

## 技術論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 43(5), 440-448(2015)

DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2015.43.5.440

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

## 등방성 운동에너지 탄두의 교전 효과 예비 분석

심상욱\*, 홍성민, 서민국, 탁민제

Preliminary Engagement Effect Analysis of  
Isotropic Kinetic Energy WarheadSang-Wook Shim\*, Seong-Min Hong, Min-Guk Seo and Min-Jea Tahk  
Korea Advanced Institute of Science and Technology

## ABSTRACT

Kinetic energy(KE) rod warhead system is a new interceptor which combines advantages of existing ones. This system is less dependant on a precision guidance than direct hit type warhead and gives high penetration rates than blast fragmentation type warhead. In this paper, isotropic KE rod warhead system is introduced with detonation/deployment model. A penetration effects of the deployed rods are calculated using TATE penetration equation. Also, an engagement performance analysis method is suggested. Finally, an optimal detonation time and engagement geometry is derived by Monte-Carlo simulation in various engagement situation using the performance analysis factor.

## 초 록

운동에너지 막대 탄두 시스템은 기존 시스템의 장점을 결합한 새로운 형태의 요격탄두 시스템으로서 직격 파괴방식에 비해 표적 유도 정밀도에 대한 의존도가 낮을뿐더러, 고폭 파편 탄두 방식보다 더 높은 관통력을 제공해 준다는 장점이 있다. 본 논문에서는 다양한 운동에너지 탄두의 사출 방식 중 등방성운동에너지 탄두의 기폭, 전개모형을 소개하고, TATE 관통방정식을 이용하여 사출된 관통자의 관통 효과를 계산하였다. 또한 교전 성능 분석을 위한 방법을 제시하였으며, 다양한 교전 상황에 대한 몬테-칼로 시뮬레이션을 통해 최적의 교전 기하 및 기폭 시점을 도출하였다.

**Key Words** : Kinetic Energy Rod Warhead(운동에너지 막대 탄두), Missile Defence System(탄도탄 방어 시스템), Penetration Equation(관통 방정식), Isotropic Kinetic Energy Warhead(등방성 운동에너지 탄두)

## 1. 서 론

현대 전장에서 가장 큰 대공위협이 되고 있는 탄도 미사일을 요격하기 위한 방식은 탄두 방식

에 있어서 크게 두 가지로 분류된다. 고폭 파편(Blast Fragmentation)과 운동에너지 직격 파괴(Kinetic Energy Hit-to-kill) 방식이다. 현재는 직격 파괴(Hit-to-kill) 기술을 이용한 요격 미사일

† Received : December 5, 2014

Revised : April 8, 2015

Accepted : April 13, 2015

\* Corresponding author, E-mail : swshim@fdcl.kaist.ac.kr

이 주로 사용되고 있으며, 고폭 파편을 이용한 탄두 방식은 하위 단계의 요격 미사일에서 주로 사용되고 있다.

하지만, 이 두 가지 방식은 탄도 미사일 요격에 있어서 각각 문제점이 존재한다. 고폭 파편 방식의 탄두는 근접한 상태에서 탄두가 폭발하면서 금속조각이 빠른 속도로 분산되면서 표적을 타격하는데, 이는 탄도 미사일과 같은 표적에 대해서는 큰 살상 효과를 주지 못한다. 특히 핵 또는 생화학 탄두가 탑재된 탄도 미사일의 경우 고폭 파편 탄두가 명중하더라도 탄두가 생존할 가능성이 있다는 것이 단점으로 지적되고 있다. 직격 파괴 방식의 경우 미국의 THAAD, SM-3, 유럽의 Aster-30, 이스라엘의 Arrow-3 미사일에서 사용하는 방식이다. 이 방식은 종말 단계에서 직격 요격체에 장착되어있는 궤도 수정 및 자세 제어 장치(Divert and Attitude Control System, DACS)를 이용하여 대상 탄도탄을 향해 정밀유도를 수행한다[1, 2]. 하지만 탄도탄 탄두의 살상율이 가장 높은 Sweet Spot으로부터 멀어질수록 탄두 파괴 효과가 감소할 우려가 있다.

기존 방식의 탄두시스템에서 발견된 단점들을 보완하기 위해 최근 운동에너지 막대 탄두(Kinetic Energy Rod Warhead)가 개발되고 있다. 운동에너지 막대 탄두는 직격 파괴 방식과 고폭 파편 방식의 장점을 결합시킨 형태로서, 요격 미사일이 표적인 탄도 미사일에 근접하면 막대 관통자(Penetrator) 다발을 고속으로 사출시켜 표적과 관통자의 상대적인 운동에너지를 이용하여 넓은 반경에 대해 표적을 직격하여 파괴하는 방식이다[11]. 이러한 방식의 탄두 시스템은 직격 파괴방식에 비해 표적 유도 정밀도에 대한 의존도가 낮을뿐더러, 고폭 파편 탄두 방식보다 더 높은 관통력을 제공해 준다.

