

특집

초월 공동어뢰의 이상유동장 해석 연구 : 완전 압축성(Full Compressibility) 및 온도 변화 영향 포함

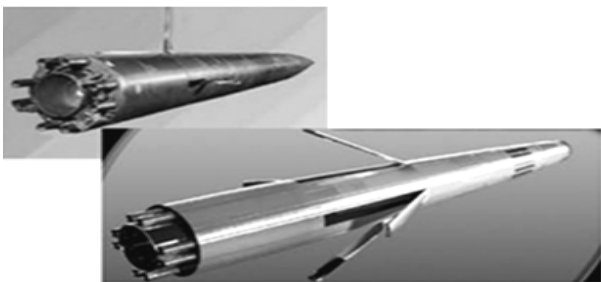
박원규 (부산대학교), 강태진 (부산대학교)
정철민 (국방과학연구소)

1. 서론

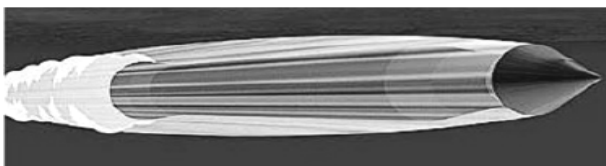
어뢰는 물속에서 스스로의 추진력으로 나아가는 장치를 말한다. 잠수함, 전함, 비행기 등에서 발사되는 이 무기는 수면에 떠 있는 배나 잠수함의 선체에 닿거나 근접하면 폭발하도록 설계되어 있다. 이러한 무기는 현대에 이르러 군사적 우위를 확보하기 위해서는 보다 높은 속도가 요구되고 있다. 초기의 어뢰는 영국의 공학자 화이트 헤드에 의해 개발되었고 속도는 6knot에 불과하였으나 현대에는 미국의 MK-46 어뢰(그림 1a)가 45노트이고 구 소련에서 개발된 Shkval 어뢰(그림 1b)는 200노트 이상인 것으로 알려져 있고, 최근 독일이 개발한 초공동 어뢰인 바라쿠다(Barracuda, 그림 1(c))는 360knot 이상의 속도로 주행한다고 알려져 있다.



(a) MK-46



(b) Shkval



(c) Barracuda

그림 1. 일반 어뢰 및 초공동 어뢰

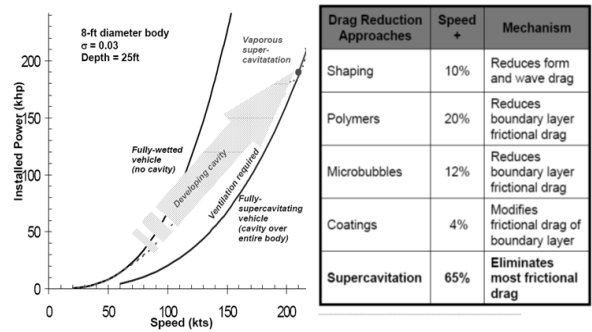


그림 2. 항력 저감 기술(출처 : DARPA)

