



## 토목구조물을 위한 첨단복합재료 구조물의 21세기 전망



김 덕 현\*

### 머리말

이 글은 필자가 영국에서 출판한 511쪽 단행본 COMPOSITE STRUCTURES FOR CIVIL AND ARCHITECTURAL ENGINEERING<sup>1)</sup>, 1988년 대한토목학회 제36회 정기총회 특별강연,<sup>4)</sup> 한국전산구조공학회 1991년 가을 학술발표회 특별강연,<sup>6)</sup> 한국복합재료학회 1998년도 정기총회 특별강연,<sup>53)</sup> The Third International Symposium on TEXTILE COMPOSITES IN BUILDING CONSTRUCTION에서의 Plenary Lecture,<sup>8)</sup> 1991년 미국 NSF 연구비수령자 (Research Grantee)의 Workshop에서의 초청강연,<sup>13)</sup> 1991년 중국 Harbin에서 열린 중국-일본-미국 지진공학 Workshop Symposium에서의 초청강연,<sup>15)</sup> 미국 및 한국 대학들에서의 세미나 특강들,<sup>16),36),3),54),55),...</sup> Third PACIFIC RIM FORUM on ADVANCED COMPOSITE에서의 keynote speech,<sup>41)</sup> 1994년 이태리에서 열린 재료와 구조물의 파괴에 대한 치수효과의 영향에 관한 INTERNATIONAL UNION OF THEORETICAL AND APPLIED MECHANICS SYMPOSIUM에서의 초청강연,<sup>43)</sup> 사회간접시설에 대한 복합재료의 응용에 관한

WILSON FORUM에서의 초청강연,<sup>47)</sup> 한국섬유공학회지 제1권 1호 특집기사,<sup>49)</sup> 대한기계학회지 39권 2호(1999.2) 테마기획,<sup>51)</sup> 한국고분자학회지 10권 1호(1999.2), 특집기사,<sup>52)</sup> 복합재료에 관한 제1차 한미 WORKSHOP에서의 초청세미나<sup>56)</sup> 등을 참고로 하여 최신의 발전현황을 추가하여 썼다.

### 1. 서 론

재료산업의 장래는 건설산업에서 쓰이던 재래의 재료들이 첨단복합재료로 대체될 때 결정된다. 건설에서의 재료는 kg이 아니고 ton으로 사용된다. 건설관련 세계시장 규모는 연간 2조 4천억달러로 추정되고 있고 미국만의 향후 20년간 사회간접분야 보수를 위한 투자 소요는 3내지 4조달러로 계산되고 있다. 이 글에는 필자가 인류문화사상 제5의 기본 구조개념이라고 주장해온 복합재료가 건설분야에서 어떻게 이용되고 있고 장래 어떤 발전을 할 것인가에 대한 간략한 설명이 실려있다.

1987년 보고에 의하면 교량만 해도 575,000개 중에서 230,000개는 구조적인 결합이 있거나 기능에 결합이 있으며 이중 143,000개는 50년 이상된

\* 정회원 · Korea Composites, 대표이사(yamcha@chollian.net)

것이다. 교통지연만 해도, 2005년에는 연료 및 근무시간 손실에서 년 500억불의 피해를 일으키는 것으로 추정되고 있다. 강철과 시멘트를 다 합친 산업을 상기해 보면 그 크기를 짐작할 수 있다.

이러한 거대한 시장에 대하여 미국은 세계에서 30년내지 40년 앞선 첨단군사기술을 응용하기 위한 기술재투자사업(Technology Reinvestment Program - TRP)을 착실히 진행하고 있다. 1996년 11월 워싱턴에서 열린 미국 토목학회 연차 총회에서 제4차 재료공학회의(Materials Engineering Conference)의 모임 주제는 새로운 1000년의 재료(Materials for the New Millennium)이었다.

강교는 부식된다. 콘크리트 보나 슬래브에 들어가 있는 철근은 전기화학적 작용에서 일어나는 부식을 피할 길이 없다. 지하 저유시설도 같은 상황에 놓인다. 1979년, 미국 표준국 조사 보고서에 의하면, 부식과 관련된 손실은 연간 약 820억불로서 GNP의 약 4.9%에 해당되며, 이런 손실방지를 위해 기존의 기술이 활용되었다면 약 320억불은 절약될 수 있었다고 되어 있다.

대형구조물 설계 건설시 가장 큰 제한 조건은 모든 건설재료에는 치수(size)의 한계가 있다는 사실이다. 예를 들면 현수교나 사장교의 경우, 강재를 사용하면 최대 지간(span) 5000m~7000m가 가능하나 유리섬유 보강 복합재료는 이의 2배, 탄소섬유를 사용하면 3배가 가능하다.

대형구조물의 무게에서 오는 문제는 더욱 심각해서 고층건물의 경우 기초 지반 능력 한계가 층고의 한계를 일으키는 경우가 흔하고 아랫기둥 강도 한계도 층고의 한계를 가져오고 너무나 큰 기둥 크기는 건축 계획의 큰 장애물이 된다. 건설 부재의 중량 때문에 중장비 사용이 필수적이며, 막대한 공사비가 증가하고 긴 공기가 필요하다. 복합재료를 사용하면 교량, 건물 등의 상판 무게가 콘크리트 제품 무게의 1/5~1/10도 가능해져서 중장비가 필요없고, 엄청난 공기 단축이 얻어진다. 예를 들어 교량 가설이 몇 년에서 몇 시간으로 단축 될 수 있다. 내 부식성이 강해서 유지 보수비가 크게 감소하는 고로 복합재료를 사용한 구조물은 단기 및 장기적으로 경제적인 것이 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 복합재료의 사용을 절대적으로 필요로한다. 교량 상판 무게가 1/4로만 감소 되어도 파손된 기존 중방향 큰 보(girder)에 복합재료로 약간의 보수만 해도 사용 가능해지고 하중의 증가시도 그대로 사용할 수 있게 된다. 1997년 3월 현재 미국 이외의 국가들에서만도 약 1500개의 구조물이 복합재료로 보수된 것으로 알려져 있다.

## 2. 역사적 필연성

### 2.1 문화사적으로 고려한 건설

이 제목에 대한 상세한 설명은 참고문헌<sup>1)-3)</sup>에 있는 고로 여기서는 생략한다.

### 2.2 구조물의 4대 기본개념

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. 이 4대 기본 개념은 참고문헌<sup>1)-5),13),14)</sup>에 자세히 설명되어 있다.

### 2.3 구조물의 제5 기본개념

21세기에 들어선 현재의 금속, 화학공학의 발달은 눈부신 발전을 거듭하여 각종 구조용 신소재의 등장을 통해 강철을 비롯한 각종 재래 구조재료의 퇴장을 강요하기 시작한 지 오래다. 지금까지 인간이 사용 가능한 재료와 응용 가능한 기술로 구조 형식을 발전시켜 왔듯이 우리에게 새로운 소재를 사용하는데 적합한 새로운 구조 형식의 개발이 필요한 것이다. 필자는 이것을 구조물의 제 5 기본 개념이라고 칭해 왔다.<sup>1),49),51)-56)</sup>

인류역사의 여명기로부터 소재는 발전을 위한 무기였었다. 역사 시대는 “석기 시대”, “청동기 시대”, “철기 시대”, 등과 같이 사용된 구조재료에 의해서 분류되기까지 했다. 그러나 오늘날 우리 시대

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 최적 용도로 사용할 가능성을 갖고 있는 것이다. “선택의 시대”란 강한 경쟁이 있음을 의미한다. 이 경쟁에서 복합재료는 훌륭하게 무장되어 있어 이의 힘을 발휘하기 시작했다. 이 복합재료의 주요 힘 가운데 하나는 성능의 다양성에 있다.

인류 문화상 제5의 구조 개념의 대표적인 구조 형식은 복합재료구조(composite structure)이다. 간단히 말해서 복합재료(composite)란, 두 가지 또는 그 이상의 소재들을 복합적으로 결합시켜 특정 목적을 위해 만들어진 최종 제품을 의미한다. 두 가지 이상의 소재가 결합되는 고로 단일 소재에는 없는 여러 가지 특성을 창출해 낼 수 있다. 복합재료의 구성 요소는 성능상으로 크게 두 가지 요소로 분류된다. 즉, 역학적 특성을 나타내 주는 보강재(reinforcement)와 이를 지지 고정시켜 주는 고정재(binder)로 구성되는데, 고정재는 흔히 모재(matrix)라 불리운다. 보강재나 모재(matrix)의 원료는 금속, 고분자, 세라믹 등 재래의 소재와 최신의 최첨단 소재까지 포함해서 모든 소재가 동원될 수 있으며 성능, 가격 등을 고려한 최적의 제품을 만들 수 있게 선별, 설계되어야 한다. 또 보강재나 모재(matrix)는 두 가지 이상의 원료가 섞인 “hybrid” 상태로 사용될 수 있다. 한국단의 예가 철근 콘크리트의 보강재로 철근과 탄소, 유리 또는 고분자 섬유를 혼합하는 경우이다. 이 소재들 가운데 건설용 섬유로는 유리섬유, 모재로는 폴리에스터나 비닐에스터와 같은 고분자 소재가 주로 사용될 전망이다.

