분사식 FRP공법을 이용한 구조물 보강 성능평가

Performance Evaluation of Structure Strengthening Using Sprayed FRP Technique

장 준 호* 장 광 석**

Chang, Chun-Ho Jang, Kwang-Seok

Abstract

The sprayed FRP strengthening technique is combining the Glass fiber and Polyester resin in open air and spraying randomly at concrete's surface with high-speed compressed air. Then it strengthens the structures with a new technique evaluated the structural performance. We applied it to concrete beam and tested for flexural strength, depended on Korea Standard(KS F 2408). Then based on the result of flexural strength, the properties were proposed that applying to structures. Based on the experiment, we have evaluated structural performance by the experiment. 1/5 scale prestressed concrete I-beam were made by Korean Highway's typical drawing in 1993. With these test results, 49.8% increased in flexural strength, improvement of the behavior of serviceability state, and strengthening was surely effective for controlling deflection and crack of structure. Consequently, it can be summarized that Sprayed FRP technique has prospect to improve the performance of structure.

요 지

분사식 FRP 보강 공법은 섬유(Fiber)와 수지(Resin)를 외부에서 혼합하여 요철이 많은 콘크리트 표면에 고속의 압축 공기로 랜덤하게 분사하여 기존 콘크리트 구조물을 보강하는 공법이다. 새로운 분사식 FRP 공법을 이용하여 구조물의 보강 성능을 평가하였다. 콘크리트 보 실험체에 대한 휨강도 실험을 수행하여 분사식 FRP의 최적물성치를 찾고 이 결과를 이용하여 PSC I형 거더 표준단면을 1/5로 축소한 구조물에 적용하여 실험을 하였다. 손상된 프리스트레스트 콘크리트에 적용한 결과 무보강보에 비하여 휨강도가 49.8% 증가하였고 사용상태의 거동이 개선되었으며, 보강에 의해 처짐 및 균열 제어에 효과적이었다. 결론적으로 분사식 FRP 공법의 보강 적용은 구조물의 성능 향상에 효과적이라고 할 수 있다.

Keywords : Sprayed FRP, Glass fiber, Polyester resin, Prestressed concrete

핵심 용어 : 분사식 FRP, 유리섬유, 폴리에스터 수지, 프리스트레스트 콘크리트

* 정회원, 계명대학교 토목공학과 조교수

** 학생회원, 계명대학교 토목공학과 박사과정

E-mail : chunho@kmu.ac.kr 053-580-5299

• 본 논문에 대한 토의를 2009년 8월 31일까지 학회로 보내주시면 2009년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

국내의 20년 이상 경과된 교량 중 약 74.3% 정도가 2등급 이하로 설계되었으며 1974이전에서 1984년에 건설된 교량 중 약 95.8%가 차량 통과하중이 DB18 또는 DB13.5로 설계되었는데[1] 최근 교통량의 증가 및 차량의 성능향상으로 인해 교량의 노후화가 한층 가속화되고 있으며 노후로 인해 내하력이 부족하여 보수·보강을 필요로 하는 교량이 많이 있다. 현재 고속도로상에 시공되어 유지 관리되는 교량 중 PSC I(Prestressed Concrete I-Beam) 형식의 교량은 고속도로 교량형식 중 가장 많은 비중을 차지하고 있는 형식으로 가장 많은 비중인 약 15.7%[1]를 차지하고 있다. 따라서 이들 PSC 교량의 유지관리는 고속국도상의 교량 관리에 있어서 중요한 부분을 차지하고 있다고 할 수 있다.

기존 거더 교량의 내하력이 저하되어 안전성을 확보하거나 내구성을 증진시키기 위하여 적용되는 방법[2]으로는 강판접착공법과 단면증설공법 등이 있으나, 보강으로 인한 자중 증가, 시공조건 및 정밀 시공 등이 요구되는 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해 최근 내구성이 우수한 탄소섬유, 유리섬유, 아라미드섬유 등의 경량의 복합 재료를 이용한 FRP Sheet 보강법 등이 연구되었다[5]. 하지만 재료 자체가 갖는 이방성 문제, 시공 전의 표면처리 작업 및 접합부 적용 시의 시공성 문제 등 현재 새로운 보강 기술의 개발이 필요한 실정이다.

이 연구에서는 유리섬유(Glass Fiber)와 폴리에스터 수지(Polyester Resin)를 외부에서 혼합하여 요철이 많은 콘크리트 표면에 고속의 압축 공기로 랜덤하게 분사하여 기존 콘크리트 구조물을 보강하는 새로운 공법, 즉 분사식 FRP(Sprayed FRP, SFRP) 공법을 적용하여 콘크리트 Beam 실험체에 대한 선행실험을 수행하여 분사식 FRP의 최적물성치를 제안하고 제안된 물성치를 활용하여 1993년 H공사의 PSC I형 거더교 표준단면(30m)[3]을 1/5로 축소한 모형 구조물 실험에 적용, 분사식 FRP공법의 보강효과를 검증하였다.

