

## 폴리머 모르타르로 보수된 철근콘크리트 보의 휨 거동

조용인<sup>1</sup>, 한상훈<sup>2\*</sup>, 박재규<sup>3</sup>, 연영모<sup>4</sup>, 홍기남<sup>5</sup>

### Flexural Behavior of RC Beam Repaired with Polymer Mortar

Yong-In Cho<sup>1</sup>, Sang-Hoon Han<sup>2\*</sup>, Jea-Kyu Park<sup>3</sup>, Yeong-Mo Yeon<sup>4</sup>, Ki-Nam Hong<sup>5</sup>

**Abstract:** The purpose of this paper is to evaluate the flexural performance of reinforced concrete (RC) beams repaired with polymer mortar. The repaired and non-repaired 13th beams which was fabricated by considering repair position, repair depth, and curing age of polymer mortar as test variables were tested under three point loading. All specimens repaired in compressive and tensile zone did not fail due to interfacial failure between polymer mortar and concrete but failed when the strain of repaired mortar exceeded the ultimate tensile strain of polymer mortar. Maximum load of specimens repaired in compressive zone was similar to that of non-repaired specimen, reference specimen. Additionally, their ductility index was higher than that of reference specimen. On the other hand, specimens repaired in tensile zone failed very brittlely and have a lower ductility index than reference specimen. Nonlinear analysis by using OpenSees was performed to predict the behavior of RC beam repaired with polymer mortar. Two dimension frame element was used to simplify an analysis model and fiber model was applied to consider the material non-linearity. It was confirmed from the analysis results that nonlinear analysis properly predicts the behavior of specimens repaired in compressive zone and overestimates the behavior of specimens repaired in tensile zone.

**Keywords:** Curing age, Ductility index, Nonlinear analysis, Polymer mortar, Repair

## 1. 서 론

철근콘크리트 구조물은 구조적, 환경적, 재료적 요인에 의해 손상을 입는다. 이런 손상은 균열이나 과다 처짐, 강도 저하 등으로 나타나며, 사용성과 내구성, 내력, 안전성이 저하된다. 최근 우리나라에서는 노후화된 국가 기반시설물들에 대한 유지관리 수요가 크게 늘어나고 있으며, 경제여건의 불확실성 증가로 건설 산업에 있어 신규투자보다는 보수·보강 위주로 패러다임이 전환되고 있다(Hong, 2015).

일반적으로 보수는 구조물의 잔여 사용기간 중에 내력이 저하되는 것을 방지하여 작업자나 사용자가 더 이상 불안감이나 불쾌감을 느끼지 않도록 하는 작업이다. 즉, 내구성이나 방수성 같은 내력 이외의 기능을 회복하는 조치이다. 콘크리트 구조물을 보수하여 그 효과를 높이기 위해서는 공사조건

에 적합한 보수재료를 선택하는 것이 중요하다. 일반적으로 보수재료는 레진 모르타르, 에폭시수지 같은 수지계 재료와 폴리머시멘트 모르타르, 폴리머시멘트 페이스트 같은 무기질계 재료로 분류할 수 있다(Lee and Song, 2007; Song et al., 2006).

최근 손상된 철근콘크리트 구조물의 보수에는 폴리머 복합재료가 널리 사용되고 있다. 폴리머 모르타르는 일반 시멘트 모르타르에 비해 경화시간이 짧고, 내동결융해성 및 내부식성 등이 우수하며, 압축·휨·인장강도가 높을 뿐만 아니라 경화시간이 시멘트 콘크리트에 비해 월등히 빠르기 때문에 열악한 환경 조건에서의 보수재료로서 매우 유익하다(Hwang et al., 1994; Joo et al., 2004; Hyung et al., 2005; Kim et al., 2007).

많은 연구자들에 의해 모르타르로 보수된 구조물의 거동을 검증하기 위한 실험적 연구가 수행되어 오고 있다(Kim et al., 1997; Cho, 2000; Ahmad et al., 2012). Kim et al.(1997)은 철근 콘크리트 보 단면이 손실된 경우를 가정하여 폴리머계, 폴리머-시멘트계 재료, 시멘트계 재료로 보수하고, 그 휨성능을 평가하였다. 그들은 폴리머계 보수 실험체는 균열이 중앙부에 집중적으로 발생하면서 취성파괴가 발생하며, 계면파괴가 발생하지 않고 인장철근과 보수재료가 합성거동을 한다고 보고하였다. Cho(1999)는 인장부 단면이 손실된 보를 가정하여 에폭시 모르타르로 인장측을 보수한 RC보에 대한 휨실험을 실

<sup>1</sup>정회원, 충북대학교 토목공학과 박사과정

<sup>2</sup>정회원, 충북대학교 토목공학부 교수, 교신저자

<sup>3</sup>정회원, 충북대학교 토목공학과 박사과정

<sup>4</sup>학생회원, 충북대학교 토목공학과 석사과정

<sup>5</sup>정회원, 충북대학교 토목공학부 교수

\*Corresponding author: shhan@chungbuk.ac.kr

School of Civil Engineering, Chungbuk National University, Chungdae-ro 1, Seowon-Gu, Chungbuk 28644, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2017년 2월 1일까지 학회로 보내주시면 2017년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

시하였다. 실험변수로는 보수길이와 보수깊이를 고려하였다. 실험을 통해 그녀는 보수길이와 보수깊이가 증가하면 보수재료의 인장강도가 구조적 거동에 미치는 영향이 크므로 보수 설계 단계에서 보수면적을 결정할 때 이를 고려해야 한다고 보고하였다. Ahmad et al.(2012)은 폴리머계질 모르타르는 전단과 휨균열을 제어하는데 매우 효과적이지만, 부재의 강성 개선에는 큰 효과를 발휘하지 못하였다고 발표하였다.

