

## RC 구조물에 적용된 부착식 휨보강공법의 보강성능 평가

홍건호<sup>1)</sup> · 신영수<sup>2)\*</sup>

<sup>1)</sup>호서대학교 건축공학과 <sup>2)</sup>이화여대 건축학과

(2002년 6월 5일 원고접수, 2002년 12월 5일 심사완료)

### Structural Performance Evaluation of Reinforced Concrete Beams with Externally Bonded FRP Sheets

Geon Ho Hong<sup>1)</sup> and Yeong Soo Shin<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Dept. of Architectural Engineering, Hoseo University, Chungnam-Do, Korea

<sup>2)</sup> Dept. of Architecture, Ewha Women's University, Seoul, Korea

(Received June 5, 2002, Accepted December 5, 2002)

#### ABSTRACT

Reinforced concrete beams are often retrofitted with various FRP composite sheets. This paper is focused on the comparison of structural performance of various FRP sheets and proposal of the retrofitting design formula.

Effects of the FRP kinds (AFRP, GFRP, CFRP) and the reinforcing steel ratio on behavior of the retrofitting beams are tested and analyzed with particular emphasis on the maximum load capacity, stiffness, and ductility. The experimental work included 4 point flexural testing of 3.2m span reinforced concrete beams with bonded external reinforcements.

The results show that the difference of FRP kinds is not large and the flexural load capacity is mainly affected by stiffness of the retrofitting materials. This paper also proposes the design formula on the retrofitting reinforced concrete flexural members and checks with this experimental work and previous research results.

**Keywords :** retrofitting, FRP, flexural performance, stiffness, load capacity, design formula

## 1. 서 론

국내 구조물의 대다수를 차지하고 있는 철근콘크리트 구조물은 설계 및 시공상의 품질관리, 사용환경 및 하중 조건의 변화 등에 의한 성능저하로 인하여 사용간에 적절한 보수·보강 등을 통한 유지관리가 필수적으로 대두되게 된다. 성능이 저하된 철근콘크리트 부재의 보강방법으로는 박판의 강판을 부재의 인장측 외단부에 부착함으로써 그 내력을 증진시키는 강판보강공법이 구조부재의 크기에 큰 영향을 미치지 않고 내력을 증진시킬 수 있는 하나의 공법으로서 지난 20여 년간 널리 이용되어 왔다. 그러나, 강판의 사용은 부식으로 인한 내력 및 부착력의 저하를 유발함으로써 강판보강공법의 가장 큰 단점을 가지게 된다<sup>1~3)</sup>. 이에 따라 1980년대부터 스위스의 연구자들을 시작으로 부식에 강한 FRP(Fiber Reinforced Plastic)를 보강재료로 사용하는 공법이 연구되기 시작하였으며<sup>4)</sup>, 이들 재료는 강판에 비하여 우수한 부식저항성, 강도와 유지관리 비용의 경제성 및 우수한 시공성 등 각종 장점으로 인하여 그 사용빈도가 증가

되고 있는 실정이다.

국내의 경우에도 섬유보강공법이 소개된 이후 그 사용빈도가 점차 증가하고 있으며, 주로 사용되는 재료로는 탄소섬유, 유리섬유 및 아라미드섬유 등을 들 수 있다. 그러나, 각 섬유의 경우에는 강도, 탄성계수 등 재료의 역학적 성질에 큰 차이를 가지고 있어 보강 후 부재의 성능에 차이를 가져올 수 있으나, 이에 대한 연구는 상당히 미흡한 실정이다. 이에 따라 본 연구에서는 섬유재료로 휨보강된 RC부재의 휨성능을 섬유재료의 종류 및 보강비율에 따라 비교분석함으로써 각 재료별 보강특성 및 설계식을 제안하도록 하였다.

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 실험계획

본 연구에서는 부착식 휨보강공법에 적용된 보강섬유의 종류 및 보강량에 따른 보강성능의 평가를 위하여, 스패น 3.2 m, 단면크기 20×35 cm의 단순보를 각 섬유보강재료로 보강한 후 4점재하방식으로 가력하여 부재의 휨성능을 평가하도록 하였다. 보강에 사용된 섬유재료로는 국내에서 사

\* Corresponding author  
Tel : 02-3277-2596 Fax : 02-3277-2396  
E-mail : shynys@mmewha.ac.kr

용이 빈번한 탄소섬유, 유리섬유 및 아라미드 섬유 등 3종류의 섬유를 대상으로 하였으며, 섬유간의 상대적인 휨성능 비교를 위하여 보강설계 시에는 섬유재료의 인장강도를 기준으로 섬유가 받게 되는 인장력( $T = A_f \cdot f_f$ )이 동일하도록 계획하였다. 섬유보강재의 보강비율은 ACI의 보강설계 개념에 따라<sup>5)</sup> 보강전 부재의 하중저항능력이 보강후 부재의 설계하중을 기준으로  $1.0D + 1.0L$  이상이 될 수 있도록 보강비율을 조정하였으며, 이 한도 내에서 각 섬유종류별로 2종류의 보강비에 대한 실험을 실시하도록 하였다. 이상과 같은 본 연구의 실험변수를 정리하면 다음의 Table 1과 같다.

## 2.2 사용재료 및 실험방법

Table 1과 같은 총 7개의 단순보 시험체는 부재의 콘크리트 타설 후 28일간 실내에서 기건양생을 실시하였으며, 양생이 완료된 후 지지점 실험장치의 크기를 제외한 시험체 전면에 대하여 섬유쉬트를 사용한 보강작업을 실시하였다. 이에 따라 부재의 보강길이는 순스팬의 약 94%에 해당하는 3.0m로 보강하였으며, Fig. 2와 같이 4점재하방식에

의한 휨성능평가실험을 수행하였다.

