

군용차량 방탄재 최적화에 관한 연구

A Study on the Armor Optimization of Military Vehicle

이 현 진* 최 재 식* 김 근 원* 신 기 수*

Hyun-Jin Lee Jae-Shik Choi Geun-Won Kim Ki-Su Shin

ABSTRACT

During the land operations, the enemy's gunnery is the primary threat. For the military vehicle, the bulletproof effect is the one of the important issues regarding the safety of soldiers on duty. Recently, the advanced military vehicles have planned to install armor plates. However, due to the budget problem, it is difficult to equip the protection systems. Hence, the optimum approach to increase bulletproof capability is essential.

In this paper, the optimum thickness and component of the armor of military vehicles were evaluated by using finite element analysis for bullet impact effects. To achieve this aim, 7.62mm NATO bullet, 1.6mm steel and Kevlar-29 composite have been modeled and the simulations were conducted with various thickness cases by using MSC Nastran sol 700.

Consequently, it was revealed that Kevlar-29 45 Layer is appropriate thickness for 7.62 bulletproof. Furthermore, Kevlar-29 in front of steel was effective by comparison with the back of steel for bulletproof.

Keywords : High Velocity Impact(고속 충격), Kevlar Armor(케볼라 장갑), FEM(유한요소 해석), Penetration(관통), Composite Laminates(복합재 적층판), Bulletproof(방탄)

1. 서론

우리 군이 사용하고 있는 군용차량은 방탄이 고려되지 않아 전·평시 임무 수행에 있어 많은 피해가 예상된다. 생존성을 보장하기 위해 방탄을 고려한 차량의 부분개조가 필요하나 막대한 소요비용으로 인해 예산 반영의 어려움이 있다¹⁰⁾.

그러므로 한정된 국방 예산 내에서 군용차량의 효율

적인 개조를 위해서는 방탄재 두께 및 구성에 관한 최적화 연구 수행이 필요하다. 일반적으로 방탄재와 관련된 연구는 실험적 해석과 수치해석에 의한 모사를 통해 연구가 진행되나 국내에서는 관련분야에 대한 연구가 저조한 실정이다. 섬유 복합재의 동적 거동에 관한 관통해석의 경우 주로 저속 충격 및 실험용 모의탄에 의해 연구가 수행되어 왔으며, 실 방탄과 관계있는 실탄에 대한 연구는 매우 드물다. 이러한 실험적 해석의 경우 많은 시간과 비용이 드는 단점이 있다. 수치해석 방법 중 하나인 유한요소해석은 실험적 해석보다 비용을 절감할 수 있고 실탄에 대한 해석도 용이하다는 장점이 있다¹⁰⁾. 그러므로 유한요소해석을 이용하여

† 2013년 3월 26일 접수~2013년 7월 5일 게재승인

* 국방대학교(KNDU)

책임저자 : 이현진(mnmm12@naver.com)

군용차량 철판 방탄기준을 충족할 수 있는 최적의 방탄재 두께를 제시할 경우 의미있는 실험 해석 자료 획득과 예산절감으로 이어질 수 있을 것이다.

본 연구에서는 유한요소해석을 이용하여 군용차량 방탄재의 두께 및 구성 최적화에 대한 연구를 수행하였다. 유한요소해석 방법은 고체형 구조물 모델링에 주로 이용되는 라그랑지안 솔버(Lagrangian Solver)를 적용하였고 MSC. Patran을 통해 모델을 구축하였으며 방탄해석에는 MSC. Nastran SOL. 700을 사용했다. 재료 모델은 Johnson-cook이 적용되었다. 군용차량 철판은 1.6mm를 가정하였고, 가장 일반적인 표준 소총탄인 7.62mm NATO FMJ¹⁾탄을 모델링하였다. 국제규격으로 사용되는 NIJ STANDARD 010106²⁾ 기준을 충족하도록 탄자속도를 847m/s으로 고정하고, 미군 방탄모에 사용되는 재질인 아라미드 섬유재 Kevlar-29를 사용하여 최적의 두께를 산출하였다. 또한, 차량의 철판을 전면재, Kevlar-29는 후면재로 개조할 때와 차량의 철판을 후면재, Kevlar-29를 전면재로 개조할 때를 비교하여 최적의 방탄 구성을 제시하였다.

