



J. Korean Soc. Aeronaut. Space Sci. 47(12), 904-912(2019)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2019.47.12.904

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

실린더형 HE 탄두 폭발 시 파편의 속도 및 발사각 추정방법 연구

황창수¹, 박용현¹, 박세권¹, 정대환², 이문식³, 강순부³, 김득수⁴

The Study on the Fragment Ejection Velocity and Spray Angle from a High Explosive Cylindrical Warhead

Changsu Hwang¹, Younhyun Park¹, Seikwon Park¹, Daehan Jung², Moonsik Lee³, Sunbu Kang³
and Deuksu Kim⁴

Department of Aeronautical Science, Jungwon University¹

Department of Mechanical Engineering, Korea Air Force Academy²

Department of Natural Sciences, Korea Air Force Academy^{3,4}

ABSTRACT

We have studied the numerical analysis about the fragment ejection velocity and spray angle when the High Explosive warhead detonated at proximity distance at an aircraft. To study the physical quantities about the warhead components is very important to assessment the vulnerability of aircraft. Generally, the physical quantities about the components of a warhead such as the mass, length, diameter and charge to mass ratio are unknown. Therefore, it is required to estimate the physical quantities by using physical continuities of similar threats. The empirical formulas to understand the dependence among charge to mass ratio, length and diameter ratio were driven by using the physical parameters of similar threatening such as terrier, sparrow. As a result, we confirmed that the dead mass ratio was closed to 20% of warhead mass since the metal case of the proximity threat acts as a simple carrier. This implies that the effective length and diameter of High Explosive Compound is smaller than the length and diameter of warhead, and become a key to understand the large ejection gradient velocity and small spray angle of fragments within 6 degree.

초 록

본 연구는 항공기에 근접하여 폭발하는 고폭형 위협 무기의 파편 발사속도 및 발사각을 수치 해석적으로 추정한 결과이다. 고폭형 위협 무기에 대한 항공기의 취약성을 평가하기 위하여 탄두 구성품의 물리량을 이해하는 것은 매우 중요하다. 일반적으로 고폭형 위협 무기에 대한 구성품의 질량, 길이 및 직경 등 물리적 변수는 알려져 있지 않다. Terrier, Sparrow 등 유사 위협 무기들의 데이터를 이용하여 charge to mass 비율, 길이와 직경 비율 등과 관련된 경험식을 수치 해석적으로 유도하였다. 근접신관에 의하여 외부에 폭발하는 탄두에서 탄두 덮개 구성비는 20% 수준으로 나타났으며, 고폭 화약의 양쪽 끝부분에서 방사되는 파편의 발사속도 구배 현상이 뚜렷이 나타났지만 범선 방향에 대한 발사각은 6° 이내로 나타났다.

† Received : August 2, 2019 Revised : October 29, 2019 Accepted : November 7, 2019

¹ Adjunct Professor, ² Adjunct Professor, ^{3,4} Professor

⁴ Corresponding author, E-mail : deuksu@gmail.com

© 2019 The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences

Key Words : Cylindrical Warhead(실린더형 탄두), High-explosives(고폭약), cm Ratio(cm 비율), Ejection Velocity(발사속도), Spray Angle(발사각), Proximity Fuze(근접신관)

I. 서 론

항공기 개발을 위한 설계 최적화 과정에서 개발 대상 항공기의 용도 및 임무 환경에 대한 취약성 및 생존성 평가에 관한 선행연구가 필수적이다. 특히 전투기와 같이 적의 위협에 직면하여 임무를 수행하여야 하는 경우 지대공 또는 공대공 미사일 등 적 위협 무기로부터 전투생존성(Air Combat Survivability)을 향상시키기 위하여 피탐성(Susceptibility) 및 취약성(Vulnerability)을 반영한 설계 최적화 기술이 개발 초기부터 반영되고 있다[1]. 대표적인 예로써 F-117은 스텔스(Stealth) 기술이 적용되어 피탐성을 감소시켜 전투생존성을 향상시켰으며, 근접항공지원(Close Air Support) 임무를 주로 수행하는 A-10은 취약한 부분을 보강하여 취약성을 감소시켜 전투생존성을 향상시켰다[2].

항공기 설계 최적화를 위해 지대공(Surface to Air, SA) 또는 공대공(Air to Air, AA) 미사일 등 다양한 위협에 대하여 개발 항공기의 피탐성, 취약성 등 생존성에 대한 정량적인 분석이 요구되고 있다. 정확한 분석을 위해서는 실 사격시험(Live Fire Test)을 통한 평가가 요구되지만, 안전성, 경제성 등을 고려하여 미국 등 주요국가에서는 COVART, AVAL 등과 같은 전문적인 M&S(Modeling & Simulation) 분석 도구를 개발하여 생존성 분석에 활용하고 있다.

M&S 분석에서 요구되는 자료는 개발 항공기의 임무 환경에 대한 추정 가능한 위협 무기에 대한 제원, 표적 피격확률, 폭풍효과(Blast Effect), 파편의 관통방정식(Penetration Equation), 표적 데이터, 피격 시 핵심 구성품(Critical Component)의 손상확률($P_{cd/h}$) 등에 대한 정량적인 자료이다. 특히 전투기의 경우 지대공/공대공미사일 등 위협으로부터 방사된 파편 형태, 크기, 속도 및 파편 개수 등에 의하여 치명적인 영향을 받기 때문에 이에 대한 정보를 M&S 분석 도구에 반영하는 것은 매우 중요하다. 그러나 적의 위협 무기에 대한 세부적인 위협 자료는 알려져 있지 않기 때문에 이론 및 경험식을 이용한 공학적 추정 방법을 통해 분석에 필요한 자료를 도출하여야 한다.

