

공기 중 폭발에 의한 함정의 손상반경 간이 계산식 개발

최완수¹·유원선^{1,†}·이현엽¹·신윤호²·정정훈³·김의영³
충남대학교 선박해양공학과¹
충북대학교 안전공학과²
한국기계연구원 시스템다이나믹스연구실³

Development of a Simplified Formula for the Damage Radius of a Naval Ship due to an AIR EXplosion (AIREX)

Wan-Soo Choi¹·Won-Sun Ruy^{1,†}·Hyun Yup Lee¹·Yun-Ho Shin²·Jung-Hoon Chung³·Euiyoung Kim³
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chungnam National University¹
Department of Safety Engineering, Chungbuk National University²
Mechanical Systems Safety Research Division, Korea Institute of Machinery and Materials³

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

To decide a separation distance of the redundant vital equipment in a naval ship, the damage radius due to an aerial explosion should be estimated. In this research, a simplified formula for the damage radius has been developed by using existing empirical formulae for reflected shock pressure and shock lethality value of equipment. As a numerical example, the damage radius for a typical pump aboard a naval ship has been calculated by the developed formula and compared with the results calculated by Measure of Total Integrated Ship Survivability (MOTISS) which is one of survivability analysis codes verified, validated and accredited by the US Navy. Also, comparison with the results calculated by existing other simplified formulae has been made.

Keywords : Redundancy and separation(이중화 및 이격), Damage radius(손상반경), Incident overpressure(입사압력), Reflected overpressure(반사압력), Shock lethality value(충격 임계치), Simplified formula(간이식), AIR EXplosion(AIREX, 공기 중 폭발), Shock wave(충격파)

1. 서 론

함정 설계에 있어서 생존성 해석 및 평가는 매우 중요한 고려 사항으로서 선진 해군에서는 설계 전(全) 과정에 이를 고려하여 설계 및 관리하고 있으며 (U.S. Naval Sea Systems Command (NAVSEA), 2012), 국내에서는 천안함 피격 사건 이후 더욱 관심이 높아지고 있다.

함정의 생존성을 향상하는 방법은 주로 피격성과 취약성을 낮추고 회복성을 높이는 향상 방안을 적용하는 것이며, 비용 및 적용 가능성을 고려한 최적화가 함 설계 전 과정에 걸쳐서 수행된다. 대한민국 해군은 2000년대 초반 이지스급 구축함인 세종대왕함

부터 본격적으로 함정 설계 및 건조에 생존성 향상 설계 개념이 도입되었으며, 2009년 통영함부터 한국기계연구원에서는 미 해군이 검증, 확인 및 인정(verification, validation and accreditation)한 생존성 해석 코드인 MOTISS (Alion Science and Technology, 2017 cited in Brett et al., 2017)를 도입, 활용하여 조선소의 생존성 향상 설계를 지원하고 있다.

2004년부터 2014년까지 수행된 함정 10척에 대한 생존성 향상 설계를 검토한 결과, 생존성 향상 방안으로서 가장 빈번하게 제안된 것이 “주요 장비에 대한 이중화(Redundancy) 및 이격(Separation)”이었다 (Alion Science and Technology, 2014).

주요 장비의 이중화와 함께 고려해야 하는 이격 배치 설계는

함의 주요 제원 및 생존성 요구 수준 등과 밀접한 관련이 있으므로, 요구작전성능(required operational capabilities) 결정에서부터 이에 대한 검토 결과를 반영하는 것이 바람직하다. 이를 위해서는 이중화 장비에 요구되는 이격거리를 계산 할 수 있는 간이식을 이용하여야 한다.

함정 취약성 해석은 위협 무기의 폭발 효과를 고려한 상세해석에 의한 방법과 폭약 중량에 따른 손상범위에 대한 경험적 또는 실험적 자료를 활용하는 간이해석 방법이 있다. Kwon et al. (2009)은 MOTISS를 이용한 취약성 해석 방법에 대한 연구를 수행하였고, Kim (2011)은 탄환 및 파편에 의한 소형 함정의 구조 손상에 대한 연구를 수행하였다. Kong et al. (2011)은 단순화된 추진 체계 관련 장비와 체계 구성 장비 간 연결성 손상에 중점을 두어 이를 평가하기 위한 코드를 개발하였으며, Shin et al. (2013)은 확률 통계에 기초한 위협 시나리오의 생성에서부터 격실/장비 배치와 임무 수행 가능 여부 평가에 중점을 둔 간이 취약성 해석 프로그램을 개발하였다. 상기 연구들은 주로 경험식으로 계산되는 손상 체적에 기반한 취약성 해석 방법에 초점을 맞추고 있어서 장비의 실제 형상, 폭발에 의한 실제 충격압력 등을 고려하지 못하였다.

