

플랜트 건설분야의 복합재료 활용현황

윤 순 중*

1. 서 론

한가지 이상의 재료를 조합(synthetic assembly)하여 원래의 각 재료보다 더 효율적인 재료가 되도록 만든 합성재(combined material)라고 정의되는 복합재는 항공우주산업분야, 군용선박분야 등 첨단산업분야에서 특수한 목적에 사용하기 위해 개발되었던 것으로 생산, 해석, 설계 관련 기술들이 민간 산업분야로 급속히 전환되면서 건설분야에서도 이 재료에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

특히, 유럽의 여러 나라, 미국, 일본 등 선진국에서는 연구결과를 이용하여 실제로 이 복합재료를 사용한 각종 구조물이 정부기관과 여러 대학, 업체의 주도로 건설되어 사용되고 있는 실정이다.

이러한 복합재료는 단위중량당의 강도와 강성이 기존 건설재료인 철이나 콘크리트에 비해 매우 크고, 각종 화학성분에 의한 부식에 대한 저항성이 뛰어나며, 전기와 열의 전도율이 낮고, 자성을 띠지 않으며, 가볍고, 충격이나 피로에 대한 저항성이 크고, 전파의 흐름을 방해하지 않는 등의 여러 가지 물리적, 역학적 장점을 가지고 있다. 그러나 유리섬유(glassfiber)를 보강재로 사용한 경우에는

태양빛으로부터 나오는 자외선(UV; ultraviolet ray)에 의해 내구성이 저하되며, 산에는 강하나 알칼리에는 약하며, 대부분의 섬유보강 플라스틱은 유연(flexible)하기 때문에 잘 휘어지는 경향이 있고, 높은 온도에서는 재료의 역학적 성질이 급격히 변하며, 고온의 불에 타기도 한다. 또한, 재료의 생산 초기단계에서는 단면이 수축되기도 하므로 잔류응력이 발생할 수 있으며, 지속적으로 재하되는 장기하중에 의해서 점탄성 성질(viscoelastic properties)로 인해 크리프변형(creep deformation)이 발생할 수 있는 단점도 가지고 있다.

구조물의 종류 및 그 구조물에 요구되는 기능이 다양한 만큼 복합재의 종류도 매우 다양하지만 크게 섬유보강 열가소성 플라스틱(fiber reinforced thermoplastic)과 섬유보강 열경화성 플라스틱(fiber reinforced thermosetting plastic)으로 분류할 수 있는데 이 중에서 건설 구조용 복합재(structural composites)로 가장 많이 사용되는 것은 섬유보강 열경화성 플라스틱(fiber reinforced thermosetting plastic)으로서 굳은 후 다시 열을 가하면 액체상태로 변화되는 열가소성 플라스틱과 달리 다시 열을 가해도 액체상태로 변화되지 않는 성질을 가지고 있다.

* 홍익대학교 토목공학과 부교수

2. 구조용 복합재의 특성

2.1 구조용 복합재의 구성

일반적으로 구조용 복합재(structural composites)는 하중을 주로 전달하고 지지하는 역할을 하는 보강섬유(fiber: glass, carbon(graphite[®]), aramid(kevlar[®]), boron, etc.)와 섬유를 유해한 외부환경으로부터 격리시켜 피복효과를 주고 구조용 부재의 모양을 유지(dimensional stability)시켜주며 보강섬유에 하중을 분배하여 전달해주는 역할을 하는 매트릭스(matrix: epoxy, polyester, vinylester, phenolics, etc.), 필요유무에 따라 첨가되는 소량의 약품(fire retardant, etc.) 등 과 색소(color: olive green, gray, beige, etc.), 그리고 체움재(filler: aluminium silicate, calcium carbonate, aluminium trihydrate, antimony trioxide, clay, etc.) 등으로 구성되어 있다. 이들 구성재료에 대해 좀 더 자세히 설명하면 다음과 같다.

■ 보강섬유

보강섬유의 종류에는 여러 가지가 있으며, 대표적인 것들을 나열하면, 유리섬유(glass fiber, 또는 fiberglass), carbon(graphite) fiber, aramid(kevlar[®]) fiber, boron fiber, UHMD polyethylene(spectra[®]), ceramic 등이 있다. 이들은 각기 서로 다른 특징을 가지고 있으며, 이들 중 건설재료에 적합하고 많이 사용되는 보강섬유는 유리섬유와 탄소섬유인데 가격은 유리섬유가 더 저렴하다. 유리섬유는 미국의 오웬스코닝(Owens-Corning)사가 처음으로 대량 생산화 시킨 것으로 여러 가지 금속 산화물이 포함된 유리분말이며 E-glass와 S-glass로 크게 구분된다. E-glass유리섬유는 가장 가격이 저렴해서 보편적으로 많이 사용되며 특히 화학적인 구성이 전기적인 절연에 유리하도록 구성되어 있는 장점이 있다. S-glass는 E-glass보다 강도와 부식에 대한 저항성이 매우 크며 가격 또한 더욱 비싼 편이다.

