

현무암 단섬유로 강화시킨 시멘트 복합재료의 물성

전상희¹, 김호동^{1*}

¹단국대학교 파이버시스템공학과

Physical Properties of Basalt Chopped Fiber Reinforced Cement Composite

Sang-Hee Chun¹ and Ho-Dong Kim^{1*}

¹Department of Fiber System Engineering, Dankook University

요약 현무암 단섬유로 강화시킨 시멘트 복합재료의 섬유장과 혼입률에 따른 인장강도와 굽힘강도의 변화를 고찰하였다. 인장 및 굽힘강도의 증가는 섬유장의 증가에 따른 효과보다는 섬유 혼입률의 증가가 더 큰 역할을 하였다. 또한 현무암 단섬유와 시멘트 사이의 우수한 계면 접착력은 물리적 성질의 향상에 좋은 영향을 미친다고 보여진다. 시멘트의 수화시 생성되는 알칼리 조건과 유사한 포화 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 용액에서의 중량감소율을 관찰한 결과 현무암 단섬유는 3주 동안의 침지 후에도 매우 작은 중량감소율을 나타냈다.

Abstract The effect of blending weight and fiber length on the tensile and flexural strength for Basalt fiber reinforce cement composites is discussed. The increase of physical properties is mainly affected by blending quantity of fibers instead of the fiber length. Also it is believed that the interfacial adhesion between Basalt fiber and cement matrix gives positive influence to the physical strength. Basalt fiber in saturated $\text{Ca}(\text{OH})_2$ solution, which is similar to the alkaline hydration environment of cement, shows very low weight loss even after 3 weeks of immersion.

Key Words : Basalt fiber, Fiber reinforced cement, Alkali resistance, Tensile strength, Flexural strength

1. 서론

유기 섬유 사용에 의해 다양한 복합재료를 강화하는 연구는 고성능 산업용 섬유의 응용범위를 크게 확대시키고 있다. 잘 알려진 바와 같이 콘크리트 재료는 압축강도가 크고 내구성이 우수하여 건축구조용 재료로써 널리 사용되고 있지만 인장강도 및 굴곡강도가 작은 취성 파괴 거동을 가지는 단점이 있다. 이러한 콘크리트 재료의 취약점은 섬유를 사용하여 강화함으로써 크게 개선시킬 수 있기 때문에 아라미드 섬유, 탄소 섬유, PVA 섬유, PE 섬유 등의 고인성 유기계 섬유 및 유리 섬유, 금속 섬유 등의 무기계 섬유를 사용한 섬유 강화 콘크리트 (Fiber Reinforced Concrete)가 많이 연구되고 상용화되고 있다 [1].

하지만 기존의 고성능 유기계 섬유의 경우, 유기고분자인 섬유와 무기재료인 콘크리트와의 접착력 저하가 실질적인 문제로 대두되고 있으며 콘크리트 폐기 시 사용된 유기계 섬유는 장기간의 분해시간이 필요하여 커다란 환경위해 요인이다. 또한 유리 섬유, 금속 섬유 등의 무기계 보강 섬유는 시멘트의 수화시에 형성되는 알칼리성 환경에서의 강도저하 및 부식의 문제점이 발견되고 있어서 장기간 동안 보강효과를 지속시키기 어렵다는 단점이 있다[2-3].

최근에 동구권을 중심으로 활발히 연구되고 있으며 상업적인 생산도 이루어지고 있는 현무암 섬유는 천연재료인 용암이 굳어져 형성된 현무암만을 사용하여 제조되는 순수한 무기 섬유로써, 열에 대한 안정성이 뛰어나서 사용 온도가 매우 넓으며, 고강도, 방음성, 내화학성, 내충격성

이 연구는 2008학년도 단국대학교 대학연구비의 지원으로 연구되었음.

