
 論 文

大韓造船學會論文集
 第 35 卷 第 1 號 1998年 2月
 Journal of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol. 35, No. 1, February 1998

박용 프로펠라의 스큐각 변화에 따른 피로강도해석

김발영*, 이주성**

Fatigue Strength Analysis of Marine Propeller Blade to Change in Skew Angle

by

Bal-Young Kim* and Joo-Sung Lee**

요 약

선미의 불균일유동장에서 작동하는 박용 프로펠라의 구조적 안전을 평가하는 강도해석 프로그램을 개발하였다. 이 논문은 여러 가지 선종에 대하여 실선자료를 기초로 하여 선속과 스큐각의 관계를 제시하였고, 대형 고속 컨테이너선박의 초기설계시 강도측면에서 스큐각의 최적화를 위하여 여러 가지 스큐각에 대한 프로펠라 강도해석을 수행하였다.

프로펠라 날개는 양력면이론으로부터 계산된 표면압력과 원심력을 받고 있다. 선박의 전진 및 후진시의 프로펠라날개의 구조응답을 구하기 위하여 정적 구조해석을 수행해서 그 결과를 기초로 피로강도를 평가하였다.

Abstract

This paper deals with the evaluation of structural safety to fatigue strength of marine propeller blades having high skew angle and operating in irregular wake field. The determination of the optimum skew angle of a propeller blade is one of the important task at the initial design stage especially in the case of high speed vessel such as container ships. A computer program system has been developed to evaluate the structural safety to fatigue strength and has been applied to several propeller blades with varying skew angle within a

발 표 : 1996년도 대한조선학회 춘계연구발표회('96. 4. 18)

접수일자 : 1996년 5월 31일, 재접수일자 : 1998년 1월 26일

*현대중공업(주) 엔진설계부

**정회원, 울산대학교 조선해양공학부

wide range. In the parametric study the pressure acting on the blade surface is calculated using the non-linear lifting surface theory and the structural analysis is performed using MSC/NASTRAN. The relationship between skew angle and structural safety to fatigue strength is investigated and this paper ends with describing the optimum skew angle of a propeller blade.

1. 서론

프로펠라의 설계에 있어서 고 스큐각의 채택은 프로펠라의 추진 효율성 향상, 캐비테이션 현상의 감소 및 프로펠라 유기 변동 압력의 감소라는 이유로 현재 널리 적용되고 있다. 이러한 추세는 종전의 프로펠라 설계와는 다른 보다 차원 높은 설계 기술이 요구되며, 특히 스큐각의 증가는 날개면에 작용하는 짝 모멘트의 증가로 익면상에 응력 집중 현상을 유발하게 되므로 프로펠라의 구조적 안전성에 문제를 야기할 수 있어서 구조적 안전성이 보장된 설계를 꾀하여야 한다.

일반적으로 프로펠라의 강도해석 절차는 먼저 프로펠라가 선미의 불균일한 유동장내에서 운전중일 때 0 deg.에서 360 deg. 까지 일회전 하는 동안의 각 위치에서 프로펠라에 작용하는 유체역학적 하중과 평균반류상태에서의 유체역학적 하중을 구한후 각각의 하중조건에 대하여 구조해석을 수행하고, 그 결과를 기초로 피로강도를 평가하게 된다.

본 논문에서는 대형 고속 컨테이너선용 프로펠라에 대하여 최적의 스큐각을 선정하기 위하여 프로펠라가 선미의 불균일한 유동장 상태에서 회전할 때 스큐각의 변화에 따른 전진 및 후진시의 정적구조해석을 수행하였고, 그 결과를 기초로 피로수명을 기준으로 피로강도를 평가함으로써 프로펠라의 스큐각과 구조적 안전성 사이의 관계를 규명하였다.

2. 실적선 프로펠라의 선속과 스큐각의 관계

컨테이너선 등 대형 고속선에서는 고 스큐각 프

로펠라를 채택하는 것이 최근의 경향이다. 실적선 프로펠라 자료[1]를 토대로 회귀분석법을 거쳐서 선종별로 선속과 스큐각, θ (deg.)를 선속, v (knots)의 식으로 표현하면 경험식을 선종별로 나타내면 식(1)과 같다.