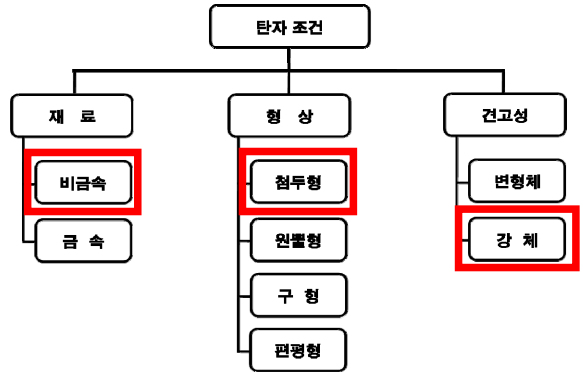


Fig. 1. Bullet condition

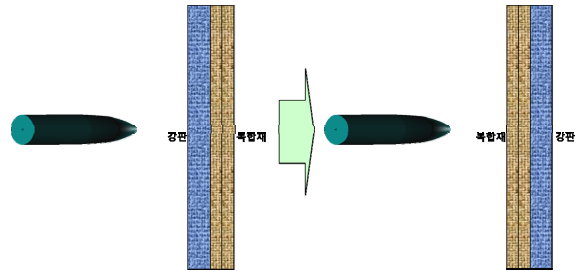


Fig. 2. Armor material composition

2. 유한요소 해석

가. 해석수행 조건

1) 탄자 조건

탄자 조건으로는 Fig. 1과 같이 재료, 형상, 견고성 3가지로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 금속 재료 중 소성형 관통(Ductile Hole Growth)을 유도할 수 있는 첨두형 강체 탄자를 해석 대상으로 하였으며, 탄자구경은 7.62mm를 적용하였다.

2) 방탄재 구성

일반적으로 섬유강화 복합재료의 경우 전면재는 강판, 후면재는 섬유강화 복합재료를 배치하여 활용한다. 본 연구에서는 Fig. 2와 같이 전면재는 철판, 후면재는 섬유강화 복합재료로 구성하여 최적의 섬유강화 복합재료의 두께를 찾은 후 효율성을 비교 검증하기 위해 섬유강화 복합재료를 전면재, 철판을 후면재로 바꾸어 관통 해석을 수행하였다.

3) 총돌속도

총돌속도는 Table 1과 같이 국제규격으로 사용되는 NIJ STANDARD 010106 정규 방탄등급 III³⁾를 만족할 수 있도록 탄속 847m/s를 적용하였다.

Table 1. NIJ STANDARD 010106 armor level III

등급	방호조건	기준 운동에너지
III	관통탄시험 - 7.62mm NATO FMJ(9.6g) 탄환을 탄속 847m/s 이상에서 방탄	3,445J

4) 방탄재 두께

최초 방탄재의 두께는 관통되지 않을 조건을 찾기 위해 De Marre의 경험식을 이용하였다. De Marre의 경험식은 식 (1)과 같이 표적재료를 관통하는데 소요되는 에너지는 타격 순간에서의 탄자 운동에너지와 같다고 가정한다.

3) 소총탄 방호용으로 7.62mm 탄환을 거리에 관계없이 방탄 가능한 성능

1) FMJ(Full Metal Jacket) : 철강합금탄자, 부드러운 탄심으로 구성된 총탄

2) 미국법사법연구소(NIJ : National Institute of Justice) 방탄 기준

$$\frac{1}{2} m V^2 = cd^3 \left(\frac{T}{d}\right)^n \quad (1)$$

여기서, m 은 탄자의 질량(kg), V 는 탄자의 타격속도(m/s), d 는 탄자의 지름(m)이다. 또한 장갑판의 두께를 구하기 위해 식 (1)을 정리하면, 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$T = 10 \left(\frac{\log\left(\frac{mv^2}{2cd^3}\right)}{1.4} + \log d \right) \quad (2)$$

지름 7.62mm, 무게 10g, 탄속 847m/s인 탄자의 변수를 식 (2)에 대입하여 식 (3)과 같이 적용 시 약 13mm 이하의 방탄재를 관통할 수 있는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 군용 차량 철판 1.4mm 이상을 가정하여 철판을 1.6mm로 하고, 방탄에 사용되는 복합재인 Kevlar-29를 12mm 후면에 배치하여 관통여부를 측정하였다.

$$T = 10 \left(\frac{\log\left(\frac{(0.098Ns^2)(847m/s)^2}{9.81m}\right)}{2(96 \times 10^7 N/m^2)(0.00762m)^3} + \log(7.62mm) \right) \quad (3)$$

5) 해석 수행 조건의 종합

Table 2는 해석 수행 조건을 종합한 것이다. 표와 같이 NIJ STANDARD 010106 III 방호등급을 충족하기 위해 탄자구경은 7.62mm, 충돌속도는 847m/s 탄속을 적용하였다. 또한 최초의 방탄재 두께는 철판 1.6mm, Kevlar-29 12mm를 부착시킨 13.6mm를 선정하고 충돌 방향은 0°를 적용하여 관통여부를 측정하였다.

