J Rec Const Resources 7(2)158-165(2019)
https://doi.org/10.14190/JRCR.2019.7.2.158

Print ISSN : 2288-3320
Online ISSN : 2288-369X

알칼리활성 슬래그 기반 초고연성 복합재료의 휨거동 해석

Analytical Study on Flexural Behavior of Alkali-Activated Slag-Based Ultra-High-Ductile Composite

이방연[1*]
Bang Yeon Lee[1*]

(Received May 17, 2019 / Revised June 26, 2019 / Accepted June 26, 2019)

The purpose of this study is to investigate analytically the flexural behavior of beam reinforced by an alkali-activated slag-based fiber-reinforced composite. The materials and mixture proportion were selected to manufacture an alkali-activated slag-based fiber-reinforced composite with high tensile strain capacity over 7% and compressive strength and tension tests were performed. The composite showed a compressive strength of 32.7MPa, a tensile strength of 8.43MPa, and a tensile strain capacity of 7.52%. In order to analyze the flexural behavior of beams reinforced by ultra-high-ductile composite, nonlinear sectional analysis was peformed for four types of beams. Analysis showed that the flexural strength of beam reinforced partially by ultra-high-ductile composite increased by 8.0%, and the flexural strength of beam reinforced fully by ultra-high-ductile composite increased by 24.7%. It was found that the main reason of low improvement in flexural strength is the low tensile strain at the bottom of beam. The tensile strain at bottom corresponding to the flexural strength was 1.38% which was 18.4% of tensile strain capacity of the composite.

키워드 : 복합재료, 휨거동, 고로슬래그, 초고연성

Keywords : Composite, Flexural behavior, Furnace slag, Ultra high ductility

1. 서 론

ECC(Engineered Cementitious Composite)로 불리는 고연성 복합재료는 일축인장하에서 변형경화현상과 3% 이상의 높은 인장변형성능을 나타내는 고성능 섬유보강 복합재료 중의 하나이다 (Li et al. 2001; Kim et al. 2007). 고연성 복합재료는 높은 인장성능을 나타내기 때문에 휨부재의 성능을 향상시킬 수 있는 가능성이 높다. 따라서 ECC를 활용한 보의 휨성능 향상 효과에 대한 연구가 많이 수행되었다.

Shin et al.(2011)은 변형경화 시멘트 기반 복합재료(SHCC)의 휨 보강 효과에 대하여 해석적 연구를 수행하였다. 해석결과 보의 하단부에 피복두께까지 SHCC로 보강한 경우 최대 휨하중이 2.0% 증가하고, SHCC 두께를 두 배로 증가시킨 경우 9.5% 증가하는 것으로 나타났다. Kim et al.(2014)은 SHCC와 고강도 철근으로 보강한 철근콘크리트 보의 휨거동을 조사하였다. 사용한 SHCC의 인장강도와 인장변형성능은 각각 1.6MPa와 2.1%였으며, 콘크리트의 압축강도는 26.1MPa이였다. SHCC 층의 두께는 60mm로 보의 전체 두께 500mm의 12%였다. 실험결과 SHCC 보강으로 최대하중은 3.5% 증가하였지만 최대하중에 해당하는 처짐은 20.2% 감소한 것으로 나타났다. 층상화 비선형해석을 통해 최대하중의 차이는 2.2% 이내로 나타났다. Zhang et al.(2014)는 무근 ECC와 콘크리트 합성 보의 휨거동에 대한 연구를 수행하였다. 해석과 실험결과 휨강도 증진은 재료의 강도와 ECC 두께에 영향을 받는 것으로 나타났다. 또한 휨강도가 급격히 증가하게 되는 ECC층의 두께가 있으며, 전체 높이의 30%인 것으로 나타났다. Khan and Abbass (2016)은 보의 하단부를 SHCC층으로 보강한 고강도 콘크리트 보의 휨거동을 실험적으로 조사하였다. 사용한 SHCC의 인장강도와 인장변형성능은 각각 4.5MPa와 1.2%였으며, 콘크리트의 압축강도는 90MPa이였다. 실험결과 SHCC로 보의 전체 높이 대비 10%를 대체함에 따라 최대하중은 2.8%, 최대하중에 해당하는 처짐은

* Corresponding author E-mail: bylee@jnu.ac.kr

[1]전남대학교 건축학부 교수 (School of Architecture, Chonnam National University, Gwangju 61186, Republic of Korea)

Copyright ⓒ 2019 by Korean Recycled Construction Resources 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

1.3% 증가하는 것으로 나타나 보강 효과가 크기 않은 것으로 나타났다.

이와 같이 ECC를 활용한 부재단위의 성능에 대한 평가는 실험과 해석을 통해 이루어졌으나 하중상태에서 ECC의 변형률 분포, 하중에 대한 기여도 등에 대한 정량적인 분석에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 또한 최근 알칼리활성 슬래그 기반 복합재료가 기존 시멘트 기반 재료에 비하여 압축강도는 낮지만 인장강도와 인장변형성능이 높은 것으로 나타났으나 부재 단위의 성능 평가에 대한 연구도 미흡한 실정이다(Choi et al. 2016).

