

함정의 내충격 설계 지침

서 승 일*, 이 채 우*

Shock Design Guidelines for Naval Vessels

by

S.I. Seo* and C.W. Lee*

1. 서 언

함정은 전투라는 특수 임무를 수행하도록 건조된 선박이므로 전투 능력은 함정의 가장 중요한 요건이라 할 수 있다. 전투 상황 속에서 함정은 여러 하중을 받을 수 있는데, 그 중에 수중 폭발에 의한 공격에 의해 치명적인 손상을 입을 수 있다.

일다 전까지도 함정의 건조시 수중 폭발 공격에 대비한 개념은 반영되지 않았으나, 근래에 해군의 관심 급증에 따라 설계시부터 내충격 개념이 반영되고 있다.

본 보고에서는 수중 폭발 현상 파악 및 분석과 이로 부터 발생하는 하중에 의한 선체 응답 및 내부 장비의 충격 해석 이론에 대해서 고찰하였다. 수중 폭발에 관련된 자료는 각국의 기밀 사항에 속한 것이 대부분이므로 연구에 난점이 따르고, 이 분야에 대한 국내의 연구 실적도 미미한 상황이다. 이런 상황을 고려하여 발표된 자료를 중심으로 설계시 적용 가능한 수중 폭발 이론과 설계 방법에 대해 고찰하였다.

2. 수중 폭발 현상

2.1. 현상 및 내력

폭약이나 핵병기의 폭발은 급작스런 에너지 방출을 초래하여 고압의 가스구체(gas bubble)를 생성시키고 주위의 물에 충격파(shock wave)를 발생시킨다. 충격파는 물에서 음속보다 더 빠른 속도로 구면파(spherical wave)의 형태로 전파되고, 이 사이에 가스구체는 수압을 중심으로 팽창, 수축을 반복하면서 수면으로 이동한다. Fig.1과 같이 가스구체의 팽창과 수축시에 충격

압(impulse pressure)이 반복적으로 작용한다.

2.2. 충격파(shock wave)[1]

고정점에서 압력의 내력(pressure history)은 다음 식으로 표현된다.

$$p(t) = p_0 e^{-t/\theta} \quad 0 \leq t \leq \theta \tag{1}$$

여기서 θ 는 감쇠 시간을 나타내고, p_0 는 첨두압력(peak pressure)을 나타낸다. (1)식이 한 점에서 시간에 따른 압력 분포를 나타낸 반면에 충격파 전면(shock front)의 후부에서 거리에 따른 압력 분포는 다음 식으로 표시된다.

$$p(x) = p_0 e^{-x/c\theta} \tag{2}$$

여기서 c 는 물속에서 음속이다.

TNT의 경우,

$$p_0 = 534 \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right)^{1.13} \text{ kgf/cm}^2 \tag{3}$$

$$\theta = 0.0925 W^{1/3} \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right)^{-3.22} \text{ millisecond} \tag{4}$$

여기서 R 는 폭발 지점에서 떨어진 거리(stand-off distance, m)이고, W 는 폭약 중량(kgf)이다.

충격파가 지나간 후의 물입자 속도는

$$v(t) = \frac{p(t)}{\rho c} + \int_0^t \frac{p(t) dt}{\rho R} \tag{5}$$

여기서 ρ 는 물의 밀도이다.

충격파의 에너지 밀도는 폭발 변수에 의해 다음 식으로 표시된다.

$$E = 0.878 \frac{W}{R^2} \text{ kgf-m/cm}^2 \tag{6}$$

2.3. 가스구체(gas bubble)

폭발에 의해 생성된 가스구체는 초기에 거의 구(sphere)에 가깝고 주요 파라미터는 최대 반경 R_{max} 과 최초 맥동(pulsation)의 지속 시간 T 이다. TNT의 경

접수일자 : 1989년 9월 5일, 재접수일자 : 1990년 3월 16일

* 정회원, 코리아 타코마 조선공업(주)

