

복합소재의 건설분야 응용현황과 콘크리트 합성압축부재의 개발

이 성 우* · 박 신 전**

Application of Composites to Construction Industry and Development of Concrete Filled Composite Compression Member

Lee, Sung Woo* · Park, Sin Zeon**

Key Words: composites, construction, concrete, pultrusion, VARTM, filament winding, confinement

Abstract

Due to many advantages of advanced composite materials, research on the application of composites to the construction industry is initiated. In this paper, fabrication methods efficient for infrastructures and application examples of each method are discussed. It also presents the structural characteristics of concrete filled glass fiber reinforced composite tubular member. Experimental results shows that strength and ductility of composite compression member is considerably increased due to concrete confinement action of composite surface.

1. 서 론

최근들어 강재 구조물이나 철근콘크리트 구조물의 노후화 문제가 심각해짐에 따라 이에 대한 유지관리 대책이 절실히 요구되고 있다. 기존 구조물의 내구연한이 다하여 보수 또는 교체가 요구되는 구조물이 기하급수적으로 증가하고 있고, 기간시설의 건설이 날로 증가함에 따라 유지관리에 대한 부담이 점점 가중되고 있다. 이에 따라 해외에서도 복합소재를 건설분야에 적용하기 위한 연구개발이 매우 활발하게 이루어지고 있으며^{(1),(2)}, 도로 및 해안구조물에 실제 적용을 시작하고 있는 실정이다.

본 논문에서는 복합소재의 건설분야 응용현황을 제조기법별로 기술하였다. 또한 국내의 건설분야 적용 연구개발 사례로 고부식 해양환경 하에서 기존의 재료인 콘크리트의 열화와 강재의 부식문제를 해결할 수 있는 복합소재 해상파일 개발의 예를 들었으며, 본 논

문에서는 일단계 연구내용의 일부인 콘크리트 합성압축부재의 구조적 특성을 실험적으로 분석한 내용을 기술하였다.

2. 복합소재 건설분야 응용현황

2.1 건설재료로서 복합소재

건설재료로서 복합소재의 장점은 우선 강재처럼 부식하지 않고 콘크리트처럼 열화하지 않아 내구년수를 적어도 두 배 이상 향상시킬 수 있다는 것이다. 또한 경량, 고강도이므로 자중을 획기적으로 줄일 수 있어 내하력의 증진이 가능하고, 시공장비의 소형화와 공기를 단축하며 교량보수 시에는 교통통제 기간을 줄여 공사비를 절감할 수 있다. 복합소재의 내부식 특성은 유지관리와 내구성 측면에서 매우 중요하며 이 외에 절연특성, 환경친화적 특성등의 장점을 가지고 있다.

2.2 인발성형(Pultrusion)기법 이용현황

* 국민대학교 토목환경공학부 교수

** 국민대학교 토목환경공학부 석사과정

인발성형기법은 자동화된 공정으로 구조부재를 연속적으로 제작할 수 있는 경제적인 제작기법으로⁽³⁾ 트러스 부재, 보강근, 교량상판 등의 제작에 적용되고 있다. 인발성형기법의 전설분야 이용현황을 기술하여 보면 다음과 같다. 사진 1은 국민대학교 복합소재 실험실에서 인발성형 제작기법으로 튜브부재를 제작하는 모습이며, 사진 2에는 미국 Strongwell사의 인발성형으로 제작한 구조부재들로서 I형강, 튜브, 채널 등 많은 제품이 이미 개발되어 실용화되고 있다. 사진 3은 Strongwell사에서 개발한 Double web 단면을 가진 보로서 복합소재 교량의 거더에 적용을 시도하고 있다. 사진 4는 복합소재 채널과 튜브로 제작한 트러스 교량이며, 사진 5는 미국 Creative Pultrusions사에서 개발한 복합소재 교량상판의 시공모습이다. 사진 6은 미국 Martin Marietta Composites사에서 개발한 복합소재 교량상판에 대한 피로시험 모습이며 그림 1에는 Georgia Institute of Technology에서 개발한 삼각형 단면의 복합소재 교량상판의 모양을 보여주고 있다.

