특집기획

CFRP(탄소섬유복합재) 긴장재 활용 기술 소개

글 정우태 / 한국건설기술연구원 구조연구본부 연구위원
전화 031-910-0580 **E-mail** woody@kict.re.kr

01 서론

기후변화에 따른 지구 온난화는 전 세계적 문제로, 이를 극복하기 위해 각국에서는 온실가스 배출에 대한 지속적인 관리와 책임을 이행하려는 노력을 하고 있다. 온실가스의 90% 이상은 이산화탄소이며 우리나라의 탄소 배출량은 전세계에서 9위(2020년 기준)로 상위를 기록하고 있다.❶ 따라서 정부는 2050년까지 탄소순배출량 0을 목표로 탄소중립을 선언하고 2050 탄소중립 시나리오를 수립 중이다.❷

산업부문은 국가 온실가스 총배출량의 약 37%를 차지하고 있으며, 여기에서 생산되는 철강과 시멘트는 건설분야에서 중요한 건설자재로 활용되고 있다.❸ 건설분야에서 정부의 탄소중립정책에 이바지하기 위해서는 탄소배출 저감형 건설자재를 사용하거나 새로운 설계 및 시공을 통해 시설물을 장수명화하는 방안이 있을 것이다.

대부분의 건설 구조물은 철근과 콘크리트로 이루어져 있다. 구조물은 시간이 경과함에 따라 노후화되고 주기적인 유지관리를 통해 수명을 연장해 가고 있다. 도로교량 1,321개, 철도시설 531개, 공항건축물 57개, 취수탑 8개 등의 유지관리예산은 2016년 541억 원에서 2017년 1,712억 원으로 216% 증액되었고, 교량 등 주요 SOC 시설물의 유지관리 시장은 확대될 전망이며, 2030년 준공 후 30년 이상된 시설물은 전체의 44.3% 달할 것으로 예상된다. 2019년 말 기준 30년 이상된 도로는 전체의 50.7%, 2017년 기준 30년 이상된 철도, 교량, 터널은 전체의 38.6%로 나타났다.❹❺

노후된 건설 구조물은 철근, 긴장재(강연선) 등의 강재로 된 건설자재의 부식으로 성능이 저하된다. 긴장재의 부식문제를 살펴보면, 서울 내부순환로 정릉천고가의 결함 원인이 교량을 받치고 있는 긴장재의 부식 때문이며, 현재 긴장재의 응력상태를 확인할 수 있는 실용기술이 거의 없는 것으로 나타났다. 정릉천고가는 준공 이후 초기점검 1회, 정밀점검 6회, 정밀안전진단 2회를 실시했지만 긴장재 내부에 대한 조사 · 점검은 이뤄지지 않았고 긴장재에 대한 유지관리 지침도 없는 것으로 나타났다.❻ 대만 Nanfangao 아치교는 케이블 파단으로 붕괴되었는데, 전문가들은 피로와 바닷가 염분에 의한 긴장재(케이블) 부식을 의심하였다.❼ 이렇듯, 노후 시설물에 대한 수명연장과 안전에 대한 원천기술 확보가 필요하며, 특히 긴장재의 부식을 방지할 수 있는 비부식 특성과 추가적인 부착센서 없이 재료자체에 계측 기능이 있는 신개념 재료 개발 필요하다.

❶ KBS NEWS, '"개도국 피해"…우리나라, 기후 불평등 위치와 책임은?', 2022.11.08.
❷ 탄소중립위원회(관계부처 합동), 2050 탄소중립 시나리오안, 2021.10.18
❸ 대한민국정부, 지속가능한 녹색사회 실현을 위한 대한민국 2050 탄소중립 전략, 2020
❹ News1, '교통사고 사망자 3천명대까지 감축한다…내진보강도 강화', 2017.01.05
❺ 국토일보, '"2030년 30년 이상 노후 시설물 전체 44.3%...노후 인프라, 새 투자 방안 마련 시급하다"', 2021.05.13
❻ 헤럴드경제, '"정릉천고가 결함은 강연선 부식 탓"…설계~관리 문제투성이' 2016.10.27.
❼ AFP, '台湾で橋崩落 12人負傷、6人が下敷きになった可能性', 2019.10.01

