

# 보수 보강 부재의 단부 부착력 개선을 위한 피로실험 연구

## A Study on the Fatigue to Improve the End Bond Properties of Repair and Strengthening Member

한만엽\*  
Han, Man-Yup

이영헌\*\*  
Lee, Young-Hun

김동욱\*\*\*  
Kim, Dong-Wook

### ABSTRACT

The concrete structure under fatigue load depresses in mechanical capability or breaks down finally because of the fatigue. So recently the study on strengthening methods using bonded steel plate is widely attended. Which could be constructed under use and without damaging the structure. The intention of this method is to increase the useability of the structure and to recover the strength. So application on fields are sharply increasing.

In this study it is tried to develop strengthening methods using notches and anchor bolts which could supply the defect on falling off of the steel plate at the end.

### 1. 서 론

반복하중을 받는 콘크리트 구조는 피로거동이 분체가 될 수 있다. 콘크리트 구조의 피로는 콘크리트의 강도를 저하시키고 균열을 발전시켜 어떤 경우에는 피로에 의한 추가손상으로 사용하중하에서도 콘크리트 구조의 역학적 기능이 저하되거나 완전파괴에까지 이르게 되는 경우가 있게 된다. 이에 따라 최근에는 구조물의 사용성 향상과 강도회복을 목적으로 구조물에 손상을 주지 않고 사용중에도 시공이 가능한 강판을 이용한 부착식 보강공법에 대한 연구가 활발히 수행되고 있으며, 이에 따라 현장 적용 사례도 대폭적으로 증가하고 있다. 그러나 강판 부착식 보강공법의 경우 보강재 단부에서의 응력집중으로 인하여 시작된 수평균열이 급작히 중앙부로 전진되어 보강재가 국한 내력을 발휘하기 전에 보강재 탈락에 의한 최종적인 파괴형태에 도달하게 된다.

본 실험에서는 노치와 앵커볼트를 이용하여 변형을 준 시험체를 제작하여, 파괴시 반복회수, 반복하중하에서의 균열 및 파괴양상, 하중-중앙처짐, 하중-변형을 관계 등을 조사하여 단부에서의 균열 발생을 억제하거나 완화할 수 있는 보강방법을 찾고자 하였다.

\* 정회원, 아주대학교 토목공학과 교수

\*\* 정회원, 아주대학교 토목공학과 석사과정

\*\*\* 정회원, 아주대학교 토목공학과 석사과정

## 2. 실험

### 2.1 실험계획

본 실험에서 사용된 시험체의 제원 및 보강재의 물성치는 그림 1과 표 1에 제시하였다. 콘크리트는 설계강도가  $210 \text{ kg/cm}^2$ 인 레미콘 제품을 사용하였고, 실험체의 단면치수 및 배근현황은 그림 1과 같이 단면  $15 \times 25\text{cm}$ , 유효길이 22cm, 총길이 240cm, 순지간 200cm으로 제작되었다.

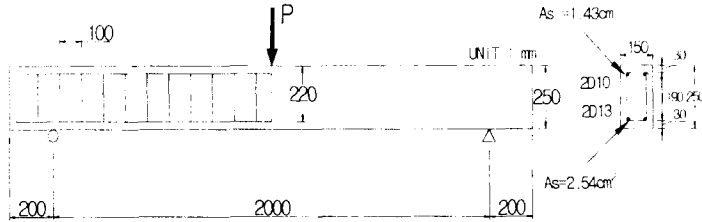


그림 1 시험체 형상

철근은 설계 항복응력  $3500 \text{ kg/cm}^2$ 인 이형철근으로 인장철근 2-D13, 압축철근 2-D10을 사용하였고, 강관의 접착에 사용된 에폭시는 배합비가 주재와 경화제의 무게비로 2:1인 외국의 T사의 EPX-3 제품을 사용하였다. 보강재로는 설계 항복응력이  $2500 \text{ kg/cm}^2$ 인 SS41 강관을 사용하였고, 시험체의 전단파괴방지를 위해 D10의 스테럽을 10cm간격으로 배근 휨 지배를 받는 보로 설계하였다.

