

# 아라미드 섬유 슈트를 이용한 철골 보 부재의 휨 보강 성능에 관한 실험적 연구

Experimental Study on the Flexural Performance of Steel Beams Reinforced by AFRP Sheets

김 강 석<sup>1)</sup>      나 환 선<sup>2)</sup>      김 강 식<sup>3)</sup>      이 현 주<sup>4)</sup>      이 강 민<sup>5)\*</sup>  
Kim, Kang Seok      Nah, Hwan Seon      Kim, Kang Sik      Lee, Hyeon Ju      Lee, Kang Min

## Abstract

Fiber Reinforced Plastic (FRP) sheets have been widely used to retrofit and rehabilitate RC structures, while in case of retrofitting steel structures, there are no codes and researches. It stems from configuration of member and characteristics of bonding behavior. This study focused on the static behavior of steel beams reinforcement by AFRP sheets. The main objective of the experimental programme was the evaluation of the force transfer mechanism, the increment of the beam load carrying capacity and the bending stiffness. A bending test was conducted on a H-shaped steel beam, with aramid FRP sheets bonded to its flanges. The mid-span deflection and the strain from three points along AFRP sheets were recorded. Test results exhibit that the increment of the load-carrying capacity with reference to a mid-span deflection level of 15 mm (1/125mm of the clear span) was equal to 9.4% and for the two layers case, an elastic stiffness increment is slightly higher than one layer case.

**Keywords** : Reinforcement, Aramid fiber Reinforced plastic, Steel structure

## 1. 서론

탄소섬유, 유리섬유, 아라미드섬유와 같은 복합소재를 이용한 보강 방법은 콘크리트 구조물에 널리 적용되고 있으나, 강 구조물에 적용된 사례는 드물다. 강 구조물의 보강공법으로는 강판 보강공법이 주로 사용되고 있으나, 강판의 자중으로 인하여 보강재의 취급이 어렵고 구조물에 따라 설비 및 기타 간섭물로 인하여 접근이 어려워 작업성이 떨어진다. 또한, 최근 강재의 원가 상승으로 공사비가 증대되고 있는 반면, 복합소재의 경우, 지속적인 소재 개발로 강재보다 저렴하게 보강에 적용할 수 있게 되었다.

콘크리트 구조물의 경우에는, 복합소재를 이용한 휨 보강, 전단 보강, 피로 성능 향상 뿐만 아니라 내화, 내구성능에 대한 부분까지 광범위한 연구가 진행되어 기술규격이 제정되는 등 보편화되었다. 반면, 복합소재를 활용한 강 구조물의 보강 사례와 기술 자료는 국내뿐만 아니라 국외에서도 극히 드물다. 그러나, 최근 복합 소재 분야의

지속적인 발전으로 인하여 물성이 개선되었고, 특히, 접착제의 부착성능이 향상되어 유럽, 미국 등지에서는 복합소재를 이용한 강 구조물의 보강 관련 연구를 수행하고 있으나, 아직까지는 기존 사례와 기술 자료가 극히 드문 상황이다. 따라서 본 논문에서는 기존 강판 보강공법 대신 복합소재의 한 종류인 아라미드 섬유 슈트를 이용하여 강 구조물 보강에 사용할 수 있는 가능성을 실험적으로 검증하고 실제 적용을 위해 해결해야하는 기술적인 문제점을 찾고자 한다.

## 2. 실험계획

### 2.1 국외 실험사례

강 구조물의 복합소재에 의한 보수, 보강방법은 전 세계적으로 초창기 기술이며, 이와 관련된 기술 논문도 2000년 이후에 발표되었다. 그러나, 대부분의 연구가 탄

1) 정회원, 한전 전력연구원 선임연구원, 충남대학교 박사과정  
2) 정회원, 한전 전력연구원 책임연구원, 공학박사  
3) 정회원, 한전 전력연구원 선임연구원  
4) 정회원, 한전 전력연구원 선임연구원  
5) 정회원, 충남대학교 건축공학과 부교수, 공학박사, 교신저자

\* Corresponding author : leekm@cnu.ac.kr 042-821-5625

• 본 논문에 대한 토의를 2011년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 2011년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

Table 1 Experimental Design

Test Type	Configuration
Mechanical Properties Test	AFRP sheet (Kevlar)
Bond test	Steel plate(L: 1000, W: 50, t: 6) + AFRP sheet(415g/m <sup>2</sup> )
Flexural Performance Test	H-shaped steel member (100×100×6×8) + AFRP sheet(415g/m <sup>2</sup> )

소섬유 스트립으로 보강된 부재의 보강성능에 중점을 두고 있다. Pierluigi와 Carlo(2006)는 탄소섬유 스트립 보강재를 이용한 보 부재의 휨 보강 성능을 평가하기 위해 보강 겹수와 접착제의 종류를 달리하여 평가하였다. 평가 결과, 지간 1/125에 해당되는 지점에서 휨내력이 1겹에서 9.2%, 2겹에서 23.3% 정도로 개선되었다는 것을 확인하였다.

또한, Tavakkolizadeh(2003)로 스트립 형태의 탄소섬유 복합소재를 이용하여 피로 실험을 통해 강재면과 복합소재의 부착 성능을 평가하였다. 평가결과, 탄소섬유 스트립의 부착으로 피로수명을 연장시켰을 뿐만 아니라, 균열 진전율이 감소된 것으로 나타났다. 이 논문에서는 탄소섬유 스트립 보강으로 열화된 금속교량의 보 부재의 피로수명이 3배 이상 향상됨을 밝혔다. 이외에도 강교량의 보강에 복합소재를 활용하기에 앞서 실험 검증을 위한 연구가 선행된 바 있다.

