

# 알루미늄 5052-H34 합금 적층재의 방탄성능과 파괴모드에 관한 연구

손세원(건국대 기계항공우주공학부), 김희재(육사 무기공학과), 박영익(건국대 대학원 기계공학과), 홍성희(건국대 대학원 기계설계학과)

## A Study on the ballistic performance and fracture mode of anodized Aluminum 5052-H34 alloy laminates

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

### ABSTRACT

The objective of this study is to determine fracture behaviors(penetration modes) and resistance to penetration during ballistic impact of Al 5052-H34 alloy laminates and anodized Al 5052-H34 alloy laminates. Resistance to penetration is determined by  $V_{50}$  ballistic limit, a statical velocity with 50% probability for complete penetration, test method. Fracture behaviors and ballistic tolerance, described by penetration modes, are respectfully observed that result 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 5.56mm ball projectile.  $V_{50}$  tests with 0° obliquity at room temperature were 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 anodized Al 5052-H34 alloy laminates.

**Key Words** : Resistance to penetration(관통저항성), Fracture behaviors (파괴거동),  $V_{50}$  ballistic limit (방호한계),

### 1. 서론

가벼우면서도 충격저항성이 우수한 고성능 섬유 강화 복합재료는 우주 항공, 자동차, 스포츠 소재 뿐 아니라 방탄재료로의 군사적 이용도도 날로 증가되고 있다. 방탄재료로서 사용되는 복합재료들은 일반적으로 충격에 대한 에너지 저장능력과 함께 사용중에 구조적 파괴를 막기위한 탄도허용능력이 요구되어 진다. 그러나 고속 충격탄자와 같이 관통성이 뛰어난 위협 조건으로부터의 방호를 목적으로 방탄재를 설계할 때에는 단순 복합재료만으로는 충분한 방탄성능을 가질 수 없는 경우가 많다. 이런 경우 충격 전면에서 충격탄자의 탄두를 일차적으로 무디게 하거나 파쇄시켜 관통자의 형상을 변화시키고, 변형된 관통자의 계속적인 관통에 저항하는 능력이 우수한

재료의 사용이 요구되어, 이들 두 가지 성질을 동시에 만족시키는 방탄재료의 개발이 꾸준히 연구되어 왔다.

국내에서는 주로 저속충격에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 상태이나, 실제 소구경 화기등에 의한 고속충격에 대한 연구는 극히 미비한 실정이다.

본 연구의 목적은 가벼우면서도 충격저항성이 우수한 고성능 섬유강화 복합재료를 이용한 방탄재료를 설계함에 있어서 탄의 충격시 에너지의 일부를 흡수시키는 동시에 탄두의 형상을 무디게 하는 효과를 얻는 전면재로 알루미늄 5052-H34 합금의 적층효과와 금속표면처리를 통해 표면경도를 증가시킨 알루미늄 5052-H34합금 적층재의 탄도 충격에 대한 관통저항성과 파괴거동(관통모드)을 결정하는데 있다.

본 연구에서는 알루미늄 합금과 양극산화피막처

리한 알루미늄 합금을 마이크로 비커스 경도계 (micro vicker's hardness tester)를 사용하여 경도를 측정하였으며, U. S AMTL(1987)에 의한  $V_{50}$  탄도한계 테스트 방법에 의하여 방호한계인  $V_{50}$ 을 측정하고, 관통저항성을 결정하였다. 파괴거동은  $V_{50}$  테스트와  $V_{50}$  테스트보다 더 큰 속도의 PTP(projectile through plates) 테스트를 통하여 관찰하였다.

## 2. 배경이론

### 2.1 금속표면처리(metal finishing)

금속은 부식에 의해 그 기계적 특성이 현저히 저하되므로 부식을 방지하고, 금속 자체의 내마모성과 내열성을 향상시키고, 경도를 증가시키기 위하여 여러 가지 방법으로 금속의 표면을 처리하고 있다.

금속 표면처리는 크게 전기도금, 화학도금, 용융도금, 금속용사, 진공도금등을 포함하는 도금법, 금속 표면에 탄소나 질소를 침투시켜서 경도가 큰 피막을 제조하는 표면경화법, 타금속에 도료를 도포해서 방식과 미관을 제공하는 도장법, 타금속 표면에 고무나 합성수지등의 피막을 제조하는 라이닝법, 금속 표면에 에나멜이나 세라믹 같은 유리질의 피막을 제조하는 코팅법, 타금속 표면에 화학변화를 주어 산화피막등을 만드는 화성처리법등이 있다.

본 논문에서는 알루미늄합금의 표면경화방법 중 양극피막산화법(anodizing)을 사용하여 알루미늄의 표면을 경화시켰다.

