

섬유보강플라스틱(FRP) 스트립으로 보강한 철골보의 휨거동에 관한 실험적연구

최성모¹ · 박재우^{2*}

¹교수, 서울시립대학교 건축학부 ²과장, 한국시설안전공단 시설안전연구소; 겸임교수, 광운대학교 건축공학과

Experimental Study of Flexural Behavior of Steel Beam Strengthened with the Fiber Reinforced Polymer Plastic(FRP) Strips

Choi, Sung Mo¹, Park, Jai Woo^{2*}

¹Professor, School of Architecture, University of Seoul, Seoul, 130-743, Korea

²Chief, Korea Infrastructure Safety Corporation, Research division Goyang, 411-758, Korea
Adjunct Professor, Dept of Architectural engineering, Seoul, 139-701, Korea

Abstract - This paper presents the experimental results of flexural behavior of steel beam strengthened with fiber reinforced polymer plastic (FRP) strips subjected to static bending loading. Four H beams were fabricated strengthened with aramid strips and carbon strips and one control specimen were also fabricated. Among them two specimens were strengthened with partial length. The H-beams had two types of failure mode, depending on the length of the FRP strips:(1) strip debonding in beams with partial length reinforcement and (2) strip rupture in beams with full length reinforcement. From the test, it was observed that maximum increase of 16% was also achieved in bending-load capacity.

Keywords - FRP, CFRP, AFRP, Carbon fiber polymer plastic, Aramid fiber polymer plastic, Strips, Steel beam, Retrofit

1. 서론

건축물은 사용기한 동안 작용하는 하중에 대해 손상 및 붕괴되지 않도록 설계되어야 한다. 이중 지진은 발생 시 무수한 인명피해 및 막대한 사회 경제적 피해를 가져오므로 구조공학자들은 발생가능한 지진에 대해 건축물의 피해를 최소화 하도록 내진설계 및 내진보강을 수행하게 된다. 2011년 일본 후쿠시마 현에서 발생한 규모 9.0의 지진의 경우 막대한 사회, 경제적 피해를 발생시켰는데 삼성경제 연구소의 '동일본 대지진의 경제적 영향과 전망'이라는 보고

서에 따르면, 대지진의 여파로 약 333조원의 경제적 피해가 발생하였으며, 생산설비, 전력난 등으로 인해 생산효율이 감소하여 GDP가 약 1.5% 감소하는 2차 피해가 발생하였다고 보고한 바 있다.

국가 인프라 시설의 하나인 발전소 중 대부분을 차지하고 있는 화력발전소가 지진으로 인해 손상될 시 발전소 가동의 중단으로 인한 전력생산량 저하, 산업시설의 전력공급량 저하 때문에 생산성의 차질 등 2차 경제적 피해가 발생하게 되어 막대한 국가적 손실을 가져오게 된다. 이에 국내발전소 시설에 대한 내진점검 및 적용 가능한 보강 안을 제안하고 그에 대한 검증이 필요한 시점이다. 발전소시설물에서 대부분을 구성하고 있는 철골구조물에 주로 적용되는 보강법은 강판보강법이다. 이는 모재와 보강재의 연결을 위해서는 볼트접합이 주로 사용되는데 이로 인해 볼트구멍의 생성으로 모재의 단면손실이 발생하게 된다. 또한 강판 자체가 중량재 이므로 보강재로 인한 자중증가가 예상되며, 시공성 효율 또한 떨어진다. 더욱이 보강을 위해 용접

Note.-Discussion open until October 31, 2014. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on December 26, 2013; revised February 12, 2014; approved on March 10, 2014.

Copyright © 2014 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-2-3409-3396 Fax. +82-2-499-0638

E-mail. anm21c@hanmail.net

을 할 경우 용접열로 인한 모재의 변형이 발생하기 쉽다는 단점이 있다. 반면 FRP는 강판에 비해 높은 인장강도를 지니고 있어 적은 보강량으로 높은 보강효과를 기대할 수 있다. 또한 보수보강 시공시 에폭시를 사용해 접착하기만 하면 되므로 시공이 간편하고, 볼트구멍으로 인한 모재 단면 손실이 발생하지 않는다. 이러한 장점으로 인해 최근 FRP는 보수보강 시장에서 다양한 분야에 널리 사용되고 있다.

본 연구에서는 화력발전소 대부분을 구성하고 있는 철골 구조물에 내진보강을 수행하고자 섬유보강플라스틱(Fiber reinforced polymer plastic, 이하 FRP라 함)을 활용한 내진보강안을 제시한다. 내진보강에 사용된 FRP의 종류는 탄소 섬유보강플라스틱(Carbon fiber reinforced polymer plastic, 이하 CFRP라 함)과 아라미드 섬유보강플라스틱(Aramid reinforced polymer plastic, 이하 AFRP라 함)이다. 연구진행방법은 먼저 실제 국내 화력발전소 1기를 모델링하여 AIK 2000 내진설계기준^[1]과 내진설계규준이 강화된 KBC 2009 내진설계기준^[2]으로 모델링하여 구조물의 주요부재인 휨재의 응력변화를 분석하는 내진사전평가를 수행하여, 본 연구에서 보강효과를 검증할 휨재의 보강필요성을 확인하였다. 이후 휨재에 대해 스트립 타입의 CFRP와 AFRP를 사용하여 H평강 플랜지 하부에 증타하여 부착한 후 휨가력 실험을 수행하여 보강효과를 검증하였다.

2. 선행연구, 보강재료 특징, 사전내진평가

2.1 선행연구

철근콘크리트 구조물의 FRP를 활용한 보수보강에 대한 연구 및 적용은 1980년대 이후 꾸준히 연구가 진행되고, 현장에 적용되어 현재는 보편적으로 널리 사용하고 있다. 그러나 철골구조에 FRP를 적용한 보수보강에 대한 연구 및 적용사례는 극히 드물다. 최근 기존의 강판보강법에 대한 고정관념을 탈피하여 해외를 중심으로 강구조물의 섬유보강플라스틱(Fiber reinforced polymer plastic, 이하 FRP)을 적용한 보수보강에 대한 연구가 진행되고 있으며, 실제로 시공현장에서도 다양하게 적용되고 있다^[3]. 선행연구구조사의 일환으로 본 연구에서 수행하고자 하는 철골보의 FRP보강에 대한 국외연구에 대해 내용을 정리하면 다음과 같다. Miller *et al.*^[4]은 합성보의 강재부위와 H형강 하부 플랜지 CFRP 슈트를 통해 보강하고 휨실험을 통해 휨성능