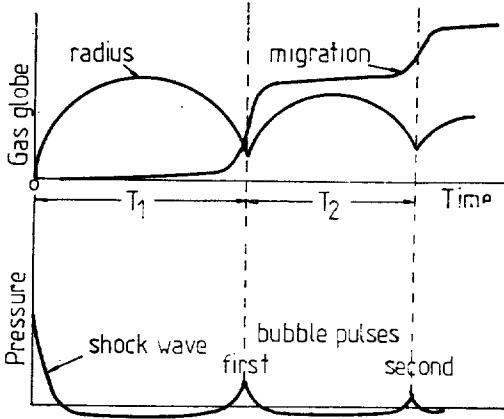


Fig. 1 History of underwater explosion events

Table 1 Dimensionless volume acceleration

τ	$\ddot{v}(\tau)$	τ	$\ddot{v}(\tau)$	τ	$\ddot{v}(\tau)$
0.16850	0.0000	1.47930	89.5690	2.43765	-0.0106
0.19281	-0.5827	1.47962	91.0060	2.47166	0.6945
0.28521	-1.9905	1.48006	92.4780	2.50104	1.5392
0.34729	-2.5879	1.48036	93.0770	2.51688	2.5837
0.42805	-3.1353	1.48449	9.2785	2.55021	3.9240
0.55009	-3.6433	1.49258	8.9034	2.57237	5.7217
0.71611	-3.9090	1.50042	8.2644	2.58638	7.1310
0.76462	-3.9090	1.51163	7.1310	2.59759	8.2644
0.93064	-3.6433	1.52564	5.7217	2.60543	8.9034
1.05268	-3.1353	1.54780	3.9240	2.61352	9.2785
1.13344	-2.5879	1.57113	2.5837	2.62008	10.4291
1.19552	-1.9905	1.59697	1.5392	2.62490	9.8540
1.28792	-0.5827	1.62635	0.6945	2.63518	7.7911
1.31223	0.0000	1.66036	-0.0106	2.65371	4.6281
1.37936	2.5207	1.70062	-0.6150	2.66761	3.1751
1.41973	6.0896	1.74981	-1.1452	2.68312	2.0977
1.44802	12.9140	1.81367	-1.6194	2.72113	0.5882
1.45846	19.2760	1.91152	-2.0505	2.77276	-0.4515
1.46971	37.2590	2.18649	-2.0505	2.80650	-0.8710
1.47366	52.6290	2.28430	-1.6194	2.84889	-1.2455
1.47769	79.1790	2.34820	-1.1452	2.90710	-1.5855
1.47859	85.4500	2.39739	-0.6945		

우 폭발이 수면하 D(m)에서 발생하였을 때,

$$R_{max} = 5.08 \left(\frac{W}{Z} \right)^{1/3} \text{ m} \quad (7)$$

$$T = 5.67 \frac{W^{1/3}}{Z^{5/6}} \text{ sec} \quad (8)$$

여기서 $Z = 3.28D + 33$ 이다.

이동하지 않는 가스구체의 최초 맥동시 반경의 변화

율은 Table 1로 주어진다[2].

$$V(t) = K\ddot{v}(\tau) \text{ m}^3/\text{sec}^2 \quad (9)$$

여기서

$$\tau = t/T_0 \quad (10)$$

$$K = 45 W^{1/3} (3.28D + 33)^{2/3} \text{ m}^3/\text{sec}^2 \quad (11)$$

$$T_0 = \frac{3.826 W^{1/3}}{(3.28D + 33)^{5/6}} \text{ sec} \quad (12)$$

폭발시 발생하는 에너지 중 53%는 충격파 에너지 발생에 소모되고 47%는 최초의 가스구체 맥동 에너지에 소모된다[1].

2.4. 경제 효과[3]

해수에는 자유 표면과 해저면이 존재하는데, 이러한 경계에 의해 충격파의 거동은 달라진다. 자유 표면의 경계 조건에 의해 인장의 반사파(tension wave)가 생성되고 물은 인장을 견디지 못해 캐비테이션이 발생한다. 캐비테이션이 발생하는 지역은 상당히 넓은데 이를 거대 캐비테이션 영역(bulk cavitation region)이라 한다. 충격 입사파와 반사파의 조합에 의해 어떤 지점에서 압력이 갑자기 없어지게 되는데 이를 단절(cut-off)이라 하고 단절 시간(cut-off time)은 Fig.2로부터 다음과 같이 구해질 수 있다.

$$t = (R_i - R) / c \quad (13)$$

$$R_i = \sqrt{(D + d)^2 + h^2} \quad (14)$$

$$R = \sqrt{(D - d)^2 + h^2} \quad (15)$$

여기서 c는 음속이다.

