

# RC 기둥 보강을 위한 새로운 강판 보강기법 및 수정 연속체 모델

## A New Steel Jacketing Method for RC Columns and a Modified Constitutive Model of Jacketed Concrete

태 기 호<sup>1)</sup> . 최 은 수<sup>2)</sup>  
*Tae, Ghiho Choi, Eunsoo*

요 약: 본 연구에서는 강자켓을 이용하여 RC 기둥을 보강하는 기법으로 분리되지 않은 스테인리스-강자켓으로 보강된 콘크리트 공시체를 제작하여 횡방향 구속응력을 적용시켜 보강 하는 방법을 제안하였다. 제시된 기법의 성능을 평가하기 위해 1.0, 1.5 및 2.0 mm 두께로 제작된 강판을 변수로 하여 3개의 무보강과 9개의 보강 콘크리트 공시체를 제작하였다. 횡방향 구속응력 도입을 위해 클램프가 사용되었으며 보강된 시편과 보강되지 않은 시편의 압축실험의 결과가 비교 분석 되었다. 실험결과 보강 강판의 두께가 증가할 수 록 압축강도가 증가했으며, 강자켓과 콘크리트는 복합거동을 하지 않으며, 실린더 중앙부가 팽창되는 것을 확인할 수 있었다. 마지막으로 실험 데이터로부터 얻은 콘크리트 공시체의 응력-변형률을 Li의 연속체 모델로 재현하여 비교 분석하였다. Li의 제안모델은 콘크리트 공시체의 항복 후의 거동에서는 오차가 커 적용이 어려움에 착안하여 수정된 Li 모델을 제안하였다. 수정된 Li 모델은 Li 모델에서 항복 후 영역의 n 값을 수정하여 얻어졌으며, 이 모델은 콘크리트의 항복 전 그리고 항복 후에도 실험값과 유사하게 재현됨을 알 수 있었다. 이로써 Li 모델의 n 값을 적절히 조절하면 실험값을 재현하는데 긍정적으로 쓰일 것으로 판단된다.

ABSTRACT: This study introduced a new steel-jacketing method to retrofit RC columns. It also estimated the performance of steel-jacketed concrete cylinders. Twelve concrete cylinders were fabricated with varying steel jacket thicknesses of 1.0, 1.5, and 2.0 mm. Lateral confining pressure was applied with three clamps and the performance of plain concrete cylinders was compared with that of steel-jacketed cylinders. Steel jacket proved to be effective in increasing the strength of the cylinder. Finally, Li's constitutive model was compared with that of the experimental results. However, Li's model showed incongruity in Region II, which indicates the region after the yield of steel jackets. Therefore, the modified value of n was used for the region and the model showed a good agreement.

핵심용어: 구속응력, 강판보강, 콘크리트, 내진보강

KEYWORD: confining stress, steel jacketing, concrete, seismic retrofit

### 1. 서론

2008년 5월 중국 쓰촨성에 발생한 규모 7.8의 지진과 2005년 3월 일본 후쿠오카에서 발생한 지진 등 최근 국내·외에 크고 작은 지진들의 발생 빈도가 높아져 교량과 교각의 보강 기법의 중요성이 두각 되고 있다. 하지만 내진 설계가 반영되지 않은 교량과 교각들이 많이 존재하며 이러한 교량의 교각은 주로 교각 하단부에 겹침 이음으로 주철근이 연결되어 있고, 이러한 겹침이음은 교각의 연성도 확보에 취약한 것으로 나타나고 있다.(이대형 외, 2005; 김태훈 외, 2003)

기존 교각의 내진보강기법은 강제보강(Furlong and Richard, 1967), 복합재료보강(홍원기 외, 2003; 박영준 외, 2003; 정영수 외, 2001), 콘크리트 보강 등이 연구되고 있으나 이들 기법들은 특징에 따른 단점들이 존재하고 있다. 따라서 보강효과를 개선시키면서 시공이 용이한 보강기법 개발의 필요성이 대두되고 있다.

본 연구에서는 효과적인 철근콘크리트 기둥 보강기법으로 횡방향 외부압력을 도입한 분리되지 않은 보강강판을 채택하였다. 이 기법은 그라우팅이 필요 없어 기존의 방법에 비해 시공이 월등히 간편하며 신속하다. 또한 분리되지 않은 보강강판으로 보강한 시편은 분리된 강판이 용접부에서 갈라지는

1) (주)유씨티 솔루션 연구소장, 공학박사

2) 교신저자, 정희원, 홍익대학교 토목공학과, 조교수

(Tel. 02-320-3060, Email. eunsoochoi@hongik.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2009년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

현상을 보강할 수 있다는 장점이 있다(최은수 외, 2008). 또한 본 연구에서 횡방향으로 구속된 보강 콘크리트 시편의 거동을 연속체 모델을 사용하여 비교 분석하였다.

