

고성능 섬유복합재료 HPFRCC의 개발 전략

Strategies for High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites Development



김윤용*
Yun-Yong Kim



조창근**
Chang-Geun Cho



하기주***
Gee-Joo Ha



배수호****
Soo-Ho Bae

Abstract

이 논고에서는 고성능 섬유보강 시멘트 복합체(HPFRCC; high performance fiber reinforced cementitious composites)를 개발할 때에 갖고 있어야 할 전략에 대하여 간략히 기술하고 있다. 특히 HPFRCC의 현장 적용에 주안점을 두어 성공적인 현장 적용을 위한 필수 요건 - 재료 성능(high performance), 경제성(low cost), 시공성(easy execution) - 과 관련하여 논하고자 한다. 이러한 필수 요건을 만족시켜야만 이 재료가 기존의 건설 시장에서 경쟁력을 확보할 수 있다. 참고적으로 이 논고는 이탈리아의 베르가모(Bergamo)에서 2004년 9월 24, 25일 이틀 동안 개최된 첨단 섬유보강 콘크리트 국제 워크샵 (International Workshop on Advanced Fiber Reinforced Concrete)에서 원저자 (Victor C. Li 교수, University of Michigan)가 초청 연사로 발표한 논문을 요약한 것이다.

1. 서 론

최근 10년 동안에 HPFRCC의 정의는 1축 인장에서 인장 변형률 경화 거동을 나타낼 수 있는 시멘트 복합체로 통일되어 왔다¹⁾. 비록 제한적이기는 하지만, 현재 HPFRCC의 발전은 구조 부재 재료로서 현장에 적용하는 단계에 이르렀다.

특히 일본의 JCI, 유럽의 RILEM에서는 기술위원회(technical committee)를 구성하여 구조 재료로서 HPFRCC를 활용하기 위한 설계 기준 제정 작업을 진행하고 있다. 이러한 작업을 토대로 재료의 현장 적용이 구체적으로 실현되고 보다 많은 시공 실적과 현장 데이터, 나아가서는 공용 중의 기술적 데이터들도 지속

적으로 축적될 것으로 기대된다. 이 논고에서는 HPFRCC를 구조부재에 적용할 때 예상되는 일반적인 사항과 문제점을 주로 다루고 있다. 이를 위하여 재료 성능, 경제성, 시공성 등 현장 적용을 위한 주요 요건에 대하여 이미 시공된 HPFRCC를 예로 논할 것이다.

2. 재료 성능 - 고성능

콘크리트 분야에서 의미하는 '고성능'은 국가 별로 그 정의가 매우 다양하다. 일본에서 '고성능 콘크리트'란 일반적으로 초유동 자기충진(self-consolidating) 콘크리트를 의미한다. 이에 반하여 유럽에서는 고내구성 콘크리트를, 미국에서는 고강도 콘크리트를 흔히 '고성능 콘크리트'라고 지칭한다. 따라서 '고성능'이란 '굳기 전 또는 굳은 후에 일반 콘크리트가 나타낼 수 없는 우수한 성능을 보이는 높은 성능의 콘크리트'로 정의하는 것이 보다 합리적인 것이라 판단한다.

다른 견지에서 '극복하고 싶은 일반 콘크리트의 성능 한계가 무엇인가?'를 살펴보면 '고성능'의 정의를 합리적으로 내릴 수 있을 것이다. 예를 들면, 많은 철근콘크리트 구조물에서 나타나는 내구성 문제, 지진과 같은 과도한 하중에 저항하는 내하성 문제 등이 일반 콘크리트 재료의 성능 한계라고 볼 수 있다. 내구성 측면에서는 콘크리트의 균열 폭 제어 능력이 중요하다. 한편, 내진 측면에서는 재료가 구조 연성을 부여할 수 있는 능력과 지진 후 보수/보강을 최소화 할 수 있는 능력이 있다면 매우 바람직할 것이다. HPFRCC는 이러한 일반 콘크리트의 성능 한계를 극복한 '고성능' 콘크리트 재료이다. 이 외에도 여러 가지 차별화된 성능 - 다양한 시공성(숏크리트, self-compactability), 경량성 등 - 을 HPFRCC에 부여할 수 있다.

