

## 토목, 건축공학을 위한 섬유 복합재료

김 덕 현

### 1. 역사적 필연성[1-7]

#### 1.1. 문화사적으로 고려한 건설

자연계의 모든 동물과 식물은 섬유질 구조에 의존하고 있고, 인류는 선사 시대부터 자연 섬유를 이용해 왔다. 각종 의류, 밧줄 등이 이에 해당되는데 20세기 후반까지 구조 목적의 소재 개발은 거의 전적으로 금속 결정체에 국한되어 왔다. 일찍이 가장 널리 사용된 구조 재료인 목재는 자연이 만들어 준 섬유 복합재료의 최선의 예임에도 불구하고 우리는 자연의 예를 무시해 왔다. 우리가 한국식 주택을 지을 때, 진흙에 짚을 섞어 만드는 벽체는 섬유 복합재료 구조의 좋은 예가 된다.

기원전 5,000년경에 이집트에 나타난 진 이집트 인은 원주민을 몰아내고 벽돌, 목재, 석재로 각종 구조물을 지었다. 이들은 이때 각종 유기섬유로 복합재료 벽돌을 만들어 주택 등 각종 구조물을 만들었고 석재구조물의 건조를 위해 훌륭한 접착재를 사용하였다.

기술은 과학이라 불리우기 이전의 여러 세기 동안 예술이었다. 이의 근원은 역사의 시초와 일치한다. 인류가 적성(hostile)의 자연 조건을 피하고자 피난처를 찾았을 때 기술을 터득하기 시작했다. 거주할만한 동굴이 없을 때 긴털의 어느 원시인은 손과 두뇌의 힘으로 돌, 진흙 및 나무가지 또는 얼음으로 별판 위에 인공동굴을 만드는 방법을 발명하였다.

기술자란 직업은 진흙 벽돌로 더 영구적인 거주처를 건설하면서 초기 단계로 접어든 것이다. 이런 구조물은 칼데아와 이집트의 유적에서 찾

아 볼 수 있다. 키로스가 기원전 약 500년에 유프라테스강의 수로를 바꾸고 바빌론을 점령했을 때 그에게는 훌륭한 기술자가 있었을 것이다. 줄리어스 쉐저가 라인강을 도하했을 때도 마찬가지이다. 이집트의 피라미드나 중국의 만리장성, 로마의 도로나 도수관 등은 건설의 예술과 재료에 능통한 사람들에 의하여 계획, 건설되었다.

#### 1.2. 구조물의 4대 기본 개념

여러 해를 지나면서 구조물 건설의 4대 기본 개념이 발전하였다. 기둥과 보, 석조아치, 목재 트러스, 현대의 철재트러스와 뼈대가 그것이다.

이집트의 사원 중 가장 훌륭한 것은 카나크(Karnak)에 있는 아몬(Ammon)의 대사원이다. 기원전 1500년에 건립된 이 사원은 길이 1,200 피트에 360 피트의 폭을 차지하고 있으며, 거대한 석재슬래브로 된 지붕을 기둥과 보가 지지하고 있다. 중앙의 기둥들은 11피트 9인치의 직경에 69피트의 높이를 갖고 있다. 이 구조물은 여러 세기에 걸쳐 건립된 것이다.

현대 건축은 그리스의 영향을 많이 받았다. 기원전 460년 내지 400년 사이의 그리스의 유명한 지도자 페리클레스의 시절에 그리스는 가장 뛰어나고 유명한 건축의 발전을 가져왔다. 아크로폴리스(Acropolis)라 불리는 아테네의 언덕에 건립된 파르테논, 에레크티엄(Erechtheum), 프로필레아(Propylaea) 등은 현대 세계에서 가장 유명하고 완전한 구조물에 속한다.

로마인은 건물 건설에 아치(arch)를 사용한 최초의 사람이다. 그들은 도수관을 복석조 아치로 건설했으며 아직도 사용되고 있는 것도 있다.

144피트의 직경을 가진 석조 돔(dome)인 로마에 있는 파르테온은 서기 120년에 완공되었다.

그리스 사람들은 이것을 더 발전시켜 재료역학의 기초가 되는 정역학을 개발하였다. 아르키메데스는 지레의 평형조건을 설명하고 물체 중심의 결정법을 찾아냈다. 그는 이 이론을 여러 가지 중력 물체의 운반 기구 제작에 응용하였다.

그리스와 로마인들이 쌓아올린 구조공학의 대부분의 지식은 중세에 들어서자 소실되었으며, 르네상스 이후에야 회복되기 시작했다. 유명한 이태리의 건축가 폰타나가 식스투스 5세 교황의 명령으로 바티칸 첨탑을 세웠을 때 구라파 기술자들로부터 많은 관심을 끌었다. 그러나 이집트인들은 이보다 수천년 전에 피렌스에서 다듬은 석재를 나일강으로 운반하면서 수많은 이런 첨탑을 건설하였다. 로마인들은 이 첨탑의 몇 개를 원위치에서 로마로 옮겨 세웠다. 16세기의 이태리 기술자는 그들의 조상들 보다 이런 일에 훨씬 뒤져 있었던 것이다.

르네상스기간에 과학에 대한 흥미가 부활하여 건축과 기술의 예술지도자들이 등장한다. 레오나르도 다 빈치는 이 기간의 가장 뛰어난 사람이었다. 그는 이 당시의 지도적인 예술가일뿐 아니라 위대한 과학자요 기술자였다.

현대 역학은 위대한 갈릴레오에 의하여 문을 연다. 그의 위대한 업적은 과학의 모든 분야에 영향을 미치고 있다. 17세기 기간에는 수학, 천문학, 역학 등에 급격한 발전을 이루어 1560년에는 이태리에 최초의 Academy of Sciences가 세워졌고, 영국의 수학자 Wallis 및 그의 학우들의 모임에서 New Philosophy 또는 Experimental Philosophy란 이름을 쓰기 시작했다(1645년). 이때 비로서, 과학이 철학과 분리되기 시작한 것이다. 르네상스 이전 특히 13세기의 스페인에는 고딕형태의 건축이 발전하여 영국, 독일, 이태리로 전파되었다.

중요한 구조물 건설의 개념인 목재트러스는 이태리의 앙드레아 파라디오에 의하여 쓰여졌다. 그러나 파라디오의 이 발명의 중요성은 18세기 중엽까지 인식되지 못했었다.

구조용강(Bessemer, 1856년)의 발전과 이의

건물 건설에 대한 이용은 로마이후의 가장 기념될 만한 일이었다. 강도 높은 강철의 사용은 고층건물, 장대교, 높은 탑 등의 건설을 가능케 하였고, 20세기의 꽃을 피게 하는 원천이 되게 하였다.

### 1.3. 구조물의 제 5 기본 개념

21세기를 눈앞에 둔 현재의 금속, 화학공학의 발달은 눈부신 발전을 거듭하여 각종 구조용 신소재의 등장을 통해 강철을 비롯한 각종 재래 구조재료의 퇴장을 가용하기 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 [1].

인류역사의 여명기로부터 소재는 발전을 위한 무기였었다. 역사 시대는 석기 시대, 청동기 시대, 철기 시대 등과 같이 사용된 구조재료에 의해서 분류되기까지 했다. 그러나 오늘날 우리 시대를 한가지만의 재료로 부를 수는 없다. 우리 시대는 선택의 시대이기 때문이다. 우리는 적절한 소재를 최적 용도로 사용할 가능성을 갖고 있는 것이다. 선택의 시대란 강한 경쟁이 있음을 의미한다. 이 경쟁에서 복합재료는 훌륭하게 무장되어 있어 이의 힘을 발휘하기 시작했다. 이 복합재료의 주요 힘 가운데 하나는 성능의 다양성에 있다.

