

선박의 추진기에서 발생하는 캐비테이션 현상이 진동에 미치는 영향

- A study on the Influence of Propeller Cavitation to the Vibration of ship -

현대선박해양연구소
책임연구원 이귀주

요 약

프로펠러 캐비테이션으로 인한 진동 관련 자료들의 상관 분석을 수행하여 실무적으로 사용하기에 간략한 방법을 도출하였다. 이 방법은 초기 설계 단계에서 모형시험을 거치지 않고 짧은 기간에 최소의 변수들을 이용하여 캐비테이션과 진동 문제를 평가할 수 있는 근사치를 제공할 수 있을 것이다.

I. 개 요

최근에 선박의 고속화와 대형화에 따라 진동과 소음이 문제가 되기 시작하였다. 또한 승무원의 소득수준 향상에 따른 고급화로 인하여 작업 조건과 승선감이 중요한 설계 변수로 작용하게 되었다.

선박의 진동은 거주구에서 안락성을 크게 악화시킬 뿐만 아니라 선박에 장착된 각종 파이프나 보조기기의 파손 또는 전자정밀기기의 고장 원인이 되고 극단적으로 클 경우에는 선체부재가 균열 및 파손되게 된다. 잠수함이나 함정 등에서는 선체진동 뿐만 아니라 수중소음에까지도 관심을 쏟고 이를 감쇄시키기 위한 노력을 기울이고 있다.

선체진동 및 소음의 주요한 기진원으로는 박용기관과 프로펠러가 있으나 본 원고에서는 박용기관에 의해 발생하는 문제는 다루지 않고 프로펠러에 의하여 야기되는 문제만을 고려하였다.

II. 추진기의 설계

프로펠러의 초기 설계는 설계 선속을 포함하는 임의의 3개 속도(V_1, V_2, V_3)에 대하여 다음과 같은 단계로 진행된다.

1. 프로펠러 단독상태의 전달마력 및 회전수(N)

$$DHP = BHP \times \eta_T \times \eta_R N = 1.02N$$

여기서 1.02는 추진기 거칠기 및 기관의 최대 허용 Torque 감소 등을 고려하여 2% 정도 여유를 준 것이다.

2. 속도별 전진속도(V_A) 및 출력 계수(B_p)의 계산

$$V_A = (1-w) \times V \quad B_p = DHP^{0.5} \cdot N / V_A^{2.5}$$

3. 프로펠러 날개수(Z)

추진기의 기진력, 효율, 진동문제 등을 고려하여 날개수를 결정하고 이 날개수에 대응하는 프로펠러 설계 도표($B_p \sim \delta$ 도표)에서 최적의 $\eta_0, \delta_0, (H/D)_0$ 를 얻는다. (표1)

4. 추진기 직경(D)의 결정

$B_p \sim \delta$ 도표에서 각 속도별 B_p 에 대응하는 직경 계수(δ)를 얻고 $\delta = ND_0 / V_A$ 로 부터 D_0 (효율이 가장 높은 직경)을 구한 후 여기에 비대선은 0.5~1%정도 그리고 일반 선형은 2~3%의 여유를 주어 속도별 추진기의 직경(D_1, D_2, D_3)을 결정한다.

표1 Bp-δ

도표명칭	익수	전 개 면적비	Propeller 기 호	사 용 단 위			
				ρ	HP	Kt	D
선 연	3	0.35	UB3-35	104.51 kg·sec ² /m ⁴ (sea water)	75 kg·m/sec	1852 m/h	m
		0.50	UB3-50				
		4	0.40				
	0.55		MAU4-55				
	0.70		MAU4-70				
	5	0.50	MAU5-50				
0.65		MAU5-60					
0.80		MAU5-80					
6	0.55	MAU6-55					
	0.70	MAU6-70					
	0.85	MAU6-85					
Troost	3	0.35	TB3-35	102 kg·sec ² /m ⁴ (fresh water)	76 kg·m/sec	6080 ft/h	ft
		0.50	TB3-50				
		4	0.40				
	0.55		TB4-55				
	0.70		TB4-70				
	5	0.45	TB5-45				
0.60		TB5-60					
Taylor	3	0.382	Taylor3-382	1.9905 $\frac{1f\text{-sec}^2}{ft^4}$	550 fb-ft/sec	6080 ft/h	ft
	4	0.508 0.612	Taylor4-508 Taylor4-612				

5. 수정된 직경 계수(δ'), 핏치비(H/D) 및 단독 효율(η_p)

위에서 구한 속도별 최적 직경 D_1, D_2, D_3 로부터 새로운 직경 계수(δ')를 구하고 δ' 와 Bp- δ 도표에 의하여 속도별로(H/D) 및 η_p 를 읽는다.

