Journal of the Korea Concrete Institute
Vol. 24, No. 2, pp. 121~127, April, 2012
http://dx.doi.org/10.4334/JKCI.2012.24.2.121

고인성 섬유보강 무시멘트 복합체의 기초 배합 및 역학 실험

조창근[1] · 임현진[1] · 양근혁[2] · 송진규[3] · 이방연[3]*

[1]조선대학교 건축학부 [2]경기대학교 건축공학과 [3]전남대학교 건축학부

Basic Mixing and Mechanical Tests on High Ductile Fiber Reinforced Cementless Composites

Chang-Geun Cho,[1] Hyun-Jin Lim,[1] Keun-Hyeok Yang,[2] Jin-Kyu Song,[3] and Bang-Yeon Lee[3]*

[1]School of Architecture, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea
[2]Dept. of Architectural Engineering, Kyonggi University, Suwon 443-760, Korea
[3]School of Architecture, Chonnam National University, Gwangju 500-843, Korea

ABSTRACT Cement has been traditionally used as a main binding material of high ductile fiber reinforced cementitious composites. The purpose of this paper is to investigate the feasibility of using alkali-activated slag and polyvinyl alcohol (PVA) fibers for manufacturing high ductile fiber reinforced cementless composites. Two mixture proportions with proper flowability and mortar viscosity for easy fiber mixing and uniform fiber dispersion were selected based on alkali activators. Then, the slump flow, compression, uniaxial tension and bending tests were performed on the mixes to evaluate the basic properties of the composites. The cementless composites showed an average slump flow of 465 mm and tensile strain capacity of approximately 2% of due to formation of multiple micro-cracks. Test results demonstrated a feasibility of manufacturing high ductile fiber reinforced composites without using cement.

Keywords : high ductility, alkali-activator, blast-furnace slag, PVA fiber, composite

1. 서 론

지난 세기의 급격한 경제 규모의 성장 및 산업화의 무분별한 진행으로 21세기는 각종 산업폐기물(건설 폐기물)에 의한 환경파괴가 진행되고 있다. 이로 인하여 지구촌의 기후변화 및 지구온난화, 자원의 고갈 등의 심각한 문제가 대두되고 있다. 특히 온실가스의 82%를 차지하는 이산화탄소의 배출량 중 8%는 콘크리트 제조 분야에서 배출되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 콘크리트 제조 공정에서 이산화탄소(CO_2) 배출을 줄이고, 폐자원 활용을 통한 친환경(eco-friendly) 콘크리트를 개발할 필요가 있다. 또한 콘크리트의 내구성을 향상시켜 구조물의 수명을 연장하여야 한다. 미국에서는 “Vision Concrete Industry”를 통하여 친환경 콘크리트를 만들기 위한 계획을 발표하였으며, 국내의 시멘트 업계에서도 2015년까지 2005년 대비 이산화탄소 발생량을 5% 감축하는 목표를 세우고 있다.[1)]

Humphrey와 Mahasenan의 연구 자료에 의하면 일반적으로 1 ton의 시멘트를 생산할 때 0.8 ton의 이산화탄소가 발생된다.[2)] 따라서 현재 주요 건설 구조재료인 콘크리트의 친환경성을 향상하기 위해 시멘트의 일부를 고로슬래그나 플라이애쉬와 같은 산업부산물로 대체하여 친환경성을 높이는 연구가 진행되고 있으며,[3-5)] 최근 시멘트를 전혀 사용하지 않는 지오폴리머나 고로슬래그 기반 알칼리 활성 콘크리트에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.[6-8)]

산업부산물을 이용하여 친환경성을 높이는 이러한 접근방법 이외에 재료의 내구성을 향상시키기 위한 연구가 진행되고 있으며, ECC(engineered cementitious composite)로 알려진 고인성/고내구성 섬유 복합체에 대한 연구가 국내에서도 활발히 진행되고 있다.[9-17)] ECC는 시멘트, 물, 잔골재로 구성된 모르타르에 2% 이내의 합성섬유를 혼입함으로써 일반적으로 일축 인장하에서 약 3% 이상의 변형 성능을 나타내는 재료이다. 이러한 고인성은 다중 균열에 의한 변형률 경화 거동이 나타나면서 발휘되며, 균열폭이 50~150 μm로 제어되기 때문에 투수계수가 균열이 발생하기 전과 비교하여 거의 변하지 않으며,[18)] 이러한 균열폭을 가질 때 자기치유 현상[19)]이 나타나기 때문에 고내구성이 발휘된다. 미시역학 이론을 통해 균열면에서 섬유가교 거동 모델과 파괴역학 이론에 기반한 안정상태 균열이론은 ECC 연구의 이론적 배경이 될 뿐만

*Corresponding author E-mail : bylee@jnu.ac.kr
Received September 7, 2011, Revised November 7, 2011, Accepted November 16, 2011
ⓒ2012 by Korea Concrete Institute

아니라 재료 설계 및 거동 분석 등에 활용되고 있다.[20] 다만, 현재까지는 시멘트 및 플라이애쉬 또는 고로슬래그를 치환한 시멘트만을 대상으로 연구되어 왔다.