입사파(incident wave)의 압력을 P₁, 해수면에 의한 반사파의 압력을 P₂, 대기압을 P_a, 중력에 의한 압력을 P_g라 하면 P점에서 총 압력 P_T는

$$P_T = P_1 + P_2 + P_a + P_g \quad (16)$$

로 주어지고 P_T < 0일 때 캐비테이션이 발생한다.

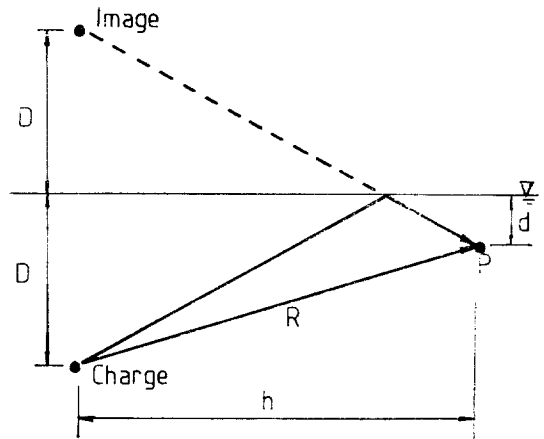


Fig. 2 Shock wave path geometry

해저면(sea bottom)에서는 압축파(compression wave)의 형태로 반사되는데, 경계를 강체라고 간주한다.

3. 선체 응답 및 손상

3.1. 초기 첨두 속도(initial peak velocity)

충격파가 선체에 도달했을 때 충격파는 선체에 하중을 가하고 선체는 운동을 하게 된다. 이때 선체가 순간적으로 최대 속도를 지니게 되는데 이를 초기 첨두 속도라 한다. 초기 첨두 속도는 선체를 비구속 평면판(plane unrestrained plate)으로 이상화하여 계산되어질 수 있다. 비구속 평면판 이론에 의한 정식화는 다음과 같다[1].

$$m\dot{v}(t) = 2p(t) - \rho cv(t) \tag{17}$$

여기서 m은 단위 면적당 질량이고 $\rho cv(t)$ 는 탈출 압력(relief pressure)이다.

초기 첨두 속도를 구하는 또 하나의 간략한 방법으로 거대 캐비테이션 이론(bulkcavitation theory)이 있다[3]. 이 이론에서는 해수면 근처에서 캐비테이션이 발생하는 영역을 선체의 배수량과 등치시키고, 물입자의 속도가 선체의 속도와 일치한다고 가정하여, 운동량 이론을 이용하여 초기 첨두 속도를 구한다.

비구속 평면판 이론이나 거대 캐비테이션 이론은 충격파의 입사 시 선체의 응답을 구할 수 있는 간단한 방법이지만 실제 상황에 비추어 보면 너무 단순화된 이론이다. 경밀한 해석을 위해서는 음향학적 관점에서 유체 구조 상호 작용(fluid-structure interaction)을 고려하는 수치적 방법을 도입하여 시뮬레이션해야 한다.

3.2. 외판의 손상

비접촉 수중 폭발(noncontact underwater explosion)시 발생하는 충격파에 의해 선체의 외판은 접시형의 변형을 일으킨다. 이때에는 하중 자체가 엄청나게 크고 변형량도 크기 때문에 소성 변형이 발생하고 외판은 막(membrane)의 거동을 보인다. 주변이 고정된 판(clamped plate)의 소성 변형 에너지(energy of plastic deformation)와 등가의 정적 압력(static pressure)은 Table 2와 같다. 소성 변형량은 Table 2의 변형 에너지와 충격파에 의한 에너지를 등가시킴으로 구해질 수 있다.

예로써 원판(circular plate)의 경우, 중앙에서의 처짐은 에너지 평형으로 부디

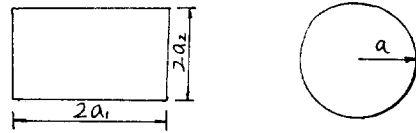
$$d = k \frac{a}{\sqrt{\sigma_y h}} \frac{W^{1/2}}{R} \tag{18}$$

와 같이 얻어진다.