이 증가된다는 결론을 도출하였으며, 실제 교량에 적용하여 보수보강을 적용하였다. Colombi and Poggi^[5]는 철골보의 하부플랜지에 CFRP 스트립을 보강하여 휨실험을 수행하였다. 보강 후 최대 23% 정도의 내력상승효과를 검증하였다. Schnerch and Eizkallai^[6]은 고탄성계 CFRP 스트립을 사용한 철골합성보 휨보강에 대한 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 CFRP스트립은 229GPa의 저탄성계 스트립과 457GPa의 고탄성계 스트립 2종류이다. 또한 일반적으로 스트립타입을 사용한 보강법은 보강재 끝부분이 모재에서 급격히 떨어져 나가는 박리파괴현상이 발생하게 된다. Schnerch and Eizkallai^[6]은 이에 대한 해결방법으로 스트립 끝부분에 사선형태로 모따기 한 후 에폭시로 보강하여 박리파괴를 지연시키는 보강방법을 채택하였다. Shaat and Fami^[7]는 하부플랜지 부분을 절단한 손상된 철골합성보에 CFRP슈트로 보강하여 구조성능 향상에 대한 검증을 실험을 통해 검증하였다. 실험에 사용된 변수는 CFRP 슈트 보강계수와 하부 플랜지에 대비 보강길이이다. 실험결과 하부 플랜지 손상을 통해 약 54% 정도의 내력이 감소되었으나, CFRP 슈트의 보강계수가 증가함에 따라 52%의 내력상승과 26%의 강성이 상승됨을 검증하였다. 보강길이에 따른 분석결과 내력은 상승하였으나 강성에는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 국내에서는 Park *et al.*^{[8],[9],[10]}가 철골기둥에 CFRP를 활용한 보수보강 연구를 수행하였다.

2.2 섬유보강플라스틱의 특징

섬유보강플라스틱(Fiber reinforced polymer plastic, FRP)가 건설보강 재료로 처음 사용되기 시작한 것은 1980년대 부터이다. FRP의 주요장점은 철근과 비교하여 비중이 1/5 수준밖에 되지 않으며, 중량대비 높은 인장강도를 가지고 있으며, 부식에 대한 저항성이 높다는 것이다. FRP 섬유는 보강재로 이용되고 있는 재료로서 탄소섬유(CFRP), 유리섬유(GFRP), 아라미드섬유(AFRP) 등의 종류가 있다. FRP는 역학적으로 탄성적인 성질을 가지고 있어, 소성변형 없이 변형이 증가함에 따라 응력이 계속적으로 증가한 후 파단점에서 취성적으로 파괴된다. 그러나 Fig. 1과 같이 GFRP를 제외하고는 강판보다 훨씬 높은 인장강도를 가지고 있어서 보강재에 대한 단면의 효율성이 증가하게 된다.

CFRP는 강도적인 측면에서는 가장 우수하나 파단시 연신율은 AFRP의 60%정도 수준밖에 되지 않고, 전도체 성질을 지니고 있어 강판에 부착 후 공기 중에 오랜 기간 동안

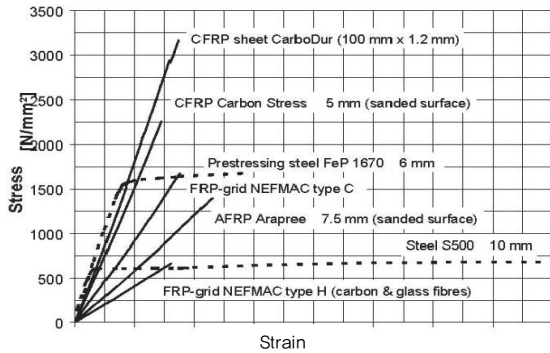


Fig. 1. Stress- strain curve of each retrofitting material

노출이 되면 Galvanic corrosion(전해질 부식, CFRP의 전도체 성질로 인해 공기 중에 노출이 될 경우 CFRP의 전해질 성질 때문에 CFRP가 부착된 강판 면이 부식되는 현상)이 발생하게 된다. 따라서 이러한 Galvanic corrosion을 방지하기 위해 비전도체 재료인 GFPP를 강판위에 부착한 후 CFRP를 혼합하는 방식으로 사용하게 된다^[4]. 또한 CFRP가 지닌 전도체 성질 때문에 발전소 보수보강 시 감전 사고로 발전소의 가동을 중단해야 되므로 경제적인 손실이 발생한다.

AFRP는 CFRP에 비해 인장강도성능은 떨어지나 연신율이 40% 정도 높으며, 비전도체라는 성질을 지니고 있다. 따라서 철판과 FRP가 부착된 면에 Galvanic corrosion에 대한 염려가 없고, 비전도체라는 성질 때문에 발전소에서 보수보강 시 가동 중단 없이 보강공사를 수행할 수 있다는 장점이 있으며, 발전소 건축물과 같은 특수조건을 지닌 철골구조물에 AFRP를 적용하여 보수보강을 수행한 연구가 국내에서 초기단계로 진행되고 있다^{[11], [12], [13]}.

또한 보강공사에 쓰이는 FRP의 종류에는 쉬트타입과 스트립타입이 있다. 일반적으로 쉬트타입은 에폭시 수지에 FRP쉬트를 함침하여 구조물에 증타하여 보수보강을 수행하며, 한 겹 이상 보강 시 위의 보강방법을 반복적으로 수행하게 된다. 쉬트타입 시공시 요구되는 보강량이 많은 경우 시공 단계가 복잡해지고 에폭시의 양생기간이 길게되며, 양생기간동안 FRP쉬트의 들뜸 현상이 발생하게 되고 다른 공법에 비해 현장작업자에 대한 의존도가 높다는 단점이 있다^[14]. 그러나 스트립타입의 경우 공장에서 섬유에 에폭시 함침 및 경화를 완료하여 판재형태로 생산되고, 현장에서는 스트립 섬유판 한쪽 면에 접착제를 도포한 후 단순히 구조물에 붙이기만 하면 되어 시공성이 우수하다는 장점이 있다.

2.3 사전내진평가

Fig. 2는 국내 내진설계 기준의 변화를 도표화 하여 나타낸 것이다.

위 도표를 살펴보면 과거 1998년에 내진설계기준이 제정된 이후 설계지진하중에 대한 기준은 계속적으로 강화되고 있음을 알 수 있다. 국내 화력발전소의 경우 대다수가 2000년 이전에 준공이 된 건물이어서 강화된 KBC 2009 기준의 설계지진하중에 대해서는 만족하지 못하므로 내진보강이 필요한 것이 현실이다. 따라서 본 연구에서는 과거 AIK 2000 기준^[1]에서의 설계지진하중과 KBC 2009 기준^[2]에서의 설계지진하중을 국내 충청지방에 위치한 실제 화력 발전소에 적용하여 MIDAS GEN 프로그램을 사용하여 사전내진평가를 수행하였으며 실제 대상건물모델링은 Fig. 3과 같다.

AIK 2000 설계지진하중(그래프의 파란색)과 KBC 2009 설계지진하중(그래프의 붉은색)에 의한 각 층별 전단력 비교는 Fig. 4에 나타나 있다. 또한 각 설계지진하중에 의한 각 부재의 응력변화 분석결과는 Fig. 5와 같다.

