

재하상태에 따른 철근콘크리트 보의 탄소섬유쉬트 보강효과

CFS Strengthening Effect of Reinforced Concrete Beams under Loading States

김민수* 오용복** 권영웅***
Kim, Min Su Ohr, Yong Bok Kwon, Young Wung

ABSTRACT

The target of this study is to compare and analyze the strengthening effect of damaged reinforced concrete beams under unloading and loading conditions through the simulation of strengthening condition in real structures. The conclusion of test results are as follows : For the concrete beam wrapped at the side in addition to be strengthened at the bottom, the strength and stiffness increase. Although the flexural capacity depends on the strengthening method, it generally shows that the strength improve in the range of 22% to 39% in comparison with the specimen without strengthening. In case of applying the equation suggested by GangaRao & Vijay for the wrapped concrete beam, it must be modified because it is likely to overestimate the flexural capacity considering the height of wrapping as the width of concrete. The strength and stiffness of reinforced concrete beams in proportion to the percentage of damage decrease. Damaged beams, which are strengthened by CFS, is structurally efficient and show reduction of strength comparing with the specimen without strengthening but stiffness is increasing.

1. 서론

구조적으로 손상된 철근콘크리트 부재는 충분한 강도와 복구성을 얻기 위해 보수·보강이 필요하다. 실제로 다양한 원인으로 인하여 현존하는 콘크리트 구조물이나 그들의 성분들에서 발생할 수 있는 구조적인 결함 등을 발견하고 이를 보강하는 방법이 현실적으로 필요하게 되었다. 부정확한 설계상의 오류, 구조계산상의 오류, 시공상의 오류, 철근의 부식, 구조적인 결함, 유지관리의 소홀은 건물전체의 안전성에 문제가 제기될 수 있다⁽¹⁾

또한 현장에 적용하는 보강기법은 아직 이론적, 기술적인 체계가 확립되어 있지 않으며, 실험시의 보강방법은 일정정도까지 선행가력(pre-loading)하고, 제하(unloading)상태에서 보강판을 접착하는 방법을 사용하지만, 균열이 닫히고 응력 상태가 변화하는 과정에서 보강효과에 영향을 받기 때문에 실험을 통한 구조부재의 보강방법은 실질적으로 시공현장과 다른 조건이므로 보강재의 산정량이 잘못 적용되고 있다.⁽²⁻⁵⁾ 그러므로 보강설계에 있어서 추가되는 인장보강재의 효과를 정량적으로 파악하기 위하여 보의 밑면에 부착하는 보강재의 효과를 연구하는 것은 매우 중요한 의미를 갖는다.

본 연구에서는 손상된 철근콘크리트 보의 보수·보강 방법에 있어서 보강시점과 하중상태를 달리하여 탄소섬유쉬트 부착에 의한 보강효과 측면에서 닫히지 않은 균열을 가진 실험체의 구조적 거동을 파악하고 실제구조물의 보강상태를 모의(simulation)하여 제하상태와 재하상태에서의 보강효과를 직·간접적으로 알아보고자 하였다

* 정회원, 인천대학교 건축공학과 대학원, 석사
** 정회원, 한국통신 조달본부 전임연구원, 공학박사
*** 정회원, 인천대학교 건축공학과 교수, 공학박사

