

# 탄소섬유쉬트로 보강된 RC보의 휨 부착성능에 관한 실험적 연구

## An Experimental Study on Flexural Adhesive Performance of RC Beams Strengthened by Carbon Fiber Sheets

최기선\* 류화성\* 최근도\* 이한승\*\* 유영찬\*\*\* 김금환\*\*\*\*  
Choi, Ki Sun Ryu, Hwa Sung Choi, Keun Do Lee, Han Seung You, Young Chan Kim, Keung Hwan

### ABSTRACT

Tensile strength of CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) is approximately 10 times higher than that of the steel reinforcement, but the design strength of CFRP is normally reduced by the bond failure between RC and CFRP. Many researches have been carried out, concerned with bond behavior between RC and CFRP to prevent the unpredicted bond failure of RC beam strengthened by CFRP, but the national design code for design bond strength of CFRP hasn't been constructed.

In this study, 3 beams specimen strengthened by CFRP under the variable of bonded length were tested to derive the design bond strength of CFRP to the RC flexural members. Also 2 beams specimen strengthened by CFRP were tested to inspect the construction environment effects such as mixing error of epoxy resin and the amount of primer epoxy resin. From the test results, It is concluded that the maximum design bond strength of CFRP to RC flexural member is considered to be  $\tau_a = 8 \text{ kgf/cm}^2$ .

### 1. 서 론

탄소섬유쉬트는 구조체의 인장축에 보강하여 철근의 인장 응력을 분담함으로써 부족한 내력을 확보하고, 과도한 처짐 및 균열을 억제함으로써 사용성을 확보하게 된다. 일반적으로 보강에 많이 사용되는 쉬트형 탄소섬유는 자체 접착성능이 없으므로 접착제로 에폭시 수지를 사용하여 구조체와 일체화시킨다. 그러므로 인장재로서의 성능을 충분히 발휘하기 위해서는 탄소섬유쉬트와 콘크리트간의 부착성능 확보가 우선되어야 한다. 선행연구<sup>1)</sup>에서 실시된 단순 인장전단 상태에서의 콘크리트와 탄소섬유쉬트와의 부착강도에 관한 실험결과에 의하면, 평균부착응력은 대략  $\tau_a = 10 \text{ kgf/cm}^2$  내외로 밝혀졌다. 그러나 공시체에 대한 단순 인장전단 접착거동은 실제 구조물의 휨 거동과는 차이가 있을 것으로 예상되므로, 구조물에서의 휨 인장상태에서의 부착성능을 검토할 필요성이 있다. 본 연구에서는 휨 인장상태에서 탄소섬유쉬트와 콘크리트의 부착성능을 규명하기 위하여 부착길이를 변수로 하는 실험체와 에폭시 강도 및 프라이머 도포량을 변수로 하는 실험체를 각각 제작하여 그 영향을 검토하였다.

\* 정회원, 한국건설기술연구원, 연구원  
\*\* 정회원, 한양대학교 초대형구조시스템연구센터 연구조교수  
\*\*\* 정회원, 한국건설기술연구원, 선임연구원  
\*\*\*\* 정회원, 한국건설기술연구원, 선임연구부장

## 2. 연구내용 및 방법

탄소섬유쉬트 보강공법에서는 보강설계시에 목표로 한 구조성능을 발휘하기 위하여 콘크리트와 탄소섬유쉬트와의 조기 부착파괴를 방지하기에 충분한 부착강도를 확보하는 것이 선행되어야 할 과제이다. 하지만 탄소섬유쉬트의 부착길이를 산정하기 위한 설계용 부착강도에 관한 국내 규정은 아직 없으며, 단지 탄소섬유쉬트의 제조회사에서 자체적으로 제시하고 있는 부착강도를 참고로 하여 적용하고 있는 실정이다. 한편, 국내에서 실시된 탄소섬유쉬트와 콘크리트와의 인장전단 응력상태에 대한 선행연구 실험결과에 의하면 약  $\tau_a = 10 \text{ kgf/cm}^2$  내외에서 부착파괴가 발생된 것으로 보고되고 있다<sup>1)</sup>. 따라서 본 연구에서는 국내 A사에서 제시하고 있는 부착강도<sup>2)</sup>( $\tau_a = 6 \text{ kgf/cm}^2$ ), 일본규준<sup>3)</sup>( $\tau_a = 4.4 \text{ kgf/cm}^2$ ) 및 선행연구의 실험결과를 참고로 하여 적정 설계용 부착강도를 도출하기 위한 실험적 연구를 수행하였으며, 부가적으로 합침 접착제 자체의 성능변화, 프라이머 도포량의 변화 등의 시공환경 요인이 탄소섬유쉬트 보강공법의 성능에 미치는 영향을 검토하였다.

