the asphalt pavement. However, it is difficult to repair and rehabilitate compared to the asphalt pavement when it comes to the maintenance problem. Since the crack is the main reason of the damage of concrete pavement, it is necessary to control the early and long-term crack in the concrete pavement. In this experimental study, the basic performance tests have been carried out to investigate the effect of hybrid fibers which were composed of micro fibers with small diameter and high aspect ratio and macro fibers with large diameter and low aspect ratio on the concrete pavement, in which lower water ratio and larger aggregates were used compared to the general concrete mixture. The test results showed that the flexural strength and toughness of concrete pavement mixture have been increased with the use of hybrid fibers in the concrete pavement mixture, even though they were less effective compared to the normal concrete mixture. It was found that the hybrid fibers were effective to control the early shrinkage of the concrete pavement which is one of the main reasons of the damage in the concrete pavement.

Keywords : fiber reinforced concrete, micro fiber, macro fiber, pavement, hybrid

1. 서 론

도로 포장은 사용 재료에 따라 크게 아스팔트 콘크리트 포장과 시멘트 콘크리트 포장으로 분류할 수 있으며, 포장 구조체의 강성에 따라 전자는 연성포장, 후자는 강성포장으로 분류하기도 한다. 시멘트 콘크리트 포장은 1970년대 무근 콘크리트 포장공법이 처음 도입된 후, 1980년대 남해고속도로 및 88고속도로에 콘크리트 포장이 적용된 것을 시작으로 그 적용실적이 점차 증가되어 현재 국내 고속도로 포장 등에 널리 쓰여지고 있으며,¹⁾ 전체 포장 면적의 16%를 차지하고 있다.

시멘트 콘크리트 포장은 중차량에 대한 적용성이 뛰어나고 사용수명이 길며 국내에서 비교적 수급이 용이한 시멘트를 활용할 수 있다는 장점에서 사용이 증가하고 있다. 그러나 시멘트 콘크리트 포장에서는 다양한 원인

에 의해 균열이 발생하고 이로 인한 단차 및 펌핑 등과 같은 2차 손상문제가 대두되고 있으며, 특히 손상 발생시 보수가 어렵고 공사의 규모가 커지는 문제점으로 인해 고유의 장점을 충분히 활용하지 못하는 것으로 지적되고 있다.^{2,3)}

기존 연구에 의하면 콘크리트 포장에 발생하는 손상은 주로 균열에 기인하며, 각종 콘크리트 포장 균열의 원인 구명에 관한 연구가 진행되어 이를 해결하기 위한 방안이 제시되고 있다.^{4,5)} 기존 연구들에 따르면 콘크리트 포장에서의 균열은 소성수축, 건조수축, 수화열, 콘크리트 상하부의 온도차 및 알칼리 실리카 반응 등 다양한 요인에 의해 발생하게 되며, 대부분 시공조건 또는 콘크리트 재료의 품질에 의한 초기 균열이 원인인 것으로 알려져 있다. 기존 연구에서는 이를 해결하기 위해 철저한 시공 품질관리, 줄눈 설치시기 및 설치위치 등과 같은 균열 제어 방안들을 제시하고 있다.^{6,7)}

콘크리트 포장에 발생하는 균열의 근본적인 원인은 콘크리트 재료 자체의 역학적 특성에 기인한다고 볼 수 있다. 즉, 콘크리트는 압축강도에 비해 상대적으로 현저히 낮은 휨·인장성능을 갖고 있기 때문에 이로 인한 인성의

*Corresponding author E-mail : yhpark@kict.re.kr

Received March 15, 2012, Revised November 12, 2012,

Accepted December 7, 2012

©2013 by Korea Concrete Institute

저하와 균열의 발생은 콘크리트의 피할 수 없는 특성인 것으로 인식되고 있다. 섬유보강 콘크리트는 이러한 콘크리트의 단점을 개선하기 위해 제안된 대표적인 방법 중 하나이다. 섬유보강 콘크리트는 콘크리트의 낮은 휨·인장성능을 섬유가 부담하게 함으로써 콘크리트 부재의 취성파괴를 방지하고 균열제어를 통해 인성을 보강할 목적으로 제안된 것으로 특히 소성수축과 건조수축 등에 의해 발생하는 균열을 제어할 목적으로 많은 연구가 이루어지고 있다. 2004년에는 PVA, PP섬유 혼입에 따른 콘크리트의 수축제어 가능성에 대한 연구 등이 진행되었고, 2005년에는 마이크로 및 매크로 섬유를 혼합 보강하여 콘크리트의 파괴특성이 개선되는 것을 밝힌 바 있다. 또한, 최근에는 PET섬유 혼입에 따른 시멘트 복합체의 변형경화 특성 등이 연구되고 있다.⁸⁻¹⁰⁾

섬유보강 콘크리트에 대한 기존 연구는 주로 섬유 종류 및 혼입률에 따른 강도 및 연성 등의 구조성능 변화에 대한 연구가 주를 이루고 있으며, 콘크리트 배합조건에 따른 섬유보강 효과에 대한 연구는 미미한 실정이다. 특히 단위 수량을 150 kg/m³ 이하로 제한하고, 굵은 골재의 최대 치수를 40 mm 이하로 규정하는 포장 콘크리트 배합에서 섬유보강 효과에 대한 연구는 거의 이루어지지 못하고 있다. Li와 Stang(1997)의 연구에 따르면 콘크리트의 굵은 골재 유무 및 배합량에 따라 섬유 부착면의 특성이 다르게 나타나기 때문에 보강효과에도 차이가 있는 것으로 보고되었으며, 골재 크기와 섬유보강 콘크리트의 성능 및 파괴모드의 상관관계를 검토한 다른 연구에서도 골재 크기가 커짐에 따라 섬유에 의한 보강효과는 감소되는 것으로 보고하고 있다.¹¹⁻¹³⁾ 따라서 일반 콘크리트에 비해 골재의 최대 치수가 10 mm 이상 차이가 나고, 콘크리트 전체 체적에서 골재가 차지하는 부피가 크게 증가하는 포장용 콘크리트 배합에서는 일반 콘크리트와 동일한 방법의 섬유보강만으로는 충분한 효과를 기대하기 어려울 것으로 판단된다. 특히 섬유보강량을 증가시키는 경우에는 콘크리트 포장 배합의 낮은 단위수량을 고려할 때 유동성이 너무 낮아지거나 섬유가 제대로 분산되지 못하고 뭉치는 현상이 발생할 가능성이 높기 때문에 원하는 보강효과가 발휘되지 못할 수 있으며, 이를 보완하기 위해 혼화제를 과다 투입하면 재료분리 및 원가상승의 문제가 발생할 수 있다.¹⁴⁾

