수중폭발에 의한 원통형 배열센서의 구조 응답 및 안정성 해석

Structural Response and Reliability of a Cylindrical Array Sensor due to Underwater Explosion

전 수 홍*. 홍 진 숙†. 정 의 봉**. 서 희 선***. 조 요 한***

Soohong Jeon, Chinsuk Hong, Weui Bong Jeong, Hee-Seon Seo and Yo Han Cho

(2011년 11월 18일 접수 ; 2011년 12월 26일 심사완료)

Key Words : Underwater Explosion(수중폭발), Structural Reliability(구조안정성), Shock Resistance(내충격성), Cylindrical Array Sensor(원통형 배열센서), SONAR(수중 음파탐지장치)

ABSTRACT

This paper establishes a modeling and simulation procedure for structural response and reliability of a cylindrical array sensor on submarines under the shock generated by underwater explosion. The structural reliability of SONAR is important because the submarine could get out of combat ability by the structural damage of the SONAR upon explosion. A cylindrical array sensor was first modeled using the finite element method. Modal analysis was then performed for the check of the reliability of the modeling. The shock resistance simulations were performed for the responses to the structural shock waves and for the responses to the directly applied underwater shock waves, according to BV-043 and MIL-STD-901D, respectively. The stresses of the structure were evaluated with von-Mises scheme. Vulnerable regions were exposed through mapping the maximum stress to the structural model. Maximum stress of the SONAR was compared with the yield stress of the material to examine the structural reliability.

1. 서 론

잠수함에 장착되어 운용되는 소나들은 외부의 위협요소들을 탐지하여 정보를 획득하기 위한 중요한 장비이다. 수중폭발이 발생하는 경우에 생성된 충격파는 직접 소나와 접촉하여 충격을 주기도 하며, 선체에 부딪힌 충격파가 간접적으로 선체를 통하여

탄성파의 형태로 전달되기도 한다. 이러한 충격이 소나의 고장이나 파손으로 이어지는 경우에 잠수함은 운용 및 전투능력에 치명적인 영향을 받게 된다. 따라서 수중폭발 현상으로 생성된 충격파에 대한 소나 구조물의 내충격 성능 및 구조적 안정성에 대한 평가가 필요하다.

함정 탑재장비의 설계단계에서 내충격 성능을 확인하는 방법과 절차는 독일 규정인 BV-043⁽¹⁾과 미 해군 규정 MIL-STD-901D⁽²⁾에서 제시하고 있다. 소나와 같이 접수된 함정 탑재장비는 BV-043에서 규정하는 바와 같이 받침대를 통하여 전파되는 충격하중에 대한 내충격 성능과 MIL-STD-901D에서 규정하는 수중폭발 충격파의 직접 타격에 의한 구조 안정성을 동시에 평가하는 것이 필요하다. 이러한 평가방법들은 실험적인 방법이나 이론적인 방법

† 교신저자; 정희원, 울산과학기술대학교 디지털기계학부
E-mail : cshong@uc.ac.kr
Tel : (052)279-3134, Fax : (052)279-3137

* 정희원, 부산대학교 대학원 기계공학부

** 정희원, 부산대학교 기계공학부

*** 정희원, 국방과학연구소

이 논문의 일부는 2010년 추계 소음진동 학술대회에서 발표되었음.

을 통하여 접근이 가능하다. 하지만 두 규정에서 제시하는 충격시험 절차를 실제로 구현하여 실험하는 것에는 각종 시험 장비 및 부대 장치 실현의 어려움으로 인하여 많은 한계를 지니고 있다. 따라서 소나에 대한 신뢰성 있는 해석 모델을 개발하고 이론적인 방법으로 접근하여 구조 안정성을 평가할 수 있는 M&S(modeling & simulation) 기법의 구축이 요구된다.

