

# 내충격 성능을 고려한 수중함 동적 강도 설계에 관한 연구

°손성완\*, 최수현\*, 김극수\*

## A Study on Dynamic Strength Analysis of Submarine Considering Underwater Explosion

°Sung-Wan Son, Su-Hyun Choi, Kuk-Su Kim

### ABSTRACT

In general, the strength of hull structures can be estimated from stress evaluation considering static and hydro-dynamic load due to sea-wave. However, war ships such as submarine, have frequently experienced the underwater explosion and local structures of ship as well as hull girder can be damaged by the dynamic response excited from underwater non-contact explosion. When explosion happens at underwater, shock wave is radiated in early short time, then gas bubbles are generated, and expansion and contraction are repeated as they float to the surface. The shock wave causes the damage of equipment and its supporting structures, on the other hand, the hull girder strength can be lost by resonance between bubble pulsation and lowest ship natural vibration period.

In this paper, the hydro-impulse force due to bubble was calculated. Based on these results the hull girder strength of submarine was estimated from transient response analysis by using NASTRAN. Also, shock analysis for some equipment supporting structures was carried out by using DDAM, in order to evaluate the strength of these local structures due to shock wave.

### 1. 서론

일반적으로 선체 강도의 평가는 정수 중에서 선박에 작용하는 정하중과 선박이 대양을 항해하면서 받게되는 파랑하중에 의해 이루어진다. 그러나 수중함과 같은 함정의 경우 전투중 폭약, 어뢰 등에 의한 비접촉 수중폭발이 빈번하게 일어나고 이러한 수중폭발에 의해 국부 판 부재 및 주요 장비 파손 뿐 아니라 선체 중강도의 상실을 가져 올 수 있다.

수중폭발이 일어나게 되면 먼저 순간적인 충격파가 폭발 직후 아주 짧은 시간 영역 내에서 발생되어 선체구조에 급격한 가속을 일으켜 이를 전달받은 함정 탑재 장비와 그 지지부 및 선체 국부 판 구조에 주로 손상을 일으킨다. 폭발 에너지 중 약 53%에 해당 하는 양이 이 충격파에 의해서 전달된다. 이는 매우 짧은 시간에 아주 높은 가속도로 선체 국부 구조에서 발생하는 에너지의 형태로 이루어진다. 충격해석 방법으로는 마해군에서 제안한 일종의 스펙트럴 해석방법인 DDAM이 널리 쓰이고 있으며, 최근에는 DYTRAN등의 범용 유한 요소 Code를 이용하여 3차원 충격모델에 의한 상세해석도 이루어지고 있다. 본 연구에서는 DDAM에 기초하여 NASTRAN에서 제공하는 User Selection PGM을 이용하여 함정에 탑재되는 장비 지지부에 대한 충격 해석을 수행하였다.

함정 선체 whipping 운동의 주기진원은 수중폭발이 일어난 후 비교적 후기 시간 영역에서 발생하는 가스구체 충격력(bubble pulse)이다. 가스구체 충격력은 수중폭발 직후 급작스런 에너지 방출에 의해 주위의 물에 야기되는 압축성 교란, 즉 초기 충격파(shock wave)가 전파해 가는 동안 폭발시 생성된 주기적인 팽창/수축의 맥동(pulsation) 운동과 부력에 의해 수직상승(migration)하는 가스구체(gas bubble)가 맥동운동 각 주기마다 최소 크기가 되

는 시점에서 반복적으로 발생한다. 폭발 초기에 발생하는 고주파 성분의 초기 충격파가 선체 국부부재 및 주요 탑재 장비에 치명적 손상을 야기시키는 데 반하여, 저주파 성분의 가스구체 충격력은 가스구체의 맥동운동 주기가 함정 선체 거더 상하 방향 저차 고유주기와 비슷하기 때문에 공진에 의한 과도한 선체거더 whipping 현상을 야기시킬 수 있다. 따라서, 수중함과 같은 함정의 종강도 평가에 있어서는 반드시 휘핑응답 해석을 통하여 그 결과를 반영하여야 한다.

본 연구에서는 Hicks의 가스구체 모델을 이용하여 수중폭발시 유체 충격력을 계산할 수 있는 프로그램을 개발하였고, 계산된 유체력을 바탕으로 NASTRAN의 Transient Response Analysis를 이용하여 함정 설계 초기 단계에서 수중 폭발에 의한 선체의 휘핑 응답 해석을 통해 종강도 평가를 수행할 수 있도록 하였으며, 당사에서 건조 예정인 수중함을 대상으로 수치계산을 수행하였다.

### 2. 선체 Whipping 응답 해석 이론

#### 2.1. 가스구체 거동 해석 및 유체 충격력 산정

수중 폭발이 일어난 후 가스 구체의 맥동에 의해 수중 또는 수상의 선체가 있는 지점에서 유체력이 작용하게 되며 이 유체력은 폭발이 일어나는 수심, 폭발의 종량에 의해 주기가 결정되며 폭발 지점과 선체와의 거리에 의해 그 크기가 변화하게 된다. 본 연구에서는 가스구체의 맥동에 의한 유동장을 이상유체로, 그리고 가스구체가 맥동운동시 구의 형태를 유지한다고 가정하여 포텐셜 이론을 바탕으로 Hicks의 가스구체의 수학적 모델을 이용하여 임의의 선체위치에서 유체력을 계산할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 지면상 자세한 표현은 생략하고 이해를 돕기 위해 계산 과정에 대해서만 간략하게 언급한다. 상세한 내용은 참고문헌을 참조하기 바란다.