2. 콘크리트 Beam의 SFRP 보강 실험 및 결과

2.1 콘크리트 Beam의 SFRP 보강 실험계획

이 실험에서는 현재 연구진행 단계인 분사식 FRP 공법의 구조물 적용을 위한 실제 구조물 보강의 최적환경을 찾기 위하여 기존 연구의[6] 섬유두께, 섬유·수지 혼입비, FRP 보강두께를 적용하여 경화제 혼입비와 경화시간을 변수로 설정하여 실험을 수행하였다. 이 실험체에 사용된 콘크리트 Beam 실험체 설계강도는 PSC Beam 설계기준강도에 만족하기 위해 향후 PSC BEAM 실험에 적용될 설계강도인 40MPa을 사용하였다. 이 실험체 제작에 사용한 시멘트는 H사의 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 혼화제는 나프탈렌계 고성능감수제를 사용하였다. Table 1과 같이 굵은 골재최대치수는 25mm를 사용하였으며, 슬럼프는 150mm를 기준으로 하고 공기량의 기준은 4.5±1.5%로 하였다. 시험체의 단

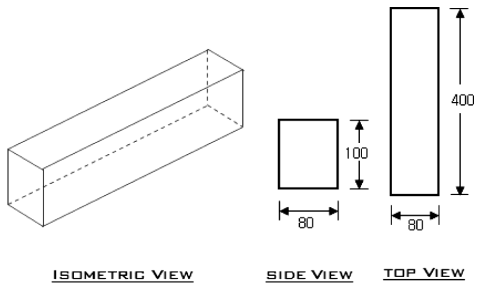


Fig. 1 Dimensions of concrete beam specimen

Table 1 Concrete mix design of concrete beam

Design strength (MPa)	Maximum size of coarse aggregate (mm)	Air content (%)	Water/Cement (%)	Sand aggregate ratio (%)	High-Range water reducing agent (kg)	Slump (mm)
40	25	4.5 ± 1.5	44.0	36.4	1.599	150

면 제원은 Fig. 1과 같이 길이 400mm이며, 단면의 크기(B×D)가 80mm×100mm인 장방형 단면의 콘크리트 Beam이다.

이 실험에 사용된 실험체는 CBN0~CB37이라 정의하는데 여기서 CB는 콘크리트 Beam을 나타내며, NO는 무보강 시험체, 3은 보강재료에 함유된 경화제량(%), 7은 보강재료의 경화일(day)을 나타낸다.

이 실험에 사용된 유리섬유에 대한 TEX, 연소율, 인장강도, 휨강도, 인장탄성률, 휨탄성률 등의 물성치를 Table 2에 나타내었다. 수지는 분사식 FRP 장비에 활용할 수 있는 폴리에스터수지를 사용하였다.

콘크리트 Beam의 휨강도 실험을 수행하기 위하여 KS F 2408 콘크리트의 휨강도 시험 방법(4)에 준하여 3등분 하중재하시험(4점 재하)을 하였으며, 콘크리트 Beam의 재령은 4주(28日)로 하였다. Table 3은 이 실험에 적용될 재료시험 일람표이다.

이 실험에서는 수지의 경화를 촉진시키는 경화제(Hardener)에 따른 3가지(1%, 2%, 3%)변수와, 양생시간(24hr, 3day, 7day)에 따른 강도 변화를 알아보고자, 무보강 실험체를 포함한 총 10개의 실험체를 제작하였다. Table 3에서 CASE②의 유리단섬유와 폴리에스터 수지와 같이 Spray-Cutter Gun의 성능 및 시공성을 고려하여 강도가 높으면서 섬유의 엉킴이 가장 적다고 판단되는 최적의 섬유길이인 2.8cm 및 섬유와 수지의 배합비율 2 : 1로 정하였으며, FRP Sheet 1겹의 강도와 상응한 보강두께 4.4mm를 변수로 고려하였다.

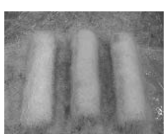
SFRP의 적용에 사용된 실험 장비로는 G사의 스프레이 장비를 사용하였으며, SFRP의 적용과정은 Photo 1과 같이 (a)프라이머 도포, (b)FRP 분사, (c)함침, (d)경화 및 양생 순으로 적용하였다.

적용과정은 먼저 콘크리트 Beam에 SFRP를 살포하기 전 표면처리를 하였으며, 그 후 스프레이 장비를 사용하여 잘게 잘려진 유리섬유와 폴리에스터 수지 및 경화제를 혼합하여 beam의 밑면을 보강하였다. 실험에 사용된 보강 재료에는 멀티앤드 로빙 타입의 유리섬유와 폴리에스터 수지를 혼합하여 사용하였다. 특히 보강재의 초기강도 및 연성능력에 영향을 미치는 경화제의 함유율에 따른 강도시험을 통

Table 2 Mechanical properties of Glass Fiber

Properties	Dry Range	Wet Range
TEX (g/km)	3460	3460
Combustion rate (%)	1.15 ± 0.1	1.15 ± 0.1
Tensile strength (N/mm^2)	77 – 94.5	70 – 840
Flexural strength (N/mm^2)	168 – 196	2240 – 2750
Tensile modulus (N/mm^2)	7700~9100×10³	7700~9100×10³
Flexural modulus (N/mm^2)	7700~9100×10³	7700~9100×10³

(a) Application of Primer (b) Application of Sprayed FRP



(c) Sprayed FRP (d) Incorporation (e) Curing

Photo 1 Application of sprayed FRP to concrete beam

Table 3 Material properties of sprayed FRP thickness for design

CASE	No.	Materials	$\varepsilon_t(\%)$	$\sigma_t(MPa)$	thickness(mm)
①	G2.8 : E = 2 : 1	Chopped glass fiber + Epoxy	0.833	1170.5	4.2
②	G2.8 : PE = 2 : 1	Chopped glass fiber + Polyester	1.036	1193.05	4.4
③	C2.8 : E = 2 : 1	Chopped carbon fiber + Epoxy	0.488	1823.85	3.0
④	C2.8 : E = 2 : 1	Chopped carbon fiber + Polyester	0.657	1668.25	4.0

