

PVD처리한 티타늄 합금의 고속충격 거동에 관한 연구

손세원* · 이두성** · 홍성희***

A Study on the high velocity impact behavior of titanium alloy by PVD method

Se-Won Sohn, Doo-Sung Lee and Sung-Hee Hong

Key Words: High velocity impact(고속충격), Ballistic limit(방호한계), Nitrified titanium alloy(질화 티타늄 합금)

Abstract

In order to investigate the fracture behaviors(penetration modes) and resistance to penetration during ballistic impact of Titanium alloy laminates and nitrified Titanium alloy laminates which were treated by PVD(Physical Vapor Deposition) method, ballistic tests were conducted. Evaporation, sputtering, and ion plating are three kinds of PVD method. In this research, Ion plating was used to achieve higher surface hardness and surface hardness test were conducted using a Micro vicker's hardness tester.

Resistance to penetration is determined by the protection ballistic limit(V_{50}), a statistical velocity with 50% probability for complete penetration.

Fracture behaviors and ballistic tolerance, described by penetration modes, are respectfully observed at and above ballistic limit velocities, as a result of V_{50} test and Projectile Through Plates (PTP) test methods.

PTP tests were conducted with 0° obliquity at room temperature using 5.56mm ball projectile. V_{50} tests with 0° obliquity at room temperature were conducted with projectiles that were able to achieve near or complete penetration during PTP tests.

Surface hardness, resistance to penetration, and penetration modes of Titanium alloy laminates are compared to those of nitrified Titanium alloy laminates.

1. 서론

티타늄합금은 $-200^\circ\text{C} \sim 600^\circ\text{C}$ 의 온도범위에서 어떠한 공업용 합금보다 증량비에 대한 높은 강도를 갖으며, 내식성이 우수하여 항공기의 엔진, 로켓 재료, 자동차, 스포츠 소재 뿐 아니라 장갑 재료로의 군사적 이용도도 날로 증가되고 있다¹⁾.

장갑재료로서 사용되는 재료는 일반적으로 탄도 충격후에도 최초 탄도 공격에 의한 구조변화

에 대하여 구조를 유지하는 구조적 특성뿐만 아니라 관통에 대한 저항성, 구조물의 하중지탱능력 및 강도를 가져야 하기 때문에 이에 적합한 복합재료(composite material)를 사용한다.

충격속도는 크게 저속(low, $<30\text{m/sec}$), 고속(high, $30\text{-}240\text{m/sec}$), 탄도(ballistic, 240m/sec 이상), 초고속(hypervelocity, $<15,000\text{m/sec}$) 충격속도의 네가지 범위로 분류하며, 장갑재료는 240m/s 이상의 충에서 발사된 총알과 같은 상황을 포함하는 탄도충격을 받는다²⁾. 이러한 고속 충격탄자와 같이 관통성이 뛰어난 위협 조건으로부터의 방호를 목적으로 장갑재를 설계할 때에는 단순 복합재료만으로는 충분한 장갑성능을 가질 수 없는 경우가 많기 때문에, 충격 전면에 충격탄자의 탄두를 일차적으로 무디게 하거나 파쇄시켜 관통자의 형상

* 건국대학교 기계항공공학부
 ** 건국대학교 수학과
 *** 건국대학교 대학원 기계설계학과

을 변화시키고, 변형된 관통자의 지속적인 관통에 저항하는 능력이 우수한 재료의 사용이 요구되어, 이들 두 가지 성질을 동시에 만족시키는 장갑재료의 개발이 꾸준히 연구되어왔다³⁾.

국내에서는 주로 저속충격에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있는 상태이나, 실제 소구경 화기 등에 의한 고속충격에 대한 연구는 그 특수성으로 인하여 미미한 실정이다.

본 연구의 목적은 가벼우면서도 충격저항성이 우수한 고성능 섬유강화 복합재료를 이용한 장갑 재료를 설계함에 있어서 전면재로 티타늄 합금의 적층효과와 PVD처리를 통해 표면경도를 증가시킨 티타늄 합금 적층재의 탄도 충격에 대한 관통 저항성과 파괴거동(관통모드)을 결정하는데 있다.