콘크리트와는 달리 폴리머는 재료의 물리적 특성은 온도의 미세한 변화에도 지대한 영향을 받으며, 그 기계적 성능은 시간 의존적인 특성을 보인다(Kosednar and Mailvaganam, 2015). 그러나 기존 연구에서는 폴리머 모르타르의 시간의존적 특성이 휨거동에 주는 영향이 평가되지 않고 있다. 이에 본 연구에서는 폴리머 모르타르로 압축축을 다양한 깊이로 보수한 RC 보의 휨실험을 폴리머 모르타르 재령 1일과 3일에 실시하여 모르타르의 시간 의존적인 특성이 휨거동에 주는 영향을 평가하였다. 더불어, 일반콘크리트보다 5배 이상의 인장강도를 발휘하는 폴리머 모르타르를 인장축 보수에 적용하여 구조거동에 미치는 영향을 평가하였다.

## 2. 실험개요

본 연구에서는 폴리머 모르타르로 압축부와 인장부를 보수한 철근콘크리트 보의 휨성능을 분석하기 위해 슬래브를 모형화한 실험체를 제작하여 휨실험을 실시하였다.

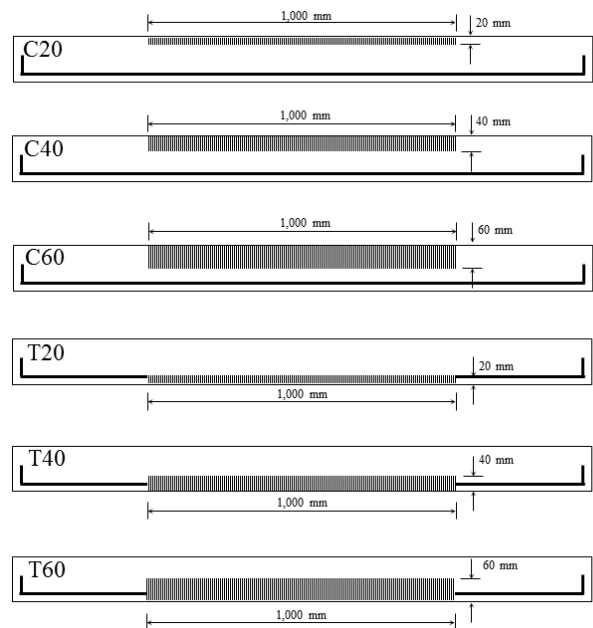
### 2.1 실험체 제원

본 연구에서는 슬래브를 모형화한 13개의 실험체를 제작하였다. Fig. 1에 실험체의 형상 및 배근 개요를 나타내었으며, Table 1에는 실험체 제원을 나타내었다. 모든 실험체의 단면 크기는 300 × 130 mm이고, 전체길이와 순경간은 각각 2,200 mm, 1,800 mm이다. 전단철근은 모든 실험체에 사용되지 않았다. 인장부에는 SD400등급의 D10 철근 3개를 인장철근으로 배근하였다.

Table 1과 Fig. 2에 나타난 것과 같이 실험변수로 손실위치, 손실깊이, 폴리머 모르타르의 재령을 고려하였다. 손실위치는 압축부와 인장부를 고려하였으며, 손실길이는 모두 1,000 mm

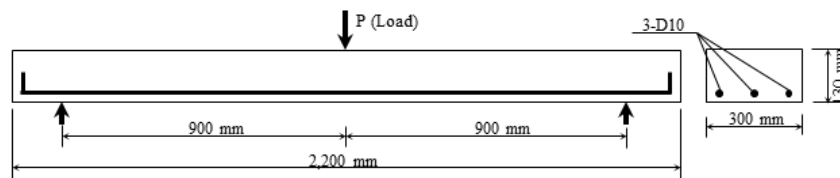
**Table 1** Details of test specimens

Specimen	Repair position	Repair depth(mm)	Curing age(Day)
Control	-	-	-
C20-D1	Compressive Zone	20	1
C20-D3		20	3
C40-D1		40	1
C40-D3		40	3
C60-D1		60	1
C60-D3		60	3
T20-D1	Tensile Zone	20	1
T20-D3		20	3
T40-D1		40	1
T40-D3		40	3
T60-D1		60	1
T60-D3		60	3



**Fig. 2** Test variables

로 동일하게 설정하였다. 콘크리트 타설 전 손실부에 손실깊이와 폭 변수에 맞는 스티로폼을 설치하여 인위적으로 손실부를 형성하였다. 손실깊이는 20 mm, 40 mm, 60 mm 3종류



**Fig. 1** Dimension of test beam

를 고려하였으며, 폴리머 모르타르의 재령은 1일과 3일을 변수로 고려하였다. 실험체명은 Table 1에 나타난 것과 같이 순서대로 손실위치(C: Compressive zone, T: Tensile zone), 손실깊이(20:20 mm, 40:40 mm, 60:60 mm), 폴리머 모르타르 재령(1D: 1 day, 3D: 3 days)을 의미한다.

## 2.2 사용재료

레디믹스트 콘크리트를 사용하여 실험체를 제작하였다. 콘크리트 배합에 사용된 굵은 골재의 최대 치수는 25 mm이며, 목표 슬럼프는 120 mm로 설정하였다. Table 2에 시험체 제작에 사용된 콘크리트의 배합설계를 나타내었다. 콘크리트 타설과 동시에 제작된  $\Phi 100 \times 200$  mm 크기 원주형 공시체의 28일 압축강도는 30.2 MPa이었다. 또한 인장철근으로 사용된 D10 철근의 항복강도와 탄성계수가 각각 560 MPa, 196 GPa임을 인장시험을 통해 확인하였다.

