

## 特輯

“건설분야에서의 복합재료 응용기술”(총 7편) 중 - 제 2편

## 섬유 복합재료를 사용한 구조물 보강공법 분석

한복규\*, 김기수\*\*, 정해문\*\*\*, 홍건호\*\*\*\*

## 1. 서론

섬유강화 복합 신재료는 우수한 역학적 특성 및 내구성 등으로 인하여 강재나 콘크리트를 대체할 새로운 재료로 주목받고 있어 향후 적극적인 활용이 기대되는 재료이다. FRP를 이용한 복합재료는 경량에 고강도로서 부식되지 않는 우수한 성능을 지니고 있어 많은 분야에서 발전을 보여 그 성능에 대한 검증이 되어왔고, 이미 선진국(미국, 일본, 유럽) 및 국내에서는 FRP와 관련된 건축/토목구조물에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 그 한 예로, 텐돈과 같은 교량의 강재 대체재, 보강용 재료 등 교량 부속품으로서의 적용 뿐 만 아니라, 콘크리트 및 강재를 대체하기 위한 일차적인 건축/토목용 구조재료로의 적용을 위한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 특히, 교량 전체를 FRP로 제작한 사례도 세계적으로 40여개가 보고되고 있고, 최근 들어 증가추세에 있다. 이와 같이 FRP를 도로구조물 혹은 건축구조물에 사용하는 이유는 기존의 강재 및 콘크리트에 비해 중량 감소로 인한 공기를 단축할 수 있고, 부식이 발생하지 않으므로 유지관리 비용의 절감을 위한 방법으로 사용되고 있다.

한편, 토목구조물에 복합재료(FRP)를 이용한 교량을 설치하는 경우 가장 큰 문제점으로 지적되는 점은 재료비가 비싸 초기건설비용이 매우 높다는 점인데, 이는 대부분의 국가에서 초기 투자비용에 주 관심을 두고 있기 때문에 문제점으로 지적되지만, 실질적으로 도로구조물의 수명, 유지관리 등의 측면을 종합적으로 고려한다면 매우 경쟁력 있는 재료로 볼 수 있다. 또한, 재료비용의 절감에 한계가 있다면 섬유강화 복합 신재료가 갖는 장점인 경량과 내식성에 대한 점을 최대한 유효하게 활용하여, 성능에 적합한 비용을 갖는 경쟁력이 있는 재료로 접근할 필요성도 있는 것으로 판단된다.

본고에서는 복합재료(FRP)와 관련하여 선진국(미국, 일본, 유럽)에 등록된 기술동향조사와 건축/토목에 사용되는 복합재료의 구조물 보강공법에 적용된 각종 FRP공법에 대하여 고찰하도록 하였다.

## 2. 복합재료(FRP)관련 기술동향 분석

현재까지 건설구조물에 대한 복합재료의 사용은 건축구조물에 비해 도로구조물(도목)의 사용빈도가 높다 할 수 있다. 이때, 각 구조물에 적용되는 기술은 구조물의 종류에 큰 관계없이 유사한 기술이 사용되므로, 본 고에서는 복합재료(FRP)와 관련된 기술동향으로서 도로구조물을 중심으로 조사된 결과를 보고하도록 하였다. 도로구조물용 복합재료(FRP)의 기술동향을 조사하기 위해, 교량용 FRP 관련 특허조사를 실시하였으며, 국내에서 복합재료의 사용은 최근에 발생한 것임을 감안하여 선진국(미국, 유럽, 일본) 특허청에 등록되어있는 것으로 조사하였다. 조사기간은 1990년부터 현재까지 등록된 복합재료(FRP)의 용도에 대한 조사를 실시하였으며, 건축구조물, 특히 교량의 보강재, 터널 혹은 콘크리트 보강재로 이용되는 복합재료에 대한 기술동향을 중심으로 조사하였다.

복합재료를 구조물에 활용하기 위한 기술은 FRP제조기술과 구조물 보강재로서의 기술로 크게 2가지로 구분할 수 있다. 전체적인 복합재료 관련 기술동향을 살펴본 결과, 미국과 유럽에 비해 일본이 복합재료 관련 기술을 주도하고 있는 실정이며, 특히, 유럽의 경우 교량에 FRP 도입기술은 일본의 10%미만인 것으로 조사되었다.

