

# 탄소섬유쉬트로 보강된 RC 보의 유한요소해석

## FE Analysis of RC Beams Strengthened with Carbon Fiber Sheet

한 상 호†

이 경 동\*

Han, Sang-Ho

Lee, Kyong Dong

(논문접수일 : 2002년 5월 20일 ; 심사종료일 : 2003년 3월 17일)

### 요 지

탄소섬유쉬트는 경량, 고강도, 우수한 내식성, 그리고 간편한 시공성 때문에 많은 종류의 철근콘크리트 부재의 보강에 사용되고 있다. 그러나 탄소섬유쉬트에 의해 보강된 철근콘크리트 부재의 파괴기동은 탄소섬유쉬트와 콘크리트 표면의 부착특성에 따라 크게 달라진다.

본 연구에서는 탄소섬유쉬트와 콘크리트 사이의 경계면에 링크요소를 이용함으로써 탄소섬유쉬트와 콘크리트 사이의 부착기동의 변화를 고려한 부착응력 미끄럼 모델을 제안하였다. 또한 이 방법의 유효성을 알아보기 위하여 탄소섬유쉬트로 보강된 철근콘크리트 보의 파괴거동에 대한 해석을 실시하여 실험결과와 비교하였다. 그 결과 본 연구에서 제안된 모델을 이용한 해석결과는 실험결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있었다.

**핵심용어** : 유한요소해석, 탄소섬유쉬트, 철근콘크리트 보, 부착응력 미끄럼

### Abstract

Carbon fiber sheet has been used to rehabilitate many types of reinforced concrete members with its superior characteristics such as their lightweight, high strength, corrosion resistance, and easy execution. But the failure behavior of reinforced concrete members show a high variation by the bond characteristics between carbon fiber sheet and concrete surface.

In this study, a bond stress slip model, which accounts for changes in bonding behavior between concrete and carbon fiber sheet with some link elements, is proposed. The link elements are used to represent the concrete carbon fiber sheet interface. To investigate the efficiency of this method, the analytical solutions for the behavior of reinforced concrete beam strengthened with carbon fiber sheet are compared with experimental ones. Results from the proposed model comparatively well agree with the experimental results.

**Keywords** : FE analysis, carbon fiber sheet, reinforced concrete beam, bond stress slip

### 1. 서 론

최근 국내외적으로 철근콘크리트 구조물의 내력을 증가시키기 위하여 탄소섬유 쉬트(Carbon Fiber Sheet : CFS), 탄소섬유 보강판(Carbon Fiber Reinforced Plastics : CFRP), 유리섬유 보강판(Glass Fiber Reinforced Plastics : GFRP) 등의 신소재를 이용한 보강공법에 대한 연구가 폭 넓게 진행되고 있다. 그 중 탄소섬유쉬트는 경량, 고강

도, 우수한 내식성, 그리고 간편한 시공성 때문에 이를 콘크리트 표면에 부착시키는 보강공법이 주목되고 있다. 그러나 이 공법에 의해 보강된 철근콘크리트 부재의 파괴기동은 탄소섬유쉬트와 콘크리트 표면의 부착특성에 따라 크게 달라지기 때문에,<sup>1),2)</sup> 보강설계를 위한 정확한 내력 산정은 어려운 실정이다. 따라서 실험적 연구와 함께 탄소섬유쉬트와 콘크리트 사이의 부착특성을 고려한 실용적인 해석법에 관한 연구도 중요시되고 있다.

