

수중익의 표면거칠기가 캐비테이션 특성에 미치는 영향

윤경종* · 김윤제**

Effects of the Surface Roughness on the Characteristics of the Cavitation in a Hydrofoil

Kyoung Jong Yun*, Youn J. Kim**

Key Words : Cavitation (캐비테이션), Surface roughness (표면거칠기), Hydrofoil (수중익), Angle of attack (받음각), CFD (전산유체역학)

ABSTRACT

In this study, the characteristics of the cavitation behavior around hydrofoil are investigated with the commercial CFD code CFX-5. Calculations are performed for NACA 64108 hydrofoil by solving the time-averaged turbulent Navier-Stokes equations and discretized by finite volume method. We classify the different cavitating regimes in which appear at the hydrofoil according to the values of cavitation number, surface roughness and angle of attack. Special attention is paid to the following topics: cavity length, void fraction and lift breakdown.

1. 서론

산업발전과 더불어 공장설비, 자동차, 항공기, 선박 및 해양구조물 등은 더욱 고강도, 고속화 및 대형화되고 있으며, 이들 기계구조물 등에 적용되는 환경조건은 다양화되고, 더욱 가혹화되는 추세에 있다. 하지만 기계는 일반적으로 그 운전성능에 있어서 한계점이 있다. 유체기계에서도 고속화에 따라 여러 가지 공학상의 문제점이 야기되고 있다. 이러한 문제점 중 고속운전의 한계를 제한하는 가장 큰 요인이 캐비테이션(cavitation)이다[1-2].

캐비테이션이 발생하면 액체 유동의 방해로 인한 성능저하가 일어난다. 또한, 기포가 깨어지면서 발생하는 충격압에 의한 소음, 그리고 물체의 표면에 충격을 주기 때문에 구조물에 피로현상이 발생한다. 이와 같

이 유체기계에 캐비테이션이 발생하면 수명을 단축시킬 뿐 아니라 성능을 감소시킨다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 캐비테이션 발생과 관련하여 많은 실험적, 수치적 연구가 진행되어왔다. Dagan [3]은 저 캐비테이션 수에서 축대칭, 정상상태의 캐비테이션 유동에 대한 항력계수를 구하는 수치적 방법에 대하여 연구하였고, Kumaraswamy 등[4]은 여러 모델의 원심펌프와 수력터빈에서 캐비테이션 발생에 따른 성능저하와 소음 발생을 실험을 통해 관찰하였다. McNulty와 Pearsall [5]은 캐비테이션이 발생하는 상태에서 펌프 성능을 향상시키기 위한 대책으로 최적의 회전차를 설계하기 위한 연구를 수행하였으며, Kubota [6]는 기포 이상유동 모델(bubble two-phase flow model)을 이용하여 캐비테이션 수, 레이놀즈 수, 받음각의 변화에 따른 NACA 0015 수중익 주위의 비정상 캐비테이션 현상을 수치적으로 해석하였다.

Uchiyama [7]는 유한요소법을 이용한 캐비테이션

* 성균관대학교 대학원

** 성균관대학교 기계공학부

E-mail : yjkim@skku.edu

수치해석방법을 발표하였고, 이류항에 대한 수치적 불안정성을 제거하기 위해 지수가중함수 (exponential weighting function)를 이용한 Petrov-Galerkin법을 기초로 하는 상류 차분 도식 (upwind scheme)을 사용하였다. Caron 등[8]은 받음각이 시간에 따라 변하는 진동 수중익에 대해 표면 거칠기에 따라 캐비테이션 현상이 어떻게 나타나는 지를 실험하였다. 또한 Coutier-Delgosha 등[9]은 난류모델 중 2-방정식 난류모델인 $k-\epsilon$ RNG 모델과 $k-\omega$ 난류모델을 이용하여 압축성 효과를 고려한 수중익 주위 유동장의 비정상 캐비테이션을 해석하였다. Berntsen 등[10]은 상용 CFD 코드인 Fluent를 이용하여 NACA 0015 수중익에 대해 2차원 수치해석을, NACA 662-415 수중익에 대해서는 3차원 수치해석을 각각 캐비테이션 수와 받음각 변화에 따라 수행하였다.