복합재료를 논할 때 세계의 “phase”를 이야기 한다. 첫째와 두번째 phase가 각각 보강재와 모재이고 세번째 phase가 보강재와 모재의 접촉부분인 “interface”이다. 두가지 이상의 소재가 결합하여 일체가 된 복합재료를 만들어내니까 당연히 중요하러니 하겠지만 이 interface야말로 주어진 소재들의 쌍으로부터 소요되는 특성을 얻을 수 있게 하는 중요한 역할을 한다. Interface를 어떻게 처리하느냐에 따라서 제작 방법, 강도등 여러

가지 특성이 판이하게 달라진다.

인류는 복합재료를 수천년동안 사용해왔다. 진흙에 짚을 썰어 흙담을 쌓았을 때 우리 조상들은 “discontinuous fiber reinforced composite”를 사용했던 것이다. 즉, 짚은 보강재이고 진흙은 모재(matrix)였다. 소위 첨단 복합재료(advanced composite)의 사용은 1964년 “저렴한” 가격으로 탄소섬유가 생산되고 부터이다. 각종 비행기에서, 부품으로부터 시작하여 이제는 주 구조재로 사용되고 있으며, Voyager나 Starship과 같은 100% 복합재료 비행기가 대두되었다. 이러한 소재의 사용은 각종 운동기구, 선박, 자동차 등으로 확산되어 갔다.

복합재료를 설계에 사용할 때, 매우 경량이고 부식이 발생하지 않는다는 사실 외에, 재래의 구조재료에 비해서 다음과 같은 장점이 있음을 구조 기술자는 발견하게 될 것이다.

- 가. 임의 방향으로의 보강 가능성
- 나. 스티프너 등과 같은 기하학적 보강 없이 구조 부재를 보강할 수 있는 가능성
- 다. 구조적 요구 사항에 따라 최적 부재 / 구조를 생산할 수 있는 가능성.

이러한 여러 가지 장점에도 불구하고 토목, 건축등 일반 건설 재료로서의 이용은 아직 초보 단계에 있다. 그 주된 원인은 다음 세 가지로 요약될 수 있다.

- 가. 이론이 일반 설계 기술자에게는 너무나 어렵다. 설계 사무소나 현장의 건설 기술자들은, 대개 학부 수준의 이론적 배경을 갖고 있다.
- 나. 건설 기술자를 위한 포괄적인 교과서/참고서가 없다. 주된 이유는 항공우주분야등 신소재 구조 기술자와 건설 기술자는 서로 다른 “언어(言語)”를 사용하고 있는데 있다.
- 다. 고급 복합재료의 가격이 높다는 편견이 있다.

최신 복합 재료의 이론은 학부를 졸업하고 실무에 종사하는 일반 건설 설계 및 시공 기술자들에게는 너무나 어렵다. 필자는 과거 수년간 일반 기술자가 소신을 갖고 쉽게 사용할 수 있는 간단하고

도 정확한 이론의 개발을 위해 노력한 결과, 과거 10년간에 국내외 학회 등에서 발표된 논문중 약 40여 편으로 거의 완성에 가까운 간단하고도 정확한 설계 이론을 확립할 수 있었다.<sup>1),17)~20),24),25),36),38)</sup>

두 번째 문제의 해결을 위해서 필자는 “Composite Structures for Civil and Architectural Engineering”이란 511쪽의 책을 완성, 영국에서 출판하였다.

현재 각종 소재의 가격은 계속 내리고 있고, 경제적이고 효율적인 제작 방법이 나날이 개발되고 있어 설계 방법이 가격 형성에 결정적인 작용을 하고 있다. 기존 재료에 근거한 부적절한 개념에 의한 설계야말로 구조물의 가격이 높게끔 되게 한 장본인인 것이다. 필자가 구조물의 제5기본 개념이라고 이름부친 새로운 개념에 근거한 최적설계가 결정적으로 필요한 것이다. 이것은 공사단가의 대소는 설계 개념에 따라 크게 좌우되기 때문이다. 선택의 폭이 방대하고 고려 사항이 무수히 많은 복합재료의 경우 가격은 설계자의 판단 능력에 더욱 크게 좌우된다.

복합재료로 교량을 건설할 때를 상상해 보자. 먼저 구조물의 경량성으로 인하여 중장비 사용이 극단적으로 감소되고 공기는 몇 달이 아니라 몇 시간대로 된다. 우리 나라와 같은 교통량이 많은 나라에서, 특히 도심지에서 교통난 해소를 위해 고가도로나 overpass를 건설할 경우, 복합재료 교량을 사용하지 않는 한 지옥과 같은 교통 혼란을 몇 달씩 면치 못한다. 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 부식방지를 위해서 복합재료 구조물을 건설하는 것은 절대 필수 불가결한 일이며, 또한 기존 구조물의 보수에도 복합재료가 사용되어야 효과적이 된다. 높은 비강도와 비강성 이외에도 강한 내충격력, 높은 피로강도를 갖고 있으며, 중량이 적으므로(1/10도 가능) 지진이나 기타 진동발생시 그 무게 비율로 감소된 관성력을 받게 된다.

미국에서, 캘리포니아에 필요한 물을 알래스카에서 1700 마일의 해저 수로로 운송하는 계획을

추진하고 있다. 강철과 콘크리트를 이용한 재래식 공법으로는 15년의 공기에 1500억불이 소요된다. 복합재료를 이용할 경우 10년 이하의 공기에 200억불 이하가 소요된다.

흔히들 건설 기술자들은 보수적이라고 하는데 이것은 잘못된 평가들이다. 건설 기술자들은 정확한 이론이나 설계 방법이 개발되기 훨씬 이전에도, 현재보다 훨씬 열등한 건설 재료로 장대교, 고층 건물, 거대한 댐들을 설계 건설하여 왔다. 남산의 Seoul Tower의 경우 필자는 좌굴과 진동에 대한 완전히 새로운 이론을 개발 적용하여 해석하였으며, 최근 필자의 이론으로 확립하면서 50여 차례 국제회의에서 발표한 이 과제에 관한 논문들은 이 Seoul Tower에서 뿌리를 찾아야 하는 것이다.<sup>1),10)~12),17),22),31),37)</sup>

복합재료에 응용되는 모재나 보강재는 수없이 많고 다양하다. 이들의 결합에서 파생되는 복합재료의 특성은 수십 권의 책으로 수록될 정도로 방대한 양이 된다. 이러한 자료와 기본원칙 등은 참고문헌<sup>1),14)~16),23),27),47)</sup> 등에서 구할 수 있다.

## 2.4 역사의 필연성

필자는 약 10여 년 전부터 복합재료를 21세기의 건설재료라고 홀로 떠들어 왔다. 그러나 1996년은 드디어 새로운 역사의 흐름을 확인할 수 있는 해였다. 1996년 11월 미국 토목학회 년차 총회에서 Materials Congress가 열렸는데 이 모임의 명칭이 “다음 천년을 위한 재료(Materials for the New Millennium)”이었다<sup>7)</sup>. 필자는 여기 참석해서 좌장을 맡고 논문도 발표했는데 만찬회에서 많은 사람들이 찾아와서 그간의 고군분투한 노력을 치하하고 필자가 쓴 저서가 엄청나게(gorgeous) 훌륭하다고 칭찬하는 소리를 들었을 때 그간의 힘들었던 일들은 다 잊혀지고 엄청나게 흐르는 역사의 필연성을 느낄 수 있었다. 누가 뭐라던 지구는 돌고 있는 것이다.

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.

제4구조 개념을 위한 강철은 100여 년 전부터 사용되어 왔다. 지금은 거의 매일 새로운 것이 발표되고 2주일 전의 지식은 고물이 되는 시대이다. 필자가 인류 문화상의 제5구조물 기본개념이라고 부르는 composite가 모든 구조물의 기본 설계에 사용되게 되는 것은 역사의 필연성에 의해서 이루어진다.

