한국정밀공학회지 제19권 제7호 (2002년 7월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 19, No. 7, July 2002.

◆특집◆ 방탄공학

방탄소재의 연구동향 및 방탄헬멧 개발

손세원*, 홍성희**

Research Trends on the Ballistic Protection Materials and development of Bullet-proof Helmet

Se Won Sohn*, Sung Hee Hong**

Key Words : Armour (장갑), Ballistic Protection(방호), Bullet-proof (방탄), Penetration mechanism (관통 기구), Protection ballistic limit (방호한계)

1. 서론

장갑재료(裝甲材料, armour)는 일반적으로 권총·소총등의 소구경화기(小口徑火器)로부터 전차 · 전함 등의 대구경화기(大口徑火器)에 이르기 까지의 다양한 적의 파괴무기로부터 방호하기 위해 특수합금의 강철이나 기타의 복합재료로 만들어진다. 공격무기가 발달되지 않았던 고대에는 동물의 가죽 · 털로 짠 두꺼운 천으로 화살이나 기타의 비상물(飛翔物)을 막았으며, 나폴레옹 시대에는 화포가 등장하였으나 그 위력이 약했으므로 군함도 60cm 정도 두께의 참나무판으로 막을 수 있었다. 화포의 성능이 발달한 19세기에는 주철판(鑄鐵板)으로 만든 갑철함(甲鐵艦)이 출현하였고, 합금술과 열처리법이 발전함에 따라 연철(鍊鐵) 위에 강철을 씌운 복합강철, 강철에 니켈·크롬을 합금한 특수강철 등 여러 종류의 장갑이 개발되었고, 오늘날은 강화플라스틱 · 알루미늄합금 · 티타늄합금 · 세라믹 등을 포함한 복합재료 등이 장갑재료로 쓰이고 있다.

이러한 장갑재료는 그 사용용도에 따라 Table 1에서와 같이 경장갑(輕裝甲, soft armor)과 중장갑(重裝甲, hard armor)으로 구분할 수 있다.

방탄(防彈, bullet-proof)은 주로 소구경의 화기나 권총등에 의한 방호를 목적으로 한다. 그 사용용도 또한 Table 2에서와 같이 산업용, 군사용으로 많은 연구가 이루어져 왔다. 현대 보병용 소화기가 개발됨에 따라 이에 대응하여 계속적으로 발전하여 왔다.

소구경화기에 대한 방호를 목적으로 하는 방탄과 관련된 재료나 메카니즘에 대한 연구는 그 특수성으로 인하여 주로 국가나 특정 연구소등에서 극히 제한적으로 연구되어 왔다.

본문에서는 장갑재료중 소구경화기에 대한 경량 방탄을 다루기 위한 탄도학(彈道學, ballistics), 관통 메카니즘(penetration mechanism), 방탄능력과 관련한 방호한계(protection ballistic limit), 방탄능력을 측정하기 위한 고속충격 시험장치(high velocity impact tester), 각국의 방호특성에 따른 규격(protection standard) 등을 기술하고, 현재 사용되고 있는 방탄재료와 더불어 세계최고 수준에 있는 국산 방탄 헬멧에 대한 연구동향을 중점적으로 살펴보고자 한다.

* 건국대학교 기계항공공학부
** 건국대학교 기계설계학과 대학원
Tel. 02-450-3468, Fax. 02-456-3460
Email sohn@konkuk.ac.kr
파괴역학, 복합재료의 방탄소재 분야에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다. 현 한국정밀공학회 기술이사.

Table 1 Soft and Hard Armor

	Body armour	Property protection
Soft Ballistics (textile structures)	Bullet or Fragment resistant vest	'Difficult areas' in vehicles to increase protection against fragments
Hard Ballistics (rigid structures)	Helmets, Rigid inserts for vests	Vehicles, Shelters, Helicopters

2. 방탄소재

2.1 장갑 재료

현재 사용되고 있는 장갑재료는 Fig. 1과 같다. 철갑장갑재중 단련장갑(鍛鍊裝甲, Wrought Armor)인 균질압연 장갑재(均質壓延裝甲材, RHA, Rolled Homogeneous Armor)는 높은 강도와 충분한 연성이 요구되어 ESR(Electroslag Remelted Process) 공법에 의해 제작된 강이 주로 사용된다. 표면경화 장갑재(SHPA, Surface Hardened Plate Armor)는 강표면을 침탄 및 질화 표면처리한 것으로 2차 세계대전 중 항공기의 외부재로 사용하였으나 제작이 힘들고, 취성파괴가 잘 일어나 근래에는 별로 사용하지 않는 재료이다. 주조장갑(Cast Armor)은 균질압연 장갑재보다 방호력이 떨어지나 복잡한 형상으로 제작이 용이하여 피탄각을 줄일 수 있는 장점 때문에 많이 사용한다.

비철장갑재인 알루미늄은 단위중량당 방호능력이 우수하여 장갑재료로 많이 사용되고 있으며, 1940년경 포병탄에 대한 전차의 파편방호용으로 개발되었다. Al5083합금 및 Al5456합금을 경화처리하여 M113 APC 장갑차에 사용하였으며, 철갑탄(AP, Armor Piercing) 방호용으로서 열처리가 가능한 Al 7049합금을 M551 Sheridan 전차의 외부판재로 사용하였다. 최근에는 대장갑 차량화기의 성능향상에 대응하기 위하여 방호력 증가와 기동성 향상이 요구되고 있어 현재의 미국과 영국 등에서는 기존의 Al5083 및 Al7039합금보다 방탄특성이 향상되고 내식성, 용접성이 더 우수한 신 Al 장갑재료인 Al2519합금과 Al7017합금이 개발되어 기존의 장갑재료가 1999년경부터 대체되는 단계에 있다.

1974년에 처음으로 미국에서 공업적인 생산이 시작된 타이타늄 소재는 산화성 분위기 및 환원성 분위기에서 그 내식성이 우수하다.

