

프로펠러 압력면 캐비테이션의 초기발생 추정 및 실험 검증

안병권^{†*}, 이창섭^{*}, 유용완^{**}, 문일성^{***}

충남대학교 선박해양공학과^{*}

한진중공업^{**}

한국해양연구원 해양시스템안전연구소^{***}

Prediction of the Propeller Face Cavity Inception and Experimental Verification

Byoung-Kwon Ahn^{†*}, Chang-Sup Lee^{*}, Yong-Wan Yu^{**} and Il-Sung Moon^{***}

Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering, Chungnam National Univ.^{*}

Hanjin Heavy Industries & Construction Co., Ltd.^{**}

Maritime and Ocean Engineering Research Institute, KORDI^{***}

Abstract

Cavitation phenomena appearing on ship propellers have long been interested and recent theoretical analyses give good results comparing with model tests. In accordance with a continuous rise in heavy powered and high speed ships, hull forms have been changed and loads acting on the propeller surface have also been increased, and they result in various and particular cavitations. In some cases, cavitation appears not only on the back but also on the face of the propeller and it causes additive pressure fluctuations and erosion of the propeller and reduces propulsion efficiency of the ship. In this study, we predict the face cavity inception using unsteady propeller analysis based on the panel method and compare the results with experimental observations.

※Keywords: Propeller(프로펠러), Face-cavitation(압력면 캐비테이션), Cavitation number(캐비테이션수), Panel method(패널법)

1. 서론

유발시킨다. 이러한 캐비테이션의 피해를 피하기 위하여 현재 수치시뮬레이션을 통해 설계단계에서부터 캐비테이션을 최소화 할 수 있도록 설계를 수행하고 있다. 최근 들어 선박의 대형화, 고속화에 따른 선형이 변화되고, 프로펠러에 작용하는 하중이 증가함에 따라 흡입면뿐만 아니라 압력면에서도 캐비테이션이 발생하여 그 피해를 가중시키는 사례들이 증가하고 있다. 특히 압력면 캐비테이션의 경우 프로펠러의 0.6~0.8R 근처의 앞날 부분에 소량으로 집중되어 발생하며, 흡입면 캐비테이션이 발생하지 않는 각도(선수를 향하여 프로펠러 기준선으로부터 시계방향으로 약 90 도부터 270 도 사이)에서 발생하기 때문에 캐비테이션에 의한 피해를 한층 가중시키는 역할을 하고 있다. 그러나 지금까지 개발된 수치해석 기법은 주로 흡입면에서 발생하는 캐비테이션에 대한 추정 및 모형시험을 통한 분석이 대부분이었다(송인행 등 2000, 안중우 등 2001, 한재운과 이창섭 1996). 압력면에서 발생하는 캐비테이션은 흡입면 캐비테이션에 비해 발생범위가 매우 좁고, 그 양도 적어 기존의 수치모사 방법을 통한 예측이 힘들다. 따라서 지금까지 압력면에서 발생하는 캐비테이션의 개선은 주로 모형시험을 통한 반복 설계경험을 토대로 이루어져왔다.

본 연구에서는 설계단계에서 압력면 캐비테이션 발생 유무를 빠르게 추정하여 설계에 반영할 수 있는 수치해석기법 개발을 목표로 하였다. 압력면 캐비테이션 추정은 Kerwin and Lee(1978)에 의하여 개발되고 수치계산의 안정성이 입증된 프로펠러 비정상 성능해석 기법(문일성 등 1996)을 사용하였다. 본 연구를 통해 개발된 수치해석 프로그램은 패널법을 바탕으로 한 프로펠러 비정상 성능 해석에서 계산된 압력면의 압력분포를 반경방향의 캐비테이션수와 비교하여 캐비테이션 발생 유무를 판별하는 비교적 간단하면서도 매우 안정적인 방법을 사용하였다. 추정된 수치 결과는 해양시스템 안전연구소에서 수행한 모형프로펠러 시험결과와 비교 분석하여 그 신뢰성과 유용성을 검증하였다.

