

소형 선박용 복합재료 축 설계를 위한 응력해석에 관한 연구

김윤해[†] · 임철문* · 배창원* · 왕지석**
(2001년 5월 17일 접수, 2001년 11월 7일 심사완료)

A Study on the Stress Analysis for Design of Composite Material Shafts of Small Boats

Yunhae Kim, Chulmoon Im, Changwon Bae and Jiseok Wang

Key Words: Filament Winding(필라멘트 와인딩), Composites Materials Shaft(복합재료축), Laminates(적층), Classical Laminated Plate Theory(고전적층판 이론)

Abstract

It is known that the composite material shafts using on small boats have various advantages comparing to forged steel shafts, for examples, specific strength, fatigue strength, corrosion, etc. The analysis of the stresses and strains in the composite material shafts made by filament winding method is presented in this paper. The classical laminated plate theory is applied on the patch cut from the composite material hollow shafts. It is verified that the composite material hollow shafts of diameter 40 mm is the most optimum when the ratio of the inner diameter to the outer 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 so it must be avoided to wind the filament by the angle over 75°.

1. 서 론

복합재료의 응용은 항공, 우주 분야에서 뿐만 아니라, 조선산업에서도 날로 증가됨에 따라 복합재료 산업은 이미 많은 발전 단계에 이르고 있다. 항공, 우주 분야에서는 오토클레이브(autoclave)를 이용하여 항공기의 동체나 헬리콥터의 블레이드를 이미 복합재료화하였고, 자동차의 범퍼 등도 프리폼에 수지를 주입하는 RTM성형법을 이용하여 복합재료화 하고 있으며, 고강도, 고탄성률을 지닌 섬유와 에폭시 등의 수지를 이용하여 필라멘트와인딩 성형법으로 압력용기 등을

복합재료화하고 있다.⁽¹⁾ 국내에서도 항공산업의 활성화로 인하여 항공기 구조물에 복합재료를 상당부분 채용하고 있으며, 조선분야에서는 FRP선박 등이 제작되어 운항중이다. 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 필라멘트와인딩 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, 비틀림피로 특성이 우수한 이점을 지니고 있다.^(2~4)

필라멘트와인딩 성형법은 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

[†] 책임저자, 회원, 한국해양대학교 기계소재공학부

E-mail: yunheak@hanara.kmaritime.or.kr

TEL : (051)410-4355 FAX: (051)410-4355

* 한국해양대학교 대학원

** 한국해양대학교 기계정보공학부

속도를 조절하여 일정한 와인딩각도와 패턴으로 수지가 함침된 연속 섬유를 심축(mandrel)에 감을 수 있는 성형기를 이용한다.⁽⁵⁻⁷⁾ 필라멘트와인딩성형법에서 핵심기술이라 할 수 있는 것은 결합 최소화를 위한 수지 함침기술, 섬유 균일 분포를 위한 섬유의 인장제어(tension control) 기술이며, 이에 따른 소형 선박용 복합재료 축의 제작, 설계기술 등이다.

필라멘트와인딩 방법으로는 수지를 섬유에 함침시키는 시기에 따라 습식와인딩(wet winding)과 건식와인딩(dry winding)으로 나뉘어진다. 습식와인딩은 와인딩하는 과정에서 섬유가 수지 함침용기를 통과할 때 수지가 함침되어 바로 심축에 감는 방법이며, 건식와인딩은 이미 수지가 섬유에 함침되어 경화가 일부 진행된 B단계로 된 프리레그 로빙(prepreg roving)을 심축에 감는 방법이다.⁽⁸⁾ 본 연구에서는 결합 최소화를 위한 수지조(resin bath) 설계, 제작을 수행하고, 연구 결과를 이용하여 복합재료 선박용 부품설계 및 제작에 활용할 예정이다.

현재 국내에서 필라멘트와인딩 기법으로 복합성형품은 압력용기 및 항공기용 동력전달축(transmission shaft)등이 개발, 제작되어 있으나, 선박용 동력전달장치는 그렇지 못한 실정이다. 선박용 축 설계에 있어서 주요한 검토사항으로 작업성, 축계강도, 축계진동 및 축계배치 등을 고려하여야 하고 축계의 강도에 크게 영향을 미치는 피로파괴를 고려하여야 한다.^(9,10)

본 연구는 선박용 복합재료 축의 성형기술을 확보하여 축의 응력해석 및 구조 설계를 하는 것이 그 목적이다.

