

탄소섬유의 개발현황과 응용전망

“不可思議한 萬能재료”



이 보 성
(忠南大工大 교수·化学学)

99.9%의 순수탄소로 구성된 탄소섬유는 인간의 머리카락과 같은 굵기로 제조되는 유리섬유보다 훨씬 가늘은 6~7미크론의 미세한 섬유로서, 강철보다 강하고 알미늄보다 가볍다는 특성때문에 “재료의 혁명” 혹은 “불가사의한 재료”라고 불려지고 있는 것이다.

유리섬유와 비교하면, 무게가 가볍고 열팽창계수가 대단히 낮으며 피로저항이 좋고 내식성이 훨씬 능가하기 때문에 점점 유리섬유의 위치를 밀어내고 있는 추세이며 특히 고온에서는 독보적인 존재이기 때문에 위와같이 부르는 것도 타당하다.

〈그림-1〉에는 각종섬유의 인장강도와 탄성계수를 비교한 것이다. 유리섬유는 200~400kg/mm²의 비교적 높은 강도와 반면에 10톤/mm²이하의 낮은 탄성계수를 가졌으며 아라미드섬유는 약300kg/mm²의 강도와 13톤/mm²의 탄성계수를 나타내고 있다.

탄소섬유는 PAN(포리아크릴섬유)계와 핏치계가 있는데 강도면에서는 PAN계가 단연 우수하다. 초고강도(SHT)형은 450kg/mm²의 강도와 25톤/mm²의 탄성계수를, 초고탄성(SHM)은 45톤/mm²의 탄성계수를 나타내고 있다. 그러나 강도는 SHT형보다 뒤진다.

한편 핏치계 탄소섬유는 등방성핏치는 저강도와 저탄성을 주지만 메조페이스핏치(MPP)계는 놀라운게도 70톤/mm²의 한외고탄성(UHM)계수를 보이고 있어 대단히 흥미 있는 것이다. 그러므로 고강도를 요구하면 PAN계를, 고탄성을 요구하면 MPP계 탄소섬유를 선택해야 한다.

이렇게 미세한 탄소섬유는 화학적으로 안정하고 공해물질이 아니며, 석면과 달리 발암물질이 아니기때문에 안심하고 외과용 재료로도 사용되고 있다. 그리하여 오늘날 그의 수요는 급격히 증가추세에 있으며 세계생산고는 약4,500톤, 이중 60%를 일본이, 그 나머지는 미국, 구라파에서 생산하고 있다. 그러나 용도는 항공용이 가장 많으며 그밖에 자동차·기계류·선박·스포츠용품 등 재래식 금속재료가 미치지 못하는 경량화 초고온, 고압, 고속용으로 응용되고 있으며 점점 금속의 자리까지도 차지하고 있다.

다만 현재 문제는 원료로부터 제조과정에서 소

비되는 에너지가 비싸게 들므로 가격이 높은 것이 단점이다. 그래서 원료비가 낮은 핏치로 전환하려고 많은 연구가 진행되고 있으나 아직은 강도면에서 뒤지고, 핏치의 열처리와 방사가 어렵기 때문에 더 개발되어야 PAN계를 이길 수 있을 것이다.

◇ 탄소섬유의 제법

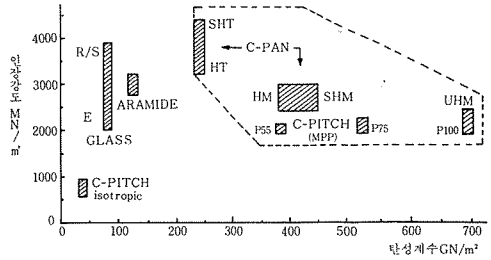
탄소섬유가 경이적인 강도와 탄성을 나타내는 원인은 탄소원자간의 매우 강력한 화학결합 때문이다.

탄소체는 3가지 동소체가 있는데, 그의 구조에 따라서 아주 강한 금강석, 덜 강한 흑연 및 무정형 탄소체로 구분된다. 무정형탄소체를 고온, 고압으로 인조금강석을 만들듯이 탄소를 함유하는 물질을 열처리 함으로써 자연흑연과 같은 구조로 전환시킬 수 있다.