*교신저자 : 김호동 (hodong@dku.edu)

접수일 09년 03월 02일

수정일 (1차 09년 06월 03일, 2차 09년 06월 14일)

계재확정일 09년 06월 17일

등을 고루 갖춘 소재이다. 특히 구성성분이 자연골재인 현무암 그대로이기 때문에 시멘트와의 접착성이 매우 크며, 폐기 시에도 전혀 환경 저해 요인이 없는 친환경성 섬유소재이다[4-5]. 이러한 현무암 섬유 filament를 절단하여 제조된 현무암 단섬유(Basalt Chopped Fiber)는 시멘트 수화시의 알칼리 조건에 대한 내구성이 뛰어나고 물성면에서도 유기계 섬유나 유리섬유에 비하여 우수하며 물성대비 가격이 가장 낮은 섬유로서 콘크리트용 섬유보강재의 문제점을 해소할 수 있다.

현무암섬유의 상업적인 가능성은 매우 크지만 아직까지 현무암섬유를 이용한 시멘트복합재료의 물성이나 알칼리 조건인 시멘트 내에서 섬유의 장기적인 안정성 등을 연구한 자료는 매우 적다. 따라서 본 연구에서는 현무암 섬유의 알칼리 조건에서의 안정성을 평가하고, 섬유 혼입률과 섬유장에 따른 현무암 단섬유 강화 시멘트 복합재료의 물성을 평가하고자 한다.

2. 실험

2.1 실험재료

이 실험에서 사용한 시멘트는 KS L 5201에 규정된 S 사 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 시멘트 보강용 현무암 단섬유는 S사에서 제공한 현무암 filament를 고경도 knife가 장착된 고속 chopping기를 사용하여 5 mm, 10 mm, 15 mm 3가지의 섬유장으로 절단하여 사용하였다. 사용한 현무암 섬유의 평균 직경은 11 μm 이었다.

알칼리 조건 하에서 섬유의 안정성을 평가하기 위해 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 의 포화수용액을 제조하여 사용하였으며 비교실험을 위해 사용한 유리섬유는 K사에서 제공한 유리섬유를 그대로 사용하였다.

2.2 섬유강화 시멘트복합재료의 제조

섬유강화 시멘트복합재료는 시멘트와 물의 중량비를 3 : 1로 하여 10분간 완전하게 혼합시켜 균일한 분산물모 만들고, 그 분산물에 대한 중량비 0 %, 0.5 %, 1 %, 2 %에 해당하는 현무암 단섬유를 투입한 후 10분간 완전하게 혼합시켰다. 준비된 섬유가 혼합된 시멘트 페이스트는 2 cm \times 1 cm \times 10 cm 인 형틀에 넣고 상온에서 28일 동안 수중 양생하였다.

2.3 물성 평가

2.3.1 인장강도

인장강도 시험은 LLOYD사의 장치를 이용하여 파지

간 길이 70 mm로 하고 인장속도 10 mm/min과 최대하중 500 N의 Load를 이용하여 인장 파괴될 때까지 하중을 가하여 인장 시험곡선을 얻었다. 인장 강도는 시료 종류 당 5회의 반복시험을 통한 인장강도의 평균값을 산출하였다.

2.3.2 굽힘강도 시험

굽힘 강도시험은 LLOYD사의 장치를 이용하여 3점 시험법으로 실시하였다. 스패ん길이는 70 mm로 하고 굽힘 속도는 10 mm/min 으로 파괴될 때까지 하중을 가하면서 굽힘 시험 곡선을 얻었다. 굽힘강도는 시료 종류 당 5회의 반복시험을 통한 굽힘강도의 평균값을 산출하였다.

2.3.3 계면 접착상태 평가

파괴된 시멘트 복합재료의 파단면은 진공상태에서 백금 코팅 후 주사전자현미경 (Scanning Electron Microscope, S-3000H, Hitachi사)을 사용하여 관찰하였다.

