

# 사회기반시설물의 내진 보강을 위한 연성재-FRP적층복합체의 역학적 거동 특성 분석: Part-II 휨 거동

박철우

강원대학교 토목공학과

(2011. 9. 15. 접수 / 2012. 2. 14. 채택)

## Characterization of Ductile Metal-FRP Laminated Composites for Strengthening of Structures: Part-II Tensile Behavior

Cheolwoo Park

Department of Civil Engineering, Kangwon National University

(Received September 15, 2011 / Accepted February 14, 2012)

**Abstract :** Steel plate or FRP materials have been typically used for the seismic retrofit of civil infrastructures. In order to overcome the limitation of each retrofitting material, a composite material, which takes advantages from both metal and fiber polymer materials, has been developed. In the study herein, the composite retrofitting material consists of metal part(steel or aluminum) and FRP sheet part(glass or carbon fiber). The metal part can enhance the ductility and the FRP part the ultimate strength. As a preliminary study to investigate the fundamental mechanical characteristics of the metal-FRP laminated composite material this study performed the flexural fracture test with various experimental variables including the number, the angle and the combination of FRP laminates. From the aluminum-FRP composite tests no great increase in flexural strength and flexural toughness were observed. However, flexural toughness of steel-FRP laminate composite was increased so that its behavior can be considered in the retrofit design. In addition, the angle and the kind of fibers should be carefully considered in conjunction with the expected loading conditions.

**Key Words :** seismic retrofit, steel, aluminum, FRP laminate composite, flexural behavior, flexural toughness

### 1. 서론

본 연구는 사회기반시설물이 지진하중 등의 다양한 외부하중과 시설물의 노후화 등으로 인하여 시설물의 성능이 저하될 수 있으며<sup>1)</sup> 특정 수준의 내진보강을 수반하지 않으면 더욱 취약한 환경에 노출될 수 있다<sup>2,3)</sup>. 하지만, 이러한 사회기반시설물 중 1988년 이전 건설된 시설물의 대부분은 내진설계의 미반영으로 인하여 내진안전성에 대한 검토와 보강이 필요하다. 본 연구에서는 이러한 사회기반시설물의 내진성능을 보강하기 위한 보강재료로서 금속성의 연성재와 FRP 재료를 적층 보강한 재료의 활용도를 검증하기 위한 기초연구로서 주요 사회기반시설물의 내진 보강을 위한 연성재-FRP적층복합체의 역학적 거동 특성 분석: Part-I 인장거동<sup>4)</sup> 연구는 문과 연계된 논문이다. 본 연구에서는 알루미늄과

스틸을 연성재로 활용하고 FRP적층으로 보강한 복합시험체의 기초적인 역학적 특성인 휨 거동에 대한 실험적 연구를 수행하고자 하며, 연구를 통하여 향후 사회기반시설물의 내진성능보강시스템의 설계 및 해석을 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

### 2. 실험

#### 2.1. 휨실험

실험변수는 FRP보강재의 적층한 섬유 종류와 섬유의 배향각 그리고 각 섬유의 적층수를 기본으로 하였으며 연성재의 종류를 스틸과 알루미늄으로 달리하였다. 시험체의 단면은 전체적으로 양 끝면의 두께 2 mm의 금속성의 연성재와 내부의 FRP 보강재 층으로 구성된다. FRP보강재는 약 0.25 mm 두께의 총 8개의 섬유적층으로 구성되는데 외부에는 시험체의 길이 방향으로 배향각 0°의 유리섬유가 1개 층씩 적층되었으며, 다시 내부에는 배향각, 적층

Table 1. Experimental variables and specimen details

Specimen	Metal layer	FRP(Fiber direction/no. of ply)				Metal layer
		Glass	Carbon	Glass	Glass	
S(A)-2C0-4G0	S: Steel or A: Aluminum, 2 mm thick	0°/1	0°/2	0°/4	0°/1	S: Steel or A: Aluminum, 2 mm thick
S(A)-2C0-4GH			0°/2	90°/4		
S(A)-2C0-2G0-2GH			0°/2	0°/2, 90°/2		
S(A)-2CH-4G0			90°/2	0°/4		
S(A)-2CH-4GH			90°/2	90°/4		
S(A)- 2CH-2G0-2GH			90°/2	0°/2, 90°/2		
S(A)-4C0-2G0			0°/4	0°/2		
S(A)-4C0-2GH			0°/4	90°/2		
S(A)-4CH-2G0			90°/4	0°/2		
S(A)-4CH-2GH			90°/4	90°/2		
S(A)-2C0-2CH-2G0			0°/2, 90°/2	0°/2		

수 및 재질을 달리하는 6개의 섬유층으로 구성되어 있다. 실험에 사용된 시험체의 종류 및 이에 따른 실험변수는 Table 1과 같다.