\* 대우중공업 선박해양연구소 진동소음 연구팀

(1) Attack Geometry 결정

: 폭약의 사양, 위치 및 폭발 깊이(응골 충격 계수)의 결정

$$\text{여기서, } KSF = \frac{\sqrt{W}}{R} \left( \frac{1 + \sin \theta}{2} \right)$$

W : 대상폭약의 TNT폭탄에 해당하는 등가중량(lb)

R : 폭약에서 응골까지의 최단거리(ft),  $\theta$  : angle of attack

(2) 가스구체의 거동 해석

① 가스구체의 맥동과 수직상승에 대한 무차원 운동 방정식과 초기 조건식 결정.

$$\frac{dx}{dt} = \sigma$$

$$\frac{d\zeta}{dt} = \lambda$$

$$\frac{d\sigma}{dt} = -\frac{3\delta}{(2\delta - \beta\sigma)} \left[ \frac{\sigma^2}{x} \left( 1 - \frac{2\beta\sigma}{3\delta} \right) - \frac{\lambda^2}{6x} + \frac{\zeta}{x_0^2} - \frac{(\gamma-1)k}{x^{\gamma+1}} \right] + \frac{\beta\sigma}{4\delta^2} \left( C_d \frac{\lambda^2}{4x} + \frac{\sigma\lambda}{3} - \frac{x}{\zeta_0} \right)$$

$$\frac{d\lambda}{dt} = -3\alpha \left( \frac{1}{\zeta_0} + \frac{\sigma\lambda}{x} - C_d \frac{\lambda^2}{4x} + \frac{\beta\sigma}{4\delta^2} (3\sigma^2 + x \frac{d\sigma}{dt}) \right)$$

$$x(0) = k^{-3(\gamma-1)} \left[ 1 + \frac{k^{1-\gamma}}{3(\gamma-1)} \right]$$

$$\sigma(0) = 0$$

$$\zeta(0) = \zeta_0$$

$$\lambda(0) = 0$$

여기서, x는 가스구체의 무차원 반경,  $\sigma$ 는 가스구체의 반경속도,  $\zeta$ 는 가스구체의 위치,  $\lambda$ 는 가스구체의 수직상승속도,  $\delta$ 는 무차원 폭발깊이,  $C_d$ 는 가스구체의 항력계수,  $\gamma$ 는 단열상수, k는 폭약의 종류에 따른 실험상수이다. 무차원에 있어서 길이는  $C_1(W/Z)^{1/3}$ , 시간은  $C_2 W^{1/3} / Z^{(4/3)}$ 로 무차원화 된다. 이때, W는 폭약중량, Z는 압력 수두이며  $C_1$  및  $C_2$ 는 폭약의 종류에 따른 실험상수이다. 그리고,  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 가스구체의 이동운동과 자유표면의 효과를 고려하는 계수로서, 그 효과를 고려할 때는 1로 지정하고 무시할 때는 0으로 한다.

② attack geometry로부터 결정된 응골 충격계수에 따른 가스구체의 1차맥동주기 결정 : 가스구체의 맥동주기에 관한 실험식을 소개하면 다음과 같다.

$$T = K \frac{W^{1/3}}{(D+33)^{1/6}} \quad [\text{sec}]$$

이때, W = charge weight [lb] ; for nuclear [kton]

D = charge depth [ft]

폭약의 종류	HBX-1	TNT	PENTOLITE	NUKE
K	4.761	4.268	4.339	515

③ 유체충격력 산정 : 가스구체의 유동에 관한 속도포텐셜을 이용하여 유도가 가능하다. 유체의 속도함수가 정의되면 유체장에서의 유체속도와 가속도를 얻을 수 있다. 포텐셜 이론에서 속도는 포텐셜의 음의 gradient이다.

$$u_r = -\nabla \phi = -\frac{\partial \phi}{\partial r}$$

가스구체가 자유표면으로부터 가까이 있을때는 표면반사가 존재하여 가스구체의 운동에 영향을 준다. 이러한 자유표면 효과를 고려하여 가스구체의 속도 포텐셜을 구하면 다음과 같다.

$$\phi = \frac{e_1}{r} + \frac{e_2}{r^2} \cos \theta - \frac{e_1}{r_1} + \frac{e_2}{r_1^2} \cos \theta_1$$

$$\text{이때, } e_1 = a^2 \frac{da}{dt}, \quad e_2 = \frac{a^3}{2} \left( U - \frac{a^2}{4k} \frac{da}{dt} \right)$$

2.2 선체 거더 고유진동수 해석

본 연구에서는 선체를 가변단면의 보 모델로 이상화하여, 선체를 각 절점으로 분할하고 분할된 절점에 선체의 질량과 부가수 질량을 집중시킨 후, 이들 집중질량을 질량이 없는 보요소로 연결시킨 후, NASTRAN의 Real Mode Analysis를 이용하여 선체 고유진동수를 계산하였다. 이때 각 단 면의 전단강성을 고려하기 위해 전단강성 계수를 계산하여 입력하였다.

