

상변화 물질을 함유한 하이볼륨 슬래그 시멘트 복합재료의 압축강도와 인장특성

Compressive Strength and Tensile Properties of High Volume Slag Cement Composite Incorporating Phase Change Material

강수태¹ · 최정일² · 이방연^{3*}

Su-Tae Kang¹ · Jeong-Il Choi² · Bang Yeon Lee^{3*}

(Received March 4, 2020 / Revised March 20, 2020 / Accepted March 24, 2020)

The purpose of this study is to investigate the compressive and tensile properties of high volume slag cement-based fiber-reinforced composite incorporating phase change material. Four mixtures were determined according to calcium hydroxide and expansive admixture, and the compressive strength and tension tests were performed. Test results showed that four mixtures showed a compressive strength over 51MPa and a tensile ductility over 3.2%. It was observed that calcium hydroxide and expansive admixture influenced the compressive and tensile performance, and the strength, ductility, and cracking patterns of composite could be improved by including proper amount of calcium hydroxide and expansive admixture.

키워드 : 복합재료, 고연성, 상변화물질

Keywords : Composite, High ductility, Phase change material

1. 서론

건축물에서 전세계 온실가스의 약 33%가 발생하고(Levermore 2008), 건축물에서 사용되는 에너지가 총 에너지의 약 38.9%를 차지하며, 이 중 38.9%는 건축물의 냉난방과 환기를 위하여 사용되는 것으로 보고되었다(Kwok and Raikovich 2010). 또한 건축물에서 냉난방으로 사용된 에너지의 대부분은 구조물의 외피를 통해 사라지는 것으로 알려져 있다.

따라서 건축물에 사용되는 재료의 열용량을 향상시키는 것을 건축물에서 냉난방으로 사용되는 에너지량을 줄일 수 있는 가장 직접적인 방법이다. 열에너지를 저장하는 방법은 화학반응에 의해 에너지가 방출되거나 흡수되는 화학에너지(chemical energy), 물질의 상태가 바뀌지 않고 온도를 높이거나 낮아지는 현열(sensible heat), 물체의 상이 변하면서 흡수하거나 방출되는 잠열

(latent heat) 현상을 이용하는 것이다(Jeon et al. 2013). 이중 상이 변하면서 에너지가 흡수되거나 방출되는 잠열 현상이 나타나는 상변화물질(Phase change material)은 특정 온도에서 고체가 액체가 되거나 액체가 고체로 변하면서 에너지가 흡수되거나 방출되는 현상을 갖고 있기 때문에 원하는 온도에서 에너지의 방출과 흡수를 조절하기 용이한 재료이다. 이러한 특성으로 구조물의 에너지 사용 저감을 목적으로 다양한 상변화물질 혼입에 따른 에너지 저감현상에 대한 연구를 수행하였다(Tyagi and Buddhi 2007; Pomianowski et al. 2013; Soares et al. 2013; Marin et al. 2016; Zavri and Stritih 2019).

상변화물질은 단독으로 사용될 수도 있으며, 기존의 건축재료에 혼입하여 사용될 수 있다. 건축재료로 가장 많은 양이 사용되는 재료는 시멘트 기반 콘크리트이며 주로 압축력에 저항하는 구조재료로 사용되지만 인장력이 압축강도의 10% 수준이고 인장변형성

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

¹대구대학교 건설시스템공학과 부교수 (Department of Civil Engineering, Daegu University, Daegu 38453, Republic of Korea)

²전남대학교 바이오하우징연구소 박사후 연구원 (School of Architecture, Chonnam National University, Gwangju 61186, Republic of Korea)

³전남대학교 건축학부 교수 (School of Architecture, Chonnam National University, Gwangju 61186, Republic of Korea)

Table 1. Properties of cement and slag

Material	Chemical composition(%)								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	TiO ₂	K ₂ O	etc.
Cement	18.5	4.5	3.3	65.8	3.4	2.2	0.3	1.1	0.9
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