2. 본 론

2.1 고전 적층판 이론(CLT:Classical Laminated Plate Theory)

2.1.1 와인딩 구조물의 응력 해석⁽¹¹⁻¹³⁾

필라멘트 와인딩 제품은 주로 내압을 받기 때문에 내압에 대한 특수한 응력해석법으로 망상구조 응력 해석(netting analysis)법이 필라멘트 와인딩 구조재료의 응력해석에 주로 사용된다.^(14,15) 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 이론을 이용하여 복합재료 적층판의 강성도를 구하고 선정된 복합재료 축의 직경에 대한 응력해석을 하였다.⁽¹⁶⁻¹⁸⁾

2.1.2 단일층 복합재료에서의 응력과 변형률⁽¹⁹⁾

단일층 복합재료의 응력 변형률 관계를 주응력 방향좌표로 표현하면 $\sigma_1, \sigma_2, \tau_{12}$ 는 1, 2방향의 주응력이며, $\epsilon_1, \epsilon_2, \gamma_{12}$ 는 주응력에서의 변형률이며, Q_{ij} 는 축소 강성도이고, \bar{Q}_{ij} 는 변환된 축소 강성도이다. 첨자 ij는 텐서 표기법으로 이후 식에서는 공학적 표기법을 사용한다. 적층판에서는 각 층마다 적층각이 다르므로 임의의 좌표계에 대한 응력-변형률 관계가 필요하다. 즉 Fig. 1에서 k번째 층의 응력 변형률 관계를 구하면 다음과 같다.

$$[\sigma_{ij}]_k = [\bar{Q}_{ij}]_k [\epsilon_{ij}]_k \quad (1)$$

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

$$\sum_{k=1}^N [\sigma_{ij}]_k = \sum_{k=1}^N [\bar{Q}_{ij}]_k [\epsilon_{ij}]_k \quad (2)$$

2.1.3 적층판에서의 힘과 모멘트

복합재료 적층판에서는 각 층마다 적층각이 다르므로 같은 외력에 대해서도 강성도 및 강도가 다르며, 감당하는 힘이 모두 다르다. 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 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} N_{xx} \\ N_{yy} \\ N_{xy} \end{pmatrix} = \sum_{k=1}^N \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} dz \quad (3)$$

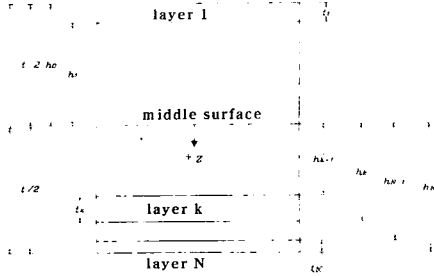


Fig. 1 The shape of laminates

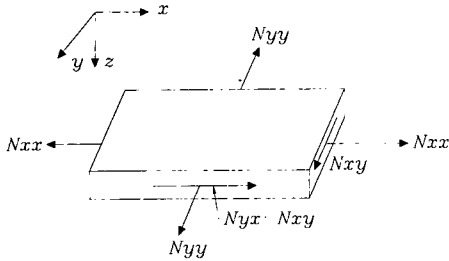


Fig. 2 Positive resultant forces

여기서, N_{ij} 는 적층판 단위길이(N/m)당 가해지는 힘이다.(Fig. 2)

여기서, 복합재료의 평균응력($\bar{\sigma}_{ij}$)은 다음 식과 같다.

$$\bar{\sigma}_{ij} = \frac{N_{ij}}{t} \tag{4}$$

t : 복합 적층판의 전체 두께

2.1.4 복합재료 적층판에서의 강성도

각 층마다 적층각이 다를 경우, 적층판에 힘과 변형률과의 관계에서 인장 강성도 및 연계 강성도를 구하면 다음 식과 같다.

$$\begin{pmatrix} N_{xx} \\ N_{yy} \\ N_{xy} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{pmatrix} \tag{5}$$

여기서, k_{ij} 는 비틀림 곡률이다. 또한,

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^N [\bar{Q}_{ij}]_k \int_{k_{z-1}}^{k_z} dz \tag{6}$$

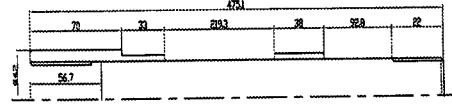


Fig. 3 Shape of shaft for small boat

$$B_{ij} = \sum_{k=1}^N [\bar{Q}_{ij}]_k \int_{k_{z-1}}^{k_z} z dz \tag{7}$$

A_{ij} 는 인장 강성도로서 힘 N_i 가 적층판에 가해졌을 때 x-y평면에 변형이 얼마나 발생했는가를 말해주는 척도이며, 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.

