

# SHCC의 구조적 활용 및 시공

Structural Applications and Construction Practices of Strain-Hardening Cementitious Composites(SHCCs)

윤현도 Hyun-Do Yun  
충남대학교 건축공학 교수

조창근 Chang-Geun Cho  
조선대학교 건축학부 교수

## 1. 머리말

변형 경화형 시멘트 복합체(SHCC)는 일반 섬유보강 콘크리트(FRC)에 비하여 균열발생 이후의 균열제어능력을 크게 향상시켜 직접 인장 하중을 받는 상태에서 강재와 유사한 변형경화거동을 유도하여 에너지 흡수능력을 개선한 신개념의 건설재료라 할 수 있다. 본고에서는 SHCC를 구조적으로 활용하기 위한 시도로 수행된 연구결과 및 국내 신축 현장 적용 사례를 몇 가지 소개하고자 한다.

## 2. SHCC 개발 도입기의 국내외 구조적용 사례

변형 경화특성을 보이는 고성능 시멘트 복합체는 연구자들에 따라 ECC(Engineered Cementitious Composite), SHCC(Strain-Hardening Cementitious Composite) 또는 HPCFRCC(High Performance Fiber Reinforced Cement Composite)로 불리기도 한다.

국내에서도 2000년도 초반부터 많은 연구자들에 의해 이러한 재료의 특성 및 활용에 대한 다양한 사례가 소개되었다<sup>1-4)</sup>. SHCC의 대표적인 적용사례로는 <그림 1>과 같이 교량의 이음부, 사장교의 바닥슬래브, 건축물의 연결보 등이 있



(a) 미국 ECC 연결슬래브의 교량적용

(b) 일본 ECC 합성바닥슬래브의 적용

(c) 일본 ECC 커플링보의 시공

그림 1. 고인성시멘트 복합체 활용 구조적용 해외사례

다. <그림 1-(a)>는 ECC의 고인성 성능을 응용하여 단순 거더교의 연결슬래브 부분에 ECC를 적용한 사례이다. 2005년 미국의 미시간 주에서 실 시공 및 적용된 공법으로 기존의 신축이음을 ECC 연결 슬래브로 대체하는 방법으로 건조수축, 온도, 차량 활하중 등에 의해 발생하는 신축량을 ECC 연결슬래브가 모두 흡수하여 교량 사용연한 및 구조안전에 기여할 수 있는 것으로, 1축 인장 하에서 변형을 경화 거동을 보이는 ECC 재료의 높은 연성능력의 장점을 잘 활용한 사례이다. <그림 1-(b)>는 일본의 북해도 지역에서 2005년경에 가설된 사장교 형식의 Mihara 교량이다. ECC의 높은 인장 연성과 미세하게 제어되는 균열 특성을 이용하여 기존 대비 대략적으로 40%의 바닥판 중량을 절감함과 동시에 100년의 사용 연한을 목표로 시공되었다. <그림 1-(c)>는 일본 동경에 소재한 17층의 Glorio Roppongi 빌딩 설계에서 ECC를 철근과 함께 커플링 보(Coupling beam)에 최초로 도입하여 시공한 최초의 사례이다. SHCC의 재료적 특성 및 SHCC 개발 도입기의 활용 사례는 문헌<sup>1-4)</sup>을 통하여 정보를 얻을 수 있다.