6. 추진계수(η_p) 및 유효마력(EHP)

다음 식에 의하여 위에서 최종적으로 구한 η_p 로부터 각 속도에서의 η_p 를 계산하고 η_p 로부터 EHP를 구한다.

$$\eta_p = \frac{(1-t)}{(1-w)} \eta_R \cdot \eta_o \quad EHP = \eta_b \cdot \eta_r \cdot BHP$$

7. 선속(V_s), 추진기 직경(D) 및 추진계수(η_p)
다음 그림과 같이 각각의 값들을 도시하고 EHP

와 EHP'의 교점에서의 값을 읽으면 이때의 속도(V_s)는 설계 출력으로 가능한 최대의 속도이며 D 및 η_o 도 최적치들이다.(표2)

8. 전개면적비(EAR)

Bp- δ 도표에서 2~3개의 EAR에 대한 D, H/D, η_o 를 구하여 다음 그림과 같이 도시한다.

9. 캐비테이션 발생한계의 판정

여러가지의 캐비테이션 판정 기준 중 Burrill의 단위 면적당의 추력(Thrust)치를 기준으로 하는 방법은 다음과 같다.

캐비테이션 수(Cavitation Number) σ 를 횡축에 단위 추력계수 τ 를 종축으로 하여 다음 그림과 같은 판정도표를 만들면 이 곡선의 밑부분이 캐비테이션을 방지할 수 있는 안전 범위가 된다.

표2

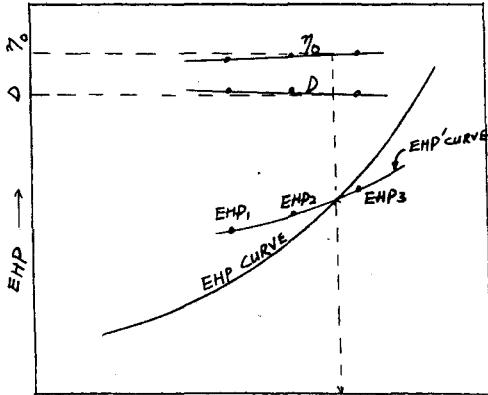
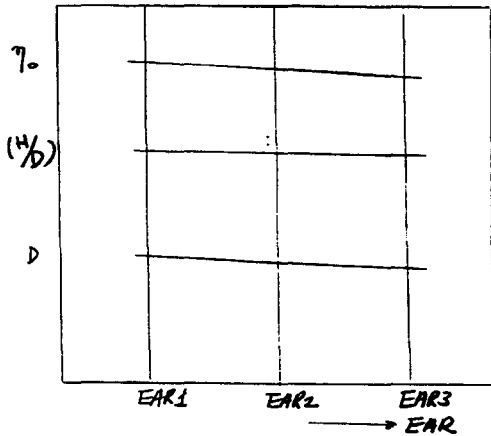


표3

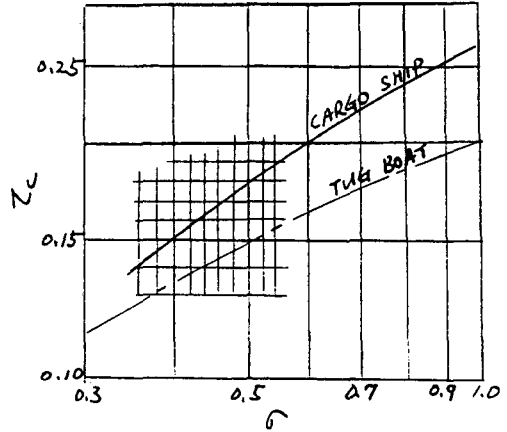


$$\sigma = \frac{(p-e)}{1/2 \rho V_R^2}$$

$$\tau_c = \frac{T/A_p}{1/2 \rho V_R^2}$$

여기서, (p-e): 추진기 중심선에서의 압력
 e : 해수의 증기압(≒0)
 ρ : 해수비중
 V_R : 추진기의 0.7R에서의 상대유속
 T : 추력
 A_p : 추진기 날개의 투영 면적