그러나, 국내에는 복합소재를 이용한 강 구조물의 보강에 관한 본격적인 연구가 진행된 바 없고, 국외사례가 대부분 스트립 형태의 탄소 섬유를 대상으로 보강 성능을 평가한 것에 착안하여, 본 논문에서는 강재와 쉬트 형태의 아라미드 복합소재의 부착 성능 및 보강 성능을 평가하여 복합소재를 이용한 강 구조물 보강의 기술적 가능성을 찾고자 한다.

## 2.2 실험 계획

국내 규격 강재 및 접착제를 대상으로 부착성능평가와 보 부재의 휨 성능 평가에 대한 실험계획을 Table 1과 같이 수행하였다. 부착성능평가에서는 가력 과정에서 단면 축소가 보강재의 탈착을 가속시킬 것을 우려하여 부착 성능의 확인을 위하여 SM490 강재를 사용하였고 휨성능 평가에서는 일반적으로 강 구조물에서 보 부재로 사용되는 SS400 강재를 대상으로 평가하였다.

Table 2 Mechanical Properties of AFRP sheet (Kevlar)

Type	Weight (g/m <sup>2</sup> )	Thickness (mm)	Tensile Strength (kN/cm) Designed Strength (MPa)	Young's Modulus (MPa)
Kevlar	415	0.288	5.884 2059	1.18×10 <sup>5</sup>

Table 3 Mechanical Properties of Epoxy bonding material

Type	Norm value (MPa)	Real Value (MPa)
Tensile strength	53.9	≤ 53.9
Bending strength	39.2	< 78.5
Compressive strength	68.6	< 107.9
Compressive elasticity	1471	< 2059
Bonding strength : Steel/Steel	9.8	< 14.7
Strength folded to CFRP	38.2	< 49.0
Bonding strength : Concrete	1.9	< 2.5

보강재인 복합소재는 강재 대비 7~10배 정도 인장강도가 우수하고 전기전도성이 없는 아라미드섬유 쉬트를 보강재료로 선정하였다. 아라미드섬유는 사용 섬유에 따라 케블라(Kevlar), 트와론(Twaron), 테크노라(Technora)가 있으며 케블라와 트와론은 인장강도 2059 MPa, 파단 신축률 1.8 %를, 테크노라는 인장강도 2353 MPa, 파단 신축률 3 % 정도이다. 대상 복합소재는 국내 S사에 제조되는 케블라 제품으로, 섬유중량 415g/m<sup>2</sup>를 사용하였다. 본 시험에서 사용된 케블라 제품(보증내력 598 kN/m)의 제조사에 제시하는 기계적 물성은 Table 2와 같다.

접착제는 별도의 물성평가 없이 Table 3과 같이 제조사의 성적서를 참고로 하였다. 인장강도는 53.9 MPa로 아라미드섬유 쉬트의 설계 인장강도 2059 MPa 대비 작은 값으로서 시험체 설계시 접착제의 인장강도는 무시하고 평가하였다. 시험방법은 물성 별로 KS, ASTM, JIS를 준용하였고, 개별 물성치 모두 요구성능에 적합한 것으로 나타났다.

## 3. 복합소재 물성 시험

### 3.1 시험체 및 시험방법

시험에 사용된 아라미드섬유 쉬트의 물성평가를 위해 Fig. 1과 같이 ASTM D 3039를 따라 시험을 진행하였다.

시편은 Fig. 1과 같이 접착제를 필름지에 미리 도포하고, 그 위에 아라미드섬유 쉬트를 롤러를 사용하여 함침한 후, 그 위에 다시 접착제를 도포하여 필름지로 덮어두



Fig. 1 Specimen manufacturing procedure



Fig. 2 View of Mechanical property test (AFRP)

Table 4 Mechanical Property Test results (AFRP sheet)

Test unit No.	Section Area (mm <sup>2</sup> )	Maximum Load (kN)	Maximum Deflection (mm)	Tension Strength (N/mm <sup>2</sup> )	Maximum elongation (%)
1	7.2	16.5	5.110	2291.7	3.2%
2		16.3	4.806	2263.9	3.2%
3		15.9	4.904	2208.3	3.3%
Mean	7.20	16.3	4.940	2254.3	3.2%
Deviation	-	0.270	0.155	42.431	0.000

고 2일간 경화시킨 뒤, 폭 25 mm, 길이 250 mm 크기로 재단하여 제작하였다. 시편의 두께는 접착제 두께가 시편 제조시마다 일정하지 않은 관계로 아라미드섬유 쉬트의 공칭두께를 기준으로 단면적을 산정하였다.

### 3.2 시험결과

시험결과 Fig. 3과 같이 항복구간 없이 탄성구간에서 취성파괴 되는 것으로 나타났다. 최대하중은 평균 16.3kN(표준편차 0.270), 최대 인장강도는 평균 2254.3 N/mm<sup>2</sup>로 설계강도 2059.4N/mm<sup>2</sup> 대비 9.5% 정도 크게 나타났다. 한편, 파괴변형률은 평균 3.2%로 일반적인 케블라의 파괴변형률 1.8% 보다 높게 나타났다.

