

표면처리가 장갑재료의 방호한계에 미치는 영향

손세원*, 김희재**, 이두성***, 홍성희****, 유명재#

An Effect of surface treatment on a Protection Ballistic Limits in armor material

S. W. Sohn*, H. J. Kim**, D. S. Lee***, S. H. Hong****, M. J. Yoo#

ABSTRACT

In order to investigate the effect of surface treatment in Aluminium alloy and Titanium alloy which are used to armor material during ballistic impact, a ballistic testing was conducted. Anodizing was used to achieve higher surface hardness of Aluminium alloy and Iron plating in PVD(Physical Vapor Deposition) method was used to achieve higher surface hardness of Titanium alloy. Surface hardness test were conducted using a Micro vicker's hardness tester. Ballistic resistance of these materials was measured by protection ballistic limit(V-50), a statical velocity with 50% probability penetration. Fracture behaviors and ballistic tolerance, described by penetration modes, are respectfully observed from the results of V-50 test and Projectile Through Plates (PTP) test at velocities greater than V-50. PTP tests were conducted with 0° obliquity at room temperature using 5.56mm ball projectile. V-50 tests were conducted with 0°obliquity at room temperature with projectiles that were able to achieve near or complete penetration during PTP tests. Surface hardness, resistance to penetration, and penetration modes of surface treated alloy laminates are compared to those of surface non-treated alloy laminates. A high speed photography was used to analyze the dynamic perforation phenomena of the test materials.

Key Words : Resistance to penetration(관통저항성), Fracture behavior(파괴거동), Surface hardening(표면경화), Protection ballistic limit(방호한계)

1. 서론

장갑재료(裝甲材料, armor)는 일반적으로 권총·소총등의 소구경화기(小口徑火器)로부터 전차전함등의 대구경화기(大口徑火器)에 이르기까지의 다양한 적의 파괴무기로 부터 방호하기 위해

특수합금강·강화플라스틱·알루미늄합금·티타늄합금·세라믹을 포함한 복합재료 등을 사용하며, 사용용도에 따라 경장갑(輕裝甲, soft armor)과 중장갑(重裝甲, hard armor)으로 구분한다.

장갑재료는 일반적인 충격에 대한 에너지 저장 능력과 탄도 충격 후에도 최초 탄도 공격에 의한

접수일: 2003년 1월 23일; 게재승인일: 2003년 11월 14일

- * 건국대학교 기계항공공학부
- ** 육군사관학교 무기공학과
- *** 건국대학교 수학과
- **** 건국대학교 대학원 기계설계학과
- # 교신저자, 건국대학교 대학원 기계설계학과
Email nj5769@korea.com Tel. (02) 450-3468

구조변화에 대하여 구조를 유지하는 구조적 특성뿐만 아니라 관통에 대한 저항성, 구조물의 하중지탱 능력 및 강도를 가져야 한다. 탄도에 대한 관통 저항력은 탄자와 관련해서는 탄자의 크기, 형상, 밀도, 경도 등에 의해, 충격현상에서는 충격속도와 각도, 방탄재와 관련해서는 재료의 경도, 강도, 연성, 미세구조와 판의 두께 등에 의하여 영향을 받는다.

본 연구는 표면처리가 방호한계에 미치는 영향을 연구하기 위한 목적으로 현재 장갑재료로 사용되고 있는 알루미늄 합금과 티타늄 합금에 표면경화처리를 하여 표면경도를 증가시킨 후 고속충격시험을 실시하여 관통 저항력의 변화를 연구하고자 하였다.

2. 배경이론

알루미늄 합금과 티타늄 합금의 표면경도를 증가시키기 위해 본 연구에서는 알루미늄 합금의 경우 표면경화방법 중 냉간압연(cold rolling) 및 양극산화피막법(anodizing)을 사용하였고, 티타늄 합금의 경우 질화경화법(Nitriding)을 사용하여 표면경도를 증가시켰다.

2.1 압연(Rolling)

압연은 소재가 회전하는 롤 사이를 통과할 때 롤의 높은 압축하중을 받아 두께가 감소되고 단면이 변형되어 판재, 형재, 봉재로 성형가공되는 작업으로, 높은 압하력에 의해 소성 변형된 소재는 조직이 미세화, 균일화되어 기계적 성질이 개선된다.

또한 냉간 압연은 열간 압연에 비하여 소재의 경도가 더 증가하고, 표면 조도가 향상되며, 강도 또한 증가한다. 냉간 압연시 작은 압하율을 가하는 마지막 가공은 SPSS(Skin Pass-Stretcher Strain)현상을 막고, 정확한 치수정밀도, 평면성, 미세한 표면을 얻을 수 있다.

