

◆특집◆ 방탄공학

전투차량용 세라믹 복합장갑의 개발추세

안성훈*, 정우균**, 김희재***

Development Trends of Ceramic Composite Armors for Combat Vehicles

Sung-Hoon Ahn*, Woo-Kyun Jung** and Hee-Jae Kim***

Key Words : Ceramic composite armor (세라믹 복합장갑), Design of Armor (장갑설계), Ceramic armor material (세라믹 장갑재), Penetration mechanism (관통기구)

1. 서론

인류의 역사는 고대로부터 수많은 전쟁과 함께 발전해 왔다. 전쟁의 승패는 국가의 흥망과 직결되었기 때문에 전쟁과 함께 새로운 무기체계도 급속도로 발달하여 왔다. 무기체계의 발달은 모순(矛盾)이라 할 수 있다. 이는 적의 어떠한 방호조건에도 최대의 피해를 줄 수 있는 탄약, 폭발물의 개발과 함께 반대로 적의 공격으로부터 피해를 최소화할 수 있는 방호체계의 개발이 대응되기 때문이다. 장갑(裝甲)은 적의 공격으로부터 안전한 방호력을 보장받을 수 있는 방패의 개념으로 개발되어 왔다.

전투차량은 전투현장에서 운용되는 전투목적의 기동장비를 통칭하는데, 광범위하게 전차와 장갑차, 보병용 전투차량 등을 모두 포함한다. 전투차량 중 전차의 기원을 고대 로마시대에 등장한 2륜 마차인 채리엇(Chariot)으로 판단하기도 하나, 현대적 개념의 전투차량은 1900년대 초반으로부터 1차 세계대전을 통하여 등장하였으며, 적의 기

관총진지 파괴를 목적으로 트랙터에 소구경 화포를 장착한 전차와 전투병력의 신속하고 안전한 이동을 위하여 장갑차가 개발되었다.

이들 전투차량은 독일의 클라우제비츠가 “전쟁론(戰爭論)”에서 언급한 시간과 장소에 대한 집중의 원칙을 효과적으로 구현할 수 있는 무기체계로 화력과 기동성, 방호력 등에 주안점을 두어 현대전의 전술을 구현하기 위한 지상무기체계 중 가장 주요한 부분으로 판단되고 있다. 실례로, 걸프전과 이라크전 등에서 미군의 M1A1 전차와 스트라이커 장갑차 등의 전술적 운용을 통하여 확인된 바 있다.

전투차량의 방호력은 전투원의 생존성과 직결되어 전투의 승패를 좌우하는 중요한 고려요소로서, 미국과 영국을 비롯한 군사 강대국에서는 높은 등급의 비밀로 분류하여 전투차량용 장갑을 개발하고 있다. 근래의 전투차량용 장갑은 우수한 방호력과 경량성을 보장하기 위하여 뛰어난 기계적 물성을 지닌 재료들을 사용하여 개발되고 있는데, 대표적인 장갑체계로 세라믹 복합장갑이 많은 관심을 받고 있다. 세라믹 복합장갑은 세라믹과 섬유강화 복합재료, 또는 금속 장갑재를 전/후면 재료로 배열하여 운동에너지탄 뿐만 아니라 화학에너지탄에 대해서도 우수한 방호력을 보이고 있다. 이에, 본 연구에서는 세라믹 복합장갑과 관련된 연구 결과들을 통하여 연구동향을 확인하고, 세라믹 복합장갑의 특성에 대하여 고찰하였다.

* 서울대학교 기계항공공학부
Tel. 02-880-7110, Fax. 02-883-0179
Email ahnsh@snu.ac.kr

기계설계 및 기능성 복합재료 분야에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다. 현 한국정밀공학회 편집이사

** 서울대학교 기계항공공학부 대학원

*** 육군사관학교 교수부 무기공학과

2. 전투차량용 장갑의 발전

2.1 전투차량용 장갑의 종류와 특징

전투차량은 전술적으로 적의 소·중화기에 대한 위협이 상존하는 지역에서 운용되는 경우가 많다. 운동에너지탄 뿐만 아니라 HEAT(High Explosive Anti-Tank)탄과 같은 화학에너지탄, 포탄의 파편 등 다양한 형태의 위험요소가 전투원의 생존성을 위협하는데¹⁻³, 전투차량용 장갑은 이러한 위협요소를 고려하여 개발되어 왔다.

초기의 장갑은 주로 금속을 단일재료로 사용하여 제작되었다. 금속장갑은 균질한 철을 단련하여 만든 RHA(Rolled Homogeneous Armor)강이 주로 사용되었으나, 표면의 경도를 강화시킨 표면경화장갑(Face-Hardened Steel armor)이나 비철금속 재료로서 알루미늄, 티타늄 합금 등이 장갑재료로 개발되어 사용되고 있다. 이러한 단일장갑은 탄두와 장갑재간의 경사를 이용하여 피탄 효과를 줄이는 경사장갑의 형태(Inclination technique)로도 사용되고 있는데, 이는 탄두를 넓은 접촉 면적과 경사접촉으로 유도하여 관통효과를 최소화 시키는 방법이다(Fig. 1 (a)).

유격장갑은 공간장갑(Space armor)이라고도 불리는 장갑의 형태로서 차체의 바깥쪽에 간격을 두고 또 하나의 장갑을 부착한 형태로서 운동에너지탄의 경우에는 외부장갑과 탄두의 충돌로 파편과 탄심이 차체에 미치는 영향을 최소화하여 파편 감쇄효과를 얻을 수 있으며, HEAT 탄의 경우에는 분사위력의 중심이 장갑 사이의 공간에서 분산되어 관통효과를 최소화 할 수 있다(Fig. 1 (b)).

복합장갑은 유격장갑의 공간에 특수한 재료를 배열하거나 복수의 장갑을 조합시킨 적층 형태의 장갑으로 금속장갑재, 섬유강화 복합재료, 세라믹, 고무충전재 등의 재료들이 사용된다. 최근의 복합장갑에 대한 연구는 세라믹 재료와 섬유강화 복합재료를 적절히 적층하여 방탄효과를 향상시키는데 관심이 집중되고 있으며, 본 논문도 이에 초점을 맞추어 고찰하였다(Fig. 1 (c)).

