

사회기반시설물의 내진 보강을 위한 연성재-FRP적층복합체의 역학적 거동 특성 분석: Part-I 인장 거동

박 철 우

강원대학교 토목공학과

(2011. 9. 15. 접수 / 2011. 12. 7. 채택)

Characterization of Metal-FRP Laminated Composites for Strengthening of Structures: Part-I Tensile Behavior

Cheolwoo Park

Department of Civil Engineering, Kangwon National University

(Received September 15, 2011 / Accepted December 7, 2011)

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 tensile test with various experimental variables including the number, the angle and the combination of FRP laminates. From the test results, both aluminum and steel-FRP laminate composite material showed increased fracture toughness. However, the angle and the kind of fibers should be carefully considered in conjunction with the expected loading conditions. In general, steel-FRP laminate composite showed better tensile performance in regards to the seismic retrofit purposes.

Key Words : seismic retrofit, steel, aluminum, FRP laminate composite, tensile behavior, fracture energy

1. 서 론

최근 국내와 인접한 일본에서도 동일본 지진 이후 지진 발생횟수가 꾸준히 증가하고 있으며, 국내에서도 지진의 발생 가능성이 증가하는 추세이며 교량, 터널 등의 대형 사회기반시설물 주요 구조물에 대한 지진과 같은 예상하지 못한 작용하중에 대한 안전성을 강화하고 있다. 토목 및 건축 주요 사회기반시설물의 경우 지진하중, 풍하중 등의 외부 하중과 시설물의 노후화 및 지진 등의 재난으로 인하여 구조물의 성능이 저하될 수 있다¹⁾. 이러한 대형 사회기반시설물의 붕괴는 엄청난 인적, 물적 재난을 초래한다. 특히 최근 도심지에서 대중교통수단 및 주거환경이 변화함에 따라 많은 시설물들이 지중에 설치되고 있으며, 이러한 지중시설물은 지진 하중에 특히 많은 영향을 받게 된다. 외국의 경우 이러한 사

례가 많이 발생함에 따라 국내에서도 지중구조물의 내진안전성에 관한 관심이 많아지고 있는 추세이다. 특히 일부 주요 사회기반 시설물은 내진설계의 미반영으로 인하여 내진안전성에 대한 검토와 보강이 요구되고 있으며, 기존 사회기반시설물의 내진성능을 보강하는 방법에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다²⁾.

이러한 주요 사회기반시설물의 내진보강은 최우선적으로 RC기둥의 보강을 고려할 수 있다. 철근콘크리트 기둥의 내진설계의 기본개념은 일정수준의 강도와 연성능력을 동시에 가지도록 하여, 기둥의 비선형 파괴거동을 통한 에너지 소산능력을 이용하는 것이다. 만약 기존의 구조물이 내진설계를 반영하지 않은 경우에도 다양한 보강방법을 활용하여 소요되는 내진성능을 확보할 수 있다. 이러한 내진보강방법은 일반적으로 강판부착보강³⁻⁵⁾, 탄소, 아라미트 및 유리섬유 등을 활용한 섬유보강재료(Fiber Reinforced

Polymer, FRP)를 활용한 보강⁶⁻⁹⁾, 그리고 화재 및 폭발 등에 유리한 현무암 바잘트 섬유를 활용한 보강¹⁰⁻¹²⁾ 등을 포함할 수 있다. 각 내진보강방법은 각각의 장단점이 있는데, 이러한 보강방법들 중 강판 보강의 경우, 지속적인 변형으로 인해 취성파괴에 효과적이지만 재료의 자중으로 인한 시공성, 부식으로 인한 내구성의 문제와 함께 콘크리트와 접착성 및 단면 일체성의 확보가 어렵다. 섬유보강재료의 경우, 내식성, 경량성 등 우수한 특성을 가지고 있으나 파단 후에는 취성적으로 파괴하는 단점을 가지고 있다. 따라서 최근 각 내진보강방법의 단점의 보완하고 장점을 취할 수 있도록 취성파괴에 대한 보강효과를 얻고, 동시에 섬유보강의 장점인 내력증가, 일체성, 내식성, 경량성을 모두 발휘할 수 있는 섬유와 강판이 복합된 보강재료의 개발이 시도되고 있다^{3,13)}.

본 연구에서는 알루미늄과 스틸의 연성재에 탄소 섬유와 유리섬유를 사용한 FRP재료를 보강한 복합재료의 기초적인 역학적 특성인 인장거동에 대한 실험적 연구를 수행하고자 하며, 연구를 통하여 향후 사회기반시설물의 내진성능보강시스템의 설계 및 해석을 위한 기초자료로 제공하고자 한다.

2. 실험

2.1. 인장실험

본 연구에서 수행하고자 하는 시험체는 고강도인

유리섬유와 탄소섬유를 활용한 FRP소재에 연성적인 성질을 강화하기 위한 목적으로 알루미늄 또는 스틸을 함께 적층한 재료이며, 이러한 재료의 인장 거동 특성의 분석을 위하여 실험연구를 수행하였다. 실험변수는 FRP보강재의 적층한 섬유의 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 FRP보강재 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, 적층수 및 재질을 달리하는 6개의 섬유층으로 구성되어 있다 (Fig. 1). 시험체의 명칭에 따른 시험체의 상세설명은

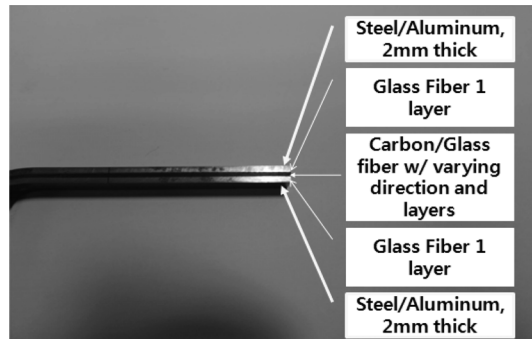


Fig. 1. View of Aluminum/Steel-FRP laminated composite specimen.