탄소섬유는 1959년 미국의 유니언 카바이트사에 의해 처음 상품화되었으며 아크릴로니트릴(polyacrylonitrile: PAN), 역청수지 또는 레이온 원료를 사

용하여 만든다. 탄소섬유 복합재는 유리섬유나 아라미드섬유 복합재보다 취성이 크며 금속과 같이 사용하면 전기부식이 되는 단점도 있다.

■ 매트릭스

매트릭스는 보강섬유를 일체로 묶어주는 역할을 하는 binder 또는 풀(glue)과 같은 것으로 종류에는 organic(e.g., thermosetting plastics, thermoplastics), carbon, metal, ceramic, concrete 등이 있으며, 건설 구조용 복합재의 생산에 가장 많이 사용되고 있는 매트릭스는 열경화성 플라스틱(thermosetting plastics)으로서 선택하여 사용할 경우 양생온도와 양생기간, glass transition temperature(Tg), 열변화에 따른 변형정도, 즉, 사용온도 등을 고려해야 한다. 열경화성 플라스틱(thermosetting plastics)의 종류는 polyesters, vinylesters, epoxies, phenolics, cyanate esters, bismaleimides, polyimides, polyurethanes 등이 있고, 이 중 폴리에스터수지는 가격이 저렴하고, 취급이 용이하며 기계, 전기, 화학적인 특성이 뛰어나서 널리 사용되고 있다. 또한 폴리에스터 수지와 비교하여 비닐에스터수지는 가격이 비싸지만 흡수와 수축이 적고 화학적인 저항성이 더 뛰어나서 화학적인 부식환경과 높은 내습저항성이 요구되는 외부 구조물 등에 많이 사용되고 있다. 에폭시수지는 폴리에스터 수지나 비닐에스터수지보다 더 고가이지만 일반적인 온도에서 건조수축이 작고 강성과 강도가 높으며 부식에 대한 저항성이 매우 높다. 이 에폭시수지는 콘크리트 구조물의 보수 보강에 가장 많이 사용되고 있다.

■ 체움재(filler)

여러 종류의 체움재가 첨가되어 복합재의 성능을 향상시키기 위해 사용되고 있는데 이를 간략히 설명하면 다음과 같다(Creative Pultrusions, 1993).

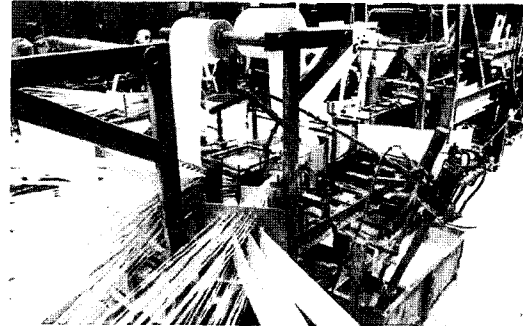
- Aluminum silicate(kaolin clay):
 - Chemical resistance
 - Opacity(Opaqueness)
 - Good surface finish
 - Insulation properties

- Calcium carbonate:
 - Good surface
 - Whiteness
 - Opacity
 - Lowering costs
- Alumina trihydrate(or with clays):
 - Fire retardancy
 - Fire retardancy with insulation properties
- Antimony trioxide:
 - Fire retardancy

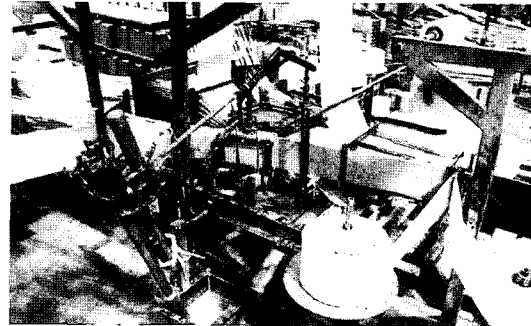
2.2 구조용 복합재의 생산방법

구조용 복합재의 생산방법은 대단히 중요하며, 하중의 형태에 따른 부재의 종류, 부재의 생산에 사용되는 원자재(raw materials: resin, fiber, etc.)의 종류, 부재에 요구되는 기능 등 다양한 조건에 부합되도록 선택하여 사용하여야 한다. 구조용 복합재의 생산방법은 이미 다양하게 개발되어 사용되고 있다. 이들 방법은 제조공정상의 특징에 따라 크게 lay-up, molding, continuous formation 3가지로 나눌 수 있으며 그 중에서 건설분야에서 가장 많이 사용되는 구조용 복합재는 pultrusion(Strongwell, 1999)이라는 방법에 의해 생산된다(그림 1 참조).

