

고속충격을 받는 Ti/Al 적층재의 파괴거동에 관한 연구

손세원[†] · 이두성^{*} · 홍성희^{**}

A study on the fracture behavior of Ti/Al laminates under high velocity impact

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

Key Words : Face material(전면재), Protection ballistic limit(방호탄도한계), Resistance to penetration(관통저항성), penetration mode(관통모드)

Abstract

In order to investigate the effect of face material on Ti/Al alloy laminates under high velocity impact, a ballistic testing was conducted. Ballistic resistance of these materials was measured by protection ballistic limit(V_{50}), a statistical velocity with 50% probability penetration. Fracture behaviors and ballistic tolerance, described by penetration modes, were respectfully observed, by 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 with 0° obliquity were also done with projectiles that were able to achieve near or complete penetration during PTP tests. Resistance to penetration, and penetration modes which face material was Titanium alloy, were compared to those which face material was anodized Al alloy after cold-rolling.

기호설명

- V_{50} : 방호탄도한계(Protection Ballistic Limits)
 P : 파엽(petalling)
 D : 연성구멍확장(Ductile Hole Growth)
 R : 방사형파괴(Radial Fracture)

1. 서론

가벼우면서도 충격저항성이 우수한 고성능 섬유강화 복합재료는 우주항공, 자동차, 스포츠 소재 뿐만 아니라 방탄재와 같은 군수산업에도 이용되고 있다. 그러나 단순복합재료의 경우 저속의 탄자나 파편에 의한 방호성능은 우수하지만, 고속

충격 탄자와 같이 관통성이 뛰어난 위협조건에 대해서는 관통에 대한 저지능력이 급격히 감소하여 충분한 방탄성능을 기대하기 어려운 경우가 많다. 이런 경우는 충격탄자를 일차적으로 무디게 하거나 파쇄시켜 충격탄자의 형상을 변화시키는 재료를 전면재로 사용하고, 다음은 변형된 충격탄자의 지속적인 관통에 저항하는 능력이 우수한 재료를 사용하여, 이 두 재료를 접합시켜 요구되는 방호특성을 만족시키는 방탄재료의 개발이 꾸준히 요구되고, 연구되어왔다.

본 논문에서는 티타늄 합금과 알루미늄 합금을 표면경도처리한 후 적층하여 탄도충격에 대한 방호탄도한계(V_{50})을 결정하고, 적층방법에 따른 각기 다른 전면재의 표면경도 차이에 따른 관통저항성을 연구하였다

2. 배경이론

알루미늄 합금과 티타늄 합금의 표면경도를 증

[†] 건국대학교 기계항공공학부
 E-mail : sohn@konkuk.ac.kr
 TEL : (02)450-3468 FAX : (02)447-5886

^{*} 건국대학교 수학과

^{**} 건국대학교 기계설계학과 대학원

가시킴을 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 양극산화피막법(anodizing)

알루미늄합금은 전해액속에서 양극으로 하고 전기를 통하여 양극에 발생하는 산소에 의해서 알루미늄면이 산화되어 내식성이 크고 대단히 경한 산화알루미늄 피막이 생성되어 표면경화 시키는 양극산화피막법을 일반적으로 사용한다. 주요 양극산화피막법으로는 전해액의 종류에 따라 옥살산법, 황산법, 크롬산법등으로 구분하며, 본 연구에서는 황산을 전해액으로 사용한 황산법을 사용하여 알루미늄 합금의 표면을 경화시켰고, 양극산화피막 처리과정은 Fig. 1과 같다.