본 연구에서는 위협 무기의 등가 TNT(Trinitrotoluene) 중량과 대상 장비에 대해 설계 초기 단계에 확보 가능한 소수의 자료를 이용하여 이중화 대상 주요 장비에 대한 최소 이격거리를 계산하기 위한 간이식을 개발하고자 한다.

2장에서는 위협 무기의 폭발에 의한 충격압력과 대상 장비의 질량과 면적 및 충격 임계치를 이용하여 손상반경을 계산하기 위한 간이식의 개발 과정을 상술하였다. 3장에서는 함정에 탑재되는 전형적인 펌프에 대해, 본 연구에서 개발된 간이식으로 계산된 손상반경을 MOTISS에 의한 해석 결과 및 기존에 개발된 간이식들에 의한 결과와 비교·검토하였다. 또한 모든 계산 결과가 Gates curve (Gates, 1987)의 범위 내에 들어오기를 검토하였다.

2. 압력기반 간이 계산식 개발

2.1 장비가 받는 최대 충격력

공기 중 폭발에 의한 손상 양상은 크게 압력, 파편, 화재에 의한 손상으로 구분할 수 있다. 여기서 파편에 의한 장비 손상은 장비 전면적에 가해지는 압력과는 달리 장비 손상 위치가 무작위로 생성되어 그 손상 여부를 예측하기 어려우며, 격벽이 존재할 경우 그 손상 확률이 무시할 정도로 낮아진다. 또한, 화재에 의한 손상은 장비가 설치되는 격실과 그 주변 공간에 대한 세부적인 설계가 진행되기 전에는 정확한 화재의 전파 양상과 그에 따른 장비 설치 공간의 온도를 예측하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 손상 양상을 압력에 의한 손상으로 고려하였으며, 설계 단계 초기에 이중화 주요 장비 이격 배치 설계를 위한 손상반경 산정에 적용하였다.

폭발 시 장비가 입사 충격파에 의해 받는 최대 압력을 최대 반사압력(P_R)이라 하는데, 이는 충격파의 최대 입사압력(P_S)으로부터 계산된다 (U.S. Department of the Army(DOA), the Navy, and the Air Force, 1990).

Sajdak et al. (2007)은 충격파의 무차원 최대 입사압력(P_{Snd})을 Baker (1983)와 U.S. DOA (1990)의 실험 자료 및 DTNSRDC 방법의 자료 (Hill, 1987 cited in Sajdak et al., 2007)를 커브 피팅하여 아래의 식 (1)과 식 (2)와 같은 근사식으로 도출하였다. 식 (1)은 자유-공기 폭발(free-air burst, 경계면의 영향을 무시할 수 있는 상황에서의 폭발)에 대한 근사식이고, 식 (2)는 표면 폭발(surface burst, 지표면과 같은 경계면 또는 근방에서 폭발)하는 경우에 대한 근사식이다.

$$P_{Snd} = 0.55 \times Z^{-1.95}, \text{ for free-air burst} \quad (1)$$

$$P_{Snd} = 1.173 \times Z^{-2.2601}, \text{ for surface burst} \quad (2)$$

이 식들에서는 식 (3)과 같은 Sachs (1944)의 무차원 거리(Z)를 사용하였다.

$$Z = r \left(\frac{P_0}{E_w W} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

여기서, $P_{Snd} : P_S/P_0$, 주변 압력(P_0)으로 무차원화된 최대 입사 압력

r : 폭발 중심에서 대상 장비까지 거리(m)

W : 폭약의 등가 TNT 중량(kg)

E_w : TNT의 단위 질량 당 폭발 에너지(m^2/s^2)

P_0 : 주변 압력(pa)를 나타내었다.