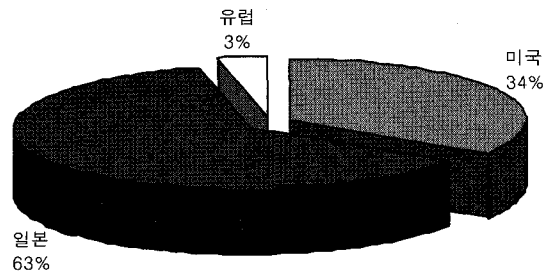


Fig. 1 국가별 복합재료(FRP) 제조기술등록 현황.

\* (주)한국쇼본드건설 과장

\*\* 호서대학교 정보통신공학부 교수

\*\*\* 한국도로공사 도로교통기술원 책임연구원

\*\*\*\* 호서대학교 건축공학과 교수, 교신저자(E-mail:honggh@office.hoseo.ac.kr)

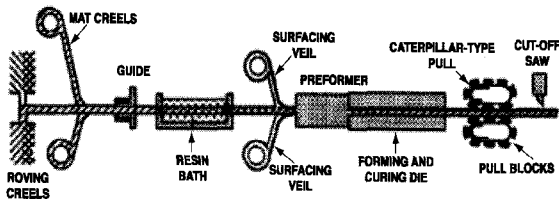


Fig. 2 인발성형 개념도.

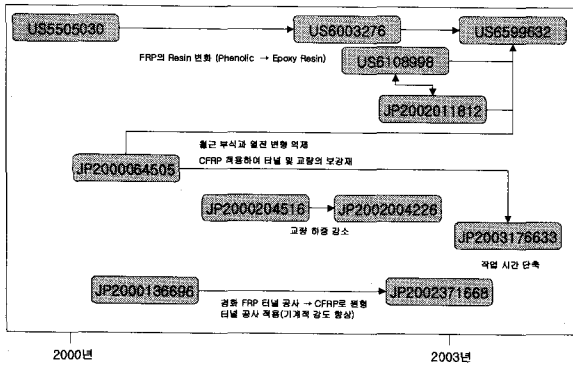


Fig. 3 구조물 보강용 FRP 시대별 특허 변화과정.

## 2.1 FRP제조기술 동향

FRP 제조기술은 복합재료를 구조물에 적용하기 위한 초기 단계로서, 제조하는 방법에 의하여 구조물 보수보강재의 성격이 결정되기 때문에 매우 중요한 기술 중의 하나이다. 연도별 FRP 제조기술의 현황을 살펴보면, 어떤 특정한 경향을 보이지 않고 제조기술이 균일하게 등록되어 있다. 그러나, 전반적으로 필라멘트 와인딩 기술이 다른 제조 기술에 비해 많은 기술로 등록되었으며, 그 다음으로 인발성형기술이다. 현재 국내에서는 인발 성형을 이용한 복합재료(FRP) 제조기술이 가장 많이 사용되고 있다. 국가별로 보면, 일본이 63%로 가장 높고 미국이 34%이며, 유럽국가들이 3%로 낮은 비율을 보이고 있는 것으로 조사되었다.

인발(Pultrusion)성형은 장섬유를 Resin Bath에 통하여 레진을 함침시킨 후 가열된 틀에 통과시켜 연속적인 형상을 갖는 제품을 생산하는 방법으로 대량생산이 가능한 장점을 가지고 있다.(Fig. 2 참조) 최근에는 구조물 보강재로 활용하기 위해서 길이 방향의 섬유 배열 밖에 성형할 수 없는 인발 성형의 기술을 개선하여 복잡한 형상으로 다변화 할 수 있는 기술을 개발하고 있다.

## 2.2 구조물 보강재(교량용)로서의 FRP 기술동향

교량용 FRP 특허는 주로 일본과 미국에서 특허를 보유하고 있으며, 전체적으로 구조물 보강용과 Deck System에 대한 기술로 구분할 수 있다. 본 기술은 보강용 FRP의 강도와 강성을 향상하기 위해서는 FRP가 적용되는 주위 환경에 적합한 수지를 선정해야 한다는 내용에 대한 것이 주류를 이루고 있다. 교량용 FRP에 사용되는 레진의 역할은 콘크리트 구조물의 보강재로 FRP를 도입할 때 콘크리트 구조물과 FRP의 접합 뿐 만 아니라, FRP의 단점을 보완하기 위한 수단으로서 전기적 절연, 화학적 내구성, 기계적 강도를 고려한 레진을 선정하여 용도에 맞는 강도와 강성을 제공하는데 있다. 레진의 구성요소는 과거에는 페놀 수지, 에폭시 수지, 기타 열가소성 혹은 열경화성 수지가 선택적으로 사용되었으나, 최근에 들어오면서 에폭시 수지를 FRP의 레진으로 가장 많이 사용되고 있다.