부재의 보강은 단순보 하부면의 표면처리 후 충전용 에폭시를 이용하여 미세한 요철을 조정하는 바탕처리를 실시하였으며, 이 후 실험계획에 따른 보강섬유쉬트를 부착하였다. 보강 후 부재는 다시 에폭시 수지의 경화반응기간을 고려하여 2주 이상의 양생기간을 거쳤으며, 특별한 단부보강 작업은 실시하지 않았다.

재하간 부재의 휨성능 평가를 위하여 스펠 중앙부 및 1/4지점에서 LVDT에 의한 처짐을 측정하였으며, 부재의 변형률 측정을 위하여 인장 철근 중앙부 2개, 압축철근 1개, 가력점 하부 인장근 1개 등 총 4개의 철근게이지를 매설하고, 보강섬유 표면에 4개의 스트레인게이지를 접착하였으며, 콘크리트의 변형률 측정을 위해서는 압축측 연단부와 측면에 5 cm 간격으로 4개의 스트레인게이지를 부착하여 실험간 변형률의 변화를 측정하도록 하였다. 이와같은 게이지의 부착위치 및 실험전경은 각각 Fig. 1, Fig. 2와 같다.

본 연구에서 사용된 콘크리트, 철근, 보강섬유 및 접착용 에폭시 각각의 역학적 특성은 다음의 Table 2, 3, 4와 같다.

Table 1 Test variables

Beam	Retrofitting material	Ply	Retrofitting length (cm)	Reinforcement ratio		
				before	after	Ratio with $\rho_{max}$ (%)
SBC	None	-	-	0.0096	-	36.9
SA1	AFRP	1	300	0.0096	0.0135	51.9
SA2	AFRP	2	300	0.0096	0.0174	66.9
SG1	GFRP	1	300	0.0096	0.0138	53.1
SG2	GFRP	2	300	0.0096	0.0181	69.6
SC1	CFRP	1	300	0.0096	0.0134	51.5
SC2	CFRP	2	300	0.0096	0.0172	66.2

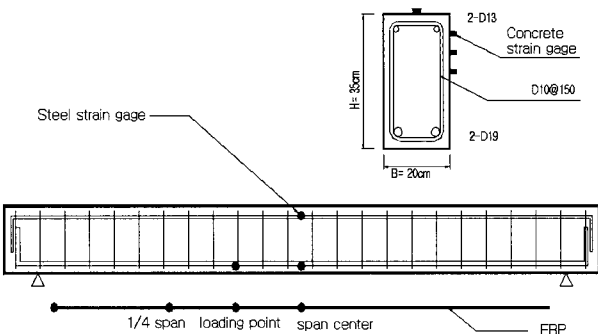


Fig. 1 Specimen detail

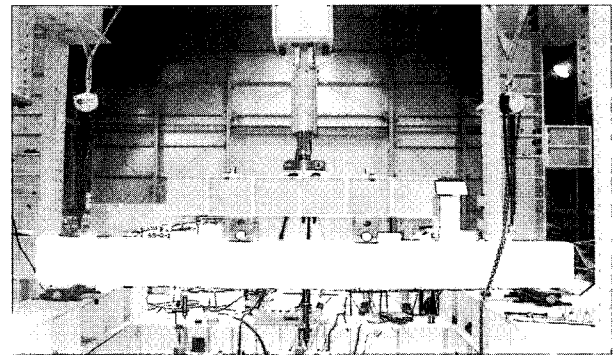


Fig. 2 Test setting

Table 2 Strength of concrete and re-bar

Material	Kind of strength	Strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	
Concrete	Compression	273	
	Splitting tension	22.6	
Re-bar	Tension	D 10	4763
		D 13	5141
		D 19	4275

Table 3 Material properties of retrofitting material

Item	Unit	AFRP	GFRP	CFRP
Tensile strength	kgf/cm <sup>2</sup>	5468.43	6612.99	8679.24
Strength per width	kgf/cm	522.55	569.3	512.03
Thickness	mm	0.96	0.86	0.59
E modulus	kgf/cm <sup>2</sup>	$1.14 \times 10^6$	$7.2 \times 10^5$	$2.35 \times 10^6$

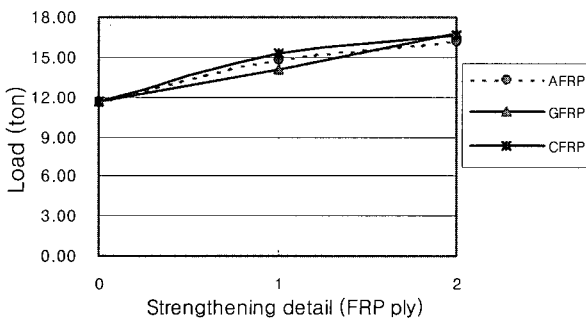
**Table 4** Material properties of epoxy adhesive

Item	Unit	Value	Remark
Tensile strength	kgf/cm <sup>2</sup>	500	KS L 2513
Elastic modulus	kgf/cm <sup>2</sup>	28000	KS L 2513
Elongation	%	2.0	KS L 2513
Density	g/cm <sup>2</sup>	1.18	ASTM D 792

### 3. 실험결과 및 분석

#### 3.1 휨내력

FRP를 사용하여 휨보강한 시험체들은 Table 5에서 나타내듯이 보강량에 따라 일정한 휨내력의 증가가 나타나게 됨을 알 수 있다. 섬유 종류에 따른 변화는 크지는 않지만 보강재의 탄성계수가 증가함에 따라 1겹보강의 경우에서 CFRP-AFRP-GFRP의 순으로 내력이 크게 나타남을 알 수 있다.