경쟁자(소재)들도 낮은 가격이란 강한 무기를 갖고 있어 복합재료는 가격은 2차요소가 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 인하에 큰 역할을 한다. 복합 재료로 제작 건설된 많은 구조물들이 타 구조 재료로 건설된 것보다 경제적인 예가 여럿이 있다.

인류 문화상 제5의 구조 개념의 대표적인 구조 형식은 복합구조(composite structure)이다. 간단히 말해서 복합재료(composite)란, 두가지 또는 그 이상의 소재들을 복합적으로 결합시켜 특정 목적을 위해 만들어진 최종 제품을 의미한다. 두가지 이상의 소재가 결합되기 때문에 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 모재의 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 모재는 두가지 이상의 원료가 섞인 hybrid 상태로 사용될 수 있다. 한 극단의 예가 철근 콘크리트의 보강재로 철근과 탄소, 유리 또는 고분자 섬유를 혼합하는 경우이다.

복합재료를 논할 때 세개의 phase를 이야기한다. 첫째와 두번째 phase가 각각 보강재와 모재이고 세번째 phase가 보강재와 모재의 접촉부분인 interface이다. 두가지 이상의 소재가 결합하여 일체가 된 복합재료를 만들어 내니까 당연히 중요하러니 하겠지만 이 interface야말로 주어진 소재들의 쌍으로부터 소요되는 특성을 얻을 수 있게 하는 중요한 역할을 한다. Interface를 어떻게 처리하느냐에 따라서 제작 방법, 강도 등 여러 가지 특성이 판이하게 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. Flakes는 여러 가지 목적을 위해 이용되며, 그 좋은 예로 전기 및 열의 전달 및 차단 등의 조절기능이다. Fibers는 소요 역학적 특성을 얻게 하는 최적 형태인데 직경의 크기에 따라 whisker( $<0.001''$ ), fiber( $0.001''\sim 0.032''$ ), wire( $0.032''\sim 0.25''$ ), rod( $0.25''\sim 2.00''$ ) 및 bar( $>2.00''$ )로 불리운다.

인류는 복합재료를 수천년동안 사용해왔다. 진흙에 짚을 썰어 흙담을 쌓았을 때 우리 조상들은 discontinuous fiber reinforced composite를 사용했던 것이다. 즉, 짚은 보강재이고 진흙은 모재였다. 소위 첨단 복합재료(advanced composite)의 사용은 1964년 저렴한 가격으로 탄소섬유가 생산되고 부터이다. 각종 비행기에서부품으로부터 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, 건축 등 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 항공우주분야 등 신소재 구조 기술자와 건설 기술자는 서로 다른 언어를 사용하고 있는데 있다.

다. 고급 복합재료의 가격이 높다는 편견이 있다.

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. 구조물의 제 5 기본 개념이라고 이름부친 새로운 개념에 근거한 최적설계가 결정적으로 필요한 것이다. 이것은 공사단가의 대소는 설계 개념에 따라 크게 좌우되

기 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 교통혼란을 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.

최근에 영국에서는 100,000리터 storm tank를 복합재료로 단 하루에 완공했다. 이 규모의 구조물을 강철로 건설하면 최소 1개월이 소요됐고, 콘크리트 구조로 건설하면 통상 3개월은 소요되었을 것이다. 공사비는 강철이나 콘크리트 구조물의 경우보다 훨씬 적었다.

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 이전에, 현재보다 훨씬 열등한 건설 재료로 장대교, 고층건물, 거대한 댐들을 설계 건설하여 왔다.

#### 1.4. 역사의 필연성

섬유기술과 산업

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. 제 4구조 개념을 위한 강철은 100여 년 전부터 사용되어 왔다. 지금은 거의 매일 새로운 것이 발표되고 2주일 전의 지식은 고물이 되는 시대이다. 인류 문화상의 제 5구조물 기본개념인 composite가 모든 구조물의 기본 설계에 사용되게 되는 것은 역사의 필연성에 의해서 이루어진다. 오늘날의 기술자는 물론 내일의 기술자들은 이러한 시대의 기술자로 활약하기 위해서 꾸준히 공부해야 한다. 가격이 비싸다는 생각은 편견이었다. 복잡한 소재 특성은 적절한 검토로 파악될 수 있다. 어려운 이론을 대체하기 위해 쉬운 해석 방법의 개발은 계속되고 있다. 여러 나라에서 새시대의 경제 강대국이 되기 위해 이 분야에 노력을 기울이고 있다. 그러나 언제나 출발할 때가 늦은 것은 아니다. 우리 기술자들도 새 공부를 하는 자세로 이 분야에 대한 연구를 시작해야 한다. 그래야 우리 후손들이 계속 행복할 수 있는 것이다.

## 2. 토목·건축 구조물에 대한 응용

### 2.1. 남아있는 연구 과제들

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(proto-type) 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.

나머지 주요한 두 문제는 다음과 같다.

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

은 요원한 상태이다.

나. 최상의 목표를 얻기 위한 설계 및 해석의 최적화.

## 2.2. 섬유 복합재료의 건설에 대한 응용 : 개요

1967년 미국 토목학회의 특별위원회는 구조용 플라스틱(현재의 의미를 가진 콤포지트란 단어는 나중에 나타났음)에 대한 간단하면서 집약적인 보고서를 제출했다. 이 보고서에 의하면, 복합재료는 높은 인장강도, 최소중량, 화학적 작용에 대한 높은 저항력 등이 요망되는 목적으로는 탁월하지만 그 성능은 높은 온도하에서의 작동이나 적은 변위가 요구되는 경우는 부적절하다고 평가했다.

30여년에 걸친 계속적이고 집중적인 개발의 결과, 오늘날의 복합재료 성능은 다른 소재들의 성능보다 월등히 우수하다. 관련된 문제는 토목 건설에 용납될 수 있는 가격구조에 있다. 이 시점에서 소재가격과 제작 단가가 고정되어 있다고 가정한다면(실제는 이런 가격 등이 나날이 낮아지고 있지만) 가격구조는 좋은 설계방법으로 낮아질 수 있다.

어느 미국 회사는 1949년부터 섬유 보강된 tube(pipe)를 20,000,000ft나 생산해 왔다. 어느 유럽회사는 같은 종류의 pipe를 20여년간 생산하고 있다. 이러한 pipe들은 다른 여러 가지 장점 이외에 경량이고 부식이 안 생기고 설치가 용이하여, 가격만 맞는다면 상하수도 계통, 담수화 plant, 화학공장의 piping, 장거리 송유관 등에 대한 응용이 폭발적으로 늘어날 것으로 예상된다.

가격에 대해 고찰할 때, 복합재료에 관한 국제 간행물에 의하면, 24 inch보다 작은 직경의 pipe는 금속이나 기타 플라스틱 제품이 우수하고, 이보다 크고 60 inch 미만인 경우는 금속과 복합재료가 막상막하이므로, 60 inch 이상에서는 복합재료에 대항할 재료가 없는 것으로 되어 있다. 그러나 본인의 경험에 의하면 10 inch 미만의 고압 pipe의 경우, 복합재료 제품이 단연 저렴하고 만약 장거리 line-pipe에서 수송비를 고려하면 단연 압도적으로 유리하게 나타났다. 직

경 48 ft가 되는 복합재료 tube가 생산된 예도 여럿이 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 rebar는 100,000 psi의 극한강도를 갖고 있다.

