

# 강판피복과 CFRP를 이용한 손상된 교각의 내진보수

## Seismic Repair of Damaged RC columns with Steel and CFRP Jackets

염 광 수<sup>\*</sup>      최 상 현<sup>\*\*</sup>      이 영 호<sup>\*\*\*</sup>      이 학 은<sup>\*\*\*\*</sup>  
Youn, Kwang-Soo      Choi, Sanghyun      Lee, Young-Ho      Lee, Hak-Eun

### 국문요약

본 논문에서는 RC 교각의 보수·보강 시 사용되는 강판피복과 CFRP의 내진 보수성능을 비교하고, 횡방향 철근비가 강판과 CFRP로 보수된 실험체의 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위하여 다른 횡철근비를 갖는 3개의 교각 실험체를 각 3개씩 총 9개를 제작하여 보수 전과 강판 및 CFRP 보수 후의 거동을 비교하였다. 비교에 사용된 거동은 이력거동과 극한거동이며 이러한 거동은 반복하중 및 단조증가하중실험의 수행을 통하여 구하였다. 각 횡철근비 및 보수방법에 대하여 이력거동, 최대하중 및 최대변위를 비교한 결과 강판과 CFRP로 보수된 실험체의 변위연성과 최대하중이 증가하였음을 확인하였다. 또한 횡방향 철근비가 증가함에 따라서 실험체의 변위연성이 증가하였고, 소성힌지의 위치도 높아짐을 알 수 있었다.

**주요어 :** 강판피복, 탄소섬유복합재료, 손상, 구속, 변위연성

### ABSTRACT

In this paper, the comparative performance of repaired RC columns using steel and CFRP is presented. Also, the effect of transverse reinforcement ratio on the behavior of the steel and the CFRP repairing is investigated. Monotonic and cyclic load tests are conducted on nine RC column specimens with different repairing strategies and transverse reinforcement ratios to compare the load-displacement curves and the hysteretic behaviors. From the tests, it is observed that both steel and CFRP jacket repairs can significantly increase the displacement ductility and the ultimate load capacity of damaged columns.

**Key words :** steel jacket, CFRP, repair, confinement, displacement ductility

## 1. 서 론

현재까지 지진하중 등의 작용으로 손상을 입은 교량의 바닥판이나 거더 등의 주요부재를 Fiber Reinforced Polymer(FRP) 등의 복합재료나 강판(Steel Jacket)을 이용하여 보수·보강하는 방법에 대한 연구가 국내외에서 광범위하게 수행되어 왔다. 특히 RC 교각의 경우, 강판이나 FRP를 외부에서 피복하여 보강하는 간편하고도 효과적인 방법이 제안된 바 있다. 강판피복을 사용한 RC 교각의 보강은 Sun et al.<sup>(1)</sup>이 최초로 제안하였으며, 이후 Prestley et al.<sup>(2)</sup>에 의하여 지속적인 연구가 수행되어 왔다. 또한, 강판 이외에 교각의 연성과 강도를 증가시키기 위해 강판 대신 FRP를 적용하는 연구도 Matsuda et al.<sup>(3)</sup>, Xiao et al.<sup>(4)</sup> 등에 의해 수행된 바 있다.

그러나 이러한 일련의 강판피복이나 FRP를 이용한 RC 교각의 보수·보강에 대한 연구는 보강에 집중되어왔으며 보수에 대한 연구는 상대적으로 미미하였다. 여기서, 보강(Retrofitting)이란 손상이 없는 구조물의 성능을 향상시키는 방법을 의미하며, 보수(Repairing)란 손상을 입은 구조물이 손상 전의 성능 및 안전 여유도를 확보하기 위한 방안을 의미한다. 교각의 보수와 관련된 연구를 정

리하면 다음과 같다. Chai et al.<sup>(5)</sup>은 강판피복으로 보강된 교각의 휨성능을 평가하기 위한 실험을 수행한 바 있다. 이 실험에서 RC 교각의 보수에 강판피복을 적용했을 경우의 성능을 손상전의 교각의 성능과 비교하였으나, 단 한개의 실험체에 적용하여 여러 경우에 대한 체계적인 연구결과가 제시되지 못하였다. Lehman et al.<sup>(6)</sup>은 4개의 RC 교각에 손상을 입히고 단면확대법을 사용하여 콘크리트, 종방향 철근, 그리고 나선철근을 추가로 배치하여 보수한 후 보수 전 성능과 비교한 바 있으나, 강판피복이나 복합재료는 적용하지 않았다. Iacobucci et al.<sup>(7)</sup>은 Carbon Fiber Reinforced Polymer(CFRP)를 사용하여 사각단면의 RC 교각을 보수 후 그 성능을 보수 전과 비교 평가한 바 있다. 그러나 손상된 실험체에서 콘크리트 피복의 탈락만이 관찰되었을 정도로 교각에 가해진 손상이 미미하여 심각한 손상을 입은 RC교각에 대한 보수성능을 판단하기 미흡하였다. 국내의 경우에도 FRP를 사용하여 손상된 교각의 보수에 대한 연구가 수행된 바 있으나, 이 연구도 실험체가 가한 손상이 작아 Iacobucci et al.<sup>(7)</sup>의 연구와 같은 문제를 갖고 있다 (Chung et al.<sup>(8)</sup>). 반면에 염광수 등<sup>(9)</sup>에 의해 수행된 바 있는 강판피복을 사용한 손상 보수에 관한 연구에서는 단순한 강판피복 보강 시의 성능분석에 제한되어 FRP 보강시와의 성능을 비교할 수 없는 단점이 있다.

