

## 고인성 복합체로 보강한 조적부재의 휨 거동 평가

양승현<sup>1</sup>, 김선웅<sup>2</sup>, 김재환<sup>3</sup>, 강석표<sup>4</sup>, 홍성욱<sup>5\*</sup>

# Evaluation of Flexural Behavior of Masonry Members Reinforced with Engineered Cementitious Composite

Seung-Hyeon Yang<sup>1</sup>, Sun-Woong Kim<sup>2</sup>, Jae-Hwan Kim<sup>3</sup>, Suk-Pyo Kang<sup>4</sup>, Seong-Uk Hong<sup>5\*</sup>

**Abstract:** This paper is a basic study to evaluate the possibility of earthquake-resistant reinforcement by reinforcing engineered cementitious composite in masonry members. In order to examine the performance according to the fiber mixing rate of the engineered cementitious composite, a test specimen was prepared according to the formulation design, and flow ability, compressive strength, flexural strength, length change rate, and direct tensile strain were measured. In addition, non-reinforced masonry members, masonry members reinforced with engineered cementitious composite, and masonry members in which glass fibers and wire mesh were separately reinforced with engineered cementitious composites were manufactured, and flexural strength and maximum displacement were measured. All specimens reinforced with engineered cementitious composite showed more than 16 times the effect of maximal strength compared to that of no reinforcement, and as a result of examining the crack shape, the energy dissipation ability was excellent, confirming the possibility of seismic reinforcement.

**Keywords:** Engineered Cementitious Composite, Reinforced, Masonry, Seismic, Disaster

## 1. 서론

경주지진(2016.09.12.) 및 포항지진(2017.11.15) 피해로 인하여 건축물 내진설계 및 보강이 사회적 관심사로 대두되고 있다. 1988년에 도입된 내진설계 관련 기준은 2005년 개정을 통해 적용대상 건축물을 확대하였고, 2017년 포항 지진 이후 2층 이상 또는 200 m<sup>2</sup> 이상의 모든 대상 건축물에 내진설계 적용이 의무화되었다(Sung and Kang, 2019; Kim et al., 2019). 하지만, 통계청(2016년)에 따르면 민간건축물 총 698만 6,913동 중 내진 성능이 확보된 건축물은 6.8%인 47만 5,335동에 불과하고, 많은 부분을 차지하고 있는 중·저층 건축물은 내진설계가 되어 있지 않다. 공동주택은 내진 성능 확보율이 42.8%로서 비교적 높은 편이나, 단독주택은 내진 성능 확보율이 3.4%로서 낮은 편이다. 소방청(2011년)에 따르면 지진 위험성이 큰 조적조 건축물은 전체 건축물 중 40% 가량이며

이 중 20년 이상 된 노후 건축물은 80%로 보고되었다. 또한, 서울시가 관리하는 재난관리 시설물 중 조적조가 차지하고 있는 비율은 D급에서 44.6% E급 85.7%로 모두 붕괴위험이 있는 것으로 나타났으며, D급의 경우 담장과 같은 비 건축물을 제외하면 재난관리 시설물 중 대부분이 조적조이다(Chang and Seo, 2011). 최근 지진 발생이 빈번히 이루어짐에 따라 지진 발생시 큰 피해가 예상되는 기존 조적조 건축물의 내진보강이 시급한 실정이다. 내진보강방안으로 노후 콘크리트 구조물의 보수·보강재료로 사용이 시도되고 있는 고인성 복합체는 비닐론(PVA)섬유나 폴리에틸렌(PE) 섬유 등의 강섬유나 유기섬유를 체적으로 1~2% 함유하고 있어 변형경화거동과 멀티플크랙 특성을 발현한다(Han et al., 2006; Cho et al., 2011; Lee et al., 2019). 이러한 특성으로 인해 균열 발생 후에도 내구성, 물질투과저항성 등을 유지할 수 있어 최근까지 연구가 진행되고 있다(Hyun et al., 2015).

(Choi et al., 2010)의 연구에서는 고인성 복합체 뿔철을 활용한 비보강 조적 벽체 보강 성능 평가 실험을 통하여 조적 벽체의 연성, 강성 및 강도 측면에서 나타난 경향을 보였고 와이어 메쉬를 통한 현저한 성능의 향상이 나타나지 않았으나 에너지 소산 능력에 있어서 벽체의 균열 발생 정도와 와이어 메쉬 증가로 인한 우수한 성능 향상을 나타내었다. 벽체 강성의 증가는 벽체의 강도 증진에 도움을 주었으나 와이어 메쉬를

<sup>1</sup>정회원, 우석대학교 건설공학과 석사과정

<sup>2</sup>정회원, (주)에이엠에스엔지니어링 기업부설연구소 소장

<sup>3</sup>정회원, (주)에이엠에스엔지니어링 대표이사

<sup>4</sup>정회원, 우석대학교 건축학과 교수

<sup>5</sup>중신회원, 우석대학교 건축학과 교수, 교신저자

\*Corresponding author: suhong@woosuk.ac.kr

Department of Architecture, Woosuk university, Chungbuk 27841, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2021년 9월 30일까지 학회로 보내주시면 2021년 10월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