2. 실험

2.1 실험체 계획

본 연구에서는 탄소섬유슈트를 이용하여 손상된 철근콘크리트 보에 휨 보강을 수행하여 보강시 하중상태 (loading, unloading), 손상정도에 따른 내력평가를 통하여 보강효과를 알아보고자 하였다. 실험에 있어서 보강이 필요한 실제구조물과 같이 단하지 않는 균열을 모의하기 위하여 일정정도까지 선행가력(preloading)하고, 하중을 유지한 상태에서 균열부위에 에폭시를 주입하고, 탄소섬유슈트를 보강하여 양생기간을 거쳐 가력하는 방법을 사용하였다.^(6,7) 실험체의 단면과 형상은 그림1과 같이 150×230×2300mm로 하였으며, 순지간 거리는 2.1m이고 압축철근은 D10(항복강도 : 4104kg/cm²)으로 보 상단으로부터 5cm되는 위치에 배근하였으며, 인장철근은 D16(항복강도 : 4242kg/cm²)을 사용하였다. 또한 보강후에도 보강재의 면적을 포함한 보강철근비가 최대철근비를 넘지 않도록 하여 압축부분의 콘크리트가 철근이나 보강재 보다 먼저 파괴가 되지 않도록 하였다. 또한 보강판은 밀면보강과 더불어 인장철근 중심의 2배까지 측면보강을 하였고, 전단보강근은 단부로부터 10cm간격으로 D6(항복강도 : 4327kg/cm²) 철근을 배근하여 전단파괴가 발생하지 않도록 하였다. 인장철근과 압축철근의 변형율을 측정하기 위해 각 철근의 중앙에 변형게이지(Strain Gauge)를 설치하였다. 각 실험변수에 따른 실험체별 특성은 표1에 나타나 있다.

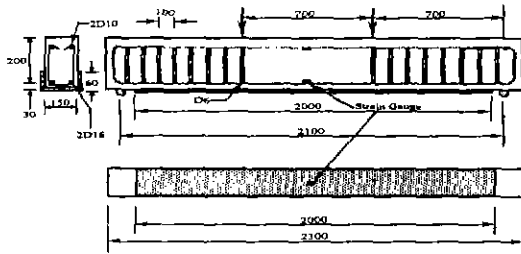


그림 1 실험체의 형상

표 1 실험변수

| Test Specimen | Material | Loading State | Degree of Damage | Concrete Strength (kg/cm ²) |
|---------------|----------|---------------|------------------|---|
| CONT | - | - | - | 250 |
| CONT-C | CFS | Unloading | - | |
| UL-C-50 | | | 50% | |
| UL-C-70 | | | 70% | |
| UL-C-90 | | | 90% | |
| L-C-50 | | Loading | 50% | |
| L-C-70 | | | 70% | |
| L-C-90 | | | 90% | |

2.2 사용재료

본 연구에서 사용된 콘크리트는 물시멘트비(w/c)는 0.58, 슬럼프 10cm, 평균압축강도는 250kg/cm²였다. 사용된 탄소섬유슈트와 에폭시 제품의 재료적 특성은 표 2, 표 3과 같다.

표 2 CFS의 재료적특성

| Product | Type | Weight (g/m ²) | Thickness (mm) | Tensile Strength (kg/cm ²) | Elastic Modulus (kg/cm ²) |
|---------|---------------|----------------------------|----------------|--|---------------------------------------|
| SK-N200 | High Strength | 200 | 0.11 | 35,500 | 2.35×10 ⁸ |

표 3 에폭시의 재료적특성

| Type | Product | Specific Gravity | Tensile Strength (kg/cm ²) | Compressive Strength (kg/cm ²) | Flexural Strength (kg/cm ²) |
|-------------|---------|------------------|--|--|---|
| Injection | SSG-70R | 1.07 | 549 | 949 | 104 |
| CFS bonding | SKRS | 1.18 | 670 | 1500 | 834 |

2.3 실험방법

탄소섬유슈트로 보강된 손상된 철근콘크리트 보를 가력하기 위해서 최대변위가 250mm, 최대하중25ton[±] actuator(INSTRON 8800)를 사용하였다. 가력면은 평활정도에 따른 응력집중을 방지하고 시험체에 균일한 하중이 작용할 수 있도록 구면좌(spherical seat)를 사용하였으며, 보 중앙부의 변위를 측정하기 위하여 변위

(LVDT)를 설치하였다. 콘크리트의 변형도와 철근의 변형도 및 보강재료와 콘크리트간의 변형일체성을 살펴보기 위해 시험체 및 보강재료의 외부에 스트레인 게이지를 부착하였다. 실험체의 파괴는 Strong Frame에서 가력용 강재를 이용하여 3점 재하 휨 시험(third point loading)을 실시하였다. 또한 실험체의 갑작스러운 사인창 파괴보다는 휨 파괴를 유도하기 위해 가력속도는 0.5ton/min으로 하중제어(load control)를 통해 시험체에 하중을 가력하였다.