2. 프로펠러 비정상 성능해석

2.1 계산 모델링

프로펠러는 비점성, 비압축성인 이상유체의 비회전성 유동장에서 작동한다고 가정한다. 이상유체 가정 하에서 프로펠러 날개, 허브 및 방출되는 반류를 둘러싸고 있는 전 유체영역에서 질량보존의 법칙이 성립하여야 하므로 다음의 식 (1)과 같이 지배방정식으로 Laplace 방정식을 얻을 수 있다.

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (1)$$

여기서, ϕ 는 교란속도 포텐셜이다. 경계면 S 로 둘러싸인 무한 유체영역에서의 경계조건은 다음과 같다.

무한 원방(S_∞)에서의 경계조건: 무한거리에서는 교란된 유동의 영향은 없다.

$$|\nabla \phi| = 0 \quad (2)$$

물체표면(S_B)에서의 경계조건: 유체는 물체 경계면을 통과할 수 없다.

$$\vec{n} \cdot \nabla \phi = -\vec{n} \cdot \vec{U}_\infty \quad (3)$$

여기서 \vec{n} 은 물체 표면에서 유동장을 향하는 단위 법선 벡터이며, \vec{U}_∞ 는 프로펠러에 유입되는 유동속도로 선미 반류의 불균일 유속(\vec{V}_s)과 프로펠러의 회전 각속도($\vec{\Omega}$) 및 프로펠러 반경(\vec{r})으로부터 $\vec{U}_\infty = \vec{V}_s + \vec{\Omega} \times \vec{r}$ 로 정의된다.

Kutta 조건: 날개 뒷날(T.E.)에서의 유동 속도는 유한하다.

$$|\nabla \phi|_{T.E.} < \infty \quad (4)$$

반류면(S_W)에서의 경계조건(운동학 및 운동역학적 경계조건): 후류 상(+), 하(-)면에서의 속도 및 작용하는 압력은 같다.

$$\vec{n} \cdot (\vec{V}^+ - \vec{V}^-) = 0, P^+ - P^- = 0 \quad (5)$$

지배방정식과 위에서 기술한 경계조건들을 만족하는 교란속도 포텐셜, ϕ 는 Green 정리를 통해 식 (6)과 같은 적분 방정식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \phi(x) = & \int_{S_B} \{-\phi(\xi)\} \frac{\partial G}{\partial n_\xi} dS \\ & + \int_{S_B} \frac{\partial \phi(\xi)}{\partial n_\xi} G dS \\ & + \int_{S_w} \{-\Delta \phi(\xi)\} \frac{\partial G}{\partial n_\xi} dS \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 $G = -1/4\pi R$, $R(\bar{x}, \bar{\xi})$ 은 경계면 위의 점(\bar{x})과 유동장 점($\bar{\xi}$) 사이의 거리이다. 식 (6) 은 프로펠러 기준 날개의 각 제어점에서 법선 다이폴의 세기를 미지수로 하는 연립방정식으로 표현할 수 있으며, 시간 영역에서 경계치 문제는 프로펠러의 전진속도를 고려하여 유한 차분화된 시간영역에서 해석하였다.

2.2 압력계수와 반경방향 캐비테이션수의 관계

프로펠러 날개면에서의 반경방향 압력계수와 캐비테이션수는 식 (7), (8)과 같이 정의된다.