## 2. 분리되지 않은 강판을 이용한 보강

### 2.1 콘크리트 공시체 준비

콘크리트 공시체는 150 mm × 300 mm (φ×L)의 크기로 제작하였다. 설계기준강도 27 MPa의 무보강 시험체를 사용하고, 보강 강판의 두께는 1.0, 1.5 및 2.0 mm로 하여 보강량에 변화를 주었다. 각 경우에 시험체를 3개씩 사용하였으며, 총 12개의 시험체를 제작하여 압축파괴 실험을 수행하였다. 2.0 mm 보강강판은 1.0 mm 두께의 보강강판 두 개를 겹쳐서 보강하였다. 1.0 mm 두께의 보강강판 두 개를 부착한 이중자켓은 우선 1.0 mm 보강판으로 구속시킨 후에 다시 1.0 mm 보강판으로 구속시켜 제작되었다. 그 후 용접선을 보강하기 위해 스틸밴드를 용접하였다. 보강강판의 항복강도는 실험을 통해서 400 MPa로 측정되었다.

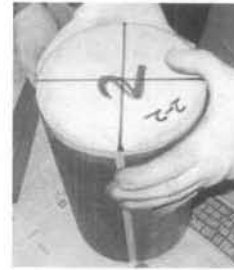
### 2.2 시험체 보강

그림 1(d)에 나타난 바와 같이 콘크리트 공시체를 강판을 이용하여 보강하기 위해 분리되지 않은 강판을 사용하였다. 강판의 크기는 290 mm × 481 mm (H×W)이다. 강판의 폭은 시편의 둘레보다 10 mm 길게 제작되어 한쪽 끝이 다른 쪽 끝과 겹칠 수 있도록 하였다. 또한 강판의 높이는 시편의 높이보다 10 mm 작게 제작되어 압축 실험 중 압축력이 강판에 직접 전달되는 것을 방지하였다. 이는 강판이 압축력에 저항하면 콘크리트 압축강도 추정에 오차가 발생할 수 있기 때문이다. 마지막으로 용접부를 보강하기 위하여 횡방향으로 스틸밴드를 용접하였다.

시험체의 보강 순서는 다음과 같으며 이를 그림 1에 나타내었다. 1) 실린더를 강판으로 감싼다. 2) 클램프로 강판에 응력을 도입한다. 3) 측면을 용접한다. 4) 용접부위에 스틸 밴드를 용접시킨다.

횡방향 구속응력을 도입하기 위해 사용한 클램프를 그림 2에 나타내었으며 사람의 힘으로 조이는 경우 발생하는 힘을 측정하기 위해서 길이 × 직경이 30.0 mm × 25.4 mm인 형상기억 합금에 120°방향으로 세 개의 스트레인이미터를 클램프를 조여서 압축력을 측정하였다. 형상기억합금의 압축변형에 대한 탄성계수(Young's Modulus)가 63 GPa로 추정되었고, 이를 이용해 추정된 클램프 하나에 의한 평균적인 압축

력은 15 kN ( $E \times \epsilon \times A$ : 63000 MPa × 479.2 × 10<sup>-6</sup> × 507 mm<sup>2</sup>)이며 5 MPa의 압력이 하나의 클램프에 의해서 콘크리트 시편에 작용되는 것으로 추정되었다.