## 4. 부착성능 평가

### 4.1 실험체 및 실험방법

부착성능은 강재의 길이방향으로 아라미드섬유 쉬트를

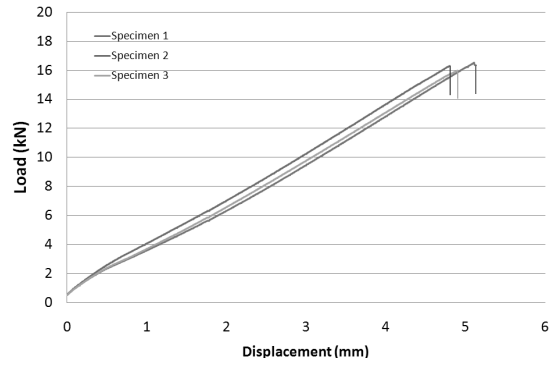


Fig. 3 Load versus deflection (AFRP sheet)

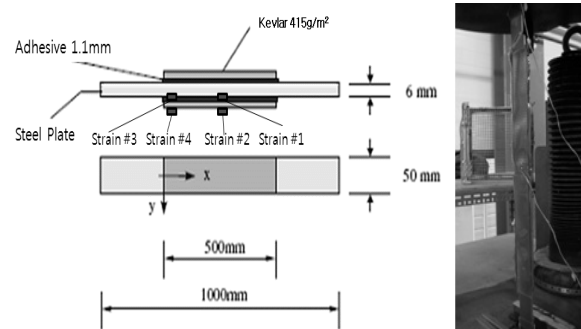


Fig. 4 Test Specimen and Side View of bond test

양면에 부착하여 아라미드섬유 쉬트와 강재의 계면의 부착응력이 순수하게 전단력이 발생하도록 Fig. 4와 같이 인장시험을 통해 평가하였다.

실험체는 길이 1,000 mm, 폭 50 mm, 두께 6 mm의 강재의 중앙부 양면에 길이 500 mm의 아라미드섬유 쉬트를 부착시켜 제작하였다. 부착력을 향상시키기 위해 부착에 앞서, 강재 표면을 쇼트 블라스트(Grit 입도 0.5~1.4 mm, 분사속도 20 HP/8EA)로 처리 후, 솔벤트로 표면에 유막, 이물질 등을 제거했다. 아라미드섬유 쉬트의 부착 방법은 아라미드섬유 쉬트 재료물성시험과 동일하게 강재와 아라미드섬유 쉬트를 함침시킨 후, 2주간 항온항습실에서 경화시켰다.

무보강 실험체의 예상 항복하중은 98.6 kN, 예상 최대하중은 149.5 kN으로, 아라미드섬유 쉬트의 유효단면적에 해당되는 예상 최대하중은 40.9 kN으로 산정되었으나, 항복 이후 강재와 아라미드섬유 쉬트의 일체 거동 여부에 따라 보강 실험체 내력이 달라지므로 산정할 수가 없다. 실험체 일람은 Table 5와 같고, 무보강 실험체 3개와 아라미드섬유 쉬트(415 g/m<sup>2</sup>) 1겹 부착한 실험체를 4개로 총 7개를 제작하여 0.2 mm/min의 하중 속도로 정적 인장시험을 수행하였다.

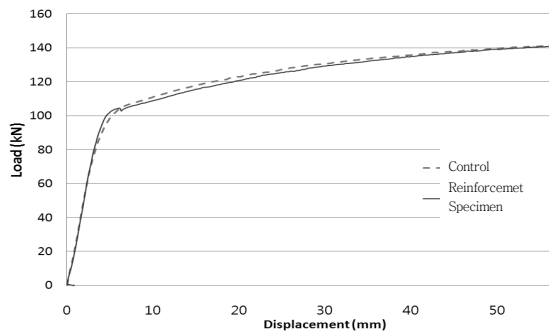


Fig. 5 Load versus displacement of bond test specimen

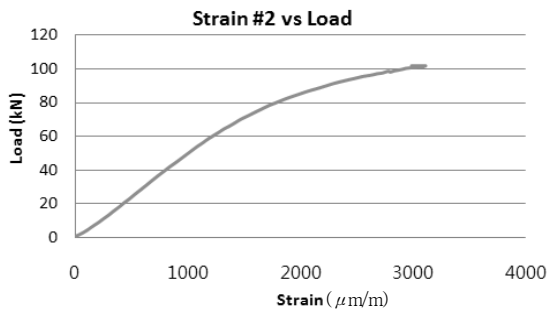
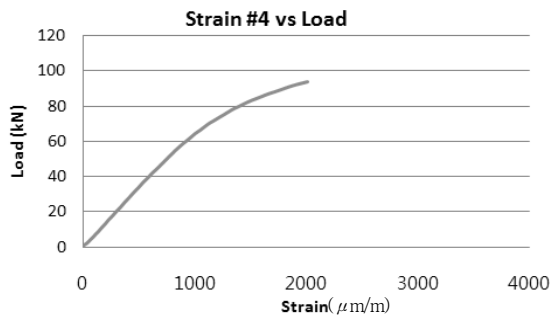


Fig. 6 Strain versus Load of AFRP sheet(#1 specimen)  
(Upper: Strain #4, Lower: Strain #2)

