

# 함정용 고장력 판재의 방호한계속도 추정을 위한 간이 실험식

문석준<sup>1,†</sup>·김원<sup>1</sup>·송진섭<sup>1</sup>·최종민<sup>2</sup>  
한국기계연구원 시스템다이나믹스연구실<sup>1</sup>  
대우조선해양 중앙연구원 특수성능연구소<sup>2</sup>

## Simplified Formula for Predicting the Ballistic Limit Velocity of High Strength Shipbuilding Steel Plates Based on Experimental Data

Seok-Jun Moon<sup>1,†</sup>·Won Kim<sup>1</sup>·Jinseop Song<sup>1</sup>·Jong-Min Choi<sup>2</sup>  
Dept. of System Dynamics Research, Korea Institute of Machinery and Materials<sup>1</sup>  
R&D Institute, Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co., Ltd.<sup>2</sup>

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.

Naval ships are designed to have a variety of active and passive systems to defend against enemy threats. One of the passive defense systems is to protect crew members and core equipment against the threat by using the outer plate of the equipment. This study was intended to deal with design methods against small arms ammunition and fragments. The Korea Institute of Machinery and Materials has measured the ballistic limit velocity of two types of high-tensile plate materials (AH36 and EH36) widely used in ships and offshore structures through tests in cooperation with various related organizations, and the result data is continuously accumulated. Based on the accumulated test results and data, such as mil test certificates of plate materials, it is intended to estimate the protection limit speed of high-tensile plates and to develop a simple calculating formula that can be used in the early design stage.

**Keywords** : Ballistic limit velocity(방호한계속도), High strength shipbuilding steel(고장력 강재), MIL-STD-662F(미군표준)

## 1. 서론

전투차량, 항공기, 함정 등은 적의 위협으로부터 방어하기 위해 다양한 능동형 및 수동형 체계를 보유하도록 설계되어 있다. 수동형 방어체계 중에 하나는 장비의 외부판을 활용하여 전투요원 및 장비를 보호하는 것이다. 함정의 경우에도 동일한 개념에서 적성국의 화기 위협에 대해 승조원 및 핵심장비 방어를 위한 함정 설계를 수행하고 있다. 본 연구에서는 적성화기로서 소화기(small arms) 탄과 파편에 대한 설계방안을 다루고자 하였다.

최근의 국내·외 연구들을 살펴보면, 대부분 시험보다는 M&S를 활용한 수치해석적인 방법들에 대한 연구와 관통해석에 대한 연구들이 다수 수행되었다(Cheon and Choi, 2020). 이런 해석적인 접근을 위해서는 위협탄의 관통력, 후면변형 및 목표물의 물성치 등에 대한 정확한 정보가 필요하다. 호주의 한 연구

팀에서는 CONWEP S/W를 활용하여 강재 및 콘크리트 부재에 발사체 및 파편 방어를 위한 설계방안에 대한 논문을 발표한 바 있다(McKenzie et al., 2018). 대한민국 육군사관학교에는 미국 법무성의 NIJ Standard (Department of Justice, 2008)에 명시된 위협탄 7.62 mm MSC(Mild Steel Core, 연강심) 탄을 포함하여 총 5개 탄종에 대해 SS400판재의 방호한계속도(ballistic limit velocity)를 실험으로 측정하고, 이를 통계적으로 비교·분석하여 유의미한 결과를 발표하였다(Kim et al., 2015). NIJ Standard는 국제적으로 가장 널리 인정받고 있는 방탄성능 규격으로 알려져 있다. 또한 육군사관학교와 한국기계연구원이 공동으로 수행한 연구에서는 적성국 소화기인 AK-47의 위협에 대해 함정 건조시 사용되는 3종의 강판재질의 방호성능을 검토하였다. MSC 탄의 탄속에 따른 각 선체재질별 방호한계속도를 비교하고, 재질별 차이를 분석하였다(Kim and Shin, 2017). 또한 추가연구로서 4종의 재질에 대한 방호두계를 예측하는 연구를

수행하였다 (Shin et al., 2018).

한국기계연구원에서는 선박 및 해양구조물 등에 널리 사용되고 있는 2종의 고장력 판재에 대한 방호한계속도를 여러 관련기관의 협조 하에 시험을 통해 측정하고, 그 결과자료를 지속적으로 축적하고 있다. 설계단계에서는 사용할 판재만 결정될 뿐 실제 건조에 사용될 판재에 대한 정보는 확보할 수 없다. 본 논문에서는 축시험결과 및 판재의 검사성적서(mill test certificate) 등의 자료를 바탕으로, 고장력 판재의 방호한계속도 추정이 가능하고 설계단계에 사용할 수 있는 간이식을 개발하고자 하였다.

