工學碩士 學位論文

필라멘트 와인딩 工法에 의해 製造된 小型 船舶用 複合材料 軸의 設計 및 應力 解析에 관한 研究

A Study on Stress Analysis and Design of Composites Shaft on Small Ship by Filament Winding Process

指導 敎授 金 允 海

2002年 08月

韓國海洋大學校 大學院

機 械 工 學 科

林　澈　文

목 차

NOMENCLATURE

σ_{ij} : Vertical stress

τ_{ij} : Shear stress

γ_{ij} : Shear strain

ε_i : Vertical strain

E_{ij} : stiffness

x, y, z : Direction of axis

Q_{ij} : Reduced stiffness

$\overline{Q_{ij}}$: Transformed reduced stiffness

S_{ij} : Compliance

l : $\cos\theta$

m : $\sin\theta$

N_{ij} : Positive resultant forces

M_{ij} : Positive resultant moments

$\boldsymbol{t}$: Total thickness of laminate

k_{ij} : Bending curvature

ε_i^0 : Midplane tensile strain

A_{ij} : Extensional stiffness

B_{ij} : Coupling stiffness

D_{ij} : Bending stiffness

PS : Horse power

Toq : Torque

D : Diameter of shaft

R : Ratio of diameter

$\overline{\sigma}_i$: Average stress of shaft direction

$\overline{\tau}_{xy}$: Average shear stress

$(\tau_{xy})_M$: Average shear stress of shaft

Abstract

Filament Winding Process is a comparatively simple operation in which continuous reinforcements in the form of roving are wound over a rotating mandrel. And now well established as a versatile method for storage tanks and pipe for the chemical and other industries.

This paper investigates that technology is ensured by filament winding process and composites shaft of small ship is developed. Property of composites shaft has high strength and effect of materials reduction as it is compared to metal shaft. So, purpose of the study is to ensure manufacture process of composites shaft, stress analysis and design of structure for small ship

The purpose of this study is to design and to analyze the stress of composite shaft which is wound by filament winding method. The composites shaft has high strength and reduction in weight compared to metal shaft. Manufacturing composites shaft is used to metal shaft(SUS420), it is diameter(D=40), length(L=300). The shaft is designed to considerate tensile, compression, torsion and vibration.

As composites shaft which is influenced the largest by torsion was analyzed, the diameter is as large as shear stress is smaller. If angle of winding is 90-degree, shear elongation becomes large and torsion moment is large. In order to replace metal shaft with composite shaft, the diameter of shaft was determined on 40mm and the ratio of

diameter was determined on 0.4 for torsion moment. As angle of winding is 30-60 degree, shear elongation was not different. In the case that angle of winding is 75-degree over, composites shaft may be fractured by torsion. So, diameter of composite shaft must be grown, because of safe of composite shaft.

제 1 장 서 론

1.1 연구배경

복합재료의 응용은 항공, 우주 분야에서뿐만 아니라, 조선산업에서도 날로 증가됨에 따라서 복합재료 산업은 이미 많은 발전 단계에 이르고 있다. 항공, 우주 분야에서는 autoclave를 이용하여 항공기의 동체나 헬리곱터의 블레이드를 복합재료화하였고, 자동차의 범퍼 등도 프리폼에 수지를 주입하는 RTM성형법을 이용하여 복합재료화 하고 있으며, 고강도, 고탄성률을 지닌 섬유와 에폭시 등의 수지를 이용하여 Filament winding 압력용기 등을 복합재료화하고 있다[1]. 국내에서도 항공산업의 활성화로 인하여 항공기구조물에 복합재료를 상당부분 채용하고 있으며, 조선분야에서는 FRP선박 등이 제작 되어 운행중이다. 그러나 조선산업 분야에서는 항공산업 분야만큼 복합재료로 성형된 제품이 활성화되어 있지 않고, 성형기술 개발이 아직 미진한 상태이어서 과학적이고 학문적인 연구는 물론 실제 적용 성형기술은 필연적이라고 할 수 있다.

본 연구는 Filament winding 성형기술 개발을 위한 요소 기술을 확보하고 이를 바탕으로 선박용 복합재료 축을 개발하고자 한다. 복합재료 축은 강도가 크며 기존에 사용하고 있는 단강제품에 비해 무게 절감 효과를 가져오고, 피로 비틀림 특성이 우수한 잇점을 지니고 있다[2]. 최근 선박기술의 고도화와 함께 재료의 효율성을 고려한 선박용 부품의 신소재화 시대가 개막되었고, 선진국에서는 80년대 후반부터 선박의 중요부품인 선박의 구동중간축 및 프로펠러와 같은 추진계통 분야 등에 섬유강화복합재료가

이미 개발 · 응용이 되어오고 있다.

1.2 목적

본 연구는 고속 · 고내식성 및 고강도의 FRP선의 국산화 개발과도 직접적으로 연계되는 기술개발로써, 고효율의 FRP선을 개발하기 위해 무엇보다도 선행되어야 할 중요한 기술개발이다. 본 기술개발에 의해 제조될 복합재료 추진축과 기존축과의 특성을 상호 비교하여 나타내면, Table 1과 같다. 선박용 축계설계에 있어서 주요한 검토사항으로 작업성, 축계강도, 축계진동 및 축계배치등을 고려하여야고 축계의 강도에 크게 영향을 미치는 피로파괴를 고려하여야 한다[7,8].

본 연구에서는 결함 최소화를 위한 Resin bath 설계, 제작을 수행하고, 연구 결과를 이용하여 복합재료 선박용 부품설계 및 제작하는 것이고, 선박용 복합재료 축을 성형기술을 확보하여 축의 응력해석 및 구조설계를 행하여 Filament winding 성형기법으로 시제품을 제작하여 문제점 및 보완대책을 강구하여 보다 우수한 제품 개발에 그 목적을 두고 있다.

Table 1 Comparison the property of steel shaft and composites shaft

	Steel shaft	Composites shaft
Materials	Steel	FRP
Weight	1(100%)	0.3(30%)
Corrosion resistance	Low	High
Specific strength	Low	High
Specific elongation	Low	High
Absolution of vibration	Bad	Good
Numbers of bearing	Many	A little
Property of repair	Bad	Good

제 2 장 필라멘트 와인딩 성형법

2.1 필라멘트 와인딩(Filament Winding Method)의 기능 및 성형법

필라멘트 와인딩 성형 기법은 수지가 함침된 연속 섬유를 회전하는 심축에 감아 주로 파이프나 압력용기, 축 등과 같은 축대칭 복합재료 구조물을 제작하는 방법이다. 성형은 심축의 회전 속도와 섬유의 공급위치를 이동시키는 캐리지(carrige)의 속도를 조절하여 일정한 와인딩각도와 패턴으로 수지가 함침된 연속 섬유를 심축(mandrel)에 감을 수 있는 성형기를 이용한다[3,4,5]. Filament Winding Method에서 핵심기술이라 할 수 있는 것은 결함 최소화를 위한 수지 함침기술, 섬유 균일 분포를 위한 섬유의 tension control기술이며, 이에 따른 소형 선박용 복합재료 축의 제작, 설계기술 등이다.

필라멘트 와인딩 방법으로는 수지를 섬유에 함침시키는 시기에 따라 습식 와인딩(wet Winding)과 건식 와인딩(dry Winding)으로 나뉘어진다. 습식 와인딩은 와인딩하는 과정에서 섬유가 수지 함침용기를 통과할 때 수지가 함침되어 바로 심축에 감는 방법이며, 건식 와인딩은 이미 수지가 섬유에 함침되어 경화가 일부 진행된 B단계로 된 프리프레그 로빙 (prepreg roving)을 심축에 감는 방법이다[6].

2.2 필라멘트 와인딩 공법에 사용되는 섬유와 수지

2.2.1 보강섬유

보강섬유로는 유리섬유, 탄소섬유가 가장 많이 사용되고 있다.

a. 유리섬유(glass fiber)

유리섬유는 타섬유에 비해 가격이 저렴하고 칫수에 대한 안정성과 함께 높은 인장강도를 갖고 있으며 와인딩시 취급이 용이하여 널리 사용하고 있다. 그러나 탄성율은 비교적 낮아서 한 방향으로 와이딩한 복합재료에 있어서 최고 탄성율은 48 55GPa 정도이며 필라멘트 와인딩 성형에서는 약간의 무게 감소 효과외에 구김이나 굽힘 또는 비틀림 하중을 받는 구조물에 널리 사용되고 있다.

b. 탄소섬유

첨단복합재료(advanced composite materials)에 가장 많이 이용되는 섬유로서 무게비강도 및 무게비탄성률이 우수하고 화학적으로 안정하며 내열성이고, 고온강도가 우수하여 고온재료로서 사용 가능하고, 열팽창계수가 낮다. 충격흡수력이 크기 때문에 스포츠 용품에 많이 사용된다.

