

고속충격에 의한 아라미드 섬유강화 금속적층재의 방탄성능 및 동적파손거동에 관한 연구

손세원(건국대 기계항공우주공학부), 이두성(건국대 수학교육과), 김동훈*(건국대 대학원 기계설계학과), 홍성희(건국대 대학원 기계설계학과)

A Study on the ballistic impact resistance and dynamic failure behavior of aramid FRMLs by high velocity impact

S. W. Sohn(Mech. Eng. Dept., Kon-Kuk Univ.), D. S. Lee(Math. Dept., Kon-kuk Univ.), D. H. Kim(Mech. Design. Dept., Kon-Kuk Univ.), S. H. Hong(Mech. Design. Dept., Kon-Kuk Univ.)

ABSTRACT

The armor composite material targets such as aramid FRMLs with different type and ply number of face material and different type of back-up material, were studied to determine ballistic impact resistance and dynamic failure behavior during ballistic impact. Ballistic impact resistance is determined by V_{50} ballistic limit, a statical velocity with 50% probability for complete penetration, test method. Also dynamic failure behaviors are respectfully observed that result from V_{50} tests. V_{50} tests with 0° obliquity at room temperature were conducted with projectiles that were able to achieve near or complete penetration during high velocity impact tests.

As a result, ballistic impact resistance of anodized Al 5052-H34 alloy(2 ply) is better than that of anodized Al 5052-H34 alloy(1 ply), but Titanium alloy showed the similar ballistic impact resistance. In the face material, ballistic impact resistance of titanium alloy is better than that of anodized Al 5052-H34 alloy. In the back-up material, ballistic impact resistance of T750 type aramid fiber is better than that of CT709 type aramid fiber.

Key Words : FRMLs(섬유강화 금속적층재), Ballistic impact Resistance(방호성능), Dynamic Failure Behavior(동적 파손거동), V_{50} ballistic limit (방호한계),

1. 서론

현재 널리 사용되고 있는 고성능 방탄재료로는 단위 중량당 강성과 강도가 높으면서 가볍고, 특히 충격 저항성이 우수한 섬유강화 복합재료가 이용되고 있다. 그러나 단순 복합재료로 장갑을 설계할 때는 저속의 탄자나 파편에 대하여는 그의 방호성능이 매우 양호하지만 고속 충격탄자와 같이 관통성이 뛰어난 위협 조건에 대해 그의 관통저지능력은 급격히 감소하여 충분한 방탄성능을 가질 수 없는 경우가 많다.

현재까지 연구된 바로는 전면재로 탄이 충격할 때 에너지의 일부를 흡수시키는 동시에 탄두의 형상을 무디게 하는 효과를 얻을 수 있는 재료를 사용하고, 후면재로 경량이면서 충격흡수 특성이 우수한

재료를 사용하여, 이들 두 재료를 접합시킴으로써 요구되는 방호특성을 만족할 수 있음이 알려졌다. 이 경우 충격특성이 우수한 아라미드 섬유가 후면재료 사용되고, 전면재로는 세라믹 재료가 사용되고 있으나 세라믹 재료는 탄자 충격후 강성유지가 어려워 자주 교체해야 하는 단점이 있다.

본 연구는 전면재로 탄자 충격후에도 그 강성을 유지할 수 있는 고강도 금속으로 양극산화피막처리된 알루미늄 5052-H34 합금과 티타늄 합금을 사용하고, 후면재로 Twaron CT709, T750 아라미드 섬유강화 복합재료를 사용한 아라미드 섬유강화 금속적층재를 제작하여, 전면재인 고강도 금속의 적층수와 적층방법, 후면재에서의 아라미드 섬유의 종류에 따른 고속탄자 충격시의 방탄성능의 변화와 동적파손거동을 관찰하고자 하였다.

본 연구에서는 U. S. AMTL(1987)에 의한 V_{50} 탄도 한계 테스트 방법에 의하여 아라미드 섬유강화 금속적층재의 방호성능을 결정하고, 동적파손거동을 관찰하였다.

2. 배경이론

2.1 섬유강화 금속적층재의 이론

섬유강화 금속적층재(Fiber Reinforced Metal Laminates, FRMLs)는 고강도 금속과 섬유강화 복합재료를 적층한 하이브리드 복합재료로서 일반적으로 기지재료에 고강도 섬유를 함침시켜 만든 프리프레그와 고강도 금속을 적층, 경화시켜서 만든다.