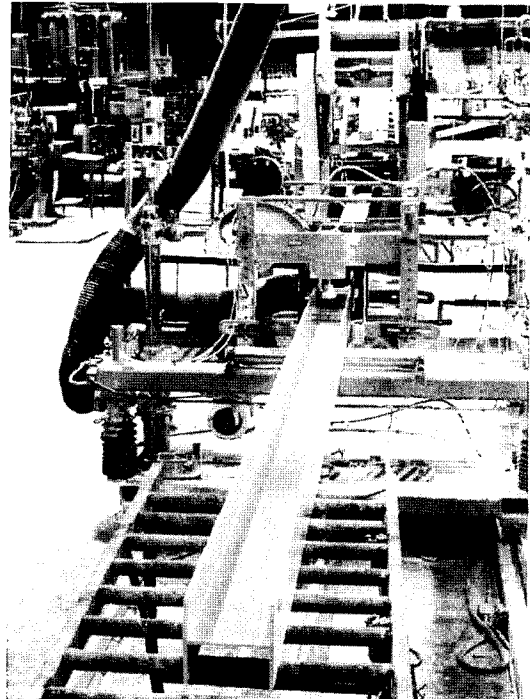
펄트루전(pultrusion) 방법은 일정한 단면을 가진 가열된 금속형틀 속으로 기계장치에 의해 연속 펄라멘트나 선형의 섬유가 수지가 스며들게 한 후 연속해서 공급하여 성형된 제품이 작업대를 빠져 나오면 절단톱에 의해 필요한 길이로 자르는 방법으로 인발성형이라고도 하며 일정한 단면을 가진 큰 부재를 경제적으로 생산할 수 있는 방법이다. 또한 금형 내부에 가열한 봉을 정착하여 속이 빈 부재나 복잡한 형상의 단면도 제작할 수 있고 여러 가지 변형을 통해 부재의 축이 곡선인 부재를 생산해 낼 수 있는 방법도 개발되었으나 대부분의 경우 직선의 제품을 주로 생산한다. 이 방법은 축방향으로 보강섬유가 배치되므로 축방향의 강도와 강성은 높으나 그 직각방향의 강도와 강성은 낮은 단점이 있으므로 사용되는 곳에 따라서 부재축의 직각방향으로 추가적인 보강이 필요할 때도 있다.



(a) 보강 섬유가 공급되는 모양 1



(b) 보강 섬유가 공급되는 모양 2



(c) 완제품이 생산되고 있는 모양

그림 1 Pultrusion Process(Strongwell, 1999)

2.3 복합재료의 강도와 역학적 성질

복합재료의 강도는 사용된 보강섬유의 종류와 매트릭스의 종류, 그리고 제조방법에 따라 다르다. 앞에서 설명한 바와 같이 복합재료를 생산하는 방법에는 여러 가지가 있으나 이를 구조용 부재로 사용함에 있어서는 펄트루전 공정이 대량생산에 가장 유리하다고 할 수 있다. 따라서 여기서는 펄트루전 공정을 통해 생산된 열경화성 플라스틱 구조용 복합재를 중심으로 설명하고자 한다. 보강섬유의 종류에 따른 복합재의 강도와 여러 가지 역학적 성질을 살펴보면 각각 표 1과 같다.

표 1 보강섬유에 따른 복합재의 강도와 역학적 성질

Property Material	Density (kg/m ³)	Tensile strength(MPa)	Elastic modulus(GPa)
High modulus carbon epoxy	1600	1000	180
Low modulus carbon epoxy	1600	1600	140
E-glass epoxy	1900	1000	40
Kevlar epoxy	1400	1400	75
Mild steel	7800	550	210
Aluminum alloy	2800	450	70
Fiber volume ratio: 60%			

복합재를 사용한 구조물의 설계 및 해석을 위하여 재료의 역학적 성질을 정확하게 구하는 것은 매우 중요하며 특히 등방성 재료와는 달리 각 방향에 대한 재료의 역학적 성질이 다르기 때문에 시편의 형태와 하중의 재하방법 등을 표준화한 시험방법이 필요하다고 할 수 있다. 현재 이러한 복합재료의 역학적 성질을 구하기 위한 많은 시험방법이 개발되고 있는 단계이며, 일부는 표준화된 시험법(ASTM)으로 사용되고 있다. 그 중 몇 가지를 그림과 함께 소개하면 다음과 같다.

▷ 인장강도(ASTM D638)

그림 2 참조

▷ 압축강도(ASTM D695)