아래의 Table 2는 시험체의 제작에 사용된 각 재료의 역학적 물성치를 정리한 것이다. 탄소섬유/에폭시와 E-유리섬유/에폭시의 경우 제조사에서 제공한 값을 나타내었으며 알루미늄 및 스틸연성재의 경우 아래의 연성재FRP복합 시험체의 휨실험방법과 동일한 방법을 준용하여 실험을 수행하여 측정된 값을 나타내었다. 측정된 하중과 변위값들로부터 항복시의 휨강도와 최대 휨강도를 계산하였으며, 또한 초기 선형구간의 고려하여 휨탄성률을 계산하였다.

알루미늄 및 스틸 복합시험체의 휨 실험은 KS M 3382 유리 섬유 강화 플라스틱의 휨 실험 방법의 3점 휨 실험 방법을 채택하여 수행하였으며, 휨시험체의 제원은 Fig. 1과 같다. 각실험 변수별로 당 3개씩의 시험편을 제작하여 실험을 수행하였다. 휨 실험에 사용한 UTM은 용량 10 tonf으로서 시험 속도는 2.15 mm/min로 하였으며 3점 시험의 지점간 거리는 88 mm로 하였다. 시험체의 휨파괴가 일어나는



Fig. 1. Flexural test specimen dimension.

시점에 실험을 종료하는 것을 원칙으로 하였으며, 파괴가 일어나지 않을 경우, 휨이 발생하여 시험체의 양 끝단이 중앙부의 하중가력 장치에 접촉하기 직전에 실험을 종료하였다.

### 3. 휨실험 결과 및 고찰

#### 3.1. 알루미늄과 스틸연성재의 휨거동

FRP복합 시험체의 분석을 위하여 시험체 제작에 사용된 알루미늄과 스틸연성재의 휨거동 특성분석을 위하여 휨실험을 실시하였다. Fig. 2는 각 시험체의 파괴 후 모습을 보여주고 있다. 각각 연성재 재료의 항복강도는 약 180 MPa 및 370 MPa로 측정되었으며, 항복 이후 크지 않은 수준의 추가적인 휨강도의 증가가 나타났다. 측정된 하중-처짐 곡선의 초

Table 2. Fundamental physical properties of used materials—Flexure

Material	Specimen	Yield strength	Max. flexural strength	Flexural Elasticity	Remark
(Unit)		(MPa)	(MPa)	(GPa)	
Carbon/Epoxy	-	1,517.0	-	138.0	Manufacturer
E-Glass/Epoxy	-	1,241.0	-	41.4	
Aluminum	Al-1	197.1	237.4	46.2	Measured
	Al-2	161.7	189.3	53.2	
Steel	St-1	375.3	504.0	163.3	
	St-2	370.5	509.9	162.7	

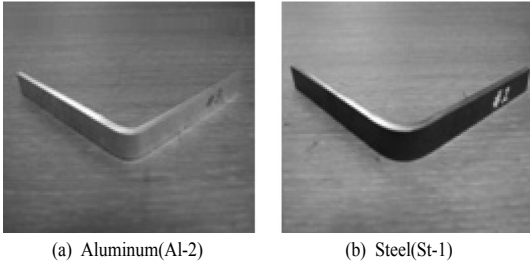


Fig. 2. Examples of failure shape of ductile metal specimens after flexural bending test.

기 선형구간을 고려하여 초기 탄성률을 아래의 식과 같이 계산하였다.

$$E_b = \frac{1}{4} \times \frac{L^3}{bh^3} \cdot \frac{P}{\delta} \quad (1)$$

여기서,  $E_b$  : 휨탄성률

$L$  : 시험체의 지점간 거리

$b, h$  : 각각 시험체의 폭과 높이

$P, \delta$  : 측정된 휨하중과 처짐

알루미늄과 스틸의 휨탄성률은 각각 약 50 GPa과 163 GPa로서 스틸의 휨강성이 알루미늄에 비하여 약 세배 이상 강한 것을 알 수 있다. 이는 인장실험 결과에서 보다 더 큰 차이임을 알 수 있다. 측정된 휨하중-처짐 곡선은 Fig. 4와 9에 그 예시를 나타내었다. 그림에서와 같이 각 재료는 휨 항복 이후 지속적인 소성변형을 통하여 추가적인 휨하중 지지력을 거의 상실하는 것으로 판단된다.

