

# 21세기 건설재료로서 복합신소재구조물의 전망

## Prospects of Advanced Composite Structures as Construction Materials for 21 C



한봉구(Bong-Koo, Han) 부회장 | 서울산업대학교 건설공학부 교수 | 공학박사 | bkhan@snut.ac.kr

### 1. 서론

오늘날까지 토목, 건축 분야의 건설공사에는 주로 콘크리트 및 강재 등이 구조용 재료로 사용되었다. 그러나 최근 산업이 발전함에 따라 구조물이 대형화되고, 중량과 부식, 내구성 문제 및 경과년수의 증가로 인한 유지보수가 중요한 문제로 대두됨에 따라 복합신소재를 건설분야에 응용하기 위한 노력들이 활발하게 진행되고 있다. 더욱이 선진국을 중심으로 첨단기술과 경제적 대국을 겨냥한 초대형 건설 프로젝트를 구상하거나 추진 중에 있다. 복합신소재의 재료중량은 강재중량의 1/4이지만 기존의 콘크리트나 강재로 건설된 구조물에 비하여 무게가 1/10로 되어 그만큼 공간을 늘릴 수 있고 층고를 높일 수 있으므로 초고층 빌딩이나 초장대 교량을 계획할 때는 필수적으로 고려되어야 할 소재임은 분명하다. 또한 기존 콘크리트나 강재에 비하여 강도/중량의 비가 매우 크므로 복합신소재 구조물은 초고층, 초장대 구조물일수록 유리한 장점이 있다. 이와 같은 복합신소재의 장점 때문에 1,000m가 넘는 초고층 빌딩이나

3,000m 이상의 초장대 교량의 건설, 초대형 해양구조물의 건설이나 인공섬, 지하도시, 해저도시의 구상에 이르기까지 모든 대형 프로젝트에서 복합신소재가 구조재로 더욱더 중요한 비중을 차지할 것이 분명하다.

### 2. 본론

#### 2.1 제5의 건설재료인 복합신소재

일반적으로 건설재료의 종류로는 4대 건설재료 즉 목재, 석재, 콘크리트, 강재를 말한다. 그러나 21세기에 들어오면서 금속, 화공분야 등의 눈부신 발전에 힘입어 콘크리트와 강재를 대체할 복합신소재가 제5의 건설재료로 등장하기에 이르렀다. 특히 미국토목학회 연차총회에서는 새로운 1000년의 건설재료(Materials for the New Millennium)로 복합신소재를 지목하여 커다란 관심을 끌고 있다[1].

지금까지 인간이 사용 가능한 재료와 응용 가능한 기술로 구조형식을 발전시켜 왔듯이 우리에게는 새로운 소재를 사용하는데 적합한 새로운 구조형식의 개발이

필요한 것이다. 제5의 건설재료의 대표적인 구조형식은 복합신소재구조(composite structures)라 할 수 있다.

인류역사의 여명기로부터 소재는 발전을 위한 무기였었다. 역사는 “석기시대”, “청동기시대”, “철기시대” 등과 같이 사용된 구조재료에 의해서 분류되기까지 했다. 그러나 오늘날 우리 시대를 한가지만의 재료로 부를 수는 없다. 우리 시대는 “선택의 시대” 이기 때문이다. 우리는 “The Right Material for the Right Place”의 시대에 살고 있는 것이다. 우리는 적절한 소재를 최적의 용도로 사용할 가능성을 갖고 있는 것이다. “선택의 시대”란 강한 경쟁이 있음을 의미한다. 이 경쟁에서 복합신소재는 훌륭하게 무장되어 있어 이제 그 힘을 발휘하기 시작했다. 이 복합신소재의 주요 힘 가운데 하나는 성능의 다양성에 있다.

이러한 복합신소재는 가격문제로 우주, 항공과 같은 “고성능/소량”산업 부문에만 주로 사용되었다. 그러나 21세기에 들어오면서 복합신소재는 기술개발과 대량생산 등에 힘입어 가격을 내리기 시작했고, 효율적인 제작방법이 출현하면서 더욱더 경쟁력있는 구조물로 각광을 받기 시작했다.

