

세라믹/유리섬유강화복합재 적층판의 고속충돌에 의한 파괴거동

정우균*, 안성훈#, 이우일*, 김희재**, 권정원***

Fracture Mechanism of Ceramic/Glass-fiber-reinforced-composites Laminate by High Velocity Impact

Woo Kyun Jung*, Sung Hoon Ahn#, Woo Il Lee*, Hee Jae Kim** and Jeong Won Kwon***

ABSTRACT

Multi-layered laminate made of ceramic/composite have been developed to prevent penetration by high velocity impact. In this study, three-layered plates consisted of 1) cover layer (glass fiber reinforced polymer), 2) Al_2O_3 ceramic plate, and 3) backing plate (glass fiber reinforced polymer) were fabricated with various conditions and tested for their ballistic protection characteristic. The ceramic composite laminates, with thin backing plate, were completely penetrated by armor piercing projectile. The plate with inserted rubber between ceramic and backing plate showed excellent ballistic protection, though completely penetrated by the second shoot.

Key Words : Ceramic composite laminate (세라믹 복합 적층판), Penetration mechanism (관통기구), Ballistic protection test (방탄시험), High velocity impact (고속충돌)

기호설명

h_1 = thickness of forward layer

h_2 = thickness of backing layer

D_1 = density of forward layer

D_2 = density of backing layer

1. 서론

공격용 무기체계의 발달은 전투장비와 전투원

에게 보다 위협적인 전장환경을 강요하고 있다. 이에 대응하여 생존성 보장을 위한 무기체계의 개발도 다양한 분야에서 활발히 진행되고 있는데, 전투목적의 기동장비에 장착되어 운용되는 장갑체계는 전투원과 장비의 방호성을 보장할 수 있는 주요한 수단으로 일찍이 군사 강대국에서는 보다 뛰어난 성능의 장갑을 개발하기 위해 노력해 왔다.

최근에는 우수한 방호력과 경량성을 보장하기 위하여 뛰어난 기계적 물성을 지닌 재료들을 사용한 장갑재가 개발되고 있는데, 대표적인 장갑체계

* 접수일: 2005년 9월 20일; 계재승인일: 2006년 4월 14일

서울대학교 기계항공공학부

교신저자: 서울대학교 기계항공공학부

E-mail ahnh@snu.ac.kr Tel. (02) 880-7110

** 육군사관학교 교수부 무기공학과

*** 캐로텍

로 세라믹 복합장갑이 많은 관심을 받고 있다.¹ 1970년대 초 영국에서 개발되어 현재는 전세계적으로 개발되고 있는 세라믹 복합장갑은 알루미나, 실리콘 카바이드 등의 다양한 세라믹²⁻⁸과 섬유강화 복합재, 또는 금속 장갑재⁹⁻¹²를 전면과 후면에 적절히 배열하여 탄자의 고속타격으로 인한 응력의 확산을 효과적으로 저지할 수 있는 구조로 설계되었는데, 운동에너지탄 뿐만 아니라 화학탄에 대해서도 우수한 방호력을 보이고 있다.

본 연구에서는 압축응력에 강한 세라믹을 전면에 배치하고, 후면에 인성과 휨 특성이 좋은 섬유강화 복합재를 배치한 구조의 세라믹/섬유강화복합재 적층판의 고속충돌에 의한 파괴거동에 관심을 기울여 실험을 통하여 세라믹 복합적층판의 관통저항에 대하여 관찰하였다. 알루미나 세라믹과 섬유강화 복합재를 에폭시 접착, 고무층 삽입 등의 조건으로 접착하여 시편을 제작하고 철갑탄을 이용한 방탄시험을 통하여 관통저항을 확인하였다.

2. 세라믹 복합 적층판의 파괴거동

고속 피탄시 장갑판에 발생하는 응력은 압축으로부터 인장, 전단으로 전이된다.¹ 세라믹 복합장갑의 구조는 이러한 응력의 변화에 착안하여 전면에는 뛰어난 압축강도를 지닌 세라믹 재료를 배치하고 세라믹이 인장과 전단에 약한 것을 보완하기 위하여 후면에 섬유강화 복합재료 등으로 보강하여 설계되고 있다. 그러나 이러한 힘의 전달과 세라믹 복합 적층판의 대응과정은 단순한 동역학적 차원의 접근으로는 현상을 명확히 설명하기 힘들며 장갑의 파괴형상도 탄자의 구경과 두께, 장갑재와 탄자의 재질, 타격속도, 충격각도 등에 따라 부

풀기, 관입, 관통, 파열, 후면파쇄, 파열 등 다양한 형상이 수십 μs 의 짧은 시간 동안 연속적으로, 또는 동시에 복합적인 형태로 발생한다.

