

炭素纖維쉬트의 材料 力學的 特性에 관한 研究

Study on the Mechanical Properties of Carbon Fiber Sheet

이 한 승*

Lee, Han Seung

ABSTRACT

As carbon fiber is a light-weight materials, high tensile strength and durability compared with rebar, the retrofitting method for RC structures using carbon fiber sheet (CFS) must be use widely. In this paper, the tensile strength test for carbon fiber sheet variable of CF's weight and elastic modulus to evaluate the design tensile strength of carbon fiber sheet which is needed for the strengthening design of CFS and the calculation of strengthening effect. As a result, the design tensile strength of CFS can be calculate using the effect coefficient of strengthening(α) of CFS, the average tensile strength of CFS and the standard deviation of CFS(equation 5)

1. 서 론

RC조 건축물의 보강공법 중에서 최근 널리 사용되고 있는 탄소섬유쉬트 보강공법(이하 CFS 보강공법이라 함)은 탄소섬유를 쉬트상으로 제작한 후, 에폭시 수지를 사용하여 콘크리트 표면에 부착시키거나 감싸 탄소섬유쉬트와 콘크리트를 일체화 시키는 공법이다. 따라서, 탄소섬유에 걸리는 응력은 탄소섬유쉬트와 콘크리트의 부착에 의해 전달되며 인장강도는 탄소섬유쉬트만이 발휘하고 에폭시수지는 보조적인 역할만을 한다. 그 때문에 탄소섬유쉬트의 인장강도는 제조상에 품질편차가 발생하고, 특히, 응력집중이 일어나기 쉽기 때문에 탄소섬유 자체의 인장강도보다 저하 할 것으로 보인다. 또한, CFS 보강공법의 시공은 주로 현장에서 이루어지기 때문에 품질관리면에서 탄소섬유쉬트가 가지고 있는 인장강도 보다도 상당한 안전계수를 사용하여 설계용 인장강도를 산정 할 필요가 있다. 또한, 탄소섬유 보강공법으로 보강된 구조부재의 파괴는 대부분이 탄소섬유쉬트의 박락으로 발생되며, 탄소섬유쉬트의 응력도는 구조부재나 시공방법에 따라 달라지기 때문에 보강효과를 정량적으로 파악하기 위해서는 탄소섬유쉬트의 재료물성을 정확히 파악하는 것이 중요하다. 그러나, 대부분의 연구에서는 탄소섬유쉬트에 의한 보강효과 산정시, 탄소섬유쉬트의 재료물성은 메이커의 카탈로그 값에 의존하고 있는 실정으로 탄소섬유쉬트의 인장강도에 관한 데이터는 거의 전무한 실정이다.

본 연구의 목적은 철근콘크리트조 건축물의 보강공법에 사용되는 탄소섬유쉬트를 대상으로 그 재료역학적 물성을 일축 인장시험에 의하여 파악함으로써 CFS 보강공법의 보강설계 및 품질관리를 위해 탄소섬유쉬트의 설계용 인장강도 산정에 관한 기초자료를 제공하는 것이다.

* 정희원, 한양대학교 초대형 구조물 시스템 연구 센터 연구 조교수

2. 탄소섬유쉬트 보강공법에서의 탄소섬유쉬트의 설계용 인장강도 산정방법

2.1. 탄소섬유쉬트에 의한 RC 구조부재의 보강 개요

그림 1과 같이 탄소섬유는 경량(강재의 1/4)으로 내구성이 뛰어나고 강재와 동등한 탄성계수를 가지고 있으며 약 10배의 인장강도를 가지고 있다. 그러나 철근과 달리 항복현상을 보이지 않는 재료특성을 가지고 있기 때문에 취성적인 파괴를 일으킬 염려가 있으며 재료 안전성을 고려해 보강설계시 필요한 인장강도를 명확히 할 필요가 있다. 또한, 탄소섬유쉬트는 그림 2와 같이 주로 RC보나 슬래브의 휨보강 및 RC기둥의 전단보강에 사용되며 그림 3과 같이 내력 증가와 함께 인성이 크게 향상하는 효과가 있다. 그러나, 종국변위는 탄소섬유쉬트의 박리 또는 파단에 의해 발생 되는 것을 알 수 있다.

