



CFRP가 보강된 철근콘크리트 보의 거동과 연성

김진율¹⁾ · 김광수^{1)*} · 박선규¹⁾ · 이영재²⁾

¹⁾성균관대학교 건설환경시스템공학과 ²⁾상주대학교 토목공학과

Behavior and Ductility of Reinforced Concrete Beams Strengthened by CFRP

Jin-Yul Kim¹⁾, Kwang-Soo Kim^{1)*}, Sun-Kyu Park¹⁾, and Young-Jae Lee²⁾

¹⁾Dept. of Construction and Environmental System Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea

²⁾Dept. of Civil Engineering, Sangju National University, Sangju 742-711, Korea

ABSTRACT In the recent construction industry, FRP is highly interesting in strengthening members of structures because it has superior material properties. This paper is an experimental study on the structural behavior of reinforced concrete beam when in using various amount of CFRP and the ductility of beams using various type of CFRP. In the experiment, when it makes an experiment using various amount of CFRP, strengthening width is more efficient than strengthening layer. The failure of CFRP strengthened beams presented brittle modes with having flexural failures. Also, It represented that most of beams classify brittle failure in the side of energy ratio. Energy ratio of CFRP sheet comparing with CFRP plate exceeds overall 50% and it represents about 70% in case of beams without strengthening layer.

Keywords FRP, ductile, energy ratio, strengthening

1. 서 론

철근콘크리트가 소개되고 프리스트레스트 공법이 개발된 후 콘크리트 구조물의 보강재로서 철근과 프리스트레싱 강재는 경제적·재료 역학적 장점으로 오랫동안 이용되어 왔다. 그러나 최근 세계 여러 나라에서 사회간접 시설의 노후화, 특히 강재의 부식으로 인한 사용성 및 안전성의 저하는 막대한 유지 보수 비용과 함께 새로운 사회 문제로 대두되었다. 이러한 건설 환경에서 복합 섬유 재료(fiber reinforced polymer, 이하 FRP)의 개발과 적용은 위에서 언급한 문제를 해결할 수 있는 새로운 재료로서 높은 관심을 모으고 있다. FRP는 비부식성, 경량성, 높은 인장강도, 비전기·전자성 등 재료적 장점과 다양한 형태로 만들 수 있는 뛰어난 성형성을 가지고 있다. 최근 일본, 유럽, 미국 등 선진 각국은 건설 산업에서 FRP의 높은 활용 가능성과 엄청난 잠재적 시장성 때문에 FRP 재료 산업뿐만 아니라 적용 기술 개발에 많은 관심과 노력을 기울이고 있다.

그러나, FRP 보강재는 파단 시까지 소성 변형 없이 선형 탄성 거동을 보이며, 인장강도에 비하여 전단강도가 매우 작고, 응력 파손의 위험이 있으며, 매우 높은 시공비가 요구되는 단점을 가지고 있다. 이와 같은 단점 중

에서도 보강재 자체가 소성 거동을 하지 않기 때문에 FRP 보강재가 사용된 구조물의 연성적 거동은 매우 취약할 수밖에 없게 된다. 따라서 정확한 설계를 위해서는 구조물의 연성과 구조 거동에 관한 충분한 연구가 선행되어야 할 것이다¹⁾.

FRP 보강재에 관한 연구가 국내외에서 활발히 진행되었다. 기존 연구에서는 주로 여러 가지 실험 변수에 대한 보의 역학적 거동과 변수에 따른 연성의 결과를 연성지수(ductility index)로 표현하고 있다¹⁻⁴⁾. 본 연구에서는 일반적으로 많이 시공되는 탄소섬유(carbon fiber reinforced polymer, 이하 CFRP) 단순부착공법에 대해서 실험 변수인 보강량에 따라 보강 효과 및 휨 실험체의 계면 특성 및 거동을 파악하고, 부착된 CFRP의 종류에 따른 연성 거동을 에너지 비로 고찰하였다.

2. 실 험

2.1 실험체의 제원 및 실험 변수

실험체의 단면 치수는 200×300 mm로 인장축과 압축축 피복 두께를 30 mm로 하였으며, 지점간 거리를 2.4 m, 전체 실험체 길이는 2.7 m로 제작하였다. 일반적인 설계 개념 측면에서는 철근콘크리트 보의 인장철근량이 압축철근량 보다 큰 것이 정상이나, 본 실험에서는 CFRP 보강으로 인한 콘크리트 연단에서의 압축 파괴를 방지하기

*Corresponding author E-mail : whitesky@skku.edu

Received November 16, 2006, Accepted February 9, 2007

©2007 by Korea Concrete Institute

위하여 압축철근을 H13, 인장철근으로는 H10을 배근하였다. 그리고, 전단 보강 철근으로는 휨 파괴를 유도하기 위해 H10을 100 mm 간격으로 배근하였다. 실험체의 수는 총 9개를 제작하였다. 기준 실험체인 무보강 실험체 1개와 순지간 길이의 90%를 고려하여 2.16 m의 길이로 CFRP의 종류(plate, sheet)에 따라 4개씩 부착하였다. 실험체에 적용한 보강량은 CFRP를 1겹, 2겹, 3겹 그리고 폭 방향으로 2겹을 적용하였다. 본 실험에 사용된 실험체 형상과 상세도 그리고 보강 변수는 Fig. 1과 Table 1에서 나타내었다.

