

FRP시트를 이용한 보강 철근콘크리트보의 휨 거동

Flexural Behavior of Strengthened RC Beams Using FRP Sheets

박 대 효* 부 준 성**
Park, Taehyo* Bu, Junseong**

ABSTRACT

This paper investigates the flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with externally bonded fiber reinforced plastic (FRP) sheets is investigated in this work. FRP is attractive for strengthening the RC beams due to its good tensile strength, low weight, resistance to corrosion, and easy applicability. A simple and direct analytical procedure for evaluating the ultimate flexural capacity of FRP strengthened reinforced concrete (SRC) beams is presented using the equilibrium equations and compatibility of strains. Upper and lower limits of FRP sheet area to ensure the ductile behavior are established. A parametric study is conducted to investigate the effects of design variables such as sheet area, sheet stiffness and strength, concrete compression strength, and steel reinforcement ratio. The analytical procedure is compared with results of experimental data available in the literature.

1. 서론

국내의 약 15,615개 교량 중 철근콘크리트교(Reinforced Concrete, RC)가 81%, 프리스트레스트 콘크리트(Prestressed Concrete, PC)교가 11%, 강교가 6.5%, 기타교량이 1.5% 정도이다. 국내교량의 81%를 차지하는 RC교의 대부분은 30년 이상된 구조물로 동결융해, 중성화, 침식, 염해, 강재부식의 열화(Deterioration), 설계, 시공, 유지관리상의 결함(Defect) 또는 초과하중, 충돌, 화재의 손상(Damage)에 의해 구조적 또는 기능적 결점을 내재하고 있다. 이러한 손상된 교량의 안전성과 내구성 확보와 현재의 과도한 교통량과 중차량의 하중을 고려한다면 반드시 적당한 방법을 이용하여 보강되어야 한다. 최근들어 RC구조물의 보강방법으로 섬유시트보강공법이 널리 활용되어가고 있는 추세이다.

섬유보강재(Fiber Reinforced Plastic, FRP)의 역학적 성질에 대해서는 많은 연구가 수행되었지만, 기존 건설재료와 FRP재료로 합성된 보강철근콘크리트 구조물의 성능을 평가하는 체계적인 이론연구는 상대적으로 미흡한 편이다.

W. An(1991)등은 FRP판으로 보강된 철근콘크리트보의 응력과 변형을 파악하기 위해 변형의 적합성과 힘의 평형을 이용한 해석모델을 제안하였으며, M.T. El-Mihilmy(2000)등은 FRP적층판으로 보강된 단철근보, 복철근보, T형보의 휨거동에 대해 극한 휨모멘트 내하력을 평가하는 해석방법을 제시하였다. N. F. Grace(1999)는 수평보강시트와 U형 수직보강시트로 보강한 RC보를 4점재하시험한 결과 모멘트 내하력의 증가와 처짐의 감소 효과가 있었으며, 수직보강재를 보의 전길이에 보강한 경우 수평보강시트의 휨파괴 가능성을 감소시킬 수 있는 결과를 얻었다.

본 연구에서는 철근콘크리트보의 휨 해석과 설계과정을 이용하여 FRP시트 보강 철근콘크리트보의 휨 보강효과를 검토한다. 콘크리트와 FRP시트의 취성파괴를 피하고 철근의 연성파괴가 발생하게 하기 위한 FRP시트의 최대·최소값을 산정하며, FRP의 종류에 따른 역학적 성질과 보강량, 콘크리트의 압축강도, 철근비를 설계변수로 하여 보강 철근콘크리트보의 거동을 해석하고, 기존 논문의 실험결과와 비교 검토한다.