Table 2 고정판의 소성 변형

판	소성 변형 에너지	정적 압력
원	$\pi h \sigma_y d^2$	$4 \sigma_y h d/a^2$
직사각형	$4 a_1 a_2 h \sigma_y d^2/a_0$	$4.5 \sigma_y h d/a_0$
정사각형	$2.84 h \sigma_y d^2$	$2.3 \sigma_y h d/a_1$

판두께(plate thickness) h
 항복 응력(yield stress) σ_y
 중앙의 처짐(center deflection) d



$$\frac{1}{a_0} = \frac{16}{45} \left(\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} \right)$$

3.3. 선체 거더(ship girder)의 응답

수중 폭발시에 선체의 각 단면에 작용하는 압력 및 속도 분포가 균일하지 않으므로 선체는 강체 운동(rigid body motion)뿐 아니라 과도적인(transient) 굽힘 변형도 겪게 된다. 후자를 휘핑(whipping)이라 하는데 이는 주로 가스구체 맥동에 의해 유발된다. 선체를 이상 유체의 표면에 떠 있는 탄성보(elastic beam)의 결합으로 모델화한다면 구체에 의한 휘핑 운동 방정식은 다음과 같다[4].

$$[M + M_w]\{\ddot{y}\} + [K]\{y\} = [M_w + \bar{M}_w]\{\ddot{u}\} \tag{19}$$

여기서

- [M] = 선체 질량 행렬
- [M_w] = 부가 질량(added mass) 행렬
- (\bar{M}_w) = 배수된 물의 질량 행렬
- [K] = 강성 행렬
- { \ddot{u} } = 구체 유속장(bubble flow field)의 가속도 행렬
- {y} = 선체의 변위 행렬

비압축성(incompressible) 유체에서 구체의 이동(migration)을 고려하지 않을 때 유체 입자의 반경 방향(radial)의 가속도는

$$\ddot{u} = \frac{\dot{V}(t)}{4\pi r^2} \tag{20}$$

로 표시된다. 여기서 V(t)는 가스구체의 부피이다.

(19)식의 해는 모드 해석(modal analysis)에 의해 얻을 수 있다. 이를 실선(L×B×D=105m×15.4m×7.8m)에 대해 자체에서 개발한 프로그램을 이용해서 구해 본 결과는 Fig.3과 같다. (19)식은 유체 구조의 상호 작용을 간략히 선형화한 것이나, 교차항의 영향

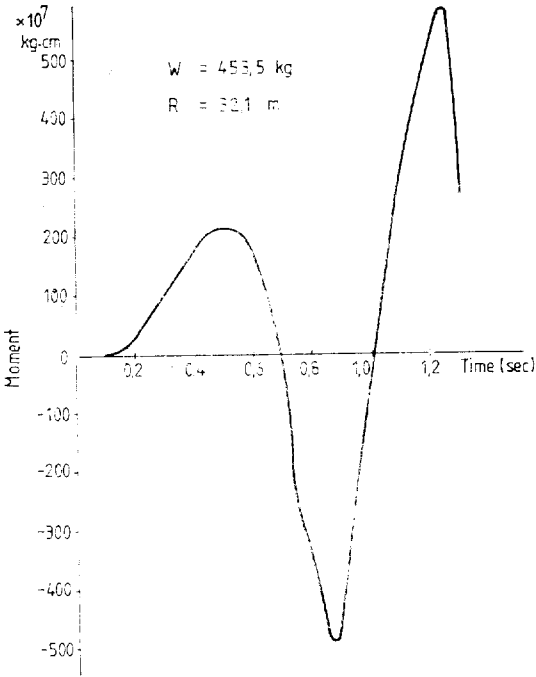


Fig. 3 Bending moment vs time at midship

및 비선형 자유표면 효과(nonlinear free surface effect), 비정상 유동(unsteady flow), 축방향유동(axial flow) 등을 고려한다면 해석은 더욱 복잡해지고 더욱 깊은 이론을 요하게 된다.

4. 장비의 응답과 손상

4.1. 충격 강도(shock factor)

충격에 의해 선체는 초기 침투 속도, 휘핑에 의한 응답 등 다양한 운동을 겪게 되고, 이 과정에서 선내의 장비(shipboard equipment)와 받침대(foundation) 등이 손상을 입게 된다. 선체 운동의 크기는 공격 세기(attack severity)에 의존하는데 공격의 세기는 충격파의 에너지 밀도와 관련이 있다. 일반적으로 선체의 충격 속도 V 는 다음 식으로 표시될 수 있다.

$$V = c \frac{W^{1/2}}{R} f(\alpha) v(t) \tag{21}$$

여기서

c = c [선종(ship type), 선체 내의 위치, 설치 형태 (type of installation)]

