

가변추진기 추진축계시스템의 설계 (제 I 보 : 외형설계)

· 김 기인*, 전 효중**, 박 명규**, 김 정렬**

Design of Propulsion Shafting System for Controllable Pitch Propeller (I : Latout Design with Sizing)

Ki-In Kim, Hyo-Jung Jeon, Myung-Gyu Park, Jeong-Ryul Kim

* 두산중공업(주) 특수사업부

** 한국해양대학교

Abstract : This study is focused on the layout design with sizing for the main propulsion shafting with controllable pitch propeller system. For appropriate design and successful manufacturing of controllable pitch propeller system, it is based on specifications to be required from the customer as well as the stresses calculation and analysis of main propulsion system for hollow shafting. And it must be performed according to the U.S military specifications MIL-STD-2189(SH) with drawing of NAVSHIPS 803-2145807, and also the stress analysis by applying safety factor. The results are as follows :

1. For the main propulsion system with controllable pitch propeller, it is designed the following items : propeller diameter, hub diameter, dimensions of oil distribution or actuating unit based on shaft mounting type, diameters of propeller and intermediate shaft, dimension of split muff coupling, coupling flange thickness and of coupling bolt diameter.
2. As the results, we can get complete our own design ability for the main propulsion shafting with controllable pitch propeller system with critical data which are necessary to establish shafting arrangement from the ship building companies.

Key words: CPP(Controllable Pitch Propeller, 가변추진기), Propulsion Shafting System(추진축계시스템), Stress Analysis(응력해석), Layout Design with Sizing(외형설계)

1. 서론

가변추진장치를 탑재한 선박의 추진축계 설계를 크게 두 가지로 나누면 추진시스템(축계+추진기)의 외형설계와 내형설계가 있다. 이 중에서 외형설계는 건조할 선박의 유형에 따른 추진축계 배열과 기본사양에 맞추어 추진시스템의 전반적인 규격과 치수를 정하는 것이고, 내형설계는 외형설계 기준에 가장 적합한 가변추진장치의 적용에 따른 성능설계를 말한다. 여기서는 추진시스템

설계 중 우선 외형설계에 초점을 두고자 한다.

가변추진기를 탑재한 선박의 추진시스템 설계의 궁극적인 목표는 각각의 구성품에 미치는 적정응력을 계산하고, 각 선급이나 특수사양에서 요구되는 안전계수를 적용하여 여기에 맞추어 적정 치수를 결정하여 추진시스템을 설계하는 것이다. 그리고 일반 선급에서도 추진축계 설계에 있어서는 일반 요구사항과 꼭 필요한 상세 요구사항들이 주어져 있다. 특히 여기서 다루고자 하는 가변추진기용 축계는 그 소요가 군용함정에 약 90%,

가변추진기 추진축계시스템의 설계 (제 I 보 : 외형설계)

민수분야에 약 10% 정도이다. 따라서 여기서는 지금까지 외국 제작사에 의존해 오던 축계시스템의 설계를 그 동안의 경험을 바탕으로 자체적으로 설계하였다. 또한 소요장비의 특성상 설계기준을 미 군사규격[MIL-STD-2189(SH)]에 맞추었으며, 현재 공급되어 가동되고 있는 기존 함정을 근거로 설계검정을 한 결과 신뢰성이 있음을 확인하였다.

2. 추진축계 응력계산

추진시스템의 외형설계를 위해서는 우선 다음과 같은 응력을 먼저 계산해야 한다.

2.1 정응력(steady stress)

(1) 전단응력

$$\tau_s = \frac{1.2 Q d_o}{2 I_p} \tag{2.1}$$

여기서, Q: 수출력토크

$$Q = \frac{75 \times 1000 \times 60 \times \text{SHP}}{2\pi N}$$

I_p : 축의 극관성모멘트

$$I_p = \frac{\pi(d_o^4 - d_i^4)}{32}$$

d_o : 중공축 외경, d_i : 중공축 내경, SHP: 축마력, N: 회전수이다.