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(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		
S(A)-2C0-2CH-2GH			0°/2, 90°/2	90°/2		
S(A)-6C0			0°/6	-		
S(A)-6CH			90°/6	-		
S(A)-4C0-2CH			0°/4, 90°/2	-		
S(A)-4CH-2C0			90°/4, 0°/2	-		

다음의 Fig. 2와 같이 정리할 수 있으며 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 인장실험방법과 동일한 방법을 준용하여 실험을 수행하여 측정된 값을 나타내었다.

알루미늄 및 스틸FRP복합 시험체의 인장실험은 KS M 3381 유리 섬유 강화 플라스틱의 인장 시험방법의 B형-II 시험체 형식을 적용하여 실험하였으며, 인장시험체의 제원은 Fig. 3과 같다. 각 실험 변수별로 3개씩의 시험체를 제작하여 실험을 수행하였다. 인장실험에 사용한 UTM은 100 tonf 용량으로서 시험 속도는 1 mm/min로 하였으며 시험체의 완전한 파단 후에 실험을 종료하였다.



Fig. 2. Naming of composite specimen in test.

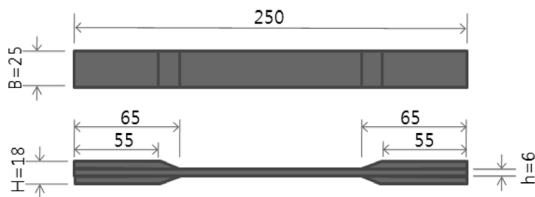


Fig. 3. Tensile test specimen dimension.

3. 인장실험 결과 및 고찰

3.1. 알루미늄과 스틸연성재의 인장거동

FRP복합 시험체의 분석을 위하여 시험체 제작에 사용된 알루미늄과 스틸연성재의 인장거동 특성분석을 위하여 인장실험을 실시하였다. Fig. 4는 각 시험체의 파괴 후 모습을 보여주고 있다. 알루미늄연성재의 항복강도는 약 133 MPa로 항복 이후 추가적인 강도의 증가 없이 지속적인 항복변형이 증가하는 인장파괴양상을 나타내었다. 스틸연성재의 경우, 항복강도의 평균은 약 215 MPa 정도이며 항복 이후 일반적인 강재의 거동 특성과 유사한 파괴 형태를 나타내었으며 최대인장강도는 약 300 MPa로 측정되었다. 알루미늄과 스틸연성재의 인장응력-변형률곡선은 Fig. 7과 14에 그 예시를 나타내었다. 또한 초기선형탄성구간을 활용하여 탄성계수를 계산하였으며 Table 2에 나타난 바와 같이 각각 약 25 GPa 및 55 GPa로 계산되었다.

본 연구에서 측정된 강도 및 탄성계수는 일반적인 알루미늄과 스틸의 특성에 비하여 작은 것을 알 수 있다. 이는 연성재 시험체의 제작은 FRP복합 시험체를 제작하는데 사용한 2 mm 두께의 두 개의 얇은 재료를 에폭시 접착제를 사용하여 붙인 시험체를 사용하여 하중이 증가함에 따라 두 개의 2 mm 두께의 판의 시험체 중 어느 한쪽으로의 응력의 집중과 함께 과도한 변형의 발생으로 인하여 다소 낮은 값

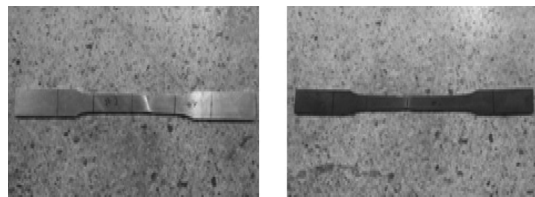


Fig. 4. Examples of failure shape of ductile metal specimens after tensile test.

Table 2. Fundamental physical properties of used materials-Tensile

Material	Specimen	Yield strength	Max. tensile strength	Elastic modulus	Remark
(Unit)		(MPa)	(MPa)	(GPa)	
Carbon/Epoxy	-	1,517.0	-	138.0	Manufacturer
E-Glass/Epoxy	-	1,241.0	-	41.4	
Aluminum	Al-1	133.0	-	25.6	Measured
	Al-2	132.5	-	24.9	
Steel	St-1	206.3	300.3	51.9	
	St-2	224.9	311.1	61.4	

이 측정된 것으로 추정된다. 하지만 각 재료별 실험 결과들에서 파괴양상이 매우 유사하였으며, FRP복합 시험체에서도 유사한 하중상태가 적용될 것으로 판단되어 각 변수별 인장거동 특성의 비교분석에는 크게 문제가 없을 것으로 판단한다.

3.2. 알루미늄FRP복합 시험체의 인장 실험결과 및 분석

Fig. 5와 6은 알루미늄을 연성재로 사용한 FRP복합 시험체의 인장실험 후의 시험체 파괴양상이다. 시험체의 파괴는 일반적으로 FRP보강재의 파단이 먼저 발생하였는데 이는 하중 가력 중에 내부의 FRP보강재의 파단 발생을 시각적 및 청각적으로 확인이 가능하였다. 이러한 내부 FRP보강재의 파단이 발생한 직후 시험체 전체의 급격한 파단이 발생하는 것으로 나타났다.

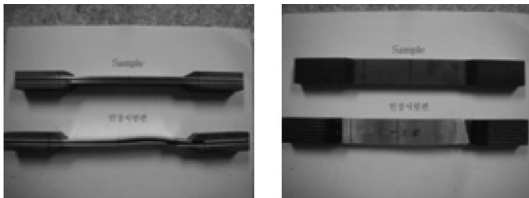


Fig. 5. Examples of failure shape of FRP composite specimens after tensile test(A-2C0-4G0).

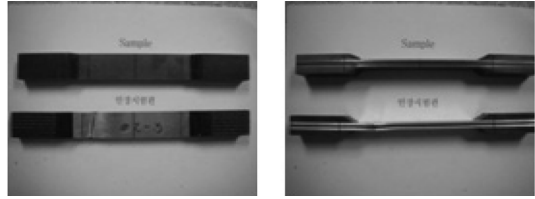


Fig. 6. Examples of failure shape of FRP composite specimens after tensile test(A-2C0-4GH).

