



탄소섬유로 휨보강된 RC 보의 부착 손실에 대한 거동 특성

서수연^{1)*} · 윤현도²⁾ · 최기봉³⁾

¹⁾충주대학교 건축공학과 ²⁾충남대학교 건축학부 ³⁾경원대학교 건축공학과

Structural Capacity of RC Beam Retrofitted by CFS with Bond Loss

Soo-Yeon Seo^{1)*}, Hyun-Do Yun²⁾, and Ki-Bong Choi³⁾

¹⁾Dept. of Architectural Engineering, Chungju National University, Chungju 380-702, Korea

²⁾Div. of Architecture, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

³⁾Dept. of Architectural Engineering, Kyungwon University, Seongnam 461-701, Korea

ABSTRACT Recently, various strengthening methods using carbon fiber sheets (CFS) have been developed for the rehabilitation of structures and applied to the concrete member. However, still research need arises in order to verify the structural capacity of RC member which experienced bond loss between concrete and CFS after strengthening. This is because previous research has focused on the development of design process and evaluation of structural capacity only for retrofit. The appearance of this loss may be initiated at just after retrofit construction. And it will be more serious when the layer number of CFS increases. In order to minimize above mistake in retrofit design using CFS, more exact evaluation process to predict the bond loss of CFS is required. The objective of this research is to study the variation of flexural structural capacity of beam which has experienced bond loss after strengthening using CFS. Experimental and analytical study are performed and evaluation of the previous formula is conducted. Test result showed that the significant strength deterioration was not found until the bond loss of 20%. Overall structural behavior of the beams can be predicted by nonlinear sectional analysis.

Keywords : carbon fiber sheet (CFS), bond loss, flexural structural capacity, nonlinear sectional analysis

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

건축 구조물에 대한 잔존수명의 결정은 현재 상태에서의 건물 안전성뿐만 아니라, 향후 건물의 사용 가능한 기간을 명시해 줄 수 있기 때문에, 재건축이나 리모델링에서 가장 중요한 인자임에는 틀림이 없다. 따라서 구조적인 측면에서는 현재 상태의 구조적인 성능과 함께 보강 후의 안전성 평가는 필수적이다.

현재 구조물의 보수보강에 넓게 사용되고 있는 공법 중의 하나가 탄소섬유로 보강하는 공법이다. 구조물의 보강에 탄소섬유와 같은 FRP (fiber reinforced polymer)를 사용하기 시작한 것은 1980년대 중반부터로서, 스위스의 연방 연구소인 EMPA에서 CFRP (carbon fiber reinforced polymer)를 이용하여 철근콘크리트 보를 보강한 것에서 시작되었다고 할 수 있으며 국내의 경우에는 1990년도부터 연구가 시작되어 현재 많은 구조물의 보강에 활용되어 왔다.

최근에는 보강 후 10년 이상 경과된 구조물에서 부착률 손실 등과 같은 성능 변화에 따라 보강 효과가 저하되는 경우가 보고되고 있다. 이와 같이 보수보강된 구조물의 2차 손상에 대한 보유 내력을 정확히 파악하기 위해서는 우선적으로 기존에 제시되어 있는 보유 내력 평가식 중에서 보다 정확도가 높은 보유내력 평가식을 파악하고, 이 제안식들을 바탕으로 2차 손상의 정도에 따른 보유내력을 평가해야 한다. 또한 탄소섬유시트 (carbon fiber sheet; CFS)를 부착하여 보강하는 방법은 CFS와 모재와의 부착정도에 따라 보강 후 내력이 결정된다. 그러나 여러 가지 원인들로 인해서 완전 부착이 어려운 경우가 많고 또한 시간의 경과에 따라 부착력이 손실되기가 쉽다. 구조물에서 부착력이 손실되는 형태는 여러 가지 형태로 나타나며, 이들 형태에 따라 다른 거동을 보이게 된다.

탄소섬유에 의한 보강 공법에 관련해서는 국내의 경우, 신영수¹⁾, 신성우²⁾, 이용택³⁾, 이원호⁴⁾, 유영찬⁵⁾ 등 많은 연구자에 의해 일련의 실험 및 이론적인 연구가 수행되었고, 국외의 경우에는 Rabinovich and Frostig⁶⁾, Teng⁷⁾ 및 일본을 포함한 많은 국가의 연구자들에 의하여 CFRP 보강 효과와 보강에 따른 구조물의 보유 내력에 관한 실

*Corresponding author E-mail : syseo@cju.ac.kr

Received September 3, 2007, Accepted October 10, 2007

©2007 by Korea Concrete Institute

험 및 해석적 연구가 수행되어, 다수의 설계식과 해석 방법 등이 개발되었다. 최근에는 한국건설기술연구원의 연구팀을 중심으로 국내외 섬유보강공법 및 기술에 대한 일련의 연구⁷⁾가 진행되어 보강재의 성능을 평가하기 위한 지침이 제안되고, 또한 국내 실정에 적합한 설계 방법이 개발된 상황이다.

그러나 이들 연구는 FRP를 이용한 보강시의 설계법과 구조 성능에 초점이 맞추어져 있기 때문에 장기적으로 보강재 또는 부착 상태의 변화에 따른 구조 성능 변화 등과 같은 현상을 반영하기에는 아직까지 부족한 점이 있다. 현재까지 보강된 FRP의 성능 저하에 따른 구조물의 구조내력 저하에 대하여 구체적인 방안이 제시되기 위해서는 많은 사례 조사와 물성 변화를 고려한 구조물의 거동 특성 변화에 대한 지속적인 연구가 요망된다.

