

초공동(超空洞) 하의 수중 주행체 캐비테이터 형상최적설계

최주호*

Shape Optimization of Cavitator for a Supercavitating Projectile Underwater

Joocho Choi*

ABSTRACT

When a projectile travels at high speed underwater, supercavitating flow arises, in which a huge cavity is generated behind the projectile so that only the nose, i.e., the cavitator, of the projectile is wetted, while the rest of it should be surrounded by the cavity. In that case, the projectile can achieve very high speed due to the reduced drag. Furthermore if the nose of the body is shaped properly, the attendant pressure drag can be maintained at a very low value, so that the overall drag is also reduced dramatically. In this study, shape optimization technique is employed to determine the optimum cavitator shape for minimum drag, given certain operating conditions. Simultaneous optimization technique is proposed for efficient cavitator shape optimization, in which the cavity and cavitator shape are determined in a single optimization routine.

초 록

수중에서 발사체가 고속으로 주행할 때 발사체의 머리 즉, 캐비테이터 만이 물과 접촉한 상태에서 커다란 공동이 발생하여 몸체 전체를 뒤덮는 초공동현상이 발생한다. 초공동 상태에서는 발사체는 저항이 감소되어 매우 빠른 속도를 낼 수 있게 된다. 더욱이 캐비테이터가 적합한 형상을 가지게 되면 매우 낮은 압력저항을 유지하고 전체적인 저항도 획기적으로 줄일 수 있기 때문에 본 연구에서는 주어진 작용환경 하에서 저항을 최소화 하기 위한 최적의 캐비테이터 형상최적설계 문제를 고려하였다. 그리고 효율적인 캐비테이터 형상최적화를 위해 공동과 캐비테이터 형상을 하나의 최적화로 변환한 동시 최적화기법을 수행하였다.

Key Words: Supercavitation(초공동), Shape Optimization(형상최적설계), Cavitator(캐비테이터)

1. 서 론

* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부
E-mail : jhchoi@kau.ac.kr
TEL : (02)300-0117 FAX : (02)3158-2191

초공동(超空洞, Supercavitation) 현상이란 수중에서 어뢰와 같은 발사체가 고속으로 주행할

때 커다란 기포(bubble) 또는 공동(cavity)이 물체의 머리에서 발생하여 물체 전체를 뒤덮는 현상을 말한다. 이 경우 머리는 공동을 발생시키는 중요한 역할을 하는데 이를 캐비테이터(cavitator)라 한다. 초공동상태에서는 주행체의 캐비테이터만 물과 접촉할 뿐, 나머지는 공기(사실은 수증기) 속에서 주행하므로 물과의 마찰저항이 획기적으로 감소되며 사실상 압력저항만이 작용하게 되어, 주행체는 작은 추진력으로도 고속 주행이 가능하게 된다. 초공동 기술은 90년대 중반부터 큰 관심을 모으기 시작하였고 최근에는 미국을 비롯한 여러 국가의 연구기관에서 이에 대한 연구를 활발히 진행하고 있다[1-3].

초공동이 가능하기 위해서는 최소 주행속도가 어느 수준 이상은 되어야 하는데, 이로 인한 저항의 절대 크기는 작지 않은 편이어서, 로켓과 같은 높은 추진력을 갖는 엔진이 필요하다. 캐비테이터의 형상은 저항 크기에도 영향을 주므로, 이것의 설계는 공동의 발생과 저항 두 가지 모두에 중요한 영향을 미친다. 따라서 본 연구에서는 물체를 다 덮을 수 있는 충분한 크기의 초공동을 발생시키면서 압력저항을 최소화시키는 캐비테이터의 형상최적설계 문제를 고려하였다.

