

고속충격시 불탄에 의한 알루미늄 합금의 관통 깊이와 형상에 관한 실험적 연구

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

The experimental investigation for penetration depth and shape of aluminum alloy plates by 5.56mm ball projectile with striking velocities between 350 and 750m/s

S. W. Sohn(Dept. of Mech. and Aerospace Eng. Kon-Kuk Univ.), H. J. Kim(Dept. of Ordnance, KMA),
Y. T. Kim(Dept. of Mech. Design. Kon-Kuk Univ.)

ABSTRACT

This investigation describes and analyses the experimental results proper to the penetration of Al5052-H34 alloy plates of thickness 6, 12 and 16mm(T/D=1, 2, 3) by 5.56mm ball projectiles over the velocity range 350-750m/s. All the high velocity impact tests were carried out at normal impact angle, i.e. zero obliquity. The experimental results presented the variation of depth of penetration, bulge height and diameter, plugged length and diameter with the velocity for tests on each plate of a given thickness in order to determine the deformation shapes of 5.56mm ball projectiles and targets. Also the protection ballistic limit(V_{50}) tests were conducted.

Key Words : High velocity impact(고속충격), Penetration shape(관통형상), Fracture mode(파괴모드), V_{50} (방호탄도한계)

1. 서론

일반적으로 탄자(projectile)가 강철이나 알루미늄과 같은 균질재료의 판재(plate)에 고속으로 충돌하는 경우, 관통현상은 재료의 고유특성에 따라서 달라질 뿐만 아니라 탄자가 표적을 타격하는 각도에 따라서도 크게 달라진다. 관통현상에 영향을 주는 인자는 크게 표적과 탄자에 영향을 주는 인자로 나뉘어진다. 표적에 영향을 주는 인자로는 재료의 경도, 강도, 연성, 취성 및 소성변형 등의 기계적 성질과 밀도와 용융점 등의 물리적 성질이 있다. 탄자에 영향을 주는 인자로는 탄자의 속도와 그의 형상 및 타격각과 재료의 특성 등이 있으며 이외에도 재료조성과 불균질성 등의 여러 인자가 있다¹⁾. 고속충격에 의한 관통현상은 탄자와 표적재료의 특성에 따라서 다양한 파괴모드를 나타내고 있으며, 각각의 파괴모드는 독립적으로 일어나는 것이 아니고 종합적으로 발생하기 때문에 정확한 해석은 어려운 실정이다.

본 연구에서는 실제 전장(戰場)에서 개인화기의

탄자로 사용되고 있는 5.56mm 불탄을 사용하여 고속충격시험을 수행한 후, 각각 다른 두께를 갖는 알루미늄 합금에 대하여 속도 변화에 따른 탄자와 알루미늄 합금의 변형 형상과 관통 깊이를 비교 해석하였다.

2. 배경 이론

2.1 파괴 모드(Fracture mode)

탄자의 형상과 표적 재료의 특성에 따른 파괴모드에 대한 대략적인 분류를 Fig. 1에 나타내었다. 원추형(conical type) 탄자의 경우, 연성재료를 관통할 때는 재료에 탄자의 반경방향으로의 유동을 발생시키고, 단열전단밴드(adiabatic shear band)를 형성하는 재료에서는 국부적으로 발생한 열에 의한 온도상승으로 그 부분에서 재료의 강도 저하로 인하여 플러그(plug)의 발생이 더 용이하게 이루어진다. 끝이 무딘(blunt type) 탄자의 경우, 얇거나 중간두께의 재료를 타격할 때에는 전단응력의 발생으로 재료를 구속하고 탄자의 앞부분으로 재료가 이동하면

서 탄자의 직경과 거의 비슷한 크기의 슬러그(slug)가 탄자와 함께 후면으로 빠져나가면서 플러그가 발생한다. 두께가 얇은 재료에 대해서는 급속한 관통구멍의 확장보다는 굽힘(bend)에 의한 재료의 불룩현상(dishing)이 더 많은 운동에너지가 사용되며, 이 경우에서 발생하는 플러그(plug)의 직경은 탄자의 직경보다 작으며 환형(annulus)형태의 분쇄가 발생한다²⁻⁴⁾.