## 3. 실험

### 3.1 재료실험

실험체 제작에 사용된 콘크리트는 설계압축강도  $240 \text{ kgf/cm}^2$ 이며, 탄소섬유쉬트는 국내 A사의 고강도 200g 제품을 사용하였다. 각 재료의 시험 결과는 Table 1~Table 4와 같다.

Table 1 Material properties of concrete

Curing age	Tensile strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	Compressive strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	Modulus of elasticity (kgf/cm <sup>2</sup> )
28 days	-	274	2.48E5
32 days	22.4	308	2.63E5

Table 2 Material properties of reinforcement

Bar type	Yield strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	Tensile strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	Modulus of elasticity (kgf/cm <sup>2</sup> )	Elongation (%)
D-10	3750	6850	1.50E6	15
D-13	4800	5920	2.07E6	15

Table 3 Material properties of CFS

THK, (cm)	Tensile strength (kgf/cm <sup>2</sup> )		Modulus of elasticity (kgf/cm <sup>2</sup> )		Failure strain	
	Nominal	Test	Nominal	Test	Nominal	Test
0.0111	35,500	45,134	2.35E6	2.59E6	0.0151	0.017

Table 4 Material properties of Epoxy

Classification	Compressive strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	Tensile strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	Flexible strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	Shear strength (kgf/cm <sup>2</sup> )
Catalog	700	300	400	100
Test	647	320	490	110

### 3.2 가력 및 측정

탄소섬유쉬트의 휨 부착성능 실험을 위하여 가력골조를 설치하고 25tf 용량의 Actuator로 1점 가력하였다. 탄소섬유쉬트 내의 응력분포를 파악하기 위하여 보강된 탄소섬유쉬트 전 길이에 걸쳐 게이지를 부착하되 응력집중이 예상되는 단부에는 게이지 간격을 좁게 부착하였다. 인장철근에는 보 중앙부 위치 뿐만 아니라 보강된 탄소섬유쉬트 최외단에서 5cm 떨어진 위치에 게이지를 부착하여 동일한 위치의 탄소섬유쉬트 게이지와 비교하였다. 각 실험체별 측정장치의 부착위치는 그림 1과 같다.

### 3.3 실험체 개요

실험체의 단면치수는 폭 15cm 높이 25cm로 인장측과 압축측 피복두께를 3cm로 하였으며, 지점길이 2.4m, 전체 실험체 길

이 3m로 계획하였다. 일반적인 철근콘크리트 보에서는 인장철근의 단면적이 압축철근 단면적보다 큰 것이 정상이나 탄소섬유로 보강된 축소모형 실험체에서는 탄소섬유슈트가 파단변형도에 이르기 전에 콘크리트가 한계압축변형도( $\epsilon_c=0.003$ )에 도달하게 된다. 따라서 본 실험에서는 탄소섬유슈트의 보강으로 인한 콘크리트 연단에서의 압괴를 방지하기 위하여 축소모형 실험체의 압축철근으로 2-D13, 인장철근을 2-D10으로 배근하였다. 전단 보강근은 휨 파괴를 유도하기 위하여 D10 철근을 10cm 간격으로 배근하였다. 각 실험체의 형상 및 치수는 Fig 2와 같다. 실험체는 총 6개로 기준실험체인 무보강 실험체와 부착길이를 변수로 하는 EF1-A계열 실험체 3개, 에폭시 계량오차를 변수로 하는 EF1-R 실험체와 프라이머 도포량을 변수로 하는 EF1-W 실험체를 제작하였다. Table 5에서 기준실험체 ES는 탄소섬유슈트 보강을 하지 않은 실험체이며, 부착길이를 변수로 한 실험체 EF1-A1, EF1-A2, EF1-A3은 ES 실험체와 동일한 단면을 갖고 탄소섬유슈트 1매를 보강한 실험체로 각각 제시된 부착응력에 의해 식 (1)로 구한 것이다.

$$L1 = \left( \frac{A_{cf} \times f_{cf}}{\tau_a \times b_a} \right) \times 2 : L > L1 \text{ 슈트파단} \quad (1)$$

프라이머의 도포량을 변수로 한 EF1-W 실험체는 계량비율은 동일하되 프라이머의 양을 표준치의 60% 도포한 것으로, 부착길이는 170cm인 EF1-A1 실험체와 같다.