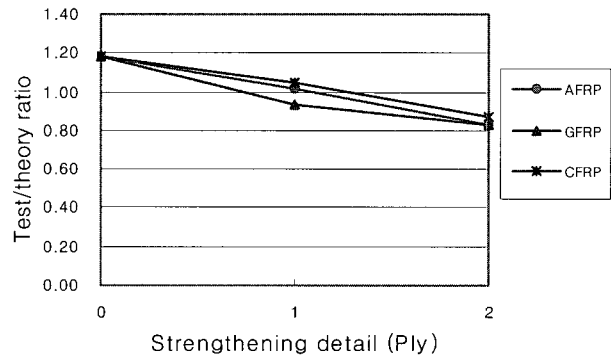


**Fig. 3** Max. load comparison

2겹보강의 경우에는 이러한 현상이 크게 둔화되어 각 섬유의 종류에 관계없이 거의 유사한 내력을 갖게 된다. 이러한 결과는 전통적인 저항내력의 계산결과와는 상이한 결과를 갖는 것으로 분석되며, 표에서 기존 연구자들의 제안식에 의한 내력의 산정은 다음 식에 의한다<sup>9,10</sup>.

$$M_n = (A_s f_y - A_s' f_s')(d - \frac{a}{2}) + A_s' f_s'(d - d') + A_f f_f (h_f - \frac{a}{2}) \quad (1)$$

본 연구의 실험결과와 기존 제안식의 계산결과를 비교해 보면 Fig. 4와 같으며, 보강량이 증가할수록 계산결과는 실제 휨내력을 지나치게 과대평가하게 됨을 알 수 있다. 즉, 기존 제안식의 계산결과에서는 보강재의 보강효과가 Fig. 5와 같이 직접적으로 가산 됨으로써 휨내력이 선형비례하는 것으로 나타내는데 반하여, 실제 보강된 보의 경우에는 보강량의 증가에 따른 강도의 증가가 선형으로 비례하지 않음을 알 수 있다. 이러한 결과는 Table 5 및 Fig. 6의 등가 철근비당 내력의 분석결과에서도 알 수 있는데, CFRP보강 부재의 경우를 살펴보면 실험의 결과에서는 보강재의 부착



**Fig. 4** Load capacity ratio between test and formula (1)

**Table 5** Test results and analysis

Beam	Test result		Previous proposed formula (1) (ton)	Test max./ formula (1)	Increase over unplated (%)		Load per equivalent reinforcement ratio		FRP stiffness (t*b*Ef) (ton)	Test max. / FRP stiffness
	Yield load (ton)	Max. load (ton)			Test max.	Formula (1)	Test max.	Formula (1)		
SBC	10.62	11.69	9.90	1.18	0	0	1218	1031	0	-
SA1	11.98	14.86	14.66	1.01	27	48	1101	1086	1,970	7.54
SA2	13.81	16.16	19.36	0.83	38	96	929	1113	3,940	4.10
SG1	11.94	14.13	15.12	0.93	21	53	1024	1096	1,115	12.68
SG2	13.90	16.82	20.31	0.83	44	105	929	1122	2,229	7.55
SC1	13.15	15.25	14.51	1.05	30	47	1138	1083	2,496	6.11
SC2	14.56	16.67	19.04	0.88	43	92	969	1107	4,991	3.34

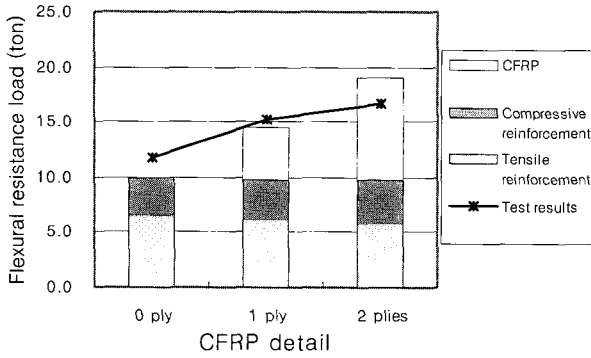


Fig. 5 Analysis of load capacity

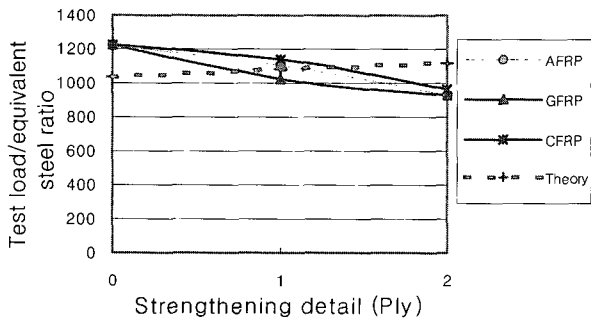


Fig. 6 Analysis with equivalent steel ratio

결수가 증가함에 따라 1218, 1138, 969로 감소하는데 반하여, 기존 제안시의 검토결과에서는 중립축거리의 변화 및 압축철근의 하중분담 능력이 증가하면서 오히려 약간씩 증가하게 되는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 식 (1)의 경우 보강재의 접합부 응력상태를 전혀 고려하지 못하고 일체인 경우를 가정하여 산정되기 때문 인 것으로 판단된다. 즉, 실제 부재의 경우에는 보강부재의 강성에 따라 접합부의 전단 및 수직응력이 증가하게 되고, 이에 따라 접합부 주변 콘크리트의 주응력이 증가하게 됨에 따라 보강재의 최대 저항능력이 발현되기 전에 이 접합부 주응력과 휨에 의한 조합응력이 콘크리트의 인장한계를 넘어서 보강재와 콘크리트가 함께 모재로부터 박락(delamination)되는 파괴

