

표면처리된 알루미늄 5052-H34 합금의 충격특성에 관한 실험적 연구

손세원*, 김희재**, 이두성***, 홍성희****

An Experimental Study on the Impact Characteristics of Surface Hardened Al 5052-H34 Alloy

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

ABSTRACT

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

Fracture behaviors and ballistic tolerance, described by penetration modes, are observed from the results of V_{50} test and Projectile Through Plates (PTP) test at velocities greater than V_{50} , respectively.

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 could achieve near or complete penetration during PTP tests. Surface hardness, resistance to penetration, and penetration modes of Al 5052-H34 alloy laminates are compared to those of cold-rolled Al 5052-H34 alloy laminates and anodized Al 5052-H34 alloy laminates and anodized Al 5052-H34 cold-rolled alloy.

Key Words : Resistance to penetration(관통저항성), Fracture behaviors (파괴거동), Protection ballistic limit (방호한계)

1. 서론

알루미늄 합금은 강보다 낮은 밀도로 인하여 경량이면서도 비강도와 비강성이 높고, 용접성이 양호하면서도 소구경탄에 대한 방탄성능이 우수하여 복합재료보다 신뢰성이 있는 소재이다. 알루미늄

합금이 장갑재료로서 사용되기 위해서는 일반적인 충격에 대한 에너지 저장능력과 탄도충격 후에도 최초 탄도 공격에 의한 구조변화에 대하여 구조를 유지하는 구조적 특성뿐만 아니라 관통에 대한 저항성, 구조물의 하중지탱능력 및 강도를 가져야 한다^{1,2}.

2002년 10월 30일 접수
* 건국대학교 기계항공공학부
** 육군사관학교 무기공학과
*** 건국대학교 수학과
**** 건국대학교 기계설계학과 대학원

선진국에서는 기존의 방탄재인 Al 5083-H131, Al 7039-T64 및 Al 2090 합금 보다 더욱 방탄성이 우수한 Al 2519-T87, Al 7017-T651을 방탄재료로 개발하여 대체하는 단계에 있으며, 국제특허로 기술을 보호 유지하고 있다^{3,4}.

장갑재료는 탄도충격에 의한 240m/s 이상의 높은 속도의 하중과 변형이 가해지는 동적 환경에 놓이게 되므로 동적 변형 및 파괴거동과 탄도충격특성에 대한 연구는 필수적이나, 국내에서는 주로 저속 충격에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 상태이며, 실제 소구경 화기 등에 의한 연구는 미미한 실정이다. 따라서 알루미늄 합금의 고속충격에 대한 저항성을 높이기 위한 연구가 필요하다⁵⁻⁸.

본 연구는 가벼우면서도 충격저항성이 우수한 고성능 섬유강화 복합재료를 이용한 방탄재료를 설계함에 있어서 탄의 충돌시 에너지의 일부를 흡수시키는 동시에 탄두의 형상을 무디게 하여 추가 관통을 저지하는 효과를 나타낼 수 있는 재료를 개발하는 것을 목적으로, 전면재로서의 알루미늄 5052-H34 합금의 적층효과와 냉간압연하여 표면을 경화시킨 알루미늄 합금의 고속충격에 대한 관통저항성과 파괴거동(관통모드)을 결정하고, 또한 냉간 압연 후 양극 산화 피막처리를 실시하여 양극산화 피막의 두께에 따른 표면경도의 변화와 이에 따른 고속 충격에 대한 관통저항성과 파괴거동을 결정하고자 하였다.

표면처리를 한 알루미늄 합금은 마이크로 비이커스 경도계(Micro vicker's hardness tester)를 사용하여 경도를 측정하였으며, 0.6km/s~1.0km/s의 충격속도를 갖는 5.56mm ball 탄을 MIL-STD-662E에 의한 V₅₀ 탄도한계 테스트 방법에 의하여 방호한계인 V₅₀를 측정하였다^{9,10}.

파괴거동은 V₅₀ 테스트와 PTP(Projectile through plates) 테스트를 통하여 관찰하였으며, 탄자의 관입시 충격속도에 따른 탄자의 관입 깊이와 재료의 변형등을 방사성 동위원소를 이용한 방사선 투과검사(Radiography test)를 이용하여 연구하였다. 또한, 결정된 V₅₀를 사용하여 De Marre 경험식에서의 De Marre 계수를 결정하고, 충격속도에 따른 장갑의 유효 저항 두께를 산출하였다^{11,12}.