흑연은 한쪽방향으로 탄소-탄소결합으로 강력한 층을 이루지만 이들 층간의 결합력은 미약한 반데어 발스힘(Var der Wal's force)에 의해서 유지되고 있기 때문에 흑연은 고체 윤활제로 사용된다. 이렇듯 방향성이 다르기 때문에 고도의 이방성을 나타내어 탄소-탄소 결합방향은 전도성이 좋고 이에 수직한 방향은 대단히 전도성이 나쁘기 때문에 절연과 전도의 양면을 갖는 응용성이 있는 것이다. 그러므로 탄소섬유를 흑연화하면 고도의 이방성을 갖는다.

탄소섬유의 제법은 탄소를 함유하는 모든 유기 물질을 적절히 열처리함으로써 결합되어 있는 수소, 질소등을 탈리시키고 탄소만 남게 하면 되는데, 가장 문제가 되는 것은 고체화학반응을 균일하게 일어나게 하는데 있다.

(그림 - 1) 각종 섬유와 탄소섬유의 물성비교



오늘날 섬유방사기술의 발달로 최소 10미크론 이하로 방사할 수 있으며 이런 미세고체내의 온도 분포는 거의 균일함으로 PAN섬유나 핏치섬유를 이와같이 방사하고, (그림-2)와 같은 공정도에 의해서 탄소섬유를 제조한다. 각 단계의 조건을 (그림-2)에 동시 표시하였다.

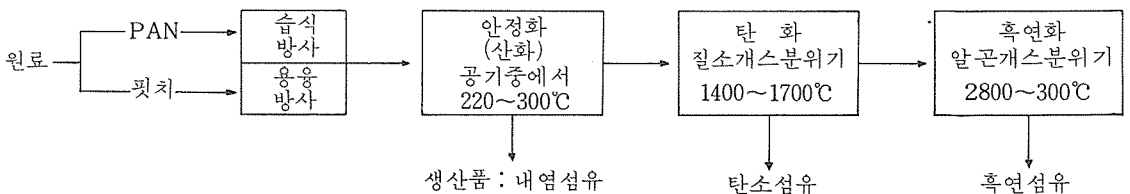
원료 PAN은 습식방사로 PAN섬유를 만들고, 핏치는 용융방사하여 핏치섬유를 만든다. 이들을 각각 달리 300℃까지 공기중에서 열처리 함으로써 다음 처리공정에서 녹지 않도록 안정화 혹은 산화 처리 한다. 이때 내염섬유로 일부 생산되며, 소방복, 커튼, 용탄자 내장용에 사용된다.

안정화된 섬유를 1400℃~1700℃까지 탄화한 것을 탄소섬유라 하며, 이때 최고강도로 상승하며 보통 탄소섬유로서 시판되고 있다. 강도가 높기 때문에 항공기등에 사용된다.

만약 이 탄소섬유를 알곤가스중에서 2800℃이상 3000℃까지 처리하면 흑연섬유로 돌아간다. 이때 강도는 저하되는 대신 탄성이 증가한다. 이것은 한 공정이 더 많아서 그만큼 값이 비싸며, 고탄성이 요구되는 용도를 가졌다. 대개는 군사용으로 쓴다.

오늘날 고분자공업은 경제적으로 습식방사기술을 개발하여 32만필라멘트까지 방사할 수 있으며, PAN섬유는 3천, 6천, 1만2천, 32만필라멘트의 섬

(그림 - 2) PAN 혹은 핏치 원료로부터 각종 탄소섬유 제조공정도



유로 제조되어 시판되고 있으며, 이를 구입하여 탄소섬유를 만들고 있다.

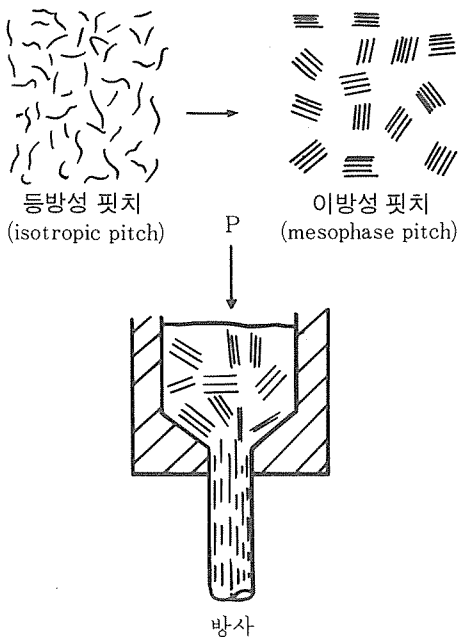
PAN 섬유는 적당한 강도를 가져서 전공정동안 함께 취급할 수 있는 특성을 소유했으며, 용융되기전에 분해가 먼저 일어나는 열안정성수지 물질이다. 그러나 원료로서 고가인 것이 단점이다. PAN 섬유를 연속적 열처리함으로써 강력한 2중결합(공명결합)을 갖는다.