세라믹 장갑재료는 알루미늄(Al_2O_3), 실리콘 카바이드(SiC) 등이 주로 사용되고 있으며, 성분의 조성비를 조정하거나 특별한 제작공정을 통하여 방탄재료로서의 요구특성을 향상시키기 위한 연구가 활발히 진행 중이다.

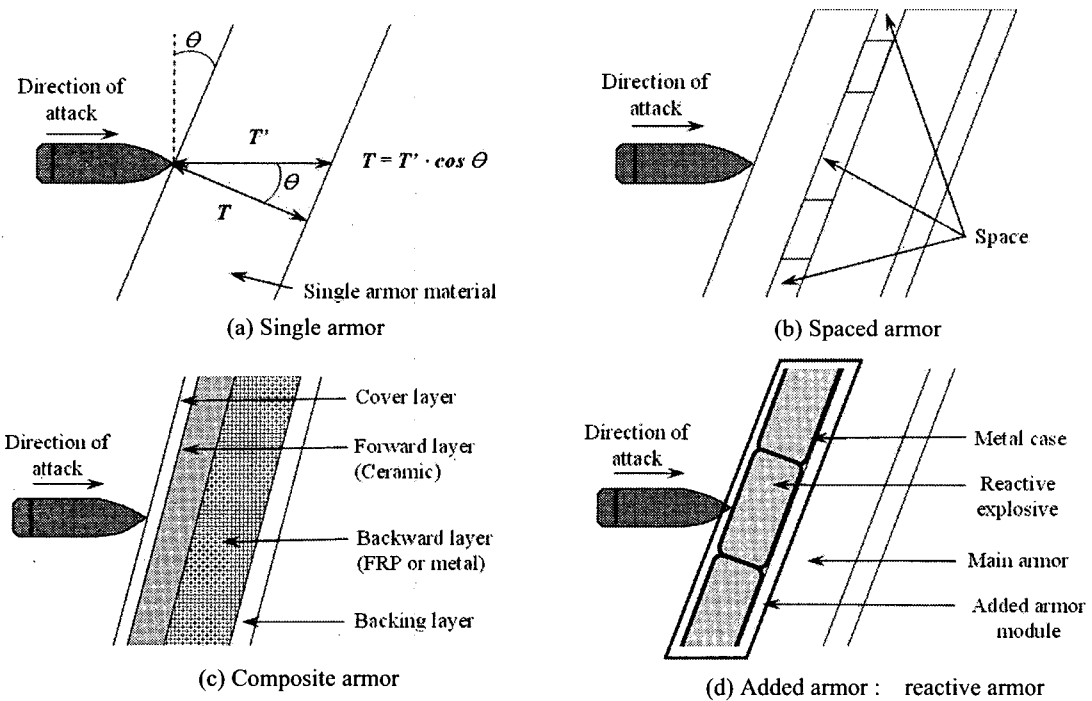


Fig. 1 Classification of armors for combat vehicles

또한 1930 년대 이후 등장하여 탁월한 기계적 물성과 경량성 등의 특징을 지녀 장갑재료로 널리 사용되고 있는 공업용 섬유재료를 이용한 섬유강화 복합재료는 나일론, 유리, 아라미드 및 고성능 폴리에틸렌 섬유 등을 수지에 함침하여 경화시켜 사용되고 있다. 주로 개인용 몸체장갑의 방탄판 재료로 사용되어 왔으나, 전투차량용 장갑재로 광범위하게 사용범위가 증가되고 있는 추세이다.

부가장갑은 차체를 형성하는 주장갑에 덧붙임 형태로 장착하는 장갑으로서, 대표적으로 반응장갑을 들 수 있다. 반응장갑은 탄의 폭발력에 대응하여 타격 방향을 바꿈으로써 탄의 위력을 감소시키고자 하는 원리로서 HEAT 탄의 초점거리를 교란시키기 위한 탄약 충전물을 상자에 충전시켜 주장갑에 추가적으로 부착하는 장갑의 형태이다(Fig. 1 (d)). 이러한 부가장갑은 반응장갑 외에도 세라믹 부가장갑의 형태로 제작되기도 한다.

2.2 세라믹 복합장갑의 연구동향

세라믹 복합장갑은 “쇼밤장갑(Chobham Armor)”라고도 하며 Composite Armor, 또는 Layered Armor, Laminate Armor 라고도 불리는데, 1970 년대 초 영국에서 개발되어 현재는 전 세계적으로 표준화된 복합장갑의 형태로 개발되고 있다. 독일의 MBT (Main Battle Tank)인 Leopard II 와 영국의 Challenger, 미국의 Abrams 등이 진보된 세라믹 복합장갑을 채택한 것으로 알려져 있다. 영국에서는 개발 당시 철저한 보안이 유지되어 개발되었으며, 장갑의 재료로는 철과 알루미늄 합금, 세라믹, 유리섬유 복합재 등이 혼합되어 샌드위치 구조로 제작되어진 것으로 추정되었다.

미국의 경우, 육군연구소(U.S. Army Research Office)에서 미 세라믹 학회(The American Ceramic Society)를 후원하여 진보된 세라믹 장갑재료의 개발에 관심을 기울이고 있다. 수많은 대학과 연구소들이 참여하여 충돌과 관통 현상, 고성능 세라믹 재료의 개발 등 다양한 분야에 대한 연구를 수행하고 있다. 또한 기업체들도 세라믹 복합장갑의 개발에 관심을 기울여 우수한 성능의 장갑재료를 개발하여 생산하고 있는데, Compositflex 사는 실리콘 카바이드와 스펙트라를 이용하여 새로운 장갑체계를 개발하였으며, Textron 사는 MMC(Metal Matrix Composite)와 세라믹 재료를 이용하여 탁월한 방탄성능의 장갑재료를 개발하였다. Allied

Signal 사는 탁월한 방탄특성을 지니는 스펙트라 복합재를 이용하여 복합장갑 체계를 개발하는 등 지속적인 신기술 개발에 주력하고 있다.

이러한 세라믹 복합장갑의 핵심기술은 발표된 연구결과를 통하여 유추할 수 있다.