본 연구에서는 NACA 64108 수중익에 대해 2차원 비정상, 비압축성 유동장 해석을 상용 코드인 CFX-5를 사용하여 표면거칠기 변화에 따른 수중익 주위의 유동과 캐비테이션 현상에 대하여 해석하였다.

2. 수치해석

2.1 지배방정식

본 연구의 수치해석에 사용한 2차원 비정상 비압축성 보존형 지배방정식은 다음과 같다.

연속방정식:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

운동량방정식:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{\rho u'_i u'_j}) \quad (2)$$

위 식은 Reynolds Averaged Navier-Stokes 방정식으로 τ_{ij} 는 점성항을 나타내며 다음과 같다.

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} - \overline{\rho u'_i u'_j} \quad (3)$$

여기서, μ 는 점성계수이며, δ_{ij} 는 Kronecker delta 함수이다.

2.2 난류모델

본 연구에서 사용한 난류 모델은 Menter [11]가 제안한 2 방정식 모델 (two equation model)인 $k-\omega$ SST (shear-stress transport) 모델 방정식이다. 이 모델은 $k-\omega$ 모델과 $k-\epsilon$ 모델의 장점만을 취한 것으로 역압력구배에서의 난류전단응력에 관한 부분을 변형한 것을 사용하였다. 방정식의 변수들은 평균유동 방정식과 마찬가지로, 자유 유동의 값 및 음속을 이용하여 무차원화된 값을 사용하였다. 이 방정식을 직교 좌표에 대한 보존형 (conservative form)으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_T}{\partial t} + \frac{\partial E_T}{\partial x} + \frac{\partial F_T}{\partial y} + \frac{\partial G_T}{\partial z} = \\ \frac{\partial E_{T_v}}{\partial x} + \frac{\partial F_{T_v}}{\partial y} + \frac{\partial G_{T_v}}{\partial z} + S + M \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 각각의 변수는 다음 식으로 나타낸다.

$$\begin{aligned} Q_T &= \begin{bmatrix} \rho k \\ \rho \omega \end{bmatrix} & E_T &= \begin{bmatrix} \rho k u \\ \rho \omega u \end{bmatrix} \\ F_T &= \begin{bmatrix} \rho k v \\ v \rho \omega \end{bmatrix} & G_T &= \begin{bmatrix} \rho k w \\ \rho \omega w \end{bmatrix} \\ E_{T_v} &= \begin{bmatrix} (\mu + \sigma^* \mu_T) \frac{\partial k}{\partial x} \\ (\mu + \sigma \mu_T) \frac{\partial \omega}{\partial x} \end{bmatrix} \\ E_{T_v} &= \begin{bmatrix} (\mu + \sigma^* \mu_T) \frac{\partial k}{\partial y} \\ (\mu + \sigma \mu_T) \frac{\partial \omega}{\partial y} \end{bmatrix} \\ E_{T_v} &= \begin{bmatrix} (\mu + \sigma^* \mu_T) \frac{\partial k}{\partial z} \\ (\mu + \sigma \mu_T) \frac{\partial \omega}{\partial z} \end{bmatrix} \\ S &= \begin{bmatrix} \left(\tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \beta^* \rho k \omega \\ \frac{\gamma}{\nu_t} \left(\tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \beta \rho \omega^2 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

여기서 상수 값을 갖는 F_1 은 벽면에서의 거리에 따른 함수 값으로 취할 수 있으며 벽면에서 멀어지면 0을 갖게 된다.