Table 2. Comprehensive analysis conditions

탄자 구경	충돌조건 (탄속)	최초 방탄재	
		철판(4340 steel)	Kevlar-29
7.62mm	847m/s	1.6mm(고정)	12mm

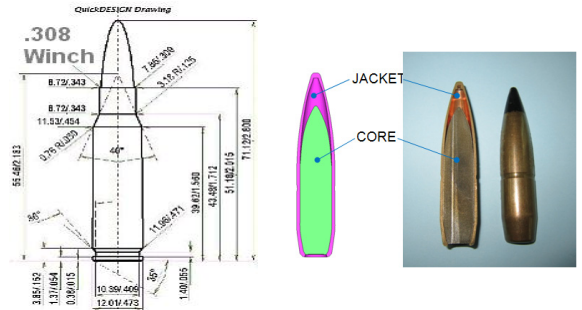
* NIJ STANDARD 010106 III 등급 충족

나. 탄자 및 철판-Kevlar-29 방탄재 모델링

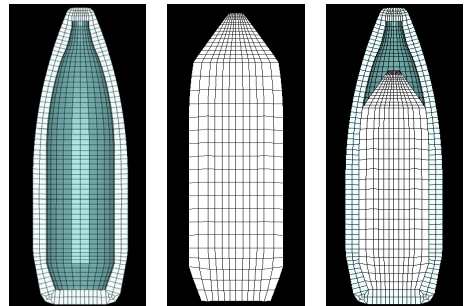
1) 탄자 모델링

7.62mm×51 NATO탄의 탄자(Bullet) 모델링은 Fig. 3과 같이 실제 탄두 규격서를 참조하여 수행 하였다.

일반적으로 탄자는 탄심(Core)과 탄자피(Jacket)로 구성되어 있다. 본 연구에서는 해석결과와 정확성을 높이기 위해 탄심과 탄자를 별도로 모델링하여 결합시켜 분석하였다. 탄자의 탄심 절점은 2,412개이며, 요소는 1,890개이다. 또한 탄자피의 절점은 2,850개이고, 요소는 1,800개이다. 그리고 전체 탄자의 절점은 5,262개이며, 요소는 3,690개이다.



a) 7.62mm bullet shape



b) 7.62mm bullet modeling

Fig. 3. 7.62mm bullet shape and modeling

Table 3은 탄자의 탄자피 및 탄심의 물성치를 나타낸 것이다^[5].

Table 3. Bullet material property

구분	Density (TONNE/mm ³)	Young's modulus (Mpa)	Poisson's Ratio
탄자피 (Jacket : Copper)	8.941E-9	1.172E+5	0.33
탄심 (Core : Lead)	1.135E-8	1.379E+4	0.42

2) 방탄재 모델링

방탄재는 150mm × 300mm 크기로 철판과 Kevlar-29의 적층구조로 모델링 하였다. 철판의 두께는 1.6mm로 고정하였으며, Kevlar-29는 1 Layer를 0.8mm 기준으로 점차 증가시켜 최적의 두께를 찾을 수 있도록 모델링 하였다.

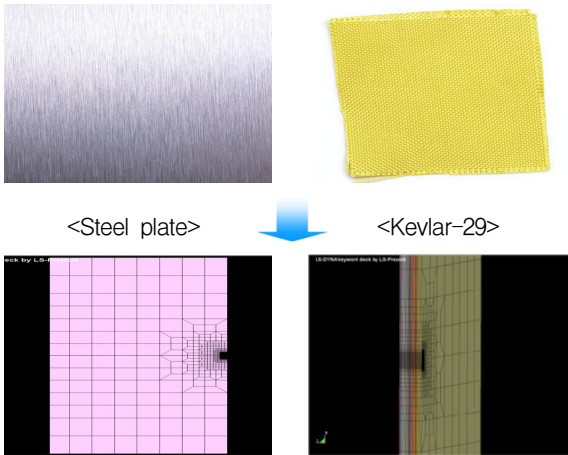


Fig. 4. Steel plate-Kevlar-29 armor material shape

Table 4. Steel plate and Kevlar-29 material property^[5]

구 분	내용		값
철판 (Steel)	Density(TONNE/mm ³)		7.85E-9
	Young's modulus(Mpa)		2.1E+5
	Poisson's Ratio		0.3
	Yield stress(Mpa)		355
	Tangent modulus(Mpa)		1.0E+3
Kevlar-29	Density(TONNE/mm ³)		1.23E-9
	Young's modulus (Mpa)	Ea	18.5E3
		Eb	18.5E3
		Ec	6.0E3
	Poisson's Ratio	Vba	0.25
		Vca	0.33
		Vcb	0.33
	Shear modulus (Mpa)	Gab	0.77E3
		Gbc	5.43E3
Gca		5.43E3	

Fig. 4는 철판-Kevlar-29 방탄재 모델링 형상을 나타낸 것이다. 최초 철판의 절점은 6,450개이며, 요소는 4,952개이다. Kevlar-29의 1 Layer 절점은 3,870개이며, 요소는 2,476개이다. Table 4는 방탄재를 구성하는 철판과 Kevlar-29의 물성치를 나타낸다.

