

초공동 운동체 구조물의 동적 불안정성 연구

김승조* · 변완일** · 장채규** · 조진연***

The Study of Dynamic Instability of Supercavitating Shell Structures

Seung Jo Kim* · Wanil Byun** · Chae Kyu Jang** · Jin Yeon Cho***

ABSTRACT

Supercavitating vehicles which cruise under water undergo high longitudinal force caused by thrust and drag. These combination may cause structural buckling. Static and dynamic buckling analysis method by using FEM can be used to predict this structural failure behavior. In this paper, some principles which include method for solution eigenvalue problem for buckling analysis are introduced. And before buckling analysis, we predicted some mode shape and natural frequency of cylindrical shell by using DIAMOND/IPSAP eigen-solver.

초 록

초공동 수중 운동체의 구조물은 수중 운동 시에 유동 마찰에 의해 생성되는 높은 축 방향 하중과 추력의 조합에 의해 좌굴 현상이 발생하게 되며, 이는 구조물의 손상과 연결된다. 따라서 운용하고자 하는 수중 운동체의 속도 범위에서 이러한 좌굴이 발생되지 않도록 구조 설계가 요구되며, 이는 유한요소 해석을 이용한 정적 및 동적 좌굴 해석으로 좌굴 예측이 가능하다. 본 연구에서는 이러한 좌굴 해석을 위한 기초적인 소개와 유한요소 좌굴 해석에 필요한 고유치 해법을 소개하고, 좌굴 해석에 앞서 고유치 해법을 통한 고유 진동수 및 모드 형상을 DIAMOND/IPSAP 프로그램을 통해 예측하여 보았다.

Key Words : Supercavitating structures, Buckling analysis, FEM(Finite Element Method), Eigenvalue analysis, DIAMOND/IPSAP

1. 서 론

초공동 현상을 활용한 기술 연구는 현재 선진국의 군사기술로 중점 연구되고 있는 분야이다. 2000년 초까지만 해도 초공동 현상에 대한 연구로는 유도, 제어, 안정 연구에 모두 초공동 물체를 강제로 다루었다[1]. 초공동 물체에 대해서

* 서울대학교 기계항공공학부 & 비행체특화연구센터

** 서울대학교 기계항공공학부

*** 인하대학교 항공우주공학과

연락처, E-mail: sjkim@snu.ac.kr

물과 캐비테이터의 선단 상호작용으로 인해 발생하는 항력은 물체의 속도의 제곱에 비례할 만큼 큰 영향을 주게 된다. 초공동 수중 운동체용 셀은 수중 운동 시에 유동 마찰에 의해 생성되는 높은 축 방향 하중과 추력의 조합으로 인해 좌굴 현상을 유발할 수 있으며, 이러한 현상이 초공동 운동체의 속도를 제한하는 요소가 된다 [2]. 좌굴 안정성은 이러한 어뢰의 구조 안정 한계를 평가하는데 꼭 필요하며 어뢰의 운용 범위를 늘리기 위한 노력도 기울여야 한다[3].

본 연구에서는 유한요소 해석을 이용하여 초공동 수중운동체 구조물의 안정성 해석이라 할 수 있는 정적 및 동적 좌굴 해석의 기초에 대하여 알아보고자 한다. 그리고 좌굴 해석을 위한 유한요소 해석 솔버(solver)를 알아보고, 이 해석 엔진을 이용하여 좌굴 해석 수행에 앞서 먼저 고유치 해석에 적용하여 고유 진동수와 모드 형상을 알아보았다.

2. 좌굴 해석

2.1 정적 좌굴 해석(static buckling analysis)

일반적인 정적 좌굴 해석의 해석 절차는 먼저 일정한 하중이 가해진 경우의 일반적인 선형 응력 해석을 수행하여 얻어지는 응력(stress)을 이용하여 초기 응력 강성 행렬(initial stress stiffness matrix) 혹은 기하 강성 행렬(geometric stiffness matrix, K_g)을 구성한 후, 선형 응력 해석에서 구해진 강성 행렬(stiffness matrix, K)와 함께 식 (1) 형태의 고유치 문제를 해석하게 된다.

$$\{K + \lambda K_g\} da = 0 \quad (1)$$

고유치 해석으로부터 고유치(eigenvalue) λ_i 와 고유벡터(eigenvector)가 얻어지게 된다. 고유벡터를 통해 좌굴 형상(buckling mode 또는 buckled shape)을 확인할 수 있으며, 고유치를 통해 실제 임계 좌굴 하중(critical buckling load, P_{cr})를 계산할 수 있다.

$$P_{cr_i} = \lambda_i P \quad (2)$$

그리고 어뢰 형태가 원통형이라고 가정한다면, 식 (2)에서 계산되는 임계 좌굴 하중 값을 이용하여 식 (3)에서와 같이 좌굴이 발생할 때의 속도 V_{cr} 까지 계산할 수 있다[4].