2. 배경이론

2.1 압연(Rolling) 및 양극산화피막법(Anodizing) 의한 표면경화(Surface hardening)

본 논문에서는 알루미늄합금의 표면경화방법 중 냉간압연(Rolling) 및 양극산화법(Anodizing)을 사용하여 알루미늄의 표면을 경화시켰다.

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 표면 조도가 훨씬 좋으며 냉간 압연에 따른 강도의 증가도 이용할 수 있다. 냉간 압연에서의 마지막 가공은 대개 작은 압하율을 가하며 SPSS (Skin pass-stretcher strain)현상을 막고, 정확한 치수 정밀도, 평면성, 미세한 표면을 얻을 수 있다.

양극산화피막법은 알루미늄의 양극처리가 대부분을 차지하고 있으며, 알루미늄을 전해액에서 양극으로 하고 전기를 통하면 양극에 발생하는 산소에 의해서 알루미늄면이 산화되어 내식성이 크고 대단히 경한 산화알루미늄 피막이 생성된다. 주요 양극산화피막법으로는 전해액의 종류에 따라 옥살산법, 황산법, 크롬산법이 있다.

본 연구에서는 알루미늄 합금의 표면을 경화시키기 위하여 냉간 압연을 실시하였으며, 양극산화 피막법중 황산법을 사용하여 알루미늄의 표면을 경화시켰다.

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 한다¹³.

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. Fig. 1은 완전관통과 불완전관통의 구분을 나타내며 (a)는 미 육군, (b)는 미 해군, (c)는 방호 장갑 설계시의 기준이다¹⁴.

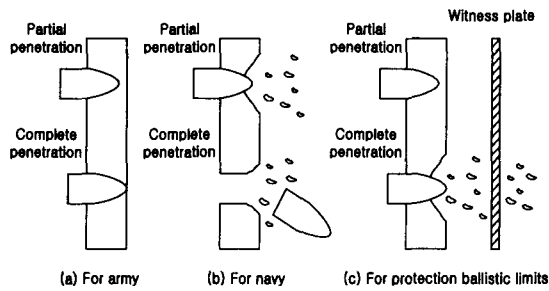


Fig. 1 Penetration mode by criteria of the army, navy and protection ballistic limits

2.3 방호한계 측정방법(V₅₀ 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.

방호성능의 측정은 MIL-STD-662E규격에 준하여 실시하며, 충격탄자가 시험편을 관통할 수 있는 확률이 50%일 때의 탄자의 충격속도에 해당하는 방호한계 속도(V₅₀)로 구하였으며, 이 속도는 높낮이(Up-and-down) 방법에 의해 측정하여 식(1)에 의해 계산된다.

$$V_{50} = \frac{\left\{ \sum_{i=0}^{N_p + N_c} V_i + K(N_p + N_c) \right\}}{N_p + N_c} \quad (1)$$

여기서, N_p는 완전관통이 일어나는 최고속도와 부분관통이 일어나는 최저속도의 차인 혼합속도범위(ZMR, Zone of mixed results)내에서 부분관통한 횟수, N_c는 혼합속도범위내에서 완전관통한 횟수이며, K는 장갑판 재료와 피탄각 및 탄두형태에 따라 정해지는 상수로서 일반적으로 $\frac{ZMR}{2}$ (%)에 해당한다^{15,16}.

2.4 파괴거동(Fracture behavior)

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

이러한 경우 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 세열 파편(Fragmentation)도 함께 발생한다^{17,18}.

2.5 방탄 요구 특성(Demanded protection properties)

방탄재료에서 요구되는 특성은 충격에 대한 저항, 파쇄에 대한 저항, 관통(Perforation)에 대한 저항등으로 나누어진다. 충격에 대한 저항은 균열이나 파열됨이 없이 폭발에너지를 흡수하는 성질이며, 파쇄에 대한 저항은 조각파쇄(Spalling) 및 딱지 파쇄(Scabbing)에 대한 저항으로서 충격점의 반대면에서 균열, 분열, 또는 파쇄되는 것에 대한 저항이다. 관통(Perforation)에 대한 저항은 탄자가 표적에 관입되는 것을 방지하려는 성질이다. 탄자가 관입될 때 탄자가 표적판을 완전히 통과하여 관통(Perforation)하던가 또는 완전히 통과하지 못하고 박히는 관입(Penetration, embedment)현상이 발생한다. 관입과 관통 현상은 표적판에 대한 탄자의 거동에 따라서 달라지며 표적판의 재료의 성질과 그 두께에 따라서 크게 영향을 받는다.