아직까지 운동에너지 막대 탄두가 실제로 적용된 요격 미사일이 없으나, 해외 선진국에서 이러한 형태의 요격 미사일 개발을 위한 연구를 활발히 진행하고 있다. 반면, 국내에서는 이와 관련된 연구가 최근 착수되고 있는 상황이다. 먼저 관통자의 기하형상 및 관통 기하 조건에 따른 관통성능 분석을 위해 AUTODYN-3D Code를 이용한 관통특성에 연구가 진행되며 있다[3-7]. 또한, 최근 본 연구진이 수행한 연구를 통해 운동에너지 막대 탄두의 개념 및 기본적인 모델이 국내에 소개 되었다[8-10].

본 논문에서는 다양한 운동에너지 막대 탄두 중 등방성 운동에너지 탄두의 기폭/전개 특성 [11] 및 TATE 관통 방정식[12-15]을 이용하여, 교

전 효과 분석을 위한 방법을 제시하였다. 이를 통해 교전 효과를 최대화하기 위한 최적의 상대 교전기하 조건 및 최적의 기폭시점을 도출하고자 한다.

2장에서는 Central Core 형태의 등방성 운동에너지 탄두의 구성과 관통자 전개 특성에 대해서 살펴보고, 3장에서는 사출된 관통자가 표적을 관통할 때의 관통 깊이를 계산하기 위한 TATE 관통 방정식을 소개한다. 4장에서는 다양한 종말 교전 상황에 대한 시나리오를 정의하고 교전 효과 분석을 위한 지표를 제시한다. 5장에서는 운동에너지 막대 탄두의 표적에 대한 관통 효과를 시뮬레이션 결과를 분석하고 최대의 효과를 기대할 수 있는 최적 기폭 시점 및 상대 교전 기하를 도출 하고자 한다.

## II. 등방성 운동에너지 탄두

운동에너지 탄두는 관통자의 사출 방식에 따라 등방성 운동에너지 탄두(Isotropic Kinetic Warhead)와 지향성 운동에너지 탄두(Aimed Kinetic Energy Warhead)로 구분된다. 또한 등방성 운동에너지 탄두는 내부의 탄두 구성에 따라 Central Core 방식의 탄두와 Jellyroll 방식의 탄두가 일반적으로 알려져 있다[13]. 본 논문에서는 등방성 운동에너지 탄두 중 Central Core 형태의 탄두를 이용하였다. 본 장에서는 Central Core 형태의 탄두 구성을 소개하고 그에 따른 관통자 전개 특성을 설명한다.

### 2.1 탄두의 구성

Central Core 형태의 운동에너지 탄두는 탄두 중심에 폭약을 위치시키고, 그 주위를 여러 겹의 관통자로 둘러싼 형태로 구성된다[11]. 관통자와 폭약 사이의 완충체를 이용하여 폭발에너지가 효율적으로 관통자에 전달되도록 한다. Fig. 1은 Central Core 탄두 구성의 단면도이다.

Figure 1에서  $D_R$ 과  $L_R$ 은 탄두를 구성하는 관통자의 직경 및 길이를 나타내고,  $t_B$ 는 완충체의 두께를 의미한다. 기본적으로 운동 에너지 탄두는 여러 개의 단(Bay)으로 구성되어 있는데, Central Core 탄두의 경우  $i$ 번째 단에 대해서 안쪽에서부터  $p$ 번째 관통자 층에 위치한 관통자의 개수  $N_R(i,p)$ 는  $D_R$ 과  $L_R$ 이 일정하다고 가정하면 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$N_R(i,p) = \left( \frac{2\pi}{D_R} \right) \left( \frac{D_c(i)}{2} + t_B + \left( p - \frac{1}{2} \right) D_R \right) \quad (1)$$

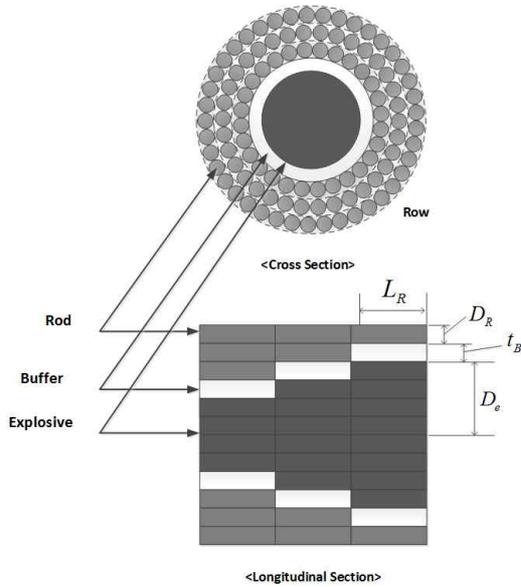


Fig. 1. Central Core Warhead Configuration

여기서  $D_e(i)$ 는  $i$ 번째 단의 폭약 직경이다.  $n(i)$ 개의 관통자 층을 가지는  $i$ 번째 단에 포함된 총 관통자 수  $N_{R_{tot}}(i)$ 는 다음의 식으로 계산할 수 있다.

$$N_{R_{tot}}(i) = 2\pi n(i) \left( \frac{D_e(i) + 2t_B}{2D_R} + \frac{n(i)}{2} \right) \quad (2)$$

관통자가 원통형인 경우 관통자 하나의 질량  $m_R$ 은 다음과 같다.

$$m_R = \rho_R \pi \frac{D_R^2}{4} L_R \quad (3)$$

여기서  $\rho_R$ 은 관통자를 이루는 물질의 밀도를 나타낸다.