2.2 양극산화피막법(Anodizing)

알루미늄합금은 전해액 속에서 양극으로 하고 전기를 통하여 양극에 발생하는 산소에 의해서 알루미늄면이 산화되어 내식성이 크고 대단히 경한 산화알루미늄 피막이 생성되어 표면경화시키는 양극산화피막법을 일반적으로 사용한다. 주요 양극산화피막법으로는 전해액의 종류에 따라 옥살산법, 황산법, 크롬산법 등으로 구분하여, 본 연구에서는

황산을 전해액으로 사용한 황산법을 사용하여 알루미늄 합금의 표면을 경화시켰고, 경화과정은 Fig. 1과 같다.

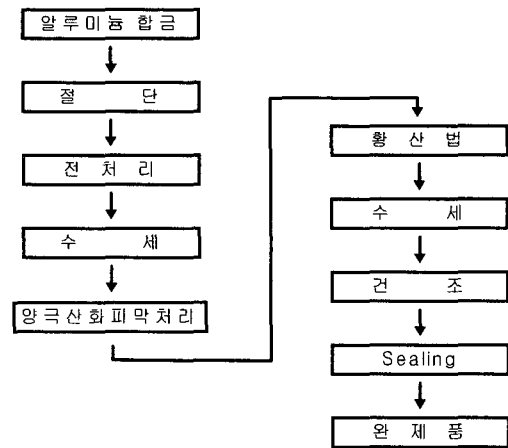


Fig. 1 Anodizing process of Al alloy

2.3 질화경화법(Nitriding)

금속의 표면경도를 증가시키고, 내부 인성을 향상시키기 위한 대표적인 표면경화처리법으로는 침탄경화법(carburizing), 질화경화법(nitriding), 고주파퀵경화법(induction hardening), 화염경화법(flame hardening)등이 있다.

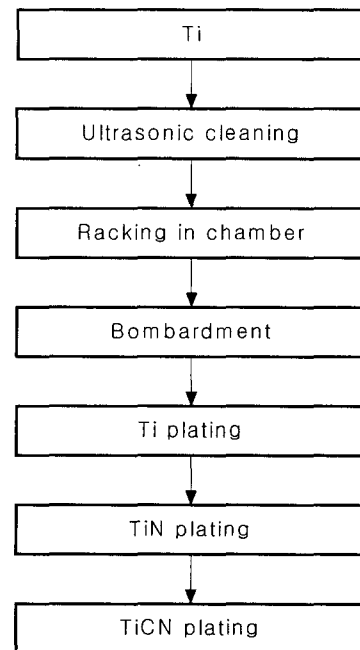


Fig. 2 Nitriding process of titanium alloy

진공증착을 통한 질화경화법은 화학증착법(CVD, chemical vapor deposition)과 물리증착법(PVD, physical vapor deposition)으로 구분되며, 이중 물리증착법은 이온 플레이팅(ion plating), 증발법(evaporation), 스퍼터링(sputtering)등의 3가지 방법이 있으며 원자 대 원자(atom by atom) 양상으로 이동되어 증착된다. 화학증착법은 증착물의 구조나 특성, 증착속도 등을 독립적으로 조절하기 어렵고 반응가스에 의한 오염과 600°C 이상의 고온처리에 따른 소재의 변형 등의 단점이 있어 이를 보완한 물리증착법을 현재 많이 사용되고 있다.

본 연구에서는 물리증착법중 이온 플레이팅(ion plating) 방법을 사용하였으며, 그 경화과정은 Fig.2와 같다. 이온 플레이팅된 티타늄 합금의 단면은 Fig. 3과 같다.

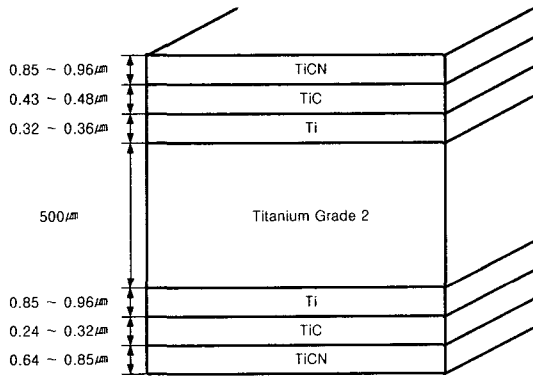


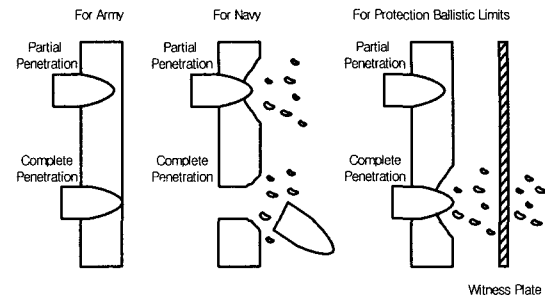
Fig. 3 Schematic diagram of nitrified titanium alloy

