

대전차유도무기의 종말 받음각 및 입사각의 상관관계에 의한 표적 파괴율 분석

Kill Probability Analysis Based on the Relation between Final Angle of Attack and Impact Angle of a Guided Anti-tank Missile

정 동 길*

Dong-Gil Jeong

Abstract

The kill probability of a missile depends on guidance error, warhead performance, and etc. In this paper, we analyzed the kill probability of anti-tank missile in a new approach. Under the condition that the missile hit the target, we studied the effect of angle of attack and impact angle. High impact angle increase the probability that the missile hits the upper armour which is relatively weaker, while high angle of attack at the impact instant decreases the effectiveness of the jet induced by the warhead. We proposed a way to increase the capability of penetration by analyzing the interrelation between impact angle and angle of attack.

Keywords : Anti-tank Guided Missile(대전차유도무기), Kill Probability(파괴율), Angle of Attack(받음각), Impact Angle(입사각), Effective Penetration Depth(유효관통력)

1. 서론

창과 방패의 관계라 할 수 있는 대전차무기와 전차의 방호력은 지속적인 발전을 거듭해왔다. 높은 관통력을 가지는 성형작약탄두에 대응하기 위해 반응장갑이 개발되었고, 다시 이를 무력화하기 위한 이중성형작약탄두가 개발되었다. 근래에 들어서는 전차의 주장갑 두께가 비교적 얇은 상부를 공격하기 위해 초기고도상승-종말고도하강의 궤적 형태를 취하는 Javelin 및

Spike나 상부 비월 방식의 TOW-2B 및 NLAW 등이 최신 전차에 유효한 대응책으로 판단된다.

대전차유도무기는 초기에 높은 비행고도를 유지함으로써 표적의 상부타격을 가능하도록 유도가 이루어진다. 그런데 표적에 대한 유도탄의 입사각은 사거리 별로 달성 가능한 수준에 한계가 있으며, 큰 입사각은 종말에 받음각의 발생을 유발함으로써 탄두의 효과도를 감소시키게 된다. 또한 동일한 입사각과 받음각을 가진다고 하더라도 전차의 타격 지점에 따라서 탄두의 효과도는 틀려지게 된다. 본 논문에서는 유도탄의 종말 입사각 및 받음각이 탄두의 유효 관통력에 미치는 영향 및 입사각과 받음각 간의 상관관계를 분석하고, 표적 모델 설정을 통하여 표적의 파괴율을 산출하

† 2010년 4월 19일 접수~2010년 7월 12일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 정동길(dgjeong@add.re.kr)

었다.

2. 유효 관통력 및 표적 모델

가. 유효 관통력 모델

1) 유효 장갑두께 모델

성형작약탄두에서 형성되는 제트와 장갑의 수평면이 이루는 각도는 장갑의 유효 두께를 변화시킨다. 이 각도를 θ 라 하면 타격 장갑 부위에 따른 장갑의 유효 두께는 식 (1), (2)와 같이 주어진다.

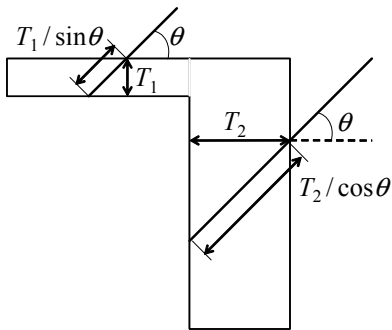


Fig. 1. 상부/측면 장갑 타격 시 유효장갑두께

$$T_{eff}^{up} = T_1 / \sin\theta \quad (1)$$

$$T_{eff}^{side} = T_2 / \cos\theta \quad (2)$$

T_{eff}^{up} , T_{eff}^{side} 는 각각 상부와 측면 장갑유효두께를 의미한다. 동일한 개념으로 일정한 기울기를 갖고 있는 전차의 전면장갑의 유효두께는 Fig. 2로부터 식(3)과 같이 구할 수 있다.

$$T_{eff}^{front} = T_3 / \sin(\theta + \sigma) \quad (3)$$

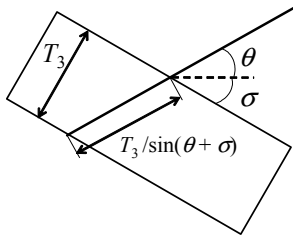


Fig. 2. 전면 장갑 타격 시 유효장갑두께

제트의 장갑 입사각도 θ 는 유도탄의 종말 피치 자세각과 동일하다. 종말 피치 자세각 θ 는 종말 속도벡터가 수평면과 이루는 각도인 입사각과 반응각만큼의 차를 갖게 된다.

