

섬유시트로 밑면과 옆면이 보강된 T형 철근콘크리트보의 휨 강도

Flexural Strength of Reinforced Concrete T Beams Strengthened with Soffit and Web Fiber Sheets.

박대호* 이규철**
Tae-Hyo Park Gyu-Chul Lee

ABSTRACT

Recently fiber sheets are used for strengthening the damaged concrete structures due to its many advantages such as its durability, non-corrosive nature, low weight, ease of application, cost saving, control of crack propagation, strength to thickness ratio, high tensile strength, serviceability and aesthetic. However, the lack of analytical procedures for predicting the nominal moment capacity by the fiber sheet reinforcement leads to difficulties in the effective process of decisions of the factors in the strengthening procedure. In this work, flexural strengthening effects by fiber sheets bonded on soffit and web of the member are theoretically studied for the reinforced concrete T beam. The analytical solutions are compared with experimental results of several references to verify the proposed approach.

1. 서 론

섬유시트(Fiber Sheet, FS)의 집착에 의한 보강은 결함(Defect), 손상(Damage), 성능저하(Deterioration)에 의해 구조적 또는 기능적인 문제점을 내재하고 있거나 내하력 증강을 요하는 콘크리트 구조물의 보강 방법이며 구조물의 재설치에 비하여 비용 효율이 높아 현재 널리 적용되고 있다(Neale, 2000; Hag-Elsafi 등, 2001). 섬유시트를 철근콘크리트보의 밑면에 부착하면 휨 보강이 가능하게 된다. 더욱이 옆면 부착은 전단뿐만 아니라 휨 보강에도 효과적이며, 균열 및 처짐을 감소시킬 수 있어 사용성 증대에도 효과가 있다(Deniand와 Cheng, 2001). El-Mihilmy와 Tedesco (2000)는 FRP로 보강된 직사각형 단면의 철근콘크리트보에 대한 휨 성능을 제시하였다. Shahawy 등 (2001)은 길이방향으로 밑면과 옆면에 CFRP를 랩핑(Wrapping)한 RC T형 거더의 휨 성능에 대한 실험으로 옆면 부분 랩핑은 옆면 전체 랩핑에 비하여 강도와 연성이 작고 철근량에 따라 바랍직하지 않은 박리에 의한 부착효과가 나타남을 확인했다. 또한, 옆면 전체 랩핑의 경우에 대하여 섬유시트의 단수(Layers)가 늘어날 수록 항복모멘트와 극한모멘트는 증가되었고, 처짐은 감소되었다. 따라서 밑면 부착보강과 밑면부착을 보조하는 밑면과 옆면의 랩핑에 의한 부착보강을 활용하는 것이 부착 단면적을 확대시킬 수 있으므로 휨강도를 증가시키고 박리 및 탈락파괴의 방지뿐만 아니라 균열을 제어하는 추가적인 효과도 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 결과적으로 본 연구에서는 극한강도 설계법을 바탕으로 옆면섬유시트가 T형 철근콘크리트보의 휨강도에 미치는 영향이 이론적으로 평가된다.

2. 섬유시트에 의해 보강된 T형 단면 철근콘크리트보의 휨 파괴

섬유시트를 이용하여 보강된 철근콘크리트보는 콘크리트, 철근, 섬유시트의 변형률 상태에 따라 세 가지 유형의 휨 파괴 형태를 나타낸다. 첫 번째는 철근의 항복과 시트의 파괴 전에 압축부의 콘크리트가 파괴되는 압축파괴(Compression Failure ; CF), 두 번째는 철근의 항복 후 섬유시트가 파괴되는 섬유시트파괴(Fiber sheet Failure ; FF), 세 번째는 철근 항복 후 콘크리트의 압축파괴가 발생하는 인장파괴(Tension Failure ; TF)이다. 보강 철근콘크리트(Strengthened Reinforced Concrete)보의 휨 거동은 일반 철근콘크리트보에서와 같이 섬유시트보다 연성이 우수한 철근이 항복한 후 콘크리트의 압축파괴가 발생하는 인장파괴가 가장 이상적이라고 할 수 있다. 따라서 철근콘크리트보의 보강설계에서 콘크리트 압축파괴와 섬유시트파괴와 같은 취성파괴를 피하고 인장파괴에 지배되도록 설계하는 것이 중요하다. 이밖의 파괴유형으로 콘크리트와 섬유시트사이의 박리파괴(Debonding Failure)나 콘크리트의 탈락파괴(Peeling Failure)와 같은 취성파괴가 있는데 이는 섬유시트의 단부를 볼트 또는 섬유시트를 이용한 정착장치를 도입함으로써 미연에 방지할 수 있다(Bencardino 등 2002). 결과적으로 본 연구에서는 다음과

