

# 철판압착법에 의해 보강된 휨부재의 구조적 거동에 관한 실험 연구

An Experimental Study on the Structural Behavior of the Repaired Flexural Members by Epoxy-Bonded Steel Plates

황 규 표*	장 성 재*	고 훈 범**
Hwang, Kyu Pyo	Jang, Sung Jae	Ko, Hune Bum
O 임 재 형**	음 성 우***	문 장 수****
Lim, Jae Hyung	Eum, Seong Woo	Moon, Jang Soo

## ABSTRACT

This paper presents comprehensive test data on the effect of Epoxy-Bonded Steel Plates on the ultimate strengths, ductilities, failure modes and structural deformations of flexural members strengthened with steel plates on the tension face. To achieve the purpose, six specimens with and without Epoxy-Bonded Steel Plates were tested. The results show that Epoxy-Bonded Steel Plate is very effective for strengthening the damaged structure. That is, plated members have enhanced ultimate strength at all load levels until failure. However, the final failure mode of plated members is brittle as soon as steel plate separates from concrete face.

## 1. 서 론

철근콘크리트 구조물이 시공된 후, 그 존속 기간동안 수축 및 진동, 구조설계 또는 시공상의 오류, 구조물의 노후화, 과다하중, 강도 저하등 여러가지 요인들에 의하여 구조체에 균열이 발생되고, 건축물이 변형되어 구조물을 보강하게 된다.

손상된 콘크리트 구조물의 보수, 보강방법으로 에폭시 주입법과 에폭시와 철판을 이용한

철판압착보강법이 널리 사용되고 있는데, 철판압착보강법은 사용중인 구조물을 상대적으로 신속하게 보강할 수 있으며 보강후 부재크기의 변화가 매우 적고, 건축구조물의 인장, 압축, 전단부위등 광범위하게 콘크리트표면에 시공된다는 장점이 있는 반면, 열을 취급하는 공간의 부재보강시 또는 화재발생시에는 불리한 보수보강법이라 할 수 있다. 또한, 에폭시 보강재료는 접착력이 뛰어나고 내화학적, 내수성이 높아 광범위하게 사용되고 있으나, 재료의 기본성능에 대한 연구와 구조적 성능의 발휘성 여부에 대한 실험적 근거와 그 효율성을 규명하기 위한 연구가 극히 제한되어 있으며 재료성능표에 언급되어 있는 내용을 그대

\* (주) 금호건설 기술연구소 연구원

\*\* (주) 금호건설 기술연구소 주임연구원

\*\*\* (주) 금호건설 기술연구소 책임연구원, 공박

\*\*\*\* (주) 금호건설 기술연구소 수석연구원, 기술사

로 사용하고 있다.

따라서, 본 연구는 보수보강법중에서 철판 압착에 의해 보강된 PC계단부재와 철판압착으로 보강되지 않은 PC계단부재에 대한 실험을 통해 구조적 거동을 비교 분석하여 보수보강 공사에 대한 기초자료를 제시하고자 한다.