$$C_p = \frac{P_v - P_\infty}{\frac{1}{2} \rho V_R^2} \quad (7)$$

$$\sigma_R = \frac{P_\infty - P_v}{\frac{1}{2} \rho V_R^2} \quad (8)$$

두식을 정리하여 비교하면 프로펠러 표면에서의 압력분포($-C_p$)가 캐비테이션수(σ_R) 보다 크거나 같으면 캐비테이션이 발생한다고 판단할 수 있다. 즉 $-C_p \geq \sigma_R$ 인 영역에서 캐비테이션이 발생하며, 실제 그 범위는 이 영역보다 후류 방향으로 확장되어 나타난다. 0.7R 에서 대표되는 캐비테이션수는 다음과 같이 정의 되며,

$$\begin{aligned} \sigma_{n(0.7R)} = & \frac{P_\infty - P_v}{\frac{1}{2} \rho n^2 D^2} \\ = & \frac{P_{atm} - P_v + \rho gh}{\frac{1}{2} \rho n^2 D^2} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 n 과 D 는 각각 프로펠러의 회전수와 직경을 의미한다. 각 반경 위치에서의 압력계수와 캐비테이션수를 비교하기 위해 반경방향 캐비테이션수, σ_R 을 식 (9)를 이용하여 다음 식 (10)과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma_R = & \frac{P_{atm} - P_v}{\frac{1}{2} \rho V_R^2} \\ = & \frac{1}{\frac{1}{2} \rho V_R^2} \left[\sigma_n \frac{1}{2} \rho n^2 D^2 - \rho gh \right] \\ = & \sigma_n \frac{n^2 D^2}{V_R^2} - 2 \frac{gh}{V_R^2} \\ = & \sigma_n \frac{1}{\left(\frac{V_R}{V_S}\right)^2} \frac{n^2 D^2}{V_S^2} - 2 \frac{gh}{n^2 D^2} \frac{1}{\left(\frac{V_R}{V_S}\right)^2} \frac{n^2 D^2}{V_S^2} \end{aligned} \quad (10)$$

식 (11)과 같이 정의되는 무차원 수인 전진비와 푸르드수를 이용하여 최종적으로 식 (13)과 같은 특정 반경에서의 캐비테이션수(σ_R)를 얻는다.

$$J_S = \frac{V_S}{nD}, \quad F_n = \frac{n^2 D}{g} \quad (11)$$

$$\sigma_R = \sigma_n \left(\frac{V_S}{V_R} \right) \frac{1}{J_S^2} - \frac{1}{F_n} \frac{(2H - 0.7R)}{J_S^2} \left(\frac{V_S}{V_R} \right) \quad (12)$$

여기서 H 는 수면으로부터 프로펠러 축 중심까지의 거리(Shaft submergence)이다.

3. 계산 결과의 비교검증

3.1 수치계산 대상 및 조건

본 연구에서는 모형시험 관측 결과가 있는 각각 다른 선종의 특정 프로펠러 4 개를 선정하여 수치 계산을 수행하였으며, 각 프로펠러의 기본 제원은 Table 1 과 같다. B 프로펠러를 제외한 A, C, D 프로펠러는 캐비테이션 시험에서 압력면 캐비테이션 발생이 관찰된 경우이다.

Table 1 Principal particular of the model propellers

Prop.	Z	$(P/D)_m$	A_e/A_o	$\sigma_{H(0.7R)}$
A	5	0.925	0.701	1.574
B	6	0.934	0.964	1.239
C	4	0.737	0.485	2.407
D	4	0.639	0.612	1.356

Table 2 Comparison of predicted face-cavity regions with experimental observations

Prop.	Calculation	Experimental Observation
A	90~280° (Max: 240°)	210~280° (Max: 240°)
B	-	-
C	250~300° (Max: 280°)	93~287° (Max: 280°)
D	130~250° (Max: 220°)	70~300° (Max: 180°)

3.2 수치계산 결과와 모형시험과의 비교

개발된 프로그램의 수치계산 결과의 실용성을 검증하기 위하여 해양시스템안전연구소의 캐비테이션 터널에서 수행된 모형시험 결과와 비교 분석하였다. Table 2 에 수치계산으로부터 얻은 압력면 캐비테이션 발생영역을 모형시험 결과와 비교하여 정리하였다.

모형시험 결과와 비교하여 계산된 압력면 캐비테이션 발생범위는 다소 차이가 있지만, 관찰된 최대 발생지점(각도)은 계산에서 예측된 최대 발생지점과 잘 일치하며, 발생 경향은 매우 유사한 결과를 보여주고 있다.