본 연구에서는 전투기를 표적으로 하는 지대공/공대공미사일 등 위협 무기의 탄두(Warhead)가 근접신관(Proximity Fuze) 또는 접촉신관(Contact Fuze)에 의해 고폭발(High Explosively Detonation)하는 경우 방사되는 파편의 평균 발사속도 및 발사각을 추정하는 방법을 고찰하였으며, 대상 위협 무기에 대한 세부 자료가 알려져 있지 않은 경우 유사 위협 무기의 탄두 제원으로부터 파편의 발사속도 및 발사각을 추

정하는 보편적인 방법에 대한 연구결과를 제시하고자 한다.

고폭탄의 고폭 화약의 폭발에너지가 외부 금속 덮개로 전이되어 파편의 생성, 파편의 발사속도 및 발사각 추정은 실 사격 시험, 해석적인 방법 및 수치 모사실험 방법 등으로 이해될 수 있다. 실 사격 시험의 경우 고비용, 데이터 획득 및 재현성 등의 문제로 매우 제한적이지만, 해석적인 방법과 수치 모사실험은 재현성 및 비용부담 측면에서 유리하다. 대표적인 해석적인 방법으로는 파편의 발사속도를 계산하는 Gurney Equation, 파편의 위치에 따른 발사각을 계산하는 Taylor Formula 등이 있다. 위의 해석적 방법에 사용된 고폭탄은 기본적으로 실린더형 대칭성을 갖는 고폭 화약, 중심축 선상 임의의 지점에 신관 및 고폭 화약 외부에 금속 덮개로 구성된 구조를 가정하고 있다. 신관에 의해 고폭 화약이 폭발하는 경우 폭발에너지가 금속 덮개로 전이되어 파편의 생성 및 방사되는 것을 가정한다. 파편의 발사속도를 결정하는 지배변수로는 고폭약의 폭발 전이 속도 VG와 금속 덮개 중량 대비 고폭 화약 중량비율 M/C이다. Gurney Equation의 경우 고폭탄 금속 덮개에 있는 파편의 초기위치에 따른 발사속도의 변화를 전혀 고려하고 있지 않기 때문에 전반적으로 파편의 발사속도를 과도하게 평가하는 문제점이 있다. Taylor Formula의 경우 파편의 발사각을 결정하는 지배변수로는 파편의 발사속도, 고폭약의 폭발 전이 속도 및 파편의 초기위치 등이다. Predrag *et al.*의 보고에 의하면 실린더 대칭성을 갖는 탄두의 폭발 시 생성된 파편의 발사속도 및 발사각에 대한 해석적인 추정 결과는 파편의 위치에 따라 실 사격 실험결과와 크게 차이가 발생한 것으로 보고되었다[3,4]. 즉, 해석적인 방법의 경우 고폭 화약 대비 금속 파편의 중량비율, 금속 파편의 초기위치 및 폭발과정에서 고폭 화약의 실린더 끝쪽의 화약 손실에 의한 End Effect 등을 고려한 파편 발사속도 및 발사각에 대한 보정이 필수적이다.

수치 모사실험으로는 유한요소법(FEM)을 기반으로 한 Abaqus 소프트웨어를 이용하여 실린더형 고폭탄 폭발 때문에 생성된 파편의 발사속도 및 발사각을 추정한 결과가 보고되었다[4]. 고폭탄 실린더 축선상 뇌관이 대칭적으로 존재하는 경우 파편의 발사속도 및 발사각에 대한 수치 모사실험 결과는 실 사격 실험결과와 많은 경우 일치하지만, 뇌관의 위치가 대칭적이지 않은 경우 파편의 위치가 고폭탄의 양쪽 끝으로 갈수록 수치 모사실험 결과는 실 사격 실험결과와 오차가 크게 발생하는 것으로 보고되었다. 수

치 모사실험의 경우 해석적인 방법보다 정확한 결과를 획득할 수 있는 장점이 있지만, 상대적으로 높은 비용부담과 고폭탄의 주요변수들에 대한 많은 정량적 데이터가 요구된다. 폭발에너지에 의한 금속 덮개의 변형과정 및 손상에 대한 정량적 데이터 및 고폭재료의 폭발과정에 대한 정량적 데이터 등이 요구된다[5-7].

금속 덮개의 변형 및 손상과 관련하여 Bridgman Effect에 의하면 고폭 과정에서 금속 덮개의 연성 및 인장 특성이 대기압에서 특성 대비 수백 배 증가하게 되어 금속 덮개가 고폭의 에너지를 실당하거나 유체 정압을 감소시키는 점 등의 비선형적인 특성이 있어 유한요소법에 따른 수치 모사실험은 매우 복잡한 과정이 요구된다[8]. Bridgman Effect에 의해 파편의 발사속도 및 발사각에 대한 오차가 크게 발생하지 않는 것으로 알려져 있다. 즉, 수치 모사실험 방법에서는 금속 덮개의 유체정압 효과에 대한 고려, 고폭탄의 끝 쪽에서 고폭압 손실 효과 및 고폭탄의 금속 덮개 중 파편으로 전이되지 않는 운반체로서 역할을 하는 dead 덮개 중량 등을 고려하기가 용이하지 않다.

따라서 본 연구에서는 실린더형 탄두의 길이 대 직경비율($L/D \leq 2$)이 작은 경우 폭발 시 발생한 압력이 유지되지 않고 감소하여 끝 쪽에 있는 파편들의 발사속도가 감소하는 현상 및 발사각이 커지는 End Effects를 고려하고[9], 금속 덮개 중량 중 파편으로 전이되지 않는 비율을 추정하여 해석적으로 파편의 발사속도 및 발사각을 추정하였다.