Container Ship :

$$\theta = 75.0 - 4.87v + 0.13 v^2$$

Bulk Carrier :

$$\theta = -77.91 - 13.13v + 0.43 v^2$$

Oil Tanker :

$$\theta = -828.89 - 113.40v + 3.77 v^2 \quad (1)$$

PCC/LPG Carrier :

$$\theta = 148.7 - 17.13v + 0.57 v^2$$

이들 관계식은 프로펠라의 초기 설계시 유용하게 이용될 수 있을 것이다. 한편, 고속 컨테이너선용 프로펠라에 있어서는 스큐각을 40deg. 까지 채택하는 경우도 있는데 유체 역학적 개선 효과가 있는 반면, 구조강도측면에서는 국부적인 응력집중현상으로 특히 피로강도에 대한 구조적 안전성 검토가 필요하다.

3. 연구의 해석 방법

3.1 개요

프로펠라의 스큐각 변화에 따른 피로 강도 변화 관계를 도출하고자 대형 컨테이너선용 프로펠라를 대상으로 모든 설계조건은 동일하게 하고 단지, 스큐각이 $\theta = 0, 20, 40, 60$ deg.인 4가지 경우에 대하여 비정상 양력면이론 (unsteady lifting

surface theory)에 의하여 날개 형상을 결정하였다. 대상 프로펠라의 형상은 Fig.1과 같다. 정적구조해석을 위하여 날개면에 작용하는 Unsteady Hydro-Dynamic Pressure는 비정상 양력면이론에 의거하여 기개발된 프로그램[2]을 사용하여 계산하였다.

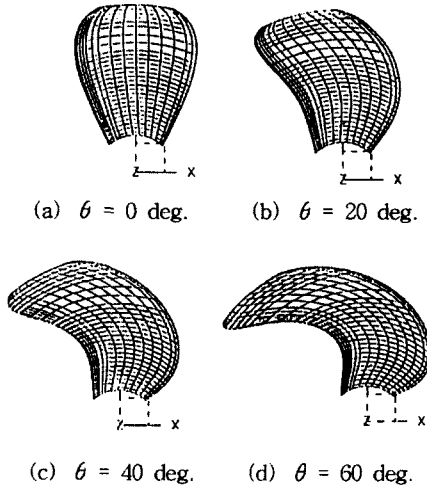


Fig.1 Propeller blade models for the present study

구조해석을 수행하기 위하여 3차원 20-절점 육면체요소로 기하학적 형상을 모델링할 수 있는 프로그램을 개발하여 사용하였으며, 양력면 이론에 의해 계산된 압력분포는 정적해석용 압력 모델링 프로그램을 사용하여 구조해석을 위한 입력 데이터 형태로 변환할 수 있도록 하였다. 구조해석을 위한 Solver는 MSC/NASTRAN을 사용하였고 Post-Processor는 I-DEAS를 사용하였다[3]. 본 연구에서 최적의 스쿠각 선정을 위해 다음의 과정을 거친다.

- (1) 프로펠라 날개의 형상설계
- (2) 유체역학적 하중 계산
- (3) 압력분포의 모델링
- (4) 기하학적 형상 모델링
- (5) 정적 구조해석
- (6) 피로강도 평가

한편, 본 연구를 위하여 개발된 프로펠라의 강도해석 시스템을 HD-PROSAP이라 하였으며, 이에 포함된 주요 프로그램은 다음과 같다.

- geometry modeling program
- pressure modeling program
- NASTRAN input data generation program
- stress evaluation program from NASTRAN output

3.2 모델링

3.2.1 압력모델링

구조해석은 정적해석을 수행하므로 하나의 요소에 대한 강성방정식의 구성은

$$[K_e] \{u_e\} = \{P_e\} \tag{2}$$

와 같다. 여기에서 $[K_e]$ 는 강성행렬이고, $\{P_e\}$ 와 $\{u_e\}$ 는 절점력과 절점변위이다. 한편, 프로펠라 날개는 면압과 원심력만을 받는 것으로 한다면 $\{P_e\}$ 는 식(3)으로 표시될 수 있다.

$$\begin{aligned} \{P_e\} &= p \int_S [H^t][n]dS + \rho\omega^2 \int_V [H^t][r]dV \\ &= \{P_{ep}\} + \{P_{ec}\} \end{aligned} \tag{3}$$

