

FRP 시트로 보강된 RC 보의 보강 효과에 대한 이론적 분석

하상수^{1*}

Theoretical Analysis for Strengthening Effects of RC Beam with Reinforced FRP Sheet

Sang-Su Ha^{1*}

Abstract: The objective of this study is to assess the strengthening effects of fiber reinforced polymer(FRP) sheets such as Carbon fiber, Glass fiber, and PET(polyethylene terephthalate) on reinforced concrete flexural members. Variables of theoretical analysis are types of strengthening materials, material properties and amount of strengthening materials. A virtual flexural member without FRP sheets was created as a control specimen to understand the structural behavior of the non-strengthened specimen in terms of elastic and ultimate cross section. In total, 11 specimens including one non-strengthened and ten strengthened specimens were investigated. Various variables such as types of strengthening, strengthening properties, and amount of strengthening were studied to compare the behavior of the control specimen with those of strengthened specimens with regard to moment-curvature relationship. Results of theoretical analysis showed that the moment capacity of strengthened specimens was superior to that of the control specimen. However, the control specimen indicated the best ductility among all the specimens. As the amount of strengthening increased, flexural performance was improved. Furthermore, the results indicated that the ductile effect of members was affected by the ultimate strain of FRP sheets. The strengthening effect on the damaged member was similar to that on the non-damaged one since there was less than 10% difference in terms of flexural strength and ductility. Therefore, even if a damaged member is treated as non-damaged for analysis there is probably no noticeable difference.

Keywords: Carbon fiber, Glass fiber, PET(polyethylene terephthalate), standard specimen, elastic cross section, ultimate cross section, moment-curvature curve, strengthening effect

1. 서론

극한강도 설계법으로 설계된 철근콘크리트 구조물에서 실제 작용하는 하중이 설계하중을 초과하게 되면 그 구조물은 구조적으로 불안정한 상태에 도달되어 적절한 보강이 이루어져야 한다. FRP 시트를 이용한 보강방법은 주로 휨을 받은 보 또는 휨과 압축을 동시에 받는 기둥을 대상으로 이루어졌다. 휨을 주로 받는 보의 경우, 휨보강과 전단보강으로 구분하고, 휨보강은 다시 세분화하여 부모멘트가 발생하는 보 단부의 상부면에 휨보강(상부 주철근과 동일방향)하는 경우와 정모멘트가 발생하는 보 중앙부의 하부면에 휨보강(하부 주철근과 동일방향)하는 경우로 구분하여 진행되었다. 보의 전단보강은 전단력이 크게 발생하는 보 단부의 측면(스터럽과 동일방향)을 보강함으로써 부족한 전단력에 저항할 수 있도록 보

강하였다.¹⁾ 보와 달리 휨과 압축을 동시에 받는 기둥의 경우는 대부분 기둥주위를 시트로 감싸는 방식으로 보강이 이루어졌는데, 이는 띠철근이나 나선철근의 역할과 같이 기둥의 주철근을 구속함으로써 강도 및 연성을 증진시키기 위한 보강 방법이다.^{2)~4)} 건설현장에서 구조물의 보강은 크게 2가지 경우로 나누어 이루어지고 있다. 첫 번째는 구조물의 증축이나 리모델링, 용도변경, 내진성능 확보 등으로 인하여 기존의 설계하중이 증가하여 보강하는 경우이며, 두 번째는 기존구조물이 환경적인 영향이나 물리적인 하중에 지속적으로 노출되면서 구조물에 균열이나 변형이 발생되어 구조물이 가지고 있는 구조성능이 저하되어 보강이 필요한 경우이다. 전자의 경우는 보강하기 전에 구조물에 구조적 손상이 발생되기 전에 이루어지는 경우이고, 후자의 경우는 구조물에 손상이 어느 정도 진행된 상태이거나 지속적으로 진행되고 있는 경우이므로 동일한 보강방법이라 할지라도 전자와 후자의 보강효과는 다르게 나타나게 된다. 실제 건설현장에서의 보강은 후자인 경우로서 구조물에 손상이 발생된 경우에 보강이 이루어지고 있는 상황이며, 증축이나 리모델링 등 설계하중의 증가로 보강하는 경우는 보강의 개념보다는 FRP 시트 공법이 아닌 단면증설법이나 강판보강 등 다른 공법을 적용하거나

¹정희원, 강남대학교 부동산건설학부(도시건축융합공학), 부교수

*Corresponding author: knuhss@kangnam.ac.kr

Division of Real Estate and Construction Engineering(Major in Urban Planning and Architecture Engineering), associate professor, Address : 40, Gangnam-ro, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do, 16979, Korea)

•본 논문에 대한 토의를 2018년 8월 1일까지 학회로 보내주시면 2018년 9월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

기둥이나 전단벽 등의 구조부재를 신설함으로써 추가된 하중에 저항하도록 하는 것이 보다 경제적이다. 그럼에도 불구하고 대부분의 보강에 대한 기준문헌이나 관련기준은 손상되지 않은 온전한 상태를 기준으로 하여 진행해 오고 있는 실정이며, 손상이 진행된 상태에서의 보강에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 FRP 시트로 보강된 휨부재가 상단면을 이용하여 동일한 조건에서 손상 전과 손상 후를 보강했을 때 보강효과를 비교하고, 보강재 종류, 보강재 물성, 보강량 등 다양한 변수가 휨보강 효과에 어떠한 영향을 미치는지 파악하는 것이 본 연구의 목적이다.