2.3 캐비테이션 모델

작동유체는 액상, 기상 그리고 비응축 기체 혼합물로 가정하였으며, 포화증기압이하에서 생성되는 기포의 크기는 Rayleigh Plesset 식에 의해서 결정된다.

$$R_B \frac{d^2 R_B}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR_B}{dt} \right)^2 + \frac{2\sigma}{R_B} = \frac{p_v - p}{\rho_f} \quad (5)$$

여기서 R_B 는 기포의 직경, p_v 는 액상 온도에서의 포화증기압, p 는 기포 주변의 액상 압력, σ 는 액상과 기상 사이에서의 표면장력계수를 각각 나타낸다.

2.4 격자계와 경계조건

Fig. 1은 2차원 수중의 주위의 격자계를 보여주고 있다. 본 연구의 수치해석에 사용된 총 격자수는 50,000개이며, 정렬격자를 사용하였다. 압력 및 속도 등의 변화가 심할 것으로 예측되는 수중의 주변에 격자를 집중시켜 생성하였다. 또한 Fig. 2에 도시한 바와 같이 해석영역을 설정하였다. 입구는 정렬격자 생성에 유리하도록 타원형으로 하였으며, x방향으로 일정한 속도를 가지고 유입되는 것으로 설정하였다. 출구조건으로는 모든 유동 변수에 대하여 유선방향으로의 구배가 0인 Neumann조건을 적용시켰으며, 출구위치에 내부 유동이 영향을 받지 않도록 익형으로부터 6c만큼 떨어진 곳에 위치시켰다. 유체 압력은 대기압으로 유

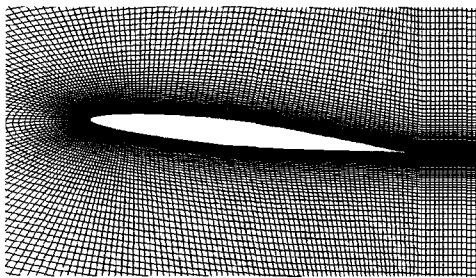


Fig. 1 Grid system of the modeled 2D hydrofoil

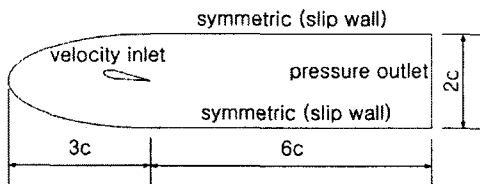


Fig. 2 Outline of the computational domain

입 된다고 가정하였고, 온도는 300K, 그리고 포화증기압은 3540 Pa로 설정하였다.

해석방법으로는 Patankar와 Spalding [12]이 제안한 비정상 SIMPLE 알고리즘을 적용하였으며, 대류항은 2차원 상류도식을 이용하여 이산화하였다. 수치해석에 사용된 계산시간단계는 0.001 s를 사용하였으며, 매 계산시간 단계별로 20번의 반복계산을 수행하였다.

3. 수치해석 결과

3.1 캐비테이션 수 영향

다음 식은 캐비테이션 수를 나타낸다.

$$\sigma = \frac{p - p_v}{\frac{1}{2} \rho V^2} \quad (6)$$

일정 압력과 일정온도에서 캐비테이션 수는 유체의 속도에 의해서만 영향을 받는다. 본 연구에서는 6°와 8°의 받음각에 대해서 유입속도를 6 m/s에서 2 m/s씩 증가시켜 12 m/s까지 수행하였다.

캐비테이션 현상이 일어나는 유동에서 중요한 매개변수는 캐비티 길이이다. 캐비티 길이는 일반적으로 유동이 진행되는 동안 일정하지 않는다. 따라서 실험적으로 고속촬영을 통해 이를 분석한다. 하지만 수치적 연구에서는 각 계산시간단계에서의 평균값을 사용할 수 있다.

