韓國精密工學會 2001年度 春季學術大會論文集 pp.784~789 KSPE 01S173

고속충격을 받는 표면처리된 알루미늄 합금의 거동에 관한 연구

손세원(건국대 기계항공우주공학부), 김희재(육사 무기공학과), 황도연*(건국대 대학원 기계설계학과), 홍성희(건국대 대학원 기계설계학과)

A Study on the fracture behavior of surface hardening treated aluminum alloy under the high velocity impact

Se-Won Sohn(Mech. Eng. Dept., Kon-Kuk Univ.), Hee-Jae Kim(Ordnance Eng. Dept. KMA), Do-Yeon Hwang(Mech. Design. Dept., Kon-Kuk Univ.), Sung-Hee Hong(Mech. Design. Dept., Kon-Kuk Univ.)

ABSTRACT

In order to investigate the fracture behaviors(penetration modes) and the resistance to penetration during ballistic impact of cold-rolled Al 5052 H34 alloy laminates, anodized Al 5052 H34 alloy laminates, and anodized Al 5052 H34 alloy after cold-rolling, ballistic testing was conducted. In general, superior armor material is brittle materials which have a high hardness. Ballistic resistance of these materials was measured by protection ballistic limit(V_{50}), a statical velocity with 50% probability for incomplete penetration.

Fracture behaviors and ballistic tolerance, described by penetration modes, are observed respectfully, resulting from 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 5.56㎜ ball projectile. V_{50} tests with 0° obliquity at room temperature were also conducted with projectiles that were able to achieve near or complete penetration during PTP tests.

Surface Hardness, resistance to penetration, and penetration modes of Al 5052 H34 alloy laminates compared to those of cold-rolled Al 5052 H34 alloy laminates and anodized Al 5052 H34 alloy laminates and anodized Al 5052 H34 alloy after cold-rolling.

1. 서 론

알루미늄 합금은 경량이면서 소구경탄에 대한 방탄성능이 우수하며 용접성이 양호하고, 복합재료보다 신뢰성 있는 소재이다. 이러한 소재인 알루미늄 합금이 장갑재료로서 사용되기 위해서는 일반적인 충격에 대한 에너지 저장능력과 사용중에 구조적 파괴를 막기 위한 탄도허용능력이 요구되어진다

선진국에서는 기존의 Al 5083, Al 7039 및 Al 2090 등의 합금 보다 더욱 방탄성이 우수한 Al 2019이나 Al 7017를 방탄재료로 개발하여 대체하는 단계이지만 선진국의 기술 유출을 꺼려해서 접근하기 어려운 실정이다. 국내에서는 주로 저속충격에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 상태이나, 실제 소구경 화기 등에 의한 고속충격에 대한 연구는 미미한 실정이다. 따라서 알루미늄 합금의 고속충격에 대한 저항성을 높이기 위한 연구가 필요하다.[1]

손 등은 양극산화 피막 처리한 알루미늄 합금 적층재의 고속충격거동시의 파괴거동과 저항성에 대하여 연구한 결과 알루미늄 합금의 표면경도가 증가 하였을 때, 탄자의 충격시 에너지 흡수효과와 탄두의 형상을 무디게하는 효과가 증가한다고 보고하였다.[5] 또한 우수한 방탄성능을 갖기 위해서는 취성을 나타내지 않으면서 높은 경도를 갖는 재료를 사용해야 한다.

본 연구는 알루미늄 합금을 냉간압연하여 표면경도를 증가시킨 후 고속충격에 대한 관통저항성과 파괴거동(관통모드)를 결정하고, 또한 냉간 압연 후 양극 산화 피막처리를 실시하여 양극산화 피막의 두께에 따른 표면경도의 변화와 이에 따른 고속 충격에 대한 관통저항성과 파괴거동을 결정하는데 그 목적이 있다.

본 연구에서는 알루미늄 합금과 양극산화피막처리한 알루미늄 합금을 마이크로 바이커스 경도계(Micro Vicker's Hardness Tester)를 사용하여 경도를 측정하였으며, MIL-STD-662E[6]에 의한 탄도한계(V_{50}) 측정 방법에 의하여 방호 한계인 V_{50}을 측정하고, 관통저항성을 결정하였다.[1,10] 파괴거동은 V_{50} 측정과 V_{50} 보다 더 빠른 속도의 PTP (Projectile through plates)테스트[8]를 통하여 관찰하였다.

