Journal of the Korea Concrete Institute
Vol. 29, No. 2, pp. 149~157, April, 2017
https://doi.org/10.4334/JKCI.2017.29.2.149

pISSN 1229-5515
eISSN 2234-2842
www.jkci.or.kr

순환잔골재 및 플라이애시가 PVA 섬유보강 시멘트 복합체의 역학적 특성에 미치는 영향

남의현 [1] · 박완신 [2] · 장영일 [2] · 윤현도 [3] · 김선우 [2]*

[1]충남대학교 융복합시스템공학과 [2]충남대학교 건설공학교육과 [3]충남대학교 건축공학과

Effect of Recycled Fine Aggregates and Fly Ash on the Mechanical Properties of PVA Fiber-Reinforced Cement Composites

Yi-Hyun Nam,[1] Wan-Shin Park,[2] Young-Il Jang,[2] Hyun-Do Yun,[3] and Sun-Woo Kim[2]*

[1]Dept. of Convergence System Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Rep. of Korea
[2]Dept. of Construction Engineering Education, Chungnam National University, Daejeon 34134, Rep. of Korea
[3]Dept. of Architectural Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Rep. of Korea

ABSTRACT As the amount of construction wastes increase, reuse of recycled materials is being considered in research areas. While there are many experimental investigations focusing on development of mortar and concrete using the recycled materials, the studies regarding the fiber-reinforced cement composites (FRCCs) using recycled materials are still limited. In this paper, an experimental attempt has been made to investigate the effect of recycled fine aggregates and fly ash on the mechanical properties of PVA FRCCs. The cement and natural sand were respectively replaced by fly ash and recycled fine aggregates at two content levels, 25% and 50%. Ten types of PVA FRCCs mixes were fabricated and tested to investigate the flexural, compressive and direct tensile behaviors. The test results show that flexural, compressive and direct tensile strength were decreased with increase in fly ash content at all ages. In particular, flexural, compressive and direct tensile strengths of specimens, containing 50% recycled fine aggregates and 50% fly ash, showed the lowest values. The modulus of elasticity of specimens showed similar trend to the 28-day compressive strength. Poisson's ratio was increased with increase in fly ash and recycled fine aggregates content.

Keywords : PVA FRCC, mechanical properties, recycled fine aggregate, fly ash

1. 서 론

콘크리트는 압축에 강하고 인장에 약한 특성을 가지고 있으므로 타설 후에 시간의 경과에 따라 발생하는 수축으로 인해 균열이 발생되어 구조적으로 성능이 저하되는 문제점을 갖고 있다. 이러한 콘크리트의 구조적 성능 저하의 원인인 균열의 발생을 억제시키기 위해서 여러 가지 연구들이 수행되었으며 그 중 하나의 방법으로 콘크리트를 섬유로 보강하여 균열저항성을 증대시키는 방법이 시도되었다.[1-3] 이에 따라 최근 국내에서는 콘크리트의 취성파괴 거동에 의한 낮은 인장강도 및 인장변형 등 단점을 보완하기 위한 섬유보강 콘크리트에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.[4-8] 또한 콘크리트의 문제점으로 막대한 천연재료의 사용으로 인한 자연환경 파괴와 폐콘크리트의 처리문제가 제기되고 있다. 특히 천연골재의 고갈로 인하여 콘크리트에 사용되는 골재의 생산을 위해 석산 개발에 따른 산림훼손 및 바다모래 채취에 따른 바다생태계 파괴 등의 문제가 발생되고 있다.[9] 최근에는 건축물의 노후화 및 재개발 사업이 활성화됨에 따라서 건설폐기물이 해마다 급격하게 증가되고 있지만 그에 비해 건설공사에 사용되는 대부분의 천연골재는 골재의 수요량에 비해 그 매장량이 한계를 보이고 있다. 이러한 자연환경 파괴의 문제를 보다 적극적으로 해결하기 위해서는 순환골재의 사용을 확대하여야 하지만, 아직까지 순환골재에 대한 인식의 부족과 순환골재 및 순환골재 콘크리트에 대한 기존 연구의 부족으로 순환골재를 보편적으로 사용하지 못하고 있는 실정이다. 이에 따라 천연골재를 사용한 콘크리트에 비해 강도 및 내구성이 감소되는 순환골재 콘크리트의 품질 향상에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있으며[10-12] 콘크리트 재료인 시멘트 사용에 따른 다량의 이산화탄소 배출을 저감하고자 시멘트 대체재를 사용하는 연구도 활발하게 진

*Corresponding author E-mail : sw.kim@cnu.ac.kr
Received October 31, 2016, Revised January 17, 2017, Accepted February 17, 2017
ⓒ2017 by Korea Concrete Institute

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.

행되고 있다.[13-14] 특히 차준호[15] 및 방진욱[16] 등의 기존 연구 결과에 의하면, 섬유보강 시멘트 복합체(Fiber-Reinforced Cement Composites, FRCCs)에 플라이애시(Fly ash)를 혼입할 경우 시멘트 복합체의 인장성능이 향상되는 것으로 보고되고 있다. 그러나 순환잔골재 및 플라이애시를 사용한 섬유보강 시멘트 복합체에 대한 연구는 많지 않다.[17] 따라서 본 연구에서는 순환잔골재 및 플라이애시의 치환율에 따른 PVA (Polyvinyl alcohol) 섬유보강 시멘트 복합체의 역학적 특성을 실험적으로 평가함으로써, 순환잔골재 및 플라이애시가 PVA 섬유보강 시멘트 복합체의 휨, 압축 및 직접인장 성능에 미치는 영향을 정량적으로 평가하고자 한다.

2. 실 험

2.1 실험계획

본 연구에서는 순환재료 치환율에 따른 PVA 섬유보강 시멘트 복합체의 역학적 특성을 실험적으로 평가하기 위하여 사전 예비실험을 통해 현재 배합에서 최적의 비빔성능 및 인장성능 확보를 위한 시멘트 체적비 2%의 PVA 섬유를 혼입하였으며, PVA 섬유를 혼입하지 않은 시험체에 비해 인장응력이 1.5～2배 향상되는 것을 확인하였다. 이때, 사전 문헌 조사를 통해 시멘트 복합체의 역학적 성능이 급격히 저하되지 않는 범위에서 순환재료 치환율(25%, 50%) 및 물-결합재비(0.35, 0.45)를 실험 변수로 설정하였으며, 실험변수에 따른 배합표를 Table 1에 나타내었다.

