

나트륨계 알칼리 활성화제 조합에 따른 섬유보강 무시멘트 복합재료의 압축 및 인장특성

Compressive and Tensile Properties of Fiber-Reinforced Cementless Composites According to the Combination of Sodium-Type Alkali-Activators

최정일¹ · 박세연¹ · 이방연^{*}

Jeong-Il Choi¹ · Se-Eon Park¹ · Bang-Yeon Lee^{1*}

(Received February 22, 2017 / Revised March 12, 2017 / Accepted March 15, 2017)

The purpose of this study is to investigate experimentally the effect of types of alkali-activators and curing conditions on the compressive and tensile behavior of fiber-reinforced cementless composites. Two types of alkali-activators and two curing conditions were determined and density test, compressive strength test, and uniaxial tension test were performed. Test results showed that the cementless composite with sodium silicate showed higher performance in terms of strength, tensile strain capacity, and toughness than that with calcium hydroxide and sodium carbonate. The effect of curing conditions depends on the types of alkali-activators.

키워드 : 알칼리 활성화제, 무시멘트 복합재료, 압축강도, 섬유, 인장거동

Keywords : Alkali-activator, Cementless composite, Compressive strength, Fiber, Tensile behavior

1. 서론

전 세계적으로 온실가스에 의한 지구 온난화와 기후 변화는 해결되어야 하는 중요한 문제이며, 산업 각계에서 이산화탄소 감축을 위한 노력이 진행되고 있다. 시멘트 제조 과정시 발생하는 이산화탄소 배출량은 단일 산업 중 가장 높은 수준이기 때문에 이산화탄소 배출량 저감을 위한 연구가 필요하다. 따라서 시멘트를 산업 부산물인 고로슬래그나 플라이애쉬 등의 포졸란 반응 및 잠재수경성 물질로 대체 또는 치환하는 연구는 시멘트 사용량을 줄이는 방안으로 활발히 연구 중에 있다(Pacheco-Torgal et al. 2008; Roy, 1999). 고로슬래그는 잠재수경성을 갖기 때문에 수화반응을 일으키기 위해서는 알칼리 활성화제가 필요하다. 알칼리 활성화제는 가성 알칼리 계열(MOH), 비규산계 약산염(M_2CO_3 , M_2S , MF), 규산염($M_2O(n)SiO_2$) 등이 많이 사용되고 있으며, 수산화나트륨(NaOH)

과 규산나트륨(Na_2SiO_3)은 다른 활성화제에 비하여 우수한 것으로 보고되고 있다(Palomo et al. 1999; Wang et al. 1995). 그러나 고로슬래그 기반 알칼리 활성화제에 대한 연구는 강도 발현이나 수화생성물에 관한 연구가 대부분이며, 섬유를 혼입한 섬유보강 복합재료에 대한 연구는 상대적으로 부족하다. Lee et al.(2012)은 고로슬래그 기반 알칼리 활성화 복합재료와 폴리비닐알코올 섬유를 이용하여 인장강도와 인장변형성능을 향상시킨 섬유보강 복합재료를 연구하였으며, Choi et al.(2016)은 고로슬래그 기반 알칼리 활성화 복합재료와 폴리에틸렌 섬유를 이용하여 압축강도 대비 인장강도가 26 % 수준인 초고연성 섬유보강 복합재료를 연구하였다. 그러나 이러한 연구는 알칼리 활성화제로 수산화칼슘($Ca(OH)_2$)과 황산나트륨(Na_2SO_4)을 사용하였으며, 다양한 알칼리 활성화제 적용과 양생방법에 따른 섬유보강 복합재료의 인장 거동 특성에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

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

¹전남대학교 건축학부 (School of Architecture, Chonnam National University, Gwangju, 61186, Korea)

Table 1. Properties of GGBS

Material	Chemical composition(%)								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	TiO ₂	K ₂ O	etc.
GGBFS*	31.5	13.0	0.5	44.6	4.9	3.4	0.8	0.5	0.9

* GGBFS: Ground granulated blast furnace slag

이 연구에서는 고로슬래그를 결합재로 사용하고 가성 알칼리 계열과 비규산계 약산염 조합을 혼입한 배합과 규산나트륨을 단독으로 혼입한 배합을 통하여 알칼리 활성화제의 종류에 따른 압축 및 인장 특성을 조사하고자 한다. 또한 양생 조건을 달리하여 양생 방법이 고로슬래그 기반 섬유보강 복합재료에 어떠한 영향을 미치는지 조사하고자 한다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1 실험 재료

2.1.1 고로슬래그

고로슬래그는 KS F 2563에 규정된 고로슬래그 미분말 3종 분말도(4,320cm²/g)를 사용하였으며, 밀도는 2,92cm³/g이다. XRF(X-ray fluorescence) 분석을 통한 고로슬래그의 화학적 성분은 Table 1과 같다.

