

## CFRP판으로 보강된 RC 보의 구조거동 해석모델 개발

Development of the Nonlinear Analysis Model on Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Prestressed Carbon Fiber-Reinforced Polymer Plates

우 상 균\*      남 진 원\*\*      김 장 호\*\*\*      변 근 주\*\*\*\*  
Woo, Sang-Kyun    Nam, Jin-Won    Kim Jang-Ho    Byun, Keun-Joo

### Abstract

The purpose of this study is to analyse and compare experimentally flexural behavior of RC beams strengthened with CFRP plates by different methods, and finally develop the nonlinear analysis model with the aim of predicting the improving effects of structural capacity and the structural behaviors of RC beams. From this study, the characteristics of bond and flexural behavior of the prestressed CFRP plates were analyzed and examined. In deed, the beams were tested with experimental parameters of strengthening methods and prestressing level, and the developed analysis model was evaluated with the testing results. From this study, it is concluded that the developed analysis model have a good reliability and can be applied to the strengthening design of beams using CFRP plates.

### 요 지

본 연구의 목적은 CFRP판을 다양한 방법으로 보강한 RC보의 휨거동을 실험적으로 비교·분석하고, 프리스트레싱을 도입하여 보강된 콘크리트 구조물의 성능개선 효과와 구조거동을 예측할 수 있는 해석모델을 개발하는 것이다. 이를 위하여 프리스트레싱이 도입된 CFRP판의 부착 및 휨거동 특성을 분석하고, CFRP 및 Epoxy 수지의 거동특성을 규명하였다. 또한 CFRP판의 보강방법과 프리스트레싱 수준 등을 실험변수로 설정하여 콘크리트 보의 휨실험을 수행하고, 개발된 해석모델의 결과와 비교·검증하였다. 연구결과 본 해석 기법은 충분한 신뢰도를 가지고 있으므로 CFRP를 사용한 보강설계에 효과적으로 적용이 가능하다고 판단된다.

**Keywords :** CFRP plate, Prestressing, Flexural capacity, RC beam, Nonlinear analysis

**핵심 용어 :** 탄소섬유판, 프리스트레싱, 휨성능, RC 보, 비선형 해석

\* 정회원, 한전 전력연구원, 선임연구원

\*\* 정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 연구교수

\*\*\* 정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수

\*\*\*\* 정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 명예교수

E-mail : wskyun@kepri.re.kr 042-865-5753

• 본 논문에 대한 토의를 2008년 8월 31일까지 학회로 보내 주시면 2008년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

## 1. 서 론

국내·외적으로 노후화된 철근콘크리트 구조물이 증가함에 따라 강판이나 FRP(fiber-reinforced polymer) 등을 이용한 구조물 보강사례가 증가하고 있으며, 이와 함께 전체 건설시장 가운데 구조물 보수·보강 분야의 비중은 크게 증가하고 있는 실정이다. 이에 따라 장기적인 관점에서 역학적인 특성뿐만 아니라 내부식성의 장점을 갖고 있는 탄소섬유 보강재와 같은 복합신소재가 기존의 강판대용으로 이용되면서 구조물의 유지관리 및 보수·보강 비용을 절감할 수 있게 되었다. 그러나 이러한 복합재료를 이용한 기존의 보강방법은 주로 표면부착을 통해 보강이 이루어지므로 보강재 단부에서의 응력집중과 통기성, 수분침투 등의 환경적 요인에 의해 부식 및 박리(부착면 파괴)가 발생하여 보강재의 재료적 성능이 충분히 발휘되기도 전에 조기 파괴되는 문제점을 안고 있다.<sup>(7)</sup>

현재 국내에서는 철근 콘크리트 구조물의 보수·보강을 위해 강판접착공법, FRP 섬유부착공법, 외부 프리스트레싱 공법 등이 사용되고 있다. 특히, CFRP 슈트 부착공법은 그동안 활발한 연구를 통해 많은 연구성과들이 보고되어 있으며<sup>(1)(2)</sup> 교량이나 건축물의 슬래브 보수·보강 등에 실무적으로 많이 적용되어 오고 있다. 그러나 CFRP 슈트 부착공법은 시간이 경과함에 따라 누수 및 환경적인 요인으로 인해 콘크리트와 슈트의 부착면이 들뜨거나 떨어지는 현상이 자주 발생하는 단점을 가지고 있다. 최근에는 CFRP 슈트 부착공법의 대안으로 CFRP판을 이용한 보강공법에 대한 연구가 연구자들에 의해서 활발하게 진행되고 있다.<sup>(4)(5)</sup> 이들의 연구결과를 분석해 보면 CFRP판으로 콘크리트 구조물을 보강할 경우 CFRP판의 보강량, 보강길이, 단부보강방법 등 여러 변수에 따라 서로 다른 구조적 거동을 기대하지만 실제 설계시 기대되는 CFRP판의 재료성능을 발휘하지 못한다. 이는 전단균열 또는 휨균열로 인해 가력점 근처 콘크리트 하단과 CFRP판의 접촉면에 계면균열로 시작되어 단부로 진전되는 계면박리파괴 또는 CFRP판의 단부에서 발생하는 응력집중으로 인한 균열로 인하여 보강판이 파괴

콘크리트를 물고 떨어지는 단부박리파괴 등으로 인한 조기파괴가 발생하기 때문이며, 이러한 파괴형태는 경제적인 측면이나 역학적인 측면에서 바람직하지 않다.

근래 이러한 CFRP판 표면부착 공법의 문제점을 해결하고 능동보강의 개념으로 CFRP판에 프리스트레싱력을 도입하여 단부에 정착하는 공법에 관한 연구결과가 몇몇 연구자들에 의해 발표되었다. 특히, 유영찬 등<sup>(5)</sup>은 CFRP판에 프리스트레싱 수준을 CFRP판의 인장강도를 기준으로 0%, 20%, 40%, 60%, 70%로 변화시킨 RC 보에 대한 휨실험을 실시하여 프리스트레싱 보강공법의 경우 CFRP판에 도입된 프리스트레싱 수준에 의해 균열하중, 항복하중 및 공칭하중은 증가하며 최종파괴 시의 부재의 처짐은 감소한다고 보고하였다. 또한, 박종섭 등<sup>(6)</sup>은 부착과 비부착식 CFRP판 프리스트레싱 공법으로 휨보강된 휨실험체에 대한 휨실험을 실시하고 휨성능 개선효과 및 연성능력을 평가하였다. 그러나 이들의 연구는 휨성능에 영향을 미칠 수 있는 여러 변수들을 고려하지 않고 주로 프리스트레싱 수준에 초점을 맞춘 연구로서 프리스트레싱 공법으로 휨보강된 휨부재의 성능개선 효과를 보다 신뢰성 있게 평가하기에는 무리가 있다.