이에 따라 본 연구에서는 시간에 따라 저하되는 부착률의 변화에 따른 구조 성능의 변화를 관찰하고자, CFS의 부착률 변화와 부착 형태의 차이에 의한 거동 차이를 실험을 통해 밝히고, 기존 제안식을 이용하여 부착률과 부착 형태 차이에 따른 구조 성능 변화를 예측함으로써 CFS로 보강된 이후 부착률이 저하된 경우에 대한 거동 특성 평가 방안을 제시하고자 한다. 또한, 비선형 구조 해석을 통하여 실험 결과와 비교 검토하여 적정 해석 방법을 제시하고자 한다.

2. 탄소섬유시트로 휨 보강된 부재의 거동 특성

기존 연구자들의 실험 연구 결과를 정리하여 Teng⁷⁾은 CFS로 휨보강된 부재의 파괴모드를 Fig. 1과 같이 (a) CFS의 파단, (b) 압축측 콘크리트의 압축파괴, (c) 전단 파괴, (d) 콘크리트 피복의 탈락, (e) 시트 단부의 부착파괴, (f) 중앙부 부착파괴에 의한 휨균열, (g) 중앙부 부착파괴에 의한 전단균열과 같이 7가지의 형태로 분류하였다. 이중 (d)와 (e)는 CFS 단부의 부착파괴, (f)와 (g)는 중앙부 부착파괴에 의한 균열과 파괴로 분류하였다.

CFS로 휨 보강된 철근콘크리트 보는 인장주근에 발생하는 응력을 CFS와 분담하여 휨 내력이 증가된다. 이에 따라 보강되지 않은 부재에 비해 탄성 구간에서 상대적으로 높은 강성을 나타내며 최대 내력까지 도달한다. 최대 모멘트 및 전단력이 작용하는 부위에서 휨균열 발생 후 수반되는 전단변형에 의하여 부재의 길이 방향으로 수직 단차가 발생하며 경사진 보강재의 수직 분력이 콘크리트 계면으로부터 CFS의 박리를 유발하는 힘으로 작용하게 되어 CFS와 콘크리트의 부착파괴가 발생하게 되고 (Fig. 2 참조), 부착파괴 이후 급격한 강도의 하락을 보이면서 보강되지 않은 부재와 유사한 거동을 보이게 된다.

CFS가 모재에 완전 부착이 되었을 경우에는 보강재의 보유 내력을 충분히 발휘하여 소요강도가 발현되지만, Fig. 3과 같이 초기 시공시의 불완전한 부착이나 시간 경과에 따른 부착률의 손실 등의 이유로 부착률 손실이 있는 경우에는 CFS의 보유 내력이 저감되어 요구 강도에

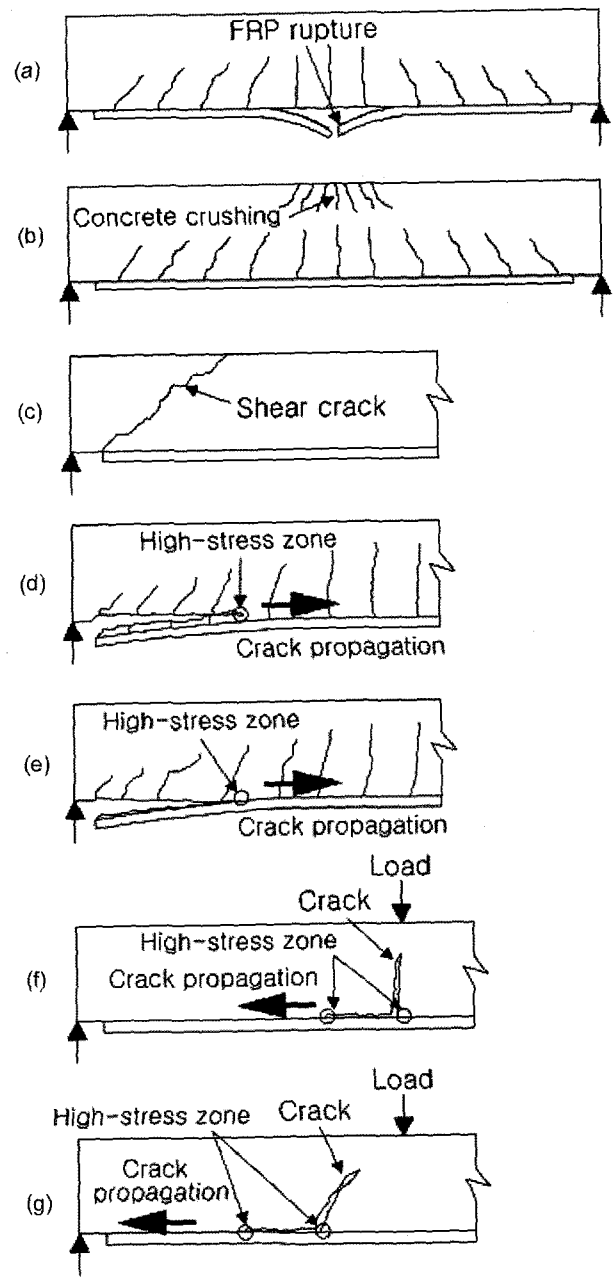


Fig. 1 Failure mode of RC beam strengthened by CFS⁷⁾

미치지 못한다. 즉 Fig. 4에서 CFS의 변형률이 충분히 발현되지 못하고, 저감된 변형률인 $k\epsilon_{cfs}$ 가 되어 목표로 하는 내력을 발휘하지 못하게 되는 것이다.

철근콘크리트 휨 부재에서 부재 자체의 성능 저하 또는 증가된 설계하중을 고려하여 CFS로 부재를 보강한 경우에, 전술한 바와 같이 CFS 보강 효과가 사라진다면 구조안전성의 측면에서 중요한 문제가 된다. 따라서 보강된 이후 부재의 구조 성능 변화에 대한 연구는 시급한 상황이다.

