

복합소재 구조물의 현황과 전망

Current Status and Future of Advanced Composite Materials for Civil Infrastructures

이성우¹⁾, Sung Woo Lee

¹⁾국민대학교 건설시스템공학부 교수, Professor, Dept. of Construction System Engineering, Kookmin Univ.

SYNOPSIS : Recently advanced composite materials have been successfully used in the civil infrastructure application due to its many advantages such as light weight, high strength, corrosion resistance. Demand for longer service life, increased durability and reduced maintenance have prompted such developments. In this article, characteristics of composite materials, fabrication process, case studies for various field and future of advanced composite materials for civil infrastructures is presented.

Key words : Advanced Composite Materials, Civil Infrastructures, Fiber Reinforced Plastics

1. 서 론

과거 10여년동안 건설기술자와 시설물 관리 담당자는 구조물의 노후화 특히, 강재 부식에 대한 해결책을 찾기 위해 고심해 왔다. 교량, 지하구조물 및 해안 구조물등의 유지 관리업무를 담당하고 있는 관리주체는 강재 구조물이나 철근콘크리트 구조물의 노후화에 따라 날이 갈수록 누적되는 보수요구물량을 도저히 감당할 수 없게 되었다. 뿐만아니라 기간시설의 건설이 날로 증가함에 따라 유지관리에 대한 부담은 점점 가중되고 있다.

근자에 해외 선진국에서는 많은 토목기술자와 정부의 건설관련 부처에서 신소재(ACM, Advanced Composite Material)를 이용한 강화 플라스틱(FRP, Fiber Reinforced Plastics)을 건설분야에 적용하는 방안을 매우 적극적으로 연구검토하고 있으며 이미 여러 지역에서 도로 및 해안 구조물에 상당수 적용하고 있다. 그 결과, 복합소재가 건설 구조재로서 이용될 수 있는 발판이 마련되었으며, 초기건설비용과 일반적인 인식부족의 문제점은 현재 많은 연구 프로젝트가 훌륭한 성과를 거두고 있어 빠른 시일내에 해결될 것으로 보인다.

복합소재의 건설분야 적용의 흐름을 살펴보면 1840년대의 건설재료로서의 강재 도입기와 유사한 면을 발견할 수 있다. 그 당시 건설재료의 역학적 성질을 다룬 문헌들을 살펴보면 강재는 다른 건설재료보다 비싸다는 이유로 대형 건설 구조물에는 적합하지 않은 것으로 평가되었으며, 차후의 고려대상으로 여겨졌다. 그러나 40여년이 지난 1884년 세계 최장의 현수교로서 강재로만 시공된 뉴욕시의 Brooklyn교가 건설되었고 이를 계기로 강구조물의 시대가 시작되었다. 당시 이러한 강구조물에 적용된 안전율은 18에서 20정도로 과잉설계되었으나 현재는 구조해석방법의 발달로 2에서 4정도로 극히 낮아졌다. 오늘날 복합소재에 대한 안전율은 기존의 재료보다 큰 값을 사용하고 있지만 지금 복합소재와 관련한 구조설계 및 설계방법론은 1800년대 중반의 강재의 경우와 같이 새로운 변혁과 혁신의 단계에 있다고 말할 수 있을 것이다.

섬유강화 복합소재는 크게 강화섬유와 섬유사이의 응력전달, 외부환경으로부터 섬유의 보호, 기계적

인 손상으로부터 섬유를 보호하는 수지로 구성된다. 복합소재는 흔히 섬유강화 플라스틱 즉, FRP(Fiber Reinforced Plastic)로도 불린다. 섬유재료로서는 유리섬유, 탄소섬유, 아라미드섬유 등 원재료와 제조방법에 따라 매우 다양하며, 수지재료로는 크게 열경화성 수지와 열가소성 수지로 나눌 수 있고, 그 종류로는 폴리에스터, 비닐에스터, 에폭시, 페놀 등으로 구조물이 요구하는 기계적, 물리적 특성에 따라 선택하여 사용할 수 있다.

2. 건설재료로서의 복합소재

새로운 건설재료의 평가기준은 내구성, 내부식성, 경제성, 경량성, 강도특성, 시공의 용이성을 들 수 있다. 복합소재는 이러한 평가기준을 만족할 수 있는 대안이 될 수 있으며, 건설재료로서 복합소재의 특성을 기술하면 다음과 같다(Stockton 1997, Chin 1996).

2.1 재료적 특성

(1) 인장강도

복합소재는 기존의 건설재료와 비교할 때 매우 훌륭한 기계적 특성을 보유하고 있다. 특히 강재보다 훨씬 큰 인장강도를 보유하고 있어 높은 인장강도를 요구하는 구조물에 매우 효과적으로 사용될 수 있다. 일반적으로 파괴시 까지 선형적인 응력-변형률 거동을 보이게 되며, 필요한 성능에 따라 섬유의 방향을 적절히 배치하여 방향별로 기계적 특성을 배분할 수 있다.

(2) 피로특성

복합소재는 10^7 사이클에서도 강도를 유지하는 우수한 피로저항특성을 보인다.

(3) 경량성

기존 재료의 구조물은 종종 과도한 하중에 의한 문제를 일으키게 되나 복합소재는 큰 하중지지력 뿐만 아니라 경량특성을 가지므로 매우 효과적인 건설재료가 될 수 있다. 구조용 강재의 경우 단위중량이 $7,850 \text{ kg/m}^3$ 이나 복합소재의 경우 약 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 에서 $2,600 \text{ kg/m}^3$ 으로 매우 작다.

(4) 비강도

항복강도를 밀도로 나눈 값으로 정의되는 비강도는 강도와 중량에 의한 재료들의 특성비교에 흔히 사용된다. 복합소재의 경우, 고강도 및 저밀도 특성으로 고강도 강재의 약 15배에 달하는 비강도를 가진다. 따라서 많은 복합소재가 상대적으로 고가임에도 불구하고 재료의 비강도 측면을 고려할 때 매우 경쟁성을 가지게 된다. <표 2.1>에서는 강재와 복합소재의 기계적 특성을 비교한 것을 보여주고 있다.

<표 2.1> 강재와 복합소재의 기계적 특성 비교

	탄성계수 GPa	강도 MPa	밀도	비강성 GPa	비강도 MPa
강재	207	248	7.85	26.3	31.5
Glass/polyester	27.1	287	2.13	12.7	135
Graphite/epoxy	70.3	683	1.61	43.7	424

(5) 비강성

탄성계수를 밀도로 나눈 값인 비강성에 있어서도 매우 우수하여 진동의 영향이 큰 구조물의 경우 저진동 특성을 가지게 된다. 즉 강재의 경우 고밀도, 고탄성계수, 낮은 감쇠특성을 가지는 반면, 복합소재의 경우, 저밀도, 높은 감쇠특성을 가지게 된다. 건물바닥, 지지판과 같이 진동의 감쇠가 요구되는 구조물에 복합소재가 사용되면 이러한 문제를 크게 감소시킬 수 있게 된다.

(6) 내부식성

건설분야에 복합소재를 이용하는 가장 중요한 이유로 내부식성을 들 수 있다. 일반적으로 사용되는 수지재료는 화학물질, 산, 해수, 담수에 대한 저항성이 있는 특성을 가지므로, 강재를 사용하는 구조물에 대한 이러한 복합소재의 내부식 특성은 유지관리와 수명비용(life cycle cost) 부분에 있어서 매우 유리하게 작용하게 된다. 따라서 해수, 화학물질 등 부식환경에 있는 강재 구조물에 매우 효율적으로 이용될 수 있다.

(7) 자성(magnetic)특성

복합소재는 플라스틱 수지와 강화섬유로 구성되므로 자력(magnetic force)에 대한 저항성을 가지게 된다. 따라서 복합소재는 자기부양 열차의 차체 및 선로 구조물에 효과적으로 사용될 수 있다. 뿐만 아니라 전파투과가 요구되는 안테나 구조물에도 효과적으로 이용된다.

(8) 전기절연특성

유리섬유, 아라미드섬유를 사용하는 대부분의 복합소재의 경우에는 전기절연 특성을 보유하고 있어 감전의 위험을 방지해야하는 구조물에 사용된다. 수년동안 발판 사다리는 절연특성을 보유한 유리섬유 복합소재를 사용하고 있으며, 발전소의 전기케이블 트레이, 점검통로와 같은 전도체와 가깝게 노출된 구조물의 경우에도 복합소재를 사용하고 있다.

2.2 시공성

건설재료로서 복합소재의 시공측면의 장점을 기술하면 다음과 같다

- (1) 경량이므로 시공장비의 경량화가 가능하다.
- (2) 경량이므로 시공속도 증가 및 구조물의 경량화가 가능하다.
- (3) 내부식성이므로 부식방지를 위한 전기방식, 방식피복, 도장 등의 방식공사가 불필요하다.