FRMLs의 강화섬유로 사용되는 아라미드 섬유는 85%의 아미드기(-NH-CO-)가 두 개의 방향족 고리에 직접 연결된 합성폴리아미드로부터 제조된 인조섬유로 화학적 안정성이 좋고, 우수한 인장강도와 탄성을 가지며, 기계적 특성과 충격특성이 아주 우수하다. 또한 보강섬유가 하중을 견디는 요소라면, 이들 각각의 섬유를 제자리에 고정시켜서 구조적인 모양을 이루기 위해서는 기지재료의 필요성이 절대적이며 전단하중일 때에는 주로 기지재료가 하중을 지탱하므로, 그 기계적 성질이 매우 중요하다.

FRMLs에 사용되는 고강도 금속은 내식성, 가공성이 좋으며 높은 강도와 파괴인성을 갖는 가볍고 강한 알루미늄 합금이나 비강도가 높고 내식성이 우수하며 충격에 대한 저항성이 매우 우수한 티타늄 합금을 사용한다.

2.2 운동에너지탄 위협에 대한 방호성능의 평가

운동에너지탄이란 탄자의 운동에너지를 이용하여 장갑으로 보호된 표적을 관통하거나 또는 표적에 충격을 가하는 탄이다. 높은 에너지를 얻기 위해서는 탄의 질량이나 속도를 크게 해야만 한다.

운동에너지탄에 의한 효과는 탄자가 표적에 충돌할 때, 표적을 관통하는 탄자, 탄의 관통중 표적재료가 파손되어 형성된 파편, 혹은 충격파에 의하여 표적재료 후면이 파괴되어 생기는 파편 등이다. 표적재료에 대한 완전 또는 불완전 관통의 구분에 대하여는 적용하는 때에 따라 Fig. 1과 같이 세 가지로 구분된다. (a)는 탄자가 표적의 후면에 도달하면 관통이라고 취급하고, (b)는 탄자가 표적을 완전히 빠져나갈 때 관통했다고 정의한다. (c)는 탄도학의 학술적인 정의로서 충돌탄의 타격에 의해 형성된 파편이나 탄자 자체가 일정거리(통상 15.4cm) 떨어진 앞면 알루미늄 합금막(0.05~0.5mm)을 관통할 때를 완

전관통이라고 정의한다.

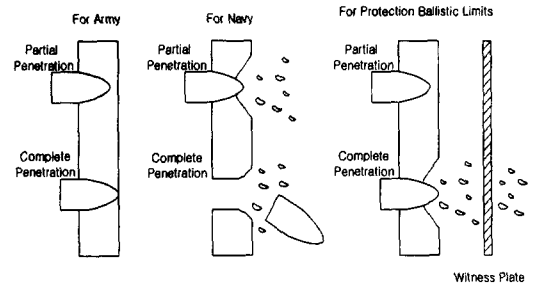


Fig. 1 Penetration mode by criteria of the army, navy and Protection Ballistic Limits

운동에너지탄의 표적충돌속도는 사용한 추진제 및 강내탄도 특성에 따라 결정되나 일반적으로 25m에서 권총탄 비행속도인 200~300m/s 범위인 것으로부터 소구경 화기의 비행속도인 1000m/s 범위까지를 운동 에너지탄의 충돌조건으로 한다.

운동에너지탄의 최종탄도학적 효과는 충돌탄에 의한 표적의 관통현상을 분석함으로써 공격 및 방호에 대한 효과를 동시에 분석할 수 있다. 충돌탄이 표적재료를 충돌할 때 탄이 관통되는 현상은, 완전 관통은 되지 않고 표적재료에 소성변형만 일으킨 경우(Partial penetration), 완전 관통이 된 경우(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 위치에 따라 결정된다. 일반적으로, 장갑의 방호성능은 일정한 충격위험에 대한 장갑의 피해를 양적으로 측정하여 이를 비교치로 삼고 있다.

가장 보편적인 방호성능 측정방법으로는 충격탄이 장갑을 완전관통하거나 부분관통하는 확률을 가지고 측정하는 방법이다. V_{10} 은 10%의 관통확률과 90%의 미관통확률을 가진 것이며, V_{90} 은 90%의 관통확률과 10%의 미관통확률을 나타낸다. 그러나 대부분의 경우 Fig. 2와 같이 관통과 미관통의 확률이 동일한 V_{50} 을 충격속도로 나타내는 V_{50} 을 방호탄도 한계(protection ballistic limit)라고 정의한다.