2.1.2 알칼리 활성화제

고로슬래그의 수화반응을 위하여 사용되는 알칼리 활성화제의 종류는 가성 알칼리 계열, 비규산계 약산염, 규산염, 알루미늄염, 알루미늄 규산염, 비규산계 강산염 등으로 분류할 수 있다(Shi et al. 2006) 이 연구에서는 가성 알칼리 계열인 수산화나트륨(NaOH)과 비규산계 약산염 계열인 탄산나트륨(Na₂CO₃)을 전체 결합재의 중량 대비 3%, 4% 대체 혼입하여 M1 결합재를 구성하였다. Purdon(1940)의 연구에 따르면 수산화나트륨을 단독 사용할 경우, 혼입량의 증가에도 불구하고 강도 증가가 나타나지 않은 안정기(plateau)가 존재하고, Kim et al.(2012)의 연구에 따르면 수산화나트륨과 탄산나트륨을 조합하여 혼입할 경우 탄산 음이온 생성에 따른 강도 증진의 효과가 있다. 따라서 수산화나트륨과 탄산나트륨을 조합하여 사용하였다. 또한, 규산나트륨을 전체 결합재의 중량 대비 10% 대체 혼입하여 M2 결합재를 구성하였다. 규산나트륨은 혼입량이 증가할수록 강도증진의 효과가 나타나기 때문에 10% 혼입하였으며, 다른 종류의 알칼리 활성화제 조합없이 단독으로 사용하였다.

2.1.3 섬유

보강섬유로 사용한 폴리에틸렌 섬유의 형상은 길이 18mm, 직경 12μm, 형상비 1,500이며, 인장강도와 밀도는 각각 2,700MPa와 0.97g/cm³이다. 폴리에틸렌 섬유는 소수성 섬유이기 때문에 친수성 섬유인 폴리비닐알코올 섬유와 달리 매트릭스와의 계면에서 마찰 부착력만 존재하며, 화학적 부착력은 존재하지 않는다.

2.1.4 혼화제

이 연구에 사용한 혼화제는 고성능감수제, 증점제, 소포제가 사용되었다. 유동성을 확보하기 위하여 폴리카arbon산계 고성능 감수제를 사용하였으며, 섬유 분산성 최적화를 위한 페이스트의 점성을 확보하기 위하여 증점제를 사용하였다. 또한 혼합과정에서 발생할 수 있는 큰 기포를 제거하기 위하여 소포제를 사용하였다.

2.2 배합 및 양생 방법

이 연구에서 조사한 배합은 Table 2와 같다. 알칼리 활성화제의 종류에 따른 특성을 조사하기 위하여 고로슬래그와 수산화나트륨, 탄산나트륨 혼합한 M1 배합과, 고로슬래그와 규산나트륨을 혼합한 M2 배합을 결합재로 사용하였으며, 물-결합재비는 40%로 통일하였다.

Li et al.(2013)의 연구에 의하면 섬유 분산성은 페이스트 점성 및 유동성에 의하여 결정되기 때문에 고성능 감수제와 증점제는 섬유 분산성이 최적화될 수 있는 적정수준으로 혼입하였다. 섬유

Table 2. Mixture proportion

Mixture	Binder				Water	SP* (%)	VMA* (%)	AF* (%)	Fiber (Vol %)
	GGBFS	AA1*	AA2*	AA3*					
M1-W*	0.93	0.03	0.04	-	0.4	0.40	0.01	0.10	1.75
M1-A*	0.93	0.03	0.04	-	0.4	0.40	0.01	0.10	1.75
M2-W*	0.90	-	-	0.10	0.4	0.04	0.01	0.10	1.75
M2-A*	0.90	-	-	0.10	0.4	0.04	0.01	0.10	1.75

* AA1: Sodium hydroxide, AA2: Sodium carbonate, AA3: Sodium silicate, SP: Superplasticizer, VMA: Viscosity modifying agent, AF: Anti-foamer, W: Water curing, A: Air curing

의 혼입량은 일반적인 고연성 섬유 보강 복합재료의 경우 부피비의 2%를 혼입하지만, 이 연구에서는 인장강도가 높고 형상비가 큰 폴리에틸렌 섬유를 사용하였기 때문에 전체 부피비의 1.75%를 혼입하였다.