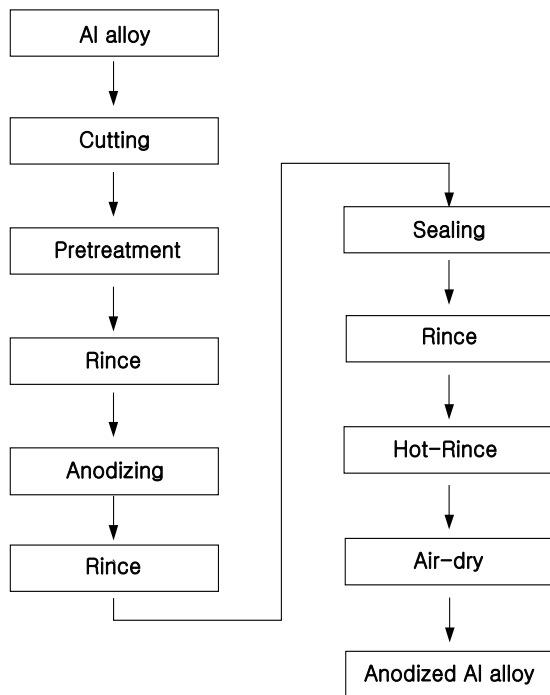


Fig. 1 Anodizing process of Al alloy

2.2 질화경화법(nitriding)

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

진공증착을 통한 질화경화법은 화학증착법(CVD, chemical vapor deposition) 방법과 물리증착법(PVD, physical vapor deposition) 방법으로 구분되며, 이 중 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 이상의 고온처리에 따른 모재의 변형 등의 단점이 있어 이를 보완한 물리증착법을 현재 많이 사용되고 있다.

본 연구에서는 물리증착법중 이온 플레이팅(ion plating) 방법을 사용하였다.

2.3 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 충에서 발사된 총알과 같은 상황을 포함하는 탄도충격을 받는다.

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 파괴된 경우의 3가지로 구분할 수 있다.

두께가 얇거나 중간 두께의 표적판에서 완전관통할때는 주로 재료의 물성치, 충격자의 형상 및 타격속도에 크게 영향을 받으면서 파괴가 발생한다. 이러한 경우 Fig. 2에서 보는 바와 같이 최초의 압축파로 일어나는 압축파괴(compression fracture), 반경방향의 방사형 파괴(radial fracture), 조각 파쇄(spall), 딱지 파쇄(scabbing), 플러그(plug), 표적판의 전면과 후면에서의 파열(petalling), 연성구멍확장(ductile hole enlargement) 및 취성재료인 경우에 발생하는 세열파편(fragmentation)도 함께 발생한다.

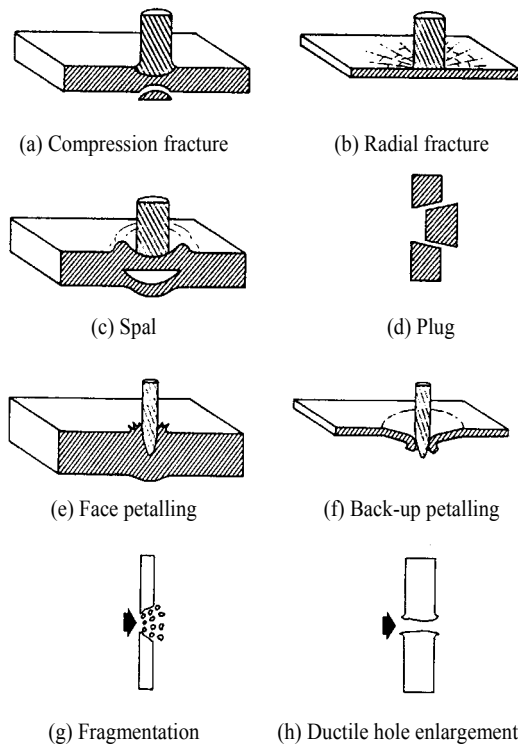


Fig. 2 Typical failure (penetration) modes of impacted plates

3. 실험

3.1 시편의 제작

본 연구에 사용된 티타늄 합금은 ASTM Grade2, 알루미늄 합금은 5083을 사용하였으며, 그 화학적 성분은 각각 Table 1, 2와 같고, 기계적 성질은 Table 3과 같다. 각각의 합금은 300×300mm크기로 제작하였으며, 각각의 1ply당 두께는 0.5mm로 하였다.