장비가 받는 무차원 최대 반사압력(P_{Rnd})은 Doering and Burkhardt (1949)의 결과에 따라 다음과 같이 주어진다.

$$P_{Rnd} = 2P_{Snd} + \frac{(\gamma + 1)P_{Snd}^2}{(\gamma - 1)P_{Snd} + 2\gamma} \quad (4)$$

여기서, $P_{Rnd} : P_R/P_0$, 주변 압력으로 무차원화된 최대 반사압력

γ : 가스의 비열비, 공기의 경우 1.4이다.

장비가 받는 최대 충격력(F_R)은 최대 반사압력에 장비의 면적(A_E)을 곱하여 구한다. 본 연구에서는, 면적은 세 방향 투영 면적의 평균값을 적용한다.

$$F_R = P_R \times A_E \quad (5)$$

2.2 장비의 손상 판단 기준

식 (5)의 최대 충격력을 장비의 충격력 허용치(F_L)와 비교하여

손상 여부를 판단한다. 본 연구에서는 참고문헌 (Alion Science and Technology, 2008)에서 제안하고 있는 식 (6)으로 주어지는 충격력 허용치를 사용하였다.

$$F_L = S_L \times (M_E \times g) \quad (6)$$

여기서, M_E : 장비의 질량
 g : 중력가속도
 S_L : 충격 임계치이다.

참고문헌 (Alion Science and Technology, 2008)에서는 미해군의 함정용 탑재장비의 충격시험사양에서 규정하는 경중량 (Light weight) 충격시험과 중간중량 (Medium weight) 충격시험을 통해 시험 대상 장비들에서 계측된 충격가속도 자료들을 커브 피팅하여 S_L 를 다음과 같이 제시하고 있다.

$$S_L = \text{Min} \left\{ 250, \text{Max} \left(125, \frac{72167.454}{(210.444 + M_E)} \right) \right\} \quad (7)$$

2.3 손상반경 계산

손상반경을 구하기 위하여, 장비가 허용할 수 있는 무차원 최대 반사압력 허용치(P_{RndL})는 식 (5)와 식 (6)으로부터 식 (8)과 같이 유도할 수 있다. 여기서, P_{RndL} 은 P_0 으로 무차원화된 최대 반사압력 허용치이다.

$$P_{RndL} = \frac{S_L M_E g}{A_E P_0} \quad (8)$$

식 (4)는 P_{SndL} 에 대한 2차 방정식으로 표현할 수 있다. 여기서, 공기의 비열비를 적용하고, 무차원 최대 반사압력으로 장비가 허용할 수 있는 P_{RndL} 를 적용하면 식 (9)와 같이 정리되며, 이 식의 양의 근이 P_{SndL} 이다.

$$3.2P_{SndL}^2 + (5.6 - 0.4P_{RndL})P_{SndL} - 2.8P_{RndL} = 0 \quad (9)$$

경계면의 영향을 무시할 수 있는 상황에서의 폭발에 대한 손상반경(R)은 식 (1)과 식 (3)을 이용하여 식 (10)과 같이 구할 수 있다.

$$R = \left(\frac{0.55}{P_{SndL}} \right)^{\frac{1}{1.95}} \left(\frac{E_W W}{P_0} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (10)$$

식 (10)에 주변 압력으로 대기압을 적용하고 TNT 단위 질량당 폭발 에너지 값(E_W) 4.516 MJ/kg을 적용하면 R 은 식 (11)이 된다.

$$R = C \times W^{\frac{1}{3}} \quad (11)$$

여기서, C 는 폭발 손상반경 상수로서 식 (12)와 같다.

$$C = 2.609(P_{SndL})^{-\frac{1}{1.95}} \quad (12)$$

이차방정식 식 (9)의 해를 지수 함수 형태로 최소자승법 (least square method)으로 커브 피팅한 식 (13)을 이용하면, 식 (11)은 식 (14)로 유도되며, 본 연구에서는 이를 ‘자유-공기 폭발 압력 기반 간이 계산식’이라 명명한다.

$$P_{SndL} = 0.4669(P_{RndL})^{0.762} \quad (13)$$

$$R = 142.8 \times \left(\frac{S_L M_E}{A_E} \right)^{-0.391} \times W^{1/3} \quad (14)$$