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. 탄도실험시 완전 및 부분

관통이 일어나는 속도범위인 혼합속범위(zone of mixed result(ZMR) : 완전관통이 일어나는 최고 속도와 부분 관통이 일어나는 최저 속도의 차이)를 어느 범위 내로 구하여야 한다.

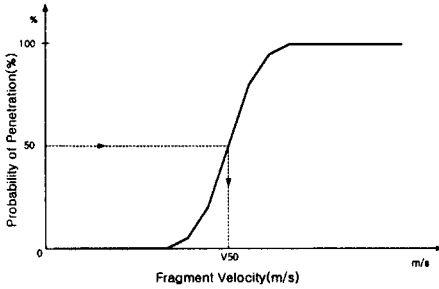


Fig. 2 Definition of Protection Ballistic Limits(V_{50})

ZMR가 어느 정도 이하가 되는 조건을 구하는 실험방법으로는 높낮이(up-and-down)방법이 사용된다. 높낮이 방법으로 V_{50} 을 결정하는데는 ZMR을 얼마로 정하느냐에 따라 요구되는 탄도실험 횟수가 결정되며, 완전 관통 및 부분관통이 일어나는 모든 경우의 충격속도의 산술평균속도를 V_{50} 으로 정한다.

2.4 동적파손거동(Dynamic Failure Behavior)

섬유강화 금속적층재의 고속충격에 의한 파손에는 볼록현상(bulging)과 오목현상(dishing), 박리현상(delamination), 디본딩(debonding), 섬유인출(fiber pullout)등이 있으며, 이러한 현상들은 표적판 재료의 성질과 두께 또는 타격각에 따라서 크게 영향을 받는다. 고강도 섬유로 보강된 복합재료에서는 탄자의 속도가 저속일 경우 강이나 알루미늄에서처럼 파엽(petal), 연성구멍확장(ductile hole enlargement) 및 조각파쇄(spalling)등은 발생하지 않고 단지 플러그(plug)만 발생하며, 탄자의 속도에 따라 다르기는 하지만 아주 저속일 경우에는 섬유인출 현상과 박리현상도 발생한다. 그러나 이러한 현상들은 탄자의 속도가 증가함에 따라 감소한다. 그 이유는 저속의 탄자가 섬유를 관통할 때, 인장응력에 의하여 필라멘트(filament)가 늘어나기 때문에 표적판의 후면에 볼록현상과 오목현상이 나타나는 것이다. 그러나, 탄자의 속도가 점점 증가하면 Fig. 3과 같이 섬유의 필라멘트의 인장변형량은 점점 감소하여 인장 변형량이 거의 없는 상태에서 필라멘트의 파괴가 일어나게 된다. 이러한 경우 표적판 후면에는 볼록과 오목현상은 전혀 발생하지 않으며 섬유인출 현상이나 박리 현상도 발생하지 않고 표적판에서 탄자의 관통구멍이 탄자의 단면적과 거의 같게 된다.

일반적으로 섬유강화 금속적층재에서는 탄자가 고강도 금속을 관통할 때 탄자의 속도가 급격히 감소하여, Fig. 4와 같이 표적판 후면에 볼록과 오목현상이 발생하게 된다.

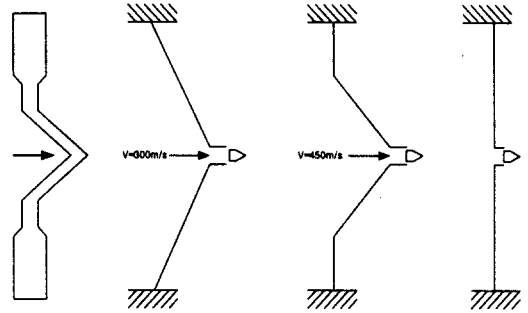


Fig. 3 Deformation of impacted fiber filament under the different impact velocity

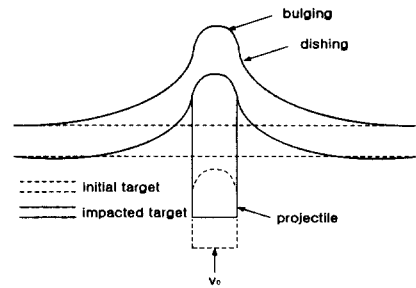


Fig. 4 bulging and dishing

표적이 손상되는 면적을 나타내는 손상크기(damage size)는 재료의 성질, 탄자의 구경, 탄자의 속도, 표적판의 두께 및 타격각에 따라 달라지며 섬유강화 금속적층재에서는 표적판 후면의 볼록과 오목현상뿐만 아니라 때에 따라서는 섬유강화 복합재료층에 박리현상이나 디본딩현상이 발생하는 경우가 있다.