2) 종말 반응각을 고려한 관통력 모델

종말 반응각은 탄두 기폭 시 유도탄의 피치 자세각과 유도탄의 속도벡터가 이루는 각으로서, 성형작약탄두에서 형성된 제트가 장갑에 만든 구멍에 대해 수직 방향 속도를 유발하여 관통력의 감소를 야기한다. 성형작약탄두의 제트에 대한 수직방향 속도가 관통력에 미치는 영향은 Yadav^[1,2]에 의해 제시되었다. 일반적으로 성형작약탄두의 관통력 P는 식 (4) 또는 (5)와 같이 표현된다^[3,4].

$$P = l_j \left(\frac{\lambda \rho_j}{\rho_t} \right)^{1/2} \quad (4)$$

$$P = S \left[\left(v_j^0 / v_j^* \right)^{\sqrt{\rho_j / \rho_t}} - 1 \right] \quad (5)$$

여기서 l_j , ρ_j , ρ_t , v_j^0 , v_j^* 는 각각 제트의 길이, 제트의 밀도, 표적의 밀도, 제트의 침투 속도 및 제트의 후미 속도이다. λ 와 S 는 각각 1~2 사이의 상수 및 스탠드오프이다. 식 (5)는 스탠드오프 효과를 고려하여 식 (4)를 보정한 것으로서 연속적인 제트에 대한 관통력 산출식이다. 본 논문에서는 식 (5)을 적용하기로 한다. 그런데 제트의 방향에 대한 수직방향 속도가 존재할 경우, 식 (5)에 의한 관통력이 보장되지 못 한다. Fig. 3은 제트의 방향에 대해 수직 속도 성분을 가지는 제트의 장갑 관통 개념도이다.

(3)

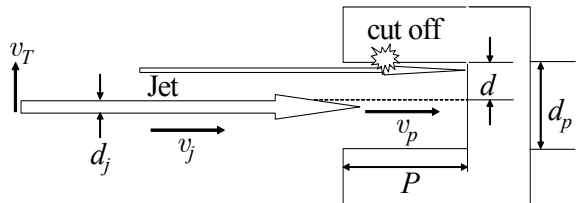


Fig. 3. 수직 속도를 가지는 제트의 장갑 관통 개념도

제트의 선단이 표적 장갑 표면에 닿게 되면서 제트의 두께인 d_j 보다 넓은 너비 d_p 의 구멍이 생기게 되며, 제트 방향에 대한 수직 방향 속도 성분인 v_T 에

의하여 제트가 장갑 벽에 닿게 된다. Fig. 4는 제트 방향에 대해 수직으로 이동하는 표적의 관통 단면으로, 초기 제트에 의해 155mm 깊이의 관통 홀이 생겼으나 수직 방향 속도에 의해 관통 홀 측면과 상호작용이 있을 뿐 추가적인 관통 깊이 생성에는 기여하지 못한다^[5].

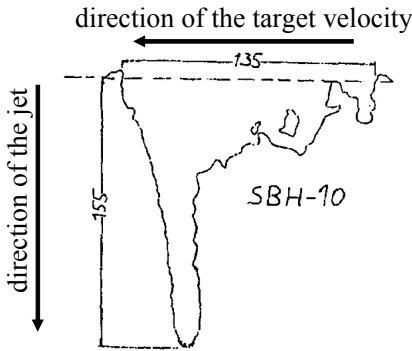


Fig. 4. 측면으로 이동하는 표적에 대한 관통 단면 (단위 : mm)

제트가 장갑 벽에 닿으면 더 이상 관통 성능에 기여하지 못하고 소멸한다고 가정할 때의 관통력은 제트가 장갑 벽에 닿는 시간에 비례한다. 즉,

$$P = v_p \Delta t_d \tag{6}$$

여기서 v_p 는 제트가 장갑을 관통하기 시작하는 순간부터 제트가 소실되기까지의 평균속력으로 다음과 같이 주어진다.