2.2.1 고속충돌 및 관통현상에 대한 연구동향

탄자와 장갑재의 고속충돌 및 관통현상은 탄자의 최종탄도학적 영향요소와 장갑재의 물성 및 피탄 조건 등에 따라 상이한 결과를 나타낸다. Sadanandan 과 Hetherington⁴ 은 알루미늄을 전면재로 하고 후면에 알루미늄 합금 또는 강장갑 재료를 배치한 2 층의 장갑판에 대한 방탄시험을 통하여 경사도가 높을수록 장갑재의 방호 한계속도가 증가함을 확인하였으며, Benloulo 와 Sanchezgalvez⁵ 는 세라믹과 섬유강화 복합재료로 구성된 복합장갑에 대해 관통에 대한 단순이론을 적용하여 현상을 묘사하고 실험을 통하여 결과를 비교하였다. Mahfuz 등⁶ 은 세라믹과 EPMA, S-2 유리섬유와 카본섬유로 구성된 다층의 방탄구조를 LS-DYNA 3D 를 이용하여 해석하고 각 층의 응력분포를 확인하였다. 이와 유사하게 Jovicic⁷ 과 Mines⁸ 는 일반적인 세라믹 복합재 구조의 장갑에 대하여 충격파로 인한 응력이 장갑재의 내부로 확산되는 과정에 대하여 연구하였다.

Chou⁹ 는 S-2 유리섬유 복합재료 방탄판의 피탄후 구조변형과 압축강도의 변화에 대하여 연구하였으며, Gama¹⁰ 는 미군에서 제시한 CIA (Composite Integral Armor)에 대하여 소개하고 20mm 모의탄에 대한 피탄효과를 해석하였고, Fawaz 등¹¹ 은 수직 입사탄과 경사 입사탄의 충돌에 대한 연구를 통하여 경사 피탄시에 탄자의 변형이 더 크게 발생함을 확인하였다. Anderson 과 Walker¹² 는 탄자와 장갑간의 충돌 순간에 발생하는 일시적인 탄두의 정지현상을 모델링하고 실험을 통하여 비교하였는데, 이때 발생하는 운동에너지에 대한 모델링을 통하여 장갑을 관통하기 위한 탄자의 운동에너지를 높이거나 탄자를 극복할 수 있는 장갑의 설계지침에 유용하게 적용할 수 있는 방안을 모색하였다.

최근에는 전투현장에서 발생 가능한 다양한 피탄의 조건을 연구하고자 하는 노력이 시도되고 있다. Shin 등¹³ 은 알루미늄과 실리콘 카바이드 세라믹 방탄판이 HEAT 탄에 의해 공격을 받을 때

제트(Jet)가 세라믹 판에 미치는 영향에 대하여 연구하였으며, Rosenberg 와 Dekel¹⁴은 압연강으로 제작된 장갑재에 대하여 표적 이동시에 피탄의 영향에 대하여 연구하였다. 부가하여 Rosset¹⁵는 연속적인 피탄(Multi-hit)의 위협에 대응하는 세라믹 타일 장갑과 반응장갑 등으로 구성된 부가장갑의 방호 특성에 대하여 연구하였다.

2.2.2 세라믹 복합장갑 재료에 대한 연구동향

세라믹 복합장갑 재료에 대한 연구는 다양한 세라믹 재료와 섬유강화 복합재료, 또는 금속 장갑재를 조합하여 피탄을 최소화하고자 하는 수많은 시도가 수행되었다. 주로 사용되는 세라믹 재료로는 알루미늄(Al_2O_3), 실리콘 카바이드(SiC), 실리콘 나이트라이드(Si_3N_4), 보론 카바이드(B_4C), 알루미늄 나이트라이드(AlN) 및 티타늄 보라이드(TiB_2) 등이며, 이러한 세라믹 재료의 조성비를 바꾸거나 두께 및 입자 크기 영향, 피탄전의 선응력 부가 등에 따른 방탄특성에 대하여 확인¹⁶⁻³⁰하거나, S-2 및 E 계열의 유리섬유나 케블라 섬유, 비닐 에스테르 등의 복합재와 알루미늄 합금 또는 압연강판 등을 효과적으로 배열함으로써 장갑의 성능을 향상시키고자 하는 연구³¹⁻⁴⁰가 수행되어 왔다. 부가하여 최근에는 FGM(Functionally Graded Material)을 이용하여 세라믹층을 구성함으로써 고속 충격시에 세라믹에서 발생하는 균열(Crack)의 확산을 최소화하고자 하는 연구⁴¹⁻⁴⁴와 CMC(Ceramic Metal Composite) 재료의 개발⁴⁵도 연구되고 있다.

세라믹 복합장갑의 재료에 대해서는 3 장에서 좀더 자세히 언급하고자 한다.

2.2.3 물성 및 구조특성과 피해평가에 대한 연구 동향

장갑재료의 물성 및 구조특성에 대한 연구는 SHPB(Split Hopkinson Pressure Bar)에 근거를 두고 수행되고 있다. 봉의 탄성응력과의 파장이 봉 내부에서의 음파속도와 충격의 지속 시간에 관계된다는 Hopkinson 의 이론을 근거로 $10^2m/s$ 에서 $10^4m/s$ 사이 속도범위에서의 장갑재료 물성에 대하여 연구되고 있다. 물성시험은 다양한 세라믹 / 섬유강화 복합재료에 대하여 압축과 인장, 굴곡강도, 경도시험 등의 정적인 시험과 충격 시험 등의 동적 시험이 병행되어 수행되고 있으며,

탄자의 경도와 인성이 장갑판에 미치는 영향, 세라믹의 입자 크기 및 밀도, 다공성, 관통저항 등의 구조특성이 방탄 특성에 미치는 영향 등 다양한 접근이 시도되고 있다. 또한, 후면판의 재질에 따른 세라믹 재료의 영향⁴⁶, VARTM (Vacuum-Assisted Resin Transfer Molding)으로 제작된 세라믹 장갑의 층간분리에 대한 연구⁴⁷, 세라믹 타일과 복합재 사이를 충전시킨 수지에 따른 장갑판의 층간분리 현상에 대한 연구⁴⁸ 뿐만 아니라 세라믹 재료를 무압 소결하여 밀도와 경도를 최적화 하거나, 카본나노튜브 등의 재료를 이용하여 강도가 증가된 세라믹 재료를 제작하는 공정에 대한 연구 등이 수행되고 있다.