2.2.2 수지(matrix)

수지(matrix)는 크게 플라스틱과 금속의 두 종류로 대별할 수 있으며, 플라스틱은 현재 매우 다양하게 많이 사용되고 금속은 금속복합재료의 제조가 매우 힘들기 때문에 많이 사용되고 있지 않다. 복합재료는 수지의 종류에 따라 크게 FRP와 FRM으로 대별되므로 현재 많이 사용되고 있는 플라스틱 수지는 경화제와 함께 반응하여 불용, 불융의 고체가 되는 열경화성 수지(thermosetting)와 열과 용제에 의하여 물리적인 성질과 상태가 변화하는 열가소성 수지 (thermoplastics)로 나누어진다. 포화폴리에스테르, 비닐에스테르, 에폭시는 필라멘트 와인딩에 사용된 3가지의 주 수지 형태

이다. 첫 번째 두가지의 형태는 주로 화학적으로 탱크, 파이프, 장비를 만드는데 사용된다. 첨단복합재료에서 우수한 기계적 성질을 가지는 에폭시계는 고온의 분야에서(200 - 250°F)와 기름부분에서 사용된 와인딩 파이프에 대해서 거의 독단적으로 사용된다. 필라멘트 와인딩에 의해서 사용되는 에폭시 수지는 무희석이고, 저점성 비스페놀 A형이다. 경화제는 수지를 단단하게도 하며, 특별한 특성을 부여한다.

2.3 필라멘트 와인딩 기계의 구조

a. 본체(main body)

본체에는 Headstock, Tailstock, Base, Carriage, Carriage Bed, Resin Bath, Eye, Eye Bath로 구성되어 있다. (Fig. 1)

b. 헤드스토크(headstock)

필라멘트 와이딩 기계의 가장 중요한 부분으로서 그 내부에는 스핀들 모터(spindle Motor), 타이밍 벨트(timing belt)를 장착하고 있다. 외부에는 조절기와 맨드렐 척(chuck)을 부착하고 있다. 이 헤드스토크는 테일스토크(tailstock)와 동심을 이루고 있으며, 이 동심을 이루는 축은 왕복대(carriage)의 왕복 이동축과 평행을 이루고 있다. (Fig. 2)

c. 테일 스토크(tailstock)

테일 스토크는 맨드렐의 길이에 따라 좌·우방향으로 이송하며 헤드스토크와 함께 맨드렐을 지지하는 작용을 한다.

d. 캐리지(carriage)

왕복대는 왕복대 베드(bed)위에 올려져 부드럽게 좌우 왕복운동을 하며,

Spindle의 회전속도에 비례하여 맨드렐의 양단에 왕복하여 와인딩 각도를 조절하는 중요 부분이고, 왕복대위에는 크로스피더(cross feeder), 수지 베스(bath), 아이(eye)부분으로 되어있다.

e. 캐리지 베드 (carriage bed)

왕복대를 이송하는 받침대로서 무게를 충분히 견딜수 있게 되어 있다. (Fig. 3)

f. 레진 베스(resin Bath)

수지 베스는 사용자의 필요에 따라 별도 제작하여 사용할수 있으며, 우선적으로 섬유 밴드(band)에 수지가 충분히 함침 될수 있도록 스케이지 롤러(Sqeeze Roller)로써 수지를 짜 주어야 한다. (Fig. 4)

g. 아이(eye), 아이 서포어터(eye support)

아이는 섬유가 맨드렐에 일정하게 감기도록 하는 최종 가이드(guide)이며, 전면에 아이 서포어터(eye support)는 왕복대에 부착되어 핸들(handle)로서 스크류에 의해 상하로 이동하여 아이를 맨드렐의 표면으로부터 일정거리로 조절이 가능하다. (Fig. 5)

h.콘드롤 패널(controller panel)

RPM 및 스피이드 세팅(speed setting) S/W, 왕복대 S/W, 스핀달 S/W,

수동안전 S/W, 사이클 카운터 (cycle counter), 경보 S/W등으로 구성되어 있다.

i. 경화오븐 (curing oven)

필라멘트 와인딩 기계에서 제작된 FRP 파이프와 molding 제품을 경화하기 위한 용도로 경화오븐을 이용한다. 오븐의 승온속도가 빠를 경우 제품표면과 내부의 경화상태가 틀려 제품이 제대로의 성질을 가질수 없으며 한쪽으로 수지가 편중되는 것을 막기 위하여 오븐내부에 모터로 회전시킬 수 있는 심압대를 장치하여 경화에 사용하였다. (Fig. 6)

j. 탈형기

필라멘트 와인딩 기계에서 제작한 FRP 파이프와 몰딩(molding)제품을 경화한 후 복합재료를 맨드렐로부터 탈형시키기 위하여 탈형기를 사용한다.