$$v_p = \frac{v_j + 0}{2} = \frac{1}{2} v_j \tag{7}$$

v_j 는 제트의 평균 속도로서 $v_j = (v_j^0 + v_j^r)/2$ 로 정의한다. Δt_d 는 제트가 제트의 방향에 대해 수직으로 d만큼 움직인 시간이므로

$$\Delta t_d = \frac{d}{v_T} = \frac{(d_p - d_j)/2}{v_m \sin \alpha} \tag{8}$$

여기서 v_m 과 α 는 각각 유도탄의 종말속도와 받음각이다. v_T 와 v_m 및 α 의 관계는 Fig. 5에 도시하였

다. 식 (6), (7), (8)에 의하여 관통력 P는 다음과 같이 주어진다.

$$P = \frac{v_j (d_p - d_j)}{4 v_m \sin \alpha} \tag{9}$$

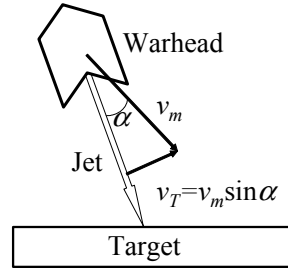


Fig. 5. 받음각과 제트의 수직 속도

하지만 받음각이 작을 경우에는 식 (9)는 유효하지 않으며, 식 (5)를 따르게 된다. 즉 관통력 산출식을 다시 표현하면 다음과 같다.

$$P = \text{MIN} \left\{ \frac{v_j (d_p - d_j)}{4 v_m \sin \alpha}, S \left[\left(\frac{v_j^0}{v_j^r} \right)^{\sqrt{\rho_j / \rho_t}} - 1 \right] \right\} \tag{10}$$

식 (10)의 두 항의 값이 같아질 때의 받음각을 임계 받음각 α_{th} 로 정의할 때, 이 값은 다음과 같이 주어진다.

$$\alpha_{th} = \sin^{-1} \left(\frac{v_j (d_p - d_j)}{4 v_m S \left[\left(\frac{v_j^0}{v_j^r} \right)^{\sqrt{\rho_j / \rho_t}} - 1 \right]} \right) \tag{11}$$

장갑 두께와 특성 및 다른 조건이 동일하다고 가정할 때, 식 (1)과 (7)에 의해 입사각 θ 와 받음각 α 에 의한 탄두의 유효관통력은 장갑타격부위 별로 식 (12)~(14)와 같이 주어진다. P_{eff}^{upper} , P_{eff}^{side} , P_{eff}^{front} 는 각각 상부, 측면, 전면 장갑에 대한 유효관통력을 의미한다.

$$P_{eff}^{upper} = \begin{cases} K \sin \theta & \alpha < \alpha_{th} \\ K \sin \theta \frac{\sin \alpha_{th}}{\sin \alpha} & \alpha \geq \alpha_{th} \end{cases} \tag{12}$$

$$P_{eff}^{side} = \begin{cases} K \cos \theta & \alpha < \alpha_{th} \\ K \cos \theta \frac{\sin \alpha_{th}}{\sin \alpha} & \alpha \geq \alpha_{th} \end{cases} \tag{13}$$

$$P_{eff}^{front} = \begin{cases} K \sin(\theta + \sigma) & \alpha < \alpha_{th} \\ K \sin(\theta + \sigma) \frac{\sin \alpha_{th}}{\sin \alpha} & \alpha \geq \alpha_{th} \end{cases} \quad (14)$$

K 는 비례상수로 탄두의 정치관통력에 해당하나, 실제 유도탄과 표적의 조우 상황에서는 탄두 전방의 기구물 등의 간섭 현상으로 인해 정치관통력보다 낮은 값을 가질 것으로 추정된다.

나. 표적 모델

유도탄의 종말 피치 자세각 및 반응각뿐만 아니라, 유도탄의 표적 타격 위치도 탄두의 장갑 관통 여부에 영향을 미치게 된다.