본 연구의 목적은 강판피복과 CFRP를 사용하여 손상된 교각의 내진보수 성능을 비교·평가하고 교각의 내진보

\* 한국건설기술연구원 Post-Doc (대표저자: yksoo79@kict.re.kr)

\*\* 정회원 · 한국원자력안전기술원 선임연구원

\*\*\* 한국건설기술연구원 선임연구원

\*\*\*\* 고려대학교 사회환경시스템공학과 교수

본 논문에 대한 토의를 2005년 8월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.  
(논문접수일 : 2005. 4. 21 / 심사종료일 : 2005. 5. 12)

수에 대한 횡방향 철근비의 영향을 분석하는 것이다. 본 연구는 다음의 단계로 수행하였다. 각기 다른 횡방향 철근비를 가진 3개의 실험체를 각 3개씩 총 9개의 RC 교각을 제작하고, 각 철근비별로 한 개의 교각에 대해 단조 증가하중실험을 통해 파괴까지의 거동을 파악하였다. 각 철근비 별로 나머지 2개의 교각은 반복하중으로 손상을 입힌 후 각각 강판피복과 CFRP로 보수하였다. 각 보수 실험체 별로 반복하중실험을 재수행하여 교각의 이력거동을 파악하였으며, 이후 파괴까지 단조증가하중을 재하하여 최대하중 및 최대변위를 구하였다.

## 2. 실험체 상세

### 2.1 실험체 제작

도로교 설계기준<sup>(10)</sup>의 규정에 맞추어 높이 2,200mm, 피복콘크리트 40mm인 직경 300 mm의 원형단면을 가진 총 9개의 실험체를 제작하였다. 종방향 철근은 D16을, 횡방향 철근은 D10을 사용하였고 보통 콘크리트를 사용

하여 강도 17.66MPa을 목표로 배합설계 하였다. 28일 일축압축강도 실험결과와 17.86 MPa이었다. 표 1과 표 2에 실험체의 구분과 사용된 재료 특성치를 정리하였다. 횡방향 철근비에 따라 P계열 실험체, SE계열 실험체, 그리고 E계열 실험체의 3개 그룹으로 분류하였다. P계열 실험체는 도로교설계규정에 맞도록 횡방향 철근을 배근한 반면 SE계열 실험체는 규정보다 50 % 적게, E계열 실험체는 71 % 적게 배근되었다.

그림 1은 전체적인 실험장치의 설치형태이며, 그림 2는 P계열 실험체의 상세도이다. 축방향 압축력은 가로 × 세로 × 높이가 각각 1 m인 Steel Box를 제작하여 내부에 30 mm두께의 철판 23장의 추가하중을 넣어 재하하였다. 실제 교각의 거동을 모사하기 위하여 실험체의 상부 코핑부와 Steel Box는 그림 3의 고정교좌장치로 연결하였다. 축력비 5%에 해당하는 63.0 kN의 자중을 가지는 Steel Box를 이용하여 교각에 축력을 가한 상태에서 Steel Box의 무게중심에 최대 가력변위(stroke) 200mm인 250kN 용량의 가력기(Actuator)를 사용하여 횡하중을 재하하였