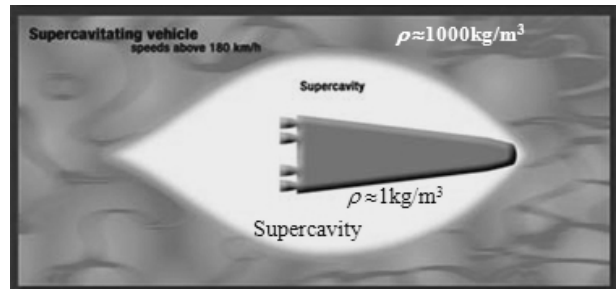


그림 3. 공동에서 액상과 기상의 밀도 비교

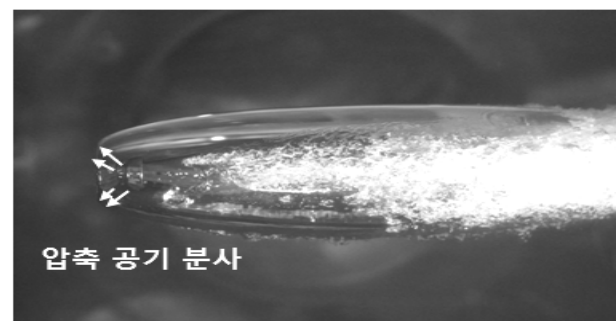


그림 4. 수중 운동체의 환기공동 이용 사례

이렇게 높은 속도를 유지하기 위해서는 추진에너지를 증가시키거나 수중 운동체에 대한 항력을 줄이는 연구가 전 세계적으로 수행되어 왔다. 그림 2는 수중운동체에 적용되는 항력 저감기술을 나열하였으며 supercavitation(초월공동)의 경우 큰 폭의 항력저감 효과가 있음을 알 수가 있다. 그림 3은 고속 운동체 주위의 초월공동을 나타낸 그림으로 초월공동이 형성되면 수중운동체는 증기(vapor)로 둘러 쌓이게 되는데

물의 밀도보다 1000배 정도 작은 증기의 밀도로 인해 상당히 작은 유동 저항만 받게 된다.

최근 들어 초고속 수중 운동체들은 자연공동을 이용해 모든 운행조건에서 초월 공동을 발생시키기 불가능하기 때문에 환기공동(Ventilated cavitation)을 이용한 공동 발생기(Cavitation generator)에 관한 연구도 진행되고 있다. 그림 4는 환기공동을 이용해 초월공동을 생성시키는 그림으로 수중 운동체가 증기에 포함된 것을 알 수 있다.

공동에 관한 연구는 주로 실험에 의해 이루어 졌으나, 최근 전산처리 기술이 발달하면서 수치해석 기법을 이용하여 연구하는 사례가 늘어나고 있다(Ha, 2007, 2009). 공동 현상의 해석은 액상과 기상이 공존하는 다상 유동이며 이것을 고려한 다상 유동해석의 수치기법이 필요하다.

많은 연구에서 액상과 기상, 비응축가스에 대하여 각각의 연속방정식을 분리하여 해석하는 균일 혼상류(homogeneous mixture) 모델(Merkle, 1998)을 사용한다. 이 방법은 액상과 기상의 경계면의 상태가 열과 동적으로 평형을 이루고 있다고 가정하므로 운동량 방정식과 에너지 방정식은 혼상류(mixture flow)에 대한 방정식을 이용한다. 초기 균일 혼상류모델은 기체와 액체는 비압축성으로 가정하여 항상 일정한 값을 유지하도록 설정하였다. 하지만 그림 5에서 보듯이, 액상과 기상이 공존할 때 매우 낮은 음속을 보이며 압축성 유동이 된다. 액상과 기상이 공존하면서 생기는 매트릭스 방정식의 stiffness 문제는 예조건화(pre-conditioning)기법을 적용해 수치 해석적 강성문제를 고려하였다.(Venkateswarm, 2001)

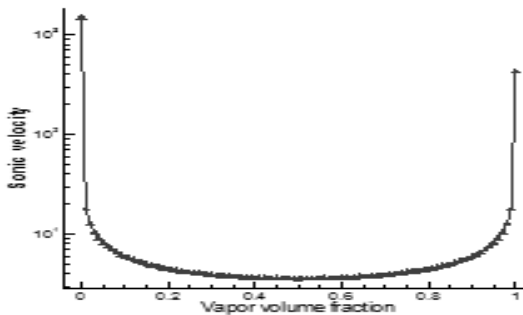


그림 5. 기상 체적 분율에 따른 음속의 변화

본 연구에서는 완전 압축성(full compressibility) 및 온도 변화를 고려할 수 있고, 응축/비응축 가스를 포함할 수 있는 다상 유동장 코드를 독자 개발하였다. 그리고 환기공동을 이용한 공동 발생기를 독자 설계 하였다. 다상 유동장 해석에서 완전 압축성, 자유표면, 중력을 포함한 부력 효과를 실험 결과를 통해 검증을 하였고, 위의 해석 기술을 응용해 수중 운동체의 water-exit/entry와 수중 탄환의 다상 유동장에 대해 연구하였다.