다음의 Fig. 7은 알루미늄연성재 및 FRP복합 시험체의 인장응력-변형률선도의 예시를 나타나고 있다. 본 연구에서는 인장실험결과로부터 각 시험체 별로 응력-변형률 곡선을 구하였으며 이로부터 최대인장강도, 최대하중시의 변형률, 섬유파단시 또는 파괴시의 변형률, 항복강도 및 이때의 변형률을 구하였으며 측정된 응력-변형률 선도의 초기 직선구간을 활용하여 각 시험체의 탄성 계수를 계산하였다. Table 3은 알루미늄FRP복합 시험체의 실험결과를 정리한 것이다.

알루미늄연성재는 FRP보강재와의 적층복합을 통하여 인장강도가 증가하였는데, 최대 약 4.8배(A-6C0 시험체)와 최소 약 1.2배(A-2CH-4GH 시험체)의 강도증진이 발생하였다. 하지만, 알루미늄과 FRP재료의 보강은 탄성계수의 저하를 초래하였다. 이는 실질적인 재료, 즉 알루미늄연성재, 유리섬유 및 탄소

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

Specimen	Max. tensile strength	Strain at max. tensile strength	Yield strength	Strain at yield	Elastic modulus	Fracture energy at yield	Fracture energy at failure
(Unit)	(MPa)		(MPa)		(GPa)	(Nm)	(Nm)
A-2C0-4G0	405.8	0.0508	-	-	7.7	-	254.1
A-2C0-4GH	306.7	0.0465	-	-	6.6	-	179.6
A-2C0-2G0-2GH	378.7	0.0531	-	-	7.3	-	247.5
A-2CH-4G0	425.5	0.0557	-	-	7.4	-	283.0
A-2CH-4GH	156.4	0.0304	-	-	8.2	-	74.5
A-2CH-2G0-2GH	232.9	0.0434	-	-	9.2	-	144.5
A-4C0-2G0	470.2	0.0535	-	-	7.7	-	304.9
A-4C0-2GH	450.7	0.0581	-	-	8.2	-	313.2
A-4CH-2G0	231.5	0.0438	-	-	8.2	-	147.5
A-4CH-2GH	181.3	0.0356	-	-	4.6	-	103.2
A-2C0-2CH-2G0	368.5	0.0516	-	-	6.3	-	240.3
A-2C0-2CH-2GH	306.2	0.0424	-	-	6.5	-	166.3
A-6C0	641.3	0.0746	-	-	9.1	-	561.2
A-6CH	194.2	0.0370	-	-	8.1	-	111.1
A-4C0-2CH	457.3	0.0579	-	-	8.4	-	315.9
A-4CH-2C0	317.8	0.0457	-	-	6.7	-	189.5

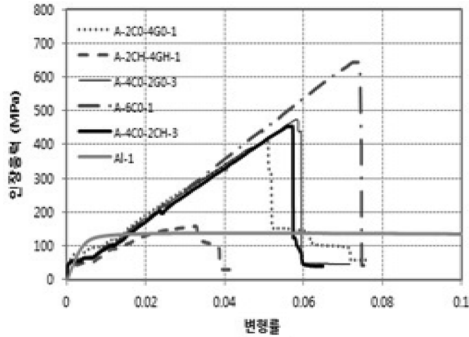


Fig. 7. Measured stress-strain curves of aluminum-FRP composite specimens.

섬유 FRP 재료들을 서로 에폭시 접착제를 활용하여 적층하는 것에 기인하는 것으로 판단되며 또한 이를 통하여 시험체의 각 재료의 적층에 균일한 응력이 작용하지 못하는 것에 원인이 있을 것으로 판단된다.

인장시험결과 알루미늄FRP복합 시험체는 Fig. 7에서 보는 바와 같이 항복을 거의 하지 않고 섬유의 파단과 동시에 시험체의 파괴가 발생하는 것으로 나타났다. 알루미늄 연성재를 사용한 경우, 최대인장강도는 탄소섬유만을 사용하고 그 적층방향이 모두 하중방향과 동일한 경우(A-6C0)에 나타났으며 최소 값은 탄소섬유를 2겹으로 가장 적게 사용하고 나머지 4겹의 유리섬유와 함께 그 배향각이 90°인 경우(A-2CH-4GH)에 나타났다. 또한 최대인장강도 작용 시 변형률도 각각의 경우에 대하여 최대 및 최소값이 발생하였다.

또한 탄소섬유의 적층수에 상관없이 배향각이 90°인 경우에는 인장응력-변형률 곡선에서 초기 탄성구간이 선형적인 형태를 잘 나타내지 않는 것으로 나타났다. 반면 탄소섬유의 배향각이 0°인 경우에는 응력상승구간에 걸쳐 전반적으로 선형적인 응력-변형률 상관관계를 나타내었다. 따라서 이러한 실험결과로부터 알루미늄FRP복합 시험체의 인장거동 특성은 유리섬유보다는 탄소섬유에 지배적인 영향을 받는 것으로 나타났다. 시험체의 인장파괴는 최대하중에서 섬유의 파단과 동시에 파괴되었는데, 이때까지의 파괴에너지를 계산한 결과도 Table 3에 함께 나타내었다. 파괴에너지는 측정된 하중-변형률 곡선의 면적으로 계산되었다. 각 시험체별 파괴에너지는 최대인장강도의 비교와 비슷한 양상을 나타내었다. 한편 알루미늄연성재의 최종파괴 시까지 파괴에너지가 FRP보강재를 사용한 경우보다 더 적으므로 FRP 보강재를 사용한 경우가 더 큰 파괴에너지를 흡수하는 것을 알 수 있다. 하지만, 시험체의 일정 크기 이