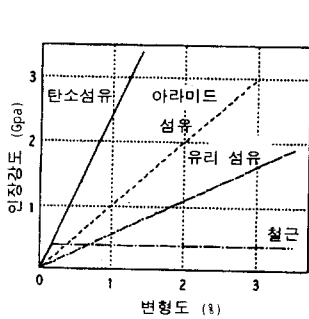


그림 1 CF의 응력도-변형도

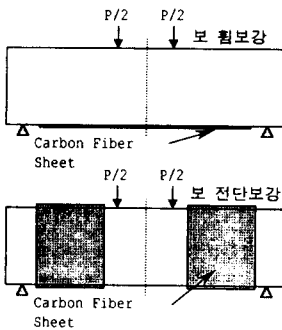


그림 2 CFS의 보강방법

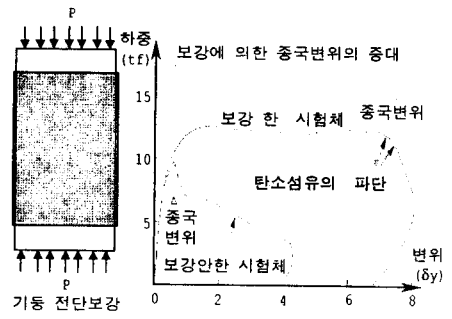


그림 3 CFS 보강공법의 효과

2.2. 탄소섬유쉬트의 설계용 인장강도 산정방법

탄소섬유쉬트의 설계용 인장강도 산정방법을 표 1에 나타낸다¹⁾. 탄소섬유의 재료강도는 21,000~28,000 kgf/cm²으로서 메이커의 카탈로그 값보다는 0.6~0.8배 정도 작은 값을 사용하여 충분한 안전계수를 사용하고 있다. 또한, 그림 4는 CFS로 전단보강한 RC보의 구조성능에 관한 연구결과이다. 최대 내력시 CFS는 파단하고 있지 않으므로 메이커 카탈로그 인장강도의 약 0.6배 정도의 용력을 나타내고 있기 때문에 이를 보강효과에 기여하는 유효계수(α)로서 산정하고 있다.

표 1 탄소섬유쉬트의 설계용 인장강도 산정방법

재료정수	AF공법*	SR-CF공법	CRS-CL공법	MARS공법
재료강도(σ_f) (kgf/cm ²)	21,000	23,500	20,000	28,000
유효계수(α)	0.3	$\frac{2}{3}$	-	$\frac{2}{3}$
유효변형도(μ)	9,000	10,000	-	$\frac{2}{3} \epsilon_{max}$
설계용 인장강도	$0.3 \cdot \sigma_f$	$\frac{2}{3} \cdot \sigma_f$	18,000 (전단설계용)	$\frac{2}{3} \cdot \sigma_f$