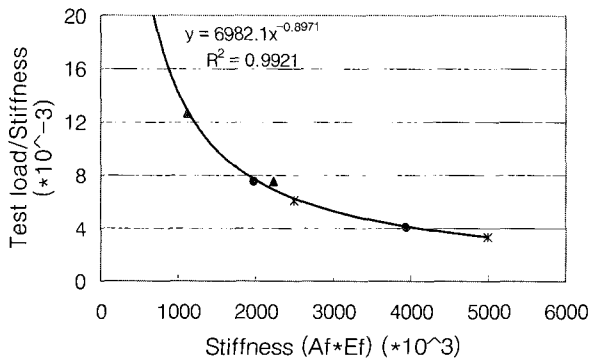


Fig. 7 Analysis with stiffness of FRP plates

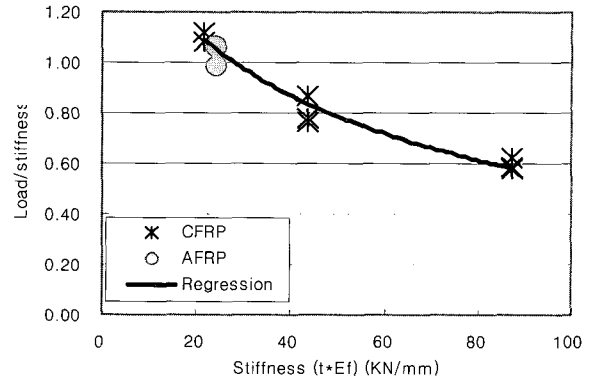


Fig. 8 Test results of Nakaba et al.<sup>8)</sup>

를 나타내는 것으로 판단된다. 이러한 결과는 2001년 El-Mihilmy 등의 FRP 정착강도 산정 제안식에서도 알 수 있는데, El-Mihilmy 등의 제안식에 따르면 FRP의 외부 부착강도는 보강재의 강성이 증가함에 따라 오히려 부착강도가 감소하고 있음을 나타내고 있다<sup>7)</sup>.

보강 FRP의 강성을  $E_f \cdot A_f$  로 정의하고, 각 실험결과 의 강성에 대한 비율을 도식하여 보면 다음의 Fig. 7과 같다. 그림에서 알 수 있듯이 강성에 대한 휨내력의 비율은 강성이 증가함에 따라 비선형으로 감소하게 되며, 이때 섬유 의 종류는 상관곡선에서 큰 영향을 끼치지 못하고 있음을 알 수 있다. 즉, 섬유의 종류는 강성으로서 상관곡선에 영향을 끼치게 되며, 다른 종류의 섬유를 사용하더라도 동일 상관곡선상에서 그 비율이 감소하고 있음을 알 수 있다. 이상과 같은 결과는 Nakaba 등의 실험결과<sup>8)</sup> 에서도 유사한 결과를 얻을 수 있는데, Nakaba 등은 탄소섬유 및 아라 미드섬유의 정착강도에 대한 실험에서 Fig. 8과 같이 보강 재의 강성에 따른 내력비가 섬유의 종류에 관계없이 비선 형으로 반비례하고 있음을 발견하였다.

### 3.2 하중-처짐관계

FRP를 사용하여 인장측에 휨보강한 철근콘크리트 보의 하중-처짐의 관계는 1999년 Ross 등이 제안한 바와 같이<sup>6)</sup> 몇 개의 직선구간으로 단순화시킬 수 있다.(Fig. 9) 즉, 보 강된 보의 휨거동은 최초 모든 재료의 완전 탄성구간 (region 1)과 콘크리트의 균열발생 후 인장철근의 항복시까지 균열단면에 대한 구간(region2) 및 인장철근의 항복 후 보강재의 강성에 의하여 하중에 저항하는 구간(region 3) 등의 3개 구간으로 구성할 수 있다. 부재의 최종 파괴는 FRP의 파단이나 콘크리트의 압축파괴 혹은 외부 보강재의 부착파괴로 나타날 수 있으며, 이때 FRP 부착파괴의 형태 는 접착파괴(de-bonding), 박락(delamination), 및 정착파괴 (Anchorage failure) 등 여러 가지 형태로 구분된다. 기존 의 연구결과에 의하면 대부분의 파괴형태는 보강재와 콘크

리트의 일부가 함께 모재로부터 분리되는 박락파괴(Delamination)의 형태를 나타내고 있으며, 이와같은 형태의 파괴는 접합부 주변 주응력의 크기가 증가함에 따라 발생되는 것으로 분석되고 있다.

본 연구의 실험결과를 정리하여 보면 다음의 Table 6 및 Fig. 10, 11과 같다. 우선 실험결과와 전체적인 하중-처짐 관계의 형태는 Fig. 9의 이론적인 가정과 상당히 유사한 형태를 가지고 있음을 알 수 있다. 실험결과와 초기 기울기를 비교해 보면 AFRP와 CFRP의 경우에는 보강재의 등가 단면 2차모멘트의 증가에 따라 부재의 기울기 강성이 증가하되 단면 2차모멘트의 증가량에는 미치지 못하는 반면, 타 재료에 비하여 탄성계수의 값이 가장 적은 GFRP의 경우에는 단면 2차모멘트의 증가량 이상으로 기울기 강성이 증가되는 현상을 볼 수 있다. 결론적으로 보강 후 강성의 증가는 보강재의 종류에 큰 관계없이 유사하게 나타나고 있으며, 이에 따라 1점보강의 경우에는 약 16~19%, 2점보강의 경우에는 30~33% 정도의 강성증가가 나타났다. 인장철근의 항복 이후를 나타내는 구간(region 3)에서도 강성의 증가현상은 초기구간의 경우와 유사한 결과를 나타냈다.