* 정회원, 한양대학교 토목공학과 조교수
** 정회원, 한양대학교 대학원 토목공학과 석사과정

같은 가정하에서 보강 철근콘크리트보를 해석한다.

1. 단면의 변형률 분포는 선형이다.
2. 콘크리트의 인장응력은 무시하고 압축응력은 등가 직사각형 응력분포로 가정한다.
3. 철근은 항복점 이하는 탄성, 항복 후에는 완전소성으로 가정한다.
4. 섬유시트는 파괴시까지 선형탄성 거동을 한다.
5. 콘크리트, 철근, FRP시트는 완전 부착되어 일체화 거동을 한다.

또한 본 연구에서는 옆면섬유시트가 T형보의 극한모멘트에 미치는 영향만 검토되고, T형 철근콘크리트보가 인장파괴의 범위를 갖도록 하는 옆면섬유시트의 보강량에 대해서 추가로 연구되어야 한다.

3. 밑면과 옆면이 보강된 T형 단면의 철근콘크리트보에 대한 힘 해석

3.1 해석 단면 형태 결정을 위한 중립축 위치 판정

T형 철근콘크리트보의 힘의 평형조건은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$C_R = T_R \quad (1)$$

T형 철근콘크리트보를 폭이 B인 직사각형 단면으로 가정하고, 위 식 (1)에 압축합력 C_R 과 인장합력 T_R 을 그림 2의 경우를 예로 적용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$0.85f'_c a B + f_y A_s' = f_y A_s + f_b A_b + (f_{wb} + f_{wt}) A_w \quad (2)$$

여기서 f'_c 은 콘크리트의 압축강도, $a (= \beta_1 c)$ 는 콘크리트의 응력분포 등가직사각형 깊이, β_1 은 콘크리트 응력블록의 파라미터(Parameter), c 는 압축부 선단에서 중립축까지의 거리, B 는 T형 콘크리트 단면의 플랜지 폭, f_y 는 철근의 항복강도, A_s' 는 압축철근의 단면적, A_s 는 인장철근의 단면적, f_b 는 밑면섬유시트의 응력, A_b 는 밑면섬유시트의 단면적이다. 이때 $A_b (= A_{b1} + A_{b2})$ 는 밑면 보강섬유시트 A_{b1} 에 밑면섬유시트를 보조하기 위해 감싸는(Wrapping) 섬유시트의 밑면에 해당하는 부분 A_{b2} 가 더해진 값이다. 또한 f_{wb} 는 옆면섬유시트 최하단의 응력, f_{wt} 는 옆면섬유시트 최상단의 응력 그리고 A_w 는 옆면섬유시트 보강단면적이다.

응력분포 등가 직사각형 깊이는 식 (2)를 a 에 관한 2차식으로 정리하여 근의 공식에 적용하면 얻을 수 있다.

$$0.85f'_c B a^2 + (2A_w E_F \epsilon_{cu} - f_y A_s' - f_y A_s - f_b A_b) a - \beta_1 A_w E_F \epsilon_{cu} (2h - h_w) = 0 \quad (3)$$

이 식을 얻기 위해 사용된 f_{wb} , f_{wt} 는 Hooke의 법칙과 적합조건에 의해 각각 아래와 표현된다.

$$f_{wb} = E_F \epsilon_{wb} = E_F \epsilon_{cu} \frac{h-c}{c}, \quad f_{wt} = E_F \epsilon_{wt} = E_F \epsilon_{cu} \frac{h-c-h_w}{c} \quad (4a, b)$$