한편, 지표면과 같은 경계면 또는 근방에서의 폭발에 대한 R 도 식 (2)와 식 (3)을 이용하여 식 (10)에서부터 식 (13)까지와 같은 방법으로 구하면 식 (15)와 같다. 본 연구에서는 이를 ‘표면 폭발 압력기반 간이 계산식’이라 명명한다.

$$R = 120.2 \times \left(\frac{S_L M_E}{A_E} \right)^{-0.337} \times W^{1/3} \quad (15)$$

3. 압력기반 간이 계산식의 검증

2장에서 개발한 압력기반 간이 계산식, 식 (14)와 식 (15)의 유용성을 검증하기 위하여, Fig. 1과 같은 함정에 탑재되는 전형적인 펌프에 대해 손상반경을 여러 가지 방법으로 계산한 결과를 비교·검토하였다. 다음의 각 절에서 압력기반 간이 계산식, MOTISS 해석, NATO 간이식 (NATO Naval Group 6, 2004), Sajdak 간이식 (Sajdak, 2012), Gates curve (Gates, 1987)에 의한 계산 방법을 설명하였다. 모든 계산 결과는 3.6절에서 종합하여 비교·검토하였다.

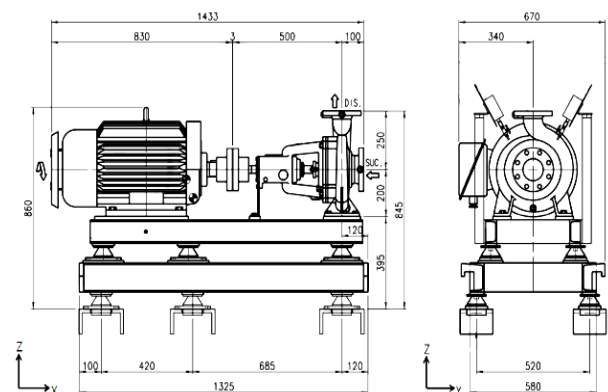


Fig. 1 Schematic diagram of the pump aboard a naval ship

3.1 압력기반 간이 계산식에 의한 계산

해석 대상 장비에 대해 ‘자유-공기 폭발 압력기반 간이 계

산식' 및 '표면 폭발 압력기반 간이 계산식'으로 손상반경을 계산하기 위한 입력 값을 Table 1에 정리하였다. 등가 TNT 중량은 현재 일반적으로 알려진 대함미사일의 폭발력을 고려하여 10~70kg으로 선정하였다. S_L 는 식 (7)로 부터 계산된 값이다.

Table 1 Input values for the pressure based simplified formula

Item		Value
Equivalent TNT weight, W (kg)		10, 30, 50, 70
Pump	M_E (kg)	660
	A_E (m ²)	0.737
S_L (g)		125

3.2 MOTISS 해석에 의한 계산

본 연구에서는 MOTISS 해석을 위하여 해석 대상 장비를 길이 (23m) x 폭(21m) x 깊이(18.6m)의 격실(compartment)에 Fig. 2와 같이 배치하여 모델링하였다. 해석 대상 장비에 대한 MOTISS 입력 자료는 Table 2에 정리하였다. 여기서 해석 대상 장비의 길이, 폭, 높이는 방향별 투영 면적이 일치하는 직육면체로 모델링한 결과이다.

Table 2 MOTISS vulnerability analysis model for the pump

Item	Value
L × B × H (m)	1.400 × 0.586 × 0.700
M_E (kg)	660

Fig. 2와 같이 폭발 위치는 격실 중앙에 고정하고, 장비의 위치를 X, Y, Z 방향으로 이동하면서 어느 거리까지 펌프가 손상되는가를 해석하여 손상반경을 산출하였다.

