資 料

Shaft Strut 設計에 對하여

趙 茂 雄

1. 序 論

배의 운동, 추진, 선회등을 목적으로 船體에 appendage를 부착시키는 것은 不可避하며 이 appendage에는 bilge keel, skeg, transom flap, spray strip, sonardome, stabilizer, shaft strut 및 bossing등이 있으나 本報에서는 shaft strut의 設計에 對해서만 언급하고자 한다.

일반적으로 propeller shaft line은 水線에 평행하게 하는 것이 추진효율에는 유리하나, 小型船의 경우 船型 및 機關室 위치의 제한등으로 평행하게 설치할 수 없는 경우가 많으며, 특히 小型高速艇의 경우에는 strut와 bossing이 船外로 돌출하게 됨으로 shaft strut의 設置가 불가피하게 된다.

Shaft strut의 設計는 다른 船殼構造設計와는 달리 rule上에 뚜렷한 언급이 없으며 이 shaft strut의 斷面抵抗, 流線調査, 伴流調査, 空洞現象調査 등의 실험과 최적위치 선정을 위한 실험등을 채용하는 경향인데, 本報에서는 주로 shaft strut의 强度計算에 對하여 檢討한 結果를 記述하였으며, 이 問題에 대하여 관심있는 設計者들에게 조금이라도 도움이 되어지길 期待한다.

2. Shaft Strut 概要

shaft strut는 水中에 노출된 propeller shaft와 propeller를 선체에 지지 시켜줄 필요가 있을 경우에 船體와 shaft 사이에 설치하는 bracket의 일종으로써 shaft와 propeller의 중량 및 strut 자체의 중량을 지탱할수 있어야 하며, propeller의 회전에 의한 가속도와, shaft의 진동으로 인하여 발생하는 기진력 및 각종 모멘트등에 충분히 견딜 수 있도록 설계, 제작되어야 한다.

3. Shaft Strut의 形狀

Shaft strut는 일반적으로 3가지의 형태로 구분한다. 즉, (1) simgle strut (2) radial-vee strut (3) tangential-vee strut로 분류하며 이들의 특징을 살펴보면 다음과 같다.

(1) **Single strut**

Fig.1에 表示한 것과 같이 shaft와 선체사이의 간격이 적은 경우에 채용가능하며, 충분한 강도를 지니는 재료를 사용하여야 한다. 그러나 이 strut는 cantilever에서와 같은 축진동, 선회 또는 cross flow에 의한 Magnus effect로 인하여 shaft에 發生하는 과대한 축하중과 이에 의한 축강성의 약화 등의 短點이 있으므로 가능한 한 피하는 것이 좋다.

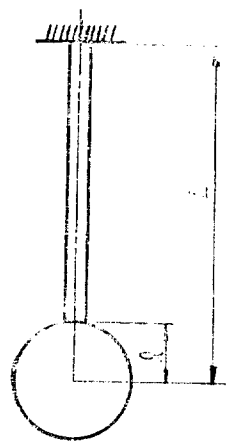


Fig. 1.

(2) **Radial-Vee strut**

Fig. 2에 表示한 것과 같이 strut의 일반적인 형태로써 shaft의 지지에는 양호한 형태이나 hub와 arm 사이의 각도선정에 주의가 필요하다.

(3) **Tangential-Vee strut**

Fig. 3에 表示한 것과 같이 arm을 많이 벌릴 필요가 있는 경우에는 hub에 대하여 arm을 接線方向으로 連結시켜야 한다. 이 arm에는 radial type과는 달리 transvers bending moment가 발생한다.

