

Ogive-Cylinder 주위와 Venturi에서의 캐비테이션 전산 유동해석

이 장 춘,¹ 안 보 경,² 김 동 훈,³ 김 찬 기,³ 박 원 규⁴

NUMERICAL ANALYSIS OF CAVITATION FLOW AROUND OGIVE-CYLINDER AND VENTURI

J.C. Lee,¹ B.K. Ahn,² D.H. Kim,³ C.K. Kim³ and W.G. Park⁴

A two-phase method in CFD has been developed and is applied to model the cavitation flow. The governing equation system is two-phase Navier-Stokes equation, comprised of the mixture mass, momentum and liquid-phase mass equation. It employs an implicit, dual time, preconditioned algorithm using finite difference scheme in curvilinear coordinates and Chien k-ε turbulence equation. The experimental cavitating flows around ogive-cylinder and venturi type objects are employed to test the solver. To prove the capabilities of the solver, several three-dimensional examples are presented.

Key Words : 캐비테이션(Cavitation), 예조건화(Pre-conditioning), 부분공동해석(Partial cavitation analysis), 오자이브-실린더(Ogive-Cylinder), 벤츄리(Venturi)

1. 서 론

캐비테이션(Cavitation)은 액체 유동의 어느 국부적 지점에 서의 압력강하로 인해 생기는 현상으로 이러한 현상은 노즐(Nozzle), 프로펠러(Propeller), 터빈(Turbine) 등 다양한 수력학적 시스템에서 발생한다. 캐비테이션의 2상유동의 물리적 해석은 매우 복잡하여 부분적인 이해에만 머물러 있다. 일반적으로 캐비테이션은 구조적인 손상과 그와 함께 발생하는 소음, 진동 등으로 인해 부정적인 측면으로 취급되어 왔으나, 다른 한편으로는 고속의 추진기와 초월공동추진체에서는 초월공동(Super-Cavity)을 이용하여 항력을 감소시키는 긍정적인 측면이 있다. 이렇듯, 여러 연구 분야에서 캐비테이션을 감소시키거나 증가시켜 더 나은 시스템의 성능을 개발하려는 연구가 진행되고 있다.

Fig. 1은 1977년 러시아에서 초월공동현상을 이용한 Shkvall 어뢰이다. 이 어뢰는 수중에서 약 500km/h 이상의 속도로 진

행하여 적을 공격 할 수 있다. 그리고 RAMICS(Rapid Airborne Mine Clearance System)은 Fig. 2에서 보듯이 헬리콥터나 비행기에 탑재한 수중 발사체를 고속으로 발사하여 초월공동을 일으켜 돌진하는 충격력으로 기뢰를 폭발시키는데 이용하고 있다.

본 연구에서는 Homogeneous Equilibrium Flow Model 중에서도 Lindau J. 등[1], Merkel 등[2], Venkateswqrn S. 등[3]에 의해 제안된 모델을 사용하였으며 압축성 유동과 비압축성 유동을 동시에 해석하기 위하여 Preconditioning Technique[4]를 이용하였다. 전산 해석은 Ogive-실린더 형상에 대한 유동해석과 벤츄리 형상에 대한 유동해석이 수행하였다.

2. 해석 기법

2.1 지배방정식

본 연구에서 이용된 유동 지배방정식은 기체와 액체에 관한 연속방정식과 혼성류에 대한 운동량 방정식으로 다음과 같다[5].

$$\left(\frac{1}{\rho_m \beta^2}\right) \frac{\partial p}{\partial \tau} + \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = (m^+ + m^-) \left(\frac{1}{\rho_l} - \frac{1}{\rho_v}\right) \quad (1)$$