이에 수중폭발에 의한 구조물의 안정성을 평가하기 위하여 다양한 연구들이 수행되었다. Seo와 Goh⁽³⁾는 폭약의 사양에 따라 수중폭발 시에 발생하는 압력을 모델링하고 수중음향 트랜스듀서의 수중폭발에 대한 충격특성 및 내충격 성능을 고찰하였으며, Lee 등⁽⁴⁾은 수중폭발 충격파에 의한 충격응답해석과 가스구체 압력파에 의한 휘핑응답해석을 기존의 해석기법과 비교하고 두 종류의 해석을 동시에 고려하여 해석할 수 있는 통합 해석기법을 제시하였다. Kim⁽⁵⁾은 ALE(Arbitrary Lagrangian/Eulerian) 기법을 이용하여 수중폭발의 직접 전달파에 의한 잠수함 액화연료탱크의 유체-구조 연성해석을 수행하였다. Shin 등⁽⁶⁾은 BV-043의 절차에 따라 선체부착형 소나의 선체 전달 탄성파에 의한 응답 특성을 이용하여 구조물의 취약성을 평가하였다.

이 연구에서는 수중폭발에 의하여 발생된 충격파가 잠수함에 부착된 원통형 배열센서에 직접 또는 간접적으로 전달되어 나타나는 구조물의 응답을 확인하고, 이로부터 안정성 평가를 수행하기 위한 M&S 기법을 구축하였다. 우선 구조해석에 필요한 유한요소모델을 구축하고, 구조-유체 연성해석을 위한 유한체적요소를 생성하였다. 선체를 통하여 장비 받침대에 가해지는 충격가속도에 의한 내충격 성능은 BV-043에 주어진 절차에 따라 MSC/NASTRAN⁽⁷⁾을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 수중폭발에 의해 충격파가 직접 가해지는 경우의 구조 안정성은 MIL-STD-901D에서 제시하는 절차에 따라 MSC/DYTRAN의 CLE(Coupled Lagrangian/Eulerian) 구조-유체 연성해석 기법⁽⁸⁾을 이용하여 시뮬레이션하였다. 유체경계에서의 무반사 경계조건을 구현하기 위하여 PML(perfectly matched layer) 기법⁽⁹⁾을 해석에 적용하였다. 구조안정성 평가는 요소 및 시간별로 소나 구조물 내에 발생한 최대응력분포를 구하여 von-Mises법⁽¹⁰⁾으로 실시하였다.

2. 원통형 배열센서의 모델링

2.1 유한요소 모델링

이 논문의 구조 안정성 평가 대상인 원통형 배열센서(cylindrical array sensor)는 다수의 배열센서가 원주방향으로 부착되어 있는 구조물로서, 잠수함 주위의 다양한 방향에서 발생하는 신호를 탐지하기 위한 장비이다. 원통형 배열센서의 구조는 Fig. 1과 같으며 드럼, 배열센서, 마운트, 선체고정부로 구성되어 있다. 대상 모델의 직경은 약 0.9 m이고 높이는 약 0.7 m이며, 전체 질량은 약 1 ton이다.

구조해석을 위하여 단순화 모델링을 실시하였으며, 각각의 센서는 등가의 point mass로 대체하였다.

Fig. 1 Geometry model of a cylindrical array sensor

Fig. 2 Finite element model

Table 1 Specifications of the FE model

	Drum	Stave array	Mount	Fixed plate
Material	Brass	Polyurethane	Rubber	Steel
No. of element	85555	33384	3203	7396

단순화 시킨 원통형 배열센서 모델을 Fig. 2와 같이 10절점 사면체 요소와 20절점 육면체 요소로 모델링하였다. 모델링 된 각 구성요소의 재료 및 요소의 개수는 Table 1과 같다. 각각의 부위는 contact 조건을 이용하여 연결하였으며, 하중을 부여하기 위하여 하나의 노드를 생성하고 선체고정부의 아래 부분을 강체요소로 연결하였다.

2.2 고유모드 해석

구조물의 유한요소 모델과 경계조건의 신뢰성을 확인하기 위하여 모드해석을 수행하였다. 모드해석을 통하여 도출된 주요 고유모드 6개를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3(a), (b)는 마운트에 의한 병진과 회전모드에 의한 거동을 표현하고 있다. Fig. 3(c)~(f)는 드럼의 원주방향 모드 및 상하방향 모드를 나타내고 있다. 고유모드형상이 물리적으로 타당한 거동을 나타내고 있으므로 각 구성요소들의 연결이 양호하게 이루어졌음을 알 수 있다. 이로부터 외부 충격파에 대한 응답특성을 알아보기에 적합한 모델링이 구축되었음을 확인할 수 있다.