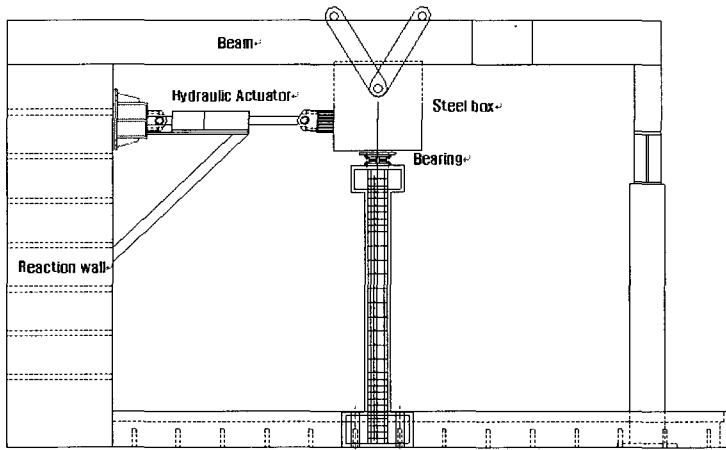


그림 1 Column Test Setup

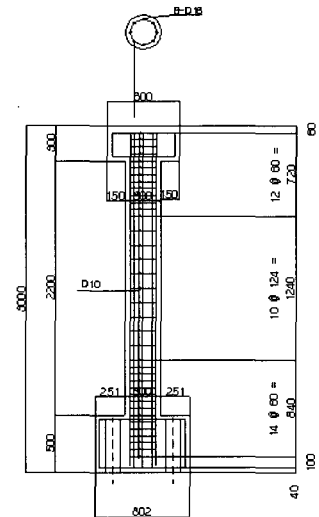


그림 2 P-type Test Column

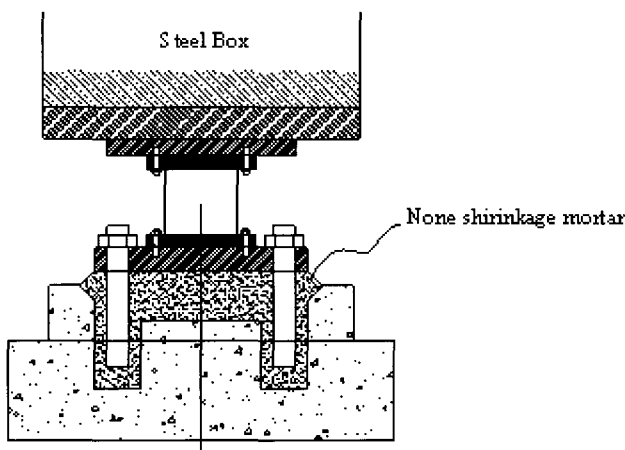


그림 3 고정교좌장치

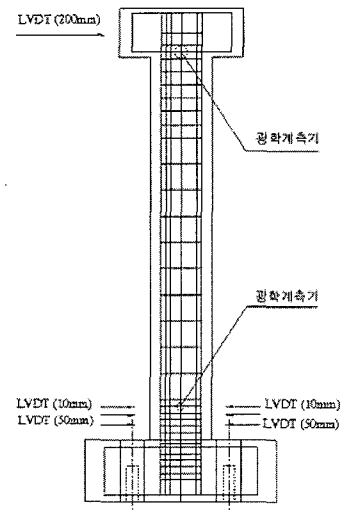


그림 4 변위계 설치위치

다. 실험체의 횡방향 변위는 2개의 광학 변위계(Optical Razor Sensor)와 7개의 Linear Variable Differential Transducers(LVDT)를 이용하여 측정하였다. LVDT는 그림 4와 같이 수평방향으로 실험체하부에 6개, 실험체상부에 한개를 설치하였다.

표 1 Test Column Group

Group Name	No.of Specimen	Transverse Ratio (%)	Spacing (mm)
P	3 EA	2.1	60
SE	3 EA	1.1	120
E	3 EA	0.6	220

표 2 Test Column Details

Column Diameter		300 mm
Column Height		2200 mm
Cover to Main Bar		40 mm
Material Properties	Concrete	17.86 MPa
	Longitudinal Steel Ratio	D16 , 353 MPa 1.26 %
	Transverse Steel	D10, 343 MPa
Axial Load		63.0 kN

### 2.2 실험 과정

항복변위를 결정하기 위하여 실험체의 단면에 대한 모멘트-곡률해석을 통해 제시된 공칭모멘트강도( $M_n$ )에 해당하는 횡하중  $V_1$ 의 0.5배와 0.75배에 해당하는 수평하중을 2회씩 반복 가력한 후, Push 방향과 Pull 방향의 변위를 각각 결정하였다. 이 변위를 0.75로 나눈 각 방향의 항복 변위를 평균하여 최종항복변위  $\Delta_y$ 를 결정하였다 (Priestley et al.<sup>(11)</sup>). 항복변위를 결정한 이후에는  $1\Delta_y$ ,  $2\Delta_y$ ,  $3\Delta_y \dots$ 로 변위를 증가시키면서 반복 재하하였다. 각 그룹별로 2개의 실험체에 반복하중을 재하하여 구조물에 손상을 주었으며, 각 실험체들은 강판피복과 CFRP로 보수하였다. 보수설계와 보수된 실험체에 대한 설명은 다음 절에 정리하였다. 보수된 실험체는 다시 반복하중을 재하하여 이력성능을 평가하였다. 실험체의 파괴까지의 거동을 파악하기 위한 단조증가하중실험(Monotonic Load Test or Pushover Test)은 0.2mm/sec의 일정한 변위하중을 재하하여 수행하였다. 각 그룹별로 1개의 실험체에 단조증가하중을 재하하여 파괴시켰다. 보수된 실험체의 경우에는 반복하중실험이 끝난 후 다시 단조증가하중실험을 통해 파괴시켰다.

### 2.3 강판피복 보수

교각을 강판피복으로 보수하기 위하여 강판피복의 두께( $t_j$ )와 보강재의 구속길이(Confinement Length,  $l_j$ )를

결정해야한다. 도로교설계기준에 맞게 배근된 P계열 실험체의 성능을 보수설계의 목표로 정하였다. 구속된 콘크리트의 압축응력이 34.3 MPa이고 구속응력이 3.02 MPa인 P계열 실험체와 같은 조건이 되도록 보수설계를 하였다. 강판피복의 두께는 Mander et al.<sup>(12)</sup>이 제안한 구속 콘크리트의 응력-변형률관계를 사용하여 결정되었다.

$$t_j = \frac{0.18(\epsilon_{cc} - 0.004)Df'_{cc}}{f_{yj}\epsilon_{sm}} \quad (1)$$