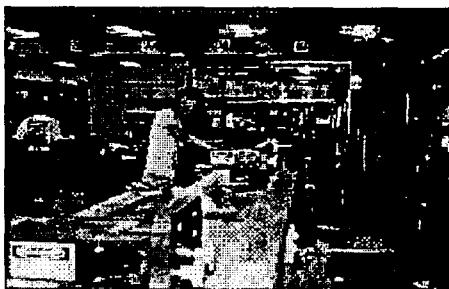


사진 1 Pultrusion에 의한 복합소재 튜브 제작

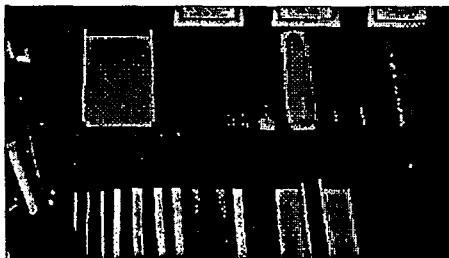


사진 2 Strongwell사의 Pultrusion부재

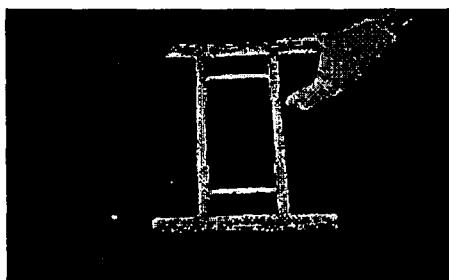


사진 3 복합소재 Double Web Beam

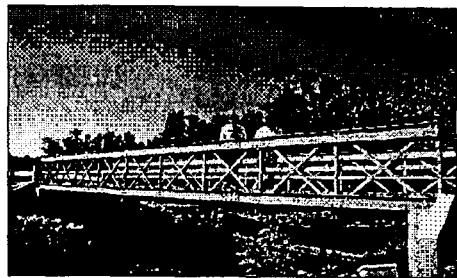


사진 4 복합소재 트러스 교량

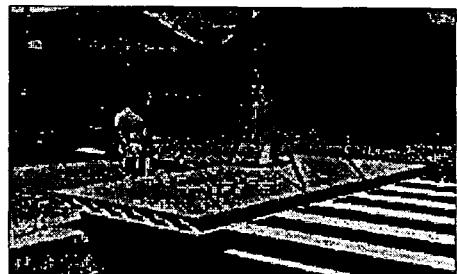


사진 5 Creative Pultrusions사의
복합소재 교량상판

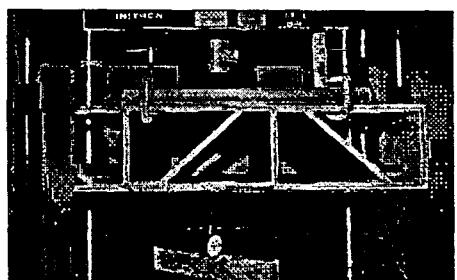


사진 6 Martin Marietta Composites사의
복합소재 교량상판 피로시험

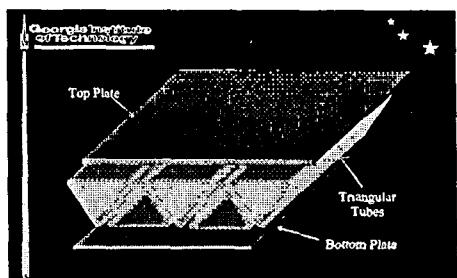


그림 1 삼각형 단면의 복합소재 교량상판
(Georgia Inst. of Tech.)