Table 3에 폴리머 배합을 모르타르 총중량에 대한 각 재료의 중량비로 나타내었다. 모르타르 배합에는 A사의 2액형 폴리머가 사용되었다. 규사는 J사의 3호와 5호사를 합수율이 0.1%가 되도록 건조시켜 사용하였다. 모르타르에서 충전제는 규사 입자 사이의 공극을 채워 폴리머의 사용량을 감소시키고 강도를 증진시키는 역할을 담당한다. 본 연구에서는 중질탄산칼슘을 충전제로 사용하였다. 사용 중질탄산칼슘의 분말도는 2,500~3,000  $\text{cm}^2/\text{g}$ 이었다. 규사와 충전제에 함유되어 있는 소량의 수분이라도 폴리머의 이소시아네이트 프리폴리머와 반응하면 발포현상이 발생할 수 있다. 발포는 폴리머 모

르타르의 강도를 저하시키는 원인이므로 이를 방지하기 위해 수분을 흡착하는 성질이 우수한 흡습제를 사용하여야 한다. 본 연구에서는 흡습제로 Silipolite 분말을 사용하였다. 폴리머 모르타르의 재령 1일의 압축강도와 휨강도는 각각 37.2와 26.7 MPa, 재령 3일의 강도는 각각 37.3과 26.9 MPa로 재령 증가에 따른 강도 증진은 크게 보이지 않았다.

## 2.3 보수방법

콘크리트 타설 28일 후에 거푸집을 해체하고 손실부를 형성하기 위해 매설하였던 스티로폼을 제거하였다. 폴리머 모르타르로 이 손실부를 보수하기 전 실험체 표면에 묻어있는 레이턴스를 샌드블라스트를 이용하여 제거하고 고압 세척을 실시하였다. 압축부 보수 실험체는 해체되었던 거푸집을 재조립하여 모르타르를 타설하였으며, 인장부를 보수하는 실험체는 실험체를 180도 회전시킨 뒤 거푸집을 조립하고 보수를 실시하였다.

## 2.4 재하방법 및 측정항목

2000 kN 용량의 액츄에이터를 사용하여 1 mm/min 속도로 변위제어 방식으로 3점 가력하였다. 하중 단계마다 실험체 중앙에 설치한 2개의 LVDT를 이용하여 변위를 측정하였으며, 각 인장철근의 중앙에 부착한 3개의 변형률 게이지를 이용하여 인장철근의 변형률을 측정하였다. 하중 단계별 모르타르의 변형률도 콘크리트 변형률 게이지를 중앙부의 보수 위치에 부착하여 측정하였다. 또한, 실험체의 초기균열과 균열진행상황을 육안으로 관찰하여 기록하였으며, 각 하중단계에서 발생하는 균열을 부재면에 기록하였다.

Table 2 Mixture design of concrete

W/B (%)	S/a (%)	Unit weight( $\text{kg}/\text{m}^3$ )					
		W	C	S	G	FA	AE
44.6	46.6	171	310	807	955	38	2.3

Table 3 Mixture design of polymer mortar

Base(%)	Hardener(%)	Sand(%)	Filler(%)	Silipolite(%)
7.5	7.5	67.0	15.0	3.0



Fig. 3 Test setup

## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1 파괴양상

실험을 통해 폴리머 모르타르의 재령은 실험체의 파괴모드에 큰 영향을 미치지 못함을 확인하였다. 이에 재령 3일 시험체를 기준으로 폴리머 모르타르 보수 휨부재의 파괴모드를 기술하였다.

Fig. 4에 모르타르 재령 3일에 실험이 진행된 시험체들의 실험후의 전경을 나타내었다. 기준실험체인 Control은 전형적인 휨파괴를 보였다. 하중 증가와 함께 중앙부 휨균열이 압축부를 향해 계속적으로 성장하였다. 인장철근이 항복한 이후 휨균열 폭이 급격하게 확대되면서 압축부 콘크리트 압괴로 실험이 종료되었다. C20-D3 실험체는 인장철근 항복 이전까지 Control 실험체와 매우 흡사한 거동을 보였으나, 항복이

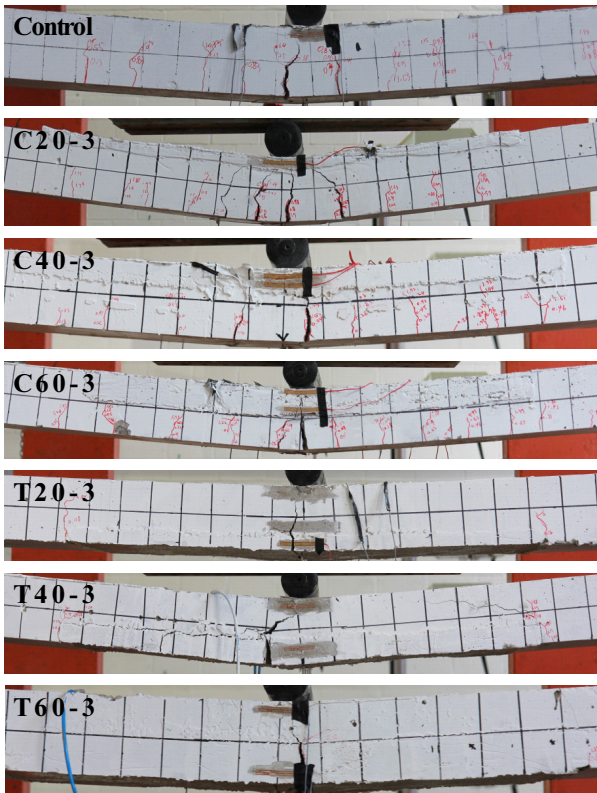


Fig. 4 Specimens after test

후에는 완전히 다른 거동을 나타내었다. 인장철근 항복이후 인장부 균열폭이 확대되면서 처짐이 급격하게 증가하였다. 이때 압축부 폴리머 모르타르는 콘크리트와 완전부착거동을 보이면서 매우 우수한 연성거동을 보였다. 시험 종료시까지

압축부 콘크리트의 압괴는 발생하지 않았으며, 인장 철근의 파단이 우려되어 중도에 시험을 종료하였다. 실험체 C40-D3 과 C60-D3은 인장철근 항복이후 C20-D3과 흡사한 거동을 하다가 압축부 폴리머 모르타르의 취성적인 인장과단으로 파괴되었으며, 모르타르에는 중앙부에 하나의 휨균열만이 발생하였다. 인장부를 모르타르로 보수한 실험체 T20-D3은 안정적으로 하중을 지지하다가 모르타르의 파단으로 급격하게 내하력을 상실하였다. 이후 지속적으로 하중을 가하자 이 실험체는 Control 실험체의 인장철근 항복 이후와 유사하게 거동하였다. T40-D3과 T60-D3도 T20-D3과 거의 유사한 거동을 보였다. 인장부 보수 실험체에서도 폴리머 모르타르에는 하나의 휨균열만이 발생하였으며, 모체 콘크리트와 모르타르 계면에서의 파괴는 발생하지 않고 완전부착 거동을 보였다.