Table 2 Application group of ballistic protection

Target group	Civil	Police	Military
Application	VIP-cars, Vehicle for transporting money, door protection	Body protection (vests and helmets), armored vehicles, armored compartment for guards	body protection, vehicle protection, ship protection, aircraft protection
Test Standard Protection classes Rules	DIN 52290	Technical standards for vests	Special standards for direct shooting, military standard for fragments
Type of exposure	bullets, fragments	mainly bullets	mainly fragments

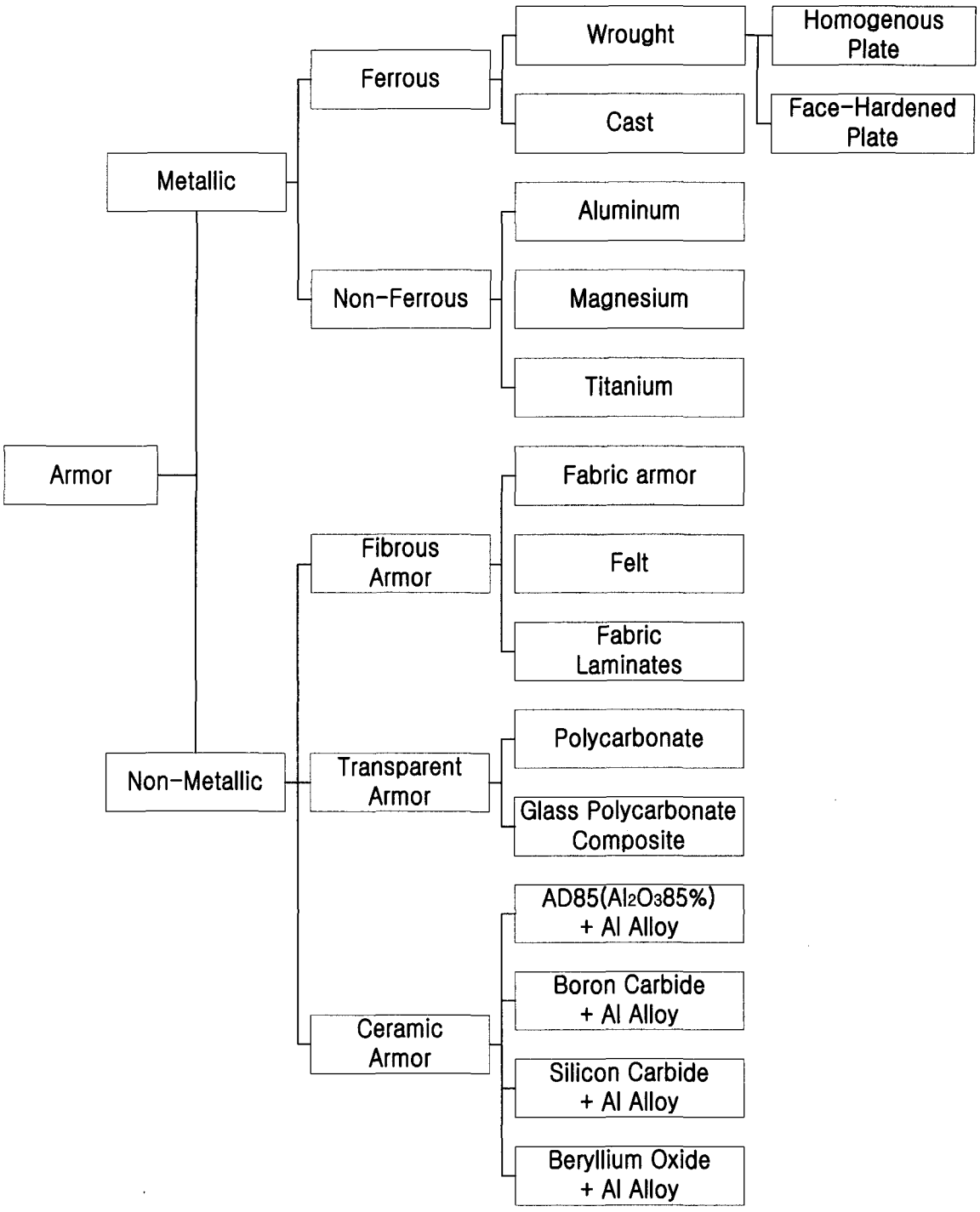

Fig. 1 Classification of Armor materials

특히 -200~600℃의 온도 범위에서 어떤 공업용 합금보다 비강도가 우수하여 무기체계 소재로서 매우 적합한 특성을 갖추고 있다. 현재 국내에서도 국방과학 연구소의 허[6] 등에 의해 아주 우수한 타이타늄 소재가 개발되어 이의 검증을 실시하고 있다.

섬유장갑재는 1930년초 나일론 섬유(Nylon fiber)를 사용한 이래로 유리 섬유(Glass fiber), 아라미드 섬유(Aramid fiber), 폴리에틸렌 섬유(Polyethylene fiber)등을 기지재료인 수지로 성형한 섬유강화 복합재료가 장갑재료로 이용되고 있다. 2차 세계대전중 미 해군에서 유리섬유강화 복합재료를 전투 헬멧용으로 사용한 이후 최근에는 경량 전투차량 및 지휘차량, 헬기 방탄재 등에 사용되고 있다. 지금까지 알려진 바에 의하면 장갑용 섬유강화 복합재료로는 S-2 유리섬유와 폴리에스테르 수지, 아라미드 섬유인 케블라(Twaron®)와 페놀수지, 폴리에틸렌 섬유인 다이니마(Dyneema®)나 스펙트라(Spectra®)와 비닐 에스테르 수지등의 강화재와 기지재료간의 조합 등이 개발 및 응용되고 있다. 이러한 섬유강화 복합재료의 방탄기구는 탄자의 운동에너지가 서로 치밀하게 짜여진 섬유 조직체의 인장 및 압축 등의 변형에너지로 변환되어 흡수, 됨으로써 이루어진다고 알려져 있다.

다음의 Fig. 2는 헬리콥터의 조종석의 장갑재를 도시하며, 전면재료로는 세라믹(Al_2O_3, SiC 등)이 사용되며, 후면재료로는 아라미드나 폴리에틸렌등이 사용되고 있다.

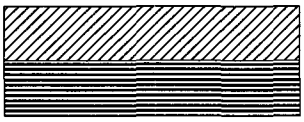

Fig. 2 Schematic diagram of pilot's seat armor in helicopter

세라믹 재료는 강성과 경도가 높고 취약하나 압축강도가 크고 열흡수성이 우수하여 운동에너지탄 및 화학에너지탄을 방호하기 위한 장갑 전면재로 사용되고 있다. 이와 같이 세라믹을 전면에 두고 후면에 Al 합금 또는 섬유강화 복합재료를 접착한 세라믹 복합재료 장갑은 최신형 장갑차의 외부재로 연구 개발되고 있다.