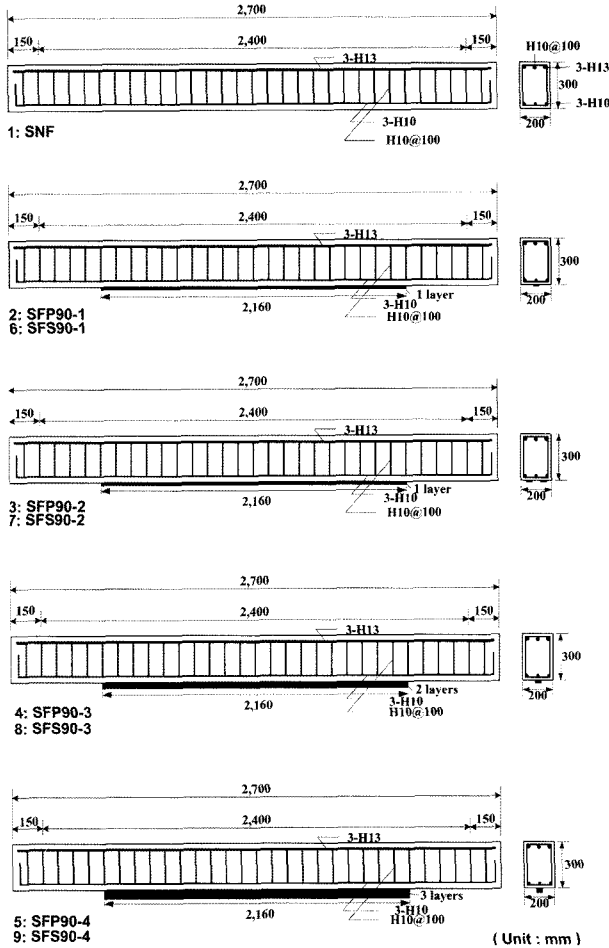


Fig. 1 Shape of specimens and detail drawing

Table 1 Name of specimen and variables

Specimens	Type of CFRP	Detail
SNF	-	Standard specimen
SFP90-1	Plate	1 ply of strengthening layer
SFP90-2		2 plies of strengthening width
SFP90-3		2 plies of strengthening layer
SFP90-4		3 plies of strengthening layer
SFS90-1	Sheet	1 ply of strengthening layer
SFS90-2		2 plies of strengthening width
SFS90-3		2 plies of strengthening layer
SFS90-4		3 plies of strengthening layer

2.2 사용 재료

2.2.1 콘크리트

실험체 제작에 사용된 콘크리트는 설계기준강도 24 MPa를 기준으로 하고, 레미콘 타설시 100×200 mm 압축강도 시험용 공시체 볼드를 취득하여 KS F 2405 (콘크리트 압축강도 시험 방법)³⁾에 의하여 재령 28일에 각각 3개씩 압축 강도시험을 실시하여 평균값을 구하였다. 시험 결과가 나타난 재료의 성질은 Table 2와 같다.

2.2.2 철근

본 실험에서 사용된 철근은 압축철근이 H13이고, 인장 철근과 스트립은 H10을 사용하였다. 인장 시험 결과를 이용하여 구한 항복강도와 탄성계수는 Table 3과 같다.

2.2.3 CFRP

보강재로 사용된 CFRP는 국내에서 제작된 1방향 CFRP를 사용하였으며, CFRP plate와 sheet를 사용하였고 재료적 성질은 Table 4와 같다.

2.3 실험 방법

CFRP가 보강된 보의 휨성능 실험을 위하여 1,000 kN 용량의 UTM(universal test machine)기를 사용하여 1점 가력하였다. 보강된 실험체에서의 압축철근, 인장철근 및 CFRP plate와 sheet의 변형률을 측정하기 위하여 최대 하중이 작용하는 중앙부에 각각 2개씩의 변형률게이지를 중앙부 콘크리트 압축 연단에서 10 mm 떨어진 위치에 부착하였다. 그리고 보강된 CFRP의 길이 방향에 대한 응력 분포의 변화를 파악하기 위하여 실험체 하면의 보강재에 변형률게이지를 150 mm 간격으로 부착하였다. 설치한 변형률게이지로부터 계속되는 데이터는 데이터로거인 EDX-1500A로 받아들여 컴퓨터를 이용하여 데이터를 정리하였다⁶⁻¹⁰⁾.