(a) 강판부착



(b) 외부압력도입



(c) 측면용접



(d) 완성된 보강시편

그림 1. 공시편의 보강 순서

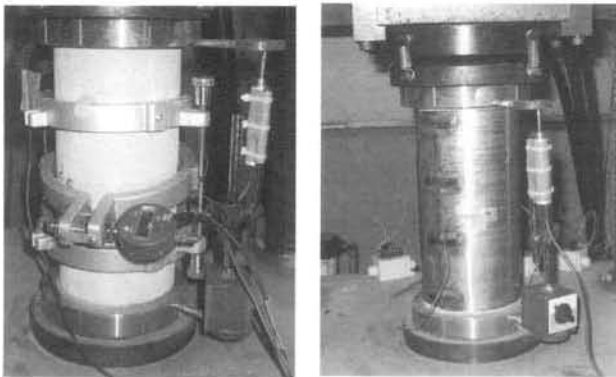


그림 2. 횡방향 구속응력 도입에 사용된 클램프

### 2.3 압축실험

콘크리트 시편의 압축파괴시험은 2000 kN 용량의 UTM를 사용하여 수행하였다. 횡방향 구속응력을 도입한 강판에 의한 보강효과를 검증하기 위하여 시편의 압축변형률을 측정하였다. 가력상황 및 계측기 부착위치를 그림 3에 나타내었다. 무보강 시편의 경우 압축변형률 측정을 위해서 compressometer와 변위계를 사용하였으나, 보강시편의 경우 콘크리트와 강판이 강결되어 있지 않기 때문에 압축 시 미끄러짐이 발생하며, 강제 표면에 compressometer를 설치하면 정확한 콘크리트의 압축변형률을 측정할 수 없다. 따라서 그림 3(b)에서 나타난바와 같이 보강시편의 상하부에 계

측용 팔을 가진 두꺼운 원형판을 설치하고 두 판 사이의 변형을 측정하여 압축변형률을 계산하였다. 또한, 보강시편 상하부의 원형판은 압축력이 전혀 없는 경우 콘크리트 표면과 완전히 밀착하고 있다고 볼 수 없기 때문에 완전한 밀착을 위해서 초기에 2 kN 이하의 압축력을 가한상태에서 압축실험을 실시하였다. 강자켓의 수평 및 수직변형률 측정하기 위해서 그림 3(b)와 같이 시편의 중앙부에 변형률게이지를 부착하였다.



(a) 무보강 시편 (b) 보강시편

그림 4. 실험 set-up 전경

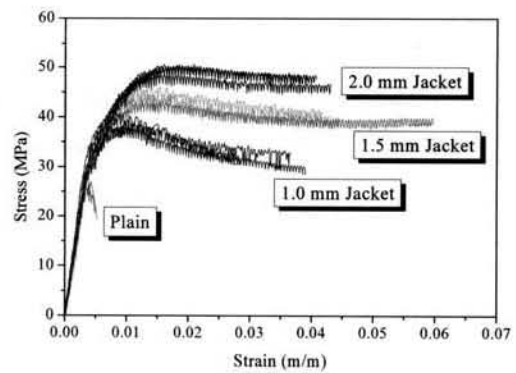
2.4. 실험결과 및 고찰

콘크리트 공시체의 무보강 시편과 보강된 시편의 응력-변형률 곡선을 그림 4(a)에 나타내었다. 무보강 콘크리트 공시체 3개의 평균 압축강도는 28.6 MPa로 나타났으며, 1.0, 1.5, 및 2.0 mm 보강판으로 보강된 시편의 평균압축강도는 각각 39.6, 44.7 및 49.8 MPa로 나타났다. 보강된 시편은 각각 47.8, 66.8, 및 85.8%의 강도증진 효과를 나타냈다. 그림 4(b)에 보강 두께와 압축강도의 관계를 나타내었다. 그래프의 삼각형은 각 보강 두께 시편의 평균 압축강도를 나타낸다. 각 보강두께에 따른 보강시편의 평균 압축강도 그래프의 회귀곡선은 거의 직선의 관계를 보임을 알 수 있다. 1.0 mm 강판 두 개를 이용한 이중자켓은 2.0 mm 강판 하나를 이용한 자켓과 동일한 압축강도를 발현한다고 말할 수 있다.

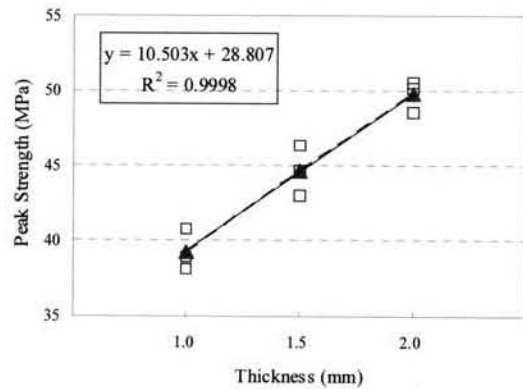
압축실험의 중단은 강자켓의 파단 때문이 아닌 압축 변형률을 측정하는 변위 변환계의 한계로 인해 변형률 0.04 부근에서 멈추었다. 1.5 mm 보강시편 실험의 변형률은 무보강시편의 파괴 시 변형률의 12배 이상인 0.06까지 도달하였다. 그림 5는 실험이 끝난 후의 시편으로 강자켓이 파단 되지 않았으며, 중앙부가 상당히 부풀어 오른 것을 알 수 있다.

