

# 강도설계법으로 산정된 탄소섬유시트 보강 철근콘크리트 보의 공칭 휨모멘트

## Determination of Nominal Moment of Strengthening Beam with Carbon Fiber Sheets Using Strength Method

조백순<sup>\*</sup>      정진환<sup>\*\*</sup>      김성도<sup>\*\*\*</sup>      박대호<sup>\*\*\*\*</sup>      이우철<sup>\*\*\*\*\*</sup>  
Baik-Soon Cho    Jin-Hwan Cheung    Seong-Do Kim    Tae-Hyo Park    Woo-Cheol Lee

### ABSTRACT

Routinely, strength method for the determination of the nominal moment of reinforced concrete beam is assumed to also be suitable for strengthening beams with carbon fiber sheets since typically strengthening beams compromise 98% by volume of reinforced concrete. Flexural capacity of strengthening beam is absolutely dependent upon the type of reinforcement materials, amount of reinforcement, anchoring system, adhesion capacity between reinforcement material and concrete. Therefore, it might be incorrect to use strength method for analysis and design of strengthening beam without considering the differences in the load-deflection curves, mechanism of failure, state of stress distribution, failure strain of the reinforcement.

An flexural analysis based on force equilibrium and strain comparability has been developed for strengthening beam. Systematic experimental investigations are compared with analytical results. Then, the adaptation of strength method for strengthening beam have also been discussed.

### 1. 서론

콘크리트구조 설계기준에 의하면, 콘크리트의 인장성능을 무시하고 보 상단의 콘크리트 압축변형률  $\epsilon_c$  가  $\epsilon_{cu}$  ( $= 0.003$ ) 일 때 콘크리트의 비선형 압축응력 분포를 직사각형 응력 분포 ( $= 0.85f_{ck}$ )로 치환하여 철근콘크리트 보의 공칭 휨모멘트를 산정하는 강도설계법을 추천하고 있다. 탄소섬유시트로 보강된 철근콘크리트 보의 98% 이상은 철근콘크리트로 구성되어있기 때문에, 일반적으로 탄소섬유시트 보강보의 해석 및 설계를 강도설계법에 의존하는 경향이 있다. 보강보의 휨성능은 보강재의 종류 및 양, 보강재의 정착장치, 보강재와 모체의 부착성능 등 보강시스템에 따라 다르게 산정되므로, 보강보의 하중-처짐 선도, 파괴형태, 응력분포, 보강재의 파단변형률 등을 규명하지 아니하고는 보강보의 해석 및 설계에 강도설계법의 적용은 한계가 있다.

본 연구는 탄소섬유시트로 보강된 철근콘크리트 보의 휨거동을 고찰하기 위하여 보강보의 휨해석 방법을 개발하였으며, 보강보 휨해석의 타당성을 검증하기 위하여 27개 탄소섬유시트 보강보에 대한 휨실험을 실시하였다. 보강보 휨해석과 실험의 비교·분석 결과 산정된 탄소섬유시트 보강보의 휨모멘트와 강도설계법으로 산정된 탄소섬유시트 보강보의 휨모멘트를 비교하였다.

\* 정희원, 인제대학교 토목공학과 조교수

\*\* 정희원, 부산대학교 토목공학과 교수

\*\*\* 정희원, 경성대학교 건설환경공학부 교수

\*\*\*\* 정희원, 한양대학교 토목공학과 조교수

\*\*\*\*\* 정희원, 부산대학교 토목공학과 박사과정

## 2. 보강보의 휨해석

직사각형 철근콘크리트 보의 인장축을 탄소섬유시트로 보강한 경우, 저항모멘트는 보를 구성하는 재료들의 역학적인 메커니즘에 의해 결정된다. 따라서 보강보의 휨성능을 각 구성재료들의 거동 상태에 따라 다음과 같이 3구간으로 나누어 해석하였다. 그림 1은 이상적인 보강보의 모멘트-곡률 선도를 도시하였다<sup>1)</sup>.