2.3 VARTM기법 이용현황

VARTM(Vacuum Assisted Resin Transfer Molding)제작기법은 한쪽 면의 금형과 Vacuum bag을

사용하여 진공상태에서 두께방향으로 신속하게 수지를 험침시키는 성형방법으로 교량상판, 파일 등 대형 구조부재 제작에 매우 적합한 기법이다. 사진 8에는 이 기법을 이용하여 시험용 플레이트를 제작하는 모습을 보여주고 있다.



사진 8 VARTM을 이용한 복합소재 플레이트 제작

특히 최근 미국에서 개발된 VARTM기법의 한 종류인 SCRIMP(Seemann's Composite Resin Infusion Molding Process)기법은 대형 토목구조물의 제작에 사용되어 그 효율성을 인정받고 있다. 이 제작기법에서는 투과성이 높은 medium을 사용하여 빠른 성형속도를 얻을 수 있으며 한 쪽 금형만을 사용하고 금형재질의 제한이 비교적 적어 매우 경제적이며 경화되지 않은 수지가 밀폐된 상태에서 제작되므로 작업환경이 우수하다. 미국의 Hardcore Composites(HCI)사는 현재 SCRIMP제작기법으로 건설용 복합소재 구조물을 개발 생산하는 대표적인 업체로서 복합소재 해상파일과 복합소재 교량상판 그리고 완전복합소재 교량 등을 제작하고 있다. VARTM으로 제작된 몇 가지 예를 들어보면, 사진 9는 Cape May-Lewes Ferry Terminal에 설치한 복합소재 해상파일이며, 사진 10은 들픈의 콘크리트 상판을 복합소재 프리포음과 함께 일체로 시공한 모습이다. 사진 11은 현재 운용중인 복합소재 펜더로서 내부는 우레탄 충진재와 강재 보강재로 일체성형되었다. 사진 12에는 Delaware주의 896도로상에 시공된 완전복합소재 교량의 모습을 보여주고 있다⁽⁴⁾. 사진 13은 노후화된 교량의 상판을 VARTM으로 제작한 복합소재 상판으로 교체한 것으로 현장설치가 수 시간 내에 완료되고 활하중에 대한 내하력을 증진시킬 수 있는 매우 효과적인 공법이다.

2.4 필라멘트 와인딩 기법 이용현황

필라멘트 와인딩 제작기법은 기둥, 파일 등 대형 폐단면의 구조부재 제작에 적합한 공법이다. 이 제작기법은 이미 튜브, 파이프 또는 저장탱크의 제작에 널리 사용되고 있는 방법이다. 사진 14에는 국민대의 복합소재 해상파일 개발 프로젝트에서 시험파일을 필

라멘트 와인딩으로 제작하는 모습을 보여주고 있다. 사진 15에는 미국 Lancaster Composites사에서 필라멘트 와인딩으로 제작한 튜브에 콘크리트를 충진하여 만든 복합소재 해상파일을 보여주고 있다. 사진 16은 미 California에서 교각에 현장용 필라멘트 와인딩기를 사용하여 내진보강을 실시하는 모습이다.