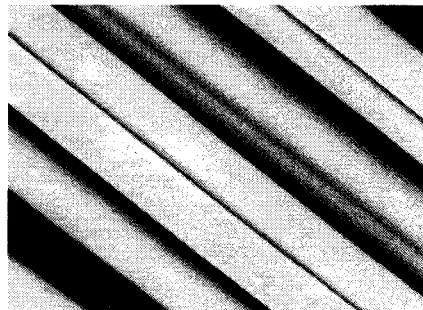
2.3.4 알칼리 안정성 평가

현무암섬유 및 유리 섬유를 포화 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 용액(1.19 g/L $\text{Ca}(\text{OH})_2$)에 3주 동안 침지시킨 후 섬유다발을 꺼내어 증류수로 2-3회 이상 수세하였다. 표면물기를 제거한 섬유다발을 상온에서 24시간 건조한 후 중량 감소율을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 현무암 단섬유의 조성 및 특성

본 연구에 사용한 현무암 단섬유의 표면과 단면 구조를 그림 1에 나타내었다. 천연 현무암을 용융방사하여 얻어지는 현무암 섬유는 매우 평활한 표면 구조를 가지며 절단된 단면은 불규칙하게 부서진 형태를 가지고 있다.



(a) Surface ($\times 2000$)



(b) Cross section (× 5000)

【그림 1】 현무암 단섬유의 외관.

또한 장섬유를 단섬유로 절단시 발생한 다량의 현무암 섬유 부스러기가 혼합되어 있음을 알 수 있다. 또한 표 1 과 표 2에 실험에 사용된 현무암 섬유의 화학조성 및 신도, 강도, 탄성률 등을 유리섬유의 물성들과 비교하여 나타내었다.

【표 1】 현무암 섬유의 화학조성[6]

Components	Contents (%)
SiO ₂	56.81
Al ₂ O ₃	16.89
CaO	9.68
MgO	2.40
Fe ₂ O ₃	10.77
Na ₂ O	1.94
K ₂ O	1.51

【표 2】 현무암 섬유와 유리섬유의 물성 비교

	Basalt	Glass[7]
Density (g/cm ³)	2.7	2.5~2.6
Diameter (μm)	11.3	10~15
Tensile Strength (MPa)	2,426	2,500
Elongation (%)	3.8	-
Elastic Modulus(GPa)	61	80 ~ 90

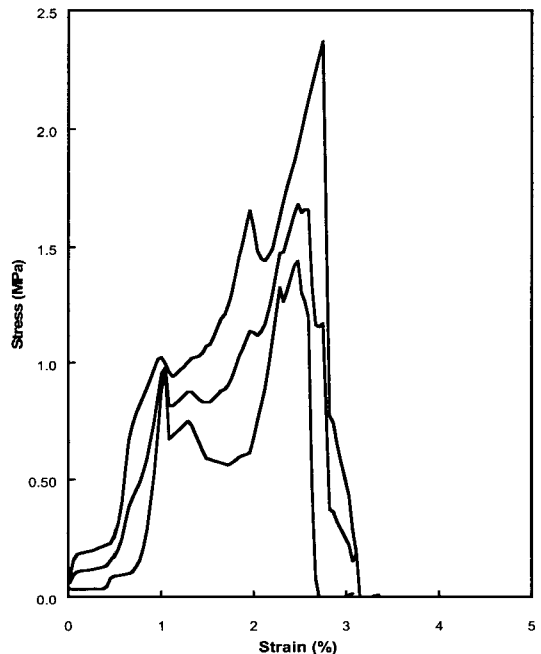
3.2 현무암 단섬유 강화 시멘트복합재료의 물리적 특성

3.2.1 인장특성

콘크리트재료는 매우 큰 압축강도를 보이지만 가장 큰 단점은 인장이나 굽힘에 매우 취약하다는데 있다. 따라서 고성능 섬유재료로 강화시킨 섬유강화콘크리트(Fiber Reinforced Concrete, FRC)는 섬유에 의한 bridging effect

를 극대화시킬 수 있기 때문에 다양한 연구가 진행되고 있다. 특히 섬유강화콘크리트는 골재로만 이루어진 보통 콘크리트에 비해 균열에 대한 저항성이 크고, 균열이 발생한 후에도 섬유가 빠져 나오면서 외력에 저항하므로 재료로서의 연성이 높다.