2. 본 론

2.1 환기공동이 포함된 초월공동 다상유동장 해석

본 연구에서는 그림 1(c)의 바라쿠다 형상에 대해 환기공동을 포함한 다상유동장 해석을 실시하였다. 그림 6는 환기공동을 위해서 후방으로 확장을 한 3차원 격자 구조이다. 우선 비응축 가스를 포함하지 않는 자연공동(natural cavitation)에 대해 계산을 수행하였다.

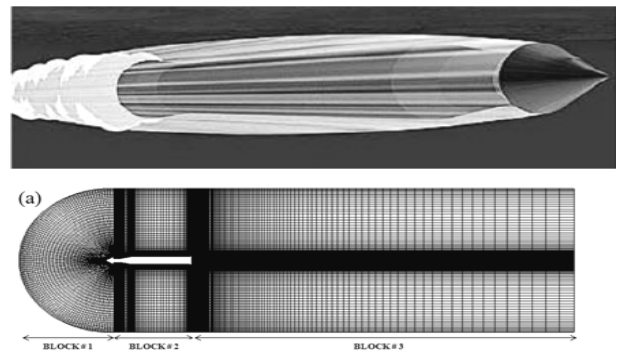


그림 6. Barracuda torpedo 와 후방확장격자구조 (2차원 단면도)

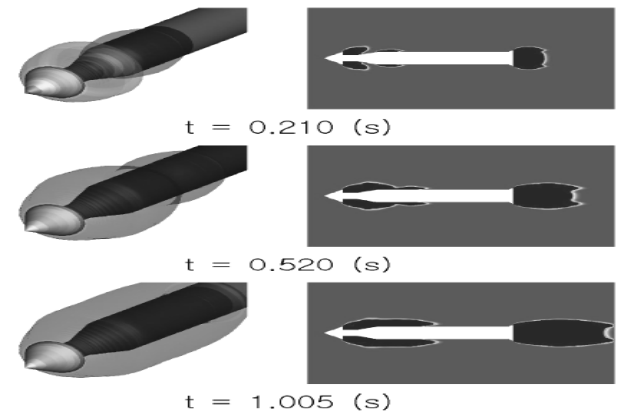


그림 7. 초월공동 수중운동체의 주위의 기상체적분율 (Natural cavitation)

그림 7은 캐비테이션 수(σ)가 0.1에서의 기상체적분율을 나타낸 그림이다. 시간이 지남에 따라 공동이 커지면서 후방으로 나아가지만 정상상태($t^* = 1.005$)에서는 공동이 수중운동체의 가운데 위치하게 된다. 그림 8은 같은 조건에서 환기공동의 분사 속도는 $U_j = 1U_\infty, 2U_\infty$ 으로 할 때 기상체적분율을 나타낸 결과로써, 시간이 지남에 따라 변하는 기상체적분율은 어뢰의 후방으로 퍼지며 변화 하는 것을 볼 수 있다. 자연공동에 비해서 전체적으로 공동이 수중운동체를 포함하게 됨으로써 상대적으로 적은 유동 저항을 갖게 된다. 그리고

$U_j = 2U_\infty$ 의 경우가 $U_j = 1U_\infty$ 인 경우 보다 압축변동에 의한 공동의 불안정성이 커지는 것을 확인 할 수 있다.