결속하기 위한 앵커가 파괴를 일으키는 주 원인이 되어 벽체 강성의 상승에 따른 별도 결속 방안이 필요하였다. (Yun et al., 2005)의 연구에서는 고인성 시멘트 복합체의 인장 특성을 평가하기 위하여 재료 및 부재수준에서 직접 인장실험을 수행하였다. 철근으로 보강된 고인성 시멘트 복합체 및 Ductal 인장 시험체는 보통 콘크리트에 비해 균열 발생 이후에도 급격한 강성저하를 보이지 않았으며, 재료수준의 직접 인장강도에 비례하여 주근항복강도가 증가하였다. 이는 고인성 복합체 및 Ductal 시험체의 인장 강성이 우수했기 때문에 판단된다. 일반 콘크리트의 인장강성 모델은 고인성 복합체의 인장 강성효과를 과소평가함으로써 고인성 복합체의 인장강성 특성을 묘사할 수 있는 모델의 제안이 요구되었다. (Lee et al., 2009)의 연구에서는 압축성형 고인성 복합체 패널의 섬유 분포특성을 파악하여 휨 성능에 미치는 섬유 분포의 영향에 관하여 연구하였다. 섬유 분산성의 경우 휨 인성이 큰 순서대로 우수한 것으로 나타났으며 섬유 방향성의 경우 실험체 크게 차이가 발생하지 않았다. 동일한 압축성형 공정을 적용하더라도 매트릭스 배합에 따라 섬유 분포 특성이 상이하게 나타나 제조 공정과 함께 재료의 배합비와 결과적으로 나타나는 섬유 분포 특성을 함께 고려해야 할 것으로 판단되었다. (Hyun et al., 2020) 연구에서는 철근콘크리트 보의 지간 중앙부를 고인성 복합체로 치환하였으며, 치환길이 변화에 따른 보 부재의 휨 성능을 실험하였다. 휨 실험 수행 결과 고인성 복합체 매트릭스 내부에 혼입된 보강섬유가 인장하중 조건에 다중 미세 균열을 발생시켜 균열 폭 제어를 통한 변형률 경화거동을 보여 우수한 연성능력을 발휘하였다. 고인성 복합체를 소성힌지부에 적용한 경우에는 곡률이 집중되는 현상이 기존 철근 콘크리트에 비하여 줄어들게 되므로 이를 고려하여 부재 설계가 이루어져야 할 것으로 판단되었다. 이처럼 고인성 복합체의 특성 단위에 관한 연구는 선행되었지만, 순수 조적부재에 고인성 복합체를 보강하여 휨 실험 통한 내진성능 연구에 관한 연구는 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구는 고인성 복합체의 조적조 건축물 내진보강 가능성을 검토하고자 섬유 혼입률에 따른 고인성 복합체의 물성을 평가하였으며, 평가를 통해 선정한 고인성 복합체를 조적부재에 보강한 후 휨 시험을 통하여 내진보강 가능성을 검증하고자 하였다.

**Table 2** Engineered cementitious composite mixing conditions

Specimen	Unit weight (20kg/bag)									
	OPC <sup>1)</sup>	Water	Silica	FA <sup>2)</sup>	Plaster	CSA <sup>3)</sup>	Superplasticizer	Powder resin	Thickener	DSRA <sup>4)</sup>
Engineered Cementitious Composite	6.08	4.20	4.58	7.37	1.00	0.7	0.30	0.20	0.002	0.39

OPC<sup>1)</sup>: Ordinary portland cement, FA<sup>2)</sup>: Fly ash, CSA<sup>3)</sup>: Calcium sulfoaluminate, DSRA<sup>4)</sup>: Drying shrinkage reducing admixture

## 2. 섬유 혼입률에 따른 ECC 물성 평가

### 2.1 실험계획

고인성 복합체는 인장변형률 증대를 위하여 섬유 혼입률을 변수로 Table 1과 같이 4개의 배합설계로 총 12개의 실험체를 계획하였다. 고인성 복합체 시험체 배합조건은 Table 2에 나타내었으며 섬유 종류 및 재료적 특성은 Table 3와 같다. 성능 목표 기준은 고인성 복합체 제조회사 중 세계최고수준인 일본 D사의 고인성 복합체 압축강도 45 MPa와 휨 강도 15 MPa의 80% 이상을 목표로 계획하였다. 측정항목으로는 플로우, 압축강도, 휨 강도, 길이변화율 및 직접인장성능 시험을 통해 섬유 혼입률 증가에 따른 물성을 평가하였다.

### 2.2 실험방법

고인성 복합체의 인장변형률 증대를 위하여 고인성 복합체의 섬유 혼입률 증가(1.4%, 1.7%, 2.0%, 2.3%)에 따른 물성을 평가하였다. 총 12개의 시험체를 제작하였으며, 제작된 시험체는 KS F 2476 폴리머 시멘트 모르타르의 시험 방법에 준하여 플로우를 측정하였고, 28일 양생후 KS F 4042 콘크리트 구조물 보수용 폴리머 시멘트 모르타르에 준하여 압축강도와 휨 강도를 측정하였다. 길이변화율은 KS F 2424 모르타르 및 콘크리트의 길이 변화 시험방법에 준하여 측정하였고, 직접 인장강도는 KS F 2423 콘크리트의 쪼갬 인장 강도 시험방법에 준하여 Fig. 1와 같이 측정하였다. 이중 최적의 고인성 복합체를 선정하여 실험체 보강재로 적용하였다.