양생 조건에 따른 영향을 검토하기 위하여 수중양생과 기중양생으로 양생 조건을 달리하여 양생하였다. 혼합은 분말형 재료인 고로슬래그와 알칼리 활성화제를 넣고 1분 동안 건비빔하였다. 건비빔 후에는 배합수를 혼입하고 고성능감수제와 증점제를 혼입하여 유동성과 점성이 최적화되는 유동상태까지 혼합하였다. 유동상태가 최적화되면 섬유를 혼입하고 4분 동안 고속으로 혼합하였으며, 기포 제거 및 안정화를 위하여 소포제를 혼입하고 1분 동안 저속으로 혼합하였다. 혼합이 완료된 후 압축강도 및 일축인장 실험을 위한 실험체를 제작하고, 양생 온도(23±3)℃, 상대습도(60±5)%에서 2일 동안 양생한 후 탈형하였다. 탈형 후, 양생조건에 따른 영향을 평가하기 위하여 양생 온도(23 ± 3)℃, 상대습도(60±5)%의 양생실에서 기중 양생 및 (23 ± 2)℃의 양생 수조에서 수중양생을 실시하였다.

2.3 실험 방법

2.3.1 밀도

밀도 실험은 고로슬래그 기반 섬유보강 복합재료에 폴리에틸렌 섬유를 혼입할 경우 의도하지 않은 과도한 기포가 생성되는지 확인하기 위하여 실시하였다. 50mm 입방 실험체를 이용하여 공기 중 무게와 수중 무게를 측정하고 식 (1)과 같은 방법으로 계산하였다.

$$p = \frac{W_{air}}{W_{air} - W_{water}} \times p_w \quad (1)$$

여기서, p_w 는 물의 밀도이고, w_{air} 와 w_{water} 는 각각 입방 실험체의 공기 중과 수중 무게를 나타낸다.

2.3.2 압축강도 및 일축인장 실험

압축강도는 KS L 5105에 따라 배합별로 3개씩 제작하여 실시하였으며, 그에 따른 평균과 표준편차를 계산하였다.

일축 인장 실험은 일본 토목학회에서 제안한 방법에 따라 실시하였다(JSCE 2008). Fig. 1(a)와 같은 형태의 실험체를 제작한 후, 28일 재령에서 인장성능 및 균열패턴을 측정하였다. 일축 인장 실험을 실시한 인장 시험기의 최대용량은 2톤이며, 0.1mm/min 속도의 변위 제어 방식으로 실험을 실시하였다. 실험체의 변위를 측정

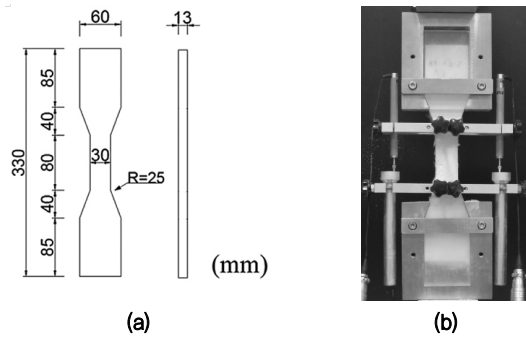


Fig. 1. (a) Dimension of specimen and (b) test setup

하기 위하여 실험체의 좌우 측면에 25mm 용량의 변위계를 부착하여 변형량을 측정하였으며, 변형률 환산을 위한 실험체의 측정 길이는 80mm이다. 측정구간 내의 단면은 폭 30mm, 두께 13mm이며, Fig. 1(b)는 고로슬래그 기반 알칼리 활성화 섬유보강 복합재료의 일축 인장 실험 모습을 나타낸다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 밀도

Fig. 2는 각 배합의 밀도를 나타낸다. 각 배합의 이론적 밀도값은 1.87g/cm³이고, 각 배합의 실험값은 약 1.88g/cm³으로써 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. 알칼리 활성화제의 종류에 따른 M1 배합과 M2 배합의 밀도는 동일한 것으로 나타났으며, 양생조건에 따른 영향도 없는 것으로 나타났다. 이 실험 결과로부터 알칼리 활성화제를 달리한 고로슬래그 기반 섬유보강 복합재료 제조 과정에서 폴리에틸렌 섬유를 혼입하고 양생 조건을 달리하더라도 의도하지 않은 기포 생성은 없는 것으로 나타났다. 이 연구에서 사용한 방법에 따라 실험체를 제조 하면 의도하지 않은 기포 생성에 따른 강도 저하는 없을 것으로 판단된다.