3. 실험

3.1 시편의 제작

본 연구에 사용된 시편은 Table 1과 같이 전면재로 양극산화피막처리된 알루미늄 5052-H34 합금과 티타늄 합금을 사용하였고, 후면재는 아라미드 섬유강화 복합재료로서 $0^\circ/90^\circ$ 기본구조의 플레인(plain) 조직을 층상으로 조합한 것을 사용하여, 고강도의 금속과 섬유강화 복합재료를 적층한 다음, 핫-프레스(Hot-Press)에서 가온·가압하여 아라미드

섬유강화 금속적층재를 제작하였다. 이때, 시편의 전체 무게는 900g으로 일정하게 유지시켰다.

Table 1 Test Specimen

No.	Material	Ply (ply/ply)	Total thickness (mm)
1	Anodized Al 5052-H34 alloy(0.5t)/Aramid fiber reinforced composite(CT709)	1/38	10
2	Anodized Al 5052-H34 alloy(0.5t)/Aramid fiber reinforced composite(CT709)	2/32	9
3	Titanium alloy(0.5t) /Aramid fiber reinforced composite(CT709)	1/32	9
4	Titanium alloy(0.5t) /Aramid fiber reinforced composite(CT709)	2/26	8
5	Anodized Al 5052-H34 alloy(0.5t)/Aramid fiber reinforced composite(T750)	2/14	9
6	Titanium alloy(0.5t) /Aramid fiber reinforced composite(T750)	2/8	5

3.2 고속충격시험

본 연구에서는 Fig. 5와 같은 장치를 사용하여 5.56mm ball탄의 고속충격시 아라미드 섬유강화 금속적층재의 방호성능과 동적파손거동을 측정하였다.

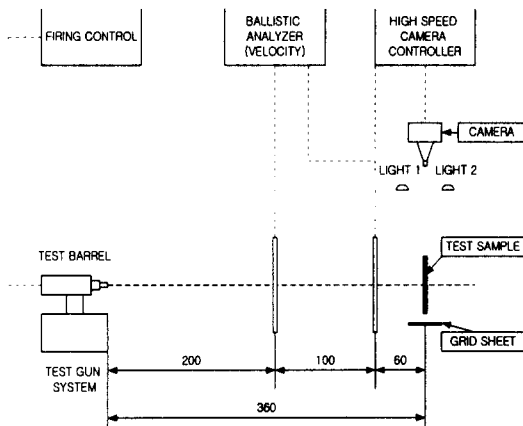


Fig. 5 Schematics of experimental device setup for FRMLs in this study

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 고속충격시험결과

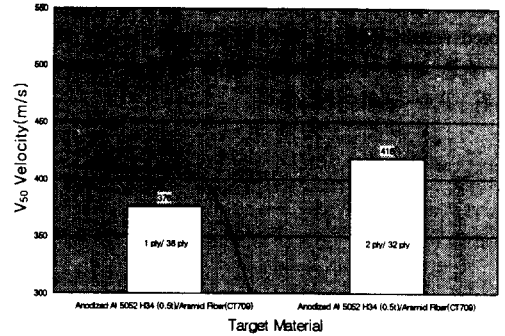


Fig. 6 The effect of the Anodized Al 5052-H34 alloy ply number on the ballistic limit of FRMLs with same total weight(900g)

Fig. 6은 전체 무게(900g)를 일정하게 유지하면서 양극산화피막처리된 알루미늄 5052-H34 합금의 적층수를 1ply, 2ply로 변화시킨 경우로서 후면재가 CT709인 FRMLs의 방호성능(V_{50})을 비교한 것이다. Fig. 6에서 보는 것처럼 전면재의 적층수가 증가한 경우 더 높은 방호성능을 보였다.

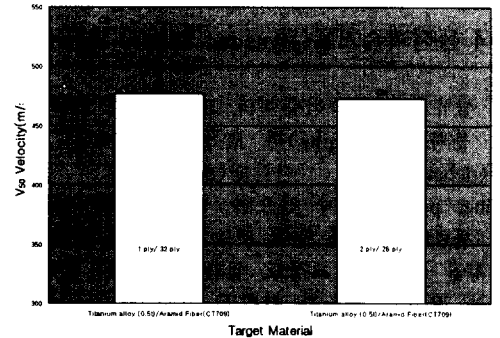


Fig. 7 The effect of the Titanium alloy ply number on the ballistic limit of FRMLs with same total weight(900g)

Fig. 7은 티타늄 합금의 적층수를 1ply, 2ply로 변화시킨 경우로서 후면재가 CT709인 FRMLs의 방호성능(V_{50})을 비교한 것이다. 이 경우에는 적층수가 증가한 경우 약간 낮은 방호성능을 보였다. 그 이유는 전체 무게(900g)를 그대로 유지하기 위해서는 후면재가 매우 얇아져 전면재와 후면재 사이의 접착면에 응력집중이 발생하고, 후면재가 구조유지의 역할을 수행하지 못했기 때문이다.