Fig. 4를 살펴보면 강화된 지진하중에 의해 각 층별로 KBC 2009에 의한 각 층별 전단력 값이 AIK 2000의해 산

AIK 1998	$V = \frac{AS}{1.2\sqrt{T}R} W \leq \frac{1.75AI}{R} \alpha - \frac{1.5AI}{R}$ A : seismic zone factor(0.12, 0.08) S : Soil type (3 type)	Establishing seismic design code in Korea
AIK 2000	$V = \frac{AS}{1.2\sqrt{T}R} W \leq \frac{1.75AI}{R}$ A : seismic zone factor(0.11, 0.07) S : Soil type (4 type)	Revising seismic zone factor (-0.11) and soil type
KBC 2005	$S = \frac{S_a}{(\frac{R}{4})T} W \leq \frac{S_B}{(\frac{R}{4})} W$ A : seismic zone factor(0.11, 0.07) S : Soil type (5 type) S_a, S_B : Response spectra acc	Using response spectra in seismic design code
KBC 2009	$S = \frac{S_a}{(\frac{R}{4})T} W \leq \frac{S_B}{(\frac{R}{4})} W$ A : seismic zone factor(0.22, 0.14) S : Soil type (5 type) S_a, S_B : Response spectra acc	Revising seismic zone factor Strengthen seismic design code

Fig. 2. A change of seismic design load

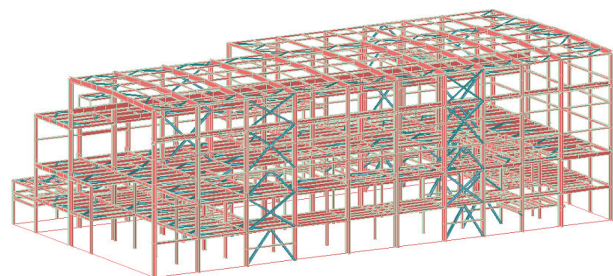


Fig. 3. Modeling of thermoelectric power plant

정된 층별 전단력 값 보다 크며, 특히 최하층인 GL층에서는 60% 정도 전단력 값이 커져 강화된 설계지진하중을 바탕으로 보수보강이 필요함을 알 수 있다. Fig. 5는 각 설계 하중에 따른 Fig. 4의 모델링에서 기둥, 보, 수평가새, 수직가새의 응력 증감을 나타낸 것인데, 기둥, 보의 경우 휨에 대한 성능요구가 증가한 것으로 나타났으며, 수평가새, 수직가새 또한 압축력이 증가하여 전반적으로 강화된 설계 지진하중 하에서 각 부재별로 보강이 필요함을 알 수 있다. 따라서 KBC 2009가 제정된 2009년도 이전에 준공된 화력 발전소에서는 현행규준에 대해 내진설계 검토 시 내진보강이 필요함을 알 수 있다. 특히 본 연구에서 초점을 맞추고 있는 보부재에 대해 2009년 이전에 준공된 발전소 건물은 현재 KBC 2009의 지진하중에 적용시 휨성능이 현저히 부

족하므로 현 내진설계 규준에 적합하기 위해서는 휨보강이 필요하다는 결론을 도출하였다^[15]. 이에 본 연구에서는 철골보의 FRP의 휨 보강효과를 검증하기 위해 내진보강 이전 먼저 검토해야 될 정적하중 상태에서의 철골보에 대한 FRP 보강효과를 검증한다. 보강에 사용될 재료는 2.2절에서 언급한 바와 같이 발전소 철골구조물에 가장 적합한 보강재료인 AFRP 스트립 타입을 사용하여 휨성능 실험을 수행하였으며, 재료에 따른 비교를 위해 CFRP 스트립을 사용하기도 하였다. 이를 통해 파괴거동, 강성, 내력 등을 분석한다.

3. 실험계획 및 결과

3.1 실험계획

본 연구에서는 사전내진평가 결과에 의해 강화된 설계지진하중에 대해 취약할 것으로 예상되는 H형강 휨재에 대해 AFRP 스트립을 이용하여 보강한 후 휨강도 향상을 통해 보강효과를 검증한다. 실험에 사용된 변수는 FRP 보강재 종류(CFRP, AFRP), 보강길이 이다. 먼저 Fig. 6(a)와 같이 H-200×204×12×12 형강에 횡비틀림 좌굴을 방지하기 위하여 H형강 윗면 플랜지에 C-300×90×9 형강을 용접하여 결합한다. 이때 실험체의 길이는 4.0m이며, 총 5개를 제작하였다. 이후 H형강 하부 플랜지 하부에 두께 1.2mm

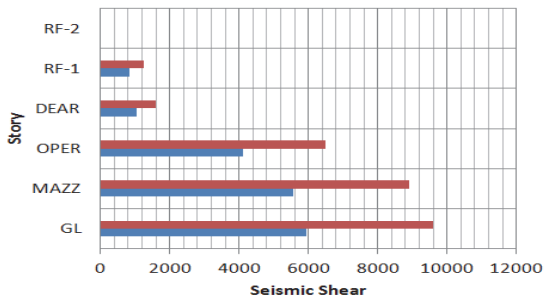


Fig. 4. Comparison of seismic analysis results for thermoelectric power plant

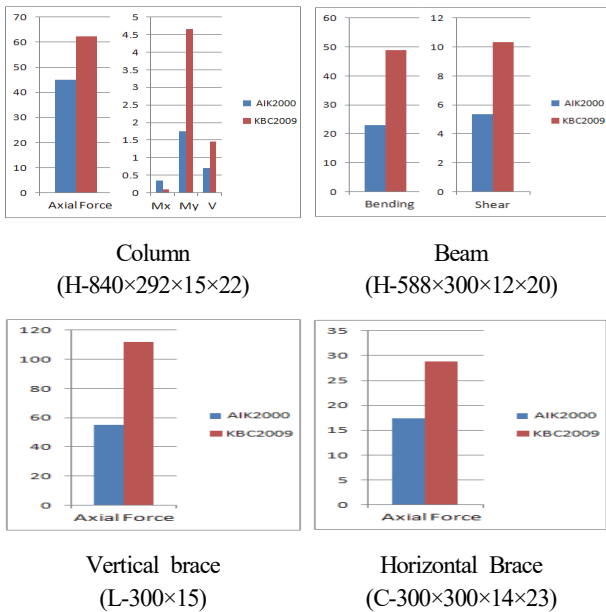
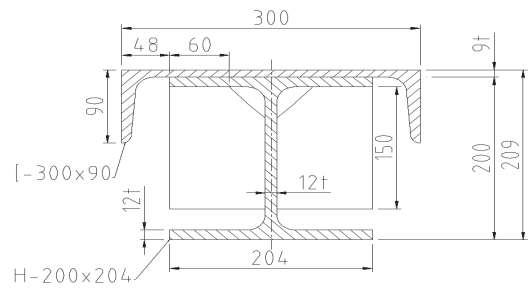


Fig. 5. Seismic analysis results of each members between AIK 2000 and KBC 2009



(a) Specimen section details



(b) Specimen fabrication procedure (CFRP/ AFRP)