## 4.2 실험결과

실험결과는 최대하중, 항복하중, 단부와 중앙부의 탈착시 하중을 구분하여 Table 6과 같이 나타냈고 하중-변위 곡선은 Fig. 5와 같다. 무보강 실험체의 최대하중은 평균 147.2 kN (표준편차 1.650), 항복하중은 평균 97.2 kN(표준편차 0.551)로 예상치와 비슷하게 나타났다. 보강 실험체의 경우, 아라미드섬유 슈트가 탈착되었을 때 일시적으로 하중이 감소하는 것으로 나타나서 탈착이 완료된 시점을 알 수 있었고, 최대하중은 평균 148.1 kN으로, 항복하중은 평균 97.6 kN으로 나타났다. 본 실험에서는 부착성능을 평가하기 위해 하중이 강재와 아라미드섬유 슈트 계면의 부착 응력이 순수하게 전단력으로만 발생하게 고려했기 때문에 무보강 실험체 평균값 대비 1kN

Table 5 Specimen details for bond test

Test unit	Reinforcement layer	Number	Calculated Yield Load	Calculated Maximum Load
Control	-	3	98.6kN	149.4kN
Reinforced Specimen	1 layer (Kevlar 415g/m <sup>2</sup> )	4	-	-

Table 6 Bond Test results

Test Specimen	Max. Load (kN)	Yield Load (kN)	Load at Side-debonding (kN)	Load at Center-debonding (kN)	
1 Wrapped Layer	1	146.8	97.1	93.7	101.8
	2	148.8	99.5	99.5	102.8
	3	151.1	98.1	100.5	106.7
	4	145.6	97.3	92.7	102.9
Mean	148.1	97.6	96.6	103.6	
Deviation	2.088	1.270	3.968	2.158	
Control (Mean)	147.2	97.2	-	-	

미만의 차이로 근사하게 나타나서 아라미드섬유 슈트 부착에 따른 강도 향상이 없는 것으로 나타났다.

부착된 아라미드섬유 슈트 표면의 단부와 중앙부 지점의 변위-하중 곡선은 Fig. 6, 7과 같고, 이 결과를 통해 계면파괴의 양상을 개략적으로 파악할 수 있다. 1번 실험체의 항복하중은 97.1 kN으로 나타났고, 단부에서는 93.7 kN 지점에서 변위 진전이 정지되어 항복 직전에 단부에서 계면파괴가 일어났고, 중앙부 지점은 항복 이후 101.8 kN에서 최종적으로 탈착되어 단부에서 시작되어 중앙부로 계면이 파괴되는 것으로 나타났다. 2번 실험체의 경우, 항복하중은 99.5 kN으로, 단부에서는 항복하중에서, 중앙부에서는 항복하중 이후 102.8 kN에서 지점에서 탈착되었다. 보강 실험체 모두 항복 부근에서 먼저 단부에서 계면 탈락이 시작된 이후 중앙부 지점에서도 계면 파괴되어 완전히 강재면에서 탈착된 것으로 나타났다. 파단 실험체에서는 Fig. 8과 같이 아라미드 섬유 슈트 면에서 균열은 발견되지 않았다.

## 5. 휨보강성능 평가

### 5.1 실험체 및 실험방법

아라미드 섬유 슈트를 이용한 보 부재의 휨 보강 성능을 평가하기 위하여 보강 겹수를 변수로 선정하여 H형강

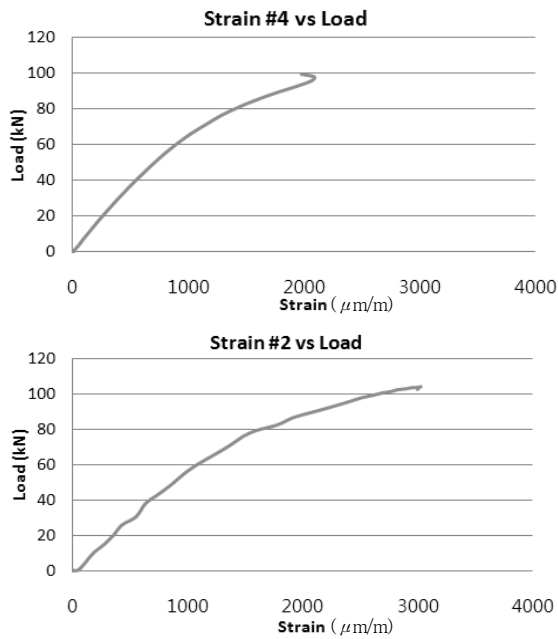


Fig. 7 Strain versus Load of AFRP sheet (#2 specimen)  
(Upper : Strain #4, Lower : Strain #2)

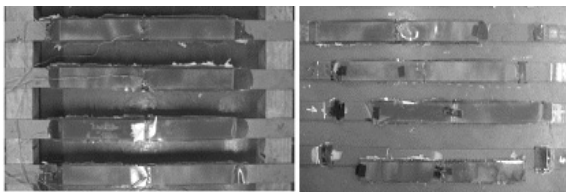


Fig. 8 Appearance of Bond test specimen

의 인장축 플랜지에 부착하여 무보강 실험체 대비 보강 실험체의 휨내력을 평가하였다.

실험체는 SS400 H형강(H: 100×100×6×8)으로 아라미드섬유 슈트가 부착되는 플랜지 하부 면은 부착성능 실험과 동일하게 쇼트 블라스트 표면 처리 후, 솔벤트로 표면에 유막을 제거하였다. 실험체 형상은 Fig. 9와 같이 양단 핀지점에서 100 mm 이격하여 총 부착길이 1,000 mm로 아라미드섬유 슈트를 부착하였고, 보의 비지지거리는 1,200mm, 하중속도 2mm/min로 실험을 진행하였다.

