

21세기의 복합재료의 신전개 방향

김 덕 현

1. 서 론

재료산업의 장래는 건설산업에서 쓰이던 재래의 재료들이 첨단복합재료로 대체될 때 결정된다. 건설에서의 재료는 kg이 아니고 ton으로 사용된다.

건설관련 세계시장 규모는 연간 2조4천억불로 추정되고 있고, 미국만의 향후 20년간의 사회간접분야 보수를 위한 투자는 3내지 4조불로 추산되고 있다. 1987년 보고에 의하면 미국의 교량만 해도 575,000개 중에서 230,000개는 구조적인 결함이 있거나 기능에 결함이 있으며 이중 143,000개는 50년 이상된 것이다.

강교는 부식된다. 콘크리트 보나 슬래브에 들어가 있는 철근은 전기화학적 작용에서 일어나는 부식을 피할 길이 없다. 지하 저유시설도 같은 상황에 놓인다.

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) 5000~7000m가 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. 건설부재의 중량 때문에 증장비 사용이 필수적이며, 막대한 공사비가 증가하고 긴 공기가 필요하다. 복합재료를 사용하면 교량, 건물 등의 상판 무게가 콘크리트 제품 무게의

1/5~1/10도 가능해져서 증장비가 필요없고, 엄청난 공기 단축이 얻어진다. 예를 들어 교량 가설이 몇 년에서 몇 시간으로 단축될 수 있다. 내 부식성이 강해서 유지 보수비가 크게 감소하는 고로 복합재료를 사용한 구조물은 단기 및 장기적으로 경제적 인 것이 된다. 지진 또는 충격시 관성력은 무게에 비례하므로 복합재료 구조물이 받는 충격력은 무게 비 만큼 줄어든다. 유지보수 및 재생의 경우, 기존 구조물의 철거, 재시공은 엄청난 공기를 필요로 한다. 기존 구조물의 보수나 재생에는 복합재료의 사용을 절대적으로 필요로 한다. 교량 상판 무게가 1/4로만 감소되어도 파손된 기존 종방향 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.

중요한 것은 이러한 모든 구조물의 건설과 유지보수에 사용되는 복합재료는 고분자 모재를 사용한다는 사실이다.



김덕현

1973 육군사관학교 교수부 토목공학과장, 교부과장, 교수부장 보좌관
1975 과학기술처 과학기술심의관
1977~1979 삼성건설(주) 부사장
1998~현재 Korea Composites대표
1990~현재 서울산업대학교 겸임교수

The Future Direction of Composites Application in the 21 Century

코리아 콤포지트(Duk-Hyun Kim, Korea Composites, #97, Kuki-dong, Chongro-ku, Seoul 110-011, Korea)

2. 역사적 필연성

2.1 문화사적으로 고려한 건설

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 예를 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 바벨탑이라 적힌 거대한 탑을 그들의 신 엔릴을 위하여 닛푸르에 세웠다. 그들이 서서히 셈족에게 밀리면서 망하기까지 누린 역사는 기독교 시대의 두 배가 넘는 긴 기간을 누렸다. 유프라테스와 티그리스 계곡의 진흙덩이 속에 인류 문화의 초반기가 묻혀 있는 것이다. 8000년 전의 수메르 인들은 태양이 우주의 어느 점을 중심으로 돌고 있으며, 그 공전주기가 약 25920년이란 사실을 알고 있었다는 근거가 있다. 그러나 불과 100여년 전만 해도 우주가 4000여년 전에 이루어졌다고 단정하는 교회가 많았다. 서기 1690년 12월에 지구가 우주의 중심으로 알고 있던 로마 교황청은 우주의 거대함을 주장하는 조다노 부루노(Jordano Bruno)라는 학자를 이단으로 몰아 화형에 처했다.

알렉산더 대왕이 살던 시절부터 지금까지의 시간은 자르곤 1세(Sargon I)로부터 알렉산더 대왕까지의 기간보다 짧다. 그러나 인류는 자르곤 1세 이전에 사원에서 기도를 했고, 판개사업을 벌였다. 기원전 5000년경에 이집트에 나타난 “진” 이집트인은 원주민을 몰아내고 벽돌, 목재, 석재로 각종 구조물을 지었다. 이들은 이때 각종 유기섬유로 복합재료 벽돌을 만들어 주택 등 각종 구조물을 만들었고 석재 구조물의 건조를 위해 훌륭한 접착제를 사용하였다. 알렉산더 대왕이 이집트의 31대 왕조를 멸하고(BC 332년) 기제(Gizeh)에 있는 한 변의 길이가 210 m, 높이가 135 m나 되고, 무게가 4,883,000 톤이나 되

는 거대한 피라미드를 보고 있을 때 그의 가슴은 인간의 무한한 능력과 가능성에 대한 경이로 벅찼고, 그의 머리는 그의 피정복 민족의 조상의 위업 앞에 숙여졌을 것이다. 이 피라미드는 제4왕조의 체옵스(Cheops)에 의하여 기원전 3733년에 건립된 것이니, 제왕의 제국이 수없이 명멸해도 인간이 제작한 위대한 유업은 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 별판 위에 인공 동굴을 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 500년에 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 사람들에게 의하여 계획, 건설되었다.

2.2 구조물의 4대 기본 개념

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 대사원이다. 기원전 1500년에 건립된 이 사원은 길이 360 m에 108 m의 폭을 차지하고 있으며, 거대한 석재슬래브로 된 지붕을 기둥과 보가 지지하고 있다. 중앙의 기둥들은 3.5 m의 직경에 20.7 m의 높이를 갖고 있다. 이 구조물은 여러 세기에 걸쳐 건립된 것이다.

현대 건축은 그리스의 영향을 많이 받았다. 기원전 460년 내지 400년 사이의 그리스의 유명한 지도

자 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 수메르(Sumer)로부터 내려오는 것을 전수받은 voussir 또는 true arch 기술로서 이 구조의 원리는 에스트루칸(Estrucan)의 corbelled arch와는 다르다. 로마시대에는 수메르(Sumer)인들이 세운 많은 벽돌 아치들이 존재하고 있었다고 믿어진다. 아직 존재하고 있는 로마 아치 중 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. 43.2 m의 직경을 갖은 석조 돔(dome)인 로마에 있는 파르테논은 서기 120년에 완공되었다.

의심할 여지없이 이집트인들은 어느 정도의 역학을 터득하고 있었다.