*정회원, 한양대학교 토목공학과 조교수

**정회원, 한양대학교 토목공학과 석사과정

2. 섬유보강시트로 보강된 철근콘크리트의 휨 해석

2.1 섬유보강시트로 보강된 철근콘크리트보의 휨 파괴

FRP시트로 보강된 철근콘크리트보(Strengthened Reinforced Concrete Beams, SRC)는 FRP시트의 변형률 상태에 따라 세 가지 유형의 휨 파괴형태를 보인다. 첫 번째는 철근의 항복과 시트의 파괴 전에 압축부의 콘크리트가 파괴되는 압축파괴(Concrete Crushing, 그림1(a)), 두 번째는 철근이 항복 후 FRP시트가 파괴되는 FRP파괴(FRP Rupture, 그림1(b)), 세 번째는 철근이 항복 후 콘크리트의 압축파괴가 발생하는 철근의 인장파괴(Tension Failure of Steel, 그림1(c))이다. 그림1은 SRC보의 콘크리트, 철근, FRP시트의 변형률에 따른 중립축의 변화와 휨파괴의 유형을 나타낸다. 취성적 파괴를 나타내는 콘크리트의 압축파괴는 FRP시트가 과다하게 보강된 경우에 발생하므로 FRP시트의 단면적을 상한값 이내로 제한하여 방지할 수 있으며, FRP시트의 보강량이 적을 경우에는 FRP시트가 인장파괴되므로 하한값 이상으로 보강하여야 한다. 가장 효과적인 보강 설계의 개념은 FRP보다 연성이 우수한 철근이 항복된 후 콘크리트의 압축파괴가 발생하는 철근의 인장파괴형태이다.

FRP시트로 보강된 철근콘크리트보를 강도설계법의 기준과 아래의 가정을 바탕으로 하여 해석하였다.

1. 단면의 변형률의 분포는 선형적이며, 콘크리트의 압축부의 최대변형률은 0.003으로 가정한다.
2. 콘크리트의 인장응력은 무시하고 압축응력은 $0.85f'_c$ 으로 일정하게 깊이 $a = \beta_1 c$ 까지 등분포하는 등가 직사각형 응력분포로 가정한다.
3. 철근은 항복점 이하는 탄성거동을 하고 항복 후에는 완전소성으로 가정한다.
4. FRP시트는 파괴시까지 선형탄성 거동을 한다
5. 콘크리트, 철근, FRP시트는 완전 부착되어 일체화 거동을 한다.

여기서 f'_c 는 콘크리트의 압축강도, c 는 압축선단에서 중립축까지의 거리, β_1 은 f'_c 이 30MPa를 초과하는 경우에는 $\beta_1=0.85$ 에서 1MPa 증가시 0.008씩 감소시켜야하고, 0.65이상이어야 한다.

그림2은 FRP시트의 단면적과 중립축의 관계를 나타내며, FRP시트의 단면적이 증가할수록 압축부 선단에서 중립축까지의 거리는 증가한다. 좌우측의 점선은 최대·최소 보강단면적의 한계값을 나타내며, FRP시트의 단면적이 이 한계값이내일 경우 SRC보의 휨 파괴는 인장철근의 연성파괴에 지배된다. 중립축의 상한과 하한을 나타내는 c_{max} 와 c_f 는 그림1에서 삼각형비를 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$c_{max} = \frac{a_{max}}{\beta_1} = 0.75 d \frac{0.003}{0.003 + \epsilon_y}, \quad c_f = \frac{a_f}{\beta_1} = d_f \frac{0.003}{0.003 + \epsilon_{fu}} \quad (1a,b)$$

여기서 ϵ_y 는 철근의 항복변형률, ϵ_{fu} 는 FRP시트의 극한변형률이다.

