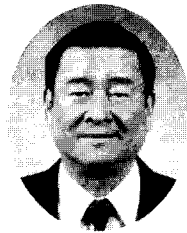


# 특집 II

건설산업에서의 FRP

## 21세기 건설 재료로서 FRP의 전망

- FRP as Construction Material in 21st Century -



김덕현\*



박상렬\*\*

### 1. 서론

본고는 복합 재료 FRP(Fiber Reinforced Polymer)가 건설 분야에서 어떻게 이용되고 있고 장래 어떤 발전을 할 것인가에 대하여 서술하고 있다. 재료산업의 장래는 건설 분야에서 쓰이던 재래의 재료가 첨단 복합 재료로 대체될 때 결정될 것이다. 왜냐하면 건설산업에서 쓰이는 재료의 양은 막대하기 때문이다. 건설 관련 세계 시장의 규모는 연간 2조 4,000억 달러로 추정되고 있고 미국만의 향후 20년간 사회간접 시설 보수를 위한 투자 소요는 3조 내지 4조 달러로 계산되고 있다. 이러한 거대한 시장에 대하여 미국은 세계에서 30년 내지 40년 앞선 첨단 군사 기술을 응용하기 위한 기술 재투자 사업(Technology Reinvestment Program)을 착실히 진행하고 있다. 1996년 11월 워싱턴에서 열린 미국 토목학회 연차 총회에서 재료공학 회의의 주제는

'Materials for the New Millennium' 이었다.

강교는 부식되고 콘크리트교에 들어 있는 철근이나 프리스트레싱 강재도 부식을 피할 길이 없다. 지하 저유 시설도 같은 상황에 놓여 있다. 1979년, 미국 표준국 조사보고서에 의하면, 부식과 관련된 손실은 연간 약 820억 달러로서 GNP의 약 4.9%에 해당된다. 복합 재료의 가장 큰 장점으로는 내부식성이 강해서 유지 보수비가 크게 감소하여 장기적으로 경제적이 된다. '기존 구조물의 철거, 재시공은 엄청난 공사비와 긴 공기를 필요로 한다. 따라서 기존 구조물의 보수 및 보강에는 복합 재료의 사용이 절대적으로 필요로 한다.

대형 구조물의 설계시 가장 큰 제한 조건은 건설 재료에 따라 치수(size)의 한계가 있다는 사실이다. 예를 들면 현수교나 사장교의 경우, 강재에 비하여 최대 지간(span)이 유리 섬유 복합 재료를 사용하면 2배, 탄소 섬유 복합 재료를 사용하면 3배가 가능하다. 고층 건물의 경우 자중에서 오는 문제가 더욱 심각해서 기초 지반 지지력의 한계가 층고의 한계를 결정하고 맨 아래층의 기둥 강도 한계도 층고의 한계를 결정

\* 정회원, Korea Composites 사장

\*\* 정회원, 제주대학교 토목공학과 교수

하며, 커다란 기둥은 건축 계획의 큰 장애물이 된다. 또한 무거운 중량 때문에 중장비 사용이 필수적이며, 막대한 공사비와 긴 공기가 필요하다. 또한, 지진 또는 충격시 관성력은 무게에 비례하므로 복합 재료 구조물이 받는 충격력은 무게비만큼 줄어든다.

## 2. 복합 재료의 필연성

### 2.1 재래 재료 구조

정착을 위한 조건으로는 식량, 물, 건설 재료가 있어야 한다. 건설 재료로서 돌과 진흙, 그리고 나무가 있었다. 자연계의 모든 동물과 식물은 섬유질 구조에 의존하고 있고, 인류는 선사 시대부터 자연 섬유를 이용해 왔다. 일찍이 가장 널리 사용된 구조 재료인 목재는 자연이 만들어 준 섬유 복합 재료의 최선의 예이며, 옛 우리나라의 진흙에 짚을 섞어 만든 벽체는 섬유 복합 재료 구조의 좋은 예가 된다.

기술은 과학이라 불리기 이전의 여러 세기 동안 예술이었다. 인류가 혹독한 자연 조건을 피하고자 피난처를 찾았을 때 그는 기술을 터득하기 시작했다. 거주할만한 동굴이 없을 때 어느 원시인은 손과 두뇌의 힘으로 돌, 진흙 및 나뭇가지 또는 얼음덩이로 인공 '동굴'을 만드는 방법을 발명하였다. 기술자란 직업은 진흙 벽돌로 더 영구적인 거주처를 건설하면서 초기 단계로 접어든 것이다.

장구한 역사를 지나면서 구조물 건설의 4대 기본 개념이 발전하였다. 이들은 그 시대에 사용 가능한 건설 재료와 응용이 가능한 기술 지식으로 발전된 구조 형식인데, 기둥과 보, 석조 아치, 목재 트러스, 현대 철강 트러스 및 뼈대 등이다.

### 2.2 복합 재료 구조

21세기를 시작하는 현재 금속, 화학공학의 눈부신 발전은 각종 구조용 신소재의 등장을 통해 강철을 비롯한 각종 재래 구조 재료의 퇴장을 강요하기 시작한 지 오래다. 지금까지 인간이 사용 가능한 재료와 응용 가능한 기술로 구조 형식을 발전시켜 왔듯이 우리에게 새로운 소재를 사용하는 데 적합한 새로운 구조 형식의 개발이 필요한 것이다. 필자는 1991년부터 이것을 구조물의 제5 기본 개념이라고 칭해 왔다.<sup>1)</sup>

인류 역사의 여명기로부터 소재는 발전을 위한 무기였다. 역사 시대는 '석기 시대', '청동기 시대', '철기 시대' 등과 같이 사용된 구조 재료에 의해서 분류되기 까지 했다. 그러나, 오늘날 우리 시대를 한가지만의 재료로 부를 수는 없다. 우리 시대는 '선택의 시대'이기 때문이다. 우리는 적절한 소재를 최적 용도로 사용할 가능성을 갖고 있는 것이다. '선택의 시대'란 강한 경쟁이 있음을 의미한다. 복합 재료의 주요한 힘 가운데 하나는 성능의 다양성에 있다.

