

구조물 보강용 탄소섬유시트의 부착특성에 관한 연구

A Study on the Bond Properties of Carbon Fiber Sheets used for Strengthening Structures

황진석* 김지영* 백명종* 박형철* 박철림**
Hwang, Jin-Seog Kim, Ji-Young Baek, Myung-Jong Park, Hyung-Choel Park, Chil-Lim

Abstract

Recently, Carbon Fiber sheet(CFS) is frequently used for strengthening deteriorated concrete structures. To strengthening damaged structures, the property and characteristic of the bond between CFS and the concrete surface must be understood. The tensile test of a single lap shear specimen was performed to study bond strength, bond stress distribution and stress transfer between CFS and concrete surface according to the bond length.

Based on the test results, there were ultimate influence length(UIL) in which bond stress was distributed, and ultimate strain reduction ratio(USRR) by which strain was reduced linearly. Bond resisting force(BRF) was estimated by UIL and USRR, and which was compared with ultimate loads. According to the results of comparison, it was shown that ultimate bond strength could be estimated reasonably by BRF.

키워드 : 극한 변형도 감소율, 극한 영향길이, 부착저항력, 평균부착응력

Keyword : Ultimate Strain Reduction Ratio, Ultimate Influence Length, Bond Resisting Force, Average Bond Stress

1. 서론

탄소섬유시트(Carbon Fiber Sheet) 접착공법은 복합재료에 의한 구조물 보강공법의 하나로서 부식의 염려가 없으며 시공성이 뛰어나 현재 적용범위가 확대되고 있다. 한편 인장재료로서의 탄소섬유시트가 접착에 의해 구조물의 휨내력 향상에 기여하기 위해서는 콘크리트와 탄소섬유시트가 부재가 종국 하중에 이를 때까지 충분한 일체거동을 해야 함을 요구하고 있다. 따라서 콘크리트와 탄소섬유시트간의 부착 거동의 규명이 본 공법에 의한 보강설계시 중요한 요소가 된다.

이 논문은 8cm×10cm×25cm 의 콘크리트 공시체에 폭 2cm와 4cm의 탄소섬유시트를 각각 4cm, 8cm, 16cm, 20cm, 24cm 의 길이로 부착시켜 부착길이 및 폭에 대한 부착성능을 실험적으로 연구한 것이다.

* 정회원, 대우건설기술연구소 연구원

** 정회원, 대우건설기술연구소 소장, 공학박사

2. 실험의 개요

2.1 시험체의 종류 및 형상

시험체의 종류는 Table 1과 같다. 시험체의 종류는 CFS의 부착특성을 규명하기 위하여 폭과 길이에 따라 구성하였으며 각각의 종류에 따른 CFS를 8cm×10cm×25cm의 크기의 콘크리트 공시체에 부착하여 시험체를 제작하였다.

2.2 가력 및 측정

가력장치는 Fig. 2와 같다. 공시체에 부착된 탄소섬유슈트에 순수 인장력만이 작용하도록 하기 위하여 고안한 장치를 만능시험기(Universal Testing Machine)에 설치하여 가력을 실시하였으며, 가력속도는 2 kg/sec 정도를 유지하였다. 슈트의 부착응력분포를 살펴보기 위하여 Fig. 3과 같이 스트레인 게이지(strain gauge: 2mm)를 부착하여 변형도를 측정하였다.

2.3 슈트의 시공 및 사용재료의 물성

CFS의 보강은 표준시방서에 따랐다. 본 실험에 사용된 콘크리트 및 에폭시의 물성은 Table 2와 같다. 공시체용 콘크리트는 소형믹서를 사용하여 제작하였으며, 그 물성치는 표준양생한 $\phi 100 \times 200$ 공시체에 대하여 제령 28일, 45일에 실시한 결과이며 인장강도는 조깅 시험법(splitting test)에 의한 것이다. 에폭시는 80℃로 6시간 고온양생하고 상온에서 7일 양생한 후 실험한 결과이다.