3. 실험결과

3.1 하중-변위특성

손상정도에 따른 처짐 거동을 살펴보면 재하(unloading)상태에서 잔류변형의 차이를 보이고 있지만, 보강 후 최대하중에 도달했을때의 처짐은 비슷하게 나타났다.(그림 2) 또한 탄소섬유취트의 파단 이후에 하중은 급격히 감소하지만 손상정도에 관계없이 어느 정도의 처짐조절 능력을 갖고 있는 것으로 나타났다. 재하상태(loading)에 의한 처짐 특성을 살펴보면 holding상태에서 발생하는 잔류변형이 손상정도에 따라 증가되고, 재하상태에서의 처짐보다 증가하는 것으로 나타났다. 이는 holding상태에서의 잔류변형의 영향으로 인한 것으로 판단할 수 있다.(그림 3)

표 4 실험결과

| Test Specimen | Initial Cracking Load (ton) | | Maximum Load (ton) | | Displacement(mm) | | A/B* |
|---------------|-----------------------------|-------|--------------------|-------|---------------------|----------|------|
| | Exp. | Theo. | Exp. | Theo. | at P _{max} | Residual | |
| CONT | 2.5 | 1.17 | 9.6 | 8.9 | 16.59 | - | 1.08 |
| CONT-C | 3.2 | 1.17 | 12.91 | 15.4 | 24.39 | - | 0.84 |
| UL-C-50 | 2.2 | 1.17 | 13.32 | 15.4 | 25.08 | 0.78 | 0.86 |
| UL-C-70 | 3.4 | 1.17 | 13.00 | 15.4 | 25.50 | 1.07 | 0.84 |
| UL-C-90 | 3.7 | 1.17 | 12.20 | 15.4 | 21.14 | 1.09 | 0.80 |
| L-C-50 | 2.1 | 1.17 | 12.53 | 15.4 | 22.26 | 0.62 | 0.81 |
| L-C-70 | 2.2 | 1.17 | 12.69 | 15.4 | 23.72 | 1.20 | 0.82 |
| L-C-90 | 1.9 | 1.17 | 12.91 | 15.4 | 27.44 | 1.63 | 0.84 |

* A/B : 최대하중에서의 실험치/이론치

3.2 변형특성

모든 시험체의 경우 인장철근의 변형도는 최대내력시 변형경화 구간에 있어서 항복변형도를 넘고 있는 것으로 나타났다. 부재항복시 6200~7700 $\mu\epsilon$ 임을 알 수 있었다. 보강관 변형도의 경우 재하상태에서는 최대하중시

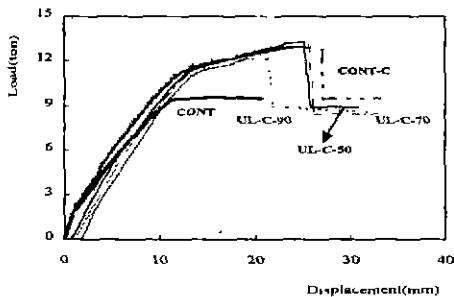


그림 2 손상정도에 따른 하중-변위관계

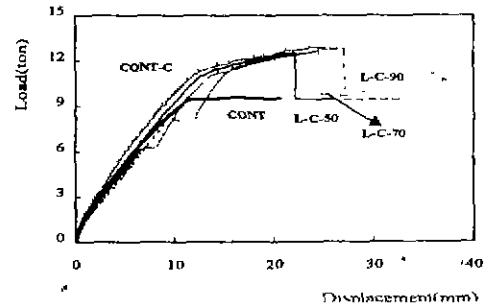


그림 3 재하상태에 따른 하중-변위관계

모두 항복변형도를 넘고 있으나 재하상태에서 손상정도가 90%인 경우는 보강판이 항복하기 전에 콘크리트 압파가 먼저 발생하는 것으로 나타났다.(그림 4) 특히 제하상태의 경우 손상정도가 증가할수록 기준시험체에 비해 보강판의 초기강성이 커짐을 알 수 있었다. 이것은 제하시 주입된 에폭시의 영향인 것으로 판단된다.