구간 I : 보강보에 균열이 전혀 없는 구간으로 보를 구성하는 재료들은 모두 탄성거동 한다. (균열이전구간)

구간 II : 인장축 콘크리트 균열로 보강보의 휨강성은 저하되었으나, 철근과 섬유 시트는 탄성 거동 한다. (항복이전구간)

구간 III : 보강보가 항복에 도달한 이후의 구간이며, 보강보의 항복은 인장철근의 항복에 의해 지배된다. 철근의 응력은 항복강도  $f_y$ 로 일정하고, 섬유시트는 파단에 이를 때까지 여전히 탄성거동을 한다. (항복이후구간)

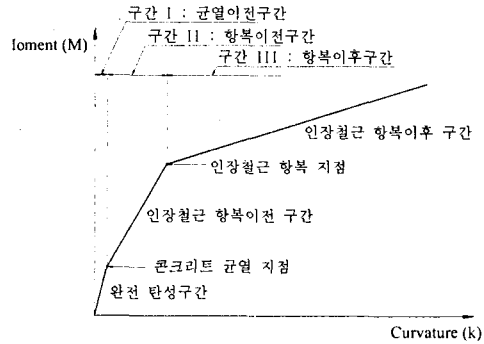


그림 1. 이상적인 보강보의 모멘트-곡률 선도

### 2.1. 구성 요소의 모델

콘크리트 압축응력-변형을 관계에 Shah<sup>2)</sup>의 모델식을 적용한다. 콘크리트 인장응력-변형을 관계는 응력 증가구간에서 콘크리트 인장강도(파괴계수,  $f_t$ )에 도달할 때까지 직선의 응력-변형을 선도로 나타내며, 응력 감소구간에서 변형률은 균열폭에 크게 영향을 받으므로 이 구간에서 응력-변형을 관계는 응력-균열폭 관계를 정의한 Gopalaratnam<sup>3)</sup>의 제안식을 적용한다. 철근의 변형률이 항복변형률  $\epsilon_y$ 에 도달하기 전까지는 탄성 거동을 하며, 철근의 변형률이 항복변형률 이상일 경우에는 변형률에 관계없이 철근 응력을 항복응력  $f_y$ 로 가정하여 변형을 경화를 무시한다. 탄소섬유시트의 인장응력-변형을 관계는 파괴에 도달할 때까지 탄성 거동을 한다.

### 2.2. 휨해석

#### 2.2.1. 균열이전구간 ( $\epsilon_t \leq \epsilon_r$ )

균열이전구간은 콘크리트의 하단 인장응력이 인장강도에 도달할 때까지이며, 이 구간에서 모든 재료들은 탄성거동을 한다. 이때 각 구성재료의 압축력 및 인장력은 다음과 같다.

$$\text{콘크리트의 압축력} : C_c = \alpha f_{ck} b c \quad (1)$$

$$\text{콘크리트의 인장력} : T_c = \frac{b(h-c)^2}{2c} E_c \epsilon_c \quad (2)$$

$$\text{철근의 인장력} : T_s = A_s E_s \left( \frac{d-c}{c} \right) \epsilon_c \quad (3)$$

$$\text{탄소섬유시트의 인장력} : T_f = A_f E_f \left( \frac{h-c}{c} \right) \epsilon_c \quad (4)$$

여기서,  $\alpha$ 는 콘크리트 평균 압축응력 상수로 다음과 같이 정의된다.

식(1)~(4)에서 힘의 평형조건을 이용하면 중립축 거리  $c$ 는 다음과 같이 정리된다.

$$\left(af_{ck}b - \frac{b}{2}E_c\epsilon_c\right)c^2 + (bhE_c + A_sE_s + A_fE_f)\epsilon_c c - \left(\frac{b}{2}h^2E_c + A_sE_s d + A_fE_f h\right)\epsilon_c = 0 \quad (5)$$

식(5)에 대해 양의 해를 취하면 중립축 거리  $c$ 를 구할 수 있다.

