

## 패류 껍질층의 경계면을 모방한 고연성 시멘트 복합재료의 휨 거동

권기성<sup>1</sup>, 전재영<sup>2</sup>, 방진욱<sup>3</sup>, 김윤용<sup>4\*</sup>

### Flexural Behavior of Highly Ductile Cement Composites Mimicking Boundary Conditions of Shellfish Skin Layer

Ki-Seong Kwon<sup>1</sup>, Jae-Yeong Chun<sup>2</sup>, Jin-Wook Bang<sup>3</sup>, Yun-Yong Kim<sup>4\*</sup>

**Abstract:** In this study, the flexural performance of Highly Ductile Cement Composites(HDCC) mimicking boundary conditions of shellfish skin layer was evaluated. To improve ductility by mimicking the boundary skin layer structure of shellfish, the method of stratification by charging between precast panels using HDCC and the method of distributing PE-mesh to the interface surface were applied. Evaluation of flexural performance of layered cement composite materials mimicking boundary conditions of shellfish skin layer resulted in increased ductility of all test specimens applied with stratified cross-section compared to typical bending test specimens. The layered method by inserting PE-mesh showed excellent ductility. This is most likely because the inserted PE-mesh made an interface for separating the layers while the HDCC pillars in the PE-mesh gave adhesion between layers.

**Keywords:** bio-mimick, ductile cement composites, PE-mesh, flexural performance, energy absorption capacity

## 1. 서론

자연계에 존재하는 생물의 특징을 모사하여 사람에게 유용한 기술을 개발하는 생체모방공학은 21세기 많은 연구자들에게 뜨거운 관심을 받는 연구 분야이다. 미국의 Otto H. Schmitt에 의해 처음 소개된 생체모방공학은 자연계에 모든 생명체들이 가진 기능성 구조의 구현을 목표로 하며, 기존의 과학적, 공학적 한계를 극복하고 자동차, 로봇, 항공기, 의료기술 등과 같은 다양한 산업에 활용되고 있다(Choi et al., 2011). 이러한 생체모방공학은 건설 분야의 경우 구조물의 설계 및 모델 분야에 주로 적용되었고(Her and Kim, 2010), 건설재료의 개발 및 이를 활용하는 응용기술에 대해 체계적인 연구는 미비한 실정이다. 건설재료를 대표하는 콘크리트는 압축에 대한 저항성은 크지만, 취성적이며 휨과 인장에 대하여 취약한 성능을 나타낸다. 이러한 재료적 한계성을 구조적인 시스템으로 개선하기 위한 방안으로 패류 껍질층의 형상을 모방한 것이 생

체모방 기술을 적용한 대표적인 사례라고 할 수 있다. 패류 껍질층의 경우 구성성분이 시멘트계 재료와 유사한 탄산칼슘이 95% 이상으로 이루어져 있어 취성적인 특징을 가질 것으로 예상되지만 우수한 인장특성과 균열에 대한 저항성능을 나타내는 것으로 보고되고 있다. 이러한 이유는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 패류 껍질층은 CaCO<sub>3</sub>로 구성된 미세한 판상입자가 규칙적인 배열로 층상화 되어 있으며, 이러한 무기입자 사이에 유기물인 단백질이 접착제 역할로 결합되어 있는 유무기 복합체를 형성하고 있기 때문이다(Haupt and Mosbach, 2000; Sarikaya, 1994). 이러한 패류의 구조적 변형 메커니즘은 재료가 파괴되는 데 필요한 에너지의 양인 인성을 급격히 증가시킬 수 있는데 구성 재료의 인장 강도와 연성, 인장 변형 경화 거동 등의 다양한 조합이 인성을 확보할 수 있는 주요한 변수로 보고하고 있다(Kakisawa et al., 2011).

한편, 고연성 시멘트 복합재료(Highly Ductile Cement Composite, HDCC)는 마이크로역학과 파괴역학을 기반으로 시멘트 복합체에 체적비로 2% 내외의 합성섬유를 혼입하여 높은 연성을 가지도록 설계된 시멘트계 재료이다. HDCC는 1축 인장 하에서 섬유와 시멘트 매트릭스와의 가교작용 및 균열폭 제어를 통해 일반 콘크리트에 비해 우수한 연성과 높은 에너지 흡수 능력의 특징을 나타낸다.(Kim et al., 2007; Choi et al., 2018). 일반 콘크리트에 비해 초기균열 이후 변형률 경화거동을 발휘하며 인장강도를 일반적으로 인장변형률 2~5%의 범위 내에 확보할 수 있는 특징으로 재료자체의 높은 인성을 확보할 수 있

<sup>1</sup>정희원, 충남대학교 토목공학과 박사과정

<sup>2</sup>정희원, 충남대학교 토목공학과 석사과정

<sup>3</sup>정희원, (주)동양 기술연구소 연구원

<sup>4</sup>정희원, 충남대학교 토목공학과 교수

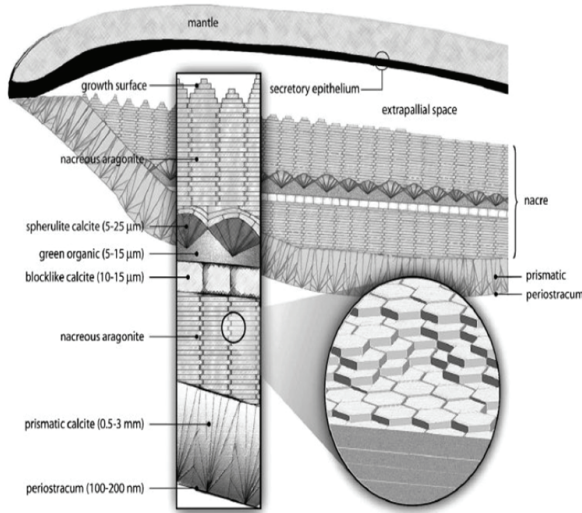
\*Corresponding author: yunkim@cnu.ac.kr