Fig. 6. Specimen section details and FRP retrofitting

Table 1. Specimen details and parameters

Specimen	Srction (mm)	FRP Type	FRP thickness (mm)	FRP retrofitting length (mm)
B4N0	H-200×204×12×12	-	-	-
B4A2.4H	□-300×90×9	AFRP	2.4	1,880
B4A2.4F				3,760
B4C1.4H	Length = 4,000	CFRP	1.4	1,880
B4C1.4F				3,760

B : Bending, 4 : 4,000mm, H: Half, 1,880mm
 A2.4 : Aramid 2.4mm, C1.4 : Carbon 1.4mm, F: Full 3,760mm

CFRP 스티립 1겹, 2.4mm AFRP 스트립 1겹을 각각 붙인다. 두 종류의 FRP 스트립의 두께가 다른 이유는 AFRP의 인장강도가 CFRP 에 비해 작기 때문에 CFRP 스트립의 두께를 적게 하여, 서로 다른 두께의 FRP 스트립이 비슷한 인장성능을 발휘하게 하기 위해서 이다. 일반적으로 전력 시설물에서는 감전으로 인해 Shot Blast 등의 표면 처리 작업이 불가능하므로, H형강 하부 플랜지에 FRP Strip를 부착하기 위해 녹제거 처리만 하였으며, 별도의 표면 처리 작업은 수행하지 않았다. 이 후 Fig. 6(b)와 같이 플랜지에 접착제를 도포한 후 FRP스트립을 부착한다(우측그림 CFRP 시공, 좌측그림 AFRP 시공과정임). 이후 시방서^[16]에서 제시한 대로 10일간 양생을 한 후 실험체를 완성하였다. 또한 보강길이에 대한 실험변수로는 밑면 플랜지에 전 길이에 걸쳐 FRP 스트립으로 보강한 실험체와 최대모멘트가 발생되는 구간인 휨재 중앙부를 중심으로 Span길이의 1/2 정도 길이에 걸쳐 FRP 스트립으로 보강한 실험체를 각각 제작하였다. 실험체 변수 및 제원은 Table 1에 정리하였다.

3.2 실험체 설치 및 계측계획

실험체는 3000kN급 만능시험기(Universal testing machine)에서 정정가력시험으로 수행되었으며, 분당 1.3mm의 가력속도로 재하 하였다. 실험체의 부착 및 휨거동을 파악하기 위해 실험체 중앙부 웹 및 상하 플랜지부위에 Fig. 7(a)과 같이 스트레인 게이지를 부착하였다. 또한 하중재하에 따른 휨재 중앙부위의 변위를 측정하기 위해 휨재 중앙부 부위에 300mm급 LVDT를 설치하였다. Fig. 7(b)는 실험체 셋팅전경을 나타낸 것이다.

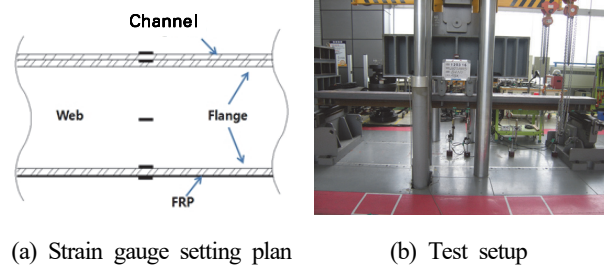


Fig. 7. Measuring plan and test setup

Table 2. Material test result of steel plate

Thickness (mm)	F_y (MPa)	F_u (MPa)	F_u/F_y	Elongation (%)	Elastic Modulus (GPa)
12	418	543	1.30	27.5	210

Table 3. Material test result of FRP strips

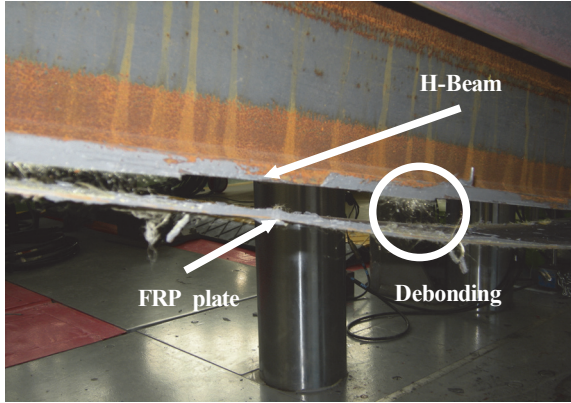
FRP type	Thickness (mm)	Tensile Strength (MPa)	Elongation at rupture (%)	Elastic Modulus (GPa)
AFRP	2.4	1570	1.82	86.3
CFRP	1.4	2696	1.50	179.7

3.3 소재시험결과

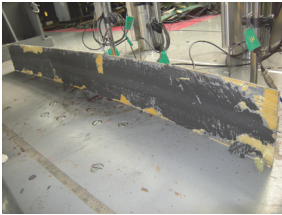
강판에 대한 재료시험^[17]결과는 Table 2에 정리하였고, CFRP스트립에 대한 재료시험^[18]결과는 제조사에서 제공한 시험성적서를 바탕으로 Table 3에 정리하였다.

3.4 실험체 파괴과정

총 5개의 실험체에 대해 정적 휨가력 실험을 수행하였으며, 실험체 모두 강판에서 FRP 스트립이 Fig. 8과 같이 탈락(debonding)이 발생하며 실험체가 파괴되는 현상을 보이고 있다. 실험에서 변수로 계획되었던 FRP의 소재종류, 부착길이에 관계없이 FRP의 탈락이 발생되었으며, 강판에서 FRP가 급작스럽게 탈락되는 취성적 파괴거동을 보이고 있다. FRP 탈락(debonding)은 휨변형이 가장 큰 휨재 중앙부 부위에서 단부부위로 확대되어 가고 있으며(Fig 8. (a)참고), 최종적으로는 휨재에서 FRP 스트립이 완전히 분리되며 파괴된다(Fig. 8 (b), (c) 참고). 또한 B4A2.4F와 B4C1.2F 실험체는 단부부위에서는 Fig. 8 (d)와 같이 섬유중 일부만 떨어져 나가 FRP 스트립이 파단(rupture)되는 파괴거동을 보였다. 이를 통해 휨변형이 큰 휨재 중앙부 부