II. 본 론

2.1 탄두 구성(Warhead Structure)

미사일에 장착되는 탄두는 보편적으로 고폭약(High Explosive Compound), 금속 성형파편(Metal Preformed Fragment) 및 금속 덮개(Metal Casing) 등으로 구성된다. 지상, 해상 및 공중 등의 표적 종류에 따라 폭풍효과, 탄두 금속 덮개 또는 방사되는 파편들에 의한 표적 관통효과, 표적 내부에서 발생하는 충격파(Shockwave) 및 수압 램(Hydrodynamic RAM) 등에 의한 2차 파괴 등 탄두 폭발 효과를 극대화하기 위하여 설계에 반영되는 주요변수로는 고폭약 중량(C), 금속 파편 중량(M_f), 금속 덮개 중량(M_c), 탄두 직경(D) 및 탄두 길이(L) 등이다[10].

고폭 화약 폭발 시 방사하는 금속 파편의 발사속도 및 발사각은 금속 파편의 총중량과 고폭 화약의 총중량(C)에 대한 경험식에 지배를 받는다. 따라서 탄두 중량에서 파편으로 전이되지 않는 금속 덮개의 중량을 구분하여 산출한 결과를 반영하여 고폭 화약의 중량 대비 금속 파편의 중량비율, 실린더형 고폭

화약의 직경 및 길이, 고폭 화약 외피에 존재하는 파편의 개수, 발사속도 및 발사각 등을 추정하였다.

2.2 고폭약 중량(C) 및 금속 파편(M_f) 중량 산출

탄두 구성요소 중 탄두 덮개의 역할은 탄두 폭발 방식에 따라 운반자 또는 관통자로서 설계된다. 근접신관, 접촉신관 및 내부폭발 방식에 따라 탄두 총질량 대비 금속 덮개의 중량비율은 Table 1과 같이 상이하다. 근접신관의 경우 탄두 덮개는 운반체의 역할만 수행하게 되고, 고폭약 폭발 시 자연파편 또는 성형파편들이 방사될 수 있도록 하는 역할을 수행하는 반면, 접촉신관 또는 내부폭발을 수행하는 탄두의 경우 금속 덮개는 표적과의 충격 또는 표적의 관통이 선행되어야 하므로 탄두 중량비율이 상대적으로 크게 설계된다.

항공기와 같이 고속으로 이동하는 경량구조의 표적에 대한 위협 무기는 피격확률을 높이기 위하여 탄두가 근접신관에 의해 폭발하는 방식이 효과적이다. 이 경우 탄두가 폭발 후 파편의 개수를 증가시킬 목적으로 탄두의 금속 덮개의 중량비율은 15~20% 수준으로 설계되고 있다. 고강도 경도를 갖는 시설물 및 지상 표적 등을 관통한 후 내부 폭발하는 경우 탄두 덮개 중량비율은 50% 수준까지 설계된다[10].

탄두 내부의 고폭약이 폭발하게 되면 자연파편(Natural Fragment), 예정된 파편(Predicted Fragment) 또는 성형파편(Preformed Fragment)을 고속으로 방사하게 되며, 이때 파편의 발사속도는 고폭약 중량(M_c)와 탄두의 금속 중량(M_f)의 비로 추정한다. Gurney 공식은 고폭 화약의 폭발 시 총에너지는 고폭 화약이 폭발할 때 방사로 전이되는 가스 폭발의 평균적인 운동에너지와 탄두 금속 외피로부터 생성된 파편의 운동에너지의 합으로 표현하고 있다[11]. Fano는 고폭 화약이 폭발하여 금속 외피를 파편 형태로 파괴하기 위하여 사용되는 에너지를 고폭 화약의 총에너지에서 제외한 고폭 화약의 가용에너지 비율을 제안하였다[12]. 그러나 위의 Fano 수식은 실험 결과와 일치하지 않은 측면에서 Fisher는 수정된 Fano 수식으로 실험을 통한 경험식을 제시하였다[13]. 즉, 탄두를 구성하는 금속 덮개에서 파편이 발생하는 과정에서 소비되는 고폭 화약의 에너지 손실을 제외한 가용 가능한 고폭 화약의 에너지를 산출

Table 1. Dead weight ratio of metal case [10]

Type	Light Structure	Intermediate Structure	Heavy Structure
Fuze	Proximity	Contact	Internal
Ratio	15~20%	25~30%	50%

하여 폭발의 속도 및 파편의 속도를 추정할 수 있는 경험식(Empirical Formula)을 보고하였다. 수정된 Fano 수식으로부터 보편적으로 사용되고 있는 수식으로는 고폭 화약이 TNT이고, 파편 및 금속 덮개가 강철(Steel)인 경우에 대해 아래 수식과 같이 제시되었다.

$$\frac{W_b}{W_t} = 0.6 + 0.4 \cdot \left(\frac{1}{1 + 2m/c} \right) \quad (1)$$

금속 덮개 질량 대비 고폭 화약의 질량비 m/c 값이 증가할수록 고폭 화약 폭발로부터 가용 가능한 에너지 값은 0.6까지 감소하는 것으로 추정하고 있다 [14]. 위의 수식으로부터 탄두가 폭발하는 과정에서 파편으로 전이될 수 있는 고폭 화약의 에너지는 m/c 값에 의존되어 있으므로 정확한 m/c 값을 추정하는 것이 중요하다.

탄두 노즈 형상에 따른 파편의 발사속도, 발사각 및 파편의 분산 정도에 대하여 금속 덮개의 Yield Strength, Ultimate Strength 및 Failure Strain 등을 고려하여 Arbitrary Lagrangian-Eulerian(ALE) Solver 및 실 사격 실험을 통한 분석 결과 파편의 분산 규칙을 제시하고 탄두의 외피 반경과 고폭 화약에 접촉하는 금속 파편의 면의 형상 및 곡률 반경에 의존하는 것으로 제시하고 있다[15]. 고폭 화약이 폭발하는 과정에서 발생하는 폭발은 내부에너지에 의존되어 있으며, 정점 폭발 및 양극성 충격에 대한 고폭의 속도에 대한 효과를 분석한 결과 등이 보고되었다 [16-18].

