

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 46(3), 257-268(2018)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2018.46.3.257

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

알루미늄 2024 표적에 대한 HE 탄두 파편의 관통 특성 연구

김득수*, 강순부*, 정대한**, 정영진***, 박용현***, 박세권***, 황창수****

A Study on the Penetration Characteristics of a Steel Fragment
Impacting on the Target Plate of Aluminum 2024Deuksu Kim*, Sunbu Kang*, Daehan Jung**, Youngjin Chung***, Yongheon Park***,
Seikwon Park*** and Changsu Hwang****

Department of Basic Science, Korea Air Force Academy*

Department of Mechanical Engineering, Korea Air Force Academy**

Department of Aeronautical Science, Jungwon University***,****

ABSTRACT

We have studied the damage mechanism of a metallic thin plate by the highly energetic fragments generated from high explosive(HE) warhead. The penetration process has presumed that the velocity of a fragment is in the range of 350 m/s to 3353 m/s, the thickness of Aluminum 2024 target plate is in the range of 1 mm~6.3 mm thick. The mass of fragment with hemisphere nose shape is in the range of 0.32 g to 16 g. The analytical solution for penetration process has been derived by using the report of the project THOR. The results of analysis implied that the closed forms by an exponentially decay function well fit the change of the ballistic limit velocity, loss velocity and loss mass of fragment as the mass of fragment and the thickness of target plate increase.

초 록

본 논문은 한국형 전투기 개발 시 적의 위협에 대한 취약성 분석을 위해 요구되는 고속 관통자가 표적을 관통하는 기구에 대해 수치 해석적으로 연구한 결과이다. 표적은 1 mm~6.3 mm 두께를 갖는 준 무한평면의 알루미늄(Aluminum) 2024 재질을 고려하였다. 관통자는 반구형 노즈 형상을 갖는 강(steel) 재질로, 입사속도는 350~3353 m/s까지, 질량은 0.32~16 g까지 갖는 것으로 고려하였다. 수치해석을 위해 사용된 실 사격 데이터는 THOR 방정식으로부터 추정하여 유추하였다. 수치해석 결과 표적을 관통하는 과정에서 관통자의 탄도한계속도는 관통자의 질량에 대한 지수 함수적으로 감소하는 수식으로 형식화(closed form of formalization) 하였다. 관통 후 잔류속도 및 잔류질량은 표적의 두께와 관통자의 질량 및 입사속도에 의존된 지수 함수적으로 감소하는 수식으로 각각 형식화하였다.

Key Words : Aircraft Survivability(항공기 생존성), Vulnerability Assessment(취약성 평가), Penetration Characteristics(관통특성), HE Warhead(고폭탄두), Aluminum 2024(알루미늄 2024)

† Received : November 30, 2017 Revised : January 20, 2018 Accepted : January 27, 2018

**** Corresponding author, E-mail : cshwang1@naver.com

I. 서 론

한국형 전투기 개발 단계에서 취약성 분석은 항공기가 적의 위협에 피격되었을 때 주요 핵심 구성품의 취약성을 감소하는 방법을 도출하고, 설계변경에 환류하여 항공기의 생존성을 향상시키기 위한 목적으로 수행되는 매우 중요한 절차이다. 임무 중인 전투기에 피해를 주는 다양한 종류의 위협이 있지만 그 중에서 가장 큰 피해를 주는 위협은 고풍탄(HE탄)이다. 고풍탄은 임무 중인 전투기 근접에서 폭발하게 되며, 폭발 후 발생된 수천 개의 고속 파편들은 항공기 핵심 구성품들을 동시 다발적으로 관통하여 심각한 손상을 가하여 임무수행을 불가능하게 하는 치명적인 위협이 된다. 고속의 파편들이 연료계통, 조종계통 및 전장계통 등의 핵심 구성품들을 손상시켜 전투기가 임무수행을 할 수 없게 되는 과정에 대한 이해는 항공기의 생존성 및 취약성 평가에서 결정적인 역할을 한다.

한국형 전투기 개발과정에서 요구되는 위협무기에 대한 항공기의 취약성 및 생존성 평가는 지상 또는 공중 위협으로부터 발사된 고풍탄의 근접 폭발에 의한 생성된 고속 파편이 개발 항공기의 핵심표적을 관통하여 항공기가 임무상실로 전이되는 과정에서 파편이 항공기를 피격할 확률, 피격 시 관통할 확률, 그리고 관통 시 손상될 확률 및 손상 시 임무상실 확률 등 연속적으로 전이되는 일련의 과정에 대한 이해를 기반으로 하고 있다[1-3].

위협무기에 대한 취약성 평가는 고풍탄의 폭발로 형성되는 탄두들의 질량 및 속도에 대한 분산 발생, 표적을 관통하는 기구에 대한 해석 과정에서 miss distance error에 대한 분산, 충돌과정에서 재료의 물성 변화에 따른 해석 오차에 의한 분산 등 복합적인 오차 발생이 가능하여 보편적이고 일반화되는 관통과정에 대한 해석을 정립하는 것이 용이하지 않다. 따라서 위협무기에 대하여 임무중인 항공기의 취약성 평가는 고속파편의 질량, 속도, 투영면적, 길이, 입사각, 재질 및 경도 등과 표적의 두께, 재질 및 경도 등의 주요 변수에 대하여 항공기의 피격확률, 취약확률 및 생존확률 등 통계 처리를 통한 확률적인 해석이 요구된다.

항공기의 취약성을 평가하기 위한 M&S (Modeling & Simulation) 도구는 실 사격시험 (Live Fire Test)을 통해 획득된 데이터로부터 유도된 경험식(Empirical equation)을 토대로 하거나 또는 이론적 수치해석 방법을 근간으로 하고 있다.

미국은 실 사격시험을 통해 획득된 데이터로부터 수치해석을 기반으로 경험적 모델(Empirical Model)을 제시하였다[4-6]. 고속 관통자가 표적을 관통하는 과정에 대한 해석적 모델링 및 관통 방정식에 대한 다양한 방법도 제시되어 있으며, 금속 발사체가 표적에 충돌하는 동안 받는 저항력에 의한 관통자의 속도 변화와 관련하여 입사속도에 대한 다항식 전개 모델, 텅스텐 관통자에 대한 관통방정식 제시, 임의의 탄두 형상에 대한 탄도관계 관통에 대한 해석 등이 제시되었다[7-10]. 실 사격시험을 기반으로 구성품의 관통과정에 대한 자료를 획득하고, 이를 이용하여 경험식을 형식화한 후 항공기의 취약성을 평가하기 위한 평가도구로는 미국의 COVART 및 스웨덴의 AVAL M&S 등이 사용되고 있다[1]. 그러나 미국방성 산하 JTCG/ME(The Joint Technical Coordinating Group for Munitions Effectiveness) 보고에 의해 COVART 사용은 보안상 사용이 제한되어 있고, 평가도구에 사용된 관통방정식 및 손상확률에 대한 경험식은 확인이 불가능한 상태이다.