표4



한편, P = 수선면에 작용하는 대기압 (10340 kg/m²) + 해수비중(1025 kg/m³) × 추진기 중심으로부터 수면까지 거리(m)
 $V_R^2 = V_A^2 + \mu^2$
 $= (V_s(1-w) \times 0.5144)^2 + (0.7\pi D \frac{N}{60})^2$

여기서, μ는 추진기 반경의 0.7배 위치에서의 날개단면의 회전속도(m/sec)

$$T = \frac{75 \text{ EHP}}{(1-t)V} = \frac{75 \text{ EHP} \cdot \eta_T \cdot \eta_R \cdot \eta_o}{V_A}$$

10. 새로운 EAR의 계산

캐비테이션 수(σ)에 대응하는 τ_c로부터 다음과 같이 최소 투영 면적을 계산한다.

$$A_p = \frac{T}{1/2 \rho V_R^2 \tau_c}$$

Taylor의 관계식을 이용하여 전개면적으로 환산하면

$$AE = AP / (1.067 - 0.229(H/D))$$

따라서 캐비테이션이 발생하지 않을 최소 전개면적비는

$$EAR' = AE / \frac{\pi}{4} D^2$$

Ⅲ. 캐비테이션과 진동 관련 추진기 특성

진동 발생에 밀접하게 관련된 추진기의 특성들을 살펴보면 다음과 같다.

1. 추진기의 회전수(N)와 직경(D)

$N \times D$ 의 값이 가능한 작은 것이 소음과 진동에 유리하다. 이 값이 작다는 것은 프로펠러 날개 끝단에서의 속도가 작은 것을 의미하기 때문이다. 통계적으로 보면 이 끝단의 속도는 39m/sec 이하면 진동의 문제를 대체적으로 피할 수 있으며 32m/sec 정도 이하이면 소음 문제까지도 피할 수가 있다.

$$V_{TIP} = \pi nD$$

2. 추진기의 단면적비(A_E/A_O)와 하중 분포

추진기 단면적비도 진동문제에 매우 중요한 변수이며 날개 끝단에서 압력이 과도하게 작용하므로 이로 인하여 캐비테이션이 발생치 않도록 하중분포가 적어야 한다.

3. 추진기의 날개 수

축계 거주구 및 선체 거더의 공진 현상을 고려하여 추진기의 날개 수가 결정되어야 한다.

4. 추진기와 선체와의 간격(Clearance)

추진기와 선체와의 간격은 캐비테이션에 영향을 미치는 변수 중에 하나이며 선급이

나 연구소마다 다소 추천하는 값이 차이가 있으나 개략적으로 비교하여 보면 다음 표와 같다.(표5)

Ⅳ. 진동 발생 방지를 위한 허용압력 및 반류 추정

1. 허용압력의 추정

추진기 상부끝단 높이와 동일한 높이의 선미끝단(b_o)에서 최대허용압력 ΔP_{CB} (acceptable pressure amplitude)는 그림 1에서 구할 수 있다. 이 ΔP_{CB} 값은 총괄적 진동 급수(vibration level)를 고려한 상태에 근거한 값이며 이때 기준 진동치는 5.5mm/s이고 이 값은 선급 요구치들의 평균 값이다. 날개의 운동 압력 크기는 그림 1로부터 구할 수 있으며 이 그림에는 최대 허용치가 점선으로 표시되었다.