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 Al 5083 alloy

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

Table 3 Mechanical properties of Ti and Al alloys

Alloy	Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Elongation (%)
Ti	345	300	110	10
Al	300	190	70.3	16

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, 냉간 압연한 알루미늄 합금, 냉간압연후 양극 산화 피막 처리한 알루미늄 합금등의 단일 적층재와 티타늄 합금과 냉간압연후 양극산화피막 처리한 알루미늄의 이중(異種) 적층재의 의 고속 충격에 대한 방호성능을 측정하기 위하여 5.56mm ball탄 및 Fig. 3과 같은 오스트리아 AVL사의 model 292 발사장치와 5.56mm 시험총열을 사용하였고, 탄자의 충격속도는 미국 MV Ordnance 사의 model 4010P 속도측정장치를 사용하였으며, Fig. 4와 같은 실험장치를 사용하여 시편의 방호성능과 파괴거동을 측정하였다.



Fig. 3 Experimental setup for high velocity impact test

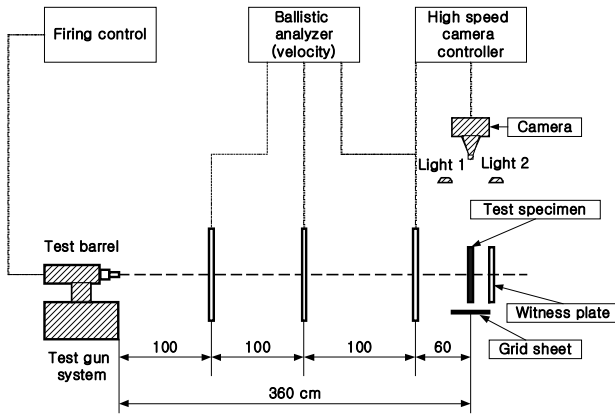


Fig. 4 Experimental setup for high velocity impact test

4. 실험 결과 및 고찰

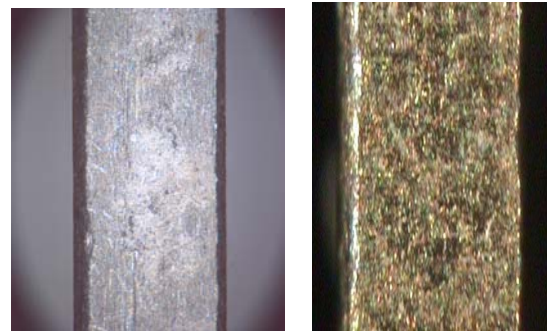
4.1 경도 및 피막 두께 측정 결과

마이크로 비커스 경도계를 이용한 티타늄 합금과 알루미늄 합금의 표면경도의 변화를 측정 한 표면경도값은 Table 4와 같고, 티타늄 합금의 경우 표면경화처리를 한 경우 표면경도가 약 3.22배 증가하였고 알루미늄 합금의 경우 압연한 경우 표면경도가 약 1.95배 증가하였고, 냉간 압연 후 양극산화피막처리를 한 경우 표면경도가 약 4.93배 증가함을 보였다.

Fig. 5는 표면 경화 처리된 알루미늄 합금과 티타늄 합금을 Sometech사의 Video microscope를 사용하여 두께방향으로 촬영한 사진으로, 측정된 알루미늄 합금의 산화피막의 평균두께는 $50\mu\text{m}$ 이며, 티타늄 합금의 TiCN층의 평균두께는 $0.9\mu\text{m}$ 이었다.

