



캐비테이션 기포와 충격파의 간섭에 관한 연구

신 병 록*¹

A NUMERICAL STUDY ON THE CAVITATION BUBBLE-SHOCK INTERACTION

Byeong Rog Shin*¹

A density based method with homogeneous cavitation model to investigate cavitation-bubble collapsing behavior is proposed and applied to bubble-shock interaction problems. By applying this method, cylindrical bubbles located in the liquid and incident liquid shock wave are computed. Bubble collapsing behavior, shock-bubble interaction and shock transmission/reflection pattern are investigated.

Key Words : 기포-충격파 간섭(Shock-Bubble Interaction), 기포붕괴(Bubble Collapsing), 캐비테이션 모델(Cavitation Model), 균질모델(Homogenous Model)

1. 서 론

과학기술 발전의 가속화와 함께 유체기계 및 기기에 대한 신뢰성, 적합성, 다양성의 향상이 끊임없이 요구되고 있다. 특히 액체를 매체로 하는 터보기계 및 추진 기계에 있어서는 이들이 고속화되어 감에 따라 캐비테이션 발생의 가능성이 증대되고 있으며, 캐비테이션 기포의 성장과 소멸 과정으로 인한 복잡하고도 강한 비정상성 때문에 유체기계의 성능저하가 초래된다. 예를 들면, 캐비테이션 기포가 붕괴될 때는 짧은 시간에 수 GPa에 이르는 높은 충격압이 발생된다. 이 충격압은 보통 펌프, 하이드로 터빈 및 프로펠러 배관시스템 수중 운동체와 같은 유체기계·기기의 표면재에 치명적인 손상을 입히며, 소음과 진동을 초래하여 결국 유체 고안물의 성능, 운전, 제어 등에 악영향을 미칠 뿐 아니라 일련의 캐비테이션 현상에 관계되는 다양한 문제를 야기한다. 이와 같은 캐비테이션 침식, 마모 등 이른바 캐비테이션 손상은 유체와 재료간의 복잡 연성계의 문제이기도하여 학제적인 관점에서 그 접근이 요구되고 있다. 그러나 이 캐비테이션 충격압은 모체에 악영향을 주는 반면 액체 속에 부유하고 있는 박테리아를 박멸하고 신장결석을 분쇄하며 재료의 표면을 개질 하는데 유효하게 활용할 수도 있어 의학 환경, 공학 분야에서 이를

이용하려는 연구가 요 몇 년 새에 활발히 진행되고 있다. 이와 같이 캐비테이션은 고속유동 상태하에 있는 유체기계·기기의 성능개선은 물론, 수명의 예측과 안전, 또는 충격파활용 기기 등의 신뢰성 확보란 관점에서 설계자·제조자는 물론 사용자에 있어서도 지극히 중요한 공통과제라는 인식하에 국내외에서 많은 연구가 이루어지고 있다.

2. 캐비테이션 모델

캐비테이션 기포가 붕괴될 때 일어나는 기포와 기포 및 충격파간의 상호 간섭현상은 위와 같은 제현상들을 이해하기 위하여 규명되어야 할 기본적인 문제이다. 캐비테이션 기포의 붕괴에 관한 현상은 초고속 복잡 현상으로 전산해석에 의한 연구가 적합하다. 그러나 본래 기포의 거동 자체가 팽창-축소-상호간섭으로 말미암아 비정상성이 강하고 이를 포함하는 유동은 넓은 범위의 밀도와 음속변화에 따른 압축성과 비압축성 유동의 성격이 공존하기 때문에 이에 대한 수치해석이 매우 어렵다. 말할 것도 없이, 이러한 유동을 나타내는 보편적인 지배방정식은 존재하지 않는다. 이 때문에, 어떤 형식이든 캐비테이션 유동을 다룰 수 있는 모델이 필요한데 현재까지 크게 나누어 2가지 즉, 캐비테이션 기포의 기-액 계면 추적법과 계면 포획법에 의한 모델이 제안되어 있다. 이 중에서 계면 추적법은 캐비테이션 영역을 일정한 국소 증기압으로 대체하고 기-액 계면을 경계로 취급하여 액상영역만을 계산한다는

¹ 중신회원, 창원대학교 기계공학과

* E-mail: brshin@changwon.ac.kr



있음이 있다. 이 때, 계면은 계면을 따라 일정한 압력으로 수렴 될 때까지 반복 갱신된다. 그러나 이 방법은 캐비테이션의 후미부분에서 압력이 회복되는 경우에만 캐비티 계면 전체에 일정 압력조건을 부과하는 것은 불가능하므로 캐비테이션 후류영역에서 2상 거동을 나타내기 위한 일종의 후류폐쇄 모델(wake closure model)이 필요하다[1,2]. 캐비티의 이탈 지점이나 압력분포와 같은 몇몇 캐비테이션 유동 특성을 예측할 수 있으나 2차원의 안정된 씨트 캐비테이션에만 적용할 수 있다는 단점이 있다.