Table 2 Material properties of concrete

Specified concrete strength (MPa)	Compression strength (MPa)	Modulus of elasticity (MPa)
24	25.7	2.16×10^4

Table 3 Material properties of steel

Type	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Modulus of elasticity (MPa)
H10	457.2	766.3	2.01×10^5
H13	466.2	679.3	2.11×10^5

Table 4 Material properties of CFRP

Type	Thickness (mm)	Tensile strength (MPa)	Modulus of elasticity (MPa)
Plate	1.2	2,942	1.47×10^5
Sheet	0.167	3,550	2.35×10^5

3. 실험 결과

3.1 파괴 양상

CFRP로 보강된 휨부재의 최종 파괴 양상을 나타내면 Fig. 4와 같다. CFRP plate와 sheet로 보강한 실험체 모두 중앙부 하중 가력점에서 휨 균열이 발생된 이후 그 위치에서의 콘크리트와 접착제 사이에 큰 계면 응력이 작용하여 박리 파괴가 진행되었다¹¹⁾. 즉, 중앙부에서 발생된 박리는 단부로 진행하면서 최종적인 박리 파괴를 일으켰다. 콘크리트와 접착제 사이에서 박리 진행시 플레이트의 경우에는 보강량이 증가할수록 더 큰 소리를 내면서 급작스럽게 파괴를 일으켰고, 쉬트의 경우는 박리 진행시 보강량에 관계없이 단부로 서서히 진전하면서 파괴되는 것을 볼 수 있었다. 그리고 플레이트의 경우는 극한하중과 박리하중이 동시에 발생해서 매우 취약적으로 파괴되는 반면, 쉬트의 경우는 플레이트에 비해 극한하중 도달 후 박리하중이 발생하므로 덜 취약적임을 알 수 있고, 보강량이 증가할수록 연성 구간이 감소하는 것을 알 수 있었다.

3.2 보강량 및 형태에 의한 영향

CFRP plate와 sheet를 지간 길이의 90%로 휨 보강된 각 실험체의 파괴시까지 하중-처짐 곡선을 나타내면 Figs. 2, 3과 같다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 플레이트로 보강된 실험체는 보강량에 따라 1장 보강한 실험체 보다는 폭으로 2장 보강한 실험체가 약 40% 정도의 내력 증가가 나타났지만, 층으로 2겹 보강한 실험체는 1겹 보강한 실험체보다 약 20% 정도, 층으로 3겹 보강한 실험체는 약 40%의 내력 증가 현상이 나타났다. 즉, 층으로 3겹 보강한 형태와 폭으로 2장 보강한 형태가 비슷한 보강 효율을 나타내므로 폭 방향으로 보강량을 증가시키게 되면 플레이트와 콘크리트의 부착 면적이 증가됨으로써 박리 파괴를 지연시킬 수 있다. Fig. 3에서 쉬트로 보강된 실험체는 보강량에 따라 1장 보강한 실험체 보다는 폭으로 2장 보강한 실험체가 약 13% 정도의 내력

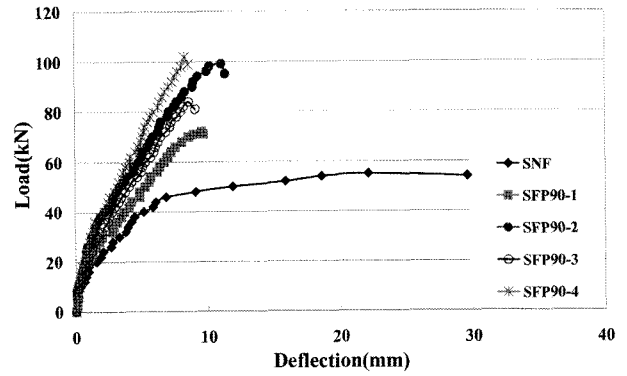


Fig. 2 Load-deflection relationship of CFRP plate

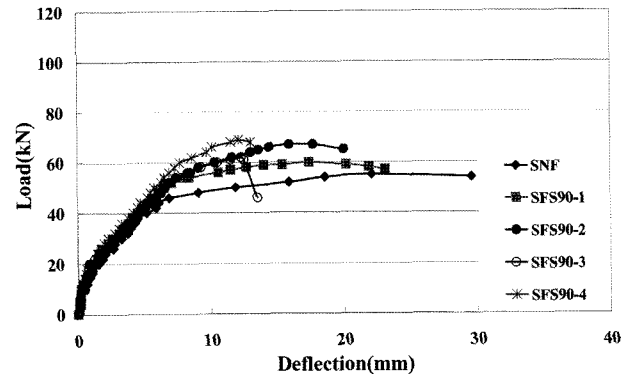


Fig. 3 Load-deflection relationship of CFRP sheet

증가가 나타났지만, 층으로 2겹 보강한 실험체는 1겹 보강한 실험체보다 약 5% 정도, 층으로 3겹 보강한 실험체는 약 15%의 내력 증가 현상이 나타나, 폭으로 2장 보강한 실험체와 층으로 3겹 보강한 실험체의 보강 효과가 거의 비슷한 것으로 나타났다.