장갑판재의 탄도에 대한 관통 저항력은 많은 변수들에 의존하며 대략적으로 분류하면, 탄자와 관련해서는 탄자의 크기, 형상, 밀도, 경도등이 있으며 충격현상에서는 충격속도와 각도등이 있다. 그리고 방탄재와 관련해서는 재료의 경도, 강도, 연성, 미세구조와 판의 두께등이 있다^{19,20}.

2.6 De Marre 방정식(De Marre's equation)

장갑판재의 파괴현상을 역학적으로 분석하는 것은 대단히 복잡하지만 기본적으로 표적을 관통(Perforation)하는 데 소요되는 에너지로 분석한다. 충격시 탄자의 운동에너지와 관통에 필요한 에너지

가 같기 때문에 탄자의 크기에 관계없이 요구되는 충격에너지로부터 요구하는 충격속도를 구할 수 있으며, 표적 관통을 위한 충격에너지는 De Marre의 경험식을 이용하여 식(2)와 같이 예측할 수 있다.

$$\frac{mv^2}{2} = cd^3\left(\frac{t}{d}\right)^n \quad (2)$$

- 여기서, m = Mass of projectile(kg)
- v = Striking velocity of projectile(m/s)
- d = Diameter of projectile(m)
- t = Efficient thickness of target Armor(m)
- c = Coefficient of de Marre equation(N/m²)
- n = Constant of experiments(usually, n=1.4)

De Marre 계수는 표적의 탄도한계 및 장갑의 두께 그리고 탄자의 직경의 크기에 따라 결정되며, 대부분 이 계수 c는 96×10⁷N/m²~144×10⁷N/m²의 값을 갖는다²¹.

3. 실험

3.1 시편의 제작

본 연구에 사용된 시편은 Al 5052 H34 합금으로써 그 화학적 조성 및 기계적 특성은 Table 1 및 Table 2와 같고, Table 4와 같이 두께가 다른 알루미늄 합금, 냉간 압연한 알루미늄 합금, 냉간압연후 양극 산화 피막 처리한 알루미늄 합금을 적층하여 총 17개의 시편을 제작하였다. Table 4에서 No.6부터 No.8까지는 1mm두께를 0.5mm로 냉간 압연한 시편이며, No.9부터 No.11까지는 0.5mm 두께의 표준 시편이고, No.12부터 No.17까지는 0.5mm 두께를 0.25mm로 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 Mechanical property of Al 5052-H34 alloy

Material (Alloy)	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Elongation (%)
Al 5052-H34	260	180	69.58	10

3.2 경도시험

알루미늄 합금은 표면경화처리에 의하여 금속의 표면경도 변화가 생기므로 경도 시험이 필요하며, 본 연구에서는 냉간압연후 양극산화피막처리한 알루미늄 합금의 표면 경도의 변화를 측정하기 위하여 마이크로 비커스 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

알루미늄 합금과 표면경화처리한 알루미늄 합금의 고속충격에 대한 방호성능을 측정하기 위하여 Fig. 2와 같은 실험 장치를 사용하여 시편의 방호성능과 파괴거동을 측정하였다.

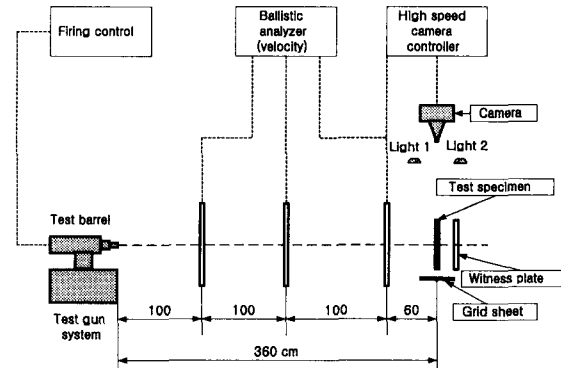


Fig. 2 Experimental setup for high velocity impact test

탄자는 5.56mm ball탄을 사용하였으며, 오스트리아 AVL사의 model 292 발사장치와 5.56mm 시험총열을 사용하였고, 탄자의 충격속도는 미국 MV Ordnance 사의 Model 4010P 속도측정장치를 사용하였다.

3.4 관입 깊이와 동적 변형 측정

관입 깊이 및 변형의 측정은 독일 Siemens사의 Mevatron M 6740 6Mv X선 촬영기를 이용한 방사선 투과검사(Radiography test)를 사용하였으며, Fig. 4와 같은 외부 변형에 대한 측정은 다이얼 캘리퍼스(Dial calipers)와 하이트 게이지(Height gauge)

를 사용하여 측정하였다.