† 책임저자, 정회원 · 순천대학교 토목환경공학부 조교수

전화: 061-750-3517; Fax: 061-750-3508

E-mail: hsh001@sunchon.ac.kr

\* 순천대학교 토목환경공학부 부교수

• 이 논문에 대한 토문을 2003년 6월 30일까지 본 학회에 보내 주시면 2003년 9월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

Arduini 등<sup>3)</sup>은 탄소섬유쉬트의 층수와 단부의 정착유무를 변수로 하여 탄소섬유쉬트와 콘크리트표면의 완전부착을 가정한 해석적 연구를 실시하였다. 또한 동경대의 이한승 등<sup>4)</sup>은 4절점 등매개변수(iso-parametric) 판부착요소를 이용하여 최대 부착응력과 전단강성을 변화시키면서 콘크리트 표면과 탄소섬유쉬트와의 부착-미끄럼작용을 고려하여 해석을 실시하였다. 국내에서도 심종성 등<sup>5)</sup>은 보강재 단부의 전단응력에 의한 콘크리트의 박리하중을 Roberts의 해석적 방법을 수정하여 계산하였으며, 균열사이의 국부적인 부착-미끄럼은 무시하였다.

본 연구에서는 탄소섬유쉬트와 콘크리트사이의 국부적인 부착-미끄럼 특성을 고려한 링크요소를 설치함으로써 탄소섬유쉬트와 콘크리트사이의 부착작용을 고려한 모델을 제안하였다. 제안된 모델의 타당성을 검증하기 위하여 탄소섬유쉬트로 보강된 RC보에 대한 2차원 유한요소해석을 실시하여 하중-처짐곡선과 탄소섬유쉬트의 변형률에 대한 기존의 실험결과<sup>3)</sup>와 비교, 검토하였다. 또한 탄소섬유쉬트와 콘크리트사이를 완전부착이라 가정한 해석결과도 함께 비교하여 본 모델의 유용성을 검증하였다.

2. 재료의 모델링

2.1 철근의 모델링

철근은 1차원 트리스요소로 모델화하여 그림 1과 같이 이차선형(bilinear)의 변형률경화를 고려한 탄소성재료로 취급하였다. 또한 압축시 철근의 좌굴은 일어나지 않는 것으로 가정하였다.

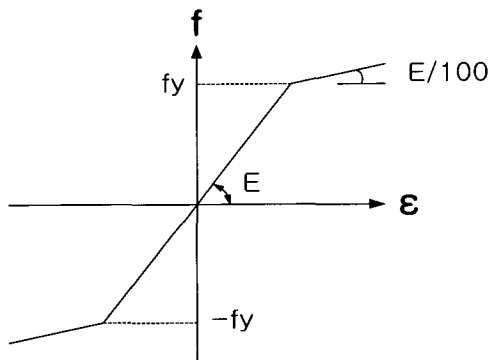


그림 1 Stress-strain relations for reinforcing bar

2.2 콘크리트

압축응력상태의 콘크리트는 그림 2와 같이 초기항복까지는 선형탄성재료로 가정하였으며, 그 후 Kupfer 등<sup>6)</sup>의

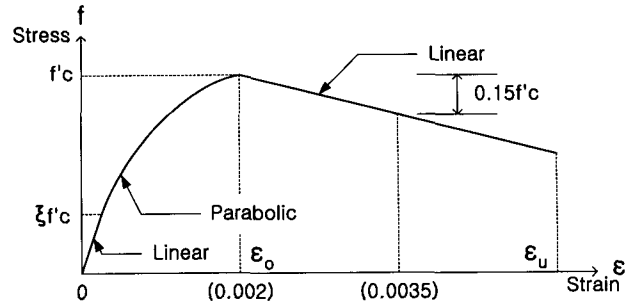


그림 2 Elastic and plastic idealization for concrete in uniaxial compression

실험결과에 근거한 한계곡면까지는 등방적으로 경화하도록 가정하였다. 또한 한계곡면에 도달한 요소는 등방적으로 연화하여 변형률로 정의된 파괴곡면을 넘으면 그 요소의 응력을 해방하도록 하였다.