### 3.2 하중-처짐관계

Table 4와 Fig. 5에 각각 폴리머 모르타르로 보수된 보들의 실험결과 요약과 하중-변위 관계를 나타내었다. Table 4에는 Control 실험체 극한하중의 60%( $0.6P_{u,con}$ )로 정의되는 사용하중 작용시 모르타르 보수 실험체들의 휨강성(EI)을 산정하여 나타내었다. Fig. 5에는 Control 실험체의 하중-변위 관계를 비교를 위해 함께 나타내었다.

Control 시험체는 사용상태의 휨강성이 238.6 kN-m<sup>2</sup>로 나타났으며, 인장철근 항복이후 급격하게 처짐이 증가하다가 압축부 콘크리트의 압괴가 발생하면서 내력을 상실하였다. 이 실험체의 연성지수는 3.95로 계산되었다. 압축부를 20 mm 보수한 C20-D1과 C20-D3의 휨강성은 각각 244.5, 264.1 kN-m<sup>2</sup>

Table 4 Summary of test results

Specimen	Service state		Yield state		Ultimate state		Ductility factor
	$\Delta_{0.6P_{u,con}}$ (mm)	$EI_{0.6P_{u,con}}$ (kN-m <sup>2</sup> )	$P_y$ (kN)	$\Delta_y$ (mm)	$P_u$ (kN)	$\Delta_u$ (mm)	$\frac{\Delta_u}{\Delta_y}$
Control	8.31	238.6	20.46	10.63	27.18	41.98	3.95
C20-D1	8.13	244.5	21.32	11.28	30.78	101.72	9.02
C20-D3	7.55	264.1	22.62	11.62	31.90	95.72	8.24
C40-D1	8.61	230.3	21.06	12.83	28.82	104.25	8.13
C40-D3	8.92	222.5	21.06	12.37	28.84	65.54	5.30
C60-D1	8.56	233.0	20.3	10.80	29.32	56.64	5.24
C60-D3	7.63	260.6	25.5	13.86	24.96	13.44	0.97
T20-D1	3.74	535.3	18.04	7.04	21.72	5.58	0.79
T20-D3	2.54	792.2	18.90	6.06	27.18	5.80	0.96
T40-D1	4.32	460.6	32.12	10.62	32.15	10.62	0.74
T40-D3	4.46	450.1	19.96	12.30	31.20	10.42	0.85
T60-D1	3.74	535.3	16.78	12.44	28.22	7.02	0.56
T60-D3	4.33	460.6	13.7	7.02	22.82	6.42	0.91