일반적으로 섬유보강으로 인한 성능향상의 효과가 나타나기 위해서는 0.5~0.7% 이상의 섬유 혼입이 필요한

것으로 알려져 있으나, 이는 강도적인 측면에서의 분석이 대부분이며, 저혼입의 수준에서 인성을 평가한 연구 문헌은 많지 않고, 포장 저혼입 배합의 경우는 이마저도 전무하다고 할 수 있다. 또한, 초기균열을 제어할 목적으로 PP섬유를 활용할 때 0.1% 정도의 저혼입률에도 효과가 있다고 알려져 있다.¹⁵⁾

이에 이 연구에서는 콘크리트 포장에서 균열제어 및 인성 증가를 위한 섬유보강의 효과를 평가하고, 적절한 섬유보강 방안을 도출하기 위해 콘크리트 배합, 섬유의 종류 및 섬유부피비를 변수로 하는 섬유보강 콘크리트 실험체를 제작하고 경화 전 및 후의 역학적 특성을 평가하였다. 섬유부피비는 작업성에 미치는 영향 및 경제성을 고려하여 최대 0.3%가 되도록 하였으며, 섬유의 종류는 강도와 인성보강 효과를 동시에 얻을 수 있도록 마이크로 섬유와 매크로 섬유를 복합하여 보강하는 것으로 했다.⁹⁾

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험변수 및 계획

이 연구에서는 콘크리트 배합에 따른 섬유보강 효과의 변화를 고찰하기 위해 보통 콘크리트 배합에 대한 섬유보강 실험체와 콘크리트 포장 배합에 대한 섬유보강 실험을 계획하였다. 두 배합의 주요한 차이점은 단위수량과 골재 최대 치수이며, 상세한 배합조건은 Table 1과 같다. 또한 콘크리트 포장 배합에 대한 효과적인 섬유보강 방안을 도출하기 위해 마이크로 섬유 또는 매크로 섬유만으로 보강된 경우와 마이크로 섬유와 매크로 섬유를 각각 혼합하여 보강한 경우에 대한 실험체를 계획하였다. Fig. 1은 변수명에 대한 설명이며, 실험변수와 변수별 해설은 Table 2에 나타내었다.

배합에 따른 섬유보강 효과는 압축강도와 인장강도를 통해 비교하는 것으로 계획하였으며, 콘크리트 포장에

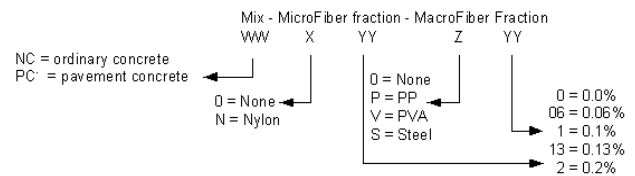


Fig. 1 Specimen description

Table 1 Mixture proportions of concrete

Type	W/C (%)	S/a (%)	AE/C (%)	SP/C (%)	W (kg/m ³)	Volume mixing (ℓ/m ³)			Max. coarse aggregate size (mm)
						C	S	G	
Normal	50	40	0.018	0.35	178	113	265	398	25
Pavement	42.3	39	0.02	0.28	150	113	270	422	32

Table 2 Parameter and fiber volume fraction

Specimen	Mixture	Volume fraction (%)				
		Nylon	PP	PVA	Steel	
NC-00-00	Normal concrete	-	-	-	-	
NC-N2-00		0.2	-	-	-	
NC-00-V2		-	-	0.2	-	
PC-00-00	Pavement concrete1	-	-	-	-	
PC-N2-00		0.2	-	-	-	
PC-00-V2		-	-	0.2	-	
PC-00-00		-	-	-	-	
PC-N1-V1		0.1	-	0.1	-	
PC-N1-S1		0.1	-	-	0.1	
PC-N1-P1		0.1	0.1	-	-	
PC-N06-V13		Pavement concrete2	0.066	-	0.133	-
PC-N06-S13			0.066	-	-	0.133
PC-N13-P06			0.133	0.066	-	-
PC-N1-V2	0.1		-	0.2	-	
PC-N1-S2	0.1	-	-	0.2		
PC-N2-P1	0.2	0.1	-	-		

대한 섬유보강 효과는 경화 전의 유동성 평가, 경화 후의 강도, 인성 및 수축량 등을 통해 비교하는 것으로 계획하였다. 실험체는 변수별, 실험 항목별로 강도실험은 각 3개씩, 수축특성은 각 2개씩 실험하는 것으로 계획하였다.

2.2 사용 재료 및 실험 방법

실험에 사용된 주요 재료의 특성은 Table 3~5와 같다. 시멘트는 국내 A사의 보통 포틀랜드 시멘트(OPC)를 사용하였으며, 굵은 골재와 잔골재는 각각 대덕산, 옥산산을 사용하였다.