그림 6에는 시편의 압축변형률(axial strain)과 강자켓의 수평(horizontal) 및 수직(vertical) 변형률을 자켓별로 비

교하여 나타내었다. 강자켓의 수직변형률은 실린더의 압축변형률과 달리 초기하중에 의해서는 거의 변형률이 발생하지 않고 일정한 하중 이상에서 증가하기 시작한다. 이것은 강자켓의 수직변형률이 압축에 의한 변형이 아니라 부풀음(bulge)에 의한 변형률임을 알 수 있다. 또한, 강자켓의 수직변형률이 수평변형률과 거의 일치하게 나타나는 것도 수직변형률이 축 방향 부피의 부풀음에 의한 변형률임을 알 수 있게 해준다. 이러한 결과는 강자켓과 콘크리트 공시체가 일체화된 복합거동을 하지 않기 때문인 것으로 판단된다. 강자켓의 최대 수평변형률은 약 0.036으로 나타나고 있으며, 이로부터 중앙부의 지름증가를 계산하면 약 6.0 mm가 증가하게 된다.



(a) 응력- 변형률 곡선



(b) 압축강도

그림 4. 보강된 공시체의 거동

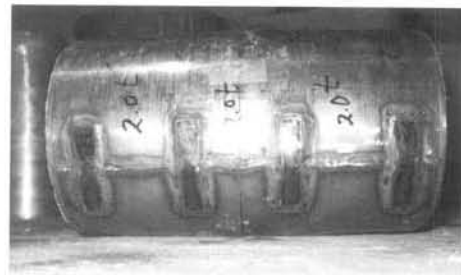


그림 5. 압축실험 후 보강시편

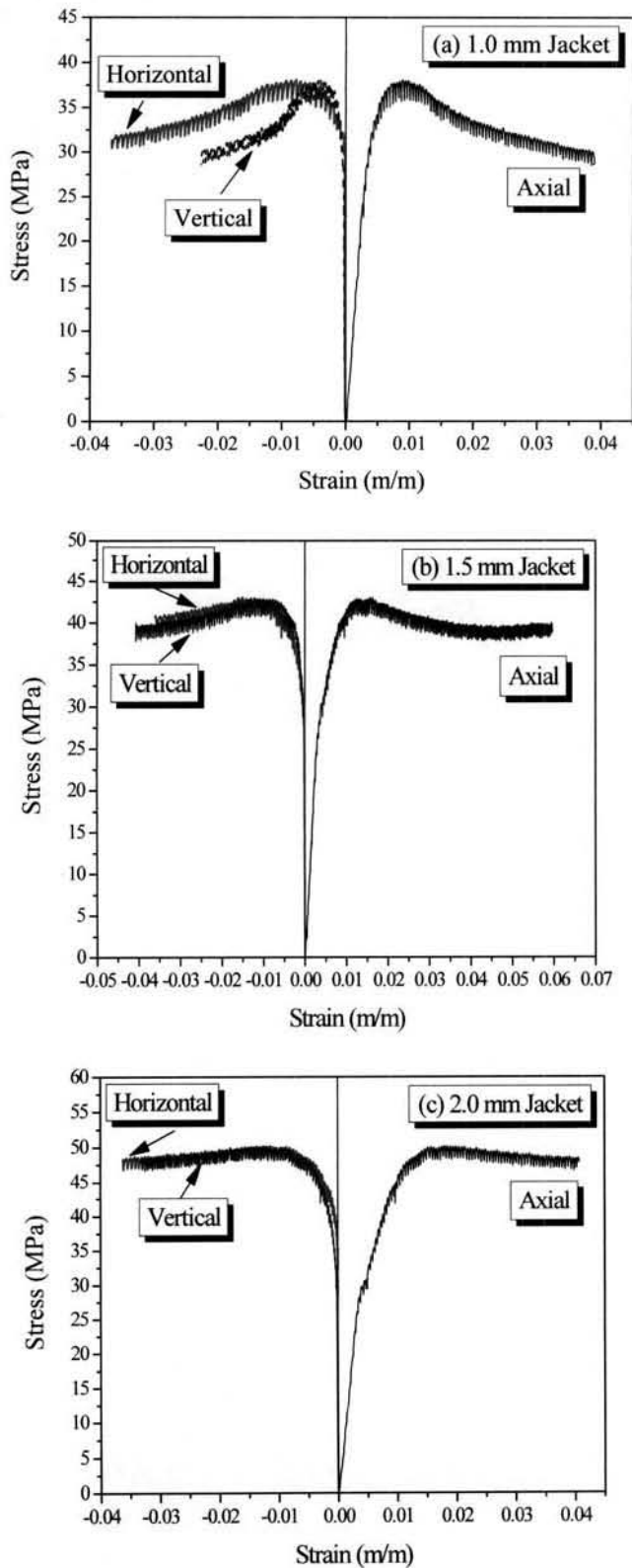


그림 6. 강자켓의 수평 및 수직변형률

### 3. 연속체모델

구속된 콘크리트에 관련된 여러 연속체모델이 제안되었다

(Saatcioglu and Razvi, 1992; Hoshikuma et al., 1997). 그 중에서도 Mander의 모델이 자주 인용되고 있다 (Mander et al., 1988). 하지만 Mander의 모델은 일반적인 횡보강 콘크리트에 사용되는 모델이므로 강자켓으로 구속되어있는 콘크리트에는 적용되지 않는다. Li (2005a, 2005b)는 강자켓과 횡보강으로 구속된 콘크리트의 연속체모델을 제안하였다. 이 모델의 응력-변형률의 관계는 그림 7과 같이 '구간 1'과 '구간 2'의 두 구간으로 나뉜다. 교차점의 응력,  $f'_{c1}$ ,은 무보강 콘크리트의 응력  $f'_{co}$ 와 횡방향 구속응력  $f_l$ 에 관한 함수이다.

$$f'_{c1} = f'_{co} + 1.519f_l^{1.18} \text{ [MPa]} \quad (1)$$

$$\text{여기서, } f_l = f_{l1} + f_{l2} \quad (2)$$

$f_{l1}$ 과  $f_{l2}$ 는 횡 방향 보강에 따른 유효구속응력과 강자켓에 의한 유효 구속응력을 나타내며,  $f_{l1}$ 과  $f_{l2}$ 의 식은 아래와 같다.

$$f_{l1} = \frac{1}{2}k_e\rho_s f_{yh} \quad (3)$$