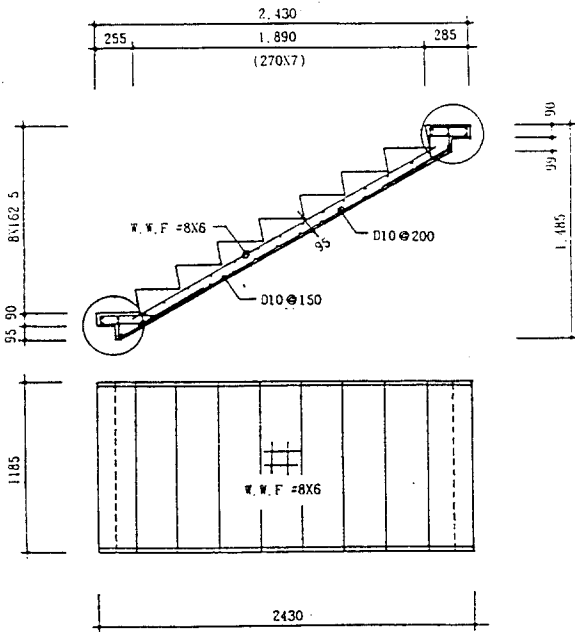


그림1 시험체의 형상

## 2. 실험

### 2.1 시험체 개요

본 실험은 철판압착 보강에 의한 휨부재의 구조적 거동을 파악하기 위한 것으로서 초기 강성과 연성효과 및 종국내력상승효과, 파괴 형태, 에폭시에 의한 철판과 콘크리트의 부착 성능등을 주로 고찰하고자 하였다. 따라서 시험체는 실험목적에 부합할 수 있는 휨부재로써 PC공장에서 기계작해 놓은 PC계단부재를 임의로 선정하였다. 시험체는 그림1에서 나타낸 것과 같이 크기 및 철근의 배근형태, 배근량등이 동일한 PC계단판이며 다만 시험변수는 철판의 부착유무 및 철판부착시 앵커볼트 사용유무로 하였다. 시험체일람은 표1과 같다.

### 2.2 실험방법

실험은 에폭시에 의해 철판압착보강을 완료한 3일후에 철판보강을 실시하지 않은 시험체 부터 6개 시험체 모두를 음성PC공장에 설치되어 있는 100ton용량의 Strong Frame으로 실시하였으며, 실험의 종료는 시험체가 완전히 파괴하여 더이상의 외력에 저항하지 못할때까지 실시하는 것으로 하였다. 각 시험체는 단순지지 조건하에 2점단조가력하였다. 가력은 초기

표1 시험체 일람표

시험체명	b (mm)	$D_{min}$ (mm)	$A_s$ ( $cm^2$ )	$A_s'$ ( $cm^2$ )	철판유무	앵커볼트 사용유무	비고
A - 1	1185	95	8EA-D10 (5.68)	W.W.F #8x6 (4.024)	유	유 (6개)	
A - 2					유	유 (6개)	
A - 3					유	무	
B - 1					무	-	
B - 2					무	-	
B - 3					무	-	
* NOTE : 1) 철판의 재질 : SS41 ( $F_y=2,860kg/cm^2$ )					4) 콘크리트강도 : $f_c'=283kg/cm^2$		
2) 철판의 크기 : 3.2 x 2,428 x 1,100					5) 철근의 강도 : $F_y=3,900kg/cm^2$		
3) W.W.F #8x6 : $F_y=5500kg/cm^2$					6) 에폭시 재료 : E-BOND 550		

부터 항복시까지 하중제어방식으로 실시하였고, 항복이후에는 하중 및 변위제어방식으로 실시하였다. 각 시험체의 하중단계에 따라 처짐량을 측정하였고, 콘크리트 표면 및 철판 표면의 변형도를 측정하였으며, 하중의 단계마다 시험체에 발생하는 균열의 형태를 관찰하였다. 그림2는 시험체의 설치상황을 나타내고 있다.