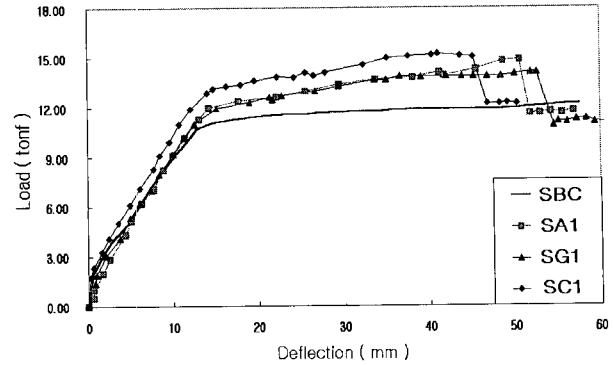


Fig. 10 Load-deflection curves for 1-ply

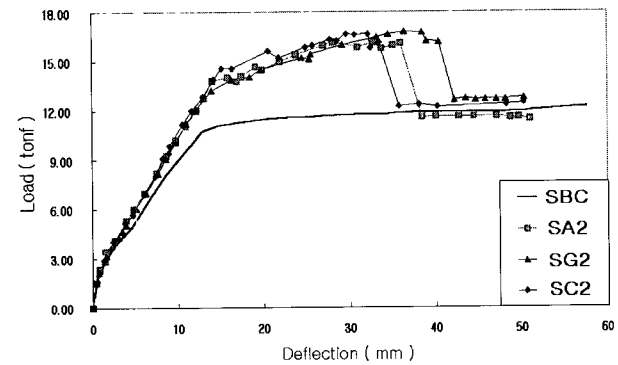


Fig. 11 Load-deflection curves for 2-ply

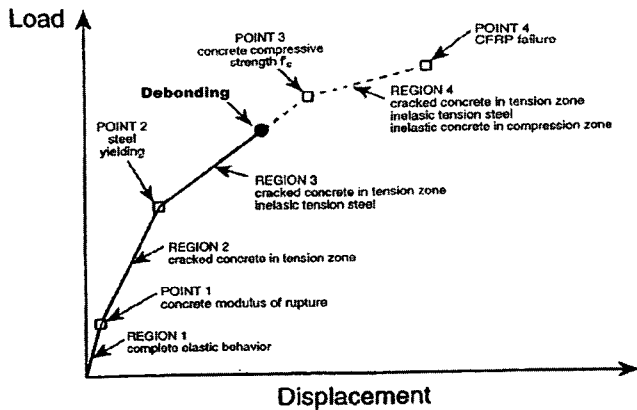


Fig. 9 Load-displacement analysis assumption<sup>6)</sup>

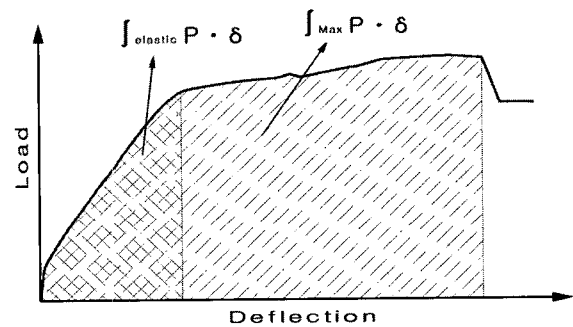


Fig. 12 Diagram for ductility (formula (2))

Table 6 Test result and analysis of load-deflection curves

Beam	Section properties			Load-deflection curve							
	Neutral axis (cm)	Moment of inertia (cm <sup>4</sup> )	Increase over unplated (%)	Initial slope	Increase over unplated (%)	2plies/1ply ratio (initial)	After yielding slope	2plies/1ply ratio (after yielding)	Elastic range energy	Total energy to Max. load	Ductility
SBC	9.29	25700	0	0.70	0	-	-	-	68	582	8.56
SA1	10.06	30900	20.2	0.81	16	1.12	0.087	1.94	92	580	6.30
SA2	10.74	35800	39.3	0.91	30		0.169		113	445	3.94
SG1	9.74	28700	11.7	0.82	17	1.14	0.086	1.92	106	607	5.73
SG2	10.15	31500	22.6	0.93	33		0.165		103	511	4.96
SC1	10.25	32200	25.3	0.83	19	1.09	0.085	1.92	116	553	4.77
SC2	11.08	38200	48.6	0.91	30		0.163		122	409	3.35

FRP를 외부 보강한 부재의 경우에는 보강재 자체의 취성적인 재료특성과 정착과괴등에 의한 취성적인 파괴양상으로 인하여 부재의 연성도 문제가 고려되지 않을 수 없다.

본 연구에서는 부재의 연성도를 분석하기 위하여 하중-처짐곡선에서 나타나는 에너지 흡수능력을 비교·분석하였으며, 이에 따라 부재의 연성도(Ductility)는 다음과 같이 정의하였다. (Fig. 12 참조)

$$Ductility = \frac{\int_{elastic}^{Maximum} P \cdot \delta}{\int_{elastic} P \cdot \delta} \quad (2)$$

실험결과의 연성도를 비교하여 보면, 1겹보강의 경우에는 4.77~6.30 정도의 연성도를 나타내어 보강되지 않은 보의 56~74%인 것으로 나타났으며, 보강량이 2배로 증가된 2겹보강의 경우에는 39~58%의 연성도를 나타내어 일반적인 인식과 마찬가지로 보강량이 증가할수록 연성도가 감소하는 것을 알 수 있었다. 보강재료별 연성도의 변화는 탄성계수가 가장 큰 CFRP의 경우에서 가장 큰 연성도의 감소 현상이 나타났으며, 재료의 탄성계수가 가장 작은 GFRP의 경우에는 타 재료에 비하여 비교적 연성도 감소가 적은 것으로 나타났다. 이와 같은 현상은 El-Mihilmy 등이 제안한 정착부 콘크리트 주응력 산정식에서<sup>7)</sup>, 보강재의 강성이 증가할수록 정착부 전단 및 수직응력이 증가하여 파괴강도를 앞당기게 된다는 이론으로 설명이 가능하다고 판단된다.

