

판재를 이용한 초고속 위협체의 방호성능에 대한 해석적 연구

Investigation Into Protection Performance of Projectile Using Flying Plate

최효성¹, 신현호², 유요한³, 박장현⁴, 김종봉^{1,✉}
Hyoseong Choi¹, Hyunho Shin², Yo-Han Yoo³, Jahng Hyon Park⁴, and Jong-Bong Kim^{1,✉}

1 서울과학기술대학교 자동차공학과 (Department of Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology)

2 강릉원주대학교 재료공학과 (Department of Materials Engineering, Gangneung-Wonju National University)

3 국방과학연구소 (Agency for Defense Development)

4 한양대학교 미래자동차공학과 (Department Automotive Engineering, Hanyang University)

✉ Corresponding author: jbkim@seoultech.ac.kr, Tel: +82-2-970-6434

Manuscript received: 2016.2.2. / Revised: 2016.5.18. / Accepted: 2016.8.29.

We investigated the protection capability of a plate against high speed projectiles demonstrating collision and penetration behaviors by finite element analysis. The element erosion method was used for penetration analysis, which showed that the speed of the projectile was slightly reduced by the collision with the protection plate. Protection capability was measured by the projectile's attitude angle change because the damage of our tanks by projectiles was also dependent on the projectile-tank collision angle. When the length of the protection plate was sufficiently long, the projectile was severely deformed and incapacitated. In the case of a small plate, the projectile was deformed only in the collision region. Thus, projection capability was investigated by the change of attitude angle. The effect of collision angle, velocity, and length of the plate on the rotational and vertical velocities of the projectile was investigated.

KEYWORDS: Active protection (능동방호), High speed projectile (고속 위협체), Plate impact (판재 충돌)

기호설명

L = Plate length

t = Thickness of a plate

V_{PR} = Projectile speed

V_X = Horizontal speed

V_Z = Vertical speed of a plate

θ = Plate attitude angle

Δt = Arrival time after collision with plate

1. 서론

전투차량은 전투를 진행하는데 있어 중요한 무기체계의 하나로 전투 중 대전차포 등의 위협체로부터 안전하게 보호되어야 한다. 전투차량을 안전하게 보호하기 위해 부가형 수동장갑 (Add-on Passive Armor), 부착형 반응장갑 (Additive Reactive Armor), 능동장갑 (Active Armor) 등의 여러 가지 방법이 연구되었다.¹ 최근에는 반응장갑을 무력화하는 탄두의 개발이 진행됨에 따라 위협체를 사전

에 무력화시키는 (Active Kill) 능동장갑의 개발이 진행되고 있다. 능동방호는 아군 전차에 접근하는 위협체를 탐지추적하여 대응체로 무력화시키는 능동과피형 (Hard-Kill)과 위협체를 교란시키거나 연막차장 후 안전한 곳으로 회피하는 유도교란형 (Soft-Kill)으로 구분된다.¹ 능동과피형 능동방호의 하나로 대응탄에 대한 연구가 진행되었다.¹ 폭발사파편을 이용해 무력화하는 대응탄은 성형작약탄 등이 작동하기 전에 불량을 유발하여 제트 (Jet)를 형성하는 능력을 감소시키는 관점에서는 효과가 있지만, 초고속 운동에너지탄을 방호하는 능력에는 한계가 있다. 그래서, 최근에는 관재나 봉재를 이용하여 운동에너지탄을 무력화하는 연구가 진행되고 있다.²⁻⁷ 관재나 봉재를 이용하여 운동에너지탄을 무력화하기 위해서는 관재나 봉재를 발사하기 위한 기술과 더불어 무력화 효과에 대한 분석이 필요하다. Paik 등⁴은 양쪽으로 이동하는 2개의 관재를 이용했을 때 관재 속도와 요우 (Yaw)각이 방호 성능에 미치는 영향을 분석하였다. Liden 등⁵⁻⁷도 관재의 속도 및 요우각에 따른 위협체의 속도 변화와 위협체의 파손 정도를 실험 및 해석을 통해서 연구하였다. 위협체 및 관재의 파괴를 해석하기 위해 파손 모델을 이용하였다. Gao와 Cho⁸는 탄소 복합재의 관통 현상에 대해 연구하였고, Hur⁹는 총탄이 비행기 구조물을 관통하는 현상에 대해 연구하였다. 또한, Choi 등¹⁰은 폭압에 의해 관재가 파손되는 현상을 해석을 통해서 연구하였고, Jung 등¹¹은 세라믹/유리섬유강화 복합재를 총탄이 관통하는 것에 대해 연구하였다.

