

Yaw가 있는 긴 관통자에 대한 이중 비행경사판재의 방호성능 분석

Protection performance of dual flying oblique plates against yawed long rod penetrator

백승훈*
Paik, Seung Hoon

김승조**
Kim, Seung Jo

유요한***
Yoo, Yo-Han

이민형****
Lee, M

ABSTRACT

The protection capability against an enhanced long rod(L/D=30) with yaw is investigated numerically and compared with that of shorter one(L/D=15). In addition details of interactions between yawed long rods and oblique plate velocity are examined. Through the simulation results, we find that dual flying plates system is more effective with longer rod due to the elongated disturbance. The protection performance is more effective for the penetrator with +6° of yaw angle than that with a yaw angle of -6°.

주요기술용어(주제어) : explicit finite element method, oblique impact, dual flying plates, yawed long rod

1. 머리말

이중 비행판재는 경사진 두 장의 판재가 두 장사이의 폭발물질의 폭발로 인해 판재에 수직이고, 서로 반대 방향으로 날아가는 시스템이다. 결국, 이중비행판재 시스템에서는 두 장의 비행판재와 관통자와의 상호 연관관계가 방호성능에 영향을 미치게 된다. 이러한 이중비행판재 반응무기는 역사적으로 화학 에너지 탄을 무력화시키기 위해서 시작되었으며, 제트와

비행판재와의 연관관계를 파악하기 위해 많은 실험^[1]과 해석적^[2] 연구가 있어왔다. 긴 관통자에 대해서도 역시 실험 및 해석을 통해 많은 관련연구가 수행되어 왔는데, 주로 정지된 경사판재에의 방호성능에 대한 연구가 많았다.

그러나, 긴 관통자에 대한 비행 경사 판재의 방호성능에 대해서는 반응 무기분야^[1-3]에서 많은 관심이 있는 분야임에도 불구하고, 정지 경사 판재에 비해 아직 많은 연구가 이루어지지 않고 있다. 실험적으로는, 60~70도의 단일 경사판재가 관통자 진행방향과 반대방향으로 0.2~0.3km/s의 속도로 날아갈 때, 관통자가 부러지며, 무력화하는 효과가 나타난다고 보고되고 있다^[4]. 수치 해석적으로는, 긴 관통자를 향해 판재의 수직 성분으로 비행하는 단일 경사 판재는 판재속도가 빨라진다고 해서 잔류 관통자에 측면외력이 증가하지 않으며^[5], 관통자와 반대방향 속도로 비

† 2005년 11월 4일 접수~2006년 3월 3일 게재승인

* 서울대학교 기계항공공학부 대학원

** 서울대학교 기계항공공학부, 비행체 특화연구센터

*** 국방과학연구소(ADD) 1체계개발본부

**** 세종대학교 기계항공우주공학부

교신저자 이메일 : sjkim@snu.ac.kr

행하는 판재가 방호 성능에 더 효과적임이 보고되고 있다^[6,7]. 이와 같은 단일비행판재에 대한 연구 이외에도, 반응장갑에는 이중비행판재도 많이 적용되고 있다. 그러나 이중비행판재의 긴 관통자에 대한 연구는 많지 않은데, 관련연구로는 두 판의 두께 비를 달리 하며, 잔류 탄의 운동에너지를 비교한 결과, 뒷 판재에 두께가 두꺼울수록 방호효율이 더 좋아진 다는 것이 보고된 바 있다^[8].

탄의 관통성을 높이기 위해 탄의 속도와 길이는 점점 커지고 있는 추세이다. 이중비행판재는 뒷 판의 후방 수평속도로 인해, 관통자와의 연관 시간이 길어지며, 판의 수직속도 성분으로 인해 횡 하중과 회전 모멘트를 탄에 인가하는 효과가 있다. 따라서, 짧은 탄 보다는 관통시간이 상대적으로 긴, 큰 L/D를 가진 탄을 무력화 하는 데 효과적으로 적용될 수 있을 것이다. 또한, yaw를 가진 탄의 경우, yaw각도와 판재 속도성분과의 상호작용으로 인해, 고정된 혹은 단일 비행판재와는 다른 거동을 보일 것이다.

