

工學博士 學位論文

섬유강화 복합소재에 의한 경량의
선박용 동력전달축 개발

The Development of Light-weight
Transmission Shaft for Vessel by Fiber
Reinforced Composite Materials

指導教授 金 允 海

2003年 2月

韓國海洋大學校 大學院

材 料 工 學 科

裴 昌 原

工學博士 學位論文

섬유강화 복합소재에 의한 경량의
선박용 동력전달축 개발

The Development of Light-weight
Transmission Shaft for Vessel by Fiber
Reinforced Composite Materials

指導教授 金 允 海

2003年 2月

韓國海洋大學校 大學院

材 料 工 學 科

裴 昌 原

本 論 文 을 裴 昌 原 의 工 學 博 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함 .

主 審 : 工 學 博 士 王 之 錫 印

委 員 : 工 學 博 士 文 慶 萬 印

委 員 : 工 學 博 士 李 柄 雨 印

委 員 : 工 學 博 士 金 鍾 道 印

委 員 : 工 學 博 士 金 允 海 印

2002年 12月 20日

韓 國 海 洋 大 學 校 大 學 院

材 料 工 學 科

裴 昌 原

목 차

Abstract	iii
Nomenclature	vi
제1장 서론	1
1.1 연구배경	1
1.2 연구목적	5
1.3 논문의 구성	5
제2장 복합재료의 일반	7
2.1 복합재료의 개요	7
2.2 필라멘트 와인딩(F/W) 성형법의 개략	19
제3장 적층판 이론에 의한 복합재료 축의 응력해석 및 설계	23
3.1 고전 적층판 이론	23
3.2 고전 적층판 이론에 의한 선박 동력전달축의 응력 해석	31
3.3 복합재료 축 설계	38
3.4 설계 결과 및 고찰	44
3.5 결론	51

제4장 선박용 동력전달축의 비틀림 응력계산	52
4.1 동력전달 토크에 의한 전단응력	52
4.2 비틀림 진동에 의한 전단응력	57
4.3 프로펠러의 비틀림 응력	62
4.4 결언	64
제5장 복합재료 동력전달축의 제작	65
5.1 동력전달축 제작 장치	65
5.2 실험재료	67
5.3 제작 방법	69
5.4 복합재와 금속재와의 접합	76
제6장 복합재료 동력전달축의 특성평가	78
6.1 섬유함유율	78
6.2 공동률	84
6.3 적층두께에 따른 인장특성	88
6.4 비틀림 특성	98
6.5 접합강도	103
6.6 경량화	107
제7장 결론	108
참고문헌	111

Abstract

High performance composites are being used increasingly for engineering applications such as space vehicles, aircrafts, road transportations, fishing-rods, golf-club shafts and yachts because of their two major advantages, namely, the higher specific strength and specific modulus. From these viewpoint, the advent of advanced fiber reinforced composites has been called the biggest technological revolution.

Filament winding process is a comparatively simple operation in which continuous reinforcements in the form of roving are wound over rotating mandrel. The filament winding method is affected by several parameters such as pot life of process time, viscosity of resin, filament winding temperature, curing condition, etc.

It is known that the composite material shafts using on small boats have various advantages comparing to forged steel shafts, for examples; high specific strength, high fatigue strength, high corrosion resistance, etc.

The purpose of this study is to analyze and design the stress of hollow shaft composites, and to evaluate the characteristics of hollow shaft composites which is wound by filament winding method.

The analysis of the stresses and strains in the hollow shaft

composites made by filament winding method is presented in this paper. Classical laminated plate theory was applied on the patch cut from the hollow shaft composites. The classical laminated plate theory was used for analyzing the stress, and for structure design. The diameter and thickness of composite shaft were calculated by this theory, and were considered the criterion of class rule in design.

It is verified that the hollow shaft composites of diameter 40 mm is the most optimum when the ratio of diameter is 0.4 and winding angle is 45° . It is also proven that the shear strain does not change seriously between 30° and 60° of winding angles. It is dangerous when the winding angle is over 75° because the values of shear strain and stress produced on the shaft are too high, and so it must be avoided to wind the filament by the angle over 75° .

The performance test of hollow shaft composites made by filament winding method is presented in this paper.

The results showed that the fiber content was 60.1 % and the resultant void content was 1.1 %. The fiber content was proper and the void content was very low.

The tensile tests were performed to verify strength of composite shafts according to the number of layers, and also the torsional tests were performed to verify strength of composite

shafts and adhesive joints.

The results of tensile tests according to the number of layers were changed greatly from 2 layers (thickness; 1.5 mm) to 4 layers (thickness; 3.0 mm). Also in the case of more than 5 layers (thickness; 3.75 mm), it was found that the tensile strength becomes a constant value. This shows that the effect of fiber is bigger than effect of matrix. It was found that the elongation according to the number of layers has little change in the layers of 5 or more. The result of torsional static test for the hollow shaft composites was measured 2316 N-m at 0.505 radian (28.9°), and the fracture happened in adhesion department with slip in higher stress than in calculated torsional stress. Adhesion strength by the adhesive was about 450 N-m at 0.046 radian (2.6°).

It is found that the hollow shaft composites had 76% weight saving effect comparing with a traditional metal shaft.

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

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

T_{oq} : Torque

D : Diameter of shaft

R : Ratio of diameter

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

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

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

제1장 서론

1.1 연구배경

복합재료(composite materials)란 두 종류 이상의 소재를 조합하여 물리적, 화학적으로 원래의 원소와 상이한 상을 형성하여 원래의 소재보다도 우수한 기능(function) 또는 특성(characteristic)을 발휘하도록 설계된 재료이다. 특히, 이 중에서 섬유강화 복합재료는 무게비강도 및 강성도가 크며 내환경성이 좋고, 또한 방향성이 있으며, 성형성이 우수하여 제품의 일체화가 가능한 점이 큰 특징이다^{1)~6)}.

이러한 복합재료의 응용은 우주, 항공 분야에서뿐만 아니라, 조선 분야 및 일반 산업분야에서도 날로 증가됨에 따라서 복합재료 산업은 이미 많은 발전 단계에 이르고 있다. 우주, 항공 분야에서는 오토클레이브(autoclave)를 이용하여 항공기의 동체나 헬리콥터의 블레이드를 복합재료화 하였고^{7),8)}, 자동차의 범퍼 등도 프리폼에 수지를 주입하는 레진 트랜스퍼 몰딩(Resin transfer molding ; RTM)성형법을 이용하여 복합재료화 하고 있으며, 현재 고강도·고탄성률을 지닌 섬유와 에폭시 등의 수지를 이용하여 필라멘트 와인딩 성형법으로 고압의 특수 압력용기 등을 복합재료화 하고 있다^{9)~11)}. 국내에서도 항공산업의 활성화로 인하여 항공기 구조물에 복합재료를 상당부분 채용하고 있으며, 조선분야에서는 복합재료를 선체로 한 선

박이 제작되어 운행중이고¹²⁾, 최근 스포츠용품 분야에서도 많이 활용되고 있다. 그러나 조선분야에서는 우주, 항공 산업분야만큼 복합재료로 성형된 제품이 활성화되어 있지 않고, 성형기술 개발이 아직 미진한 상태이어서 과학적이고 학문적인 연구는 물론 실제 적용 가능한 성형기술 개발은 필연적이라고 할 수 있다.

한편, 지속적인 해상 물동량의 증가에 따라 선박용 주기관의 성능은 장행정화, 대출력화 됨에 따라 이에 사용되는 동력전달축은 점점 가혹한 환경하에 놓여지게 될 뿐만 아니라 선박의 고속, 고출력, 경량화를 통한 고효율화를 요구하고 있는 것이 현실이다.

그리고 선박의 추진 축계는 크랭크축, 중간축 및 추진기축으로 구성되어 있고^{13)~15)} 대부분 단강재로 만들어진다¹⁶⁾.

현재 일반적으로 이용되고 있는 단조강 추진축의 경우, 그 평가기술은 각국의 선급규정에 정해놓고 있듯이 그 기술력과 공신력이 어느 정도 축적되었다고 사료되나, 복합재료의 사용이 널리 확대되고 있는 시점에서 선박에 복합재료를 이용할 경우 이를 평가할 수 있는 기술이 없는 실정이다.

그러나 최근 들어 선박건조기술의 발달과 함께 재료의 효율성을 고려한 선박용 부품의 신소재화 시대가 개막되었고, 1970년대 말부터 선진국에서는 재료의 효율성을 고려하여 선박용 부품들을 복합재료의 성형법을 이용하여 설계·제작하고 있다. 이들 선진국에서는 1980년 후반부터 선박의 동력전달축인 중간축, 프로펠러, 스텐튜브 베어링 등을 이미 섬유강화 복합재료로 성형하여 개발 응용하고 있

으며^{17)~20)}, 디젤기관의 피스톤에도 개발·응용되고 있다^{21)~24)}. 그러나 우리 나라에서는 복합재료를 이용한 선박용 동력전달축에 대한 연구가 거의 이루어지지 않고 있으며 헬리콥터와 자동차의 동력전달축에 대해 일부 연구하고 있는 실정이다.

기존의 금속재 추진축과 비교할 때 보강섬유로 강화된 복합재료로 제작된 축은 상당한 무게감소를 달성할 수 있어 경제적인 측면 및 연료 소비량 측면에서도 상당한 효과를 거둘 수 있다²⁵⁾. 그리고 복합재료는 금속재료에 비해 상당한 진동 감쇠 능력을 가지고 있는 것으로 알려져 있으므로 선박 운항시에 발생하는 진동으로 인한 출력저하 등을 최소화시키고, 선박의 경량화 및 비틀림 진동을 줄이고 선체의 추진속도 증가 및 추진축의 변형 등을 최소화시킴으로써 정비성의 향상을 도모할 수 있다.

또한, 선박의 동력전달축(중간축 및 프로펠러축)은 단강재로 만들어지므로 무게의 증가에 따라 축 진동도 심할 뿐만 아니라 중량 증가에 따라서 베어링의 증가 설치가 필수적이다.

선박에 설치되는 동력전달축은 경량화, 유지관리의 편리성, 경제성 등의 종합적인 면에서의 성능 향상을 위해 복합재료 성형법의 하나인 필라멘트 와인딩(Filament winding ; F/W)과 같은 복합재료 성형 기술을 이용하여 제작 가능하며, 보다 추진효율을 향상시킬 수 있는 성형방법의 설계기술이 가능하다고 할 수 있다. 또한 복합재료와 금속재료의 접합에 따른 접착기술의 연구를 곁들여 완벽한 하나의 복합재료 동력전달축의 개발이 가능할 뿐만 아니라 복합재료 축

과 프로펠러를 일체로 개발할 수 있으며 이에 대한 설계 및 평가가 이루어져야 할 것이다.

따라서 본 연구에서는 소형선박에 사용할 수 있는 직경 40mm의 복합재료를 제작하기 위해 먼저 복합재료의 응력해석에 많이 이용하고 있는 고전 적층판 이론에 의해 적층 복합재료의 응력해석을 통해 복합재료 축을 설계하고 이 설계결과에 따라 복합재료 축을 제작하여 복합재료 축의 여러 가지 특성들을 평가하고자 한다.

Table 1은 본 연구에서 개발하고자 하는 섬유강화 복합재료 추진축과 기존 단강재 축과의 특성을 상호 비교하여 나타낸 것이다.

Table 1 Comparison of characteristics between forged steel shaft and composites shaft

Kind of shaft Characteristics	Forged steel shaft	Composites shaft
Materials	Forged steel	Reinforced fiber plastics
Weight	1 (100%)	0.3 (30%)
Anti - corrosion	Bad	Good
Specific strength	Low	High
Specific elongation	Low	High
Absorption of vibration	Bad	Good
Number of bearings	Many	Few
Maintenance	Bad	Good
Joining for metal	Good	Bad
Recycling	Good	Bad

1.2 연구목적

본 연구에서는, 필라멘트 와인딩 성형기술을 이용하여 기존에 선박에 사용하고 있는 단강재 선박용 동력전달축에 비해 무게 절감효과를 가져오고 우수한 기계적 특성 및 내식성 등의 이점을 지니고 있는^{26)~28)} 소형 선박용 복합재료 동력전달축을 개발하여 그 기술을 바탕으로 대형선박용 동력전달축 개발에 대한 기초를 마련하고자 하였다.

따라서, 본 연구에서는 제작하고자 하는 소형 선박용 복합재료 동력전달축의 응력해석을 통해 소형 선박에 사용하는 직경이 약 40mm의 동력전달축을 설계하고, 복합재료 성형법 중에서 축, 파이프 등의 성형에 많이 이용되고 있는 필라멘트 와인딩 성형법에 의해 시제품을 제작하여 섬유함유율, 공동률, 인장특성, 정적 비틀림 특성 및 접합특성 등을 평가하여 소형선박에 사용 가능여부를 파악하고 경량의 복합재료 동력전달축을 개발하는 것이 목적이다.

1.3 논문의 구성

본 논문은 전체 7장으로 구성되는데 제1장에서는 본 연구를 하게 된 배경과 필요성 및 연구목적에 대하여 설명하고, 제2장에서는 본 연구에서 필요한 복합재료의 강화섬유와 기지재료 및 본 연구에서 이용한 복합재료 성형방법에 대해 설명하고, 제3장에서는 고전 적층판 이론에 의해 복합재료에 대한 응력해석을 통해 복합재료 축을 설

계하였고 이 결과에 대해서 논하고, 제4장에서는 복합재료 축에 걸리는 비틀림 응력을 계산하였으며, 제5장에서는 설계 결과에 따라 복합재료 축을 제작하기 위한 방법에 대해 설명하였고, 제6장에서는 제작된 복합재료 축의 여러 가지 특성들을 평가하였고, 제7장에서는 본 논문의 결론에 대하여 논하고 향후 연구과제를 제시하였다.

제2장 복합재료의 일반

2.1 복합재료의 개요

복합재료는 주로 하중을 담당하는 보강재(reinforcement)와, 보강재와 결합하여 하중을 보강재에 전달하는 기지재료(matrix)로 구별되며, 각각의 뛰어난 특성을 살려 복합공정을 거쳐 만드는 재료로서 기지재료의 종류에 따라 금속기지 복합재료(metal matrix composites), 세라믹기지 복합재료(ceramic matrix composites) 및 고분자기지 복합재료(polymer matrix composites)로 분류된다.

2.1.1 보강재(Reinforcement)

고분자기지 복합재료에서는 보강재로 주로 섬유가 사용되는데 유리섬유(glass fiber), 탄소섬유(carbon fiber), 케블라섬유(kevlar fiber), 보론섬유(boron fiber) 및 세라믹계 섬유인 실리콘 카바이드(silicon carbide)와 알루미나 섬유(alumina fiber) 등이 주로 사용된다²⁹⁾.

Table 2는 강화섬유들의 특성을 비교한 것이다³⁰⁾.

Table 2 Properties of reinforcing fiber

Materials Properties	Glass		Carbon			Polyaramid		Bo- ron	Silicon carbide
	E	S	High strength	High modulus	Ultra high modulus	Kevlar 29	Kevlar 49		
Specific gravity	2.6	2.5	1.8	1.9	2.0	1.44	1.44	2.5	2.6
Tensile modulus (GPa)	72	87	230	370	520	83	124-131	400	180-200
Tensile strength (GPa)	1.7	2.5	2.5	1.8	1.0	2.3	2.3	2.8	2.4
Strain to failure (%)	2.4	2.9	1.1	0.5	0.2	2.8	1.8	0.7	1.2
CTE $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	5.0	5.6	-0.4	-0.5	-1.1	-	-2.0	4.9	3.1

※ E : E-glass

※ S : S-glass

※CTE : Coefficient of thermal expansion

최근에는 복합재료의 보강재로 주로 연속섬유가 사용되고 있으며 그 중 가장 오래된 보강섬유가 유리섬유이다. 이 유리섬유의 원료로는 규사(silica), 석회석(limestone), 붕사 등이 주를 이루며 그 배합비에 따라 각 성질이 달라진다.

유리섬유를 복합재료에 많이 사용하는 이유는 다음과 같다.

- ① 인장강도 및 탄성계수가 크다.
- ② 불연성이며 화학적 내구성이 양호하다.
- ③ 흡수성이 작다.

- ④ 표면처리제가 다양하고 비교적 수지와와의 접착성이 좋다.
- ⑤ 물리적 성질중 전기저항성이 좋다.
- ⑥ 다른 보강재보다 가격이 비교적 안정적이다.

유리섬유의 조성에 관한 성분비는 Table 3과 같다.

Table 3 Chemical composition of glass fibers

Types Compositions(%)	E-glass	C-glass	A-glass	T-glass	M-glass (YM-31-A)	AR-glass
	SiO ₂	52~56	60~65	72	64.3	53.7
Al ₂ O ₃	12~16	2~6	0.6	24.8		1~5
CaO	15~25	15~20	10	<0.01	12.9	0~12
MgO	0~6		2.5	10.3	9	
Na ₂ O+K ₂ O	0~1	8~12	14.2	0.27		13~18
Fe ₂ O ₃				0.2	0.5	
LiO ₂					3	
BeO					8	
TiO ₂					2	
ZnO					3	
B ₂ O ₃		2~7		<0.01		0~4
ZrO ₂						12~21
SO ₃			0.7			
Characteristics	electric insulation	acidity-proof	creation of glass wool	high tensile strength	high modulus of elasticity	alkalinity-proof

유리섬유는 원료 조성에 따라 A, C, E, S유리로 분류할 수 있으며, A유리는 고알칼리 유리로서 대표적인 유리이며 화학물질에 대한 저항성이 높다. 전기절연의 목적으로는 저알칼리 조성의 E(electricity) 유리가 사용된다. 현재 대부분의 유리섬유제품은 E유리섬유로 만들어진다. 특별히 화합물에 대한 저항성이 요구될 경우에는 C(corrosion)유리가 사용되며 높은 인장강도가 요구될 경우에는 S(silica)유리가 사용된다. 유리섬유는 우수한 성능과 가격이 저렴하여 많은 분야에서 사용되고 있다.

유리섬유는 사용목적에 따른 포장 및 직조방법에 따라 여러 가지로 분류된다. 유리섬유에는 장섬유와 단섬유가 있는데, 장섬유는 용해된 유리를 고속으로 인출하여 감은 실이며, 단섬유는 용해된 유리를 원심방법 또는 화염법으로 날려 면상으로 한 것이다. 장섬유의 기본적인 것은 유리 양(yarn) 및 유리 로빙(roving)이다. 원료를 약 1,600℃의 온도에서 용해하여 50~2,000개를 집속제로 집속한 것을 스트랜드(strand)라 하며, 이것에 꼬임을 가한 것을 양이라고 한다. 꼬임을 가하지 않고 가닥들을 수십 개씩 합한 것을 로빙이라고 하며 일반적으로 여러 개의 스트랜드를 합쳐서 만든다. 로빙을 직조한 것(woven roving)은 선박과 같은 대형구조물을 적층 및 제작하는데 많이 쓰이며 두께는 0.5~1.0mm이고 단위면적당 무게는 0.4~1.35kg/m²이다. 유리섬유는 매트 형태로도 만들어지는데 유리섬유 매트는 단섬유(chopped strand)매트, 연속섬유(continuous strand)매트, 표면매트(또는 veil)의 세 가지로 분류한다. 단섬유 매트는 유리섬유 스트랜드를 25~50mm의 길이로 짧게 잘라 평면 위에 배열시

켜 놓고 적절한 화학처리를 가하여 서로 붙게 만든 것으로 그 단위 면적당 무게는 0.24~0.92kg/m²이다³¹⁾.

보통 강화 플라스틱이라 하면 유리섬유를 보강재로 한 것을 가리키고 있다고 해도 좋을 만큼 유리섬유가 많이 사용되고 있으며, 이것은 유리섬유가 다른 재료에 비해서 강도가 뛰어나고 값이 싸기 때문이다. 유리섬유에는 여러 가지의 형태의 것이 있으므로 제품의 성능, 성형가공의 방식, 가격 등의 여러 조건을 고려하여 가장 적합한 형태의 것을 선택하여야 한다. Table 4는 상온에서의 유리섬유와 에폭시 수지를 적층한 것의 특성을 나타낸 것이고, Table 5는 각종 유리섬유 제품들의 사용 패턴별 특성을 것이다.