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

충격속도는 크게 저속(low, <30m/sec), 고속(high, 30-240m/sec), 탄도(ballistic, 240m/sec 이상), 초고속(hypervelocity, <15,000m/sec) 충격속도의 네가지 범위로 분류하며, 장갑재료는 240m/s 이상의 총에서 발사된 총알과 같은 상황을 포함하는 탄도충격을 받는다.²

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 ~ 300 m/s 범위인 것으로부터 소구경 화기의 비행속도인 1000m/s 범위까지를 운동에너지탄의 충격조건으로

한다.



(a)For Army (b)For navy (c)For protection ballistic limits
 Fig. 4 Penetration mode by criteria of the army, navy and protection ballistic limits

탄자의 최종탄도학적 효과는 충격탄에 의한 표적의 관통현상을 분석함으로써 공격 및 방호에 대한 효과를 동시에 분석할 수 있다. 충격탄이 표적 재료를 충격할 때 탄이 관통되는 현상은 완전관통은 되지 않고 표적재료에 소성변형만 일으킨 경우(PP, partial penetration), 완전 관통이 된 경우(CP, complete penetration), 불완전관통이지만 표적재료가

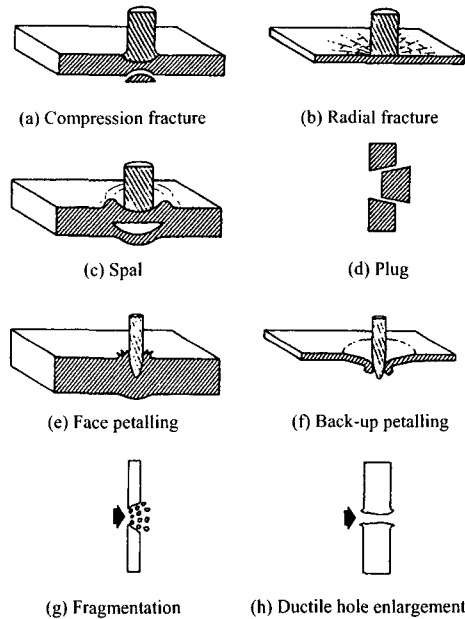


Fig. 5 Typical failure (penetration) modes of impacted plates

파괴된 경우의 3가지로 구분할 수 있다. Fig. 4는 완전관통과 불완전관통의 구분을 나타내며 (a)는 미 육균, (b)는 미 해균, (c)는 방호 장갑 설계시의 기준이다.

두께가 얇거나 중간 두께의 표적판에서 완전관통할때는 주로 재료의 물성치, 충격자의 형상 및 타격속도에 크게 영향을 받으면서 파괴가 발생한다. 이러한 경우 Fig. 5에서 보는 바와 같이 최초의 압축파괴로 일어나는 압축 파괴(compression fracture), 반경방향의 방사형 파괴(radial fracture), 조각 파쇄(spall), 딱지 파쇄(scabbing), 플러그(plug), 표적판의 전면과 후면에서의 파엽(petalling), 연성구멍확장(ductile hole enlargement) 및 취성재료인 경우에 발생하는 세열파편(fragmentation)도 함께 발생한다.

2.5 방호한계 측정방법(V-50 Ballistic Test Method)

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

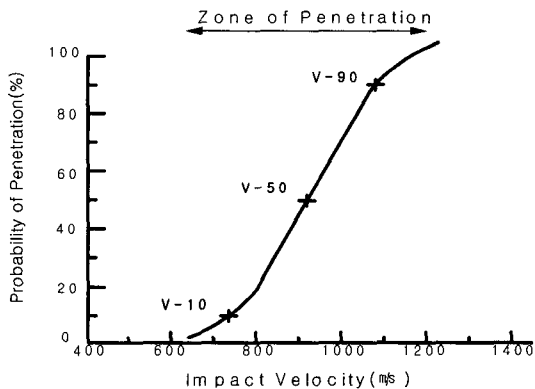


Fig. 6 Deformation of Protection Ballistic Limits (V-50)

방호성능의 측정방법은 충격탄이 장갑을 완전 관통하거나 부분관통하는 확률을 가지고 측정하는 방법으로, Fig. 6에서와 같이 V-10은 10%의 관통확률과 90%의 미관통확률을 가진 것이며, V-90은 90%의 관통확률과 10%의 미관통확률을 나타낸다. 그러나 대부분의 경우 관통과 미관통의 확률이 동일한 충격속도를 나타내는 V-50을 방호탄도 한계(protection ballistic limit)라고 정의한다.