2.2 사용재료

Fig. 1에 플라이애시, 순환잔골재, 천연잔골재 및 PVA섬유를 각각 나타내었다. 본 연구에서 사용한 시멘트는 KS L 5201[18]에 규정된 1종 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 플라이애시는 KS L 5405[19] 규정을 만족하는 보령 화력발전소에서 생산된 F급 플라이애시를 사용하였다. Table 2에 본 연구에서 사용된 플라이애시의 화학적 조성을 나타내었다. 순환잔골재는 폐콘크리트를 파쇄하여 생산된 밀도 2.44 g/cm^3, 흡수율 4.32%, 최대직경 5 mm인 KS F 2573[20] 규정을 만족하는 순환잔골재를 사용하였으며, 천연잔골재는 강원도 주문진에서 생산된 해사를 사용하였다. Table 3에 순환잔골재 및 천연잔골재의 재료특성을 나타내었다. 보강섬유는 일본 K사의 고장력 PVA섬유를 사용하였으며, Table 4에 PVA 섬유의 기계적 특성(제조사 제공 값)을 나타내었다. 혼화제는 단위 수량 저감 및 워커빌리티를 향상 시키는 폴리카르복실산계 감수제를 사용하여 흐름성능을 확보하고자 하였으며, 목표 플로우 값을 180 mm 내외로 설정하였다.

Table 1 Mix proportions

Mixture	W/B	Unit weight (kg/m^3)						SP (kg)
		W	C	FA	S	RS	PVA	
OPC	0.35	310	884	-	1,061	-	7.30	5.04
F25R25		321	663	221	796	265		
F25R50		332	663	221	531	531		
F50R25		321	442	442	796	265		
F50R50		332	442	442	531	531		
OPC	0.45	334	743	-	1,114	-	6.13	2.23
F25R25		346	557	186	835	278		
F25R50		358	557	186	557	557		
F50R25		346	371	371	835	278		
F50R50		358	371	371	557	557		

(a) Fly ash

(b) Recycled sand

(c) Natural sand

(d) PVA fiber

Fig. 1 Materials used for FRCCs

Table 2 Chemical properties of fly ash

Specific Gravity (g/cm^3)	Blaine (cm^2/g)	Composition (%)						
		SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Ig. loss
2.11	3,990	50.72	20.73	6.37	3.61	1.08	0.54	3.04

Table 3 Physical properties of fine aggregates

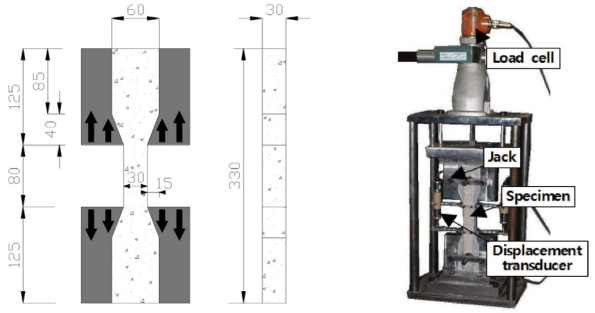
Type	Density (g/cm^3)	Water absorption (%)
Recycled sand	2.44	4.32
Natural sand	2.59	0.76

Table 4 Mechanical properties of PVA fiber

	Specific Gravity (g/cm^3)	Length (mm)	Diameter (μm)	Aspect ratio	Tensile strength (MPa)	Modulus of elasticity (GPa)
PVA	1.30	12	39	307	1,600	40

2.3 실험방법

본 연구에서는 PVA 섬유보강 시멘트 복합체의 역학적 특성을 평가하기 위해 휨 및 압축강도 시험체 10개, 직접인장강도 시험체 10개 등 배합별로 20개의 시험체, 총 200개의 시



(a) Details (unit: mm) (b) Test set-up

Fig. 2 Direct tensile strength test

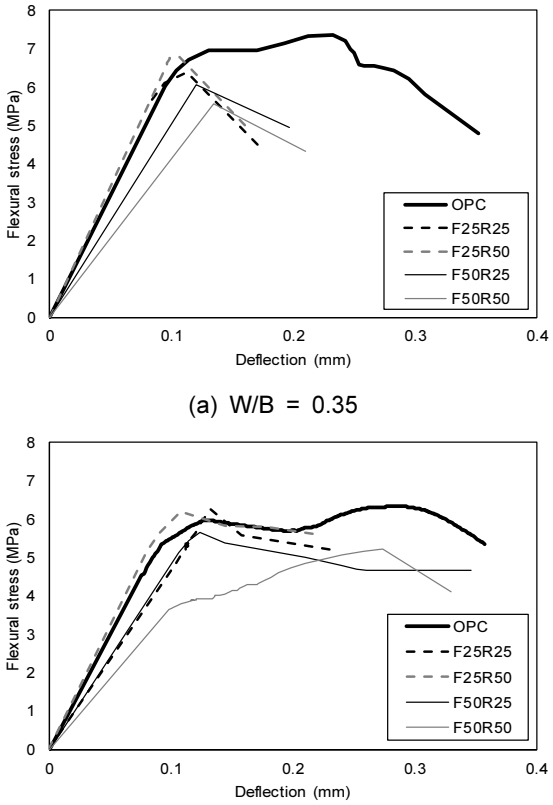
Fig. 3 UTM (1,000 kN Cap.)

험체를 제작하여 실험을 수행하였다. 휨 및 압축강도 시험체의 제작은 KS L ISO 679[21]에 의거하여 40×40×160 (mm)몰드에 타설하여 제작하였고, 압축강도 실험을 위한 시험체는 휨 강도 실험에 의해 파단된 시험체를 사용하였다. 직접인장강도 시험체는 Fig. 2(a)에 나타낸 바와 같이 덤벨형(Dumbbell shape)으로 제작하였으며, Fig. 2(b)에 직접인장강도시험기를 나타내었다. 휨, 압축 및 직접인장강도 시험체 제작 후 온도 20 ± 2°C의 항온수조에서 수중양생 하였으며, 7일 및 28일 경과 후 실험을 실시하였다. 휨 및 압축강도 실험에는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 1,000 kN 용량의 UTM으로 가력하여 하중을 측정하였으며, 휨 시험체 중앙부에 LVDT를 설치하여 지점과 중앙부의 상대 처짐량을 측정하였다. 또한 압축강도 실험에서는 시험체의 측면에 변형률 게이지를 부착하여 압축거동에 따른 수직 및 수평 변형률을 각각 측정하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 순환재료 치환율에 따른 휨 거동 특성

