

## NASTRAN DMAP을 활용한 내충격 평가 기법 (DDAM) 개발에 관한 연구

신민용\*, 이재환\*\*, 정정훈\*\*\*, 김병현\*\*\*

### Development of Performance Evaluation Method of Shock-Resistance(DDAM) using NASTRAN DMAP

by

M. Y. Shin\*, J. H. Lee\*\*, J. H. Jung\*\*\* and B. H. Kim\*\*\*

#### 요 약

기존의 DDAM에서 충격응답해석을 위해 널리 채용되는 수학적 모델은 단순화된 다자유도의 질량·스프링계 모델이었다. 그러나 근래에는 탑재장비가 점점 복잡하고 다양해지기 때문에 이를 전체 유한요소 모델로 모델링해서 충격해석을 실시하고 있다. 본 논문에서는 범용 구조유한요소 해석프로그램인 MSC/NASTRAN에서 제공하는 DMAP 기능을 활용하여 선박, 함정용 탑재장비의 내충격 안전성평가에 활용할 수 있는 DDAM 프로그램을 개발하였다. 고유진동해석후 DMAP으로 추출한 데이터를 입력치로 하여 본 연구에서 개발된 DDAM 에 의해 도출된 장비의 유효질량, 중량, 충격응답등은 ANSYS에서 제공하는 DDAM 결과와 비교되었다. 대체적으로 두 결과는 잘 일치하여 프로그램의 유용성 및 정확성이 확인되었다.

#### Abstract

The DDAM (Dynamic Design Analysis Method) has been the most popular method for the shock response analysis of naval shipboard equipment. It was common to model the equipment as a simplified mass-spring system with multi degree of freedom in DDAM. Nowadays, however, it is necessary to adopt the finite element method for the shock response analysis due to the complexity of equipment. In this study, the DDAM program is developed to evaluate the performance of shock-resistance of FEM models using MSC/NASTRAN DMAP (Direct Matrix Abstraction Program) which provides the practical tools in interfacing with the externally developed program. Through the numerical test of the structural components and comparison with the results of ANSYS DDAM, it is confirmed that the

접수일자 : 1998년 9월 16일, 재접수일자 : 1999년 3월 4일

\* 정회원, 수산(중) 특장연구소

\*\* 정회원, 충남대학교 선박해양공학과

\*\*\* 정회원, 한국기계연구원 구조시스템연구부

developed program can be applicable to analyze the shock responses of the shipboard equipments.

### 1. 서론

비접촉 수중폭발 공격에 의한 함정의 전투 불능 사례의 원인들을 분석해 보면, 선체자체의 충격손상보다는 주요 탑재장비들의 충격손상에 기인하는 경우가 많다. 따라서, 고도의 전투 유지 능력을 필요로 하는 함정의 건조를 위해서는 장비설계시 내충격 설계 개념의 도입 및 해석을 통한 대상장비의 내충격 안전성 평가 과정이 요구된다. 장비의 충격응답해석 방법으로 현재 가장 널리 사용되고 있는 방법은 미국 NRL(Naval Research Laboratory)에서 제안한 DDAM (Dynamic Design Analysis Method)으로 스펙트럴 해석(Spectral Analysis) 방법의 하나이다[1].

기존의 DDAM에 의한 장비의 충격응답해석을 위해 널리 채용되는 수학적 모델은 단순화된 다자유도의 질량·스프링계 모델이었다. 그러나 현재는 탑재장비가 점점 복잡하고 다양해지기 때문에 유한요소 모델로 모델링해서 충격해석을 실시하고 있다. 예로 범용 구조유한요소해석프로그램인 ANSYS[2]는 DDAM을 하나의 해석기능으로 제공하고 있으나 특정 단위계만을 사용하고, MSC/NASTRAN 은 DDAM 모듈을 최근에 제공해서 이수목등은 [3] version 68을 이용하여 함정에 장착될 주기관 받침대에 대한 DDAM 해석을 수행하였다.