따라서  $i$ 번째 단에 포함된 관통자의 총 질량  $M_{R_{tot}}(i)$ 은 다음과 같다.

$$M_{R_{tot}}(i) = \frac{(\pi D_R)^2}{2} L_R \rho_R n(i) \left( \frac{D_e(i) + 2t_B}{2D_R} + \frac{n(i)}{2} \right) \quad (4)$$

$i$ 번째 단에 포함된 폭약 질량  $M_c(i)$ 와 완충제의 질량  $M_B(i)$ 는 Fig. 1에 나타나 있는 Central Core 탄두의 형상으로부터 아래의 식과 같이 계산할 수 있다.

$$M_c(i) = \frac{\pi}{4} \rho_e D_e(i)^2 L_R \quad (5)$$

$$M_B(i) = \pi \rho_B t_B L_R (D_e(i) + t_B) \quad (6)$$

식 (4), (5) 그리고 (6)의 결과들을 이용하여 전

체  $m$ 개의 단으로 이루어진 Central Core 탄두의 전체 질량  $M_{tot}$ 은 다음의 식으로 정의할 수 있다.

$$M_{tot} = \sum_{i=1}^m (M_{R_{tot}}(i) + M_c(i) + M_B(i)) \quad (7)$$

## 2.2 관통자 전개 모델

운동 에너지 탄두의 경우 정확한 사출 패턴 및 사출 속도를 해석하기가 어렵다. 따라서 전개되는 관통자들의 사출 속도는 실험적으로 얻어진 속도의 평균식을 사용한다[11].

Central Core 탄두는 신관이 작동하여 폭약이 폭발하면 관통자들이 탄두의 중심축에 수직인 방향으로 사출된다.  $i$ 번째 단에 포함된 관통자의 사출 속력  $V(i)$ 는 다음 식과 같다.

$$V(i) = \sqrt{2E} \sqrt{\frac{(C/M)(i)}{\left(1 + \frac{D_e(i)}{2L_R}\right) \left(1 + \frac{1}{2}(C/M)(i)\right)}} \quad (8)$$

이 때,  $E$ 는 거니(Gurney) 상수이며 이는 폭발에 의해 방출되는 물체의 상대적인 비행 속도를 나타낸다. 또한 폭약의 질량과 관통자의 질량비를 나타내는  $(C/M)(i)$ 는 다음의 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$(C/M)(i) = \frac{M_c(i)}{M_{R_{tot}}(i)} \quad (9)$$

Central Core 탄두 방식에서 같은 단에서 사출된 관통자들은 동일한 속도를 가지는 것을 식 (8)을 통해 확인할 수 있다. 이는 폭약이 탄두의 중심부에 위치하고 있어 같은 단에 포함되어 있는 관통자 층들은 내부에 동일한 양의 폭약을 가지기 때문이다. 따라서 관통자들이 동심원을 이루며 사출되기 위해서는 탄두가 여러 단으로 구성되어야 한다.

본 논문에서 Central Core 탄두의 관통자 전개

Table 1. Kinetic Energy Warhead Parameter

관통자 지름	10mm	관통자 탄성계수	$4.11 \times 10^{11}$ N/m <sup>2</sup>
관통자 길이	30mm	관통자 개수	168
관통자 질량	45.4g	완충제 밀도	$1.0 \times 10^3$ kg/m <sup>3</sup>
폭약 거니 상수	1.50m/s	완충제 두께	28mm
폭약 밀도	$1.05 \times 10^3$ kg/m <sup>3</sup>		

특성을 살펴보기 위해 관통자와 폭약, 그리고 완충제의 사양은 Table 1과 같이 정의하였다. 탄두는 총 4개의 단으로 구성되어 있으며 최대 사출속도를 100m/s로 설정하고 각 단별로 20m/s씩 사출속도의 차이가 나도록 구성하였다. 관통자의 재질은 텅스텐으로 가정하였으며, 폭약과 완충제의 물리적 상수는 최대사출 속도를 만족시키도록 설정하였다.

### III. 막대 관통 방정식

본 장에서는 탄두로부터 사출된 운동에너지 막대가 표적의 표면과 충돌할 때의 파괴효과를 분석하기 위한 막대관통자의 관통 방정식을 기술하였다. TATE 관통방정식을 이용하여 관통자가 표적평면과 이루는 기하 조건 및 속도에 따라 관통깊이를 계산 할 수 있다[12-15].