따라서, 본 연구에서는 CFRP판 및 예폭시 수지의 거동 특성과 CFRP판과 콘크리트 사이의 경계면 거동을 규명한 후, CFRP판으로 프리스트레싱 보강된 콘크리트 구조의 거동을 보다 신뢰성 있게 예측하고 보강설계에 보다 효과적으로 적용할 수 있는 비선형 구조 해석모델을 개발하고자 한다.

## 2. 프리스트레싱을 도입한 CFRP 보강 공법에 관한 연구개발 현황

본 연구에서와 같이 프리스트레싱이 도입된 CFRP 보강공법에 관해서는 과거 Quantrill와 Holloway 등에 의하여 연구가 수행된 바 있다.<sup>(3)</sup> Holloway 등은 CFRP에 미리 프리스트레싱을 도입한 후 시공편의를 위하여 콘크리트 보를 뒤집어 놓아 하면이 위로 향하게 하고 하면위에 예폭시를 도포한 후 콘크리트 보를 위로 들어올려 일정한 압력으로 긴장되어 있는

CFRP판과 콘크리트 보를 밀착시켜 부착시키는 방법을 적용하였다. 이러한 방법으로 프리스트레싱 CFRP가 시공된 콘크리트 보에 대하여 휨파괴 실험을 실시하여 약 60~85%의 극한하중 증진효과를 규명한 바 있다. 또한, Garden과 Hollaway등은 현장에서 프리스트레싱이 도입된 CFRP를 이용하여 프리스트레스트 콘크리트 보를 보강하는 공법에 대하여 연구한 바 있다.<sup>(4)</sup>

한편, 스위스의 S&P사에서는 CFRP에 프리스트레싱을 도입하는 장비와 정착장치 등을 개발하여 다양한 콘크리트 구조물에 적용한 사례가 있다. S&P사는 보강위치에 CFRP의 한쪽 단부를 정착하여 설치한 후 긴장장치를 긴장한 뒤 에폭시가 미리 도포된 보강면과 CFRP를 부착시킨 다음 긴장된 쪽을 정착하는 방법을 사용하고 있으며, 프리스트레싱이 도입된 CFRP로 보강할 경우 일반 CFRP 부착공법에 비하여 약 30%~50%의 CFRP 사용량을 감소시킬 수 있다고 보고하고 있다.

이상과 같이 대부분의 기존 연구는 프리스트레싱 수준에 따른 보강효과를 규명한 것이며, CFRP판 및 에폭시 수지의 거동 특성과 CFRP판과 콘크리트 사이의 경계면 거동을 반영하여 CFRP판으로 프리스트레싱 보강된 콘크리트 구조의 거동을 보다 신뢰성 있게 예측하고 보강설계에 적용할 수 있는 해석기법에 대한 연구는 거의 미미한 실정이다.

### 3. 탄소섬유 보강재의 거동특성

#### 3.1 에폭시의 거동특성

일반적으로 경화된 에폭시 수지의 경우, 파괴강도에 도달하기 전 선형탄성거동과 유사한 거동을 보이며 이후 취성적인 파괴가 유발된다. 따라서 기존의 연구에서는 대부분 에폭시의 거동을 선형탄성모델로 설명하고 있다. 한편, CEB-FIP에서 Täljsten(1994)는 에폭시 수지의 역학적 특성을 Fig. 1과 같이 제시하고 있으며, 재료특성값이 매우 넓은 범위로 분포되어 있다는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 수행된 에폭시의 일축 인장실험결과

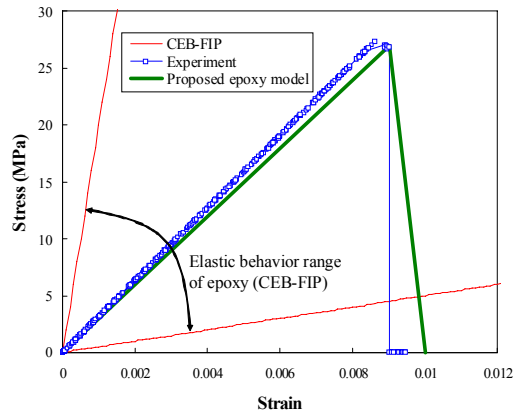


Fig. 1 에폭시 거동 모델

와 국내·외의 문헌분석 및 기존 연구결과를 바탕으로 에폭시 거동특성을 분석하고, Fig. 1과 같이 에폭시 거동 모델을 제안하였다. 제안된 모델은 인장거동특성을 반영한 구성방정식이며, 이를 함수식으로 나타내면 다음과 같다.

- ▶ 1 구간 :  $0 \leq \epsilon \leq \epsilon_{cr} (=0.009)$   
 $f = 3.0 \times 10^3 \epsilon$  (MPa) ,  $E = 3$  (GPa)
- ▶ 2 구간 :  $\epsilon_{cr} (=0.009) < \epsilon \leq \epsilon_u (=0.01)$   
 $f = -2.75 \times 10^4 \epsilon + 270$  (MPa)

#### 3.2 CFRP의 거동특성

CFRP의 거동에 관한 연구는 과거에서 현재까지 많은 연구가 진행되어 왔으며, 과거의 연구에서는 CFRP의 파괴기준을 일반적으로 일축 인장강도로 정의하고 파괴강도, 즉 인장강도에 도달하기전의 거동을 선형탄성으로 가정하는 이론이 주를 이루었다. 그러나 CFRP를 선형탄성재료로 가정하는 기존의 연구는 CFRP가 일축 인장강도에 도달하기 전까지의 단계별 거동을 고려하지 않고, 최대 인장강도만을 고려한 평균탄성계수를 적용함으로써 결과적으로 CFRP의 성능을 과소평가하는 경향이 있는 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 20개의 CFRP의 일축 인장실험결과를 바탕으로 인장거동을 4단계로 구분하여 거동특성