사진 9 복합소재 해상파일

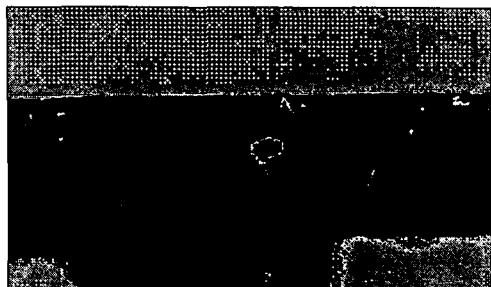


사진 10 복합소재 프리포음 부두상판

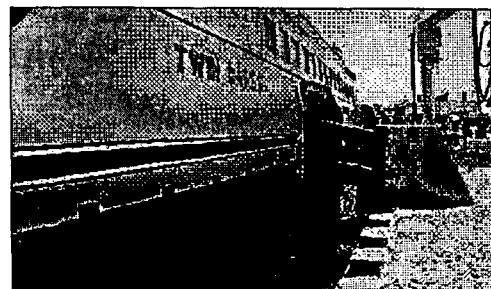


사진 11 신소재 펜더 운용모습

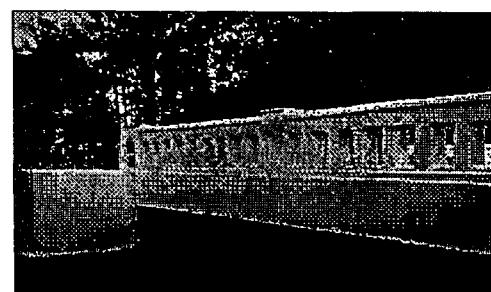


사진 12 완전 복합소재 교량



사진 13 판형교의 콘크리트 상판을 교체한
복합소재 교량상판



사진 14 필라멘트 와인딩에 의한 복합소재 튜브 제작



그림 15 복합소재 튜브에 콘크리트를 충진한 파일

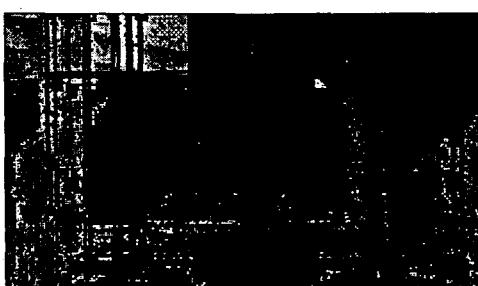


사진 16 현장 필라멘트 와인딩에 의한
교각의 내진보강

2.5 건설분야 복합소재 응용전망

건설분야 복합소재의 응용분야를 단기, 장기로 구

분해 보면 표 1과 같다. 단기적으로 적용가능한 분야는 현재 당장 실용화가 가능한 경구조물로서 구조적인 중요성이 그다지 크지 않은 구조부재들이다. 장기적으로 적용 가능한 분야는 당장의 실용화는 어렵지만 수년내 내구성에 관련된 자료가 충분히 확보되고 설계기준이 완성되면 조만간 실용화될 수 있을 것으로 보인다.

표 1 건설분야 복합소재 적용 분류

분야	적용 대상	제조기법
단기	Grating	PT, VARTM
	Handrails	PT, FW
	Bearing supports	PT, FW
	Light posts	FW
	Sewer pipe	FW, VARTM
	Frames, truss	PT
	Concrete repair (plates and wrap)	PT, VARTM, HL
	Bridge deck	PT, VARTM
장기	Fender piles	VARTM, FW
	Reinforcing bar	PT
	Post-tensioning	PT
	Prestressing	PT
	Load-bearing piles	VARTM, FW
	Column	VARTM, FW

주) PT : Pultrusion , FW : Filament Winding

VARTM : Vacuum Assisted Resin Transfer Molding

HL : Hand Lay-up

3. 콘크리트 합성압축부재의 개발

3.1 연구배경

현재 국민대학교 구조안전연구소에서는 해양수산부의 지원을 받아 복합소재를 건설분야에 본격적으로 적용하기 위한 첫 프로젝트로 복합소재 해상파일을 개발하고 있다. 본 연구에서 개발하고 있는 복합소재 파일은 복합소재 튜브에 콘크리트를 충진한 합성압축부재로서 내부식, 고내구성, 고강도 장점을 가지고 있어 고부식 해양환경에 매우 적합할 것으로 평가된다. 본 연구결과를 활용하여 앞으로 기둥, 교각, 육상파일 등에 사용될 수 있는 새로운 압축부재가 개발될 수 있을 것으로 전망된다.