接受日字 : 1980年 4月 1日
* 正會員, 코리아나코바 造船工業(株)

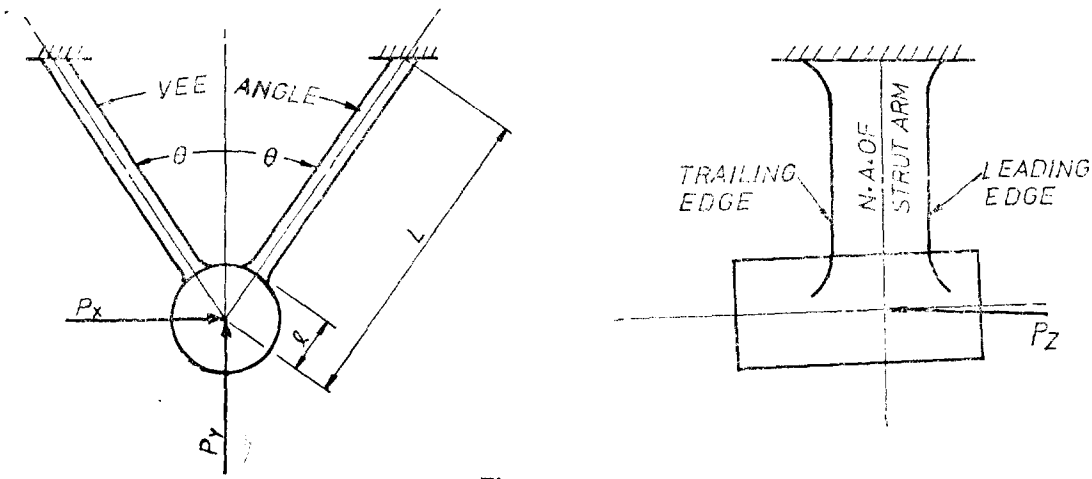


Fig. 2.

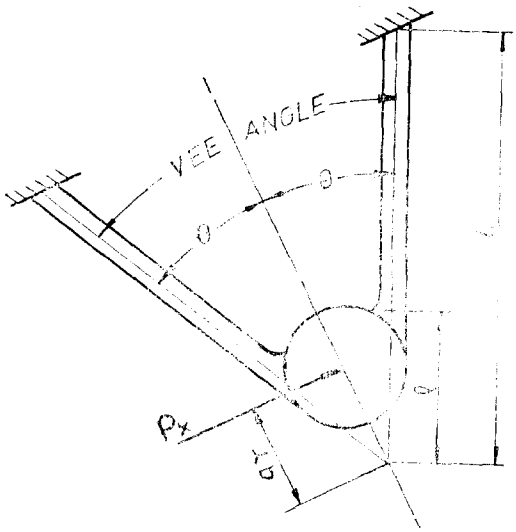


Fig. 3.

4. 設計時의 留意事項

設計過程에서 고려할 사항은 건조하는 선박의 특성과 임무에 따라 다르겠으나 일반적인 shaft strut 設計時에 特別히 留意해야 할 事項들은 다음과 같다.

(1) 전속항진의 경우 shaft bearing의 지지뿐 아니라 propeller의 회전에 의한 불균형한 원심력 및 선체운동에 의한 관성력등에 충분히 견딜수 있도록 설계하여야 하며, propeller의 역회전은 진동력을 크게 하므로 이에 대한 재질의 피로한계도 충분히 고려해야 한다.

(2) Shaft strut에 걸리는 外力중에 가장 큰 요인인 propeller blade 折損에 따른 급격한 하중 變化에 대하여 충분히 견딜수 있어야 하며, 이 荷重은 strut의 극한강도 결정에 요소가 된다.

(3) Propeller나 shafting에 대하여 예기되는 손상을 방지하기 위하여 안전도를 유지할 수 있는 적절한 여유를 주어 계산되어야 하며, 매우 나쁜 해상상태에서는 propeller에 작용하는 힘이 과대해 질 것이고 이에 따라 정상적인 상태를 초과하는 힘과 모멘트가 strut에 가해지는 것을 고려하여야 한다.

(4) Strut는 strut arm을 지나는 급류와 기타 요인에 의하여 생기는 부식과 같은 해로운 영향을 제한할 수 있는 구조로 설계하여야 한다.