상의 항복변형은 실제 구조물에서 허용하는 보강효과를 초과하게 된다. 따라서 이러한 사실을 고려할 경우, FRP보강을 통한 알루미늄연성재의 파괴에너지의 증대는 알루미늄연성재의 항복 시까지 그리고 알루미늄FRP복합 시험체의 파괴 시까지의 파괴에너지를 비교하는 것이 적절한 것으로 판단된다. 알루미늄연성재 시험체(Al-1, Al-2)의 실험결과에서 항복점까지의 파괴에너지 값은 약 3.9 Nm로서 이를 알루미늄FRP복합 시험체의 파괴 시 파괴에너지와 비교할 경우, 최소 약 19배(A-2CH-4GH 시험체)에서 최대 약 140배(A-6C0 시험체)까지 더 큰 파괴에너지를 흡수할 수 있는 것으로 분석되었다. 또한 대부분의 알루미늄FRP복합 시험체에서 섬유의 파단 즉, 최대인장강도의 발현은 변형률이 약 0.06 내외에서 나타나는 것으로 분석되었다. 따라서 이때 즉 알루미늄연성재의 변형률이 0.06일 때까지 흡수하는 파괴에너지는 약 50 Nm이며, 이를 FRP복합시험체의 파괴에너지와 비교할 경우, 최소 약 1.5배(A-2CH-4GH 시험체)에서 최대 약 11배(A-6C0 시험체) 정도의 파괴에너지의 증대를 기대할 수 있는 것으로 나타났다.

따라서 본 연구의 목적에서와 같이 내진보강재로 활용하기 위하여 알루미늄연성재를 FRP로 보강할 경우 충분한 인장강도 및 파괴에너지 증대효과를 기대할 수 있는 것으로 분석되었다.

다음은 탄소섬유 적층수에 따른 알루미늄FRP복합 시험체의 인장거동 특성을 분석한 결과이다.

3.2.1. 탄소섬유가 2겹인 경우

다음의 Fig. 8은 탄소섬유가 2겹인 경우, 유리섬유의 방향에 따른 강도의 변화를 나타내고 있다. 유

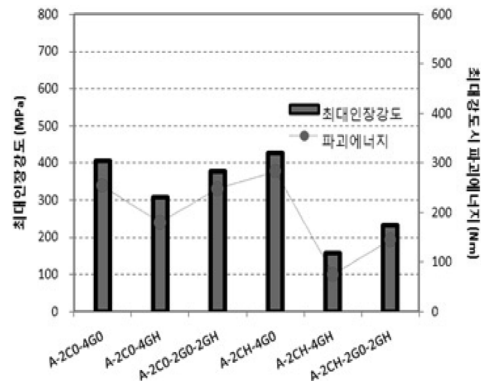


Fig. 8. Tensile strength and fracture energy of aluminum FRP composite specimens with 2 layers of carbon sheets.

리섬유의 방향에 따라 인장강도의 크기가 의존적으로 변화하는 것을 알 수 있다. 탄소섬유의 방향이 하중방향과 평행한 경우(2C0- 변수에 해당) 4겹의 유리섬유가 0°에서 90° 또는 혼합으로 변화할 경우 각각 24.4%, 6.7% 감소하였다. 하지만 2겹의 탄소섬유의 배향각이 90°인 경우(2CH- 변수에 해당) 각각 63.2%, 45.3% 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 탄소섬유가 2겹인 경우, 유리 섬유 방향에 따라 강도의 민감도는 탄소섬유의 배향각이 90°인 경우 훨씬 심각한 것으로 나타났다. 또한 4겹의 유리섬유 배향각이 0°인 경우를 제외하고는 탄소섬유의 배향각이 90°인 경우에 시험체의 강도가 낮은 것을 알 수 있다.

3.2.2. 탄소섬유가 4겹인 경우

다음의 Fig. 9는 탄소섬유가 4겹인 경우, 유리 섬유의 방향에 따른 알루미늄FRP복합 시험체의 인장강도를 비교하고 있다. 전체적으로 탄소 섬유의 배향각이 동일한 변수에 대해 유리섬유의 방향이 90°인 경우 0°에 비하여 감소하는 것으로 나타났다. 4겹의 탄소섬유가 0°, 90°인 경우를 비교할 때, 유리섬유의 배향각이 0°일 때 강도는 95.8%, 90°일 때 78.3% 그리고 혼합인 경우 83.1%로 감소하는 것으로 나타났다. 하지만 탄소섬유의 강도가 유리섬유에 비하여 크므로 탄소섬유가 4겹인 경우 시험체의 강도는 유리섬유의 배향각보다는 탄소 섬유의 방향에 훨씬 큰 영향을 받는 것을 알 수 있다. 또한 탄소섬유의 적층수가 2겹에서 4겹으로 증가함에 따라, 즉, 유리섬유는 4겹에서 2겹으로 감소, 탄소 섬유의 배향각이 0°인 경우에는 유리섬유의 방향에 크게 상관없이 탄소섬유의 증가에 따라 강도가 증가하였지만, 탄소섬유의 배향각이 90°인 경우에는 탄소섬

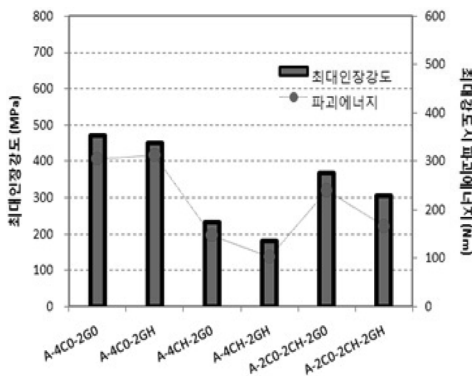


Fig. 9. Tensile strength and fracture energy of aluminum FRP composite specimens with 4 layers of carbon sheets.

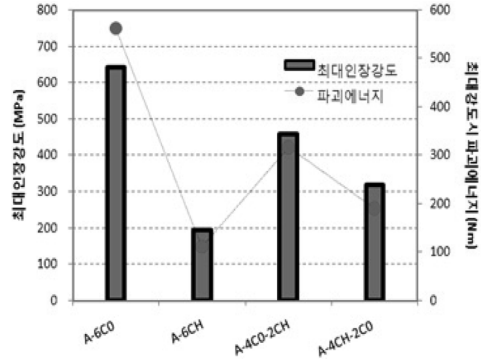


Fig. 10. Tensile strength and fracture energy of aluminum FRP composite specimens with 6 layers of carbon sheets.