탄두를 구성하는 금속 덮개가 고폭 화약의 폭발 때문에 형성된 파편 질량(m_f)에 대한 Mott's 질량분산 확률(M_A)는 금속 덮개의 두께(t_c) 및 고폭 화약의 직경(d_c)에 의존되어 있으며, 파편 개수 기댓값(N_f)과 관련하여 Mott's distribution은 다음 수식과 같이 제시하였다[19].

$$N_f(m_f) = \frac{M_{asc}}{2M_A^2} \cdot \exp\left(-\frac{m_f^{1/2}}{M_A}\right) \quad (2)$$

$$M_A = Bt_c^{5/6}d_c^{1/3}(1 + [t_c/d_c])$$

위의 식에서 Mott 상수 B는 고폭약의 특성 및 실린더형 덮개 형상에 의해 결정되는 상수로 Comp. A-3는 0.997, Comp. B는 1.006, Pentolite는 1.126, RDX는 0.964 그리고 TNT는 1.415 등으로 주어져 있다[14]. 따라서 파편 질량분산 확률 및 분산 개수 추정은 정확한 c/m 비율 추정이 중요하다. 그러나 일반적인 탄두 구조는 고폭 화약, 퓨즈 어댑터, 성형파편, Liner, Filler, Hoisting Lug 및 End Plate 등으로 구성되어 있으며, 이중 고폭 화약 폭발 시 파편으로 방사되지 않는 구성품이 존재하기 때문에 c/m 비율을 산정하는 측면에서 금속 질량이 과도하게 설정될

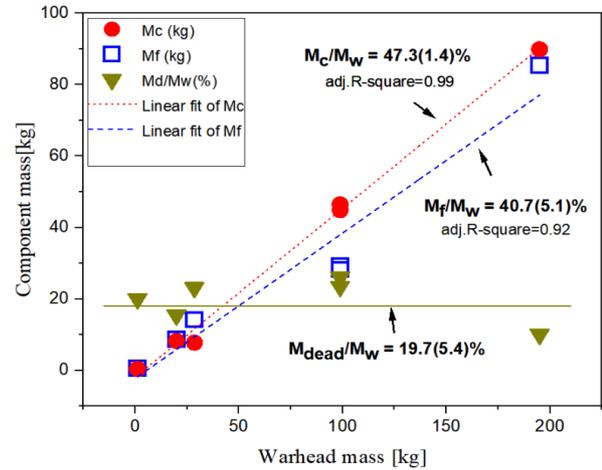


Fig. 1. The linear changes of a high explosive compound weight and metal fragment weight as the weight of warhead increase. The M_{dead}/M_w ratio is approximately constant around 19.7%.

수 있다. 즉, 탄두를 구성하는 금속 덮개에서 파편으로 발생하는 비율을 정확히 추정함으로써 탄두 폭발 이후 발생하는 파편의 개수, 발사각, 속도 및 질량 분포들에 대한 데이터 정확성이 향상될 수 있다.

1964년 미 국방성에서 보고된 유사위협 무기 중저대공 및 공대공 위협 무기별 탄두 총중량, 탄두 총길이 및 직경, c/m 비율, 파편 개수, 파편 크기 및 밀도 등의 데이터를 이용하여 탄두 금속 덮개에서 파편으로 전이되지 않는 dead 부분을 반영한 파편 중량 비율을 수치적으로 계산하였다[10]. 수치 해석하는데 활용된 유사 위협자료는 Terrier 1, Terrier 2, Sparrow I & III 등이다. 탄두 총중량(M_w), 파편 총중량(M_f), c/m 비율, 파편 수(N_f), 파편 크기 및 밀도 등의 데이터를 이용하여 파편 총중량비율(f), 고폭 화약 중량비율(α) 및 덮개 dead 중량비율(γ) 등의 상관관계를 분석하였다.

$$M_w = M_f + M_c + M_{dead} \quad (3)$$

$$\rightarrow f = \frac{M_f}{M_w}, \quad \alpha = \frac{M_c}{M_w}, \quad \gamma = \frac{M_{dead}}{M_w}, \quad \beta = \frac{c}{m} = \frac{M_c}{M_f}$$

탄두 총중량 M_w 가 증가함에 따라 파편 총중량 구성 비율의 수치해석 결과는 Fig. 1과 같이 탄두에서 파편 중량비율(f)는 40.7%(4.6)이며, 고폭 화약 중량비율(α)는 47.3%(3.0) 수준인 것으로 나타난 반면, 덮개 dead 중량비율(γ)은 상수 값을 갖는 것으로 나타났다.

$$M_f = 0.407M_w - 0.089 \quad (4)$$

$$M_c = 0.473M_w - 1.976$$

Table 2. SA/AA Missile High Explosive Threat [10]

Threat		M_w	M_f	M_c	c/m	N_f	f	α	γ
known	SA-2a	195	85.484	89.929	1.052	8000	0.438	-	0.101
	Terrier- II	98.883	29.217	46.455	1.59	4200	0.295	0.470	0.235
	Terrier- I	98.883	28.229	44.884	1.59	4058	0.285	0.454	0.261
	Sparrow-III	28.576	14.243	7.719	0.542	1488	0.498	0.270	0.232
	Sparrow- I	19.958	8.681	8.194	0.944	1315	0.435	0.410	0.155
	SA-7a	1.17	0.566	0.369	0.653	900	0.483	-	0.201
unknown	AA-11	8	3.167	1.805	0.57	1300	0.39	0.225	0.385
	AA-10	39	15.784	16.415	1.04	242	0.40	0.422	0.178

Table 2에서 M_{dead} 중량비율(γ)에 대한 산술평균은 19.73(± 5.4)%로 Table 1에 제시된 바와 같이 근접 폭 발하는 위협 무기의 20% 수준에 근접하는 것으로 나타났다. 따라서 공대공 위협 무기에 대한 M_{dead} 중량비율(γ)을 위의 결과를 적용하여 탄두 중량 대비 고폭 중량비율과 파편 중량비율을 산출하는데 활용하였다. 위의 결과를 이용한 탄두 구성품에 대한 제원이 알려져 있지 않은 AA-10 및 AA-11의 탄두 구성품의 중량비율에 대해 추정된 값은 Table 2에 제시하였다.