교량건설에 대한 복합재료의 응용은 비록 느린 속도가긴 하지만 이미 시작되었다. 독일의 뒤셀도르프시는 세계에서 최초로 복합재료를 이용한 도로교가 건설되어 있는 것으로 확인된 곳이다. 1986년에 개통된 16 m폭의 47 m 지간을 가진 이 교량은 유리섬유와 폴리에스테르로 된 복합재료 봉으로 프리스트레스한 세계 최초의 pc 교이다. 오지리(Austria)에서는 부두와 선착장이 볼트로 연결된 blow-molded 복합재료로 건조되었다.

중국에서는 고분자 복합재료의 차량전용 교량을 건설한 것으로 알려져 있는데, 아직 성능에 대해서는 알려진 바가 없다. 역시 중국에서 13 ft 폭의 89 ft 스패 보행자용 사장교를 복합재료로 건설했다. 미육군용 공격용 중형(heavy) 교량은 장갑차 위에 3개의 연결된 부분으로 운반되게 되어 있는데, 수압식으로 109 ft 스패까지 퍼질 수 있으며 비지지된 스패중앙에서 70톤 하중을 지지하는 것으로 알려져 있다.

유럽과 아프리카를 지브랄타 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 여러 안 중 가장 저렴한 방법의 약 25%에 불과하다.

길이 113 m인 횡단 육교가 스코틀랜드의 Aberfeldy에 세워졌다[30]. 이 교량은 유리 섬유 보강 복합재료로 구성되었으며, 40개의 평행한 Kevlar 케이블에 의해 지지된다. 상판 구조는 유리섬유보강 복합재료로 구성되었으며, 높이 17.5 m의 유리 섬유 보강 복합재료 탑(tower)에 매

달려 있다. 250톤의 유리 섬유 보강 복합재료 부재가 이 교량에 사용되었다. 1994년 현재, 총 9개의 유리 섬유 복합재료(GFC) 교량이 중국에 설계되고 건설되었다[30]. 가장 오래된 교량은 1982년에 세워진 2차선 교량인데 그 성능은 아직 확인되지 않았다. 다른 8개의 교량은 횡단 육교와 케이블로 지지된 GFC 보이다. U.C. Long Beach와 같은 대학을 포함하는 여러 개의 기관들은 복합재료 교량을 연구해 왔다. 최근 Lockheed Martin Missiles Space의 연구개발부는 저가의 폴리머 매트릭스 복합재료 고속도로의 교량을 보고하였다[8]. 시범용 복합재료 교량의 치수(길이 9 m, 폭 5.4 m)는 교량의 플-사이즈(18 m)의 1/4 부분을 나타낸다. 하중은 AASHTO HS20-44 Truck이고, 강도 기준은 물성값에 4의 안전계수를 고려한 최초 ply 파괴 범주의 최대응력이 사용되었다. 교량은 전부 표준 E-glass 보강 폴리에스테르와 비닐에스테르 폴리머 복합재료로 만들어 졌으며, 짧은 시간범주[시간 120-feet(36 m) 이하]에 주안하여 만들었다. 설계 개념은 multi-cell box와 orthotropic beam system이다. 각각의 구성 요소의 무게는 1590 kg보다 적고 미리 결합시킬 수 있으며, 재래식 장비로 교대에 들어올릴 수 있다. 교량의 결합은 전적으로 단 세명의 인력, 지게차와 경량 호이스트에 의해 수행되었다. 상세한 실험결과, 이 교량의 재하능력이 AASHTO 시방서 조건의 2배를 초과하는 것으로 나타났다. 최대 재하 하중은 51.36톤인데, 이때의 응력은 설계허용응력의 20%보다 작았다. 그것은 교량을 효과적인 비용으로 지을 수 있는 것을 증명한다(2178 dollars/m<sup>2</sup>). 재료값은 사용이 증가할수록 지속적으로 떨어지는 것이 예상되며, 이 비용은 더욱 더 떨어질 것이다.

스위스 연방연구소는 교량건설에 대한 복합재료의 장래이용에 관한 연구를 해왔다. 여러 보고 가운데 기존 교량을 보강하는 방법에 대한 안이 흥미롭다. 기존 교량 보강을 위해서 탄소 섬유 적층판이 사용될 경우, 강관을 사용한 경우와 비교해서 약 20% 저렴한 것으로 나와 있다. 복합재료의 여러 가지 장점에 추가해서 저렴한 가격이

란 사실은 획기적인 것임에 틀림없다.

각종 파이프라인, 도로 항만시설등 생명선(lifeline)의 주·부구조재의 신규 공사 및 유지보수를 위한 복합재료의 응용은 참고문헌[8]에 자세히 설명되었다.

여러 나라에서 여러 가지 복합재료 sheet가 돔이나 내벽, 지붕 등으로 사용되고 있다. 복합재료로 된 콘크리트 형틀은 이미 오래 전부터 사용되고 있다. 선박, 콘테이너 등 여러 가지 수송수단이 복합재료로 되어 있다.

1987년의 보고에 의하면 미국 내의 교량 560,000개중 약 60%가 structurally defective or functionally obsolete한 것으로 나타나 있다. 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 820억 달러로서 G.N.P의 약 4.9%에 해당되며, 이런 손실방지를 위해 기존의 기술이 활용되었다면 약 320억불은 절약될 수 있었다고 되어 있다.

복합재료가 토목 및 건축 구조물에 응용될 때, 이러한 소재의 장점을 최대한으로 활용하기 위한 설계 노력이 수행되어야 한다. 이러한 노력의 일환으로 구조 형식의 새로운 기본 개념이 개발되어야 한다. 기존 기술자는 보충 교육으로 재훈련되어야 하고, 학생들은 복합재료 설계에 관련된 새로운 원리를 처음부터 교육받아야 한다. 과거의 기술자는 재료의 선택자였다. 차세대의 기술자는 재료의 설계자이어야 한다.

### 2.3. 건설용 섬유 복합재료의 3대 분야

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 온 지 오래이고 대형 체육관, 공항, 기타 각종 구조물에서 인장 건축부재의 개념이 활용되고 있음을 알 수 있다. 토질 및 기초공학자들

은 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 공사비는 콘크리트를 사용할 때의 50%에 불과했다. 이와 비슷한 개념의 예는 여러 가지 있다. 폴리프로필렌 보강된 아스팔트 활주로 포장, 폴리에스테르 스티렌 폴리머 도로 오버레이, 섬유보강 콘크리트 상판, 포장 등 많은 예가 있다. 폴리머 고정된 모래는 대형 구조물의 충전 재료 사용되고 있다.

표준단면 구조요소로는 강재로 생산되는 각종 단면의 요소가 주로 유리섬유, 폴리에스테르, 비닐에스테르 등을 사용하여 인발(pultrusion)에 의해서 생산된다. 이런 단면은 섬유 보강재를 위한 최적형태가 아니어서 최저가격을 얻기는 어려우나 내자기성, 내부식성 등을 인정받아 그 사용이 점차 확대되고 있다. 유리-에폭시, 탄소-에폭시, 아리미드-에폭시, 또는 hybrid-polymer의 복합재료 강봉이나 케이블은 교량 등 각종 구조물에 널리 쓰이기 시작했다. 그러나 이러한 rigid 구조 요소의 단면은 강재를 위한 단면으로서 섬유보강 복합재료를 위한 구조 단면의 개발 및 활용이 가격의 저렴화, 중량의 감소 등을 더욱더 가속화시킬 것이다.