2. 이론 연구계획

2.1 보강부재 선정

본 연구에 사용하고자 하는 기준실험체를 선정하기 위해 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 기둥간격이 8.1m이고, 큰 보 중간에 작은 보 2개가 설치되어 있는 골조시스템의 기준평면을 이용하였다. 설계하중은 활하중과 고정하중의 하중조합으로 가정하였으며, 활하중은 $3kN/m^2$, 고정하중은 자중 및 칸막이벽 등을 고려하여 $5kN/m^2$ 로 가정하였다. 콘크리트 설계기준 압축강도 및 철근의 항복강도는 각각 $24MPa$, $400MPa$ 를 적용하였다. Fig. 1에 표시된 A부재와 B 부재는 본 연구에서 기준실험체를 결정하기 위해 선정한 것이며, 각 부재의 최대 휨모멘트(M_u)에 대한 단면크기 및 배근에 따른 설계모멘트(ϕM_n)를 Table 1에 나타내었다. Table 1에 나타낸 바와 같이 A 부재는 큰 보에 설치된 작은 보로 양단부에 모멘트가 발생되지 않는 단순보로 가정하여 중앙부에서의 최대 휨모멘트(M_u)는 $w_u \times l^2/8$ (Fig. 2 참조)으로 산정하였으며, B 부재는 기둥과 강접합된 고정보로 보 단부에서의 부모멘트와 보 중앙부에서의 정모멘트 값은 각각 $-2 \times P_u \times l/9$, $P_u \times l/9$ (Fig. 3 참조)로 산정하였다.

A 부재는 단순보 형태이므로 지점을 제외한 모든 구간에서 정모멘트가 발생하고, B 부재는 양단 고정보 이므로 양 단부에서 부모멘트가 발생하고, 중앙부에서는 정모멘트가 발생한다. 따라서 A, B 부재에 휨 보강이 필요한 경우에는 A 부재에서는 정모멘트가 발생하는 보 하부에 휨 보강(Fig. 2 참조)을 실시하고, B 부재에서는 보 단부와 중앙부로 나누어 단부에는 보 상부에 보강하고, 중앙부에는 보 하부에 휨 보강(Fig. 3 참조)을 실시해야 한다. 또한, Fig. 2와 Fig. 3에 설계하중을 초과하는 하중에 의해 추가된 모멘트 빗금 친 부분으로 나타내었으며, 추가된 모멘트에 저항할 수 있도록 적절한 보강이 이루어져야 한다.

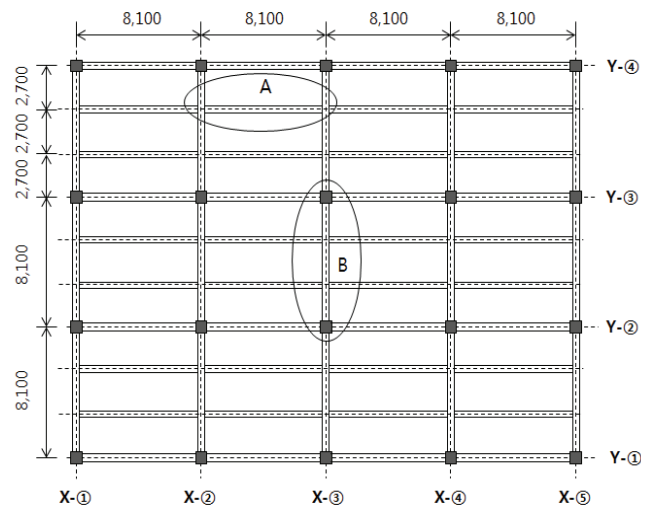


Fig. 1 Standard plane for target flexural members

Table 1 Design bending moment of selected members

Member	w_u * ¹⁾ [kN/m]	M_u [kN.m]	b [mm]	d [mm]	A_s [mm ²]	ρ	ϕM_n * ⁵⁾ [kN.m]
A 부재	-	0	350	439	2-D10	0.0129	82.9
	+	222* ²⁾			5-D22	0.0101	251
B 부재	-	-395* ³⁾	350	587	5-D25	0.0123	441
	+	198* ⁴⁾			4-D22	0.0038	207

*¹⁾: $29.2kN/m = 2.7m \times (1.2w_D + 1.6w_L)$ ($w_D: 5kN/m^2, w_L: 3kN/m^2$) *²⁾

$$: \frac{w_d^2}{8} = \frac{29.2 \times 7.8^2}{8} = 222kN.m,$$

$$*^3): \frac{2P_u l}{9} = -\frac{2 \times 227.8 \times 7.8}{9} = -395kN.m (P_u = w_u \times l)$$

$$*^4): \frac{P_u l}{9} = \frac{227.8 \times 7.8}{9} = 198kN.m (P_u = w_u \times l)$$