2.3 선체거더 휘핑 응답 해석

고유진동 해석시 설명한 보이론에 의해 선체를 모델링 한 후 개발한 프로그램으로 계산된 각 유한요소 절점에서의 가스구체에 의한 시간이력 유체력을 입력하중으로 하여 NASTRAN의 Transient Modal Response Analysis를 수행하여 선체 휘핑응답을 계산하며 이때 계산된 유체력을 자동적으로 Transient 해석의 입력하중으로 변환시키기 위하여 NASTRAN의 DMAP을 이용하였다.

수중폭발에 의한 구조물의 휘핑응답을 정확하게 계산하기 위해서는 정확한 유체-구조 상호작용 이론의 도입이 요구되지만, 가스구체의 거동에 의한 유동을 이상유체로 취급할 수 있기 때문에 유체-구조 상호작용을 점구조물의 진동해석에 통상 사용되는 부가수 질량 효과(Virtual Mass Effect)로 근사시켜 계산한다. 선체 거더를 유한요소 모델링하면 가스구체 충격력에 의한 휘핑운동 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} & ([M_r] + [M_a]) \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + [C_r] \frac{dy(t)}{dt} + ([K_r] + [K_b]) y(t) \\ & = ([M_a] + [M_b]) \frac{du_y(t)}{dt} \end{aligned}$$

여기서,  $[M_a]$ ,  $[C_a]$  및  $[K_a]$ 는 각각 선체거더의 질량, 감쇠 및 강성행렬이고  $[M_b]$ ,  $[M_b]$  및  $[K_b]$ 는 각각 부가수 질량, 배수질량 및 부력에 의한 강성행렬이며 이들은 시간에 따라 변화하지 않는 값이다. 그리고,  $y(t)$ 는 선체 절점의 변위를 나타내는 함수이고  $u_y(t)$ 는 절점에서의 가스구체의 거동에 의한 수직방향 유체가속도 벡터로서 이는 가스 구체의 반경방향 유체가속도의 수직성분이다.

3. 수중함에 대한 휘핑 해석 결과

3.1 고유진동 해석 결과

수중함은 일반상선이나 수상전함과는 달리 비교적 단면형상이 단순한 원형단면의 압력선체가 주요 강성을 이루고 있으며 그 위로 GRP구조가 일부분 둘러싸고 있다. 본 계산에서는 함교 및 GRP는 단면 강성치 계산에서 제외하였으며 수중함의 경우 통상적인 운항조건이 수중 상태이므로 부가수 질량을 위한 조건은 선체가 완전히 물에 잠겨진 상태에서 계산하였다.

고유진동 해석에서 얻어진 선체 수직방향 고유진동수는 군사목적상 수록하지 못하였으며 Table 10에 본 연구에서 사용된

NASTRAN에 의한 beam 해석 결과와 3차원 유한요소 모델에 의한 해석결과를 상대적으로 비교하여 나타내었다.

**Table 1 Vertical Hull Girder Natural Frequencies of H209M**

Mode	Beam Model	3D Method
1st(2 Node)	1.0	1.021
2nd(3 Node)	1.0	1.08
3rd(4 Node)	1.0	1.018
4th(5 Node)	1.0	1.14

**3.2 Attack Geometry 결정**

본 연구에서는 TNT 10kg이 선체 직하 방향에서 폭발하는 것을 가정하였으며, 수중함의 향해 수심과 폭발 수심을 변경하여 공진 및 비공진 상태를 고려한 6가지 경우에 대해 계산을 수행하였다. Table 2에 계산이 수행된 6가지 경우의 폭발위치, 수중함 위치 및 KSF(Keel Shock Factor) 그리고 가스구체 맥동 주기 등을 정리하여 나타내었다.

**Table 2. Attack Geometry for Whipping Analysis(TNT 10kg)**

CASE	수중함 향해수심(M)	폭발 수심 (M)	수중함과 폭발 수심 사이거리	KSF	가스구체 주기
CASE 1	58.34	70.34	12 M	0.33	공진(T=0.10 sec)
CASE 2	63.34	70.34	7 M	0.33	공진(T=0.10 sec)
CASE 3	53.34	70.34	17 M	0.33	공진(T=0.10 sec)
CASE 4	40.34	70.34	30 M	0.33	공진(T=0.10 sec)
CASE 5	50.0	62.0	12 M	0.33	비공진(T=0.10 sec)
CASE 6	50.0	57.0	7 M	0.33	비공진(T=0.10 sec)

**3.3 유체 충격력 계산 결과**

가스구체의 거동현상 및 그에 따른 유체 충격력을 살펴보기 위해 Fig. 1에 Case 1의 경우에 대해서 가스구체의 반경변화에 따른 선체 중앙부 위치에서 유체 가속도의 시간 이력을 나타내었다. Fig.1에서 알 수 있듯이 가스구체가 압축과 팽창을 반복하면서 최소 반경지점에서 펄스 형태의 유체 충격력이 주기적으로 발생하는 것을 알 수 있다.