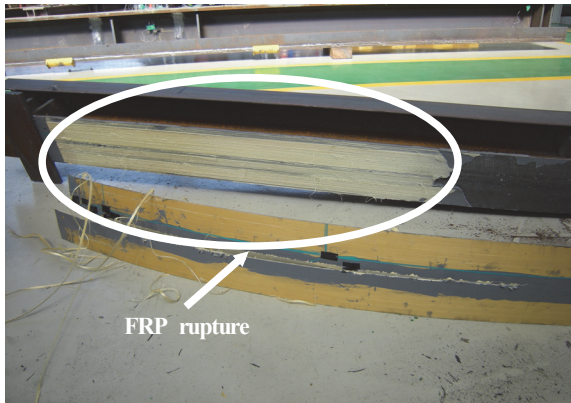
(a) FRP debonding procedure at mid span



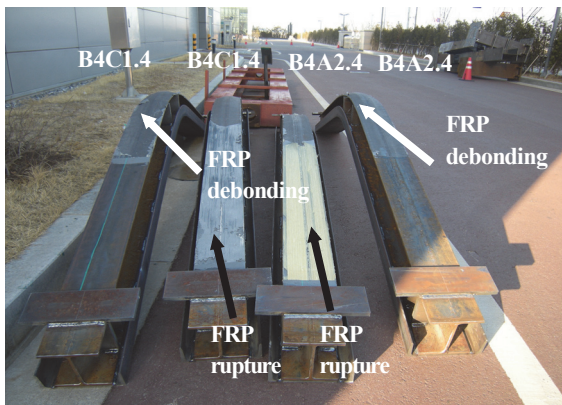
(b) AFRP debonding (Final, B4A2.4H)



(c) CFRP debonding (Final, B4C1.4F)



(d) FRP plate rupture



(e) Final failure shape for retrofitting specimen

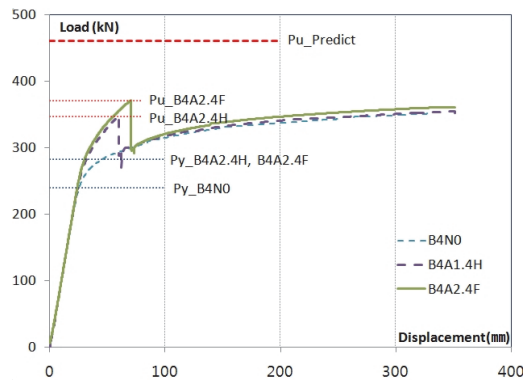
Fig. 8. Specimen failure mode

위에서는 박리(debonding)파괴가 지배를 하고, 상대적으로 휨변형이 적은 단부부위에서는 FRP 파단(rupture)에 의해 파괴가 지배됨을 알 수 있다. Fig. 8(e)은 각 보강실험체의 최종파괴 모습을 보여주는 것 인데, 플랜지 하부에 FRP 스트립이 전체보강 된 실험체는 중앙부는 FRP 탈락현상이 단부는 FRP 파단현상이 나타나 섬유 일부가 강판에 부착되어 있음을 보인다. 그러나 1/2 길이보강 실험체에서는 상대적으로 짧은 보강길이 때문에 중앙부에서 FRP 박리 파괴에 의해 지배받고 있음을 알 수 있었다.

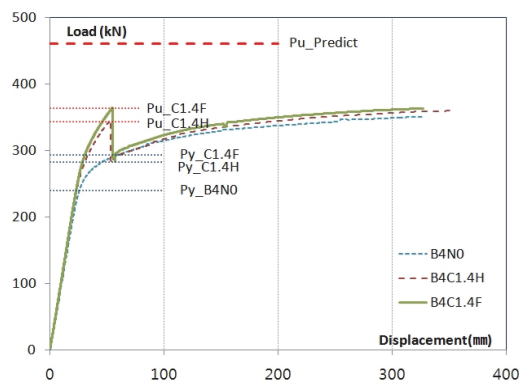
4. 실험결과 분석

4.1 하중-변위 관계

Fig. 9(a)는 AFRP 보강 실험체와 무보강 실험체의 하중-변위곡선을 비교한 것이며, Fig. 9(b)는 CFRP 보강 실험체와 무보강 실험체의 하중-변위곡선을 비교한 것이다. 우



(a) Load-displacement curve (AFRP specimen)



(b) Load-displacement curve (CFRP specimen)

Fig. 9. Load-displacement curve

선 무보강실험체는 항복하중(P_y)이전까지는 하중이 계속적으로 증가하다가 이후 점진적으로 하중이 증가율이 감소함을 보이고 있다. FRP 보강 실험체는 하중재하 초기구간에서는 계속적으로 하중이 증가함을 보이고 있다. 그러나 FRP 스트립이 탈락(debonding)한 이후 하중이 급작스럽게 떨어지고 이후로는 무보강 실험체와 비슷한 거동을 보이고 있다. 또한 FRP 스트립이 탈락된 시점을 보면, AFRP 보강 실험체는 축하중 약 63mm 부근에서 FRP 스트립이 탈락되었으나, CFRP 보강 실험체는 축하중 약 53mm 부근에서 FRP 스트립이 탈락되어 AFRP 스트립이 사용하는 것이 CFRP 스트립을 사용하는 것에 비해 연성 측면에서 개선됨을 보이고 있다. 이는 2장에서 언급한 것처럼 AFRP가 CFRP에 비해 파단시 연실율 값이 커 상대적으로 연성적인 측면에서 유리하기 때문이다. 만약 FRP 스트립 탈락시점을 지연시킨다면, 연성능력을 개선시킬 수 있을 것으로 예상되며, 향후 클램프나 볼트체결 등을 이용해 FRP 스트립의 탈락시점을 지연시킬 수 있는 연구가 추가적으로 진행되어야 할 것이다.

4.2 내력, 초기강성 분석

Table 4에는 각 실험체의 항복하중, FRP 스트립이 탈락시 하중, 초기강성의 결과 값을 정리하였다. FRP 스트립을 이용한 휨성능 보강효과에 대한 정량적 평가를 위해 기준실험체 대비 항복시 하중(P_y)과 FRP 스트립 탈락시 하중에 대해 각각 비교하였으며 이를 통해 내력상승에 대한 보강효과를 검증하였다. Schnerch *et al.*^[19]은 철골보의 FRP보강에 대한 설계 가이드라이을 통해 활하중의 증가로 구조물이 탄성상태를 유지하기 위해서는 고정하중과 증가된 활하중이 합이 $0.6P_y$ 를 넘지 못하여야 된다고 제안한 바 있다. 따

라서 본 연구에서는 Schnerch *et al.*의 보강 가이드라인에 근거하여 실험결과에서 항복강도(P_y)를 비교 분석하였다.

우선 초기강성 결과 값을 분석하면, 무보강 실험체 대비 최대 6.3% 증가하여 보강에 따른 초기강성 증가효과는 미비한 것으로 나타났다. 또한 초기강성은 FRP의 종류나 보강길이에 거의 영향을 받지 않음을 보이고 있다.