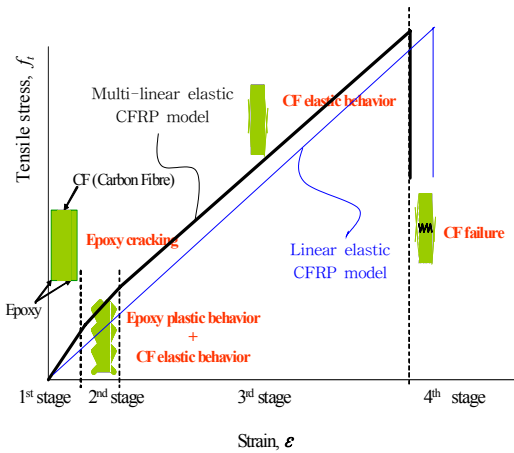


Fig. 2 다중선형 CFRP 거동 모델

을 분석하고, Fig. 2와 같이 CFRP 거동 모델을 제안하였다. 제안된 모델은 CFRP의 인장거동특성을 반영한 구성방정식이며, 이를 함수식으로 나타내면 다음과 같다.

- ▶ 1 구간 :  $0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_e (=0.000176)$   
 $f = 1.5331 \times 10^5 \varepsilon$  (MPa)  $E = 153.31$  (GPa)
- ▶ 2 구간 :  $\varepsilon_e (=0.000176) \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{cr} (=0.000276)$   
 $f = 1.5270 \times 10^5 \varepsilon + 0.1248$  (MPa)  $E \approx 152.70$  (GPa)
- ▶ 3 구간 :  $\varepsilon_{cr} (=0.000276) \leq \varepsilon \leq \varepsilon_u (=0.0183)$   
 $f = 1.5216 \times 10^5 \varepsilon + 1.2048$  (MPa)  $E \approx 152.16$  (GPa)

### 3.3 프리스트레싱이 도입된 CFRP의 거동특성

본 연구에서는 프리스트레싱이 도입된 CFRP판의 거동특성을 분석하였다. 프리스트레싱이 도입된 구조물에 분포되는 프리스트레싱력의 분포 범위를 발현길이(development length)라고 정의할 수 있으며, 이것은 다시 프리스트레싱력의 분포가 최대가 되어 부착저항능력을 충분히 발현하는 휨부착 길이(flexural bond length)와 프리스트레싱력의 분포가 불균일한 구간인 전달길이(transfer length)로 구분할 수 있다. CFRP에 프리스트레싱을 도입하게 되면 전달길이

구간이 발생하여 CFRP의 불균일한 응력이 분포하게 되어 보강 효율성이 저하될 우려가 있다. 따라서 CFRP의 프리스트레싱 도입 과정에서부터 CFRP의 위치별 응력-변형률 관계를 분석하여 전달길이의 발생 유무를 분석하였다. 이를 위하여 Fig. 3과 같이 폭 50mm, 길이 1800mm의 CFRP에 3000 $\mu\epsilon$ 의 변형률을 유발시키는 프리스트레싱을 도입하고, 콘크리트 시험체에 부착하여 경화시킨 후 CFRP 위치별 응력분포를 관찰하였다.

CFRP에 3000 $\mu\epsilon$ 의 변형이 발생할 때 까지 프리스트레싱을 적용한 후 CFRP에서 각 위치별로 종방향 변형률을 측정하였으며, 그 결과는 Fig. 4와 같다. 여기서 Case1과 Case2는 동일한 규격의 시험체로부터 측정된 결과를 도시한 것이다.

Fig. 4에서 보는 바와 같이 CFRP의 모든 위치에서 3000 $\mu\epsilon$ 과 유사한 변형률이 측정되었다. 프리스트레싱력을 도입한 후 콘크리트 시험체와 CFRP판을 예