능도 약 0.01%에서 0.1%로 매우 낮은 취성적 성질을 갖고 있다. 이러한 콘크리트의 낮은 인장성능은 적절한 섬유와 선형과 이론에 기반한 설계를 통하여 인장변형성능을 2% 이상으로 향상시킬 수 있다(Kwon et al. 2016; Choi et al. 2018; Choi et al. 2019, Shin et al. 2019). 인장하중하에서 하중에 대한 저항성이 크고 변형성능이 우수한 섬유보강 복합재료에 상변화물질을 혼입하여 건축재료로 사용하는 경우 역학적성과 에너지저감을 동시에 확보할 수 있는 장점이 있으며, 패널 형태로 사용하는 경우 인장성능 향상으로 시공중이나 사용중에 외부충격에 의한 손상을 최소화할 수 있다.

이 연구에서는 이러한 다기능 건축재료 개발에 대한 기초연구로서 상변화물질을 혼입하고 슬래그를 다량 함유한 시멘트 기반 섬유보강 복합재료에서 슬래그를 활성화시킬 수 있는 알칼리활성화제 중의 하나인 수산화칼슘과 수축량을 감소시킬 수 있는 팽창제가 압축 및 인장성능에 미치는 영향을 조사하고자 한다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1 실험 재료

2.1.1 결합재

이 연구에서 사용한 결합재는 보통 포틀랜드 시멘트, 고로슬래그 및 수산화칼슘이다. 고로슬래그는 KS F 2563에 규정된 고로슬래그 미분말 3종 분말도(4,320cm²/g)를 사용하였으며, 밀도는 2.92cm³/g이다. Table 1은 XRF(X-ray fluorescence) 분석을 통한 보통 포틀랜드 시멘트와 고로슬래그의 화학적 성분을 나타낸다. 알칼리활성화제는 고로슬래그의 잠재수경성을 활성화시키기 위하여, 수산화칼슘 성분이 95% 이상인 분말형태의 수산화칼슘을 사용하였다. 잔골재는 규사 7호를 사용하였고, 수축량 저감 및 강성 확보를 위하여 혼입하였다. 굵은골재는 매트릭스의 파괴인성을 증가시켜 안정상태 균열 발생 가능성이 낮아지고, 섬유의 균질한 분포를 저하시키기 때문에 사용하지 않았다.

2.1.2 혼화제

섬유의 분산성이 최적화되는 유동상태를 확보하기 위하여 폴리

카르본산계 고성능 감수제와 증점제를 사용하였다. 또한 실험체 제작과정에서 의도하지 않게 발생한 기포가 압축 및 인장거동에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 소포제를 사용하였다. 팽창제는 수축량을 저감하기 위하여 혼입하였고, Hauyne(3CaO₃·3Al₂O₃·CaSO₄), 유리석회(CaO), 석고(CaSO₄)로 구성된 칼슘설포알루미네이트(CSA)계 팽창재를 사용하였다.

2.1.3 상변화물질

상변화물질은 분자식 C₁₇H₃₆의 n-Heptadecane이 97% 이상인 파라핀계열 제품을 사용하였다. 상변화 온도는 22℃이고, 상변화 온도보다 낮은 경우 고체 상태, 높은 경우 액체 상태를 나타낸다. 일반적인 잠열 용량은 200kJ/kg이고, 비열 용량은 2kJ/kg이다. 또한 밀도는 15℃의 고체 상태일 때 0.88g/cm³, 25℃의 액체 상태일 때 0.77g/cm³이다.

2.1.4 섬유

보강 섬유로는 인장강도 3 030MPa인 폴리에틸렌 섬유를 사용하였다. 직경은 16μm이며, 길이는 12mm로서 형상비는 750이다. 탄성계수는 112GPa이며, 밀도는 0.97g/cm³이다.