### 3.2. 알루미늄FRP복합 시험체의 휨 실험결과 및 분석

Fig. 3은 알루미늄을 연성재로 사용한 FRP복합 시험체의 휨실험 후의 시험체 파괴양상이다. 알루미늄 FRP복합 시험체의 휨거동은 휨하중 초기에는 선형적인 거동을 나타내다가 휨항복이 발생하고 난 후에 어느 정도의 추가적인 휨강도 증가가 나타났다. 이후 휨처짐의 지속적인 소성변위 증가 이후 시험체 단면에서 휨변위로 인한 시험체 상하의 알루미늄 연성재와 중앙부의 섬유들과의 박리파괴가 발생하고 이후 단계적으로 휨하중이 감소하는 거동을 나타내었다. 하지만 휨하중 하에서의 연성재 및 섬유의 파단이 일시적으로 전체에서 발생하는 것이 아니므로 시험체의 휨 소성거동은 실험의 종료 시까지 지속되었다.

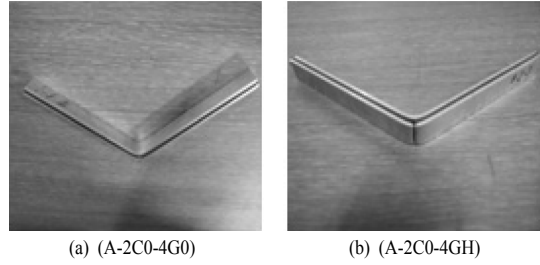


Fig. 3. Examples of failure shape of FRP composite specimens after flexural test.

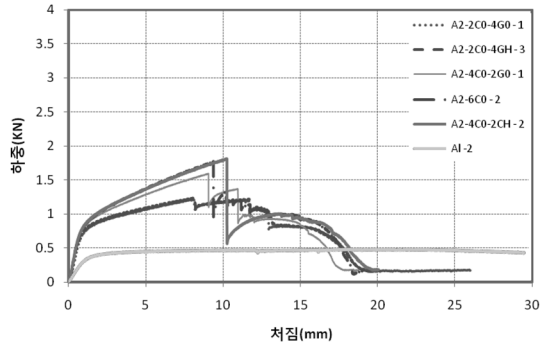


Fig. 4. Measured flexural load-deflection curves of aluminum-FRP composite specimens.

또한 알루미늄FRP복합 시험체의 휨탄성률은 약 45~50 GPa로서 알루미늄 연성재와 비슷한 수준을 유지하는 것으로 나타났다. 이는 인장실험결과와는 다른 결과로 알루미늄FRP 복합 시험체의 휨거동은 섬유적층보강에 의한 영향이 별로 없는 것으로 나타났다. 다음의 Fig. 4는 알루미늄연성재 및 FRP복합 시험체의 휨하중-처짐 선도의 예시를 나타내고 있다. 본 연구에서는 휨실험 결과로부터 휨강도 및 휨파괴연성과 처짐을 각각 휨항복 시 및 최대강도 시에 따라 구하였으며 하중-처짐 곡선의 초기 직선구간을 활용하여 위의 식 (1)과 같이 휨탄성률을 계산하였다. Table 3은 알루미늄 FRP복합 시험체의 실험결과를 정리한 것이다.

다음의 Fig. 5, 6, 및 7은 각각 탄소섬유의 적층수가 2겹, 4겹 그리고 6겹인 경우의 항복휨강도와 항복 시까지의 휨파괴연성을 각각 비교하고 있다. 항복휨강도는 FRP보강섬유의 적층수와 배향각에 상관없이 거의 동일한 값을 나타내고 있으며, 이는 FRP보강이 없는 알루미늄연성재의 항복강도와 비슷한 수준을 나타내고 있다. 따라서 알루미늄FRP복합 시험체의 FRP보강으로 인한 항복휨강도의 증진은 기대할 수 없는 것으로 나타났다. 하지만 알루미늄연성재와는 달리 항복 이후 추가적인 휨강도의 증

