DOI : 10.5050/KSNVE.2010.20.12.1183

함정용 추진전동기의 내충격성 해석

Shock Resistance Analysis of a Propulsion Motor for Naval Vessels

배 성 욱*·홍 진 숙**·정 의 봉†·박 영 수***·빈 재 구****

Sungwook Bae, Chinsuk Hong, Weuibong Jeong, Youngsu Park and Jaegoo Bin

(2010년 9월 17일 접수 ; 2010년 11월 17일 심사완료)

Key Words : Shock Spectrum(충격 스펙트럼), Shock Resistance(내충격), Propulsion Motor(추진전동기)

ABSTRACT

Shock-resistance test for a real equipment for a normal vessel is one of the difficult problem in many cases because of terrible cost and weight. An analysis technique to evaluate the shock resistance in a design stage is necessary, instead In this paper, the process to evaluate the shock resistance of a propulsion motor for naval vessels was presented based on German navy's BV043 regulation. The shock signal to impose the equipment under the test was first evaluated, and was then applied to the structural FE model of the equipment. From the transient FEA, the time history of von-Mises stress was obtained by the mode superposition method. The shock resistance was evaluated using the peak value of the von-Mises stress.

1. 서 론

함정에 탑재된 추진전동기는 동력을 프로펠러에 전달하여 함정의 추진을 담당하는 주요한 장치로서 함정의 생존성 관점에서 내충격 안전성 확보는 매우 중요한 위치를 차지한다. 일반적으로 함정은 임무수행 중 여러 원인에 의해 충격을 받을 수 있다. 함정의 임무수행 중 발생할 수 있는 충격원인 중 수중폭발이 선체에 직접적으로 전달되어 일어나는 접촉성 폭발의 경우 선체 자체 손상이나 파손 등으로 대책마련이 힘들게 된다. 반면, 비접촉성 수중폭발에 의한 경우 주로 주요 탑재 장비의 충격에 의한 파손 또는 장비 받침대의 손상 등으로 인한 장비의 작동불능 등이 발생하게 되며 이에 대한 대책마련이 필요하다.

함정의 고유 임무수행 중 발생할 수 있는 비접촉식 폭발에 의한 충격은 여러 원인 또는 경로를 통해 발생 할 수 있다. 예를 들면, 어뢰나 기뢰 또는 함대함 유도탄 등의 공격으로 발생 할 수 있다. 특히, 이들 공격에 의해 발생한 수중폭발 발생 시 야기되는 에너지는 충격파 형태로 함정에 전달되어 선체를 급가속시키고 선체를 통해 탄성파가 전파되어 추진전동기 등의 탑재장비에 치명적인 영향을 미치게 된다. 추진전동기는 함정의 기동을 위한 필수적인 장비로서 손상으로 회복하지 못할 경우 기동을 하지 못하게 되므로 함정은 임무수행능력을 상실 및 생존도 위협을 받을 수 있다. 따라서, 함정과 승무원의 생존성 확보를 위해서 장비의 설계 초기에서부터 수중폭발 등에 의한 충격의 영향으로 파손 또는 성능저하 등이 되지 않도록 설계초기에서부터 내충격 설계가 이루어져야 하며 내충격성 검증이 이루어지고 난 후 장비의 제작에 착수 하여야 한다.

장비의 내충격 성능을 검증하기 위한 방법으로는

† 교신저자; 정회원, 부산대학교 기계공학부
E-mail : wbjeong@pusan.ac.kr
Tel : (051)510-2337, Fax : (051)517-3805
* 부산대학교 대학원 기계공학부
** 정회원, 울산과학대학 디지털기계학부
*** 효성중공업
****국방과학연구소