### 2.2 충격속도(impact vlocity) 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/s 범위까지를 운동 에너지탄의 충격조건으로 한다.

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), 완전 관통이 된 경우(CP, complete penetration), 불완전관통이지만 표적재료가 파괴된 경우의 3가지로 구분할 수 있다.

### 2.3 방호한계 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. 1 에서와 같이  $V_{10}$ 은 10%의 관통확률과 90%의 미관통확률을 가진 것이며,  $V_{90}$ 은 90%의 관통확률과 10%의 미관통확률을 나타낸다. 그러나 대부분의 경우 관통과 미관통의 확률이 동일한  $V_{50}$ 을 충격속도로 나타내는  $V_{50}$ 을 방호탄도 한계(Protection ballistic limit)라고 정의한다.

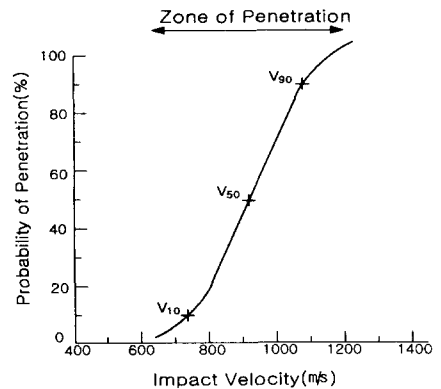


Fig. 1 Definition of Protection Ballistic Limits( $V_{50}$ )

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.

### 2.4 파괴모드(fracture behavior)

두께가 얇거나 중간 두께의 표적판에서 완전관통할 때는 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.

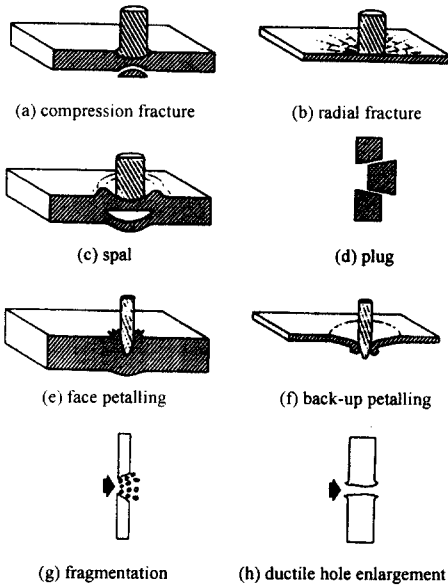


Fig. 2 Typical Failure(Penetration) Modes of Impacted Plates

### 3. 실험

#### 3.1 시편의 제작

본 연구에 사용된 시편은 Table 1과 같이 알루미늄 1052 합금, 두께가 다른 알루미늄 5052-H34 합금, 양극산화피막처리한 알루미늄 5052-H34 합금을 사용하여 적층하여 제작하였고, 적층두께는 모두 25mm (1 inch)로 하였다.

Table 1 Test Specimen

No.	Material	Thickness (mm/1 ply)	Ply	Total thickness (mm)
1	Al 1052	0.5	50	25
2	Al 5052 H34	0.5	50	25
3	Al 5052 H34	1.0	25	25
4	Al 5052 H34	25	1	25
5	Anodized Al 5052 H34	0.5	50	25

#### 3.2 경도시험

본 연구에서는 양극산화피막처리에 의한 알루미늄 5052-H34 합금의 표면경도의 변화를 측정하기 위하여 마이크로 비이커스 경도계를 사용하여 표면경도를 측정하였다.

### 3.3 고속충격시험

본 연구에서는 알루미늄 5052-H34 합금과 양극산화피막처리에 의한 알루미늄 5052-H34 합금의 고속충격에 대한 방호성능을 측정하기 위하여 Fig. 3과 같은 장치를 사용하여 방호성능과 파괴모드를 측정하였다.

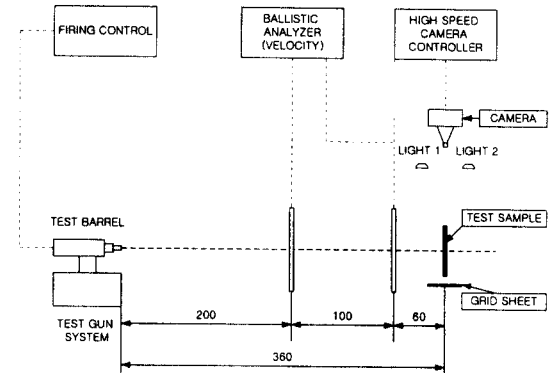


Fig. 3 Experimental Setup

### 4. 실험 결과 및 고찰

#### 4.1 경도시험결과

마이크로 비이커스 경도계를 사용하여 측정된 경도값은 Table 2와 같다.