콘크리트의 변형도는 부재항복시 3900~6000 $\mu\epsilon$ 으로 하중상태와 관계없이 비슷한 결과를 나타냈다. 또한 제하상태에서 콘크리트는 500~700 $\mu\epsilon$ 의 잔류변형율을 나타냈다.(그림 5) 특히 손상정도가 70%, 90%인 경우 재가력(reloading)후에 초기강성이 급격하게 증가됨을 볼 수 있었다.

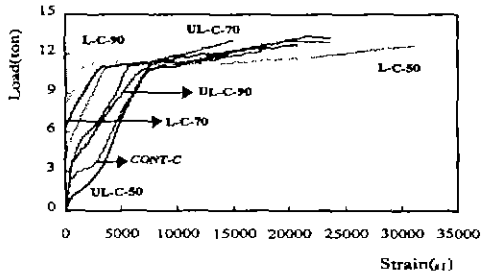


그림 4 제하상태에 따른 CFS의 변형특성

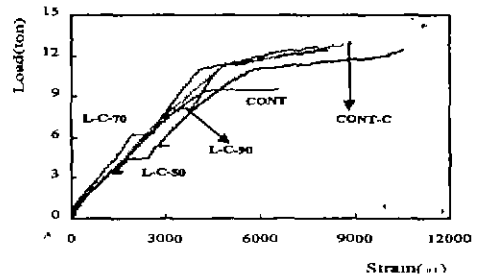


그림 5 제하상태에 따른 콘크리트 변형특성

4. 실험결과와 분석

4.1 강도 평가

GangaRao & Vijay⁽⁹⁾는 ACI 318-95에서 제시하고 있는 복근보의 공칭모멘트 산정식에 인장측 보강재의 단면적에 따른 내력을 첨가하여 산정하였다. 이 때 주근의 중심에서 중립축까지의 거리는 콘크리트가 0.003에서 보강판은 보의 밑면에서 ϵ_{car} 이 선형변화 한다고 가정하여 대략적인 값을 산정하였다.

인장측 탄소섬유쉬트의 내력(T_{car})

$$T_{car} = \sum_{i=0}^3 (A_{car})_i (Avg. f_{car})_i \quad (1)$$

여기서, $(Avg. f_{car})_i = (Avg. \epsilon_{car})_i E_{car}$

식(1)과 같이 인장측 탄소섬유쉬트의 내력을 알면 평형방정식을 이용하여 a 값을 구할 수 있다. 따라서 인장철근의 중심에 대한 각각의 모멘트를 구하면 식 (2)와 같다.

$$M_u = 0.85 f_{ck} a b (d - \frac{a}{2}) + A' f_s (d - d') + \sum_{i=0}^3 (A_{car})_i (Avg. f_{car})_i d' \quad (2)$$

탄소섬유로 보강된 손상 받은 철근콘크리트 보의 최대하중에 대한 이론값의 비율은 $0.80 \leq \text{실험값} / \text{이론값} \leq 0.86$ 으로 나타났다.(표 4) 특히 측면 보강시험체는 손상정도가 증가할수록 내력이 증가되는 것으로 나타났다.(그림 6) 이것은 하중상태에 따른 균열의 영향인 것으로 판단된다. 손상정도와 관계없이 제하상태에서 균열이 닫히고 에폭시 주입 및 탄소섬유쉬트 부착과정에서 제하시 발생한 잔류처짐량이 더 회복되어 균열의 폭이나 에폭시 주입량의 차이가 없었기 때문이다. 또한 기존의 연구⁽⁷⁾중에서 재하중 강판으로 보강된 경우 손상되지 않는 시험체에 비해 구조적으로 효과적이며 강도나 강성이 보다 우수함을 알 수 있었다. 그러나 탄소섬유의 경우는 강판공법과 달리 강도가 저하되는 것으로 나타났다. 이는 보강시 시공방법이 강판공법에 비해 까다롭고 에폭시 주입과 동시에 강판이 부착되는 것이 아니고, 에폭시 주입의 양생기간과 탄소섬유쉬트 정착에 앞서 1~2일 정도의 holding 기간을 갖고 있기 때문에 다른 보강공법에 비해 잔류변형도 크고, 그로 인해 내력이 저하되는 것으로 판단된다.

