

고속충격에 의한 세라믹/섬유강화 복합재료의 동적파손 거동

김희재 · 육종일* · 이승구**

육군사관학교 무기공학과

*국방과학연구소

**충남대학교 섬유공학과

Dynamic Failure Behavior of Ceramic/Fiber-Reinforced Composites under High Speed Impact Loading

Hee Jae Kim, Jong Il Yuk* and Seung Goo Lee**

Department of Ordnance Engineering, Korea Military Academy, Seoul 139-799

*Agency for Defense Development

**Department of Textile Engineering, Chungnam National University, Taejon 305-764

(1997년 5월 15일 받음, 1997년 8월 1일 최종수정본 받음)

초 록 전면재를 알루미늄, 후면재를 Kevlar 또는 S-2 유리 섬유강화 복합재료로 접합한 이종재료 장갑에 대하여 알루미늄의 두께 변화와 복합재료의 적층구조에 따른 고속충격 특성 변화에 대하여 연구하였다. 또한 시험재료의 동적 관통현상을 분석하기 위하여 고속촬영기법이 이용되었다. 시험결과, 전면재인 알루미늄은 충격탄자 직경의 80% 상당하는 두께(본 실험에서는 6mm)인 경우 양호한 방탄성능을 보였다. 후면재인 복합재료는 섬유를 alternating 구조로 적층한 경우가 laminar 구조로 적층한 것에 비하여 더 우수한 방탄성능을 나타내었다.

Abstract The high speed impact performance of dissimilar armor materials such as alumina/Kevlar or S-2 glass fiber-reinforced composites, was studied with different thickness of alumina(face material) and different structure of the composites(back-up material). A high speed photography was conducted to analyze the dynamic perforation phenomena of the test materials. Alumina as a face material, having its thickness equivalent to 80% of the diameter of the striking projectile showed the good ballistic performance (6mm thick in this study). In the back-up material, the alternating type fiber composite is better ballistic performance than the laminar type one.

1. 서 론

고성능 섬유강화 복합재료는 단위 중량당 강성과 강도가 높으면서 가격도 저렴하여 여러 산업 분야에 널리 사용되고 있으며, 특히, 가벼우면서도 충격 저항성이 우수하여 방탄 재료로의 군사적 이용도도 날로 증가되고 있다¹⁾. 그러나 고속 충격탄자와 같이 관통성이 뛰어난 위협 조건으로부터의 방호를 목적으로 장갑을 설계할 때는 단순 복합재료만으로는 충분한 방탄성능을 가질 수 없는 경우가 많다²⁾. 이런 경우는 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 장갑 재료의 개발이 꾸준히 연구되어 왔다^{1~4)}.

현재까지 연구된 바로는 탄이 충격할 때 에너지의 일부를 흡수시키는 동시에 탄두의 형상을 무디게 하는 효과를 얻는 개념에서 세라믹 재료를 전면재(face material)로 채택하고, 경량이면서 충격흡수 특성이 우수한 섬유강화 복합재료를 후면재(back-up material)로 사용하여, 이들 두 재료를 접합시킴으로써 요구되는 방호특성을 만족할 수 있음이 알려졌다^{2~4)}. 이 경우 전면재로 사용할 수 있는 세라믹 재

료의 종류는 다양하나, 경제성이 양호한 알루미늄이 일반적으로 적용되고 있으며, 후면재로는 Kevlar 혹은 S-2 glass 섬유로 강화한 복합재료가 이용되고 있다.

일반적으로 장갑재료를 설계할 때는 그 장갑을 적용하는 무기체계의 설계과정에서 요구하는 수준의 방호성능과 허용되는 중량이 예상되어진다. 이러한 요구수준을 근거로 한 이종재료 장갑을 설계함에 있어서, 방탄재의 평균 면밀도를 고려하여 전면재인 세라믹의 효과적인 두께와 후면재인 섬유강화 복합재료의 섬유의 종류와 구조(층상 구조 또는 하이브리드 구조 등), 모재의 함량 등의 설계변수를 선정하여야 한다.

본 연구는 이러한 다양한 설계변수를 가진 이종재료 장갑에 대하여 전면재인 세라믹의 효과적인 두께와 후면재인 복합재료의 적층구조 방법에 따른 방탄성능의 변화를 관찰하고자하였다. 그리하여 설계하여 제작한 알루미늄/FRP(fiber-reinforced plastic composite) 이종재료 장갑 시험편의 방탄성능을 측정하고, 충격탄자가 재료를 관통할 때 재료의 파괴 거동을 분석하여 최적의 방탄성능을 가지는 장갑재료의 제작조건을 도출하고자 하였다. 이종재료의 방탄성능은 MIL-STD-662E 규격서⁵⁾에 명시된 방호한계속도(V_{50})를 측정하여 평가하였으며, 시험 과정중 재료의 동적

변형 거동은 고속 카메라를 이용하여 격자면에 파손 현상이 투영된 상태를 촬영하여 가시화시키는 기법으로 재료의 파손현상을 분석하였다.