경쟁 소재들도 낮은 가격이란 강한 무기를 갖고 있어 복합 재료는 가격은 2차 요소가 되는 우주 항공과 같은 고성능/소량 산업 부문만 지배할 수 있었다. 오늘날 소재들의 가격 구조는 내려오는 기미가 보이기 시작했고, 효율적인 제작 방법이 나날이 출현하고 있어, 기술자들은 이들 새 소재들을 매우 심각하게 고려해야만 하기에 이르렀다. 설계 방법은 생산 가격 인화에 큰 역할을 한다. 복합 재료로 제작, 건설된 많은 구조물들이 다른 구조 재료로 건설된 것보다 경제적인 실패가 여럿 있다.

인류 문화상 제5의 구조 개념의 대표적인 구조 형식은 복합 재료 구조(composite structure)이다. 간단히 말해서 복합 재료란 두 가지 또는 그 이상의 소재들을 복합적으로 결합시켜 특정 목적을 위해 만들어진 제품을 의미한다. 두 가지 이상의 소재가 결합되는 고로 단일 소재에는 없는 여러 가지 특성을 창출해낼 수 있다. 복합 재료의 구성 요소는 성능상으로 크게 두 가지 요소로 분류된다. 즉, 역학적 특성을 나타내주는 보강재(reinforcement)와 이를 지지 고정시켜주는 고정재(binder)로 구성되는데 고정재는 흔히 모재(matrix)라 불린다. 보강재나 모재의 원료는 금속, 고분자, 세라믹 등 재래의 소재와 최첨단 소재까지 포함해서 모든 소재가 활용될 수 있으며 성능, 가격 등을 고려한 최적의 제품을 만들 수 있게 선별, 설계되어야 한다.

복합 재료를 논할 때 3개의 'phase'를 이야기한다. 첫째와 두번째 phase가 각각 보강재와 모재이고, 세번째 phase가 보강재와 모재의 접촉 부분인 'interface'이다. 두 가지 이상의 소재가 결합하여 일체가 된 복합 재료를 만들어 내는 이 interface야말로 주어진 소재들의 특성을 얻을 수 있게 하는 중요한 역할을 한다. Interface를 어떻게 처리하느냐에 따라서 제작 방법, 강도 등의 여러 가지 특성이 달라진다.

보강재는 형태에 따라 fibers, flakes, particulates 등으로 구분된다. Particulates는 소요 물리적 특성을 얻게도 하고 가격을 저하시키는 일도 한다. 콘크리트 내의 모래, 자갈이 그 예이다. Fibers는 소요 역학적 특성을 얻게 하는 최적 형태인데 직경의 크기에 따라 whisker, fiber, wire, rod 및 bar로 불린다.

### 2.3 복합 재료의 특성

복합 재료를 구조물에 사용할 때, 매우 경량이고 부식이 발생하지 않는다는 사실 외에 재래의 구조 재료에 비해서 다음과 같은 구조적 장점이 있다.

- ① 임의 방향으로의 보강 가능성
- ② 스티프너등과 같은 기하학적 보강 없이 구조 부재를 보강할 수 있는 가능성
- ③ 구조적 요구 사항에 따라 최적 부재/구조를 생산할 수 있는 가능성

복합 재료로 교량을 건설할 때 구조물의 경량성으로 중장비 사용이 극단적으로 감소되고 공기는 크게 단축된다. 우리나라처럼 교통량이 많은 나라에서 특히, 도심지에서 교통난 해소를 위해 고가도로나 차량용 육교를 건설할 경우, 복합 재료 교량을 사용하지 않는 한 지옥과 같은 교통 혼란을 몇 달씩 면치 못한다. 미국에서 캘리포니아에 필요한 물을 알래스카에서 1,700마일의 해저 수로로 운송하는 계획을 추진하고 있다. 강철과 콘크리트를 이용한 재래식 공법으로는 15년의 공기에 1,500억 달러가 소요된다. 복합 재료를 이용할 경우 10년 이하의 공기에 200억 달러 이하가 소요된다.

다음은 내부식성이다. 우리는 이미 여러 가지 구조물에서 부식으로 인한 엄청난 국가적 손실을 입고 있다. 콘크리트 내의 철근은 전기, 화학적 작용으로 부식이 진행되고 있다. 새로 건설하는 구조물의 부식 방지를 위해서 복합 재료 구조물을 건설하는 것은 절대 필수 불가결한 일이며, 또한 기존 구조물의 보수에도 복합 재료가 사용되어야 효과적이 된다. 높은 비강도와 비강성 이외에도 강한 내충격력, 높은 피로 강도를 갖고 있으며 중량이 적으므로 지진이나 기타 진동 발생시 감소된 관성력을 받게 된다.

복합 재료의 최대 강도와 강성은 보강재가 연속 섬유

형태로 배치될 때 얻어질 수 있다. 이런 섬유는 같은 방향이나 일정한 각도를 갖고 배치될 수 있다. 대부분의 구조 부재는 여러 개의 층으로 이루어진 일정한 두께를 필요로 한다. 이러한 것은 적층(laminate)이라 불린다. 비록 당연한 것 같기는 하나 필라멘트 형태 복합 재료의 섬유에 관한 기본적인 원칙이 있다.

- ① 효과적인 복합 재료 성능을 얻기 위해서는 섬유의 신장은 매트릭스의 신장보다 적어야 하고 강성은 높아야 한다.
- ② 적층의 역학적 특성은 보강재 종류보다 양과 형태, 즉 길이와 배치 방향에 좌우된다.
- ③ 복합 재료 구조 부재의 강도는 섬유 용량이 클수록 커진다.
- ④ 일정 방향으로의 직선 섬유 길이가 길수록 그 방향으로의 하중 부담 능력이 커진다.
- ⑤ 섬유 배치 방향이 힘의 방향을 결정하고 섬유 용량이 강도 획득량을 결정한다.

#### (1) 일방향성(unidirectional)

섬유의 동일 방향 배치가 가장 잘 되어지고 최대 섬유 용량을 얻을 수 있다. 최대 강도는 섬유 방향으로 발생한다. 85%(중량비)까지의 섬유가 배치될 수 있다.

#### (2) 이방향성(bidirectional)

연속 섬유가 직각으로 배치되어 있다. 강도는 이 두 방향으로 최대가 된다. 중량비 65%까지의 섬유가 배치될 수 있다.