3. 유한요소해석 결과 및 분석

가. 유한요소해석 결과

Fig. 5부터 Fig. 10은 철판 1.6mm 후면에 Kevlar-29를 15~45 Layer 두께로 배치한 방탄재의 관통효과에 대해 해석을 수행한 결과를 나타낸다. 최적의 방탄재 두께를 산출하기 위해 50 Layer와 25 Layer의 합을 평균을 산출한 결과 37 Layer부터 해석을 수행하였으며, 이후 2~3 Layer 씩 증가시켜 최적의 방탄재 두께를 산출하였다.

1) 철판, Kevlar-29(12mm, 15 Layer)

Fig. 5는 철판 후면에 Kevlar-29 15 Layer를 배치한 방탄재의 관통효과에 대해 해석을 수행한 결과를 나타낸다. 그림과 같이 최초 탄자가 철판에 충격 후 탄자피는 계속해서 속도가 감소하여 최소 760m/s 이상의 속도를 유지하였다. 탄심은 관통 시 속도가 820m/s 이하까지 감소하다 0.3μs 이후 속도가 점차 증가하여 830m/s까지 회귀하는 현상을 보여 주고 있다. 이는 고속으로 인해 방탄재가 탄심의 충격에너지를 효과적으로 흡수하지 못하기 때문이다

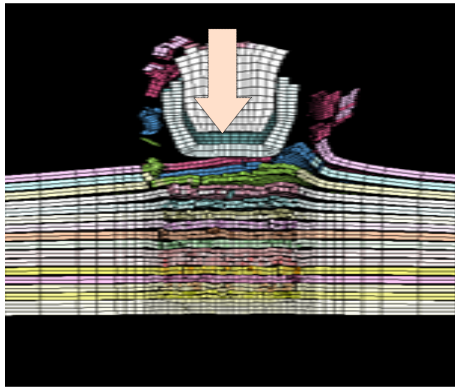
2) 철판, Kevlar-29(20mm, 25 Layer)

Fig. 6은 Kevlar-29 25 Layer 해석결과를 나타낸 것이다. 그림과 같이 잔류속도를 고려하여 후면에 10 Layer를 증가하고 25 Layer를 해석 시에는 관통이 됨을 알 수 있다.

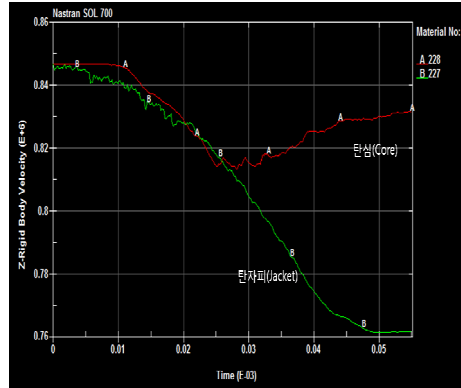
3) 철판, Kevlar-29(29.6mm, 37 Layer)

해석결과 방탄 가능한 것으로 산출된 50 Layer와 25 Layer의 평균을 산출한 결과를 적용하여 37 Layer부터 해석을 수행하였으며, 이후 2~3 Layer 씩 증가시켜 최적의 방탄재 두께를 산출하였다.

Fig. 7은 Kevlar-29 37 Layer 해석결과를 나타낸 것이다. 7ms 이후 탄심의 속도는 0으로 감소하였으며, 관통 이후 탄자피의 속도는 시간이 지나면서 감속되