3. 구조 실험

3.1 실험 계획

본 실험에서는 탄소섬유시트의 부착률과 부착 방법의

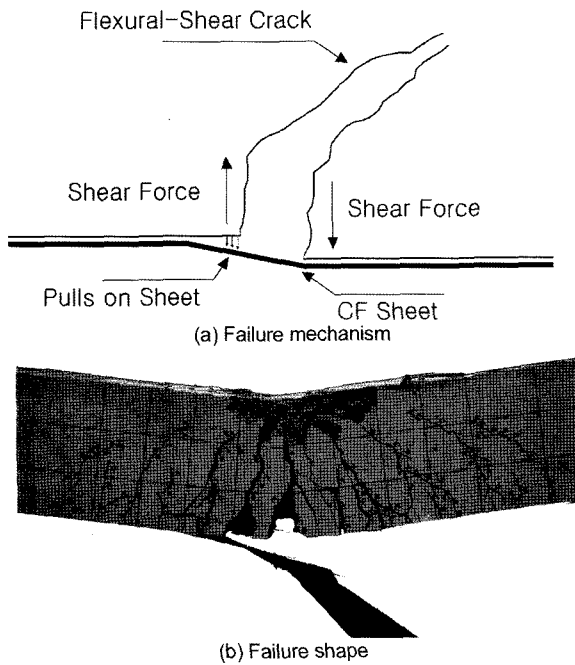


Fig. 2 Failure mechanism of RC beam strengthened by CFS

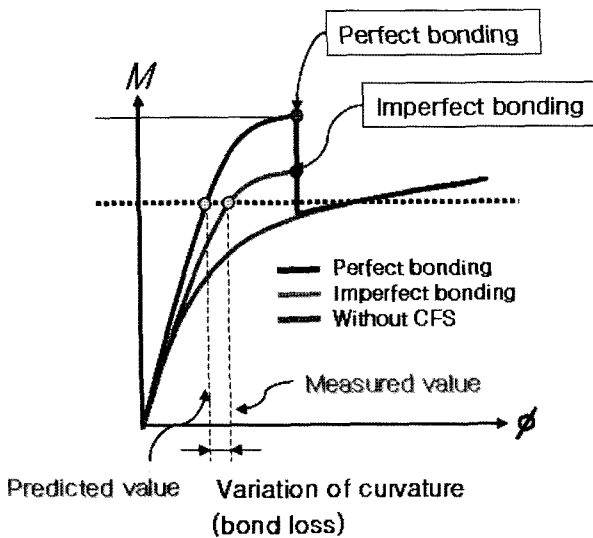


Fig. 3 M-φ curve of RC beam strengthened by CFS

Table 1 List of test specimens

Specimen	Bonding type	Width of CFS (mm)	Bonding ratio (%)	Bonding area (m ²)
CB		-	-	-
C100		200	100	0.320
C90		180	100	0.288
C80		160	100	0.256
R90		200	90	0.288
R80		200	80	0.256

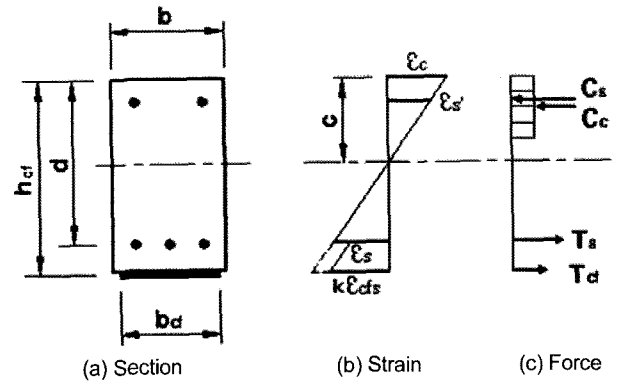


Fig. 4 Resistance of RC beam strengthened by CFS

차이에 따른 거동을 파악하기 위하여 Table 1 및 Fig. 5와 같이 시험체를 계획하였다. 시험체는 총 5개로 기준이 되는 무보강 시험체 (CB)와 시험체 하부에 탄소섬유를 전단면에 부착한 시험체 (C100), 부착 면적을 중앙으로부터 90%와 80% 부착한 시험체 (C90, C80), 임의 위치를 비부착 시켜 부착 면적을 90%와 80% 부착시킨 시험체 (R90, R80)로 구성하였다. 모든 시험체에 대하여, 탄소섬유의 보강은 1겹으로 하고, CFS 부착길이는 전체 보의 길이에서 중앙부 1,600 mm 구간으로 하였다.

3.2 시험체 및 실험 장치

Fig. 5에 시험체의 배근상세도를 나타내었다. 시험체는 폭 200 mm, 높이 300 mm, 길이 2,000 mm의 시험체에 주철근 (HD13)을 하부에 4개, 상부에 3개 배근하였다.

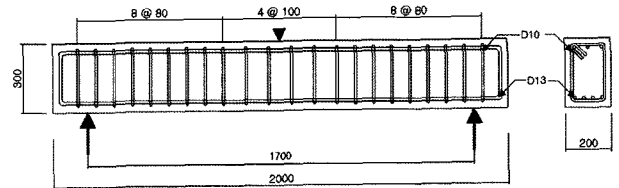


Fig. 5 Test specimen

철근은 중앙에 휩파괴를 유도하기 위하여 양쪽 단부는 80 mm 간격으로 중앙은 100 mm 간격으로 배근하였다. 또한 시험시에 상부 콘크리트에 압축파괴가 일어나는 것을 방지하기 위하여 콘크리트 강도를 35 MPa 이상으로 배합설계 하였다. Table 2는 시험에 사용된 재료 물성치를 나타내고 있다.