Department of Civil Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 34134, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2020년 3월 31일까지 학회로 보내주시면 2020년 4월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

**Table 1** Mix proportion of HDCC

W/B (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )							Fiber volume fraction (%)
	Water	OPC	BFS	FA	SS	SP	MC	
45	380	380	338	127	670	3.4	5.9	2



**Fig. 1** Microstructure of hierarchical structure of abalone shell(Kim, 2015)

어앞서 기술한 패류 생체모방 구조 시스템에 가장 적합한 재료로 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서는 HDCC를 패류 껍질 형상 구조 시스템 적용 가능성을 실험적으로 평가하고자 한다. 패류 껍질 경계면 구조를 모방하여 인성을 향상시키기 위해 두 가지 경계면 특성을 변화시킬 수 있는 방안을 검토하였다. 우선 프리캐스트 형식으로 제조된 패널 사이를 후 타설 HDCC로 충전하여 충상화 한 방법이다. 또한 PE-mesh를 경계면에 배근하여 Fig. 1과 같이 PE-mesh 공간을 통과하여 형성된 다수의 마름모 모양 기둥이 접착제 역할을 할 수 있는 방법이다. 두 가지 계면 특성 변화를 변수로 제작된 실험체의 파괴 거동과 하중-변형 관계, 에너지 흡수 능력을 휨 실험을 통해 평가하였다.

## 2. 사용재료 및 실험방법

### 2.1 사용재료

본 연구에서 시멘트 복합재료를 제조하기 위해 사용된 HDCC 배합은 Table 1과 같다. 주 결합재로 1종 보통포틀랜드 시멘트(OPC)를 사용하였고, 유동성 확보를 통한 작업성능 및 섬유 분산성능을 높이기 위하여 고로슬래그 미분말(BFS)과 플라이 애시(FA)를 혼입한 3성분계 배합을 활용하였다. OPC와 BFS 및

**Table 2** Properties of binder

Binder	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)
OPC	3.15	3,492
BFS	2.90	4,260
FA	2.22	3,420

**Table 3** Properties of Silica sand

Type	Diameter (mm)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	SiO <sub>2</sub> (%)	Moh's hardness
Silica Sand	0.1 ~ 0.3	2.60	96	7

**Table 4** Properties of PVA fiber

Density (g/cm <sup>3</sup> )	Diameter (mm)	Length (mm)	Tensile Strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)
1.3	0.04	12	1,580	37

FA의 물리적 특징은 Table 2와 같다. 골재로는 시멘트 매트릭스의 충전률을 높여 수축량을 저감시키기 위하여 규사(SS)를 사용하였고 합성섬유로는 PVA섬유를 사용하였으며 시멘트 매트릭스 체적의 2%를 혼입하였다. 골재 및 섬유의 물리적 특성은 Table 3과 Table 4에 각각 나타나 있다. 섬유의 효과적인 분산을 위하여 카르복실계의 고성능감수제(SP) 및 셀룰로오스계 분리제 감제(MC)를 혼화제로 첨가하였다. 목표 배합강도는 교량의 연결슬래브 및 접속슬래브 등과 같이 이 재료를 적용할 것으로 예상되는 부재의 일반적인 설계기준압축강도인 27 MPa를 만족하도록 배합강도로서 35 MPa의 압축강도 확보를 목표로 하였다.

### 2.2 HDCC 기초성능 평가

#### 2.2.1 1축 인장 시험

패류 껍질층의 경계면 구조 시스템에 적용하는 HDCC의 인장특성을 사전평가하기 위해 1축 인장 시험을 수행하였다(JSCE, 2008). 실험체 중앙부 80 mm 구간에 1축 인장력이 집중될 수 있도록 Fig. 2(a)의 아령형상으로 제작하였다. 1축 인장 시험은 최대용량 200 kN의 만능재료시험기를 활용하여 재하속도 0.1 mm/min으로 하중을 가력하였다. 하중 가력시 Fig. 2(b)와 같이 실험체 중앙부 좌우 측면에 변위계를 설치하여

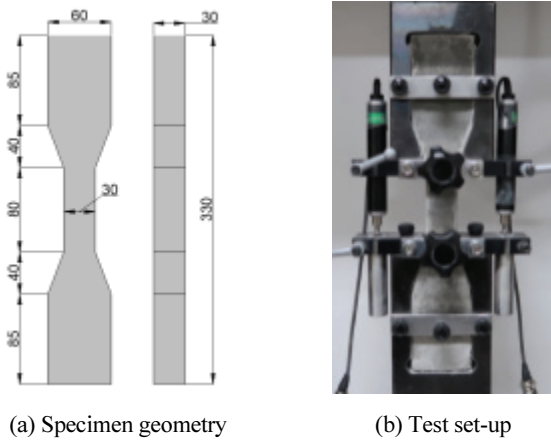


Fig. 2 Uniaxial tensile test specimen and test set-up

변형률을 측정하였다. 모든 실험체는 탈형 후 수중양생하여 재령 28일에 시험을 실시하였다.