1 학생회원, 부산대학교 대학원 기계공학과

2 삼성중공업

3 국방과학연구소 2체계본부

4 정회원, 부산대학교 기계공학부

* Corresponding author, E-mail: wgpark@pusan.ac.kr

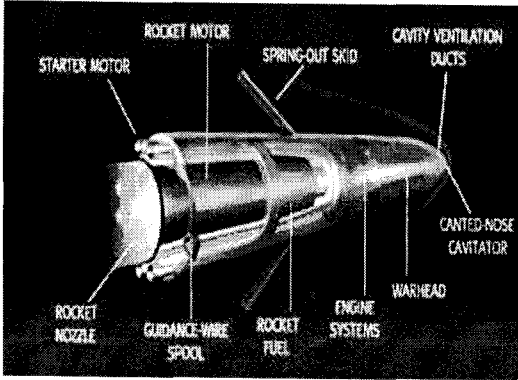


Fig. 1 Shkvall Torpedo

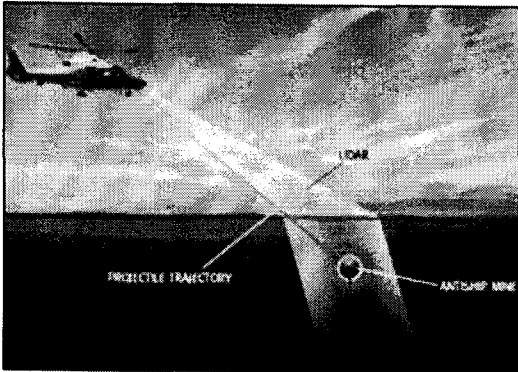


Fig. 2 RAMIC

용시키면 다음과 같은 식으로 나타난다[4].

$$\Gamma_e \frac{\partial \hat{Q}}{\partial t} + \Gamma \frac{\partial \hat{Q}}{\partial \tau} + \frac{\partial \hat{E}_j}{\partial \xi_j} - \frac{\partial \hat{E}_j^v}{\partial \xi_j} - \hat{H} = 0 \quad (6)$$

여기서 \hat{Q} 는 유동벡터, \hat{E}_j 는 대류항을, \hat{E}_j^v 는 점성항, \hat{H} 는 소스항을 의미한다. Γ_e 는 압축성과 비압축성을 동시에 풀기 위한 preconditioning 행렬으로써 다음과 같이 정의된다.

$$\Gamma_e = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \rho_m & 0 & 0 & u \Delta \rho \\ 0 & 0 & \rho_m & 0 & v \Delta \rho \\ 0 & 0 & 0 & \rho_m & w \Delta \rho \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서 $\Delta \rho \equiv \rho_l - \rho_v$ 로 정의한다.

난류모델은 Chien의 k-ε model을 사용하였다[6].

2.3 캐비테이션 모델

캐비테이션은 상변화 과정의 동역학적, 열역학적 현상에 의해 발생한다. 액체-증기의 진행과정은 m^+ 와 m^- 로 나타내며 이 항들은 각각 액화와 증기화로 표현할 수 있다[4][5]. 본 연구에서는 캐비테이션 해석을 위해 Homogeneous equilibrium flow model을 사용하였으며 이때 Evaporation term(m^-)과 Condensation term(m^+)은 다음과 같이 주어진다[2].

$$\dot{m}^- = \frac{C_{dest} \rho_l \text{Min}(P - P_v, 0) \alpha_l}{(0.5 \rho_l U_\infty^2) t_\infty} \quad (8)$$

$$\dot{m}^+ = \frac{C_{prod} \rho_v \text{Max}(P - P_v, 0) (1 - \alpha_l)}{(0.5 \rho_l U_\infty^2) t_\infty} \quad (9)$$

t_∞ 는 평균 유동 시간(= L_∞ / U_∞)이며 Empirical Constant는 여기에서는 $C_{dest}=1$ $C_{prod}=80$ 로 하여 구하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 Ogive 실린더 주위의 캐비테이션 유동 해석

Ogive 실린더를 해석하기 위한 격자계는 3차원 회전체 주위의 유동을 해석하기 위한 격자계로서, 총 격자점의 수는 $82 \times 132 \times 37$ 로 400,488개이다.

본 연구에서 사용된 레이놀즈수(Reynolds Number)는

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m u_i) + \frac{\partial}{\partial \tau} (\rho_m u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_m u_i u_j) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\mu_{m,t} [\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}]) + \rho_m g_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial \alpha_l}{\partial t} + (\frac{\alpha_l}{\rho_m \beta^2}) \frac{\partial p}{\partial \tau} + \frac{\partial \alpha_l}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha_l u_j) = (\dot{m}^+ + \dot{m}^-) (\frac{1}{\rho_l}) \quad (3)$$

$$\rho_m = \rho_l \alpha_l + \rho_v \alpha_v \quad (4)$$

$$\mu_t = c_\mu \rho_m \frac{k^2}{\epsilon} \quad (5)$$

위 방정식을 무차원화 하여 일반화된 곡선좌표계로 나타낸 후 Preconditioning Technique를 이용한 Dual-Time Method를 적

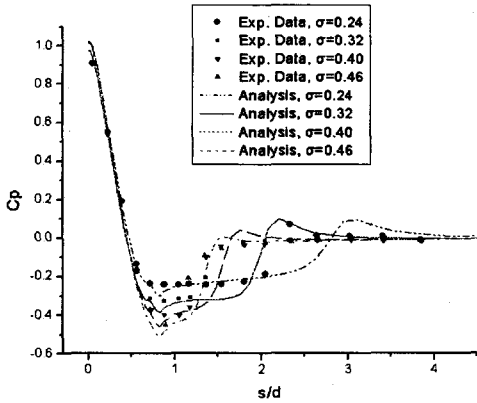


Fig. 3 Pressure Coefficient

1.36×10^5 이며 특성 속도(V_{Ref})는 10.8m/s이며 특성길이(L_{Ref})는 0.23m이다.