### 2.3 실험결과

고인성 복합체의 인장변형률 증대를 위해 섬유 혼입률 증가에 따른 총 4개의 배합설계를 진행한 플로우 실험 결과를

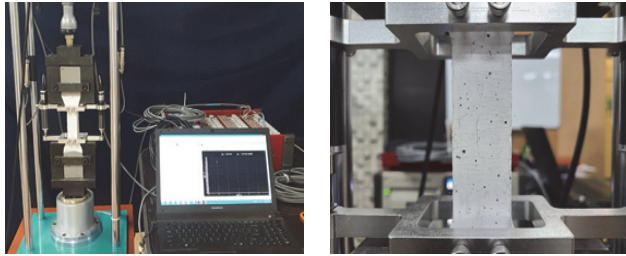
**Table 1** Experimental plan(ECC)

Reinforcement	Specimen name	Mix design	Fiber mixing ratio (%)
Engineered	ECC14	W/C = 0.3	1.4
Cementitious	ECC17		1.7
Composite	ECC20		2.0
: ECC	ECC23		2.3

Table 4에 나타내었다. ECC14의 플로우 값은 194.4 mm로 나타났고, ECC17는 162.1 mm로 나타났고, ECC20는 125.5 mm

**Table 3** Fiber type and mechanical properties

Type	Weight (g/cm <sup>3</sup> )	length (mm)	diameter (μm)	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)
PVA	1.3	12	39	1600	40



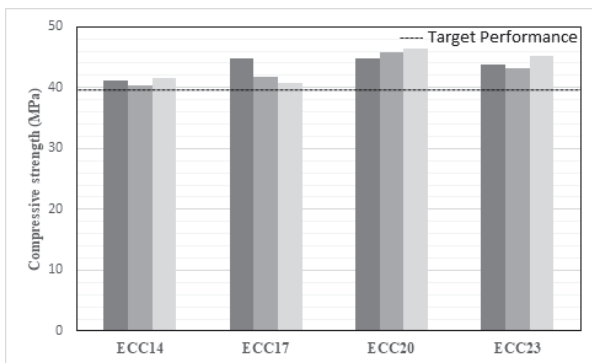
**Fig. 1** Direct tensile test(ECC)

**Table 4** Flow experiment results(ECC)

No	Specimen	Fiber mixing rate(%)	Flow(mm)	Fiber-ball
1	ECC14	1.4	194.4	Nonexistence
2	ECC17	1.7	162.1	Nonexistence
3	ECC20	2.0	125.5	Nonexistence
4	ECC23	2.3	116.7	Existence

**Table 5** Compressive strength test result(ECC)

Specimen	Compressive strength (MPa)			Average (MPa)
	(1)	(2)	(3)	
ECC14	41.2	40.3	41.6	41.0
ECC17	44.7	41.8	40.8	42.4
ECC20	44.7	45.8	46.4	45.6
ECC23	43.8	43.1	45.2	44.0



**Fig. 2** Compressive strength(ECC)

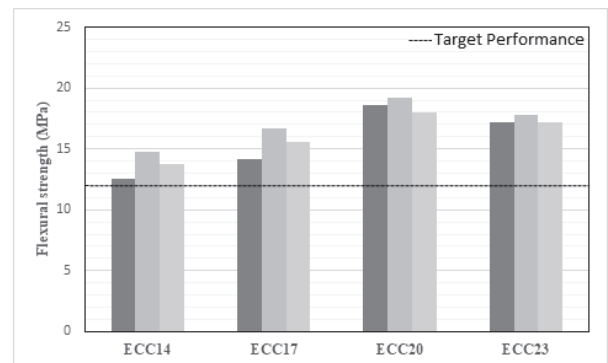
로 나타났고, ECC23는 116.7 mm로 나타났다. 섬유 혼입률이 증가함에 따라 흐름성능이 감소하는 형상을 보였다. ECC14와 ECC17의 경우 흐름 발생이 과도하여 미장성 확보가 어려울 것으로 판단되었으며, ECC20의 경우 섬유 흡수로 인해 흐름성능이 감소하여 점성이 생겼으나 적절한 분산성능을 가지고 있어 원활한 작업성이 확보될 것으로 판단되었다. ECC23의 경우 다량의 섬유 혼입으로 인하여 분산이 제대로 되지 않아 뭉침 현상(Fiber-ball)이 발생하였다. 이는, 물리적 성능뿐만 아니라 시공성의 문제가 발생할 것으로 판단되었다.

섬유 혼입률에 따른 고인성 복합체의 압축강도 실험결과는 Table 5와 Fig. 2에 나타내었다. ECC14의 압축강도 시험결과 41.0 MPa로 나타났고, ECC17의 경우 42.4 MPa로 나타났고, ECC20의 경우 45.6 MPa로 나타났고, ECC23의 경우 44.0 MPa로 나타나 모든 시험체가 목표성능인 40.0 MPa 이상을 만족하였다.

섬유 혼입률에 따른 고인성 복합체의 휨 강도 실험결과는 Table 6과 Fig. 3에 나타내었다. ECC14는 13.7 MPa로 나타났고, ECC17의 경우 15.5 MPa로 나타났고, ECC20의 경우 18.6 MPa로 나타났고, ECC23의 경우 17.4 MPa로 나타나 목표 성능인 12.0 MPa 이상을 만족하였다. 섬유 혼입률이 1.4%~2.0% 증가할수록 압축강도와 휨 강도가 증가하였으나 2.3%를 혼입한 ECC23의 경우에는 다량의 섬유 혼입으로 인하여 분산이 제대로 되지 않아 압축성능과 휨 성능이 감소한 것으로 판단된다.

