

섬유강화 금속 적층 재료의 고속 충격 저항성에 관한 연구

손세원(건국대 기계항공공학부), 김영태* (건국대원 기계설계학과)

A Study on the high-velocity impact resistance of fiber reinforced metal laminate materials

S. W. Sohn(Dept. of Mech. & Aerospace Eng. Konkuk Univ.), Y. T. Kim(Dept. of Mech. Design, Konkuk Univ.)

ABSTRACT

Recently, high-performance composite materials have been used for various industrial fields because of their superior high strength, high stiffness and lower weight. In this study, manufactured fiber reinforced metal laminate materials are composed of two parts. One is hard-anodized Al5083-O alloy as a face material and the other is high strength aramid fiber (Twaron® CT709) and polyethylene fiber(Dyneema HB25) laminates as a back-up material. Resistance to penetration is determined by protection ballistic limit(V_{50} , a static velocity with 50% probability for complete penetration) test method. V_{50} tests with 0° obliquity at room temperature were conducted with 5.56mm ball projectiles that were able to achieve near or complete penetration during high velocity impact tests.

Key Words : Fiber reinforced metal laminates materials (섬유강화 금속 적층재료), Anodizing (양극산화 피막법), Protection ballistic limit, V_{50} (방호탄도한계)

1. 서론

고성능 섬유강화 복합재료는 단위 중량당 강성과 강도가 높으면서 가격도 저렴하여 여러 산업분야에서 널리 사용되고 있으며 특히, 경량임에도 충격 저항성이 우수하여 방탄재료로의 군사적 이용도 날로 증가되고 있다. 그러나 고속 충격 탄자와 같이 관통성이 뛰어난 위협 조건으로부터의 방호를 목적으로 장갑을 설계할 때는 단순 복합재료만으로는 충분한 방탄성능을 가질 수 없는 경우가 많다. 이런 경우는 충격 전면에서 충격 탄자의 탄두를 일차적으로 무디게 하거나 파쇄시켜 탄자의 형상을 변화시키고, 변형된 탄자의 계속적인 관통에 대한 저항 능력이 우수한 재료의 사용이 요구되어, 이들 두 가지 성질을 동시에 만족시키는 장갑재료의 개발이 꾸준히 연구되어 왔다¹⁾.

현재까지 개발된 섬유강화 복합재료로는 유리 섬유계와 아라미드 섬유계 및 폴리에틸렌 섬유계가 있으며, 단순 복합재료의 상대적인 낮은 경도를 극복하기 위하여 1970 년대 이후부터 Al_2O_3 , SiC, B_4C 등의 초경도 세라믹 재료를 사용하여 각 재료의 장점을 살린 혼성구조 섬유강화 복합재료가 개발되어

오고 있다. 하지만 세라믹의 높은 취성과 낮은 구조특성, 높은 중량으로 인하여 개인용의 경방탄재료로의 사용에는 어려운 실정이다.

본 연구에서는 세라믹의 단점을 극복하고 세라믹과 유사한 효과를 얻을 수 있는 경방탄 재료의 개발을 위하여 전면재료 양극산화 피막처리된 알루미늄 합금을 사용하고, 후면재료는 아라미드 섬유인 Twaron® CT709 와 폴리에틸렌 섬유인 Dyneema HB25 를 사용한 섬유강화 금속 적층재료를 제작하고, 각 시편에 대한 고속충격 저항성과 파괴 모드를 비교·분석하였다.