해석 및 시험 충격시험기를 통한 장비 내충격시험, 수중폭발시험, 그리고 Fig. 1과 같은 전선(full ship) 수중폭발시험[1] 등이 있다. 하지만 이들 시험들의 경우 비용과 규모 면에서 수행하기 힘든 점이 있을 뿐 아니라 장비 또는 함정의 설계단계에서는 수행할 수 없는 단점이 있다. 따라서 장비의 설계단계에서 내충격 성능을 예측할 수 있는 M&S(modeling & simulation)기반의 해석기술이 필요하다. 이와 같은 M&S기반의 해석 절차로는 독일 해군에서 제시한 BV043[2]과 미국 NRL(Naval Research Laboratory)에서 제시한 DDAM(dynamic-design analysis method)[3] 등이 있다. BV043은 독일 해군에서 제시한 방법으로 군함의 설계변경 혹은 설계 승인을 위한 모든 절차 및 의무 등을 규정한 기술집으로 내충격(shock resistance) 관련 내용이 포함되어 있다. DDAM은 미국 NRL에서 제시한 방법으로 실선 충격시험 계측에서 얻어진 응답스펙트럼을 기초로 장비의 설계기준 충격응답스펙트럼을 규정하고 모드중첩법에 의해 장비 또는 받침대의 변위, 응력 등을 계산하게 된다. DDAM은 MSC.Nastran[4] 및 Ansys 등의 범용 해석프로그램에서 해석 모듈을 제공하고 있다. 국내에서는 선체부착형 원통형 배열소나의 선체충격에 의한 응답[5]에 대한 연구와 MIL-S-901D[6]를 이용한 부유식 충격시험기의 충격응답해석[7] 등이 연구되어 왔다.

이 연구에서는 독일 해군의 BV043을 이용한 충격해석을 통해 충격 발생 시 추진전동기의 응력 분포를 구한 후 재료의 구조안전성을 평가함으로써 BV043의 절차에 대한 연구 및 추진전동기의 내충격성능을 파악하고자 한다.

Fig. 1 Shock trial of USS OSPREY(MHC 51) at the aberdeen test center(courtesy of U.S. Navy)

2. 충격에 대한 이론적 해석

2.1 충격 스펙트럼

Fig. 2와 같은 1자유도계의 기초 변위 가진 $y(t)$에 의한 상대변위 $z(t)=x(t)-y(t)$의 운동방정식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$m\ddot{z}(t)+c\dot{z}(t)+kz(t)=-m\ddot{y}(t) \tag{1}$$

여기서 m은 1자유도 시스템의 질량, c는 감쇠 그리고 k는 강성을 나타낸다. 또는 고유진동수 $\omega_n=\sqrt{k/m}$, 감쇠율 $\zeta=c/2\sqrt{mk}$를 이용하여 운동방정식을 표현하면 다음과 같다.

$$\ddot{z}(t)+2\zeta\omega_n\dot{z}(t)+\omega_n^2 z(t)=-\ddot{y}(t) \tag{2}$$

식 (2)의 $-\ddot{y}(t)$를 크기가 갑작스럽게 변화하는 일련의 충격량을 간주하면 시간 t에서의 응답은 다음과 같이 충격량들의 convolution적분으로 구할 수 있다.

$$z(t)=\int_0^t -\ddot{y}(\tau)g(t-\tau)d\tau \tag{3}$$

여기서, 단위충격 응답함수 $g(\tau)$는 다음과 같다.

$$g(t)=\frac{e^{-\zeta\omega_n t}}{m\omega_d}sin\omega_d t \tag{4}$$

여기서 감쇠 고유진동수 $\omega_d=\sqrt{1-\zeta^2}\,\omega_n$이다.

구조물의 고유진동수 ω_n를 x축으로 하여 가속도, 상대의사가속도, 상대변위의 최대값을 그리면 충격스펙트럼을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$S_d=|z(t)|_{\max}=\frac{S_v}{\omega_n}$$

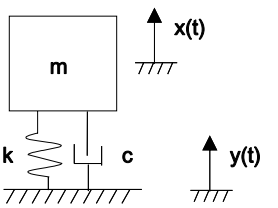


Fig. 2 1DOF system

$$S_v = |\dot{z}(t)|_{\max}$$
$$S_a = |\ddot{z}(t)|_{\max} = \omega_n S_v \quad (5)$$

여기서 하첨자 d,s 및 a는 각각 변위, 속도 그리고 가속도를 나타낸다.