### 3. 구조물의 단면복구 및 보강 적용 사례

SHCC의 장점을 응용하여 이를 구조물의 단면 보강이나 보수에 적용하는 많은 시도가 이루어져 왔다. SHCC로 기존 철근콘크리트의 부재를 보수하는 방법은 SHCC의 균열제어에 의해 외부 염해성분의 내부 침투를 억제하여 철근부식에 대한 저항성을 크게 향상시키는 것으로 Kobayashi 등<sup>5)</sup>에 의해 보고되고 있다. 철근콘크리트 보의 인장축 하부에 대하여 국부적으로 SHCC를 보강할 경우 발생할 수 있는 조기 계면탈락에 의한 취성파괴를 억제하고 철근콘크리트 보의 전단 성능을 보강하기 위하

여 철근콘크리트 보의 전 단면을 감싸는 보강방법이 김선우<sup>6)</sup> 및 Meda 등<sup>7)</sup>에 의해 시도되었다. 김선우 및 Meda 등의 연구결과로부터 SHCC를 활용하여 기존 철근콘크리트 보를 감싸는 보강 방법(Jacketing)은 휨 및 전단성능을 향상시킬 수 있는 유효한 방법이며, 연성증진에 크게 기여하는 것으로 나타났다. 시공의 편의성을 개선한 뿔칠 공법을 단면 복구 및 보강 공법에 활용한 적용예도 있다. 국내에서는 대전지역의 교각에 <사진 1>과 같이 뿔칠형 SHCC를 활용하여 단면 보강한 사례 등이 있으며, 최근까지 터널, 농수로 등 다양한 시설물의 보강 및 보수의 목적으로 활용되고 있는 수준에 있다<sup>8)</sup>.

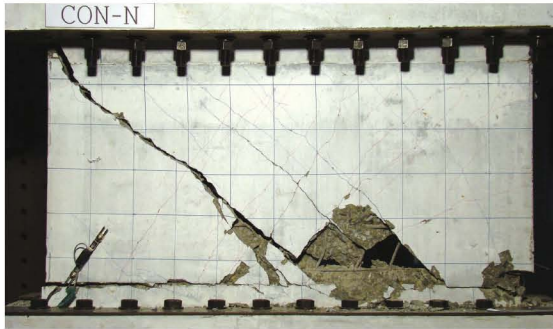
이상과 같이 SHCC를 활용하여 기존 철근콘크리트 구조물을 국부적으로 또는 전단면을 감싸서 보수 및 보강하는 방법으로 극한 상황의 균열손상 제어를 통해 구조 성능의 향상, 특히 연성 증진 등을 꾀하고, 공용중의 균열폭 저감을 통하여 내구성을 증진시킬 수 있을 것으로 기대된다.

### 4. 전단벽의 상세 단순화 사례

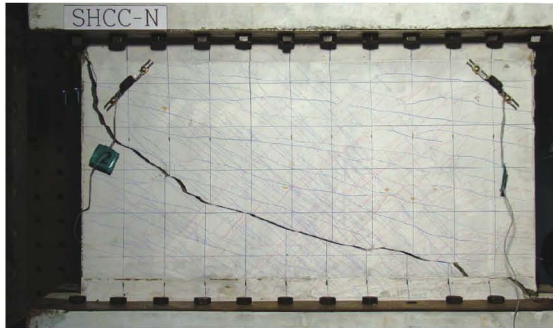
보통콘크리트 및 1.5% PE 섬유를 보강한 SHCC를 사용한 형상비 0.55인 전단벽에 대한 내진성능 평가실험<sup>9)</sup>에서 SHCC를 사용한 전단벽은 높은 전단력에 의해 벽판에 높은 인장응력이 유도되었음에도 불구하고 <사진 2>와 같이 매트릭스내의 보강 단섬유가 이에 효율적으로 저항하며 향상된 균열손상 제어능력을 보이는 것으로 보고되고 있다. Nagai 등<sup>10)</sup>의 연구에서 바벨형 단면을 갖고 형상비 0.58인 전단벽에 설계기준강도 50 MPa, 2% PVA 섬유로 보강된 SHCC 전단벽은 보통콘크리트 전단벽에 비하여 높은 전단강도를 보였으며, 균열제어성능도 우수한 것으로 보고하고 있다. Fukuyama 등<sup>11)</sup>도