에폭시 계량오차를 변수로 하는 EF1-R 실험체는 기준치인 주재 대 경화제의 혼합비 2:1에서 주재의 양을 20% 감소한 것으로, 부착길이는 130cm로 EF1-A2 실험체와 같다. 재료실험 결과에 의하면 주재 대 경화제 비가 -20%일 때 에폭시 인장강도는  $319\text{kgf/cm}^2 \rightarrow 154\text{kgf/cm}^2$ 으로 표준강도의 48%로 감소하게 된다<sup>4)</sup>. 각 실험체의 특성은 Table 5와 같다.

Table 5 Summary of the test specimens

Specimen	Reinforcement	Bond stress (kgf/cm <sup>2</sup> )	Layer (ply)	Bond length (cm)	L1 (cm)	Bond stress based on	Remark
ES	$\rho / \rho_b = 0.16$	.	.	.	.	-	Standard
EF1-A1	$A'_s = 2.54\text{cm}^2$ $A_s = 1.42\text{cm}^2$ $A_{cf} = 0.111\text{cm}^2$	4.4	1	170	179.1	JCI Recommend	-
EF1-A2		6	1	130	131.4	Company, A	-
EF1-A3		8	1	100	98.5	Test Result	-
EF1-W		4.4	1	170	179.1	-	Primer Reduction
EF1-R		6	1	130	131.4	-	Epoxy mixing error

#### 4. 실험 결과

##### 4.1 실험결과 분석

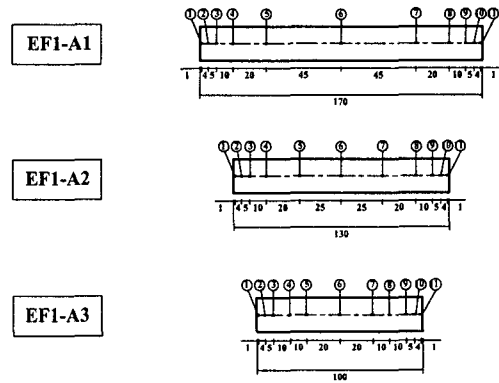


Fig 1 Position of strain gages in CFS

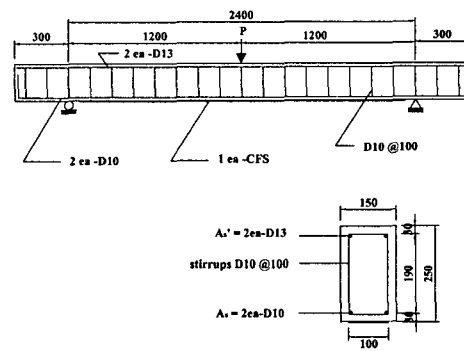


Fig 2 Typical specimen dimension

실험으로부터 얻은 초기 균열하중과 철근이 항복하는 항복 하중, 실험체가 파괴되거나 하중이 감소하는 경향을 보일 때의 최대하중을 각각 이론치와 비교하여 나타내면 Table 6과 같다. Table 6에서 이론치는 철근과 탄소섬유쉬트의 설계인장강도를 사용하는 기준값(Cal<sub>n</sub>)과, 각 재료의 인장실험을 통하여 구한 실제 인장강도를 적용한 해석값(Cal<sub>e</sub>) 및 철근은 설계인장 강도값, 탄소섬유쉬트의 응력은 실험시의 변형도로부터 계산된 응력을 기준으로 하여 계산한 실험해석값(Cal<sub>e</sub>) 으로 구분하여 계산하였다.

탄소섬유쉬트를 보강하지 않은 ES 실험체를 기준으로 할 때 프라이머의 도포량을 감소시킨 EF1-W 실험체를 제외하고는 모든 실험체가 탄소섬유쉬트가 파단되는 거동을 보였다. 즉, 평균부착응력을 8 kgf/cm<sup>2</sup>으로 적용하여도 부착파괴는 발생 하지 않으며, 에폭시의 강도를 48% 저감하여도 탄소섬유쉬트의 부착성능에는 큰 영향이 없는 것으로 나타났다.