$$*^5): \phi M_n = 0.85 \times A_s f_y (d - a/2),$$

$$(a = A_s f_y / (0.85 f_{ck} b), f_y = 400MPa, f_{ck} = 24MPa)$$

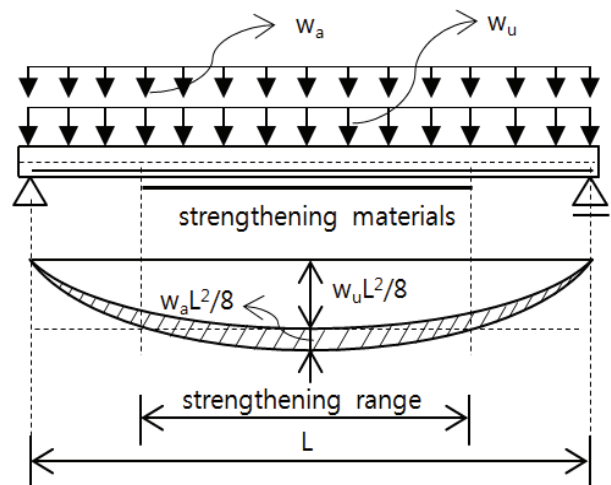


Fig. 2 Moment diagram of A member

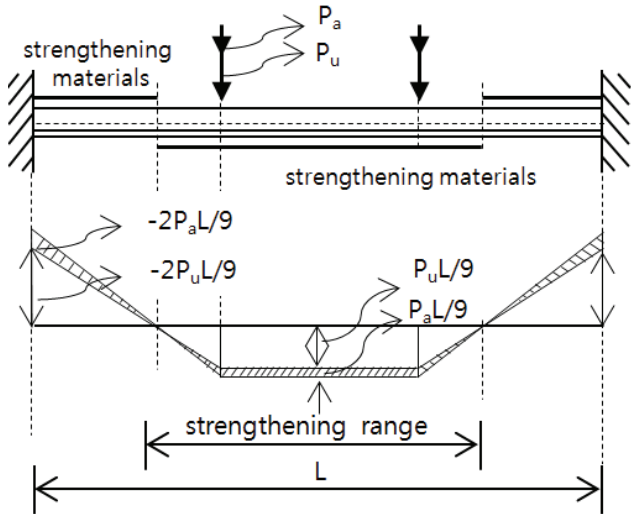


Fig. 3 Moment diagram of B member

2.2 보강 재료물성

본 연구에 사용한 보강재 및 에폭시의 재료물성은 Table 2에 나타낸 바와 같이 기존논문^{5)~7)}에 발표된 값을 적용하였으며, 보강재별 응력-변형률 관계 그래프는 Fig. 4와 같다.

Table 2 Mechanical properties of fibers and Epoxy

Fiber type	f_{fu} [MPa]	ϵ_f [%]	E_f [GPa]	Thickness [mm]
CFS	1,820	0.94	193.6	0.17
GFS	958	1.68	57.0	0.34
PET	627	15.2	7.4*	0.05
Epoxy	40.9	2.58	0.16	-

* secant modulus corresponding to 1% strain is given from PET tensile test.

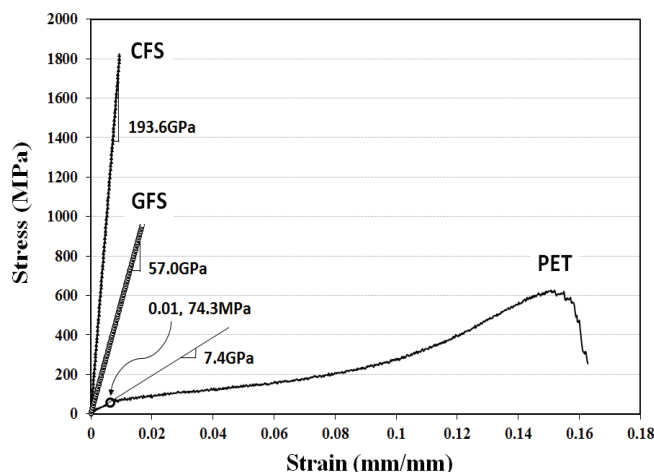


Fig. 4 Stress-strain relationship of fibers⁵⁾

2.3 기준실험체 선정 및 단면성능

2.1절에 기술한 A 부재와 B 부재 중에서 단순보인 A 부재를 기준실험체로 하여 2.2절에 기술한 보강재의 재료물성을 적용하여 휨 보강효과를 파악하고자 한다. 휨 보강 효과를 정확히 파악하기 위해서는 보강하지 않은 기준실험체의 휨 성능과 보강한 실험체들의 휨 성능을 각각 비교하여야 한다. 본 절에서는 보강하지 않은 기준실험체에 대한 휨 성능을 파악하기 위한 것으로 인장철근이 항복하기 전과 항복 이후의 모멘트-곡률을 제시하고, 기준실험체의 휨 성능에 영향을 주는 변수를 파악하여 보강실험체에 적용하기 위한 것이다. Fig. 5는 기준실험체가 항복단면일 때와 극한단면일 때로 각각 구분하여 각 단면에 대한 이론분석에 적용되는 값을 정리하여 나타낸 것이다. 여기서 항복단면이란 인장철근이 항복변형률(ϵ_y)에 도달할 때 압축콘크리트는 압괴가 발생하지 않은 단계를 말하며, 극한 단면이란 압축콘크리트가 극한변형률(ϵ_{cu})에 도달할 때 인장철근이 항복단면을 훨씬 지나 연성거동을 나타내는 단계를 의미한다.

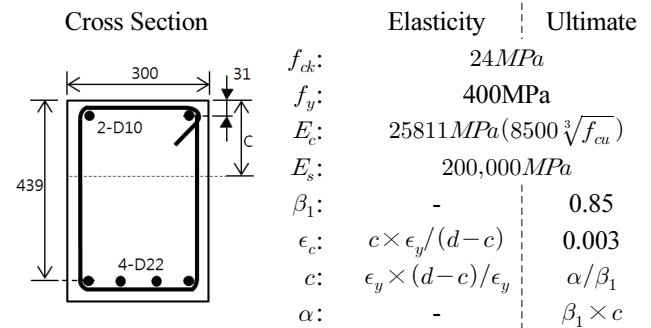


Fig. 5 Cross section and input data for theoretical analysis

Fig. 6은 기준실험체가 항복단면일 때, 철근과 콘크리트의 변형률, 응력도 및 하중관계를 나타낸 것이다. 이 단계에서 인장철근의 변형률(ϵ_s)과 콘크리트의 변형률(ϵ_c)은 중립축(c)으로부터 거리에 비례한다고 가정하고, 철근과 콘크리트에 발생하는 응력은 각 재료시험으로부터 얻은 응력-변형률 곡선을 이용하여 구할 수 있다.