2. 배경이론

2.1 섬유강화 복합재료의 파괴거동

섬유강화 복합재료의 고속 충격에 대한 관통 저항성은 강화재의 질감성(tenacity)과 동적 탄성률(dynamic modulus), 인성(toughness)등에 기인한 것으로 구조적 강성(stiffness)이 필요치 않는 방탄조끼 등의 용도에는 수지와 결합 없이 직조된 형태로 사용되고 있다. 그러나 수지로 결합된 섬유강화 복합재료에서는 탄자의 속도가 어느 단계에 이르러

섬유의 응력과 전달속도(E/ρ 에 비례)를 초과하게 되면 섬유의 변형이 발생하기 전에 관통이 진행되기 때문에 저속(400m/s 이하)의 권총 탄환이나 파편 보호용으로 사용되고 있다. 한편 수지는 구조 역할재로서 강성을 유지하고 섬유의 손상을 보호하는 역할 외에 탄자의 관통에 대해서는 수지와 섬유와의 층간분리, 섬유간의 응력전달 및 분산, 수지 자체의 강도 등으로 인하여 탄자의 운동 에너지를 흡수함으로써 방탄 효과를 갖게 되며, 연성을 갖는 재질일수록 재료의 변형영역을 크게 하고 인장파괴에 대한 높은 저항력을 가짐으로써 방탄 성능이 개선된다고 알려져 있다²⁾. 층간분리 현상은 재료가 인장파괴와 전단파괴에 대한 충분한 저항을 가질 때 발생할 수 있는 파괴 기구로서 섬유강화 복합재료의 관통진행 기구를 거시적으로 도시하면 Fig. 1과 같다.

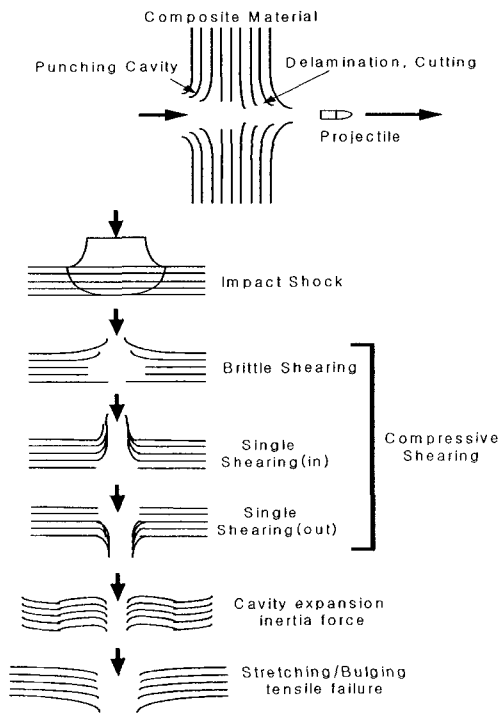


Fig. 1 Schematics of penetration cavity and sequential phase of resistance for composite materials upon high velocity impact

2.2 양극산화피막법

양극산화 피막법(anodizing)은 알루미늄 합금을 전해액에서 양극으로 통전하면 양극에 발생하는 산소에 의해서 알루미늄 표면에 산화 알루미늄(Al_2O_3) 피막을 생성하는 표면경화 처리방법이다. 주요 양극 산화 피막법으로는 옥살산법, 황산법, 크롬산법

등이 있으며 본 연구에서는 직류 황산법(유산법: H_2SO_4)이 수행되었으며, 그 표면 경화 처리 과정은 Fig 2와 같다.