Fig.1 Main body

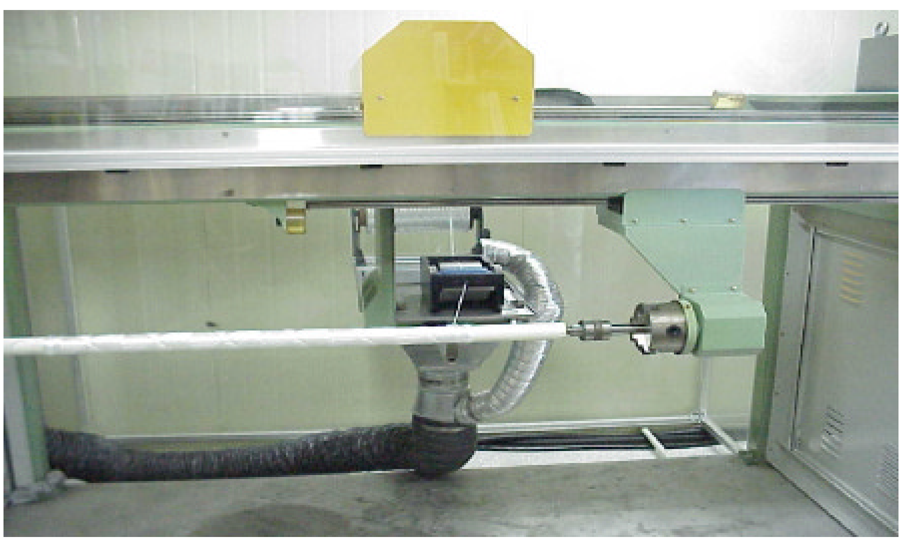


Fig.2 Headstock and tailstock

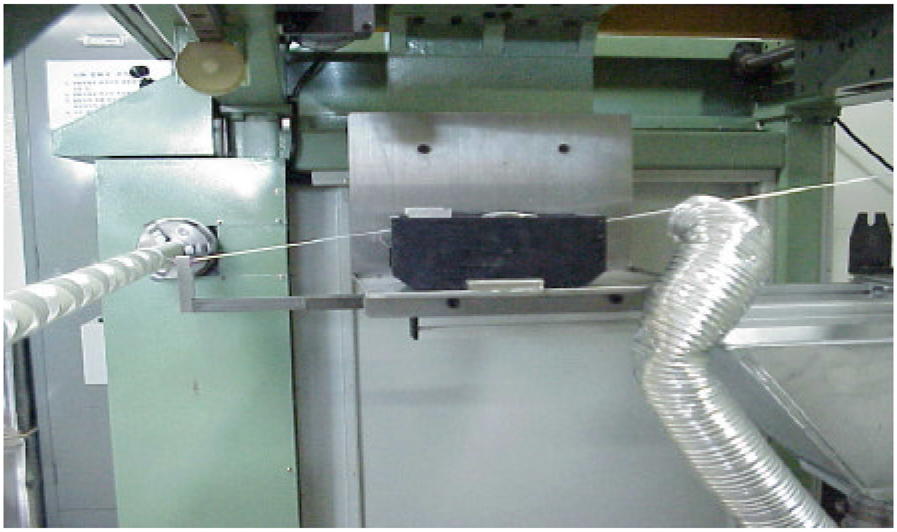


Fig.3 Carriage and carriage bed

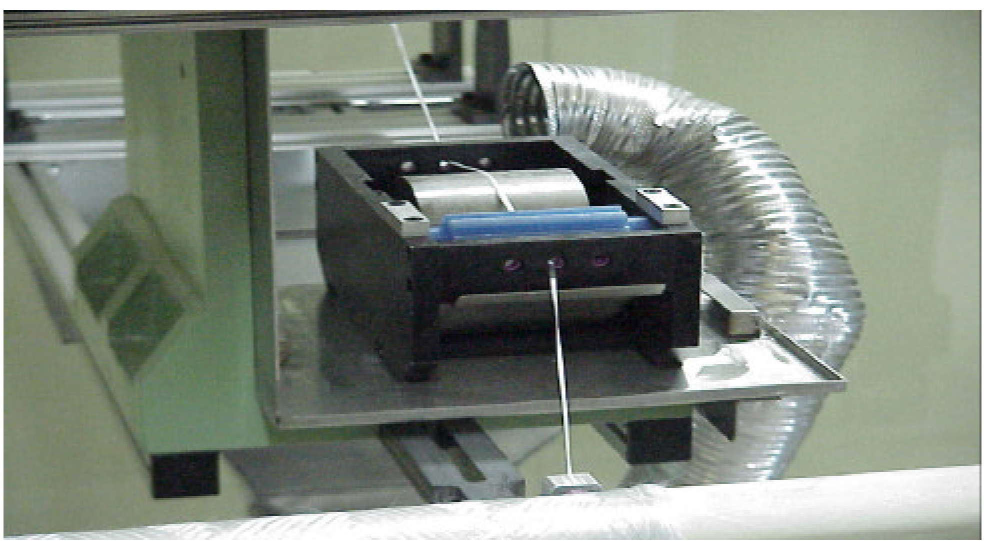


Fig.4 Resin bath

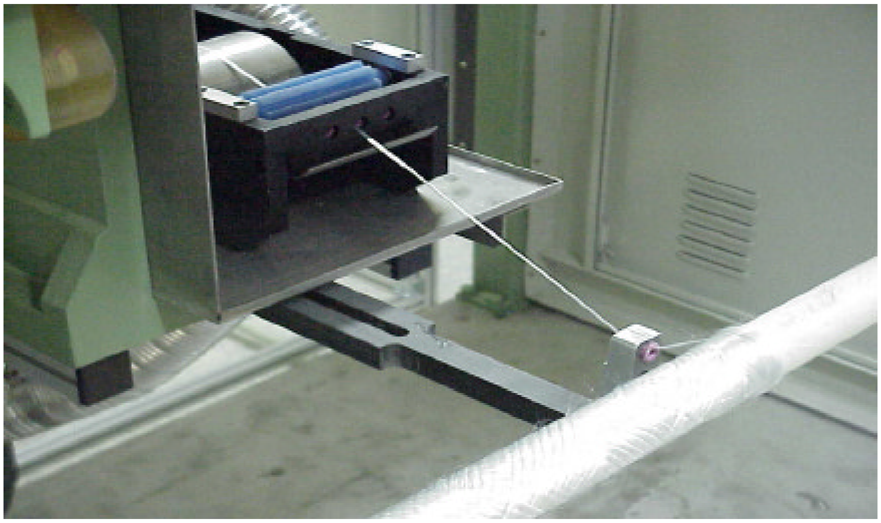


Fig.5 Eye and eye support

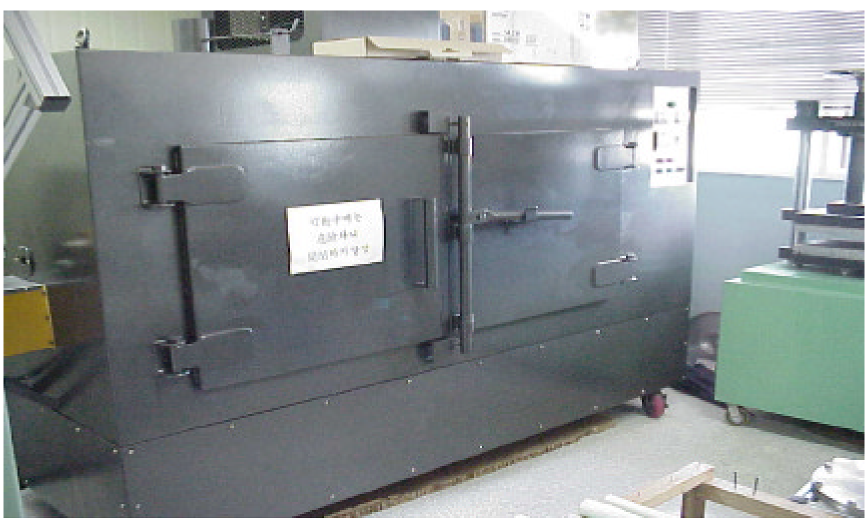


Fig.6 Curing oven

2.4 성형공정

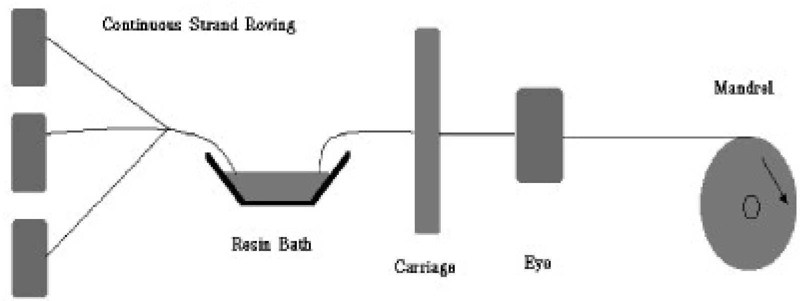


Fig. 7 Filament winding fabrication system

필라멘트 와인딩 공정은 섬유상의 Yarn이나 Tow에 수지를 함친 시킨 후 회전하는 mandrel 주위에 일정하게 감은 후 경화(cure)시키는 공정이다. 내부의 mandrel은 제거하거나, 제거하기가 어려운 경우에는 복합재료의 내부에 그냥 남겨놓는 경우도 있다. 이 공정으로 얻을수 있는 제품의 모양은 간단하며, 파이프나 항공기의 동체 혹은 자동차의 frame 등이다. 이 공정에 주로 사용되는 섬유는 유리섬유, 탄소 섬유, aramid 섬유등이고, 수지는 폴리에스테르(polyester), 비닐에스테르(vinylester)와 에폭시 수지(epoxy resin)등이다.

이 공정방법은 수평형, 수직형으로 나눌 수가 있고, 필라멘트 와인딩 제어장치는 mandrel의 회전속도와 좌우 이동속도를 조화시켜야만 한다. 제어장치는 한가지 제품만을 위한 것과 여러 가지 제품을 위한 것이 있다. 제어장치는 기계적인 작동방법과 컴퓨터를 사용하는 것이 있는데, 기계적인 작동방법은 초기 투자 비용은 적게 드나, 제품을 바꾸어 생산할 경우에 복잡한 계산이 필요하고, 하드웨어를 바꾸어야만 하는 번거로움이 있다.

필라멘트 와인딩(Filament Winding)에 의하여 제조된 제품은 여러 가지 인자, 예를 들면 mandrel의 강성 및 표면처리, winding 속도, 수지의 precure, 섬유의 얼라인먼트(alignment)와 장력, 그리고 온도 제어 등에 의하여 영향을 받는다. 따라서 섬유와 성질을 잘 제어하는 것이 중요하다.

a. Mandrel 전처리와 장치

표면이 골고루 잘 연삭된 맨드렐을 탈형시 보다 용이하게 하기 위해서 왁스형 이형제를 균일하게 표면처리한 다음 경화오븐에 넣어 100℃정도의 온도에서 경화시킨다. 이 맨드렐은 필라멘트 와인딩 기계의 척과 지지축에 평행하게 장착하고 아이와 맨드렐사이의 간격은 6-7mm 정도로 하여 고정시킨다.

b. 수지의 혼합

수지를 주제와 경화제를 일정한 비율로 한 수지를 혼합하여 교반기로 10분 정도로 작동후 내부의 기포를 위해 진공 챔벌에 넣은 후 탈포처리를 한다. 장기간 두면 경화가 시작하므로 단기간 동안 실행하고 이때 진공 챔벌은 25   27 mmHg 정도로 탈포한다.

c. 와인딩(winding)

와인딩시 섬유의 장력이 일정하게 유지하는 것을 유의해야한다. 왜냐하면 맨드렐 양끝부분에서 지체시에 섬유의 장력이 적을 때 섬유의 처침이 생기기 때문이다. 스프렌드(strand)사이에 스프링(spring)을 끼워서 마찰력을

이용하여 섬유가 갑자기 풀려 나오는 것을 예방한다.

d. 경화

경화시 수지의 흘러내림에 의한 수지의 불균일 분포를 방지하기 위해 오븐내부에 맨드렐을 회전하여 준다.

e. 탈형

탈형시 경화된 복합재료 제품이 손상이 가지 않도록 최대한 서서히 행하면서 탈형한다.

2.5 필라멘트 와인딩 공정의 장점 및 단점

2.5.1 장 점

① 각 layer나 winding parts에 대한 보강섬유의 배열에 대한 고속 반복성을 가진다.

② 하중 방향에 대하여 손쉽게 보강섬유를 배열할 수 있으며 연결 부위를 제외한 모든 구조물 위에 연속 섬유를 감을 수 있다. Autoclave 성형에서 제작이 불가능한 대형 구조물에 대해서도 제작이 가능하다.

③ Fiber의 V_f (volume fraction)을 높일수 있다

④ 대형 구조물의 제작시 제조경비를 절감 할 수 있다.

⑤ Prepreg 보다 저렴한 가격의 재료를 사용하므로 비교적 제조단가가 적게든다.

2.5.2 단 점

① 구조물의 형태는 대부분 mandrel을 제거할 수 있어야 한다.

② Mandrel 표면부 곡선의 기울기가 큰 것, 즉, 요철이 심한 mandrel에 대해서는 와인딩이 불가능하다.

③ 하나의 lamina에서는 보강섬유의 배열 방향을 바꾸기 힘들다.

④ Mandrel은 필수적이나 제작이 까다롭고 제조 가격이 비싸다.

⑤ 와인딩 후 제품의 표면이 메끄럽지 못하다.

제 3 장 복합재료 적층판 이론

복합재료의 역학을 취급하는 방법에는 미시적 방법과 거시적 방법이 있는데, 미시적 방법은 복합재료 각 층(ply 또는 laminate)내의 섬유(fiber)와 모재(matrix)를 구별하여 각각에 걸리는 응력(stress)과 변형률(strain)를 계산하는 방법이다.

거시적 방법은 각 층 내의 섬유와 모재를 구별함이 없이, 두 물질의 성질이 완전히 혼합되어 평균 성질을 나타낸다고 가정하고 응력과 변형룰을 계산하는 방법이다. 거시적 방법에는 대개 1mm 정도 이상 크기의 물체에 관심을 가지며, 일반적으로 균일한 직교 이방성 플라이에 관심을 갖는다.

3.1 고전 적층판 이론

필라멘트 와인딩 구조 재료는 거시적으로 섬유 방향이 대칭으로 된 단층을 적층한 적층판과 같다고 볼 수 있으므로, 적층판 구조 응력 해석법이 바로 적용 될 수 있다.