2.2 배합, 실험체 제작 및 양생 방법

이 연구에서 조사한 배합은 Table 2에 정리되어 있다. 배합은 결합재(binder)의 대비 중량비로 표현하였다. 실험변수는 알칼리활성화제의 양과 팽창제의 양이며, 다른 재료들의 배합비는 모두 동일하다. 시멘트와 슬래그를 결합재로 사용하고 팽창제를 결합재 대비 10% 첨가한 배합(P)을 기본 배합으로 설정하였다. P-A 배합은 P 배합에서 슬래그를 활성화시킬 수 있는 수산화칼슘을 결합재의 성분으로 추가한 배합이다. P-EA 배합은 P-A 배합에서 팽창제의 양을 절반으로 줄인 배합이다. 마지막으로 P-A-EA 배합은 P-EA 배합에서 활성화제의 양을 2배로 증가하고 팽창제는 사용하지 않았다.

실험체를 제작하기 위하여 분말형 재료들인 결합재와 팽창재, 규사를 혼합기에 넣고 2분 동안 건비빔하였다. 이 후 배합수를 혼

Table 2. Mixture proportions

Mixture	Binder			Expansion agent	Silica sand	Water	Super-plasticizer (%)	Viscosity modifying agent (%)	Anti-foamer (%)	PCM (%)	Fiber (Vol. %)
	Cement	GGBFS	Ca(OH) ₂								
P	0.3	0.7	0	0.10	0.4	0.35	0.2	0.04	0.1	0.10	1.75
P-A	0.3	0.665	0.035	0.10							
P-EA	0.3	0.665	0.035	0.05							
P-A-EA	0.3	0.630	0.070	0							

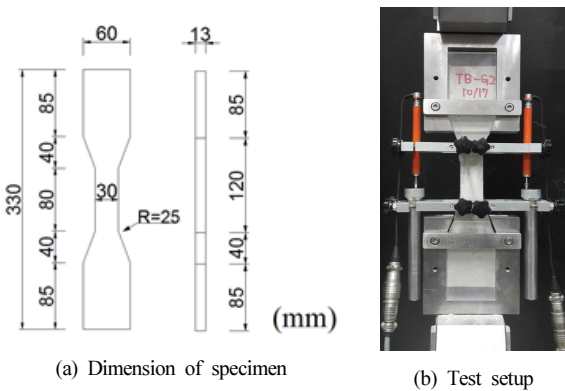


Fig. 1. Dimension of specimen and test setup

입하고 바로 화학혼화제인 고성능감수제, 증점제와 소포제를 투입하여 약 3분간 추가로 혼합하였다. 이후, 섬유를 투입하였으며, 섬유의 분산성이 최적화 될 때까지 고속으로 혼합하였다. 섬유의 분산성이 최적화되면 액상 형태의 상변화물질을 혼입하였고, 모든 재료가 혼합기에 투입된 후 약 5분간 혼합하였다.

혼합이 완료된 압축강도 시험을 위하여 한변의 길이가 50mm인 정사각형 실험체를 배합별로 3개씩 제작하였다. 또한 인장거동을 평가하기 위하여 일본토목학회에서 제안한 방법(JSCCE 2008)에 따라 배합별로 4개씩 인장실험체를 제작하였다. Fig. 1(a)는 인장 실험체 치수를 나타낸다. 실험체 제작이 완료된 후 수분 증발을 최소화하기 위하여 플라스틱 필름으로 실험체를 덮고 2일 동안 양생 온도(23 ± 3)°C와 상대습도(60 ± 5)%에서 2일 동안 기건 양생을 하였다. 실험체를 탈형한 후 온도(23 ± 2)°C로 수중양생을 실시하였다.

2.3. 실험 방법

밀도는 압축강도 시험을 위한 실험체를 이용하였으며, 각 실험체의 무게를 공기 중과 수중에서 측정하여 계산하였다. 각 실험체의 압축강도는 KS L 5105에 따라 측정하였다. 일축인장실험은 일본토목학회에서 제안한 방법에 따라 수행하였으며, 최대 용량 2톤

의 전기식 인장실험기를 사용하였다. 하중은 로드셀로 측정하고, 변형은 Fig. 1(b)와 같이 단면적이 일정한 길이 80mm에 발생한 변형을 실험체 양쪽에 설치된 변위측정기를 사용하여 측정하였다. 인장하중은 분당 0.1mm의 속도로 변위제어 방식으로 가하였다.