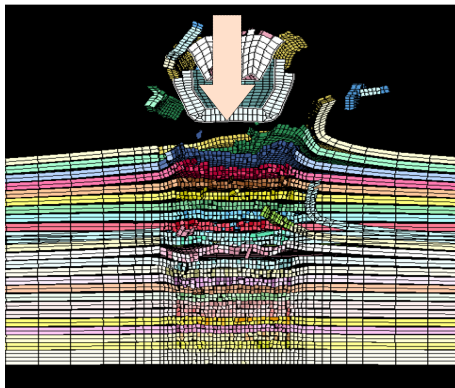


(a) Penetration shape

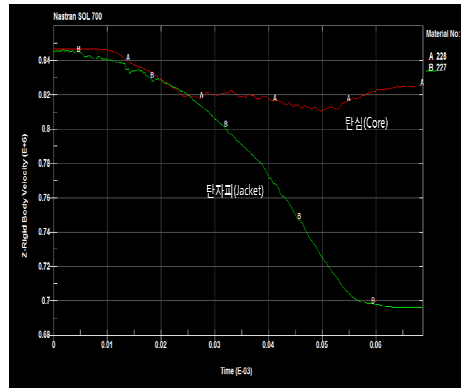


(b) Time-core & jacket velocity variance

Fig. 5. Kevlar-29 12mm 15 Layer analysis result

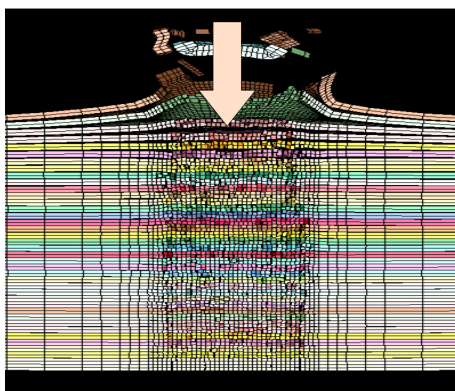


(a) Penetration shape

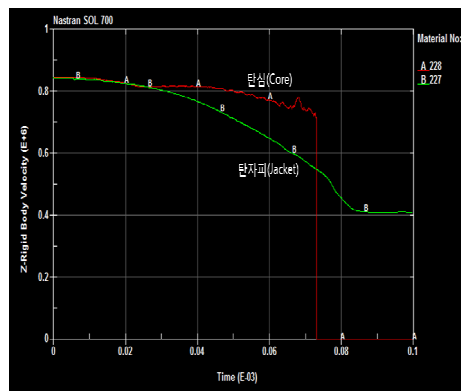


(b) Time-core & jacket velocity variance

Fig. 6. Kevlar-29 20mm 25 Layer analysis result



(a) Penetration shape



(b) Time-core & jacket velocity variance

Fig. 7. Kevlar-29 29.6mm 37 Layer analysis result

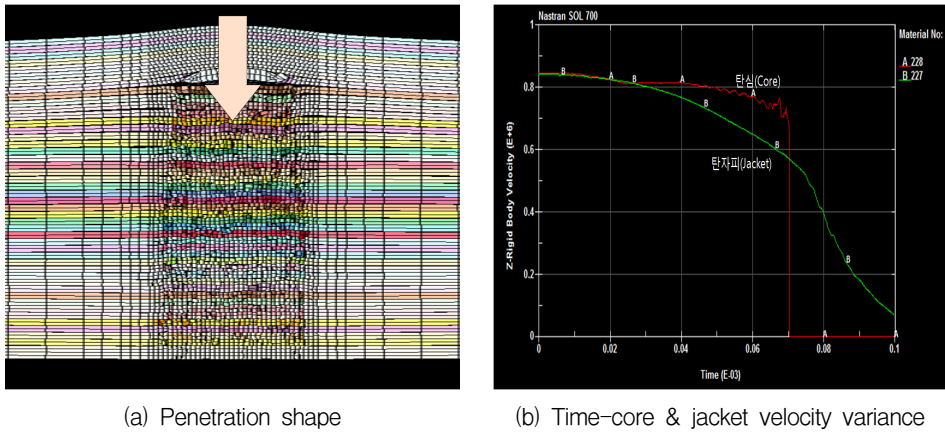


Fig. 8. Kevlar-29 32mm 40 Layer analysis result

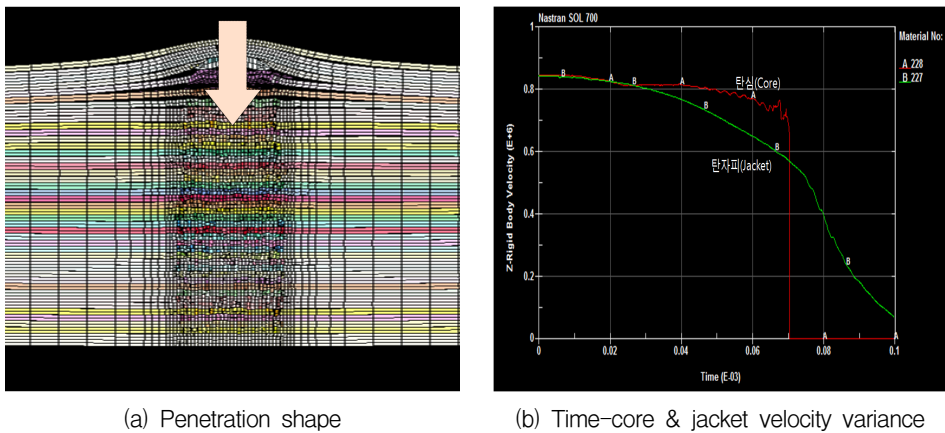


Fig. 9. Kevlar-29 33.6mm 42 Layer analysis result

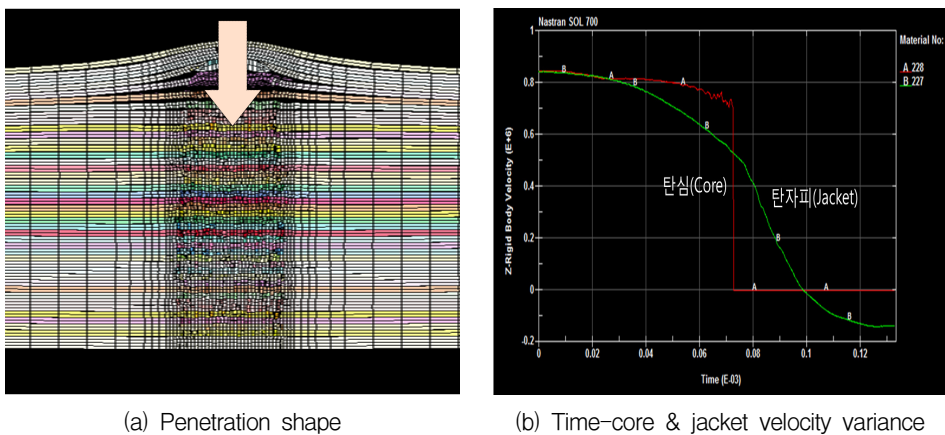