한편, 계면 포획법은 기본적으로 각 상에 대하여 서로 다른 방정식으로 기술되는 Eulerian 방법이 널리 이용된다. 캐비티 전 영역의 형상을 방정식의 한 해의 일부로써 나타내게 되므로 이 방법의 큰 매력은 후류폐쇄 모델을 필요로 하지 않는다는 데에 있다. 이 방법은 적용하는 지배방정식에 따라 다시 2 유체모델과 혼합유체 모델 그룹으로 나뉜다. 첫 번째 그룹은 각 상에 각각의 성격에 맞는 보존방정식이 적용되고 경계면의 상호작용을 source 항의 첨가로 나타낸다[3]. 반면 혼합유체 그룹은 넓은 범위의 밀도 변화를 허용하므로써 기상과 액상, 그 혼합상 모두를 단일 혼합유체로 취급한다. 혼합상으로 구성된 각 계산 셀 내에서 매질은 균질하고 셀과 파셀사이를 no-slip으로 간주한 균질 모델이고 기-액 2상 매체를 다루면서도 단상 유동과 같이 단일 혼합매체에 대한 방정식 하나만으로 나타낼 수 있는 의단상모델(pseudo-shingle phase model)이다. 밀도변화의 포획방법에 따라 상태방정식을 통하여 기상과 액상사이의 밀도 변화를 단일 혼합체 연속방정식을 이용하여 구하는 방법과[4,5], 각 상의 거동을 나타내기 위하여 각기 구성된 각각의 연속방정식을 푸는 방법이 있다. 후자는 source 항의 도입으로 기상과 액상 사이의 물질전달을 조절하거나[6,7] 단순화된 Eulerian 형태의 Reyleigh-Plesset 방정식으로 기포군의 변화를 조절한다[8,9]. 원리적인 관점에서 계면 포획법은 모든 형태의 캐비테이션에 적용할 수 있다.

3. 캐비테이션 기포붕괴와 충격파 간섭

한편, 캐비테이션 기포의 붕괴거동에 관한 연구는 대부분 실험적인 방법이지만 하나 그 중요성으로 인하여 현재까지 정력적으로 이루어지고 있다[10-11]. 그러나 기포가 최대 크기로 팽창한 후 수축하고 다시 리바운드하여 팽창하는 일련의 수축/팽창을 거듭하고 micro jet를 발생하며 붕괴에 이른다. 물리현상은 설명할 수 있어도, 충격압/팽창파의 상세한 전파과정 등 이들의 초고속 현상을 정량적으로 파악할 수가 없다. 기포가 붕괴할 때 강체 벽 근처에서 일어나는 counter jet (대향 제트)나, 기포주변의 압력분포, 충격파/팽창파의 특성 및 기포붕괴 중에 일어나는 2차 캐비테이션[10]의 형성과정과 분포 등의 해명 또한 불가능한 것이다.

위에서 언급된 micro jet은 물체표면에 손상을 입히는 주요 인자이다. micro jet이 주변 고체 면에 충돌했을 때 기포가 재 팽창시에 일어나는 충격파보다 엄청난 크기의 충격압을 발생하고 벽면에 국부적으로 치명적인 충격력을 제공한다. 그 충격력의 크기는 수중폭발의 현상을 생각하면 쉽게 이해할 수 있다. 최초의 폭발은 주변에 거의 손상을 주지 않으나 이것이 매우 큰 기포를 만들고 붕괴할 때에 근처에 있는 고체표면을 향한 micro jet (reentrant jet)을 발생한다. 만약 이 고체가 잠수함이라면 기포붕괴는 선체에 엄청난 손상을 가져다주게 되고 micro jet이 충돌한 후에 남은 기포군이 리바운드하고 연쇄적으로 붕괴할 때 발생하는 충격파[12-13]가 표면의 손상을 가속시킨다. 따라서 충격파에 의한 손상의 방지와 유효한 활용도를 제어하기 위해서는 micro jet 생성기구를 포함한 기포붕괴의 거동에 대한 상세한 정보가 필요불가결하다.

위와 같은 복잡한 고속현상의 상세한 해명을 목적으로 Shin[14] 등은 최근 캐비테이션 모델을 제안하고 여러 조건의 캐비테이션 유동의 계산을 통하여 검증하였다[15-18]. 이 모델은 고속현상을 지배하고 있는 제1 인자가 압축성 효과에 있음에 착안하여 국소균질모델의 개념에 입각하여 고안한 해석 기법이다. 즉, 기-액 2상 매체를 국소적으로 유한한 void율(기체의 체적분율)을 갖는 균질의 의사 단상매체로 취급하고 압축성 계산해법을 응용하여 유동장 전체를 일괄하여 풀다. 이 때 기포나 액적의 계면은 void율의 불연속면으로 취급하고 계면추적을 하지 않으므로써 복잡한 유동장 현상의 재현이 가능하다.

