

2차원 수중익 주위의 비정상 공동 현상 해석

이세영* · 이창진**

Numerical Simulation of Cavitating flow around 2D Unsteady Hydrofoil

Seyoung Lee* · Changin Lee**

초 록

공동 현상은 난류와 이상 유동으로 인해 그 해석에 어려움이 따르게 된다. 따라서 본 연구에서는 Pressure based 알고리즘을 이상 유동 포착 기법 중, volume fraction 모델에 Kunz의 공동 현상 모델을 이용, 공동 현상을 해석할 수 있는 코드를 개발하였다. 이를 통해 2차원의 수중익 주위의 정상유동 해석을 통하여 수중익 주위의 압력 분포를 비교, 코드의 검증에 나섰다. 또한 2차원 수중익 주위의 비정상 해석을 통해 재진입 영역의 발달에 따른 공동의 생성 및 붕괴를 모사하여 실험 결과와 비교하였다.

Key Words : Cavitation(공동 현상), Re-entrant jet(재진입 영역), Unsteady(비정상)

1. 서 론

수중에서 운동하는 물체 주변의 공동 현상 해석은 여러 가지 어려움을 수반한다. 대부분 난류 유동을 동반하기 때문에 난류 해석의 어려움이 따르게 되고, 이상 유동이기 때문에 경계면 포착의 어려움이 발생하게 된다.

이상 유동의 경계면 포착 기법은 여러 연구자들에 의해 수행되어 왔는데 최근의 연구 흐름은 크게 2가지로 나눌 수 있다.

그 첫 번째는 Barotropic 법칙을 이용하여 혼합 밀도를 표현 하는 방법이다. 이 방법은 액상과 증기의 혼합물을 단상으로 보는 방법으로, 밀도로써 유체의 특성을 표현하게 된다. 주로 비압축성, 비 점성 영역의 해석에 사용되었으며

SIMPLE 알고리즘 등에 적용되어왔다. [1,2]

이와는 다르게, Kunz등이 제안한 방법으로 수송 방정식의 생성 항에 응축과 증발 모델을 포함 시키는 방법이 있다. 이 모델은 주로 압축성 효과가 큰 영역의 해석에 사용되기 때문에 낮은 마하 수 영역에서 효율성이 떨어지게 된다. 하지만 비정상 현상의 해석에 이점을 가진다.[1]

따라서 본 연구에서는 Kunz 등이 제안한 방법을 Pressure-based 알고리즘에 응용하여 수치 해석 코드를 개발하였다. 이상 경계 면에서 적용 범위가 넓은 volume fraction 기법을 사용, 실제 경계면에 가깝게 해석할 수 있도록 하였다.

2차원 수중익 주위의 비정상 해석을 통해 재진입 영역의 발달에 따른 공동의 성장 및 붕괴를 모사하여 소음과 부식 등의 문제점을 해결하는데 사용할 수 있다. 터보 펌프의 인듀서나 선박의 프로펠러등의 분야에서도 응용할 수 있는 토대를 마련하게 된다. 또한 압축성으로의 확장을 통해 향후 초 공동 영역으로 연구를 확장시

* 건국대학교 대학원 항공우주공학과

** 건국대학교 기계항공공학부

연락처, E-mail: cjlee@konkuk.ac.kr

킬 수 있다.

2. 지배 방정식과 모델링

2.1 지배 방정식

본 수치해석 코드의 지배 방정식은 연속 방정식, Navier-Stokes 방정식, volume 수송 방정식으로 구성된다. 직교 좌표계에서 각 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho_m dV + \int_S \rho_m \vec{v} \cdot \vec{n} dS = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho_m \vec{v} dV + \int_S \rho_m \vec{v} \vec{v} \cdot \vec{n} dS = \int_V \vec{T} \cdot \vec{n} dS + \int_V \rho \vec{b} dV \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \alpha_i dV + \int_S \alpha_i \vec{v} \cdot \vec{n} dS = \int_V (\dot{m}^- + \dot{m}^+) dV \quad (3)$$

여기서,

$$T_{ij} = - \left(p + \frac{2}{3} (\mu + \mu_t) \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right) \delta_{ij} + (\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

이고, 혼합물의 밀도와, 난류 점성은 다음과 같이 정의된다.