Fig. 10. Kevlar-29 36mm 45 Layer analysis result

나 7ms초 이후의 최종 속도는 400m/s 이상을 유지하여 관통 후 살상력이 있음을 확인할 수 있다.

4) 철판, Kevlar-29(32mm, 40 Layer)

Fig. 8은 Kevlar-29가 40 Layer일 때의 관통현상을 나타낸다. 탄심은 37 Layer와 비교하여 0.7 μ s초 이전에 속도가 0으로 도달하며, 탄자피는 0.1ms 이후 속도가 150m/s 이상으로 유지되어 살상력이 있음을 확인할 수 있다.

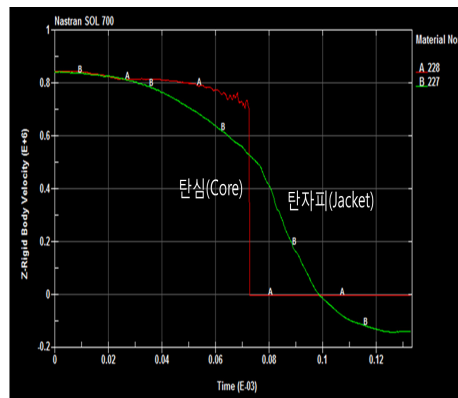
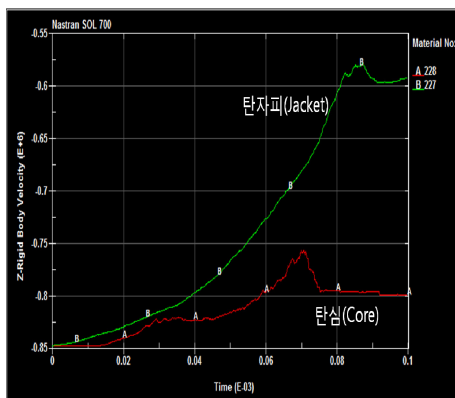
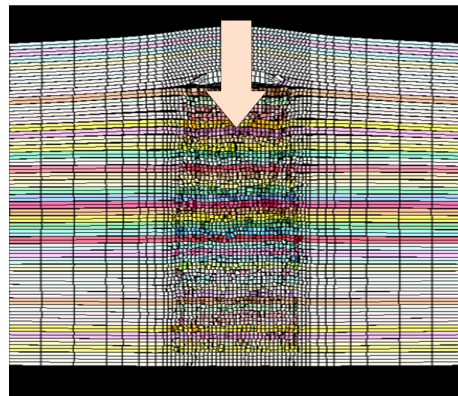
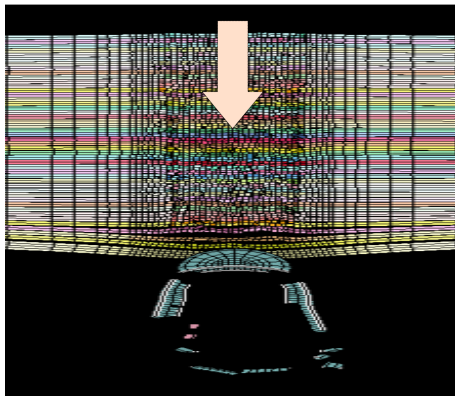
5) 철판, Kevlar-29(33.6mm, 42 Layer)

Fig 9는 Kevlar-29 42 Layer 해석결과를 나타낸다. 그림과 같이 42 Layer는 40 Layer 일 때와 비슷한 결과를 보이며 관통이 되는 현상을 보여준다. 그리고 Kevlar Layer가 증가할수록 인장응력도 증가하여 탄자의 충격에너지를 흡수하는 현상을 보인다. 탄심은 0.7

μ s초에 속도가 0으로 감소하며 탄자피는 0.1ms초 이후 속도가 80m/s로 감소가 되나 아직 살상력이 있음을 확인할 수 있다.

