

강섬유 보강 시멘트 복합체의 시공성 향상에 관한 연구

A Study on the Improvement of Construction Performance of Steel Fiber Reinforced Cementitious Composites

고 경 태* 박 정 준** 김 방 옥** 이 종 석* 김 성 옥*** 이 장 화****
Kyung-Taeg Koh Jung-Jun Park Bang-Wook Kim Jong-Suk Lee Sung-Wook Kim Jang-Hwa Lee

ABSTRACT

In this study, it is investigate to influence on the dispersion of fiber and the flowability of matrix of type and amount of superplasticizer, velocity agent, mineral admixture and steel fiber to improve for construction performance of steel fiber reinforced cementitious composites.

As for the test results, it was found that the dispersion of fiber and the flowability of matrix in steel fiber reinforced cementitious composites can improve by using of properly amount and combination of superplasticizer, velocity agent, mineral admixture. Furthermore, It show that the aspect ratio of steel fiber affect the construction performance of fiber reinforced cementitious composites, and the improvement for construction performance is the more effective the smaller aspect ration of steel fiber.

1. 서 론

콘크리트는 경제성 및 내구성이 우수한 건설재료로서 강재와 더불어 가장 널리 사용되고 있다. 그러나 콘크리트는 인장강도와 휨강도가 작고 균열이 발생하기 쉬운 본질적인 결함을 가지고 있으며, 또한 고강도 콘크리트의 실용화에 따른 압축강도의 증가로 콘크리트의 취성파괴가 문제되고 있다. 이런 결함 및 문제점을 개선하고자 최근 외국에서는 ECC(Engineered Cementitious Composite), RPC(Reactive Powder Concrete), CRC(Compact Reinforced Composite), SIFCON(Slurry Infiltrated Concrete), SIMCON(Slurry Infiltrated Mat Concrete) 등 다양한 고인성 시멘트 복합체가 개발되고 주목을 받고 있다. 특히 국내에서도 고인성 시멘트 복합체의 한 종류인 RPC로 선유도 보도교에 적용된 사례가 있어 관심이 높아지고 있으나, 이에 대한 연구는 전무한 실정이다.

고인성 시멘트 복합체는 시멘트계 재료를 섬유로 보강한 복합재료로서 종래의 섬유보강콘크리트(Fiber Reinforced Concrete, FRC)의 성능을 발전시켜 진일보된 재료이다. 역학적 특성으로서 휨, 인장, 압축 파괴 시에 인성이 대폭적으로 향상됨은 물론 휨응력 하에서도 다수의 균열이 분포되는 특성을 가지고 있으며, 다수 균열의 발생 이후에도 겉보기 변형의 증가와 함께 응력이 증가하는 변형경화(straining hardening)와 무수한 미세 균열이 분산되는 특성을 가지고 있다.

* 정회원, 한국건설기술연구원 토목연구부 선임연구원

** 정회원, 한국건설기술연구원 토목연구부 연구원

*** 정회원, 한국건설기술연구원 토목연구부 기술원

**** 정회원, 한국건설기술연구원 토목연구부 구조재료그룹장

***** 정회원, 한국건설기술연구원 토목연구부 연구위원

고인성 시멘트 복합체의 변형경화와 미세균열 분산특성을 실현시키기 위해 섬유 및 매트릭스의 특성, 섬유와 매트릭스와의 부착강도, 매트릭스의 공기량 등의 영향을 받지만, 섬유를 다량으로 사용하여 균등 분산시키는 것이 무엇보다 중요하다. 일반적으로 섬유를 다량으로 사용하면 배합 중에 fiber ball 현상이 발생하여 유동성, 시공성이 저하되어 경우에 따라서 소요의 역학적 특성을 얻지 못하는 경우가 발생한다.

따라서 본 연구에서는 고인성 섬유보강 시멘트 복합체의 소요 워커빌리티를 확보하고, 복합체 내에 섬유 분산성을 향상시키는 방법에 대해 연구하였다.

2. 섬유 분산성 향상의 기본개념

섬유보강 시멘트 복합체에서 섬유는 시멘트, 모래 등의 입자에 비해 형상계수(aspect ratio)가 매우 크기 때문에 섬유를 다량으로 사용할 경우에 fiber ball 현상이 발생하여 유동성이 저하되어 시공에 상당히 제약을 주는 문제가 있다.