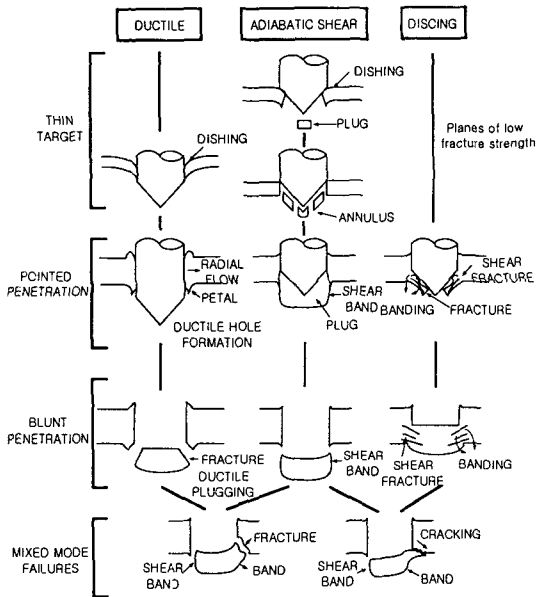


Fig. 1 Classification of failure modes to illustrate the effects of material properties and projectile geometry

2.2 방호탄도한계(Protection ballistic limit, V_{50})와 관통 형상(Penetration shape)

장갑의 방호성능이란 탄자의 관통에 저항하는 장갑능력이며, 측정방법은 탄자가 표적재료를 완전 관통하거나 부분관통하는 확률을 가지고 측정한다. 관통과 미관통의 확률이 동일한 V_{50} 을 충격속도로 나타내는 방호탄도한계(Protection ballistic limit)라고 정의한다⁵⁾. 이 한계는 일정한 표적장갑의 두께와 피탄자에 대하여 추진제의 양을 조절하여 충격속도를 변화시키면서 탄도실험을 행하여 얻는다. 또한 충격속도는 높낮이(up-and-down)방법에 의하여 측정한다.

탄자의 최종탄도학적 효과는 충격탄에 의한 표적의 관통현상을 분석함으로써 공격 및 방호에 대한 효과를 동시에 분석할 수 있다. 탄자가 표적재료를 충격할 때 탄이 관통되는 현상은 완전관통된 경우(CP, Complete Penetration), 완전관통은 되지 않고 표적재료에 소성변형만을 일으킨 부분관통의 경우(PP, Partial Penetration), 부분관통이지만 표적재료

가 파괴된 경우의 3 가지로 구분할 수 있다⁶⁾. 본 연구에서는 관통모드를 Fig. 2와 같이 부분관통과 완전관통으로 구분하여 그 변형 정도를 해석하였다.

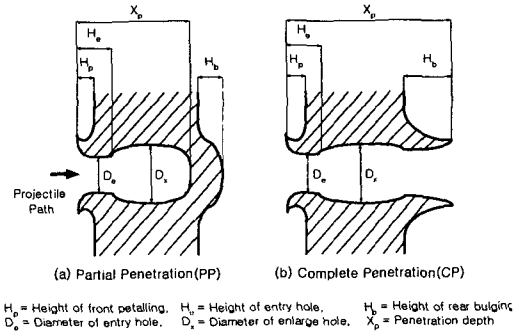


Fig. 2 Schematic of the sectioned penetration shape of specimen after high velocity impact test

3. 실험

3.1 시편 제작

본 연구에 사용된 각 시편은 Al5052-H34 합금(300mm×300mm)이며, 그 화학적 성질과 기계적 성질은 Table 1, 2와 같다. 일정한 T/D(Thickness of plates/Diameter of projectile)를 유지하기 위하여 각 시편의 두께를 6, 12, 16mm (T/D=1, 2, 3)로 하였다.