$v(t)$ = 시간에 따른 속도의 변화

$f(\alpha)$ = 입사각 α 의 함수

(21)에서 $W^{1/2}/R$ 을 충격 강도로 정의하고 공격의

세기를 나타내는 지수로 사용한다. 미해군에서는 용골 충격 강도(keel shock factor)를 입사각의 기하학적 관계까지 고려한 계수로 정의하고 있다.

$$KSF = \frac{W^{1/2}}{R} \frac{(1 + \sin\alpha)}{2} \tag{22}$$

4.2. 충격 해석의 종류

4.2.1. 정적 강도 해석(static strength analysis)

내충격 장비의 설계 검토를 위한 충격 해석 방법으로 오래 전부터 널리 사용된 것이다. 간단한 방법으로 충격설계수(shock design number)를 구하고, 장비의 중량에 곱하여 충격하중을 동가의 정적하중(equivalent

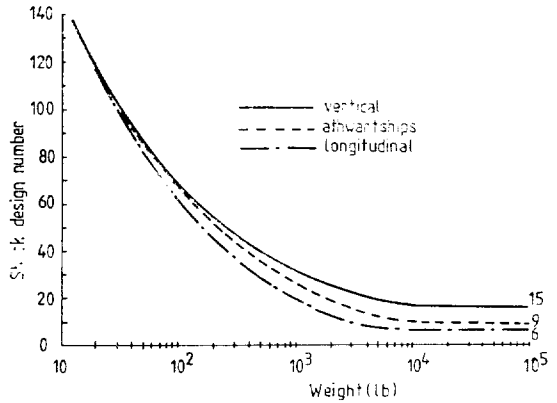


Fig. 4 High impact shock data for main structural members and subbase of shipboard items of machinery and equipment

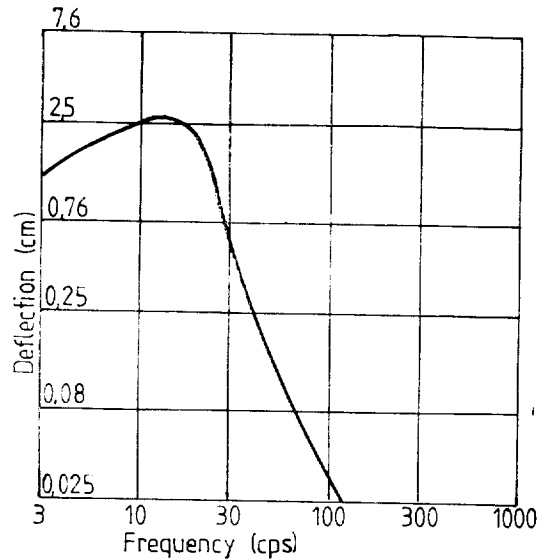


Fig. 5 Deflection spectrum of a shipboard shock motion

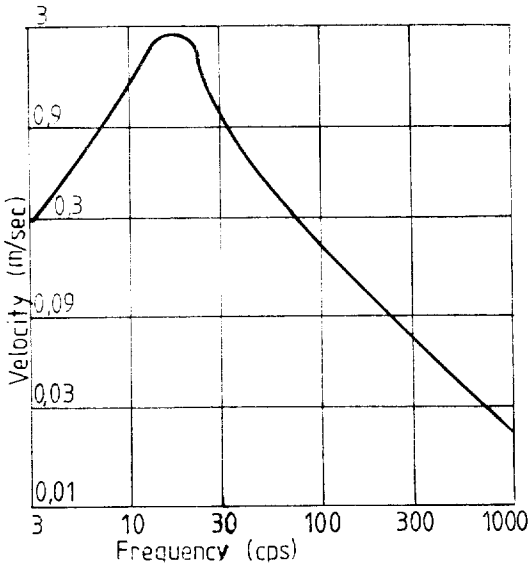


Fig. 6 Velocity representation of a shock spectrum

static load)으로 치환한다. 따라서 동적 문제가 등가의 정적 문제로 치환되어 정적 구조 해석 수행으로 설계 검토가 이루어질 수 있다. 미해군에서 사용하던 충격설계계수는 Fig. 4와 같다[5].