최근 들어 지속가능성(sustainability)이라는 새로운 성능이 구조 성능 못지않게 중요한 성능 요건으로 대두되고 있다. 이러한 견지에서 HPFRCC의 '고성능'이 사회 기반 시설물

* 정회원, 충남대학교 토목공학과 교수
yunkim@cnu.ac.kr

** 정회원, 경북대학교 방재연구소 연구교수

*** 정회원, 경일대학교 건축공학과 교수

**** 정회원, 안동대학교 토목공학과 교수

(infrastructure)의 지속가능성을 극대화 할 수 있을 것으로 기대하고 있다. HPFRCC와 관련된 지속가능성 증진에 관한 연구는 현재까지 초기 단계에 머물러 있지만, 그 타당성과 실현 가능성은 점차로 증명되어 가고 있다²⁾.

3. 경제성(ECC의 시공 비용)

경제성 문제에 매우 민감한 건설 산업에서 HPFRCC가 경쟁력을 갖고 현장에 적용되기 위해서는 비용 문제가 결정적인 요인이 된다. 따라서 HPFRCC의 재료비를 최소화할 뿐만 아니라 타설 비용을 절감하면서, 사용 수명 동안의 총 가치를 증가시키는 효과를 함께 고려할 수 있는 방법이 필요하다. 즉 경제적, 환경적, 사회적 비용을 종합적으로 평가하는 방법이 필수적이며, 이를 통하여 지속가능성을 증진시키는 효과를 토대로 HPFRCC의 경제성을 합리적으로 평가하여야 한다.

HPFRCC 원가 상승의 주된 요인은 섬유로서, 시멘트, 물, 모래의 가격에 비하여 매우 높은 비용이 요구된다. 따라서 HPFRCC에 사용되는 섬유의 양을 최소화하고, 높은 섬유 함량으로 고성능화를 지향하는 기존의 비실용적인 개념으로부터 탈피하여야 한다. 섬유 함량을 최소화하면서 고성능화를 지향하기 위해서는 섬유, 매트릭스 및 경계면에서 발생하는 역학적 상호 작용을 최적화하는 기법이 필요하다. 즉 이들 3가지 역학적 요인의 상호작용을 명확히 규명하는 해석 기법이 요구된다. 최근 몇 년 동안 마이크로 단계에서 HPFRCC의 역학적 거동을 이해하기 위하여 마이크로역학(micromechanics) - 소요 성능을 얻기 위하여 기본 요소의 특성(섬유, 매트릭스, 경계면의 특성)을 역학적인 체계를 기반으로 결정하는 기법 - 이 체계적으로 발전하여 왔다. 이 방법론의 효용성은 ECC(engineered cementitious composites)의 개발을 통하여 입증된 바 있다³⁻⁷⁾. ECC는 섬유의 양을 최소화(2% 체적비)하면서 섬유복합체의 연성을 극대화할 수 있도록 개발된 HPFRCC이다.

HPFRCC의 비용을 단순히 단위체적당의 재료 비용으로 나타내는 것은 현실적으로 합리적이지 않다. 다시 말해서 HPFRCC의 재료 원가 이외에도 HPFRCC를 타설하기까지 소요되는 총비용(인건비, 운송비 포함)이 반드시 고려되어야 한다. 예를 들어 HPFRCC의 우수한 인장 및 전단 성능을 고려하여 전단철근을 사용하지 않게 되면, 철근의 재료비와 철근공 인건비를 크게 절감할 수 있기 때문에 구조물 축조에 소요되는 비용은 크게 감소할 수 있다. 아울러 구조물의 체적과 사하중이 감소하기 때문에 날씬한 구조(thinner structures)를 실현할 수 있고, 이와 관련한 2차적인 비용 절감도 가능할 것이다. 만약 HPFRCC가 우수한 시공성(자기충진성 등), 경량성

등의 특수한 기능을 추가적으로 갖고 있다면, 이를 통하여 인건비와 운송비를 추가적으로 절감할 수도 있다. 또한 HPFRCC를 프리캐스트 요소에 사용할 경우, 수송 중에 발생할 수 있는 손상 비용이 절감되기 때문에 시공 전 보수에 소요되는 비용이 크게 감소될 것으로 예상된다. 구조물 축조에 소요되는 총 비용을 근거로 강섬유 보강 콘크리트(비록 HPFRCC가 아니더라도)의 비교 우위 경제성에 대하여 Failla 등⁸⁾이 이미 검토하여 보고한 바 있다.