**3.4 선체 휘핑 응답 계산 결과**

각 절점의 유체 충격력을 입력으로 하여 보이론 모델에 의해 NASTRAN의 Transient Response Analysis를 수행하여 선체 각 절점에서의 응답을 계산하고 각 단면의 중립 축에서 가장 먼 지점에서 응력을 구하였다. 이때 Transient Response Analysis 계산시 선체 상하 고유 모드를 5차까지 포함시켰으며 계산시간 간격은 충격력이 충분히 고려될 수 있게 최대한 짧은 간격으로 선정하여 응답이 정상응답 상태를 나타내는 시간까지 계산하였다.

Fig.2에 공진 상태에서 KSF가 0.33인 경우, 즉 수중함 하부 12m에서 폭발이 일어나는 경우인 Case 1에 대해 선미부와 선미에서 선체길이 방향의 1/4지점 그리고 선체 중앙부의 3곳에서 계산된 변위와 응력의 시간이력을 나타내었으며, 선체 길이 방향의 응력 분포를 알아보기 위해 선체중앙부를 포함한 22개 단면위치에서 계산된 최대 응력 값을 Fig.3에 도시하였으며 Table3에 각 폭발조건에서 계산된 최대 응력 값을 정리하였다.

**Table 3 Maximum Stress of Mid Ship Section**

CASE	최대 응력값 (N/m²)	수중함과 폭발 수심 사이거리	KSF	가스구체 주기
CASE 1	3.71 E+08	12 M	0.33	공진(T=0.10 sec)
CASE 2	9.03 E+08	7 M	0.33	공진(T=0.10 sec)
CASE 3	1.62 E+08	17 M	0.33	공진(T=0.10 sec)
CASE 4	0.33 E+08	30 M	0.33	공진(T=0.10 sec)
CASE 5	2.53 E+08	12 M	0.33	비공진(T=0.10 sec)
CASE 6	4.97 E+08	7 M	0.33	비공진(T=0.10 sec)

계산결과를 살펴보면, Fig.2에서 알 수 있듯이 Case1의 경우, 선체 2절 고유 진동수가 가스구체의 맥동주기와 일치하는 공진 상태이므로 계산된 휘핑 거동이 2절 진동모드가 지배적인 양상을 나타내며 모드 형상의 영향으로 변위가 선미부에서 가장 크며 모드의 절점 가까이에 위치한 선체 길이방향 1/4지점에서 가장 적은 것을 알 수 있다.

선체 길이 방향의 응력 분포는 Fig.3에서 나타나듯이 선체 중앙부에서 최대응력이 발생하며 선미부보다 단면 형상이 다소 큰 선 수부에서 약간 높은 응력치를 보이고 있으며, 이것은 폭발이 선체 중앙부 직하 방향( $\theta=90^\circ$ )에서 발생하는 Attack Geometry를 가정했기 때문이며 계산된 전 Case에서 유사한 양상을 보이고 있다.

선체 종강도 평가의 주요대상이 되는 선체 중앙부 최대 응력값을 살펴보면, Table 3에서 알 수 있듯이 공진 상태의 경우로써 선체가 폭발지점과 가장 가까운 Case2의 경우, 최대 응력이  $9.03\text{N/mm}^2$ 로 수중함 압력 선체의 재료의 허용응력  $5.5\text{E}+08\text{ N/m}^2$ 을 초과하여 종강도 상실의 우려가 있으며 선체와 폭발지점의 거리가 멀어지는 다른 경우에 있어서는 허용 응력을 넘지 않고 있다. 물론 절대적인 응력의 크기는 폭발지점과 선체가 가까울수록 즉 KSF가 커질수록 증가된다.

한편 비공진 상태에서는 동일한 KSF(여기서는 폭발양량 및 검사각이 동일함으로 선체와 폭발지점의 거리에 의해 결정됨)를 갖는 조건에서 공진상태에 비해 적은 응력이 발생함을 알 수 있다. 즉 동일한 KSF를 갖는 Case 2와 Case6을 비교하면 공진상태에서 계산된 최대응력이 허용응력치를 초과하는 반면 비공진 상태(Case6)에서는 최대응력값이  $4.97\text{ N/mm}^2$ 로 약 1/2로 감소하여 허용응력을 초과하지 않고 있음을 알 수 있다.

이상의 결과를 볼 때, 동일한 Attack Geometry에 대해서도 가스구체의 주기가 선체고유 진동수와 공진될 때 과도한 휘핑거동에 의해 선체 종강도를 상실할 가능성이 높으며 비공진 상태가 되면 최대 응력이 감소하게 되고 그 감소율은 가스구체의 주기가 선체 고유 진동수에 벗어나는 정도에 의존함을 알 수 있다.

**4. 충격파에 의한 장비 및 지지대의 충격 해석**

본 장에서는 NASTRAN을 이용하여 수중 폭발시 충격파에 의한 탑재장비 및 지지부의 내 충격 설계를 수행하는 것을 목적으로 현재 내 충격 해석에 가장 널리 쓰이고 있는 DDAM(Dynamic Design Analysis Method)의 이론적 배경을 고찰하고 실제 합정에 탑재되는 장비 지지부에 대한 충격해석을 수행하여 그 결과를 평가하였다.