실험결과에서 무보강 실험체에 비하여 탄소섬유쉬트를 1배 보강하였을 경우 탄소섬유쉬트의 하중분담으로 항복하중은 28%~35%의 증가를 보였으며, 철근의 항복이후 탄소섬유쉬트의 2차 강성발현으로 최대하중은 무보강 실험체의 항복하중 기준으로 68%~94%의 증가효과를 보였다. 항복하중은 비교적 유사한 값을 보이나 최대하중은 다소 오차가 심하게 나타났으며, 부착파괴가 발생했음에도 불구하고 탄소섬유쉬트가 파단된 실험체 보다 더 높게 나온 것으로 미루어, 프라이머 도포량을 60%로 감소시켜도 보강성능상에는 문제가 없는 것으로 판단된다. 프라이머는 콘크리트 면에 침투하여 함침체인 레진과의 부착성능을 향상시키는 효과를 목적으로 하는 만큼 콘크리트 표면 상태와 밀접한 관계를 가진다. 그러나 탄소섬유쉬트를 부착하는 보강에서는 열화된 콘크리트 표면의 연마가 선행되어지며 선행연구에서 콘크리트의 흡수를 및 표면상태와 프라이머 도포량을 변수로 인발접착실험을 수행한 결과에서도 큰 영향이 없는 것으로 나타났다. 단지 탄소섬유쉬트의 파단 임계점에서 국부적인 박리로 인해 부착파괴가 선행된 것으로 보여진다. Fig 3은 각 실험체의 하중-변위 곡선을 나타낸 것이며, Fig 4는 최종파괴시 균열분포를 보여준다.

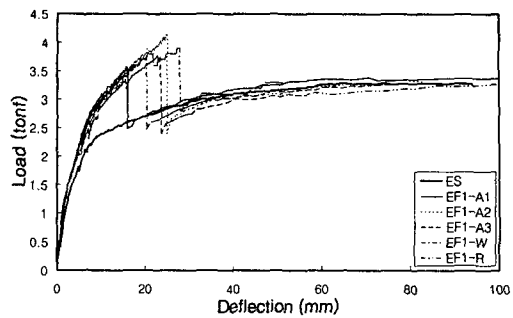


Fig 3 P-δ Curve of test specimens

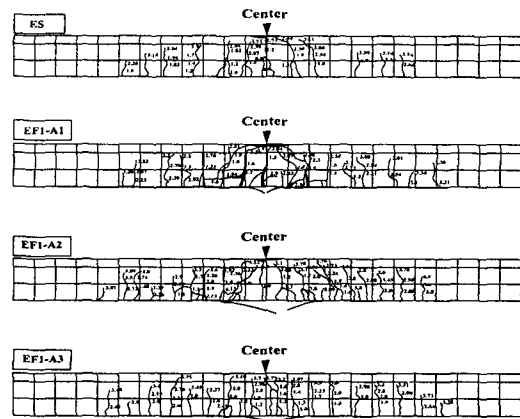


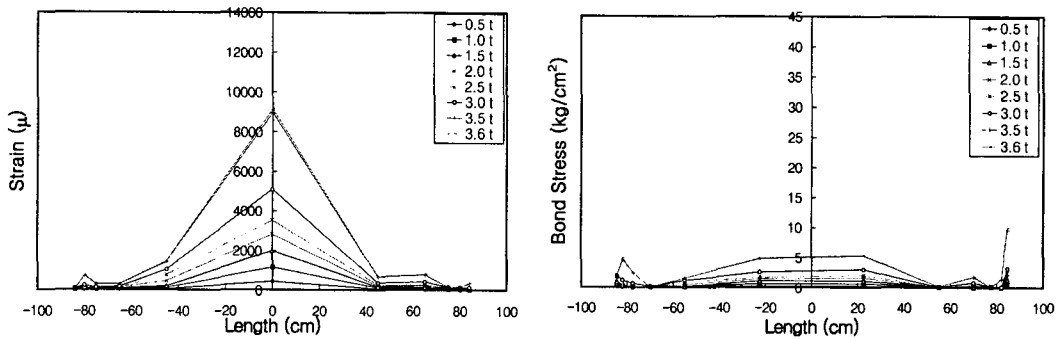
Fig 4 Comparison of cracking at ultimate load