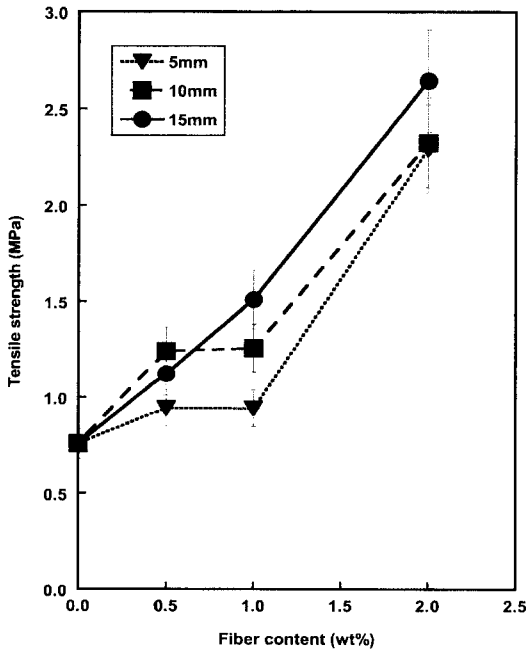
섬유장 10 mm의 현무암 단섬유를 2 wt% 혼입한 시멘트 복합재료에 대한 인장-응력 곡선을 그림 2에 나타내었다. 이때 한 종류의 시료를 수회 시험한 인장강도 곡선을 한 그래프에 나타내어 시료간의 반복되는 인장파괴 거동이 유사하다는 것을 보여주고자 하였다. 각 시료간의 인장강도의 차이는 있지만 인장에 의한 파괴거동은 유사한 형태를 보이고 있으며, 점진적인 인장파괴 거동의 변화가 아닌 불규칙적으로 인장강도의 spike현상이 보이는 것은 혼입된 현무암 섬유에 의해 시멘트 재료의 인장파괴가 효과적으로 제어되고 있음을 보여준다.



【그림 2】 섬유장 10 mm의 현무암 단섬유를 2 wt% 혼입시킨 시멘트 복합재료의 전형적인 인장 stress-strain 곡선.

섬유장과 혼입양에 따른 최대 인장강도의 변화를 그림 3에 나타내었다. 섬유의 혼입량이 증가할수록 최대 인장강도가 급격히 증가하는 것을 알 수 있으며, 섬유로 강화하지 않은 시멘트복합재료의 인장강도는 0.76MPa이었으나 섬유장 15 mm의 섬유를 2 wt% 혼입한 경우 인장강도가 2.64 MPa로 300% 이상 크게 향상되었다. 하지만 긴 섬유장을 갖는 시료의 인장강도가 짧은 섬유장을 갖는

시료의 인장강도보다 낮게 나타나는 경우가 있어 섬유장과 인장강도의 관련성에 대해서는 보다 많은 시험을 통해 판단해야 할 것으로 사료된다. 단, 섬유의 함유량이 인장강도에 크게 영향을 끼치는 현상은 현무암 섬유와 같이 신장률이 매우 작은 경우, 섬유와 시멘트 matrix간의 접착강도가 현무암 섬유 자체의 인장강도보다 매우 커서 섬유가 인발되기 전에 파괴된다는 것을 의미하며 이것은 시멘트 복합재료의 단위면적을 통과하는 섬유의 양이 인장강도에 더 크게 영향을 준다고 판단된다.



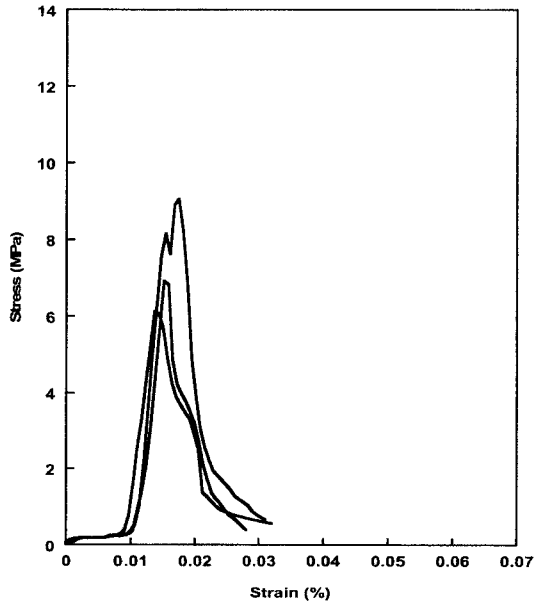
[그림 3] 섬유장 및 혼입률에 따른 현무암 단섬유 강화 시멘트 복합재료의 최대 인장강도.

