

2 차원 날개 단면 주위의 캐비테이션 유동 특성 연구

최정은*, 정석호*, 이동현*

현대중공업(주) 선박해양연구소*

Cavitating Flow Characteristics around a 2-Dimensional Hydrofoil Section

Jung-Eun Choi*, Seok-Ho Chung* and Dong-Hyun Lee*

Hyundai Maritime Research Institute, Hyundai Heavy Industries, Co. Ltd.*

Abstract

Recently, the erosion due to cavitation frequently occurs on a horn-type rudder of a high-speed large container carrier. It is necessary to understand the flow characteristics around a rudder in fully wetted and cavitating flow condition, and the process of generation and collapse of cavitation for a rudder design to minimize the cavity-induced erosion. The flow characteristics around a two-dimensional hydrofoil(NACA66) are investigated through the computational method utilizing a viscous flow theory applied to a cavitation model. The computational results from the viscous flow theory are verified by the comparison with the experimental results, and are compared with those from the potential flow theory. The effects of angle of attack, Reynolds number, cavitation number, and thickness ratio on the cavitating flow are also investigated.

※Keywords: CFD(계산유체역학), NACA66, Cavitation (공동), Thickness ratio effect(날개두께비 효과), Scale effect(축척 효과), Lift to drag ratio(양항력비)

1. 서론

최근 컨테이너 운반선은 대형화 및 고속화가 계속되고 있는 추세에 있다. 대형 컨테이너 운반선의 고속화는 프로펠러 후류의 유속을 증가시켜 프로펠러 뿐만 아니라 타에 작용하는 압력도 감소시

킨다. 프로펠러와 타에 작용하는 압력이 증기압 이하로 감소하게 되면 프로펠러와 타 면에 캐비테이션이 발생하게 된다. 타에 발생한 캐비테이션은 압력이 회복되는 부분까지 이동한 후에 붕괴된다. 이때 캐비테이션의 붕괴가 급격하게 축소됨에 따라 순간 압력이 매우 커지며 진동과 소음이 발생하고 타를 침식시켜 타 효율을 저하시킨다. 그리고 캐비테이션이 타 면에서 터지면 강한 충격작용이 생겨 산화 피막이 깨지고 부식이 생긴다. 캐비테이션에 기인한

접수일: 2006년 11월 30일, 승인일: 2007년 2월 22일

† 교신저자: jechoi@hhi.co.kr, 010-9768-2078

침식을 최소화하는 타를 설계하기 위해서는 타 주위의 캐비테이션 발생 유무에 따른 유동을 잘 이해하는 것이 필요하다.

타는 선체와 프로펠러 후류에 위치해 있으므로 타 주위 유동은 아주 복잡하다. 캐비테이션이 발생하지 않은 타 주위 유동해석 및 타 성능해석에 대한 연구는 지금까지 많은 연구가 있어 왔다(민계식과 정경남 2000, 공도성 등 2002, 부경태 등 2003). 타 캐비테이션은 타 유입 경사류가 결정적인 역할을 하므로 선체와 프로펠러 후류 속도장을 정확하게 추정하는 것이 필요하다. 그러나 프로펠러 후류 속도장을 정확하게 추정하는 데에는 많은 노력과 시간이 소요된다. 따라서 선체와 프로펠러 후류 속도장과 날개 단면을 2 차원으로 이상화한 연구가 많이 수행되고 있다. 이러한 연구는 실제 상황과 많은 차이가 있을 수 있으나 캐비티의 생성, 붕괴 과정 및 거동을 잘 이해할 수 있고 설계 변수 및 계산조건의 변화가 캐비테이션 성능에 미치는 영향을 잘 파악할 수 있는 장점이 있다. 2 차원 날개 단면의 캐비테이션 유동 특성에 대한 연구는 주로 실험적 방법(Shen and Dimotakis 1989, 송인행 등 2004)과 포텐셜 이론(Uhlman 1987, 이창섭 1989) 혹은 점성이론(Berntsen et al. 2001, 배준환 등 2005)을 이용한 수치적 방법 등이 있다. 실험적 방법은 신뢰성이 있으나 비경제적이라는 면과 축척효과를 고려하여야 하는 단점이 있다. 그리고 캐비테이션은 경계층 내부에서 생성, 붕괴되므로 포텐셜 이론을 이용한 추정에는 한계가 있다. 점성이론을 이용한 수치적 방법은 이러한 단점을 제거할 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서는 캐비테이션 모형과 점성이론을 이용한 수치적 방법으로 증기의 volume of fraction 을 계산함으로써 캐비테이션 성능을 추정하는 기법을 사용하였다. 수치해석을 위한 지배방정식은 물과 증기의 혼합류에 대한 모멘텀 수송방정식인 Reynolds averaged Navier-Stokes 식과 캐비테이션 모형을 이용한 증기 수송방정식이다. 캐비테이션 모형은 Reyleigh-Plesset 식을 이용하였다. 격자생성은 GRIDGEN 을 사용하였으며