한편, 피탄후 장갑판의 피해검사 방법에 대한 연구도 활발히 진행되고 있는데, 고속 충격후 장갑재 내부 마이크로 구조의 변화와 배면층 재료의 피해에 대한 분석 등이 수행되고 있다. 대부분 피해검사 연구는 Ultrasonic 을 이용한 NDE (Non-destructive Evaluation) 방법으로 수행하고 있으나, 최근에는 세라믹 장갑재료의 균열 확산을 이온빔 조사법을 이용하여 확인한 연구⁴⁹도 진행되었다.

3. 세라믹 복합장갑의 재료

현재까지 개발된 세라믹 복합장갑은 일반적으로 전면에 세라믹 장갑판을 배치하고, 후면에 섬유강화 복합재나 금속 장갑재로 보강하는 형태의 2 층형 구조를 기본으로 발전되어 왔다. 이에 부가하여 전면의 세라믹 장갑층을 섬유강화 복합재로 보강하거나 후면의 섬유강화 복합재와 세라믹 장갑판 사이에 고무층을 추가하는 등 피탄효과를 감소시키거나 기능적 특성을 부여하기 위하여 보강을 하기도 한다. 또한 부가장갑의 형태가 아닌 세라믹 복합장갑을 주장갑으로 하는 경우 후면에 불연성 재료나 전자파 교란을 회피하기 위한 층을 덧붙이기도 한다(Fig. 2). 각 층은 세라믹 복합장갑 설계시 중요한 변수로 고려되는데, 장갑 총 중량의 감소와 피탄피해의 최소화라는 목적을 두고 최적화하여 설계되어야 한다.

3.1 세라믹 재료

세라믹 재료는 높은 경도와 강성, 압축강도 및

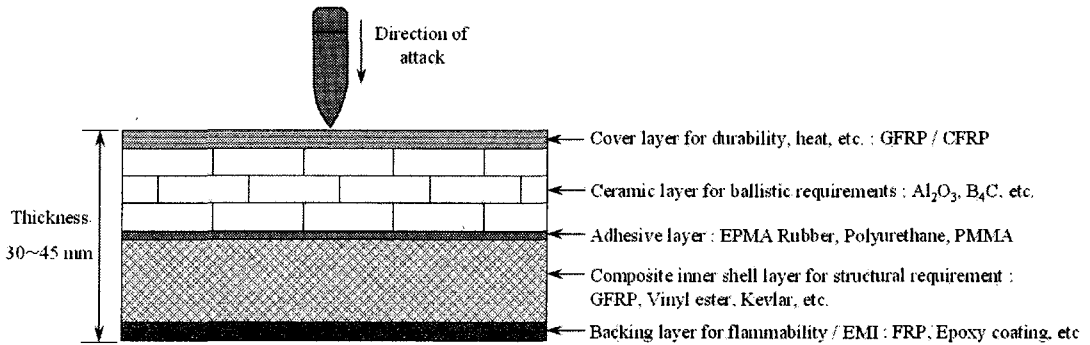


Fig. 2 Schematic diagram of typical ceramic composite armor

우수한 열 흡수성으로 운동에너지탄 뿐만 아니라 HEAT 탄과 같은 화학에너지탄에 대해서도 효과적인 방호를 제공할 수 있다. 장갑재료로 사용되는 세라믹으로는 알루미늄(Al_2O_3), 보론 카바이드(B_4C), 실리콘 카바이드(SiC), 티타늄 다이보라이드(TiB_2), 알루미늄 나이트라이드(AlN) 등이 있다. 각각의 세라믹 재료들은 비중, 면밀도, 탄성계수, 경도 등의 물성이 상이하여 위협요소에 따라 효과적인 재료를 선별하여 사용하여야 한다.

근래에는 우수한 특성을 부여하기 위하여 한종의 세라믹 재료에 다른 세라믹 입자를 첨가하여 복합세라믹을 제작하는 연구와 함께, 파열의 확산을 방지하기 위해 FGM 을 이용하여 경도는 높으나 부서지기 쉬운 세라믹 재료를 전면으로 하여 함량을 점차적으로 감소시키는 동시에 금속

분말 등의 재료함량을 증가시켜 후면으로 갈수록 경도는 낮아지나 강성과 인장은 높아지는 새로운 형태의 세라믹 재료가 개발되고 있다.

한편, 세라믹 장갑판은 판의 크기와 배치, 후면판과의 접합방법 등에 따라라도 상이한 방탄 효과를 나타낸다. 한 장의 비교적 큰 장갑판을 사용하여 부가장갑의 형태로 제작되기도 하며 비교적 작은 크기의 타일형태를 배열하여 장갑판을 구성하기도 한다. 세라믹 전면판과 후면 보강판의 접합은 고강도의 필름형 접착제나 에폭시 계열의 공업용 접착제를 사용하여 접착 시키기도 하는데, 섬유강화 복합재를 후면판으로 사용할 경우, 세라믹 판과 섬유강화 복합재를 일체형의 공정으로 성형시 높은 방탄효율을 보인다.