2. 이론적 배경

2.1 압연(Rolling)

압연은 소재가 회전하는 롤 사이를 통과할 때 롤의 높은 압축하중을 받아 두께가 감소되고 단면이 변형되어 판재, 단면재(형재), 봉재로 성형가공되는 작업을 말하며, 높은 압하력에 의한 소성 변형이므로 금속조직이 미세화 되고 균일화되어 기계적 성질이 개선된다.

열간 압연에 비하여 경도가 큰 냉간 압연재의 표면은 열간 압연에 비하여 표면 조도가 훨씬 좋으며 냉간 압연에 따른 강도의 증가도 이용할 수 있다. 냉간 압연에서의 마지막 가공은 대개 작은 압하율을 가하며 정확한 치수정밀도, 평면성, 미세한 표면을 얻을 수 있다 아울러 *SPSS(Skin Pass-Stretcher Strain)*현상을 막기 위해 아주 작은 압하율로 가공한다.

본 연구에서는 알루미늄 합금의 표면을 경화 시키기 위하여 냉간 압연을 실시하였다

2.2 양극산화피막법(Anodizing)

양극산화피막법은 일반적으로 알루미늄의 양극처리가 대부분을 차지하고 있고, 알루미늄을 전해액에서 양극으로 하고 전기를 통하면 양극에 발생하는 산소에 의해서 알루미늄면이 산화되어 산화알루미늄 피막이 생성된다. 이 피막은 대단히 강하며 내식성이 크고 매우 적은 전도성의 섬유상이 되어 여러 가지 색으로 염색을 할 수 있다. 주요 양극산화피막법으로 옥살산법, 황산법, 크롬산법이 있다.

본 연구에서는 양극산화피막법중 황산법을 사용하여 알루미늄의 표면을 경화시켰고, 경화과정은 Fig 1과 같다.

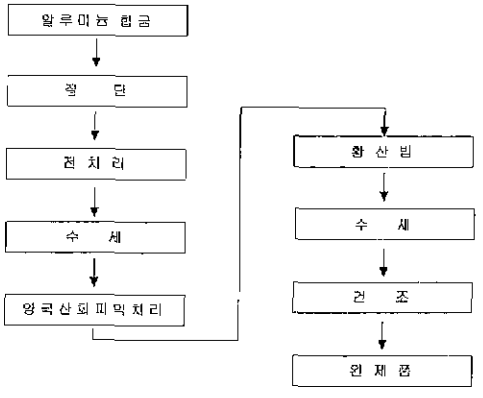


Fig 1 Anodizing process of Al alloy

2.2 충격속도(Impact Velocity) 및 관통모드 (Penetration Mode)

탄자의 운동에너지를 이용하여 장갑으로 보호된 표적을 관통하거나 또는 표적에 충격을 가하는 운동에너지탄의 표적충돌속도는 사용한 추진제(*Propellant*) 및 강내탄도 특성에 따라 결정되나 일반적으로 소구경 화기의 비행속도 범위인 300~1000m/s범위를 운동 에너지탄의 충격조건으로 삼고 있다.

운동에너지탄의 최종탄도학적 효과는 충격탄에 의한 표적의 관통현상을 분석함으로써 공격 및 방호에 대한 효과를 동시에 분석할 수 있다. 충격탄이 표적재료를 충격할 때 탄이 관통되는 현상은, 완전관통은 되지 않고 표적재료에 소성변형만 일으킨 경우(PP, Partial Penetration), 완전관통이 된 경우(CP, Complete Penetration), 불완전관통이지만 표적재료가 파괴된 경우의 3가지로 구분할 수 있다.