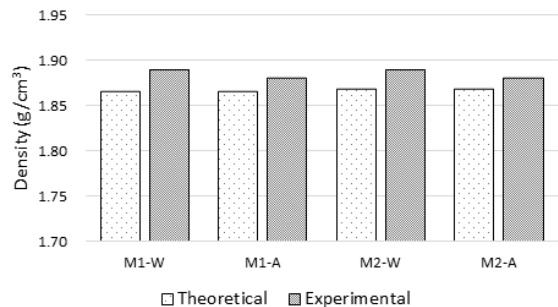


Fig. 2. Density

3.2 압축강도

Fig. 3은 이 연구에서 조사한 각 배합별 압축강도를 나타내며, 전체적으로 평균 48.5MPa로 나타났다. 알칼리 활성화제의 종류에 따른 영향은 규산나트륨을 10% 혼입한 M2 배합이 수산화나트륨과 탄산나트륨을 혼합한 M1 배합보다 강도가 높은 것으로 나타났다. M2-W 배합은 49.6MPa로 M1-W 배합보다 11.5% 증가한 것으로 나타났고, M2-A 배합은 50.3MPa로 M1-A 배합보다 1.4% 증가한 것으로 나타났다. Cho et al.(2016)의 연구 결과에 따르면 28일 재령 하에서 규산나트륨을 혼입하였을 때, 가성 알칼리 계열(KOH, NaOH)이나 비규산계 약산염 계열(Na_2CO_3)을 혼입하였을 때 보다 강도가 향상된다. 이 연구에서 사용한 배합에서도 규산나트륨을 혼입한 M2 배합이 수산화나트륨과 탄산나트륨을 조합한 M1 배합보다 강도 증진 효과가 있는 것으로 나타났고, 특히, 수중양생의 경우에 그 효과가 큰 것으로 나타났다. M1 배합이 M2 배합보다 낮은 강도를 나타내는 이유는 수화과정에서 에트링가이트(ettringite) 생성 후 모노설페이트(monosulfate)가 생성되고, C_4AH_3 -모노설페이트의 고용체가 생성되어 C-S-H gel이 형성되는데 C_4AH_3 이 활성화제의 첨가량이 증가할수록 많이 생성된다. 일반적으로 OPC 내에서 C_4AH_3 은 경화체내 건조수축의 원인으로 알려져 있기 때문에 이로 인한 강도 저하가 발생한 것으로 판단된다(Ahn et al. 2003).

양생 조건에 따른 영향은 수산화나트륨과 탄산나트륨을 조합한 경우 기중양생을 실시한 M1-A 배합이 수중양생을 실시한 M1-W 배합보다 압축강도가 11.5% 증가하는 것으로 나타났다. 이는, 기중양생에 따른 수분 발산에 의해 표면 에너지가 증가하였기 때문으로 판단된다. 규산나트륨을 혼입한 M2 배합의 경우 기중양생을 실시한 배합이 수중양생을 실시한 배합보다 1.4% 증가하였으나, 그 차이가 크지 않은 것으로 나타났다. 이 실험 결과를 통해 수산화나트륨과 탄산나트륨을 조합하여 사용하는 경우 규산나트륨만 사용한 경우에 비하여 양생방법에 따라 강도차이가 크게 나타나는

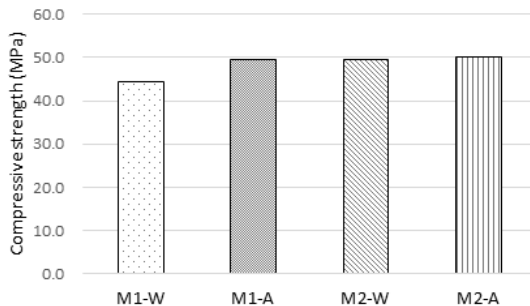


Fig. 3. Compressive strength

것을 확인하였다.

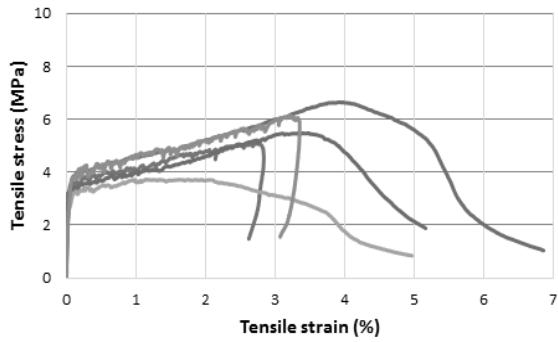
일반적으로 시멘트 기반 콘크리트의 경우 수중양생을 한 경우 기중양생을 한 경우에 비하여 강도가 더 크게 나타나는데 이 연구에서 조사한 알칼리 활성화 슬래그 기반 복합재료는 양생방법에 따라 다른 양상을 나타내었다.

