

## 표면 경화 처리된 Al, Ti 의 고속 충격 저항성에 관한 연구

손세원(건국대 기계항공공학부), 김희재(육군사관학교 무기공학과),  
홍성희(건국대 대학원 기계설계학과), 김영태\*(건국대 대학원 기계설계학과)

### A Study on the resistance of surface hardening treated Aluminum, Titanium alloy under the high velocity impact

S. W. Sohn(Mech. Eng. Dept., Kon-Kuk Univ.), H. J. Kim(Ordance Dept., KMA),  
S. H. Hong(Mech. Design. Dept., Kon-Kuk Univ.), Y. T. Kim(Mech. Design. Dept., Kon-Kuk Univ.)

#### ABSTRACT

In order to investigate the fracture behaviors(penetration modes) and resistance to penetration during ballistic impact of surface hardening treated Aluminum, Titanium alloy laminates, ballistic tests were conducted. In this paper, Anodized Al 5083-H131 alloy laminates and nitrified Ti (Gr.2) alloy laminates were used to achieve higher surface hardness. Surface hardness test were conducted using a Micro vicker's hardness tester and thickness of surface hardening treated specimens was measured by video microscope.

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

**Key Words :** Anodizing(양극산화피막법), PVD(물리증착법), Ballistic impact resistance(방호성능),  $V_{50}$  ballistic limit(방호한계)

#### 1. 서 론

장갑재료로서 사용되는 재료는 일반적으로 탄도 충격 후에도 최초 탄도 공격에 의한 구조변화에 대하여 구조를 유지하는 구조적 특성뿐만 아니라 관통에 대한 저항성, 구조물의 하중지탱능력과 강도를 가져야 한다. 또한, 탄도충격에 의한 높은 속도(240m/s 이상)의 하중과 변형이 가해지는 동적 환경에 놓이게 되므로 동적 변형 및 파괴거동과 탄도충격특성에 대한 연구는 필수적이다.

장갑재료는 사용되는 용도와 위협조건에 따라 다양한 종류의 재료가 사용되고 있으나 경량화의 문제와 특정한 요구 조건을 만족시키기 위하여 알루미늄 합금, 티타늄 합금과 복합재료등의 사용이 날로 증가하는 추세이다<sup>1)</sup>.

본 연구의 목적은 표면경화처리된 알루미늄 합금과 티타늄 합금의 적층 효과와 가벼우면서도 충

격저항성이 우수한 고성능 섬유강화 복합재료를 이용한 장갑재료를 설계함에 있어서, 전면재로 표면경도가 증가된 알루미늄 합금, 티타늄 합금 적층재의 탄도 충격에 대한 관통저항성과 파괴거동(관통 모드)을 결정하는데 있다.

본 연구에서는 표면경화처리된 알루미늄 합금과 티타늄 합금을 마이크로 비커스 경도계(Micro vicker's hardness tester)를 사용하여 경도를 측정하고, U. S AMTL(1987)에 의한  $V_{50}$  탄도한계 테스트 방법<sup>2)</sup> 및 MIL-STD-662E<sup>3)</sup> 규격서에 의하여 방호한계인  $V_{50}$ 을 측정하고, 관통저항성을 결정하였다<sup>4,5)</sup>. 파괴거동은  $V_{50}$  테스트와  $V_{50}$  테스트보다 더 큰 속도의 PTP(Projectile Through Plates) 테스트<sup>6)</sup>를 통하여 관찰하였다.

#### 2. 배경 이론

## 2.1 양극 산화 피막법(Anodizing)

금속의 기계적 특성을 보완, 향상시키면서 부식을 방지하고, 금속 자체의 내마모성과 내열성을 향상시키고, 경도를 증가시키기 위하여 여러 가지 방법의 표면처리가 수행되고 있다. 이러한 금속 표면 처리는 일반적으로 도금(Plate), 화성처리(Chemical coating), 라이닝(Lining), 도장(Painting), 양극산화피막처리(Anodizing), 표면경화(Case hardening)등으로 분류할 수 있다. 이 중 양극산화피막법은 일반적으로 알루미늄의 양극처리가 대부분을 이루고 있으며, 알루미늄을 전해액에서 양극으로 하고 전기를 통하면 양극에 발생하는 산소에 의해 표면이 산화되어 산화알루미늄( $Al_2O_3$ )의 피막이 생성된다. 이 피막은 대단히 강하며 내식성이 크고 매우 적은 전도성의 섬유상이 되어 여러 가지 색으로 염색할 수도 있다. 주요 양극산화 피막법으로는 옥살산법, 황산법, 크롬산법등이 있다. 본 연구에서는 양극산화 피막법 중 황산법을 사용하여 알루미늄 합금의 표면을 경화시켰다.