Fig. 4는 시험체의 휨 응력-처짐 관계를 나타낸 것이며, 물-결합재비 0.35를 적용한 OPC, F25R25, F25R50, F50R25 및 F50R50 시험체의 최대응력에서의 처짐은 각각 0.232 mm, 0.112 mm, 0.104 mm, 0.120 mm 및 0.134 mm로 OPC 시험체가 최대응력에서의 처짐이 가장 크게 나타났으며, F25R50 시험체가 최대응력시 처짐이 가장 작게 나타났다. 물-결합재비 0.45를 적용한 OPC, F25R25, F25R50, F50R25 및 F50R50 시험체의 최대응력에서의 처짐은 각각 0.285 mm, 0.132 mm,



(a) W/B = 0.35

(b) W/B = 0.45

Fig. 4 Flexural stress-deflection curves

0.108 mm, 0.124 mm 및 0.274 mm로 물-결합재비 0.35를 적용한 시험체와 동일하게 OPC 시험체가 최대응력에서의 처짐이 가장 크게 나타났으며, FA25R50 시험체가 최대응력에서의 처짐이 가장 작게 나타났다.

물-결합재비 0.35를 적용한 시험체 중 순환재료를 사용하지 않고 PVA섬유로만 보강된 OPC 시험체의 재령 7일 및 28일에서 휨강도는 각각 7.11 MPa 및 7.35 MPa로 나타났으며 순환재료를 사용한 시험체에 비하여 모든 재령에서 가장 높은 휨강도를 나타내었다. 플라이애시 25% 및 순환잔골재를 25% 치환한 F25R25 시험체의 재령 7일 및 28일에서 휨강도는 각각 6.15 MPa 및 6.37 MPa로 OPC 시험체의 휨강도에 비해 각각 14% 및 13% 감소되어 나타났다. 플라이애시 25% 및 순환잔골재를 50% 치환한 F25R50 시험체의 재령 7일 및 28일에서 휨강도는 각각 5.36 MPa 및 6.8 MPa로 OPC 시험체에 비해 휨강도가 각각 25% 및 7% 감소되어 나타났으며, 플라이애시 50% 및 순환잔골재를 25% 치환한 F50R25 시험체의 경우 재령 7일 및 28일에서 휨강도가 5.62 MPa 및 6.05 MPa로 나타났으며, OPC 시험체의 휨강도에 비해 21% 및 18% 감소되어 나타났다. 특히 플라이애시 50% 및 순환잔골재를 50% 치환한 F50R50 시험체의 경우 물-결합재비 0.35를 적용한 모든 시험체 중 가장 낮은 휨강도를 나타내었으며, 재령 7일 및 28일에서의 휨강도는 4.92 MPa 및 5.55 MPa로 OPC 시험체에 비해 각각 31% 및 24% 감소되어 나타났다.

물-결합재비 0.45를 적용한 시험체의 경우 재령 7일에서

Table 5 Flexural test results

Mixture	W/B	7-day	28-day	
		f_b (MPa)	f_b (MPa)	δ_b (mm)
OPC	0.35	7.11 (±0.64)	7.35 (±2.64)	0.232
F25R25		6.15 (±0.10)	6.37 (±0.80)	0.112
F25R50		5.36 (±0.16)	6.80 (±2.20)	0.104
F50R25		5.62 (±0.92)	6.05 (±1.05)	0.120
F50R50		4.92 (±0.19)	5.55 (±0.95)	0.134
OPC	0.45	4.55 (±0.52)	6.34 (±0.74)	0.285
F25R25		4.86 (±1.60)	6.25 (±0.47)	0.132
F25R50		4.90 (±0.71)	6.20 (±1.49)	0.108
F50R25		5.23 (±0.54)	5.66 (±0.11)	0.124
F50R50		4.74 (±1.09)	5.21 (±0.98)	0.274

는 물-결합재비 0.35를 적용한 시험체의 휨강도 경향과는 다르게 OPC 시험체의 휨강도가 가장 낮게 나타났으며, 순환재료를 사용한 시험체가 OPC 시험체보다 휨강도가 증가되어 나타났다. 재령 28일 경우에는 물-결합재비 0.35를 적용한 시험체와 동일하게 OPC 시험체의 휨강도가 가장 높게 나타났다. 물-결합재비 0.45를 적용한 OPC 시험체의 재령 7일 및 28일 휨강도는 각각 4.55 MPa 및 6.34 MPa로 나타났으며, F25R25 시험체의 재령 7일 및 28일 휨강도의 경우 각각 4.86 MPa 및 6.25 MPa로 OPC 시험체에 비해 휨강도가 각각 7% 증가 및 1% 감소되어 나타났다. F25R50 및 F50R25 시험체의 재령 7일에서 휨강도는 각각 4.9 MPa 및 5.23 MPa로 OPC 시험체에 비해 휨강도가 각각 8% 및 15% 증가되어 나타났으며, 재령 28일의 경우 휨강도가 각각 6.2 MPa 및 5.66 MPa로 OPC 시험체의 휨강도에 비해 2% 및 11% 감소되어 나타났다.

F50R50 시험체의 재령 7일 및 28일 휨강도는 4.74 MPa 및 5.21 MPa로 OPC 시험체의 휨강도에 비해 4% 증가 및 18% 감소되어 나타났다. 물-결합재비 0.45를 적용한 시험체의 휨강도를 비교했을 경우 재령 7일에서는 순환재료의 치환율이 휨강도 발현에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

모든 재령에서 0.35를 적용한 시험체의 경우 1～18%의 휨강도 감소를 나타냈으며, 물-결합재비 0.45를 적용한 시험체의 경우 7～31%의 휨강도 감소를 나타내었다. 따라서 물-결합재비가 낮은 경우에는 순환재료 치환율이 휨강도 발현에 미치는 영향이 상대적으로 적은 것으로 판단된다. Table 5에 휨강도 실험 결과를 정리하여 나타내었다.