2.3 방호탄도한계(V_{50}) 측정방법

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

방호성능의 측정방법은 충격탄이 장갑을 완전관통하거나 부분관통하는 확률을 가지고 측정하는 방법으로, Fig. 2와 같이 관통과 미관통의 확률이 동일한 V_{50}을 충격속도로 나타내는 V_{50}을 방호탄도한계(*Protection Ballistic Limit*)라고 정의한다

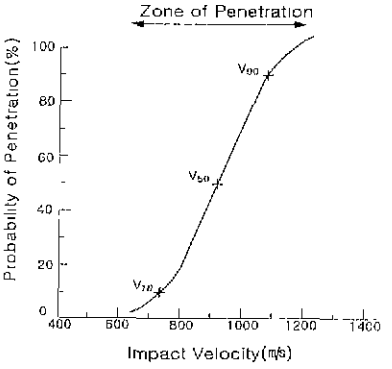


Fig. 2. Definition of Protection Ballistic Limits(V50)

이 한계는 일정한 표적장갑의 두께와 피탄각(obliquity . 충격면에서의 장갑면에 대한 법선과 동일점에서의 탄도에 대한 접선간의 각)에 대하여 추진제의 양을 조절하여 충격속도를 변화시키면서 탄도실험을 행하여 얻는다.

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

2.4 파괴거동(Fracture Behavior)

두께가 얇거나 중간 두께의 표적판에서 완전관통할 때는 주로 재료의 물성치, 충격자의 형상 및 타격 속도에 크게 영향을 받으면서 파괴가 발생한다 충격을 받은 판의 파괴거동은 단일거동을 나타내거나 또는 아주 복잡하거나 수 개의 거동를 갖는 형태로 나타난다.

이러한 경우 Fig 3에서 보는 바와 같이 최초의 압축파로 일어나는 압축파괴(Compression Fracture), 반경방향의 방사형 파괴(Radial Fracture), 조각 파쇄(Spal), 딱지 파쇄(Scabbing), 플러그(Plug), 표적판의 전면과 후면에서의 파엽(Petalling), 연성구멍확장(Ductile Hole Enlargement) 및 취성재료인 경우에 발생하는 세열파편(Fragmentation)도 함께 발생한다.

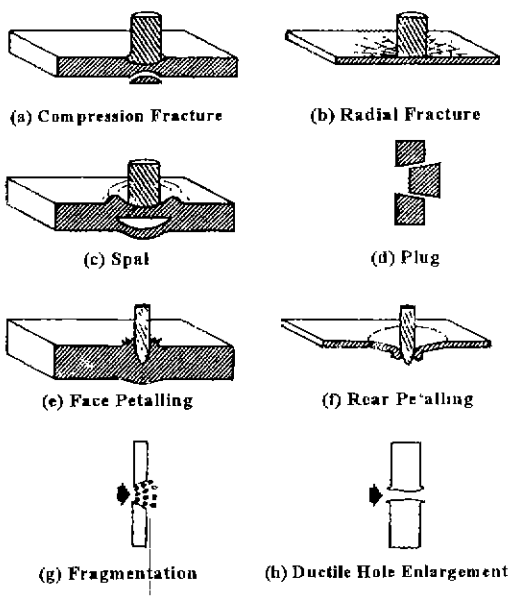


Fig. 3. Typical Failure(Penetration) Modes of Impacted Plates

3. 실험 방법

3.1 시편의 제작

본 연구에 사용된 시편은 Al 5052 H34 합금으로써 그 화학적 조성은 Table 1과 같고, Table 2와 같이 두께가 다른 알루미늄 합금, 냉간 압연한 알루미늄 합금, 냉간압연후 양극 산화 피막 처리한 알루미늄 합금을 사용하여 적층하여 시편을 제작하였다 여기서 No.1부터 No.3까지는 1㎜두께를 0.5㎜로 냉간 압연한 시편이며,No.4부터 No.6까지는 0.5㎜ 두께의 표준 시편이고, No.7부터 No.12까지는 0.5㎜ 두께를 0.25㎜로 압연을 행한 것이다.

Table 1 Chemical composition of Al 5052 H34 alloy

Composition	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Al
wt%	0.25	0.40	0.10	0.10	2.80	0.35	0.10	bal.