그리스사람들은 이것을 더 발전시켜 재료역학의 기초가 되는 정역학을 개발하였다. 아르키메데스(기원전 287~212년)는 지레의 평형조건을 설명하고 물체 중심의 결정법을 찾아냈다. 그는 이 이론을 여러 가지 중력 물체의 운반 기구 제작에 응용하였다.

로마인은 위대한 건설자들이다. 기념탑이나 사원 뿐 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 첨탑을 세웠을

때 구라파 기술자들로부터 많은 관심을 끌었다. 그러나 이집트인들은 이보다 수천년 전에 씨엔느(Syene)에서 다듬은 석재를 나일강으로 운반하면서 수많은 이런 첨탑을 건설하였다. 로마인들은 이 첨탑의 몇 개를 원위치에서 로마로 옮겨 세웠다. 16세기의 이태리 기술자는 그들의 조상들보다 이런 일에 훨씬 뒤져 있었던 것이다.

르네상스기간에 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 결실이고 수학의 낙원이라고 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 과학원(Academy of Sciences)이 세워졌고, 영국의 수학자 왈리스(Wallis) 및 그의 학우들의 모임에서 신 철학(new philosophy) 또는 실험 철학(experimental philosophy)란 이름을 쓰기 시작했다(1645년). 이때 비로소, 과학이 철학과 분리되기 시작한 것이다. 르네상스 이전 특히 13세기의 스페인에는 고딕형태의 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 못했었다.

페시아(Persia)의 왕들은 3500년경 전부터 강철을 인도로부터 구했고, 이 제조 기술은 2900년전 쯤 중앙 유럽으로, 2600년전 경 중국으로 전해졌다. 1667년, 키르커(Kircher)는 서기 65년에 중국에 건설된 지간 60 m의 철재 현수교에 대해 기술했는데, 20개의 철재 체인으로 된 이 현수교에 대해, 후에 나비에(Navier)를 비롯한 여러 사람이 기술하였다. 탁월한 유지 보수에 대한 의문이 생기는데, 중국은 훌륭한 락커(lacquer)도장을 할 수 있는 원료를 주는 식물들이 무성해서 금속 체인에 효과적인 보호를 하는 것이 불가능하지 않았다고 보고 있다.

현대 철강기술은 미국 핏츠버그(Pittsburgh) 토박이 윌리엄 켈리(William Kelly, 1811~88)가 개발했으나 혼자 연구를 하던 그는 결국 파산선고를 받고, 그의 업적은 영국의 헨리 벅세머(Henry Bessemer, 1813~98)가 되어 작위까지 받은 벅세머의 이름이 이 기술을 대표하고 있다(1856년). 구조용강의 발전과 이의 건물 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 제 5기본 개념

21세기를 눈앞에 둔 현재의 금속, 화학공학의 발달은 눈부신 발전을 거듭하여 각종 구조용 신소재의 등장과 함께 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 5기본 개념이라고 칭해 왔다.

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 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 두 가지 이상의 원료가 섞인 hybrid 상태로 사용될 수 있다. 한 극단의 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.

인류는 복합재료를 수천년 동안 사용해왔다. 진흙

에 짚을 썰어 흙담을 쌓았을 때 우리 조상들은 불연속 섬유보강 복합재료(discontinuous fiber reinforced composite)를 사용했던 것이다. 즉, 짚은 보강재이고 진흙은 모재였다. 첨단복합재료(advanced composite)의 사용은 1964년 저렴한 가격으로 탄소 섬유가 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.

- 1) 임의 방향으로의 보강 가능성.
- 2) 스티프너 등과 같은 기하학적 보강 없이 구조 부재를 보강할 수 있는 가능성.
- 3) 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.

- 1) 이론이 일반 설계 기술자에게는 너무나 어렵다. 설계 사무소나 현장의 건설 기술자들은, 대개 학부 수준의 이론적 배경을 갖고 있다.
- 2) 건설 기술자를 위한 포괄적인 교과서/참고서가 없다. 주된 이유는 항공우주분야 등 신소재 구조 기술자와 건설 기술자는 서로 다른 언어를 사용하고 있는데 있다.
- 3) 고급 복합재료의 가격이 높다는 편견이 있다.

최신 복합재료의 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 Engineering이란 511쪽의 책을 완성, 영국에서 출판하였다.¹⁾

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 이름 부친 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 육교(overpass)를 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*, 7, 8 (1993)), 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 작았다.

2.4 역사의 필연성

필자는 약 10여년 전부터 복합재료를 21세기의 건설재료라고 홀로 떠들어 왔다. 그러나 1996년은 드디어 새로운 역사의 흐름을 확인할 수 있는 해였다. 1996년 11월 미국 토목학회 년차 총회에서 재료 학술대회(Materials Congress)가 열렸는데 이 모임의 명칭이 새로운 천년을 위한 재료(Materials for the New Millennium)이었다.⁷ 누가 뭐라던 지구는 돌고 있는 것이다.

역사는 변하는 것이 필연이다. 구조 개념은 인류 역사의 필연성에 의해서 변해 왔다. 지금까지의 구

구조물 4대 기본 개념은 그 당시 사용 가능한 소재와 응용 가능한 이론에 의해서 개발되어 왔다. 제 4구조 개념을 위한 강철은 100여년 전부터 사용되어 왔다. 지금은 거의 매일 새로운 것이 발표되고 2주일 전의 지식은 고물이 되는 시대이다. 필자가 인류 문화상의 제 5구조물 기본개념이라고 부르는 복합재료(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 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.

3. 1995년까지의 건설에 대한 복합재료 사용

재료산업의 장래는 건설산업에서 쓰이던 재래의 재료들이 첨단 복합재료로 대체될 때 설정된다. 건설에서의 재료는 kg이 아니고 ton으로 사용된다.

인류가 만든 복합재료는 수 천년동안 사용되어 왔지만, 복합재료의 고차원 기술은, 1964년 영국 왕립 우주항공국(Royal Aircraft Establishment)에서 충분히 높은 인장강도와 강성을 가진 탄소섬유를 생산하면서부터 시작하여 우주 항공산업에서 사용되기 시작했다. 건설에 대한 응용은 지금 진행중이다.

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 고정되

어 있다고 가정한다면(실제는 이런 가격 등이 나날이 낮아지고 있지만) 가격구조는 좋은 설계방법으로 낮아질 수 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 689.7 MPa의 극한강도를 갖고 있다.

3.1 유지 보수 및 재생을 위한 복합재료

스위스 연방연구소는 교량건설에 대한 복합재료의 장래이용에 관한 연구를 해왔다. 여러 보고서 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.