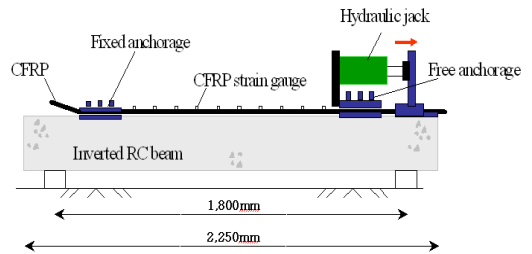


Fig. 3 프리스트레싱에 의한 CFRP의 변형률 측정실험 방법

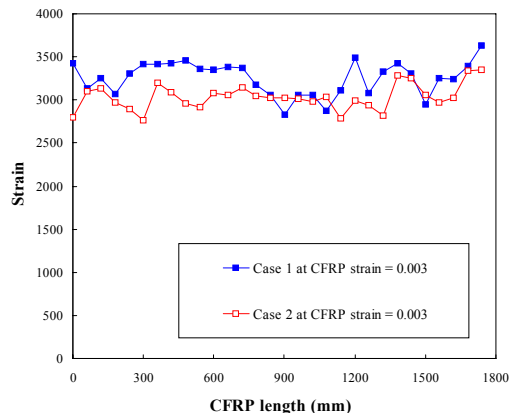


Fig. 4 CFRP의 위치별 변형률 측정결과

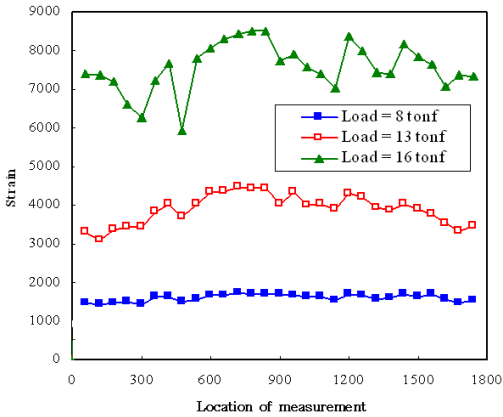


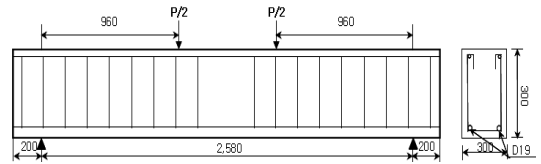
Fig. 5 하중별 CFRP의 위치별 변형률 측정결과

폭시를 이용하여 부착시킨 후, 가동단을 고정하여 정착한 다음 48시간 경화시켰으며, 이후 4점 휨실험을 실시하여 프리스트레싱된 CFRP판의 휨거동을 추가적으로 관찰하였다. 실험결과 CFRP가 파괴되어 구조내력을 완전히 상실하기 전까지 CFRP 초기에 도입된 프리스트레싱력은 동일한 하중인 경우 위치에 관계없이 일정하게 분포되어 가해지는 하중에 저항하는 것으로 분석되었으며, CFRP의 하중별 응력분포 측정결과는 Fig. 5와 같다. 여기서, 하중 16tonf의 변형률값에 변동이 발생한 이유는 하중 16tonf가 파괴직전의 하중으로써, 그에 따른 CFRP를 이루고 있는 fiber가 국부적으로 파단되고 있어서 해당 게이지 부착구간에서 변형률이 변동을 보이고 있기 때문인 것으로 판단된다.

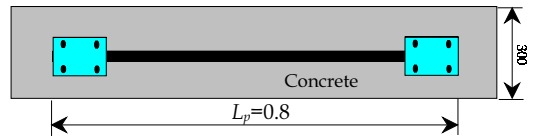
#### 4. 프리스트레싱이 도입된 CFRP판으로 보강한 철근콘크리트 부재의 휨실험

##### 4.1 실험체 제원

본 연구에서는 프리스트레싱이 도입된 CFRP판으로 보강된 철근콘크리트 보의 휨성능 개선효과를 분석하기 위해 Fig. 6과 같은 실험체를 제작하여 휨실험을 실시하였다. 실험체 단면은 폭과 높이가 300mm이고 길이가 2980mm이며, 보강된 실험체에서 휨파괴나 CFRP판의 박리파괴가 발생하기 전에 전단파괴가 발



(a) 실험체 측면도



(b) 실험체 하부 평면도

Fig. 6 실험체 상세(단위 : mm)

생되는 것을 방지하기 위해 전단철근을 150mm 간격으로 배근하였다.

또한 실험변수로는 CFRP판의 보강방법과 프리스트레싱 수준 등을 고려하였다. 보강방법은 무보강, 표면부착, 단부정착 그리고 프리스트레싱 등으로 나누었으며, 프리스트레싱 수준은 4%와 6%를 각각 선정하였다.

##### 4.2 사용재료

실험체는 레미콘을 이용하여 제작하였으며, 설계기준 압축강도는 40MPa로 설정하였다. 28일 경과 후 휨실험 당일  $\phi 100 \times 200$ mm 크기의 원주형 공시체에 대한 압축강도 시험을 실시하였으며, 실험결과 실제 콘크리트 압축강도는 48.9MPa로 나타났다.

본 연구에 사용된 인장철근은 KS D 3504 이형철근으로 SD40인 D19를 사용하였다. 또한, 압축철근과

Table 1 콘크리트의 재료 물성값

설계강도 (MPa)	실측강도 (MPa)	탄성계수 (MPa)	인장강도 (MPa)	포아송비
40.0	48.9	271,000	2.0	0.167

Table 2 철근의 재료 물성값

철근치수	탄성계수 (MPa)	인장강도 (MPa)	항복강도 (MPa)	신장율 (%)
D10mm*	$2 \times 10^5$	481.5	321.0	3.932
D19mm*		535.5	357.0	4.373

\* 한국도로교표준시방서

전단철근으로는 D10이 사용되었으며, Table 2에 사용 철근에 대한 재료 물성값을 나타내었다.

실험체 보강을 위해 사용한 CFRP판은 스위스 S사에서 개발된 제품으로서 두께는 1.4mm이며 철근과 비교하여 탄성계수는 거의 같으나 인장강도는 약 5배인 재료이며, CFRP판의 부착에 사용된 에폭시는 같은 회사에서 생산된 제품으로서 재료 물성값은 Table 3 및 4와 같다.

### 4.3 보강 방법

실험체에 CFRP판을 보강하기 전 인장부에 묻어있는 레이턴스를 제거하기 위해 그라인딩을 하고 고압세척을 실시하였다. 프리스트레싱을 가하지 않고 표면부착만 하는 실험체는 부착위치에 에폭시를 얇게 바른 다음 CFRP판을 콘크리트면에 압착하는 방법으로 보강을 실시하였다. 한편, 프리스트레싱 보강하는 실험체는 먼저 Photo 2에 나타난 정착장치를 설치하기 위한 앵커볼트 구멍을 햄머드릴을 이용하여 뚫고, 고압세척하여 앵커구멍에 남아있는 먼지를 제거하였다. 프리스트레싱을 도입하는 방법은 ① 실험체의 양쪽 단부에 Photo 2에 나타난 앵커 플레이트를 설치한 후 이를 이용하여 CFRP판의 한쪽을 고정한다. ② 에폭시를 슬래브의 하면에 얇게 바른 후 압착시킨다. ③ CFRP판의 다른 한쪽을 가동장치에 정착한 후 Photo 1에 나타난 것과 같이 유압장치를 이용하여 가동장치를 밀어내어 프리스트레싱을 가한다. ④ 가동장치 앞쪽의 정착판에 CFRP판을 고정한다. CFRP판을 고정하기 위해서 사용된 정착장치의 정착면은 Photo 2에

나타낸 것과 같이 곡률을 주어 마찰력을 증가시켜 슬립이 발생하는 것을 방지하였다.