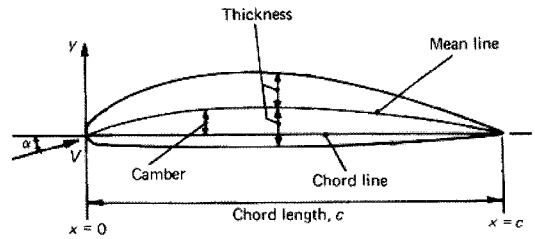


Fig. 1 Coordinate system and notation of a hydrofoil

수치해석은 FLUENT V6.2 를 사용하였다. 비점성 유동이론을 이용한 캐비테이션 유동해석은 저차 패널법 및 비선형 캐비테이션 이론(Kinnas et al. 1992, 1993)을 사용하였다. 대상날개는 실험결과가 있는 NACA66 을 사용하였으며 받음각(α), 날개 두께비(t/c), 캐비테이션 수(σ), 레이놀즈 수(Re) 등이 비공동 및 공동유동에 미치는 영향을 연구하였다.

2. 수치해석

본 계산을 위하여 적용된 좌표축과 날개 단면의 형상 정의는 Fig. 1 과 같다.

2.1 지배방정식

날개 주위의 유체는 물(ℓ)과 증기(v)의 혼합물(m)이며 비압축성 난류유동의 특성을 갖는다고 가정한다. 혼합류의 지배방정식은 질량과 모멘텀 보존식인 연속방정식과 Reynolds averaged Navier-Stokes 식이며 다음과 같이 표현된다.

연속방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{V}_m) = 0 \tag{1}$$

여기서 $\rho_m (= \sum_{k=1}^m \rho_k)$ 은 밀도이고, $\vec{V}_m [= (\sum_{k=1}^m \alpha_k \rho_k \vec{V}_k) / \rho_m]$ 은 mass-averaged velocity 이다.

Reynolds averaged Navier-Stokes equation

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \vec{V}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{V}_m \vec{V}_m) \\ = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \nabla \cdot (\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{V}_{dr,k} \vec{V}_{dr,k}) \end{aligned} \tag{2}$$

여기서 p 는 local pressure 를 나타낸다. $\bar{\tau}$ 는 stress tensor 이며 다음과 같이 표현된다.

$$\bar{\tau} = \mu_m [(\nabla \bar{V}_m + \nabla \bar{V}_m^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \bar{V}_m \bar{I}] \quad (3)$$

여기서 μ_m 은 동점성계수를 나타내며 \bar{I} 는 단위 tensor 이다. 그리고 $\bar{V}_{dr,k}$ 는 상대속도와 관련이 있는 secondary phase k 의 drift velocity 이다.

$$\bar{V}_{dr,k} = \bar{V}_k - \bar{V}_m \quad (4)$$

여기서 \bar{V}_k 는 secondary phase velocity 이다. 난류 closure 를 위하여 realizable $k-\epsilon$ 난류모형을 사용하였다.

증기 수송방정식

혼합류의 연속방정식으로부터 얻어지는 증기수송방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m f_v) + \nabla \cdot (\rho_m \bar{V}_m f_v) = \nabla \cdot (\gamma \mathcal{N} f_v) + R_e - R_c \quad (5)$$

여기서 f_v 는 vapor mass fraction 이고 γ 는 effective exchange coefficient 이다. R_e 와 R_c 는 증기의 생성과 액화를 나타내고, 다음에 표현되는 Rayleigh-Plesset 식을 사용하여 구하였다.