탄소배출을 많이 하는 건설자재인 강재의 부식문제를 원천적으로 해결하기 위해 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Polymer, 이하 CFRP(탄소섬유복합재))를 활용하여 건설자재를 대체하는 노력들이 진행되고 있다. 탄소섬유복합재에 사용되는 탄소섬유는 고강도, 고탄성 소재로서 항공기, 우주 왕복선 등에 핵심소재로 활용되고 있으나 고가의 소재인 관계로 건설 분야에서는 거의 활용되지 못하고 있는 실정이다. 국내에서는 2011년부터 탄소밸리 구축사업을 통해 전주에 탄소특화 국가산업단지, 첨단벤처단지 등을 조성하였고, 탄소섬유 국산화 기술개발에 성공했다. 2018년 일본은 탄소섬유를 수출규제대상에 포함시킴에 따라 정부는 탄소섬유 국산화 및 지원 정책을 장려하였고, 효성은 탄소섬유의 일본 의존을 줄이기 위해 2028년까지 탄소섬유 산업에 총 1조원을 투자해 현재 2,000톤인 생산규모를 12배 확대하기로 하였다.

탄소섬유 시장은 연평균 11% 규모로 성장하고 있으며, 일본기업이 전세계 시장의 50% 이상 공급하고 있다. 일본은 건설분야에서도 정부의 지원을 받아 보강재 및 긴장재를 상용화하고 있으며, 유럽 및 미국도 건설분야에 탄소섬유복합재를 활용하려는 노력이 이어지고 있다.

이 글은 탄소섬유복합재의 이해를 돕고 건설분야 활용 가능성에 대한 내용으로 한국건설기술연구원에서 수행된 탄소섬유복합재(긴장재)관련 연구에 대해 소개한다. 탄소섬유복합재가 처음 건설분야에 도입된 보강분야의 공법개발과 현재 수행하고 있는 고기능성 케이블 개발, 마지막으로 탄소섬유복합재의 향후 활용 방안에 대해 서술하였다.

02 탄소섬유 복합재(CFRP)

2.1 복합재료

복합재료(Composite Materials)란 성분이나 형태가 다른 두 종류 이상의 소재가 거시적으로 조합되어 유효한 기능을 갖는 재료를 일컫는다. 섬유강화 복합재료(Fiber Reinforced Polymer Composites, FRP 복합재료)는 보강섬유(Reinforcing Fiber)와 결합재(Matrix)를 조합시킨 복합재료로서 [표 1]과 같은 특징이 있다.

복합재료에 사용되는 보강섬유로는 유리섬유(Glass Fiber), 아라미드섬유(Aramid Fiber), 탄소섬유(Carbon Fiber) 등이 주로 이용되며, 용도에 따라 연속섬유, 단섬유, 분말섬유 형태로 사용된다. FRP 긴장재 또는 보강근 용도로는 연속섬유가 이용된다. 결합재로는 에폭시 또는 불포화 폴리에스테르 등과 같은 열경화성 수지 또는 포화 폴리에스테르와 같은 열가소성 수지가 이용된다([그림 1]).

건설분야에서 복합재료를 긴장재로 활용하기 위해서는 높은 하중수준을 지속적으로 견뎌야 하기 때문에 역학특성 및 내구성능이 좋은 탄소섬유가 주로 활용되고 있다([표 2]).

[표 1] 복합재료 장단점[6]

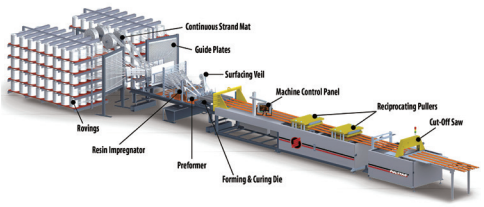
장점	단점
- 경량성 - 높은 비강도(high strength-to-weight ratio) - 높은 비강성(high modulus-to-weight ratio) - 내부식성, 내후성, 비자성, 낮은 열전도성 - 유연성(특정 방향, 부위의 강도 조절 가능) - 치수 안정성, 저유지관리, 고내구성	- 저탄성계수 - 항복점 없는 취성 파괴 - 낮은 횡방향 강도 - 가격 고가 - Stress-rupture (유리, 아라미드섬유)