AA-10은 R-27 Alamo로 알려져 있으며, 탄두 중량은 8kg이고, AA-11은 R-23 Vypel로 알려진 탄두 중량이 38kg인 공대공미사일이며 MIG-29에 탑재된 실존하는 위협 무기이다. 수식 (4)를 이용하여 금속 파편 질량, 고폭 화약 질량, 파편 수 등을 산출하여 Table 2에 제시하였다. 제시된 값을 이용하여 파편의 발사각 및 파편 발사속도를 수치적으로 다음과 같이 산출하였다.

2.3 탄두 유효 길이(L_c) 및 유효 직경(D_c) 추정

탄두에서 고폭약이 차지하는 중량, 길이 및 반경을 추정하기 위하여 고폭 화약은 속이 팍 찬 실린더 형상으로 고려하고, 고폭 화약 외곽 실린더에 파편들이 촘촘히 둘러쌓아 실린더 겹질 형상으로 이루어진 것으로 가정하면 탄두 길이(L) 및 직경(D)와 고폭 화약의 길이(L_c) 및 직경(D_c)는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$L = L_c + 2l_{case}, \quad D = D_c + 2t_c \quad (5)$$

한 변의 길이가 a_0 인 정육면체 Steel 파편이 실린더형 고폭 화약 외경(R)인 옆면을 둘러싸고 있는 경우 파편 총중량은 다음과 같이 표현된다.

$$M_f = \rho_f V_f = \rho_f \cdot \pi(R^2 - R_c^2)L_c = N_f \rho_f a_0^3 \quad (6)$$

위의 식에서 탄두 반경(R)은 고폭 화약 반경(R_c)과

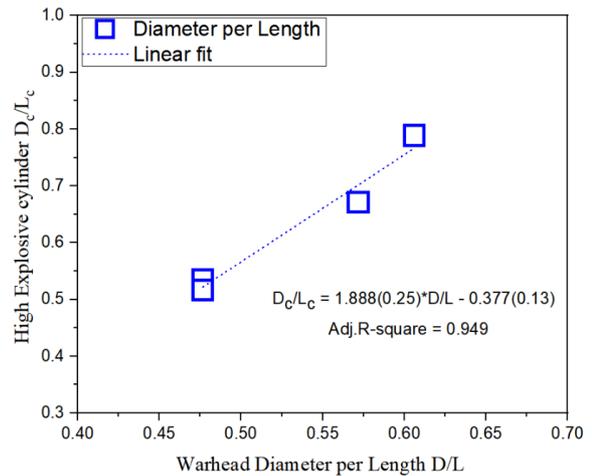


Fig. 2. Effective(D/L) estimation of high explosive compound from warhead

금속 두께(t_f)의 합이다. 만약 금속 파편이 단일 층으로 구성되어 있다면 $t_f = a_0$ 이다. 따라서 식 (6)은 다음과 같이 표현된다.

$$D_c = D - 2a_0 \rightarrow L_c = \frac{N_f a_0^2}{\pi(D - a_0)} \quad (7)$$

Table 2에서 Terrier와 Sparrow 위협 무기에 대한 Warhead General에 제시된 데이터를 이용하여 D_c/L_c 대비 D/L 의 의존성에 대해 수치 해석한 결과는 Fig. 2와 같이 선형적인 관계가 뚜렷이 나타났다. 이를 이용하여 지대공/공대공미사일의 탄두 데이터를 이용하여 D_c/L_c 추정된 결과를 Table 3에 제시하였다.

SA-7의 경우 탄두 질량은 1.15kg, 고폭 화약(RDX)은 0.37kg이 포함된 것으로 알려져 있다. 탄두의 직경은 72mm로 추정되며, 20% 수준의 M_{dead} 질량은 제외하면 금속 파편 총질량은 $M_f = 0.55$ 로 추정된다. 한쪽 끝이 파편 금속으로 둘러쌓는 실린더 형상으로 가정하고 고폭 화약 부피, 파편 질량 및 파편 수를

추정하면 다음과 같다.

$$M_c = \rho_c \pi R_c^2 L_c \rightarrow (R - t_c)^2 L_c = 6.5 * 10^{-5} \quad (8)$$

$$M_f = \rho_f [\pi R^2 (t_c + L_c) - \pi R_c^2 L_c] \rightarrow [R^2 (t_c + L_c) - (R - t_c)^2 L_c] = 2.17 * 10^{-5} \quad (9)$$

$$t_c^3 - 0.01388 t_c^2 + 0.006112 t_c - 2.17 * 10^{-5} = 0 \quad (10)$$

식 (8)~(10)에 보간법을 적용하여 계산한 결과 $t_c = 0.00385s$ 이며, $D_c = 0.0643m$ 및 $L_c = 0.06295m$ 이었다.

Table 3에 제시된 위협 무기의 탄두 길이 및 직경 데이터로부터 고폭 화약의 직경 및 길이를 계산한 결과를 이용하여 고폭 화약 폭발 시 방사되는 파편의 발사속도 및 발사각을 아래와 같이 계산하였다.