Table 2 Hardness of Test Specimen by Micro Vicker's Hardness Tester

No.	Material	Thickness (mm/1 ply)	Hardness(H <sub>v</sub> )
1	Al 1052	0.5	46
2	Al 5052 H34	0.5	88
3	Al 5052 H34	1.0	87
4	Al 5052 H34	25	79
5	Anodized Al 5052 H34	0.5	249

#### 4.2 고속충격시험결과

5.56mm ball 탄의 WC870 type 추진제(propellant) 양에 따른 탄자의 속도는 Fig. 4와 같다.

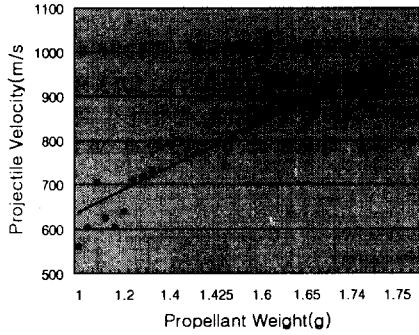
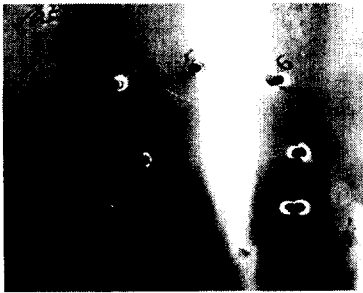
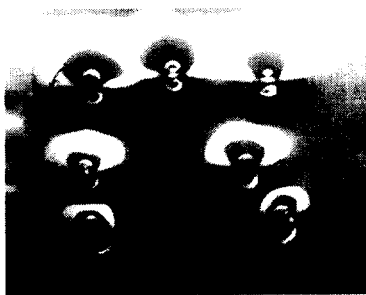


Fig. 4 Projectile Velocity(m/s) Vs. Propellant Weight(g)



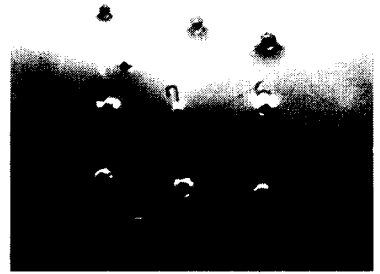
(a) Front



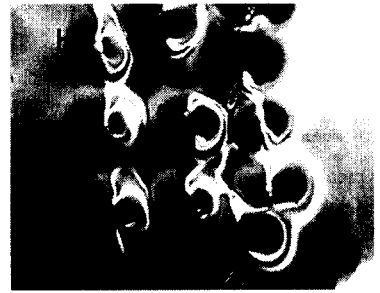
(b) back

Fig. 5 PTP Result of Al 1052 laminates

알루미늄 1052 합금(0.5t) 적층재의 고속충격시험 결과는 Fig. 5와 같다. 측정된 알루미늄 1052 합금 적층재의  $V_{50}$ 은 618m/s이었다. 완전관통후의 파괴모드는 전면에서는 고속탄자에 의한 약간의 전면 파열(petalling)이 보였고, 후면에서는 다른 시편에 비하여 가장 큰 후면 파열이 발생되었다.



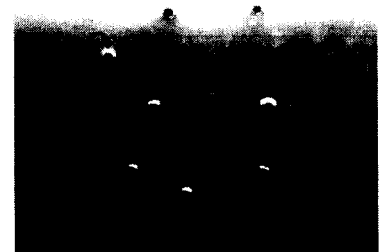
(a) Front



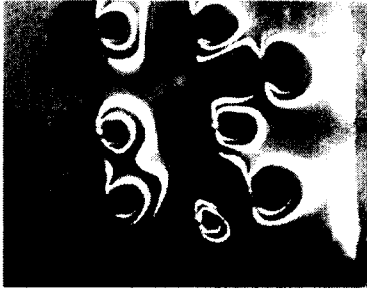
(b) back

Fig. 6 PTP Result of Al 5052-H34 (0.5t) laminates

알루미늄 5052-H34 합금(0.5t) 적층재의 고속충격시험 결과는 Fig. 6과 같다. 측정된 알루미늄 5052-H34 합금(0.5t) 적층재의  $V_{50}$ 은 784m/s이었다. 완전관통후의 파괴모드는 전면에서는 알루미늄 1052 합금 적층재와 같은 전면파열이 발생하였고, 후면에서는 후면파열이 발생하였으나 알루미늄 1052 합금 적층재보다 파열량이 감소하였다.



(a) Front



(b) back

Fig. 7 PTP Result of Al 5052-H34 (1t) laminates

알루미늄 5052-H34 합금(1t) 적층재의 고속충격 시험 결과는 Fig. 7과 같다. 측정된 알루미늄 5052-H34 합금(1t) 적층재의  $V_{50}$ 은 885m/s이었다. 완전관통후의 파괴모드는 전면에서는 감소된 전면파열이 발생하였고, 후면에서는 감소된 후면파열이 발생하였다.