## 2.2 물리 증착법(PVD)

질화 경화법은 진공 증착 방법으로서 진공 증착 방법은 CVD(Chemical Vapor Deposition) 방법과 PVD(Physical Vapor Deposition)방법으로 나뉘어 진다. PVD 방법은 증발법(Evaporation), 스퍼터링(Sputtering), 이온 플레이팅(Ion plating)등의 3 가지 방법이 있으며 원자 대 원자(Atom by atom) 양상으로 이동되어 증착된다. CVD 방법은 증착물의 구조나 특성, 증착 속도 등을 독립적으로 조절하기 어렵고 반응가스에 의한 오염과 600°C 이상의 고온처리에 따른 소재의 변형등의 단점이 있어 이를 보완한 PVD 방법을 현재 많이 사용하고 있다.

본 연구에서는 PVD 방법중 이온 플레이팅을 사용하였다. 이온 플레이팅은 진공 속에서 이온화 또는 여기된 증발 원자로서 피복하는 것으로서 마찰이 작고 내마모성이 요구되는 피복(코팅)에 응용되고 있다.

## 2.3 방호탄도한계 측정법(Method of $V_{50}$ ballistic Test)

장갑의 방호성능이란 탄자의 관통에 저항하는 장갑의 능력을 의미하며, 측정방법은 충격탄이 장갑을 완전 관통하거나 부분 관통하는 확률을 기지고 측정하는 방법이다. 관통과 미관통의 확률이 동일한  $V_{50}$  을 충격속도로 나타내는 방호탄도한계(Protection ballistic limit)라고 정의한다.

이 한계는 일정한 표적장갑의 두께와 피탄각(Oblivity : 충격면에서의 장갑면에 대한 법선과 동일점에서의 탄도에 대한 접선간의 각)에 대하여 추진체의 양을 조절하여 충격 속도를 변화시키면서 탄도실험을 행하여 얻는다. 또한 충격속도는 높낮이(up-and-down)방법에 의하여 측정된다.

## 3. 실험

### 3.1 시편 제작

본 연구에 사용된 시편은 Al 5083-H131 합금과 Ti (Gr. 2) 합금으로서 그 화학적 조성을 Table 1, 2 와 같으며, 기계적 성질은 Table 3 과 같다. 두 종류의 시편 모두 1 ply 당 두께는 0.5mm 이고, 동일한 두께에서의 비교를 위하여 각각 15ply 로 적층하여 시편을 제작하였다.

Table 1 Chemical composition of Al 5083-H131 alloy

Composition	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
Al 5083-H131 wt%	0.4	0.4	0.1	0.25	4.5	0.15	0.25	0.15

Table 2 Chemical composition of Ti (Gr. 2) alloy

Composition	N	C	H	Fe	O
Ti Gr. 2 wt%	0.03	0.10	0.015	0.30	0.25

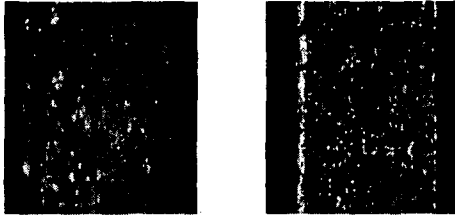
Table 3 Mechanical Properties of Al 5083-H131 alloy & Ti (Gr. 2) alloy

Material (Alloy)	Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Elongation (%)
Al 5083-H131	300	190	70.3	16
Ti Gr. 2	345	300	105	10

### 3.2 경도 및 피막 두께 측정

표면 경화 처리된 알루미늄, 티타늄 합금의 표면 경도 변화를 측정하기 위하여 마이크로 비커스 경도계(M-type, Micro vicker's hardness tester, Shimazu)를 사용하여 표면 경도를 측정하였다.

Fig. 1 은 시편의 표면 경화 처리된 피막층의 두께를 측정한 사진이며, Sometech 사의 Video microscope 를 사용하여 측정하였다. 양극산화 피막법에 의해 표면 처리된 Al 5083-H131 의 산화피막의 두께는 40 ~ 60 $\mu$ m 이며, PVD 처리된 Ti (Gr. 2)의 TiCN 층의 두께는 0.85 ~ 0.96 $\mu$ m 이다.



