

고속충격에 의한 Al 5052-H34 합금의 관통거동에 관한 연구

손세원* · 이두성** · 홍성희***

A Study on perforation behavior of Aluminum 5052-H34 alloy by high velocity impact

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

Key Words: High velocity impact, Ballistic limit, perforation behavior

Abstract

In order to investigate the fracture behaviors(perforation modes) and resistance to perforation during ballistic impact of aluminum alloy plate, ballistic tests were conducted.

Depth of penetration experiments with 5.56mm-diameter ball projectile launched into 25mm-thickness Al 5052-H34 targets were conducted. A powder gun launched the 3.55g projectiles at striking velocities between 0.6 and 1.0 km/s. radiography of the damaged targets showed different penetration modes as striking velocities increased.

Resistance to perforation is determined by the protection ballistic limit(V_{50}), a statistical velocity with 50% probability for complete perforation.

Fracture behaviors and ballistic tolerance, described by perforation modes, are respectfully observed at and above ballistic limit velocities, as a result of V_{50} test and Projectile Through Plates (PTP) test methods.

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 perforation during PTP tests.

The effect of various impact velocity are studied with depth of penetration.

1. 서론

알루미늄 합금은 재료 자체의 낮은 밀도로 인하여 비강도와 비강성이 높으며, 소구경탄에 대한 방탄능력이 우수하여 장갑재료로의 개발이 날로 증가되고 있다¹⁾.

장갑재료로서 사용되는 재료는 일반적으로 탄도 충격후에도 최초 탄도 공격에 의한 구조변화에 대하여 구조를 유지하는 구조적 특성뿐만 아니라 관통에 대한 저항성, 구조물의 하중지탱능력 및 강도를 가져야 한다. 또한, 탄도충격에 의

한 높은 속도(240m/s이상)의 하중과 변형이 가해지는 동적 환경에 놓이게 되므로 동적 변형 및 파괴거동과 탄도충격특성에 대한 연구는 필수적이다.

본 연구와 관련된 연구를 살펴보면 Silsby²⁾는 1.3km/s ~ 4.5km/s의 충격속도를 갖는 텅스텐 탄자를 장갑강에 충격시켜 충격속도에 따른 관통깊이의 연관관계에 대하여 연구하였다. 또한, Orphal³⁾은 세라믹재료의 고속충격에 대한 연구에서 고속충격시 탄자는 변형을 일으키고, 관통과정중에 탄자의 부서짐으로 인한 중량감소가 발생함을 보고하였다. 아울러 Forrestal⁴⁾에 의하면 알루미늄 6061-T651 합금과 C-300 머레이강의 고속충격시 탄자의 속도가 1.3km/s 이하에서는 탄자의 변형이 발생하지 않으나, 그 이상에서는 심한 변형이 발생된다고 보고하였다.

* 건국대학교 기계항공공학부

** 건국대학교 수학과

*** 건국대학교 대학원 기계설계학과

본 연구에서는 0.6km/s ~ 1.0km/s의 충격속도를 갖는 5.56mm ball 탄을 U. S. AMTL(1987)에 의한 V_{50} 탄도 한계 테스트 방법⁵⁾ 및 MIL-STD-662E⁶⁾ 규격서에 의하여 가벼우면서도 충격저항성이 우수한 알루미늄 5052-H34 합금에 충격시켜 방호한계인 V_{50} 를 측정하고, 관통저항성을 결정하였다.

파괴거동은 V_{50} 테스트와 PTP(projectile through plates) 테스트⁷⁾를 통하여 관찰하였으며, 탄자의 관입시 충격속도에 따른 탄자의 관입 깊이와 재료의 변형등을 방사성 동위원소를 이용한 방사선 투과검사(Radiography Test)를 이용하여 연구하였다. 또한, 결정된 V_{50} 을 사용하여 De Marre 경험식에서의 De Marre 계수를 결정하고, 충격속도에 따른 장갑의 유효 저항 두께를 산출하였다.

2. 배경이론

2.1 방탄 요구 특성(Demanded Protection Properties) 및 관통 모드(Perforation Mode)

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 딱지파쇄(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 경도와 강도, 연성, 미세구조와 판의 두께등이 있다.