이 연구에서는 알칼리활성 슬래그 기반 초고연성 복합재료(UHD composite: ultra-high-ductile composite)의 압축강도 및 일축 인장성능을 평가하고, 초고연성 복합재료로 구성된 보의 휨거동을 해석적으로 분석하고자 한다.

2. 초고연성 복합재료의 재료적 특성

2.1 사용재료 및 배합

이 연구에서는 고로슬래그를 주 결합재료 사용하였고, 슬래그를 활성화시키기 위하여 수산화칼슘($Ca(OH)_2$)과 황산나트륨(Na_2SO_4)을 알칼리 활성화제로 사용하였다. 고로슬래그는 KS F 2563에 규정된 고로슬래그 미분말 3종 분말도를 사용하였으며, 밀도는 2.92cm^3/g이다. Table 1은 XRF(X-ray fluorescence) 분석을 통한 고로슬래그의 화학 성분을 나타낸다.

균열면에서 가교 작용을 통하여 미세 균열폭을 제어하고 다중균열과 변형률 경화거동을 나타낼 수 있도록 하기 위하여 형상비가 큰 고강도 폴리에틸렌 섬유를 보강섬유로 사용하였다. Table 2는 폴리에틸렌 섬유를 나타내며, 형상비가 1 500으로 매우 크며 인장강도가 2 700MPa로 폴리비닐알코올 섬유나 폴리프로필렌 섬유에 비하여 2배에서 4배 정도 인장강도가 크다.

Table 1. Properties of slag

Material	Chemical composition(%)								
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	TiO_2	K_2O	etc.
GGBFS*	30.6	13.8	0.5	40.4	8.0	4.0	0.9	0.5	1.3

* GGBFS: Ground Granulated Blast Furnace Slag

Table 2. Properties of fiber

Name	Length (mm)	Diameter (μm)	Aspect ratio	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Density (g/cm^3)
PE	18	12	1 500	2 700	88	0.97

Table 3. Mixture proportion

Binder		Water	SP* (%)	AF* (%)	Fiber (Vol.%)
GGBFS	Alkali activator				
0.895	0.105	0.30	0.5	0.10	1.50

* SP: Superplasticizer, AF: Anti-foamer

섬유의 균질한 분산과 적절한 유동성을 확보하기 위하여 폴리카르본산계 고성능 감수제를 사용하였으며, 실험체 제작과정에서 의도하지 않은 기포로 인하여 압축강도와 인장거동에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 소포제를 사용하였다.

Table 3은 이 연구에서 조사한 알칼리활성 슬래그 기반 초고연성 복합재료의 배합을 나타낸다. 슬래그와 알칼리 활성화제의 양을 1로 하였을 때 다른 재료들의 양을 질량비로 표시하였다. 알칼리 활성화제의 양은 총 결합재 양의 10.5%이며, 수산화칼슘이 7.5%이고, 황산나트륨이 3.0%이다. 물-결합재비는 30%로 하였다. 고성능 감수제의 양과 소포제의 양은 페이스트가 적절한 유동성을 확보하고, 의도하지 않은 큰 기포의 생성을 막기 위하여 시행착오를 통해 최적화하였다. 섬유의 양은 부피비로 표시하였는데 이는 섬유 가교 거동에서 섬유의 개수 등이 중요한데 섬유의 개수는 혼입된 섬유의 질량보다는 부피가 더 직접적인 관계를 갖기 때문이다. 일반적으로 고연성 복합재료를 제조할 때 섬유의 양은 부피비로 2.0%를 적용하는데(Li and Li 2013; Kim et al. 2003; Yang et al. 2009), 이 연구에서는 인장강도가 우수한 폴리에틸렌 섬유를 사용하였기 때문에 섬유량을 25% 감소하였다.

2.2 실험체 제작 및 양생 방법

실험체 제작을 위하여 먼저 분말형인 슬래그와 알칼리 활성화제를 혼합기에 넣고 1분 동안 건비빔하였다. 이 후 배합수를 혼입하고 바로 화학혼화제인 고성능감수제와 소포제를 투입하여 약 3분간 추가로 혼합하였다. 페이스트가 균질한 상태인 것과 균질한 섬유의 분산을 위해 적절한 유동상태인 것을 확인한 후 섬유를 서서히 투입하였다. 섬유를 모두 혼입한 후 약 4분 동안 추가로 혼합을 실시하였다.

혼합이 완료된 후 압축강도 측정을 위하여 50mm 입방형 공시체를 3개 제작하였다. 일반적으로 인장거동은 압축에 비하여 편차가 크기 때문에 인장거동을 평가하기 위한 실험체는 5개 제작하였다. 인장실험을 위한 실험체의 형상은 일본토목학회에서 제안한 것과 동일하며(JSCE 2008), 인장성능을 측정하는 구간의 단면은

30mm x 13mm이며, 측정구간 길이는 80mm이다. 실험체를 제작한 후 양생 온도 (23±3)℃, 상대습도 (60±5)%에서 2일 동안 기건양생을 한 후 탈형하였다. 실험체를 탈형한 후 (23±2)℃의 양생수조에서 재령 28일까지 수중양생을 실시하였다.