Figure 2는 막대 관통자가 표적의 표면에 충돌할 때의 상대적인 기하를 나타낸 것이다.  $\theta$ 는 관통자의 속도 벡터와 표적 평면의 법선 벡터가 이루는 빗각을 의미한다. 또한, 막대의 중심축과 막대의 속도벡터가 이루는 각을 의미하는 각을 편주각  $\beta$ 로 정의하였다. 빗각과 편주각이 커질수록 원통형태의 막대가 평면에 충돌할 때의 관통깊이  $P$ 은 감소하게 된다. 표적의 두께를  $T_A$ 라고 하면, 막 관통자가 표적을 완전히 관통하기 위한 최소 두께  $T$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$T = \frac{T_A}{\cos\theta} \quad (10)$$

관통자의 관통 방정식은 편주각이 0인, 즉 속도 벡터와 막대의 자세가 정렬되어 있는 상태에서 다음과 같이 계산된다[12-15].

$$\left(\frac{P}{L_R}\right) = \left(1 - \frac{D_R}{L_R}\right) \mu (1 - e^{-V_R^{0.6}})^8 + 2.64 \frac{D_R}{L_R} \left(\frac{V_R}{A}\right)^{2/3} \quad (11)$$

여기서  $P$ 는 관통 깊이를 나타내고,  $V_R$ 는 충돌시 관통자의 속도를 의미한다. 또한  $\mu = \sqrt{\rho_R/\rho_T}$ 로서 막대와 표적간의 밀도의 비를 나타내는 상수이다. 위의 식에서  $A$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$A = 2(R_T - Y_R)(1 - \mu^2)/\rho_T \quad (12)$$

여기서  $R_T$ 와  $Y_R$ 는 각각 표적과 막대 관통자의 강도를 나타낸다.

한편, Fig. 3과 같이 편주각이 임계값 이상으로 큰 경우에는 막대의 뒤쪽 끝 부분이 관통된 벽면

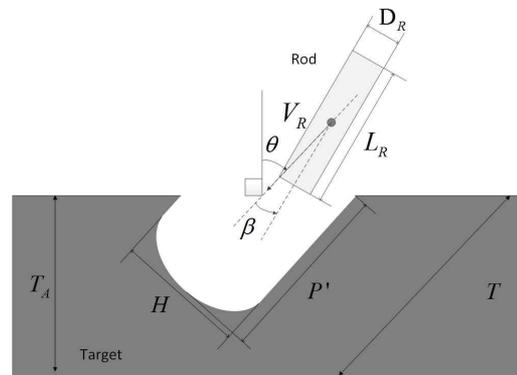


Fig. 2. Penetration model variables definition

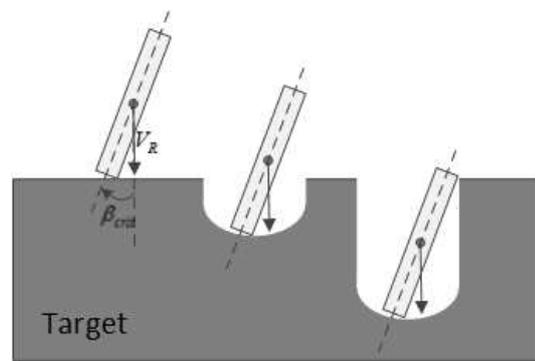


Fig. 3. Definition of critical yaw angle

에 부딪히면서 관통효과가 감소하게 된다. 이때의 편주각을 임계 편주각(Critical Yaw Angle,  $\beta_{crit}$ )이라고 정의한다. 관통된 구멍의 직경  $H$ 와 임계 편주각은 다음의 식으로 부터 계산 할 수 있다.

$$H = D_R \sqrt{\frac{Y_R}{R_T} + \frac{2\rho_R(V_R - U)^2}{R_T}} \quad (13)$$

$$\beta_{crit} = \sin^{-1} \left[ \frac{H/D_R - 1}{2(L_R/D_R)} \right] \quad (14)$$

이 때 식 (13)의 변수  $U$ 는 충돌 접촉면의 속도이며, 다음과 같은 식으로 계산할 수 있다.

$$U = \left[ V_R - \frac{\mu(V_R^2 + A^2)^{1/2}}{1 - \mu^2} \right] \quad (15)$$

편주각이 임계 편주각 보다 작은 경우에 한하여, 편주각이 존재할 때 막대가 최종적으로 표적의 표면을 관통하는 깊이  $P$ 은 다음의 식으로 표현된다.

$$P = (P_0 - P_1)e^{-\alpha(\beta/\beta_{crit})^2} + P_1 \quad (16)$$

여기서  $P_0$ ,  $P_1$ ,  $\alpha$ 는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$P_0 = L_R(P/L_R)$$

$$P_1 = D_R(P/L_R)$$

$$a = 0.2 / (L_R/D_R)^{0.8}$$

주어진 조건으로부터 식 (16)를 이용하여 관통된 깊이를 계산하고, 계산된 깊이가 식(10)의 깊이보다 큰 경우 표적 관통에 성공하였다고 판단한다.

#### IV. 교전 성능 분석 방법

##### 4.1 표적 모델

탄도 미사일의 탄두와의 교전 상황을 모사하기 위해 표적 모델은 Fig. 4와 같은 원뿔 형태의 표적으로 가정하였다. 표적의 표면은 두께 3mm의 금속으로 가정하였으며 높이는 2.3m, 중심축을 기준으로 원뿔의 각은 10도로 가정하였다. 3장에서 정의된 관통방정식으로 계산된 관통 깊이가 표적의 두께 보다 더 큰 경우 관통에 성공했다고 판단하였다.