Fig. 1 은 A 프로펠러에 대한 수치해석 결과로 날개 앞날 부근의 흡입면(SS, Suction Side)과 압력면(PS, Pressure Side)의 압력계수(-C_p)를 전 회전각도에 대해 해당 반경 방향의 캐비테이션수와 비교하였다. 이 프로펠러의 경우 흡입면 캐비테이션이 발생하지 않는 각도(90~280 도)에서 압력면

캐비테이션이 발생함을 볼 수 있으며, Fig. 2 는 압력면 캐비테이션이 발생하지 않는 B 프로펠러의 경우로 압력면의 압력계수가 해당 캐비테이션수보다 작게 나타남을 볼 수 있다.

계산 결과에 대한 해석을 보다 쉽게 하기 위해 Fig. 3 이후에서와 같이 극좌표계 형식으로 표현하였으며, 최대 압력계수(-C_p)를 갖는 반경 방향의 압력면에 대해 해당 캐비테이션수와 비교하였다. 즉 압력계수가 캐비테이션수를 벗어나는 경우 압력면 캐비테이션이 발생함을 의미하며, 초기 발생각도와 최대 발생각도를 쉽게 이해할 수 있도록

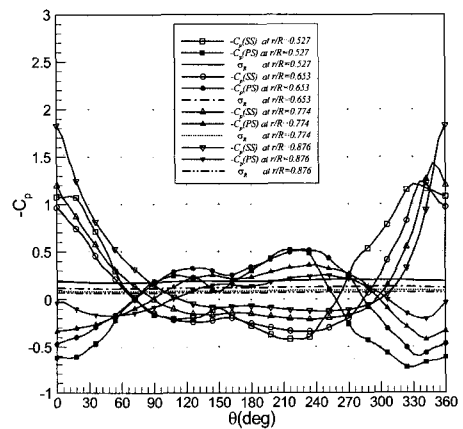


Fig. 1 Predicted pressure coefficients at different radial positions of A propeller

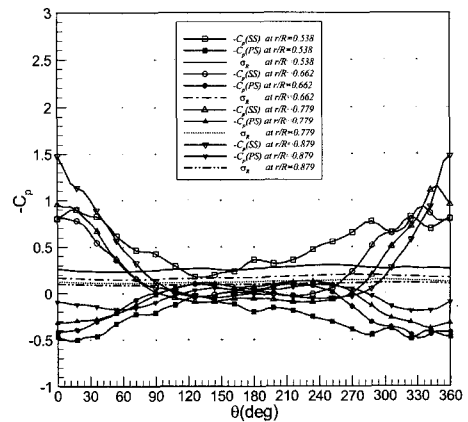


Fig. 2 Predicted pressure coefficients at different radial positions of B propeller

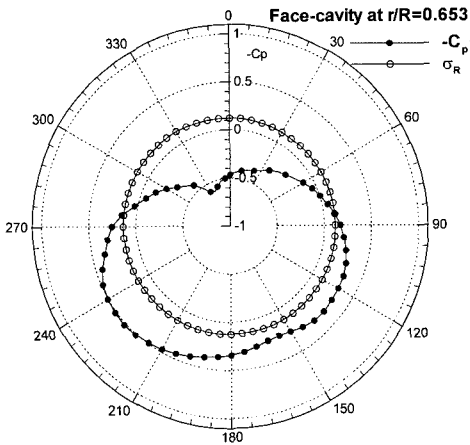


Fig. 3 Face-cavity prediction of A propeller (0.653R)

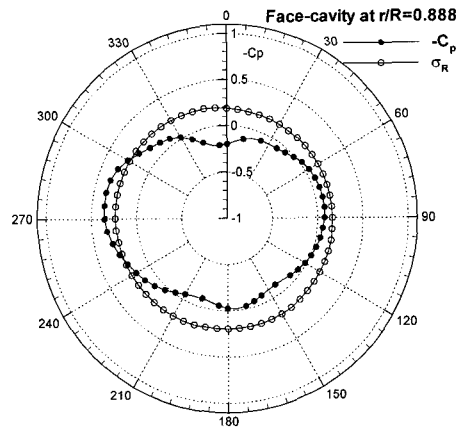


Fig. 6 Face-cavity prediction of C propeller (0.888R)