## 2.2 복합신소재의 구성 요소

간단히 말해서 복합재료(composite)란, 두 가지 또는 그 이상의 소재들을 복합적으로 결합시켜 특정 목적을 위해 만들어진 최종 제품을 의미한다. 두 가지 이상의 소재가 결합되므로 단일소재에는 없는 여러 가지 특성을 나타낸다. 복합재료의 구성요소는 성능으로 크게 두 가지 요소로 분류된다. 즉, 역학적 특성을 나타내는 보강재(reinforcement)와 이를 지지 고정시켜 주는 고정재(binder)로 구성되는데, 고정재는 흔히 모재(matrix)라고 불린다. 보강재나 모재(matrix)의 원료는 금속, 고분자, 세라믹 등 재료의 소재와 최신의 최첨단 소재까지 포함해서 모든 소재가 동원될 수 있으며 성능, 가격 등

을 고려한 최적의 제품을 만들 수 있게 선별, 설계되어야 한다. 또한 보강재나 모재(matrix)는 두 가지 이상의 원료가 섞인 “hybrid”형태로 사용될 수 있다. 한 극단의 예가 철근콘크리트의 보강재로 철근과 탄소, 유리 또는 고분자 섬유를 혼합하는 경우이다. 이 소재들 가운데 건설용 섬유로는 유리섬유, 모재로는 폴리에스터와 같은 고분자 소재가 주로 사용될 전망이다.

복합재료를 논할 때 세 개의 “phase”를 이야기한다. 첫째와 두 번째 phase가 각각 보강재와 모재이고 세 번째 phase가 보강재와 모재의 접촉부분인 “interface”이다. 두 가지 이상의 소재가 결합하여 일체가 된 복합재료를 만들어 내니 당연히 중요하겠지만 이 interface야말로 주어진 소재의 특성을 얻을 수 있게 하는 중요한 역할을 한다. Interface를 어떻게 처리하느냐에 따라서 제작 방법, 강도 등 여러 가지 특성이 판이하게 달라진다.

## 2.3 복합신소재 구조물의 특성

오늘날 대부분의 건설기술자들은 복합재료가 수 천년 동안 사용해왔다는 사실을 인식하지 못하고 있다. 그러나 우리 조상들은 이미 수천년 전에 진흙에 짚을 섞어 흙 담을 쌓았을 때부터 복합재료를 사용했으며 이는 “discontinuous fiber reinforced composite”라 지칭할 수 있다. 즉 짚은 보강재이고 진흙은 모재(matrix)이었다. 간단히 말해서 복합재료(composite)란, 두 가지 또는 그 이상의 소재들을 복합적으로 결합시켜 특정 목적을 위해 만들어진 재료를 의미한다.

소위 첨단복합신소재(advanced composite materials)의 사용은 1964년부터 탄소섬유가 대량 생산되면서 가격이 내려가기 시작하면서부터이다. 각종 비행기에서, 각종 부품으로 시작하여 이제는 주 구조재로 사용되고 있으며, 항공기나 철도차량에 100% 복합신소재 구조가 등장하기 시작했다. 이러한 소재의 사용은 각

중 운동기구, 선박, 자동차 등으로 확산되어 가고 있다.

복합신소재는 콘크리트와 강재에 비해서 다음과 같은 특징이 있다.

- (1) 무게가 가볍다. 복합신소재 재료중량은 강재중량의 1/4이며 기존의 강재나 콘크리트로 건설된 구조물과 비교하면 1/10에 불과하다.
- (2) 부식이 발생하지 않는다.
- (3) 임의 방향으로의 보강이 가능하다.
- (4) 인성, 열 특성, 전자기적 특성이 뛰어나다.
- (5) 감쇠효과가 우수하다.
- (6) 부품의수를 감소시킨다.
- (7) 보강부재의 보강이 없어도 구조 부재를 보강할 수 있다.
- (8) 지진발생시 경량으로 인한 관성력이 감소한다.
- (9) 구조적 요구 사항에 따라 최적의 부재를 생산할 수 있다.
- (10) 구조물의 경량과 가설의 용이성으로 건설 공기를 획기적으로 단축한다.

이러한 여러 가지 장점에도 불구하고 토목, 건축 등 일반 건설재료로서의 이용은 아직 초보 단계에 있는데 그 주된 원인은 다음 세 가지로 요약될 수 있다.

- (1) 복합신소재가 가격이 비싸다는 편견이 있다.
- (2) 복합신소재 관련 이론이 건설 기술자들에게는 너무나 어렵다.
- (3) 복합신소재 관련 국내 설계기준이나 시방서가 없다.

현재 각종 복합신소재의 가격은 계속 내리고 있고, 경제적이고 효율적인 제작방법이 나날이 개발되고 있어 설계방법이 가격 형성에 결정적인 역할을 하고 있다. 기존 재료에 근거한 부적절한 개념에 의한 설계야말로 구조물의 가격을 상승시키는 원인이 된다. 이것은 공사 단가가 설계개념에 따라 크게 좌우되기 때문이다. 선택의 폭이 방대하고 고려 사항이 무수히 많은 복합재료의 경

우 가격은 설계자의 판단 능력에 더욱 크게 좌우된다.