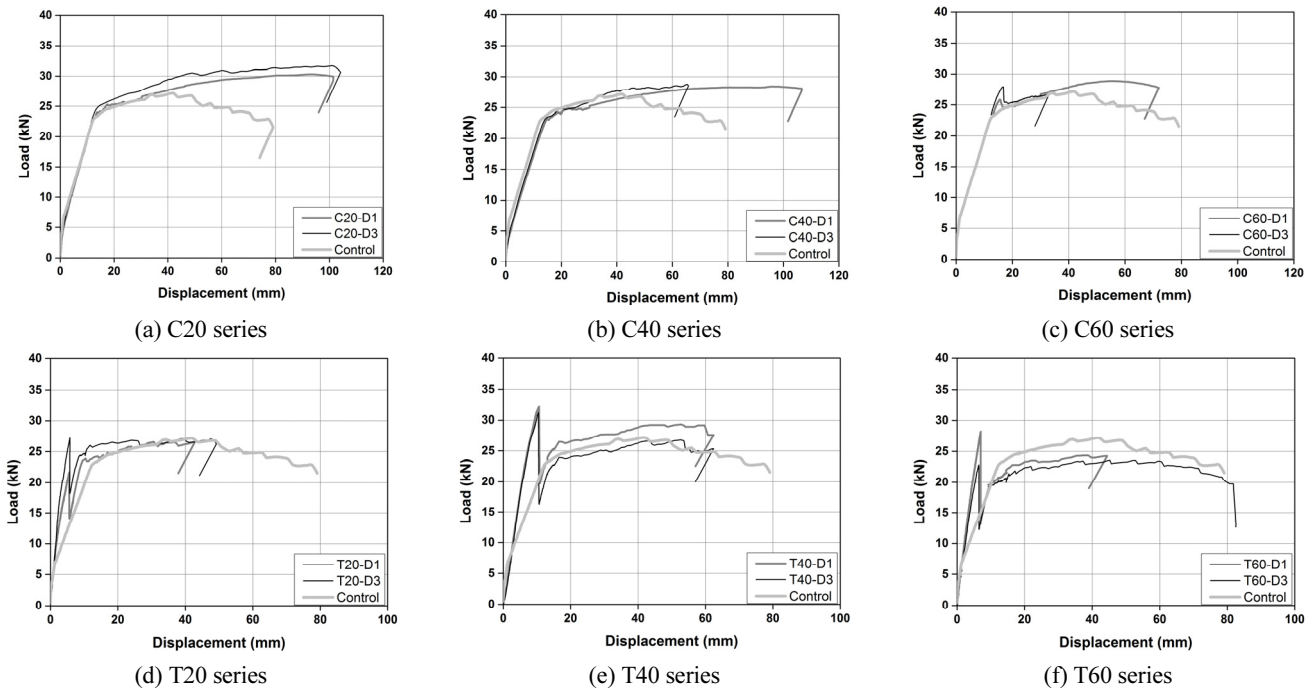


Fig. 5 Comparison of load-displacement curves

으로 Control과 큰 차이를 보이지 않았다. 인장철근 항복이후에는 모르타르의 부착파괴나 압괴가 발생하지 않고 처짐이 계속적으로 증가하는 연성적인 거동을 보였다. C20-D1과 C20-D3의 연성지수는 각각 9.02와 8.24로 Control보다 2배 이상 연성이 개선된 결과를 나타내었다. C20-D3가 C20-D1보다 다소 연성이 감소하였으나 전체적인 거동에는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 압축부를 40 mm 보수한 C40-D1과 C40-D3의 사용상태 휨강성과 최대하중은 Control 실험체와 큰 차이를 보이지 않았으며, 연성지수는 각각 8.13, 5.30으로 모르타르 재령이 증가할수록 뚜렷하게 감소하는 경향을 보였다. Fig. 5(c)에 압축부를 60 mm 보수한 C60 시리즈의 하중-변위 곡선을 나타내었다. C60-D1과 C60-D3 모두 사용상태 휨강성은 Control과 유사하였으며, 인장철근의 항복이후 갑작스런 1차 모르타르 파열음과 함께 하중이 다소 감소하였다. 이후 하중을 계속적으로 가하자 2차 모르타르의 파열음과 함께 내력이 상실되었다. C60-D1과 C60-D3의 연성지수는 각각 5.24, 0.97로 모르타르 재령이 증가할수록 급격하게 연성이 감소하였다. 즉, 보수 깊이가 증가할수록 모르타르 재령 증가에 따른 연성 감소현상이 뚜렷하게 나타났다. 이는 폴리머 모르타르로 압축부를 보수하더라도 보수깊이가 깊어지게 되면 폴리머 모르타르 일부가 중립축 이하에 위치하게 되어 인장응력이 발생하기 때문으로 판단된다. 즉, 폴리머 모르타르로 압축부를 보수하는 경우라도 연성을 확보하기 위해서는 보수깊이를 중립축 이상으로 제한하는 것이 바람직한 것으로 생각된다.

인장부를 20 mm 보수한 T20-D1과 T20-D3의 사용상태 휨강성은 각각 539.3, 792.2 kN·m<sup>2</sup>으로 Control 실험체보다 크게 개선되는 결과를 나타내었다. 이후 약 5 mm 처짐이 발생한 시점에서 갑작스럽게 인장부 모르타르가 파단되면서 하중이 감소하였다. 그 이후에는 Control 실험체와 유사한 휨거동을 보였다. T20-D1과 T20-D3 실험체의 연성지수는 각각 0.79, 0.96으로 최대하중이 발현된 이후에 인장철근이 항복하였다. 인장부를 40 mm 보수한 T40-D1과 T40-D3은 사용상태 휨강성이 각각 460.6, 450.1 kN·m<sup>2</sup>으로 Control보다 약 1.9배 개선되었으며, 약 10 mm 처짐이 발생한 시점까지 안정적으로 하중을 지지하다가 갑작스럽게 모르타르 파단하면서 내력을 상실하였다. 그 이후 거동은 Control과 유사하였다. T40-D1과 T40-D3 실험체의 연성지수는 각각 0.74, 0.85로 최대하중이 발현된 이후에 인장철근이 항복하는 매우 취성적인 거동을 보였다. 인장부를 60 mm 깊이로 보수한 T60-D1과 T60-D3는 각각 539.3, 792.2 kN·m<sup>2</sup>의 휨강성을 보였으며, 약 5 mm 처짐이 발생한 시점까지 안정적으로 하중을 지지하다가 갑작스럽게 모르타르가 파단하면서 내력을 상실하였다. T60-D1과 T60-D3 실험체의 연성지수는 각각 0.56, 0.91로 최대하중이 발현된 이후에 인장철근이 항복하는 매우 취성적인 거동을 보였다.

인장부를 보강한 모든 실험체의 사용하중 상태에서의 휨강성은 Control 실험체와 비교하여 2배 이상 향상되었다. 극한 상태에서는 최대하중이후 인장부 모르타르가 파단하면서 내력을 상실하는 매우 취성적인 휨거동을 나타내었다. 또한,

Fig. 5(f)에서 볼 수 있는 것과 같이 보수두께가 과다하게 커지면 중립축이 하강하여 인장부 보수모르타르의 하면은 인장응력, 상면은 인장응력을 받는 복합응력 상태가 되어 보다 빠른 시점에서 매우 취성적 파괴가 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 폴리머 모르타르로 인장부를 보수하는 경우에도 보수 효율성을 높이기 위해서는 적정 보수깊이의 선정이 선행되어야 할 것으로 판단된다.

### 3.3 하중-변형률관계

Fig. 6에 폴리머 모르타르를 60 mm 깊이로 보수한 실험체의 하중-변형률 관계를 나타내었다. 압축부를 보수한 실험체의 모르타르는 재하 초기에는 압축변형률이 발생하였으나, 하중이 증가하여 중립축이 상승하면서 모르타르 일부에는 인장변형률이 발생하기 시작하였다. 인장철근이 항복변형률 2800  $\mu\epsilon$ 을 초과하면서 모르타르의 인장변형률이 급격하게 증가하여 약 400  $\mu\epsilon$ 에 도달했을 때 모르타르가 파단되면서 보가 파괴되었다. 인장부를 60 mm 깊이로 보수한 실험체의 모르타르는 하중 재하 초기부터 인장변형률이 발생하였다. 하중이 증가하면서 변형률이 선형적으로 증가하다가 모르타르의 변형률이 약 400  $\mu\epsilon$ 에 도달했을 때 급작스럽게 모르타르가 파단되었다. 이때 인장철근의 변형률은 아직 항복하지 않고 탄성거동을 하고 있었다. 폴리머 모르타르로 보수된 부재가 연속적으로 거동하기 위해서는 극한상태까지 모르타르에 파단 인장변형률이 발생하지 않도록 보수깊이를 결정해야 함을 확인할 수 있다.