본 연구에서는 티타늄 합금 합금과 PVD 처리한 티타늄 합금 합금을 마이크로 비커스 경도계(micro vicker's hardness tester)를 사용하여 경도를 측정하고, U. S AMTL(1987)에 의한 V_{50} 탄도 한계 테스트 방법⁴⁾ 및 MIL-STD-662E⁵⁾ 규격서에 의하여 방호한계인 V_{50} 를 측정하고, 관통저항성을 결정하였다^{6,7)}. 파괴거동은 V_{50} 테스트와 V_{50} 테스트보다 더 큰 속도의 PTP(projectile through plates) 테스트⁸⁾를 통하여 관찰하였다.

2. 배경이론

2.1 표면경화처리

금속의 표면경도를 증가시키고, 내부 인성을 향상시키기 위한 대표적인 표면경화처리법으로는 침탄경화법, 질화경화법, 고주파 켈칭경화법, 화염경화법등이 있다.

본 논문에 사용된 질화경화법은 진공증착 방법으로써 진공증착방법은 크게 CVD(chemical vapor depositon) 방법과 PVD(physical vapor depositon) 방법으로 나뉘어 진다. PVD 방법은 증발법(evaporation), 스퍼터링(sputtering), 이온 플레이팅(ion plating)등의 3가지 방법이 있으며 원자대원자(atom by atom) 양상으로 이동되어 증착된다. CVD 방법은 증착물의 구조나 특성, 증착속도등을 독립적으로 조절하기 어렵고 반응가스에 의한 오염과 600℃이상의 고온처리에 따른 모재의 변형등의 단점이 있어 이를 보완한 PVD 방법을 현재 많이 사용되고 있다⁹⁾.

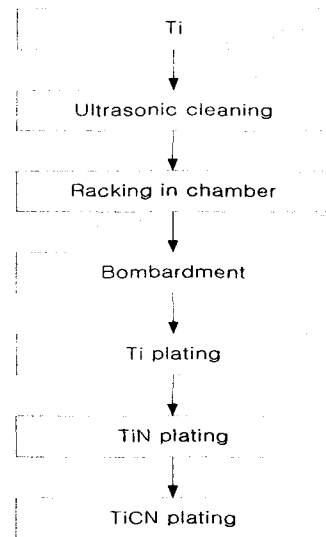


Fig 1. Nitriding process of titanium alloy

본 연구에서는 티타늄합금의 표면경화를 위하여 PVD 방법중 이온플레이팅(ion plating)을 사용하여 티타늄 합금의 표면을 경화시켰으며, 경화 과정은 Fig. 1과 같다.

2.2 충격속도(impact velocity) 및 관통모드 (penetration mode)

탄자의 운동에너지를 이용하여 장갑으로 보호된 표적을 관통하거나 또는 표적에 충격을 가하는 탄인 운동에너지탄의 표적충격속도는 사용한 추진제(propellant) 및 강내탄도 특성에 따라 결정되나 일반적으로 25m에서 권총탄 비행속도인 200~300m/s 범위인 것으로부터 소구경 화기의 비행속도인 1000m/s범위까지를 운동 에너지탄의 충격조건으로 한다.

운동에너지탄의 최종탄도학적 효과는 충격탄에 의한 표적의 관통현상을 분석함으로써 공격 및 방호에 대한 효과를 동시에 분석할 수 있다. 충격탄이 표적재료를 충격할 때 탄이 관통되는 현상은 Fig. 2와 같이, 완전관통은 되지 않고 표적 재료에 소성변형만 일으킨 경우(PP, partial penetration), 완전 관통이 된 경우(CP, complete penetration), 불완전관통이지만 표적재료가 파괴된 경우의 3가지로 구분할 수 있다.