예를 들어, 복합신소재로 교량을 건설할 때를 생각해 보자. 먼저 구조물의 경량성으로 인하여 중장비 사용이 극단적으로 감소되고 공기는 몇 달이 아니라 며칠로 단축된다. 우리나라와 같은 교통량이 많은 나라에서, 특히 도심지에서 교통난 해소를 위해 고가도로나 육교를 건설할 경우, 복합신소재 교량을 사용하지 않는 한 교통혼잡은 몇 달씩 지속된다. 다음은 내부식성이다. 우리는 이미 여러 가지 구조물에서 부식으로 인한 엄청난 국가적 손실을 입고 있다는 사실을 알고 있다. 콘크리트 속의 철근은 화학적, 전기적 작용으로 부식이 진행되고 있다. 새로 건설하는 구조물의 부식방지를 위해서 복합신소재 구조물을 건설하는 것은 필수 불가결한 요소이며, 또한 기존 구조물의 보수에도 복합신소재가 사용되어야 효과적인 구조물이 된다. 높은 비강도와 비강성 이외에도 강한 내충격성, 높은 피로강도를 갖고 있으며, 중량이 적으므로 지진이나 기타 진동발생시 그 무게 비율로 감소된 관성력을 받게 된다.

복합신소재 이론은 학부를 졸업하고 실무에 종사하는 일반 설계 및 시공 기술자들에게는 너무나 어렵다. 이를 해결하기 위하여 일반 건설기술자들도 쉽게 사용할 수 있는 간단하고도 정확한 이론에 대한 연구가 꾸준히 진행되고 있다[2~5]. 또한 복합신소재 관련 설계기준이나 시방서의 제정 등이 시급히 요청된다.

## 2.4 복합신소재 경제적인 구조물임을 입증

복합신소재가 건설분야에 접목되면서 가장 큰 어려움은 가격 문제이었다. 불과 십여년 전만 해도 복합신소재는 가격이 비싸서 우주 항공과 같은 “고성능/소량” 산업 분야에만 활용되었다.

오늘날 복합신소재의 가격은 하락하기 시작했고, 효율적인 제작방법이 나날이 발전하면서, 건설기술자들은 이들 복합신소재의 사용을 검토하기에 이르렀다. 오늘

날 복합신소재는 꾸준한 소재개발과 대량생산 등에 힘입어 가격이 하락하면서 건설분야에서도 경제적인 재료로 평가받기 시작했다.

복합신소재로 제작, 건설된 많은 구조물들이 강재나 콘크리트 구조보다 경제적인 구조물임을 입증하는 분야가 등장했다. 예를 들어 영국에서는 100,000리터 “storm tank”를 복합재료로 단 하루 만에 완공했다. 이 규모의 구조물을 강재로 건설하면 최소 1개월이 소요되고, 콘크리트 구조로 건설하면 통상 3개월 이상이 소요되었을 것이다. 공사비는 강재나 콘크리트에 비하여 훨씬 적었다. 또한 미국에서는 캘리포니아에 필요한 물을 알래스카에서 1700마일의 해저 수로로 운송하는 계획을 추진하고 있다. 강재나 콘크리트를 이용한 재래식 공법으로는 적어도 15년 이상의 공기에 1500억달러가 소요된다. 복합신소재를 이용할 경우 5년 이내의 공기에 200억달러 정도가 소요된다.

## 2.5 미국의 첨단군사기술 기술재투자사업

건설관련 세계시장 규모는 연간 2조4천억달러로 추정되고 있고, 미국만의 향후 20년간의 사회간접분야 보수/보강을 위한 투자는 3조~4조달러로 추산되고 있다. 미국은 교량만 해도 575,000개 중에서 230,000개는 구조적인 결함이 있거나 기능에 결함이 있으며 이중 143,000개는 50년 이상 된 것이다. 교통체증으로 인해 연료 및 시간 손실은 연간 500억달러로 추정되고 있다. 이러한 거대한 시장에 대하여 미국은 세계에서 30년 ~ 40년 앞선 첨단군사기술을 응용하기 위한 기술재투자사업(Technology Reinvestment Program - TRP)을 민수분야에 착실히 진행하고 있다.

강재구조물은 부식이 가장 큰 문제가 되며 콘크리트 구조물은 무게가 무거워 초고층빌딩 또는 초장대 교량을 설치하는데 한계가 있다. 지하 저유시설도 같은 상황에 놓여 있다. 미국 표준국의 조사보고서에 의하면, 부

식과 관련된 손실은 연간 약 820억달러로서 GNP의 약 4.9%에 해당되며, 이런 손실방지를 위해 복합신소재 기술이 활용되었다면 약 320억달러는 절약될 수 있었다.