탄자의 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. Fig. 1은 완전관통과 불완전관통의 구분을 나타내며 (a)는 미 육군, (b)는 미 해군, (c)는 방호장갑 설계시의 기준이다⁷⁾.

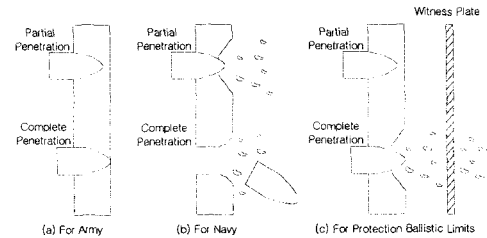


Fig. 1 Penetration mode by criteria of the army, navy and Protection Ballistic Limits

2.2 파괴 거동(Fracture Behavior)

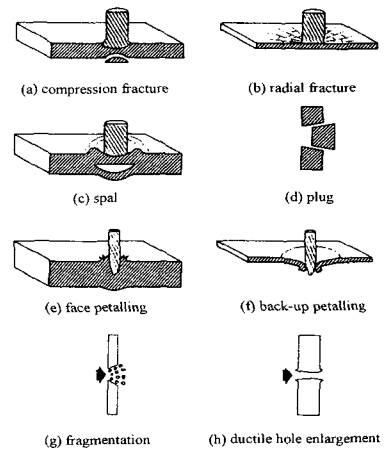


Fig. 2 Typical Failure(Penetration) Modes of Impacted Plates

일반적으로 두께가 얇거나 중간 두께의 강철이나 알루미늄과 같은 균질재료에 고속의 탄자가 충돌될 때의 관통현상을 분석하면 표적판의 재료와 두께 또는 탄자의 충격각에 따라서 Fig. 2에서 보는 바와 같이 최초의 압축파로 일어나는 압축 파괴(compression fracture), 딱지 파쇄(scabbing), 플러그(plug), 반경방향의 방사형 파괴(radial fracture), 표적판의 전·후면에서의 파열(petalling), 연성구멍확장(ductile hole enlargement), 조각 파쇄(spal)와 취성재

료인 경우에는 세열파편(fragmentation)도 함께 발생한다⁸⁾.

2.3 방호한계 측정방법(Method of V₅₀ Ballistic Test)

장갑의 방호성능이란 탄자의 관통에 저항하는 장갑능력이며, 측정방법은 충격탄이 장갑을 완전 관통하거나 부분관통하는 확률을 가지고 측정하는 방법으로, 관통과 미관통의 확률이 동일한 V₅₀을 충격속도로 나타내는 방호탄도한계(protection ballistic limit)라고 정의한다.

이 한계는 일정한 표적장갑의 두께와 피탄각(obliquity : 충격면에서의 장갑면에 대한 법선과 동일점에서의 탄도에 대한 접선간의 각)에 대하여 추진체의 양을 조절하여 충격속도를 변화시키면서 탄도실험을 행하여 얻는다. 또한 충격속도는 낮아짐(up-and-down) 방법에 의하여 측정한다.

2.4 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 에너지가 같기 때문에 탄자의 크기에 관계없이 요구되는 충격에너지로부터 요구하는 충격속도를 구할 수 있으며, 표적 관통을 위한 충격에너지는 De Marre의 경험식을 이용하여 다음의 식(1)과 같이 예측할 수 있다.

$$\frac{mv^2}{2} = cd^3 \left(\frac{t}{d} \right)^n \quad (1)$$

- 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 갖는다.

3. 실험

3.1 시편의 제작

본 연구에 사용된 시편은 알루미늄 5052-H34 합금을 사용하였으며 그 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1, 2와 같고, 두께는 25mm(1 inch)로 하였다.

Table 1 Chemical composition of Al 5052-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 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 고속 충격 시험

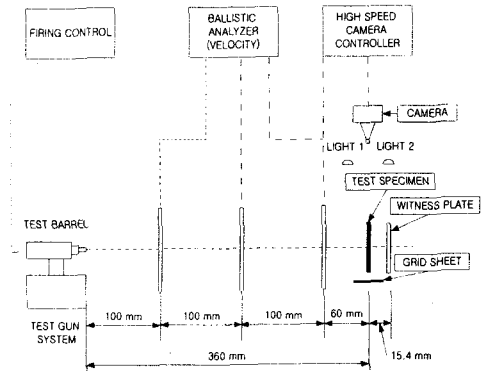


Fig. 3 Experimental Setup for High velocity Impact test

본 연구에서는 알루미늄 5052-H34 합금(25mm)의 방호탄도한계 V₅₀을 측정하기 위하여 5.56mm ball탄 및 오스트리아 AVL사의 model 292 발사장치와 5.56mm 시험총열을 사용하였고, 탄자의 충격속도는 미국 MV Ordnance 사의 model 4010P 속도측정장치를 사용하였으며, 이들 실험 장치의 개략도는 Fig. 3과 같다.