#### (3) 다방향성(multidirectional)

짧게 잘려진 섬유들이 무작위하게 배치되거나 매트 형태로 배치되기도 해서 등방성의 성질을 갖게 한다. 중량비 65%까지 배치될 수 있다.

이상과 같은 예는 복합 재료의 일반적 특성을 설명한데 불과하며 구체적인 역학적 성능은 소재 특성, 경화 방법 등을 포함한 여러 가지 요인에 좌우된다.

### 2.4 역사적 필연성

1996년 11월 미국토목학회 연차 총회에서 Materials Congress가 열렸는데 이 모임의 명칭이 '새 천년을 위한 재료(Materials for the New Millennium)'였다.<sup>2)</sup> 역사는 변하는 것이 필연이다. 구조 개념은 인류

역사의 필연성에 의해서 변해 왔다. 지금까지의 구조물 4대 기본 개념은 그 당시 사용 가능한 소재와 응용 가능한 이론에 의해서 개발되어 왔다. 제4 구조물 개념을 위한 강철은 100여 년 전부터 사용되어 왔다. 제5 구조물 기본 개념이라고 부르는 복합 재료가 모든 구조물의 기본 설계에 사용되게 되는 것은 역사의 필연성에 의해서 이루어진다. 가격이 비싸다는 생각은 편견이었다. 복잡한 소재 특성은 적절한 검토로 파악될 수 있다. 어려운 이론을 대체하기 위해 쉬운 해석 방법의 개발은 계속되고 있다. 여러 나라에서 새로 시대의 경제 강대국이 되기 위해 이 분야에 노력을 기울이고 있다. 우리 기술자들도 새로 공부를 하는 자세로 이 분야에 대한 연구를 시작해야 한다. 그래야 우리 후손들이 계속 행복할 수 있는 것이다.

### 3. 2000년 현재 건설에서의 복합 재료

인류가 만든 복합 재료는 수천 년 동안 사용되어 왔지만 복합 재료의 고차원 기술은 1964년 영국 왕립 우주항공국에서 충분히 높은 인장 강도와 강성을 가진 탄소 섬유를 생산하면서부터 시작하여 우주항공산업에서 사용되기 시작했다. 각종 비행기 부품으로부터 시작하여 이제는 주 구조재로 사용되고 있으며 이러한 소재의 사용은 각종 운동 기구, 선박, 자동차 등으로 확산되어 갔다. 건설에 대한 응용은 현재 진행 중이다.

1967년 미국토목학회의 특별위원회는 구조용 플라스틱에 대한 간단하면서 집약적인 보고서를 제출했다. 이 보고서에 의하면, 복합 재료는 높은 인장 강도, 낮은 중량, 부식 작용에 대한 높은 저항력 등이 요망되는 목적으로는 탁월하지만 높은 온도 하에서의 거동이나 작은 변위가 요구되는 경우 그 성능이 부적절하다고 평가했다. 그러나, 30여 년에 걸친 계속적이고 집중한 개발의 결과, 오늘날의 복합 재료 FRP의 성능은 다른 소재들의 성능보다 월등히 우수하다. 문제는 건설산업에서 용납될 수 있는 가격 구조에 있다. 이 시점에서 소재 가격과 제작 단가가 고정되어 있다고 가정한다면 가격 구조는 좋은 설계 방법으로 낮아질 수 있다.

#### 3.1 유지 보수 및 재생을 위한 복합 재료

스위스 연방연구소는 교량에 대한 복합 재료 FRP

의 장래 이용에 관한 연구를 해왔다. 여기에서 기존 교량 보강을 위해서 탄소 FRP 적층판이 사용될 경우 강판을 사용한 경우와 비교해서 약 20% 저렴한 것으로 나와 있다. 복합 재료의 여러가지 장점에 추가해서 저렴한 가격이란 사실은 획기적인 것임에 틀림없다.

섬유 복합 재료는 새로운 구조물을 위한 재료로서 뿐만 아니라, 건물이나 사회간접 시설의 보수 및 유지를 위해서도 지극히 중요한 재료이다. 미국만의 사회간접 시설의 넓은 구조물 대체 사업비가 향후 20년간 3조 내지 4조 달러로 추산되고 있다. 우리나라의 교량, 상하수도 등 사회간접 시설 노후화로 인한 문제가 매우 심각함에도 불구하고 그 규모조차 확인되지 않고 있다. 이러한 시설물의 유지 보수 및 대체 공사에 따른 엄청난 비용과 교통 혼란 등을 고려할 때, 섬유 복합재료 FRP의 사용 이외에는 다른 방법이 없다. 구조물의 유지 관리 및 내구성 문제뿐만 아니라 시간이 결정적으로 중요하기 때문이다.<sup>31)</sup>

최근 지진 때문에, 미국 육군공병단과 캘리포니아주 교통국(Caltrans)에 의해 기둥 보강에 대한 많은 연구가 이루어졌다. 대부분의 경우 재킷들을 보강하기 위해 구조 부재의 기둥을 둘러싸게 하고 폴리머 콘크리트로 그 재킷 밑에서부터 위로 그라우팅한다. 1993년 현재 미국 전역에 걸쳐 100개 이상의 기둥이 FYFE 시스템으로 고속도로 교량에 성공적으로 적용되었다. 고속도로 교량에 추가해서 여러 물탱크와 주차 건물이 이 시스템으로 보수되었다.

남부 캘리포니아에 있는 한 회사에서 개발된 자동화된 'winder'는 콘크리트 기둥의 능력을 증진시키기 위해 탄소 테이프로 감고 양생하도록 설계되었다. 하루에 두 개나 세 개의 기둥이 보수될 수 있다. 강철 jacketing은 기둥 1개당 3~4일 정도 걸린다.<sup>32)</sup> 1997년 6월 현재 4개의 복합 재료 기둥 보강 방법이 미국 캘리포니아주 교통부에 의해 승인되었다. 이들은 Hexcel-Fyfe 방법, Xxsys 방법, Hardcore-du Pont 방법, Snap-Tite 방법 등이다. 위의 네 방법은 모두 기둥 보강의 5개 기본 형태, 즉 Wet Wrap, Fabrics and Towsheets, Wet Wrap/Tows, Towpreg Wrap, Precured Shells, Precured Tapes 중의 하나에 속한다.