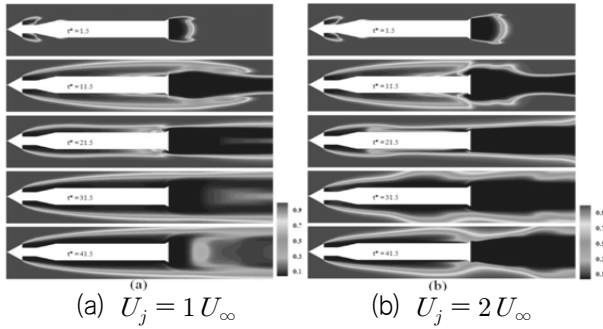


그림 8. 초월공동 수중운동체의 주위의 기상체적분율

2.2 원전 압축성을 고려한 수중 운동체의 다상유동장 해석

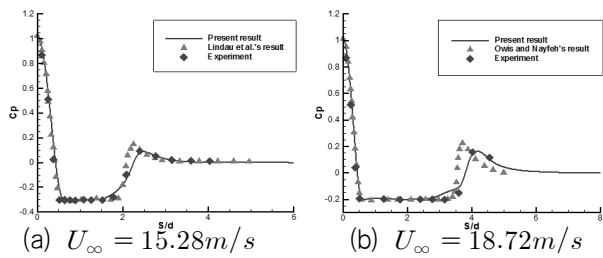


그림 9. 1/2-caliber 실린더의 시간 평균된 압력계수 ($\rho_\infty = 38504 \text{ pa}$)

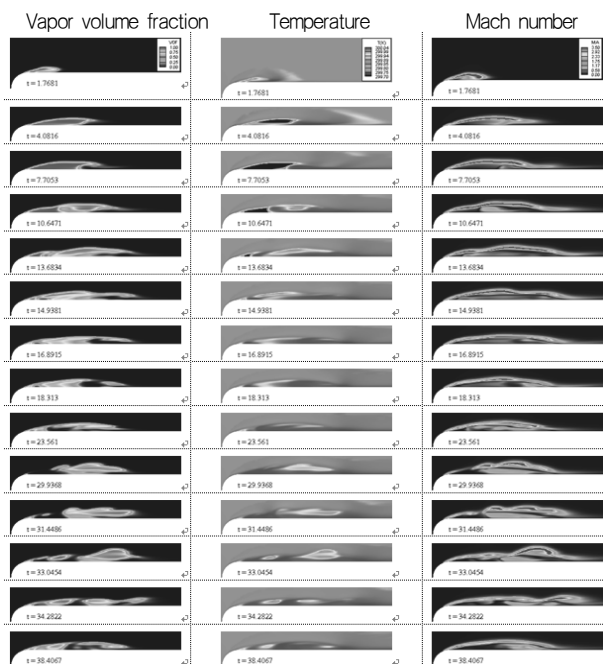


그림 10. 시간 변화에 따른 1/2-caliber cylinder의 캐비테이션 해석

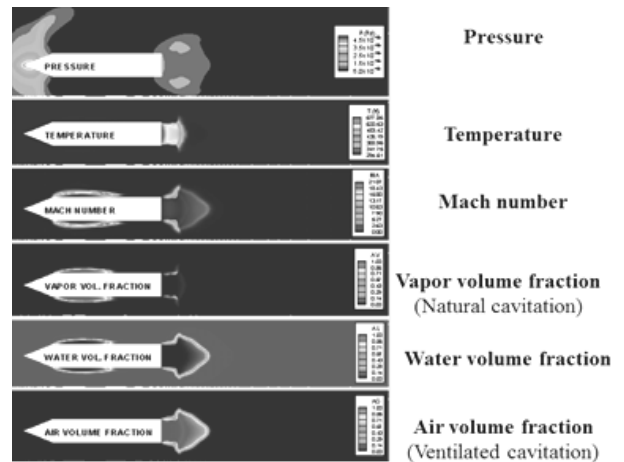
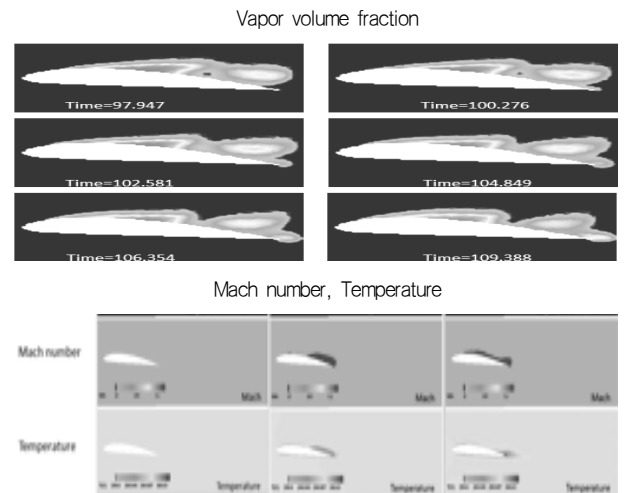