### 2.2.2 압축강도 시험

HDCC의 압축강도는 KS F 2405에 준하여 평가하였다. 압축강도를 측정하기 위하여  $\varnothing 100 \times 200$  mm의 원주형 공시체를 제작하였다. 본 연구에서 제시하는 압축강도는 3개의 공시체의 평균값이다.

## 2.3 패류 껍질층 모방 실험체의 휨 실험

### 2.3.1 휨 실험체 제작

기초 성능을 확인한 HDCC를 활용하여 패류 껍질층의 경계면을 모방한 휨 실험체를 제작하는 일련의 과정을 본 절에서 기술하였다. 휨 실험체의 형상은 높이 100mm, 폭 150mm, 길이 550 mm로 제작하였다. 이는 일반적인 휨 실험체 보다 전단경간비를 증가시켜 완전한 휨 파괴 거동을 확보하기 위함이다. 휨 실험체는 총 4종류의 변수를 고려하여 제작하였다. 각 실험체 제작변수는 Table 5와 같으며, 시험체의 형상은 Fig. 3에 나타낸 바와 같다. Type-N 실험체는 굳지 않은 HDCC로 전체 제작된 것이며, Type-P 실험체는 기존 연구 (Kwon et al, 2018)를 통해 평가된 프리캐스트 HDCC 패널과 굳지 않은 HDCC를 층상화하여 제조한 실험체이다. Type-M7 및 Type-M15 실험체는 내경이 각각 7 mm, 15 mm인 PE-mesh를 경계면에 삽입하여 제작된 것이다. Photo 1은 실험체 제작 전경을 나타내고 있다. Type-P 실험체의 경우 패널의 간격을 일정하게 유지하기 위하여 측면을 노출면으로 하여 제작하였으며(Photo 1(a)), Type-N 및 Type-M7, M15의 경우 상부를 노출면으로 하여 제작하였다(Photo 1(b)). 모든 실험체는 각각 3개씩 제작하였다. PE-mesh의 물리적 특성은 Table 6에 나타내었고 형상은 Photo 2와 같다. 휨 실험은 실험체 탈형 후 수중

양생을 거쳐 재령 28일에 수행하였다.

### 2.3.2 휨 실험

패류 껍질층 경계면 형상을 모방하여 제작된 휨 실험체에 대하여 4점 재하방식의 휨 실험을 실시하였다. 지간거리는 400 mm, 2점 하중 가력점 사이의 거리는 100 mm로 단순 지지하였다. 휨 실험을 위해 최대용량 200 kN의 만능재료시험기를 사용하였고, 하중 가력속도는 0.5 mm/min로 균열부에 응력이 집중되어 시험체가 파괴될 때까지 하중을 가력하였다.

Table 5 Details of test variables

Specimen	Detail
Type-N	General bending test specimen
Type-P	Precast panel is inserted specimen
Type-M7	Using PE-mesh with an internal diameter of 7mm
Type-M15	Using PE-mesh with an internal diameter of 15mm

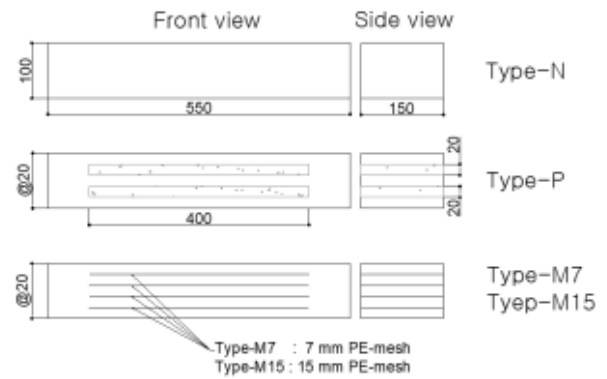
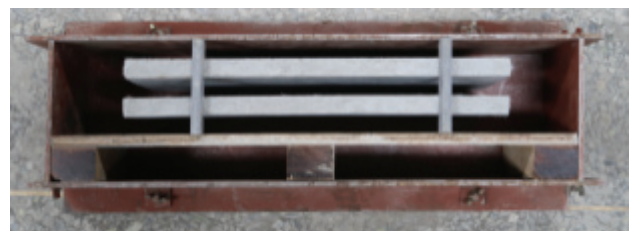


Fig. 3 Details of flexural specimens



(a) Placing panel of Type-P specimen



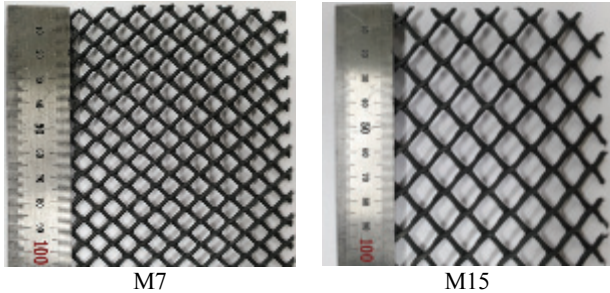
(b) Placing PE-mesh of Type-M7 specimen

Photo 1 Manufacturing of specimens



**Table 6** Properties of PE-mesh

No.	Mesh size (mm)	Width (mm)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Tensile strength (MPa)
M7	7.3×7.7	3	0.91	33
M15	12.5×15	4.15		