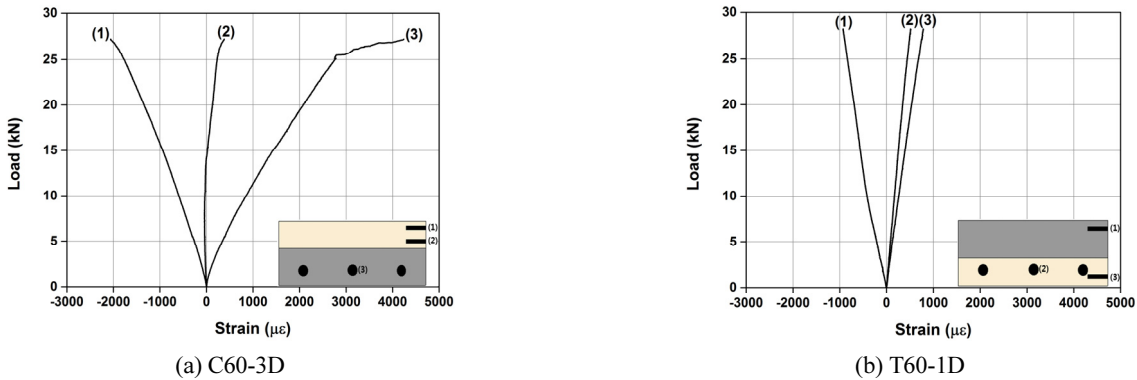


Fig. 6 Comparison of load-strain curves

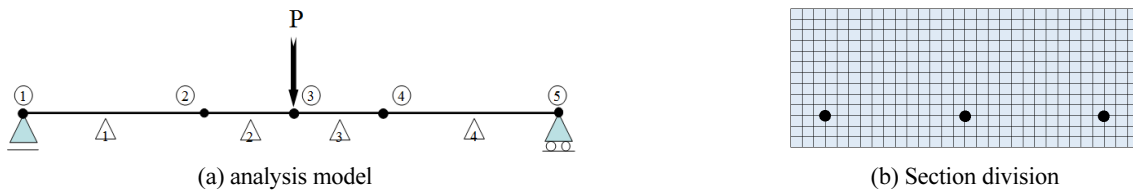


Fig. 7 Model of structure analysis

## 4. 유한요소 해석

### 4.1 해석모델

기존 RC보의 해석적 연구에서는 고전적인 뼈대요소와 비교하여 자유도수가 많은 뼈대요소, 2차원 plate/shell 요소, 또는 3차원 solid 요소를 적용한 조밀한 매쉬를 사용하였다 (Barbato, 2009). 이러한 해석모델들은 매쉬형성 및 해석시간이 오래 걸려 실무에서 적용하기에 어려움이 있다. 이에 본 연구에서는 Fig. 7에 나타낸 것과 같이 2차원 뼈대요소를 이용하여 폴리머 모르타르로 보강된 RC 보의 휨거동 해석을 실시하였다. 단면은 비선형 거동을 묘사하기 위해서 2차원 화이버로 모델링하였다. 콘크리트, 철근, 폴리머 모르타르의 재료적 비선형을 고려하기 위해 Fig. 8~10에 나타낸 응력-변형률 모델을 적용하였다. 또한 요소의 수를 줄이면서 해석의 정확도를 향상시키기 위해 각 뼈대요소당 5개의 적분점을 설정하였다. 구조해석은 범용구조해석 프로그램인 OpenSees (Mazzoni, 2006)을 이용하여 수행하였다. 비선형 해석은 하중재하점에 수직변위를 가하여 내력을 계산하는 Newton-Raphson법에 기초한 변위제어법을 사용하였다. 이때 변위의 증분은 한 스텝당 0.001 mm로 지정하였다.

### 4.2 재료모델

해석에 사용된 콘크리트의 재료모델을 Fig. 8에 나타내었다. 콘크리트의 압축거동은 Kent-Scott-Park 모델을 적용하였

으며, 인장거동은 선형 인장연화거동을 가정하였다. Fig. 8에서  $f'_c$ 는 콘크리트 압축강도,  $\epsilon_0$ 는 콘크리트 압축강도 발현 시의 변형률,  $\epsilon_{cu}$ 는 콘크리트의 극한변형률을 나타내며, 입력값으로 각각 30.2 MPa, 0.003, 0.01을 적용하였다.

해석에 사용된 철근의 재료모델은 Fig. 9과 같이 Bi-linear 모델을 적용하였다. 변형률경화 구간에서의 탄성계수는 초기 탄성계수의 0.3%를 적용하였다. Fig. 9에서  $\epsilon_y$ ,  $f_y$ 는 각각 철근의 항복변형률, 항복응력을 나타내며, 입력값으로 560 MPa, 196 GPa을 적용하였다.