(a) Anodized Al 5083-H131 (b) Nitrified Ti (Gr.2)

Fig. 1 Microphotograph of surface hardening treated specimens using video microscope

### 3.3 고속 충격 시험

시편의 방호탄도한계  $V_{50}$  을 측정하기 위하여 5.56mm ball 탄 및 시험 총열, 오스트리아 AVL 사의 model 292 발사장치를 사용하였고, 탄자의 충격속도는 미국 MV Ordnance 사의 model 4010P 속도 측정 장치를 사용하였으며, 실험 장치의 개략도는 Fig. 2 와 같다.

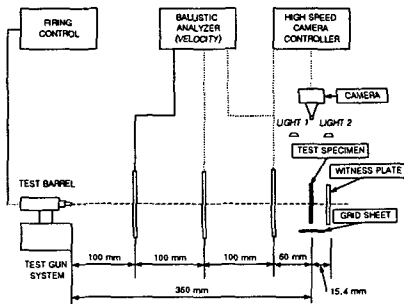


Fig. 2 Experimental setup for high velocity impact test

## 4. 실험 결과 및 고찰

### 4.1 경도 시험 결과

마이크로 비커스 경도계를 사용하여 측정된 각 시편의 경도값은 Table 4 와 같다. Al 5083-H131 합금은 하중 50g, Ti (Gr. 2) 합금은 1000g의 하중을 가하여 측정하였다.

Table 4 Hardness of specimens by micro vicker's hardness tester

Materials (Alloy)	Thickness (mm / 1 ply)	Surface hardness (Hv)
Al5083-H131	0.5	91.39
Anodized Al5083-H131	0.5	436.85
Ti (Gr. 2)	0.5	140.73
Nitrified Ti (Gr. 2)	0.5	452.77

### 4.2 고속 충격 시험 결과

고속 충격 시험은 5.56mm ball 탄자의 속도조절을 위하여 WC 870 type 추진제(Propellant)의 양을 조정하여 수행되었다.

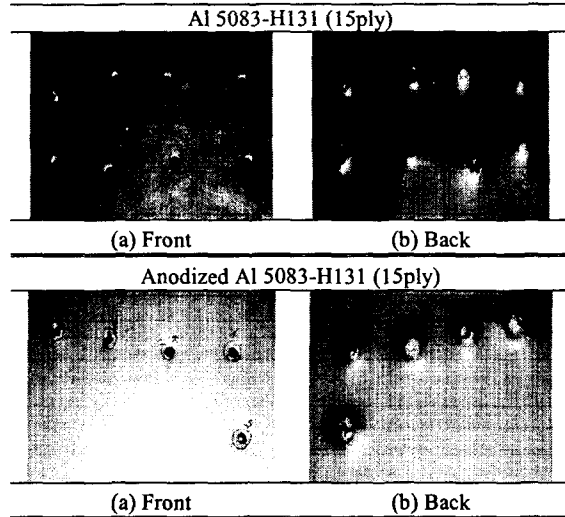


Fig. 3 Results of Al 5083-H131 alloy laminates after impact test

Fig. 3 은 Al 5083-H131 과 양극산화피막 처리된 Al 5083-H131 합금 적층재의 고속충격 시험 결과이며,  $V_{50}$  은 각각 384.1m/s 와 448.0m/s 으로 양극산화 피막처리로 인하여  $V_{50}$  이 16.64%증가하였다. 시편의 파괴거동은 전면에서는 전면파열(Face petalling)이 발생하였고, 후면에서는 파열과 방사형 파괴(Radial fracture)가 발생하였다.

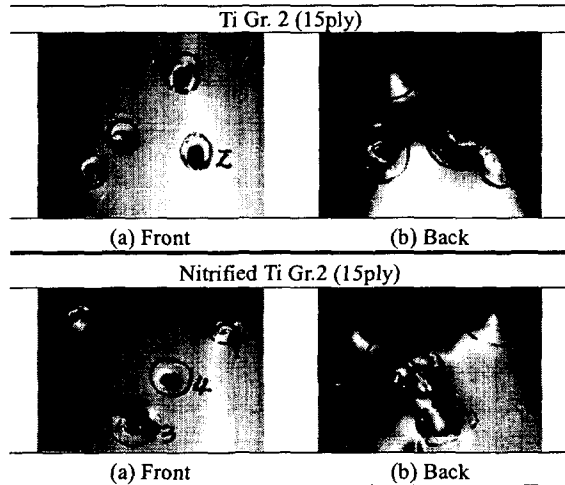


Fig. 4 Results of Ti Gr. 2 alloy laminates after impact test

Ti (Gr.2) 와 PVD 처리된 Ti (Gr.2) 합금 적층재의 고속충격 시험 결과는 Fig. 4 와 같다. 측정된 시편의  $V_{50}$  은 각각 662.9m/s 와 692.7m/s 이었으며, PVD 처리로  $V_{50}$  이 약 4.5% 증가하였다. 시편의 파괴거동은 Al 5083-H131 합금과 비교해 볼 때, 후면에서 더 넓은 소성변형영역이 발생하였는데, 이는 Ti (Gr. 2) 합금의 우수한 기계적 성질로 인하여 고속충격에서 다른 관통에 요구되는 에너지가 소성변형에너지로 전환되었기 때문이라 사료된다.