Rayleigh-Plesset 식

Bubble 의 성장과 붕괴를 추정하기 위하여 (6) 식으로 주어진 Rayleigh-Plesset 식을 사용하였다.

$$R_B \frac{D^2 R_B}{Dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{DR_B}{Dt} \right)^2 = \left(\frac{p_B - p}{\rho_l} \right) - 4 \frac{v_l}{R_B} \frac{DR_B}{Dt} - \frac{2\sigma}{\rho_l R_B} \quad (6)$$

여기서 R 은 bubble 의 반경을 나타내며 아래 첨자 B 는 bubble 을 나타낸다. 그리고 σ 는 표면장력이다. (6)식에서 극한 bubble 크기를 고려하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

i) $\rho < \rho_{sat}$

$$R_e = C_e \frac{V_{ch}}{\sigma} \rho_l \rho_v \sqrt{\frac{2(p_{sat} - p)}{\rho_l} (1 - f_v)} \quad (7)$$

ii) $\rho > \rho_{sat}$

$$R_c = C_c \frac{V_{ch}}{\sigma} \rho_l \rho_v \sqrt{\frac{2(p_{sat} - p)}{3 \rho_l} f_v} \quad (8)$$

여기서 $C_e(=0.02)$ 와 $C_c(=0.01)$ 는 경험으로부터 구한 상수이고, $V_{ch}(\approx \sqrt{k})$ 는 국부 slip velocity 의 효과를 고려한 characteristic velocity, ρ_{sat} 는 포화

증기압이다.

2.2 수치해석 기법

계산 영역은 유한개의 작은 격자로 나누어지며 지배방정식은 이산화 과정을 거쳐 대수방정식으로 변환된다. 공간이산화 처리는 cell-centered 유한체적법을, 시간이산화는 1 차 implicit 법을 사용하였다. 대류항과 volume fraction 은 QUICK scheme 을, 확산항은 중앙차분법을 사용하였으며, 속도-압력 연성은 SIMPLEC algorithm 을 적용하였다.

3. 대상모형, 계산조건 및 격자생성

대상형상은 Shen and Dimotakis(1989)가 수행한 모형시험과 동일한 형상인 NACA66 두께 및 $a=0.8$ 평균선 캠버분포를 선택하였다. 주요 형상 요소로는 camber ratio(t/c)=0.02, $t/c=0.09$ 그리고 chord length(c)=0.1254m 이다.

캐비테이션 유동에 영향을 미치는 변수는 단면형상, α , σ [$= (p_{exit} + p_{oper} - p_v) / (1/2 \rho_l V_0^2)$], 그리고 $R_N (= V_0 c / \nu)$ 등이다. 여기서 V_0 는 유입속도, p_{exit} 는 출구면 압력, p_{oper} 은 operating 압력을 나타낸다. 비공동과 공동유동 조건에서 계산을 수행하였으며, 여러 가지 R_N (2.00×10^6 , 3.00×10^6 , 1.01×10^8)에서도 계산을 수행하였다. 여기서 $R_N = 2.00 \times 10^6$, 3.00×10^6 는 모형시험에서 수행한 값이고, $R_N = 1.01 \times 10^8$ 는 실제 선박의 타에 적용한 값이다. 그리고 날개두께비가 공동유동에 미치는 영향을 조사하기 위하여 3 가지 경우의 t/c (0.06, 0.09, 0.12)에 대해 계산을 수행하였다.

계산 영역은 $-2.5 < x/c < 6.0$, $-3.0 < y/c < 3.0$ 이며 사용된 격자 수는 11,560 개이다. 날개 면으로부터 첫번째 격자간격은 약 $y^+ = 45$ 이다.

입구면 경계조건은 균일류의 유입속도 성분을 사용하였으며 출구면 경계조건은 일정한 값의 정압력을 사용하였다. 벽 경계조건으로 계산시간의 효율성을 고려하여 벽함수를 사용하였다. 그리고 p_{oper} 를 변화시킴으로써 σ 의 값을 조절하였다.

4. 결과 및 토의

여러 가지 받음각에서의 비공동·공동유동과 날개두께비 변화에 따른 유동특성을 조사하였다.

받음각 변화에 따른 캐비테이션 유동 특성

Fig. 2 는 leading edge sheet cavitation 과 mid-chord cavitation 이 발생하는 경우의 캐비티를 나타낸다. 여기서 실선은 점성유동이론으로부터 구한 캐비티이고 점선은 비점성유동이론으로부터 구한 캐비티이다. 점성유동이론으로부터 구한 캐비티는 10%의 vapor volume fraction 에서 발생한다고 가정하였다. $\sigma=0.91/\alpha=4^\circ$ 인 경우, 전형적인 leading edge sheet cavitation 특성이 나타나며, $\sigma=0.38/\alpha=1^\circ$ 인 경우는 mid-chord cavitation 특성이 나타난다. Leading edge sheet cavitation 인 경우 캐비티 길이(ℓ_c)와 캐비티 체적(V_c)의 R_N 에 기인한 변화는 거의 없다. 그러나 mid-chord cavitation 인 경우 R_N 이 클수록 ℓ_c 변