2.2 복합재료 축 설계 및 응력 해석

일반적으로 선박용 축계는 한국선급규정⁽²⁰⁾에 따라서 그 직경을 결정한다. 그러나, 소형선박에 있어서는 그 규정에 따르지 않고 설계하여도 무방하여, 일반 축 설계와 동일한 방법으로 설계하였다.

본 연구에 제작하고자 하는 축은 소형선박에서 사용하고 있는 금속재료(SUS420) 축을 복합재료 축으로 대체하기 위한 것으로 직경(D) 30~50mm, 길이(L)는 약 300mm의 축이다. 축의 형상은 Fig. 3과 같다.

현재 이 축 베어링 위치를 고려해 볼 때 굽힘 모멘트에 의한 힘은 작용하지 않는다고 볼 수 있다. 따라서 인장, 압축과 비틀림 및 진동에 대해서 토크(torque)와 최대 RPM을 기준으로 축을 설계하고 하고자 한다

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

$$(\tau_{xy})_M = \frac{16 Toq}{\pi(D_0)^3(1-R^4)} \tag{8}$$

여기서, $(\tau_{xy})_M$ 는 전단응력(N/mm²)이고, Toq는

토크이며, D0는 축의 외경, R(D1/D0)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.

$$(\tau_{xy})_M = \bar{\tau}_{xy} \quad (9)$$

식 (5)는 복합적층판이 균일 적층판이고, 벨런스가 된 대칭 적층판이라 하면, 다음과 같이 간단히 할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} N_{xx} \\ N_{yy} \\ N_{xy} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{pmatrix} \quad (10)$$

식 (10)을 다시 쓰면,

$$\begin{aligned} N_{xx} &= A_{11} \epsilon_x^0 + A_{12} \epsilon_y^0 + A_{16} \epsilon_{xy}^0 \\ N_{yy} &= A_{12} \epsilon_x^0 + A_{22} \epsilon_y^0 + A_{26} \epsilon_{xy}^0 \\ N_{xy} &= A_{16} \epsilon_x^0 + A_{26} \epsilon_y^0 + A_{66} \epsilon_{xy}^0 \end{aligned} \quad (11)$$

식 (11)과 같이 표현할 수 있다. 여기서 복합적층판이 벨런스가 된 적층판이라고 가정하였고, 플라이의 두께는 모두 동일하므로, 식 (11)은 식 (6)과 식 (7)을 이용하여 다음과 같이 간단히 할 수 있다.

$$\begin{aligned} N_{xx} &= t [\bar{Q}_{11} \epsilon_x^0 + \bar{Q}_{12} \epsilon_y^0 + \bar{Q}_{16} \epsilon_{xy}^0 / M] \\ N_{yy} &= t [\bar{Q}_{12} \epsilon_x^0 + \bar{Q}_{22} \epsilon_y^0 + \bar{Q}_{26} \epsilon_{xy}^0 / M] \\ N_{xy} &= t [\bar{Q}_{16} \epsilon_x^0 / N + \bar{Q}_{22} \epsilon_y^0 / N + \bar{Q}_{26} \epsilon_{xy}^0] \end{aligned} \quad (12)$$

여기서, t는 복합적층판의 총두께이고 N은 적층한 적층판의 수이다. 식 (12)은 식 (3)에 의해서 정리하면

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_x &= \bar{Q}_{11} \epsilon_x^0 + \bar{Q}_{12} \epsilon_y^0 + \bar{Q}_{16} \epsilon_{xy}^0 / N \\ \bar{\sigma}_y &= \bar{Q}_{12} \epsilon_x^0 + \bar{Q}_{22} \epsilon_y^0 + \bar{Q}_{26} \epsilon_{xy}^0 / N \\ \bar{\tau}_{xy} &= \bar{Q}_{16} \epsilon_x^0 / N + \bar{Q}_{26} \epsilon_y^0 / N + \bar{Q}_{66} \epsilon_{xy}^0 \end{aligned} \quad (13)$$

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

최적의 설계를 위해서는 와인딩시에 섬유가 받

는 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.⁽¹³⁾ 최적의 와인딩 각을 설정함으로써 재료절감 및 무게감소를 할 수 있다. 식 (13)에서 계산 할 때, $\bar{\sigma}_x, \bar{\sigma}_y = 0$ 이므로, 변형률 ϵ_x, ϵ_y 는 변형률 ϵ_{xy} 보다 작아 그 값을 무시할 수 있다. Fig. 4는 직경과 직경비에 따른 축의 전단응력을 나타내고 있다. 전단응력이 직경비(D1/D0)가 0.4이하일 때는 크게 변화가 없음을 알 수가 있다.

