

# 함정 장비시스템의 내충격해석을 위한 동적설계해석법(DDAM) 응용

°이종문\* · 이수목\*

## DDAM Shock Analysis for Equipment Systems of Ships

J. M. LEE, S. M. LEE

### ABSTRACT

The dynamic design analysis method (DDAM) to analyze and evaluate shock response of the equipment system mounted in ships are discussed. Theoretical background of the DDAM based on the general shock response analysis was introduced. Spectrum dip effect between the equipment system and supporting structure was specially focused being peculiar to general shock response analysis. Actual shock design values used in the DDAM were reviewed in their category, general trend and establishing process. Aspects of DDAM analysis using MSC/NASTRAN were shortened. As a conclusion DDAM is regarded as a reasonable way of analysis for the onboard equipment system due to the underwater shock.

### 1. 서 론

함정이 비접촉 수중폭발에 노출되더라도 성능을 보전하고 임무를 수행하기 위해서는 함 내부로 전파되는 충격에 대해 탑재된 장비와 구조물의 안전성이 보장되어야 한다. 이를 확인하기 위해 함 건조 후 실선 실험을 수행하기도 하지만 과도한 비용 및 고가 장비의 파손 가능성 등의 문제를 내포하고 있으므로 설계 단계에서 해석적으로 검증할 수 있는 기법이 필요하다.

대부분의 동적 설계에서와 마찬가지로 충격해석에도 초기에는 등가 정적해석 방법을 사용하였는데 장비의 질량에 충격가속도(g) 단위의 설계충격지수(shock design number)를 곱한 하중으로 정적해석을 수행하는 방법이다. 이 방법은 개념이 간단하여 널리 사용되었지만 대상 장비시스템의 동특성을 전혀 고려하지 않는 한계점이 있어 지금까지의 사용하지 않는다.

함정에 탑재되는 장비 및 받침대에 대해 내충격 설계검증을 위한 표준해석 방법으로서 동적설계해석법(Dynamic Design Analysis Method, DDAM)을 제정하였는데 이는 기본적으로 구조물의 고유진동수와 모드형상에 기초하여 하중을 분포시킴으로써 구조물의 동특성을 최대한 반영하였고 설계기준 가속도를 지정하여 충격하중을 산정함으로써 충격응답 스펙트럼의 계산에 소요되는 복잡한 절차를 줄였다.

물론 최근의 발달된 전산기와 풍부한 해석 패키지를 이용하면 시간영역 해석을 통하여 좀더 실감나는 충격해석을 수행할 수 있겠으나 정교한 해석모델이 필요하고 많은 계산량이 요구되며 그럼에도 불구하고 충격하중의 산정 등 그 결과의 불확실성과 신뢰도에는 여전히 문제가 있을 수 있다. 무엇보다도 이 방법은 장비의 내충격 안전성을 설계적으로 검토하는 데 있어 지나친 시간을 필요로 하기 때문에 비현실적이다.

이런 점에서 DDAM은 설계자가 직접 비교적 손쉽게 수행할 수 있고 그 결과는 합리적이고 실용

\* 현대중공업(주) 선박해양연구소

적인 것을 추구한 데에 그 기술적 의미와 장점이 있다.

그간 DDAM은 국내적으로 군사적 성격 때문에 공개되어 충분히 논의되고 발전되지 못한 감이 있고 이러한 여건으로 인해 개념상의 주의점과 사용상의 오류 등이 적시에 지적되고 수정되지 못한 것이 현실이었으나 최근 들어 국내에서도 합정관련 분야에서 연구가 진행되어져 왔다<sup>(1-3)</sup>.

이러한 관점에서 본 논문에서는 DDAM의 이론적 배경, 계산 과정, 충격하중의 산정과 해석 사례 등을 통해 핵심적 개념과 실제적 방법에 대해 소개하고자 한다.

## 2. DDAM의 이론적 배경

DDAM을 이용한 충격해석은 원래 토목구조의 내진해석에 기초한다. 충격이 전달되는 지지부(foundation)를 제외하고는 구속조건이 없는 모델을 가정하며 지지부가 구속된 진동모드들로부터 구조물의 응답을 계산한다. 참여계수, 유효모드 질량, 응답 스펙트럼 등의 개념도 내진해석의 기법을 그대로 옮겨온 것이다. 다만 내진해석에는 지반 위에 놓이는 구조물이 지반의 운동에 아무런 영향을 미치지 않는다는 가정을 포함하고 있는 반면, 합정 충격해석에서는 선체와 장비시스템 간에 무시할 수 없는 상호작용이 존재한다는 점이 중요한 차이이다. 따라서 DDAM에서는 이런 효과를 고려하여 응답 스펙트럼을 이해하여야 하고 설계 충격치를 결정하는 데에 반영하여야 한다. 본 절에서는 내진해석의 일반적 개념과 용어 등을 간략히 설명하고 spectrum dip effect 등 DDAM 해석과정이 일반 내진해석과 다른 부분들에 대해 소개하고자 한다.