그림 11. 뾰기형 수중 운동체에서 온도변화효과를 고려한 다상 유동장 해석 결과



(a) PNU's result

(b) Experimental result

그림 12. 시간변화에 따른 hydrofoil 주위의 다상 유동장 해석

초월공동 수중운동체는 일반 프로펠러 구동하는 수중운동체와는 달리 수중로켓추진으로부터 추진력을 얻으므로, 수중로켓 연소가스의 압축성 효과 모델링이 필요하다. 본 연구에

서는 1/2-caliber cylinder을 $\sigma = 0.30$ 에 대해서 완전 압축성 효과를 고려하여 전산 해석을 수행하였다. 그림 9은 각각 속도가 15.28m/s, 18.72m/s일 때 비압축성 결과, 실험 결과와 함께 비교하였다(김동현, 2012).

그림 10은 $U_{\infty} = 18.72m/s$ 일 때 기체체적분율, 온도, 마하수를 시간에 따라 나타낸 그림이다(왼쪽 순). 액상과 기상의 경계면에서 낮은 음속으로 인해 높은 마하수를 가지는 것을 알 수 있다.

그림 11은 freestream temperature가 300k이고 후미부에서 분사되는 비응축가스의 온도가 578k일 때의 해석 결과이다.

그림 12(a)는 Clark-Y hydrofoil에 대해 캐비테이션 해석을 수행한 결과이다. Liu(1999)의 실험결과와 비교하였고 받음각 5° 에서 시간 변화에 따른 가상 체적 분율을 비교하였다. 그리고 그림 12(b)는 마하 수와 온도를 나타내었다.

2.3 잠수함 발사체에 대한 응용

캐비테이션 해석 기술 및 항력 저항 기술을 응용하여 잠수함의 수중 발사체에 대한 연구를 진행하였다.

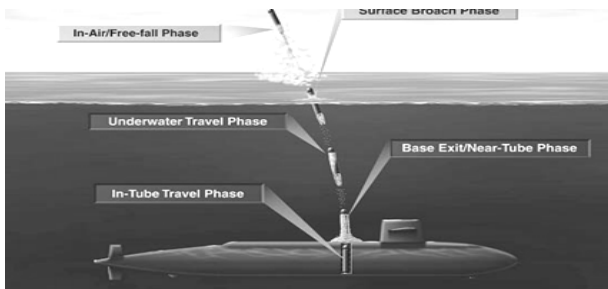


그림 13. 잠수함의 미사일 발사 체계

그림 13은 잠수함의 미사일 발사 체계를 나타낸 그림이다. 이러한 발사체 중 압축공기를 이용한 분사방법이 있으며 고속으로 발사되는 미사일은 공동의 발생을 야기하게 된다. 본 연구에서의 완전 압축성, 온도변화, 응축/비응축을 포함한 다상 유동장 해석 기술을 바탕으로 미사일의 water-exit/entry문제와 고속으로 발사되는 수중 탄환의 다상 유동장에 관한 연구를 진행하였다.