(5) 유연하게 잘 다듬어진 表面이 고속정에서 가장 중요한 사항에 하나이며, strut의 방향에 대한 유선의 방향間의 角度는 저항의 見地에서 決定되어야하며, 이 값들은, 일반적으로 고속정에서는 model test에 의하여 선택되고, 底速船舶에서는 lines의 고찰로부터 直接 추정하는 것이 普通이다.

5. 設計過程

(1) Strut arm의 section 選定

Strut arm의 section은 arm의 chord(c)의 thickness(t)와의 比 t/c의 값에 따라 決定하는 것이 普通이다. 旣히 使用되고 있는 斷面形狀 및 種類를 列擧하면 다음과 같고, 이것을 Fig. 4에 圖示하였다.

i) DTMB의 EPH(Ellipse-Parabola-Hyperbola)Section

ii) U.S. Navy Standard ($t/c=1/6$)

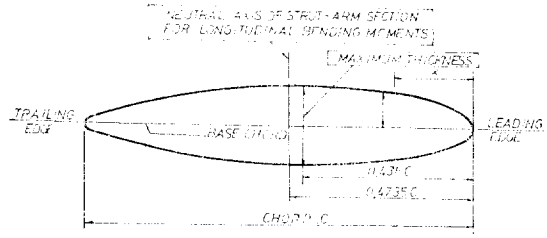
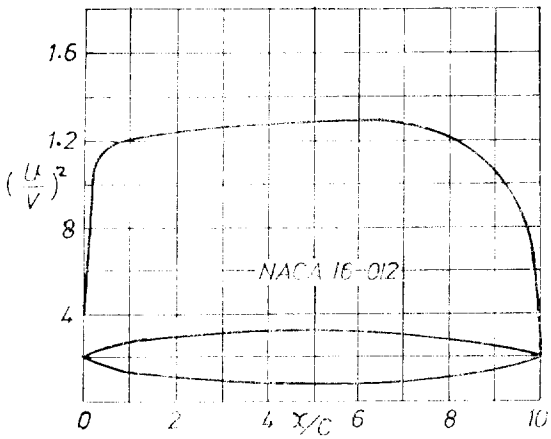


Fig. 4.



x (Percent)	y (Percent)	$(U/V)^2$	U/V	$\Delta U_a/V$
0	0	0	0	2.624
1.25	1.292	1.002	1.001	1.268
2.5	1.805	1.109	1.053	0.942
5.0	2.509	1.173	1.083	0.677
7.5	3.032	1.197	1.004	0.551
10	3.457	1.208	1.099	0.473
15	4.135	1.223	1.106	0.378
20	4.664	1.237	1.112	0.319
30	5.417	1.257	1.121	0.245
40	5.855	1.271	1.128	0.197
50	6.000	1.286	1.134	0.161
60	5.835	1.293	1.137	0.131
70	5.269	1.275	1.129	0.102
80	4.109	1.203	1.097	0.075
90	2.517	1.051	1.025	0.015
95	1.415	0.908	0.953	0.027
100	0.120	0	0	0

radius: 0.703 per cent

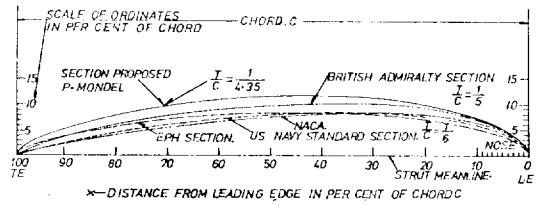
Fig. 5. NACA 16-012 basic thickness form

iii) British admiralty section ($t/c=1/5$)

iv) P. Mondel이 제안한 section ($t/c=1/4.25$)

v) NACA에서 제안한 각종 section(당사에서 建造한 고속정에서는 Fig. 5에 表示한 것과 같은 NACA 16~012의 斷面形狀을 사용한 실적이 있다.)

i)의 EPH 단면의 방정식은 다음과 같으며



x/c	y/t	x/c	y/t	x/c	y/t
.01	.1064	.35	.4902	.75	.3705
.025	.1669	.40	.4983	.80	.3260
.05	.2325	.45	.4997	.85	.2749
.10	.3186	.50	.4946	.90	.2170
.15	.3774	.55	.4830	.95	.1480
.20	.4204	.60	.4647	.975	.1027
.25	.4522	.65	.4399	.99	.0642
.30	.4750	.70	.4085		