2.3 실험 방법

압축강도와 일축인장거동을 평가하기 위한 실험은 각각 KS L 5105와 일본토목학회에서 제안한 방법에 따라 실시하였다. 압축강도는 최대용량 30톤의 압축강도용 실험기를 사용하여 측정하였으며, 일축인장 실험은 최대용량 2톤의 전기방식 인장 실험기를 이용하여 수행하였다. 일축인장 하중은 0.1mm/min 속도의 변위제어 방식으로 가하였으며, 실험체에 가해진 하중은 실험기에 부착된 로드셀로 측정하였다. 단면이 일정한 길이 80mm 내의 변위를 측정하기 위하여 상하부에 지그를 부착하고 지그에 변위측정기를 양쪽에 설치하였다. 실험체에 가해진 응력은 로드셀에서 측정된 하중을 단면적으로 나누어 계산하였으며, 변형률은 두 개의 변위측정기에서 측정된 변형량을 평균한 후 측정구간인 80mm로 나누어 계산하였다.

2.4 재료적 특성

이 연구에서 조사한 복합재료의 압축강도는 32.7MPa로 나타났으며, 표준편차는 1.5MPa로 나타났다. 동일한 물–결합재비를 갖는 시멘트 기반 콘크리트에 비하여 낮은 압축강도가 나타났으며, 기존 연구에서도 유사한 결과가 보고되었다(Choi et al. 2016).

Fig. 1은 실험체의 인장응력과 인장변형률 그래프를 나타낸다. 그래프에 나타난 바와 같이 모든 실험체는 첫 번째 균열발생이후 변형경화현상이 발생하면서 매우 높은 인장변형성능이 나타났으며, 인장강도 또한 첫 번째 균열강도에 비하여 큰 것으로 나타났다. 변형경화현상이 나타나면서 여러 개의 응력감소가 나타나는 이유는 인장실험을 할 때 변위제어 방식으로 했기 때문이다. 변위제어 방식으로 하중을 가하게 되면 새로운 균열이 발생할 때 새로운 균열의 폭이 균열이 발생하지 않은 부분의 탄성 변형에 비하여 매우 크기 때문에 새로운 균열이 발생하게 되면 다른 부분의 변형이 감소하게 된다. 이로 인하여 실험체에 유발되는 응력이 감소하게 되는 것이다. 따라서 인장응력과 변형률 곡선에서 응력감소는 새로운 균열 발생을 의미하며 응력감소의 개수는 균열의 개수와 같다.

첫 번째 균열강도와 인장강도는 각각 3.30MPa와 8.43MPa로 나타났다. 다중균열과 변형경화현상이 나타나기 위한 조건 중의

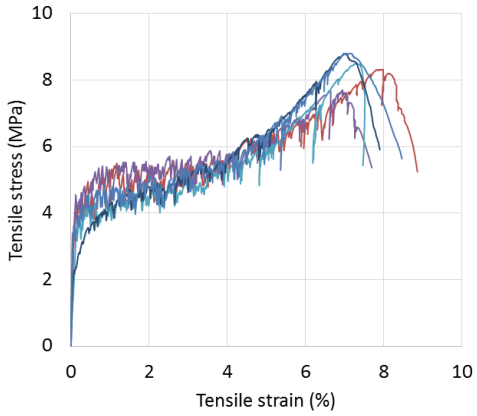

Fig. 1. Uniaxial tensile behavior of UHD composite

하나인 강도조건은 첫 번째 균열강도 대비 인장강도로 평가될 수 있으며, 이 값은 최소 1보다 커야 하고 이 값이 클수록 다중균열과 변형경화현상이 나타날 확률이 높아진다. 이 연구에서 조사한 복합재료는 이 값이 2.55로 매우 높은 것으로 나타났으며, 이는 균열의 개수를 의미하는 인장응력과 변형률 곡선에서 응력감소의 개수가 많은 것과 연관됨을 알 수 있다. 일반 콘크리트가 압축강도 대비 인장강도가 10% 정도인 반면 이 연구에서 조사한 복합재료는 25.8%로 나타나, 압축강도 대비 인장강도가 매우 큰 것을 알 수 있다.

인장변형성능(인장연성)은 7.52%로 나타났는데 콘크리트의 인장변형성능이 0.01%인 것을 고려하면 이 연구에서 조사한 복합재료의 인장변형성능이 매우 높다는 것을 알 수 있다. 일반적으로 고연성 복합재료의 인장변형성능을 3% 정도로 고려하고 있는데 (Li 2012; Xu and Cai 2010) 이 연구에서 조사한 복합재료는 2배 이상을 나타내고 있기 때문에 초고연성을 나타낸다고 볼 수 있다.

3. 초고연성 복합재료의 휨거동 해석

3.1 휨거동 해석 방법

휨거동은 실제 재료의 응력–변형률 곡선을 반영하고, 단면 층상화 방법을 통해 해석적으로 평가하였다. 먼저 압축연단 재료의 변형률을 조금씩 증가시켜 가면서 그에 따른 휨모멘트를 계산한다. 그러나 이 과정 중에 중립축(c)의 값을 모르기 때문에 가정한 값을 초기값으로 하여 "단면 내의 모든 합력은 0이다."라는 힘의 평형조건을 만족하는 c값을 반복계산법에 의하여 찾아야 한다. 이렇게 하여 주어진 압축연단에서 재료의 변형률 ϵ_c값에 대한 휨모멘트(M)값을 구하고, ϵ_c값을 조금 더 증가시켜 이 과정을 반복한

다. 이 과정을 계속 수행하면 휨모멘트가 최대가 되는 값을 얻을 수 있으며, 휨모멘트-곡률 관계도 구할 수 있다.