이 한계는 일정한 표적장갑의 두께와 피탄자

(obliquity : 충격면에서의 장갑면에 대한 법선과 동일점에서 탄도에 대한 접선각의 각)에 대하여 추진제의 양을 조절하여 충격속도를 변화시키면서 탄도실험을 행하여 얻는다.

탄도실험을 행하여 높낮이(Up-and-Down) 방법을 사용하여 완전 및 부분관통이 일어나는 속도범위인 혼합속도범위(ZMR, Zone of Mixed Results), 즉 완전 관통이 일어나는 최고 속도와 부분 관통이 일어나는 최저 속도의 차이를 어느 범위 내로 구해야 한다.

3. 실험

표면처리를 한 알루미늄 합금과 티타늄 합금은 마이크로 비이커스 경도계(micro vicker's hardness tester)를 사용하여 경도를 측정하였으며, 관통저항력은 0.3km/s ~ 0.7km/s의 충격속도를 갖는 5.56mm ball 탄을 MIL-STD-662F의 탄도한계 테스트 방법을 이용하였다. 장갑재료의 표면경화에 따른 파괴거동은 V-50 테스트와 PTP(projectile through plates)테스트를 통하여 관찰하였으며, 고속촬영기(high speed camera)를 사용하여 고속충격시 탄자와 장갑재료의 거동을 살펴보았다.

3.1 시편의 제작

본 연구에 사용된 티타늄 합금은 ASTM Grade2, 알루미늄 합금은 5083-H131을 사용하였으며, 그 화학적 성분은 각각 Table 1, 2와 같고, 기계적 성질은 Table 3과 같다.

Table 1 Chemical composition of Titanium alloy

	N	C	H	Fe	O	Ti
wt(%)	0.03	0.10	0.015	0.30	0.25	bal.

Table 2 Chemical composition of Al5083-H131 alloy

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
wt(%)	0.4	0.4	0.1	0.4~1.0	4~4.9	0.05~0.25	0.25	0.15	bal.

표면경도 증가에 따른 장갑재료의 관통저항력의 변화를 연구하기 위하여 Table 4와 같이 티타늄

Table 3 Mechanical properties of Ti and Al alloys

Alloy	Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Elongation (%)
Ti(Gr.2)	345	300	110	10
Al5083-H131	300	190	70.3	16

합금, PVD 처리한 티타늄 합금, 두께가 다른 알루미늄 합금, 냉간 압연한 알루미늄 합금, 냉간압연후 양극 산화 피막 처리한 알루미늄 합금을 적층하여 시편을 제작하였다. 티타늄 합금의 1 Ply당 두께는 0.5mm로 하였으며, 알루미늄 합금의 경우 No. 7부터 No. 12까지는 4mm 두께를 0.5mm로 냉간 압연한 시편이고, No. 12부터 No. 18까지는 4mm 두께를 1.0mm로 냉간 압연한 시편이다.

Table 4 Test Specimen

No	Material	Thickness (mm/1Ply)	Ply	Total Thickness (mm/1Ply)
1	Ti alloy	0.5	9	4.5
2	Ti alloy	0.5	12	6.0
3	Ti alloy	0.5	15	7.5
4	Nitrified Ti alloy	0.5	9	4.5
5	Nitrified Ti alloy	0.5	12	6.0
6	Nitrified Ti alloy	0.5	15	7.5
7	Rolled Al alloy	0.5	15	7.5
8			20	10.0
9			25	12.5
10	Anodized Al alloy after cold-rolling	0.5	15	7.5
11			20	10.0
12			25	12.5
13	Rolled Al alloy	1.0	7	7
14			10	10.0
15			13	13.0
16	Anodized Al alloy after cold-rolling	1.0	7	7
17			10	10.0
18			13	13.0

3.2 경도 시험 및 피막 두께 측정

경도시험은 티타늄 합금, PVD 처리한 티타늄

합금, 냉간 압연한 알루미늄 합금, 냉간압연 후 양극산화 피막처리한 알루미늄 합금의 표면경도의 변화를 측정하기 위하여 마이크로 비이커스 경도계(M-type, Micro vicker's hardness tester, Shimadzu)를 사용하여 표면경도를 측정하였다.