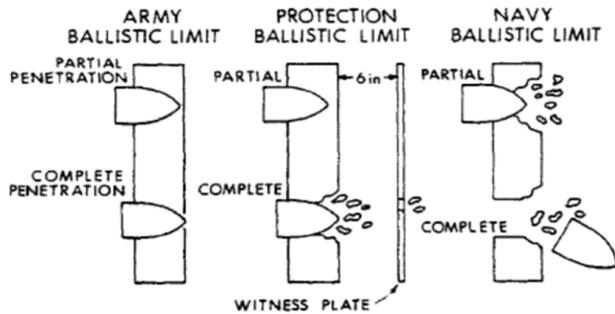


Fig. 1 Definition for ballistic limit (Air Force Flight Dynamics Laboratory, 1976)

방호한계속도는 Fig. 1과 같이 다양하게 정의되어 사용되고 있다. 탄(또는 파편)의 관통 여부는 완전관통(Complete Penetration, CP)와 부분관통(Partial Penetration, PP)으로 대별된다. 미 육군의 판정기준은 Fig. 1의 “Army Ballistic Limit”이며, 탄(또는 파편)이 판재의 후면에서 보이면 완전관통, 보이지 않으면 부분관통으로 분류한다. 미 해군의 판정기준은 “Navy Ballistic Limit”이며, 탄(또는 파편)이 판재의 후면을 완전히 통과하면 완전관통이고, 그렇지 않으면 부분관통이다. 미 국방규격인 MIL-STD-662F (Department of Defense, 1997)의 판정기준은 Fig. 1의 “Protection Ballistic Limit”에 해당하며, 판재의 뒷 부분에 6인치 이격 설치된 증명판(또는 방호검증판, witness plate)의 관통여부에 따라 완전관통과 부분관통을 판정한다. 본 규격은 소화기

탄(파편 포함)에 대한 방호성능을 측정하기 위한 시험방법 및 환경조건을 다루고 있으며, 개인전투체계에서부터 장갑차 및 군용 항공기의 장갑에 이르기까지 다양하게 적용되고 있다. 또한 함정 설계/건조 기준인 “방탄재질의 방탄성능 시험 기준 (조합(수)-기-6-028(3))” (Republic of Korea Navy, 2020)도 본 규격을 근간으로 제정된 것으로 알려져 있다. 따라서 본 논문에서는 MIL-STD-662F를 적용하여 방호한계속도를 판정하였다.

## 2. 시험 개요

### 2.1 시편(고장력 판재) 특성

고장력강은 연강(mild steel)의 단점을 개선하기 위해 소량의 규소, 망간, 바나듐, 티타늄, 몰리브덴 등을 첨가하여 강성을 높이는 반면 경량화한 저합금강이다. 인장 강도뿐만 아니라 용접성, 내식성, 내마모성 등도 점차 향상되고 있어 선박 및 해양구조물에 널리 사용되고 있다. 특히 경량화가 중요한 함정의 외판에 많이 활용되고 있다. 선박용 고장력강은 강도(strength)에 따라 AH32, AH36, AH40 등의 판재로 구별되고 있다. 또한 등급(grade)에 따라 AH, DH, EH 등의 판재로 나누어진다. 각 판재의 화학적 성분을 Table 1에 정리하였고, Table 2에는 물성치를 정리하였다. 정리된 자료는 판재 생산과정에서 요구되는 최소 조건에 해당된다. 따라서 생산된 판재는 정리된 자료 이상의 특성치를 보유하고 있게 된다. Table 1과 2의 자료를 보면, 2개의 강은 기계적 특성 측면에서 차이가 없는 것으로 판단된다. 논문에서는 AH36 판재와 EH36 판재만을 대상으로 진행한 연구결과를 정리하였다.

### 2.2 시험 개요

방호한계속도 추정식을 개발하기 위해 다양한 두께의 판재에 대해 MIL-STD-662F 시험을 수행하였다. 시험은 국내 KOLAS

Table 1 Chemical parameters of high strength steels (Octal Metals, 2020)

Steel	C	Mn	Al	Si	P	S
AH36	≤0.18	0.7-0.16	≥0.015	0.1-0.5	≤0.04	≤0.04
DH36	≤0.18	0.9-0.16	≥0.015	0.1-0.5	≤0.04	≤0.04
EH36	≤0.18	0.9-0.16	≥0.015	0.1-0.5	≤0.04	≤0.04

Table 2 Mechanical properties of high strength steels (Octal Metals, 2020)

Steel	Thickness (mm)	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	V-type impact test		
					Temp. (°C)	Absorption work (Akv/J)	
						Vertical	Horizontal
AH36	≤50	≥355	490-620	≥22	0	≥34	≥24
DH36	≤50	≥355	490-620	≥22	-20	≥34	≥24
EH36	≤50	≥355	490-620	≥22	-40	≥34	≥24

공인시험기관에서 방호한계속도로써  $V_{50}$ 을 산정하는 시험을 수행하였다.  $V_{50}$  시험은 완전관통과 부분관통의 결과 중에서 완전관통의 최고 총돌속도와 부분관통의 최저 총돌속도의 범위가 18 m/s 이하(총 4발인 경우)인 완전관통 및 부분관통 총돌 속도들의 평균값으로 산출된다. 총 6발인 경우에는 27 m/s 이하, 총 10발인 경우에는 38 m/s 이하 조건을 적용한다. 따라서 한 시험편의 방호한계속도를 도출하기 위해서는 최소 4발이상의 사격시험이 요구되며, 시험실무자의 숙련도에 따라 10발이상의 사격시험이 시행되는 경우도 있다.