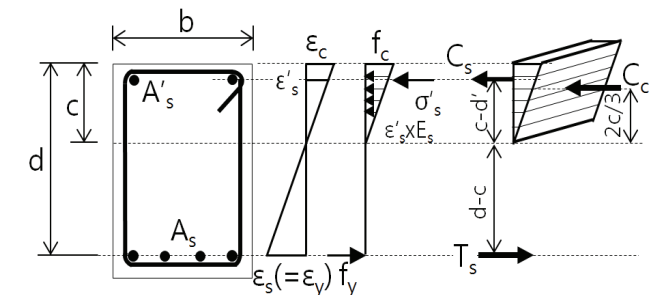


Fig. 6 Strain, stress, and internal forces distribution in elastic state

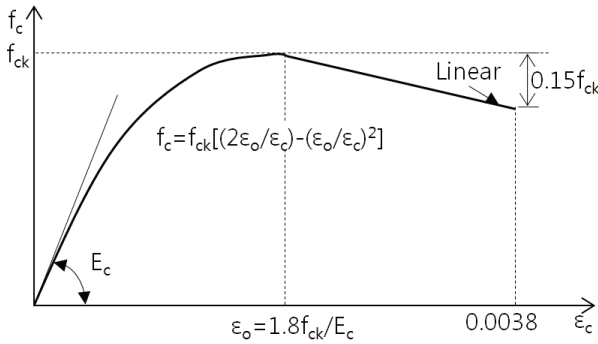


Fig. 7 Stress-strain relationship of modified general concrete by Hognestad⁸⁾

그러나 철근과 달리 콘크리트의 응력 변형을 분포는 비선형거동을 보이기 때문에 특정 위치에서의 콘크리트의 변형률 크기, 압축응력도 및 압축력의 크기를 정확하게 산정하기가 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 7에 나타난 바와 같이 Hognestad⁸⁾에 의해 제시된 응력도-변형률 곡선을 적용하였다. 이 이론에 따르면 변형률과 응력도가 동시에 증가하면서 포물선 형태를 가지는 구간과 변형률이 증가하면서 응력이 선형으로 감소되는 구간으로 구분하며, 최대응력(f_{ck})에 대응하는 변형률($\epsilon_o = 1.8f_{ck}/E_c$, Fig. 7 참조)을 제안식을 이용하여 압축영역에 있는 콘크리트의 응력을 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

$$f_c = f_{ck} \left[2 \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_o} \right) - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_o} \right)^2 \right] \quad (1)$$

앞서 기술한 바와 같이 인장철근의 변형률(ϵ_s)과 콘크리트의 변형률(ϵ_c)은 중립축(c)으로부터 거리에 비례하고, 힘의 평형으로부터 압축력과 인장력이 같아지는 점이 중립축 길이이다. Fig. 8은 기준실험체가 항복단면일 때 중립축 길이를 나타낸 것으로, 인장영역에 있는 철근의 인장력(T_s)과 압축영역에 있는 철근에 의한 압축력(C_s) 및 콘크리트에 의한 압축력(C_c)의 합이 같아지는 점을 표시한 것으로 중립축 길이는 $145.4mm$ 로 계산되었다.

극한단면은 KBC 2016⁹⁾ 기준에 제시되어 있는 설계법과 동일한 개념으로 Fig. 9에 나타난 바와 같이 콘크리트와 철근의 변형률 관계는 선형을 유지하며, 압축콘크리트 응력분포는 등가직사각형 응력블록으로 가정하여 휨강도를 산정하였다. 항복단면에 비해 극한단면은 콘크리트의 압축변형률이 극한 변형률인 0.003에 도달되는 것으로 가정하며, 콘크리트의 응력분포가 항복단면에서는 삼각형 형태로 가정한 반면에 극한 단면에서는 등가직사각형 응력블록으로 가정하여 계산하였다. 등가직사각형 응력블록 깊이(α)는 중립축거리(c)와 콘크리트 압축강도 계수(β_1)의 곱으로 표현된다.

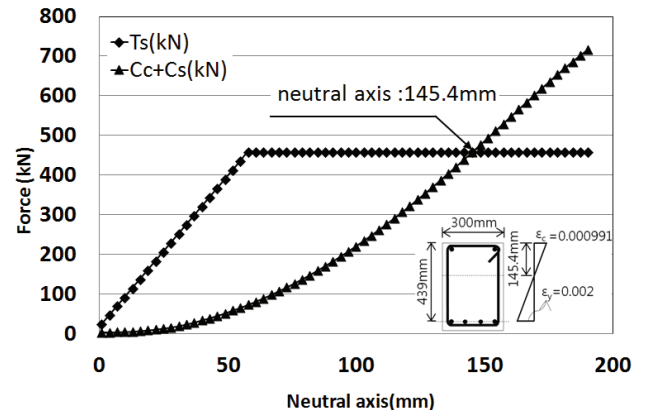


Fig. 8 Neutral axis in the elastic area(when $\epsilon_s = \epsilon_y$)

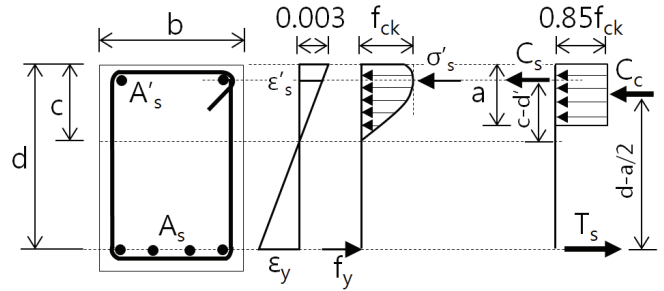


Fig. 9 Strain, stress, and internal forces distribution in ultimate state

Table 3 Theoretical values for non-strengthened specimen

	b	d	ρ_s	c	ϵ_c	ϵ_t	M_n	ϕ	μ
	mm	mm	%	mm	%	%	kN.m	$10^{-6}/mm$	
Elastic state	300	439	0.87	145.4	0.099	0.200	179.4	6.8	5.6
Ultimate state	300	439	0.87	78.2	0.300	1.384	186.1	38.4	

*1: Neutral axis, $c = \epsilon_c \times d / (\epsilon_y + \epsilon_c) = 145.4mm$

*2: Compressive strain, $\epsilon_c = \frac{c \times \epsilon_y}{(d-c)} = \frac{145.4 \times 0.002}{(439-145.4)} = 0.00099$