여기서,  $\epsilon_{cc}$ 는 구속된 콘크리트의 최대압축변형률,  $D$ 는 실험체 직경,  $f'_{cc}$ 는 구속된 콘크리트의 압축강도,  $f_{yj}$ 는 강판의 항복강도, 그리고  $\epsilon_{sm}$ 은 강판의 최대변형률이다. 본 실험에서 사용한 강판은 KS규격의 일반 구조용 압연 강재 SS400(항복강도: 245 MPa, 인장강도: 400 MPa)이며, 구속된 콘크리트의 최대 변형률은 0.05, 철근의 최대변형률은 0.12를 각각 사용하였다. 식 (1)을 이용하여 강판피복의 두께는 2 mm, 강판피복에 의한 구속응력은 3.06 MPa를 구하였다. 강판피복의 최소 구속길이는 Priestley et al.<sup>(11)</sup>이 제안한 다음 식을 이용하여 계산하였다.

$$l_j \geq D \text{ or } l_j \geq 0.25L \quad (2)$$

여기서,  $L$ 은 소성힌지에서 하중재하 위치까지의 높이이다. 식 (2)를 이용하여 최소 구속길이는 720.7mm를 구하였으며, 이를 근거로 피복길이를 750mm로 결정하였다. 위의 결과를 바탕으로, 두께 2.0mm이고 높이 750mm인 강판피복으로 손상된 실험체를 보수하였다.

강판피복은 직경 320mm의 반원형 단면을 가지는 셸 모양으로 제작하여 용접을 통해 접착하였다. 교각과 강판 피복사이에는 무수축 모르타르를 주입하였으며, 이를 위해 강판피복은 교각실험체 직경보다 20mm 크게 제작하였다. 교각 단면과 강판사이의 간격을 Molting하기 전에 손상부위 및 강판 보강영역을 몰로 세척하였으며, 기둥에 횡하중이 작용 시 강판과 기초부의 간섭을 방지하기 위해 25mm의 간격을 두었다. 보수된 실험체는 최소 3일 이상의 양생 후에 반복하중을 재하하였다. 강판피복으로 보수된 실험체의 단면은 그림 5에 제시되어 있다.

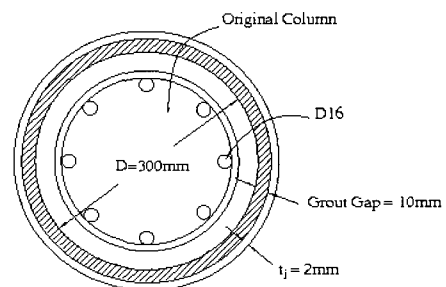


그림 5 강판피복 보수단면

### 2.4 CFRP 보수

손상된 RC기둥의 보수에 쓰인 CFRP의 두께와 보수높이는 강판피복 보수와 동일하게 P실험체와 유사한 거동을 하도록 설계하였다. CFRP의 두께는 Seible et al.<sup>(13)</sup>이 제안한 구속된 콘크리트의 응력-변형률 관계식을 이용하여 결정되었다. 소성힌지부의 구속을 위한 CFRP의 필요두께는 식 (3)을 이용하여 계산하였다.

$$t_j = \frac{0.1(\epsilon_{cc} - 0.004) D f'_{cc}}{f_{CFRP} \epsilon_{fr}} \quad (3)$$

여기서,  $f_{CFRP}$ 는 CFRP의 파단시 인장강도이며,  $\epsilon_{fr}$ 은 CFRP의 파단시 변형률이다. 구속된 콘크리트의 최대 변형률은 0.05로, CFRP의 파단시 변형률은 1.5 %, 그리고 인장강도는 3,484 MPa 이다. CFRP로 구속된 콘크리트의 압축응력( $f'_{cc}$ )은 염광수 등<sup>(14)</sup>이 제안한 다음 식을 이용하였다.

$$\frac{f'_{cc}}{f_{co}} = 1 + 2.21 \frac{f_l}{f_{co}} \quad (4)$$

여기서,  $f_{co}$ 는 구속되지 않은 콘크리트의 압축강도이며,  $f_l$ 은 CFRP에 의한 구속응력이다. 식 (3)과 (4)에 의해 계산된 CFRP의 두께는 0.33 mm이다. CFRP의 구속길이는 Seible et al.<sup>(13)</sup>이 제안한 다음식을 이용해 715mm로 계산되었다.

$$L_{cl} \geq L_p \text{ or } L_{cl} \geq L/8 \text{ or } L_{cl} \geq 0.5D \quad (5)$$

여기서,  $L_{cl}$ 은 CFRP의 구속길이이다.

실험체 손상주위의 콘크리트를 제거한 후 CFRP를 부착하기 전에 무수축 모르타르로 손상부분을 보완하였다.