Table 4 Properties of typical epoxy-glass fiber laminates at room temperature

Properties	Glass mat	Glass cloth (tooling cloth)	Glass cloth (fabric)	Filament wound glass fiber
Specific gravity	1.6~1.8	1.6~1.8	1.8~2.0	1.8~1.9
Extent of reinforcement (%)	40~50	50~55	65~70	75~85
Tensile strength (MPa)	82.7~172.4	172.4~241.3	344.7~413.7	551.6~1379
Compressive strength (MPa)	206.8~241.3	275.8~344.7	344.7~413.7	344.7~517.1
Flexural strength (MPa)	137.9~172.4	206.8~275.8	482.6~551.6	689.5~1379
Modulus of elasticity in flexures (GPa)	10.3~12.4	13.8~17.2	24.1~27.6	41.4

Table 5 The using patterns of reinforcing glass fiber

General form	General description	Process	General glass content of typical laminates(%)	Typical application
Rovings	continuous strands of glass fibers	filament winding, continuous panel, preforming(matched die molding), spray-up	25~85	pipe, automobile bodies, rod stock, rocket motor cases, ordnance
Woven fabrics	woven cloth from glass fiber yarns in 38-, 44- and 60-in widths	hand lay-up, vacuum bag, autoclave, high-pressure laminating	50~70	aircraft structures, marine, ordnance hardware, electrical flat sheet, tubing
Woven roving	woven glass fiber strands; coarser and heavier than fabrics	hand lay-up, wet system	40~70	marine, large containers, tooling
Chopped strands	strands cut to lengths of 1/8 to 2in	premix molding, per-slurry preforming	15~40	electrical and appliance parts, ordnance components
Reinforcing mats	continuous or chopped strands in random matting	matched die molding, hand lay-up, centrifugal casting	20~45	translucent sheets, truck and automobile -body panel, marine
Surfacing and overlaying mats	nonreinforcing random mat	matched die molding, hand lay-up, filament winding	5~15	where smooth surfaces are required ; automobile bodies, some housing
Non woven fabrics	unidirectional and parrel rovings in sheet form	hand lay-up, filament winding	60~80	aircraft structures

2.1.2 기지재료(Matrix)

복합재료를 구성하고 있는 요소 중에서 기지재료(matrix)는 섬유 사이에서 응력을 전달하고, 주위 환경으로부터 섬유를 보호하며, 기계적인 마모로부터 섬유를 보호하는 역할을 한다. 이러한 기지재료로 많이 사용되는 플라스틱 수지는 한번 가열되어 성형되면 다시 성형되지 않는 열 경화성 수지(thermosetting resin)와 가열과 냉각과정을 반복하여도 가역반응이 일어나는 열가소성 수지(thermoplastic resin)로 나누어지며, Table 6에 그 특성을 나타내었다.

Table 6 Comparison of properties between thermosetting and thermoplastic resins

	Thermosetting	Thermoplastics
Properties	<ul style="list-style-type: none"> • chemical reaction • irreversible process • low viscosity • high fluidity • long curing time • sticky prepreg 	<ul style="list-style-type: none"> • no chemical reaction • reversible process • high viscosity • low fluidity • short curing time • stiff prepreg
Merits	<ul style="list-style-type: none"> • low process time • good fiber impregnation • complex form process • low viscosity 	<ul style="list-style-type: none"> • good toughness • recycle • low price • long shelf life • high resistance
Demerits	<ul style="list-style-type: none"> • short process time • discomfort shelf life 	<ul style="list-style-type: none"> • low chemical resistance • very high temperature

열 경화성 수지는 에폭시 수지, 불포화 폴리에스테르 수지, 페놀 수지 등이 있으나 복합재료 제조용으로 에폭시 수지가 가장 많이 사용되고 있다. Table 7은 대표적인 열 경화성 수지들의 특성을 비교한 것이다³²⁾.

에폭시 수지는 주로 비스페놀(bisphenol)A, 즉 페놀 2분자와 아세톤의 축합으로 생성한 화합물과 에피클로로히드린(epichlorhydrine)이란 그 분자 속에 에폭시기를 갖는 화합물의 축합생성물을 뜻한다.

에폭시 수지는 강도가 높고 접착성이 양호하며 반응수축이 작고 경화제에 의해 물성 변화가 가능한 장점이 있으나, 내후성과 내수성이 약하고 경화시간이 긴 단점이 있어 주의가 필요하지만 가장 용도가 넓은 플라스틱의 하나이다. 그리고 이것은 접착제, 도료, 적층품, 주형품, 성형품 등으로서 화학 전기, 기계, 토목공업 등의 여러 분야에서 역활은 대단히 중요하다. 에폭시 수지는 단독으로는 사용하지 않고 경화제와 함께 사용해야만 그 특징을 발휘한다^{33),34)}. 에폭시 수지의 종류는 매우 다양하며 그 특성은 Table 8과 같다.

Table 7 Comparison of properties for thermosetting resins

Properties	Epoxy	Polyester	Phenolic
Cure mechanism	polymerization of resin plus hardener	catalytic copolymerization of resin and vinyl monomer	condensation polymerization of resin, aided by catalysts
Wet impregnation (typical system)	liquid resins plus amine hardeners	styrene-modified resins plus peroxide catalysts	liquid phenolics plus acid catalysts
Contact pressure for laminating(psi)	to 15	to 15	to 15
Typical temperature for cure (°C)	25~150	25~100	25~170
Typical cure time (min)	60~180	10~60	60~180
Shelf stability of liquid resin (alone)	excellent	fair	poor
Shrinkage of resin system during cure	low	high	high
Adhesion to metal substrates	excellent	fair	fair
Adhesion to wood	good	good	fair
Adhesion to concrete	excellent	fair	fair
Impregnation to a dry stage (B-staged)	solid epoxy plus an hydride or latent cure agent in solvent or hot melt	solvent-dispersed polyester plus peroxide catalyst	solvent dispersed polyester plus peroxide catalyst
Pressures for laminating (psi)	25~100	25~100	25~1,000psi
Typical temperature for cure (°C)	100~150	100~150	100~150
Shelf stability of impregnated glass at 25°C	limited	limited	limited
Electrical properties of cured laminate	excellent	excellent	good(poor arc resistance)
Physical properties of cured laminate	excellent	excellent	excellent(best heat resistance)
Cost	moderate	low	low

Table 8 Comparison of kinds and properties for epoxy resin

Specification		Properties	Remarks
Bisphenol A epoxy resin		plasticity, impact strength, compressive strength, chemical-resistance	
Cycloaliphatic epoxy resin		chemical-resistance, thermal deformation temp., electric insulation, impregnation, molding	
Multi-functional epoxy resin	Tri-functional	low viscosity, low temp. curing, nondiscoloration, plasticity, low volatility	insulation varnish, tar epoxy, FRP, molding
	Four-functional	curing, thermal endurance, mechanical strength	CFRP, thermal endurance paints, adhesives
Thermoplastic epoxy resin	Dimer modified	plasticity, low volatility, anti-impact, adhesive strength, dimension stability	molding of electric parts, plastic paints
	Polyglycol modified	plasticity, low viscosity, anti-impact, percentage elongation	paint, adhesives, potting, molding
Brominated epoxy resin		self-extinguishing additives, incombustibility, dimension stability, mechanical strength, incombustibility, size stability	PCB, incombustible paint, incombustible adhesives, acrylate materials
Novolac epoxy resin		thermal endurance, chemical-resistance, adhesive strength	forming, thermal endurance
Polyol modified epoxy resin		low temp. curing, plasticity, chemical-resistance	anti-corrosion paints, tar epoxy
Bisphenol F epoxy resin		low viscosity, reactivity, low temp. curing, plasticity	low temp. curing paints, mortar, molding, impregnation, adhesives
Phenoxy resin		adhesive property, self-fusion promoters, plasticity, corrosion resistances, anti-impact	magnetic tape binder, electric cable enamel, primer, can coating
Other resin modified epoxy resin	Urethane modified	low temp. curing, adhesive strength, plasticity	structural adhesives, sealing, paints, molding
	Rubber modified	elasticity, plasticity, thermal endurance, mechanical strength, reactivity	structural adhesives, electric molding additives, sealant, plastic paints, grouting
	Silicone modified	thermal endurance, chemical-resistance, plasticity, anti-impact, simplicity	thermal endurance paints, flexibilisers

2.1.3 경화제(Hardeners)

에폭시 수지는 경화제와 반응해서 기계적 강도나 내약품성이 우수하지만 그 성질은 경화제의 종류나 배합비 혹은 경화조건 등에 의해서 그 성질이 크게 바뀐다.

경화제 종류는 아민계 및 유기산무수물계로 대별되며 전자는 상온 또는 중온 경화제로 사용되고 후자는 고온 경화제로 사용된다. 이외에도 많은 종류의 경화제가 있으며 용도에 따라서 적당히 선택하여 사용하여야 한다.

수지에 배합하는 경화제의 양은 에폭시 당량(1g당량의 에폭시기를 포함한 수지의 그램수)을 기본으로 산출된다. 유기폴리아민이 가장 많이 사용하고 있는 경화제이다³⁵⁾.

2.1.4 부자재(Additives)

부자재는 주재료에 첨가하여 가공성을 개량한다든지 또는 제품의 품질성능을 바꿀 뿐만 아니라 가격조정 등에도 커다란 역할을 한다. 부자재로서는 가소제(plasticizer), 산화방지제, 자외선 흡수제, 난연제(flame retardants), 착색제(colorants), 충전재(fillers), 대전 방지제 등이 있다. Table 9 및 Table 10에는 경화온도 및 화학조성에 따른 경화제를 비교하여 각각 나타낸다.

Table 9 Comparison of various hardeners according to the curing temperature

	Temperature range	Hardeners
Low temperature hardener	~10 °C	<ul style="list-style-type: none"> • polymercaptan, mercaptan additives and their derivatives • special amine additives • mannich reaction substances • curing promotive materials for aliphatic amine, aromatic amine, alicyclic amine
Room temperature hardener	10°C ~40°C	<ul style="list-style-type: none"> • polyamide amine • aliphatic amine, derivatives • aromatic amine, derivatives • alicyclic amine, derivatives
Medium temperature hardener	60°C ~100°C	<ul style="list-style-type: none"> • imidazole • alicyclic amine inducing substances • tri-amine
Medium high temperature hardener	100°C ~	<ul style="list-style-type: none"> • DICY • BF, amine base • imidazole derivatives
High temperature hardener	140°C ~	<ul style="list-style-type: none"> • aromatic Polyamine • acid anhydride

Table 10 Comparison of various hardeners according to the chemical formation

	Hardeners
Aromatic amine base	<ul style="list-style-type: none"> • aliphatic polyamine • chemical modified aliphatic amine • tri-amine modified aliphatic amine
Polyamide amine and amidoamine	<ul style="list-style-type: none"> • polyamide amine • polyamide/epoxy adduct
Alicyclic amine Base	<ul style="list-style-type: none"> • alicyclic amine • adduct reaction substances • tri-amine derivatives
Aromatic amine	<ul style="list-style-type: none"> • aromatic amine • modified aromatic amine
Etc.	<ul style="list-style-type: none"> • DICY • BF • imidazole

2.2 필라멘트 와인딩(F/W) 성형법의 개략

2.2.1 개요

필라멘트 와인딩(Filament winding; F/W) 성형법은 섬유 안이나 토우(tow)에 수지를 함침시킨 후 제품을 성형시키기 위해 미리 준비한 심축(mandrel)을 회전시켜서 회전하는 심축 주위에 일정하게 감은 후 경화시키는 공정의 복합재료 성형법이다^{36),37)}.

필라멘트 와인딩 성형법은 수지가 함침된 연속섬유를 회전하는 심축에 감아 주로 축대칭 복합재료 구조물을 제작하는 방법이다. 성형은 심축의 회전속도와 섬유의 공급위치를 이동시키는 섬유밴드대(carrige)의 속도를 조절하여 일정한 와인딩 각도와 패턴으로 수지가 함침된 연속섬유를 심축에 감을 수 있는 성형기를 이용한다^{38)~40)}.

필라멘트 와인딩 성형법에서 핵심기술이라 할 수 있는 것은 결합 최소화를 위한 수지 함침기술, 섬유 균일 분포를 위한 섬유의 장력 제어기술, 설계기술 등이다^{41),42)}.

필라멘트 와인딩 성형법에서 경화가 끝난 필라멘트 와인딩 제품 내부의 심축은 제거하는 경우가 많지만 제거하기 어려운 경우에는 복합재료 내부에 그대로 두는 경우도 있다. 필라멘트 와인딩 성형법은 최근 파이프, 용기, 축, 프로펠러 등 각종 셸 구조 또는 프레임구조의 성형에 많이 응용되는 장섬유(연속섬유)강화 복합재료 기술의 하나이다.

2.2.2 필라멘트 와인딩 성형법의 특징

필라멘트 와인딩 성형법은 다른 복합재료 성형법에 비해 사용되는 재료의 가격이 저렴하고 인건비가 적게 들며, 컴퓨터 제어나 로봇 등을 이용하면 생산공정의 균일성을 이룰 수 있기 때문에 제품의 복제성이 좋고, 자동화가 용이하다는 이점이 있다.

따라서, 필라멘트 와인딩 성형법은 우주항공 관련의 기기에 일찍이 응용되었으며 산업용으로 사용되는 내식성의 파이프나 용기의 제작에 이용되었고, 최근에는 경량이면서 고강도가 요구되는 고압가스 용기, 고압파이프 등으로 응용이 확대되어 연구되고 있다^{43),44)}. 최근에는 6축의 와인딩 성형기가 개발되어 축대칭이 아닌 복잡한 형상의 제품도 제작하고 있다⁴⁵⁾.

Table 11에는 다른 복합재료 성형법에 비해 필라멘트 와인딩 성형법의 특징을 나타낸다⁴⁶⁾.

Table 11 Properties of filament winding process

Merits	<ul style="list-style-type: none"> • Highly repetitive and accurate in fiber placement • Can use continuous fibers over the whole component area • Large and thick-walled structures can be built • Mandrel costs can be lower than other tooling costs • Lower cost for large numbers of components • Costs are relatively low for material
Demerits	<ul style="list-style-type: none"> • Shape of the component must permit mandrel removal • Cannot generally wind reverse curvature • Cannot change fiber path easily(in one lamina) • Needs a mandrel • Generally poor external surface

2.2.3 필라멘트 와인딩 성형법의 와인딩 패턴

필라멘트 와인딩 성형법은 섬유를 감는 패턴에 따라 헬리컬 와인딩(helical winding), 폴라 와인딩(polar winding)법 등이 있다.

헬리컬 와인딩은 심축이 계속 회전하고 캐리지(섬유밴드대)가 심축 방향으로 직선 왕복운동 하면서 섬유를 감는 방법으로 압력용기나 파이프, 축 등을 감는데 사용된다. 후프 와인딩은 심축이 정지되어 있는 동안 섬유를 공급해주는 팔이 축방향으로 한 바퀴 돌면서 1패턴을 이룬 다음 심축이 밴드폭 만큼 회전하고 다시 팔이 돌아가며 이미 감긴 섬유 옆을 계속 감는 방법으로 주로 구형이나 돔(dome)형 압력용기 등을 만드는데 사용된다⁴⁷⁾.

또한, 수지의 함침 여부에 따라 습식 와인딩법과 건식 와인딩법이 있는데, 습식 와인딩법은 와인딩하는 과정에 섬유가 함침 용기(bath)를 통과할 때 수지가 섬유다발 내로 함침되고 바로 심축에 섬유를 감는 방법과 와인딩 후 함침하는 방법 및 와인딩 전 함침하는 방법이 있으며⁴⁸⁾, 건식 와인딩법은 열 경화성 수지를 만드는 반응에서 어떠한 액체와 접촉하면 늘어나고 가열하면 열화하지만 완전히 용해되거나 용융하지 않는 중간단계⁴⁹⁾인 즉, 수지가 이미 함침되어 경화가 일부 진행된 B-단계의 프리프레그(prepreg)를 심축에 감는 방법을 말한다.

2.2.4 필라멘트 와인딩 성형법

필라멘트 와인딩 성형법의 전체적인 공정 및 과정을 Fig. 1 및 Fig. 2에 나타낸다.

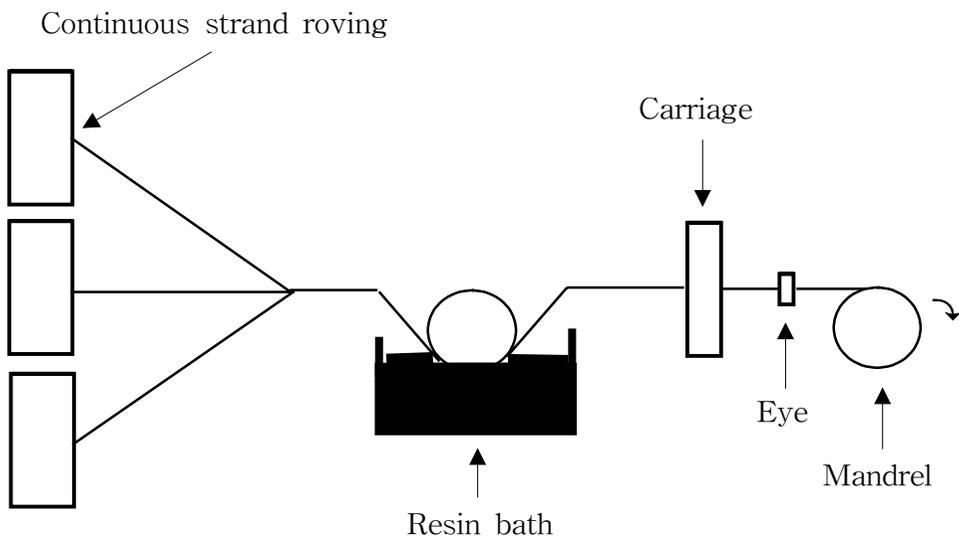


Fig. 1 Scheme of filament winding process.

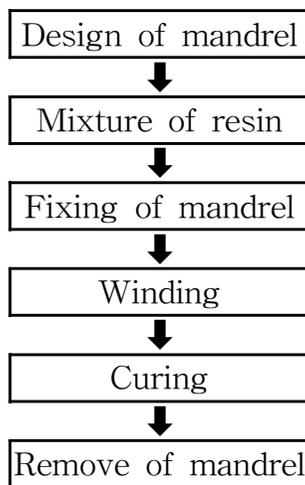


Fig. 2 Flow chart of filament winding process.

제3장 적층판 이론에 의한 복합재료 축의 응력해석 및 설계

복합재료 역학의 해석 방법에는 미시적 방법과 거시적 방법이 있는데, 미시적 방법은 복합재료 각 층(ply 또는 laminate)내의 섬유(fiber)와 기지재료(matrix)를 구별하여 각각에 걸리는 응력(stress)과 변형률(strain)을 계산하는 방법이다. 거시적 방법은 각 층 내의 섬유와 기지재료를 구별함이 없이 두 물질의 성질이 완전히 혼합되어 평균 성질을 나타낸다고 가정하고 응력과 변형률을 계산하는 방법이다. 미시적 방법에는 복합재료의 거동을 분석하는데 유용하게 이용되는 반면 거시적 방법에는 대개 1mm 정도 이상 크기의 물체를 주로 다루게 되며 일반적으로 균일한 직교 이방성 플라이로 취급하여 다룬다.

3.1 고전 적층판 이론

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

복합적층판의 문제를 재료역학의 관점에서 간단하게 해석하기 위

해서는 다음 세 가지의 가정을 필요로 한다.

- ① 복합적층판이 인장이나 압축 및 전단응력만을 받는 경우에는 (굽힘을 받지 않을 경우) 적층판의 두께 방향으로 변형률이 일정하다.
- ② 각 플라이의 변형률은 같으며, 또한 적층판의 변형률과 같다.
- ③ 탄성계수는 각 플라이마다 서로 다르며, 따라서 응력은 각 플라이마다 다른 값을 갖는다.

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

3.1.1 응력-변형률 관계식

섬유강화 복합재료와 같은 직교 이방성 재료는 재료 성질이 대칭인 서로 직교하는 3개의 평면을 갖고 있으므로 수직응력 σ_1 , σ_2 , σ_3 와 전단 변형률 γ_{12} , γ_{23} , γ_{31} 사이에는 어떤 상호관계가 없으며, 또한, 전단응력 τ_{12} , τ_{23} , τ_{31} 와 수직 변형률 ϵ_1 , ϵ_2 , ϵ_3 사이에도 상호관계가 없다. 여기서 첨자 1, 2, 3은 각각 섬유방향, 섬유방향에 수직인 방향, 그리고 이 두 방향에 수직인 방향을 나타낸다. 따라서 응력-변형률 관계식은 아래의 (1) 및 (2)의 식과 같다^{50),51)}.

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{31} & Q_{32} & Q_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{pmatrix} \quad (2)$$

여기서, Q_{ij} 는 축소강성 계수라 하고, S_{ij} 는 컴플라이언스 (compliance) 계수라고 한다.

단층은 평판이므로 평면응력(plain stress) 상태로 볼 수 있다. 평면 응력 상태에 대한 응력-변형률 관계식은 재료 상수를 사용하면 식(3)과 같다.

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} \quad (3)$$

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

3.1.2 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 팽창비(ν)로써 기계적 거동을 표현할 수 있는 반면 직교 이방성 재료인 단층에서는 섬유방향 1(1방향), 섬유 방향에 수직인 방향 2(2방향), 그리고 1과 2 방향에 수직인 3(3방향)에 대한 재료 상수로써 다른 방향에 대한 기계적 거동을 모두 나타낼 수 있다. 이러한 재료는 상수 축 방향 인장시험, 순수 전단 시험과 같은 간단한 시험으로 결정된다. 특히 섬유강화 단층에서는 섬유방향의 탄성계수(E_x)가 섬유방향에 수직인 방향의 탄성계수(E_y)보다 훨씬 크다.

식 (2)에서 축소강성행렬을 재료 상수로 나타내면 다음 식 (4)와 같다.

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

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 상반정리(reciprocal theorem)에 의해 9개의 독립 상수가 됨을 알 수 있다⁵²⁾.