유의 적층수가 증가하여도 강도의 증가는 기대할 수 없는 것으로 나타났다.

3.2.3. 탄소섬유가 6겹인 경우

위의 Fig. 10은 탄소 섬유가 총 6겹이며 내부 섬유 적층 구간에는 유리섬유가 없는 경우에 대하여 강도를 비교하고 있다. 6겹의 탄소섬유 배향각이 모두 90°인 경우 이는 모두 0°인 경우에 비하여 강도가 약 30.3% 수준으로 감소하였으며, 최대인장강도의 작용시 변형률도 약 50% 수준으로 낮은 변형률에서 파괴되었다. 또한 총 6겹의 탄소섬유 중 4겹을 0° 및 90°로 배치한 경우, 모두 0°인 경우에 비하여 각각 71.3% 및 49.6%의 값을 나타내었다.

3.3. 스틸FRP복합 시험체의 인장 실험결과 및 분석

Fig. 11과 Fig. 12는 스틸을 연성재로 사용한 FRP 복합 시험체의 인장실험 후의 시험체 파괴양상이다. 스틸FRP복합 시험체의 경우, 알루미늄FRP복합 시험체와는 달리 외부 스틸연성재의 1차적인 항복이 발생한 이후 FRP보강재의 파단이 발생하는 것으로 관찰되었다. FRP보강재의 파단 이후 급격한 응력의 감소가 발생하였지만 즉각적으로 파괴되지 않고 추가적인 소성변형이 지속적으로 발생하는 것으로 나타났다.

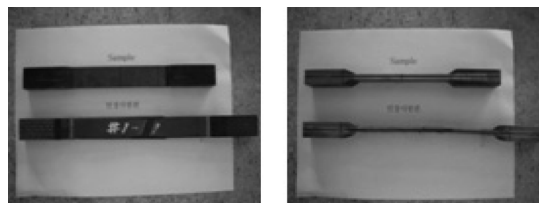


Fig. 11. Examples of failure shape of FRP composite specimens after tensile test(S-2C0-4G0).

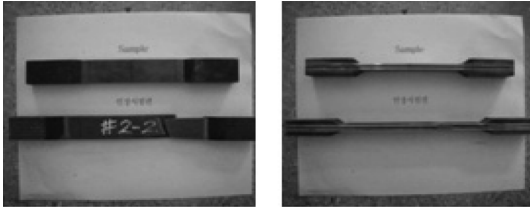


Fig. 12. Examples of failure shape of FRP composite specimens after tensile test(S-2C0-4GH).

다음의 Fig. 13은 스틸연성재 및 FRP복합 시험체의 인장응력-변형률선도의 예시를 나타나고 있다. 알루미늄FRP복합 시험체에서와 마찬가지로 여러 가지의 인장거동 특성 인자를 계산하였으며 이를 Table 4에 나타내었다.

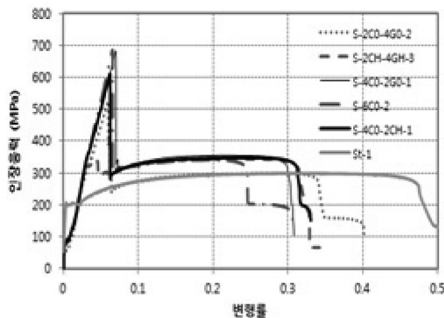


Fig. 13. Measured stress-strain curves of steel-FRP composite specimens.

스틸연성재의 경우 알루미늄연성재와 달리 비교적 명확한 항복점을 나타내었으며 일정량의 항복변형 이후 변형률경화작용에 의한 추가적인 하중의 증가와 변형이 발생한 후 최종파괴 되었다. 이후 지속적인 변형을 동반한 후에 최종파괴 되었다. 항복응력은 약 200 MPa로서 이는 최대인장강도의 약 2/3 수준이었다. 알루미늄 시험체와 마찬가지로 FRP보강재의 복합사용으로 인하여 강도의 증진이 발생하였는데, 최대인장강도 기준으로 최대 약 2.4배(S-6C0 시험체)까지 증진되었다. 또한 탄소계수도 알루미늄 시험체와 마찬가지로의 이유로 인하여 감소한 것으로 판단된다.

Fig. 13에서 보는 바와 같이, 스틸FRP복합 시험체의 경우, 약 300 MPa 전후에서 미세한 1차항복을 나타내었지만 이 때 변형량의 증가가 발생하는 것이 아니라 응력-변형률 곡선의 기울기가 조금 변화하는 정도로 관측되었다. FRP보강재의 재질, 배향각 및 적층수의 변수에 따라, 추가적인 인장응력의 증가가 있는 후에 섬유 파단과 함께 급격한 응력의 감소가 나타났다. 하지만 이때에도 시험체는 완전히 파괴 되지 않고 스틸연성재의 극한강도값과 비슷한 수준인 약 300 MPa 전후의 응력을 받으면서 지속적인 변형을 유발하였다. 따라서 이러한 결과로부터 스틸을 연성재로 사용한 경우에는 섬유의 파단 시까지 스틸연성재와 FRP와의 복합 효과에 의하여 최대