Table 3. Flexural test results of aluminum-FRP composite specimens

Specimen	Max. flexural strength	Deflection at max. flexural strength	Yield flexural strength	Deflection at yield	Elastic modulus	Flexural toughness at yield	Flexure toughness at failure
(Unit)	(MPa)	(mm)	(MPa)	(mm)	(GPa)	(Nm)	(Nm)
A-2C0-4G0	300.7	8.9	177.6	1.1	47.6	0.48	9.0
A-2C0-4GH	290.1	8.6	177.1	1.1	46.2	0.52	8.6
A-2C0-2G0-2GH	304.5	9.3	181.9	1.1	50.8	0.57	9.8
A-2CH-4G0	306.0	9.0	180.4	1.2	44.8	0.57	9.4
A-2CH-4GH	254.6	8.0	164.0	1.1	42.6	0.46	6.7
A-2CH-2G0-2GH	283.3	8.4	179.9	1.1	47.5	0.49	8.0
A-4C0-2G0	358.1	9.2	185.3	1.1	50.5	0.57	10.9
A-4C0-2GH	328.7	9.1	171.4	1.1	45.2	0.52	9.5
A-4CH-2G0	265.7	7.8	172.7	1.1	47.1	0.56	7.7
A-4CH-2GH	258.9	6.6	180.3	1.1	48.2	0.60	6.1
A-2C0-2CH-2G0	338.2	8.3	183.7	1.1	45.6	0.55	9.3
A-2C0-2CH-2GH	360.4	9.4	187.1	1.1	48.8	0.60	11.1
A-6C0	366.8	9.2	184.4	1.1	45.2	0.59	11.2
A-6CH	260.5	7.0	187.2	1.2	46.5	0.62	6.3
A-4C0-2CH	385.2	10.0	188.2	1.2	46.2	0.63	13.1
A-4CH-2C0	268.5	10.1	178.4	1.1	45.6	0.57	7.3

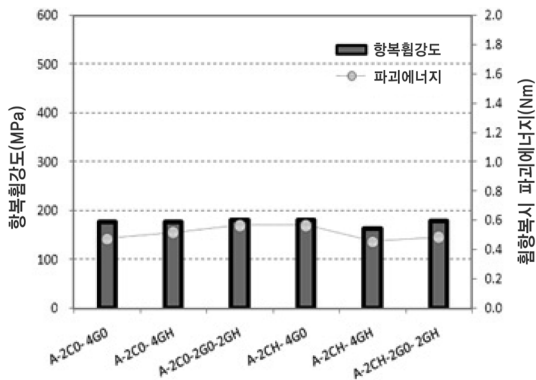


Fig. 5. Flexural strength and flexure toughness of aluminum-FRP composite specimens with 2 layers of carbon sheets.

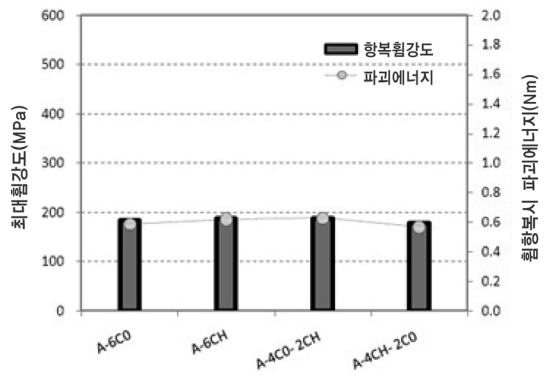


Fig. 7. Flexural strength and flexure toughness of aluminum-FRP composite specimens with 6 layers of carbon sheets.

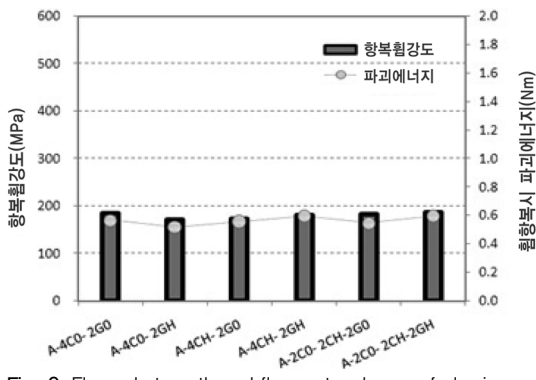


Fig. 6. Flexural strength and flexure toughness of aluminum-FRP composite specimens with 4 layers of carbon sheets.

진이 있었다. 탄소섬유의 적층수와 배향각도에 따라 큰 차이는 없었지만 탄소섬유의 배향각이 0°인 경우, 적층수가 2겹인 경우 최대휨강도가 항복휨강도의 약 1.7배인 반면 탄소섬유적층수가 4겹 및 6겹인 경우에는 약 1.9배로 증가하였다.