이상에서 기술한 바와 같이, HPFRCC의 재료 원가도 물론 중요하지만, 이는 구조물 축조까지 소요되는 총 시공 원가의 일부에 지나지 않으므로, 초기 시공 경제성을 평가할 때에는 보다 종합적인 분석을 수행한 후에 HPFRCC의 적용 여부를 판단하여야 한다.

4. 시공성(Ease of Execution)

경제성과 함께 현장 시공성이 중요한 소요 성능이 된다. 특히 기존에 사용되어 온 건설 장비를 활용하는 시공 성능을 논할 필요가 있는데, 자기충진용 ECC⁹⁾, 슛크리트용 스프레이 ECC¹⁰⁾, 압출 공법에 의하여 제조된 ECC^{11,12)} 등이 이미 개발된 바 있다. 이러한 우수한 시공성을 갖는 ECC는 마이크로역학을 이용하여 섬유의 함량을 최소화하면서 레올로지의 특성을 조절하는 방법으로 개발되었다. 즉 마이크로역학을 적용함으로써 경제성뿐만 아니라 시공성도 크게 개선할 수 있음을 알 수 있는 사례이다.

5. ECC 재료의 적용 사례

현재 ECC를 다양한 현장에 적용하기 위한 시도가 이루어지고 있다. 이 절에서는 대표적인 사례와 향후의 계획을 기술하면서 ECC의 적용 사례를 소개하고자 한다.

<그림 1>은 2003년 일본 히로시마 현에 소재한 Mitaka 댐의 보수 현장 사진이다¹³⁾. Mitaka 댐은 시공 이후 60년 이상 사용되었기 때문에 콘크리트 면이 심하게 열화된 상태였다. 따라서 콘크리트 댐에 발생된 균열, 누수 및 각종 열화를 보수하기 위하여 ECC를 보수재로 보수 시공을 하였다. 약 600 m² 면적의 상류 측 댐 표면을 20 mm 두께의 ECC를 스프레이 공법으로 시공하여 보수하였다.

<그림 2>는 일본 기후 지역에 위치한 옹벽의 보수 사례이다. 옹벽은 알칼리 골재 반응에 의하여 심하게 열화 되어 있었으며, 많은 미세균열이 분포되어 있는 상황이었다. 일반 콘크리트를 사용하여 보수 시공을 할 경우에는 반사균열(reflected cracking)이 발생할 가능성이 매우 높았기 때문에 표면층의 균열을 제어



그림 1. Mitaka 댐의 보수 (스프레이 공법에 의하여 타설된 20mm 두께의 ECC 보수층)



그림 2. 일본 기후 지역 옹벽의 보수(스프레이 공법에 의하여 타설된 ECC 보수층)

할 목적으로 ECC를 보수재료로 선정하였다. 보수 시공 이후에 1년이 경과한 시점에서 현장을 관측한 결과, 폭 $50\mu\text{m}$ 이하의 미세균열만이 관찰되었다¹⁴⁾.

〈그림 3〉은 압출 공법에 의하여 제조된 ECC 기둥의 한 예이다¹²⁾. 이외에도 우수한 변형 성능을 갖고 있는 ECC 파이프

요소가 또한 개발된 바 있다¹⁵⁾.

〈그림 4〉는 2005년 여름 미시간주에서 시공된 단순거더교의 슬래브를 연결하는 ECC 연결슬래브 개념도를 나타내고 있다. 이 공법은 기존의 신축이음을 ECC 연결슬래브로 대체하는 방법으로 건조수축, 온도, 차량 활하중 등에 의하여 발생하는 신