여기서 ϵ_{wb} 는 옆면섬유시트 최하단의 변형률, ϵ_{wt} 는 옆면섬유시트 최상단의 변형률, ϵ_{cu} 는 콘크리트의 극한 변형률, h 는 콘크리트 단면의 높이, h_w 는 옆면섬유시트의 보강 높이, 그리고 E_F 는 섬유시트의 탄성계수이다. 식 (4)은 3.2.1절의 중립축이 플랜지와 옆면섬유시트 사이에 있는 T형 복철근콘크리트보를 나타낸 것이다. 한편 중립축이 플랜지 안에 있는 경우에는 옆면섬유시트는 중립축 아래에만 존재할 수 있으므로 식 (2)에서 T_w 의 항 $(f_{wb} + f_{wt}) \times A_w$ 이 동일하게 적용되어야 한다. 또한 3.2.2절의 중립축이 플랜지와 옆면섬유시트 아래에 존재하는 경우에도 위치 판별에 사용되는 식 (2)가 힘의 평형조건에 따른 식이므로 중립축 위의 압축력 크기만큼 중립축 아래의 인장력이 상쇄되어 3.2.1절의 중립축이 플랜지와 옆면섬유시트 사이에 있는 경우와 동일하게 식 (4)가 구해진다. 다시 기술하면, 옆면섬유시트의 응력 분포를 별도로 나타낸 그림 1과 같이 옆면섬유시트가 중립축 위에 존재하는 경우에 $T_{w2} = -C_w$ 이므로 T_w 만 남게 되어 옆면섬유시트가 중립축 아래에 존재하는 경우의 T_w 와 같아진다. 이는 단철근콘크리트보의 경우에서도 동일하게 적용될 수 있다.

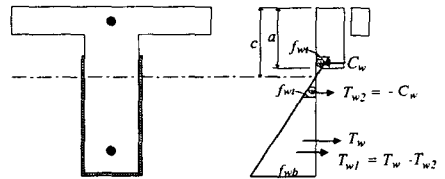


그림 1 중립축이 플랜지와 옆면섬유시트 아래에 있는 경우에서 옆면섬유시트의 힘의 평형상태

식 (3)에 의해 구한 응력분포 등가직사각형의 깊이 a 가 플랜지 두께 t_f 보다 크면 중립축이 플랜지 아래에 있는 경우로 3.2절과 같이 T형 단면으로 해석되며, a 가 t_f 보다 작거나 같으면 중립축이 플랜지 안에 있는 경우로 중립축 아래의 콘크리트 인장응력을 무시하므로 플랜지 폭 B 를 폭으로 하는 직사각형 단면으로 해석된다. 중립축이 플랜지 안에 있는 T형 복철 근콘크리트보의 단면은 형상 조건이 $h_w < (h - t_f)$ 이므로 중립축이 플랜지 안에 있고 옆면섬유시트가 중립축 위에 있는 경우는 존재하지 않는다. 이 경우에는 b 를 대신하여 B 를 대입하면 간단히 압축합력을 나타낼 수 있고, 이밖의 수식들은 중립축이 플랜지와 섬유시트 사이에 있는 경우와 동일하게 적용되므로 쉽게 나타낼 수 있다.

3.2 중립축이 플랜지 아래에 있는 경우

3.2.1 옆면섬유시트가 중립축 아래에 있는 경우

중립축이 플랜지와 옆면섬유시트 사이에 있는 경우는 그림 2와 같이 표현할 수 있다. 그림 2에서 압축력은 콘크리트의 복부 (bh)에 해당하는 압축력 C_{c1} , 콘크리트의 복부를 제외한 플랜지 $[(B-b)t_f]$ 에 해당하는 압축력 C_{c2} , 압축철근에 의한 압축력 C_s 로 나누어 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