사진 1. 뿔칠형 SHCC를 활용한 구조물의 국내 보강사례<sup>6)</sup>



(a) 콘크리트 전단벽



(b) SHCC 전단벽

사진 2. 전단벽의 최종파괴 양상<sup>9)</sup>

유사한 연구결과를 보고하였으며, 미시건대학의 Parra-Montesinos<sup>12)</sup> 등의 연구결과 HPFRCC는 낮은 형상비를 갖는 전단벽의 보강근을 대체할 수 있으며, 특히 최소전단보강근이하에서도 PE-HPFRCC를 적용시 층간변위비 2.5%, SF-HPFRCC의 적용시 층간변위비 1.5%까지 안정된 거동을 확보할 수 있다고 보고하고 있다. Cho 등<sup>13)</sup>은 고연성시멘트복합체의 2축전단특성모델 개발 및 이를 활용한 철근콘크리트 면내보강 특성에 관한 실험 및 해석모델 개발에 관한 연구를 수행하였다.

이상과 같이 SHCC를 활용하여 높은 전단응력을 받는 전단벽 또는 연결보 등의 복잡한 배근상세를 단순화하고 또한, 균열폭을 제어하여 에너지 소산능력 및 손상제어 능력을 크게 향상시킬 수 있는 것으로 보고되고 있다.

### 5. 기존 구조물의 내진보강 사례

〈그림 2〉와 같이 최근 비내진상세를 갖는 기존 철근콘크리트 건축물의 내진보강을 위한 요소 또는 내진보강요소와 기존 골조의 접합부 등에 SHCC의 적용을 위한 연구가 이루어지고 있다. 이러한 연구결과를 종합하여 보면 SHCC는 내진보강 및 제진특성을 함께 갖는 재료적

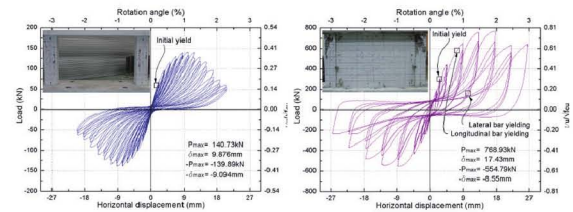
특성으로 내진보강요소로의 활용 가능성도 높게 평가된다. 또한 기존 철근콘크리트 구조물의 보강을 위하여 활용되는 내진보강용 철골가새 또는 제진장치와의 접합부에 SHCC를 적용할 경우 접합부의 복잡한 보강상세를 단순화하면서 구조적인 능력이 저감되지 않는 새로운 접합부 충전재로서의 활용 가능성도 확인되고 있다<sup>14)</sup>.

### 6. 국내 신축 건축물에 적용 사례

국내에서 SHCC를 실제 건축물에 최초로 적용된 사례로서는 고연성시멘트복합체 프리캐스트 내진 복합기둥공법이 있다. 내진 복합기둥공법에서는 품질확보, 친환경성 및 시공성을 고려하여 〈그림 3〉과 같이 부재를 프리캐스트 박스(PCa-HPFC)로 제작함으로써 시공단계