섬유보강 시멘트 복합체에서 섬유의 균일한 분산성을 얻기 위해 매트릭스에 높은 점성을 부여하는 방법이 유효한 것으로 알려져 있다. 매트릭스에 점성을 부여하는 방법으로는 단위수량 저감, 혼화제 다량 사용, 증점제 사용이 있으나, 이 중에서 단위수량을 저감시키는 방법과 혼화제를 다량으로 사용하는 방법은 점성을 높이는 데 어느 정도 한계가 있고, 증점제를 사용하는 방법은 점성을 비교적 간단히 부여할 수 있다. 그러나 증점제를 필요 이상으로 사용할 경우, 매트릭스의 점성이 너무 높아 유동성이 저하되고, 매트릭스의 경화가 지연되는 등의 문제가 있다. 또한 매트릭스의 유동성을 높이는 방법으로는 고성능감수제 사용이 가장 유효하나, 고성능감수제를 너무 많이 사용하게 되면 매트릭스의 점성이 낮아져 재료분리가 발생하기 쉬워 fiber ball 현상이 발생할 것으로 판단된다. 따라서 양호한 워커빌리티와 균일한 섬유분산을 가지는 섬유보강 시멘트 복합체를 제조하기 위해서는 증점제와 고성능감수제 등을 적절한 사용이 유효할 것으로 판단된다.

3. 시험개요

3.1 사용재료 및 기본배합

본 연구에서 사용한 재료를 표 1에 나타내었다. 물-결합재비(W/B) 35%, 모래-결합재비(S/B) 50%, 단위수량 350kg/m³, 강섬유 혼입율 2.0%(체적)으로 기본배합으로 구성된 섬유보강 시멘트 복합체를 대상으로 증점제, 고성능감수제, 혼화제, 강섬유의 종류 및 양 등이 시공성에 미치는 영향을 검토하였다.

3.2 배합방법 및 시험방법

배합은 3리터 모르타르용 믹서를 사용하였으며, 배합순서는 그림 1과 같다. 섬유보강 시멘트 복합체의 워커빌리티는 플로우시험(KS L 5105)에 의해

표 1 사용재료 및 물성

사용재료	기호	물성
시멘트	C	보통포틀랜드시멘트, 비표면적 3.333cm ² /g, 밀도 3.15g/cm ³ , MgO 2.8%, SO ₃ 2.3%
혼화제	FA	플라이애시, 비표면적 3.618cm ² /g, 밀도 2.80g/cm ³ , 강열감량 3.8%, SiO ₂ 55.9%
	BS	고로슬래그, 비표면적 3.333cm ² /g, 밀도 3.15g/cm ³ , MgO 2.8%, SO ₃ 2.3%
	SF	실리카폼, 비표면적 240,000cm ² /g, 밀도 2.10g/cm ³ , 강열감량 1.5%, SiO ₂ 96.0%
모래	S	6호 규사, 20~30mesh 90%, SiO ₂ 95%
섬유	F1	강섬유, 양단후크형, L35×D0.7mm
	F2	강섬유, 양단후크형, L30×D0.5mm
고성능감수제	SP1	폴리칼콘산계
	SP2	멜란민계
증점제	VL	비이온성 셀룰로오스계

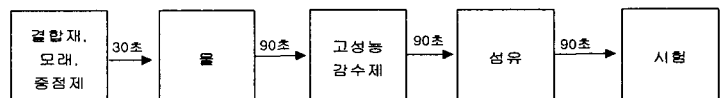


그림 1 배합방법

유동성으로 평가하였으며, 또한 육안관찰에 의해 재료분리 상태를 평가하였다. 그리고 섬유 분산성은 육안으로 관찰하여 모르타르 중의 fiber ball의 상태에 따라 등급 1(양호), 2(보통), 3(불량)으로 구분하여 평가하였다.