3.3 일축 인장

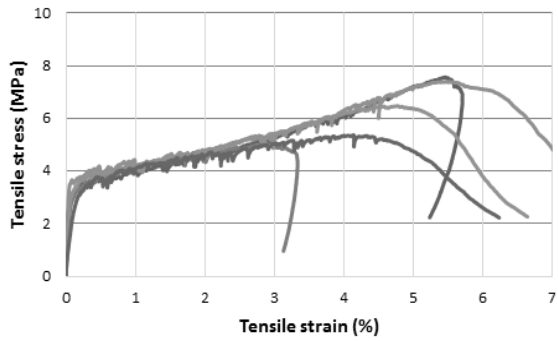
Fig. 4는 알칼리 활성화제의 종류와 양생조건에 따른 고로슬래그 기반 섬유보강 복합재료의 인장응력과 변형률의 관계를 나타낸다. 인장강도는 M2-W 배합이 8.2MPa로 가장 높게 나타났으며, 인장변형성은 M2-A 배합이 5.7%로 가장 높게 나타났다. 전체적으로 모든 실험체에서 첫 번째 균열이 발생한 이후, 다중 균열에 의한 변형을 경화거동이 뚜렷이 나타났으며, 인장강도 도달 후, 균열폭이 커지고 인장강도가 감소하여 실험체가 파괴되는 양상을 나타내었다. 모든 실험체에서 변형률이 증가함에 따라 응력이 감소하였다가 증가하는 변형 경화 현상이 반복되어 나타났다. 이는 인장 실험에서 하중을 변위제어 방식으로 가할 경우, 균열이 발생하면 균열 부분의 강성이 감소하게 되고 이로 인하여 응력이 이완되기 때문이다.

Fig. 5는 각 배합의 초기균열강도, 인장강도, 인장변형성을 나타낸다. 초기균열강도는 각 배합의 압축강도 대비 7.1% 수준으로 나타났다(Fig. 5(a)). 일반적으로 초기균열강도는 압축강도와 유사한 경향을 나타내는데 이 연구에서는 약간 다른 경향을 나타내었다. 규산나트륨을 혼입한 M2-W 배합의 초기균열강도는 3.8MPa로 M1-W 배합보다 11.8% 높은 것으로 나타났고, M2-A 배합은 M1-A 배합보다 5.9% 감소한 것으로 나타났다. 양생 조건에 의한 영향은 M2 배합의 경우 수중양생을 실시한 M2-W 배합이 M2-A 배합보다 18.8% 높은 것으로 나타났고, M1 배합은 M1-W 배합, M1-A 배합 모두 3.4MPa로써 양생조건에 따른 영향은 크지 않은 것으로 나타났다. 압축강도 대비 초기균열강도는 양생조건에 따라 매우 유사하게 나타났다. 수중양생을 실시한 M1-W 배합과 M2-W 배합은 7.7% 수준, M1-A 배합과 M2-A 배합은 각각 6.8%, 6.3% 수준이다.

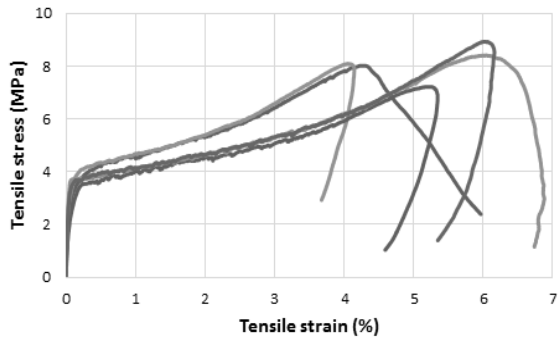
Fig. 5(b)는 각 배합의 인장강도를 나타낸다. 알칼리 활성화제의 종류에 의한 영향은 M2-W 배합과 M2-A 배합의 인장강도가 M1-W 배합과 M1-A 배합보다 각각 54.7%, 9.4% 증가한 것으로 나타났다. 이는 규산나트륨을 혼입한 M2 결합재가 수산화나트륨과 탄산나트륨을 혼입한 M1 결합재보다 균열면에서 섬유가 저항하는 섬유 가교 응력이 더 우수하다는 것을 의미한다. 양생 조건