*아라미드 섬유

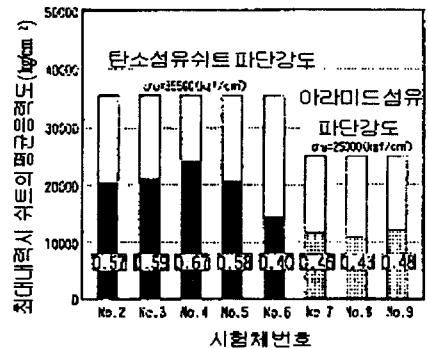


그림 4 최대내력시의 CFS의 평균응력도

특히, CFS 보강공법 내력평가지 사용하는 CFS의 인장강도는 CFS 재료강도에 보강 유효계수(α)를 곱하거나, CFS의 변형도가 표 1에 나타내는 유효 변형도(μ)에 도달 했을 때로 산정하고 있으며 이는 최대변형도의 2/3에 해당되어 보강 유효계수(α)와 거의 일치함을 알 수 있다. 또한, 탄소섬유쉬트는 철근과 동일하게 휨내력 및 전단내력을 부담하기 때문에 휨 내력 및 전단내력의 평가는 식(1) ~ 식(4)와 같이 기존 내력 산정식에 탄소섬유쉬트가 분담하는 부분을 누가시켜 평가 하고 있다. 특히, 탄소섬유쉬트의 내력평가 부분은 탄소섬유쉬트의 재료강도에 부재실험을 통하여 얻어진 보강 유효계수(α)를 곱하여 평가하고 있다. 따라서, 내력평가에서는 부재별로 시공성 및 환경조건을 고려한 보강 유효계수(α)의 적절한 평가와 함께 CFS의 재료강도의 산정이 매우 중요함을 알 수 있다.

$$M_{total} = M_{steel} + M_{cfs} = (0.9 \times a_t \times \sigma_{sy} \times d) + (0.9 \times a_f \times E_f / E_s \times \alpha \times \sigma_{sf} \times D) \quad (1)$$

$$P_t \times \sigma_y \text{ (전체 휨 보강량)} = P_{st} \times \sigma_{sy} + P_{cf} \times \alpha \times \sigma_{cf} \quad (2)$$

a_t ; 철근 단면적, σ_{sy} ; 철근 항복점, d ; 보의 유효층, a_f ; CFS 단면적, E_s ; 철근 탄성계수, E_f ; CFS 탄성계수, α ; 보강 유효계수, P_{wf} ; CFS의 전단 보강근비, σ_f ; CFS 재료강도, σ_{sf} ; CFS 재료강도, D ; 보의 높이, P_{st} ; 인장 철근비, P_{cf} ; 인장 CFS비

$$V_{total} = V_{concrete} + V_{steel} + V_{cfs} \quad (3)$$

$$\sum(P_w \cdot \sigma_w \text{ : 전체 전단 보강량}) = P_{ws} \cdot \sigma_{sy} + P_{wf} \cdot \alpha \cdot \sigma_f \quad (4)$$

$$\sum(P_w \cdot \sigma_w \text{ : 전체 전단 보강량}) = P_{ws} \cdot \sigma_{sy} + \sum(P_{wf} \cdot E_{wf} \cdot \epsilon_f)$$

P_{ws} ; 전단 보강근비, σ_{sy} ; 전단 보강근 항복강도, P_{wf} ; CFS의 전단 보강근비, σ_f ; CFS 재료강도, α ; 보강 유효계수, E_{wf} ; CFS의 탄성계수, ϵ_f ; 전단저항 유효 변형도

3. 탄소섬유쉬트의 인장강도 시험

3.1 시험개요

표 2에 실험인자 및 수준을 나타낸다. 실험에서는 탄소섬유유의 탄성율과 탄소섬유증량이 탄소섬유쉬트의 재료물성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 일반탄성제품 및 고탄성제품, 탄소섬유증량이 200g/m² 및 300 g/m² 인 것을 사용하였으며 각 재료의 물성을 표 3에 나타낸다.

표 2 실험인자 및 수준

실험인자	수준	수준수
CFS 탄성율	일반, 고탄성	2
CFS 증량	200, 300g/m ²	2

표 3 탄소섬유쉬트의 역학적 특성

종류	인장강도 (kgf/cm ²)	탄성율 (kgf/cm ²)	단면적 (cm ² /m)	중량 (g/m ²)
R-200	35000	2.4×10 ⁹	1.11	200
R-300	35000	2.4×10 ⁹	1.67	300
HM(고탄성)	29000	6.5×10 ⁹	0.95	200

3.2 인장 시험편의 제작방법

인장시험체는 현장시공과 동일한 방법으로 실시하였으며, 우선, 평판위에 필름을 붙이고 그 위에 탄소섬유슈트에 에폭시 수지를 함침시켜 실온에서 3일 방치한 후, 다이아몬드 그라인더로 섬유방향으로 폭이 12.5mm가 되도록 절단하고 그림 5에 나타낸 것과 같이 시험편 양단부에 타브를 설치하였고, 시험편의 중앙에는 스트레인 게이지를 붙여 인장 시험을 실시하였다.

