필라멘트 와인딩 공법에 의한 소형 선박용 복합재료 축 설계에 관한 연구

배창원*, 임철문*, 왕지석**, 김윤해**

A Study on the Design of Composites Shaft for Small Ship by Filament Winding Process

C.W. Bae*, C.M. Im*, J.S. Wang**, Y.H. Kim**

Key Words : Filament Winding, Composites Shaft, Laminates, CLT(Classical Laminated Plate Theory)

Abstract

The purpose of this study is the design of composite shaft which is wound by Filament Winding method.

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. The result that if tensile stress was zero, torsion stress was a certain value below 0.4(diameter rate) and torsion strength was the highest value on 45° (winding angle). In case of 90° (winding angle), we have to consider the torsional monent when the composites shaft was load.

기호설명

$\overline{\sigma}_{ij}$: 복합적층판의 평균응력(N/m^2)

N_{ij} : 복합적층판의 단위길이당 힘(N/m)

ϵ_{ij} : 복합적층판의 변형률

$\overline{Q}_{ij}$: 변형된 강성도(N/m^2)

t : 복합적층판의 총두께

1. 서 론

복합재료 응용은 항공, 우주 분야에서 뿐만 아니라, 조선, 선박에서도 날로 증가됨에 따라서 복합재료 산업은 이미 많은 발전 단계에 이르고 있다.[1] 국내에서도 항공산업의 활성화로 인하여 항공기구조물에 복합재료를 상당부분 채용하고 있으며, 조선분야에서는 FRP선박 등이 제작 되어 운행중이다.그러나 조선, 선박분야에서는 항공산업 분야만큼 복합재료로 성형된 제품이 활성화되어 있지않고, 성형기술 개발이 아직 미진한 상태이어서 과학적이고 학문적인 연구는 물론 실제 적용 성형기술은 필연적이라 할 수 있다. 본 연구는 Filament winding 성형기술 개발을 위한 요소 기술을 확보하고 이를 바탕으로 선박용 복합재료 축을 개발하고자 한다. 복합재료 축은 강도가 크며 기존에 사용하고 있는 단강제품에 비해 무게 절감 효과를 가져오고, 피로 비틀림 특성이 우수한 잇점을 지니고 있다.[2]

필라멘트 와인딩 성형 기법은 수지가 함침된 연속 섬유를 회전하는 심축에 감아 주로 파이프나 압력용기, 축 등과 같은 축대칭 복합재료 구조물을

* 한국해양대학교 대학원
** 한국해양대학교 교수

제작하는 방법이다. 성형은 심축의 회전 속도와 섬유의 공급우치를 이동시키는 캐리지(Carrige)의 속도를 조절하여 일정한 와인딩각도와 패턴으로 수지가 함침된 연속 섬유를 심축(Mandrel)에 감을 수 있는 성형기를 이용한다.[3,4,5]

필라멘트 와인딩 성형 기법은 수지가 함침된 연속 섬유를 회전하는 심축에 감아 주로 파이프나 압력용기, 축 등과 같은 축대칭 복합재료 구조물을 제작하는 방법이다. 성형은 심축의 회전 속도와 섬유의 공급위치를 이동시키는 캐리지(Carrige)의 속도를 조절하여 일정한 와인딩각도와 패턴으로 수지가 함침된 연속 섬유를 심축(Mandrel)에 감을 수 있는 성형기를 이용한다.[6]

선박용 축계설계에 있어서 주요한 검토사항으로 작업성, 축계강도, 축계진동 및 축계배치등을 고려하여야고 축계의 강도에 크게 영향을 미치는 피로파괴를 고려하여야 한다.[7,8]

1차년도 연구 사업인 본 연구에서는 우남마린(주)과 함께 선박용 복합재료 축을 성형기술을 확보하여 축의 응력해석 및 구조설계를 행하여 Filament winding 성형기법으로 시제품을 제작하여 문제점 및 보완 대책을 강구하여 보다 우수한 제품 개발에 그 목적을 두고 있다.

2. 본 론

2.1 적층판의 응력 해석

일반적으로 선박용 축계는 선급에서 규정에 따라서 그 직경을 결정한다.[9] 그러나, 소형선박에 있어서는 그 규정에 따르지 않고 설계하여도 무방하다. 따라서 일반 축계 설계[10]와 동일한 방법으로 설계하였다.