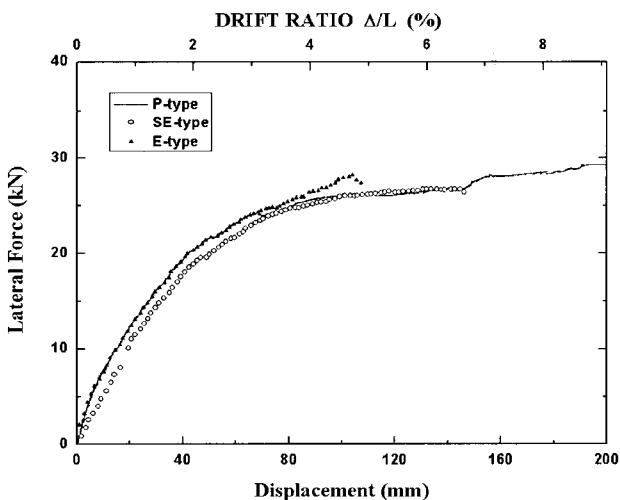


그림 7 손상전 실험체의 하중-변위 곡선

강판피복과는 달리, 교각과 CFRP 사이에는 간격을 두지 않았다. CFRP는 현장 부착법으로 실험체에 부착시켰으며, 0.165mm의 CFRP 시트타입을 2장 겹쳐서 보수하였다. 사용된 CFRP의 재료 특성치는 표 3에 정리하였다. 보수된 실험체는 최소 3일 이상의 양생 후에 보수실험을 실시하였다. 그림 6은 강판피복과 CFRP로 보수한 후의 실험체의 모습이다.

표 3 Properties of CFRP

Weight per unit length	Yield strength	Elastic modulus	Fracture strain
200 g/m <sup>2</sup>	3484 MPa	230618 MPa	1.5 %

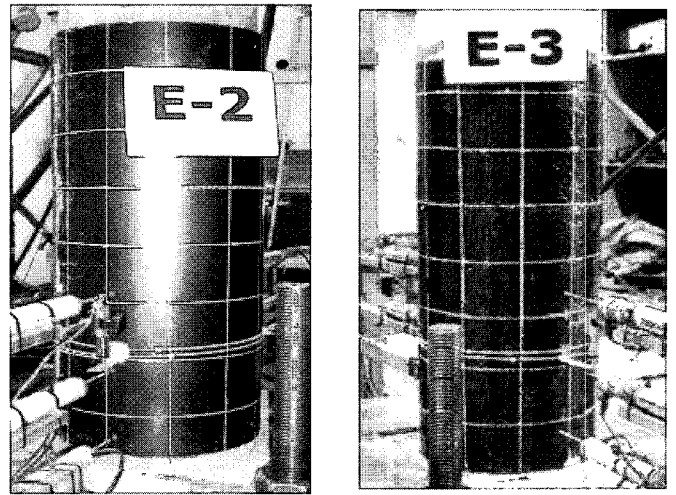


그림 6 강판피복(좌)과 CFRP(우)로 보수된 실험체

### 3. 실험결과와 분석

#### 3.1 손상전 교각에 대한 실험

각 계열에서 한 개의 실험체를 단조증가하중실험을 통해 파괴시켰다. 실험체의 하중-변위 관계곡선을 그림 7에서 각 계열별로 비교하였다. 실험체의 변위연성(displace-

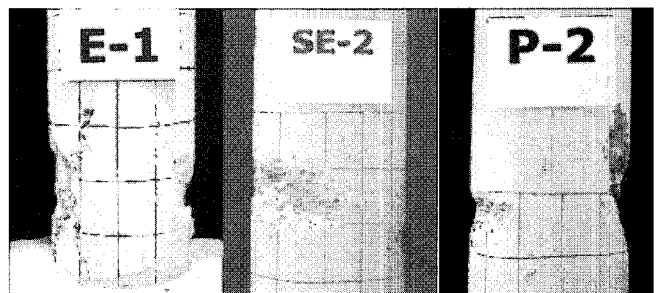


그림 8 반복하중으로 손상된 실험체

ment ductility)은 횡방향 철근비가 증가함에 따라서 증가한 반면에, 최대하중에서는 큰 차이가 나지 않았다. 각 계열에 포함된 나머지 2개의 실험체는 반복하중으로 손상을 주었다.

그림 8은 반복하중실험 후 손상된 실험체의 상태로써, 심부콘크리트의 균열과 피복 콘크리트의 탈락이 관찰되었으며, 종방향 철근의 좌굴은 발생하지 않았다. 한 가지 특기할 사실은 실험체의 소성힌지 위치가 횡방향 철근비가 증가함에 따라 높아진 것이다. 즉 P 계열 실험체의 소성힌지 위치가 가장 높은 반면에, E 계열 실험체가 가장 낮게 측정되었다. 각 계열별 소성힌지의 위치는 P 계열 실험체의 경우는 기초에서부터 600 ~ 700mm, SE 계열은 500 ~ 600mm, 그리고 E 계열은 100 ~ 200mm로 측정되었다. 이러한 결과는 소성힌지의 높이를 기초와의 연결부에서부터 실험체 직경 이내로 제시하였던 Priestley et al.<sup>(11)</sup>의 경험식보다 상당히 높은 위치이다. 이 결과를 참조할 때 횡방향 철근비와 소성힌지의 높이 간의 상관관계에 대하여는 추후 보다 체계적인 연구가 필요하다고 판단된다.