섬유와 시멘트를 결합할 때 탄소 섬유를 사용하면 균질성을 얻기도 힘들고 값도 비싸다. 값이 싼 유리섬유를 사용하면 시멘트의 화학 작용으로 섬유가 분해 작용을 일으킬 가능성이 있다. 강섬유를 사용하면 섬유가 콘크리트 배합 밑에 가라앉거나 엉켜서 균질성의 확보가 곤란해진다. 모든 복합재료 설계에서 그렇듯이 신뢰성 있는 제작 방법이 반드시 고려되어야 할 사항이다. 최

근의 경향은 이러한 문제의 해결이 눈앞에 보이게 한다. 2차 보강의 경우 fibrillated fiber나 강 섬유 mat에 RTM에 근거를 둔 SIFCON을 사용하면 이 콘크리트는 균질성이나 신뢰성에 있어 희망을 보이게 한다. 그러나 이것은 어디까지나 2차 보강재의 사용에 불과하고 역학적으로 필요한 주보강재의 설치가 요구된다. 복합재료 표준 단면으로 생산되는 봉이나 케이블은 강철에 대한 기본개념(제4의 개념)으로 제작되기 때문에, 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 제5 기본 개념에 의한 구조설계가 요구되는 것이다. 주보강재로 장섬유의 사용을 위한 제작 방법의 연구는 필자에 의해 추진되고 있다.

교량에 대해서는 프리스트레싱용 강봉 또는 케이블, 케이블튜브 교량, glulam-CFRP 빔, T-system 교량, 현수교 및 사장교용 cable, 고속 전철용 교량 등에 대해서 복합재료가 이미 사용되었거나 연구가 진행중이다.

#### 2.4. 사업성

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 폭주중에 진행하는 것을 흔히 본다. 복합재료 교량에는 이러한 문제가 없다. 재래식 교량의 건설 공기는 몇 달 또는 몇 년을 이야기한다. 복합재료 교량의 건설 공기는 며칠로 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.

모 선진 2개국의 1년 건설 시장이 1조 미불이 된다. 유럽의 건설시장은 년 1조 5천억불이다. 미국만의 향후 20년간의 사회간접분야 보수를 위한 투자는 3내지 4조불로 추산되고 있다. 교량만 해도 575,000개 중에서 230,000개는 구조적인 결함이 있거나 기능에 결함이 있으며 이중 143,000개는 50년 이상된 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.

## 2.5. 다른 나라들의 움직임

Advanced Structures Inc., Amalga, A. O. Smith, Brunswick, Corrosion Controllers, Inc., J. K. Fisher, Inc., M. M. F. G., Owens Corning 및 방계회사, Polygon Co., Randolph Co., Structural Composites Inc., 3M, Xerxes 등 다른 여러 회사에서 유전 지대의 각종 piping, 주유소 시설, 화학공장 시설물, 610 ft 길이의 대형 barge 구조, 20'×20'×40'의 굴뚝, 양어장, 각종 가스 저장탱크, 15 m 직경의 잠수함, 항공기 동체 등을 제작하여 왔다.

A. O. Smith에서 30년 전에 매설한 pipeline의 일부를 절단해서 시험한 결과, 구조적으로 아무 이상이 없음을 발견했다는 것은 발표한 바와 같다[8].

복합재료구조의 신뢰성에 대해서는 이제 논란의 여지가 없어진 지 오래이나, 토목 건축 분야의 기술자들의 타성에 의해서 타 분야에서 개발한 기술을 받아들이지 않은 것과, 가격이 재래의 구조재료보다 비쌀 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. 건설 분야에 대한 섬유복합재료의 응용의 본격적인 움직임은 극히 최근의 일이다.

## 2.6. 섬유 복합재료

여러 가지 상이한 형태의 보강재 가운데 구조 응용의 관점에서 가장 중요한 것은 필라멘트 형태이다. 일반적으로 연속 필라멘트 보강된 복합재료는 높은 비강도와 비강성을 갖는다. 이러한 형태의 복합재료에 응용되는 모재나 보강재는 수없이 많고 다양하다. 이들의 결합에서 파생되는 복합재료의 특성은 수십 권의 책으로 수록될 정도로 방대한 양이 된다. 본문에서는 이러한 복합재료에 사용되는 용어를 설명하는데 그치기로 한다.

먼저 한 겹의 층을 고려한다. 보강재가 불연속일 때 섬유는 무작위(random) 또는 선택된(preferred) 배치가 된다. 무작위 배치된 불연속 섬유보강된 한 겹의 층은 특별한 주의가 필요하긴 하나 층 면내에서 균질성으로 간주될 수 있다.

복합재료의 최대 강도와 강성은 보강재가 연속 섬유 형태로 배치될 때 얻어질 수 있다. 이런 섬유는 같은 방향(unidirectional)이나 일정한 각도를 갖고(angle ply) 배치될 수 있다.

대부분의 구조 부재는 여러 개의 층으로 이루어진 일정한 두께를 필요로 한다. 이러한 것은 적층(laminate)이라 불리운다. 가끔 소재가 서로 다른 종류의 다수 층을 혼합적층(hybrid laminate)이라 부른다. 보강 섬유도 혼합될 수 있다.

비록 당연한 것 같기는 하나 필라멘트 형태 복합재료의 섬유에 관한 기본적인 원칙이 있다.

가. 효과적인 복합재료 성능을 얻기 위해서는 섬유의 신장은 매트릭스의 신장보다 적어야 하고 강성은 높아야 한다.

나. 적층의 역학적 특성은 보강재 종류보다 양과 형태 즉, 길이와 배치 방향에 좌우된다.

다. 복합재료 구조 부재의 강도는 섬유 용량이 클수록 커진다.

라. 일정 방향으로의 직선 섬유 길이가 길수록 그 방향으로의 하중 부담 능력이 커진다.

마. 섬유 배치 방향이 힘의 방향을 결정하고 섬유 용량이 강도 획득량을 결정한다.

### 1) 일방향성 (unidirectional)

섬유의 동일 방향 배치가 가장 잘되어지고 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 형태 배치되기도 해서 등방성의 성질을 갖게 한다. 중량비 65%까지 배치될 수 있다.

위와 같은 원칙을 배경으로 다음과 같은 사실이 쉽게 이해될 수 있다.

평행으로 배치된 연속적인 섬유들은 섬유 방향으로 높은 강도를 마련해 주나 횡방향으로는 매우 낮은 강도를 가져다준다. 90° 엇갈린 겹(cross ply)을 추가하면 0°와 90° 방향으로 좋은 강도를 가져오나 이 복합재료는 45° 방향으로 매우 약하다. 만약 섬유들이 120° 간격으로 삼중으로 배치되면 이 복합재료는 모든 방향으로 적당한 강도를 갖게 된다. 만약 불연속 섬유가 배치되면 복합재료 강도는 몇 10분의 1단위로 감소된다.

예로서 500,000 psi 인장강도를 가진 섬유를 고려하면 일방향성 섬유의 복합재료는 섬유 방향으로 200,000 psi의 인장강도를 갖는데 이방향성(엇갈린 겹)으로 배치되면 0°와 90° 방향으로 약 100,000 psi의 강도를 나타낸다. 120°의 3층 복합재료는 모든 방향으로 약 70,000 psi의 강도를 갖는다.

이상과 같은 예는 복합재료의 일반적 특성을 설명한데 불과하며 구체적인 역학적 성능은 소재 특성, 경화방법 등을 포함한 여러 가지 요인에 좌우된다는데 명심해야 한다.

## 2.7. 건물 및 사회 간접 시설의 보수 및 재생을 위한 섬유 복합재료

섬유 복합재료는 새로운 건설 시설물을 위한 재료로서 뿐만 아니라, 건물이나 사회 간접 시설의 보수 및 유지를 위해서도 지극히 중요한 재료이다. 미국만의 사회 간접 시설의 넓은 구조물 대체 사업비가 3내지 4조달러로 추산되고 있다.