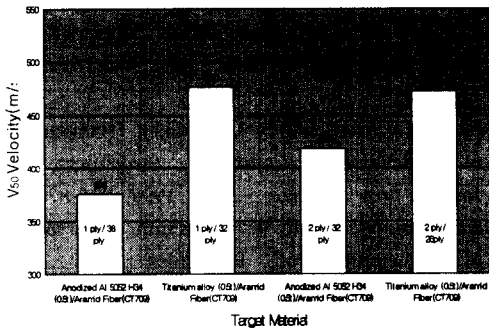


Fig. 8 The effect of the face material type on the ballistic limit of FRMLS with same total weight(900g)

Fig. 8은 전면재의 종류에 따른 FRMLS의 방호성능(V_{50})을 비교한 것이다. Fig. 8에서 보는 것처럼 양극산화피막처리된 알루미늄 5052-H34 합금보다 티타늄 합금을 전면재로 사용했을 때 더 높은 방호성능(V_{50})을 보였다.

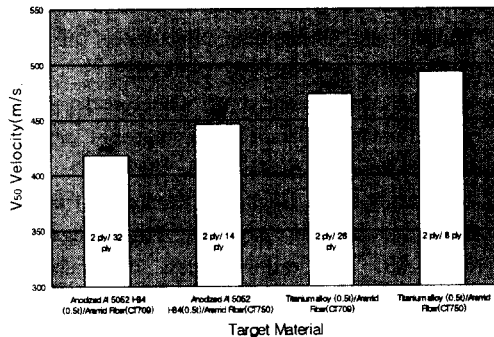
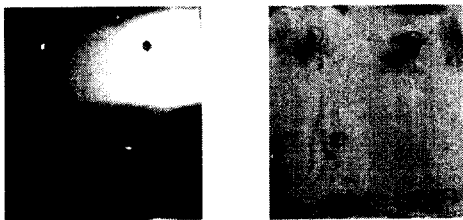


Fig. 9 The effect of the back-up material type on the ballistic limit of FRMLS with same total weight(900g).

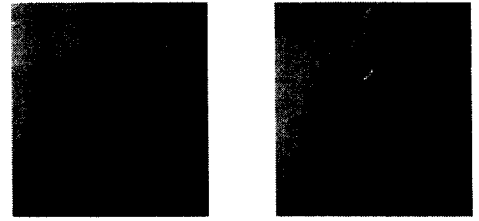
Fig. 9는 후면재의 종류에 따른 FRMLS의 방호성능(V_{50})을 비교한 것이다. Fig. 9에서 보는 것처럼 T750이 CT709보다 더 좋은 방호성능(V_{50})을 보였다.



(a) front (b) back

Fig. 10 The failed Titanium alloy/T750 after high velocity impact test.

Fig. 10은 고속충격실험후 파손된 티타늄 합금/T750 시험편을 나타낸 것으로, (a)는 시험편의 전면이고, (b)는 시험편의 후면이다.



(a) (b)

Fig. 11 The dynamic failure behavior on test material after high velocity impact.

(a) test material before high velocity impact.
(b) test material after high velocity impact.

Fig. 11은 고속충격실험후 파손된 시험편의 동적 파손거동을 나타낸 것으로 (a)는 고속충격실험전의 시험편이고, (b)는 고속충격실험후의 시험편이다. Fig. 11에서 보는 것처럼 (b)는 볼록과 오목현상이 발생되었고, 넓고 완만한 형태의 손상영역을 보였다.