2. 반류(Wake)

최대허용압력 (P_{CB})으로부터 유효반류 (W_{TMAX})의 최대 허용치를 구하기 위한 도표는 그림 2~4와 같다. 이 도표에서 사용한 변수들은 다음과 같다.

$$- \rho n^2 D^2$$

여기서, $n = \text{rpm}/60$

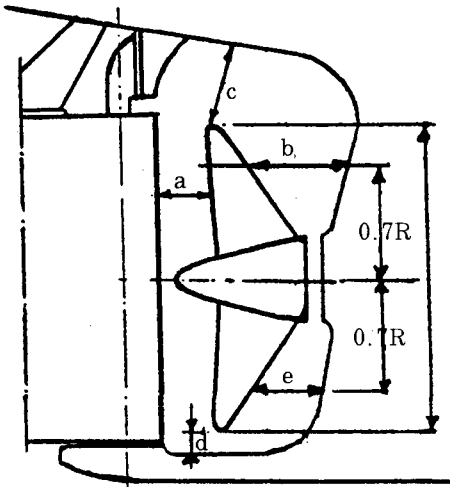
$D =$ 추진기 직경(m)

$$- d/R$$

d 는 $r/R=0.9$ 인 지점에서 추진기 날개 끝단서부터 선체까지 거리이고 $R = D/2$ 이다.

표5

추진기관 \ Clearance	Clearance				
	a	b	c	d	e
SENER	0.15D	$0.2D \leq b \leq 0.498D$	0.6b	0.05D	0.7b
MARIN	0.12D	0.2D	0.1D	0.05	0.7b
DNV	0.1368D	$b \geq 0.15D$	$c \geq 0.1D$	0.35D	0.7b



- σ (캐비테이션 수)

$$\sigma = \frac{(10.4+h) \times 1000}{\frac{1}{2} \rho (\pi n D \times 0.7)^2}$$

h = 홀수로부터 축중심(shaft center)까지의 깊이

$f = r/R$ 이 0.95 및 0.80인 지점에서의

$$\frac{(f \times P)^{0.95}}{(f \times P)^{0.80}} \quad (\text{추진기 하중계수})$$

날개 단면의 최대 곡률

$P = r/R$ 이 0.95 및 0.80인 지점에서의 피치

초기설계 단계에서 하중계수를 알 수 없을 경우에는 0.5 적용

- $J_1 - J_m$

$$J_1 - J_m = \frac{V_s}{nD} (W_{TMAX} - W'e)$$

이 값은 그림 4에서 다음식과 같이 추진기 익면적비 변화에 따라 수정한 유효 반류에 대한 최대 반류의 상한선을 찾기 위하여 사용되어졌다.

수정된 유효반류는

$$W'e = W_e - \left(\frac{T}{\rho n D^3} \left(\frac{f_1 - 1.0}{f_1} \right) \frac{1}{\frac{\Delta K_T}{\Delta J} V_s} \right) \text{ 이고}$$

여기서,

$$f_1 = \frac{\left(\frac{A_e}{A_o}\right)_N \times 2.13 \times D}{C_{0.9} \times Z}$$

$C_{0.9} = r/R$ 이 0.9인 지점에서의 날개 단면 길이

$$\left(\frac{A_e}{A_o}\right)_N = \frac{4T}{\pi D^2} \times$$

$$\frac{1}{0.5 \rho V^{2.07} (0.333 \sqrt{\sigma} - 0.05) (1.067 - 0.23 \left(\frac{H}{D}\right)^{0.8})}$$

만약에 $\frac{\Delta K_T}{\Delta J}$ 를 알지 못할 때는 다음과 같은 추정값을 적용하면 된다.

Z	3	4	5	6
$\Delta K_T / \Delta J$	0.32	0.36	0.42	0.48

또한 추력(T)을 다음 식에 의하여 구할 수도 있다.

$$T = \frac{75 \text{SHP} \eta_o}{(1 - W_e) V_s} (K_p)$$

3. 최대 반류의 평가

최대 반류는 0.80이하인 것이 좋다. 만약에 0.80이상이면 박리(seperation)와 불안정한 유장(unstable flow)이 생성될 가능성이 크다.

이 경우에는 빈번한 주기의 압력 충격으로 소음과 날개의 부식을 증가시키는 요인이 된다. 또한 더 나아가서는 캐비테이션 와(eddy)가 추진기 끝단(tip)으로부터 발생하여 선체로 이동할 가능성도 있다. 이러한 와는 소음뿐 아니라 선체의 지역적 압력 변화(local pressure variation)의 원인이 될 수도 있다.