4.2 연성 평가

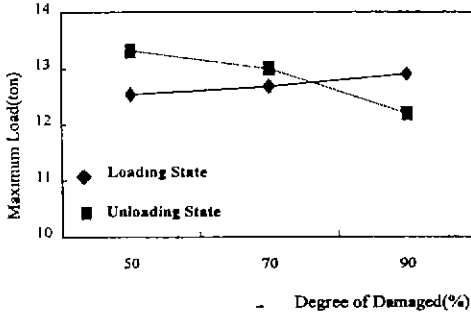


그림 6 하중상태에 따른 강도성향

철근콘크리트 보의 에너지 흡수능력에 대한 특성은 연성 (ductility)이며 곡률이나 처짐의 비, 또는 철근의 항복상태에 대한 극한상태에서의 회전각 등으로 정의할 수 있다. 본 연구에서는 실험을 통한 하중-변위 곡선에서 연성을 구했고, 변형특성을 이용하여 모멘트-곡률관계를 얻을 수 있었다. 표 5에서 볼 수 있듯이 손상정도가 50%, 70%인 경우는 선행가력으로 인한 잔류처짐량으로 인해 보강시점이 증가할수록 연성이 증가되는 것으로 나타났다. 그러나 손상정도가 90%인 경우는 연성이 감소하는 것으로 나타났다. 시험체의 내력차이는 크지 않았지만, 다른 손상정도에 비해 초기의 잔류처짐량이 크고 제하시 이미 철근과 콘크리트

가 항복에 이르렀기 때문에 이미 단면이 가지고 있는 에너지의 손실량이 많았기 때문으로 생각된다. 곡률측면에서 평가한 연성은 변위에 대한 연성과 비슷한 비율로 증·감을 나타내고 있다. 다소 차이를 보이는 이유는 곡률의 경우 변형특성을 가지고 평가했기 때문에 파괴에 이르기까지 정확한 변형을 측정하기 힘들었기 때문으로 판단된다. 따라서 변위측정과 같이 파괴이후까지 변형율을 측정할 수 있었다면, 보다 정확한 연성을 평가할 수 있으리라 생각된다.

표 5 연성평가

| Specimen | Experimental Values | | | | | |
|----------|---------------------|------------|-----------------------------|----------|----------|-------------------------|
| | δy | δu | $\frac{\delta u}{\delta y}$ | ϕy | ϕu | $\frac{\phi u}{\phi y}$ |
| CONT | 11.78 | 16.59 | 1.41 | 0.00043 | 0.00080 | 1.86 |
| CONT-C | 11.64 | 24.39 | 2.10 | 0.00054 | 0.00125 | 2.31 |
| UL-C-50 | 12.90 | 25.08 | 1.94 | 0.00045 | 0.00097 | 2.19 |
| UL-C-70 | 12.34 | 25.50 | 2.07 | 0.00056 | 0.00129 | 2.30 |
| UL-C-90 | 12.34 | 21.14 | 1.71 | 0.00048 | 0.00100 | 2.08 |
| L-C-50 | 12.37 | 22.26 | 1.80 | 0.00037 | 0.00066 | 1.78 |
| L-C-70 | 12.67 | 23.72 | 1.87 | 0.00025 | 0.00048 | 1.92 |
| L-C-90 | 15.46 | 27.44 | 1.77 | 0.00030 | 0.00051 | 1.70 |