표적 모델은 T-72 전차를 단순화한 형태를 사용하였다. Fig. 6은 T-72 전차의 형상 및 크기 제원을 보여 주며, Fig. 7은 이를 단순화하여 표현한 3차원 모델이다. T-72 전차의 장갑 두께는 정확히 알려진 바가 없기 때문에, 상부장갑 두께를 50mm, 측면 및 전면 장갑 두께를 200mm로 가정하여 모델을 설정하였다. 실제 장갑 두께도 이 수치에서 크게 벗어나지 않을 것으로 추정된다. 또한 전면장갑의 기울기는 30°로 설정하였다. Fig. 7에서 밝은 영역과 어두운 영역은 각각 취약한 장갑(50mm)과 비교적 방호력이 우수한 장갑(200mm)을 나타내며, 각 영역의 넓이도 도시하였다.

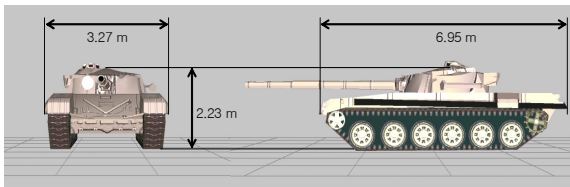


Fig. 6. T-72 전차의 형상 및 크기

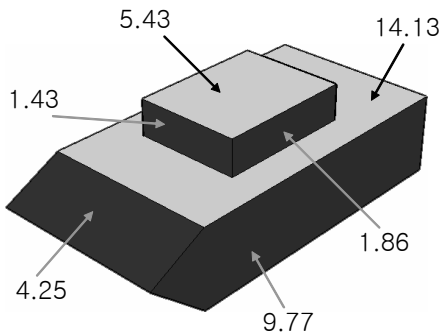


Fig. 7. 단순화한 T-72 전차 모델과 영역별 넓이(m²)

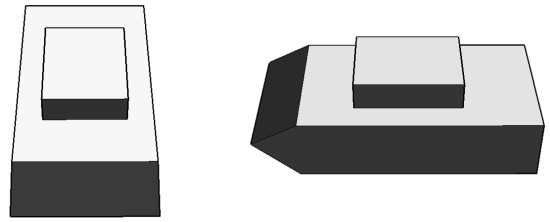


Fig. 8. 표적 모델의 평면 투사(좌 : 정면, 우 : 측면)

유도탄이 전차 표적의 상부장갑을 타격할 확률은 유도탄의 종말 입사각 및 표적의 자세(정면 또는 측면)에 의해 결정된다. 표적 영역 내의 각 지점을 유도탄이 타격할 확률은 균일하다고 가정할 때, 유도탄이 상부장갑 또는 측면장갑을 타격할 확률은 Fig. 8과 같이 3차원 표적을 유도탄의 종말 속도벡터 방향으로 2차원 평면에 투사하였을 때의 상부/측면/전면 장갑 면적 비율을 따른다. 식 (15), (16)은 각각 유도탄이 표적의 정면과 측면을 지향할 경우에 상부, 측면, 전면 장갑의 투사 면적을 산출한 것으로 Fig. 7의 전차모델의 영역별 넓이를 반영하였다. 또한 식 (17)은 상부, 측면, 전면 장갑을 타격할 확률을 나타낸다. S_{upper} , S_{side} , S_{front} 는 각각 비행각에 따라 투사된 상부, 측면, 전면 장갑 영역이며, Pr_{upper} , Pr_{side} , Pr_{front} 는 각각 상부, 측면, 전면 장갑을 타격하게 될 확률, γ 는 유도탄의 종말 입사각이다.

$$S_{upper} = \begin{cases} (15.3 + 1.43[2.66 - \cot \gamma]) \sin \gamma & (\gamma > 20.6^\circ) \\ 15.3 \sin \gamma & (\gamma \leq 20.6^\circ) \end{cases} \quad (15)$$

$$S_{side} = 1.43 \cos \gamma$$

$$S_{front} = 4.25 \sin(\gamma + 30^\circ)$$

$$S_{upper} = \begin{cases} (17.84 + 1.86[0.94 - \cot \gamma]) \sin \gamma & (\gamma > 46.69^\circ) \\ 17.84 \sin \gamma & (\gamma \leq 46.69^\circ) \end{cases} \quad (16)$$