본 논문에서는 MSC/NASTRAN ver. 67 과 같이 DDAM 모듈이 제공되지 않는 경우, DMAP[4, 5]을 이용하여 탑재장비의 내충격 안전성평가에 활용할 수 있는 DDAM 프로그램을 개발하고, 선체구조의 주요소인 보, 판, 보강판을 수치계산 모델로 택하여 개발프로그램의 유용성을 검증하였으며 ANSYS DDAM 과도 비교되었다.

### 2. DDAM에 의한 함정용 탑재장비의 내충격 안전성 평가

함정의 탑재장비에 대해서는 가능한 한 충격시험을 통하여 내충격 성능을 검증하는 것이 각국 해군의 기본입장이다. 하지만 중량 및 크기제한으로 충격시험이 불가능한 장비에 대해서는 그 대안으로 충격해석을 통하여 내충격 성능을 검증하도록 각국 해군에서는 요구하고 있다. 국내에서 DDAM 에 대한 이론적 배경에 대한 검토는 정정훈등의 논문[6]에 발표되어 있다. DDAM에서는 실선 충격시험 계측을 통하여 얻어진 응답스펙트럼을 기초로 장비의 설계 기준 충격응답스펙트럼을 규정하고 있는데 미해군은 이를 DDS(Design Data Sheet) 072-1로 명명하고 비밀로 취급하고 있기 때문에 통상의 DDAM해석에서는 일반인에게 공개된 NRL Memorandum Report[7]에서 제공하는 충격응답스펙트럼을 사용한다. DDAM의 절차는 NAVSEA[8, 9]에서 자세히 규정하고 있으며, 이를 토대로한 특징은 다음과 같다.

- DDAM에서는 최대응답에 관심이 있기 때문에 장비에 작용하는 충격 하중의 지속시간이 매우 짧고 수 회 이하의 진동을 하는 점을 감안하여 장비구조의 감쇠를 고려하지 않을 수도 있다.

- DDAM에서는 충격력을 구할 때 장비, 구조 또는 받침대의 설치 위치, 충격력의 방향 (수직, 수평, 전후) 및 품목의 설계 조건 (탄성 또는 탄소성)에 따라 충격설계치 (Shock Design Value)를 사용하는데 이 값은 가속도 응답스펙트럼으로부터 구한다.

- 모드중첩법에 기초하여 대상계의 전체응답 (각 모드에 의한 응답의 합산) 을 계산하기 위해서는 통상 각 모드의 기여분을 아래 식 (1)의 SRSS[10] (Square Root Sum of Squares) 방법에 따라 계산하는데 비해, DDAM에서는 식 (2)의 NRL Sum[1] 즉, 가장 큰 응답을 주는 모드의 응답절대치에 기타 모드의 기여분을 합산하는 방법으로, 각 모드의 기여분중 가장 큰 값에 대해 특별히 그 가중도를 높이고 있다. 그 이유는 NRL 계산결과가 SRSS에 의한 결과보다 항상 큰 값을

증으로 보다 높은 안전율을 갖기 때문이다.

$$s_j = \sqrt{\sum_{i=1}^N (s_{ji})^2} \tag{1}$$

$$s_j = |s_{ja}| + \sqrt{\sum_{i=1}^N (s_{ji})^2 - s_{ja}^2} \tag{2}$$

식 (1)에서  $s_j$ 는  $j$ 점에서 전체응답이고  $s_{ji}$  는  $j$ 점에서  $i$ 번째 모드의 응답이며,  $N$  는 총모드수이다. 식 (2)에서  $s_{ja}$ 는 절점  $j$ 의 모드 응답중 최대값이다.