화는 거의 없으나 V_c 는 커짐을 알 수 있다. V_c 는 압력장과 관련있는 변수이므로, 선박인 경우 선체 변동압력에 영향을 미칠 수 있다. 비점성유동이론으로부터 구한 캐비티는 leading edge sheet cavitation 의 ℓ_c 는 점성유동이론으로부터 구한 값보다 약간 적게 나타나며 V_c 는 많이 적게 나타난다. Mid-chord cavitation 인 경우, 비점성유동이론으로부터 구한 ℓ_c 와 V_c 모두 점성유동이론으로부터 구한 값과 많은 차이가 있다. 비점성유동 해석인 경우, 경계조건을 캐비티표면이 아닌 날개표면에서 만족시켰으므로 날개두께에 비해서 캐비티 두께가 큰 경우 V_c 추정에 오차가 있을 것으로 사료되므로 이에 대한 연구가 필요하다.

Fig. 3 은 표면압력계수 [$c_p = (p - p_{exit}) / (1/2 \rho V_0^2)$]를 실험치와 비교한 결과이다. Leading edge sheet cavitation 이 발생할 경우, 수치해석 결과와 모형시험 결과는 대체로 만족할 만한 일치를 보여 주고 있다. 그러나 mid-chord cavitation 이 발생한

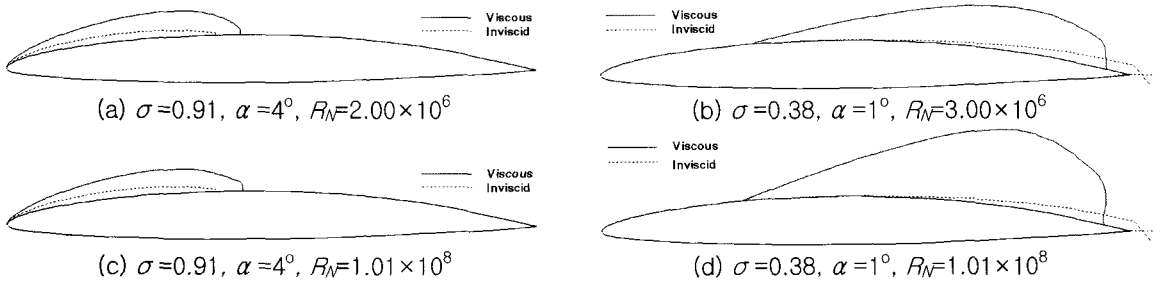


Fig. 2 Cavitation on a NACA66 section at various angles of attack and Reynolds numbers

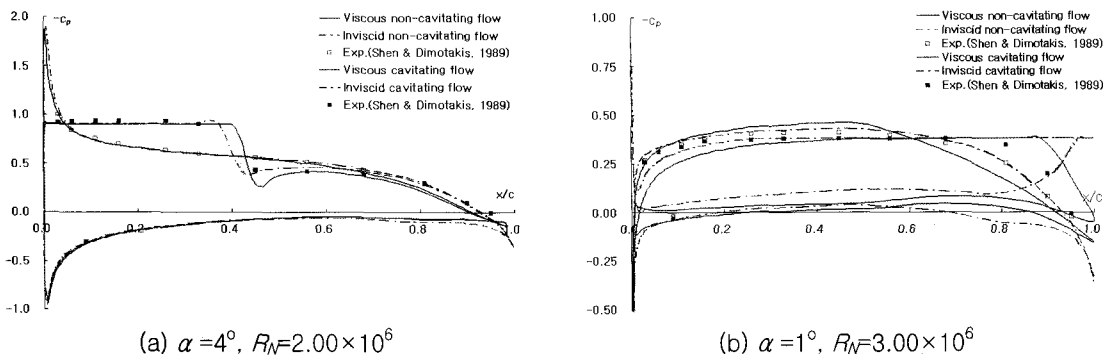


Fig. 3 Distribution of pressure coefficient on the surface: non-cavitating and cavitating flow condition