*3: Tensile strain, $\epsilon_t = \frac{\epsilon_{cu} \times (d-c)}{c} = \frac{0.003 \times (439-78.2)}{78.2} = 0.01384$

*4,5: Normal flexural strength,

*4 $M_n = \frac{1}{2} \sigma_c (c)(b) \times \frac{2c}{3} + \sigma'_s \times A'_s \times (c-d) + A_s f_y (d-c)$

*5 $M_n = C_c \times (d - \frac{a}{2}) + C_s \times (d-d)$

*6,7: Curvature in elastic and ultimate state,

*6 $\phi_y = \frac{\epsilon_c}{c} = \frac{\epsilon_y}{d-c}, \frac{0.00099}{145.4mm} = \frac{0.002}{(439-145.4)mm} = 6.8 \times 10^{-6}/mm$

*7 $\phi_u = \frac{\epsilon_{cu}}{c} = \frac{\epsilon_t}{d-c}, \frac{0.003}{78.2mm} = \frac{0.01384}{439-78.2} = 38.4 \times 10^{-6}/mm$

*8: Ductility ratio, $\eta = \frac{\phi_u}{\phi_y} = \frac{38.4}{6.8} = 5.6$

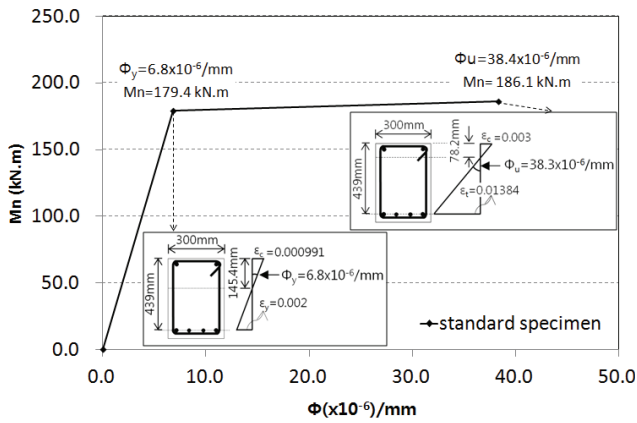


Fig. 10 Moment-Curvature curve of standard specimen

Table 3은 기준실험체에 대한 항복단면 일 경우와 극한단면일 경우의 중립축 길이(c), 콘크리트 및 철근의 변형률(ϵ_c, ϵ_t), 공칭모멘트(M_n) 및 곡률(ϕ), 그리고 연성비(η) 등을 식과 함께 나타내었으며, 항복단면 및 극한단면에서의 휨모멘트에 대한 산정식은 식 (2)~식 (5)에 자세하게 나타내었다.

$$M_n = \left(\frac{1}{2} (f_c) b c \left(\frac{2c}{3} \right) \right) + (\sigma'_s) (A'_s) (c - d') + (f_y) (A_s) (d - c) \quad (2)$$

$$M_n = C_c \left(d - \frac{a}{2} \right) + C_s (d - d') \quad (3)$$

$$C_c = 0.85 f_{ck} a b \quad (4)$$

$$C_s = (E_s \epsilon'_s A'_s)$$

$$a = \frac{-B + \sqrt{(B^2 - 4AC)}}{2A}, A = 0.85 f_{ck} \quad (5)$$

$$B = (0.003 E_s A'_s - A_s f_y), C = 0.003 E_s A'_s \beta_1 d'$$

여기서, b ; 보 폭, d ; 보 유효높, f_c ; 압축 연단에서의 콘크리트 응력, c ; 중립축 길이, ϵ'_s ; 압축철근의 압축변형률, σ'_s ; 압축철근의 응력, A_s ; 인장철근양, A'_s ; 압축철근양, d' ; 압축연단에서 압축철근까지의 길이, f_{ck} ; 콘크리트 설계압축강도, f_y ; 인장철근의 항복강도, β_1 ; 등가직사각형 응력블록 계수, a ; 등가직사각형 응력블록, E_s ; 철근의 탄성계수 이다.

압축철근을 고려한 복근보로 하여 산정하였으며, 분석결과 압축철근의 상태는 항복하기 전 상태인 것으로 나타났다. Fig. 10은 기준실험체의 항복단면과 극한단면의 모멘트-곡률($M-\phi$) 곡선과 각 단면에서의 중립축 및 변형률 등을 같이 나타내었으며, Table 3과 Fig. 10에서 보는 바와 같이 극한상태(186.1kN.m)에서의 휨 강도는 항복단면(179.4kN.m)에 비해 약 3.7% 높게 나타났으며, 극한상태에서의 곡률(ϕ_u)은 $38.4 \times 10^{-6}/mm$ 로 나타나 항복단면에서의 곡률($\phi_y = 6.8 \times 10^{-6}/mm$)에 비해 약 5.6배 높게 나타났다.

3. 휨 보강 단면의 이론적 분석

3.1 보강 실험체의 보강 개요

보강하기 않은 기준단면에 FRP 시트로 보강했을 때 휨보강 효과를 파악하기 위해 다양한 형태의 변수를 선정한 후 이론적 분석을 실시하였다. Table 4는 이론적 분석에 사용된 총 11개 실험체의 단면크기, 보강재 종류, 보강접수 등을 정리하여 나타낸 것이다. Table 4에 나타낸 바와 같이 보강재 종류는 3종(CFS, GFS, PET)이며, 보강접수는 보강재의 두께를 고려하여 CFS와 GFS인 경우는 1접, 2접, 3접으로 보강 하였으며, 상대적으로 두께가 얇은 PET의 경우는 5접, 7접, 10접, 15접으로 보강하였다. 연성거동을 고려하여 인장철근과 보강재의 보강근비는 최소보강근비와 최대보강근비 이내가 되도록 하였다. Fig. 11은 항복단면일 때 모멘트와 곡률을 산정하기 위하여 철근과 콘크리트 및 보강재에서의 변형률, 응력도 및 하중관계를 나타낸 것이고, Fig. 12는 극한단면일 때를 나타낸 것이다.