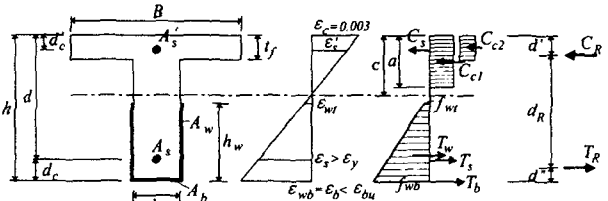


그림 2 중립축이 플랜지와 옆면섬유시트 사이에 위치

$$C_{c1} = 0.85f'_c ba = 0.85f'_c b\beta_1 c, \quad C_{c2} = 0.85f'_c (B-b)t_f, \quad C_s = f_y A_s' \quad (5a, b, c)$$

여기서 b 는 콘크리트 단면의 복부 폭이다. 압축합력 C_R 은 식 (5)의 합에 의해 나타낼 수 있다. 또한, 각각의 인장력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_s = f_y A_s, \quad T_b = f_b A_b = A_b E_F \epsilon_{cu} \frac{h-c}{c}, \quad T_w = (f_{wb} + f_{wt}) A_w = A_w E_F \epsilon_{cu} \frac{2h-2c-h_w}{c} \quad (6a, b, c)$$

여기서 T_s 는 인장철근의 인장력, T_b 는 밑면섬유시트의 인장력 그리고 T_w 는 옆면섬유시트의 인장력이다. 옆면섬유시트의 탄성계수 E_w 는 일반적으로 밑면섬유시트와 같은 재료를 사용하므로 섬유시트의 탄성계수 E_F 와 같아진다. 인장합력 T_R 은 식 (6)의 합으로 나타낼 수 있다.

중립축 위치를 구하기 위해 힘의 평형조건식 (1)에 위의 압축합력과 인장합력을 대입하여 c 에 관한 2차식으로 정리하면 다음과 같다.

$$(0.85f'_c b\beta_1)c^2 + [0.85f'_c (B-b)t_f + f_y A_s' - f_y A_s + A_b E_F \epsilon_{cu} + 2A_w E_F \epsilon_{cu}]c + [-A_b E_F \epsilon_{cu} h - A_w E_F \epsilon_{cu} (2h - h_w)] = 0 \quad (7)$$

중립축의 위치는 위 식 (7)을 근의 공식에 대입하여 구한 두 값 중 양의 값을 선택하면 얻을 수 있다.

공칭모멘트 M_n 은 우력모멘트와 같이 나타낼 수 있으므로 다음 식 (8a)에 압축합력 및 인장합력, 압축합력과 인장합력 사이의 거리 d_R 을 구하는 식 (8b)를 대입하면 얻을 수 있다.

$$M_n = T_R d_R = C_R d_R, \quad d_R = h - d' - d'' \quad (8a, b)$$

여기서 d_R 은 압축부 선단에서 압축합력 작용점까지의 거리 d' 과 인장부 선단에서 인장합력 작용점까지의 거리 d'' 을 대입하면 얻을 수 있다. 이때 d' 은 압축력에 대한 모멘트 평형조건에 의해, d'' 은 인장력에 대한 모멘트 평형조건에 의해 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$d' = \frac{0.5a C_{c1} + 0.5t_f C_{c2} + d_c' C_s}{C_R}, \quad d'' = \frac{T_s d_c + T_w d_w}{T_R} = \frac{T_s d_c + T_w \left[\frac{(f_{wb} + 2f_{wt})}{3(f_{wb} + f_{wt})} h_w \right]}{T_R} \quad (9a, b)$$

여기서 d_w 는 옆면섬유시트의 인장력의 작용점과 인장부 선단 사이의 거리로 그림 2의 응력분포도에서 옆면섬유시트의 전체 인장력과 옆면섬유시트의 응력분포도를 \triangle 형 및 \square 형으로 나눈 부분 인장력간의 모멘트 평형조건에 의해 구할 수 있다.

결과적으로 설계모멘트 M_d 는 앞에서 구한 공칭모멘트에 강도감소계수 ϕ 를 곱하여 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$M_d = M_u = \phi M_n \quad (10)$$

단철근콘크리트의 경우는 C_s 또는 A_s' 항을 무시하면 관련 식을 얻을 수 있다. 뿐만 아니라 섬유시트를 밀면에만 부착하여 보강한 경우는 식 (7), (9b)에서 T_w 와 A_w 항을 무시하면 중립축, 인장부 선단에서 인장합력 작용점까지의 거리 등을 표현할 수 있다.