두 번째로 실험결과를 통해 얻은 내력을 분석하면 다음과 같은 결과 값을 도출하였다. (1) 항복하중(P_y)은 하중-변위곡선상에서 초기 선형구간에 대한 강도 값으로 정의한다. 항복하중(P_y) 결과 값을 분석하면, AFRP 보강 실험체는 무보강 실험체에 비교하여 항복강도는 약 16%의 증가 효과가 있는 것으로 나타났으며, CFRP 보강 실험체는 무보강 실험체에 비교하여 항복강도는 약 16~20%의 증가 효과가 있는 것으로 나타났다. (2) 또한 두 종류의 FRP는 비슷한 인장강도 값을 지니고 있어 FRP 소재의 종류에 따른 내력차이는 거의 없음을 보이고 있다. (3) 보강길이에 따른 분석결과를 살펴보면 전체보강 실험체와 보강길이 1/2 실험체의 따른 내력차이는 약 6%로 보강길이가 내력에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

Table 4에서 예상최대하중은 무보강 실험체인 경우 전소성모멘트 값으로, 보강실험체인 경우 전소성모멘트 값에 FRP의 파단시 휨강도 값을 더하여 산정하였다. 무보강 실험체를 기준으로 FRP를 보 Span 전체에 부착한 경우, FRP 보강에 의해 예상되는 최대 하중 대비 AFRP와 CFRP 각각 81%와 77%의 하중을 견디는 것으로 나타났다. 보 span의 1/2 길이만 부착한 경우 또한, AFRP와 CFRP 실험체에서 각각 75%와 72%의 결과를 나타냈다. 실험 결과 FRP 부착이 탈락되는 시점까지는 강성과 하중이 증가하는 것으로 나타나고 있으므로, 부착성능을 향상시킬 수 있는 보다 심도 있는 연구가 수행된다면 충분한 휨내력을 발휘

Table 4. Summary of results for initial stiffness and load at yield point, FRP debonding point and maximum load

Specimen	Initial stiffness		Predicted load (P_u) (kN)	Load at yield point (P_y)		Load at FRP debonding		Maximum load (P_{max})	
	Value (kN/mm)	Gain or loss (%)		Value (kN)	Gain or loss (%)	Value (kN)	Gain or loss (%)	Value (kN)	Gain or loss (%)
B4N0	9.82	-	316	244	-	-	-	350	-
B4A2.4H	9.98	1.7	460	282	15.6	347	-	347	-1.0
B4A2.4F	9.94	1.7		282	15.6	371	6.9	371	6.0
B4C1.4H	10.24	4.3	474	282	15.6	343	-	343	-2.0
B4C1.4F	10.44	6.3		293	20.1	364	6.1	364	4.0

할 것으로 사료된다. Table. 4에서 또한 각 실험체의 최대 내력값(P_{max})을 비교 분석하였다. 먼저 1/2 길이로 보강한 실험체는 무보강 실험체와 최대내력이 거의 비슷하였으며, 전길이에 걸쳐 보강한 실험체는 6%, 4% 내력이 증가된 것으로 나타났다. 또한 Fig. 9의 하중-변위 곡선을 살펴보면, FRP 스트립 탈락이후 무보강실험체와 비슷한 거동을 보이고 있다. 이와 같이 보강실험체에서 예상되는 하중보다 실험값이 적게 나타나고, 최대내력값에서 보강실험체와 보강실험체의 내력값이 비슷한 이유는 휨가력 중 FRP의 부착성능 저하로 탈락하여 FRP가 충분한 휨강도를 발휘하지 못하기 때문이라 사료된다. 따라서 기존 철근콘크리트 보강에서 쓰이고 있는 박리파괴를 지연시킬 공법(Wrapping, 클램프 등)을 이용하여 박리파괴 시점을 지연시켜 부착성능을 개선한다면 강도와 연성능력을 확보를 동시에 확보할 수 있을 것으로 사료되며, 이에 대해 검증할 수 있는 추가적 연구가 진행되어야 할 것이다.

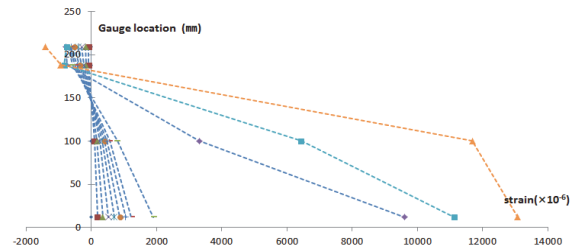
4.3 하중-변형을 관계

Fig. 10은 실험체 중앙부 웹 부위에 부착된 스트레인 게이지를 통해 결과 값을 얻은 하중-변형률 관계 곡선이다. 각지점의 변형률 값은 30kN 단위로 측정하여 표시하였다.

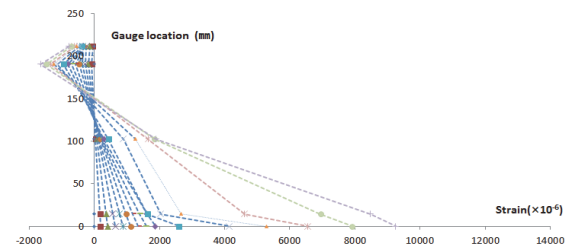
우선 B4N0 실험에는 하중 240kN (최하부위 변형률2000 μ) 까지는 중립축의 변화가 없다가 하중 270kN 부근(하부플랜지 변형률 9600 μ)에서 플랜지 하부에 급격한 변형이 발생하며 중립축이 상부로 상승하기 시작하여 이 후 변형률이 계속적으로 증가함을 보이고 있다. 이후 하중 300kN(하부플랜지 변형률 13000 μ)까지 휨변형이 계속적으로 증가함을 보이고 있다.

AFRP 보강실험체에서 B4A2.4F 실험체는 하중 270kN (하부플랜지 변형률 약 2600 μ)부근에서 중립축이 위쪽으로 상승하기 시작했으며 FRP 변형률 또한 증가하게 된다. 이후 플랜지 하부의 AFRP가 탈락되는 시점 (하중 371kN) 까지 급격히 증가하고 있음을 보이고 있다. B4A2.4H 실험체는 하중 270kN(하부플랜지 변형률 약 3000 μ)부근에서 중립축이 위쪽으로 상승하기 시작했으며, FRP 변형률 또한 증가하기 된다. 이후 플랜지 하부의 AFRP가 탈락되는 시점 (하중 345kN)까지 급격히 증가하고 있음을 보이고 있다.

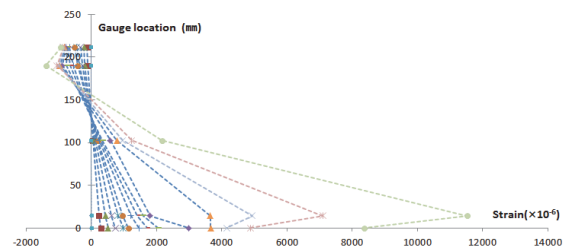
CFRP 보강실험체에서 B4C1.4F 실험체는 하중 270kN (하부플랜지 변형률 약 2600 μ)부근에서 중립축이 위쪽으로 상승하기 시작했으며 FRP 변형률 또한 증가하게 된다.