3.2 순환재료 치환율에 따른 압축거동 특성

3.2.1 압축강도

Fig. 5는 재령 7일 및 28일에서의 순환재료 치환율에 따른 압축강도를 나타내는 것이며, 물-결합재비 0.35를 적용한 OPC 시험체의 경우 재령 7일 및 28일에서의 압축강도는 39.97 MPa 및 45.89 MPa로 나타났으며, 모든 재령에서 순환

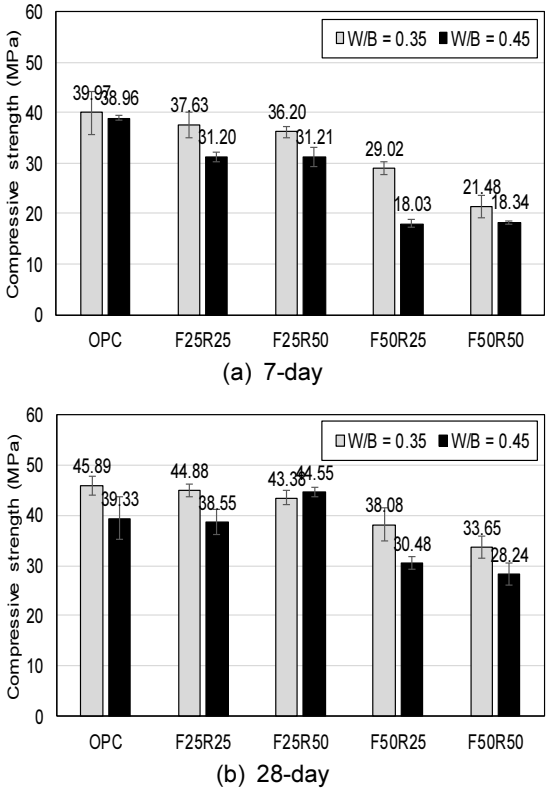


Fig. 5 Compressive strength with curing period

재료를 사용한 시험체의 압축강도에 비해 가장 높게 나타났다. F25R25 시험체의 재령 7일 및 28일 압축강도는 37.63 MPa 및 44.88 MPa로 나타났으며 OPC 시험체에 비해 압축강도가 각각 6% 및 2% 감소되어 나타났다. F25R50 및 F50R25 시험체의 재령 7일에서의 압축강도는 각각 36.2 MPa 및 29.02 MPa로 OPC 시험체에 비해 압축강도가 각각 9% 및 27% 감소되어 나타났으며, 재령 28일에서의 압축강도는 43.36 MPa 및 38.08 MPa로 OPC 시험체에 비해 각각 6% 및 17% 감소되어 나타났다. 특히 F50R50 시험체의 경우 모든 재령에서 가장 낮은 압축강도를 나타내었으며, 재령 7일 및 28일에서의 압축강도는 각각 21.48 MPa 및 33.65 MPa로 OPC 시험체에 비해 압축강도가 46% 및 27% 감소되어 나타났다.

물-결합재비 0.45를 적용한 시험체의 경우 OPC 시험체의 재령 7일 및 28일에서의 압축강도는 38.96 MPa 및 39.33 MPa로 나타났으며, F25R25 시험체의 재령 7일 및 28일에서의 압축강도는 31.2 MPa 및 38.55 MPa로 OPC 시험체에 비해 압축강도가 각각 20% 및 2% 감소되어 나타났다. F25R50 시험체의 재령 7일 및 28일에서의 압축강도는 각각 31.21 MPa 및 44.55 MPa로 OPC 시험체에 비해 20% 감소 및 13% 증가되어 나타났다. F50R25 및 F50R50 시험체의 재령 7일에서의 압축강도는 각각 18.03 MPa 및 18.34 MPa로 OPC 시험체의 압축강도에 비해 각각 54% 및 53%가 감소되어 나타났으며 재령 28일에서의 압축강도는 각각 30.48 MPa 및 28.24 MPa로 OPC 시험체에 비해 압축강도가 각각 23% 및 28% 감소되어 나타났다. 특히 F50R25 및 F50R50 시험체의

경우 재령 7일에서의 압축강도가 OPC 시험체에 비해 현저하게 낮게 나타나, 플라이애시를 50% 치환하는 경우, 기존 연구결과에서 보고된 바와 같이 초기강도발현이 지연되는 것으로 판단된다.[17]

3.2.2 탄성계수

Fig. 6은 순환재료 치환율에 따른 탄성계수를 그래프로 나타낸 것이며, 탄성계수는 전반적으로 재령 28일에서의 압축강도와 유사한 경향을 보였다. 탄성계수는 50마이크로 변형률에 해당하는 응력 및 50마이크로 변형률, 압축강도의 40%에 해당하는 응력 및 변형률을 측정하여 해당 구간의 기울기로 산정하였다.

물-결합재비 0.35를 적용한 OPC 시험체의 탄성계수는 17.59 GPa로 나타났으며, F25R25 및 F25R50 시험체의 탄성계수는 각각 16.42 GPa 및 15.36 GPa로 OPC 시험체의 탄성계수에 비해 각각 7% 및 13% 감소되어 나타났다. F50R25 및 F50R50 시험체의 탄성계수는 각각 13.97 GPa 및 11.12 GPa로 나타났으며 OPC 시험체의 탄성계수에 비해 각각 21% 및 37% 감소되어 나타났다.

물-결합재비 0.45를 적용한 OPC 시험체의 탄성계수는 15.55 GPa로 나타났으며, F25R25 및 F25R50 시험체의 탄성계수는 각각 15.68 GPa 및 16.44 GPa로 OPC 시험체의 탄성계수에 비해 각각 1% 및 6% 증가되어 나타났다. F25R25 및 F25R50 시험체의 경우 탄성계수에 미치는 영향이 미비한 것으로 판단된다. F50R25 및 F50R50 시험체의 탄성계수는 각각 12.55 GPa 및 10.85 GPa로 나타났으며 OPC 시험체의 탄성계수에 비해 각각 19% 및 30% 감소되어 나타났다.