[표 2] FRP 긴장재의 역학특성

구 분	철근	PS 강연선	GFRP 보강근	CFRP 긴장재	AFRP 긴장재
밀도 (g/cm³)	7.9	7.9	1.25 ~ 2.10	1.50 ~ 1.60	1.25 ~ 1.40
항복응력 (MPa)	276 ~ 517	1350	N/A	N/A	N/A
인장강도 (MPa)	490	1800	483 ~ 1600	1900 ~ 3690	1400 ~ 1800
탄성계수 (Gpa)	210	210	35 ~ 51	130 ~ 150	50 ~ 70
항복변형률 (%)	1.4 ~ 2.5	0.7 ~ 1.0	N/A	N/A	N/A
파단변형률 (%)	6.0 ~ 12.0	6.0	1.2 ~ 3.1	0.5 ~ 1.7	2.0 ~ 4.0
릴렉세이션율 (%)	-	0.7 ~ 2.0	-	1.5 ~ 3.0	5 ~ 15
종온도팽창계수 (x 10-6/℃)	11.7	11.7	6 ~ 10	0.6	-5 ~ -2
횡온도팽창계수	11.7	11.7	21 ~ 23	22 ~ 23	60 ~ 80

[그림 1] 다양한 형상의 복합재료❾

[그림 2] 펄투르전 방식 개요도❿



2.2 탄소복합재 생산

복합재료 생산 방식은 RTM(Resin Transfer Molding), 압축성형, 필라멘트 와인딩, 펄트루전 등으로 다양하다. 이중 펄트루전 방식은 섬유의 직진성을 높여 생산하기 때문에 복합재의 성능을 향상시킬 수 있어서 길이방향으로 긴 철근이나 긴장재 생산이 유리하다.

펄투르전 방식은 [그림 2]와 같다. 다수의 탄소섬유 로빙(Rovings)은 가이드 플레이트를 지나 수지에 함침되며 이후 금형을 통과하면서 단면이 형성된다. 이후 가열을 통해 경화되고 마지막으로 운반에 적합한 길이로 절단하여 생산된다. 탄소복합재의 단면은 금형에 따라 결정되는데 대부분 판형이나 봉형으로 생산되며, 봉형의 경우, 생산업체의 기술력에 따라 다양한 모양의 피복을 만들 수 있다([그림 3]).

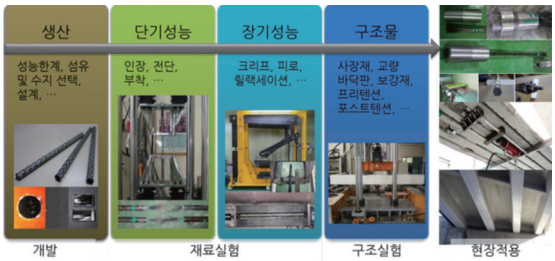
2.3 탄소복합재 개발 및 활용 과정

탄소복합재는 새로운 건설 재료이다. 새로운 재료를 현장에 활용하기 위해서는 재료의 장단기 물성파악과 활용분야에 맞는 성능평가를 거쳐야 한다. 새로운 건설 재료는 활용목적에 적합한 목표 물성을 달성하기 위해 섬유와 수지를 선택하고 섬유 함유량을 목표에 맞게 설계하여 생산해야 한다. 이렇게 생산된 탄소복합재는 인장, 전단, 부착 등 다양한 단기성능과 크리프, 피로, 릴랙세이션과 같은 장기성능 실험을 수행하여 안전성을 확보한다. 재료실험을 통해 다양한 데이터가 확보되면 활용분야에 맞게 구조실험을 수행하여 성능 및 시공성을 검증한 후 현장에 적용한다([그림 4]).