우리 나라의 교량, 상하수도 등 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 문제뿐 아니라 시간이 결정적으로 중요하기 때문이다. 이 내용은 참고 문헌[8]에 비교적 자세히 설명되어 있으므로 여기서는 생략한다.

## 3. 건설에 대한 섬유 복합재료의 사용을 위한 연구개발 방향

### 3.1. 건설을 위한 복합재료 적층 주요 부재의 예비설계를 위한 간편한 해석법[1,31-33,36]

건설용 복합재료 구조부재의 효율적인 형태 가운데 중요한 것은 상형(box) 단면인데, 이런 단면의 각 요소(element)면은 탄성지지된 적층판으로 이루어진다. 적층판의 설계와 해석은 너무 복잡해서 상당한 수의 구조 기술자들은 복합재료설계에 대해 알레르기 증세까지 보인다. 전체구조물의 최초 기본설계시부터, 각 판의 재료 선택 및 섬유배향 등을 결정한다는 것은 상당히 어려운 일이다. 경계조건은 탄성지지되었으며, 지지조건은 아직 미지의 함수로 되어있다. 일반적으로 복합재료 적층판의 해석에 있어 경계조건은 고전적 역학이나 탄성론의 경우와 같이 단순하지가 않다. 가장 단순한 경우인 단순지지 및 고정지지인 경우라 해도 여덟가지 형태가 있다.

### 3.2. 최적화 설계[1,38,44]

복합재료 구조물에 많은 경비가 드는 원인은 다른 재료에 기초한 개념을 바탕으로 한 부적합한 설계에 들 수 있다. 복합재료 구조부재 제작의 경우 저자가 5번째 구조개념이라 한 새로운 구조개념에 기초한 최적화 설계는 가격감소를 위해서 필수적이다.

토목구조물중 많은 부분이 1차원요소의 뼈대로서 고려하여 해석될 수 있다. 일반적으로 구조요소가 인장하중에 기초하여 설계되었을 때, 복

합재료는 인장에 강하며 축방향과 평면내에 작용하는 인장하중과 다른 하중형태에 대해서는 약한, 얇은 단면을 갖는다. 이것은 박판상형(box) 구조물이나 샌드위치 패널 등의 사용에 의한 증가된 단면계수를 필요로 한다. 뼈대가 해석된 후에는 일차원요소라 하더라도 박판단면 해석방법에 의한 추가적인 연구를 필요로 한다. 그러한 단면의 얇은 패널은 이들 판에 수직인 하중에 대해서는 약하다. 그러한 하중에 대비해서 stringer가 횡단 격판 사이에 설치된다. 격판은 평면전단의 형태로 stringer로부터의 하중을 보의 벽면으로 전달한다.

복합재료 구조물의 최적화는 비교적 최근의 연구과제이다. 최적화 방법과 복합재료 구조물은 지난 30년 동안 발전되었으며, 그것의 결합은 좀더 최근에 발전되었다. 설계 최적화를 위한 R/D 방향의 제안은 토의를 간단하게 하고자 교량으로 설명한다. 건물의 바닥판 체계도 이에 속한다. 서론에서 언급했던 장점 외에도, 복합재료가 교량 건설에 사용된다면 공기는 굉장히 단축될 것이다. 그 주된 이유 중에 하나는 구조물의 경량이다. 손상이 있을 경우에도, 보수는 재래식 교량보다 훨씬 쉬울 것이다. 부식된 교량의 문제는 잘 알려져 있다. 경량의 교량 상판은 지진이나 어떤 종류의 충격에도 작은 관성력을 일으킬 것이며, 결과적으로 보다 경제적인 기초공사가 될 것이다.

교량 상판에 관해서는 수많은 재료와 구조개념, 제조공정이 있으며, 이러한 문제에 관한 체계적인 관찰과 연구에는 오랜 세월이 걸린다.

보강섬유는 일반적으로 인장에 강하다는 사실을 상기하면, 박스모양의 요소는 연구할 개념 중의 하나가 될 수 있다고 생각할 수 있다. 특히 honeycomb 샌드위치의 요소는 박스모양 개념에 속한다. 여러가지의 제조공정 가운데서도, 특히 상판을 기존의 거더위에 올릴 때, 필라멘트 와인딩 공법은 특히 좋은 방법이다. 구형의 상판이 상판의 짧은 경간방향으로 와인딩될 때, 긴경간 방향은 원래의 거더크기에 따라 만들어 질 수 있다. 이러한 경우 해결해야 할 문제는,

가. 구형단면의 와인딩은 특정회사에서만 쓰

고 있는 특별한 기술을 필요로 한다.

나. 보강섬유에 수직인 전단하중을 저항하기 위한 방법은 연구되어야 한다.

그 중 몇가지 방법은

1) 코아를 이용하는 법 : 코아는 honeycomb, foam, 나무 또는 어떤 재료도 될 수 있다.

2) 경량의 금속뼈대로 만들어진 mandrel을 박스안에 남겨두고 필라멘트 와인딩된 박스와 일체로 작용하게 한다. 이러한 경우 해결해야 할 문제는 mandrel과 composite 박스 사이의 compatibility, 온도팽창계수가 유사한 재료의 선택

3) 필라멘트 와인딩된 부분과, 아주작은 마모성을 갖는 composite 포장으로된 일체단면을 만든다. 이것은 오랜 기간의 연구를 필요로 한다.

다. 포장

포장재료로서 좋은 것을 찾기 위해 여러가지 재료들을 시험하여야 한다. Impregnate된 직조 섬유와 적은 마모성을 가진, 강화된 폴리머의 결합이 한가지 해결책이 될 수 있으며, 폴리머 콘크리트가 쓰일 수도 있다. 이 포장은 필라멘트 와인딩된 부분과 일체가 된 단면을 이룰 것이다. 이 포장위에 미끄럼 방지제가 쉽게 추가될 수 있다. 그러나, 폴리머 콘크리트내의 모래가 섬유의 마모파손에 원인이 되지 않게 특별한 조심이 필요하다. 몇가지문제가 해결된다면 섬유보강 시멘트로 된 복합재료는 좋은 재료가 될 수 있다.

라. 설계와 해석

현재 advanced composite 교량상판에 대한 설계 지침은 구하지 못한다. 그러나, 해석을 위한 이론들은 다음의 두 문제를 제외하곤 아주 완전하다.

1) Size/ scale 효과를 고려한 파괴/강도이론 : 토목구조물들은 일반적으로 크기 때문에 원형 시험이 불가능하다. 구조물의 치수가 커지면 섬유강도는 많이 감소되며, 이러한 문제는 세밀한 연구를 필요로 한다.

2) 가장 경량이고, 안전율이 극대화 되는 구조물의 설계와 해석의 최적화는, 몇가지 구조개념 형태에 대해서는 어느 정도 이루어졌으나, 아직도 더 많이 연구되어야 할 과제이다.

마. 주경간 교량 거더

박스모양 요소는 주경간 거더로 사용될 수 있다. Pultrusion과 필라멘트 와인딩 그리고 또 다른 방안들의 결합이 제작공정을 위해 필요하다. 이러한 과정은 오랜 연구기간을 필요로 한다.

**3.3. 치수효과[8,40,42,44]**

치수 효과는 콘크리트나 암석과 같은 quasi-brittle 재료들의 물리적 특성에 영향을 미친다. 모든 재료의 경우에 체적이 크면 흠이 클 수 있다. 복합재료 구조의 파괴역학에 대한 치수효과의 적당한 이론이 아직까지 없었다. 구조물의 섬유 묶음 크기가 증가하면, 섬유 강도가 감소하는 현상을 흔히 경험해 왔다. 복합재료내의 강도 분배와 치수사이의 관계를 특성짓는 효과적인 방법은 아직 완전하지 않다. 대형 복합구조가 일반적으로 작은 복합구조보다 약하다는 사실은 상당 기간 알려져 왔다.