$$S_{side} = 11.63 \cos \gamma$$

$$S_{front} = 4.25 \sin 60^\circ \sin \gamma$$

$$Pr_{upper} = S_{upper} / S_{total} \quad (17)$$

$$Pr_{side} = S_{side} / S_{total}$$

$$Pr_{front} = S_{front} / S_{total}$$

여기서 $S_{total} = S_{upper} + S_{side} + S_{front}$. 투사된 상부 장갑 영역 중 전차 포탑에 의해 가려지는 영역은 입사각 γ 에 따라 틀러지며, γ 가 특정값 이하일 경우 모두 가려지기 때문에 식 (15), (16)에서처럼 γ 의 범위에 따라 구분된 식을 가진다.

3. 종말 자세각 및 받음각 상관관계

대표적인 사격후망각방식의 대전차유도무기는 미국의 Javelin과 이스라엘의 Spike가 있으나, Spike에 비해 Javelin에 대한 다양한 정보가 일반적으로 알려져 있다. 3절에서는 Javelin 대전차유도무기를 기준으로 종말 입사각, 자세각 및 받음각의 상관관계를 도출하도록 한다.

가. 상부공격 비행계획 모델

Fig. 9는 Javelin의 사거리별 상부공격 계략 비행계획적으로 고도유지 비행 후 종말유도로 표적을 타격하게 된다^[6].

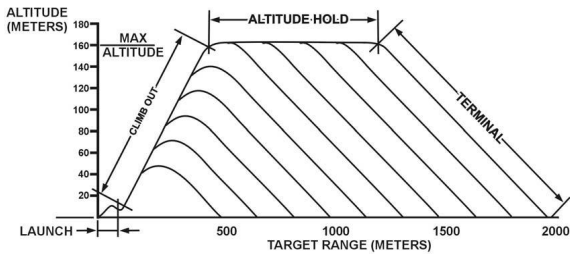


Fig. 9. Javelin의 사거리별 비행계획

고도유지비행 후 비례항법유도로 종말유도를 할 경우에 시선각변화율이 일정한 원호 형태의 궤적을 형성할 경우 최대입사각을 달성할 수 있다^[7]. Fig. 10에서와 같이 표적과 지면 거리 d 만큼 떨어진 위치에서 고도 h 의 고도유지비행을 마치고 원호의 궤적으로 표적을 타격한다고 할 때 원호의 반지름 r 은 식 (18)과 같이 주어진다. 또한 원의 방정식으로부터 입사각 γ 를 식 (19)과 같이 구할 수 있다.

$$r = \frac{d^2 + h^2}{2h} \tag{18}$$

$$\gamma = \tan^{-1} \left(\frac{2hd}{|d^2 - h^2|} \right) \tag{19}$$

Fig. 11은 표적과 유도탄의 상대거리 d (이하 종말유도거리)의 변화에 따른 입사각 γ 의 변화를 도시한 것이다. 종말유도거리가 작을수록 입사각이 증가하게 되나, 이는 유도탄의 기동력과 탐색기 김발각에 의해 제한을 받게 된다.

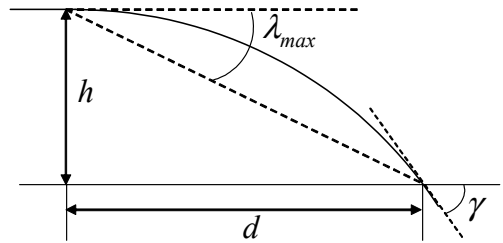


Fig. 10. 종말 비행계획 모델

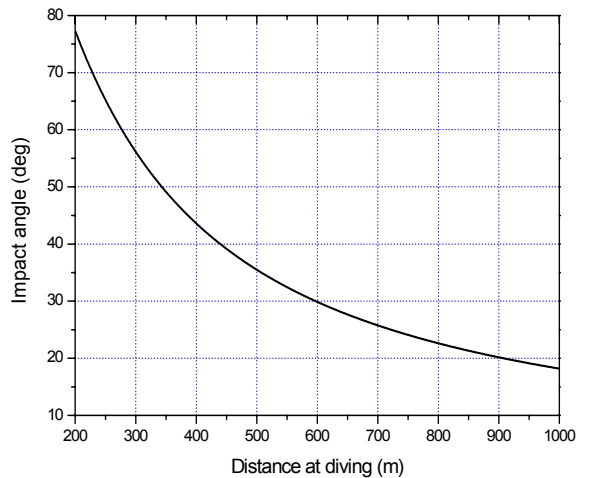


Fig. 11. 종말유도거리에 따른 입사각

일반적으로 종말유도거리는 유도탄의 기동성보다는 최대 김발각 λ_{max} 에 의해 제한되며, Fig. 10으로부터 다음의 관계를 얻는다.