본 연구에서는 위의 캐비테이션 모델을 갖는 밀도 기반의 쌍곡형 해법에 대하여 압축성 비압축성 비정상 유동의 안정 해석을 위해 시간 및 공간해상도를 3차 정확도의 MUSCL TVD법과 Roe의 유속차분법 및 4차 정확도의 Runge-Kutta법으로 확장하고 캐비테이션 기포의 붕괴문제에 적용한다. 본 논문의 발표에서는 수치계산을 통하여 캐비테이션 기포가 수중 또는 벽면(고체벽 또는 변형벽)주변에서 붕괴될 때 나타나는 기포주변의 압력분포, 리바운드시에 발생하는 충격파 특성, 반사 팽창파 특성 등 압력파의 전파 과정과 2차 캐비테이션 분포 및 micro jet의 생성 메커니즘에 대하여 살펴본다.

후 기

이 논문의 일부는 수중운동체특화연구센터(UVRC)의 지원 을 받아 연구되었음. 이에 관계자 각위에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 2000, Gopalan, S. and Katz, J., "Flow Structure and modeling Issues in the Closure Region of Attached



- Cavitation," *Phys. of Fluids*, Vol.12-4, p.186.
- [2] 1994, Chen, Y. and Heister, S.D., "A Numerical Treatment for Attached Cavitation," *ASME J. Fluids Eng.*, Vol.116, p.613.
- [3] 1998, Grogger, H.A. and Alajbegovic, A., "Calculation of Cavitating Flows in Venturi Geometries Using Two Fluid Model," *ASME FED-SM 98*, Washington D.C.
- [4] 1998, Shin, B.R. and Ikohagi, T., "A Numerical Study of Unsteady Cavitating Flows," *Proc., 3rd Int., Sympo. on Cavitation*, Vol.2, p.301.
- [5] 2000, Ventikos, Y. and Tzabiras, G., "A Numerical Method for the Simulation of Steady and Unsteady Cavitating Flows," *Computers & Fluids*, Vol.29, p.63.
- [6] 1998, Merkle, C.L. et al., "Computational Modeling of the Dynamics of Sheet Cavitation," *Proc., 3rd Int., Sympo. on Cavitation*, Vol.2, p.307.
- [7] 2000, Kunz, R.F. et al., "Modeling Hydrodynamic Nonequilibrium in Cavitating Flows," *Computers & Fluids*, Vol.29, p.849.
- [8] 1996, Chen Y. and Heister, S.D., "A Preconditioned Navier-Stokes Method for Two-Phase Flows with Application to Cavitation Prediction," *ASME J. Fluids Eng.*, Vol.118, p.172.
- [9] 2001, Singhal, A.K. et al., "Mathematical Basis and Validation of the Full Cavitation Model," *ASME FED SM-2001*, New Orleans, Louisiana.
- [10] 2001, Robinson, P.B. et al., "Interaction of Cavitation Bubbles with a Free Surface," *J. of Applied Physics*, Vol.89, p.8225.
- [11] 1986, Tomita, Y. and Shima, A., "Mechanisms of Impulsive Pressure Generation and Damage Pit Formation by Bubble Collapse," *J. Fluid Mechanics*, Vol.169, p.535.
- [12] 1981, Shima, A. et al., "An Experimental Study on Effects of a Solid Wall on the Motion of Bubbles and Shock Waves in Bubble Collapse," *Acustica*, Vol.48, p.293.
- [13] 1980, Fujikawa, S. and Akamatsu, T., "Effects of the Non-Equilibrium Condensation of Vapour on the Pressure Wave Produced by the Collapse of a Bubble in a Liquid," *J. Fluid Mech.*, Vol.97, p.481.
- [14] 2003, Shin, B.R. et al., "A Numerical Study of Unsteady Cavitating Flows Using a Homogenous Equilibrium Model," *Computational Mechanics*, Vol.30, p.388.
- [15] 2003, Iga, Y. et al., "Numerical Study of Sheet Cavitation Break-off Phenomenon on a Cascade Hydrofoil," *ASME J. Fluid Engng.*, Vol.125, p.643.
- [16] 2004, Shin, B.R. et al., "Application of Preconditioning Method to Gas-Liquid Two-Phase Flow Computations," *ASME J. Fluid Engng.*, Vol.126, p.605.
- [17] 2004, Yamamoto, S. and Shin, B.R., "A Numerical Method for Natural Convection and Heat Conduction around and in a Horizontal Circular Pipe," *Int'l J. of Heat and Mass Transfer*, Vol.47, p.5781.
- [18] 2008, Seo, J.H., Moon, Y.J. and Shin, B.R., "Prediction of Cavitating Flow Noise by Direct Numerical Simulation," *J. Comput. Phys.*, Vol.227, p.6511.