표면 경화 처리된 피막층의 두께는 Sometech사의 Video microscope를 사용하여 측정하였다.

3.3 고속 충격 시험

고속충격 시험은 티타늄 합금, PVD 처리한 티타늄 합금, 두께가 다른 알루미늄 합금, 냉간 압연한 알루미늄 합금, 냉간압연후 양극 산화 피막 처리한 알루미늄 합금의 고속충격에 대한 방호성능을 측정하기 위하여 5.56mm ball탄 및 오스트리아 AVL사의 model 292 발사장치와 5.56mm 시험총열을 사용하였고, 탄자의 충격속도는 미국 MV Ordnance사의 model 4010P 속도측정장치를 사용하였으며, Fig. 7과 같은 실험장치를 사용하여 시편의 방호성능과 파괴거동을 측정하였다.

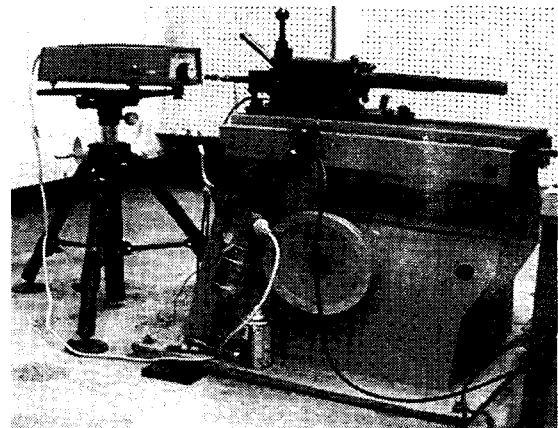


Fig. 7 Test gun system

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 경도 및 피막 두께 측정 결과

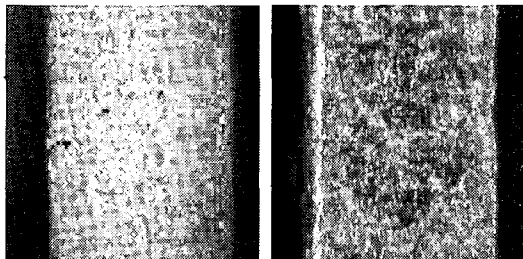
마이크로 비이커스 경도계를 이용한 티타늄 합금과 알루미늄 합금의 표면경도의 변화를 측정한 표면경도 값은 Table 5와 같고, 티타늄 합금의 경우 표면경화처리를 한 경우 표면경도가 약 3.22배 증가하였고 알루미늄 합금의 경우 압연한 경우 표면경도가 약 1.95배 증가하였고, 냉간 압연후 양극산

화피막처리를 한 경우 표면경도가 약 4.93배 증가함을 보였다.

Table 5 Surgage hardness of specimen

material	surface hardness (Hv, 1000g)
Titanium alloy	141
Nitrified Titanium alloy	453
Al alloy(0.5)	92
Rolled Al alloy	180
Anodized Al alloy after cold-rolles alloy	456

Fig. 8은 표면 경화 처리된 알루미늄 합금과 티타늄 합금을 Sometech사의 Video microscope를 사용하여 두께방향으로 촬영한 사진으로, 측정된 알루미늄 합금의 산화피막의 평균두께는 50 μ m이며, 티타늄 합금의 TiCN층 평균두께는 0.9 μ m이었다.



(a) Anodized Al 5083-H131 (b) Nitrified Ti

Fig. 8 Microphotograph of surface hardening treated specimens using video microscope

4.2 티타늄 합금의 고속충격 시험결과

5.56mm ball 탄의 WC870 type 추진제(propellant)와 WC844 type 추진제 양에 따른 탄자의 속도는 탄자의 속도범위가 350 ~ 600m/s이며, WC844 type 추진제를 사용할 경우 탄자의 속도범위가 550 ~ 1,050m/s이었다.

Ti 합금의 고속충격시험결과 각각의 V-50 및 관통모드는 Table 6과 같고, 동일한 두께에서 재료에 대한 방호한계는 Fig. 10과 같다.

티타늄 합금 적층재(9ply)의 경우 V-50은 528%,

12ply의 경우 V-50은 566%, 15ply의 경우 V-50은 662%로 두께가 증가하는 경우 V-50이 선형적으로 증가 하였다.