투명 장갑재료는 투명하면서도 우수한 관통저항능력을 갖는 재료로서 VIP용 자동차의 유리, 계기 보호용 및 전차 승무원, 화학실험용 차량, 경찰 시위진압대원용 방패 및 보호안경 등에 많이 사용되고 있다.

2.2 장갑 재료의 요구조건

방탄재료는 탄도학적으로 관입 및 관통에 대한 저항성, 균열(cracking)이나 파괴됨이 없이 비교적 큰 구경의 철갑탄(AP, armor piercing)이나 고폭탄(high explosive)의 폭발(explosion)에 의한 에너지를 장갑이 흡수하려는 성질인 충격(shock)에 대한 저항성, 균열이나 조각으로 파열(flaking)되거나 또는 분리하여 떨어져 나가는 분리절단(break away)형의 파괴가 일어나지 못하도록 하는 파쇄(破碎, spalling)에 대한 저항성과 인성이 요구된다.

3. 기본이론 및 위협요인

3.1 탄도학

고전적 탄도학은 17세기 초에 G.갈릴레이와 I. 뉴턴으로부터 시작되었고, 18~19세기에 걸친 총포의 발달과 함께 빠르게 진보하였다. 탄도학은 처음 투척물이나 투하물체에 대한 연구로부터 시작되었고, 오늘날은 총포탄 · 항공기용 폭탄 · 로켓 등의 군용 비상체를 주요 연구대상으로 한다. 또한 최근에 우주선 · 인공위성과 같은 우주 비상체가 출현하면서부터는 그에 대한 궤도 연구와도 밀접한 관계를 가지고 있다.

항공역학과 탄도학 사이에는 유사점이 많아서 한계를 명확히 구분하기가 어려우나, 일반적으로 항공 역학은 대기 속에서의 비상체를 중심으로 하여, 공기가 그 비상체에 끼치는 여러 현상을 연구하는 학문이라고 할 수 있고, 탄도학은 주로 관성에 의해서 비행하는 물체를 중심으로 하여, 그 비상체에 미치는 외부로부터의 모든 영향을 연구하는 학문이라고 할 수 있다. 따라서 탄도학에서 취급되는 외부의 영향은 대기권 내와 공기가 없는 대기권 외의 것까지 포함하게 된다. 탄도학은 탄도의 구분에 따라서, 강내 탄도학(interior ballistics), 강외 탄도학(exterior ballistics), 천이 탄도학(transition ballistics), 최종탄도학(terminal ballistics) 등으로 구분해서 연구되어 왔다. 그러나 최근에는 탄도미사

일, 로켓의 발달, 우주선 · 인공위성의 출현 등으로 응용분야가 확대되어 가고 있다.

강내탄도학(interior ballistics)은 추진제의 연소로 발생한 추진가스의 힘을 받는 동안 강내에서 움직이는 운동특성을 연구하는 운동역학의 한 분야이며, 강외탄도학(exterior ballistics)은 탄자가 총구 또는 포구를 떠나 어떤 매개체를 통하여 목표물까지 비행하는 동안 탄자의 운동특성을 연구하는 분야이다. 천이탄도학(transition ballistics)은 탄자가 약실에서부터 이동을 시작하여 총구를 떠난 후 수 밀리초(ms) 동안 총구 근방에서 일어나는 여러 가지 복잡한 현상과 그 효과에 대하여 연구하는 분야이며, 최종탄도학(terminal ballistics)은 표적에 대한 무기의 효과에 의한 분석과 종합은 물론 요구하는 무기의 효과를 나타내도록 탄약을 설계하는 제반 원리를 연구하는 분야이다.

3.2 위협요인

전장에서의 대표적 사상원인을 살펴보면 Table 3과 같이 대부분의 경우가 파편에 의한 것이며, 파편의 중량별로 살펴보면 135mm L5A1 폭탄의 경우 Table 4에서와 같이 1.0g 이하의 세열파편이 전체 파편의 77% 이상을 차지한다.

Table 3 Typical causes of military casualties in general warfare

element	Ratio(%)
Fragments	59
Bullets	19
etc	22

Table 4 Exposure to Fragments in 135mm L5A1 artillery grenade

Fragment Weight(g)	Ratio(%)
0.1～1.0	77
1.0～10.0	21
10.0～140.0	2

이러한 세열파편의 속도분포에 의한 사상누적율을 살펴보면, Table 5와 같이 파편의 속도가 530m/s 이상 되는 경우 사상누적율이 90%가 넘음을 알 수 있으며 이를 통하여 표준위협상태는 파편의 무게 1.0g, 파편의 속도는 530m/s 이상임을 알 수 있다.

Table 5 Lethal injury ratio by fragment velocity

fragment velocity(m/s)	cumulative lethal injury ratio(%)
50 ~ 380	50
50 ~ 450	75
50 ~ 530	90
50 ~ 620	92
50 ~ 760	95
50 ~ Infinite	100

4. 관통기구(Penetration Mechanism)

4.1 비관통 소성변형

총구를 떠난 탄자가 목표물에 도착하게 되면 관입(貫入) 또는 관통(貫通)을 하게 된다. 이때 관입이란 탄이 장갑판을 통과함이 없이 그 속에 들어와 박혀있는 상태를 말하며, 관통은 탄이 장갑판을 완전히 통과한 상태를 말한다.

두께가 얇은 표적판에 끝이 평면으로 이루어진 막대(rod)가 관통하지 못하고 단지 충돌만 하였을 때에 발생하는 파괴모드(failure mode)로, Fig. 3과 같이 타격된 지점의 표적판 뒷면에 발생하는 볼록(bulge) 현상과 표적 뒷면에 굽힘에 의해서 타격점으로부터 밀려나와 생기는 오목(dish) 현상이 있다.

막대(rod)의 타격속도를 점점 증가시키면 최초에는 탄성변형만 일어나다가 나중에는 소성변형이 일어나고 최종적으로는 파괴가 발생한다.