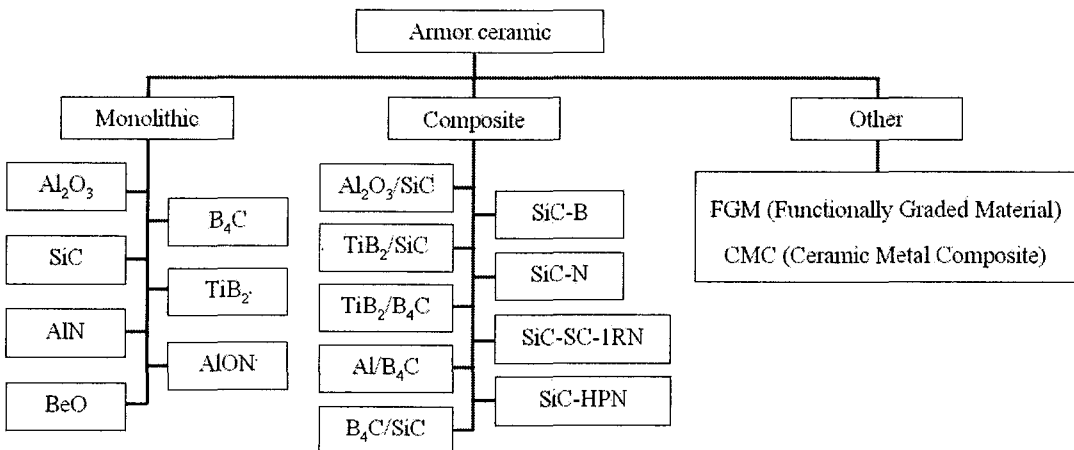


Fig. 3 Ceramic materials for armor

3.2 섬유강화 복합재료

전면 보강재, 후면재 또는 기능 부가층의 재료로 사용되는 섬유강화 복합재료로는 유리섬유, 탄소섬유, 케블라 섬유 및 고성능 폴리에틸렌 섬유 등이 사용되고 있다. 각각의 재료는 상이한 물성으로 장갑판의 보강재로 사용시 다양한 장단점을 보이는데, 전면 보강판의 경우 탄소섬유 복합재를 사용할 시 피탄속도의 감소와 충격후 양호한 강성을 보이거나 가격이 높으며 연속적인 피탄에 대하여 층간분리 현상이 발생하게 된다. 반면 유리섬유 복합재는 고속 피탄이 쉽게 관통되는 단점을 지니나 높은 밀도의 재료를 사용할 경우 충격속도 감소효과와 경제성을 도모할 수 있다. 이러한 이유로 유리섬유와 탄소섬유를 하이브리드로 적층하여 제작된 복합재를 사용하는 경우도 있다.

유리섬유 복합재의 경우 S-2 glass 의 밀도와 강도가 E glass 에 비하여 탁월하나 가격 또한 6 배 이상 높아 경제적인 측면을 고려하여 적절히 판단하여 사용되고 있다.

또한, 새로운 소재의 섬유강화 복합재를 개발하기 위한 노력도 활발하게 이루어지고 있다. 미국의 Boeing 사는 ATAK-MAT-2 라는 유리섬유 기반의 복합장갑재를 개발하여 케블라 섬유나 스펙트라보다 후면재의 층간분리를 현저히 감소시켰으며, 피탄능력을 15% 이상의 향상시키고, 생산단가를 35~50% 절감시키는 결과를 얻었다.

3.3 금속 재료 및 기타 재료

세라믹 복합장갑의 후면재로 주로 사용되는 사용되는 금속 장갑재는 강장갑 재료와 알루미늄 합금 등이 있다. 강장갑 재료로는 균질 압연장갑(RHA:Rolled Homogeneous Armor), 표면경화 강장갑(Face-Hardened Steel Armor) 등이 사용되고 있으나 근래에는 장비의 기동성을 보장하기 위한 경량화 추세로 알루미늄 합금으로 대체되고 있는 경향이다. 세라믹 복합장갑의 후면재로 주로 사용되는 알루미늄 합금은 2000 계열(Al-Cu 계)인 2024, 5000 계열 (Al-Mg 계) 5083, 6000 계열(Al-Mg-Si 계) 6061, 7000 계열 (Al-Zn-Mg 계) 7017, 7079 등이 있다.

이외에 세라믹 복합장갑에 사용되는 재료로는 세라믹으로부터 후면재로의 충격 압력의 확산을 최소화하기 위해 에틸렌 프로필렌 고무(Ethylene

propylene rubber, EPMA)나 폴리우레탄(Polyurethane), 아크릴(Poly methyl meta acrylate, PMMA) 등이 층간 충전물로 사용되기도 한다. 부가하여 난연 특성이 우수한 복합재를 장갑의 후면에 배치하여 화학에너지탄으로 인한 화재의 확산을 방지하거나 전자파 차폐 구조재를 전면, 또는 후면에 배치하여 전자파에 의한 간섭을 회피하고자 하는 노력도 시도되고 있다.

4. 세라믹 복합장갑의 관통기구

운동에너지탄의 탄자 고속충돌로 인한 장갑판의 응력은 압축으로부터 인장, 전단으로 전이된다. 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 설계되었다. 그러나 이러한 힘의 전달과 세라믹 장갑의 대응과정은 단순한 동역학적 차원의 접근으로는 현상을 명확히 설명하기 힘들며 장갑의 파괴형상도 복합적인 형상으로 발생하게 된다.

4.1 장갑의 파괴형상

운동에너지탄에 의한 장갑의 파괴는 탄자의 구경과 두께, 장갑재와 탄자의 재질 및 타격속도, 충격각도 등에 따라 부풀기(Bulging), 관입(Plugging), 관통(Penetration), 파열(Petalling), 후면 파쇄(Spalling), 파열(Fracturing) 등 다양한 형상을 보인다(Fig. 4).

부풀기는 비관통 소성변형시 나타나는 현상으로 접시 모양으로 장갑재가 부풀어 오르는 형상을 보이는 것을 말하며, 관입은 탄자의 운동에너지에 의한 전단력으로 인하여 장갑재를 후면으로 밀고 나가는 형태로서 완전관입시 장갑재는 천공(Punching) 형태로 장갑재의 후면으로 밀려나게 된다. 관통은 소성관통, 파면화관통 등이 있으며 육군 또는 해군에서 판단하는 관통의 한계는 다소 차이가 있다. 파열은 관입이나 관통의 과정에서 인장응력에 의하여 장갑재의 충돌 전면 또는 후면에 꽃잎(Petal)모양의 형상을 발생시키는 것이다. 후면파쇄는 탄자의 충돌에너지에 의한 입사응력과 장갑재의 반사응력과의 상충으로 인하여 전면 또는 후면의 장갑재가 파편화하여 조각처럼 떨어져 나가는 현상을 말한다.