### 3.3 균열 및 파괴양상

FRP로 외부 보강된 시험체의 주된 파괴형태는 인장철근의 항복 후 균열폭의 증가와 함께 FRP와 일부 콘크리트가 함께 모재로부터 분리되는 박락파괴(Delamination)의 형태를 나타내었다. 기준시험체의 경우에는 부재의 중앙부로부터 수직방향의 전형적인 휨균열의 발생과 더불어 파괴되었으며, 보강시험체의 경우에는 가력 초기에 스패 중앙의 두 가력점 사이에서 한쪽으로 편중된 휨균열이 발생된 이후, 단부쪽을 포함한 시험체 하부면에 균열이 발생하면서 진전되었다. 인장철근의 항복 이후에는 기존에 발생한 수직의 휨균열들 사이를 잇는 수평 및 경사진 미소균열들이 표면에서 관찰되었으며, 이러한 새로운 균열들이 성장하여 보강재와 보강재에 부착된 콘크리트의 일부가 모재로부터 탈락되는 박락파괴의 형태를 나타내었다. 유리섬유로 1겹보강된 SG1을 제외한 모든 시험체의 파괴형태는 상기와 같은 박락파괴를 나타내었으며, SG1의 경우에는 중앙부 보강재의 탈락과 함께 GFRP가 인장파단되는 양상을 나타내었다. 이와 같은 보강재의 인장파괴는 Table. 7에 나타난 파괴시 FRP의 변형률로부터 SG1 시험체의 경우 인장축의 변형률이 타 시험체에 비하여 크게 나타났음을 알 수 있다. Fig. 13에서 나타나는 각 시험체의 파괴양상을 살펴보면 SG1을 제외한 모든 보강 시험체의 경우에서 가력점 사이의 보강

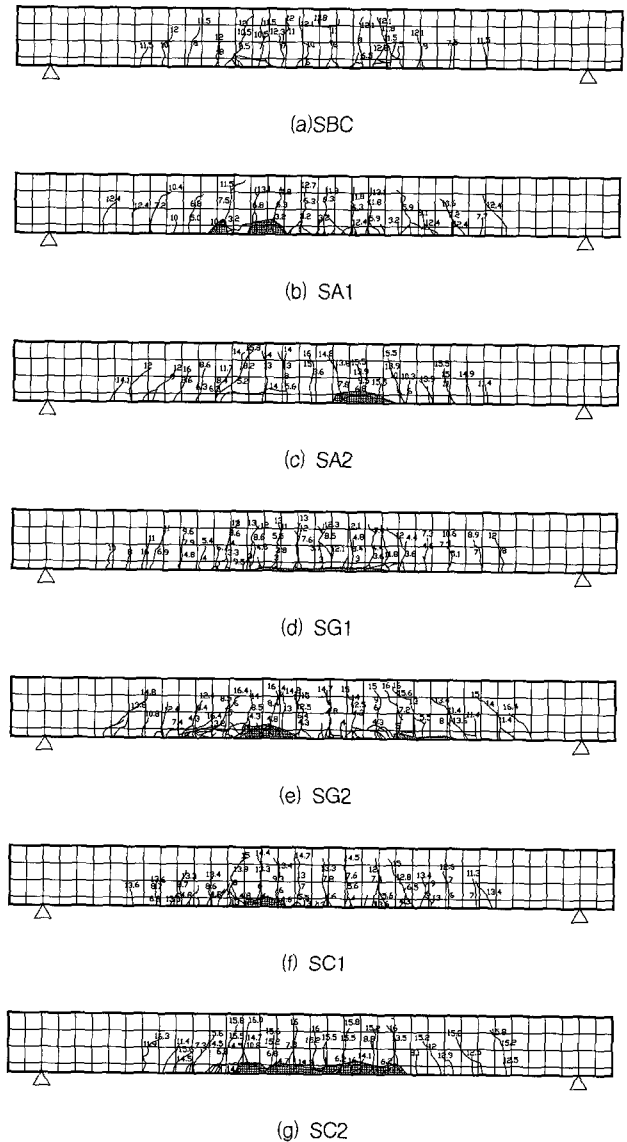


Fig. 13 Failure drawings

Table 7 Test results of failure aspect

Beam	Strain at failure ( $\times 10^{-6}$ )		Failure aspect
	Concrete at compression face	FRP	
SBC	3661	-	Flexural
SA1	3883	13623	Center-delamination
SA2	2823	7328	Center-delamination
SG1	3270	21801	FRP fracture
SG2	3065	8230	Center-delamination
SC1	2902	9175	Center-delamination
SC2	2904	9902	Center-delamination

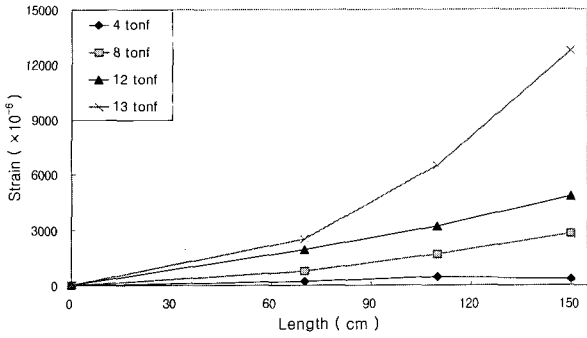


Fig. 14 FRP strain distribution of SA1

재가 콘크리트와 함께 탈락되며 부재가 파괴되는 양상을 나타내었으며, 이와 같은 현상은 시험체 중앙부의 콘크리트의 주응력이 접합부 전단응력 및 휨응력에 의하여 콘크리트의 인장한계를 넘어서면서 파괴가 발생하는 것으로 판단된다.(그림속의 숫자는 균열하중(tonf)를 의미함) 즉, Fig. 14에서 나타나듯이 보강부재의 인장축 변형률은 인장철근의 항복 이후 급격한 증가를 나타내며, 이때 휨모멘트가 최대인 중앙부 근처에서 파괴가 시작되는 것으로 판단된다.