2.2 보강 단철근 콘크리트보(Strengthening of Singly Reinforced Concrete Beams : SSRC)

그림 3.의 FRP시트로 보강된 단철근 콘크리트보에서 힘의 평형에 의해 아래의 식이 성립된다.

$$C_c = T_R \quad (2)$$

여기서 C_c 는 콘크리트의 압축력, T_R 는 단면에 작용하는 인장합력을 나타낸다. 콘크리트의 압축력은 등가 직사각형 응력분포의 가정에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$C_c = 0.85 f'_c b a \quad (3)$$

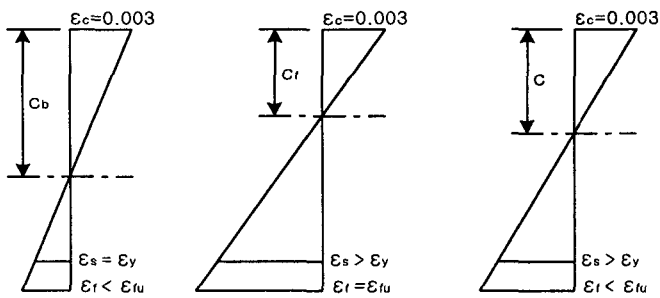
인장합력은 철근의 인장력 T_s 과 FRP시트의 인장력 T_f 의 합으로 다음과 같다.

$$T_R = T_s + T_f \quad (4)$$

그림 3.으로부터 모멘트 평형조건에 의해 T_s 와 T_R 에 대해서 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$T_s(d_f - d) = T_R d'' \quad (5)$$

여기서 d_f 는 압축선단에서 FRP시트의 중심까지의 거리, d 는 압축선단에서 인장철근의 중심까지의 거리, d'' 는 인장합력의 작용점에서 FRP시트 중심까지의 거리이다. SRC보의 공칭모멘트 M_n 는 콘크



(a)콘크리트압축파괴 (b)FRP시트파괴 (c)철근인장파괴

그림 1 변형률 분포도

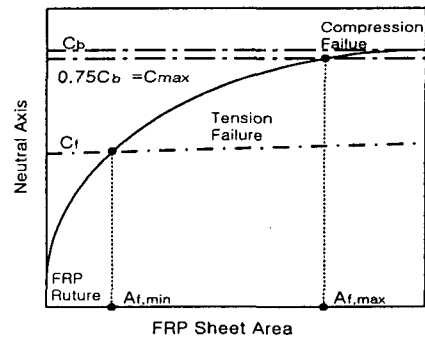


그림 1 FRP시트의 단면적과 중립축의 관계

리트의 압축력과 인장압력 사이의 거리 d_R 를 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$M_n = T_R d_R = C_c d_R \quad (6)$$

여기서 $d_R = d_f - 0.5a - d''$ 이다.

식(3)의 a 를 식(6)에 대입하면 T_R 에 대한 이차식을 얻을 수 있으며, 이 식을 풀면 다음과 같다.

$$T_R = a(d_f - d'') - \sqrt{a^2(d_f - d'')^2 - 2aM_n} \quad (7)$$

여기서 $a = 0.85f'_c b$ 이다. 등가 직사각형 응력깊이와 중립축의 위치는 아래와 같이 구할 수 있다.

$$a = \beta_1 c = \frac{T_R}{0.85f'_c b} \quad (8)$$

철근의 항복상태에서 FRP시트의 과단변형률 도달여부에 따라 철근과 FRP시트의 인장력은 표1과 같이 구할 수 있으며, FRP시트의 응력 f_f 은 아래의 식으로 나타낼 수 있다.