Table 4 Theoretical values for the specimens

no.	Spec.	b mm	d mm	A_s mm ²	ρ_s %	Strengthening				
						Types	A_f mm ²	layer	ρ_f %	ρ_f/ρ_s %
1	N-S	300	439	1146	0.87	-	-	-	-	-
2	SC-1						51	1	0.039	4.45
3	SC-2	300	439	1146	0.87	CFS	102	2	0.077	8.90
4	SC-3						153	3	0.116	13.35
5	SG-1						102	1	0.077	8.90
6	SG-2	300	439	1146	0.87	GFS	204	2	0.155	17.80
7	SG-3						306	3	0.232	26.70
8	SP-5						75	5	0.057	6.54
9	SP-7						150	7	0.077	8.90
10	SP-10	300	439	1146	0.87	PET	150	10	0.114	13.09
11	SP-15						225	15	0.171	19.63

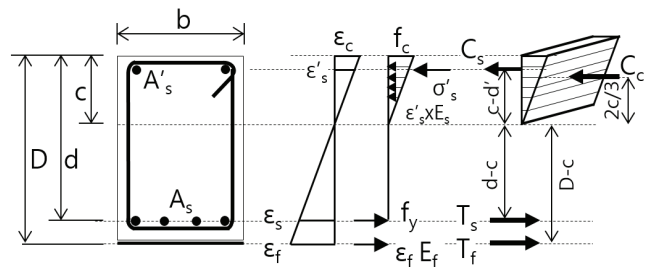


Fig. 11 Strain, stress, and internal forces distribution in elastic state of strengthening cross section

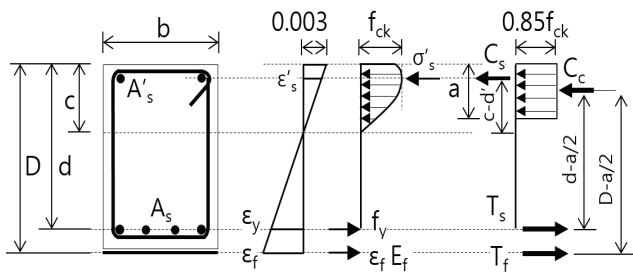


Fig. 12 Strain, stress, and internal forces distribution in ultimate state of strengthening cross section

3.2 보강 실험체의 변수 해석 결과

Fig. 11과 Fig. 12에 나타난 콘크리트의 압축하중(C_c), 압축철근의 압축하중(C_s), 인장철근의 인장하중(T_s), 보강재료의 인장하중(T_f)과 중립축(c) 거리, 압축연단에서의 콘크리트 변형률(ϵ_c) 등을 이용하여 각 실험체의 휨모멘트와 곡률을 산정하였다.

Table 5는 항복단면, 극한단면, 보강시 실제 단면으로 나누어 c , C_{c+s} , T_{s+f} , ϵ_c , M , ϕ , C_s , T_s , T_f , c 등을 각 실험체 별로 정리하여 나타낸 것이다. Fig. 13은 보강하지 않은 실험체(N-S)와

CFS로 보강한 실험체의 모멘트-곡률을 비교한 그래프이다. 그림에서 보는 바와 같이 CFS로 보강한 실험체의 휨보강 효과는 1.18 ~ 1.50로 나타났으며, 연성은 0.82 ~ 0.61로 감소하는 것으로 나타났다. Fig. 14는 보강하지 않은 실험체(N-S)와 GFS로 보강한 실험체의 모멘트-곡률을 비교한 그래프로 휨보강 효과는 1.15 ~ 1.35로 나타났으며, 연성은 0.85 ~ 0.70 나타났다. Fig. 15는 보강하지 않은 실험체(N-S)와 PET로 보강한 실험체의 모멘트-곡률을 비교한 그래프로 휨보강 효과는 1.01 ~ 1.03로 나타났으며, 연성은 0.99 ~ 0.96 나타났다. SC-2, SG-1, SP-7 실험체(Table 5의 음영 부분)들은 보강량이 모두 동일한 실험체로 보강근비(ρ_f)가 0.77%인 실험체들로 휨강도는 CFS > GFS > PET 순으로 우수하고, 연성은 PET > GFS > CFS 순으로 우수한 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 13 ~ Fig. 15의 비교그래프에서도 같은 결과를 보여주고 있음을 알 수 있다. 또한, Table 5에 극한단면 일 때 휨모멘트와 실제 보강이 이루어지는 단면에서의 휨모멘트 비(M_u/M_u) 및 곡률비(ϕ_u/ϕ_u)는 각각 1.00 ~ 1.07, 1.00 ~ 0.94로 나타나 현장에서 균열이 발생한 후에 보강을 실시했을 때와 균열이 발생하기 전에 보강했을 때 결과는 크지 않을 것으로 판단된다.