Table 4 Summary of flexural concrete beam tests plan

No	Specimen	Material	Fiber loading	Spray Type	Fiber length	Thickness	Hardener	hardening time
①	CBN0	–	–	–	–	–	–	–
②	CB11	Glass Fiber + Polyester + PE primer	30%	Con'c Fiber	2.8cm	4.4mm	2%	24 Hr
③	CB13							3 Day
④	CB17							7 Day
⑤	CB21						3%	24 Hr
⑥	CB23							3 Day
⑦	CB27							7 Day
⑧	CB31						4%	24 Hr
⑨	CB33							3 Day
⑩	CB37							7 Day

하여 최적의 경화제 혼합비를 알고자 하였으며, 그 결과값을 검토하여 PSC I형 축소 구조물 보강에 대한 최적배합비를 적용하고자 하였다. 이 실험에 사용된 측정 장치는 200ton S사의 UTM을 사용하여 가력 하였으며, LDVT를 이용하여 중앙점의 변위를 측정하였다. Table 4는 콘크리트 휨 강도 시험을 수행하기 위한 변수를 나타내었다. Table 4에서와 같이 무보강 시험체의 강도 실험을 통하여 경화제 1%~3%, 경화시간 1일~7일의 시험변수를 각각 두어 무보강 콘크리트 Beam과 보강된 콘크리트 Beam의 성능을 비교·분석하고자 한다.

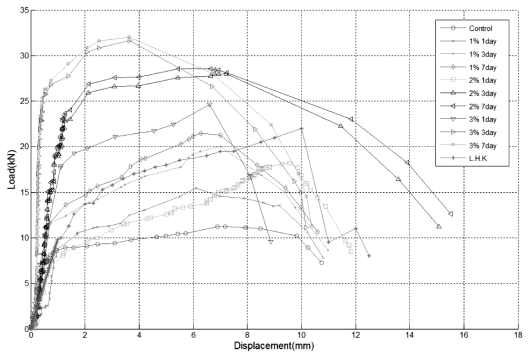


Fig. 2 Comparison of load vs. midspan displacement for all RC beams

2.2 콘크리트 Beam의 SFRP 보강 실험결과

콘크리트 Beam에 SFRP를 적용하여 보강한 결과, 파괴양상은 전반적으로 중앙부에서 시작된 분사식 FRP 보강재의 파단 및 박리가 일어나면서 최종 파단 되었으며, 콘크리트 Beam이 휨파괴가 일어난 후 보강된 FRP 슬립현상에 의한 최종모드로 파괴되었다.

Table 4에 나타난 변수를 고려한 실험결과를 하중-변위 곡선으로써 Fig. 2에 도시하였다. 기존 연구(6)의 실험변수 이외에 경화제 함유량 및 경화시간의 변수를 고려하여 휨 시험을 수행하였다. 두 변수를 고려함으로써 보수·보강시 경화제 사용량에 따른 강도증진효과와 공법적용 후 강도발현기간을 보다 정확히 파악할 수 있기 때문이다. Fig. 2의 하중-변위 곡선그래프를 살펴보면 FRP로 보강된 실험체는 예상한 바와 같이 강도가 증진된 것을 알 수 있으며, 경화제가 1%, 3% 사용한 경우보다 2% 혼합한 경우가 연성이 가장 증대된 것으로 나타났다. 이것은 폴리에스터 수지의 경화를 촉진함에 있어서 경화제량이 과도할 경우 급격하게 굳어짐에 따라 폴리에스터 수지의 강성이 증가하나 화학적 열이 발생되어 재료의 물성이 저하되기 때문이다.

FRP를 살포하지 않은 무보강보는 13.89kN에서 파괴되었으며, 분사식 FRP가 보강된 실험체 중 3일이 경과된 시험체는 24시간 경과된 시험체에 비해 강도가 25.9% 증진되었다. 또한 7일이 경과된 시험체는 3일이 경과된 시험체에 비해 강도가 7.3% 증진되었다. 또한 보강재의 완전경화(평균 7일)와 3일 경화기간과 비교하였을 때 3일 경화는 완전경화

Table 5 Concrete mix design of prestressed concrete beam

Section	Design strength (MPa)	Maximum size of coarse aggregate(mm)	Air content (%)	Water/Cement (%)	Sand aggregate ratio(%)	AE plasticizer(kg)
SLAB	27	25	4.5 ± 1.5	45.5	45	1.161
PSC BEAM	40	25	4.5 ± 1.5	44.0	36.4	High-Range plasticizer(kg)
						1.599

에 약 96.5%에 달하는 강도를 가져 3일 경화시에도 충분한 강도를 가지는 것으로 판단된다. FRP로 보강된 휨 시험체들은 무보강 시험체에 비하여 보강 후 평균적으로 최대내하력이 약 1.5~2배 이상 증가하였다. SFRP적용 콘크리트 Beam 실험 결과 기 연구된 결과(6)와 비교하여 경화제량 및 경화일에 따라 복합재료의 강도에 중요한 영향을 주고 있다. 또한 기존의 보강효과보다 약 19% 우수한 보강효과(휨강도)를 나타내는 SFRP의 최적 배합비를 파악하였다. 차후 이 자료를 근거로 실무자에게 현장 적용 시 구체적인 공법메뉴얼 작성에 많은 도움을 줄 수 있으리라 판단된다. 이 시험결과를 이용하여 손상을 입은 실제 구조적 결함이 있는 구조물에 보강하였을 경우 보강효과의 가능성을 토대로 H사(1993년) 표준도(3)에 제시되어 있는 PSC I형 Beam 축소모형실험을 하였다.