### 3. MSC/NASTRAN DMAP을 이용한 DDAM 프로그램 개발

DMAP기능은 문법적인 규칙들을 가지고 있는 고급언어로서 NASTRAN과 외부에서 개발된 프로그램을 연계하기 위한 수단을 제공한다. DMAP은 모듈이라고 불리는 함수블록들로 구성되어 있으며, 이 모듈들은 각기 자기이름과 특별한 기능들을 가지고 있다. Fortran 언어와 유사한 점이 많아 데이터들간의 상호 인터페이스를 용이하게 할 수 있다. DDAM해석은 모드해석을 이용한 선형 탄성계에 대한 응답해석방법이다. 따라서 DDAM에 의한 충격응답해석을 위해서는 고유진동해석을 선행하여야 한다.

고유진동해석 과정에서 DMAP을 사용해 추출한 대상탑재장비의 질량, 고유모드, 고유치 등의 데이터를 사용하여 각 모드에 대한 식 (3)의 참여계수 (Participation Factor), 식 (4)의 유효질량 (Effective Mass) 및 식 (5)의 유효중량 (Effective Weight)을 계산하고 이로부터 대상장비의 충격거동에 기여도가 큰 모드를 결정한다.

$$P_a = \frac{\sum_i^N M_i X_{ia}}{\sum_i^N M_i X_{ia}^2} \tag{3}$$

$$M_a = P_a \sum_i^N M_i X_{ia} \tag{4}$$

$$W_a = g \times M_a \tag{5}$$

식 (3)에서  $M_i$ 는 정규화 되기전  $i$ 번째 자유도

의 집중질량이고,  $X_{ia}$ 는  $a$ 번째 모드의  $i$ 번째 성분이며  $P_a$ 는  $a$ 번째 모드에 대한 참여계수이다. 식 (4)에서  $M_a$ 는  $a$ 번째 모드에 대한 유효질량이며 식 (5)의  $W_a$ 는 모드에서의 유효중량이다. 그리고 이들 모드 각각에 대해 경험식을 이용하여 식 (6)의 충격설계치를 계산하고, 마지막으로 유효정적하중을 산출한다.

$$D_a = \min(V_a \times \omega_a, A_a \times g)$$

또는  $6g$  중 큰 값 (6)

$D_a$ 는  $a$ 번째 모드에 대한 충격설계치[10]로서 가속도로 주어지며 고유진동수  $\omega_a$ 와 중력가속도  $g$ , 그리고 충격설계치 계산에 사용되는  $A_a$ ,  $V_a$  (경험식에서 제공됨)가 사용되어 얻어진 값과  $6g$ 를 비교하여 큰 값으로 결정한다[10-11]. 또한 이 값은 3가지 충격방향 (수직, 수평, 전후방향)에 대해 서로 독립적으로 작용하며 선종별, 시스템의 마운트 위치별, 탄성 및 탄소성 설계별로 주어진다.

한 예로 대상장비가 수상함의 갑판에 설치돼 있고, 수직방향으로 하중이 작용하며, 탄성장비로 가정할 때, 식 (6)의  $A_a$ 와  $V_a$ 의 값은 식 (7), (8)과 같으며 식 안의  $u$ 는 유효중량  $W_a$ 와 같은 단위를 갖음을 의미한다. 식 (9)에서  $F_{ia}$ 는  $a$ 번째 모드에 대한 각 질량 점에서의 유효정적하중 (Effective Static Force or Modal Force)이다.

$$A_a = 10 \times \frac{(37.5u + W_a) \times (12u + W_a)}{(6u + W_a)^2} \tag{7}$$

$$V_a = 30 \times \frac{(12u + W_a)}{(6u + W_a)} \tag{8}$$

$$F_{ia} = M_i \times X_{ia} \times P_a \times D_a \tag{9}$$

유효정적하중은 충격해석 모델이 받는 하중이기 때문에 그 값을 하중치로 하고 고유진동해석용 FEM 모델에 MSC/NASTRAN의 Restart기능을 사용하여 정적재해석을 수행한다. 이어서 나온 응

력, 변위값들을 식 (2)의 NRL Sum 에서 최종적인 충격응력 및 변위를 구하며, 과정은 Fig. 1 과 같다.