세라믹 복합장갑의 피탄시 거동은 통상 500 m/s 이상의 고속도 구역에서 발생하며, 유체역학적 유동(Hydrodynamic flow)과 동역학적 반발이 동시에 작용하게 된다.¹⁴ Fig. 1은 유리섬유 전면보강재와 세라믹 전면재, 유리섬유강화 복합재로 구성된 3층형 세라믹 복합 적층판의 파괴거동을 예시한 것으로, 전면보강재는 탄자의 충격에너지를 감쇄시키고 세라믹 장갑재 전면의 파쇄현상을 억제시키는 한편 탄자가 세라믹 재료와 충돌하면서 발생하는 세라믹 파편이 충돌전면으로 분출되는 것을 최소화시키는 역할을 한다. 전면 보강재를 관통한 탄자는 세라믹 재료 내로 유입되면서 강한 압축응력을 받아 파열됨과 동시에 후면으로 지속적인 유동을 하게 되고 세라믹에는 원추형의 Hertzian cone 균열이 형성되어 그 후면에 걸리는 인장응력에 의해 후면 파열이 발생되며, 탄자의 파열과 유동은 계속 진행하게 된다. 이러한 과정을 통하여 탄자의 마멸(Erosion)과 세라믹의 균열에 의한 파괴가 세라믹 장갑재 전체로 전파된다. 한편, 후면재는 탄자가 세라믹 장갑재를 파괴하는 과정에서는 세라믹의 원추형 파괴를 저지하여 세라믹의 파손을 자연시키는 역할을 하며, 이후 탄자가 세라믹 재료를 파괴하고 유동하면서 발생시키는 압력에 의하여 휘어지게 된다. 이때 후면재에는 인장과 전단응력이 작용하게 되는데, 섬유강화 복합재료는 전단과 인장에 대한 저항력과 어느 정도 휘어지면서 에너지를 흡수할 정도의 인성을 가지며 경량이라는 점에서 후면재로 적합한 재료라 할 수 있다.

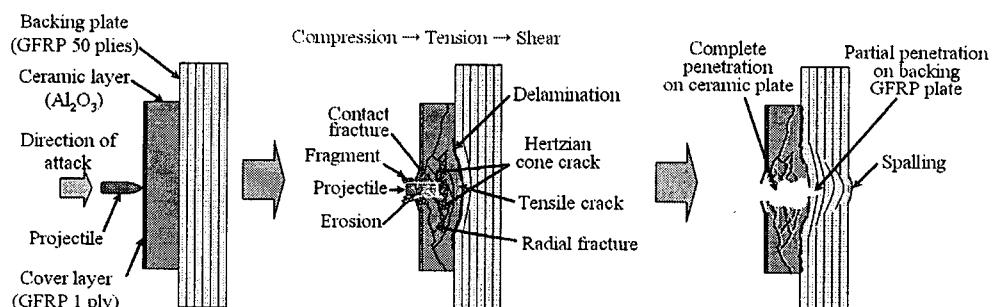


Fig. 1 Penetration mechanism of ceramic composite laminate

3. 실험

3.1 시편제작

실험에 사용된 재료는 Al_2O_3 세라믹과 평직 유리섬유 복합재료로서, 세라믹은 2 차에 걸친 재료 조합과 Slip 숙성을 거쳐 캐스팅으로 10mm의 두께로 제작되었다.

방탄실험용 시편은 유리섬유 프리프레그를 적층하여 진공성형을 통해 6.8mm와 15mm 두께의 유리섬유강화 복합재 후면층을 제작하고, 에폭시 접착, 프리프레그 접착, 고무층 삽입 등 다양한 방법으로 세라믹과 후면재를 접착하였다. 또한, 세라믹 전면을 유리섬유 프리프레그로 보강하여 전면보강재를 구성하였다.