인장응력상태의 콘크리트는 인장한계곡면에 도달하면 최대주응력에 직교하는 균열이 발생하는 것으로 가정하였다. 균열발생 이후의 변형을 연화단계에서 균열과 이에 직교하는 국부좌표계에 관한 콘크리트의 응력-변형률관계는 다음 식과 같이 고려하였다.

$$\begin{pmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\beta G} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} f_{11} \\ f_{22} \\ \tau_{12} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \epsilon^f \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E(1-\omega)} & -\frac{\nu}{E} & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\beta G} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} f_{11} \\ f_{22} \\ \tau_{12} \end{pmatrix} \quad (1)$$

여기서, E는 탄성계수, G는 전단탄성계수, ν는 포아손비, ε<sup>f</sup>는 파괴변형률(fracture strain), β는 균열에 의한 전단강도저감계수이다. 또한 f<sub>11</sub>, f<sub>22</sub>, τ<sub>12</sub>, ε<sub>11</sub>, ε<sub>22</sub>, f<sub>12</sub>는 균열면에 수직한 방향을 1로 하였을 때의 응력 및 변형률을 나타내며, ω는 콘크리트의 인장변형률 연화특성을 나타내기 위하여 도입한 손상도 파라미터로써 ω=0(무손상)부터 ω=1(완전손상)까지 임의의 값을 취하도록 하였다. 식(1)에서 파괴변형률 ε<sup>f</sup>와 손상도 ω와는 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$\epsilon^f = \frac{\omega}{1-\omega} \frac{f_{11}}{E} \quad (2)$$

손상도 ω는 균열면에 수직한 응력 f<sub>11</sub>에 대응하여 그림 3과 같이 조정된다. 즉,

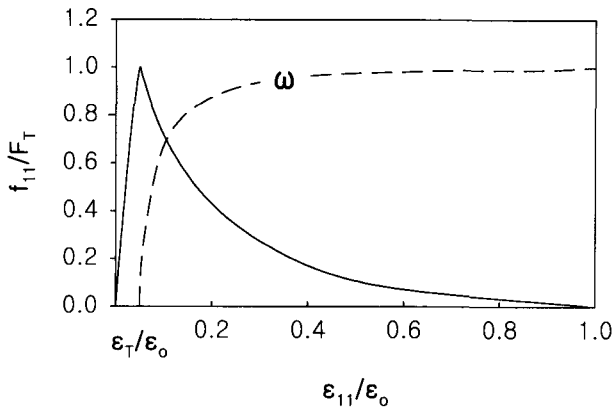


그림 3 Exponential strain softening model

$$\left. \begin{aligned} \omega &= 0 & (\epsilon_{11} < \epsilon_T) \\ \omega &= 1 - \frac{F_T}{E\epsilon_{11}} \exp\left[-\frac{a}{\epsilon_0}(\epsilon_{11} - \epsilon_T)\right] & (\epsilon_{11} \geq \epsilon_T) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

여기에  $F_T$ 와  $\epsilon_T$ 는 인장연화 시점에서의 응력과 변형률,  $\epsilon_0$ 는 연화곡선에 있어서 응력을 0으로 볼 수 있는 변형률, 또한  $a$ 는 지수곡선 변형률연화의 정도를 조정하는 파라미터로  $a = -5$ 를 취함으로써 직접인장시험에서 관찰된 변형률연화를 근사할 수 있었다.

### 2.3 탄소섬유쉬트

탄소섬유쉬트는 인장강도까지 선형탄성적으로 거동하기 때문에 응력-변형률 관계는 그림 4와 같이 가정하였으며, 파단된 탄소섬유쉬트는 인장응력을 전달하지 못하기 때문에 재료강성을 무시할 정도로 작게 하였다. 즉 인장응력이  $f_t$ 에 도달하면 응력을 0으로, 탄성계수  $E$ 를 0에 가까운 값으로 변경하였다.