여기에서,
 $\{P_{ep}\}$ = load vector induced by surface pressure

$\{P_{ec}\}$ = load vector induced by centrifugal body force

ρ = mass density of blade material

ω = angular rotation velocity of propeller

$[r]$ = position vector in radial direction

$[n]$ = surface normal vector

p = pressure intensity

$[H^t]$ = element transformation matrix

식(3)에서 프로펠라 날개면에 작용하는 압력 $\{P_{ep}\}$ 는 양력면 이론으로부터 구한 단면의 각 Offset 위치에 대응되는 Camber Line 상의 압력으로 변환한 결과이고 이로부터 날개 전표면의 Offset 위치에 대응되는 압력분포가 구해진다. 임의의 유한요소의 표면에 작용하는 압력분포는 식(3)으로 구한 압력분포를 이용하고 Spline Curve Fitting 기법을 적용해서 식(4)로부터 구한다.

$$\{P_{ep}\} = \left(\frac{[\int \int S(P) dr dc]}{[\int \int dr dc]} \right) \quad (4)$$

여기에서 S(P)는 압력분포에 대한 Cubic Spline 함수이고, r과 c는 각각 반경방향과 Chord 방향을 표시한다.

3.2.2 형상모델링

Fig.2는 날개의 유한요소 모델링을 예시하는데, 전체좌표계에서 절점의 위치 $P(x_i, y_i, z_i)$ 는 프로펠라 날개의 설계자료를 사용하여 식(5)로 나타낼 수 있다.

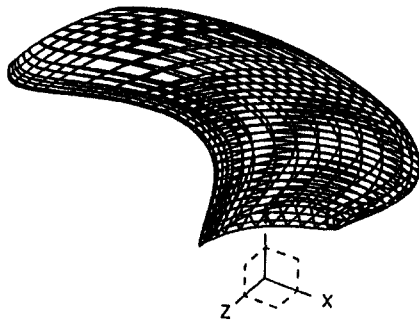


Fig.2 Example of generated mesh with 20-node isoparametric elements

$$\begin{aligned} x_i &= R \sin[(L - x) \cos \phi - y \sin \phi] / R \\ y_i &= R \cos[(L - x) \cos \phi - y \sin \phi] / R \\ z_i &= Lr - [(L - x) \sin \phi + y \cos \phi] \end{aligned} \quad (5)$$

여기에서 R은 단면의 반경 (radius of section), L_e 는 Generator Line에서 Leading Edge까지의 길이, L_r 은 Rake, ϕ 는 Pitch Angle이고, x와 y는 날개단면의 Offset 치수이다.

4. 해석시스템의 검증

본 연구에서 개발한 해석시스템의 타당성을 보이기 위하여 타 기관의 해석시스템과 비교하였다. 비교 기관별 해석방법과 검증 프로펠라의 주요특성은 Table 1과 Table 2와 같다. 검증 프로펠라에 대하여 평균반류 상태에서의 구조해석 결과, 최대 응력분포의 경향은 매우 일치하며 응력의 최대 오차는 약 3%로서 이는 양력면 이론에 의한 압력 계산의 차이로 판단된다. 각 기관별 응력분포는 Fig.3과 같다

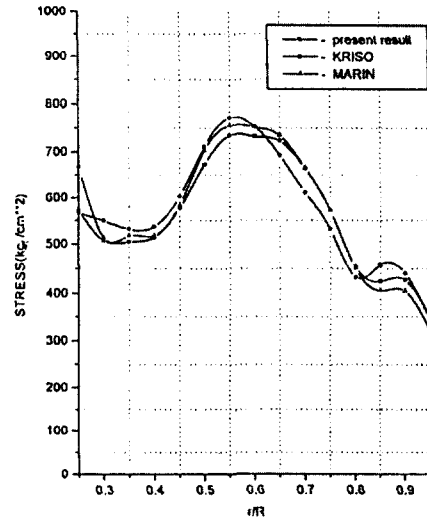


Fig.3 Comparison of maximum stress distribution of the verifying propeller

Table 1 Comparison of strength assessment criteria

comparison reference	present paper	KRISO[1]	MARIN[4]
analysis solver	MSC/NASTRAN	MSC/NASTRAN	MSC/NASTRAN
F.E. modelling	20-node solid	20-node solid	20-node solid
loading	distributed loading	distributed loading	distributed loading
strength assessment criteria	static/fatigue	static/dynamic	static

Table 2 Principal particulars of the verifying propeller

ship type	104K Tanker	pitch ratio (0.7r/r)	0.8233
ship speed (knots)	15.24	skew angle (deg.)	31.0
MCR (BHPxRPM)	12000 x 78	rake (deg.)	0.0
no. of blades	4	section type	NACA66
diameter (mm)	7350	thrust (kgf/cm ²)	1093937
expanded area ratio	0.427	material	NiAlBc

5. 해석시스템의 적용

프로펠라의 스쿠각 변화에 따른 최대 응력의 변화 관계를 도출하고자 실 제작 탑재된 대형 컨테이너선용의 4가지 대상 프로펠라 (Fig.1)에 대하여 강도 해석을 수행하였으며 주요 특성을 Table 3에 열거하였다.