### 3. 1995년 까지의 건설에 대한 복합재료 사용

#### 3.1 남아있는 연구과제들

우리는, 많은 사람들이 고생해서 연구한 결과들이 쓸모가 없거나, 다른 사람들이 이미 발표한 연구내용이거나 해서 결국 연구를 위한 연구 또는 남의 것을 베낀 발표내용이란 등의 평을 듣는 것을 자주 보아 왔다. 이에 필자는 더 연구해야 할 내용들을 제시해서 새로 연구하는 사람들이 시간과 노력을 절약하고 본격적인 연구에 매진하는데 도움을 주고자 이 부분을 쓴다.

가격은 이차적 문제가 되는 우주 항공용 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 원형(prototype)실험이 불가능하다. 시편(test piece)강도나 축소(sub-scale)모델 시험강도는 일반적으로 현장 구조재료 강도 보다 높다. 아무도, 설계 강도를 얻기 위해서, 빌딩이나 교량을 파괴할 수는 없다. 비등방성 재료구조물의 응력 계산 문제는, FEM 또는 다른 여러 가지 해석적 방법으로, 비교적 쉽게 해결된다.

새로운 1000년을 위한 나머지 주요한 세 문제는 다음과 같다.

가. 치수효과(size/scale effects)를 고려한 적절한 파괴범주의 개발.

오늘날까지 완전한 해결은 요원한 상태이다.<sup>43)~48)</sup>

나. 최상의 목표를 얻기 위한 설계 및 해석의 최적화.<sup>1),13),15),23),39)~41),46),48)</sup>

다. 지능 구조물(intelligent structure)의 개발<sup>56)</sup>

이 문제들에 대한 자세한 연구방향은 필자의 기 발표문들<sup>30),49),41)~55)</sup>에 자세히 제시되어 있다.

#### 3.2 유지보수 및 재생을 위한 복합재료

섬유 복합재료는 새로운 건설 시설물을 위한 재료로서뿐 아니라, 건물이나 사회 간접 시설의 보수 및 유지를 위해서도 지극히 중요한 재료이다. 미국만의 사회 간접 시설의 낡은 구조물 대체 사업비가 향후 20년간 3대지 4조달러로 추산되고 있다. 우리 나라의 교량, 상하수도등 사회 간접 시설 노후화로 인한 문제는 심각함에도 불구하고 그 규모조차 확인되지 않고 있다. 이러한 시설물의 유지 보수 및 대체 공사에 따른 엄청난 교통 혼란 및 각종 다른 문제 등을 고려할 때, 섬유 복합재료의 사용 이외에는 다른 방법이 없다. 구조물의 유지 관리 및 영구성 문제뿐만 아니라, 시간이 결정적으로 중요하기 때문이다. 이 내용은 참고문헌<sup>8),50)</sup>에 비교적 자세히 설명되어 있다.

중요한 것은 이러한 보수공사에 사용되는 재료는 고분자를 모재로 하는 복합재료라는 사실이다.

입자형 복합 재료(particulate composite)에서는 한가지 또는 여러 가지 재료의 입자가 다른 재료의 연속적인 모재에 첨가되어 있다. 입자들은 모재와 마찬가지로 금속 또는 비금속일 것이다. 특정 목적을 위한 복합재료를 형성함에 있어 수많은 조합이 가능하다. 현재 토목 기술자를 위한 구조용 입자형 복합재료 중 가장 중요한 것은 "Portland cement concrete"이다. 폴리머 포화콘크리트(PIC), 폴리머 시멘트콘크리트(PCC 또는 PMC), 폴리머 콘크리트(PC) 등과 DSP, MDF, 초속경콘크리트 등의 각종 첨가제와 제작과정, 강도 등 특성, 사용처 등은 참고문헌<sup>1),8),50)</sup>에 상세히 설명되어 있으므로 여기서는 생략한다.

최근 지진 때문에, 미국 육군 공병단과 캘리포니아주 도로국(Caltrans)에 의해 기둥보강에 대한 많은 연구가 이루어졌다. 이에 대한 자세한 내용은 참고문헌<sup>8)</sup>에 자세히 설명되어 있다.

강철 쉘 재킷은 이미 소개되었고, 탄소섬유 RP 재킷과 유리섬유 RP 재킷도 최근 나오고 있다. 대부분의 경우, 그 재킷들은 수리를 위한 구조부

재의 기둥을 둘러싸게 하고, 폴리머 콘크리트로 그 재킷 밑에서부터 위로 그라우팅한다. 1993년 현재, 미국 전역에 걸쳐 100개 이상의 기둥이 "FYFE" 시스템으로 고속도로에 성공적으로 설치되었다. 고속도로 구조물에 추가해서 여러 물탱크와 주차 건물이 이 시스템으로 보수되었다.

남부 캘리포니아에 있는 한 회사에서 개발된 자동화된 "winder"는 콘크리트 기둥의 능력을 증진시키기 위해 탄소 테이프(유리섬유 및 다른 재료의 사용도 가능)로 감고 양생하도록 설계되었다. 하루에 두 개나 세 개의 기둥이 보수될 수 있다. 강철 "jacketing"은 기둥 1개당 3~4일정도 걸린다<sup>8)</sup>. 복합재료(카본, 유리 및 기타) 재킷 보강된 기둥에 대한 실험은 캘리포니아주, 네바다주, 오하이오주 등과 다른 지역에서 수행되어 오고 있다.

빌딩 슬래브와 교량 및 고속도로의 포장의 비구조적 균열은 폴리머 포화 콘크리트(PIC)에 의해 비교적 쉽게 수리될 수 있다. 콘크리트 구조부재의 작은 파해는, "PIC", PMC(PCC), PC, 또는 필요하다면 복합재료 재킷이나 테이프와 함께 그 밖의 입자형복합재료로 보수될 수 있다.

만일 교량과 빌딩의 판이 심하게 손상되었다면, 그러한 판은 대체되어야 하며, 그러한 경우 복합재료 판은 다른 재료의 판과 비교할 때 많은 이점을 갖는다.

- 장점 : 경량, 우수한 내부식성, 기본 단위의 공장제작 가능성, 버팀목이나 뼈대작업이 없는 빠른 설치.

복합재료로 만들어진 판구조는 콘크리트나 강으로 만들어진 판 보다 현저하게 가볍다. 복합재료를 사용함으로써, 기존 교량구조물의 상판 총하중은 1/4이하로 절감될 수 있으며, 이러한 무게의 감소는 같은 거더, 기둥 또는 교각에 활하중의 증가와 추가차선을 가능케하며, 그보다 중요한 것은 손상되고 약화된 상부구조물을 가진 교량을 지속적으로 모두 사용할 수 있게 한다는 것이다. 이러한 모든 것이 훨씬 적은 건설비로 가능하며, 이러한 상황이 건물에도 똑같이 적용된다.

앞에서 설명한 것처럼, 바닥슬래브를 경량 복합

재료 패널로 대체하고, 필요하면 주경간구조물에 대한 테이프 접착이나 지지점 또는 현외부재를 추가하는 등의 간단한 보수로 주경간 구조물의 재건이 충분할 수 있다. 그러나 상세한 조사 후 손상이 심하다고 발견된다면, 구조물의 제거와 재건이 최후의 보수가 될 것이며, 가장 경제적인 해결방법이 될 수 있다. 손상에 대한 평가는 쉬운 작업이 아니며, "NDT"와 "NDE"를 요구한다. 손상에 대한 평가는 간단하지만 정확한 해석 방법을 필요로 하며 적절한 치수효과가 연구되어야 한다. 시편으로 시험하여 얻은 재료의 강도는 현장의 강도보다 크게 나온다. 복잡한 구조물의 "NDE"에 필요한 치수효과를 고려한 진동해석 방법은 필자에 의해 개발되어왔다.

### 3.3 생명선에 대한 복합재료 응용

1993년 현재 복합재료는 미국 파이프라인 시장의 50%와 지하저유탱크시장의 90%를 차지하고 있다.

유럽과 아프리카를 지브랄탈(Gibraltar)해협을 통해 연결하려는 생각이 진지하게 고려되고 있다. 여러 제안 가운데 두 가지가 흥미롭다. 하나는 탄소섬유 복합재료 사장교를 건설하는 것이고, 다른 하나는 수중 복합재료 튜브를 건설하는 것이다. 후자의 건설비는 다른 여러안 중 가장 저렴한 방법의 약 25%에 불과하다.

각종 파이프라인, 도로 항만시설등 생명선(lifeline)의 주·부구조재의 신규 공사 및 유지 보수를 위한 복합재료의 응용은 참고문헌<sup>8),50),56)</sup>에 자세히 설명되었다.