❽ 국토해양부, 사장교용 FRP 케이블 시스템 기초 연구, 2011.03
❾ https://slideplayer.com/slide/232985/
❿ https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=16402

[그림 3] 국내 생산 CFRP 긴장재

[그림 4] FRP 개발 과정 및 활용



03 보강분야 활용

3.1 국내외 기존 보강공법

콘크리트 구조물의 성능향상에 사용되는 보강공법은 일반적으로 치환공법, 단면증설공법, 부재추가공법, 지점추가공법, 부착공법, 긴장보강공법 등으로 분류할 수 있다. 치환공법은 손상된 부재를 새로운 부재로 교체하는 공법이며, 단면증설공법은 노후화된 표면 콘크리트를 제거하고 새로운 콘크리트로 대체하는 공법으로서 주로 슬래브, 벽체 등에 적용된다. 부재추가공법은 기존 주형들 사이에 새로운 주형을 추가하여 성능을 향상시키는 공법이며, 지점추가공법은 교각 사이에 새로운 교각을 추가함으로써 경간 길이를 짧게 하여 내하성능을 향상시키는 공법이다. 부착공법은 콘크리트 면에 강재 또는 Fiber Reinforced Polymer(FRP) 재료를 부착하여 구조물의 성능을 향상시키는 공법으로서 콘크리트 구조물 보강 시 가장 많이 활용되는 공법이며, 이를 응용한 다양한 기술들이 개발되고 있다. 긴장보강공법은 PS 긴장재 또는 FRP 긴장재 등을 긴장하고 정착하는 공법으로 구조물에 상향력을 제공함으로써 내하성능 및 사용성을 개선시킬 수 있는 공법이다. 이 중에서 가장 많이 이용되는 공법은 부착공법과 긴장보강공법이며, 국내에서도 콘크리트 교량의 보강공사 시에 이 공법들이 대부분 적용되고 있다. 대표적인 보강공법들의 연도별 흐름은 [그림 5]와 같다.

1990년대 이후로 FRP 표면매립 보강방법이 도입되었다. 표면매립보강을 제외하면 대부분 보강재는 외부에 노출되기 때문에, 구조물 보강후 화재, 충돌 등 외부로부터 다양한 손상을 받을 수 있다. 표면매립보강은 이러한 단점을 최소화하는 공법으로 보강재를 콘크리트 하단 홈에 매립하는 것으로 보강재를 외부의 직접적인 손상으로부터 보호한다.

표면매립보강은 미리 제작된 홈 안에 보강재를 고강도 에폭시나 그라우트를 사용하여 매립하기 때문에, 강판 또는 탄소섬유 부착보강과는 달리 표면 준비 작업이 필요하지 않다. 표면매립보강의 적용은 콘크리트 덮개에 따라 좌우되며, 표면매립보강에 사용된 보강재는 시공 후에 외부적인 손상으로부터 보호될 수 있다. 콘크리트 구조물을 능동적으로 보강하기 위해서는 외력이 도입되는 긴장보강이 필요하며, 표면매립보강에 긴장력을 도입하는 연구가 진행되고 있다.

[그림 5] 보강공법의 흐름

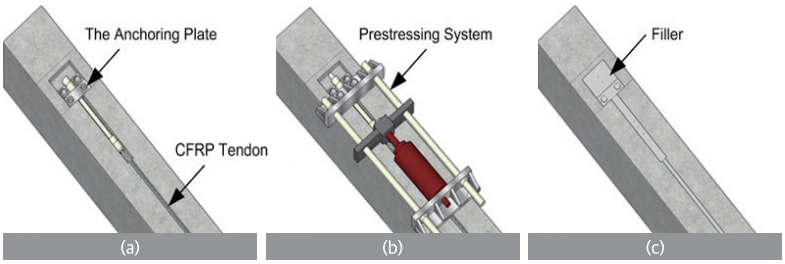
3.2 CFRP 표면매립 긴장보강공법 개발

표면매립 긴장보강을 위해서는 긴장장치가 필요하다. 많은 연구자들이 기존 PSC 구조물의 프리텐션방식과 유사한 방식으로 구조물과 별도로 설치된 반력대를 이용하여 구조물에 긴장력을 도입하였다. 이런 방식은 긴장력을 도입하기는 편리하나, 현장적용 등 실용화에는 적합하지 않은 방식이다. 한국건설기술연구원은 현장적용이 가능한 긴장력 도입 방법을 개발하였는데, 기존 프리텐션방식과 달리 긴장력 도입후에 긴장장치 해체가 가능하기 때문에 보강기간을 단축할 수 있는 장점을 가지고 있는 방법이다([그림 6]).