또한 캐비테이션 수(σ)는 아래와 같이 정의한다.

$$\sigma = \frac{P_\infty - P_v}{\frac{1}{2} \rho_\infty V_{Ref}^2} \quad (10)$$

본 연구에서 사용한 실험값은 Rouse & Mcnown[7]의 결과 값을 인용하였으며 캐비테이션 수를 바꾸어 가며 해석한 압력계수의 결과 값의 비교는 Fig. 3과 같다. Fig. 3의 결과를 살펴보면 캐비테이션이 일어나는 구간은 실험값과 잘 일치하고 있으나, 압력이 복구되는 지점부터는 상이한 부분이 나타나고 있었다. 이는 두 개의 상이 공존하는 부분에 대한 상 경계조건의 해상도와 경계지점의 격자 밀집도에 기인하는 것으로 여겨진다. 또한 압력이 복구된 후 압력계수 값은 일정하게 실험값과 잘 일치한다. Fig. 4는 캐비테이션 수에 따른 Void Fraction을 나타낸 것이다.

또한 Fig 5는 7° 기울인 뒤에 계산을 수행해 보았는데 캐비테이션 수에 따라서 캐비테이션 버블이 달라짐을 볼 수 있었다. Fig. 6의 경우 캐비테이션 버블 형상을 다른 논문과 비교해 보기 위해 수행하였는데 Fig. 3의 경우에서 보는 것처럼 두 개의 상이 공존하는 부분에 대해서 약간의 문제가 있는 것을 볼 수 있었다[5].

3.2 벤츨리 형태 주위의 캐비테이션 유동 해석

벤츨리 형태 주위를 해석하기 위한 격자계는 Fig. 7과 같으며 총 격자점의 수는 158×50×44로 347,600개이다.

본 연구에서 사용된 레이놀즈수(Reynolds Number)는 1.416×10^6 이며 특성 속도(V_{Ref})는 7.2m/s이며 특성길이(L_{Ref})는 0.224m이다. Venturi type에서 속도분포에 대한 실험값은 Stutz