3.2 해석을 위한 재료 모델

해석을 위하여 기존의 연구결과 또는 이 연구의 실험결과를 가장 잘 모사할 수 있는 콘크리트, 초고연성 복합재료, 그리고 철근의 응력과 변형률 관계 모델을 적용하였다.

3.2.1 콘크리트 재료 모델

콘크리트의 압축응력과 변형률 모델은 응력 증가부(Ascending branch)와 응력 하강부(Descending branch)로 나누었고, Kim and Lee 모델에 의해 제안된 모델을 사용하였으며, 식 (1)과 같다 (Kim and Lee 1992).

$$\sigma = \begin{cases} f_c\left[A\left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0}\right)-(A-1)\left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0}\right)^{A/(A-1)}\right] & (0<\epsilon<\epsilon_0) \\ f_c e^{\left[-B(\epsilon-\epsilon_0)^C\right]} & (\epsilon_0<\epsilon<\epsilon_u) \end{cases} \quad (1)$$

여기서, f_c는 콘크리트 압축강도이며, ϵ_0는 압축강도에 해당되는 변형률을 의미하며, 식 (2)와 같다.

$$\epsilon_0 = 7\times 10^{-4}\sqrt[3]{f_c} \quad (2)$$

A, B, C는 곡선의 형태를 결정하는 변수이며 다음과 같다.

$$A = \frac{E_c\epsilon_0}{f_c} \quad (3)$$

$$B = \left(260+\frac{100}{f_c}\right) \quad (4)$$

$$C = 1.2-0.006f_c \quad (5)$$

콘크리트의 탄성계수는 식 (6)을 사용하였다.

$$E_c = 8500\sqrt[3]{f_c} \quad (6)$$

콘크리트의 인장응력과 변형률 관계는 식 (7)과 같이 Bilinear 모델을 적용하였다.

$$\sigma = \begin{cases} E_c\epsilon & (\epsilon_t<\epsilon<0) \\ -4E_c(\epsilon-\epsilon_t)+f_t & (\epsilon<\epsilon_t) \end{cases} \quad (7)$$

여기서, f_t는 콘크리트의 인장강도를 나타내며 압축강도의 10%로 정하였으며, ϵ_t는 인장강도에 해당되는 변형률을 나타낸다. 인장응력이 변화연화거동을 거치면서 0에 도달한 경우 이후 변형률에서는 모두 인장응력을 0으로 간주하였다.

3.2.2 초고연성 복합재료 재료 모델

초고연성 복합재료의 압축응력과 변형률 모델은 응력 증가부와 응력 하강부로 나누었으며, 응력 증가부는 Zhou et al.(2015)에 의해 제안된 모델을 사용하였으며, 응력 하강부는 Xu and Cai(2010) 모델을 사용하였다. 응력 하강부에서 Xu and Cai(2010) 모델을 사용한 이유는 Zhou et al.(2015) 모델의 경우 최신의 연구에 의해 제안된 모델이지만 하강부를 응력과 변형률이 아닌 응력과 변형(Deformation)의 형태로 모델을 제안하였기 때문이다. 이 연구에서 적용한 초고연성 복합재료의 응력 상승부의 응력(σ)과 변형률(ϵ) 모델은 식 (8)과 같다.

$$\sigma = \begin{cases} E_0\epsilon & (0<\epsilon<\epsilon_{0.4}) \\ E_0\epsilon(1-\alpha) & (\epsilon_{0.4}<\epsilon<\epsilon_0) \\ f_{cu}\dfrac{\left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0}\right)}{b_0\left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0}-1\right)^2+\frac{\epsilon}{\epsilon_0}} & (\epsilon_0<\epsilon) \end{cases} \quad (8)$$

여기서, E_0는 초고연성 복합재료의 탄성계수를 의미하며, 식 (9)와 같고, $\epsilon_{0.4}$는 압축강도(f_{cu})의 40%에 해당하는 변형률을 의미한다.

$$E_0 = 1.5(f_{cu})^{0.638} \quad (9)$$

ϵ_0는 압축강도에 해당되는 변형률을 의미하며, Zhou et al. (2015)의 실험결과를 이용하여 선형회귀분석을 수행하여 식 (10)과 같이 구하였다.

$$\epsilon_0 = 2.657\times 10^{-5}f_{cu}+0.002988 \quad (10)$$

α는 압축응력과 변형률 관계에서 비선형성을 모사하기 위하여 도입된 탄성계수 감소계수이며, 식 (11)과 같다(Zhou et al. 2015).

$$\alpha = a\frac{\epsilon E_0}{f_{cu}} - b \tag{11}$$

여기서, a와 b는 실험상수로서 Zhou et al.(2015)에 의해 각각 0.308과 0.124로 제안되었다.