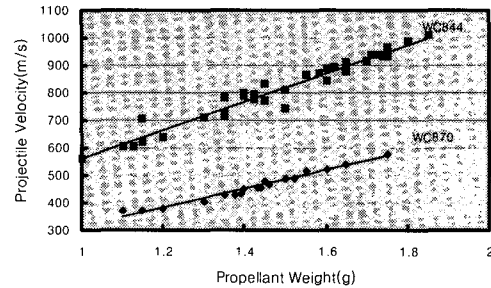


Fig. 9 Projectile velocity(m/s) vs. Propellant weight(g)

Table 6 Ballistic text results of Titanium alloy (Protection Criteria)

No	Material	ply	V-50	Penetration Mode	
				face	back
1	Ti alloy	9	528	P	P, D
2	Ti alloy	12	566	P	P, D
3	Ti alloy	15	663	P	P, D
4	Ti(+TiCN)	9	538	P	P
5	Ti(+TiCN)	12	611	P	P
6	Ti(+TiCN)	15	693	P	P

P : Petalling, D : Ductile Hole Enlargement

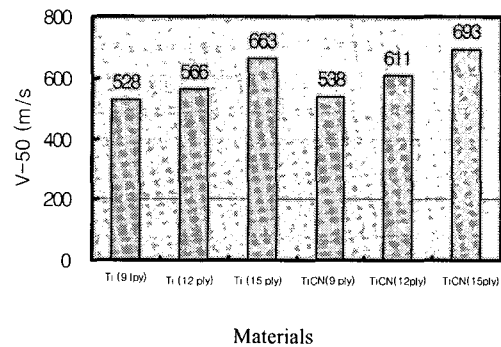


Fig. 10 V-50 velocity vs. Target materials in Ti alloy

표면경화시킨 티타늄 합금 적층재(9plies)의 V-50은 538m/s으로 동일한 두께의 티타늄 합금에 비하여 V-50이 약 1.9%(10m/s) 증가하였고, 전·후면에서의 손상영역은 감소하였다. 표면경화시킨 티타

늄 합금 적층재(12plies)의 V-50은 611m/s로 동일한 두께를 갖는 티타늄 합금에 비하여 V-50이 약 7.9%(45m/s) 증가하였으며, 전·후면에서의 손상영역이 감소함을 보였다.

표면경화시킨 티타늄 합금 적층재(15plies)의 V-50은 693m/s로 동일한 두께를 갖는 티타늄 합금에 비하여 V-50이 약 4.5%(30m/s) 증가하였으며, 전·후면에서의 손상영역 또한 감소함을 알 수 있었다.

일반적인 경향은 같은 재료동일 두께의 경우 적층재 보다 단일 두께의 경우가 방탄효과가 우수함을 보이나, 표면경화시킨 티타늄 합금의 경우, 적층재가 동일한 두께의 티타늄 적층재보다 방호한계값이 증가한다. 이유는 관통저항성에 영향을 주는 주요인자인 경도의 증가가 탄자의 변형(Blunting, 무덤현상)을 가속시키기 때문이라고 사료된다.

4.3 Al 5083-131 합금의 고속충격 시험결과

고속충격 후 Al 5083-H131의 V-50의 테스트 결과는 Table 7과 같다

Table 7 Ballistic test results of Al 5083-H131 alloy (Protection Criteria)

No	Material	Ply	Total Thickness (mm)	V-50
7	Rolled Al alloy (0.5mm/Ply)	15	7.5	384
8		20	10.0	486
9		25	12.5	501
10	Anodized Al alloy after cold-rolling (0.5mm/Ply)	15	7.5	448
11		20	10.0	509
12		25	12.5	579
13	Rolled Al alloy (1.0mm/Ply)	7	7	405
14		10	10.0	487
15		13	13.0	550
16	Anodized Al alloy after cold-rolling (1.0mm/Ply)	7	7	462
17		10	10.0	539
18		13	13.0	625

Fig. 11은 0.5mm 두께의 Al 5083-H131 적층재(25plies)의 고속충격시험 결과이고, 냉간 압연한 경

우 V-50은 501m/s이고, 냉간 압연후 양극산화 피막 처리한 경우 V-50은 579m/s 였다. 동일 두께일 때 V-50은 냉간 압연한 시편에 비해 양극산화 피막처리한 시편은 평균 77m/s (13.3%) 증가하였다.