### 4.4 하중재하 및 측정 방법

CFRP판으로 보강한 실험체의 휨실험을 위해 Photo 3과 같이 시험장비를 구성하였으며, 250 kN 용량의 Actuator를 이용하여 실험을 수행하였다. 하중은 보의 중앙에서 360mm 떨어진 두 점에서 변위제어방식에 의해 4점 재하하였다. 한편, 보의 중앙에는 변위계(linear variable displacement transducer, LVDT)를 설치하여 하중-처짐 관계를 계측하였으며, 인장철근과 CFRP판에는 변형률 게이지를 부착하여 변형률을 측정하였다. 또한, 데이터 로거(data logger)를 이

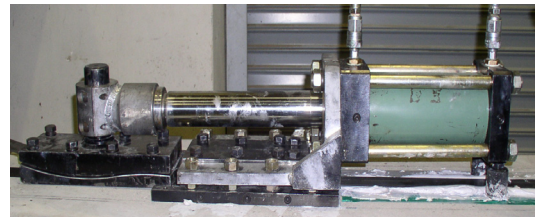


Photo 1 CFRP판의 프리스트레싱 장치



Photo 2 단부정착판 단면

Table 3 CFRP판의 재료 물성값

제 품 명	탄성계수 (MPa)	인장강도 (MPa)	극한변형률 ( $\mu\text{s}$ )
S & P Laminate (150/2000)	210,000	2,203	7,540

Table 4 에폭시의 재료 물성값

제 품 명	탄성계수 (MPa)	인장강도 (MPa)	극한변형률 ( $\mu\text{s}$ )
S & P Laminate (150/2000)	7,850	27.5	5,140

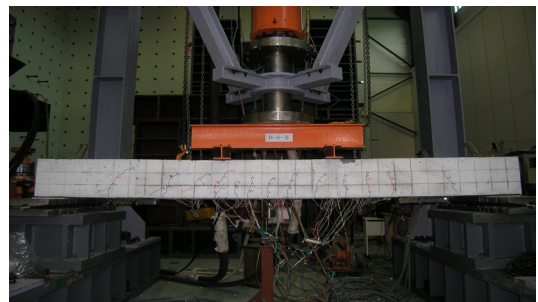


Photo 3 휨실험 전경

용하여 실험체의 최종 파괴 시까지 실험체 중앙부에서의 처짐과 철근, 콘크리트 그리고 CFRP판의 변형률을 하중단계별로 측정하였다. 아울러 실험체의 초기균열과 균열진행상황, CFRP판의 탈락 등을 육안으로 관찰하여 기록하였으며, 각 하중단계에서 발생하는 균열을 부재면에 기록하여 실험종료 후 균열도를 작성하고 사진촬영을 하였다.

## 5. 실험 결과

### 5.1 파괴모드

실험체의 파괴형태는 실험 시 콘크리트 균열의 발생과 진전, CFRP판의 탈락유무, 그리고 인장철근과

CFRP판에 부착한 변형률 게이지 및 변위계의 값을 참고로 하여 각 실험체의 파괴과정과 최종파괴 형태를 결정하였으며, 각 실험체별 실험결과를 Table 5 및 Fig. 7에 나타내었다.

기준실험체인 RU는 초기균열이 26.4kN에서 발생하였으며, 하중이 증가하면서 실험체 인장부에 휨균열이 일정한 간격으로 발생하기 시작했다. 최대하중 이후 새로운 휨균열은 발생하지 않고 실험체 중앙부 근처의 균열이 압축부로 성장하면서 균열 폭이 증가하여 처짐이 크게 증가하였다. 최종파괴 시점에서는 인장부에 발생한 균열이 성장하여 압축부까지 도달하였으며, 이로 인해 압축부 콘크리트가 압괴하는 전형적인 휨파괴 양상을 나타내었다.(Fig. 8)

CFRP판을 표면부착한 RS 실험체는 초기균열 발생하중이 31.6kN으로 기준실험체 보다 약간 큰 값을 나타내었다. 그러나 그 이후 발생하는 휨균열은 RU와는 다르게 일정한 간격과 속도로 압축부로 진전하는 거동을 나타내었다. 최대하중에서도 RU와 같이 새로운 휨균열은 발생하지 않았으며, 기 발생한 균열의 폭도 크게 증가하지는 않았다. 그러나 최대하중에서 급작스럽게 CFRP판의 단부에서 큰 소음이 발생하면서 CFRP판이 탈락하는 취성적인 파괴모드를 나타내었다(Fig. 9).

단부정착 보강한 R0A 실험체는 하중이 증가하다가 콘크리트면과 CFRP판을 부착시키고 있는 에폭시가

Table 5 휨실험 결과

실험체	초기 균열하중 (kN)	극한하중 시			파괴모드
		하중 (kN)	처짐 (mm)	증가율 (%)	
RU	26.4	146.7	72.9	-	휨파괴
RS	31.6	167.7	21.18	14.3	계면박리
R0A	36.0	211.0	47.6	43.8	인장파괴
R4A	56.6	218.5	33.7	48.9	인장파괴
R6A	62.6	223.8	32.4	52.6	인장파괴

R U

① ②

① : 철근콘크리트 시편,  $f_{ck} = 40\text{MPa}$

② : 보강방법 (U=무보강, S=표면부착, 0A=단부정착, 4A=프리스트레싱 0.4%, 6A=프리스트레싱 0.6%)

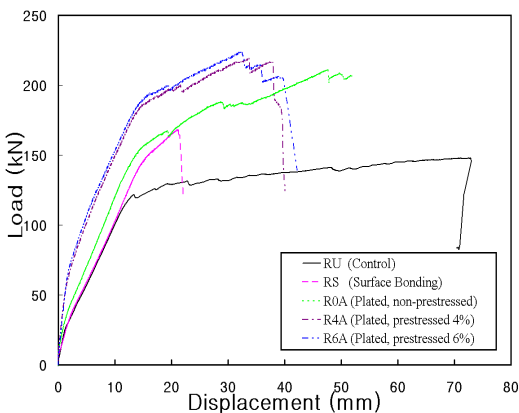


Fig. 7 보강방법에 따른 하중-처짐 관계

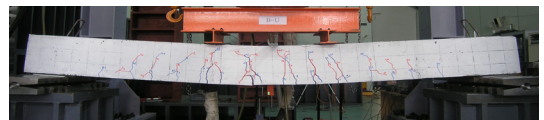


Fig. 8 콘크리트 휨파괴

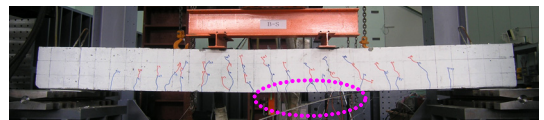


Fig. 9 계면박리 파괴

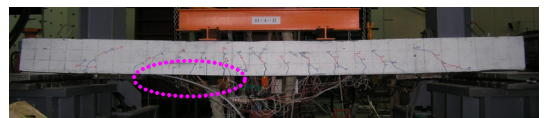


Fig. 10 CFRP판의 인장파괴

떨어지면서 약 4kN 정도의 하중이 감소하였다가 다시 증가하였다. 또한 단부정착으로 인해 CFRP판이 탈락하지 않고 계속적으로 하중을 받으면서 처짐이 증가하다가 지점부 부근의 CFRP판이 파단되면서 실험이 종료되었다.