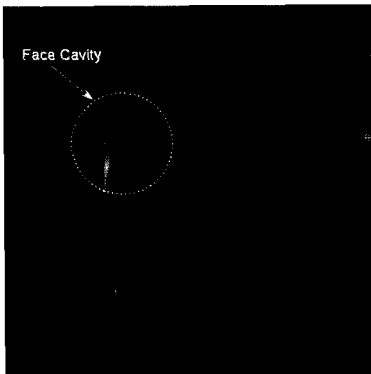


Fig. 4 Model test of A propeller (240°)

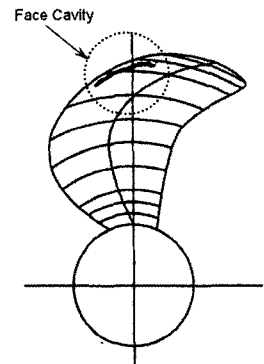


Fig. 7 Model test sketch of C propeller (280°)

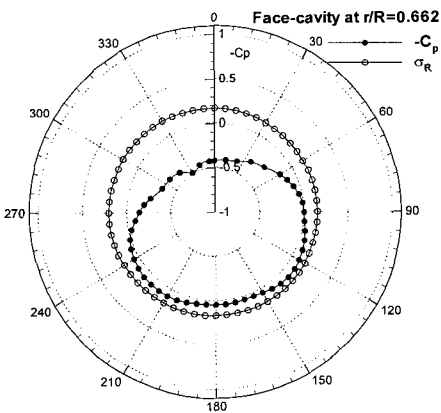


Fig. 5 Face-cavity prediction of B propeller (0.662R)

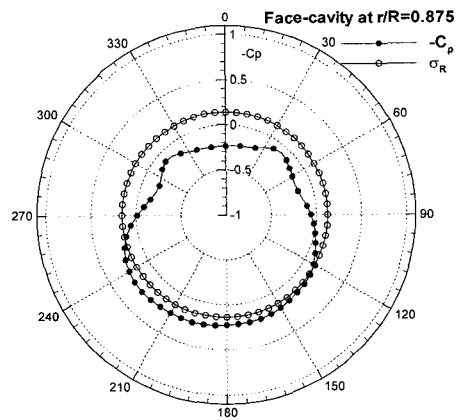


Fig. 8 Face-cavity prediction of D Propeller (0.875R)

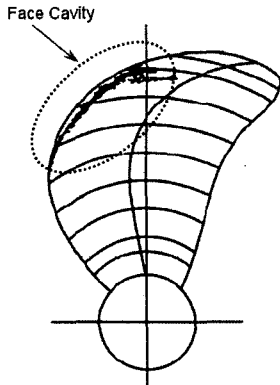


Fig. 9 Model test sketch of D propeller (180°)

하였다. Fig. 3 은 A 프로펠러에 대한 계산 결과로 최대 압력면 캐비테이션이 발생하는 지점인 $0.653R$ 에서의 압력계수와 캐비테이션수에 대한 비교를 보여준다. 이 프로펠러의 경우 $0.653R$ 에서 90 도에서 280 도 영역에서 압력면 캐비테이션이 발생할 수 있으며, 240 도 부근에서 최대로 발생할 수 있음을 예측할 수 있다. Fig. 4 는 A 프로펠러에 대한 모형시험 결과로 $0.6\sim 0.8R$ 부근의 압력면에 240 도 근처에서 캐비테이션이 최대로 발생하고 있는 상태의 관측사진을 보여주고 있다.