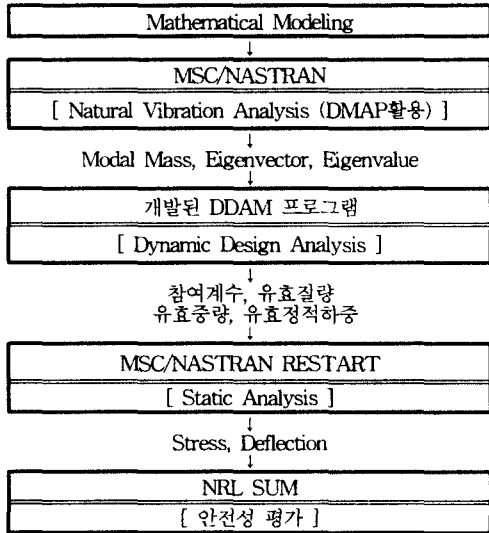


Fig. 1 Procedure of developed DDAM

4. 수치계산 에 및 고찰

본 연구에서 개발된 프로그램으로 선체 주 구조 부재인 보와 보강판을 해석한 결과와 검증용 위하여 ANSYS의 DDAM 결과를 비교한 내용은 다음과 같다.

4.1 보 모델

DDAM 해석에서는 대상 장비의 충격등급, 설치 위치 및 충격해석기준을 정확히 정의해야 이로부터 해석에 필요한 충격설계치값이 결정된다. 함정의 지속적인 전투능력을 위해, 충격하중을 받은 후에도 영구변형 없이 그 기능을 필수적으로 유지해야 하는 충격등급은 A이고, 갑판지지에 설치된 장비를 Fig. 2의 보 모델로 가정하였다. 보 모델은 절점이 19개, 요소가 18개, 길이는 1.83 m, 단면적은  $1.89 \times 10^{-3} m^2$ , 관성모멘트는  $2.97 \times 10^{-3} m^4$ , 탄성계수는  $2.067 \times 10^{11} N/m^2$ , 밀도는  $7850 kg/m^3$ , Poisson's Ratio는 0.3 이다.

MSC/NASTRAN 고유진동해석 후 DMAP으로 추출한 데이터들을 입력치로 하여 개발한 DDAM 프로그램에서 계산한 참여계수, 유효질량등의 값들과 ANSYS 의 DDAM 에서 계산된 값들을 Table 1에 비교하였다. 두 프로그램에서 계산된 각 모드별, 참여계수(절대값), 유효질량의 값들이 거의 일치함을 알 수 있다. 식(9)에 의해 계산된 유한요소 절점에서의 일차 진동모드의 유효정적하중은 Fig. 3과 같다.

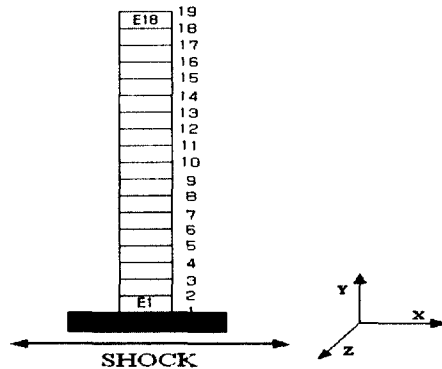


Fig. 2 Cantilever beam model

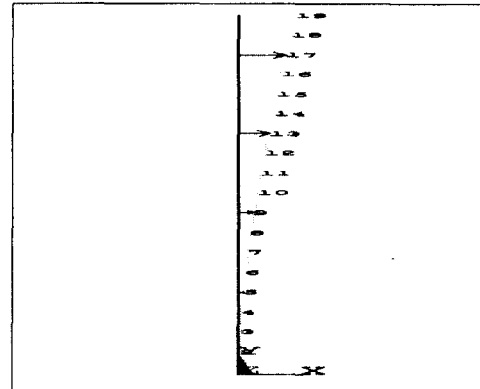


Fig. 3 Modal force of the cantilever beam

이 유효정적하중을 입력치로 하여 정적해석 수행후, 변위와 응력을 NRL Sum한 결과는 Table 2에 있는데 Node 는 보 유한요소의 절점을 의미한다. 이 값들은 [3, 8]의 제안에 따라 전체 모드 중 유효중량값이 전체중량의 80% 이상을 차지하

는 1차, 2차 모드를 선별한 후 식 (2)에 의해 구한 충격응답인 응력과 변위값들이다. 이렇게 선별된 모드들만을 사용한 값과, 1차에서 7차까지 모드들을 사용해 구한 값들은 거의 같다[12].