3.3. 시험방법 및 측정항목

CFS의 인장 시험방법은 JIS K 7073 탄소섬유강화 플라스틱의 인장시험방법에 준하여 실시 하였으며 측정항목은 최대 인장강도 및 탄성계수이다. 특히, 탄성계수의 산정은 그림 6에 나타낸 것처럼 하중의 20% 와 60% 사이의 직선부분의 변화율로부터 산정 하였다.

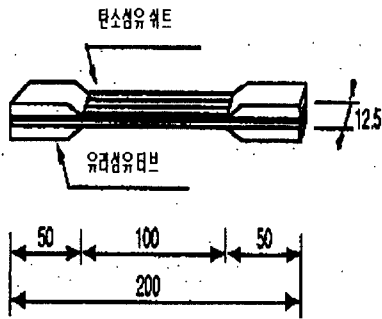
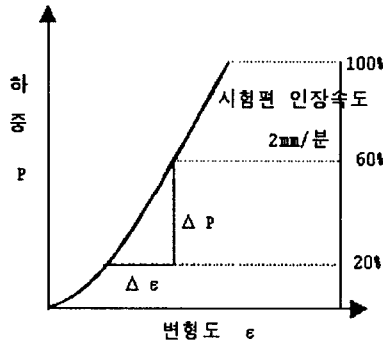


그림 5 CFS 인장강도 시험편



$$\sigma_f = \frac{P_B}{A_m}$$

P_B : 파단하중, σ_B : 인장강도
 A_m : 단면적

$$E_f = \frac{\Delta P}{\Delta \epsilon} = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \epsilon}$$

E_f : 인장 탄성율, ΔP : 하중 증분
 $\Delta \epsilon$: 변형 증분, $\Delta \sigma$: 응력 증분

그림 6 인장강도 및 탄성계수 측정방법

4. 실험결과 및 고찰

4.1 탄소섬유슈트의 인장강도 · 탄성계수 · 파단신율

그림7에 CFS의 응력도-변형도 관계를 나타낸다. 또한, 그림 8 및 그림 9는 CFS의 인장강도와 탄

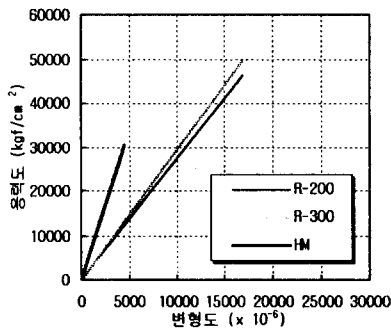


그림 7 CFS의 응력도-변형도 관계

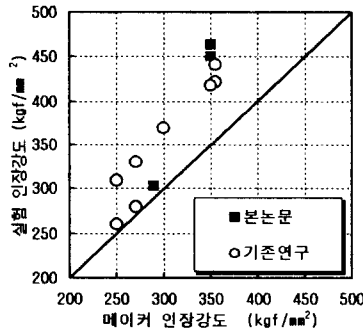


그림 8 CFS 인장강도 비교

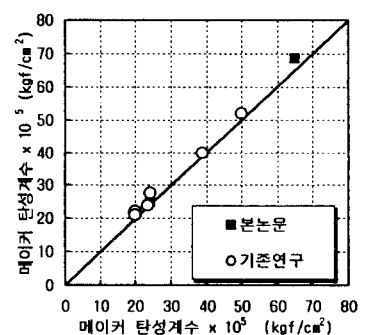


그림 9 CFS 탄성계수 비교

성계수를 본 실험값, 메이커 값 및 기존연구와 비교하여 나타낸 것이다. 한편, 그림 10은 CFS의 인장시험 결과를 도수분포로 나타낸 것이다. 시험에서 산정한 CFS 인장강도의 평균치는 일반 탄성제품