Table 2. Property of Materials

(a) Mixing table of Concrete					
Cement (kg/m ³)	Water (kg/m ³)	Fine Aggregate (kg/m ³)	Coarse Aggregate (kg/m ³)	Max. size of Aggregate (mm)	W/C ratio (%)
325	205	715	1,010	13	63
(b) Properties of CFS					
Tensile Strength (kg/cm ²)		Modulus of Elasticity (kg/cm ²)		Thickness (mm)	
45,650.0		2.49×10 ⁶		0.11	
(c) Properties of Concrete					
Compressive Strength (kg/cm ²)	Tensile Strength (kg/cm ²)	Ages (day)	etc.		
245.3	21.7	28	-		
265.2	25.1	45	at testing		

Table 1. Types of Specimen

Specimen	Width, B (mm)	Length, L (mm)	No. of Sheets
T-2-4	20	40	3
T-2-8	20	80	3
T-2-16	20	160	3
T-2-20	20	200	3
T-2-24	20	240	3
T-4-4	40	40	3
T-4-8	40	80	3
T-4-16	40	160	3
T-4-20	40	200	3
T-4-24	40	240	3

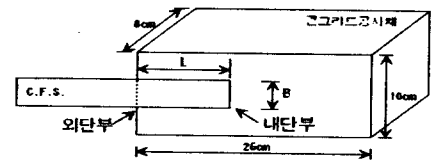


Fig. 1 Specimen

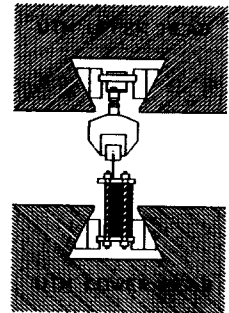
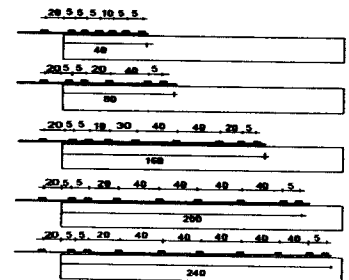


Fig. 2 Loading Frame



cf) It is numbered from outside end as No.1, no.2 ...

Fig. 3 Strain gauge

(d) Properties of Epoxy

Comp. Strength (kg/cm ²)	Tensile strenght (kg/cm ²)	Flexural Strength (kg/cm ²)	Elongation ratio (%)	Poisson's ratio	Modulus of Flexural Elasticity (kg/cm ²)	Modulus of Tensile Elasticity (kg/cm ²)
812.9	507.2	691.5	3.76	0.38	19.2×10 ³	33.4×10 ³

3. 실험결과 및 분석

3.1 변형도 분포

하중의 증가에 따라 발생한 탄소섬유쉬트의 변형도는 Fig. 4 및 Fig. 5와 같다. 초기 하중단계에서는 탄소섬유쉬트의 변형도가 외단부에서 큰 폭으로 증가하지만 파괴하중 부근에 도달하게 되면 내단부에서 가까운 부분의 변형도가 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다. 그러나 Fig. 4의 (b)를 보면 극한하중에 도달하여도 내단부에서 변형도가 증가하지 않는 부분이 존재하므로 부착길이의 증가에 따라 전체 부착면 중 일정 부분만이 부착응력을 발생시킬 수 있다. Fig. 5에서 변형도는 외단부로부터 선형으로 감소하며, 부착폭과 길이에 따라 극한 하중시 변형도 감소율(ultimate strain reduction ratio)과 부착응력이 영향을 미치는 길이인 영향길이(ultimate influence length)가 존재함을 알 수 있다.

본 실험에서의 결과를 근거로 Fig. 6과 같이 회귀분석을 통하여 구한 값을 Table 3에 나타내었으며, 영향 길이는 부착폭 2cm일 경우 132mm, 부착폭 4cm일 경우에는 224mm에 수렴하는 것으로 나타났다. 극한 하중시 변형도 감소율은 부착폭 2cm인 경우 $40.43 \times 10^{-6}/\text{mm}$, 부착폭 4cm인 경우 $23.03 \times 10^{-6}/\text{mm}$ 에 수렴하는 것으로 나타났다. 극한 하중시의 변형도 감소율과 영향 길이의 회귀분석 결과는 다음의 식으로 표현할 수 있다.