프리스트레싱 보강한 실험체는 모두 RU 및 RS 실험체와 비교해서 초기균열 발생하중이 크게 증가하였으며, 균열이 지점부까지 균일한 간격으로 발생하였다. 철근의 변형률이 항복변형률 이상으로 증가하면서 CFRP판과 콘크리트의 부착면에서 약간의 파괴음이 발생하기 시작하였으며, 재하하중이 최대하중에 도달하면서 실험체의 중앙부에서 CFRP판과 콘크리트를 일체화시키고 있던 에폭시가 콘크리트로부터 떨어지면서 엄청난 폭음이 발생하였다. 재하하중은 부착면의 급작스런 탈락과 동시에 5~10kN 정도 급격하게 감소하였으며, 실험이 지속적으로 진행되면서 중앙부 CFRP판의 탄소섬유들이 한 가닥씩 파단되어 떨어져 나가면서 점차적으로 내력을 상실하다가 순간적으로 CFRP판이 인장파단되는 파괴모드를 나타내었다(Fig. 10).

한편 실험종료 후 모든 실험체의 단부 정착판을 분해하여 CFRP판 슬립여부를 조사하였으나 단부 정착판에 정착된 CFRP판 표면에 슬립의 흔적은 보이지 않았다.

## 5.2 결과분석

보강방법에 따른 각 실험체의 휨실험 결과는 Table 5와 같다. 실험결과 기준실험체와 비교하여 CFRP판을 표면부착한 경우 하중저항능력이 14.3% 증가하였으나, 단부정착 및 프리스트레싱 보강된 실험체는 43.8~52.6% 증가하여 보강효과가 표면부착한 경우에 비해 크게 개선됨을 확인할 수 있었다.

또한, 프리스트레싱 보강된 실험체의 경우 기준실험체에 비해 초기균열 발생시점의 하중이 크게 증가하여 초기균열 억제효과가 매우 큰 것을 확인할 수 있었다. 그러나 프리스트레싱 보강된 실험체는 CFRP판의 파단에 의해 취성적으로 파괴되므로 기준실험체에 비해 상대적으로 처짐은 작게 나타났다.

## 6. 프리스트레싱이 도입된 CFRP로 보강된 휨부재의 비선형 해석

본 연구에서는 재료물성 실험에 근거하여 개발된 해석기법과 네덜란드 Delft 공대와 TNO Building and Construction Research에서 개발한 Diana Ver. 7.2를 이용하여 비선형 유한요소 해석을 수행하였으며, 실험결과와의 비교분석을 통해 개발된 해석모델의 신뢰성을 검증하였다.

비선형 유한요소 해석의 재료모델링에는 본 연구에서 제안한 에폭시 거동 모델과 CFRP의 다중선형 거동 모델을 Diana의 user-subroutine에 적용하였으며, 콘크리트와 철근 등은 CFRP 보강 휨부재 파괴실험에 사용한 재료 물성값을 고려하여 최적의 재료 물성값을 입력하였다.

### 6.1 재료 모델링

#### 6.1.1 콘크리트

- 콘크리트 압축강도 :  $f_{cu} = 48.9 \text{ MPa}$
- 콘크리트 탄성계수 :  $E_c = 27.1 \text{ GPa}$
- 콘크리트 인장강도 :  $f_{tu} = 2.0 \text{ MPa}$
- 콘크리트 포아송비 : 0.167
- 콘크리트 인장변형률 : 0.0000714
- 콘크리트 파괴기준 : Drucker-Prager
- 콘크리트 균열모델 : Smeared crack model

#### 6.1.2 철근

- 철근 탄성계수 :  $E_s = 200 \text{ GPa}$
- 철근 항복강도 :  $f_y = 357 \text{ MPa}$
- 철근 극한강도 :  $f_u = 535 \text{ MPa}$
- 철근 포아송비 : 0.3
- 철근 인장변형률 : 0.04
- 철근 파괴기준 : von Mises

#### 6.1.3 CFRP

- CFRP 두께 :  $t_p = 1.4 \text{ mm}$
- 섬유함유율 : 0.75



- 극한 인장변형률 :  $\epsilon_p = 7540 \mu s$
- CFRP 탄성계수 :  $E_p = 210 GPa$
- CFRP 인장강도 :  $f_p = 2203 MPa$
- CFRP 포아송비 : 0.31
- CFRP 파괴기준 : von Mises 모델에 근거한 triple-linear model

#### 6.1.4 에폭시

- 에폭시 탄성계수 :  $E_a = 7.85 GPa$
- 에폭시 극한 인장변형률 :  $\epsilon_p = 5140 \mu s$
- 에폭시 인장강도 :  $f_a = 27.50 MPa$
- 에폭시 포아송비 : 0.25
- 에폭시 파괴기준 : Linear fracture
- 에폭시 균열모델 : Smearred crack model

### 6.2 유한요소 모델링

프리스트레싱 CFRP 보강 실험체에서 콘크리트는 Drucker-Prager 파괴기준을 갖는 3차원 8절점 Solid element(HX24L)을 사용하였으며, 철근은 Bar element (BAR)를 사용하여 모델링 하였다. 또한 CFRP와 정착장치는 콘크리트와 동일한 Solid element로 모델링 하였다. 한편, 에폭시는 일반적으로 콘크리트와 CFRP의 경계면 역할을 수행하게 되므로 3차원 interface element(Q24IF)와 같은 경계면 요소를 사용하여 모