부착 및 휨거동을 파악하기 위해 실험체 중앙부 및 단부와 중앙 지점에 강재와 아라미드섬유 슈트에 변형률 게이지를 부착하였고, 보 중앙부에 변위계를 설치하였다. 양단과 중앙부에서 플랜지를 횡구속 하였고, 상부 플랜지의 가력지점에서 국부좌굴을 막기 위해 스티프너로 보강하였다.

아라미드섬유 슈트와 강재가 소성 이후에도 일체화된 거동을 하고, 변형 이후에도 단면변화가 없다는 가정 하

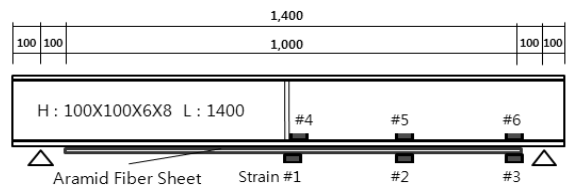


Fig. 9 Configuration of Flexural Performance Test Specimen

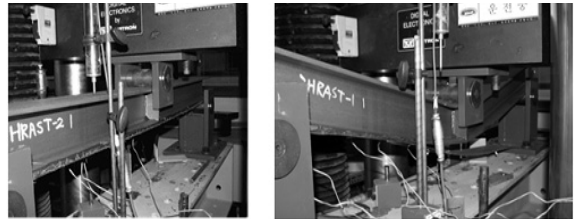


Fig. 10 Test view (Flexural Performance test)

Table 7 Specimen Details of Flexural Performance Test Specimen

Specimen	# of Wrapped layer	# Specimen	Bonding Material	Curing Period
Control	-	1	-	-
Reinforcement	1 (Kevlar 415 g/m <sup>2</sup> )	2	Epoxy Resin	2 Weeks
	2 (Kevlar 415 g/m <sup>2</sup> )	2		

에 실험체에 사용된 H형강의 소성 단면계수를 적용하여 공칭 휨 강도 및 전단강도를 계산하였다. 무보강 실험체의 경우, 공칭 휨강도와 전단하중이 각각 21.5 kN·m, 71.5 kN로 계산되었고, 1겹 보강된 실험체의 경우, 무보강 실험체 대비 13.8 % 증가된 24.4 kN·m와 81.5 kN, 2겹 보강된 실험체의 경우, 27.8 % 증가된 27.4 kN·m와 91.4 kN로 계산되었다.

## 5.2 실험결과

아라미드섬유 슈트 1겹과 2겹 보강의 철골 보 부재의 휨내력 개선효과에 대한 정량적 평가를 위한 1점 가력 휨 실험 결과는 Table 9와 같다. 항복하중, 탄성강성도, 실험체 지간 1,200 mm의 1/125에 해당되는 9.6 mm 변형 시 하중과 아라미드섬유 슈트 최대변형률 및 극한하중을 무보강 실험체와 보강 겹수에 따라 비교 분석하였다.

여기서, 항복하중은 실험체에 사용된 H형강 및 아라미드섬유 슈트의 설계두께에 대한 단면계수와 강재 SS400의 항복강도 245 N/mm<sup>2</sup>를 적용하여 계산한 값이고, 극한하중은 아라미드섬유 슈트 최대변형 이후, 즉 계면파괴

Table 8 Flexural Performance Test Results

Specimen	Yield Load (kN) (Calculated)	Elastic Stiffness (kN/mm)	Load at 9.6 mm deflection (kN)	Load at 15 mm deflection (kN)	Max. Elong.	Max. Load (kN)
Control	68.84	14.68(-)	87.13(-)	89.15(-)	-	85.38 (-)
1 Ply	78.75	15.34 (▲4.5%)	89.78 (▲3.0%)	92.38 (▲3.6%)	0.0125	93.33 (▲9.3%)
		15.04 (▲2.4%)	90.61 (▲4.0%)	94.60 (▲6.1%)	0.0137	94.90 (▲11.2%)
2 Ply	88.75	15.55 (▲5.9%)	92.08 (▲5.7%)	97.53 (▲9.4%)	0.0108	97.53 (▲14.2%)
		15.58 (▲6.1%)	90.76 (▲4.2%)	95.03 (▲6.6%)	0.0123	95.03 (▲11.3%)

직전의 하중으로 정하였다. 또한, 보강된 실험체와 비교하기 위해 무보강 실험체의 하복하중 및 강성도와 지간의 1/80과 1/125에 해당하는 15 mm, 9.6 mm 처짐에서의 하중 값을 구하였고, 부재의 전단면이 항복되었다고 예상되는 극한하중을 나타냈다.

지간 1200 mm의 1/80에 해당하는 처짐 15 mm에서의 하중은 Fig. 11과 같이 1겹 보강 실험체의 경우, 92.38 kN, 94.60 kN으로 무보강 실험체 대비 3.6%, 6.1% 증가되었고, 2겹 보강 실험체에서는 97.53 kN, 95.03 kN으로, 6.6% 9.4% 증가된 수치로 나타났다.

계면파괴 직전까지의 하중은 1겹 보강 실험체에서 93.33 kN, 94.90 kN로 나타나서, 무보강 실험체의 전항복하중 85.38 kN 대비 각각 9.3%, 11.2% 증가되었다. 2겹 보강 실험체에서는 14.2%, 11.2% 증가된 93.33 kN, 94.90 kN으로 나타났다. 1겹, 2겹 보강 실험체 모두 일시적으로 하중 저하가 나타났는데 이것은 아라미드 섬유 슈트 탈착시 유압 가력 장치에서 일시적인 유압 저하로 나타난 현상이다.