A.O.Smith에서 30년 전에 매설한 파이프라인(pipeline)의 일부를 절단해서 시험한 결과, 구조적으로 아무 이상이 없음을 발견했다는 것은 발표한 바와 같다.<sup>8)</sup>

### 3.4 교량에 대한 응용

교량건설에 대한 복합재료의 응용은 비록 느린 속도이긴 하지만 이미 시작되었다. 독일의 뒤셀도르프(Dusseldorf)시는 세계에서 최초로 복합재료 보강보를 이용한 콘크리트 도로교가 건설되어 있다. 1986년에 개통된 16m폭의 47m 지간을 가진 이 교

량은 유리섬유와 폴리에스테르로 된 복합재료 봉으로 프리스트레싱한 세계 최초의 “pc”교이다. 오지리(Austria)에서는 부두와 선착장이 볼트로 연결된 “blow-molded” 복합재료로 건조되었다. 미육군용 공격용 중형(heavy)교량은 장갑차 위에 3개의 연결된 부분으로 운반되게 되어 있는데, 수압식으로 33미터 스펀까지 펴질 수 있으며 비지지된 스펀중앙에서 70톤 하중을 지지하는 것으로 알려져 있다.<sup>3)~5),13)~16),27),28),52),53),55),56)</sup>

이 제목에 대한 내용은 참고문헌들에 상세히 설명되어 있으므로 이 절에서는 생략한다.

교량에 대해서는 프리스트레싱용 강봉 또는 케이블, 케이블튜브 교량, “glulam-CFRP” 보, “T-system” 교량, 현수교 및 사장교용 케이블, 고속 전철용 교량등에 대해서 복합재료가 이미 사용되었거나 연구가 진행중이다.

### 3.5 건설전반에 대한 응용

건설용 복합재료는 크게 다음 세분야로 나뉘어진다.

- 가. 지질섬유(geotextile) 및 인장 건축부재
- 나. “표준단면” 구조요소(rigid 구조요소)
- 다. 섬유와 시멘트 결합

지질섬유개념은 토질 및 기초 공학에서 활용되어 온지 오래고 대형 체육관, 공항, 기타 각종 구조물에서 “인장 건축부재”의 개념이 활용되고 있음을 알 수 있다.

토질 및 기초공학자들은 기초, 뚝, 사면 등의 보강을 위해 지오텍스타일을 사용해 왔다. 부식 저항 특성 때문에 해양 원유 플랫폼, 항만, 수로, 지하 시설물 등에 대한 복합재료의 응용은 급격히 팽창할 것으로 보인다.

일반적으로 토목 건설의 규모는 방대한 것이어서 경제성이 주요 고려 사항이 된다. 이런 점에서 볼 때, 복합재료와 기존 재료를 혼용하는 것이 일차적으로 고려되어야 한다. 불란서의 어느 회사는 폴리에스테르 실로 보강된 모래로 옹벽을 건설했다. 이 필라멘트는 높은 내부 마찰 각과 cohesion을 제공하게 되어 결과적으로 건설된 옹벽의 공

사비는 콘크리트를 사용할 때의 50%에 불과했다. 이와 비슷한 개념의 예는 여럿이 있다. 폴리프로필렌 보강된 아스팔트 활주로 포장, 폴리에스테르 스틸렌 폴리머 도로 오버레이, 섬유보강 콘크리트 상판, 포장 등 많은 예가 있다. 폴리머고정된 모래(폴리머 콘크리트-PC, 또는 석재복합재료라 할 수 있음)는 대형 구조물의 충전재로 사용되고 있다.

세계의 여러 회사에서 복합재료 표준 구조 단면을 생산하고 있다. 이런 구조부재들은 상하수도 처리장, 화학공장, 제지공장 등에 사용되고 있다. 복합재료는 전자파를 전달하지 않아서 컴퓨터 센터, 병원의 자기 공명투영실 등의 건설에 사용되고 있다. 복합재료로 된 콘크리트 보강재는 689.7MPa의 극한강도를 갖고 있다.

“표준단면” 구조요소로는 강재로 생산되는 각종 단면의 요소가 주로 유리섬유, 폴리에스테르, 비닐에스테르등을 사용하여 인발(pultrusion)에 의해 생산된다. 이런 단면은 내자기성, 내부식성 등을 인정받아 그 사용이 점차 확대되고 있다. 유리-에폭시, 탄소-에폭시, 아리미드-에폭시, 또는 “hybrid-polymer”의 복합재료 강봉이나 케이블은 교량 등 각종 구조물에 널리 쓰이기 시작했다.

복합재료 표준 단면으로 생산되는 봉이나 케이블은 강철에 대한 기본개념(제4의 개념)으로 제작되는 고로, 비효율적이어서 가격이 높다. 1996년 10월의 Wilson Form에서 나온 이야기로는 자재의 가격은 강재의 3~10배가 되는데, 구조물의 전체 수명을 고려하면, 콤포지트 봉이나 케이블이 경제적이 된다는 것이었다. 가격을 낮추려면 제5기본개념에 의한 구조설계가 요구되는 것이다. 주 보강재로 장섬유의 사용을 위한 제작 방법의 연구는 필자에 의해 추진되고 있다.

여러 나라에서 여러 가지 복합재료된 얇은 판(sheet)이 돔이나 내벽, 지붕 등으로 사용되고 있다. 복합재료로 된 콘크리트 형틀은 이미 오래 전부터 사용되고 있다. 선박, 콘테이너 등 여러 가지 수송 수단이 복합재료로 되어 있다. 프라스틱 제 말뚝은 이미 여러나라에서 사용중이다.

복합재료를 주 구조재로 사용할 경우의 가격 문제는, 이미 단기적으로도 유리하지만 장기적인 관점에서의 장점은 훨씬 크다. 교량 등의 수명을

100-120년으로 고려할 때, 유지 보수 문제는 심각하다. "Smart structure" 개념을 도입한 복합재료 구조는 이러한 문제 해결을 쉽게 해준다. 재래식 교량의 유지 보수를 극심한 교통량의 폭주 중에 진행하는 것을 흔히 본다. 복합재료 교량에는 이러한 문제가 없다. 재래식 교량의 건설 공기는 몇 달 또는 몇 년을 이야기한다. 복합재료 교량의 건설 공기는 몇 일로 이야기한다. 복합재료 구조물을 사용하면 각종 환경 문제의 대두를 피할 수 있다. 복합재료 교량 무게는 재래식 구조의 10% 내외도 가능해서 중장비 사용법도 달라진다. 10% 정도의 상부 구조는 하부 구조 가격을 저하시킨다. 대체로 하부 구조 공사비가 총 공사비의 50% 정도임을 상기하여야 한다. 지진이나 폭발물 또는 기타 충격시 동적하중은 1/10으로 감소되고 충격 흡수 능력도 크다.

복합재료구조의 신뢰성에 대해서는 이제 논란의 여지가 없어진지 오래이나, 토목 건축 분야의 기술자들의 타성에 의해서 타 분야에서 개발한 기술을 받아들이지 않은 것과, 가격이 재래의 구조재료보다 비싼 것이라는 선입관 때문에 사용이 활발하지 않았던 것이다. 건설 분야 기술자의 타성의 타파는 꾸준한 계몽으로 이루어질 수 있으나, 제품 가격의 저하는 소재 가격 저하와 설계 및 제작 기술의 향상으로만 가능한 것이다.

미국은 첨단군사기술의 평화적 목적을 위한 응용을 구체적으로 진행하고 있다. 여러 연방기관 가운데 육군 공병단의 건설기술 연구소(Construction Engineering Research Laboratories-CERL)은 법에 의해서, 미국 건설산업에 이익이 되게 하고, 세계적인 건설시장에서, 미국 건설업체가 더 경쟁력을 갖게 할 건설기술을 배양시키고 시범해 보일 책임을 지고 있다. 미국 연방 및 주정부들의 협력 기관이 진행 중인, 비군사 목적을 위한 군사기술의 응용사업들은 참고문헌들<sup>23),26),28),51)~53),55)</sup>에 자세히 설명되어 있어서 여기서는 생략한다.

#### 4. 2000년 현재 건설에서의 복합재료

##### 4.1 보수 및 재생

이 제목의 1996년 현재의 상황은 필자가 건물 건설에 대한 섬유복합재료(textile composites in

building construction)에 관한 제3차 국제회의(1996)에서 행한 주제강연(plenary lecture)내용에 자세히 설명되었으므로 여기서는 반복하지 않는다.<sup>8)</sup>

1997년 6월 현재 4개의 복합재료 기둥보강방법(composite column jacket systems)이 미국 캘리포니아 주 교통부(Caltrans)에 의해 승인되었다. 이들은 "Hexcel-Fyfe"방법, "Xxsys"방법, "Hardcore-du Pont"방법, 및 "Snap-Tite"방법 등이다. 위의 네 방법은 모두 다음의 기둥보강(column wrapping or encasement)의 5개 기본 형태중의 하나에 속한다.