3. 선체진동에 의한 구조물의 응답특성 해석

잠수함의 선체를 통하여 전달되는 충격파는 원통형 배열센서의 선체고정부를 통하여 전파된다. 이때 선체고정부에 입력되는 충격파형은 BV-043에서 제시하는 DVA선도를 이용하여 Fig. 4와 같이 모델링할 수 있다. DVA선도는 충격응답스펙트럼을 의미

하며, 잔류속도(remaining velocity) r_0 , 변위응답 스펙트럼(displacement response spectrum, SD) d_0 , 의사속도응답 스펙트럼(pseudo-velocity response spectrum, PSV) v_0 및 의사가속도응답 스펙트럼(pseudo-acceleration response spectrum, PSA) a_0 를 이용하여 나타낸 그래프이다. 각 성분은 서로 다른 고유진동수를 가지는 다수의 1자유도계가 부착된 베이스를 충격가진 하여 발생하는 각 자유도계의 최대 상대변위를 계산함으로써 구할 수 있다. 원통형 배열센서의 응답을 구하기 위하여 사용된 시간에 따른 충격 가속도 신호는 Fig. 5와 같으며, DVA선도와 동일한 에너지를 가지는 세 개의 삼각파로 변환하여 모델에 적용하였다. 여기서 사용된 파라미터들은 DVA선도에 상응하는 에너지를 잘 표현할 수 있도록 여러 번의 시행착오를 거쳐서 생성하였다.

해석된 결과는 식 (1)을 이용하여 von-Mises 응력을 유도하고 재료의 항복응력과 비교하여 구조 안정성을 평가하였다.

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}, \quad (1)$$

Fig. 4 DVA shock response spectrum

Fig. 3 Selected Natural modes of the analysis model

Fig. 5 Triangular acceleration curve from the DVA curve

여기서 σ_e 는 von-Mises 응력이며, σ_1 , σ_2 , σ_3 은 각 방향의 주응력이다.

내충격 응답해석은 수직방향, 횡방향과 종방향에 대하여 BV-043에서 제시하고 있는 DVA 데이터로부터 충격 가속도 신호를 생성하여 선체고정부에 입력한 후에 MSC/NASTRAN을 이용하여 과도해석을 수행함으로써 실시하였다. 먼저 수직방향의 가속도를 입력한 경우에 요소와 시간에 따른 von-Mises 응력변화는 Fig. 6과 같다. 전체 해석 시간동안에 구조물의

Fig. 6 Von-Mises stress response to the vertical shock

Fig. 7 Maximum von-Mises stress distribution due to the vertical shock

Fig. 8 Maximum von-Mises stress at each time due to the vertical shock

각 요소에 발생한 최대응력을 추출하여 Fig. 7과 같이 구조물에 맵핑하였으며 이로부터 수직방향으로 충격 가속도가 가해지는 경우에 구조물 내에서 최대응력이 발생하는 지점은 드럼의 윗부분과 아랫부분임을 확인할 수 있었다. 또한, 응력변화 데이터로부터 각 시간별 전체요소에서의 최대응력을 구하여 Fig. 8에 나타내었으며, 재료의 항복응력과 비교한 경우에 해당 구조물은 외부 충격에 대하여 구조적으로 안전하다고 평가할 수 있었다.

횡방향과 종방향의 가속도를 입력한 경우의 요소와 시간에 따른 von-Mises 응력변화는 각각 Fig. 9 및 12와 같다. 전체 해석 시간동안에 구조물의 각 요소에 발생한 최대응력을 추출하여 Fig. 10 및 13와 같이 구조물에 맵핑하였으며 이로부터 횡방향과 종방향의 충격 가속도 입력 시 구조물 내에서 최대응력이 발생하는 부분은 드럼의 기둥 아랫부분이었으며, 가진되는 방향으로 조금 더 큰 응력이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 응력변화 데이터로부터 각 시간별 전체요소에서의 최대응력을 구하여 Fig. 11과 14에 나타내었으며, 재료의 항복응력과 비교한 경우에 해당 구조물은 외부 충격에 대하여 구조적으로 안전하다고 평가할 수 있었다.