국내에서는 국방과학연구소, 세종대학교, 인하대학교, 국방과학원, 육군사관학교 및 공군사관학교 등에서 무기개발과 관련하여 생존성 연구를 수행하고 있다. 한국형 전투기 생존성과 관련하여 생존성 개념 연구, 생존성 분석을 위한 GUI 기반 소프트웨어 SACS에 대한 연구 성과 등이 발표되었다[11-13]. 한국형 함정 개발과 관련하여 함정 생존성 연구는 COART를 이용한 함정 취약성 분석방법, 취약면적 기반의 생존성 분석 결과, 함정의 통합 생존성 분석 절차에 대한 성과 및 함정 통합생존성 설계 해석 기술 개발에 관한 연구 성과 등이 발표되었다[14-16]. 위와 같이 국내 무기 개발과 관련된 생존성 분석은 평가도구를 활용한 평가 결과 또는 평가 소프트웨어의 개선뿐만 아니라, 위협무기로부터 취약구성품의 손상 과정에 대한 해석 및 실 사격시험을 통하여 획득된 데이터에 대한 분석 등이 요구된다. 한국형 전투기 개발 과정에서 생존성 평가를 위해 요구되는 M&S 평가도구의 개발, 실 사격 시험을 위한 평가 시스템에 대한 개발 및 자료 축적 등이 지속 요구되고 있는 실정이다.

한국형 전투기 개발과정에서 위협무기에 대한 생존성 향상을 위하여 시제기를 대상으로 실 사격시험 평가를 수행하고 획득된 데이터 분석 결과를 개발과정에 환류 작업하는 일련의 과정이 요구된다. 그러나 이때 발생하는 고비용 문제, 위협무기를 구비할 수 없는 현실적인 문제, 실험장소의 안전성 확보 문제 등으로 실험을 기반으로

한 취약성 평가방법은 용이하지 않다. 특히 위협 무기가 고퍽탄인 경우 상공에서 임무중인 전투기를 대상으로 폭발하여 고속의 파편에 의한 취약성 평가를 수행하는 것은 다수의 핵심부품 간 항공기 임무상실의 직접적인 원인관계를 밝히기가 용이하지 않으며, 재현성 확보도 곤란하다. 이와 같이 개발 대상무기체계의 취약성 평가가 용이하지 않는 이유는 위협무기로부터 생성된 고속 파편이 개발 무기의 핵심표적으로 관통하는 과정에서 발생하는 핵심부품의 손상 정도, 손상된 정도가 핵심부품의 기능상실로의 전이, 핵심부품의 기능상실이 개발 대상 무기의 임무상실로의 전이 등에 대한 일련의 과정에 대한 복잡성에 기인하기 때문이다. 이러한 복잡성을 이해하기 위해 본 연구에서는 항공기 취약성과 연관하여 고속 파편이 항공기 핵심부품을 피격하는 경우 파편이 핵심부품을 관통하는 과정에서 발생하는 관통확률을 추정하기 위해 관통기구에 대한 이론적 해석을 시도하였다. 관통과정의 복잡성의 1차적인 원인은 고퍽의 위협무기가 항공기 근방에서 폭발하는 경우 발생하는 파편들의 형상, 질량 및 속도, 및 경도 등의 분산에 의한 측면과, 분산된 파편들이 핵심표적으로 관통하는 과정에서 표적으로 입사하는 각도, 표적의 두께, 표적의 재질, 표적과 표적사이의 이격거리 등에 기인하기 때문이다. 관통과정의 복잡성은 입사하는 파편과 표적의 물리적 특성 사이의 상관관계에 의하여 관통자의 형상이 유지되는 영역(non-deformable projectile regime), 준-유체역학적 영역(semi-hydrodynamic regime) 및 유체역학적 영역(hydrodynamic regime) 등으로 3 가지 영역으로 구분하여 해석될 수 있다[9,17].

관통자의 형상이 유지되는 영역은 관통자의 속도가 1.0~1.5 km/s 이하의 영역으로, 표적을 관통하는 과정에서 파편에 의해 유도되는 항력이 스트레스(Stress)와 스트레인(Strain)의 관계를 탄성적으로 유도되어 형상이 변형되지 않는 영역이다. 이 영역에서는 파편 및 표적의 강도와 같은 보편적인 재질의 강도 특성이 관통자의 운동에너지 손실 및 표적의 재질에서 유도되는 스트레스 사이의 상관관계를 이해하는 주요 변수로 고려된다. 준 유체역학적 영역은 Alekseevskii-Tate model에 의해 정의되며[18-19], 표적에 대한 관통자의 상대속도는 1.0~3.0 km/s 사이에 분포된다. 이 영역에서는 관통자가 긴 경우 두꺼운 표적을 관통하는 동안 침식이 발생되며, 스트레스에 의하여 쉽게 변형되기 쉬워 형상변형이 유발된다. 표적에 대한 관통자의 상대속도가 3 km/s를 상회하는 경우는 유체역학적 영역으로 표적과 관통

자 사이의 강도 및 경도 등에 의한 고체 탄성 상호관계 특성은 무시될 수 있어 유체-유체 특성으로 고려되는 영역이다. 이 영역에서는 고속 파편의 운동에너지가 표적으로 관통하는 과정에서 고온으로 전이되어 파편과 표적을 고온으로 용융시켜 유체로 변형하게 된다.

본 연구에서는 취약성 평가의 핵심 기술로써 고퍽탄으로부터 생성된 고속의 파편이 전투기의 핵심구성품을 관통하는 과정을 연구하기 위하여 THOR project[20]에서 제시된 알루미늄 2024 평면 표적으로 입사되는 강(steel) 파편의 관통과정과 관련된 실 사격 데이터를 이용하였다. 파편의 입사속도는 형상이 유지되는 영역(non-deformable projectile regime of penetration)부터 준 유체역학적 영역(the semi-hydrodynamic regime)까지 설정하였으며, 파편이 표적을 관통한 후 파편의 손실속도, 잔류속도 및 잔류질량에 대한 실사격 데이터를 이용하여 수치해석을 통하여 유도된 일반화된 관계식을 연구하였다. 계속되는 연구에서는 수치해석 과정에서 발생된 신뢰도 및 주요 변수들의 오차와 변인관계에 대하여 통계적 해석을 수행하여 취약성 및 생존성에 대한 확률함수를 유도하는 연구를 수행할 계획이며, 본 연구에서는 관통 과정에 대한 관계식에 국한하여 연구하였다.

II. 본 론

2.1 표적과 관통자의 동역학

M&S에서 사용되는 전형적인 관통자는 구형 대칭성을 갖는 직경 23 mm의 탄두 노즈를 갖는 실린더형 몸체로 구성된 것으로 고려하며, 전투기의 취약 핵심부품인 표적은 유한한 두께와 유한한 크기의 곡면형이지만 고속의 관통자가 입사하는 순간 충격단면적은 표적 전체 크기에 비하여 매우 크기 때문에 준 무한평면인 것으로 고려하였다. 이 경우 발생된 오차는 COVART 및 AVAL 등의 M&S 평가도구에서와 같이 표적을 그리드로 분할하고 관통자가 무질서하게 여러번 입사시켜 관통 가능성을 통계적으로 처리하여 취약확률을 산출하는 것과 연관되어 있다. 3차원 구조로 정의되는 관통자가 표적을 관통하는 과정에서 운동량 및 에너지 교환기구는 관통자와 표적의 구조적인 대칭성의 차이로 인하여 해석적으로 표현하기가 용이하지 않다. 1945년 이후 관통자가 표적을 관통하는 기구에 대하여 다양한 해석적인 방법 및 경험적 방법에 대한 연구가 시도되어왔다[6]. 관통과정의 복잡성은 구조적인 변화

에 대한 해석 및 에너지 교환 기구에 대한 이해가 동시에 요구된다. 이는 표적으로 입사되는 관통자의 입사속도가 1~3 km/s 영역인 경우 관통자의 형상이 변형되지 않거나 또는 표적을 관통하는 과정이 준-유체역학적으로 거동하는 특성 등이 중복되기 때문에 관통 과정 에너지 손실에 대한 극적인 변화에 대한 이해가 필요하다. 실린더 대칭성을 갖는 관통자는 실린더 좌표계로 표현될 수 있으며, 보편적인 평면 표적은 유한한 두께와 준-무한평면으로 표현된다. 관통자가 표적으로 입사 방향을 z축으로 설정하며, 표적의 법선 방향에 대하여 편주각(yaw angle)으로 입사하는 것으로 정의한다.