본 연구에서는, L/D=30인 관통자와 L/D=15인 관통자에 대해 판재 속도 변화에 따른 이중비행 판재의 방호성능을 평가하고, yaw가 있을 경우, 판재속도와 연관 효과로 인해 방호성능에 어떻게 영향을 미치는지 살펴보는 것을 목적으로 한다. 탄의 속도는 1.5 km/s와 2.5km/s에 대해 평가 하였다.

2. 고속충돌 수치해석 코드

고속 충돌을 수치 모사할 수 있는 상용코드들이 많이 있으나, 새로운 수치알고리즘과 재료 모델링해석을 위해 자체 코드를 보유하고 있기도 하다. 본 연구에 사용된 코드는 이러한 목적 및 충돌 병렬 알고리즘연구를 위해 자체 개발된 IPSAP/Explicit(IPSAP : Internet Parallel Structural Analysis Program)이다^[9].

IPSAP/Explicit는 외연시간적분법 및 비선형 연속체에 기반을 하고, C언어로 개발되었다. 체적 잠금 현상을 방지하기 위해 1점 적분을 수행하였고, 이 때문에 발생하는 의사모드를 제어하기 위해 아우어글래스 제어(Hourglass Control)기법^[10]을 적용하였다. 적

분 속도, 변위, 좌표 값등은 중앙스텝 중앙차분법(half-step central difference method)에 의해 증분되며, 해의 안정성을 위해 CFL 조건을 만족하도록 하였다. 객관화된 응력변화율 모사를 위해 Jaumann Rate를 도입하였다. 접촉처리를 위해서는 버킷소팅(Bucket Sorting) 알고리즘^[11]과 패널티 방법(Penalty Method)을 적용하였으며, 요소소진(Element Erosion)^[12]에 따른 외곽면의 변화를 자동으로 갱신하도록 하였다^[11].

고속충돌 시 정적 변형에서 고려해야하는 변형률 경화(strain hardening) 이외에도, 변형률속도에 따른 경화(strain rate dependant hardening) 그리고 단일 변형에 따른 열적 연화(thermal softening) 현상을 동시에 고려하기 위해, 항복조건으로 Johnson-Cook 모델^[13]을 사용하였다.

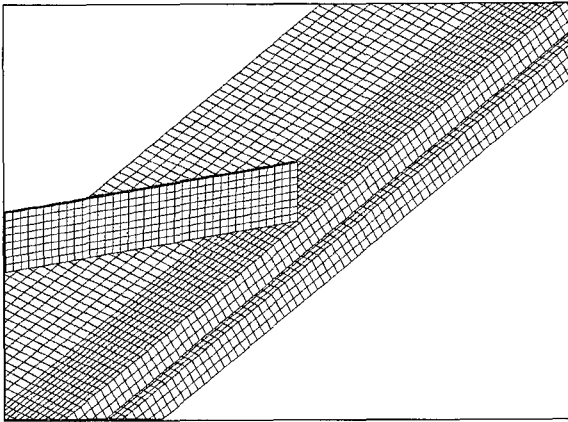
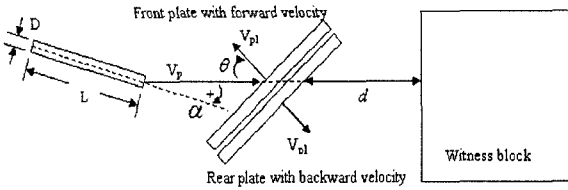
$$\sigma_y = (A + B\bar{\epsilon}^n) \left[1 + C \ln \frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0} \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_{ref}}{T_{melt} - T_{ref}} \right)^m \right] \quad (1)$$

여기서, σ_y 는 항복응력, A 는 정적 항복강도, B 는 변형률 경화 상수, $\bar{\epsilon}$ 등가소성변형률, n 은 변형률 경화 지수, C 는 변형률 속도 파라미터, $\dot{\bar{\epsilon}}$ 는 등가 변형률 속도, $\dot{\bar{\epsilon}}_0$ 는 기준변형률속도, T 는 온도, T_{ref} 는 기준 온도, T_{melt} 는 재료의 용점, 그리고 m 은 온도 지수이다.