4. 시험결과 및 고찰

4.1 고성능감수제의 영향

그림 2는 고성능감수제의 종류와 양이 섬유보강 시멘트 복합체의 유동성 및 섬유 분산성에 미치는 영향을 검토한 결과이다. 본 실험에 사용된 폴리카본산계 고성능감수제는 정전기적인 반발력과 고분자 흡착층의 상호작용에 의한 입체반발력(입체장해 작용)에 의해 높은 감수효과가 발휘되고, 멜란민계 고성능감수제는 정전기적인 반발력에 의한 효과가 지배적으로 알려져 있다. 본 연구에 의하면 폴리칼본산계 고성능감수제의 경우에는 첨가량이 증가할수록 플로우값이 증가하였고 fiber ball 현상도 없는 것으로 나타났으며, 시멘트 중량의 0.5%를 사용한 경우에 플로우값이 200mm이상의 고유동성을 얻을 수 있으며, 시멘트 중량의 1% 정도에서 fiber ball 현상도 거의 없는 것으로 나타났다. 그러나 멜란민계 고성능감수제는 첨가량을 증가시키더라도 매트릭스의 유동성 및 섬유의 분산성 향상에 거의 효과가 없는 것으로 나타났다.

이상과 같이 섬유보강 시멘트 복합체 제조 시 고성능감수제가 섬유분산성과 매트릭스의 유동성에 미치는 영향을 검토한 결과, 폴리칼본산계 고성능감수제는 멜란민계 고성능감수제보다 효과가 있으며, 이것은 감수제의 흡착에 의한 입체장해 효과가 유동성 향상에 역할을 한 것으로 판단된다.

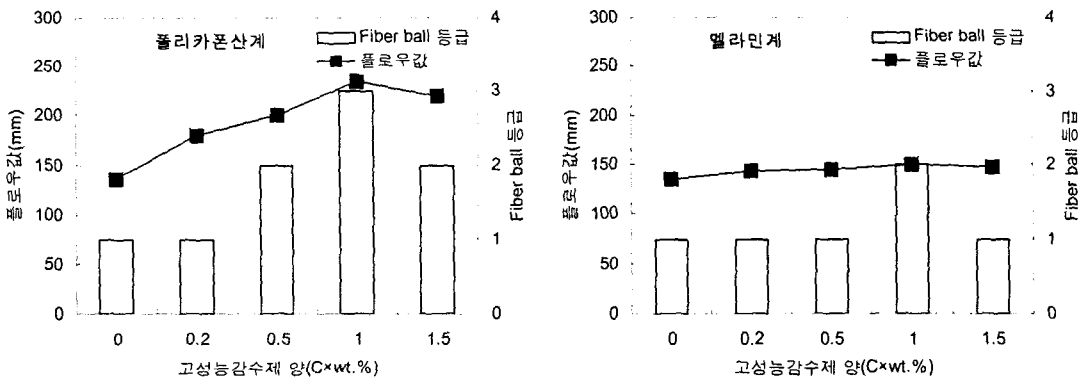


그림 2 고성능감수제의 종류 및 양이 섬유분산성에 미치는 영향

4.2 증점제의 영향

그림 3은 증점제의 사용방법에 따른 영향을 검토한 결과이다. 셀룰로오스계 증점제는 수용성이지만, 배합시간 안에 완전히 용해되지 않아 증점제의 역할을 충분히 발휘되지 않을 가능성이 높은 것으로 알려져 있어 본 연구에서는 분말형 증점제와 분말형 증점제를 20% 수용액으로 제조한 다음 증점제 수용액으로 사용하는 방법에 대해서도 검토하였다.

증점제를 분말형으로 사용한 경우에는 첨가량이 증가할수록 플로우값이 감소하는 것으로 나타났으나, 증점제를 수용액으로 사용한 경우에는 분말형에 비해 시멘트 중량에 0.2%까지는 플로우값이 감소가 큰 것으로 나타났으나, 그 이후에는 플로우값이 거의 일정하고 fiber ball 현상이 거의 없는 것으로 나타났다.