3.2.2 옆면섬유시트가 중립축 위에 있는 경우

중립축이 플랜지와 옆면섬유시트 아래에 있는 경우는 그림 3과 같이 표현할 수 있다.

그림 3에서 각각의 압축력은 식 (5)와 아래의 중립축 위에 부착된 옆면섬유시트의 압축력 C_w 로 나타낼 수 있다. 또한 각각의 인장력은 식 (6a, b)와 다음의 중립축 아래에 부착된 옆면섬유시트의 인장력 T_w 로 나타낼 수 있다.

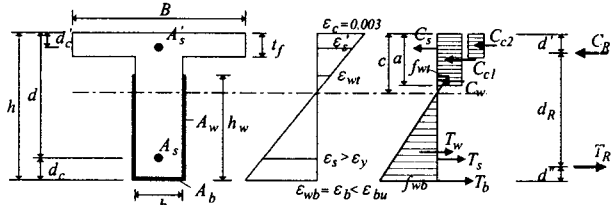


그림 3 중립축이 플랜지와 옆면섬유시트 아래에 위치

$$C_w = f_{wt} t_w [h_w - (h - c)], \quad T_w = f_{wb} t_w (h - c) \quad (11a, b)$$

여기서 t_w 는 옆면섬유시트의 두께이고, f_{wb} 는 식 (4a)에 의해 표현될 수 있다. 중립축 위치는 힘의 평형조건식 (1)에 앞에서 설명한 압축합력과 인장합력을 대입하여 c 에 관한 2차식으로 정리하면 식 (7)과 같아지므로 옆면섬유시트가 중립축 아래에 있는 경우와 같게 됨을 알 수 있다. 공칭모멘트는 식 (8)에 앞의 압축합력과 인장합력을 대입하여 구할 수 있다. 여기서 d' 은 아래와 같이 압축력에 대한 모멘트 평형조건식에 압축부 선단에서 C_w 의 작용 위치까지의 거리 d_w' 를 대입하면 얻을 수 있다.

$$d' = \frac{0.5a C_{c1} + 0.5 t_f C_{c2} + d_c' C_s + d_w' C_w}{C_R} = \frac{0.5a C_{c1} + 0.5 t_f C_{c2} + d_c' C_s + \frac{1}{3}(2h - 2h_w - c) C_w}{C_R} \quad (12)$$

또한, 인장부 선단으로부터 인장합력의 작용위치 d'' 은 아래와 같이 인장력에 대한 모멘트 평형조건에 인장부 선단에서 옆면섬유시트 인장력 T_w 의 작용 위치 d_w 를 대입하면 얻을 수 있다.

$$d'' = \frac{T_s d_c + T_w d_w}{T_R} = \frac{T_s d_c + T_w \frac{h-c}{3}}{T_R} \quad (13)$$

그림 1과 3에서 옆면섬유시트의 보강 높이가 높아지면 $f_{wt} = 0$ 까지는 중립축이 아래로 이동하고 $f_{wt} = 0$ 부터는 중립축이 다시 위로 이동하여 3.1절의 해석 단면 형태 결정을 위한 중립축 위치 판정에서 검토한 바와 같이 서로 상쇄되는 관계에 있다. 한편 공칭모멘트를 구하는 식 (8)에서 옆면섬유시트가 $f_{wt} = 0$ 인 위치보다 높아지면 T_R 과 d'' 은 변하지 않고 d' 이 커지게 되어 d_R 이 작아지므로 공칭모멘트와 극한모멘트도 동시에 작아진다. 그러므로 $f_{wt} = 0$ 인 위치보다 높게 옆면섬유시트를 보강하면 휨강성이 손실된다. 따라서 $f_{wt} = 0$ 인 위치에서 균형상태인 동시에 옆면섬유시트를 최대로 보강할 수 있는 중립축의 상한값 c^* 를 갖는다고 할 수 있다. 결과적으로 옆면섬유시트의 최대로 보강할 수 있는 단면적은 $h = h_w^* + c^*$ 인 옆면섬유시트의 최대 보강높이 h_w^* (또는 h_{wMax})를 구함으로써 아래 식에 대입하여 구할 수 있다.