복합소재 튜브에 콘크리트를 충진한 합성압축부재의 경우 섬유의 hoop방향 구속(confinement)효과로 압축강도와 연성이 크게 증가하는 것으로 보고되고 있다⁽⁵⁾. 그림 2에는 각종 합성압축부재의 압축거동을 비교하여 보여주고 있으며, 그림 3에는 보통 상태의 콘크리트 실린더가 압축력을 받을 때와 복합소재 튜브에 콘크리트를 충진한 실린더가 압축력을 받을 때와 비교하여 보여주고 있다.

3.2 합성압축공시체 제작

GFRP 복합소재 튜브는 사용된 섬유의 구조와 제작기법에 따른 성능을 평가하기 위하여 필라멘트 와인딩 공법과 다축 유리섬유 직포(multiaxial fabric)를 이용한 핸드레이이업으로 제작하였다. 이 복합소재 튜브에 콘크리트를 충진하여 양생시킨 후 합성 압축강도 공시체를 완성하였다. 복합소재 튜브 제작에 사용된 섬유 및 수지는 표 2와 같다.

표 2 복합소재 튜브 제작에 사용된 섬유 및 수지

제작수지	층도	유적	제조사
단섬유 매트	1st layer wrapping	450g/m ²	Owens-corning
E glass Roving	필라멘트 와인딩	2200tex(g/m)	Vetrotex
E glassStitched Fabric	다축 유리섬유 직포	500g/m ² , 900g/m ²	MAX(동일산자)
불포화 폴리에스테르	섬유 기저재료	isophthalic type	Polycoat, Epovia

탈형을 위하여 이형체와 폴리에스터 필름으로 감싼 단소강관 멘드릴에 단섬유 매트로 제1층을 만들고 이후 2층 필라멘트 와인딩기에 의해 55mm폭으로 10가닥의 2200tex로빙을 소요의 두께로 와인딩하였다. 다축 유리섬유 직포를 이용하여 제작한 복합재료 튜브는 기준이 되는 다축 유리섬유 직포를 소요 섬유량에 따라 적충하여 제작하였다. 내부충진 콘크리트로는 설계기준강도 420kg/cm²인 콘크리트를 사용하였다. 각 압축공시체의 종류는 필라멘트 와인딩(FW)과 다축 유리섬유 직포를 사용한 핸드레이이업(HL)에 대하여 유리섬유 직포의 적충수를 기준으로 구분하였다.