본 연구에서는 위협체가 관재와 충돌 후 위협체의 자세각 변화에 대해 연구하였다. 위협체의 파괴 (부러짐)에 관한 물성 자료 확보가 어려워 파괴는 고려하지 않았다. 위협체와 관재의 충돌에 대해 유한요소 해석을 수행하여 위협체가 관재와 충돌하였을 때 속도 변화, 형상변화, 그리고 자세각을 관찰하여 무력화 가능성을 분석하였다. 관재의 속도, 관재와 위협체와 충돌 각도, 관재의 두께 등이 무력화 정도에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 해석 모델 및 물성

Fig. 1은 해석한 모델의 형상을 보여준다. 위협체는 V_{PR} 의 속도로 x방향 (우측)으로 이동하고 있고, 대응판재는 (V_x , V_z)의 속도로 위협체를 향해 이동하고 있다. 해석은 판재의 두께 (t), 충돌각도

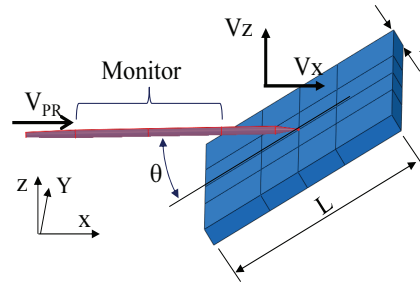


Fig. 1 Analysis model description for the collision of a projectile with a plate

Table 1 Material constants for the Johnson-Cook model^{12,13}

Part	Projectile	Plate
Material	Tungsten heavy alloy	4340 steel
Young's modulus (GPa)	389.2	200.1
Poisson's ratio	0.28	0.30
Density (kg/m ³)	17,200	7,870
A (GPa)	1.411	0.792
B (GPa)	0.223	0.510
C	0.022	0.014
n	0.108	0.260
m	1.0	1.03
T _{ref} (°C)	20.0	20.0
T _{melt} (°C)	3,410	1,427

(θ), 그리고 관재의 이동속도에 대해서 수행하였고, 초기 충돌지점은 관재 윗면의 중심으로 가정하였다. 충돌 후 위협체의 거동은 Fig. 1에 'Monitor'라고 표시된 부분 (앞에서부터 $L_p/4$ 부분부터 $4L_p/5$ 부분까지, L_p = Length of Projectile)을 이용하여 분석하였다. 위협체의 맨 앞부분과 맨 뒤 부분은 충돌에 의해 크게 변형하고 파편화 되어, 위협체의 회전을 분석할 때 오차를 유발할 수 있기 때문이다. 위협체와 관재에 경계조건은 별도로 부여하지 않았고, 속도를 초기조건으로 부여하였다. 그리고, 위협체와 관재는 자기접촉 (Self Contact)을 포함해 접촉처리 하였고, 마찰계수는 0으로 하였다. 위협체의 직경은 21 mm, 길이는 680 mm 이다. 위협체 초기속도 V_{PR} 은 2 km/s로 하였다.

재료의 유동응력은 Johnson-Cook¹² 모델로 묘사하였고 물성계수는 Table 1에 기술하였다.^{12,13} 위협체 재료로는 Tungsten Heavy Alloy를, 관재 재료로는 4340 Steel을 이용하였다. 관통 현상을 해석하기

위해 요소소진 (Element Erosion) 방법을 사용하였고, 소진 기준으로는 등가소성변형을 1.5를 사용하였고,¹⁴ 해석은 NET3D^{13,15,16}로 수행하였다.