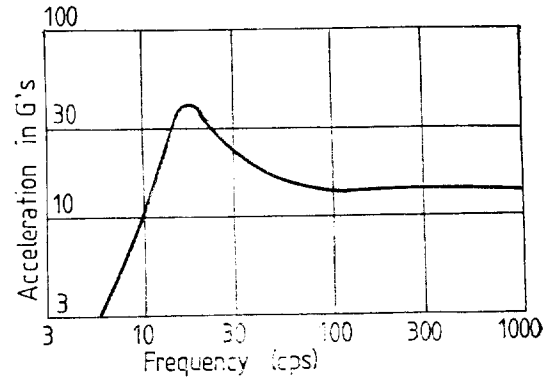


Fig. 7 Acceleration spectrum of a shipboard shock motion

4.2.2. 충격 스펙트럼(shock spectrum)

충격 스펙트럼은 충격시 질량 스프링계의 최대 응답을 고유 진동수의 함수로 표시한 것이다. 실선 계측으로 부터 얻어진 충격 스펙트럼을 기초로, 질량 스프링계로 모델화된 진동계의 정규 모드(normal mode)를 계산하고 모드 간 중첩에 의해 최대 충격 응답이 주어진다. 충격 스펙트럼의 예는 Fig. 5-7과 같다[6].

4.2.3. 동적 설계 해석 방법(dynamic design analysis method)

Table 3 Motion inputs for dynamic analysis

Location(Note 1)	Direction	Elastic Design		Elastic-Plastic Design	
		A	V	A	V
Hull Mounted	Vertical	1.0A ₀	1.0V ₀	1.0V ₀	0.5V ₀
	Athwartship	0.4A ₀	0.4V ₀	0.4A ₀	0.2V ₀
	Longitudinal	0.2A ₀	0.2V ₀	0.2A ₀	0.1V ₀
Deck Mounted	Vertical	0.5A ₀	0.5V ₀	0.5A ₀	0.25V ₀
	Athwartship	0.2A ₀	0.2V ₀	0.2A ₀	0.1V ₀
	Longitudinal	0.2A ₀	0.2V ₀	0.2A ₀	0.1V ₀
Shell Plating Mounted	Vertical	2.0A ₀	2.0V ₀	Not Permitted	
	Athwartship	0.4A ₀	0.4V ₀		
	Longitudinal	0.2A ₀	0.2V ₀		

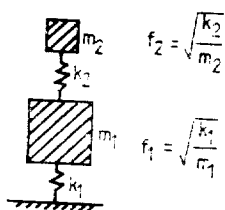
$$V = 152.4 \frac{(5443 + W)}{(2722 + W)} \text{ cm/sec} \quad A = 20 \frac{(17009.6 + W)(5443 + W)}{(2722 + W)^2}$$

where W=modal weight in kgf

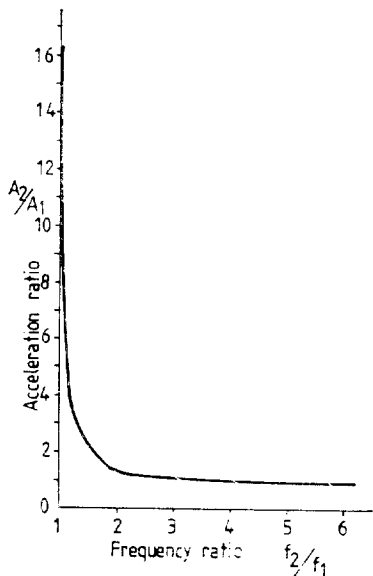
Hull Mounted-equipment and foundation systems mounted directly to the basic hull structure(frames, structural bulkheads below the water line, and shell plating above the water line).

Deck Mounted-equipment and foundation systems mounted directly to the decks, nonstructural bulkheads, or to structural bulkheads which are above the water line.

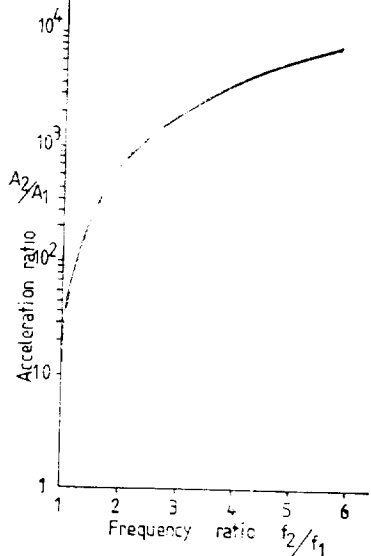
Shell Plating Mounted-applies only to equipment mounted directly to the shell plating below the water line without intervening foundations.