탄소섬유의 적층수가 2겹인 경우, 배향각이 0°일 때는 4겹의 유리섬유의 방향에 따른 휨강도의 변화가 거의 없었지만 배향각이 90°일 때는 유리섬유의 배향각이 0°와 90°인 경우의 최대휨강도감소가 약 17% 정도 발생하였다.

탄소섬유의 적층수가 4겹인 경우에는 유리섬유의 배향각보다는 탄소섬유의 배향각에 따라 휨강도의

감소가 뚜렷이 나타났으며 이는 탄소섬유가 6겹인 경우에도 마찬가지로 나타났다.

하지만 실험변수에 따른 항복휨강도 및 최대휨강도의 변화는 전체적으로 크지 않은 것으로 나타나 알루미늄FRP복합 시험체의 휨거동은 연성재로 사용된 알루미늄의 휨거동이 지배적인 영향을 미치는 것으로 판단된다. 휨하중 처짐 곡선으로부터 구한 휨파괴연성은 전체적으로 휨강도의 값과 비슷한 변수별 비교를 나타내었으며, 알루미늄연성재의 항복 시 휨파괴연성은 약 0.35 Nm로서 FRP보강으로 인한 휨파괴연성의 증대 역시 크게 기대할 수 없는 것으로 나타났다.

또한 Fig. 4에서 보는 바와 같이 알루미늄 FRP복합 시험체의 항복시 처짐을 약 1.1 mm 전후이지만, 최대휨강도 시의 처짐은 약 8 mm 전후의 상당히 큰 값이지만 그 증가량은 상대적으로 크지 않으므로 알루미늄FRP복합 시험체가 도시철도시설물의 내진보강재료로 사용되기 위해서는 휨거동의 역학적인 특성은 휨항복 이전까지의 거동만을 고려하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

### 3.3. 스틸FRP복합 시험체의 휨 실험결과 및 분석

Fig. 8은 스틸을 연성재로 사용한 FRP복합 시험체의 휨파괴 실험 후 시험체의 파괴양상이다. 스틸

FRP복합 시험체의 휨 거동은 알루미늄FRP복합 시험체와 마찬가지로 휨항복이 발생한 이후 추가적인 휨 강도의 증진이 나타났으며, 일부 변수의 시험체 (S-2C0-4GH, S-2C0-2G0-2GH, S-2CH-4GH, S-6CH 및 S-4C0-2CH 등)를 제외한 대부분의 시험체에서는 실험을 종료할 때까지 시험체의 파손이 발생하지 않았다. 이러한 경우 실험은 시험체의 휨에 의한 변형이 실험기기의 하중 가력부에 접촉하기 직전에 종료하였다. 이러한 시험체에서는 최대 하중 이후 하중의 급격한 감소가 발생하였는데 이는 스틸연성재나 섬유와의 직접적인 파단이라기 보다는 스틸과 섬유보강재 또는 섬유보강재 간의 접촉이 분리되어 휨강성이 순간적으로 감소함에 따라 발생하였다. 휨하중-처짐 곡선의 초기접선구간을 이용하여 계산한 휨

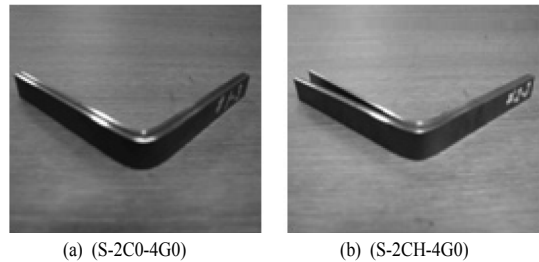


Fig. 8. Examples of failure shape of FRP composite specimens after flexural test.