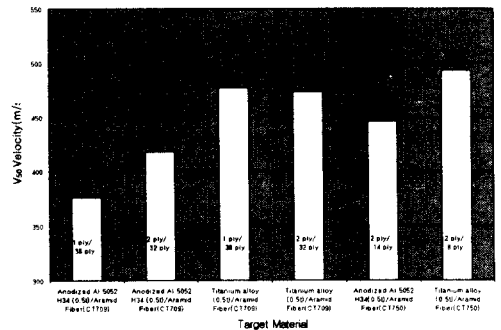


Fig. 12 The result of V_{50} Ballistic Limits test on test material(Protection Criteria)

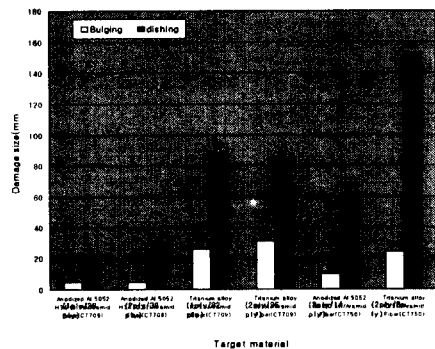


Fig. 13 The result of Damage size on test material.

Fig. 12와 Fig. 13은 각 시험편의 방호성능(V_{50})과 손상영역의 크기를 나타낸 것이다.

5. 결론

전면재로 양극산화피막처리한 알루미늄 5052-H34 합금과 티타늄 합금을 사용하고, 후면재로 아라미드 섬유와 에폭시 수지를 사용하여 제작한 아라미드 섬유강화 금속적층재의 고속충격시험 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 티타늄 합금을 사용하여 제작한 아라미드 섬유강화 금속적층재는 볼록현상과 오목현상이 발생하였다. 고속충격시 전면재가 충격탄자의 형상을 무디게 하여 탄자속도를 감소시키는 역할을 충분히 수행하였음을 보여 주는 넓고 완만한 형태의 손상영역이 나타났다.

(2) 전면재로 양극산화피막처리한 알루미늄 5052-H34 합금을 사용하였을 경우 전면재의 적층수가 1 ply일 때의 V_{50} 은 376m/s이고, 2 ply일 때의 V_{50} 은 418m/s로, 전면재의 적층수를 1ply에서 2 ply로 증가시켰을 때 약 11%의 방호성능 향상을 가져왔다.

(3) 전면재로 티타늄 합금을 사용하였을 경우 V_{50} 은 477m/s이고, 양극산화피막처리한 알루미늄 5052-H34 합금을 사용한 경우 V_{50} 은 376m/s로, 양극산화피막처리한 알루미늄 5052-H34 합금보다 티타늄 합금이 약 27% 더 우수한 방호성능을 나타내었다.

(4) 후면재로 T750 아라미드 섬유를 사용하여 섬유강화 금속적층재를 제작한 경우 V_{50} 은 446m/s이고, CT709 아라미드 섬유를 사용해 제작한 경우 V_{50} 은 418m/s로, CT709 아라미드 섬유보다 T750 아라미드 섬유가 약 7% 더 우수한 방호성능을 나타내었다.

후기

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

참고문헌

1. B. Wang, S. M. Chou, "the Behavior of laminated composite plates as armour", *Journal of Materials Processing Technology* 68 (1997), 279-287.
2. Jie Xiong, Bohong Gu, Shan-yuan Wang, "An Investigation into ballistic impact property of aramid

- fabric laminated composite", 937-938.
3. Zahid I. Baig, and Vinay Dayal, "Effect of Ballistic Impact Damage on thin and thick composite", 219-220.
4. Jack R. Vinson, Jeffrey M. Walker, "Ballistic Impact of Thin-Walled Composite Structures", *AIAA Journal*, Vol. 35, No. 5, May 1997, 875-876.
5. 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.
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. L. Chen, B. Jang, L. Hwang, J. Hwakes, and R. Zee, "Impact and Penetration Resistance of Fibrous Composites", ANTEC '88, 1626-1629.
9. Ahmed M. Monib and J. W. Gillespie Jr., Bruce K. Fink, "Damage Tolerance of Composites subjected to Ballistic Impact", ANTEC '98, 1463-1467.
10. N. J. Mills and a Gilchrist, "Response of helmets in direct and oblique impacts", *Proceedings of the NATO-ASI on Crashworthiness of Transportation Systems Structural Impact and Occupant Protection*, July 7-19 1996, Troia, Portugal, 89-105.
11. Alan J. Lesser, "Effect of Resin crosslink density on the Impact Damage Resistance of Laminated Composites", ANTEC '96, 3239-3242.
12. H. J. Kim, J. I. Yuk, S. G. Lee, "Dynamic Failure Behavior of Ceramic/Fiber-Reinforced Composites under High Speed Impact Loading", *Korean Journal of Materials Research*, Vol. 7, No. 9 (1997)