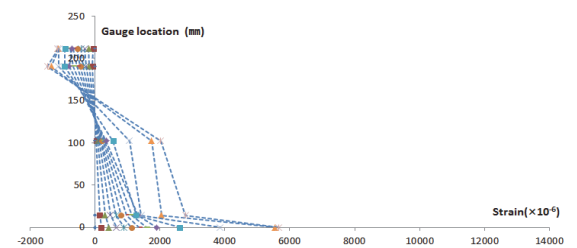
(a) B4N0



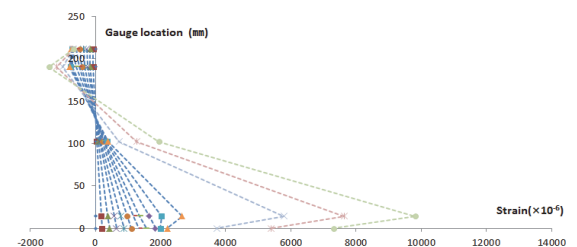
(b) B4A2.4F



(c) B4A2.4H



(d) B4A1.4F



(e) B4A1.4H

Fig. 10. Load-strain curve

이후 하중 330kN (하부플랜지 변형률 약 5500 μ)부위에서는 변형률 상승폭이 감소하기 시작하였으며 하중 CFRP 탈락시점인 340kN(플랜지 하부부위 변형률 약 5500 μ) 변형이 거의 발생하고 있지 않음을 관찰할 수 있다. B4C1.4H 실험체는 하중 260kN 부근에서 (하부플랜지 변형률 약 2200 μ) 부근에서 중립축이 상승하기 시작했으며 이후 플랜지 하부부위는 계속적인 변형을 보이며 최종적으로 CFRP 탈락하중 360kN (하부플랜지 변형률 약 10000 μ)부근까지 계속적으로 변형이 증가됨을 보이고 있다.

상기 하중-변형률 곡선을 통하여 FRP 보강 후 휨재의 인장 부분인 하부 플랜지의 변형률이 감소되었으며, 변형을 증가시키기 위해서는 더 큰 하중이 소요되는 현상을 관찰하였으며 이를 통해 철골보에서의 FRP의 휨보강효과를 검증하였다. 또한 전면보강 실험체에 비해 1/2 보강실험체는 플랜지 하부에서 더 큰 변형이 일어남을 알 수 있으며, 이를 통해 전면보강이 휨보강 효과에 더 효율적임을 알 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 사전내진평가를 바탕으로 지진하중에 취약할 것으로 예상되는 화력발전소 철골 보부재에 FRP 스트립을 밑면플랜지에 보강하고 휨성능을 평가하는 실험을 수행하였다. FRP스트립은 발전소 건물의 내진보강시 가장 적합할 것으로 사료되는 비전도체 재료인 아라미드 소재 타입을 비교하여 사용하였으며 FRP의 재료에 따른 휨성능을 비교하기 위해 CFRP스트립을 사용하였다. 실험을 통해 도출한 결과는 다음과 같다.

- (1) 정적가력시험을 통해 보강된 4개의 실험체 모두 플랜지 부위에서 FRP 소재의 종류에 관계없이 FRP 스트립이 급작스럽게 탈락(debonding)되는 취성적 파괴거동을 보이고 있다. 이중 플랜지 전면이 보강된 실험체는 중앙 부부위는 FRP 탈락(debonding)이, 단부부위는 파단(rupture)이 발생하며 파괴되었다. 반면 절반길이 보강된 실험체는 짧은 보강길이에 의해 FRP 스트립이 탈락되는 거동만 보이고 있다.
- (2) 하중-변위곡선에서 FRP 보강 실험체는 하중재하 초기 구간에서는 계속적으로 하중이 증가함을 보이고 있다. FRP 스트립이 탈락(debonding)한 이후 하중이 급작스럽게 떨어지고 이후로는 무보강 실험체와 비슷한

거동을 보이고 있다. 이중 AFRP 보강실험체의 탈락 시점이 CFRP 보강실험체의 탈락시점보다 지연되어 연성적인 거동을 보이고 있다.

- (3) 초기강성은 무보강 실험체 대비 최대 6.3% 증가하여 보강에 따른 초기강성 증가효과는 미비한 것으로 나타났다. 또한 초기강성은 FRP의 종류나 보강길이에 거의 영향을 받지 않음을 보이고 있다.
- (4) FRP의 보강개념에서는 증가된 활하중에 대해 탄성상태를 유지하는 것이 중요하다. 이에 본 연구에서는 각 실험체에 대해 항복내력을 분석하였다. 분석결과, AFRP 보강 실험체는 무보강 실험체에 비교하여 항복강도는 약 16%의 증가 효과가 있는 것으로 나타났으며, CFRP 보강 실험체는 무보강 실험체에 비교하여 항복강도는 약 16~20%의 증가 효과가 있는 것으로 나타났다. 또한 보강길이에 따라서는 6%정도의 내력변화가 나타나 보강길이가 휨내력에 영향을 미치는 것으로 나타났다.
- (5) 하중-변형률 곡선을 통해 FRP 보강 후 휨재의 인장 부분인 하부 플랜지의 변형률이 감소되었으며, 변형을 증가시키기 위해 더 큰 하중이 소요되는 현상을 관찰하였다. 이를 통해 철골보에서의 FRP의 휨보강 효과를 검증하였다. 또한 전면보강 실험체에 비해 1/2 보강실험체는 플랜지 하부에서 더 큰 변형이 일어남을 알 수 있으며, 이를 통해 전면보강이 휨보강 효과에 더 효율적임을 알 수 있었다.
- (6) 본 연구에서 FRP 보강을 통해 강도적인 측면에서는 보강효과를 확인하였으나, 박리파괴가 발생하여 연성적인 측면에서는 불리함을 관찰하였다. 따라서 기존 철근 콘크리트 보강에서 쓰이고 있는 박리파괴를 지연시킬 공법(Wrapping, 클램프 등)을 이용하여 박리파괴를 지연시켜 연성능력을 확보를 검증할 수 있는 추가적 연구가 진행되어야 할 것이다.

감사의 글

본 논문은 2012년 서울시립대학교 교내연구과제인 “FRP (Fiber Reinforced Plastic)를 이용한 철골구조물 휨성능 보강” (201204301047)에 대한 지원으로 이루어졌으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌(References)