단층(lamina)는 적층된 섬유 강화 복합재료에서 기초적인 요소이므로 단층의 기계적 거동은 적층된 섬유강화 구조물을 이해하는데 중요하다. 여기서는 거시적은 기계적 거동을 살펴보기로 한다.

a. 응력-변형률 관계식(Stress-Strain Relation)

섬유강화 복합재료와 같은 직교 이방성 재료는 재료 성질이 대칭인 서로 직교하는 3개의 평면을 갖고 있으므로 수직응력 σ_1, σ_2, σ_3와 전단 변형률 γ_{12}, γ_{23}, γ_{31} 사이에는 어떤 상호관계가 없으며, 또 전단응력 τ_{12}, τ_{23}, τ_{31}와 수직 변형률 ε_1, ε_2, ε_3 사이에도 상호관계가 없다. 여기서 첨자 x, y, z는 섬유방향, 섬유방향에 수직한 방향, 그리고 이 두 방향에 수직한 방향을 나타낸다. 따라서 응력-변형률 관계식은 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{31} & Q_{32} & Q_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} \text{----------------(1)}$$

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{pmatrix} \text{----------------(2)}$$

여기서, Q_{ij}는 축소강성 계수라 하고, S_{ij}는 Compliance 계수라고 한다.

단층은 평판이므로 평면응력 상태로 볼 수 있다. 평면 응력 상태에 대한 응력-변형률 관계식은 재료 상수를 사용하면 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} \text{----------------------------(3)}$$

이상의 응력-변형률 관계식은 평면상의 힘을 받고 있는 각 단층의 강성 (stiffness) 및 응력해석의 기초가 된다.

b. 직교 이방성 재료의 기계적 성질

직교 이방성 재료는 등방성 재료와 달리 세 개의 방향성을 갖고 있으므로 3차원 문제에서는 식(1)에서 보듯이 9개의 재료상수에 의해 그 기계적 성질을 설명할 수 있다. 평면응력 문제에서는 앞에서 언급했듯이 네 개의 독립된 재료상수에 의해 그 기계적 성질을 설명할 수 있다. 등방성 재료는 탄성계수(E)와 쁘아송 비(ν)로써 기계적 거동을 표현할 수 있는 반면 직교 이방성 재료인 단층에서는 섬유방향 1(1방향), 섬유 방향에 수직한 방향 2(2방향), 그리고 1와 2 방향에 수직한 3(3방향)에 대한 재료 상수로써 다른 방향에 대한 기계적 거동을 모두 나타낼수 있다. 이러한 재료는 상수축 방향 인장시험, 순수 전단 시험과 같은 간단한 시험으로 결정된다. 특히 섬유강화 단층에서는 섬유방향의 탄성계수(E_x)가 섬유방향에 수직한 방향의 탄성계수(E_y)보다 훨씬 크다.

식 (2)에서 축소강성행렬을 재료 상수로 나타내면, 다음과 같은 식이 된다.

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix} \quad \text{--(4)}$$

여기서, 각 첨자는 위에서 정의한 방향과 일치한다. 식 (4)에서는 마치 12개의 상수가 있는 것처럼 보이지만 $S_{ij} = S_{ji}$인 대칭성으로 인해 다음과 같은 상반정리에 의해 9개의 독립상수가 됨을 알 수 있다.

$$\frac{\nu_{ij}}{E_i} = \frac{\nu_{ji}}{E_j} \qquad i,\ j=1,\ 2,\ 3$$

c.섬유방향에 따른 응력과 변형률의 변환

복합재료는 사용방향에 맞게끔 섬유방향을 바꾸면서 적층할 필요성이 있다. 일반적으로 주재료방향과 기하학적 좌표가 일치하지 않고 Fig. 8과 같이 θ만큼의 각을 이룰 때 1, 2방향의 응력과 x, y 방향의 응력은 다음식과 같다.

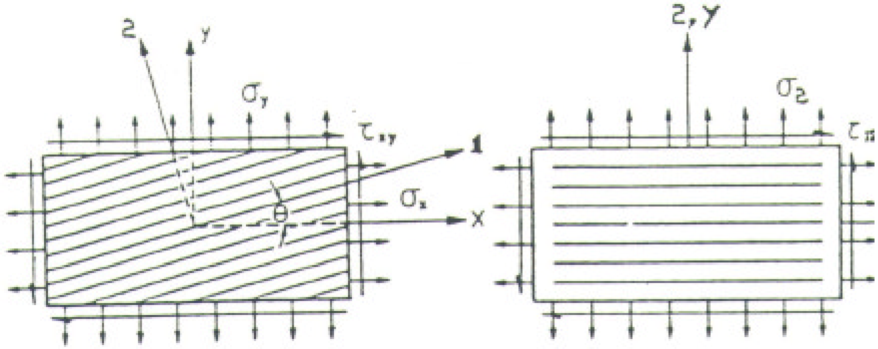


Fig. 8 Rotation of the main fiber axis for the optional x,y axis

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = [T]^{-1} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{pmatrix} \quad \text{-----------------} (5)$$

변형률은 다음 식과 같다.

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \frac{\gamma_{xy}}{2} \end{pmatrix} = [T]^{-1} \begin{pmatrix} \varepsilon_2 \\ \varepsilon_1 \\ \frac{\gamma_{12}}{2} \end{pmatrix} \quad \text{-----------------} (6)$$

단,

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin^2\theta & 2\sin\theta\cos\theta \\ \sin^2\theta & \cos^2\theta & -2\sin\theta\cos\theta \\ -\sin\theta\cos\theta 0 & \sin\theta\cos\theta & \cos^2\theta\sin^2\theta \end{bmatrix} \quad \text{-----------------} (7)$$

이다.

식 (5),(6),(7)과 식 (3)을 이용하여 x, y방향의 응력 변형도 관계식을 유도하면,

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{Q}_{11} & \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{16} \\ \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{22} & \overline{Q}_{26} \\ \overline{Q}_{16} & \overline{Q}_{26} & \overline{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} \text{-------------------------} (8)$$

이 된다.

여기서 ,

$$\overline{Q}_{11} = Q_{11} l^4 + (2 Q_{12} + 2 Q_{66}) l^2 m^2 + Q_{22} m^4$$

$$\overline{Q}_{12} = S_{22} (l^4 + m^4) + (Q_{11} + Q_{22} - 4 Q_{66}) l^2 m^2$$

$$\overline{Q}_{22} = Q_{11} m^4 + 2(Q_{12} + 2 Q_{66}) l^2 m^2 + Q_{22} l^4$$

$$\overline{Q}_{16} = (Q_{11} - Q_{22} - 2 Q_{66}) l^3 m - (Q_{22} - Q_{12} - 2 Q_{66}) l m^3$$

$$\overline{Q}_{26} = (Q_{11} - Q_{22} - 2 Q_{66}) l m^3 - (Q_{22} - Q_{12} - 2 Q_{66}) l^3 m$$

$$\overline{Q}_{66} = (Q_{11} + Q_{22} - 2 Q_{12} - 2 Q_{66}) l^2 m^2 + Q_{66} (l^4 + m^4)$$

단, $l = \cos\theta$, $m = \sin\theta$이다.

$\overline{Q}_{ij}$는 변환된 축소강성계수를 나타낸다. $\overline{Q}_{ij}$는 Q_{ij}와 비교할 때 9개의 요소를 가지고 있지만 역시 4개의 독립 재료상수로 표시되어 있음을 알 수 있다. 기하학적인 좌표인 x, y에 대해서 전단변형률과 수직 응력 사이에 또 수직 변형률과 상호관계가 있어서 이를 단층 직교 이방성 단층이라 부르기도 한다.

3.2 고전 적층판 이론에 의한 응력 해석

하중은 받는 복합재료 적층판의 변위와 변형률은 단일층 복합재료와 달리 각층 사이의 상호작용으로 인하여 변위와 변형률이 복잡한 형태롤 나타나게 되는데, 이러한 변위, 변형률을 구체적으로 구할 수 있는 이론을 고전 적층판이론이라하면, 고전 적층이론이라고도 한다. 고전 적층이론은 최종적으로 복합재료 적층판의 강성도를 구하는 것이 목적이다.

a. 단일층 복합재료에서의 응력과 변형률

앞 절에서 단일층 복합재료의 응력 변형률 관계를 주재료 방향좌표로 표현하면 식(3)과 같다. 식 (3)에서 σ_1, σ_2, τ_{12}는 1, 2방향의 주응력이며, ε_1, ε_2, γ_{12}는 주응력에서의 변형률이며, Q_{ij}는 축소 강성도이다. 또 3축을 중심으로 일정한 각만큼 회전시킨 x-y 좌표계에서 이들의 관계를 표현하면 식 (8)와 같다. 적층판에서는 각 층마다 적층각이 다르므로 식(8)과 같은 임의의 좌표계에 대한 응력-변형률 관계가 필요하다. 즉 Fig. 9에서 k번째 층의 응력 변형률 관계를 구하면 다음과 같다.

$$[\sigma_{ij}]_k = [\overline{Q}_{ij}]_k[\varepsilon_{ij}]_k \text{ ------------------------------------- (9)}$$