경우, 수치해석 결과와 모형시험 결과는 캐비티 발생, 붕괴 영역에서 leading edge sheet cavitation 결과와 비교하여 상대적으로 많은 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 비점성유동이론을 적용한 경우, leading edge cavitation 이 붕괴하는 지점과 mid-chord cavitation 이 발생하는 영역에서 점성이론 적용한 결과와 많은 차이를 보이고 있다. 캐비티 영역에서의 압력변화는 거의 없으나 캐비티 붕괴 영역에서는 압력이 급격하게 회복되어 캐비티 붕괴 이후 영역에서는 비공동유동 조건의 결과와 유사한 값을 갖는다. 일반적으로 많은 타 설계자들은 계산의 편의성과 경제성을 고려하여 비공동유동조건에서 구한 압력계수분포 곡선으로부터 캐비티 발생 여부를 추정하는 방법을 사용

하고 있다(부경태 등 2002, 황윤식과 박제준, 2004, 박선호 등 2005). 그러나 Fig. 3 에서 보는 바와 같이 비공동유동조건에서의 압력계수 분포는 공동유동 결과와 차이를 보이고 있으므로 주의하여야 한다.

Fig. 4 는 날개표면 압력계수의 R_N 효과를 나타낸다. 표면 압력계수에 대한 R_N 효과는 거의 없으나 mid-chord cavitation 이 발생하는 경우 R_N 효과는 leading edge sheet cavitation 이 발생하는 경우와 비교하여 상대적으로 큼을 알 수 있다. 그러나 이러한 수치해석 결과는 검증자료가 아직 부족하므로 앞으로 많은 연구가 필요할 것으로 사료된다.

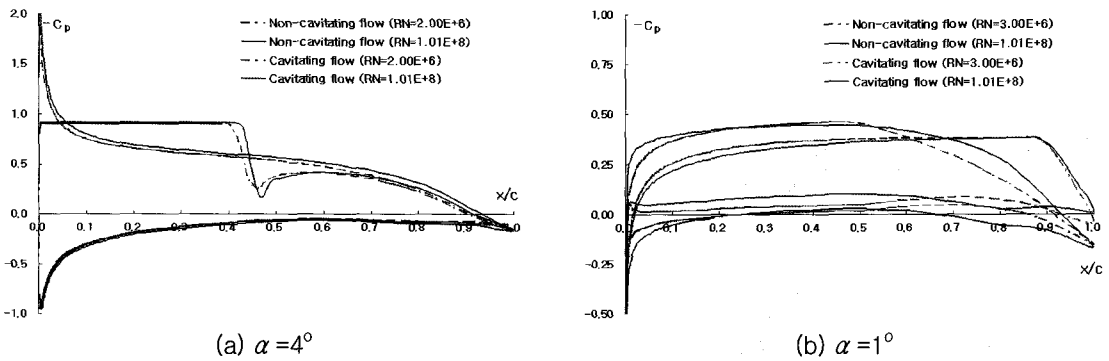


Fig. 4 Distribution of pressure coefficient on the surface at various Reynolds numbers : fully wetted and cavitating flow condition

Table 1 Lift and drag coefficient in fully wetted and cavitating flow condition

σ	α (°)	Method	R_N	C_L		C_D		C_L/C_D	
				Cav*	FW**	Cav	FW	Cav	FW
0.91	4	Exp.	2.00×10^6	0.665	0.624	0.021	0.017	31.67	36.71
		Cal.(Vis)	2.00×10^6	0.670	0.637	0.018	0.016	36.40	39.13
		Cal.(Vis)	1.01×10^8	0.683	0.689	0.014	0.009	48.90	72.60
		Cal.(Inv)		0.698	0.660	0.017	0.014	40.50	48.40
0.38	1	Exp.	3.00×10^6	0.318		0.016		19.88	
		Cal.(Vis)	3.00×10^6	0.305	0.349	0.027	0.011	11.26	32.88
		Cal.(Vis)	1.01×10^8	0.241	0.370	0.026	0.007	9.34	55.67
		Cal.(Inv)		0.245	0.341	0.028	0.009	36.20	36.20

* Cav : Cavitating flow condition
 ** FW : Fully wetted flow condition

축척효과를 포함한 양력계수와 항력계수 값을 Table 1 에 표시하였다. 일반적으로 날개단면 효율은 양항력비(C_L/C_D)로 표현되는데 캐비테이션이 발생하면 양항력비가 낮아진다. 특히 mid-chord 캐비테이션인 경우가 leading edge sheet cavitation 인 경우보다 효율저하가 큼을 알 수 있다. Re 가 증가할수록 비공동유동인 경우는 효율이 증가한다. 그러나 mid-chord cavitation 인 경우는 leading edge sheet cavitation 유동과는 달리 Re 가 증가할수록 효율이 감소함을 알 수 있다. Leading edge sheet cavitating 유동인 경우, 캐비테이션이 발생하면 양력계수와 항력계수가 모두 증가하나 항력계수 증가량이 더 크다. 그러나 mid-chord cavitation 유동인 경우는 항력계수는 증가하나 양력계수는 감소하는 특성이 있다. 이러한 현상은 Re 가 증가할수록 심하게 나타난다.