총탄은 “방탄재질의 방탄성능 시험 기준”에서 명시하고 있는 7.62 mm MSC탄을 사용하였으며, 파편탄은 0.3 Caliber 모의파편탄 (Department of Defense, 2006)을 사용하였다. 탄과 판재의 총돌각도는 수직(90도)을 유지하였다. Fig. 2는 시험을 마친 판재의 모습을 한 예로 보여 주고 있다. 격자모양의 탄착점에 대상으로 사격이 시행되었고, 해당 탄착점에 구멍이 형성된 것을 확인할 수 있다. 참고로 본 시험이 가능한 KOLAS 공인시험기관으로는 국방기술품질원 국방신뢰성연구센터, 국방과학연구소 장갑시험연구실, 삼양컴텍 방탄시험소 등이 있다. 본 논문의 시험결과는 국방기술품질원 국방신뢰성연구센터와 삼양컴텍 방탄시험소에서 수행한 것이다.

### 3. 탄의 방호한계속도

#### 3.1 AH36 판재

2.2절에서 기술한 바와 같이 본 논문에서 탄의 방호한계속도는 7.62 mm MSC탄에 대해서만 고려하고 있다. Fig. 3은 한 시험편의 방호한계속도 시험결과를 예로서 보여주고 있다. 총 8발을 사격하였으며, 이중 4발이 유효탄으로 선정되었다. 선정된 4발의 평균(방호한계속도)은 약 510 m/s이고, 총돌속도의 범위는 18 m/s 이내이다. 두께가 상이한 6장의 AH36에 대해 동일한 시험을 수행한 후 본 저자들이 사용하고 있는 추정식 (1)을 시험 결과에 적용한 것을 Fig. 4에 보여주고 있다.

본 저자들은 방호한계속도의 추정식으로 아래와 같이 표현되는 것을 사용하고 있다.

$$V_{lim} = \alpha \times \left[ \frac{E_u(\sigma_y + \sigma_u)}{3} \right]^\beta \times \left( \frac{Q_1}{Q_2} \right)^\gamma \quad (1)$$

여기서  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ 는 추정계수이며,  $E_u$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_u$ 는 각각 판재의 연신율(공칭), 항복강도(공칭), 인장강도(공칭)이다.  $Q_1$ ,  $Q_2$ 는 판재의 두께 특성인자와 탄의 특성인자이며, 탄의 특성인자는 표준자료로서 잘 정리되어 있다. 따라서 방호한계속도 추정식을 개발하기 위해서는 추정계수  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ 를 정확하게 산정해야 하며, 판재의 기계적 물성치가 미리 확보되어야 한다. 시험 판재의 시험결과를 바탕으로 곡선맞춤(curve fitting) 방법 등으로 추정식 (1)을 도출할 수 있다. 시험방법 및 곡선맞춤 방법 등에 대

한 자세한 사항은 참고문헌 (Shin et al., 2018)에 잘 정리되어 있다.