콘크리트의 혼합은 트윈샤프트 믹서를 사용하여 잔골재, 시멘트, 섬유 및 굵은골재를 투입하고, 30초 동안 건비빔을 저속(20 rpm)으로 실시하였다. 건비빔 후 물을 넣고 60초 동안 중속(30 rpm)으로 비빔 후, 다시 혼합체를 첨가하여 고속(40 rpm)으로 90초 동안 비벼 콘크리트를 제조하였다.

굳지 않은 콘크리트의 실험에서 슬럼프는 KS F 2402 규정에 의거 실시하였으며, 공기량은 KS F 2421 규정에 따라 실시하였다. 경화 콘크리트의 압축, 인장, 휨시험은 해당 규격에 맞는 공시체(압축 인장시험체 $\phi 10 \times 20$, 휨 시험체 $55 \times 15 \times 15$)를 제작하여 양생온도 20°C가 유지되도록 1일간 기중 양생을 실시한 후 탈형하여, 수중 양생조에서 소요 재령까지 양생한 후 KS F 2405(압축강도), KS F 2423(쪼갠인장강도), KS F 2408(휨강도), KS F 2566(휨인성), KS F 2424(콘크리트의 길이변화), KS F 2586(콘크리트의 자기수축변화) 규정에 의거하여 실험을 실시하였다.

Table 3 Physical properties of ordinary portland cement

Density (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)	Soundness (%)	Setting time (Min)		Compressive strength (MPa)		
			Ini.	Fin.	3 days	7 days	28 days

Table 4 Physical properties of aggregates

Type	Density (g/cm ³)	Fineness modules	Absorption ratio (%)
River sand	2.65	2.86	2.63
Crushed sand	2.50	2.62	1.42
Coarse agg. 20 mm	2.71	7.01	1.18
Coarse agg. 32 mm	2.70	6.88	0.58

Table 5 Physical properties of fiber

Property	NY	PP	PVA	ST
Density (g/cm ³)	1.16	0.91	1.30	7.86
Aspect ratio	1000	75~100	45	65
Length (mm)	12	30	30	35
Diameter (mm)	0.012	0.3~0.4	0.66	0.54
Tensile strength (MPa)	896	250~1000	900~1600	1200
Modulus of elasticity (GPa)	3.9~4.9	3~30	23~41	200

3. 실험 결과 및 분석

3.1 배합에 따른 실험 결과

Fig. 2는 마이크로 섬유(nylon) 또는 매크로 섬유(PVA) 0.2% 부피비로 보강된 보통 콘크리트 배합과 포장 콘크리트 배합의 강도비를 나타낸 것이다. 그림에서 강도비는 각 배합별로 보강되지 않은 콘크리트에 대한 섬유보강 콘크리트의 강도비를 의미한다. 그림에 보인 바와 같이 배합에 관계없이 섬유에 의한 보강효과는 콘크리트의

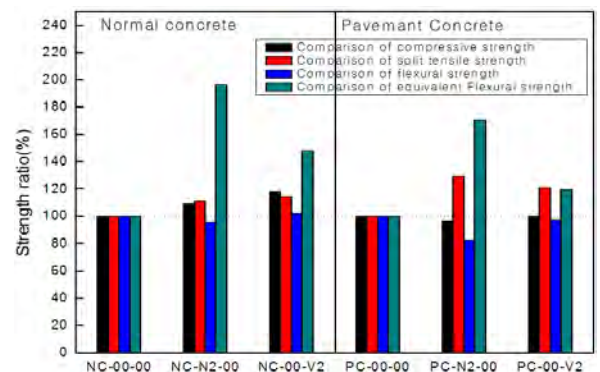


Fig. 2 Comparison of strength ratio

인성을 나타내는 등가휨강도에서 가장 크게 나타나고 있다. 최대휨강도가 낮더라도 섬유보강에 의한 인성증가로 인해 균열 이후의 인성에너지가 작용하여 등가휨강도가 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 일반 콘크리트 배합 및 포장 콘크리트 배합 모두 인장강도가 소폭 향상되는 일정한 상승 경향을 나타내었으나, 일반적으로 일반 콘크리트에서 매크로 섬유유의 함유량이 0.5% 이상 혼입되어야 일정 성능이 발휘되는 것으로 알려져 있으므로 이는 섬유유의 분산차 등의 실험적 오차로 볼 수 있다.

3.2 하이브리드 섬유보강 콘크리트 포장 실험 결과

3.2.1 굳지 않은 콘크리트 특성

Fig. 3과 4에는 각각 콘크리트 포장 배합의 변수별 슬럼프 및 공기량을 나타내었다. Fig. 3에서 섬유가 보강되지 않은 PC-00-00 실험체의 경우에는 30 mm의 슬럼프 값으로 도로공사 표준시방서의 포장 콘크리트 슬럼프 기준값인 25±10 mm를 만족하는 값을 나타냈으나, 섬유보강 콘크리트에서는 섬유부피비가 0.2%로 매우 낮았음에도 불구하고 섬유보강에 따른 점성 증가로 인해 15 mm 내외의 매우 낮은 슬럼프 값을 나타냈다. 실제 현장에서는 대체적으로 35~40 mm 정도의 슬럼프 값을 유지하는 것이 일반적이라고 알려져 있으므로 섬유보강에 따른 슬럼프 감소가 현장에서의 작업 성능에 어느 정도 영향을 미칠 수 있는지 추가적인 검토가 필요하며, 비교적 저렴한 재료로 타설되는 포장 배합에서 보강성능의 향상을 위해 섬유부피비를 증가시키는 것은 작업 성능, 섬유유의 분산성, 경제적인 측면 등을 고려하였을 때 적정 한계선이 있을 것으로 판단된다.