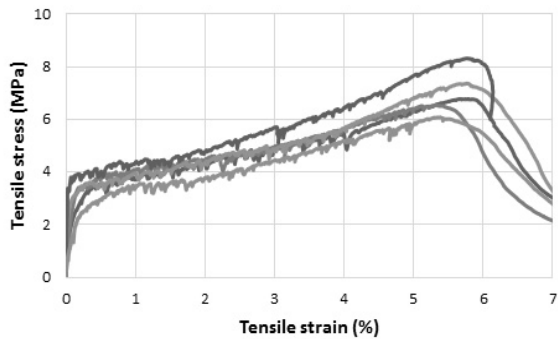
(a) M1-W



(b) M1-A

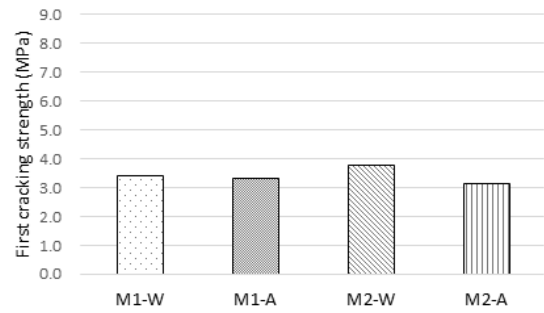


(c) M2-W

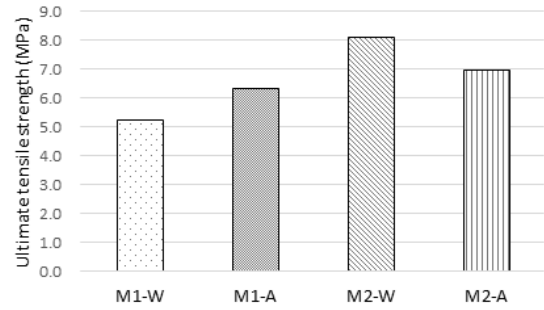


(d) M2-A

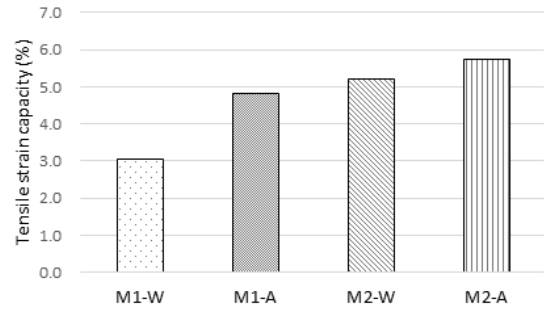
Fig. 4. Tensile stress-strain curves



(a) First cracking strength



(b) Ultimate tensile strength



(c) Tensile strain capacity

Fig. 5. Tensile behavior

에 의한 영향은 M1 배합의 경우 기중양생이 수중양생보다 20.8% 증가한 것으로 나타났고, M2 배합은 수중양생이 기중양생보다 17.1% 증가한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 알칼리 활성화제의 종류마다 인장강도가 향상되는 양생조건이 다르다는 것을 의미하며, 수산화나트륨과 탄산나트륨을 조합하여 사용할 경우 기중양생이 수중양생보다 인장강도가 우수하고, 규산나트륨을 사용할 경우 수중양생이 기중양생보다 우수하다는 것을 의미한다. 전체적으로 인장강도는 압축강도보다 알칼리 활성화제와 양생방법에 따라 차이가 크게 발생하는 것으로 나타났다.

압축강도 대비 인장강도는 M2-W 배합이 16.4%, M2-A 배합이 13.9%이며, 이는 M1-W와 M1-A 배합과 비교하여 각각 37.8%, 8.6% 높은 것으로 나타났다. M2-W 배합의 인장강도는 압축강도

대비 인장강도가 10% 수준인 일반 콘크리트보다 약 1.6배 향상되었기 때문에 우수한 인장력을 갖는 복합재료로서의 활용이 가능할 것으로 판단된다.

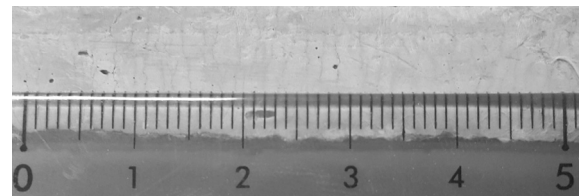
인장변형성능은 양생방법에 관계없이 M2 배합이 M1 배합보다 우수한 것으로 나타났고, 기중양생이 수중양생보다 우수한 것으로 나타났다. 기존 연구에 따르면 초기균열강도 대비 인장강도의 비율이 증가할수록 균열의 개수 및 인장변형성능이 증가한다(Kanda et al. 2006). 모든 배합의 초기균열강도 대비 인장강도는 각각 1.5, 1.9, 2.1, 2.2로 나타났고, 인장변형성능은 각각 3.1%, 4.8%, 5.2%, 5.7%로 나타났다. 초기균열강도 대비 인장강도가 증가할수록 인장변형성능이 증가하는 비례 관계가 나타나 초기균열강도 대비 인장강도가 다중균열에 의한 인장변형성능과 강한 상관관계가 있다는 것을 이 연구에서도 확인하였다. 알칼리 활성화제의 종류에 따라서 M2-W 배합의 인장변형성능은 5.2%로서 M1-W 배합보다 67.7% 높았으며, M2-A 배합의 인장변형성능은 5.7%로서 M1-A 배합보다 18.8% 높은 것으로 나타났다. M2-W 배합과 M2-A 배합의 초기균열강도 대비 인장강도는 M1-W 배합과 M1-A 배합보다 각각 40.0%, 15.8% 높은 것으로 나타났고, 인장변형성능의 차이와 초기균열강도 대비 인장강도의 차이가 유사한 경향을 나타내었다. 양생조건에 의한 영향은 M2 배합의 경우 기중양생을 실시하였을 때, 수중양생을 실시한 경우보다 9.6% 높은 것으로 나타났고, M1 배합은 기중양생이 수중양생보다 54.8% 높은 것으로 나타났다.

인장강도와 인장변형성능 측면에서 종합적으로 M2 배합이 M1 배합에 비하여 모두 우수한 것으로 나타났으며 양생방법에 따라서는 M1 배합은 기중양생이 수중양생보다 우수하고, M2 배합은 인장강도는 수중양생이 우수하지만 인장변형성능은 기중양생이 우수한 것으로 나타났다.