Table 4 Surface hardness of specimen

No.	material	Surface hardness (Hv, 1000g)
1	Titanium alloy	140.73
2	Nitrified titanium alloy	452.77
3	Al alloy	92.33
4	Cold-Rolled Al alloy	180.36
5	Anodized Al alloy after cold-rolling	455.65



(a) Anodized Al alloy (b) Nitrified Ti alloy
Fig. 5 Microphotograph of surface hardening treated specimens using video microscope

4.2 고속충격 시험결과

WC870 type의 추진제(propellant)를 사용할 경우 5.56mm ball 탄자의 속도범위는 350~600m/s이며, WC844 type 추진제를 사용할 경우 탄자의 속도범위는 550~1,050m/s으로 나타났다.

고속충격에 대한 각 시편의 V50 및 관통모드는 Table 5와 같다.

Fig. 6에서와 같이 티타늄 합금 적층재(15ply)의 경우 V₅₀은 662m/s이었으며, 완전관통후의 파괴모드는 전면에서는 연성구멍 확장이 후면에서는 연성구멍 확장 및 후면과열(Back-Petalling)이 발생하였다. 표면경화시킨 티타늄 합금 적층재(15plies)의 V₅₀은 692.68m/s으로 동일한 두께를 갖는 표면처리하지 않은 티타늄 합금에 비하여 V₅₀이 약 4.5%(29.76m/s) 증가하였으며, 완전관통후의 전·후면에서의 손상영역 또한 감소함을 알 수 있었다.

표면경화시킨 티타늄 합금 적층재가 동일한 두께의 티타늄 적층재보다 방호한계값이 증가하는 이유는 관통저항성에 영향을 주는 주요인자인 경도의 증가로 인한 관통저항성의 증가 때문이라고

Table 5 Ballistic test results of Specimens (Protection Criteria).

No	Material	Ply	V ₅₀ (m/s)	Penetration Mode	
				face	back
1	Ti alloy	15	662.92	D	P, D
2	Ti(+TiCN)	15	692.68	P	P
3	Rolled Al alloy	15	384.1	P	P, D
4	Anodized Al alloy after cold-rolling	15	448.0	P	R
5	Ti/Anodized Al	15	519.42	P	R
6	Anodized Al/Ti	15	614.61	P	P, D

P : Petalling, D : Ductile Hole Enlargement, R: Radial Fracture

추측된다.

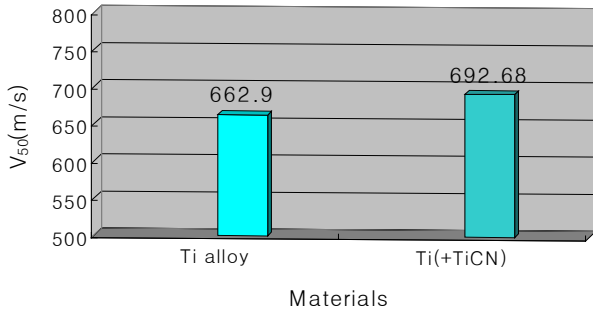


Fig. 6 V₅₀ velocity vs. Target materials in Ti alloy

Fig 7에서와 같이 냉간 압연한 알루미늄 합금 적층재(15ply)의 경우 V₅₀은 384.1m/s이었으며, 완전관통후의 파괴모드는 전면에서는 전면파열(Face-Petalling)이 후면에서는 연성구멍 확장 및 후면파열(Back-Petalling)이 발생하였다.

냉간압연후 양극산화피막처리한 알루미늄 합금 적층재(15ply)의 경우 V₅₀은 448.0m/s이었으며, 완전관통후의 파괴 거동은 전면에서는 급격히 크기가 감소한 파열이 발생하였고, 후면에서는 방사형 파괴(Radial Fracture)가 발생하였다.