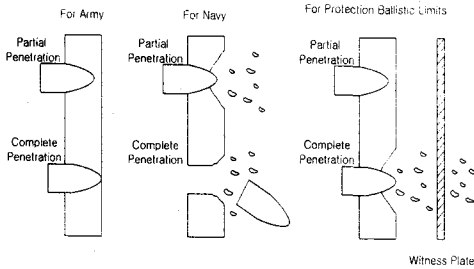


Fig. 2 Penetration mode by criteria of the army, navy and Protection Ballistic Limits

2.3 방호한계 측정방법

장갑의 방호성능이란 탄자의 관통에 저항하는 장갑능력이며, 이 성능은 탄의 종류, 충격속도 및 탄두의 형상과 장갑재료의 성질, 규격 및 지지점의 위치등에 따라 결정된다.

방호성능의 측정방법은 충격탄이 장갑을 완전 관통하거나 부분관통하는 확률을 가지고 측정하는 방법으로, Fig. 3 에서와 같이 관통과 미관통의 확률이 동일한 V_{50} 을 충격속도로 나타내는 V_{50} 을 방호탄도 한계(protection ballistic limit)라고 정의한다.

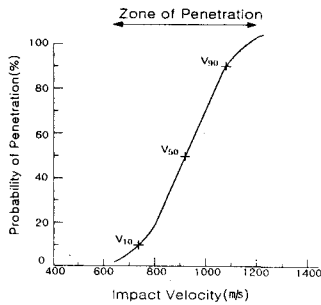


Fig. 3 Definition of Protection Ballistic Limits(V_{50})

이 한계는 일정한 표적장갑의 두께와 피탄각 (obliquity : 충격면에서의 장갑면에 대한 법선과 동일점에서의 탄도에 대한 접선간의 각)에 대하여 추진체의 양을 조절하여 충격속도를 변화시키면서 탄도실험을 행하여 얻는다. 또한 충격속도는 up-and-down 방법에 의하여 측정하며 다음 식 (1)에 의해 계산한다.

$$V_{50} = \frac{\left\{ \sum_{i=1}^{N_p + N_c} V_i + K(N_p + N_c) \right\}}{N_p + N_c} \quad (1)$$

여기서 N_p 는 ZMR(Zone of Mixed Result : 완전관통이 일어나는 최저속도와 부분관통이 일어나는 최저속도의 차)내에서 부분관통(partial penetration)한 횟수이고, N_c 는 ZMR내에서 완전관통(complete penetration)한 횟수이며, V_i 는 충격속도(striking velocity), K 는 장갑재료와 피탄각 및 탄자 형태에 의해 정해지는 상수로서 일반적으로 $\frac{ZMR}{2}$ (m/s)에 해당한다.

3. 실험

3.1 시편의 제작

본 연구에 사용된 티타늄 합금은 ASTM GR2를 사용하였으며 그 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1, 2와 같고, 티타늄 합금, PVD 처리한 티타늄 합금 합금을 적층하여 Table 3과 같은 시편을 제작하였고, 1 ply당 두께는 0.5mm로 하였다.

Table 1 Chemical composition of Titanium alloy

Composition	N	C	H	Fe	O	Ti
wt%	0.03	0.10	0.015	0.30	0.25	bal

Table 2 Mechanical property of Titanium alloy

Alloy	Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elongation(%)	Area reduction (%)
Grade 2	345	300	10	25

Table 3 Test Specimen

No.	Material	Thickness (mm/1 ply)	Ply	Total thickness (mm)
1	Ti Grade 2	0.5	9	4.5
2	Ti Grade 2	0.5	12	6.0
3	Ti Grade 2	0.5	15	7.5
4	TiCN	0.5	9	4.5
5	TiCN	0.5	12	6.0
6	TiCN	0.5	15	7.5

3.2 경도 시험

본 연구에서는 Fig 4와 같은 PVD 처리에 의한 티타늄 합금의 표면경도의 변화를 측정하기 위하여 마이크로 비이커스 경도계(M-type, Micro vicker's hardness tester, Shimadzu)를 사용하여 표면경도를 측정하였다.