2.2 BV043에 의한 충격 응답 해석

BV043은 내충격성능을 검증하는 방법들 중 시험을 우선시 하고 있으나 설비의 크기, 비용, 무게과다 등의 제약을 받을 경우 컴퓨터 해석을 통한 검증으로 대체할 수 있도록 하고 있다.

충격파에 노출된 장비의 내충격해석을 위해서 BV043에서는 Fig. 3에서와 같이 충격응답스펙트럼을 이용한다. 여기서 d_o는 변위스펙트럼의 기준값, v_o는 의사속도스펙트럼의 기준값, 그리고 a_o는 가속도스펙트럼의 기준값을 나타내며 선주가 결정한다. 이 충격스펙트럼은 장비의 받침대에서 허용하는 최대 충격치로 간주되며 이에 등가인 Fig. 4의 사인파(sine wave) 또는 Fig. 5의 삼각파(triangular wave) 등의 시간영역 가속도 값으로 충격량을 정의한다. Fig. 4에 주어진 이중 사인 충격파의 세부 값은 다음과 같다[2].

$$a_2 = 0.5a_0$$
$$t_1 = \frac{\pi v_1}{2a_2}$$
$$v_1 = \frac{2}{3}v_0 = v_2 \quad (6)$$
$$a_4 = -\frac{\pi v_1}{2t_2}$$
$$t_2 = \frac{2d_0}{v_1} - t_1$$

그리고 Fig. 5와 같은 이중 삼각형 형태의 충격파에 대한 세부 값은 다음과 같다[2].

$$a_2 = 0.6a_0$$
$$v_2 = \frac{3}{4}v_0$$
$$t_3 = 2v_2/a_2$$
$$(t_5 - t_3) = \frac{6d_0 \times 1.05 - 1.6a_2 t_3^2}{1.6a_2 t_3} \quad (7)$$
$$a_4 = -a_2 t_3/(t_5 - t_3)$$
$$t_4 = t_3 + 0.6(t_5 - t_3)$$

이 가속도 값을 장비의 선체결합부에 부가하여 실험을 수행하거나 실제시험과 동일하게 이론적 해석에 의한 시뮬레이션을 하는 방법으로 내충격성을 검토하도록 하고 있다. 이 연구에서는 삼중 삼각형 충격파를 장비의 선체결합부인 마운트 하단에 부여하고 시뮬레이션을 통하여 충격응답을 구하고 구조건전성을 평가하였다.

충격응답을 구하기 위해서 전동기 시스템을 유한요소모델로 이산화하면 다음과 같은 다자유도계의 운동방정식으로 표현할 수 있다.