1960년대부터 휨과 전단 보강에 대한 전통적인 보강 방법은 강판을 구조물에 부치는 데 집착해 왔다. 그러나, 강판은 무겁고 부식하게 된다. 복합 재료가

강철 대신 사용될 때, 현장으로 이동되고 정 위치에 들어 올려지는 데는 1/40의 무게가 수송된다. 더구나 가설 시간과 구조물이 받게 되는 총 무게가 크게 감소된다. 이런 요소들은 현장에서의 다른 활동들의 방해 를 크게 감소시킨다. 많은 경우에 접착된 복합 재료 보강은 강판보다 저렴하게 될 뿐더러 성능도 더욱 좋다. 1997년 현재 전 세계에서 1,500여 콘크리트 구조물이 FRP 부착 공법으로 보강되었다.

1999년에 브라질에 있는 70년된 385 m 길이의 육교 보수에 2,200 m<sup>2</sup>의 탄소 섬유 재료가 사용되었는데 보수된 구조물의 강도는 강철로 보수할 경우의 강도의 7배가 넘었고 가격은 40 % 저렴하였다. 최근에 미국 웨스트버지니아주의 두 곳의 교량 상판을 유리/비닐에스터 재료의 복합 재료로 제작하여 재생시켰는데 이 FRP 상판은 50년 교량 수명 기간 중 유지 보수의 필요성을 감소시키고, 철근 콘크리트 상판 무게의 20%로, 6배의 하중 능력을 제공할 것으로 기대되고 있다.

〈그림 1〉은 일본에서의 탄소 섬유 복합 재료(CFRP) 쉬트의 연도별 사용량 증가를 나타내고 있고, 〈그림 2〉는 CFRP 쉬트를 이용한 보강 프로젝트의 연도별 수의 증가를 보여주고 있는데, 그 증가 추이는 가히 기하급수적이라 할 수 있다.<sup>4)</sup>

### 3.2 콘크리트 보강을 위한 복합 재료

미국 육군공병단은 콘크리트 보강을 위한 FRP 복합 재료와 관련된 다음 연구 개발 프로젝트들을 수행하였다.

- ① 프리스트레싱 응용을 위한 FRP 복합 재료의 시범
- ② 콘크리트 교량 상판을 위한 FRP 복합 재료 FRP 봉의 시범
- ③ 철근 콘크리트 구조물의 보수/능력 향상을 위한 FRP 보강 체계의 개발 및 시범

부식이 안생기고 가격이 저렴하고 받침대나 형틀이 필요 없으며 재래의 교량 체계보다 월등한 이점을 주는 고속도로 교량 체계에 대한 새로운 개념의 개발을 위한 목적을 가진 연구 프로젝트가 미국 로렌스기술대학교에 의해 진행되었다. 연구 내용은 2중 T형 보, 상판과 T형 보와의 연결 등과 유리 섬유 복합 재료(GFRP), 탄소 섬유 복합 재료(CFRP) 등을 사용한 프리스트레싱 등 여러 가지 상세한 기술 내용을 검토했다. 플로리다 아틀란틱대학교는 토목 구조에 대한 첨단 고강도 복합 재료의 사용에 관한 심도 깊은 연구를 수행하였다. 교량 및 여러 형태의 보에 대한 GFRP, CFRP, 아라미드 섬유 복합 재료(AFRP)의 사용에 대한 타당성, 교량을 위한 탄소 섬유 케이블의 타당성 등이 연구되었다.

이 외에도 세계 선진 각국의 대학교와 연구소 등에서 철근 및 프리스트레싱 강재 대체재로서 FRP 콘크리트 구조에 대하여 활발히 연구하고 있다. 특히, 이 중에서 주목할 만한 주제들은 FRP 재료의 비소성으로 인한 연성(ductility) 개념의 재확립과 연성 확보 방법, 비소성과 낮은 휨 방향 전단 강도로 인한 FRP의 전단 파괴의 가능성, 프리스트레싱 텐던으로 사용하기 위하여 현장 제작이 가능한 정착구의 개발 등이다.

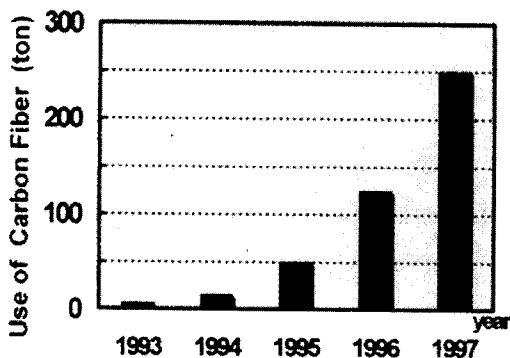


그림 1. CFRP 쉬트의 사용량 증가 추이(일본)

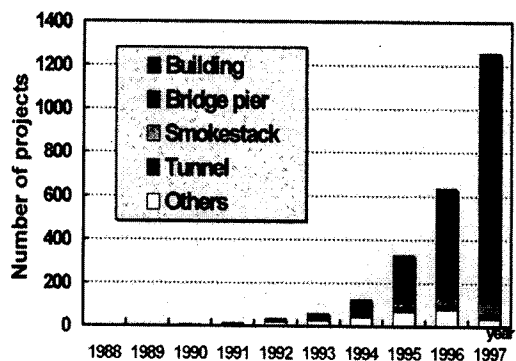


그림 2. CFRP 쉬트를 사용한 보강 프로젝트 수의 증가 추이(일본)

### 3.3 복합 재료 교량

교량 건설에 대한 복합 재료의 응용은 이미 시작되었다. 독일의 Dusseldorf 시는 세계에서 최초로 복합 재료 FRP 봉을 이용한 콘크리트 도로교가 건설되어 있다. 1986년에 개통된 16 m 폭의 47 m 지간을 가진 이 교량은 유리 섬유와 폴리에스테르로 된 FRP 봉으로 프리스트레스한 세계 최초의 교량이다. 길이 113 m인 횡단 육교가 스코틀랜드의 Aberfeldy에 세워졌다.<sup>5)</sup> 이 교량은 유리 섬유

보강 복합 재료로 구성되었으며 40개의 평행한 케블라 케이블에 의해 지지된다. 상판 구조는 유리 섬유 보강 복합 재료로 구성되었으며 높이 17.5 m의 유리 섬유 보강 복합 재료 탑(tower)에 매달려 있다. 250 톤의 GFRP 부재가 이 교량에 사용되었다. 1994년 현재, 총 9개의 GFRP 교량이 중국에 설계되고 건설되었다.<sup>5)</sup> 가장 오래된 교량은 1982년에 세워진 2차선 교량이고 다른 8개의 교량은 횡단 육교와 케이블로 지지된 GFRP 교량이다.