**Table 6** Flexural strength test result(ECC)

Specimen	Flexural strength (MPa)			Average (MPa)
	(1)	(2)	(3)	
ECC14	12.5	14.8	13.8	13.7
ECC17	14.2	16.7	15.6	15.5
ECC20	18.6	19.2	18.0	18.6
ECC23	17.2	17.8	17.2	17.4



**Fig. 3** Flexural strength(ECC)

섬유 혼입률에 따른 고인성 복합체 길이변화율 시험 결과는 Table 7에 나타내었다. ECC14의 경우 -0.156%, ECC17의 경우 -0.089%, ECC20의 경우 -0.022%, ECC23의 경우 -0.069%로 나타났다. ECC14의 경우 페이스트 양이 과다하여 길이변화율이 크게 나타난 것으로 판단되며 ECC20까지 섬유량이 증가할수록 길이변화율은 감소하는 경향을 나타내었다. 하지만

**Table 7** Ratio of length change(ECC)

Specimen	ECC14	ECC17	ECC20	ECC23
Ratio of Length Change (%)	-0.156	-0.089	-0.022	-0.069

**Table 8** Direct tensile strength and strain test result(ECC)

Specimen	Tensile Stress (MPa)			Average
	(1)	(2)	(3)	
	Tensile Strain (%)			
	(1)	(2)	(3)	
ECC14	3.05	2.78	3.16	3.00
	0.02	0.01	0.05	0.03
ECC17	3.37	3.48	3.43	3.43
	0.46	0.25	0.36	0.36
ECC20	4.36	4.46	4.63	4.48
	4.24	4.48	4.88	4.53
ECC23	3.87	4.36	3.81	4.01
	1.22	1.70	1.32	1.41

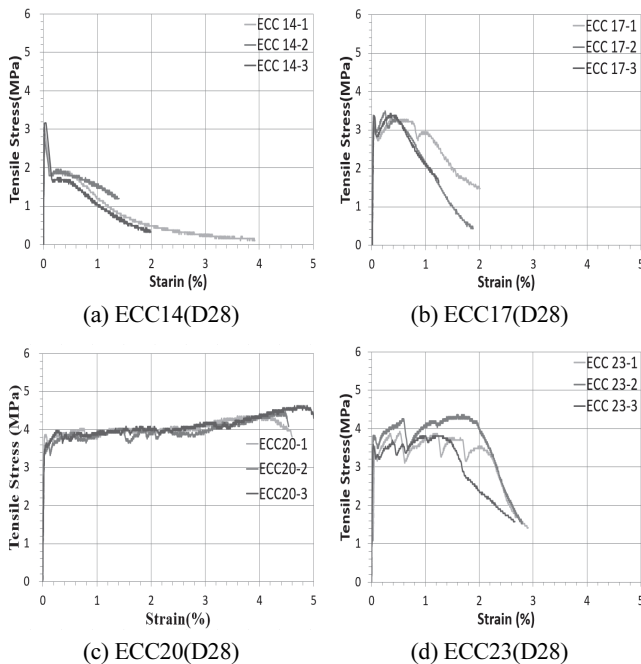
ECC23의 경우에는 다시 증가하는 경향을 나타내었는데, 이는 섬유 과다 혼입으로 인해 비빔성능이 저하되어 다른 시험체에 비해 고인성 복합체의 내부가 밀실하지 못해 나타난 결과로 판단된다.

고인성 복합체의 직접인장강도와 직접인장변형률 실험결과를 Table 8과 Fig. 4에 나타내었다. 직접인장강도 실험결과 ECC14의 경우 3.00 MPa, ECC17의 경우 3.43 MPa, ECC20의 경우 4.48 MPa, ECC23의 경우 4.01 MPa로 나타났다. 직접인장변형률 실험결과 ECC14의 경우 0.03%, ECC17의 경우 0.36%, ECC20의 경우 4.53%, ECC23의 경우 1.41%로 나타났다. 고인성 복합체의 섬유 혼입률 증가(1.4%, 1.7%, 2.0%, 2.3%)에 따른 물성실험결과 종합적으로 ECC20의 시험체가 무해한 미세균열인 Multiple crack 특성이 안정적으로 발현되었으며 직접인장에 따른 균열 특성이 가장 우수한 것으로 나타나 조적부재의 보강재로 사용하였다.

### 3. ECC로 보강한 조적부재 휨 강도 평가

#### 3.1 실험계획

고인성 복합체로 보강한 조적부재의 내진성능을 평가하기 위한 실험계획을 Table 9, Fig. 5에 나타내었다. 본 연구는 1종 시멘트 벽돌 190 mm×90 mm×57 mm를 사용하였으며 레미탈은 H사의 일반 미장용 레미탈을 사용하였다. 레미탈의 역학적 특성은 Table 10에 나타내었다. 보강재는 고인성 복합체, 유리섬유, 용접철망을 사용하였으며 유리섬유와 용접철망의



**Fig. 4** Direct tensile stress strain curve(ECC)

**Table 9** Name of test specimen

No	Specimen	Engineering		
		Cementitious Composite	Reinforcement	Joint Element
1	U-M1 <sup>1)</sup>	-	-	-
2	U-M2	-	-	-
3	R-ME1 <sup>2)</sup>	20 mm	-	-
4	R-ME2	20 mm	-	-
5	R-MGE1 <sup>3)</sup>	20 mm	Fiberglass	-
6	R-MGE2	20 mm	Fiberglass	-
7	R-MWE1 <sup>4)</sup>	20 mm	Wire mesh (Φ1.0×10×10)	Anchor
8	R-MWE2	20 mm	Wire mesh (Φ1.0×10×10)	Anchor

U-M<sup>1)</sup>: Unreinforced Masonry

R-ME<sup>2)</sup>: Reinforced Masonry Engineering Cementitious Composite

R-MGE<sup>3)</sup>: Reinforced Masonry Glass Fiber Engineering Cementitious Composite

R-MWE<sup>4)</sup>: Reinforced Masonry Wire mesh Engineering Cementitious Composite