표면매립 긴장보강공법을 개발하기 위해 다수의 재료실험을 수행하여 CFRP 긴장재 및 정착구 물성을 확보하였다. 그리고 현장적용을 위해 모형시편 실험과 실대형 구조실험으로 보강성능을 파악하고 시공성을 검토하였다. 개발된 공법은 [그림 7]과 같이 실교량에 적용하여 현장적용성을 검증하였다.

표면매립 긴장보강공법의 특징은 비부식 보강재료를 사용하여 부식 문제를 근본적으로 해결하고, 긴장력 도입으로 사용성을 개선하였다. 또한 보강된 긴장재가 구조물의 표면에 매립되기 때문에 교량 하부에서 발생하는 차량 충돌 및 화재로부터 직접적인 손상을 받지 않는다. 표면매립 FRP 긴장 보강 기술을 개발하기 위하여 목표 긴장력을 안전하게 FRP에 도입하고 매립 가능한 크기를 갖는 압착형 정착구 개발, 그리고 긴장력을 보강 구조물에 도입할 수 있는 긴장 시스템 개발이 핵심기술이며, 개발된 기술은 실대형

[그림 6] 표면매립 긴장장시스템 개요 (a) 정착구 설치 (b) 긴장시스템 (c) 충전 및 양생



[그림 7] 표면매립 긴장장시스템 현장 적용

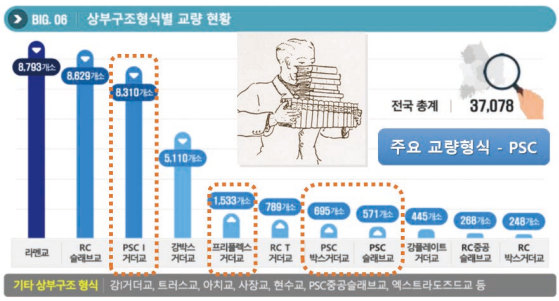
실험 및 현장적용을 통해 성능 검증을 완료하였다. 향후 개발 기술은 DB-18 이하의 교량성능을 DB-24로 개선하고, 성능이 저하된 DB-24 교량을 복원하는데 도움이 될 것으로 판단된다.

04 센싱 케이블 개발

4.1 기존 긴장재의 문제점

건설분야에 사용되는 긴장재는 PSC (Pre-Stressed Concrete) 거더교량 뿐만 아니라 케이블을 활용하는 사장교나 현수교 등 다양한 구조물에 사용되고 있다. 교량분야에 긴장재를 사용하면서 경간길이를 길게 할 수 있을 뿐만 아니라, 철근콘크리트의 경우 단면을 줄일 수 있는 장점이 있어 긴장재가 적용된 국내교량은 30% 이상이 PSC 거더이다.

[그림 8] 상부구조형식별 교량현황(2020)



구조물이 노후화됨에 따라 철근, 강연선(긴장재)의 부식으로 인해 구조물이 붕괴되는 사례가 종종 발생하고 있다. 2016년에 서울 내부순환로 정릉천고가가 긴장재의 부식으로 파단되었고, 2017년에는 평택국제대교 붕괴, 2019년은 대만 아치교 붕괴 등 긴장재의 부식으로 최악의 경우 붕괴로 이어지기 때문에 시설물 대형사고가 우려되고 있는 실정이다. 이러한 긴장재는 시공 이후 적정한 힘을 유지하고 있는지 현재상태를 파악할 수 있는 기술이 미흡하기 때문에 사전관리가 불가하여, 긴장재 파단이나 구조물 붕괴 이후 사후관리만 가능한 실정이다. 또한 향후 노후 시설물이 급증하여 유지관리 시장이 확대될 것으로 예상되기 때문에 고성능 고기능성 건설자재 개발이 필요하다.