2. 문제 정의

2.1 초공동 유동을 위한 해석문제 정의

Fig. 1과 같이 수중에서 물체가 높은 속도 U_0 로 주행하는 경우 물체의 머리 부분에서부터 시작되는 매우 큰 공동, 즉 초공동이 발생한다. 물속 깊이 h , 밀도 ρ 일 때 상류의 압력 P_0 는 $P_{atm} + \rho gh$ 로 주어지며, 초공동 내의 압력은 P_c 로 표시한다. 그림에서 원 내의 머리 부분이 캐비테이터로서 이것의 모양에 따라 초공동의 형상이 결정될 뿐만 아니라 저항의 크기도 결정된다. 따라서 본 연구에서는 원하는 형상의 초공동을 생성하면서 저항을 최소화시키는 캐비테이터의 형상을 결정하고자 한다. 이를 위해 초공동 유동문제에 대한 해를 먼저 구하고, 이어서 캐비테이터의 최적화 문제에 대한 해를 구한다.

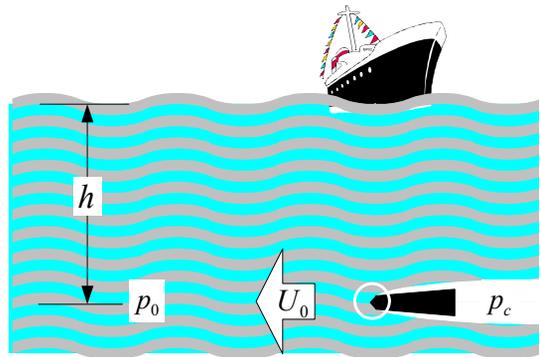


Fig. 1 Projectile Underwater

3. 초공동 유동해석

3.1 초공동 유동해석의 동등 최적화

초공동 유동해석은 앞서 언급한 바와 같이 동등 최적화 문제로 바꾸어 해를 구할 수 있다. 이 경우 캐비테이터 형상은 미리 주어지는데, 이를 단위반경의 원판으로 하였다. 설계변수는 Fig. 2와 같이 일정 간격의 높이 변수 C_1, C_2, \dots, C_{nc} 에 의해 표현되는 B-스플라인 함수와 공동의 길이 l_c 로 정의할 수 있다. 이렇게 되면 주어진 속도(또는 캐비테이션 수)와 주어진 캐비테이터 하에서 최적화 결과 설계변수, 즉 공동의 형상이 결정되는 것이다. 그러나 본 연구에서는 공동의 길이를 오히려 주어진 값으로 바꾸고, 대신 캐비테이션 수를 결정하는 것으로 하였다.

최적화는 공동길이를 5로 하고, $C_1 - C_5$ 5개의 높이 변수에 대해 수행하였고, 최적화 과정 중 구배는 민감도 공식을 이용하여 계산하였으며, 형상이 계속 변하므로 자동으로 생성되는 자유

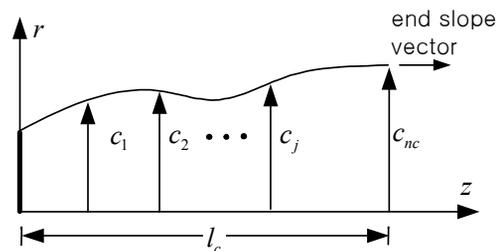


Fig. 2 Modeling of the Cavity Shape

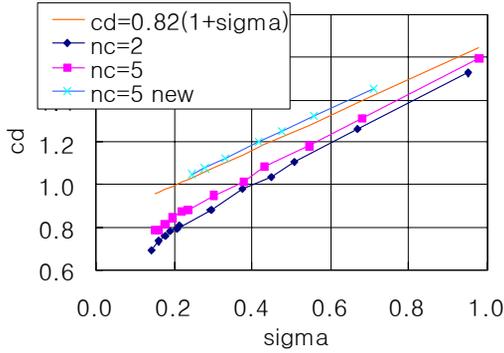


Fig. 3 Comparison Between Theoretical and Numerical Results

메시와 수작업이 필요한 맵 메시 두 가지를 가지고 각각 최적화를 해 보았다. 또한 유한차분법으로 구배를 계산하여 이를 이용한 최적화도 같이 수행해 보았으며 그 결과 유한차분법이 더 많은 횟수에도 불구하고 최적화까지 도달하지 못했으며 자유메시나 맵메시 모두 유사한 결과를 보이고 있어 굳이 맵메시를 활용치 않아도 됨을 알 수 있었다.