(2) 압축응력

$$\sigma_c = \frac{4T}{\pi d_o^3} \tag{2.2}$$

여기서, T는 축력으로서

$$T = \frac{75 \times 60 \times \text{EHP}}{1852 \times \frac{V}{60} \times (1 - t)}$$

와 같고, EHP: 유효마력, V: 선속 [knot], t: 추력감소계수이다.

(3) 합성 정응력

$$\sigma_s = \sqrt{\tau_s^2 + 4\sigma_c^2} \tag{2.3}$$

2.1 동응력(alternating stress)

(1) 굽힘응력

$$\sigma_B = \frac{W_P d_o}{I} \tag{2.4}$$

여기서, W_P 는 프로펠러 무게이며, I는 축의 관성모멘트로서

$$I = \frac{\pi(d_o^4 - d_i^4)}{64}$$

이며, 이 응력은 최대 허용범위인 4.22 kgf/mm² 이내에 있어야 된다.

(2) 비틀림진동응력

$$\tau_D = 0.05 \tau_s \tag{2.5}$$

(3) 합성 동응력

$$\sigma_D = \sqrt{K_b^2 \sigma_B^2 + 4 K_i^2 \tau_D^2} \tag{2.6}$$

2.3 안전계수(safety factor)

안전계수 n은 다음 식으로 계산하는데, 함정의 경우는 최소한 2.0 이상을 유지하여야 한다.

$$\frac{1}{n} = \frac{\sigma_s}{\sigma_{yp}} + \frac{\sigma_D}{\sigma_{max}} \tag{2.7}$$

여기서, σ_{yp} 는 축 재료의 항복점응력이고, σ_{max} 는 피로한도(fatigue limit)이다.

3. 추진시스템 설계

3.1 추진시스템설계를 위한 기본사항

건조할 선박형태에 따라 가장 적합한 추진시스템을 설계하기 위하여 조선소 및 고객으로부터 다음과 같은 자료를 입수하여 설계에 적용해야 한다.

- 선체 : 유형, 기본치수, 선속, 반류계수 등
- 엔진 : type(디젤엔진 또는 증기터빈), 출력 및 실린더 수 등의 상세사양
- 추진기 : 프로펠러 수(단축 또는 쌍축) 등
- 축계 : 길이
 - 감속기 또는 플라이휠에서 후부격벽까지의 거리
 - 후부격벽에서 프로펠러까지의 거리
- 적용선급 또는 ice class 적용여부
- 기관실 및 선미축의 배열에 대한 도면 등

3.2 치수계산

(1) 프로펠러 직경

프로펠러 직경을 산출하기 위하여 우선 다음 식을 이용하여 프로펠러 직경에 대한 계수를 구한다^[4].

$$C_{DP} = \frac{7 DHP}{N^2 V_a} \quad (3.1)$$

여기서, DHP: 전달마력 (BHP), N: 프로펠러 회전수 (rpm), V_a : 프로펠러 전진속도 (knot) 이며,

$$V_a = \frac{V(100-w)}{100}$$

이고, V: 선박 속도 (knot), w: 반류계수 (%)이다. Fig. 1은 상기 계수에 대한 프로펠러 직경을 산출하는 도표이다.