직선 입사궤적을 따라 표적으로 입사되는 관통자는 입사 궤적에 대한 투영 단면적이 표적에 손상을 주는 면적이 된다. 일반적으로 표적의 법선 방향에 대하여 관통자의 투영단면적은 임의의 입사 편주각을 기준으로 수직인 성분과 수평인 성분으로 구분하여 벡터합으로 표현될 수 있다. 충격 입사 편주각의 범위는 물리적인 한계 내에서 투영면적이 의미를 갖도록 설정하여야 한다. 관통자의 입사 투영면적은 표적의 법선 방향으로 손상을 줄 수 있는 영역으로 표적에 일차적으로 법선 방향의 스트레스와 연관된다. 관통자 노즈의 측면면적은 표적과 접촉과정에서 측면 스트레스에 의한 총항력을 유도하게 된다. 관통자의 3차원 모형의 대칭성은 관통과정에서 관통자의 운동에너지가 표적으로 에너지 교환이 이루어지는 점에서 법선 저항력 및 측면 저항력을 분해하여 관통과정을 이해하여야 하는 점에서 중요하게 고려될 수 있다. 표적에 대하여 임의의 편주각으로 입사하는 n개의 관통자에 대하여 관통자의 투영 단면적은 다음 수식과 같이 표현할 수 있다.

$$A_P(\phi) = \sum_i^n A_{H_i} \cos\phi + \sum_i^n A_{V_i} \sin\phi \quad (1)$$

$$= SA_H \cos\phi + SA_V \sin\phi$$

3차원 형상을 갖는 관통자가 표적으로 입사할 때 표적에 대한 최대 투영면적은 관통자의 법선 방향 투영면적의 합과 측면방향 투영면적의 합에 대한 비율로 정해지는 각도로 입사하는 경우이며 $\tan\phi_{\max} = SA_V/SA_H$ 조건을 만족하는 경우이다. 입사각의 선택율은 물리적인 입사각의 범위에 의하여 $\min(SA_H \text{ or } SA_V) \leq A_P(\phi) \leq A_P(\phi_{\max})$ 로 정의된다.

Arthur Dzimian은 관통자가 표적을 관통하는 과정에서 발생하는 감속과 관련하여 관통방정식

및 단위 질량당 규격화된 관통방정식을 정의하였으며[21], 세 개의 저항력 항으로 구성하여 다음 수식과 같이 제시하였다[8,22].

$$M \frac{dV}{dt} = -(AV^2 + BV + C) \quad (2)$$

$$\frac{dV}{dt} = -(aV^2 + bV + c)$$

Backman와 Goldsmith는 관통과정에서 발생되는 세 가지 저항력과 관련된 계수들에 대하여 A는 유체역학적 항력(drag force) 계수, B는 마찰력 계수(frictional force), C는 저항력(resistance force) 계수로 정의하였다[23]. 본 연구에서는 관통깊이를 계산하기 위하여 관통자가 준 무한평면 표적으로 입사하는 과정에서 감속 저항력을 갖는 경우에 대하여 해석적 방법을 다음과 같이 유도하였다. 표적 속으로 입사된 관통자의 침투깊이 S에 대하여 적분형 관통방정식은 다음과 같다.

$$\int_{v_{imp}}^{v_{res}} \frac{v dv}{(av^2 + bv + c)} = - \int_{S_0}^S ds \quad (3)$$

관통방정식의 경계조건으로 표적의 표면에서 입사속도는 $v_{s=0} = v_{imp}$ 로, 관통자가 표적을 관통하기 위한 최소속도인 탄도한계속도는 $v_{s=\ell} = v_B$ 로, 관통자가 표적의 두께 ℓ 을 완전히 관통한 후의 잔류 속도는 $v_{s>\ell} = v_{res}$ 로 각각 정의된다. 위의 경계조건을 만족하는 적분형 관통방정식의 해로서 표적을 관통하는 깊이 S, 입사속도 $v_{imp} = v_0$ 및 잔류속도 $v_{res} = v$ 와의 관계식은 항력계수 a가 0이 아닌 경우를 제외하면 다음과 같다.

$$S = \frac{1}{2a} \ln \left[\frac{(v_0^2 + \frac{b}{a}v_0 + \frac{c}{a})}{(v^2 + \frac{b}{a}v + \frac{c}{a})} \right] \quad (4)$$

$$+ \frac{b}{2aR} \ln \left[\frac{(2av+b)-R}{(2av+b)+R} \cdot \frac{(2av_0+b)+R}{(2av_0+b)-R} \right]$$

여기서, $R = \sqrt{b^2 - 4ac}$ 이다. 관통자가 표적을 관통하는 과정에서 관통깊이 S와 잔류속도 v_{res} 의 관계는 단위질량당 항력계수 a, 마찰력계수 b 및 저항력계수 c값에 따라 다섯 가지의 경우로 정리된다[23]. 첫째, 구조적 강도가 높은 표적 재료인 경우 항력계수 $a = 0$ 및 마찰력계수 $b = 0$ 로 설정되고, 저항에 의하여 침투깊이와 잔류속도 관계식은 $S - S_0 = (v_{res}^2 - v_{imp}^2)/2c$ 가 된다. 둘째,

구조적으로 견고한 점성을 갖는 재료인 경우 항력계수 $a = 0$ 로 설정되고, 마찰력과 저항력에 의해 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$S - S_0 = (v_{imp} - v_{res})/b + c/b^2 \cdot \ln[(v_{res} + c/b)/(v_{imp} + c/b)] \quad (5)$$

셋째, 구조적으로 명확히 비 점성 특성을 갖는 재료인 경우 마찰력 $b = 0$ 으로 설정되며, 항력과 저항력에 의해 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$S - S_0 = (1/2a) \cdot \ln[(c + av_{imp}^2)/(c + av_{res}^2)] \quad (6)$$

넷째, 구조적으로 점성과 유체항력을 갖는 재료인 경우 a, b, c 등을 모두 고려하는 경우 침투깊이와 에너지 관계식은 수식 (4)와 같다. 다섯째, 구조적으로 액체와 같이 "soft"한 재료인 경우 저항력 $c = 0$ 으로 설정되고, 항력과 마찰력에 의해 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$S - S_0 = (1/a) \cdot \ln[(av_{imp} + b)/(av_{res} + b)] \quad (7)$$