표 1. 실험재료의 특성 및 재료

구분	강도 ( $\text{kg/cm}^2$ )	탄성계수 ( $\text{kg/cm}^2$ )	탄성계수비	치수	비고	
시험체	콘크리트	210	$2.17 \times 10^5$	-	$b=15\text{cm}$ $h=25\text{cm}$ $d=22\text{cm}$ $l=200\text{cm}$	
	철근	3,500	$2.04 \times 10^6$	9	$\phi = 10\text{mm}$ $\phi = 13\text{mm}$	
보강재	강관	2,500	$2.0 \times 10^6$	9	$b_s = 10\text{cm}$ $d_s = 0.3\text{cm}$	TYPE 2(SS 41)
에폭시	840~910	$3.56 \times 10^4$	-		EPX-3	

### 2.2 실험변수

표 2 단부 변형에 따른 실험변수

보강재	시험체기호	보강 특성	세부 사항	비고
부보강	ST			
강관	SST	기존보강		
	SBN	노치	위치 :보강재중앙 길이 :3cm	V형 노치
	SEAS	하변보강	단부보강+단부앵커(6)-> 총 12개의 앵커	모서리처리& 2cm의 중앙노치
	SEA		단부에6개씩 총 12개의 앵커	
	SSA		보강재의 등간격 앵커	
SESA	(하변+측면) 보강	단부보강(앵커2)+측면보강(앵커2)->총 12개의 앵커		

본 실험에서는 1개의 부보강 시험체를 기준으로하여, 강관보강 시험체 6개 총 7개의 시험체를 제작하였으며, 1개의 기준보강 시험체를 제작하여 비교의 기준으로 사용하였다. 시험체는 모두 동일한 크기의 강관을 사용하였으며, 실험변수로는 크게 노치의 크기와 앵커볼트(지름6mm, 길이 8cm)의 사용으로 나눌 수 있다. 표 2에는 이러한 노치 종류별 시험체의 명칭과 노치의 특징 등이 요약되어 있다.

### 2.3 재하 및 측정방법

#### 2.3.1 정적재하실험

본 연구에서는 피로실험에 앞서서 시험체의 변수별 정적강도를 알아 보고자 정적재하실험을 실시하였다. 정적재하실험의 실험방법은 1점 휘 실험으로서 Load cell로 재하하였다. 하중 재하는 30t의 유압 잭과 용량 20t의 Load cell을 사용하였고, 모든 시험체에 대하여 항복하중에 도달 할 때까지는 배 100kg마다 측정하였으며, 항복하중 이후에는 치짐이 1mm씩 증가 할 때마다 데이터를 측정하였다.

#### 2.3.2 피로실험

피로실험에 사용된 시험기는 외국 M사의 50ton급 유압식 피로시험기를 사용 반복하중의 최대값과 최소값을 일정하게 유지하는 하중제어방식에 의하여 실험을 수행하였으며, 재하속도는 2Hz의 속도로 재하하였다. 재하하중의 최대하중( $P_{max}$ )은 정적최대강도의 70%로 하였고, 최소하중( $P_{min}$ )은 최대하중( $P_{max}$ )의 10%로 하였다. 표3에 실험체 변수별  $P_{max}$ 와  $P_{min}$ 을 나타내었다. 그리고 정적최대하중이 가장 큰 SST를 제외한 다른 시험체들의 평균정적최대하중의 70%를 최대하중으로 하였다.

표 3 각 시험체별 사용하중

보강재	시험체명	정적하중		동적하중		비 고
		항복하중	최대하중	$P_{max}$	$P_{min}$	
부보강	ST	3300	3913	2700	270	
강관	SST	7900	8673	6100	610	
	SBN	6403	7507	5400	540	
	SEAS	5968	7373	5400	540	
	SEA	5993	7287	5400	540	
	SSA	7193	8247	5400	540	
	SESA	6600	8113	5400	540	

피로하중의 반복회수는 최대 1,000,000회까지로 하였으며 측정을 위하여 표 4와 같은 반복회수에 대하여 피로실험기를 정지시킨 후 정적으로 하중을 증가시키며 측정하였고, 시험체의 과도한 치짐이나 보강재의 탈락등 파괴의 조짐이 보일시에 측정하였다. 측정하중은 최대하중( $P_{max}$ )을 10단계로 나눈 하중에 대하여 균일진전상황, 콘크리트 변형율, 철근 변형율, 보강재 변형율, 변위관계를 측정하였다.