### 2.1 지반 운동에 의한 구조물의 응답

내진해석에 있어서 지반의 운동에 의한 구조물의 거동은 스펙트럼 해석에 기초하고 있다<sup>(4)</sup>. 응답 스펙트럼의 개념은 1932년 Biot에 의해 처음으로 도입되었는데<sup>(5)</sup>, 이를 이용하면 단순 1자유도계의 경우 그 고유진동수만 알면 지진이나 충격에 의한 최대응답을 바로 읽을 수 있으며, 대부분의 실제 구조물과 같이 다자유도계에 대해서도 모드해석에 의해 여러 개의 독립된 등가 1자유도계로 치환하고 각각 모드에 대한 응답을 응답 스펙트럼으로부터 구하여 이로부터 절점응답을 계산할 수 있다.

DDAM 해석에서는 직접적으로 응답 스펙트럼을 이용하는 대신에 여러 개의 실선 응답 스펙트럼으로부터 결정된 설계충격곡선(shock design curve)에서 설계치를 읽어 온다.

### 2.2 모드별 응답의 합산

각 모드별 최대응답으로부터 전체응답을 계산하는 다양한 방법 중에서 가장 널리 채택되는 방법은 SRSS(Square Root of the Sum of the Square)이지만 DDAM의 경우 NRL 합산법(Navy Research Lab summation)을 사용한다. 이는 각 모드 기여분 중 가장 기여도가 큰 값에 대해 특별히 그 가중도를 높이는 방법으로서 다음과 같이 정의된다.

$$(X_i)_{NRL} = |X_i|_{\max} + \sqrt{(X_i)_{SRSS}^2 - (X_i)_{\max}^2}$$

여기서  $|X_i|_{\max}$ 는 각 모드 기여분 중 기여도가 가장 큰 값이다

### 2.3 모드유효질량 (modal effective mass)

동적 평형상태에서 지지부와 구조물 사이에 작용하는 힘은 각 절점에 작용하는 가상적인 힘의 총합과 같고, 이는 모드유효질량과 설계가속도의 곱으로 표현된다.

모드유효질량은 DDAM의 설계충격스펙트럼을 산정하는데 있어 중요한 인자의 하나로 각 모드의 유효질량의 합이 구조물 전체질량의 80%를 넘게 해석주파수 범위를 선정하여야 유용한 결과를 얻을 수 있다<sup>(6)</sup>.

설계충격스펙트럼을 산정하는데 있어서 모드유효질량이 어떻게 기여하느냐는 Cunniff등<sup>(7)</sup>이 체계적으로 연구하였으며 유효절점하중, 즉 지지부의 최대반력과 설계충격스펙트럼은 장비의 모드유효증량에 좌우되며 모드유효증량이 증가할수록 설계충격스펙트럼은 감소함을 확인하였다. 이는 동일한 충격하중에 대해 경구조보다 중구조를 움직이기 어렵다는 직관에도 부합된다.

### 2.4 Spectrum dip effect

Biot이 구조물 내진설계에 스펙트럼 해석방법을 이용할 때는 동일한 위치에서 발생한 여러개의 지진시간 이력으로부터 계산된 각각의 응답스펙트럼을 모두 포락하는(envelope) 포락응답스펙트럼을 사용할 것을 제안하였으며, 이러한 포락응답스펙트

럼이 오늘날까지 토목, 건축 구조물의 내진설계에 사용되고 있다. 그러나 포락응답스펙트럼을 이용한 스펙트럼 해석방법을 함정의 주요장비 및 받침대에 적용할 경우 너무 과도한 설계가 이루어짐이 확인되었고, 심지어는 실선 충격시험에서 어떠한 손상도 발생하지 않은 장비시스템의 지지부에서 계측된 충격응답으로부터 계산된 포락응답스펙트럼에 견딜 수 있는 장비시스템을 설계조차 할 수 없는 경우도 발생하였다. 미해군에서는 실선실험을 통해서 이러한 현상의 원인이 장비시스템과 선체의 상호작용 때문임을 확인하고, 이를 규명하기 위해 실험 및 이론적 연구를 심도있게 진행하였다.