$$\rho_m = \rho_l \alpha_l + \rho_v (1 - \alpha_l),$$

$$\mu_t = \frac{\rho_m C_\mu k^2}{\varepsilon}$$

2.2 공동 현상 모델링

물리적으로 공동 현상의 과정은 열역학과 시스템 내에서 일어나는 상변화 역학에 의해 지배된다. 이 복잡한 현상은 식 (4)의 \dot{m}^- 와 \dot{m}^+ 항으로 모델링하고 이는 각각 다양한 밀도장으로 인한 상의 증발과 응축을 나타낸다. 상변화 율에 대한 식은 Kunz등이 제안하였고, 표면 장력과 부력은 일반적으로 웨버수와 프루이드 수가 높은 환경을 고려하여 무시한다. 이를 이용한 공동 현상 모델은 다음과 같으며 Volume 수송 방정식에서 생성 항을 통해 표현된다.

$$\dot{m}^- = \frac{C_{dest} \rho_v \alpha_l \text{MIN}[0, p - p_v]}{\rho_l \left(\frac{1}{2} \rho_l U_\infty^2 \right) t_\infty} \quad (4)$$

$$\dot{m}^+ = \frac{C_{prod} \rho_v \alpha_l^2 (1 - \alpha_l)}{\rho_l t_\infty}$$

식 (4)에서의 시간 단위는 특성 길이와 기준 속도(reference velocity)의 비(l/U)로 정의된다. 본 연구에서는 경험적 상수인 C_{dest} 와 C_{prod} 의 값은 각각 9×10^5 와 3×10^4 를 사용하였고, 물과 증기의 밀도 비는 1000의 값을 사용하였다.

2.2 난류 모델

난류 해석을 위해서 일반적으로 널리 사용되고 있는 표준 k- ε 난류 모델을 사용하였다. 또한, 벽 함수를 사용함으로써 완전 난류 영역과 점성 영역을 고려하여 해석하였다. 난류 유동에서 사용된 상수는 표 1.과 같다.

표 1. 난류 모델에서 사용되는 상수

	C_μ	C_1	C_2	σ_k	σ_ε	σ_h	σ_i
표준 k- ε	0.09	1.4	1.92	1.0	1.3	0.9	0.9

3. 수치 해석 방법

본 연구에서 지배방정식의 수치해석은 유동현상에 쉽게 적용할 수 있는 FVM을 이용하였다. 속도 성분과 종속 변수들의 배열을 위한 격자계는 비 엇갈림 격자계를 사용하였다. 비 엇갈림 격자계는 압력과 속도 해에 있어서 심각한 비 물리적인 진동 현상을 초래할 수 있다. 이를 해결하기 위하여 모멘트 보간법을 적용한 압력방정식을 이용하였다.

계산의 알고리즘은 SIMPLE을 이용하였으며, 격자 면에서의 대류항은 상류 도식(upwind scheme)을 사용하여 차분화 하였다.[3]

4. 해석 결과

4.1 코드의 검증

개발된 코드의 검증을 위해 정상상태의 2차원 수중익 주위의 공동 현상을 해석하였다. 해석 모델은 NACA0012를 사용하였으며 받음각은 1도이다. 레이놀즈수는 코드를 기준으로 2×10^6 이며 캐비테이션 수는 0.42이다. 격자의 형상은 그림 1.과 같으며 격자의 개수는 350x50으로 하였다.

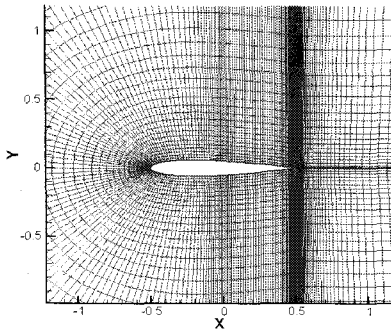


Fig 1. NACA0012 주위의 격자 형상

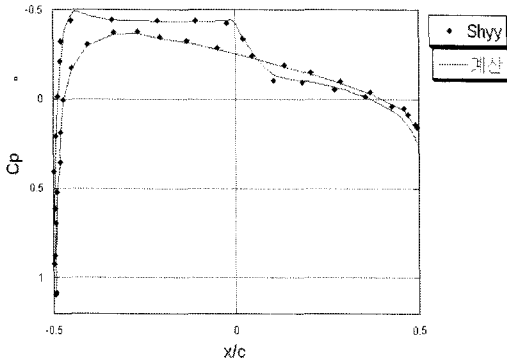


Fig 2. NACA0012 압력 분포 해석

같은 알고리즘을 사용한 Shyy의 논문[4]의 압력 분포 결과와 개발된 코드를 통해 얻어진 결과를 비교하였다. 그림 2.에서 보는 바와 같이, 비교적 개발된 코드의 계산 결과가 잘 일치하는 것을 확인하였다.