한편 핏치는 원료로서 저렴하지만, 만여종의 복합물질로 되었기 때문에 직접 탄소섬유의 원료로 사용할 수 없고 개질해서 쓴다. 물론 개질하지 않은 핏치로 만든 탄소섬유는 강도가 낮아서 그런데로 방열재 및 시멘트보강재등의 용도가 있다.

핏치의 개질여하에 따라서는 <그림-1>에 보인 바와 같이 고탄성으로부터 한외고탄성의 흑연섬유를 얻을 수 있다는 것이 확인되어 오늘날 이의 비상한 관심을 끌고 있지만 문제점이 많이 남아 있어 지금까지 시작품만 나오고 있는 실정이다.

그것은 등방성 핏치로부터 적절한 열처리를 통하여 중간상(Mesophase 혹은 액정이라고도 함)을 형성, 성장시켜서<그림-3 참조> 배향성이 좋은 이

<그림-3> 등방성 핏치로부터 메조페이스 핏치 형성과 방사



방성 핏치로 만들어 이를 방사, 다시 열처리하며 탄소 혹은 흑연섬유를 만드는데 중간상형성과 방사, 안정화 과정이 아직도 완전 해결되지 않았기 때문이다. 이와같은 과정을 나타낸 것이 <그림-5>이다. 배향은 노즐을 통해 방사하는 과정에서 연신을 적절히 함으로써 행상된다.

◇세계적 동향

최초로 탄소섬유를 만든 것은 꼭 107년전 에디슨이 대나무를 탄화하여 전구의 필라멘트로 사용하려고 특허를 낸 것이다. 그러나 실질적인 섬유상 탄소섬유를 만들었다는 특허는 1963년부터 출현되었으며, 시작품은 미국의 UCC가 재생레이온 사로부터 일본의 공업연구소가 PAN으로부터 각각 탄소섬유를 1967년에 거의 동시에 내었다. 그러나 시판용은 일본 탄소사가 1972년에, 미국의 Great Lake탄소사, 영국의 존슨이 1973년에 경쟁적으로 내었다. 이때까지는 값도 고가였으며 강도는 200kg/mm를 넘지 못했다. 그후 10년간의 개발로 강도는 300kg/mm로 상승했고 값은 100\$이하로 떨어졌다. 오늘날은 400kg/mm까지의 강도증가와 30\$까지 값이 하락하였다. 이를 이제는 새세대(new generation)라고 부르고 있다. 서독도 그사이 PAN계 탄소섬유의 생산국이 되었다.

한편 1983년 UCC는 핏치로부터 고탄성의 탄소섬유를 시험생산했다고 발표했으며, 일본의 가시마석유사가 시작품을 내고있다. 그밖에 각대학, 연구소등에서 성공했다고 보고 하고 있다.

1980년대에 들어서 브라질, 인도, 루마니아, 대만, 한국 등이 탄소섬유 개발에 열을 올리고 있으며, 2년전 결국 대만이 영국으로부터 노하우를 구입했고 또한 한국도 같은 방법으로 PAN계 탄소섬유 생산국이 되었다. 그러나 브라질등은 독자적 개발에 전념하고 있다.

우리나라에서도 탄소섬유 연구개발은 이미 1970년에 시작되었다. 과기처의 지원으로 1971년 4월 한국화학공학회 연구발표회에 처음으로 실험실적 규모의 탄소섬유제조에 관한 연구를 보고했으며 MOST-Project R-71-36으로 보고된 이래 서독

Karlsruhe 대학과 공동연구를 수행하면서 탄소섬유 제조와 그의 응용연구를 1976년 세계탄소학회에 발표했으며, 또한 한국화학학회지등에 다수의 논문을 발표하였다. 그후 10년만에 국내에서도 관심이 고조되어 몇몇기업들이 공동연구를 제의하였다. 1982년 중간에 한국기계연구소와 공동개발연구를 시작했으며 이보다 앞서 KAISTS는 J사와 연구계약을 맺고 처음으로 연구개발이 시작되었다.