표 6 휨 강성의 평가

| Specimen | Rigidity, EI(10 ⁹ kg/cm ²) | | | | | |
|----------|---|----------------|------|-----------------|----------------|------|
| | Exp. | | | Theo. | | |
| | Before cracking | After cracking | | Before cracking | After cracking | |
| | Yield | Ultimate | | Yield | Ultimate | |
| CONT | 1.61 | 0.72 | - | 3.53 | 1.82 | - |
| CONT-C | 1.80 | 0.80 | 0.10 | 3.53 | 1.97 | 0.44 |
| UL-C-50 | 1.40 | 0.96 | 0.11 | 3.53 | 1.97 | 0.44 |
| UL-C-70 | 1.52 | 0.85 | 0.11 | 3.53 | 1.97 | 0.44 |
| UL-C-90 | 1.51 | 0.89 | 0.10 | 3.53 | 1.97 | 0.44 |

| Specimen | Rigidity, EI(10 ⁹ kg/cm ²) | | | | | |
|----------|---|-------|---------------------|-------|-----------------|----------------|
| | Exp. | | | Theo. | | |
| | Before strengthening | | After strengthening | | Before cracking | After cracking |
| | Before cracking | Yield | Before cracking | Yield | | |
| L-C-50 | 2.68 | 1.05 | 2.19 | 1.15 | 3.53 | 1.97 |
| L-C-70 | 2.35 | 1.35 | 1.95 | 1.35 | 3.53 | 1.97 |
| L-C-90 | 2.45 | 1.35 | 1.87 | 1.30 | 3.53 | 1.97 |

4.3 휨 강성 평가

보강판이 정착된 철근콘크리트 보의 휨 강성(flexural rigidity)은 일정한 값을 갖지는 않지만 하중상태, 균열 폭, 균열길이, 보강판의 두께, 정착층의 두께에 따라 달라진다. 또한 본 연구와 같이 선행가력으로 인해 균열이 발생하고 제하시 균열이 다시 닫히는 문제점으로 인해 각 하중에 대한 휨 강성을 평가하는 것은 상당히 어려운 일이다. 특히 재하중에 보강되는 시험체의 경우 무보강 시험체와는 달리 보강전과 보강후에 대한 휨 강성의 평가가 동시에 이루어져야 한다. 따라서 본 연구에서는 Triantafyllou & Plevis가 제안한 모멘트-곡률 관계를 통한 이론값과 실험을 통해 얻은 모멘트-곡률 관계를 이용하여 이론값과 실험값을 비교·고찰하였으며, 그 결과는 표6과 같다. 표 6에서도 볼 수 있듯이 이론값이 실험값 보다 과대평가 되는 경향을 나타

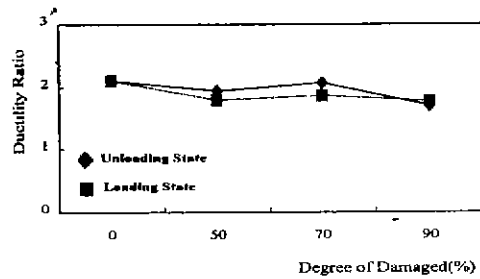


그림 7 손상정도에 따른 연성

내고 있다. 또한 사용하중상태나 극한하중상태로 갈수록 휨 강성의 차이는 더욱 커짐을 알 수 있었다. 이것은 선형가력으로 발생한 균열의 영향으로 판단된다. 재하상태에서 보강된 시험체의 휨 강성은 제하상태에서 보강된 시험체의 휨 강성보다 크게 나타남을 알 수 있었다. 초기균열이 발생하였을 때의 휨 강성의 차이는 재하의 유·무에 의한 것으로 판단할 수 있다. 보강 후의 강성은 모든 시험체가 제하상태에서의 균열전 강성보다 크게 증가하는 것으로 나타났다. 이는 재하상태에서 보강된 보강판이 손상된 시험체의 강성을 보다 더 증가시키는 것으로 볼 수 있다.