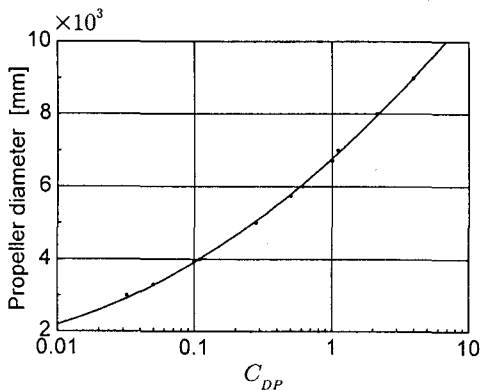


Fig. 1 Propeller diameter versus coefficient

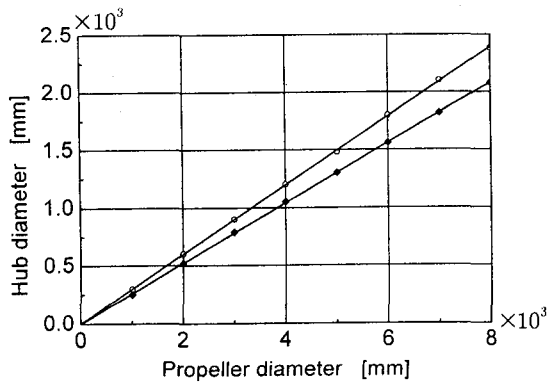


Fig. 2 Hub diameter versus propeller diameter

(2) 허브 치수

Fig. 2는 프로펠러 직경에 대한 허브 치수를 구하는 도표로서, 곡선 A는 허브 유형 중에서 칼라 베어링형에 대한 것이고, 곡선 B는 트리니언 베어링형에 대한 허브 치수이다.

Fig. 3은 허브 직경에 대한 허브 외형치수 관계를 현재 전 세계에서 가동되고 있는 가변추진기의 허브 외형치수를 실조사하여 백분율(%)로 나타낸 것이다.

(3) 축상설치형 유압분배기 또는 유압작동기 산출

Fig. 4는 선급규정에 의거 축상설치형의 유압분배기 또는 유압작동기와 중간축 최소직경을 산출하기 위한 그림이다.

(5) 중간축 직경

중간축 직경은 다음 식으로 계산한다.

$$d_{INT} = Fk \left(\frac{BHP}{N} \times \frac{a}{\sigma_u + b} \times r_d \right)^{1/3} \quad (3.2)$$

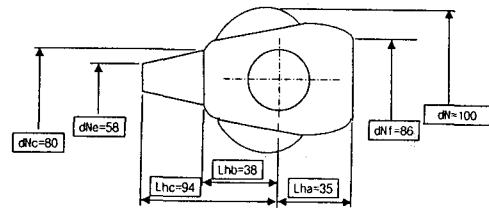


Fig. 3 Principal dimensions (%) of hub outline

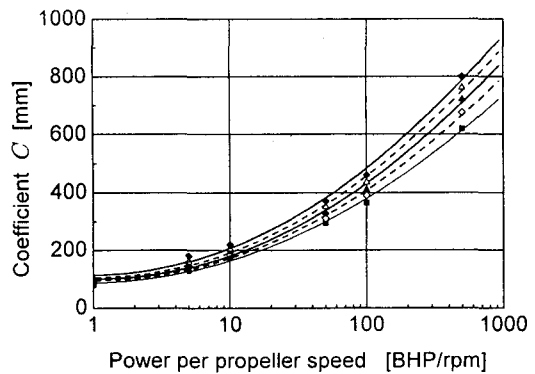


Fig. 4 Coefficients for calculating diameter of intermediate shaft according to Class Society's regulation

가변추진기 추진축계시스템의 설계 (제 I 보 : 외형설계)

여기서,

- F : 엔진 유형에 따른 계수(선급규정)
- k : 중간축형태에 따른 계수(선급규정)
- BHP: 최대연속출력
- N : 프로펠러 회전수
- a : 계수(선급규정)
- b : 계수(선급규정)
- σ_u : 축 최소인장강도(선급규정)

$$m = \frac{1}{1 - \left(\frac{d_i}{d_o}\right)^4}$$

- (5) 프로펠러 축 직경
프로펠러 축 직경 d_{SP} 는 일반적으로 중간축 직경의 약 120% 이상을 취한다. 즉,
$$d_{SP} = 1.22 \times d_{INT} \quad (3.3)$$

- (6) 분리형 머프 커플링 치수
일반적으로 이 형태의 커플링은 축 직경이 200 mm 이하인 축계에 적용되며, Fig. 5는 분리형 머프 커플링의 토크, 접선력 및 볼트에 미치는 힘의 방향을 보여주고 있다.