Table 2 Test Specimen

No.	Material	Thickness (mm/1 ply)	Ply	Total thickness (mm)
1	Rolled Al alloy	0.5	15	7.5
2	Rolled Al alloy	0.5	20	10.0
3	Rolled Al alloy	0.5	25	12.5
4	Anodized Al alloy	0.5	15	7.5
5	Anodized Al alloy	0.5	20	10.0
6	Anodized Al alloy	0.5	25	12.5
7	Anodized(25㎛) Al alloy after cold-rolling	0.25	30	7.5
8	Anodized(25㎛) Al alloy after cold-rolling	0.25	40	10.0
9	Anodized(25㎛) Al alloy after cold-rolling	0.25	50	12.5
10	Anodized(50㎛) Al alloy after cold-rolling	0.25	30	7.5
11	Anodized(50㎛) Al alloy after cold-rolling	0.25	40	10.0
12	Anodized(50㎛) Al alloy after cold-rolling	0.25	50	12.5

3.2 경도 시험

알루미늄 합금의 표면경화처리에 의하여 금속의 표면경도 변화가 생기므로 경도 시험이 필요하다.

본 연구에서는 냉간압연후 양극산화피막처리한 알루미늄 합금의 표면 경도의 변화를 측정하기 위하여 마이크로 비이커스 경도계(M-type, Micro Vicker's Hardness Tester, Shimadzu)를 사용하였고, 양극산화피막 단면에 일정량의 무게로 다이아몬드 정사각추 압자를 사용하여 누름자국을 주고, 그 크기로 표면 경도를 측정하였다

3.3 고속 충격 시험

본 연구에서는 알루미늄 합금과 양극산화피막처리에 의한 알루미늄 합금의 고속충격에 대한 방호성능을 측정하기 위하여 Fig. 4와 같은 실험 장치를 사용하여 시편의 방호성능과 파괴거동을 측정하였다.

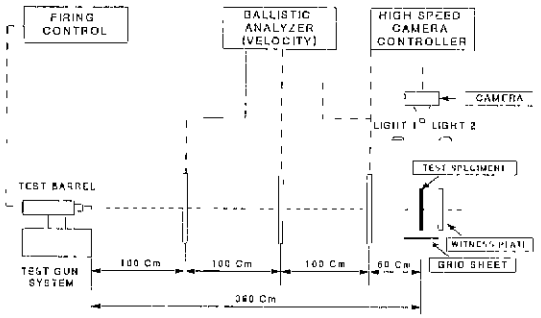


Fig 4 Experimental Setup for High Velocity Impact Test

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 경도시험

마이크로 비이커스 경도계를 사용하여 측정된 경도 값은 Table 3과 같았으며, 냉간압연한 알루미늄 합금에 비하여 양극산화처리 두께 25㎛, 50㎛일 때 각각 2.9배, 4.8배의 표면경도 증가를 보였다.

Table 3 Hardness of Test Specimen by Micro Vicker's Hardness Tester

No.	Material	Thickness (mm/1 ply)	Surface Hardness (H_v, 50g)
1	Rolled Al alloy	0.5	91.36
2	Anodized Al alloy	0.5	440.65
3	Anodized(25㎛) Al alloy after cold-rolling	0.25	260.39
4	Anodized(50㎛) Al alloy after cold-rolling	0.25	436.85

4.2 고속충돌시험

5.56㎜ ball 탄의 WC870 type 추진제(Propellant)양에 따른 탄자의 속도는 Fig. 5와 같으며, 추진제 양을 변화시켜서 요구하는 탄자 충돌 속도를 결정하여 충돌 시험을 실시하였다.

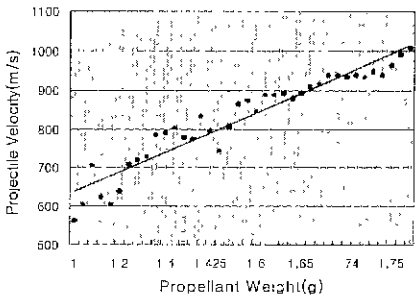
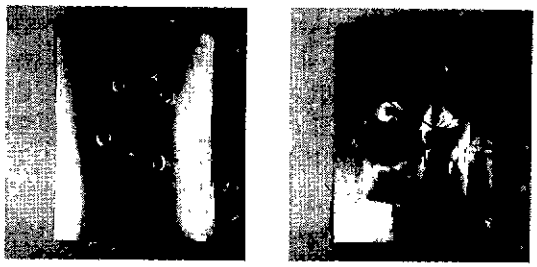