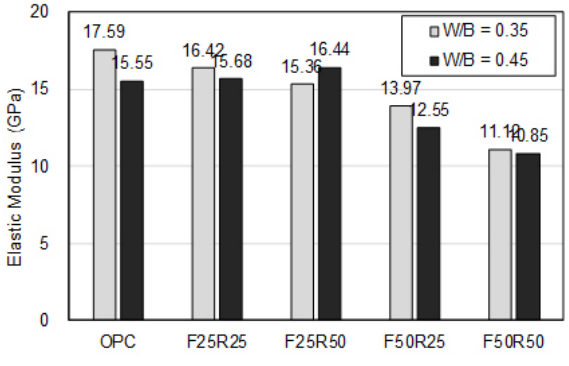


Fig. 6 Elastic Modulus

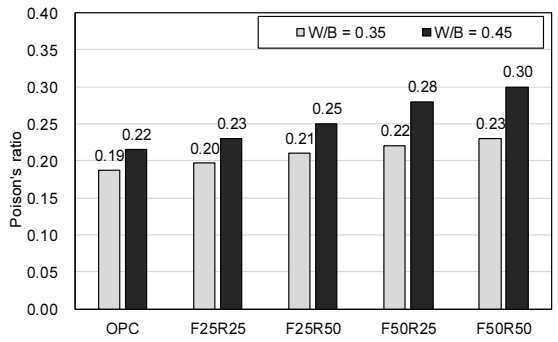


Fig. 7 Poisson's ratio

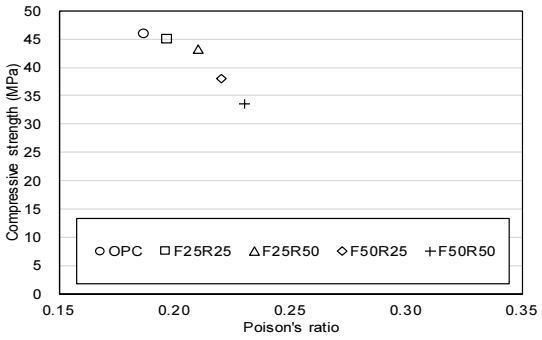
3.2.3 푸아송 비

Fig. 7은 순환재료 치환율에 따른 푸아송 비를 그래프로 나타낸 것이며, 푸아송 비는 압축강도를 7 MPa 단위로 나누어 측정 된 가로 및 세로 변형률 비의 평균값으로 산정하였다. 전반적으로 물-결합재비 0.45를 적용한 시험체의 푸아송 비가 물-결합재비 0.35를 적용한 시험체의 푸아송 비보다 높게 나타났다. 물-결합재비 0.35를 적용한 OPC 시험체의 푸아송 비는 0.19로 나타났으며, F25R25 및 F25R50 시험체의 푸아송 비는 각각 0.20 및 0.21로 OPC 시험체에 비하여 각각 5% 및 11% 증가되어 나타났다. F50R25 및 F50R50 시험체의 푸아송 비는 각각 0.22 및 0.23으로 OPC 시험체에 비해 각각 16% 및 21% 증가되어 나타났다.

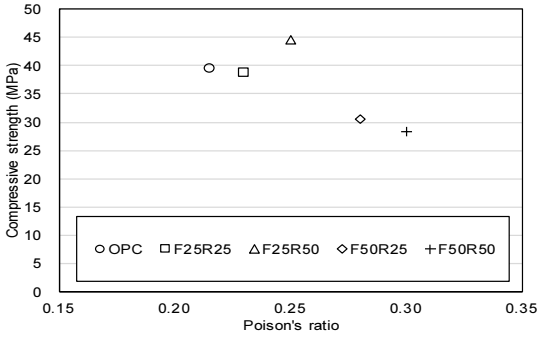
물-결합재비 0.45를 적용한 OPC 시험체의 푸아송 비는 0.22로 나타났으며, F25R25 시험체의 푸아송 비는 0.23으로 OPC 시험체에 비해 5% 증가되어 나타났다. F25R50 및 F50R25 시험체의 푸아송 비는 각각 0.25 및 0.28로 OPC 시험체에 비해 각각 14% 및 27% 증가되어 나타났으며, F50R50 시험체의 푸아송 비는 0.30으로 OPC 시험체에 비해 36% 증가되어 나타났다. 모든 물-결합재비에서 순환재료를 사용한 시험체가 OPC 시험체에 비해 푸아송 비가 증가되어 나타났으므로 순환재료를 사용한 PVA 섬유보강 시멘트 복합체 제조시 푸아송 비에 미치는 영향을 고려해야 할 것으로 판단된다.

모든 물-결합재비에서 순환잔골재 및 플라이애시 치환율이 증가됨에 따라 푸아송 비가 증가되는 것으로 나타났다. 물-결합재비 0.35를 적용하는 경우, 순환잔골재 치환율이 25%에서 50%로 증가함에 따라 푸아송 비가 5% 증가하는 것으로 나타났으며, 플라이애시 치환율이 25%에서 50%로 증가함에 따라 푸아송 비가 10% 증가하는 것으로 나타났다. 물-결합재비 0.45를 적용하는 경우에는, 순환잔골재 치환율이 25%에서 50%로 증가함에 따라 푸아송 비가 7~9% 증가하였으며, 플라이애시 치환율이 25%에서 50%로 증가함에 따라 푸아송 비가 20~22% 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 순환잔골재 치환율에 비해 플라이애시 치환율이 푸아송 비에 미치는 영향이 크며, 이러한 경향은 물-결합재비가 커질수록 심화되는 것으로 판단된다.

Fig. 8은 압축강도와 푸아송 비의 관계를 나타낸 것이다. 김정은[22] 등의 연구결과에 의하면, 플라이애시, 고로슬래그, 실리카퓸 등 광물성 혼화재를 사용하는 경우 푸아송 비가 0.248까지 나타나는 것으로 보고되고 있다. 본 연구에서도 그림에서 나타난 바와 같이 플라이애시를 사용할 경우 푸아송비가 0.20이상의 값을 보였으며, 전반적으로 압축강도가 감소함에 따라 푸아송 비는 증가되는 경향을 나타내었다. 물-결합재비 0.35를 적용한 시험체의 압축강도는 OPC, F25R25, F25R50, F50R25 및 F50R50 시험체 순으로 압축강도가 크게 나타났으며, 이에 반해 푸아송 비는 F50R50, F50R25, F25R50, F25R25 및 OPC 시험체 순으로 크게 나타났다. 물-결합재비 0.45를 적용한 시험체의 압축강도의 경우는 F25R50