2.3 경제적 효과

(1) 경량구조

복합소재를 사용하면, 구조물 전체의 자중을 크게 줄여줄 수 있어 같은 기능의 기존 재료를 사용하는 구조물에 비해 경량화로 인한 경제성을 크게 제고시킬 수 있고, 경량화로 인해 시공이 간편해지고, 공기단축이 가능하며, 운송비를 상당히 절감시킬 수 있는 장점이 있다. 특히 현장 작업시 경량이므로 취급이 용이하여 적은 인력으로 작업이 가능하게 되며, 공장에서 미리 조립할 경우 현장시공비용을 절감할 수 있게 되고, 향상된 시공성으로 인해 공기를 단축할 수 있는 효과 역시 기대할 수 있다. 교량인 경우, 이러한 공기단축효과에 의해 공사시 교통통제기간도 상당히 줄일 수 있어 간접비용 역시 크게 절감할 수 있는 장점을 가지게 된다.

교량의 성능 개선을 위해 복합소재 바닥판으로 콘크리트 바닥판을 교체하게 되면, 바닥판의 자중을

1/5 이하로 줄여주어 거더나 교각 등 하부구조의 보강 없이 활하중에 대한 내하력을 증진시켜 줄 수 있어 종래 방법에 비해 현저하게 공사비를 절감시킬 수 있다. 복합소재 바닥판을 신설 교량에 적용할 경우에는 경량특성으로 인해 거더와 교각으로 전달되는 하중이 경감되어 하부구조를 종래보다 경제적으로 건설할 수 있게 된다. 또한 복합소재 바닥판은 경량이므로 운반비가 절감되고 설치시 대형 장비가 불필요하므로 시공비 절감 및 건설공기의 획기적 단축을 기대할 수 있다.

공장에서 제작된 복합소재 바닥판을 콘크리트 바닥판을 철거함과 동시에 거치하여 조립할 수 있으므로 교통통제 기간도 획기적으로 줄여주어 교통통제로 인한 간접비용 절감과 시민 불편을 크게 완화시켜 줄 수 있다.

복합소재를 건설재료로 사용하면 경량 특성으로 인해 구조물의 자중이 대폭 줄어들게 되어 지진으로 인한 지진하중도 동일한 비율로 감소하므로 구조물의 내진 성능을 크게 향상시킨다. 종래 재료로 건설된 교량이나 건물의 바닥판을 복합재료 바닥판으로 교체한다면 하부구조나 기둥 등의 보강없이 내진 성능을 향상시킬 수 있어서 경제성과 안전성을 도모할 수 있다.

(2) 내구연수 향상

강재와 콘크리트를 재료로 하여 건설된 기존 구조물의 경우에는 강재의 부식과 콘크리트의 열화, 외부환경에 의한 침식, 세굴 등의 물리적 손상의 문제가 있으나 내부식, 고내구성 특성을 보유한 복합소재로 제작된 구조물의 수명은 기존의 콘크리트와 강재를 이용한 구조물에 비해 현저히 증대되게 된다.

복합소재는 고강도, 내부식성, 내마모성 및 차수성 특성을 보유하고 있으므로 해수나 오·폐수와 같은 부식환경에서도 전혀 영향을 받지 않으며, 침식작용이나 마모작용, 세굴, 충격 등으로부터 보호되므로 내구성을 현저하게 향상시킬 수 있으며 그에 따라 구조물의 내구연한을 연장시킬 수 있게 된다.

또한 콘크리트 보호용도의 복합소재 피복판을 콘크리트 구조물 표면에 설치할 경우 부식환경에 대한 콘크리트 표면 보호로 인한 내구성 증진뿐만 아니라, 콘크리트에 별도의 강도 증진용 혼화제를 사용할 필요가 없게되며 고가의 시멘트 사용량도 줄일 수 있게 되고, 콘크리트 피복 두께를 줄일 수도 있어 콘크리트 구조물의 단면축소도 가능하게 되어 시공비용을 절감할 수 있게 되는 경제적 이점이 있다.

복합소재의 내부식, 고내구성 특성은 복합소재 구조물의 유지관리비용을 크게 절감할 수 있게 한다. 기존의 강재 구조물을 대체하여 복합소재를 사용하면, 강재의 부식을 방지하기 위한 정기적인 내식도장이 필요없게 되어 유지관리비용이 절감될 뿐만 아니라, 부식에 의해 손상된 구조물을 보수하는 비용 역시 필요없게 된다.

교량의 성능개선을 위해 콘크리트 바닥판을 복합소재 바닥판으로 교체하면, 복합소재의 내부식, 고내구성 특성으로 인해 내구수명이 길어져서 교량의 승급과 동시에 교량의 수명을 크게 연장시켜 주고, 공사후 유지관리를 할 필요가 거의 없게 되어 건설 투자비의 효율을 극대화시켜 준다.

(3) 기존 구조물의 보수·보강

복합소재는 또한 기존의 콘크리트 또는 강재 구조물의 내하력 복원과 보강을 위해 사용될 수 있다. 경량의 복합소재를 이용하여 콘크리트 또는 강재 구조물을 보수·보강하는 경우에는 구조물의 자중을 거의 증가시키지 않은 상태로 간편하게 보강할 수 있다.

콘크리트 구조물의 보강에는 현재 섬유쉬트 접착공법이 많이 이용되고 있다. 또한 강재 구조물의 보강에도 최근에는 탄소섬유 플레이트 접착공법이 이용되기 시작하였다. 이러한 섬유쉬트나 플레이트를 접착하는 방법 이외에 최근 국내에서는 현장진공함침에 의한 보강방법도 개발되었다.

기존의 콘크리트 또는 강재 구조물의 보수·보강을 위하여 복합소재를 이용한 현장 진공성형 보강방법을 이용하게 되면, 진공감압에 의한 기압차를 이용하여 강화섬유를 수지로 함치시키므로 종래의 현장

수작업 적층공법에 비해 수지함침비율이 체적비로 일정하게 50%로 유지할 수 있어 보강용 복합소재가 고밀도로 성형되어 수지소모량이 절감되고, 적층시 공기함유량을 최소화시킬 수 있을 뿐만 아니라 보강섬유의 적층두께의 제한이 없어 경제적이고 고품질의 보강이 가능하게 된다. 또한 수지재료가 외부에 노출되지 않는 건식기법으로 현장작업성이 우수하여 보강공사비가 절감된다. 두께가 얇은 복합소재를 이용하여 보강하게 되므로 건축한계(clearance)에 대한 문제도 발생하지 않고, 내부식 특성을 보유한 복합소재를 사용하므로 부식에 의한 내하력 저하의 우려 없이 영구히 보강효과를 발휘할 수 있게 되어, 별도의 방청도장이 필요없어 경제적이다.

기존의 강재 구조물의 보강방법에 의하면, 보강 공사시에 차량을 통제하여 교량에 가해지는 활하중을 경감시켜야만 하나, 복합소재의 진공성형 부착에 의한 보강방법을 사용하면 대상부재에 손상을 가하지 않고 보강을 실시하므로 차량통행을 방해하지 않고 보강을 실시하므로 공사로 인한 간접비용을 크게 절감할 수 있을 뿐만 아니라 저장탱크 또는 파이프라인과 같은 플랜트 시설의 경우 내부를 비우지 않고 해당 강재에 탄소섬유 복합소재를 부착하여 보강하므로 시설의 가동중단으로 인한 문제점이 전혀 발생하지 않는다.

2.4 적층구조

강화섬유의 방향성은 복합소재의 기계적 특성에 큰 영향을 미친다. 적층 복합소재에서는 원하는 방향별 물성을 얻기 위해 섬유의 방향성을 가지도록 적층한다. 다양한 일방향층들을 함께 적층시킬 수 있으며, 그림 2.1에는 4개의 층을 가지는 적층 예를 보여주고 있다.

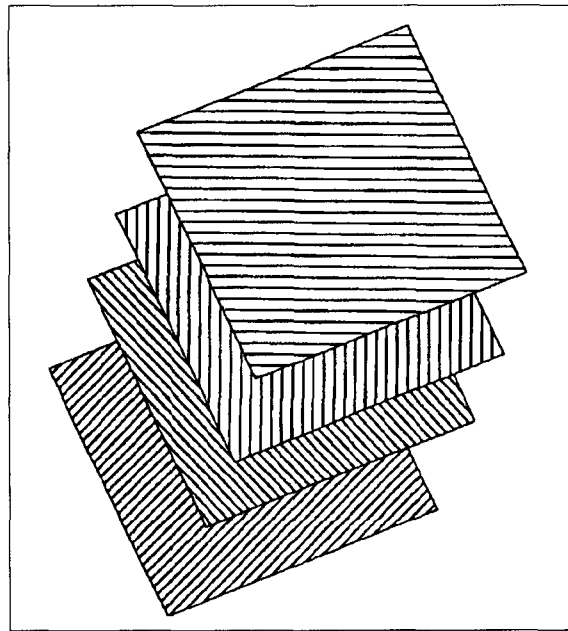


그림 2.1 4개의 층을 가지는 적층 예

3. 복합소재의 제조방법

복합소재의 제조방법에는 여러 가지가 있으나 주로 사용되고 있는 제조방법은 다음과 같다.