1) 자유표면 연구

본 연구에서는 자유표면 거동을 동역학적 조건(Dynamic condition)과 운동학적 조건(Kinetic condition)의 경계조건을 이용하여 표현하였다. 그림 14는 NACA0012에 대해 받음각 5° 이고 레이놀즈 수가 1.624×10^5 일 때 자유표면 근처에서의 wave elevation에 관해 실험결과와 비교하였다. 수중익형에 의해 유도되는 자유표면의 거동을 비교적 정확히 표현하는 것을 확인 하였다. 그림 15는 leading edge부근에서 비응축가스를

를 분사할 때 생기는 공동의 변화에 대해 실험결과와 비교를 하였다.

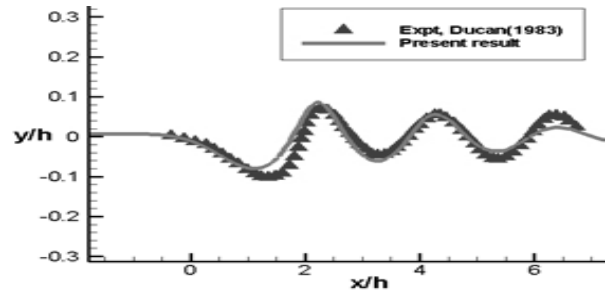


그림 14. NACA0012 hydrofoil에 대한 파형

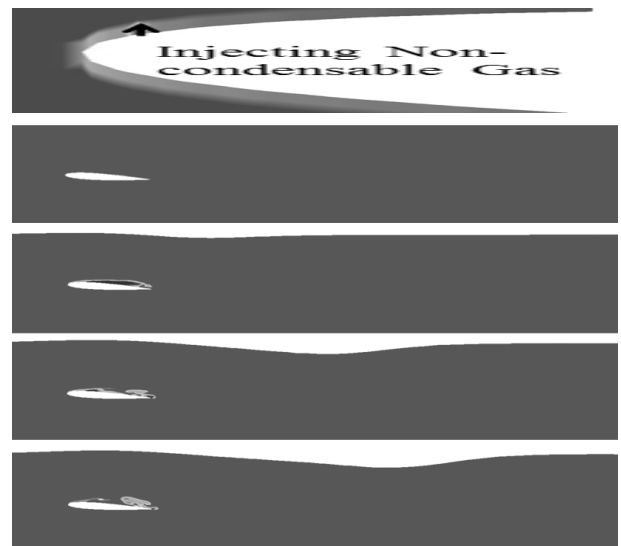


그림 15. Ventilated hydrofoil에 대해 시간에 따른 공동과 자유표면의 변화

2) 비응축 가스의 부력 영향 연구

다음으로 수중운동체가 받을 수 있는 중력 효과를 고려해 다상유동 해석을 진행하였다. 캐비테이션 수가 0.0075, Froude number가 9일 때 기상 체적 분율을 나타낸 결과로서 중력효과에 의해 공동의 형상이 변화하는 것을 알 수 있고 변화된 형상이 실험결과와 유사한 것을 알 수 있다.(그림 16)

3) Water-exit 및 Water-entry 문제 해석

그림 17은 수중 미사일의 선두부를 2가지 각(angle)으로 고려하여 다상 유동해석을 수행하였다. 시간에 따라 수중 미사일이 자유표면을 통과하여 발사되는 것을 확인할 수 있었다. 이것과는 반대로 그림 18은 외부에서 수중으로 진입하는 수중 무기에 대하여 다상유동 해석을 수행하였다. 자연공동과 후미부에서 비응축 가스를 사용한 환기공동에 대하여 시간에 따라 나타낸 결과이다.

