

# 새로운 1000년의 건설재료 (건설을 위한 복합재료)

김 덕 현

KOREA COMPOSITES

서울시 종로구 구기동 97

TEL : (822) 379-5127, 391-2766, FAX : (822) 379-7118

## 요 약

이 글에는 문화사적으로 고려한 건설공학의 위치와 구조물의 제 5 기본 개념으로서의 복합재료 그리고 건설 재료로서의 섬유 복합재료의 대두는 역사적인 필연성에 의한 것임이 설명되어 있다. 여러 나라에서의 섬유 복합재료의 건설에 대한 응용 현황과 여러 학계의 움직임이 설명되고 앞으로의 연구방향이 간략하게 설명되어 있다.

## 1. 서 론

건설관련 세계시장 규모는 연간 2조 4천억불로 추정되고 있고 미국만의 사회간접 시설의 유지 보수비가 3내지 4조불로 계정되어있다. 이러한 거대한 시장에 대하여 미국은 세계에서 30년내지 40년 앞선 첨단군사기술을 응용하기 위한 기술재투자사업(Technology Reinvestment Program - TRP)을 착실히 진행하고 있다. 작년(1996년) 11월 워싱턴에서 열린 미국 토목학회 연차 총회에서 제4차 Materials Engineering Conference의 모임 주제는 새로운 1000년의 재료(Materials for the New Millennium)이었다. 한편 한국의 건설분야는 완전히 낙후한 기술로 노동집약적 산업으로 남아있으며 이 사실은 성수대교와 삼풍백화점의 붕괴는 물론 당산철교의 철거 재시공, 신 소재도 아닌 강구조로 재시공하는 성수대교의 감리를 외국회사가 실시하는 등이 웅변으로 증명하고 있다. 미국 캘리포니아의 지진으로 심하게 파손된 교량들도 신 소재의 이용으로 안전하게 보수하는 것과 비교할 때 하늘과 땅의 거리를 느끼게 한다. 한편 건설시장의 환경은 U. R. 등으로 국내시장 개방이 불가피한 것으로 되어 있고, 국제시장 진출은 기술의 낙후성으로 점차 곤란해 질 것으로 예상되고 있다.

앞으로의 발전방향 및 대비책은 첨단소재를 이용하는 완전히 새로운 개념의 기술획득이 될 것이다. 문제는 2주일전의 기술이 고물이 되는 현 상황 속에서 한국 건설계는 구태의연한 상태에 있으며 새 기술을 이용한 건설산업 진출은 시작도 하지 않고 있다는데 있다. 새로운 기술의 습득을 위해서는 매주 수십 가지의 신기술자료를 읽어야 하는데 우리나라 기업 풍토상 경영자는 물론 중간 관리층 기술자들도 책을 읽을 시간도 없거니와 읽는 풍토도 아직 생기지 않고 있다는데 문제의 심각성이 있다.

여러 가지 문제에 대한 대책으로 신속 과감하게 새기술을 도입하고 새로운 응용연구 사업을 전개하고, modular된 신제품을 활용하는 건설사업을 전개해야하는데 도대체 신 소재가 무엇이고 어떤 것이 새기술이나 이것들을 알기 위해 무슨 공부를 해야 하느냐에 이르러서는 속수무책이 된다. 미국에서도 우주항공 및 소재관계 전문가들은 건설기술자들과 서로 다른 언어를 사용한다고 말하는 정도여서 요즈음 필자는 설계·건설에 많은 경험을 갖고 수주활동도 해본 배경에 재료·항공분야에서 160여 편의 발표를 한 유일한 사람이라해서 미국의 여러 모임에 관여해온바가 있다.

필자의 지난 10년간의 연구는 “첨단 복합재료의 건설에 대한 응용”에 집중되어, 이 분야의 책을 영국에서 출판하였고 130여 차례의 발표 및 특별 강연을 국내외에서 실시하였다. 그 내용은 다음 네 가지로 요약된다.

1. 복합재료 이론은 학부를 졸업한 일반 건설 계통 설계자에게는 너무 어렵다. 따라서 충분히 정확한 결과를 주면서 아주 쉽고 간단한 이론 식의 개발을 추진해 왔다.
2. 첨단재료를 사용한 구조물은 가격이 비싸다는 편견이 있어왔다. 모든 구조물은 사용된 재료에 맞게 개념이 설계되어야 한다. 첨단재료에 가장 적합한 구조개념의 최적화에 대한 여러 편의 발표문은 이러한 목적으로 이루어 졌다. 오늘날 복합재료 구조물의 무게가 재래의 재료로된 구조물에 비해서 1/10 이하이면서 제작 및 공사비가 1/5 이하이고, 공기가 몇 년이 아니고 며칠이면서 더 견고한 구조물들이 많이 구축되고 있는데 부식이 안생긴다는 사실까지를 고려하면 장기적으로 더 경제적인 구조물의 건설이 가능하다.
3. 모든 구조물은 치수(size)가 커지면 강도가 떨어진다. 첨단재료를 항공기나 자동차등에 사용할 때는 실험에 의해 파괴강도를 구할 수 있다. 건설구조물의 경우 완공된 건물이나 교량으로 파괴 실험을 할 수는 없다. 문제는 현장 건조물의 강도는 시편 강도 보다 훨씬 작다는데 있다. 필자는 최초로 치수에 의한 강도 감소를 고려한 강도이론 및 설계지침을 발표하고 계속 발전시켜 왔다.
4. 파손된 구조물의 보수나 하중증가에 따른 보강 등의 문제는 심각하다. 이러한 목적을 이루기 위해서 복합재료의 사용이 점차 증가되고 있는데, 그 큰 이유는 파손된 구조물의 파괴 없이 신속한 보수를 하고 또 보강으로 구조물을 안전하게 사용할 수 있게 한다는 사실이다. 새로운 방법이건 옛날 방법으로건 보수를 위해서는 기존 구조물의 강도를 측정해야 한다. 구조물의 비파괴시험에서 많이 쓰이는 방법 가운데 하나가 고유 진동수를 구하는 것인데 계기 측정치를 구조물 부존 강도와 비교하고자 할 때 진동유발을 위한 첨가 하중을 고려한 고유 진동수의 계산은 매우 힘들다. 이에 본인은 1974년에 서울(남산)타워설계를 위해 개발한 이론을 복합재료를 포함한 2차원 문제로 확장 발전시키고 임의의 단면 및 여러 가지 경계조건의 경우, 축하중도 작용하는 경우, 여러 가지 추가된 집중하중(질량)이 있는 경우 등의 문제로 확장하여 왔다. 금년에는 passive 및 active control 등의 경우인 각종 탄성 지지된 경우로 확장, 여러 국제회의에서 발표하기로 되어있다.