가. "Wet Wrap, Fabrics and Towsheets"

"CMI", "Hexcel Fyfe", "Mitsui", "Mitsubishi", "Quake Wrap", "Tonen" 등이 이 방법을 사용한다.

나. "Wet Wrap, Tows"

"Obayashi"회사만이 이 방법을 사용한다.

다. "Towpreg Wrap"

"Xxsys" 회사만이 이 방법을 사용한다.

라. "Precured Shells"

"Du Pont Hardcore"와 "CMI"가 이 방법을 사용한다.

마. "Precured Tapes"

"Sika/Stesalit"가 이 방법을 제공한다.

1960년대부터 휨과 전단 보강에 대한 전통적인 보강방법은 강판을 실패해가는 구조물에 부치는데 집착해 왔다. 그러나 강판은 무겁고 부식하게 된다. 1980년대에 일본과 서구 국가들은 고성능 복합재료로 구조물을 보강하는 것을 검토했다. 그러나 복합재료 보강재는 접근이 곤란하거나 심한 부식과 같은 특수한 경우에만 경제성(cost effective)이 있는 것으로 믿어졌다. 그러나 곧 재료값은 통상 최종 공사비의 20%에 불과하다는 사실이 발견되었다.

복합재료가 강철대신 사용될 때, 현장으로 이동되고 정 위치에 들어 올려지는데는 1/40의 무게가 수송된다. 더구나 가설 시간과 구조물이 반게 되는 총 무게가 크게 감소된다. 이런 요소들은 또 현장에서 다른 활동들의 방해로 크게 감소시킨다.



많은 경우에 접착된 복합재료 보강은 강판보다 저렴하게 될뿐더러 성능도 더욱 좋다. 1997년 현재 전세계에서 1500여 콘크리트 구조물이 접착된 복합재료로 보강되었다.

최근에 미국 웨스트 버지니아(West Virginia) 주의 두 곳의 교량 상판을 유리/비닐에스터 재료의 복합재료로 제작하여 재생시켰는데 이 FRP 상판은 50년 교량 수명 기간 중 유지보수의 필요성을 감소시키고, 철근콘크리트 상판 무게의 20%로, 6배의 하중능력을 제공할 것으로 기대되고 있다.

전 세계적으로 수많은 교량, 주차장, 고층건물 및 기타 콘크리트, 목재, 및 강 구조물들이 보강이나 보수를 필요로 하고 있다. 이 방대한 규모의 사업에 고분자 소재의 복합재료가 유일한 해답으로 대두하고 있는 것이다.

1999년에, Brazil에 있는 70년된 385미터 길이의 육교보수에 2200평방미터의 탄소섬유재료가 사용되었는데, 보수된 구조물의 강도는, 강철로 보수할 경우의 강도의 7배가 넘었고 가격은 40% 저렴하였다.

미국의 여러곳의 기존 해안구조물이 복합재료 구조물로 대체되고있다. Delaware에 있는 한 구조물의 경우, 1000여개의 목재파일을 단 44개의 복합재료 파일로 대체하였다(1999.3).

#### 4.2. 콘크리트 형틀을 위한 유리섬유 보강 고분자 복합재료

유리섬유 콘크리트 구조용 형틀의 장점은 다음과 같다.

- 가. 강철이나, 목재 등으로 된 형틀과는 비교가 안되는 극히 매끄러운 고밀도 콘크리트 마감을 얻을 수 있게 한다.
- 나. 용통성과 주조 가능성(moldability) 때문에 유리섬유 형틀은, 완공된 콘크리트 모양을 해칠 수 있는 이음새와 중첩 연결부의 수를 감소시킨다.
- 다. 유리섬유 보강 고분자 (plastic) 복합재료의 주조가능성은 완공된 표면에 불필요한 불연속성이 없는 복잡한 형태의 제작을 가능케 한다.

라. 재료의 경량성 때문에 복합재료 형틀은 중장비 사용을 크게 감소시키면서, 상당한 노동력 절약과 빠른 건설을 가능케 한다.

마. 이 경량성은, 또, 쉽게 다루어 질 수 있고, 경화된 콘크리트에서 빠르게 떼어질수 있는, 큰, 한덩어리의 형틀 사용을 가능케한다. 1개층을 동시에 콘크리트 타설할 수도 있게 한다.

바. 복합재료 형틀은 압축 개스(gas)의 폭발로 콘크리트로부터 깨끗하게 분리된다

#### 4.3 복합재료 교량

100% 유리섬유 복합재료로 된 차량용 도로교가 1997년 11월에 미국 캔서스(Kansas)주에 건설되었다. 이 빠른, 저가의 대체 시스템은 전세계의 실패된(failed) 교량과 암거(culvert)의 한 좋은 해결방법이 된다. 이 7.7미터 지간에 9미터 폭을 가진 교량은, 경량크레인을 사용하여 공장제작된 단면들로 약 10시간에 가설되었다. 강철이나 콘크리트를 사용한 체계는 어떤 방법으로도 10시간 내에 가설될 수 없으므로, 이런 형태의, 신속히 재시공되는, 단경간 교량에 대한 소요(所要)는 대단할 것이다. 캔서스주의 한 군에서만 지난 5년간 200개의 암거가 물에 쓸려 내려간 것으로 알려져 있다. 이 교량은 섬유보강 플라스틱 벌집모양의(honeycomb) 샌드위치 체계로 되어있는데, 폭은 3미터여서, 교량거더 길이에 따라 적당한 수의 판을 차례대로 옆으로 배치할 수 있다. 교량거더 간격은 통상 7.7미터 보다 작다는 사실을 상기할 필요가 있다.

UCSD는 Caltrans, DARPA 및 연방 도로청(FHWA)으로부터 연구비를 받아, 100% 복합재료 교량상판의 가격과 콘크리트제와 비교한 성능을 평가하기 위한 연구를 하였다. 미국에서의 공로(highway)교의 평균 수명은 68년이고 상판이 있는 경우 35년인 것으로 추정되고 있다. 미국의 모든 도로교 상판의 40%는 1990년대에 35년될 것으로 나타나 있다. 제설용 소금을 사용할 경우, 재래식의 교량상판 수명은 10년뿐이다. 복합재료 상판은 이러한 도전을 해결할 수 있다. 연구된 상판의 길이는 45.7미터, 폭은 2.3미터였는데, 실험결과 복합재료 상판은, 콘크리트제 보다 크게 높은 하중을 견디

면서, 하중은 보통 5670kg 이라는 콘크리트제의 1/4이었다.

다른 캘리포니아 대학교(CSULB)는 1980년대부터, 복합재료 기술의 교량 설계 및 건설로의 이진을 위한 일련의 연구를 해왔다. 여러 가지 복합재료 구조요소들을 연구한 결과 상판과 케이블이 복합재료 사용을 위한 가장 적절한 교량 요소라고 결론지었다.

록히드 마틴(Lockheed Martin)사가 국방예산의 감소로 인해, 우주항공기술의 2중사용(dual-use) 시장을 찾기 시작해서, 교량을 이 목적으로 선택했는데, 이 분야는 새 건설(단-경간)과 재생(교량 상판) 두 가지 모두에 큰 시장을 제공할 것으로 판단했다. 설계조건은 미주 도로 및 수송기술자 협회(AASHTO) 시방서 18m 지간 단순 지지된 교량의 경우대로 있었는데 일련의 실험결과 교량은 AASHTO HS20-44 시방서에 의한 능력 32,400kg을 훨씬넘는 50,850kg이었고 총 가격은 목표액은 200/0.09m<sup>2</sup>보다 낮았다.

웨스트 버지니아 대학교에서 연구한 교량 상판은 중방향 거더위에 놓여있다.

1997년 6월에 Hardcore는 펜실베니아에 있는 20미터 지간에 4.5미터 폭의 복합재료 상판으로 교량을 재생하는데, 공장 제작된 40톤 하중을 견딜 수 있는 복합재료 상판으로 한시간 만에 가설하였다.

#### 4.1 콘크리트 보강을 위한 복합재료

미국 육군공병단은 콘크리트 보강을 위한 "FRP" 복합재료와 관련된 다음 프로젝트들을 지원했다.