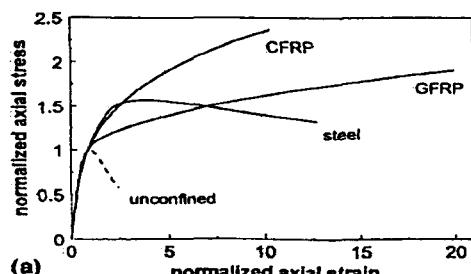


그림 2 합성압축부재의 축방향 응력-변형률 비교

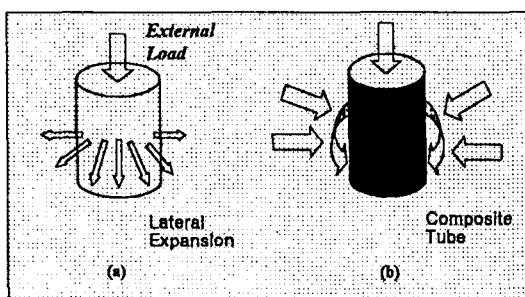


그림 3 합성압축부재의 구속효과

3.3 시험결과

무근콘크리트 압축강도 공시체에 대한 강도시험 결과 최대압축응력의 평균은 448kg/cm²이다. 필라멘트 와인딩으로 제작한 복합재료 튜브에 콘크리트를 충진한 압축강도 시험체의 시험결과 복합소재 튜브의 구속 효과에 의해 압축강도는 튜브의 두께에 따라 약 2.3 배에서 4.8배 증가하는 것으로 나타났다. 필라멘트 와인딩으로 제작한 복합소재 튜브로 구속된 압축공시체의 응력-변형률 곡선을 그림 4에 도시하였다. 응력-변형률 곡선은 초기에는 무근콘크리트의 응력-변형률 곡선과 매우 유사한 양상을 보이며 무근콘크리트의 최대응력 근처에서 섬유량에 따라 대개 2차적인 선형성을 보이는 곡선이 나타난다. 최대하중에서 압축강도 공시체의 파괴양상은 실린더 중앙부의 로빙이 끊어지기 시작하면서 전체적으로 확산되는 것을 알 수 있었으며 결과적으로 개개의 로빙이 분리파괴되는 현상을 볼 수 있었다. 다축 유리섬유 직포로 제작한 복합소재 튜브에 콘크리트를 충진한 압축강도 시험체의 시험결과 축방향 최대응력은 무근콘크리트 압축강도 시험체에 대하여 약 2배에서 4배까지 증가하는 것으로 나타났고 최대 강도의 증가추세는 필라멘트 와인딩으로 제작한 실린더보다 더 작게 나타나는 것을 알 수 있었다. 다축 유리섬유 직포으로 제작한 복합소재 튜브로 구속된 압축시험체의 응력-변형률 곡선은 그림 5와 같다. 최대하중에서 압축시험체의 파괴양상은 GFRP튜브의 취약부분인 길이방향 마무리면이 슬립(slip)에 의해 벌어지면서 충간분리파괴가 일어났다.

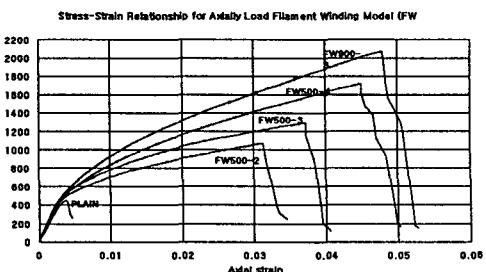


그림 4 필라멘트 와인딩 제작 합성압축부재의 응력-변형률 곡선

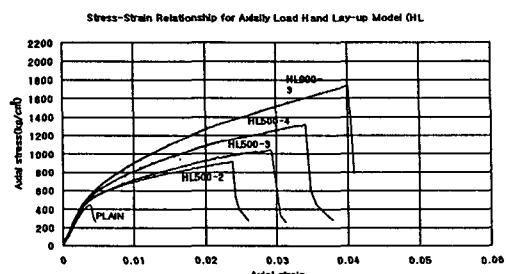


그림 5 다축 유리섬유 직포로 제작한 합성압축부재의 응력-변형률 곡선

3.4 시험결과 분석

복합소재 튜브 합성압축부재의 파괴강도는 hoop 방향 섬유량을 시험체의 두께비(t/D)와 섬유부피비 그리고 hoop방향 섬유부피비(α)로 분석하였다. 그림 6과 같이 필라멘트 와인딩과 다축 유리섬유 직포로 제작한 튜브로 만든 합성압축부재에 대해 거의 같은 강도증가 추세를 얻을 수 있어 사용된 섬유구조와 상관없이 복합소재 합성압축부재 강도를 예측할 수 있었다.