- Hand lay-up
- Chopped fiber spray lay-up
- Vacuum molding
- Injection molding
- Pultrusion
- Filament winding
- Press molding
- Autoclave molding
- Resin transfer molding
- Vacuum-assisted resin transfer molding

이들 복합소재 제조공법 중 건설분야 적용을 위해 사용될 수 있는 주요 공법으로는 인발성형(pultrusion)과 VARTM(Vacuum-Assisted Resin Transfer Molding) 및 필라멘트 와인딩(filament winding)을 들 수 있다. 본 원고에서는 이들 복합소재 제조공법에 대해 좀더 자세히 설명하고자 한다.

3.1 인발성형

인발성형기법이란 함침된 섬유를 금형을 통하여 당김으로서 원하는 단면의 부재를 연속적으로 제작하는 복합소재 제조기법으로 전 공정이 자동화되어 있어 토목구조 부재를 저 생산가로 제작할 수 있는 효과적인 제조방법의 하나이다. 이 공정은 기지재료에 함침시킨 섬유 강화재가 가열된 금형을 통과하면서 급속하게 경화되므로 빠르게 성형이 이루어진다(Kukich 1994). 높은 섬유부피비를 가지는 고품질의 복합소재를 제작할 수 있으며, 임의의 형상을 가지는 금형을 사용하여 다양한 단면 제작이 용이하고 제조공정이 완전히 자동화되어 있어 구조용 형강에 해당되는 단면 등의 대량생산에 사용될 수 있다. 그림 3.1에서는 인발성형 장비의 개요를 보여주고 있으며, 사진 3.1에서는 국민대학교 구조안전연구소에서 보유하고 있는 인발성형 장비를 보여주고 있다.

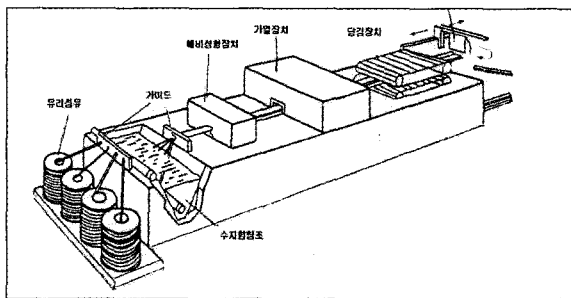


그림 3.1 인발성형 장비의 개요

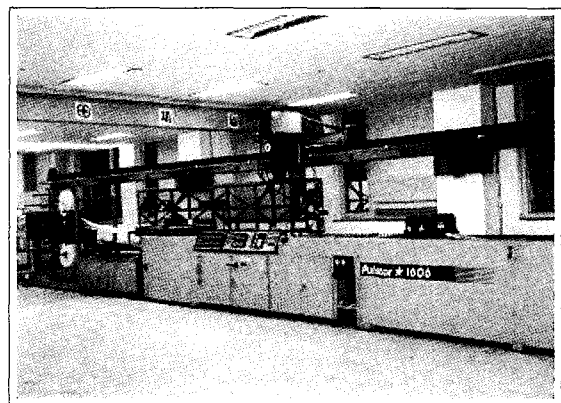


사진 3.1 인발성형 장비의 모습

3.2 VARTM(Vacuum Assisted Resin Transfer Molding) 공정

VARTM성형법의 모태가 되는 RTM(Resin Transfer Molding)성형법은 항공, 자동차, 스포츠 용품 제조에 널리 사용되고 있는 복합소재 제조기법으로 1940년대에 처음으로 이용되기 시작하여 여러 유사 공법이 개발되면서 제조비용과 제품성능부분에 많은 발전이 이루어지고 있다(Steenkamer 1994).

VARTM성형법은 밀폐된 금형에 위치한 섬유강화재에 수지를 주입하여 성형하는 RTM성형법을 발전시켜 한쪽 면의 금형과 진공백(vacuum bag)을 이용하여 진공상태의 섬유프리폼에 신속하게 수지를 함침시켜 복합소재 구조물을 성형하는 방법이다. 섬유프리폼은 대기압에 의해 압착되어 50%의 섬유부피비를 유지할 수 있으며, 한쪽 면의 금형을 사용하므로 금형비용을 절감할 수 있어 저비용, 고품질의 대형 복합소재 구조물 제작에 매우 효과적이다. 이 제조기법은 원래 선박제조에 널리 사용되었으나 최근 복합소재 교량과 복합소재 해상파일의 제작 등에 사용되고 있다(Gillio 1997). 그림 3.2에서는 VARTM공정의 개요를 보여주고 있으며, 사진 3.2에서는 VARTM에 의한 교량바닥판 제작모습을 보여주고 있다.

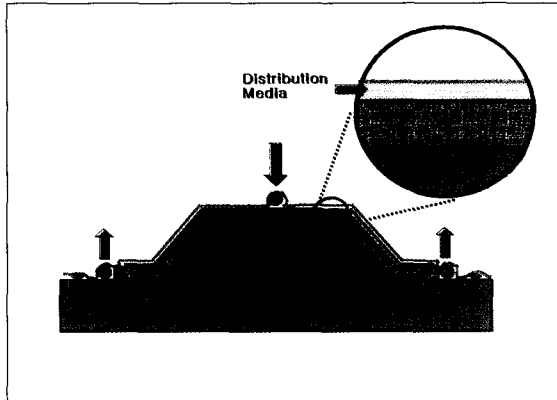


그림 3.2 VARTM공정의 개요

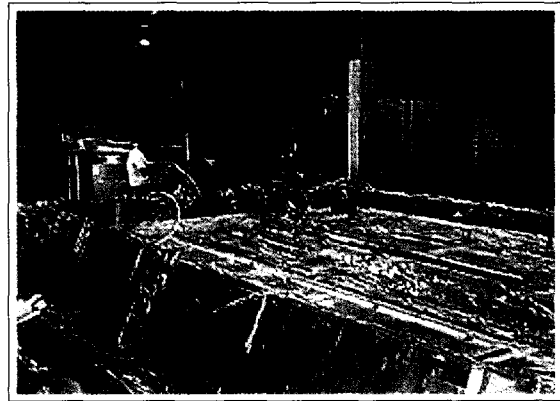


사진 3.2 VARTM에 의한 교량바닥판 제작모습

3.3 필라멘트 와인딩

필라멘트 와인딩은 섬유보강재를 원통형 형틀 형상의 맨드릴 주위에 감아 폐단면 부재를 만드는 제작기법으로 원통형 또는 판형 구조물과 같은 단순한 형상의 구조물 제작에 이용된다. 주로 로빙사 형태의 섬유재료를 이용하게 되며, 구조물이 하중조건에 따라 여러 방향으로 강화섬유를 배치할 수 있다. 필라멘트 와인딩 제조방법은 토목구조재로 사용되는 기둥, 파일 등 대형 폐단면의 제작에 적합한 공법으로 복합소재 파일, 튜브, 파이프 또는 저장탱크의 제작에 널리 사용되고 있으며 섬유를 횡방향으로 쉽게 배치할 수 있어 내압을 받는 부재의 제조에 적합하다. 그림 3.3에서는 필라멘트 와인딩 장비개요를 보여주고 있으며, 사진 3.3에서는 필라멘트 와인딩을 이용한 복합소재 파일의 제작모습을 보여주고 있다.

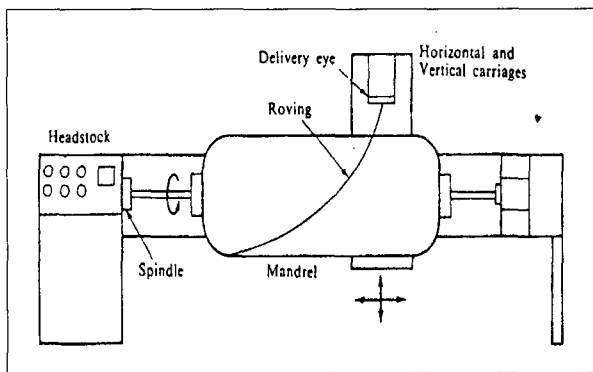


그림 3.3 필라멘트 와인딩 장비 개요



사진 3.3 필라멘트 와인딩을 이용한 복합소재 파일의 제작모습

4. 건설분야 적용사례

4.1 복합소재 해상파일

(1) 연구개발 배경

국민대학교 구조안전연구소에서는 해양수산부의 연구지원으로 해상 또는 육상의 콘크리트 및 강재 파일을 대체할 목적으로 복합소재 파일을 개발하고 있으며, 복합소재 파일은 유리섬유 복합소재 튜브에 콘크리트를 충전한 합성부재 형태로 제작된다. 유리섬유 복합소재 튜브는 섬유구조설계를 통하여 파일의 구조적 성능에 적합한 구조체로 제작되어 휨 및 압축, 전단 등의 외력에 저항하게 되며, 충전 콘크리트는 파일의 압축성능을 향상시키고 강성을 보완하는 역할을 하게 된다. 복합소재 튜브의 열화를 방지하기 위하여 수지내 자외선 안정제를 사용하거나 겔코우팅을 하여 보호하게 된다. 복합소재 파일은 경량 고강도 내부식 재료를 사용하여 기존의 콘크리트 파일의 열화 및 균열 또는 강재파일의 부식으로 인한 문제가 없어 내구년한을 획기적으로 증대시킬 수 있으며, 시공장비를 경량화하고 공기를 단축할 수 있는 효과가 있다(이성우 2000b). 또한 전기방식, 방식피복, 도장과 같은 방식공사가 불필요하여 유지관리가 용이한 장점이 있다.