표 4 측정 반복회수

측 정	1	2	3	4	5	6	7	8
반복회수	1	10	100	1,000	10,000	100,000	200,000	300,000
측 정	9	10	11	12	13	14	15	X
반복회수	100,000	500,000	600,000	700,000	800,000	900,000	1,000,000	

### 3. 실험 결과 및 분석

#### 3.1 시험체별 파괴시 피로하중회수와 파괴형태

표 5는 피로시험을 통하여 측정된 시험체 파괴시의 피로하중 반복회수와 파괴형태를 나타낸 것이다. 무보강 시험체의 경우 중앙부에서 전형적인 휨 파괴가 발생하였고, 에폭시의 상태가 양호한 기존보강 시험체(SST)의 경우 보강단부에서 발생한 균열의 발달로 우측강관이 콘크리트를 붙고 떨어지는 파괴 형태를 보였다. 그러나, SSA를 제외한 하변보강 시험체(SEAS,SEA)의 경우 에폭시 주입공을 통해 에폭시가 흘러 나오는등 에폭시 양생불량으로 인해 콘크리트와 강관이 서로 다른 거동을 보인다. 좌,우측에 각각 6개씩 설치한 앵커가 전단파괴를 일으켜 보강재가 탈락하는 파괴형태를 보였다.

표 5 시험체별 파괴시 피로하중회수와 파괴형태

시험체명	피로하중크기			파괴 반복회수	파괴형태
	%	$P_{max}$	$P_{min}$		
무보강	70	2700	270	272,534	휨 파괴
SST	80	6900	690	113,532	측면 강관 탈락(에폭시 양호)
SBN	70	5400	540	10,000	중앙부 노치 파단(에폭시 양호)
SEAS	70	5400	540	41,498	측면 강관 탈락(에폭시 불량)
SEA	70	5400	540	77,988	측면 강관 탈락(에폭시 불량)
SSA	70	5400	540	15,032	중앙부 노치 파단(에폭시 양호)
SESA	70	5400	540	18,076	중앙부 노치 파단(에폭시 양호)

#### 3.2 하중 - 처짐 측정결과

아래의 그림2는 모든 시험체에 대해 각 측정단계마다 Load cell과 변위측정기(LVDT)를 통해 측정 한 하중과 처짐을 나타낸 그래프이다.

모든 시험체가 하중회수가 증가함에 따라 처짐량의 변화에는 차이가 있으나 계속적인 증가를 보였다. 에폭시 양생불량인 시험체(SEAS, SEA)가 각 측정단계마다 많은 처짐량의 변화를 보인 반면, 중앙부의 노치 파단으로 파괴가 발생한 시험체(SBN, SSA, SESA)의 경우 최대 처짐은 반복회수가 증가함에 따라 많은 변화를 보이지 않아 강성의 저하없이 보강재의 파단과 함께 시험체가 파괴되는 양상을 보였다. 기존보강 시험체(SST)는 하중단계 80%의 반복회수 100,000에서 보강재 단부에서의 균열이 발견된 후 균열이 발달과 함께 큰 처짐의 변화를 보였다.

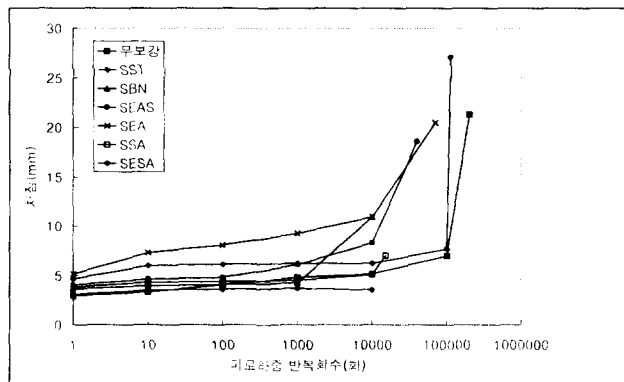


그림 2 반복회수-처짐 곡선

### 3.3 시험체별 S-N 선도

시험체의 시험체의 응력수준을 100%로 하고 표 5에 나타난 각 시험체의 파괴시의 피로하중 반복회수를 이용한 S-N선도는 그림 8과 같이 나타났다.