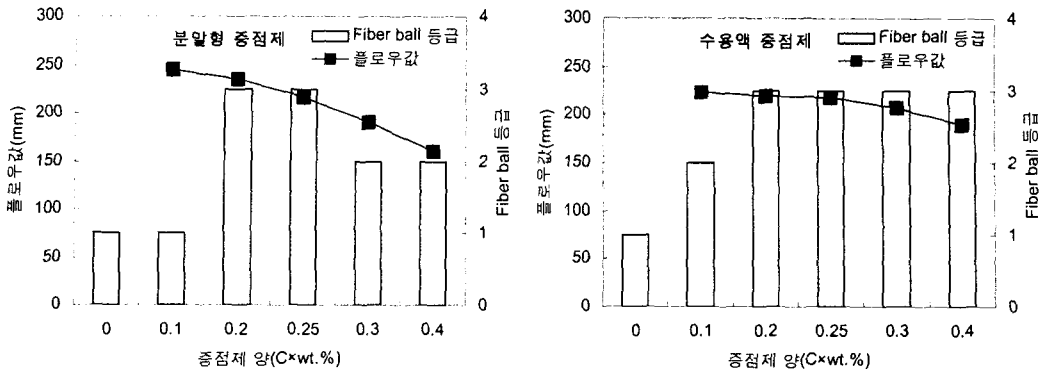


그림 3 증점제 사용방법 및 양이 섬유분산성에 미치는 영향

이것은 수용액 증점제를 첨가함으로써 굳지않은 모르타르가 배합 초기부터 충분한 점성을 가지고, 섬유의 분산 안정화가 달성되었기 때문이다. 그리고 배합 초기부터 완전히 분해된 증점제가 시멘트입자에 흡착되어 초기수화에 의한 시멘트 입자끼리의 2차 응집을 억제시킨 결과, 모르타르의 유동성을 유지시키는 것으로 판단된다.

이상과 같이 섬유보강 시멘트계 복합체 제조 시 증점제가 섬유 분산성과 매트릭스의 유동성에 미치는 영향을 검토한 결과, 증점제를 수용액으로 사용하는 방법은 분말형으로 사용하는 방법보다 효과가 있는 것으로 나타났으며, 이것은 증점제를 수용액으로 사용함으로써 완전 분해시켜 배합 초기부터 모르타르에 충분한 점성을 부여하여 섬유분산을 안정화시키고, 또한 시멘트 입자끼리의 2차 응집을 억제시키기 때문으로 판단된다.

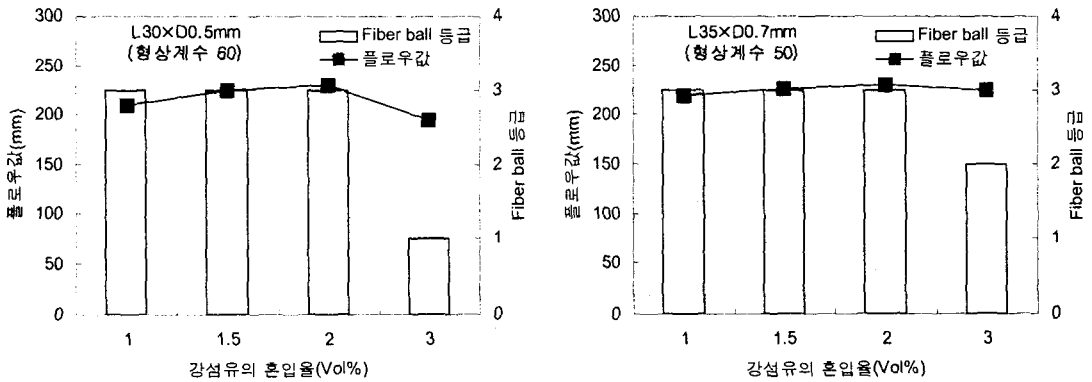


그림 4 강섬유 종류 및 혼입율이 섬유분산성과 유동성에 미치는 영향

4.3 강섬유의 종류 및 혼입율의 영향

그림 4는 강섬유 종류 및 혼입율이 섬유보강 시멘트 복합체의 유동성과 섬유분산성에 미치는 영향이다. L35x0.7mm(형상계수 50)인 강섬유는 L30x0.5mm(형상계수 60)인 강섬유에 비해 매트릭스의 유동성 및 섬유의 분산성 향상에 유효한 것으로 나타났으며, 섬유보강 시멘트 복합체의 체적에 3%를 혼입하더라도 fiber ball 현상이 별로 없는 것으로 나타났다. 섬유보강 시멘트 복합체의 유동성 및 fiber ball 현상에 강섬유의 형상계수가 중요한 요소가 되고, 본 연구결과에 의하면 형상계수가 작을수록 유리한 것으로 나

타났으며, 일례로 유럽에서 고인성 섬유보강 시멘트 복합체로 사용되는 CRC의 강섬유의 형상계수는 30정도이다.