$$d \geq \frac{h}{\tan \lambda_{max}} \tag{20}$$

영상탐색기를 적용한 대전차유도무기의 최대김발각은 $25^\circ \sim 30^\circ$ 수준이며, Fig. 7에 나타난 바와 같이 유지 고도값을 160m라 할 때 최소 종말유도거리는 277~343m가 된다.

나. 받음각-가속도 모델

반지름 r 인 원호궤적을 형성하기 위하여 필요한 가속도 a 는 식 (18)에 의하여 다음과 같이 주어진다.

$$a = \frac{v^2}{r} = v^2 \frac{2h}{d^2 + h^2} \tag{21}$$

한편 공력에 의하여 발생하는 가속도 a_{aero} 는 다음과 같다.

$$a_{aero} = \frac{F_N}{m} = \frac{QS_{ref}C_N}{m} \quad (22)$$

여기서 F_N , m , Q , S_{ref} , C_N 은 각각 공력에 의한 양력, 유도탄 질량, 동압, 기준넓이(유도탄 단면적) 및 양력 계수이다. 트림(trim)조건 하의 C_N 을 고려할 경우, C_N 은 반응각 α 의 함수로 볼 수 있다. C_N 과 α 의 관계는 유도탄의 형상에 의해서 결정되며, Javelin의 형상으로부터 개략적인 값을 산출할 수 있다^[8]. Fig. 12는 Javelin의 형상으로부터 산출한 개략 공력계수를 식 (22)에 대입하여 얻은 가속도 값이다.

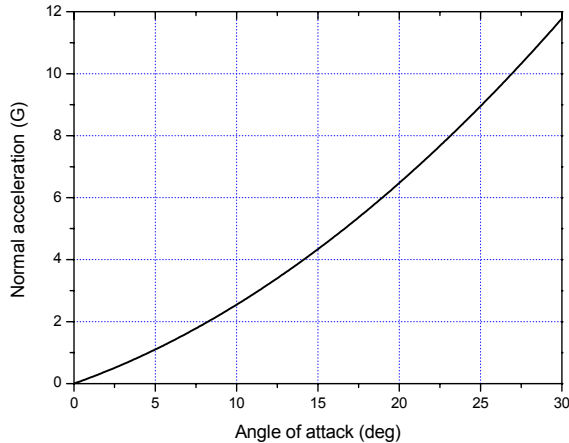


Fig. 12. 반응각에 따른 기동 가속도

이때 적용한 속력값은 140m/s로 2,000m 사거리에 대한 비행시간이 14초임을 고려하였다^[6]. Javelin 탐색기의 최대김발각이 30°라고 가정하면 식 (20)과 (21)로부터 최대입사각을 달성하기 위한 기동요구가속도는 약 6G임을 알 수 있으며, 이는 20도 미만의 반응각으로 달성 가능한 기동성이다(Fig. 11). 중력가속도 g 를 고려한 종말 요구 공력가속도는 다음과 같다.

$$a_{aero} = a - g \cos \gamma \quad (23)$$

Fig. 13은 입사각에 대한 종말 반응각을 산출한 것으로 입사각이 증가하면 반응각도 증가하는 것을 알 수 있다.