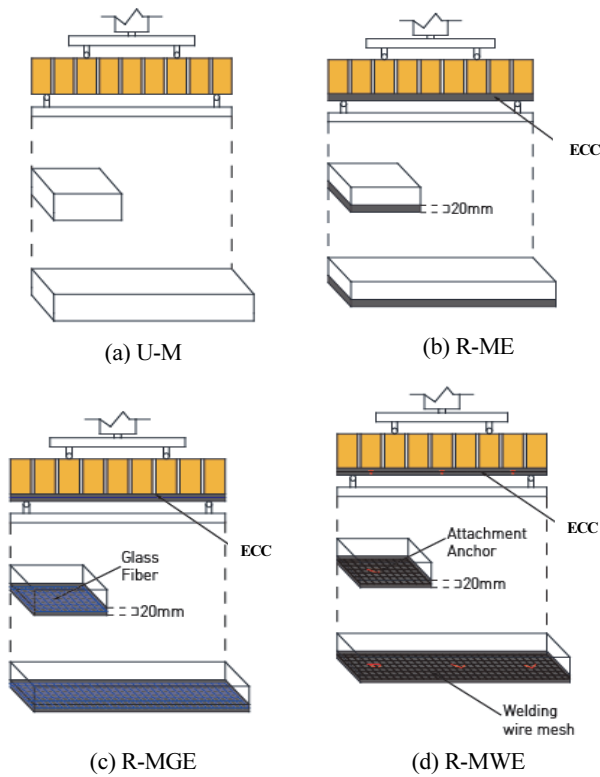


Fig. 5 Design of specimen plan

Table 10 Remitar mechanical properties

No	Test type	Unit	Test result
1	Compressive strength	7day	MPa 13.3
		28day	MPa 19.2
2	Water holding	%	75.0
3	Air content	Vol%	17.0
4	Sand content (0.15 mm sieve residue)	%	72.0
5	Maximum size of sand	4.0 mm	% 100.0
		4.75 mm	% 100.0

재료적 특성을 Table 11, Table 12에 나타내었다. 용접철망 부착재로는 지름 10 mm, 길이 45 mm의 부착앵커와 주문 제작한 연결철물을 사용하였으며 형상은 Fig. 6에 나타내었다. 실험체는 기존 조적벽체를 묘사하여 구성하였으며 크기는 593 mm×190 mm×90 mm로 제작하였다. R-ME 실험체의 경우 제작된 실험체에 고인성 복합체 20 mm를 보강하였고, R-MGE 실험체의 경우 고인성 복합체를 1차 도포한 후 유리섬유를 부착하여 2차 보강하였다. R-MWE 실험체의 경우 고인성 복합체를 1차 도포한 후 용접철망을 부착앵커와 연결철물로 고정하고 2차 보강하여 총 8개 제작하였다. 측정항목으로는 휨강도와 변위길이를 측정하였으며 강도 실험 진행 중과 실험 종료 후의 주요 균열양상을 살펴보았다.

Table 11 Fiber glass properties

Specification	Mesh size (mm)		Mass g/m <sup>2</sup>	Tensile strength		Type
	Warp	Weft		Warp	Weft	
FG5×5-60	5	5	60±3	700	550	leno

Table 12 Wire mesh properties

Mesh/Inch	Wire diameter		Aperture		Open Area	Weight /100 Square foot
	Inch	mm	Inch	mm		
1×1	0.08	2.03	0.92	23.37	84.6	41.1

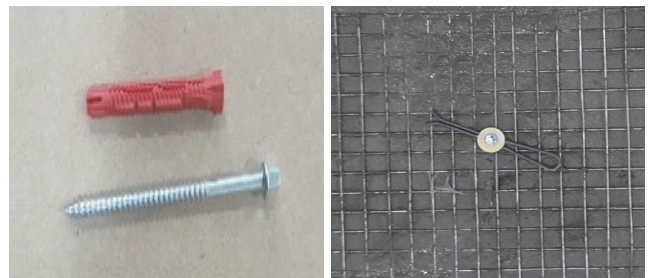


Fig. 6 Attachment anchor and Binding hardware

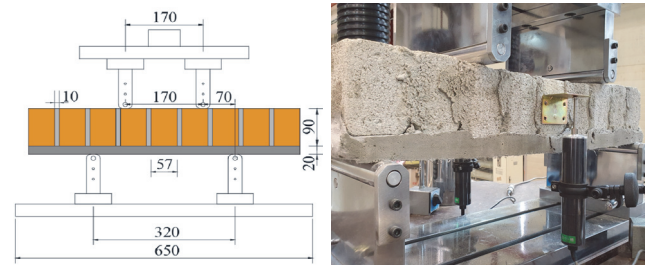


Fig. 7 Flexural strength test

### 3.2 실험방법

고인성 복합체로 보강한 조적부재의 내진성능을 평가하기 위하여 실험체 제작 28일 양생 후 KS F 2408 콘크리트의 휨강도 시험방법에 준하여 실험을 Fig. 7과 같이 실행하였다. 실험체의 길이방향의 일정구간에 최대모멘트가 발생하도록 양단을 단순지지 경계조건으로 길이방향의 1/3과 2/3 지점에 2점 집중하중을 가력하였다. 재하방법은 0.01 mm/s의 속도로 1 방향으로 재하하였고 최대하중의 70% 이하로 저하될 때까지를 시험종료 조건으로 하여 하중과 중앙부의 처짐량을 측정하였다.