표적의 두께를 점점 증가시키면 볼록과 오목현상은 점점 감소하고 많은 굽힘이 일어나지 않으면서도 응력의 집중으로 충격자가 표적판을 파고 들어가 탄환구멍(crater)이 발생한다.

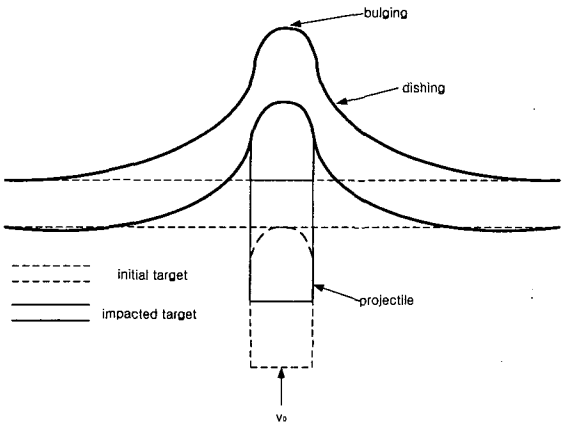

Fig. 3 Bulging and Dishing

또한 일반적으로 고강도 섬유강화 복합재료와 고강도 금속의 복합재료 방탄재에서 탄자가 고강도 금속을 관통할 때 탄자의 속도를 급격히 떨어뜨려 표적판 후면에 볼록과 오목현상이 발생한다.

표적이 손상되는 면적을 나타내는 손상영역크기(damage zone size)는 재료의 성질, 탄자의 구경, 탄자의 속도, 표적판의 두께 및 타격각도에 따라 크게 달라지며 섬유강화 금속적층 복합재에서는 표적판 후면의 볼록과 오목현상뿐만 아니라 때에 따라서는 뒷면의 섬유강화 복합재료 층에 딜라미네이션(delamination)과 디본딩(debonding)이 발생하는 경우가 있다.

4.2 파괴 형상(Fracture mode)

두께가 얇거나 중간 두께의 표적판이 완전관통할때 주로 재료의 물성치, 충격자의 형상 및 타격속도에 크게 영향을 받으면서 파괴가 발생한다.

이 경우 Fig. 4에서 보는 바와 같이 최초의 압축파로 일어나는 압축파괴(compression fracture), 반경방향의 방사형 파괴(radial fracture), 조각 파쇄(spal), 딱지 파쇄(scabbing), 플러그(plug), 표적판의 전면과 후면에서의 파엽(petalling), 연성구멍확장(ductile hole enlargement) 및 취성재료인 경우에 발생하는 세열파편(fragmentation)도 함께 발생한다.

초기응력파에 의한 파괴는 극한 압축응력 σ_{uc} (ultimate compressive stress)보다 큰 응력파가 발생하였을 때 발생하는데, 경량의 표적판(low density target)에서 발생한다. 반경방향의 파괴는 인장강도가 압축강도보다 훨씬 작은 세라믹(ceramic) 계통의 표적판에서 발생한다. 조각파쇄는 초기의 압축파가 표적후면 경계면에서 반사되어 압축파가 인장파로 바뀌면서 응력파의 중첩으로 인한 인장파괴모드(tensile failure mode)가 형성되어 발생하며, 이는 탄자가 표적에서 폭발하는 경우에 대부분 발생한다.

딱지파쇄는 조각파쇄와 비슷한 현상이나 표적의 표면이 압연등으로 인하여 등방성(isotopic)을 상실하였거나 또는 재료의 성질이 균일하지 못한 경우에 국부적으로 조각을 형성하여 딱지모양으로 떨어져나가는 것이다. 플러그는 전단응력에 의하여 파괴가 일어나는 것으로 탄자의 직경과 거의 같은 크기의 슬러그(slug)가 탄자와 함께 표적후면으로 빠져나가는 것이다.

전단응력과 변위에 의하여 발생한 열은 순간적으로 퍼져나가지 못하고 좁은 환형띠(narrow annulus) 내에 정체되므로, 국부적으로 발생한 열에 의한 온도상승으로 인하여 그 부분에서 재료의 강도는 떨어지고 그의 안정도(stability)는 잃게 된다. 이것을 단열전단 파괴모드(adiabatic shearing failure mode)라고 한다.

플러그 파괴는 끝이 뭉툭한 충격자(blunt

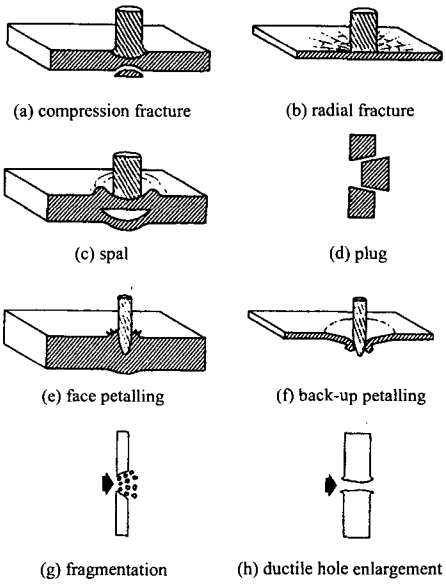

Fig. 4 Typical Failure(Penetration) Modes of Impacted Plates

penetrator) 로 얇거나 중간두께의 견고한 표적판을 타격할 때 주로 발생하는데 타격속도와 타격각에 크게 영향을 받는다. 파열은 충격자의 입구(lip) 근방에서 초기 응력파가 지나간 후에 반경과 원주방향의 인장응력에 의하여 발생한다. 이는 충격자가 앞으로 미는 표적판의 전진운동에 의하여 발생한 굽힘응력으로 인하여 생긴 소성변형으로 발생하는 것이다. 플러그파괴는 둥글거나 원추형으로 생긴 탄자를 느린 속도로 타격시키거나, 끝이 뭉툭한 탄자를 탄도한계속도(ballistic limit)로 얇은 표적판을 타격시킬 때 주로 발생한다. 탄자가 앞으로 전진함에 따라 표적 후면의 돌출현상은 더욱 커지고 재료의 인장강도의 한계를 넘어 별모양의 균열(star-shaped crack)이 발생하여 표적후면의 파열이 형성된다.