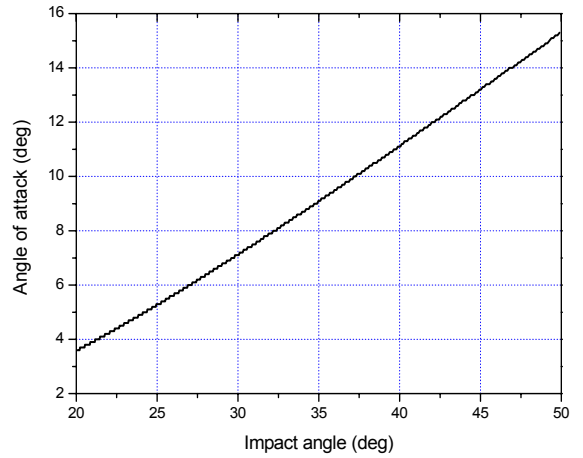


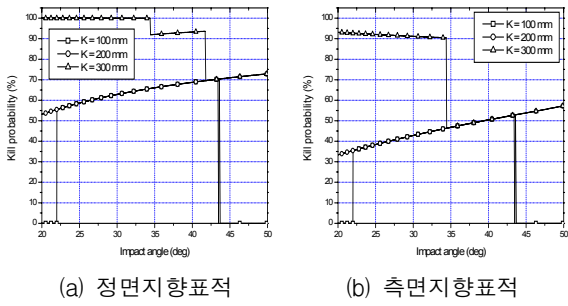
Fig. 13. 입사각-종말 반응각

4. 표적 파괴율 산출

본 연구에서는 표적이 명중되었다는 가정 하에서 표적 장갑의 관통여부를 기준으로 파괴율을 산출한다. 이중성형작약탄두의 선구탄두에 의해 반응장갑은 제거된 것으로 가정하고, 주탄두와 주장갑만을 고려하도록 한다.

표적의 파괴율은 식 (12)~(14)에서 주어진 유효관통력과 식 (15)~(17)의 타격점 확률로부터 계산할 수 있다. 일반적으로 대전차용 성형작약탄두의 정치관통력, 즉 반응각 0°, 입사각 90°인 상태로 탄두가 정지한 상태에서 측정된 관통력은 500mm 이상이나, 선구탄두-주탄두 간섭 등의 제한 요소로 인해 실제적인 관통력은 감소하게 된다. 이중성형작약탄두의 시험결과^[9]를 고려하여 식 (12)~(14)의 K 를 100~300(mm)로 가정하고 시뮬레이션을 수행하였다. 그리고 입계반응각은 탄두의 특성에 의해 상이한 값이나, 표적 파괴율 산출을 위해 106mm 성형작약탄 기폭 시험을 통해 획득된 데이터^[6]를 식 (9)에 적용하여 계산하였다. 또한 종말레적에서 반응각은 유도탄 상부로 형성되므로 종말 피치 자세각은 입사각에서 반응각을 더한 값으로 산출하였다.

종말입사각을 달리하도록 종말유도모델을 설정하고 동일한 초기 조건(고도, 속도) 하에서 표적 장갑 관통 확률을 산출한 결과는 Fig. 14와 같다. Fig. 14.(a), (b)는 각각 표적이 정면을 지향하는 경우와 측면을 지향하는 경우의 파괴율을 나타내고 있다.



(a) 정면지향표적 (b) 측면지향표적

Fig. 14. 입사각 변화에 따른 표적 파괴율

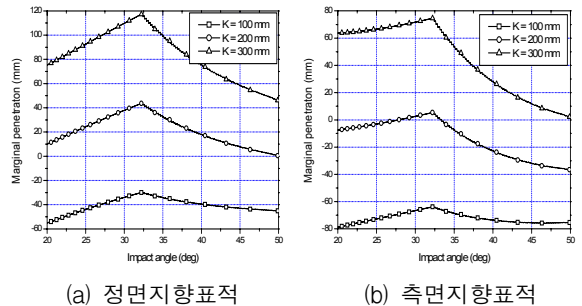
Fig. 14는 장갑관통 여부를 기준으로 표적 파괴율을 산출한 것으로 측면 지향 표적에 비해 정면 지향 표적의 파괴율이 전반적으로 높은 것을 알 수 있으나, 종말 입사각과 받음각의 변화에 따른 파괴율 변화를 파악하기 힘들다. 따라서 기대관통력 $E[P_{eff}]$ 과 장갑 두께 기대값 $E[T]$ 의 차를 잉여관통력 P_{mrg} 로 정의하고 이 값의 성향을 파악하도록 한다.