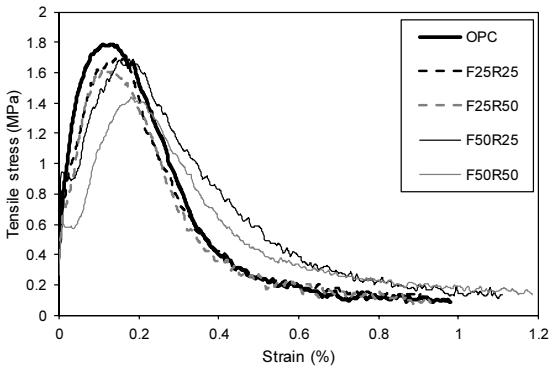


(a) W/B = 0.35

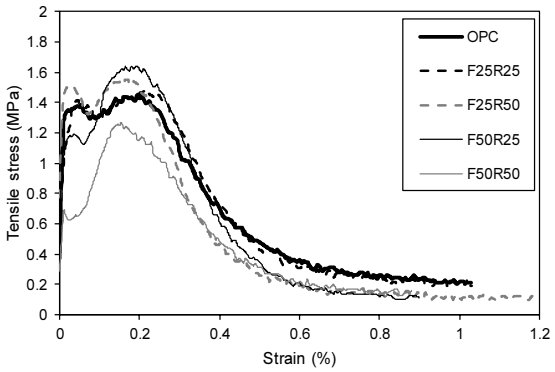


(b) W/B = 0.45

Fig. 8 Relationships between compressive strength and Poisson's ratio



(a) W/B = 0.35



(b) W/B = 0.45

Fig. 9 Direct tensile stress-strain curves

시험체를 제외하고 물-결합재비 0.35를 적용한 시험체의 압축강도-푸아송 비 관계 특성과 유사한 경향을 나타냈다. 특히 물-결합재비 0.35 및 0.45를 적용한 시험체 모두 푸아송 비가 OPC, F25R25, F25R50, F50R25 및 F50R50 순서로 크게 나타났으며, 물-결합재비 0.45를 적용한 시험체 중 F25R50의 경우 압축강도는 타 시험체에 비해 크게 나타났지만 푸아송 비가 F25R25 및 F25R50 시험체에 비해 크게 나타났고, 물-결합재비 0.35 및 0.45에서 동일한 경향으로 나타난 것으로 볼 때 푸아송 비는 압축강도의 영향도 있을 것으로 판단되지만 압축강도의 영향에 비해 순환재료 치환율에 의한 영향이 더 크게 작용한 것으로 판단된다.

3.3 순환재료 치환율에 따른 인장거동 특성

Fig. 9는 직접인장 시험체의 응력-변위 관계를 나타낸 것이며, 물-결합재비 0.35를 적용한 OPC, F25R25, F25R50, F50R25 및 F50R50 시험체의 최대응력에서의 변형률은 각각 0.13%, 0.14%, 0.11%, 0.18% 및 0.18%로 F50R25 및 F50R50 시험체가 최대응력에서의 변형률이 가장 크게 나타났으며, F25R50 시험체가 최대응력에서의 변형률이 가장 작게 나타났다. 물-결합재비 0.45를 적용한 OPC, F25R25, F25R50, F50R25 및 F50R50 시험체의 최대응력에서의 변형률은 각각 0.20%, 0.21%, 0.17%, 0.19% 및 0.16%로 F25R25 시험체가 최대응력에서의 변형률이 가장 크게 나타났으며, F50R50 시험체가 최대응력에서의 변형률이 가장 작게 나타났다. 특히 물-결합재비 0.35를 적용한 시험체는 초기균열 이후 시멘트 매트릭스 내 PVA 섬유의 가교 작용으로 응력증가를 보였지만, PVA 섬유와 시멘트 매트릭스 간 높은 부착응력 및 파괴에너지로 인해 균열 분산특성이 발현되지 않고 응력이 저하되는 특성을 보였다. 물-결합재비 0.45를 적용한 시험체는 초기균열 이후 시멘트 매트릭스 내 PVA 섬유의 가교 작용으로 응력증가를 보였고, 균열이 분산된 이후에도 또 다른 균열부에서의 PVA 섬유 가교 작용에 의한 응력 및 처짐이 증가되는 특성을 보였다.

물-결합재비 0.35를 적용한 OPC 시험체의 재령 28일에서의 인장강도는 1.79 MPa로 나타났으며 순환재료를 사용한 시험체에 비해 가장 높은 인장강도를 나타내었다. F25R25 시험체의 재령 28일에서의 인장강도는 1.69 MPa로 나타났으며, OPC 시험체에 비해 인장강도가 6% 감소되어 나타났다. F25R50 및 F50R25 시험체의 인장강도는 각각 1.63 MPa 및 1.69 MPa로 나타났으며 OPC 시험체의 인장강도에 비해 각각 9% 및 6% 감소되어 나타났다. 특히 F50R50 시험체의 경우 휨강도 및 압축강도의 경향과 동일하게 시험체 중 가장 낮은 인장강도를 나타내었으며, 재령 28일에서 인장강도는 1.44 MPa로 OPC 시험체에 비해 인장강도가 20% 감소되어 나타났다.

물-결합재비 0.45를 적용한 OPC 시험체의 인장강도는 1.45 MPa로 나타났으며, F25R25 시험체의 인장강도는 1.48 MPa로 OPC 시험체의 인장강도에 비해 2% 증가되어 나타났다. F25R50 및 F50R25 시험체의 인장강도는 각각 1.55 MPa 및 1.64 MPa로 OPC 시험체의 인장강도에 비해 각각

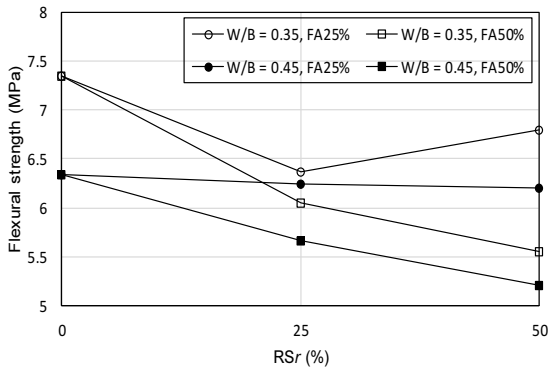
Table 6 Direct tensile test results

Mixture	W/B	28-day	
		f_t (MPa)	ϵ_t (%)
OPC	0.35	1.79 (±0.14)	0.13
F25R25		1.69 (±0.22)	0.14
F25R50		1.63 (±0.22)	0.11
F50R25		1.69 (±0.31)	0.18
F50R50		1.44 (±0.41)	0.18
OPC	0.45	1.45 (±0.13)	0.20
F25R25		1.48 (±0.10)	0.21
F25R50		1.55 (±0.33)	0.17
F50R25		1.64 (±0.08)	0.19
F50R50		1.27 (±0.18)	0.16