항만 및 어항 구조물의 잔교식 안벽 파일에 사용되는 재료는 일반적으로 콘크리트 또는 강재를 사용하고 있다. 강재파일은 부식이 주요 문제가 되며(사진 4.1) 부식방지를 위한 추가의 방식공사를 해야하고, 시공 후에도 유지관리비 지출이 많은 단점이 있으며, 콘크리트 파일 또한 해수에 의한 염해로 콘크리트가 열화하고 철근이 부식되어 내구성과 유지관리에 많은 문제가 발생하고 있다.(사진 4.2) 이러한 문제를 근본적으로 해결하기 위해 고내구성 신소재를 이용한 복합소재 해상파일을 개발할 필요가 있다.

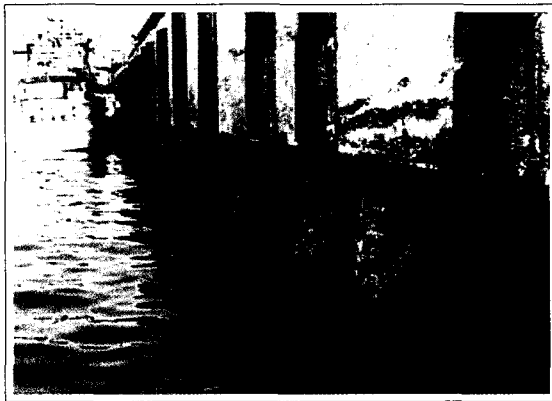


사진 4.1 강관 파일의 부식으로 인한 전반적인 노후화 모습

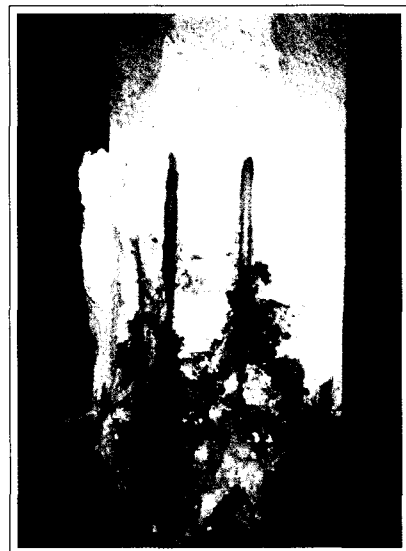


사진 4.2 콘크리트 파일의 열화 (박리/철근부식)

(2) 해외 사례

1996년의 Delaware에서는 Cape May-Lewes Ferry 공사에 Hardcore Composites사에서 만든 18개의 유리섬유 파일을 목재 파일과 교체하여 설치하였다. 직경 324mm이고 길이가 20m인 복합소재 파일의 중량은 약 318kg이고 전체 공사에 약 5.9ton의 복합소재를 사용하였다. 진동 해머로 항타한 후 각각의 파일은 1.36ton의 콘크리트로 채워졌다.

이 복합소재 파일은 목재 파일보다 4배의 휨강성과 3배의 강도를 나타내었으며 5년 이상의 사용 후에도 열화 징후 및 집안 충격에 의한 마모가 보이지 않았다. 사진 4.3 및 사진 4.4에는 Delaware에서 돌핀에 시험 시공된 복합소재 파일을 보여주고 있다.

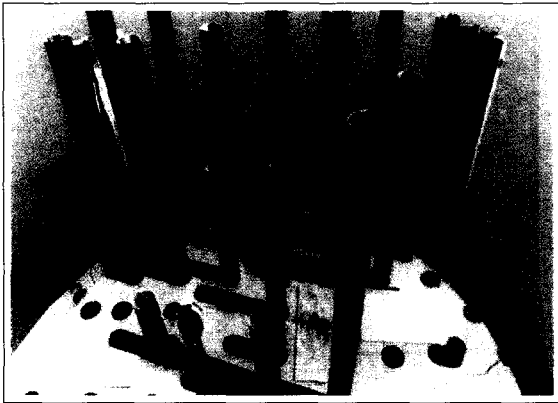


사진 4.3 미국 Delaware의 돌핀에 시공된
신소재파일



사진 4.4 돌핀에 항타완료된 상태의
복합소재 파일

또 다른 예로는 Lancaster Composites사에서 제작된 복합소재 파일을 Texas주의 해군항만에 시험시공한 예이다. 사진 4.5 파일 설치 전 현장에 적치된 복합소재 파일을 보여주며, 사진 4.6에는 시공후 모습을 보여주고 있다.

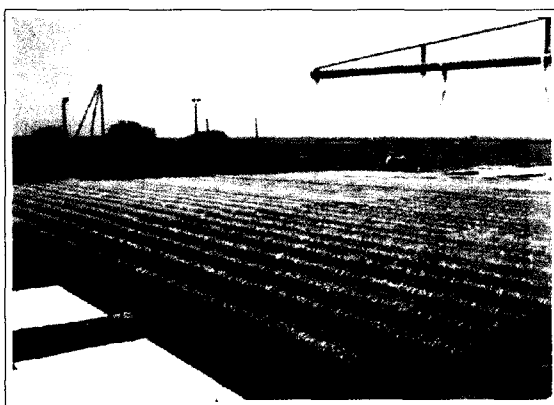


사진 4.5 복합소재 파일의 시공전 현장에
적치된 모습

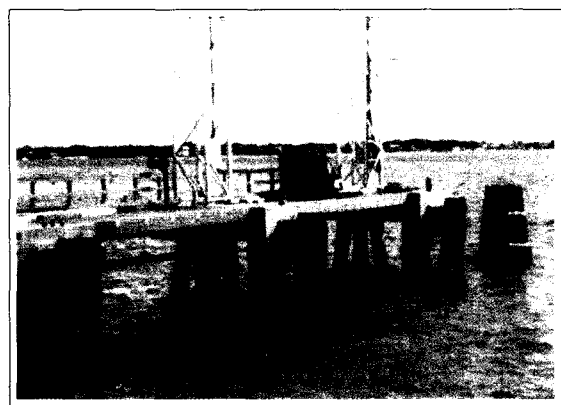


사진 4.6 Texas주의 해군부두에 시공된
복합소재 파일 모습

사진 4.7에서는 국민대학교 구조안전연구소에서 개발한 복합소재 모델파일의 휨-압축시험 모습을 보여주고 있으며, 사진 4.8에서는 직경 550mm인 대구경 복합소재 파일을 제작하고 있는 모습을 보여주고

있다.

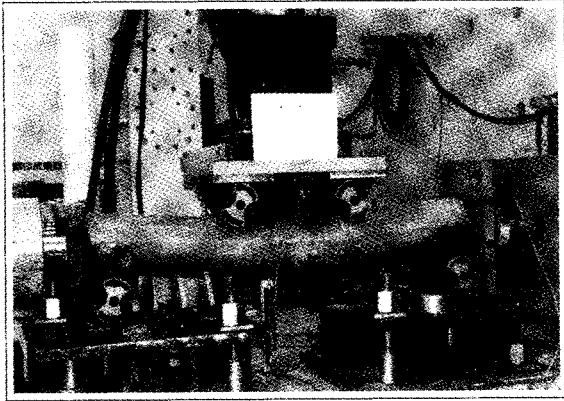


사진 4.7 복합소재 모델파일의 힘-압축 시험모습

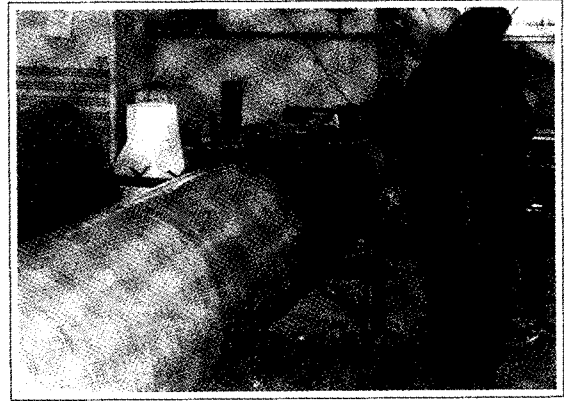


사진 4.8 대구경 복합소재 파일의 제작모습

4.2 복합소재 SHEET 파일

전기한 원형 복합소재 파일뿐만 아니라 해외에서는 복합소재 쉬트 파일도 개발하여 실용화시키고 있다. 내부식 및 경량특성으로 인한 잇점을 전기한 원형 복합소재 파일과 동일하며 안벽이나 호안등에 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 보인다. 그림 4.1에는 상용화되고 있는 복합소재 쉬트파일 단면을 보여 주고 있으며, 사진 4.9에는 미국 텍사스주에서 열화된 콘크리트를 복합소재 쉬트파일로 교체시공한 모습을 보여주고 있고 사진 4.10에는 북부캐롤라이나주에서 강재부식으로 해안의 경관을 해치는 것을 막기 위해 복합소재 쉬트파일로 교체시공한 모습을 보여 주고 있다.