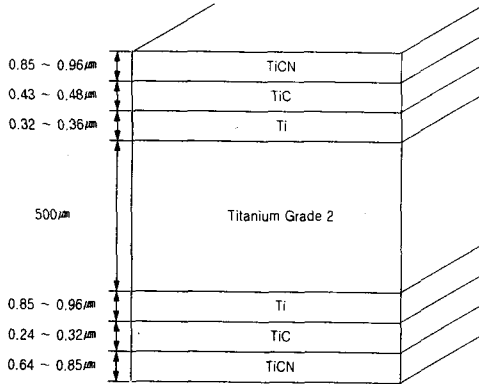


Fig. 4 Schematic diagram of nitrided titanium alloy

3.3 고속 충격 시험

본 연구에서는 티타늄 합금과 PVD 처리에 의한 티타늄 합금의 고속충격에 대한 방호성능을 측정하기 위하여 5.56mm ball탄 및 오스트리아 AVL사의 model 292 발사장치와 5.56mm 시험총열을 사용하였고, 탄자의 충격속도는 미국 MV Ordnance 사의 model 4010P 속도측정장치를 사용하였으며, 이들 실험 장치의 개략도는 Fig. 5와 같다.

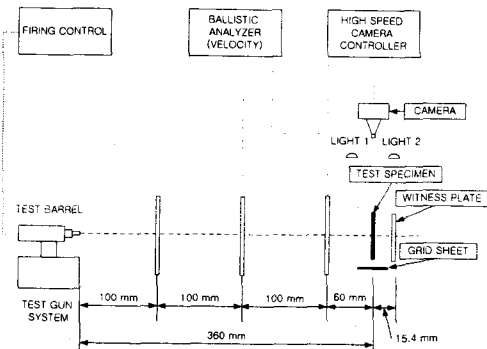


Fig. 5 Experimental Setup for high velocity impact test

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 경도시험결과

마이크로 비이커스 경도계를 이용한 티타늄 합금과, PVD 처리에 의한 티타늄 합금의 표면경도의 변화를 측정한 결과는 Table 4와 같고, PVD 처리하여 표면경화처리를 한 경우 티타늄 합금에 비하여 표면경도가 약 322% 증가하였다.

Table 4. Surface hardness of specimen

material	Surface hardness (Hv, 1000g)
Titanium alloy	140.73
nitrided titanium alloy	452.77

4.2 고속 충격 시험결과

5.56mm ball 탄의 WC870 type 추진제(propellant)와 WC870 type 추진제 양에 따른 탄자의 속도는 Fig. 6과 같다. WC870 type의 추진제를 사용할 경우 탄자의 속도범위가 350~600ms이며, WC844 type 추진제를 사용할 경우 탄자의 속도범위가 550~1,050ms이었다.

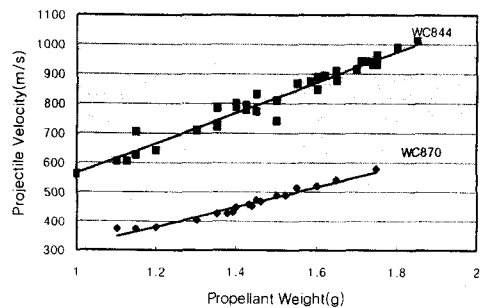
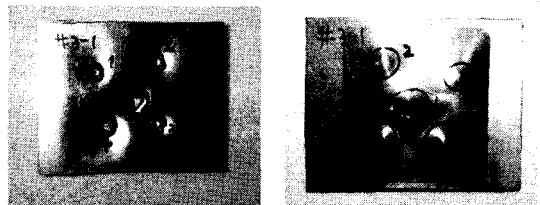


Fig. 6 Projectile Velocity(m/s) Vs. Propellant Weight(g)