여기서  $k_e$ 는 유효구속계수이며,  $\rho_s$ 는 횡보강판 철근비이고,  $f_{yh}$ 는 횡보강판의 항복응력이다.

여기서 콘크리트 실린더의 횡방향 보강철근이 없기 때문에  $f_{l1}$  값은 "0"이다.

$$f_{l2} = \frac{2 \times t \times E_{cs} \times \epsilon_{cs}}{D} \quad (4)$$

여기서  $t$  = 스틸자켓의 두께,  $E_{cs}$  = 스틸자켓의 탄성계수,  $D$  = 실린더의 지름,  $\epsilon_{cs}$  = 스틸자켓의 항복변형률이다.

축 응력  $f'_{c1}$ 에 대응되는 변형률을  $\epsilon_{c1}$ 으로 나타내며 이것은 실험에서 얻은 곡선의 회귀곡선에서부터 얻어진다.

$$\epsilon_{c1} = \epsilon_{c0} \left[ 1 + 12.2 \frac{f_l}{f'_{co}} \right] \quad (5)$$

여기서,  $\epsilon_{c0}$  = 구속되지 않은 콘크리트의 변형률로 0.002값이 적었다. 응력  $f_c$ 와 변형률  $\epsilon_c$ 의 관계는 두 구간으로 나뉜 곡선에서 구할 수 있다. 각 구간에서 쓰인 공식은 다음과 같다.

1) 변형률  $0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{cl}$  (구간 I)

$$f_c = f'_c \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cl}} \right) \left[ (n-1) \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cl}} \right) + (2-n) \right] \quad (6)$$

2) 변형률  $\epsilon_c \geq \epsilon_{cl}$  (구간 II)

$$f_c = f'_{cl} \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cl}} \right)^n \quad (7)$$

여기서,  $n$ 은 구간 II의 승수를 나타내며, 이 값은 유효 구속력의 함수로 나타난다.

$$n = 0.1 + 0.075 \left( \frac{f_l}{f'_{co}} \right) \quad (8)$$

각 보강 판에 대해 Li 모델과 실험에서 얻은 응력 변형률 곡선을 그림 8에 나타내었다. 보강 판의 두께와 상관없이 탄성구간(Region I)에서는 실험곡과 모델곡이 유사하게 거동하는 것으로 나타났지만 항복한 후의 거동에 대한 식 (7) (Region II)는 실험에 의한 응력 탄성 그래프는 점차 응력이 감소하는데 반해 모델은 증가하는 것으로 나타났다.