탄성 강성도의 경우, 1겹 보강 실험체에서 무보강 실험체 대비 실험체 별 2.4%, 4.5% 증가되었고, 2겹 보강 실험체는 5.9%, 6.1% 까지 증가되는 것으로 나타났다.

실험결과, 보강 겹수가 증가함에 따라 무보강 실험체 대비 내력 개선에 효과가 있는 것으로 나타났지만, 예상 내력 계산에서의 개선효과에 비해 절반 정도의 수준의 개선효과를 보였다. 그 이유는 모든 보강 실험체가 단부에서 계면파괴로 파단되었고, 이후 아라미드섬유 슈트가 실험체 내력 개선에 영향을 미치지 못했기 때문이다.

1겹 보강 실험체에서 아라미드섬유 슈트의 계면파괴가 발생되기 직전까지의 최대변형률은 0.0125, 0.0137로,

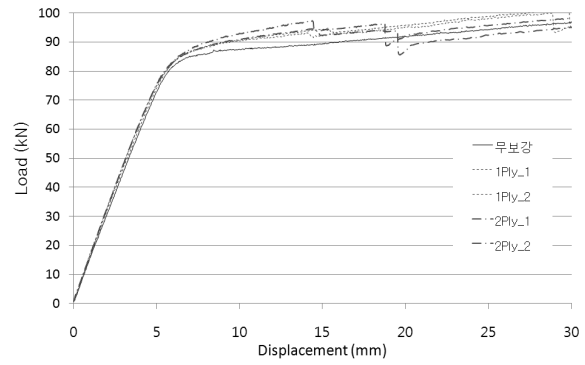


Fig. 11 Load versus Displacement of refitted beams

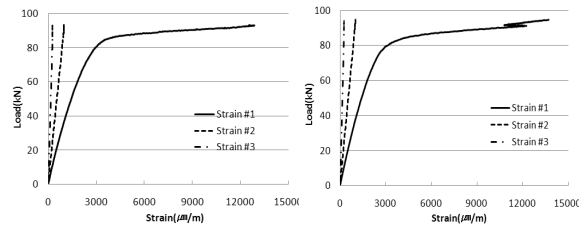


Fig. 12 Load versus Strain 1 ply Specimen(Left: #1, Right #2)

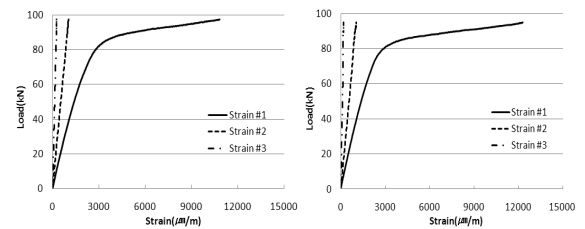


Fig. 13 Load versus Strain 2 ply Specimen(Left: #1, Right: #2)

이때 하중은 93.33 kN, 94.90 kN으로 나타났다. 2겹 보강 실험체는 각 실험체 별로 아라미드섬유 슈트의 최대변형률 0.0108, 0.0123로 나타나서 1겹 보강 실험체 대비 평균 13% 정도 작게 나타났고, 이때의 하중은 97.53 kN, 95.03 kN으로 나타나서, 2.3% 정도 크게 나타났다. 즉, 2겹 보강 실험체는 1겹 보강 실험체에서 발현된 아라미드섬유 슈트의 최대변형 이전에 계면파괴가 발생되었고, 동일 하중 조건에서 비교해도, 아라미드섬유 슈트의 부착응력은 1겹에 비해 2겹 실험체에서 작게 나타났다는 것을 알 수 있다. 또한, 아라미드섬유 슈트의 변형률은 Fig. 12, 13과 같이 중앙부에서 단부로 갈수록 작아지고, 1겹 보강 실험체보다 2겹 보강 실험체에서 변형이 작은 것으로 나타났다.

실험체 별로 아라미드섬유 슈트의 위치에 따른 변형률 분포를 하중 단계 별로 산정해보면 Fig. 14~17과 같다. 아라미드섬유 슈트 변형률은 중앙부에서 떨어질수록 작게 나타났고, 하중이 증가될수록 증가 폭이 커지는 것으로 나

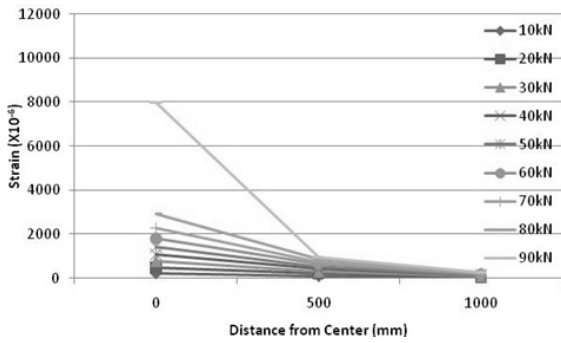


Fig. 14 AFRP strain of 1 wapped layer (#1)

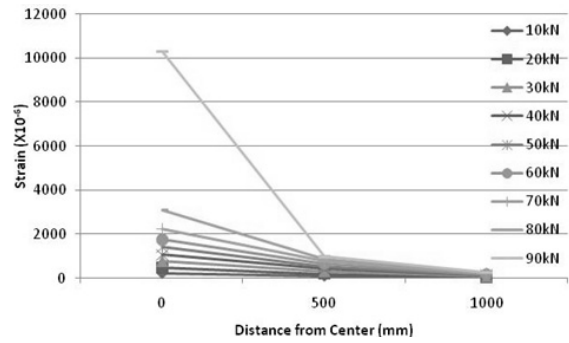


Fig. 15 AFRP strain of 1 wapped layer (#2)