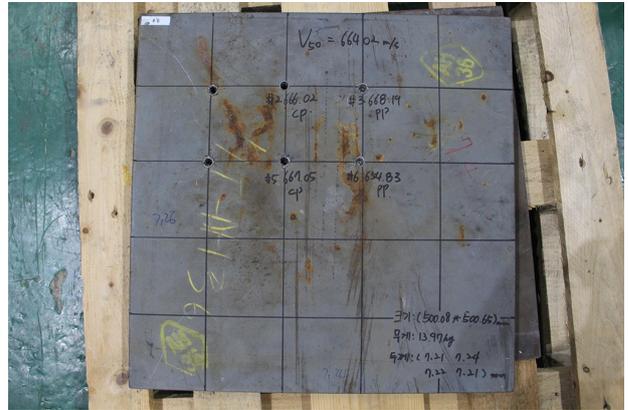


Fig. 2 Plate tested for ballistic limit velocity

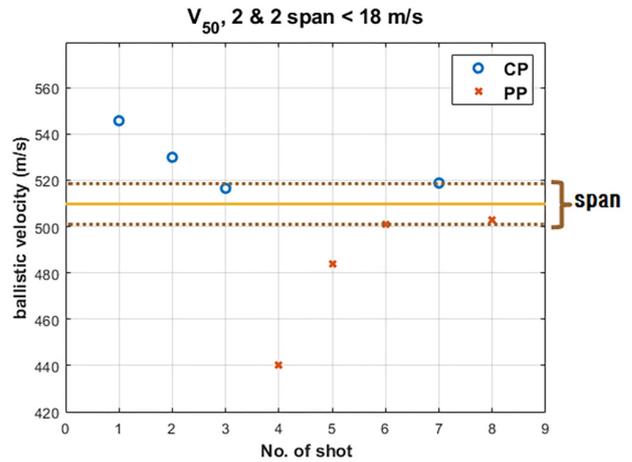


Fig. 3 An example of ballistic limit velocity for AH36

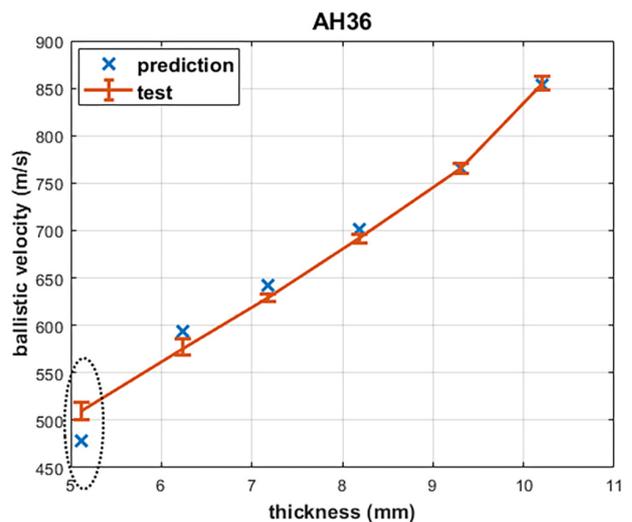


Fig. 4 Ballistic limit velocity for AH36

Fig. 4를 보면, 대부분 추정식에 의한 결과와 시험결과가 5% 이내의 오차를 보이고 있는 것을 알 수 있다. 단, 두께 5.1

mm 부근에서의 결과는 오차가 약 6.2 %로 상대적으로 큰 것을 알 수 있다. 이 판재의 경우에는 판재에 대한 검사증명서를 확보할 수 없어서 MatWeb.com(2021)에서 제공하는 물성치를 사용하였다.

Table 3 Mechanical properties of AH36

	Yield strength (MPa)	Ultimate strength (MPa)	Elongation at break (%)
MatWeb	355	490	22
Certificate	388 - 458	533 - 555	23 - 25

검사증명서는 판재 납품기관(제강업체)에서 제공하는 공식 품질 문서이다. Table 3에는 MatWeb.com에서 제공하는 물성치와 확보한 검사증명서에 명시된 정보를 정리하였다. 정보의 차이가 5 % - 20 % 정도가 되는 것을 확인할 수 있으며, 이로부터 추정치의 오차가 발생한 것으로 판단된다.

따라서 시험 판재에 대한 검사증명서가 확보되면, 추정식에 의한 방호한계속도는 약 5 % 이내의 오차범위에서 잘 추정하는 것을 알 수 있다.

### 3.2 EH36 판재

EH36 판재에 대해서도 AH36 판재에 적용한 방법과 동일하게 적용하였다. Fig. 5는 한 시편의 방호한계속도 시험결과를 예로서 보여주고 있다. 총 7발을 사격하였으며, 이중 유효탄으로 6발이 선정되었다. 선정된 6발의 평균(방호한계속도)은 약 650 m/s이고, 충돌속도의 범위는 27 m/s 이내이다. 두께가 상이한 6장의 EH36에 대해 동일한 시험을 수행한 후 본 저자들이 사용하고 있는 추정식 (1)을 시험 결과에 적용한 것을 Fig. 6에 보여주고 있다.

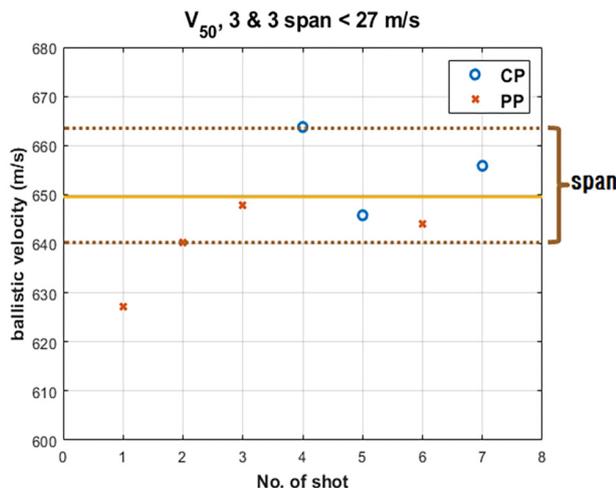


Fig. 5 An example of ballistic limit velocity for EH36

Fig. 6을 보면, AH36 판재와는 달리 오차가 큰 경우가 많은 것을 알 수 있다. 약 8.3 mm 두께에서는 약 5 % 오차를, 약 9.0 mm 두께에서는 약 13 % 오차를 보이고 있다. EH36 판재에 대해서는 검사증명서를 모두 확보하고, 그 정보를 적용한 것이다. AH36 시편과 달리 검사증명서의 정보를 활용하였음에도 불구하고 추정식과의 비교적 큰 오차를 보이고 있다.

오차의 원인을 파악하기 위해 Table 4에 Fig. 6의 판재에 대한 검사증명서의 물성치를 정리하였다. 식 (1)에서 보는 바와 같이 추정식에는 판재의 물성치가 식 (2)와 같이 복합적으로 영향을 미치므로, 이를 계산하여 Table 4에 'U value'로 같이 정리하였다.

Table 4의 U 값(식 (2)참조)을 살펴보면, 약 8.3 mm 및 9.0 mm 두께 판재의 값이 상대적으로 차이가 있는 것을 확인할 수 있다. 특히 연신율 값이 일반적으로 알려져 있는 범위를 벗어나 있는 것을 확인할 수 있다. 추정식과 시험결과와의 오차발생은 이로 인한 것으로 판단된다.