필자는 이러한 모임에서 이야기한 내용들을 모아 일반기술자들이 이해하기 쉽게 이 글을 썼다. 이 글의 주요 내용은 대한토목학회지 제21권 제2호(1973) [2], 1991년 여름, 미국의 과학재단 연구비를 수령하는 지진공학, 지능구조물, 공학분야의 연구원들의 workshop에 초빙되어 강연한 내용[13], 동년 11월 중국 할빈에서 열린 미국, 일본, 중국 3국의 지진공학에 대한 회의에 미국대표 7명중 한 명으로 초청되어 강의한 내용[15], 1996년 10월, 제3차 섬유 복합재료에 대한 국제회의에서 plenary lecture로 강의한 내용[8], 및 한국섬유공학회 발행의 섬유기술과 산업, 제1권, 제1호[49, pp21~36]등을 참고로 쓰여져 있다.

## 2. 역사적 필연성 [1,2,3,4,5,6]

### 2.1 문화사적으로 고려한 건설

인류의 역사는 투쟁의 연속이었고, 그 투쟁의 대상은 한계가 없었다.

시생대(proterozoic age)의 바다 밑 진흙 속에 살던 많은 종류의 원시 생명체가 끊임없이 변하는 자연 조건에 의하여 소멸되었고, 변화하는 조건에 적응할 수 있었던 "strain"은 생존할 수 있었다. 적자생존의 철칙은 계속 적용되어 돌연변이를 일으킨 어느 strain은 환경에 더 잘 적응하면서 성장할 수 있었다.

고생대(palaeozoic age)의 화석에서 발견되는 삼엽충은 수많은 변이 끝에 지금의 왕게(king crab)로도 발전되었다고 보인다.

중생대(mesozoic age)는 거대한 공룡들의 전성기였다. 그들이 살던 지역은 일정한 온도를 유지하였고 먹이가 많아서 점점 거대한 체구를 갖게 되었다. 그러나 알 수 없는 원인에 의하여 지구의 회전축이 갑자기 기울자 지구에는 추운 겨울과 더운 여름이 지금의 4계절보다는 짧은 간격으로 번갈아 왔다. 온도의 변화라는 크나큰 도전에 적응할 수 없던 이들 공룡은 차츰 소멸되어 갔다.

중생대 후기에 살던 지금의 쥐만한 크기의 보잘것없는 왜소한 원시 포유동물은 약간의 털과 온도 변화에 대한 적응력을 갖고 있어 기후 변화를 견디어 냈다. 이들은 긴 고난의 시기를 지나면서 차차 증식하고 변이 하면서 수많은 화산과 끊임없는 지진으로 특징 지워지는 신생대(cainozoic age)의 세계 지배자로 등장했다.

이 포유류는 자기들의 전통과 습성을 교육하는 능력을 가지고 있었다. 신경조직은 사용하면 발전되게 마련이었고, 중생대까지의 동물에 비하여 자연에 더 잘 적응할 수 있게 되었다. 동굴을 대피소로 이용하게 된 것도 두뇌의 발달에 기인했으며, 신생대는 "두뇌 성장의 시대"라 불려질 수도 있는 것이다. 생물이 능동적으로 자연을 극복하고자 노력하기 시작한 것은 이때부터로 보아야겠다.

인류와 비슷한 모습을 한 "존재"는 빙하기부터 산 것으로 알려져 있다. 제 4빙하기가 절정에 달했던 약 5만년 전에 네안데르탈인이 사용했던 동굴에는 불을 사용한 흔적이 있다. 이들은 추운 환경을 불을 사용하여 견디어 갔고, 불을 사용 못한 열등한 종족은 멸망했다. 네안데르탈인은 역사상 최초로 두뇌로서 자연을 지배한 strain인 것 같다.

제 4빙하기 말인 40,000~25,000년전에 네안데르탈인은 자취를 감추었다. 이들은 자연에 의하여 도태된 것이 아니고 다른 부족에 의하여 밀려났다. 남아시아나 아프리카 또는 지중해 분지에서 성장한 것으로 보이는 Cro-Magnard, Grimaldi 등의 최초의 인류가 서서히 밀려가는 빙단을 따라 북상하면서 네안데르탈인을 그들의 동굴로부터 쫓아냈다.

정복자와 피정복자간에 흔히 있는 혼혈의 흔적이 없는 것으로 보아 털이 긴 네안데르탈인의 여인이 지극히 못생겼거나 성질이 사나웠는지 모른다. 여하튼 네안데르탈인은 현재 알

려진 바로는 자연에 의하지 않고 타종족에 의하여 소멸된 최초의 종족인 것이다.

유럽의 신석기시대인이 등장한 것은 10,000~12,000년전이다. 이들은 정착하여 농업에 종사하기 시작하였고, 금을 장식으로 사용하면서, 6,000~7,000년전부터는 동을 사용하고, 3,000년전부터는 철을 사용하기 시작했다.

이에 앞서 주목할 것은 지중해 분지의 침수이다. W. B. Wright에 의하면 15,000~10,000년전에 북극의 빙하가 녹으면서 거대한 유량의 물이 지중해 분지로 흘러 들어오기 시작했다. 특히 지부랄터 해협을 통해 흘러 들어오는 대서양의 물은 한때 아늑한 집이요 친절하였던 호수를 적으로 만들었고, 처음에는 서서히 증가하다가 나중에는 가속적으로 흘러들었다. 일부는 주변의 산으로 이동했으나 많은 부족이 수장되었다. 지중해 분지의 낙원을 방황하던 원시인은 이 크나큰 “홍수”에 도전 할 기술이 없었다.

정착을 위한 조건으로는 식량, 물, 건설재료가 있어야 한다. 이집트에는 진흙과 돌이, 메소포타미아에는 햇빛으로 벽돌이 될 수 있는 진흙이 있었다.

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 “예”를 무시해 왔다. 우리가 한국식 주택을 지을 때, 진흙에 짚을 섞어 만드는 벽체는 섬유 복합재료 구조의 좋은 예가 된다.

수메르인들은 이미 기원전 6500년에 수로 공사를 하면서 유능한 수리 기술자로 발달했고, 성서에 “바벨”탑 이라 적힌 거대한 탑을 그들의 신 엔릴을 위하여 닛푸르에 세웠다. 그들이 서서히 셈족에게 밀리면서 망하기까지 누린 역사는 기독교 시대의 두 배가 넘는 긴 시간을 누렸다. 유프라테스와 티그리스계곡의 진흙덤이 속에 인류 문화의 초반기가 묻혀 있는 것이다. 8000년전의 수메르 인들은 태양이 우주의 어느 점을 중심으로 돌고 있으며, 그 공전주기가 약 25920년이란 사실을 알고 있었다는 근거가 있다.