3. 결과 및 분석

3.1. 밀도와 압축강도

Fig. 2는 이 연구에서 조사한 4가지 배합에 대하여 실험을 통해 구한 밀도를 나타낸다. 측정된 실험값과 이론값의 최대 차이는 1.2%로 나타났다. 이론적 밀도는 각 재료의 밀도와 배합비를 통해 계산하였다. 이론값과 실험값을 비교함으로써 큰 기포나 손상이 없이 실험체가 제작되었음을 확인할 수 있다.

Fig. 3은 각 배합의 압축강도를 나타낸다. 활성화제를 넣은 경우 강도변화는 거의 발생하지 않은 반면 팽창제의 양이 감소할수록 그에 비례하여 압축강도가 감소하는 것으로 나타났다. 팽창제를 넣지 않고 활성화제를 가장 많이 넣은 P-A-EA 배합의 압축강도가 가장 낮게 나타났다. 이를 통해 이 연구에서 조사한 배합의 범위에서 압축강도를 높게 유지하기 위해서는 팽창제를 혼입하는 것이 적절한 것으로 나타났다. 4가지 배합의 압축강도에 대한 변

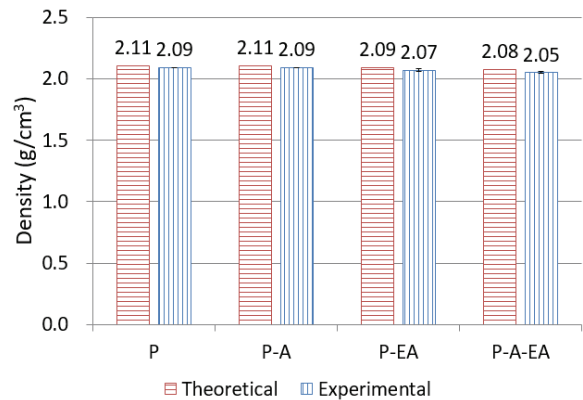


Fig. 2. Density

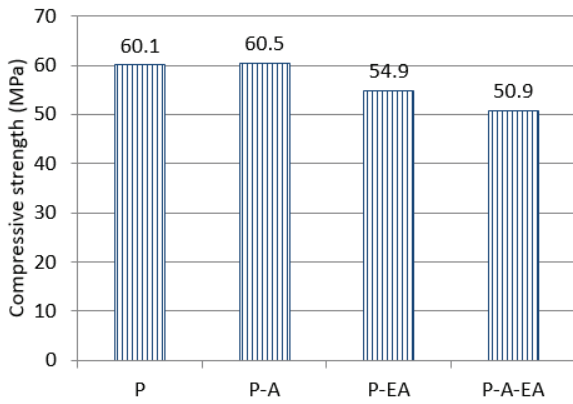


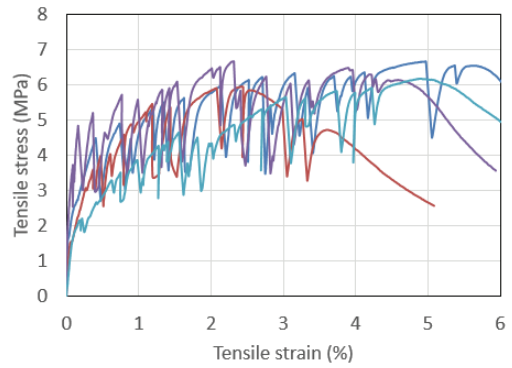
Fig. 3. Compressive strength

동계수(coefficient of variation)는 최대 6.8%로 나타났다.