연성파괴(ductile failure)와 조각파쇄는 경도가 낮은 중간두께의 표적판에서 주로 많이 발생한다. 이외에도 표적의 손상은 탄자의 파열 또는 탄자의 변형등에 의해서도 크게 달라지며, 특히 성형장약의 분출물은 탄환구멍을 주로 형성한다.

5. 방호한계 측정 방법

어떠한 충격위협에 대해서도 방호 표적재로서 충분한 두께의 재료층을 사용한다면 방호가 가능하다. 그러나 실제적으로는 장갑의 중량과 크기에 제한성이 있어 사용조건에 따라 장갑의 방호한계 및 규격이 설정된다. 이에 따른 장갑의 최적 설계조건을 찾고자하여 방호성능을 평가한다.

장갑의 방호성능이란 탄자의 관통에 저항하는 장갑능력이며, 이 성능은 탄의 종류, 충격속도 및 탄두의 형상과 장갑재료의 성질, 규격 및 지지점의 위치등에 따라 결정된다. 그러나 일반적으로 장갑의 방호성능은 일정한 충격위협에 대한 장갑의 피해를 정량적으로 측정하여 이를 비교치로 삼고 있다. 장갑의 파괴는 선정된 충격위협에 장갑이 완전관통하였느냐, 혹은 부분관통하였느냐로 구분하며 그 기준은 Fig. 5와 같다.

방탄성능이란 관통에 대한 저항능력, 충격에너지 흡수능력을 말하며, 그 측정방법으로는 50% 확률의 완전관통을 하는 경우의 충격속도를 이용하는 방호탄도한계(Protection ballistic Limit) 측정방법과 50% 확률의 완전관통을 하는 경우의 피탄각도를 이용하는 방호탄도 임계각도(θ_{50}) 측정방법, 그리고 기준장갑 관통저항에 대비한 상대적 관통 저항능력인 방호효율(Ballistic Efficiency) 측정방법과 같은 방법이 있다.

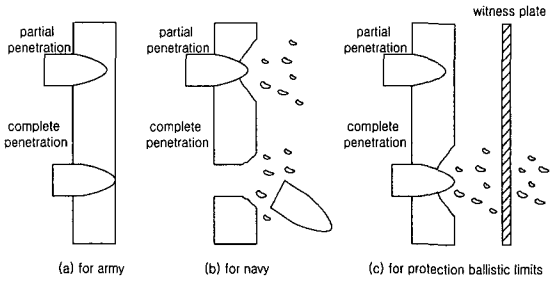

Fig. 5 Penetration mode by criteria of the army, navy and protection ballistic limits

5.1 방호탄도한계(Protection ballistic limit) 측정방법: 50% 완전관통 충격속도

가장 보편적인 방호성능 측정방법으로서 운동에너지탄이 장갑을 완전관통하거나 부분관통하는 확률이 동일한 충격속도(50% 완전관통할수 있는 충격속도, V_{50})를 방호탄도 한계(protection ballistic limit: V_{50})라고 정의한다.

방호성능의 측정방법은 충격탄이 장갑을 완전관통하거나 부분관통하는 확률을 가지고 측정하는 방법으로, Fig. 6에서와 같이 V_{10}은 10%의 관통확률과 90%의 미관통확률을 가진 것이며, V_{90}은 90%의 관통확률과 10%의 미관통확률을 나타낸다.

이 한계는 일정한 표적장갑의 두께와 피탄각(obliquity: 충격면에서의 장갑면에 대한 법선과 동일점에서의 탄도에 대한 접선간의 각)에 대하여 추진제의 양을 조절하여 충격속도를 변화시키면서 탄도실험을 행하여 얻는다. 이때 충분한 횟수의 탄도실험을 행하여 반드시 완전 및 부분관통이 섞여서 일어나는 속도범위인 혼합속도범위(ZMR: zone of mixed results) 즉, 완전관통이 일어나는 최고속도와 부분관통이 일어나는 최저속도의 차이를 어느 범위내로 구하여야 한다.

혼합속도범위가 어느 정도 이하가 되는 조건을 구하는 실험방법으로는 다양하나 일반적으로 높낮

이(up-and-down) 방법을 사용한다.

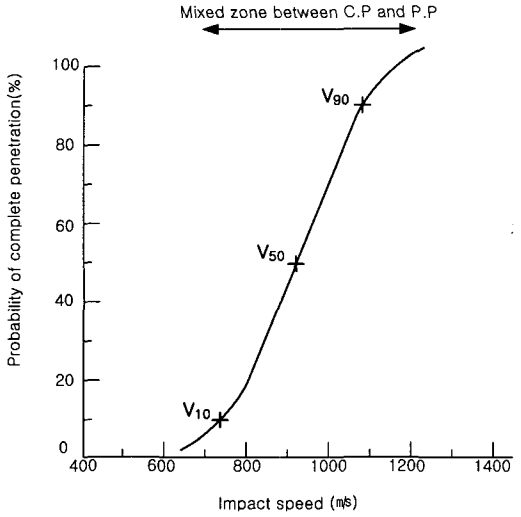

Fig. 6 Definition of Protection Ballistic Limits (V_{50})

5.2 고속충격시험(High velocity impact test)

충격속도는 크게 저속(low, <30m/sec), 고속(high, 30-240m/sec), 탄도(ballistic, 240m/sec이상), 초고속(hypervelocity, <15,000m/sec) 충격속도의 네가지 범위로 분류하며, 장갑재료는 240m/s 이상의 총에서 발사된 총알과 같은 상황을 포함하는 탄도충격을 받는다

고속충격에 대한 방호성능을 측정하기 위하여 Fig. 7과 같은 장치를 사용하여 방호성능과 파괴모드를 측정한다.

고속 충격탄 관통실험장치를 설치하고 총열로부터 123.12cm 떨어진 지점에 속도측정을 위하여 Fig. 8과 같이 1번 탄도스크린(Ballistic Screen)을 설치한 후 다시 91.44cm 떨어진 지점에 2번 탄도스크린을 설치한 후 다시 3번 탄도스크린을 91.44cm 떨어진 지점에 설치한다. 3번 탄도스크린에서 72cm 떨어진 지점에 시험편을 놓고, 시험편에서 15.2cm 떨어진 지점에 알루미늄 확인판을 놓고 확인판에서 20cm 떨어진 지점에 커버상자(recovery box)를 설치한다.