따라서 이 연구의 목적은 최근 활발히 연구되고 있는 시멘트를 전혀 사용하지 않는 알칼리 활성 슬래그를 결합재로 사용하고 PVA(polyvynyl alcohol) 섬유로 보강하여 ECC와 같은 고인성을 나타내는 섬유 보강 무시멘트 복합체 개발의 가능성을 검토하는 것이다. 이를 위하여 두 가지 결합재를 변수로 2%(부피비)의 PVA 섬유를 혼입하여 복합체를 제조하였고, 유동성, 압축강도, 일축인장 성능, 휨 성능을 조사하였다.

2. 재료 및 실험 방법

2.1 재료

2.1.1 고로슬래그

이 연구에서 사용된 고로슬래그는 KS F 2563에 규정되어 있는 3종 분말도(4,204 cm^2/g)인 콘크리트용 고로슬래그이며, 비중과 염기도는 각각 2.93와 1.81이다. Table 1은 이 연구에서 사용한 고로슬래그의 화학 성분을 나타낸다.

2.1.2 알칼리 활성화제

알칼리 활성화제는 6가지 즉, 수산화 계열의 가성 알칼리 계열, 비규산계 약산염, 규산염, 알루민산염, 알루미나 규산염, 비규산계 강산염 등으로 분류할 수 있으며,[21] 이 연구에서는 가격이 비교적 싼 $Ca(OH)_2$, Na_2SO_4, 그리고 Na_2SiO_3를 알칼리 활성화제로 사용하였다.

2.1.3 골재

콘크리트의 파괴인성은 골재의 크기가 증가함에 따라 커진다. 그러나 섬유 보강 콘크리트에서는 매트릭스의 파괴인성이 작을수록 복합체에서 안정상태 균열(steady state crack)이 발생할 확률이 커지기 때문에 골재를 사용하지 않아서 매트릭스의 파괴인성을 줄이거나 크기가 작은 골재를 사용하여야 한다. 이 연구에서는 복합체의 수축량을 줄이고 강성 확보를 위하여 평균 직경이 100 μm이고 비중이 2.65인 K사의 규사(silica sand) 7호를 잔골재로 사용하였다.

2.1.4 혼화제

유동성을 향상시키고 균일한 섬유 분산성을 얻기 위하여 폴리카르본산계 고성능 감수제와 증점제를 사용하였다. 또한 혼합 과정에서 생길 수 있는 큰 기포를 제거하기 위하여 소포제(antifoamer)를 첨가하였다.

2.1.5 PVA 섬유

이 연구에서 사용한 섬유는 일본 K사에서 ECC에 적합하도록 제조된 PVA 섬유이며, 상세한 물리적 성질은 Table 2와 같다.

2.2 배합, 양생 및 실험 방법

2.2.1 배합 및 양생

이 연구에서는 두 가지 배합을 검토하였다(Table 3). 결합재의 주요 재료는 고로슬래그이며, 알칼리 활성화제의 종류와 비율에 따라 총 두 가지 배합을 결정하였다. 물-결합재의 비율은 고성능 감수제의 양을 3% 이내에서 사용하면서 혼합이 가능하며 유동성을 최대한 확보할 수 있도록 예비 실험을 통해 결정하였다. 또한 섬유의 뭉침 현상이 발생하지 않는 범위 내에서 최소의 증점제를 첨가하였다. 섬유의 양은 섬유의 가교 작용과 매트릭스의 파괴 인성에 대한 미세역학 변수 값들을 알게 되면 이론적으로 계산할 수 있다. 현재 고로슬래그 기반 모르타르의 파괴 인성 및 섬유 인발 실험에 대한 연구 자료가 없기 때문에 이 연구에서는 표준 ECC를 만드는데 사용되는 섬유량과 동일한 전체 부피 대비 2%의 PVA 섬유를 사용하였다. Fig. 1은 각 재료의 사진을 나타낸다.

각 재료는 중량 비로 계량한 후, Fig. 2에 나타난 바와 같이 결합재와 규사, 소포제를 넣고 1분 동안 건비빔을 실시하고, 배합수를 혼입한 후 1분 동안 30 L 용량의 전동 혼합기로 혼합하면서 증점제와 유동화제를 첨가하였다. 모르타르가 균일하게 혼합된 후 PVA 섬유를 1분에 걸쳐 조금씩 넣고 4분 동안 혼합하였다. 혼합이 완료된 후 유동성을 측정한 후 압축강도, 일축 인장, 휨 실험을 위한 시편을 제작하여 3일이 지난 후 탈형하여 28일 동안 수중양생을 실시하였다.