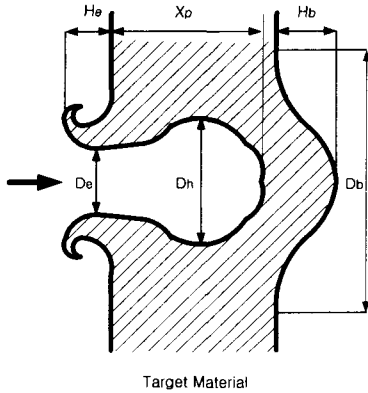


Fig. 3 Schematic of the sectioned view of the impact craters

여기서, H_e =Entry hole height,
 H_b =Bulge height,
 D_e =Entry hole diameter,
 D_h =Maximum deformation hole diameter,
 X_p =Depth of penetration

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 경도시험결과

마이크로 비이커스 경도계를 사용하여 측정된 경도값은 Table 3과 같고, 냉간압연한 알루미늄 합금에 비하여 양극산화처리 두께 25 μ m, 50 μ m일 때 각각 2.9배, 4.8배의 표면경도 증가를 보였다.

4.2 고속충돌시험

5.56mm ball 탄의 WC870 type 추진제(Propellant) 양에 따른 탄자의 속도는 Fig. 4와 같으며, 추진제 양을 변화시켜서 요구하는 탄자 충돌 속도를 결정하여 충돌 시험을 실시하였다.

표면경도에 대한 각 재료의 V_{50} 은 Table 4와 같고, 동일한 두께에서 재료에 대한 방호한계는 Fig. 5, 6과 같다.

알루미늄 1052 합금(No. 1) 적층재의 고속충격 시험 결과 V_{50} 은 618m/s였다. 파괴모드는 전면에서는 약간의 전면 파열(Front petalling)이, 후면에서는 큰 후면 파열(Rear petalling)이 발생하였다.

Table 3 Hardness of test specimen by micro vicker's hardness tester

No.	Material	Thickness (mm/ply)	Surface hardness (H_v , 50g)
1	Al 1052	0.5	46
2	Al 5052 H34	0.5	88
3	Rolled Al alloy	0.5	91.36
4	Anodized Al alloy	0.5	440.65
5	Anodized(25 μ m) Al alloy after cold-rolling	0.25	260.39
6	Anodized(50 μ m) Al alloy after cold-rolling	0.25	436.85

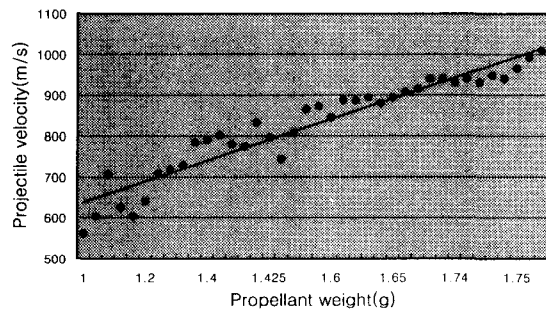


Fig. 4 Projectile velocity(m/s) vs. propellant weight(g)

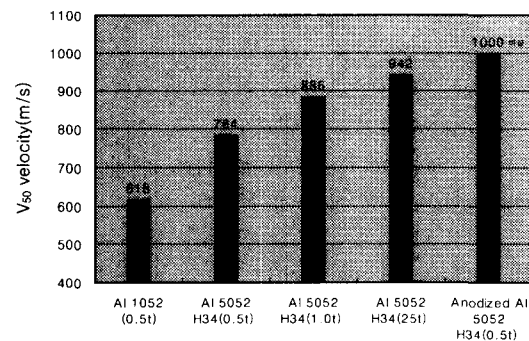


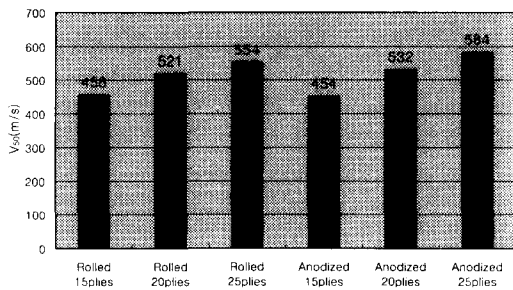
Fig. 5 V_{50} velocity vs. target materials

알루미늄 5052-H34 합금(No. 2) 적층재의 V_{50} 은 784m/s였다. 파괴모드는 전면에서는 전면파열이 발생하였고, 후면에서는 알루미늄 1052 합금 적층재보다 감소한 후면파열이 발생함을 알 수 있었다.