캐비티 붕괴영역에서 압력계수가 급격하게 변하고 있는 것은 Fig. 5 에 보인 바와 같이 캐비티 붕괴영역 후류에서 유동박리가 발생하여 속도기울기가 큰 것에 기인한다.

날개두께비가 캐비테이션에 미치는 영향

Fig. 6 은 비공동유동 조건에서의 날개두께비 변화에 대한 날개표면 압력계수 분포이다. t/c 가 클수록 흡입면 앞날 부근에서의 압력계수 크기가 작고 중간 부위에서는 크기가 큰 특성을 보여준다. 이러한 압력역전 영역은 받음각이 클수록 크게 나타난다. 따라서 t/c 가 클수록 leading edge sheet cavitation 이 발생할 가능성은 낮으나 mid-chord cavitation 이 발생할 가능성은 높다는 것을 추론할 수 있으며 Fig. 7 과 Fig. 8 에서 확인할 수 있다.

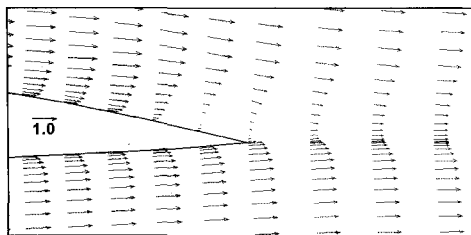


Fig. 5 Velocity vector around the region of cavitation-collapse: $\sigma=0.38$, $\alpha=1^\circ$, $Re=3.00 \times 10^6$

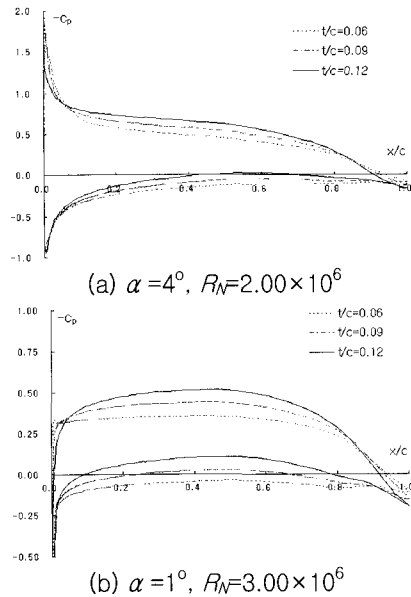


Fig. 6 Distribution of pressure coefficient on the surface in non-cavating flow condition

Fig. 7 과 Fig. 8 은 leading-edge sheet 와 mid-chord cavitation 이 발생한 경우의 t/c 와 α/σ 변화에 대한 캐비티 발생을 나타낸다. 동일한 값의 t/c 인 경우 α/σ 가 증가할수록 l_c 와 V_c 는 증가한다. Leading edge sheet cavitation 이 발생할 경우, 낮은 값의 α/σ 에서는 캐비티 발생이 앞날에 제한되어 나타나므로 t/c 가 적을수록 l_c 가 크다. 그러나 α/σ 가 증가하면 캐비티 발생은 중간 부위까지 발생되면 반대로 된다. Mid-chord cavitation 이 발생할 경우, $\alpha/\sigma=0.035$, $t/c=0.06$ 인 경우에는 캐비티가 발생하지 않는다. 그러나 캐비티가 발생하면 다른 두 가지 t/c 인 경우보다 캐비티가 넓게 발생한다. 비점성유동 이론을 적용하여 구한 캐비티는 leading edge sheet cavitation 이 발생할 경우, 발생 유무를 추정할 수 있으나 점성유동이론을 적용하여 구한 캐비티와 많은 차이를 보이고 있다. Mid-chord cavitation 이 발생할 경우, 비점성유동 이론을 적용할 경우 캐비티 발생을 추정하지 못하고 있다.