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

3.1.3 섬유방향에 따른 응력과 변형률의 변환⁵³⁾

복합재료는 사용방향에 맞도록 섬유방향을 바꾸면서 적층을 할 필요성이 있다. 일반적으로 주재료방향과 기하학적 좌표가 일치하지 않고, Fig. 3과 같이 θ 만큼의 각을 이룰 때 1, 2방향의 응력과 x, y 방향의 응력은 식 (5)와 같다.

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

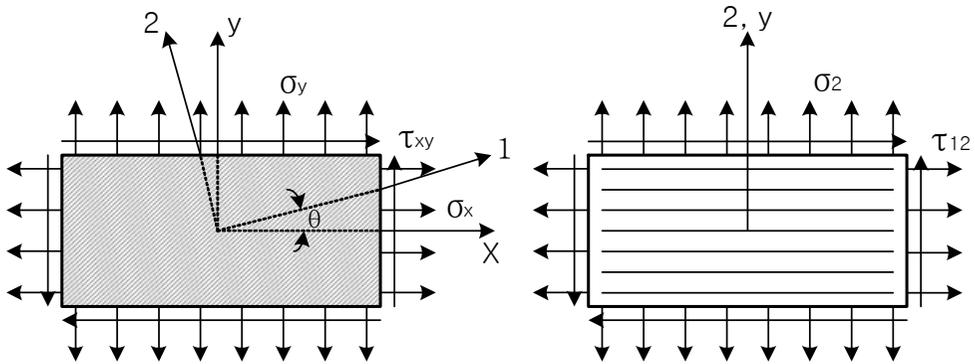


Fig. 3 Rotation of the main fiber axis for the optional x, y axis.

또한, 변형률은 다음 식 (6)과 같다.

$$\begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \frac{\gamma_{xy}}{2} \end{pmatrix} = [T]^{-1} \begin{pmatrix} \epsilon_2 \\ \epsilon_1 \\ \frac{\gamma_{12}}{2} \end{pmatrix} \quad (6)$$

단,

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

이다.

식 (5), (6), (7)과 식 (3)을 이용하여 x, y방향의 응력-변형률 관계식을 유도하면 식 (8)이 된다.

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} \quad (8)$$

여기서 ,

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

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

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

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

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

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

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

\bar{Q}_{ij} 는 변환된 축소강성계수를 나타낸다. \bar{Q}_{ij} 는 Q_{ij} 와 비교할 때 9개의 요소를 가지고 있지만 역시 4개의 독립 재료상수로 표시되어 있음을 알 수 있다. 기하학적인 좌표인 x, y 에 대해서 전단변형률과 수직 응력 사이에 또 수직 변형률과 상호관계가 있어서 이를 단층 직교 이방성 단층(generally orthotropic lamina)이라 부르기도 한다.

3.2 고전 적층판 이론에 의한 선박 동력전달축의 응력 해석

하중을 받는 복합재료 적층판의 변위와 변형률은 단일층 복합재료와 달리 각층 사이의 상호작용으로 인하여 변위와 변형률이 복잡한 형태가 나타나게 되는데, 이러한 변위와 변형률을 구체적으로 구할 수 있는 이론을 고전 적층판이론(Classical laminated theory, CLT)이라 하며, 고전 적층이론이라고도 한다. 고전 적층이론은 최종적으로 복합재료 적층판의 강성도를 구하는 것이 목적이다.

3.2.1 단일층 복합재료에서의 응력과 변형률⁵⁴⁾

앞절에서 단일층 복합재료의 응력 변형률 관계를 주응력 좌표계로 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)과 같다. 적층판에서는 각 층마다 적층각이 다르므로 임의의 좌표계에 대한 응력-변형률 관계가 필요하다.

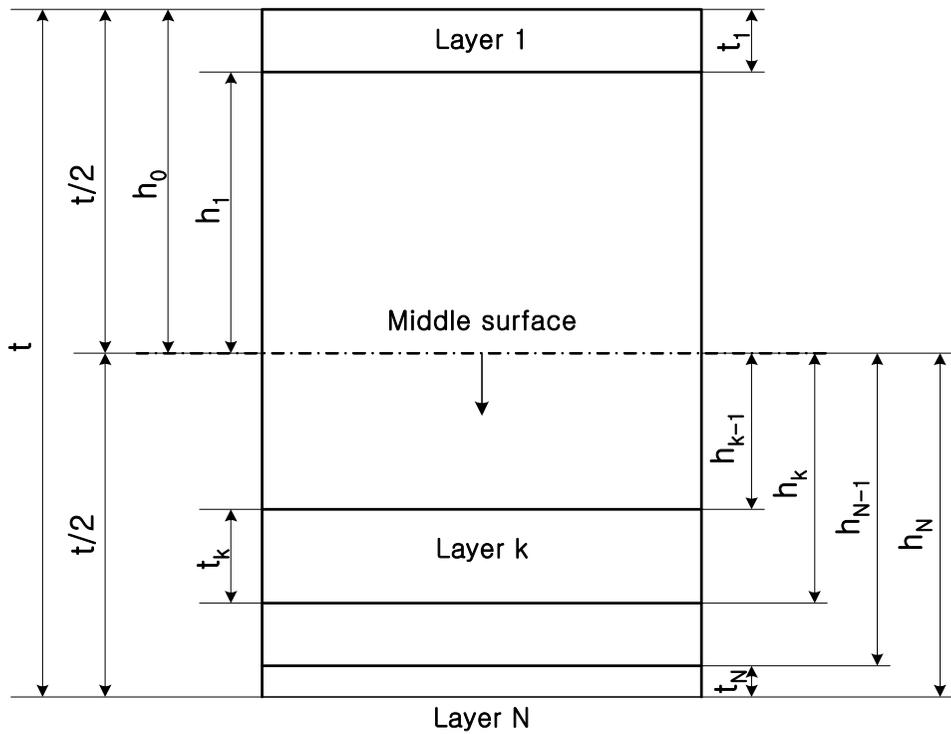


Fig. 4 The shape of laminates.

즉 Fig. 4에서 k 번째 층의 응력 변형률 관계를 구하면 다음과 같다.

$$[\sigma_{ij}]_k = [\bar{Q}_{ij}]_k [\varepsilon_{ij}]_k \quad (9)$$

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

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

3.2.2 적층판에서의 힘과 모멘트

복합재료 적층판에서는 각 층마다 적층각이 다르므로 같은 외력에 대해서도 강성도 및 강도가 다르며, 감당하는 힘이 모두 다르다. 각 층의 강성도는 이미 앞에서 언급하였으며, 적층판 전체에 가해지는 힘과 모멘트는 적층판 두께에 따라 각층마다 다른 힘과 모멘트를 적분함으로써 구할 수 있다. 이 때 적층판을 평면응력 상태라 가정하면 적층판에 가해지는 힘은 다음의 식 (11) 및 식 (12)와 같다.

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

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

여기서, N_{ij} 는 적층판 단위길이(N/m)당 가해지는 힘이고, M_{ij} 는 적층판 단위 길이당 가해지는 모멘트이다(Fig. 5).

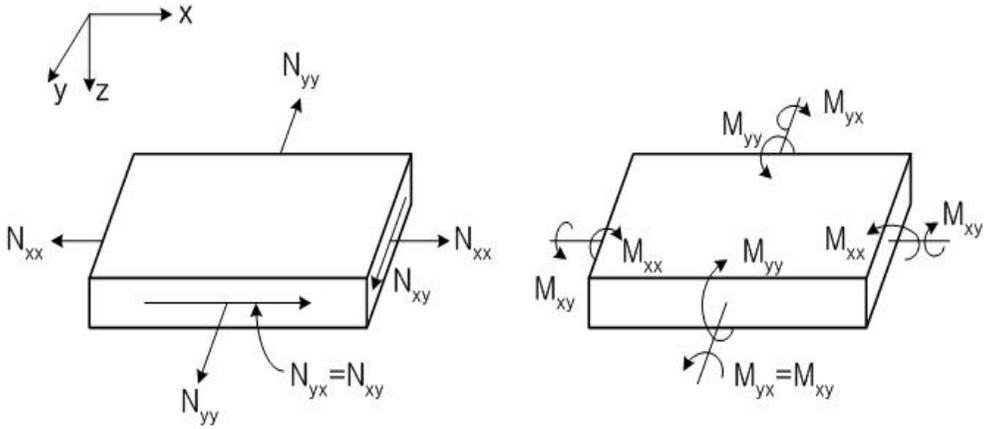


Fig. 5 Resultant forces and moments.

여기서, 복합재료의 평균응력은 다음 식 (13)과 같다.

$$\bar{\sigma}_{ij} = \frac{N_{ij}}{t} \quad (13)$$

t : 복합 적층판의 전체 두께

3.2.3 복합재료 적층판에서의 강성도

각 층마다 적층각이 다를 경우 적층판에 힘과 변형률과의 관계에서 인장 강성도 및 연계 강성도를 구하면 다음의 식 (14) 및 식 (15)와 같다.

$$\begin{pmatrix} N_{xx} \\ N_{yy} \\ N_{xy} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{pmatrix} \quad (14)$$

$$\begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{pmatrix} \quad (15)$$

여기서, k_{ij} 는 비틀림 곡률이다.

또한,

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^N [\overline{Q_{ij}}]_k \int_{k_{z-1}}^{k_z} dz \quad (16)$$

$$B_{ij} = \sum_{k=1}^N [\overline{Q_{ij}}]_k \int_{k_{z-1}}^{k_z} z dz \quad (17)$$

$$D_{ij} = \sum_{k=1}^N [\overline{Q_{ij}}]_k \int_{k_{z-1}}^{k_z} z^2 dz \quad (18)$$

A_{ij} 는 인장 강성도로서 힘 N_i 가 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 일반 금속재료에서 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.

3.2.4 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 (16), (17), (18)을 표현하면 다음의 식 (19), (20), (21)과 같다.

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^N [\bar{Q}_{ij}]_k \int_{k_{z-1}}^{k_z} dz = \bar{Q}_{ij} t \quad (19)$$

$$B_{ij} = \sum_{k=1}^N [\overline{Q}_{ij}]_k \int_{k_{z-1}}^{k_z} z dz = 0 \quad (20)$$

$$D_{ij} = \sum_{k=1}^N [\overline{Q}_{ij}]_k \int_{k_{z-1}}^{k_z} z^2 dz = \frac{1}{12} \overline{Q}_{ij} t^3 \quad (21)$$

3.3 복합재료 축 설계

일반적으로 선박용 축계는 선급의 규정에 따라서 그 직경을 결정한다⁵⁵⁾. 그러나, 소형선박에 있어서는 그 규정에 따르지 않고 설계하여도 무방하다.

한편, 소형 선박 및 요트용 축일지라도 설계를 할 경우에는 고려해야 할 여러 가지 변수가 많기 때문에 최적의 직경 및 축의 길이를 결정하는 것은 매우 어려운 일이다. 사용되는 재질이 등방성 재료가 아닌 복합재료와 같은 이방성 재료일 경우 섬유 방향에 따라 물성치가 달라지므로, 직경 및 축의 길이 결정은 더욱 많은 설계 조건을 생각하여야 한다. 복합재료의 물성치는 단섬유인지 연속섬유인지에 따라서도 상당한 차이를 갖는다. 그리고 물성치에 미치는 가장 중요한 요인은 섬유의 방향에 있어서 복합재료 설계시 충분히 고려되어야 한다.

일반적으로 축이 만족해야 하는 가장 중요한 요구 조건은 최대 각속도까지 올렸을 때 걸리는 토크 및 각(角)변형이라 할 수 있다. 동력원에서 전달되는 힘이 축을 통해서 전달되므로 축에는 토크에 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 방향과 섬유 방향을 일치시키면 무게를 절감할 수 있다. 축에 비틀림 하중이 가해지면 최

대 응력은 축 방향에 대해 45°방향으로 걸리므로 섬유방향이 45° 방향이 되게 성형하면 가장 이상적이다. 그러나, 축의 길이, 직경을 고려하면 좀 더 달라질 수 있다.

본 연구에서는 현재 소형 선박에 사용되고 있는 금속재 축을 대신 할 수 있는 복합재료 축을 설계함에 있어서의 축의 최대 회전수, 토크 및 사용된 복합재료 물성치를 고려하여 와인딩 각도를 결정하였다.

제작하고자 하는 축의 길이를 고려해 볼 때 굽힘 모멘트에 의한 힘은 작용하지 않는다고 볼 수 있다. 따라서 인장, 압축과 비틀림 및 진동에 대해서 토크와 최대 회전수를 기준으로 축을 설계하고 하고자 한다.

3.3.1 와인딩 구조물의 응력 해석^{56),57)}

필라멘트 와인딩 제품은 주로 내압을 받기 때문에 내압에 대한 특수한 응력해석법으로 망상구조 응력 해석(Netting analysis)법이 필라멘트 와인딩 구조재료의 응력해석에 주로 사용된다^{58),59)}. 그러나, 본 연구에서 제작하고자 하는 축은 내압을 받는 구조가 아닌 인장, 압축 및 비틀림응력을 받으므로 적층판 구조 응력 해석법을 사용하였다. 필라멘트와인딩구조 재료는 거시적으로 섬유 방향이 대칭으로 된 플라이를 적층한 적층판과 같다고 볼 수 있으므로, 적층판 구조 응력 해석법이 바로 적용 될 수 있다.

하중을 받는 복합재료 적층판의 변위와 변형률은 단일층 복합재료와 달리 각층 사이의 상호작용으로 인하여 변위와 변형률이 복잡한 형태를 나타나게 되는데, 이러한 변위, 변형률을 구체적으로 구할 수 있는 이론인 고전 적층판 이론(CLT)을 이용하여 복합재료 적층판의 강성도를 구하고 선정된 복합재료 축의 직경에 대한 응력해석을 하였다^{60)~62)}.

3.3.2 복합재료 축 설계

본 연구에 제작하고자 하는 축은 소형선박에서 사용하고 있는 직경(D) 40mm의 길이(L) 475.1mm의 금속재료(STS 420) 축을 축의 중간부분 길이 약 300mm를 복합재료로 대체하기 위한 것이다.

Fig. 6은 소형 선박에 사용중인 축의 형상이다.

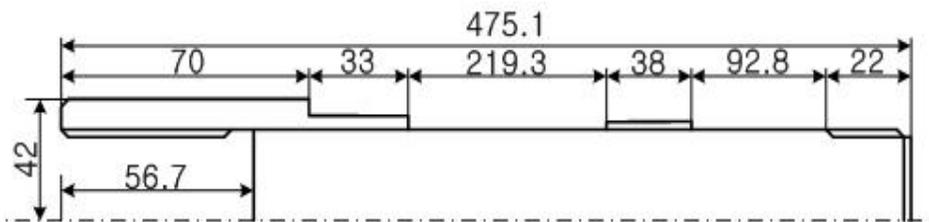


Fig. 6 The shape of shaft for small boat.

복합재료 축에 있어서 가장 중요한 특성은 일정한 거리만큼 떨어져 있는 두 지점 사이에서 걸리는 토크라고 할 수 있다. 이 때 이

축이 중공축이면, 축이 받는 전단응력은 다음과 같은 식 (22)로 표현될 수 있다.

$$(\tau_{xy})_M = \frac{16T_{oa}}{\pi(D_0)^3(1-R^4)} \quad (22)$$

여기서, $(\tau_{xy})_M$ 는 전단응력(N/mm²)이고, T_{oa} 는 토크이며, D_0 는 축의 외경, $R(D_1 / D_0)$ 은 축의 내경과 외경의 비이다. 복합재료에 있어서 전단응력 τ_{xy} 는 각 층마다 다르게 작용하지만 와인딩 각도가 모든 층이 같다고 가정하면 축이 받는 전단응력 $(\tau_{xy})_M$ 과 복합재료가 받는 평균전단응력 $\bar{\tau}_{xy}$ 은 같다고 할 수 있다.

$$(\tau_{xy})_M = \bar{\tau}_{xy} \quad (23)$$

식 (14)에서 복합적층판이 균일 적층판이고, 밸런스 된 대칭 적층판이라 하면, 식 (14)는 다음의 식 (24)와 같이 간단히 할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} N_{xx} \\ N_{yy} \\ N_{xy} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{pmatrix} \quad (24)$$

식 (24)를 다시 쓰면,

$$\begin{aligned}
 N_{xx} &= A_{11} \varepsilon_x^0 + A_{12} \varepsilon_y^0 + A_{16} \varepsilon_{xy}^0 \\
 N_{yy} &= A_{12} \varepsilon_x^0 + A_{22} \varepsilon_y^0 + A_{26} \varepsilon_{xy}^0 \\
 N_{xy} &= A_{16} \varepsilon_x^0 + A_{26} \varepsilon_y^0 + A_{66} \varepsilon_{xy}^0
 \end{aligned}
 \tag{25}$$

로 표현할 수 있다.

여기서 복합적층판이 밸런스 된 적층판이라고 가정하였고, 단층의 두께는 모두 동일하므로 식 (25)는 다음의 식 (26)과 같이 간단히 할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 N_{xx} &= t [\bar{Q}_{11} \varepsilon_x^0 + \bar{Q}_{12} \varepsilon_y^0 + \bar{Q}_{16} \varepsilon_{xy}^0 / N] \\
 N_{yy} &= t [\bar{Q}_{12} \varepsilon_x^0 + \bar{Q}_{22} \varepsilon_y^0 + \bar{Q}_{26} \varepsilon_{xy}^0 / N] \\
 N_{xy} &= t [\bar{Q}_{16} \varepsilon_x^0 / N + \bar{Q}_{26} \varepsilon_y^0 / N + \bar{Q}_{66} \varepsilon_{xy}^0]
 \end{aligned}
 \tag{26}$$

여기서, t 는 복합 적층판의 총 두께이고 N 은 적층한 적층판의 수이다. 식 (26)을 식(13)에 의해서 정리하면 식 (27)이 된다.

$$\begin{aligned}
\bar{\sigma}_x &= \bar{Q}_{11} \varepsilon_x^0 + \bar{Q}_{12} \varepsilon_y^0 + \bar{Q}_{16} \varepsilon_{xy}^0 / N \\
\bar{\sigma}_y &= \bar{Q}_{12} \varepsilon_x^0 + \bar{Q}_{22} \varepsilon_y^0 + \bar{Q}_{26} \varepsilon_{xy}^0 / N \\
\bar{\tau}_{xy} &= \bar{Q}_{16} \varepsilon_x^0 / N + \bar{Q}_{26} \varepsilon_y^0 / N + \bar{Q}_{66} \varepsilon_{xy}^0
\end{aligned} \tag{27}$$

여기서, $\bar{\sigma}_x$ 는 축 방향의 평균응력이고, $\bar{\sigma}_y$ 는 축에 수직한 방향의 평균응력이며, $\bar{\tau}_{xy}$ 는 평균 전단응력이다. 복합재료 축은 압축과 인장 그리고 비틀림만을 받는다고 가정하였으므로 $\bar{\sigma}_y$ 와 $\bar{\sigma}_x$ 는 그 값이 작다고 할 수 있다. 따라서, $\bar{\sigma}_x$, $\bar{\sigma}_y=0$ 이라 할 수 있다.

이상의 계산 결과를 토대로 비주얼 C++를 이용하여 프로그램화 하여 설계 결과를 도출하였다.

3.4 설계 결과 및 고찰

직경 40mm인 복합재료 축의 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^{63),64)}. 최적의 와인딩 각을 설정함으로써 재료절감 및 무게감소를 할 수 있다.

식 (27)에서 $\bar{\sigma}_x, \bar{\sigma}_y=0$ 이므로, 변형률 ϵ_x, ϵ_y 는 변형률 ϵ_{xy} 보다 작아 그 값을 무시할 수 있다.

Fig. 7은 직경과 직경비에 따른 축의 전단응력을 나타내고 있다.

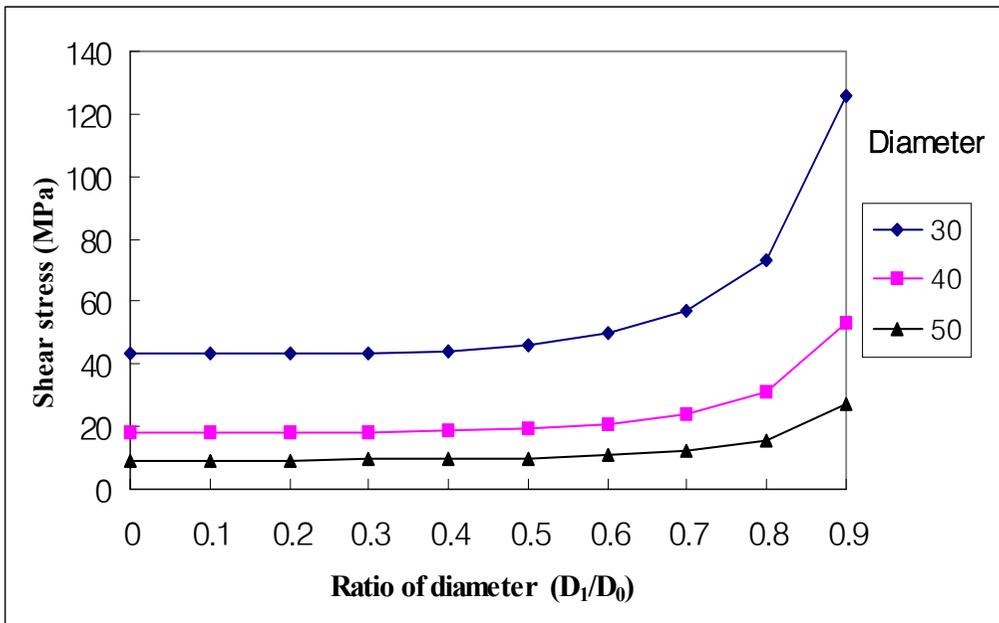


Fig. 7 Variation of shear stress with the ratio of dimension.