그 결과 스펙트럼해석방법에 의한 장비시스템의 내충격 설계에 있어서 충격응답스펙트럼으로부터 읽어야 할 설계기준 충격값은 장비시스템과 선체를 포함한 전체시스템의 고유진동수에서의 값이 아니라 장비시스템이 지지부에 완전고정 (fixed-base) 되어 있다고 가정하여 계산된 고유진동수에서의 값이며, 통상 이 값은 Fig.1과 같이 충격응답스펙트럼의 valley에 놓이게 됨을 확인하였다<sup>(8)</sup>. 이 현상을 spectrum dip effect라고 칭하고 이를 DDAM에 직접 반영하여 설계충격곡선(shock design curve)을 결정하였다.

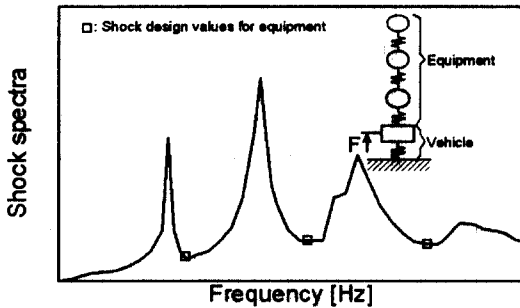


Fig.1 Spectrum dip effect

### 3. 충격하중의 결정

설계 및 해석을 위한 DDAM의 충격하중의 산정은 구미 각국마다의 기준과 절차가 있으나 대부분 미해군의 기준을 모방하거나 참조하여 산정 방식이 같거나 유사한 형태를 띄고 있는 것으로 파악된다. 본 절에서는 NRL 1396<sup>(9)</sup>을 기준으로 충격하중의 산정 방법과 절차에 대해 설명한다.

### 3.1 조건에 따른 분류

DDAM해석에 사용하는 충격하중은 선박의 종류, 장비지지 위치, 충격의 방향, 설계 기준에 따라 다르게 적용한다.

#### 1) 선박의 종류에 따른 분류

피충격체가 수상함(surface ship)인가 수중함(submarine)인가에 따라 다른 충격하중을 적용한다. 충격에 대한 인접성, 충격 손상후의 심각도 등을 고려하여 수중함에 대해 수상함보다 약 2배 가량 높은 값을 적용한다.

#### 2) 장비의 지지위치에 따른 분류

장비 시스템이 지지된 위치에 따라 아래와 같이 세가지 형태로 분류한다. 충격의 전달성을 고려하여 데크지지보다 선체지지에 높은 충격하중을 부여하고 외판지지에 가장 높은 충격하중을 부여한다.

- a) 데크지지 (deck mounted)
- b) 선체지지 (hull mounted)
- c) 외판지지 (shell mounted)

#### 3) 충격 방향에 따른 분류

충격의 방향을 선박의 좌표축으로 보아 수직, 좌우, 전후로 분류하고 서로 다른 값을 적용한다. 수상함에 대해서는 수직, 좌우, 전후방향에 대해 대개 5 : 2 : 1의 비의 크기로 적용하나 수중함의 경우는 좌우방향이 수직방향보다 오히려 크거나 적어도 같은 크기의 충격하중을 적용함에 유의할 필요가 있다. 하나의 장비시스템에 대해 3방향의 충격 하중과 이에 의한 응답을 모두 고려해야 한다.

#### 4) 설계 기준에 따른 분류

충격이 지나간 후 영구변형의 허용 여부 즉, 탄성 설계와 탄소성 설계에 따라 충격하중을 다르게 산정한다.

- a) 탄성 충격설계 : 충격에 노출된 후 본래의 물리적 치수를 유지해야 하는 경우에 적용하며 터어빈, 감속기어, 프로펠러 축 등의 회전체를 받쳐주는 모든 받침대와 특별히 정렬이 중요한 장비의 받침대 등에 해당한다.
- b) 탄소성 충격설계 : 탄성 설계가 요구되지 않는 모든 장비와 받침대의 충격해석에 적용한다. 단, 외판 지지의 경우에는 탄소성 설계를

허용하지 않는다.

구체적인 예로서 Table 1에 수상함의 선체지지 조건의 경우의 설계충격치를 제시하였다.