Fig. 9 Von-Mises stress response to the transverse shock

Fig. 10 Maximum von-Mises stress distribution due to the transverse shock

Fig. 11 Maximum von-Mises stress at each time due to the transverse shock

Fig. 12 Von-Mises stress response to the longitudinal shock

Fig. 13 Maximum von-Mises stress distribution due to the longitudinal shock

Fig. 14 Maximum von-Mises stress at each time due to the longitudinal shock

4. 수중폭발의 직접 충격파에 의한 구조물의 응답특성해석

수중폭발이 발생한 경우에 생성되는 충격파의 직접 전파에 의한 구조물의 응답은 MIL-STD-901D에서 제시하고 있으며, 이에 따른 실험 환경을 구현하기 위하여 Fig. 15와 같이 해석영역을 설정하고 구조물과 폭발물을 10 m의 간격을 두고 위치시켰다.

유체의 해석영역은 MSC.DYTRAN을 이용하여 유한체적요소로 생성하였다. 앞서 생성한 구조물의 유한요소 모델을 해석영역 내부에 설정하고 유체 요소의 변형 없이 해석이 가능한 CLE(Coupled Lagrangian/Eulerian) 방법을 이용하여 유체-구조 연성해석을 수행하였다. 수중폭발 구현을 위한 폭발물은 JW(Jones-Wilkins-Lee) 모델⁽¹¹⁾을 적용하였으며 해당 모델의 상태방정식은 식 (2)와 같다.

$$P = A \left(1 - \frac{\omega \eta}{R_1} \right) e^{-\frac{R_1}{\eta}} + B \left(1 - \frac{\omega \eta}{R_2} \right) e^{-\frac{R_2}{\eta}} + \omega \eta \rho_0 e, \quad (2)$$

여기서 e 는 단위질량당 내부에너지, ρ_0 는 참조밀도, ρ 는 폭발물의 밀도, η 는 ρ_0/ρ 이다. A, B, ω, R_1, R_2 는 폭발물의 종류에 따라 정해지는 상수이며 Lee와 Tarver⁽¹²⁾에 의해 정의되었다. 이 연구에서는 TNT에 대한 물성치를 사용하였다.

유체영역의 경계에서 압력구배에 의해 발생하는

Fig. 15 Analysis domain for an underwater explosion

Fig. 16 Pressure propagation in the analysis domain after underwater explosion

Fig. 17 Variation of the von-Mises stress distribution with time after underwater explosion

반사파의 영향을 줄이기 위하여 PML 기법을 적용하였다. PML 기법은 각 방향에 흡수계수를 적용하여 경계에서 발생하는 압력구배를 줄여주는 역할을 한다.

TNT를 폭발시킨 이후의 압력전파 과정은 Fig. 16과 같이 시간에 따라 나타내었다. 또한 수중폭발력이 구조물에 전달된 이후에 발생하는 구조물의 응력분포도 Fig. 17과 같이 시간에 따라 나타내었다. 수중폭발 해석에 대한 요소와 시간에 따른 von-Mises 응력변화는 Fig. 18과 같이 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 전체 해석시간 동안에 구조물의 각 요소에

Fig. 18 Von-Mises stress response to the underwater explosion

Fig. 19 Maximum von-Mises stress distribution due to the underwater explosion

Fig. 20 Maximum von-Mises stress at each time due to the underwater explosion

발생하는 최대응력을 맵핑한 결과는 Fig. 19와 같이 나타났다. 수중폭발 해석의 맵핑된 결과로부터 구조물에 발생하는 응력은 드럼의 전체에서 큰 경향을 보였으며, 드럼의 바닥부분에서 특히 큰 값이 나타남을 확인할 수 있었다. 또한, 각 시간에 따른 전체 요소에서의 최대응력을 구하여 Fig. 20에 나타내었다. 응력은 약 0.008초에서 최대값을 가진 이후에 시간이 흐름에 따라 크기가 줄어드는 것을 확인할

수 있었다. 재료의 항복응력과 구조물의 최대응력을 비교한 경우에 해당 구조물은 수중폭발 충격에 대하여 구조적으로 안전하다고 평가할 수 있었다.