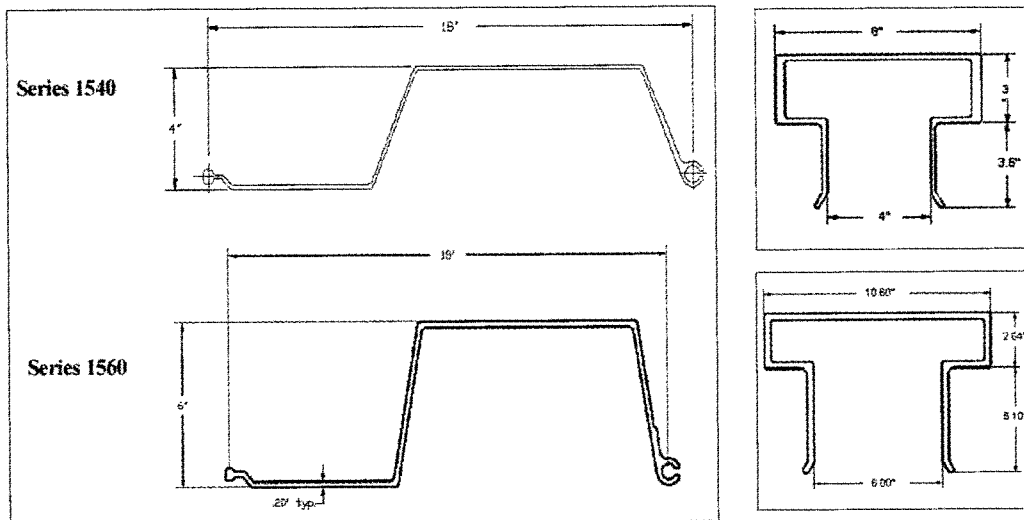


그림 4.1 상용화되고 있는 복합소재 쉬트파일 단면



사진 4.9 열화된 콘크리트를 복합소재 쉬트파일로 교체시공



사진 4.10 강재를 복합소재 쉬트파일로 교체시공

4.4. 복합소재 교량

현재 해외에서 시공되고 있는 복합소재 교량은 크게 완전 복합소재 교량과 일부 복합소재 교량이다. 완전복합소재 교량은 거더가 없는 슬래브 교량 형태나 현수교 또는 사장교 형태의 교량이고, 일부 복합소재 교량은 교량 바닥판만 콘크리트 바닥판을 복합소재 바닥판으로 시공하거나, 복합소재 철근이나 복합소재 텐돈을 이용한 프리스트레스 교량이다. 이 중 복합소재 바닥판은 콘크리트 바닥판 무게의 5분의 1정도 밖에 안되는 경량으로 자중을 줄여줄 수 있어 매우 유망한 응용분야로 부각되고 있다. 특히 자중을 줄여주므로써 하부구조에 건설비용을 줄여줄 수 있는 큰 이점이 있다. 또한 노후 콘크리트 바닥판을 복합소재 바닥판으로 교체할 경우 자중감소로 인해 활하중을 증가시켜줄 수 있어 하부구조의 별도 보강 없이 내하력 증진으로 인한 성능개선을 도모하여 DB18 교량의 DB24교량으로의 승급이 가능하므로 크게 효과적이다. 또한 바닥판 교체 시공기간이 매우 짧아 교통통제 시간도 획기적으로 줄일 수 있어 공사외 간접비용을 크게 줄여 줄 수 있다(Chages 1998).

그림 4.2에서는 기존 콘크리트 바닥판과 복합소재 바닥판의 중량을 비교한 도표를 보여주고 있다. 사진 4.11에는 미국 Delaware주의 896도로상에 시공된 거더가 없는 완전복합소재 슬래브 교량의 모습을 보여주고 있다. 그림 4.12에는 건설 예정인 사장교 형태의 완전 복합소재 교량인 미국의 Gilman교를 보여주고 있다. 사진 4.13에서는 또다른 사장교 형태의 복합소재 교량인 영국의 Aberfeldy교를 보여주고 있다. 사진 4.14에서는 미국 Delaware주의 노후화된 교량 바닥판을 VARTM으로 제작한 복합소재 바닥판으로 교체한 것을 보여주고 있다.

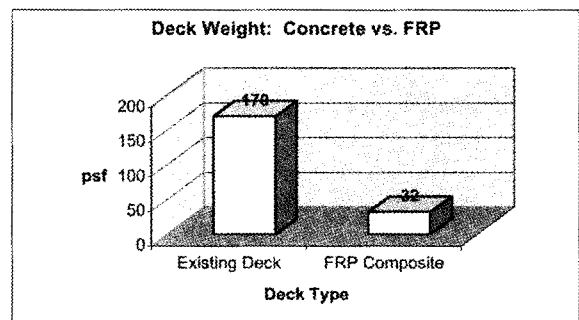


그림 4.2 콘크리트 바닥판과 복합소재 바닥판의 중량 비교

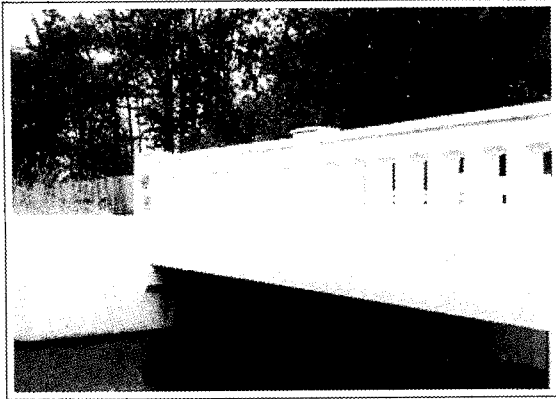


사진 4.11 완전복합소재 교량

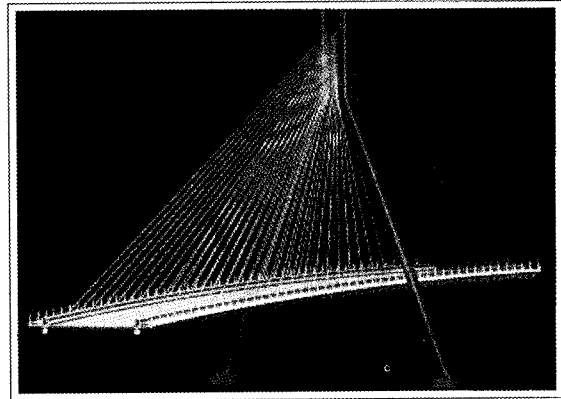


그림 4.12 완전 복합소재 사장교
(Gilman bridge)

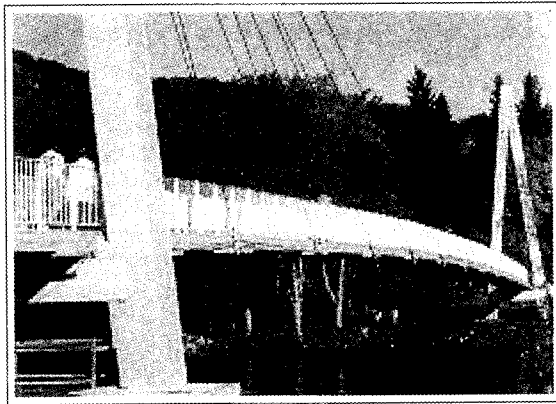


사진 4.13 완전 복합소재 사장교
(Aberfeldy bridge)

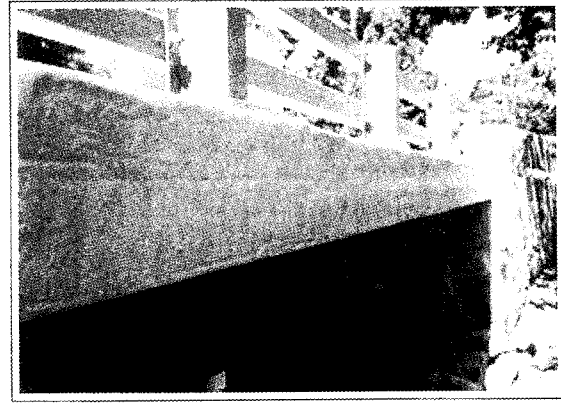


사진 4.14 노후화된 교량 바닥판을 교체한
VARTM으로 제작한 복합소재 바닥판

사진 4.15에서 사진 4.18에서는 미국 뉴욕주의 Warrensburg교에 시공된 복합소재 바닥판을 이용한 교량성능개선 사례를 보여주고 있다. 이 교량은 1940년대에 건설된 교량으로 경량 복합소재 바닥판을 이용하여 종래의 보수공법에 비해 절반정도의 예산으로 단 하루만에 신속하게 시공하여 교량을 승급시키므로써 중차량 통행 제한을 해제시켜 매우 경제적이고 효과적으로 교량의 성능개선을 시행한 사례이다. 이 교량에 사용된 복합소재 바닥판은 미국MMC(Martin Marietta Composites사)에서 개발된 것으로 그 단면은 그림4.3과 같다.