Fig. 6은 시험체 설치 상황을 나타내고 있다. 시험은 만능시험기에 의해 1점 가력으로 시험을 실시하였다. 하부의 지점은 부재하부에 마찰력에 의한 모멘트가 걸리는 것을 방지하기 위하여 한쪽은 힌지로 다른 한쪽은 롤러로 단순지지 하였다. 시험체 하부에 LVDT를 설치하여 수직변위를 측정하였고, 바닥표면과 하부 주철근 중앙과 상부 콘크리트 표면에 각각 스트레인게이지를 부착시켜 측정하였다.

3.3 실험 결과 및 분석

Fig. 7에 시험체의 최종 균열도를 나타내었다. 일반적으로 철근콘크리트 보에 CFS를 보강하게 되면 보의 인장주근에 걸리는 응력을 보강재인 CFS가 분담하여 철근콘크리트 보의 휨 내력을 증가시키는 역학적 특징을 갖는다. CFS로 보강된 철근콘크리트 부재는 보강되지 않은 부재에 비해 탄성 구간에서 다소 큰 강성을 나타내며 최대 내력까지 도달하고, CFS와 콘크리트의 사이에서 탄소섬유가 떨어지는 부착파괴나 콘크리트 표면이 탈락하는 박리파괴가 발생하면 급격한 강도의 하락을 보이면서 보강되지 않은 부재와 비슷한 거동을 보이게 된다.

본 실험에서도 시험체의 파괴 형태는 전형적인 휩파괴 형태로 우선 중앙 하부 콘크리트에 균열이 발생하고, 철근항복점까지 탄성 거동을 하면서 하중이 증가한 후, 철근이 항복한 후 최대 내력에 도달하였다. 그 후 탄소섬유가 탈락하면서 하중이 급격히 줄어들었다가, 수직 변위가 증가하면서 상부 콘크리트에 부분적인 압축파괴가 일어난 후, 최종적으로 철근이 파단되어 시험이 종료되었다. 시험체는 모두 탄소섬유가 탈락하는 부착파괴 형

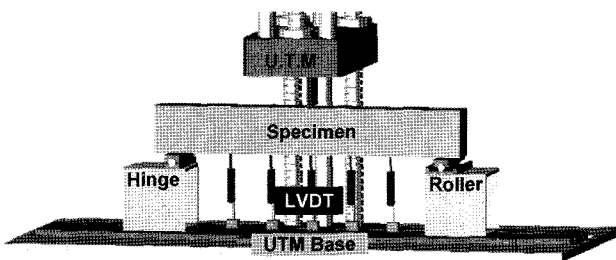


Fig. 6 Set up of test specimen

Table 2 Mechanical properties of materials

Reinforcement				Concrete	CFS
Bar size	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Compression strength (MPa)	Tensile strength (MPa)
HD13	516	625	20	37	4103
HD10	345	423	31		

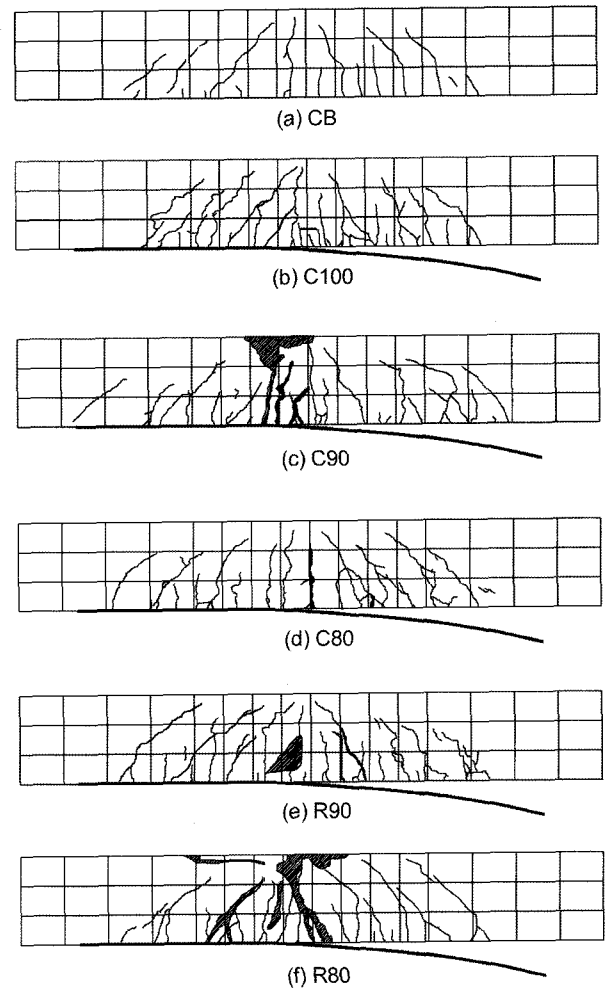


Fig. 7 Final crack patterns

태로 파괴되면서 최대하중에 도달하였다.

시험체의 하중변위 곡선을 Fig. 8에 나타내었다. 그래프에서 각 시험체에 콘크리트 초기균열이 발생한 ■지점까지 동일한 양상을 보이고 있다. 이후 초기균열 발생지점부터 하부 주철근이 항복한 ●지점까지는 인장철근으로만 하중을 부담하는 CB시험체에 비하여 탄소섬유와 인장철근으로 하중을 부담하는 CFS 보강 시험체가 높은 강성을 나타내었다.