압축응력 하강부 식에서 b_0는 압축강도에 해당되는 변형률 이후 재료의 취성적인 정도를 나타낼 수 있는 계수로서 0부터 무한대(∞)의 범위를 갖게 된다. 이 연구에서는 이 계수를 5로 가정하였다.

초고연성 복합재료의 인장응력과 변형률 관계는 식 (12)와 같이 Trilinear 모델을 적용하였다.

$$\sigma = \begin{cases} E_0\epsilon & (\epsilon_{cr} < \epsilon < 0) \\ \left(\dfrac{f_t - f_{cr}}{\epsilon_{tu} - \epsilon_{cr}}\right)(\epsilon - \epsilon_{cr}) + f_{cr} & (\epsilon_{tu} < \epsilon < \epsilon_{cr}) \\ c_0\left(\dfrac{f_t - f_{cr}}{\epsilon_{tu} - \epsilon_{cr}}\right)(\epsilon - \epsilon_{tu}) + f_t & (\epsilon < \epsilon_{tu}) \end{cases} \tag{12}$$

여기서, f_{cr}와 f_t는 각각 복합재료의 균열강도와 인장강도를 나타낸다. ϵ_{cr}와 ϵ_{tu}는 각각 균열강도와 인장강도에 해당되는 변형률을 나타낸다. c_0는 인장강도에 도달한 이후 인장응력과 변형률의 기울기를 변형경화구간에서의 기울기 대비 나타내는 계수로서 이 연구에서는 20을 사용하였다. 인장응력이 변화연화거동을 거치면서 0에 도달한 경우 이후 변형률에서는 모두 인장응력을 0으로 간주하였다.

3.2.3 철근 재료 모델

철근의 응력과 변형률 모델은 선형탄성 구간과 완전소성 구간을 갖는 Bilinear 모델을 사용하였으며, 식 (13)과 같다.

$$\sigma = \begin{cases} f_y & (\epsilon_y < \epsilon) \\ E_s\epsilon & (-\epsilon_y < \epsilon < \epsilon_y) \\ -f_y & (\epsilon < \epsilon_y) \end{cases} \tag{13}$$

여기서, f_y와 ϵ_y는 각각 철근의 항복강도와 항복변형률을 나타내며, E_s는 철근의 탄성계수를 나타낸다.

3.3 초고연성 복합재료 휨거동

Fig. 2는 3.2절에 기술된 재료모델에 이 연구에서 조사한 재료들을 적용하여 구한 응력과 변형률 그래프를 나타낸다. 콘크리트의 압축강도는 초고연성 복합재료와 동일한 32.7MPa로 가정하였으며, 초고연성 복합재료의 압축강도와 인장성능은 2.4절에 기술된 실험결과를 모사할 수 있도록 하였다. 또한 철근의 항복강도는 400MPa로 가정하였다.

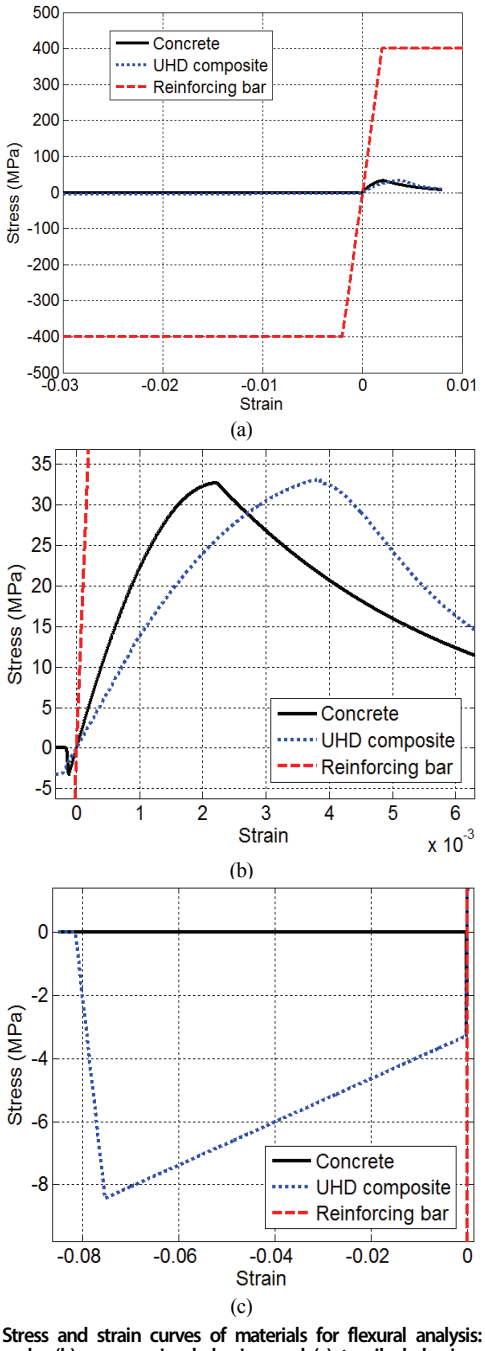

Fig. 2. Stress and strain curves of materials for flexural analysis: (a) full scale, (b) compressive behavior, and (c) tensile behavior