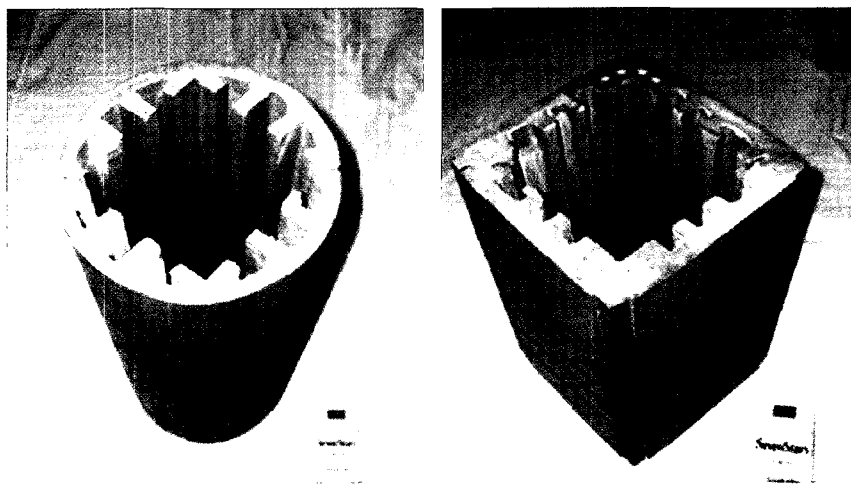


그림 3. 압출 성형된 ECC 기둥

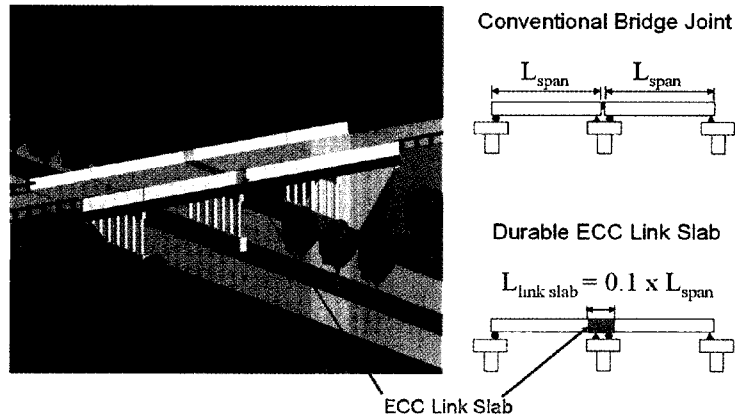
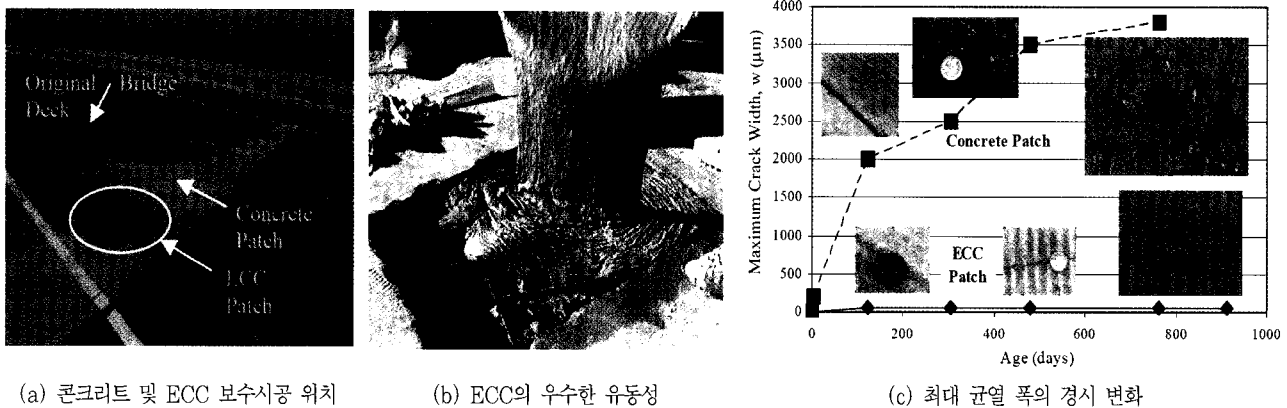


그림 4. 단순거더교에 적용된 ECC 연결슬래브의 개념도(미국 미시간주)



(a) 콘크리트 및 ECC 보수시공 위치

(b) ECC의 우수한 유동성

(c) 최대 균열 폭의 경시 변화

그림 5. ECC를 이용한 교량 슬래브의 보수(미국 미시간주)

축량을 ECC 연결슬래브가 모두 흡수하도록 설계/시공된다. 이 공법은 기본적으로 1축 인장 하에서 변형을 경화 거동을 보이는 ECC 재료의 탁월한 연성을 활용한 것이다¹⁶⁾. ECC의 우수한 균열폭 제어 능력과 피로 저항 성능을 기반으로 교량의 전반적인 내구성이 크게 증진될 것으로 예상된다.