Table 1 Chemical composition of GGBS (ground granulated blast furnace slag)

Ingredients	MgO	Al_2O_3	SiO_2	SO_3	K_2O	CaO	TiO_2	MnO	Fe_2O_3
Content (wt%)	4.38	13.8	34.7	0.95	0.48	44.6	0.74	0.24	0.11

Table 2 Physical properties of PVA fibers

Diameter (mm)	Length (mm)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Young's modulus (GPa)	Oil content (%)
0.04	12	1,600	6	37	0.8

Table 3 Mixing proportions - composition of binder and *W/B* ratios

Mix	Binder		*W/B*	*S/B*	Fiber (vol %)
	Source material	Alkali activator			
B1	GGBS	$Ca(OH)_2$, Na_2SiO_3	0.55	0.4	2
B2	GGBS	$Ca(OH)_2$, Na_2SO_4	0.35	0.4	2

Note) *W/B*: water-to-binder ratio by weight, *S/B*: sand-to-binder ratio by weight

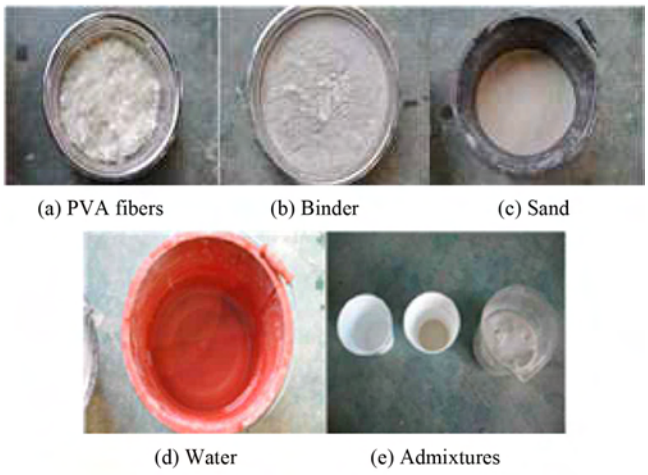


Fig. 1 Materials

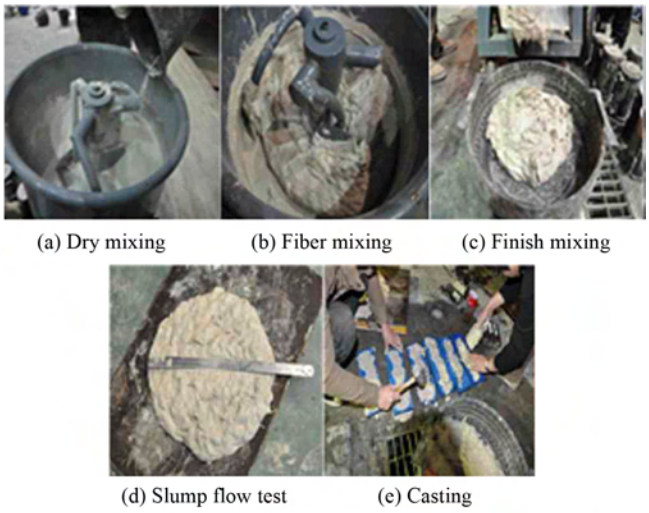


Fig. 2 Mixing and casting procedures

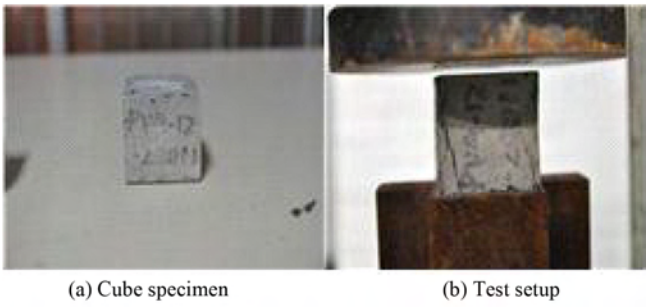


Fig. 3 Compression test

2.2.2 실험 방법

굳기 전과 굳은 후의 기본적인 물성을 파악하기 위하여 슬럼프 플로 시험, 압축강도, 일축 인장, 휨 실험을 실시하였다. 슬럼프 플로 시험은 KS F 2594에 따라 실시하였으며, 압축강도는 KS L 5105에 규정된 50 mm 입방 시험체를 이용하여 측정하였다(Fig. 3). 일축 인장 실험은 고인성 재료에 대한 규정이 없기 때문에 김윤용[22] 등에 의해 제안된 Fig. 4와 같은 실험체와 하중 가력 방법을 적용하였다. 하중은 일축 인장 실험기기에서 0.1