폴리머 모르타르에 대한 재료실험을 통해 얻어진 인장 및 압축 응력-변형률 곡선을 토대로 Fig. 10과 같이 폴리머 모르

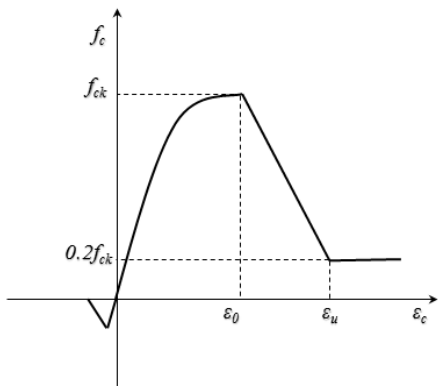


Fig. 8 Concrete material model

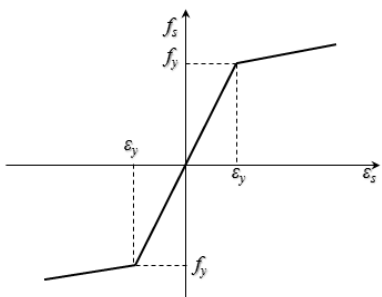


Fig. 9 Steel material model

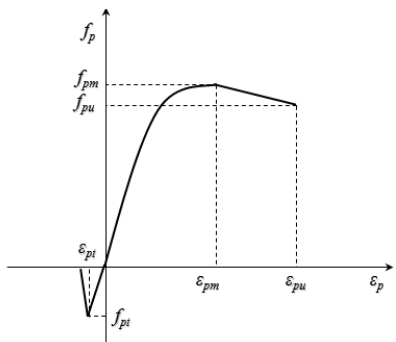


Fig. 10 Mortar material model

타르를 모델화하였다. 폴리머 모르타르의 시간의존적 재료비 선형을 고려하기 위해 재령 1일과 3일에 압축 및 인장강도 시험을 실시하였으나 재령에 따른 차이가 나타나지 않았다. 이에 구조해석에서는 재령의 영향을 고려할 수 없어 해석결과에서는 재령 1일과 3일의 해석결과를 동일하게 제시하였다. Fig. 10의  $f_{pm}$ ,  $f_{pu}$ ,  $f_{pt}$ ,  $\epsilon_{pm}$ ,  $\epsilon_{pu}$ ,  $\epsilon_{pt}$  입력 값으로 각각 37.2 MPa, 33.9 MPa, 8.3 MPa, 0.0124, 0.0258, 0.001을 사용하였다.

### 4.3 해석결과

Table 5와 Fig. 11에 해석결과와 실험결과의 비교를 나타내었다. Table 5에 나타난 바와 같이 압축부를 보수한 실험체의  $P_{Analysis}/P_{Test}$ 는 0.94~1.14로 구조해석은 실험결과를 매우 적절하게 예측하는 것으로 나타났다. Fig. 11(a)~(c)에서도 해석결과는 비교적 압축부를 보수한 실험체의 하중-처짐 관계를 적절하게 예측함을 알 수 있다.

인장부를 보수한 실험체의  $P_{Analysis}/P_{Test}$ 는 1.00~1.63으로 해석결과는 실험결과를 과대평가하는 결과를 보였다. 특히, 인장부를 60 mm 깊이로 보수한 실험체 T60-D1과 T60-D3의  $P_{Analysis}/P_{Test}$ 이 각각 1.32와 1.63으로 매우 큰 오차를 나타내었다. 이는 해석상의 오류라기보다는 보수 두께가 두꺼워짐에 따라 폴리머의 인장변형률이 급격하게 증가하여 일부 단면이 파단할 때의 충격으로 전체 보수 단면이 파단되기 때문에 나타난 현상으로 판단된다. 한편, Fig. 11(d)~(e)는 구조해석이 인장부를 보수한 실험체의 강성 증가 및 취성적 파괴를 적절하게 예측함을 보여준다.

따라서, 본 연구에서 제시한 해석모델은 폴리머 모르타르로 보수한 구조물의 휨거동을 예측하는데 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

Table 5 Analysis results

Specimen	Test result ( $P_{Test}$ ) (kN)	Analysis result ( $P_{Analysis}$ ) (kN)	$\frac{P_{Analysis}}{P_{Test}}$
C20-D1	30.78	30.09	0.98
C20-D3	31.90	30.09	0.94
C40-D1	28.82	27.87	0.97
C40-D3	28.84	27.87	0.97
C60-D1	29.32	28.35	0.97
C60-D3	24.96	28.35	1.14
T20-D1	21.72	27.36	1.26
T20-D3	27.18	27.36	1.01
T40-D1	32.15	32.02	1.00
T40-D3	31.20	32.02	1.03
T60-D1	28.22	37.12	1.32
T60-D3	22.82	37.12	1.63