$$U = \left[ \frac{E_u(\sigma_y + \sigma_u)}{3} \right] \quad (2)$$

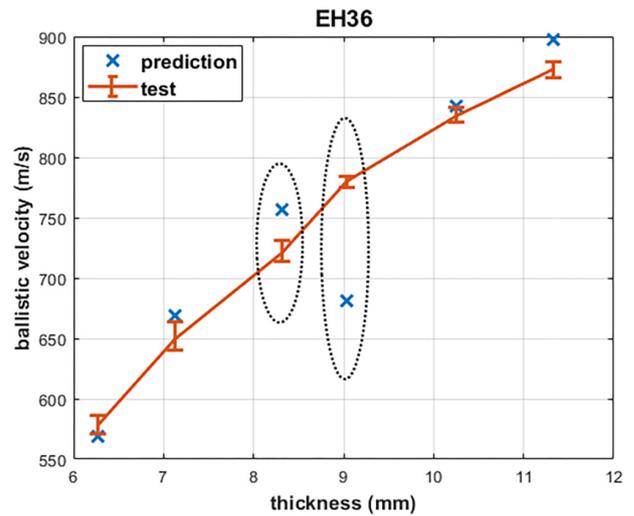


Fig. 6 Ballistic limit velocity for EH36

Table 4 Mechanical properties of EH36

Thickness (mm)	Yield strength (MPa)	Ultimate strength (MPa)	Elongation at break (%)	U value
6.27	457	533	21	6,930
7.13	450	521	25	8,092
8.32	435	508	27	8,487
9.03	480	551	18	6,186
10.25	414	502	26	7,939
11.33	436	517	25	7,942

### 3.3 간이 설계식

앞에서 기술한 추정식은 해당 판재의 검사증명서가 보유된 상태이고, 보유한 검사증명서의 물성치가 정확하다면, 95 % 이상의 정확도를 갖는 방호한계속도를 제공할 수 있다. Table 2에서 보듯이 고정력강인 AH36과 EH36 판재의 기계적 물성치의 요구치는 거의 동일하다. 또한 ASTM A131에서 규정하고 있는 물성치도 거의 동일하다. 하지만 국내 조선소에 납품되고 있는 고정력강 판재는 복수의 제철소에서 생산되고 있으며, 생산 로트별로 물성치가 다른 것을 검사증명서를 통해 알 수 있다. 특히, 일부 검사증명서의 값에 상당한 오류가 있는 것으로 판단된다.

추정식을 설계단계에서 사용하기 위해서는 해당 판재의 검사증명서 미보유 상태에서도 정확도 높은 방호한계속도 추정치를 제공해야 한다. 이를 위해 식 (2)로 표현되는 판재의 물성치를 미리 결정한 후 이를 바탕으로 추정식의 추정계수를 재산정해야 한다. 따라서 본 저자들이 보유하고 있는 AH36과 EH36 판재의 검사증명서(약 30편)를 활용하여 대표 물성치를 결정하였다. 대표 물성치는 산출평균 방법을 사용하였다. 이 과정에서 이상치라고 판단되는 검사증명서 결과 값도 포함하였다. 산정된 고정력강의 대표 물성치는 표준편차와 함께 Table 5와 같이 산정되었다.

Table 5 Representative mechanical properties (mean/standard deviation)

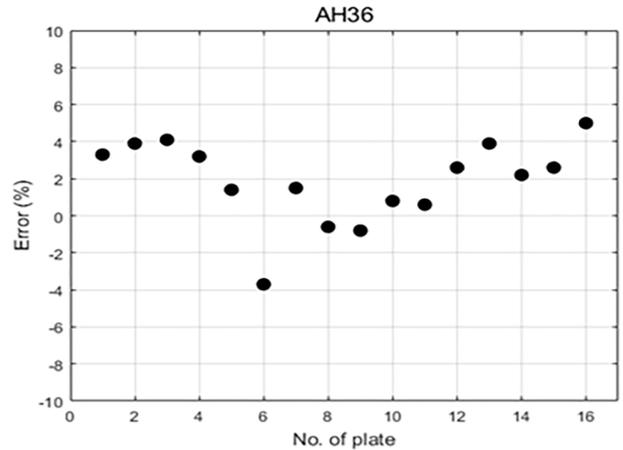
Material	Yield strength (MPa)	Ultimate strength (MPa)	Elongation at break (%)
AH36	409.4/26.4	544.3/8.8	23.8/1.6
EH36	441.0/17.4	509.8/17.6	24.6/2.6

Table 5에 정리된 정보를 바탕으로 추정한 방호한계속도를 시험결과와 비교한 결과를 Fig. 7에 정리하였다. Fig. 7에는 방호한계속도와 시험결과의 상대 오차비율을 보여주고 있으며, AH36 판재에 대해서는 약 5 %이내, EH36 판재에 대해서는 약 6 %이내의 수치를 보여주고 있다. 따라서 축적된 고정력강의 검사증명서를 바탕으로 산정된 대표물성치를 활용한 결과가 약 5 % 내외의 정확도를 확보할 수 있음을 확인하였다.