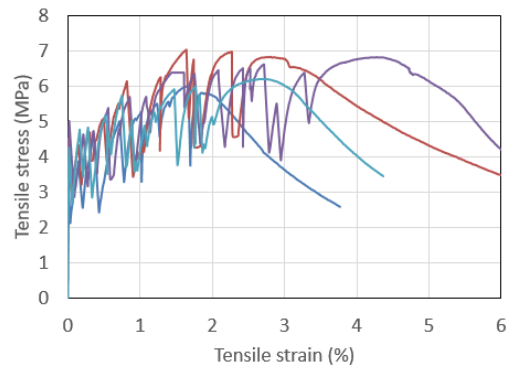
3.2 일축 인장

Fig. 4는 각 배합별 인장응력과 변형률의 관계를 나타낸다. 4가지 배합 모두 첫 번째 균열발생 이후 응력의 감소와 증가가 반복되는 현상이 나타났으며, 전체적으로 변형률이 증가하면서 인장응력이 증가하는 변형경화현상이 나타났다. 모든 배합에서 변형경화현상이 나타났지만 배합별로 인장강도와 인장변형성능에는 차이가 나타났다. 변형경화현상이 발생하는 중에 인장응력의 저하가 크게 발생하였는데 이러한 현상이 생기는 이유는 하중을 하중제어방식이 아닌 변위제어방식으로 가하였기 때문이다. 변위제어방식의 경우 실험체에 일정한 속도로 변형을 가하고 동시에 실험체에 가해진 응력을 로드셀을 이용하여 측정하기 때문에 실험체에 균열이 발생할 때마다 인장하중이 이완되기 때문이다. 이는 균열부위의 강성이 균열이 발생하지 않은 매트릭스보다 훨씬 작기 때문이다. 또한 이 연구에서 사용한 폴리에틸렌 섬유는 소수성의 성질을 갖고 있어 응력과 균열개부변위 관계가 원점에서 시작하기 때문에 힘의 평형, 적합조건과 힘과 변위의 관계를 만족하기 위하여 친수성 섬유를 사용하는 경우에 비하여 균열이 크게 발생하거나 응력 저하가 크게 발생하기 때문이다.

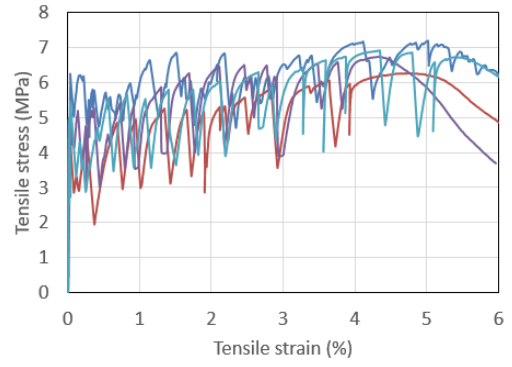
Fig. 5는 인장성능을 정량적으로 나타낼 수 있는 인장강도와 인장연성을 각 배합별로 나타낸 것이다. 인장강도는 각 실험체의 최대 인장응력을 평균하여 계산하였고, 인장연성은 인장강도에 해당하는 변형률로 정의하여 계산하였다. 이 연구에서 조사한 배합에서 활성화제의 양이 0%에서 0.035%와 팽창제의 양이 0.05%에서 0.1%까지 인장강도에는 뚜렷한 차이가 나타나지 않은 반면 활성화제의 양이 0.07%이고, 팽창제를 넣지 않은 P-A-EA 배합에서 가장 낮은 인장강도가 측정되었다. 인장연성은 뚜렷한 경향이 나



