

초대형 컨테이너선박 방향타의 캐비테이션 수치계산 및 검증

김건도*, 문일성*, 김경열*, 반석호*, 이창섭†**

한국해양연구원 해양시스템안전연구소*
충남대학교 선박해양공학과**

Numerical Calculation and Validation for Rudder Cavitation of a Large Container Ship

Gun-Do Kim*, iL-Sung Moon*, Kyoung-Youl Kim*, Suk-Ho Van*
and Chang-Sup Lee†**

Maritime and Ocean Engineering Research Institute(MOERI), KORDI*
Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chungnam National Univ.**

Abstract

With the increase of ship size and speed, the loading on the propeller is increasing, which in turn increases the rotational speed in the propeller slipstream. The rudder placed in the propeller slip stream is therefore subject to severe cavitation with the increased angle of attack due to the increased rotational induction speed of the propeller. In the present paper the surface panel method, which has been proved useful in predicting the sheet cavitation on the propeller blade, is applied to solve the cavity boundary value problem on the rudder. The problem is then solved numerically by discretizing the rudder and cavity surface elements of the quadrilateral panels with constant strengths of sources and dipoles. The strengths of the singularities are determined satisfying the boundary conditions on the rudder and cavity surfaces. The extent of the cavity, which is unknown a priori, is determined by iterative procedure. Series of numerical experiments are performed increasing the degree of complexity of the rudder geometry and oncoming flows from the simple hydrofoil case to the real rudder in the circumferentially averaged propeller slipstream. Numerical results are presented with experimental results.

※Keywords: Rudder(타), Cavitation(캐비테이션), Rudder cavitation(타 캐비테이션), Panel method(패널법)

1. 서 언

최근 선박의 대형화, 고속화가 계속되고 있어 새로운 선형 개발과 새로운 추진 장치의 필요성이 어느 때보다 높아가고 있다. 특히 하나의 프로펠러로 추진할 수 있는 용량의 한계에 다다르도록 프로펠러를 설계하는 추세가 계속되고 있어 프로펠러에 발생하는 캐비테이션이 기존의 허용한계를 넘나들고 있다. 이러한 프로펠러의 하중과다는 프로펠러 바로 후류에 위치한 타의 정상 작동에도 영향을 미치고 있다.(Fig. 1) 프로펠러의 하중은 곧바로 타가 위치한 프로펠러 후류의 속도장에 큰 영향을 미쳐 타에 캐비테이션이 발생하고 이에 의한 손상이 큰 문제로 대두되게 된 것이다. (Han et al. 2001)

타에 표면 손상과 타의 성능 저하를 유발하는 타 표면 침식현상, 캐비테이션 현상 등은 여러 가지 원인에 의해 발생된다. 타 표면에 발생하는 캐비테이션도 여러 가지가 있지만, 유체역학적인 관점에서만 보더라도 타의 단면을 구성하고 있는 비행익의 앞날(leading edge)에 걸리는 음의 부하에 의한 캐비테이션 현상, 타 날개의 밑바닥(rudder shoe)에 강한 날개끝 보오텍스가 분리되면서 낮은



Fig. 1 Photo showing erosion due to rudder cavitation

압력에 의해 발생하는 날개끝 보오텍스 캐비테이션, 타의 회전축 바로 후류의 간극(gap) 부근의 유동현상에 기인한 캐비테이션 현상 등을 들 수 있다.

본 논문은 이중에서도 프로펠러의 하중증가로 직접적으로 가속되는 유기속도장이 타의 유체역학적인 성능에 미치는 영향을 위주로 살펴보고 이의 이론적 해결 방법을 모색하는 데에 주 목적을 두고자 한다. 프로펠러의 하중 증가는 당연히 추방향의 속도를 증가시키고, 동시에 회전방향의 유기속도를 증가시킨다. 이러한 유기속도는 비행익을 이용하여 설계된 타 날개에도 영향을 주어 타 날개 표면의 압력 저하에 큰 영향을 준다.

양력을 발생하여 선박의 조종에 필요한 힘을 발생하는 타에 발생하는 캐비테이션 현상을 이론적으로 추정하는 방법은 유사한 양력이론을 활용하는 프로펠러의 캐비테이션 이론을 적용하여 해석하는 것이 가능하다. 프로펠러의 캐비테이션 현상에 대한 이론적인 추정은 Lee(1979)에 의해 보오텍스 분포법을 이용하여 비정상 캐비테이션을 해석할 수 있음이 발표된 이래, 한재문과 이창섭(1996), Kim et al.(1995)에 의해 프로펠러에 발생한 캐비테이션이 선체에 미치는 변동압력을 추정하는 단계에 까지 이르고 있다. 프로펠러에 발생하는 캐비테이션을 패널법에 의해 해석하려는 노력은 이창섭(1989), Lee et al. (1994)에 의해 2 차원 단면의 캐비테이션이 해석가능함이 발표된 이후, 이창섭/서정천(1995)에 의해 정도 향상이 이루어지고, 김영기 등(1993)에 의해 캐비테이션이 발생하지 않는 프로펠러의 정상성능을 해석에 확인된 후에, Kim and Lee(1996)에 의해 프로펠러의 비정상 캐비테이션 현상을 추정할 수 있는 수준까지 발전되었다.