$$[M]\{\ddot{z}(t)\} + [C]\{\dot{z}(t)\} + [K]\{z(t)\} = \{f(t)\} \quad (8)$$

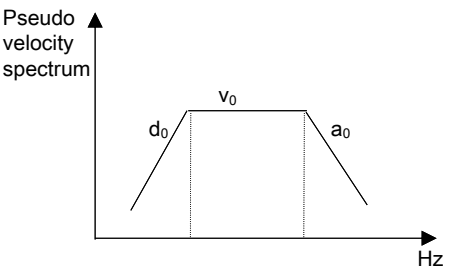


Fig. 3 Shock response spectrum

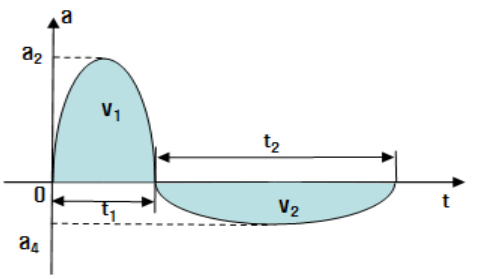


Fig. 4 Double sine wave acceleration pattern

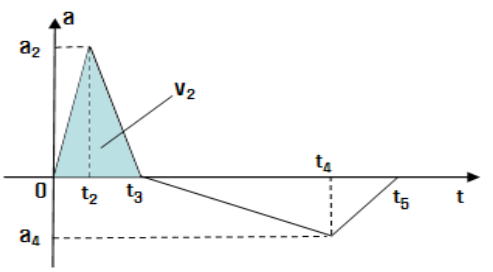


Fig. 5 Triangular wave acceleration pattern

여기서 $[M]$은 질량행렬, $[C]$는 감쇠행렬, $[K]$는 강성행렬 그리고 $\{f(t)\}$는 외력 벡터이다. 모드중첩(mode superposition)을 이용하면 과도응답을 효율적으로 해석할 수 있다. 모드중첩법은 각 모드의 선형결합을 통해 시스템의 응답을 다음과 같이 표현하게 된다. 모드중첩법은 시간영역 차분법과 비교하여 동적거동을 지배하는 저차모드에 대한 해석만으로도 비교적 정확한 해에 근접한 해를 얻을 수 있다. 반대로, 구조계의 특정 응답이 누락될 수 있으므로 반응하는 모드의 정확한 확인이 필요하다.

비감쇠계에 대한 고유치 문제는 다음과 같다.

$$([K]-\omega^2[M])\{\phi\}=\{0\} \tag{9}$$

식 (9)로부터 고유모드 $\{\phi\}_q, q=1\sim n$을 구하면 비례점성감쇠계에 대한 모드자표계에서의 비연성화된 방정식은 다음과 같다.

$$\ddot{v}_q(t)+2\zeta_q\omega_q\dot{v}_q(t)+\omega_q^2 v_q(t)=\{\phi\}_q^{\top}\{f(t)\} \tag{10}$$

그러므로 시스템의 응답은 모드중첩에 의하여 다음과 같다.

$$\{z(t)\}=\sum_{q=1}^{n} v_q(t)\{\phi\}_q \tag{11}$$

장비의 구조건전성 평가는 폰 미제스법으로 수행하였다. 장비가 장착되는 마운트 바닥부에 충격 가속도를 입력한 후 식 (12)와 같이 구조물의 각 요소에 발생하는 폰-미제스(von-Misses)응력을 확인하였다.

$$\sigma_e=\sqrt{\frac{(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2}{2}} \tag{12}$$

여기서 σ_e는 폰-미제스 응력이고 σ_1, σ_2 및 σ_3는 요소의 주응력(principal stress)를 나타낸다.

발생한 응력 중 전 시간대에 걸쳐 각 요소별 최대값을 확인하여 구조의 취약부를 확인하였다. 취약부에 대한 판단은 각 요소별 최대값이 재료의 항복응력(yield stress)을 초과할 때 구조가 취약하다고 판단하였다.

3. 충격 해석

3.1 유한요소 해석을 위한 전처리

Fig. 6은 해석 대상인 추진전동기의 솔리드 모델을 보이고 있다. 선체에 고정되는 부분은 4개의 마운트 하단부이며 이 지점을 통해서 충격파가 인가된다. 전동기의 상단 및 외부에 장착된 보조장비의 받침대와 형상을 모두 반영하여 충격에 의한 이들 장비의 응답도 모두 확인할 수 있도록 하였다.