- 가. 프리스트레싱 응용을 위한 FRP 복합재료의 시범.
- 나. 콘크리트 교량상판을 위한 FRP 복합재료 보강봉(rebar)의 시범.
- 다. 철근 콘크리트 구조물의 보수/능력향상을 위한 FRP 복합재료 체계의 개발 및 시범

부식이 안생기고 가격이 저렴한, 받침대나 건설형틀이 필요없고, 재래의 교량체계보다 월등한 이점을 주는 고속도로 교량체계에 대한 새로운 개

념의 개발을 위한 목적을 가진 연구 프로젝트가 로렌스 기술대학교 (Lawrence Technology University)에 의해 진행되었다. 연구내용은 2중 T보(DT-double T girders), 상판과 DT와의 연결등 여러 가지 이고 유리섬유 복합재료(GFRP), 탄소섬유복합재료(CFRP)등을 사용에서 프리스트레싱(prestressing) 등 여러 가지 상세한 기술 내용을 검토했다.

플로리다 아틀란틱 대학교(Florida Atlantic University)는 토목구조에 대한 첨단 고강도 복합재료의 사용에 관한 심도 깊은 연구를 수행하였다. 교량 및 여러 형태의 보에 대한 GFRP, CFRP, 아라미드 보강 프라스틱(AFRP)의 사용에 대한 타당성, 교량을 위한 CFCC 케이블, 첨단 고강도 복합재료를 사용한 보수 및 재생 교량에 대한 AFRP 사용의 타당성 등이 연구되었다.

이들 연구 결과는 만족하다고 요약될 수 있다.

#### 4.2 탱크, 파이프, 기타

1963년 이후, 미국에서, 복합재료 지하저장 탱크의 건설을 위해 1억5천만kg 이상의 수지가 사용되었다. 1993년 현재, 지하저장 탱크시장의 90%, 송유관 시장의 50%를 복합재료가 차지한 것은 전술한 바와 같다. 오웬스코닝 유리섬유 회사(Owens-Coning Fiberglass Corp.)가 1964년에 22710리터 탱크를 일리노이주에 있는 한 주유소에 문었는데, 1990여름, 주도로 팽창 프로젝트 때문에 캐내어야만 했다. 그런데 이 탱크는 좋은 상태에 있고 압밀 시험을 통과했으므로, 다른 주유소에 매설되었다. 1960년 이후, 300,000개 이상의 폴리에스터 탱크가 미국 전역의 주유소에 설치되었다. 전세계 상하수도계통의 유지보수에 필요한 추정자금은 연간 약 3000억불이다. 이 시장에는 복합재료가 가장 강력하게 대두할 것이다. FRP 파이프는 더 긴 수명과 낮은 보수필요성을 갖고 무게는 경량이다(약 1/5).

미국의 한 회사는 Saudi Arabia와 Kuwait 회사들과 함께 BondAtrand Kuwait Ltd.란 현지 법인을 설치하고 2000년 1월부터 Kuwait 유전과 산업용 복합재료 파이프를 생산하기 시작했다. 다른 미국회사는 이미 세계의 17개국에 18개의 복합재료 파이프 공장을 건설했다.

### 5. 첨단재료의 토목건설응용시 필요한 연구 개발 방향.

이 문제는 3.1절과 참고문헌<sup>30)</sup>에서 자세히 설명 되었으므로 몇가지 중요한 과제만 간단히 반복 설명된다.

가. 토목건설을 위한 몇가지 적층 주 구조물의 예비 설계를 위한 간단한 해석방법.

나. 치수효과(size/scale effects)를 고려한 강도/파괴 이론.

다. 설계의 최적화

- 1) 코어(cores)를 가진 교량 및 건물용 상판.
- 2) 힘을 저항하기 위해 코어(cores)를 장 섬유로 감는일(winding)
- 3) 경량고속빠대로 이루어진 "mandrel"을 filament wound된 "box"와 공동으로 작용하게끔 "box"안에 남기는 일. 이 경우 해결되어야 할 문제들은
  - i) mandrel과 복합재료 "box"사이의 적합성 (compatibility)
  - ii) 같은 열팽창계수를 가진 재료의 선택.
- 4) 상판의 상부와 아주 작은 마모계수를 가진 소재로 이루어진 포장부분을 일체로 만드는 일

### 6. 표준시방서

건설산업계에서 복합재료를 더욱더 받아들이기 위해서는 이러한 재료를 건물시방서나 여러 가지 표준시방서에 포함시켜야 한다. 이러한 표준시방서들의 개발은, "pultrude"된 구조물형태에 사용되는 재료에 대해서는 플라스틱산업학회(Society for the Plastics Industry), 복합재료에 대한 표준시방서는 미국 표준국(American National Standards Institute), 미국 재료시험학회(American Society for Testing Materials), 미국 공로교협회(American Association of State Highway and Transportation officials), 미국 콘크리트협회(American Concrete Institute), 캘리포니아 운송부(California Department of Transportation), 또 가장중요한 미국토목학회(American Society of Civil Engineers)등이 개발에

참여하고 있다. 연방공로교협회(FHWA)와 미육군 공병단은 탄소섬유와 유리섬유 프리스트레싱 봉의 개발에 참여하고 있다.<sup>22)</sup> ACI의 440 위원회(섬유보강 플라스틱 보강재 위원회)와 ASTM D-20 위원회(콘크리트보강을 위한 FRP 복합재료위원회) 등은 시험방법과 재료 Standard를 개발하고 있다. FHWA, AASHTO, ACI, PCI 및 ASTM은 설계 및 건설 시방서와 필요한 설계자료의 개발을 하고 있다. Port Hueneme에서의 성공에 힘입어 미해군은 탄소 및 유리섬유 프리스트레싱봉을 Panama City의 시설에 사용할 것이다.

### 7. 지능 구조물

토목공학 응용을 위한 지능구조물(smart structures)의 연구에 관한 두 개의 주요한 프로젝트가 미국에서 진행중이다.

먼저 것은 "Cooperative Research and Development Agreement"란 것으로 참가자들은 미 육군 공병단, 버지니아 공대(Virginia Polytechnic Institute), 일리노이 대학교, 및 프라스틱 산업학회(Society for the Plastic Inderstry)등이다. 참가자들은 복합재료 구조물의 질적 및 양적 평가를 위한 방법을 개발하고 있다. 이 방법은 많은 작은 크기의 입자들을 재료 안에 배치하여 이 입자들이 들어있는 재료의 일부가 된다는데서, 다른 지능 기술들과 차이가 있다. 복합재료 부품의 모든 부분이 "신경"을 갖고 있어서 부품 전 부분의 건강 진단이 가능한데, 과거의 "string"계이지는 어느 국부적 파괘만 측정할 수 있다. 이 연구의 목적은, 어느 대상물의 구조적 기능을 변화시키지 않는 정도의 파괘를 감지해서 기술자들이 보수를 계획할 수 있는 시간을 갖게 하자는데 있다.

다른 프로젝트는 ISIS(Intelligent Sensing for Innovative Structures)로서 1995년 9월에 시작되었다. 이 프로젝트의 전체적인 과제는, 복합재료와 광섬유 진단 기술(fiber optic sensing technology)를 개발하고 이것들을 건설 산업에 응용하는데 있다.

이 프로젝트는 "Bragg grating"이라 불리는, 광섬유 안에 배치된 "거울"을 복합재료 구조 부품에

“집어넣는” 일을 한다. “Bragg grating”을 가진 광섬유는 한가지 파장에만 해당하는 빛을 발산해서, 구조물의 온도와 변형율을 그 하나의 파장에 해당하는 빛깔로 측정한다. 예를들어, 빛의 색깔이 청색이 되면, 광섬유는 압축을 재고 있다. 빛의 색깔이 빨개지면, 광섬유는 인장을 재고 있다. “Bragg grating”은, 대상물체의 압력, 진동, 온도, 변형율등의 분포 상태를 mm의 극소부분의 정확도로 측정할 수 있다. 광섬유들은 보강재 섬유와 같은 특성과 형태를 갖고 있어서 복합재료와 쉽게 적합될 수 있다. 따라서 광섬유들은 복합재료 부품안에 쉽게 배치될 수 있다. 광섬유는 구조물 안에 아주 느리거나 아주 빠른 변화를 측정할 수 있다.

ISIS는 광섬유가 들어있는, pre-stressing 또는 post-tension용 pultruded tendon을 개발했다. 1996년초에, 광섬유가 들어있는 복합재료 부품을 사용한 세계 최초의 교량이 건설되었고 다른 두 개가 그 해에 계획되었다. 칼가리(Calgary)에 있는 이 교량은 광섬유가 들어있는 복합재료 “pre-stressing tendon”으로 보강되어 있다. 광섬유기술과 복합재료는 다음 5년 내에 보수 및 재활용 사업에 있어서 토목공학 분야에, 또 다음 십년 안에는 건설산업 전체에 엄청난 충격을 가할 것이다.