파괴시험결과 각 시험체에 대한 피로수명과 피로강도의 관계를 회귀분석을 통하여 고찰하면 다음 표 6과 같은 식을 얻을 수 있으며, 이 식을 이용하여 추정된 피로한계 백만회에 대한 피로강도를 표 7에 나타내었다.

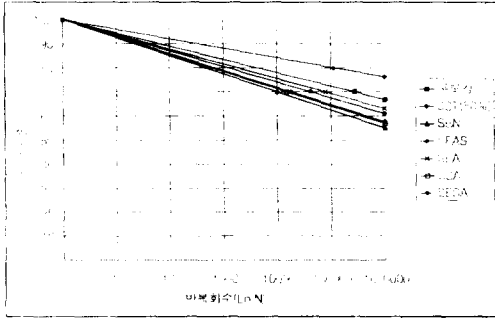


그림 3 시험체별 S-N선도

표 6 시험체별 S-N 식

시험체명	응력수준	S-N 식
무보강	70%	$S = -2.397 \times \ln(N) + 100$
SST	80%	$S = -1.7182 \times \ln(N) + 100$
SBN	70%	$S = -3.2572 \times \ln(N) + 100$
SEAS	70%	$S = -2.8213 \times \ln(N) + 100$
SEA	70%	$S = -2.6633 \times \ln(N) + 100$
SSA	70%	$S = -3.1192 \times \ln(N) + 100$
SESA	70%	$S = -3.0605 \times \ln(N) + 100$

표 7 시험체별 피로강도(N: 1,000,000회)

시험체명	피로강도(%)	보강시험체/무보강시험체
무보강	66.88	1.00
SST	76.26	1.14
SBN	55.00	0.82
SEAS	61.02	0.91
SEA	63.21	0.95
SSA	56.91	0.85
SESA	57.72	0.86

앞의 표 7에 나타난 것처럼 반복회수 100만회에 대한 피로강도는 55~76.26%사이로 나타났다. 이는 철근 콘크리트 보의 100만회에 대한 최대 응력 수준은 일반적으로 최대 설계강도의 50% 내외 또는 60~70%로 재래 보강(SST)을 제외한 모든 보가 피로강도 범위 내인 것으로 나타났다.

### 3.4 하중과 변형율의 관계

앞의 그림 4는 각 측정단계마다 시험체 중앙에서의 콘크리트와 철근, 보강재의 응력을 나타낸 그래프이다. 이 그래프를 사용 데이터를 정리하였는데 왼쪽 세로축은 철근 게이지와 콘크리트 게이지 측정값을 나타내고 있으며 오른쪽 세로축은 철근 게이지 측정치이다.

중단 강판이 날라간 시험체(SST, SEA, SEAS)는 파괴가 발생할때의 보강재의 변형율은 떨어진 반면 콘크리트와 철근의 변형율은 증가하는 것으로 나타났다. 이는 보강재의 탈락으로 인해 보강재가 받아주던 하중을 콘크리트와 철근이 부담하기 때문인 것으로 판단된다. 중앙부 노치의 파단으로 인해 파괴가 발생한 시험체(SBN, SSA)의 경우 보강재의 변형율이 매우 높게 나타나 중앙부 노치부분에서의 응력 집중을 볼 수 있다. 모든 시험체가 반복회수가 증가할수록 변형율이 증가하는 반면 무보강 철근 게이지 측정값은 하중회수 100만회에서 감소함을 볼 수 있다. 이는 게이지 부착위치에서 발생한 균열이 진전됨에 따라 게이지 측정값에 영향을 준 것으로 사료된다.