Table 1 Chemical composition of Al5052-H34 alloy

Composition	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn
wt%	0.25	0.4	0.1	0.1	2.2	0.15	0.1

Table 2 Mechanical property of Al5052-H34 alloy

Tensile Strength (MPa)	Shear Strength (MPa)	Modulus of Elasticity (GPa)	Elongation (%)
260	125	70	10

3.2 고속충격시험(High velocity impact test)

본 연구의 고속충격시험에서는 5.56mm 볼탄(5.56mm ball projectile, M193)을 사용하였으며, 볼탄의 탄심(core)은 Pb(67.3%), 외피(case)는 Cu(31.3%), Sb(0.4%)로 구성되어 있으며 탄자의 충격속도는 추진제의 양을 조정하여 증가시켰다. 고속충격시험에 사용된 발사장치는 오스트리아 AVL사의 Model 292이며, 탄자의 충격속도는 미국 OEHLER 적외선 스크린 Model 57과 HP사의 UNIVERSAL COUNTER Model 5334 A, B를 사용하여 측정하였다. 고속충격시험은 MIL-STD-662F⁷⁾ 규격에 의하여 수행되었으며, 실험 장치의 개략도는 Fig. 3과 같다.

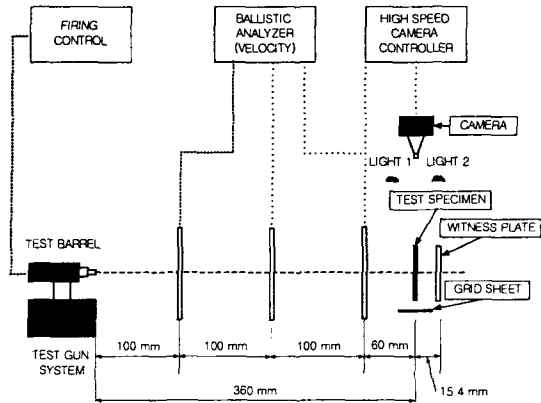


Fig. 3 Schematics of the ballistic range setup for high velocity impact test

4. 실험결과 및 고찰

4.1 충격속도 증가에 따른 관통 형상

두께가 6mm 인 시편에 속도를 증가시키면서 고속충격시험을 수행한 후의 단면사진을 Fig. 4 에 나타내었다. 충격속도가 375m/s(V_{50})이하에서는 시편 전체에 걸친 굽힘(bending)이 현저하게 나타나고 있으며(Fig. 4 (a)), 굽힘에 의한 변형각은 약 2-6° 이었다. V_{50} 이상의 속도에서는 굽힘이나 블록현상 보다는 플러그(plug)의 급속한 형성이 진행되고, 충격속도 증가에 따라 후면 플러그의 직경이 더 작아지고 있음을 알 수 있다. 또한 이 플러그의 직경은 어느 임계속도 이상에서는 굽힘거동에서 전단거동으로 변하고 있음을 알 수 있었다.

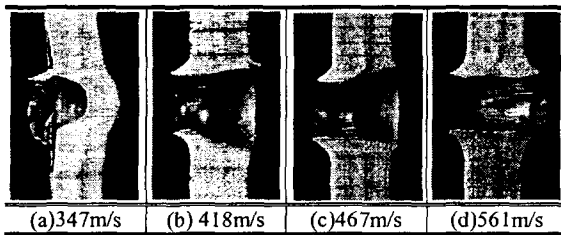


Fig. 4 Cross-section photo of penetration shape increasing impact velocity(specimen thickness=6mm)

Fig. 5 와 6 은 두께가 12, 16mm 인 시편의 고속충격시험 후 단면사진이다. 탄자의 변형은 속도와 타격각에 의하여 큰 영향을 받으며, 충격속도 증가에 따른 탄자의 변형은 반경방향 보다는 진행방향으로의 변형이 더 커짐을 알 수 있다.