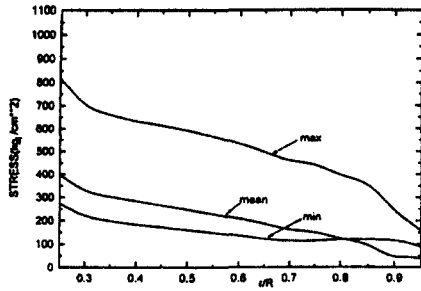
Table 3 Principal particulars of sample propellers

item	specification
ship type	4400 TEU container ship
ship speed	25.1 knots
MCR (BHP x RPM)	67080 x 104
no. of blades	6
diameter	8200 mm
mean pitch ratio	0.9953
rake angle	-4.18 deg.
thrust coefficient, K _T	0.2066
section type	NACA66 (a=0.8)

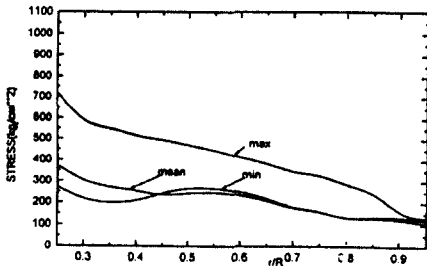
한편, 프로펠라 재질의 물성치는 아래와 같다.

- 0.2% proof stress : $\sigma_Y = 2150 \text{ kgf/cm}^2$
- tensile strength : $\sigma_t = 5200 \text{ kgf/cm}^2$
- 허용응력: 전진시 $\sigma_u = 450 \sim 520 \text{ kgf/cm}^2$
후진시 $\sigma_u = 1750 \text{ kgf/cm}^2$

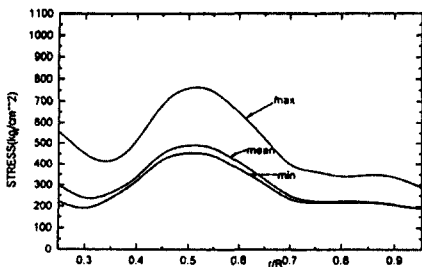
프로펠라가 전진 운전중일 때 최대 반류 위치 (회전각 0 deg. 위치)에서 최대 추력이 발생하고, 최소 반류 위치 (회전각 110 deg. 위치)에서 최소 추력이 발생하므로 이 두 위치에서 구조해석을 수행하고 또한 평균 반류상태에서도 구조해석을 수행하게 된다. 스쿠각에 따른 불균일 유동장 상태의 최대, 최소 및 평균 반류 위치에서 Face면에 발생하는 반경방향으로의 최대응력을 Fig.4에 표시하였고, 최대 추력시 반경방향으로의 응력분포를 Fig.5에 정리하였다. 이상의 결과로부터 스쿠각이 증가함에 따라 최대 응력이 발생하는 위치가 Root에서 0.5r/R~0.6r/R의 Trailing Edge로 이동함을 알 수 있다.



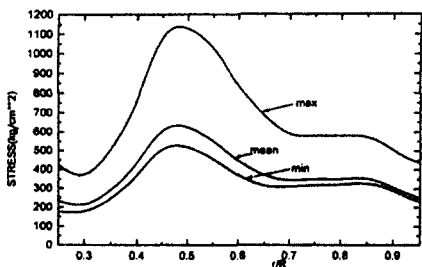
(a) $\theta = 0$ deg.



(b) $\theta = 20$ deg.



(c) $\theta = 40$ deg.



(d) $\theta = 60$ deg.

Fig.4 Maximum stress distribution on face surface subject to maximum, minimum and mean wake field

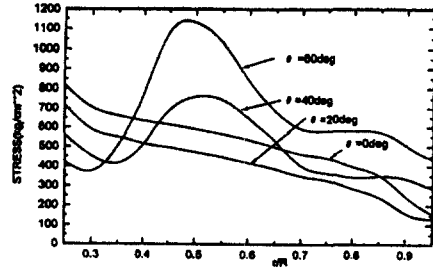


Fig.5 Comparison of maximum stress varying skew angle subject to maximum thrust

프로펠라가 후진 운전시에는 전진 운전시 보다 발생하는 응력이 일반적으로 높으므로 이에 대한 검토가 필요하다. 응력분포는 전진 운전시와 동일한 방법으로 구하면 되고, 허용응력이 대부분의 선급에서 0.2% proof stress의 70%로 규정하고 있다. Table 4는 스쿼각이 40 deg인 프로펠라에 대해 후진시 반경방향으로 최대응력의 분포를 정리한 것인데, 허용응력이 1750 kgf/cm²인 것과 비교해 보면 최대 응력이 허용응력을 초과하지 않는 것을 볼 수 있다.