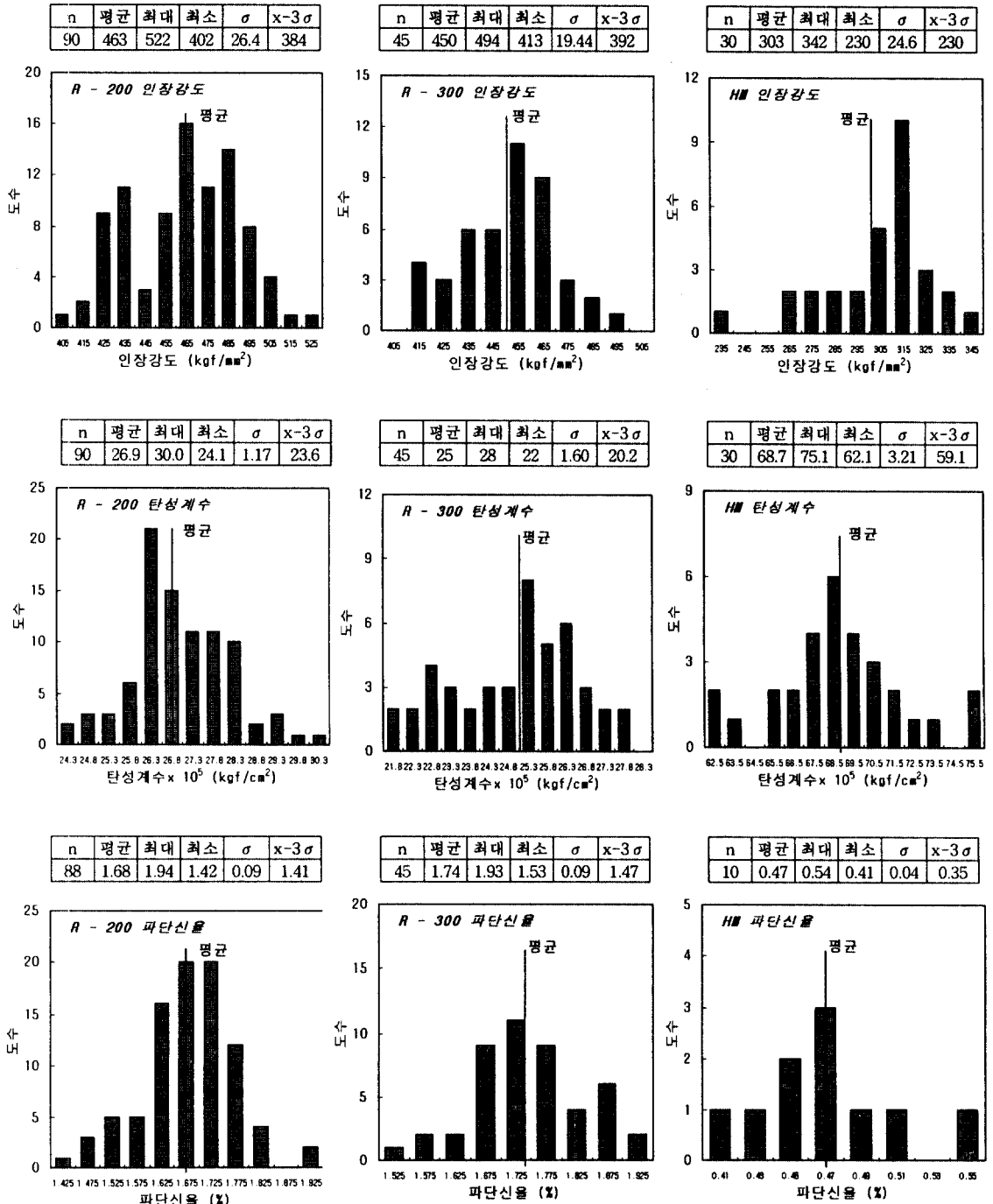


그림 10 탄소섬유쉬트의 인장시험 결과

인 경우, 메이커 값보다 약 1.3배 높게 나타나고 있으나 고탄성제품은 시험값과 메이커 값이 거의 유사한 결과로 나타났다. 또한, 기존 연구결과도 시험값과 메이커값과는 상당한 차이를 보이고 있어 메이커에서는 제품의 최소값 이하로 품질을 보증하기 위하여 상당한 안전율을 두고 있음을 알 수 있다. 한편, 탄성계수는 시험값과 메이커값이 거의 동일한 결과로 나타났으며, 도수분포는 정규분포의 형태이고 모든 실험결과 값은 불량율을 거의 0%로 관리한 X-3σ 값 보다 크게 나타났다. 또한, [(시험 인장강도-메이커 인장강도)/표준편차]로 산정한 재료안전도는 일반탄성제품인 경우 약 5로서 충분한 여유를 가지고 있으나 고탄성제품은 0.5로서 고탄성제품 일수록 품질관리가 중요한 것을 알 수 있다.

4.2 탄소섬유쉬트의 설계 인장강도 산정

이상의 고찰을 종합하여 기존 CFS보강 시험체에서 산출한 보강 유효계수 α 를 각각 0.6 및 2/3으로 산정한 경우, 본 실험결과에 의한 탄소섬유쉬트의 설계인장강도는 식 (5)와 같이 산정 할 수 있다. 표 1은 식 (5)를 사용하여 산정한 탄소섬유쉬트의 설계 인장강도로서 메이커값은 시험값보다 일반탄성의 경우 약0.7~0.75배, 고탄성인 경우 약 0.95정도의 안전계수를 가지고 있음을 알 수 있다.

$$\text{탄소섬유쉬트 설계 인장강도} = \alpha \times [\text{시험 평균값} - 3\sigma] \quad (5)$$

표 4 탄소섬유쉬트 설계 인장강도

보강 유효계수(α)	R-200 (kgf/cm ²)		R-300 (kgf/cm ²)		HM (kgf/cm ²)	