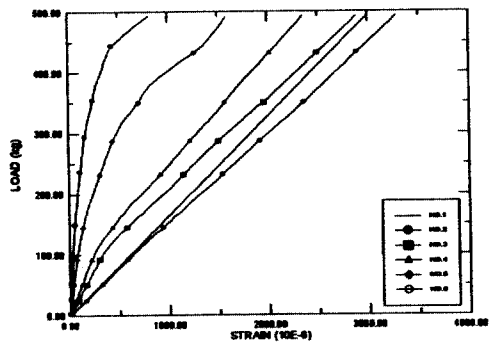
$$R_{USR} = N_1 + \frac{N_2}{L} \quad (1)$$

$$N_1 = 40.43, N_2 = 161.80 : \text{부착폭} = 2\text{cm}$$

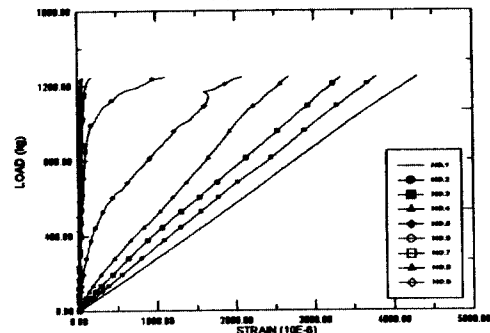
$$N_1 = 23.03, N_2 = 77.74 : \text{부착폭} = 4\text{cm}$$

Table 3. Ultimate Strain reduction ratio and influence length

Specimen	Ultimate Strain Reduction Ratio (10 ⁻⁶ /mm)	Ultimate Influence Length (mm)
T-2- 4	79.01	40.00
T-2- 8	64.54	80.00
T-2-16	-	-
T-2-20	56.27	116.57
T-2-24	37.39	120.45
T-4- 4	40.42	40.00
T-4- 8	38.25	80.00
T-4-16	26.92	132.36
T-4-20	25.53	154.19
T-4-24	25.18	159.81



(a) T-2-4



(b) T-4-16

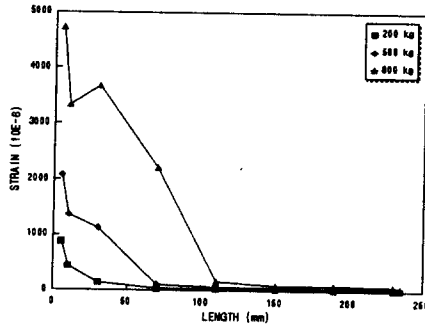
Fig. 4 Strain of C.F.S. according to Load

$$L_{UI} = K_1 \times (1 - e^{K_2 L}) \quad (2)$$

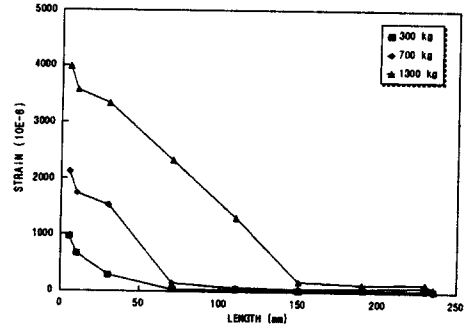
$K_1 = 132.05, K_2 = -0.106$: 부착폭 = 2cm

$K_1 = 223.77, K_2 = -0.055$: 부착폭 = 4cm

여기에서 R_{USR} = 극한 변형도 감소율, L_{UI} = 극한 영향길이(mm), L = 부착길이(mm)이다.

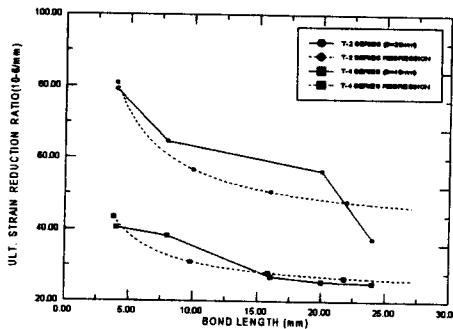


(a) B = 2 cm, L = 24 cm

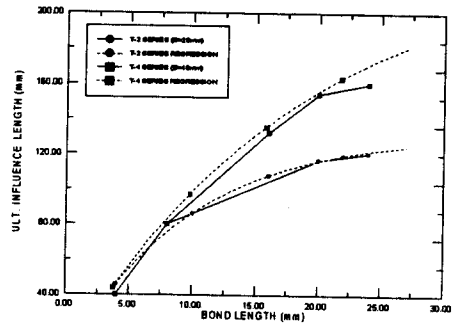


(b) B = 4 cm, L = 24 cm

Fig. 5 Distribution of Strain in C.F.S.