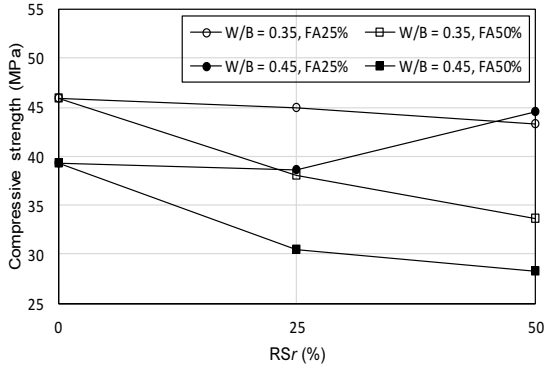
7% 및 13% 증가되어 나타났다. F50R50 시험체의 경우 물-결합재비 0.35를 적용한 시험체와 동일하게 시험체 중 가장 낮은 인장강도를 나타내었으며, 인장강도는 1.27 MPa로 OPC 시험체의 인장강도에 비해 12% 감소되어 나타났다. 전반적으로 인장강도는 물-결합재비 0.35 및 0.45를 적용하는 경우에 F50R50 시험체를 제외하고 순환재료 치환율이 인장강도에 미치는 영향은 미비한 것으로 판단된다. Table 6에 인장강도 실험 결과를 정리하여 나타내었다.

3.4 순환재료 치환율에 따른 강도 특성

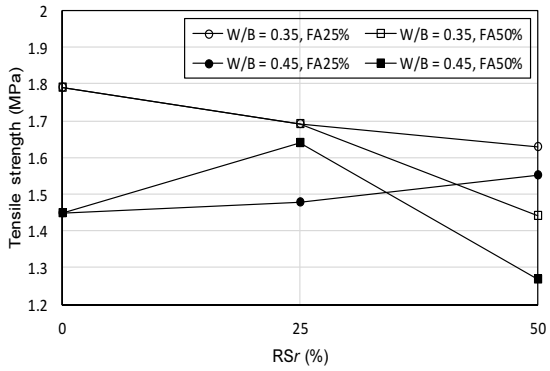
Fig. 10은 순환잔골재 및 플라이애시 치환율에 따른 휨,압축 및 인장강도 특성을 나타낸 것이며, 범례의 4가지 변수를 이용하여 각각의 물-결합재비 및 플라이애시 치환율에 따른 강도 특성을 평가하였다. 동일한 변수에서 순환잔골재 치환율에 따라 강도가 단계적으로 변화되는 것은 동일 실험요인에서 순환잔골재의 치환율만 변하기 때문에 순환잔골재의 치환율에 따라 강도에 미치는 영향으로 평가할 수 있다. 플라이애시 치환율이 25%인 시험체의 강도는 순환잔골재 치환율이 증가함에 따라 강도의 감소가 미비하거나 증가되는 경향을 나타났으며, 이는 순환잔골재 치환율이 25%인 경우 강도에 미치는 영향이 비교적 미비한 것으로 판단된다. 플라이애시 치환율이 50%인 시험체는 순환잔골재 치환율이 증가함에 따라 강도가 모두 감소하였다. 이는 순환잔골재를 50% 치환하는 경우 원골재의 순환처리시 완전히 제거되지 않은 기부착 다공성의 모르타르의 영향으로 판단되며, 다공성 모르타르는 흡수력이 크므로 시멘트 수화반응에 필요한 유효수량의 감소 및 섬유와 시멘트 매트릭스 사이의 치밀한 결합을 저하시켜 강도가 저하[23]되는 것으로 판단된다. 또한 순환잔골재 치환율이 50%인 경우 동일한 물-결합재비에서 플라이애시 치환율이 25%인 시험체보다 50%인 시험체의 휨, 압축 및 인장강도가 모두 낮게 나타났으며, 이는 동일한 실험요인에서 플라이애시 치환율이 증가함에 따라 플라이애시의 초기강도발현 지연 효과[17]에 의해 강도가 다소 저하



(a) Flexural strength



(b) Compressive strength



(c) Tensile strength

Fig. 10 Relationships between strength and replacement ratio of recycled sand

되는 것으로 판단된다. 따라서 순환잔골재 및 플라이애시를 50% 치환하는 경우 휨, 압축 및 인장강도의 목표성능 발현에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 순환잔골재 및 플라이애시가 PVA 섬유보강 시멘트 복합체의 역학적 특성에 미치는 영향을 실험적으로 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) PVA 섬유보강 시멘트 복합체에 순환잔골재 및 플라이애시를 치환하였을 경우, 휨, 압축 및 직접인장강도가 감소하였으며, 특히 순환잔골재 및 플라이애시를 각각 50% 치환하는 경우 가장 낮게 나타났다.

2) 탄성계수는 재령 28일에서의 압축강도와 유사한 경향을 나타냈으며, 플라이애시를 50% 치환한 경우 OPC 시험체에 비해 탄성계수가 크게 감소되었다.
3) 순환잔골재 및 플라이애시 치환율이 증가함에 따라 푸아송 비가 증가되었으며, 물-결합재비가 커질수록 푸아송 비가 크게 나타났다. 특히 순환잔골재의 치환율에 비해 플라이애시 치환율에 따른 푸아송 비의 증가가 크게 나타나는 것으로 판단되었다.
4) 휨, 압축 및 인장강도와 순환잔골재 및 플라이애시 치환율의 상관관계를 분석한 결과, 플라이애시를 25% 치환하는 경우 순환잔골재 치환율이 강도에 미치는 영향은 미비하였으며, 플라이애시를 50% 치환하는 경우 순환잔골재 치환율에 따른 강도의 감소가 비교적 크게 나타났다.
5) PVA 섬유보강 시멘트 복합체 제조시 플라이애시를 50% 치환하는 경우 휨, 압축, 인장강도, 탄성계수 및 푸아송 비 등의 목표성능 발현에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다. 추후 연구에서는 보다 세분화된 물-결합재비, 순환잔골재 및 플라이애시 치환율을 실험변수로 설정하여 순환재료가 섬유보강 시멘트 복합체의 역학적 특성 및 내구성에 미치는 영향에 대해 분석할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2015R1C1A1A02036481).