Fig. 3에서와 같이 다양한 공동길이에 대해 각각 최적화를 수행, 해당 캐비테이션 수와 저항계수를 구하고, 이론치와 비교하였다. 형상변화가 급격한 공동 시작부에 보다 많은 설계변수를 배치하여 해를 구했는데, 그 결과 이론치와 거의 같은 결과를 얻을 수 있었다.

4. 캐비테이터 형상 최적설계

4.1 캐비테이터 형상 최적설계

캐비테이터의 형상설계를 위해 형상을 Fig. 4와 같이 유리(rational)2차원 커브로 표현하였는데, 이는 다음과 같은 식으로 나타난다.

$$x(\eta) = \frac{(1-\eta)^2 x_1 w_1 + 2\eta(1-\eta)x_2 w_2 + \eta^2 x_3 w_3}{(1-\eta)^2 w_1 + 2\eta(1-\eta)w_2 + \eta^2 w_3} \quad (1)$$

여기서 $x_1 = (-b_1, 0)$, $x_2 = (-b_1, b_2)$, $x_3 = (0, 1)$, $w_1 = 1$, and $w_3 = 1$ 로서 $x_1 \sim x_3$ 은 제어점들, $w_1 \sim w_3$ 은 각 점의 가중치를 나타낸다. 설계변수는 b_1 , b_2 및 가중치 w_2 로 정하였다. 공동 형상

은 앞에서와 같은 방법으로 정의되는데, 설계변수는 3개의 높이변수 C_1 , C_2 , C_3 이다. 동시 최적화를 위한 목적함수는 저항계수 C_d , 제한조건은 압력차 $P - P_c$ 값을 0으로 하는 것, 설계변수는 캐비테이터와 공동 두 경계의 설계변수들로 하였다. 또한 원하는 공동의 길이를 제한조건으로 추가하는 것은 이미 주어졌으므로 자동으로 만족하고 있으며, 대신 본 문제에서는 캐비테이션 수까지 주어진 값으로 해야 해가 성립된다.

공동의 높이 설계변수를 3개로 하고, 길이를 5, 캐비테이션 수를 0.2로 한 경우에 대해 최적화 형상을 Fig. 5, 공동경계에서의 압력차를 Fig. 6에 보였다. 또한 초기 대비 최적화 결과를 Table 1에 보였는데, 여기서 cobj는 압력차 값을 나타낸다. 목적함수인 저항계수 C_d 가 초기 대비 증가하였지만, 이는 초기 형상에서 아직 초공동 형상이 제대로 결정되어 있지 않았기 때문이며, 최적해는 압력차 cobj가 0으로 수렴된 초공동 형상이 결정된 상태에서 최소화항을 구현한 결과를 알 수 있다.