(a) Ult. Strain Reduction Ratio



(b) Ultimate Influence Line

Fig. 6 Regression of Ultimate Strain Reduction ratio and Influence Length

3.2 부착응력도의 분포

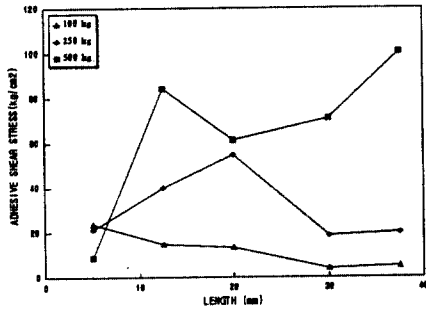
콘크리트와 슈트간의 부착응력도는 슈트에 발생한 변형도의 차이에서 구할 수 있으며 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$\tau_i = \frac{(\epsilon_{i+1} - \epsilon_i) E_{cf} A_{cf}}{b_{cf} l_i} \quad (3)$$

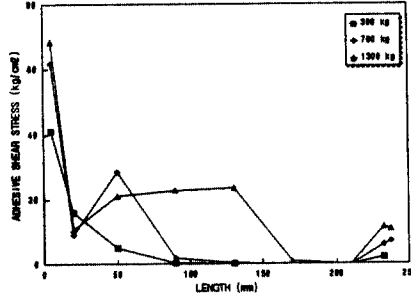
여기에서 τ_i = i 구간의 부착응력, ϵ = 탄소섬유슈트의 변형, E_{cf} = 탄소섬유슈트의 탄성계수,

A_{cf} = 탄소섬유쉬트의 면적, b_{cf} = 탄소섬유쉬트의 폭, l_i = i 구간의 길이이다.

위의 식으로 부착응력의 분포를 구하면 Fig. 7과 같다. 낮은 하중단계에서는 외단부에 부착응력이 집중되고, 하중이 증가하여 극한 하중에 도달하면 전체 부착응력이 영향길이내로 분산되는 현상을 나타냈다.



(a) T-2-4



(b) T-4-24

Fig. 7 Distribution of Bond Stress

3.3 평균부착응력도와 부착저항력

실험에서 구한 파괴하중을 부착면적으로 나눈 평균부착응력을 구하여 Fig. 8에 나타내었다. 평균부착응력은 탄소섬유쉬트의 폭과 길이가 커질수록 낮아지는 것을 볼 수 있으며 회귀분석을 통하여 0에 수렴하는 것을 알 수 있다. 이러한 원인은 탄소섬유쉬트의 변형도와 부착응력에서 나타난 바와 같이 부착길이가 길어질수록 극한상태에서 변형도와 부착응력이 분포하는 일정한 영향길이 존재하므로 부착저항력의 크기가 일정해지기 때문인 것으로 추정된다. 여기에서 부착저항력 F_{UR} 은 식 (1)과 식 (2)의 극한 변형도 감소를 및 영향길이를 극한 부착력을 구한 것이며 다음과 같다.

$$F_{UR} = L_{UR} R_{USR} E_{cf} A_{cf} \quad (4)$$

Table 4에서 각 시험체별로 실험에서 얻은 극한하중과 식 (1)과 식 (2)를 사용하여 구한 부착저항력(bond resisting force)을 비교해보면 극한하중과 부착저항력이 대부분 일치하는 것으로 나타났다.