	시험값	메이커 값	시험값	메이커 값	시험값	메이커 값
0.6	23000	16200	23500	17500	13800	13000
2/3	25600	18100	26100	19500	15300	14400

5. 결 론

철근콘크리트조 건축물의 보강공법에 사용되는 탄소섬유쉬트를 대상으로 그 재료 역학적 물성을 인축 인장시험에 의하여 파악 한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 실험 평균 인장강도는 일반탄성제품인 경우, 메이커 값보다 약 1.3배 높으며, 고탄성제품은 거의 동일한 결과로 나타나, 메이커에서는 품질을 보증하기 위하여 상당한 안전율을 두고 있음을 알 수 있다.
- 2) 실험 평균 탄성계수는 메이커값과 거의 동일한 결과를 보이고 있으며, 재료 안전도는 일반탄성제품인 경우 약 5, 고탄성제품은 0.5로서 고탄성제품 일수록 품질관리가 더욱 필요하다고 판단된다.
- 3) CFS보강공법의 보강설계 및 보강효과 평가시에 사용되는 CFS의 설계용 인장강도는 기존의 연구 결과를 적절히 평가하여 유효 보강계수(α)를 산정하는 것에 의해 식 (5)를 이용하여 구할 수 있다.

感謝의 글

本 論文의 材料를 提供해 주신 日本 三菱化學(미쯔비시) 에 깊은 感謝의 말씀을 올립니다.

參考文獻

- 1.日本建築學會,“連續纖維補強材의 콘크리트 構造への 應用”, 1998.9
- 2.日本콘크리트 工學協會,“連續纖維補強 콘크리트 研究委員會報告書”, 1997.7
- 3.JSCE, “Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials”, Concrete Engineering Series 23, 1997.10