Table 5 Theoretical values of strengthened specimen for various variables

no.	spec.	Types	Elastic section state						Ultimate section state						Actual strengthening effect						Ratio					
			c	C_{c+s}	T_{s+f}	ϵ_c	M_y	ϕ_y	c	α	C_{c+s}	T_{s+f}	ϵ_c	M_u	ϕ_u	c	α	C_{c+s}	T_{s+f}	ϵ_c	M_u	ϕ_u	M_y	M_u	ϕ_y	ϕ_u
			mm	kN	kN	%	kN.m	$10^{-6}/\text{mm}$	mm	mm	kN	kN	%	kN.m	$10^{-6}/\text{mm}$	mm	mm	kN	kN	%	kN.m	$10^{-6}/\text{mm}$	⑤	⑫	⑬	⑭
1	N-S	-	145.4	458.4	458.4	0.099	179.4	6.8	78.2	66.5	458.4	458.4	0.3	186.1	38.4	78.2	66.5	458.4	458.4	0.3	186.1	38.4	5.63	1.00	1.04	1.00
2	SC-1		146.1	462.5	462.5	0.100	181.1	6.8	94.9	80.7	551.2	551.2	0.3	220.3	31.6	94.9	80.7	551.2	551.2	0.3	220.3	31.6	4.63	1.00	1.22	1.00
3	SC-2	CFS	146.0	466.7	466.7	0.100	182.9	6.8	111.9	95.1	644.0	644.0	0.3	253.1	26.8	108.4	92.1	625.0	625.0	0.3	246.5	27.7	3.92	1.03	1.38	0.97
4	SC-3		147.5	470.9	470.9	0.101	184.8	6.8	126.3	107.3	721.4	721.4	0.3	279.5	23.8	117.8	100.1	675.7	675.7	0.3	264.0	25.5	3.46	1.07	1.51	0.94
5	SG-1		145.7	459.9	459.9	0.099	180.4	6.8	92.1	78.3	535.7	535.7	0.3	214.7	32.6	89.9	76.5	524.0	524.0	0.3	210.4	33.4	4.78	1.02	1.19	0.98
6	SG-2	GFS	146.2	463.2	463.2	0.100	181.5	6.8	102.6	87.2	593.5	593.5	0.3	235.4	29.2	99.1	84.3	574.6	574.6	0.3	228.7	30.3	4.28	1.04	1.30	0.97
7	SG-3		146.6	465.7	465.7	0.100	182.5	6.8	111.4	94.7	641.1	641.1	0.3	252.1	26.9	106.9	90.9	617.0	617.0	0.3	243.7	28.1	3.94	1.04	1.38	0.97
8	SP-5		145.4	458.7	458.7	0.099	179.5	6.8	79.2	67.3	464.0	464.0	0.3	188.2	37.9	79.2	67.3	464.0	464.0	0.3	188.2	37.9	5.56	1.00	1.05	1.00
9	SP-7	PET	145.5	458.7	458.7	0.099	179.5	6.8	79.5	67.6	466.0	466.0	0.3	189.0	37.7	79.5	67.6	466.0	466.0	0.3	189.0	37.7	5.54	1.00	1.05	1.00
10	SP-10		145.5	458.8	458.8	0.099	179.6	6.8	80.2	68.1	469.5	469.5	0.3	190.3	37.4	80.2	68.1	469.5	469.5	0.3	190.3	37.4	5.49	1.00	1.06	1.00
11	SP-15		145.5	459.1	459.1	0.099	179.7	6.8	81.2	69.0	475.1	475.1	0.3	192.4	37.0	81.2	69.0	475.1	475.1	0.3	192.4	37.0	5.42	1.00	1.07	1.00

- ①, ⑦, ⑭ c : neutral axis
- ②, ⑨, ⑯ C_{c+s} : compressive force of concrete and steel
- ③, ⑩, ⑰ T_{s+f} : tensile force of steel and reinforcing materials
- ④, ⑪, ⑱ ϵ_c : compressive concrete strain at top layer
- ⑤ M_y : bending Moment in elastic section state

- ⑥ ϕ_y : curvature in elastic section state
- ⑫ M_u : bending Moment in ultimate section state
- ⑬ ϕ_u : curvature in ultimate section state
- ⑲ M_u : bending Moment in actual strengthening
- ⑳ ϕ_u : curvature in actual strengthening

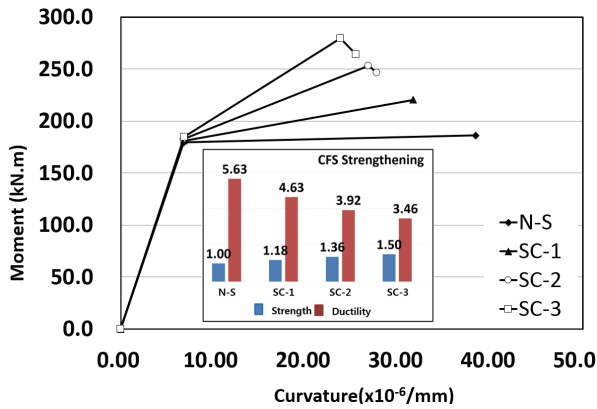


Fig. 13 Comparison of Moment-Curvature by CFS strengthening

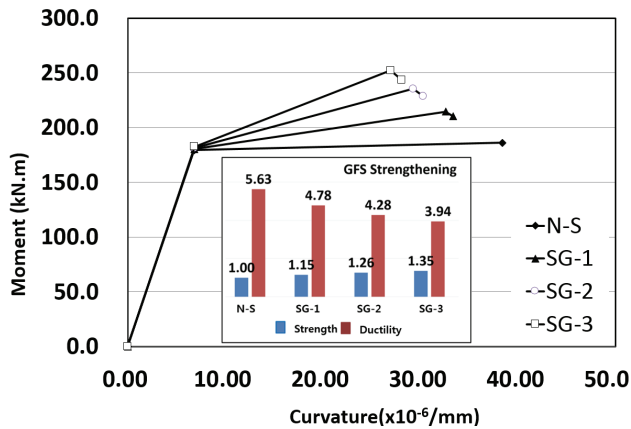


Fig. 14 Comparison of Moment-Curvature by GFS strengthening

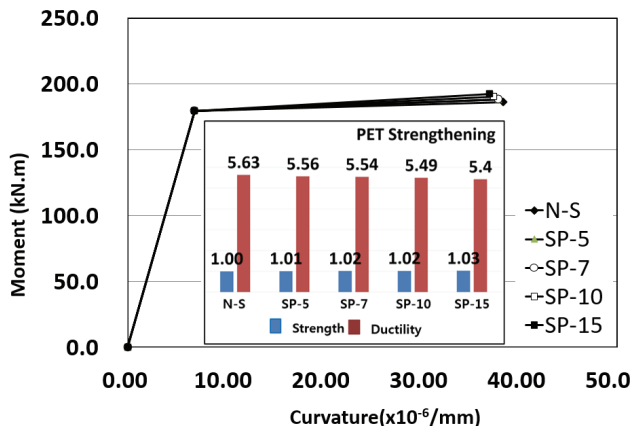


Fig. 15 Comparison of Moment-Curvature by PET strengthening

4. 결론

무보강 실험체(N-S)에 CFS, GFS, PET 섬유로 보강하여 다양한 변수 해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 보강하지 않은 기준실험체(N-S)의 항복단면 및 극한단

면에서의 휨모멘트는 각각 179.4kN.m, 186.1kN.m 로 거의 유사하게 나타났으나, 곡률은 항복단면($6.8 \times 10^{-6}/mm$)에 비해 극한단면($38.4 \times 10^{-6}/mm$)에 약 5.6배 크게 나타났다.