수메르인을 정복한 셈족의 Sargon I 세(기원전 2750년)를 이은 여러 제국의 말로는 알렉산더대왕에 의한 정복이다(기원전 330년).

알렉산더 대왕이 살던 시절부터 지금까지의 시간은 Sargon I로부터 알렉산더대왕까지의 기간보다 짧다. 그러나 인류는 Sargon I 세 이전에 사원에서 기도를 했고, 관개사업을 벌였다. 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 접착제를 사용하였다. 알렉산더대왕이 이집트의 31대 왕조를 멸하고(BC 332년) Gizeh에 있는 한 변의 길이가 700 피트요, 높이가 450 피트나 되고, 무게가 4,883,000 톤이나 되는 거대한 피라미드를 보고 싶을 때 그의 가슴은 인간의 무한한 능력과 가능성에 대한 경의로 벅찼고, 그의 머리는 그의 피정복 민족의 조상의 위업 앞에 숙여졌을 것이다. 이 피라미드는 제4왕조의 Cheops에 의하여 기원전 3733년에 건립된 것이니, 제왕의 제국이 수없이 명멸해도 인간이 제작한 위대한 위업은 시간의 한계를 초월하여 장엄하게 남아 있는 것이다.

기술은 과학이라 불리우기 이전의 여러 세기 동안 예술이었다. 이의 근원은 역사의 시초와 일치한다. 인류가 적성(hostile)의 자연 조건을 피하고자 피난처를 찾았을 때 그는 기술을 터득하기 시작했다. 거주할만한 동굴이 없을 때 긴털의 어느 원시인은 손과 두뇌의 힘으로 돌, 진흙 및 나뭇가지 또는 얼음덩이로 벌판 위에 인공“동굴”을 만드는 방법을 발명하였다.

기술자란 직업은 진흙 벽돌로 더 영구적인 거주처를 건설하면서 초기 단계로 접어든 것이다. 이런 구조물은 칼데아와 이집트의 유적에서 찾아 볼 수 있다. 키로스가 기원전 약 500

년에 유프라테스강의 수로를 바꾸고 바빌론을 점령했을 때 그에게는 훌륭한 기술자가 있었을 것이다. 줄리어스 씨저(Julius Caesar)가 라인강을 도하했을 때도 마찬가지이다. 이집트의 피라미드나 중국의 만리장성, 로마의 도로나 도수관 등이 건설의 예술과 재료에 능통한 사람들에 의하여 계획, 건설되었다.

## 2.2 구조물의 4대 기본 개념

불과 100여년전만 해도 우주가 4000여년전에 이루어 졌다고 단정하는 교회가 많았다. 서기 1690년 12월에 지구가 우주의 중심으로 알고 있던 Roma 교황청은 우주의 거대함을 주장하는 Jordano Bruno라는 학자를 이단으로 몰아 화형에 처했다. 그러나 지구는 태양 주위를 돌고 있었고, 8000년전의 Sumer인들은 이 태양도 우주의 어느 점을 중심으로 돌고 있으며, 그 공전 주기가 약 25920년이란 사실을 알고 있었다는 근거가 있다. 3500년전의 Sanscrit로 기술된 마하바라다(마하바라밀다)란 글에는 우주(은하계)에 10억 이상의 지구와 유사한 별이 존재한다고 쓰여 있다. 어떤 천문학자는 은하계의 2000억개의 별들 중에는 우리 태양과 비슷한 것이 200억개가 될 것이고 그 별들 중에는 생명체에게 적당한 열을 받는 지구와 같은 행성을 가진 것이 1/20, 즉 10억개는 될 것이며, 대기와 물이 있고 자전하는 지구 비슷한 행성을 가진 별이 최소한 다시 그 1/100, 즉 1000만개, 생명체를 가지고 있는 것 중에서 인류만큼 발달된 생명체를 가졌을 가능성이 있는 것이 다시 1/500, 즉 2만개쯤 될 것이라고 한다. 대우주에는 수십억개의 외부 은하가 있다. 그러니 최소 60조~70조의 별에 인류와 비슷한 문명을 가진 생명체가 사는 천체가 있을 수 있다는 계산이 된다.

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.

칼데아에 있는 폐허화된 구조물은 기원전 5000년에 지어진 것이기는 하나 그리스이전에 지어진 최고의 구조물은 이집트사람의 불멸의 작품이라 할 수 있다. 이집트의 사원 중 가장 훌륭한 것은 카나크(Karnak)에 있는 아몬(Ammon)의 대사원 이다. 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 페리클레스(Pericles)의 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 건설에 아치(arch)를 적극적으로 사용했는데, 이 기술은 동방의 Sumer로부터 내려오는 것을 전수받은 "voussir" 또는 "true arch" 기술로서 이 구조의 원리는 Etruscan의 "corbelled arch"와는 다르다. 로마시대에는 Sumer인들이 세운 많은 벽돌 아치들이 건재하고 있었다고 믿어진다. 아직 건재하고 있는 로마 아치중 가장 오래 된 것은 "Temple of Saturn" 앞에 있는데 이것은 기원전 6~4세기에 건립되었다. 이것은 순수 voussir arch로서 로마인들은 여기 적용된 원리를 후에 계속해서 사용하였다. 그들은 도수관을 복석조 아치로 건설했으며 아직도 사용되고 있는 것도 있다. 144피트의 직경을 갖은 석조 돔(dome)인 로마에 있는 파르테온은 서기 120년에 완공되었다.

의심할 여지없이 이집트인들은 어느 정도의 역학을 터득하고 있었다.

그리스사람들은 이것을 더 발전시켜 재료역학의 기초가 되는 정역학을 개발하였다. 아르

키메데스(기원전 287~212년)는 지레의 평형조건을 설명하고 물체 중심의 결정법을 찾아냈다. 그는 이 이론을 여러 가지 중력 물체의 운반 기구 제작에 응용하였다.

로마인은 위대한 건설 자들이다. 기념탑이나 사원뿐 아니라 도로, 교량, 진지 등으로 쓰인 축성 구조물이 아직도 남아 있다. 아우구스투스(Augustus)황제 시의 유명한 기술자인 비투루비우스(Vitruvius)가 쓴 책에는 이러한 건설에 관한 방법이 적혀 있다. 남부 프랑스에 있는 폰 두 가르(Pont du Gard)는 아직도 훌륭한 교량으로 이용되고 있다. 로마의 아치를 현대의 아치와 비교하면, 현대에는 더 가벼운 구조물을 만든다는 것을 알 수 있다. 로마인들은 응력해석의 이점을 갖지 못했다. 그들은 최적 형태의 아치를 사용할 줄 몰랐고, 통상 짧은 스패를 가진 반원을 썼다.