(a) SHCC 날개벽 요소에 의한 보강사례



(b) SHCC 끼움벽에 의한 보강사례



(c) 철골가새 및 기존 철근콘크리트 골조 접합부에 SHCC 적용 사례<sup>14)</sup>

그림 2. 비내진 상세를 갖는 철근콘크리트 골조의 보강을 위한 SHCC의 적용 사례

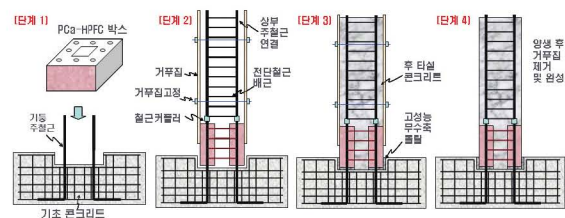
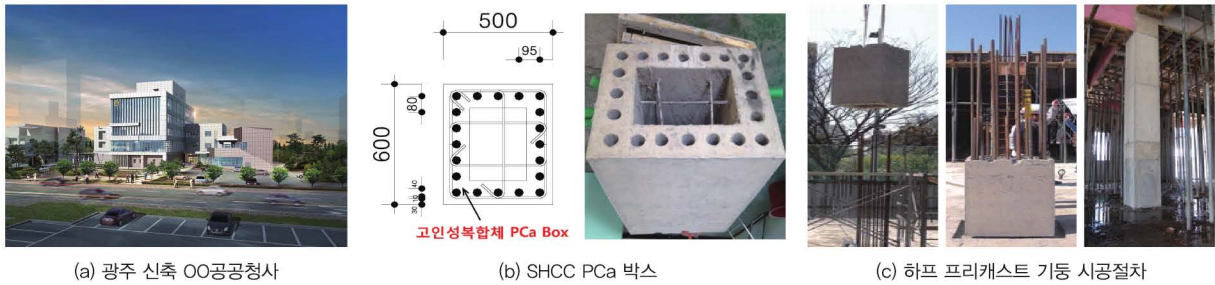


그림 3. 고연성시멘트복합체 이용 하프 프리캐스트 복합기둥공법의 시공절차



(a) 광주 신축 OO공공청사

(b) SHCC PCa 박스

(c) 하프 프리캐스트 기둥 시공절차

그림 4. 고인성시멘트복합체 하프 프리캐스트 복합기둥 시공사례

의 효율성과 공기 단축을 극대화한 시공방안을 마련하여 국내 특허 기술을 확보하였다<sup>15)</sup>. 배합은 고로슬래그와 플라이애시를 섞어 시멘트 사용량을 60%로 최소화한 배합을 통해 탄소저감형으로 제작하였다.

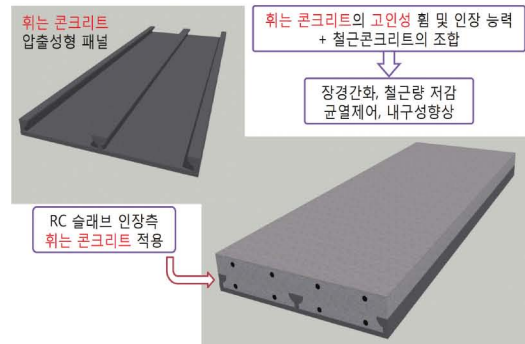
본 기술은 내진설계를 고려한 건축물 중요 기둥에 적용함으로써 철근량 및 단면크기를 줄일 수 있는 친환경 복합내진기둥 공법으로 광주광역시 서구 치평동에 소재한 신축 OO공공청사의 저층부에 내진 기둥으로 시공 반영되어 국내 최초로 신축공사현장에 고인성 콘크리트 기술을 구조부재로 설계 적용한 성공사례가 되었다(그림 4). 향후 고층빌딩의 기둥 및 교량의 교각에 확대 적용시 내진성능 확보와 동시에 철근량 감소 등의 경제성 향상이 기대된다.

SHCC의 신축 건축물 시공에 대한 두 번째 적용사례는 고인성 프리캐스트 복합 슬래브의 시공사례이다. 고인성시멘트복합체의 우수한 균열제어 및 인장 성능을 활용하여 슬래브의 사용 성능을 개선하고, 균열 제어 효과를 얻으며, 휨내력의 향상뿐만 아니라 내화능력 개선 등을 얻을 수 있는 동시에 무지주 및 무거푸집 방식으로 시공이 가능한 구조 시스템 공법이다. (그림 5)와 같이 고인성시멘트복합체는 압출성형 가공으로 제작될 경우 성형이 용이하고 섬유복합체의 배합 조직이 더욱 치밀하게 되어 고인성 변형능력 및 균열제어 효과가 더욱 우수하고 내구성이 향상되는 장점을 높일 수 있다. 이러한 장점을 활용해 압출성형 가공으로 리브를 가진 패널을 제작하여 이를 하프 프리캐스트 슬