1987년의 보고서에 의하면 미국 내의 교량 560,000개중 약 60%가 구조적 결함 또는 기능상으로 낡은 것으로(structurally defective or functionally obsolete) 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 820억불로서 G.N.P의 약 4.9%에 해당되며, 이런 손실방지를 위해 기존의 기술이 활용되었다면 약 320억불은 절약될 수 있었다고 되어 있다.

미국에서의 1987년 보고서에 의하면 교통지연만 해도, 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.

섬유 복합재료는 새로운 건설 시설물을 위한 재료로서 뿐 아니라, 건물이나 사회 간접시설의 보수 및 유지를 위해서도 지극히 중요한 재료이다. 미국만의 사회 간접시설의 낡은 구조물 대체 사업비가 향후 20년간 3내지 4조달러로 추산되고 있다. 우리나라의 교량, 상하수도 등 사회 간접시설 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 참고문헌에^{8,50} 비교적 자세히 설명되어 있다.

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

입자형 복합재료에서는 한 가지 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 concrete이다.

폴리머 포화 콘크리트(PIC)는 양생된 일반 철근 콘크리트의 공극을 모노머로 포화시킨 다음 폴리머 화 되게 하여 이루어진, 개선된 품질을 가진 폴리머-콘크리트 연합체를 말한다.

자주 사용되는 모노머는 methyl methacrylate (MMA)와 styrene(S)이다. Acrylonitrile과 epoxy도 쓰인다.

Poly(methyl methacrylate) (PMMA)의 사용은 강도와 취성(brittleness)을 증가시킨다. Butylacrylate(BA)나 styrene(S)의 첨가는 연성을 증가시킨다. 50%의 MMA와 BA의 사용은 건축재료에 적합한 연성과 강도를 증가시킨다. Benzoyl peroxide(BPO)와 azobisisobutyronitrile(AIBN)는 기폭제로 사용될 수 있다. Dimethylaniline(DMA)은 증진제(promoter)의 한 종류이다. 열안정성의 증가를 위해서는 trimethylpropane trimethacrylate(TMPTMA)와 같은 가교제(cross linking agent)나 polyester-styrene과 같은 열경화성 모노머가 사용될 수 있다.

폴리머 포화 콘크리트는 1960년대부터 개발되어 왔으며, 댐, 핵발전소, 고속도로와 해양구조물 등에서 그 적용례를 찾을 수 있다. 최근에 염분과 결빙에 의한 콘크리트 구조물의 부식이 심각하다고 보고 되었으며, PIC가 더 많은 관심을 끌기 시작했다. 표면 보호와 콘크리트 구조 부재의 형틀판으로 얇은 PIC 프리캐스트 판넬을 사용함으로써, 품질 향상과 대량생산을 가능케 하여 제작비 감소의 효과를 얻을 수 있다. PIC의 품질은 주로 포화율과 포화 깊이에 따라 달라진다. 포화율과 포화 깊이의 증가는 비용

을 증가시키므로, 향상된 품질과 비용과 같은 모든 요소를 고려한 판단이 필요하다.

PIC는 처리되지 않은 콘크리트와 비교할 때 역학적 성질이 크게 개선된다. 일반적으로, 압축강도 17,000-28,000 psi(117-193 MPa), 휨강도 2,560-4,270 psi(17.6-29 MPa)와 6.4×10^6 psi(44 GPa)의 영계수가 얻어진다. 포와송비는 0.18-0.20이다. 압축강도가 39,800 psi(275 MPa)까지 얻어질 수 있다고 보고되었다. 일반적으로 콘크리트는 탄성적으로 거동하다 파괴되며, 크리프는 현저히 감소하여 무시될 수 있게 된다. PIC의 두드러진 성질 중의 하나는 결빙-해빙 작용에 대한 저항성이다. 결빙-해빙 1,000 회 후에 일반 콘크리트의 영계수는 약 30% 감소되나, PIC는 초기 값을 유지한다. 마모 손실은 일반 콘크리트의 약 1/3이며, 내화화성 및 내풍화성이 우수하다. 3,000시간 동안 자외선에 노출된 후에도 강도의 감소가 없다. 피로 특성은 일반 콘크리트와 비슷하고 같은 비율에 대해 높은 강도를 유지한다. PIC는 보수와 재건 및 내부식용으로 적합한 좋은 재료이며, 제작에 관한 연구는 진행 중이다.

Polymer cement concrete(PCC) 또는 polymer modified concrete(PMC)는 보통 포틀랜드 시멘트와 폴리머로 구성된 혼합물체를 함유하고 있다. 그러나 폴리머 포화 콘크리트와 다르게, 모노머와 폴리머는 직접적으로 표준 시멘트 콘크리트 혼합체에 가해지게 된다. 표준 포틀랜드 시멘트 콘크리트가 혼합된 후, 모노머나 폴리머 유액(폴리머가 물에 유화된 것)을 혼합체에 첨가하며, 총혼합물을 형틀 안에 타설하고 양생한다.

폴리머 시멘트 콘크리트에 쓰이는 폴리머 혼화재는 다양하다. Styrene-butadiene rubber(SBR) 유액과, ethylene vinylacetate(EVA)과 polyacrylic acid ester(PAE) 유액과 같은 폴리머 분산체가 널리 쓰이고 있다.

워커빌리티나 보통 모르타르와의 결합응력을 증가시키기 위해, EVA 등과 같은 분말로 된 물질이나, methyl cellulose(MC), poly(vinyl alcohol) 등과 같은 수용성 폴리머가 널리 쓰이고 있다. 에폭시 수지는 유럽과 미국에서 많이 쓰였으나, 좋은 강도를 얻기 위해서는 폴리머 시멘트의 비율이 30% 이상 되어야 하는 까닭에 성능 대 가격의 불균형이 나타난다. Poly(methyl methacrylate) (PMMA), polyesterstyrene 및 poly(vinylidene chloride) 등도 사용되어 왔다.

보통 시멘트 콘크리트에 polymer latex 재료를 첨가하면 역학적 특성이 현저하게 증가한다. 보통 콘크리트 믹스에 추가된 1%의 PMMA는 압축강도를 두배 증가시킨다. Vinylidene chloride latex의 사용에 의해, 보통 콘크리트의 접착응력은 5배까지 증가한다.