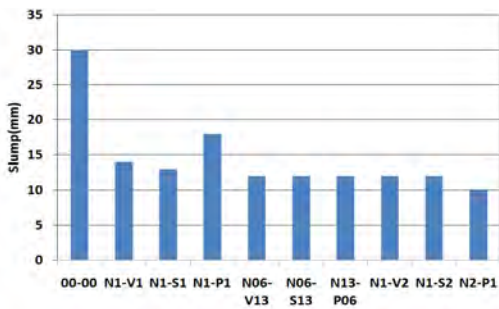


Fig. 3 Slump for pavement concrete

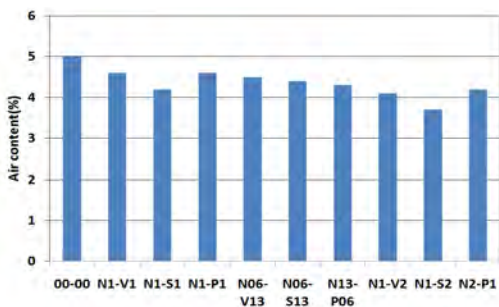


Fig. 4 Air content for pavement concrete

Fig. 4에서 섬유보강된 실험체는 섬유가 없는 배합보다 공기량이 감소하는 것으로 나타났으나 그 차이는 실험오차로 판단된다.

굳지 않은 콘크리트 특성에 대한 실험 결과 섬유 혼입에 따라 유동성이 저하되는 것으로 나타났으나 마이크로 섬유와 매크로 섬유의 혼합 보강에 따른 영향은 거의 없는 것으로 나타났다.

3.2.2 경화 콘크리트의 강도 특성

Fig. 5에는 콘크리트 포장 배합의 재령별 압축강도를 나타내었다. 그림에서 섬유종류에 관계없이 섬유부피비에 따라 압축강도가 증가하는 것으로 나타났으며, 동일한 섬유부피비 0.2%에서는 압축강도의 변화가 크지 않은 것으로 나타났다.

Fig. 6은 재령 28일에서의 쪼갬인장강도를 비교하여 나타낸 것이다. PC-00-00 실험체에 비해서 섬유보강 콘크리트 실험체의 성능향상을 소폭 기대하였으나, 섬유보강에 따른 강도는 증가되지 않았으며 소폭의 편차만이 나타났다. 이는 섬유 혼입률이 낮고 섬유의 분산성이 좋지 않은 것에 기인한 실험적 오차로 판단되며, 일반 콘크리트의 배합과 마찬가지로 포장 콘크리트 배합에서도 0.2% 섬유보강으로는 뚜렷한 인장강도의 향상이 관찰되지 않았다.

이 그림에 의하면 나일론과 PVA섬유를 1:1로 보강한 PC2-N1-V1 실험체와 섬유부피비 0.3%로 보강한 PC2-N1-V2, PC2-N1-S2를 제외한 모든 실험체의 인장강도가 무보강 콘크리트 포장 배합 실험체보다 낮게 나타났다.

Fig. 7은 재령 7일 재령 28일의 변수별 휨강도를 나타

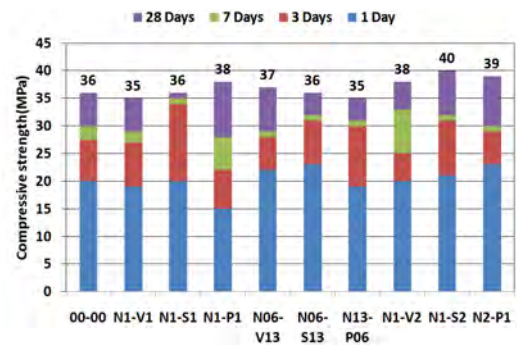


Fig. 5 Comparison of compressive strength

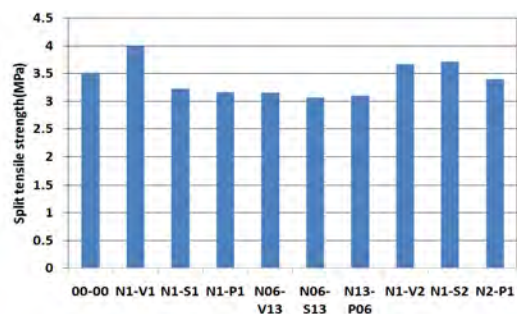


Fig. 6 Comparison of split tensile strength

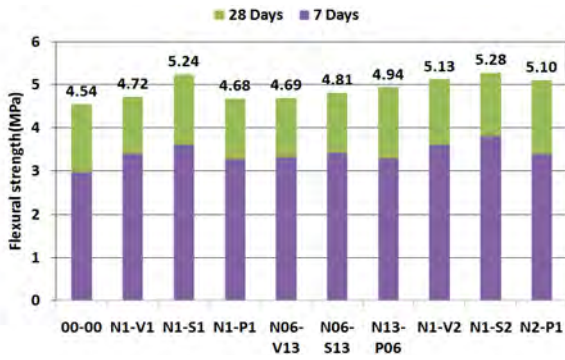


Fig. 7 Comparison of flexural strength

낸 것이다. 이 그림에서 모든 섬유보강 실험체의 휨강도는 무보강 실험체보다 향상되는 것으로 나타났으며, 동일 섬유 실험체의 경우 섬유부피비가 0.2%에서 0.3%로 증가되면 휨성능도 증가하는 것으로 나타났다. 섬유부피비가 0.2%인 경우 동일 섬유 실험체의 휨강도는 마이크로 섬유의 함유 비율이 클수록 증가하는 것으로 나타났다. 섬유부피비 0.2%에서 마이크로 섬유와 매크로 섬유의 비율을 1:1로 보강한 PC2-N1-V1, PC2-N1-S1에 비해 섬유 비율을 1:2로 보강한 PC2-N06-V13, PC2-N06-S13의 휨강도는 각각 1%, 9% 낮아졌다. 마이크로 섬유와 매크로 섬유 비율을 2:1로 보강한 PC2-N13-P06은 PC2-N1-P1에 비해 휨강도가 약 6% 증가하는 것으로 나타났다. 실험 결과에 의하면 강(steel) 매크로 섬유의 경우 마이크로 섬유에 의한 휨보강 효과 변화폭이 비교적 높게 나타났으며, PVA섬유를 매크로 섬유로 혼입한 경우에는 강 매크로 섬유와 비교하여 상대적으로 영향이 작은 것으로 나타났다.