##### 4.2 교전 시나리오 정의

운동에너지 탄두의 효과를 고려하여 최대의 성능을 기대할 수 있는 상대 교전 기하를 찾기 위해 운동에너지 탄두와 표적 탄두의 교전 시나리오는 다음과 같이 정의 하였다. 교전 상황은 종말유도의 마지막 시점으로 운동에너지 탄두(유도탄)가 기폭 된 후 표적(탄도탄)까지 관통자도 도달하는 수 밀리 초의 짧은 교전 상황을 고려하였다. 먼저 표적의 속도 벡터 방향을  $-x$ 축으로 설정하고, 표적의 자세각은 속도벡터 방향과 일치한다고 가정하였다. 운동에너지 탄두는 표적의 반대 방향인  $x$ 축의 양의 방향을 기준으로 비행경로각  $\gamma$ 와 받음각  $\alpha$ 로 비행하며 이 때 유도탄의 자세각은  $\theta = \gamma + \alpha$ 로 나타난다. 운동에너지 탄두의 중심점이 유도 오차 없이 목표지점인 대

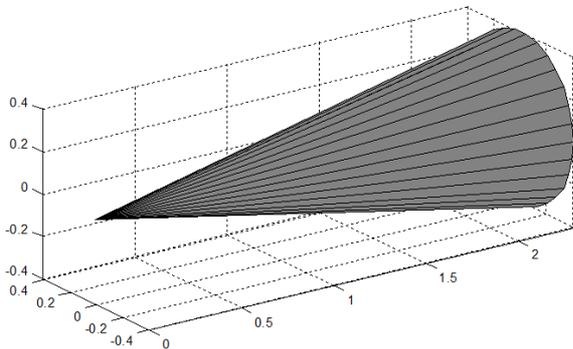


Fig. 4. Definition of target

Table 2. Engagement Scenario

비행경로각, $\gamma$ (deg)	0, -5, -10, -15, -20, -25, -30, -35, -40, -45, -50, -55, -60, -65, -70, -75, -80, -85, -90
받음각, $\alpha$ (deg)	-30, -20, -10, 0, 10, 20, 30
$t_{go}$ (msec)	1, 2, 3, 4
관통자 최대 사출속도 (m/s)	100

상 표적의 2/3 지점까지 도달하는 시간 time-to-go를 계산하여 이를 기준으로 유도탄의 초기 위치를 설정한다. 이때, 매우 짧은 시간동안의 교전 상황을 모사하므로 표적과 유도탄의 속도 벡터 및 자세각은 일정하다고 가정한다.

사출 이후 표적에 도달하기까지 관통자들은 폭발에 의한 교란 및 공기저항에 의해 다양한 자세각으로 표적과 충돌하게 된다. 이를 고려하기 위해 관통자의 자세각은 운동에너지 탄두의 자세각을 기준으로 30도의 표준편차를 갖는 랜덤변수로 정의한다. 이러한 시나리오에서 표적 평면과 관통자의 상대적인 속도 벡터 및 자세각에 따라 관통깊이가 달라진다. 따라서 유도탄의 비행경로각, 받음각, 관통자의 사출시점을 매개 변수로 설정하여 변수들을 다양한 조건으로 변화시키면서 관통효과를 분석하였다. 이와 같은 매개 변수 연구(Parameter Study)를 통해 관통효과 측면에서의 최적의 교전기하를 도출하였다. 매개 변수들의 조합들은 Table 2와 같다.

##### 4.3 교전 성능 분석 지표

운동에너지 탄두의 효과를 분석하기 위해서는 적절한 교전 성능 분석 지표가 필요하다. 관통자의 관통 깊이, 관통 후 속도, 관통에 성공한 비율과 같이 다양한 기준에 따라 교전 성능을 분석할 수 있으나, 본 논문에서는 전체 관통자 중에 관통에 성공한 관통자의 비율을 관통확률  $P_p$ 와 본 연구에서 제안한 교전 성능 분석지표를 이용하여 분석하고자 한다. 먼저 관통확률  $P_p$ 는 다음과 같이 정의하였다.

$$P_p = \frac{N_p}{N_R} \quad (17)$$

여기서  $N_R$ 은 전체 관통자의 개수이고,  $N_p$ 은 관통에 성공한 관통자의 개수이다. 이는 가장 직관적인 분석지표라고 볼 수 있다. 한편, 관통에 성공한 관통자는 해당위치를 충분히 파괴할 수

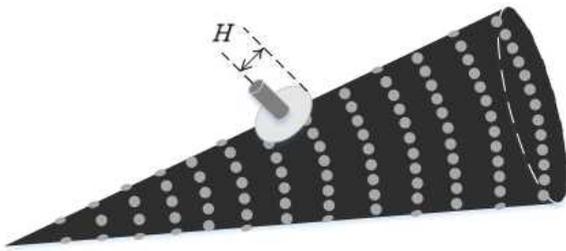


Fig. 5. Performance Analysis Scheme

있다고 가정한다면 표적의 표면을 중복하지 않도록 고르게 관통에 성공하는 것이 표적내부의 탄두 파괴 효과가 더 크다고 할 수 있다.