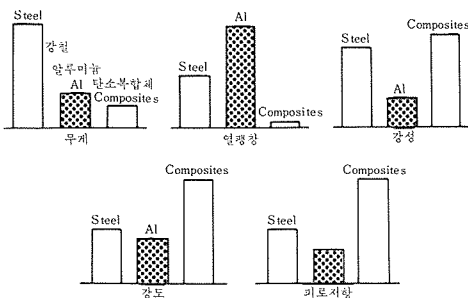
1983년초부터는 S사와 투자로 PAN계 탄소섬유의 본격적인 공업화연구가 시작되어 1년만에 시작품을 내었으며, 1984년 SITRA에 출품하였다. 이 사업은 1985년 MOST가 관여되었고, 1986년 5월에 종료하여 연구보고서를 MOST에 제출하였다. 이무렵 C사는 영국으로부터 기술도입으로 공장을 세웠으며 S사는 이것과 경쟁을 피하고 중간생산품인 prepreg제조에 착수했다.

한편 필자는 서독 Karlsruhe대학과 서독정부의 지원으로 핏치계탄소섬유개발의 국제공동연구를 수행, 기초연구가 완료되었으며, 다시 국제연합의 지원을 받아 현재 공업화 연구가 진행중이며 내년에는 산업체에 기술이전할 계획이다. 별도로 KAIST 역시 핏치계 탄소섬유연구를 진행하고 있는 것으로 알려지고 있다. 그밖에 탄소섬유의 Prepreg를 만들고 있는 H및 L사가 있으며 모두 스포츠, 레저용품에 소비되고 있다. 그러나 앞으로 자동차공업, 항공공업등의 수요 전망이 크다.

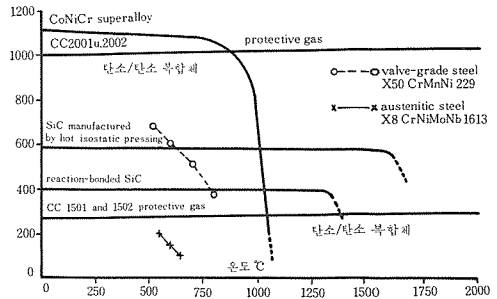
◇ 응용전망

탄소섬유는 섬유자체만의 응용보다 고분자수지

(그림 - 4) 탄소/탄소 복합재와 재래금속 및 합금과의 비교



(그림 - 5) 금속과 탄소섬유와의 물성 비교



와 결합하여 만든 복합재료로서 널리 사용되기 때문에 신소재복합재 (advanced composite)라고 부른다. 보강재료로서 탄소섬유는 비교적 새로운 것이며 이들의 개발은 1960년대 탄소섬유의 출현과 함께 시작되었다. 그러나 그 당시는 다른 섬유에 비해 강도나 탄성이 떨어져서 빛을 못보았다. 그후 원료 PAN의 개선으로 물성이 상승되면서 다른 섬유를 밀어내고, 저밀도, 고강도 및 경도때문에 항공분야를 독차지하게 되었다.

그러나 이런 응용에 결정적 중단을 준 것은 롤스로이스 RB12211항공엔진의 브레이드의 사용이었다. 불충분한 반복시험의 결여로 실패로 끝난 것이었다. 그러나 이 문제는 다시 해결되었고, 마침내 그것은 우주왕복선이 증명하였다.

지난 10년간 성공적인 응용은 물성에만 달려 있는 것이 아니라 적정한 설계, 새로운 고성능 제법 및 특별한 시험법등에 달려있다. 무엇보다도 이 재료의 이방성때문에 이 재료를 구조물로 재단할 수 있는 유일무이한 가능성은 설계자들에게 완전히 새로운 개척분야를 제공하였다.