〈그림 5〉는 미국 미시간주에서 교량 슬래브의 패치 보수에 ECC를 활용한 사례이다. 이 교량의 경우 일평균 교통량은 상대적으로 낮은 반면, 초대형 트럭들이 빈번히 소통되기 때문에 매우 중량의 활하중이 재하되는 특징을 갖고 있다. 또한 미시간주는 겨울철에 매우 혹독한 동결-융해 작용이 나타나는 기후 특성을 갖고 있다. 보수 이후 2년 이상의 사용 기간을 거쳤으나, 현재까지도 ECC 보수면은 매우 양호한 상태인 것으로 관측되고 있다. 단지 폭 30µm 이하의 매우 미세한 균열만이 형성된 상태이다. 대조적으로, 동일 시기에 시공된 콘크리트 보수면은 수 mm 폭의 균열이 발생하였다. 이는 HPRCC를 실제 기후조건과 사용하중 하에 노출시키고 지속적으로(대략 700일 가량) 관측한 결과로서 현재까지는 흔치 않은 사례라 할 수 있다.

〈그림 6〉은 일본 북해도 지방에 최근 건설된 Mihara교를 나

타낸다. 2005년 5월 개통된 사장교로서, 매우 얇은 ECC-강 합성 바닥판 시스템으로 시공된 교량이다. ECC의 높은 인장 연성과 미세하게 제어되는 균열 특성을 이용하여 기존에 비하여 약 40%의 바닥판 중량을 절감하였고, 100년의 사용 연한을 목표로 시공되었다.

6. 결 론

이 논고는 높은 연성으로 대표되는 재료의 고성능과 경제성, 시공성 등 성공적인 현장 적용 요건을 충족하는 HPRCC의 개발 전략에 대하여 소개하였다. 이를 통하여 보수보강, 프리캐스트, 현장 타설, 대규모 현장 적용, 상용화 등 일련의 실용화 항목에 ECC 재료가 매우 적합한 것으로 판단한다. 또한 다양한 현장 적용을 통하여 ECC 재료의 차별화된 주요 성능 - 높은 연성과 미세한 균열 폭 제어 능력 - 은 현장에서도 동일하게 발현된다는 사실이 입증되었다. 이러한 ECC의 차별화된 성능은 보통콘크리트 또는 일반 섬유보강콘크리트에서는 쉽게 얻을 수 없는 이 재료만의 장점이다. □

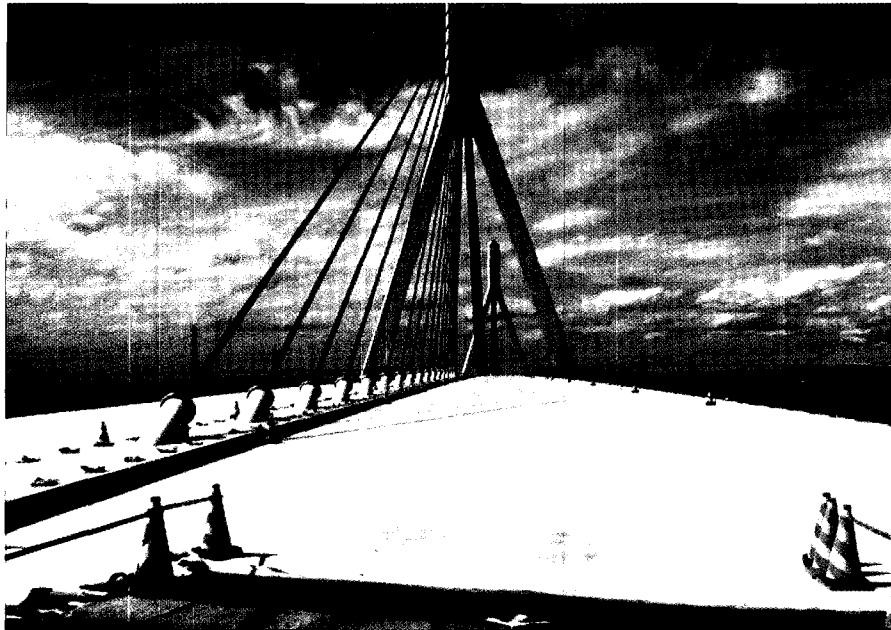


그림 6. 일본 북해도의 Mihara 교(ECC-강 합성 바닥판)