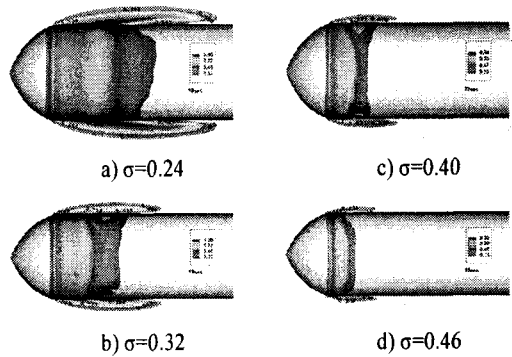


Fig. 4 Void Fraction of Each Cavitation Number

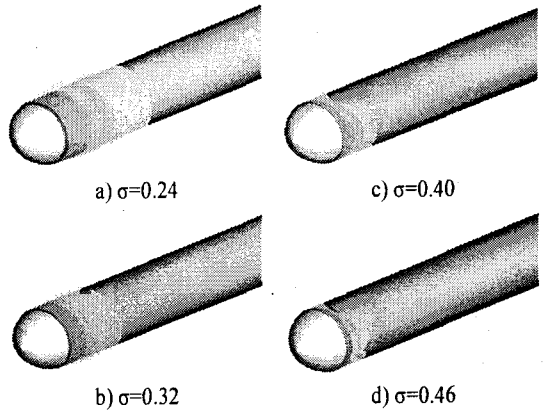


Fig. 5 Bubble Shape for ogive-cylinder at a 7° angle-of-attack



Fig. 6 Bubble Shape for ogive-cylinder at a 10° angle-of-attack, $\sigma=0.32$

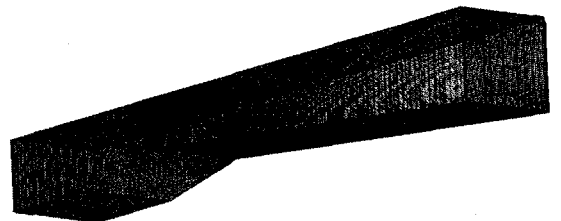


Fig. 7 Grid System of Venturi Type

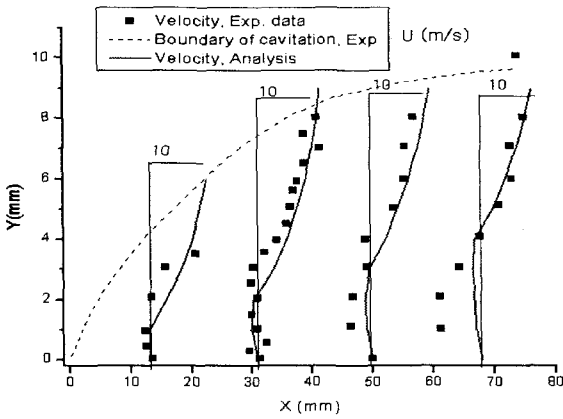


Fig. 8 Time-averaged Velocity Profiles, $\sigma=1.98$

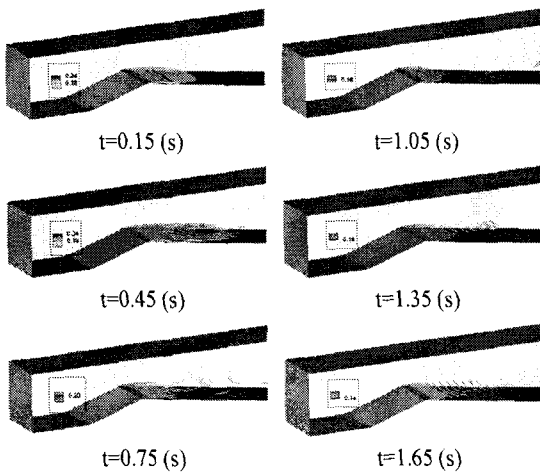


Fig. 9 Cavity Shapes during the Insatability Cycle

& Reboud[8]의 논문을 인용하였으며 캐비테이션 수는 1.98이다.

속도 분포에 대한 비교 결과는 Fig. 8과 같으며 실험값과 전체적으로 일치함을 알 수 있었으며, Fig. 9는 각 시간에 따른 Cavity 형상을 나타내었다.

4. 결 론

본 연구에서는 3차원 예조건화된 비정상상태 Navier-Stokes 방정식을 캐비테이션 모델을 사용하여 3차원 Ogive 실린더 주위와 Venturi type 내부의 캐비테이션 유동해석을 수행하였

으며 실험과 타연구자의 계산결과와 비교하였다. 비교적 실험이나 타 연구자의 계산결과와 비교적 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있었다. 본 논문에서 사용된 전산해석 방법은 향후 여러 가지 보안을 통하여 다중 블록 격자계를 이용한 고속 수증체의 슈퍼캐비테이션(super cavitation) 유동 해석과 유체기계에 발생하는 캐비테이션 현상 해석 등에 응용을 시도할 예정이다.

후 기

본 논문은 수중운동체 특화연구센터(UVRC)의 연구지원으로 이루어 졌습니다.

참고문헌

- [1] Lindau, J., Kunz R., Boger D., Stinerbring D., Gibeling H., 2002, "High Reynolds Number, Unsteady, Multiphase CFD Modeling of Cavitaing Flow," *Journal of Fluids Eng.*, Vol.124, pp.607-615.
- [2] Merkle, C.L., Feng, J., Buelow P.E.O., 1998, "Computational Modeling of the Dynamics of Sheet Cavitation," *3rd International Symposium on Cavitation*, Grenoble, France.
- [3] Venkateswam S., Lindau J.W., Kunz R.F., Merkle C.L., 2001, "Preconditioning Algorithms for Computation of Multi-Phase Mixture Flows," *AIAA Paper 2001-0279*.
- [4] Kunz R.F., Chyczewski T.S., Boger D.A., Stinebring D.R., Gibeling H.J., 1999, "Multi-Phase CFD Analysis of Natural and Ventilated Cavitation about Submerged Bodies," *FEDSM99-7364*
- [5] Kunz R.F., Boger D.A., Stinebring D.R., Chyczewski T.S., Gibeling H.J., 1999, "A Preconditioned Navier-Stokes Method for Two-Phase Flows with Appication to Cavitation Prediction," *AIAA Paper 99-3329*.
- [6] Chien K.Y., 1982, "Prediction of Change and Boundary Layer Flows with a Low Reynolds Number Turbulence Model," *AIAA J.*, Vol.22, pp.33-38.
- [7] Rouse H., McNown J.S., 1948, "Cavitation and Pressure Distribution, Head Forms at Zero Angle of Yaw," *Studies in Engineering, Bulletin 32*, State University of Iowa.
- [8] Stutz B., Reboud J.L., 1997, "Two-phase Flow Structure of Sheet Cavitation," *Physics of Fluids*, Vol.9(12).