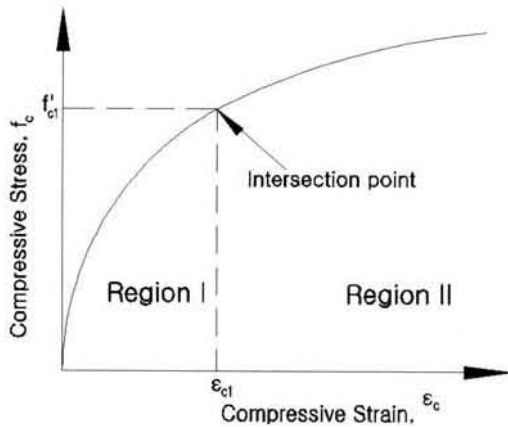


그림 7. 강자켓으로 보강된 콘크리트 연속체 모델

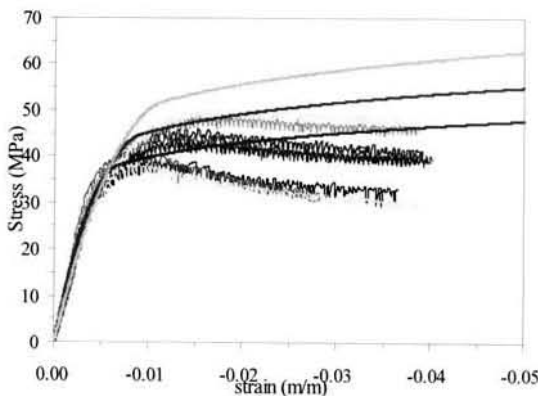


그림 8. 연속체 모델과 실험 응력-변형률 곡선

이것은 식 (8)에 의해 얻어진  $n$ 의 값이 양(+)의 값을 갖기 때문에 변형률의 증가할 수록 응력 또한 증가하는 것으로 판단된다. 따라서 구간 2의 식 (8)에 의해 얻어진  $n$ 의 값에  $-0.25$ 를 곱하여 식 (7)이 음의 지수형태를 갖도록 변형시켜 얻어진 응력-변형률 곡선을 그림 9에 나타냈다. 수정된  $n$ 값을 사용하여 얻은 항복 후(Region II)의 응력-변형률 곡선이 실험값과 유사하게 나타났다. 즉,  $n$ 의 값이  $-0.25$ 일 때, 실험값과 모델 값의 오차가 최소가 된다.

따라서 구간 1에 기존 Li 모델을, 구간 2에는 수정된  $n$  값을 사용한 Li 모델을 이용하여 새로운 모델을 그림 9에 나타내었다. 경계 변형률 값에서 그래프의 미분 값이 연속되지 않는 것으로 나타났지만 본 연구의 목적은 보강 공시체의 거동을 잘 재현하는 것이므로 비연속모델을 제안하였다.

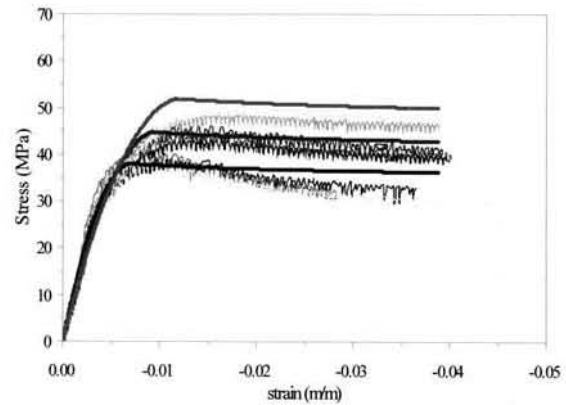
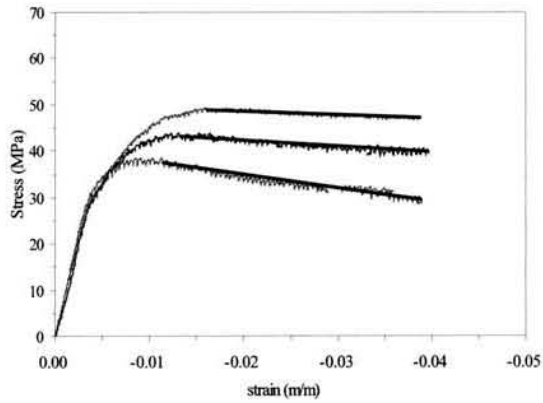