래브 방식에 적용하는 연구가 수행되었다<sup>16)</sup>. 광주광역시 OO신축공공청사에 <사진 3>과 같이 고인성시멘트 복합체 적용 하프프리캐스트 복합슬래브 공법이 시공 반영되었다. 본 슬래브 공법은 시공시 거푸집 및 철제 지주 등이 전혀 사용되지 않는 무지주 및 무거푸집 공법으로서 가설공사비 절감을 극대화 할 수 있다.



(a) 고인성시멘트복합체 압출성형공정



(b) 복합슬래브의 구조개념

그림 5. 압출성형 고인성시멘트복합체 하프 PCa 복합 슬래브<sup>16)</sup>

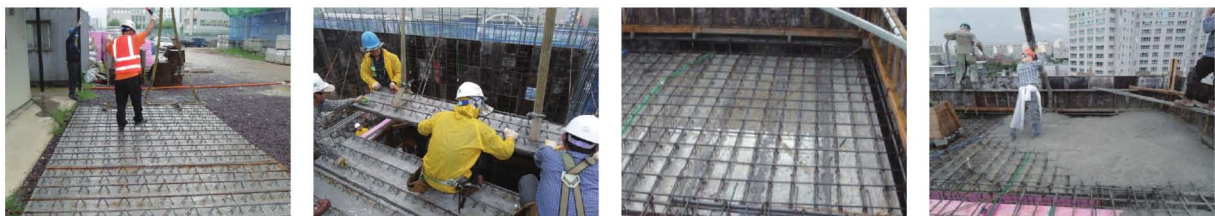


사진 3. 고인성시멘트복합체 적용 무지주·무거푸집 복합슬래브 시공현장

그 외 현재 국내에서 SHCC를 활용한 다양한 시도가 이루어지고 있으며, 국내 연구자가 수행한 이와 관련된 연구 성과 중 국내외 관련 논문집에 발표된 사례는 최근 발표된 논문<sup>17)</sup>을 참조하면 보다 많은 SHCC의 구조적인 적용 가능성을 이해하는데 도움이 될 것이다. □

담당 편집위원 : 신경준(충남대학교) kjshin@cnu.ac.kr

참고문헌

1. 윤현도, 양일승, 한병찬, 福山洋, 譚訪田晴彦, 고인성 시멘트 복합체의 최신기술: DFRCC 의 제조기술 및 특성, 콘크리트학회지, Vol. 16, No. 5, 2004, pp. 49 ~ 58.
2. 김윤용, 김정수, 김광련, 고인성 섬유 복합재료 ECC의 특성과 적용, 콘크리트학회지, Vol. 16, No. 5, 2004, pp. 64 ~ 72.
3. 이재연, 윤현도, 전에스더, 송동엽, 고성능 섬유보강 시멘트 복합체(HPFRC)의 특성과 적용사례, 시설안전, 2005, pp. 96 ~ 113.
4. 김윤용, 조창근, 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료 ECC의 개발 및 적용 현황, 한화건설 기술지, 2008.
5. Kobayashi, K., & Rokugo, K., "Mechanical Performance of Corroded RC Member Repaired by HPFRCC Patching", *Construction and Building Materials*, Vol. 39, 2013, pp. 139 ~ 147.
6. Kim, S. W. and Yun, H. D., "Crack-damage Mitigation and Flexural behavior of Flexure-dominant Reinforced Concrete Beams Repaired with Strain-hardening Cement-based Composite", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 42, No. 4, 2011, pp. 645 ~ 656.
7. Meda, A., Mostosi, S. and Riva, P., "Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beam with High-Performance Fiber-Reinforced Cementitious Composite Jacketing", *ACI Structural Journal*, Vol. 111, No. 5, 2014, pp. 1,059 ~ 1,068.
8. (주)PNR 시스템, (주)AMS 엔지니어링, 한국진단보강(주), 건설신기술 제563호 연장심사자료, 2012.
9. 강수원, 양해준, 어중걸, 윤현도, 슬릿 크기에 따른 철근 콘크리트 저형 전단벽의 이력거동, 한국콘크리트학회 가을 학술대회 논문집, Vol. 24, No. 2, 2012, pp. 67 ~ 68.
10. Nagai, S., Kanda, T., Maruta, M. and Miyashita, T., Shear Capacity of Ductile Wall with High Performance Fiber Reinforced Cement Composite, 1st fib Congress, 2002, pp. 767 ~ 774.
11. Fukuyama, H., Suwada, H. and Mukai, T., "Test on High-performance Wall Elements with HPFRCC", In G. Fischer, & V. C. Li(Eds.), *International RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites in Structural Applications*, RILEM Publications SARL, 2006, pp. 365 ~ 374.
12. Parra-Montesinos, G. J. and Kim, K. Y., "Seismic Behavior of Low-rise Walls Constructed with Strain-