**Photo 2** Details of PE-mesh



**Photo 3** Bending test set-up

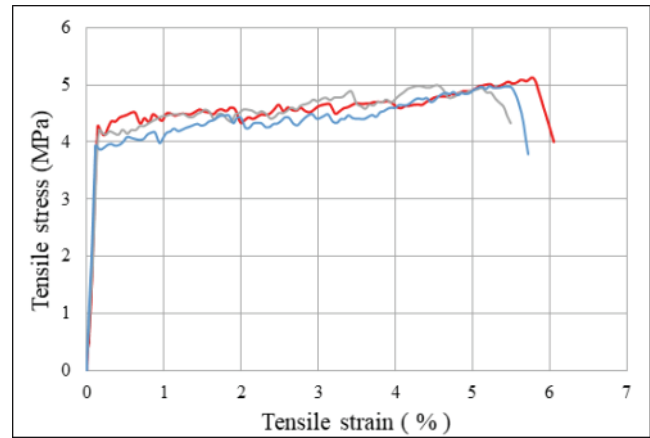
시험체 중앙부 양단에 변위계를 설치하여 하중재하에 따른 처짐량을 측정하였다. 휨 실험 전경은 Photo 3과 같다.

### 3. 실험결과

#### 3.1 HDCC 재료 특성 평가

##### 3.1.1 1축 인장 시험

본 연구에서 활용한 HDCC의 1축 인장 시험 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 첫 번째 응력저하가 발생된 시점의 강도를 초기균열강도로 정의하였으며, 인장강도는 최대 인장응력으로 정의하였다. 인장변형성능은 최대 인장응력시의 변형률 값으로 정의하였다. 3개의 실험체는 평균 4.1 MPa에서 초기균열이 발생하였으며, 초기균열 발생 후 응력이 증가되는 변형률 경화거동을 나타내었다. 또한, 변형률 경화거동이 나타나는 과정에서 응력저하 현상이 발생되었는데 이러한 응력저하는



**Fig. 4** Tensile stress-strain curve of HDCC

**Table 7** Compressive strength of HDCC

NO.	1	2	3	Average
Compressive strength (MPa)	37.8	39.3	38.2	38.4

발생된 미세균열에 의하여 변위제어 방식으로 하중이 가력될 시 응력이완이 발생하기 때문이다. 즉, 응력저하의 발생 횟수는 미세균열의 발생수를 의미한다. 인장강도 및 인장변형성능은 각각 평균 5.0 MPa 및 5.5 %로 나타났다.

##### 3.1.2 압축강도 시험

사용재료의 압축강도 시험 결과는 Table 7에 나타내었다. 평균 압축강도는 38.4 MPa로 인장강도와 더불어 충분한 압축강도를 확보할 수 있는 것으로 나타났고 일반 콘크리트 공시체의 취성적 파괴거동과 다르게 압축 파괴시 섬유 가교작용을 통해 실험체의 형상을 유지하였다.

#### 3.2 휨성능 평가 결과

##### 3.2.1 균열패턴

패류 껍질층 경계면 형상을 모방하여 제작된 실험체의 실험 결과 관찰된 균열패턴을 Photo 4에 나타내었다. Type-N 실험체의 경우 하중이 증가함에 따라 초기 선형구간 이후 실험체 중간하부 인장부에서 초기균열이 발생되었으며 하중이 증가함에 따라 실험체 인장연단에 다수의 미세균열이 발생되었다. 또한, 변형률 경화거동과 함께 처짐량이 증가함에 따라 발생된 다수의 미세균열은 순수 휨 구간내 압축연단으로 진행되었으며, 이후 하나의 균열에 응력이 집중되어 균열폭이 증가하였다. 기존연구(Lee et al., 2012; Hyun et al., 2018; Shin et al., 2019)에서 나타난 바와 같이 최종 파괴되는 일반적인 HDCC의 파괴거동을 나타내었다.