타 주위의 유체역학적 거동을 해석하기 위해서는 우선 프로펠러와 타의 상호작용을 해석하는 것이 필요하다.(공도성 등 2002) 프로펠러에 의해 유기되는 회전방향 속도가 타에서는 우회전 프로펠러의 경우 프로펠러 축심보다 낮은 위치의 타 날개 단면에는 날개 앞날의 좌현쪽이 흡입면이 되어 캐비티가 발생하고, 축심보다 높은 위치에서는

반대로 날개 앞날의 우현쪽이 흡입면이 되어 캐비티가 발생한다. 이와 같이 프로펠러의 유기속도가 타의 단면에 유입되는 경사류에 결정적인 역할을 하므로 프로펠러의 후류 속도장을 정확히 예측하는 것이 중요하고, 타에 의한 반응도 중요하므로 프로펠러와 타의 상호작용이 정밀하게 연구되어야 한다. 본 논문에서는 프로펠러의 영향이 있는 상태에서 타 날개 표면에 발생하는 캐비티를 예측하는 이론을 개발하는 것이 기본적인 목적이므로 프로펠러-타 상호작용을 해석하여 프로펠러 후류의 속도장을 예측함으로써 후류가 타의 캐비테이션에 미치는 영향을 조사하였다.

본 연구에서 프로펠러 성능 해석에는 Greeley and Kerwin(1982)의 비 선형 후류 모형과 집중 보오텍스 분포법을 사용한 양력면 이론을, 타의 성능 및 공동해석에는 포텐셜 기저 패널법을 채택하였고 프로펠러-타 상호작용 계산에는 반복계산을 통한 수렴 해를 구하였다. 개발된 수치계산법의 검증을 위하여 먼저 포텐셜 기저 패널법을 적용하여 전동타와 유사한 형상의 사각형 날개 (rectangular wing)에 대한 캐비테이션 발생여부 등의 캐비테이션 특성에 대한 수치해석을 수행하였으며, 또한 프로펠러 작동시 대형 컨테이너선의 타에 발생하는 타 자체 캐비테이션에 대한 수치해석을 수행하여 실험 결과와 비교 검증하였다.

개발된 수치계산법의 검증을 통하여 프로펠러의 영향을 고려한 타의 공동 거동을 예측하는 데에 유용한 도구가 될 수 있음을 보였다.

2. 문제의 정식화

타가 작동하는 선미 유동장은 기본적으로 보오텍스 유동이 혼재하는 비회전성 유체장이다. 그러나 프로펠러와 타 주위의 유동장을 Helmholtz의 정리를 이용하여 회전성이 있는 속도장과 비회전성의 속도장으로 나누어 표현할 수 있으며(이창섭과 이진태 1990), 유효속도장이 주어지면 프로펠러 경계치 문제를 포텐셜 이론에 의해 해석하는 것과 마찬가지로 타의 경계치 문제도 마찬가지로 가정에 의해 포텐셜 이론 해석이 가능하다. 추진기

면에 유동, $U(r, \theta)$ 가 추진기에 유입될 때 추진기는 일정한 속도 n 으로 회전하고 타는 추진기 뒤에 타 각 δ_R 인 상태로 놓여 있다고 하자. 자유 표면의 영향은 무시하고 타로 인한 추진기 후류의 형상은 변형되어야 하나 본 연구에서는 추진기 후류 변화를 무시하기로 한다. 아울러 추진기와 타의 상호작용은 원칙적으로 추진기가 회전함에 따라 타에 미치는 힘이 시간적으로 변화하고, 추진기의 성능은 시간적으로 변화하는 비정상 현상이나 이에 대한 비교 실험 자료가 부족하고 추진기 후류의 수치 정렬에는 많은 계산시간이 소요되므로 본 연구에서는 추진기 날개 사이를 임의의 갯수로 분할하여 각 날개 각도(blade angle)에서 계산된 비정상 유체력의 평균치가 정상 유체력과 같다고 가정하였다.

이를 요약하면 아래와 같다.

- 1) 유체는 이상유체 가정 하에 있다.(비정상, 비압축성, 비회전성)
- 2) 타의 존재에 따른 추진기 후류의 변형은 무시한다.
- 3) 정상 유체력은 비정상 유체력의 시간적 평균치와 같다.
- 4) 프로펠러에 발생하는 캐비티의 영향은 무시한다.