### 2.2.2. 항복이전구간 ( $\epsilon_t \leq \epsilon_r$ 그리고 $\epsilon_s \leq \epsilon_y$ )

항복이전구간은 보의 하단인 콘크리트 인장측에서 균열이 발생한 직후부터 인장철근이 항복에 도달할 때까지이다. 따라서 콘크리트의 인장력은 증가구간과 감소구간으로 나누어서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{콘크리트의 인장력} : \begin{cases} T_{c1} = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_r}{\epsilon_c} b c f_r & : \epsilon_t \leq \epsilon_r, \text{ 응력증가구간} \\ T_{c2} = \bar{a} f_r b \left\{ h - \left(1 + \frac{\epsilon_r}{\epsilon_c}\right) c \right\} & : \epsilon_t \geq \epsilon_r, \text{ 응력감소구간} \end{cases} \quad (6)$$

여기서,  $\bar{a}$ 는 인장측 콘크리트 응력 감소구간의 평균 인장응력 상수이다.

식(1),(3),(4),(6)에서 힘의 평형조건을 이용하면 중립축 거리  $c$ 는 다음과 같이 정리된다.

$$\left(af_{ck}b - \frac{bf_r\epsilon_r}{2\epsilon_c} + \bar{a}f_r b \left(1 + \frac{\epsilon_r}{\epsilon_c}\right)\right)c^2 + (A_sE_s\epsilon_c + A_fE_f\epsilon_c - \bar{a}f_rbh)c - (A_sE_s d + A_fE_f h)\epsilon_c = 0 \quad (7)$$

식(7)에 대해 양의 해를 취하면 중립축 거리  $c$ 를 구할 수 있다.

### 2.2.3. 항복이후구간 ( $\epsilon_t > \epsilon_r$ 그리고 $\epsilon_s > \epsilon_y$ )

항복이후구간은 보강보의 콘크리트 인장변형률  $\epsilon_t$ 가 파괴 인장 변형률  $\epsilon_r$ 을 훨씬 초과하였으며, 이때 철근은 항복한 상태이다. 따라서 철근의 인장력은 다음과 같다.

$$\text{철근의 인장력} : T_s = A_s f_y \quad (8)$$

식(1),(4),(6),(8)에서 힘의 평형조건을 이용하면 중립축 거리  $c$ 는 다음과 같이 정리된다.

$$\left(af_{ck}b - \frac{bf_r\epsilon_r}{2\epsilon_c} + \bar{a}f_r b \left(1 + \frac{\epsilon_r}{\epsilon_c}\right)\right)c^2 + (A_fE_f\epsilon_c - A_s f_y - \bar{a}f_rbh)c - A_fE_f h \epsilon_c = 0 \quad (9)$$

식(9)에 대해 양의 해를 취하면 중립축 거리  $c$ 를 구할 수 있다.

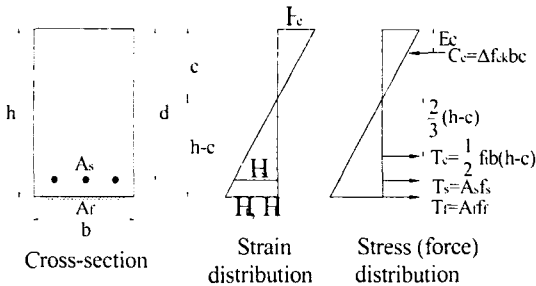


그림 2. 구간 I의 변형률 분포도 및 응력(힘) 분포도

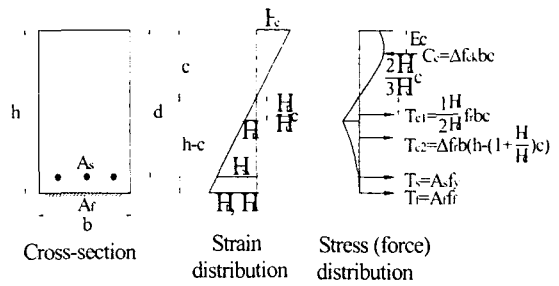


그림 3. 구간 II, III의 변형률 분포도 및 응력(힘) 분포도

탄성구간과 항복이후 구간 및 항복이후구간의 변형률 분포도, 구성 재료의 응력(힘) 분포도를 그림 2와 3에 나타내었다. 각 콘크리트 압축 변형률 단계에서 콘크리트 압축력의 작용점에 대하여 모멘트를 취하면 구간 I에서의 탄소섬유시트 보강보의 저항모멘트  $M$ 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$M = T_c \left( \frac{2}{3} (h - c) + (c - \beta c) \right) + T_s (d - \beta c) + T_f (h - \beta c) \quad (10)$$