Fig. 7에서 전단응력이 직경비(D_1 / D_0)가 0.4이하일 때는 크게 변화가 없음을 알 수가 있다.

여기서, 복합재료의 와인딩 각도가 일정하므로 복합재료 축의 전단응력은 변형률과 전단강성계수(\bar{Q}_{66})에 의해서 변하게 된다.

따라서, 식 (27)에서 변형률과 응력의 관계에서 최적의 설계가 가능함을 알 수 있다. Table 12에 축의 설계조건에 관한 사항을 나타내었다.

Table 12 Design condition for composite materials shaft

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

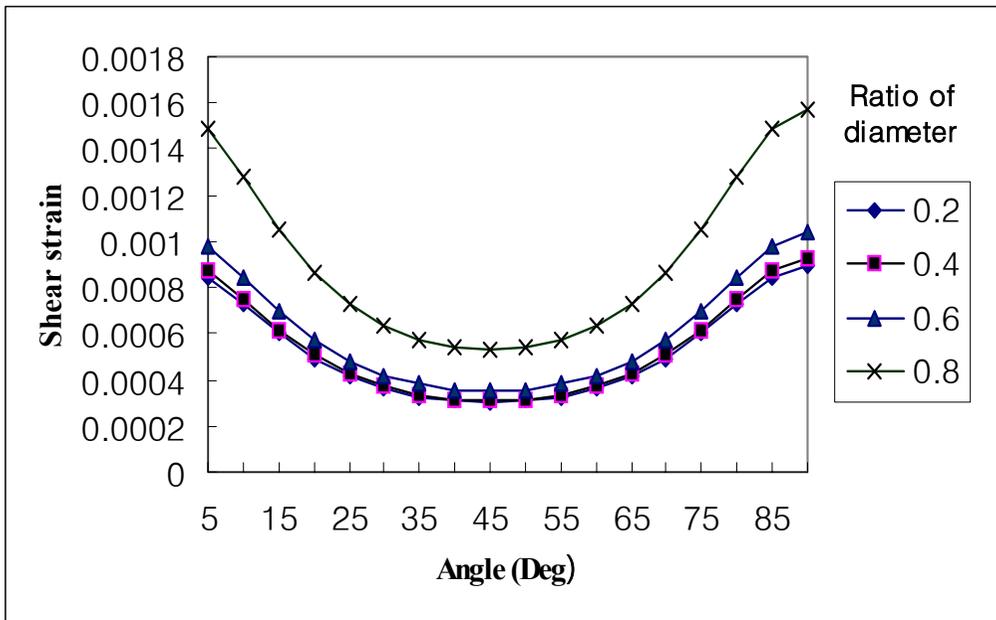


Fig. 8 Variation of shear strain with the winding angle (ε_{xy}^0 , $D_0 = 40$).

Fig. 8에서 보는 바와 같이 전단변형률은 45°를 기준으로 대칭임을 알 수 있다.

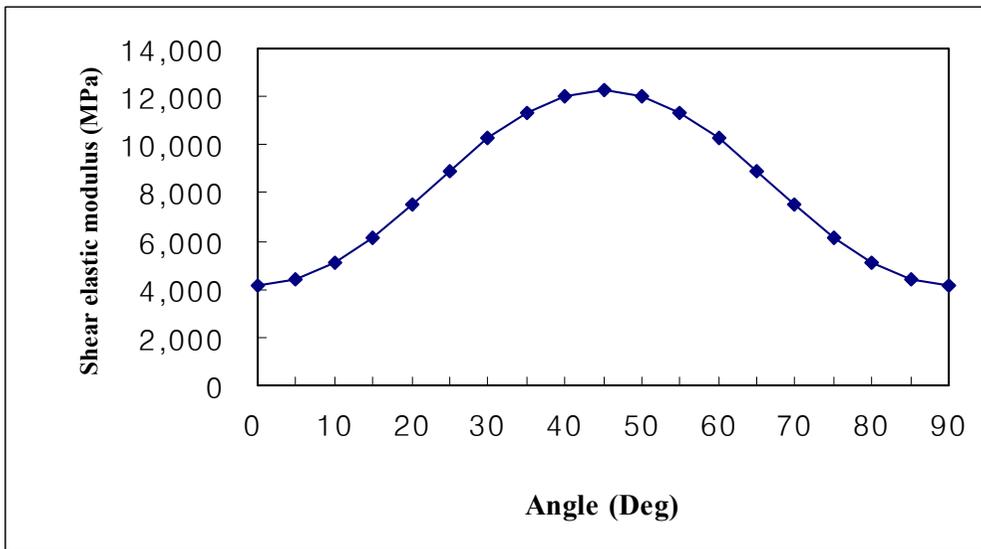


Fig. 9 Variation of rigidity with winding angle.

또한, Fig. 9에서는 전단 탄성계수도 45°를 기준으로 대칭적으로 변하고 있음을 보여주고 있다.

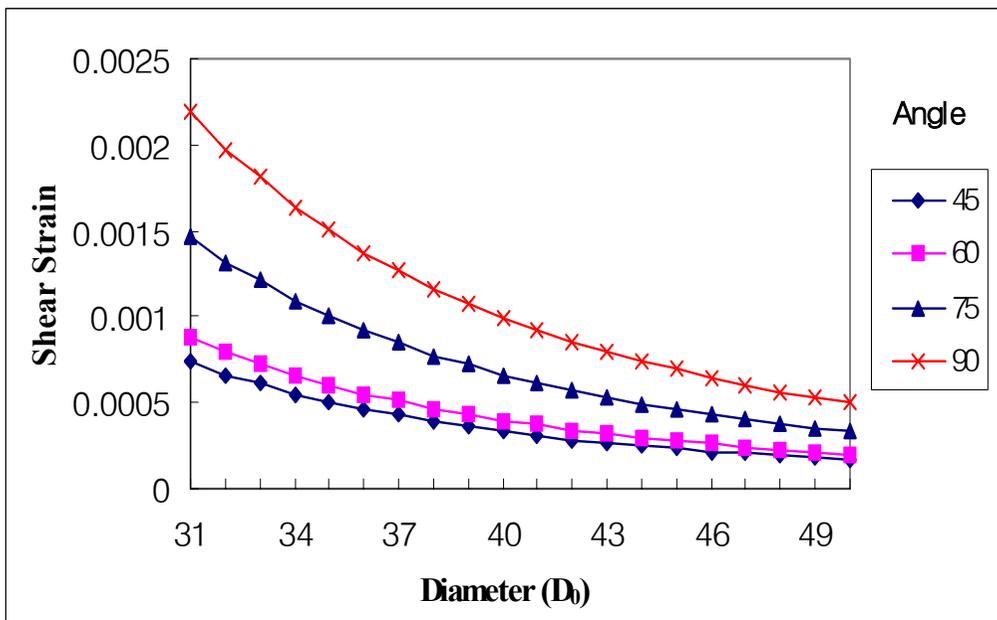


Fig. 10 Variation of shear strain with diameter and winding angle ($D_1 / D_0 = 0.4$).

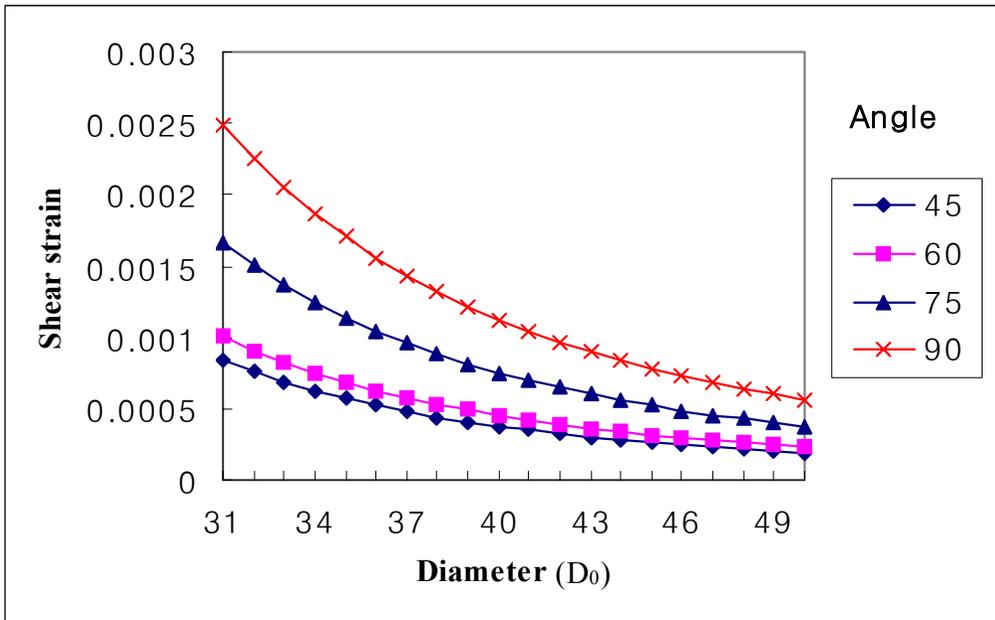


Fig. 11 Variation of shear strain with diameter and winding angle ($D_1 / D_0 = 0.6$).

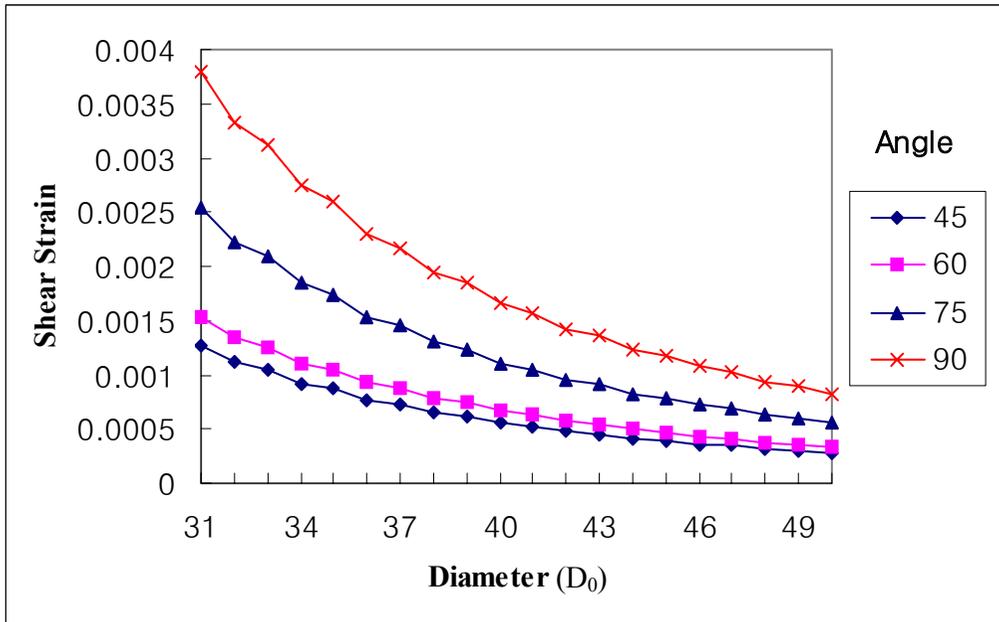


Fig. 12 Variation of shear strain with diameter and winding angle ($D_1 / D_0 = 0.8$).

그리고 Fig. 10, Fig. 11 및 Fig. 12에서 보는 바와 같이, 직경비에 따른 전단변형률은 직경비 0.2와 직경비 0.4에서는 큰 차이가 없고 직경비가 0.6과 0.8이상일 때 현저한 차이가 나타나며, 각도에 대해서는 와인딩 각도 90°일 때 전단변형률이 최대임을 알 수 있다. 따라서 현재 제작하고자 하는 축의 직경을 고려할 때 허용응력을 고려하여 알맞은 값을 선정하였다.

3.5 결론

본 장에서는, 소형선박용 복합재료 축을 개발하기 위해서 응력해석 및 구조설계를 하였다. 와인딩 구조물을 고전적층판이론으로 해석하여 복합재료 축에 가장 큰 영향을 미치는 비틀림을 고려하여 계산하였을 때, 직경이 클수록 전단응력을 적게 받음을 알 수 있었고, 와인딩 각도가 90°일 때 전단변형률이 가장 커져 비틀림 모멘트에 가장 큰 영향을 받음을 알 수 있었다. 직경을 40mm로 하여 축을 제작할 때 직경비(D_1 / D_0)를 0.4로 하고 와인딩 각도를 45°로 할 때 가장 최적의 설계가 가능하며, 섬유 배열이 30°~ 60°사이에서는 전단변형률의 변화가 크게 없음을 알 수 있었다. 또한 와인딩 각도가 75°이상이 되는 경우는 그 전단응력 값이 커져 축의 파괴가 일어나므로 75°이상으로 와인딩 하는 경우 축의 직경을 더 크게 해야한다.

제4장 선박용 동력전달축의 비틀림 응력계산

4.1 동력전달 토크에 의한 전단응력

축이란 일반적으로 원형 단면적으로 되어 있는 동력을 전달하는 회전체이며 비틀림, 휨 또는 축방향의 인장 및 압축하중을 단독으로 받거나 이들의 복합하중을 받고 있다.

제조된 동력전달축이 실선에 사용될 때에 이 프로펠러 축은 동력을 전달하기 때문에 비틀림 토크를 받고 이로 인한 전단응력이 프로펠러 축에 발생한다.

또한 주기관이 왕복동 기관이면 비틀림 진동이 축계에 발생하고 이 진동이 반복하중이 되어 이로 인한 반복 전단응력이 프로펠러 축에 추가된다. 이들 전단응력 외에 프로펠러 무게와 축 자중에 의한 굽힘 모멘트가 프로펠러 축에 주어져 이로 인한 굽힘 응력이 발생하게 된다.

본 장에서는, 외경 40mm, 내경 16mm인 복합재료 중공축의 비틀림 시험을 행하고자 할 때 복합재료로 제작되는 프로펠러 축에 걸어야 하는 비틀림 시험 하중을 제시하고자 한다.

프로펠러 축이 기관의 동력을 전달하므로 프로펠러 축에 토크가 걸리는데, 이로 인한 전단응력을 구하려면 프로펠러축의 직경을 알아야 한다. 프로펠러축의 직경을 계산하는 일반적인 공식은 식 (28)과 같다⁶⁵⁾.

$$d = 100 K_2 \sqrt[3]{\frac{560 P}{n (T + 160)}} \quad (28)$$

여기서,

d : 프로펠러축의 직경(mm)

K_2 : 프로펠러 축 설계특성에 관한 계수로서 Table 13과 같다.

P : 기관의 연속최대출력시 프로펠러축의 전달동력(kW)

n : 기관의 연속최대출력시 프로펠러축의 분당회전수(rpm)

T : 프로펠러 축 재료의 규격 최소인장강도로서

400~800N/mm²를 원칙으로 한다. 다만, 프로펠러축의

이 값이 600N/mm²를 넘는 경우에는 600N/mm²로 한다.

Table 13 Coefficient K_2

Kind of shaft	Adhesive method of propeller	K_2
Propeller shaft	Key	1.26
	Insert without key	1.22
	Flange	1.22
Stern tube shaft		1.15

식 (28)을 사용하기 편리하도록 하기 위하여 전달동력 P 의 단위

를 kW에서 Nmm/sec로 바꾸면 다음의 식 (29)와 같이 된다.

$$d = K_2 \sqrt[3]{\frac{560P'}{n(T+160)}} \quad (29)$$

여기서 P' 는 기관의 연속최대출력시 프로펠러축의 전달동력(N mm/sec)이고 다른 기호는 식 (28)의 내용과 동일하다.

한편 프로펠러 축이 전달하는 토크는 다음 식 (30)으로 계산되는 데

$$T_{oq} = \frac{60P'}{2\pi n} \quad (30)$$

여기서, T_{oq} 는 기관의 연속 최대출력시 프로펠러 축이 전달하는 토크(N-mm)이다.

식 (29)를 바꾸어 쓰면 다음 식 (31)과 같이 된다.

$$\frac{P'}{n} = \frac{T+160}{560} \frac{d^3}{K_2^3} \quad (31)$$

이 식과 식 (30)을 비교하여 프로펠러축의 전달 토크 T_{oq} 를 구하면 식 (32)가 된다.

$$T_{oa} = \frac{60P'}{2\pi n} = \frac{60}{2\pi} \frac{T+160}{560} \frac{d^3}{K_2^3} \quad (32)$$

프로펠러축의 전달 토크 T_{oa} 에 의하여 발생하는 전단응력 τ 는 다음 식 (33)으로부터 구할 수 있다.

$$\tau = 16 \frac{T_{oa}}{\pi d^3} \quad (33)$$

여기서 τ 는 프로펠러 축 표면에 발생하는 전단응력(N/mm²)이다.

식 (32)를 식 (33)에 대입함으로써 프로펠러축의 전단응력 계산식은 다음 식 (34)와 같이 된다.

$$\tau = \frac{0.08685(T+160)}{K_2^3} \quad (34)$$

프로펠러 축에 발생 가능한 최대 전단응력을 구하기 위하여 Table 13에서 계수 K_2 값들 중 프로펠러 축에 해당되는 것들에서 가장 작은 값인 $K_2 = 1.22$ 를 취하고, 재료의 규격 최소인장강도 T 로서 가장 큰 값인 600N/mm²을 식 (34)에 대입하여 계산하면 식 (35)와 같이 된다.

$$\tau = 36.35 \text{ N/mm}^2 \quad (35)$$

이 값은 프로펠러 축이 전달하고 있는 동력에 의해서만 발생하는 전단응력이나 프로펠러 축은 전술한 바와 같이 프로펠러 무게와 프로펠러 축 자중에 의한 굽힘 모멘트를 받으므로 이 굽힘 모멘트에 의한 굽힘 응력을 계산하고 등가전단응력으로 환산하여 식 (35)에 합해야 한다. 그러나, 프로펠러 축에 걸리는 굽힘 모멘트를 계산하기 위하여 프로펠러 무게와 베어링의 위치 및 기타 축계의 배치를 알아야 하는 데, 이것이 선박마다 다르기 때문에 프로펠러 축에 걸리는 굽힘 응력이 얼마라고 단정할 수가 없다. 그런데, 프로펠러 축에 걸리는 굽힘 모멘트에 의한 굽힘 응력은 프로펠러 보스, 전부 베어링 지지부에서 가장 크고 축 중간 부분은 그다지 크지 않으며, 이 부분의 굽힘 모멘트에 의한 굽힘 응력을 등가 전단응력으로 환산하면 식 (35)로 계산된 전단응력의 10% 정도이다. 그러므로 동력 전달에 의하여 발생하는 전단응력은 다음의 식 (36)과 같이 된다고 할 수 있다.

$$\tau' = 40.0 \text{ N/mm}^2 \quad (36)$$

4.2 비틀림 진동에 의한 전단응력

선박의 디젤기관과 같이 왕복동 기관을 사용하면 회전력의 불균일로 인하여 축계에 비틀림 진동이 발생하게 되고 이 진동에 의하여 프로펠러 축에 전단응력이 추가된다. 특히 축계 비틀림 진동의 노드(node)가 프로펠러 축에 있으면 이 진동에 의하여 큰 전단응력이 프로펠러 축에 생기는 데 거의 모든 선박에서 2절 비틀림 진동의 노드는 프로펠러 축에 있고, 2절 비틀림 진동에 의한 전단응력이 꽤 크다는 사실을 주목할 필요가 있다. 그러므로 비틀림 진동에 의한 전단응력의 크기를 제한하고 있는 데 그 내용은 다음과 같다.

디젤기관을 주기관으로 하는 선박의 중간축, 추력축, 프로펠러 축, 선미관축에 작용하는 비틀림 진동응력은 아래 규정에 따른다.

- ① 연속최대회전수 105% 이하에서 기관을 연속 사용하는 경우의 비틀림 진동에 의한 전단응력은 다음의 τ_1 값을 초과해서는 안된다.

$$\tau_1 = \frac{T_s + 160}{18} C_k C_d (3 - 2\lambda^2) \quad (37)$$

단, $0 \leq \lambda \leq 0.9$

$$\tau_1 = 1.38 \frac{T_s + 160}{18} C_k C_d \quad (38)$$

단, $0.9 < \lambda \leq 1.05$

여기서,

τ_1 : 기관을 연속 사용하는 경우의 비틀림 진동에 의한 전단응력의 허용한도(N/mm^2)

λ : 사용회전수와 연속최대회전수와와의 비

T_s : 축 재료의 규격 최소 인장 강도(N/mm^2) 다만, 프로펠러 축 및 선미관 축에 있어서는 $590 N/mm^2$ 를 초과할 수 없다.

C_k : 축의 종류 및 모양에 관한 계수로서 프로펠러 축 및 선미관 축에 대해서는 $C_k = 0.55$ 이다.