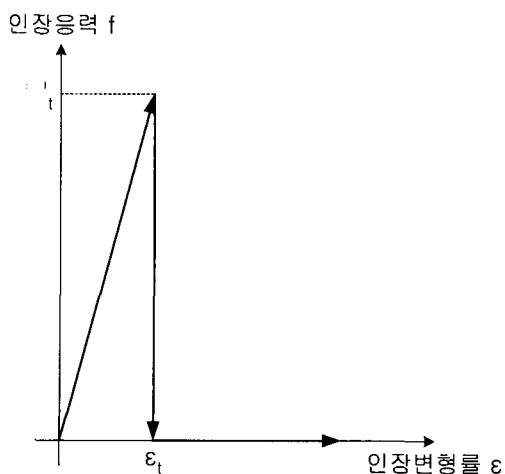


그림 4 Idealized tensile stress-strain relations for CFS

### 3. 콘크리트와 탄소섬유쉬트와의 부착-미끄럼 모델링

탄소섬유쉬트로 보강된 RC부재의 항복내력은 쉬트의 길이 및 층수에 비례하여 증가하고 종국내력도 크게 증가되지만, 종국내력에 도달하기 이전에 탄소섬유쉬트의 부착과 파괴 발생되기 때문에 탄소섬유쉬트와 콘크리트를 완전부착이라 가정 한 종국내력의 계산값은 일반적으로 시험결과에 의한 측정값보다 크다.

이와 같이 탄소섬유쉬트로 보강된 RC부재에 있어서 탄소섬유쉬트와 콘크리트 사이의 부착특성은 그 부재의 내력과 파괴양상에 큰 영향을 미친다. 본 연구에서는 탄소섬유쉬트요소와 콘크리트요소사이에 그림 5와 같은 링크요소를 설치함으로써 탄소섬유쉬트와 콘크리트의 부착작용을 고려해 보았다.

탄소섬유쉬트면의 수직방향으로는 상대변위가 발생하지 않도록 링크강성  $K_n$ 에 큰 값을 주었으며, 탄소섬유쉬트 면 방향의 링크강성  $K_b$ 는 기존의 실험적 연구결과<sup>7)</sup>를 참고하여 그림 6과 같이 조정되도록 가정하였다.

그림 6의  $\tau_{bmax}$ 는 탄소섬유쉬트와 콘크리트의 국부적인 부착강도를 나타낸 것이며, 본 연구에서는 기존의 연구결과<sup>8)</sup>로부터 1.5 MPa의 값을 취하도록 하였다.  $K_b$ 는 탄소

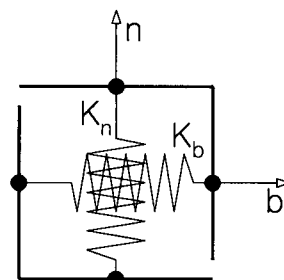


그림 5 Bond link element

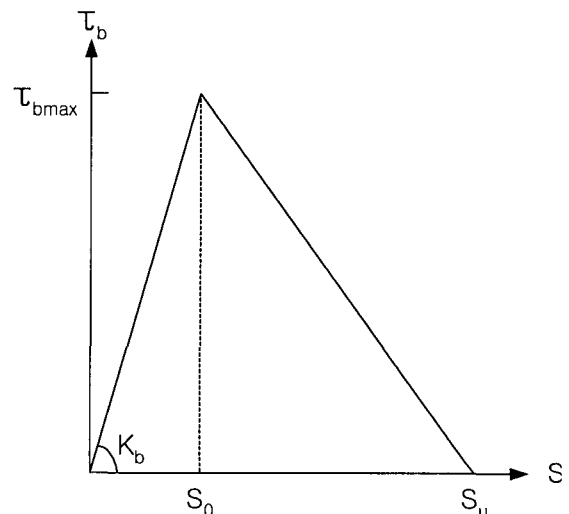


그림 6 Bond stress-slip relations for CFS

섬유쉬트와 콘크리트사이의 부착파괴까지의 탄성강도로써 탄소섬유쉬트와 콘크리트사이의 접착층의 탄성강도  $E_b$ 에 의해 결정되도록 다음 식으로부터 구하였다.