그리스와 로마인들이 쌓아올린 구조공학의 대부분의 지식은 중세에 들어서자 소실되었으며, 르네상스 이후에야 회복되기 시작했다. 유명한 이태리의 건축가 폰타나(Fontana; 1543~1607년)가 식스투스(Sixtus) 5세 교황의 명령으로 바티칸 침탑을 세웠을 때 구라파 기술자들로부터 많은 관심을 끌었다. 그러나 이집트인들은 이보다 수천년 전에 씨엔느(Syene)에서 다듬은 석재를 나일강으로 운반하면서 수많은 이런 침탑을 건설하였다. 로마인들은 이 침탑의 몇 개를 원위치에서 로마로 옮겨 세웠다. 16세기의 이태리 기술자는 그들의 조상들보다 이런 일에 훨씬 뒤져 있었던 것이다.

르네상스 기간에 과학에 대한 흥미가 부활하여 건축과 기술의 예술지도자들이 등장한다. 레오나르도 다 빈치(1452~1519년)는 이 기간의 가장 뛰어난 사람이었다. 그는 이 당시의 지도적인 예술가일 뿐 아니라 위대한 과학자요 기술자였다. 그의 기록을 보면 여러 분야의 과학에 관한 발견을 한 것을 알 수 있다. 그는 역학에 지대한 흥미를 가져서 그의 기록에 “역학은 수학의 결실이요 수학의 낙원이다”라 썼다.

현대 역학은 위대한 갈릴레오(1564~1642년)에 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 Philosophy”란 이름을 쓰기 시작했다(1645년). 이때 비로서, 과학이 철학과 분리되기 시작한 것이다. 르네상스 이전 특히 13세기의 스페인에는 고딕 형태의 건축이 발전하여 영국, 독일, 이태리로 전파되었다.

중요한 구조물 건설의 개념인 목재트러스는 이태리의 앙드레아 파라디오(Andrea Palladio; 1518~1580년)에 의하여 쓰여졌다. 그러나 파라디오의 이 발명의 중요성은 18세기 중엽까지 인식되지 못하였다.

Persia의 왕들은 3500년경 전부터 강철을 인도로부터 구했고, 이 제조 기술은 2900년전 쯤 중앙 유럽으로, 2600년전 경 중국으로 전해졌다. 1667년, Kircher는 서기 65년에 중국에 건설된 지간 200ft의 철재 현수교에 대해 기술했는데, 20개의 철재 체인으로 된 이 현수교에 대해, 후에 Navier를 비롯한 여러 사람이 기술하였다. 탁월한 유지 보수에 대한 의문이 생기는데, 중국은 훌륭한 lacquer 도장을 할 수 있는 원료를 주는 식물들이 무성해서 금속 체인에 효과적인 보호를 하는 것이 불가능하지 않았다고 보고 있다.

현대 철강기술은 미국 Pittsburgh 토박이 William Kelly(1811~88)가 개발했으나 혼자 연구를 하던 그는 결국 파산선고를 받고, 그의 업적은 영국의 Henry Bessemer(1813~98) 것이 되어 작위까지 받은 Bessemer의 이름이 이 기술을 대표하고 있다(1856). 구조용강의 발전과 이의 건설에 대한 이용은 로마 이후의 가장 기념될 만한 일이었다. 강도 높은 강철의 사용은 고층건물, 장대교, 높은 탑 등의 건설을 가능케 하였고, 20세기의 꽃을 피게 하는 원천이 되게 하였다.

### 2.3 구조물의 제5 기본 개념

21세기를 눈앞에 둔 현재의 금속, 화학공학의 발달은 눈부신 발전을 거듭하여 각종 구조용 신 소재의 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[1, P1].

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 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.

경쟁자(소재)들도 “낮은 가격”이란 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 방법이나 날이 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 실 예가 여럿이 있다.

인류 문화상 제5의 구조 개념의 대표적인 구조 형식은 복합구조(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 창출 해 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. 한 극단의 예가 철근 콘크리트의 보강재로 철근과 탄소, 유리 또는 고분자 섬유를 혼합하는 경우이다.

복합재료를 논할 때 세개의 “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 내니까 당연히 중요하려니 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.

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(<0.0000254m), fiber(0.0000254m~0.0008128m), wire(0.0008128m~0.00635m), rod(0.00635m~0.0508m) 및 bar(>0.0508m)로 불리운다.

인류는 복합재료를 수천년동안 사용해왔다. 진흙에 짚을 섞어 흙담을 쌓았을 때 우리 조

상들은 “discontinuous fiber reinforced composite”를 사용했던 것이다. 즉, 짙은 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 “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 간단하고도 정확한 이론의 개발을 위해 노력한 결과, 과거 5년간에 국내외 학회 등에서 발표된 논문중 약 40여 편으로 거의 완성에 가까운 간단하고도 정확한 설계 이론을 확립할 수 있었다.

두 번째 문제의 해결을 위해서 필자는 “Composite Structures for Civil and Architectural Engineering”이란 511쪽의 책을 완성, 영국에서 출판하였다[1].

표1은 ksi-foot단위로 표시된 단위 일당의 비용(cost)을 미화 달러로 표시한 것이다. Glass/epoxy의 인장강도를 125,000psi로 사용했는데, 이 값은 섬유 무게비를 50%를 사용한 것으로 200,000psi도 용이하게 얻을 수 있다. 이때 강철의 비용과 비교하면  $77 \times (125/200)=48$ ,  $48 \times (1/868)=1/18$ , 즉 강철 값의 1/18이 된다. 유리 섬유 가격은 파운드당 80cent인데 원가는 4cent도 가능하므로, 강철 값의 1/360도 가능하다. 여러 면에서 우수한 소재인 Carbon/epoxy도 강철 값의 1/4인데, 현재 파운드당 30불하는 Carbon fiber의 값이 대량사용시 유리 섬유 값에 접근할 수 있다는 이야기이니까 현재까지 사용해온 재료들에 비해서 엄청나게 싼 재료가 될 것을 알 수 있다.