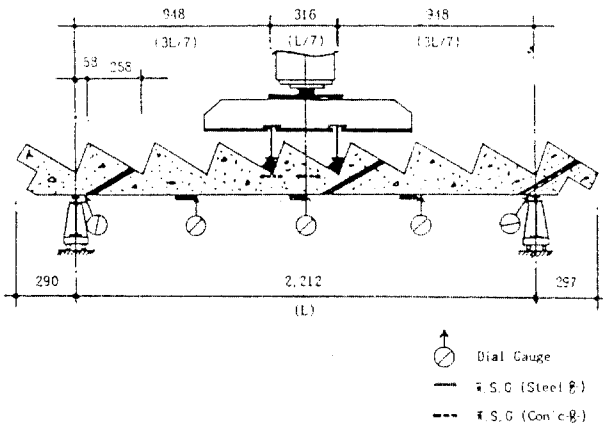


그림2 시험체의 설치상황

표2 시험체별 실험결과 일람표

시험체명	하중 (Ton)		변위 (mm)		파괴형태
	Pcr	Pmax	$\delta_{cr}$	$\delta_{max}$	
	(1)	(2)	(3)	(4)	
A-1	7.0	16.8	5.31	20.0	철판분리+휨전단+압괴
A-2	5.0	16.5	2.35	9.50	철판분리+휨파괴
A-3	5.0	14.7	2.50	7.50	철판분리+휨파괴
B-1	1.0	5.50	2.29	120.0	휨파괴
B-2	0.8	5.58	1.30	109.8	휨파괴
B-3	1.0	6.60	1.85	90.05	휨파괴

\* NOTE : (1) 초기균열 발생시 하중  
(2) 최대하중  
(3) 초기균열 발생시 변위  
(4) 최대하중시 변위

## 2.3 실험 결과

실험은 실험여건이 허락하는 조건하에서 시험체가 파괴되거나 최대하중시까지 계속하는 것을 원칙으로 하였으나, 시험체의 파괴형태에 따라 실험진행여부를 판단하였다. 따라서 철판으로 보강하지 않은 시험체는 파괴가 이미 종곡에 도달하여 더 이상의 강성을 발휘할 수 없다고 판단되어 최대하중에서 실험을 중단하였으며, 철판으로 보강한 시험체는 철판의 분리에 의한 종곡내력의 저하현상이 발생하였을 때 실험을 중단하였다. 그 결과들을 표 2에 나타내었다.

## 3. 실험결과와 비교·분석

### 3.1 일반사항

각 시험체의 거동을 특징짓는 하중-변위 곡선을 일반화하여 거동을 비교·분석하였다. 다만, 시험체의 완전파괴보다도 실험의 주변여건 및 실험진행의 상황을 고려하여 실험이 종료되었기 때문에 종곡내력의 상태 및 종곡변위의 값은 약간의 오차가 발생할 것으로 사료된다. 그러나, 실험이 종료되었을 때의 시험체 상태는 거의 완전파괴 직전의 상태였기 때

표3 시험체별 실험결과 비교

시험체명	ePcr (ton)	ePy (ton)	ePmax (ton)	ePcr/ePy	ePmax/ePy	eKe (ton/mm)
A-1	7.0	15.2	16.8	0.46	1.11	2.11
A-2	5.0	16.5	16.5	0.30	1.00	1.94
A-3	5.0	14.7	14.7	0.34	1.00	2.01
B-1	1.0	2.50	5.50	0.40	2.20	0.67
B-2	0.8	3.89	5.58	0.21	1.43	0.62
B-3	1.0	4.80	6.60	0.21	1.38	0.56

\* ePcr : 실험에 의한 균열하중  
ePy : 실험에 의한 항복하중  
ePmax : 실험에 의한 최대하중  
eKe : 실험에 의한 탄성구배

문에 본 연구자는 시험체가 완전히 파괴된 것으로 판단하였다. 이때의 하중을 최대하중이라고 하였고, 해석을 통해 이론적으로 최대하중 및 항복하중을 예측하여 실험결과와 비교하였으며, 각 시험체에 대한 실험결과를 표3에 나타내었다.

### 3.2 파괴양상

일반적으로 휨부재는 하중이 증가하면서 최대휨모멘트 부분에서 균열이 발생하여 낮은 휨모멘트 부분으로 일정한 간격의 균열이 발생하는 현상을 나타내게 된다. 본 실험에서 철판으로 보강되지 않은 B-Series 시험체의 파괴양상을 살펴볼 때, 일반적인 휨부재와 같은 전형적인 파괴현상을 나타내고 있었다. 그러나, 앵커볼트로 철판을 고정하고 에폭시 주입에 의해 보강된 A-1과 A-2 시험체는 휨균열의 진전에 의한 전단파괴 및 철판의 분리에 의한 취성파괴의 형태를 나타내고 있었다.