3. PSC I형 Beam의 SFRP 보강 실험 및 결과

3.1 PSC I형 Beam의 SFRP 보강 실험계획

PSC I형 Beam 하중재하 실험 목적은 손상이 없는 무보강 부재에 균열하중(사용성 상태)을 재하하여 주 균열을 발생시킨 후 하중을 제거한 후 SFRP로 보강하고 파괴시까지 하중을 재하하여 PSC I형 Beam의 보강성능 향상을 평가하고자 하였다. 실험부재는 최근 보수·보강 문제가 되기 시작하는 약 15년 전 교량을 대상으로 하기 위하여 H공사(1993)의 DB24로 설계된 PSC I-Beam의 표준도를 근거로 하여 1/5로 축소시켜 설계하였다. 축소설계에 있어 길이의 비로 상사시켰기 때문에 길이에 따른 상대적인 복부 폭이 작아 시방서 규정을 만족시키기 위해서 복부 폭을 제작 가능한 최대 치수로 설계하였다. 강선의 긴장력은 도로교 설계기준의 콘크리트 허용 인장응력을 만족시키는 조건으로 긴장하였다. PSC I형 Beam의 압축강도는 설계기준에 의거 $f_{ck} = 40MPa$로, 슬래브의 압축강도는 $f_{ck} = 27MPa$로 각각 설계하였다. PSC I형 Beam의 강선은 SWPD 7B의 7연선 직경 12.7mm를 사용하였으며, 철근은 $f_y = 420MPa$인 H10 철근을 사용하였다. PSC I형 BEAM 실험체에 사용된 배합설계표는 Table 5에 나타나 있다. PSC I형 Beam 실험체의 부재 총길이는 양쪽 내민길이 각각 0.25m를 포함한 지간 6m의 단순보이다.

3.2 PSC I형 Beam의 제작과정 및 측정방법

PSC I형 Beam의 제작은 철근조립, 스트레인게이지 부착, 콘크리트 타설, 쉬스관 배치 및 강선 긴장 순으로 제작하였으며 세부 제작과정으로는 Slab 철근배치 및 조립, PSC beam 철근배치 및 조립, Strain Gauge 부착, Slab 콘크리트 타설 및 양생, 쉬스관 배치, PSC beam 거푸집 조립, PSC beam 콘크리트 타설 및 양생, PSC beam 거푸집 해체, 강선 배치, 정착구 배치, 강선 긴장, 제작완료, 운반 및 시험대 거치, 화이트메쉬 작업 순으로 하였다. PSC I형 Beam 실험체의 거동을 측정하기 위하여 부재에 사용되는 철근에 Strain Gauge를 부착 하였다. Strain Gauge를 부착하기 전 이형의 철근표면을 매끄럽게 하여 변형률 측정에 오차가 나지 않게 하였으며, 부착 위치는 Fig. 3과 같이 부재 중앙점 및 1/4지점, 3/4지점의 상·하부 주철근, 슬래브철근 스트럽에 부착하여 각 지점의 압축, 인장, 전단

측의 변형률을 측정하였다. 부재의 중앙점 및 1/3지점의 변위를 측정하기 위하여 LVDT를 각 점의 하단에 설치하였다. 또한 보강 전·후의 휨균열 억제효과를 분석하기 위해 부재중앙점 하단부에 Crack Gauge를 설치하였다. Crack Gauge 역시 부착효과를 위해 표면을 매끄럽게 처리하였으며 Crack Gauge를 통하여 하중증가에 따른 부재의 휨-균열폭을 측정하였다. 부재의 하중재하방법은 Fig. 3과 같이 2000kN 액튜에이터를 이용하여 2점 가력하였으며, 순지간 길이 6m의 3등분점에 각각 롤러를 설치하였다.

3.3 PSC I형 Beam의 SFRP 실험방법

무보강 부재(PSBN)의 하중재하실험과 균열하중을 미리 주어 손상된 beam에 대한 SFRP 적용 부재(PSBF)의 비교를 통해 보강성능을 평가하였다. 보강 부재는 SFRP를 보강하기 전 beam의 하단부