$$K_b = \frac{E_b}{2(1 + \nu_b) t_b} \quad (4)$$

여기서,  $E_b$ ,  $\nu_b$ 는 접착층의 탄성강도 및 포아손비를 나타내며,  $t_b$ 는 접착층의 두께를 나타낸다. 또한 최종 미끄럼 변위  $S_u$ 는  $\tau_{bmax}$ 에 대응하는 변위  $S_0$ 의 10배 값을 이용하였다.

#### 4. 해석대상물 및 해석개요

##### 4.1 해석대상물

해석대상물은 Arduini 등<sup>3)</sup>이 실험했던 탄소섬유쉬트로 보강된 RC 보로써 시험체의 단면치수 및 배근상세는 그림 7과 같다. 시험체 B1은 무보강, 시험체 B2 및 B3는 각각 시험체 B1의 저면에 탄소섬유쉬트로 1층 및 3층으로 보강한 모두 3개의 시험체를 이용하였다.

보의 치수는 300×400×2500mm이고 상부 및 하부에 각각 2-D13, 3-D13의 이형철근을 배근하였다. 또한 사용된 철근량은 평형철근비의 33%이며, 시험체가 보강될 경우 휨내력의 증가로 인하여 전단파괴되는 것을 방지하기 위하여 직경 8mm인 D8 스테럽을 100mm간격으로 충분히 배근하였다.

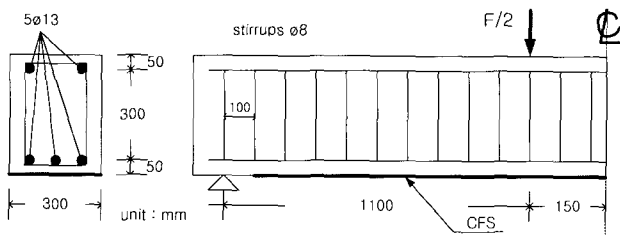


그림 7 Beams strengthened with CFS

##### 4.2 해석개요

탄소섬유쉬트로 보강된 RC 보의 2차원 유한요소 분할도를 그림 8에 나타내었다. 해석에서는 시험체의 형상과 하중의 대칭성을 고려하여 좌측 절반만을 이용하였다. 콘크리트에는 정변형을 삼각형요소, 철근 및 탄소섬유쉬트는 1차원 트러스요소를 이용하였으며, 콘크리트와 철근의 경계면에는 균열부근에서의 부착열화가 고려된 부착링크요소<sup>9)</sup>를 설치하였다. 또한 탄소섬유쉬트와 콘크리트사이에는 그림 6의

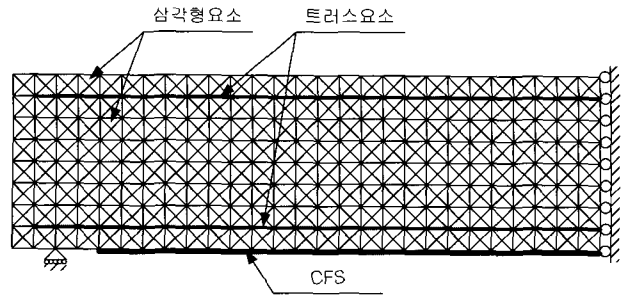


그림 8 Modeling of finite element

표 1 Mechanical properties of materials used for experimental and analytical program

	탄성계수 E(GPa)	포아손비 $\nu$	항복강도 $f_y$ (MPa)	압축강도 $f'_c$ (MPa)	인장강도 $f_t$ (MPa)
콘크리트	26	0.2	-	30	1.9
철근	200	0.3	340	-	530
탄소섬유	400	0.26	-	-	3,000
접착제	11	0.25	-	-	26

부착응력-미끄럼관계를 고려한 링크요소를 설치하여 각각의 부착특성을 재현하였다.