추진전동기 유한요소모델은 Fig. 7에서 보인 바와 같이 10절점 삼각형 요소로 모델링하였다. 구성품의 재질은 스틸류의 SS400으로 물성치는 Table 1과 같다. 항복응력은 230 MPa으로 해석 후 요소별 최대값과 비교하였다. 충격이 입력되는 절점들을 RBE2를 이용하여 충격점에 연결하고 충격점에 해당 충격량을 입력하는 방법을 사용하였다. 길이방향 충격량은 Fig. 8(a)와 같으며 수평방향과 반경방향의

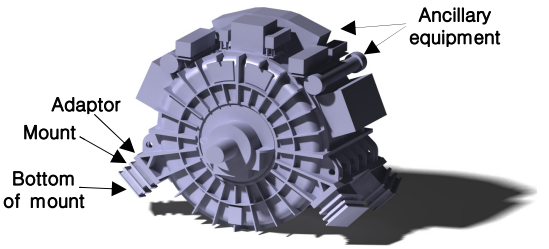


Fig. 6 Motor model

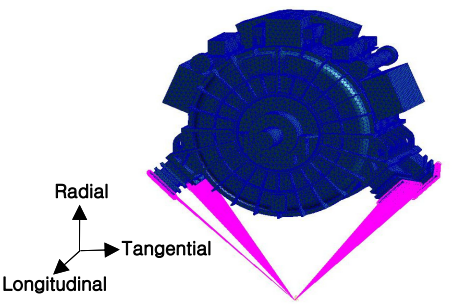
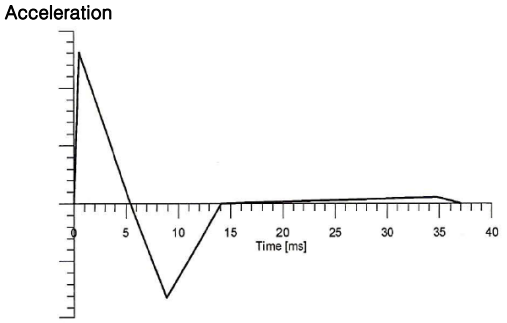


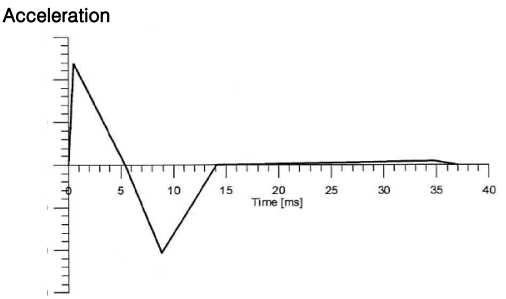
Fig. 7 FEM model

Table 1 Material properties

Material specification	Value
Density(kg/m^3)	7865
Young's modulus(GPa)	205
Poisson's ratio	0.29
Yield stress(MPa)	230
Ultimated stress(MPa)	415



(a) Longitudinal shock input



(b) Tangential & radial shock input

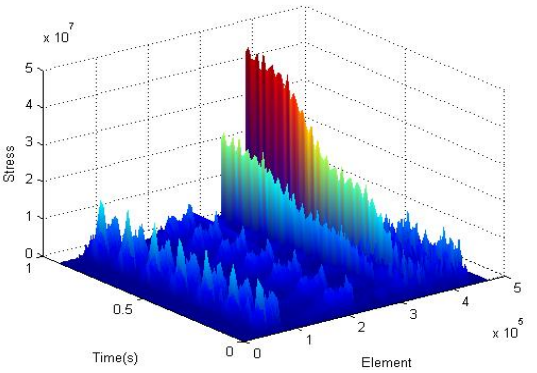
Fig. 8 Shock input

충격량은 동일하다고 가정하였으며 Fig. 8(b)와 같다. 그리고 3방향의 충격가속도가 각각 전동기 하단부에 설치된 마운트에 적용하였을 때의 충격응답해석을 수행하였다. 충격값은 전동기의 충격 응답 스펙트럼에서 구해진 값이다.