그림 9. 수정 연속체 모델과 실험결과

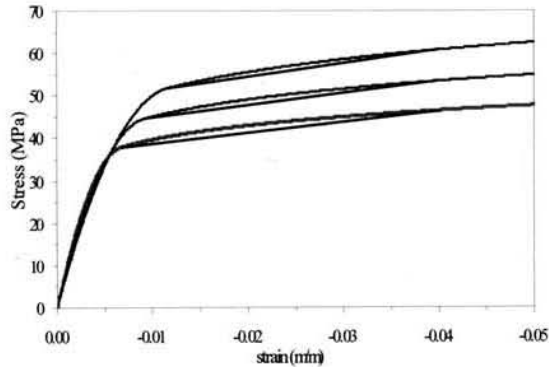
Li식과 수정된 Li식의 적용성을 알아보기 위해 경계변형률 값에서 기존모델, 수정모델 그리고 실험값의 응력값을 표 1과 2에 나타내었다. 기존 모델과 수정 모델의 응력값은 식 (6)을 통해 구하였으며, 실험값은  $\epsilon_c$ 의 실험 응력값을 읽어 평균값을 취하였다. 보강 두께가 두꺼워 질수록 오차는 2.5%에서 10.4%로 증가하였으며, 기존 모델과 수정 Li 모델은 유효숫자 범위 내에서 일치하는 것으로 나타났다.

그림 10에 실험값과 기존모델 그리고 수정모델 그의 항복 후 기울기를 나타내었고, 그 기울기 값을 표 3에 나타내었다. 모델에서는 경계점에서부터 변형률  $-0.04$ 점의 기울기를 사용하였으며, 실험값에서는 최대 응력 지점에서 변형률  $-0.04$  지점까지의 기울기를 구하여 비교하였다. Li 모델에서는 보강두께가 증가할수록 오차가 1.0 mm 일 때  $-186.2\%$ 에서 2.0 mm 일 때  $-495.2\%$ 로 증가하였고, 수정 Li 모델에서는 오차가 1.0 mm 일 때 80.7%에서 2.0 mm 일 때 9.1%로 줄어드는 것으로 나타났다. 또한 기존 모델과 수정 모델을 비교하였을 때 수정 Li 모델이 오차가 적은 것으

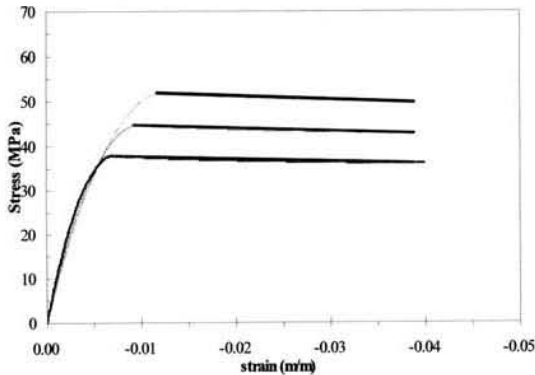
로 나타났다.



(a) 실험결과



(b) 기존의 연속체 모델



(c) 수정된 연속체 모델

그림 10. 각 모델의 항복 후 기울기 비교

표 1. 기존 model  $f_{cl}$  과 실험  $f_{cl}$  비교

보강 두께 (mm)	$\epsilon_{cl}$	기존 모델 $f'_{cl}$	실험 $f_{cl}$				오차 (%)
			실험1	실험2	실험3	평균	
1.0	0.00682	37.96	34.858	39.250	36.973	37.027	2.52
1.5	0.00923	44.67	42.882	42.340	39.250	41.491	7.66
2.0	0.01164	51.81	46.514	46.514	47.815	46.948	10.36

표 2. 수정 model의  $f_{cl}$  과 실험  $f_{cl}$  비교

보강 두께 (mm)	$\epsilon_{cl}$	수정 모델 $f'_{cl}$	실험 $f_{cl}$				오차 (%)
			실험1	실험2	실험3	평균	
1.0	0.00682	37.95	34.858	39.250	36.973	37.027	2.50
1.5	0.00923	44.67	42.882	42.340	39.250	41.491	7.66
2.0	0.01164	51.81	46.514	46.514	47.815	46.948	10.36

표 3. 실험값, 기존 model 및 수정 model의 항복 후 기울기 비교

보강 두께 (mm)	실험	Li model		수정 Li model	
		slope	오차 (%)	slope	오차 (%)
1.0	-298.76	257.38	-186.15	-57.683	80.69
1.5	-124.93	258.02	-306.53	-64.798	48.13
2.0	-80.293	317.35	-495.24	-72.973	9.12