표1.ESTIMATED COST IN \$/ksi-foot (1994.4)

MATERIAL	TENSILE STRENGTH (psi)	% Fiber		\$/ksi-ft
		VOL	WT	
GLASS/epoxy	125,000	33	50	0.0077
CARBON/epoxy	167,000	42	50	0.0296
KEVLAR/epoxy	220,000	48	50	0.0223
STEEL	40,000	NA	100	0.0868
CONCRETE	$f_c'=3000$	NA	100	0.0115

By F. ISLEY. AT W/F. 94

대량사용시 C/F 가격, G/F 가격에 접근 가능  
(20~30 USD/#) (0.8 D/#) (1994.8)

$(77 \times 125 / 200 = 48) \times 1 / 868 = 1 / 18$

\* G/F 원가:  $0.04D/\# : 1/18 \times 1/20 = 1/360$

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 제 5기본 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 작으므로 (1/10도 가능) 지진이나 기타 진동발생시 그 무게 비율로 감소된 관성력을 받게 된다.

최근에 (SAMPE JOURNAL 1993. 7. 8), 영국에서는 100,000리터 "storm tank"를 복합재료로 단 "하루"에 완공했다. 이 규모의 구조물을, 강철로 건설하면 최소 1개월이 소요됐고, 콘크리트 구조로 건설하면 통상 3개월은 소요되었을 것이다. 공사비는 강철이나 콘크리트 구조물의 경우보다 훨씬 작았다.

미국에서, 캘리포니아에 필요한 물을 알래스카에서 1700 마일의 해저 수로로 운송하는 계획을 추진하고 있다. 강철과 콘크리트를 이용한 재래식 공법으로는 15년의 공기에 150억불이 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. 남산의 SEOUL TOWER의 경우 좌굴과 진동은 완전히 새로운 이론을 개발 적용하여 해석되었으며, 최근 필자의 이론으로 확립하면서 50여 차례 국제회의에서 발표한 이 과제에 관한 논문들은 이 SEOUL TOWER에서 뿌리를 찾아야 하는 것이다.

3.1고가도로만 해도 필자는 그 당시 최신의 이론을 적용하였고, 최초의 여러 가지 건설 기술을 도입하여 경제적인 구조물이 가능케 하였으며, 강구조가 콘크리트 구조에 비해서 비싸지 않을 수 있다는 인식이 널리 퍼지게 되었다. 이러한 건설이 가능했던 주된 이유는, 설계자로서의 필자의 소신도 있지만 발주처 기술진의 용기에 있다고 보아야 한다. 이 기술자들이 구태의연한 설계에 만족하면서 지냈다면, 또 재료가 1/3로 감소되었는데도 "점도 없이" 그런 공사를 감행할 수 있는 용기를 갖지 않았다면 그러한 새로운 구조물의 건설은 가능치 않았다.

## 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 “새로운 천년을 위한 재료(Materials for the New Millennium)”이었다[7]. 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. 제 4구조 개념을 위한 강철은 100여 년 전 부터 사용되어 왔다. 지금은 거의 매일 새로운 것이 발표되고 2주일 전의 지식은 고물이 되는 시대이다. 필자가 인류 문화상의 제 5구조물 기본개념 이라고 부르는 composite 가 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 검토토 파악될 수 있다. 어려운 이론을 대체하기 위해 쉬운 해석 방법의 개발은 계속 되고있다. 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.

## 3. 토목·건축 구조물에 대한 응용

### 3.1 남아있는 연구 과제들

우리는, 많은 사람들이 고생해서 연구한 결과들이 쓸모가 없거나, 다른 사람들이 이미 발표한 연구내용이거나 해서 결국 연구를 위한 연구 또는 남의 것을 베낀 발표내용이란등의 평을 듣는 것을 자주 보아왔다. 이에 필자는 더 연구해야할 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. 나머지 주요한 두 문제는 다음과 같다.

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

오늘날까지 완전한 해결은 요원한 상태이다.

나. 최상의 목표를 얻기 위한 설계 및 해석의 최적화.

이에 대한 자세한 연구방향은 참고문헌들에 제시되어 있다.

### 3.2 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 토목건설에 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 미국회사는 1949년부터 섬유 보강된 tube(pipe)를 20,000,000ft나 생산해 왔다(1991년 현재). 어느 유럽회사는 같은 종류의 pipe를 27여 년 간 생산하고 있다. 이러한 pipe들은 다른 여러 가지 장점 이외에 경량이고 부식이 안 생기고 설치가 용이하여, 가격만 맞는다면 상수도 계통, 담수화 plant, 화학공장의 piping, 장거리 송유관 등에 대한 응용이 폭발적으로 늘어날 것으로 예상된다.

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

가격에 대해 고찰할 때, 복합재료에 관한 국제 간행물에 의하면, 24inch보다 작은 직경의 pipe는 금속이나 기타 플라스틱 제품이 강적이고 이보다 크고 60inch 미만인 경우는 금속과 복합재료가 막상막하이므로, 60inch 이상에서는 복합재료에 대항할 재료가 없는 것으로 되어 있다. 그러나 본인의 경험에 의하면 10inch 미만의 고압 pipe의 경우, 복합재료 제품이 단연 저렴하고 만약 장거리 line-pipe에서 수송비를 고려하면 단연 압도적으로 유리하게 나타났다. 직경 48ft가 되는 복합재료 tube가 생산된 예도 여럿이 있다.

세계의 여러 회사에서 복합재료 표준 구조 단면을 생산하고 있다. 이런 구조부재들은 상수도 처리장, 화학공장, 제지공장 등에 사용되고 있다. 복합재료는 전자파를 전달하지 않아서 컴퓨터 센터, 병원의 자기 공명투영실 등의 건설에 사용되고 있다. 복합재료로 된 rebar는 100,000psi의 극한강도를 갖고 있다.

교량건설에 대한 복합재료의 응용은 비록 느린 속도이긴 하지만 이미 시작되었다. 독일의 뒤셀도르프(Dusseldorf)시에는 세계에서 최초로 복합재료보강봉을 이용한 콘크리트 도로교가 건설되어 있다. 1986년에 개통된 16m폭의 47m 지간을 가진 이 교량은 유리섬유와 폴리에스테르로 된 복합재료 봉으로 프리스트레스한 세계 최초의 pc교이다. 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 109ft 스패까지 펼칠 수 있으며 비지지 된 스패중앙에서 70톤 하중을 지지하는 것으로 알려져 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.

길이 113m인 횡단 육교가 스코틀랜드의 Aberfeldy에 세워졌다[28]. 이 교량은 유리 섬유 보강 복합재료로 구성되었으며, 40개의 평행한 Kevlar 케이블에 의해 지지된다. 상판 구조는 유리섬유보강 복합재료로 구성되었으며, 높이 17.5m의 유리 섬유 보강 복합재료 탑(tower)에 매달려 있다. 250톤의 유리 섬유 보강 복합재료 부재가 이 교량에 사용되었다.