그러므로, 플레이트로 보강된 실험체와 같이 층으로 보강한 형태와 폭으로 보강한 경우가 비슷한 보강 효율을 보이며 부착 면적이 증가됨에 따라 박리 파괴를 지연시키는 것으로 나타났다. Table 5는 9개의 실험체를 초기 균열하중과 극한하중에 대하여 정리하였다.

3.3 CFRP에 대한 변형률

CFRP plate와 sheet를 지간 길이의 90%로 휨 보강하였

Table 5 Test results for experiment

Specimens	Cracking load		Yielding load		Ultimate load		Spalling load	
	Load (kN)	Deflection (mm)	Load (kN)	Deflection (mm)	Load (kN)	Deflection (mm)	Load (kN)	Deflection (mm)
SNF	18.0	1.0	46.0	6.9	55	22.1	-	-
SFP90-1	19.0	1.2	66.0	7.6	-	-	72.0	9.6
SFP90-2	22.0	0.9	95.0	10.1	-	-	99.0	11.1
SFP90-3	22.0	1.0	85.0	8.6	-	-	85.0	8.6
SFP90-4	24.0	0.8	83.0	10.2	-	-	83.0	10.2
SFS90-1	19.0	1.0	52.0	7.1	60.0	17.4	57.0	23.1
SFS90-2	16.0	0.9	54.0	8.2	67.0	19.1	63.0	22.1
SFS90-3	18.0	1.0	56.0	9.5	62.0	12.1	62.0	12.1
SFS90-4	16.0	0.8	58.0	8.2	69.0	12.7	69.0	12.7

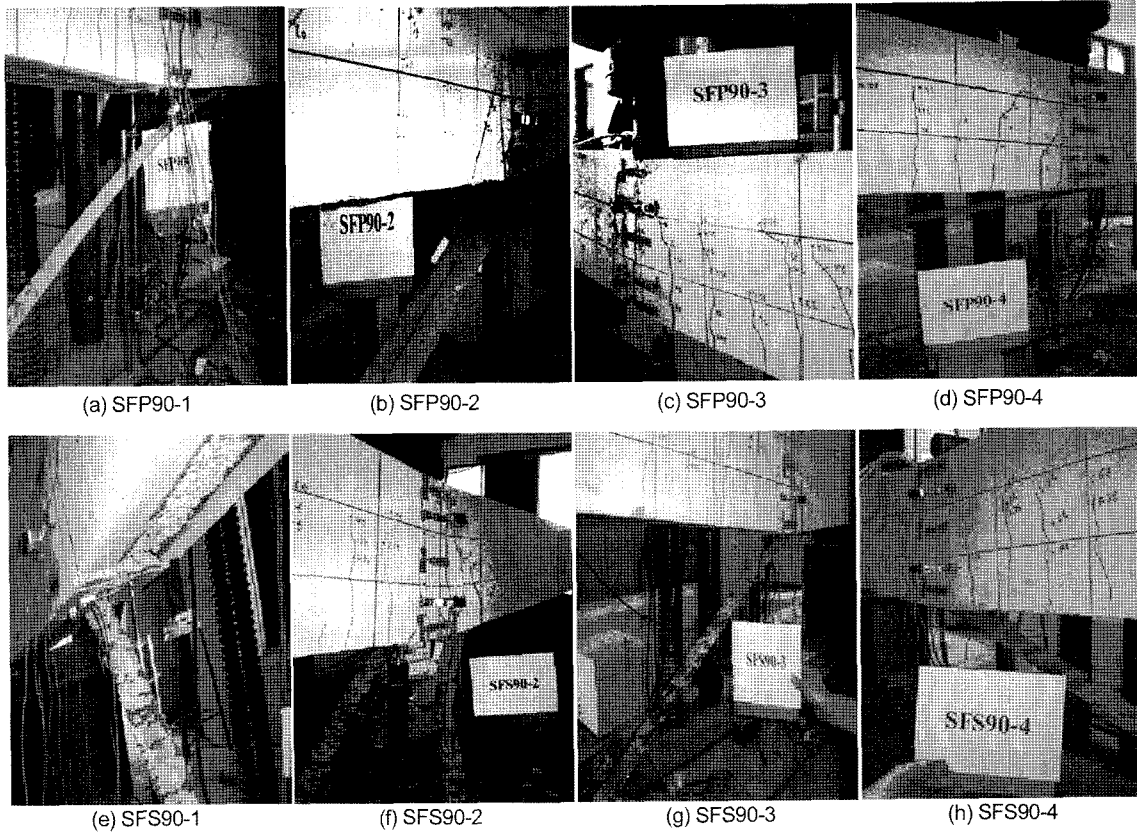


Fig. 4 Failure modes of specimens

을 때, 이런 CFRP의 변형률 분포에 대해 CFRP 변형률-거리 곡선을 나타내면 Figs. 5, 6과 같다.