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

따라서, 식 (13)에서 변형률과 응력의 관계에서 최적의 설계가 가능함을 알 수 있다. Table 1에 설계조건에 관한 사항이 나타내었다.

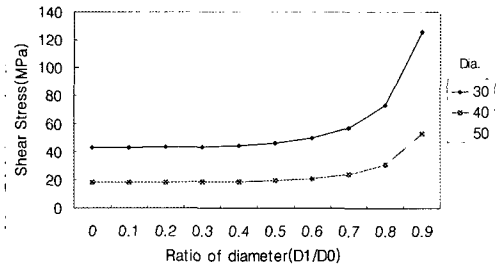


Fig. 4 Variation of shear stress with the ratio of dimension

Table 1 Design condition for composite materials shaft

Horse power(PS)	196
RPM	6,000
Tensile elastic of modulus glass/epoxy composites(E1)	42,770 (MPa)
Tensile elastic of modulus glass/xpoxy composites(E2)	11,720 (MPa)
Poisson's ratio(ν 12)	0.27
Shear modulus(G12)	4,130 (MPa)

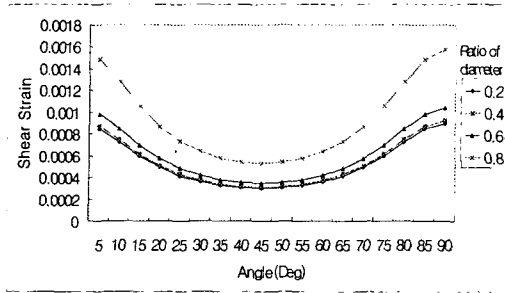


Fig. 5 Variation of shear strain with the winding angle(ϵ_{xy}^0 , $D0=40$)

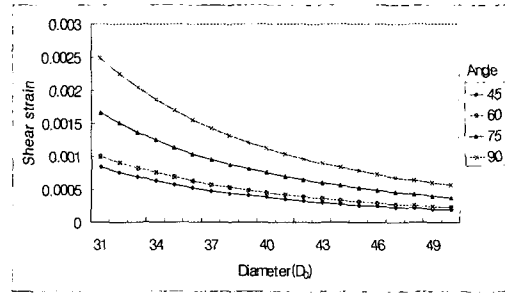


Fig. 8 Variation of shear strain with diameter and winding angle($D1/D0=0.6$)

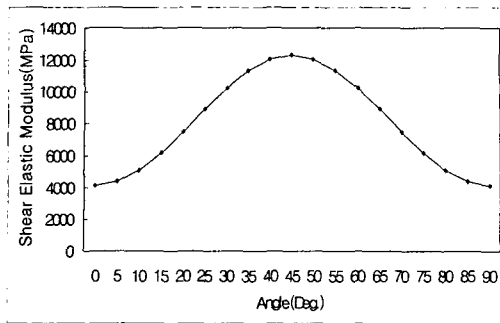


Fig. 6 Variation of rigidity with winding angle

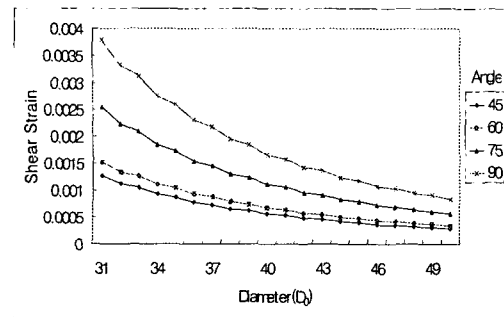


Fig. 9 Variation of shear strain with diameter and winding angle($D1/D0=0.8$)

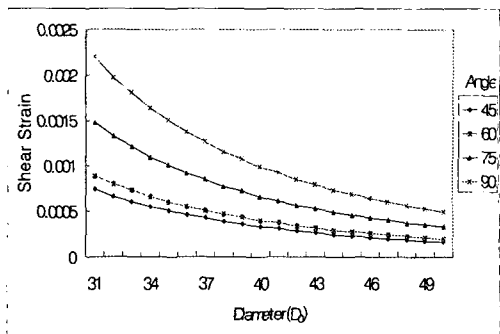


Fig. 7 Variation of shear strain with diameter and winding angle($D1/D0=0.4$)

Fig. 5와 6에서 보는바와 같이 전단변형률은 45°를 기준으로 대칭임을 알 수 있었고, 90°에서 가장 큰 변형률을 나타내고 있다. 또한 전단 탄성계수도 45°를 기준으로 대칭적으로 변한다.