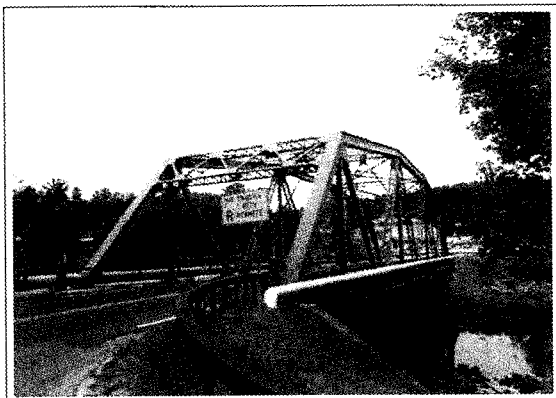


사진 4.15 시공전 교량 전경

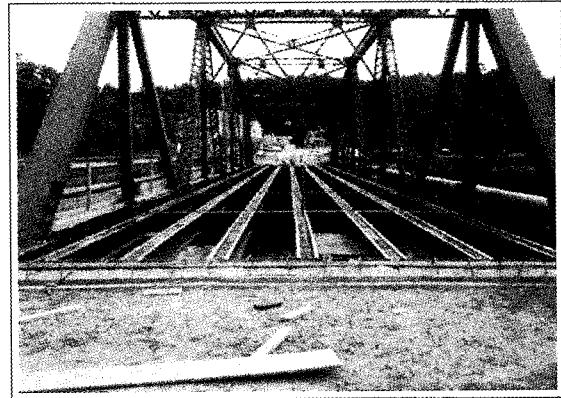


사진 4.16 콘크리트 바닥판 제거 후 모습

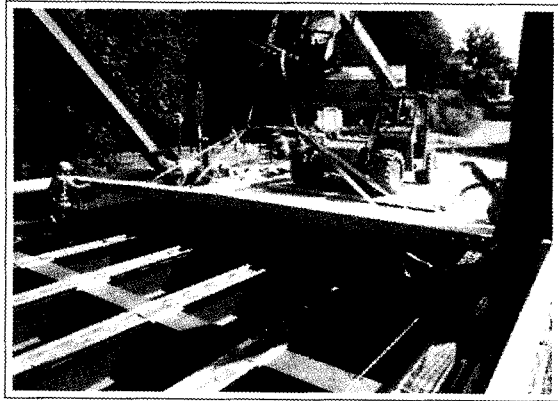


사진 4.17 복합소재 바닥판의 설치

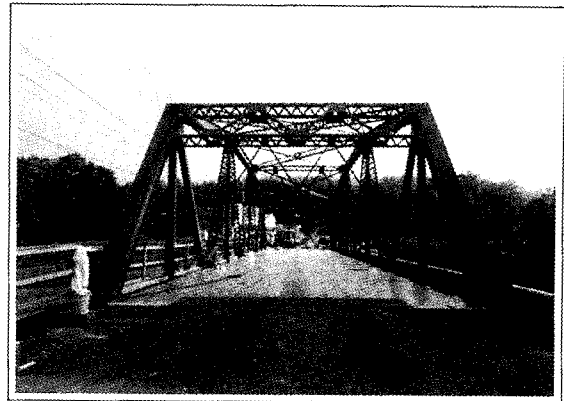


사진 4.18 복합소재 바닥판 시공완료

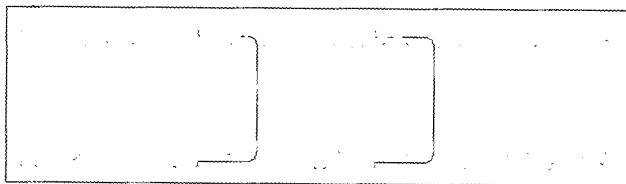


그림 4.3 미국 Martin Marietta Composites사의 교량 바닥판 단면

국내에서도 (주)국민씨아이와 국민대학교 구조안전연구소에서는 복합소재 상판 교체 공법의 국내 적용을 위하여 다양한 단면형상의 복합소재 바닥판을 시험제작하고 최적화된 단면을 개발하였다((주)국민씨아이 2000).

그림 4.4에는 개발된 복합소재 바닥판(델타테크)을 보여주고 있다. 이 개발된 복합소재 바닥판을 이용하여 국내최초로 중부고속도로 하일-호법간 확장공사 진입도로 교량에 시험 적용하였다. 사진 4.19과 사진 4.20에는 복합소재 테크의 인양, 설치 및 설치 후 중차량 통행 모습이다. 시범시공은 단 20분만에 신속히 완료되었으며 완공즉시 중차량을 통행시켜 그 안전성과 시공의 간편성을 입증하였다.

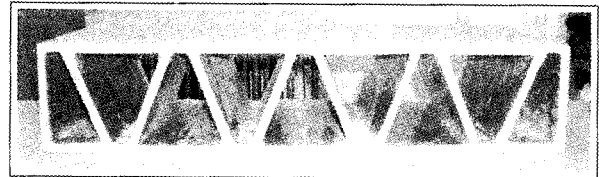


그림 4.4 국내에서 개발된 복합소재 바닥판(델타테크)



사진 4.19 복합소재 인양 모습



사진 4.20 복합소재 테크 설치후 중차량 통행 모습

4.5 복합소재 트러스 및 건축구조물

트러스는 우아하고 시선을 사로잡는 구조물이다. 그러나 외부에 노출된 트러스는 유지보수 비용으로 인해 현재 신설구조물에는 사용빈도가 낮다. 복합소재를 사용할 경우에는 설계의 유연성, 중량의 감소 및 탁월한 내구성 이외에도 유지보수 비용을 절감시킬 수 있는 잇점이 있다. 복합소재로 트러스 구조물을 만들 경우 트러스 구조만의 특이한 아름다운 형상을 다시 재현 시켜 줄 수 있을 것이다. 복합소재 트러스 구조는 미적인 면외에도 세장부재를 사용하여 대형 기하형상을 창조하므로써 건설재료를 효과적으로 사용한다. 트러스 설계기술은 복합소재의 장점인 고강도와 상대적으로 낮은 탄성계수로 인한 구조상 설계난점을 동시에 해결할 수 있는 방법을 제공한다. 개별 트러스 부재는 축방향의 인장이나 압축력을 지지한다. 축방향 강도는 섬유를 그방향으로만 나열하여 최적화 할 수 있으므로 복합소재는 축력을 받는 부재설계에 아주 적합하다. 복합소재 트러스 부재에서 인장은 섬유가 주로 받고 압축은 레진이 주로 받게 된다. 사진 4.21와 사진 4.22에는 경량의 제작된 트러스를 헬리콥터로 운반하여 육상운반로 개척 필요없이 신속하게 가설하는 모습을 보여주고 있다.

사진 4.23에서는 미 해군에서 시공한 복합소재 트러스 계단타워를 보여주고 있으며, 사진 4.24에서는 복합소재의 전파투과특성을 이용하여 인발성형 부재로 제작된 통신시설용 구조물을 보여주고 있다.