또한 구간 II, III에서의 탄소섬유시트 보강보의 저항모멘트  $M$ 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$M = T_{c1} \left( \frac{2\epsilon_r}{3\epsilon_c} + 1 - \beta \right) c + T_{c2} \left[ c - \beta c + \frac{\epsilon_r}{\epsilon_c} c + \bar{\beta} \left( h - \left( 1 + \frac{\epsilon_r}{\epsilon_c} \right) c \right) \right] + T_s (d - \beta c) + T_f (h - \beta c) \quad (11)$$

여기서,  $\bar{\beta}$ 는 인장축 콘크리트 응력 감소구간의 인장력  $T_{c2}$ 의 작용점 거리를 나타내는 상수이다.

### 3. 보강보 실험

보강보 실험을 통하여 2장에서 유도한 보강보 휨해석의 타당성을 입증하기 위해 탄소섬유시트 보강보의 휨실험을 실시하였다. 다양한 인장철근비에 대한 보강보의 휨 특성을 파악하기 위해서 철근은 2-D13(D13인 보), 2-D16(D16인 보), 2-D19 (D19인 보)의 3가지를 선택하여 실험체를 제작하였으며, 보의 전단 파괴를 방지하기 위해 스텝머(D10)를 10cm 간격으로 전단 구간에 배근하였다.

설계두께 0.11mm, 중량 200gf/m<sup>2</sup>의 탄소섬유시트를 보강재로 사용하였으며, 철근 콘크리트 보의 하부에 폭 15cm, 길이 250cm 크기로 부착하였다. 보강재 양에 대한 보강보의 휨성능을 고찰하기 위해 현실적으로 가장 많이 시공하는 보강겹수(1~4겹)를 선택하였다. 탄소섬유시트의 정착을 위해 보강재의 단부에 폭 50cm의 U-밴드(휨 보강용 섬유 시트와 같은 겹수 적용)를 시공하였다. 보강보 실험에 대한 신뢰성을 확보하기 위해 각 보강겹수들에 대해 2개씩의 동일한 보와 각 기준실험보 1개씩을 제작하여 총 27개의 실험보에 대해 실험을 실시하였다.

보강보의 형상 및 가력상황을 그림 4에 나타내었다. 50tonf 용량의 MTS 액추에이터를 사용하여 네 점 휨실험을 실시하였다. 단순지지 경계조건을 만족하도록 실험보의 양쪽 단부에서 각각 10cm 떨어진 곳에 강제 롤러를 설치하여 실험보를 지지하였다. 하중은 실험보의 중앙에서 좌우 40cm씩 떨어진 곳에 강제 가력보를 이

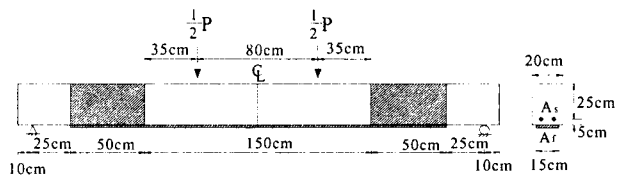


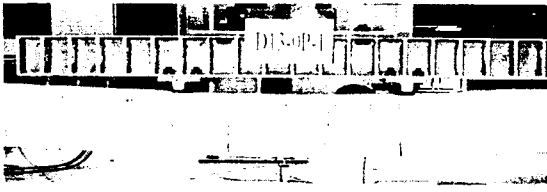
그림 4. 보강보의 형상 및 가력상황

용하여 가력하였으며, 이때 두 가력점 사이는 순수 휨을 받는 구간이 된다. 하중은 액추에이터를 통해 변위 제어방식으로 2.0mm/min.의 속도로 가하였다. 작용하중은 액추에이터에 부착된 하중계(load cell)를 사용하여 측정하였으며, 작용하중에 대한 실험보의 처짐은 보의 중앙 하부에 설치된 변위계(LVDT)를 사용하여 측정하였다. 콘크리트 및 탄소섬유시트의 변형률을 측정하기 위해 보의 중앙에서 길이 방향으로 3개의 변형률 게이지를 상단 및 하단에 부착하였다. 측정된 변형률은 보강보 실험의 분석에 사용되며, 특히 작용하중에 따른 보의 중립축 위치와 곡률 산정, 최대 도달 탄소섬유시트의 변형률을 측정하는데 이용되었다.