일반적인 보통 시멘트 콘크리트와는 다르게, 폴리머 시멘트 콘크리트 혼합 설계에는 반드시 압축, 인장, 휨강도, 연성, 접착응력, 방수성, 화학적 저항특성 등의 모든 관련 인자들을 고려하여야 한다. 물-시멘트비보다는 폴리머-시멘트비에 의존하는 그러한 특성 때문에, 폴리머-시멘트비는 실제 실험에 의해 구해지는 모든 사항에 따라 결정되어야 한다.

폴리머 시멘트 콘크리트(또는 모르타르)는 이미 일반적인 건설구조용 재료로 사용되어져 왔다. 열화된 교량이나, 도로의 보수나 재포장에 폴리머 시멘트 콘크리트가 광범위하게 사용된다. PCC는 결빙 및 해빙, 결빙방지용 소금(deicing salts)의 침투 및 마모에 대한 탁월한 저항성을 갖고 있다. 기존 콘크리트에 대한 우수한 접착응력 때문에, 폴리머 시멘트 콘크리트는 일반적인 철근 콘크리트 구조물의 수리를 위한 탁월한 재료이다.

최근, 몇 가지 초속경(超速硬) 폴리머 콘크리트들이 개발되어 왔다. 그중 하나는 보통 포틀랜드 시멘트와 상온에서, magnesium acrylate와 같이, 즉시 폴리머화하는 모노머의 혼합물을 사용한다. 이것은 양생시간이 1초 이내이기 때문에 shotcrete로 사용된다.

Macro-defect free(MDF) 시멘트는 1981년부터 발달되어 왔다. Poly(vinyl alcohol)과 poly(acrylamide)와 같은 수용성 폴리머가 폴리머-시멘트비 2~8%로 사용된다. 이 복합재료는, 14,000 psi(98 MPa) 이상의 휨강도를 가지나, 불리한 hygrothermal 효과의 영향을 받는다. 이러한 문제의 해결을 위해 철저한 연구가 진행 중이다.

Polyacrylate salt와 같은 흡수성 폴리머를 사용한 고강도 콘크리트가 1989년에 보고되었다. 이러한 콘크리트의 여러 가지 프리캐스트 콘크리트 제품이 injection molding이나, compression molding에 의해 제작할 수 있음을 주시해야 한다. 폴리머 시멘트 콘크리트의 장점은 보통 포틀랜드 시멘트 콘크리트에 사용된 기술이 아무런 어려움 없이 사용될 수 있다는 것이다. Micro-silica를 포함하고 있다는 뜻인 MSC 및 작은 입자를 밀도 높게 다졌다는 뜻

인 DSP 콘크리트 등에 대한 특별한 주목이 요구된다. DSP 콘크리트는 표준 콘크리트의 10배까지의 높은 압축강도를 가질 수 있다.

가끔 resin concrete라고도 불리는 폴리머콘크리트(PC)는 모노머와 골재 혼합물의 폴리머화로 형성된 복합재료이다. 선택된 폴리머 모제는 포틀랜드 시멘트 또는 다른 일반적인 콘크리트 바인더를 완전히 대체한다.

기술자는 어떤 경우라도 보통 포틀랜드 시멘트 콘크리트처럼 배합 설계와 시편의 시험을 할 수 있어야 한다. 강철, 유리, 그리고 pitch based 탄소섬유와 같은 단섬유들은 폴리머 콘크리트 보강에 사용된다. 폴리머 콘크리트가 구조부재에 사용될 때, 보통 콘크리트 보강용 강봉, PC 콘크리트용 강선 및 강봉 또한 composite 봉 등이 보강재로 사용된다.

최근 지진 때문에, 미국 육군 공병단과 캘리포니아주 도로국(Caltrans)에 의해 기둥보강에 대한 많은 연구가 이루어졌다.

어떤 사람들은 자신이 지진으로부터 안전하다고 생각한다. 그러나 지진은 어느 곳에서나 발생할 수 있다. 지진 중 어떤 것은 사람들이 거의 느낄 수 없는가 하면, 또 어떤 것은 재앙으로 다가온다. 1906년 4월 18일 수요일 05시 12분 San Andreas Fault는 시속 2,000마일의 속도로 San Francisco의 심장부에 일격을 가했는데, 이때 가해진 에너지는 2차 대전중에 사용된 모든 폭발물보다 더 컸다. 이 지진은 단 65초 동안 계속 되었는데, 이 Fault선 가까이 있는 거의 모든 인간이 만든 구조물들을 파괴하였다. 가스관과 전선들이 절단되고 이 시의 대부분에 화재를 일으켰다. 490개 블록에 있는 28,000여 건물들이 소각되어 버렸다.

기술자들이 고려하는 것은 이러한 사태가 세계의 어느 곳에서, 어느 순간에나 일어날 수 있다는데 있다. 아름다운 뉴욕주도 예외는 아니다. 1734년부터 1984년까지, 383번의 지진이 일어났던 것으로 기록되어 있다. 토목 기술자들은 이런 재앙의 영향을 최소화하기 위해서 계속 준비하고 대비하여 왔다.

강철 쉘 재킷은 이미 소개되었고, 탄소섬유 RP 재킷과 유리섬유 RP 재킷도 최근 나오고 있다. 대부분의 경우, 그 재킷들은 수리를 위한 구조부재의 기둥을 둘러싸게 하고, 폴리머 콘크리트로 그 재킷 밑에서부터 위로 그라우팅한다. 1993년, 미국 전역에 걸쳐 100개 이상의 기둥이 FYFE 시스템으로 고속도로에 성공적으로 설치되었다. 고속도로 구조

물에 추가해서 여러 물탱크와 주차 건물이 이 시스템으로 보수되었다.

남부 캘리포니아에 있는 한 회사에서 개발된 자동화된 winder는 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 jacketing은 기둥 1개당 3~4일정도 걸린다.⁸ 복합재료(카본, 유리 및 기타) 재킷 보강된 기둥에 대한 실험은 캘리포니아주, 네바다주, 오키오주 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 피해는, PIC, PMC(PCC), PC, 또는 필요하다면 복합재료 재킷이나 테이프와 함께 그 밖의 입자형 복합재료로 보수될 수 있다.

교량 슬래브와 보의 보수를 위한 섬유판(탄소, 유리, 아라미드)의 사용은 여러 지역에서 수행되어 오고 있다. 1994년 3월, 한 회사는 100회 이상의 현장 시도로 좋은 성과를 이루었다고 주장하였다. Delaware주의 여러 개의 교량이 프리캐스트, 프리스트레스 보에 횡방향 보강을 하지 않음으로써 야기된 바닥에 종방향 균열이 생겼는데 이러한 것은 바닥의 횡방향에 탄소섬유를 접착함으로써 수리되었다. 부식과 강재 프리스트레스 부재의 신장과 공간에 스며드는 수분의 동결융해작용이 균열을 발생시켰다. 과거에는 만일 이러한 상태가 어느 점에 도달하면 교량은 보수되지 않고 교체되었다.