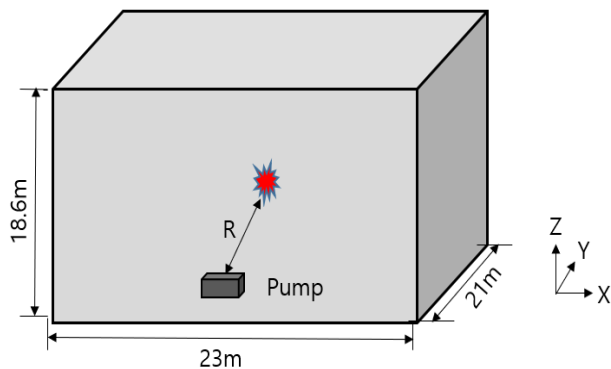


Fig. 2 Schematic diagram for MOTISS analysis model

MOTISS 해석에서는 사용자가 폭발 유형(자유-공기 폭발, 표면 폭발)을 결정하게 되어 있다. 본 연구에서는 폭발 유형에 따른 해석 결과의 차이도 검토하기 위하여 두 가지 모드에 대한 MOTISS 해석을 수행하였다. 방향별 손상반경을 Table 3에 정리하였으며, Table 5에는 평균값만 정리하였다.

Table 3 Damage radius by MOTISS (m)

W (kg)	Direction	Free-air burst		Surface burst	
		R	Mean	R	Mean
10	X	3.30	3.39	4.92	5.14
	Y	3.48		5.32	
	Z	3.39		5.17	
30	X	4.45	4.69	6.78	7.21
	Y	4.89		7.54	
	Z	4.74		7.31	
50	X	5.15	5.48	7.91	8.47
	Y	5.74		8.89	
	Z	5.55		8.6	
70	X	5.68	6.08	8.77	9.41
	Y	6.39		9.91	
	Z	6.17		9.55	

3.3 NATO 간이식에 의한 계산

NATO (NATO Naval Group 6, 2004)에서는 특정한 구조물이나 장비의 폭약에 의한 손상범위를 산정하는 간이식을 개발하였으며, 식 (16)과 같이 손상반경을 폭약 중량만의 함수로 나타내고 장비의 종류와 차폐물 유무의 영향은 계수에서 반영되도록 하였다.

$$R = C \times W^{1/3} \quad (16)$$

여기서, R : 폭발 중심에서 손상 위치까지의 거리(m)

W : 폭약의 등가 TNT 중량(kg)

C : 폭발 반경 손상 상수로서, 대상과 차폐물 유무에 따른 값은 Table 4와 같다.

Table 4 Blast damage radii constants (NATO Naval Group 6, 2004)

Target	C
5 mm bulkhead(BHD)	1.9
2 x 5 mm double BHD	1.2
Light machinery	2.2
Light machinery behind BHD/DK	1.1
Electrical/electronic components	2.8
Electrical/electronic components behind BHD/DK	1.4
4 mm deck(DK)	2.5
2 decks 4 mm each	1.25
Double bottom	1.5

3.4 Sajdak 간이식에 의한 계산

Sajdak (2012)에 의하면, 손상 체적은 폭약의 등가 TNT 중량에 의해 결정되지만, 손상범위의 형상은 폭약의 종류에 따라 타

원체(Ellipsoid) 또는 구(Sphere)로 되며 경험적으로 결정되는 반경비를 사용하여야 한다. 손상 체적의 형상이 구인 경우, 식 (17)과 같이 손상반경은 폭약 중량만의 함수로 표현된다.

$$R = 1.4343 \times W^{1/3} \quad (17)$$

여기서, R : 폭발 중심에서 손상 위치까지의 거리(m)
 W : 폭약의 등가 TNT 중량(kg)을 나타낸다.

3.5 Gates curve에 의한 계산

손상범위를 추정하기 위한 경험 자료로는 2차 세계대전 시 내부 폭발(internal explosions)에 의한 함정의 손상 상황에 대한 방대한 자료를 정리하여 폭약 중량에 따른 손상 체적의 상한과 하한을 도표로 나타낸 Gates curve (Gates, 1987)가 가장 신뢰성 있게 활용되고 있다. Fig. 3의 Gates curve에 의한 체적으로부터 손상 체적의 형상을 구로 가정하면 식 (18)을 이용하여 손상반경을 구할 수 있으며, 상한 및 하한 곡선을 이용한 손상반경 계산 결과를 Table 5에 정리하였다.

$$R = \left(\frac{3V}{4\pi} \right)^{1/3} \quad (18)$$

여기서, R : 폭발 중심에서 손상 위치까지의 거리(m)
 V : 손상 체적(m^3)을 나타낸다.