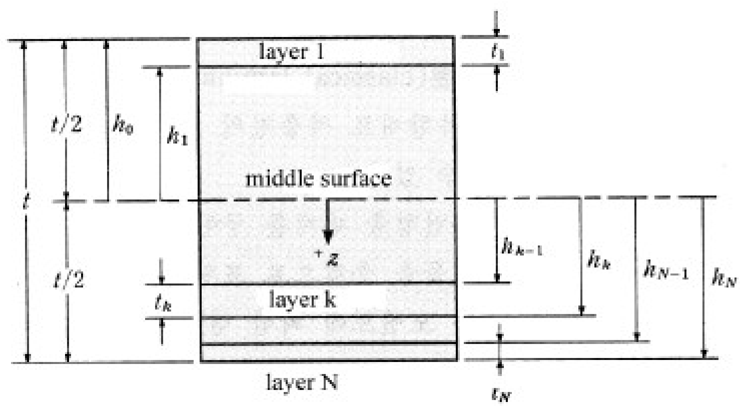


Fig. 9 The shape of laminates

이를 두께 방향으로 적분함으로써 적층판 전체의 응력 변형률 관계를 구할 수 있다.

$$\sum_{k=1}^{N}[\sigma_{ij}]_k = \sum_{k=1}^{N}[\overline{Q}_{ij}]_k[\varepsilon_{ij}]_k \quad (10)$$

b. 적층판에서의 힘과 모멘트

복합재료 적층판에서는 각 층마다 적층각이 다르므로 같은 외력에 대해서도 강성도 및 강도가 다르며, 감당하는 힘이 모두 다르다. 각 층의 강성도는 이미 앞 절에서 언급하였으며, 적층판 전체에 가해지는 힘과 모멘트는 적층판 두께에 따라 가층마다 드른 힘과 모멘트를 적분함으로써 구할 수 있다. 이 때, 적층판을 평면 응력 상태라 가정하면, 적층판에 가해지는 힘과 모멘트는 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{pmatrix} = \sum_{k=1}^{N} \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} dz \text{ -------------------------------- } (11)$$

$$\begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{pmatrix} = \sum_{k=1}^{N} \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} z\,dz \text{ -------------------------------- } (12)$$

여기서, N_{ij}**는 적층판 단위길이당 가해지는 힘**, M_{ij}**는 적층판 단위길이당 가해지는 모멘트이다**.(Fig 10)

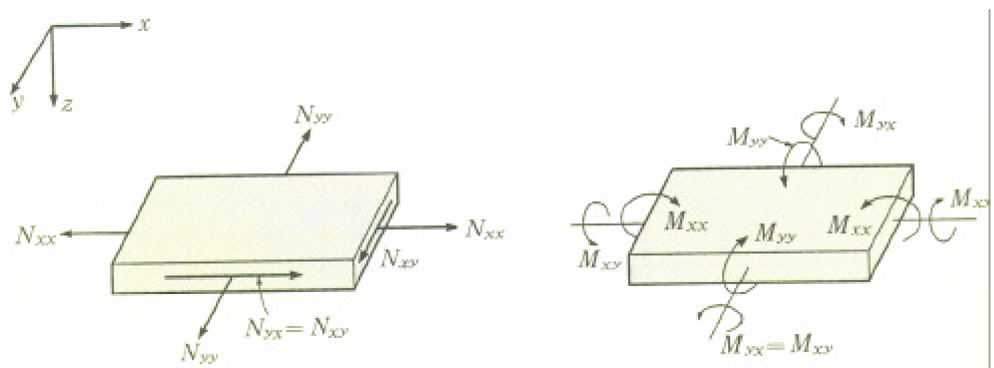


Fig. 10 Positive resultant forces and moment

여기서, 복합재료의 평균응력은 다음식과 같다.

$$\bar{\sigma}_{ij} = \frac{N_{ij}}{t} \text{ -- } (12\text{-}1)$$

t : **복합적층판의 전체 두께**

c. 복합재료 적층판에서의 강성도

각 층마다 적층각이 다를 경우, 적층판에 힘과 모멘트와 변형률과의 관계에서 인장 강성도 및 굴곡 강성도를 구하면 다음식과 같다.

$$\begin{pmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{pmatrix} \quad \text{---------------(13)}$$

$$\begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{pmatrix} \quad \text{---------------(14)}$$

여기서, k_{ij}는 비틀림 곡률이다. 또한,

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^{N} [\overline{Q}_{ij}]_k \int_{k_{z-1}}^{k_z} dz \quad \text{-----------------------------------(15)}$$

$$B_{ij} = \sum_{k=1}^{N} [\overline{Q}_{ij}]_k \int_{k_{z-1}}^{k_z} z\,dz \quad \text{-----------------------------------(16)}$$

$$D_{ij} = \sum_{k=1}^{N} [\overline{Q}_{ij}]_k \int_{k_{z-1}}^{k_z} z^2 dz \quad \text{-----------------------------------(17)}$$

A_{ij}는 인장 강성도로서 힘 N_i가 적층판에 가해졌을 때 x-y평면에 변형이 얼마나 발생했는가를 말해주는 척도이며, D_{ij}는 굴곡 강성도로서 모멘트 M_{ij}가 적층판에 가해졌을 때 x-y평면에 적층평판에 얼마만큼 휘고 비틀리는가를 나타내는 척도이다. 또한, B_{ij}는 일반금속재료에서 볼 수 없는 이방성 복합재료 적층판에서만 찾을 수 있는 특성으로 적층판이 휘거나 비틀림 변형이 생기며, 적층판에 모멘트가 가해질 경우에는 휨 또는 비틀림 변형 및 x-y평면 변형까지 생긴다. 이러한 변형정도를 나타내는 척도를 연계강성도라 한다.

d. 균일적층판

균일 적층판은 적층판이기는 하나 구성하고 있는 층들이 같은 물성을 갖고 있으므로 단일층 복합재료와 같은 메카니즘을 지니고 있으며, 크게 등방성, 특별 직교 이방성, 일반 직교 이방성, 이방성으로 분류할 수 있다. 여기서 일반 직교 이방성인 경우는 주응력 방향으로 방향성을 지닌 재질로서, 식 (15), (16), (17)을 표현하면 다음과 같다.

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^{N} [\overline{Q}_{ij}]_k \int_{k_{z-1}}^{k_z} dz = \overline{Q}_{ij}\, t \text{ - } (18)$$

$$B_{ij} = \sum_{k=1}^{N} [\overline{Q}_{ij}]_k \int_{k_{z-1}}^{k_z} z\, dz = 0 \text{ - } (19)$$

$$D_{ij} = \sum_{k=1}^{N} [\overline{Q}_{ij}]_k \int_{k_{z-1}}^{k_z} z^2 dz = \frac{1}{12} \overline{Q}_{ij}\, t^3 \text{ - } (20)$$

제 4 장 적층판 이론에 의한 축 설계

일반적으로 선박용 축계는 선급에서 규정에 따라서 그 직경을 결정한다. 그러나, 소형선박에 있어서는 그 규정에 따르지 않고 설계하여도 무방하다. 따라서 일반 축계 설계와 동일한 방법으로 설계하여도 무관한다.

현재 제작하고자 하는 소형 선박 및 요트용 축일지라도 고려해야 할 여러 가지 변수가 많기 때문에 최적의 직경 및 축의 길이를 결정하는 것은 매우 어려운 일이다. 사용되는 재질이 등방성 재료가 이닌 복합재료와 같은 이방성 재료일 경우 섬유(fiber)의 방향에 따라 물성치가 달라지므로, 직경 및 축의 길이 결정은 더욱 많은 설계 조건을 생각하여야 한다. 복합재료의 물성치는 단섬유냐 연속 섬유냐에 따라서도 상당한 차이를 갖는다. 그리고 물성치에 미치는 가장 중요한 요인은 섬유의 방향에 있어서 복합재료 설계시 충분히 고려 되어야 한다.

일반적으로 축이 만족해야 하는 가장 중요한 요구 조건은 최대 각속도까지 올렸을 때 걸리는 Torque 및 각(angle)변형이라 할 수 있다. 동력원에서 전달되는 힘이 축(shaft)을 통해서 전달되므로 축에는 Torque에 의한 응력이 작용되고, 이에 따른 각 변형이 생긴다. 이러한 응력과 변형은 축의 파괴 요인이 되기 때문에 설계시 중요하게 검토되어야 한다. 일반 금속재료로 된 축은 모든 방향에 대해 강도, 강성도가 같은 반면에 복합재료의 경우는 방향성이 존재하기 때문에 축에 비틀림 하중이 걸렸을 때, 가장 응력이 많이 걸리는 방향으로 섬유 방향을 두면 무게를 절감할 수 있다. 축에 비틀림 하중이 가해지면 최대 응력은 축 방향에 대해 45° 방향으로 걸

리므로 섬유방향이 45° 방향이 되게 성형하면 가장 이상적이다. 그러나, 축의 길이, 직경을 고려하면 좀 더 달라질 것이다.

본 연구에서는 현재 소형 선박에 사용되고 있는 축을 대신하는 복합재료 축을 설계함에 있어서의 축의 최대 RPM, 및 Torque, 사용된 복합재료 물성치를 고려하여 winding 각도를 결정하였다.

본 연구에 제작하고자 하는 축은 소형선박에서 사용하고 있는 금속재료 (SUS420) 축을 복합재료 축으로 대체하기 위한 것으로 직경(D) 30 50mm, 길이(L) 500mm의 축이다. 현재 이 축 베어링 위치를 고려해 볼 때 굽힘 모멘트에 의한 힘은 작용하지 않는다고 볼 수 있다. 따라서 인장, 압축과 비틀림 및 진동에 대해서 Torque와 최대 RPM을 기준으로 축을 설계하고 하고자 한다.