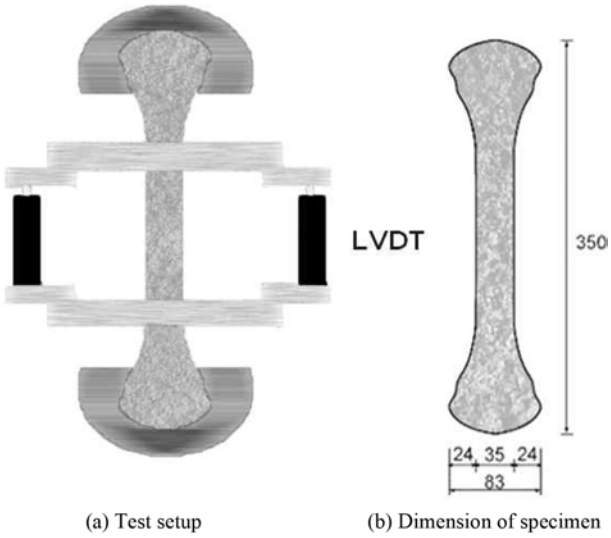


Fig. 4 Uniaxial tension test (unit: mm)

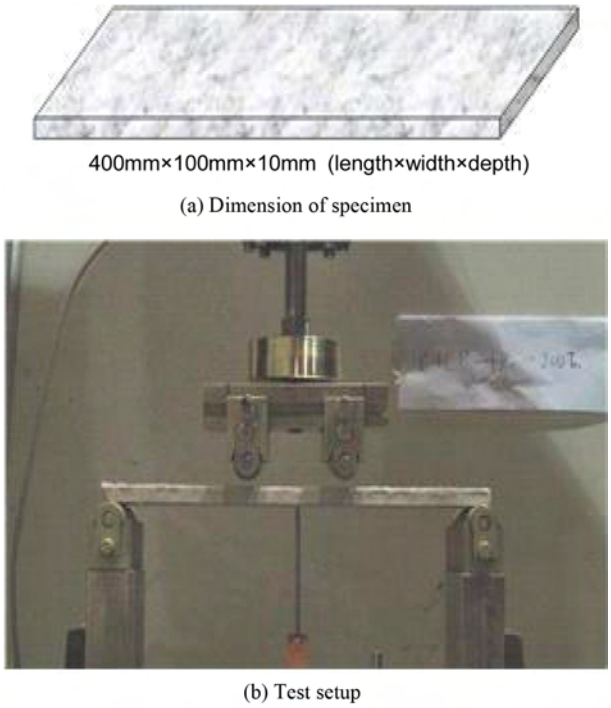


Fig. 5 Bending test

mm/min의 속도로 변위제어 방식으로 가하였고, 두 개의 변위 측정기(LVDT)를 시험체의 양측에 부착하여 150 mm의 계측 길이에 대한 변위를 측정한 후 변형률로 환산하였다. 휨 실험은 Fig. 5(a)와 같은 400 × 100 × 10 (mm) 크기의 직사각형 패널 실험체를 제작하였고, 실험체 중심에서 각각 50 mm만큼 떨어진 거리에서 2점 하중을 변위제어 방식으로 가하여 실시하였다. 지간 거리는 380 mm이며 처짐은 중앙부에 변위 측정기를 설치하여 측정하였다. 휨 응력은 다음 수식과 같이 계산하였다.

$$f_b = \frac{3P \times l}{b \times d^2} \quad (1)$$

여기서, f_b는 휨 응력(MPa), P는 최대 하중(N), l은 지점

부와 하중 작용점까지의 거리(mm), b와 d는 각각 실험체의 폭 및 높이(mm)를 나타낸다.

3. 실험 결과

3.1 슬럼프 플로 시험 결과

Fig. 6은 슬럼프 플로 시험 결과를 나타내며, 섬유 뭉침이나 섬유와 매트릭스 사이에 재료 분리가 발생하지 않았다. B1 배합의 슬럼프 플로우는 480 mm이고, B2 배합의 슬럼프 플로는 450 mm로 측정되었다. 콘크리트 표준시방서에서는 슬럼프 플로 600 mm를 고유동 콘크리트로 명시하고 있는데,[23] 이에는 미치지 못하지만 일반 콘크리트나 섬유보강 콘크리트에 비하여 높은 유동성을 나타내고 있으며, 고유동 콘크리트로 분류되기 위하여 물-바인더비, 혼화재료의 종류 및 양을 최적화하면 유동성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