이상의 구조해석결과를 종합적으로 보여주기 위해 스쿼각에 따라 전진과 후진 운전시 최대응력이 발생하는 r/R의 위치를 Table 5에 정리하였다. Table 5에서 보는 바와 같이 스쿼각의 증가에 따라 전진 운전시 최대응력의 발생위치가 Root에서 0.5r/R로 이동하며, 후진시에는 스쿼각과 상관없이 날개의 끝단부근에서 최대 응력이 발생함을 알 수 있다. 평균 반류에 대한 전진 및 후진시의 응력해석 결과로부터 스쿼각, θ 과 발생하는 최대응력, σ_{max} 사이의 관계식을 다음과 같이 도출하였고, 이들을 Fig.6에 보였다.

$$\text{전진시 } \sigma_{max} = 0.129\theta^2 - 4.457\theta + 437.07$$

$$\text{후진시 } \sigma_{max} = 0.329\theta^2 + 8.913\theta + 482.16 \quad (6)$$

전진시 최대응력은 스쿼각이 약 50 deg.이상이면 허용응력을 초과하게 되고, 후진 운전시는 스

Table 4 Maximum stress on back side in astern condition for $\theta = 40\text{deg.}$ (unit = kgf/cm^2)

r/R	0.25	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	0.95
σ_{\max}	356	301	465	754	907	1153	1284	1269	1356

Table 5 Maximum stress position and its magnitude (unit = kgf/cm^2)

skew angle (deg.)	ahead condition (on face side)		astern condition (on back side)	
	r/R	σ_{\max}	r/R	σ_{\max}
0	0.25	395	0.90	380
20	0.25	373	0.95	815
40	0.50	485	0.95	1356
60	0.50	632	0.95	2194

큐각 증가에 따라 급격한 응력 증가 현상이 나타나며 이 경우에도 스큐각 약 50 deg.에서 허용응력을 초과하게 된다.

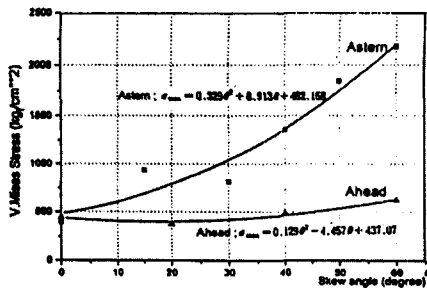


Fig.6 Relation between maximum stress and skew angle

6. 피로 강도 평가

본 연구에서 피로강도평가는 Goodman Diagram을 이용하였다. Fig.7은 대상 프로펠라재질의 피로 실험 결과와 50%, 90%, 99%의 신뢰도에 대한 p-S-N 곡선이다[5-7].

6.1 피로강도에 대한 안전계수

프로펠라 피로안전강도를 평가하는 Goodman 방법에 의한 피로한도선도의 대표적인 예로서 스

큐각 $\theta = 60 \text{ deg.}$ 인 경우에 대해 Fig.8에 예시하였다. 여기에서 피로수명은 p-S-N 곡선으로부터 90% 신뢰도에 대하여 선박의 수명 20년에 대응되는 5×10^8 cycles를 기준으로 하였다. Goodman Diagram에서 종축은 p-S-N 곡선으로부터 90% 신뢰도에 대한 피로수명에 대응되는 응력진폭이고, 이 점과 재질의 인장강도를 연결한 선 아래가 피로 안전영역이다. 한편 구조해석결과로부터 각 반경별로 평균반류시 최대응력을 횡축의 값으로 하고 최대 및 최소반류시 대응되는 반폭응력을 종축의 값으로 하였을 때 이 점이 피로한도선도의 선상에 놓이면 안전계수는 1.0이 된다. 스큐각이 $\theta = 0, 20, 40, 60 \text{ deg.}$ 인 각 경우에 대하여 피로한도에 대한 안전 계수는 1.11, 1.22, 1.65, 0.88로 각각 구하여졌다.