표적을 관통하는 과정에서 탄두의 관통깊이 및 잔류속도를 결정하는 a, b, c 는 표적의 재질 특성과 탄두 노즈 형상에 따라 발생하는 스트레스에 대한 이해가 요구된다. 일반적으로 탄두의 형상은 Fig. 1과 같이 반구형인 노즈와 실린더 몸체로 구성된 것으로 고려된다. 탄두가 유한한 두께 l 을 갖는 표적에 대해 정방향으로 관통하는 과정에서 발생하는 저항력은 탄두의 노즈와 표적 사이의 스트레스에 의존된다. 입사방향을 기준으로 탄두 노즈 형상은 중방향 반경인 구조함수 $\rho = \Phi(x, \phi)$ 로 정의되며 표적과의 접촉지점인 관통변위 x 및 회전각 ϕ 에 대하여 법선 스트레스 $\Omega_n(x, \phi)$ 및 접선 스트레스 $\Omega_t(x, \phi)$ 와 연관되어 있다. Bazhenov는 표적과 접촉하는 관통자의 표면에 작용하는 총 항력을 다음과 같이 정의하였다[6].

$$dD = (-\hat{v}_x) \cdot \begin{cases} [\Omega_n(u, v)\hat{n}_0 + \Omega_\tau(u, v)\hat{\tau}_0]dS & (u_x < u < 1) \\ [\Omega_n(1, v)\hat{n}_0]dS & (u = 1) \\ 0 & (u < u_x) \end{cases} \quad (8)$$

여기서 $u = -\hat{v}_x \cdot \hat{n}(x, \phi)$ 는 탄두의 노즈 형상이 표적을 접촉하는 지점에서 방향코사인을 나타낸다.

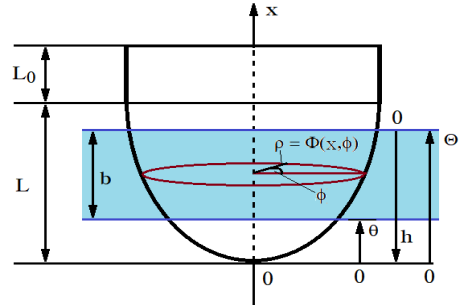


Fig. 1. Penetrator has a nose part with length L and a cylinder part with length L₀.

Figure 1에서 관통자가 표적을 관통하는 과정에서 상호작용하는 접촉면은 $0 \leq x \leq \theta$ 영역이며, 이 중 관통자의 노즈가 표적을 관통하는 과정에서 스트레스를 유발시키는 접촉면적은 $\theta \leq x \leq \theta$ 영역에 존재하는 측면면적이다. 접촉과정에서 발생하는 총 항력은 관통자의 침투깊이 및 속도의 의존성에 따라 표적을 관통하는 과정에서 표적과의 접촉면에서 유도되는 법선방향 스트레스와 측면방향 스트레스에 의해 유도되는 총 항력으로 구분되며 다음과 같이 표현된다[6].

$$D = \Omega_n(1, v) \int_{normal} dS + \int_{lateral} \Omega_0(u, v) dS \quad (9)$$

관통자의 중심축인 x 축을 기준으로 정방향 항력 스트레스인 $\Omega_n(1, v)$ 는 노즈 형상이 평탄화되어 있는 경우만 고려되는 항이다. 노즈 부분이 평탄화되어 있지 않고 반구형으로 되어 있는 경우 입사방향에 대하여 노즈 표면은 방향코사인은 $u = -\hat{v}_0 \cdot \hat{n}_0 = \cos v < 1$ 값을 갖게 되며, 총 항력은 $\Omega_0(u, v)$ 에 의한 측면 접촉 부분에서 스트레스를 받게 된다. 노즈의 측면 접촉 부분에서 발생하는 스트레스는 측면에 대한 법선 스트레스 $\Omega_n(u, v)$ 및 접선 방향 스트레스 $\Omega_t(u, v)$ 로 구분되며, 접선 방향 스트레스는 법선방향에 대한 운동마찰 계수에 의한 마찰력으로 다음과 같이 표현할 수 있다[6].

$$\Omega_0 = u\Omega_n(u, v) + \sqrt{1 - u^2} \Omega_\tau(u, v) = (u + \mu_{fr} \sqrt{1 - u^2}) \Omega_n(u, v) \quad (10)$$

따라서 관통자가 표적을 관통하는 과정에서 받게 되는 스트레스 $\Omega_n(u, v)$ 는 관통자의 표면의 방향

과 진행방향 사이의 방향코사인 u 및 속도 v 에 대한 의존성으로 갖게 된다.

관통자가 표적을 관통하는 과정에서 접촉하는 미분면적 dS 는 중심축 상의 위치 x 및 회전각 ϕ 변화에 대하여 $dS = u_0(x, \phi) dx d\phi$ 로 표현되며 이때 $u_0(x, \phi)$ 는 실린더 좌표계에서 직각좌표계로(또는 구면좌표계에서 직각좌표계) 변환하는 메트릭으로 구조함수 $\rho = \Phi(x, \phi)$ 및 위치 x 및 회전각 ϕ 에 대한 변화율 Φ_x 및 Φ_ϕ 에 대하여 다음과 같은 관계식으로 정의된다[6].

$$u_0(x, \phi) = \sqrt{\Phi^2(\Phi_x^2 + 1) + \Phi_\phi^2} \quad (11)$$

접촉 지점에서 발생하는 법선 스트레스는 관통자의 현재속도와 연관되어 있으며 일반적으로 다음식과 같이 관통자의 속도에 대한 다항식으로 전개 될 수 있다.

$$\Omega_n = \sum_{i=0}^n a_i v^i \quad (12)$$

관통자가 표적을 통과하는 과정에서 발생하는 스트레스는 속도에 대하여 2항 또는 3항으로 구성된 다항식으로 근사하여 사용된다. 관통자의 입사 속도가 유체역학적 관통영역 한계(the hydrodynamic regime of penetration)까지 도달하지 않는 경우 표적으로 관통하는 과정에서 유도되는 스트레스는 마찰력과 항력에 대한 두 개의 항이 지배하게 되며, 스트레스 함수를 2개 항으로 구성하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Omega_n(u, v) &= \omega(u)v^2 + a_0 = a_2 u^2 v^2 + a \\ \Omega_r(u, v) &= \mu_{fr} \Omega_n(u, v) \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 $\omega(u) = a_2 u^2$ 는 관통자가 구형의 회전대칭성을 갖는 경우이며, a_0 와 a_2 변수는 재료의 특성에 의존되어 있다. 스트레스에 대하여 2개항 다항식전개 모델을 이용하여, 구형의 탄두 모형을 갖는 관통자에 대하여 총 항력은 다음 수식과 같이 표현할 수 있다[6].

$$\begin{aligned} D(h, v) &= \int_{\theta(h)}^{\theta(h)} dx \int_0^{2\pi} \Omega_n(u, v) U(x, \phi) d\phi \\ &= f_0(h) a_0 + f_2(h) v^2 \end{aligned} \quad (14)$$

여기서, $f_0(h) = 2\pi a_0 \int_{\theta(h)}^{\theta(h)} (\Phi_x + \mu_{fr}) \Phi dx$

$$\begin{aligned} f_2(h) &= 2\pi a_2 \int_{\theta(h)}^{\theta(h)} u^2 (\Phi_x + \mu_{fr}) \Phi dx \\ u^2 &= \Phi_x^2 / (\Phi_x^2 + 1) \end{aligned}$$