해석코드의 정확성 검증을 위해, 여러 참고문헌의 실험 및 다른 해석 코드와의 결과를 비교하여 개발된 코드의 신뢰성을 확인하였다^[14].

3. 해석 조건

그림 1은 전체 해석 모델의 형상과 탄과 판재가 충격되는 부위의 유한요소 모델이다. 탄의 지름은 5mm, 길이는 75mm, 150mm(L/D=15, 30) 두 가지 경우이다. 탄의 요(yaw)는 -6° , 0° , $+6^\circ$ 이고, 반 시계방향인 $-yaw$, 시계방향인 $+yaw$ 로 정의 하였다. 판재는 길이 300mm, 폭 50mm이고, 두께 2.5mm의 판재 2장이 1mm의 간격을 두고 놓여 있다. 경사각은 60도이다. 판재 속도(V_{pl})는 0.2, 0.3, 0.5km/s에 대해 테스



[그림 1] 초기 형상 및 충돌부위 메쉬 형상

트하였다. 탄과 이중판재 사이의 거리는 1mm, 이중판재 뒷면과 검증판(witness block) 사이의 거리(그림 1의 'd')는 240mm 이다. 검증 판은 높이 200mm, 폭 50mm, 길이는 250mm 이다.

탄의 메쉬는 그림 1에서 보듯이, 지름을 방향으로 8개(메쉬크기 0.65mm), 판재는 각 판에서 두께 방향으로 3개(메쉬크기 0.83mm)가 되도록 하였고, 검증판의 경우도 비슷한 메쉬밀도를 유지하기 위해, 관통영역부위를 중심으로 메쉬 크기를 0.67mm로 하였다. 관통영역은 해석조건에 따라 그 영역 크기에 차이가 있으므로, 전체 메쉬수도 차이가 있다. 전체 메쉬 수는 약 20만개에서 30만개정도이다.

4. 해석 결과

가. 방호효율과 기준관통깊이

여러 다른 조건에서 방호구조물의 방호성능 평가 시 정규화 된 기준을 사용해야 한다. 본 연구에서 사용된 장갑효율(Armour effectiveness) 혹은 방호효율은 다음과 같다.

$$\text{방호효율} = \frac{DOP_{ref} - DOP_{res}}{T} \quad (2)$$

여기서, DOP_{ref} 는 기준 관통 깊이(Depth Of Penetration)로 방호판재 없이 관통자가 검증판에 바로 입사될 때 관통 깊이이다. DOP_{res} 는 비행 판재를 관통한 후 잔류 탄이 검증판에 관통된 깊이이다. T는 판재의 관통방향두께(Line Of Sight : LOS)인데, 판재의 두께 5mm와 경사각 60° 는 변하지 않으므로, T 혹은 LOS는 10mm 로 고정 된다.

탄자는 텅스텐 중합금(DX2HCMF) 재료이고, 판재는 강판((SIS 2541-03)으로, 물성치는 표 1^[5]과 같다.

한편, Yaw가 있는 탄에 대한 방호효율 평가할 때, 식 (2)의 DOP_{ref} 를 Yaw가 없는 탄에 대한 값을 사용한다면, 방호효율은 이중 판재 자체에 의한 방호효과와 탄의 Yaw에 의한 방호효과가 혼합되어 나타나게 된다. 따라서 본 연구에서는 이중비행판재만의 방

[표 1] Constants in Johnson-Cook model for Tungsten(DX2HCMF) and Mild steel (SIS 2541-03)

Material Constant	Value of Material Constant	
	Tungsten (DX2HCMF)	Steel (SIS 2541-03)
E(GPa)	389.16	200.1
Poisson ratio	0.28	0.3
Density(g/cm ³)	17.6	7.87
A(GPa)	1.05	0.75
B(GPa)	0.177	1.15
C	0.0275	0.014
n	0.12	0.49
m	1.0	1.0
T _{ref} (°C)	20.0	20.0
T _{melt} (°C)	1,45	1,427