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 판보다 현저하게 가볍다. 복합재료를 사용하면으로써, 기존 교량구조물의 상판 총하중은 반이하로 절감될 수 있으며, 이러한 무게의 감소는 같은 거더, 기둥 또는 교각에 활하중의 증가와 추가차선을 가능케 하며, 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 복합재료 패널로 대체하고, 필요하다면 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, NDT와 NDE를 요구한다. 손상에 대한 평가는 간단하지만 정확한 해석 방법을 필요로 하며 적절한 치수효과가 연구되어야 한다. 시편으로 시험하여 얻은 재료의 강도는 현장의 강도보다 크게 나온다.

3.2 생명선(Lifeline)에 대한 복합재료 응용

어느 미국회사는 1949년부터 섬유 보강된 관(pipe)을 6,000,000 m나 생산해 왔다(1990년). 어느 유럽회사는 같은 종류의 파이프를 27여 년간 생산하고 있다. 이러한 관들은 다른 여러 가지 장점 이외에 경량이고 부식이 안 생기고 설치가 용이하여, 가격만 맞는다면 상하수도 계통, 담수화 공장, 화학공장의 배관, 장거리 송유관 등에 대한 응용이 폭발적으로 늘어날 것으로 예상된다.

1993년, 복합재료는 미국 파이프라인 시장의 50%와 지하저유탱크시장의 90%를 차지하고 있다. 가격에 대해 고찰할 때, 복합재료에 관한 국제 간행물에 의하면, 60 cm보다 작은 직경의 파이프는 금속이나 기타 플라스틱 제품이 강적이고 이보다 크고 150 cm 미만인 경우는 금속과 복합재료가 막상막하고, 150 cm 이상에서는 복합재료에 대항할 재료가 없는 것으로 되어 있다. 그러나 필자의 경험에 의하면 25 cm 미만의 고압 파이프의 경우, 복합재료 제품이 단연 저렴하고 만약 장거리 관로(line-pipe)에서 수송비를 고려하면 단연 압도적으로 유리하게 나타났다. 직경 15 m가 되는 복합재료 관이 생산된 예도 여럿이 있다. 미국 유타주의 발전소에 있는 205 m 높이의 철근 콘크리트 굴뚝은 복합재료 내부 안감(liner)을 갖고 있다. 직경은 8.4 m이다.

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 항만시설 등 생명선(lifeline)의 주·부구조재의 신규 공사 및 유지 보수를 위한 복합재료의 응용은 참고문헌에⁸ 자세히 설명되었다.

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 등과 다른 여러 회사에서 유전 지대의 각종 배관, 주유소 시설, 화학공장 시설물, 180 m 길이의 대형 부교(barge)구조, 6×6×12 m의 굴뚝, 양어장, 각종 가스 저장탱크, 15m 직경의 잠수함, 항공기 동체 등을 제작하여 왔다.

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

3.3 교량 및 건물에 대한 응용

교량건설에 대한 복합재료의 응용은 비록 느린 속도가긴 하지만 이미 시작되었다. 독일의 뒤셀도르프(Dusseldorf)시는 세계에서 최초로 복합재료 보강봉을 이용한 콘크리트 도로교가 건설되어 있다. 1986년에 개통된 16 m폭의 47 m 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 33 m 스패까지 퍼질 수 있으며 비지된 스패중앙에서 70 톤 하중을 지지하는 것으로 알려져 있다.

길이 113 m인 횡단 육교가 스코틀랜드의 아버펠디(Aberfeldy)에 세워졌다.²⁸ 이 교량은 유리섬유 보강 복합재료로 구성되었으며, 40개의 평행한 케이블라 케이블에 의해 지지된다. 상판 구조는 유리섬유 보강 복합재료로 구성되었으며, 높이 17.5 m의 유리섬유 보강 복합재료 탑(tower)에 매달려 있다. 250 톤의 유리섬유 보강 복합재료 부재가 이 교량에 사용되었다. 1994년 현재, 총 9개의 유리섬유 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. 한 캘리포니아 대학교와 같은 대학을 포함하는 여러

개의 기관들은 복합재료 교량을 연구해 왔다. 최근 록히드 마틴사(Lockheed Martin Missiles Space)의 연구개발부는 저가의 폴리머 매트릭스 복합재료 고속도로의 교량을 보고하였다.⁸ 시범용 복합재료 교량의 치수(길이 9 m 폭 5.4 m)는 교량의 폴-사이즈(18m)의 1/4부분을 나타낸다. 하중은 AASHTO HS20-44 Truck이고, 강도 기준은 물성값에 4의 안전계수를 고려한 최초 겹(ply) 파괴 범주의 최대응력이 사용되었다. 교량은 전부 표준 유리섬유(E-glass) 보강 폴리에스테르와 비닐에스테르 폴리머 복합재료로 만들어졌으며, 짧은 시간범주(시간 120-feet(36 m)이하)에 주안하여 만들었다. 설계 개념은 multi-cell box와 orthotropic beam system이다. 각각의 구성 요소의 무게는 1,590 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 축하중은 51.36톤인데, 이때의 응력은 설계허용응력의 20%보다 작았다. 그것은 교량을 효과적인 비용으로 지을 수 있는 것을 증명한다(2,178 dollars/m²). 재료값은 사용이 증가할수록 지속적으로 떨어지는 것이 예상되며, 이 비용은 더욱더 떨어질 것이다.

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

3.4 건설 전반에 대한 응용

여러 나라에서 여러 가지 복합재료로 된 얇은 판(sheet)이 돔이나 내벽, 지붕 등으로 사용되고 있다. 복합재료로 된 콘크리트 형틀은 이미 오래 전부터 사용되고 있다. 선박, 컨테이너 등 여러 가지 수송수단이 복합재료로 되어 있다.

플라스틱 제 말뚝은 이미 여러 나라에서 사용중이다. 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(1987년). 이 필라멘트는 높은 내부 마찰 각과 점착력(cohesion)을 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, 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.

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 3~10배가되는데, 구조물의 전체 수명을 고려하면, 콤포지트 봉이나 케이블이 경제적이 된다는 것이었다. 가격을 더 낮추려면 제5 기본개념에 의한 구조설계가 요구되는 것이다. 주 보강재료 장섬유의 사용을 위한 제작 방법의 연구는 필자에 의해 추진되고 있다.