기준 좌표계는 회전하며 작동하는 추진기 성능

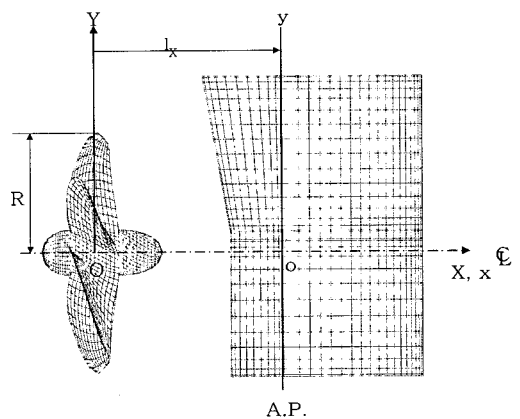


Fig. 2 Coordinate system for analysis of propeller and rudder

해석에 적합하도록 추진기 날개 면에 고정된 우수 좌표계를 택하기로 한다. 프로펠러의 축 중심과 일치하는 하류방향을 X-축으로 잡고, 중력과 반대인 상방을 Y-축으로 잡으며, Z-축은 좌현 쪽을 양의 방향으로 잡았다. 타 형상 표현의 편의상 원점은 타의 앞날에 두기로 한다.(Fig. 2)

유효속도장만 주어지고 다른 물체가 존재하지 않는 이상 유체장을 가정하였으므로 섭동 속도 포텐셜 ϕ 가 존재하며, 지배방정식으로 Laplace 방정식을 만족하여야 한다. 즉,

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

식 (1)은 다음과 같은 경계조건을 부가하면 추진기 및 타 주위의 유동은 유일하게 정의된다.

1) 무한 원방에서의 교란속도 정지 조건

$$\nabla \phi \rightarrow 0 \quad (2)$$

2) 추진기 날개면 및 타 표면에서의 비침투조건

$$\hat{n} \cdot (\vec{V} + \vec{v}_R) = 0 \quad \text{on } S_p \quad (3)$$

$$\hat{n} \cdot (\vec{U} + \vec{v}_p) + \frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad \text{on } S_R \quad (4)$$

여기에서 S_p , S_R 은 각각 추진기와 타 표면을 나타내며 \hat{n} 은 물체표면에서 유동장을 향하는 방향을 양으로 하는 단위 법선 벡터, \vec{U} 는 유입유동을 \vec{V} 는 유입유동과 추진기 시스템에 의해 유기된 전속도를 나타내며, \vec{v}_R 는 타에 의해 추진기 표면에 유기 되는 유기속도, \vec{v}_p 는 추진기에 의해 타 표면에 유기되는 유기속도를 나타낸다.

3) 추진기와 타 날개 뒷날에서의 Kutta 조건

$$|\nabla \phi| < \infty \quad (5)$$

4) 추진기와 타의 후연 반류면에서의 운동학적 경계조건

$$\hat{n} \cdot (\vec{V}^+ - \vec{V}^-) = 0 \quad (6)$$

여기서 첨자 +, -는 후연 반류의 상하면을 나타낸다.

5) 추진기와 타의 후연 반류면에서의 역학적 경계조건

$$p^+ - p^- = 0 \quad (7)$$

여기서 p 는 압력을 의미한다.

이상의 조건은 캐비테이션이 발생하지 않아도 적용되는 경계조건이며, 캐비테이션이 발생하는 면 위에서는 다른 경계조건이 필요하다.

6) 캐비티 표면에서의 운동학적 경계조건

$$DF / Dt = 0 \quad (8)$$

여기서 $F(x, y, z, t)$ 는 캐비티 표면의 식이다.

7) 캐비티 표면에서의 역학적 경계조건

$$p = p_v \quad (9)$$

여기서 p_v 는 증기압을 나타낸다. 캐비티 문제의 해석을 위해서는 캐비티의 마강에 대한 조건을 도입하여야 하며, 여기서 캐비티 뒷날(cte)의 두께 T^c 가 영이라는 조건을 도입한다. 즉,

8) 캐비티 마강 조건

$$T^c(\bar{x}_{cte}) = 0 \quad (10)$$

3. 적분방정식 및 적분방정식 이산화

경계면 S 로 둘러싸인 무한 유체 영역에서 지배방정식 (1)을 만족하는 섭동 속도 포텐셜, ϕ 는 다음과 같은 Green 정리를 만족한다.

$$\phi = \int_S \left\{ (-\phi) \frac{\partial G}{\partial n} + \frac{\partial \phi}{\partial n} G \right\} ds \quad (11)$$

여기서 $G = -1/4\pi R$, $R(\vec{p}, \vec{q})$ 은 경계면 위의 점(\vec{q})과 유동장 점(\vec{p}) 사이의 거리이다.

식(11)에 식(2)에서 (10)까지로 기술된 경계조건을 추진기와 타의 표면에 적용하여 추진기와 타 주위의 유동해석을 수행하기로 한다.