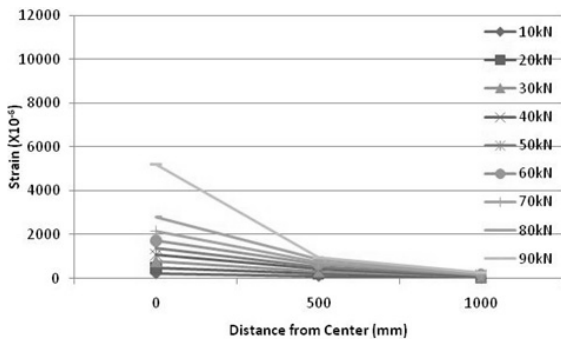


Fig. 16 AFRP strain of 2 wapped layer (#1)

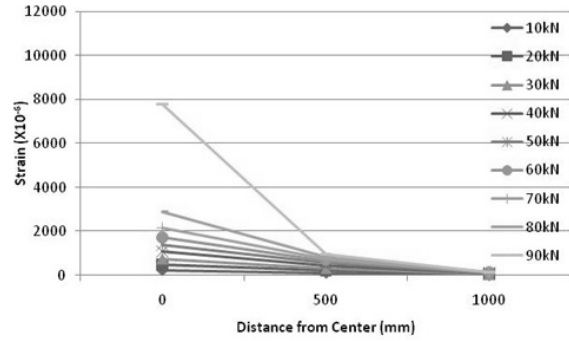


Fig. 17 AFRP strain of 2 wapped layer (#2)

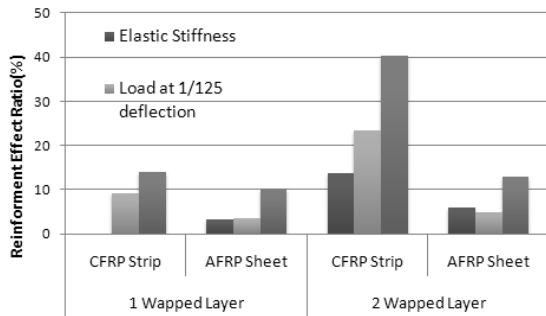


Fig. 18 Comparison of Reinforcement ratio

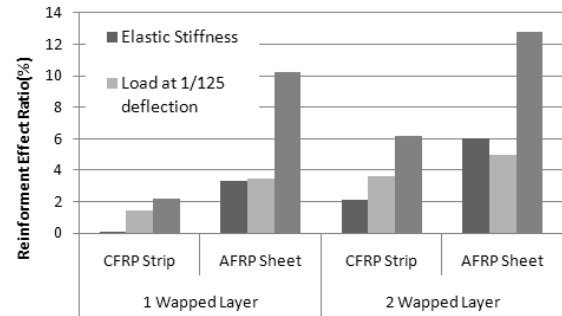


Fig. 19 Comparison of Reinforcement ratio (at indifference of mechanical properties)

타났고, 계면파괴가 발생하는 부근의 하중 90 kN 지점에서 아라미드섬유 슈트 변형률이 가장 큰 폭으로 증가되었다. 또한, 하중단계 별 아라미드섬유 슈트의 변형률은 1 겹 보강 실험체보다 2 겹 보강 실험체가 작게 나타났다. 즉, 아라미드섬유 슈트의 응력분포가 2 겹 보강 실험체의 경우, 1 겹 실험체와 달리 중앙부의 응력 집중보다는 전반적으로 골고루 응력이 분포가 되는 것을 확인할 수 있었다.

### 5.3 보강재 종류 별 비교

Pierluigi(2006)의 논문에서 수행된 실험은 스트립 복

합소재 보강에 의한 휨 성능 평가 사례로서, 극한하중 및 시간의 1/125 처짐시 하중에서 스트립 부재의 보강효과가 1 겹에서 9.2%, 2 겹에서 23.3%로 나타났다. 따라서, Fig. 18과 같이 아라미드 섬유 슈트 부재로 보강한 본 실험 결과와 비교하면 탄소섬유 스트립 부재 보강방법이 내력 개선효과가 월등히 높다.

그러나, 탄소섬유 스트립 부재의 물성(설계두께 1.4 mm, 탄성계수  $1.96 \times 10^5 \text{MPa}$ )과 본 실험에서 사용된 아라미드섬유 슈트 부재의 물성(설계두께 0.288 mm, 탄성계수  $1.18 \times 10^5 \text{MPa}$ )의 차이를 무차원화하여 휨 내력의 개선효과를 비교하면 Fig. 19와 같이 오히려

쉬트 부재의 개선효과가 더 높은 것으로 나타났다. 그러나, 본 실험은 정적 가력을 통한 휨 내력만을 평가했으므로 보강 설계를 위한 자료로 즉각적으로 활용할 수는 없고, 비교 가능한 선행 연구사례도 부족하기 때문에 스트립과 쉬트의 효율성은 향후, 보다 심도있는 연구가 필요하다고 사료된다.

## 6. 결론

최근 복합 소재 분야의 지속적인 발전으로 인하여 물성이 개선되었고, 특히, 접착제의 부착성능이 향상되었다. 또한, 최근 강재의 원가 상승으로 보강설계의 재료 선택에서 복합소재가 더욱 매력적으로 부각되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 복합소재를 이용한 강 구조물의 보강에 대한 가능성을 검토하기 위해 부착 성능 및 휨 보강 성능을 평가하였다.