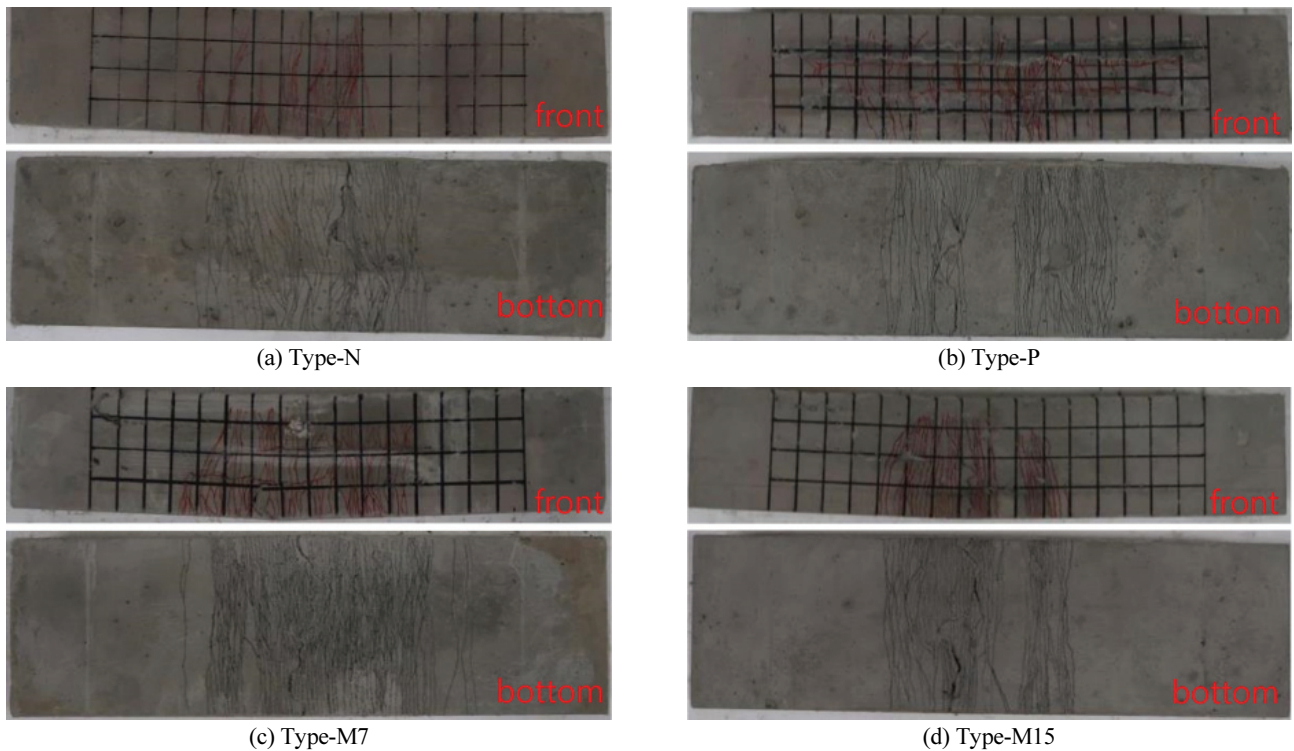


Photo 4 Crack patterns of specimens

한편, 프리캐스트 패널을 삽입하고 굳지 않은 HDCC를 패널 사이 충전하여 층상화한 방법으로 제작된 Type-P 실험체의 경우 Type-N 실험체와 동일하게 실험체 중앙 인장부에서 초기균열이 발생하였다. 그러나 초기균열 발생 이후 HDCC와 패널 경계부가 강하게 부착되어 있는 부분에서는 HDCC에서 발생된 휨 균열이 패널까지 연결되는 Type-N 실험체와 유사한 반사균열이 관찰되었지만, 부착성능이 상대적으로 취약한 경계면에서 HDCC와 패널의 분리 및 슬라이딩이 관찰되었다. 미세균열이 층간 경계면에 도달할 때, 층 분리가 일어나면서 반사균열은 발생하지 않았다. 그 이후 처짐이 증가하면서 각 층의 하부에서 다수의 미세균열이 새로이 발생하였고, 최종 처짐량은 Type-N 실험체에 비하여 큰 것으로 측정되었다. 이와 같이 층의 하부에 다수의 미세균열이 새로이 발생하는 현상은 지간 내의 순수 휨 구간에서 집중적으로 발생되었다. 또한 Type-N 실험체와는 다르게 순수 휨 구간 외측의 전단지간에서도 다수의 휨 균열이 관찰되었다. 이는 순수 휨 구간에서 층 분리가 일어나면서 휨 균열 집중 현상이 나타나지 않아 상대적으로 변형률이 큰 휨 구간 외측의 전단지간에서도 다수의 휨 균열이 발생한 것으로 판단된다.

Type-M7 시험체도 순수 휨 구간에서 초기 휨 균열이 발생한 이후 인장부에서 다중 미세균열이 발생하기 시작하였다. 하중이 증가함에 따라 하부 층의 다중 미세 균열이 PE-mesh 경계면

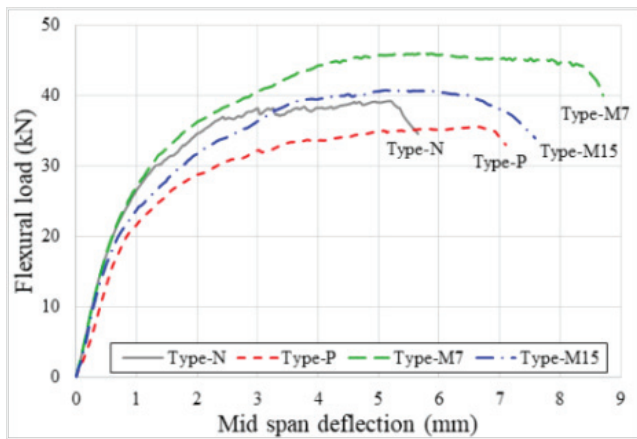
을 관통하여 다음 층에 반사균열을 형성시키는 균열패턴이 발생하였다. 하중과 처짐이 더욱 증가함에 따라 반사균열들이 상부로 계속 진전하였는데, 이때 하층 경계면부터 수평균열이 관찰되기 시작했다. 그러나 Type-P 실험체와는 다르게 경계면에서 층간 분리현상은 관찰되지 않았다. Type-M7 실험체의 최종 파괴는 Type-N 실험체와 동일하게 하나의 균열폭이 확장되면서 하중이 감소하여 파괴되는 전형적인 휨파괴 거동을 나타내었다. Type-M15 실험체의 경우 Type-M7 실험체와 유사한 초기 균열 거동을 보였으나 하중이 증가함에 따른 파괴거동에는 차이가 관찰되었다. 또한 Type-M7 실험체와 다르게 수평균열은 관찰되지 않았고, 하부 층의 균열이 PE-mesh 경계면을 관통하여 상부로 반사 균열이 나타나는 현상을 보였다. 처짐량이 증가함에 따라 하나의 균열폭이 증가하면서 최종 파괴에 이르렀고, HDCC로 전체를 일체화하여 타설한 Type-N 실험체와 유사한 휨 균열 패턴을 나타내었다.