3. 해석 결과 및 분석

3.1 충돌 형상 및 속도 변화

Fig. 2는 위협체가 판재와 충돌하여 관통하는 형상을 보여준다. Fig. 2의 해석에서 판재의 길이는 0.6 m, 두께는 0.05 m, 충돌각 (θ)은 30° , 판재의 x 축 및 z 축으로 이동 속도는 각각 - 500 m/s와 500 m/s 이다. 0.4 ms 에 관통이 이루어졌고 관통 후 위협체가 심하게 찌그러졌음을 알 수 있다. 위협체의 파괴 물성을 정확하게 알고 파괴 모델을 적용하면 파편으로 깨지는 현상을 모사할 수 있을 것으로 사료되나 현재는 파괴물성을 측정하는 것이 어려워 파괴를 모사하지는 못했다.

판재와 충돌에 의한 무력화 정도를 분석하기 위해 먼저 속도 변화를 관찰하였다. Fig. 3은 위협체의 진행방향(x 방향)과 수직방향(z 방향)의 속도 변화를 보여준다. 충돌 후 진행방향 속도는 1.93 km/s 로 변화가 크지 않다. 그렇기 때문에 속도를 줄여서 위협체를 무력화시키는 것에는 한계가 있는 것으로 판단이 된다. 수직방향의 속도는 충돌 후 약 194 m/s 이다. 이후에는 이와 같은 위협체 진행의 수직방향 속도와 회전 속도를 이용하여 무력화 할 수 있는 가능성에 대해 기술하고자 한다. 즉, 판재와의 충돌로 위협체의 궤도를 변경하여 무력화 하는 가능성과 위협체를 회전시켜 위협체가 아군 전차에 충돌하는 자세각을 크게 하여 침투 깊이를 줄이는 방향에 대해 분석하였다.

3.2 판재의 길이, 속도, 충돌 각도의 영향

판재의 길이, 수직방향 속도, 그리고 충돌각도에 대해 해석을 수행하여 무력화 가능성을 분석하였다. Fig. 4는 대응 판재의 길이에 따른 위협체의 충돌 후 형상을 보여준다. 길이가 200 mm 이하인 경우 판재가 위협체의 전면부만 충돌해서 앞 부분만 변형이 되었다. 이것은 전면부 충돌시 전면부는 파손이 될 수 있지만, 후방부는 그대로 위력을 가질 수 있음을 의미한다. 판재의 길이가 400 mm 이상일 경우에는 판재길이 200mm 이상인 경우보다 위협체 전체가 상대적으로 심하게 변형되었다. Fig. 5는 위협체의 수직방향 (z 방향) 속도에 따른 충돌 후 변형형상을 보여준다. 수직방향 속도가

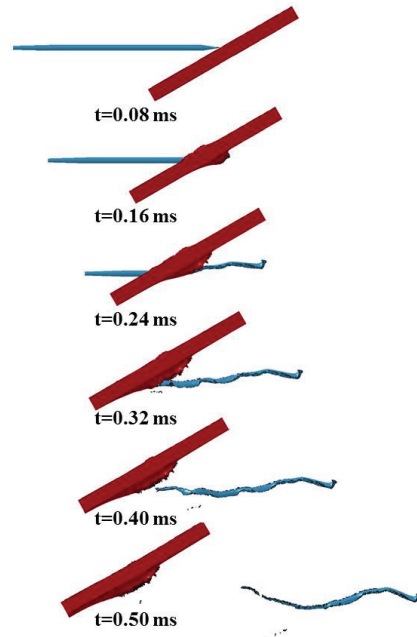


Fig. 2 Penetration procedure of a projectile into a plate ($L = 0.6$ m, $t = 0.05$ m, $\theta = 30^\circ$, $V_x = -500$ m/s, $V_z = 500$ m/s)

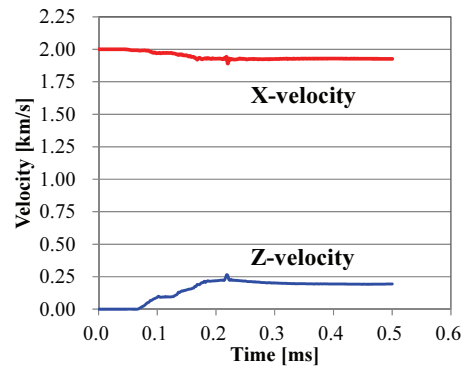


Fig. 3 Projectile velocity during collision ($L = 0.6$ m, $t = 0.05$ m, $\theta = 30^\circ$, $V_x = -500$ m/s, $V_z = 500$ m/s)