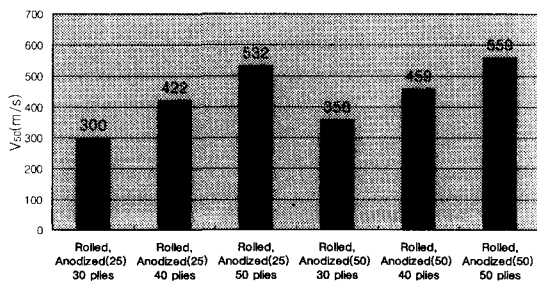
알루미늄 5052-H34 합금(No. 3) 적층재의 V_{50} 은

885ms였다. 파괴모드는 전면에서는 감소된 전면파엽이 발생하였고, 후면에서는 감소된 후면파엽이 발생하였다. 알루미늄 5052-H34 합금판(No. 4)의 V_{50} 은 942ms였다. 파괴모드는 전면에서는 급격히 크기가 감소한 파엽이 발생하였고, 후면에서는 약간의 후면파엽과 연성구멍확장(Ductile hole enlargement)의 양상을 보였다.

양극산화 피막처리한 알루미늄 5052-H34 합금(No. 5) 적층재의 V_{50} 은 일반 5.56mm ball탄(최고속도 1000ms)으로는 V_{50} 을 측정할 수 없는 우수한 관통저항능력을 보여주었으며, 이에 대한 특허신청을 하여 실용신안을 취득(등록 제0247335호)하였고, 발명특허는 심사중(출원번호 제2001-23101호)에 있다. 파괴모드는 전면에서는 파엽이 발생하였으나, 후면에서는 방사형 크랙이 발생하였다.



(a) Results of test specimen from No. 6 to No. 11



(b) Results of test specimen from No. 12 to No. 17

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

25mm의 동일한 두께를 갖는 알루미늄 합금은 적층수가 증가할수록 방호한계값은 선형적으로 감소함을 알 수 있다. 이는 장갑재료의 설계시 적층장갑(laminated armor)이 기본적으로 동일한 전체 두께의 단일판보다 고속충격에 대한 저항성이 감소한다는 기존의 실험결과와 잘 일치한다. 그러나 양

극산화 피막처리한 알루미늄 합금의 경우 일반적인 이론과는 다르게 동일한 두께의 알루미늄 합금판보다 방호한계값이 증가하였다. 이는 표면경도의 증가가 고속충격시 탄의 무더짐(blunting) 효과를 증대시켜 탄자의 관통능력을 감소시키기 때문이라고 추측된다.

Table 4 Ballistic test results of test specimen (Protection criteria)

No.	Material	Thickness (mm)	Ply	Hardness (Hv)	V_{50} (m/s)
1	Al 1052	0.5	50	46	618
2	Al 5052-H34	0.5	50	88	784
3	Al 5052-H34	1.0	25	87	885
4	Al 5052-H34	25	1	79	942
5	Anodized Al 5052 H34	0.5	50	249	1000 이상
6	Rolled Al alloy	0.5	15	91.25	458
7	Rolled Al alloy	0.5	20	91.44	521
8	Rolled Al alloy	0.5	25	91.25	554
9	Anodized Al alloy	0.5	15	432.10	454
10	Anodized Al alloy	0.5	20	439.35	532
11	Anodized Al alloy	0.5	25	450.50	584
12	Anodized(25 μ m) Al alloy after cold-rolling	0.25	30	260.90	300
13	Anodized(25 μ m) Al alloy after cold-rolling	0.25	40	269.15	422
14	Anodized(25 μ m) Al alloy after cold-rolling	0.25	50	256.06	532
15	Anodized(50 μ m) Al alloy after cold-rolling	0.25	30	440.45	358
16	Anodized(50 μ m) Al alloy after cold-rolling	0.25	40	438.50	459
17	Anodized(50 μ m) Al alloy after cold-rolling	0.25	50	431.60	559

냉간 압연한 알루미늄 합금 적층재(25 Plies)의 V_{50} 은 554ms였다. 완전관통후의 파괴거동은 전면에서는 알루미늄 합금 적층재와 같은 전면파엽(Face petalling)이 발생하였고, 후면에는 후면파엽(Rear petalling)이 발생하였다.