그림 3 참조

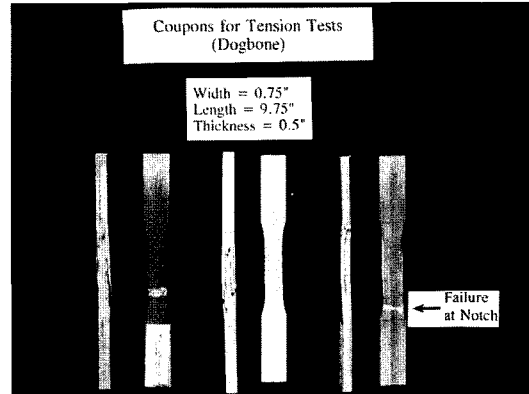
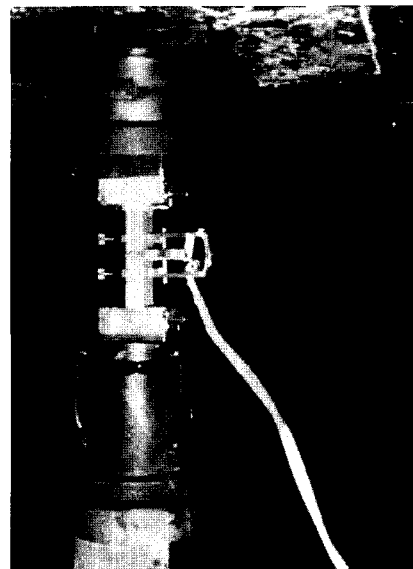
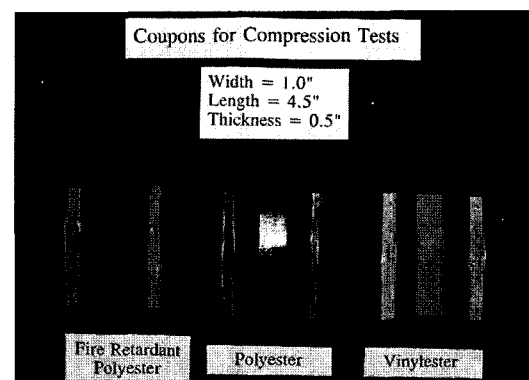


그림 2 Tension test coupon specimen



(a) Compression test set-up



(b) Compressive test coupon

그림 3 Compressive test coupon specimen

▷휨강도(ASTM D790)

휨강도는 시편을 두 개의 지지점에 올려놓고 시편의 중앙에 하중을 재하하여 측정한다.

▷전단강도(ASTM D638)

전단강도시험은 여러 가지 시편형상에 따른 많은 시험방법이 있으나 그 중 가장 대표적인 방법은 Iosipescu법에 의한 시험법이다. 이 방법은 시편제작이 쉽고 인장력이나 압축력으로 전단강도를 측정할 수 있기 때문에 특별한 장치가 필요하지 않다. 정확하면서도 쉬운 방법은 45° off-axis tension test 방법이나 시편의 길이가 인장시험에 적합하도록 충분한 길이를 확보할 수 있어야 사용할 수 있다.

▷충격강도

Izod 충격은 시계추와 같은 충격을 시편에 가하여 결정하며 그 시편은 노치가 있을 수도 있고 없을 수도 있다. 가해지는 충격하중으로 인해 시편이 파괴되는데 필요한 에너지를 Izod 충격강도로 결정한다.

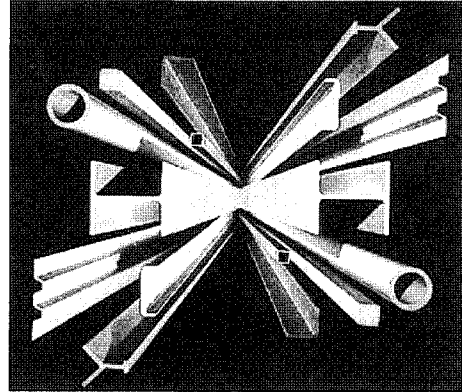


그림 4 Creative Pultrusion(1993)

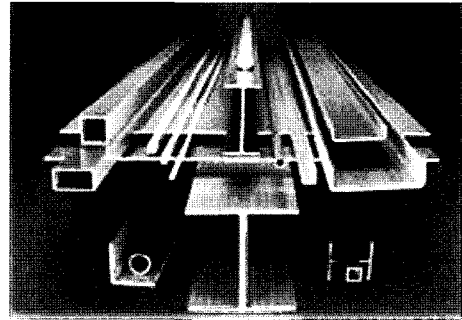


그림 5 Strongwell(1999)

2.3 건설 구조용 복합재의 종류

건설 구조용 복합재료는 그 종류가 무수히 많기 때문에 실제로 생산하여 사용하고 있는 것들을 대상으로 간략히 설명하면 다음과 같다.

● 구조용 부재

구조용 부재의 단면형상은 기존 강재의 단면형상과 유사하며, 단면형상의 최적화가 진행되고 있는 실정이므로 구체적인 단면의 치수는 생략하고 미국의 여러 회사에서 생산되고 있는 제품을 그림으로 보여주면 그림 4, 5와 같다.