대형구조물 건설시 가장 큰 제한조건은 모든 건설재료에는 치수의 한계가 있다는 사실이다. 예를 들어 현수교나 사장교의 경우 강재를 사용할 경우 보다 복합신소재인 유리섬유를 사용하면 이의 2배, 탄소섬유를 사용하면 3배가 가능하게 된다.

대형구조물의 무게에서 오는 문제는 더욱 심각해서 고층건물의 경우 기초 지반 능력 한계가 층고의 한계를 일으키는 경우가 흔하고 기둥 강도 한계도 층고의 한계를 불러일으키며 대형 기둥 크기는 건축 계획의 큰 장애물이 된다. 건설 구조물은 중량 때문에 중장비 사용이 필수적이며, 막대한 공사비가 증가하고 있다.

복합신소재를 사용하면 교량, 건축물 등의 상판 무게가 콘크리트 제품 무게의 1/10로 되어 그 만큼 경간과 층고를 높일 수 있다[5]. 예를 들어 교량 공사기간이 2~5년에서 단 2~5개월로 단축 될 수 있다. 내부식성이 강해서 유지 보수비가 크게 감소하므로 복합재료를 사용한 구조물은 단기 및 장기적으로 경제적인 구조물이 된다. 지진 또는 충격시 관성력은 무게에 비례하므로 복합재료 구조물이 받는 충격력은 무게비 만큼 줄어든다. 유지보수 및 재생의 경우, 기존 구조물의 철거, 재시공은 엄청난 공기를 필요로 한다. 기존 구조물의 보수나 재생에는 복합신소재의 사용을 절대적으로 필요로 한다. 교량 상판의 무게를 절반만 줄여도, 파손된 거터를 탄소섬유 등 복합신소재로 보수/보강하면 얼마든지 다시 사용할 수 있다.

## 2.6 복합신소재 블루오션 급부상

복합신소재의 사용처가 급속도로 확대되면서 탄소섬유 시장도 급성장하고 있다. 복합신소재가 건설업계의 블루오션으로 떠오르면서 미국, 일본 등 주요 선진국들

은 시장 선점을 위하여 치열한 경쟁을 벌이고 있다. 미국과 일본은 원천기술을 보유한 업체들의 발 빠른 사업 확장으로 급속히 발전하고 있다. 유럽연합 역시 복합신소재 개발에 박차를 가하고 있다.

각국 정부도 복합신소재 육성에 앞을 다투어 나서고 있다. 일본 정부는 2003년부터 작년까지 도레이의 자동차용 탄소섬유 개발 사업에 20억엔을 지원했다. 미국도 우주/항공과 군사분야에 탄소섬유 적용을 늘리기 위해 정부 차원에서 민관군 공동 연구개발 프로젝트인 기술 재투자사업(TRP)을 실행에 옮기고 있다. 이와 같이 복합신소재가 새로운 1000년의 건설재료의 블루오션으로 급부상하고 있음은 누구도 부인할 수 없는 현상이 되고 있다.

## 2.7 복합신소재 50%를 넘어서게 된다.

앞으로 10년 뒤에는 금속소재로 만들어진 자동차와 항공기가 자취를 감출지도 모른다[6]. 무게는 강재의 4분의 1에 불과하지만 10배는 더 강한 복합신소재인 탄소섬유가 강재의 영역을 빠른 속도로 대체할 것으로 예상된다. 더욱이 건설시장에서 건설자재도 강재나 콘크리트 대신 복합신소재가 차지하는 비중이 급부상하고 있다. 기존의 소재보다 가벼우면서 강도는 훨씬 높아진 복합신소재가 소재산업에 혁명을 일으키고 있다. 복합신소재는 비행기, 자동차, 조선, 건설 등 거의 모든 산업 분야에 핵심 소재로 빠르게 적용되고 있다. 미국의 보잉사는 비행기 동체의 소재로 알루미늄 대신 복합신소재 사용비율을 늘리고 있다. 연비를 절감하기 위해 1996년부터 탄소섬유를 일부 사용해온 보잉사는 비행기 동체와 날개 등으로 점차 적용 대상을 확대하고 있다. 이를 위해 세계 탄소섬유 시장의 70% 이상을 장악하고 있는 일본 섬유업체 도레이와 7,000억엔 규모의 탄소섬유를 공급하기로 하는 계약을 맺었다. 도레이는 2021년까지 보잉사의 비행기 동체, 날개 등의 부품을 공급할 계획이

다. 비행기 날개와 동체를 탄소섬유로 대체할 경우 리벳의 수가 50,000여개 줄어든다. 무게도 15% 감소해 연료효율이 20% 증가하게 된다. 이를 통해 연간 1조 2,000억원의 유류비를 절약할 수 있다[6].