항공기계에 있어서 수년간의 비행시험은 이 신소재의 신뢰도를 증가하였다. 가장 최근의 개발은 1985년 4월 파리의 공중쇼에서 보여준 에어버스 (airbus)310에 대한 수직안정장치였다. 이 구조물은 이제까지 공업적규모로 제조된 탄소섬유 보강 복합재료로부터 만든 가장 큰 부품이었다. 최근에 합브로그에는 이 목적을 위해서 특별한 생산공정이 설립되었다. 역시 수송분야와 기계분야에서 이런 신소재복합재는 2차구조물로서 괄목할만한 개발 진전을 보였다. 가장 최신의 예는 초고속기차(350

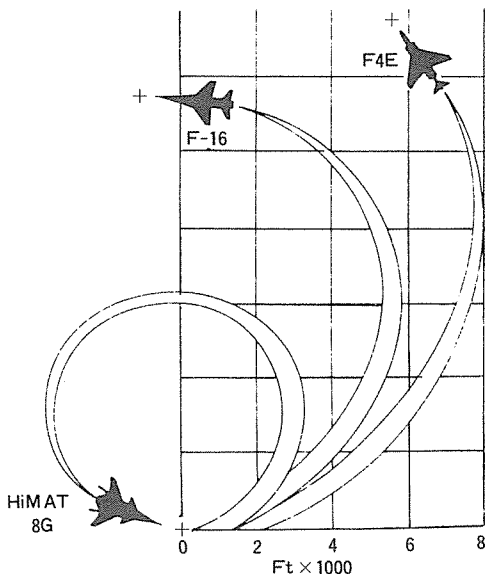
km/시간)를 위해서 개발한 대체후레임(bogie frame)이다. 이 응용은 현재 독일에서 철로상의 시운전 테스트중에 있다.

고분자 매트릭스대신 탄소매트릭스로 된 복합재는 소위 탄소/탄소 복합재라고 부르고 있으며, 우주선의 코나 미사일엔진에 사용될 뿐만 아니라 모든 차량, 항공기등의 제동(브레이크)기에 사용되는 석면을 대체하고 있다. 또 다른 혁명적인 응용은 초소성(superplastic) 온도범위에서 티타늄 같은 고용용점을 가진 금속의 금형으로서 사용할 수 있는 것이다. 다음 <그림-4>에서 보다시피 오직 탄소/탄소 복합재만 고온에서도그의 물성을 유지할 수 있음을 알 수 있다.

다음 <그림-5>은 강철과 알루미늄과 탄소섬유복합재의 무게, 열팽창, 강성, 강도 및 피로저항등을 정상적으로 비교한 것이다. 이것을 보면 강철보다 강하고 알루미늄보다 가볍기 때문에 그의 응용면을 무한히 증가시키고 있다는 것을 알 수 있다. 초음속 제트기의 속도가 마하 2이면 동체의 온도가 150℃, 마하 3이면 300℃, 마하 4가되면 550℃까지 가열되어 금속재료로서는 비행불가능이 된다.

<그림-6>은 고도전술용 항공기술(HiMat) 비행기인데, 탄소/탄소 복합재를 사용함으로써 회전반경

<그림 - 7> HiMat 전투기에 탄소탄소 복합체 사용



<그림 - 8> 소형자동차에 탄소복합체 응용



을 크게 감소시킬 수 있음을 실제 보여준 것이다.

MX미사일에 대한 고체로켓트모터 노즐은 직경 2.33 m, 무게 226.8kg로서, 탄소/탄소 복합재로 만들어졌으며 68만불의 제작비가 들었다. 이렇듯 군사적인 용도는 양적으로나 질적, 그리고 값에 있어서도 무제한으로 요구되고 있는 것이 특수하다.

대표적인 전투기에 약 반톤의 탄소섬유 복합재가 사용되는데, 무게를 15~30% 감소시킬 수 있으며, 사테리트의 안테나는 무게를 50%감소할 수 있으며, 중요한 점은 온도변화에 제로팽창계수를 갖도록 만들 수 있는 것이다.

방직기의 복과 복직을 탄소섬유 복합재로 만들므로써, 나무로 만든 것보다 66% 중량감소에 속도를 10% 증가시키고 수명을 6개월에서 3년으로 연장하고, 소음을 3데시벨로 감소할 수 있다고 보고하였다. 이밖에도 직기의 많은 부품을 대체할 수 있어서 그야말로 방직기의 개혁을 가져왔다.

자동차에도 현재 70% 이상의 중량감소를 할 수 있다고 보고 있다. 만약 이렇게 대체하면 다음 <그림-7>과 같이 소형자동차의 본네트나 문을 한손으로 들 수 있다. 이밖에 스프링 및 송, 엔진의 연결로드, 엔진지지대등 수많은 부품이 대체되고 있다.