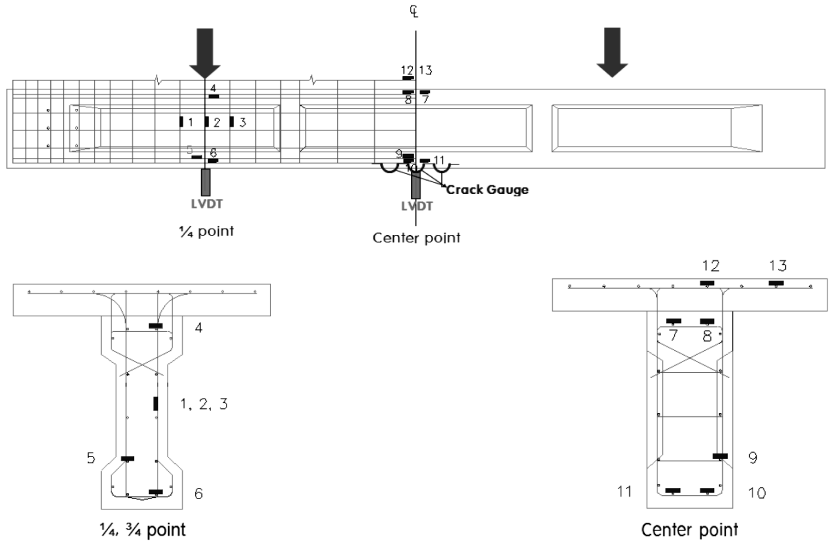


Fig. 3 Shematic of flexural test setup

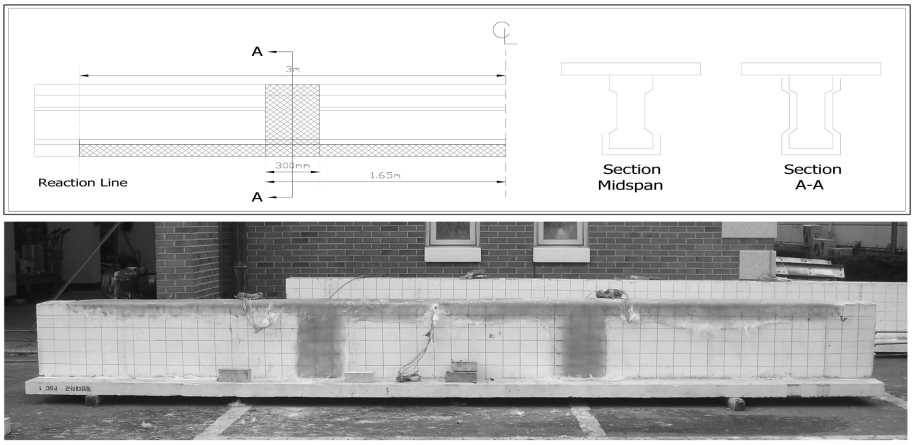


Fig. 4 Schematic of sprayed FRP retrofit configuration

분 부착에 문제가 생기지 않도록 매끄럽게 표면처리를 하였다. 보강형태는 Fig. 4와 같이 부재의 하부 플랜지는 전 길이에 대해 보강을 수행하였으며, 길이의 1/3, 2/3지점은 전단보강형태로 보강하였다. 이때 SFRP 보강 두께는 콘크리트 Beam 실험에서 산정한 보강 두께 적용비를 이용하여 8.8mm로 보강하였다. 실험과정은 (a) 무보강[PSBN]beam 실험, (b) 데이터 수집, (c) Crack 체크, (d) PSBF[SFRP 보강]beam 사용하중 재하, (e) SFRP 보강, (f) SFRP 보강 PSC I형 Beam의 하중재하 실험 순으로 하였다.

3.4 PSC I형 Beam의 SFRP 실험결과

실험체는 모두 균열하중 발생 이후 순수 휨 구간의 전 영역에서 걸쳐서 균열이 고루 발달하고 하중증가에 대해 큰 변형의 증가를 보이는 전형적인 연성파괴의 양상이 나타났다. 무보강부재(PSBN)의 경우 긴장재가 항복이후 콘크리트가 압축파괴를 일으키며 파괴가 되었다. 분사식 FRP로 보강된 부재(PSBF)의 경우 Fig. 5와 같이 하중이 증가함에 따라 휨균열이 발생하면서 최대내력이후 전단 보강된 SFRP가 계면박리발생 후 전단균열이 발생하기 시작하였다. 항복은 인장철근·긴장재 순서로 나타났으며, 이때 휨 균열을 보이면서 최대내력에 도달하게 되고 최대내력이후 연성적인 거동이 나타났다.

Fig. 6은 중앙점에서의 하중-변위 곡선그래프를 나타낸 것이며 Fig. 7과 Fig. 8은 부재 길이의 1/3 지점 및 2/3 지점에서의 하중-변위 곡선그래프를 나타내었다. 무보강 부재에 비하여 SFRP를 적용하여 보강한 부재는 초기강성이 증가하여 사용상태의 거동이 개선되었으며, 무보강 부재는 하중이 146kN 재하되었을 때부터 처짐이 급격하게 증가하기 시작하였지만 SFRP 적용 부재는 처짐의 증가폭과 진전속도가 무보강 부재에 비해 작음을 알 수 있다. 이는 SFRP 보강을 통하여 초기하중에 대한 처짐의 증가가 작다는 것을 나타내며 SFRP 보강재의 박리가 일어나기 전의 사용하중까지는 변형이 무보강 부재에 비해 감소한 것으로 나타났다.

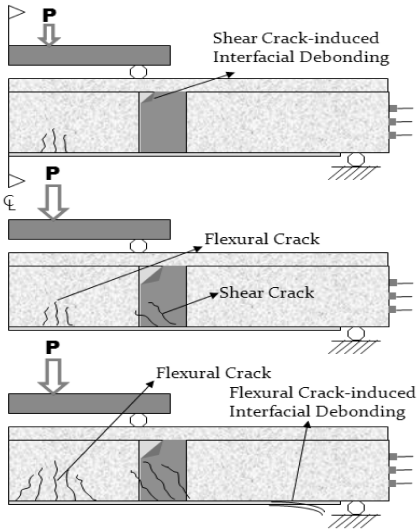


Fig. 5 Failure mode of PSC I-beam

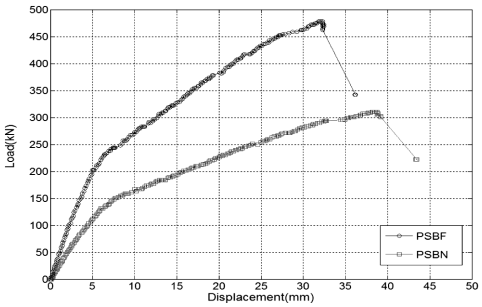


Fig. 6 Load-Displcement curves(midpoint)