C_d : 축의 직경에 관한 계수로서 다음 식에 따른다.

$$C_d = 0.35 + 0.93 d^{-0.2}, \quad d: \text{축의 직경(mm)}$$

- ② 연속최대 회전수 80% 이하에서는 비틀림 진동에 의한 전단응력이 다음의 τ_2 을 초과하지 않는 경우 전호에서 산출된 τ_1 값을 초과하는 회전수 범위를 신속히 통과하는 것을 조건으로 승인 할 수 있다.

$$\tau_2 = \frac{1.72}{\sqrt{C_k}} \quad (N/mm^2) \quad (39)$$

이상에서 축계의 비틀림 진동에 의한 전단응력의 허용치에 관한 규정을 제시하였는데, 여기서 규정 ②호인 식 (39)는 1절 비틀림 진동의 공진 주파수가 사용회전수 이내에 있을 때 회전수를 0에서부터 올려 가면 필연적으로 임계회전수를 통과하기 때문에 이 회전수를 통과하면서 공진으로 인하여 진폭이 커지고 큰 전단응력이 발생하므로 규정 ①에서 허용치를 넘게 될 때에 대비한 완화 규정이라고 할 수 있다. 어떻든 가능한 최대의 비틀림 진동응력을 계산하고 이 응력을 앞절의 동력전달에 의한 응력에다 합산하여 발생 최대응력을 구하고 이로부터 발생 가능한 최대 스트레인을 구하여야 한다.

우선, 식 (37)과 식 (38)에서 식 (37)로 계산된 값이 크므로 식 (37)을 취한다. 이 식에서 λ 는 0에서 0.9까지 변할 수 있는 데, 이식의 값을 되도록 크게 하기 위하여 $\lambda = 0$ 에 가까워야 한다. 다음에 축의 직경에 관한 계수 C_d 로서 직경 d 가 작을수록 이 값이 커지나 실질적으로 축의 직경 d 가 어느 값 이하로 작아질 수 없으므로, C_d 값을 여러 가지 크기의 축직경 d 에 대하여 구하여 각각의 축에 대한 τ_1 값을 구하여 제시하고자 한다. 우선 여러 가지의 크기의 축 직경 d 에 대한 C_d 값을 구하여 보면 Table 14와 같다.

Table 14 Diameter d of shaft and coefficient C_d

d (mm)	30	40	50
C_d	0.8210	0.7947	0.7753

한편 축 재료의 규격 최소인장강도인 T_s 는 590 N/mm^2 이 가장 크므로 이 값과 프로펠러 축에 관한 계수 $C_k = 0.55$ 를 위의 λ , C_d 값과 합계 식 (37)에 대입하여 τ_1 을 계산하면 식 (40)과 같이 되고 Table 14를 이용하여 여러 가지 축의 직경 d 에 대한 값들을 구하면 Table 15와 같다.

$$\tau_1 = 68.75C_d \quad (\text{N/mm}^2) \quad (40)$$

Table 15 Diameter d of shaft and maximum value of torsional vibration stress acceptability limit of τ_1

d (mm)	30	40	50
τ_1 (N/mm ²)	56.4	54.6	53.3

다음에 발생 가능한 최대전단응력을 구하여야 하므로 식 (40)을 식 (39)에 대입하여 d 를 구하면 다음 식과 같이 되고

$$\tau_2 = 157.6C_d \quad (N/mm^2) \quad (41)$$

여러 가지 축의 직경 d 에 대한 값들을 계산하면 Table 16과 같다.

Table 16 Diameter d of shaft and maximum value of torsional vibration stress acceptability limit of τ_2

d (mm)	30	40	50
τ_2 (N/mm ²)	129.4	125.2	122.2

4.3 프로펠러의 비틀림 응력

프로펠러축의 동력전달에 의하여 발생하는 전단응력 τ' 는 식 (36)에 보인 바와 같이 40.0 N/mm^2 이다. 여기에 비틀림 진동에 의하여 발생 가능한 최대응력을 합산하여야 하는 데 이 전단응력은 식 (41) 또는 Table 16에서 나타내는 τ_2 이다. 그러므로 프로펠러 축에 발생 가능한 최대 전단응력은 식 (42)가 되며

$$\tau' + \tau_2 = 40.0 + 157.6 C_d \quad (\text{N/mm}^2) \quad (42)$$

여러 가지 축 직경 d 에 대하여 계산하면 Table 17과 같다.

Table 17 Diameter d of shaft and maximum shear stress $\tau' + \tau_2$

d (mm)	30	40	50
$\tau' + \tau_2$ (N/mm ²)	169.4	165.2	162.2

한편, 중공축의 비틀림 모멘트 및 응력은 식 (43)과 같다.

$$T = \tau Z_P = \tau \frac{\pi}{16} \left(\frac{d_2^4 - d_1^4}{d_2} \right) \quad (43)$$

여기서 $d_2 = 40\text{mm}$, $d_1 = 16\text{mm}$, $\tau = 165.2 \text{ N/mm}^2$ 이므로 이를 계산하면 $T = 2,022.8 \text{ N-m}$ 이다.

4.4 결론

본 장에서는, 소형선박용 복합재료 축을 개발하기 위해서 한국선급의 선급 및 강선규칙에 의하여 프로펠러 축의 동력전달 토크에 의하여 발생하는 전단응력과 축의 비틀림 진동에 의하여 발생 가능한 최대 전단응력을 계산하였다.

따라서, 중공축의 비틀림 모멘트 및 응력의 계산식에서 외경 40mm, 내경 16mm 길이 300mm인 복합재료 중공축의 프로펠러 축의 비틀림 토크 $T = 2,022.8\text{N}\cdot\text{m}$ 이다. 결론적으로 정적 비틀림 시험을 할 경우 복합재료로 제작된 축이 계산된 값 이상의 토크에서도 견뎌야 한다.

제5장 복합재료 동력전달축의 제작

5.1 동력전달축 제작 장치

본 연구에서 복합재료 동력전달축의 제작에 사용한 필라멘트 성형기는 컴퓨터 프로그램에 의하여 와인딩 정보를 입력시킨 다음 스피들캐리지(spindle carriage), 크로스피드(crossfeed)를 전기적 신호로써 속도와 위치를 제어하여 심축 직경의 변화에 무관하게 일정한 각도로 와인딩할 수 있도록 설계되어 있는 3축 필라멘트 와인딩 성형기를 사용하였다. Fig. 13과 Table 18은 실험에 사용한 3축 필라멘트 와인딩 성형기의 사진과 그 사양을 나타낸 것이다.



Fig. 13 Photograph of filament winding machine.

Table 18 Specifications of filament winding machine

	Specifications
Winding Dia.	25 ~ 300 mm
Winding length	1,200 mm
Weight of mandrel	Max. 20 kg
Number of spindle	1 Axis
Height of spindle	1,000 mm
Number of axis	- . X axis : Mandrel rotation rpm : 0 ~ 200 rpm - . Y axis : Carriage traverse stroke of traverse: 0 ~ 1,400 mm speed of traverse: 0.3 m/sec - . Z axis : Cross feed stroke of cross feed: 0 ~ 300 mm speed of cross feed: Max. 0.3 m/sec
Winding Angle	0 ~ 90
Number of roving	2 rovings

5.2 실험재료

F/W 성형법에 사용하는 보강섬유와 기지재료는 일반 산업용으로 널리 사용되고 있는 유리섬유와 특성이 뛰어난 에폭시 수지를 사용하였다.

5.2.1 유리섬유

본 실험에서는 강도가 우수하고 가격이 저렴하여 보강재로 가장 많이 사용되고 있는 유리섬유를 사용하였다. 유리섬유는 (주) 한국화이하에서 생산한 필라멘트 와인딩용 유리섬유로서 그 특성을 Table 19에 나타낸다.

Table 19 Properties of fiber used in this study

Kinds	Tex	Tensile strength (N/Tex)	Diameter (μm)	Service
ERS 2310FW	2,310	> 0.196	13	Filament winding Pultrusion

※ Tex : 선밀도 단위로써 1,000m당 g을 말한다.

5.2.2 기지재료(matrix)

본 연구에서 사용한 기지재료는 그 특성이 우수한 에폭시 수지를

사용하였다. 에폭시 수지는 국도화학에서 생산된 것으로 그 물성치는 Table 20에 나타내었다.

Table 20 Properties of matrix used in this study

Kinds	E.E.W (g/eq)	Viscosity (cps at 25°C)	Weight ratio	Service
Epoxy resin (KBR-1729)	170-190	5,000-6,000	100	Filament winding Laminating
Curing agent (KBH-1085)		30-60	80	Filament winding Laminating
Catalyst agent (BDMA)		300-700	3	

※ E. E. W(Epoxy Equivalent Weight) : 에폭시 당량이란 에폭시기 1개에 대한 당량(g/eq)이며 평균분자량을 1분자당의 에폭시기의 수로 나눈 값이다.

5.3 제작 방법

5.3.1 수지혼합

수지혼합은 에폭시수지, 무수물계 경화제(curing agent), 경화 촉진제(catalyst agent)를 무게비로 100 : 80 : 3으로 정밀 계량하여 교반기에서 혼합하여 수지조에 부어서 함침되도록 하였다. Fig. 14는 수지 혼합용 교반기를 나타낸 사진이다.



Fig. 14 Photograph of mixture bath of resin.

5.3.2 심축(Mandrel)

심축은 필라멘트 와인딩 재의 기하학적인 형상을 만들어주는 기본적인 요소이다. 따라서 심축은 경화되지 않은 복합재료를 와인딩 하

는 과정 및 경화 중에 허용온도내의 변형만을 하여야 한다. 본 실험에서는 실제 축과 동일한 크기의 축을 만들기 위해 16mm의 환봉을 심축으로 사용하였다.

5.3.3 장력제어 시스템

필라멘트 와인딩 성형법은 섬유의 장력을 잘 제어하는 것이 복합재료의 성능을 최적화 하기 위한 가장 중요한 인자중의 하나이다. 일반적으로 헬리컬와인딩이나 폴라와인딩의 경우에는 적정 장력이 4.4~17.7N이고, 후프와인딩의 경우에는 구조의 압착을 증가시키기 위해서 26.5~35.3N 정도의 장력을 가진다⁶⁶⁾. 본 연구에서는 토크의 전달을 퍼머넌트 마그네틱의 자기력으로 행하여 항상 일정한 토크를 조정할 수 있는 퍼머히스토크 컨트롤러(PHT 5D)를 사용하여 심축 굽기에 관계없이 섬유의 장력이 29.4N으로 일정하게 장력이 걸리도록 하여 시험편을 제작하였다.



Fig. 15 Photograph of tension control.

5.3.4 수지탱크와 섬유전달 시스템

성형시 수지함침에 사용된 수지 함침조는 롤러 함침(roller impregnation)형의 것으로 수지조 밖에는 수지의 함침량을 조절하는 와이퍼(wiper)가 장착되어 있다. 롤러 함침형 수지조는 작은 장력에서도 수지를 잘 함침 할 수 있는 특성이 있다. 본 실험에서는 필라멘트 와인딩 시험기에 장착 및 탈착이 가능한 롤러 함침조로써 필요 시에는 가열할 수 있도록 되어 있다.

5.3.5 와인딩 성형

본 실험에서 시험편 제작을 위해 필라멘트 성형법중 축과 파이프,

압력용기 등에 많이 사용되고 있는 헬리컬 와인딩법을 이용하여 특성 평가를 위한 시험편을 만들어 시험하였다. Fig. 16에 와인딩시 컴퓨터에 조정한 기본 입력치를 나타낸다.

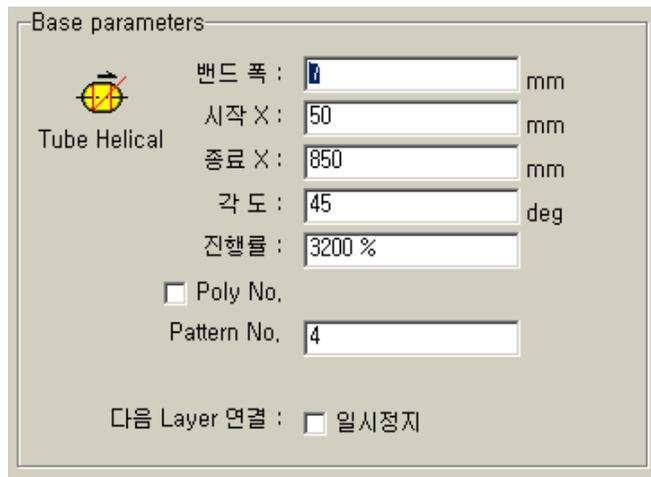


Fig. 16 Base parameters of helical winding.

Fig. 17 (a)는 헬리컬 와인딩에 대한 개략도를 나타낸 것으로 섬유가 일정한 장력하에서 섬유밴드로부터 계속적으로 공급되면서 수직조에서 함침되어 아이를 통해 회전중인 심축에 45°방향으로 감기면서 캐리지가 이동하여 끝단까지 감긴 후 다시 원래 시작한 위치로 되감아와서 1 플라이를 완성한다. Fig. 17의 (b)는 2 플라이한 심축의 단면도를 나타낸 것으로 번호는 심축의 단면상에서 감기는 순서를 나타낸다. Fig. 18은 헬리컬 와인딩법으로 시험편을 제작하는 사진을 나타낸다.

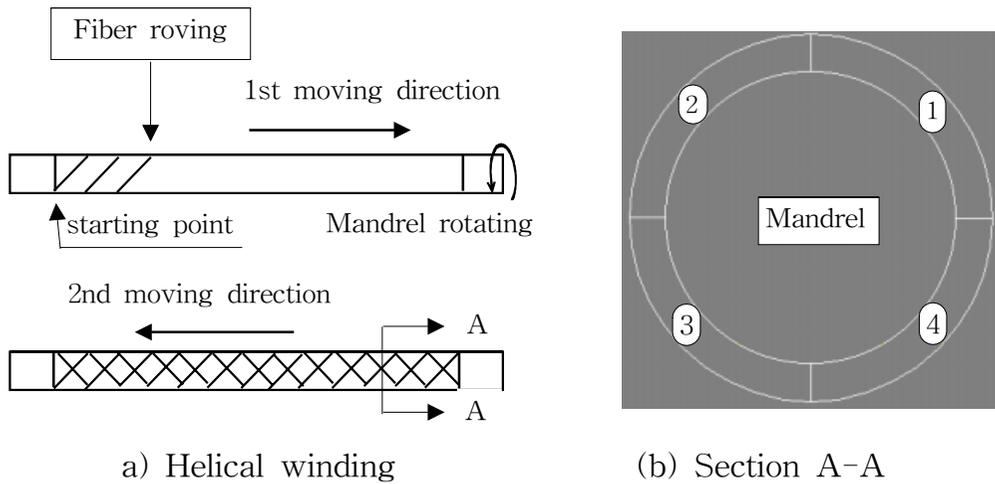


Fig. 17 Scheme of helical winding.



Fig. 18 Photograph of filament winding.

5.3.6 경화시스템

필라멘트 와인딩시 요구되는 수지의 성질은 와인딩 과정에서 낮은

점도를 필요로 하기 때문에 긴 가사수명(pot life)을 갖는 것이 바람직하지만 경화시의 비용도 줄이고 생산성을 높이기 위해서는 짧은 가사시간이 요구되므로 이 두 가지 조건을 잘 조화시켜야만 된다. 경화시간을 줄이기 위해서 경화온도를 높게 유지하면 복합재료의 표면에 미소크랙이 발생할 수가 있다.

필라멘트 와인딩으로 제조된 복합재료 제품은 경화에 필요한 열원이 내부에 있으면 내부로부터 경화가 시작되고, 열원이 외부에 있으면 표면으로부터 경화가 시작된다. 표면으로부터 경화가 시작되면 경화중에 기포와 내부수지가 빠져나가기 어려우며 내부로부터 경화가 시작되면 수지가 너무 많이 빠져나갈 염려가 있다. 그러나 내부로부터 경화가 시작되면 복합재료 내부의 기공 등이 수지와 함께 방출될 수가 있으므로 기공의 양이 줄어드는 이점이 있다. 또한 표면으로부터 경화가 시작되면 수지가 계속 흘러나와 표면에 방울이 지는 현상을 배제할 수 있다.

따라서, 표면에 방울지는 현상을 없애고 수지의 균일한 분포를 얻기 위하여 경화시에는 제품을 회전시키는 것이 바람직하다. 또한 두꺼운 제품을 경화시킬 때에는 내부의 발열반응에 의하여 복합재료의 온도가 허용온도를 넘지 않도록 주의하여야만 한다.

본 연구에서는, 경화를 위해서 경화오븐을 이용하였으며 경화시 표면의 방울이 만들어지는 현상을 없애고 수지의 균일한 분포를 위해서 경화오븐 내에서 15rpm으로 회전시키며 경화하였다. Fig. 19는 경화중인 시험편의 사진이며, Fig. 20은 경화사이클을 나타낸 것이다.



Fig. 19 Photograph of curing in curing oven.

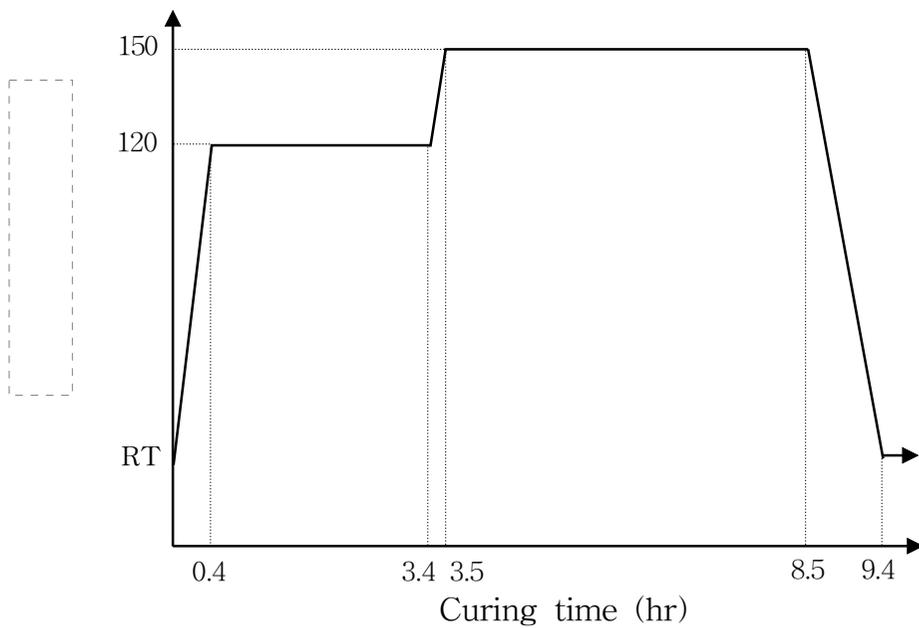


Fig. 20 Cycle of cure.

5.4 복합재와 금속재와의 접합

복합재료 축과 금속재 사이에 접합수단으로 기계적인 접합과 접착제에 의한 접합법이 있다. 이 중 접착제에 의한 접합이 많이 사용되는 이유는 접착제는 다른 물질에 잘 붙는 성질을 가지고 있을 뿐만 아니라 한 물질에서 다른 물질로 가하여진 힘을 잘 전달시킬 수 있는 강도를 가지고 있기 때문이다.

복합재료 동력전달축과 금속재와의 접착제에 의한 접합 특성을 파악하기 위하여 접착제를 이용한 접합을 하여 시험을 하였다. 이 때 사용한 접착제는 미국 LOCTITE사의 Hysol EA 9302.2NA이며 그 물성치는 Table 21과 같다.

Table 21 Uncured adhesive properties of the epoxy paste adhesive used in the joints

	Epoxy paste (Part A)	Curing agent (Part B)
Mix ratio by Weight	100	22
Viscosity @ 25°C	300 Pa · sec	0.05 Pa · sec
Brookfield HBT	Spdl 7 @ 20 rpm or 2.09 rad/sec	Spdl 1 @ 100 rpm or 2.09 rad/sec
Shelf life @ 25°C	1 year	1 year
Color	Off-white	Blue

※ Pa · sec = 10 Poise이다.

본 접착제는 시험온도 25℃에서 7일 동안 경화시킨 후의 Tensile lap shear strength는 37.2 MPa이었다⁶⁷⁾.

본 실험에서 접착제에 의한 접합은 접착면을 #80 사포로 문지른 후 질산 50% 용액에서 약 20분간 표면 부식시켰다. 그리고 나서 아세톤으로 세척하여 접착제를 균일하게 바른 후 접합하여 경화오븐에서 경화시켜 시험편을 만들었다.

제6장 복합재료 동력전달축의 특성평가

6.1 섬유함유율

6.1.1 개요

섬유함유율(fiber content)은 유리섬유강화 플라스틱(GFRP)의 전체질량(또는 전체부피)에 대한 유리섬유의 질량(또는 부피)의 비율을 백분율로 표시한 것을 말한다⁶⁸⁾. 섬유함유율을 구하는 방법에는 두 가지 방법이 있는데 유리강화 플라스틱 전체의 무게에 대한 유리섬유 무게비율을 백분율로 표시한 유리섬유 무게함유율과 유리섬유강화 플라스틱의 전체 부피에 대한 유리섬유 부피의 비율을 백분율로 표시한 유리섬유 부피 함유율로 나누어진다.