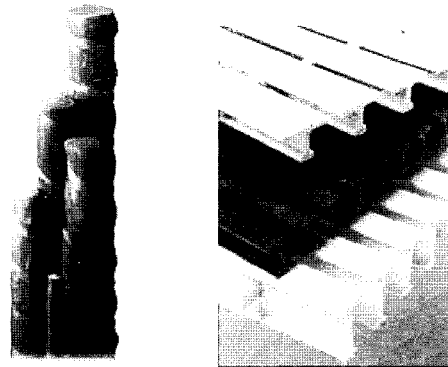


그림 6 Re-bar(glass fiber) and grating

● Re-bar 및 기타

그림 6~8 참조

● Tank 및 Silo, Pipe, Duct

그림 10 참조

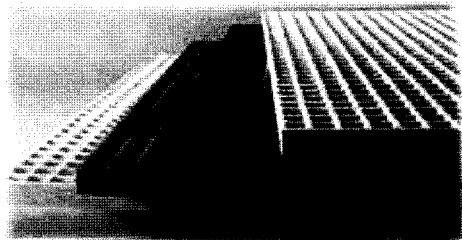


그림 7 grating(2)

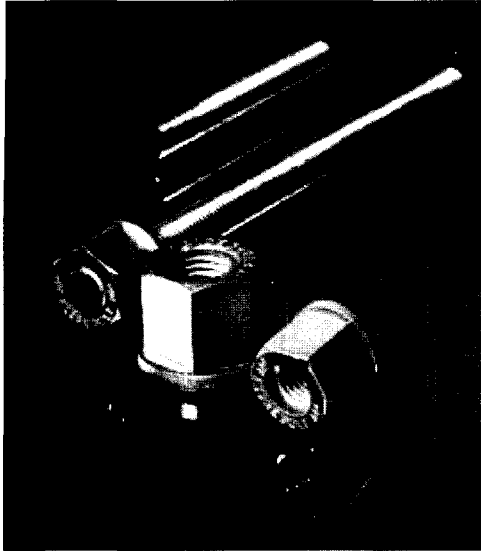
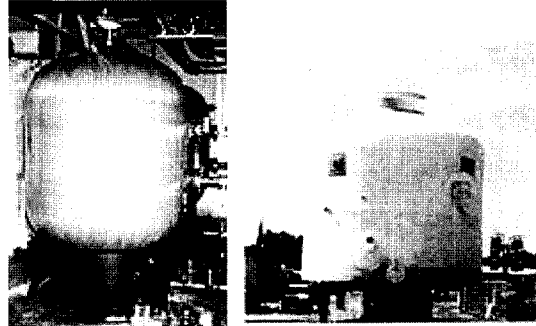


그림 8 Fiber bolt and nut



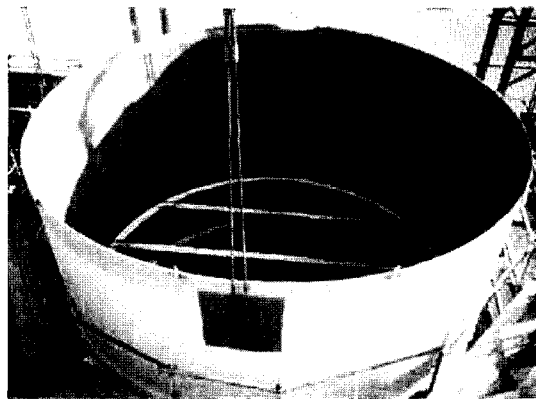
그림 9 Re-bar 배근



(a)



(b)



(c)

그림 10

3. 복합재를 사용한 구조물의 현황

현재 사용되고 있는 건설 구조용 복합재를 사용한 구조물들을 살펴보면 매우 다양하고 광범위하나 가장 많이 사용되는 분야인 빌딩, 건축구조물과 플랜트 및 해양구조물의 경우를 간단하게 소개하면 다음과 같다.

- Building Structure

그림 11~13 참조

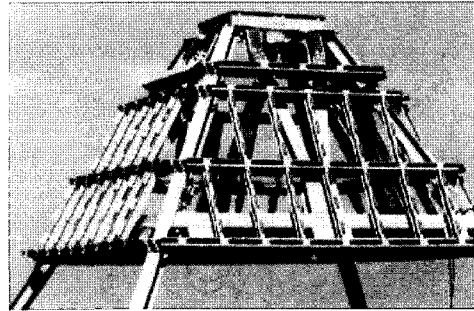
- Plant structure

복합재는 특히 화학성분과 염분에 의한 부식 저항성이 높고 자체중량이 작은 점 등 때문에 섬유,

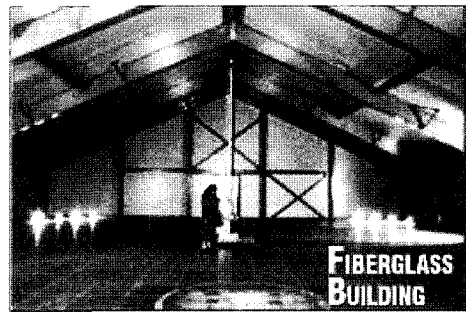
제지, 폐수처리 공장 및 화학약품 제조시설, 전자제품 생산관련시설(비자성이 요구됨) 등 플랜트구조물, 각종 선박이 접안하는 부두시설물이나 해양석유개발과 관련된 각종 해양구조물 등에 널리 사용되고 있다. 이를 간단히 그림으로 살펴보면 다음과 같다.