탄소섬유 부착률과 부착 방법의 차이에 따른 영향을 비교해보면 중앙을 중심으로 단면폭에 대해 100% 부착된 C100 시험체가 가장 높은 내력과 변위에서 최대 내력에 도달하였고, 부착비율에 따라 C90, C80의 순서로 보강비율에 따라 점차적으로 최대 내력 및 최대 내력시의 변위가 감소되었다. 또한 부착 방법의 차이에 따른 영향을 비교해보면 C90, C80 시험체 보다 임의의 위치를 비부착시킨 R90, R80 시험체가 최대 내력 및 최대

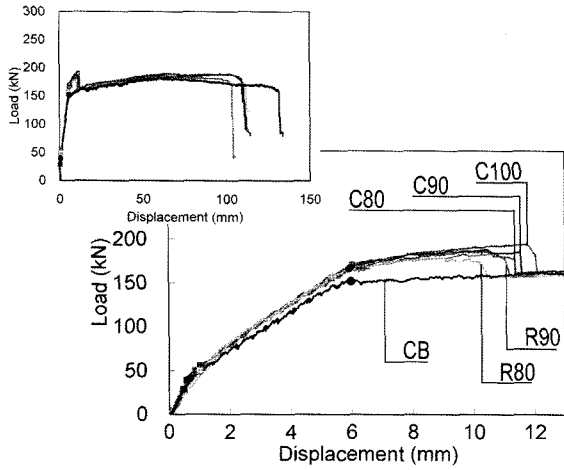


Fig. 8 Load-displacement envelope curve

내력시의 변형 능력이 낮게 나타났다. 이로부터 내력의 측면에서는 부착률 80% 이상인 경우 큰 차이가 없지만, 최대 내력시의 변위값이 부착률 감소에 따라 감소함을 알 수 있다.

Fig. 9는 각 시험체에서 압축측 콘크리트, 인장주근 그리고 하부면의 CFS 표면에 부착한 변형률 변화를 나타낸 것이다. 그림으로부터, 비록 CFS 부착면의 20%를 비부착시킨 시험체에서도 CFS의 변형률이 하부 인장철근의 변형도를 상회하였음을 알 수 있고, 비부착을 분산시키거나 측면에 집중시킨 경우 모두에서 동일한 양상임을 알 수 있다. 이로부터 CFS의 일부분이 비부착되더라도, 비부착률이 20% 이내라면 CFS는 충분히 보강 효과를 발휘함을 알 수 있다.

Table 3은 실험 결과와 휨 내력 계산 결과를 비교한 표이다. 계산에 사용된 식은 서수연 등의 분석⁸⁾에서 신뢰도가 매우 높은 것으로 나타난 식 (1)의 신성우식²⁾과 식 (2)의 ACI 설계식⁹⁾을 가지고 비교하였다. 여기서 식 (1)은 변형도 곡선에서 탄소섬유의 변형률에 준하여 철근 변형률을 직선보강하여 구하여진 식이다.

신성우 등²⁾

$$M_n = T_s(d-k) + T_{cfs}(h-k) \quad (1)$$

$$\varepsilon_c = \frac{c}{h-c} \varepsilon_{cfs}$$

$$\varepsilon'_s = \frac{c-d'}{h-c} \varepsilon_{cfs}$$

$$\varepsilon_s = \frac{d-c}{h-c} \varepsilon_{cfs}$$

$\varepsilon_s < 0.002$ 일때

$$C_c = \frac{c^2 \varepsilon_{cfs}}{(h-c)0.002} \cdot 0.85 \cdot f'_c \cdot \frac{b}{2}$$

$\varepsilon_s > 0.002$ 일때

$$C_c = 0.85 f'_c b \left(1 + \frac{0.001}{\varepsilon_{cfs}} \right) c - 0.85 f'_c \cdot 0.001 \frac{b}{\varepsilon_{cfs}} h \text{ 이고,}$$

$$C_s = \frac{c-d'}{h-c} \varepsilon_{cfs} E_s A'_s$$

$$T_s = \varepsilon_s E_s A_s = A_s f_y$$

$$T_{cfs} = \varepsilon_{cfs} E_{cfs} A_{cfs}$$

여기서, k : C_c 와 C_s 합력의 압축연단에서의 거리, ε_{cfs} : CFS 부착과괴 변형률, d : 유효높이, d' : 압축연단부터 상부 주철근까지 거리, h : 부재높이, c : 압축연단에서 중립축거리, A_{cfs} : 탄소섬유량, A_s : 하부 주철근량이다.

ACI 설계식^{3,4)}

$$M_n = A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \psi A_f f_{fe} \left(h - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \quad (2)$$

여기서, A_s : 하부 주철근량, f_s : 콘크리트 압축강도, d : 유효높이, β_1 : 콘크리트 강도특성계수, c : 압축연단에서 중립축거리, ψ : 강도감소계수, A_f : 탄소섬유량, f_{fe} : 탄소섬유 인장강도, h : 부재높이이다.

실험 결과를 기존 계산식과 비교하여 보면 식 (1)의 국내식의 경우 실험 결과와 계산 결과가 거의 일치하고 있다. 그러나 식 (2)의 경우는 계산 결과가 약간 높게 평가되었다. 식 (2)에서 보강부재의 휨성능 판단시, 중요한 변수로 작용하는 탄소섬유 부착과괴 변형률 ε_{cfs} 의 값은 실

Table 3 Predicted and observed ultimate strength

Specimen	Test result			Ratio of test result				Calculation result				Analysis result				
	Yield strength (kN)	Ultimate strength (kN)	Displacement at ultimate strength (mm)	Ratio of ultimate strength		Ratio of displacement		Shin's equation		ACI code		Yield strength (kN)		Ultimate strength (kN)		
				3/4 /2	5/3 6/4	3/4 /2	5/3 6/4	Result (kN)	Test Cal.	Result (kN)	Test Cal.	Result (kN)	Test Anal.	Result (kN)	Test Anal.	
①	CB	150	184	15.32	-	-	-	-	170	1.08	177	1.04	132	1.14	179	1.03
②	C100	170	194	11.84	-	-	-	-	184	1.05	197	0.98	156	1.09	194	1.00
③	C90	166	188	11.54	0.97	-	0.97	-	184	1.02	195	0.96	153	1.08	190	0.99
④	C80	156	186	11.36	0.96	-	0.96	-	183	1.01	193	0.96	150	1.04	186	1.00
⑤	R90	167	183	11.03	0.94	0.97	0.93	0.96	184	0.99	195	0.94	-	-	-	-
⑥	R80	157	179	10.20	0.92	0.96	0.86	0.90	183	0.98	193	0.93	-	-	-	-