### 3.3 실험결과

고인성 복합체로 보강한 조적부재의 내진성능을 평가하기 위한 무보강 조적부재와 고인성복합체로 보강한 조적부재의

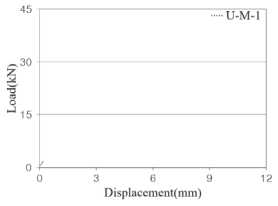

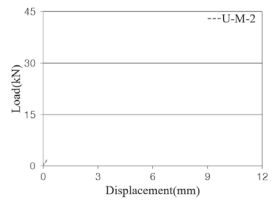

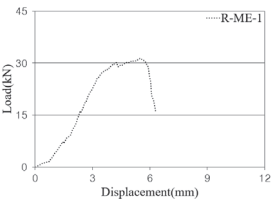

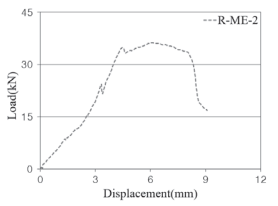

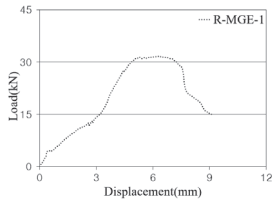
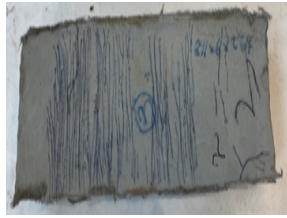
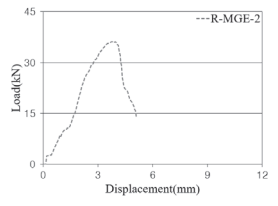

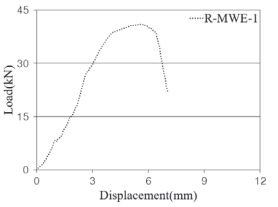

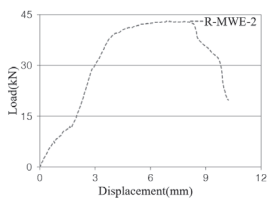

휨 실험 결과는 Table 13에 나타내었으며, 실험 종료 후 최종 파괴형상은 Table 14에 나타내었다. 무보강인 U-M 실험체의 최대하중( $P_{max}$ )은 각 2.00 kN, 1.88 kN으로 나타났고, R-ME 실험체의 경우 최대하중( $P_{max}$ )은 각 31.34 kN, 36.26 kN으로

나타났고, R-MGE 실험체의 경우 최대하중( $P_{max}$ )은 각 31.64 kN, 36.20 kN으로 나타났고, R-MWE 실험체의 경우 최대하중( $P_{max}$ )은 40.96 kN, 43.00 kN으로 나타났다. 무보강 조적부재는 조적벽돌 사이의 줄눈에서 각 0.8 kN, 0.7 kN에 초기균열

**Table 13** Flexural stress-displacement test result

No	Specimen	Maximum strength (kN)	Nonreinforcement contrast		Maximum displacement (mm)	Nonreinforcement contrast displacement ratio
			kN	Ratio		
1	U-M1	2.00	-	-	0.20	-
2	U-M2	1.88	-	-	0.20	-
3	R-ME1	31.34	29.34	15.67	6.29	31.45
4	R-ME2	36.26	34.26	18.13	9.09	45.45
5	R-MGE1	31.64	29.64	15.82	9.24	46.20
6	R-MGE2	36.20	34.20	18.10	5.10	25.50
7	R-MWE1	40.96	38.96	20.48	7.25	36.25
8	R-MWE2	43.00	41.00	21.50	10.23	51.15

**Table 14** Flexural stress-displacement test result of specimen and Type of specimen destruction

Specimen	Flexural stress-displacement test result			
	Experiment No. 1		Experiment No. 2	
U-M				
R-ME				
R-MGE				
R-MWE				

이 발생하였으며 최대내력 2.00 kN, 1.88 kN에서 파단되었다. 무보강 시험체와 비교하여 R-ME 시험체의 최대하중( $P_{max}$ )은 약 15.67배, 18.13배의 하중증대 효과를 나타내었고, R-MGE 시험체의 경우 무보강 대비 최대하중( $P_{max}$ )은 15.82배, 18.10배의 하중증대 효과를 나타내었고, R-MWE 시험체의 경우 무보강 대비 20.48배, 21.50배의 하중증대 효과를 나타내었다. 고인성복합체로 보강한 조적부재는 조적벽돌 사이의 줄눈에서 균열 발생 시 내력이 일시적으로 감소하다 증가하는 거동이 나타났으며 이는 시험체 하단부에 보강된 고인성 복합체가 휨 인장에 저항한 것으로 판단된다.

U-M 시험체의 최대변위( $\delta_{max}$ )는 각 0.20 mm, 0.20 mm로 나타났고, R-ME 시험체의 최대변위( $\delta_{max}$ )는 각 6.29 mm, 9.09 mm로 나타났고, R-MGE 시험체의 경우 최대변위( $\delta_{max}$ )는 각 9.24 mm, 5.10 mm로 나타났고, R-MWE 시험체의 경우 최대변위( $\delta_{max}$ )는 각 7.25 mm, 10.23 mm로 나타났다. 무보강 시험체와 비교하여 R-ME 시험체의  $\delta_{max}$ 는 31.45배, 45.45배의 변형증가 효과를 나타내었고, R-MGE 시험체의 경우 무보강 대비  $\delta_{max}$ 는 46.20배, 25.50배의 변형증가 효과를 나타내었고, R-MWE 시험체의 경우 무보강 대비 36.25배, 51.15배의 변형증가 효과를 나타내었다.