최근 록히드 마틴사(Lockheed Martin Missiles Space)의 연구개발부는 저가의 폴리머 매트릭스 복합 재료 고속도로 교량을 보고하였다(그림 3).<sup>3)</sup> 교량은 전부 표준 유리 섬유(E-glass) 보강 폴리에스터와 비닐에스터 폴리머 복합 재료로 만들어졌으며, 짧은 지간(36 m 이하)을 중심으로 만들었다. 설계 개념은 multi-cell box와 직교 보 구조 시스템이다. 각각의 구성 요소의 무게는 1,590 kg보다 적고 미리 결합시킬 수 있으며 재래식 장비로 교대에 들어올릴 수 있다. 교량의 결합은 전적으로 단 세 명의 인력, 지게차와 경량 호이스트에 의해 수행되었다. 상세한 실험 결과, 이 교량의 재하 능력이 AASHTO 시방서 조건의 2배를 초과하는 것으로 나타났다. 최대 재하 축 하중은 51.36톤인데 이때의 응력은 설계 허용 응력의 20%보다 낮았다. 그것은 교량을 효과적인 비용으로 지을 수 있는 것을 증명한다(\$2,178/m<sup>2</sup>).

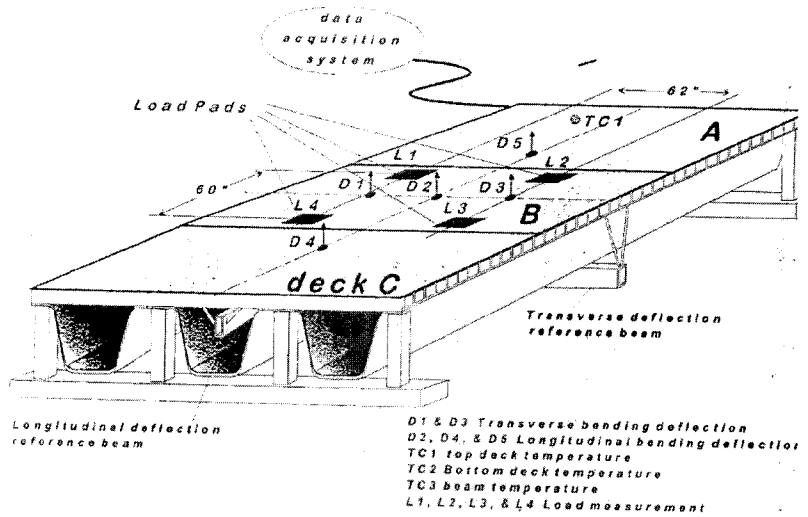


그림 3. 록히드 마틴에서 연구한 교량 단면

교량에 대해서는 프리스트레스용 텐던 또는 케이블, 케이블 튜브 교량, 접합 CFRP 보, T-시스템 교량, 현수교 및 사장교용 케이블, 고속 전철용 교량 등에 대해서 복합 재료가 이미 사용되었거나 연구가 진행 중이다. 100% 유리 섬유 복합 재료로 된 차량용 도로교가 1997년 11월에 미국 캔사스주에 건설되었다. 7.7 m 지간에 9 m 폭을 가진 교량은 경량 크레인을 사용하여 공장 제작된 단면들로 약 10시간에 가설되었다. 강철이나 콘크리트를 사용한 구조는 어떤 방법으로든 10시간 내에 가설될 수 없으므로 이런 형태의 신속히 재시공되는 단경간 교량에 대한 수요는 대단할 것이다.

UCSD는 Caltrans, DARPA 및 연방도로청(FHWA)으로부터 연구비를 받아, 100% 복합 재료 교량 상판과 콘크리트 상판과의 성능을 비교, 평가하기 위한 연구를 하였다. 미국에서의 고속도로 교량의 평균 수명은 68년이고 상판의 경우 35년인 것으로 추정되고 있다. 미국의 모든 도로교 상판의 40%는 1990년대에 35년이 될 것으로 나타나 있다. 세설용 소금을 사용할 경우, 재래식의 교량 상판 수명은 10년 뿐이다. 복합 재료 상판은 이러한 도전을 해결할 수 있다. 연구된 상판의 길이는 4.57 m, 폭은 2.3 m였는데, 실험 결과 복합 재료 상판은, 콘크리트 상판보다 높은 하중을 견디면서 자중은 콘크리트 상판의 1/4이었다. 다른 캘리포니아 대학교(CSULB)는 1980년대