Table 1 Shock design values (surface ship, hull mounted)

Shock direction	Elastic		Elastic-plastic	
	$A_a$	$V_a$	$A_a$	$V_a$
Vert.	$1.0 A_0$	$1.0 V_0$	$1.0 A_0$	$0.5 V_0$
Trans.	$0.4 A_0$	$0.4 V_0$	$0.4 A_0$	$0.2 V_0$
Longi.	$0.2 A_0$	$0.4 V_0$	$0.2 A_0$	$0.1 V_0$

$$A_0 = 20 \frac{(17+M)(5.44+M)}{(2.72+M)^2} \text{ [g]} \quad (M \text{ in ton})$$

$$V_0 = 152.4 \frac{(5.44+M)}{(2.72+M)} \text{ [cm/s]}$$

### 3.2 설계충격곡선 (shock design curve)

실제 DDAM 충격하중 산정의 최종결과는 가속도이다. 이 가속도를 1자유도계의 질량 혹은 다자유도계 모드유효질량에 곱한 하중으로부터 장비시스템의 응답을 구한다. 이러한 가속도를 DDAM에서는 설계충격곡선 (shock design curve)이라 부르는 그래프에서 구하는데 그 대표적인 그림을 보면 Fig.2와 같다. 그림은 수상함에 선체지지된 장비의 수직 가속도로서 탄성설계를 가정한 것이다. 기본적으로 충격방향에 관계없이 6g의 최소치를 규정하고 있고 계의 질량이 클수록 전체적으로 낮은 값을 부여함을 알 수 있다. 동일한 질량에 대하여 저주파수 영역에서는 고유진동수가 높아질수록 비례하여 가속도가 증가하되 그 최대치가 제한되어 그 이상의 높은 주파수에서는 일정한 가속도 (설계 가속도  $A_a$ )를 가짐을 알 수 있다.

## 4. DDAM 해석 예

일반 구조해석용 프로그램인 MSC/NASTRAN 과 ANSYS 등이 DDAM을 위한 모듈을 포함하고 있으며 프로그램에 따라 운용상의 차이가 있으나 전체적인 해석절차는 유사하다. 본 해석에서는 NASTRAN을 사용하였으며, 이를 이용한 DDAM 해석절차는 다음과 같이 3단계로 나뉘어 진다.

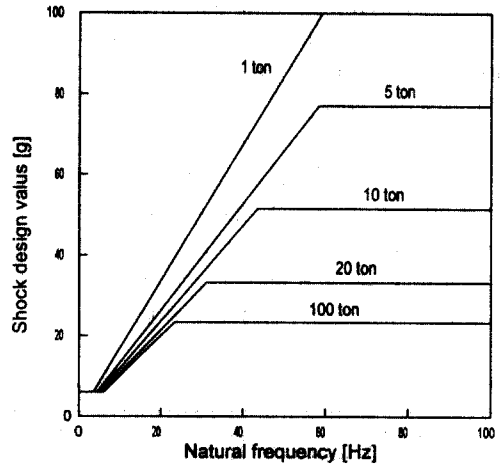


Fig.2 Shock design curve (surface ship, hull mounted, vertical)

- 1 단계 : 고유치해석 과정  
→ 고유진동수, 모드, 참여계수, 유효모드질량
- 2 단계 : 설계충격치 계산 과정  
→ 설계가속도 결정
- 3 단계 : 결과 회복 과정  
→ 모드별 응답(변위, 응력 등) 계산 및 합산

특히 NASTRAN을 이용할 때 DDAM의 해석 개념에 부합시키기 위하여 모델링에 유의할 점들이 있으며 참고문헌<sup>110)</sup>에 상세히 기술되어 있다.

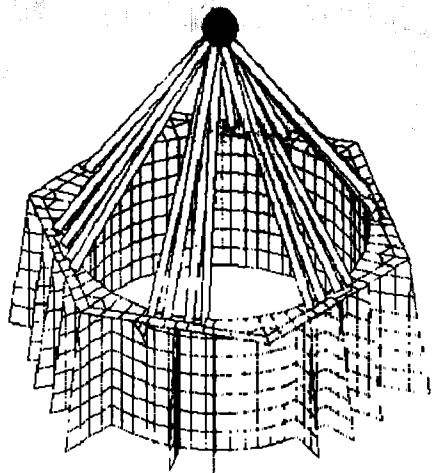


Fig.3 A sample model for DDAM : foundation of auxiliary boiler

전형적인 DDAM 해석 예제의 하나로 기뢰부설 함의 보조보일러 받침대에 대한 해석 사례를 보았다. Fig.3에 보인 바와 같이 무게중심에 집중된 보일러의 질량을 원주형의 받침대와 실제의 볼트위치에서 강체연결하였다. 받침대 하부의 경계조건은 고정구속(fixed-base)조건으로 하였고 설계충격치의 산정 기준은 수상선의 장비에 대해 선체지지와 탄소성 설계를 기준으로 하였다. 대상 장비의 해석 결과는 Table 2에 제시하였고, 수직방향의 충격에 대한 받침대의 응력분포를 Fig.4에 보였다.