후면재의 두께를 6.8mm와 15mm로 판단한 이유는, Fawaz 등¹³이 설명한 전면재의 두께와 밀도 및 후면재의 밀도에 대한 후면재의 최적화 두께에 관한 식 (1)을 근거로 판단하였다.

$$h_1/h_2 \approx 4(d_2/d_1) \quad (1)$$

세라믹 전면재와 유리섬유강화 복합재 후면재의 접착은 일체 진공성형법과 일반적인 접착방법과의 접착효율에 대한 연구¹⁴와 박판의 고무층 삽입이 충돌에너지의 완충에 미치는 영향에 대한 연구¹⁵ 등을 참조하여 적용하였다.

Table 1은 시편제작 조건이며, Fig. 2는 조건에 따라 제작된 시편의 모습이다.

Table 1 Specimens fabrication conditions

No.	Condition	Thickness of specimens (Ceramic / GFRP, mm)
#1	Epoxy adhesive	10.1 / 6.4
#2	Prepreg bonding	10.2 / 16.5
#3	Epoxy adhesive	10.15 / 14.5
#4	Prepreg bonding	10.1 / 7.1
#5	Rubber & Epoxy	10.12 / 16

제작된 유리섬유강화 복합재 후면재는 얇은 시편(6.8mm 기준, 시편 #1, 4)의 경우 최대 0.4mm의 두께오차를 보였으며, 두꺼운 시편(15mm 기준, 시편 #2, 3, 5)의 경우 최대 1.5mm의 오차를 보였는데, 이는 시편제작간 진공도에 따라 수지유동(Resin flow)의 차이가 발생한 것으로 판단된다.

3.2 방탄시험

방탄성능을 측정하기 위한 방법으로는 방호 탄도한계 측정법, 방탄효율 측정법, 임계각도 측정법 등 다양한 방법이 있는데, 본 연구에서는 방호 탄도한계 측정법을 이용하여 실험하였다. 방호 탄도한계 측정법은 완전관통(CP)과 부분관통의 비율이 각각 50%를 만족하는 타격속도를 구하여 이를 방탄성능으로 판단하는 방법으로 V_{50} , $V_{50}(\text{PBL})$, V_{BL} 등으로 한계속도를 표시한다.¹⁶

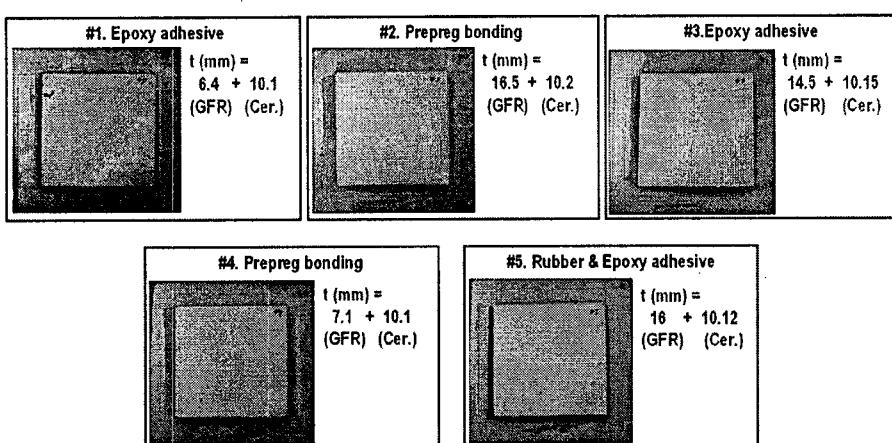


Fig. 2 Fabricated specimens for ballistic protection test

본 실험의 목적은 앞서 언급한 바와 같이 세라믹 복합 적층판의 파괴거동에 대한 고찰이므로 방호 탄도한계 측정법을 사용하였으나 임의 한계속도에 대한 각 시편의 관통저항을 확인하는데 관심을 두었다.