이런 현상에 대한 여러 가지 이유가 있을 수 있다. 가장 중요한 이유는 brittle한 보강 섬유의 치수효과이다. brittle한 섬유는 일반적으로 강하고 지름이 균일하지만 다른 강도를 가진 흠을 포함하고 있을 수 있다. 긴 섬유는 짧은 섬유보다 그러할 가능성이 더 많다.

강도비 R은 적용된 하중에 대한 극한강도 또는 최대강도의 비율이다. 강도비의 정의는 다음과 같다.

$$\{\sigma\}_{max} = R \{\sigma\}_{applied} \text{ and } \{\epsilon\}_{max} = R \{\epsilon\}_{applied} \tag{1}$$

R은 안전계수 또는 하중계수이다. 파괴는 R=1일 때 일어난다. R<1일 때 1/R의 계수에 의한 강도보다 작용 하중이 더 커진다. 이것은 물리적으로 불가능하지만 설계에 있어서 유용한 정보를 제공해 준다. 예를 들어 (R-1) 비율 만큼 작용 하중을 감소시키면 된다. Tsai[44]에 따르면 상호작용하는 파괴영역을 구체화하는 쉬운 방법은 quadratic criterion을 사용하는 것이다. 이것은 Maxwell에 의해 제안되었던 비틀림 에너지, 또는 응력의 일반화이고, 그 후에 Huber에 의해 더욱 개발되었다. 이러한 영역을 사용함에 따라 우

리는 파괴모드의 정의에 의한 파괴영역에 의존하는 대신에 사용 가능한 데이터를 설계도구로서 사용한 파괴영역을 찾아낼 수 있다. Tsai와 Wu는 응력공간의 영역을 quadratic scalar products로서 다음과 같이 나타냈다.

$$F_{ij} \sigma_i \sigma_j + F_i \sigma_i = 1, \quad i, j = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \tag{2}$$

F<sub>i</sub>와 F<sub>ij</sub>는 2차와 4차 lamina strength tensor들이다. 대칭축 x-y에 관하여 평면응력 상태에 있는 얇은 orthotropic ply에 대해서 이 파괴영역은 다음과 같이 된다.

$$F_{xx} \sigma_x^2 + F_{yy} \sigma_y^2 + 2F_{xy} \sigma_x \sigma_y + F_{ss} \sigma_s^2 + F_x \sigma_x + F_y \sigma_y + F_s \sigma_s = 1 \tag{3}$$

여기서 F는 강도 변수들이고 다음으로부터 얻어진다.

$$F_{xx} = \frac{1}{XX'}, \quad F_{yy} = \frac{1}{YY'}, \quad F_{ss} = \frac{1}{S^2},$$

$$F_x = \frac{1}{X} - \frac{1}{X'}, \quad F_y = \frac{1}{Y} - \frac{1}{Y'}, \quad F_s = 0 \tag{4}$$

X: 종방향 인장강도, X': 종방향 압축강도, Y: 횡방향 인장강도, Y': 횡방향 압축강도, S: 종방향 전단강도

이러한 강도들은 실험에 의해서 얻어진다.

4차 텐서인 F<sub>xy</sub>는 재료 주방향에 대한 단축시험으로부터는 결정될 수 없고 2축시험으로 결정될 수 있다. F<sub>xy</sub>가 위식에서 σ<sub>x</sub>와 σ<sub>y</sub>의 계수임을 상기하자. F<sub>xy</sub>의 값은 다양한 공학적 강도와 2축 인장 파괴응력들에 의존한다. Tsai는 다음의 공식을 제안했다.

$$F_{xy} = F_{xy}^* (F_{xx} F_{yy})^{1/2} \tag{5}$$

여기서 F<sub>xy</sub>\*는 기준화된 상호작용 항이며, 만일 믿을 수 있는 2축시험 데이터를 이용할 수 없다면 그것은 아래와 같은 실험 상수 값으로 취급될 수 있다.

$$-1/2 \leq F_{xy}^* \leq 0 \tag{6}$$

이 수치는 일반화 된 von Mises의 기준인 -1/2과 수정된 Hill의 기준과 거의 동일한 결과를 주

는 0의 범위 내의 값을 준다.

경험이 많은 복합재료 제조기술자에 의해서 경험으로 얻어진 filament wound 튜브에 사용되는 유리섬유의 인장강도 감소비율이 Figure 1에 나타나 있다. Crasto와 Kim[40,44]의 일방향 보강된 AS4/3501-6 복합재료의 90° 방향 인장강도에 대한 실험결과로부터 다음과 같은 회귀분석식을 구하였다.

$$y = -0.000030549n^2 - 0.00268n + 1.01065 \quad (7)$$

여기서 n은 층수를 나타낸다.

에폭시에 대한 이 방정식은 같은 모재를 사용한 결과가 아니라도 90° 인장강도 감소비를 측정하는데 사용할 수 있다. 그러나 장차 다른 모든 보강섬유와 모재들에 대하여 질량이 커짐에 따른 X, X', Y, Y' 그리고 S의 강도 감소비를 점차로 구해야한다. Filament winding과 다른 제조방법에 대해서도 마찬가지로 연구되어야 할 것이다.

현재의 이용가능한 지식으로 에폭시 모재에 유리섬유로 보강된 복합재료에 대해서 다음과 같은 강도-파괴해석 과정을 추천한다.

- 1) Figure 1에서 감소된 X값을 얻는다.
- 2) 크기효과는 인장과 압축이 같다고 가정한다(이 가정은 상세한 연구가 이루어진 다음에 수정되어질 것이다).
- 3)  $Y=Y(\text{시험편 강도}) \times \text{식 (7)}$
- 4)  $Y'=Y'(\text{시험편 강도}) \times \text{식 (7)}$
- 5)  $S=S(\text{시험편 강도})$ 으로 가정

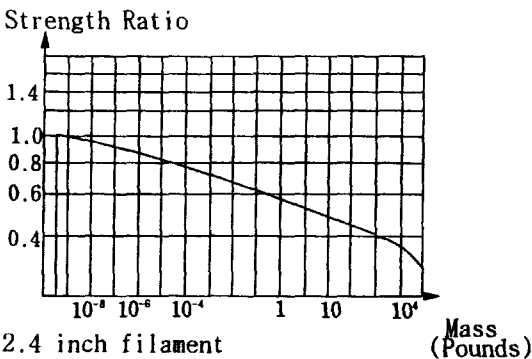


Figure 1. 질량 증가에 따른 유리섬유 인장강도 감소율.

6) 응력공간에 대한 Tsai-Wu 파괴영역을 사용 탄성계수의 감소비를 모르기 때문에 변형률 공간의 영역 사용은 복잡하다.

위와 같은 단계로 얻은 강도는 다른 재료나 제작방법으로 만들어진 증가된 크기의 복합재료에 정확하지 않을 수 있다. 그러나 그 결과가 아주 나쁘지는 않을 것이다. 무엇인가 있는 것이 없는 것 보단 훨씬 안전하다. 감소된 인장강도 값으로 강도이론을 적용하는 것이 시험편 결과 값에 의한 구조물 설계보다는 훨씬 안전하다. 추천된 가정으로 안전한 구조물을 설계할 수 있을 것이고, 더 나아가서는 다양한 재료성분으로 서로다른 크기 효과를 갖는 복합재료 구조물의 파괴-강도 이론의 연구에 박차를 가할 수 있을 것이다. 재료가 유리섬유나 에폭시가 아닐 경우에도 Figure 1과 방정식 7만을 수정하여 사용하면 된다. 크기효과에 대한 정확한 지식이 없을때 Figure 1과 방정식 7을 사용할 수 있다.