### 3.2.2 하중-처짐 관계

각 실험체의 대표적인 하중-처짐 곡선을 Fig. 5에 나타내었다. 선형구간을 지나 초기균열이 발생한 후 처짐량이 급격하게 증가하기 시작하였는데, Table 8에 나타낸 바와 같이 초기 균열 하중은 Type-P 실험체가 가장 낮은 18.8 kN으로 측정되었고 나머지 3개 실험체는 20.4 ~ 21.6 kN으로 유사한 값을 나

**Table 8** Flexural test results(average value)

Specimen	Initial cracking		Ultimate state		Energy absorption (kN·mm)
	load (kN)	Deflection (mm)	load (kN)	Deflection (mm)	
Type-N	21.0	0.65	37.1	5.1	175.2 ± 3.2
Type-P	18.8	0.63	35.7	6.7	205.5 ± 8.1
Type-M7	21.6	0.67	45.0	8.0	326.5 ± 4.6
Type-M15	20.4	0.72	40.6	7.2	256.6 ± 4.9



**Fig. 5** Typical load vs. mid-span deflection curves

타내었다. 초기균열 하중뿐만 아니라 초기 강성도 Type-P 실험체가 가장 작은 값을 나타내었다. 이는 후 타설 HDCC와 패널 경계면의 부착이 초기 휨 균열 발생 이전에 이미 부분적으로는 손실되었다는 것을 보여주는 결과이다. 최고 하중은 Type-M7 실험체가 평균 45.0 kN으로 가장 큰 값을 나타냈으며, Type-M15 > Type-N > Type-P의 순서로 크게 측정되었다. Type-N 실험체에 비해 PE-mesh를 이용한 경계면 모방 기법이 휨강도를 1.09 배 ~ 1.21 배 증가시켰고, 프리캐스트 패널을 적용한 방법은 휨강도를 4% 감소시킨 것으로 나타났다. 이러한 결과를 통해 경계면의 부착 성능이 층상 부재의 휨강도에 직접적인 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

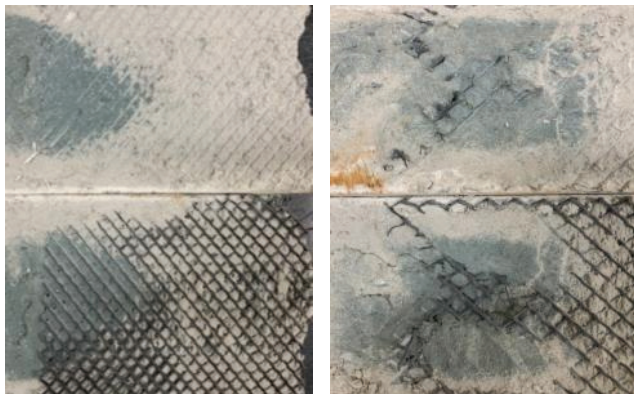
실험체의 최대 처짐량은 Type-M7 > Type-M15 > Type-P > Type-N 순으로 측정되었다. 경계면에 균열이 발생한 실험체가 경계면에 균열이 발생하지 않은 실험체에 비하여 큰 처짐량을 나타내었고, HDCC 일체로 제작된 Type-N 실험체가 가장 작은 처짐량을 나타내었다. 따라서 층상화된 단면의 실험체는 하중 전달 능력의 차이에도 불구하고 일체 타설 부재에 비하여 연성이 증가됨을 알 수 있다.

Photo 5는 휨 실험 후 파괴된 Type-M7과 M15 실험체의 경계면을 보여준다. mesh 체눈에 생성된 다수의 각주형 HDCC는 경계면에 부착력을 형성하는 역할을 하며, 이는 육각형 판

형 무기물이 단백질로 수직 연결된 패류 경계형상과 유사하다. Type-M7 실험체는 mesh가 촘촘하여 Type-M15에 비하여 효과적으로 층을 분리시키는 역할을 하였기 때문에 경계면 균열이 발생한 것으로 판단된다. 반면, mesh 체눈의 크기가 섬유 길이에 비하여 작기 때문에 mesh를 통과하면서 생성된 각주형 HDCC의 섬유들이 경계면에 직교하는 방향으로 주로 배열되었을 것으로 사료된다. 이로 인하여 HDCC의 높은 변형능력이 충분히 발휘되면서 경계면의 부착이 확보되어 계면의 슬라이딩을 효과적으로 억제하였을 것으로 판단된다. 이러한 결과로 Type-M7 실험체가 가장 높은 휨강도와 처짐량을 나타냈다고 판단한다. 반면, Type-P 실험체의 경우, 중앙부 처짐은 크다 하더라도 층 분리와 경계면 슬라이딩을 억제할 수 없기 때문에 하중 전달 능력을 확보하기에 충분한 층간 부착을 갖지 못하는 것으로 판단된다. 한편, Type-M15 실험체의 경우 Type-N 실험체에 비하여 처짐량이 크게 측정되었으나, Type-N 실험체에서 관찰되었던 반사균열 패턴이 나타났다. 이는 각주형 HDCC 크기가 Type-M7 실험체에 비하여 크기 때문인 것으로 판단된다. Type-M15 실험체는 Type-M7 실험체에 비하여 mesh가 성기어 층을 분리시키는 효과가 낮았을 것으로 사료된다. 또한 mesh 체눈의 크기가 15 mm로서 PVA섬유 길이보다 길기 때문에 섬유의 배열이 3차원의 무작위로 분포되어 각주형 HDCC의 재료 특성이 Type-N 실험체와 동일하였을 것으로 추정된다. 추후 mesh 크기를 변수로 경계면의 섬유 분포와 경계면 부착의 관계를 구명하는 추가적 연구가 필요할 것으로 판단된다.