3.1 보오텍스 분포법에 의한 추진기 주위 유동 해석

본 연구에서 추진기성능 해석에는 물체의 캠버면에 미지의 집중 보오텍스를 분포하고, 또 날개 단면에서 캠버의 크기가 작고 두께가 얇다고 가정한 선형이론으로부터 양력문제와 두께문제를 분리하여 두께를 표현하기 위한 쏘오스를 분포한 집중 보오텍스 분포에 의한 양력면 이론(Greeley and Kerwin 1982)을 사용하였다. 후연 보오텍스면의

수축 및 변형은 원칙적으로 후류면에서의 운동학적 및 동역학적 경계조건을 만족하도록 경계치 문제의 일부로 결정되어야 한다. 그러나 이러한 비선형 문제를 반복계산에 의한 수렴 해를 구하는 데는 많은 계산시간과 노력이 필요할 것으로 보인다. 따라서 본 연구에서는 추진기 후류 모형으로 추진기 후류의 수축과 변형에 대한 실험적 결과에 바탕을 둔 Greeley 및 Kerwin(1982)의 비선형 후류 모형을 사용하고 상호작용 계산 시 타에 의한 추진기 후류면의 변형은 고려하지 않기로 하였다. 추진기 표면에서의 운동학적 경계조건인 식(3)을 적용하기 위하여 추진기를 보조텍스 및 쏘오스 시스템으로 치환하여, 보조텍스 보존법칙 및 Kelvin의 정리 등(Kerwin and Lee 1978)을 이용하여 정리하면 다음과 같은 이산화된 방정식을 얻을 수 있다.

$$\sum_{m=1}^{M_p} \sum_{n=1}^{N_p} K_{ijnm}^{\square} \Gamma_{nm} = d_{ij} - \sum_{m=1}^{M_p} \sum_{n=2}^{N_w} K_{ijnm}^{\square} T_m^{(t-n+1)} \quad (12)$$

여기서, Γ_{nm} 은 특이점 nm 에서 보조텍스의 세기로서 경계치 문제의 해의 일부로 결정된다. M_p 및 N_p 는 추진기 캠버면의 반경 방향 및 코드방향의 패널수를 각각 나타낸다. K_{ijnm}^{\square} 은 (n, m) 번째 스펠방향 보조텍스와 뒷날 하류의 첫 번째 방출 보조텍스, 그리고 이들의 끝을 연결하는 두 코드방향 보조텍스로 이루어지는 폐쇄 보조텍스에 의하여 (i, j) 번째에 위치하는 제어점에 유기되는 법선방향 유기속도를 나타낸다. 또한 d_{ij} 는 다음과 같은 기지량의 합을 나타낸다.

$$d_{ij} = -\hat{n}_{ij} \cdot (\vec{U} + \vec{r} \times \Omega + \vec{v}_{ij}^{BQ} + \vec{v}_{ij}^O + \vec{v}_{ij}^R) \quad (13)$$

여기서, \vec{U} 는 유입유동, \vec{r} 은 무차원된 추진기 반경, Ω 는 추진기 회전 각속도, \vec{v}_{ij}^{BQ} 는 날개 두께를 표현하는 쏘오스에 의해 유기되는 속도를 의미하며, \vec{v}_{ij}^O 는 기준날개를 제외한 날개들과 후류면에 분포되어 있는 보조텍스 의해 유기되는

속도를 의미하며, \vec{v}_{ij}^R 는 타에 의해 추진기에 유기되는 속도를 의미한다.

$T_m^{(t)}$ 는 시각 t 에서의 m 번째 날개단면 주위의 순환이다. 즉,

$$T_m^{(t)} = \left[\sum_{n=1}^{N_p} \Gamma_{nm} \right]^{(t)} \quad (14)$$

3.2 패널법에 의한 타 주위 유동 해석

타의 경우는 날개 표면에 부분캐비티가 발생한다. 식(11)의 Green 정리로부터 무한영역의 이상 유동장에 놓여 있는 타에 의해 교란된 속도장에서 선행 속도포텐셜 ϕ 는 아래와 같은 적분방정식으로 표현된다.

$$\phi(\vec{p}) = \int_{S_R+S_C} \left\{ (-\phi) \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{-1}{4\pi R(p, q)} \right) + \frac{\partial \phi}{\partial n} \left(\frac{-1}{4\pi R(p, q)} \right) \right\} dS \quad (15)$$

$$+ \int_{S_w} (-\Delta\phi) \left(\frac{-1}{4\pi R(p, q)} \right) d\vec{s}$$

여기서, S_R , S_w 는 타의 표면과 타의 후연반류면을 나타내고, S_C 는 캐비티 발생부분을 나타내며, $\Delta\phi$ 는 타 뒷날에서의 포텐셜 점프로써 후류에 방출된 법선 다이폴의 세기이다.