계산에 사용된 유리섬유와 에폭시로 된 복합재료의 물성은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E_x &= 38.6 \text{ GPa}, E_y = 8.27 \text{ GPa}, \nu_x = 0.26 \\ G &= 4.14, \text{ Gpa h}_0 = 0.125 \text{ mm}, V_f = 0.45 \\ X &= 1062 \text{ MPa}, X' = 610 \text{ MPa}, Y = 31 \text{ MPa} \\ Y' &= 118 \text{ MPa}, S = 72 \text{ MPa} \end{aligned}$$

다음과 같은 세가지 경우에 대하여 계산을 수행하였다.

- A. 인장과 압축 모두 감소를 시킨 경우
- B. 단지 인장만 감소를 시킨 경우

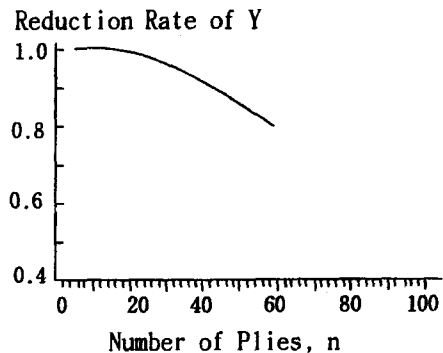


Figure 2. 질량증가에 따른 에폭시 모재의 인장강도 감소율.

C. 인장, 압축 모두 감소하지 않는 경우 각각의 경우에 대하여 수정된 Hill's( $F_{xy}^*=0$ )와 일반화된 von Mises 영역( $F_{xy}^*=-1/2$ )을 고려하였다. 작용하중은 다음과 같이 가정하였다.

$$\sigma_x = 700 \text{ MPa}, \sigma_y = 20 \text{ MPa}, \sigma_z = 50 \text{ MPa}$$

$\sigma_y = -20 \text{ Mpa}$ 인 경우에 대해서도 계산을 수행하였다. 층수는 100층으로 가정하였다.

필자는, 이전에 발표된 논문들에서, 치수 효과를 고려한 강도-파괴 해석 과정을 제안하고, 강도비(즉 안전계수)는 다음의 다섯가지 요인에 의해 좌우된다고 결론지었다. 이 다섯 요인은 시편 강도의 감소에 관한 두 경우인

가. 감소를 인장과 압력 두 강도에 대해서 고려할 때와

나. 감소를 인장 강도에 대해서만 고려할 경우, 두개의 파괴범주,  $F_{xy}^*=0$ 과  $F_{xy}^*=-1/2$ , 그리고 작용 응력 상태 등이다. 제안된 size/scale 효과의 연구-개발 방향은 다음과 같이 요약될 수 있다.

가. 대형구조물에 사용 가능한 재료의 각각에 대하여 질량에 기초한 섬유강도의 감쇠율을 구한다.

나. matrix에 대해서 가와 같이 한다.

다. 설계에 사용될 여러 가지 적층판의 각 형태에 대해서, 작용응력의 가능한 모든 조합하여 실험을 수행한다.

**Table 1.** Value of  $R^+$  in case of  $\sigma_x=700, \sigma_y=20, \sigma_z=50$

Mass, lbs (0.455 kg)	Type	( $F_{xy}^*=0$ ) $R^+$	( $F_{xy}^*=-1/2$ ) $R^+$
$10^8$	A	0.5937	0.7058
	B	0.5843	0.6541
	C	0.8660	0.9771
$10^7$	A	0.5862	0.7015
	B	0.5655	0.6315
	C	0.8660	0.9771
$10^6$	A	0.5837	0.6998
	B	0.5598	0.6247
	C	0.8660	0.9771
$10^5$	A	0.5751	0.6930
	B	0.54200	0.6033
	C	0.8660	0.9771
$10^4$	A	0.5665	0.6852
	B	0.5262	0.5843
	C	0.8660	0.9771
$10^3$	A	0.5496	0.6675
	B	0.4986	0.5512
	C	0.8660	0.9771
$10^2$	A	0.5419	0.6588
	B	0.4875	0.5377
	C	0.8660	0.9771
$10^1$	A	0.5275	0.6414
	B	0.4680	0.5146
	C	0.8660	0.9771
1	A	0.5141	0.6245
	B	0.4514	0.4948
	C	0.8660	0.9771
10	A	0.5028	0.6099
	B	0.4382	0.4791
	C	0.8660	0.9771

**Table 2.** Value of  $R^+$  in case of  $\sigma_x=700, \sigma_y=-20, \sigma_z=50$

Mass, lbs (0.455 kg)	Type	( $F_{xy}^*=0$ ) $R^+$	( $F_{xy}^*=-1/2$ ) $R^+$
$10^8$	A	1.2839	1.0208
	B	1.6000	1.3096
	C	1.2902	1.1303
$10^7$	A	1.2365	0.9821
	B	1.5258	1.2521
	C	1.2902	1.1303
$10^6$	A	1.2218	0.9703
	B	1.5036	1.2350
	C	1.2902	1.1303
$10^5$	A	1.1744	0.9330
	B	1.4343	1.1817
	C	1.2902	1.1303
$10^4$	A	1.1309	0.8995
	B	1.3734	1.1349
	C	1.2902	1.1303
$10^3$	A	1.0529	0.8409
	B	1.2692	1.0549
	C	1.2902	1.1303
$10^2$	A	1.0208	0.8171
	B	1.2278	1.0232
	C	1.2902	1.1303
$10^1$	A	0.9639	0.7752
	B	1.1558	0.9679
	C	1.2902	1.1303
1	A	0.9152	0.7396
	B	1.0955	0.9216
	C	1.2902	1.1303
10	A	0.8767	0.7116
	B	1.0485	0.8854
	C	1.2902	1.1303

라. 위의 가, 나, 다의 결과로 각각의 응력조합에 대해  $F_{xy}^*=0$ 와  $F_{xy}^*=-1/2$  중 어느 이론이 실험결과와 가까운가를 찾아낸다.

마. 가, 나, 다의 결과로 각각의 응력상태에서, 횡방향 강도의 감소가 중요한지 아닌지를 알아낸다.

바. 각 응력상태하에서 감소가 인장과 압축강도에 대해 적용되어야 하는지 아니면 인장강도에만 적용되어야 하는지를 알아낸다.

#### 4. 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 기본개념 이라고 부르는 복합재료가 모든 구조물의 설계 건설에 사용되게 되는 것은 역사의 필연성에 의해서 이루어진다.

과학이 철학과 분리되기 시작한 것은 1645년의 일이다. 인류 문화사의 길이와 비교할 때 극히 최근의 일이다.

건설 기술자(civil engineer)란 용어를 최초로 사용한 사람은 John Smeaton이란 영국 사람이었다(1761년). 그는 자신을 진지나 bunker 등의 구축을 주로 하는 군공기술자(military engineer)와 구분하기 위하여 그렇게 부른 것이다. 그러니까 1761년에 건설 공학과 군 공학이란 두 개의 공학이 생긴 것이다.