2) CFS로(1겹~3겹) 보강한 실험체(SC-1, SC-2, SC-3)의 휨 모멘트 및 곡률은 보강하지 않은 기준실험체(N-S)에 비해 휨보강 효과는 1.18 ~ 1.50로 우수하게 나타났으며, 연성은 0.82 ~ 0.61로 감소하는 것으로 나타났다.

3) GFS(1겹~3겹) 보강한 실험체(SG-1, SG-2, SG-3)의 휨 모멘트 및 곡률은 보강하지 않은 기준실험체(N-S)에 비해 휨보강 효과는 1.15 ~ 1.35로 우수하게 나타났으며, 연성은 0.85 ~ 0.70 나타났다.

4) PET(5겹~15겹)로 보강한 실험체(SP-5, SP-7, SP-10, SP-15)의 모멘트 및 곡률은 보강하지 않은 기준실험체(N-S)에 비해 휨보강 효과는 1.01 ~ 1.03로 나타났으며, 연성은 0.99 ~ 0.96 나타났다.

5) 보강량이 모두 동일할 경우, 휨보강 효과는 파괴시 강도가 우수한 CFS > GFS > PET 순으로 우수하고, 연성은 PET > GFS > CFS 순으로 우수하게 나타났다.

6) 극한단면 일 때 휨모멘트와 실제 보강이 이루어지는 단면 일 때 휨모멘트 비(M_a/M_u) 및 곡률비(ϕ_a/ϕ_u)는 각각 1.00 ~ 1.07, 1.00 ~ 0.94로 나타나 현장에서 균열이 발생한 후에 보강을 실시했을 때와 균열이 발생하기 전에 보강했을 때의 결과는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는(2016 학년도) 강남대학교 교내연구비 지원에 의해 수행된 결과로써 이에 감사드립니다.

References

ACI 440. 2R-08 (2008), Guild for Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, ACI Committee 440, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, pp. 24-34.

Aggawidjaja, D., Ueda, T., Dai, J. and Nakai, H. (2006), Deformation capacity of RC piers wrapped by new fiber-reinforced polymer with large fracture strain, *Cement and Concrete Composites*, 28, 914-927.

Donguk Choi., S. Vachirapanyakun., S.-Y. Kim., and S.-S. Ha. (2015), Ductile Fiber Wrapping for Seismic Retrofit of Reinforced Concrete Columns, *Journal of Asian Concrete Federation*, 1(1), 37-46.

Eivind Hognestad, Norman W. Hanson, and Douglas McHenryc (1995), Concrete Stress Distribution in Ultimate Strength Design, *ACI Journal*, Proceedings, 52(4), 475-479.

Korean Building Code and Commentary, Architecture Institute of Korea, pp. 425-429.

Mander, J.B., Priestly, M.J.N, and Park, R., Theoretical stress-strain model for confined concrete, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 1988, pp.1804-1825.

Richart, F.E., Brandtzaeg, A., and Brown, R. L. (1928), A study of the failure of concrete under combined compressive stresses, Bulletin 185, Univ. of Illinois Engineering Experimental Station, Champaign, Ill.

Sang-Su Ha (2017), Experimental Study on Reinforcement Effects of

PET sheet, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 20(3), 163-169.

Vachirapanykun, S., Lim, M. K., and Choi, D. U. (2016), Seismic Performance of Circular RC Retrofitted Using Ductile PET Fibers, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 28(3), 289-298.

Received : 04/16/2018

Revised : 04/18/2018

Accepted : 04/23/2018

요 지 : 본 연구의 목적은 철근콘크리트 휨 부재에 탄소섬유시트, 유리섬유시트, PET(polyethylene terephthalate) 섬유 등을 이용하여 보강했을 때, 보강재 종류, 보강재 물성, 보강량 등에 따른 보강효과를 파악하는 것이다. 변수별 보강효과를 파악하기 위해 가상의 휨부재를 기준실험체로 선정하여, 기준실험체에 대해 항복단면과 극한단면일 때의 모멘트-곡률 관계를 파악하였다. 보강하지 않은 기준실험체에 보강재 종류, 보강재 물성, 보강량 등 다양한 변수를 적용하여 총 11개의 실험체의 모멘트-곡률 곡선을 비교하였다. 분석 결과, 보강하지 않은 실험체에 비해 보강한 실험체의 휨강도는 높게 나타났다. 그러나 연성에 대해서는 보강하지 않은 기준실험체가 가장 우수한 것으로 나타났다. 변수별 휨 보강 효과는 보강량이 많고, 파괴시 재료강도가 높을수록 우수하게 나타났으며, 연성효과는 보강재의 파괴시 변형률이 높을수록 우수한 것으로 나타났다. 손상 전과 손상 후의 보강효과에 대해서는 휨보강 효과와 연성효과 모두 10% 이내로 미미하게 나타나 손상상태에 있더라도 안전한 상태로 해석해도 큰 차이가 없을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 탄소섬유, 유리섬유, PET 섬유, 기준실험체, 항복 단면, 극한 단면, 모멘트-곡률 곡선, 보강효과