이상과 같이 섬유보강 시멘트 복합체의 제조시 섬유의 분산성과 매트릭스의 유동성은 강섬유의 형상계수의 영향을 크게 받으며, 형상계수가 작을수록 유리한 것으로 나타났으며, 국내에서도 고인성 섬유보강 시멘트 복합체를 제조하기 위해서는 형상계수가 작은 강섬유의 개발이 시급한 것으로 판단된다.

4.4 무기질 혼화재의 영향

섬유보강 시멘트 복합체는 시멘트, 모래, 물 및 섬유로 이루어진 일종의 슬러리(slurry)이다. 이 슬러리의 유동성은 자유수량에 영향을 받지만, 과도한 자유수량은 복합체의 강도를 저하시킬 뿐만 아니라 균열의 원인이 되며, 경우에 따라서 재료분리를 일으키기도 한다. 따라서 가능한 적은 양의 자유수로 소요의 유동성과 섬유 분산의 안정성을 확보하기 위해서는 수경성이 낮은 무기질 혼화재를 첨가하는 방법이 유효할 것으로 판단된다. 따라서 본 실험에서 무기질 혼화재로서 플라이애시, 고로슬래그, 실리카폼을 선정하여 그 효과에 대해 검토하였다.

그림 5는 무기질 혼화재가 섬유보강 시멘트 복합체의 섬유분산성과 유동성에 미치는 영향을 검토한 결과이다. 플라이애시 치환율 10%, 고로슬래그 치환율 30% 및 실리카폼 치환율 5%까지 매트릭스의 유동성이 향상되는 것으로 나타났고, 이것은 무기질 혼화재를 첨가함으로써 볼베어링 효과 등에 의한 영향으로 사료된다. 그리고 섬유의 분산성은 플라이애시 치환율 20%, 고로슬래그 30%, 실리카폼 5% 이상부터 향상되는 것으로 나타났고, 이것은 무기질 혼화재를 첨가함으로써 모르타르 고체입자 사이에 존재하는 자유수량이 적어져 모르타르 구조가 치밀하게 되었고, 증점제와 함께 사용함으로써 점성효과가 상승되었기 때문으로 판단된다.

그리고 플라이애시 치환율 30%, 고로슬래그 50%, 실리카폼 10% 이상부터 모르타르의 유동성이 저하되는 것으로 나타났으며, 이것은 혼화재를 다량으로 첨가함으로써 슬러리 중의 입자 표면적이 증가하여 흡착할 고성능 감수제 양이 부족하였기 때문으로 추정되며, 고성능감수제 양을 증가시키며 유동성은 다시 증가될 것으로 추정된다.