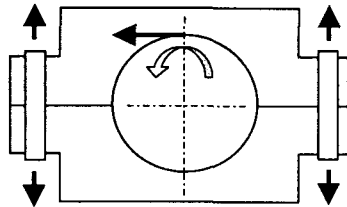


Fig. 5 Force directions on the separated Muff Coupling

- ① 토크
$$Q = \frac{1000 \times 60 \times A \times \text{BHP}}{2\pi N} \quad [\text{kgf} \cdot \text{mm}]$$
- ② 축 접선력
$$F_t = \frac{2Q}{D} \quad [\text{kgf}]$$
- ③ 볼트 1개당 전달되는 힘

Table Number of bolt versus shaft diameter

축 직경 d_o	50	100	150	200	250
볼트 수 z	4	6	8	10	12

$$F_B = \frac{F_t}{\mu z} \quad [\text{kgf}]$$

여기서, μ : 마찰계수, z : 볼트 수 이다.

- ④ 분리형 머프 커플링 볼트의 직경

$$d_{MC} = \left(\frac{4F_B}{\pi \sigma_{BU}}\right)^{1/2}$$

- ⑤ 조립완료후 볼트의 신장치수

$$\delta = F_B l A E$$

여기서, l : 볼트 총길이, A : 볼트 단면적, E : 볼트 재료의 종탄성계수 이다.

..... (3.4)

- (7) 추진축계 플랜지 두께

- ① 중간축 플랜지 두께
$$t_{INT} = \min 0.20 \times d_{INT} \quad [\text{mm}] \quad (3.5)$$

- ② 프로펠러 축 플랜지 두께
$$t_{SP} = \min 0.25 \times d_{SP} \quad [\text{mm}]$$

여기서, d_{INT} : 중간축 직경, d_{SP} : 프로펠러 축 직경 이다.

- (8) 커플링 볼트 직경

커플링 플랜지용 볼트의 직경은 다음 수식에서 구한 치수보다 적지 않아야 된다.

$$d_{CB} = 0.65 \times \left\{ \frac{d_{INT}^2 (\sigma_U + b)}{z d_c \sigma_{BU}} \right\}^{1/2} \quad (3.6)$$

여기서,

- d_{CB} : 커플링 볼트의 직경
- d_{INT} : 중간축 직경
- d_c : 볼트 원주직경
- d_{BU} : 볼트 재료의 최소 인장강도

$$\sigma_u < \sigma_{BU} < 1.7\sigma_u$$

커플링 볼트의 재료는 연신율 16% 이상의 강재 이어야 하고, 일반적인 볼트의 응력은 볼트 재료의 항복강도 70%를 초과하지 않아야 한다. 그리고 최악의 부하상태인 최대 토크하의 전단응력은 볼트 재료 최소규정 인장강도의 50%보다 적어야 한다.

4. 결론

전 세계의 가변추진기 제작사는 대부분 각자 독자적인 설계에 바탕을 두고 특성화

된 가변추진장치를 전 세계적으로 공급하여 오고 있다. 특히 가변추진기는 민수선박보다 대부분 특수선박에 적용되어 오고 있으며 고객이 요구하는 가변추진장치의 최적설계와 성공적인 제작을 위하여 특수목적에 보다 비중을 두어 미 군사규격 MIL-STD-2189(SH)와 관련도면 NAV-SHIPS 803-2145807의 설계기준에 따라 추진축계에 대해 응력을 해석하고, 기초자료를 참고하여 다음과 같은 가변추진시스템을 설계하였다.

- 추진기 직경
- 허브 직경
- 추진축과 중간축 직경
- 분리형 머프커플링 치수
- 추진축 및 중간축 커플링 플랜지 치수
- 커플링 플랜지 볼트 치수

지금까지 본 설계방식으로 적용된 예는 없으나, 기존의 전 세계적인 가변추진기 전문제작사의 설계자료와 비교하여 오차범위 내에서 이론적인 검정이 완료된 상태로서 향후 국내 가변추진기 탑재선박에 점차 적용하여 최적상태의 설계능력을 확보하고자 한다.