[그림 9] 센싱 케이블 연구 개요 (2021~2025)[11]

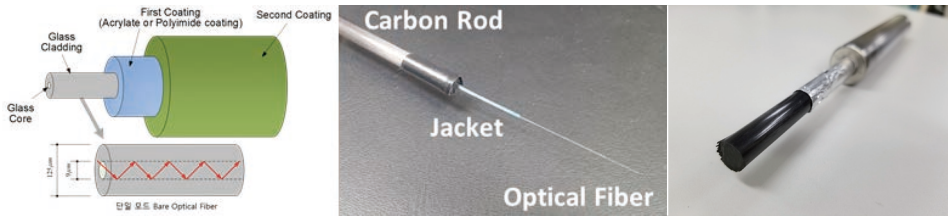
4.2 광섬유 센서 내장 탄소섬유 케이블

케이블의 응력을 측정하기 위해 [그림 10]과 같이 케이블 생산시 직경 0.3 mm 광섬유 센서를 케이블 중앙에 매립하여 생산하였다. 광섬유는 중심부에 굴절률 높은 유리 코어, 바깥은 굴절률이 낮은 유리 클래딩으로 구성되어 중심부를 통과하는 빛을 전반사시키는 광학적 섬유로서, 일반적으로 사용하는 변형률 게이지보다 영구적 사용이 가능하고, 전자기 간섭 없고 리드선 처리가 용이한 장점이 있다.

긴장재로 사용되는 탄소섬유 케이블에서는 긴장력 확인을 위하여 변형률을 계측해야 하므로 광케이블의 코어 내부에서 1개의 모드만을 전반사시킬 수 있는 단일모드 광섬유 케이블을 사용하였다.

[11] 한국건설기술연구원, 탄소기반 고기능성 건설 재료 기술개발, 2021.12

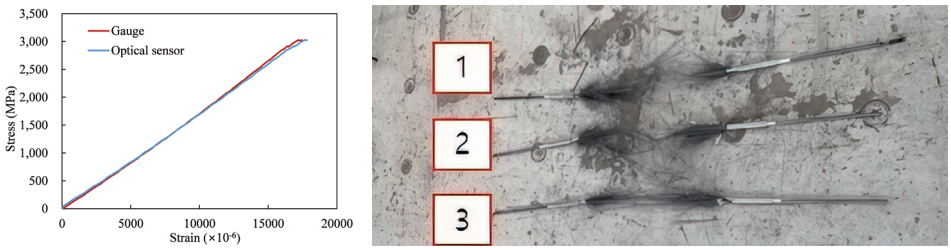
[그림 10] 센싱 개요 및 탄소섬유 케이블



긴장재용 탄소섬유 케이블 제작에 사용되는 FBG(Fiber Bragg Grating) 센서는 국부적인 부분의 변형률을 계측할 수 있는 센서로서 베어(Bare) 상태의 광케이블을 이용하며, 원하는 위치를 지정하여 자외선에 노출시키는 방법으로 제작하였고 또한 정확성과 1kHz이상의 고속측정이 가능하기 때문에 동적계측에도 활용될 수 있는 장점이 있다.

센싱케이블의 계측가능성을 검증하기 위해 인장실험을 수행한 결과, 모든 센싱용 케이블의 파괴모드는 섬유가 한가닥씩 파단되는 형태로 나타났다. 센싱 케이블은 인장강도에 도달할 때까지 선형거동을 보이며 인장하중 240 kN 이상, 인장강도는 약 3,000 MPa 이상, 탄성계수는 170 GPa를 나타냈다([그림 11]). 케이블 외부에 부착한 변형률 게이지의 값과 광섬유 측정값의 차이를 변형률 게이지 측정값으로 나눈 FBG 센싱용 케이블의 오차는 5% 미만으로 나타나 센싱 케이블의 성능을 검증할 수 있었다.