500 m/s 인 경우에는 위협체가 심하게 변형되었지만, 수직방향 속도가 0인 경우에는 전면부만 조금 변형되고 뒷부분은 변형이 거의 없다. 수직방향 속도가 적은 경우에는 무력화가 되지 않을 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 판재의 충돌 각도에 따른 충돌 후 위협체의 변형형상을 보여준다. 탄알과 같이 질량이 작은 운동체는 판재를 관통하지 못하고 튀어나오

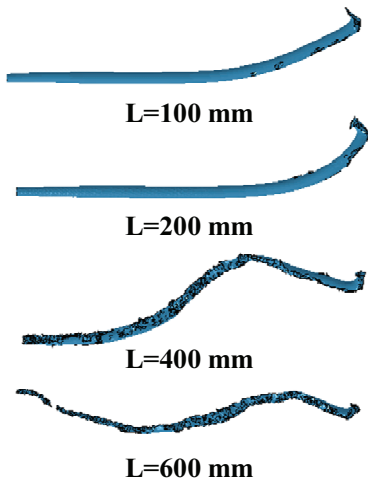


Fig. 4 Deformed shape for various lengths of counter plate ($t = 0.05 \text{ m}$, $\theta = 30^\circ$, $V_x = -500 \text{ m/s}$, $V_z = 500 \text{ m/s}$)

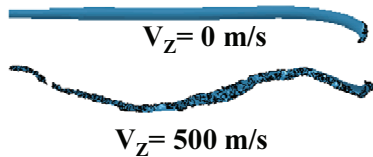


Fig. 5 Deformed shape for different normal velocities of counter plate ($L = 0.6 \text{ m}$, $t = 0.05 \text{ m}$, $\theta = 30^\circ$, $V_x = -500 \text{ m/s}$)

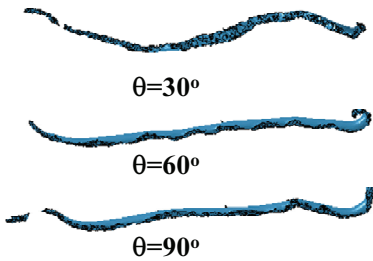


Fig. 6 Deformed shape for various collision angles of projectile with counter plate ($L = 0.6 \text{ m}$, $t = 0.05 \text{ m}$, $V_x = -500 \text{ m/s}$, $V_z = 500 \text{ m/s}$)

기도 한다.¹⁷ 또한 비교적 긴 봉재도 판재와의 각도가 약 5이하인 경우 튀어나오기도 하지만¹⁸ 이 경우 정확하게 충돌시키기가 어렵기 때문에 본 연구에서는 튀어 나오는 현상은 분석에서 제외하였다. 판재의 각도가 60도 이상인 경우에는 판재의 각도가 30도인 경우에 비해 변형도 작고 직선 형

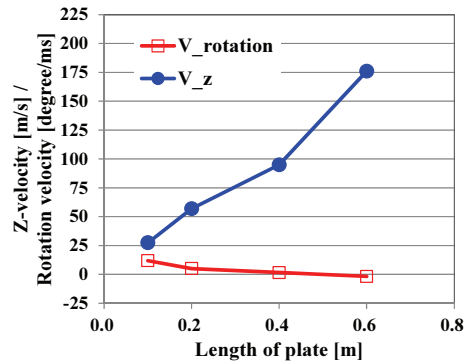


Fig. 7 Z-directional and rotational velocity of projectile for various plate length ($t = 0.05 \text{ m}$, $\theta = 30^\circ$, $V_x = -500 \text{ m/s}$, $V_z = 500 \text{ m/s}$)