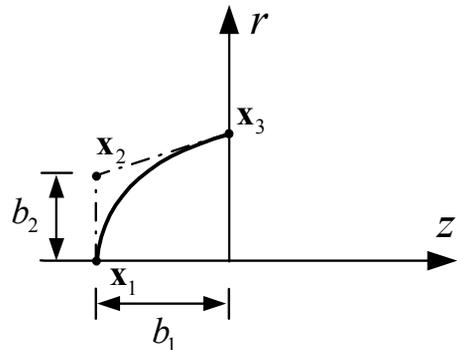


Fig. 4 Shape of the Cavitator

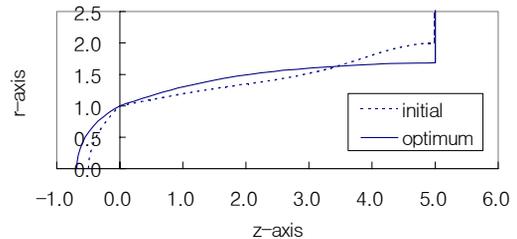


Fig. 5 Initial and Optimum Shapes in Simultaneous Optimization

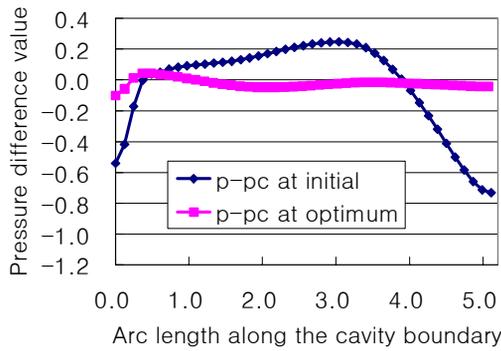


Fig. 6 Pressure Difference at Initial and Optimum Stages of Simultaneous Optimization

Table 1. Iteration Summary of Cavitator Optimization Problem

design parameter	initial	optimum
b1	0.5000	0.7214
b2	0.5000	0.6490
w2	1.0000	1.0017
c1	1.3000	1.4290
c2	1.6000	1.5983
c3	2.0000	1.6595
cobj	0.3029	0.0314
Cd	0.4285	0.4366
# iter		19
# cost eval		48

5. 토의 및 결론

본 연구에서 초공동 유동문제와 함께 캐비테이터의 형상최적설계를 위해 효과적인 최적화 기법을 제시하였다. 초공동 유동에서 미지의 공동형상을 결정하는 문제는 동등한 최적화 문제로 변화하여 해결하였고, 캐비테이터 형상성계시 나타나는 다단계 최적화 문제는 초공동 유동에서 고려하는 목적함수를 제한조건으로 바꾸고 캐비테이터와 공동의 형상을 한꺼번에 최적화함으로써 해결하였다. 또한 형상최적설계에서 유한요소법의 단점은 형상 변화 시 메시를 같이 변화시키기 위해 불편한 수작업이 필요한 맵메시를 반드시 사용해야 하는 것이었는데, 본 연구에

서는 자유메시를 가지고도 이와 동일한 수렴성을 보임으로써, 훨씬 편한 형상최적화를 가능하게 하였다.

여러 가지 조건에서 초공동 유동해석을 실시한 결과, 원하는 수준에 근접하기 위해서는 설계변수를 형상이 급격히 변화하는 부위에 보다 많이 배치하는 것이 중요함을 알았다. 향후 연구방향은 이것이 자동으로 결정되는 것을 연구할 계획이다. 아울러 초공동의 형상을 보다 실제에 가깝게 비대칭 재진입 제트 현상까지 포함하여 고려하는 것도 나아갈 방향이다.

참고 문헌

1. Ng, Kam W., "Overview And Future Research Directions Of Undersea Weapon Fesign & Optimization," 9th AIAA/ISSMO Symposium in Multidisciplinary Analysis and Optimization, 2002
2. Kirschner, I. N. et al., "Supercavitation Research and Development," report from Applied Research Laboratory at the Pennsylvania State University (ARL/PSU)
3. RTO LECTURE SERIES 005, Supercavitating Flows, RTO-EN-010, 2002
4. Pellone, C. and Rowe, A., "Supercavitating hydrofoils in non-linear theory," Third International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, 1981
5. Uhlman, J. S., "The surface singularity method applied to partially cavitating hydrofoils," Ph.D. Thesis, 1983
6. Fine, N. E. "Nonlinear analysis of cavitating propellers in non-uniform flow," Ph. D., Thesis, 1992
7. Kinnas, S. A. and Fine, N. E., "Non-linear analysis of the flow around partially or super-cavitating hydrofoils by a potential based panel method," Proceedings of the IABEM-90 Symposium, 1990