시편의 변형은 두 경우 모두 유사한 형태를 보이고 있다. 탄자의 관입에 의하여 탄자의 진행방향으로 소성유동이 발생하며, 이 소성유동은 후면 플러그의 생성을 초래하고, 그 영역의 크기는 충격

속도에 비례하여 증가하는 경향을 보이고 있다. 또한 시편의 후면에서는 블록현상이 발생하고 있으며, 속도가 V_{50} 이상이 되면 플러그의 생성으로 인한 관통이 발생함을 알 수 있다.

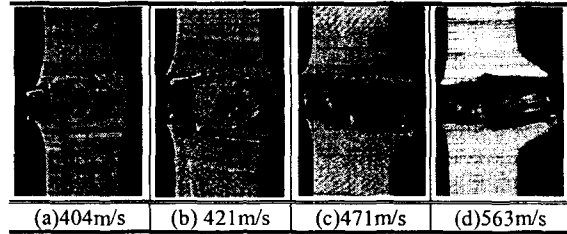


Fig. 5 Cross-section photo of penetration shape increasing impact velocity(specimen thickness=12mm)

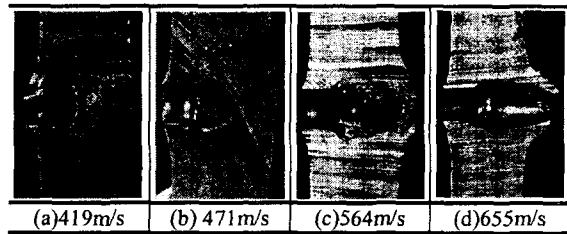


Fig. 6 Cross-section photo of penetration shape increasing impact velocity(specimen thickness=16mm)

4.2 형상 변형의 해석

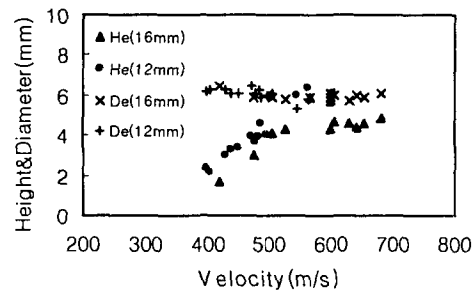


Fig. 7 Height of entry hole(He) and Diameter of entry hole(De) increasing impact velocity at each specimen

Fig. 7 은 각 시편에서의 속도증가에 따른 관입 초기 부분의 직경 변화(D_e)와 탄자가 원주방향의 변형 없이 관입하는 부분까지의 깊이(H_e)를 나타낸다. D_e 의 변형은 두께와 속도증가에 따라 큰 변화 없이 일정함을 보이고 있다. H_e 의 변형은 탄자 후미 주름진 부분의 형상(탄대홈, cannelure)으로 인하여 탄심의 날이 후방으로 팽창하는 것을 구속하여 일정속도 이상에서는 거의 일정한 깊이를 나타내고 있다.

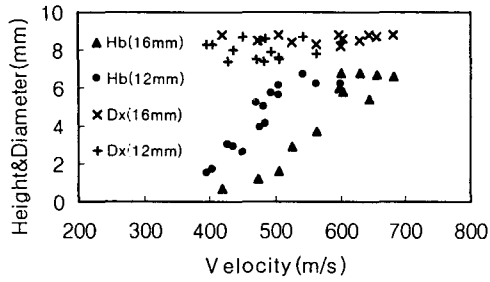


Fig. 8 Height of rear bulging(H_b) and Diameter of enlarge hole(D_x) increasing impact velocity at each specimen

Fig. 8 은 후면 볼록현상(H_b)과 탄자의 원주방향의 팽창으로 인해 발생하는 변형부의 최대 직경(D_x)을 나타낸다. H_b , D_x 모두 시편의 두께에 비례함을 확인할 수 있으며, H_b 는 부분관통의 경우 선형적으로 증가하고 완전관통 이후에는 변형량이 일정함을 알 수 있다. D_x 는 속도변화에 따라서 변형량에 약간의 차이가 있으나, 임계속도 이상에서는 거의 일정함을 나타내고 있다.