3.2.2 굽힘특성

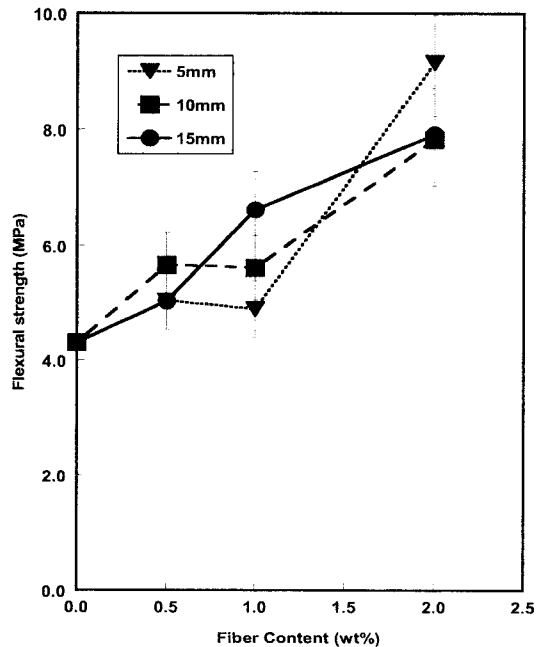
한 종류의 시료를 반복하여 굽힘강도를 시험한 결과를 한 그래프에 나타낸 그림 4는 시멘트와 같은 취성재료의 인장특성과 전형적인 굽힘파괴 거동을 보여준다. 취성재료의 경우 아주 작은 굽힘 변형에서 파괴가 일어나는데 섬유장이 짧고 혼입률이 적을수록 일반적인 시멘트의 굽힘파괴처럼 순간적으로 절단되었지만 섬유장이 길고 혼입률이 증가할수록 섬유에 의한 bridging 효과가 나타나서 파괴시 최대 굽힘강도를 나타낸 후에도 완전히 절단되지 않고 시료가 균열이 생기면서 형태를 유지하는 현상을 나타내었다.

섬유장과 혼입률의 증가에 따른 굽힘강도의 변화를 그림 5에 나타내었다. 인장강도의 경우와 마찬가지로 섬유의 혼입률이 증가할수록 강도가 증가하였고, 섬유를 혼입

하지 않은 시멘트복합재료의 굽힘강도가 4.30 MPa이었던 것에 반해 5 mm의 현무암 섬유를 2 wt% 혼입하여 강화시킨 경우, 굽힘강도가 9.15 MPa로 크게 증가하였다.



[그림 4] 섬유장 10 mm의 현무암 단섬유를 2 wt% 혼입시킨 시멘트 복합재료의 전형적인 굽힘 stress-strain 곡선.

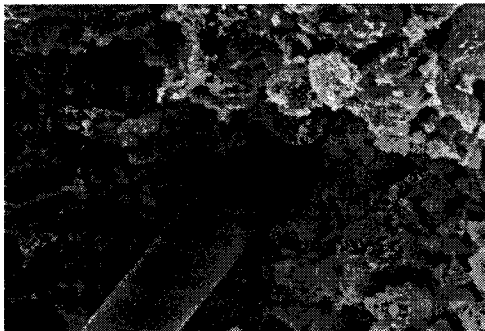


[그림 5] 섬유장 및 혼입률에 따른 현무암 단섬유 강화 시멘트 복합재료의 최대 굽힘강도.