(a) Front

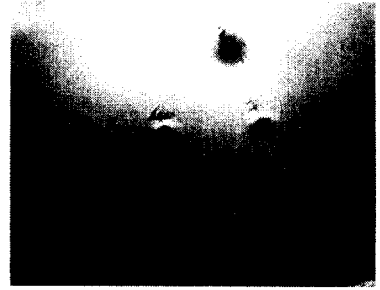


(b) back

Fig. 8 PTP Result of Al 5052-H34 (25t)

알루미늄 5052-H34 합금판(25t)의 고속충격시험 결과는 Fig. 8과 같다. 측정된 알루미늄 5052 H34 합금판(25t)의  $V_{50}$ 은 942m/s이었다. 완전관통후의 파괴모드는 전면에서는 급격히 크기가 감소한 파열이 발

생하였고, 후면에서는 약간의 후면파열과 연성구멍 확장(ductile hole enlargement)이 발생하였다.



(a) Front



(b) back

Fig. 9 PTP Result of Anodized Al 5052-H34 (0.5t) laminates

산화양극피막 처리한 알루미늄 5052-H34 합금(0.5t) 적층재의 고속충격시험 결과는 Fig. 9와 같다. 산화양극피막 처리한 알루미늄 5052 H34 합금(0.5t) 적층재의  $V_{50}$ 은 일반 5.56mm ball탄(최고속도 1000 m/s)으로는  $V_{50}$ 을 측정할 수 없는 관통저항능력을 보여주었다. 파괴모드는 전면에서는 파열이 발생하였으나, 후면에서는 방사형 크랙이 발생하였다.

Table. 3 Result Versus  $V_{50}$  Ballistic Limits test (Protection Criteria).

No.	Material	Hardness (Hv)	$V_{50}$ (m/s)	Penetration Mode	
				face	back
1	Al 1052	46	618	P	P
2	Al 5052-H34	88	784	P	P
3	Al 5052-H34	87	885	P	P
4	Al 5052-H34	79	942	P	D
5	Anodized Al 5052 H34	249	1000이상	P	R

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

표면경도에 대한 각 재료의  $V_{50}$  및 관통모드는 Table 3과 같고, 동일한 두께에서 재료에 대한 방호한계는 Fig. 10과 같다.

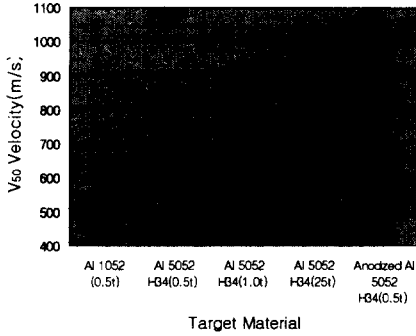


Fig. 10  $V_{50}$  velocity Vs. Target Materials

## 5. 결론

알루미늄 1052 합금 적층재, 두께가 다른 알루미늄 5052-H34 합금 적층재, 양극산화피막처리한 알루미늄 5052-H34 합금 적층재의 5.56mm ball탄의 고속 충격시험 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 방탄시험결과 모든 시편의 전면에서는 전면 파열(face petalling)이 발생하였으나, 후면에서는 양극산화피막처리한 알루미늄 5052-H34 합금 적층재는 방사형 파괴(radial fracture)가 발생하였고, 다른 시편에서는 후면파열(back-up petalling)이 발생하였다.

(2) 양극산화피막처리한 알루미늄 5052-H34 합금 적층재는 알루미늄 5052-H34 합금 적층재보다 탄도 충격시험 결과 우수한 방탄저항 특성을 보였다.  $V_{50}$  (방호한계)에서 알루미늄 5052-H34 합금 적층재는  $V_{50}$ 이 784m/s이고, 동일 두께의 양극산화피막처리한 알루미늄 5052-H34 합금 적층재는  $V_{50}$ 이 1,000m/s 이상이었다.

(3) 표면경도 측정결과 양극산화피막처리한 알루미늄 5052-H34 합금의 표면경도는 249Hv 였고, 알루미늄 5052-H34 합금의 표면경도는 88Hv, 알루미늄 1052 합금의 표면경도는 46Hv였다.

(4) 방탄시험결과 더욱 강한 표면경도를 갖는 알루미늄 합금으로 제작한 금속적층재를 사용할 경우, 방호한계  $V_{50}$ 을 더욱 향상시킬 수 있다.

## 후기

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

## 참고문헌

1. 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.
2. 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.
3. Crouch, I. G., "Metallic Armor-from Cast Aluminum alloys to High-Strength Sheets," Materials Forum, Vol. 12, pp. 31-37, 1988.
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. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.