$$A_{wMax} = h_w^* t_w \quad (14)$$

옆면섬유시트의 최대 보강높이 h_w^* 는 균형상태에 대하여 식 (7)에 재료성질, 힘의 평형조건, 적합조건에 따라 식 (14)와 $h = h_w^* + c^*$ 를 적용한 식에 다시 $f_{wt} = 0$ 과 $c^* = h - h_w^*$ 을 대입하여 h_w^* 에 관한 1차 방정식으로 정리하여 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$h_w^* = \frac{0.85f'_c [b\beta_1 h + (B-b)t_f] + f_y A_s' - f_y A_s - f_{bB} A_b}{0.85f'_c b\beta_1 + f_{wbB} t_w} \quad (15)$$

여기서 균형상태에서의 밀면섬유시트의 응력 f_{bB} 와 옆면섬유시트 최하단 응력 f_{wbB} 는 재료와 변형의 적합조건이 같으므로 그림 3의 변형을 본포도에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$f_{bB} = f_{wbB} = E_F \left[\frac{h}{d} \varepsilon_y + \left(\frac{h}{d} - 1 \right) \varepsilon_{cu} \right] \quad (16)$$

여기서 ε_y 는 철근의 항복변형률, d 는 압축부 선단에서 압축철근 중심까지의 거리이다.

4. 해석결과와 실험결과의 비교

휨 성능에 대한 해석결과를 검증하기 위해 실험결과와 본 연구에서 제안된 식의 계산결과를 비교하였다. 여기서 비교 대상이 되는 실험 모델은 일반적인 형상을 갖는다. 수학적 모델은 실험 부재와 형상의 차이가 나타나므로 근사한 값을 갖게 된다. 표 1은 밀면만 섬유시트로 보강된 RC T형보의 극한하중에 대한 실험값(Wang과 Restreto, 2001)과 해석값을 비교한 결과이고, 그림 4는 밀면과 옆면섬유시트로 랩핑하여 보강된 RC T형보의 극한하중에 대한 실험값(Shahawy 등, 2001)과 해석값을 비교한 결과이다. 여기서 그림 4의 가로축은 옆면섬유시트의 보강 높이이고 괄호안은 사용된 섬유시트의 단수(Layers)를 의미한다. 밀면 보강의 표 1의 실험결과는 섬유시트과파(FP) 및 콘크리트의 전단과파에 의해 해석결과와 약 58%의 큰 차이를 보인다. 그렇지만 밀면과 옆면 보강의 그림 4의 실험결과와 해석결과와의 차이는 약 8.6%로 작은 오차가 나타나며, 부재 하부에 부분적으로 옆면 보강된 경우는 콘크리트의 탈락과파로 약 16.6%의 조금 더 큰 차이를 보인다. 즉 옆면 부착면의 증가로 더 정확한 결과가 예측될 수 있다. 다음 절에서는 이 해석과정을 바탕으로 고강도와 고탄성 섬유시트를 적용하여 보강단면적과 보강높이가 콘크리트보에 미치는 영향을 평가할 것이다.

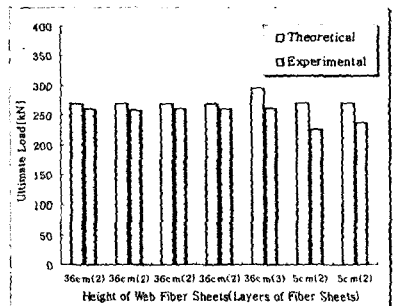


그림 4 밀면과 옆면섬유시트로 보강된 RC T형보의 극한하중 실험값(Shahawy 등, 2001)과 해석값의 비교

표 1 밀면만 섬유시트로 보강된 RC T형보의 극한하중에 대한 실험값과 해석값의 비교

참고문헌	시편	B mm	t _r mm	b mm	d mm	h mm	f' _c MPa	β ₁	A _s mm ²	f _y MPa	A _s ' mm ²	f' _y MPa	A _b mm ²	E _F GPa	f _{wB} MPa	[N.A.] c mm	극한하중(kN)		비교 %
																	계산값	실험값	
Wang과 Restreto (2001)	F1	1007	50	150	456	500	19	0.85	628	325	226	316	120	65	658	33	281.6	180.0	47.2%
	F2	1007	50	150	456	500	19	0.85	628	325	226	316	360	65	658	53	422.4	239.0	68.8%