필라멘트 와인딩 제품은 주로 내압을 받기 때문에 내압에 대한 특수한 응력해석법으로 망상구조 응력 해석(netting analysis)법이 필라멘트 와인딩 구조재료의 응력해석에 주로 사용된다.[11,12] 그러나, 본 연구에서 제작하고자 하는 축은 내압을 받는 구조가 아닌 인장, 압축 및 비틀림을 받으므로 적층판 구조 응력 해석법을 사용했다. 필라멘트 와인딩(Filament winding) 구조 재료는 거시적으로 섬유 방향이 대칭으로 된 플라이를 적층한 적층판과 같다고 볼 수 있으므로, 적층판 구조 응력 해석법이 바로 적용 될 수 있다.[13]

2.2 적층판 이론에 의한 축 설계.[14]

본 연구에 제작하고자 하는 축은 소형선박에서 사용하고 있는 금속재료(SUS420) 축을 복합재료 축으로 대체하기 위한 것으로 직경(D0) 30~50mm, 길이(L)는 약 300mm의 축이다. 현재 이 축 베어링 위치를 고려해 볼 때 굽힘 모멘트에 의한 힘은 작용하지 않는다고 볼 수 있다. 따라서 인장, 압축과 비틀림 및 진동에 대해서 Torque와 최대 RPM을 기준으로 축을 설계하고 하고자 한다.

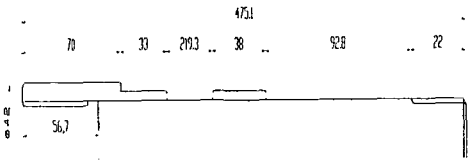

그림 1.축의 설계 도면

$$N_x = t[\ \overline{Q}_{11}\ \varepsilon_x^0 + \overline{Q}_{12}\ \varepsilon_y^0 + \overline{Q}_{16}\ \varepsilon_{xy}^0/N]$$
$$N_y = t[\ \overline{Q}_{12}\ \varepsilon_x^0 + \overline{Q}_{22}\ \varepsilon_y^0 + \overline{Q}_{26}\ \varepsilon_{xy}^0/N]$$
$$N_{xy} = t[\ \overline{Q}_{16}\ \varepsilon_x^0/N + \overline{Q}_{22}\ \varepsilon_y^0/N + \overline{Q}_{26}\varepsilon_{xy}^0]$$
-----(1)

최적의 설계를 위해서는 와인딩 시에 섬유가 받는 힘을 최대로 하기 위해 일반적으로 축에 있어서 인장이나 압축에 있어서는 0°로 하는 것이 유리하고 비틀림에 대해서는 45°로 하는 것이 유리하지만 여러 가지 조건과 특성을 고려할 때 최적의 와인딩 각을 설정하는 것이 중요하다. 최적의 와인딩 각을 설정함으로서 재료절감 및 무게감소를 할 수 있다. 축에 작용하는 압축, 인장강도는 그 값이 전단응력에 비해 작으므로 식(1)에서 $\overline{\sigma}_x$, $\overline{\sigma}_y = 0$이라고 가정하였고, 결국 변형률 ε_x, ε_y는 변형률 ε_{xy}보다 작아 그 값을 무시할 수 있다. 그림 2은 직경과 직경비에 따른 축의 전단응

력을 나타내고 있다. 전단응력이 직경비(D0/D1)가 0.4이하일 때는 크게 변화가 없음을 알 수가 있다.

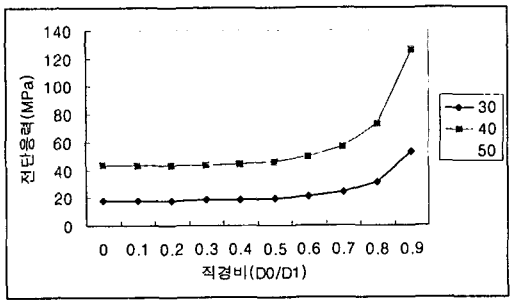

그림 2. 직경비에 따른 전단응력

여기서, 복합재료의 와인딩각도가 일정하므로 복합재료 축의 전단강도는 변형률과 전단강성계수($\overline{Q}_{66}$)에 의해서 변하게 된다. 따라서, 식 (1)에서 변형률과 응력의 관계에서 최적의 설계 조건을 얻을 수 있다. 표 1에 설계조건에 관한 사항이 나타난다. 전단변형률은 45°를 기준으로 대칭임을 알 수 있었고 90°에서 가장 큰 전단변형률을 나타내고 있다. 또한 전단탄성계수도 45°를 기준으로 대칭임을 알 수 있다. 그림 3에서 각도에 따른 전단변형률은 각도 40°과 60°사이에서 일정하고 각도 65°와 85°사이에 현저한 차이를 보이며 각도 90°에서는 변형률이 최대임을 알 수 있다.

여기서, 본 연구에서 제작하고자 하는 소형선박용 축재료인 단강재(SUS420)를 대체하기 위해서 직경을40mm로 하여 축을 제작하기로 하기로 하였다.