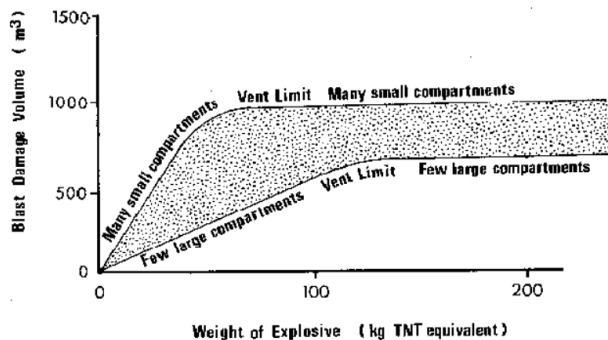


Fig. 3 Blast damage volume curves with explosive weight (Gates, 1987)

3.6 고찰

3.1절에서부터 3.5절까지 기술한 손상반경 계산 결과를 등가 TNT 중량 별로 Table 5에 정리하여 비교·검토하였다. MOTISS 해석에 의한 결과는 Table 3의 방향별 손상반경의 평균값으로 다른 결과들과 비교하였다.

Table 5에서 보면, Gates curve에 의한 손상반경은 하한과 상한의 차이가 크므로 설계에 적용하기에는 어려움이 있어 보인다. 그러나 Gates curve는 2차 세계 대전 시 내부 폭발에 의한 함정의 손상 상황에 대한 방대한 자료를 정리한 결과로 가장 신뢰성 있는 자료이다. Table 5의 손상반경 계산 결과 중 '자유·공기 폭

발 압력기반 간이 계산식', NATO 간이식 및 Sajdk 간이식에 의한 모든 결과는 Gates curve에 의한 손상반경 범위 내에 있음을 확인할 수 있다. 그러나 표면 폭발에 대해 MOTISS 해석결과와 압력기반 간이 계산식에 의한 손상반경 계산 결과는 서로 잘 일치하지만, Gates curve에 의한 손상반경 범위를 과도하게 벗어나므로 함정 내부폭발에 적용하기에는 적합하지 않은 것으로 판단된다.

Table 5 Damage radius by the developed formula, MOTISS, and other formulae

W (kg)	Analysis method	Damage radius		Difference*
		Free-air	Surface	
10	MOTISS	3.39m	5.14m	-
	Developed formula	3.26m	5.15m	- 3.8%
	Sajdak formula	3.09m		- 6.1%
	NATO formula	2.37m		- 28 %
	Gates curve	2.33m ~ 3.52m		
30	MOTISS	4.69m	7.21m	-
	Developed formula	4.71m	7.43m	+ 0.4%
	Sajdak formula	4.46m		- 4.9%
	NATO formula	3.42m		- 27 %
	Gates curve	3.36m ~ 5.08m		
50	MOTISS	5.48m	8.47m	-
	Developed formula	5.58m	8.81m	+ 1.8%
	Sajdak formula	5.28m		- 3.6%
	NATO formula	4.05m		- 26%
	Gates curve	3.99m ~ 6.02m		
70	MOTISS	6.08m	9.41m	-
	Developed formula	6.24m	9.87m	+ 2.6%
	Sajdak formula	5.91m		- 2.8%
	NATO formula	4.53m		- 26%
	Gates curve	4.46m ~ 6.73m		

*) Difference compared to the MOTISS free-air result

본 연구에서 개발된 '자유·공기 폭발 압력기반 간이 계산식'에 의한 손상반경이 기존의 간이식들에 의한 결과보다 MOTISS 결과와 가장 잘 부합함을 알 수 있다. 이것은 압력기반 간이 계산식이 MOTISS와 같이 위험 무기 폭발에 의한 충격압력과 장비의 질량면적비(M/A)를 반영하는데 반해, 다른 간이식들은 이를 반영하지 않는 단순한 식을 사용하기 때문이다. 따라서 장비의 질량면적비가 달라지면 다른 간이식들은 MOTISS와의 차이가 더욱 커질 수도 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 폭약의 등가 TNT 중량에 따른 손상반경을 위험 무기의 폭발에 의한 충격압력과 대상 장비의 질량과 면적 및 충격 임계치를 이용하여 계산하는 압력기반 간이 계산식을 개발하였다. 본 간이식에 의한 계산 결과가 기존에 개발된 간이식들에 의한 계

산 결과보다 MOTISS 해석결과와 잘 일치함을 확인하였다.