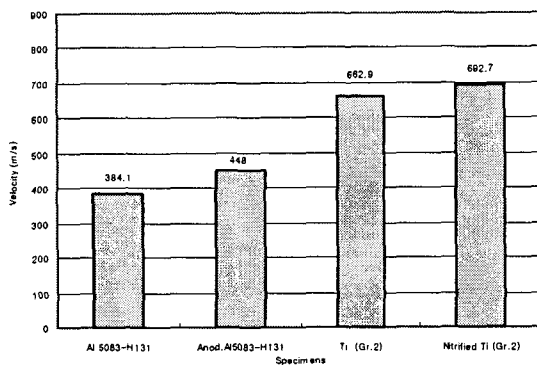


Fig. 6 Protection ballistic limits( $V_{50}$ ) Vs. target specimens

## 5. 결론

Al 5083-H131, 양극산화피막 처리된 Al 5083-H131 합금 적층재와 Ti (Gr. 2), PVD 처리된 Ti (Gr. 2) 합금 적층재의 5.56mm ball 탄에 의한 고속충격 시험 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 표면 경도 측정 결과 Al 5083-H131 합금은 양극산화 피막처리를 한 시편이 일반 시편보다 경도가 약 4.78 배 증가하였으며, Ti (Gr. 2) 합금은 PVD 처리한 시편이 표면처리를 하지 않은 시편보다 약 3.22 배 표면 경도가 증가하였다.

(2) Al 5083-H131 합금과 Ti (Gr. 2) 합금 모두 일반시편보다 표면 처리하여 표면 경도를 증가시킨 시편이 우수한 방탄저항 특성을 보였다. Al 5083-H131 합금의 경우, 양극 산화 피막 처리한 시편이 일반시편 보다  $V_{50}$  이 16.64% (63.9m/s) 정도 증가하였으며, PVD 처리한 Ti (Gr. 2) 합금의  $V_{50}$  은 일반 시편 보다 4.5% (29.8m/s) 증가하였다.

(3) 표면처리를 하지 않은 일반 시편의 경우, Ti (Gr. 2) 합금이 Al 5083-H131 합금보다 72.59% (278.8m/s) 증가된  $V_{50}$  을 보였으며, PVD 처리된 Ti (Gr.

2) 합금의  $V_{50}$  은 양극산화피막 처리된 Al 5083-H131 합금보다 54.62% (244.7m/s) 정도 증가하였다.

(4) 양극산화피막 처리된 Al 5083-H131 합금의 면밀도에 대한  $V_{50}$  값과 PVD 처리된 Ti (Gr. 2)의 면밀도에 대한  $V_{50}$  값은 각각 165.9m/s 와 153.9m/s 이며, Ti (Gr. 2)의 값이 7.8% 적게 나왔으며 이는 피막 두께가 더 얇기 때문이라 사료된다.

## 후 기

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

## 참고문헌

1. U.S. Army Research Laboratory, "Military Specification MIL-A-12560G, Armor Plate, Steel, Wrought, Homogeneous," Dept. of the Navy, Defense Printing Service, Philadelphia, PA, 1984.
2. 손세원, 김희재, 홍성희, 황도연, "표면처리된 Al 5083-H131 합금의 고속충격 거동에 관한 연구," 한국정밀공학회 추계학술대회 논문집 '2001, pp. 820-824.
3. U.S. Army Research Laboratory, "Military Standard,  $V_{50}$  Ballistic Test for Armor, MIL-STD-662E," Dept. of the Navy, Defense Printing Service, Philadelphia, PA, 1984.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 손세원, 김희재, 홍성희, 황도연, "PVD 처리된 티타늄 합금의 고속충격 거동에 관한 연구," 대한기계학회 춘계학술대회 논문집 A '2001, pp. 567-572.
8. 손세원, 김희재, 황도연, 홍성희, "고속충격을 받는 표면처리된 알루미늄 합금의 거동에 관한 연구," 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집 '2001, pp. 784-789.