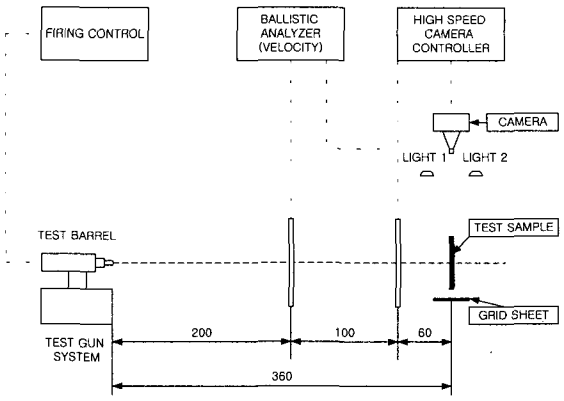

Fig. 7 Schematics of the ballistic impact experimental device setup for test materials

총열을 지지하고 있는 탄자 발사대인 거총대는 Fig. 9와 같이 Aerolab. Supply Co.에서 제작한 거총대(mount)를 사용하고, 총열은 오스트리아 AVL사(社)의 5.56mm의 소총 총열을 사용하며 사용된 탄자는 5.56mm ball탄을 사용한다. Fig. 10과 같은 미국 Hewlett Packard사의 디지털 오실로스코프와 미국 MV Ordance사의 model 4010P 크로노그래프(chronograph)를 사용하여 탄자의 속도를 측정한다.

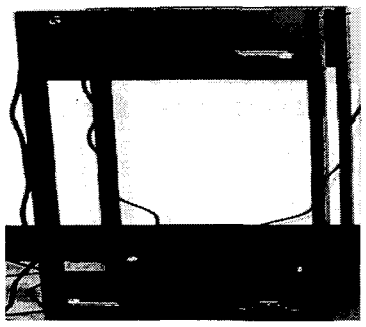

Fig. 8 Ballistic screen

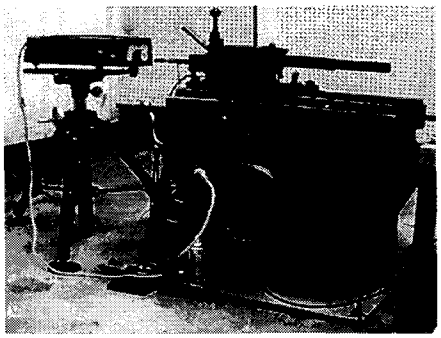

Fig. 9 Mount

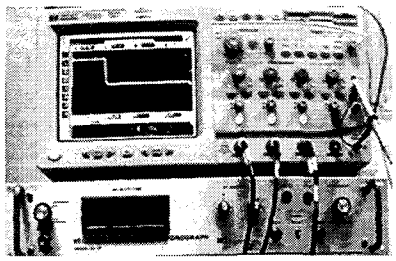

Fig. 10 Digital oscilloscope and velocity computing chronograph

6. 방탄헬멧(Bullet-proof helmet) 제작용 소재

현재 연구개발중인 방탄 헬멧(Helmet) 제작용 소재는 크게 다음의 4분야로 구별된다.

1. 나일론 섬유(Nylon Fiber)
   : 나일론 섬유 + 열경화성수지
2. 아라미드 섬유(Aramid Fiber)
   : 아라미드 섬유 + 열경화성수지
3. 고성능 폴리에틸렌 섬유(HPPE Fiber)
   : HPPE + 열가소성수지
4. 혼성 복합재료(Hybrid Composite materials)
   : Aramid + HPPE

이러한 섬유강화 플라스틱(FRP, Fiber Reinforced Plastic)의 관통능력은 저속의 탄자나 파면에 대하여는 그의 방호능력이 매우 양호하지만 탄자나 파편의 속도가 증가할수록 그의 관통저지능력은 급격히 감소한다. 그러므로 비교적 낮은 속도의 파편의 방호를 주임무로 하는 방탄복이나 헬멧용으로는 우수한 성능을 발휘하지만 고속의 탄자, 더욱이 관통을 위주로 개발된 AP계통의 방호를 실시하여야 되는 차량계통이나 헬리콥터의 방탄재료로 사용되기는 KRP를 제외하고는 적합하지 않은 것으로 알려져 있다.

또한, 고속의 탄자를 방어할 목적일 경우에는 FRP에 세라믹을 보강하여 사용하는 겨우 우수한 관통저지능력을 발휘하는 것으로 알려져 있으나 고속 충격 후 탄자의 속도와 판재의 두께에 따라 세라믹이 부서져 떨어져 나가는가 하면 층이 이격되거나 후면에서 볼록현상도 발생하는 문제를 해결해야 하는 연구가 필요하다.

폴리에스터를 사용하는 유리섬유 복합재료나 GRP는 적은 단면밀도를 가지면서도 가격이 저렴하고 관통저항능력이 우수하여 저속탄자나 파편의 관통방지를 위한 다용도목적으로 널리 사용될 것으로 판단된다.

중량이 문제가 되는 저속용 방탄재에서는 아라미드섬유가 가격은 비교적 높지만 단면밀도가 가장 작기 때문에 아라미드 섬유를 사용한 아라미드 섬유강화 플라스틱(AFRP)이 많이 사용될 것이다.

금속 장갑재에서는 파엽, 연성구멍확장, 플러그 및 조각파쇄 현상이 뚜렷이 나타나지만, 비금속장갑재에서는 플러그현상 외에는 기타 현상이 잘 나타나지 않는다. 저속의 탄자에서는 오목이나 볼록현상이 잘 나타나고, 어떤 경우에는 섬유인출 및 층의 이격현상이 발생한다. 고속의 경우는 표적의 손상면적 즉 손상크기가 탄자의 단면적에 비하여 그리 크지 않다.

마지막으로 고속충격시 금속의 소성변형으로 힌한 탄자의 충격에너지를 흡수하면서도, 그 구조를 유지하며 충분한 강성을 가질 수 있는 고강도 금속과 고강도 섬유를 강화한 섬유강화 금속(FRM, Fiber Reinforced Metal)을 장갑재료에 적용하는 연구 또한 활발하게 진행중이다.