[표 2] Comparison of Reference Penetration

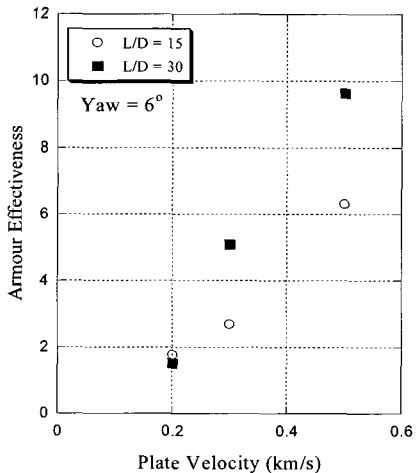
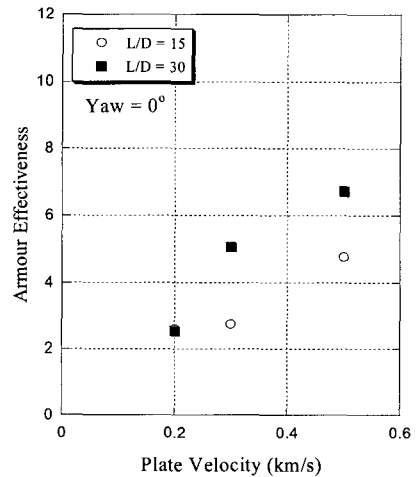
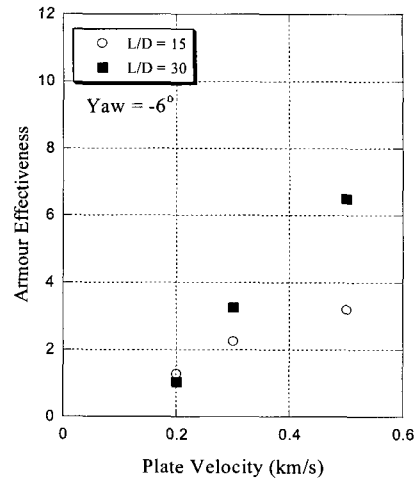
Yaw (deg)	V_p (km/s)	1.5		2.5		
		L/D	15	30	15	30
0	P_N (mm)		61.5	115.2	112.2	207.6
	P_N/L		0.82	0.77	1.48	1.38
	P_N/L		0.83 ^[15]	0.70 ^[15]	1.38	1.33 ^[16]
6	P(mm)		49.5	71.0	105.7	148.2
	P/ P_N		0.80	0.62	0.94	0.71
	P/ P_N		-	~ 0.6 ^[17]	-	~ 0.8 ^[17]

호효과를 평가하기 위해 DOP_{ref} 를 Yaw가 있는 탄에 대한 값을 사용하였다. 즉, 6도의 Yaw를 가진 탄에 대한 이중비행판재의 방호효율을 구할 때, 6도 Yaw를 가진 탄의 DOP_{ref} 를 이용하여 식 (2)의 값을 구했다. 표 2에 Yaw가 있을 때와 없을 때의 기준 판통 깊이를 계산하고 다른 참고문헌의 값과 비교한 결과이다.

나. 판재속도와 L/D의 영향

판재속도(V_{pl}) 증가와 L/D의 증가에 따른 차이를 알아보기 위해 그림 2에 탄에 대한 방호 성능을 도시 하였다. 탄속(V_p) 2.5km/s인 경우에 대해서만 나타내었는데, 탄속 1.5km/s인 경우에는, 판재속도 0.4 km/s 이상에서, L/D=15와 L/D=30인 경우 모두, 첫 번째 판재만 관통하고, 두 번째 판재는 관통하지 못하고 판재를 따라 미끄러지는 현상을 보였기 때문이다. 이와 유사한 현상은 참고문헌 [6]에서도 보고하고 있다.

판재 속도 0.2km/s인 경우, L/D에 따른 차이가 거의 미약한데, 이 경우를 제외하면, L/D=30 탄에 대한 방호효율이 모두 높은 나타났다. 이것은 L/D가 큰 경우, 판재와의 간섭시간이 훨씬 길므로, 방호 구조물의 방해(disturbance) 효과가 더 크게 나타나기 때문이다. 또한, Yaw가 음의 값에서 양의 값으로 증가할수록 탄에 대해 방호효율이 더 높게 나타나는 것을 알 수 있다.