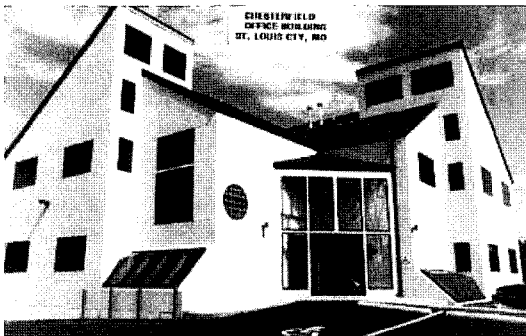
(a)



(a)

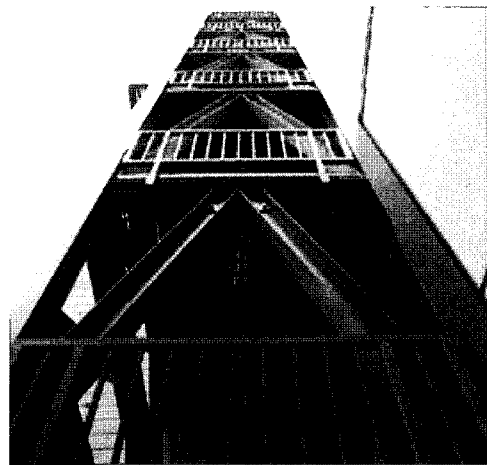


(b)



(b)

그림 11 Graham FRP Composite
(<http://www.grahamfrp.com>)



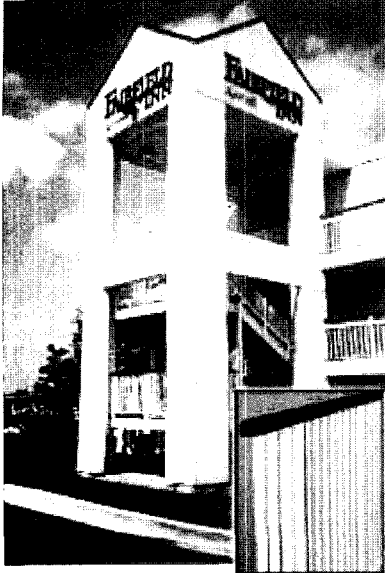
(c)



그림 12 Owens Corning
(<http://www.owenscorning.com>)

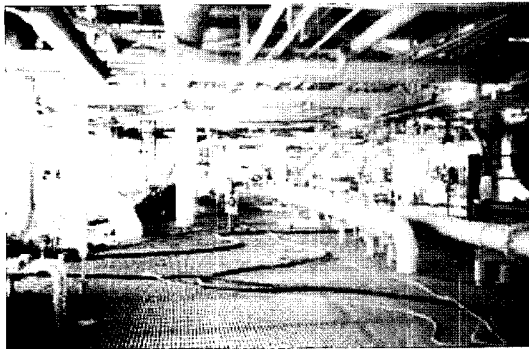


(d)



(e)

그림 13 Strongwell(<http://www.strongwell.com>)



(a)



(b)

그림 14 Strongwell(<http://www.strongwell.com>)

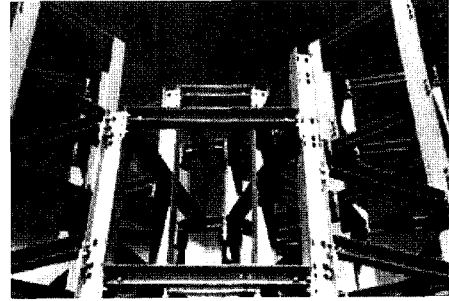


그림 15 Creative Pultrusions
(<http://www.creativepultrusions.com>)

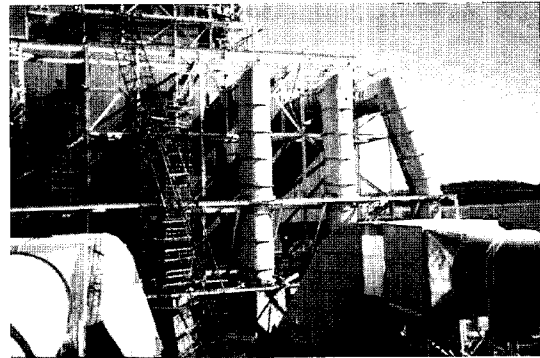
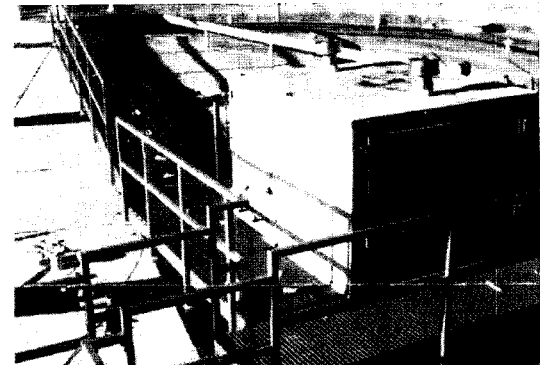


그림 16 An-Cor Industrial Plastics FRP Fabricators
(<http://www.an-cor.com>)



(a)



(b)



(c)