실험은 7.62mm 직경의 철갑탄을 사용하였으며, 장약의 양을 조절하여 임의 한계속도 조건을 구성하였다. 준비된 탄을 발사장치에 장착한 후 요(Yaw)의 발생과 속도측정장치의 정상 작동여부를 확인하였다. Yaw는 탄자의 비행안정과 직결되는 요소로 정확한 피탄을 위해서는 반드시 보정되어야 한다.¹⁷ 탄자의 Yaw 발생이 이상없음을 확인한 후 시편고정대에 제작된 세라믹 복합 적층판 시편을 고정시키고 각 시편당 1 발 또는 2 발을 사격하여 방탄성능을 관찰하였다. 시험 결과는 관통여부와 후면의 균열크기에 따라 방탄효율을 평가하였다. Fig. 3은 속도기록 스크린을 이용한 방탄시험장치의 개략도이다.

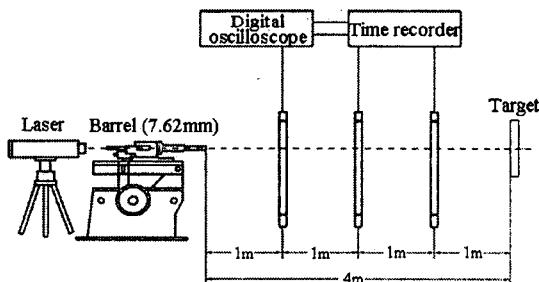


Fig. 3 Set-up of ballistic protection test

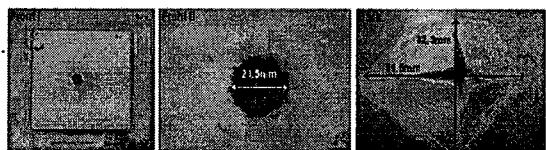
4. 결과 및 토의

방탄시험결과 세라믹 복합 적층판은 제작조건에 따라 부분관통(PP), 또는 완전관통(CP) 되었다. 후면의 유리섬유강화 복합재의 두께가 식 (1)에 의해 계산된 시편(#1, 4)의 경우에는 완전관통 되었으나 두꺼운 배면층을 가지는 시편(#2, 3, 5)의 경우는 부분관통 되었다. 그러나 시편 #5에 대한 두번재 사격(#5-2nd)에서는 완전관통이 관찰되었다. Fig. 4는 각 시편에 대한 방탄 시험결과이다.

Fig. 4(a)는 식 (1)에 의해 산출된 두께(6.8mm)의 후면재를 에폭시 접착방법으로 세라믹과 접착한 시편 #1의 실험결과로서, 시편은 완전관통되어 탄자의 인입구와 인출구는 천공화되었고 세라믹은

미세한 파편으로 파쇄되어 분산되거나 내부에 잔류하고 있었다. 후면의 복합재판은 십자 모양으로 균열이 발생하였으며 유리섬유층은 충간 분리됨이 관찰되었다. 그러나 세라믹과 복합재 간의 충간분리는 발생하지 않았다.

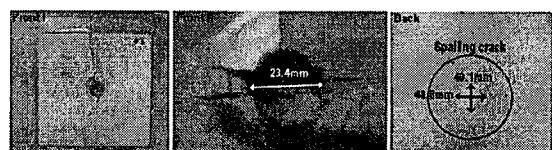
Fig. 4(b)는 식 (1)에 의해 산출된 두께의 약 2.5 배에 해당하는 두께(15mm)의 후면층을 프리프레그를 이용하여 세라믹과 접착한 시편 #2의 실험결과이다. 세라믹 전면층은 완전파쇄 되었으나 후면층은 관통되지 않았다.