$$P_{cr} = \frac{\rho_w A_c C_{D_c}}{4\pi R h} V_{cr}^2 \quad (3)$$

2.2 동적 좌굴 해석(dynamic buckling analysis)

좌굴 해석에 있어서 하중이 다음과 같이 시간에 따라 변화하는 항이 있을 경우, 동적 좌굴 해석에 해당된다.

$$S(t) = S_0 (1 + \beta \cos(\Omega t)) \quad (4)$$

이 때의 모션 방정식(equation of motion)은 Mathieu-Hill type 방정식으로

$$[M]\{\ddot{q}\} + [K + (1 + \beta \cos(\Omega t))K_g]\{q\} = 0 \quad (5)$$

과 같으며, 여기에 Bolotin's Method[5]를 적용하여,

$$\{q(t)\} = \sin\frac{\Omega t}{2}\{a\} + \cos\frac{\Omega t}{2}\{b\} \quad (6)$$

식 (6)을 식 (5)에 대입하면, 다음과 같은 고유치 형태의 동적 좌굴 해석 방정식이 구성된다.

$$\left| K + \left(1 \pm \frac{\beta}{2}\right) K_g - \frac{\Omega^2}{4} M \right| = 0 \quad (7)$$

K 는 일반 강성 행렬을 K_g 는 기하 강성 행렬을 M 은 질량 행렬을 의미하며, 속도에 의한 하중에 의해 기하 강성 행렬이 정해지면 고유치 해석을 통해 고유치로 주파수를 구할 수 있으며, 이를 통해 어뢰 속도와 주파수 간의 stability map을 구성할 수 있다.

3. 고유치 해석 솔버

구조물의 고유치 해석은 식 (8)과 같다. 이는 정적 좌굴 식 (1)과 동적 좌굴해석 식 (7)과 동일한 형태가 되며, 이를 통해 고유치는 고유 진동수를 고유벡터는 모드 형상을 확인할 수 있다.

$$\{K - \lambda M\}\phi = 0 \quad (8)$$

이러한 형태의 고유치를 풀이하는 방법은 Jacobi Transfrom Method, HQRI Method, Subspace Iteration Method, Deteminant Search Method, Reduction Method, Lanczos Method 등 여러 가지가 있으며, 병렬 계산에 유리하며 선형 연립 방정식 계산에 효과적인 병렬 다중 프론트 해법(parallel multifrontal method)도 적용할 수 있는 Block Lanczos Method를 이용하여 고유치 해석을 수행하였다.

그림 1은 원통형 셸에 대하여 유한요소 모델링 한 것으로 표현하였다. 표 1은 상용 프로그램과 DIAMOND/IPSAP 프로그램(Block Lanczos Method)을 사용하여 계산한 고유치 비교를, 그림 2는 모드 형상을 나타낸 것이다.

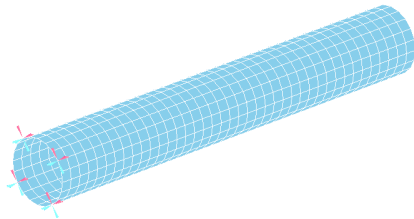


Fig. 1 FEM Model of Cylindrical Shell

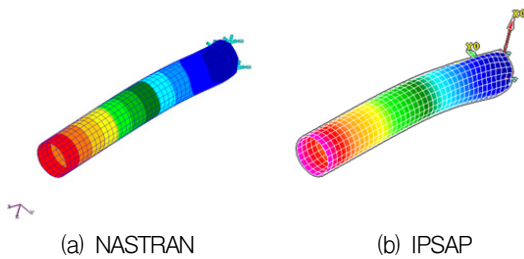


Fig. 2 Mode Shape #1

Table 1. Result of Eigenvalue Analysis (Hz)

#	MSC.NASTRAN	IPSAP
1	55.29	55.33
3	149.9	151.4
5	184.3	185.3
10	355.0	355.2

참 고 문 헌

1. Kirschner, I.N., Kring, D.C., Stokes, A.W., Fine, N.E., Uhlman, J.S., 2002. Control strategies for supercavitating vehicles. *Journal of Vibration and Control* 8, 219 - 242.
2. Vasin, A.D., 2001. Some problems of Supersonic cavitation flows. In: *Proceedings of the 4th International Symposium on Cavitation*, Pasadena CA, 20 - 23 June 2001.
3. Harkins, T.K., 2001. Hydroballistics: development, theory and some test results. In: *19th International Symposium on Ballistics*, Interlaken, Switzerland, 7 - 11 May 2001.
4. S.S. Ahn, M. Ruzzene, "Optimal Design of Cylindrical Shells for Enhanced Buckling Stability: Application to Supercavitating Underwater Vehicles", *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol.42, pp.967-976, 2006
5. V.V. Bolotin, "The Dynamic Stability of Elastic Systems", Holden-Day, Inc., 1964