또한, A-Series 시험체의 최종파괴시 취성적인 현상뿐만 아니라, 철판과 콘크리트의 전단력에 의한 앵커볼트의 절단 및 휨현상도 발생하였다. 이것은 최종파괴시까지 철판이 탄성적으로 거동하다가(에폭시에 의해 부착되어 콘크리트와 일체로 거동), 최대하중에서 에폭시의 부착성능이 발휘되지 못하고 철판과 콘크리트가 분리되었기 때문으로 사료된다.

앵커볼트를 사용하지 않고 에폭시 주입에 의해 철판으로 보강된 A-3 시험체에서는 앵커볼트를 사용하고 에폭시 주입에 의해 철판으로 보강된 A-1 및 A-2 시험체에서와 같은 파괴현상이 나타난 것으로 보아 앵커볼트의 사용여부는 시험체의 파괴양상에 영향을 주지 못하는 것으로 사료된다. 그러나 최대내력 비교에서 언급하겠지만, 앵커볼트의 사용은 최대내력 상승에 영향을 주고 있었다.

### 3.3 하중-변위 관계

그림3에 각 시험체의 하중-변위 곡선을 비교하여 나타내었다. 하중-변위 곡선의 모양에서 시험체의 거동을 고찰해 보면, B-Series 시험체에서는 전형적인 휨부재의 거동형태로써 항복하중까지는 탄성거동이며, 항복하중 이후에는 하중의 증가량보다 변위의 증가량이 급격히 커지는 연성거동( $\Delta_u/\Delta_y > 1$ )의 형태를 나타내고 있다. 그러나 A-Series 시험체는 최대하중에 도달할 때까지 곡선의 기울기가 탄성구배였으며, 최대하중에 도달한 후, 하중은 철판으로 보강되지 않은 시험체에서의 항복하중점까지 급격히 감소하는 취성적인 형태의 거동을 나타내고 있다. 이와 같은 현상은 최고하중에 도달할 때까지 에폭시의 부착성능이 우수하여 보강된 철판이 인장보강재로써 역할을 충분히 할 수 있었기 때문이며, 취성적인 거동은 철판의 항복에 의한 파괴가 아니고 철판과 콘크리트사이의 접착재로 사용되고 있는 에폭시의 파괴 및 철판과 콘크리트의 분리에 의한 원인으로 사료된다.

또한, 철판을 에폭시 주입에 의해 보강할 때, 앵커볼트를 사용한 A-1, 2 시험체와 앵커볼트를 사용하지 않은 A-3 시험체와의 거동은 전체적으로 비슷한 상태임을 알 수 있었다.

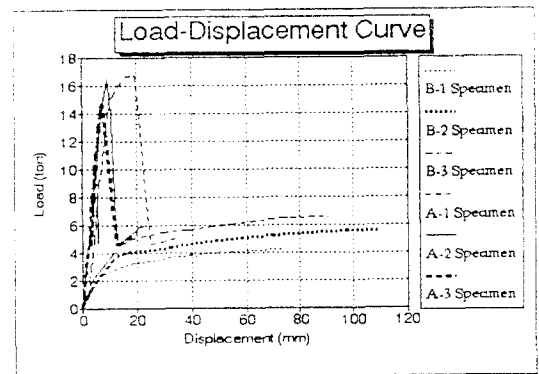


그림3 하중-변위 곡선의 비교

그러나, 최대내력에서 A-1,2시험체가 A-3시험체보다 약 12~14%정도 높게 평가되어 앵커볼트가 내력상승에 효과적이라 할 수 있지만, 철판압착보강시 앵커볼트의 역할은 내력상승의 효과보다도 보강초기에 철판의 지지효과를 위해 사용된 것으로 판단해야 할 것이다.