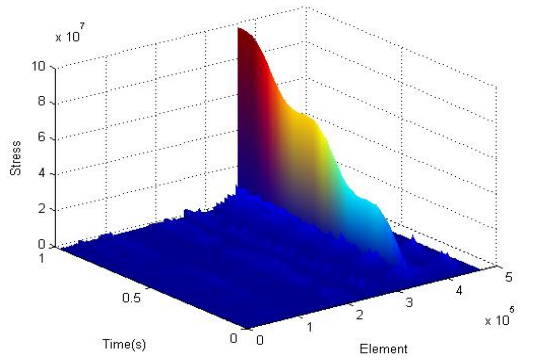
3.2 해석 결과

Fig. 9의 (a), (b) 및 (c)는 각 방향별 충격입력에 따른 전동기 모든 절점에서의 폰-미제스 응력을 시간에 따라 확인한 것으로 전동기에 발생하는 응력의 변화를 확인 할 수 있다. 최대값이 발생하는 어댑터(adaptor)이외의 부분에서는 비교적 작은 응력이 발생함을 알 수 있다.

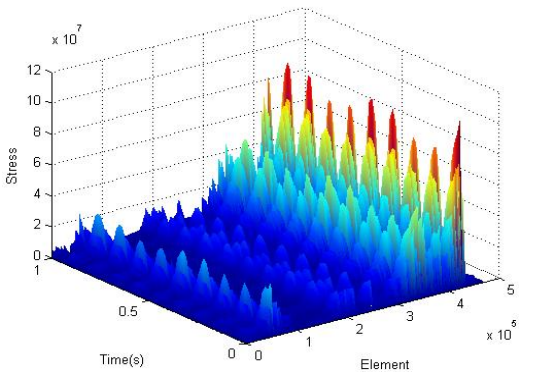
Fig. 10의 (a), (b) 및 (c)는 각각 길이방향, 수평방향 및 반경방향 충격입력에 따라 발생한 폰-미제스 응력값 중 요소별 최대값을 추출하여 나타낸 것으로 0초에서 1초까지 발생한 응력값 중 요소별 최대 발생응력을 확인하였다. 최대응력은 108.7 MPa이며 반경방향의 충격량 입력에 따라 노드번호 25,000 부근인 마운트 상단의 어댑터(adaptor)부분에서 발생