Table 1 The results of DDAM using DMAP and ANSYS of the cantilever beam

Mode	Frequency (Hz)			Participation Factor		Effective Mass (kg)	
	NASTRAN	ANSYS	EXACT SOLUTION	DDAM (DMAP)	DDAM (ANSYS)	DDAM (DMAP)	DDAM (ANSYS)
1	10.7	10.7	10.8	.30	.30	16.46	16.46
2	67.2	67.5	67.9	.17	.17	5.08	5.08
3	187.8	189.0	190.3	.10	.10	1.73	1.73
4	366.8	369.8	372.9	.07	.07	0.88	0.88
5	604.4	610.2	616.5	.05	.05	0.53	0.53
6	899.8	909.6	921.0	.05	.04	0.33	0.33
7	1252.2	1267.5	1286.4	.04	.04	0.23	0.23

Table 2 Shock responses of the cantilever beam

Node	NRL Sum Deflection (m)	NRL Sum Stress (N·m <sup>-2</sup> )
1	.000	1.32E+08
5	.002	6.71E+08
9	.006	6.32E+07
13	.011	3.76E+07
17	.017	6.26E+06

4.2 보강판 모델

보강판 모델은 역시 충격등급 A, 갑판지지에 설치되고, 충격하중을 받은 후에도 영구변형을 허용할 수 없는 장비로 가정하였다. Fig. 4와 같이 보강판의 평판부분은 절점 121개, 요소 100개, 길이 600 × 600 mm, 두께 3.2 mm, 물성치는 보 모델과 같으며, 직사각형이고, 단면치수의 깊이와 두께가 30 mm × 3.2 mm인 보강재 (요소 90개)가 y 방향으로만 등간격으로 배치된 4변 단순 지지된 모델이다.

고유진동해석 후 DMAP으로 추출한 데이터들을

Table 3 The results of DDAM using DMAP and ANSYS of the stiffened plate

Mode	Frequency (Hz)			Participation Factor		Effective Mass (Kg)	
	NASTRAN	ANSYS	Measured [13]	DDAM (DMAP)	DDAM (ANSYS)	DDAM (DMAP)	DDAM (ANSYS)
1	196.2	191.8	190	2.93	3.00	8.62	9.00
2	215.6	236.6	210	.2E-7	.4E-11	.8E-15	.1E-22
3	274.1	319.6	272	.91	.75	.83	.56

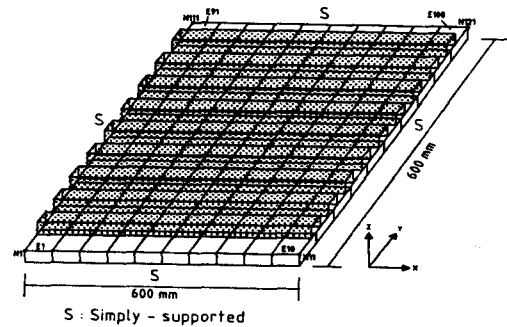


Fig. 4 Stiffened plate

입력치로 하여 본 연구에서 개발된 DDAM에서 계산한 참여계수, 유효질량값들이 Table 3 에 있는데, NASTRAN의 고유진동수는 김극천등[13]에 발표된 실험치와 비슷하다. Fig. 5 에는 본 연구결과와 ANSYS DDAM 에 의해 계산된 유효 질량 비교곡선이 있는데 양쪽이 비슷함을 알 수 있다.