Fig. 6.

$$\text{Ellipse: } \left(1-\frac{x/c}{0.43613}\right)^2+4\left(\frac{y}{t}\right)^2=1 \quad \cdots\cdots(1)$$

$$0<x/c<0.43613$$

$$\text{Parabola: } \frac{1}{2}\left(\frac{x/c}{0.43613}-1\right)^2+2\left(\frac{y}{t}\right)=1 \quad \cdots\cdots(2)$$

$$0.43613<x/c<0.87226.$$

$$\text{Hyperbola: } \left(1+\frac{1-x/c}{0.30839}\right)^2-16\left(\frac{y}{t}\right)^2=1 \quad \cdots\cdots(3)$$

$$0.87226<x/c<1$$

이단면 off-set는 Fig. 6과 같다.

(2) Arm이 Vee型인 경우

Arm 사이의 각도는 propeller shaft의 위치와 船型 등을 고려하여 결정하며 radial-vee型인 경우에 그 사이각이 작으면 hull 근처의 arm의 간격이 줄어들어 block effect가 발생하며, 이를 막기 위하여 hub의 최대직경과 같은 원을 arm 사이에 그릴때 양쪽 arm의 내면이 hub에 접하게 하도록 추천하기도 하나 상용되는 각도는 65°이상으로 한다.

(3) Shaft strut의 强度計算式

Shaft strut에 걸리는 外力, 1個의 propeller blade 질손에 따른 遠心力, 推力에 의하여 blade에 걸리는 横方向의 分擔力, 및 shaft moment 등을 결정하는데에는 다음과 같은 式들이 쓰이고 있으며, 이 式들을 radial-vee strut, tangential-vee strut 및 single strut의 强度計算에 應用한다.

i) propeller center line에 걸리는 원심력 및 불균형

추력에 의한 모멘트를 M_1이라고 하면

$$M_1=0.0035\ D_p\ [W_pA_p\ (N/100)^2+3H/V] \cdots\cdots(4)$$

여기서

D_p=propeller 직경(inch)

W_p=propeller weight (Kips)

A_p=propeller 날개끝에서 arm의 중성축까지 Shaft center line에 평행하게 잰거리(inch)

N=full power때의 shaft RPM

H=軸에 대한 SHP

V=max speed of ship(Rnots)

ii) Shaft bending strength에 관련되는 모멘트를 M_2라고 하면

$$M_2=0.3\ Z_s\ Fy_s \cdots\cdots(5)$$

여기서

Z_s=Section modulus of shaft (in^3)

Fy_s=Tensile yield strength for shaft (ksi)

iii) Radial strut에 관계되는, shaft의 bending strength의 하중을 P_3이라고 하면

$$P_3=Z_s\ Fy_s/D_s \cdots\cdots(6)$$

여기서

D_s=shaft의 外徑(inch)

iv) Tangential strut에 관계되는 propeller 및 shaft의 중량에 관계되는 하중을 P_4이라고 하면

$$P_4=10W_p+5W_sL_s \cdots\cdots(7)$$

여기서

W_s=Unit weight of shaft (kips/inch)

L_s=bearing 사이의 shaft의 길이(inch)

v) Intermediate strut에 걸리는 모멘트를 M_5이라고 하면

$$M_5=0.12\ Z_s\cdot Fy_s \cdots\cdots(8)$$

vi) Intermediate strut를 Radial-Vee 형으로만 계대하였을 때의 하중을 P_6이라고 하면

$$P_6=0.6\ Z_s\cdot Fy_s/D_s \cdots\cdots(9)$$

vii) Intermediate strut를 tangential-vee 형으로만 계대하였을 때의 하중을 P_7이라고 하면

$$P_7=10W_s\cdot L_s \cdots\cdots(10)$$

(4) 强度計算의 實際

i) Radial-Vee strut

이 strut arm에 걸리는 모멘트 및 하중은 M_1, M_2, P_3이고, required longitudinal $SM(Z_L)$은 上記한 M_1및 M_2 중 큰 값을 택한다. 즉