[그림 11] 센싱 케이블 응력-변형률 그래프와 파단 형상



케이블의 성능은 활용분야에 따라 고하중을 요구하기도 한다. 따라서 싱글 정착장치 결과를 바탕으로 3멀티용 및 7멀티용 앵커헤드를 제작하고 각 싱글 정착장치로 제작된 케이블 3개와 7개로 만들어진 멀티 케이블의 인장실험을 수행하였다. 실험결과, 3멀티 시편의 평균하중은 약 740 kN, 7멀티 시편은 평균 약 1,640 kN으로 개별 인장강도의 99% 이상의 성능을 보이므로 높은 하중이 필요한 사장교나 현수교의 케이블로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

[그림 12] 멀티 케이블 시편 및 파단 형상

05 건설분야 활용 및 추진방안

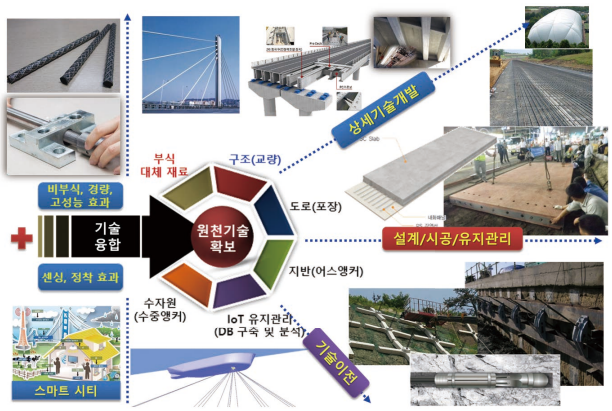
탄소섬유복합재는 항공, 우주, 자동차 분야에서 많이 활용되고 있지만, 건설분야는 보강재 정도로 미미하다. 강연선 대체재료로 개발된 CFRP 긴장재는 긴장력이 필요한 다양한 분야에 활용할 수 있다. 앞서 서술된 보강분야뿐만 아니라 거더교, 사장교, 현수교 등의 케이블을 사용하는 신설 교량에도 적용할 수 있을 것이다. 교량 이외에도 콘크리트 도로포장분야, 어스앵커 등의 지반분야, 원전 구조물 등에 사용될 수 있다.

전세계적으로 탄소중립 목표를 달성하기 위해 탄소저감형 건설자재개발에 착수해서 상용화하고 있다. 국내의 경우, 유리섬유 보강근이 상용화되고 있지만, 새로운 건설자재를 현장에 활용하기 위한 표준 시험방법과 건설기준은 미비한 실정이다.

국내 건설분야에서 탄소산업을 활성화하기 위해서는 기존 규정을 개정할 수 있는 제도개선이 포함된 과제가 추진되어야 현행 제도의 미비점을 개선할 수 있을 것이다. 이를 위해 표준화된 시험법에 따른 인검증으로 탄소 활용 건설자재, 설계 및 시공관련 신뢰성을 향상시키고 국가 표준 및 설계기준을 마련하여 탄소 건설자재 현장적용을 촉진하고 관련연구를 활성화시킬 수 있을 것이다.

탄소활용 연구성과물들이 사장되지 않고 다수의 건설현장에 지속적으로 활용되어 강재 건설자재를 대체할 수 있는 새로운 재료로 활성화되기를 기대해 본다.

[그림 13] CFRP 긴장재 활용 방안



※참고문헌

01. KBS NEWS, '"개도국 피해"…우리나라, 기후 불평등 위치와 책임은?', 2022.11.08.
02. 탄소중립위원회(관계부처 합동), 2050 탄소중립 시나리오안, 2021.10.18
03. 대한민국정부, 지속가능한 녹색사회 실현을 위한 대한민국 2050 탄소중립 전략, 2020
04. News1, '교통사고 사망자 3천명대까지 감축한다…내진보강도 강화', 2017.01.05
05. 국토일보, '"2030년 30년 이상 노후 시설물 전체 44.3%...노후 인프라, 새 투자 방안 마련 시급하다"', 2021.05.13
06. 헤럴드경제, '"정릉천고가 결함은 강연선 부식 탓"…설계~관리 문제투성이' 2016.10.27.
07. AFP, '台湾で橋崩落 12人負傷、6人が下敷きになった可能性', 2019.10.01
08. 국토해양부, 사장교용 FRP 케이블 시스템 기초 연구, 2011.03
09. https://slideplayer.com/slide/232985/
10. https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=16402
11. 한국건설기술연구원, 탄소기반 고기능성 건설 재료 기술개발, 2021.12