#### 4. 보강설계식 제안

본 연구의 실험결과에 의하면 FRP를 사용하여 인장축에 외부 휨보강된 부재의 경우에는 보강재의 강성에 따라 강도의 강성에 대한 발현비율이 비선형으로 반비례하고 있으며, 보강재의 종류에 따른 변화는 크지 않은 것으로 나타나고 있다. 즉, 외부보강부재의 경우에는 접합 에폭시 등의 성능이 우수하여 모재 콘크리트와의 일체를 이루었다 하더라도, 계면 부위 콘크리트의 접합응력이 보강재의 강성에 따라 증가하게 됨으로써 보강재의 최대내력에 도달하기 전에 박락파괴를 발생시키게 된다. 이에 따라 보강설계식에는 보강재의 내력분담부분에 보강재의 강성에 의한 감소계수가 고려되어야 할 필요가 있다.

즉, 기존의 연구자들에 의한 저항모멘트의 설계식은 다음과 같이 고려할 수 있으며,

$$M_n = M_{n1} + M_{n2} + M_{n3} \\ = (A_s f_y - A_s' f_s')(d - \frac{a}{2}) + A_s' f_s'(d - d') \\ + A_f f_f (h_f - \frac{a}{2}) \quad (3)$$

이때,  $M_{n1}$ 은 인장철근만에 의한 모멘트 분담력이며,  $M_{n2}$ 는 압축철근에 의한 모멘트 분담력, 그리고  $M_{n3}$ 은 보강재에 의한 모멘트 분담력을 의미한다. Fig. 5에서 나타나듯이 기존의 식에서는 보강재의 보강비율이 증가함에 따라  $M_{n1}$  및  $M_{n2}$ 의 크기는 큰 변화를 나타내지 않으나,  $M_{n3}$ 의 과도한 증가에 따라 실험결과와 비교할 때  $M_{n3}$ 의 능력을 과대평가하는 경향이 있으므로, 부재의 안전한 설계를 위해서는

$M_{n3}$ 에 대한 적절한 감소계수의 도입이 필수적이다. 즉, 기존의 설계식은 다음과 같은 감소계수의 도입에 의하여 설계내력을 조정할 수 있다.

$$M_n = M_{n1} + M_{n2} + K_f \cdot M_{n3} \quad (4)$$

이때 감소계수  $K_f$ 는 보강재의 강성을 고려하는 함수로 표시될 것이며, 실험결과와 회귀분석결과 다음과 같은 로그함수로 표시될 수 있다.

$$K_f = 4.3 - \frac{\ln(S_f)}{4} \quad (K_f \leq 1) \quad (5)$$

단,  $S_f = E_f \cdot A_f$  (보강재의 강성)

$E_f$ : 보강재의 탄성계수

$A_f = b_f \cdot t_f$  (보강재의 단면적)

상기의 감소계수는 보강재의 강성을 고려하여 저항모멘트의 보강재 부분의 내력을 감소시키게 된다. 즉, 보강재의 강성이 증가되면 이에 반비례하여 보강재의 저항내력을 감소시키게 되나, 단순한 로그함수의 도입은 GFRP나 AFRP와 같은 저 탄성계수의 보강재에 대해서는 아직까지도 내력을 과대평가할 수 있다. 이에 따라 보다 실질적이고 편리한 설계식의 작성을 위해서는 이와 같은 저 탄성계수의 보강재에 대한 추가적인 보정이 필요하게 된다. 따라서, 본 연구에서는 다음과 같이 섬유유 종류에 따른 보정을 실시하도록 제안한다.

Table 8 Comparison with proposed formula

Beam	Test load (ton)	Proposed formula (5)	ratio with test	Proposed formula (6)	ratio with test
SBC	11.69	9.90	1.18	9.90	1.18
SA1	14.86	13.09	1.13	11.78	1.26
SA2	16.16	14.58	1.11	13.12	1.23
SG1	14.13	14.16	1.00	11.33	1.25
SG2	16.82	16.59	1.01	13.27	1.27
SC1	15.25	12.70	1.20	12.70	1.20
SC2	16.67	13.85	1.20	13.85	1.20

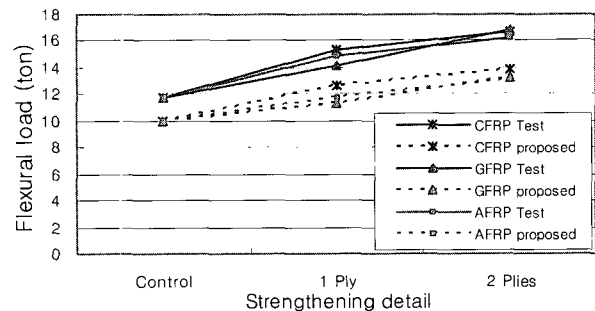


Fig. 15 Comparison with proposed formula

Table 9 Comparison with previous research results

Researcher	Specimen details									Test result (ton)	Previous proposed formula (3)	Proposed formula (6) (ton)	Test / proposal (6)	Remarks
	b (cm)	h (cm)	L (cm)	$f_{ck}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$A_s$ (cm <sup>2</sup> )	$A_s'$ (cm <sup>2</sup> )	$b_f$ (cm)	$t_f$ (cm)	FRP					
Rahimi <sup>1)</sup>	20	15	210	600	1.57	1.005	15	0.12	CFRP	6.97	8.58	6.11	1.14	
	20	15	210	600	1.57	1.005	15	0.18	GFRP	6.16	9.09	6.41	0.96	
Niguyen <sup>2)</sup>	12	15	133	321	2.36	0.565	8	0.12	CFRP	5.89	9.10	7.66	0.77	Lack of development length
P.M. et al. <sup>3)</sup>	15	25	280	540	9.42	0	13	0.35	GFRP	19.7	25.57	19.54	1.01	
Quantrill <sup>4)</sup>	10	10	90	530	0.85	0.57	8	0.12	CFRP	4.08	5.15	4.42	0.92	low E modulus

$$K_f = C_f \cdot \left( 4.3 - \frac{\ln(S_f)}{4} \right) \quad (6)$$

단,  $C_f$ : 보강 섬유 종류에 따른 계수

- CFRP = 1.0
- AFRP = 0.9
- GFRP = 0.8

상기의 제안식에 따라 각 부재의 내력 및 실험결과를 정리하여 보면 다음의 Table. 8 및 Fig. 15와 같이 본 연구의 실험결과를 약 20% 정도의 안전율로 비교적 잘 예측하고 있음을 알 수 있다.