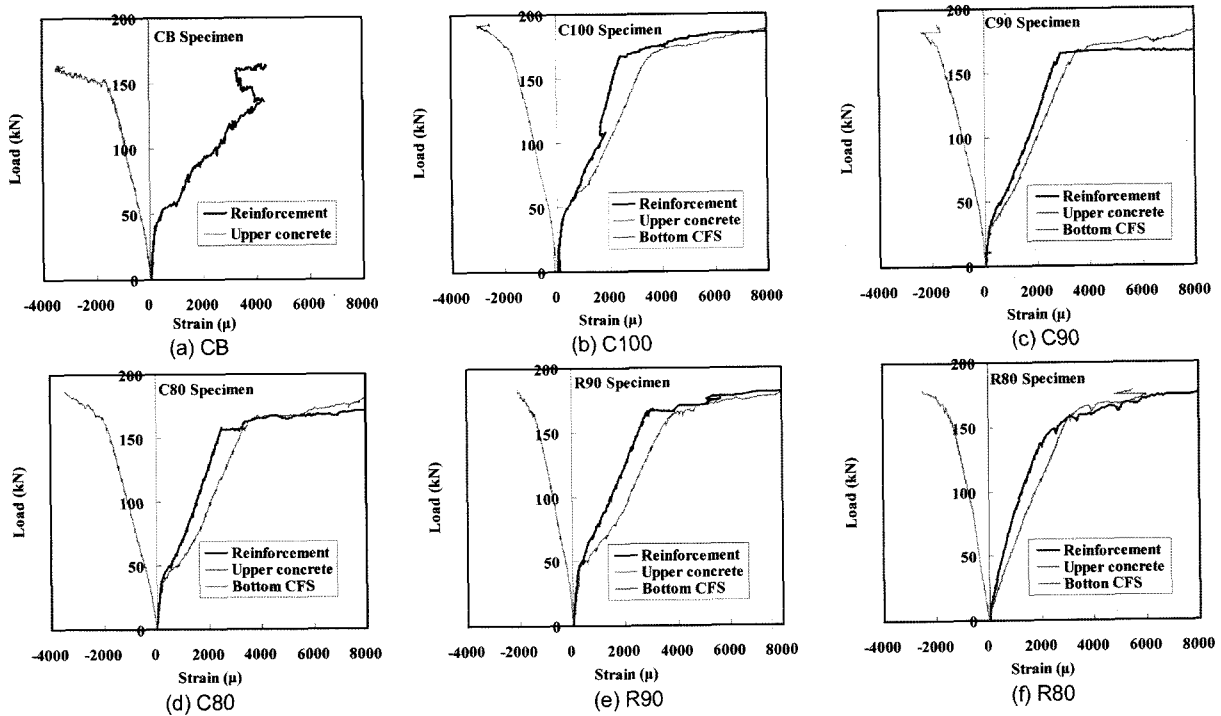


Fig. 9 Load-strain curve

제 보강된 구조물에서는 과거의 보수보강 기록만으로 판단해야 한다. 현재 개발되어 있는 탄소섬유 종류와 에폭시의 종류는 그 제조사와 사용용도에 따라 무수히 많고, 재료 성질도 각각 다르다. 따라서 구조물의 보수보강 기록에 사용된 재료의 제조사와 종류, 물성치 등을 명확히 하여야 할 것이다. 본 연구에서도 Table 3의 검토에서는 사용 재료의 제조사에서 제공하는 재료물성치를 가지고 판단하였다. 그 결과 실험 결과에 비해 계산 결과가 높게 평가되었다. 서수연 등⁸⁾의 연구에서는 식 (2)가 탄소섬유의 보강량 증가에 따라 안정적인 범위에서 평가되었기에 기존의 식 (2)를 사용하여 구조물의 보강에 대한 내력을 평가함에 있어서 안정적인 범위에서 평가가 가능하다고 판단하였다. 그러나 섬유 보강 계수가 1점으로 보강량이 충분하지 못하고, 더욱이 부착률이 감소하는 경우의 본 실험에서는 그 결과를 과대평가하는 경향이 나타났다. 이러한 것은 식 (1)의 경우도 마찬가지이다. Table 3에서 C100 시험체에 대한 부착률을 감소시킨 시험체의 최대하중 비율은 0.97~0.92로 점차적으로 감소하였다. 또한, 최대 하중시의 변위에 대한 비율도 0.97~0.86으로 감소하였다. 더욱이 동일한 부착면적을 갖는 C시리즈 시험체에 대한 R시리즈 시험체의 최대 내력의 비율이 계산에서는 동일하지만, 실제 실험 결과에서는 임의 단면을 비부착시킨 R시리즈 시험체들이 4%정도 낮은 내력과 10%정도 낮은 변위에서 최대 내력에 도달 하였다. 따라서 기존에 CFS로 보강된 보유내력 평가에 있어서는 외관조사 등으로 부착 상태를 파악하고, 부착 형태에 따라 추가적인 부착감소계수의 적용이 필요하다고 판단된다. 또한 본 실험에서는 비부착 면적을 80%까지 제작하여 시험하였으나, 이후 여러 가지 비부착 형태와 부착률을

변수로 추가적인 검토가 필요한 것으로 판단된다.