$$f_f = E_f \epsilon_f = 0.003 E_f \frac{d_f - c}{c} \quad (9)$$

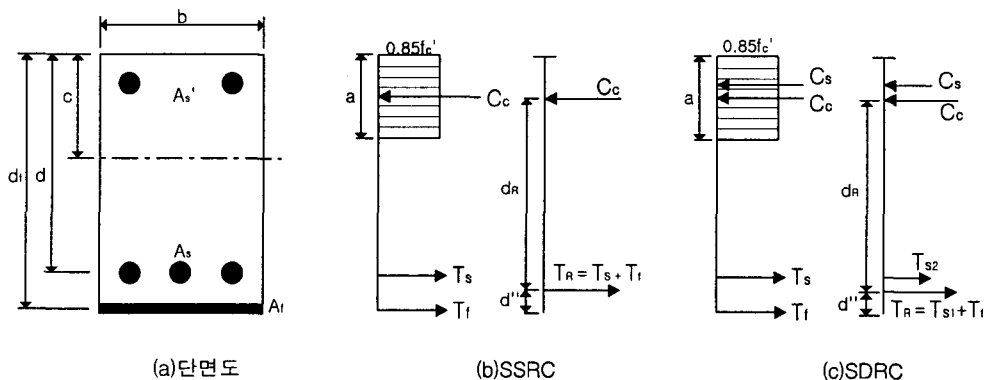
여기서 E_f 는 FRP시트의 섬유방향 탄성계수이고, ϵ_f 는 FRP시트의 변형률이다.

2.3 보강 복철근 콘크리트보(Strengthening of Doubly Reinforced Concrete Beams : SDRC)

그림 3의 FRP시트로 보강된 복철근 콘크리트보에서 평형조건에 의해 아래의 관계가 성립된다.

$$C_c + C_s = T_{s1} + T_f + T_{s2} \quad (10)$$

여기서 C_s 는 철근의 압축력, T_{s1} 은 인장철근에서 압축철근에 대응되는 부분을 제외한 나머지 철근



(a)단면도

(b)SSRC

(c)SDRC

그림 3 보강 철근콘크리트보

의 인장력, T_{s2} 는 압축철근에 대응되는 철근의 인장력으로 각각 다음과 같다.

$$T_{s1} = (A_s - A_s')f_y \quad (11)$$

$$T_{s2} = C_s \quad (12)$$

여기서 A_s 는 인장철근의 단면적, A_s' 는 압축철근의 단면적, f_y 는 철근의 항복응력이다. 복철근보의 인장합력과 콘크리트의 압축력은 각각 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$T_R = T_{s1} + T_f \quad (13)$$

$$C_c = 0.85f_c'ba \quad (14)$$

공칭모멘트는 T_R 와 C_c 의 우력모멘트와 C_s 와 T_{s2} 의 우력모멘트의 합으로 아래와 같다.

$$M_n = T_R d_R + T_{s2}(d - d_c') \quad (15)$$

여기서 d_c' 은 압축철근의 덮개이며, SSRC보의 경우와 유사하게 인장합력 T_R 을 아래와 같이 얻는다.

$$T_R = \alpha(d_f - d'') - \sqrt{\alpha^2(d_f - d'')^2 - 2\alpha[M_n - T_{s2}(d - d_c')]} \quad (16)$$

SDRC보의 등가 직사각형 응력의 깊이와 중립축의 위치는 식(16)의 T_R 을 식(8)에 대입하여 구할 수 있다. FRP시트로 보강된 복철근 콘크리트보에서 인장철근의 항복후 압축철근과 FRP시트의 변형률 조건에 따른 각각의 경우에 대해서 철근과 FRP시트의 인장력과 철근의 압축력은 표1과 같이 구할 수 있다. f_s' 는 압축철근의 응력을 나타내며 변형률분포도의 삼각형비를 이용하여 다음과 같이 주어진다.

$$f_s' = E_s \epsilon_s' = 0.003 E_s \frac{c - d_c'}{c} \quad (17)$$

여기서 ϵ_s' 은 압축철근의 변형률이다.