복합재료를 주 구조재로 사용할 경우의 가격 문제는, 이미 단기적으로도 유리하지만 장기적인 관점에서 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 중장비 사용법도 달라진다. 10% 정도의 상부구조는 하부구조 가격을 저하시킨다. 대체로 하부구조 공사비가 총 공사비의 50% 정도임을 상기하여야 한다. 지진이나 폭발물 또는 기타 충격시 동적하중은 1/10으로 감소되고 충격흡수 능력이 크다.

복합재료 구조의 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. 건설분야 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)는 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 복합재료 구조 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 고등연구 계획청(Advanced Research Products Administration-ARPA : 전의 DARPA. 우리 국방과학연구소와 유사한 조직이었으나 에너지성도 참여하게 되어 ARPA로 개칭하였다가 최근 다시 DARPA로 개칭)장 덴만(Denman)박사가 미 하원 군사소위원회 청문회에서 보고한 내용에는 투자전략, 우선순위, 개발계획 등이 포함되어 있는데, 네 가지 투자 전략중 건설과 관련된 것은 사회 간접시설과, 겸용기술의 활용이란 두 가지이다. 다섯 가지 우선순

위 가운데 하나는 겸용기술 개발에 대한 국방비 재투자가 포함되어 있다. 개발계획은 핵심기술, 사회 간접 시설, 군사응용 등 세 가지로 되어 있는데, 첫 번째 핵심기술은 다시 세 가지로 재료를 포함하고 있다.

우선순위 5가지 중 하나인, 겸용기술 개발에 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 DARPA에 의해서 개발되고 관리된다. 이 DARPA 사업은 국방관련기업체(납품업체, 제조업체, 시스템 개발업체), 건설관련 업체, 및 연구기관(대학 등)의 조합(Consortium)들에게 주어진다.

클린턴 대통령은 DARPA의 연방 TRP사업으로서 41개 프로젝트를 선정했다고 발표했다(1993. 10. 22). 총 1억 7천만불에 달하는 이 1차년도 예산은 집행중이던 1994년 TRP예산 4억 7천 2백만불의 일부로서, 이것은 대통령의 5개년 국방재투자 및 기술전환사업(Defense Reinvestment Conversion Initiative) 200억불 계획중의 최초집행분이 된다. 이 41개 TRP사업의 하나가 샌디애고 캘리포니아 대학교(UCSD)부근, I-5 고속도로에 놓여질 세계 최초의 내진성이 강한 100% 복합재료 차량용 사장교이다. 연구개발, 설계, 시공은 UCSD주관 하에, DARPA, 캘리포니아 주정부, 각종 기업체 등 12개 조직이 참여하는데, 1단계 사업비의 50%인 1천 35만불은 DARPA에서 지출하고 록히드, 두폰 등 기업체가 50%를 출자한다. 즉 TRP는 정부 및 기업체 공동출자의 개념인 것이다. 3단계로 이루어진 사업의 총비용은 5천 5백만불로 예상하고 있는데, 폭 18m에 길이 135m의 이 교량이 완공되면, 10년후에 연간 1,000억불의 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% 신소재 사장교의 건설로서, 최종 건설은, 밤사이 몇 시간 내에 가설할 계획이다. 클린턴 대통령은 이 사업비 지급을 발표하면서 이것은 엄청난 가능성을 가진 매우, 매우 인상깊은 아이디어이다라고 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 헤게미어(Hegemier)교수에 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 고속도로 가에서 건조되어 교통량이 적은 하루 저녁에 들어서 설치될 수 있는 것이다. 첨단 군사 기술을 민간용으로 변환시키는 이 시범사업은 21세기에 토목 기술자를 위한 전혀 새로운 산업을 열어주게 될 것이다.

4. 1998년 현재 건설에서의 복합재료

4.1 보수 및 재생

이 제목의 1996년 현재의 상황은 참고문헌에¹³ 자세히 설명되었으므로 여기에서는 반복하지 않는다.

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

- 1) Wet Wrap, Fabrics and Towsheets
CMI, Hexcel Fyfe, Mitsui, Mitsubishi, Quake Wrap, Tonen 등이 이 방법을 사용한다.
- 2) Wet Wrap, Tows

Obayashi 회사만이 이 방법을 사용한다.

- 3) Towpreg Wrap
Xxsys 회사만이 이 방법을 사용한다.
- 4) Precured Shells
DuPont Hardcore와 CMI가 이 방법을 사용한다.
- 5) Precured Tapes
Sika/Stesalit가 이 방법을 제공한다.

1960년대부터 휨과 전단 보강에 대한 전통적인 보강방법은 강판을 실패 해가는 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 받게 되는 총 무게가 크게 감소된다. 이런 요소들은 또 현장에서 다른 활동들의 방해로 크게 감소시킨다. 많은 경우에 접착된 복합재료 보강은 강판보다 저렴하게 될 뿐더러 성능도 더욱 좋다. 1997년 현재 전세계에서 1500여 콘크리트 구조물이 접착된 복합재료로 보강되었다.

최근에 미국 서 버지니아(West Virginia)주의 두 곳의 교량 상판을 유리/비닐에스테르 재료의 복합재료로 제작하여 재생시켰는데 이 FRP 상판은 50년 교량 수명기간 중 유지보수의 필요성을 감소시키고, 철근콘크리트 상판 무게의 20%로, 6배의 하중능력을 제공할 것으로 기대되고 있다(그림 4).

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

4.2 콘크리트 형틀을 위한 유리섬유 보강 고분자 복합재료

유리섬유 콘크리트 구조용 형틀의 장점은 다음과 같다.

- 1) 강철이나, 목재 등으로 된 형틀과는 비교가 안 되는 극히 매끄러운 고밀도 콘크리트 마감을 얻을 수 있게 한다.