#### 4.1 DDAM 이론적 배경

DDAM(Dynamic Design Analysis Method)은 수중폭발 충격하중에 대하여 함정용 주요 탑재 장비 및 받침대의 내 충격 설계검증을 위한 해석 방법으로서 1960년 미 해군 연구소(NRL : Naval Research Laboratory)에서 제안한 스펙트럴 해석 방법이며 현재에도 가장 많이 사용하고 있다.

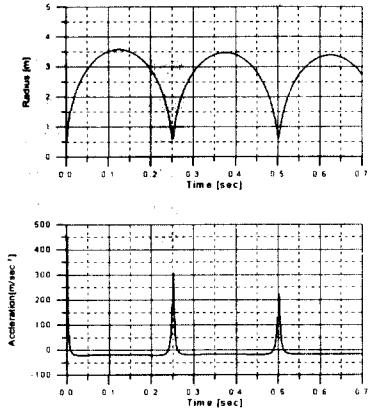


Fig. 1 Time History of bubble radius and fluid acceleration at Mid Ship (Case 1)

Boit가 제안한 스펙트럴 해석법은 각각의 등가 1 자유도 계의 응답 계산에 있어서 주어진 응답 스펙트럼으로부터 등가 1 자유도 계의 고유진동수에 해당하는 값을 읽기만 하면 되기 때문에 convolution 적분이 필요하지 않다. 뿐만 아니라 실제 구조물을 몇 개 모드만의 등가 1 자유도 계로 치환하여 전체응답을 계산하여도 구조적으로 충분히 안전한 결과를 얻을 수 있음을 입증하였다. 장비시스템의 내 충격 설계에 있어서 충격응답 스펙트럼으로부터 읽어와 할 실제 설계기준 충격하중 값은 장비 시스템과 선체를 포함한 전체 시스템의 고유진동수에서 발생하는 peak값이 아니라 장비 시스템의 지지부가 완전 고정되어 있다고 가정하여 계산된 장비시스템만의 fixed-base 고유진동수에서의 값을 사용하여야 하며 그렇지 않을 경우 과도한 설계를 초래 할 수 있다.

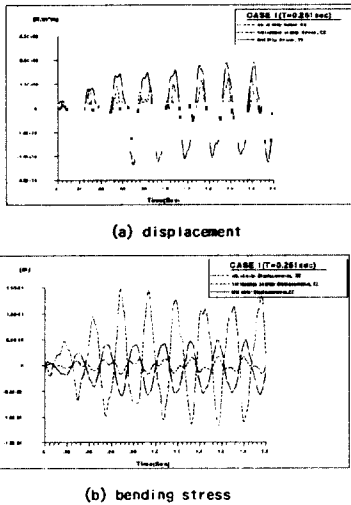


Fig. 2 Time History of Displacement and Bending Stress (Case 1)

선체와 장비 시스템 사이의 상호작용을 무시한 스펙트럴 해석법은 과도한 설계를 초래 할 수 있기 때문에 이러한 상호작용의 영향을 고려할 수 있는 방법으로 모드별 유효질량이라는 개념이 새로이 도입되었다. 모드별 유효질량은 지지부 운동에 대한 장비 시스템의 반작용 크기의 척도로서 동일한 충격하중에 대하여 유효질량이 클수록 즉, 실제 더 무거운 장비 시스템일수록 더 작은 충격 가속도가 장비 시스템에 작용함을 알 수 있다. 이는 직관적으로 동일한 충격하중으로 가벼운 장비보다 무거운 장비를 움직이기가 더 어렵다는 사실을 입증하며 실제 장비 시스템이 받게 되는 충격하중을 정확히 산정하기 위해서는 장비 시스템과 선체의 상호작용을 반드시 고려해야 함을 의미한다.

그러므로 설계가속도는 충격하중에 의한 충격하중 응답 스펙트럼으로부터 fixed base 고유진동수와 모드 유효 질량의 함수로 구해진다.

장비시스템을 유한요소로 나누어서 해석 할 경우 이론적으로는 고유진동 해석에서 구해진 모든 모드를 이용하여 DDAM 해석을 수행해야 실제 구조물의 질량과 모드 유효질량이 일치하게 된다. 그러나 대형 구조물의 경우 모든 모드를 사용하게 되면 엄청난 계산시간과 전산기 용량이 요구되므로 해석시 고려해야 하는 실용적 기준이 필요하게 되었다. 따라서, 모드별 유효 질량의 합이 적어도 전체 질량의 80%이상이 되기만 하면 된다는 기준이 만들어 졌다. 이 기준을 적용할 경우 1000개 이상의 요소를 가지는 대형구조물도 보통 100개 이하의 모드를 사용하여 해석 할 수 있다. 아래 Fig.4에 설계자의 이해를 돕기 위해 DDAM에 의한 충격해석을 수행하는 과정을 나타내었다.