Fig. 2의 결과와 비교할 때 마이크로와 매크로 섬유의 복합 보강은 휨성능 향상에 효과적인 것으로 판단되며, 특히 마이크로 섬유의 휨성능 향상 기여도가 높은 것으로 판단된다. 이러한 경향은 기존 섬유보강 콘크리트의 일반 배합 범위에서의 실험 결과들과 일치하는 것으로 포장 배합에서도 마이크로 섬유가 최대하중 이전의 균열제어에 효과적으로 작용하고 있는 것으로 판단된다.¹⁶⁻¹⁸⁾

Fig. 2와 Fig. 5~7의 결과를 요약하면 콘크리트 포장 배합에서 하이브리드 섬유보강은 인장강도 측면에서 기여도는 크지 않으나 매크로 섬유에 의해 압축강도를 향상시키는 효과가 있으며, 몇몇 변수에서 섬유보강에 의해 소폭의 휨강도 향상이 나타났다. 특히 하이브리드 섬유보강은 휨강도 측면에서 시너지 효과를 나타내는 것으로 판단된다.

3.2.3 경화 콘크리트의 인성

마이크로 섬유와 매크로 섬유를 하이브리드화시켜 보강하는 가장 큰 이유는 마이크로 섬유에 의한 강도증진 효과와 매크로 섬유에 의한 인성증진 효과를 동시에 얻기 위해서이다.¹⁶⁾ 앞서 분석한 바와 같이 이 연구에서 수행한 실험에 따르면 기존 연구 결과들과 마찬가지로 하이브리드 섬유보강은 휨강도 향상에 효과적이며, 특히

마이크로 섬유의 휨강도 향상에 기여가 큰 것으로 나타났다.

이 연구에서는 하이브리드 섬유보강이 포장용 콘크리트 배합의 휨인성에 미치는 영향을 고찰하기 위해 KS F 2566의 등가휨강도 및 인성지수 산정식에 따라 4점 휨재하시험으로 구한 Fig. 8의 응력-변위 곡선으로부터 휨인성을 평가하였다. KS F 2566에 따른 재령 28일의 등가휨강도 및 인성지수는 Table 6과 같다.

Fig. 8에서 보강섬유에 강섬유를 포함한 실험체가 상대적으로 최대값 이후의 응력 저하폭이 가장 작은 것으로 나타났으며, PP, PVA섬유를 함유한 실험체의 응력 저하폭은 유사한 것으로 나타났다.

마이크로 섬유와 PP 또는 PVA 매크로 섬유의 혼합비가 소폭 변화하더라도 최대강도 이후의 강도에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 나타났으나, 강섬유가 포함된 실험체에서는 섬유함유량 0.3%가 섬유함유량 0.2%보다 최대강도 이후 강도가 증가하는 것으로 관찰되었다. 강섬유가 포함된 실험체는 강섬유 혼합비율에 따라 인성지수도 증가하는 경향을 나타냈다.

Table 6에 보인 바와 같이 섬유보강된 실험체는 전반적으로 PC-00-00 실험체와 비교하였을 때 등가휨강도의 성능이 증가하는 경향을 나타냈으며, 강섬유 혼입 실험체는 최대 3배 이상 등가휨강도가 증가하는 것으로 나타났다. 경화 콘크리트의 강도 특성에서 마이크로 섬유함유량이 증가함에 따라 휨강도가 증가했던 경향과는 달리 등가휨강도의 경우에는 마이크로 섬유의 혼합비 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. 강섬유가 혼입되지 않은 나일론-PP, 나일론-PVA 섬유보강 실험체는 총 섬유보강량이 증가하면 등가휨강도가 증가하지만 마이크로 섬유와 매크로 섬유 혼합비율이 등가휨강도에 미치는 영향은 일정한 경향을 나타내지는 않았다. 강섬유 혼입 실험체는 마이크로 섬유 혼합비가 큰 PC2-N1-S1 실험체의 휨강도가 PC2-N06-S13보다 큰 것으로 나타났지만 등가휨강도는 강섬유 혼합비가 큰 PC2-N06-S13 실험체가 더 큰 것으로 나타났다.

Table 6 Flexural toughness

Experimental condition	Equivalent bending stress (MPa)	Toughness index (I _s)
PC-00-00	0.46	1.085
PC-N1-V1	0.58	1.64
PC-N06-V13	0.65	1.407
PC-N1-V2	0.85	1.655
PC-N1-S1	1.15	1.888
PC-N06-S13	1.46	1.967
PC-N1-S2	1.49	2.546
PC-N1-P1	0.52	1.736
PC-N13-P06	0.7	1.411
PC-N2-P1	0.8	1.368