이상과 같이 플라이애시, 고로슬래그, 실리카폼 등과 같은 무기질 혼화재를 적절한 양으로 치환하여

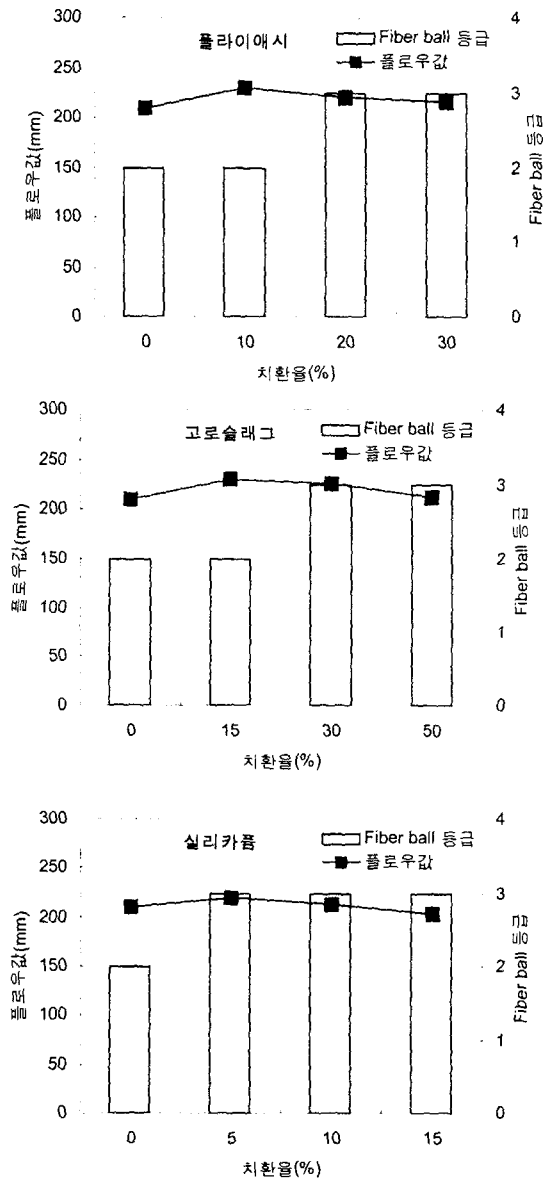


그림 5 무기질 혼화재가 섬유분산성 및 유동성에 미치는 영향

사용하면, 모르타르의 유동성이 향상되고 섬유 분산을 안정화시키는 효과가 있는 것으로 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 고인성 섬유보강 시멘트 복합체의 소요 워커빌리티를 확보하고, 복합체 내에 섬유 분산성을 향상시키는 방법에 대해 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 섬유보강 시멘트 복합체 제조 시 폴리칼폰산계 고성능감수제는 멜란민계 고성능감수제보다 섬유의 분산성과 매트릭스의 유동성 향상에 유효하며, 이것은 감수제의 흡착에 의한 입체장해 효과가 유동성 향상에 역할을 하기 때문에 사료된다.
- (2) 증점제를 수용액으로 사용하는 방법은 분말형으로 사용한 방법보다 섬유보강 시멘트 복합체의 시공성 향상에 효과가 있는 것으로 나타났으며, 이것은 증점제를 수용액으로 사용함으로써 완전 분해시켜 배합 초기부터 모르타르에 충분한 점성을 부여하여 섬유분산을 안정화시키기 때문으로 판단된다.
- (3) 섬유보강 시멘트 복합체의 제조 시 섬유의 분산성과 매트릭스의 유동성은 강섬유의 형상계수의 영향을 크게 받으며, 형상계수가 작을수록 유리한 것으로 나타났다. 따라서 국내에서도 고인성 섬유보강 시멘트 복합체를 제조하기 위해서는 형상계수가 작은 강섬유의 개발이 시급한 것으로 판단된다.
- (4) 플라이애시, 고로슬래그, 실리카폼 등과 같은 무기질 혼화재를 적절한 양으로 치환하여 사용하면, 모르타르의 유동성이 향상되고 섬유의 분산을 안정화시키는 효과가 있는 었다.

참 고 문 헌

1. Li, V. C. and Leung, C. K. Y., "Steady-state and multiple cracking of short random fiber composites, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.118, No.11, pp.2246-2264, 1992.
2. Naaman, A. E. and Reinhardt, H. W., "High performance fiber reinforced cement composites 2(HPFRCC 2)", E&FN Spon, 1996.
3. Nielsen, C. V., Olsen, J. F. and Aarup, B. K., "Effect of fiber on the bond strength of high-strength concrete", 4th International Symposium on Utilization of High-Strength High-Performance Concrete, Paris, 1996.
4. 윤현도, 후쿠야마 히로시 등, "자기손상저감성 고성능 섬유보강시멘트 복합재료", 한국구조물진단학회 제6권 제2호, 2002. 4.
5. 原田, 新村, "高じん性コンクリート", *コンクリート工學* Vol.36, No.1, 1998. 1.
6. Li, V. C., Kong, Kong, H. J. and Chan, Y. W., "Development of self-compacting engineered cementitious composites", *Proc. Intl's Workshop on Self-Compacting Concrete*, pp.46-59, 1998.
7. 이도현, 김태성, "고성능감수제", *한국콘크리트학회지* 제8권 2호, 1996.4.
8. "新・コンクリート用混和材料 技術と市場", *シーエムシー*, 1988.