[그림 2] Effect of plate velocity and L/D on armour effectiveness, $V_p = 2.5$ km/s

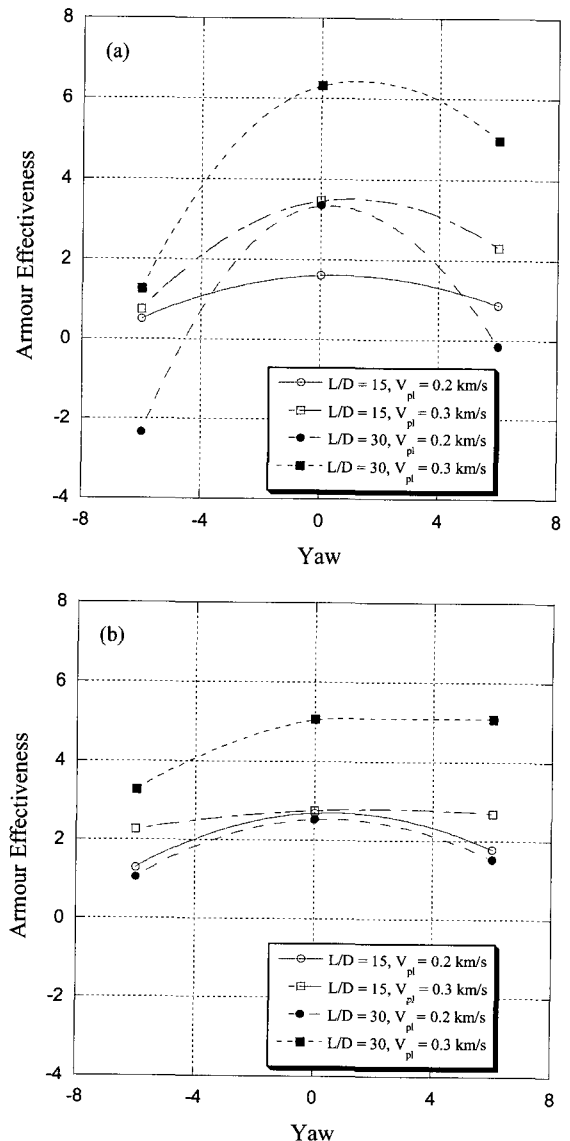
다. 탄의 Yaw와 충돌 속도의 영향

그림 3에서 보면, 전체적으로 불룩한 형태로 0도 yaw의 탄자에 대해 가장 방어 효율이 좋게 나타나고, yaw가 있을 때 상대적으로 작은 값을 보이고 있다. 그러나, 그림 4~7의 관통 과정을 보면, 0도 yaw인 경우의 관통깊이가 yaw가 있는 경우 보다 모두 크게 나오는 것을 알 수 있다. 이것은 잔류탄에 의한 관통깊이는 크더라도, 실제, 방호구조물의 탄에 대한 방호효율은 오히려 높게 나왔다는 것을 뜻하는 것으로, 0도 yaw의 탄에 대한 이중비행판재의 방호 효과가 yaw를 가진 탄에 대한 방호효과보다 크다는 것을 의미한다. 0도 yaw의 탄의 경우 검사판에 입사될 때 이중비행판재에 의해 방해(disturbance)된 상태에서, 즉 입사 시에는 yaw가 0도가 아닌 상태에서 입사되지만, yaw가 있는 경우, 탄이 경사판재를 지나면서 초기 yaw 각도가 감소하는 방향으로 회전하는 경향 때문에^[18,19], 방호 효과는 0도 탄에 대해서 보다 작을 수 있게 된다. 특히, 그림 3(a)의 $L/D=30$, $V_{pl}=0.3$ kms/s 인 경우, $DOP_{res} > DOP_{ref}$ 가 되어, 방호효율이 0보다 작은 값을 갖게 되는데, 이는 초기 yaw와 반대 방향으로 회전하는 효과로 인해 검사판에 입사할 때에는 초기 yaw 각보다 작은 각으로 입사하게 되고, 이러한 효과가 탄두의 소진 및 감속과 같은 이중 비행 판재의 다른 방호 효과보다도 더 커서 결국 DOP_{ref} 보다 DOP_{res} 이 크게 나타나는 경우로 볼 수 있다. 실제로, $V_p=1.5$ km/s, $L/D=30$, $V_{pl}=0.2$ km/s(그림 5)의 경우, $200\mu s$ 정도에서 탄이 입사되기 시작하는데, 이때, -6도 yaw를 가진 경우, 약 -4.5도로 줄어들게 된다. +6도 yaw인 경우는 판재를 빠져나온 탄이 전체적으로 휘어진 형상을 보이며, 탄의 각도가 길이방향에 따라 차이를 보이지만 탄의 앞부분은 거의 수직방향으로 입사되고 있는 것이 관찰된다. 관통 과정에서 탄의 뒷부분은 후면판재의 영향으로 인해 아래 방향으로 내려가는데, 이 때문에 큰 관통깊이가 생기는 원인이 된다.