3.2 압축강도 실험 결과

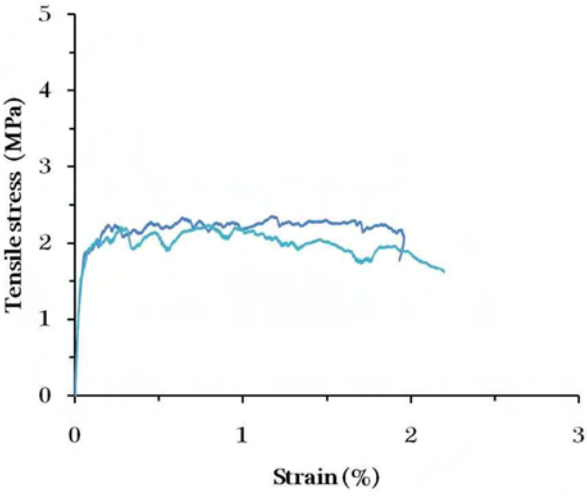
Table 7은 압축강도 시험 결과를 나타낸다. 재령 28일에 측정되었으며, 물-결합재비에서 어느 정도 유추할 수 있듯이 B2 배합이 B1에 비하여 크게 나타났으며, 51.9% 증가된 값을 나타내었다. 파괴 양상은 하중이 증가하면서 점차 미세한 수직방향 균열이 발생하였고, 최대 하중 이후에 균열 폭이 증가하면서 파괴에 도달하였다. 최대 하중에 도달한 후에도 시편은 섬유의 가교 작용에 의해 실험 전과 거의 동일한 형상을 유지하였다.

3.3 일축 인장 실험 결과

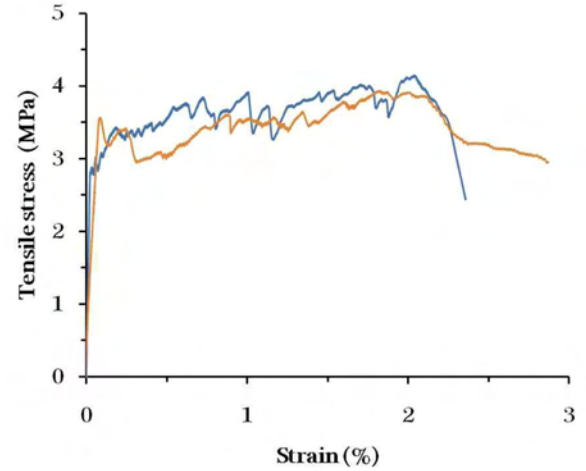
Fig. 7은 일축 인장실험 결과를 나타낸다. B1과 B2 모두 변형률 경화거동을 보이면서 다중 균열에 의한 고인성을 나타내고 있다. 인장변형성능은 연화거동이 시작되는 변형률로 정의하였으며, 두 배합에 대한 균열 강도, 인장변형성능, 인장강도는 Table 8에 정리되어 있다. 물-결합재비 차이와 압축강도 시험 결과에서 어느 정도 유추할 수 있듯이 균열 강도와 인장강도는 물-바인더비가 낮은 B2인 배합이 B1에 비하여 각각 70.3%와 86.4% 크게 나타났다. 균열강도에 비하여 인장강도의 증가폭이 더 큰 이유는 섬유인발 실험[24]을 통하여 구한 데이터를 바탕으로 해석적으로 알 수 있는데 섬유와 매트릭스 사이의 계면 물성 즉, 화학적 부착과 마찰 부착력의 증가량이 균열 강도의 증가량보다 더 커서 섬유가교성능이 더 증가한 때문인 것으로 판단된다. 인장변형성능은 B2가 B1에 비하여 16.7% 크게 나타났다. Li and Leung,[25] Li and

(a) B1 (b) B2

Fig. 6 Slump flow test results



(a) B1



(b) B2

Fig. 7 Uniaxial tensile stress-strain curves

Table 7 Compressive strength of composite specimens

Type	Compressive strength (MPa)
B1	15.6
B2	23.7

Table 8 Uniaxial tension test results

Mix	Cracking strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Tensile strain capacity (%)
B1	1.85	2.29	1.80
B2	3.15	4.04	2.04

(a) Full size image

(b) Magnified image

Fig. 8 Multiple micro-cracks of Mix B2

Fig. 9 Typical fiber dispersion of PVA fibers in cracked section

Wu,[26] Leung[27] 등에 따르면 섬유복합재료가 다중 균열에 의한 변형률 경화거동을 나타내기 위해서는 강도 조건과 에너지 조건을 만족하여야 한다. 강도 조건은 균열 면에서 섬유에 의한 최고 가교응력이 복합체의 균열 강도보다 커야 한다는 조건이다. 에너지 조건은 응력과 개구변위의 관계를 나타내는 섬유 가교 곡선에서 상보에너지가 매트릭스 파괴 인성보다 클 때 성립한다. Kanda와 Li[20]는 이를 성능 지표로 표현하였고, 이론적으로 두 기준이 1을 넘게 되면 다중 균열이 발생하게 되지만 지표가 클수록 변형 성능이 증가하게 된다. 따라서 강도 기준만을 보면 B2가 B1에 비하여 크기 때문에 인장변형성능이 증가한 것으로 판단된다.