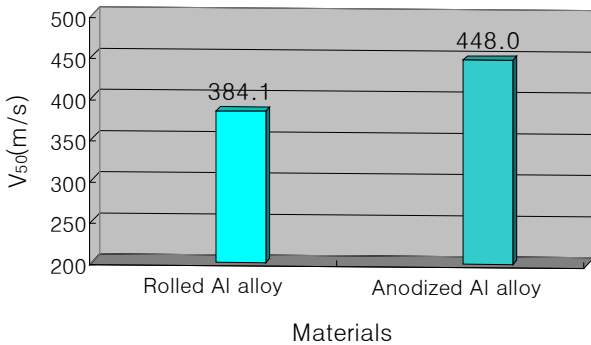


Fig. 7 V₅₀ velocity vs. Target materials in Ti alloy

티타늄 합금과 냉간압연후 양극산화피막처리한 알루미늄 합금의 이종(異種) 적층재에 대한 고속 충격 실험후의 V₅₀은 Fig. 8과 같다.

티타늄 합금을 전면에 사용하고 양극산화피막처리한 알루미늄 합금을 후면에 사용한 결과 V₅₀이 519.42m/s이었다. 양극산화피막처리한 알루미늄 합금을 전면에 사용하고 티타늄 합금을 후면에 사용한 결과 V₅₀이 614.61m/s로서 양극산화피막처리한 알루미늄합금을 전면재료 사용한 경우 V₅₀이 1.18

배 증가하였다. 이는 표면경도가 양극산화피막처리한 알루미늄 합금이 티타늄 합금보다 더 높기 때문에 고속충격시의 관통저항성이 증가되었기 때문이라고 사료된다.

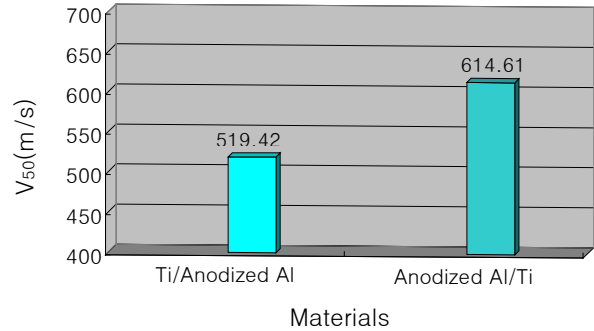


Fig. 8 V₅₀ velocity vs. Target materials in Ti/Al and Al/Ti laminates

Fig. 9, 10은 고속충격 실험 후의 Ti/Al 이중적층재의 전·후면을 나타내고 있으며, Fig. 9는 티타늄 합금을 전면재료로 한 경우 완전관통후 연성구멍확장이 발생하였으며, Fig. 10은 냉간압연후 양극산화피막처리한 알루미늄 합금이 후면재이며 완전관통된 경우 방사형 파괴가 발생하였다.

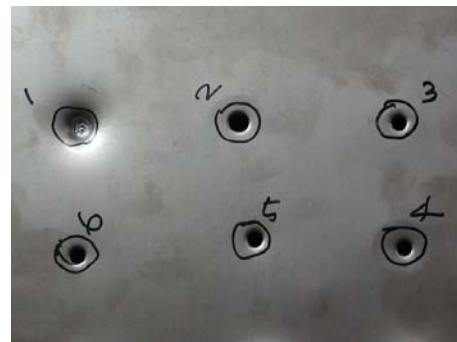


Fig. 9 PTP result of front face in Ti(8plies)/Anodized Al(7plies) laminates



Fig. 10 PTP result of back face in Ti(8plies)/Anodized Al(7plies) laminates

Fig. 11,12는 고속충격 실험 후의 Al/Ti 이중적층재의 전·후면을 나타내고 있으며, Fig. 11은 냉간압연후 양극산화피막처리한 알루미늄 합금이 전면재인 경우에도 완전관통후 연성구멍확장이 발생하였으며, Fig. 12는 티타늄 합금이 후면재인 경우는 완전관통후 후면파열 및 연성구멍확장이 발생하였다.