(a) Longitudinal shock input



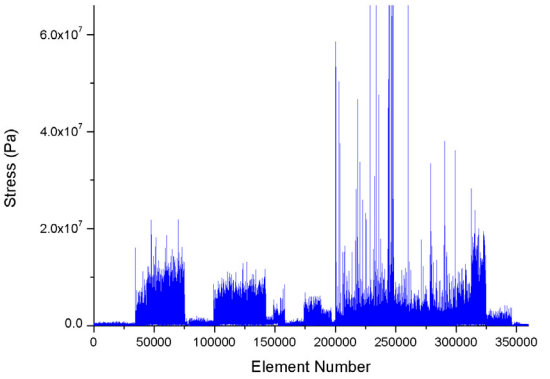
(b) Tangential shock input



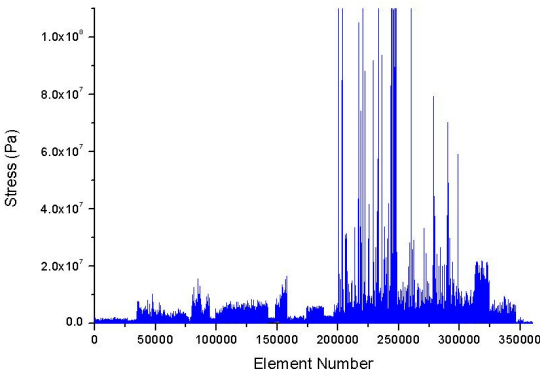
(c) Radial shock input

Fig. 9 Distribution of von-Mises stress according to the time

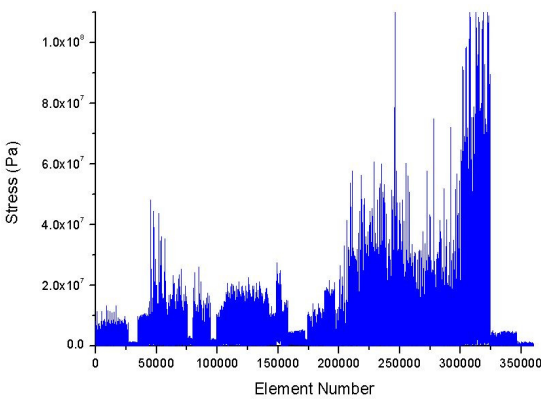
하였다. 재료의 허용응력인 230 MPa을 넘지 않으므로 장비의 파손이나 파단 등이 발생하지 않을 것으로 판단된다. 각 방향별 충격입력에 따른 최대 발생응력을 표로 정리하여보면 Table 2와 같다. 재료의 항복응력값을 발생한 최대 응력값으로 나눈 값을 안전계수(safe factor)라고 정의하면 각 방향별 안전계수는



(a) Longitudinal shock input



(b) Tangential shock input



(c) Radial shock input

Fig. 10 Distribution of von-Mises stress

Table 2 Max. stress per each direction

	Longitudinal	Tangential	Radial
Max. stress (MPa)	63.2	98.3	108.7
Safe factor (Yield/Max)	3.64	2.34	2.12

3.64, 2.34 및 2.12로 비교적 안전한 구조 건전성을 가짐을 판단할 수 있다.

4. 결 론

이 연구에서는 수중폭발 시 발생하는 충격파에 대한 전동기의 구조건전성 검증을 위한 방법으로 독일해군의 BV043을 이용한 내충격해석 방법과 절차를 확립하였다. 그리고 설계 단계에 있는 추진전동기 모델에 적용하여 내충격 해석을 수행하였다.

전동기가 장착되는 마운트 바닥부분에 가속도 충격파를 인가하고 전동기에 발생하는 폰-미제스 응력(von-Mises stress)을 구하여 내충격성을 해석하였다. 길이방향의 충격을 인가하고 내충격해석을 수행한 결과 최대 63.2 MPa의 폰-미제스 응력이 마운트 상단의 어댑터(adaptor)부분에서 발생하였다. 동일한 방법으로 반경방향의 충격을 전동기의 수평방향 및 반경방향으로 인가하고 내충격해석을 수행한 결과 최대 98.3 MPa 및 108.7 MPa의 폰-미제스 응력이 마운트 상단의 어댑터(adaptor)부분에 발생하였다. 내충격해석 결과 최대응력이 재료의 항복응력을 초과하지 않으므로 추진전동기에 치명적인 파손이나 파단이 발생하지 않을 것으로 예상되며 따라서 추진전동기는 내충격설계 기준을 만족하는 것으로 판단되었다.

후 기

이 연구는 효성중공업 위탁과제사업으로 수행된 연구결과이며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

(1) Hans, U. M., Ronald, M. R. and Kurt, H., 1997, “Simulated Ship Shock Tests/Trials,” American Society of Newspaper Editors.

(2) BV043, 1985, “Shock Resistance Experimental and Mathematical Proof,” Federal German Army Procurement Office.

(3) Belsheim, R. O. and O'Hara, G. J., 1960, “Shock Design of Shipboard Equipment, Part 1, Dynamic-design Analysis Method,” Naval Research

Laboratory Report 5545.

(4) MSC.Nastran, “Quick Reference Guide”.

(5) Shin, C. J., Hong, C. S., 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.

(6) MIL-S-901D, 1989, “Shock Tests. H.I.(High Inpact) Shipboard Machinery, Equipment, and systens, Requirements for”.

(7) Kwon, J. I., Lee, S. G. and Jeong, J. H., “Shock Response Analysis of MIL-S-901D Floating Shock Platform,” Journal of Society of Naval Architects of Korea, Vol. 42, No. 5, pp. 493~498.