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

Specimen	Max. tensile strength	Strain at max. tensile strength	Yield strength	Strain at yield	Elastic modulus	Fracture energy at yield	Fracture energy at failure
(Unit)	(MPa)		(MPa)		(GPa)	(Nm)	(Nm)
S-2C0-4G0	493.2	0.0548	242.8	0.1672	11.8	62.75	335.6
S-2C0-4GH	447.2	0.0552	289.6	0.0280	11.5	89.9	317.8
S-2C0-2G0-2GH	498.1	0.0580	302.5	0.0284	12.1	95.9	363.1
S-2CH-4G0	552.7	0.0594	324.7	0.0286	12.7	105.3	408.8
S-2CH-4GH	310.1	0.2433	278.9	0.0255	11.6	85.3	184.8
S-2CH-2G0-2GH	393.3	0.0562	310.3	0.0294	11.9	101.9	315.7
S-4C0-2G0	699.1	0.0710	336.9	0.0300	12.6	116.1	583.6
S-4C0-2GH	600.6	0.0636	297.3	0.0271	12.2	94.7	465.0
S-4CH-2G0	407.0	0.0593	297.7	0.0282	12.0	97.0	343.1
S-4CH-2GH	314.3	0.2840	246.2	0.0238	12.0	69.4	208.6
S-2C0-2CH-2G0	496.2	0.0567	294.4	0.0263	12.7	89.4	360.2
S-2C0-2CH-2GH	425.0	0.0500	284.6	0.0268	12.4	85.7	437.3
S-6C0	722.2	0.0695	312.8	0.0279	12.9	99.8	595.9
S-6CH	322.0	0.2414	287.7	0.0269	11.7	93.1	185.4
S-4C0-2CH	614.4	0.0631	332.5	0.0296	12.3	114.6	471.8
S-4CH-2C0	452.4	0.0507	308.8	0.0284	12.2	101.0	294.2

한 응력증가가 발생되다가 보강된 섬유층의 파단과 함께 응력이 급격히 감소하고, 이후에는 스틸연성재 자체가 하중지지능력을 유지함으로써 추가적인 파괴에너지를 증대를 가져오는 것으로 나타났다. 최대인장강도는 알루미늄연성재를 사용한 경우와 마찬가지로 탄소섬유만 6겹으로 0°방향으로 배향한 경우 최대인장강도가 발생되었다. 하지만 탄소섬유 4겹과 유리섬유 2겹을 0°로 배향한 경우에는 탄소섬유만을 0°로 배향한 경우에 비하여 약 96.8%의 높은 인장강도 값을 나타내었다. 이는 알루미늄을 연성재로 사용한 경우(A-6CO대비 A-4CO-2GO) 약 73.3%에 비하여 스틸연성재와 탄소섬유의 복합효과가 인장강도의 증진에 더 크게 기여하는 것으로 분석되었다. 또한 스틸연성재 복합 시험체의 최소인장강도는 탄소섬유 90° 2겹과 유리섬유 90° 4겹을 사용한 경우(S-2CH-4GH 시험체)에 나타났으며 최대인장응력 발생 시의 변형률도 가장 낮은 수준을 나타내고 있다.

따라서 강도 및 탄성계수 등을 고려해 볼 때 FRP 보강시 시험체의 인장강도의 증진은 스틸연성재를 사용한 경우에 그 효과가 더 큰 것으로 판단된다.

파괴에너지를 계산하여 스틸FRP복합시험체는 대부분 항복점이 나타나므로 항복시까지의 파괴에너지를 계산하였으며, 또한 최대인장강도 이후에도 스틸연성재에 의한 하중지지효과가 있지만 최대인장강도가 섬유의 파단에 의하여 지배된다는 점을 감안하여 섬유의 파단 시까지의 파괴에너지를 계산하여 Table 4에 나타내었다. 항복 시까지의 파괴에너지는 대부분의 시험체에서 약 100 Nm 전후의 값을 나타내어 각 변수별로 뚜렷한 차이를 나타내지 않았지만, 섬유파단 시 즉 최대인장강도가 발생하는 시점까지의 파괴에너지는 알루미늄FRP복합 시험체와 마찬가지로 변수별 비교는 최대인장강도의 비교와 비슷한 양상을 나타내었다. 스틸연성재의 항복 시까지의 파괴에너지는 약 3.0 Nm로서 FRP보강에 의하여 항복점에서 파괴에너지는 최소 약 20배(S-2CO-4GO 시험체)에서 최대 약 39배(S-4CO-2GO 시험체) 정도 증가하는 것으로 나타났다. 또한 스틸 FRP 복합 시험체의 최대인장강도시의 변형률이 약 0.06 전후이며 이때의 스틸연성재의 파괴에너지는 약 85 Nm로서 이는 최소 약 3.5배(S-4CH-2CO 시험체)와 최대 약 7배(S-4CO-2GO 및 S-6CO 시험체)의 파괴에너지의 증대를 기대할 수 있는 것으로 나타났다. 최대인장강도의 파괴시 변형률이 약 0.06에 미치지 못하는 것으로 나타난 S-2CH-4GH 및 S-6CH

(변형률 약 0.04) 시험체와 S-4CH-2GH(약 0.05) 시험체의 경우에도 최대인장 강도시의 파괴에너지 값이 약 3배 이상의 증대를 기대할 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 알루미늄FRP복합 시험체와 마찬가지로 스틸연성재를 FRP로 보강한 경우에도 충분한 인장강도 및 파괴에너지 증대효과를 기대할 수 있는 것으로 분석되었다.

다음은 탄소섬유 적층수에 따른 스틸FRP복합 시험체의 인장거동 특성을 분석한 결과이다.

3.3.1. 탄소섬유가 2겹인 경우

다음의 Fig. 14는 탄소섬유가 2겹인 경우, 유리섬유 방향에 따른 강도의 변화를 나타내고 있다. 탄소섬유가 2겹인 경우, 그 배향각이 90°이지만 4겹의 유리섬유의 배향각이 0°인 경우에 가장 높은 인장강도를 나타내었다. 탄소섬유의 방향이 하중방향과 평행한 경우(2CO- 변수에 해당) 4겹의 유리섬유가 0°에서 90° 또는 혼합으로 변화할 경우 각각 9.3% 감소 및 약 1.0% 증가하였다. 하지만 2겹의 탄소섬유의 배향각이 90°인 경우(2CH- 변수에 해당) 각각 43.9%, 28.8% 감소하는 것으로 나타나 탄소섬유가 2겹인 경우, 유리섬유의 방향에 따라 강도의 민감도는 탄소섬유의 배향각이 90°인 경우 훨씬 심각한 것으로 나타났다. 또한 알루미늄 시험체와 마찬가지로 4겹의 유리섬유 배향각이 0°인 경우를 제외하고는 탄소섬유의 배향각이 90°인 경우에 인장강도가 낮은 것을 알 수 있다.