사회 간접시설(infrastructures) 만이 지능기술(smart technology)로부터 혜택을 받는 유일한 분야가 아니다. 어떤 회사들은 부식이 심한 환경에 처해있는 파이프와 탱크들을 진단하기 위해 이 기술을 사용해 왔다. 해양(off shore) 개스 및 유전 생산 시설에 사용되는 탄소섬유 “polyurethant” 파이프는 파이프의 높은 응력부위에 배치된 sensor로 잔여 강도와 수명을 추정할 것이다. 부식 방지층을 진단하는 기술도 개발중이다. 특별한 처리를한 “polyester veil”은 탱크 부식 방지층의 부식을 측정할 수 있다

### 8. 보수를 위한 지능 콘크리트의 사용

어느 특별한 콘크리트는 구조요소의 보수 뿐 아니라 지능(smart) 구조재료로 쓰일수 있다. 콘크리트의 기존 계기들은, “strain gage”, 광섬유 또는

압전(piezoelectric)계기 등이다. 이런 모든 계기들은 높은 가격, 짧은 수명, 전자기 또는 “laser”같은 비싼 주변장치의 필요성 등의 문제를 갖고 있다. 따라서 토목 구조물을 위한 계기(sensor)의 사용은 아주 흔하지 않다. 그러나 최근 개발된 기술에서는 콘크리트 자체가 “sensor”이므로 “strain gage”나 광섬유, “piezoelectric” 또는 다른 “sensor”를 콘크리트 안에 매설할 필요가 없다.

어느 섬유를 첨가하면 콘크리트의 강도를 증가시키고 도로 포장이나 콘크리트 구조 부재의 보수에도 적합하게 된다. 전기 전도되는 섬유 보강된콘크리트를 활용하는 도로는 콘크리트안에 설치된 압력(또는 무게) 측정능력을 전 도로에 걸쳐 갖고 있어서 교통 상태를 “real time”으로 “monitor”하게된다. 우리가 효과적으로 사용하기 불가능한 중량기(저울)가 필요 없게 된다.

이러한 콘크리트는 EMI(electromagnetic interference)차단효과를 갖고 또 정전기 방지 능력을 갖는다. 이런 섬유가 첨부된 콘크리트는, 이 콘크리트를 “smart”하게 할 뿐아니라 더 좋은 구조재료로 만든다. 휨강도, 휨연성(flexural toughness) 및 결빙, 해빙(freeze-thaw)내성이 증가하는 반면 건조 수축은 감소한다. 건조수축의 감소는 이 콘크리트의 구멍이나 균열을 보수하는데 아주 요긴하다. 이미 수축된 기존 콘크리트와 새 콘크리트 사이의 접착이 많이 향상되기 때문이다.

### 9. 유지 보수 및 재생을 위한 지능 소재

파괴되거나 부식되는 건물이나 사회간접시설의 문제는 전세계적으로 심각하고 이러한 구조물들의 보수나 재생을 위한 비용은, 장래 새로운 건설에 필요한 비용보다 크지않다고 양보하더라도-최소한 그 비용만치 크다. 크지않은 파괴일 경우 “tape”와 함께 또는 없이, 또 다른 재료와 함께 입자형 복합재료(particulate composites)로 보수될 수 있다. 심한(heavy) 파괴일 경우, 상판체계(slab system), 또 만약 파괴가 더 심하면, 주 뼈대 구조물들도 대체 되어야 한다. 구조물의 궁극적인 보수는, 완전제거와 재시공이다.

이 모든 목적을 위해서, 복합재료가 가장 적합하다.

유지보수와 재생작업은 가장 짧은 시간에 이루어질 수 있고, 결과적으로, 거의 유지관리보수가 필요없는 구조물을 만들게되며, 가격도 가장 싸게 만들수 있다.

지능재료(smart materials)는 지능 구조물(intelligent structures)을 건설하는데 사용된다. 여러 가지 가운데, 구하고자 하는 특성은, 균열이 발생할 때 스스로 치료 하는 것으로, 교량, 상하수도 체계, 또 기타 구조물들 파괴를, 현장의 그 위치에서 스스로 보수하여 이들의 사용수명이 현저하게 연장되게 하는것이다.

## 10. Hybrid Matrix의 사용

"Modified Portland"시멘트 콘크리트와 같은 값싼 모재 (matrix)가 장(long) 섬유 보강된 구조요소로 훌륭하게 쓰일 수 있다. 필자는 미국의 두 대학교와 함께, 1991년에서 1996년까지 이 과제에 대해서 연구해 왔다. 그 결과는 희망적이었다. "Prototype" 제작 및 실험 방법이 현재 연구 중이다.

## 11. 결 론

역사는 변하는 것이 필연이다. 지금까지의 구조물 4대 기본개념은 그 당시 사용 가능한 재료와 응용 가능한 이론에 의해 개발되어 왔다. 지금은 거의 매일 새로운 것이 발표되고 2주일 전의 지식은 고물이 되는 시대이다. 필자가 인류 문화상의 제5 구조물 기본개념이라고 부르는 복합재료가 모든 구조물의 설계 건설에 사용되게 되는 것은 역사의 필연성에 의해서 이루어진다.

강철이나 콘크리트나 알루미늄이나 등의 선택의 여지가 없이, 모든 구조물에는 복합재료를 사용하게 되며, 이것은 인류의 기술관련 및 소재관련 지식이 발달한데 따른 역사적 필연성에 의한 결과이다.

건설재료로서의 섬유 복합재료의 장점은 본문에서 비교적 상세히 설명되어 있다. 이러한 장점을 갖는 재료가 최대한로 활용되기 위해서는 각분야의 공학자들이 서로 다른 전공분야에 대한 이해를 증진시키고 상호 협조하는 분위기가 생활화

되어야 한다. 지금의 과학 기술은 너무 세분화되어 같은 분야의 기술자들도 다른 전공을 하는 사람과는 다른 "언어"를 사용하고 있다. 나는 강구조, 너는 진동 등등 전공만 이야기해서는 구조물이 성립되지 않는다. 한 구조물의 건설에는 천문지리, 수리학, 지질공학, 구조물계획, 진동, 안정성(좌굴), 응력 및 변위 계산을 위한 역학, 설계, 재료(화학, 금속, 세라믹), 제작방법, 시공방법 기타 모든 분야가 합쳐져야 가능한 것이다.

건설관련 세계시장 규모는 연간 2조 4천억불로 추정되고 있고 미국만의 사회간접 시설의 유지보수비가 3내지 4조불로 제정되어 있다.

이러한 방대한 시장에 대해서 복합재료가 사용된다는 것은 역사적 필연성에 의해 결정됐다는 것을 재강조하면서 복합재료의 모재로는 고분자가 주로 사용될 것이라는 것은 주목할 만한 사실이다. 이러한 시기가 먼 미래에 있는 것이 아니고 이미 시작되었다는 것을 재강조한다.

## 참 고 문 헌

1. Kim, D. H., *Composite Structures for Civil and Architectural Engineering*, E & FN SPON, Chapman & Hall, London, 1995
2. 김덕현, "토목공학의 정의와 분야", 대한토목학회지, 제21권 제2호, 1973, pp.38~45
3. 김덕현, "문화사적으로 고찰한 공학과 미래지향적인 공학 교육", 강원대학교 산업기술연구소 논문집, 제 7집, 춘천, 1987
4. 김덕현, "토목구조물을 위한 신소재의 응용", 대한토목학회, 제36회 정기총회 특별강연, 서울, 1988. 4. 30
5. 김덕현, "도로구조물에 대한 첨단 신소재의 응용", 한국도로공사 초청강의, 서울, 1989. 6
6. 김덕현, "Design of Composite Material Structures", 한국전산구조공학회, 1991년도 가을 학술 발표회 특별강연, 서울, 1991. 10, pp.5~13
7. Chong, K. P., Editor, *Materials for the New Millennium, Proc. of the Fourth Materials Engineering Conference*, ASCE, Washington D. C., November 10~14, 1996