참고문헌

1. Naaman, A.E., and H.W. Reinhardt, "High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites", *RILEM Proceedings*, 31, E&FN Spon, 1996.
2. Li, V.C., M. Lepech, S. Wang, M. Weimann, and G. Keoleian, "Development of Green ECC for Sustainable Infrastructure Systems", *Proc., Int'l Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology, Beijing, China*, Ed. K. Wang, Published by Iowa State Univ. 2004, pp.181~192.
3. Kanda, T. and V.C Li, "A New Micromechanics Design Theory for Pseudo Strain Hardening Cementitious Composite", *ASCE J of Engineering Mechanics*, Vol.125, No.4, 1999, pp.373~381.
4. Li, V.C., "From Micromechanics to Structural Engineering the Design of Cementitious Composites for Civil Engineering Applications", *JSCE Journal of Struc. Mechanics and Earthquake Engineering*, Vol.10, No.2, 1993, pp.37~48.
5. Li, V.C., "On Engineered Cementitious Composites(ECC) - A Review of the Material and its Applications", *Journal Advanced Concrete Technology*, Vol.1, No.3, 2003, pp 215~230.
6. Li, V.C., S. Wang, and C. Wu, "Tensile Strain-Hardening Behavior of PVA-ECC", *ACI Materials Journal*, Vol.98, No. 6, 2001, pp.483~492.
7. Li, V.C., C. Wu, S. Wang, A. Ogawa, and T. Saito, "Interface Tailoring for Strain-Hardening PVA-ECC", *ACI Materials Journal*, Vol.99, No.5, 2002, pp.463~472.
8. Failla, C., P. Magnetti, "The Experience in SFRC Production of an Italian Precast factory", *Proceedings of International Workshop on Advanced Fiber Reinforced Concrete*, Italy, 2004.
9. Kong, H.J., S. Bike, and V.C. Li, "Development of a Self Compacting Engineered Cementitious Composite Employing Electroseric Dispersion/Stabilization", *Journal Cement and Concrete Composites*, Vol.25, No.3, 2003, pp.301~309.
10. Kim, Y.Y., H.J Kong, and V.C Li, "Design of Engineered Cementitious Composite (ECC) Suitable for Wet-mix Shotcreting", *ACI Materials Journal*, Vol.100, No.6, 2003, pp.511~518.
11. Stang, H. and V.C. Li, "Extrusion of ECC-Material", *Proc., High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 3(HPFPRCC 3)*, Ed. H. Reinhardt and A. Naaman, Chapman &Hull, 1999, pp.203~212.
12. Takashima, H., K. Miyagai, T. Hashida, and V.C. Li, "A Disign Approach for the Mechanical Properties of Polypropylene Discontinuous Giber Reinforced Cementitious Composites by Extrusion Molding", *Journal of Engineering Fracture Mechanics*, Vol.70, No.7-8, 2003, pp.853~870.
13. Kojima, N., Sakata, T. Kanda, and M. Hiraishi, "Application of Direct Sprayed ECC for Retrofitting Dam Structure Surface Application for Mitaka-Dam in Concrete", *Japan Concrete Institute*, Vol.42, No.5, 2004.
14. Rokugo, K., *Experimental Use of ECC for Repair of ASR damaged Earth-Retaining Wall*, in Japanese, 2004.
15. Li, V.C., and M. Lepech, "Crack Resistant Concrete Material for Transportation Research Board", *83rd Annual Meeting Washington, D.C. Compendium of Papers CD ROM*, Paper 04-4680, 2004.
16. Kim, Y.Y., G. Fischer, and V.C Li, "Performance of Bridge Deck Link Slabs Designed with Ductile ECC", *ACI Structural Journal*, Vol.101, No.6, 2004, pp.792~801.