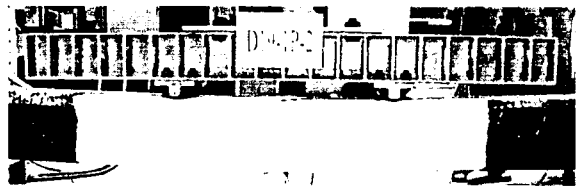
### 4. 휨해석 및 실험결과의 고찰

철근콘크리트 보 하단의 콘크리트 응력이 인장강도에 도달할 때 휨 균열은 시작되며, 균열로 인해 보의 중립축은 상부로 이동한다. 하중이 더 가해지면 균열은 중립축을 향해 보의 상단으로 계속 전진하며, 이때 균열의 폭은 커지지만 일반적으로 균열의 수는 증가하지 않는다(그림 5 (a) 참조). 그러나 탄소섬유시트 보강보에서는 하중증가에 따라 균열 폭이 커짐과 동시에 균열들 사이에 새로운 균열이 발생한다(그림 5 (b) 참조). 콘크리트 하부에 또다시 균열이 발생한 것은 그 위치에서의 콘크리트가 새롭게 인장강도에 도달하였음을 의미하며, 이는 콘크리트에 부착된 보강재가 콘크리트의 응력을 구속하는 능력이 있는 것으로 판단된다.<sup>1)</sup> 따라서 탄소섬유시트 보강보의 휨성능은 콘크리트 인장성능의 고려가 요구된다.

탄소섬유시트 보강보의 휨해석과 휨실험에서 측정된 하중-처짐 선도를 그림 6에 3종류의 휨해석에 의한 보강보의 하중-처짐 선도를 나타내었으며, 각각의 선도는 보 하단의 콘크리트 평균 인장응력의 성능에 따라 분류된다. 즉,  $f_t = 0.0f_r$ ,  $f_t = 0.1f_r$ ,  $f_t = 0.2f_r$ 로 나타난 곡선들은 각각 보 하단의 콘크리트 평균 인장응력을 콘크리트 인장강도의 0%, 10%, 20%로 간주하여 휨해석한 결과이다. 그림 7에 3종류의 하중-처짐 선도를 산정하는데 사용한 응력분포도를 도시하였다.  $f_t = 0.1f_r$ 로 휨해석한 보강보의 하중-처짐 선도가 실험에서 측정된 최대하중에 도달할 때까지의 결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다.  $f_t = 0.1f_r$ 로 휨해석한 탄소섬



(a) 기준 철근콘크리트 보



(b) 탄소섬유시트 보강보

그림 5. 기준 철근콘크리트 보와 탄소섬유시트 보강보의 균열 분포도

유시트 보강보의 항복하중과 최대하중을 실험결과와 그림 8에 비교하였다. 그림에 도시된 직선은 탄소섬유시트 보강보의 항복하중에 대한 실험값과 해석값이 일치할 때를 의미하므로 각 점이 대부분 직선 근처에 있어 실험결과와 보강보 휨해석은 잘 일치함을 알 수 있다. 따라서 탄소섬유시트가 보강된 철근콘크리트 보의 휨성능은 보 하부의 콘크리트 평균인장성능을 콘크리트 인장강도의 10%로 고려한 탄소섬유시트 보강보 휨해석이 타당한 것으로 결론지을 수 있다.