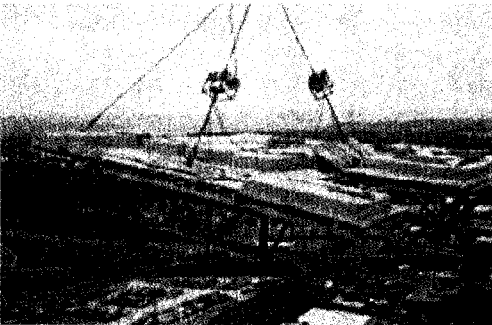
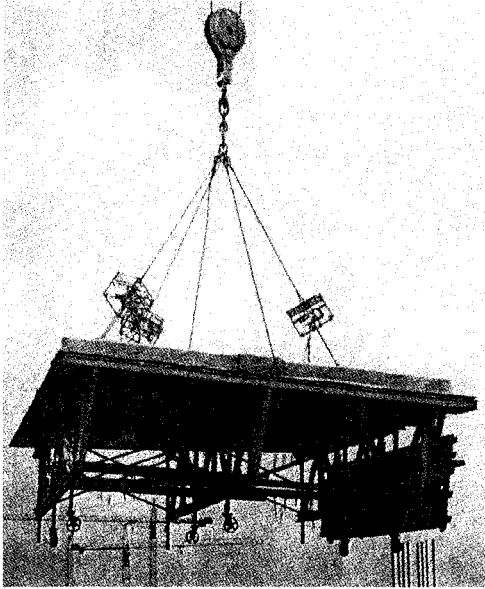


그림 1. 경량으로 인하여, 1개층을 동시에 콘크리트 타설할 수 있게 하는 복합재료 형태.

- 2) 융통성과 주조가능성(moldability) 때문에 유리섬유 형태는, 완공된 콘크리트 양을 헤칠 수 있는 이음새와 중첩 연결부의 수를 감소시킨다.
- 3) 유리섬유 보강 고분자 (plastic) 복합재료의 주조가능성은 완공된 표면에 불필요한 불연속성이 없는 복잡한 형태의 제작을 가능케 한다.
- 4) 재료의 경량성 때문에 복합재료 형태는 중장비 사용을 크게 감소시키면서, 상당한 노동력 절약과 빠른 건설을 가능케 한다.
- 5) 이 경량성은, 또, 쉽게 다루어질 수 있고, 경화된 콘크리트에서 빠르게 떼어질 수 있는, 큰, 한덩어리의 형태를 사용을 가능케 한다(그림 1).
- 6) 복합재료 형태는 압축 개스(gas)의 폭발로 콘크리트로부터 깨끗하게 분리된다.

4.3 복합재료 교량

100% 유리섬유 복합재료로 된 차량용 도로교가 1997년 11월에 미국 캔사스(Kansas)주에 건설되었다. 이 빠른, 저가의 대체 시스템은 전세계의 실패된(failed) 교량과 암거(culvert)의 한 좋은 해결방법이 된다. 이 7.7 m 지간에 9 m 폭을 가진 교량은, 경량크레인을 사용하여 공장제작된 단면들로 약 10 시간에 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. 캔사스주의 한 군에서만 지난 5년간 200개의 암거가 물에 쓸려 내려간 것으로 알려져 있다. 이 교량은 섬유보강 플라스틱 벌집모양(honeycomb)의 샌드위치 체계로 되어 있는데, 폭은 3미터 여서, 교량거더 크기에 따라 적당한 수의 판을 차례대로 옆으로 배치할 수 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 도로교상판의 40%는 1990년대에 35년 될 것으로 나타나 있다. 건설용 소금을 사용할 경우, 재래식의 교량상판 수명은 10년뿐이다. 복합재료 상판은 이러한 도전을 해결할 수 있다. 연구된 상판의 길이는 4.57 m, 폭은 2.3 m였는데, 실험결과 복합재료 상판은, 콘크리트제보다 크게 높은 하중을 견디면서, 하중은 보통 5,670 kg이라는 콘크리트제의 1/4이었다.

다른 캘리포니아 대학교(CSULB)는 1980년대부터, 복합재료 기술의 교량 설계 및 건설로의 이전을 위한 일련의 연구를 해왔다. 여러 가지 복합재료 구조요소들을 연구한 결과 상판과 케이블이 복합재료 사용을 위한 가장 적절한 교량 요소라고 결론지었다. 연구된 교량요소들은 그림 2와 같다.

록히드 마틴(Lockeed Martin)사가 국방예산의 감소로 인해, 우주항공기술의 2중사용(dual-use)시장을 찾기 시작해서, 교량을 이 목적으로 선택했는데, 이 분야는 새 건설(단-경간)과 재생(교량상판) 두가지 다에 큰 시장을 제공할 것으로 판단했다. 설계조건은 미주 도로 및 수송기술자 협회(AASHTO) 시방서 18 m 지간 단순 지지된 교량의 경우대로 있는데 일련의 실험결과 교량은 AASHTO HS20-44 시방서에 의한 능력 32,400 kg을 훨씬넘는 50,850 kg

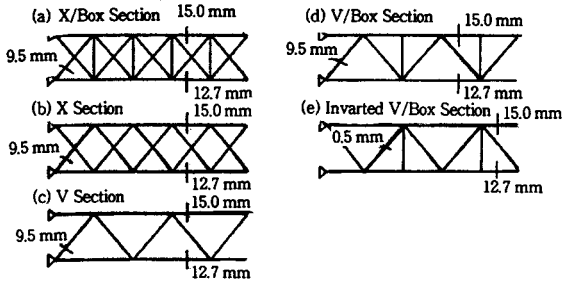


그림 2. 하중전달에 적합하다고 판단되어 연구한 교량 상판 단면들.

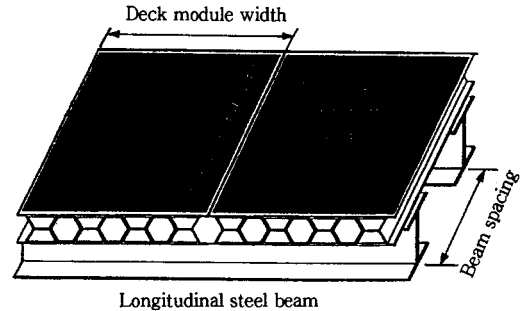


그림 4. 웨스트 버지니아 대학교에서 연구한 교량 상판.

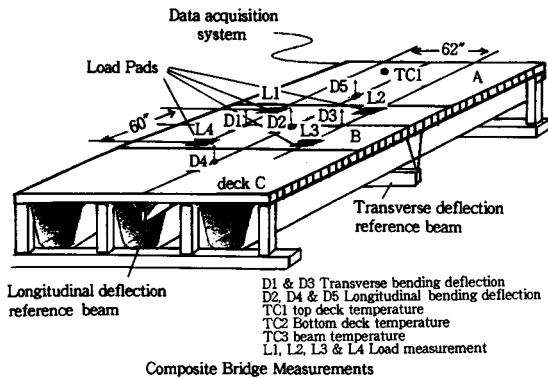


그림 3. 록키드 마틴에서 연구한 교량 단면.