표 1 SRC보의 변형률조건에 따른 철근의 인장력과 압축력 및 FRP시트의 인장력

	Strain Condition		Tension		Compression	Failure Mode
	FRP sheet	Compression Steel	Steel	FRP Sheet	Steel	
SDRC	$\epsilon_f < \epsilon_{fu}$	-	$T_s = A_s f_y$	$T_f = A_f f_f$	-	Tension Failure
	$\epsilon_f = \epsilon_{fu}$	-	$T_s = A_s f_y$	$T_f = A_f f_{fu}$	-	FRP Rupture
SSRC	$\epsilon_f < \epsilon_{fu}$	$\epsilon_s' = \epsilon_y$	$T_s = A_s f_y$	$T_f = A_f f_f$	$C_s = A_s' f_y$	Tension Failure
	$\epsilon_f < \epsilon_{fu}$	$\epsilon_s' < \epsilon_y$	$T_s = A_s f_y$	$T_f = A_f f_f$	$C_s = A_s' f_s'$	Tension Failure
	$\epsilon_f = \epsilon_{fu}$	$\epsilon_s' = \epsilon_y$	$T_s = A_s f_y$	$T_f = A_f f_{fu}$	$C_s = A_s' f_y$	FRP Rupture
	$\epsilon_f = \epsilon_{fu}$	$\epsilon_s' < \epsilon_y$	$T_s = A_s f_y$	$T_f = A_f f_{fu}$	$C_s = A_s' f_s'$	FRP Rupture

3. FRP시트 단면적의 설계

FRP시트의 보강단면적 A_f 에 따라 아래의 휨 파괴형태 중 하나를 나타낸다.

1. $A_{f,\min} < A_f < A_{f,\max}$ ⇒ Tension Failure
2. $A_f \leq A_{f,\min}$ ⇒ FRP Rupture
3. $A_f \geq A_{f,\max}$ ⇒ Concrete Crushing

FRP시트 최대값과 최소값은 SRC보가 인장철근의 연성파괴에 지배되기위한 범위(그림1(c))를 나타내며, 최대값은 평형상태의 변형률 조건(그림1(a))과 관련되고, 최소값은 FRP시트의 변형률이 극한변형률에 도달한 경우(그림1(b))와 관련된다. FRP시트의 최소, 최대 단면적은 식(2)과 (10)로부터 단철근의 경우 식(18a,b), 복철근의 경우 식(19a,b)으로 각각 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$A_{f, \min} = \frac{0.85f'_c ba_f - A_s f_y}{f_{fu}}, \quad A_{f, \max} = \frac{0.85f'_c ba_{\max} - A_s f_y}{f_{fb}} \quad (18a, b)$$

$$A_{f, \min} = \frac{0.85f'_c ba_f + A'_s f'_s - A_s f_y}{f_{fu}}, \quad A_{f, \max} = \frac{0.85f'_c ba_{\max} + A'_s f'_{sb} - A_s f_y}{f_{fb}} \quad (19a, b)$$

여기서 f_{fu} 는 FRP시트의 극한강도이고, f_{fb} 는 변형률평형조건에서 FRP시트의 응력으로 아래와 같다.

$$f_{fb} = 0.003 E_f \frac{d - c_b}{c_b} \leq f_{fu} \quad (20)$$

SRC보의 FRP시트 단면적은 단철근과 복철근의 경우에 대해 각각 아래와 같이 주어진다.

$$A_f = \frac{0.85f'_c ba - A_s f_y}{f_f}, \quad A_f = \frac{0.85f'_c ba + A'_s f'_s - A_s f_y}{f_f} \quad (21a, b)$$

위의 식으로부터 계산된 FRP시트 단면적이 최대값과 최소값 범위내에 있다면 SRC보는 철근의 인장 파괴에 지배되며, 최소값이하이면 FRP시트의 인장파괴, 최대값이상이면 콘크리트의 취성파괴가 발생된다.

4. 설계변수의 검토

보강 철근콘크리트보에 대해 FRP시트의 단면적과 콘크리트 단면적의 비인 FRP보강비(A_f/bd), 철근비(A_s/bd), 콘크리트 압축강도의 설계변수와 SRC보의 극한모멘트의 관계는 그림4, 5, 6의 결과와 같이 비교될 수 있으며, RC보의 단면은 폭 150mm, 유효높이 400mm, 높이 450mm이다.