Reference

1. Choi, O.C., “Control of Cracking in Concrete Structures”, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.6, No.4, 1994, pp.17-24.
2. Kim, J.K., “Causes of Concrete Cracks”, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.6, No.4, 1994, pp.6-16.
3. Kim, K.S., Byun, K.J., Song, H.W., and Lee, C.H., “Degradation Analysis of Deteriorated Reinforced Concrete Structures due to Cracks and Steel Corrosion”, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.17, No.1, 2005, pp.163-166.
4. Yun, H.D., Kim, Y.C., and Kim, S.W., “Effect of Reinforcing Fiber Types on the Behavior Characteristics of SHCCs”, *Journal of the architectural institute of Korea Structure & Construction*, Vol.24, No.5, 2008 pp.141-148.
5. Park, W.S., Yun, H.D., Jeon, E., and Nam, S.,H., “Effect of Fiber on the Properties of Strain Hardening Cement-Based Composite(SHCC)”, *Journal of the architectural institute of Korea Structure & Construction*, Vol.25, No.11, 2009 pp.29-36.
6. Kim, S.W., Lee, M.J., Jang, Y.H., Jang, G.S., Song, S.H., and Yun, H.D., “Flexural and Tensile Performance of Strain-Hardening Cement Composite with Synthetic Fibers”, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.20, No.1, 2008, pp.925-928.
7. Song, P.S., Hwang, S., and Sheu, B.C., “Strength Properties of Nylon-and Polypropylene-fiber-reinforced Concrete”, *Cement and Concrete Research*, Vol.35, No.8, 2005, pp.1546-1550.
8. Lawler, J. S., and Zampini, D., “Microfiber and Macrofiber Hybrid Fiber-reinforced Concrete”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol.17, No.5, 2005, pp.595-604.
9. Lee, D.H., Kim, H.J., Jun, M.H., and Jung, J.S., “The State of the Art Report on Technical Development of Recycled Aggregates for Concrete”, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.19, No.2, 2007, pp.34-41.
10. Choi, H.B., Shin, Y.S., An, S.H., Chung, H.S., and Kang, K.I., “A Properties and Durability of Recycled Aggregate Concrete”, *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, Vol.23, No.9, 2007, pp.125-132.
11. Park, R.S., and Bae, J.S., “An Experimental Research on the Quality Improvement of Recycled Aggregates Using Surface Treatment Method”, *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, Vol.27, No.3, 2007, pp.421-426.
12. Lee, K.H., Park, H.J., Lee, D.G., Han, S.I., Kim, H.S., and Kim J.M., “A Fundamental Study on the Quality Improvement of Recycled Aggregate by Na_2CO_3(Aq)”, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.21, No.2, 2009, pp.435-436.
13. Park, K.T., Son, S.H., and Han, C.G., “Effect of Recycled Aggregates Powder on the Properties of Zero Cement Mortar Using the Recycled Fine Aggregates and Fly-Ash”, *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, Vol.12, No.2, 2012, pp.161-168.
14. Bae, S., and Jeon, J., “Compressive Strength and Resistance to Freezing and Thawing of Recycled Aggregate Concrete Containing Ground Granulated Blast Furnace Slag”, *Journal of The Korean Society of Disaster Information*, Vol.9, No.4, 2013, pp.469-475.
15. Cha, J.H., Song, S.H., Jang, Y.H., Jeon, E., Kim, Y.Y., and Yun, H.D., “Evaluation of Mechanical Properties of Strain-hardening cement composite mixing Fly ash and PET Fiber”, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.21, No.2, 2009, pp.227-228.
16. Bang, J.W., Hyun, J.H., Seo, J.S., Lee, E.S., Lee, B.J., and Kim, Y.Y., “The axial tensile properties of the Green SHCC in accordance with types of fly ash”, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.25, No.2, 2013, pp.323-324.
17. Kim, S.W., Cha, J.H., Kim, Y.Y., and Yun, H.D., “Mechanical Properties of Strain Hardening Cement-Based Composite (SHCC) with Recycled Materials”, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.22, No.5, 2010, pp.727-736.

18. Korea Standards Association, KS L 5201, Portland cement, 2016, 16p.
19. Korea Standards Association, KS L 5405, Fly ash, 2016, 20p.
20. Korea Standards Association, KS L 2573, Recycled aggregates for concrete, 2014, 14p.
21. Korea Standards Association, KS L ISO 679, Methods of testing cements-Determination of strength, 2006, 20p.
22. Kim, J.E., Park, W.S., Eom, N.Y., Yun, S.H., Kim, D.G., and Noh, J.M., "An Experimental Study on Poisson's Ratio of Ternary High Performance Concrete", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.24, No.2, 2012, pp.783-784.
23. Sim, J.S., Park, C.W., Moon, I.W., and Lee, H.C., "Fundamental Performance Evaluation of Recycled Aggregate Concrete with Varying Amount of Fly Ash and Recycled Fine Aggregate", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.17, No.5, 2005, pp.793-801.

요 약 건설 폐기물 양이 증가하면서, 순환재료의 재사용은 건설 분야 중에서도 학문적으로 활발하게 연구되고 있는 분야로 자리 매김하고 있다. 이에 따라 순환재료를 사용한 모르타르 및 콘크리트 품질의 개선과 역학적 특성을 규명하고자 하는 연구는 활발하게 진행되고 있지만, 순환재료를 사용한 섬유보강 시멘트 복합체에 대한 연구는 많지 않다. 본 연구에서는 순환잔골재 및 플라이애시가 PVA 섬유보강 시멘트 복합체의 역학적 특성에 미치는 영향에 대해서 실험적으로 분석하고자 하였다. 순환잔골재 및 플라이애시 치환율은 25% 및 50%로 설정하였으며, 순환재료 치환율에 따른 10개의 PVA 섬유보강 시멘트 복합체의 휨, 압축 및 인장거동을 실험적으로 평가하였다. 실험결과 플라이애시 치환율이 증가함에 따라 휨, 압축, 직접인장강도가 감소하였다. 특히 순환잔골재 및 플라이애시를 각각 50% 치환하는 경우 강도가 가장 낮게 나타났다. 탄성계수는 재령 28일에서의 압축강도와 유사한 경향을 나타냈으며, 푸아송 비는 순환잔골재 및 플라이애시 치환율이 증가함에 따라 크게 나타났다.

핵심용어 : PVA 섬유보강 시멘트 복합체, 역학적 특성, 순환잔골재, 플라이애시