관통자가 표적을 관통하면서 표적과의 상호작용에서 발생하는 스트레스는 마찰력 및 항력에 의한 성분으로 관통자와 표적의 구조함수와 연동되어 있음을 보이고 있다. 총 항력에서 속도에 무관한 상수항인 $f_0(h)$ 는 노즈 형상의 구조함수 및 마찰계수에 의하여 입사방향으로 유도되는 항력형 스트레스를 나타내며, 속도 제곱에 비례하는 항인 $f_2(h)$ 는 노즈 형상의 구조함수 및 마찰계수에 의하여 관통자의 노즈 부분의 표면 법선방향으로 유도되는 스트레스에 의한 것으로 해석된다. 따라서 관통자의 속도 제곱항에 대하여 선형적인 관통방정식은 다음과 같이 정리된다.

$$\frac{m}{2} \frac{dv^2}{dh} = -f_2(h)v^2 - f_0(h), \quad v(0) = v_{imp} \quad (15)$$

위의 식에 대한 일반적인 해로써 표적을 관통하는 과정에서 관통자의 속도는 다음과 같다[6].

$$v^2(h) = \frac{1}{Q(h)} [v_{imp}^2 - \frac{2}{m} \int_0^h f_0(h') Q(h') dh'] \quad (16)$$

여기서, $Q(h) = \exp(\frac{2}{m} \int_0^h f_2(\zeta) d\zeta)$ 이다. 위의 식에서 관통자와 표적을 관통하는 과정에서 손실되는 에너지는 총 항력에 의한 $f_0(h)$ 와 $f_2(h)$ 에 의하여 발생되고 있음을 알 수 있다. 관통자가 표적을 관통하기 위하여 입사되는 초기 속도를 v_{imp} , 관통자가 표적을 관통하기 위한 최소의 초기속도를 v_u , 그리고 표적을 관통한 후 남아있는 잔류 속도를 v_{res} 으로 정의하면 관통자의 운동에너지 관계식은 다음과 같다[6].

$$\frac{1}{2} m v_{res}^2 = \frac{1}{2} m v_{imp}^2 - \frac{1}{2} m v_{loss}^2 \quad (17)$$

위의 수식으로부터 유도된 에너지 손실항 $v_{loss}(h)$, 최대 관통깊이 $v(H) = 0$, 탄도한계속도에 대응되는 에너지 관계식은 다음과 같이 정리된다.

$$\frac{1}{2} m v_{imp}^2 = \int_0^H f_0(h') Q(h') dh' \quad (18)$$

$$\frac{1}{2} m v_u^2 = \int_0^{b+L} f_0(h') Q(h') dh' \quad (19)$$

결과적으로 표적을 관통하는 관통자의 탄도한계 속도 v_{bl} 및 잔류속도 v_{res} 는 관통자의 탄두 노즈 형상에 따라 표적을 관통하는 과정에서 발생하는 항력 및 마찰력 스트레스에 기인하며 지수함수적인 의존성을 갖는 것으로 해석된다.

2.2 모의실험 결과

알루미늄 2024T-3 금속판 표적과 금속 탄두에 대한 관통 특성에 대한 M&S를 수행하였다. 존스 홉킨스 대학의 Ballistic Analysis Laboratory (BAL) 기관에서는 실 사격시험 평가를 기반으로 하여 강(steel) 재질의 파편이 다양한 금속 재료를 관통하는 과정에서 파편의 탄도한계속도 v_{bl} , 잔류속도 v_{res} 및 잔류질량 m_{res} 에 대하여 획득된 경험적 관계식을 Project THOR Technical No. 47(1961)에 보고하였으며[20], 비금속 재료에 대한 관통기구와 관련된 경험식도 Project THOR Technical Report No. 51(1963)로 보고하였다[24]. 금속판형의 표적에 대해서는 다양한 경험식 및 기본적인 모델과 관련하여 Zook 및 James에 의해 정리하여 보고되었다[25-26]. 또한 Holloway는 텅스텐 파편이 강(steel) 및 알루미늄 표적을 관통하는 과정에 대하여 THOR 방정식을 적용한 결과에 대해 보고하였다[27]. THOR 방정식은 실 사격시험으로부터 획득된 데이터를 이용하여 관통자의 탄도한계속도, 잔류속도 및 잔류질량 등에 대한 경험방정식으로서 관통자의 초기 질량 m_0 , 관통자의 투영단면적 A , 관통자의 초기입사속도 v_0 와 입사각도 θ_0 , 그리고 표적의 두께 T 등 다섯 개의 변수에 대한 연관성을 제시하였다. 1961년에 발표된 THOR 방정식을 바탕으로 수정된 경험식은 1981년 DOE, 2005년 Crull 및 2010년 Dusenberry에 의해 요약되어 아래 수식과 같이 발표되었다[28-29].

$$v_{bl} = 0.3048 \cdot 10^{c_1} (61024bA)^{\alpha_1} \cdot (15432.4m)^{\beta_1} (\sec\theta)^{\gamma_1} \quad (20)$$

$$v_{res} = v_{imp} - 0.3048 \cdot 10^{c_0} (61024bA)^{\alpha_0} \cdot (15432.4m)^{\beta_0} (\sec\theta)^{\gamma_0} (3.28084v_{imp})^{\lambda_0} \quad (21)$$

$$m_{res} = m - 0.648 \cdot 10^{C_2-4} (61024bA)^{\alpha_2} \cdot (15432.4m)^{\beta_2} (\sec\theta)^{\gamma_2} (3.28084v_{imp})^{\lambda_2} \quad (22)$$

위의 수식에서 사용된 상수 값들은 탄두 노즈의 형상, 재질 및 표적의 물리적 특성에 따라 실 사격실험을 통하여 획득된 데이터로부터 추정된

경험상수이다. 본 연구에서는 반구형 노즈 형상을 갖는 강(steel) 재질의 탄두와 알루미늄 2024T-3 표적에 대하여 알려진 THOR 상수값들을 이용하여 실 사격시험 데이터를 추정하였으며, 추정된 데이터를 이용하여 수식 (16)에서 이론적으로 제시된 스트레스가 손실속도 및 손실질량 등에 미치는 영향성을 추정하는 수치해석을 시도하였다. 관통자 질량 m_{imp} , 입사속도 v_{imp} , 표적 두께 ℓ 을 주 변수로 고려하여 수치해석 하였으며, 관통자 및 표적의 물리적 특성 등이 관통기구에 미치는 일반화된 영향성을 추정하였다.

파편의 질량 W_f (lb)과 파편의 직경 d (in)의 영향을 파편의 계량 밀도 $D = W_f/d^3$ 로 표현하며, 표준 노즈 형상에 대하여 cgs 단위로 환산하였다. 관통자의 질량 m_{imp} 와 입사속도 v_{imp} 및 표적의 두께 ℓ 에 대하여 표적을 관통한 후 관통자의 잔류속도, 탄성한계속도, 잔류질량 및 운동량의 변환관계를 계산하여 보았다.