Fig. 3은 초고연성 복합재료의 휨거동 해석과 성능 평가를 위한 단면형상을 나타낸다. 해석은 총 4가지 경우에 대하여 수행하였으

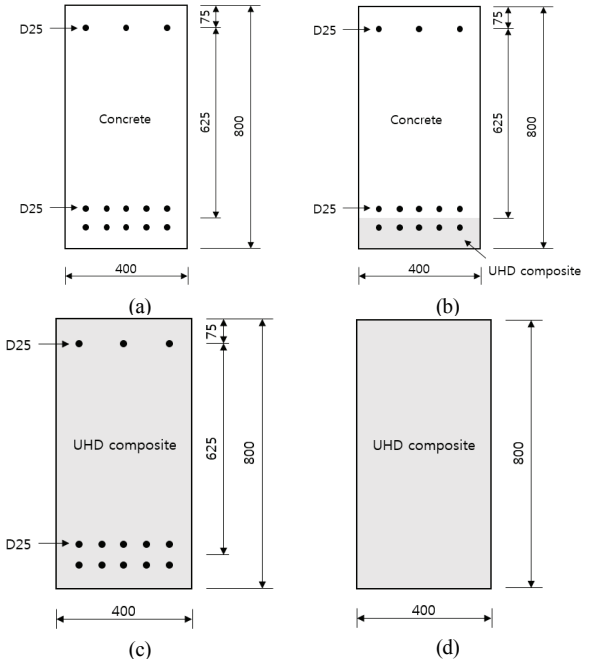

Fig. 3. Sectional view of beams: (a) R-C, (b) R-C+UHD composite, (c) R-UHD composite, and (d) UHD composite(no bar)

며, 기준이 되는 철근콘크리트 보(R-C)의 치수 및 철근 배근은 다음과 같다. 보의 높이는 800mm, 폭은 400mm이며, 10개의 인장철근(D25)이 압축연단으로부터 700mm에 위치하고, 3개의 압축철근(D25)이 압축연단으로부터 75mm에 있다고 가정하였다. R-C 보는 연성거동을 할 수 있도록 과소철근콘크리트 보로 설계되었으며, 철근비는 1.81%이다. 등가직사각형 응력블록을 이용하여 계산한 R-C 보의 휨강도는 1 277kNm이며, 휨강도일 때 인장철근의 변형률은 0.95%로 나타났다. 최소철근비는 0.36%이고, 최대철근비 규정을 만족하기 위한 철근의 변형률이 0.40%이기 때문에 콘크리트구조기준(2012)의 조건을 모두 충족하는 것으로 나타났다. R-C+UHD composite 보는 단면의 하단부부터 인장철근이 위치한 부분까지 초고연성 복합재료로 치환한 단면이다. R-UHD composite 보는 전단면이 초고연성 복합재료로 사용된 단면이며, UHD composite 보는 철근이 없이 전단면이 초고연성 복합재료로만으로 구성된 단면이다.

해석은 압축연단의 변형률이 0부터 0.008까지 수행되었다. Fig. 4는 각 단면에 대한 모멘트와 곡률 곡선을 나타내며, Fig. 5는 각 단면에서 곡률에 따른 압축연단으로부터 중립축까지 거리를 나타낸다. Table 4는 각 단면의 휨강도, 변형률, 그리고 중립축을 나타낸다. 등가직사각형 응력블록을 이용하여 계산한 R-C 보의 휨강도(1 277kNm)는 비선형 단면해석을 통해 구한 휨강도인 1 282

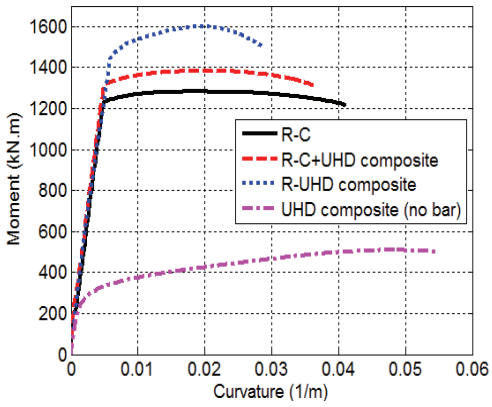

Fig. 4. Moment and curvature curves

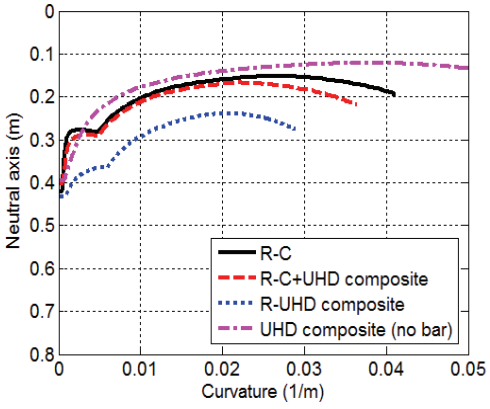

Fig. 5. Neutral axis

kNm과 약 0.4%의 차이가 나타났다. 이를 통하여 이 연구에서 수행한 휨거동 해석 방법이 적절함을 확인할 수 있다.