교량용 FRP의 시대별 기술 변화는 '90년대 중반 이후에는 FRP를 교량, 콘크리트 보강재, 철근 콘크리트 대체재에 대한 가능성의 기술에 초점을 두었으며, '90년대 후반에 들어오면서 FRP의 물성 향상, 교량용 FRP 제조 기술, FRP의 수지 선정, FRP 소재 개발, 작업 시간 단축 등으로 실용적인 특허가 등록되었다.(Fig. 3 참조) 즉, '90년대 후반에 들어오면서 구조물 적용을 위한 연구와 적용 시 발생하는 문제점을 보완하기 위한 연구가 이루어지고 있는 것이 큰 특징이라 할 수 있다.

## 3. 복합재료(FRP)를 이용한 공법

건설 분야에서의 복합재료의 용도와 이용방법은 시설물의 특성에 따라 아주 다양하게 개발 및 활용되고 있다. 복합재료의 이용이 가능하게 된 것은 화학분야의 고분자계 신소재가 개발되면서, 기존 건설재료와 혼합, 병용하여 강도, 내부식성, 내마모성, 내충격성, 절연성 및 경량화 등의 특성으로 시설물의 내구성과 안정성 등을 확보할 수 있기 때문이다. 복합재료를 이용한 대표적인 공법은 다음과 같다.

- ① 섬유슈트 부착공법
- ② 성형판 보수보강공법
- ③ FRP rod 및 강선 보강공법

### 3.1 섬유슈트 부착공법

섬유부착공법에 사용되는 복합재료(FRP)의 구성은 보강재(Fiber)와 모재(Matrix)로 구성되어 있으며, 보강재로 이용되고 있는 주요섬유는 탄소섬유(Carbon Fiber), 유리섬유(Glass Fiber), 보론섬유(Boron Fiber) 등의 무기물질 섬유와 유기물질 섬유인 아라미드섬유(Aramid Fiber)가 있다. 결합재는 수지계를 사용하여 내식성, 내열성을 가지고 있어 역학적 특성 뿐만 아니라 화학적 특성의 향상에도 기여하고 있다. 복합재료는 강재 혹은 콘크리트처럼 부식하지 않을 뿐 만 아니라, 나무처럼 썩지 않고

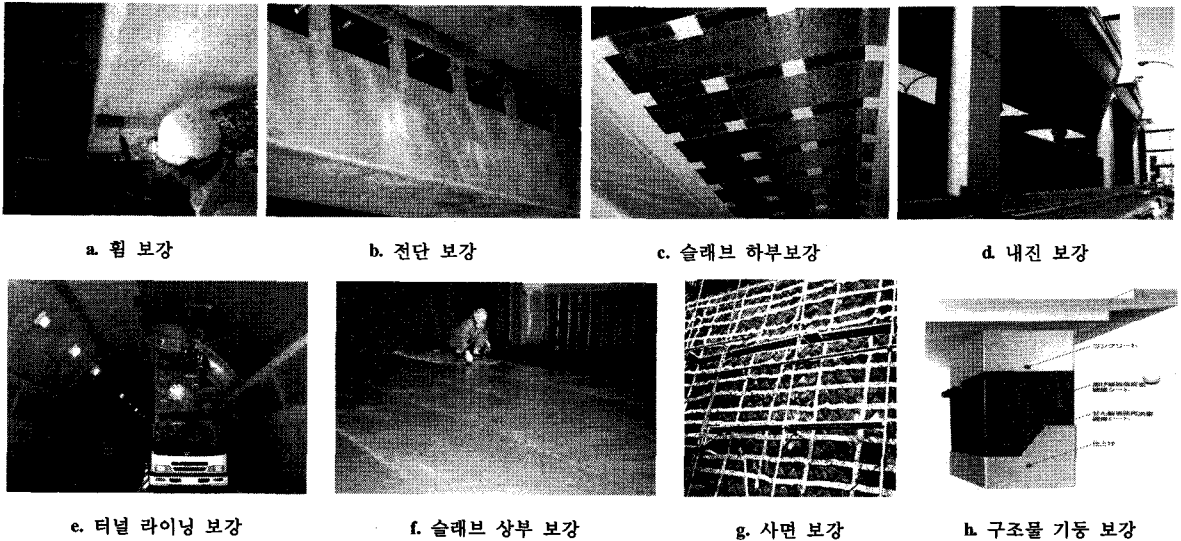


Fig. 4 섬유부착공법 활용분야.