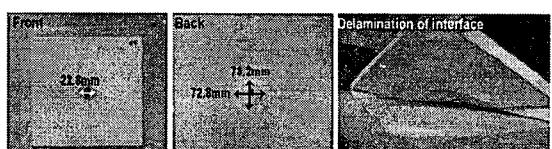
(a) Test result of specimens #1



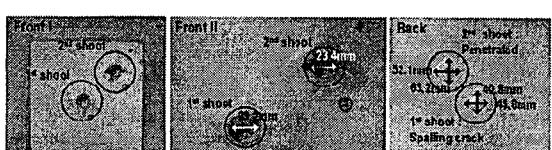
(b) Test result of specimens #2



(c) Test result of specimens #3



(d) Test result of specimens #4



(e) Test result of specimens #5

Fig. 4 Results of ballistic protection test

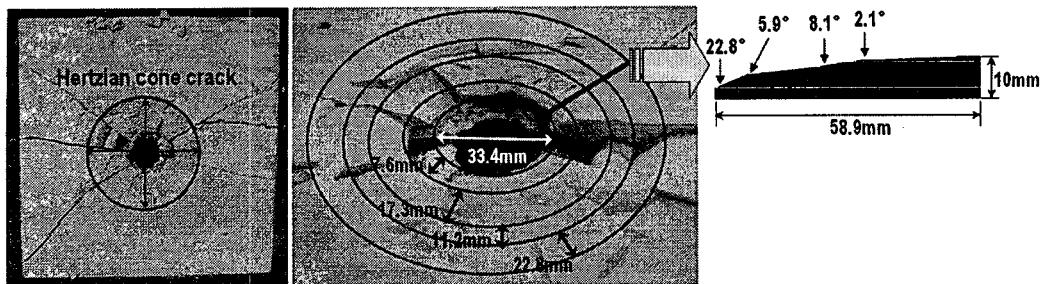


Fig. 5 Crushed ceramic inner surface by Hertzian cone crack

그러나 후면총의 배면에는 직경 59mm 정도의 spalling crack이 발생하였다. 파쇄된 세라믹은 전면 보강재의 영향으로 파쇄된 상태에서 형상을 유지하고 있었으나 세라믹 전체에 균열이 전파되어 있음을 관찰되었다.

Fig. 4(c)는 시편 #2와 같은 두꺼운 후면총을 시편 #1과 같이 에폭시 접착을 이용하여 제작한 시편 #3의 실험결과이다. 시편은 부분관통 되었으며, 후면총의 배면에는 약 49mm 크기의 spalling crack이 발생하였고, 세라믹총과 복합재 총은 80%정도 분리되었다. 이를 완전히 분리시켜 세라믹 안쪽면의 파쇄형상을 관찰할 수 있었다 (Fig. 5).

내부의 세라믹은 Hertzian cone crack에 의하여 탄자의 관입구로부터 원형을 그리며 파쇄가 확장된 모습을 확인할 수 있었다. 파쇄된 형상은 여러 단계에 걸쳐 계단형태의 파쇄층을 형성하였는데, 이는 탄자의 고속충돌에 의한 응력파가 세라믹으로 전파되고 다시 후면총에 의해 반사되는 과정에서 발생한 것으로 판단된다. 또한 Fig. 4(c)를 통하여 확인된 탄자의 인입구 크기는 약 23.4mm였으나, 배면의 세라믹은 약 33.4mm의 직경으로 파쇄되어 있음을 확인할 수 있었다.

부가하여 분리된 세라믹면과 복합재면의 표면을 통하여 에폭시 접착제가 후면재인 유리섬유 복합재총보다 세라믹에서의 접착이 좋지 않았던 것을 알 수 있었다.

Fig. 4(d)는 식 (1)에 의해 계산된 두께(6.8mm)의 후면총과 세라믹을 프리프레그를 이용하여 진공성형으로 접착한 시편 #4의 실험결과이다. 시편은 후면에 약 73mm의 관통에 의한 균열이 발생되며 완전관통 되었다. 부가하여 세라믹 전면판과 복합재 후면판 사이에서 부분적인 총간분리 현상이 확인되었다.

Fig. 4(e)는 두꺼운 후면재(15mm)와 세라믹총 사이에 박판의 고무총을 삽입하고 에폭시로 접착한 방탄재인 시편 #5에 대한 실험결과이다. 시편 #5는 하나의 시편에 대하여 2발의 사격을 실시하였는데, 이는 피해를 입은 방탄판이 계속된 타격에 어떠한 방호를 보일 수 있는지 단편적으로 확인해 보기 위함이였다. 실험결과를 통해 세라믹 총과 복합재총 사이에 고무총을 삽입함으로써 1차 사격에서의 spalling crack은 에폭시만으로 접착하였을 경우보다 약 12%감소함을 확인하였다. 그러나, 2차 사격에서는 시편은 완전관통 되었는데, 이는 1차사격 결과 세라믹 전체에 균열이 확산되었기 때문으로 판단된다.