수치해석에 사용된 관통자의 질량 m_{imp} 은 2.5 g, 5 g, 10 g 및 15 g 경우이며, 표적의 두께 ℓ 는 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm 및 6.35 mm로 설정하였다. Fig. 2는 반구형 노즈 형상을 갖는 금속 관통자 m_{imp} 가 표적을 정방향으로 입사하는 경우 관통자의 탄도한계 속도 변화를 보여주고 있으며, 관통자의 질량이 증가할수록 탄도한계 속도는 지수 함수적으로 감소하는 경향에 대하여 다음과 같은 지수함수를 사용하여 수치해석을 하였다.

$$v_{bl} = v_0 \exp[-m_{imp}/\mu] + v_c \quad (23)$$

수치 해석한 결과 식 (23)에서 지수함수의 감쇠상수로 설정한 μ 는 두께가 서로 다른 표적에

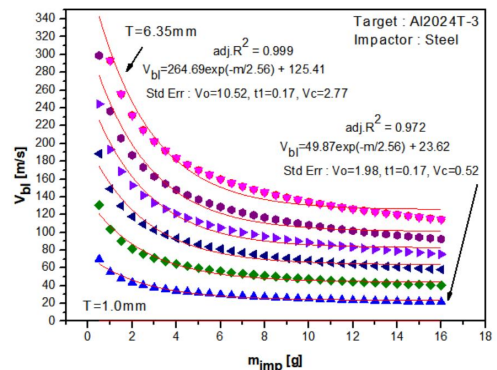


Fig. 2. The Ballistic limit velocity of the impactor decrease exponentially as impactor mass increases.

대하여 모두 $\mu = 2.56 \pm 0.174$ 를 갖으며, 또한 offset 상수 v_c 도 $v_c = 0.47v_0$ 의 관계를 갖는 것으로 해석되었다. 수치해석 결과 신뢰도는 $Adj. R^2 = 0.97$ 이상이었다. 식 (23)에서 감쇠상수 μ 가 일정한 값을 갖는 것은 관통자의 질량과 무관하며, 식 (16)에서 같이 관통과정에서 표적과의 접촉에서 발생하는 스트레스에 의한 것으로 해석될 수 있다. 따라서 Fig. 2에서와 같이 표적의 두께 변화에 따른 탄도한계속도의 의존성은 식 (23)에서 v_0 와 연관성이 있음을 추정하였다. 추정한 결과는 Fig. 3에서와 같이 탄도한계속도에 대한 수치해석 식에서 v_0 값은 표적의 두께 변화에 선형적인 의존성을 뚜렷이 갖는 것으로 나타났다. 따라서 탄도한계 속도에 대한 수치해석 결과 표적의 두께변화와 관통자의 질량 변화에 대하여 다음 수식과 같은 의존성을 갖는 것으로 해석되었다.

$$v_{bl} = (40.0\ell + 12.4) \cdot [\exp(-m_{imp}/2.56) + 0.47] \quad (24)$$

위의 식에서 표적의 탄도한계속도 v_{bl} 의 단위는 m/s, 두께 b 의 단위는 mm, 관통자의 질량 m_{imp} 의 단위는 g이다.

표적의 두께가 0인 경우 v_0 값이 12.4의 threshold 값을 갖으며, 이때 질량이 0인 경우 탄도한계속도의 offset 값은 5.8이었다 결과적으로 탄도한계속도에 대하여 수치해석으로 유도된 식 (24)는 Aluminum 2024T-3 표적의 허용두께의 범위 0.5 mm에서 51.0 mm까지, 반구형 노즈 형상을 갖는 강(steel) 재질 탄두의 허용질량 0.32 g에서 16 g까지에 대하여 $Adj. R^2$ 값이 0.99 이상으로 매우 높은 신뢰도를 갖는 것으로 확인되었다.

금속 관통자가 알루미늄 표적을 관통하는 과정에서 손실되는 에너지 및 관통 후 잔류 에너지를 추정하기 위하여 실 사격시험을 기반으로 한

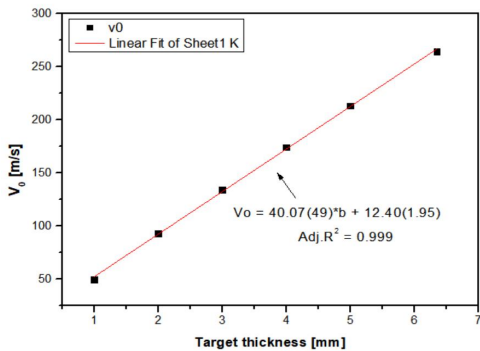


Fig. 3. The v_0 increases linearly as target thickness increases.

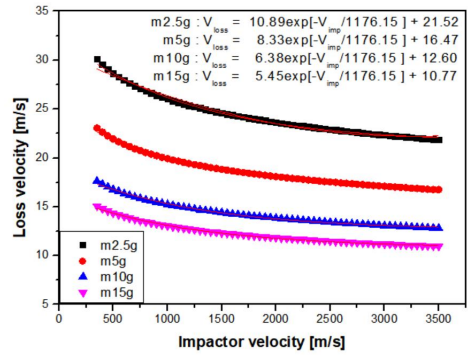


Fig. 4. The velocity loss of the impactor decrease exponentially as the impactor velocity increases.

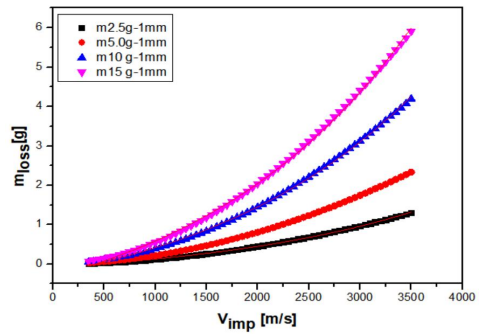


Fig. 5. The mass loss of the impactor increase exponentially as the impactor velocity increases.

THOR 방정식을 이용하였다. 관통과정에서 손실되는 속도에 대하여 관통자의 질량 m_{imp} , 입사속도 v_{imp} 및 표적의 두께 ℓ 를 주변수로 고려하여 수치해석을 하였다. Fig. 4와 5는 두께 1mm 알루미늄 표적에 대하여 서로 다른 질량을 갖는 관통자에 대하여 표적 속에서 손실되는 속도 v_{loss} 와 손실 질량 m_{loss} 에 대하여 관통자의 입사속도 v_{imp} 와의 지수함수적인 연관성을 나타내고 있다. 이를 추정하기 위한 수치해석 함수는 다음과 같으며, 감쇠변수로 ν 와 γ 및 offset 상수 v_c 와 m_c 를 각각 설정하였다.

$$v_{loss} = v_0 \exp[-v_{imp}/\nu] + v_c \quad (25)$$

$$m_{loss} = m_0 \exp(v_{imp}/\gamma) + m_c \quad (26)$$

수치 해석 결과 관통자의 질량이 2.5 g, 5 g, 10 g 및 15 g까지 변화되는 모든 경우에 대하여 감쇠상수는 $\nu = 1176.15 \pm 31.42$ 로 일정하고, 상

수 v_c 는 v_0 에 대하여 $v_c = 1.97v_0$ 로 일정한 비례 값을 갖는 것으로 나타났다. 이는 관통자가 표적을 관통하는 과정에서 감쇠상수 ν 및 계수 v_c 는 관통자의 질량과 무관하고 식 (16)에서와 같이 표적을 관통하는 접촉면에서 표적의 재질과 관통자의 형상에 의한 스트레스에 의하여 결정되는 상수임을 확인할 수 있었다. 손실속도 v_{loss} 가 표적의 두께변수 ℓ 및 관통자의 질량변수 m_{imp} 에 대한 의존성을 추정하기 위해 수행한 수치해석 결과를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 6에서와 같이 두께가 상이한 표적에 대하여 v_0 값의 수치해석 결과는 $Adj. R^2 = 0.99$ 이상의 신뢰도를 보였으며, 관통자의 질량에 대해 $v_0 \approx b_0 + b_1m + b_2m^2$ 다항식 의존성을 갖는 것으로 나타났다. v_0 다항식에서 전개 계수 b_i 값들은 Fig. 7과 같이 표적의 두께에 대해 선형적인 특성을 갖는 것으로 확인되었다.