4. CFS로 휨보강된 RC 보의 비선형 해석

4.1 해석 방법

본 장에서는 CFS로 휨보강된 부재에 대한 비선형 해석을 통하여 CFS의 부착률에 따른 비선형 해석 결과와 실험 결과를 비교하여 CFS의 부착 면적과 부착 방법의 차이에 따른 강도 저감을 파악하여, 부착률에 따른 내력을 예측할 수 있도록 하고자 한다.

CFS로 휨 보강된 부재의 해석은 단면해석 프로그램인 XTRACT v2.6.0¹⁰⁾을 사용하였다. 이 프로그램은 콘크리트를 구속 콘크리트와 비구속 콘크리트를 사용하고, 단면을 유한개의 메쉬로 분할하여 해석을 수행하며 부재 해석에 필요한 재료 모델들의 데이터를 사용자가 입력하여 여러 가지 재료 모델의 특성을 만들 수 있다. 이런 재료 특성을 고려한 단면 해석의 결과는 모멘트-곡률 관계로 도출된다.

해석 과정에서 사용되는 재료 모델들 중 콘크리트는 전술한 바와 같이 비구속 콘크리트와 구속 콘크리트로 나누어 사용하고, 철근은 재료 실험 결과에 따라 항복강도가 516 MPa로 항복강도, 최대강도, 파괴강도를 갖는 Tri-linear 모델로 하였다 (Fig. 10참조).

CFS와 부착면에 대한 고려와 파단 이후의 급격한 내력 감소를 나타낼 수 있도록 CFS의 재료 특성과 부착 특성을 고려하여 Fig. 11과 같은 모델을 사용하였다. 비부착된 CFS 단면을 해석에서 반영하지 않음으로서 CFS의 비부착 효과를 고려하였다. CFS가 파단 또는 탈락된

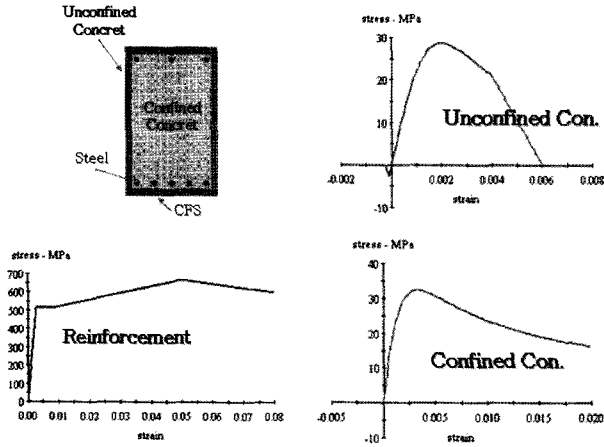


Fig. 10 Material model of concrete & reinforcement

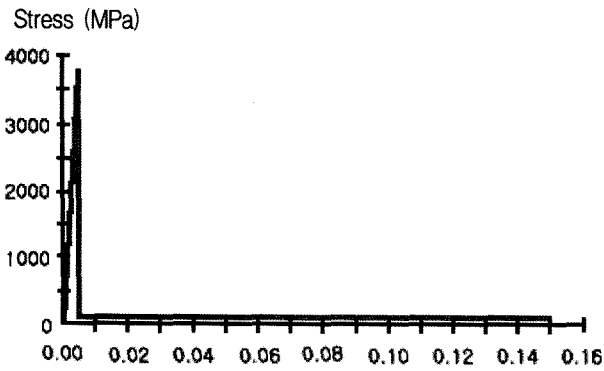


Fig. 11 Material model of CFS

이후에는 CFS의 기여도는 없는 것으로 고려하였다.

4.2 해석 결과와 실험 결과의 비교

Fig. 12는 해석 결과 나타난 시험체의 모멘트-곡률관계 그래프를 나타낸다. 그림으로부터, CFS의 비부착률을 고려할 경우, 실험 결과와 유사하게 최대강도가 저하됨을 알 수 있다.

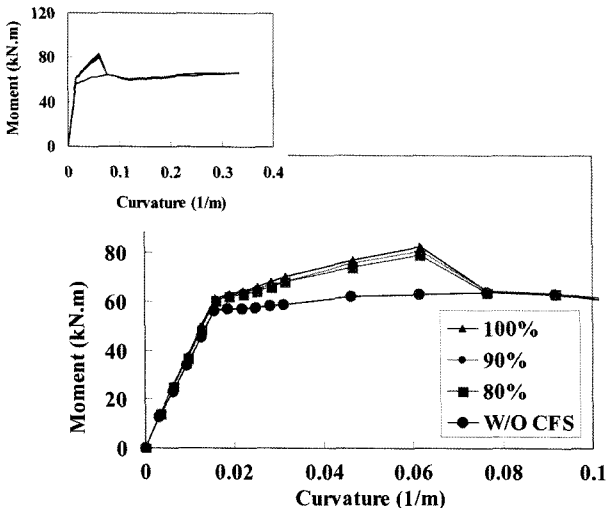


Fig. 12 Moment-curvature curve (analysis result)

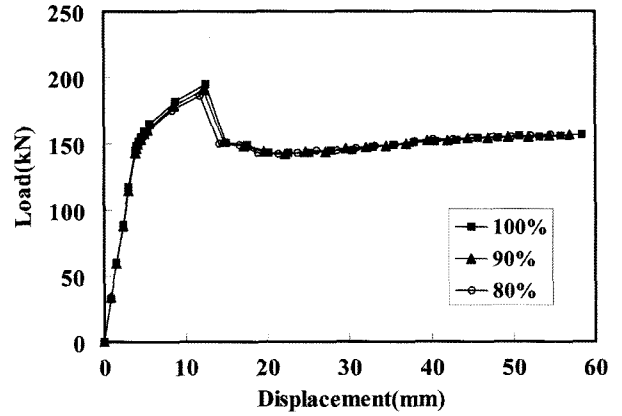


Fig. 13 Load-displacement curve (analysis result)