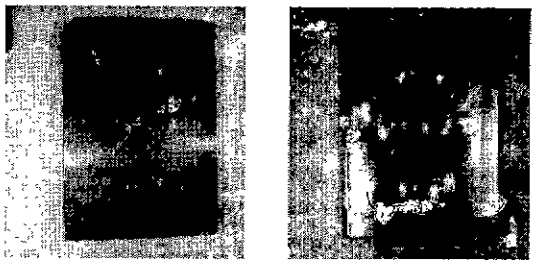
Fig. 5. Projectile Velocity(㎧) Vs Propellant Weight(g)



(a) Front (b) Back

Fig. 6. PTP Results of Cold-rolled Al alloy(25 Plies) Laminates

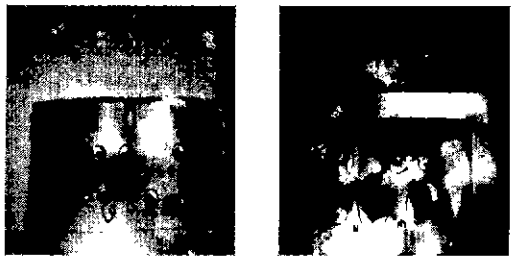
냉간 압연한 알루미늄 합금 적층재(25 Plies)의 고속충격시험 결과는 Fig. 6과 같다. 측정된 냉간 압연한 알루미늄 합금 적층재의 V_{50}은 554㎧이었다. 완전관통후의 파괴거동은 전면에서는 알루미늄 합금 적층재와 같은 전면파엽(Face Petalling)이 발생하였고, 후면에는 후면파엽(Rear Petalling)이 발생하였다.



(a) Front (b) Back

Fig. 7 PTP Results of Anodized Al alloy(25 Plies) Laminates

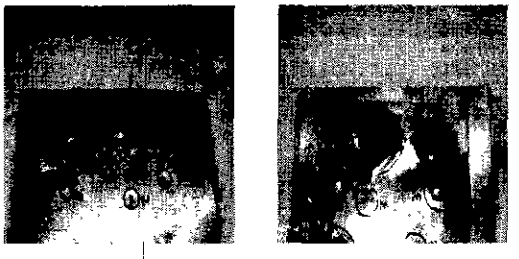
양극산화피막 처리(50㎛)한 알루미늄 합금 적층재(25 Plies)의 고속충격시험 결과는 Fig 7과 같다. 측정된 알루미늄 합금 적층재의 V_{50}은 584㎧이었다. 완전관통후의 파괴거동은 전면에서는 전면파엽이 발생하였고, 후면에서는 파엽(Petalling)과 연성구멍확장(Ductile Hold Enlargement)을 확인할 수 있었다.



(a) Front (b) Back

Fig. 8. PTP Results of Anodized(25㎛) Al alloy (50 Plies) Laminates after Cold-rolling

냉간압연후 양극산화피막 처리(25㎛)한 알루미늄 합금 적층재(50 Plies)의 고속충격시험 결과는 Fig. 8과 같다. 측정된 알루미늄 합금 적층재(50 Plies)의 V_{50}은 532 m/s이었다. 완전관통의 파괴 거동은 전면에서는 급격히 크기가 감소한 파열이 발생하였고, 후면에서는 방사형 파괴(Radial Fracture)가 발생하였다.