5. 휨 해석 적용

섬유시트 보강 철근콘크리트보의 휨성능을 평가하기 위해 플랜지 폭 600mm, 플랜지 높이 90mm, 복부 폭 92mm, 유효깊이 340mm, 높이 445mm, 인장철근 단면적 113mm² (D6×4)인 T형 단면의 단철근콘크리트 단면과 표 2의 재료를 적용하였다. 섬유시트는 고강도(High Strength, HS FS)와 고탄성(High Elasticity, HE FS) 두 종류이다. 이 연구에서는 Watson Bowman Acme Corp.(2002)에서 생산되는 Wabo[®]MBrace Fibers의 HS FS와 HE FS를 사용하여 이론적으로 비교하였다. 또한 그림 5와 같이 밀면 전체를 한 겹 보강한 상태를 기준으로 밀면과 옆면을 랩핑하여 보강된 철근콘크리트보에 대해서 극한모멘트를 평가하였다. 한편 결과의 차이가 큰 밀면만 보강한 경우는 비교하지 않는다.

옆면섬유시트의 재료적 성질과 두께는 밀면섬유시트와 동일하게 적용하였다. 보의 밀면에 두께 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5, 1.75, 2.0mm의 섬유시트가 부착된 상태에서 보강높이를 50mm 씩 복부 전체높이까지 증가시켜 모멘트의 변화를 검토하였다. 보강 재료에 따른 섬유시트 보강단면적의 증가에 대한 모멘트 변화를 그림 6에 HS FS와 HE FS를 비교하여 나타내었다. 고탄성 섬유시트가 고강도 섬유시트의 동일한 섬유보강량에 대해 모멘트 증가량이 크게 나타났다. 두 섬유시트 모두 보강량이 증

표 2 재료의 역학적 성질

재료	속성	값	종류	극한강도	탄성계수	파괴변형률
철	탄성계수	27.1 GPa	HE FS	3.52 GPa	0.0095	
	항복강도	440 MPa		3.79 GPa	0.01662	
철	탄성계수	196 GPa	HE FS	3.52 GPa	0.0095	
	항복변형률	0.0022		3.79 GPa	0.01662	

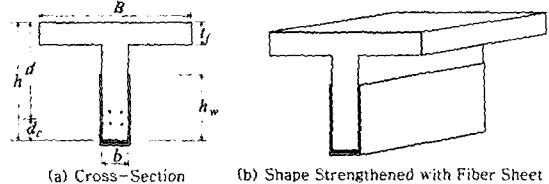


그림 5 휨 해석 적용 단면 및 섬유시트 부착 형상

가할수록 모멘트의 증가비가 감소하였다. 그림 7과 8은 각각 HS FS와 HE FS에 대하여 T형보 복부 전체에 걸쳐 변화하는 섬유시트의 보강높이와 극한모멘트의 관계를 나타낸다. 약 0-150mm(전체 높이의 약 1/3) 구간까지는 섬유시트의 보강높이에 따라 모멘트가 증가되지만, 150mm 이후로는 모멘트의 변화가 거의 없거나 감소되는 경향을 나타낸다. 또한, 그림 7, 8의 두께 1.25, 1.5, 1.75, 2.0mm에서 중립축이 플랜지와 옆면섬유시트 아래에 있는 경우 옆면섬유시트 높이가 h_w^* 인 위치까지 모멘트가 증가되고 h_w^* 부터는 모멘트가 감소됨을 알 수 있다.