4.2 비정상 유동 해석

비정상 해석을 위한 형상은 Darmstadt 대학의 실험에서 사용된 CLE 수중익을 사용하였다.[5] CLE 수중익의 형상은 그림 3.과 같으며 코드 길이는 107.9mm이고 두께는 16mm이다.

TESTED HYDROFOILS

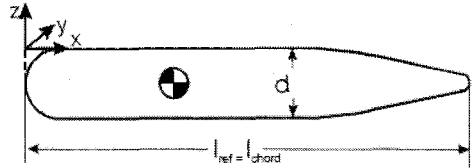


Fig 3. CLE-수중익의 형상

그림 4.는 CLE 익형주위의 격자 형상 모습이다. 격자의 경계조건은 1번은 입구조건, 2번은 출구 조건, 3번과 4번은 벽면 조건을 사용하였다. 입구에서는 속도 성분, 부피 비, 난류 성분이 주어지고 출구에서는 압력, 속도, 부피 비의 구배가 없는 조건이 주어진다. 벽면에서는 압력, 부피 비, 난류 성분의 값을 보간법을 사용하여 구하고, 속도는 미끄러짐이 없는 조건이 사용되었다.

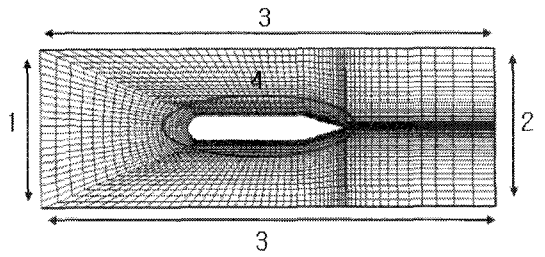


Fig 4. CLE 수중익 주위의 격자 형상(130x50)

계산 조건은 실험과 동일하게 사용하였다. 자유류의 속도는 16 m/s이며 코드 길이에 따른 레이놀즈수는 1.6×10^6 로 결정되었다. 또한 실험에서 공동의 주기적 발생이 생긴 캐비테이션 수는 2.7이었으므로 이를 그대로 사용하였다.

7. 결론 및 향후 계획

Pressure-Based 알고리즘과 volume fraction 방정식을 사용하여 2차원 수중의 주위를 공동 현상을 해석할 수 있는 코드를 개발하였다.

코드의 검증은 정상상태의 NACA0012를 이용하여 Shyy의 논문의 결과와 비교하였다. 익형 주위의 압력 분포를 계산하여 Shyy의 논문결과와 비교적 일치하는 것을 확인 하였다.

시간의 변화에 따른 비정상 해석에서는 재진입 영역(re-entrant jet)의 성장에 따른 공동의 성장과 붕괴를 모사하여 실험 결과와 비교해 보았다. 또한 Kunz의 공동 현상 모델을 사용하여 다른 모델을 사용한 해석 결과와도 비교해 보았다.

이를 토대로, 향후 터보 펌프의 인듀서 해석이나 선박의 프로펠러 해석의 기초가 될 수 있는 진동하는 수중의 주위의 공동현상의 해석을 실시할 예정이다.

참 고 문 헌

1. J.L. Rebound, O. Countier-Delgosha, B. Pouffary, R. Fortes-Patella, " Numerical simulations of unsteady cavitating flows : some applications and open problems ", 5th International Symposium on Cavitation, Osaka, Japan, November, 1-4, 2003
2. B. Puaffary, R. Fortes-Patella, J.L. Rebound, "Numerical Simulation of Cavitating flow around a 2D hydrofoil : A Barotropic Approach" 5th International Symposium on Cavitation, Osaka, Japan, November, 1-4, 2003
3. 장선용, 이창진, "Pressure-based 알고리즘을 이용한 cavitation 현상의 수치적 연구", 2004 항공 우주 무기 체계 발전 세미나 학술 대회 논문집, 2004년, pp.440-444
4. I. Senocak, W. Shyy, " Numerical simulation of turbulent flows with sheet cavitation " , CAV2001 : sessionA7.003
5. M. Hofmann, H. Lohrberg, G. Ludwig, B. Stoffel, J.L. Rebound, "Numerical and Experimental investigation on the self oscillating behaviour of cloud cavitation" 3rd ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference July 18-38,1999