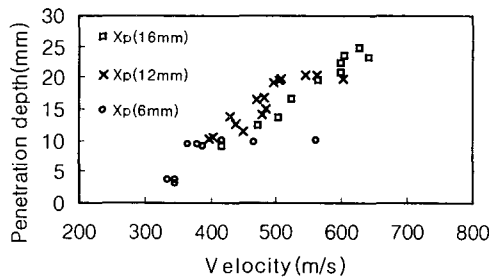


Fig. 9 Penetration depth(X_p) increasing impact velocity at each specimen

Fig. 9 는 시편의 관통깊이(X_p)를 나타낸 것이다. 두께가 다른 각 시편 모두 부분관통의 범위에서는 속도의 증가에 따라 선형적으로 관통깊이가 증가하지만, 완전관통 이후에는 일정함을 보이고 있다.

5. 결론

A15052-H34 합금의 두께가 6, 12, 16mm 인 시편에 5.56mm 볼탄에 의한 고속충격시험 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 시편의 두께가 6, 12, 16mm 에서의 방호탄도한계(V_{50})는 각각 375, 502, 616m/s 이었다.

(2) 두께가 얇은(6mm) 시편의 파괴모드는 V_{50} 이하에서는 시편전체에 걸친 굽힘(bending)이 현저하며, V_{50} 이상에서는 급속한 플러그의 발생이 진행함을 알 수 있었다.

(3) 중간 두께(12, 16mm) 경우의 파괴모드는 두께에 비례하여 속도증가에 따라 볼록현상과 관통깊이가 증가하지만, 전면파열의 높이와 관입부의 직경은 일정함을 알 수 있었다.

(4) 각 두께의 시편에서, V_{50} 이상의 속도영역에서는 관통깊이와 변형형상은 일정함을 보이고 있으며, 이는 완전관통 이후에는 시편과 탄자의 변형에 사용되는 일정량의 변형 최대 에너지가 존재함을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2000-000-003P3-0) 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Jonas A. Zukas, "High Velocity Impact Dynamics," John Wiley & Sons, Inc., pp. 65 - 107, 1990.
- Backman, M. E., and W. Goldsmith, "The Mechanics of Penetration of Projectiles into Targets," Int. J. Engng. Sci., vol. 16, pp. 1 - 99, 1978.
- Leppin, s., and R. L. Woodward, "Perforation Mechanisms in Thin Titanium Alloy Targets," Int. J. Impact Engng., Vol. 4, pp. 107 - 115, 1986.
- Woodward, R. L., "Penetration Behavior of a High-Strength Aluminum Alloy," Met. Technol., Vol. 6, pp. 106 -110, 1979.
- U.S. ATEC, "U.S. ATEC. Test Operations Procedure 2-2-710 Ballistic Test for Armor," A137973, U.S. Army Test Evaluation Command, Aberdeen Proving Ground, MD21005.
- 손세원, 김희재, 박영의, 홍성희, "알루미늄 5052-H34 합금 적층재의 방탄성능과 파괴모드에 관한 연구," 한국정밀공학회 추계학술대회 논문집, pp. 507-512, 2000.
- U.S. Army Research Laboratory, "Military Standard, V50 Ballistic Test for Armor, MIL-STD-662F." Dept. of Defense, 1997.
- 손세원, 이두성, 홍성희, 김영태, "저속충격시 Ball 탄(5.56mm)의 형상변화에 관한 연구," 한국정밀공학회 춘계학술대회논문집, pp.865-868, 2002.