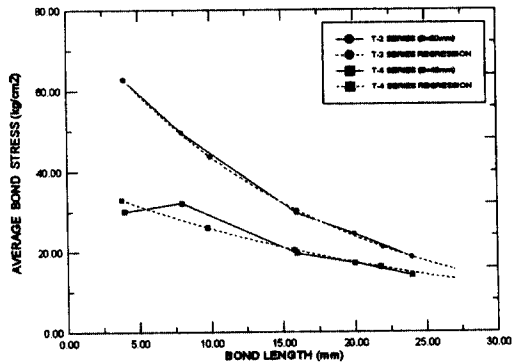


Fig. 8 Average Bond Stress

Table 4. Comparison of Ultimate Loads and Bond Resisting Force

Specimen	Average Bond Stress (kg/cm ²)	Ultimate Load (kg) (1)	Bond Resisting Force (kg) (2)	(1)/(2)
T-2- 4	62.75	502	532	0.94
T-2- 8	49.63	794	752	1.06
T-2-16	29.50	944	895	1.05
T-2-20	24.35	974	926	1.05
T-2-24	18.54	890	943	0.94
T-4- 4	30.00	480	558	0.86
T-4- 8	32.06	1026	861	1.19
T-4-16	19.50	1248	1252	1.00
T-4-20	17.10	1368	1377	0.99
T-4-24	14.04	1348	1476	0.91

따라서 현재 CFS 보강 설계에서는 부착강도를 예측하기 위하여 평균부착응력을 사용하고 있지만 극한 영향길이와 변형도감소율을 고려하지 못하므로 이를 고려할 수 있는 부착저항력을 사용하면 보다 정확한 예측이 가능한 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구는 구조물 보강에 사용되는 탄소섬유쉬트의 콘크리트면에 대한 부착특성을 실험을 바탕으로 분석하고 평가한 것이며 결과는 다음과 같다.

1. 탄소섬유쉬트의 변형도는 각 하중단계별로 단부에서부터 선형으로 감소한다. 변형도의 선형적인 감소는 극한 하중에서도 성립하며 이 때 부착길이가 길어질수록 수렴하는 성질이 보인다. 극한하중시 길이의 증가에 따라서 수렴하는 변형도 감소율은 탄소섬유쉬트의 폭이 2cm인 경우 $40.43 \times 10^{-6}/\text{mm}$ 이며, 4cm인 경우 $23.03 \times 10^{-6}/\text{mm}$ 로 나타났다.
2. 탄소섬유쉬트의 변형도 및 부착응력이 분포하는 길이는 부착길이가 길수록 수렴하는 성질을 가진다. 이러한 유효길이의 수렴치는 탄소섬유쉬트의 폭이 2cm인 경우 132mm이며, 4cm인 경우 224mm으로 나타났다.
3. 탄소섬유쉬트의 평균부착응력은 부착길이와 폭이 증가할수록 낮게 수렴하는 성질을 나타내며, 회귀 분석결과 부착길이가 증가할수록 평균부착응력은 0에 수렴하는 것으로 나타났다.
4. 부착저항력은 쉬트의 부착길이가 길어질수록 일정한 값으로 수렴하게 되며 이러한 원인은 탄소섬유쉬트의 변형도 감소율 및 부착응력의 분포길이가 일정해지기 때문이다. 부착길이가 길어질수록 부착저항력이 일정한 수치에 수렴하게 되므로 탄소섬유쉬트의 부착길이를 증가시킴에 따라서 부착저항력이 무한히 증가하는 것은 아님을 알 수 있다.
5. 실험에서 구한 극한하중과 부착저항력이 대부분 일치하므로 극한부착내력은 유효길이와 변형도 감소율을 고려한 부착저항력을 사용하면 유효하게 평가할 수 있다.

参 考 文 献

1. M. J. Chajes, W. W. Finch, T. F. Januszka, T. A. Tomson, Jr, "Bond and Force Transfer of Composite Material Plates Bonded to Concrete," ACI Structural Journal, V.93, No. 2, March-April 1996.
2. 佐野 正, 三浦 尚, "RC部材引張縁に接着された鋼板のはく離現狀に關する研究," 콘크리트工學年次論文報告集, Vol. 16, No. 1, 1994
3. 宇治公降, "既設構造物の補強におけるシート狀連續炭素纖維の付着特性," 土木學會第47回年次學術講演會, 平成4年9月
4. 宇治公降, 横田和直, 池田尙治, "シート狀炭素纖維による既設構造物の耐荷性能向上機構," 콘크리트工學年次論文報告集, Vol. 14, No. 2, 1992
5. 신영수, 홍기섭, 최완철, 홍영균, "탄소섬유쉬트로 보강된 철근콘크리트 보의 구조적 거동," 大韓建築學會論文集, 11券8號, 通卷82號, 1995年 8月
6. T.S建設工業, 炭素纖維Sheet 補強工法 技術資料, 1994年 12月