Table 6 Comparison of calculative and experimental results

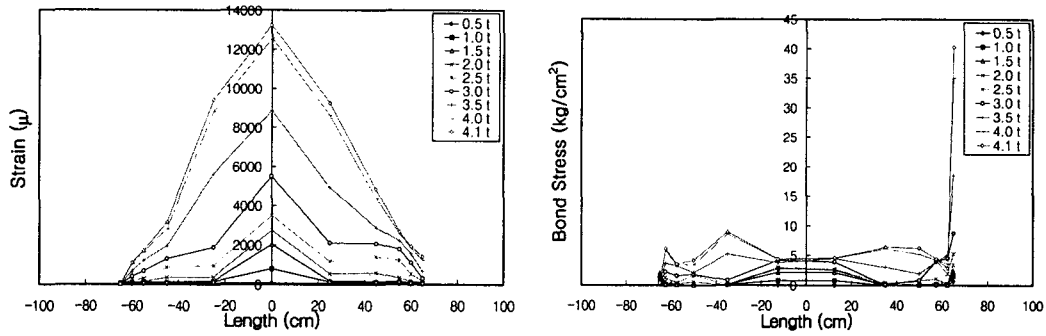
Specimen	Crack load (tf)		Yield load (tf)		Maximum load (tf)					P <sub>max</sub> /P <sub>y-ES</sub>	Failure mode
	Cal <sub>n</sub>	Exp	Cal <sub>n</sub>	Exp	Cal <sub>n</sub>	Cal <sub>e</sub>	Cal <sub>e</sub>	Exp	ε <sub>ef</sub>		
ES	0.92	0.6	1.9	2.01	2.04	2.5	-	3.28	-	1.00	Flexural
EF1-A1	0.96	1.1	2.13	2.70	3.48	4.25	2.87	3.57	9,147	1.78	Fracture
EF1-A2	0.96	1.1	2.13	2.60	3.48	4.25	3.30	4.13	13,239	2.05	Fracture
EF1-A3	0.96	1.1	2.13	2.89	3.48	4.25	3.22	3.74	12,500	1.86	Fracture
EF1-W	0.96	1.1	2.13	2.72	3.48	4.25	3.00	3.90	10,346	1.94	Rip-off
EF1-R	0.96	0.8	2.13	2.86	3.48	4.25	3.04	3.76	10,730	1.87	Fracture

4.2 변형도 분포

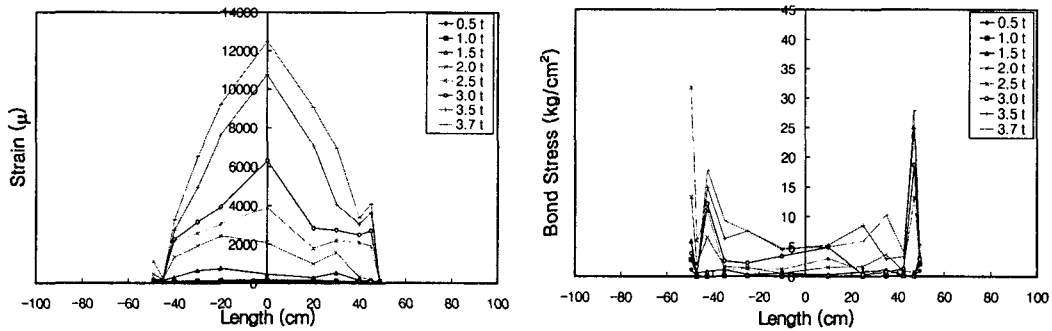
이론적으로 집중하중을 받는 단순보는 단부에서부터 하중가력점까지 선형적인 변형도 분포를 보이게 되지만 철근이 항복한 이후 소성경화가 이루어지기 전까지는 탄소섬유쉬트가 추가되는 하중에 대하여 저항하기 때문에 철근 항복구간 내에서의 변형을 곡선의 기울기도 증가하게 된다. Fig 5의 좌측은 각 실험체의 탄소섬유쉬트 변형도 분포를 나타낸 것으로 항복하중 이전에는 대체로 선형적인 변형률 분포를 보이지만, 이후 항복구간에서는 변형률이 증가하는 것으로 나타났다. Fig. 5에서 보는 바와 같이, 3개의 실험체 모두 탄소섬유쉬트의 파단이 발생했지만 파단시의 변형도는 0.0091~0.012 정도의 변동폭을 나타내고 있으며, 이에 따른 최대내력도 3.57~4.13 으로 큰 변동 폭을 나타내고 있다. 따라서, 탄소섬유쉬트의 파단을 기준으로 하여 보 강설계를 할 경우, 탄소섬유쉬트의 파단시 변형율의 변동폭을 고려한 안전계수의 도입이 필요하다고 판단된다.