(a) Front

(b) back

Fig. 7 PTP Result of Ti (9plies) laminates

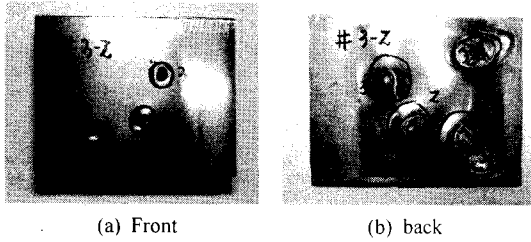


Fig. 8 PTP Result of Ti (12plies) laminates

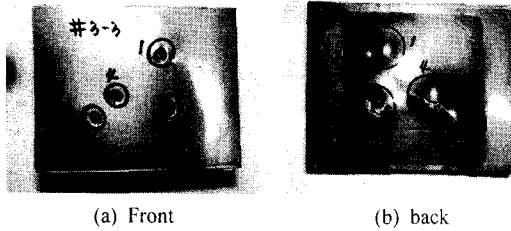


Fig. 9 PTP Result of Ti (15plies) laminates

티타늄 합금 적층재(9ply)의 고속충격시험 결과는 Fig. 7과 같다. 측정된 티타늄 합금 적층재의 V_{50} 은 528m/s이었다.

티타늄 합금 적층재(12ply)의 고속충격시험 결과는 Fig. 8과 같다. 측정된 티타늄 합금 적층재의 V_{50} 은 566m/s이었다.

티타늄 합금 적층재(12ply)의 고속충격시험 결과는 Fig. 9와 같다. 측정된 티타늄 합금 적층재의 V_{50} 은 662m/s이었다.

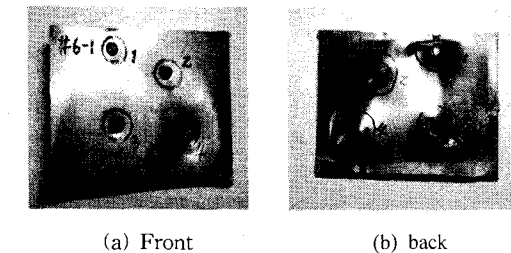


Fig. 10 PTP Result of TiCN (9plies) laminates

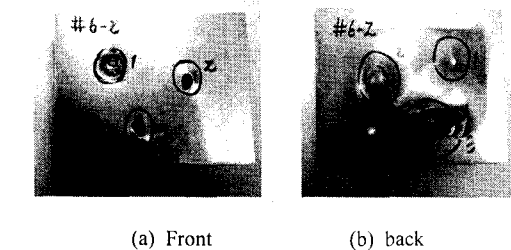


Fig. 11 PTP Result of TiCN (12plies) laminates

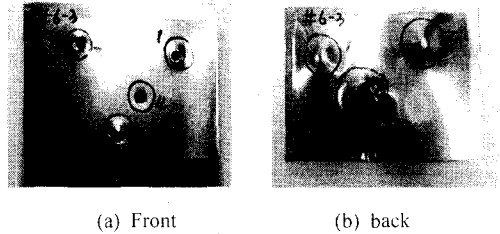


Fig. 12 PTP Result of TiCN (15plies) laminates

PVD 처리한 티타늄 합금 적층재(9ply)의 고속충격시험 결과는 Fig. 10과 같다. 측정된 PVD 처리한 티타늄 합금 적층재의 V_{50} 은 538.13m/s으로 동일한 두께의 PVD 처리를 하지 않은 티타늄 합금에 비하여 V_{50} 이 약 1.9%(10.03m/s) 증가하였고, 전·후면에서의 손상영역 또한 감소함을 알 수 있었다.

PVD 처리한 티타늄 합금 적층재(12ply)의 고속충격시험 결과는 Fig. 11과 같다. 측정된 PVD 처리한 티타늄 합금 적층재의 V_{50} 은 610.88m/s으로 동일한 두께를 갖는 PVD 처리하지 않은 티타늄 합금에 비하여 V_{50} 이 약 7.9%(44.56m/s) 증가하였으며, 전·후면에서의 손상영역 또한 감소함을 알 수 있었다.

PVD 처리한 티타늄 합금 적층재(15ply)의 고속충격시험 결과는 Fig. 12와 같다. 측정된 PVD 처리한 티타늄 합금 적층재의 V_{50} 은 692.68m/s으로 동일한 두께를 갖는 PVD 처리하지 않은 티타늄 합금에 비하여 V_{50} 이 약 4.5%(29.76m/s) 증가하였으며, 전·후면에서의 손상영역 또한 감소함을 알 수 있었다.