양극산화피막 처리(50 μ m)한 알루미늄 합금 적층재(25 Plies)의 V_{50} 은 584m/s이었다. 완전관통후의 파괴거동은 전면에서는 전면파열이 발생하였고, 후면에서는 파엽(Petalling)과 연성구멍확장(Ductile hole enlargement)을 확인할 수 있었다.

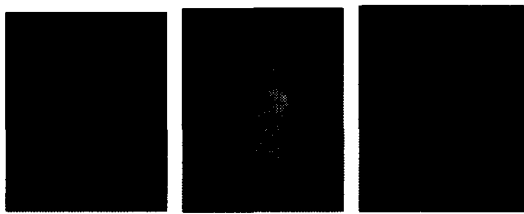
한편으로 냉간압연후 양극산화피막 처리(25 μ m)한 알루미늄 합금 적층재(50 Plies)의 V_{50} 은 532m/s였다. 완전관통의 파괴 거동은 전면에서는 급격히 크기가 감소한 파엽이 발생하였고, 후면에서는 방사형 파괴(Radial fracture)가 발생하였다.

냉간압연후 양극산화피막 처리(50 μ m)한 알루미늄 합금 적층재(50 Plies)의 V_{50} 은 559m/s였다. 파괴모드는 전면에서는 파엽이 발생하였고, 후면에서는 방사형 파괴(Radial fracture)의 양상을 보였다.

냉간 압연후 양극산화피막 두께가 25 μ m인 경우와 50 μ m의 경우의 적층수에 대한 V_{50} 의 평균증가율은 11%로, 이는 양극산화 피막두께의 증가에 따라 V_{50} 이 증가됨을 보이나, 적층수의 증가에 따른 V_{50} 의 증가는 선형적으로 비례하지 않음을 보였다.

4.3 고속충격 후 동적변형 측정결과

Fig. 7은 고속충격시험 결과 관입된 알루미늄 5052-H34 합금판(25mm)의 X선 촬영기를 이용한 방사선 투과(Radiography test) 단면이다. 충격속도에 따라 관입 깊이의 차이를 보이고 있으며, 전면 파엽(Petalling) 및 후면 볼록형 돌기부(Bulging)와 시편 내부에서 탄자의 변형형상을 나타낸다.

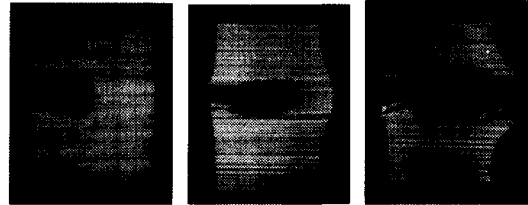


(a) at V=607m/s (b) at V=791m/s (c) at V=991m/s

Fig. 7 Cross-section of impacted specimens using radiography

Fig. 8은 고속충격을 받은 시편의 단면 사진이며, 타격 속도의 증가에 따른 관입과 관통의 형상을 보이고 있다. 완전관통 후의 파괴모드는 전면에서는 급격히 크기가 감소한 파엽(Petalling)이 발생하였고, 후면에서는 완전 관통한 경우에는 플러그

(Plug)가 발생하였고, 관통하지 못한 관입의 경우에는 볼록형의 돌기부(Bulging)가 발생하였다.



(a) at V=607m/s (b) at V=791m/s (c) at V=991m/s

Fig. 8 Cross-section of impacted test specimens

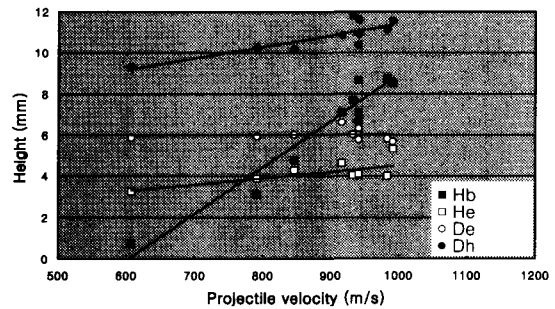


Fig. 9 Entry hole height (H_e), bulge height (H_b), Entry hole diameter (D_e) & Ductile enlarge hole diameter (D_h) vs. increasing impact velocity