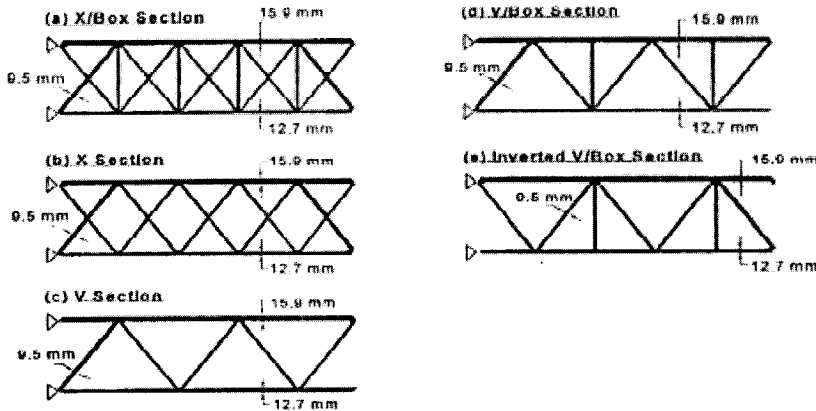


그림 4. 적절한 교량 요소로 연구한 교량 상판 단면들

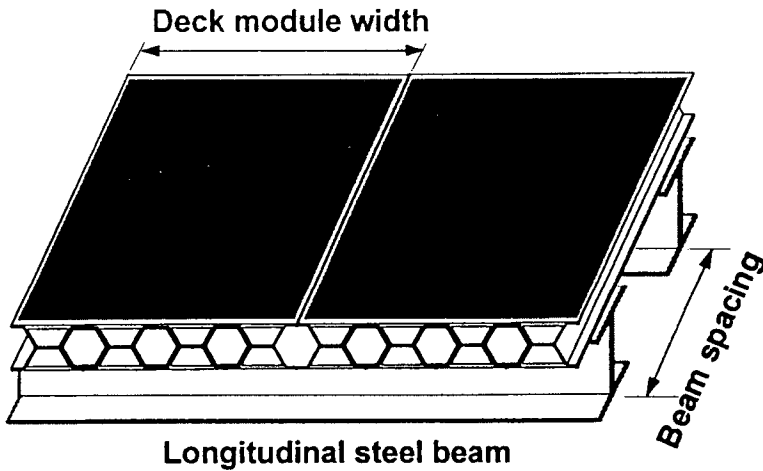


그림 5. 웨스트버지니아대학교에서 연구한 교량 상판

부터 복합 재료 교량 설계 및 건설로의 이전을 위한 일련의 연구를 해왔다. 여러 가지 복합 재료 구조 요소들을 연구한 결과 상판과 케이블이 복합 재료 사용을 위한 가장 적절한 교량 요소라고 결론지었다. 연구된 교량 요소들은 <그림 4>와 같다.

웨스트버지니아대학교에서 연구한 교량 상판은 <그림 5>와 같으며 종 방향 거더 위에 놓여 있다.

### 3.4 탱크, 파이프, 기타

1963년 이후 미국에서 복합 재료 지하 저장 탱크의 건설을 위해 1억 5,000만 kg 이상의 수지가 사용

되었다. 1993년 현재 지하 저장 탱크 시장의 90%, 송유관 시장의 50%를 복합 재료가 차지하고 있다. Owens-Coning 유리 섬유회사가 1964년에 2만 2,710리터 탱크를 일리노이주에 있는 한 주유소에 물었는데 1990년 도로 확장 때문에 캐내어야만 했다. 그런데 이 탱크는 좋은 상태였고 압밀 시험을 통과했으므로 다른 주유소에 매설되었다. 1960년 이후, 30만 개 이상의 폴리에스터 탱크가 미국 전역의 주유소에 설치되었다.

전 세계 상하수도 계통의 유지 보수에 필요한 추정 자금은 연간 약 3,000억 달러이다. 이 시장에는 복합 재료가 가장 강력하게 대두할 것이다. FRP 파이프는 더 긴 수명과 낮은 보수 필

요성을 갖고 무게는 약 1/5 정도로 경량이다. 가격에 대해 고찰할 때 복합 재료에 관한 국제 간행물에 의하면 60cm보다 적은 직경의 파이프는 금속이나 기타 플라스틱 제품이 유리하고 이보다 크고 150cm 미만인 경우는 금속과 복합 재료가 비슷하고, 150cm 이상에서는 복합 재료가 유리하다고 되어 있다. 그러나, 25cm 미만의 고압 파이프의 경우 복합 재료 제품이 단연 저렴하고 만약 장거리 관로에서 수송비를 고려하면 단연 압도적으로 유리하게 나타났다.

지질 섬유 개념은 토질 및 기초 공학에서 활용되어 온지 오래고 토질 및 기초공학자들은 기초, 뚝, 사면 등의 보강을 위해 지오 텍스타일을 사용해 왔다. 섬유

와 시멘트와의 결합으로는 폴리프로필렌이 보강된 아스팔트 활주로 포장, 폴리에스테르 스티렌 폴리머 도로 오버레이, 섬유 보강 콘크리트 상판, 포장 등 많은 예가 있다.

복합 재료는 콘크리트 형태로 사용될 수 있는데 값이 싼 유리 섬유가 주로 이용되며 그 장점은 다음과 같다.

- ① 강철이나, 목재 등으로 된 형틀보다 극히 매끄러운 마감을 얻을 수 있게 한다.
- ② 용통성과 구조 가능성 때문에 유리 섬유 형틀은 완공된 콘크리트 모양을 해칠 수 있는 이음새와 중첩 연결부의 수를 감소시키고, 불필요한 불연속 부분이 없는 복잡한 형태의 제작을 가능케 한다.
- ③ 재료의 경량성 때문에 복합 재료 형틀은 증장비 사용을 크게 감소시키면서 시공 기간을 단축한다.

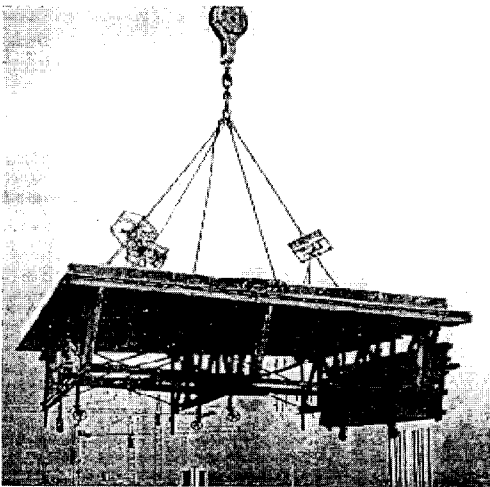


그림 6. 1개 층을 동시에 타설할 수 있는 복합 재료 형틀

#### 4. 건설 분야에서 복합 재료 사용을 위한 연구 개발 방향

구조 기술자들은 복합 재료로 사회간접 시설 설계시, 기존의 재료에 비해 경량이고 내부식성을 가지는 것 이외에도 아래와 같은 장점이 있는 것을 발견하게 된다.