Fig. 8은 B2 실험체의 균열 패턴을 나타내며, 평균 30~40 μm폭의 미세균열이 매우 좁은 간격으로 다수 발생한 것을 알 수 있다. Fig. 9는 파괴된 단면에 PVA 섬유가 어떻게 분산되어 있는지를 보여주는 파괴 단면이다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 뭉쳐있는 섬유가 없이 섬유가 고루 분산되어 있는 것을 관찰할 수 있다.

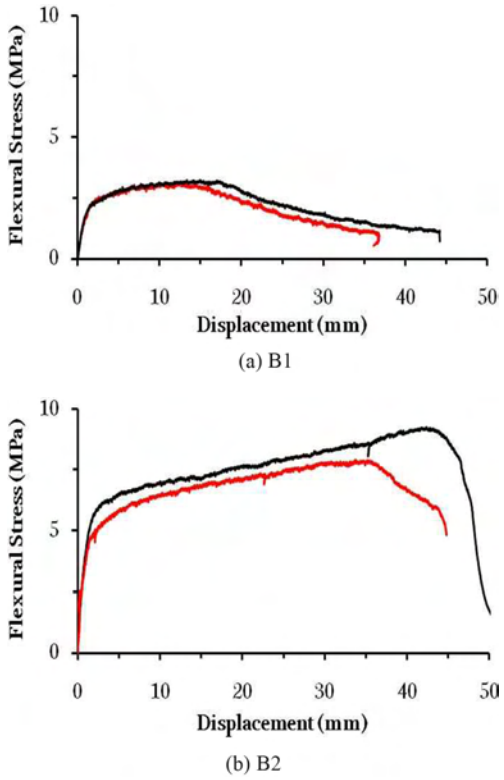


Fig. 10 Load-displacement curves

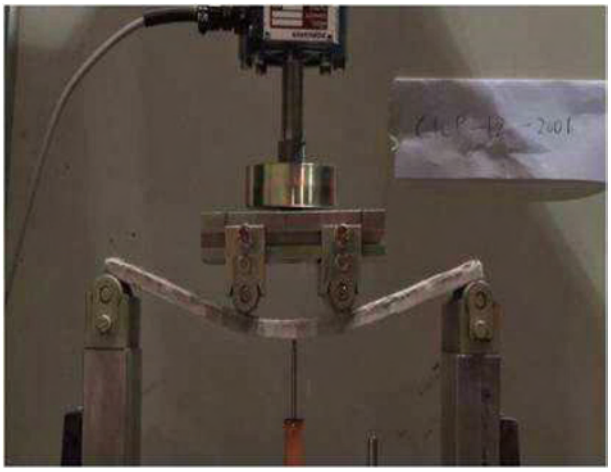


Fig. 11 Typical high-ductile behavior in bending (Mix B2)

3.4 휨 실험 결과

Fig. 10은 휨 실험 결과를 나타낸다. 일축 인장실험 결과와 같이 첫 번째 균열이 발생한 이후에 다중균열에 의한 변형률 경화거동을 나타내고 있다. 또한 일축 인장실험 결과와 유사하게 B2 배합이 B1에 비하여 강도와 변형 성능면에서 매우 우수함을 관찰할 수 있다. Fig. 11은 B2 배합시편의 휨 실험 결과 사진이며, 매우 큰 변형 성능을 나타내는 것을 관찰할 수 있다. 휨 균열 강도, 휨 강도와 휨 처짐 성능은 Table 9에 정리되어 있다. 휨 처짐 성능은 연화거동이 시작되는 처짐값으로 정의하였다. Fig. 12는 B2 배합의 휨 실험 실험체의 균열 분포와 형태를 나타내며, 2~3 mm의 균열 간격을 가진 포화된 균

Table 9 Bending test results

Mix	Flexural cracking strength (MPa)	Flexural strength (MPa)	Flexural deflection capacity (mm)
B1	2.2	3.1	17
B2	5.6	8.5	40

Fig. 12 Multiple micro cracks observed in specimen (Mix B2)

열을 관찰할 수 있다.