3.3.2. 탄소섬유가 4겹인 경우

다음의 Fig. 15는 탄소섬유가 4겹인 경우, 유리섬유 방향에 따라 강도를 비교하고 있다. 4겹의 탄소섬유의 배향각도가 0°, 90° 및 혼합인 경우, 유리섬유

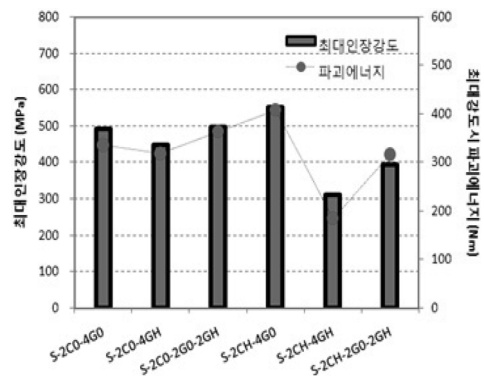


Fig. 14. Tensile strength and fracture energy of steel-FRP composite specimens with 2 layers of carbon sheets,

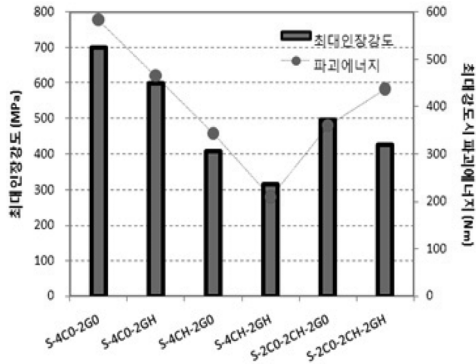


Fig. 15. Tensile strength and fracture energy of steel-FRP composite specimens with 4 layers of carbon sheets.

의 배향각도가 90°일 때는 0°에 비하여 각각 85.8%, 97.2%와 81.8%로 감소하였다. 하지만 유리섬유가 동일한 경우 탄소섬유의 배향각도에 따른 강도변화가 훨씬 심각하였다. 유리섬유 2겹의 배향각이 0°이고 4겹의 탄소섬유의 배향각이 0°에서 90° 및 혼합인 경우로 변화할 때 인장강도는 각각 약 58.2%과 74.2%로 감소하였다. 또한 탄소섬유의 적층수가 2겹에서 4겹으로 증가, 즉, 유리섬유의 적층수는 4겹에서 2겹으로 감소할 경우, 탄소섬유의 배향각이 0°인 경우에는 강도의 증가가 현저하지만, 90°인 경우에는 강도의 증가가 없거나 오히려 감소하는 것으로 나타났다.

3.3.3. 탄소섬유가 6겹인 경우

다음의 Fig. 16은 탄소섬유만을 6겹으로 내부 섬유보강재로 사용한 경우의 강도를 비교하고 있다. 6겹의 탄소섬유의 배향각이 모두 모두 0°와 90°인 경우에 강도의 차이가 확연히 나타났으며, 4겹의 배향각도가 0°인 경우와 4겹의 배향 각도가 90°인 경우에도 강도의 차이가 현저한 것으로 나타났다.

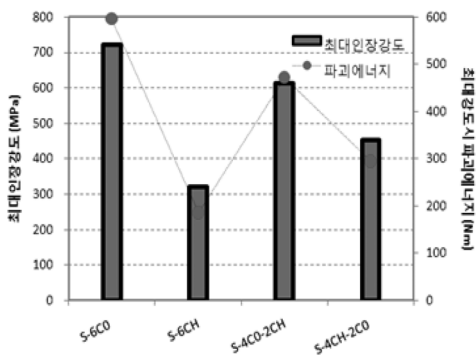


Fig. 16. Tensile strength and fracture energy of steel-FRP composite specimens with 6 layers of carbon sheets.

4. 결론

본 연구는 사회기반시설물의 내진보강을 위하여 기존의 강관 및 FRP보강재를 활용한 방법의 장점을 최대화하기 위하여 알루미늄과 스틸의 연성재에 탄소섬유와 유리섬유를 사용한 FRP재료를 보강한 복합재료를 활용하기 위한 기초연구로서, 연성재-FRP 복합적층재의 기초적인 역학적 특성인 인장거동에 대한 실험적 연구를 수행하고자 하였다. 실험결과와 분석을 통하여 향후 시설물의 내진성능보강시스템의 설계 및 해석을 위한 기초자료로서 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 알루미늄연성재의 항복강도는 약 133 MPa로 항복이후 추가적인 강도의 증가 없이 지속적인 항복 변형이 증가하는 인장파괴양상을 나타내었다. 스틸 연성재의 경우, 항복강도의 평균은 약 215 MPa 정도이며 항복 이후 최대인장강도는 약 300 MPa로 측정되었다. 탄성계수는 각각 약 25 GPa 및 55 GPa이었다. 측정된 강도 및 탄성계수는 일반적인 알루미늄과 스틸의 특성에 비하여 작는데 이는 연성재 시험체의 제작은 FRP복합 시험체를 제작하는데 사용한 2 mm 두께의 두 개의 얇은 재료를 에폭시 접착제를 사용하여 접착한 시험체를 사용하여 하중이 증가함에 따라 한쪽으로 응력의 집중과 함께 과도한 변형의 발생으로 인한 것으로 추정된다.

2) FRP보강재와의 적층복합을 통하여 알루미늄 연성재의 인장강도가 최대 약 4.8배(A-6CO 시험체)와 최소 약 1.2배(A-2CH-4GH 시험체)의 강도증진이 발생하였다. 스틸연성재는 최대 약 2.4배(S-6CO 시험체) 정도의 강도 증진이 발현되었다. 하지만, 두 연성재료 모두 FRP로 보강한 경우 탄성계수는 감소하는 것으로 나타났다. 이는 이질적인 재료들의 적층함에 따라 발생하는 것으로 판단된다.

3) 알루미늄FRP복합 시험체는 항복을 거의 하지 않고 섬유의 파단과 동시에 시험체의 파괴가 발생하였다. 최대인장강도는 탄소섬유만을 사용하고 그 적층방향이 모두 하중방향과 동일한 경우(A-6CO 시험체)에 나타났으며 최소값은 탄소섬유 2겹과 유리섬유 4겹의 배향각이 90° 경우에 발생하였다.