Figure 6과 7의 결과로부터 v_0 를 관통자 질량 m 의 다항식으로 근사할 때 전개계수들은 표적의 두께 ℓ 에 대하여 선형적인 관계를 갖는 것으로 나타났다. 따라서 v_0 는 관통자의 질량 m 과 표적의 두께 ℓ 에 대하여 2변수 함수 $v_0(\ell, m)$ 로 다음 식과 같이 근사되었다.

$$v_{loss} = v_0(\ell, m) \cdot [\exp(-v_{imp}/1176.15) + 1.97] \quad (27)$$

여기서, $v_0(\ell, m) \approx b_0(\ell) + b_1(\ell) \cdot m + b_2(\ell) \cdot m^2$,

$$b_0(\ell) = 13.99\ell - 0.95,$$

$$b_1(\ell) = -1.16\ell + 0.079,$$

$$b_2(\ell) = 0.0412\ell - 0.0028.$$

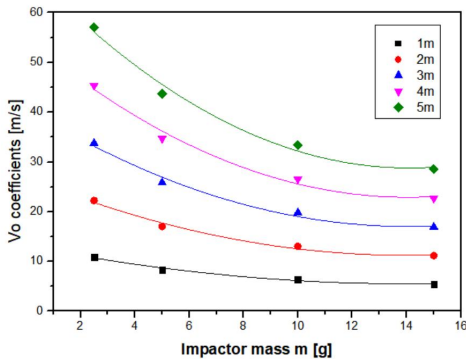


Fig. 6. The v_0 coefficients decrease nonlinear as the impactor mass increases.

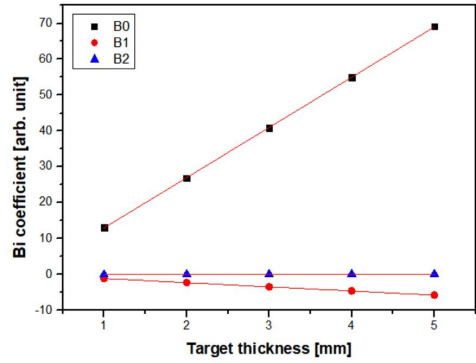


Fig. 7. The b_i coefficients of v_0 decrease linearly as the target thickness increases.

결과적으로 관통자가 표적을 관통하는 과정에서 손실속도와 잔류속도는 $v_{res} = v_{imp} - v_{loss}$ 의 관계식으로부터 계산될 수 있다. 위의 수식은 실 사격시험으로부터 획득된 THOR방정식에서 제시한 표적의 두께 범위 $0.5\text{mm} \leq \ell \leq 51\text{mm}$, 반구형 형상을 갖는 관통자의 질량 범위 $0.32\text{g} \leq m \leq 16\text{g}$, 관통자의 속도 범위 $366\text{m/s} \leq v_{imp} \leq 3353\text{m/s}$ 에 대하여 $Adj. R^2 \geq 0.99$ 의 신뢰도를 갖는 추정 결과이다.

관통자의 입사속도가 증가함에 따라 관통자의 질량 손실 정도를 Fig. 5에 나타내었다. 관통자의 질량 손실량을 관통자의 입사질량 및 표적의 두께에 대한 의존성은 식 (26)의 지수함수를 이용하여 수치해석 하였다. 수치해석 결과 관통자의 속도 및 관통자의 질량 증가에 따라 질량 손실량 증가상수는 $\gamma = 2151.87 \pm 40.70$ 로, 상수비는 $m_0/m_c = 1.21$ 로 모두 동일하게 나타났다. 계수 m_0 에 대하여 표적의 두께 ℓ 및 관통자의 질량 m 에 대한 의존성을 추정한 결과 Fig. 8과 9에 나타내었다. 계수 $m_0 = m_0(\ell, m)$ 의 2변수에 대한 비선형적인 의존성은 다음과 같은 다항식으로 추정되었다.

$$m_{loss} = m_0 \cdot [\exp(v_{imp}/2151.87) + 1.21] \quad (28)$$

여기서, $m_0(\ell, m) \approx b_0(\ell) + b_1(\ell) \cdot m + b_2(\ell) \cdot m^2$,

$$b_0 = (0.05348 + 0.0134\ell - 0.001\ell^2),$$

$$b_1 = (0.09252 + 0.02318\ell - 0.0018\ell^2),$$

$$b_2 = (-7.87 - 1.98\ell + 0.0296\ell^2)10^{-4}.$$

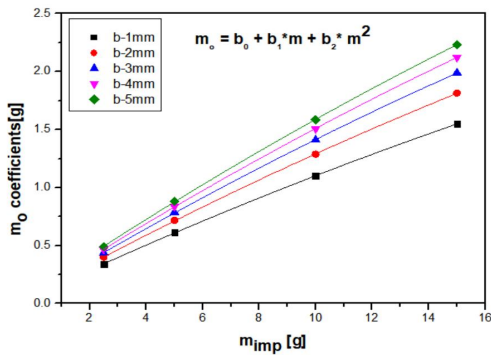


Fig. 8. The leading coefficient m_0 increases nonlinear as the impactor mass increases.

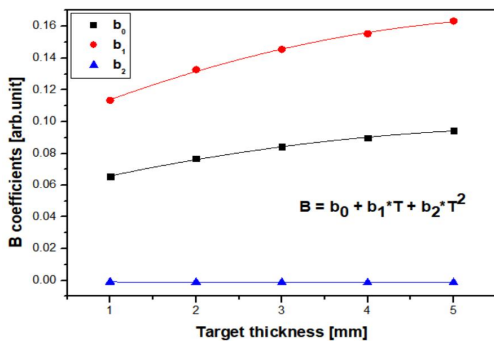


Fig. 9. The b_i coefficients increases nonlinear as the target thickness increases.

알루미늄 표적에 대하여 반구형 노즈 형상을 갖는 금속탄두가 관통하는 과정에 대하여 관통자의 탄구한계속도, 질량 손실 및 속도 손실 등에 대하여 지수함수 형식을 이용하여 수치해석을 수행한 결과 모두 높은 신뢰도를 갖는 것으로 나타났다. 주요 변수로는 관통자의 입사질량, 입사속도 및 표적의 두께인 것으로 추정되었다. 관통과정에서 발생하는 탄두 노즈와 표적 사이의 발생하는 스트레스에 의한 총 항력은 지수함수의 감쇠인자 및 offset 인자로 작용하고 있는 것으로 확인되었다. 이러한 감쇠상수 및 offset 상수는 표적의 재질과 탄두의 형상 및 입사각이 바뀌는 경우에 대하여 특정한 값으로 변경될 것으로 추정된다.