2.4 위협 무기의 발사속도 및 발사각 추정

미사일 탄두가 폭발할 때 방사되는 파편의 속도는 고폭약의 종류와 파편의 총중량 등에 의존한다. 탄두 폭발에 따른 파편의 발사속도 V_f 는 End Effects에 의한 감속효과를 고려한 Karpp *et. al.*이 제시한 수정된 Gurney Formula[20] 및 Gurney Constant에 대한 경험식[10] 등을 이용하여 계산하였다.

$$V_f = (\sqrt{2E})_{eff} \cdot \sqrt{\frac{F(z) \cdot c/m}{1 + 0.5F(z) \cdot c/m}} \quad (11)$$

$$F(z) = 1 - [1 - \min(\frac{z}{2R_c}, 1.0, \frac{L_c - z}{R_c})]^2 \quad (12)$$

$$(\sqrt{2E})_{ideal} = 0.52 + 0.25 * D_c \quad (km/sec) \quad (13)$$

식 (11)과 (12)에서 z 는 실린더형 고폭 화약의 중심축 선상에서 $z=0$ 기준점 너판 위치로부터 축 상의 거리를 나타내며, 실린더형 고폭 화약 외피에 존재하는 정방형 파편의 축 방향 초기위치를 나타낸다. 위의 식에서 Gurney Constant는 에너지 보존법칙으로부터 실린더형 고폭 화약의 길이 대비 직경비(L_c/D_c)가 매

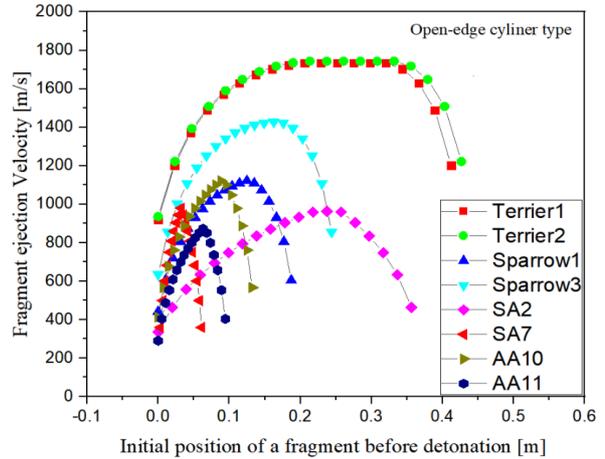


Fig. 3. Fragment ejection velocity

우 큰 경우에는 $\sqrt{2E}$ 로 수렴하는 값을 가지며, L_c/D_c 가 6보다 작은 경우 $\sqrt{2E}$ 의 유효값은 Weinland의 데이터에 의해 다음의 경험식으로 표현된다[21].

$$(\sqrt{2E})_{effective} = (\sqrt{2E})_{ideal} (1 - 0.36e^{-0.68L_c/D_c}) \quad (14)$$

식 (14)을 이용하여 고폭 화약 폭발 시 파편의 발사속도에 대한 계산 결과는 Fig. 3과 같다. 파편 위치별 발사속도는 양 끝 쪽에서 고폭 화약의 손실에 의한 폭발에너지 손실로 인해 파편의 발사속도가 감소하는 것으로 이해할 수 있다.

파편의 발사각 δ 는 비정상상태에 대해 보편적으로 적용되는 수정된 Taylor 방정식[22] 및 폭발이 정상상태에 도달되기 전 금속 파편 층에서 감속되는 속도 구배효과[23] 등을 적용하여 실린더형 고폭 화약 중심축 선상 z 위치에서 실린더형 외피에 존재하는 파편이 법선 방향에 대하여 기울어져 방사되는 발사각은 다음 수식과 같이 계산하였다.

$$\sin \delta = \left[\frac{V_f}{2D_c} - \frac{V_f \tau}{2} - \frac{(V_f \tau)^2}{5} \right] \cdot \frac{z}{\sqrt{R_c^2 + z^2}}, \quad (15)$$

where $0 \leq z \leq L_c$

Table 3. Diameter and length of warhead and high explosive by threat weapon

[m]	Terrier		Sparrow		SA		AA	
	#I	#II	#I	#III	2a	7a	10	11
L	0.554	0.554	0.302	0.355	0.769	0.135	0.504	0.314
D	0.264	0.264	0.183	0.203	0.957	0.144	0.460	0.340
N_f	4058	4200	1315	1488	8000	900	242	1300
a_0	0.0095	0.0095	0.0093	0.0105	0.0109	0.0042	0.020	0.0067
L_c	0.458	0.474	0.208	0.271	0.396	0.0629	0.147	0.105
D_c	0.245	0.245	0.164	0.182	0.752	0.0643	0.190	0.169

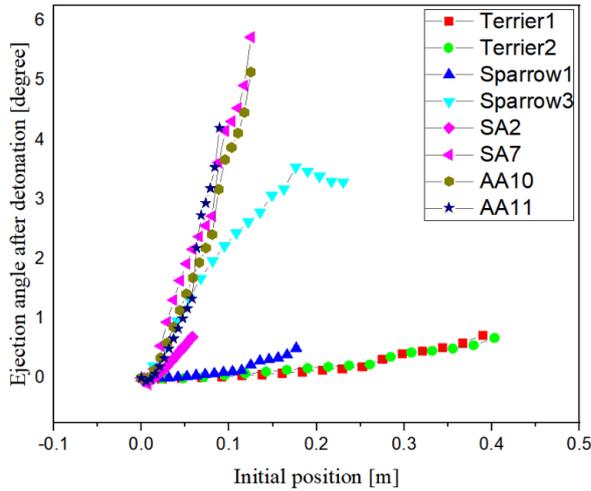


Fig. 4. Fragment ejection angle after detonation

위의 식에서 시상수 τ 는 폭발속도가 종단속도의 63%에 도달할 때까지의 특성 시간으로 Table 4와 같이 $5 \sim 8 \mu\text{sec}$ 수준이며, V_f 은 폭발지점으로부터 폭발 압 속도가 전이되는 거리에 따른 파편의 속도 변화율로 $0.01(1/\mu\text{sec})$ 수준인 것으로 알려져 있다[23]. Fig. 4는 식 (15)를 이용하여 고폭형 위협 무기에서 탄두 폭발 시 파편의 발사각을 계산한 결과를 보여 주고 있다. 발사각은 탄두 표면의 법선 방향에 대하여 기울어진 각도를 의미하며, 양의 각도는 고폭 화약 폭발이 진행되는 방향이다. 파편의 발사각은 전체 적으로 법선 방향 부근이며, 6° 를 벗어나지 않는 것으로 나타났다.