hardening Fiber Reinforced Cement Composites", *In Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, 2004.

13. Cho, C. G., Ha, G. J. and Kim, Y. Y., "Nonlinear Model of Reinforced Concrete Frames Retrofitted by In-filled HPFRCC Walls", *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 30, No. 2, 2008, PP. 211 ~ 223.
14. Kim, S. H., Youn, G. H., Kim, Y. C., Kim, J. H. & Yun, H. D., "Development of Sprayable Strain-Hardening Cement Composite (SHCC) for Joint between Existing R/C Building and Seismic Retrofit Elements", *The Journal of Korean Institute of Educational Facilities*, Vol. 19, No. 5, 2012, pp. 29 ~ 36.
15. Cho, C.G., Kim, Y. Y., Feo, L. & Hui, D., "Cyclic Responses of Reinforced Concrete Composite Columns Strengthened in the Plastic Hinge Region by HPFRCC Mortar", *Composite Structures*, Vol. 94, 2012, pp. 2,246 ~ 2,253.
16. 조창근, 한병찬, 이정환, 김윤용, '압출성형 ECC 패널을 이용하여 제작된 복합바닥슬래브의 휨거동', 콘크리트학회 논문집, Vol. 22, No. 5, 2010, pp. 695 ~ 702.
17. Choi, W. C., Yun, H. D., Cho, C. G. and Feo, L., "Attempts to Apply High Performance Fiber-reinforced Cement Composite(HPFRCC) to Infrastructures in South Korea", *Composite Structures*, Vol. 109, 2014, pp. 211 ~ 223.



**윤현도** 교수는 충남대학교를 졸업하고 한양대학교에서 석/박사학위를 취득하였으며, 일본기후대학 토목공학과에서 변형경화형 시멘트 복합체(SHCC)를 활용한 철근콘크리트구조물의 균열제어라는 논문으로 박사학위를 취득하였다. 현재 충남대학교 건축공학과 교수로 FRC 및 SHCC의 구조적 활용에 대한 연구를 진행하고 있으며, 우리 학회 섬유보강콘크리트위원회 위원장 및 영문논문집(UCSM) 편집위원장을 역임하고 있다.  
wiseroad@cnu.ac.kr



**조창근** 교수는 경북대학교를 졸업하고, 일본의 동경공업대 건축학과에서 콘크리트 부재의 3차원유한요소 휨강도 평가에 관해 박사학위를 취득하였다. 첨단소재 고성능 콘크리트 부재 응용개발 및 복합 콘크리트 비선형해석 연구를 수행하고 있으며, 우리 학회(전)콘크리트전산해석위원회 위원장을 역임하였다. 현재 런던의 City University London 대학 방문교수를 함께 역임하고 있다.  
chocg@chosun.ac.kr