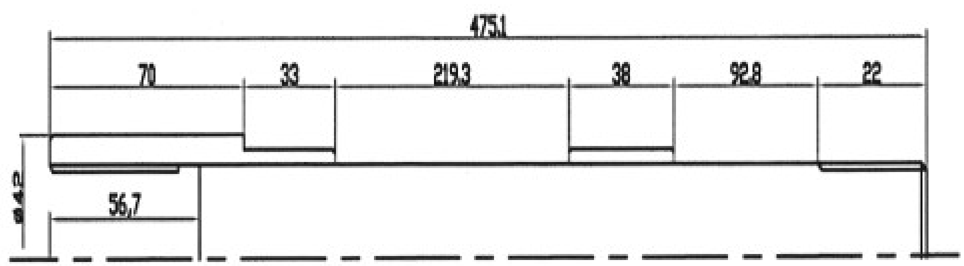


Fig. 11 Shape of shaft for small ship

복합재료 축에 있어서 가장 중요한 특성은 일정한 거리만큼 떨어져 있는 두 지점 사이에서 걸리는 Torque라고 할 수 있다. 이 때 이 축이 중공축이면, 축이 받는 전단응력은 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$(\tau_{xy})_M = \frac{16\,Toq}{\pi D^3(1-R^4)} \text{------} (21)$$

여기서, $(\tau_{xy})_M$는 전단응력(N/mm^2)이고, Toq는 Torque이며, D는 축의 외경, R은 축의 외경과 내경의 비이다. 복합재료에 있어서 전단응력 τ_{xy}는 각 층마다 다르게 작용하지만 와인딩 각도가 모든 층이 같다고 가정하여 축이 받는 전단응력 $(\tau_{xy})_M$과 복합재료가 받는 평균전단응력 $\bar{\tau}_{xy}$은 같다고 할 수 있다.

$$(\tau_{xy})_M = \bar{\tau}_{xy} \text{------} (22)$$

식 (13)은 복합적층판이 균일 적층판이고, 일반 직교 대칭 적층판이라 하면, 다음과 같이 간단히 할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_x^{\,0} \\ \varepsilon_y^{\,0} \\ \gamma_{xy}^{\,0} \end{pmatrix} \text{------} (23)$$

식 (21)을 다시 쓰면,

$$\begin{aligned} N_x &= A_{11}\,\varepsilon_x^{\,0} + A_{12}\,\varepsilon_y^{\,0} + A_{16}\,\varepsilon_{xy}^{\,0} \\ N_y &= A_{12}\,\varepsilon_x^{\,0} + A_{22}\,\varepsilon_y^{\,0} + A_{26}\,\varepsilon_{xy}^{\,0} \text{------} (24) \\ N_{xy} &= A_{16}\,\varepsilon_x^{\,0} + A_{26}\,\varepsilon_y^{\,0} + A_{66}\,\varepsilon_{xy}^{\,0} \end{aligned}$$

과 같이 표현할 수 있다. 여기서 복합적층판이 일반 직교 대칭 적층판이라고 가정하였고, 단층의 두께는 모두 동일하므로, 식 (24)는 다음과 같이 간단히 할 수 있다.

$$N_x = t[\ \overline{Q}_{11}\ \varepsilon_x{}^0 + \ \overline{Q}_{12}\ \varepsilon_y{}^0 + \ \overline{Q}_{16}\ \varepsilon_{xy}{}^0 / N]$$

$$N_y = t[\ \overline{Q}_{12}\ \varepsilon_x{}^0 + \ \overline{Q}_{22}\ \varepsilon_y{}^0 + \ \overline{Q}_{26}\ \varepsilon_{xy}{}^0 / N] \text{------------------} (25)$$

$$N_{xy} = t[\ \overline{Q}_{16}\ \varepsilon_x{}^0 / N + \ \overline{Q}_{22}\ \varepsilon_y{}^0 / N + \ \overline{Q}_{26}\ \varepsilon_{xy}{}^0\ ]$$

여기서 t는 복합적층판의 총두께이고 N은 와인딩한 횟수이다. 식 (25)은 식(12- 1)에 의해서 정리하면

$$\overline{\sigma}_x = \ \overline{Q}_{11}\ \varepsilon_x{}^0 + \ \overline{Q}_{12}\ \varepsilon_y{}^0 + \ \overline{Q}_{16}\ \varepsilon_{xy}{}^0 / N$$

$$\overline{\sigma}_y = \ \overline{Q}_{12}\ \varepsilon_x{}^0 + \ \overline{Q}_{22}\ \varepsilon_y{}^0 + \ \overline{Q}_{26}\ \varepsilon_{xy}{}^0 / N \text{---------------------} (26)$$

$$\overline{\tau}_{xy} = \ \overline{Q}_{16}\ \varepsilon_x{}^0 / N + \ \overline{Q}_{22}\ \varepsilon_y{}^0 / N + \ \overline{Q}_{26}\ \varepsilon_{xy}{}^0$$

이다. 여기서, $\overline{\sigma}_x$는 축 방향의 평균응력이고, $\overline{\sigma}_y$는 축에 수직한 방향의 응력이며, $\overline{\tau}_{xy}$는 전단응력이다. 축은 압축과 인장 그리고 비틀림만을 받는다고 가정하였으므로 $\overline{\sigma}_y$와 $\overline{\sigma}_x$는 그 값이 작다고 할 수 있으므로 $\overline{\sigma}_x$, $\overline{\sigma}_y = 0$이라 할 수 있다. 따라서, 식 (26)에서 변형률과 응력의 관계에서 최적의 설계 조건을 얻을 수 있다.

제 5 장 계산 결과 및 제작

5.1 계산 결과

최적의 설계를 위해서는 와인딩시에 섬유가 받는 힘을 최대로 하기 위해 일반적으로 축에 있어서 인장이나 압축에 있어서는 0°로 하는 것이 유리하고 비틀림에 대해서는 45°로 하는 것이 유리하지만 여러 가지 조건과 특성을 고려할 때 최적의 와인딩 각을 설정하는 것이 중요하다. 최적의 와인딩 각을 설정함으로서 재료절감 및 무게감소를 할 수 있다. 식(13)에서 계산 할 때, $\overline{\sigma}_x$, $\overline{\sigma}_y = 0$이므로, 변형률 $\varepsilon_x, \varepsilon_y$는 변형률 ε_{xy}보다 작아 그 값을 무시할 수 있다. Fig. 12는 직경과 직경비에 따른 축의 전단응력을 나타내고 있다. 전단응력이 직경비(D_0/D_1)가 0.4이하일 때는 크게 변화가 없음을 알수가 있다.

여기서, 복합재료의 와인딩각도가 일정하므로 복합재료 축의 전단응력은 변형률과 전단강성계수($\overline{Q}_{66}$)에 의해서 변하게 된다.

따라서, 식 (26)에서 변형률과 응력의 관계에서 최적의 설계가 가능함을 알 수 있다. Table 1에 설계조건에 관한 사항이 나타나 있다.

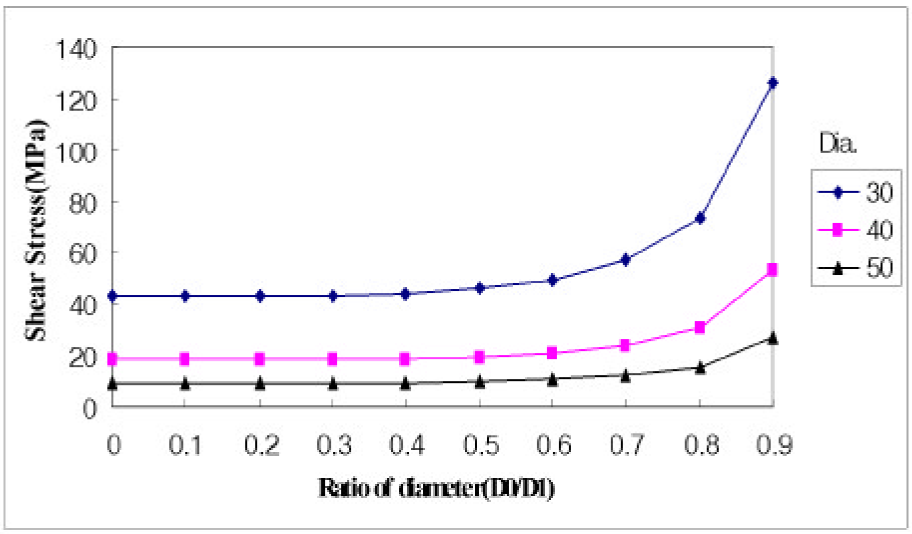


Fig.12 Shear stress for rate of dimension

Table 2 Design condition for composite shaft

Horse power	196(PS)
RPM	6,000
Tensile elastic modulus of glass/epoxy composites(E_1)	42,770 (MPa)
Tensile elastic modulus of glass/xpoxy composites(E_2)	11,720 (MPa)
Poisson's ratio(ν_2)	0.27
Shear modulus(G_{12})	4,130 (MPa)

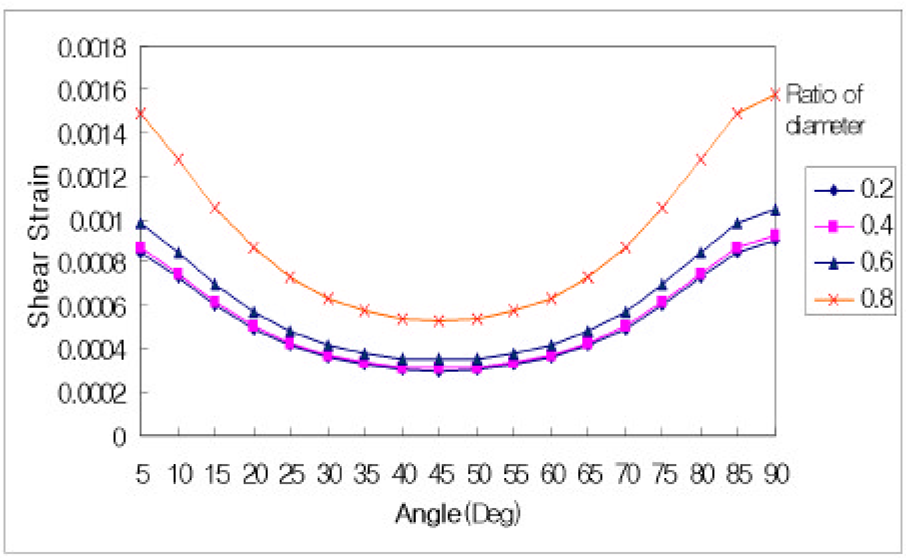


Fig. 13 Shear strain for angles and ratio of dimension(ε_{xy}^{0}, D_0=40)

전단변형률은 45°를 기준으로 대칭임을 알 수 있었고 90°에서 가장 큰 변형률을 나타내고 있다. 또한 전단탄성계수도 45°를 기준으로 대칭적으로 변한다.