1994년 현재, 총 9개의 유리 섬유 복합재료(GFC)교량이 중국에 설계되고 건설되었다[28]. 가장 오래된 교량은 1982년에 세워진 2차선 교량이라는데 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 9m 폭 5.4m)는 교량의 풀-사이즈(18m)의 1/4부분을 나타낸다. 하중은 AASHTO HS20-44 Truck이고, 강도 기준은 물성값에 4의 안전계수를 고려한 최초 ply 파괴 범주의 최대응력이 사용되었다. 교량은 전부 표준 E-glass 보강 폴리에스터와 비닐에스터 폴리머 복합재료로 만들어졌으며, 짧은지간범주 [지간120-feet(36m)이하]에 주안 하여 만들었다. 설계 개념은 multi-cell box와 orthotropic beam system이다. 각각의 구성 요소의 무게는 1590kg보다 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 축하중은 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 증가할 수록 지속적으로 떨어지는 것이 예상되며, 이 비용은 더욱더 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 강판을 사용한 경우와 비교해서 약 20% 저렴한 것으로 나와 있다. 복합재료의 여러 가지 장점에 추가해서 저렴한 가격이란 사실은 획기적인 것임에 틀림없다.

각종 파이프라인, 도로 항만시설등 생명선(lifeline)의 주.부구조재의 신규 공사 및 유지 보수를 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, 컨테이너 등 여러 가지 수송 수단이 복합재료로 되어 있다.

1987년의 보고에 의하면 미국 내의 교량 560,000개중 약 60%가 “structurally defective or functionally obsolete”한 것으로 나타나 있다. 강교는 부식된다. 콘크리트 보나 슬래브에 들어 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 G. N. P의 약 4.9%에 해당되며, 이런 손실방지를 위해 기존의 기술이 활용되었다면 약 320억불은 절약될 수 있었다고 되어 있다.

대형 구조물의 설계 건설시 가장 큰 제한 조건은 모든 건설재료에는 치수의 한계가 있다는 사실이다. 예를 들면 현수교(사장교)의 경우 이론적 최대지간(span)은 강재인 경우 5000m~7000m인데, 유리섬유보강 복합재료를 사용하면 이의 2배, 탄소섬유보강 복합재료를 사용하면 이의 3배가 가능하다. 고층건물 건설시, 지반 내하력의 한계로 층고의 제한을 받는 경우가 많은데 재래식 상판(slab) 무게의 1/10인 복합재료를 사용하면, 층고의 증가는 물론, 중장비 불필요, 기동치수 감소에서 오는 증가된 공간의 확보, 지진이나 충격시 관성력(inertia force)의 1/10로의 감소에서 오는 엄청난 안전성의 증가 등, 현대인의 상상력을 훨씬 초월하는 여러 가지 가능성이 생긴다.

### 3.3 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 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(1987). 이 필라멘트는 높은 내부 마찰 각과 cohesion을 제공하게 되어 결과적으로 건설된 옹벽의 공사비는 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 또는 석재복합재료라 할 수도 있음)는 대형 구조물의 충전재로 사용되고 있다.

“표준단면” 구조요소로는 강재로 생산되는 각종 단면의 요소가 주로 유리섬유, 폴리에스테르, 비닐에스테르등을 사용하여 인발(pultrusion)에 의해서 생산된다. 이런 단면은 섬유보강재를 위한 최적형태가 아니어서 최저가격을 얻기는 어려우나 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. 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 시멘트의 결합을 할 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. 최근의 경향은 이러한 문제의 해결이 눈앞에 보이게 한다. 2차 보강의 경우 “fibrillated fiber”나 긴(長) 강섬유 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 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 더 낮추려면 제5기본 개념에 의한 구조설계가 요구되는 것이다. 주 보강재로 강섬유의 사용을 위한 제작 방법의 연구는 필자에 의해 추진되고 있다.

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

### 3.4 사업성

복합재료를 주 구조재로 사용할 경우의 가격 문제는, 이미 단기적으로도 유리하지만 장기적인 관점에서의 장점은 훨씬 크다. 교량등의 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 증장비 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. 교통지연만해도, 2005년에는 연료 및 근무시간 손실에서 년 500억불의 피해를 일으키는 것으로 추정되고 있다. 이것은 구조물의 유지관리가 잘 되고 있는 미국의 예이다. 우리나라나 다른 제3국의 경우는 더 심각하다고 보아야 한다. 강철과 시멘트를 다 합친 산업을 상기해 보면 그 크기를 짐작할 수 있다.

### 3.5 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 barge구조, 20'×20'×40'의 굴뚝, 양어장, 각종 가스 저장탱크, 15m 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 없어진지 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. 필자가 1989년 8월 중국 Guangzhou에서 열린 7차 ICCM (International Conference on Composite Materials)에서 "Geometric Nonlinear Analysis of Underground Laminated Composite Pipes"란 제목으로 발표했을 때 참가자중 여러 사람이 건설, 특히 토질공학과 복합재료 역학을 결합한 최초의 논문이라고 평했다.

1991년 8월에 미국 과학재단 연구비를 수령하는 원로 교수 모임에 초청되어 Composite에 대해서 간단히 이야기 하니까 사회 보던 교수가 Composite이론이 어렵지 않을 수 있으며 가격이 저렴할 수 있다는 사실을 처음 알았다고 이야기했다.

1990년 미국 토목학회 제 8차 Structural Congress에서, Composite에 관한 학술논문은 필자의 것 하나뿐이었다. 과학재단의 공무원들은, 필자로 하여금 "Composite Structures for Civil and Architectural Engineering"란 책을 집필, 출판 의뢰를 알선했다. 이 초고는 8월의 원로교수 회의에서 소개되고 참석자들은 최소한 한가지의 전문 교과서는 있다고 기뻐했