평판의 받음각 변화에 따른 캐비티 길이에 대하여 Acosta [13]는 매개변수 $\sigma/2\alpha$ 를 사용하였으며, Arndt [14]은 얇은 수중익에 대해서도 이 매개변수를 적용하

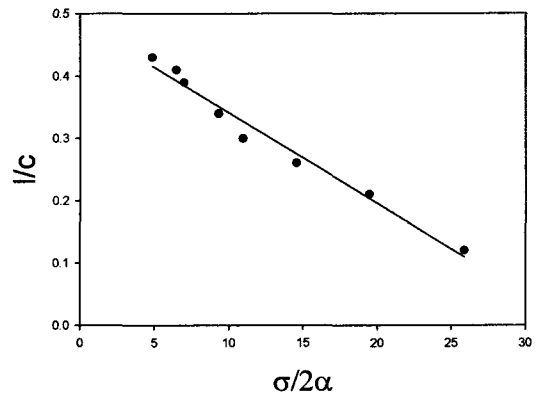


Fig. 3 Cavity length versus $\sigma/2\alpha$

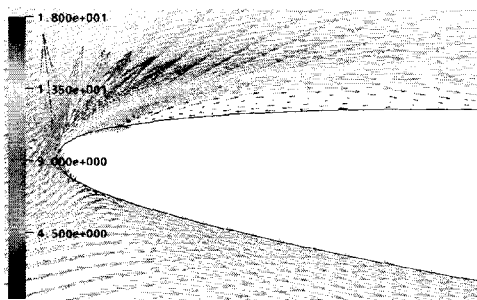
였다. Fig. 3은 매개변수 $\sigma/2\alpha$ 에 대하여 익현길이에 대한 캐비티길이 비의 관계를 나타낸다. 그래프를 통해 알 수 있듯이 매개변수 $\sigma/2\alpha$ 는 캐비티 길이와 관계가 있음을 알 수 있다. 또한, 이는 수치해석을 통해 캐비테이션 현상을 예측하는 것이 비록 정확하게 일치하는 물리적인 모델은 아닐지라도 어느 정도 캐비테이션 현상을 예측할 수 있음을 보여주고 있다.

3.2 표면거칠기 영향

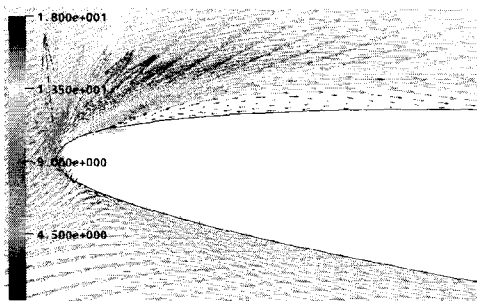
본 연구에서는 캐비테이션 현상이 동일 캐비테이션 수 하에서 표면거칠기의 변화에 따라 어떤 변화가 있

는지 알아보기 위해 동일 유입속도에 대해 표면거칠기를 0, 100, 200 μm 로 변화시키면서 수치해석을 수행하였으며, 수중익 주변의 속도분포를 Fig. 4에 도시하였다. 결과를 보면 표면거칠기가 증가함으로써 속도구배가 역전되는 구간이 조금 앞쪽으로 이동하고, 영역 또한 줄어드는 것을 볼 수 있다. 이는 표면경계층 내의 저 운동량을 갖는 유동이 표면거칠기에 의하여 외부 유동과 혼합되면서 운동량이 증가했기 때문으로 판단된다. 또한, 0 μm 에서 100 μm 으로 표면거칠기 변화를 주었을 경우에는 속도 역전영역의 분포 변화가 크지만, 100 μm 에서 200 μm 으로 표면거칠기를 증가시켰을 경우에는 그 효과가 미미하였다. 그리고 표면거칠기가 증가할 경우, 항력의 증가가 예상되므로 수중익에 표면거칠기를 주는 것은 세심한 고려가 필요함을 알 수 있다.