- 뛰어난 인성
- 뛰어난 전자기적 특성

- 우수한 감쇠 효과
- 임의 방향으로의 보강 가능
- 필요 조건에 따른 최적화된 부재/구조물의 생산 가능성
- 지진 발생시, 경량으로 인해 관성력 감소
- 구조물의 경량과 가설의 용이성으로 인해 건설 공기 단축

위와 같은 장점들로 인해 복합 재료가 기존의 재료들을 대신해 21세기의 주된 건설 재료가 되리라는 것을 기대할 수 있다. 그러나, 이러한 여러 가지 장점에도 불구하고 토목, 건축 등 일반 건설 재료로서의 이용은 아직 초보 단계에 있다. 그 주된 원인은 다음 세 가지로 요약될 수 있다.

- ① 이론이 일반 설계 기술자에게는 너무나 어렵다. 설계 사무소나 현장의 건설 기술자들은 대개 학부 수준의 이론적 배경을 갖고 있다.
- ② 건설 기술자를 위한 포괄적인 교과서나 참고서가 없다. 주된 이유는 항공우주분야등 신소재 구조 기술자와 건설 기술자는 서로 다른 '용어'를 사용하고 있는 데 있다.
- ③ 복합 재료의 가격이 높다는 편견이 있다.

최신 복합 재료의 이론은 학부를 졸업하고 실무에 종사하는 일반 건설 설계 및 시공 기술자들에게는 너무나 어렵다. 그러나, 현재까지 쉽게 사용할 수 있는 간단하고도 정확한 이론 개발을 위해 노력한 결과 거의 완성에 가까운 간단하고도 정확한 설계 이론이 확립되고 있다. 흔히들 건설 기술자들은 보수적이라고 하는데 이것은 잘못된 평가들이다. 건설 기술자들은 정확한 이론이나 설계 방법이 개발되기 훨씬 이전에 현재보다 훨씬 열등한 건설 재료로 장대교, 고층 건물, 거대한 댐들을 설계 건설하여 왔다.

현재 복합 재료 소재의 가격은 계속 내리고 있고 경제적이고 효율적인 제작 방법이 나날이 개발되고 있어 설계 방법이 가격 형성에 결정적인 작용을 하고 있다. 구조물의 제5 기본 개념이라고 이름 붙인 새로운 개념에 근거한 최적 설계가 결정적으로 필요한 것이다. 선택의 폭이 방대하고 고려 사항이 무수히 많은 복합 재료의 경우 가격은 설계자의 판단 능력에 더욱 크게 좌우된다.



#### 4.1 남아있는 연구 과제들

가격은 2차적 문제가 되는 우주항공용 구조물들과 비교할 때 건설 구조물들은 엄청난 양의 재료를 필요로 하고 가능한 한 낮은 가격으로 제작되어야 한다. 대부분의 토목 건축 구조 요소들은 치수가 커서 거의 모든 경우에 실물 원형 실험이 불가능하다. 시편 강도나 축소 모델 시험 강도는 일반적으로 현장 구조 재료 강도보다 높다. 비등방성 재료 구조물의 응력 계산 문제는 FEM(Finite Element Method) 또는 다른 해석 방법으로 비교적 쉽게 해결된다. 나머지 주요한 세부 문제는 다음과 같다.

- ① 치수 효과(size/scale effect)를 고려한 적절한 파괴 이론의 개발
- ② 최상의 목표를 얻기 위한 설계 및 해석의 최적화
- ③ 지능 구조물(intelligent structure)의 개발
- ④ 표준시방서의 개발

#### 4.2 표준시방서

건설업계에서 복합 재료를 더 받아들이기 위해서는 FRP 재료를 구조물 시방서나 여러 표준시방서에 포함시켜야 된다. 이러한 표준시방서들의 개발은 pultruded 구조물 형태에 사용되는 재료에 대해서는 플라스틱산업학회(Society for the Plastics Industry), 복합 재료에 대한 표준시방서는 미국표준국(American National Standards Institute), 미국재료시험학회(American Society for Testing Materials), 미국도로교통협회(American Association of State Highway and Transportation Officials), 미국콘크리트학회(American Concrete Institute), 캘리포니아주 교통부(California Department of Transportation), 또 가장 중요한 미국토목학회(American Society of Civil Engineers) 등이 개발에 참여하고 있다.

ACI의 440 위원회(FRP 보강재위원회)와 ASTM D-20 위원회(콘크리트 보강을 위한 FRP 복합재료위원회)등은 시험 방법과 재료 표준을 개발하고 있다. ACI 440 위원회는 1996년 그 동안의 FRP 관련 기술을 정리, 요약한 'State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Plastic Reinforcement for Concrete Structures'를 간행하였고<sup>6)</sup> 현재 'Guide

for Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures'를 준비 중에 있다.<sup>7)</sup> FHWA, AASHTO, ACI, PCI 및 ASTM은 설계 및 건설 시방서와 필요한 설계 자료의 개발을 하고 있다. 한편 일본은 1993년 세계에서 처음으로 FRP 콘크리트 구조물을 위한 설계 가이드 라인을 내놓았다.<sup>8)</sup>

#### 4.3 지능 구조물(Intelligent Structures)

건설공학 응용을 위한 지능 구조물(Smart Structures)의 연구에 관한 두 개의 주요한 프로젝트가 미국에서 진행 중이다. 먼저 것은 Cooperative Research and Development Agreement란 것으로 참가자들은 미 육군공병단, 버지니아 공대, 일리노이 대학교 및 프라스틱산업학회 등이다. 연구 참가자들은 복합 재료 구조물의 질적 및 양적 평가를 위한 방법을 개발하고 있다. 이 방법은 많은 작은 크기의 입자들을 복합 재료 안에 배치하여 이 입자들이 들어 있는 복합 재료의 일부가 된다는 데서 다른 지능 기술들과 차이가 있다. 복합 재료 부품의 모든 부분이 '신경'을 갖고 있어서 부품 전 부분의 건강 진단이 가능한데 과거의 string 게이지는 어느 국부적 파괴만 측정할 수 있었다. 이 연구의 목적은 어느 대상 구조물의 기능을 변화시키지 않는 정도의 파괴를 감지해서 기술자들이 보수를 계획할 수 있는 시간을 갖게 하자는데 있다.