유리섬유 강화 플라스틱은 강화재인 유리섬유와 기지재인 수지가 함침되어 적층되는데 유리섬유 강화 복합재료의 기계적 특성에 영향을 미치는 것은 섬유의 역학적 특성과 섬유 함유율이다.

섬유강화 복합재료의 강도는 섬유함유율, 섬유배향성, 섬유와 기지재료의 계면상태 등에 의해서 크게 영향을 미치기 때문에 기계적 특성을 결정하기 위해서 중요한 요인이다⁶⁹⁾. 이것은 기계적 특성뿐만 아니라 유리섬유 강화 플라스틱의 열적 특성으로서 요구되는 선팽창률 및 열전도율과 유리섬유 강화 플라스틱의 기본적 특성인 비중이

나 비열의 결정에도 필요하기 때문에 유리섬유강화 플라스틱의 기본적인 특성을 조사하는 기초 데이터로서 섬유함유율의 측정은 반드시 필요하다⁷⁰⁾.

6.1.2 시험편 및 시험방법

유리섬유 강화 플라스틱의 섬유함유율의 측정은 무게함유율로써 유리섬유 강화 플라스틱 전체 무게에 대한 유리섬유 무게의 비율을 백분율로 표시한 것이다.

유리섬유 강화 플라스틱 섬유함유율의 시험편은 햇빛, 자외선 및 열선의 직사광선을 받지 않는 곳에서 온도 $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ 및 상대습도 $50\pm 5\%$ 에서 48시간 이상 보관하였다가 동일 온도와 동일 습도에서 시험을 실시하였다.

시험편의 모양은 적층판 전체를 대표하도록 Fig. 21과 같은 위치에서 잘라낸 것으로 시험편의 가장자리는 매끄럽게 다듬질하였다.

시험편의 무게는 2g 이상이 되도록 3개를 제작하여 질량을 측정하여 그 평균치로 계산하였다⁷¹⁾.

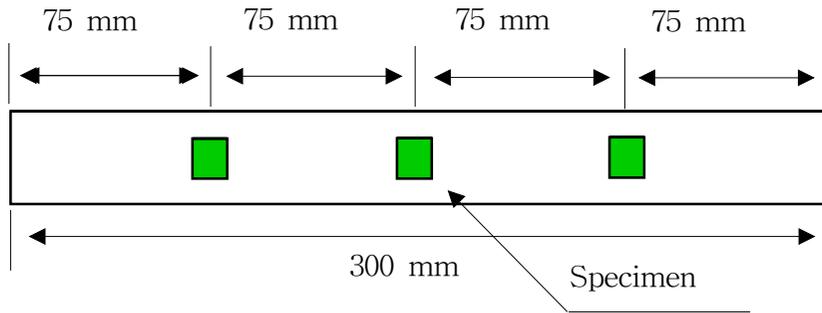


Fig. 21 Specimen selections for fiber fraction and void content.

섬유함유율의 시험 절차는 다음과 같다.

- ① 도가니를 $625 \pm 20^\circ\text{C}$ 의 전기 머플로에서 일정량이 될 때까지 건조하고 데시케이트(건조 염화칼슘이나 실리카겔 등 적절한 건조제) 안에서 냉각 시켜둔다.
- ② 도가니의 질량(M_1) 및 연소전의 도가니와 시험편의 질량(M_2)를 1mg까지 정확히 잰다.
- ③ 시험편을 넣은 도가니를 $625 \pm 20^\circ\text{C}$ 의 전기로에서 가열한다. 탄소질이 완전히 없어지고 나서 데시케이트에 옮겨 실온이 될 때까지 냉각하고 연소후의 도가니와 시험편 질량(M_3)를 1mg까지 잰다.

이 때 도가니는 머플로 내의 온도 분포를 고려하여 벽면에서 약 2~3cm 거리를 두고 놓아야 하며, 급격한 발화를 피하기 위해 약 300°C 에서 도가니를 머플로에 넣고 625°C 로 서서히 온도를 상승시켜 2시간 이상 연소시켜야 한다.

6.1.3 섬유함유율의 계산

본 연구에서 섬유함유율을 구하기 위해 적층한 축의 전체를 대표할 수 있도록 시험편 3개를 잘라내어 그 질량을 계측하여 평균하여 시험편 질량을 구한 결과 7.6031g이었으며 도가니의 질량은 1.6152g이었고 연소후의 도가니와 시험편 질량은 6.1847g이었다.

한편 본 연구에서는 충전재를 포함하지 않았기 때문에 유리섬유의 무게 함유율(W_f)은 다음 식 (44)를 이용하여 계산할 수 있다.

$$W_f = \frac{M_3 - M_1}{M_2 - M_1} \times 100 \quad (44)$$

여기에서 W_f : 유리섬유 무게함유율(%)

M_1 : 도가니의 질량(g)

M_2 : 연소전의 도가니와 시험편 질량(g)

M_3 : 연소후의 도가니와 시험편 질량(g)

따라서 식 (44)에 따라 섬유함유율을 구하여 소수점 1자리까지 표시하면 섬유함유율(W_f)은 60.1%이다.

6.1.4 결과 및 고찰

본 연구에서 구한 섬유 함유율의 결과를 Table 22에 나타내었다.

Table 22 Fiber volume fraction

Condition Specimen	Winding method	Number of specimen	Fiber weight fraction(%)
Shaft	Helical	3 ea	60.1

전술한 바와 같이 유리섬유 강화 플라스틱에서 섬유함유율은 재료의 기계적 특성에 큰 영향을 미치는데, 필라멘트 와인딩의 성형법에서는 와인딩시 섬유에 걸리는 섬유의 장력뿐만 아니라 와인딩 속도, 와인딩 두께 와인딩 방법 및 와인딩 각도 등에 따라 섬유함유율이 변하게 되고 섬유함유율의 변화에 따라 기공함량, 섬유와 수지의 접착특성 등이 변화하기 때문에 주의할 필요가 있다.

섬유함유율이 높으면 강도는 높게 할 수 있으나 수지 함침율이 나빠지게 되고, 반대로 섬유함유율이 낮으면 수지 함침율은 좋아지나 강도가 문제시 될 수 있다.

필라멘트 와인딩 성형법을 이용하여 와인딩 하는 경우 감겨지는 섬유 스트랜드의 장력조절에 따라 섬유함유율이 약 55% ~ 62%로 유지할 수 있다^{72),73)}.

필라멘트 와인딩 성형법으로 헬리컬 와인딩 한 CNC(compressed natural gas) 용기의 섬유함유율이 53.8%인 것으로 계측⁷⁴⁾되었고 압력용기 제작에서 적층두께 2.1mm, 3.1mm에서 섬유함유율이 60%로 계측⁷⁵⁾된 것으로 미루어 본 연구에서 계측된 섬유함유율 60.1%는 적절한 것으로 사료된다.

6.2 공동률

6.2.1 개요

유리강화섬유 플라스틱의 성형공정에는 강화재와 기지재료를 혼합하여 복합화 하여야 하는데 두 재료의 복합이 되도록 효율이 좋고 단시간에 되어야 함은 물론 기공함량의 편차가 나지 않는 것이 중요하다.

공동률(void content)의 측정은 유리섬유강화 플라스틱의 성형공정에 관해서 유리섬유 강화 플라스틱 내에서 생기는 공동률을 구하여 성형법의 검토나 유리섬유 강화 플라스틱의 기계적 특성에 미치는 공동률의 영향을 보는 등에 필요하기 때문에 유리섬유 강화 플라스틱의 기본적인 특성을 검토할 때에 요구되는 기초적인 데이터로서 필요한 인자이다.

따라서 공동률의 측정방법은 유리섬유 강화 플라스틱의 특성의 기초가 되는 섬유함유율과 같은 기본적인 특성치에 관한 측정법으로 충전재가 함유되어 있지 않은 유리섬유 강화 플라스틱을 대상으로 한 것으로 그 측정법은 유리섬유강화 플라스틱을 구성하는 유리섬유에 수지의 밀도를 측정하여 각각의 측정치를 이용하여 유리섬유 강화 플라스틱의 공동률을 구하는 방법이 많이 이용되고 있다⁷⁶⁾.

그러나 공동률의 측정은 유리섬유강화 플라스틱 시험편의 밀도, 유리 섬유함유율, 유리섬유 강화 플라스틱을 구성하는 각 소재의 밀도를 이용하여 계산에 의해 구하는 것으로 각종 소재의 밀도의 측정

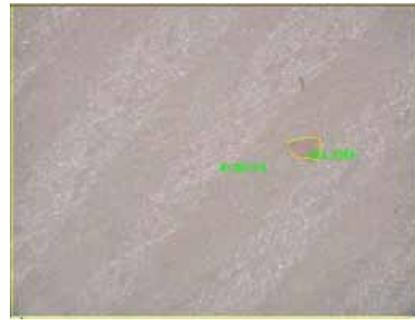
에는 높은 정도가 요구된다. 따라서, 각각의 밀도의 측정은 곤란할 뿐만 아니라 높은 측정 정도를 따라야 하므로 공동률의 측정에는 유리섬유나 수지의 밀도에 있어서는 범용의 유리섬유에 대해서는 규정된 값($\rho = 2.54 \text{ g/cm}^3$)을 이용하거나⁷⁷⁾ 관련의 카다로그 값을 사용하는 경우도 있다. 그러나 유리섬유 공동률은 섬유의 밀도 등과 성형시의 조건(성형온도나 압력 등의 경화조건) 등에 의해 달라질 수 있으므로 각각의 시험편에 있어서 정밀하게 측정을 하는 것이 바람직하지만 이는 매우 어렵다.

6.2.2 시험편 및 시험방법

공동률의 측정을 위한 시험편은 전체를 대표하도록 Fig. 21과 같이 자른 절단부를 6개⁷⁸⁾를 광학현미경(50배율)으로 관찰하여 화상분석기(Image analyzer)로 기공의 면적을 구하여 시험편 전체 면적으로 나누어 계산하였다. Fig. 22의 (a) ~ (f)는 공동률을 측정하기 위해 촬영한 현미경 사진을 나타낸다.



(a)



(d)



(b)



(e)



(c)



(f)

Fig. 22 Photographs of void content($\times 50$).

6.2.3 공동률의 계산

전술한 방법으로 기공함량을 계산한 결과를 Table 23에 나타내었다.

Table 23 Void content

Condition Specimen	Winding method	Number of specimen	Void content (%)
Shaft	Helical	6 ea	1.1

복합재료는 기공함량에 따라 기계적 특성에 많은 영향을 미치므로 기공함량이 낮을수록 좋은 것은 당연하고, 필라멘트 와인딩 성형법은 섬유에 장력이 걸리므로 일반적인 다른 복합재료 성형법보다 그 기공함량이 낮은 편이다.

본 연구에서 기공함량을 계산한 결과 1.1%로 상당히 낮은 것으로 판단된다. 이는 필라멘트 와인딩 성형시 적절한 장력뿐만 아니라 경화시 경화 오븐 내에서 내부로부터 경화가 되면서 내부의 기공이 외부로 방출되도록 경화온도 조절과 균일한 수지 분포를 위해서 오븐 내에서 15 rpm으로 회전한 것 때문으로 사료된다.

6.3 적층두께에 따른 인장특성

필라멘트 와인딩 재의 재료시험에 있어서는 필라멘트 와인딩 재는 매우 방향성이 크기 때문에 일반적인 시험법을 그대로 적용할 수 없는 것이 많다. 재료시험으로서는 일방향 강화재에 시험이 기본이지만 감는 각도에 관한 시험을 행하는 것이 중요하다.

한편, 선박용 동력전달축은 선박의 안전향해에 직결되는 중요부품이므로 그 신뢰성과 안전성의 확보를 위해 제품의 강도평가는 대단히 중요하다고 할 수 있다.

필라멘트 와인딩 성형법으로 제작하는 축을 시험하는 것은 실제 크기의 축을 만들어 기계적 특성 시험을 하는 것이 가장 바람직 하지만 실제크기의 축을 제작하여 시험한다는 것은 많은 어려움이 따른다. 즉, 외경 40mm, 내경 16mm인 복합재료 중공축을 제작하여 인장특성을 평가하는 것은 여러 가지의 많은 어려움이 따르기 때문에 적층 두께에 따라 인장 특성을 평가하여 어느 정도의 적층 이상에서 강도가 포화되는지를 파악하기 위하여 적층 두께별 인장시험을 하였다.

6.3.1 적층두께에 따른 인장특성 평가

필라멘트 와인딩 성형품의 인장특성을 평가하기 위해서는 평판 시험편, 링 시험편 및 실린더 시험편으로 크게 구분되어지나 평판형상의 적층판일 경우에는 평판시험편, 압력용기와 같은 원주방향의 응

력을 받는 형상의 제품은 제품의 특성상 링 시험편인 이른바 NOL (Naval Ordnance Laboratory) Ring 시험편^{79)~82)}을 그리고 파이프와 중공축과 같은 파이프 형상의 제품의 경우에는 실린더 시험편을 이용하여 시험하고 있다^{83)~85)}.

본 연구에서 제작하고자 하는 선박용 복합재료 구동축은 중공 축으로써 평판시험편이나 압력용기와 같은 원주방향으로 인장이 걸리는 것이 아니므로 축방향으로 인장응력과 압축응력이 걸릴 뿐만 아니라 비틀림 응력이 걸리므로 축이나 파이프 형상의 인장시험편으로 많이 사용되는 실린더형 시험편으로 인장시험을 하였다.

6.3.2 시험편 및 시험방법

인장시험편은 실린더 시험편으로서 인장시험편이 물리는 그립 (grip) 부분에는 강(SS41)을 사용하였고 중간부에는 PVC 파이프를 사용하였는데 3곳을 Cutting하여 기계적 특성에 영향이 미치지 않도록 하였다. Fig. 23은 인장 시험편을 만들기 위한 심축을 나타낸 것이다.

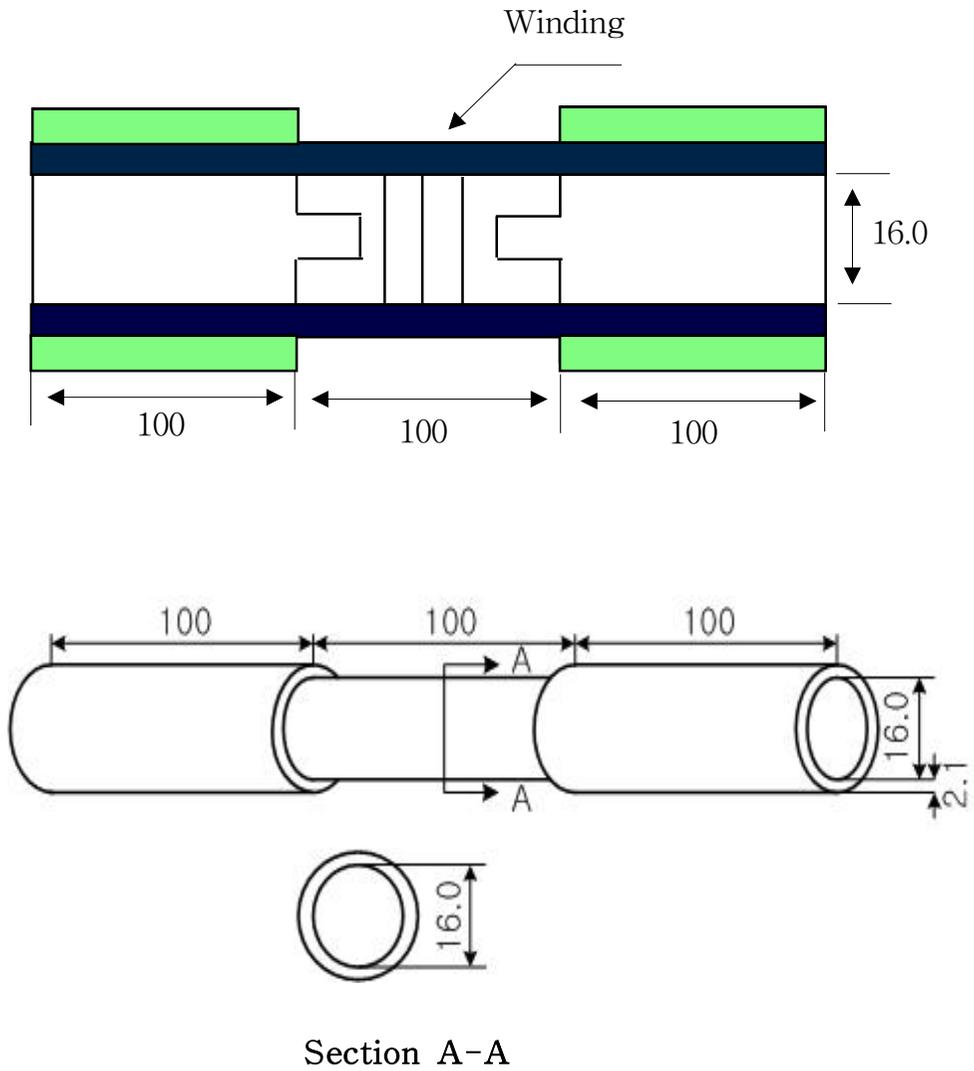


Fig. 24 Configuration of the specimens of tensile test.

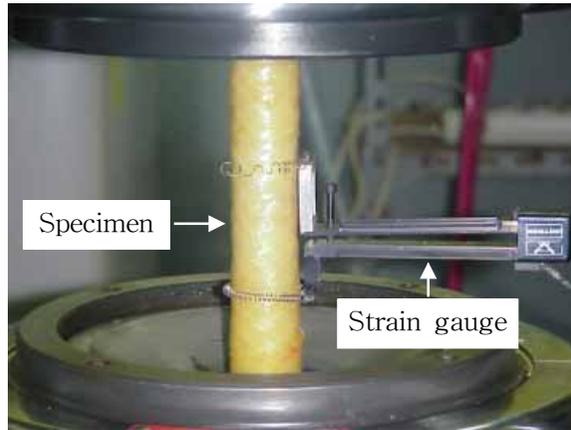


Fig. 25 Tensile testing apparatus.

6.3.3 결과 및 고찰

인장특성 평가를 위해 적층 두께(1 ply = 0.75mm)가 서로 다른 시험편 즉, 2-layers(적층두께; 1.5mm), 3-layers(적층두께; 2.25mm), 4-layers(적층두께; 3.0mm), 5-layers(적층두께; 3.75mm), 6-layers(적층두께; 4.5mm) 및 7-layers(적층두께; 5.25mm)를 각각 5개씩 인장시험을 하였다. Table 24는 인장시험 결과를 나타내었고 Fig. 26에 인장시험 결과를 그래프로 나타내었다.

Table 24 Results of tensile test

Lay-up thickness (mm)	1.5	2.25	3.0	3.75	4.5	5.25
Mean tensile strength (MPa)	102.17	82.02	52.38	44.69	43.79	44.49
Strain at auto break (%)	12.478	14.751	15.989	16.774	17.006	17.424

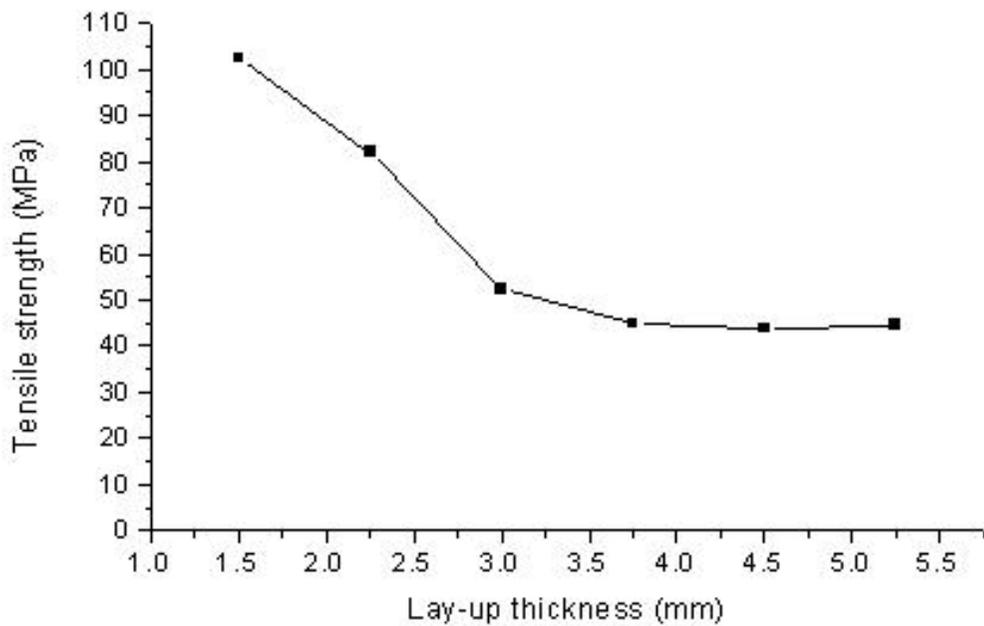


Fig. 26 Tensile strength curve on each thickness.