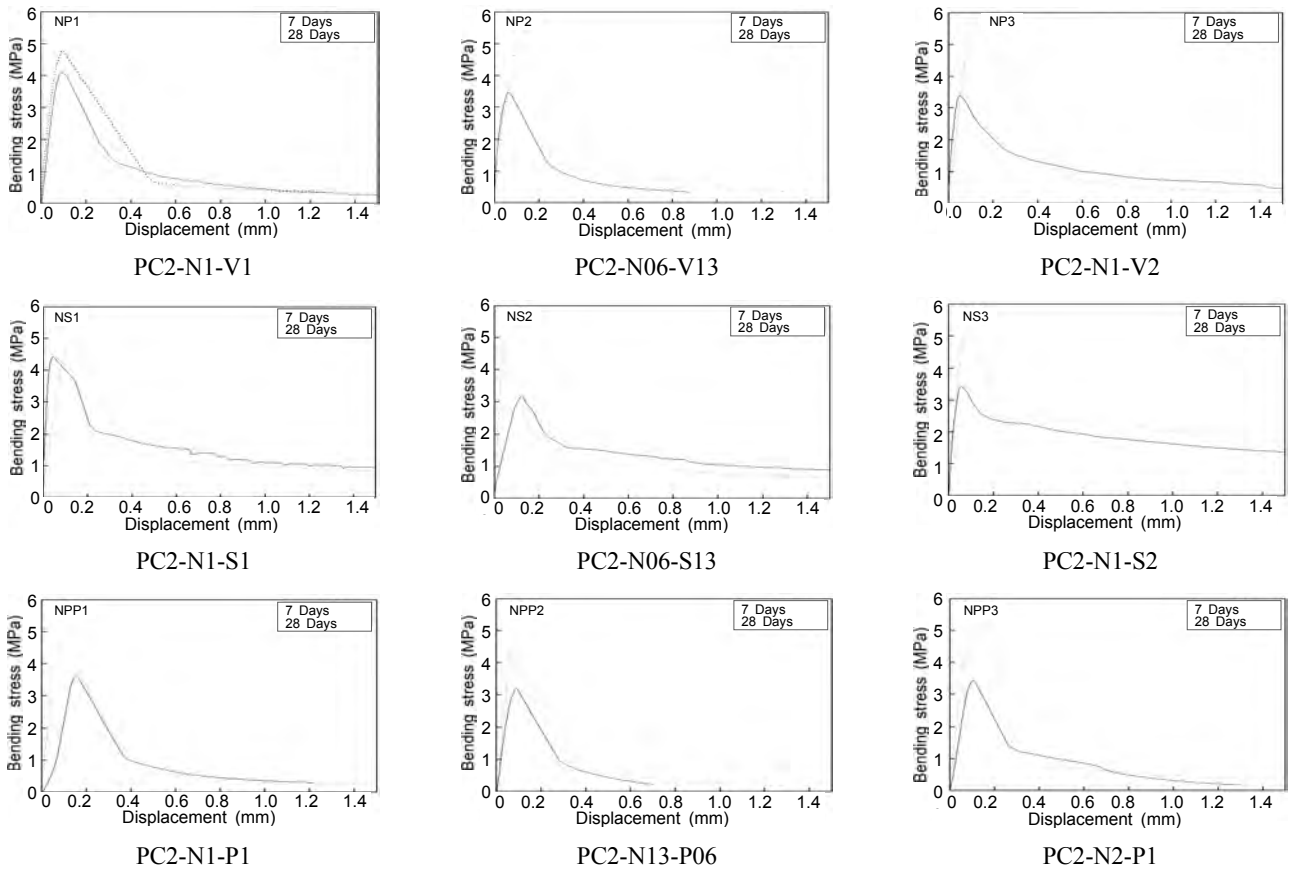


Fig. 8 Flexural stress-displacement curve

인성지수의 경우에도 섬유보강 실험체가 무보강 실험체보다 향상되는 것으로 나타났으며, 강섬유 혼입 실험체의 경우에는 강섬유 혼입비가 클수록 인성지수도 증가하는 것으로 나타났다. PP 또는 PVA 매크로 섬유가 혼합된 실험체에서는 마이크로 섬유와 매크로 섬유의 혼합비에 따른 경향은 나타나지 않았다.

3.2.4 수축특성 실험 결과

Fig. 9와 10에는 각각 재령 28일까지의 자기수축변형률과 재령 56일까지의 건조수축 변형률을 나타내었다.

Fig. 9에서 PC2-N2-P1을 제외한 섬유보강 실험체는 무보강 실험체와 유사하거나 작은 자기수축변형률을 나타내고 있다. 섬유보강 실험체의 자기수축변형률은 무보강 실험체 대비 $\pm 30\%$ 의 큰 차이를 나타내고는 있다. 그러나 자기수축변형률의 절대값이 100 마이크로 스트레인 내외로 매우 작기 때문에 실험오차를 고려할 때 이 실험 결과로부터 섬유보강에 의한 자기수축 감소 효과를 확인하기에는 다소 무리가 있는 것으로 판단된다.

하이브리드 섬유로 보강된 각 실험체들의 재령 56일까지의 건조수축 길이변화율은 각각 Fig. 10, Table 7과 같다. 섬유로 보강되지 않은 PC2-00-00 실험체는 초기 14일까지 건조수축이 급격하게 발생하다가 14일 이후 점차 수축변형률이 감소하여 재령 56일에서 500×10^{-6} 의 값을 나타냈다. Fig. 10에 나타난 바와 같이 섬유보강 실험체