플레이트의 경우, Fig. 5에서 보는 바와 같이 1점 보강한 실험체의 보강재 박리변형률은 약 4,787 $\mu\epsilon$ 까지 변형률이 발생되었다. 플레이트를 보강한 실험체 중에서

가장 높은 변형률을 나타내었다. 이런 변형률은 CFRP plate의 극한변형률에 약 40% 정도 값을 나타내므로 단순 부착 보강한 방법은 보강재의 효율을 최대한 이용하지 못하는 것으로 나타났다. 그리고 보강량이 증가함에 따라 박리 파괴시 보강재의 박리변형률은 급격히 감소했

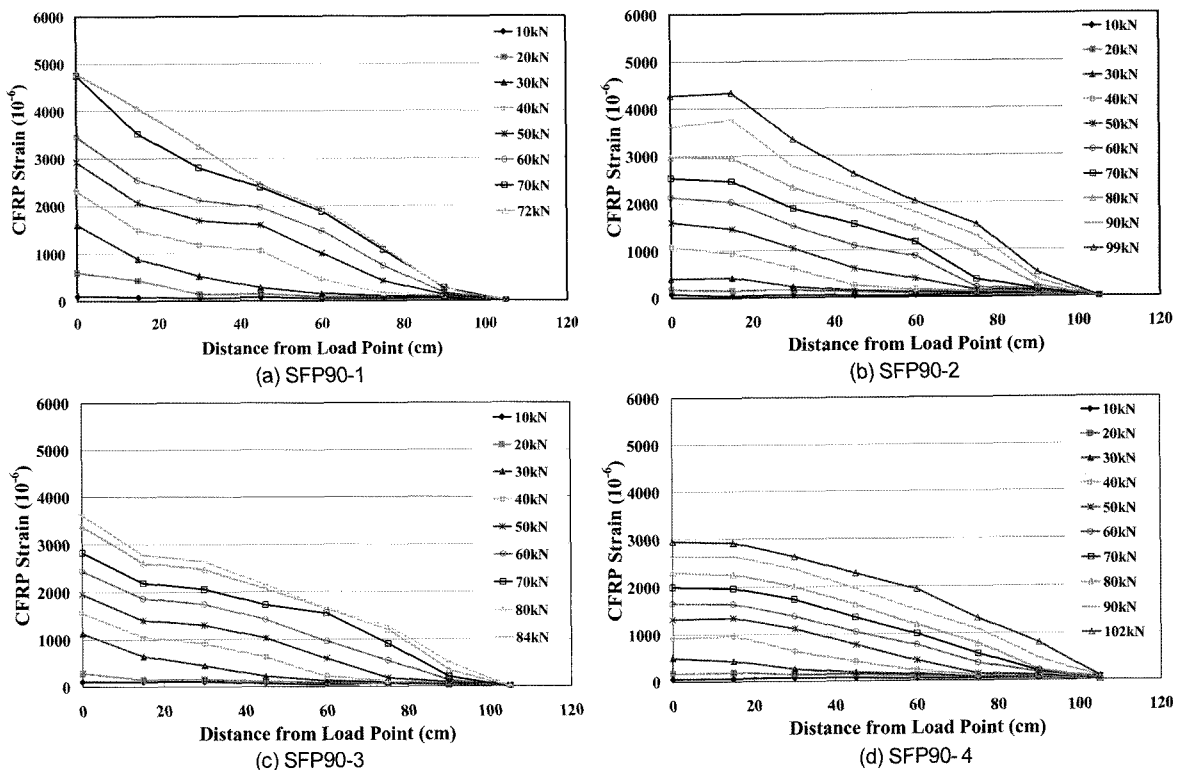


Fig. 5 Strain curves of CFRP plate

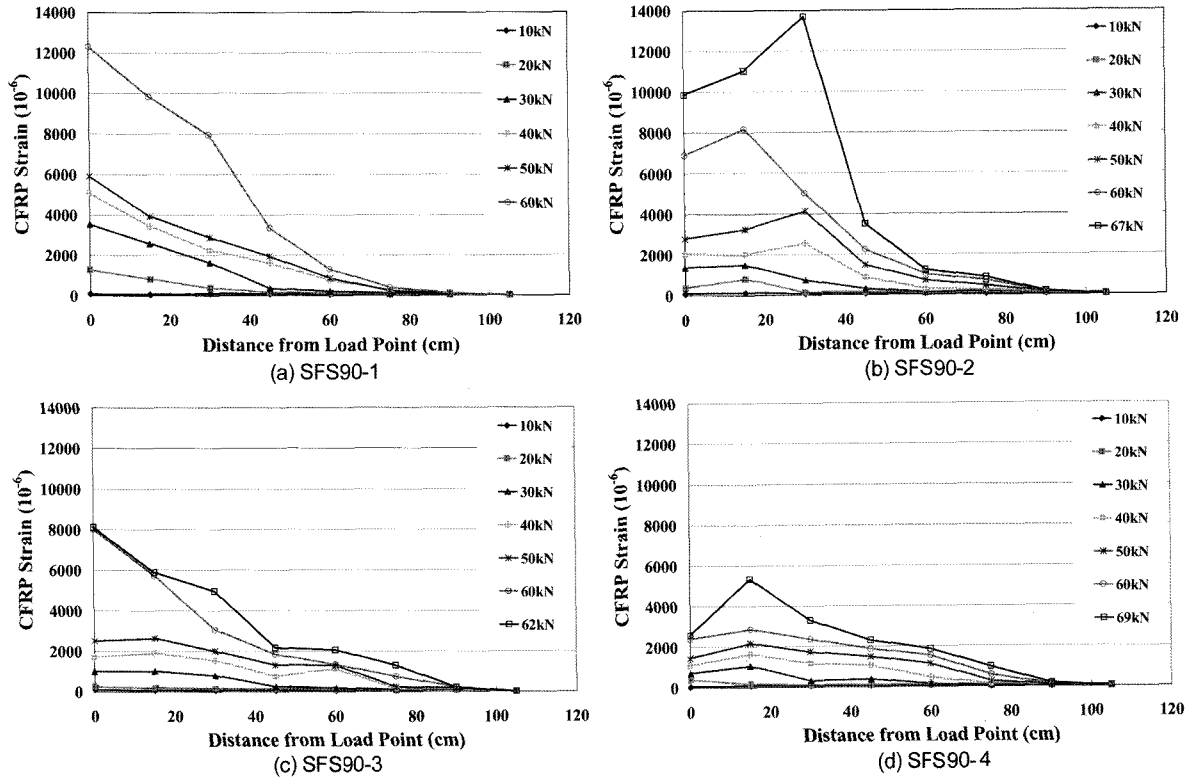


Fig. 6 Strain curves of CFRP sheet

다. 따라서, 보강량이 증가할수록 보강효율이 많이 감소하는 것을 알 수 있었다.

쉬트를 보강한 실험체는 Fig. 6에 나타난 것처럼 플레이트를 보강한 실험체와 비슷한 양상을 보였다. 1점을 보강한 실험체가 약 12,303 $\mu\epsilon$ 인 박리변형률을 나타내며, 가장 크게 나타났다. 그리고 보강량이 증가할수록 보강효율이 감소하며 보강재의 재료적 특성을 제대로 발휘하지 못하는 것을 알 수 있었다.

4. 보의 연성

4.1 연성(ductility)