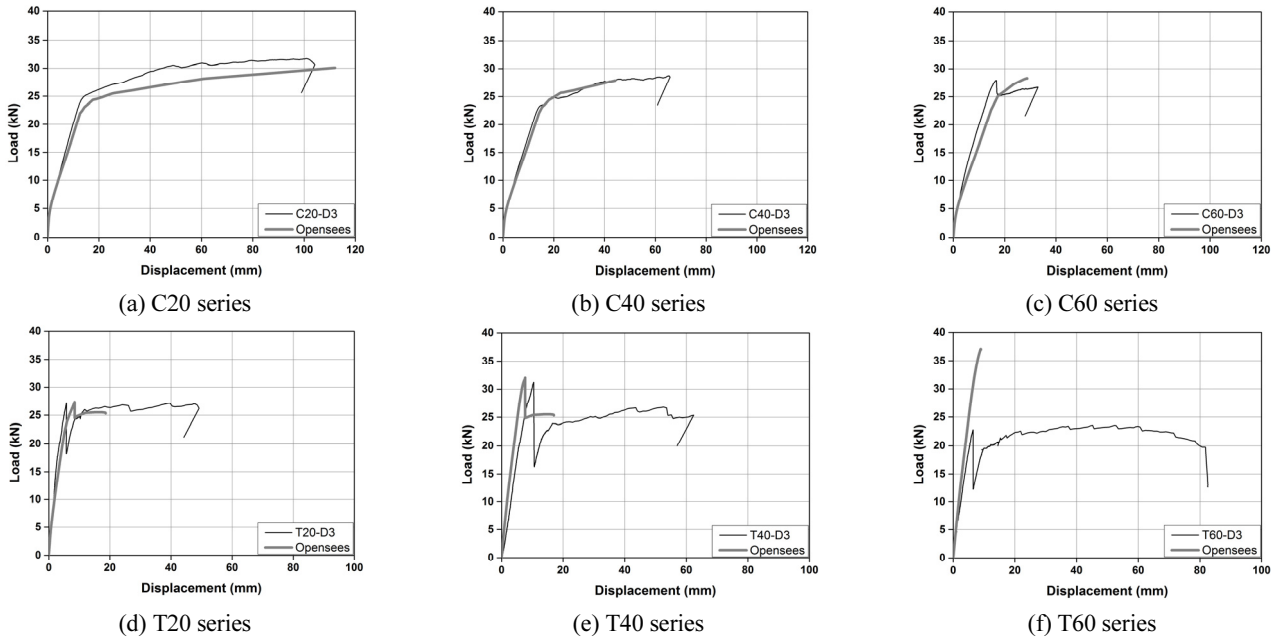


Fig. 11 Comparison of test and analysis results

## 4. 결론

본 연구에서는 압축부와 인장부가 결손된 휨부재를 폴리머 모르타르로 보수하여 그 거동을 실험적·해석적으로 분석하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 압축측 결손부를 폴리머 모르타르로 보수한 실험체의 최대하중은 크게 증가하지 않았으나, 연성은 크게 개선되었다. 또한, 모체콘크리트와 모르타르 계면에서의 파괴는 발생하지 않았으며, 모르타르의 재령이 증가할수록 연성이 감소하는 경향을 나타내었다.
- 2) 인장측 결손부를 폴리머 모르타르로 보수한 실험체의 사용상태의 휨강성은 Control과 비교하여 2배 이상 개선되었으나, 최대하중이후 인장철근이 항복하는 매우 취성적인 휨거동을 보였다.
- 3) 압축측과 인장측을 보수한 실험체 모두 폴리머 모르타르의 두께가 증가함에 따라 파괴가 취성적으로 전환되었다. 따라서 폴리머 모르타르 보수시 적절한 연성확보를 위해서는 극한상태에서 폴리머 모르타르에 극한 인장변형률이 발생하지 않도록 보수두께를 적절하게 선정하는 것이 필할 것으로 판단된다.
- 4) 2차원 골조요소와 파이버 모델을 이용한 비선형 해석은 비교적 적절하게 폴리머 모르타르로 보수한 RC부재의 휨거동을 적절하게 예측하는 것으로 나타났다.

## References

- Ahmad, S., Elahi A., Barbhuiya, S. A., and Farid Y. (2012), Use of polymer modified mortar in controlling cracks in reinforced concrete beams, *Construction and Building Materials*, 27, 91-96.
- Barbato, M. (2009), Efficient Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Beams Retrofitted with Fiber Reinforced Polymers, *Computers and Structures*, 87(3-4), 167-176.
- Cho, H. N. (2000), Flexural Behavior of Damaged Reinforced Concrete Beams repaired with Epoxy Mortar, *Master's Thesis of Ewha University*.
- Hong, J. K. (2015), A Study on Properties of PVAc Polymer Repair Material for Concrete Structure Maintenance, *Master's Thesis of Hanyang University*.
- Hwang, E. H., Hwang, T. S., and Ohama, Y. (1994), The Strength and Durability of Polymer-Cement Mortars, *Journal of the Korean Industrial and Engineering Chemistry*, 5(5), 786-794.
- Hyung, W. G., Kim, W. K., and Soh, Y. S. (2005), Durability of Polymer-Modified Mortars Using Acrylic Latexes with Methyl Methacrylate, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 17(3), 411-418.
- Joo, M. J., Lee, Y. S., and Jung, I. S. (2004), Drying Shrinkage and Strength Properties of High-Fluidity Polymer-Modified Mortar, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 16(5), 651-657.
- Kim, B. G., Shin, Y. S., Hong, G. S., Hong, Y. K., and Choi, O. C. (1997), An Evaluation on the Flexural Strength of Concrete Beams Repaired by Polymer resin, *Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 1(1), 107-112.
- Kim, W. K. and Jo, Y. K. (2007), Strength Properties of Polymer-Modified Repair Mortars according to Curing Conditions and Repair Methods, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 19(4), 457-465.



Kosednar, J. and Mailvaganam N. P. (2005), Selection and Use of Polymer-Based Materials in the Repair of Concrete Structures, *Journal of performance of constructed facilities*, 19(3), 229-233.

Lee, M. H. and Song, T. H. (2007), An Experimental Study on the Flexural Behavior of One-Way Concrete Slabs Using the Restorative Mortar and Crimped Wire Mesh, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 19(5), 569-575.

Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M. H., and Fenves, G. L. (2006), OpenSees Command Language Manual, *Pacific Earthquake Engineering Research Center*.

Song, H. S., Lee, C. Y., and Min, C. S. (2006), Effects of Polymer in Properties of Pre mixed Type Mortar for Concrete Repair, *Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 10(4), 153-159.

Received : 09/23/2016

Revised : 10/26/2016

Accepted : 11/17/2016

---

**요 지** : 본 논문은 폴리머 모르타르로 보수된 철근콘크리트 보의 휨거동을 실험적·해석적으로 분석한 결과를 제시한다. 실험적 연구에서는 보수위치, 모르타르 재령을 실험변수로 고려하여 제작된 13개의 보에 대한 3점 휨실험이 실시되었다. 인장축 및 압축축을 보수한 실험체들의 파괴는 모르타르와 콘크리트의 계면에서 발생하지 않았으며, 폴리머 모르타르의 인장변형률이 극한변형률을 초과하는 순간 발생하였다. 압축축을 보강한 실험체들은 기준실험체의 최대하중과 유사하였다. 그들의 연성지수는 기준실험체보다 훨씬 컸다. 인장축을 보수한 실험체는 매우 취성적으로 파괴되었으며, 연성지수가 크게 감소하였다. 폴리머 모르타르로 보수된 철근콘크리트의 보의 휨거동을 예측하기 위해 Opensees를 사용한 재료비선형 해석을 진행하였다. 해석 모델을 단순화하기 위해 2차원 골조요소를 적용하였으며, 재료 비선형성을 고려하기 위해 파이버 모델을 적용하였다. 해석결과는 비선형 구조해석은 압축축 보수 실험체의 휨거동을 적절하게 예측하나, 인장축 휨거동은 다소 과대 평가하는 것으로 나타났다.

**핵심용어** : 재령, 연성지수, 비선형해석, 폴리머 모르타르, 보수

---