7. 각국의 방호규격(Protection standard)

일반적으로 방탄헬멧이나 방탄조끼의 방호규격은 Table 6, Table 7과 같은 미 법무성(NIJ, National Institute of Justice)의 US 규격을 사용하며, 유럽의 경우 Table 8과 같은 통일된 규격을 사용한다.

Table 6 NIJ STANDARD-010601.01 (Helmet)

Armor Type	Test Bullet	Bullet Weight	Minimum Velocity (± 50 ft/s)
I	22 LRHV LEAD	2.6g (40gr.)	320m/s (1050ft/s)
	38 RN LEAD	10.2g (158gr.)	259m/s (850ft/s)
IIA	9㎜ FMJ	8.0g (124gr.)	332m/s (1090ft/s)
	357 Magnum JSP	10.2g (158gr.)	381m/s (1250ft/s)
II	9㎜ FMJ	8.0g (124gr.)	358m/s (1175ft/s)
	357 Magnum JSP	10.2g (158gr.)	425m/s (1395ft/s)

Table 7 NIJ STANDARD-010601.01 (Vest)

Armor Type	Test Bullet	Bullet Weight	Minimum Velocity (± 50 ft/s)
I	22 LRHV LEAD	2.6g (40gr.)	320m/s (1050ft/s)
	38 RN LEAD	10.2g (158gr.)	259m/s (850ft/s)
IIA	9㎜ FMJ	8.0g (124gr.)	332m/s (1090ft/s)
	357 Magnum JSP	10.2g (158gr.)	381m/s (1250ft/s)
II	9㎜ FMJ	8.0g (124gr.)	358m/s (1175ft/s)
	357 Magnum JSP	10.2g (158gr.)	425m/s (1395ft/s)
IIIA	9㎜ FMJ RN	8.0g (124gr.)	427m/s (1400ft/s)
	44 Magnum JSP	15.6g (240gr.)	427m/s (1400ft/s)
III	7.62㎜ NATO DMJ	9.6g (148gr.)	838m/s (2750ft/s)
IV	.30 caliber M2 AP	10.8g (166gr.)	869m/s (2850ft/s)

Table 8 CEN - European Standard (part1)

Class	Weapon	Calibre	Ammunition type	mass (g)	Applying test conditions: test range (m) +/-0.005	striking velocity (m/s) +/-10	no. of strikes	striking distance (mm) +/-10
BR1	rifle	.22 lr	RN/lead	2.6	10.00	360	3	120
BR2	hand gun	9mm para	FJ[2]/RN/SC	8,0	5.00	400	3	120
BR3	hand gun	.357 magnum	FJ[2]/CB/SC	10.2	5.00	430	3	120
BR4	hand gun	.44 magnum	FJ[4] /FN/SCP	15.6	5.00	440	3	120
BR5	rifle	5.56 × 45	FJ[4] /PB/SC	4.0	10.00	950	3	120
BR6	rifle	7.56 × 51	FJ[2]/PB/SC	9.5	10.00	830	3	120
BR7	rifle	7.56 × 51	FJ[4] /PB/HC	9.8	10.00	820	3	120

RN -Round Nose
FN -Flat Nose
CB -Coned Bullet
SC -Soft Core with Lead
SCP -Soft Core with Lead and Steel Penetration(type SS109)
PB -Pointed Bullet
HC -Steel Hard Core,mass[1] -3.8, hardness more than 63 HRC
FJ -Full Metal Jacket Bullet

[1]nominal value, tolerance +/-0.1g
[1]Full Steel Jacket (Tombak Plated)
[1] Full Steel Jacket
[1] Full Tombak Jacket

Class	Weapon	Calibre	Ammunition type	mass[1] (g)	Applying test conditions: test range (m) +/-0.005	striking velocity (m/s) +/-10	no.of stikes	striking distance (mm) +/-10
SG1	shot gun	cal.12/70	solid lead slug[2]	31.0	10.00	420	1	
SG2	shot gun	cal.12/70	solid lead slug[2]	31.0	10.00	420	3	125

[1]normal value, tolerance +/-0.1g
[2]brenneke

8. 결론

방탄장갑 및 방탄헬멧의 개발에 관한 지금까지의 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 방탄장갑재는 종래의 주종을 이루었던 철갑장갑재에서 현재는 비중이 가벼운 알루미늄 합금 또는 타이타늄 합금등의 장갑재로 대치되고 있으며, 현재에도 높은 강도와 인성을 갖는 알루미늄 합금의 경금속 장갑재가 계속적으로 연구 개발되어 대치되고 있다.

2. 알루미늄 합금보다 면밀도가 우수한 타이타늄 합금의 방탄재료가 차세대의 재료로 각광받고 있으며, 이에 대해 세계 각국에서 계속적으로 연구 개발되고 있다.

3. 섬유강화 플라스틱(FRP)에서 고속탄자에 대한 저항성은 유리섬유강화 플라스틱(GFRP), 아라미드섬유강화 플라스틱(AFRP), 폴리에틸렌섬유강화 플라스틱(PFRP)이 우수한 방탄성능을 보이므로 점차적으로 섬유강화 복합재료의 역할이 증대되어 갈 것으로 기대된다.

4. 섬유강화 플라스틱(FRP)의 관통능력은 저속에서는 우수함을 보이나 고속에서 그 능력이 감소하여 금속과의 복합재료(FRMLs, Fiber Reinforced Metal Laminates)를 개발하여 나간다면 우수한 방탄효과를 기대할 수 있다.