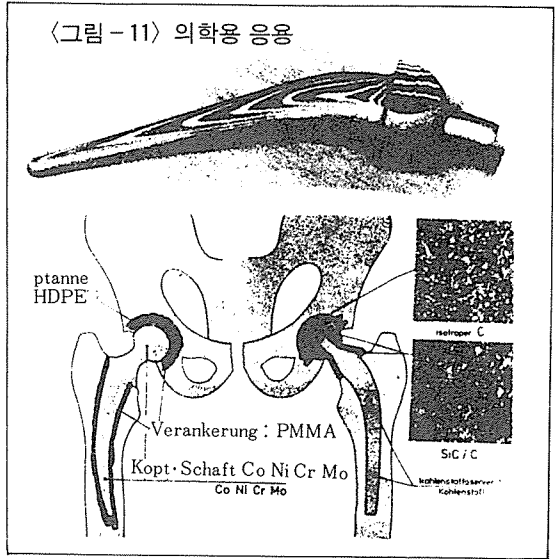
간접수송면의 응용으로서 전차의 부교를 들 수 있다. 다음 <그림-8>는 독일 레오포드2의 부교인

데 길이 40m, 60톤에 견딜 수 있게 만들었다. 모든 부하를 받는 구조물을 단일방향의 탄소섬유보강에 폭시로 만들었으며, 총20톤의 무게를 가졌다.

구조물에 대한 또 다른 응용은 최근 일본의 모리나가 빌딩을 탄소섬유보강시멘트복합재 사용으로 60%의 중량감소와 20%의 철근절약을 가져왔다. 앞으로 건축물에 다량 탄소섬유소요가 예상되는데, 이런 탄소섬유는 등방성핏치체로서도 가능하다. 또한 구조물의 응용은 해저유전의 프라트홈의 외관을 이와같은 탄소섬유 복합재로 만들므로서 해수의 부식을 방지할 수 있었고 연차별로 더 깊이 세울 수 있었다. 이리하여 1978년 shell사는 305m까지 시추할 수 있었다.

이제는 스포츠용품의 응용면을 보면, 탄소섬유보강 테니스라켓트는, 탄소섬유의 강도와 강성이 라켓트의 헤리틀크를 저하시켜 라켓트전면에 고체성 느낌을 주며 에너지손실을 적게하고 볼의 속도를 증가시켜 준다. 탄소섬유보강 골프채는 무게를 감소시킨만큼 크럽헤드에 더 중량을 주도록 만들어서 더 큰 추진거리를 줄 수 있도록 만들어졌다. 오늘날 탄소섬유 보강골프채는 연에 2~3백만 개가 세계시장에 나오고 있다. 또한 탄소섬유뉴시대는 중량감소로 응답증가를 주고 손의 느낌을 증가시킨다. 그위에 댐핑효과를 주어서 더 멀리 정

(그림-11) 의학용 응용



확히 투척할 수 있도록 해준다.

끝으로 의학적응용(그림-9)을 들 수 있다. 탄소는 화학적으로 안정하기 때문에 수술실로 사용되며 근육과 공생하기때문에 제거할 필요가 없으며 대용뼈, 인공심장, 허프의 뼈로 사용되고 있다. 심지어 치근의 고정용으로 응용되고 있음을 상상하면 장래에는 탄소섬유 인조인간이 나올 것이다.

◇ 결론

탄소섬유의 강도는 거의 이론치의 반도 못미치게 만들어지고 있기 때문에 아직도 개발도상에 있다고 볼 수 있는데도 불구하고 그의 특성으로 인해서 꿈의 섬유라고 불려지고 있으며, 가격의 저하와 함께 모든 재료와 경쟁하여 밀어내고 있는 실정이다.

1990년대에는 금속의 위치의 반이나 차지할 것이라고 예견하고 있다. 고강도 경량화는 탄소섬유 복합재로 가능하며 이방성으로 인해 에너지제어 내지 절감이 가능하다.

그러나 옥에도 티가 있듯이 충격강도가 금속보다 약한 것이 흠이므로 현재는 다른 재료로 피복하여 방지하고 있으나 이것도 매트릭선택으로 해결될 수 있으므로 모든 요구에 만능재료가 될 것이다.

(그림-9) 전차의 부교에 탄소섬유 복합체 응용