6) 철판, Kevlar-29(36mm, 45 Layer)

Fig. 10은 Kevlar-29 45 Layer 해석결과를 나타낸다. 그림과 같이 45 Layer에서 탄자는 관통되지 못했으며, 이는 방탄재의 두께로 인해 강화된 섬유 인장강도가 탄자의 충격에너지를 효과적으로 흡수하기 때문이다. 또한 0.1ms초 이전 탄심의 속도는 0에 도달하며 섬유의 반동에 의해 파편이 뒤로 밀려나는 것을 알 수 있다. 42 Layer 해석과 비교 시 속도가 감소하는 시점은 큰 차이가 없으나 최종 속도로 도달하면서 남은 Kevlar의 Layer가 많을수록 그 속도가 급격히 감소하는 현상을 나타낸다.



(a) Forepart material

(b) Rear material

Fig. 11. Kevlar-29 forepart · rear material penetration comparison

나. 결과분석

1) 철판, Kevlar-29(36mm, 45 Layer) 전·후면재 비교

Fig. 11은 Kevlar 전·후면재 관통을 비교한 것이다. 그림과 같이 Kevlar-29가 후면재로 사용할 때와는 달리 전면재일 경우에는 관통이 되었다. Kevlar를 전면재로 구성하였을 때 관통 후 속도는 탄심은 800 m/s, 탄자피는 600m/s로서 충격에너지를 효과적으로 흡수하지 못하였다. 반면 전면재를 강판재질로 사용한 경우에는 시간 경과에 따라 탄자와 탄자피 모두 속도가 급격히 떨어지며 방탄 효과를 내는 것을 확인할 수 있다. 이는 초기 탄자가 강판에 충돌 시 충격으로 탄자의 탄심이 노출되어 탄심과 탄자피가 동시에 방탄재의 영향을 받을 수 있음을 나타낸다.

2) 방탄효과 분석

유한요소 해석결과 전면재는 철판 1.6mm 일 때, 후면재 Kevlar-29는 45 Layer(36mm)일 때 최적의 방탄효과를 보였다. 그러나 전면재를 Kevlar-29 45 Layer(36mm)로 구성한 경우에는 방탄은 되지 않았다. 이는 섬유재질 특성상 초기에 관통되어 탄자피와 탄심이 방탄재의 영향을 상대적으로 적게 받기 때문이다. 또한, 탄심은 전면재가 철판 1.6mm 시 Kevlar-29의 Layer가 많아질수록 탄자피에 비해 속도가 0으로 먼저 감속되나, 탄자피는 탄심에 비해 감속이 늦게 되어 방호에 더 큰 위험이 됨을 확인할 수 있다. Fig. 12는 시간 대 탄자피의 관통속도를 나타낸 것이다. 그림과 같이 탄

자의 속도는 Kevlar-29의 두께와 시간에 따라 비례적으로 속도가 빠르게 감소하는 현상을 보인다. 이러한 현상은 탄자 속도가 저속일수록 방탄에 효과적임을 나타낸다. 이는 탄자가 고속일수록 섬유강화 복합재료 특성상 섬유재료의 섬유인출이나 섬유재의 층간분리현상이 발생하지 않아 탄자의 충격에너지를 흡수하지 못하기 때문이다.

4. 결론

본 연구에서는 유한요소해석을 이용하여 군용차량용 방탄재 최적화 연구를 수행하였다. 이를 위해 7.62mm Nato 탄의 도면을 바탕으로 유한요소 모델링을 하고, 군용 차량 철판은 1.6mm를 가정하여 Kevlar 방탄재의 적층 구조물을 적용한 결과 다음과 같은 시사점을 도출하였다.

첫째, Kevlar-29는 두께가 증가할수록 섬유인출에 의한 인장응력이 비례하여 증가하였으며, 45 Layer(36mm) 일 때 탄자의 운동에너지를 흡수하여 최적의 방탄 효과를 보였다.

둘째, 전면재가 Kevlar-29이고, 후면재가 철판인 경우는 전면재 철판, 후면재 Kevlar-29에 비해 방탄에 효과적이지 못함을 확인하였다.

셋째, 방탄재 구성 시 최초 탄심 충격에너지에 영향을 주기 위해서는 전면재에 철판, 합금 등 강한 재질을 사용하여 탄자피 및 탄심의 감속에 영향을 줄 수 있어야 한다. 또한 군용차량 철판 기준으로 7.62mm Nato 탄을 방호하기 위해서는 Kevlar-29 45 Layer를 철판의 후면재로 부착해야 됨을 제시할 수 있다.

이상의 연구에도 불구하고 본 연구에서는 철판과 Kevlar-29의 적층구조 방탄재를 대상으로 정면충돌에 한정하여 연구를 수행하였다. 향후 경사 장갑의 효과 및 아라미드 섬유계 방탄재와 세라믹 또는 고성능 폴리에틸렌 섬유재질을 혼합한 방탄재에 대한 연구를 확대해 나간다면 군용차량의 기동성을 유지하면서 최상의 방탄효과를 낼 수 있는 방탄재 개발에 많은 도움을 줄 것으로 판단된다.