콘크리트 인장성능을 고려한 탄소섬유시트 보강보의 휨해석에 의한 휨모멘트-곡률 선도를 그림 9에 나타내었다. 보강재 파단변형률  $\epsilon_{fu}$ 가 보강보의 휨성능에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 보강보 휨모멘트-곡률 선도에 보강재 파단변형률 값(0.006~0.011)들을 나타내었다.

또한 압축상단 콘크리트 변형률  $\epsilon_c$ 가  $\epsilon_{cu}$  (=0.003)일 때 각 보강재 양에 따른 보강보 휨모멘트의 변화를 그림 9에 나타내었다. 상대적으로 보강재 양이 적거나,  $\epsilon_{fu}$ 를 낮게 적용한 보강시스템은  $\epsilon_f$ 가  $\epsilon_{fu}$ 에 도달하였을 때  $\epsilon_c$ 가  $\epsilon_{cu}$ 에 도달하지 못하고 보강구조물로서 기능을 상실하는 것으로 나타났다. 그림 9에서  $\epsilon_c = \epsilon_{cu}$  선의 좌측이 이들에 해당한다.  $\epsilon_c$ 가  $\epsilon_{cu}$ 에 도달하지 못하고 보강구조물로서 기능을 상실하는 경우에는 강도설계법 조건인  $\epsilon_c = \epsilon_{cu}$ 의 적용은 탄소섬유시트 보강보의 최대 휨모멘트를 과대평가하기 때문에 본 연구에서 제시한 보강보 휨해석(비선형해석)을 이용하여 탄소섬유시트 보강보의 최대 휨모멘트를 산정하여야 한다.

이와는 반대로 상대적으로 보강재 양이 많거나,  $\epsilon_{fu}$ 를 높게 적용한 보강시스템은  $\epsilon_c$ 가  $\epsilon_{cu}$ 에 도달한 후에도  $\epsilon_f$ 가  $\epsilon_{fu}$ 에 도달하지 않아 보강구조물은 더 큰 외부하중에 대해 저항할 수 있다. 이 경우에 강도설계법 조건인  $\epsilon_c = \epsilon_{cu}$ 의 적용은 탄소섬유시트 보강보의 최대 휨모멘트를 과소평가하게 된다. 그러나  $\epsilon_c$ 가  $\epsilon_{cu}$ 에 도달한 후에는 콘크리트 압축상단의 균열로 인하여 사용성 측면에서 구조물의 기능을 상실한 상태이므로 강도설계법 조건인  $\epsilon_c = \epsilon_{cu}$ 를 적용하여 탄소섬유시트 보강보의 최대 휨모멘트를 산정하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