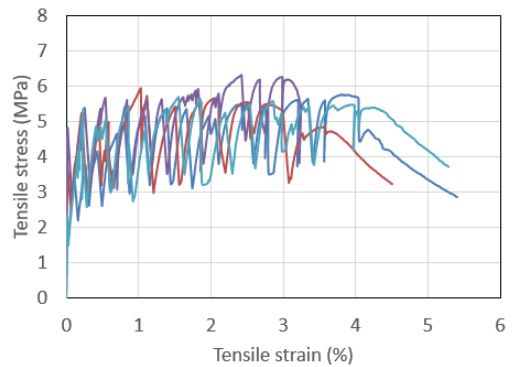
(a) P



(b) P-A



(c) P-EA



(d) P-A-EA

Fig. 4. Tensile stress-strain curves

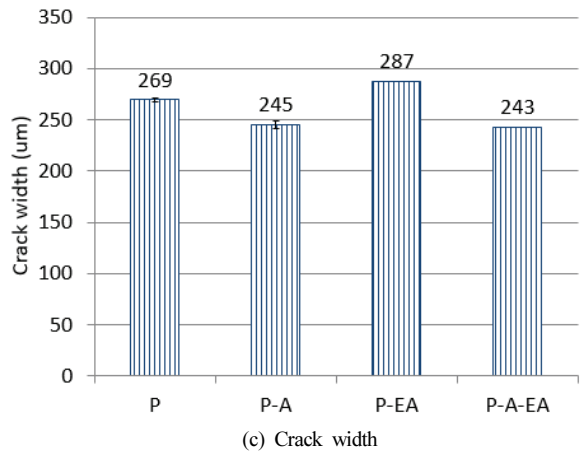
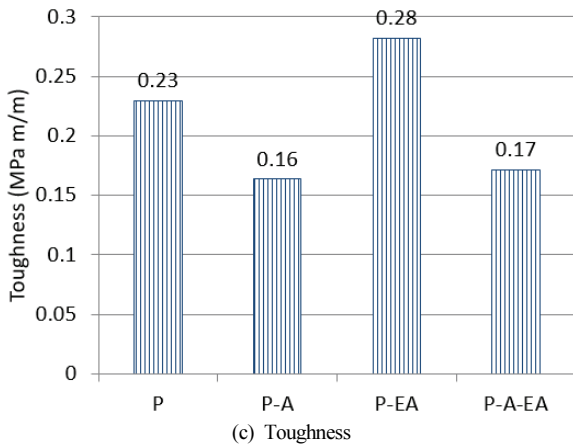
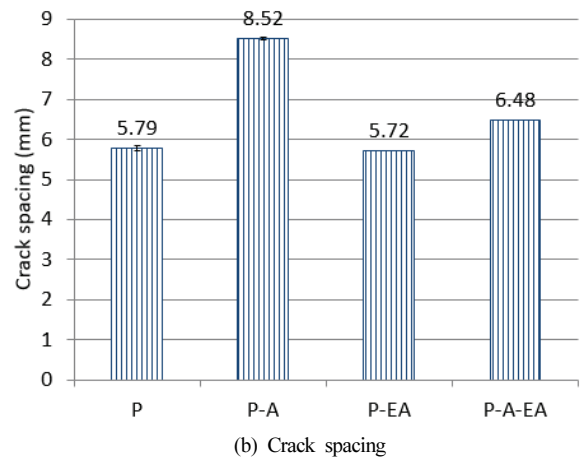
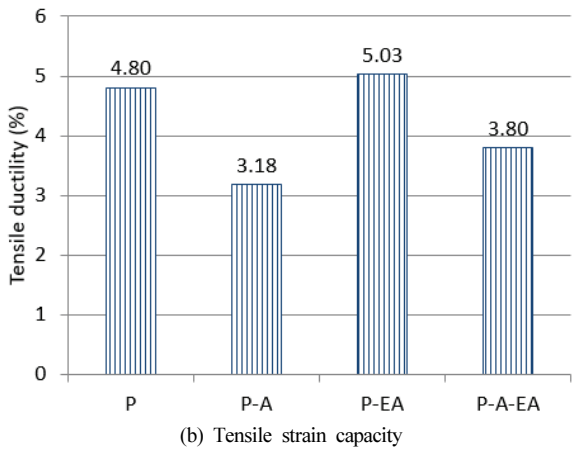
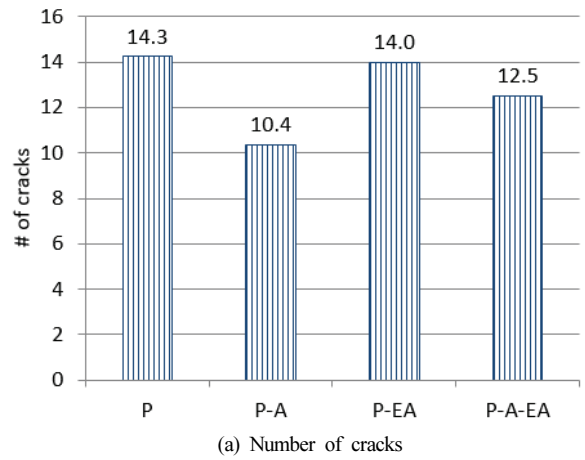
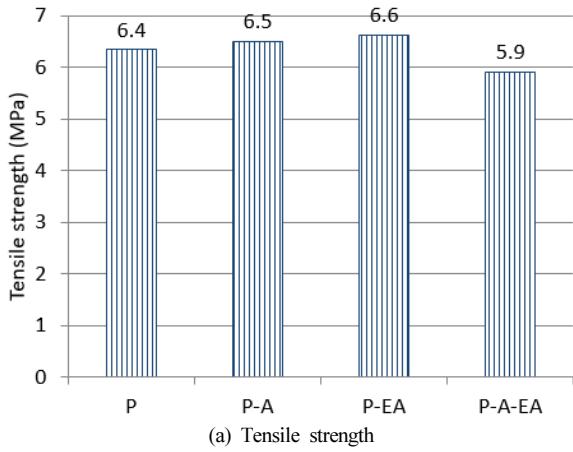