Fig. 12는 Al 5083-H131 두께 1.0mm(13plies)일때, 냉간 압연한 경우 V-50은 550m/s이고, 냉간압연 후 양극산화 피막처리한 경우 V-50은 625m/s 였다. 동일 두께일때 V-50은 냉간 압연한 시편에 비해 양극산화 피막처리한 시편은 62m/s (7.4%) 증가하였다.

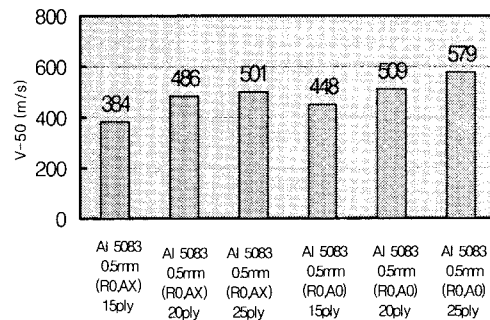


Fig. 11 Protection Ballistic Limits(V-50) of Al 5083-H131 (0.5mm/Ply)

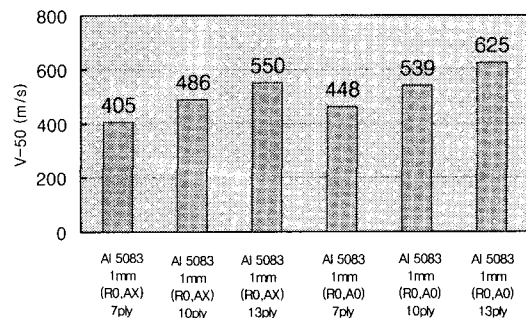


Fig. 12 Protection Ballistic Limits(V-50) of Al 5083-H131 (1.0mm/Ply)

4.4 고속 충격 가시화 실험

표면 처리한 알루미늄 합금의 고속충격시 시편에 작용하는 영향과 탄도의 형상 변화를 미국 Cordin 사의 Rotating Drum Cameras Model No. 350을 사용하여 가시화 한 결과는 Fig. 13과 같고, 충격속도에 따른 탄자의 변형형상은 Fig. 14와 같다.

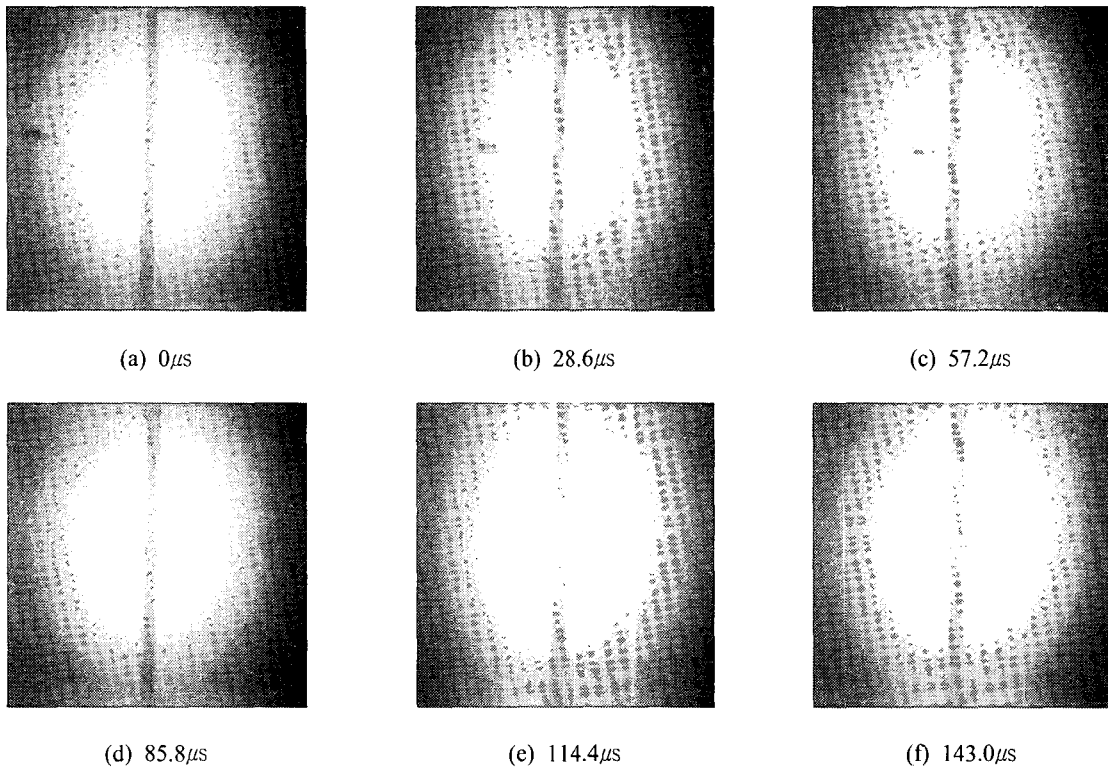


Fig. 13 A series of high speed photographs of Al 5083-H131 alloy (Striking velocity of the projectile was 402.1m/s)