표 1은 실험 및 해석에 사용된 콘크리트, 철근, 탄소섬유쉬트, 그리고 콘크리트와 탄소섬유쉬트 사이의 접착층의 재료특성을 나타낸 것이다.

#### 5. 해석결과 및 고찰

탄소섬유쉬트와 콘크리트 사이의 부착특성을 고려한 해석과 완전부착을 가정한 해석을 실시한 후, 두 가지 해석결과와 기존의 실험결과를 이용하여 각 시험체별 하중-처짐 관계, 하중-탄소섬유쉬트의 변형률관계에 대하여 비교, 검토하였다.

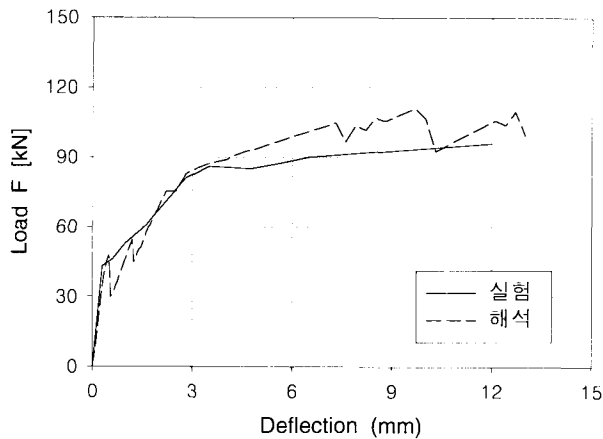
##### 5.1 하중-변위관계

그림 9는 3개의 시험체에 대하여 실험 및 두 가지 해석결과로부터 얻어진 보의 중앙부 하단에서의 하중-처짐 곡선을 나타낸 것이다. 단, 실험에 의한 하중-처짐 곡선은 처너하중의 것을 이용하였다.

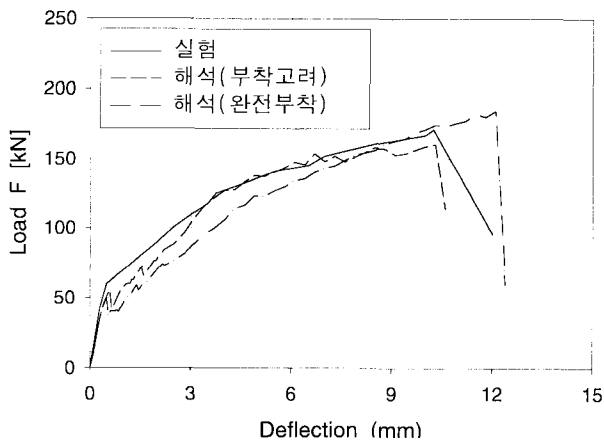
무보강인 시험체 B1에 대한 해석결과는 실험결과에 비해 극한하중의 값은 약간 높게 나타났으나, 전반적인 하중-변위 곡선의 양상은 잘 재현되었음을 알 수 있었다.

탄소섬유쉬트가 1층 보강된 시험체 B2에 대한 실험결과와 하중 60KN에서 보의 중앙부에 휨균열이 발생하면서 하중-처짐 곡선이 완만해지다가 하중 171KN에서 탄소섬유쉬트가 파단되면서 파괴되었다. 탄소섬유쉬트와 콘크리트 사

이를 완전부착으로 가정한 해석결과는 실험결과에 비하여 항복하중은 작고 극한하중은 크게 나타났다. 그러나 부착 특성을 고려한 해석결과는 실험결과에 의한 항복하중 및 극한하중과 거의 일치하였으며, 전체적인 하중-처짐 곡선도 잘 재현되었음을 알 수 있었다.