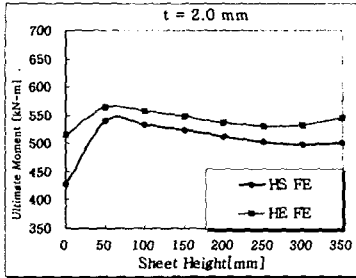


그림 6 보강재료에 따른 보강높이와 극한모멘트 관계

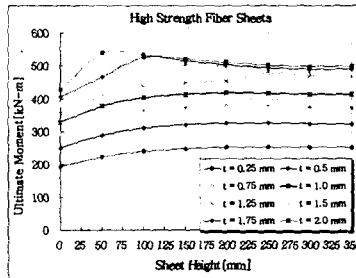


그림 7 보강높이와 극한모멘트 관계 [HS FS]

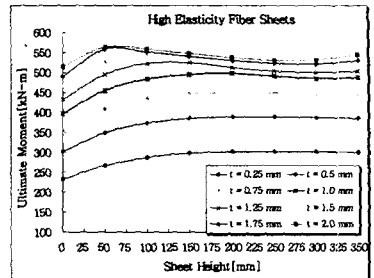


그림 8 보강높이와 극한모멘트 관계 [HE FS]

6. 결 론

손상된 T형 철근콘크리트보의 밀면과 옆면을 섬유시트로 보강한 후의 휨 강도를 해석하였다. 철근콘크리트의 강도설계법의 기준을 바탕으로 밀면과 옆면이 U형으로 보강된 경우에 대하여 섬유시트의 부착이 철근콘크리트보의 휨모멘트에 미치는 영향을 평가하였다. 실험결과와의 비교에서 알 수 있듯이 밀면만 섬유시트로 보강하는 경우는 섬유시트파괴나 섬유시트의 박리파괴, 그리고 콘크리트의 전단 및 탈락파괴가 없을 때에만 본 연구에서 제안한 해석방법을 적용할 수 있다. U형 보강의 경우 부착단면적의 확보와 균열의 제어 효과로 보의 밀면만 섬유시트로 보강되었을 때 발생하는 부착파괴와 전단 및 탈락파괴를 막을 수 있고, 부수적으로 휨 보강효과도 얻을 수 있다. 이때 휨 보강효과는 섬유시트의 옆면 부착높이가 전체높이의 1/3 또는 h_w^* 에서 최대가 된다. 추가적으로 T형 철근콘크리트보가 인장파괴의 범위를 갖고 섬유시트의 박리파괴와 콘크리트의 탈락 및 전단파괴를 방지하도록 하는 옆면섬유시트의 적절한 보강단면적 및 보강위치 등에 관한 연구가 필요하며, 직사각형 단면에 비하여 일반적인 T형 단면 철근콘크리트보의 밀면과 옆면섬유시트의 보강에 대하여 많은 실험 연구가 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

1. Bencardino, F., Spadea, G. and Swamy, N. (2002). "Strength and ductility of reinforced concrete beams externally reinforced with carbon fiber fabric," *Structural Journal*, 99(2), 163-171.
2. Deniand, C. and Cheng, J.J.R. (2001). "Shear Behavior of reinforced concrete T-beams with externally bonded fiber-reinforced polymer sheets," *Structural Journal*, 98(3), 386-394.
3. El-Mihilmy, M.T. and Tedesco, J.W. (2000). "Analysis of reinforced concrete beams strengthened with FRP laminate," *Journal of Structural Engineering*, 126(6), 684-691.
4. Hag-Elsafi, O., Alampalli, S. and Kunin, J. (2001). "Application of FRP laminates for strengthening of a reinforced-concrete T-beam bridge structure," *Composite Structures*, 52, 453-466.
5. Neale, K.W. (2000). "FRPs for structural rehabilitation : A survey of recent progress," *Progress in Structural Engineering and Materials*, 2, 133-138.
6. Shahawy, M., Chaallal, O., Beitelman, T.E. and El-Saad, A. (2001). "Flexural strengthening with carbon fiber-reinforced polymer composites of preloaded full-scale girders," *Structural Journal*, 98(5), 735-742.
7. Wang, Y.C. and Restreto, J.I. (2001). "Response of RC T-Beams strengthened for flexure with staggered CFRP plates," *Journal of Composites for Construction*, 5(3), 188-199.
8. Watson Bowman Acme Corp. (2002). "Wabo[®]MBrace composite strengthening system," *Engineering Design Guidelines*.