2.5 발사속도 및 발사각 추정 결과 분석

항공기를 표적으로 하고 근접신관에 의해 폭발하는 고폭탄에 대하여 탄두 덮개가 단순 운반체의 역할을 수행하는 경우 덮개의 중량비율은 19.7% 수준으로 추정되었으며, 이는 US Army Material[10]에서 제시하는 값에 수렴하는 것으로 추정되었다. 이 경우 덮개 중량을 제외하면 탄두 중량 대비 금속 파편의 중량비율은 $40.7(\pm 5.1)\%$ 수준으로, 고폭 화약의 중량비율은 $47.3(\pm 1.4)\%$ 수준으로 선형적인 관계가 있음을 확인하였다. 추정된 고폭 화약 중량 및 금속 파편

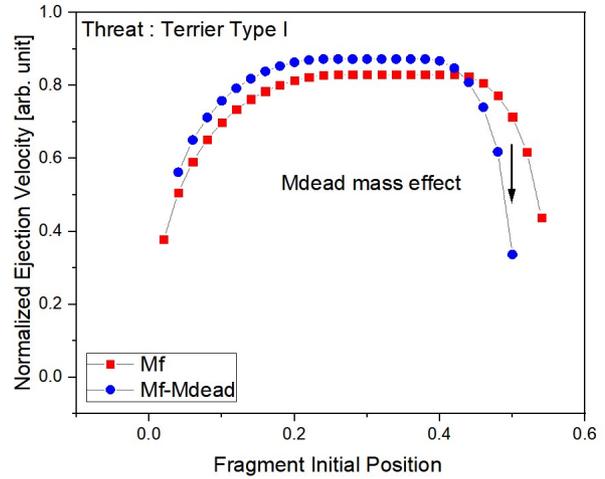


Fig. 5. Fragment ejection velocity effected by dead mass of metal case in Terrier Type I threat

중량, 고폭 화약의 직경 및 길이 등의 값을 이용하여 정방향 금속 파편의 초기위치별 발사속도와 발사각을 추정하였다. 발사속도는 고폭약 폭발에너지 전이에 대한 end effect에 의하여 시작과 끝점에서 속도 구배가 크게 발생하는 것으로 나타난 반면, 파편의 발사각은 법선 방향에 대하여 6° 이내로 방사되는 것으로 나타났다.

탄두 구성품 중 덮개 중량에서 파편으로 전이되지 않는 dead mass를 고려하는 경우 Table 3을 이용한 데이터를 이용하여 계산된 발사속도 및 발사각에 대한 효과를 Fig. 5와 Fig. 6에 각각 나타내었다. dead mass를 고려하는 경우 폭발지점에서 85% 부근 지점까지는 파편의 발사속도가 증가하는 반면 85%를 벗어나 탄두의 끝 쪽으로 위치한 파편들의 발사속도는 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 파편의 발사각은 실린더형 탄두의 금속 덮개 법선 방향에 대하여 기울어진 각도 δ 로 나타내며, 파편 위치별 dead mass를 고려하지 않은 경우 대비 고려한 경우에 대한 상대적인 발사각의 비율에 대한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 파편의 위치가 폭발지점에서 85% 수준 이전까지 dead mass에 의한 효과로 발사각이 100~120% 수준까지 증가하는 것으로 나타난 반면, 85% 이후

Table 4. Time of explosion velocity gradient characteristic of cylinder type warhead [23]

High Explosives	τ (μsec)	L (mm)	D (mm)	c/m	$\sqrt{2E}$	casing steel 1020
OCTOL	5	101.6	50.8	0.86	2.8	thin wall (2.6mm)
OCTOL	6	101.6	50.8	0.43	2.8	thick wall (5.2mm)
TNT	5.5	101.6	50.8	0.77	2.4	thin wall (2.6mm)
TNT	7.3	101.6	50.8	0.38	2.4	thick wal l(5.2mm)

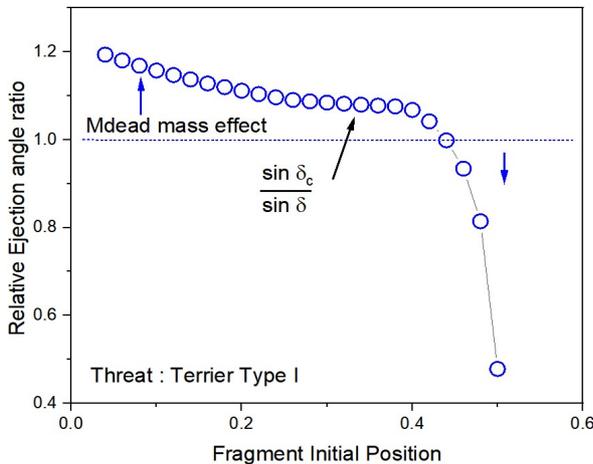


Fig. 6. The relative ejection angle ratio of fragment considering dead mass of metal case in Terrier Type I threat

지점부터는 발사각은 50% 수준으로 급격히 감소하는 것으로 나타났다.

85% 이후 지점부터는 폭압의 감소 효과에 의해 파편들의 발사속도가 감소와 동반하여 발사각은 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 위의 결과는 Table 3에 주어진 위협들의 경우에서처럼 탄두 길이 대비 직경 비율이 $L/D \leq 2$ 인 경우 폭압의 감소가 탄두의 끝 쪽으로 갈수록 많이 감소하는 효과에 의한 결과를 반영하였기 때문이다.