3.3 관입 깊이와 동적 변형 측정

시편 내부에 대한 관입 깊이의 측정은 독일

Siemens사의 Mevatron M 6740 6Mv X선 촬영기를 이용한 방사선 투과검사(Radiography Test)를 사용하였으며, 외부 변형에 대한 측정은 Dial Caliper와 Height Gauge를 사용하여 측정하였다.

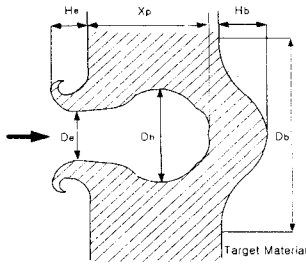
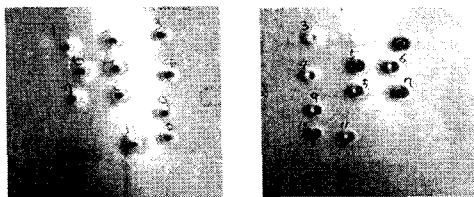


Fig. 4 Schematic of the sectioned view of the impact craters

Fig. 4에서, H_e =Entry Hole Height, H_b =Bulge Height, D_e =Entry Hole Diameter, D_n =Maximum Deformation Hole Diameter, X_p =Depth of Penetration 이다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 고속 충격 시험 결과



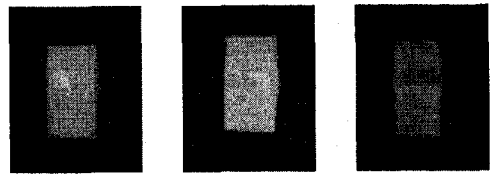
(a) Front (b) Back

Fig. 5 PTP Result of Al 5052-H34 alloy (25mm)

알루미늄 5052-H34 합금판(25mm)의 고속충격 시험 결과는 Fig. 5와 같다. 측정된 알루미늄 5052-H34 합금판(25mm)의 V_{50} 은 942m/s이었다.

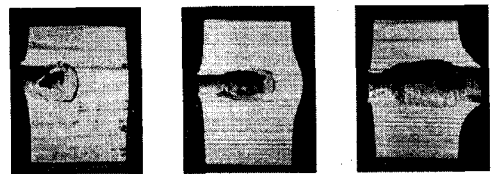
4.2 실험 후 관통 사진

Fig. 6은 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 파열(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. 6 Cross-section of impacted specimens using radiography

Fig. 7은 시편을 절단하여 CCD Camera를 사용하여 촬영한 시편의 단면 사진이며, 타격 속도의 증가에 따른 관입과 관통의 형상을 보이고 있다. 완전관통 후의 파괴모드는 전면에서는 급격히 크기가 감소한 파열(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. 7 Cross-section of impacted specimens using CCD Camera

4.3 동적 변형 측정 결과

Table 3은 충격 후 시편의 각 변형부에 대한 측정 결과이다.

Table 3 Dynamic Deformation after Impact Test

No.	V (m/s)	H_e (mm)	H_b (mm)	X_p (mm)	D_e (mm)	D_b (mm)	D_n (mm)
1	982	4.01	8.77	C.P.	5.81	21.03	11.12
2	607	3.25	0.74	12.46	5.86	17.22	9.30
3	791	3.90	3.14	20.72	5.94	22.42	10.26
4	846	4.31	4.78	23.21	6.03	18.86	10.19
5	991	5.34	8.53	C.P.	5.67	23.66	11.56
6	916	4.65	7.11	27.74	6.62	21.03	10.85
7	940	4.05	6.67	C.P.	5.78	21.56	10.98
8	940	4.14	8.69	28	6.01	21.5	10.38
9	932	4.05	7.69	27.91	6.03	21.27	11.81
10	940	4.13	7.11	C.P.	6.31	20.63	11.62
11	940	4.13	8.69	28.54	5.98	20.56	10.89