Table 2는 각 시편별 탄자 인입구 및 인출구의 크기와 이에 따른 시편 평가결과를 정리한 것이다. 방탄성능은 관통여부, 후면 spalling crack 크기 등을 고려하여 방호한계 기준 판단방법을 근거로 판단하였다.¹⁶

Table 2 Evaluation of tests results for ballistic protection

Specimens No.	Insertion (mm)	Release: Spalling crack size (mm)			Results	Evaluation (Rank)
		Max.	Min.	Avg.		
#1	21.5	91.5	82.3	86.9	CP	6
#2	21.1	59.7	58.1	58.9	PP	3
#3	23.4	49.1	48.8	48.9	PP	2
#4	22.8	73.2	72.8	73.0	CP	5
#5	1 st	23.2	45.8	40.8	43.3	PP
	2 nd	23.4	63.2	52.1	57.6	CP
						4

(CP : Complete Penetration, PP : Partial Penetration)

피탄으로 인한 장갑판의 피해는 우선 군에서 적용하는 기준에 의거 완전관통과 부분관통으로 구분하였다. 이후 각각의 그룹 내에서 배면충인 섬유강화 복합재의 후면에 발생한 균열을 방호한계 기준으로 판단하여 다시 등급을 분류하였다.

정리된 결과를 통하여 세라믹과 두꺼운 배면충의 섬유강화 복합재로 제작된 시편의 경우가 최적화 두께로 판단되었으나 이보다 얇은 배면충을 가지는 시편보다 뛰어난 방탄특성을 보임을 알 수 있다. 이는 탄자와 장갑판의 충돌에서 발생한 응력의 전이과정에서 두꺼운 배면충이 보다 효과적으로 응력파의 전파를 저지하는 것으로 판단된다. 즉, 배면충이 두꺼워짐에 따라 고속충돌에 의한 응력을 효과적으로 방호한다고 할 수 있다. 한편, 부분관통된 #2, 3, 5 번 시편에 대한 접착방법에 따른 영향을 살펴보면, 세라믹 층과 섬유강화 복합재층 사이에 고무층을 삽입한 시편에서 가장 양호한 방탄효율이 관찰되었으며(#5), 에폭시를 사용하여 접착한 시편(#3)이 프리프레그를 이용하여 접착한 시편(#2)보다 양호한 방탄특성을 보이는 것으로 판단된다.

5. 결론

실험을 통하여 유리섬유 전면보강재와 알루미나 세라믹 전면재, 유리섬유강화 복합재 후면재로 구성된 3 층형 세라믹 복합 적층판의 파괴거동에 대하여 고찰하였다.

본 실험을 통하여 확인된 내용을 아래와 같이 정리할 수 있다.

(1) 세라믹층의 균열확장과 파쇄된 세라믹 페인의 분출을 최소화하기 위하여 적용한 유리섬유 전면보강재는 의도한 기능을 효과적으로 수행하였다.

(2) 섬유강화 복합재료는 세라믹 복합적층판의 후면재로 적합한 재료로 판단되며, 후면재의 두께는 비용과 면밀도, 요구 방탄성능 등을 고려하여 적절하게 설계되어야 한다.

(3) 이종재료의 적층으로 구성된 방탄판의 설계 시 가장 중요한 요소는 각기 다른 두 재료의 접착에 관한 부분이라 할 수 있는데, 본 연구에서는 후면재인 섬유강화 복합재에 사용된 에폭시 등의 기

지를 진공성형하여 사용하는 것이 양호한 결과를 보였다.

(4) 전면재와 후면재 사이에 고무층 등을 삽입함으로써 탄자의 충돌로 인한 압축응력 등의 전파를 효과적으로 제지할 수 있을 것이다.

장갑재료의 방탄특성에 대한 국내의 연구는 국방과학연구소와 육군사관학교 등의 군 관련 연구기관과 일부 방산업체를 중심으로 수행되어 왔는데 연구결과는 특별히 공개 되지 않고 있으며, 국내 민간 대학이나 연구소의 방탄 재료에 대한 연구도 상당히 미흡한 실정이다. 이에 전장에서의 생존성 보장이라는 군사적 목적뿐만 아니라 테러 등에 대비할 수 있는 민간차원에서의 방탄재에 대한 연구도 요구된다 할 수 있다. 부가하여 방탄실험은 많은 시간과 예산을 필요로 하기 때문에 다양한 고려요소들을 모두 반영하여 수행하는 것은 불가능하다. 이에 유한요소 프로그램 등을 이용하여 모델을 구성하고 이를 검증하는 과정을 통하여 최적의 방탄구조를 설계할 수 있을 것이다.