## 5. 결론

DDAM의 이론적 배경과 과정에 대해 고찰하고 함정의 충격응답스펙트럼의 특성에 대해 면밀히 검토하여 적절한 설계충격치를 결정하는 개념과 절차를 소개하였다. 그 간편성과 안정성을 고려할 때 DDAM 해석방법은 함정 장비의 내충격해석을 위해 매우 합리적이고 실용적인 방법으로 평가된다.

## 참고문헌

Table 2 Analysis result of auxiliary boiler

Shock dir.	N.F. of dominant mode	Effective modal mass	Shock design value	Max. defl. of equipm't	Max. stress of foundation
X	63.5 Hz	1.66 ton	10.0 g	0.9 mm	1461 kgf/mm <sup>2</sup>
	65.1 Hz	2.17 ton	9.9 g		
Y	63.5 Hz	2.18 ton	19.3 g	1.7 mm	2920 kgf/mm <sup>2</sup>
	65.1 Hz	1.65 ton	20.6 g		
Z	157.1 Hz	3.79 ton	90.5 g	1.3 mm	4923 kgf/mm <sup>2</sup>

(equipm't mass : 3,720 kg, foundation mass : 515 kg)

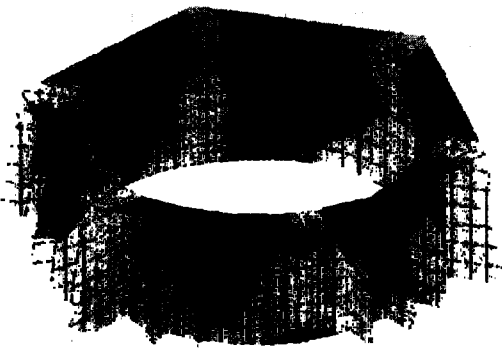


Fig.4 Stress distribution of the foundation

Table 2에서 보듯이 계산된 고유진동수는 수직방향의 경우 157 Hz에 이른다. 이때 수직방향 설계충격치는 90g를 넘으며 이에 상응하는 응력의 국부적인 최대치도 높게 나타나는 결과를 보였다. 또한 유효모드질량에 받침대 질량은 크게 기여하지 못하는 것도 알 수 있다.

(1) 정정훈, 김병현, "DDAM에 의한 함정용 탑재장비 내충격해석의 이론적 배경에 대한 검토", 대한조선학회 춘계학술대회 논문집, 1998.

(2) 이수목, 이종문, 박용렬, "DDAM을 이용한 함정 장비시스템의 내충격해석", 현대기보, 제18권 3호, 1998.

(3) 이수목, 이종문, "하부구조의 유연성이 DDAM 충격해석에 미치는 영향", 대한조선학회 선박해양구조연구회 1999년도 동계 연구발표회 논문집, 1999.

(4) Clough, Ray W. and Penzien, J., *Dynamics of Structures*, 2nd Edition, McGraw-Hill Book Company, pp. 613-667, 1993.

(5) Remmers, G., "The Evolution of Spectral Techniques in Navy Shock Design", Shock and Vibration Bulletin 53, Part I, pp. 59-70, 1982.

(6) "Shock Design Criteria for Surface Ships", Naval Sea Systems Command, NAVSEA 0908-LP-000-3010A, 1995.

(7) Cunniff, P. F. and O'Hara, G. J., "A Procedure for Generating Shock Design Values", Jour. of Sound and Vibration, Vol. 134, No. 1, pp. 155-164, 1989.

(8) O'Hara, G. J. and Cunniff, P. F., "The Shock Spectrum Dip Effect", Jour. of Sound and Vibration, Vol. 103, No. 3, pp. 311-321, 1985.

(9) O'Hara, G. J. and Belsheim, R. O., "Interim Design Values for Shock Design of Shipboard Equipment", NRL 1396, 1963.

(10) McPheeters, B., "A DDAM Processor for MSC/NASTRAN", MSC/NASTRAN, 1997.

(11) Shin, Y. S. and Geers, T. L., "Response of Marine Structures to Underwater Explosion, Part I: Theoretical Background", Lecture Note, 1995.