Fig. 9는 충격속도 증가에 따른 전면 파엽량(H_e), 후면 볼록형 돌기부(Bulging)량과 시편의 입구직경(D_e)과 최대 변형 직경(D_h)의 크기를 나타내었다. 속도가 증가함에 따라 전면 파엽량(H_e)은 약간의 증가를 보이는 반면, 후면 볼록형 돌기부(Bulging)량이 선형적으로 보다 더 증가함을 알 수 있다. 이는 충격속도 증가시 일정량의 충격에너지가 전면에서 작용하고, 나머지의 충격 에너지가 관입에 작용하기 때문으로 사료된다. 속도가 증가함에 따라 입구 직경의 크기는 충격속도에 따라 변하지 않고 일정함을 나타내고 있으나, 최대 관입직경(D_h)의 경우 충격속도가 증가함에 따라 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 이는 충격속도가 증가함에 따라 충격에너지의 증가로 인한 탄자의 무더짐효과(Blunting effect)가 주로 작용하기 때문이라고 해석된다.

Fig. 10은 충격속도 증가에 따른 탄자의 관입량(X_p)와 볼록형 돌기부(Bulging) 영역의 크기(D_b)를 나타내었다. 속도가 증가함에 따라 탄자의 관입량

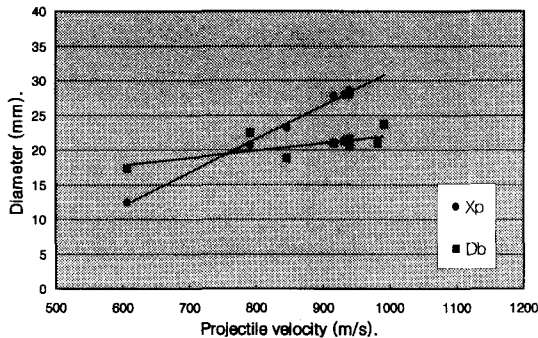


Fig. 10 Bulge diameter (D_b) & depth of penetration (X_p) vs. increasing impact velocity

이 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 이는 탄자의 충격 에너지가 증가할수록 시편의 소성 변형이 증가하고, 충격에너지가 소성변형에너지 보다 커지면 탄자는 관통을 하게됨을 의미한다.

4.4 De Marre 계수의 결정 및 유효 관통 깊이의 비교

식(2)의 De Marre 계수를 결정하기 위하여 $m = 3.55 \times 10^{-3} \text{kg}$, $v = 942 \text{m/s}$, $d = 5.56 \times 10^{-3} \text{m}$, $t = 25 \times 10^{-3} \text{m}$, $c = \text{De Marre 계수} (\text{N/m}^2)$, $n = 1.4$ 를 적용하고, 시험을 통한 방호한계인 $V_{50}(942 \text{m/s})$ 을 적용한 결과, De Marre 계수는 $109 \times 10^7 \text{N/m}^2$ 이었으며, 이 값은 제안된 De Marre 계수의 유효범위를 만족시키는 값이다.

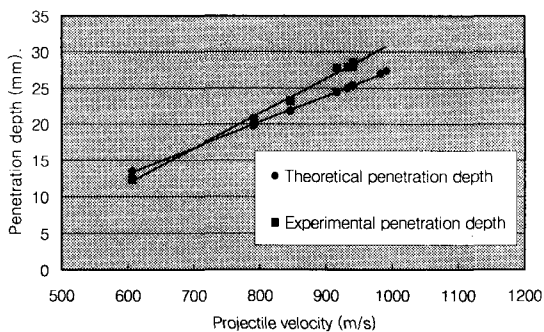


Fig. 11 Comparison of theoretical and experimental penetration depth vs. increasing striking velocity

De Marre방정식을 사용한 이론적인 관통깊이와 실험에 의해 측정된 관통깊이를 비교하면 Fig. 11과 같이 이론값과 실험값의 관통깊이가 10% 이내로 잘 일치하는 것으로 나타났다. 관통된 시편의 관통깊이는 후면 플러그(Plug)에 의한 파엽(Petalling)까지를 고려하여 측정된 것이다.

5. 결론

알루미늄 1052 합금 적층재, 두께가 다른 알루미늄 5052-H34 합금 적층재, 표면경화처리한 알루미늄 5052-H34 합금 적층재에 5.56mm 볼탄의 고속 충격시험 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 동일두께(0.5mm, 50ply)의 Al 5052-H34 합금 적층재의 V_{50} 은 784m/s, 양극산화 피막처리(50 μm)한 경우는 V_{50} 이 1,000m/s 이상으로, 양극산화 피막 처리한 경우가 27.5% 이상 향상된 고속충격저항 특성을 보였다.