(a) EF1-A1



(b) EF1-A2



(c) EF1-A3

Fig 5 CFS strain distributions and calculated bond stresses

### 4.3 평균부착응력

Fig 5의 우측 그래프는 탄소섬유쉬트에 부착된 스트레인게이지 간의 변형률 차이를 식 (2)를 사용하여 계산한 탄소섬유쉬트의 부착응력이다. 균열에 의한 변형률의 편차를 보이는 단부를 제외한 구간에서는 대체로 일정한 응력을 나타내며, 단부에서의 응력집중은 부착길이가 짧아질수록 증가하는 것으로 나타났다. Fig. 5에서 보는 바와 같이, 중앙부 최대모멘트 주위에서의 평균 부착응력은 약  $5\text{kgf/cm}^2$  내외로, (1)식에 의해 계산된 부착강도 보다 작은 값을 나타내고 있다. 이는 불규칙한 휨균열의 발생 및 실험계측에서의 오차에 근간하는 것으로 사료되나, 어느 정도 계산치와 유사한 값을 나타내고 있으므로 타당성이 있다고 판단된다.

$$\tau_x = \frac{(\epsilon_{x+1} - \epsilon_x) E_{cf} t_{cf} n}{l_x} \quad (2)$$

여기에서,  $\tau_x$  : x 구간의 부착응력,  $\epsilon$  : 탄소섬유쉬트의 변형률,  $E_{cf}$  : 탄소섬유쉬트의 탄성계수,  
 $t_{cf}$  : 탄소섬유쉬트의 두께,  $n$  : 탄소섬유쉬트의 매수,  $l_x$  : x 구간의 길이

## 5. 결 론

본 연구에서는 탄소섬유쉬트 보강공법의 부착성능에 영향을 미치는 요인으로 탄소섬유쉬트의 부착길이, 에폭시 도포량, 에폭시 계량오차에 따른 강도저감 변수를 적용하여 휨 인장상태에서 실험을 수행하였다. 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 적정 부착길이 산정을 위한 설계용 부착강도는 일본의  $\tau_a = 4.4\text{kgf/cm}^2$  및 국내 A사에서 적용하는  $\tau_a = 6\text{kgf/cm}^2$  모두 안전측이며, 본 실험결과에 의하면 최대  $\tau_a = 8\text{kgf/cm}^2$  까지 가능할 것으로 판단된다.
- (2) 에폭시 수지의 혼합오차를 통해 에폭시 강도를 48% 감소시켜도 부착강도에는 큰 영향이 없는 것으로 나타났다. 에폭시는 탄소섬유쉬트의 접착 및 구속으로 인한 강도발현을 목적으로 하므로 에폭시 강도는 기준강도를 상회하지 않아도 일정 강도 이상이면 합성재로서의 구조적 성능을 발휘할 수 있는 것으로 판단된다.
- (3) 프라이머의 도포량을 기준량의 60%로 감소시켰을 경우 부착과파가 발생되었으나, 파단 임계점에서 국부적인 박리의 진행으로 인하여 부착과파가 선행된 것으로 보인다. 따라서, 부착성능의 향상을 위해서는 프라이머 및 에폭시의 표준 도포량을 준수하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

1. 최근도, 류화승, 최기선, 이한승, 유영찬, 김궁환, “탄소섬유쉬트와 콘크리트의 부착”, 가을학술발표회논문집, 한국콘크리트 공학회, 제12권 2호, 2000, pp.1019~1024
2. (주)한국화이버/한국카본, “탄소섬유시트 공법 기술자료(II)”, 해림, 1998, pp.52
3. 土木學會コンクリト委員會, “コンクリト構造物の補強指針(案)”, 土木學會, 1999, pp94
4. 건설교통부, 한국건설기술연구원, “철근콘크리트 건축구조물 보수·보강 공법의 성능평가에 관한 연구”, 건설교통부 연구과제, 2000. 11, pp.126~135