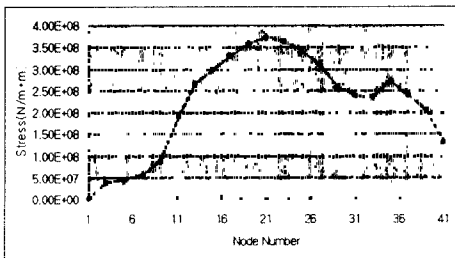


Fig. 3 Longitudinal Stress Distribution (Case 1)

#### 4.2 MSC NASTRAN을 이용한 DDAM 해석법

MSC/NASTRAN의 경우 현재까지 DDAM에 의한 충격응답 해석법이 정규 Solution Sequence로 등록되어 있지는 않으나 사용자 선택사항으로 ddam.v70이라는 DDAM alter가 지원되고 있다. DDAM의 충격해석 과정은 앞서 언급했듯이 고유진동 해석을 수행한 후 그 결과를 바탕으로 이루어진다. 따라서 먼저 해석 대상 구조물을 유한요소로 모델링 한 후 normal mode analysis (Sol

103)를 수행해야 한다. MSC/NASTRAN 충격해석 과정은 다음 3 단계로 이루어져 있으며 Fig. 5에 그 절차를 도시하였다.

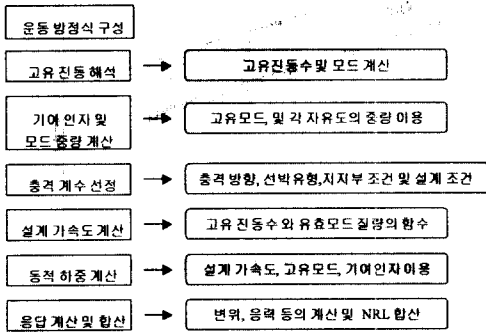


Fig. 4 Shock Analysis Procedure by using DDAM

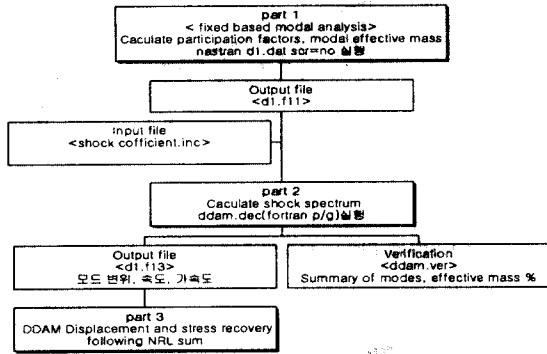


Fig. 5 DDAM Flow Chart of NASTRAN

### Part 1) 고유진동 해석

NASTRAN의 모드해석에 사용하는 SOL 103을 이용하여 Fixed base 상태에서 고유진동 해석을 수행하고 고유진동수와 기여인자를 계산한다.

### Part 2) 모드 변위, 속도 및 가속도 값 계산

고유진동 해석 결과를 입력으로 하여 DDAM FORTRAN 프로그램을 실행하여 설계 가속도를 추정한 후 모드 변위, 속도 가속도의 값을 계산하여 파일에 저장한다. 설계가속도의 값은 Shock coefficient 파일이나 Shock Spectra 파일을 이용하여 계산할 수 있고, 유효 모드 질량이 일정한 값에 도달하면 프로그램은 자동적으로 중단된다.

### Part 3) Data recovery

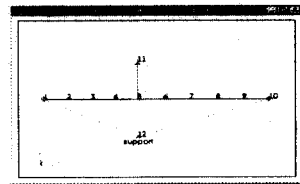
위에서 계산한 결과를 입력으로 하고 NASTRAN의 Restart 기능을 이용하여 각 충격방향에 따른 응력과 변위를 출력한다.

## 4.3 잠재 탑재 장비에 의한 충격 해석 결과

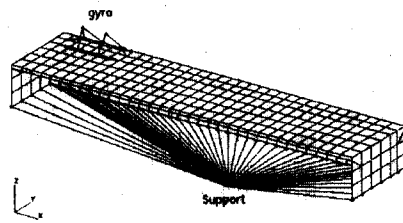
당사 수중함에 실제 탑재되는 장비의 지지대에 대하여 DDAM을 이용하여 모델링한 후 충격해석을 수행하여 각각의 변위 및 응력분포를 계산한 후 비접속 수중 폭발에 의한 구조물의 안정성을 평가하였다. 해석 대상으로 선정된 장비의 지지대는 비교적 간단한 beam 형상의 지지대와 3차원 구조물로 이루어진 두 가지 장비 지지대에 대하여 해석을 수행하였으며 Fig.6에 해석을 위한

모델을 나타내었다.

beam 형상의 지지대인 경우 아래 그림과 같이 z방향의 직선운동과 y방향의 회전운동이 가능한 10개의 절점을 가진 보요소로 모델링 하였다. 장비는 집중질량 요소로 모델링 한 후 연결구조의 강성을 고려하여 지지부의 절점 5번과 스프링요소로 연결하였으며 선체구조와 연결되는 1번과 10번 절점을 Support(12)와 MPC의 RBE2(Rigid Body Element)로 연결하였다. 3차원 지지구조인 경우 foundation의 충격에 대한 안전성을 평가하는 것이 목적이므로 장비는 집중질량으로 단순하게 모델링하여 강체로 (RBE2) Foundation과 연결하였으며 충격이 Deck를 통하여 전달되므로 Deck와 접한 부분을 Support와 RBE2로 연결하였다. 이때 foundation의 plate 뿐만 아니라 stiffener도 shell 요소로 모델링 하였다.



(a) beam Model



(b) 3D Model

Fig 6 F.E. Model for DDAM

Beam 모델에서는 실제중량에 대한 유효 모드 중량의 비가 2개의 모드만 사용하여도 85.3%로 80%이상이므로 처음 2개의 모드를 사용하여 변위와 응력을 계산하였다.