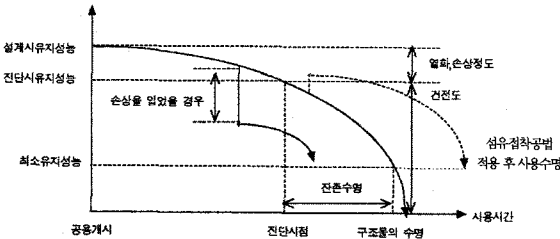


Fig. 5 섬유접착공법을 통한 사용수명의 연장.

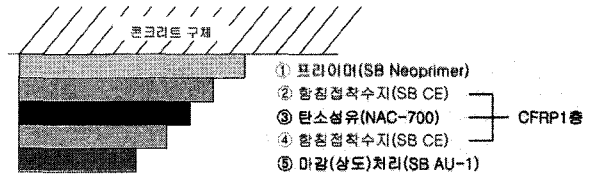


Fig. 6 섬유접착공법(CFRP) 표준도.

높은 강성을 유지하고 있기 때문에 구조물 보수보강 시 많은 장점으로 인하여 점점 그 사용 빈도가 증가하고 있는 추세이다. 섬유부착공법의 활용분야는 구조물 휨보강에서부터 내진보강, 터널보강 등 다양한 분야에서 활용되고 있으며, 현재 국내에서도 많은 연구가 진행 중에 있는 실정이다. 섬유부착공법에 의해 구조물을 보수보강하는 주된 이유는 구조물의 사용기간 동안 손상이나 열화를 통하여 감소된 내구성이 내하성의 감소로 전파되고 이로 인해 구조물의 사용수명이 감소되기 때문에, 섬유부착공법을 통하여 콘크리트 구조물의 사용수명이 연장되는 것을 목표로 하고 있다. Fig. 5에서는 섬유접착공법을 통하여 구조물의 내하성과 내구성의 변화과정을 나타내었다.

섬유접착공법의 시공개요는 기존의 철근콘크리트 상판의 밀면, 보의 밀면과 측면에 섬유접착을 에폭시수지로 합침 및 적층을 통하여 구체에 접착하여 구조체와 일체화 시키는 보강공법이다. Fig. 6에서는 섬유접착공법중의 하나인 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic) 접착공법의 시공표준도를 나타내었다.

Fig. 6에서 보는바와 같이 섬유를 중심으로 에폭시수지를

사용함에 따라 내식성 향상에 도움을 줄 수 있기 때문에, 염해 지역에 콘크리트 구조물 보호와 동시에 구조물 보강효과에 활용할 수 있다. 섬유접착공법의 활용분야에 대해서 살펴보면 Fig. 4와 같이 요약할 수 있다. Fig. 4-a(휨보강), b(구조물 전단보강), c(슬래브 하부보강)등은 구조물의 리모델링 시에 콘크리트 구조물의 보수보강공법에 널리 사용되고 있다. 이외에도 최근 선진국(미국, 일본)에서 많은 연구가 진행됨에 따라 Fig. 4-d(내진보강)와 같이 섬유부착공법 중의 하나인 아라미드 섬유시트의 피로하중에 대한 저항성이 크다는 특징을 이용하여 구조물(교각, 기둥)의 내진보강재료로 활용하는 기술도 널리 활용되고 있다.

일본 기술연구소에서는 섬유접착공법은 부재의 내하력 향상뿐만 아니라, 균열을 구속하는 효과가 있는 것을 확인한 바 있으며, Fig. 4e에서 보는바와 같이 터널 라이닝 보강용도로 활용하여 시공한 바 있다. Fig. 4-f, h에서는 섬유접착공법이 양방향인 아닌 일방향성임을 이용하여 구조물 보수보강방법에 있어서 새로운 시스템을 개발하여 슬래브 상부 보강과 구조물 기둥 보강을 Fig. 4에서 보는바와 같이 적용하였다. 유리섬유를 활용하여 Fig. 4g에서와 같이 사면보강의 용도로 활용한 사례가 과거에 있었으나, 현재는 사용되지 않는 공법이다.