위와 같이 고폭형 탄두에서 End Effect를 고려한 파편의 발사속도 및 발사각을 해석적으로 추정하는 방법은 공대공 또는 지대공 고폭형 미사일 위협에 항공기가 피격되는 치명적인 손상을 일으킬 수 있는 유효 파편 수를 산정하는 측면에서 매우 중요하게 적용될 수 있다.

III. 결 론

본 연구에서는 임무 중인 아군 항공기에 직접적인 위협이 되는 공대공 및 지대공 미사일 위협들로부터 발생하는 파편의 발사속도 및 발사각을 추정하기 위하여 유사위협 무기의 데이터를 이용하여 해석적인 방법으로 추론하였다. 유사 위협 무기의 탄두 질량, 고폭 질량, 파편 질량 및 직경 대비 길이 비율 등의 데이터를 이용하여 탄두에서 탄두 덮개가 차지하는 중량 구성 비율, 고폭의 길이 및 직경 비율 등을 경험적인 방법을 통해 수치 해석하였다. 이를 통하여 탄두의 구성품 중 파편으로 전이되지 않는 dead mass에 대한 일반적인 비율을 추정하였으며, 폭압 감소에 의한 end effect 등을 고려하여 파편의 발사속도 및 발사각을 추정하였다. 이와 같은 방법은 임무 중인 항공기가 적의 고폭탄 폭발로 피격되는 경

우 치명적인 위협이 될 수 있는 파편의 발사속도 및 발사각에 대한 추정을 해석적 평가방법으로 최적화하는데 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

본 계산과정은 탄두 속도 및 항공기 표적 속도 등에 대한 상대속도를 고려하지 않았으며, 단지 고폭 화약 폭발에 의한 파편의 발사속도 및 발사각 계산에 한정하였다.

References

- 1) Ball, R. E., *The Fundamentals of Aircraft Combat Survivability Analysis and Design*, 2nd Ed., AIAA, Inc. USA, 2003, pp. 1~5.
- 2) Lim, S., Kim, B., and Lee, I., *Introduction to Aircraft Systems Effectiveness Analysis*, Cheong Moon Gak, Co. Korea, 2010, pp. 66~86.
- 3) Waggener, S., "The performance of axially initiated cylindrical warheads," *4th International Symposium on Ballistics*, Monterey, CA, 1978.
- 4) Elek, P., Jaramaz, S., Mickovic', D., and Miloradovic', N., "Numerical Simulation of Fragmentation Warhead Mechanisms," *6th International Scientific Conference on Defensive Technologies*, Belgrade, Serbia, October 2014.
- 5) Johnson, G. R., and Cook, W. H., "A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures," *7th International Symposium on Ballistics*, The Hague, 1983.
- 6) Johnson, G. R., and Cook, W. H., "Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 21, No. 1, 1985, pp. 31~48.
- 7) Davis, W. C., *Shock waves; rarefaction waves; equations of state*, Explosive Effects and Applications (Eds. J. A. Zukas and W. P. Walters), Springer, New York, USA, 2003, pp. 47-113.
- 8) Bridgman, P. W., "Rough Compressions of 177 Substances to 40,000 kg/cm," *Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences*, Vol. 76, No. 3, 1948, pp. 71-87.
- 9) Charron, J. Y., "Estimation of Velocity Distribution of Fragmenting Warheads using a Modified Gurney method," Thesis, The School of Engineering of the Air Force Institute of Technology, 1979.
- 10) Davidson, R. O., *Research and Development of Material, Engineering Design Handbook, Warheads-General(U)*, Headquarters, U. S. Army Materiel

Command, 1964, pp. 36-138.

11) Gurney, R. W., *The Initial Velocities of Fragments from Bombs, Shells, and Grenades*, BRL-405, Ballistic Research Laboratory, Maryland, 1943, pp. 1~11.

12) Baker, W. E., and Johnson, O. T., *Relative Air Blast Damage Effectiveness of Various Explosives*, BRL Report 689, 1953.

13) Fisher, E. M., and Aronson, C. J., *The Effect of the Steel Case on the Air Blast from High Explosives*, NAVORD Report 2753, 1953.

14) Needham, Charles E., *Blast Waves (Shock Wave and High Pressure Phenomena)*, 2nd Ed., Springer International Publishing AG, 2018.

15) Tanapornraweeki, G., and Kulsirikman, W., "Effects of material properties of warhead casing on natural fragmentation performance of high explosive(HE) warhead", *World Academy of Science, Engineering and Technology* 59, 2011.

16) Patterson II, J. D., and Wenig, J., *Air Blast Measurements Around Moving Explosive Charges*, BRL Memo. Report 767, 1954.

17) Armendt Jr., B. F., *Air Blast Measurements*

Around Moving Explosive Charges, Part II, BRL Memo. Report 900, 1955.

18) Armendt, B. F., and Sperrazza, J., *Air Blast Measurements Around Moving Explosive Charges, Part III*, BRL Memo. Report 1019, 1956.

19) Mott, N. F., *Fragmentation of High Explosive Shells, A Theoretical Formula for the Distribution of Weights of Fragments*, Army Operation Group Research, 1943.

20) Karpp, R. R., and Predebon, W. W., "Calculation of Fragment Velocities from Fragmentation Munitions," *Proceedings of the First International Symposium on Ballistics*, 1974.

21) Gurney, R. W., "The initial Velocities of Fragment from Bombs, Shell and Grenade," BRL Report No 405, 1943.

22) Sui, S. Y., and Wang, S. S., "Terminal effects," National defence Industrial press, Beijing 2000.

23) Randers-Pehrson, G., "An Improved Equation for Calculating Fragment Projection Angles," Feltman Research Lab., US Army Picatinny Arsenal 2017.