DDAM으로 계산한 결과 최대 응력은  $2.68 \times 10^4 \text{ lb/in}^2$ 로 지지부에서 발생하였다. 이 값은 AH36의 항복 응력인  $5.12 \times 10^4 \text{ lb/in}^2$  ( $36 \text{ kg/mm}^2$ ) 보다 작으므로 이 지지대의 경우 수중폭발에 대해 안전한 것으로 판단된다. 계산된 응력 분포 및 변위를 Fig.7에 나타내었다.

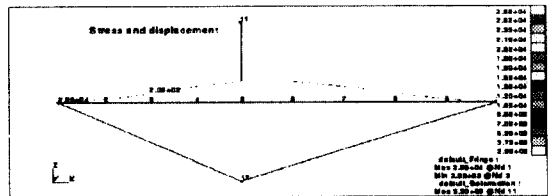


Fig 7 DDAM Result of beam structure

3차원 모델의 경우 3차원 구조물의 수중폭발에 대한 장비 및

받침대의 안전성을 평가하기 하는 기준으로 Von Mises 항복 응력 식을 사용하여 계산된 응력이 재료의 항복 응력보다 큰 경우 손상이 발생한다고 가정하였다.

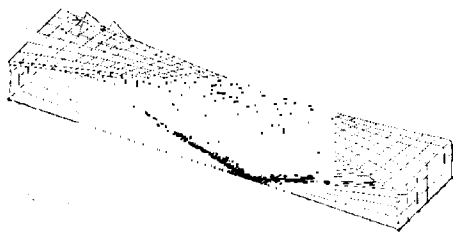
Z방향에 대한 유효 모드중량은 100개의 모드를 사용할 경우 전체질량의 57.8%인 1800 lb의 유효 모드 중량이 DDAM에 의한 충격 해석에 사용되었다. 하지만 지지대가 deck와 연결되는 부위가 fixed 상태이므로 z방향으로 변위가 발생할 수 없음을 고려하면, 유효모드 질량의 합은 전체질량에서 지지부의 질량을 뺀 값에 접근할 것이므로 전체질량 3121.62 lb에서 지지부의 질량 920 lb를 제외한 상부 Plate의 질량은 2200 lb이고 유효모드질량의 합이 1800 lb이므로 상부 plate에 대한 유효모드질량은 81.8%가 되기 때문에 이 충격해석은 유효한 것으로 판단된다. X방향의 유효모드질량은 전체질량의 67%이고 Y방향은 80%를 사용하였다.

충격설계 가속도는 수중함의 Deck 지지로 고려하여 탄성설계 조건에서 산정 하였으며 Table 4에 각 충격방향에서 계산된 DDAM 해석 결과를 주모드의 고유 진동수 및 설계 가속도와 함께 수록하였으며 충격방향중 가장 큰 응력을 주는 상하방향 충격시의 응력 분포도를 Fig. 8에 상하 방향의 주모드와 함께 나타내었다.

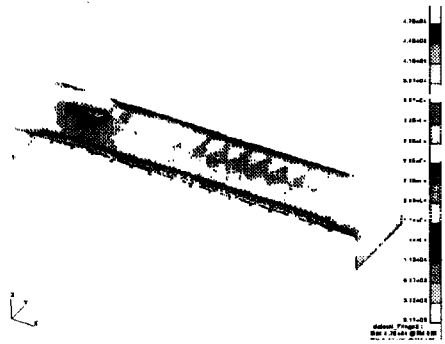
해석 대상 구조물의 경우, 계산된 최대 응력과 변위는 종방향 충격시 가장 낮았으며 상하 방향으로 충격이 가해질 때 가장 크게 나타나고 있다. 이는 Table 4에서 알 수 있듯이 비록 산정된 설계 가속도가 크더라도 전체적인 구조 강성에 지배되는 주요 모드의 영향이 계산 결과에 크게 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. Fig.8의 상하 방향 충격시의 응력 분포를 살펴보면, 최대응력이 발생하는 지점은 상부 plate의 중앙부 끝단에서 발생하고 있으며 이 위치는 Fig.8의 (a)에 나타난 상하 방향 주요 모드에서 최대 변위가 발생하는 위치와 일치하고 있음을 알 수 있다. 하지만 구조 안정성 관점에서 상하 방향 충격시 최대응력치가  $4.78E4 \text{ lb/in}^2$ 으로 대상 구조물의 항복 응력보다 작으므로 모든 방향의 충격에 대해 안전한 것으로 판단된다.