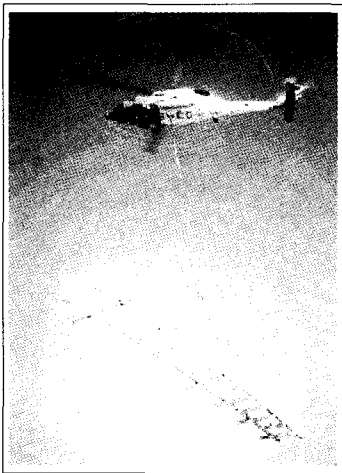


사진 4.21 제작된 트러스를 헬리콥터로 운반하는 모습

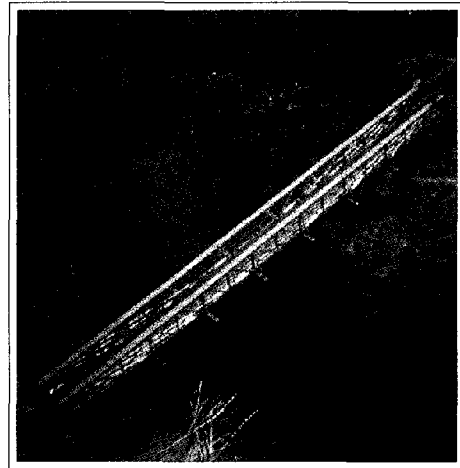


사진 4.22 복합소재 트러스 설치후 모습

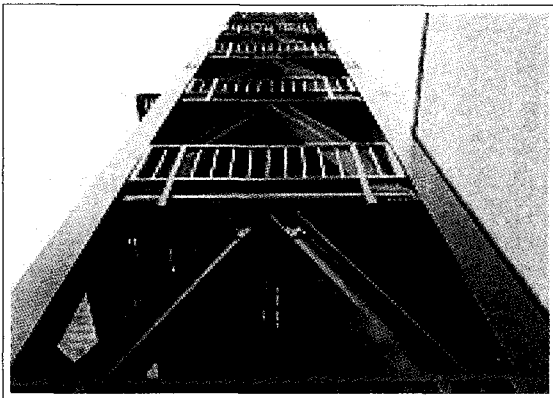


사진 4.23 복합소재 트러스 계단타워

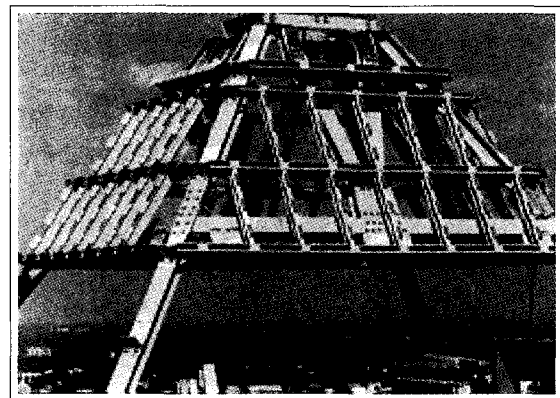


사진 4.24 복합소재를 이용한 통신시설 건물

4.7 복합소재 스페이스 패널(Composite Space Panel)

복합소재 스페이스 패널은 콘크리트 슬래브 또는 라이닝 시공시 기존의 비계공법이나 강재 데크플레이트 공법의 문제점을 개선하기 위하여 (주)국민씨아이와 국민대학교 구조안전연구소에서 공동개발한 것으로서 슬래브 콘크리트 타설시 작업하중을 지지하는 거푸집 대체용의 유리섬유강화 복합소재판과 처짐제어를 위해 복합소재판의 배면에 설치된 보강보로 구성된 스페이스 패널을 사용하여 슬래브 또는 터널 라이닝 가설시 적용하게 된다. 복합소재 스페이스 패널을 이용한 무비계 스페이스 공법은 비계 또는 동바리가 불필요하므로 공기단축, 공사비 절감 및 비계붕괴 등으로 인한 공사중 안전사고를 방지할 수 있으며, 경량이므로 설치 및 해체가 용이한 장점을 가진다. 사진 4.25에서는 복합소재 스페이스 패널을 이용한 시험시공시 패널이 설치된 모습을 보여주고 있다. 그림 4.5에서 그림 4.8까지는 복합소재 스페이스 패널을 이용한 무비계 가설 공법의 예를 보여주고 있는데, 그림 4.5에서는 철골 구조물 슬래브의 시공예를 보여주고 있으며, 그림 4.6에서는 강재교량 슬래브의 시공예를 보여주고 있다. 그림 4.7에서는 잔교식 안벽 바닥판의 시공예를 보여주고 있으며, 그림 4.8에서는 터널 라이닝의 시공예를 보여주고 있다.

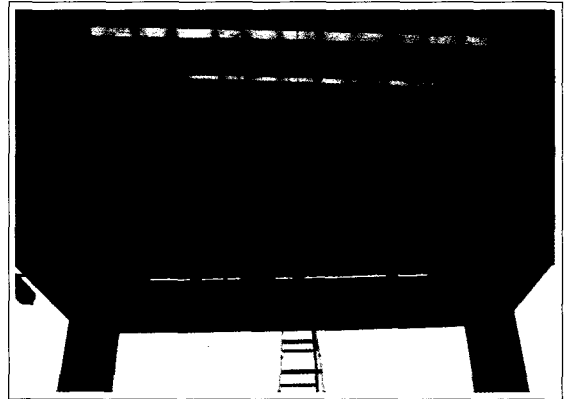


사진 4.25 복합소재 스페이스 패널이 설치된 모습

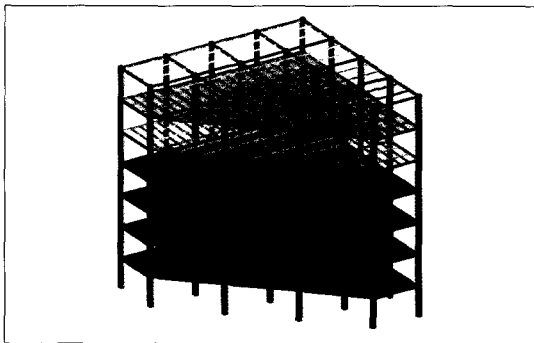


그림 4.5 철골구조물 슬래브의 시공예

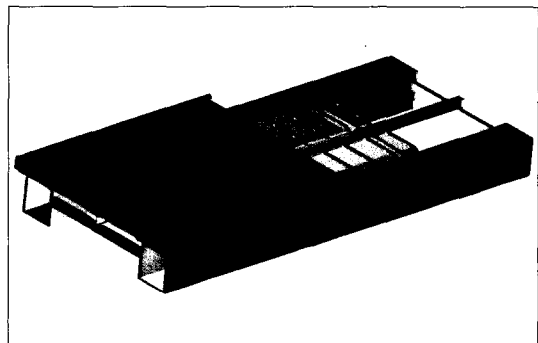


그림 4.6 강재교량 슬래브의 시공예

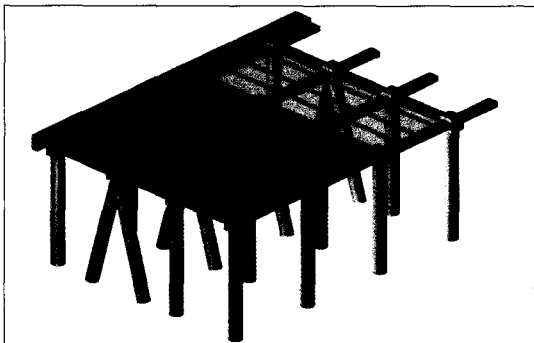


그림 4.7 잔교식 안벽 바닥판의 시공예

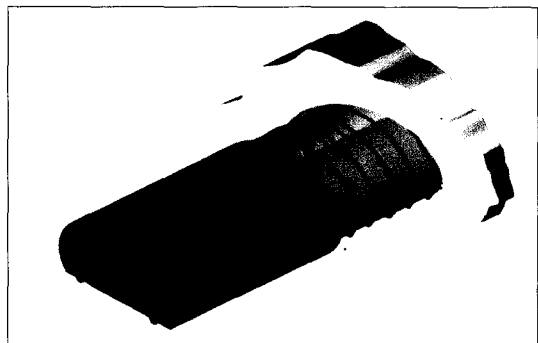


그림 4.8 터널 라이닝의 시공예

4.8 지반분야 복합소재 적용 사례

복합소재는 지반공학 분야에서도 기존의 강재를 대체할 수 있는 대안으로 떠오르고 있다. 일본에서는 사면 보강용 그라우팅용 앵커 및 보강토 옹벽의 보강재료로서 복합소재 그라운드 앵커 및 지오그리드가 개발되어 시공되고 있으며, 유럽 및 북미를 중심으로 기초보강분야, 대규모 굴착 및 토공분야, 댐 및 터널보강분야, 암반의 앵커 등에 적용되고 있다(권오엽 2000). 특히, 이탈리아의 경우 일반 플라스틱관 주변에 FRP 보강재를 부착하여 터널 막장보강 공법에 적용, 보강효과를 극대화하는 공법 및 장치를 개발하였다. 이와 같이 섬유강화 복합소재는 기존의 강재의 부식문제를 해결할 수 있을 뿐만 아니라 경량성을 가지면서, 훌륭한 인장강도 특성을 보유하고 있어 각종 지반 구조물에 널리 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

한편, 터널분야에서 FRP 복합소재의 적용은 유럽을 중심으로 활발히 이루어지고 있는데, 주로 터널 굴착공법과 병행하여 적용되는 터널보조공법의 주지보재인 강재를 대응하기 위한 목적으로 사용되고 있다. 이러한 터널분야 적용예로는 부식에 취약하여 영구 지보재료의 활용이 곤란한 기존 강재로봇트를 대체하여 시공성 및 내구성을 증대시킬 수 있는 'FRP 록볼트 공법', 굴착대상 막장면을 일정한 강성을 보유한 FRP관을 이용하여 막장을 선행 보강하는 막장 안정공법인 'FRP 막장 수평보강 공법(사진 4.26, 그림 4.9)', 지반조건이 취약한 지역에서 터널굴착이 진행될 경우 터널 안정성 확보를 위해 적용하는 보조공법인 강관다단 그라우팅 공법의 강관부식문제와 시공성 문제를 해결하기 위한 'FRP보강 그라우팅 공법'을 들 수 있다.