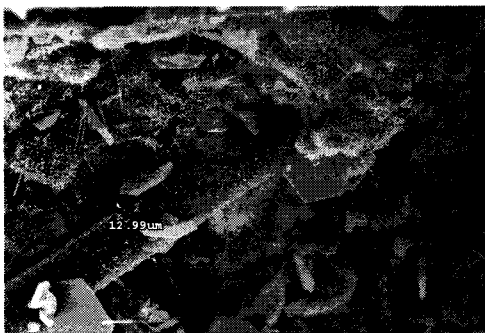
3.3 현무암 단섬유와 시멘트 간의 계면특성

현무암 섬유와 시멘트 matrix간의 접착상태를 비교하기 위하여 동일한 조건으로 탄소섬유를 혼입시킨 시멘트 복합재료를 준비하여 전자현미경으로 섬유와 시멘트간의 계면을 확인하였다. 그림 6(a)에 나타난 것처럼 탄소섬유의 경우 매끄러운 섬유표면이 그대로 유지되고 있으며 시멘트와의 접착상태도 매우 불량한 상태임을 볼 수 있다. 이러한 현상은 탄소섬유의 화학구조는 섬유표면에 시멘트와 접착이나 결합을 유도할 만한 관능기를 가지고 있지 않을 뿐만 아니라 섬유의 제조 공정상 물리적으로도 결합을 유도할 만한 요철을 부여할 수 없기 때문인 것으로 판단된다[8].

반면에 그림 6(b)에서 보이는 것처럼 현무암 섬유의 경우 표면에 시멘트 수화물이 잘 결합되어 있음을 볼 수 있으며 시멘트와 섬유의 계면도 잘 유지되고 있음을 볼 수 있다. 이러한 점은 섬유의 혼입량에 따라 인장강도나 굽힘강도가 크게 영향받는다라는 사실을 잘 설명한다.



(a) Carbon fiber



(b) Basalt fiber

[그림 6] 현무암 섬유 및 탄소섬유 강화 시멘트 복합재료 단면 구조의 비교.

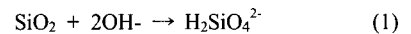
3.4 알칼리 조건하에서의 섬유의 안정성

일반적으로 포틀랜드 시멘트가 수화현상에 의해 경화될 때 생성되는 다량의 OH⁻이온 때문에 시멘트 강화에 사용되는 섬유는 매우 강한 알칼리 조건 하에서도 안정해야만 한다. 이러한 강 알칼리 조건에서의 섬유의 안정성은 시멘트 경화시 형성되는 물질과 가장 유사한 Ca(OH)₂의 포화용액에서 장기간에 걸친 중량감소를 관찰함으로써 유추해 볼 수 있다. 표 3에 나타난 바와 같이 포화된 알칼리 용액 속에서의 중량 감소율을 비교해 볼 때, 유리 섬유의 중량 감소율보다 현무암 섬유의 중량감소율이 매우 작음을 알 수 있으며, 아주 강한 알칼리 조건인 2 N의 NaOH 용액에서 3시간을 끓인 경우에도 유리섬유보다 낮은 중량감소율을 나타냈다.

[표 3] 알칼리조건에서 현무암섬유의 중량감소율

	Sat. Ca(OH) ₂ solution	2N NaOH solution
Condition	3 weeks at 25 oC	3 hr at boil
Basalt fiber	0.24 %	5.5 %
E-Glass fiber	1.62 %	6.0 %

무기물질로 이루어진 유리섬유와 현무암 섬유가 알칼리 조건에서 상이한 거동을 보이는 것은 섬유의 화학조성 뿐만 아니라 섬유의 형성조건과도 밀접한 관계가 있기 때문이다. 알칼리 조건에서 유리의 주성분인 SiO₂는 화학반응식 (1)과 같은 화학반응을 한다고 알려져 있다[6,9].



$$G_{\text{reaction}}^{\circ} = G_{\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}}^{\circ} - (2G_{\text{OH}^-}^{\circ} + G_{\text{SiO}_2}^{\circ}) = -5.16$$

(단, $G_{\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}}^{\circ} = -283.19$, $G_{\text{OH}^-}^{\circ} = -37.60$,

$$G_{\text{SiO}_2}^{\circ} = -202.83)$$

따라서 이 반응의 깃스자유에너지는 $G_{\text{reaction}}^{\circ} = -5.16$ 으로 음수를 나타내기 때문에 유리섬유의 경우 자발적인 반응이 일어나기 쉽다고 생각된다. 하지만 현무암 섬유 제조시 용융되어 있던 현무암 내의 SiO₂성분은 Al₂O₃ 성분과 함께 냉각되면서 mullite(3Al₂O₃·2SiO₂)의 형태로 결정화하기 때문에 단일성분으로 있을 때와는 매우 다른 화학적특성을 보인다고 알려져 있다[6]. 이 mullite의 $G_{298K, \text{mullite}}^{\circ} = -1649.4 \text{ Kcal/mol}$ 이기 때문에 전체 반응의 깃스자유에너지는 양의 값을 가지게 되어 같은 알칼리 조건에서 안정한 상태를 가진다고 추정된다.