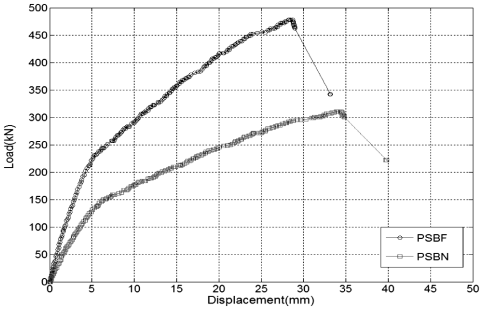


Fig. 7 Load-Displcement curves(1/3 point)

인장측 하중-변형 관계는 Fig. 9와 같이 무보강 부재의 인장측 철근 항복 변형률은 약 127kN에서 0.000185로 변형이 급격히 증가하여 항복하였음을

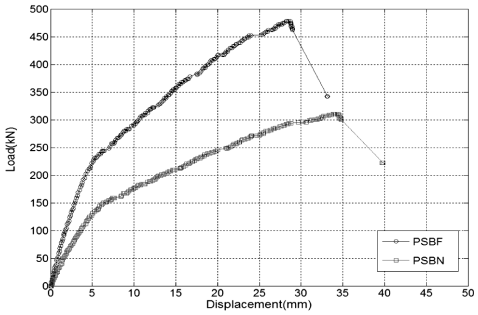


Fig. 8 Load-Displcement curves(2/3 point)

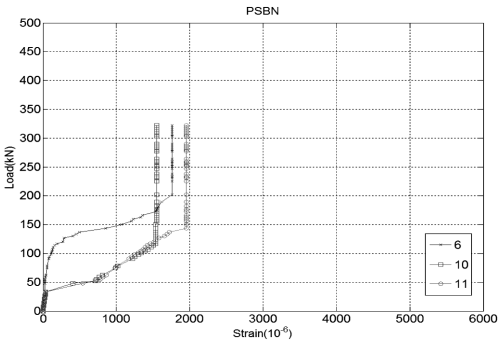


Fig. 9 Load-strain curves of tension reinforcement(PSBN)

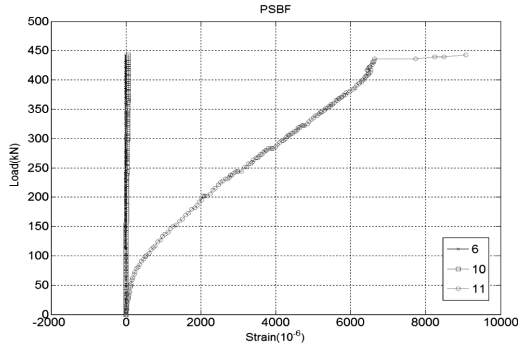


Fig. 10 Load-strain curves of tension reinforcement(PSBF)

볼 수 있다. 하지만 SFRP 적용 보강부재는 413kN까지 탄성거동을 보이고 436kN에서 항복하였다.

Fig. 11과 Fig. 12는 압축 철근의 하중에 따른 변형 관계를 나타낸 것이다. 무보강 부재의 압축 철근의 변형률 곡선에서는 316kN에서 철근의 항복변형이 중립축에 도달하기 전에 파괴되었다. 하지만 SFRP 적용 보강 부재는 파괴에 도달하기까지 압축

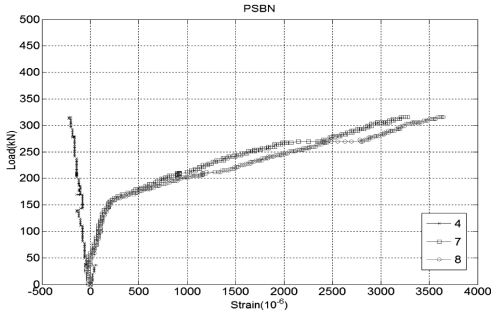


Fig. 11 Load-strain curves of compressive reinforcement (PSBN)

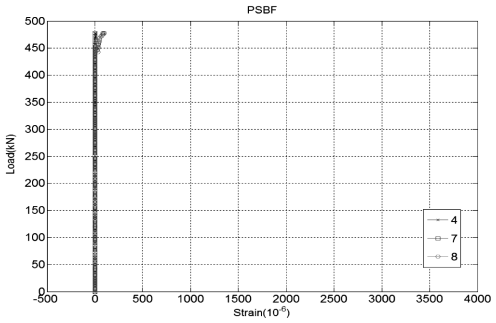


Fig. 12 Load-strain curves of compressive reinforcement (PSBF)

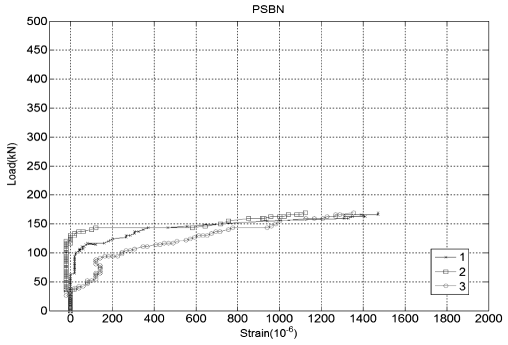


Fig. 13 Load-strain curves of shear reinforcement(PSBN)

철근의 변형이 거의 발생하지 않았다.