기술과 건축은 같은 근원을 갖고 있었다. 언제 다른 직업 분야로 분리되었는가는 찾아보기 힘들다. 아마 그 당시 구주 국가 중에서 가장 선진국이던 중세 불란서에서 시작하였던 것 같다. 도로, 교량, 수로 등의 건설은 Charlemagne의 시절로부터 왕실의 관심사였다. Corps des Ponts et Chaussée's는 13세기부터 있었다고 알려져 있다. 다음과 같은 Louis 14세의 에피소드는 기술이란 직업이 필요에 의하여 발전하게 되었다는 사실을 이야기 해준다. 획기적인 기념 구조물

을 만들고 싶은 열망에 찬 왕은 그의 친근한 건축가 Mansard에게 Allier강의 Moulins에 석조 교량을 건설하도록 지시하였다. Mansard는 석조 예술의 권위자였으나 수리학이나 유수의 침식작용에 대해서는 아무것도 몰랐다. 당연히 그 다리는 곧 붕괴 되었다. 이 당시의 기술자들은 이 사건에 대하여 기술자는 위대한 공공사업에 건설의 예술을 적용함에 있어 더 연구하고 더 다양성 있어야 하며, 외견상의 장식보다는 견실성에 치중해야 한다는 것을 공공에 알려야 한다고 했다.

영국의 기술은 산업혁명의 후기 결실의 하나로 꽃피게 되었다. 최초의 기술자의 조직인 The Institution of Civil Engineers는 상호교육과 그 당시 유행하던 교육방법을 보완하기 위한 목적으로 1818년에 구성되었다. 이 조직의 설립자들은 military engineer와 구분하고자 civil engineer란 이름을 썼는데, 이 이름이 건설기술자를 뜻하게 된 데는 초대 회장인 Thomas Telford가 석공으로 시작한 거대한 건설사업의 설계 및 시공자로 이름난 사람이었다는 이유가 크다.

건설재료로서의 섬유 복합재료의 장점은 본론에서 비교적 상세히 설명되어있다. 이러한 장점을 갖는 재료가 최대로 활용되기 위해서는 각 분야의 공학자들이 서로 다른 전공분야에 대한 이해를 증진시키고 상호 협조하는 분위기가 생활화 되어야 한다. 지금의 과학 기술은 너무 세분화 되어 같은 분야의 기술자들도 다른 전공을 하는 사람과는 다른 언어를 사용하고 있다. 나는 강구조, 너는 진동 등등 전공만 이야기해서는 구조물이 성립되지 않는다. 한 구조물의 건설에는 천문 지리, 수리학, 지질공학, 계획, 구조물, 진동, 안정성(좌굴), 응력 및 변위 계산을 위한 역학, 설계, 재료(화학, 금속, 세라믹), 제작방법, 시공방법 기타 모든 분야가 합쳐져야 가능한 것이다.

여러 나라에서의 섬유 복합재료의 응용 현황, 연구 동향 등이 간략히 설명되어 있는데 우리도 지금부터 노력하면 그들과 동참하게 될 것이다. 언제나 출발할 때가 늦지 않은 것이다.

## 참고문헌

1. D. H. Kim, *Composite Structures for Civil and Architectural Engineering*, E & FN SPON, Chapman & Hall, London, 1995.
2. 김덕현, *대한토목학회지*, 21(2), 38(1973).
3. 김덕현, 강원대학교 산업기술연구소 논문집, 제 7집, 1987.
4. 김덕현, 대한토목학회 제 36회 정기총회 특별강연, 서울, 1988.
5. 김덕현, 한국도로공사 초청강의, 서울, 1989.
6. 김덕현, 한국전산구조공학회, 1991년도 가을 학술 발표회 특별강연, 서울, 1991.
7. K. P. Chong (Ed.), "Proc. of the Fourth Materials Engineering Conference", ASCE, Washington D. C., November 10~14, 1996.
8. D. H. Kim, Plenary Lecture at the Third International Symposium on Textile Composites in Building Construction, Seoul, Korea, November, 1996.
9. D. H. Kim, 7th International Conference on Composite Materials, Guangzhou, 1989.
10. D. H. Kim, First International Society for the Advancement of Material and Process Engineering Symposium (JISSE 1), Tokyo, 1989.
11. D. H. Kim, Structures Congress, American Society of Civil Engineers, Baltimore, MD., U.S. A., 1990.
12. D. H. Kim, ICCM 8, Honolulu, Hawaii, July 1991.
13. D. H. Kim, EHM/BCS/NSF Research Grantee Workshop, Phoenix, AZ., August 5-6, 1991.
14. D. H. Kim, US-Korea-Japan Trilateral Seminar on Frontier R & D for Constructed Facilities, Honolulu, 1991.
15. D. H. Kim, China-Japan-USA Trilateral Symposium/Workshop on Earthquake Engineering, Harbin, China, 1991.
16. D. H. Kim, Seminar Lecture, University of California, Davis, 1992.
17. D. H. Kim, "Proc. of the Second International Symposium on Textile Composites in Building Construction", Lyon, France, 1992.
18. D. H. Kim, "Proc. of International Conference on Education Practice and Promotion of Computational Method in Engineering Using Small Computers", Dalian, China, 1992.
19. D. H. Kim, "Proc. of Advanced Composite Materials in Bridges and Structures", Sherbrook, Canada, 1992.
20. D. H. Kim, International Conference on Computational Engineering Science, Hong Kong, 1992.
21. 김덕현, 종합기술공사 특별강연, 1993.
22. D. H. Kim, Summary Speech, The First Wilson Forum on Existing and Potential Applications of Composite Materials in the Infrastructure, San Francisco, 1993.
23. D. H. Kim, "Proc. of Advances in Materials and Processing Technology-93 (AMPT-93)", Dublin, Ireland, 1993.
24. 김덕현, 汎武, 71, 1993.
25. 김덕현, *대한토목학회지*, 41(5), 1993.
26. D. H. Kim, The Second Annual Wilson Forum : Existing & Potential Applications of Composite Materials in the Infrastructure, Santa Ana, California, 1994.
27. 김덕현, *생산기술*, 6(6), 1995.
28. D. H. Kim, The Third Asian-Pacific Conference on Computational Mechanics, Sheraton Hotel, Seoul, Korea, September 16-18, 1996.
29. D. H. Kim, American Society of Civil Engineers, Washington, DC, November 10-14, 1996.
30. Preprints, The Wilson Forum on Existing & Potential Application of Composite Materials in the Infrastructure, Alexandria VA, October 28~29, 1996.
31. 김덕현, "Theory of Non-Prismatic Folded Plate Structures," 서울대학교 응용역학연구회, 1966.
32. D. H. Kim, 16th Congress of Applied Mechanics, Tokyo, Japan, 1966.
33. D. H. Kim, International Symposium on Space Technology and Sciences, Tokyo, Japan, 1967.
34. D. H. Kim, Seminar Lecture, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1992.
35. D. H. Kim, 3rd Japan International SAMPE Symposium and Exhibition, 1993.
36. D. H. Kim, *J. of Materials Processing Technology*, 55, Elsevier, London, 242(1995).
37. D. H. Kim, "Proc. of Korea-Japan Joint Seminar on Structural Optimization", Seoul, Korea, 1992.
38. D. H. Kim, Keynote Speech, 3rd Pacific Rim Forum on Advanced Composites, Honolulu, 1993.
39. S. W. Tsai, *Composite Design, Think Composites*, Dayton, OH., 1988.
40. K. P. Chong and D. H. Kim, Invited Lecture, International Union of Theoretical and Applied Mechanics on Size-Scale Effects in the

- Failure Mechanisms of Materials and Structures, Torino, Italy, 1994.
41. 김덕현, 한국 복합재료학회, 1994.
  42. D. H. Kim, "Proc. of International Symposium on Public Infrastructure Systems Research", Seoul, Korea, 1995.
  43. D. H. Kim, EUROMECH 334, Lyon, 1995.
  44. D. H. Kim, The Wilson Forum on Existing & Potential Application of Composite Materials in the Infrastructure, Alexandria, Virginia, October 28-29, 1996.