본 논문에서 제안하는 교전 성능 분석 지표로서, 전체 관통자 중에 관통에 성공한 관통자의 비율 및 표적의 전체 표면 중 파괴된 부위의 비율을 이용하여 탄두의 교전 성능을 분석하고자 한다. 이를 위해 Fig. 5와 같은 형태로 표적의 표면에 약 10cm의 간격을 갖는 기준점들을 설정하였다. 이때, 관통에 성공한 관통자들이 파괴한 관통 직경  $H$ 는 식 (14)를 통해 계산된다. 이를 이용하여 각각의 기준점 중 파괴된 기준점들을 판단한다. 최종적으로 전체 기준점 들 중 파괴된 기준점들의 비율을 교전 성능 분석 지표  $\epsilon$ 이라 정의하였다.

$$\epsilon = \frac{N_d}{N_t} \tag{18}$$

여기서  $N_d$ 는 파괴된 기준점들의 개수이고,  $N_t$ 는 표적 표면에 존재하는 전체 기준점의 개수이다.

### V. 시뮬레이션

앞 장에서 설정한 변수 및 교전 시나리오 조건들을 이용하여 각각의 경우에 대해 몬테-칼로 시뮬레이션을 수행하여 교전 성능을 분석하였다. 교전 결과는 전체 관통자 수 중에서 표적에 충돌한 관통자 수의 비율인 탄착 확률, 전체 관통자 수 중에서 표적을 관통한 관통자 수의 비율인 관통 확률, 그리고 본 논문에서 제안한 교전 성능

분석 지표  $\epsilon$ 의 세 가지 값을 계산하여 그 결과를 비교하였다.

Figure 6~8은  $t_{go}$ 가 3msec인 경우에 대해 운동 에너지 탄두의 비행경로각 및 받음각에 따른 탄착 확률, 관통 확률, 성능 지표의 차이를 도시하고 있다. 앞 절에서 설명 하였듯이, 관통자들의 자세각은 유도탄의 속도 벡터를 기준으로 30도의

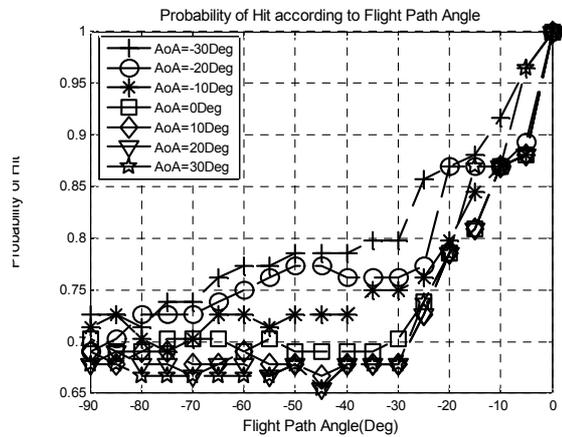


Fig. 6. Probability of Hit (FPA, AoA)

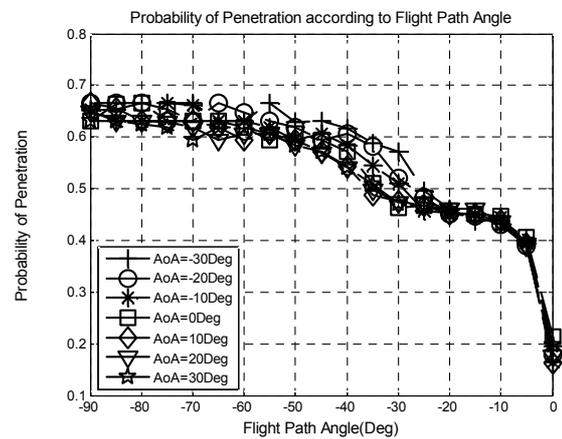


Fig. 7. Probability of Penetration (FPA, AoA)

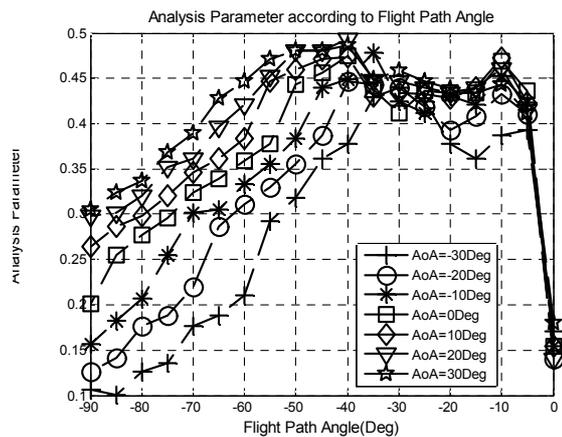


Fig. 8. Analysis Parameter (FPA, AoA)

표준편차를 갖는 랜덤변수로 가정하였다. Fig. 6에 표시된 것과 같이 탄착 확률은 비행경로각이 작은 Head-on 상황에서 가장 높은 것을 볼 수 있다. 하지만 Fig. 7에서 볼 수 있듯이 관통 확률은 오히려 Head-on 상황에서 더 낮게 나타난다.

이는 비행경로각이 작을수록 관통자의 표적 평면에 대한 충돌각이 크게되므로 관통 효과가 낮아지고, 비행경로각이 커질수록 관통자가 표적 평면에 보다 수직인 방향으로 충돌하여 관통 효과가 높아지기 때문이다. 이 때 Fig. 8에서 볼 수 있듯이 비행경로각이 약 30도~40도 정도를 이루는 경우에 가장 높은 탄두 파괴 효과를 나타내는 것을 알 수 있다. 비행경로각이 너무 작은 경우엔 앞서 설명한 바와 같이 관통 확률이 낮아서 성능 분석 지표 역시 감소한다. 반대로 비행경로각이 너무 큰 경우에는 관통 확률은 높지만 같은 위치에 중복되어 관통하는 관통자의 비율이 높아져서 오히려 성능 분석 지표는 감소하기 때문이다.