Fig. 13은 Fig. 12의 곡선에 대하여 항복하중보다 증가된 하중에 의하여 소성힌지 형성과 더불어 비선형 거동이 시작되는 것으로 간주하고, 소성힌지 구간내의 곡률을 2차적분하여 하중-변위관계로 나타낸 것이다. 해석 결과 나타난 항복내력과 최대 내력을 실험 결과와 비교하여 Table 3에 나타내었으며, 전체적으로 실험 결과와 해석 결과가 좋은 대응을 보이고 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

- 1) 탄소섬유로 휨보강된 보에 대한 실험 결과 보강 시험체의 경우, 보강재가 부착과괴할 때 최대 내력에 도달하고, 그 후에는 무보강 시험체의 거동과 유사한 경향을 보였다.
- 2) 탄소섬유의 부착률이 감소할 때 부착 면적과 부착 형태에 따라 최대 내력 및 최대 내력시의 변위도 감소하지만 그 정도는 미미한 것으로 나타났다.
- 3) 기존의 국내 제안식 식 (1)과 ACI 기준식 식 (2)를 가지고 시험체의 내력을 평가한 결과, 탄소섬유로 보강된 시험체의 휨내력 산정에 있어서 기존의 제안식은 93%~105%의 범위에서 평가되며 이 값은 휨내력 산정에 있어서 안전율을 고려할 때 유효하다고 판단된다.
- 4) 단 동일한 부착 면적을 갖는 경우에 부착된 위치와 형상에 따라 최대 내력과 변위에서 추가로 최대 10% 정도의 내력 및 변위량 감소가 나타났다.
- 5) 비선형 단면 해석을 통하여 CFS로 휨보강된 부재의 거동을 예측할 수 있으며, 또한 부착률 손실에 따른 거동의 변화도 예측 가능한 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 사회기반시설물평가 중점연구단 (04 핵심기술 C02)의 연구비지원으로 수행되었기에 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 신영수, 최완철, 홍기섭, 홍영균, “탄소섬유시트로 밀면 보강된 철근콘크리트 보의 구조적 거동”, 대한건축학회 논문집, 11권 8호, 1995, pp.249~257.
2. 신성우, 반병렬, 안종문, 조인철, 김영수, 조삼재, “탄소섬유시트의 보강량 및 정착길이가 RC보의 휨거동에 미치는 영향”, 한국콘크리트학회 봄학술발표회 논문집, 10권 1호, 1998, pp.579~584.
3. 이용택, 이리형, “CFS로 보강된 철근콘크리트 보의 휨내력향상효과에 관한 연구”, 한국구조물진단학회 논문집, 3권 3호, 1999.
4. 이원호, 임재형, 박인수, “탄소섬유시트에 의한 철근콘크리트 보의 휨보강 효과”, 대한건축학회논문집 구조계, 17권 1호, 2001, pp.11~19.
5. 한국건설교통기술평가원, “시설물 보강공법 성능인증을 위한 시험항목·방법 및 평가기준 설정 연구”, 2004 건설기술기반구축사업 제1차년도 중간보고서, R&D/2004-기반구축 A13, 2005.
6. Rabnovich, O. and Frostig, Y., “Closed-Form High-Order Analysis of RC Beams Strengthened with FRP Strips”, *Journal of Composite for Construction*, ASCE, Vol.4, No.2, pp.65~74.
7. Teng, J. G., Chen, J. F., Smith, S. T., and Lam, L., *FRP Strengthened RC Structures*, John Wiley & Sons, Ltd, 2002.
8. 서수연, 김경태, 윤승조, 윤현도, 최기봉, “탄소섬유로 휨보강된 RC부재의 구조성능평가”, 대한건축학회 논문집 (심사중).
9. ACI Committee 440, *ACI440.2R 02 Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*, ACI, 2002.
10. XTRACT v2.6.0, *Cross Sectional X Structural Analysis of Components*, IMBSEN.

요 약 최근 탄소섬유를 보강재로 사용한 구조 부재의 휨 거동에 관한 많은 연구가 진행되어 왔으나, 대부분의 연구는 FRP를 이용한 설계법의 개발과 구조 성능 평가에 초점이 맞추어져 있기 때문에 장기적으로 보강재 또는 부착 상태의 변화에 따른 구조 성능 변화 등과 같은 현상을 반영하기에는 아직까지 부족한 점이 있다. 이에 따라 현재까지 보강된 FRP의 성능 저하에 따른 구조물의 구조 내력 저하에 대하여 구체적인 방안이 제시되기 위해서는 많은 사례 조사와 물성 변화를 고려한 구조물의 거동 특성 변화에 대한 지속적인 연구가 요망된다. 본 연구에서는 시간에 따라 저하되는 부착물의 변화에 따른 구조 성능의 변화를 관찰하고자, CFS의 부착률 변화와 부착 형태의 차이에 의한 거동 차이를 실험을 통해 밝히고, 기존 제안식을 이용하여 부착률과 부착 형태 차이에 따른 구조 성능 변화를 예측함으로써 CFS로 보강된 이후 부착률이 저하된 경우에 대한 거동 특성 평가방안을 제시하였다 또한, 비선형 단면 해석을 통하여 실험 결과와 비교 검토하여 적정 해석 방법을 제시하였다.

핵심용어 : 탄소섬유시트, 부착 손실, 휨 성능, 비선형 단면 해석