참고문헌

- [1] 전효중, 軸系裝置와 프로펠러, 대진출판사, pp. 170~179, 256~271, 2000.
- [2] 전효중, 船舶動力傳達裝置, 태화출판사, pp. 370~384, 1986.
- [3] Jan Tornblad, Marine Propellers and Propulsion of Ships, Marine Lab. KaMeWa AB Sweden, pp. 11-1~11-6, 1987.
- [4] Fritz Schanz, Paper E2 Controllable pitch propellers, Escher Wyss GmbH, Ravensburg, Germany, pp. 1-E2-1~1-E2-11, 1981.
- [5] Roy L. Harrington, Marine Engineering, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 601 Pavonia Av, Jersey City, N.J. 07306. pp. 353~408, 1992.
- [6] Lloyd's Register of Shipping, Main Propulsion Shafting, Propeller, Part 5, Chapter 6~7, Sec. 1~3, 4, pp. 1~5.
- [7] Bureau Veritas, Rules and Regulations for the Classification of Ships, Part III Machinery Systems, Chapter 17 Propelling and Auxiliary Machinery, Courbevoie-France, pp. 41~59, 1996.
- [8] DNV, Part 4, Chapter 2, Propulsion and Auxiliary Machinery, Sec. 6-7, pp. 28~39, 1992.
- [9] ABS Rules, Machinery Equipment and System, Part 4 Sec.7, Propellers and Propulsion Shafting, pp. 4/7.1~4/7.35, 2000.
- [10] J. S. Carlton, Marine Propellers and Propulsion, Butterworth Heinemann Ltd, Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP, Chapter 6, Propeller Performance Characteristics, pp. 83~127, 1994.
- [11] T. P. O'Brien Cgia, Amrina, The Design of Marine Screw Propellers, Hutchinson Scientific & Technical, London, Chapter 2, Model Experiments and Propulsion Factors, pp. 38~54, 1962.
- [12] 김기인, 전효중, 김정렬, 가변추진 장치의 이해, 한국박용기관학회지, Vol. 25, No. 5, pp. 974~985, 2001.
- [13] MIL-STD-2189(SH), Design Methods for Naval Shipboard Systems, Sec. 243-1, Part 1, Propulsion Shafting, pp. 1~94, 1994.
- [14] NAVSHIPS 803-2145807, Standard Drawing of Propulsion Shafting & Components, pp. 1C~9C, 1988.
- [15] Edward V. Lewis, Principles of Naval Architecture, Volume II. Resistance, Propulsion and Vibration, The Society of Naval Architecture and Marine Engineering, Jersey City, NJ, U.S.A, pp. 127~164, 1988.
- [16] Myer Kutz, Mechanical Engineers' Hand Book, Second Edition, A Wiley-Interscience Publication, pp. 191~245, Dec. 1997.
- [17] Korean Register of Shipping, 한국선급규칙, 제5편, 3장 축계 및 동력전달장치, pp. 1~5, 1999.

부록 가변추진시스템 설계치

최대연속사용출력(maximum continuous rating in BHP)	Ne	6,610 ps
프로펠러속도(propeller speed)	n	298 rpm
선박속력(ship speed)	Va	22 knot
반류계수(wake coefficient)	w	0.04 constant
프로펠러 전진속도(speed of advance at propeller)	Ve	22 knot
프로펠러 직경(propeller diameter)	Dp	2,717 mm
프로펠러 허브규격(propeller hub size)	dN	760 mm
유압분배기 또는 작동기 규격(based on shaft mounting type)	Us	190 Size
프로펠러축 직경(propeller shaft diameter)	dp	280 mm
중간축 직경(line shaft diameter)	d	229 mm