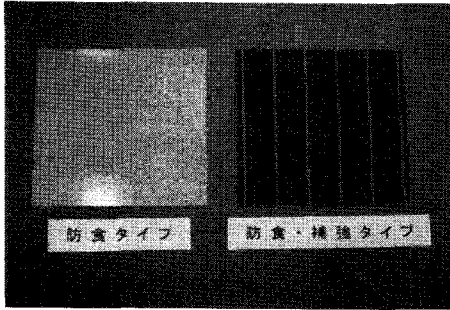


Fig. 7 FRP를 이용한 성형판 공법.

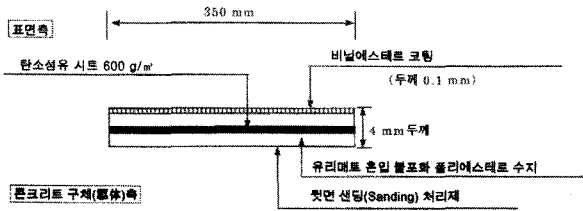


Fig. 8 성형판 구성요소(보강TYPE).

### 3.2 성형판 보수·보강공법

성형판 보수·보강공법이란 얇은 두께의 유리매트(유리섬유) 성형판을 콘크리트 구조물에 적용하여 방식성을 부여한 방식 피복 공법으로서 높은 부식환경에 적용할 수 있는 공법이다. 복합재료(FRP)로 제작한 성형판은 섬유의 종류에 따라 보수 및 보강형태로 나눌 수 있는 것이 특징이다.(Fig. 7 참조) 최근 국내·외에서 하수도 콘크리트 구조물의 노후화가 큰 사회문제로 나타나면서 하수도 콘크리트 구조물의 유지·보수·공법 개발에 많은 연구를 하고 있는 실정이다.

하수도 구조물의 철근열화 형태를 살펴보면, 하수 중에 발생한 황산소스가 콘크리트 표면의 수분을 흡착하고 박테리아에 의한 황산이 생성되게 된다. 이렇게 발생한 황산이 콘크리트와 대응하면서 콘크리트를 중성화시킴으로써 철근 부식을 유발하

게 된다. 즉, 하수도 구조물의 보수·보강공법에는 구조물의 화학적 침식에서 보호하는 것과 함께 내하력의 향상에 도움을 줄 수 있는 재료를 요구하게 된다.

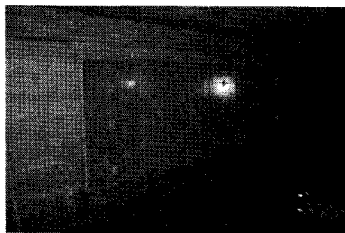
이와 같은 요구조건을 만족시킬 수 있는 것이 본 장에서 소개하고 있는 성형판 보수·보강 공법이다. 복합재료(FRP)를 이용하여 제작한 성형판의 세부적인 구성요소는 다음 Fig. 8에 나타내었으며, 그림에서 보는바와 같이 방식·보강TYPE은 성형판 중간부위에 위치한 탄소섬유에 의하여 전체적으로 검은색으로 이루어져 있다. 하지만, 콘크리트 면 부착 시 충전재의 주입상황을 확인하기 위하여 판재의 일정한격으로 반 투명부분을 형성한 것이 특징이라 할 수 있다.

본 공법은 복합재료의 우수한 방식성능을 이용하여 하수도 콘크리트 BOX에 부착하여 방식 및 콘크리트 보강효과를 극대화 시킨 공법으로써 방식효과와 확인은 반드시 필요한 사항이다. 이에 따라, 일본 공인 시험기관의 EPMA 분석을 통하여 방식성능을 확인하였다.(Fig. 10 참조) 본 시험방법은 복합재료(FRP)를 이용하여 제작한 성형판 시험체에 10% 황산수용액에 60일간 침지시키고 시험체의 유황 침투 깊이가 시험체의 판 두께의 1/100 이하인 것을 EPMA 분석결과를 확인하는 방법으로 시험을 실시한 결과 Fig.10과 같은 결과를 얻을 수 있었으며, 분석결과 성형판 시험체에서는 피복의 얼룩, 벗겨짐 현상, 깨짐 및 황산의 침투가 이루어지지 않은 것을 확인할 수 있었다.