휨 실험을 결과를 통해 측정된 휨 하중과 중앙부 처짐값을 이용하여 실험체의 에너지 흡수 능력을 계산한 결과는 Fig. 6과 같다. 에너지 흡수 능력은 휨 하중과 처짐 그래프에서 최대 하중의 90%로 하강된 변위까지 면적으로 정의하였다(Soltan et al., 2014). Type-M7 실험체가 평균 326.5 kN·mm으로 가장 높은 에너지 흡수 능력을 보였으며 이는 기준시험체인 Type-N 실험체보다 1.86 배 높은 결과이다. 또한, Type-M15 및 Type-P 실험체는 각각 Type-N 실험체 보다 1.46 배 및 1.17 배 높은 에너지 흡수 능력을 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 휨 하중-처짐 곡선의 면적은 하중의 크기와 처짐량의 곱으로





(a) Type-M7

(b) Type-M15

Photo 5 Fracture section of interface

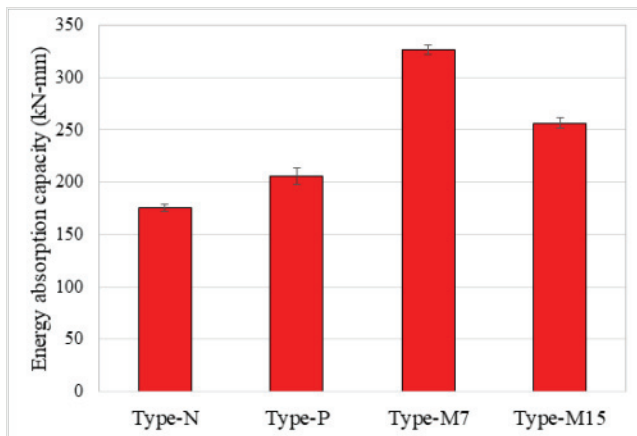


Fig. 6 Energy absorption capacity

서 그 크기에 비례한다. 이에 기인하여 상대적으로 높은 휨 하중과 처짐량을 보인 Type-M7 실험체의 에너지 흡수 능력이 가장 크게 나타났다. 이는 실험체 내부에 삽입된 PE-mesh가 층을 분리하는 경계면 역할을 하고, PE-mesh 체눈 내의 각주형 HDCC는 경계면에 강한 부착을 주었기 때문이라 판단된다. 4종류의 실험체에 대하여 에너지 흡수 능력의 표준편차를 분석한 결과 패널을 삽입한 Type-P 실험체의 표준편차가 가장 높게 나타났는데, 이는 패널과 후 타설 HDCC 경계면의 수평전단 발생 정도에 따른 큰 차이가 발생하였기 때문이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 HDCC를 패류 껍질층 경계면 형상 구조 시스템 적용 가능성을 실험적으로 평가하였다. 패류 껍질층 경계면 구조를 모방하여 프리캐스트 형식으로 제조된 패널 사이를 HDCC를 충전한 실험체와 PE-mesh를 HDCC층의 경계

면에 배치한 실험체 등 2가지 경계면 특성을 고려하여 제작한 4종류 휨 실험체의 성능을 평가하였다. 이 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 본 연구에서 활용한 HDCC 기초 성능 평가 결과 평균압축강도는 평균 38.4 MPa로 목표 배합강도를 만족하였으며, 1축 인장 시험 결과 평균인장강도 및 인장변형성은 각각 5.0 MPa 및 5.5 %로 나타났다.
- 2) 휨 실험을 통하여 휨 강도와 연성을 평가한 결과, 층이 없는 실험체인 Type-N 실험체에 비하여 층상 구조를 갖고 있는 실험체의 중앙부 처짐량이 더 크게 나타났다. 한편, Type-P 실험체는 Type-N에 비하여 중앙부 처짐이 크게 측정되었으나, 경계면의 부착이 부족하여 층분리와 경계면슬라이딩을 억제할 수 없어 가장 낮은 하중 전달 능력을 나타내었다. 따라서 하중 전달 능력 증진을 위해서는 경계의 부착력 확보가 반드시 필요한 것으로 나타났다.
- 3) PE-mesh를 활용한 층상화 방법은 mesh를 관통하는 각주형 HDCC가 층 사이의 경계면을 연결하는데, 이는 육각형 모양의 판형 무기물이 단백질로 수직 연결된 패류 경계형상과 유사하다. 이 중에서 Type-M7 실험체가 가장 높은 휨강도와 처짐량을 나타내었다. 이는 실험체 내부에 삽입된 PE-mesh가 층을 분리하는 경계면 역할을 하고, PE-mesh 체눈 내의 각주형 HDCC가 경계면에 충분한 부착을 주었기 때문이라 판단된다. 또한 Type-M7 실험체의 에너지 흡수 능력은 평균 326.5 kN·mm로 비교 실험체인 Type-N에 비하여 1.86 배 높게 측정되었다.
- 4) Type-M15 실험체는 Type-M7 실험체에 비하여 mesh의 크기가 커서 층 분리 효과가 낮은 것으로 판단된다. 또한 mesh 체눈의 크기가 15 mm로서 PVA섬유 길이보다 길기 때문에 섬유의 배열이 3차원의 무작위로 분포되어 각주형 HDCC의 재료 특성이 Type-N 실험체와 유사하였을 것으로 사료된다. 추후 mesh의 크기를 변수로 경계면의 섬유 분포와 경계면 부착의 관계를 구명하는 추가적 연구가 필요할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

이 논문은 2015년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2015R1A5A1037548).