Fig. 26에서 보는 바와 같이 2-layers(적층두께; 1.5mm)에서 4-layers(적층두께; 3.00mm)의 구간에서는 적층 두께가 변화함에 따라 강도의 값이 급격하게 변화하는 것을 알 수 있으며 이것은 하중에 대한 기지재료의 영향보다 강화섬유에 의한 강화가 지배적이라는 것을 보여준다. 4-layer(적층두께; 3.00mm)에서 5-layers(적층두께; 3.75mm)의 구간에서는 변화가 어느 정도 완만해 지는 것을 볼 수 있는데 이것은 적층 두께가 두꺼워 질수록 기지재료와 보강재 사이의 계면이 박리현상의 범위가 넓어져 섬유에서 하중을 분산시키지 못한 것으로 사료된다. 5-layers(적층두께; 3.75mm) 이상의 경우에는 먼저 계면 박리가 발생하여도 수지와 섬유간의 평균적인 특성은 거의 일정한 강도값을 가지는 것으로 사료된다. 이는 내경이 동일할 때 적층 두께가 두꺼워질수록 인장강도는 약간 떨어진다는 연구 결과와 일치⁸⁶⁾할뿐만 아니라 적층 두께가 어느 정도 두꺼울 때까지는 인장강도가 떨어진다는 연구 결과와 일치하고 있다^{87),88)}.

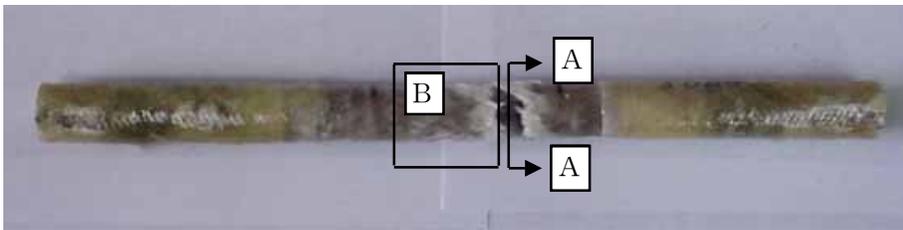
Fig. 27은 적층 두께에 따른 인장시험결과 시험편의 파단 사진을 나타낸다. (a)는 3-layers(적층두께; 2.25mm)일 때, (b)는 5-layers(적층두께; 3.75mm)일 때, (c)는 7-layers(적층두께; 5.25mm)일 때 시험편의 파단 단면과 파단 옆면 및 파단된 시험편의 전체사진을 나타낸 것이다.



Section A-A



Section B



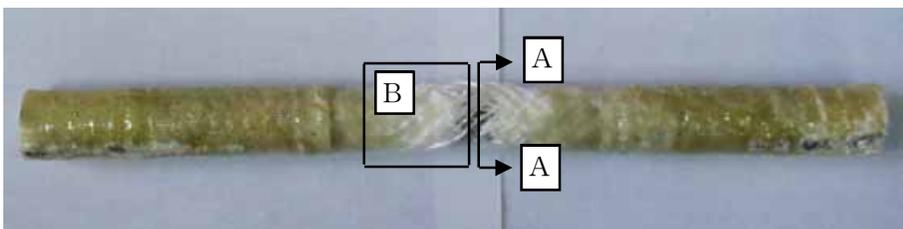
(a) 3-layers(lay-up thickness; 2.25 mm)



Section A-A

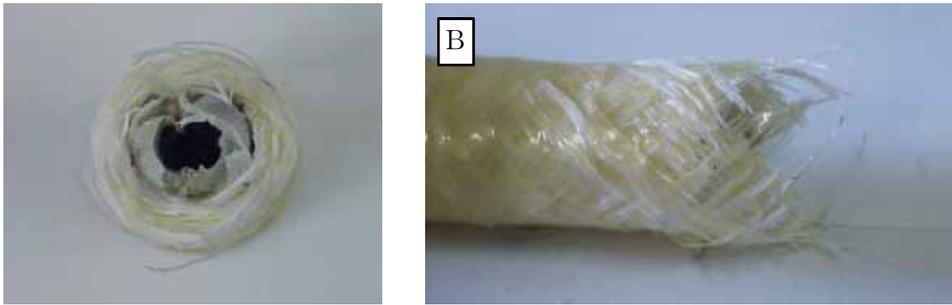


Section B



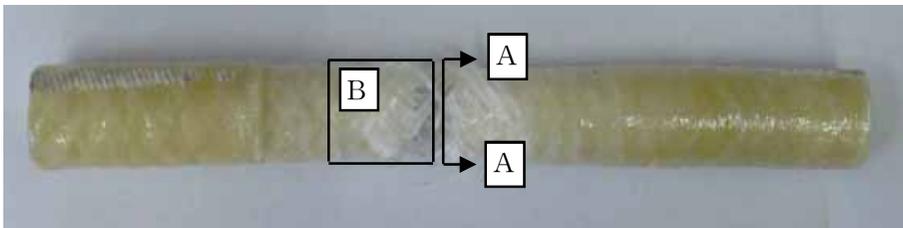
(b) 5-layers(lay-up thickness; 3.75 mm)

Fig. 27 Photographs of after fracture.



Section A-A

Section B



(c) 7-layers(lay-up thickness; 5.25 mm)

Fig. 27 Continued.

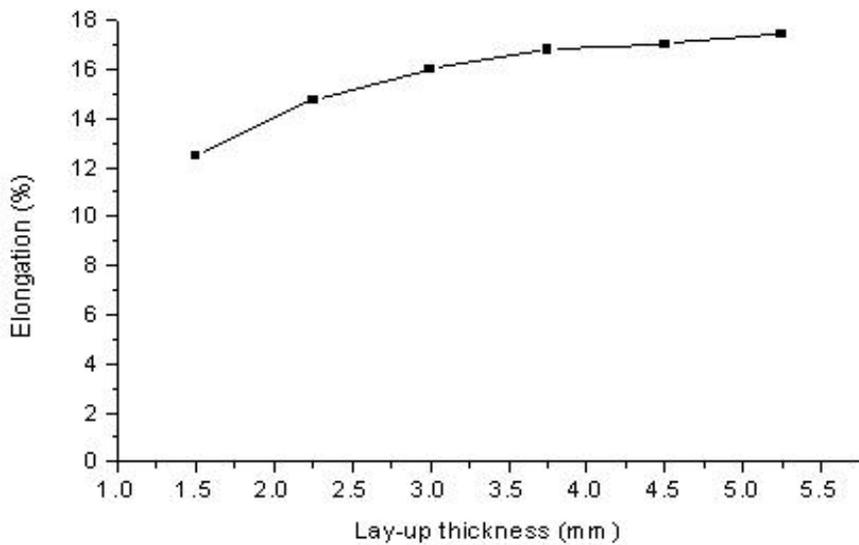


Fig. 28 Elongation curve on each thickness.

Fig. 28에서는 적층두께에 따라 연신율의 변화를 나타낸 것이다. 그래프에서 알 수 있듯이 5-layers 이상에서는 연신율이 서서히 포화되는 것을 알 수 있었다. 이것은 5-layers 이상에서는 섬유가 하중을 분산시키는 것으로 짐작할 수 있다.

6.4 비틀림 특성

6.4.1 개요

환봉을 비틀면 표면에 최대 전단응력이 생기고 중심의 응력은 0이 된다. 즉, 반지름 방향에 응력 구배가 생긴다. 탄성범위 내에서는 응력 구배는 직선적이며 계산은 가능하지만 소성영역에서는 전응력의 계산에 많은 가정이 필요해진다. 따라서 기초적인 연구를 위한 시험법으로서는 부적합한 면이 많은 편이다. 그러나 비틀림 시험법은 횡탄성계수(강성률)를 직접 구할 수 있다. 또한, 기술적으로는 동력전달요소로서 축의 비틀림에 대한 강도를 알 필요가 있다.

6.4.2 시험편 및 시험방법

비틀림 특성을 파악하기 위한 시험편은 실제축의 크기와 같은 외경 40mm, 내경 16mm인 시험편을 만들어 심축을 탈형시켜 길이 300mm로 잘라서 만들었다. 그리고 비틀림 시험기용 지그와의 연결은 Fig. 29와 같이 기계적인 접합(볼트 체결)을 하여 시험하였다. 본 연구에 사용한 비틀림 시험(Torsional test machine)은 미국 MTS사의 215.45 Rotary actuator 모델로서 상세 사양은 Table 25에 나타난다. Fig. 30은 비틀림시험기의 사진이며, Fig. 31은 비틀림 시험용 시험편의 형상이다.

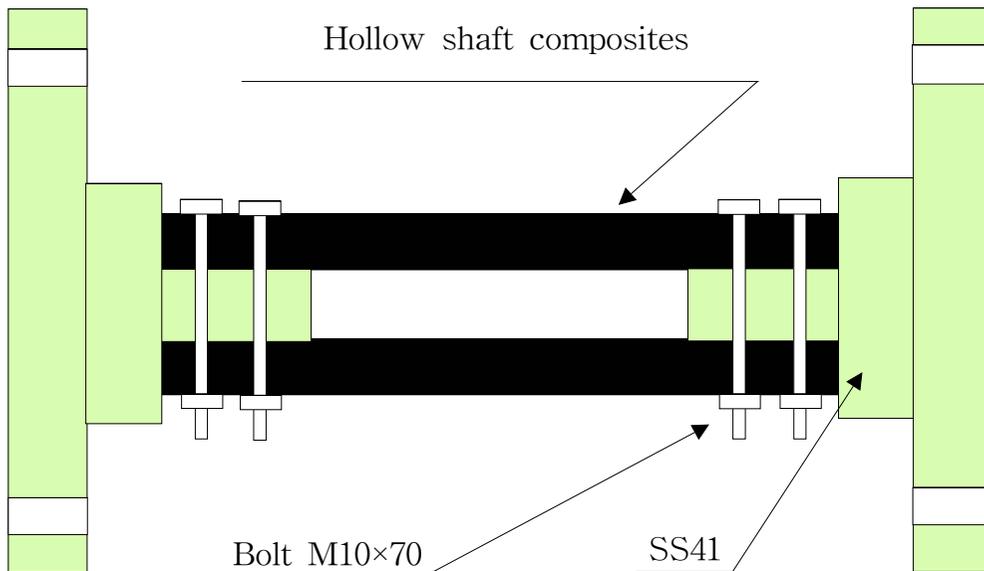


Fig. 29 Specimen and zig of mechanical joining for torsional test.

Table 25 Spec. of torsional test machine used in this study

Dynamic torque	5,565 N-m
Maximum angular	$\pm 50^\circ$
Line accumulator in HSM	3.8 liters
Flow capacity of servo valve	1,121 pm
Maximum control channel of digital controller	8 channels
Accuracy of load cell	1 % of full range
Non-linearity and hysteresis of torque cell	0.1 % of full range



Fig. 30 Photograph of torsional test machine.



Fig. 31 Specimen of torsional test.

시험방법의 절차는 다음과 같다.

- ① 비틀림 시험기에 시험편을 물려 비틀림 시험기의 각 변위를 50° 로 조정한다.

- ② 시험기의 speed는 0.06rad/sec로 한다.
- ③ 비틀림 각을 서서히 증가시켜 시험편이 파손할 때까지 시험한다.
- ④ 토크와 비틀림각 선도를 작성한다.

6.4.3 결과 및 고찰

정적 비틀림 강도시험은 시험편 2개를 실시하였으며 그 결과는 Fig. 32와 같다.

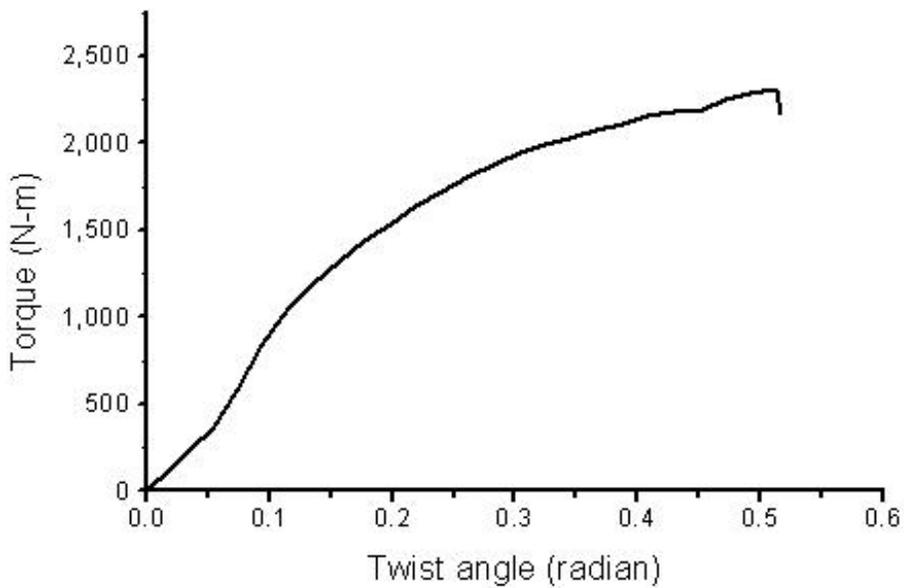


Fig. 32 Results of torsional test (torque-degree).

복합재료의 최대 비틀림 응력은 기존 금속재 축의 비틀림 응력의 약 45%정도이고, 복합재료의 축이 기존 금속재 축에 비해 공진 주

파수가 약 15% 낮아진다⁸⁹⁾. 이는 복합재료의 축이 금속재 축보다 진동에 대한 댐핑(damping) 특성이 더 좋다는 것을 보여줄 뿐만 아니라 기관의 저속 회전수에서의 공진 주파수가 낮아지기 때문에 기관의 시동성이 좋다는 것을 보여준다. 또한, 복합재료의 정적 비틀림 하중하에서 튜브는 전단응력과 전단변형률 관계는 비선형성을 보여주고 있다⁹⁰⁾.

Fig. 32는 복합재료 동력전달축의 토크-비틀림각 선도를 나타낸 것이며 본 연구에서 제작한 복합재료 동력전달축의 비틀림 토크와 비틀림 각의 특성은 극한 비틀림 강도까지는 거의 선형적으로 변화하다가 갑자기 파손되는 양상을 보였으며 통상의 금속재료에서 볼 수 있는 비선형 영역 및 항복강도 등을 정의하기가 곤란함을 알 수 있었다.

복합재료 동력전달축은 비틀림 시험을 하기 위해 제작된 비틀림 시험용 지그와 비틀림 시험편을 연결한 접합부 부위가 파손됨을 알 수 있었다. 이 부분의 파손양상은 파손초기에 접합볼트 구멍 주위가 응력집중으로 파손되면서 토크가 급격히 떨어지는 양상을 보였다.

파손위치가 복합재료 축이 아닌 접합부에서 파손되는 양상으로 볼 때 플랜지 접합부의 정적 비틀림강도가 복합재료 축의 비틀림강도보다 낮은 것을 알 수 있었다. 정적 비틀림강도 시험으로서 알 수 있는 복합재료 축의 비틀림강도는 기계적인 접합부의 비틀림 강도보다 높은 것을 알 수 있었다. 이때의 극한 비틀림토크는 2316N-m이며, 그 때의 비틀림각도는 0.505 radian(28.93°)임을 알 수 있었다.

6.5 접합강도

6.5.1 개요

복합재료 구조물의 구조적인 효율은 기본구조 뿐만 아니라 그 구조물의 연결에 의해 많이 평가된다. 복합재료와 복합재료와의 연결 또는 복합재료와 금속간의 연결 등 어느 경우에서도 매우 중요하다. 이러한 복합재료의 접합은 기계적인 접합(mechanical joining)과 접착제에 의한 접합(adhesive joining)으로 크게 분류되는데, 기계적인 접합에 비해 접착제에 의한 접합은 넓은 면적에 하중을 분포시킬 수 있고, 구멍을 가공할 필요가 없으며, 응력집중 현상을 막을 수 있기 때문에 많이 이용되고 있다.

접착제에 의한 접합은 충분한 강도를 갖는 접착제가 필요하지만 기밀, 전기절연, 진동감쇠 등의 구조물 목적에 적합하여야 한다. 또한, 그 접합강도는 접착제의 종류, 접착제의 두께, 접합길이, 피접합부의 강성 및 표면조도 등에 영향을 받는다. 이러한 접착제에 의한 접합법은 single-lap joint, double-lap joint, scarf joint, stepped-lap joint 등의 방법이 있으나 single-lap joint, double-lap joint 방법이 많이 이용되고 있다.

6.5.2 시험편 및 시험방법

금속재 플랜지와 복합재료 축과의 접합강도를 평가하기 위하여 비

틀림 시험편과 동일하게 외경 40mm, 내경 16mm 시험편을 만들어 탈형시킨 후 길이 300mm로 잘라서 시험편 지그와 접착제에 의한 접합을 한 후 접합강도 시험편으로 사용하였다.

Fig. 33은 접합강도를 평가하기 위하여 비틀림 시험용 지그와 시험편의 접합부를 나타낸 것이다.

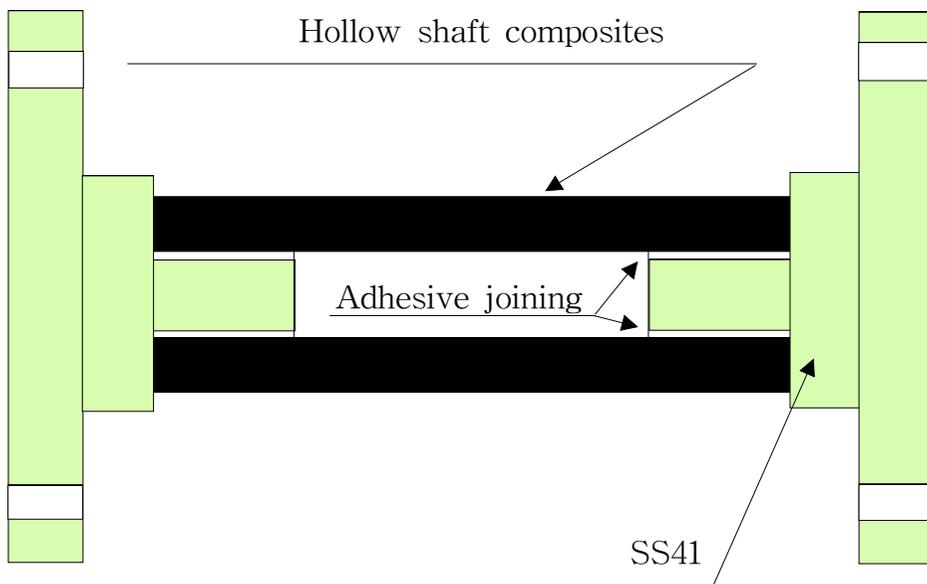


Fig. 33 Specimen and jig of adhesive joining for torsional test.

접합강도 시험에 사용한 시험기는 앞절에서 비틀림 시험시에 사용한 동일한 비틀림 시험기를 사용하였고 시험방법도 앞절에서 실시한 시험방법과 동일하게 2개를 시험하였다.

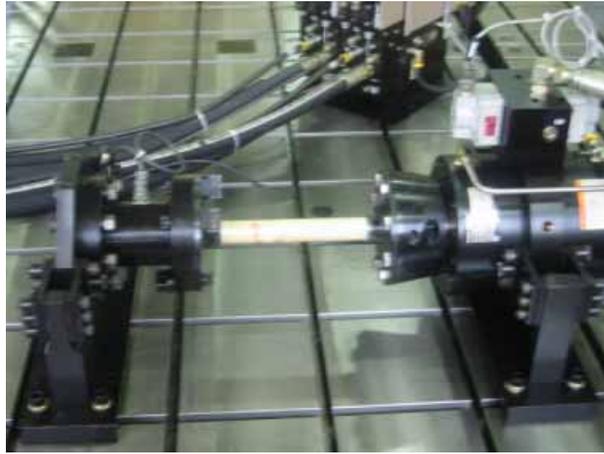


Fig. 34 Torsional test apparatus for adhesive joining.

6.5.3 결과 및 고찰

Fig. 35는 복합재료 축과 비틀림 시험기 지그간의 접착제의 의한 접합상태를 평가하기 위하여 비틀림 시험을 행한 결과를 토크-비틀림각 선도로 나타낸 것이다.

비틀림 토크와 비틀림 각의 특성은 비틀림 토크와 비틀림 각이 거의 선형적으로 변화하다가 갑자기 접착제의 접합부위가 파손되는 양상을 보였으며, 순간적으로 접착제 접합부에 슬립이 발생하여 토크가 급격히 떨어지는 양상을 보였다.

이 때의 극한 비틀림 토크는 약 450N-m이며, 그 때의 비틀림 각도는 약 0.046 radian(2.63°)임을 알 수 있었다.