보의 연성(ductility)은 파괴 이전까지 수행할 수 있는 하중의 손실 없이 비탄성 변형을 유지하는 보의 성능으로 정의할 수 있다. 이 정의에 따라 연성은 변형이나 에너지 흡수의 견지에서 표현되어질 수 있다. 항복에서 뚜렷한 철근의 소성 변형이 있는 철근콘크리트 보의 경우에, 연성은 극한에서의 변형과 항복점에서의 변형비로 계산되어 질 수 있다. 변형은 변형률, 처짐, 혹은 곡률로서 나타내어질 수도 있다. 철근콘크리트 구조물의 경우 철근의 항복을 기준으로 연성을 계산할 수 있지만 CFRP가 외부에 부착된 보의 경우는 파단까지 선형-탄성 거동을 하기 때문에 연성을 산정하기는 어렵다. 본 연구에서는 연성을 측정할 때 회전, 곡률, 처짐의 비로 구할 경우 항복과 극한 상태를 명확하게 구분하지 못하므로 에너지 방법을 선택하여 연성을 평가하였다.

4.2 에너지 개념에 의한 방법

에너지 정의에 기초한 연성은 비탄성, 탄성, 그리고 전체 에너지 중에 어떤 두 개의 비로써 정의되어 진다(Fig. 7). 여기에서는 비탄성 에너지와 전체 에너지의 비로 간주되어 진다. 그래서 전체 에너지는 하중-변형 곡선 전체의 아래 면적을 계산하면 되므로 쉽게 계산할 수 있다. 그러나 선형 에너지 부분과 비선형 에너지 부분을 결정함에 있어 문제가 된다. 첫 번째 방법은 하중의 증가가 다르게 바뀌는 점을 찾는 것이다. 두 번째 방법은 하중-곡선에서 편평한 부분을 기준으로 에너지 변곡점을 찾아 구분하는 것이다. 그리고 연성지수(ductility index) 보다는 에너지 비(energy ratio)를 사용해 분류하려고 한다¹²⁾. 본 연구에서는 하중-처짐 곡선에서 첫 번째 방법을 선택하여 에너지 변곡점을 결정하였다. 기울기 S1, S2, S3는 수치적분을 적용하여 계산해 기울기를 찾았고, 하