C.P. : Complete Penetration

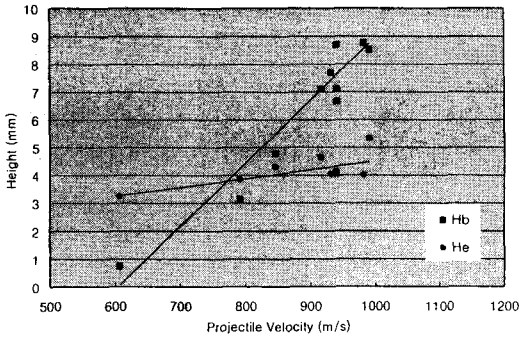


Fig. 8 Entry hole Height(H_c) & Bulge Height(H_b) Vs. increasing impact velocity

Fig. 8은 충격속도 증가에 따른 전면 파열량(H_c)과 후면 볼록형 돌기부(bulging)량을 나타내었다. 속도가 증가함에 따라 전면 파열량(H_c)은 약간의 증가를 보이는 반면, 후면 볼록형 돌기부(bulging)량이 선형적으로 보다 더 증가함을 알 수 있다. 이는 충격속도 증가시 일정량의 충격에너지가 전면에 작용하고, 나머지의 충격에너지가 관입에 작용하기 때문으로 사료된다.

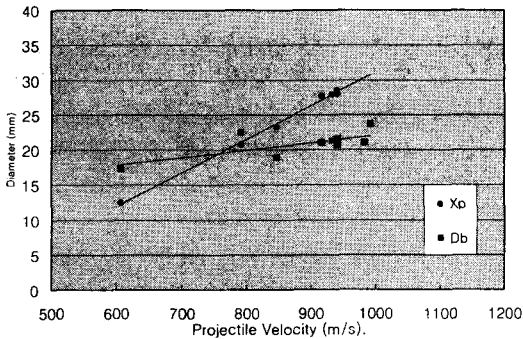


Fig. 9 Bulge Diameter(D_b) & The depth of penetration(X_p) Vs. increasing impact velocity

Fig. 9는 충격속도 증가에 따른 탄자의 관입량(X_p)와 볼록형 돌기부(bulging) 영역의 크기(D_b)를 나타내었다. 속도가 증가함에 따라 탄자의 관입량이 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 이는 탄자의 충격 에너지가 증가할수록 시편의 소성 변형이 증가하고, 흡수된 충격에너지가 소성변형에너지 보다 커지면 탄자는 관통을 하게됨을 의미한다.

Fig. 10은 충격속도에 따른 시편의 입구직경(D_e)과 최대 변형 직경(D_h)의 크기를 나타내었다. 속도가 증가함에 따라 입구직경의 크기는 충격속도에 따라 변하지 않고 일정함을 나타내고 있으

나, 최대 관입직경(D_h)의 경우 충격속도가 증가함에 따라 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 이는 충격속도가 증가함에 따라 충격에너지의 증가로 인한 탄자의 무더짐(blunting) 현상의 증가로 해석된다.

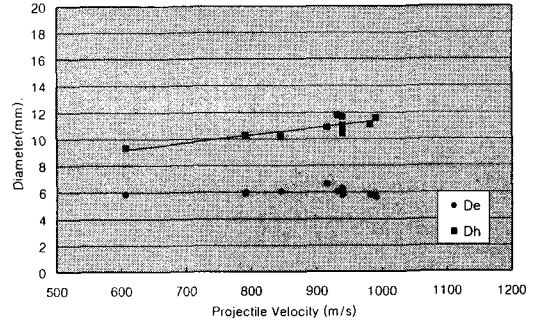


Fig. 10 Entry hole diameter(D_e) & Ductile Enlarge hole diameter(D_h) Vs. increasing impact velocity

4.4 De Marre 계수의 결정

식(1)의 De Marre 계수를 결정하기 위하여 $m = 3.55 \times 10^{-3} \text{kg}$, $v = 942 \text{m/s}$, $d = 5.56 \times 10^{-3} \text{m}$, $t = 25 \times 10^{-3} \text{m}$, $c = \text{De Marre 계수} (\text{N/m}^2)$, $n = 1.4$ 을 적용하고, 시험을 통한 방호한계인 $V_{50}(942 \text{m/s})$ 을 적용한 결과, De Marre 계수는 $109 \times 10^7 \text{N/m}^2$ 이다. 이 값은 제안된 De Marre 계수의 유효범위를 만족시키는 값이다.