Table 4 DDAM Analysis Result of 3D Model

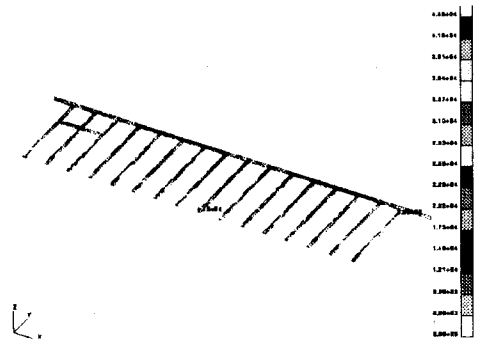
충격 방향	주요 모드	고유 진동수	설계 가속도	최대 응력 ( $\text{lb/in}^2$ )	최대 변위
X(종 방향)	92	255.0 Hz	185.4 g	1.10	0.14 in
Y(횡 방향)	8	50.7 Hz	181.3 g	4.44	0.63 in
Z(상하 방향)	1	4.1 Hz	38.3 g	4.78	10.8 in



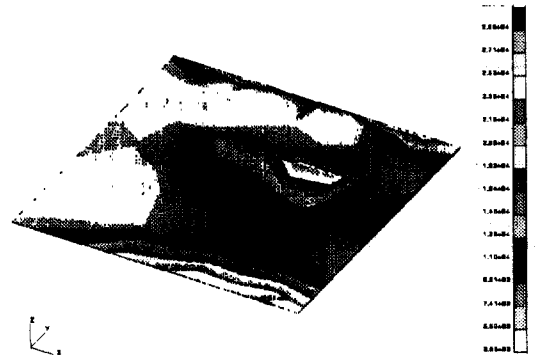
(a) Vertical Principle Mode



(b) Stress Distribution of entire structure



(c) Stress Distribution of Stiffener



(d) Stress Distribution of plate below equipment

Fig. 8 Principle Mode and Stress Distribution of 3D Model

## 5. 결론

- 선체를 가변 단면 보로 이상화하여 수중폭발시 발생하는 가스구체의 유체 충격력에 의해 선체에 발생하는 휘핑응답을 계산할 수 있는 기법을 개발하였으며, 이를 바탕으로 함정 초기 설계 단계에서 휘핑에 의한 선체 증강도 검토를 가능하게 하였다.

- 가스구체의 유체 충격력을 계산하기 위해 이상유체의 포텐셜 이론에 기초한 프로그램을 개발하였으며, 선체 고유치 해석 및 휘핑 응답 계산은 NASTRAN을 이용하여 계산하였으며 실선을 대상으로 폭발 수심 및 수중함 혼합 수심을 변경하여 공진 및 비공진 상태의 6가지 폭발 경우에 대해 휘핑 응답 계산을 수행하였다.
- 계산 결과 가스구체 맥동주기와 선체 2절 고유진동수가 일치하는 공진상태의 경우 폭발지점과 선체와의 거리가 근접하게 되면(약 10M내) 과도한 휘핑거동에 의해 종강도를 상실할 가능성이 있으며, 비공진 상태에서는 동일한 폭발조건이라 하더라도 최대 응력이 감소함을 알 수 있고 그 감소율은 가스구체의 주기와 선체 고유 진동수의 차이에 의존하게 된다.
- 뿐만 아니라, 수중 폭발시 충격파에 의한 함정 탑재 장비 및 지지대의 구조 안정도 평가를 위해 NASTRAN의 DDAM(Dynamic Design Analysis Method)을 이용한 충격 해석을 수행하였다.
- 정도 높은 충격해석을 수행하기 위해 DDAM의 이론적 배경 및 해석과정 등을 상세히 검토하였으며 실선에 탑재되는 장비 지지대를 대상으로 충격해석을 수행하여 안정성 여부를 평가하였다.
- 본 연구에서 정립된 방법들을 이용하면 함정이 전투중 받게되는 수중폭발로 인해 선체가 받게되는 휘핑 거동에 의한 선체 종강도 및 직접 충격파에 의한 탑재 장비 및 지지대의 구조 안정성 평가를 정도 높게 수행 할 수 있을 것으로 판단되며, 함정 설계시 보다 신뢰성 있는 내 충격 설계가 이루어 질 것으로 기대된다.
- 보다 신뢰성 있는 함정의 내충격 설계를 위하여 수중 폭발시의 유체-구조 연성거동 해석이 가능한 3차원 충격해석 모델에 의한 충격 응답 해석이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

## 참고문헌

- [1] 박병욱, 조윤식, "수중폭발 가스구체에 의한 선체거동의 Trade-Off Study", 대한조선학회 춘계 발표 논문집 pp453 - 456, 1997
- [2] 정정훈, 허영철, 김병현, "수중폭발 휘핑 응답 해석을 통한 선체 거더 종강도 평가", 대한조선학회, 춘계 발표 논문집 pp429 - 433, 1997
- [3] Toshimasa Saitoh 의 "Gas bubble-induced ship hull whipping", 관서조선학회지 pp105-112, 1995
- [4] A N Hicks, "Explosion induced Hull Whipping", Advances in Marine Structures, Elsevier Science Publishers, 1986
- [5] Barton McPheeters "A DDAM Processor for MSC/NASTRAN including an MSC/PATRAN Interface", 26 February 1998.
- [6] 정정훈, 김병현, "DDAM에 의한 함정용 탑재장비 내 충격 해석의 이론적 배경에 대한 검토", Proceedings of the Annual Spring Meeting, SNAK, Ulsan, 23-24, April, 1998, pp 401~405
- [7] 이수목, 김희원, 정균양, "동적 설계 해석법(DDAM)을 이용한 선박 주기관 지지 구조의 충격해석", Proceedings of the Annual Spring Meeting, SNAK, Ulsan, 23-24, April, 1998, pp 351~354
- [8] P.F.Cummiff, "A Procedure for Generation Shock Design