Fig. 4에서 각 단면별 모멘트와 곡률 곡선을 보면 인장부에 균열이 생기는 부분과 철근이 항복함에 따라 강성이 변하는 것을 볼 수 있다. 보의 하단부에서 인장철근의 위치까지 UHD composite로 치환한 R-C+UHD composite 보와 단면 전체를 UHD composite으로 치환한 R-UHD composite 보는 R-C 보에 비하여 휨강도가 각각 8.0%와 24.7% 증가하는 것으로 나타났다. 인장강도가 8.43MPa이고, 인장변형성능이 7.52%에 달하는 우수한 인장성능을 갖는 복합재료를 이용하더라도 보의 휨강도 증가가 크지 않은 이유는 휨강도에 해당하는 바닥의 변형률이 크지 않기 때문이다. Table 4에서 보 바닥의 변형률은 철근이 사용되는 경우 초고연성 복합재료가 사용되더라도 변형률이 최대 1.38%로 초고연성 복합재료의 인장변형성능의 18.4%밖에 되지 않은 것으로 나타났다.

휨강도에 해당하는 압축연단의 변형률을 보면 R-C 보가 0.29%로 콘크리트구조기준(2012)에서 콘크리트 압축연단의 극한변형률

Table 4. Flexural strength, strain, and neutral axis predicted by analysis

Type of beam	Flexural strength (kNm)	Strain at flexural strength (%)			Neutral axis(m)	
		at top	at tension steel	at bottom	at ϵ_c=0.005%	at flexural strength
R-C	1 282	0.29	0.94	1.11	0.421	0.166
R-C+UHD composite	1 385	0.37	1.16	1.38	0.403	0.167
R-UHD composite	1 598	0.46	0.88	1.07	0.433	0.240
UHD composite	508	0.63	2.75	3.23	0.396	0.131

0.3%와 거의 일치하는 것으로 나타난 반면 R-C+UHD composite 보와 R-UHD composite 보의 경우 각각 0.37%와 0.46%로 나타나 보의 휨강도 증진을 위하여 압축부에 더 많은 변형이 필요한 것으로 나타났다.

콘크리트구조기준(2012)에 따르면 보의 연성거동을 위하여 철근콘크리트 보의 파괴 기준인 압축연단의 콘크리트 변형률이 0.3%일 때(휨강도에 해당) 철근의 변형률은 0.40%(철근의 항복강도가 400MPa이하인 경우) 이상이 나타나야 하는데 이 연구에서 가정한 보는 모두 최소 허용변형률을 초과하는 것으로 나타났다.

중립축은 Fig. 5와 Table 4에 나타난 바와 같이 균열이 발생하기 전 즉, 압축변형률이 매우 작은 경우 단면의 중앙부에 위치하다가 점차 위쪽으로 이동하고 인장부에 균열이 생기는 부분과 철근이 항복하는 부분에서 중립축의 변화가 크게 발생하는 것을 볼 수 있다.

종합적으로 일반적인 철근콘크리트 보의 설계방법을 적용하는 경우 초고연성 복합재료를 효율적으로 사용하지 못하는 것으로 나타났으며, 초고연성 복합재료를 효율적으로 사용하기 위해서는 인장부의 변형이 증가될 수 있도록 설계될 필요가 있는 것으로 나타났다.

철근 없이 UHD composite으로만 되어 있는 보는 R-C 보에 비하여 휨강도가 60.3% 감소하는 것으로 나타나 동일 크기의 단면을 갖는 철근콘크리트 보를 대체하기에는 한계가 있는 것으로 나타났다. 다만, 보의 바닥에서 휨강도일 때 변형률은 초고연성 복합재료의 인장변형성능의 43.0%로 나타나 철근이 있는 경우에 비하여 초고연성 복합재료의 인장성능을 보다 효과적으로 사용할 수 있는 것으로 나타났다.

4. 결 론

이 연구에서는 알칼리활성 슬래그 기반 초고연성 복합재료를 제조하고, 압축강도와 인장거동을 실험적으로 조사하였다. 또한 초고연성 복합재료를 활용한 보의 휨거동을 비선형 단면해석을 통하여 해석적으로 분석하였다. 이를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 수산화칼슘과 황산나트륨을 사용하여 슬래그를 활성화시킨 결합재를 기반으로 폴리에틸렌 섬유로 보강하여 압축강도와 인장강도가 각각 32.7MPa와 8.43MPa로 나타났으며, 압축강도 대비 인장강도가 일반 콘크리트에 비하여 2.6배 높게 제조가 가능하다는 것을 확인하였다. 또한 인장변형성능이 7.52%로 나타나 일반적인 고연성 복합재료 대비 2배 이상의 인장변형성능이 나타났다.
2) 현행 구조기준을 만족하는 철근비 1.81%인 철근콘크리트 보와 초고연성 복합재료를 활용한 보에 대하여 기존에 제안된 비선형 재료모델과 비선형 단면해석을 이용하여 휨거동 해석을 수행한 결과 초고연성 복합재료를 활용하여 콘크리트를 100% 치환하면 철근콘크리트 보 대비 최대 24.7%의 휨강도 증진이 있는 것으로 나타났다.
3) 휨거동 해석 결과 동일한 압축강도를 갖는 콘크리트 대비 2배 이상의 인장강도와 750배 이상의 인장변형성능을 갖는 복합재료를 활용하더라도 보강 효과가 크지 않은 이유는 인장부에서 휨강도에 해당하는 인장변형이 초고연성 복합재료의 인장변형 성능에 비하여 매우 낮기 때문인 것으로 나타났다.
4) 철근콘크리트 보와 동일한 단면과 재료의 강도가 동일하면서 철근으로 보강되지 않고 초고연성 복합재료만으로 구성된 보는 철근콘크리트 보에 비하여 휨강도가 낮아 동일 크기의 단면을 갖는 철근콘크리트 보를 대체하기에는 한계가 있는 것으로 나타났으나, 철근으로 보강된 경우에 비하여 인장변형성능 측면에서 초고연성 복합재료의 성능을 효과적으로 사용할 수 있는 것으로 나타났다.