4.5 유효 관통 깊이의 비교

결정된 De Marre계수를 사용하여 이론적인 관통깊이와 실험에 의해 측정된 관통깊이를 비교하면 Table 4 와 같다.

Table 4 Penetration Depth Comparison between Theoretical and Experimental

No.	V (m/s)	Theoretical Penetration Depth (mm)	Experimental Penetration Depth (mm)
1	982	26.954	C.P.
2	607	13.557	12.46
3	791	19.789	20.72
4	846	21.784	23.21
5	991	27.308	C.P.
6	916	24.404	27.74
7	940	25.322	C.P.
8	940	25.322	28
9	932	25.015	27.91
10	940	25.322	C.P.
11	940	25.322	28.54

C.P. : Complete Penetration

Fig. 11과 같이 이론값과 실제값을 비교해 보면 관통깊이가 잘 일치하는 것으로 나타났다. 관통된 시편의 관통깊이는 후면 플러그(Plug)에 의한 파엽(Petalling)까지를 고려하여 측정된 것이다.

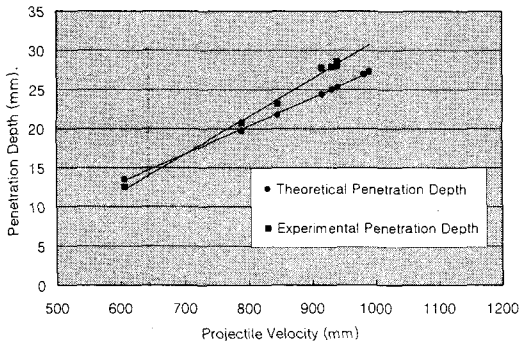


Fig. 11 Comparison of Theoretical and Experimental penetration depth Vs. increasing striking velocity

4. 결론

알루미늄 5052-H34합금의 5.56mm ball탄에 의한 고속충격시험 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 고속충격시험 결과 25mm(1 inch) 두께의 알루미늄 5052-H34합금의 방호한계 V_{50} 은 942m/s 이었다.

(2) 충격속도가 증가함에 따라 전면에서의 파엽 (petalling)과 후면의 볼록형 돌기부(bulging)은 선형적으로 증가하였으며, 파엽(petalling)보다는 볼록형 돌기부(bulging)의 크기의 증가폭이 더 컸다. 탄자의 표적판에 대한 관입깊이도 충격속도의 증가에 따라 선형적으로 증가하였다.

(3) 고속 충격시험결과 알루미늄 5052-H34 합금의 De Marre 계수 C는 $109 \times 10^7 \text{N/m}^2$ 이다.

(4) De Marre식에 의한 이론적 장갑두께와 실험에 의한 관통 깊이를 비교한 결과 평균오차 9.7%의 유사한 값을 나타내었다. 이를 통해 V_{50} 과 De Marre 계수가 결정되면 속도에 따른 유효 장갑 두께를 예측할 수 있다.

후기

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

참고문헌

- (1) 손세원, 이두성, 김동훈, 홍성희, "고속충격에 의한 아라미드 섬유강화 금속적층재의 방탄성능 및 동적파손거동에 관한 연구," 한국정밀공학회 추계학술대회 논문집 2000, pp. 527-532.
- (2) Silsby GF. "Penetration of semi-infinite steel targets by tungsten rods at 1.3 to 4.5km/s," Proceedings of the Eighth Int. Symposium on Ballistics, TB/31-35, Orlando, Florida, 1984.
- (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) 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, MD 21005.
- (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) 손세원, 김희재, 박영의, 홍성희, "알루미늄 5052-H34 합금 적층재의 방탄성능과 파괴모드에 관한 연구," 한국정밀공학회 추계학술대회 논문집 "2000, pp. 507-512.
- (8) 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.
- (9) 손세원, 이두성, 홍성희, "PVD처리한 티타늄 합금의 고속충격 거동에 관한 연구," 대한기계학회 춘계학술대회논문집 A, 2000, pp. 567-572.