Table 4. Flexural test results of steel-FRP composite specimens

Specimen	Max. flexural strength	Deflection at max. flexural strength	Yield flexural strength	Deflection at yield	Elastic modulus	Flexure toughness at yield	Flexure toughness at failure
(Unit)	(MPa)	(mm)	(MPa)	(mm)	(GPa)	(Nm)	(Nm)
S-2C0-4G0	606.7	13.2	337.3	0.7	108.0	0.67	24.2
S-2C0-4GH	639.6	11.9	406.8	0.8	116.5	0.77	29.1
S-2C0-2G0-2GH	667.2	10.6	431.3	0.9	96.8	0.87	27.0
S-2CH-4G0	677.4	11.4	434.3	0.9	97.2	1.00	31.3
S-2CH-4GH	574.1	9.4	419.9	0.9	93.1	0.97	14.5
S-2CH-2G0-2GH	652.4	13.3	435.9	0.9	90.5	0.92	19.5
S-4C0-2G0	694.2	12.5	445.9	1.1	85.3	1.33	20.8
S-4C0-2GH	677.3	9.4	404.6	0.9	107.9	0.99	22.4
S-4CH-2G0	640.8	20.2	422.5	1.0	101.1	1.23	17.9
S-4CH-2GH	515.9	10.1	322.5	0.8	98.2	0.67	10.4
S-2C0-2CH-2G0	650.9	12.8	424.3	1.1	93.0	1.42	21.7
S-2C0-2CH-2GH	631.4	16.7	408.8	1.1	72.3	1.22	18.1
S-6C0	710.8	9.7	423.4	1.3	90.5	1.48	23.7
S-6CH	563.8	17.9	388.2	1.0	73.4	0.90	17.5
S-4C0-2CH	623.8	6.2	431.4	1.0	97.8	1.23	15.7
S-4CH-2C0	662.1	10.5	434.6	1.1	87.7	1.27	27.8

탄성률은 대부분의 시험체에서 약 100 GPa 전후의 값을 나타내어 스틸연성재의 휨탄성률에 비하여 다소 낮은 값을 나타내었다. 이는 알루미늄 FRP복합 시험체 경우 휨탄성률이 연성재에 비하여 거의 동일한 값을 나타내는 현상과는 다소 다른 것으로 시험체 제작 시 섬유 적층에 의한 접착 등의 이유에 기인한 것으로 판단된다. 다음의 Fig. 9는 스틸연성재 및 FRP복합 시험체의 휨하중 처짐곡선의 예시를 나타내고 있으며 Table 4는 실험결과로부터 얻어진 휨거동 특성인자를 나타내고 있다.

다음의 Fig. 10, 11, 및 12는 각각 탄소섬유의 적층수가 2겹 4겹 그리고 6겹인 경우의 스틸FRP복합 시험체의 항복휨강도와 항복 시까지의 휨파괴연성을 비교하고 있다.

스틸연성재의 항복휨강도는 약 370 MPa이며 스틸FRP복합 시험체의 항복휨강도도 약 400 MPa 전후로서 FRP보강섬유의 종류, 적층수 및 배향각에 따

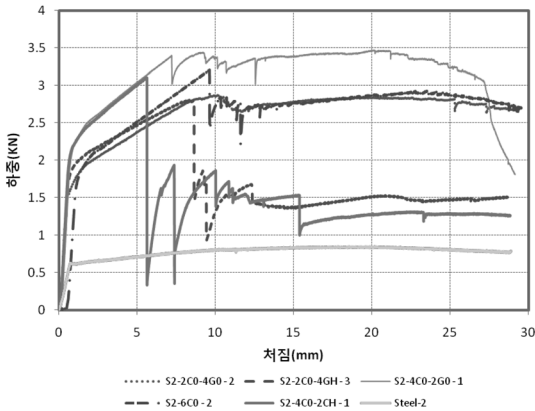


Fig. 9. Measured flexural load-deflection curves of steel-FRP composite specimens.

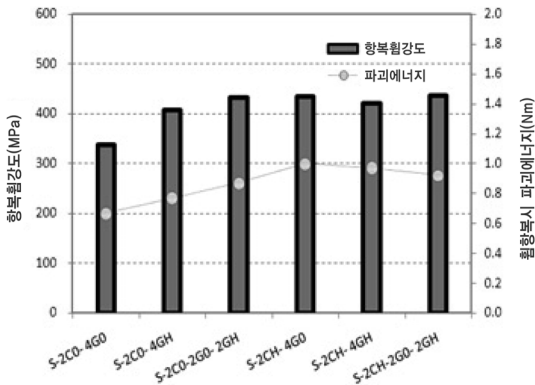


Fig. 10. Flexural strength and flexure toughness of steel-FRP composite specimens with 2 layers of carbon sheets.