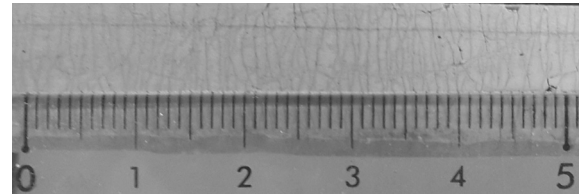
인성은 인장강도와 인장변형성능의 면적을 계산하여 구하였으며, 각 배합별 인성은 Table 3에 정리되어 있다. M2-W 배합의 인성이 가장 우수한 것으로 나타났고, M1-W 배합의 인성이 가장 떨어지는 것으로 나타났다. 인성이 가장 우수한 M2-W 배합을 기준으로 다른 배합의 인성을 비교한 결과 M2-A 배합은 94% 수준으로 나타났다. M2-W 배합은 M1-A배합보다 인장변형성능이 낮지

Table 3. Toughness under a uniaxial tensile load

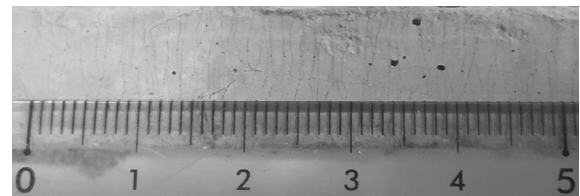
Mixture	Toughness (MPa·mm/mm)	Relative toughness
M1-W	0.13	0.43
M1-A	0.23	0.75
M2-W	0.31	1
M2-A	0.29	0.94



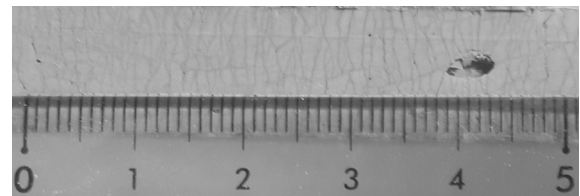
(a) M1-W



(b) M1-A



(a) M2-W



(b) M2-A

Fig. 6. Cracking pattern (unit of number: cm)

만, 인장강도가 높기 때문에 종합적인 인성은 더 우수한 것으로 나타났다. M1-W 배합과 M1-A 배합의 인성은 M2-W 배합의 인성에 비하여 각각 43%와 75% 수준으로 나타났다. M2-A와 비교하면 각각 46%와 80% 수준인 것으로 나타났다. 인성 측면에서는 규산나트륨을 알칼리 활성화제로 사용하고 수중양생을 실시하는 경우 가장 우수한 것으로 나타났다. 이 연구에서 사용한 배합을 이용하여 섬유보강 복합재료를 제조할 경우 규산나트륨을 혼합한 배합이 에너지 흡수능력 및 인장변형성능 측면에서 더 우수한 것으로 나타났다.

Fig. 6은 각 배합별로 대표적인 균열패턴을 촬영한 것이며, 모든 배합의 대표 실험체에서 미세한 다중 균열이 발생한 것으로 관찰할 수 있다.

종합적으로 알칼리 활성화제로 규산나트륨을 사용할 경우, 수산화나트륨과 탄산나트륨을 혼합하여 사용한 것보다 강도가 우수하고 다중 균열을 통한 인장변형성능 및 에너지 흡수능력이 우수

한 것으로 나타났다. 양생조건에 따라서는 규산나트륨을 활성화제로 사용하는 경우 수중양생은 기중양생과 비교하여 인장변형성은 부족하나 인장강도가 우수하여 종합적인 인성이 우수한 것으로 나타났다 수산화나트륨과 탄산나트륨을 혼합한 경우 기중양생이 수중양생보다 우수한 것으로 나타났다.

이 연구에서 2가지의 알칼리 활성화제 시스템과 2가지 양생방법에 대해 조사하였는데, 비록 제한된 실험 조건하에서 실시하였으나 알칼리 활성 슬래그 기반 섬유보강 복합재료는 알칼리 활성화제 종류 및 양생방법에 따라 강도 및 인장거동에 차이가 발생하는 것을 확인하였다.