(a) Front (b) Back

Fig. 9. PTP Result of Anodized (50㎛) Al alloy (50 Plies) Laminates after Cold-rolling

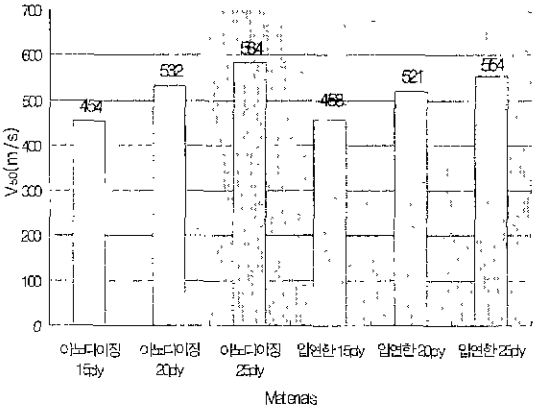
냉간압연후 양극산화피막 처리(50㎛)한 알루미늄 합금 적층재(50 Plies)의 고속충격시험 결과 Fig. 9와 같다. 측정된 알루미늄 합금 적층재의 V_{50}은 559m/s이었다. 파괴모드는 전면에서는 파열이 발생하였고, 후면에서는 방사형 파괴(*Radial Fracture*)가 발생하였다.

Table. 4 Ballistic Test Results of Test Specimen (Protection Criteria).

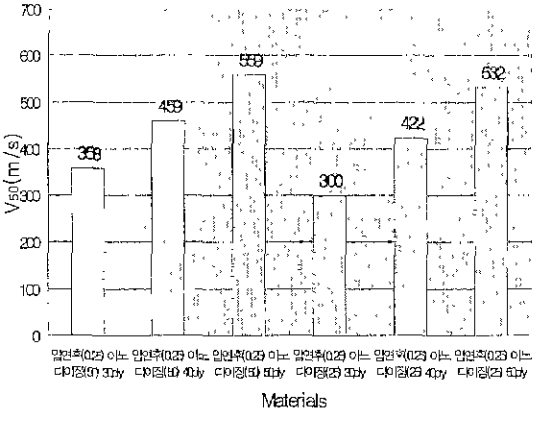
No.	Material	Hardness (Hv)	V_{50}(m/s)	Penetration Mode	
				face	back
1	Rolled Al alloy	91.25	458	P	P
2	Rolled Al alloy	91.44	521	P	P
3	Rolled Al alloy	91.25	554	P	P
4	Anodized Al alloy	432.10	454	P	P, D
5	Anodized Al alloy	439.35	532	P	P, D
6	Anodized Al alloy	450.50	584	P	P, D
7	Anodized(25㎛) Al alloy after cold-rolling	260.90	300	P	R
8	Anodized(25㎛) Al alloy after cold-rolling	269.15	422	P	R
9	Anodized(25㎛) Al alloy after cold-rolling	256.06	532	P	R
10	Anodized(50㎛) Al alloy after cold-rolling	440.45	358	P	R
11	Anodized(50㎛) Al alloy after cold-rolling	438.50	459	P	R
12	Anodized(50㎛) Al alloy after cold-rolling	431.60	559	P	R

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

표면경도에 대한 각 재료의 V_{50} 및 관통거동은 Table 4와 같고, 동일한 두께에서 재료에 대한 방호한계는 Fig. 10(a), (b)와 같다



(a) Results of Test Specimen from No. 1 to No. 6



(b) Results of Test Specimen from No. 7 to No. 12

Fig 10. Protection Ballistic Limits(V_{50}) Vs. Target Materials

5. 결 론

냉간 압연한 알루미늄 합금 적층재, 산화양극피막 처리한 알루미늄 합금 적층재, 냉간압연후 산화양극피막 처리한 알루미늄 합금 적층재의 5.56㎜ ball탄의 고속충격시험 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 고속충격시험결과 모든 시편의 전면에서는 전면 파열(Face Petalling)이, 후면에서는 냉간 압연한 알루미늄 합금 적층재는 후면 파열(Rear Petalling)이 발생하였고, 양극산화피막 처리한 알루미늄 합금 적층재는 후면파열과 연성구멍확장(Ductile Hold Enlargement)이, 냉간 압연후 양극산화피막 처리한 알루미늄 합금 적층재는 방사형 파괴(Radial Fracture)가 발생하였다.

(2) 냉간 압연한 알루미늄 합금 적층재(25 Plies)의 V_{50}은 554m/s이고, 양극산화피막 처리한 알루미늄 합금 적층재(25 Plies)의 V_{50}은 584m/s으로 냉간 압연한 알루미늄 합금 적층재보다 양극산화피막 처리한 알루미늄 합금 적층재가 5%정도 우수한 방탄저항 특성을 보였다.