태를 유지하고 있음을 알 수 있다. 위협체의 아래 부분이 심하게 변형된 것은 판재가 수직방향(위)으로 움직이고 있어 위협체의 아래 면을 위 방향으로 충돌하기 때문이다. Gee와 Littlefield¹⁹는 위협체가 경사로 충돌할 경우 수직으로 충돌할 때 관통 깊이가 가장 크고, 각도가 작아질수록 관통 깊이가 작아짐을 보였다. Fig. 6에 보인 충돌 후 위협체가 아군 탱크에 충돌할 때, 판재의 각도가 30도인 경우는 경사로 충돌한다고 볼 수 있기 때문에 60도인 경우보다 관통 깊이가 작을 것으로 예측되나 추가적인 연구를 통해 확인이 필요하다.

Fig. 7은 판재의 길이에 따른 위협체의 수직방향 속도와 회전 속도를 보여준다. 수직방향 속도는 위협체 전체가 이동하는 속도이고, 회전 속도는 충돌이 끝나고 안정화 된 상태에서 Fig. 1에서 'Monitor' 라고 표시된 부분의 속도를 추출하였다. Fig. 7에서 충돌 후 위협체의 수직방향 속도와 회전 속도는 같은 경향을 가지지 않음을 알 수 있다. 판재 길이가 길수록 위협체의 수직방향 속도는 증가하지만 회전 속도는 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 Fig. 4에서 원인을 찾을 수 있다. 판재의 길이가 짧은 경우 위협체의 앞 부분에서만 충돌이 발생하여 위협체를 크게 회전시키지만, 충분한 에너지가 전달되지 않아서 수직방향으로는 속도를 증가시키지 못한다. 판재의 길이가 긴 경우 위협체 앞에서 뒷부분까지 충돌하기 때문에 수직방향 속도는 크지만, 회전은 크지 않다. 수직방향 최대 속도는 판재 길이가 0.6 m인 경우 약 175 m/s 이고, 최대 회전속도는 판재의 길이가 0.1 m인 경우 약 12 degree/ms 이다. 위협체가 아군 전차 중앙을 향

해 진행할 때, 위협체가 아군 탱크를 충돌하지 못하고 비켜가는 조건을 다음의 식으로 예측할 수 있다.

$$\Delta t_{Dev} = \frac{L_T}{2V_Z} \quad (1)$$

$$L_{C,Dev} = V_{PR} \cdot \Delta t_{Dev} \quad (2)$$

식(1)과 식(2)에서 Δt_{Dev} 는 위협체 회피를 위해 필요한 위협체의 도착 시간(관재와 충돌 후)이고, L_T 는 아군 전차의 길이, V_{PR} 과 V_Z 은 각각 위협체의 수평방향과 수직방향 속도, 그리고 $L_{C,Dev}$ 는 아군 전차에서 충돌지점까지의 거리로 Fig. 8에 나타나 있다. M₁ 전차는 길이, 폭, 높이가 각각 약 8 m, 4 m, 3 m이다. 그리고, Plate가 위협체를 전차의 폭, 길이, 높이 어느 방향으로 밀어낼 지 알 수 없기 때문에 가장 긴 치수인 전차의 길이를 이용하여 계산하였다. M₁ 전차의 길이가 약 8 m이지만 본 연구에서는 10 m로 계산하였다. 위협체의 진행 속도 2.0 km/s와 수직방향 속도 175 m/s를 이용하여 최소 충돌거리를 계산하면 56.8 m가 된다. 즉, 56.8 m 밖에서 충돌해야 회피가 가능함을 알 수 있다.

Gee와 Littlefield¹⁹는 위협체가 전차와 충돌시 자세각이 60도 이상이면 관통력이 약 20% 이하로 감소한다는 결과를 제시하였다. 그래서 본 연구에서는 위협체가 관재와 충돌 후 전차와 충돌하는 자세각이 60도가 되는 충돌거리를 다음과 같이 계산하여 방호 가능성을 분석하였다.