다른 프로젝트는 ISIS(Intelligent Sensing for Innovative Structures)로서 1995년에 시작되었다. 이 프로젝트의 전체적인 과제는 복합 재료와 광섬유 진단 기술(fiber optic sensing technology)을 개발하고 이것들을 건설 산업에 응용하는 데 있다. 이 프로젝트는 Bragg grating이라 불리는 광섬유 안에 배치된 '거울'을 복합 재료 구조 부품에 집어넣는 일을 한다. 광섬유는 대상 물체의 압력, 진동, 온도, 변형률 등의 분포 상태를 mm의 극소 부분의 정확도로 측정할 수 있다. 광섬유들은 보강재 섬유와 같은 특성과 형태를 갖고 있어서 복합 재료와 쉽게 적합될 수 있다. 따라서 광섬유들은 복합 재료 안에 쉽게 배치될 수 있다. ISIS는 광섬유가 들어있는 프리스트레싱 텐던을 개발했다.

1996년 초에 광섬유가 들어있는 복합 재료를 사용한 세계 최초의 교량이 건설되었고 다른 두 개가 그

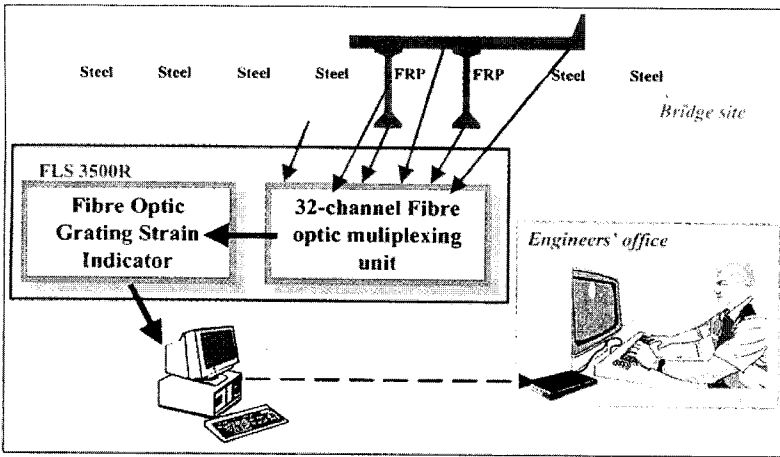


그림 7. 광섬유 계측 기술 시스템

해에 계획되었다. 캐나다의 캘거리에 있는 이 교량은 광섬유가 들어 있는 FRP 프리스트레싱 텐던으로 보강되어 있다. 광섬유 기술과 복합 재료는 다음 5년 내에 보수 및 재생 사업에 있어서, 또 다음 10년 안에는 건설산업 전체에 엄청난 충격을 가할 것이다. <그림 7>은 광섬유 계측 기술 시스템을 보여주고 있다.

### 5. 결 론

역사는 변하는 것이 필연이다. 지금까지의 구조물 4대 기본 개념은 그 당시 사용 가능한 재료와 응용 가능한 이론에 의해 개발되어 왔다. 지금은 거의 매일 새로운 것이 발표되고 2주일 전의 지식은 고물이 되는 시대이다. 인류 문화상의 제5 구조물 기본 개념이라고 부르는 복합 재료가 모든 구조물 건설에 사용되게 되는 것은 역사의 필연성에 의해서 이루어진다. 이것은 인류의 기술 및 소재 관련 지식이 발달한 데 따른 역사적 필연성에 의한 결과이다.

건설 재료로서의 섬유 복합 재료 FRP의 장점은 본문에서 비교적 상세히 설명되어 있다. 이러한 장점을 갖는 재료가 최대로 활용되기 위해서는 각 분야의 공학자들이 서로 다른 전공 분야에 대한 이해를 증진시키고 상호 협조하는 분위기가 생활화되어야 한다. 지금의 과학 기술은 너무 세분화되어 같은 분야의 기술자들도 다른 전공을 하는 사람과는 다른 '언어'를 사용하고 있다. 나는 강구조, 너는 콘크리트 구조 등등 전

공만 이야기해서는 새로운 구조물이 성립되지 않는다. 한 구조물의 건설에는 수리학, 지질공학, 구조물 계획, 진동, 안정성(좌굴), 응력 및 변위 계산을 위한 역학, 설계, 재료(화학, 금속, 세라믹), 제작 방법, 시공 방법, 기타 모든 분야가 합쳐져야 가능한 것이다.

건설 관련 세계 시장 규모는 연간 2조 4,000억 달러로 추정되고 있고 미국만의 사회간접 시설의 유지 보수비가 3조 내지 4조 달러로 계정되어 있다. 이러한 방대한 시장에 대해서 복합 재료가 사용된다는 것은 역사적 필연성에 의해 결정된다는 것을 재 강조하면서 복합 재료의 모재로는 고분자가 주로 사용될 것이라는 것은 주목할 만한 사실이다. 복합 재료의 시대는 먼 미래에 있는 것이 아니고 이미 시작되었다는 것을 재 강조한다. □

### 참고문헌

1. Kim, D. H., Composite Structures for Civil and Architectural Engineering, E & FN SPON, Chapman & Hall, London, 1995.
2. Chong, K. P., Editor, Materials for the New Millennium, Proc. of the Fourth Materials Engineering Conference, ASCE, Washington D. C., November, pp. 10-14, 1996.
3. Kim, D. H., "Composite Materials for Repair and Rehabilitation of Buildings and Infrastructures", Plenary Lecture at The Third International Symposium on TEXTILE Composites In Building Construction, Seoul, Korea, November, pp. 7-9, 1996.
4. Fukuyama, H., "FRP Composites in Japan," Concrete International, American Concrete Institute, October, 1999, pp. 29-32.
5. Kim, D. H., "Cement Problems - Applications of Composite Materials for the Infrastructure", The Second Annual Wilson Forum : Existing & Potential Applications of Composite Materials in

- the Infrastructure, Santa Ana, California, April, pp. 18-19, 1994.
6. ACI Committee 440, "State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Plastic Reinforcement for Concrete Structures," American Concrete Institute, 1996.
  7. ACI Committee 440, "Guide for Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures." American Concrete Institute, Draft.
  8. Sonobe, Y., and Fukuyama, H., et. al., "Design Guidelines of FRP Reinforced Concrete Building Structures," Journal of Composites for Construction, ASCE, August 1997, pp. 90-115(English Version).