### 3.4 최대내력 비교

해석은 응력블럭에 의한 모멘트-곡률 관계를 규명하는 Layer모델을 사용하여 항복하중과 최대하중을 구하였다. 해석의 기본가정은 ① 개개의 Layer에 있는 철근과 콘크리트의 변형도는 중립축으로부터의 거리에 선형적으로 비례하며, ② 콘크리트의 인장강도는 무시하고, ③ 전단변형에 의한 영향은 무시한다.

콘크리트는 Thorenfeldt, Tomaszewicz, Jensen에 의해 제안된 모델을 사용하였으며, 철근은 3부분의 직선으로 가정하여 이상화된 모델을 사용하였다.

표4와 그림4에서 나타낸 바와 같이, A-Series 시험체에서 해석결과에 대한 실험결과는 항복하중이 56%~63%이고 최대하중은 56%~64%이며, B-Series시험체에서는 항복하중이 68%~130%이고 최대하중은 105%~125%로 나타났다. 따라서, 해석에 의한 철판보강한

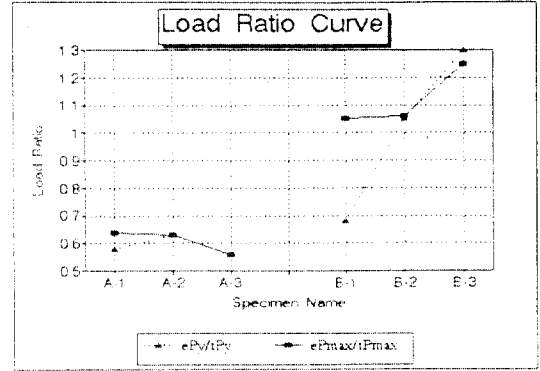


그림4 항복하중 및 최대하중에 대한 해석결과와 실험결과의 비교

시험체의 항복하중 및 최대하중의 예측은 정확하지 못함을 알 수 있었다. 이와 같은 현상은 철판이 최대내력까지 거동할 수 있도록 에폭시가 접착제로써 역할을 다하지 못하였음을 나타낸 것이다. 그러나 철판으로 보강하지 않은 B-Series시험체의 내력과 비교하여 볼 때, A-Series시험체는 3배이상의 내력상승을 나타내고 있어 철판보강의 성능은 우수하다고 할수 있을 것이다.

### 3.5 철판과 콘크리트의 부착성능

철판압착에 의한 휨부재의 보강은 철판과 콘크리트를 부착시켜주는 에폭시의 부착성능에 의해 보강부재의 구조적성능을 향상시킬 수 있다는 사실을 상기의 사실들에 의해 알 수 있었다. 본 실험에서 사용된 에폭시의 부착성능을 실험결과를 통하여 분석해 보면 다음과 같다.

먼저, 하중-변형도 곡선을 살펴보면, A-1시험체에서 시험체의 스펠 중앙부 철판의 변형도가 최대하중에서 항복 변형도에 거의 도달하였음을 알 수 있었으나, A-2시험체와 A-3시험체에서는 철판의 스펠중앙부 변형도가 탄성 상태에 존재하고 있음을 알 수 있었다. 또한,

표4 시험체별 이론과 실험결과의 비교·분석

시험체명	ePy (ton)	ePmax (ton)	tPy (ton)	tPmax (ton)	ePy/tPy	ePmax/tPmax
A-1	15.2	16.6			0.58	0.64
A-2	16.5	16.5	26.07	26.07	0.63	0.63
A-3	14.7	14.7			0.56	0.56
B-1	2.50	5.50			0.68	1.05
B-2	3.89	5.58	3.70	5.26	1.05	1.06
B-3	4.80	6.60			1.30	1.25

\* ePy : 실험에 의한 항복하중  
 ePmax : 실험에 의한 최대하중  
 tPy : 해석에 의한 항복하중  
 tPmax : 해석에 의한 최대하중