4. 결 론

이 연구에서는 시멘트를 전혀 사용하지 않아 친환경적이고, 미세한 다중 균열에 의한 변형 경화거동에 의하여 고내구성/고인성을 나타내는 섬유 보강 복합체의 개발 가능성에 대하여 조사하였다. 이를 위하여 두 가지 배합에 대한 실험적 연구를 수행하였고, 이를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 시멘트를 전혀 사용하지 않고 고로슬래그 기반 알칼리 활성 결합재, 규사, 물로 이루어진 모르타르에 PVA섬유를 2%(부피비) 혼입하여, 일축 인장하에서 약 2% 정도의 인장변형성능과 다중 미세균열을 나타내는 것을 확인하였다. 이를 통하여 시멘트를 전혀 사용하지 않고도 변형률 경화거동에 의한 고인성을 나타내는 섬유 복합체의 개발가능성을 입증하였다.
2) Na_2SiO_3보다 Na_2SO_4를 알칼리 활성화제로 사용한 경우에 더 작은 물-결합재비로 균일한 섬유 분산성을 확보하면서 섬유 혼합을 용이하게 하기 위한 적절한 모르타르의 유동성 및 점성을 확보할 수 있었으며, 알칼리 활성화제의 종류에 따른 두 배합의 슬럼프 플로우는 450 mm와 480 mm로 나타나 일반 콘크리트에 비하여 매우 높은 유동성을 나타내었다.
3) 두 가지 배합 중에서 Na_2SO_4를 알칼리 활성화제로 사용한 배합이 압축강도, 일축인장 그리고 휨 성능이 우수한 것으로 나타났으며, 압축강도는 23.7 MPa이고, 인장강도와 인장변형성능은 각각 4.1 MPa과 2.1%로 나타났다. 이 배합의 물-결합재 비율은 0.35이며, 결합재에 대한 잔골재의 비는 0.4이다.
4) 향후 유동성을 향상시키기 위한 추가 연구가 필요하며, 강도와 변형 성능을 향상시키기 위하여 고로슬래그 기반 알칼리 활성 모르타르의 역학 특성과 섬유와 모르타르 사이의 계면 특성에 관한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2011년 교육과학기술부와 바이오하우징연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(지역거점연구단육성사업/바이오하우징연구사업단). 또한 이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2011-0020027).

참고문헌

1. 홍건호, 서민철, “황토와 고로슬래그를 혼입한 친환경 콘크리트의 부착성능 평가,” 대한건축학회 논문집 구조계, 26권, 3호, 2010, pp. 19~26.
2. Humphreys, K. and Mahasenan, M., *Toward a Sustainable Cement Industry. Sub-Study 8: Climate Change*, An Independent Study Commissioned to Battelle by World Business Council for Sustainable Development, 2002, 2 pp.
3. 이상수, 송하영, 이승민, “콘크리트 특성에 미치는 고분말도 플라이애쉬의 치환율 및 물-결합재비 영향에 관한 실험적 연구,” 콘크리트학회 논문집, 21권, 1호, 2009, pp. 29~35.
4. 김광수, 장승엽, 이광명, “플라이애쉬 콘크리트의 압축강도 및 내구 특성,” 대한토목학회논문집, 24권, 4호, 2004, pp. 703~711.
5. 한천구, 김성환, 손호정, “고로슬래그 미분말의 치환율 증가에 따른 고강도 콘크리트의 공학적 특성 분석,” 한국건설순환자원학회지, 4권, 3호, 2009, pp. 62~68.
6. 송진규, 양근혁, 김건우, 김병조, “고로슬래그와 나트륨계열 활성화제를 이용한 무시멘트 모르타르의 특성,” 대한건축학회 논문집 구조계, 26권, 6호, 2010, pp. 61~68.
7. 양근혁, 심재일, 이설, 황혜주, “알카리활성 무시멘트 경량모르타르의 유동성, 압축강도 및 내화특성,” 대한건축학회 논문집, 25권, 8호, 2009, pp. 151~158.
8. 양근혁, 오승진, 송진규, “경량골재를 사용한 알칼리 활성 슬래그 콘크리트의 역학적 특성,” 콘크리트학회 논문집, 20권, 3호, 2008, pp. 405~412.
9. 방진욱, 김정수, 이방연, 장영일, 김윤용, “하이브리드 섬유로 보강한 고강도 경량 시멘트 복합체의 개발,” 한국복합재료학회 논문집, 23권, 4호, 2010, pp. 35~43.
10. 김윤용, “시멘트계 모르타르 매트릭스를 활용한 섬유복합재료 ECC(Engineered Cementitious Composite)의 설계와 시공 성능,” 한국복합재료학회지, 20권, 2호, 2007, pp. 21~26.
11. 이재영, 김재환, 한병찬, 박선규, 권영진, “ECC로 피복된 고강도 콘크리트 부재의 폭렬억제성능에 관한 연구,” 한국화재소방학회논문지, 22권, 4호, 2008, pp. 85~94.
12. 김장호, 김동완, 경민수, 배병원, 임윤묵, “고기능성 시멘트계 복합재료의 휨 및 인장 특성에 대한 연구,” 대한토목학회 정기 학술대회 논문집, 2003, pp. 1292~1297.