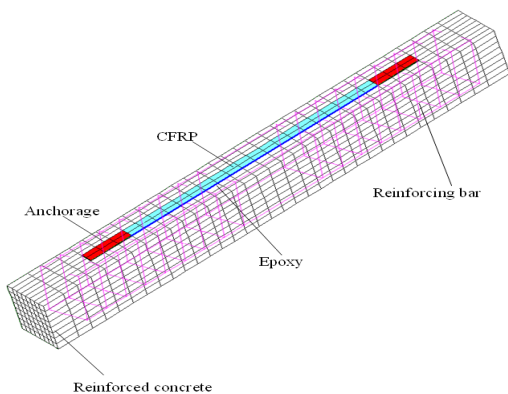


Fig. 11 프리스트레싱 CFRP 보강 실험체의 유한요소 모델링 형상

델링이 가능하다. 그러나, 해석 대상 구조에 사용된 에폭시는 CFRP보다 두꺼운 2mm의 소요 두께를 가질 뿐만 아니라, 콘크리트와 대등한 수준의 강도를 소요하고 있으므로, 본 해석에서는 Solid element를 이용하여 에폭시를 모델링 하였다.

콘크리트, 철근, CFRP, 정착장치 및 에폭시를 모두 고려한 프리스트레싱 CFRP 보강 실험체의 유한요소 모델링 형상은 Fig. 11에 나타내었다.

### 6.3 해석결과

프리스트레싱 CFRP 보강 실험체의 휨 파괴 거동 해석을 수행하였으며, 실험체 중앙부의 하중-변위 관계는 Fig. 12에 나타내었다. 또한 하중단계별 시험체의 응력분포, 처짐 형상 및 균열 분포 등은 Fig. 13에 나타내었다. Fig. 12에서 보는 바와 같이 개발된 해석 모델은 프리스트레싱 CFRP 보강 실험체의 파괴 거동을 비교적 정확히 예측하고 있음을 알 수 있다. 개발된 모델을 적용하여 각 실험체에 대한 유한요소 해석을 수행하였으며, 그 결과를 실험결과와 비교하여 나타내면 Table 6과 같다.

Table 6에서와 같이 실험결과와 해석결과의 오차를 통해 신뢰도를 산출한 결과 약 90%의 신뢰도를 확보한 것으로 평가되었다. 그러나 RS 실험체는 균열하중과 항복하중의 경우 실험결과와 해석결과의 신뢰도가 약 94%인 반면, 극한하중은 78%의 신뢰도를 나타내었다.

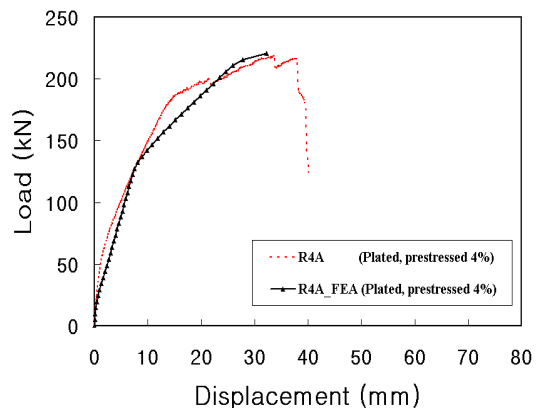
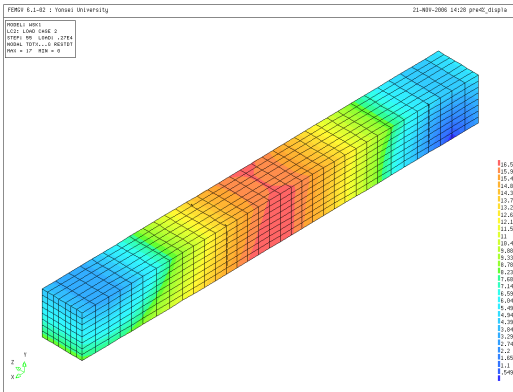
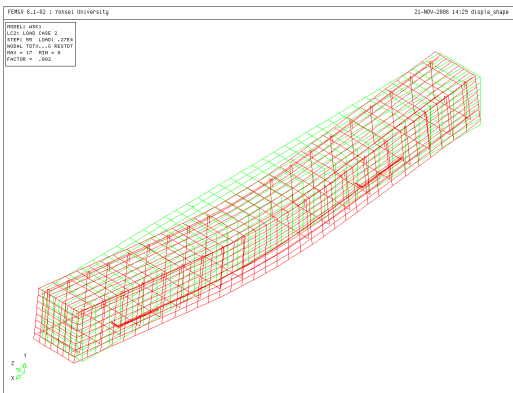


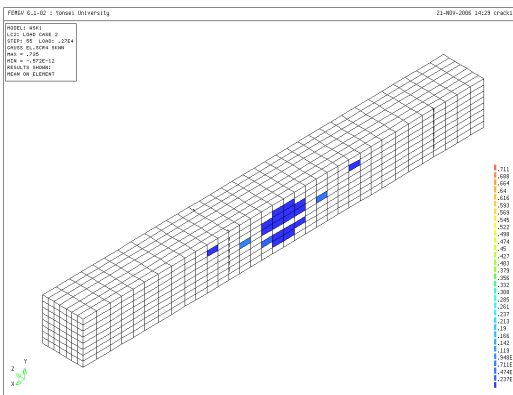
Fig. 12 프리스트레싱 CFRP 보강 실험체의 하중-변위 해석 결과 비교



(a) 실험체의 응력분포도



(b) 실험체의 처짐형상



(c) 실험체의 균열발생 형상

Fig. 13 프리스트레싱 CFRP 보강 실험체의 휨파괴 해석 결과

Table 6 프리스트레싱 CFRP 보강 실험체의 유한요소 해석과 실험결과 비교분석

실험체	균열하중(kN)		항복하중(kN)		극한하중(kN)	
	실험	해석	실험	해석	실험	해석
RU	26.4	24.5	121.3	107.8	146.7	142.2
RS	31.6	29.4	140.0	132.3	167.9	215.6
R0A	36.0	34.3	143.4	137.3	211.0	215.7
R4A	56.6	44.1	181.6	137.3	218.5	220.6
R6A	62.6	44.1	188.5	137.3	223.8	225.5
신뢰도(%)	85.9		85.5		98.3	