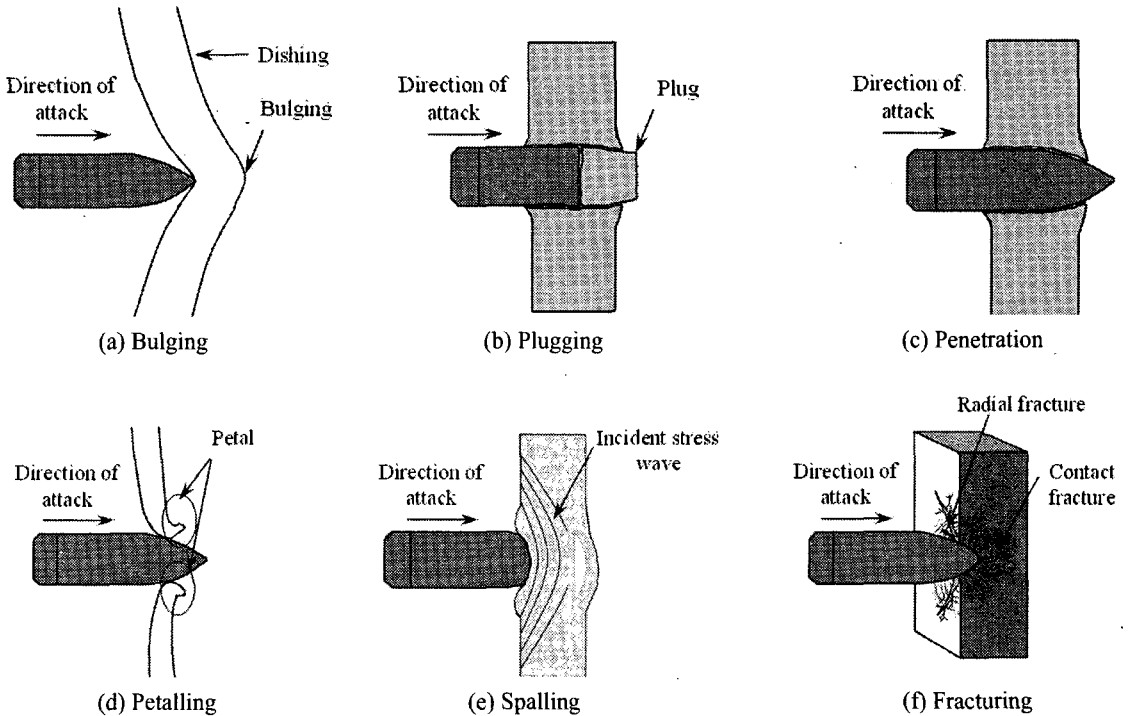


Fig. 4 Penetration mechanism of armor

파열은 탄두의 충격에 의하여 장갑재의 전면이나 후면 또는 내부에 균열이 발생하는 것을 말한다.

고속의 운동에너지탄에 의한 장갑의 파괴는 단일 형상으로 나타나는 것이 아니며 수십 μ s의 짧은 시간 동안 연속적으로, 또는 동시에 복합적인 형태로 발생한다.

4.2 장갑파괴 영향 요소

장갑의 파괴는 탄자와 장갑재의 충돌로 발생하게 되는데, 탄자의 최종탄도학적 요인과 장갑재의 재료 및 설계구조에 따라 방탄성능이 판단된다. 즉 장갑의 파괴현상은 탄자의 질량과 충격속도, 직경, 밀도, 길이, 형상, 타격각 등의 탄자 영향 요소와 장갑재료의 경도, 압축, 인장, 전단 강도와 강성, 밀도 등의 물성과 단일 또는 다층구조, 층상 배열 방법 및 두께 등의 구조에 따라 다양한 형태로 나타나게 된다. 장갑의 관통 거동에 영향을 미치는 요인을 Table 1에 정리하였다.

Table 1 Influence factors of penetration of armor

Projectile	Properties	Weight
		Caliber
		Length
		Shape
		Density
		Hardness
Terminal ballistics	Velocity	
	Impact angle	
	Impact area	
Armor	Material properties	Density
		Young's modulus
		Shear modulus
		Poisson's ratio
		Compression stress
		Hardness
	Armor plate	Size
		Thickness
		Lamination

이러한 장갑파괴 영향요소의 관계에 대하여 De Marre 와 Thompson 은 탄자가 수직으로 장갑판을 타격할 때의 관통현상을 일반 탄도 경험식을 통하여 식 (1)과 같이 간략히 나타내었다.

$$\frac{mV_L^2}{d^3} = \left(\frac{h_0}{d}\right)^n \quad (1)$$

이때, m 은 탄자의 질량, V_L 은 한계속도, d 는 탄자의 직경, h_0 는 장갑재의 두께이며 n 은 장갑재의 재료물성을 나타내는 특성값이다.

장갑의 설계시, 이러한 장갑의 파괴 영향요소를 분석함으로써 위협을 판단하고 최적의 장갑구조를 예측함으로써 보다 우수한 성능의 장갑을 개발할 수 있을 것이다.

4.3 세라믹 복합장갑의 파괴 거동

세라믹 복합장갑의 피탄시 거동은 통상 700~5000 m/s 의 범위인 중간속도 구역에서 발생하며, 유체역학적 유동(Hydrodynamic flow)과 동역학적 반발이 동시에 작용하게 된다. Fig. 5 와 같은 3 층형 세라믹 복합장갑의 경우, 전면 보강재는 탄자의 충격에너지를 감쇄시키고 세라믹 장갑재 전면의 파쇄현상 발생을 억제시키는 한편

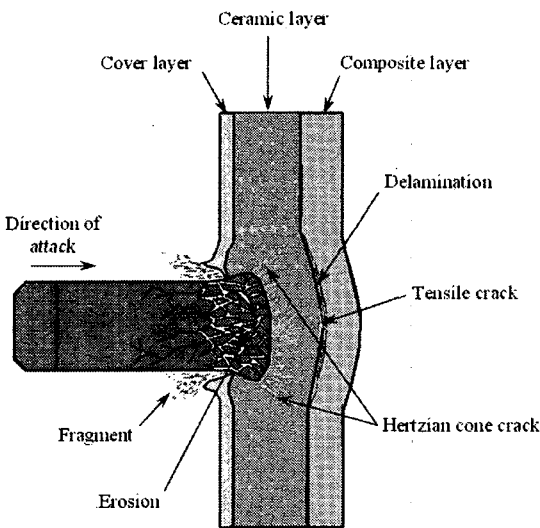


Fig. 5 Penetration of 3 layered ceramic armor

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 지연시키는 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 연신률이 있으며, 경량이라는 점에서 후면재로 적합한 재료라 할 수 있다.

이러한 세라믹 복합장갑의 파괴거동은 실험을 통하여 관찰이 가능하며, 이론적 모델의 컴퓨터를 이용한 계산으로 예측할 수 있다. 최근에는 이러한 고속충돌 및 파괴 모델을 해석 가능한 LS-DYNA, AUTODYN 과 같은 상용 유한요소해석 프로그램이 일반화되어 사용되고 있다.