$$\Delta t_{Rot} = \frac{60^\circ}{V_{Rot}} \quad (3)$$

$$L_{C,Rot} = V_{PR} \cdot \Delta t_{Rot} \quad (4)$$

식(3)과 식(4)에서 Δt_{Rot} 는 위협체가 60도 이상 회전하기 위해 필요한 위협체 도착 시간(관재와 충돌 후)이고, $L_{C,Rot}$ 은 아군 전차에서 충돌지점까지의 거리이다. 위협체의 진행 속도 2.0 km와 관재와 충돌 후 위협체의 회전속도 13 degree/ms를 이용하여 최소 충돌거리를 계산하면 9.2 m가 된다. 즉 9.2 m밖에서 충돌하면 관통 깊이를 약 20%로 줄일 수 있다. 두 결과를 비교해 볼 때, 위협체를 56.8 m 거리에서 충돌시키는 것보다 9.2 m 거리에서 충돌시키는 것이 보다 쉽기 때문에 자세각을 바꾸어 방호하는 것이 유리하다고 판단이 된다. 위협체의

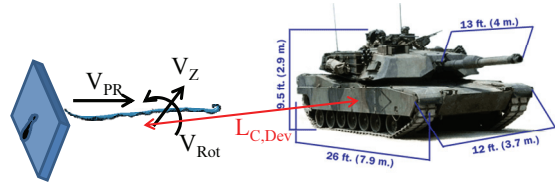


Fig. 8 Schematic illustration of active protection using plates²⁰

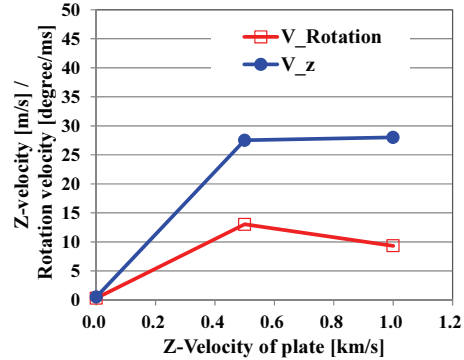


Fig. 9 Z-Directional and rotational velocity of projectile for various plate velocities in z-direction ($L = 0.1$ m, $t = 0.05$ m, $\theta = 30^\circ$, $V_x = -0.5$ km/s)

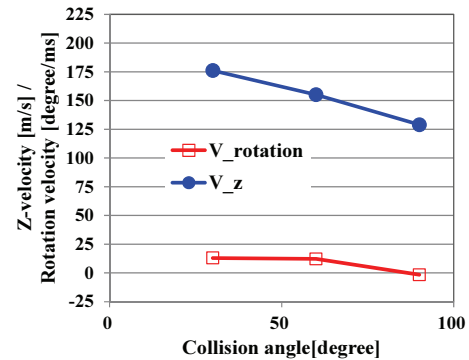


Fig. 10 Z-directional and rotational velocity of projectile for various collision angles ($L = 0.1$ m, $t = 0.05$ m, $\theta = 30^\circ$, $V_x = -500$ m/s, $V_z = 500$ m/s)

자세각을 바꾸는 관점에서 볼 때, 관재의 길이가 작은 것이 더 유리함을 Fig. 7에서 알 수 있다. 그래서 관재의 길이를 0.1 m로 고정하고 관재의 속도 및 충돌 각도에 대해 해석을 수행하여 Figs. 9와 10에 나타내었다. Fig. 9의 결과에서, 관재의 수직방향 속도가 0.5 km/s 인 경우가 탄두의 회전속도가 가장 큼을 알 수 있다. 충돌 후 위협체의 회전속도는 관

Table 2 Summary of protection capability

No	L (m)	V _Z (m/s)	Collision angle (deg.)	Protection capability		
				Severe deform	L _{C,Dev} (m)	L _{C,Rot} (m)
1	0.1	500	30	X	363.6	9.2
2	0.2	500	30	X	175.4	23.9
3	0.4	500	30	0	105.3	76.0
4	0.6	500	30	0	56.8	69.6
5	0.1	0	30	X	20000.0	382.0
6	0.1	1000	30	X	357.1	12.9
7	0.1	500	60	X	64.5	9.8
8	0.1	500	90	X	77.5	76.0

제의 속도가 1.0 km/s인 경우가 0.5 km/s인 경우보다 작고, 충돌 후 위협체의 수직방향 속도는 판재의 수직방향 속도가 0.5 또는 1.0 km/s 인 두 가지 경우 거의 같음을 알 수 있다. 이것은, 판재의 속도가 빠른 경우 위협체의 맨 앞부분만 충돌하고 파손을 일으키기 때문에 사료된다. 위협체와 판재의 충돌각도에 따른 결과 (Fig. 10)에서는 충돌각도가 60도 이하인 경우 위협체의 회전속도는 비슷하고, 수직방향 속도는 충돌각이 커질수록 작아짐을 알 수 있다.