현재 소형선박에 사용되고 있는 축재료인 단강재(SUS420)를 대체하기 위해서 본 연구에서는 직경을 40mm로 하여 축을 제작하기로 하였다. Fig. 7, 8 및 9에서 보는바와 같이 직경비에 따른

변형률은 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 변형률이 최대임을 알 수 있었다. 따라서 현재 제작하고자 하는 축의 직경을 고려할 때, 재료의 절감과 허용응력을 고려하여 알맞은 값을 선정하였다.

3. 결론

본 연구에서는 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 직경비를 0.4로 하고 와인딩 각도를 45°로 할 때 가장 최적의 설

계가 가능하며, 섬유 배열이 $30^\circ \sim 60^\circ$ 사이에서는 전단 변형률의 변화가 크게 없음을 알 수 있었다. 또한 와인딩 각도가 75° 이상이 되는 경우는 그 전단응력값이 커져 축의 파괴가 일어나므로 75° 이상으로 와인딩하는 경우 축의 직경을 더 크게 해야한다. 이후, 실제 축을 제작하여 여러 가지 시험법을 통해 설계되어진 값과 시험한 결과를 비교 분석할 필요가 있다.

참고문헌

- (1) 홍창선, 1994, "복합재료 응용기술 및 현황," 대한기계학회지 제34권 제5호 pp. 334~341.
- (2) Peters S. T., Humphrey W. D., Foral R. F., 1991, "Filament Winding Composite Structure Fabrication," Society for the Advancement of Material and Process Engineering, pp. 5-1~5-46.
- (3) 엄문광, 이우일, 1994, "복합재료와 성형공정," 대한기계학회지 제34권 제5호, pp. 310~325.
- (4) 조규중, 1997, "복합재료의 물성 평가법," 대한기계학회지 제37권 제10호, pp. 58~63.
- (5) Peters S. T., 1988, *Handbook of Composites*, Chapman & Hall, London, pp. 456~458.
- (6) Stuart M. Lee, 1990, *Filament Winding*, In International Encyclopedia of Composites, VCH, pp. 503~518.
- (7) Peters S. T., 1987, *Filament Winding*, In Engineered Materials Handbook, Vol. 1, Composites, pp. 504~509.
- (8) George Lubin, *Filament Winding*, Handbook of Composites, VAN NOSTRAND REINHOLD, pp. 449~450.
- (9) 과학기술처, 1991, "항공기용 복합재료 Transmission shaft 개발."
- (10) 전효중, 1986, *船舶動力傳達裝置*, 태화출판사, pp. 1~20.
- (11) Pagano N. J. and Whitney J. M., 1970, "Geometrical Design of Composite Cylindrical Characterization Specimens," *J. Composite Materials*, Vol. 4, p. 360.
- (12) 박진용, 황운봉, 한경섭, 1991, "축 및 비틀림 하중하에서 복합적층판의 파괴기구와 기계적 거동분석," 대한기계학회논문집 제15권 제4호, pp. 1233~1244.
- (13) 조문성, 김승호, 이영신, 1998, "복합재료 선형가이드의 응력해석 및 최적 적층각 설계," 대한기계학회논문집 (A) 제22권 제8호, pp. 1418~1430.
- (14) John wiley and Sons IncRosto, D. V. and Grove, C. S., *Filament winding, its development manufacture application, and design*, pp. 216~248.
- (15) 김창완, 황운봉, 박현철, 신대식, 박의동, 1996, "강도를 고려한 원통형 복합재료 구조물의 최적설계," 대한기계학회논문집 (A) 제20권, 제3호, pp. 775~787.
- (16) 植村益次, 安宅信行, 福田博, 1984, *FRP 構造強度 設計の 實際*, 社團法人 強化プラスチック協會, pp. 2~19.
- (17) 조맹호, 1994, "복합재료 적층판의 고차이론의 검토," 대한기계학회지 제34권 제7호, pp. 517~526.
- (18) 박정선, 허해규, 이수용, 1997, "굽힘 및 비틀림 하중 작용시 횡방향 모재균열을 갖는 복합재료 판넬 해석," 대한기계학회논문집 (A) 제21권 제6호, pp. 971~980.
- (19) Johnes, R. M, 1975, *Mechanics of composite Materials*, MacGraw - Hill Washington, pp. 147~156.
- (20) 韓國船級協會, 1997, *船級 및 鋼船規則 제5편 機關裝置 제3장 軸系 및 動力傳達裝置*.