4. 결론

본 연구에서는 현무암 단섬유로 강화시킨 시멘트복합재료의 물리적 특성과 알칼리 조건하에서 장기적인 안정성을 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 현무암 섬유 강화 시멘트복합재료는 2 wt%이하의 적은 섬유혼입량에도 매우 큰 인장강도의 증가를 가져왔으며(0.64 MPa → 2.64MPa), 굽힘강도의 경우에도 섬유 무혼입 시멘트복합재료가 4.30 MPa의 굽힘강도를 나타내는데 비해 현무암 섬유보강 후 최고 9.15 MPa까지 향상되는 등 물성의 향상 효과가 매우 컸다.
2. 이러한 물성의 증가는 섬유장의 변화보다는 섬유혼입률에 더욱 크게 영향을 받았으며, 현무암 섬유와 시멘트 matrix간의 양호한 계면접착력이 큰 역할을 하고 있는 것으로 나타났다.
3. 또한 Ca(OH)₂ 포화용액을 이용한 알칼리 조건 하에서 섬유의 중량 감소율 실험을 통해 현무암 섬유는 상온에서 3주후에도 0.24% 이하의 매우 낮은 중량 감소율을 나타내었다.

참고문헌

- [1] 이용구, 이수철, 박철우, "최신콘크리트공학", 구미서관, pp. 494-514, 2006.
- [2] 김무한, "건식비중분리법에 의한 고품질 재생잔골재 제조·생산 시스템의 적용성 평가", 한국콘크리트학회 학술발표논문집, 20, pp. 69-76, 2005.
- [3] 김무한, "재생골재 콘크리트의 구조체 적용성에 관한 기초적 연구(1)", 대한건축학회, 9, pp. 201-211, 1993.
- [4] 세코텍 홈페이지, <http://www.secotech.co.kr>
- [5] T. Czigany, J. Vad, K. Ooloskei, "Basalt Fiber as a Reinforcement of Polymer Composites", Periodica Polytechnica Ser. Mech. Eng., 49, pp. 3-14, 2005.
- [6] Y. Ma, B. Zhu and M. Tan, "Properties of ceramic fiber reinforced cement composites", Cement and Concrete Research, 35, pp. 296-300, 2005.
- [7] S. E. Artemenko, "Polymer Composite Materials Made From Carbon, Basalt, and Glass Fibres. Structure and Properties", Fiber Chemistry, 35, pp. 226-229, 2003.
- [8] H. D. Kim, J. S. Yoo, M. H. Kim, G. Y. Kim, and Y. D. Kim, "The Fiber Reinforcing Effect on the Physical Properties of Recycled Fine Aggregate Concrete", Textile Science and Engineering, 45, pp.

47-56, 2008.

- [9] X. Qian, B. Shen, B. Mu and Z. Li, "Enhancement of Aging Resistance of Glass Fiber Reinforced Cement", Materials and Structures, 36, pp. 323-329, 2003.

전 상 희(SangHee Chun)

[정회원]



- 2009년 2월 : 단국대학교 파이버시스템공학과 (공학사)
- 2009년 3월 ~ 현재 : 단국대학교 대학원 파이버시스템공학과 석사과정

<관심분야>

섬유고분자재료, 섬유복합재료

김 호 동(HoDong Kim)

[정회원]



- 1989년 2월 : 한양대학교 대학원 섬유공학과 (공학석사)
- 2001년 8월 : Case Western Reserve University, USA (공학박사)
- 1988년 12월 ~ 1996년 7월 : (주)코오롱 기술연구소 선임연구원

- 2004년 3월 ~ 현재 : 단국대학교 파이버시스템공학과 교수

<관심분야>

섬유고분자재료, 섬유복합재료