5. 결 론

단히지 않은 균열이 있는 손상 받은 철근콘크리트 보에 대해서 재하조건과 보강시점을 달리하여 나타나는 탄소섬유쉬트 보강효과를 알아보려고 하였다. 일련의 실험과 해석을 통하여 나타난 손상된 보의 탄소섬유보강 효과의 결론은 다음과 같다.

(1) 에폭시 레진이 보강판과 완전하게 부착될 경우 보강된 보의 강성과 강도는 증가된다. 이 때 균열에 의한 강도와 연성의 감소는 에폭시 주입에 의한 보수로서 회복된다.

(2) 측면(wrapping)보강을 할 경우, 강도와 강성은 증가하지만, 보강판비(보강량)가 증가할수록 연성은 감소한다. 또한 탄소섬유쉬트의 보강은 무보강 시험체 내력의 22%~39%의 강도증진 효과가 있다.

(3) GangaRao & Vijay가 제안한 측면 보강 내력산정식은 내력산정시 과대평가가 될 수 있으므로, 폭을 고려하여 수정·보완되어야 한다.

(4) 손상정도에 따른 철근콘크리트 보의 강도와 강성은 손상정도가 클수록 감소한다. 특히 재하(loading)상태에서 밀면 보강과 더불어 측면 보강을 하는 것이 효과적이다.

(5) 재하상태에서 보강된 시험체의 경우, 정상보의 균열전 강성보다 14%~35%의 감소를 나타내고, 보강전 초기균열 이후의 강성보다는 0.5~2배 크게 나타난다. 이 때 해석값과 실험값의 비율이 상당한 오차를 보이는데 이는 유효단면2차모멘트의 불확실성 때문인 것으로 보인다. 그러므로 중립축을 산정하는 제안식들의 적용에 유의할 필요가 있다.

참 고 문 헌

1. D. N. Trikha, S. C. Jain, S. K. Hali, "Repair and Strengthening of Damaged Concrete Beams", *Concrete International*, Vol. 13, No. 6, pp. 53~59, June 1991.
2. R. N. Swamy, R. Jones, A. Charif, "The Effect of External Plate Reinforcement on the Strengthening of Structurally Damaged RC Beams", *ASCE* Vol. 67, No. 3, pp. 45~56, 1989. 2.
3. Sharif, A., Hussain, M., Al-Sulaimani, G. J., Basunbul, I. A., and Baluch, M. H., "Flexural behavior of precracked reinforced concrete beams strengthened externally by steel plate", *ACI Structural Journal*, Vol.92, No.1, pp.14~22, Jan-Feb, 1995.
4. Alfarabi Sharif, G. J. Al-Sulaimani, I. A. Basunbul, M. H. Baluch, B. N. Ghaleb, "Strengthening of Initially Loaded RC Beams Using FRP Plates", *ACI Structural Journal*, Vol. 91, No. 2, pp. 160~169, March-April, 1994.
5. S. A. Hamoush, S. H. Ahmad, "Debonding of Steel Plate-Strengthening Concrete Beams", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 116, No. 2, pp. 356~371, February, 1990.
6. Y. N. Ziraba, M. H. Baluch, I. A. Basunbul, A. M. Shrif, A. K. Azad, G. J. Al-Sulaimani, "Guidelines Toward the Design of Reinforced Concrete Beams with External Plates", *ACI Structural Journal*, Vol. 91, No. 6, pp. 639~646, November-December, 1994.
7. R. Jones, R. N. Swamy and T. H. Ang, "Under- and Over Reinforced Concrete Beams with Glued Steel Plates", *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, Vol. 4, No. 1, pp. 19~32, February 1982.
8. T. C. Triantafyllou, N. Plevris, "Strengthening of RC Beams with Epoxy-Bonded Fibre-Composite Materials", *Materials and Structures*, pp. 201~211, 1992.
9. Hota V. S. GangaRao, P. V. Vijay, "Bending Behavior of Concrete Beams Wrapped with Carbon Fabric", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 124, No. 1, pp. 3~10, January 1998.
10. 김민수, "손상된 철근콘크리트 보의 탄소섬유쉬트 보강효과", 인천대 석사학위 논문, 1999