현재 한국해군 함정의 생존성 향상 설계를 MOTISS를 이용하여 수행하는 것을 고려하면, 개발된 간이 계산식은 설계 단계 초기에서부터 이중화 주요 장비에 대한 최소 이격거리를 계산하는데 효과적으로 사용될 수 있다. 본 연구에서 개발된 압력기반 간이 계산식이 다른 간이식들에 비해 대상 장비의 질량과 면적 자료가 필요하다는 다소 불편함은 있으나, 설계 단계 초기부터 이중화 주요 장비 이격 배치 설계를 매우 정확하게 수행할 수 있으리라 판단된다.

후 기

본 연구는 2020년 산업기술평가관리원(KEIT) 조선해양핵심기술개발사업 “조선해양 배관철의장 블록물류 혁신을 위한 스마트 생산협업시스템 개발” 과제(20002772)의 지원을 받아 수행하였습니다.

References

- Alion Science and Technology, 2008. *MOTISS Beta Version 2.1 User Manual*, Alion Science and Technology Corporation, 4300 King Street, Suite 101, Alexandria, VA 22302. USA.
- Alion Science and Technology, 2014. *Survivability lessons learned report*, Alion Science and Technology Corporation, 4300 King Street, Suite 101, Alexandria, VA 22302. USA.
- Baker, W. E., 1983. *Explosions in Air*, Wilfred Baker Engineering, San Antonio.
- Brett, J. et al., 2017. Integrated survivability analysis of naval platforms in high threat environments, *Pacific International Maritime Conference*, Sydney, Australia, 3–5 October 2017.
- Doering, W. & G. Burkhardt, 1949. *Contributions to the theory of detonations*, TR No. F-TS-1227-1A, Wright-Patterson AFB, Ohio.
- Gates, P.J., 1987. *Surface Warships: An introduction to design principles*, London: Brassey's Defence, 1987. Print.
- Hill, B., 1987. *Program to calculate free-field explosion parameters version 2.2*, DTNSRDC Code 1750.2, 28 August 1987.
- Kim, K.S., 2011. A study on the procedure to assess the vulnerability of warship. *Master degree thesis*. Incheon: Inha University.
- Kong, Y.K., Lee, H.Y., Chung, J.H. & Choi, W.S., 2011. Study on the vulnerability analysis method of naval vessel at concept design stage. *Proceedings of Annual Autumn Meeting Society of Naval Architects of Korea*, Mokpo, 4 November 2011, pp.777–782.
- Kwon, J.I., Chung, J.H. & Kim, B.H., 2009. Study on the simplified vulnerability analysis and its application at concept design stage, *Joint Conference of the Korean Association of Ocean Science*

- and Technology Societies*. May 2009.
- NATO Naval Group 6, 2004. Specialist Team on Small Ship Design, *NATO/PIP Working Paper on Small Ship Design*.
- Sachs, R.G., 1944. *The dependence of blast on ambient pressure and temperature*, BRL Report No. 466 Aberdeen Proving Ground, Md.
- Sajdak, J.W., P.F. Morrissequ, G.F. Raisig, S.E. Juckett, and D.P. Eling, 2007. *MOTISS Beta Version 2.0 User Theory Manual*, Alion Science and Technology Corporation, 4300 King Street, Suite 101, Alexandria, VA 22302. USA.
- Sajdak, J.W., 2012. Early considerations of survivability in the design of naval combatants—concepts of redundancy, separation and enclaving, *Naval Ship Technology Seminar*, Changwon, Republic of Korea, 15–16 November 2012.
- Shin, Y.H., Kwon, J.I. & Chung, J.H., 2013. Development of a simplified vulnerability analysis program for naval vessel. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*. 50(6), pp.383–389.
- U.S. Departments of the Army(DOA), the Navy, and Air Force, 1990. *Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions*, Headquarters, Departments of the Army, the Navy, and the Air Force, Washington, DC.
- U.S. Naval Sea Systems Command (NAVSEA), 2012. *Ship Design Manager (SDM) and Systems Integration Manager (SIM) Manual*, NAVSEA S9800-AC-MAN-010.



최 완 수



유 원 선



이 현 엽



신 윤 호



정 정 훈



김 의 영