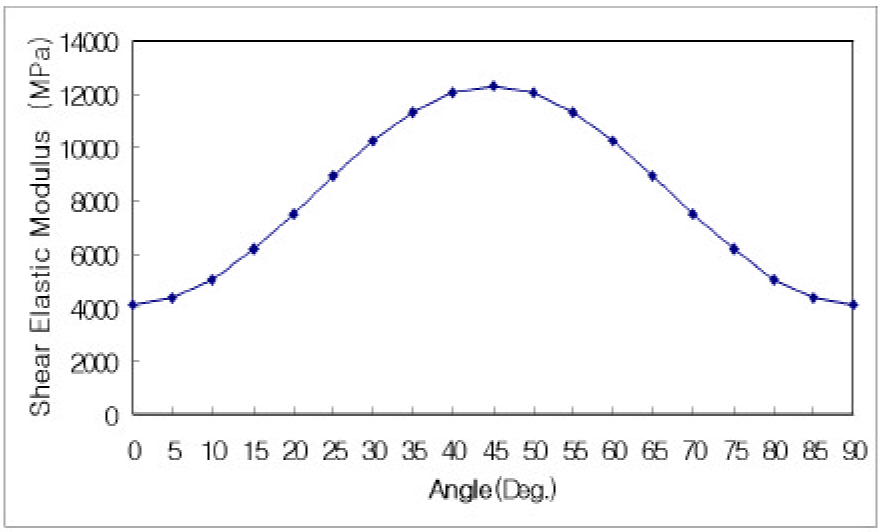


Fig. 14 Modulus of rigidity for angles

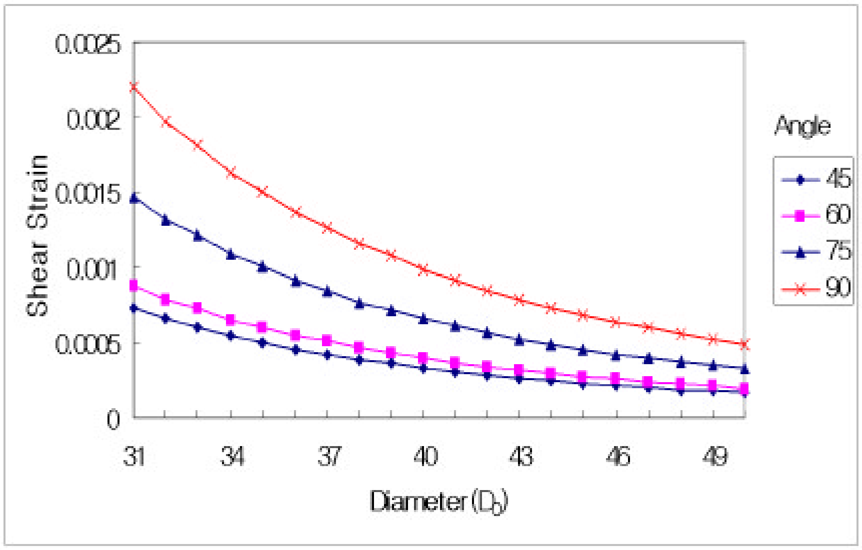


Fig. 15 Shear strain for angles and dimensions(D_0/D_1=0.4)

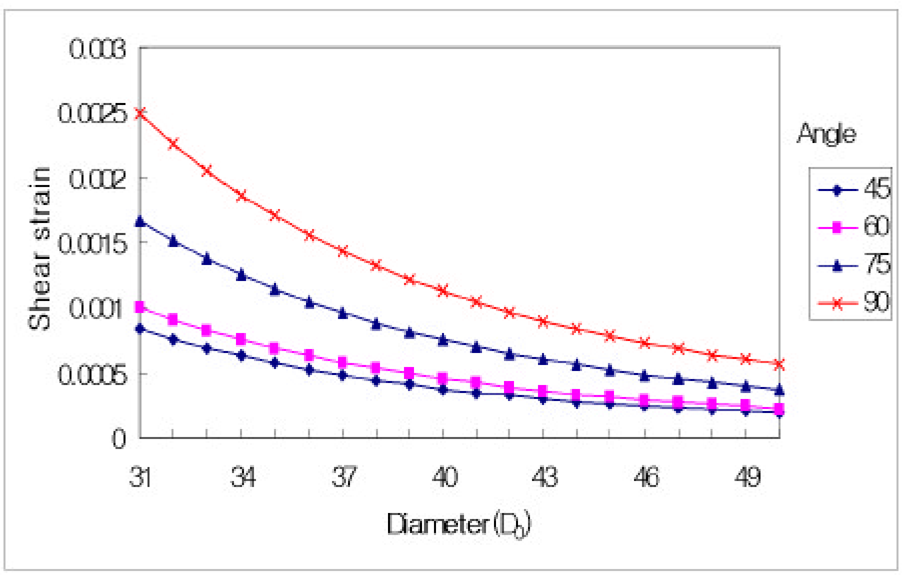


Fig. 16 Shear strain for angles and dimensions(D_0/D_1=0.6)

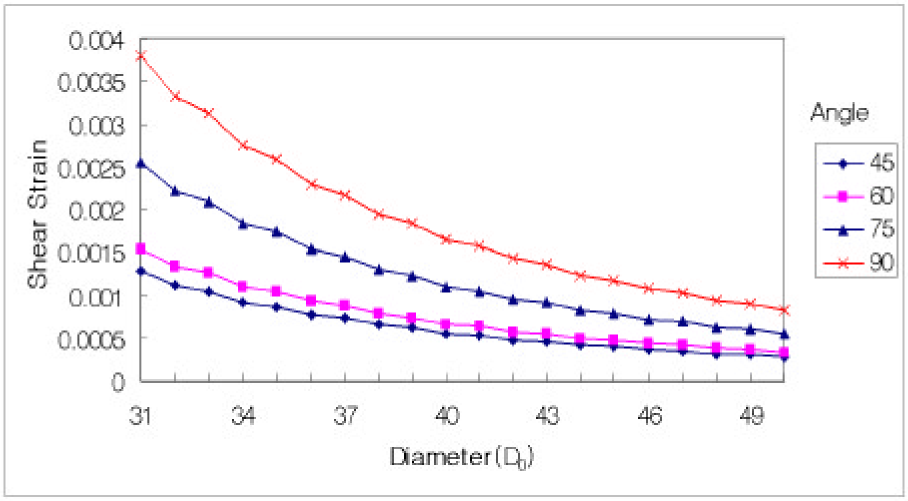


Fig. 17 Shear strain for angles and dimensions(D_0/D_1=0.8)

현재 소형선박에 사용되고 있는 축재료인 단강재(ST S420)**를 대체하기 위해서 본 연구에서는 직경을** 40mm**로 하여 축을 제작하기로 하였다**. **그리고 직경비에 따른 변형률은 직경비** 0.2**와 직경비** 0.4**에서는 큰 차이가 없고 직경비가** 0.6**과** 0.8**이상일 때 현저한 차이가 나타나며 각도에 대해서는 와인딩 각도** 90° **일 때 변형률이 최대임을 알 수 있다**. **따라서 현재 제작하고자 하는 축의 직경을 고려할 때**, **재료의 절감과 허용응력을 생각하여 알맞은 값을 선정하여 직경은** 40mm**로 하고 직경비는** 0.4**로 하였으며**, **와인딩 각도는** 45° **로 하였다**.

5.2 필라멘트 와인딩 공법에 의한 실제 축의 제작

a. 기지재료(matrix)

기지재료로서 사용되는 모재는 여러 가지가 있으며, 가장 많이 사용되는 기지 재료로서는 열경화성 폴리에스터, 비닐 에스터, 에폭시 및 페놀수지 등이 사용되며 본 연구에서 사용된 기지재료는 국도화학에서 제작한 에폭시 수지로서 사용된 기지재의 물성치는 Table 3에 나타나 있다.