### 3.2 보수된 실험체에 대한 반복하중실험

그림 9와 10은 각각 강판피복과 CFRP로 보수된 실험체의 계열별 이력곡선이다. SE와 E 계열 실험체의 이력곡선 면적이 P 계열보다 약간 넓었다. 이를 근거로 보수된 실험체의 횡방향 철근비는 에너지 흡수능력에 거의 영향을 미치지 않는다고 판단된다. 실험체의 형상비가 7.3이므로, 실험체는 휨거동이 지배적이며 에너지 소산능력은 횡방향 철근비보다는 종방향 철근비에 많은 영향을 받는다고 판단된다.

### 3.3 보수된 실험체에 대한 단조증가하중실험

보수된 실험체에 대한 반복하중실험 후, 최대변위와 하중을 결정하기 위하여 단조증가하중을 재하하였다. 그림 11과 12는 각각 강판피복과 CFRP로 보수된 실험체에 대한 하중-변위곡선이다. 그림 11에서 강판피복으로 보수한 경우 최대하중이 상당히 근접하였다. 반면에, 그림 12에서 CFRP로 보수된 실험체는 100 mm까지는 유사한 거동했지만, 그 이후에는 P 계열 실험체가 다른 실험체보다

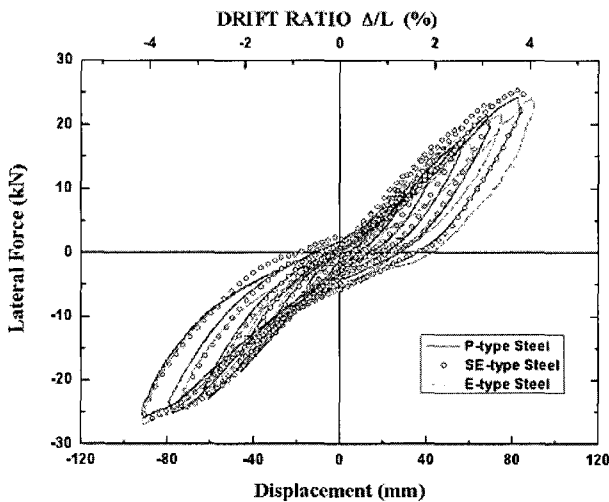


그림 9 강판피복 보수실험체 이력곡선

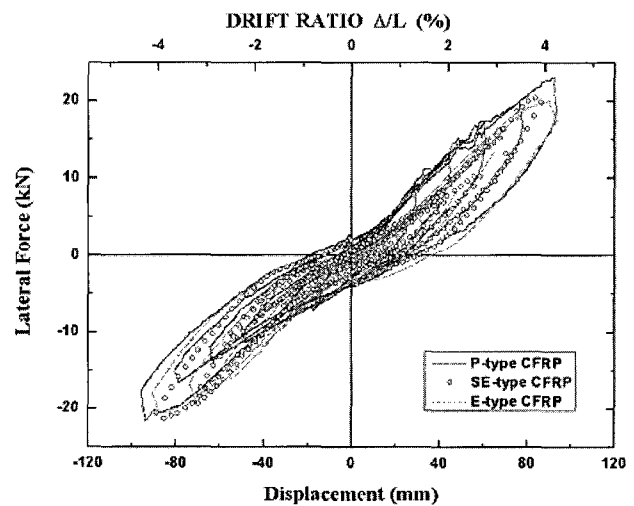


그림 10 CFRP 보수실험체 이력곡선

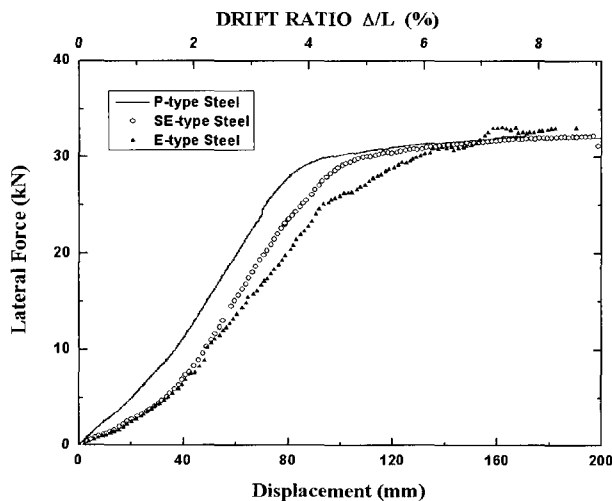


그림 11 강판피복 보수실험체의 하중-변위곡선

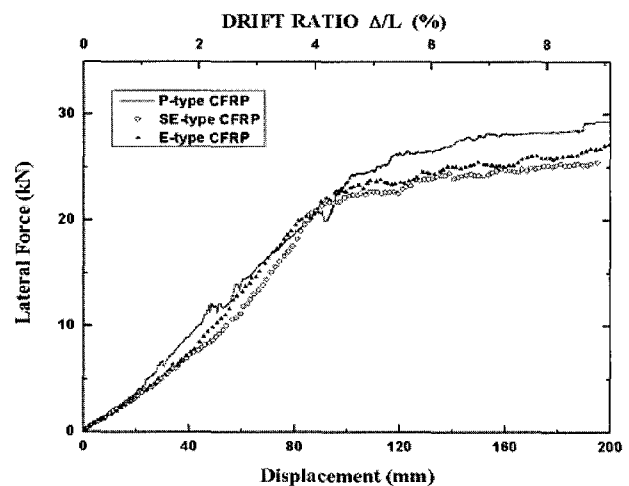


그림 12 CFRP 보수실험체의 하중-변위곡선

더 큰 하중 능력을 보여주었다. 최대하중은 E 계열은 27.1 kN, SE 계열은 26.9 kN, 그리고 P 계열은 29.3 kN로 측정되었다. 각 계열별 실험체의 최대변위와 최대하중을 표 4에 정리하였다.