(3) 냉간 압연후 양극산화피막 두께 25㎛인 경우와 50㎛의 경우의 V_{50}의 평균증가율은 11%가 됨을 보였으며 이는 양극산화피막의 증가에 따라 어느 한계까지는 V_{50}이 증가 된다고 사료된다

(4) 고속충격(300~1000m/s)시 적층수의 증가에 따른 V_{50}의 증가는 선형적으로 비례하지 않음을 보였다.

후기

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

참고문헌

(1) 이용연, 심인옥,""알루미늄 경방탄재," 재료마당, 제13권, 제5호, pp. 44-52, 2000.

(2)"John F. Chinella and Martin G. H. Wells, "Ballistic Penetration and Fracture Modes of an austempered ductile iron and AISI 4140 Steels," Structures Under Extreme Loading Conditions-1998, ASME 1998, PVP-Vol. 361, pp. 37-53, 1998.

(3) Backman. M. E. and W Goldsmith. "The Mechanics of Penetration of Projectiles into Tarets," International Journal of Engineering Science, Vol 16, pp,1-99, 1978.

(4) Manganello, S. J., and R. D. Forrest, "Metallurgical Factors Affecting the Ballistic Behavior of Sheet Targets," Journal of Materials, Vol. 7, No. 2, pp. 231-239. 1972.

(5) 손세원, 김희재, 홍성희, 박영의, "5052-H34 합금 적층재의 방탄 성능과 파괴모드에 관한 연구." 한국정밀공학회 추계학술대회 논문집, pp.507-512, 2000.

(6) 손세원, 이두성, 홍성희, 김동훈, "고속충격에 의한 아라미드 섬유강화 금속적층재의 방탄성능 및 동적파손거동에 관한 연구," 한국정밀공학회 추계학술대회 논문집, pp.527-532, 2000.

(7) 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.

(8) 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.

(9) 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

(10) Weiss, V, A. Wu, and J. Biegel. "Exploratory Study of the dynamic Fracture Ductility of TRIP and 300M Steels," AMMRCTR 79-8, Army Materials and Mechanics Research Center, Watertown, MA02172, 1979

(11) 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.

(12) 손세원. 이두성. 장정원, 홍성희, "ARALL재의 개발과 이의 파괴거동에 관한 연구," 한국정밀공학회 추계학술대회 논문집, pp. 908-912, 1996.

(13) 이창길, 이성학, 이용연, "탄도 충격에 의하여 변형된 Al-Li 합금의 파괴 특성," 금속학회지,"제31권, 제1호, pp. 7-15, 1993

(14) 이창길, 김기종, 이성학, "세 알루미늄 합금에서의 동적 비틀림 특성과 방탄성능의 상관 관계 연구," 금속학회지,"제35권, 제1호, pp. 38-44, 1997.

(15) 허선무, 심인옥, 천창환, "타이타늄 합금 방탄재 적용 현황과 제조 기술," 재료 마당, 제23권, 제5호, pp 34-43, 2000.

(16) Chong-Hee Kim "Fractographic Studies in Ballistically Damaged Polycrystalline Alumina," Journal of the Korean Ceramic Society, Vol. 15, No. 3, pp 127-134. 1978.

(17) 김희재, 육종일, 이승구, "고속 충격에 의한 세라믹/섬유강화 복합재료의 동적 파손 거동." 한국 재료학회지, Vol. 7, No. 9, pp 795-804, 1997.

(18) Jang-J, Park-R, Yun-Y, Park-J and Kim-H, "Failure of Ceramic/Fibre-Reinforced Plastic Composites Under Hypervelocity Impact Loading," Journal of Materials Science. Vol. 32, No. 1, pp. 23-33. 1997.

(19) Nair-SV. Subramaniam-A, Goettler-LA, "Fracture-Resistance of Polyblends and Polyblend Matrix Composites .2. Role of the Rubber Phase in Nylon 6,6/ABS Alloys," Journal of Materials Science, Vol. 32, No 20, pp. 5347-5354. 1997.