(a) specimen B1

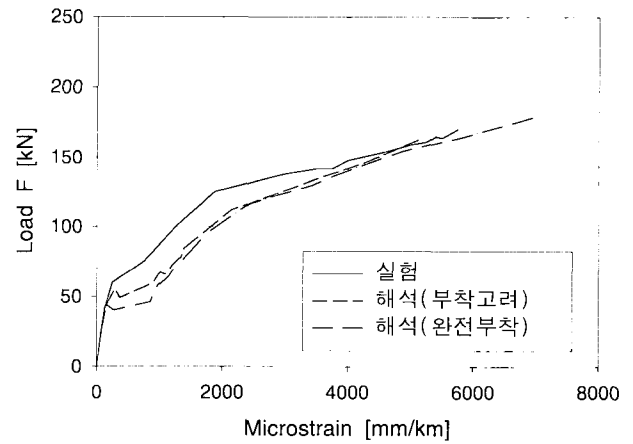


(b) specimen B2

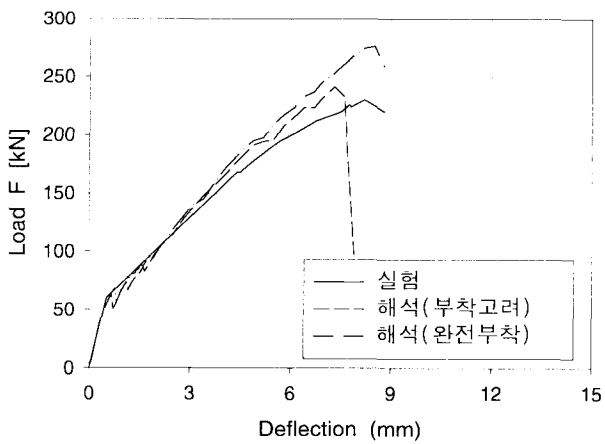
탄소섬유쉬트가 3층 보강된 시험체 B3에 대한 실험결과와 하중 60kN에서 보의 중앙부에 휨균열이 발생하면서 하중-처짐 곡선이 완만해지다가 하중 230kN에서 단부의 탄소섬유쉬트가 탈락되면서 전단 파괴되었다. 탄소섬유쉬트와 콘크리트의 사이를 완전부착으로 가정한 해석결과는 실험결과보다 극한하중이 크게 나타났지만, 부착특성을 고려한 해석결과는 실험결과에 의한 항복하중 및 극한하중과 거의 일치하였으며, 전체적인 하중-처짐 곡선도 잘 재현되었음을 알 수 있었다.

### 5.2 하중-탄소섬유쉬트의 변형률관계

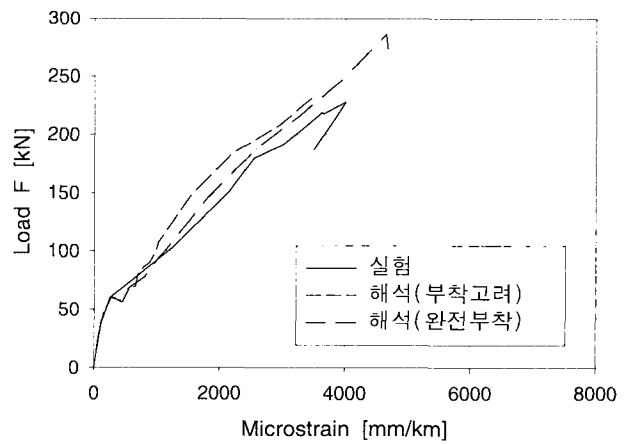
탄소섬유쉬트로 보강된 시험체 B2, B3에 대한 보의 중앙부에서 하중에 따른 탄소섬유쉬트의 변형률을 그림 10에 나타내었다. 탄소섬유쉬트와 콘크리트 사이를 완전부착이라 가정한 해석결과와 부착을 고려한 해석결과는 실험에 의한 하중-탄소섬유쉬트의 변형률 관계와 전반적으로 유사한 경향을 나타내고 있지만, 완전부착을 고려한 해석결과



(a) specimen B2



(c) specimen B3



(b) specimen B3

그림 9 Load and mid-span deflection

그림 10 Load and mid-span CFS strain

는 두 시험체 모두 파괴하중시의 탄소섬유쉬트의 변형률이 실험결과에 비하여 크게 나타났다.