4) 알루미늄FRP복합 시험체의 인장거동 특성은 유리섬유보다는 탄소섬유에 지배적인 영향을 받는 것으로 나타났다. 탄소섬유의 적층수에 상관없이 배향각이 90°인 경우에는 인장응력-변형률 곡선에서 초기 탄성구간이 선형적인 형태를 잘 나타내지 않았으며, 배향각이 0°인 경우에는 응력상승구간에 걸쳐

전반적으로 선형적인 응력-변형률 상관관계를 나타내었다.

5) 파괴에너지를 계산한 결과, 알루미늄연성재의 변형률이 FRP복합 시험체의 평균적인 파괴시 변형률인 0.06일 때, 최소 약 1.5배에서 최대 약 11배까지의 파괴에너지 증대를 기대할 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구의 목적에서와 같이 내진보강재로 활용하기 위하여 알루미늄연성재를 FRP로 보강할 경우 충분한 파괴에너지 증대효과를 기대할 수 있는 것으로 분석되었다.

6) 스틸FRP복합 시험체의 경우, 약 300 MPa 전후에서 미세한 1차항복을 하고 FRP보강재의 재질, 배향각 및 적층수의 변수에 따라, 추가적인 인장응력의 증가가 있는 후에 섬유층의 파단과 함께 급격한 응력의 감소가 나타났다. 이후에도 완전히 파괴되지 않고 지속적인 변형을 유발하였다. 스틸연성재와 탄소섬유의 복합효과가 인장강도의 증진에 크게 기여하는 것으로 분석되었다.

7) 파괴에너지는 시험체 변수별로 뚜렷한 차이를 나타내지 않았지만, 최대인장강도 시에는 약 3배에서 7배까지의 증가하는 것으로 나타나, 알루미늄FRP복합 시험체와 마찬가지로 스틸연성재를 FRP로 보강한 경우에도 충분한 파괴에너지 증대효과를 기대할 수 있는 것으로 분석되었다.

8) 알루미늄 및 스틸FRP복합 시험체에서, 탄소섬유가 2겹인 경우, 유리 섬유층의 방향에 따라 강도의 민감도는 탄소섬유의 배향각이 0°인 경우보다 90°인 경우 훨씬 심각한 것으로 나타났다. 따라서 사회기반시설물의 내진보강을 위하여는 사용된 섬유의 배향각을 예상되는 하중방향을 잘 고려하여 조절하여야 할 것으로 판단된다.

9) FRP복합 시험체의 인장거동은 유리섬유보다는 탄소섬유에 더 많은 영향을 받는 것으로 분석되었다. 동일한 섬유 변수에 대하여 알루미늄FRP복합 시험체는 섬유의 파단과 동시에 급작스런 파괴양상을 나타내지만 스틸FRP복합 시험체는 최대인장강도 이후에도 스틸연성재의 강도수준으로 추가적인 하중 지지능력을 확보하는 것으로 나타나 파괴에너지를 흡수하고 내진보강안전성을 고려할 경우 스틸FRP복합 적층재가 더 효과적인 것으로 판단된다. 하지만, 보강대상 구조물과 예상하중과의 상관관계 및 현장 시공조건 등을 고려하여 이러한 적절한 선택을 하여야 할 것이다.

참고문헌

- 1) 신정열, 안태기, 김진호, 황경필, 박은천, “도시철도 역사구조물 손상탐지 및 건전성 평가기법 개발방안”, 한국철도학회, 한국철도학회 2007년도 추계학술대회논문집, pp. 1242~1247, 2007.
- 2) 김두기, FRP-연성재 복합재로 보강된 도시철도 개착식 터널기중의 내진보강효과, 한국구조물진단유지관리공학회, 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) 백승덕, “강판과 탄소섬유를 이용한 부착식 보강공법의 조기탈락방지공법 연구”, 아주대학교 대학원 학위논문, 2000.
- 5) 오용복, 정일영, 콘크리트 강도 및 철근비에 따른 철근콘크리트 보의 강판보강효과에 관한 연구, 한국콘크리트학회 논문집 : Vol. 9, No. 5, pp. 165~175, 1997.
- 6) 심종성, 배인환, 박성재, “손상된 R/C보의 보강 후 피로거동에 관한 실험적 연구”, 대한토목학회 논문집, 제16권, 제I-2호, 대한토목학회, pp. 135~142, 1996.
- 7) 박철림, 황진석, 박형철, 백명중, “탄소섬유쉬트로 보강된 철근콘크리트보의 부착파괴거동에 관한 실험적 연구”, 한국콘크리트학회 논문집 Vol. 9, No. 6, pp. 157~164, 1997.
- 8) 최기선, 류화성, 최근도, 이한승, 유영찬, 김궁환, “탄소섬유쉬트로 보강된 RC보의 휨 부착성능에 관한 실험적 연구”, 한국콘크리트학회 가을 학술발표회 논문집, pp. 997~1002, 2001.
- 9) 유영준 조정래, 정우태, 박종섭, 박영환, “콘크리트 표면처리와 CFRP 단부정착 방법에 따른 부착 특성실험”, 한국콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, pp. 579~584, 2003.
- 10) Sim, J., Park., C. and Moon, D. Y., “Characteristics of Basalt Fiber as a Strengthening Material for Concrete Structures”, Composite Part B: Engineering, Elsevier, Vol. 36, pp. 504~512, 2005.
- 11) BASALT 섬유를 활용한 콘크리트 구조물의 보강 기술 개발, 한국건설기술연구원, 2002.
- 12) 박철우, 심종성, Basalt 섬유쉬트의 철도시설 콘크리트구조물 보강재로서의 부착거동 연구, 한국철도학회논문집, 제12권, 제9호, pp. 641~648, 2009.
- 13) 윤정배, 안상호, 조백순, 원종필, 섬유-유공강판 복합플레이트르 사용한 콘크리트 구조물 보강공법, 엠프로연구보고서, 2003.