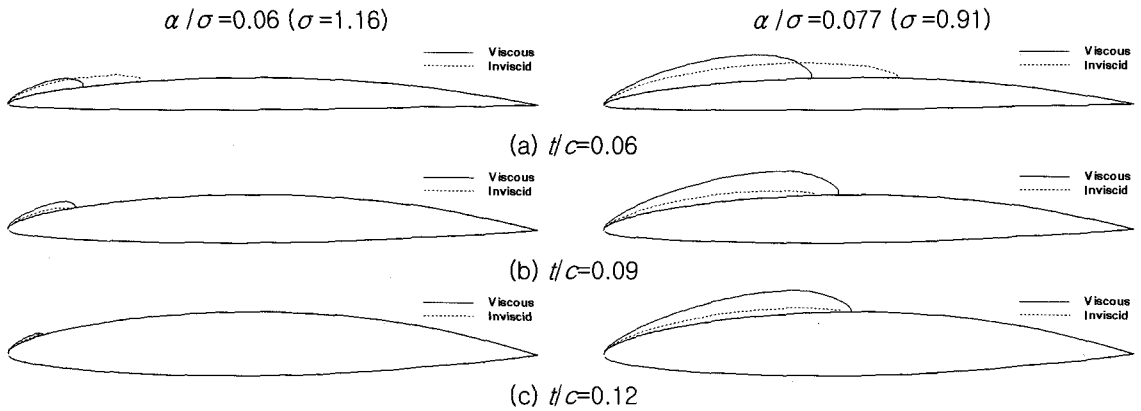


Fig. 7 Cavitation on NACA66 section at various thickness ratios : $\alpha = 4^\circ$, $R_N = 2.00 \times 10^6$

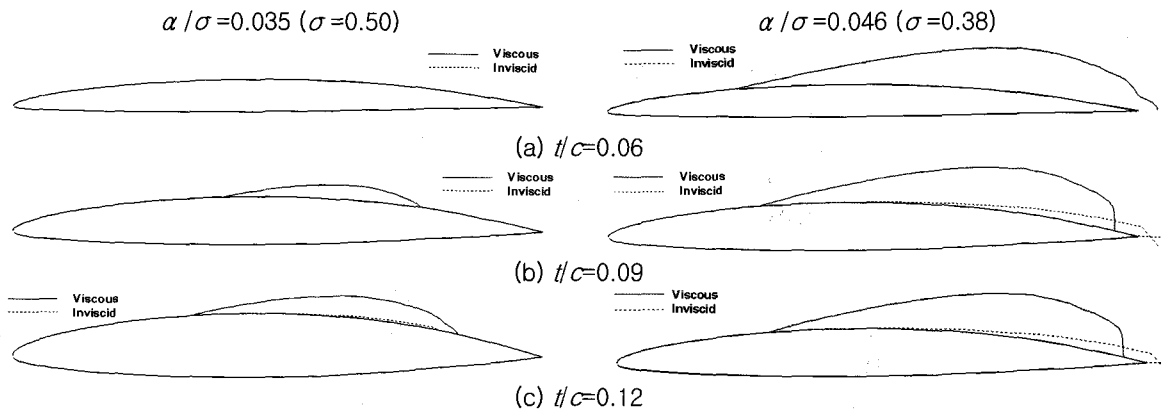


Fig. 8 Cavitation on a NACA66 section at various thickness ratios : $\alpha = 1^\circ$, $R_N = 3.00 \times 10^6$

Table 2 Lift and drag coefficient at various thickness ratios

Case		$\alpha = 4^\circ, R_N = 2.00 \times 10^6$			$\alpha = 1^\circ, R_N = 3.00 \times 10^6$		
α / σ		Ncav	0.06	0.077	Ncav	0.035	0.046
C_L	t/c	0.06	0.631	0.639	0.673	0.352	0.445
		0.09	0.637	0.647	0.670	0.349	0.305
		0.12	0.620	0.637	0.674	0.340	0.184
C_D	t/c	0.06	0.018	0.021	0.022	0.010	0.022
		0.09	0.016	0.018	0.018	0.011	0.027
		0.12	0.015	0.015	0.015	0.011	0.034
C_L/C_D	t/c	0.06	34.24	31.06	30.05	35.78	19.86
		0.09	39.13	36.77	36.40	32.88	11.26
		0.12	40.44	41.40	44.12	29.77	5.43

Table 2 에서 보는 바와 같이 $\alpha=4^\circ$ 인 경우 t/c 가 클수록 효율은 증가하고, $\alpha=1^\circ$ 인 경우 효율은 감소한다. 이와 같은 현상은 $\alpha=4^\circ$ 인 경우 t/c 가 클수록 항력계수는 감소하나 $\alpha=1^\circ$ 인 경우는 증가하기 때문인 것으로 추정된다. 여기서 주의할 점은 항력계수는 t/c 변화에 따른 비례관계를 보여주고 있으나 양력계수는 t/c 뿐만 아니라 캐비테이션 발생 유무에 따라 크기가 달라진다는 것이다.