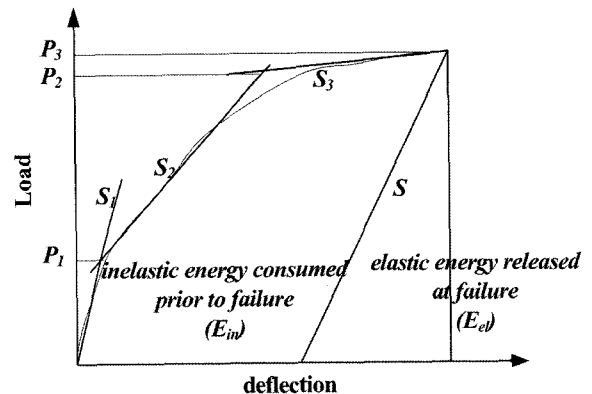


Fig. 7 Total, elastic, and inelastic energies

중 P1, P2는 다른 구간의 기울기를 연장하여 만나는 점의 하중을 뜻하며, 하중 P3은 극한하중을 뜻한다.

따라서, 탄성과 비탄성 에너지의 크기를 결정할 때 아래와 같은 식으로 계산할 수 있다(Fig. 7).

$$S = \frac{P_1 S_1 + (P_2 - P_1) S_2 + (P_3 - P_2) S_3}{P_3}$$

여기서, P₁, P₂, P₃ : 하중
S, S₁, S₂, S₃: 기울기

4.3 보의 연성에 따른 분류

비탄성 에너지와 전체 에너지의 비로 정의된 에너지 비(energy ratio)는 연성의 더 좋은 측정 방법으로 제안되어 졌다. 만약 에너지비가 75% 보다 더 크면 그 보의 연성 파괴(ductile failure)가 지배적일 것이다. 그리고 에너지비가 70%~74% 사이이면 반연성(semi-ductile)으로 고려되어 진다. 만약 69% 이하일 때 보의 취성 파괴(brittle failure)가 지배한다¹²⁾. 에너지 비(energy ratio)에 따라 실험체의 연성 분류를 나타내면 Table 6과 같다.

CFRP를 이용하여 보 하면에 단순 부착 하였을 때, 플레이트는 27%~38% 정도의 에너지 비를 나타내어 아주 취성적임을 알 수 있었다. 슈트의 경우는 50%~75% 정도 에너지 비 값을 얻었다. 플레이트에 비해 거의 두 배 값이다. 그리고, 슈트 부착시 하면에 1장과 폭으로 2장 부착한 실험체(SFS90-1, SFS90-2)는 약 70% 정도의 연성비를 나타내며 연성 파괴를 포함하고 있다.

5. 결 론

하면에 CFRP plate와 sheet를 단순 부착한 철근콘크리트 보의 보강량에 따른 보강 효과 및 계면 특성과 연성에 대한 결과는 다음과 같다.

- 1) CFRP의 보강량에 따라 전체적으로 보강성능이 증가함을 볼 수 있었다. 특히, 플레이트와 슈트 보강 모두 층으로 3겹 보강한 것과 폭으로 2장 부착한

경우가 비슷한 보강 효율을 나타내었다. 그리고 보강면의 부착 단면이 증가할수록 박리 파괴 하중을 지연시키는 것을 알 수 있었다.

- 2) 박리가 일어날 때 중앙부에서 휨 균열이 발생한 후 그 위치에서의 콘크리트와 접촉제 사이에 큰 계면응력이 작용하여 최종으로 박리 파괴가 발생하였다. 플레이트의 경우 보강량이 증가할수록 더 큰 소리를 내면서 급작스럽게 파괴를 일으키며 극한하중이 동시에 발생해서 매우 취성적인 파괴 양상을 보였다. 반면, 슈트의 경우 박리 진행이 보강량에 관계없이 극한하중 도달 후 박리하중이 발생하므로 플레이트에 비해 덜 취성적이고, 보강량이 증가할수록 연성 구간이 줄어드는 것을 알 수 있었다.
- 3) CFRP 플레이트와 슈트의 변형률은 모두 1겹 보강했을 때 최대값을 나타내었고, 보강량이 증가할수록 보강의 효율이 떨어지는 것을 알 수 있었다. 그리고, 보강재의 재료적 특성을 제대로 발휘하지 못하고 탈락되는 것을 알 수 있었다.
- 4) CFRP가 부착된 철근콘크리트 보의 연성 평가에서 보면 전체적으로 CFRP의 단순 부착 공법에서는 취성적으로 분류되어 졌다. 박리 파괴에서 검증되었듯이 연성 분류 에서도 보면 CFRP 플레이트가 슈트에 비해 취성적으로 거동함을 알 수 있다. 그리고, 슈트의 경우는 대부분이 취성 파괴를 일으키지만, 에너지 비가 전체적으로 50%를 넘었다. 보 하면에 겹 보강을 하지 않은 SFS90-1, SFS90-2의 경우는 70% 정도의 에너지 비를 나타내고 있다. 따라서 CFRP의 단순 부착 공법에서는 보강재의 연성 기능을 충분히 발휘할 수 있는 부착 공법의 개선과 단부 anchorage system의 개발이 이루어진다면 더 좋은 연성을 기대할 수 있을 것이라고 생각되어진다.