그림에서 나타낸 바와 같이 두 가지 해석결과에 의한 탄소섬유쉬트의 변형율은 실험결과와 동일하게 항복하중 이후에 급격히 증가하였으며, 이것은 인장철근이 항복한 후에도 추가하중을 탄소섬유쉬트가 계속 부담한다는 것을 잘 재현해 주고 있음을 나타낸다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 탄소섬유쉬트와 콘크리트사이의 국부적인 부착-미끄럼 특성을 고려한 링크요소를 설치함으로써 탄소섬유쉬트와 콘크리트사이의 부착작용을 고려한 모델을 제안하였다. 제안된 모델의 타당성을 검증하기 위하여 탄소섬유쉬트로 보강된 RC보에 대한 2차원 유한요소해석을 실시하여 기존의 실험결과와 비교, 검토하였다. 또한 탄소섬유쉬트와 콘크리트사이를 완전부착이라 가정 한 해석결과도 함께 비교하여 본 모델의 유용성을 검증해 보았다.

본 연구의 결과 탄소섬유쉬트와 콘크리트사이를 완전부착으로 가정한 해석결과는 시험체 B2, B3 모두 실험결과에 비하여 극한하중 및 탄소섬유쉬트의 변형률이 높이 평가되었다. 그러나 본 연구에서 제안된 부착-미끄럼 모델을 고려한 해석결과는 시험체 B2, B3 모두 실험에 의한 항복하중 및 극한하중과 거의 일치하였으며, 전반적인 하중-처짐곡선도 잘 재현되었음을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서 제안한 국부적인 부착-미끄럼을 고려한 해석 방법이 완전부착을 고려한 해석방법보다 항복하중과 극한하중 등을 잘 예측하고 있음을 알 수 있었다.

## 참 고 문 헌

1. Hae-Geun Park, "Flexural Strength Evaluation of RC Members Laminated by Carbon Fiber Sheet", *KCI Concrete Journal*, Vol. 14, No. 1, 2002, pp.1~7
2. Stephen Kurtz, "Comparison of Inorganic and Organic Matrices for Strengthening of RC Beams with Carbon Sheets", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 127, No. 1, 2001, pp.35~42
3. Arduini, M., "Brittle Failure in FRP Plate and Sheet Bonded Beams", *ACI Structural Journal*, Vol. 94, No. 4, 1997, pp.363~370
4. 李翰承, "炭素纖維シートによって曲げ補強したRC梁の有限要素解析", *コンクリート工學年次論文報告集*, Vol. 18, No. 1, 1996, pp.1065~1070
5. 심종성, "강판 및 탄소섬유로 보강된 철근콘크리트보에 대한 해석적 연구", *콘크리트학회지*, 제9권, 제6호, 1997, pp.129~137
6. Kupfer, H. R., "Behavior of Concrete Under Biaxial Stresses", *ACI Journal*, Vol. 66, No. 8, 1969, pp.656~666
7. 岳尾弘洋, "CERP接着工法における炭素纖維シートの付着特性", *コンクリート工學年次論文報告集*, Vol. 19 No. 2, 1996, pp.1599~1604
8. 緒方紀夫, "炭素纖維による段落し部を有する既存RC橋脚の耐震補強に関する研究", *日本土木學會論文集*, No. 540/VI-31, 1996, pp.85~104
9. 한상호, "비선형 부착모델을 이용한 철근콘크리트 구조물의 균열 분포에 관한 연구", *대한토목학회논문집*, 제 17권, 제 I-6호, 1997, pp.867~874