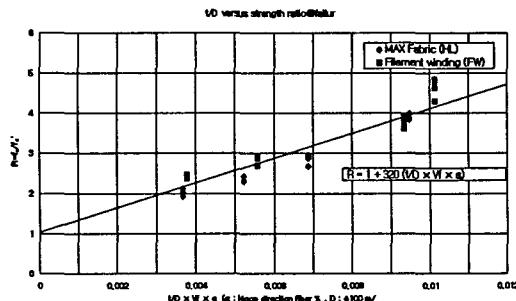


그림 6 수정된 두께비에 따른 파괴강도 증가추세

그림 3과 그림 4에서 보이는 바와 같이 복합소재 튜브로 구속된 합성압축부재의 압축거동의 가장 큰 특징으로 콘크리트의 압축영역과 복합소재 튜브의 구속영역이라는 분명한 구분을 보이며, hoop방향의 섬유량이 증가할수록 GFRP튜브의 구속에 의한 파괴강도가 증가하고 파괴시 연성도 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 그림 7에서는 무근콘크리트의 압축파괴 변형률($\epsilon = 0.003$)에서 강도증가추세를 보여주고 있다. 여기에서 보는 바와 같이 복합소재 튜브 자체의 압축하중 분담과 구속효과로 약 15~25%의 응력증가를 보이며 복합소재 튜브의 두께에 따른 응력증가의 차이가 크지 않은 것을 알 수 있었다⁽⁶⁾. 설계시 콘크리트 합성압축부재의 강도와 연성증가를 모두 이용할 수는 없으나 무근 콘크리트 압축파괴 변형률($\epsilon = 0.003$)에서의 강도증가계수(C_m)를 설계에 반영할 수는 있을 것이다.

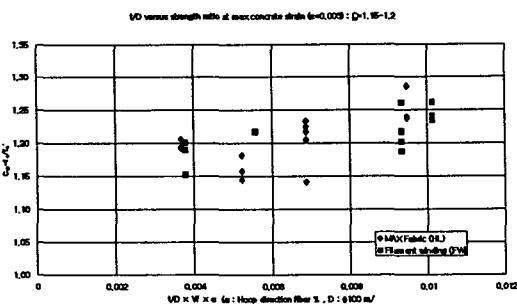


그림 7 $\epsilon = 0.003$ 의 합성부재의 강도증가

4. 결론

본 논문에서는 복합소재의 건설분야 응용현황을 인발성형, VARTM, 필라멘트 와인딩 제조기법의 활용분야별로 기술하였으며, 국내에서도 소개한 복합소재 제조기법을 활용하여 건설분야에 새로운 구조재가 개발될 수 있는 가능성을 제시하였다. 또한 현재 수행중인 복합소재 해상파일 개발 프로젝트에서 복합소재 튜브에 콘크리트를 충진한 합성압축부재의 거동특성을 분석하였다. 복합소재 합성압축부재는 콘크리트에 대한 구속효과로 강도가 크게 증진되며, 최종적으로 연성파괴가 일어나 파괴시 매우 유리하다. 따라서 앞으로 콘크리트 충진 합성압축부재는 내부식, 고내구성, 고강도, 고연성 특징을 이용하여 해상파일을 비롯한 기둥, 교각 등에 사용될 수 있는 새로운 압축부재로 개발될 수 있을 것으로 전망된다.

감사의 글

본 연구는 해양수산부의 지원으로 수행하고 있으며, 해양수산부의 연구지원에 감사드립니다.

참고문헌

- J. R. Hazen, Composites for Infrastructure, Ray Publishing-Guide for Civil Engineers, 1998.
- S. L. Stockton, Composite Materials for Civil Engineering Structures, Technical Letter No. 1110-2-548, U.S.Army, Mar 1997.
- D. S. Kukich, An Overview of the Pultrusion Process, CCM 94-01, Center for Composite Material, Delaware, Mar 1994.
- M. Chajes, "Advanced Composite Bridges in Delaware," Proceeding of the 2nd International Conference on Composites in Infrastructure Vol 1, p645-650, Jan 1998.
- J. Kanatharana and L. W. Lu, "Strength and Ductility of Concrete Columns Reinforced by FRP Tubes," Second International Conference on Composites in Infrastructure, Tuscon, Arizona, Jan 1998, p.370-379.
- D. Lillistone, "Concrete-Filled Fibre Reinforced Plastic Circular Columns," Composite Construction-Conventional and Innovative, Conference Report, IABSE, Sep 1997.
- C. P. R. Hoppel et al, Design and Analysis of Composite Wraps for Concrete Columns, CCM 95-15, Center for Composite Material, Delaware, July 1995.