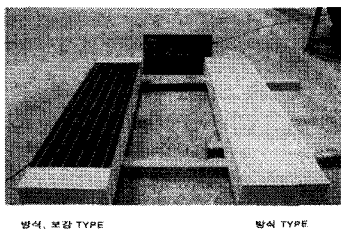
성형판 공법의 활용분야에 대해서 살펴보면 Fig. 9(a)와 같이 하수도 콘크리트 BOX에 방식·보강형태로 활용할 수 있다. 뿐만 아니라, 섬유접착공법과 같이 구조물 보수·보강용으로도 최근 일본에서 많은 연구가 이루어져 콘크리트 구조물 벽, 슬래브, 보드에 널리 쓰이고 있는 상태이다. 성형판을 얇게 제작하여 Fig. 9(c)에서 보는바와 같이 원형형태의 구조물 보강이 가능한 공법으로 활용되고 있다.

### 3.3 FRP rod 및 강선 보강공법

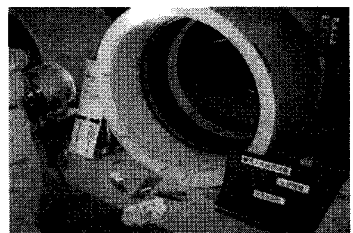
앞에서 설명한 복합재료를 이용한 공법 이외에 기타 복합재료를 이용한 공법 및 재료를 살펴보면 다음과 같다.



a. 하수도 콘크리트BOX



b. 구조물 보수/보강



c. 원형 구조물 보강

Fig. 9 성형판 공법의 활용.

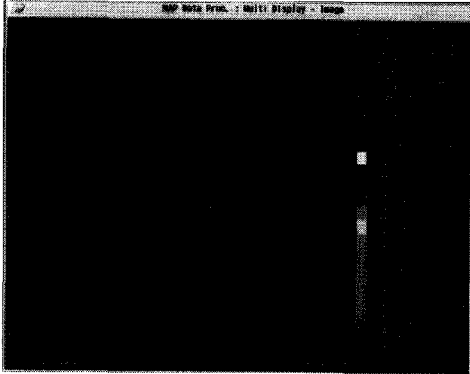


Fig. 10 성형판 EPMA분석결과.

복합재료(FRP)는 높은 인장강도를 가지고 있어 프리스트레스트 콘크리트에서 강재 긴장재의 대체 재료로 주목을 받고 있으며, 이와 관련된 연구가 최근 활발하게 진행 중에 있다. 그러나, FRP 긴장재는 일상적인 건설재료로 활용하기에는 통용되는 시방서의 재 규정이 현재까지 완비되지 않았기 때문에, 이에 따른 많은 연구와 실험이 진행되고 있다. 다음 Fig. 11에서는 복합재료(FRP)의 긴장재 활용 예에 대해 나타내었다.

### 3.4 FRP 구조물 보강공법 관련 설계기준 소개

최근 토목건축과 관련하여 FRP의 적용성이 연구되고 있는 분야는 트러스 또는 프레임, 벽체-건물교량에 사용되는 판, 콘크리트 내부의 보강재 또는 긴장재, 콘크리트, 목재, 벽돌, 강재 등의 외부 긴장재로서의 플레이트나 셸, 콘크리트 부재 외부 보강재 또는 거푸집 등이 있으며, 이러한 모든 분야에서 FRP 적용 가능성이 매우 높은 것으로 알려졌다. 또한, 이러한 분야에 적용 가능한 FRP의 제작을 위하여 다양한 제조공정 및 기술에 관한 연구도 수행되고 있다.

전 세계적으로 시공된 약 80개소의 복합재료 교량의 경우, 정립화된 복합재료 전용 시방규정 및 지침에 의하여 설계·시공된 사례는 없는 것으로 조사되었다. FRP 관련 설계기준 및 시방서는 FRP 사용 초기에는 기존 교량의 보강 차원에서 활용되다가 점차 신설교량의 철근 또는 긴장재를 대체하는 내부 보강재로 영역이 넓혀졌다. 최근에 들어서는 바닥판, 주형, 교각 등 교량의 주 구조부재에 FRP를 적극적으로 사용하려는 노력이 진행되고 있다. 따라서, 현재 체계적으로 설계기준 및 시방서의 틀이 구축되어 있는 것은 주로 보강재로 사용되는 FRP에 대한 것이 주류를 이루고 있다는 것이다. 즉, 주 구조부재로서의 FRP에 대한 체계화된 설계기준이 거의 없는 실정이다.