III. 결 론

현실적으로 실 사격시험을 통해 데이터를 획득하고, 획득된 데이터를 이용하여 경험식을 형식

화하는 과정은 비용부담이 크고, 실험장치의 구성 및 측정 장치의 정확도에 대해 높은 신뢰성이 요구된다. 또한 실험의 위험성에 따른 안전 확보와 장시간 소요 등 다양한 문제점들에 직면하기 때문에 용이하지 않다. 따라서 본 논문에서 제시하는 탄도한계속도와 잔류속도 함수는 BRL그룹에서 THOR 프로젝트로 수행된 실 사격시험을 통해 획득된 데이터로부터 추정된 경험식을 이용하여 실 사격시험 데이터를 추정하고, 수치해석을 통하여 수식 형식화에 대해 일반화를 시도하였다. 제시된 일반화된 수식들은 탄두 질량, 속도 및 표적의 두께 등에 대한 제한된 범위 내에서 실 사격시험 결과에 매우 근접하는 결과를 재현할 수 있다. 위협무기에 의해 항공기의 생존성과 취약성을 분석하는 과정에서 취약구성품별 손상확률을 산정하는데 있어서 관통과정에 대한 이해가 필수적으로 요구된다. 위협무기가 표적을 관통하는 과정에서 손실되는 에너지와 관통 후 잔류속도 등은 취약구성품의 손상확률 $P_{al/h}$ 을 추정하기 위한 근거가 될 수 있다. 항공기의 취약구성품별 손상확률에 대하여 축적된 데이터가 없는 상황에서 합리적으로 $P_{al/h}$ 를 추정하는 수식화는 매우 중요하다. 본 연구결과로서 제시되는 관통자의 손실속도와 관통 후 잔류속도 및 잔류질량 등에 대한 수식을 통하여 취약 구성품의 손상확률을 추정하는데 중요하게 적용될 것으로 기대된다. 계속되는 연구를 통하여 잔류속도, 잔류질량 및 손실속도 수식을 이용하여 $P_{al/h}$ 함수의 수식화를 구현하여 보고할 계획이다.

References

- 1) JTCG/ME, *Penetration Equations Handbook for Kinetic-Energy Penetration(U)*, Joint Technical Coordinating Group for Munitions Effective(Anti-Air), JTCG/ME-77-16, 1985.
- 2) Federal Aviation Administration(FAA), *Advanced Aircraft Material-Engine Debris Penetration Testing*. Office of Aviation Research and Development. Washington, D.C., 2005.
- 3) Kim, K. S., and Lee, J. H., "Vulnerability Assessment Procedure for the Warship Including the Effect of Shotline and Penetration of Fragments," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 49, No. 3, 2012, pp. 254~263.
- 4) U.S. Army Test and Evaluation Command

Test Operations Procedure, "Ballistic Tests of armor Materials," Report No. TOP 2-2-710, U. S. Army Aberdeen Proving Ground(STEAP-MT-M) Aberdeen Proving Ground, MD. 21005, April 6, 1977.

5) Mascianica, F. S., "Ballistic Technology of Lightweight Armor materials (U)," Army Materials Research Agency, Watertown, Mass., AMRA MS 74-07, Sep. 2004.

6) Gabi Ben-Dor, Anatoly Dubinsky, and Tov Elperin, "High-Speed Penetration Dynamics," *World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.*, Singapore, 2013.

7) Recht R. F., "Chapter 7 - High Velocity Impact Dynamics: Analytical Modeling and Plate Penetration Dynamics," John Wiley & Sons, Inc., 1990, pp. 443~514.

8) Allen, W. A., Mayfield, E. B., and Morrison, H. L., "Dynamics of a projectile Penetrating Sand," *Journal of Applied Physics*, Vol. 28, No. 3, 1957.

9) Recht, R. F., and Finnegan, S. A., "Penetration Equations for Tungsten Fragments," Denver Research Institute, Denver, CO. NWC TP 6788, Naval Weapons Center, China Lake, CA, May 1986.

10) Ipson, T. W., and Recht, R. F., "Ballistic Perforation by Fragments of Arbitrary Shape," Denver Research Institute, NWC TP 5972, Naval Weapons Center, China Lake, CA, May 1986.

11) Jung, K. J., "A Study on Survivability of Combat Aircraft in Conceptual Design," *Journal of The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, Vol. 26, No. 7, 1998, pp. 153-160.

12) Yang, J. S., Lee K. T., and Myeong, H. S., "The Advanced Study of GUI Based Software SACSAs for the Aircraft Combat Survivability Analysis and Aircraft/Ground-based Threat Database," *Proceeding of The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences 2012 Conference*, 2012, pp. 824~829.

13) Kim, J. H., Yang, J. S., Kim, S. H., and Lee, K. T., "The Study of Improved GUI Based Integrated Software for the Aircraft Combat Survivability Analysis," *Proceeding of The Korean Society for Aeronautical & Space*

Sciences 2012 Conference, 2012, pp. 1878~1883.

14) Kim, K. S., Lee, J. H., Son, and Hwang, S. Y., "Simplified Vulnerability Assessment Procedure for the Warship Based on the Vulnerable Area Approach," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 48, No. 5, 2011, pp. 404~413.

15) Kim, K. S., Lee, J. H., Son, G. J., and Jeon, J. I., "A study of the procedure for integrated survivability assessment," *Society of CAD/CAM Engineers 2012 Conference*, 2012, pp. 824~840.

16) Kim, H. S., "Development of Design & Analysis Technology for Total Ship Survivability Enhancement," Korea Institute of Machinery & Materials, 2012.

17) Khoda-rahmia, H., Fallahib A., and Liaghatc, G. H., "Incremental deformation and penetration analysis of deformable projectile into semi-infinite target," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 43, Issues 3~4, Feb. 2006, pp. 569~582.

18) Alekseevskii, V. P., "Penetration of a rod into a target at high velocity. In Combustion, Explosion and Shock Waves 2," *Faraday Press, New York, USA*, 1966.

19) Tate, A., "A theory for the deceleration of long rods after impact," *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 15, 1967, pp. 387~399.

20) Project THOR Technical Report No. 47, The Johns Hopkins University, Institute for Cooperative Research, Ballistic Analysis Laboratory, Baltimore, MD., 1961

21) Arthur J. Dzimian, "The Penetration of Steel Sphere into Tissue Models," U. S. Army, Chemical Warfare Laboratories, Technical Report, CWLR 2226, Aug. 1956.

22) George W. Stone, Security and Survivability Department, 5822, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico 87185.

23) Backman, M. E., and Goldsmith, W., "The Mechanics of Penetration of Projectiles Into Targets," *Int. J. Eng. Sci.* Vol. 16, Issue 1, 1978, pp. 1~99.

24) Project THOR Technical Report No. 51, The Johns Hopkins University, Institute for Cooperative Research, Ballistic Analysis Laboratory, Aberdeen Proving Ground, MD., 1963.

25) Zook, J., "An Analytical Model of Kinetic Energy Projectile/Fragment Penetration," BRL MR 2797, 1977.

26) James Dehn, TECHNICAL REPORT ARBRL-TR-02188, Particle Dynamics of Target Penetration, Sep. 1979.

27) Holloway, C. L., Danish, M. B., and Matts., J. A., "Penetration Relations for

Tungsten Alloy Fragments versus Selected Target Materials," ARBRL-TR-02087, 1978.

28) DOE/TIC-11268, "A manual for the prediction of blast and fragment loadings on structures," *U. S. Department of Energy*, 1981

29) Dusenberry, D. O., "Handbook for Blast Resistant Design of Buildings," *J. Wiley & Sons*, Hoboken, NJ, 2010.