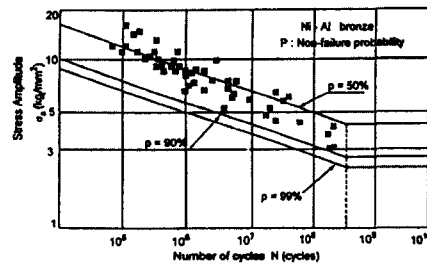


Fig.7 p-S-N curve of propeller bladematerial

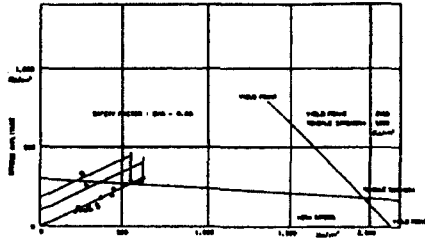


Fig.8 Example of modified Goodman stress diagram (θ = 60 deg.)

6.2 피로강도와 스큐각사이의 관계

Goodman diagram으로부터 피로한도에 대한 안전계수와 스큐각의 관계도를 Fig.9에 나타내었다. 이 그림에서 보듯이 스큐각이 약 50 deg. 이상이면 안전계수는 1.0이하가 되어 피로한도를 초과하게 된다. 이상의 결과로부터 Table 3의 사양을 갖는 프로펠라는 전진 및 후진의 모든 운전조건에서 강도상 허용용력을 만족하는 최대 스큐각은 약 50 deg.인 것을 알 수 있다.

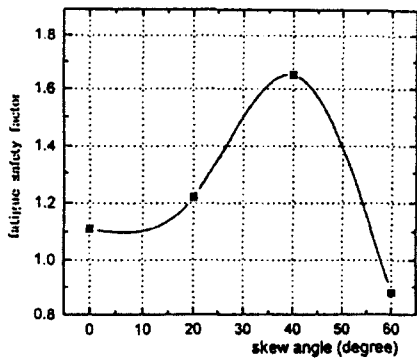


Fig.9 Safety factor vs skew angle with reference to fatigue strength

7. 결론

불균일 유동장내에서 작동하는 선박용 프로펠라의 구조해석에 있어서 종래의 간이식이나 각국의 선급 규정식으로는 고스큐각의 강도평가는 물론

피로강도평가에 적지않은 어려움이 있었다. 본 논문에서는 고스큐각은 물론 일반적인 형상의 프로펠라에 대해서도 구조해석을 효율적으로 수행할 수 있는 시스템을 개발하였고 이의 결과를 이용해서 피로강도를 평가하는 과정을 정립하였다.

본 논문의 적용결과에 의하면 선박의 수명 20년을 기준으로 피로수명을 5×10^8 cycles으로 보았을 때 스큐각이 대략 50 deg.이하 범위 내에서는 안전하나 그 이상의 경우 피로강도가 허용수준보다 낮아짐을 알 수 있었다. 전술한 바와같이, 특히 고스큐각의 채택이 일반화되는 최근의 프로펠라 설계 추세에 비추어 이 논문에서 제시한 프로펠라의 구조해석 및 피로강도 평가과정은 실무에서 매우 유용하게 이용될 수 있을 것이며, 또한 스큐각의 결정은 구조적 강도와 상반되는 관계를 갖고 있으므로 여기에서 제안한 스큐각과 최대용력사이의 관계를 이용하면 최적의 스큐각을 선정하는데에 참고가 될 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 김발영, 이광인, "프로펠라 실적 Data Base", 현대중공업 엔진설계부, 1995
- [2] 최군일, 이흥기, "프로펠라 설계 표준서" 현대중공업 선박해양연구소/엔진설계부, 1991
- [3] MSC, "MSC/NASTRAN Quick Reference Guide and Dynamic Analysis Manual", MSC, 1994
- [4] MARIN, "Stress Analysis Report for Hull No. H404 Propeller", MARIN Report, Aug. 1987
- [5] Denoh,S., Morimoto, K., Nakano, I. and Moriya, K., "Fatigue Strength in Marine Propeller Blades - part I : fatigue strength of propeller materials", 일본 박용 기관 학회지 제15권 제4호, 1981
- [6] Denoh,S., Morimoto, K., Nakano, I. and Moriya, K., "Fatigue Strength in Marine Propeller Blades - part II : allowable flaw size in propeller blades", 일본 박용 기관 학회지 제15권 제5호, 1981
- [7] 일본학술진흥회, "알루미늄 청동", 알루미늄 청동 위원회편저, 1968