식(15)로 표현된 적분방정식을 3 차원 공동 유동의 수치계산을 위하여 이산화하기로 한다. 타의 코드방향으로는 반여현 분할방식을 스펠방향으로 균등 분할방식을 택하였다. 스펠방향 j -번째 스트립의 코드방향으로 i -번째 제어점에 대하여 적분방정식(15)를 이산화하면 다음과 같다. 즉,

$$\sum_{m=1}^{M_R} \left\{ \sum_{n=1}^{N_R} D_{ijnm} \phi_{nm} - \sum_{n=1}^{N_R} S_{ijnm} \left(\frac{\partial \phi}{\partial n} \right)_{nm} + (\phi_{N_R m} - \phi_{1m} + H(\alpha_{1m}, \alpha_{N_R m}, \beta_{1m}, \beta_{N_R m}) D_{ijnm}^w) \right\} = 0 \quad (16)$$

여기서 N_R , M_R 는 코드방향 및 스펠방향으로 분포된 패널수를 의미하고, D_{ijnm} , S_{ijnm} 등은

다음과 같다.

$$D_{ijm} = \begin{cases} 1 - \int_{c_{rm}} \frac{\partial}{\partial n_{rm}} G_{ijm} ds & ,if \quad ij = rm \\ \int_{c_{rm}} \frac{\partial}{\partial n_j} G_{ijm} ds & ,if \quad ij \neq rm \end{cases}$$

$$S_{ijm} = \int_{c_{rm}} G_{ijm} ds, \quad D_{ijm}^v = \int_{c_{rm}} \frac{\partial}{\partial n_m} G_{ijm} ds$$

$$G_{ijm} = \frac{1}{4\pi R(\vec{x}_{ij}; \vec{\xi}_{rm})}, \quad R(\vec{x}_{ij}; \vec{\xi}_{rm}) = |\vec{x}_{ij} - \vec{\xi}_{rm}| \quad (17)$$

$$H(\alpha, \alpha_N, \beta, \beta_N) = -\alpha_N \xi_N + \alpha \xi_1 - \beta_N \eta_N + \beta \eta_1 + (\beta_N - \beta) \eta$$

그리고, $H(\dots)$ 함수는 Suh et al(1992)에 의해 제안된 날개 뒷날에서의 Kutta 조건을 만족시키기 위하여 국소적으로 포텐셜의 선형변화를 이용한 식이다.

타 표면에서의 비침투 경계조건 식(4)로부터 캐비테이션이 발생하지 않은 타 표면에 분포된 쏘오스의 세기는 다음과 같이 기지의 값이 된다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = -\hat{n} \cdot (\vec{U} + \vec{v}_p) \quad (18)$$

또한, 캐비테이션이 발생하는 타 표면에서의 캐비티 범위와 쏘오스의 세기는 경계치 문제의 해의 일부로 결정된다.

4. 3차원 날개의 공동유동 해석

수치 해석의 검증을 위하여 우선 NACA 0012 단면을 사용하여 만든 날개두께가 스펠방향으로 균일한 수중익을 선택하여, 받음각 $\alpha = 10.0^\circ$, 캐비테이션수 $\sigma = 1.0$ 을 입력으로 하여 캐비테이션을 계산하였다. Fig. 3은 캐비티가 발생하는 하중상태에서 계산된 날개표면에서의 압력분포를 보여준다. Fig. 4는 이러한 하중상태에서 계산한 캐비티의 모양을 보여준다. Fig. 3과 4로부터 날개의 중심선 좌우로 압력과 캐비티의 분포가

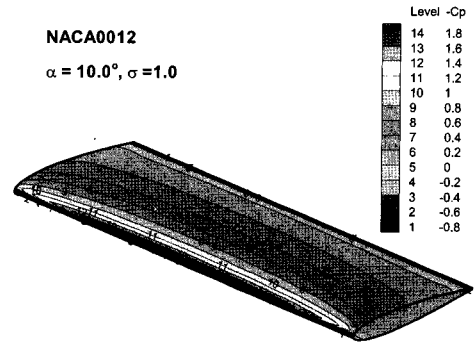


Fig. 3 Pressure distribution on the hydro-foil at $\alpha = 10^\circ$ and $\sigma = 1.0$

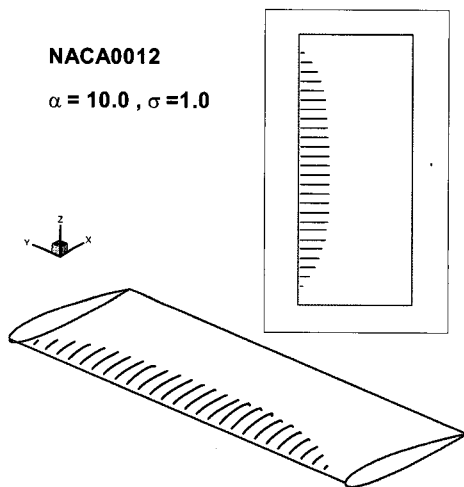


Fig. 4 Cavity pattern predicted at condition in Fig. 3

대칭임을 우선 관찰할 수 있다. 특히 날개 단면에 걸리는 하중(순환)이 날개 끝으로 갈수록 적어지므로 양 날개 끝에서는 캐비티가 잘 발생하지 않는 것을 관찰할 수 있다.