$$P_{mrg} = E[P_{eff}] - E[T] \quad (14)$$

$$E[P_{eff}] = Pr_{upper} \times P_{eff}^{upper} + Pr_{side} \times P_{eff}^{side} + Pr_{front} \times P_{eff}^{front} \quad (15)$$

$$E[T] = Pr_{upper} \times T_{upper} + Pr_{side} \times T_{side} + Pr_{front} \times T_{front} \quad (16)$$

여기서 T_{upper} , T_{side} , T_{front} 는 각각 상부, 측면, 전면 장갑두께이다. Fig. 15의 (a), (b)는 각각 표적이 정면, 측면을 지향할 때의 잉여관통력을 나타내고 있다. 잉여관통력이 높을수록 표적 관통 확률이 높다고 할 수 있으며, 측면 지향 표적보다는 정면 지향 표적에 대해 높은 잉여관통력이 확보되는 것을 확인하였다. 이는 측면 지향 표적의 경우에 장갑두께가 두꺼운 영역을 타격확률이 상대적으로 높기 때문이다. 입사각이 증가함에 따라 종말 받음각 역시 거의 선형적으로 증가하게 되는데, 임계받음각 부근에서 잉여관통력이 최대가 되며 입사각이 증가하더라도 종말 받음각에 의한 관통 성능 감소로 잉여관통력은 감소하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 종말 받음각이 종말 입사각에 비해 표적 파괴율에 미치는 영향이 더 큰 것으로 판단할 수 있다.



(a) 정면지향표적 (b) 측면지향표적

Fig. 15. 입사각 변화에 따른 잉여관통력

5. 결론

본 논문에서는 대전차유도탄이 표적에 명중했다는 가정 하에 성형작약탄두의 장갑 관통 여부로 표적의 파괴율을 산출하였다. 유도탄의 종말 입사각 및 받음각으로부터 탄두의 유효관통력을 정의하였을 뿐만 아니라, 표적 모델을 설정하고 유도탄의 표적 타격점에 따른 장갑 두께 변화를 고려하여 표적 파괴 여부를 분석하였다. 관통력과 장갑 두께의 기대값 차를 잉여관통력으로 정의하고 시뮬레이션을 수행하여 최대의 관통효과를 위한 종말 입사각과 받음각의 관계를 분석하였다. 분석 결과 관통력에 영향을 주지 않는 최대 허용 받음각, 즉 임계 받음각을 가질 때 관통성능이 최대가 되는 것을 확인하였다.

References

- [1] H. S. Yadav, "Interaction of a Metallic Jet with a Moving Target", Propellant, Explos., Pyrotech., Vol. 13, pp. 74~79, 1988
- [2] H. S. Yadav, "Effect of Moving Plate on Jet-Penetration", Propellant, Explosives, Pyrotechnics, Vol. 14, pp 12~18, 1989.
- [3] G. Birkhoff, D. P. Mcdougall, E. M. Pugh, and G. Taylor, "Explosives with Lined Cavities", J. Appl. Phys., Vol. 19, pp. 563~582, 1948.
- [4] R. DiPersio, J. Simon, and A. Merendine, "Penetration of Shaped Charge jets into Metallic Targets", BRL-Report No. 1296, Sep., 1965.
- [5] Y. Me-Bar and Y. Partom, "Shaped Charge Jet Tail

- Velocity”, Propellant, Explosives, Pyrotechnics, Vol. 22, pp. 355~359, 1997.
- [6] Dept. of the Army, “FM 3-22.37 : Javelin Medium Antiarmor Weapon System”, 2003. 1.
- [7] 김태훈 외 4명, “대전차 유도탄의 표적 상부 공격을 위한 총돌각 증대 유도법칙”, 유도무기학술대회논문집, Vol. 14, 2007.
- [8] P. Zarchan, “Tactical and Strategic Missile Guidance 5th Edition”, AIAA, 2007.
- [9] 장수호 외 3명, “이중성형작약 탄두 관통특성 연구”, 지상무기학술대회논문집, Vol. 15, 2007.
- [10] 오경환 외 3명, “성형작약 제트에 대한 반응장갑의 방호력 연구”, 국방과학연구소, GWSD-419-92752, 1992.