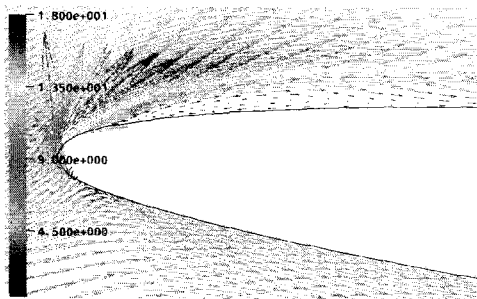
Fig. 5는 수중익 윗면에서의 압력분포를 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 수중익 전연부에서 포화 증기압 이하로 내려가는 영역이 표면거칠기가 증가할수록 감소하는 것을 볼 수 있다. 그리고 수중익 전체에 걸쳐 절대압력이 표면거칠기가 클수록 약간 높음을



(a) 0 μm



(b) 100 μm



(c) 200 μm

Fig. 4 Velocity profiles around hydrofoil with different surface roughness

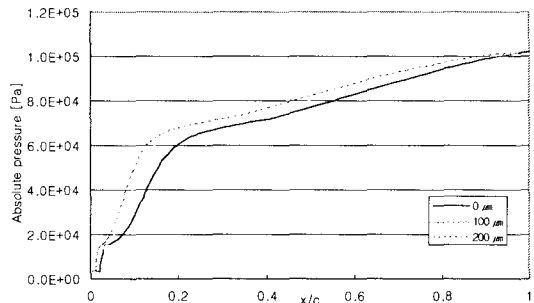


Fig. 5 x/c versus absolute pressure on the hydrofoil

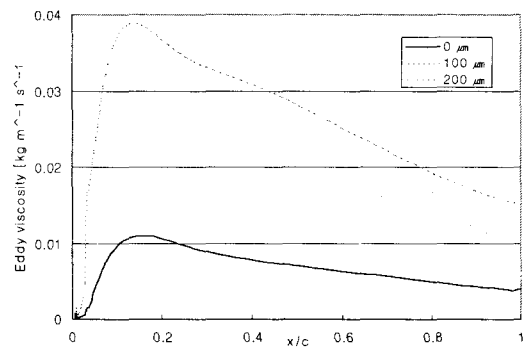
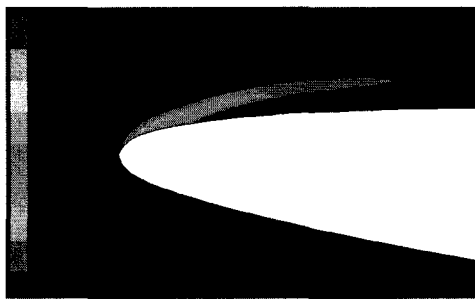


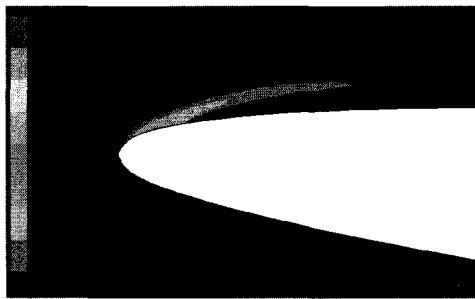
Fig. 6 x/c versus eddy viscosity on the hydrofoil

알 수 있다. 이는 Fig. 6에서 볼 수 있듯이 표면거칠기 증가에 따라 와류 강도가 증가함으로써 생긴 결과라고 할 수 있다. 와류 강도가 커짐에 따라 압력구배의 크기가 작아짐을 알 수 있고, 또한 와류 강도의 경우 표면거칠기 증가에 따라 그 크기가 비약적으로 증가함을 알 수 있다. 이는 표면거칠기가 커질 경우, 얻을 수 있는 캐비테이션 감소의 효과보다 항력의 증가, 양력의 감소 등 손실이 더 커질 수 있음을 의미한다.

Fig. 7은 NACA 64108 수중익 전연부에서 발생한 기상의 체적 분율을 보여주고 있다. 앞에서 속도분포와 압력분포 결과로부터 예상했던 것처럼 표면거칠기



(a) 0 μm



(b) 100 μm



(c) 200 μm

Fig. 7 Contour plots of constant water vapor with different surface roughness

증가에 따라 캐비테이션 발생 영역이 감소함을 볼 수 있다. 하지만, 표면거칠기 증가에 따른 캐비테이션 감소효과는 점점 줄어들음을 볼 수 있다. 속도 역전 영역에 의해 수중익 전연부에 발생한 캐비테이션이 수중익에 붙어 있지 못하고 떨어져 나감을 볼 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 대기압하에서 표면거칠기 변화에 따른 NACA 64108 수중익 주위의 유동과 캐비테이션 현상을 해석하기 위해 $k-\omega$ SST 난류모델을 적용하여 수치해석을 수행하였다.