5. 프로펠러를 고려한 타 공동유동 해석

일반적으로 방향 타의 캐비테이션은 프로펠러 후류에 의하여 많은 영향을 받기 때문에 프로펠러 후류에서의 성능평가가 필수적이다. 선미 후류에 놓인 타 주위의 유동해석을 수행하기 위해서는

프로펠러의 후류가 타에 미치는 영향이 고려된 타 표면에서의 속도를 구하여야 한다. 이를 엄밀히 계산하기 위해서는 선체와 프로펠러의 상호관계로 발생하는 불균일 유효속도를 수치계산 하여야 하며, 프로펠러와 타의 상호작용으로 발생하는 프로펠러 후류의 변형과 상호 위치의 시간적 변화에 따른 비정상 해석 등 많은 양의 수치해석을 수행해야 한다.

본 연구에서는 앞의 가정에서와 같이 타에 의한 프로펠러 후류의 변형을 고려하지 않았으며, 불균일 반류장에서 작동하는 프로펠러의 각 날개 각도 (blade angle)에서 계산된 비정상 유체력의 평균치가 정상 유체력과 같다는 가정에 수치해석을 수행하였다. 수치해석은 한국해양연구원의 캐비테이션 터널에서 수행되었던 시험결과와의 비교를 위해 동일 시험조건에서 수행되었고, 시험은 캐비테이션수, $\sigma_n=1.4$ 및 추력계수, $K_T=0.21$ 의 상태에서 수행하였다. 여기서, $\sigma_n = P_o - P_v / 0.5 \rho v^2 D^2$, $K_T = T / \rho n^2 D^4$ 이며, P_o 는 터널내의 교란되지 않은 균일류의 압력이고, P_v 는 물의 증기압을 나타낸다.

계산과 시험에 사용된 프로펠러 및 타의 주요제원을 Table 1에 정리하였으며, 시험구성은 Fig. 5에 도시하였다. 캐비테이션 터널에서 재현된 반류분포를 Fig. 6에 도시하였으며, 프로펠러와 타의 상호작용을 고려한 수치해석시 유입유동 입력자료로 사용하였다.

Fig. 7은 수치계산에 사용된 프로펠러와 타의 패널형상을 보여주고 있다. Fig. 8은 프로펠러 작동시, 타각 0인 경우의 타 표면에서의 압력분포를 보여주고 있으며, 이때 캐비티가 발생하지는 않았다. 수치해석결과에서 볼 수 있듯이 우회전

Table 1 Principal characteristics of propeller and rudder

Propeller		Rudder	
Blades	6	Aspect ratio	1.48
(P/D) _m	0.99	Section	NACA0020
Ae/Ao	0.94		



Fig. 5 Propeller and rudder interaction test configuration

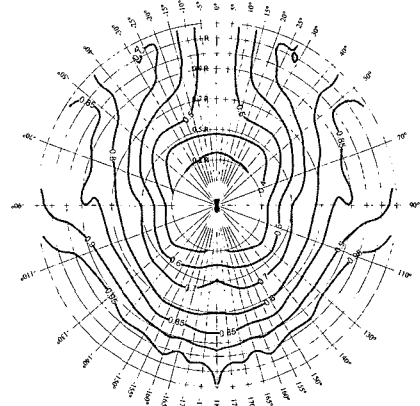


Fig. 6 Axial wake distribution

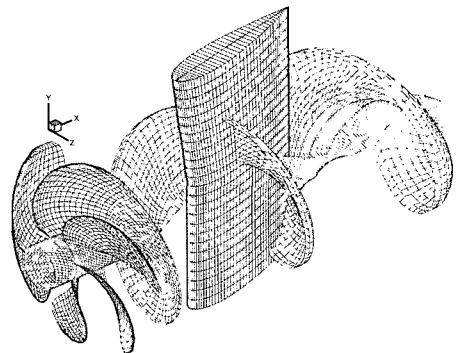
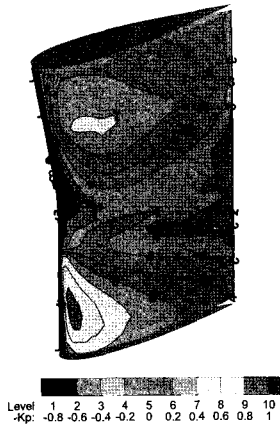
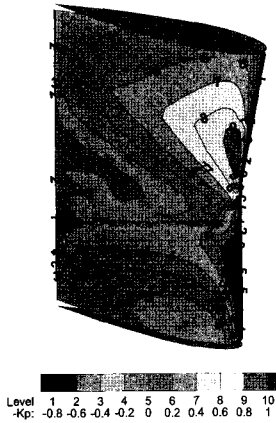


Fig. 7 Panel arrangement of propeller and rudder (propeller:16 x 18, rudder:25 x 90)



(a) Port side



(b) Starboard side

Fig. 8 Pressure distribution on rudder surface at $\alpha = 0^\circ$ behind a propeller