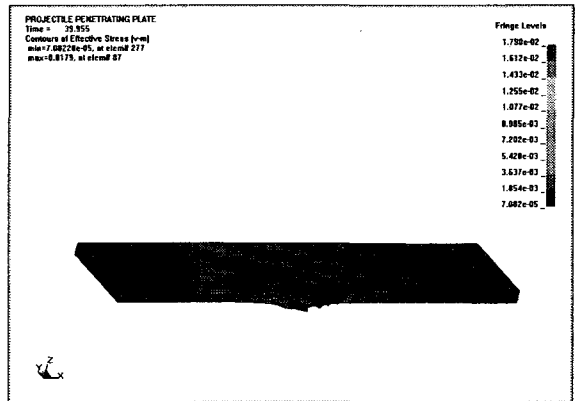


Fig. 6 Simulation results of LS-DYNA 3D

5. 결론

발표된 연구결과를 통하여 세라믹 복합장갑의 재료와 관통기구에 대하여 살펴보았다. 세라믹 복합장갑에 대한 연구는 세부 재료에 대한 연구뿐만 아니라 구조적 설계, 제작공정에 대한 연구 등 다양하게 수행되고 있는데, 연구동향을 통하여 세라믹 복합장갑의 설계지침을 간략히 아래와 같이 정리할 수 있다.

(1) 세라믹 복합장갑은 세라믹 전면재와 섬유강화 복합재 또는 금속 장갑재료를 이용한 후면재의 2 층형 구조를 기반으로 섬유강화 복합재로 세라믹의 전면을 보강하거나, 세라믹 전면재와 후면재 사이에 접착과 완충특성을 부여할 수 있는 충전재를 사용하는 등 다층의 구조로 확장되어 설계할 수 있다.

(2) 세라믹 복합장갑에 주로 사용되는 세라믹 재료로는 알루미나(Si_2O_3), 보론 카바이드(B_4C), 실리콘 카바이드(SiC), 티타늄 보라이드(TiB_2), 알루미늄 나이트라이드(AlN) 등이 있으며, 이들 세라믹 재료들은 탄성계수와 비중, 면밀도, 경도 등 장갑재료에서 요구되는 물성이 상이하여 위협 요소에 따라 단일 재료로, 또는 적절히 조합되어 복합세라믹이나 FGM 등의 형태로 사용된다.

(3) 후면재는 섬유강화 복합재료나 알루미늄 합금, 강장갑재 등이 사용되는데 지속적인 고성능 섬유강화 복합재가 개발되고 있으며, 세라믹 복합장갑의 파괴거동 및 경량화 측면에서 볼 때 섬유강화 복합재를 선호하는 추세이다.

(4) 성형공정은 각각의 재료를 우수한 물성의 접착재료를 사용하여 접착하거나 VARTM 등의 방법을 통해 일체 성형하는 경우 등이 있으며, 일체형으로 제작시 접착방법으로 제작된 장갑보다 우수한 방탄효과를 나타내었다.

그러나 이와 같이 공개된 연구결과를 통하여 장갑개발 기술의 척도를 판단하는 것은 한계가 있다. 각 국가는 세라믹 복합장갑의 핵심설계 기술에 대하여 높은 등급의 비밀로 분류하여 철저히 관리하고 있기 때문에 세부적인 재료의

조성과 구체적인 설계형상을 도출하는 것은 불가능하다고 볼 수 있다.

장갑재료의 방탄특성에 대한 국내의 연구는 국방과학연구소와 육군사관학교⁵¹ 등의 군 관련 연구기관과 두산 인프라 코어, 삼성테크윈, 로템, 오리엔탈공업 등의 일부 업체를 중심으로 수행되어 왔는데, 연구결과는 특별히 공개 되지 않고 있다. 국내 민간 대학이나 연구소의 방탄 재료에 대한 연구도 상당히 미흡한 실정으로 서울대학교 강태진⁵¹ 교수팀의 섬유강화 복합재 관통특성 연구, 건국대학교 손세원⁵² 교수팀의 대인방호용 방탄재의 개발 연구 외에 고성능 세라믹을 개발하는 연구실이 일부 있으나 미국 등 군사 선진국에 비하여 상당히 저조한 실정이다.

이에, 군 전투원의 생명과 성공적인 작전의 수행을 위해서 세라믹 복합장갑 개발과 같은 핵심 국방기술에 대한 관심과 투자가 요망된다.

후 기

이 연구는 BK21의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Kim, H. J., "Ballistic Protection Engineering," Cheong Moon Gak Publishers, 2004.
2. Lee, H. J., "Rifle and Ballistics," Cheong Moon Gak Publishers, 1998.
3. Korea Military Academy, "Weapon engineering," Cheong Moon Gak Publishers, 1992.
4. Sadanandan, S. and Hetherington, J. G., "Characterization of Ceramic/Steel Ceramic / Aluminum Armours Subjected Oblique Impact," International Journal of Impact Engineering, Vol. 19, pp. 811-819, 1997.
5. Benloulo, I. S. C. and Sanchezgalvez, V., "A New Analytical Model to Simulate Impact onto Ceramic/Composite Armors," International Journal of Impact Engineering, Vol. 21, pp. 461-471, 1998.
6. 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.
7. Jovicic, J., "Modeling of the ballistic behavior of gradient design composite armor," *Composites : Part A*, Vol. 31, pp. 773-784, 2000.
 8. Mines, R.A.W., "A one-dimensional stress wave analysis of a lightweight composite armour," *Composite Structures*, Vol. 64, pp. 55-62, 2004.
 9. Chou, S. C., "Ballistic impact damage of s2 glass reinforced plastic structural armors," *Composites Science and Technology*, Vol. 58, pp. 1453-1461, 1998.
 10. Gama, B. A., "Aluminum foam integral armor : a new dimension in armor design," *Composite Structures*, Vol. 52, pp. 381-395, 2001.
 11. 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.
 12. Anderson, C. E. and Walker, J. D., "An analytical model for dwell and interface defeat," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 31, pp. 1119-1132, 2005.
 13. Shin, H. S., Oh, S. Y., Kim, D. K., Kim, C. W. and Chang, S. N., "Investigation on Fracture Behavior of Armor Ceramics Against HEAT Penetration," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 23, pp. 631-638, 2003.
 14. Rosenberg, Z. and Dekel, E., "On the role of material properties in the terminal ballistics of long rods," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 30, pp. 835-851, 2004.
 15. Rosset, W. S., "Patterned armor performance evaluation," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 31, pp. 1223-1234, 2005.
 16. Rosenberg, Z., Dekel, E., Hohler, V., Stilp, A.J. and Wever, K., "Hypervelocity Penetration of Tungsten Alloy Rods into Ceramic Tiles : Experiments and 2-D Simulations," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 20, pp. 675-683, 1997.
 17. 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.
 18. Sharma, M. M. and Amateau, M. F., "Processing of laminated hybrid ceramic composites," *Composites Part B*, Vol. 29, pp. 189-194, 1998.
 19. 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.
 20. Weber, K., Holmquist, T. J. and Templeton, D. W., "The Response of Layered Aluminum Nitride Targets Subjected to Hypervelocity Impact," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 26, pp. 831-841, 2001.
 21. Hubert, W., Meyer, J. and Kleponis, D. S., "Modeling The High Strain Rate Behavior of Titanium Undergoing Ballistic Impact and Penetration," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 26, pp. 509-521, 2001.
 22. Simha, C. H. M., Blesa, 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.
 23. Bao, Y., Su, S., Yang, J. and Fan, Q., "Prestressed ceramics and improvement of impact resistance," *Materials Letters*, Vol. 57, pp. 518-524, 2002.
 24. Arias, A., Zaera, R., Puente, J. L. and Navarro, C., "Numerical modeling of the impact behavior of new particulate-loaded composite materials," *Composite Structures*, Vol. 61, pp. 151-159, 2003.
 25. Forquin, P., Denoual, C., Cottenot, 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.
 26. Zhang, G. J., Ando, M., Yang, J. F., Ohji, T. and Kanzaki, S., "Boron carbide and nitride as reactants for in situ synthesis of boride-containing ceramic composites," *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 24, pp. 171-178, 2004.
 27. Goncalves, D.P., Melo, F. C. L., Klein, A. N., and Qureshi, H. A., "Analysis and investigation of ballistic impact on ceramic/metal composite armour," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 44, pp. 307-316, 2004.
 28. Yu. R. C., Ruiz, G. and Pandolfi, A., "Numerical