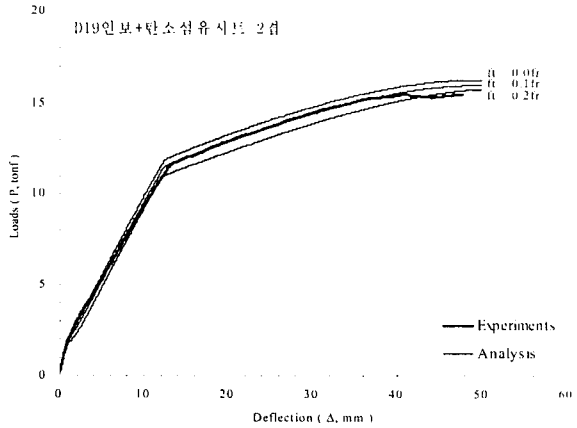


그림 6. 3종류의 휨해석에 의한 보강보의 하중-처짐 선도

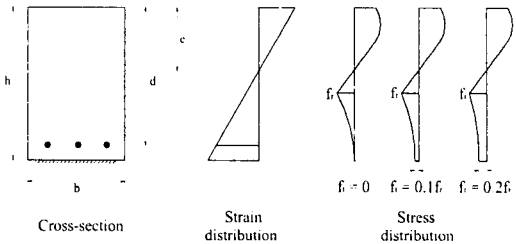


그림 7. 3종류의 하중-처짐 선도의 산정에 사용된 응력분포도

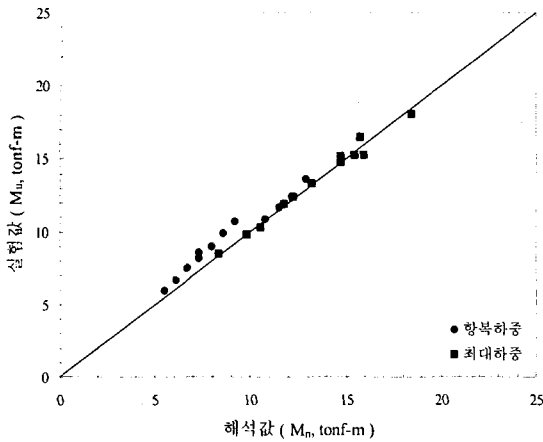


그림 8. 탄소섬유시트 보강보의 항복하중 및 최대하중의 해석값과 실험값의 비교

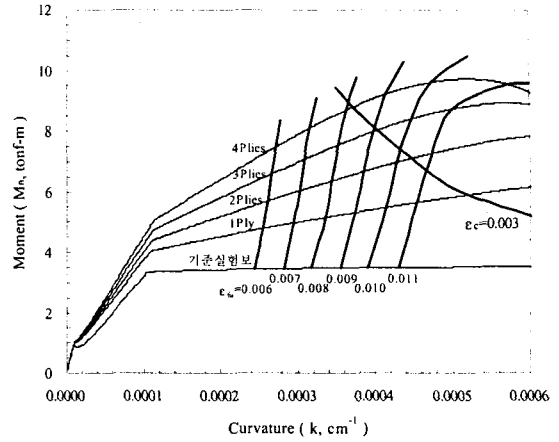


그림 9. 탄소섬유시트 보강보의 휨해석에 의한 휨모멘트-곡률 선도

## 5. 결론

- 탄소섬유시트 보강 철근콘크리트 보의 휨성능은 보 하부의 콘크리트 평균인장성능을 콘크리트 인장강도의 10%로 고려한 탄소섬유시트 보강보 휨해석이 타당한 것으로 나타났다.
- $\epsilon_c$ 가  $\epsilon_{cu}$ 에 도달하기 전에  $\epsilon_f$ 가  $\epsilon_{fu}$ 에 도달하는 경우 강도설계법 조건인  $\epsilon_c = \epsilon_{cu}$ 의 적용은 탄소섬유시트 보강보의 최대 휨모멘트를 과대평가하는 것으로 나타나 보강보 휨해석(비선형해석)을 이용하여 탄소섬유시트 보강보의 최대 휨모멘트를 산정하여야 한다.
- $\epsilon_c$ 가  $\epsilon_{cu}$ 에 도달한 후에  $\epsilon_f$ 가  $\epsilon_{fu}$ 에 도달하지 않은 경우 강도설계법 조건인  $\epsilon_c = \epsilon_{cu}$ 의 적용은 탄소섬유시트 보강보의 최대 휨모멘트를 과소평가하게 된다. 그러나  $\epsilon_c$ 가  $\epsilon_{cu}$ 에 도달한 후에는 콘크리트 압축상단에 균열이 발생되어 사용성 측면에서 구조물의 기능을 상실한 상태이므로 강도설계법 조건인  $\epsilon_c = \epsilon_{cu}$ 를 적용하여 탄소섬유시트 보강보의 최대 휨모멘트를 산정하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 (주)MPRO의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

## 참고 문헌

- Mahmoud T. El-Milhimly and Joseph W. Tedesco "Deflection of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Plates" ACI Structural Journal, 2000. 9-10, pp. 679~688.
- Surendra P. Shah, Apostolos Fafitis, and Richard Arnold, "Cyclic Loading of Spirally Reinforced Concrete", Journal of Structural Engineering, Vol. 109, No. 7, 1983. 7, pp. 1695~1710.
- Gopalratnam, V. S. and Shah, S. P., "Softening Response of Plane Concrete in Direct Tension", ACI Structural Journal, Vol. 82, No. 3, 1985. 5-6, pp. 310-323.
- Hollaway, L. C. and Leeming, M. B., "Strengthening of Reinforced Concrete Structures", Woodhead Publishing Ltd. 1999.