다. 11월에는 중국에서 미. 일. 중 공동 세미나에 미국 대표 7명중 1인으로 참석, 복합재료 설계에 대하여 주제 발표를 하도록 알선했다. 1992년 1월에는 University of California, Davis에서 초청하여 "Design of Composite Material Structures for Civil Engineering Application"이란 제목으로 이야기했고 3월에는 University of Illinois, Urbana-Champaign에서 "A Simple Method for Exact Analysis of Composite Laminated Structures for Civil Construction"이란 제목으로 이야기했다. 이 일련의 움직임은 미국을 비롯한 선진국 학계는 신속하게 활용하고 있다. 1991년 12월 동경에서의 SAMPE(Society for the Advancement of Material and Process Engineering)국제회의에서 필자가 좌장역할을 하고 발표를 했을 때, 설계나 이론에 관한 논문은 별로 없었고 강재 단면을 모방한 Composite부재가 몇 가지 발표되었다. 그 이후의 여러 학회에서도 몇 번 발표된 이러한 단면들은 소재의 특성을 최대한으로 활용하지 못하여 경제적이지 못하나 내 부식성 등에서는 평가 될 만했다. 현저한 변화는 1992년 3월의 제 37차 SAMPE 국제회의에서 볼 수 있었다. 28개 분과 중에서, 제일 앞의 1A 분과에서 "산업, 교통, 건설에 대한 Advanced Composite 시장"이란 제목을 다룬 것이다. 세 가지 제목이 다 건설 관계임은 물론이다. 우주 항공만을 주로 다루어 온 첨단 기술 학회에서 건설을 제 1의 분과에서 다룬 것이다. 그 후의 변화는 더욱 놀랍다. 6월에는 불란서에서 "Textile Composites in Building Construction"이란 회의가 열리고 10월에는 Canada에서 "Advanced Composite Materials in Bridges and Structures"란 회의가 열렸다. 즉 건축과 교량에 관련된 복합재료에 대한 국제회의가 연거푸 같은 해에 열렸다. 필자는 상기 두 회의와, 7월에 중국서 열린 소형 컴퓨터의 교육 활용에 관한 국제회의, 12월에 홍콩에서 열린 Computational Engineering Sciences에 관한 국제 회의 등에서 좌장 역할을 하고 논문도 발표하였는데 특기할 것은 중국의 회의는 중국 항공기 부품 제작에 관한 보고 이외는 복합재료에 관한 것은 필자것 하나 뿐이었으나 다른 모임들에서는 여러 가지 흥미로운 발표가 있었다. 그러나 그 내용은 아직 구각을 벗어나지 못한 상태여서 우리 나라는 아직도 비교 우위에 있다고 할 수 있었다.

1993년 2월에는 호주에서 "Advanced Composites - 93"란 회의가 열렸다. 이 회의는 참가자가 주로 우주 항공계이고 건설계는 필자 혼자 발표하였는데 그 내용이 신 소재의 대량 사용을 위한 간단하고 정확한 설계에 대한 내용이어서 좋은 호응을 받았고 많은 과학자들로 부터 계속 협조하자는 제의를 받았다. 중요한 것은 이 회의 후에 열린 초청 인사들만 모임 forum이다. 필자는 Boeing 항공사의 Chief Engineer Max Spenser 박사, 이태리의 Viscount 교수(ECCMVII회장), Duralcan(Alcoa 계열사) Bill Hoover 부사장 등과 같이 panelist 역할을 했는데 토의 논제는 "경제적인 설계와 제작"이었다. 첨단 우주항공 관련 회사들이 대량으로 재료를 사용할 건설 분야로의 응용을 위한 관심을 갖고 있다는 증거이며, 공학사상 획기적인 변화의 시초가 될 수 있었다.

1993년 5월에는 캘리포니아주 Anaheim에서 제38차 SAMPE 국제회의와 전시회가 열렸다. 필자는 다른 8명의 원로들과 함께 "CONSULTANTS CORNER"에서 상담역 노릇을 했는데 많은 방문자들 중 대부분이 첨단소재의 건설로의 응용에 관한 문제를 논의하고자 와서 상담역 9명중 유일한 건설 관계자인 필자는 상당히 바쁜 시간을 보냈다. 학술회의에서 발표된 건설관계 논문은 5편이었다. 주목할 것은 이후에 San Fransisco에서 개최된 Wilson Forum이다. 30명의 초청 인사로 이루어진 이 모임은 첨단 재료와 건설을 어떻게 결합시키느냐를 토론하기 위한 것이었다. 2월 호주에서의 Australasia-Pacific Forum은 첨단 소재의 기술 이전을 중심으로한 회의로서, 건설로의 이전이 첨단 과학 산업을 크게 활성화시킨다는 결론을 얻은 것인 반면, 미국에서의 이 모임은 처음부터 건설로의 응용을 주제로 한 최초의 모임으로 그 이름 자체가 "Existing and Potential Application of Composite Materials in the Infrastructure"였다. Stanford 대학교의 Springer교수 Texas 대학교의 Fowler교수등

을 비롯한 학계원로들, 일본 SAMPE회장 Teranishi 박사, 상해 합성수지 연구소 Yin박사, 기타 미국 소재 관련 전문가들과 교통 담당 부서의 공무원들이 모였다. 필자는 “Composites in Construction-Consideration for Design”이란 논제와 Summary Speech로서 건설에 대한 신 소재 응용의 문제점과 이의 해결 방법, 기술 이전의 방법, 군사 기술의 평화 목적 이용을 통한 군수 산업체와 전반적인 경제의 대 발전과 제2 산업 혁명의 성공적인 완수 등에 대해서 이야기했다. 이 모임은 점점 여러 분야 사람들의 관심을 높여와서 금년(1997)에는 세 번, 내년(1998)에는 네 번 개최될 예정인데 각 모임은 보수, 교량 상부구조 등과 같이 특별한 topic에 대해서 발표 및 토론을 하는 것으로 되어있다.

### 3.6 미국의 TRP

미국은 첨단군사기술의 평화적 목적을 위한 응용을 구체적으로 진행하고 있다. 여러 연방 기관 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. 이 목적을 위해서 발주된(1993. 7. 20) 건설생산성 향상계획(Construction Productivity Advancement Programs-CPARS)프로젝트 중 두 가지는 복합재료와 관계된 것으로, 하나는 “복합재료구조 해양 파일 및 쉬트파일의 개발 및 시범” 사업이고, 다른 하나는 “고급, 재료혼용복합재료 구조물(Advanced Hybrid ‘Supercomposite’ Structures)의 개발 및 시범” 사업으로서 새로운 교량 상부구조를 포함하고 있다.

1994년초, 미 국방성 및 에너지성 소속의 고등연구계획청(Advanced Research Products Administration-ARPA : 전의 DARPA. 우리 국방과학연구소와 유사한 조직이었으나 에너지성도 참여하게 되어 ARPA로 개칭하였다가 최근 다시 DARPA로 개칭)장 Denman박사가 미 하원 군사소위원회 청문회에서 보고한 내용에는 투자전략, 우선순위, 개발계획등이 포함되어 있는데, 네 가지 투자 전략중 건설과 관련된 것은 사회간접시설과, 겸용기술의 활용이란 두 가지이다. 다섯 가지 우선순위 가운데 하나는 겸용기술 개발에 대한 국방비 재투자가 포함되어 있다. 개발계획은 핵심기술, 사회간접시설, 군사응용등 세 가지로 되어 있는데, 첫 번째 핵심기술은 다시 세 가지로 재료를 포함하고 있다.