휨 강도 시험이 진행되는 동안 8개 시험체의 주요 균열양상을 관찰하였다. 먼저 무보강 시험체인 U-M의 기본적인 파괴양상을 파악하였다. U-M의 경우 0.8 kN, 0.7 kN일 때 줄눈 부분에서 초기 균열이 발생하였으며 최대 내력에서 즉시 파단되었다. R-ME의 경우 7.00 kN, 8.47 kN에서 초기 균열이 발생하였으며 하중 증가와 함께 여러 방향으로 추가적인 미세균열이 발생하였으나, 최대 하중시까지 파단 발생 없이 내력이 증가하였으며 최대 하중에 도달한 이후 응력 집중에 의해 파단면이 발생하여 시험을 종료하였다. R-MGE의 경우 4.5 kN, 2.5 kN에서 초기 균열이 발생하였으며 주요 균열양상은 적은 내력에도 쉽게 미세 균열이 발생하였고 중앙부를 중심으로 수 많은 미세 균열이 발생된 후 중앙부 균열에 의해 파단이 발생하였다. 이는, 유리섬유가 접합성능은 유리하지만 강성이 떨어지기 때문으로 판단된다. R-MWE의 경우 8.76 kN, 7.86 kN에서 초기균열이 발생하였으며 주요 균열양상은 조적부재

사이의 줄눈으로부터 균열이 발생하였고 이후 해당 부분에서 고인성 복합체가 직선방향으로 파단되었다. 고인성 복합체로 보강한 시험체들의 파괴양상은 큰 차이를 보이지 않았으나, R-MWE의 경우 다른 보강 시험체들보다 미세균열이 많았는데 이는, 접합된 와이어 메쉬와 고인성 복합체 보강으로 인해 다른 보강 시험체들보다 에너지소산능력이 더욱 우수했기 때문으로 판단된다.

#### 4. 비교 · 분석

고인성 복합체를 보강한 조적부재의 내진성능을 평가하기 위하여 고인성 복합체와 유리섬유 및 용접철망을 보강하여 휨 시험을 수행하였고 이를 분석한 평균 결과값을 Table 15과 Fig 8에 나타내었다. 무보강 시험체의 평균 최대하중( $P_{max}$ )은 1.94 kN으로 나타났으며 평균 최대변위( $\delta_{max}$ )는 0.20으로 나타났다. R-ME 시험체의 경우 평균 최대하중( $P_{max}$ )은 33.80 kN으로 나타났으며 무보강 시험체와 비교하여 평균 최대하중( $P_{max}$ )은 약 16.90배의 하중증대 효과를 나타냈다. R-MGE 시험체의 경우 평균 최대하중( $P_{max}$ )은 33.92 kN으로 나타났으며 무보강 시험체와 비교하여 평균 최대하중( $P_{max}$ )은 16.96배의 하중증대 효과를 나타냈다. R-MWE 시험체의 경우 평균 최대하중( $P_{max}$ )은 41.98 kN으로 나타났으며 무보강 시험체와 비교하여 평균 최대하중( $P_{max}$ )은 20.99배의 하중증대 효과를 나타냈다.

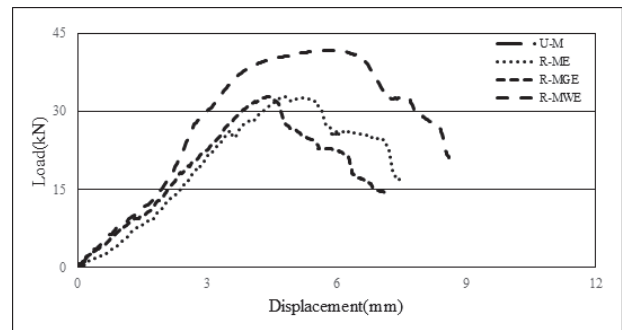


Fig. 8 Flexural stress-displacement test result average

Table 15 Average of flexural strain results

Specimen	Maximum strength (kN)	Nonreinforcement contrast		Maximum displacement (mm)	Nonreinforcement contrast displacement ratio
		kN	Ratio		
U-M	1.94	-	-	0.20	-
R-ME	33.80	31.80	16.90	7.55	38.45
R-MGE	33.92	31.92	16.96	7.17	35.85
R-MWE	41.98	39.98	20.99	8.74	43.70

R-ME 실험체 평균 최대변위( $\delta_{max}$ )는 7.55 mm로 나타났으며 무보강 실험체와 비교하여 평균 최대변위( $\delta_{max}$ )는 38.45배의 변형증가 효과를 나타내었다. R-MGE 실험체의 경우 평균 최대변위( $\delta_{max}$ )는 7.17 mm로 나타났으며 무보강 실험체와 비교하여 평균 최대변위( $\delta_{max}$ )는 35.85배의 변형증가 효과를 나타내었다. R-MWE 실험체의 경우 평균 최대변위( $\delta_{max}$ )는 8.74 mm로 나타났으며 무보강 실험체와 비교하여 평균 최대변위( $\delta_{max}$ )는 43.70배의 변형증가 효과를 나타내었다.

고인성 복합체를 보강한 실험체 R-ME와 고인성 복합체와 유리섬유를 보강한 실험체 R-MGE의 경우 최대내력과 최대변위는 비슷하게 나타났으며, 고인성 복합체와 와이어 메쉬를 보강한 실험체 R-MWE가 최대내력과 최대변위가 가장 우수한 것으로 나타났다.