그림4.은 콘크리트압축강도 41.4MPa, 철근비 0.005의 RC보에 극한강도 3.5GPa, 탄성계수 228GPa의 고강도FRP와 극한강도 2.9GPa, 탄성계수 372GPa의 고탄성FRP로 보강된 SRC보의 극한모멘트와 FRP시트보강비와의 관계를 나타낸다. 실선과 점선은 각각 고탄성FRP와 고강도FRP를 사용한 SRC보의 극한모멘트 증가량을 나타낸다. 두 경우 모두 섬유보강비가 증가함에 따라 극한모멘트는 증가하며, 고탄성FRP의 경우가 모멘트 증가량이 더 크다. FRP보강비가 증가할수록 모멘트의 증가비는 감소된다.

그림5.은 콘크리트압축강도 41.4MPa의 RC보를 고탄성FRP를 이용하여 FRP보강비 0.005, 0.010, 0.015로 보강한 3개의 SRC보와 RC보에 대해서 철근비와 극한모멘트의 관계를 나타낸다. RC보의 경우는 철근비가 증가함에 따라 극한모멘트가 증가하지만, 고탄성FRP로 보강한 SRC보의 경우는 철근비의 증가에 의한 극한모멘트의 향상에 효과가 없음을 알 수 있다. 그림4.의 경우와 같이 FRP보강비의 증가에 의해 극한모멘트가 증가시됨을 확인할 수 있다.

그림6.은 철근비 0.015의 RC보를 고강도FRP를 이용하여 FRP보강비 0.005, 0.010, 0.015로 보강한 3개의 SRC보와 RC보에 대해서 콘크리트압축강도증가에 따른 극한모멘트의 변화를 나타낸다. RC보의 경우 콘크리트압축강도가 증가에 의한 극한모멘트의 향상에 효과가 없지만, SRC보의 경우 각각의 섬유보강비에 대해 콘크리트압축강도가 증가함에 따라 극한모멘트의 증가함을 알 수 있다. 이러한 SRC

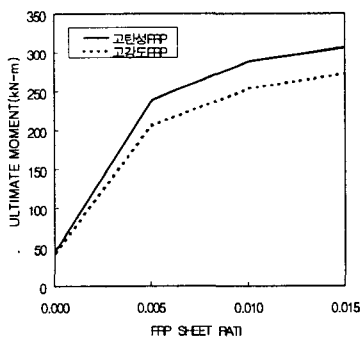


그림 4 FRP보강비와 극한모멘트

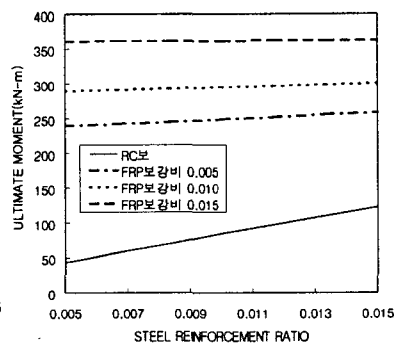


그림 5 철근비와 극한모멘트

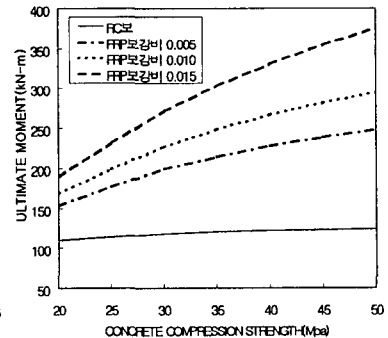


그림 6 압축강도와 극한모멘트

보의 반응은 교량 상판의 교체시 고강도 콘크리트를 대체사용하고 보의 밑면에 FRP시트를 보강함으로써 극한모멘트 내하력의 증가에 효과적으로 활용될 수 있다.