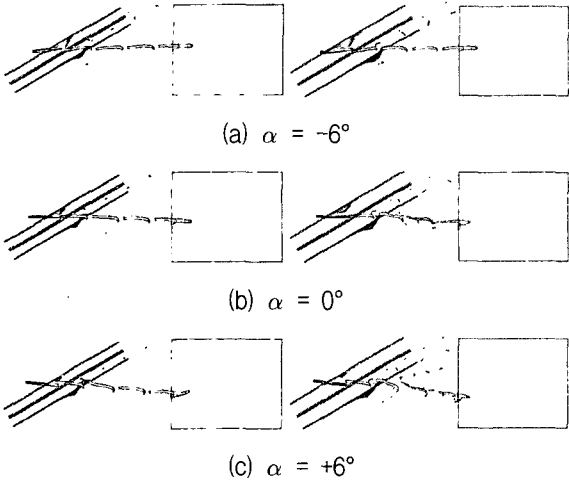
한편, 전반적으로 -6도 yaw의 탄보다 +6도 yaw의 탄에 대해 전반적으로 효율이 더 높게 나오고 있다. 그림 4~7에서 판재 속도 0.3km/s인 경우를 보면, -6도 보다 +6도인 경우에 탄에 더 큰 손상이 발생하는 것이 관찰되며, 판재의 변형양상 또한 +6도 yaw인

경우가 더 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

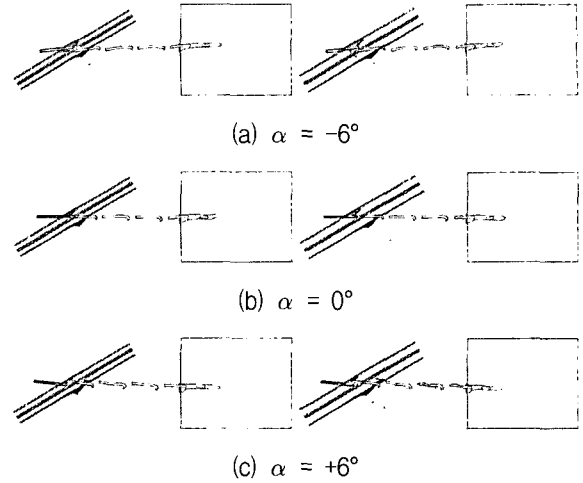
다음으로, 탄의 충돌속도에 따른 영향을 살펴보기 위해 1.5km/s의 경우(그림 3(a))와 2.5km/s의 경우(그림 3(b))를 비교해 보면, 2.5km/s인 경우가 yaw에 따른 편차가 작고, 더 좁은 범위에서 효율이 분포한다. 이것은 2.5km/s인 경우가 운동에너지가 크고, 판재와의 간섭시간이 더 작기 때문에, 판재에 의한



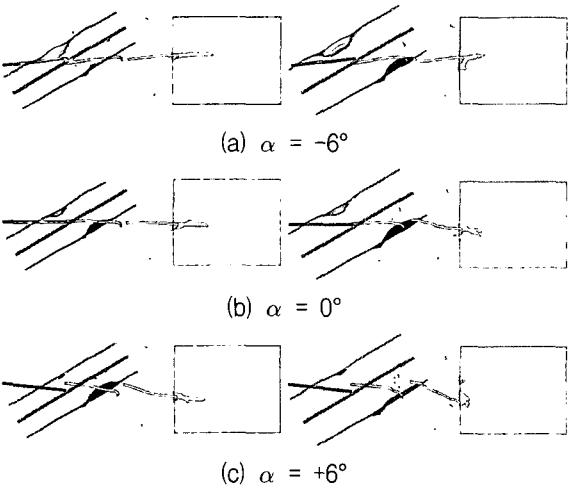
[그림 3] Effect of yaw on armor effectiveness, (a) $V_p = 1.5$ km/s, (b) $V_p = 2.5$ km/s.