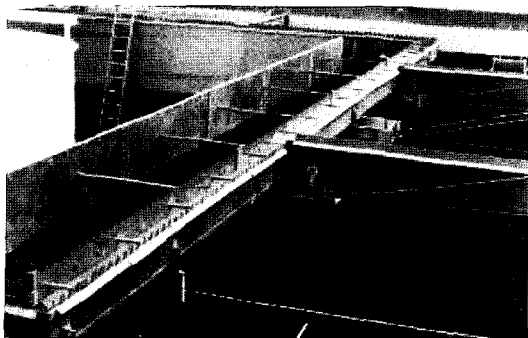
그림 17 Strongwell(<http://www.strongwell.com>)



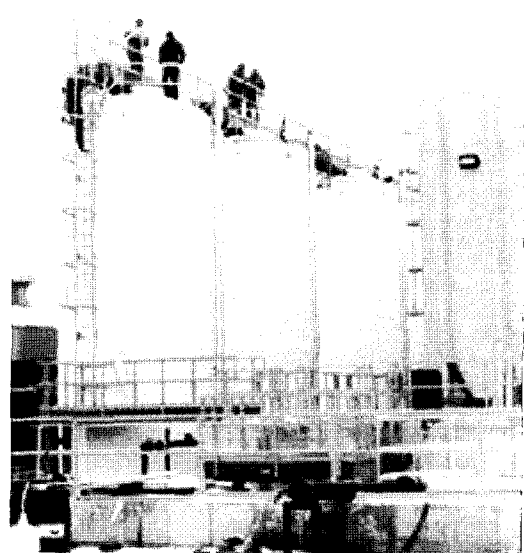
그림 18 Waste water treatment facility



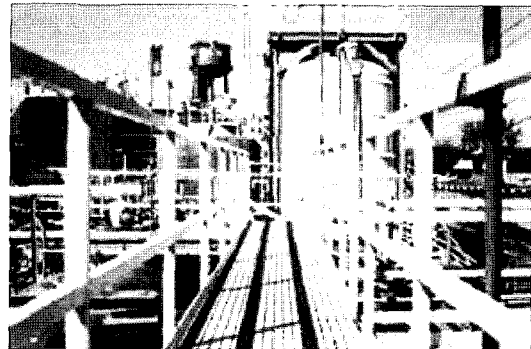
그림 19 Strongwell(<http://www.strongwell.com>)



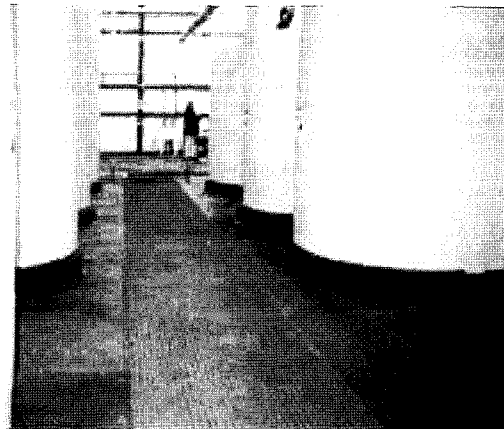
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 20 Strongwell(<http://www.strongwell.com>)

4. 설계, 해석, 생산 등을 위한 연구개발

다양하게 급변하고 있는 사회환경과 더불어 토목, 건축 구조물의 경우에 있어서도 새로운 공법과 기술의 개발 및 신소재의 사용 등 여러 가지 측면에서 변화가 필요하다. 구조물에 요구되는 기능, 주변환경과의 조화, 유지관리, 교통량의 폭발적 증가 등 갖가지 역할을 효과적으로 수행하기 위해서는 복합재와 같은 새로운 재료의 개발은 필연적이며, 그에 따른 연구 또한 필수적이라고 할 수 있다.

구조용 복합재는 일부 제조회사에서 자신들의 표준화된 부재(standard structural shape)를 생산하여 약적한 후 선택하여 사용할 수 있는 단계에 있지만 구조물과 구조물내의 부재에 요구되는 역할에 따라 부재의 생산자체를 설계(custom pultrusion)하여 사용할 수도 있다.

앞에서도 설명한 바와 같이 구조용 복합재는 여러 가지 방법으로 생산될 수 있으며, laminated, unidirectional(layered), winding, braiding 등 생산 방법에 따라 재료의 역학적 성질이 판이하게 다르므로 해석과정에서 재료의 방향성과 적층조건 등을 고려해야만 한다.

부재의 역학적 거동을 해석하기 위해서는 해석 방법에 대한 연구와 병행해서 실험적 연구가 진행되어야 한다. 해석방법에 대한 연구는 상당한 수준에 이미 도달해 있고 실험적 연구결과도 여러 기관에서 발표되고 있다. 또한 해석과 설계는 분리하여 따로 생각할 수 없는 것으로서 단면에 대한 표준화와 병행하여 해석과 설계에 필요한 여러 가지 역학적, 물리적 성질을 구해야 하고, 이 결과를 이용하여 여러 가지 단기 및 장기하중조건과 갖가지 경계조건하에서의 부재 및 구조시스템의 거동을 연구해야 한다.