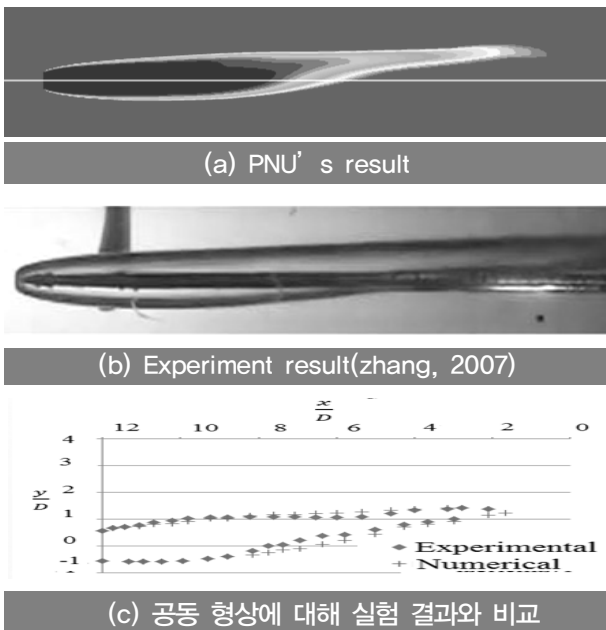


그림 16. Disk with gravity effect :
Ventilated cavitation

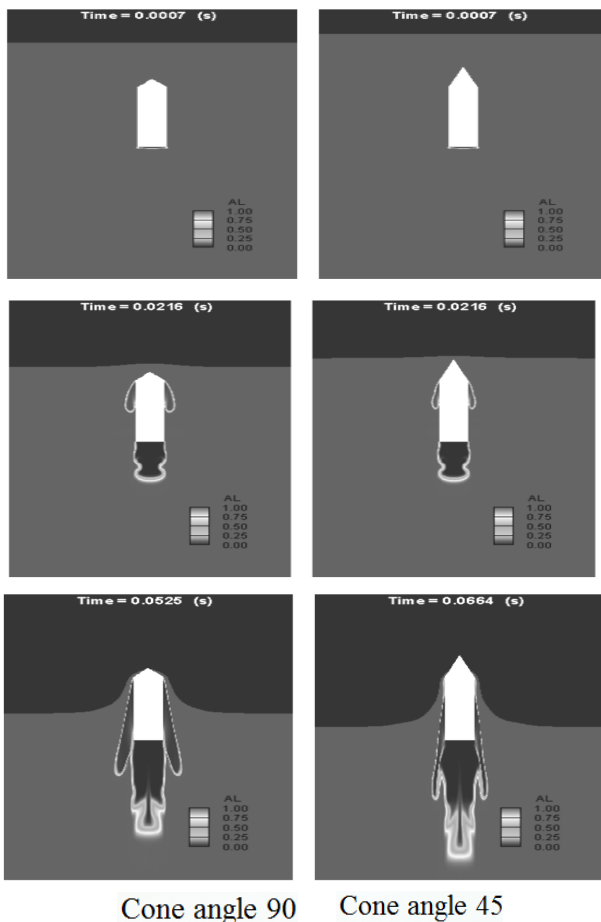


그림 17. Water-exit 수중 운동체의 전산 해석

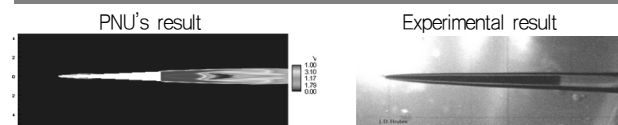


(a) Natural cavitation



(b) Ventilated cavitation

그림 18. Water-entry 수중 운동체의 전산 해석



(a) 기상 체적 분율의 실험결과와의 비교



(b) 압력, 밀도, 국부온도의 실험결과와의 비교

그림 19. 수중 탄환에 대한 해석 및 실험 결과 비교

4) 수중 탄환의 다상 유동장 해석

그림 19는 Underwater Bullet에 관한 연구 결과로 Hrubes(2001)의 실험결과와 비교하였다. 지름이 20mm이고 발사되는 수중탄환의 속도는 15400m/s이다. 실험과 똑같은 조건으로 해석을 진행을 하였고 실험과 해석결과가 비교적 유사한 것을 알 수 있다.