(a) Spring mass system of two degrees of freedom



(b) First mode



(c) Second mode

Fig. 8 Calculated acceleration ratio based on DDAM

동적 설계 해석 방법은 NRL(Naval Research Laboratory)에서 개발되었고 미해군에서 충격 해석 방법으로 채택된 것이다[5]. 충격 스펙트럼에 의한 방법의 일종이라 할 수 있는데, 수중 폭발 현상과 관련지어 생각한다면, 폭발 시 초기의 선체 응답 속도가 계단형(step function)이라 가정한 것이다. 각 정규 모드의 응답은 모드 진동수(modal frequency)와 모드 중량(modal weight)의 함수로 주어지고 최대 응답은 저차 모드의 조합으로 구해진다. 충격 입력치(shock input value)는 Table 3과 같다[3]. 간단한 2자유도의 질량 스프링계에 대해 동적 설계해석 방법을 적용해 보면 Fig.8과 같고 이로부터 구조와 부구조의 상호 영향을 파악할 수 있다.

4.2.4. 직접 동역학 해석(direct dynamic analysis)

이 방법은 장비가 위치한 지점의 운동을 적절한 함수의 형태로 가정하고, 이 운동을 장비 기초(base)의 운동으로 보아 시간에 따른 장비의 거동을 기술하는 방법이다. 기초의 운동을 Fig. 9와 같은 펄스 형태로 가정하고, 그 함수 형태를 다음 식과 같이 가정한다.

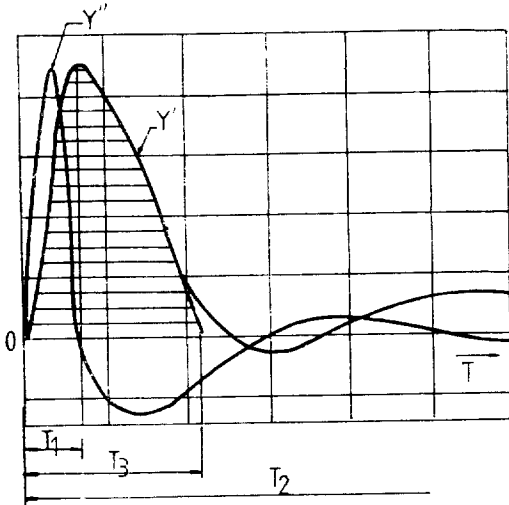
$$Y' = \beta \frac{Y'_{max}}{2} \left(1 - \cos \frac{\pi}{T_1} t \right) \tag{23}$$

4.3. 충격 시험(shock test)

충격 시험은 수중 폭발 현상을 기계적 장치의 충격으로 재현하여 장비의 안전도를 검사하는 방법이라 할 수 있다. 대표적인 충격 시험으로 MIL-S-901C를 들 수 있다. 장비의 중량에 따라 낙하시키는 물체의 중량과 위치를 정하고 기계적 장치로 충격을 가한다. 대중량의 장비는 부유식 충격 플랫폼(floating shock platform)에서 실선과 유사한 충격 시험을 행한다[8].

4.4. 충격 해석 방법의 평가

정적 강도 해석 방법은 간편함이 그 장점이지만 장비와 받침대의 동역학적 특성이 고려되지 않는다는 약점을 지니고 있다. 동적 설계 해석 방법은 선형의 진동계를 가정하고 도입된 방법이므로 주의를 요한다. 동적 설계 해석 방법이나 직접 동역학 해석에 의한 방법은 모두 주 선체와 부구조(substructure)인 장비의 상호 영향을 무시한다는 가정이 내포되어 있으므로 주의를 요한다. 장비의 중량이 선체의 중량에 비해 무시할 수 없을 정도이거나, 장비의 고유 진동수와 근접할 때 상호 작용의 효과는 크게 된다. 동적 설계 해석 방법을 이용할 경우에 영향 계수(influence coefficient)는 장비를 3차원 구조로 모델화하고 집중 질량의 위치마다 단위 하중을 가하고 처짐을 취함으로 범용 구조 해석 프로그램을 이용하여 계산이 가능하다. 충격 시험



Y' = Velocity
 Y'' = Acceleration
 T₁ = Rising time
 T₂ = Duration
 T₃ = Impulse time

Fig. 9 Typical time history for dynamic analysis

에 의한 보증 방법은 3방향(상하, 좌우, 전후) 모두에 대해서 시험할 수 없다는 약점이 있다[8].