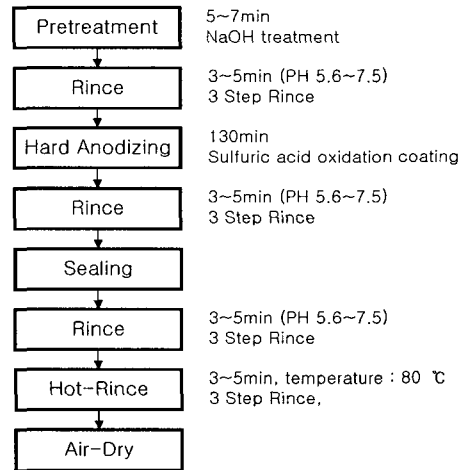


Fig. 2 Hard-anodizing process

2.3 방호탄도한계

장갑의 방호성능이란 탄자의 관통에 저항하는 장갑능력이며, 측정방법은 탄자가 표적재료를 완전 관통하거나 부분 관통하는 확률을 가지고 측정한다. 관통과 미관통의 확률이 동일한 V_{50} 을 충격속도로 나타내는 방호탄도한계(Protection ballistic limit)라고 정의한다. 이 한계는 일정한 표적장갑의 두께와 피탄각에 대하여 추진제의 양을 조절하여 충격속도를 변화시키면서 탄도실험을 행하여 얻는다. 또한 충격속도는 높낮이(up-and-down)방법에 의하여 측정한다³⁾. 탄자의 최종 탄도학적 효과는 충격탄에 의한 표적의 관통현상을 분석함으로써 공격 및 방호에 대한 효과를 동시에 분석할 수 있다. 탄자가 표적 재료를 충격할 때 탄이 관통되는 현상은 완전관통된 경우(CP, Complete Penetration), 완전관통은 되지 않고 표적재료에 소성변형만을 일으킨 부분관통의 경우(PP, Partial Penetration), 부분관통이지만 표적재료가 파괴된 경우의 3가지로 구분할 수 있다.

3. 실험

3.1 시편제작

본 연구에서는 섬유강화 금속 적층재료의 제작을 위하여 전면재료는 양극산화 피막처리된 Al5083-O 합금(1.0mm)을 사용하였으며, 후면재는 $0^\circ/90^\circ$ 의 플레인 구조를 가진 AKZO-NOVEL 사의 아라미드 섬유인 Twaron[®] CT709와 DSM 사의 폴리에틸렌 섬유인 Dyneema HB 25를 사용하였고, 각 재료의 특성은 Table 1, 2와 같다.

Table 1 Mechanical property of Al5083-O alloy

Tensile Strength (MPa)	Shear Strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Elongation (%)
290	170	70.3	22

Table 2 Mechanical property of fibers

Fiber	Density (g/cm ³)	Tensile Strength (GPa)	Young's Modulus (GPa)	Elongation (%)
Twaron [®] CT709	1.44	1.98	47.3	2.6
Dyneema HB 25	0.97	3.0~6.0	170~220	3.7

Twaron 섬유강화 복합재료에서 수지는 에폭시계인 ciba 社의 Araldite AW106 과 경화제인 HV953K 를 1:1 의 비율로 혼합하여 사용하였으며, Dyneema 섬유는 폴리우레탄 수지가 섬유내에 프리프레그 형태로 존재하며 두 종류의 시편 모두 섬유를 적층시킨 후, Hot-press 에서 가온·가압(100℃, 20MPa, 40min.)하여 시편을 제작하였다. 제작된 시편은 Table 3 과 같으며 각 시편의 전체 크기는 300mm×300mm, 전체 중량은 750±10g 을 유지하도록 하였다.

Table 3 Test specimen for high velocity impact test

No.	Specimen	Layer (ply/ply)	Total Thickness (mm)	Total Weight (g)
1	Twaron CT709	35	6.7	758
2	Anodized Al5083-O alloy(1.0mm) / Twaron CT709	1/24	6.4	750
3	Dyneema HB 25	64	9	754
4	Anodized Al5083-O alloy(1.0mm) / Twaron CT709	1/41	7	752

3.2 고속 충격 시험

본 연구의 고속 충격 시험에서는 5.56mm 볼탄(5.56mm ball projectile, M193)을 사용하였으며, 볼탄의 탄심(core)은 Pb(67.3%), 외피(case)는 Cu(31.3%), Sb(0.4%)로 구성되어 있으며 탄자의 충격속도는 추진제의 양을 조정하여 증가시켰다. 고속충격시험에 사용된 발사장치는 오스트리아 AVL 사의 Model 292 이며, 탄자의 충격속도는 미국 OEHLER 적외선 스크린 Model 57 과 HP 사의 UNIVERSAL COUNTER Model 5334 A, B 를 사용하여 측정하였다. 고속충격

시험은 MIL-STD-662F⁴⁾ 규격에 의하여 수행되었으며, 실험 장치의 개략도는 Fig. 3 과 같다.