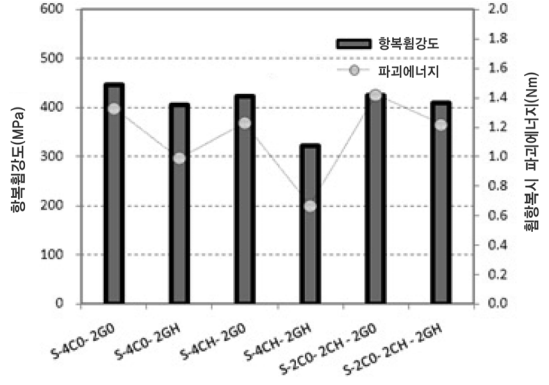


Fig. 11. Flexural strength and flexure toughness of steel-FRP composite specimens with 4 layers of carbon sheets.

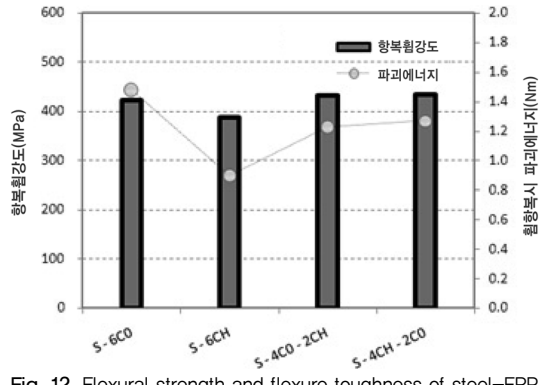


Fig. 12. Flexural strength and flexure toughness of steel-FRP composite specimens with 4 layers of carbon sheets.

른 항복강도의 증가는 크지 않았다. 하지만 스틸연성재의 경우 휨항복 이후 Fig. 9에서 보는 바와 같이 추가적인 휨하중의 증가없이 처짐만 급격히 증가하였지만, 스틸FRP복합 시험체의 경우 항복 이후 일정수준으로 휨강도의 증가가 있었다. 최대휨강도는 항복휨강도의 약 1.5배 정도로 측정되었으며, 각 실험변수에 따른 최대휨강도의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 이러한 결과로부터, 스틸FRP복합 시험체의 휨거동은 섬유보강의 효과가 휨항복 시까지는 크지 않아 휨거동은 스틸연성재의 거동에 지배되는 것을 알 수 있다.

항복 시와 최대휨하중 시까지의 휨파괴연성을 계산한 결과 휨파괴연성의 변수별 비교도 휨하중의 비교와 비슷한 양상을 나타내었다. 다만, 탄소섬유의 적층수가 4겹과 6겹이고 배향각이 90°인 경우 항복휨강도가 다소 낮았으며 특히 휨파괴연성이 상대적으로 더 낮은 것으로 나타났다. 스틸연성재의 항복 시 휨파괴연성이 약 0.25 Nm인 점을 감안하면, 알루미늄FRP복합 시험체와는 달리 스틸FRP복합 시

험체의 경우 FRP보강으로 인한 휨파괴연성의 증대 효과가 매우 뚜렷한 것으로 나타났다. 이는 향후 스틸FRP복합 시험체를 도시철도시설물의 내진보강재로 활용할 경우 항복 시까지 설계에 고려하더라도 충분한 휨파괴연성의 흡수증대효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

탄소섬유의 적층수가 2겹인 경우에는 배향각에 따른 휨강도의 변화가 거의 없었으며, 탄소섬유의 적층수가 4겹인 경우에도 탄소섬유의 배향각에 따른 휨강도의 변화보다는 나머지 2겹의 유리섬유의 배향각이 90°인 경우에 휨강도의 감소가 더 큰 것으로 나타났다. 또한 탄소섬유의 적층수가 6겹인 경우, 배향각에 따른 휨강도의 가장 큰 것으로 나타나 향후 이러한 스틸FRP복합 재료를 철도시설물의 내진보강재로 활용할 경우 예상되는 지진하중의 방향과 시설물의 예상 거동 방향에 따라 보강재의 섬유방향에 유의해야 할 필요가 있을 것으로 판단된다.