- [1] 대한건축학회(2000) 건축물 하중기준 및 해설, 태림문화사, pp.61-72.
Architectural Institute of Korea (2000) *Standard Design Loads for Buildings*, Taerim-Moonhwasa, Korea, pp.61-72 (in Korean).
- [2] 대한건축학회(2009) 건축구조기준 (KBC 2009) 및 해설, 기문당.
Architectural Institute of Korea (2009) *Korea Building Code (KBC 2009) and Commentary*, Kimoon dang, Korea (in Korean).
- [3] Xiao, X.-L., and Zhang, L. (2007) State-of-the-Art Review on FRP Strengthened Steel Structures, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.29, No.8, pp.1808-1823.
- [4] Miller, T.C., Chajes, M.J., Mertz, D.R., and Hastings, J.N. (2001) Strengthening of a Steel Bridge Girder Using CFRP Plates, *Journal of Bridge Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.6, No.6, pp.514-522.
- [5] Colombi, P., and Poggi, C. (2006) An Experimental, Analytical and Numerical Study of the Static Behavior of Steel Beams Reinforced By Pultruded CFRP Strips, *Composites Part B: Engineering*, Elsevier, No.1, Vol.37, pp.64-73.
- [6] Schnerch, D., and Eizkallai, S. (2008) Flexural Strengthening of Steel Bridges With High Modulus CFRP Strips, *Journal of Bridge Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.13, No.2, pp.192-201.
- [7] Shaat, A., and Fami, A. (2008) Repair of Cracked Steel Girders Connected to Concrete Slabs Using Carbon-Fiber-Reinforced Polymer Sheets, *Journal of Composites for Construction*, American Society of Civil Engineers, Vol.12, No.6, pp.650-659.
- [8] 박재우, 최선규, 최성모, 송동엽, 유정환(2012) 탄소섬유시트(CFRP Sheets)로 보강된 세장한 각형강관기둥의 중심축하중실험, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제24권, 제6호, pp.735-742.
Park, J.W., Choi, S.K., Choi, S.M., Song, D.Y., and Yoo, J.H. (2012) Concentrated Axial Loading Test for Slender Square Hollow Section Retrofitted by Carbon Fiber Reinforced Polymer Sheets (CFRP Sheets), *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.24, No.6, pp.735-742 (in Korean).
- [9] 박재우, 최선규, 유정환(2013) 탄소섬유시트(CFRP Sheets)로 보강된 장주 각형강관기둥의 중심축하중거동, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제25권, 제3호, pp.299-305.
- Park, J.W., Choi, S.K., and Yoo, J.H. (2013) Behavior of Long Square Hollow Section Columns Retrofitted Using Carbon Fiber Reinforced Polymer Sheets (CFRP Sheets) Subjected to Concentrated Axial Loading, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.25, No.3, pp.299-305 (in Korean).
- [10] 박재우, 홍영균, 최성모(2010) 탄소섬유시트로 보강된 콘크리트충진 원형강관기둥의 연성능력, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제22권, 제2호, pp.185-195.
Park, J.W., Hong, Y.K., and Choi, S.M. (2010) Ductility Capacity for Concrete Filled Steel Circular Tubes Reinforced by Carbon Fiber Sheets (CFSS), *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.22, No.2, pp.185-195 (in Korean).
- [11] 류재용, 이원식, 오경진, 이상우, 최성모(2013) AFRP를 이용한 강재 보강에서 보강방법에 따른 부착성능, 한국복합신소재구조학회 2013년 학술발표대회 논문집, 한국복합신소재구조학회, pp.52-53.
Ryu, J.Y., Lee, W.S., Oh, G.J., Lee, S.W., and Choi, S.M. (2013) Bond Capacity of Steel Members Strengthened by Various Methods Using AFRP, *Proceedings of Annual Conference of Korean Society for Advanced Composite Structures*, KOSACS, pp.52-53 (in Korean).
- [12] 류재용, 문지영, 이원식, 오경진, 최성모(2013) FRP를 이용한 철골보의 휨 보강, 한국강구조학회 2013년 학술발표대회 논문집, 한국강구조학회, pp.127-128.
Ryu, J.Y., Moon, J.Y., Lee, W.S., Oh, G.J., and Choi, S.M. (2013) Flexural Strengthening of Steel Beams Using FRP, *Proceedings of Annual Conference of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, pp.127-128 (in Korean).
- [13] 류재용, 김도범, 최영환, 노광근, 최성모(2012) AFRP를 이용한 Steel Beam 휨보강 성능에 관한 실험, 한국복합신소재구조학회 2012년 학술발표대회 논문집, 한국복합신소재구조학회, pp.33-34.
Ryu, J.Y., Kim, D.B., Choi, Y.H., Noh, K.G., and Choi, S.M. (2012) Flexural Strengthening Capacity of Steel Beam Reinforced by AFRP, *Proceedings of Annual Conference of Korean Society for Advanced Composite Structures*, KOSACS, pp.33-34 (in Korean).
- [14] 홍건호(2008) 벨크로를 이용한 FRP 플레이트 보강공법의 시공공법 개선, 구조물진단학회지, 한국구조물진단유지관리학회, 제12권, 제6호, pp.225-232.
Hong, G.-H. (2008) Construction Method Improvement of the FRP-Plate Strengthening Method Using the Velcro, *Journal of Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, Vol.12, No.6, pp.225-232 (in Korean).

- rean).
- [15] 티섹구조엔지니어링 기술사 사무소(2013) 복합소재와 제진장치를 이용한 발전소 철골구조물의 최적내진보강에 관한 기술개발, 지식경제부 전력산업융합원천 기술개발사업 연구보고서, 지식경제부.
Tsec Structural Engineering & Construction (2013) *Development of Seismic Retrofit for Steel Structures in Power Plant Using Fiber Reinforced Plastic and Vibration Control Devices*, Report on Power Generation & Electricity Delivery Core Technology Program from MKE, Ministry of Knowledge Economy, Korea (in Korean).
- [16] 한국구조물진단유지관리학회(2006) 한국구조물진단공학, 구미서관, pp.383 -390.
Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection (2006) *Korea Structural Maintenance and Inspection Engineering*, Goomiseogwan, Korea (in Korean).
- [17] 국가기술표준원(2007) 금속재료 인장시험편(KS B 0801: 2007).
Korean Agency for Technology and Standards (2007) *Test Pieces for Tensile Test for Metallic Materials* (KS B 0801: 2007), Korea (in Korean).
- [18] American Society for Testing and Materials (2008) *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composites* (ASTM D3039/D3039M-08), USA.
- [19] Schnerch, D., Dawood, M., Rizkalla, S., and Sumner, E. (2007) Proposed Design Guidelines for Strengthening of Steel Bridges with FRP Materials, *Construction and Building Materials*, Elsevier, Vol.21, No.5, pp.1001-1010.

요 약 : 본 연구에서는 콘크리트 섬유보강플라스틱(FRP)로 보강된 철골보의 정적 휨하중상태에서 휨거동에 관한 실험결과를 제시하였다. 아라미드섬유 스트립과 탄소섬유 스트립으로 보강된 4개의 실험체를 제작하였으며, 1개의 기준실험체를 제작하였다. 이 중 두 실험체는 부분보강방식으로 보강되었다. H빔은 두 종류의 파괴모드를 가지고 있는데, (1) 부분보강 실험체에서는 FRP 스트립이 탈락(debonding)되는 파괴모드를 보이고 있으며, 전면보강 실험체에서는 FRP 스트립이 파단(rupture)되는 거동을 보이고 있다. 실험 결과 16%의 휨내력 상승효과를 관찰하였다.

핵심용어 : FRP, CFRP, AFRP, 탄소섬유보강플라스틱, 아라미드보강섬유플라스틱, 스트립, 철골보, 보강