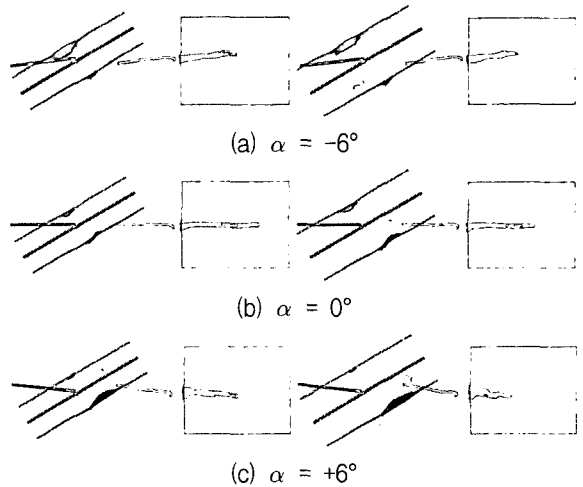
[그림 4] Penetration process, $V_p = 1.5\text{km/s}$, $L/D = 15$, $V_{pl} = 0.2\text{km/s}$ (left), 0.3km/s (right).
Plotting time ; penetrator : 0, 50, 100, 150, 200, 250, $300\mu\text{s}$; plate : 0, $100\mu\text{s}$.



[그림 6] Penetration process, $V_p = 2.5\text{km/s}$, $L/D = 15$, $V_{pl} = 0.2\text{km/s}$ (left), 0.3km/s (right).
Plotting time ; penetrator : 0, 30, 60, 90, 120, 150, $200\mu\text{s}$; plate : 0, $60\mu\text{s}$



[그림 5] Penetration process, $V_p = 1.5\text{km/s}$, $L/D = 30$, $V_{pl} = 0.2\text{km/s}$ (left), 0.3km/s (right).
Plotting time ; penetrator : 0, 100, 200, $400\mu\text{s}$; plate : 0, $200\mu\text{s}$.



[그림 7] Penetration process, $V_p = 2.5\text{km/s}$, $L/D = 30$, $V_{pl} = 0.2\text{km/s}$ (left), 0.3km/s (right).
Plotting time ; penetrator : 0, 100, 200, $300\mu\text{s}$; plate : 0, $200\mu\text{s}$.

교란효과가 상대적으로 작게 나타나기 때문으로 보인다. 그림 4~7을 보더라도, 1.5km/s 의 탄이 2.5km/s 의 탄에 비해 관재 속도 증가 및 yaw 변화에 따른 손상이 더 크게 나타나고 있다.

5. 결론

길이가 긴 탄에 대해 이중비행관재의 방호효율을 평가하기 위해, $L/D=30$ 과 15 인 탄에 대해 비교하였

다. 또한 탄 Yaw가, 방호효율이 어떻게 영향을 미치는지도 분석하여 보았다. Yaw가 있는 탄에 대한 효율 평가 시 역시 yaw가 있는 탄에 대한 기준관통 깊이 값을 사용하였다. 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 이중비행판재는, L/D에 따른 방호성능의 차이가 매우 미약한 판재속도 0.2km/s인 경우를 제외하면, L/D=15인 탄 보다 L/D=30인 탄에 대해 더 높은 방호효율을 보였다.
- (2) L/D가 더 큰 탄에 대해, 판재의 속도에 따른 방호효율의 민감도가 더 높게 나왔다.
- (3) Yaw에 따른 방호효율은 Yaw가 없을 때 가장 높게 나오면서 전체적으로 블록한 형태를 나타내었다. 이것은 초기 Yaw를 줄이는 경사판재의 효과와 더불어, 기준관통깊이를 Yaw가 있는 탄에 대해서 계산 했을 때에 나타나는 경향이다.
- (4) 음의 Yaw 각도보다 양의 Yaw 각도를 가진 탄에 대해 방호효율이 훨씬 높게 나타났다.
- (5) Yaw에 따른 방호효율은 고속 영역(1.5km/s) 일 때 보다 초고속 영역(2.5km/s)일 때 더 좁은 범위에서 분포하였다.