표 4에 제시된 바와 같이 보수이전의 실험체는 횡방향 철근비가 작아짐에 따라 최대변위가 감소하였으나 보수 후에는 횡방향 철근비의 변화에 관계없이 최대변위와 최대하중이 매우 유사하게 나타났다. 결과적으로 보수된 교각에서는 최대하중 및 변위에 대한 횡방향철근비의 영향이 미미함을 알 수 있었다. 일부 실험체들이 가력기의 최대 가력변위인 200mm에서 파괴가 되지 않았지만, 다른 실험체가 191mm ~ 198.1mm에서 파괴된 결과로부터 유추해 볼 때 파괴되지 않은 실험체도 최대변위가 200mm를 조금 넘을 것으로 판단된다.

표 4 각 계열 실험체의 최대변위 및 하중

Group	Maximum strength (kN)	Maximum displacement (mm)
E	Original	28.34
	Steel	32.10
	CFRP	27.10*
SE	Original	26.80
	Steel	32.28
	CFRP	26.90
P	Original	29.2*
	Steel	32.0*
	CFRP	29.3*

\* 실험체가 최대가력변위 200 mm에서 파괴되지 않았음.

그림 13 ~ 15는 각 계열별로 실험체의 보수 전·후의 하중-변위곡선을 비교한 결과이다. 여기서, 강판피복과 CFRP로 보수된 실험체들의 초기강성이 작은 이유는 반

복하중실험 후에 다시 단조증가하중을 가력했기 때문이며, 설계의도에 부합되게 보수된 실험체들의 변위연성이 손상전 P 계열 실험체의 변위연성과 같거나 증가하였음을 알 수 있다. 강판피복으로 보수된 각 계열의 실험체들의 최대하중이 32 kN 부근인 반면에, CFRP로 보수된 실험체의 경우는 이보다 낮은 값을 가졌다. 이는 강판피복이 가지는 휨강성에 영향을 받은 것으로 판단된다.

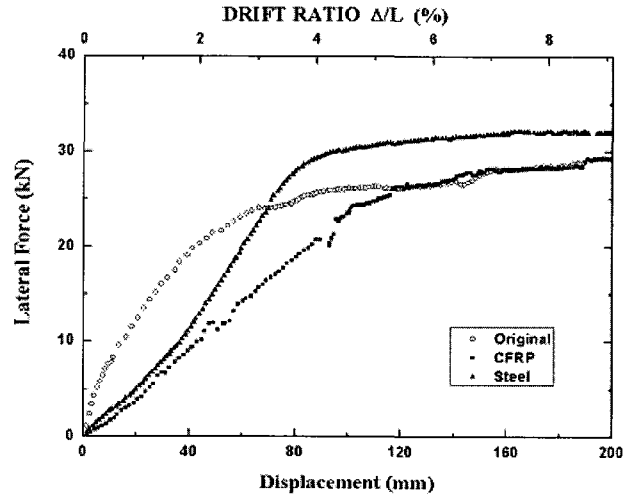


그림 15 P 계열 실험체의 하중-변위곡선

#### 4. 결 론

본 연구에서는 손상된 RC 교각의 보수보강 시 사용되는 강판피복과 CFRP의 내진 보수성능을 비교하고, 횡방향 철근비가 강판과 CFRP로 보수된 실험체의 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 각 횡철근비 및 보수방법에 대하여 이력거동, 최대하중 및 최대변위를 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 손상된 실험체는 보수 후 모두 목표한 변위연성과 극