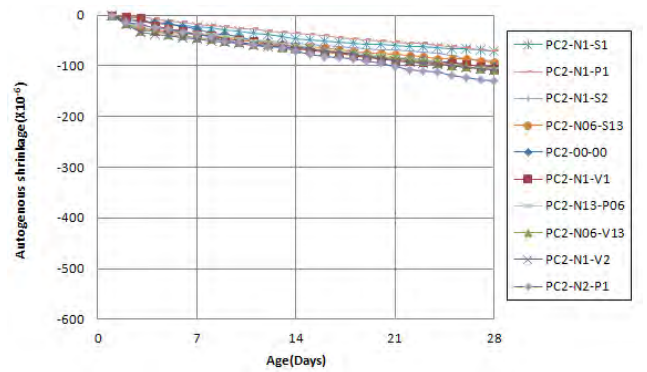


Fig. 9 Autogenous shrinkage of hybrid FRC

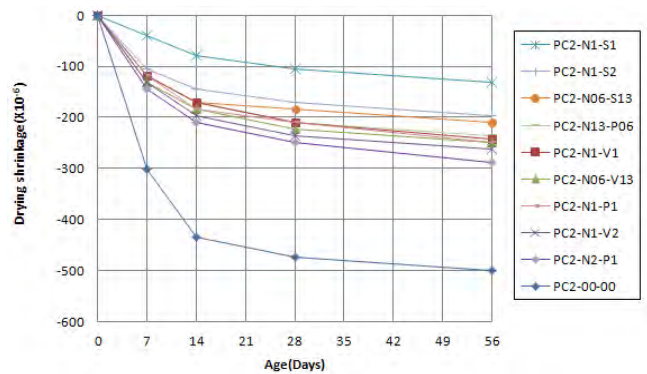


Fig. 10 Drying shrinkage of hybrid FRC

Table 7 Drying shrinkage

Age (day)	Drying shrinkage ($\times 10^{-6}$)									
	00-00	N1-V1	N06-V13	N1-V2	N1-S1	N06-S13	N1-S2	N1-P1	N13-P06	N2-P1
7	-302.00	-118.42	-131.58	-131.58	-39.47	-118.42	-105.26	-118.00	-118.00	-144.00
14	-434.21	-171.05	-184.21	-197.37	-78.95	-171.05	-144.74	-184.21	-171.05	-210.53
28	-473.68	-210.53	-223.68	-236.84	-105.26	-184.21	-171.05	-210.53	-210.53	-250.00
56	-500.00	-243.00	-250.00	-263.00	-131.00	-210.00	-197.00	-250.00	-236.00	-289.00

는 모두 무보강 실험체에 비해 건조수축이 현저히 감소하는 것으로 나타났다. 특히 Table 7에 따르면 섬유보강 실험체는 변수에 따라 재령 14일까지 $39.5 \sim 66.5 \times 10^{-6}$ 의 건조수축변형률이 발생하여 재령 14일까지 132.2×10^{-6} 의 건조수축변형률이 발생된 무보강 실험체보다 초기 건조수축 제어에 효과적인 것으로 나타났다. 재령 14일 이후에는 모든 실험체의 건조수축 변화율이 유사한 것으로 나타났다. 이와 같은 결과에서 섬유보강은 콘크리트 포장 배합의 초기 수축을 제어하는데 매우 효과적임을 알 수 있다.

강섬유가 혼합된 실험체의 건조수축 변화율이 다른 섬유보강 실험체에 비해 낮은 것으로 나타났으며, 매크로 섬유와 마이크로 섬유의 혼합비율에 따른 건조수축 변화율의 차이는 미미한 것으로 나타났다.

4. 결 론

이 연구에서는 골재의 최대 치수 및 단위수량이 일반 콘크리트 배합과 다른 포장용 콘크리트 배합에서 섬유보강에 따른 거동 특성을 고찰하고, 적절한 섬유보강 방안을 마련하기 위해 형상비 차이가 있는 마이크로 섬유와 매크로 섬유로 하이브리드 보강된 콘크리트 포장 실험체에 대한 기본적인 물성 실험을 수행하였으며, 실험 결과 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 동일 형상비를 갖는 마이크로 또는 매크로 섬유 단독으로 보강된 경우 포장용 콘크리트 배합에서는 일반 콘크리트 배합에 비해 인장강도를 제외한 휨강도, 압축강도 및 휨인성 증가 효과가 낮게 나타났다.
- 2) 마이크로 섬유와 매크로 섬유로 하이브리드 보강된 콘크리트는 섬유보강에 의해 슬럼프 값이 50% 이상 감소되어 유동성이 저하되는 것으로 나타났으나 마이크로 섬유 또는 매크로 섬유의 혼합비율은 유동성에 미치는 영향이 크지 않은 것으로 나타났다.
- 3) 하이브리드 섬유보강 실험체는 무보강 실험체보다 압축강도와 휨강도가 증가하는 것으로 나타났으며, 압축강도는 매크로 섬유 혼합비가 클수록 증가하고, 휨강도는 마이크로 섬유 혼합비가 클수록 증가하는 것으로 나타났다. 이 연구의 실험에서 하이브리드 섬유보강 실험체의 쪼갬인장강도는 무보강 실험체와 유사한 것으로 나타났다.

- 4) 강섬유를 매크로 섬유로 혼합한 하이브리드 보강 실험체가 PP 또는 PVA섬유를 매크로 섬유로 혼합한 실험체보다 최대 휨강도 이후 응력저하폭이 가장 낮은 것으로 나타났으며, 다른 매크로 섬유 혼합의 경우보다 연성지수도 큰 것으로 나타났다.
- 5) 강섬유 혼합비율이 증가할수록 연성지수도 증가하는 것으로 나타났으며, PP 또는 PVA섬유가 혼합된 실험체는 마이크로 섬유와 매크로 섬유의 혼합비에 따른 연성 변화는 나타나지 않았다.
- 6) 하이브리드 섬유보강 실험체는 무보강 실험체에 비해 건조수축이 크게 감소하는 것으로 나타났다. 무보강 실험체는 재령 14일까지 132.2×10^{-6} 의 건조수축 변형률이 발생하였으나 하이브리드 섬유로 보강된 실험체는 $39.5 \sim 66.5 \times 10^{-6}$ 의 건조수축 변형률이 발생하여 초기 재령에서 건조수축 저감효과가 뛰어난 것으로 나타났다.