Fig. 5. Tensile behavior

Fig. 6. Cracking pattern

타나지 않았으며, P 배합과 P-EA 배합이 나머지 두 배합에 비하여 큰 것으로 나타났다. 종합적으로 압축강도에 비하여 인장성능은 활성화제와 팽창제의 영향이 비례적으로 나타나지 않았다. 압축강도와 인장성능 측면에서 기준 배합인 P 배합과 P-EA 배합이 다른 배합에 비하여 우수한 것으로 나타났다. 인장강도의 변동계수는 최대 6.5%로 압축강도의 변동계수와 유사하였지만 인장연성의 변

동계수는 최대 30.5%로 상대적으로 큰 것으로 나타났다. 재료의 에너지 흡수 능력을 나타내는 인성은 인장강도와 인장연성이 가장 높게 나타난 P-EA 배합이 가장 크게 나타났으며, 전체적으로 인장변형성능과 유사한 경향을 나타내었다. 이는 인장강도에 비하여 인장연성이 배합별로 차이가 크게 나타났기 때문이다.

Fig. 6은 각 배합별 측정구간 내에 발생한 균열개수, 균열간격, 균열폭을 나타낸다. 균열개수는 실험체 양면에 발생한 균열을 육안관찰을 통하여 측정하였다. 변형측정구간인 80mm 내에 배합별로 10개에서 14개의 균열이 발생하였으며, 전체적으로 인장연성과 유사한 경향을 나타내었다. 균열간격은 변형측정구간을 균열개수로 나누어서 구하였기 때문에 균열개수와 반비례한 결과가 나타났다. 균열폭은 변형측정구간내에 발생한 변형량을 균열의 개수로 나누어 계산하였다. 이는 균열폭이 균열이 발생하지 않은 구간의 변형에 비하여 매우 크기 때문에 변형은 모두 균열폭에 의해 발생하였다고 가정할 수 있기 때문이다. 균열폭은 다른 균열패턴에 비하여 상대적으로 차이가 크지는 않게 나타났으나 전체적으로 인장연성과 균열개수와 유사한 경향을 나타내었다.

4. 결론

이 연구에서는 상변화물질을 혼입한 슬래그 다량 치환 시멘트 기반 섬유보강 복합재료의 압축 및 인장성능을 실험적으로 조사하였다. 특히 슬래그를 활성화시킬 수 있는 활성화제의 양과 팽창제의 혼입량에 따른 거동을 조사하였다. 실험을 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 상변화물질을 함유한 슬래그 다량 치환 섬유보강 복합재료는 50MPa 이상의 압축강도를 나타내었고, 변형경화현상과 함께 5.9MPa 이상의 인장강도와 3% 이상의 높은 인장연성을 나타내었다.
- (2) 이 연구에서 조사한 배합 내에서 활성화제 보다는 팽창제가 압축강도에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 팽창제의 양이 증가할수록 압축강도는 증가하는 것으로 나타났다. 이에 반하여 인장성능은 활성화제와 팽창제의 영향이 비례적으로 나타나지 않았다.
- (3) 압축강도와 인장강도의 변동계수는 최대 6.8%로 유사하게 나타난 반면 인장연성은 최대 30.5%로 큰 것으로 나타나 인장연성의 품질관리가 더 어려운 것으로 나타났다.
- (4) 활성화제와 팽창제는 압축 및 인장성능에 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 활성화제를 넣지 않고 팽창제를 0.1% 넣은 P 배합과 활성화제를 0.035%, 팽창제를 0.05% 넣은 P-EA 배합이 다른 두 배합에 비하여 강도, 연성, 인성, 균열개수 및 균열간격 측면에서 우수한 것으로 나타났다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