후기

본 연구는 서울대학교 BK21 과 공학연구소, 주로템(로기연마 05M012)의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다. 또한, 방탄실험을 도와주신 육군사관학교 무기공학과 김영선, 허남영님에게 감사드립니다.

참고문헌

1. Ahn, S. H., Jung, W. K. and Kim, H. J., "Development Trends of Ceramic Composite Armors for Combat Vehicles," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 22, No. 7, pp. 7-18, 2005.
2. Grace, F. I. and Rupert, N. L., "Analysis of Long Rods Impacting Ceramic Targets at High Velocity," International Journal of Impact Engineering, Vol. 20, pp. 281-292, 1997.
3. Sharma, M. M. and Amateau, M. F., "Processing of laminated hybrid ceramic composites," Composites Part B, Vol. 29, pp. 189-194, 1998.
4. Lundberg, P., Renstrom, R. and Lundberg, B.,

- "Impact of metallic projectiles on ceramic targets: transition between interface defeat and penetration," International Journal of Impact Engineering, Vol. 24, pp. 259-275, 2000.
5. Weber, K., Holmquist, T. J. and Templetion, D. W., "The Response of Layered Aluminum Nitride Targets Subjected to Hypervelocity Impact," International Journal of Impact Engineering, Vol. 26, pp. 831-841, 2001.
6. Simha, C. H. M., Blessa, S. J. and Bedford, A., "Computational modeling of the penetration response of a high-purity ceramic," International Journal of Impact Engineering, Vol. 27, pp. 65-86, 2002.
7. Bao, Y., Su, S., Yang, J. and Fan, Q., "Prestressed ceramics and improvement of impact resistance," Materials Letters, Vol. 57, pp. 518-524, 2002.
8. Forquin, P., Denoual, C., Cotterot, C. E. and Kild, F., "Experiments and modelling of the compressive behaviour of two SiC ceramics," Mechanics of Materials, Vol. 35, pp. 987-1002, 2003.
9. Lee, M. and Yoo, Y. H., "Analysis of ceramic/metal armour systems," International Journal of Impact Engineering, Vol. 25, pp. 819-829, 2001.
10. Lynch, N. J., Bless, S. J., Brissenden, C., Berry, D. and Pedersen, B., "Novel Penetrator Performance Against a Steel-Ceramic-Steel Target at 0 Over The Velocity Range 1800 to 2900 m/s," International Journal of Impact Engineering, Vol. 26, pp. 475-486, 2001.
11. Fritz, L., "Carbon, polyethylene and PBO hybrid fiber composites fot structural lightweight armor," Composites Part A, Vol. 33, pp. 211-231, 2002.
12. Yadav, S. and Ravichandran, G., "Penetration resistance of laminated ceramic/polymer structures," International Journal of Impact Engineering, Vol. 28, pp. 557-574, 2003.
13. Fawaz, Z., Zheng, W. and Behdinan, K., "Numerical simulation of normal and oblique ballistic impact on ceramic composite armours," Composite Structures, Vol. 63, pp. 387-395, 2004.
14. Mahdi, S., Gamaa, B. A., Yarlagadda, S. and Gillespie, J. W., "Effect of the manufacturing process on the interfacial properties and structural performance of multi-functional composite structures," Composites Part A, Vol. 34, pp. 635-647, 2003.
15. Mahfuz, H., Zhu, Y., Haque, A., Abutalib, A., Vaidya, U., Jeelani, S., Gama, B., Gillespie, J. and Fink, B., "Investigation of high-velocity impact on integral armor using finite element method," International Journal of Impact Engineering, Vol. 24, pp. 203-217, 2000.
16. Kim, H. J., "Ballistic Protection Engineering," Cheong Moon Gak Publishers, pp. 161-163, 2004.
17. Yoo, Y. H., "Numerical Simulation of High-Velocity Oblique Impacts of Yawed Long Rod Projectile Against Thin-Plate," Journal of the Korean Society of Mechanical Engineering, Vol. 26, No. 7, pp. 1426-1437, 2002.