Fig. 13과 Fig. 14는 전단 철근의 하중에 따른 변형 관계를 나타낸 것이다. 무보강 부재 전단철근의 변형은 사용하중(167kN)에 가까워지면서 급격하게 증가하는데, 이것은 사용하중에 따른 부재의 전단영역에서 경사균열이 발생하였기 때문이다. 전

단철근의 항복-변형률 곡선은 Fig. 13과 같이 무보강 부재는 137kN에서 급격하게 변형이 발생되지만, SFRP 적용 보강 부재는 322kN에서 변형이 발생하기 시작하였다.

전단철근의 경우 무보강 부재는 167kN에서 변형률이 0.001472로 변형이 급격하게 발생하였으나 SFRP 적용 보강 부재의 경우 319kN에서 변형률이 0.001002로 변형이 발생하기 시작하였다. Fig. 14와 같이 SFRP 적용 보강 부재의 1, 2번 전단철근은 파괴시까지 변형이 나타나지 않았으며, 중앙점에 가까운 전단철근은 경사균열에 의한 변형으로 약 319kN에서부터 시작되었음을 알 수 있다. 하중-변형률 곡선그래프를 통하여 SFRP 적용 보강은 무보강 실험체에 비해 균열 발생 후 휨 및 전단 거동에 있어서 응력발생제어에 효과가 나타났다.

무보강 부재의 인장측 철근을 보면 파괴와 함께 하중 310kN에서 항복을 하였고, 압축철근은 163kN에서 급격하게 변형이 증가하였으며, 전단철근은 137 kN에서 급격하게 변형이 증가하였다. SFRP 적용 보강 부재의 인장측 철근을 보면 변형의 증가가 상대적으로 감소되었고 변형이 거의 나타나지 않아 beam의 휨 성능이 개선되었음을 알 수 있다. 무보강 부재의 압축측 철근을 보면 약 160kN에서 변형이 급격하게 나타났으나 SFRP 적용 보강 부재는 파괴시까지 변형이 거의 발생되지 않았다.

SFRP 적용 보강으로 인한 실험체의 균열억제 효과를 분석하기 위해 실험체 중앙점 하단부에 Crack Gauge를 설치하여 균열폭을 측정하였다.

Fig. 15는 하중에 따른 휨-균열폭 관계를 나타낸 것으로 무보강 부재는 262kN에서 급격하게 빠른 속도로 균열폭이 증가하기 시작하였으나 SFRP 적용 보강 부재의 경우 균열발생이 천천히 증가하였으며 최종 균열폭은 약 40% 감소되었다. Fig. 16과

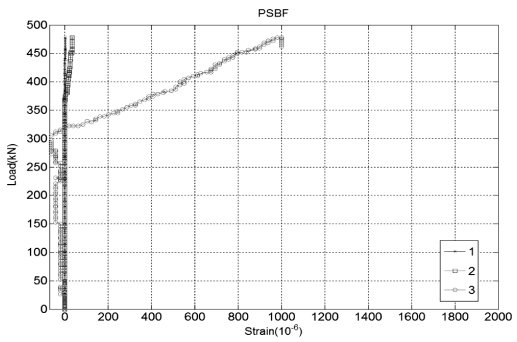


Fig. 14 Load-strain curves of shear reinforcement(PSBF)