한편 Fig. 9~11은 운동에너지 탄두의 반응각이 0도인 경우에 대해 비행경로각 및 사출시점에 따른 탄착 확률, 관통 확률, 성능 지표를 도시하고 있다. Fig. 9에서 볼 수 있듯이  $t_{go}$ 가 작을수록 표적에 가까이에서 관통자를 사출하기 때문에 탄착

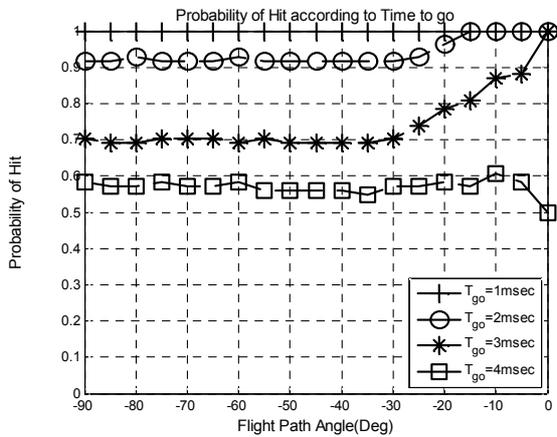


Fig. 9. Probability of Hit (Time-to-go)

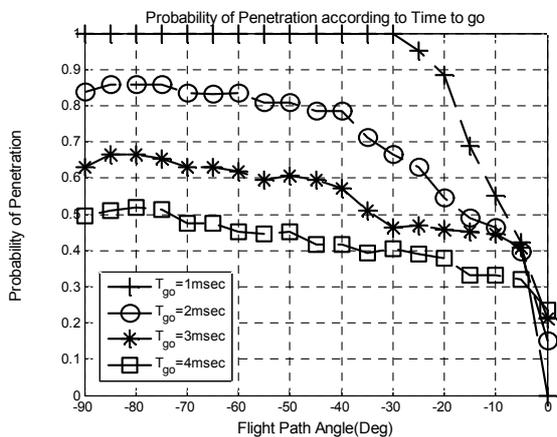


Fig. 10. Probability of Penetration(Time-to-go)

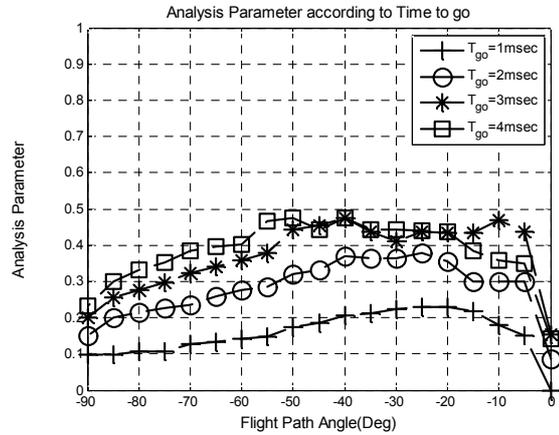


Fig. 11. Analysis Parameter(Time-to-go)

확률이 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 또한 관통 확률 역시 탄착 확률에 비례하여  $t_{go}$ 가 작을수록 높아진다. 반면에 성능지표의 경우에는 오히려  $t_{go}$ 가 1msec인 경우에 가장 낮게 나타나며,  $t_{go}$ 가 3~4msec인 경우에 표적 파괴 성능이 더 우수한 것을 확인 할 수 있었다.

이는 탄두를 미리 기폭 시킬수록 관통자들이 충분히 전개될 수 있어 타격 반경이 커지기 때문이다. 하지만 3msec 이후에는 거의 비슷한 성능을 보이는 것을 알 수 있는데, 이는 관통자들을 너무 멀리서 사출하게 되면 관통자들의 전개 반경이 대상 탄두의 크기보다 커져서 탄착에 성공하지 못하는 관통자들의 수가 증가하기 때문이다. 비행경로각에 대한 성능 분석 지표의 결과는 Fig. 6~8의 경우와 유사하게 모든 사출시점에 대해 비행경로각이 약 30도~40도 사이에서 가장 높게 나타난 것을 확인할 수 있었다.

위 시뮬레이션 연구를 통해 유도탄과 표적과의 상대적인 충돌각이 30~40도인 경우에 가장 효과적인 교전효과를 기대할 수 있으며, 충돌 3~4msec 전에 관통자들을 사출하는 것이 가장 효과적이라는 것을 알 수 있었다. 본 논문에서 도출한 결과는 관통자의 사양 및 유도탄과 표적의 속도에 따라 변할 수 있다. 하지만, 본 논문에서 제시한 성능 지표를 이용하여 각 상황에 맞는 최적의 교전 기하 및 사출 시점을 도출 할 수 있을 것으로 기대된다.