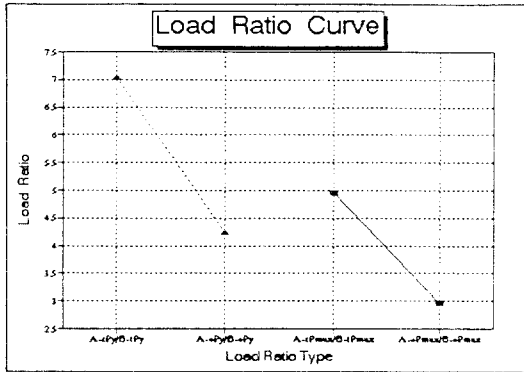


그림5 B-Series시험체에 대한 A-Series 시험체의 하중 비교

그림4에서 A-Series시험체의 최대내력은 해석 결과에 비해 실험결과가 약 60%정도로 시험체에 사용한 에폭시의 부착성능은 철판을 사용한 시험체의 극한내력에 미치지 못함을 알 수 있었다. 그러나, 그림5에서 알 수 있듯이 철판으로 보강하지 않은 B-Series시험체에 비하여 철판으로 보강한 A-Series시험체의 내력의 상승효과는 항복하중 약 4배이상, 최대하중 약 3배이상의 효과가 있음을 알 수 있었다.

#### 4. 결 론

이상의 제한된 실험결과를 비교·분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 철판으로 보강하지 않은 B-Series시험체의 파괴양상은 전형적인 휨파괴의 형태인 반면, A-Series시험체의 파괴양상은 철판과 콘크리트의 분리에 의한 취성파괴였다.

(2) 최대내력에 있어서 B-Series시험체는 해석결과와 실험결과가 거의 일치한 반면, A-Series시험체의 최대내력은 해석결과의 약 60%임을 알 수 있었다. 이와 같은 현상은 해석과정에서 에폭시의 부착성능을 정량적으로 고려하지 못한다에서 연유된 것으로 판단된다.

(3) E-BOND 550 에폭시에 의한 두께3.2mm

철판의 보강효과는 보강하지 않은 시험체보다 약 3배이상의 종곡내력이 상승됨을 알 수 있었다. 따라서 철판에 의한 휨부재의 보강효과는 우수한 것으로 사료된다. 그러나 참고문헌 1)에 의하면, 철판의 두께 및 에폭시 두께등은 보강되어야 할 부재에 따라서 적당한 재질을 선택하여 사용되어야 할 것이며 만일 보강재료가 적당하지 못할 경우에는 취성에 의한 파괴의 형태도 나타날 수 있으며 소정의 효과를 발휘할 수 없는 것으로 보고하고 있다.

(4) 철판압착법으로 보강할때, 철판의 고정을 앵커볼트로 사용한 시험체는 앵커볼트를 사용하지 않은 시험체보다 최대내력이 약 12%~14%정도 상승되었지만, 철판압착보강시 앵커볼트의 역할은 구조체의 내력상승효과보다도 보강초기에 철판의 지지효과를 위해 사용된 것으로 판단해야 할 것으로 사료된다.

본 연구는 당사 음성PC공장에서 (주)침조엔지니어링의 시공자문 및 자료제공에 의해 이루어졌음을 밝히며, 음성PC공장직원 여러분과 (주)침조엔지니어링 회사측에 심심한 감사의 뜻을 표합니다.

#### 참고문헌

1. Swamy, R.N., Jones, R., Bloxham, J.W.: "Structural behaviour of reinforced concrete beams strengthened by epoxy-bonded steel plates", The Structural Engineer/Vol 65A, No.2, February, 1987, pp59-68.
2. Jones, R., Swamy, R.N. and Bouderbah, A.: "Composite behaviour of concrete beams with epoxy bonded external reinforcement", The International Journal of Cement Composites 2, No.2, May, 1980, pp91-107.
3. Michael P. Collins and Denis Mitchell: "Prestressed Concrete Structures", Prentice Hall, Inc., 1991.