미해군의 일반 사양서(General Specification)에 따르면 장비의 중요도에 따라 등급을 나누고, 22,680kg (=50,000 lb)이하의 주요 장비와 받침대는 충격 시험을 실시하도록 되어 있다. 또한 충격 시험이 불가능한 장비와 받침대는 동적 설계 해석 방법에 따라 충격 보증을 실시하도록 되어 있다[9].

5. 내충격 설계 지침

수중 폭발 공격에 대비한 선체 설계 시에는 항복 응력을 초과한 소성 대변형의 가능성을 고려에 넣어야 한다. 주요 고려 사항으로 다음을 들 수 있다[1].

- 취성 재료보다는 고장력이고 연성이 풍부한(ductile) 재료가 좋다.
- 응력 집중이 일어날 만한 개구는 가능한한 피하고 불가피한 경우에는 보강이 필요하다.
- 외관 근처의 적벽은 파손 시 침수가 초래되므로 과도 변형으로 인해 빗어지지 않도록 설계되어야 한다.

- 선체 거머더는 휘핑에 의한 손상을 극복할 만한 강성을 지녀야 하고 구조적인 불연속을 피해야 한다.
- 장비와 선각은 충격시 장비의 운동으로 천공(puncturing)이 발생되지 않도록 충분한 간격이 유지되어야 한다.

선체의 장비는 선체 손상 이전에 파손되기가 쉬우므로 장비에 대한 내충격 설계는 선체보다 더욱 필요하다. 장비의 내충격 설계 시 고려 사항으로 다음을 들 수 있다.

- 주요 장비에 탄성 지지대(resilient mount)의 설치가 요구된다. 탄성 지지대는 충격 하중으로 인한 선체 운동과 공진을 피하도록 설계되어야 한다.
- 정렬(alignment)이 중요하지 않은 장비는 소성 변형을 허용하도록 설계되어야 한다.
- 정렬이 중요한 장비나 고착 볼트는 완전한 탄성역 내에서 설계되어야 한다.
- 충격 해석을 통해 설계 시에 안전 여부에 대한 검토가 이루어져야 한다.

6. 결 언

이상에서 실제 적용 가능한 수중 폭발 현상 및 선체, 장비의 응답 이론에 대해 고찰해 보았고, 적용 과정에서 의 문제에 대한 평가를 내려 보았다. 그런데 수중 폭발 현상 및 선체, 장비의 응답을 이론적으로 기술하는 데에는 많은 난점이 내포되어 있다. 폭발 하중 및 소성역에서의 선체 응답 거동을 간략화하여 수학적으로 모델화하는 과정은 너무도 복잡한 문제를 발생시키기 때문이다. 미해군에서는 오랜 연구 경험을 축적하여 실제와 가까운 구조의 모델화, 충격과 및 가스 구제의 유체 역학적 기술, 유체 구조 상호 작용의 고려, 구조 부구조 상호 작용의 고려 등이 가능한 전산 코드를 개발한 실정에 있다. 이에 비해 경험과 이론면에서 뒤떨어져 있는 우리의 실정을 감안한다면 연구자들의 수중 폭발 현상에 대한 많은 관심과 연구 노력이 필요하다고 하겠다. 또한 선체 설계 시 내충격 개념을 반영할 수 있는 내충격 설계 기준이 정립되어 있지 못한 실정이므로 설계 기준 확립을 위한 지속적인 노력이 요구된다.

후 기

연구 과정에서 많은 자료를 제공해 주시고, 조언을 주신 진해 기계창의 송준태 실장님과 박병욱 연구원께 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] A.H. Keil, "The Response of Ships to Underwater Explosion", *T. of SNAME*, Vol. 69, 1961.
- [2] A.N. Hicks and J.L. Mckeeman, "The Elastic Theory of Explosion Induced Whipping: Computer Program Specification", NCRE Report R550, 1968.
- [3] L.T. Butt, Naval Ship Shock Design, Lecture Notes.
- [4] K.A. Bannister, "Whipping Analysis Techniques for Ships and Submarines", Shock and Vibration Bulletin, 1980.
- [5] Shock Design of Shipboard Equipment, NAVSHIP 250-423-30, 1961.
- [6] R.L. Bort, "Assessment of Shock Design Methods and Shock Specifications", *T. of SNAME*, Vol. 70, 1962.
- [7] Shock Design Criteria for Surface Ships, NAVSEA 0908-LP-000-3010, 1976.
- [8] Shock Test(High Impact), MIL-S-901C, 1963.
- [9] "Shock", General Specifications for the US Navy, section 072, 1981.