## VI. 결 론

본 논문에서는 탄도탄 요격 유도탄의 새로운 탄두 방식인 등방성 운동에너지 탄두의 기폭/전

개 모델의 개념 및 특성을 소개하고, 탄두 효과를 분석하기 위한 기법을 개발하였다. 또한 이를 이용하여 탄두효과를 분석하는 시뮬레이션을 수행하였으며, 교전 효과를 최대화하는 최적의 기폭 시점 및 최적의 상대 교전 기하를 도출하였다. 원뿔 모양의 표적에 대해 등방성운동에너지 탄두의 관통자는 Head-on 상황에서 탄착 확률은 높아지지만 관통 확률은 반대로 감소하는 것을 확인 할 수 있었다. 충돌각이 클수록 관통 확률이 증가하지만 전체적인 표적 파괴 효과를 최대화하는 충돌각의 범위가 존재하는 것을 시뮬레이션을 통해 확인 할 수 있었다. 또한,  $t_{go}$ 가 작을수록 표적 가까이에서 관통자들을 사출하기 때문에 탄착 확률 및 관통 확률이 증가하지만 관통자들이 넓게 사출되지 않아 표적을 효과적으로 파괴하지 못하는 것을 관찰할 수 있었다. 표적 파괴 효과를 최대화 하기 위한 최적의 기폭시점이 존재하는 것을 확인할 수 있었다. 다양한 관통자의 사양 및 상대 속도에 따라 그 수치는 바뀔 수 있으나 본 논문에서 제시한 성능 지표를 이용하여 각 상황에 맞는 최적의 교전 기하 및 기폭 시점을 도출 할 수 있을 것으로 기대된다.

## 후 기

본 연구는 국방과학연구소(계약번호 : UD1300 02CD)의 연구비 지원 아래에 수행되었습니다.

## References

- 1) Y. W. Lee, H. I. Heo, "Development Status and Outlook of the Missile Defense System with DACS", KSAS Spring Conference, Apr. 2010, pp. 402 - 405.
- 2) C. H. Lee, T. H. Kim, B. E. Jun, "Nonlinear Acceleration Controller Design for DACS type Kill Vehicle", KSAS Spring Conference, Apr. 2014, pp. 1147 - 1153.
- 3) J. H. Jo, Y. S. Lee, "Numerical Simulation of Failure Mechanism of PELE Perforating Thin Target Plates," Trans of KSME series A, Vol. 36 No.12, 2012, pp. 1577 - 1583.
- 4) J. H. Jo, Y. S. Lee, J. H. Kim and Y. W. Bae, "Analysis of Hypervelocity Impact Fracture Behavior of Multiple Bumper Steel Plates," Trans of KSME series A, Vol. 37 No.6, 2013, pp. 761 - 768.
- 5) J. H. Jo, Y. S. Lee, J. H. Kim and Y. W. Bae, "Study on Penetration Characteristics of Tungsten Cylindrical Penetrator," Trans of KSME series A, Vol.37 No.9, 2013, pp. 1083 - 1091.
- 6) J. H. Jo, Y. S. Lee, J. H. Kim and Y. W. Bae, "Study of hypervelocity penetration characteristics of segmented tungsten penetrator," Trans of KSME series A, Vol.37 No.8, 2013, pp. 953 - 960.
- 7) Lee, S.W., Yang, T.H., Lee, Y.S. and Bae, Y.W., "A Study on Perforation Prediction of Metal Targets by Cylindrical Tungsten Penetrator", Journal of Mechanical Science and Technology, Vol.29, No.1, pp.115 - 120, 2015
- 8) S. W. Shim, S. H. Hong, M. G. Seo, M. J. Tahk, J. I. Lee, "Penetration Performance Analysis of Isotropic Rod Warhead according to Engagement Geometry", KSAS Spring Conference, Apr. 2014, pp. 576 - 579.
- 9) M. G. Seo, S. W. Shim, S. H. Hong, M. J. Tahk, J.I. Lee, K. R. Song, "Analysis on Component Configuration and Rod Deployment Characteristics of Isotropic Rod Warheads", KSAS Spring Conference, Apr. 2014, pp. 584 - 587.
- 10) S. H. Hong, M. G. Seo, S. W. Shim, M. J. Tahk, J.I. Lee, "Comparison of Penetration Performance in Aiming KE Rod Warhead and Isotropic KE Rod Warhead due to Miss Distance", KSAS Spring Conference, Apr. 2014, pp. 580 - 583.
- 11) R. M. Lloyd, Physics of Direct Hit and Near Miss Warhead Technology, Progress in Astronautics and Aeronautics, 2001, pp. 326 - 328.
- 12) R. M. Lloyd, Conventional Warhead Systems Physics and Engineering Design, Progress in Astronautics and Aeronautics, 1998, pp.131 - 149.
- 13) A. Tate, "Long Rod Penetration Models - Part I. A Flow Field Model for High Speed Long Rod Penetration", International Journal of Mechanical Sciences, Vol.28, No.8, 1986, pp. 535 - 548.
- 14) A. Tate, "A Theory for the Deceleration of Long Rods After Impact", Journal of the

Mechanics and Physics of Solids, Vol. 15, No. 6, 1967, pp.387 - 399.

15) A. Tate, "Further results in the theory of

long rod penetration", Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. 17, No. 3, 1969, pp.141 - 150.