이 논문은 2018학년도 대구대학교 연구년 과제 지원에 의한 논문이며, 이에 감사드립니다.

References

- Choi, J.I., Park, S.E., Cha, S.L., Lee, B.Y. (2019). Effects of type of synthetic fiber on material properties of cementless composite, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **7(3)**, 255–261 [in Korean].
- Choi, J.I., Park, S.E., Lee, B.Y., Kim, Y.Y. (2018). Tensile properties of polyethylene fiber-reinforced highly ductile composite with compressive strength of 100MPa class, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **30(5)**, 497–503 [in Korean].
- Jeon, J., Lee, J.H., Seo, J., Jeong, S.G., Kim, S. (2013). Application of PCM thermal energy storage system to reduce building energy consumption, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, **111(1)**, 279–288.
- JSCE. (2008). Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks(HPFRC). Japan: Japan Society of Civil Engineers.
- Kwok, A.G., Rajkovich, N.B. (2010). Addressing climate change in comfort standards, *Building and Environment*, **45(1)**, 18–22.
- Kwon, S.J., Kang, S.T., Choi, J.I., Lee, B.Y. (2016). Compressive and tensile behavior of polyethylene fiber reinforced composite according to silica sand and fly ash, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **4(1)**, 25–30 [in Korean].
- Levermore, G. (2008). A review of the IPCC assessment report four, part 1: the IPCC process and greenhouse gas emission trends from buildings worldwide, *Building Services Engineering Research and Technology*, **29(4)**, 349–361
- Marin, P., Saffari, M., de Gracia, A., Zhu, X., Farid, M.M., Cabeza, L.F., Ushak, S. (2016). Energy savings due to the use of PCM for relocatable lightweight buildings passive heating and cooling in different weather conditions, *Energy and Buildings*, **129**,

- 274–283.
- Pomianowski, M., Heiselberg, P., Zhang, Y. (2013). Review of thermal energy storage technologies based on PCM application in buildings, *Energy and Buildings*, **67**, 56–69.
- Shin, K.J., Lee, S.C., Kim, Y.Y. (2019). High ductile fiber reinforced concrete with micro fibers, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, **23(2)**, 92–98 [in Korean].
- Soares, N., Costa, J.J., Gaspar, A.R., Santos, P. (2013). Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency, *Energy and Buildings*, **59**, 82–103.
- Tyagi, V.V., Buddhi, D. (2007). PCM thermal storage in buildings: a state of art, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **11(6)**, 1146–1166.
- Zavri, E., Stritih, U. (2019). Improved thermal energy storage for nearly zero energy buildings with PCM integration, *Solar Energy*, **190**, 420–426.

상변화 물질을 함유한 하이볼륨 슬래그 시멘트 복합재료의 압축강도와 인장특성

이 연구의 목적은 상변화물질을 혼입한 슬래그 다량 치환 시멘트 기반 섬유보강 복합재료의 압축 및 인장성능을 실험적으로 조사하는 것이다. 이를 위하여 활성화제인 수산화칼슘과 팽창제의 양에 따라 4가지 배합을 결정하였고, 밀도, 압축강도 및 인장성능을 평가하였다. 실험결과 4가지 배합 모두 51MPa 이상의 압축강도와 3.2% 이상의 인장연성이 나타났다. 수산화칼슘과 팽창제는 압축 및 인장성능 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 적절한 혼합을 통하여 강도, 연성, 균열패턴을 향상시킬 수 있는 것으로 나타났다.