부착성능평가 결과, 실험체 모두 항복 부근에서 단부 파괴가 시작되어 3~4 kN 하중증가 후, 중앙부 지점까지 계면파괴되어 강재면에서 탈착된 것으로 나타나서, 항복 이전까지는 강재와 아라미드섬유 쉬트가 일체 거동에 따른 보강효과를 예상할 수가 있었다.

보 부재의 복합소재 보강에 따른 휨 성능 평가 결과, 무보강 실험체의 전항복하중 85.38 kN 대비, 1겹 보강 실험체의 계면파괴 직전까지의 하중은 93.33 kN, 94.90 kN로 나타나서 각각 9.3%, 11.2% 증가되었다. 2겹 보강 실험체에서는 14.2%, 11.2% 증가된 93.33 kN, 94.90 kN으로 나타났다. 보강 두께가 증가함에 따라 무보강 실험체 대비 내력 개선효과를 확인하였으며, 복합소재를 활용한 강 구조물 보강의 가능성을 실험적으로 검증할 수 있었다. 다만, 보강 실험체 모두 단부에서 보강재가 조기에 탈착되어 일체 거동이 유지되지 못하고 보강성능이 저하되는 것으로 나타났는데, 향후, 단부 부착파괴를 지연시키고, 보강성능을 향상시킬 수 있는 보강 방법 및 보강재의 형상에 대한 연구와 반복하중에 대한 부재의 보강성능 평가가 필요하다고 판단된다.

## 참고문헌

1. American Society for Testing Materials, ASTM D 3039, "Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials", 2006.
2. Cadei JMC, Stratford TJ, Holloway LC, Duckett WG., "Strengthening metallic structures using externally bonded fibre-reinforced polymers", C595. London: CIRIA, 2004.
3. Deng J. Lee, "MMK. Behaviour of metallic beams reinforced with a bonded CFRP plate under static loading", Compos Struct, in press, doi:10.1016/j.compstruct.2005.09.004. 2006.
4. Ibrisa Akbara, Deric John Oehlers and M.S. Mohamed Alia, "Derivation of the bond-slip characteristics for FRP plated steel members", Journal of Constructional Steel Research, Volume 66, Issues 8-9, Pages 1047-1056. August-September 2010.
5. M. A. Youssef, "Analytical prediction of the linear and nonlinear behaviour of steel beams rehabilitated using FRP sheets", Engineering Structures, Volume 28, Issue 6, Pages 903-911, May 2006.
6. Nikouka F. Lee, MMK, Moy S., "Strengthening of metallic structures using carbon fibre composites", IABSE Symposium, Melbourne, 2002.
7. Pierluigi Colombi, Carlo Poggi, "An experimental, analytical and numerical study of the static behavior of steel beams reinforced by pultruded CFRP strips", Composites Part B 37, 2006.
8. Tavakkolizadeh M., Saadatmanesh H., "Fatigue strength of steel girders strengthened with carbon fiber reinforced polymer patch", J Struct Eng, 2003;129(2):186.96., 2003.
9. Xiao-Ling Zhao and Lei Zhangb, "State-of-the-art review on FRP strengthened steel structures", Engineering Structures, Volume 29, Issue 8, Pages 1808-1823, August 2007.

(접수일자 : 2010년 8월 4일)

(수정일자 : 2010년 10월 20일)

(심사완료일자 : 2010년 11월 9일)



---

## 요 지

강 구조물의 보강공법으로는 강판 보강공법이 대표적인 방법으로 통용되고 있으나, 일부 구조물에서는 고정 설비 및 기타 간섭물로 인하여 보강 시공이 번거롭고, 보강부재 접합시 원부재의 단면 손실이 수반되는 단점이 있다. 최근, 강재의 원가 상승으로 강판 보강공사의 시공비가 증가되고 있는 실정이다. 반면, 복합소재를 이용한 보강공사의 경우는 재료의 자중이 가벼워서 보강재 취급이 수월하고 내화확성능이 우수하기 때문에 유지비용이 절감되기 때문에 콘크리트 구조물에서는 널리 사용되고 있다. 본 논문에서는 복합소재를 이용한 강 구조물의 보강의 기술적 가능성을 검증하기 위해 강재와 복합소재와의 부착성능 및 보부재를 통해 휨 보강 성능을 평가하였다. 그 결과, 항복 이전까지는 강재와 아라미드섬유 쉬트가 일체 거동에 따른 보강효과를 예상할 수가 있었다. 또한, 보강 겹수가 증가함에 따라 무보강 실험체 대비 내력이 증가했지만, 예상 보강효과(1 겹에서 12.5%, 2겹에서 25%)에 비해 절반 정도의 수준의 개선효과를 보였다. 그 이유는 모든 보강 실험체가 계면파괴로 파단되었고, 이후 아라미드섬유 쉬트가 실험체 내력 개선에 영향을 미치지 못했기 때문이다. 따라서, 최근 복합소재의 재료적 개선 및 접착제의 부착성능 향상으로 인하여 강 구조물의 보강공사에 적용할 수 있는 가능성을 찾을 수 있었으나, 보강성능을 향상시키기 위한 부착성능 향상을 위한 방법에 대한 연구가 필요하다고 판단된다.

**핵심 용어** : 보강, 복합소재, 아라미드섬유강화플라스틱, 강 구조물