자동차업계도 연비향상과 배기가스 배출 감소를 위해 탄소섬유 적용 부위를 점차 확대해 나가고 있다. 자동차 차체의 17%를 탄소섬유로 대체할 경우 전체 무게가 30% 줄어들게 되며 20%의 연료 절감을 가져오게 된다. 탄소섬유는 현재 본넷트, 팬더, 범퍼 등에 주로 사용되고 있다. 경주용 차량인 페라리는 지붕과 도어부분을 제외한 차체의 상당 부분을 탄소섬유로 대체하였다. 일본 도요타 자동차 등도 탄소섬유 차량 개발을 서두르고 있다. 자동차업계에서는 배터리가 무거운 것이 단점인 전기자동차도 탄소섬유를 통해 무게를 상당 부분 줄이게 되면 경쟁력있는 차량이 될 것으로 예상하고 있다.

미국에서 촉발된 첨단군사기술을 민수용 건설시장에 응용하기 위한 기술재투자사업이 성공적으로 진행되어 새로운 1000년의 건설재료인 복합신소재가 급부상하고 있으며 앞으로 50년 후인 2060년에 이르면 건설재료 시장에서 복합신소재가 차지하는 비중이 50%를 넘어서게 될 것으로 예상된다.

## 2.8 일본의 복합신소재 탄소섬유 시장 선점

일본 도레이 회사가 보잉사에 공급하여 제작된 보잉 787은 1,500장 이상의 대형 알루미늄 판을 50,000여개 리벳으로 이어붙이는 기존의 항공기 동체 제작방식과는 달리, 비행기 틀을 만든 뒤 탄소섬유로 필라멘트 와인딩하여 대형 성형기에 넣어 고온·고압으로 구워내는 방식을 채택하고 있다. 이러한 일체형 성형기법은 이음매가 없고, 부식을 걱정할 필요가 없다. 알루미늄 동체보다 4분의 1 이상 가벼워 평균 운항거리도 16,000km까지 늘어났다. 보잉 787이 “꿈의 항공기”라고 불리는 것도 바로 이런 이유에서다. 보잉사가 2007년 말 차세대 주력

여객기로 개발하면서 도레이가 보잉 787의 동체를 만드는데 사용된 탄소섬유를 독점 공급했다. 보잉은 도레이에 대한 고마움의 표시로 전 세계 항공사들 사이에서 인도 경쟁이 치열한 보잉 787 제1호기를 일본 항공사에 넘기기로 했다[6].

도레이는 1970년대까지 화학섬유가 주력이었지만 일찌감치 자동차, 항공 등 다양한 산업분야에 적용할 수 있는 복합신소재 분야에 눈을 돌려 첨단 신소재 기업으로 변신하는데 성공했다. 이 회사의 변신을 자극한 건 다름 아닌 바로 한국이었다. 1960년대 말부터 한국, 대만 등 경쟁국의 섬유산업이 급격히 성장하면서 위기감을 느낀 이 회사는 1971년 탄소섬유 개발에 착수했다. 강철보다 가벼우면서도 강도는 더 높은 탄소섬유가 미래 항공기와 로켓의 핵심부품 소재로 널리 쓰일 것이라는 판단에서였다.

도레이는 1970년대 중반 상업생산을 시작했지만 시장은 냉담했다. 이 회사는 이에 굴하지 아니하고 골프채, 낚시대 등으로 사업을 다각화 하면서 개척해 나갔다. 이 회사는 1982년 처음으로 보잉 757 부품과 우주 왕복선 컬럼비아호의 동체의 일부에 탄소섬유를 납품하기 시작했다. 1990년대 들어 탄소섬유 적용 분야가 확대되면서 이 회사의 복합신소재 사업이 빠른 속도로 성장을 거듭했다.

도레이는 연간 20조원으로 추정되는 세계 탄소섬유 시장에서 1위를 기록하면서 30%대의 시장점유율을 기록하고 있다. 이 회사가 2004년 발표한 새 경영비전 “뉴 도레이 21”에는 탄소섬유가 여전히 신사업부문으로 분류되어 있는데 개발한 지 30년이 지났어도 탄소섬유의 시장 성장 가능성이 무한하다는 생각에서 신사업분야로 분류하고 이를 핵심 사업으로 추진하고 있는 것이다.