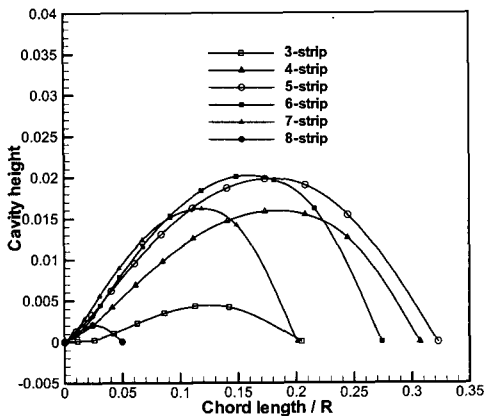


Fig. 9 Cavity height predicted at $\alpha = 12^\circ$

프로펠러의 경우 프로펠러의 유기속도가 타의 단면에 유입되는 경사류에 영향을 미쳐 프로펠러 축심보다 낮은 위치의 타 날개 단면에는 날개 앞날의 좌현쪽에 낮은 압력장이 형성되며, 축심보다 높은 위치에서는 반대로 날개 앞날의 우현쪽에 낮은 압력장이 형성됨을 알 수 있다. 그림에서 $K_p = P - P_\infty / 0.5\rho n^2 D^2 = C_p \cdot J_s^2$ 와 같이 무차원화 하였고, 이때 P_∞ 는 무한원방에서의 압력이며, P 는 타 표면에서의 압력이다.

Fig. 9 는 타각 $\alpha = 12^\circ$ 에서의 수치해석결과이며, 타 주위에서의 공동유동 해석시 만족되어야 하는 식(10)의 캐비티 마감조건이 충분히 만족되었음을 알 수 있다. 타각의 변화에 따른 캐비테이션의 발생범위를 시험과 비교하여 Fig. 10 ~ Fig. 13 에 도시하였다. 수치해석결과 타 표면에서 캐비티의 성장과 함께 박리현상이 비교적 없는 타각 ($9^\circ, 12^\circ$)에서 시험결과와 잘 일치하는 결과를 보여 주고 있으나, 캐비티의 거동이 불안정한 타각 영역 ($15^\circ, 18^\circ$)에서는 시험에 비해 캐비티의 양을 적게 추정하고 있다. 타각이 상대적으로 큰 경우 ($15^\circ, 18^\circ$)는 적은 타각 ($9^\circ, 12^\circ$)에 비해 실제 유동에서 유동의 박리현상이 좀더 발생할 수 있는 영역이며, 이러한 박리현상에 따라 박리점 (separation point) 이후에는 이상유동에 비해 상대적으로 낮은 압력장이 형성되며, 이는 캐비티가 발생된 시점에서 캐비티의 성장을 보다 활성화시킬 것이다. 본 수치해석방법은 유동관점에 있어 점성 및 박리현상 등을 고려하지 못하고 있으며, 본 수치해석결과가 비교적 큰 타각영역 ($15^\circ, 18^\circ$)에서 캐비티를 적게 추정하는 것은 이상유동의 가정에 따른 결과라 사료된다.

6. 결 언

추진기와 방향타의 상호작용을 고려하여 타에 발생하는 얇은층 캐비테이션(sheet cavitation)을 추정할 수 있는 기법이 정식화되었다. 개발된 수치해석 프로그램의 수치계산 결과와 모형시험의 결과를 비교, 분석함으로써 수치프로그램의 적용 범위 및 타당성을 검증하였다. 그러나 본 연구에서 수치해석을 위해 사용된 혼 타의 경우, 방향타

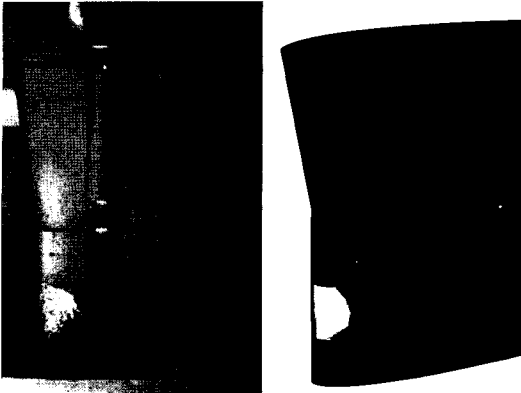


Fig. 10 Cavity pattern predicted at $\alpha = 9^\circ$: comparison with experiment

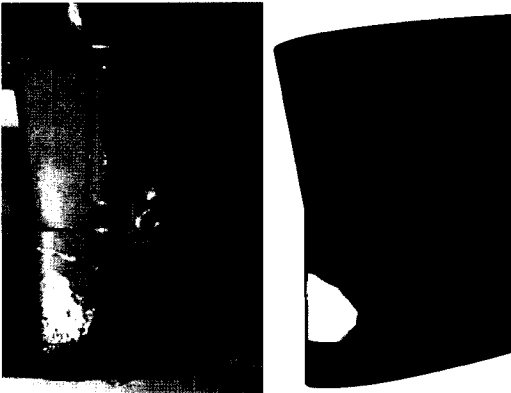


Fig. 11 Cavity pattern predicted at $\alpha = 12^\circ$: comparison with experiment