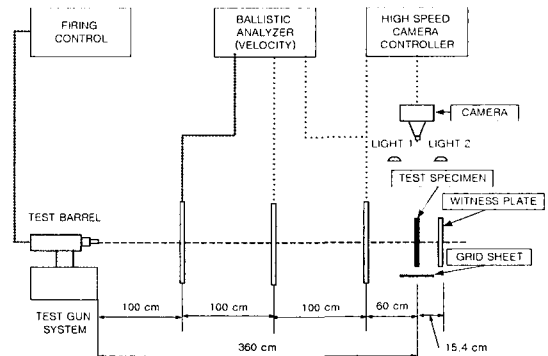


Fig. 3 Schematics of the ballistic range setup for high-velocity impact test

4. 실험 결과 및 고찰

본 연구에서 전면재로 사용된 알루미늄 합금의 양극산화 피막처리 후의 표면 경도 변화를 측정하기 위하여 마이크로 비커스 경도계(M-type, Micro vicker's hardness tester)를 사용하였으며, 측정결과 양극산화 피막처리 전의 알루미늄 합금의 표면 경도는 87Hv, 양극산화 피막처리 후의 표면 경도는 552Hv 로서 표면 경도가 약 534.48% 증가하였다. 또한 양극산화 피막처리 후의 생성된 산화 알루미늄(Al₂O₃) 피막을 IMT 社의 광학 현미경(VideoTest-Size5.0)을 사용하여 측정하였으며 측정 결과 피막의 평균 두께는 80~100μm 이었다.

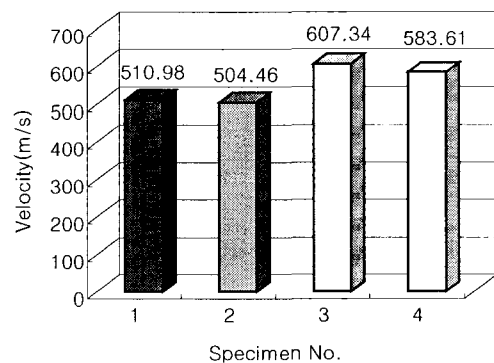


Fig. 4 Protection ballistic limits(V₅₀) vs. specimen

Fig. 4 는 고속충격 시험 결과 측정된 각 시편의 방호탄도한계(V₅₀)를 나타내는 그래프이며, Fig. 5 는 4 종류의 시편 중 시편의 변형 상태가 가장 양호한 시편 No. 1 의 관통과정을 고속 촬영한 사진이다.

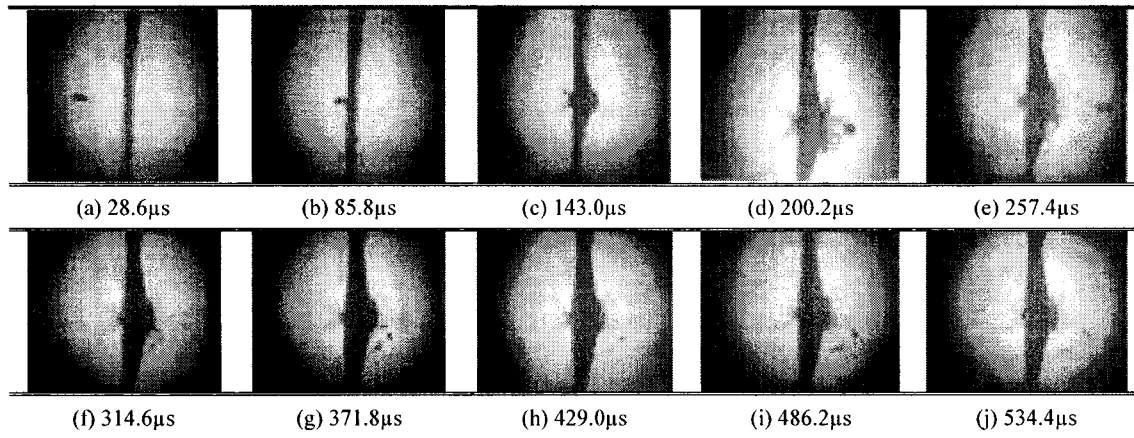


Fig. 5 Photo of penetration process of Twaron CT709 composite materials (Specimen No.1) in using high-speed camera