## 2.9 미국의 복합신소재 연구개발 프로젝트

구조물의 설계나 안전진단은 간단한 장비와 기술로 이루어지는 것이 아니다. 뼈대 전체의 3차원 거동을 분석해야하고, 1차원 구조로 잘못 알고 있는 보나 기둥도 3차원 구조로 해석하여야 한다. 모든 구조재료는 복합재료인데 등방성으로 가정하면서 문제가 발생하고 있다. 대부분의 토목, 건축 구조 요소들은 치수가 커서 거의 모든 경우에 원형(prototype) 실험이 불가능하다. 시편 강도나 축소(sub-scale)모델 시험강도는 일반적으로 현장 구조재료 강도 보다 높다. 비등방성 구조물의 응력 계산 문제는 FEM 등 여러 가지 다른 해석적 방법으로 비교적 쉽게 해결된다.

복합신소재 구조의 신뢰성에 대해서는 이제 논란의 여지가 없어진지 오래이나 토목, 건축 분야의 기술자들이 타성 때문에 타 분야에서 개발한 기술을 받아들이지 않은 것과 가격이 콘크리트나 강재보다 비쌀 것이라는 선입관 때문에 사용을 주저한 것은 사실이다.

건설기술자의 편견과 타성의 타파는 꾸준한 계몽으로 이루어질 수 있으며 제품 가격은 신소재 가격 하락과 설계 및 제작 기술의 향상으로 점차 떨어지게 된다.

미국은 첨단군사기술의 평화적 목적을 위한 응용을 구체적으로 진행하고 있다. 여러 연방기관 중 육군공병단의 건설기술연구소(Construction Engineering Research Laboratories - CERL)는 법에 의해서, 미국 건설산업에 이익이 되게 하고, 세계적인 건설시장에서, 미국 건설업체가 더욱더 경쟁력을 갖추게 할 책임을 가지고 있다. 이러한 목적을 위해서 발주된 건설생산성 향상계획(Construction Productivity Advancement Programs)프로젝트 중 두 가지는 복합재료와 관련된 것으로, 하나는 “복합재료구조 해양파일 및 슈트파일의 개발” 사업이고, 다른 하나는 “첨단 하이브리드 슈퍼복합신소재 구조물(Advanced Hybrid 'Supercomposite' Structures)의 개발” 사업으로서 새로운 교량 상부구조를 포함하고 있다.

미국 국방성의 국방첨단연구계획청(Defense Advanced Research Projects Agency - DARPA)의 소장 Denman 박사가 미 하원 군사소위원회 청문회에서 보고한 내용에는 투자전략, 우선순위, 개발계획 등이 포함되어 있는데, 네 가지 투자 전략중 건설과 관련된 것은 사회간접시설과 겸용기술의 활용이다. 다섯 가지 우선순위 가운데 하나는 겸용기술 개발에 대한 국방비 재투자가 포함되어 있다. 개발계획은 핵심기술, 사회간접시설, 군사응용 등 세 가지로 되어 있는데, 첫 번째 핵심기술은 다시 세 가지로 재료를 포함하고 있다.

우선순위 5가지 중의 하나인, 겸용기술개발에 재투자를 실천하기 위한 구체적인 핵심은 기술재투자사업(Technology Reinvestment Project - TRP)으로 이를 위해 구성된 국방기술민수전환위원회(Defense Technology Conversion Council - DTCC)에는 상무부, 에너지부, 교통부, "NASA", "NSF" 등 정부 각 기관이 참여하고 있다.

건설분야에 대한 첨단복합재료 사용을 발전시키기 위한 연방 국방기술 전환사업은 "DARPA"에 의해서 개발되고 관리된다. 이 DARPA 사업은 국방관련기업체(납품업체, 제조업체, 시스템 개발업체), 건설관련 업체 및 연구기관(대학 등)이 참여한다.

DARPA의 연방 TRP사업으로 41개 프로젝트를 선정했으며 국방재투자 및 기술전환사업(Defense Reinvestment Conversion Initiative)에 200억달러가 소요된다. 이 41개 TRP사업의 하나가 캘리포니아대학교 샌디에고 분교(UCSD)부근 I-5 고속도로에 건설된 세계최초의 내진성이 강한 100% 복합재료 차량용 사장교이다. 연구개발, 설계, 시공은 UCSD주관 하에, DARPA, 캘리포니아 주정부, 각종 기업체 등 12개 조직이 참여하는데, 1단계 사업비의 50%인 1천35만달러는 "DARPA"에서 지출하고 록히드, 두퐁 등 기업체가 50%를 출자한다. 즉 TRP는 정부 및 기업체 공동출자의 개