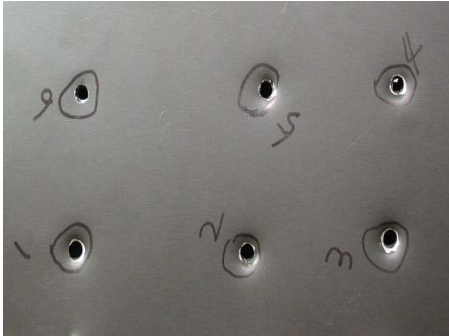


Fig. 11 PTP result of front face in Anodized Al(7plies) + Ti(8plies) laminates



Fig. 12 PTP result of back face in Anodized Al(7plies) + Ti(8plies) laminates

5. 결론

5.56mm ball탄을 사용하여 티타늄합금과 표면처리한 알루미늄 합금 적층재의 고속충격 실험 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 티타늄 합금 적층재의 V_{50} 은 662.92m/s이고, 동일 두께의 PVD 처리한 티타늄 합금의 V_{50} 은 692.68m/s으로 V_{50} 이 4.5%(29.76m/s) 증가하였으며, 알루미늄 적층재의 경우 냉간 압연후의 V_{50} 은 384.12m/s이고, 동일 두께의 압연후 양극산화피막처리한 경우 V_{50} 은 448.0m/s으로 V_{50} 이 16.6%(63.88 m/s)의 증가를 보였다.

(2) Ti/Al 이중적층재의 V_{50} 은 전면재로 티타늄 합금을 사용하였을 때 519.42m/s이고, 전면재로 냉

간압연후 양극산화피막처리한 알루미늄 합금을 사용하였을 때 614.61m/s로, V_{50} 이 18.3%(95.19m/s)의 증가를 보였다.

(3) 표면경도 측정결과, PVD 처리를 한 티타늄 합금은 표면경도가 약 3.22배, 알루미늄 합금은 압연한 경우 약 1.95배, 냉간 압연후 양극산화피막처리한 경우 표면경도가 약 4.93배 증가하여, 표면경도가 증가할수록 우수한 방탄저항 특성을 보였다.

(4) Ti/Al 이중적층재는 후면재로 티타늄 합금을 사용하였을 때 후면파열 및 연성구멍확장이 발생하였으며, 후면재로 냉간압연후 양극산화피막처리한 알루미늄 합금을 사용하였을 때 방사형파괴를 보였다.

후 기

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

참고문헌

- (1) Zukas, J. A., T. Nicholas, H.F. Swift, L. B. Greszczuk, and DR. Curran, 1982, "Penetration and Perforation of Solid," Impact Dynamics, Zukas, J. A., et al., John Wiley and Sons, New York, pp. 155-183.
- (2) U.S. Army Research Laboratory, "Military Standard, 1984, "V50 Ballistic Test for Armor, MIL-STD-662F," Dept. of the Navy, Defense Printing Service, Philadelphia, PA.
- (3) S. W. Sohn, D. S. Lee, and S. H. Hong, 2001, "A Study on the high velocity impact behavior of titanium alloy by PVD method", Proceeding of KSME, pp. 567-572.
- (4) S. W. Sohn, D. S. Lee, H. J. Kim and S. H. Hong, 2002, "The fracture behavior of the surface treated Al 5083-H131 alloy under hyper velocity impact", Proceeding of International symposium on Experimental Mechanics, Taiwan, p. 66.
- (5) S. W. Sohn, H. J. Kim, Y. T. Kim, and S. H. Hong, 2002, "A Study on the resistance of surface hardening treated Aluminum, Titanium alloy under the high velocity impact," Proceeding of Korean Society of Precision Engineering, pp. 852-855.
- (6) John F. Chinella and Martin G. H. Wells, 1998, "Ballistic Penetration and Fracture Modes of an austempered ductile iron and AISI 4140 Steels," Structures Under Extreme Loading Conditions- 1998, ASME, PVP-Vol. 361, pp. 37-53.
- (7) Backman, M. E. and W. Goldsmith, 1978, "The Mechanics of Penetration of Projectiles into Targets," International Journal of Engineering Science, Vol. 16, pp.1-99.