참고문헌

1. B. Wang, S. M. Chou, "The Behavior of laminated composite plates as armour," Journal of Materials Processing Technology 68, pp. 279-287, 1997.
2. Jie Xiong, Bohong Gu, Shan-yuan Wang, "An Investigation into ballistic impact property of aramid fabric laminated composite," pp. 937-938, 1997.
3. Zahid I. Baig and Vinay Dayal, "Effect of Ballistic Impact Damage on thin and thick composite," pp. 219-220, 1997.
4. B. Wang, S. M. Chou, "The Behavior of laminated composite plates as armour", Journal of Materials Processing Technology 68, 279-287, 1997.
5. Jack R. Vinson, Jeffrey M. Walker, "Ballistic Impact of Thin-Walled Composite Structures," AIAA Journal, Vol. 35, No. 5, pp. 875-876, May 1997.
6. 허선무, 심인옥, 천창환, "타이타늄 합금 방탄재 적용현황과 제조기술," 재료마당, 제13권, 5호, pp. 34-43, 2000.
7. Roger L. Ellis, F. Lalande, Hongyu. Jia and Craig A. Rogers, "Ballistic impact resistance of graphite composites with superelastic SMA and SPECTRA hybrid components," AIAA, pp. 906-916, 1997.
8. Department of U. S. Defense, Military Standard MIL-STD-662E, "Ballistic Test for Armor," 1968.
9. David S. Stargel, "Modeling the Ballistic Response of Aluminum Plates with LS-DYNA3D," pp. 296-299.
10. Suha Oral, "A Computational Procedure to predict Delamination Damage and composite plates under ballistic impact," pp. 687-688.
11. N. J. Mills and A Gilchrist, "Response of helmets in direct and oblique impacts," Proceedings of the NATO-ASI on Crashworthiness of Transportation Systems Structural Impact and Occupant Protection, July 7-19, Tr! ia, Portugal, pp. 89-105, 1996.
12. Alan J. Lesser, "Effect of Resin crosslink density on the Impact Demage Resistance of Laminated Composites," ANTEC '96, pp. 3239-3242, 1996.
13. G. Ben-Dor, A. Dubinsky, T. Elperin, "Effect of air gap and order of plates on ballistic resistance of two layered armor," Theoretical and Applied Fracture Mechanics 31, pp. 233-241, 1999.
14. Ahmed M. Monib and J. W. Gillespie Jr., Bruce K. Fink, "Damage Tolerance of Composites subjected to Ballistic Impact," ANTEC '98, pp. 1463-1467, 1998.
15. L. Chen, B. Jang, L. Hwang, J. Hwakes and R. Zee, "Impact and Penetration Resistance of Fibrous Composites," ANTEC '88, pp. 1626-1629, 1988.
16. Shan-yuan Wang, Bohong Gu, Jie Xiong, "The Influence of strain rate on the impact behavior of fiber and its bullet-proof composite," pp. 871-872.

17. Craig A. Rogers, "Ballistic impact resistance of graphite composite with superelastic SMA and SPECTRA® hybrid components," AIAA-97-1044, pp. 906-916, 1997.
18. 이홍주 편저, 총과 탄도학, 청문각, 1998.
19. 김정태, 최준홍, 신현호, "초고속 충돌현상 분석 기술," 기계저널, 제39권, 제11호, pp. 45-49, 1999.
20. 김동훈, 이두성, 김동훈, 홍성희, "고속충격에 의한 아라미드 섬유강화 금속적층재의 방탄성능 및 동적파손거동에 관한 연구," 한국정밀공학회, 2000 추계학술대회 논문집, pp. 527-532, 2000.
21. 박영의, 손세원, 김희재, 홍성희, "알루미늄 5052-H34 합금 적층재의 방탄성능과 파괴모드에 관한 연구," 한국정밀공학회, 2000 추계학술대회 논문집, pp. 507-512, 2000.
22. 육종일, 하현승, 강대석, "섬유강화 복합재료의 신제조 기법 및 고충격 파괴메카니즘(1)," 재료마당, 제13권 5호, pp. 68-80, 2000.
23. 육종일, 하현승, 강대석, "섬유강화 복합재료의 신제조 기법 및 고충격 파괴메카니즘(2)," 재료마당, 제13권 6호, pp. 40-53, 2000.
24. 황도연, 손세원, 김희재, 홍성희, "고속충격을 받는 표면처리된 알루미늄 합금의 거동에 관한 연구," 한국정밀공학회, 2001 춘계학술대회 논문집, pp. 784-789, 2001.
25. 홍성희, 손세원, 이두성, "PVD 처리한 티타늄 합금의 고속충격 거동에 관한 연구," 대한기계학회, 2001 춘계학술대회 논문집 A, pp. 567-572, 2001.
26. Se-Won sohn, Dong-Ahn Kwon, Sung-Hee Hong, "A Study on Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Foam Core Sandwich Structures," International Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Sep. 2001, Vol. 2, No. 3, pp. 47-53, 2001.
27. 홍성희, 손세원, 김희재, 황도연, "표면처리된 알루미늄 5083-H131 합금의 고속 충격 거동에 관한 연구," 한국정밀공학회, 2001 추계학술대회 논문집, pp. 820-824, 2001.
28. 육군사관학교, 무기체계학, 청문각, 2001.
29. 손세원, 이두성, 홍성희, "고속 충격에 의한 알루미늄 5052-H34 합금의 관통 거동에 관한 연구," 대한기계학회, 2001 추계학술대회 논문집 A, pp. 174-179, 2001.
30. 이용연, 심인옥, "국방소재/알루미늄 경방탄재," 재료마당, 제13권, 5호, pp. 44-53, 2000.
31. 이홍주외 6인 신편 병기공학, 청문각. 2001.
32. 김영태, 손세원, 김희재, 홍성희, "표면경화처리된 Al, Ti의 고속충격 저항성에 관한 연구," 한국정밀공학회, 2002 춘계학술대회, pp. 852-855, 2002.
33. 홍성희, 손세원, 이두성, 김영태, "저속충격시 ball탄(5.56mm)의 형상변화에 관한 연구," 한국정밀공학회, 2002 춘계학술대회 pp. 865-868, 2002.
34. 12. H. J. Kim, J. I. Yuk, S. G. Lee, "Dynamic Failure Behavior of Ceramic/Fiber-Reinforced Composites under High Speed Impact Loading," Korean Journal of Materials Research, Vol. 7, No. 9, 1997.
35. Backman, M. E. and W. Goldsmith, "The Mechanics of Penetration of Projectiles into Targets," International Journal of Engineering Science, Vol. 16, pp. 1-99, 1978.
36. U.S. Army Research Laboratory, "Military Standard, V50 Ballistic Test for Armor, MIL-STD-662E," Dept. of the Navy, Defense Printing Service, Philadelphia, PA, 1984.
37. U.S. Army Test Evaluation Command, "U.S. Army Test Eval. comd. Test Operations Procedure 2-2-710 Ballistic Test for Armor," A137973, U.S. Army Test Evaluation Command, Aberdeen Proving Ground, MD 21005.