Fig. 5 는 모형시험 결과 압력면 캐비테이션이 발생하지 않은 B 프로펠러에 대한 수치해석 결과로 모든 회전영역에서 압력계수가 캐비테이션수보다 작아 캐비테이션이 발생하지 않음을 쉽게 확인할 수 있다. Fig. 6 과 Fig. 7 은 각각 C 프로펠러의 최대 압력면 캐비테이션 발생위치인 $0.8R$ 근처에 대한 수치해석 결과와 모형시험 결과이다. 이 프로펠러의 계산결과 250~300 도 영역(최대 280 도)에서, 압력면 캐비테이션이 발생함을 확인할 수 있으며, 시험결과도 280 도에서 최대 압력면 캐비테이션이 발생하였다.

Fig. 8 과 Fig. 9 는 D 프로펠러의 경우로 계산결과 130~250 도 부근에서 압력면 캐비테이션이 발생함을 보여주며, 모형시험 결과와 비교하여 최대 발생 각도는 다소 차이가 있지만 해당 영역부근에서 압력면 캐비테이션이 유사하게 발생되었다. 위

의 계산 및 시험결과들을 종합 분석해 볼 때 본 연구를 통해 개발된 해석방법으로 압력면 캐비테이션의 발생 유무, 발생 위치와 최대 발생 각도를 비교적 정확하게 예측할 수 있음을 알 수 있다.

4. 결론

압력면에서 발생하는 캐비테이션의 경우 캐비테이션의 발생범위가 상대적으로 작아 기존의 수치계산 방법을 통한 예측이 힘들기 때문에, 그 중요성에도 불구하고 모형시험과 설계자의 경험에 의해 추정되고 개선되어 왔다.

본 연구에서는 패널법을 이용한 프로펠러 비정상 성능해석을 통해 계산된 압력면의 압력분포를 반경방향의 캐비테이션수와 비교하여 해당 반경에서의 캐비테이션 발생 유무를 쉽고 확인할 수 있는 방법을 개발하였다. 수치해석 결과는 모형시험 결과와의 비교/검토를 통하여 압력면 캐비테이션의 발생 여부를 신속하게 판단하고, 최대 발생 영역을 비교적 정확하게 예측할 수 있음을 확인하였다. 한편 압력면 캐비테이션의 추정에 있어 프로펠러 앞날과 끝날 부근과 같이 형상변화 심해 복잡한 유동현상이 발생하는 영역에서도 정도 높은 계산결과를 보여주는 B 스플라인 기저 고차 패널법이 본 연구에서 사용한 저차 패널법 보다 압력면 캐비테이션을 해석하는 데 더 적합할 것으로 보이며, 수치해석의 이해를 높이기 위해 정확한 캐비테이션의 체적추정 및 가시화를 위한 연구가 필요하다고 판단된다.

참 고 문 헌

- 문일성, 이창섭, 김영기, 1996, “포텐셜을 기저로 한 패널법에 의한 프로펠러의 비정상 유동해석,” 대한조선학회 논문집, 제 33권, 제 1호, pp. 9-18.
- 송인행, 안중우, 문일성, 김기섭, 2000, “2 차원 날개단면의 앞날 형상 변화에 따른 캐비테이션 특성 연구,” 대한조선학회 논문집, 제 37권, 제 1호, pp. 60-66.
- 안중우, 박영하, 문일성, 김기섭, 2001, “고속 프로

펠러의 형상변화에 따른 캐비테이션 및 소음 특성,” 대한조선학회 논문집, 제 33 권, 제 3 호, pp. 23-30.

- 한재운, 이창섭, 1996, “ 프로펠러 캐비테이션에 의해 유기된 변동압력 계산,” 대한조선학회 춘계학술대회 논문집, pp. 434-437.
- Kerwin, J.E. and Lee, C.S., 1978, "Prediction of Steady and Unsteady Marine Propeller Performance by Numerical Lifting Surface Theory," Trans. SNAME, Vol. 86, pp. 218-258.



< 안 병 권 >



< 이 창 섭 >



< 유 용 완 >



< 문 일 성 >