$$Z_L=K_6\ M/F_y$$

여기에서

$$K=\sqrt{\left(\frac{K_5}{\sin\theta}\right)^2+\left(\frac{0.5}{\cos\theta}\right)^2} \cdots\cdots(11)$$

$$K_5=\frac{2-l/L-(l/L)^2}{4[1+l/L+(l/L)^2]} \cdots\cdots(12)$$

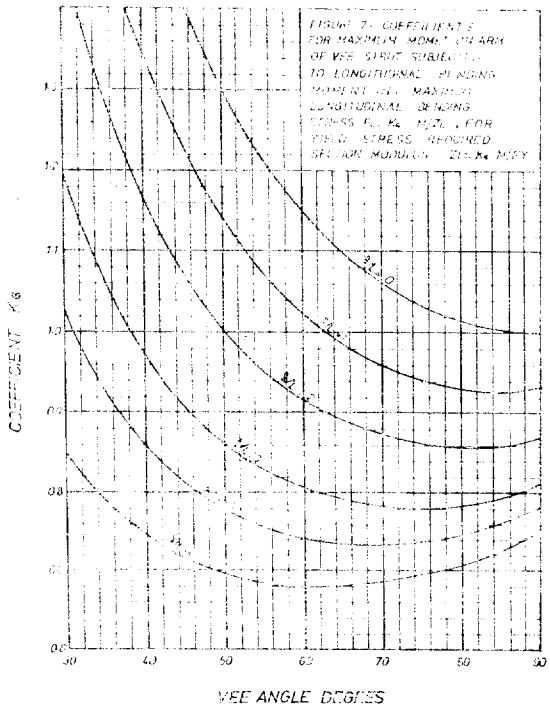


Fig. 7.

로 表示되며, 이 關係를 Fig. 7에 차아트化하였다.

여기에서 얻은 Z_L과 초기과정에서 가정한 Z_L을 비교하여 최대 bending moment에 대하여 안한가를 검토해야 한다.

또 이 arm에 걸리는 column force $P=F_c\ A\ \sin Z0$는 P_3보다 커야 한다.

EPH의 단면으로 가정하여 $C/L=5$인 경우에

$$Z_L=0.0842\ c^2t \cdots\cdots(13)$$

$A=0.747\ ct$로 구할수 있다.

진동에 대해서는

Shaft arm의 고유진동수를 F라고 하면

$$F=\frac{2890}{L^2}\sqrt{\frac{EI_T}{W}}\ (\text{cpm}) \cdots\cdots(14)$$

여기에서

E=Young 계수

I_T=횡단면의 base cord에 대한 2차 모멘트

W=arm의 단위 길이당 중량.

EPH 단면을 사용하여 STL인 경우에

E=29600 ksi

$I_T = 0.0449\ ct^3$

$W = 0.000212\ ct$ kips/in으로 계산한다.

수중에서의 振動數는

$$F_W = k\frac{t}{(L/100)}\text{cpm} \quad \cdots\cdots(15)$$

으로 계산되며 $c/t = 4, 5, 6$일때 $k = 580, 560, 540$으로 된다. 이렇게 얻어진 고유진동수 F는 propeller speed N (rpm)에 blade數를 곱한 것보다 20%이상 커야 한다. 만약 이를 만족치 않을 경우 engine full power에서 동조현상 또는 共鳴現象이 발생하여 선체에 불리한 영향을 미치게 한다.

ii) Tangential-Vee strut

이 strut arm에는 M_1, M_2의 모멘트와 P_4의 하중이 걸리며, required SM은 radial-vee strut에서와 같이 구하고 이 arm에서 중요시되는 transverse bending stress를 이용한 응력을 f_t이라고 하면

$$f_t = k_5\ p_4\ a_p/Z_T \quad \cdots\cdots(16)$$

따라서 $Z_T = k_5\ p_4\ a_p/f_T \quad \cdots\cdots(17)$

여기에서 얻은 Z_T와 가정단면에서 얻은 $Z_T = 0.049ct^3$을 비교하여 안전여부를 판정한다.

iii) Single strut

이 arm은 tang ential-vee strut의 경우와 같이 transverce strength가 주요 연구과제이다.