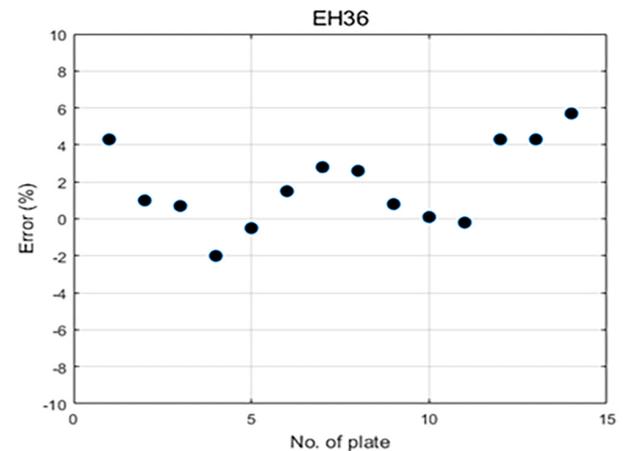
### 4. 파편의 방호한계속도

파편의 방호한계속도에 대한 추정식으로 THOR formula, JTCG/ME equation, Grabarek's equation 등이 있으나 (Zook et al., 1992), 시험자료를 바탕으로 제안된 THOR formula이 가장 적합한 것으로 알려져 있다 (Wang et al., 2014). THOR formula는 마그네슘, 알루미늄(2024-T3), 연강, 구리, 강화유리 등 다양한 재질에 대한 식을 제공하고 있으나, 본 논문에서 다루고 있는 고정력 판재에 대한 정보는 포함하고 있지 않다. 2.2절에 기술한 바와 같이 본 논문에서 고려하고 있는 파편탄인 0.3 Caliber 모의파편탄에 대한 특정 추정식의 도출이 필요하다. 일

반적으로 파편탄의 추정식은 총탄의 추정식과는 상이한 것으로 알려져 있다. Fig. 8은 표준 파편탄의 모습을 보여주고 있다.



(a) AH36



(b) EH36

Fig. 7 Error of ballistic limit velocity for AH36 and EH36

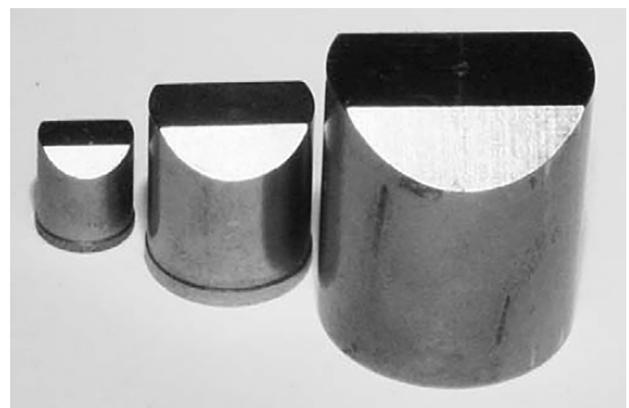


Fig. 8 Standard fragments (Jordan & Naito, 2010)

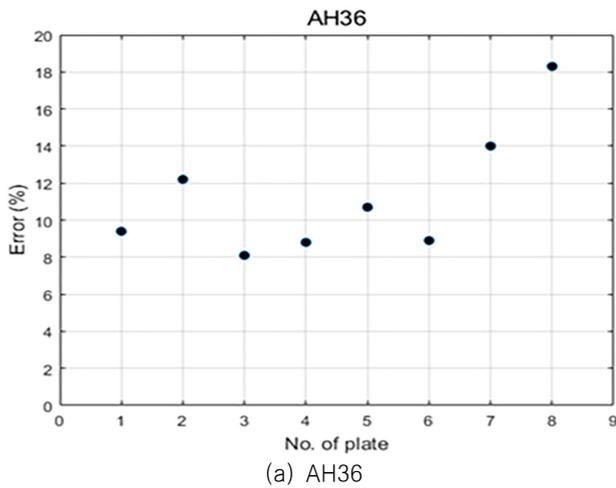
THOR formula는 아래의 식 (3)과 같은 형태이다.

$$V_r = V_R - 10^{c_1} (hA)^{c_2} m^{c_3} V_R^{c_4} \quad (3)$$

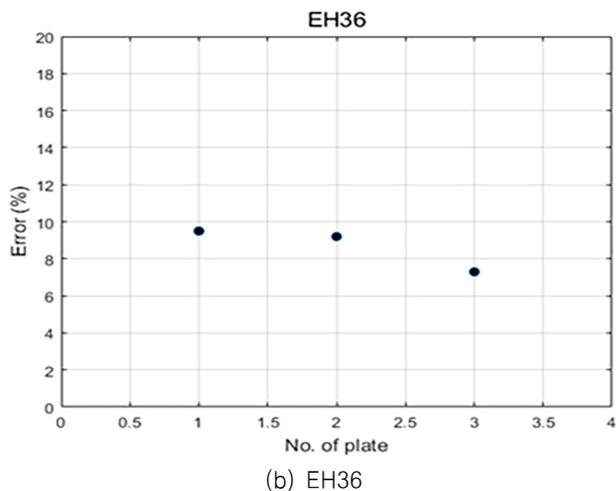
- 여기서,  $V_f$  : 관통후의 속도
- $V_R$  : 총돌 속도
- $h$  : 판재의 두께
- $A$  : 판재와 탄의 접촉면적
- $m$  : 탄의 질량
- $c_1$  : 계수

식 (3)에서 보듯이 판재의 특성정보로서 두께 정보만 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 방호한계속도는 관통후의 속도( $V_f$ )가 0 이 되는 속도에 해당한다. 따라서 시험결과로부터 식 (3)의 계수 ( $c_1$ )를 구함으로써 추정식을 도출할 수 있다. 단, 식 (3)의 단위는 ft-lb계를 사용하고 있으므로, SI 단위계로 변환해서 사용하였다.

파편탄에 대한 시험은 2020년부터 수행하여 결과를 지속적으로 축적하고 있으나, 보유한 정보가 충분하지 않다. Fig. 9는 파편탄에 대한 시험결과와 추정한 결과의 오차비율을 정리한 것이다. 오차가 총탄에 비해 큰 것을 알 수 있으며, 최대 20 % 수준인 것을 확인할 수 있다.