따라서 부재를 효과적으로 생산하여 사용하기 위해서는 여러 분야에서 연구, 개발된 자료의 수집과 분석이 필요하며, 건설재료로 사용하는데 필요한 여러 가지 기술자료를 습득할 수 있도록 지속적인 실험적, 이론적 연구가 필요하다. 이 과정에서 기존 건설재료를 사용하면서 얻어진 여러 가지 지식들은 유용하게 이용될 수 있으므로, 건설 구조

용 복합재를 사용한 구조물의 해석, 설계, 시공기술이 급속히 발전될 수 있다.

이와 같은 여러 가지 필요한 자료가 습득되면 산업계, 학교와 학회, 연구기관, 관공서 등이 함께 각종 관련기준을 공동으로 개발할 수 있을 것이다. 복합재를 본격적으로 구조용 부재로 사용하기 위해서는 다음과 같은 기준들이 확립되어야 한다.

- (1) 재료에 대한 표준시험법
- (2) 복합재의 생산방법에 대한 기준
- (3) 품질관리규정
- (4) 해석과 설계에 필요한 Guideline
- (5) 파괴의 명확한 기준
- (6) 연결부의 기준
- (7) 시공관련 상세정보 등

5. 복합재의 활용전망, 향후과제 및 결론

복합재는 여러 가지 우수한 재료특성으로 많은 분야에서 그 사용이 점차 증가되고 있다. 미국과 여러 선진국의 경우 업계와 학계에서 지속적으로 연구한 결과 상당한 기술축적이 이루어지고 있으며, 완전하지는 못하지만 그러한 기술자료를 사용하여 여러 종류의 구조물을 시공하여 사용하고 있고 실제로 사용하면서 발견되는 문제점들을 지속적으로 연구하고 있다.

미국의 NCC(National Composite Center; www.compositecenter.org)는 1996년 Ohio주의 Kettering에 설립된 비영리기관으로서 복합재의 생산과 사용을 통한 시장의 활성화로부터 경제성장을 도모하고 있다. 이 기관은 산업계, 학교, 정부기관과 함께 자동차부문(Automotive Sector), 소비재부문(Commercial Sector), 국방/항공우주부문(Defense/Aero-space Sector), 사회기초기반사업부문(Infrastructure Sector)에 대해 연구개발협력을 하고 있다. 우리가 주목해야 할 부문은 사회기초기반시설분야로써 NCC는 첨단복합재를 사용하여 새로운 구조물을 건설하고 기존 구조물을 보수, 보강하는 데에 초점을 맞추고 있다.

이러한 복합재료를 건설현장에 사용하는데 있어서 발생할 수 있는 문제중의 하나는 경제성이다. 구조

물의 경제성을 분석하기 위해서는 자재의 생산, 시공, 사용연한, 유지관리 및 보수보강, 그리고 각각에 필요한 장비의 사용이나 시공기간, 교통의 통제 등으로 인한 인원 및 물류운송의 지연 때문에 야기되는 비용 등 종합적이고 포괄적인 분석이 필수적이다. 이러한 첨단복합재료가 항상 다른 재료보다 효과적이라고 할 수는 없다. 아직 많은 부분에 대한 연구가 필요하고 또한 체계화된 설계기준의 확립과 표준시험법의 제정 등이 수반되어야 하므로 복합재가 널리 사용되기 위해서는 더 많은 연구와 시간이 필요하다.

참 고 문 헌

1. AISC, Load and Resistance Factor Design Manual of Steel Construction, AISC LRFD Manual, Second Edition, American Institute of Steel Construction, Inc, 1993
2. ASCE, Structural Plastics Design Manual, Task Committee on Design of the Structural Plastics Research Council of the Research Council on the American Society of Civil Engineers, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 63, Vol. 1 and Vol. 2, Published by the American Society of Civil Engineers, New York, 1984
3. Creative Pultrusions, The Pultex[®] Pultrusion Design Manual of Pultex[®] Standard and Custom Reinforced Polymer Structural Profiles, Creative Pultrusions, Inc., Alum Bank, Pennsylvania, 1993(<http://www.creativepultrusions.com>)
4. Schwartz, M. M., Composite Materials Handbook, 2nd ed., McGraw-Hill, Inc., New York, 1992
5. Strongwell, Extren[®] Design Manual, Strongwell, Bristol, Virginia, 1999(<http://www.strongwell.com>)
6. Taly, N., Design of Modern Highway Bridges, McGraw-Hill, Inc., New York, 1998
7. Yoon, S. J., Local Buckling of Pultruded I-Shape Columns, Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia, 1993
8. Zureick, A., Thornton, W. A., and Burgett, L. B., Load and Resistance Factor Design, LRFD for Structural Steel Buildings, Education Extension Series, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia, 1989
9. Zureick, A., Hoke, M. J., and Muzzy, J. D., Design, Construction, and Repair of Composite Polymer Structures for Civil Engineers, Continuing Education Series, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia, 1999 