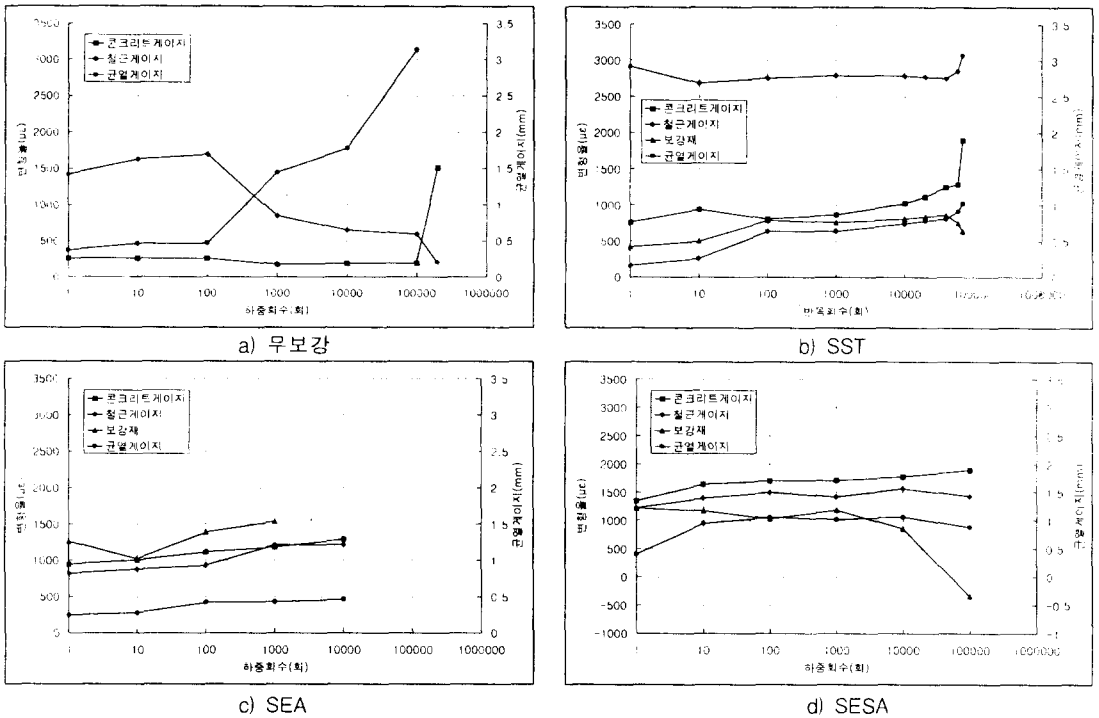


그림 4 반복회수에 따른 하중-변형률 곡선

#### 4. 결 론

본 연구에서 무보강 및 강판보강 시험체에 대한 피로시험으로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 에폭시의 양생이 양호했던 시험체는 주로 중앙부 노치부분의 균열에 의한 파단으로 파괴되었으나, 에폭시의 품질이 불량했던 시험체의 경우는 단부보강을 위해 설치한 앵커볼트의 파괴로 인해 강판이 탈락, 시험체가 파괴되었다.
2. 노치가 파괴된 시험체의 처짐은 반복회수에 따라 변화가 적었으나 보강재의 변형률은 매우 크게 나타나 노치부의 응력집중이 큰 것으로 나타났다.
3. 시험체의 S-N선도로부터, 보강시험체의 100만회에 대한 피로강도는 55~77% 사이로 나타났으며, 기존보강(SST)를 제외한 모든 시험체가 무보강 시험체보다 더 작게 나타났다.

#### 5. 참고문헌

1. 한만엽, 송병표, "노치를 이용한 보강재의 부착력증가 방안에 관한 연구", 한국 콘크리트 학회, 1998년도 봄 학술 발표회 논문집, pp.647~652
2. R.N.Swamy, R.Jones, N.Bloxham, "Structural Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Epoxy-Bonded Steel Plates", Structural Engineer, Vol.65A, No.2, 1987, pp.59~68
3. John M.Hanson, CRAIG A. Ballinger, "Consideration for Design of Concrete Structures Subjected to Fatigue Loading", ACI 215R-74, 1986, pp.215R~215R-25