(a) AH36



(b) EH36

Fig. 9 Error of ballistic limit velocity for fragments

THOR formula(식 (3))에 SI 단위계를 적용한 후 방호한계속도를 다음의 식과 같이 정의할 수 있다.

$$V_{lim} = 0.3048 \cdot 10^{c_1} (61023.75 \cdot hA)^{c_2} (15432.1 \cdot m)^{c_3} \quad (4)$$

식 (4)의 계수  $c_1$ 는 시험결과를 활용하여 최소제곱법에 근거한 곡선맞춤(curve fitting)으로 산정할 수 있다. 산정된 계수와 식 (4)로부터 추정된 수치와 시험 결과의 비교결과를 Fig. 10에 보여주고 있다. Fig. 10에 보는 바와 같이 오차비율이 약 5 % 이 내에 있는 것을 확인할 수 있다.

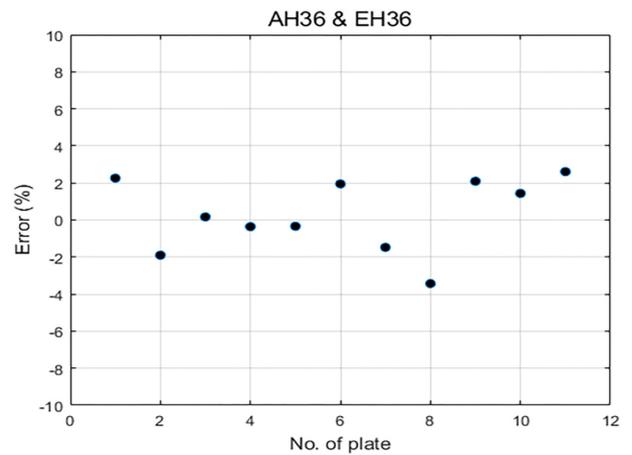


Fig. 10 Error of ballistic limit velocity for fragments

## 5. 복합 판재의 방탄한계속도

개발한 추정식을 적용하여 복합 판재의 방호한계속도를 산정하였다. 복합 판재는 AH36 판재의 한 면에만 polyurea 코팅을 한 판재이다. Fig. 11은 복합 판재의 단면을 보여주고 있다.

복합 판재의 특성상 탄의 총돌방향에 따라 방호한계속도가 상이할 것이다. 즉, AH36 판재 면에 먼저 탄이 총돌한 후 관통하고 코팅재에 총돌하는 경우(Fig. 11의 좌측 그림)와 코팅재에 먼저 탄이 총돌한 후 관통하고 AH36 판재에 총돌하는 경우(Fig. 11의 우측 그림)로 나눌 수 있다. 전자는 탄이 AH36 판재에 총돌한 후 관통하면, 파편 형태로 코팅재에 총돌할 것으로 예측된다. 반면, 후자는 탄이 코팅재에 총돌한 후 관통하면, 탄 형태를 유지하면서 AH36 판재에 총돌할 것으로 예상된다. 왜냐하면, polyurea 코팅재의 강도가 탄에 비해 상대적으로 낮기 때문이다. 추정식에 사용된 polyurea 코팅재의 물성치는 참고문헌 (Wang et al., 2019)에서 제공한 수치를 사용하였으며, Table 6에 간략하게 정리하였다.

따라서 방호한계속도의 추정 절차가 상이할 것이다. 전자인 경우에는 탄의 방호한계속도 추정식을 사용한 후 파편의 방호한계속도 추정식을 추가로 적용해야 한다. 후자의 경우, 파편의 방호한계속도 추정식을 먼저 사용한 후 탄의 방호한계속도 추정식을 적용해야 한다. Table 7은 전자에 대한 시험결과와 추정결과를

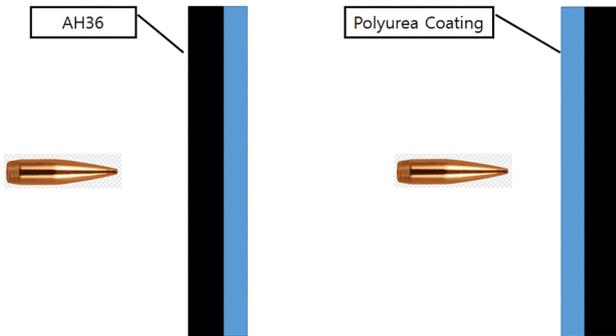


Fig. 11 AH36 plate with polyurea coating

Table 6 Mechanical properties of polyurea coating material

	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Yield strength (MPa)	Ultimate strength (MPa)	Elongation at break (%)
XS-350	1,180	18.1	19.2	162

Table 7 Ballistic limit velocity of combined plates

Plate thickness (mm)	Coating thickness (mm)	Test result (m/s)	Predicted result (m/s)	Error (%)
7.18	3.02	665.2	643	3.3
7.18	4.01	664.4	645	2.9
7.18	4.88	658.4	647	1.7
8.19	3.10	736.6	702	4.7
8.19	3.72	721.3	703	2.5
8.19	4.73	721.1	705	2.2

Table 8 Ballistic limit velocity of combined plates

Coating thickness (mm)	Plate thickness (mm)	Test result (m/s)	Predicted result (m/s)	Error (%)
3.02	7.18	641.6	642	0.1
4.01	7.18	638.8	642	0.5
4.88	7.18	629.0	642	2.1
3.10	8.19	694.4	701	1.0
3.72	8.19	690.2	701	1.6
4.73	8.19	696.6	701	0.6

정리한 것이고, Table 8은 후자에 대한 시험결과와 추정결과를 정리한 것이다.