미국의 경우에는 'FRP를 이용한 설계 및 시공지침(Guide for the design and construction of concrete reinforced with

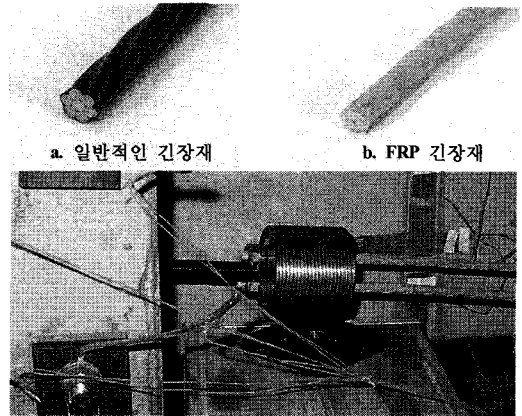


Fig. 11 FRP 긴장재의 활용.

bars, 2000)'이 규정되어 있다. 여기에는 FRP의 기본적인 재료 특성치 및 사용상의 주의점, 그리고 최소 사용량과 FRP 취급 및 시공 시 주의점 등 FRP 재료에 대하여 비교적 상세히 기술하고 있다. 또한, FRP의 기본적인 설계개념이 정립되어 있고, 힘, 전단, 온도 그리고 연결부 설계 등에 대한 연구결과를 바탕으로 각각에 대한 설계 한계치 등을 규정하고 있으며, 이에 대한 설계방법 및 이를 이용한 설계 예를 제시하고 있다. 한편, 유럽에는 복합재료를 이용하여 구조물을 설계, 시공하기 위한 설계기준 및 지침서로서 'FRP구조 설계기준'(Design Code, Structural Design of Polymer Composites, 1996)'이 있으며, 캐나다의 경우에는 '도로교설계기준(Canadian Bridge Design Code, 2000)'에 FRP구조에 대한 기준이 규정되어 있다. 일본의 경우, 'FRP를 이용한 콘크리트 구조물의 설계 및 시공 요령(Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials, 1997)' 등에 FRP구조에 대한 설계 및 시공, 시험방법 등이 규정되어 있다.

## 4. 결론

복합재료(FRP)를 이용한 구조물 보강공법은 복합 신재료의 우수한 역학적 특성 및 내구성 등으로 인하여 강재나 콘크리트를 대체할 새로운 재료로 주목받고 있다. 특히, 보강재의 중량 감소로 인한 시공성 향상 및 공기단축과 부식이 발생하지 않음에 따른 유지관리 비용 절감 등의 장점은 향후 적극적인 활용을 기대하게 된다고 볼 수 있다. 그러나, 건축/토목 구조물용으로 설계된 섬유강화 복합재료에 대한 기존의 수많은 연구에도 불구하고, 보강재의 계면탈락에 의한 취성파괴를 방지할 수 있는 기술이 필요하고, 장기적인 내구성에 대한 신뢰할 수 있는 데이터가 부족하다는 것이 큰 문제점으로 나타나고 있다.

## 감사의 글

본 연구는 건설교통부의 건설핵심기술연구개발사업(03산학연 A07-09)의 지원과 과학재단 우수연구센터인 스마트 사회기반시설 연구센터의 지원에 의해 이루어진 것입니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- 1) Taniguchi, H., Mutsuyoshi, H., Kita, H., and Machida, A., “Ductile Behavior of Beams using FRP as Tendons and Transverse Reinforcement,” FRP Reinforcement for Concrete Structures, ACI SP 138-39, 1993, pp. 651-670.
- 2) 高橋仁智 외, “破壊力學手法によるひび割れ分散を考慮した纖維補強輕量コンクリートパネルの曲げ破壊解析”, 日本建築學會構造系論文集, 第541號, 2001, pp. 37-42.
- 3) 古市耕輔 외, “FRPを用いたコンクリート構造物のライフサイクルコストのケーススタディー”, 橋梁と基礎, 第37卷, 第5号, 2003, pp. 39-44.
- 4) 明嵐政司 외, “CFRP吊橋の經濟性に關する研究”, 土木技術資料, Vol. 42, 日本土木研究所, 2000, pp. 26-31.