고유진동 해석 후 얻어진 6개의 모드들 중 전체 유효중량의 80% 이상을 차지하는 1차 모드만으로 계산된 유효정적하중이 각 절점마다 분포된 형태와 이 하중으로 NASTRAN 에 의해 계산된 응력 분포를 Fig. 6 과 Fig. 7에 각각 나타내었다.

선택된 1차모드가 전체 유효중량의 80%를 초과했다고 해도 선택되지 않은 나머지 모드의 기여도가 있기 때문에 추가로 6차 모드까지 고려해서 유효정적하중을 계산하고, 변위와 응력값을 구하였다. 1차 모드와 1-6차 모드까지 사용한 해석결과를 비교한 곡선이 Figs. 8 ~ 9에 있는데 (Node는 유한요소절점 번호), 비교곡선을 통해 알 수 있듯

이 1차 모드만의 경우와 1차에서 6차까지 모두 선택한 경우, 변위와 응력에 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

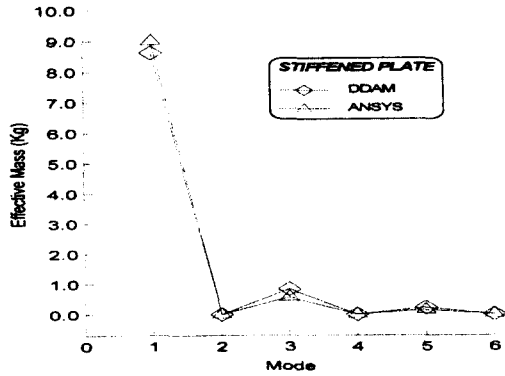


Fig. 5 Comparison of computed effective masses

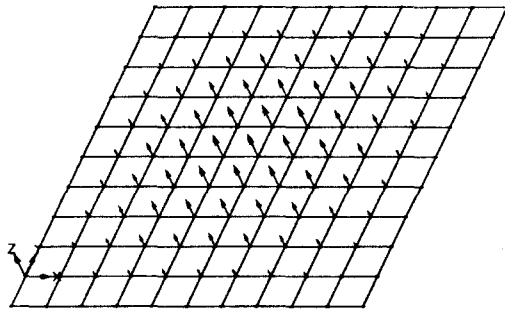


Fig. 6 Modal force of the stiffened plate

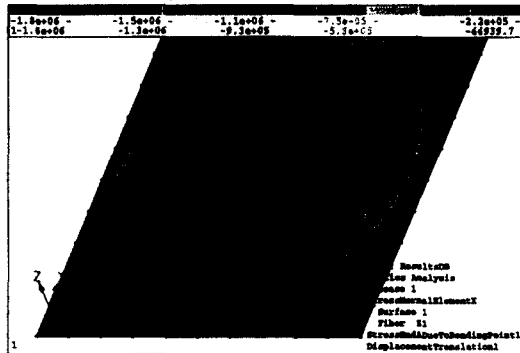


Fig. 7 Distribution of stress of the stiffened plate

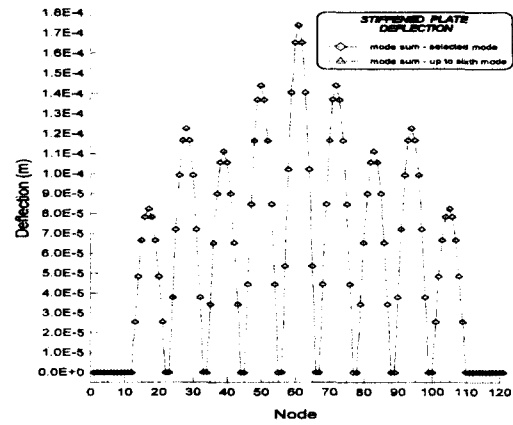


Fig. 8 Deflections using the selected mode versus using six modes

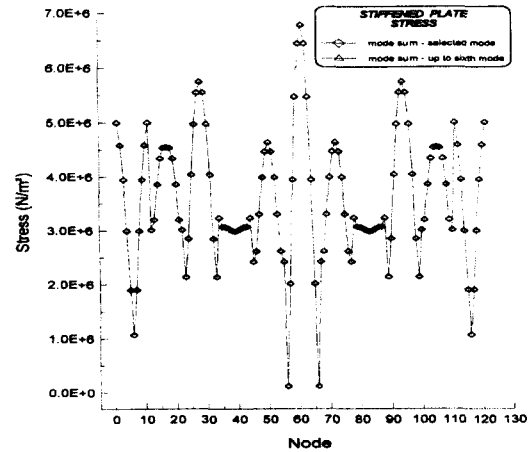


Fig. 9 Stresses of using the selected mode versus using six modes

### 5. 결론

본 연구는 DDAM이 제공되지 않는 MSC/NASTRAN ver. 67에서 DMAP을 이용하여 DDAM을 개발하고 보, 보강판의 유효질량, 중량, 충격응답등을 산출하였다. 계산된 값들은 ANSYS에서 제공하는 DDAM에 의해 계산된 결과와 비교되었다. 대체적으로 두 결과는 잘 일치하여 프로그램의 유용성 및 정확성이 확인되었다. 보강판의 경우 1차모드 만으로 계산된 충격응답과 6개 모드를 사용한 경우, 양쪽의 변위와 응력에 큰 차

이가 없음을 알 수 있다.

기존의 DDAM에서는 해석 모델을 간단한 다자유도의 질량·스프링계로 치환해 충격응답해석을 수행하였기 때문에 그 정확성에 한계가 있었지만, 본 개발 프로그램에서는 유한요소모델로 충격응답해석을 수행함으로써 해석의 정확도를 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다. 특히 DMAP을 사용함으로써 NASTRAN의 범용성을 이용한 것에 의의가 있다 하겠다.