Table 2에 해석 결과를 정리하였다. 해석 3번과 4번의 경우 (Fig. 4) 위협체의 변형이 크고 sine파 형태로 변형이 되어 변형이 작고 직선형태를 유지하고 있는 위협체보다 판통 깊이가 작고 방호 성능이 우수할 것으로 예측이 되나 추가적인 연구를 통해 확인이 필요하다. 또한, 해석 3번과 4번의 경우 무거운 판재를 발사해야 한다는 어려움이 있을 수 있다. 판재의 길이를 0.1 m로 작게 한 경우 위협체의 경로를 변경하여 아군 전차를 보호하기 위해서는 최소한 약 80 m 이상의 거리에서 500 m/s의 수직방향 속도와 충돌각도 60도 이상으로 충돌 시켜야 함을 알 수 있다 (해석 7, 8). 하지만, 충돌에 의해 위협체의 자세각을 60도 이상 회전시켜서 방호하기 위해서는, 충돌각 60도 이하에서 수직방향 속도 500 m/s 이상으로 약 13 m 거리에서 충돌시키면 무력화가 가능한 것을 알 수 있다 (해석 1, 6, 7). 해석에서는 편의상 수직방향 속도를 이용하였지만, 탱크의 높이와 길이가 각각 약 3 m, 10 m 이하이기 때문에 위협체 진행 방향에 직각인 방향의 속도 500 m/s로 10 m 거리에서 충돌시키는 것은 어렵다. 위협체 방향으로 속도가 500 m/s라고 할 때 수직방향 거리가 최소 10 m가 필요하기 때문이다. 그래서 주변의 전차와 협력하는 방호 시스템 또는 판재를 회전시키면서 충돌시키는 방법 등의 추가적인 연구가 필요하다.

4. 결론

본 연구에서는 판재를 이용하여 초고속 위협체를 방호하기 위한 방호 성능에 대해 연구하였다. 판재의 길이, 충돌 각도, 그리고 충돌 속도가 방호 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 판재의 두께가 위협체 직경의 2.4배고, 위협체 길이가 직경의 32 배인 경우 판재와 충돌 후 위협체의 속도가 약 5% 만 감소하는 것을 알 수 있었고, 그렇게 때문에 속도를 감소시켜 방호하는 것은 어려움을 알 수 있었다. 판재와의 충돌에 의해 위협체의 경로를 변경하여 회피하는 방안과 위협체의 자세각을 바꾸어 침투 성능을 감소시키는 방안으로 방호 가능성을 분석하였다. 결과로 위협체의 경로를 바꾸는 것보다는 자세각을 바꾸어 침투 성능을 저하시키는 것이 유리함을 알 수 있었다. 또한 판재의 수직방향 속도와 충돌각에 따른 방호를 위한 최소 충격 거리를 예측하여 제시하였다. 판재와 위협체의 충돌각도는 60도 이하여야 하고, 수직방향 속도는 500 m/s 이상이어야 무력화 가능성이 있음을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 국방과학연구소 생존성 기술 특화센터의 사업으로 지원받아 연구되었음 (계약번호 UD090090GD).