각 재료의 V_{50} 및 관통모드는 Table 4와 같고, 동일한 두께에서 재료에 대한 방호한계는 Fig. 13와 같다.

Table. 4 Ballistic test results of test specimen (Protection Criteria).

No.	Material	ply	V_{50} (m/s)	Penetration Mode	
				face	back
1	Ti	9	528.10	P	P, D
2	Ti	12	566.32	P	P, D
3	Ti	15	662.92	P	P, D
4	TiCN	9	538.13	P	P
5	TiCN	12	610.88	P	P
6	TiCN	15	692.68	P	P

P : Petalling, D Ductile Hole Enlargement

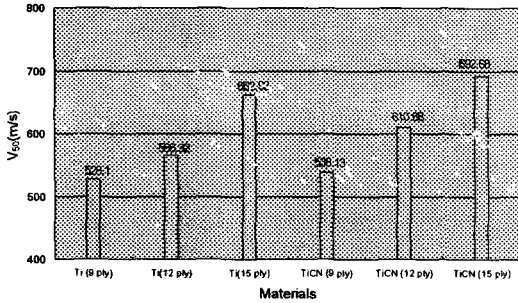


Fig. 13 V₅₀ velocity Vs. Target Materials

4. 결론

티타늄 합금 적층재와 PVD 처리한 티타늄 합금 적층재의 경도시험 및 5.56mm ball탄에 의한 고속충격시험 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 표면경도 측정결과 PVD 처리한 티타늄 합금의 표면경도는 452.77HV였고, 티타늄 합금의 표면경도는 140.73HV로 PVD 처리를 한 경우 표면경도가 약 3.22 배 증가하였다.

(2) 고속충격시험결과 티타늄 합금의 경우 후면에서는 파열(petalling)과 연성구멍확장(ductile hole growth)이 발생하였으나, PVD 처리한 티타늄 합금의 경우 파열(petalling)이 발생하였다. 또한 PVD 처리한 티타늄 합금 적층재의 경우 전·후면에서의 손상영역이 티타늄 합금보다 작게 나타나 충격에 대한 흡수능력이 향상되었음을 알 수 있었다.

(3) 표면경화 처리를 하여 표면경도를 증가시킨 경우 우수한 방탄저항 특성을 보였다. V₅₀(방호한계)에서 PVD 처리한 티타늄 합금 적층재의 V₅₀은 538.13m/s ~ 692.68m/s이고, 동일한 두께의 티타늄 합금의 V₅₀은 528.1 m/s ~ 662.92m/s로써 V₅₀이 평균 4.8%(31.74m/s) 증가하였다.

후기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(2000-2-30400-014-3)지원으로 수행되었음.

참고문헌

- (1) 허선무, 심인옥, 천창환, "타이타늄 합금 방탄재 적용현황과 제조기술," 재료마당 제13권 5호, pp. 34-43, 2000.
- (2) 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.

- (3) 손세원, 김희재, 박영의, 홍성희, "알루미늄 5052-H34 합금 적층재의 방탄성능과 파괴모드에 관한 연구," 한국정밀공학회 추계학술대회 논문집 '2000, pp. 507-512.
- (4) 손세원, 이두성, 김동훈, 홍성희, "고속충격에 의한 아라미드 섬유강화 금속적층재의 방탄성능 및 동적파손거동에 관한 연구," 한국정밀공학회 추계학술대회 논문집 '2000, pp. 527-532.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) Zukas, J. A., T. Nicholas, H.F. Swift, L. B. Greszczuk, and DR. Curran, "Penetration and Perforation of Solid," Impact Dynamics, Zukas, J. A., et al., John Wiley and Sons, New York, pp. 155-183, 1982.
- (8) 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.
- (9) Bong Hee Hahn, Dae Hong Ko, "Effect of Substrate Temperature and N2 Pressure on the Properties and Structure of Titanium Nitride Deposits by Reactive Ion Plating," J. of the Korean Institute of Metals, Vol. 24, No. 10, 1986.