References

[1] A Tabiei and I. Ivanov, "Computational Micro-

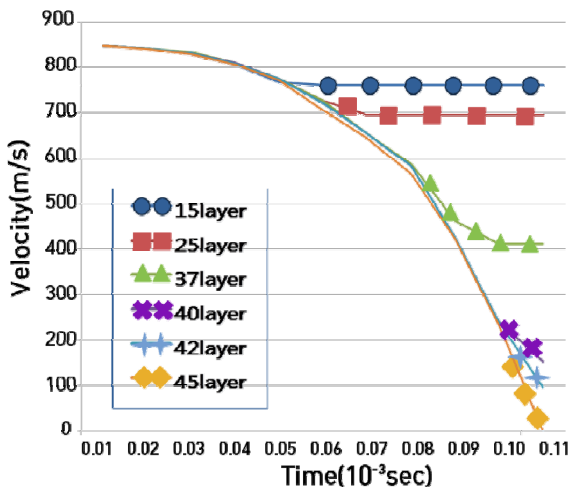


Fig. 12. Time-jacket velocity variance

- Mechanical Model of Flrlexible Woven Fabric for Finite Element Impact Simulation”, Proc. of the 7th Int. LS-DYNA Users Conference, 2002.
- [2] C. F. Yen, “Ballistic Impact Modeling of Composite Materials”, Material Sciences Corporation & 7th Int. LS-DYNA Users Conference, 2002.
- [3] J. V. Hoof, “Modeling of Impact Induced Delamination in Composite Materials”, Ph.D. Theis, Dep. Mechanical and Aerospace Engineering, Caleton University, Ontario, 1999.
- [4] Msc Software, “Linear Static, Normal Modes, and Buckling Analysis Using MD Nastran R3 and Patran 2008 r1”, Santa Ana : MSC. Software, 2011.
- [5] Robert Mcmeeking, “Numerical Simulation of Impact on Ceramic Armour System”, International Workshop on Computational Mechanics of Materal, 2012.
- [6] Sai Kiran Chellu, “Finite Element Simulation of Ballistic Impact on Metal and Composite Plate”, Ph.D. Theis, Dep. Mechanical Engineering, B. E., Andhra University, 2004.
- [7] Q. Z. Gerald, “Am17 Protective Functional Evaluation of Helmet Against Ballistic Impact”, Thesis, Dep. Mechanical Engineering, National University, Singapore, 2007.
- [8] 공창덕 외 3명, “탄소/에폭시 복합재 적층판과 강판의 저속충격 거동에 관한 비교연구”, 한국복합재료학회지, 제20권 제5호, 2007.
- [9] 권호영 외 3명, 탄약구조학, 도서출판 골드, 2004.
- [10] 김희재, 방탄공학, 청문각, 2004.
- [11] 바이스 아담스 외 1명, 알기 쉬운 유한요소 해석, 사이텍미디어, 2009.
- [12] 박재범 외 3명, “저속 충격하중을 받는 탄소 섬유강화 복합재 압력용기의 잔류강도 저하평가”, 한국복합재료학회지, 제21권 제 3호, 2008.
- [13] 손세원 외 3명, “고속충격에 의한 아라미드 섬유 강화 금속적층재의 방탄성능 및 동적파손거동에 관한 연구”, 한국정밀공학지, 2000.
- [14] 안정희, “최적 설계를 고려한 복합재 평판 고속 충돌 특성에 관한 연구”, 경상대학교 박사학위논문, 2009.
- [15] 육군사관학교, 무기체계공학, (주)복스힐, 2003.
- [16] 이강용, 응력해석 및 재료거동학, 연세대학교 출판부, 2006.
- [17] 이복원 외 4명, “전단농화유체를 함침한 케블라 직물의 저속충격거동 및 마찰특성연구”, 한국복합재료학회지 제21권, 2008.
- [18] 이영욱 외 1명, 병기공학, 노드미디어, 2010.
- [19] 이종구 외 4명, “적층구조에 대한 방탄성능 연구”, 한국항공공우주학회지 추계 학술발표회 논문집 제 21권, 2010.
- [20] 이홍주, 총과 탄도학, 청문각, 1996.
- [21] 임태성, “복합재료 샌드위치 구조용 기계적 접합부의 피로 및 충격특성에 관한 연구”, KAIST 기계공학과 박사학위논문, 2004.
- [22] 장동환 외 1명, HyperMesh를 이용한 유한요소 모델링, 도서출판 대가, 2008.
- [23] 지국현 외 1명, “저속충격을 받는 적층 복합재료 평판의 직접수치모사”, 한국복합재료 학회지, 제 20권 제5호, 2007.
- [24] 최종근 외 1명, 재료역학, 청문각, 2009.