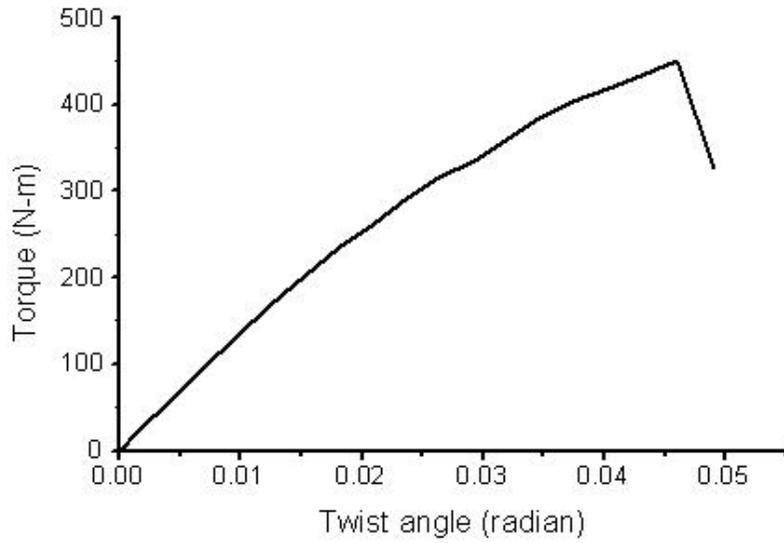


Fig. 35 Results of torsional test (torque-degree).

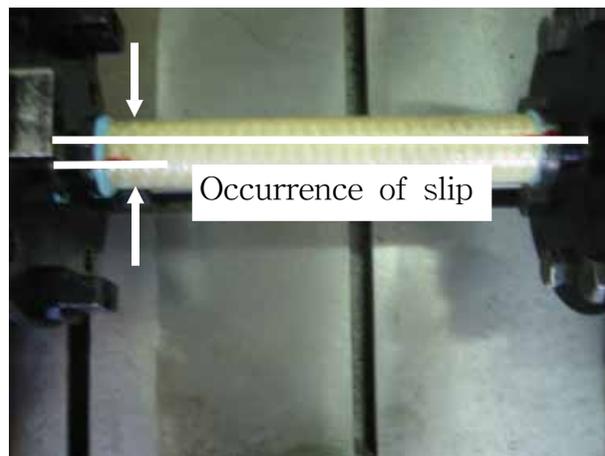


Fig. 36 Photograph of after fracture for torsional test by adhesive.

6.6 경량화

복합재료 축의 장점인 경량화는 기존 금속재 축의 최고 81%의 경량화된 연구 논문이 있으며⁸⁹⁾, 본 연구에서도 경량화의 정도를 확인하기 위하여 동일한 규격의 복합재료로 제작된 축을 5개의 무게를 계량하여 같은 치수의 단강재 축의 무게를 계량하여 비교한 결과 약 76%의 경량화가 되었다. 그 결과를 Table 26에 나타내었다.

Table 26 Comparison of weight for transmission shaft by forged steel and composite materials

Weight \ Shaft	Forged steel shaft	Composite materials shaft
Weight	2,630 g	620 g

제7장 결론

본 연구에서는 복합재료로 제작하고자 하는 소형 선박용 동력전달축의 응력해석을 통해 외경이 약 40mm 되는 동력전달축을 설계하였다. 설계 결과에 따라 복합재료 성형법 중에서 축, 파이프 등의 성형에 많이 이용되고 있는 필라멘트 와인딩 성형법에 의해 시제품을 제작하여 그 기계적 특성들을 평가하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 고전적층판 이론에 의한 외경 40mm의 소형 선박용 복합재료 동력전달용 중공축의 응력해석 및 설계를 한 결과 내경과 외경비 (D_1/D_0)를 0.4로 하고 와인딩 각도가 45°로 할 때 최적 설계임을 알 수 있었다.
2. 소형 선박 동력전달용 복합재료 중공축의 비틀림 모멘트 및 응력을 규정에 의해 구한 결과 축의 외경 40mm, 내경 16mm, 길이 300mm일 때 축의 비틀림 토크 $T = 2,022.8\text{N}\cdot\text{m}$ 인 것을 알 수 있었다.
3. 섬유함유율을 계측한 결과 60.1%로 섬유함유율은 적절한 것으로 판단되며, 공동률을 계측한 결과 1.1%로 상당히 낮은 것으로 보

아 필라멘트 와인딩 성형시 장력이 적절했던 것으로 판단되며 또한 경화과정이 적절했던 것으로 판단된다.

4. 적층 두께에 따라 인장 특성 평가를 한 결과, 2-layers(적층두께; 1.5mm)에서 4-layers(적층두께; 3.00mm)의 구간에서는 적층 두께가 변화함에 따라 강도의 값이 급격하게 변화하는 것을 알 수 있으며 이것은 하중에 대한 기지재료의 영향보다 강화섬유에 의한 강화가 지배적이라는 것을 보여주는 것으로 판단된다. 5-layers(적층 두께; 3.75mm) 이상의 경우에는 먼저 계면 박리가 발생하여도 수지와 섬유간의 평균적인 특성은 거의 일정한 강도값을 가지는 것으로 사료된다. 또한, 적층두께에 따른 연신율의 변화는 5-layers(적층두께; 3.75mm) 이상에서는 연신율이 서서히 포화되는 것을 알 수 있었다.

5. 외경 40mm, 내경 16mm, 길이 300mm인 복합재료 축의 정적 비틀림 시험을 행한 결과 비틀림 토크와 비틀림 각이 거의 선형적으로 변화하다가 비틀림 시험용 지그와 비틀림 시험편을 연결한 기계적 접합부가 파손됨을 알 수 있었다. 이 부분의 파손양상은 접합 볼트 구멍주위가 응력집중으로 파손되면서 토크가 급격히 떨어지는 양상을 보였다. 복합재료 축의 정적 비틀림 강도가 접합부의 비틀림 강도보다 높은 것을 알 수 있었으며 접합부가 파손될 때의 최대 비틀림 토크는 약 2316N-m으로서 계산된 비틀림

토크보다 높으며, 그 때의 비틀림 각도는 0.505 라디안(28.93°)임을 알 수 있었다.

6. 접착제 Hysol EA 9302.2 NA를 이용하여 외경 40mm, 내경 16mm, 길이 300mm인 복합재료 축과 금속재와의 접합강도를 평가한 결과 비틀림 토크와 비틀림 각이 거의 선형적으로 변화하다가 갑자기 접착제의 접합부위가 파손되는 양상을 보였으며, 순간적으로 접착제 접합부에 슬립이 발생하여 토크가 급격히 떨어지는 양상을 보였다. 이 때의 비틀림 강도는 약 450N-m이며, 비틀림 각도는 0.046 라디안(2.63°)임을 알 수 있었다.

7. 경량화 정도를 확인하기 위해 동일한 치수의 금속재 축과 복합재료축의 무게를 계량한 결과 복합재료 축이 약 76%의 경량화가 된 것을 알 수 있었다.

이상의 결과들을 종합적으로 검토해 보면 복합재료로 제작한 동력 전달축은 소형 선박용 동력전달용으로 충분히 사용할 수 있으리라 사료되지만 금속부재와 복합부재의 접합부에서 파손되는 양상으로 미루어 향후 이에 대한 많은 연구가 요구된다. 또한, 실선에 장착하여 충분한 안전성이 검토되어야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

- 1) 奥田謙介, 炭素纖維と 複合材料, 共立出版株式會社, pp 26~30, 1992.
- 2) Daniel B., Miracle and Steven L., Donaldson, ASM Handbook, Vol. 21, Composites, ASM International, pp 3~17, 2001.
- 3) 日本材料學會, 先端材料の 基礎知識, オーム社, pp 65~81, 1991
- 4) 福田 博, 横田力男, 塩田-路, 複合材料 基礎工學, 日刊工業新聞社, pp 1~3, 1994.
- 5) 김윤해, 한중원, 복합재료학, 효성출판사, pp 1~18, 2001.
- 6) 島村昭治, 官入裕夫, 複合材料, 實教出版, pp 22~31, 1993.
- 7) B. S. Mitin, A. A. Ilyin and E. N. Kablov, Present Situation and Development of Aviation Materials Science in Russia, Korea- Russia Joint Seminar on Composite Technology, pp 1~7, 1997.
- 8) A. A. Baker, A Summary of work on applications of advanced fiber composites at the Aeronautical Research Laboratories, Australia, Composites, Vol. No. 1, pp 11~16, 1978.
- 9) C. S. Smith, Design of Marine Structures in Composite Materials, ELSEVIER SCIENCE PUBLISHERS LTD., pp 1~13, 1990.
- 10) 홍창선, 복합재료 응용기술 및 현황, 大韓機械學會誌 第34卷 第5

- 號 pp 334~341, 1994.
- 11) H. G. haldenwanger and L. Vollrath, *Plastics in Automotive Engineering*, Hanser/Gardner Publications. Inc., pp 147~177, 1994.
 - 12) シーエムシ-出版部, *コンポジット材料の 製造と 應用*, シーエムシ-, pp 170~183, 2000.
 - 13) 吉井 弘, 近藤和彦, *軸系装置-軸系(この1)*, *日本造船學會誌*, 第656號, pp 94~103, 1984.
 - 14) 吉井 弘, 近藤和彦, *軸系装置-軸系(この2)*, *日本造船學會誌*, 第657號, pp 148~161, 1984.
 - 15) 木下文治, *動力傳達装置*, *日本造船學會誌*, 第655號, pp 12~23, 1984.
 - 16) 全孝重, *船舶動力傳達装置*, 太和出版社, pp 1~8, 1986
 - 17) 吉井 弘, *軸系の 最近の 動向*, *日本船用機關學會誌*, 第27卷 第9號, pp 653~660, 1992.
 - 18) 澁田 成人, 吉川 光昭, *船舶用 CFRP製 高彈性 推進軸*, *日本複合材料學會誌*, 21, 4 pp146~154, 1995
 - 19) 배창원, 김윤해, 정하돈, *첨단 신소재를 이용한 조선기자재의 개발 동향*, *韓國船用機關學會誌* 第20卷 第4號 pp 323 ~ 332, 1996.
 - 20) 砂原誠一, 中川賢-郎, 藤井宣彦, 吉川光昭, *先進 複合材 中間軸の 開發*, *日本船用機關學會誌*, 第27卷 第9號, pp 779~786, 1992.
 - 21) D. Hull and T. W. Clyne, *An Introduction to Composite*

- Materials(second Edition), CAMBRIDGE, pp 303~305, 1996.
- 22) 日本化學會, 複合材料, 學會出版センター, pp 39~41, 1986.
- 23) T. Donomoto, N. Miura, K. Funatani and N. Miyaki, Ceramic Fiber Reinforced Piston for High Performance Diesel Engine, SAE Tech. Paper No. 83052, Detroit, MI, 1983.
- 24) 渡辺 保, 船用機關の 新材料 ピストンリング, 日本船用機關學會誌, 第29卷, 第9號, pp 565-570, 1993.
- 25) Susan Rush, HIGH-PERFORMANCE COMPOSITES, pp 48~49, 2000.
- 26) S. T. Peter, W. D. Humphrey, R. F. Foral, Filament Winding Composite Structure Fabrication, Society for the Advancement of Material and Process Engineering, pp 5-1~5-46, 1991.
- 27) 엄문광, 이우일, 복합재료와 성형공정, 大韓機械學會誌 第34卷 第5號, pp 310~325, 1994.
- 28) 조규중, 복합재료의 물성 평가법, 大韓機械學會誌 第37卷 第10號, pp 58~63, 1997.
- 29) A. Y. LOU, T. P. MURTHA, J. E. OCONNOR, D. G. BRADY, Continuous fiber thermoplastic composites(Lief A. Carlsson, Thermoplastic composite materials), Elsevier Science Publishers B. V., pp 167~204, 1991.
- 30) 上田市三, 強化纖維-II, グラスファイバー, 日本複合材料學會誌, 16-6, pp 226~232, 1990.
- 31) 전의진, 이우일, 윤관준, 김태욱 공저, 최신복합재료, (주) 교학사,

- pp 8~9, 1995.
- 32) Clayton A. May, Epoxy Resins, Marcel Dekker Inc., pp 885~926, 1988.
 - 33) 金博允, 에폭시 樹脂, 大光書林, pp 13~31, 1994
 - 34) 垣内 弘, エポキシ樹脂, 株式會社 昭晃堂, pp 1~19, 1990.
 - 35) 日本플라스틱技術協會, 플라스틱 技術, 大阪市工業研究所, pp 86~92, 203~221, 1996.
 - 36) S. T. Peters, Handbook of Composites, Chapman & Hall, London, pp 456~458, 1988.
 - 37) 後藤 卒土民, 實踐 FRP成形, 工業調査會, pp 67~74, 1997.
 - 38) Stuart M. Lee, Filament Winding, In International Encyclopedia of Composites, VCH, pp 503~518, 1990
 - 39) Peters S. T., Filament Winding, In Engineered Materials Handbook, Vol. 1, Composites, pp 504~509, 1987.
 - 40) George Lubin, Filament Winding, Handbook of Composites, VAN NOSTRAND REINHOLD COMPANY, pp 449~450, 1981.
 - 41) Soo-Yong Lee, George S. Springer, Filament Winding Cylinders; I Process Model, Journal of Composite Materials, Vol. 24, pp 1270~1298, 1990.
 - 42) Z. CAI, T. Gutowski, S. Allen, Winding and Consolidation Analysis for Cylindrical Composite Structures, Journal of Composite Materials, Vol. 26, pp 1374~1399, 1992.

- 43) Dominick V. Rosato, Designing with Reinforced Composites, Hanser Gardner Publications Inc., pp 138~142, 1997.
- 44) 川原正言, FW法の成形と安全性評価, 日本機械學會(No. 920-99) 講演會, PMC(高分子複合材料)の物性及び機能性(最近の測定・評価方法), pp 15~21, 1992.
- 45) プラスチック成形加工學會, 先端成形加工技術, シグマ出版, pp 317~328, 1999.
- 46) P. K. MALLICK, Composites Engineering Handbook, MARCEL DEKKER INC., pp 515~548, 1997.
- 47) 森本尙夫, FRP 成形の實際, 高分子刊行會, pp 219~231, 1984.
- 48) G. S. Golovkin, Advanced Technology Winding-Made Goods of Continuous Fiber-Reinforced Thermoplastics, Korea - Russia Joint Seminar on Composite Technology, pp 71~77, 1997.
- 49) 韓國標準協會, 韓國産業規格 KS M 3000 플라스틱용어, 1985.
- 50) Isaac M. Daniel, Ori Ishai, Engineering mechanics of composite materials, Oxford University Press Inc., pp 37~61, 1994.
- 51) 官入裕夫, 池上皓三, 金原勳, 複合材料入門, 培風館, pp 94~114, 1983.
- 52) TAKEHITO FUKUDA, ZENICHIRO MAEKAWA, TORU FUJII, Fiber composite materials, Elsevier Science Publishers B. V., pp 9~13, 1994.

- 53) 福田 博, 邊 吾一, 複合材料の 力學 序說, 古今書院, pp 83~87, 1989.
- 54) ROBERT M. JONES, Mechanics of composite Materials, MacGraw Hill Book Company, pp. 147~156, 1975.
- 55) 韓國船級, 船級 및 鋼船規則 제5편 機關裝置, 제3장 軸系 및 動力傳達裝置, 1997.
- 56) 박진용, 황운봉, 한경섭, 축 및 비틀림 하중하에서 복합적층판의 파괴기구와 기계적 거동분석, 大韓機械學會論文集 第15卷 第4號, pp. 1233~1244, 1991.
- 57) 조문성, 김승호, 이영신, 복합재료 선형가이더의 응력해석 및 최적 적층각 설계, 大韓機械學會論文集 (A) 第22卷 第8號, pp. 1418~1430, 1998.
- 58) John wiley, Sons Inc Rosto, D. V. and Grove, C. S., Filament winding, its development manufacture application, and design, pp. 216~248.
- 59) 김창완, 황운봉, 박현철, 신대식, 박의동, 강도를 고려한 원통형 복합재료 구조물의 최적설계, 大韓機械學會論文集 (A), 第20卷, 第3號, pp. 775~787, 1996.
- 60) 植村益次, 安宅信行, 福田 博, 邊 吾一, FRP 構造強度 設計의 實際, 社團法人 強化プラスチック協會, pp. 2~19, 1984.
- 61) 조맹호, 복합재료 적층판의 고차이론의 검토, 大韓機械學會誌 第34卷 第7號, pp. 517~526, 1994.
- 62) 박정선, 허해규, 이수용, 굽힘 및 비틀림 하중 작용시 횡방향 모

- 재균열을 갖는 복합재료 판넬 해석, 大韓機械學會論文集 (A), 第 21卷 第6號, pp. 971~980, 1997.
- 63) B. Spencer, D. Hull, Effect of winding angle on the failure of filament wound pipe, Composites, Vol. 9, No. 4, pp 263~271, 1978.
- 64) D. Hull, M. J. Legg and B. Spencer, Failure of glass/polyester filament wound pipe, Composites, Vol. 9, No. 1, pp 17~24, 1978.
- 65) 韓國船級, 船級 및 鋼船規則 제5편 기관장치, 1999.
- 66) 이대길, 정광섭, 최진호, 복합재료 역학 및 제조기술, 시그마프레스, pp 345~346, 1998.
- 67) ASTM, ASTM D 1002, Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading(Metal to Metal), 2001.
- 68) 韓國標準協會, 韓國産業規格 KS F 2240 유리섬유강화 플라스틱의 시험방법 통칙, 1989.
- 69) 조선형, 임영호, 김이곤, 압축성형된 한 방향 섬유강화 고분자 복합판의 섬유함유율 분포, 韓國複合材料學會誌, 第7卷, 第3號, pp 67~76, 1994.
- 70) 官入裕夫, FRP試驗 マニュアル, 日本規格協會, pp. 79~81, 1989
- 71) 韓國標準協會, 韓國産業規格 KS F 2244 유리섬유 강화 플라스틱의 섬유함유율 측정 방법, 1990.
- 72) 김병선, 황병선, 섬유강화 복합재료의 가공, 高分子 科學과 技術,

- 第10卷, 第1號, pp 20~34, 1999.
- 73) 박종래, 복합재료 보강용 고성능 섬유재료, 高分子 科學과 技術, 第10卷, 第1號, pp 55~64, 1999.
- 74) 김윤해, 고기능성 복합재료의 제조와 그 특성평가에 관한 연구, 韓國船舶機關學會誌 第22卷 第2號, pp 139~145, 1998.
- 75) 황태경, 정현조, 정상기, 정발, 강병윤, 김종식, 필라멘트 와인딩 복합재 압력용기의 파열 압력 향상에 관한 연구, 韓國複合材料學會誌, 第8卷, 第3號, pp 84~93, 1995.
- 76) 官入裕夫, FRP試驗 マニュアル, 日本規格協會, pp. 81~84, 1989.
- 77) ASTM, ASTM D 2734, Standard Test Methods for Void Content of Reinforced Plastics, 1994.
- 78) 韓國標準協會, 韓國産業規格 KS F 2245 유리강화 섬유 플라스틱의 공동율 측정 방법, 1990.
- 79) 배창원, 권순철, 임철문, 엄수현, 김윤해, 필라멘트 와인딩 공법으로 제조된 복합재료 NOL Ring 시험편의 최적 인장강도 평가법에 관한 연구(풍력발전용 복합재료 터빈 블레이드 제조 및 평가를 목적으로), 韓國船舶機關學會誌 第25卷 第1號, pp 87~94, 2001.
- 80) ASTM, ASTM D 2290 Standard Test Method for Apparent Tensile of Ring or Tubular Plastics and Reinforced Plastics by Split Disk Method, Annual Book of ASTM Standards, 1992
- 81) 윤성호, 김천근, 조원만, 필라멘트 와인딩된 링시험편을 이용한 인

- 장특성평가, 大韓機械學會論文集, 第19卷, 第6號, pp 1479~1489, 1995.
- 82) 윤성호, 김천곤, 조원만, 필라멘트 와인딩 공법으로 제작된 링시편과 인장시편의 인장특성 비교, 韓國複合材料學會誌, 第8卷, 第2號, pp 52~60, 1995.
- 83) P. D. SODEN, D. LEADBETTER, P. R. GRIGGS and G. C. ECKOLD, The strength of a filament wound composite under biaxial loading, *Composites*, Vol. 9, pp 247~250, 1978.
- 84) 林 毅, 複合材料工學, 日科技連出版社, pp 1022~1025, 1988.
- 85) ASTM, ASTM D 2105 Standard Test Method for Longitudinal Properties of Fiberglass (Glass - Fiber - Reinforced - Thermosetting - Resin) Pipe and Tube, Annual Book of ASTM Standards, Vol 08.04, pp 85~89, 1993.
- 86) Pagano N. J. and Whitney J. M., Geometrical Design of Composite Cylindrical Characterization Specimens, *J. Composite Materials*, Vol. 4, pp. 360~378, 1970.
- 87) N. J. Pagano, Interlaminar Response of Composite Materials (Ran Y. Kim, Experimental Observations of Free - Edge Delamination), Elsevier Science Publishers B. V., pp 111~160, 1989.
- 88) K. Schulte, W. W. Stinchcomb, Damage mechanisms in fiber reinforced composite materials(Klaus Friedrich, Application of Fracture Mechanics to Composite Materials), Elsevier Science

Publishers B. V., pp 273~325, 1989.

- 89) J. W. Lee, M. Y. Shon, S. S. Park, Y. H. Rew, Development of High Performance Composite Propulsion Shaft for High Speed Vessels, ACCM(Asia-Australians Conference on Composite Materials, pp 1295~1300, 2000.
- 90) 이창수, 황운봉, 비선형 변형 거동을 가는 섬유강화 복합재료의 피로수명 예측, 韓國複合材料學會誌, 第12卷, 第4號, pp 1~7, 1999.