감사의 글

이 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업(FRC 복합 포장 혼합물 개발)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. Nam, Y. K., *Highway Pavement Engineering*, Goomibook, 2004, pp. 297-301.
2. Yang, S. C., Park, G. H., and Kwon, S. M., "Domestic Road Concrete Pavement Construction Status," *Magazine of Korean Society of Road Engineers*, Vol. 2, No. 3, 2000, pp. 11-23.
3. Um, J. Y., *Methodology for Constraining Asphalt Concrete Overlay against Reflection Cracking*, Korea Expressway Corporation Road Research Institute, 2000.
4. Woon, Y. M., Suh, Y. C., and Kim, H. B., "Measurement of the Early-Age Coefficient of Thermal Expansion and Drying Shrinkage of Concrete Pavement," *International Journal of Highway Engineering*, Vol. 10, No. 1, 2008, pp. 117-122.
5. Hong, S. H., Han, S. H., and Yun, K. K., "A Case Study for Deterioration due to Alkali-Silica Reaction in the Cement Concrete Pavement," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 18, No. 3, 2006, pp. 355-360.
6. Park, D. G., Suh, Y. C., Ahn, S. S., and Kim, H. B.,

- “Behaviors of Early-Age Cracks on the JCP,” *International Journal of Highway Engineering*, Vol. 6, No. 2, 2004, pp. 47-59.
7. Yoo, T. S., Hong, S. H., Kim, H. G., and Han, S. H., “Distresses Caused by Material on Cement Concrete Pavement in Highways,” *Proceedings of the Korean Society of Road Engineers*, Vol. 5, 2003, pp. 111-114.
 8. Won, J. P., Hwang, K. S., Park, C. G., and Park, H. G., “Evaluation of Crack Control and Permeability of Hydrophilic PV A Fiber Reinforced Cement Composite,” *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 16, No. 2, 2004, pp. 391-396.
 9. Kim, M. H., Kim, J. H., Kim, Y. R., and Kim, Y. D., “An Experimental Study on the Mechanical Properties of HPRCCs Reinforced with the Micro and Macro Fibers,” *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 17, No. 2, 2005, pp. 263-271.
 10. Park, W. S., Yun, H. D., and Jeon, E., “Effects of PET Fiber Hybrid Conditions on Strain-Hardening Characteristics of Cement Composites,” *Journal of Architectural Institute of Korea*, Vol. 24, No. 10, 2008, pp. 37-44.
 11. Li, V. V. and Stang, H., “Interface Property Characterization and Strengthening Mechanisms in Fiber Reinforced Cement Based Composites,” *Advanced Cement Based Materials*, Vol. 6, No. 1, 1997, pp. 1-20.
 12. Shin, K. J. and Jang, K. H., “Flexural Behavior and Cracking Characteristics of High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composite according to Fine Aggregate Contents,” *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 27, No. 5A, 2007, pp. 735-743.
 13. Lee, Y. O. and Yun, H. D., “Effect of Aggregate Size on the Behavior and Fracture Characteristics in Ductile Fiber-Reinforced Cementitious Composites,” *Journal of Architectural Institute of Korea*, Vol. 23, No. 12, 2007, pp. 19-26.
 14. Architectural Institute of Korea, “Fiber Reinforced Concrete,” *The Technical Report on Fiber Reinforced Concrete*, ATR 97-2, 1997, pp. 29-46.
 15. Won, J. P., Park, C. G., and Ahn, T. S., “Shrinkage Cracking and Durability Characteristics of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete,” *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 19, No. I-5, 1999, pp. 783-790.
 16. Won, J. P., Kim, M. K., and Park, C. G., “Control of Plastic Shrinkage Cracking of Hybrid PVA Fiber Reinforced Cement Composites,” *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 25, No. 4-A, 2005, pp. 621-626.
 17. Betterman, L. R., Ouyang, C., and Shah, S. P., “Fiber Matrix Interaction in Microfiber-Reinforced Mortar,” *Advanced Cement Based Materials*, Vol. 2, No. 2 pp. 53-61.
 18. Kim, N. W., Lee, S. G., Han, B. Y., and Bae, J. S., “Flexural Fracture Toughness Characteristics of Hybrid Steel Fiber Reinforced Concrete,” *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 23, No. 4-A, 2003, pp. 619-625.

요 약 시멘트 콘크리트 포장은 중차량에 대한 뛰어난 적용성과 장기간의 공용성을 지녔고, 아스팔트보다 구입이 용이하여 내구성 및 경제적 측면에서 우수한 장점을 가지고 있으나, 아스팔트 포장에 비해 노후화 되거나 파손이 발생할 경우 대규모 유지보수가 발생할 수 있는 단점이 있다. 콘크리트 포장의 손상은 대부분 균열에 의한 것으로 콘크리트 포장의 초기 및 장기균열을 제어할 수 있는 기술 확보가 필요하다. 이 연구에서는 일반적인 구조용 콘크리트 배합에 비해 단위수량이 낮고 굵은 골재 최대 치수가 큰 콘크리트 포장 배합에서의 섬유보강 효과를 평가하기 위해 직경이 작고 형상비가 큰 마이크로 섬유와 직경이 크고 형상비가 작은 매크로 섬유로 하이브리드 보강된 콘크리트 포장용 배합에 대한 기본적인 성능실험을 수행하였다. 실험 결과 콘크리트 포장 배합의 섬유보강 효과는 일반 구조용 콘크리트 배합에 비해 낮은 것으로 나타났으나 하이브리드 섬유로 보강된 콘크리트 포장 배합은 휨강도 및 인성보강 효과가 큰 것으로 나타났다. 특히 하이브리드 섬유보강 콘크리트는 포장 손상의 주요 요인인 콘크리트 포장의 초기 건조수축을 제어하는데 매우 효과적인 것으로 나타났다.

핵심용어 : 섬유보강 콘크리트, 마이크로 섬유, 매크로 섬유, 포장, 하이브리드