13. 김동완, 경민수, 배병원, 전경숙, 임윤묵, 김장호, “Tension Properties of Engineered Cementitious Composite (ECC),” 한국콘크리트학회 가을 학술대회 논문집, 15권, 2호, 2003, pp. 244~247.
14. 조창근, 김윤용, “섬유보강 고인성시멘트복합체패널의 2축 전단 비선형 모델,” 한국전산구조공학회 논문집, 22권, 6호, 2009, pp. 597~605.
15. 이방연, 한병찬, 조창근, 권영진, 김윤용, “압출성형 ECC 패널의 섬유분산 특성과 그에 따른 휨 성능,” 콘크리트학회 논문집, 21권, 5호, 2009, pp. 573~580.
16. Cho, C. G., Ha, G. J., and Kim, Y. Y., “Nonlinear Model of Reinforced Concrete Frames Retrofitted by In-Filled HPFRCC Walls,” *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 30, No. 2, 2008, pp. 211~223.
17. 조창근, 한병찬, 이정한, 김윤용, “압출성형 ECC 패널을 이용하여 제작된 복합바닥슬래브의 휨 거동,” 콘크리트학회 논문집, 22권, 5호, 2010, pp. 695~702.
18. Lepech, M. D. and Li, V. C., “Water Permeability of Engineered Cementitious Composites,” *Journal of Cement and Concrete Composites*, Vol. 31, No. 10, 2009, pp. 744~753.
19. Yang, Y., Yang, E. H., and Li, V. C., “Autogenous Healing of Engineered Cementitious Composites at Early Age,” *Journal of Cement and Concrete Research*, Vol. 41, No. 2, 2011, pp. 176~183.
20. Kanda, T. and Li, V. C., “Practical Design Criteria for Saturated Pseudo Strain Hardening Behavior in ECC,” *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 4, No. 1, 2006, pp. 59~72.
21. Shi, C., Krivenko, P. V., and Roy, D. M., *Alkali-Activated Cements and Concrete*, Taylor and Francis, New York, 2006, 370 pp.
22. 김윤용, 김정수, 하기주, 김진근, “고로슬래그 미분말이 혼입된 ECC의 개발,” 콘크리트학회 논문집, 18권, 1호, 2006, pp. 21~28.
23. 국토해양부 제정 콘크리트 표준시방서, 한국콘크리트학회, 기문당, 2009, 360 pp.
24. Redon, C., Li, V. C., Wu, C., Hoshiro, H., Saito, T., and Ogawa, A., “Measuring and Modifying Interface Properties of PVA Fibers in ECC Matrix,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 13, No. 6, 2001, pp. 399~406.
25. Li, V. C. and Leung, K. Y., “Steady-State and Multiple Cracking of Short Random Fiber Composites,” *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 118, No. 11, 1992, pp. 2246~2264.
26. Li, V. C. and Wu, H. C., “Conditions for Pseudo Strain-Hardening in Fiber Reinforced Brittle Matrix Composites,” *Journal Applied Mechanics Review*, Vol. 45, No. 8, 1992, pp. 390~398.
27. Leung, C. K. Y., “Design Criteria for Pseudoductile Fiber-Reinforced Composites,” *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 122, No. 1, 1996, pp. 10~14.

요 약 지금까지 연구된 고인성 섬유 복합체의 주요 결합재는 시멘트이다. 이 연구의 목적은 시멘트를 전혀 사용하지 않은 고로슬래그 기반 알칼리 활성 모르타르와 PVA(polyvinyl alcohol) 섬유를 이용하여 고인성을 나타내는 복합체에 대한 가능성을 검토하는 것이다. 이를 위하여 알칼리 활성화제 종류에 따라 균일한 섬유 분산성을 확보하면서 섬유 혼합을 용이하게 하기 위한 적절한 모르타르의 유동성 및 점성을 갖는 두 가지 배합을 결정하였고, 복합체의 기본적인 성능을 평가하기 위하여 슬럼프 플로, 압축강도, 일축인장, 휨 실험을 수행하였다. 실험 결과 두 가지 배합의 슬럼프 플로는 평균 465 mm로 나타났고, 약 2% 정도의 인장 변형 성능과 다중 미세균열을 나타내는 것을 확인하였다. 이를 통하여 시멘트를 전혀 사용하지 않고도 변형률 경화 거동에 의한 고인성을 나타내는 섬유 복합체의 개발 가능성을 입증하였다.

핵심용어 : 고인성, 알칼리 활성화제, 고로슬래그, PVA 섬유, 합성