5. 해석결과와 실험의 비교

단면해석과정의 결과를 검증하기 위해 기존 논문의 실험 결과(P. A. Ritchie(1991), A. Sharif(1994), C. A. Ross(1999))와 본 연구에서 제안된 식의 계산 결과를 비교하였다. 기존 논문의 실험결과는 4점재하시험에 의한 것이며, 에폭시를 이용하여 철근콘크리트보의 밑면에 FRP시트를 부착하였다. 그림 7, 8은 각각 SRC보와 RC보의 실험값과 계산값의 차이를 $\pm 20\%$ 의 범위에 대해서 비교한 것으로 FRP시트로 보강된 철근콘크리트보의 극한하중의 계산값이 실험결과와 큰 차이가 없음을 보여준다. SRC보의 단면해석의 계산결과와 실험 결과의 절대치의 평균차이는 약 14.1%정도이며, 이는 기존 RC보의 실험결과와 계산결과와의 차이 23.3%와 비교해보면 단면 해석결과가 적절함을 보여주는 결과이다.

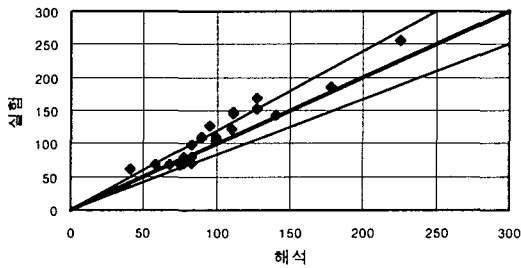


그림 7 SRC보의 해석과 실험 결과비교

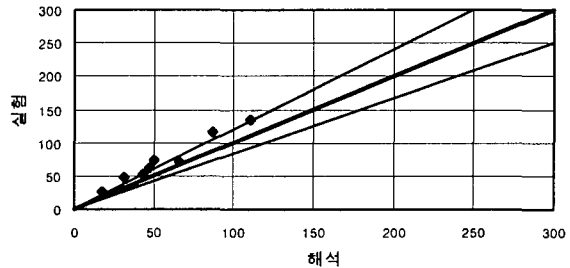


그림 8 RC보의 해석과 실험 결과비교

6. 결론

FRP시트로 보강된 SRC보에서 FRP보강비를 증가시킬수록 극한모멘트의 크기는 증가하나, 증가비는 감소되어진다. SRC보가 철근의 인장파괴에 지배되기 위한 FRP시트의 단면적과 중립축의 최대·최소한계치를 나타내었으며, 최대값이상이면 콘크리트의 압축파괴가 발생되고, 최소값이하이면 FRP시트가 파괴된다. SSRC와 SDRC보에 대해 극한모멘트 계산식이 FRP시트의 인장력과 철근의 인장력의 합력을 이용하여 유도되었으며, FRP시트를 이용한 RC보의 보강에 있어 적절한 보강단면적과 보강효과를 예측할 수 있다.

REFERENCE

1. W. An, H. Saadatmanesh and M. R. Ehsani. (1991). "RC beams strengthened with GFRP plates. II: Analysis and parametric study." J. of Structural Engineering, ASCE, 117(11), 3434-3455.
2. N. F. Grace, G. A. Sayed, A. K. Soilman and K. R. Saleh. (1999). " Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Fiber Reinforced Polymer (FRP) Laminates." Structural Journal, ACI, 96(5), 865-874.
3. P. A. Ritchie, D. A. Thomas, L. Lu and G. M. Connelly, (1991). "External reinforcement of concrete beams using fiber reinforced plastics." Structural Journal, ACI, 88(4), 490-500.
4. A. Sharif, G. J. Al-Sulaimani, I. A. Basunbul, M. H. Baluch, and B. N. Ghaleb, (1994). "Strengthening of initially loaded reinforced concrete beams using FRP plates." Structural Journal, ACI, 91(2), 160-168.
5. C. A. Ross, D. M. Jerome, J. W. Tedesco, and M. L. Hughes, (1999). "Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Externally Bonded Composite Laminates." Structural Journal, ACI, 96(2), 212-220.
6. M. T. El-Mihilmy and J. W. Tedesco. (2000). "Analysis of reinforced concrete beams strengthened with FRP laminates." J. of Structural Engineering, ASCE, 126(6), 3434-3455.