Table 7과 Table 8의 결과를 살펴보면, 모두 오차가 5 % 미만인 것으로 확인되었다. 또한 Table 7의 결과 오차가 더 작은 것은 탄의 형태를 계속 유지하고 있기 때문인 것으로 판단된다. 탄의 형태가 파편형태로 변경되면, 다양한 형상의 파편이 발생할 것이 예상되어 추정식의 정확도를 낮출 것으로 판단된다.

## 6. 결론

전투무기체계는 장병 및 자체 설비보호를 위해 방탄설계가 필요하며, 설계단계에서 방탄능력을 추정할 수 있는 간이식이 필요하다. 본 연구에서는 소화기탄(7.62 mm MSC) 및 파편(0.3 Caliber FSP)의 위협조건에서 선박용 고정력강(AH36, EH36)의 방호한계속도를 추정하는 간이 설계 식을 제안하였다. 간이 설계식은 KOLAS 공인시험기관에서 수행한 시험결과를 바탕으로 개발되었으며, 방탄재질의 특성은 검사증명서를 활용하여 신뢰성을 높였다.

개발된 추정식을 활용하여 복합판재(AH36 + 폴리우레아 코팅)의 방호한계속도를 산정하여 시험결과와 비교하였으며, 약 5% 이내의 오차를 보임을 확인하였다.

설계 간이식을 개발하는 과정에 사용된 시험결과와 양이 충분하지 않기 때문에 더욱 신뢰성을 높이기 위한 추가 시험 및 결과분석 연구가 지속적으로 수행되어야 할 것이다. 또한 다른 위협무기와 강재에 대한 유사한 연구도 필요한 것으로 판단되며, 지속적으로 수집된 데이터는 대한민국 국방력 향상에 기여할 것으로 확신한다. 본 저자들은 관련 기관과 함께 꾸준한 연구개발을 진행하고자 한다. 관계 기관의 지속적인 관심과 지원을 소망한다.

## 후기

본 논문은 함정의 생존성향상 기술개발 영역의 일환이며, 방위사업청, 대우조선해양의 재정적 지원을 받았으며, 지원에 감사사를 드립니다.

## References

- Air Force Flight Dynamics Laboratory, 1976. *Joint Technical Coordinating Group Report*.
- Cheon, J.M. & Choi, Y.S., 2020. Influence of projectile velocity on penetration into a steel plate. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 21, pp.137-144.
- Department of Defense, 1997. *V<sub>50</sub> Ballistic Test for Armor*. MIL-STD-662F.
- Department of Defense, 2006. *Projectile, Calibers .22, .30, .50, And 20MM Fragment-Simulating*. MIL-DTL-46593B.
- Department of Defense, 2008. *Unified Facilities Criteria(UFC) Structures to resist the effects of accidental explosions*. UFC 3-340-02.
- Department of Justice, 2008. *Ballistic Resistance of Body Armor*, NIJ(National Institute of Justice) Standard-0101.06.
- Jordan, J.B. & Naito, C.J., 2010. Calculating fragment impact velocity from penetration data. *International Journal of Impact*

*Engineering*, 17, pp.530–536.

Kim, J.H. et al., 2015. Small caliber projectile ballistic limit velocity analysis. *Proceeding of the Korea Institute of Military Science and Technology*, pp.3–4.

Kim, J.H. & Shin, Y.H., 2017. Ballistic limit velocity comparison for warship materials against AK-47 7.62mm MSC. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 54(4), pp.286–293.

Matweb.com, 2021. ASTM A131 steel, Grade AH36. <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=1dcef41729e6420e9612cbd4bec8dc26&ckck=1> [Accessed 5 February 2021].

McKenzie, G., Samali, B., Zhang, C. & Anciche, E., 2018. Design strategies for fragment and projectile penetration into steel and concrete structural elements using CONWEP. *Asian Journal of Civil Engineering*, 19, pp.792–809.

Octal Metals, 2021. AH36, DH36, EH36 Steel Plate for Shipbuilding. <https://www.octalmetals.com/ah36-dh36-eh36-shipbuilding-steel-plate/> [Accessed 5 February 2021].

Republic of Korea Navy, 2020. *Criteria for ballistic resistant protective materials*.

Shin, Y.H., Chung, J.J., & Kim, J.W., 2018. Test and estimation of ballistic armor performance for recent naval ship structural materials. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 10(6), pp.762–781.

Wang, H. et al., 2019. Investigating the dynamic mechanical behaviors of polyurea through experimentation and modeling. *Defence Technology*, 15, pp.875–884.

Wang, J. et al., 2014. Improvement and simulation of THOR Formula with Yaw Angle. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 7(2), pp.106–112.

Zook, J.A., Frank, K. & Silsby G.F., 1992. *Terminal ballistics test and analysis guidelines for the penetration mechanics branch*, Ballistic Research Laboratory.