또한, Fig. 9에서 보는 바와 같이, 스틸FRP복합 시험체의 경우, 항복시의 처짐이 약 1 mm 전후이지만 최대휨하중이 작용할 때의 처짐은 약 10 mm 이상의 값이 되는 것을 알 수 있다. 하지만 휨하중이 알루미늄FRP복합 시험체와는 달리 최대휨하중까지 다소 높은 기울기로 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 이러한 휨 특성은 도시시설물의 내진보강재로 활용할 경우 항복 이후의 강도증진도 휨거동의 역학적 특성으로 고려할 수 있는 것으로 판단된다. 하지만 지진하중의 크기 및 현상상황 등의 조건에 따라 그 적용 수준을 다시 검토하여야 할 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구는 도시철도시설물의 내진보강을 위하여 기존의 강판 및 FRP보강재를 활용한 방법의 장점을 최대화하기 위하여 알루미늄과 스틸의 연성재에 탄소섬유와 유리섬유를 사용한 FRP재료를 보강한 복합재료를 활용하기 위한 기초연구로서, 연성재-FRP복합적층재의 기초적인 역학적 특성인 휨거동에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 실험결과와 분석을 통하여 향후 도시철도시설물의 내진성능보강 시스템의 설계 및 해석을 위한 기초자료로서 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 알루미늄 및 스틸연성재의 항복강도는 각각

약 180 MPa 및 370 MPa로 측정되었으며, 항복 이후 추가적인 강도의 증진은 거의 없이 소성변형을 나타내었다. 초기선형탄성구간을 활용하여 휨탄성률을 계산한 결과, 각각 약 50 GPa 및 1,635 GPa로 계산되었다.

- 2) 알루미늄FRP복합 시험체는 휨하중 초기에는 선형적인 거동을 나타내다가 휨항복이 발생하고 난 후에 어느 정도의 추가적인 휨강도 증가가 나타났다.

- 3) 알루미늄FRP복합 시험체의 FRP보강으로 인한 항복휨강도와 휨파괴연성의 증진은 기대할 수 없는 것으로 나타났다. 알루미늄FRP복합 시험체의 항복휨강도 및 항복시까지의 휨파괴연성 FRP보강섬유의 적층수와 배향각에 상관없이 비슷한 수준의 값을 나타내고 있으며, 이는 FRP보강이 없는 알루미늄연성재의 항복강도와 비슷한 수준이었다. 또한 알루미늄FRP복합 시험체의 휨탄성률도 알루미늄연성재와 비슷한 수준이었다.

- 4) 알루미늄FRP복합 시험체가 사회기반시설물의 내진보강재로 사용되기 위해서는 휨거동의 역학적인 특성은 휨항복 이전까지의 거동만을 고려하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

- 5) 스틸 FRP복합 시험체는 휨하중이 알루미늄 FRP복합 시험체와는 달리 최대휨하중까지 다소 높은 기울기로 증가하며, 이러한 휨 특성은 도시시설물의 내진보강재로 활용할 경우 항복 이후의 강도증진도 휨거동의 역학적 특성으로 고려할 수 있는 것으로 판단된다.

- 6) 스틸FRP복합 시험체의 항복휨강도는 스틸연성재와 비교하여 실험변수에 따른 증가가 뚜렷하지 않았다. 하지만 항복 이후 약 1.5배 정도의 휨강도의 증가가 있었지만, 실험변수에 따른 최대휨강도의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 이로부터, 스틸FRP복합 시험체의 휨거동은 섬유보강의 효과가 휨항복 시까지는 크지 않아 휨거동은 스틸연성재의 거동에 지배되는 것을 알 수 있다.

- 7) 스틸FRP복합 시험체의 경우 FRP보강으로 인한 휨파괴연성의 증대효과가 뚜렷한 것으로 나타났다. 이는 향후 스틸FRP복합 시험체를 사회기반시설물의 내진보강재로 활용할 경우 항복시까지 설계에 고려하더라도 충분한 휨파괴연성의 흡수증대효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

- 1) 신정열, 안태기, 김진호, 황경필, 박은찬, 도시철

- 도 역사구조물 손상탐지 및 건전성 평가기법 개발방안, 한국철도학회, 한국철도학회 2007년도 추계학술대회논문집, pp. 1242~1247, 2007.
- 2) 김두기, FRP-연성재 복합재로 보강된 도시철도 개착식 터널기중의 내진보강효과, 한국구조문진단유지관리공학회, Vol. 14, No. 6, pp. 85~92, 2010.
- 3) 박태만, 박성민, 홍혁준, 강경수, 윤정배, 복합판으로 보강된 철근콘크리트 기중의 내진성능연구, 한국콘크리트학회 논문집, Vol. 17, No. 1, pp. 113~120, 2005.
- 4) 박철우, 사회기반시설물의 내진 보강을 위한 연성재-FRP적층복합체의 역학적 거동 특성 분석: Part-I 인장 거동, 한국안전학회 논문집, Vol. 27, No. 1, pp. 55~62, 2012.