(2) 냉간 압연후 양극산화피막 두께가 25 μm 인 경우와 50 μm 의 경우의 V_{50} 의 평균증가율은 11%로, 피막두께의 증가에 따라 V_{50} 이 증가됨을 보이나, 적층수에 따른 V_{50} 의 증가는 선형적으로 비례하지 않음을 보였다.

(3) Al 5052-H34 합금의 De Marre 계수 C는 $109 \times 10^7 \text{N/m}^2$ 이었으며, 이는 이론값과 실제값이 잘 일치하는 것을 보이며, 이를 통해 V_{50} 과 De Marre 계수가 결정되면 속도에 따른 유효장갑 두께를 예측할 수 있다.

(4) Al 5052-H34 합금의 표면경도는 88Hv, 양극산화 피막처리한 경우의 표면경도는 249Hv로, 경도가 증가함에 따라 고속충격에 대한 저항성이 증가하므로, 더욱 경한 Al 합금을 사용할 경우, 방호한계 V_{50} 을 더욱 향상시킬 수 있다.

(5) 충격속도가 증가함에 따라 전면에서의 전면 파엽(Petalling)량과 후면의 볼록형 돌기부(Bulging)의 크기는 선형적으로 증가하였고, 시편에 대한 탄자의 관입깊이도 충격속도의 증가에 따라 선형적으로 증가하였다.

후기

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

참고문헌

1. 이용연, 심인옥, "알루미늄 경방탄재," 재료마당, 제13권, 제5호, pp. 44-53, 2000.
2. Crouch, I. G., "Metallic Armor-from Cast Aluminum alloys to High-Strength Sheets," Materials Forum, Vol. 12, pp. 31-37, 1988.
3. Orphal DL, Franzen RR, Piekutowski AJ, Forrestal MJ, "Penetration of Confined Aluminum nitride targets by Tungsten rods at 1.5-4.5km/s," International J. of Impact Eng., Vol. 18, pp. 355-386, 1996.
4. Forrestal MJ, Okajima K, Luk VK, "Penetration of 6061-T651 Aluminum targets with Rigid long rods," ASME J. Appl. Mech., Vol. 55, pp. 755-760, 1988.
5. Backman, M. E. and Goldsmith, W., "The Mechanics of Penetration of Projectiles into Targets," International Journal of Engineering Science, Vol. 16, pp. 1-99, 1978.
6. Manganello, S. J. and Forrest, R. D., "Metallurgical Factors Affecting the Ballistic Behavior of Sheet Targets," Journal of Materials, Vol. 7, No. 2, pp. 231-239, 1972.
7. 이창길, 이성학, 이용연, "탄도 충격에 의하여 변형된 Al-Li 합금의 파괴 특성," 금속학회지, 제31권, 제1호, pp. 7-15, 1993.
8. Kim, C. H., "Fractographic Studies in Ballistically Damaged Polycrystalline Alumina," Journal of the Korean Ceramic Society, Vol. 15, No. 3, pp 127-134, 1978.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. ATEC, U. S., "U.S. ATEC. Test Operations Procedure 2-2-710 Ballistic Test for Armor," A137973, U.S. Army Test Evaluation Command, Aberdeen Proving Ground, MD 21005.
13. 김희재, 육종일, 이승구, "고속 충격에 의한 세라믹/섬유강화 복합재료의 동적 파손 거동," 한국재료학회지, Vol. 7, No. 9, pp 795-804, 1997.
14. Zukas, J. A., T. Nicholas, Swift, H. F., Greszczuk, L. B. and Curran, DR., "Penetration and Perforation of Solid," Impact Dynamics, Zukas, J. A., et al., John Wiley and Sons, New York, pp. 155-183, 1982.
15. Roger L. Ellis, Frederic Lalande, and Hongyu. Jia, "Ballistic impact resistance of graphite composite with superelastic SMA and SPECTRA™ hybrid components," Proceeding of American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA-97-1044, pp. 908-916, 1997.
16. 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.
17. 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, PVP-Vol. 361, pp. 37-53, 1998.
18. 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.
19. 손세원, 김희재, 홍성희, 박영의, "5052-H34 합금 적층재의 방탄 성능과 파괴모드에 관한 연구," 한국정밀공학회 추계학술대회 논문집, pp. 507-512, 2000.
20. 손세원, 홍성희, "방탄소재의 연구동향 및 방탄 헬멧 개발," 한국정밀공학회지, 제17권, 제7호, pp. 7-19, 2002.
21. 이홍주, "총과 탄도학," pp. 284-285, 청문각, 2001.