## 5. 결론

고인성 복합체로 보강한 조적부재의 내진 성능 평가하기 위하여 섬유 혼입률에 따른 고인성 복합체 물성을 평가하였으며, 선정된 고인성 복합체로 보강한 조적부재의 휨 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 고인성 복합체의 인장변형을 증대를 위해 섬유 혼입률에 따른 성능을 검토한 결과 실험체 ECC14와 ECC17의 경우 플로우 측정결과 흐름이 발생하여 미장성 확보가 어려울 것으로 판단되었다. 실험체 ECC23의 경우 과다 섬유 혼입으로 인하여 분산이 되지 않아 뭉침 현상(Fiber-ball)이 발생하여 시공성의 문제가 발생할 것으로 사료되며 다량의 섬유 혼입에 대한 비빔성능을 향상시킬 수 있는 방안이 추가로 필요할 것으로 판단된다.
- 2) ECC20의 경우 다른 시험체와 비교하여 압축성능 및 휨 성능이 가장 우수한 것으로 나타났으며 미세균열인 Multiple crack 특성이 안정적으로 발생되어 직접인장에 따른 균열 특성이 가장 우수한 것으로 나타나 조적부재의 보강재로 선정하였다.
- 3) 고인성 복합체로 보강한 조적부재 휨 강도 실험 결과 무보강 실험체의 경우 최대내력에서 바로 파단되었으나, 고인성복합체로 보강한 조적부재는 공통적으로 조적벽돌 사이의 줄눈에서 균열이 발생 시 내력이 일시적으로 감소하다가 다시 증가하는 거동이 나타났으며 이는 실험체 하단부에 보강된 고인성 복합체가 휨 인장에 저항한 것으로 판단된다.
- 4) 고인성 복합체를 보강한 모든 실험체들은 무보강과 비교하여 최대내력이 평균 16배 이상의 효과가 나타났으며 균열 형상을 검토한 결과 에너지소산능력이 우수한

것으로 보이며 내진성능 보강에 효과가 있는 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 성과물은 중소벤처기업부에서 지원하는 2021년도 산학 Collabo R&D사업(No.S3106526)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다. 이에 감사드립니다.

## References

1. Sung, H. S., and Kang, H. K. (2019), A Study on Seismic Performance of Masonry-infilled Reinforced Concrete Frames Retrofitted with High-performance Materials, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Korea Concrete Institute, 31(5), 449-458.
2. Kim, J. H., Jo, S. P., Seo, S. Y., and Yun, H. D. (2019), Seismic Performance of Non-ductile Reinforced Concrete Frames with Precast ECC Wall Panels, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, 23(6), 105-112.
3. Chang, K. K., Seo, D. W., (2011), Present State and Necessity of Seismic Design for Low-rise Masonry Buildings in Korea, *Review of Architecture and Building Science*, Architectural Institute of Korea, 55(5), 45-50.
4. Han, B. C., Kim, J. H., Lim, S. C., Naoharu, M. Joen. Y. J., Kwon, Y. J. (2006) The State of Repair Methods Using HPRCCs at Home and Abroad, *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Korea Concrete Institute, 18(2), 56-63.
5. Cho, H. W., Bang, J. W., Han, B. C., and Kim, Y. Y. (2011), Flexural Experiments on Reinforced Concrete Beams Strengthened with ECC and High Strength Rebar, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Korea Concrete Institute, 23(4), 503-509.
6. Lee, D. K., Lee, K. C., Lee, C. D., and Shin, K. J. (2019), Study on ECC Tensile Behavior due to Constrained Drying Shrinkage, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, Korean Recycled Construction Resources Resources Institute, 7(4), 367-374.
7. Hyun, J. H., Sim, Y. H., Bang, J. W., and Kim, Y. Y. (2015), Cyclic Responses of Steel Reinforced ECC Column under Reversed Cyclic Loading Conditions, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, 19(4), 75-82.
8. Choi, H. K., Park, B. K., Bae, B. I., and Choi, C. S. (2010), Lateral Resistance of Unreinforced Masonry Walls Retrofitted with ECC, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, Architectural Institute of Korea, 26(12), 3-10.
9. Yun, H. D., Yang, I. S., Han, B. C., Jeon, Esther., and Kim, S. W. (2005), Experimental Study on Tension Stiffening Behavior in High-Performance Fiber-Reinforced Cementitious Composites (HPRCCs), *Journal of the Architectural Institute of Korea*



*Structure & Construction*, Architectural Institute of Korea, 21(10), 27-36.

10. Lee, B. Y., Cho, C. G., Kim, Y. Y., Han, B. C., Kwon, Y. J. (2009), Fiber Distribution Characteristics and Flexural Performance of Extruded ECC Panel, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Korea Concrete Institute, 21(5), 573-580.
11. Hyun, J. H., Bang, J. W., Lee, B. Y., and Kim, Y. Y. (2020), Flexural Behavior of Concrete-ECC Composite Beam Reinforced

with Steel Rebar, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, 24(3), 104-111.

Received : 04/30/2021

Revised : 06/18/2021

Accepted : 08/18/2021

---

**요 지** : 논문은 조적부재에 고인성 복합체를 보강하여 내진보강 가능성을 평가하기 위한 기초연구이다. 고인성 복합체의 섬유 혼입률에 따른 성능을 검토하기 위하여 배합설계에 따라 시험체를 제조하고 유동성능, 압축강도, 휨 강도, 길이변화율 및 직접인장변형률을 측정하였다. 또한, 무보강 조적부재, 고인성 복합체로 보강한 조적부재, 고인성 복합체에 유리섬유 및 와이어 메쉬를 별도 보강한 조적부재를 제작하고 휨 강도와 최대변위를 측정하였다. 고인성 복합체를 보강한 모든 실험체들은 무보강과 비교하여 최대내력이 16배 이상의 효과가 나타났으며 균열 형상을 검토한 결과 에너지소산능력이 우수한 것으로 나타나 내진보강 가능성을 확인하였다.

**핵심용어** : 고인성 복합체, 보강, 조적조, 내진, 재난

---