#### 4. 결 론

본 연구에서 분리되지 않은 강판에 횡방향 구속압력을 도입하여 콘크리트를 보강하는 기법을 제시하였다. 제시된 강판 보강기법은 그라우팅을 하지 않아도 되기 때문에 시공이 간편하며, 강자켓 용접부위의 파괴가 일어나지 않아 콘크리트 시편의 강도 및 연성도 증진에 매우 효과적인 것으로 나타났다. 또한 보강판의 두께를 변수로 하여 콘크리트 시편의 압축 강도를 측정했을 때 보강판의 두께가 두꺼울수록 강도가 증가하는 것으로 나타났다. 1.0 mm 두께의 보강강판 두 개를 덧붙여 2.0 mm 두께의 보강강판을 제작하였고, 이 보강판이 하나의 보강판처럼 거동하는 것으로 나타났다. 따라서 지름이 큰 RC기둥의 경우 보강두께가 증가하게 되는데 이러한 경우, 얇은 여러 개의 강판을 겹쳐서 보강하는 것이 가능하다.

마지막으로, 보강된 콘크리트의 실험적 거동을 연속체모델을 이용해 분석하였다. 연속체 모델로는 Li의 모델이 사용되었다. 하지만 Li의 모델은 콘크리트 항복 후 거동을 재현하는데 있어 실험값과의 오차가 크게 나타났다. 따라서 Li 모델의 항복 후 제안식에 수정된 n 값을 적용하여 수정된 Li 모델을 제안하였다. 구간 I 과 구간 II 구역에 각각 다른 n의 값을 적용하였기 때문에 경계 변형률에서 불연속성이 나타났다. 하지만 본 연구의 목적은 보강 콘크리트의 실험적 거동을 잘 재현하는데 있으므로 수정된 Li 모델은 보강 콘크리트의 거동을 잘 재현한다고 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 2007학년도 홍익대학교 학술연구진흥비에 의하여 지원되었으며, 이에 감사를 표하는 바입니다.

## 참 고 문헌

- 이대형, 박창규, 정영수(2005). 겹침이음 및 보강된 철근 콘크리트 교각의 내진성능평가를 위한 Macro모델, *대한토목학회논문집*, 제 25권 5A호 pp.857-864, 2005년 9월.
- 김태훈, 박현용, 김병석, 신현목(2003). 철근의 겹침이음을 고려한 철근콘크리트 교각의 내진성능 평가, *한국지진공학회논문집*, 제 7권 제3호 pp.31-38, 2003년 6월.
- 최은수, 조성철, 정영수, 조백순(2008) 그라우팅이 필요 없는 RC기둥 강관보강 기법, *한국강구조학회논문집*, 제 20권 1호, pp.55-65, 2008년 2월.
- 홍원기, 김희철, 윤석한, 박순섭(2003) 탄소섬유튜브로 황구속된 각형 콘크리트 기둥의 압축강도 성능에 관한 연구, *한국지진공학회 논문집*, 제 7권 1호 pp.1-7, 2003년 2월
- 박영준, 이강돈, 염광수, 이영호, 이학은(2003). 탄소섬유시트(CFS)로 보강된 콘크리트의 거동, *대한토목학회 정기학술대회*, 제 7권 1호 pp.1-7, 2003년 2월
- 정영수, 박종협, 박희상(2001). 섬유보강 원형 RC교각의 내진성능 평가를 위한 유사동적실험, *한국지진공학회논문*, 제 5권 2호 pp.49-57, 2001년 4월
- Furlong and Richard, W.(1967). Strength of steel-encased concrete beam columns, *Proceedings, ASCE*, Vol. 93, ST.5, 1967, pp. 113-124.
- Saatcioglu, M., and Razvi, S.R.(1992) Strength and Ductility of Confined Concrete, *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol. 118, No. 6, pp. 1590-1607.
- Hosikuma, M., Kawashima, K., Nagaya, K., and Taylor, A.W. (1997). Stress-strain Model of Confined Concrete in Bridge Piers, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 123, No. 5, pp. 624-633.
- Mander, J.B., Priestly, M.J.N., and Park, P. (1988). Observed Stress-strain Behavior of Confined Concrete, *Journal of the Structural Division, ACSE*, Vol. 114, No. 8, pp. 1827-1849.
- Li, Y.F., Hwang, J.S., Chen, S.H., and Hsieh, Y.M. (2005a). A study of reinforced concrete bridge columns retrofitted by steel jackets, *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, Vol. 28, No. 2, pp.319-328.
- Li, Y.F., Chen, S.H., Chang, K.C., and Liu, K.Y. (2005b). A constitutive model of concrete confined by steel reinforcements and steel jackets, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 32, pp.279-288.

(접수일자 : 2008. 5. 23 / 심사일 2008. 6. 24 /  
게재확정일 2008. 7. 14)