재질의 yield strength에 대하여 요구되는 단면계수 Z_T는

$$Z_T = p_7\ a_s/F_y \quad \cdots\cdots(18)$$

여기에서 a_s는 shaft center line에서 문제의 단면까지의 거리를 hull, midlength 및 hub에 대하여 각각 구하여, arm에 걸리는 torsional moment를 M_x이라면

$$M_x = \frac{4GI_T}{(L-l)[1+(4\gamma_c/c)^2]} \quad \cdots\cdots(19)$$

여기에서

G=관성 탄성계수

I_T=chord에 대한 관성모멘트

γ_c=관성반경

EPH의 斷面인 경우에는

$$M_x = Q\ I_T/L-l \quad \cdots\cdots(20)$$

로 表示되고, $G = 12\times10^6$ psi이고, $c/t = 3, 4, 5$일때 $Q = 43,300,\ 45,300,\ 46,200$이 된다.

Shaft의 stiffeness를 M'이라고 하면

$$M' = 4\ E_sI_s/L_s \quad \cdots\cdots(21)$$

따라서 strut가 받을 모멘트 M은

$$M = \frac{M_5\times M_x}{M_x+2M'} \quad \cdots\cdots(22)$$

이모멘트로 인하여 arm에 걸리는 shear stress를 f_x이라고 하면 $f_x = \frac{M}{B_2}Z_T$에서 구하여

$f_s = 0.6\ F_y$에 넣으면 torsional stress에 대하여 요구되는 Z_T는 $Z_T = \frac{M}{1.2\ Fy} \quad \cdots\cdots(23)$

(18)식은 bending만을 고려하였을 때의 요구하는 단면계수이고 (23)식은 torsional에 의거 요구되는 단면계수이다.

iv) 船殼構造와 strut arm과의 연결

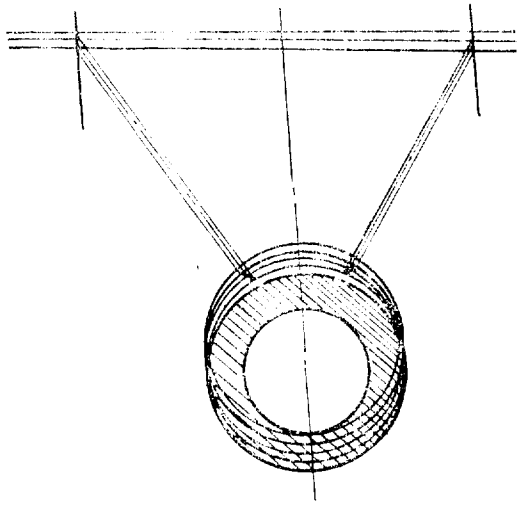


Fig. 8.

위와 같이 strength 추경과정을 거쳐 결정된 chord, thickness 및 section의 形狀을 결정하여 선체에 Fig. 8과 같은 모양으로 부착시킬때 이와 동등이상의 단면계수를 갖인 palm을 만들어 船殼의 縱 및 橫部材에 연결시킨다.

6. 結　　言

以上과 같이 shaft strut 設計에 대하여 斷片的인 윤곽 설명으로 그쳤으나, 극히 제한된 크기 형상 및 强度計算에 있어서 實務에 도움이 될 수 있기를 바라는 마음 간절하다.

參 考 文 獻

1. "*Design Data Sheet DDS 4301-2*"
2. "*Hydro Dynamic in Ship Design*", SNAME
3. "*The Theory of Wing Section*"
4. R. J. Roark; "*Formulas for Strees and Strain*"
5. S.R. Heller Jr.; "*Natural Frequencies of Shaft Struts*"