전면재를 사용하지 않은 시편 No.1 과 No.3 는 방호탄도한계가 전면재를 사용한 시편보다 약간 높게 측정됨을 알 수 있었으며, 시편 전체에 걸쳐 볼록 현상(bulging)과 섬유인출, 계면박리, 층간분리 현상 등이 발생하였다. 반면 전면재로 양극산화 피막 처리된 알루미늄 합금을 사용한 시편 No.2 와 No.4 의 경우, 방호탄도한계는 No.1 과 No.3 보다 각각 6.52m/s, 23.73m/s 정도 떨어지나, 표면 경도의 증가가 탄이 무너지는 효과(blunting effect)를 초래하여 충격 전면에서 연성구멍확장이 발생하고, 상대적인 시편 전체에 걸친 변형량이 약 20%정도 감소됨을 알 수 있었다.

5. 결론

Twaron® CT709 섬유와 Dyneema HB25 섬유를 사용한 섬유강화 금속 적층재료의 고속충격 시험 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Twaron® CT709 섬유만으로 제작된 시편(No.1)의 방호탄도한계(V_{50})는 510.98m/s 이며, 양극산화 피막 처리된 알루미늄 합금을 전면재로 사용한 시편(No.2)의 V_{50} 은 504.46m/s 으로 시편 No.1 이 시편 No.2 보다 V_{50} 이 약 6.52m/s 우수하였다.

(2) Dyneema HB25 섬유만으로 제작된 시편(No.3)의 방호탄도한계는 607.34m/s 이며, 양극산화 피막 처리된 알루미늄 합금을 전면재로 사용한 시편(No.4)의 V_{50} 은 583.61m/s 으로 시편 No.3 이 시편 No.4 보다 V_{50} 이 약 23.73m/s 우수하였다.

(3) Dyneema HB25 섬유만으로 제작된 시편(No.3)의 V_{50} 은 Twaron® CT709 섬유로만 제작된 시편(No.1)의 V_{50} 보다 약 96.36m/s 정도 우수하였으며, 양극산화

피막처리된 알루미늄 합금(1.0mm)을 전면재로 사용한 Dyneema HB25 섬유강화 금속 복합재료(No.4)의 V_{50} 은 양극산화 피막처리된 알루미늄 합금을 전면재로 사용한 Twaron® CT709 시편(No.2)의 V_{50} 보다 약 79.15m/s 정도 우수하였음을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2000-000-00313-0) 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. V. P. W. Shim, C. T. Lim and K. J. Foo, 2001, "Dynamic mechanical properties of fabric armour", International Journal of Impact Engineering, Vol. 25, pp. 1-15.
2. J. R. Brown and G. T. Egglestone, 1989. "Ballistic properties of composite materials for personnel protection", MRL Technical report, MRL-TR-89-6.
3. U. S. ATEC, "U. S. ATEC. Test Operations Procedure 2-2-710 Ballistic Test for Armor", A137973, U. S. Army Test Evaluation Command, Aberdeen Proving Ground, MD21005.
4. U.S. Army Research Laboratory, 1997 "Military Standard, V_{50} Ballistic Test for Armor. MIL-STD-662F." Dept. of the Nave, Defense Printing Service, Philadelphia, PA.
5. S. W. Sohn, H. J. Kim, S. H. Hong and Y. T. Kim. 2002, "A study on the resistance of surface hardening treated Aluminum, Titanium alloy under the high velocity impact", Spring Conference proceeding of the Korean Society of Precision Engineering, pp.852-855.