후 기

본 연구는 ADD 장기기초과제(UD040012AD)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] Held M. Disturbance of shaped charge jets by bulging armour. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics* 2001; 26: 191-5.
- [2] Yadav H. S., Kamat P. V., Effect of moving plate on jet-penetration. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics* 1989; 14: 12-8.
- [3] Held M, Mayseles M, Rototaev E. Explosive reactive armour. *Proceedings of the 17th*

- international Symposium on Ballistics. Midrand (South Africa); 1998. p.33~46.*
- [4] Liden E, Johansson B, Lundberg B. Effect of thin oblique moving plates on long rod projectiles: A reverse impact study. *International Journal of Impact Engineering*, 2005. In press.
- [5] Liden E, Ottosson J, Holmberg L. WHA long rods penetrating stationary and moving oblique steel plates. *Proceedings of the 16th international Symposium on Ballistics. San Francisco (USA); 1996. p.703~11.*
- [6] Shin H, Yoo Y. H., Effect of the velocity of a single flying plate on the protection capability against obliquely impacting long rod penetrators, *Combustion, Explosive, Shock Waves*, 2003; 39: 591~600.
- [7] Lee, M., A numerical comparison of the ballistic performance of unitary rod and segmented-rods against stationary and moving oblique plates. *Int J Impact Eng* 2001; 26 (1-10): 399~407.
- [8] Yoo Y. H., Shin H., Protection capability of dual flying plates against obliquely impacting long rod penetrators. *International Journal of Impact Engineering*, 2004; 30: 55~68.
- [9] Paik S. H., Moon J. J., Kim S. J., and Lee M., Parallel performance of large scale impact simulations on linux cluster super computer. *Comput Struct* 2006; 84(10-11): 732~741.
- [10] Flanagan D. P., Belytschko, T., A uniform strain hexahedron and quadrilateral and orthogonal hourglass control. *Int. J. Numer. Meths. Eng.* 1981; 17: 679~706.
- [11] Heinstein M. W., Mello F. J., Attaway S. W., Lausen TA. Contact-impact modeling in explicit transient dynamics. *Comput Methods Appl Mech Engrg* 2000; 187: 621~640.
- [12] Sewell D. A., Ong A. C. J., Hallquist J. O., 1990, "Penetration calculation using an erosion

- algorithm in DYNA”, The 12th International Symposium on Ballistics.
- [13] Johnson G. R., Cook W. H., A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rate, and high temperatures. The 17th International Symposium on Ballistics. The Hague (Netherlands); 1983. p.541~7.
- [14] Paik S. H., Kim S. J., High speed impact and penetration analysis using explicit finite element method. Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology. 2005; 8(4): 5~13
- [15] Anderson C. E., Jr., Walker J. D., Bless S. J. and Partom Y., On the L/D effect for long-rod penetrators. Int J Impact Eng 1996; 18: 247-64.
- [16] Anderson C. E., Jr., Walker J. D., Bless S. J., On the velocity dependence of the L/D effect for long-rod penetrators. Int J Impact Eng 1995; 17: 13~24.
- [17] Gee D. J. and Littlefield D. L., Yaw Impact of rod projectiles. Int J Impact Eng 2001; 26: 211-20.
- [18] Fugelso E. and Taylor J. W., Evaluation of combined obliquity and yaw for U 0.75 wt% Ti Penetrators. Los Alamos Scientific Laboratory, LA-7402-MS, 1978.
- [19] Cagliostro D. J., Mandell D. A., Schwalbe L. A., Adams T. F. and Chapyak E. J., MESA 3-D calculations of armor penetration by projectiles with combined obliquity and yaw. Int J Impact Eng 1990; 10: 81~92.