이었고 총 가격은 목표액 200/0.09 m²보다 낮았다 (그림 3).

웨스트 버지니아 대학교에서 연구한 교량 상판은 그림 4와 같으며 종방향 거더 위에 놓여있다.

1997년 6월에 Hardcore는 펜실베이니아에 있는 20 m 지간에 4.5 m 폭의 복합재료 상판으로 교량을 재생했는데, 공장 제작된 40톤 하중을 견딜 수 있는 복합재료 상판으로 한 시간만에 가설하였다.

4.4 콘크리트 보강을 위한 복합재료

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

- 1) 프리스트레싱 응용을 위한 FRP 복합재료의 시범.
- 2) 콘크리트 교량상판을 위한 FRP 복합재료 보강봉(rebar)의 시범.
- 3) 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 개념의 개발

을 위한 목적을 가진 연구 프로젝트가 로렌스 기술 대학교 (Lawrence Technology University)에 의해 진행되었다. 연구내용은 2중 T보(DT-double T girders), 상판과 DT와의 연결 등 여러 가지이고 유리섬유 복합재료(GFRP), 탄소섬유 복합재료(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 심도깊은 연구를 수행하였다. 교량 및 여러 형태의 보에 대한 GFRP, CFRP, 아라미드 보강 플라스틱(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.

4.5 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-Corning Fiberglass Corp.)가 1964년에 22,710 L 탱크를 일리노이주에 있는 한 주요소에 묻었는데, 1990여름, 주도로 팽창 프로젝트 때문에 캐내어야만 했다. 그런데 이 탱크는 좋은 상태에 있고 압밀 시험을 통과했으므로, 다른 주유소에 매설되었다. 1960년 이후, 300,000개 이상의 폴리에스테르 탱크가 미국 전역의 주유소에 설치되었다.

현재 15억불의 미국 하수체계 산업이 재래의 주철 및 콘크리트 파이프로 지배되고 있다. FRP 파이프는 더 긴 수명과 낮은 보수필요성을 갖고 무게는 경량이다(약 1/5).

5. 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 본론에서 비교적 상세히 설명되어 있다. 이러한 장점을 갖는 재료가 최대로 활용되기 위해서는 각 분야의 공학자들이 서로 다른 전공분야에 대한 이해를 증진시키고 상호 협조하는 분위기가 생활화되어야 한다. 지금의 과학 기술은 너무 세분화되어 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, 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 유지 보수비가 3내지 4조불로 계정되어 있다.

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

참 고 문 헌

1. D. H. Kim, E & FN SPON, Chapman & Hall, London (1995).
2. 김덕현, 대한토목학회지, 21(2), 38 (1973).
3. 김덕현, 강원대학교 산업기술연구소 논문집, 제7집, 춘천 (1987).

4. 김덕현, 대한토목학회 제36회 정기총회 특별강연, 서울 (1988).
5. 김덕현, 한국도로공사 초청강의, 서울 (1989).
6. 김덕현, 한국전산구조공학회 1991년도 가을 학술 발표회 특별강연, p. 5 (1991).
7. K. P. Chong, Proc. of the Fourth Materials Engineering Conference, ASCE, Washington D. C., November 10-14 (1996).
8. D. H. Kim, The Third International Symposium on TEXTILE Composites in Building Construction, Seoul, Korea, November 7-9 (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, 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, 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, Advanced Composites 93, Australia (1993).
23. D. H. Kim, The First Wilson Forum on Existing and Potential Applications of Composite Materials in the Infrastructure, San Francisco (1993).
24. D. H. Kim, Proc. of Advances in Materials and Processing Technology-93 (AMPT-93), Dublin, Ireland (1993).
25. D. H. Kim, 3rd Japan International SAMPE Symposium and Exhibition, December (1993).
26. 김덕현, 汎武 71號, 1993.
27. 김덕현, 대한토목학회지, 41, 5 (1993).
28. D. H. Kim, The Second Annual Wilson Forum: Existing & Potential Applications of Composite Materials in the Infrastructure, Santa Ana, California (1994).
29. 김덕현, 생산기술, 6(6) (1995).

30. D. H. Kim, *The Third Asian-Pacific Conference on Computational Mechanics*, Sheraton Hotel, Seoul, Korea, September 16-18 (1996).
31. D. H. Kim, *American Society of Civil Engineers*, Washington, DC, November 10-14 (1996).
32. D. H. Kim, *The Wilson Forum on Existing & Potential Application of Composite Materials in the Infrastructure*, Alexandria VA, October 28~29 (1996).
33. 김덕현, 서울大學校 應用力學硏究會 (1966).
34. D. H. Kim, *16th Congress of Applied Mechanics*, Tokyo, Japan (1966).
35. D. H. Kim, *International Symposium on Space Technology and Sciences*, Tokyo, Japan (1967).
36. D. H. Kim, Seminar Lecture, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1992.
37. D. H. Kim, *3rd Japan International SAMPE Symposium and Exhibition*, 1993.
38. D. H. Kim, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 55, p. 242, Elsevier, London (1995).
39. D. H. Kim, *Proc. of Korea-Japan Joint Seminar on Structural Optimization*, Seoul, Korea (1992).
40. D. H. Kim, *Proc. of Advances in Materials and Processing Technology-93(AMPT-93)*, Dublin, Ireland (1993).
41. D. H. Kim, *3rd Pacific Rim Forum on Advanced Composites*, Honolulu (1993).
42. S. W. Tsai, Think Composites, Dayton, OH. (1988).
43. K. P. Chong and D. H. Kim, *International Union of Theoretical and Applied Mechanics Symposium on Size-Scale Effects in the Failure Mechanisms of Materials and Structures*, Torino, Italy (1994).
44. 김덕현, 한국복합재료학회, 1994.
45. D. H. Kim, *Proc. of International Symposium on Public Infrastructure Systems Research*, Seoul Korea (1995).
46. D. H. Kim, *EUROMECH 334*, Lyon (1995).
47. D. H. Kim, *The Wilson Forum on Existing & Potential Application of Composite Materials in the Infrastructure*, Alexandria, Virginia, October 28-29 (1996).
48. D. H. Kim, *The Third International Symposium on TEXTILE Composites In Building Construction*, Seoul, Korea, November 7-9 (1996).
49. 김덕현, 섬유기술과산업, 1(1) (1997).
50. 김덕현, 대한토목학회지, 45(4) (1997).