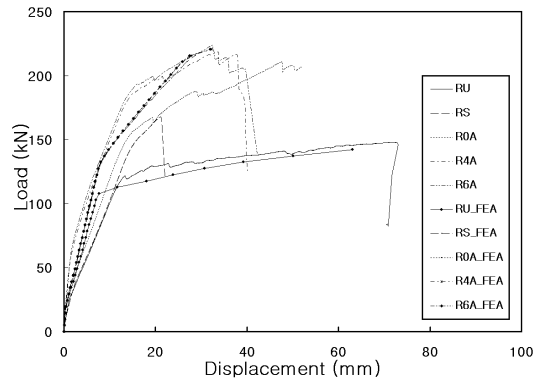


Fig. 14 실험체의 휨파괴 실험 및 해석결과

## 7. 결론

이상의 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 기준실험체에 비해 CFRP판을 표면부착한 경우 파괴하중은 14.3% 증가하였으며, 프리스트레싱 보강한 경우는 48.9 ~ 52.6%까지 증가하여 보강에 따른 휨성능 증대효과를 나타내었다.
- 2) CFRP판의 프리스트레싱 보강을 통해 콘크리트의 초기균열 발생시점을 상당히 지연시킬 수 있다는 것을 확인할 수 있었고, 프리스트레싱 보강한 경우 프리스트레싱 수준이 증가함에 따라 파괴하중이 증가하였다.
- 3) 실험체 보강을 위해 사용된 에폭시와 CFRP에 대하여 일축인장강도 실험을 수행하였다. 또한 문헌 분석 및 실험결과를 바탕으로 에폭시는 연화거동이 추가된 거동 모델을, CFRP는 기존의 단일선형거동 모델을 개선한 다중선형거동 모델을 제안함으로써 거동 예측의 정확성을 향상시켰다.

- 4) 제안된 재료 모델을 적용하여 프리스트레싱이 도입된 CFRP로 보강된 콘크리트 구조물의 구조거동을 예측할 수 있는 구조해석 모델을 개발하였다.
- 5) 개발된 해석 모델을 적용하여 무보강, 표면부착 및 프리스트레싱 보강 실험체의 휨파괴 거동을 해석하였으며, 실험결과와 해석결과를 비교분석하여 개발된 해석기법의 신뢰성을 검증하였다. 검증결과 본 해석기법은 CFRP를 사용한 보강설계에 효과적으로 적용이 가능하다고 판단된다. 그러나 표면부착의 경우 신뢰도가 다른 보강방법에 비해 다소 떨어지는 것으로 나타나 이에 대한 추가 보완 연구가 필요할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 과기부 원자력중장기연구개발사업의 지원 하에 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

#### 참고문헌

1. 김기승, "탄소섬유로 보강된 콘크리트 휨부재의 거동 해석", 연세대학교 석사학위 논문, 1997.
2. 이용택, 이리형, "탄소섬유워트트로 보강된 철근 콘크리트 보의 전단강도에 관한 연구", 대한건축학회논문집 구조계, 16권 1호(통권 135), pp. 11-16.
3. 심중성, 김규선, "보강판으로 성능개선된 RC보의 조기파괴거동", 대한토목학회 정기학술발표대회논문집, 제9권, 1999, pp. 561-570.
4. 허우영, "경계면 파괴를 고려한 보수·보강 구조물의 해석기법 개발", 연세대학교 석사학위 논문, 2000.
5. 유영찬, 최기선, 박영환, 박종섭, 김궁환, "외부 부착형 프리스트레스 탄소섬유판으로 보강된 RC보의 휨거동", 한국콘크리트학회 봄학술발표대회논문집, 제17권, 1호, 2005. 4, pp. 255-258.
6. 박종섭, 박영환, 유영준, 정우택, 강재윤, "부착 또는 비부착된 탄소판으로 긴장 보강한 RC보의 보강성능", 한국콘크리트학회 봄학술발표대회논문집, 제17권, 1

- 호, 2005. 4, pp. 279-282.
7. 김형수, 홍기남, 이상균, 송영철, 한상훈, "프리스트레스를 가한 CFRP판으로 보강한 철근콘크리트 보의 휨성능 개선", 한국콘크리트학회 봄학술발표대회논문집, 제17권, 1호, 2005, pp. 471-474.
8. Quantrill, R. J., Hollaway, L. C. and Thorne, A. M. Predictions of the Maximum Plate End Stresses of FRP Strengthened Beams : Part II, Magazine of Concrete Research, Vol. 48, No. 177, 1996, pp. 343-351.
9. Arduini, M. and Nanni, A. Parametric Study of Beams with Externally Bonded FRP Reinforcement. ACI Structural Journal, Vol. 94, No. 5, 1997, pp. 493-501.
10. Quantrill, R. J., and Hollaway, L. C. The Flexural Rehabilitation of Reinforced Concrete Beams by the Use of Prestressed Advanced Composite Plates. Composites Science and Technology, Vol. 58, 1998, pp. 1259-1275.
11. Garden, H. N. and Hollaway, L. C. An Experimental Study on the Influence of Plate End Anchorage of Carbon Fibre Composite Plates Used to Strengthened Reinforced Concrete Beams. Composites Structures, Vol. 42, No. 2, 1998, pp. 175-188.
12. Akhrawat Lenwari, Thaksin Thepchatri and Pedro Albrecht, "Flexural Response of Steel Beams Strengthened with Partial-Length CFRP Plates", ASCE Journal of Composites for Construction, Vol. 9, No. 4, August, 2004, pp. 296-303.
13. Amir M. Malek, Hamid Saadatmanesh, and Mohammad R. Ehsani, "Prediction of Failure Load of R/C Beams Strengthened with FRP Plate Due to Stress Concentration at the Plate End", ACI Structural Journal, V. 95, No. 1, January-February 1998, pp. 142-152.

(접수일자 : 2007년 2월 7일)  
(심사완료일자 : 2008년 5월 20일)