Conflict of interest

None.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술연구사업의 연구비지원(19SCIP-B103706-05)과 국토교통기술촉진연구사업의 연구비지원(19CTAP-C151882-01)에 의해 수행되었습니다.

References

Choi, J.I., Song, K.I., Song, J.K., Lee, B.Y. (2016). Composite properties of high-strength polyethylene fiber-reinforced cement and cementless composites, Composite Structures, **138**, 116-121.

JSCE. (2008). Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks(HPFRCC), Japan: Japan Society of Civil Engineers.

Khan, M.I., Abbass, W. (2016). Flexural behavior of high-strength concrete beams reinforced with a strain hardening cement-based composite layer, Construction and Building Materials, **125**, 927-935.

Kim, J.K., Kim, J.S., Ha, G.J., Kim, Y.Y. (2007). Tensile and fiber dispersion performance of ECC(engineered cementitious composites) produced with ground granulated blast furnace slag, Cement and Concrete Research, **37(7)**, 1096-1105.

Kim, J.K., Lee, T.G. (1992). Nonlinear analysis of reinforced concrete beams with softening, Computers & Structures, **44(3)**, 567-573.

Kim, Y.Y., Kong, H.J., Li, V.C. (2003). Design of engineered cementitious composite suitable for wet-mixture shotcreting, ACI Materials Journal, **100(6)**, 511-518.

Kim, Y.Y., Lee, B.Y., Bang, J.W., Han, B.C., Feo, L., Cho, C.G. (2014). Flexural performance of reinforced concrete beams strengthened with strain-hardening cementitious composite and high strength reinforcing steel bar, Composites Part B: Engineering, **56**, 512-519.

Li, M., Li, V.C. (2013). Rheology, fiber dispersion, and robust properties of engineered cementitious composites, Materials and Structures, **46(3)**, 405-420.

Li, V.C. (2012). Tailoring ECC for special attributes: A review, International Journal of Concrete Structures and Materials, **6(3)**, 135-144.

Li, V.C., Wang, S., Wu, C. (2001). Tensile strain-hardening behavior of polyvinyl alcohol engineered cementitious composite(PVA-ECC), ACI Materials Journal, **98(6)**, 483-492.

Shin, S., Kim, K., Lim, Y. (2011). Strengthening effects of DFRCC layers applied to RC flexural members, Cement and Concrete Composites, **33(2)**, 328-333.

Xu, S.L., Cai, X.R. (2010). Experimental study and theoretical models on compressive properties of ultrahigh toughness cementitious composites, Journal of Materials in Civil Engineering, **22(10)**, 1067-1077.

Yang, E.H., Sahmaran, M., Yang, Y., Li, V.C. (2009). Rheological control in production of engineered cementitious composites, ACI Materials Journal, **106(4)**, 357-366.

Zhang, J., Wang, Z., Ju, X., Shi, Z. (2014). Simulation of flexural performance of layered ECC-concrete composite beam with fracture mechanics model, Engineering Fracture Mechanics, **131**, 419-438.

Zhou, J., Pan, J., Leung, C.K. (2015). Mechanical behavior of fiber-reinforced engineered cementitious composites in uniaxial compression, Journal of Materials in Civil Engineering(ASCE), **27(1)**, 04014111.

알칼리활성 슬래그 기반 초고연성 복합재료의 휨거동 해석

이 연구의 목적은 알칼리활성 슬래그 기반 섬유보강 복합재료를 보 부재의 재료로 활용하였을 때 휨거동을 해석적으로 분석하는 것이다. 7% 이상의 초고연성이 나타날 수 있는 알칼리활성 슬래그 기반 섬유보강 복합재료를 제조하기 위하여 재료 및 배합을 선정하였고, 재료의 압축강도와 인장성능을 평가하였다. 복합재료는 압축강도 32.7MPa, 인장강도 8.43MPa, 인장변형성능 7.52%를 나타내었다. 초고연성 복합재료로 구성된 보의 휨거동을 분석하기 위하여 4가지 단면에 대하여 비선형 단면 층상화 방법을 사용하여 해석을 수행하였다. 해석결과 초고연성 복합재료로 부분적으로 보강된 경우 8.0%, 콘크리트가 복합재료로 전부 치환되어 전체 보강된 경우 24.7%의 휨강도 증진효과가 있는 것으로 나타났다. 휨강도 증진 효과가 크지 않은 이유는 인장 연단의 변형률이 최대 1.38%로 초고연성 복합재료의 인장변형성능의 18.4%밖에 되지 않기 때문인 것으로 나타났다.