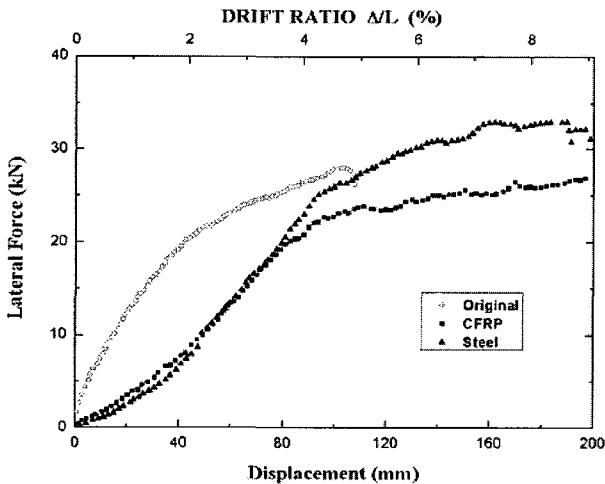


그림 13 E 계열 실험체의 하중-변위곡선

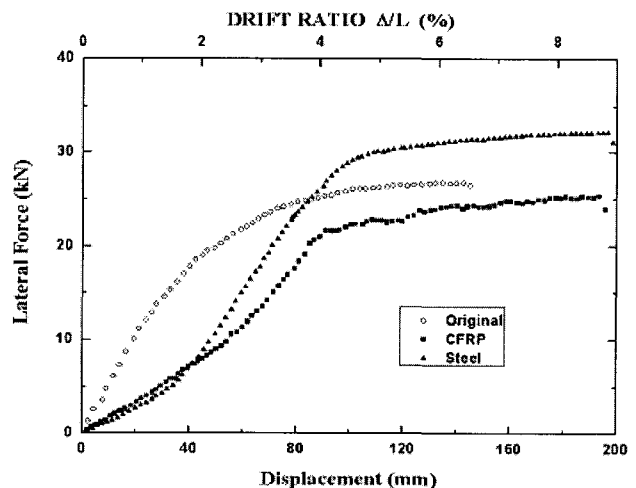


그림 14 SE 계열 실험체의 하중-변위곡선

한하중을 확보하였다. 이로부터 손상된 실험체도 적절하게 보수만 된다면 손상 이전의 안전 여유도를 회복할 수 있는 것을 확인하였다.

2. 실험체의 변위연성은 횡방향 철근비가 증가함에 따라서 증가하였고, 소성힌지의 위치도 높아졌다. 반면에 최대하중과 이력거동에 큰 차이가 없었으며, 에너지 소산능력 역시 유사하였다.
3. 강판피복으로 보수된 실험체의 최대하중이 CFRP로 보수된 실험체보다 높았으며 보다 나은 에너지 소산능력을 보여주었다.

### 참 고 문 헌

1. Sun Z., Seible F. and Priestley, M.J.N., "Flexural retrofit of rectangular reinforced concrete bridge column by steel jacketing," Structural Systems Research Project, Report SSRP-93/07, University of California, San Diego, 1993, p. 215
2. Priestley, M.J.N., Seible F., Xiao Y. and Verma, R., "Steel Jacket Retrofitting of Reinforced Concrete Bridge Columns for Enhanced Shear Strength - Part 1: Theoretical Considerations and Test Design," *ACI Structural Journal*, Vol. 91, No. 4, 1994, pp. 394-405.
3. Matsuda T., Fujiwara H. and Higashida N., "Effect of carbon fiber reinforcement as a strengthening measure for reinforced concrete bridge piers," *Proceedings of 1st US-Japan Workshop on Seismic Retrofit of Bridges*, Public Works Institute, Ministry of Construction, Tsukuba, Japan, 1990, pp. 356-374.
4. Xiao, Y., Wu, H. and Martin, G.R., "Prefabricated Composite Jacketing of RC Columns for Enhanced Shear Strength," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 125, No. 3, 1999, pp. 225-264
5. Chai, Y.K., Priestley, M.J.N. and Seible F., "Seismic retrofit of circular columns for enhanced flexural performance," *ACI Structural Journal*, Vol. 88, No.5, 1991, pp. 572-584.
6. Lehman, D.E., Gookin, S.E., Nacamuli, A.M. and Moehle, J., "Repair of earthquake-damaged bridge columns," *ACI Structural Journal*, Vol. 98, No. 2, 2001, pp. 233-242.
7. Iacobucci, R.D., Sheikh, S.A. and Bayrak, O., "Retrofit of square concrete columns with carbon fiber-reinforced polymer for seismic resistance," *ACI Structural Journal*, Vol. 100, No. 6, 2003, pp. 785-794.
8. Chung, Y.S., Park, C.K., Lee, E.H. and Lee, D.H., "Experimental Seismic Performance Evaluation of Damaged Circular RC Bridge Piers with Lap Splices," *Proceedings of the International Civil Engineering Conference on Sustainable Development in the 21st Century*, Nairobi, Kenya, 2003, pp. 95-100.
9. 염광수, 윤기용, 이학은, "강판피복법을 이용한 손상된 교각의 휨연성 보강", 대한토목학회 논문집, Vol. 24, No. 5A, 2004, pp. 1023~1030.
10. 건설교통부제정, 한국도로교통협회, 도로교설계기준, 2003.
11. Priestley, M.J.N., Seible, F. and Calvi G.M., *Seismic Design and Retrofit of Bridges*, John Wiley & Sons, 1996.
12. Mander, J.B., Priestley, M.J.N. and Park, R., "Theoretical stress-strain model for confined concrete," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 114, No. 8, 1988, pp. 1804-1826.
13. Seible, F., Priestley, M.J.N., Hegemier, G.A. and Innamorato D., "Seismic retrofit of RC columns with continuous carbon fiber jackets," *Journal of Composites for Construction*, Vol 1, No. 2, 1997, pp. 52-62.
14. 염광수, 이영호, 박영준, 이학은, "탄소섬유시트(CFS)로 보강된 콘크리트의 거동", 대한토목학회 논문집, Vol.24 No.2A, 2004, pp. 259~265.