- investigation on the dynamic behavior of advanced ceramics," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 71, pp. 897-911, 2004.
29. Holmquist, T. J. and Johnson, G. R., "Modeling prestressed ceramic and its effect on ballistic performance," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 31, pp. 113-127, 2005.
 30. Lundberg, P. and Lundberg, B., "Transition between interface defeat and penetration for tungsten projectiles and four silicon carbide materials," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 31, pp. 781-792, 2005.
 31. Wang, B., "The behaviour of laminated composite plates as armor," *Materials Processing Technology*, Vol. 68, pp. 279-287, 1997.
 32. Nandlall, D., "Numerical simulation of the ballistic response of GRP plate," *Composites Science and Technology*, Vol. 58, pp. 1463-1469, 1998.
 33. Huang, X. G., Gillespie, J. W. J., Kumar, V. and Gavin, L., "Mechanics of integral armor: discontinuous ceramic-cored sandwich structure under tension and shear," *Composite Structures*, Vol. 36, pp. 81-90, 1996.
 34. Fellows, N.A. and Barton, P.C., "Development of impact model for ceramic-faced semi-infinite armour," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 22, pp. 793-811, 1999.
 35. Lee, M. and Yoo, Y. H., "Analysis of ceramic/metal armour systems," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 25, pp. 819-829, 2001.
 36. 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.
 37. Holmquist, T., Templeton, D. W. and Bishnoi, K. D., "Constitutive modeling of aluminum nitride for large strain, high-strain rate, and high-pressure applications," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 25, pp. 211-231, 2001.
 38. Hohler, V., Weber, K., Tham, R., James, B., Barker, A. and Pickup, I., "Comparative Analysis of Oblique Impact on Ceramic Composite Systems," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 26, pp. 333-344, 2001.
 39. Fritz, L., "Carbon, polyethylene and PBO hybrid fiber composites for structural lightweight armor," *Composite : Part A*, Vol. 33, pp. 211-231, 2002.
 40. Yadav, S. and Ravichandran, G., "Penetration resistance of laminated ceramic/polymer structures," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 28, pp. 557-574, 2003.
 41. Chin, E. S.C., "Army focused research team on functionally graded armor composites," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 259, pp. 155-161, 1999.
 42. Bendor, G., Dubinsky, A., Elperin, T. and Frage, N., "Optimization of two component ceramic armor for a given impact velocity," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 33, pp. 185-190, 2000.
 43. Wang, Z. and Nakamura, T., "Simulations of crack propagation in elastic plastic graded materials," *Mechanics of Materials*, Vol. 36, pp. 601-622, 2004.
 44. Jin, Z.H. and Dodds, R. H. Jr., "Crack growth resistance behavior of a functionally graded material: computational studies," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 71, pp. 1651-1672, 2004.
 45. Hall, I. W. and Den, M., "High Strain Rate Behavior of a Sic Particulate Reinforced Alumina Ceramic Matrix Composite," *Scripta Materialia*, Vol. 38, No. 4, pp. 667-674, 1998.
 46. Sherman, D., "Impact failure mechanisms in alumina tiles on finite thickness support and the effect of confinement," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 24, pp. 313-328, 2000.
 47. 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.
 48. Mahdi, S. and Gillespie, J. W., "Finite element analysis of tile-reinforced composite structural armor subjected to bending loads," *Composites : Part B*, Vol. 35, pp. 57-71, 2004.
 49. Pallone, A., Demaree, J. and Adams, J., "Application of nondestructive ion beam analysis to measure

- variations in the elemental composition of armor materials," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research : Part B, Vol. 219, pp. 755-758, 2004.
50. Kim, H. J., Yuk, J. I. and Lee, S. G., "Dynamic Failure Behavior of Ceramic / Fiber-Reinforced Composites under High Speed Impact Loading," Korean Journal of Materials Research, Vol. 7, No. 9, pp. 795-804, 1997.
 51. Kim, C., Kim, S. M. and Kang, T. J., "Energy Absorption Mechanism of Kevlar Multiaxial Warp Knitted Fabric Composite under Impact Loading," Journal of the Korean Society for Composite Materials, Vol. 11, No. 6, 1998.
 52. Sohn, S. W. and Hong, S. H., "Research Trends on the Ballistic Protection Materials and Development of Bullet-proof Helmet," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 19, No. 7, pp. 7-19, 2002.