Fig. 12 Cavity pattern predicted at $\alpha = 15^\circ$: comparison with experiment

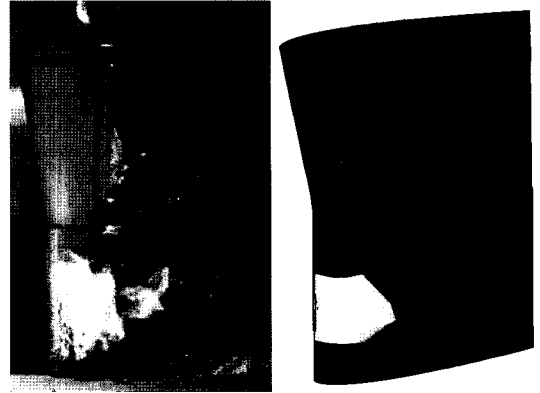


Fig. 13 Cavity pattern predicted at $\alpha = 18^\circ$: comparison with experiment

의 고정부 및 간극(gap)의 형상을 고려하지 않았다. 따라서 향후 방향타의 고정부와 간극을 고려한 수치해석 기법의 개발이 요구된다. 또한 수치해석법의 심도 있는 검증을 위하여 보다 광범위한 경우에 대하여 모형시험과의 비교연구가 필요하다.

참 고 문 헌

- 공도성, 한재문, 유재문, 2002, “ 선미 후류에서 작동하는 혼타의 압력분포에 관한 연구,” 대한조선학회 논문집, 제 39 권, 제 2 호, pp. 1-10.
- 김영기, 이진태, 이창섭, 서정천, 1993, “ 포텐셜을 기저로한 패널법에 의한 프로펠러의 정상 성능 해석,” 대한조선학회 논문집, 제 30 권, 제 1 호, pp. 73-86.
- 이창섭, 1989, “ 양력판 이론에 의한 2 차원 수중익의 부분 캐비티 문제 해석,” 대한조선학회지, 제 26 권, 제 4 호, pp. 27-34.
- 이창섭, 서정천, 1995, “ 쌍곡면 패널에서의 다이폴 분포,” 대한조선학회 논문집, 제 32 권, 제 2 호, pp. 32-42.
- 이창섭, 이진태, 1990, “ 선미 후류-프로펠러 상호작용을 고려한 유효반류추정법,” 대한조선학회 논문집, 제 27 권, 제 2 호, pp. 1-12.

- 한재운, 이창섭, 1996, “ 프로펠러 캐비테이션에 의해 유기된 변동압력 계산,” 대한조선학회 춘계학술발표회, pp. 434-437.
- Greeley, D.S. and Kerwin, J.E., 1982 “ Numerical Method for Propeller Design and Analysis in Steady Flow,” Trans. of SNAME. Vol. 90, pp. 415-453.
- Han, J.M., Kong, D.S., Song, I.H. and Lee, C.S., 2001, "Analysis of the Cavitating Flow around the Horn-Type Rudder in the Race of a Propeller," Proc. Cavitation 2001, SessionB9.005, pp. 1-8.
- Kim, Y.G., Lee, C.S. and Moon, I.S., 1995, "Prediction of Hull Surface Pressure Induced by a Cavitating Propeller," Proc. 6-th Intl Symp. on Practical Design of Ships and Mobile Units, Vol 1, Sept 17-22, pp. 308-320.
- Kim, Y.G. and Lee, C.S., 1996, "Prediction of Unsteady Performance of Marine Propellers with Cavitation using Surface-panel Method," Proc. 21-st Symp. on Naval Hydrodynamics, Office of Naval Research, Vol. IV, Trondheim, Norway, pp. 16-31.
- 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. 218-253.
- Lee, C.S., 1979, Prediction of Steady and Unsteady Performance of Marine Propeller with or without Cavitation by Numerical Lifting-surface Theory, Ph. D Thesis, MIT.
- Lee, C.S., Kim, Y.G. and Suh, J.C., 1994, "A Surface Panel Method for Analysis of Hydrofoils," J. of Ship Research, Vol. 38, No. 3, pp. 175-181.
- Natarajan, S., 2003, Computational Modeling of Rudder Cavitation and Propeller/ Rudder Interaction, Report No. 03-5, Dept of Civil Engineering, Univ. of Texas at Austin.
- Suh, J.C., Lee, J.T. and Suh, S.B., 1992, "A Bilinear Source and Doublet Distribution over a Planar Panel and Its Applications to Surface Panel Methods," Proc. 19-th Symp. on Naval Hydrodynamics, Office of Naval Research, Seoul, pp. 837-847.



< 김 건 도 > < 문 일 성 > < 김 경 열 >



< 반 석 호 > < 이 창 섭 >