(1) 동일 받음각에 대해 유속을 변화시켜 수치해석을 함으로써 평판에 적용되는 매개변수 $\sigma/2\alpha$ 를 두께가 얇은 수중익에도 적용할 수 있음을 알게 되었다. 이는 다양한 수중익에 대해서도 매개변수 $\sigma/2\alpha$ 를 적용하여 보다 쉽게 수중익에서 발생하는 캐비테이션을 예상할 수 있으리라 생각된다.

(2) 표면거칠기가 증가함으로써 박리지점이 수중익의 전연부로 이동하였으며, 속도 역전 영역의 크기가 줄어들었다.

(3) 표면거칠기의 증가에 따라 와류 강도는 증가하였으며, 이로 인해 경계층 내외부의 유동이 혼합되면서 압력구배가 줄어들었다.

(4) 캐비테이션이 표면거칠기 증가에 따라 감소하였으나, 거칠기 증가에 따른 감소효과는 점차 줄어들었다.

결과를 종합해 볼 때, 표면거칠기의 캐비테이션 감소 효과는 존재하나, 날개의 효율증가와 캐비테이션 감소의 두 조건을 만족시키는 범위에서 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

- (1) Knapp, R. T., Daily, J. W., Hammitt, F. G., 1970, "Cavitation," McGraw-Hill, New York.
- (2) Young, F. R., 1989, "Cavitation," Imperial College Press.
- (3) Dagan, A., 1988, "Axially Symmetric Cavitation Flow at Small Cavitation Numbers," International journal for numerical methods in fluids, Vol. 8, No. 8, pp. 943-955
- (4) Kumaraswamy, S., Radha Krishna, H. C., 1988, "Cavitation Studies of Centrifugal Pumps,"

- Irrigation and power, Vol. 45, No. 1, pp. 99-116
- (5) McNulty, P. J., Pearsall, I. S., 1982, "Cavitation Inception in pumps," *Journal of Fluids Eng.*, Vol. 104, No. 1, pp. 99-104
- (6) Kubota, A., 1988, "Numerical Studies of Unsteady Cavitation on a Hydrofoil by a Bubble Two-Phase Flow Model," Doctorate Thesis, The University of Tokyo
- (7) Uchiyama, T., 1998, "Numerical simulation of cavitating flow using the upstream finite element method," *Applied mathematical modelling*, Vol. 22, No. 4/5, pp. 235-250
- (8) Caron, J.-F., Farhat, M., Avellan, F., 2000, "On the Leading Edge Cavity Development of an Oscillating Hydrofoil," *Proceedings of ASME FEDSM'00*
- (9) Coutier-Delgosha, O., Fortes-Patella, R., Reboud, J. L., 2002, "Simulation of unsteady cavitation with a two-equation turbulence model including compressibility effects," *Journal of Turbulence*, Vol. 3(058)
- (10) Berntsen, G. S., Kjeldsen, M., Arndt, R. E. A., 2001, "Numerical modeling of sheet and tip vortex cavitation with fluent 5," CAV2001, sessionB5.006
- (11) Menter, F. R., 1994, "Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering application," *AIAA Journal*, Vol. 32, No. 8, pp. 1598-1605
- (12) Patankar, S. V., Spalding, D. B., 1972, "A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows." *International Journal of heat and Mass Transfer* vol. 15, no. 10, pp. 1787-1806
- (13) Acosta, A. J., 1955, A note on partial cavitation of flat plate hydrofoil. Tech. Rep. E-19.9, California Institute of Technology.
- (14) Arndt, R. E. A., 1981, Recent advances in cavitation research. *Advances in Hydroscience* 12.