#### 후 기

본 연구를 지원한 기계연구원에 감사를 포함한다.

#### 참 고 문 헌

- [1] NAVSHIPS 250-423-30, Shock Design of Shipboard Equipment, Dynamic Design Analysis Method, 1961.
- [2] Swanson Analysis System Inc, ANSYS User's Manual of Rev. 5.0, Vol.(I-IV), 1992.
- [3] 이수목, 김희원, 정균양, "동적 설계 해석법(DDAM)을 이용한 선박 주기관 지지구조의 충격해석, 대한조선학회 춘계학술대회 논문집, pp. 351-354, 1998, 4.
- [4] The Macneal-Schwendler Corporation, MSC/NASTRAN Version 66A User's Manual, Vol. II, 1989.
- [5] The Macneal-Schwendler Corporation, MSC/NASTRAN Version 64 Programmer's Manual, Vol. I-V, 1986.
- [6] 정정훈, 김병현, "DDAM에 의한 함정용 탑재장비 내충격해석의 이론적 배경에 대한 검토", 대한조선학회 춘계학술대회 논문집, pp. 401-405, 1998, 4.
- [7] G. J. O'Hara and R. O. Belsheim, Interim Design Values for Shock Design of Shipboard Equipment, NRL Memorandum Report 1396, 1963
- [8] NAVSEA 0908-LP-003-3010, Shock Design Criteria for Surface Ships, 1976.
- [9] NAVSEA 0908-LP-003-3010A, Shock Design Criteria for Surface Ships(Draft), 1994.
- [10] R. Regoord, Shipboard Shock Response of the Modal Structure DSM : Experimental Results vs. Responses Predicted by Eight Participants, Shock and Vibration Bulletin No. 54, 1984
- [11] DDAM에 의한 함정용 조타기 플린저조립체의 내충격해석, 한국기계연구원 보고서, 1995, 6.
- [12] 신민용, NASTRAN DMAP을 활용한 함정용 탑재장비의 내충격 안전성 평가기법에 관한 연구, 충남대학교 석사논문, 1997, 2.
- [13] 김극천, 한성용, 정정훈, "유공 직사각형 보강판의 진동해석", 대한조선학회지, 제24권 제3호, pp. 35~42, 1987.