5. 결론

NACA66 단면 주위의 비공유동특성과 공동유동 특성을 캐비테이션 모형을 이용한 점성유동이론을 이용하여 수치해석하였다. 공동유동에 영향을 미치는 변수인 받음각, 날개두께비, 캐비테이션 수, 레이놀즈 수의 영향에 대해 조사하였다. 이러한 변수들의 적합한 조합으로 캐비테이션 형태에 따른 유동특성 변화, 축척효과, 형상효과, 캐비테이션 붕괴 영역의 유동특성 그리고 양항력비 비교를 통한 효율 등을 분석하였다. 본 연구는 최근 대형 고속 컨테이너 운반선의 혼 타에서 자주 발생하고 있는 캐비테이션에 기인한 타 침식을 최소화하는 타를 설계하기 위한 기초 자료로 활용될 예정이다.

참 고 문 헌

- 공도성, 한재문, 유재문, 2002, “ 선미 후류에서 작동하는 혼타의 압력 분포에 관한 연구,” 대한조선학회 논문집, 제 39 권, 제 2 호, pp. 1-10.
- 민계식, 정경남, 2000, “ 선박의 최적 방향타 설계를 위한 실험적 연구,” 대한조선학회 논문집, 제 37 권, 제 2 호, pp. 88-99.
- 박선호, 허재경, 유병석, 2005, “ 캐비테이션을 고려한 타 끝단 형상 비교,” 대한조선학회 춘계학술대회 논문집, pp. 793-799.
- 배준환, 선호성, 이수갑, 2005, “ 수중익 캐비테이션 유동 해석에 관한 수치적 연구,” 대한조선학회 춘계학술대회 논문집, pp. 359-364.

- 부경태, 백광준, 한재문, 송인행, 2002, “ FLUENT 코드를 이용한 타 단면의 점성유동 해석,” 대한조선학회 춘계학술대회 논문집, pp. 209-212.
- 부경태, 한재문, 송인행, 신수철, 2003, “ FLUENT 코드를 이용한 타 단면의 점성유동 해석,” 대한조선학회 논문집, 제 40 권, 제 4 호, pp. 30-36.
- 송인행, 백광준, 안성욱, 오정근, 서정천, 2004, “ Gap 이 있는 이차원 타 형상 변화에 대한 캐비테이션 특성 연구,” 대한조선학회 춘계학술대회, pp. 51-56.
- 이창섭, 1989, “ 양력판 이론에 의한 2 차원 수중익의 부분 캐비티 문제 해석,” 대한조선학회 논문집, 제 26 권, 제 4 호, pp. 27-34.
- 황윤식, 박제준, 2004, “ 러더 단면 및 간극 형상에 따른 2 차원 점성유동 수치해석,” 대한조선학회 춘계학술대회 논문집, pp. 1070-1075.
- Berntsen, G.S., Kjeldsen, M. and Arndt, R.E.A., 2001, “ Numerical Modeling of Sheet and Tip Vortex Cavitation with FLUENT 5,” CAV2001.
- “ FLUENT 6.1 User's Guide” , 2002, Fluent Inc..
- “ GRIDGEN User Manual Version 14” , 2002, Pointwise.
- Kinnas, S.A. and Fine, N.E., 1993, “ A Numerical Analysis of the Flow around 2-D and 3-D Partially Cavitating Hydrofoils,” J. of Fluid Mechanics, Vol. 254, pp. 151-181.
- Kinnas, S.A. and Fine, N.E., 1992, “ A Nonlinear Boundary Element Method for the Analysis of Unsteady Propeller Sheet Cavitation,” The 9th Symposium on Naval Hydrodynamics, pp. 717-737.
- Shen, Y.T. and Dimotakis, P.E., 1989, “ The Influence of Surface Cavitation on Hydrodynamic Forces,” Proc. of the 22nd American Towing Tank Conference, St. John's, Canada.
- Uhlman, J.S., 1987, “ The Surface Singularity

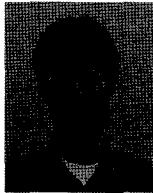
Method Applied to Partially Cavitating Hydrofoils,” J. of Ship Research, Vol. 31, No. 2, pp. 107-124.



< 최 정 은 >



< 정 석 호 >



< 이 동 현 >