감사의 글

본 연구는 한국건설교통기술평가원 지정 R&D(05기반 구축 D04-01) 연구비 지원에 의하여 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김나정, 이은주, 신영수, 홍건호, "FRP로 보강한 철근콘크리트 보의 구조 거동에 미치는 보강면 처리의 영향", 대한건축학회논문집, 20권 1호, 2004, pp.75~82.
2. 박상렬, 김태우, "CFRP판으로 부착된 RC 보의 복부정착 형태에 따른 보강 효과", 대한토목학회논문집, 23권 6A호, 2003, pp.1113~1121.
3. 박현정, 박성수, "탄소섬유시트로 보강된 철근콘크리트 보의 연성 거동에 관한 실험적 고찰", 한국구조물진단학회, 5권 3호, 2001, pp.181~189.
4. 최창식, 김용채, "탄소섬유시트로 보강된 R/C 보의 최대 내력에 관한 연구", 한국구조물진단학회, 5권 2호, 2001,

Table 6 Ductility classification of beams

Specimens	Energy ratio (E _m /E _t)	Classification of beam ductility
SNF	81.35%	Ductile
SFP90-1	33.30%	Brittle
SFP90-2	38.12%	Brittle
SFP90-3	26.93%	Brittle
SFP90-4	27.92%	Brittle
SFS90-1	75.35%	Ductile
SFS90-2	67.24%	Brittle
SFS90-3	50.79%	Brittle
SFS90-4	50.41%	Brittle

- pp.199~204.
5. KS F 2405, 콘크리트의 압축 강도 시험 방법, 한국표준협회, 2005, pp.1~6.
 6. 이리형, 송성용, 나정민, 이용택, “탄소섬유시트로 보강된 철근콘크리트 보의 휨 거동에 관한 실험 연구”, 대한건축학회 가을학술발표회 논문집, 18권 2호, 1998, pp.347~352.
 7. 이리형, 이현호, 구은숙, “탄소섬유시트로 휨보강한 RC 보의 거동에 관한 실험적 고찰”, 대한건축학회논문집, 14권 6호, 1998, pp.77~84.
 8. 연길환, “탄소섬유를 사용한 RC보의 구조 거동에 관한 기초적 연구”, 대한건축학회논문집, 7권 6호, 1991, pp.229~236.
 9. 양동석, 박선규, 이용학, “강연선 및 탄소섬유쉬트로 보강된 철근콘크리트 보의 휨 거동 특성”, 콘크리트학회 논문집, 14권 2호, 2002, pp.216~222.
 10. 고병순, “탄소섬유판으로 외부부착 보강된 철근콘크리트 보의 거동 특성”, 성균관대학교, 석사학위논문, 2004.
 11. Zhishen, Wu. and Jun, Yin, “Fracturing behavior of FRP-Strengthened concrete structures”, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.70, 2003, pp.1339~1335.
 12. Grace, N. F., Soliman, A. K., Abdel-Sayed, G and Saleh, K. R., “Behavior and Ductility of Simple and Continuous FRP Reinforced Beams”, *Journal of Composites for Construction*, November, 1998, pp.186~194.
 13. 조병완, “CFRP 긴장재를 이용한 프리스트레스 콘크리트 보의 연성 평가”, 대한토목학회논문집, 21권1-A호, 2001, pp.43~52.

요 약 최근 건설 산업에서 FRP는 재료적 장점들 때문에 구조물의 보강재로서 높은 관심을 모으고 있다. 본 연구에서는 CFRP 보강량에 따른 철근콘크리트 보의 구조적 거동과 보강된 CFRP 종류에 따른 보의 연성에 대해 연구한 것이다. 실험에서 보강량을 증가시켜 실험했을 때 실험체를 겹 보강하는 것보다는 폭 보강하는 것이 더 효율적이었다. CFRP로 보강된 보의 파괴에서는 휨 파괴를 일으키면서 취성적인 양상을 보였다. 또한 에너지 비 측면에서 보의 대부분이 취성 파괴로 분류되었다. CFRP 플레이트에 비해 쉬트의 에너지 비가 전체적으로 50%를 넘고 겹 보강을 하지 않은 실험체는 약 70% 정도로 나타났다.

핵심용어 : FRP, 연성, 에너지 비, 보강