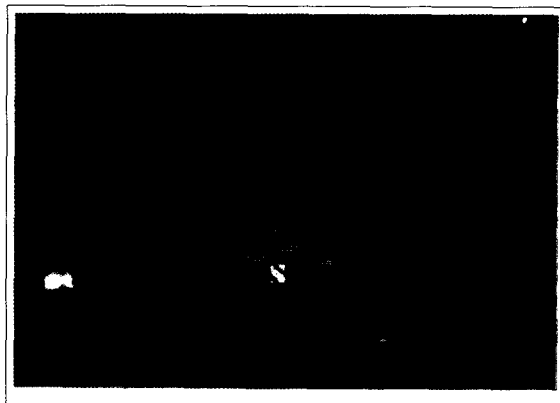


사진 4.26 FRP를 이용한 막장수평보강 시공전경

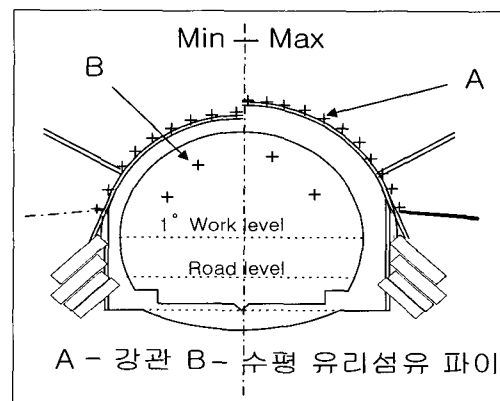


그림 4.9 막장 수평보강공법 적용 예

특히, FRP보강 그라우팅 공법은 파이프루프 공법 및 일반 그라우팅 공법을 일련의 단일 공정으로 시공하는 공법으로, 기존의 강관 보강형 다단 그라우팅 공법의 장점을 최대한 활용하면서 강관의 부식 및 시공상의 문제점으로 해결하기 위해 FRP복합소재 파이프를 대체·보완하기 위해 국내에서 개발된 공법이다(권오엽 2000). 그림 4.10에서는 FRP보강 그라우팅공법의 FRP파이프의 형상 및 구조를 보여주고 있다.

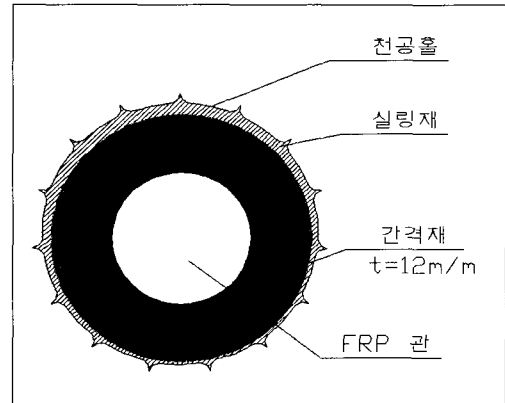
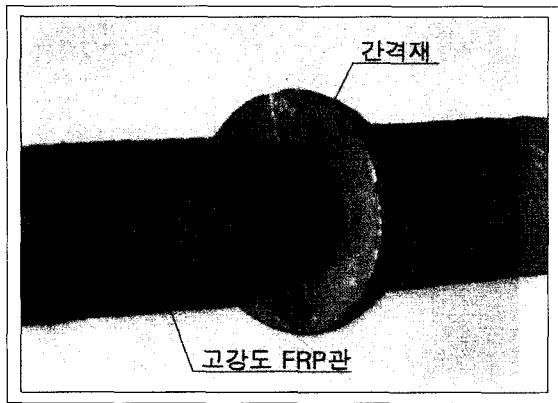


그림 4.10 FRP보강 그라우팅공법의 FRP파이프의 형상 및 구조

FRP보강 그라우팅공법은 토사사면보강(사진 4.27), 암반사면보강(사진 4.28), 직립사면보강(사진 4.29) 등의 사면보강 및 터널보강(사진 4.30)에 적용될 수 있다.

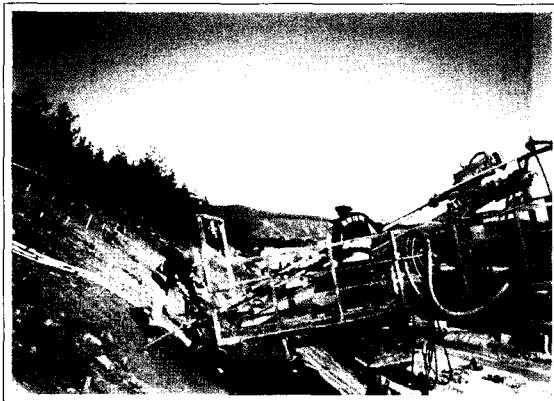


사진 4.27 토사사면보강 예



사진 4.28 암반사면보강 예



사진 4.29 직립사면보강 예

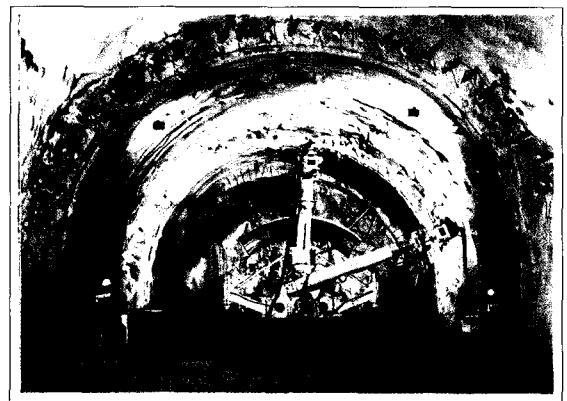


사진 4.30 터널보강 예

6. 결 론

본고에서는 복합소재의 건설분야 분야적용을 위한 이해를 돕기 위하여 복합소재의 특성을 기술하였으며, 건설분야에 적용할 수 있는 복합소재 구조물의 제조방법과 해외 및 국내의 건설분야 적용사례를 소개하였다. 복합소재는 경량, 고강도, 내부식, 고내구성 등 콘크리트와 강재를 대체할 수 있는 훌륭한 특성을 보유하고 있고, 섬유, 수지 등 복합소재 제작에 필요한 모든 원자재가 국내에서 생산되고 있으며, 항공, 방위산업분야의 기술이 이미 상당 수준 축적되어 있어 국내에서도 멀지 않은 장래에 새로운 건설재료로 이용될 수 있을 것으로 보인다.

참 고 문 헌

1. Stockton, S. L. (1997) *Composite materials for civil engineering structures*. Technical Letter No. 1110-2-548, U.S.Army.
2. Chin, J. W. (1996) *Materials aspects of fiber-reinforced polymer composites in infrastructure*, NIST.
3. Kukich, D.S (1994) *An overview of the pultrusion process*, CCM 94-01, Center for Composite Material, Delaware.
4. Steenkamer, D. A. (1994) *An overview of the resin transfer molding process*. CCM 94-02, Center for Composite Material, Delaware.
5. Gillio, E. F. (1997) *Co-injection resin transfer molding of hybrid composites*. CCM 97-23, Center for Composite Material, Delaware.
6. 이성우 (2000a) 복합소재 구조물 제작을 위한 VARTM 제조공정 도입 및 건설분야 활용기법 연구개발, 연구보고서, KMU/SSRC-00/02, 국민대학교 구조안전연구소.
7. Chajes, M. (1998) Advanced composite bridges in delaware, *Proceeding of the 2nd International Conference on Composites in Infrastructure*, Vol. 1, pp. 645-650.2.
8. (주)국민씨아이 (2000) 대형 구조물의 하중 지지용 복합소재 트러스 데크 구조, 특허출원서, 제 2000-10-0065335호, 특허청.
9. 이성우 (2000b) 고내구성 신소재 해상파일 개발연구(Ⅱ), 연구보고서, KMU/SSRC-00/03, 국민대학교 구조안전연구소
10. 권오엽(2000) FRP 보강 그라우팅 공법의 개발, 연구보고서, 한국지반공학회