또한, Fig. 15로부터 본 연구의 제안식은 보강부재의 내력 향상의 경향을 잘 추적하고 있는 것으로 판단된다. 기존의 연구결과와 본 연구의 제안식을 비교하여 보면 Table. 9에서 나타나듯이, 정착파괴를 일으킨 Niguyen의 시험체나 저탄성계수의 CFRP를 사용한 Quantrill의 시험체를 제외하고, 일반적인 강도의 보강재료와 박락파괴를 나타내는 대부분의 시험체에서 그 파괴강도를 대체적으로 잘 예측하고 있음을 알 수 있다.

### 5. 결 론

인장축 외단부에 섬유보강재료로 휨보강된 RC부재의 보강성능 평가에 관한 연구결과로 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 동일한 인장강도로 보강설계된 보의 경우, 그 내력은 보강재의 강성에 관계되며, 단위강성당 내력은 보강재의 강성과 비선형적으로 반비례한다.
- 2) 부재의 전체 강성(하중-처짐관계)는 섬유의 종류에 크게 관계되지 않으며, 연성도(ductility)는 강성이 증가할수록 대체적으로 감소하는 경향을 나타낸다. 특히, 연성도의 감소는 보강량이 커질수록 뚜렷한 경향을 나타내는 것으로 판단된다.
- 3) 정착파괴를 방지할 수 있는 적절한 보강길이를 확보하였을 경우 부재의 내력은 박락파괴(delamination)

강도에 의하여 결정된다.

- 4) 기존의 보강설계식은 보강부재의 내력을 과다평가하고 있으며, 본 연구에서 제안한 보강재 강도감소계수의 도입 및 제안 설계식은 기존의 연구결과와 비교할 때 상당히 타당한 결과를 갖는 것으로 분석된다.

### 감사의 글

이 논문은 한국과학재단의 해외 Post-doc. 연수지원비에 의하여 연구되었음.

### 참고 문헌

1. Hamid Rahimi and Allan Hutchinson, "Concrete beams strengthened with externally bonded FRP plates," *Journal of composites for construction*, Vol.5 No.1, Feb. 2001, pp.44~56.
2. Dai Minh Nguyen et al., "Brittle failure and bond development length of CFRP-concrete beams," *Journal of composites for construction*, Vol.5 No.1, Feb. 2001, pp.12~17.
3. Phalguni Mukhopadhyaya and Narayan Swamy, "Optimizing structural response of beams strengthened with GFRP plates," *Journal of composites for construction*, May 1998, pp.87~95.
4. R.J.Quantrill et al., "Experimental and analytical investigation of FRP strengthened beam response: Part I," *Magazine of concrete research*, No. 177, Dec. 1996, pp.331~342.
5. ACI Committee 440, "Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures," *ACI*, Jan. 2000.
6. C. Allen Ross et al., "Strengthening of reinforced concrete beams with externally bonded composite laminates," *ACI Structural Journal*, Mar.-April



- 1999, pp.212~220.
7. Mahmoud T. El-Mihilmy et al., "Prediction of anchorage failure for reinforced concrete beams strengthened with fiber-reinforced polymer plates," *ACI Structural Journal*, May-June 2001, pp.301~314.
  8. Kasumassa Nakaba et al., "Bond behavior between fiber-reinforced polymer laminates and concrete," *ACI Structural Journal*, May-June 2001, pp.359~367.
  9. Alfarabi Sharif, M.H. Baluch et al., "Strengthening of initially loaded reinforced concrete beams using FRP plates," *ACI Structural Journal Technical Paper*, Mar.-April 1994, pp.160~168.
  10. 한만엽, 송병표, "보강재의 변형 부착에 따른 보의 구조적 거동," 콘크리트학회지 제 10권 3호, 1998년 6월, pp.197~208.

## 요 약

섬유보강재를 사용한 철근콘크리트 부재의 보강공법은 재료의 내부식성 및 시공의 편리성 등 여러 가지 장점으로 인하여 최근 그 사용이 현저하게 증가하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 여러 가지 종류의 섬유보강재를 사용하여 휨보강된 철근콘크리트 보의 휨성능을 비교하고, 그 특성을 고려한 보강설계식을 제안하였다. 섬유보강재의 종류(아라미드, 유리, 탄소섬유) 및 보강비에 따른 철근콘크리트 보의 휨성능을 검토하기 위하여 3.2m 스패의 단순보에 대한 실험을 실시하였으며, 실험의 결과를 최대내력, 강성 및 연성도의 관점에서 분석하였다.

본 연구의 실험결과, 부재의 휨보강내력은 보강재의 종류에 따른 인장강도보다는 강성에 주로 관계하는 것으로 나타났으며, 연성도는 강성이 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었다. 본 연구에서는 이와 같은 실험결과를 기반으로 휨보강설계식을 제안하였으며, 이를 신뢰성있는 선행 연구자들의 연구결과와 비교하여 그 타당성을 검증하였다.

**핵심용어 :** 보강, 섬유보강재, 휨보강성능, 강성, 내하력, 설계식