따라서 선형을 수정해서라도 W_{TMAX} 값을 맞추어 주는 것이 좋으며 만약에 이 경우가 어려우면 추진기 변경설계를 하거나 선체-추진기 간격을 증가시키는 것도 한가지 방법이 될 수 있다. 이러한 경우에는 시행

오차법으로 간격을 결정한다.

V. 결론

1. 반류 값을 알고 있을 경우 추진기 설계 변수와 clearance 및 날개에 작용하는 압력 크기를 주어진 도표에 의해 결정할 수 있다.

2. 이 방법은 30노트 이하의 배에 적용 가능할 것이며 쌍축선은 단축선으로 가정하여 적용할 수 있을 것이다.

3. 날개 형상이나 지역적 반류 분포는 고려하지 않았다. 이러한 경우 변수의 조화에 만족한 결과를 얻는 것은 매우 어려우며 많은 연구가 필요하다.

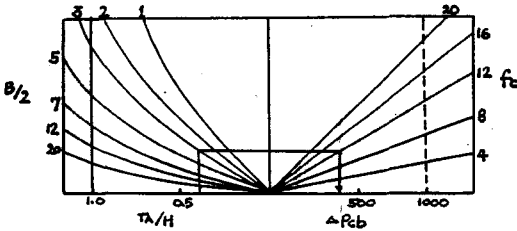


그림1 허용압력 크기를 구하는 도표

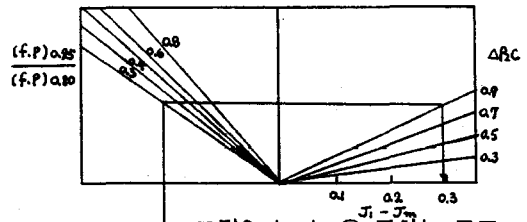


그림2 J1-Jm을 구하는 도표

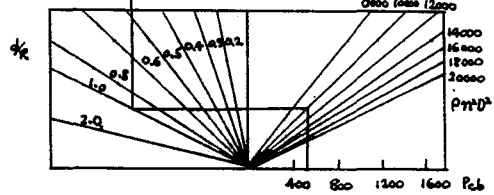


그림3 추진기 하중계수를 구하는 도표

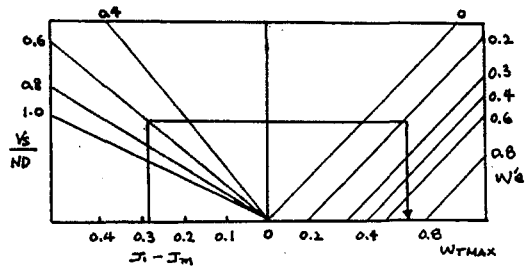


그림4 WTMAX를 구하는 도표

사용부호

- B bo단면의 홀수에서의 폭
- bo 추진기 상단끝에서부터 선체끝단까지의 수평거리
- C0.9 r/R=0.9에서 날개 단면 길이
- D 추진기 직경
- f 추진기 날개 단면의 최대 곡부
- fc 날개 주기 = $Z \frac{RPM}{60}$
- h 축의 깊이
- H 배의 깊이 = $\frac{Vs(1-w)}{nD}$
- J 전진 계수 = $\frac{T}{\rho n^2 D^2}$
- KT 추진 계수 = $\frac{T}{\rho n^2 D^2}$
- n 초당 회전수
- P 핏치
- H/D 핏치-직경 비

- TA 선미 홀수
- Vs 선속
- V0.7 r/R=0.7에서 회전 속도($V_{0.7}=0.7\pi nD$)
- We 유효 반류
- WTMAX 날개가 반류 정점에 있을 때 r/R 0.9~1.0사이의 최대 반류
- Z 추진기 날개 수
- ΔPCB 캐비테이션 발생시 bo에서의 압력 크기
- ΔP2C 운동압력
- ΔKT/ΔJ KT 곡선의 경사
- η0 추진기 단독 효율
- ηR 상대 회전 효율
- ηT 전달 효율