5. 결 론

잠수함에 부착되어 수중 탐지 장비로 사용되는 소나에 대한 구조 응답 및 안정성을 평가할 수 있는 M&S기법을 수립하고, 원통형 배열센서에 대하여 해석 및 평가를 실시하였다.

선체를 통하여 전달되는 충격파에 대한 해석을 위하여 BV-043에서 제시하는 방법에 따라 수직방향, 횡방향 및 종방향에 대한 입력 파형을 모델링하고 MSC.NASTRAN을 이용하여 내충격 해석을 수행하였다. 수중폭발에 의하여 직접적으로 충격파가 전해지는 경우의 해석은 MIL-STD-901D에서 제시하는 절차에 따라 MSC.DYTRAN을 이용하여 해석을 수행하였다. 폭발물은 JWL 모델의 상태방정식 형태로 해석에 적용하였다. 해석결과는 각 시간과 요소에 대하여 구조물의 구조안정성을 평가할 수 있도록 결과를 도출하였으며, 해석결과를 구조물에 맵핑하여 최대응력이 발생하는 부분을 쉽게 확인할 수 있도록 후처리 과정을 확립하였다. 또한 각 시간별 최대응력 발생 경향을 확인할 수 있도록 하였으며, von-Mises법을 통하여 구조물의 항복응력과 비교하고 구조 안정성을 평가할 수 있도록 하였다.

이 논문을 통하여 확립된 평가 방법을 이용하면 원통형 배열센서가 아닌 잠수함에 부착되는 다양한 장비에 대해서도 동일하게 적용하여 구조안정성을 평가하는 것이 가능할 것이다.

후 기

이 연구는 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) BV043, 1985, Shock Resistance Demonstration by Experimental of Comparison, Federal German Army Procurement Office.
- (2) MIL-S-901D, Shock Tests, HI(High Impact) Shipboard Machinery, Equipment and Systems, Requirement for.
- (3) Seo, H. S. and Goh, B., 2006, Analysis for Anti-shock Characteristics of Underwater Acoustic Transducers to the Explosive Shock, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 16, No. 11, pp. 1108~1114.
- (4) Lee, S. G., Kwon, J. I. and Chung, J. H., 2007, Integrated Structural Dynamic Response Analysis considering the UNDEX Shock Wave and Gas Bubble Pulse, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 44, No. 2, pp. 148~153.
- (5) Kim, J. H., 2007, Shock Response Analysis under Underwater Explosion for Underwater Ship using ALE Technique, Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering, Vol. 10, No. 4, pp. 218~226.
- (6) Shin, C., Hong, C., Jeong, W. B. and Seo, H. S., 2009, Dynamic Response of Hull Mounted Cylindrical Array Sonars to Shocks, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 19, No. 2, pp. 146~154.
- (7) MSC.NASTRAN Reference Manual.
- (8) MSC.DYTRAN Reference Manual.
- (9) Hu, F. Q., 2008, Absorbing Boundary Conditions for Nonlinear Euler and Navier-Stokes Equations based on the Perfectly Matched Layer Technique, Journal of Computational Physics, Vol. 227, No. 9, pp. 4398~4424.
- (10) Ugural, A. C. and Fenster, S. K., 2002, Advanced Strength and Applied Elasticity, Prentice Hall.
- (11) Lee, E. L., Hornig, H. C. and Kury, J. W., 1968, Adiabatic Expansion of High Explosive Detonation Products, UCRL-50422, University of California, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA.
- (12) Lee, E. L. and Tarver, C. M., 1980, Phenomenological Model of Shock Initiation in Heterogeneous Explosives, Physics of Fluids, Vol. 23, No. 12, pp. 2362~2372.