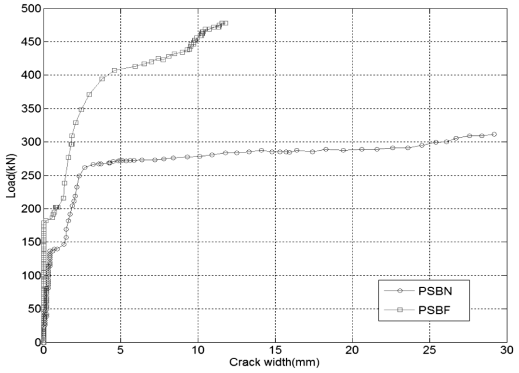


Fig. 15 Load-crack width curves

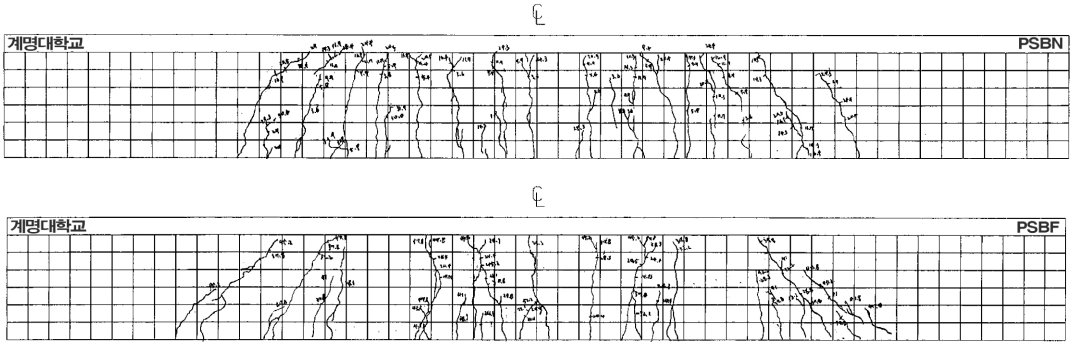


Fig. 16 Cracked patterns at the end of test

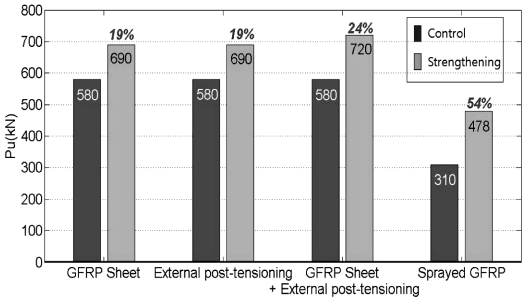


Fig. 17 Comparison of Sprayed FRP and earlier studies

같이 균열양상은 모든 부재에서 휨 구간 균열이 거의 일정한 간격으로 발생하였으며 SFRP 적용 보강을 통하여 균열이 억제되었음을 알 수 있다. SFRP 적용 보강은 구조물의 균열제어에도 효과적인 것을 알 수 있다.

3.5 기존 연구 결과와 실험 결과와의 비교

GFRP Sheet 보강재 및 외부 강선을 이용한 연구와 분사식 FRP 공법의 보강 효과를 비교하기 위해 기존연구(5)와 실험결과를 비교하였다. Fig. 17에는 분사식 FRP 적용 연구와 상기 기존 연구의 실험결과를 비교하여 나타내었다.

최대내력 측면에서 이 연구의 유리단섬유를 이용한 분사식 FRP 공법의 보강효과가 기존 FRP Sheet 및 외부강선보강보다 우수한 효과를 나타내고 있다. 이는 각 실험체의 설계 및 재료가 상이하기 때문이며 보강적용방법에 따른 보강재량이 다르기 때문이다. 유리섬유 Sheet와 외부강선으로 모두 보강한 경우와 비교하였을 때 분사식 FRP 적용 실험체의 경우 그 이상의 보강 효과가 나타났다.

4. 결 론

이 연구에서는 구조물을 보강하는 새로운 공법인 분사식 FRP공법을 적용하여 PSC I형 Beam의 보강성능 및 거동특성을 분석하기 위해 콘크리트 빔 실험에 보강 적용하여 최적배합비를 찾고, 이를 PSC I형 Beam 실험체에 적용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 분사식 FRP의 콘크리트 Beam 적용 실험 결과, 섬유길이 28mm와 유리섬유 · 폴리에스터 수지 배합비 1:2 그리고 보강두께 4.4mm의 물성치를 적용하여 최적배합비는 경화제량 2%, 경화시간 7일 이상으로 나타났다.
2) 경화시간에 따른 재료 시험 결과, 완전 경화 7일 강도에 따른 기준으로 3일 경화된 실험체는 약 96%에 가까운 강도를 발현하였다.
3) 균열하중을 재하한 PSC I형 Beam 실험체에 분사식 FRP를 적용하여 실험한 결과 무보강 실험체에 비하여 휨강도가 49.8% 증가하였으며, 초기강성이 증가하여 사용상태의 거동이 개선되었다.
4) 분사식 FRP의 적용으로 균열 발생 후의 보강부재의 휨 및 전단거동에 있어서 응력발생제어에 큰 효과가 나타났으며, 균열 발생 억제에도 효과적이었다.
5) 향후 실제 구조물에 보강하였을 경우 보강성능 효과의 가능성이 기대되며, 가속도 센서를 이용한 Natural Frequency의 변화를 측정하고 반복실험을 통해 보강 전·후의 고유진동수를 추정하여 정확한 모드형상을 통하여 이 연구와 비교 · 분석을 할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 해안구조물에 대한 친환경 신소재의 활용기술 연구 및 도시철도표준화2단계연구개발사업의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 한국 건설기술 연구원, 건설교통부, 2006년 교량 및 터널현황, 2006. 4.
2. 한국 건설기술 연구원, 건설교통부, 교량구조물의 보수, 보강 공법 편람, 1995. 5.
3. 한국도로공사, 고속도로건설공사 표준도, 1993.
4. 한국표준협회, “콘크리트의 휨강도 시험 방법(KS F 2408)”, 2003.

5. 김현호, 송재필, 김기봉, 정영수, “PSC부재의 성능개선 기법에 관한 정적 실험 연구”, 한국구조물진단학회지, 제7권 제1호, 2003. 1., pp. 157-163.
6. Lee, H. K. and Hausmann, L. R., “Structural Repair and Strengthening of Damaged RC Beams with Sprayed FRP”, Journal of Composite Structures, Vol.63, 2004, pp. 201-209.
7. Andrew J. Boyd, Ningfeng Liang, Perry S. Green, Kimberly Lammert, “Sprayed FRP Repair of Simulated Impact in Prestressed Concrete Girders”, Construction and Building Materials, Vol.61, 2006, pp. 10-16.
8. Banthia N, Yan C, Nandakumar N, “Sprayed Fiber Reinforced Plastics (FRPs) for Repair of Concrete Structures”, In: 2nd International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, 1996, pp. 537-545.
9. Boyd AJ, “Rehabilitation of Reinforced Concrete Beams with Sprayed Glass Fber Reinforced Polymers”, PhD Thesis, Department of Civil Engineering, University of British Columbia, Vancouver, Canada, 2000.
10. J. G Teng, J. F Chen, S. T. Smith, L. Lam, “FRP-Strengthened RC Structures”, West Sussex: Chichester, 2002.

(접수일자 : 2008년 12월 26일)
(수정일자 : 2009년 4월 15일)
(심사완료일자 : 2009년 5월 20일)