Fig. 14 A deformation of 5.56mm ball projectile by high velocity striking

5. 결 론

표면경화 처리한 티타늄 합금과 알루미늄 합금 적층재의 경도시험 및 5.56mm ball탄에 의한 고속충격시험 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 티타늄 합금 적층재의 적층수에 따른 V-50은 528m/s ~ 662m/s이고, 동일 두께의 PVD 처리한

티타늄 합금의 V-50의 경우는 538m/s ~ 692m/s으로 V-50이 평균 4.8%(32m/s) 증가하였다.

(2) 알루미늄 5083-H131합금은 동일한 두께일 때 냉간 압연후의 V-50보다, 냉간 압연후 양극산화 피막처리한 경우 V-50이 평균 10.4%의 증가를 보였다.

(3) 표면경도 측정결과, PVD 처리를 한 티타늄 합금은 표면경도가 약 3.22배, 알루미늄 합금은 압연한 경우 약 1.95배, 냉간 압연후 양극산화피막처리를 한 경우 표면경도가 약 4.95배 증가하여, 표면경도가 증가할수록 탄자의 변형을 증가시켜 우수한 방탄저항 특성을 보였다.

(4) 티타늄 합금의 경우 후면에서는 파열(petal ling)과 연성구멍확장(ductile hole growth)이 발생하였으나, PVD 처리한 티타늄 합금의 경우 파열(petal ling)만 발생하였다.

후 기

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

참고문헌

- Huh Sun Moo, Sim In Ok, Chun Chang Hwan, "Application present and manufacture technique of Titanium alloy on bulletproof," Trend in Metals & Materials Engineering, Vol. 13., No. 5., pp. 34-43, 2000.
- 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.
- Sohn S. W, Kim H. J, Park Y. U, Hong S. H, "A Study on the ballistic performance and fracture mode of Aluminum 5052-H34 alloy laminates," Proc. KSPE, 2000, pp. 507 -512.
- Sohn. S. W, Lee. D. S, Kim H. J, Hong. S. H, " An Experimental Study on the Impact Characteristics of Surface Hardened Al 5052-H34 Alloy," J. KSPE, Vol. 20. No. 3., 2003.
- Sohn. S. W, Hong. S. H, "Research Trends on the Ballistic Protection Materials and development of bullet-proof helmet," J. KSPE, Vol. 19. No. 1., pp. 7-19, 2002.
- 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.
- 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.
- 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., Jhon Wiley and Sons, New York. pp. 155-183, 1982.
- U.S. Army Test Evaluation Command, "U.S.Army Test Eval. Comd. Test Operations Procedure 2-2-710 Ballistic Test for Ramor," A137973. U.S. Army Test Evaluation Command. Aberdeen Proving Ground, MD 21005.
- 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.
- Kim. J. K, Yu. T. X, "Impact Response and Dynamic Failure of Composite and Laminate Materials, Part I : Impact Damage and Ballistic Impact," Trans Tech Publications, 1998.
- Kim. J. K, Yu. T. X, "Impact Response and Dynamic Failure of Composite and Laminate Materials, Part II : Strain-Rate Effect, Energy Absorption and Modeling," Trans Tech Publications, Switzerland, 1998.
- P. D. Smith, J. G. Hetherington, "Blast and Ballistic Loading of Structures," Butterworth-Heinemann Ltd, 1994.
- Roy C. Laible, "Ballistic Materials and Penetration Mechanics," Elsevier Scientific Publishing Company, 1980.
- Sohn. S. W, Lee. D. S, Kim H. J, Hong. S. H, "The Fracture Behavior of the surface treated Al 5083-H131 alloy under hyper velocity impact," Proceeding of International symposium on Experimental Mechanics, 2002, 12. 29. Taipei, Taiwan.
- John F. Chinella, Martin G.H. Wells, "Ballistic Penetration and Fracture Modes of An Austempered Ductile Iron and AISI 4140 Steel," U.S. Army Research Lab, ASME PVP- Vol.361, pp. 37-53, 1998