3. 결론

본 연구에서는 완전 압축성(full compressibility) 및 온도변화를 고려할 수 있고, 응축/비응축 가스를 포함할 수 있는 다상 유동장 코드를 독자 개발하였다. 그리고 환기공동을 이용한 공동 발생기를 독자 설계를 통해 초고속 수중운동체의 항력 저감 기술에 대하여 전산해석을 수행하였다. 비응축가스를 이용하여 초월공동을 생성하는 공동발생기에 대해 전산해석을 수행하였고 환기공동으로 인해 수중운동체가 받는 유동 저항이 줄어드는 것을 확인하였다. 그리고 완전 압축성, 온도변화 효과를 고려하여 액상과 기상의 공존에서 생길 수 있는 문제에 대해 조사를 하였다. 마지막으로 수중 운동체의 거동에 영향을 줄 수 있는 자유표면, 중력에 의한 부력 효과를 실험 결과를 통해 검증하였다. 위의 기술을 응용해 잠수함의 발사체에 대해 수중 무기에 관한 전산 해석을 수행하였다. 수중 운동체의 water-exit/entry와 수중 탄환의 다상 유동장에 대해 연구하였다. 본 연구실에 개발된 다상유동 해석 코드를 사용하여 다양한 수중 운동체의 거동에 대해 연구할 수 있을 것으로 생각한다.

후 기

본 기고문은 국방부 산하 방위산업청 지정 수중운동체특화 연구센터(Underwater Vehicle Research Center)의 지원으로 이루어졌습니다. 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

Cong-Tu Ha, Warn-Gyu Park, Charles L. Merkle, "Multiphase flow analysis of cylinder using a new cavitation model", CAV2009-Paper No.99, 2009.
 Cong-Tu Ha, Warn-Gyu Park, J. C. Lee, S. H. Kim, D. H. Kim, Cavitation Flow Simulation of Cylinder Hydrofoil and Venturi, *The 9th Asian International Conference on Fluid Machinery*, Ramanda Hotel, Korea, 2007.10.17.~2007.10.19.

Cong-Tu Ha, Warn-Gyu Park, and Merkle, C.L., Multiphase Flow Analysis of Cylinder Using a New Cavitation Model, *Proceedings of 7th International Symposium on Cavitation*, CAV2009-No. 99., 2009.
 Hrubes, JD., "High-Speed imaging of super-cavitating underwater projectiles," *Experiments in Fluids*, Vol. 30, 2001, pp. 57-64.
 Merkle, CL., Feng, JZ., Buelow PEO., "Computational modeling of the dynamics of sheet cavitation", *Proceedings of the 3rd International Symposium on Cavitation*, p.307.
 Neaves, MD., Edwards, JR., "Hypervelocity underwater projectile calculations using a preconditioning algorithm", AIAA 2003-1286.
 Venkateswarn, S., Lindau, JW., Kunz, RF., Merkle, CL., "Preconditioning algorithms for computation of multi-phase mixture flows", AIAA Paper, 2001-0279.
 김동현, 박원규, 정철민, "압축성 영향을 고려한 초월공동 수중운동체 주위의 다상유동장 전산해석", 제9회 해양무기 학술대회, 2012.



박 원 규

- 1958년생
- 1993년 미국 Georgia Tech. 공학박사
- 현 재 : 부산대학교 기계공학부 교수
- 관심분야 : 전산유체역학
- 연 락 처 : 051-510-2457
- E - mail : wgpark@pusan.ac.kr



강 태 진

- 1979년생
- 2006년 한양대학교 기계공학과 졸업
- 현 재 : 부산대학교 기계공학부 박사과정
- 관심분야 : 다상유동해석
- 연 락 처 : 051-510-3064
- E - mail : kang@pusan.ac.kr



정 철 민

- 1975년생
- 2003년 부산대학교 기계공학부 석사
- 현 재 : ADD
- 관심분야 : 전산유체역학 및 수중무기
- 연 락 처 : 055-540-6123
- E - mail : cmjung@add.re.kr