Table 3 Properties of matrix used in this study

Kinds	E.E.W (g/eq)	Viscosity (CPS at 25 ℃)	Ratio	Note
Epoxy resin (KBR-1729)	170-190	5,000-6,000	100	F/W, Laminating
Curing agent (KBH-1085)		30-60	80	F/W, Laminating
Catalyst agent(BDMA)		300-700	3	

b. 강화재(reinforcement)

본 연구개발에서는 강도가 우수하고 가격이 저렴하여 강화재로 가장 많이 사용되고 있는 유리섬유를 사용하였다. Glass roving에는 크게 두가지가 있다. 방사시 직접 소정의 TEX에 따라 균일하게 roll상으로 권취한 것을 Direct winding roving(single roving)이라 하며, 소정의 TEX로 되어진

가는 Strand를 여러가닥 합사하여 정해진 TEX로 권취한 것을 multi roving(assembled roving)이라 한다. 본 연구개발에서 사용된 유리섬유는 다음과 같다.

Table 4 Properties of fiber used in this study

Kinds	TEX	Tensile strength (g/Lox)	Dia.(㎛)	Note
ERS2310FW	2310	MIN.20	13	F/W, Pultrusion

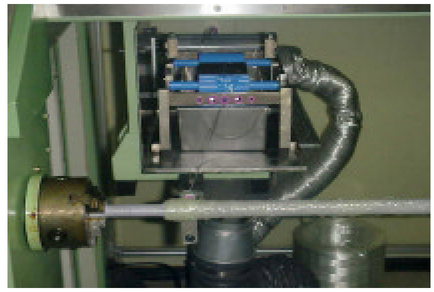
c. Shaft 제작용 필라멘트 완인딩 기계

Table 5 Spec of filament winding machine

	Regulations
Winding Dia.	25-300mm
Winding length	1200mm
Weight of mandrel	Max. 20kg
No. of spindle	1 Axis
Height of spindle	1000mm
No. of axis	-. X Axis : Mandrel rotation rpm : 0-200rpm -. Y Axis : Carriage traverse stroke of traverse: 0-1400mm speed of traverse:0.3m/sec -. Z Axis : Cross feed stroke of cross feed:0-300mm speed of cross feed:Max. 0.3m/sec
Winding angle	0-90
No. of roving	2 Rovings

d. **제작 방법 및 제작 과정**

(a) A mixture of resin



(b)fixed Mandrel

(c)winding

(d)cure

(e)shaft

Fig. 18 Process of Shaft

e. **수지의 경화 사이클**

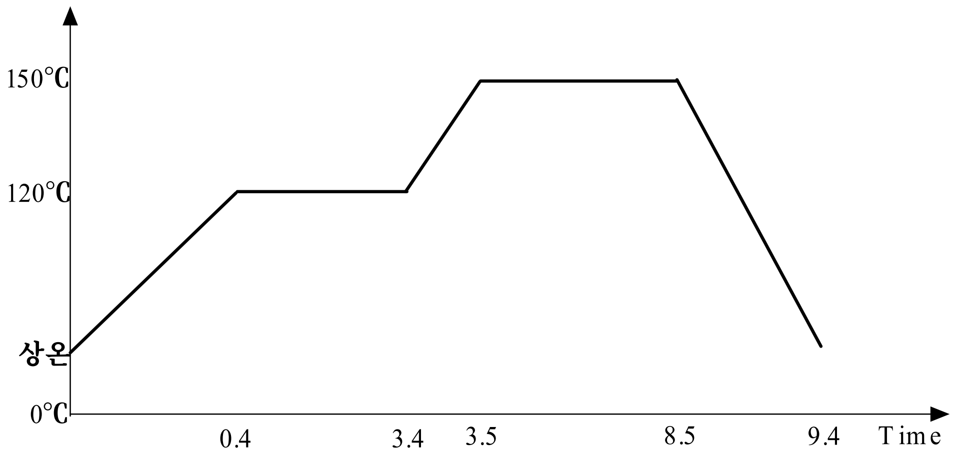


Fig. 19 Cycle of cure

(**단**, **경화오븐의 온도는** 1**분에** 3°C**의 온도상승을 가진다**.)

f. **기계적 특성시험**

(1) **경량화시험**(**제작된 축**)

No.	1	2	3	4	5	Average	Steel shaft
Weight (g)	611	622	619	611	638	620	2630

제 5 장 결 론

소형 선박용 복합재료 축을 개발하기 위해서 축의 응력해석 및 구조설계를 행하였으며, 와인딩 구조물은 고전 적층판이론으로 해석하여 복합재료 축에 가장 큰 영향을 미치는 비틀림을 고려하여 계산하였고, 여기서 직경이 클수록 전단응력을 적게 받음을 알 수 있었다. 또한, 와인딩 각도가 90°일 때 전단변형률이 가장 커져 비틀림 모멘트에 가장 큰 영향을 받음을 알 수 있었고, 직경을 40mm로 하여 축을 제작할 때 직경비를 0.4로 하고 와인딩 각도를 45°로 할 때 가장 최적의 설계가 가능함은 Fig. 4 Fig. 9를 통해서 알 수 있다. 섬유 배열이 30° 60° 사이에서는 전단 변형률의 변화가 크게 없음을 알 수 있었으며, 와인딩 각도가 75° 이상이 되는 경우는 그 전단응력값이 커져 축의 파괴가 일어나므로 75° 이상으로 와인딩하는 경우 축의 직경을 더 크게 해야한다. 경량화에 있어서도 기존의 단강재(STS 420)의 무게에 비해 약 60%정도의 무게 감량 효과를 가져왔다.

Reference

1. Stress Analysis and Structual Design of FRP Pressure Vessel, K. J. Yoon, Tae-Wook Kim, Eui-Jin Jun, 1990.

2. Processign Technology of Composite Materials, E.J.Jun, pp. 18-27, 대한기계학회지 1992

3. Technology and status of composites applications C.S.Hong pp. 334-341 대한기계학회지 1994

4. Filament Winding Composite Structure Fabrication, S.T. Peter, W.D. Humphrey, R.F. Foral 1992

5. Composite materials and their manufacturing processes M.K.Eom, W.I.Lee pp. 310-325, 대한기계학회지 1994

6. 복합재료의 물성 평가법 K.J.Cho, pp.58-63, 대한기계학회지 ,1997

7. Handbook of Composites, Edited by S.T. Peters, Published in 1988 by Chapman & Hall, London, pp 456 458

8. Peters, S.T., Foral, R.F and Humphrey W.D. ,1987, Filament Winding In International Encyclopedia of Composites, pp 503 518

9. Peters, S.T.,1987,Filament Winding, In Engineered Materials Handbook, Vol.1, Composites, pp 504 509

10. Handbook of Composites, Edited by George Lubin, Filament Winding, A.M.Shibley, Plastic Technical Evaluation Center, pp 449 450

11. Development of Composite transmission shaft for Aircraft, 한국 과학기술처
12. 船舶動力傳達裝置, 전효중, pp. 1 20, 1986
13. Geometrical Design of Composite Cylindrical Characterization Specimens, N.J. Pagano and J.M.Whitney, J. Composite Materials, Vol.4, 1970, pp 360
14. Analyze on Failure Mechanisms and Mechanical Behavior of Composite Laminates under Axial and Torsional Loadings, W.B.Hwang, J.Y.Park, K.S.Han 대한기계학회논문집, 1991
15. Stress Analysis and Design of Optimal Fiber Angle of Composite Linear Guider Used for Robot Platform S.H.Kim, Y.S.Lee, M.S.Cho, 대한기계학회논문집 A, 1998
16. Filament winding ,its development manufacture application, and design, John wiley and Sons IncRosto, D.V and Grove, C.S pp.216 248
17. Optimal Design of Cylindrically Laminated Composite Shells for Strength , D.S.Shin, E.D.Park, H.C.Park, C.W.Kim, W.Hwang, pp.775-787, 대한기계학회논문집 A, 1996
18. FRP 構造强度 設計の 實際、 植村益 次, 安宅信行, 福田 博
19. Review on Higher Order Laminated Composite Plate Modelings M.H.Cho, pp. 517-526, 대한기계학회지, 1994

20. Analysis of a Composite Panel with Transverse Matrix Cracks nuder Bending and Twisting Moments, J.S.Park, S.Y.Lee, H.K.Hur, pp. 971-980, 대한기계학회논문집A, 1997

21. Mechanics of composite Materials, MacGraw-Hill Washington pp. 147 156 Johnes, R, M, 1975

22. 船級 및 鋼船規則 제5편 機關裝置 제3장 軸系 및 動力傳達裝置, 1997

23. 기계설계 Machine Design 5장 축, Robert L. Norton

24. Stress Analysis and Design of Optimal Fiber Angle of Composite Linear Guider Used for Robot Platform, S.H.Kim, Y.S.Lee, M.S.Cho, pp. 1418-1430 대한기계학회논문집 A, 1998

20. Analysis of a Composite Panel with Transverse Matrix Cracks nuder Bending and Twisting Moments, J.S.Park, S.Y.Lee, H.K.Hur, pp. 971-980, **대한기계학회논문집**A, 1997

21. Mechanics of composite Materials, MacGraw-Hill Washington pp. 147 156 Johnes, R, M, 1975

22. **船級 및 鋼船規則 제5편 機關裝置 제3장 軸系 및 動力傳達裝置**, 1997

23. **기계설계** Machine Design 5**장 축**, Robert L. Norton

24. Stress Analysis and Design of Optimal Fiber Angle of Composite Linear Guider Used for Robot Platform, S.H.Kim, Y.S.Lee, M.S.Cho, pp. 1418-1430 **대한기계학회논문집** A, 1998