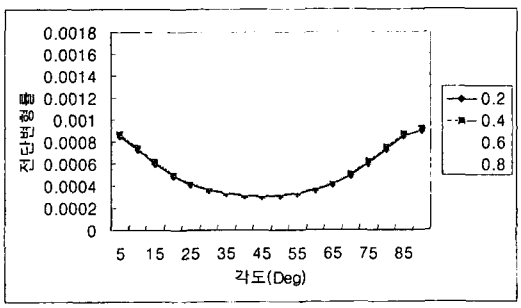

그림 3.각도와 직경비에 따른 전단변형률(ε^0_{xy}, D=40)

마력(PS)	196
회전수(RPM)	6000
Glass/Epoxy 복합재료의 섬유방향인장 영률(E_1)	42770 (MPa)
Glass/Epoxy 복합재료의 섬유방향인장 영률(E_2)	11720 (MPa)
복합재료의 Poisson's ration(v_{12})	0.27
복합재료의 전단영률(G_{12})	4130 (MPa)

표 1. 복합재료 축의 설계조건

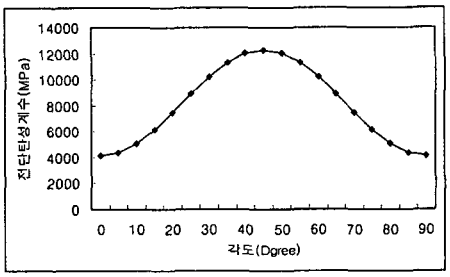

그림 4. 각도에 따른 전단탄성계수

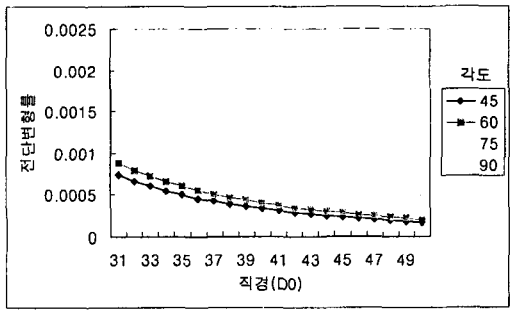

그림 5.직경과 각도에 따른 전단변형률(D/D1=0.4)

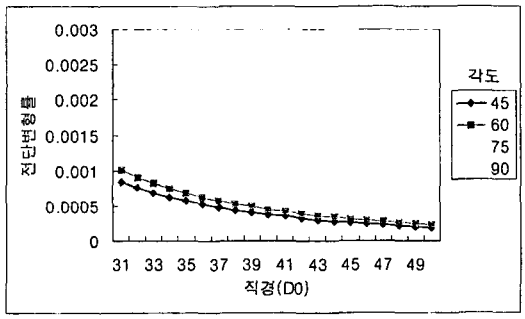

그림 6.직경과 각도에 따른 전단변형률(D/D1=0.6)

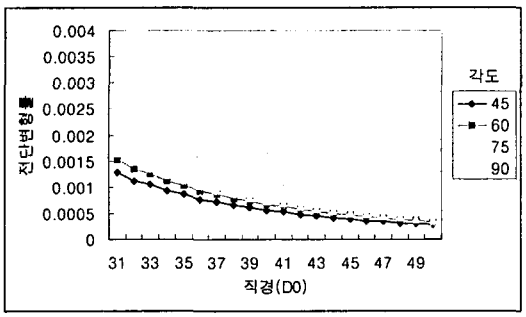

그림 7.직경과 각도에 따른 전단변형률(D/D1=0.8)

따라서 현재 제작하고자 하는 축의 직경을 고려할 때 재료의 절감과 허용강도를 생각하여 알맞은 값을 선정하는 것이 유리하다.

3. 결 론

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, 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 설계가 가능하며, 섬유 배열이 60°이하가 되는 경우에서도 변형률의 변화가 크게 없음을 알 수 있다. 이후, 실제 축을 제작하여 여러 가지 시험법을 통해 설계되어진 값과 시험한 결과를 비교 분석할 필요가 있다.

참고문헌

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

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

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

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

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

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

7.Development of Composite transmission shaft for Aircraft , 한국과학기술처

8.船舶動力傳達裝置 , 전효중, 1986 pp.1～20

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

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

11.Geometrical Design of Composite Cylindrical Characterization Specimens, N.J. Pagano and J.M.Whitney, J. Composite Materials, Vol.4, 1970, pp360

12.Filament winding ,its development manufacture application, and design, John wiley and Sons IncRosto, D.V and Grove, C.S pp.216～248

13.FRP 構造强度 設計の 實際, 植村益次, 安宅信行, 福田 博

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