념인 것이다. 3단계로 이루어진 사업의 총비용은 5천5백만달러인데, 폭 18미터에 길이 135미터의 이 교량이 완공되면, 향후 연간 1000억달러의 건설시장을 지배할 것으로 기대하고 있다. 이 사업의 1단계 내용은, 교량교각의 보강시스템과 낮은 구조물, 부식, 동결, 유지보수 불량 등으로 발생한 교량상판 교체 시스템의 개발, 실험 및 사용자를 위한 현장 시범 등으로서, 복합재료가 교량보수에 효과적으로 사용될 수 있다는 것을 증명하는데 있다. 2단계는, 이 보수과정의 마케팅을 하는데 있다. 관계기관과의 협조 하에, 설계기준과 시방서 및 제작과정 등을 개발하는 것도 포함한다. 3단계는 상기 100% 복합신소재 사장교의 건설이다. 이러한 사업은 군수업체가 그들의 군사기술을 비군사적 목적으로 민수용으로 전환하는 좋은 본보기가 된다.

제작방법은 "filament winding", "pultrusion", "RTM", "resin infusion molding" 등이 사용되었다. 완공된 후에는 컴퓨터를 이용해서 교량의 거동을 "real-time"으로 추적한다. UCSD의 Gilbert Hegemier교수에 의하면 구조 부재 가격은 콘크리트나 강재 가격보다 비싸나, 건설기간 단축, 가설공사의 불필요, 대형장비 불사용 등을 통해, 완공된 교량은, 단기적 판단으로도 훨씬 저렴하게 된다. 장기적으로 볼 때, 부식 등으로 인한 보수비용 절감, 중량이 1/10 인데서 오는 지진시 또는 기타 충격시 받는 파괴력의 1/10 로의 감소, 교통체증에서 오는 손실 감소 등을 고려하면 엄청난 액수의 경제적 이익을 가져다준다. 첨단 군사기술을 민수용으로 전환시키는 이 시범사업은 성공적으로 수행되었으며 21세기에 토목기술자를 위한 전혀 새로운 개념의 복합신소재 시장의 서막을 알리는 계기가 되었다.

## 2.10 국내기업들도 투자를 확대하고 있다.

국내 기업들도 2000년도부터 복합신소재 시장에 서서히 투자를 확대하고 있다.

코오롱은 1979년부터 신소재 개발에 착수하여 2005년 세계에서 세 번째로 아라미드를 선보였다. 코오롱은 연간 2,000톤인 생산 규모를 내년 말까지 8,000톤으로 늘릴 계획이다. 이 규모는 세계 1위인 듀폰사의 25,000톤 생산량의 3분의 1 수준이다.

한국화이버는 복합신소재 분야에 사업을 꾸준히 확장하고 있으며 특히 건설용 복합신소재 시장을 선점하려는 노력을 가시화하고 있다. 뿐만 아니라 철도차량 동체를 복합신소재로 만들어 눈길을 끌고 있다. 또한 지난해 나로호 발사시 복합신소재 핵심 기술을 주도하였으며 나로호에 탑재했던 페어링을 제작하였다. 페어링은 발사체 두부에 위치해 다른 어느 부품보다도 아주 높은 온도에 잘 견디고 가벼워야 한다. 페어링을 만드는 데 사용한 소재는 복합신소재인 탄소섬유로 알루미늄 소재보다도 견고하고 가벼우면서도 아주 높은 열에 잘 견디는 특성을 가지고 있다.

또한 한국화이버가 역점사업으로 추진하고 있는 한국형 틸팅열차는 하나콤 샌드위치 구조의 탄소섬유 복합신소재로 제작된 철도차량이다. 이 차량은 일체형 성형기법 즉 차체 전체를 탄소섬유 복합신소재를 이용, 한번에 제작한 후 대형 성형기에 넣어 고온·고압으로 구워내는 방식이다. 세계 최초로 구현한 이 방식은 차량 무게를 30% 이상 줄여 경제성도 높다. 복합신소재로 만든 틸팅열차의 최대 장점은 기존 선로를 그대로 이용하는 것이다. KTX가 전용철로를 가져야 했던 것과는 달리 틸팅열차는 기존 선로를 그대로 사용하면서 속도를 높인다. 새마을호의 최대 속도는 시속 140km이다. 반면 틸팅열차는 직선구간에서 시속 200km의 최고속도를 낼 수 있다. 또 곡선구간에서도 새마을호의 시속 70km보다 50% 정도 빠른 시속 100km로 달릴 수 있다. 경제적 효과도 매우 좋다. 철도연구원 신소재 틸팅열차 시스템 연구단은 우리 기술로 열차를 개발했기 때문에 연간 약 990억원의 수입대체효과가 있다며 유럽과 미국은

물론 동남아시아와 아프리카까지 수출 가능성도 검토 중이라고 한다. 한국형 틸팅열차는 이미 성능은 입증됐고 안전성만 검증받으면 된다. 100,000km 시험주행이 끝나는 2010년 양산에 착수, 2012년부터는 철로를 달리기 시작한다.