4. 결론

이 연구에서는 알칼리 활성화제의 종류와 양생조건을 달리하여 섬유보강 복합재료의 압축 및 인장거동에 미치는 영향을 실험적으로 조사하였다. 이를 위하여 두 가지 종류의 활성화제 조합 및 두 가지 양생 방법에 따라 실험체를 제작하고, 압축강도 실험 및 일축 인장 실험 등을 수행하였으며, 이를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 알칼리 활성화제로 규산나트륨을 사용할 경우, 수산화나트륨과 탄산나트륨을 혼합하여 사용하는 것보다 압축강도 측면에서 유리한 것으로 나타났다. 양생조건에 의한 영향은 수산화나트륨과 탄산나트륨을 혼합하여 사용하면 기중양생이 더 우수한 것으로 나타났고, 규산나트륨을 혼합하여 사용하면 수중양생과 기중양생에 의한 차이가 없는 것으로 나타났다.
2. 고로슬래그와 규산나트륨을 결합제로 사용하고 PE 섬유를 혼합할 경우 인장변형성능 5% 이상의 고연성을 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 수중양생과 기중양생에 따른 인장성능의 차이는 알칼리 활성화제의 종류에 따라 다르게 나타났다.
3. 종합적으로 규산나트륨을 알칼리 활성화제로 사용하는 경우 수산화나트륨과 탄산나트륨을 사용하는 것과 비교하여 인장강도, 인장변형성능, 인성 측면에서 우수한 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술연구사업의 연구비지원(17SCIP-B103706-03)과 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업 “나노전기방사기술을 융합한 등가감시 10%급 다기능 건축재료 및 구조시스템 개발(과제번호: 15CTAP-C097490-01)”의 연구비에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

Ahn, J.W., Cho, J.S., Kim, H.S., Han, G.C., Han, K.S., Kim, H. (2003). Activation property of blast furnace slag by alkaline activator, *Journal of the Korean Ceramic Society*, **40(10)**, 1005–1014 [in Korean].

Cho, K.H., Yeoi, I.H., Ji, D.H. (2016). Evaluation on chloride binding capacity of mineral mixed paste containing an alkaline activator, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **28(2)**, 157–165 [in Korean].

Choi, J.I., Lee, B.Y., Ranade, R., Li, V.C., Lee, Y. (2016). Ultra-high-ductile behavior of a polyethylene fiber-reinforced alkali-activated slag-based composite, *Journal of the Cement and Concrete Composites*, **70**, 153–158.

JSCE. (2008). Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks (HPFRCC), *Concrete Engineering Series*

Kanda, T., Li, V.C. (2006). Practical design criteria for saturated pseudo strain hardening behavior in ecc, *Journal of Advanced Concrete Technology*, **4(1)**, 59–72.

Kim, G.W., Kim, B.J., Yang, K.H., Song, J.K. (2012). Strength development of blended sodium alkali-activated ground granulated blast-furnace slag(GGBS) mortar, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **24(2)**, 137–145 [in Korean].

Lee, B.Y., Cho, C.G., Lim, H.J., Song, J.K., Yang, K.H., Li, V.C. (2012). Strain hardening fiber reinforced alkali-activated mortar—a feasibility study, *Journal of the Construction and Building Materials*, **37**, 15–20.

Lepech, M.D., Li, V. C. (2009). Water permeability of engineered cementitious composites, *Journal of Cement and Concrete Composites*, **31(10)**, 744–753.

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

Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J., Jalali, S. (2008). Alkali-activated binders: a review, part 2, about materials and binder manufacture, *Journal of the Construction and Building Materials*, **22(7)**, 1315–1322.

Palomo, A., Grutzeck, M.W., Blanco, M.T. (1999). Alkali-acti-

- vated fly ashes: a cement for the future, *Journal of the Cement and Concrete Research*, **29(8)**, 1323–1329.
- Purdon, A.O. (1940). The action of alkalis on blast-furnace slag, *Journal of the Society of Chemical Industry*, **59**, 191–202.
- Roy, D.M. (1999). Alkali-activated cements: opportunities and challenges, *Journal of the Cement and Concrete Research*, **29(2)**, 249–254.
- Shi, C., Roy, D., Krivenko, P.V. (2006). *Alkali-Activated Cements and Concrete*. Taylor and Francis.
- Wang, S., PU, X. C., Scrivener, K.L., Pratt, P.L. (1995). Alkali-activated slag cement and concrete: a review of properties and problems, *Journal of the Advances in Cement Research*, **7(27)**, 93–102.

나트륨계 알칼리 활성화제 조합에 따른 섬유보강 무시멘트 복합재료의 압축 및 인장특성

이 연구의 목적은 알칼리 활성화제의 종류와 양생방법에 따라 나타나는 고로슬래그 기반 섬유보강 복합재료의 압축강도 및 인장거동에 대해 실험적으로 조사하는 것이다. 이를 위하여 알칼리 활성화제 2종류의 배합과 2가지 양생방법을 결정하였고, 밀도 실험, 압축강도 실험과 일축인장 실험을 수행하였다. 실험 결과, 규산나트륨을 사용한 경우 수산화칼슘과 탄산나트륨을 혼합하여 사용한 경우에 비하여 강도, 인장변형성능, 인성 측면에서 우수한 것으로 나타났으며, 활성화제 종류에 따라 양생방법에 의한 영향이 다르게 나타나는 것을 확인하였다.