8. 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 7-9, 1996
9. Kim, D. H., Geometric Nonlinear Analysis of Underground Laminated Composite Pipes, *7th International Conference on Composite Materials*, Guangzou, 1989. 8
10. Kim, D. H., A Simplified Method of Vibration Analysis of Irregularly Shaped Composite Structural Elements, *First International Society for the Advancement of Material and Process Engineering Symposium (JISSE 1)*, Tokyo, 1989. 12
11. Kim, D. H., Vibration Analysis of Irregularly Shaped Composite Structural Members, *1990 Structures Congress*, American Society of Civil Engineers, Baltimore, MD., U.S.A., 1990. 5
12. Kim, D. H., Vibration Analysis of Irregularly Shaped Laminated Thick Composite Plates, *ICCM 8*, Honolulu, Hawaii, July 1991
13. Kim, D. H., "Composite Structures in Civil and Architectural Engineering", Invited Lecture, EHM/BCS/NSF Research Grantee Workshop, Phoenix, AZ., August 5-6, 1991
14. Kim, D. H., "Composite Materials for Civil Structures", US-Korea-Japan Trilateral Seminar on Frontier R & D for Constructed Facilities, Honolulu, 1991. 10
15. Kim, D. H., "Design of Composite Material Structures", China-Japan-USA Trilateral Symposium/Workshop on Earthquake Engineering," Harbin, China, 1991. 11
16. Kim, D. H., "Design of Composite Material Structures for Civil Construction," Seminar Lecture, University of California, Davis, 1992. 2. 24
17. Kim, D. H., A Simple Method of Obtaining 'Exact' Values of the Natural Frequencies of Vibration for Some Composite Laminated Structures for Civil Construction, *Proc. of the Second International Symposium on Textile Composites in Building Construction*, Lyon, France, 1992. 6. 23-25
18. Kim, D. H., The Influence of Anisotropy on Buckling Strength of Laminated Composite Structures for Civil Construction, *Proc. of International Conference on Education Practice and Promotion of Computational Method in Engineering Using Small Computers*, Dalian, China, 1992. 7. 30. -8. 2
19. Kim, D. H., A Simple Method of Obtaining 'EXACT' Values of The Buckling Strength for Some Laminated Structures for Civil Construction, *Proc. of Advanced Composite Materials in Bridges and Structures*, Sherbrook, Canada, 1992. 10. 7-9
20. Kim, D. H., Simple Method of Analysis for Preliminary Design of the Composite Laminated Primary Structures for Civil Construction, *International Conference on Computational Engineering Science*, Hong Kong, 1992. 12. 17-22
21. 김덕현, "21세기의 건설재료 및 구조개념", 종합기술공사 특별강연, 1993. 2
22. Kim, D. H., A Simple Method of Obtaining "Exact" Values of the Natural Frequencies of Vibration for Some Composite Laminated Structures for Civil Construction, *Advanced Composites 93*, Australia, 1993. 2
23. Kim, D. H., "Composites in Construction-Considerations for Design," Summary Speech, The First Wilson Forum on Existing and Potential Applications of Composite Materials in the Infrastructure, San Francisco, 1993. 5
24. Kim, D. H., Simple Method of Analysis for Preliminary Design of Certain Composite Laminated Primary Structures for Civil Construction-II, *Proc. of Advances in Materials and Processing Technology-93 (AMPT-93)*, Dublin, Ireland, 1993. 8. 24-27

25. Kim, D. H., A Simple Method of Analysis for Preliminary Design of the Composite Laminated Primary Structures for Civil Construction, *3rd Japan International SAMPE Symposium and Exhibition*, December 1993. 12.
26. 김덕현 “21世紀를 指向한 美 經濟 再建의 戰略,” 汎武 71號, 1993. 4
27. 김덕현 “21세기의 건설재료 및 구조개념,” 대한토목학회지, 제 41권 제5호, 1993. 10
28. 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, 1994. 4. 18-19
29. 김덕현 “Composite 프로젝트에 대한 사업성,” 생산기술, 6권 6호, 1995. 6
30. Kim, D. H., Proposed R/D Direction of Advanced Composite Materials Application for Civil Construction, *The Third Asian-Pacific Conference on Computational Mechanics*, Sheraton Hotel, Seoul, Korea, September 16-18, 1996
31. Kim, D. H., “Vibration Analysis of Special Orthotropic Plate with Variable Cross-Section, and with a Pair of Opposite Edges Simple Supported and the Other Pair of Opposite Edges Free,” American Society of Civil Engineers, Washington, DC, November 10-14, 1996
32. Preprints, The Wilson Forum on Existing & Potential Application of Composite Materials in the Infrastructure, Alexandria VA, October 28~29, 1996
33. 김덕현, “Theory of Non-Prismatic Folded Plate Structures,” 서울대학교 應用力學研究會, 1966. 5. 13.
34. Kim, D. H., Analysis of Triangularly Folded Plate Roofs of Umbrella Type, *16th Congress of Applied Mechanics*, Tokyo, Japan, 1966. 10. 19.
35. Kim, D. H., The Effect of Neglecting the Radial Moment Terms in Analyzing a Finite Sectorial Plate by Means of Finite Differences, *International Symposium on Space Technology and Sciences*, Tokyo, Japan, 1967. 5
36. Kim, D. H., “A Simple Method of ‘Exact’ Analysis of Some Composite Laminated Structures for Civil Construction,” Seminar Lecture, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1992. 3. 3
37. Kim, D. H., Influence of Angle Orientation and Plate Aspect Ratio on the Critical Buckling Load of [ABBCAAB]<sub>r</sub> Type Laminates, *3rd Japan International SAMPE Symposium and Exhibition*, 1993. 12
38. Kim, D. H., A simple method of analysis for the preliminary design of particular composite laminated primary structures for civil construction, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 55, Elsevier, London, 1995, pp.242~248
39. Kim, D. H., Optimization of Composite Material Structures - The State of the Art, *Proc of Korea-Japan Joint Seminar on Structural Optimization*, Seoul, Korea, 18-20, 1992. 5
40. Kim, D. H., The Importance of Concept Optimization of Composite Structures, *Proc of Advances in Materials and Processing Technology-93 (AMPT-93)*, Dublin, Ireland, 1993. 8. 24-27
41. Kim, D. H., The Importance of Concept Optimization, Keynote Speech, *3rd Pacific Rim Forum on Advanced Composites*, Honolulu, 1993. 11. 2~4
42. Tsai, SW., “Composite Design,” Think Composites, Dayton, OH., 1988
43. Chong, K. P. and Kim, D. H., Size/Scale Effect in the Failure of Brittle Materials and Composite Structure, Invited Lecture,

- International Union of Theoretical and Applied Mechanics Symposium on Size-Scale Effects in the Failure Mechanisms of Materials and Structures*, Torino, Italy, 1994. 10
44. 김덕현, "Size-Scale Effects in the Failure of Composite Structures," 한국 복합재료 학회, 1994. 11. 25
  45. Kim, D. H., The Importance of Concept Optimization in Design And Scale/Size Effects In the Failure of Composite Structures, *Proc. of International Symposium on Public Infrastructure Systems Research*, Seoul Korea, 1995. 9. 25-27
  46. Kim, D. H., Importance of Concept Optimization in Design and Size/Scale Effects in The Failure of Composite Structures, *EURO-MECH 334*, Lyon, 1995. 5. 15-17
  47. Kim, D. H., "The Importance of Concept Optimization in Design and Scale/Size Effects in the Failure of Composite Structures," Invited Speaker, The Wilson Forum on Existing & Potential Application of Composite Materials in the Infrastructure, Alexandria, Virginia, October 28-29, 1996
  48. Kim, D. H., The Importance of Concept Optimization in Design and Scale/Size Effects in the Failure of Composite Structures, *The Third International Symposium on TEXTILE Composites In Building Construction*, Seoul, Korea, November 7-9, 1996
  49. 김덕현, "토목건축공학을위한 섬유복합재료", 특집, 섬유기술과산업, 제1권 제1호, 한국섬유 공학회, 1997. 3
  50. 김덕현, "건물과 사회간접시설의 보수와 재건을 위한 복합재료", 대한 토목학회지, 제45권 제4호, 1997. 4
  51. 김덕현, "건설분야에서의 복합재료 응용", 테마기획, 기계저널, Vol. 39, No. 2, 대한기계학회, 1999. 2
  52. 김덕현, "21세기의 복합재료의 신전개방향", 특집, 고분자 과학과 기술, Vol. 10, No.1, 한국고분자학회, 1999.2
  53. 김덕현, "건설산업에서의 복합재료의 응용", 한국복합재료학회 1998년도 정기총회 특별강연, 1998. 11. 13
  54. 김덕현, "새로운 1000년의 건설재료", 강원대학교 초청강연, 1997. 6. 20
  55. 김덕현, "새로운 1000년의 건설재료", 서울 산업대학교 초청강연, 1997. 12. 11
  56. Kim, D. H., "Composites in Construction," *Proc. of the First Korea-U.S. WORKSHOP/Seminar on Composite Materials*, Seoul, Korea, September 7~11, 1998 