우선순위 5가지 중 하나인, 겸용기술개발에 국방비 재투자를 실천하기 위한 구체적인 핵심은 기술재투자사업(Technology Reinvestment Project - TRP 1993. 3. 11 발표)으로서 이를 위해 구성된 국방기술 민수 전환위원회(Defense Technology Conversion Council - DTCC)에는 상무부, 에너지부, 교통부, NASA, NSF 등 정부 각 기관이 참여하고 있다.

건설공학에 대한 첨단복합재료 사용을 발전시키기 위한 연방국방기술 전환사업은 ARPA에 의해서 개발되고 관리된다. 이 ARPA 사업은 국방관련기업체(납품업체, 제조업체, 시스템 개발업체), 건설관련 업체, 및 연구기관(대학등)의 조합(Consortium)들에게 주어진다.

클린턴 대통령은 ARPA의 연방 TRP사업으로서 41개 프로젝트를 선정했다고 발표했다(1993. 10. 22) 총 1억 7천만불에 달하는 이 1차년도 예산은 집행 중이던 1994년 TRP예산 4억 7천 2백만 불의 일부로서, 이것은 대통령의 5개년 국방재투자 및 기술전환사업(Defense Reinvestment Conversion Initiative) 200억불 계획중의 최초집행분이 된다. 이 41개 TRP사업의 하나가 샌디에고 캘리포니아 대학교(UCSD)부근, I-5 고속도로에 놓여질 세계최초의 내진성이 강한 100% 복합재료 차량용 사장교이다. 연구개발, 설계, 시공은 UCSD주관 하에, ARPA, 캘리포니아 주정부, 각종 기업체등 12개 조직이 참여하는데, 1단계 사업비의 50%인 1천 35만불은 ARPA에서 지출하고 록히드, 두폰등 기업체가 50%를 출자한다. 즉 TPR는 정부 및 기업체 공동출자의 개념인 것이다. 3단계로 이루어진 사업의 총비용은 5천 5백만불로 예상하고 있는데, 폭 60피트에 길이 450피트의 이 교량이 완공되면, 10년후에

1000억불의 시장을 지배할 것으로 기대하고 있다. 이 사업의 1단계 내용은, 교량교각의 보강시스템과 낡은 구조물, 부식, 동결, 유지보수 불량 등으로 발생한 교량판 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, 시방서나 제작 과정 등을 개발하는 것도 포함한다. 3단계는, 상기 100% 신 소재 사장교의 건설로서, 최종 건설은, 밤사이 몇 시간 내에 가설할 계획이다. 이 세단계 사업 모두가 1997년 완료예정이다. 클린턴 대통령은 이 사업비 지급을 발표하면서 “이것은 엄청난 가능성을 가진 매우, 매우 인상깊은 아이디어이다.”라고 이야기 했는데, 이 사업은 군수업체가 그들의 군사기술을 비군사적 목적으로 민수용으로 사용하는 좋은 본보기가 된다.

현재 고려되는 제작 방법은, filament winding, pultrusion, RTM, resin infusion molding 등이다. 완공된 후는 Cray C 98 컴퓨터를 이용해서 교량의 거동을 real-time으로 추적한다. UCSD의 Hegemier교수에 의하면 구조 부재 가격은 콘크리트나 강철 가격보다 비싸나, 건설기간 단축, 가설공사의 불필요, 대형장비 불사용 등을 통해, 완공된 교량은, 단기적 판단으로도 훨씬 저렴하게 된다. 장기적으로 볼때, 부식 등으로 인한 보수비용 절감, 중량이 1/10인데서 오는 지진시 또는 기타 충격시 받는 파괴력의 1/10로의 감소, 교통 방해에서 오는 손실 감소 등을 고려하면 엄청난 액수의 경제적 이익을 갖다준다. 이 교량은 고속도로가에서 건조되어 교통량이 적은 하루 저녁에 들어서 설치될 수 있는 것이다. 첨단 군사 기술을 민간용으로 변환시키는 이 시범 사업은 21세기에 토목 기술자를 위한 전혀 새로운 산업을 열어주게 될 것이다.

### 3.7 섬유복합재료

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 섬유 보강된 한 겹의 층은 특별한 주의가 필요하긴 하나 층 면 내에서 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 혼합일 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.

마-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.

마-2 이방향성(bidirectional)

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

마-3 다방향성(multidirectional)

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

이상과 같은 예는 복합재료의 일반적 특성을 설명 한데 불과하며 구체적인 역학적 성능은 소재 특성, 경화방법등을 포함한 여러 가지 요인에 좌우된다는데 명심해야 한다

### 3.8 건물 및 사회 간접 시설의 보수 및 재생을 위한 섬유 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 3내지 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 문제뿐 아니라, 시간이 결정적으로 중요하기 때문이다. 이 내용은 참고문헌[8, 50]에 비교적 자세히 설명되어 있으므로 여기서는 생략한다.

## 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.

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

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 Chaussee's"는 13세기부터 있었다고 알려져 있다. 다음과 같은 Louis 14세(1642~1715년)의 에피소드는 기술이란 직업이 필요에 의하여 발전하게 되었다는 사실을 이야기 해준다. 획기적인 기념 구조물을 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. 자연히 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 한다"는 것을 공공에 알려야 한다고 했다.

영국의 기술은 산업혁명의 후기 결실의 하나로 꽃피게 되었다. 최초의 기술자의 조직인 "The Institution of Civil Engineers"는 상호교육과 그 당시 유행하던 교육방법을 보완하기 위한 목적으로 1818년에 구성되었다. 이 조직의 설립자들은 "Military Engineer"와 구분하고자 "Civil Engineer"란 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 본문에서 비교적 상세히 설명되어 있다. 이러한 장점을 갖는 재료가 최대한 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 천문 지리, 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.

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.

## 참 고 문 헌

1. Kim, D. H., *Composite Structures for Civil and Architectural Engineering*, E & FN SPON, Chapman & Hall, London, 1995.
2. 김덕현, "토공공학의 정의와 분야", 대한토목학회지 제 21권 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 제 36회 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, Guangzhou, 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. 김 덕현, "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," EUROMECH 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", 섬유기술과산업, 제1권 제1호, 한국섬유공학회, 1997. 3.
50. 김덕현, "건물과 사회간접시설의 보수와 재건을 위한 복합재료", 대한 토목학회지, 제45권 제4호, 1997. 4.