REFERENCES

1. Cho, S. H., Song, Y.- W., and Kim, G.-L., "A Study on Counter-Munition for Active Protection System according to Fragmentation Type," Proc. of the Korean Institute of Military Science and Technology, pp. 72-75, 2005.
2. Held, M., "Disturbance of Shaped Charge Jets by Bulging Armour," Propellants Explosives Pyrotechnics, Vol. 26, No. 4, pp. 191-195, 2001.
3. Yadav, H. and Kamat, P., "Effect of Moving Plate on Jet-Penetration," Propellants, Explosives, Pyrotechnics, Vol. 14, No. 1, pp. 12-18, 1989.
4. Paik, S., Kim, S., Yoo, Y., and Lee, M., "Protection Performance of Dual Flying Oblique Plates Against a Yawed Long-Rod Penetrator," International Journal of Impact Engineering, Vol. 34, No. 8, pp. 1413-1422, 2007.
5. Lidén, E., Johansson, B., and Lundberg, B., "Effect of Thin Oblique Moving Plates on Long Rod Projectiles: A

- Reverse Impact Study,” *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 32, No. 10, pp. 1696-1720, 2006.
6. Lidén, E., Andersson, O., and Lundberg, B., “Deformation and Fracture of a Long-Rod Projectile Induced by an Oblique Moving Plate: Experimental Tests,” *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 38, No. 12, pp. 989-1000, 2011.
 7. Lidén, E., Mousavi, S., Helte, A., and Lundberg, B., “Deformation and Fracture of a Long-Rod Projectile Induced by an Oblique Moving Plate: Numerical Simulations,” *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 40, pp. 35-45, 2012.
 8. Gao, T. and Cho, J.-U., “A Study on Damage and Penetration Behaviour of Carbon Fiber Reinforced Plastic Sandwich at Various Impacts,” *Int. J. Prec. Eng. Manuf.*, Vol. 16, No. 8, pp. 1845-1850, 2015.
 9. Hur, J.-W., “A Study on the Ballistic Damage Tolerance Design of Aircraft Structure from Armor Piercing Bullet Hits,” *Int. J. Prec. Eng. Manuf.*, Vol. 12, No. 1, pp. 85-90, 2011.
 10. Choi, Y. S., Lee, J. W., Yoo, Y.-H., and Yun, K.-J., “A Study on the Behavior of Blast Proof Door under Blast Load,” *Int. J. Prec. Eng. Manuf.*, Vol. 17, No. 1, pp. 119-124, 2016.
 11. Jung, W. K., Ahn, S. H., Lee, W. I., Kim, H. J., and Kwon, J. W., “Fracture Mechanism of Ceramic/Glass-Fiber-Reinforced-Composites Laminate by High Velocity Impact,” *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 23, No. 5, pp. 170-176, 2006.
 12. Johnson, G. R. and Cook, W. H., “A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates, and High Temperatures,” *Proc. of the 7th International Symposium on Ballistics*, pp. 541-547, 1983.
 13. Yoo, Y. H. and Lee, M., “Prediction Effectiveness of an Oblique Plate Against a Long Rod,” *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 33, No. 1, pp. 872-879, 2006.
 14. Yoo, Y. H., Paik, S. H., Kim, J.-B. and Shin, H., “Performance of a Flying Cross Bar to Incapacitate a Long-Rod Penetrator Based on a Finite Element Model,” *Engineering with Computers*, Vol. 29, No.4, pp. 409-415, 2013.
 15. Yu, Y.-H., Jang, S.-N., and Jeong, D.-T., “Numerical Simulation of High-Velocity Oblique Impact of Mild Steel Spheres Against Mild Steel Plates,” *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 26, No. 3, pp. 576-585, 2002.
 16. Yoo, Y. H., “Numerical Simulation of High-Velocity Oblique Impacts of Yawed Long Rod Projectile Against Thin-Plate,” *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 26, No. 7, pp. 1426-1437, 2002.
 17. Zukas, J. A. and Gaskill, B., “Ricochet of a Deforming Projectiles from Deforming Plates,” *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 18, No. 6, pp. 601-610, 1996.
 18. Murali, V. and Naik, S. D., “Ricochet Angle for Armament Shapes,” *International Journal Application or Innovation in Engineering and Management*, Vol. 2, pp. 86-92, 2013.
 19. Gee, D. and Littlefield, D., “Yaw Impact of Rod Projectile,” *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 26, No. 1, pp. 211-220, 2001.
 20. HowStuffWorks SCIENCE, “Right Now in Science,” <http://science.howstuffworks.com> (Accessed 14 November 2016)