## References

1. Choi, Y. C., Choi, J. S., and Cho, Y. W., (2011), Biomimetic Functional Materials: Find a Solution from Mother Nature, *Polymer Science and Technology*, The Polymer Society of Korea, Vol. 22, No. 5, pp.460-466.
2. Her, K. A., and Kim, C. K., (2010), A study on the Compositional method of Architectural applied of Biomimicry, *Proceedings of the Korean Institute of Interior Design*, Korean Institute of Interior Design, Vol. 12, No. 1, pp. 132-135.
3. Kim, B. Y., (2015), Fabrication of bio-inspired composites that mimic structure of nacre and its characterization, Master's thesis, Hanyang University, pp.5-6.
4. Haupt, K., and Mosbach, K., (2000), Molecularly Imprinted Polymers and Their Use in Biomimetic Sensors, *Chem, Rev.*, Vol.100, pp. 2495-2504.
5. Sarikaya, M., (1994), An introduction to biomimetics: A structural viewpoint, *Micro. Res. Tech.*, Vol.27, pp. 360-375.
6. Kakisawa, H., and Sumitomo, T., (2011), The toughening mechanism of nacre and structural materials inspired by nacre, *Sci. Technol. Adv. Mater.*, Vol.12, No.6, 064710.
7. Kim, J. K., Kim, J. S., Ha, G. J., and Kim, Y. Y., (2007), Tensile and Fiber Dispersion Performance of ECC Produced with Slag Particles, *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, No. 7, pp. 1096-1105.
8. Choi, J. I., Park, S., Bang, B. Y., and Kim, Y. Y., (2018), Tensile Properties of Polyethylene Fiber-Reinforced Highly Ductile Composite with Compressive Strength of 100 MPa Class, *Journal of the Korea Concrete institute*, *Korea Concrete institute*, Vol. 30, No. 5, pp. 497-503.
9. Japan Society of Civil Engineers (2008): Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with multiple fine cracks (HPFRCC), Concrete Engineering Series, Vol. Concrete L.
10. Kwon, K. S., Bang, J. W., and Kim, Y. Y., (2018), Flexural performance of Multi-layered Fiber-reinforced Cement Composites with Diverse Interface Shape, *Journal of the Korea Concrete institute*, *Korea Concrete institute*, Vol. 30, No. 4, pp. 429-435.
11. Nelson, P. K., Li, V. C., and Kamada, C., (2002), Fracture toughness of microfiber reinforced cement composites, *Journal of Materials in Civil Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.98, No.5, pp. 384-391.
12. Lee, B.Y., Han, B.C., Cho, C.G., and Kim, Y.Y., (2012), Flexural Performance and Fiber Distribution of an Extruded DFRCC Panel, *Computers and Concrete*, Vol. 10, No. 2, pp. 105-119.
13. Hyun, J.H., Lee, B.Y., and Kim, Y.Y., (2018), Composite Properties and Micromechanical Analysis of Highly Ductile Cement Composite Incorporating Limestone Powder, *Applied Sciences*, Vol.8, Issue 2, 151; doi:10.3390/app8020151, 10 pages.
14. Shin, K. J., Lee, S.C., and Kim, Y.Y., (2019), High Ductile Fiber Reinforced Concrete with Micro Fibers, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, *Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 23, No. 2, pp. 92-98.
15. Soltan, D. G., Ranande, R., and Li, V. C., (2014), A Bio-inspired Cementitious for High Energy Absorption in Infrastructural Applications, *Blucher Material Science Proceedings*, MM&FGM 2014, Vol. 1, No. 1.

Received : 12/26/2019

Revised : 12/31/2019

Accepted : 01/06/2020

---

**요 지** : 본 연구에서는 패류 껍질의 경계조건을 모사한 고연성 시멘트 복합재료의 휨 성능을 평가하였다. 패류 껍질층 경계면 구조를 모방하여 프리캐스트 형식으로 제조된 패널 사이를 후 타설 HDCC로 충전한 실험체와 PE-mesh를 HDCC층의 경계면에 배치한 실험체 등 2가지 경계면 특성을 고려하여 제작한 4종류 실험체의 휨 성능을 평가하였다. 패류 껍질의 경계조건을 모사한 고연성 시멘트 복합재료의 휨 성능 평가 결과 일반적인 휨 시험체 대비 충상화 단면을 적용한 모든 실험체의 연성이 증가하였다. 특히 PE-mesh를 삽입하여 충상화한 방법이 가장 우수한 연성을 나타내는 것을 확인하였다. 이는 삽입된 PE-mesh가 층을 분리하는 경계면 역할을 하고, PE-mesh 체눈 내의 각주형 HDCC는 층과 층 사이의 부착을 견고히 하는 역할을 하였기 때문이라고 사료된다.

**핵심용어** : 생체모방, 고에너지 흡수 시멘트 복합재료, PE-mesh, 휨성능, 에너지 흡수 능력

---