국내 기업들도 이제는 첨단복합신소재에 관심을 갖게 되었으며 새로운 100년의 건설재료인 복합신소재가 블루오션으로 급부상하고 있으며 앞으로 50년후인 2060년에 이르면 건설재료 시장에서 복합신소재가 차지하는 비중이 50%를 넘어서게 될 것으로 예상되므로 복합신소재에 대한 투자 비중을 더욱 늘려야 한다.

### 3. 결론

역사는 변하는 것이며 건설재료 역시 변하는 것은 필연적이라 할 수 있다. 지금까지의 토목, 건축 구조물은 그 당시에 사용 가능한 재료와 응용 가능한 이론에 의해 개발되어 왔다. 역사적으로 제5의 건설재료라고 할 수 있는 복합신소재는 모든 구조물의 설계, 건설에 사용되게 될 것이라는 것은 역사적인 필연성에 의해라고 말할 수 있다. 강재나 콘크리트 등의 건설재료와 더불어 모든 구조물에서 복합신소재를 사용하게 될 것이며, 이러한 결과는 인류의 기술 관련 및 소재 관련 지식이 발달한데 따른 역사적 필연성에 의한 결과이다.

건설재료로서의 복합신소재의 장점은 본문에서 비교적 상세히 설명되어있다. 이러한 장점을 갖는 재료를 최대한 활용되기 위해서는 각 분야의 공학자들이 서로 다른 전공분야에 대한 이해를 증진시키고 상호 협조하는 분위기가 조성되어야 한다.

건설관련 세계시장 규모는 연간 2조4천억달러로 추정되고 있고 미국만의 사회간접 시설의 유지 보수비가 3조~4조달러로 예상되고 있다. 이러한 방대한 건설시장에 복합신소재가 사용된다는 것은 역사적 필연성이라



할 수 있으며 복합신소재의 모재로는 고분자가 주로 사용될 것이라는 것은 주목할 만한 사실이다.

복합신소재가 건설시장을 주도할 것이라는 것은 먼 미래에 있는 것이 아니고 이미 시작되었다. 21세기는 건설구조물도 고성능 복합신소재가 주 구조재로 이용될 전망이며 콘크리트나 강재와 더불어 복합구조형식으로 더욱더 발전될 전망이다. 특히 초대형구조물의 경우 고성능 복합신소재를 채택할 것이 분명하므로 21세기는 복합신소재의 시대가 이미 시작되었음은 의심의 여지가 없다 할 것이다.

21세기는 고도의 선진산업사회로서 구조물의 초고층화, 초장대화, 초대형화로 이어지며 고성능, 고강도, 고기능과 고품질 복합신소재의 개발과 최첨단 구조공학기술이 모두 응용되어야 한다. 환경 친화적인 복합신소재를 더욱더 활용하여 자원보존과 환경보호 측면에서 적절하게 이용할 수 있는 고도의 기술을 개발해야만 21세기형 초대형 프로젝트의 성공을 기대할 수 있다. 따라서 복합신소재구조학회를 중심으로 각종 설계기준과 시방서의 제정 및 연구개발이 활성화 되어야만 앞으로 밀어닥칠 세계적인 복합신소재 건설시장에서 생존할 수 있는 길이라는 점을 강조하면서 이 글을 마치고자 한다.

### 참고문헌

1. Chong, K. P., Editor (1996), "Materials for the New Millennium", Proc. of the Fourth Materials Engineering Conference, ASCE, Washington D. C., November 10 ~14.
2. Han, B. K. and Kim D. H. (2001), " Analysis of Steel Bridges by Means of Specially Orthotropic Plate Theory ", Journal of KSSC, Vol 13 , No. 1, pp.61-69, 2001.
3. Kim D. H and Han, B. K. (2004), " Simple Method

of Vibration Analysis of Three Span Continuous Reinforced Concrete Bridge with Elastic Intermediate Supports " Jour. of KSCM, Vol 17, No. 3, pp.23-28.

4. 한봉구, 김덕현, 최종윤 (2009), " 고층 빌딩 경량화를 위한 첨단 복합재료 슬래브에 관한 연구", 한국강구조학회 2009년 학술발표대회.

5. Han, B. K. and Kim D. H. (2009), "A Study on Post-Tensioned Reinforced Concrete Slab by the Beam Theory " Jour. of KSCM, Vol 22, No. 5, pp. 24-29.

6. 이정호 (2009), "日 도레이 탄소섬유 30년 집념...보잉787 절반은 우리가 만들었다", 한국경제신문.