2. 실험 방법

실험 재료

본 연구에서는 7.62mm ball탄 위협에 대한 방탄 재료를 설계하는 과정에서 시험 방탄재의 두께 및 제작방법에 따른 방탄성능의 변화를 구하여 효과적인 방탄성능을 가진 이중 재료 방탄재를 제작하고자 하여 Table 1과 같이 시험편을 제작하였다. 이들 시험편의 전면재는 한국기술요업(주)에서 공급한 150mm×150mm 크기의 AD90급 알루미늄, 후면재인 Kevlar 섬유강화 복합재료의 경우는 0°/90° 기본 구조에 두께 방향으로 tricot/stitching이 가해진 3축 경편 조직과 4×4 Basket 조직을 층상으로 조합한 것을 사용하

였다⁶⁾. 이때 Fig. 1의 (A)의 3축 경편조직과 (B)의 basket 조직을 (C)와 같이 교대로 층상배열한 것을 alternating structure라 하였고, (D)와 같이 3축 경편조직들/Basket 조직들의 차례로 층상배열한 것을 laminar structure라 하였다. S-2 glass 섬유강화 복합재료의 경우는 5×5 plain 조직으로 제작한 것을 단일로 층상배열하여 제작하였다. 이들 세라믹과 복합재료를 접착제로 접착한 이중재료 방탄재에 대하여는 총 면밀도를 3.2g/cm²로 일정하게 유지시켰다.

본 연구에서는 다음의 두 가지 설계 개념으로 실험을 실시하였는데, 첫째는 전면재인 세라믹 재료의 두께 변화에 따른 방탄성능 측정을 통하여 효과적인 시험편 두께를 결정하고자 하였으며, 둘째는 동일한 전면재 두께에 대한 후면재인 복합재료의 종류에 따른 방탄성능의 비교를 통하여 방탄성능이 우수한 강화섬유의 최적 구조를 구하고자 하였

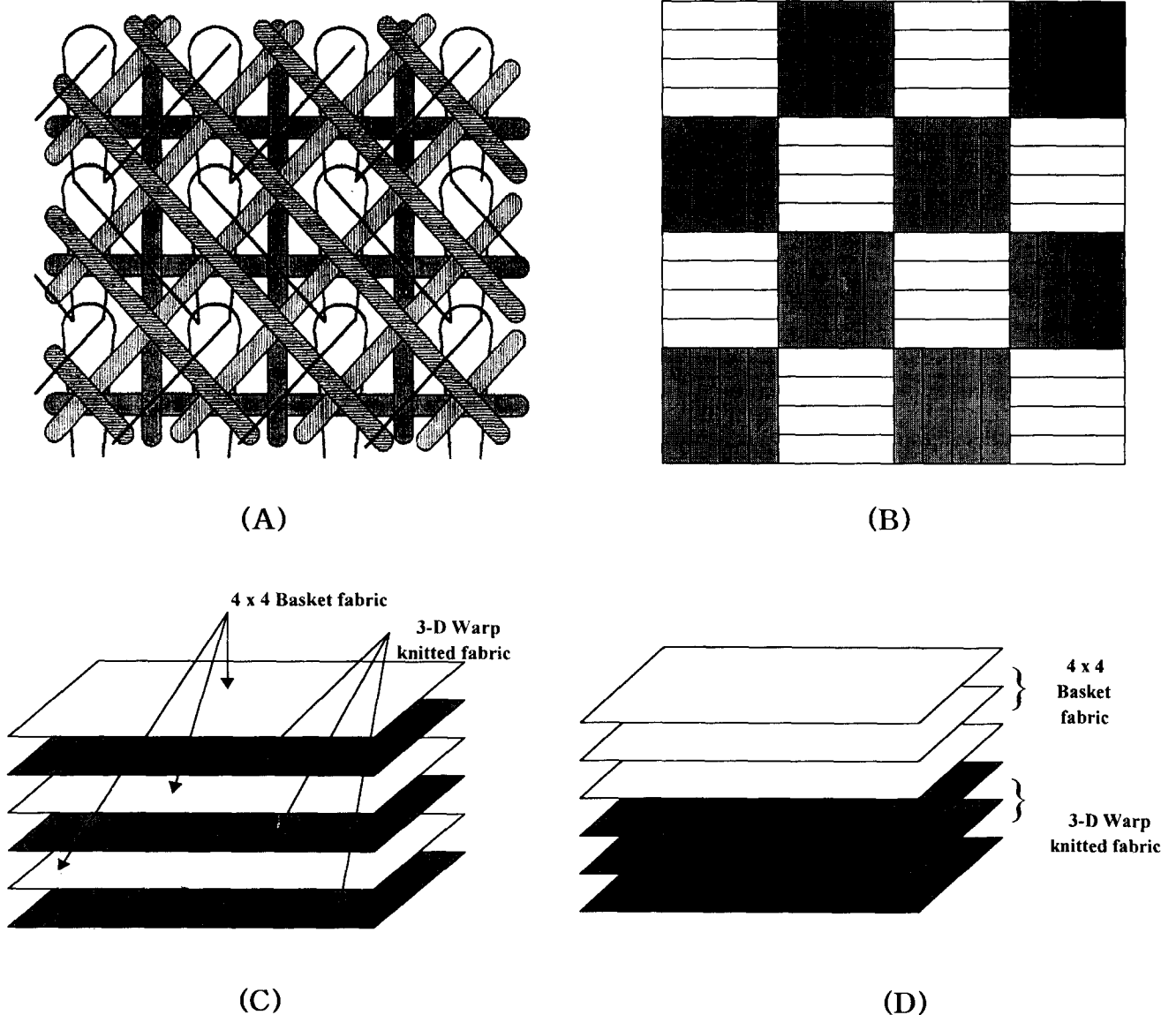


Fig. 1. Schematics of Kevlar fabric structures and stacking sequences of the back-up FRP materials in this study.: (a) 3 axial warp knitted fabric, (b) 4×4 basket fabric, (c) alternating type back-up and (d) laminar type back-up.

Table 1. Ceramic/FRP dissimilar materials used in the this study.

Materials	Thickness(mm)	Areal Density(g/cm ²)
Al ₂ O ₃ /kevlar reinforced composite (laminar structure)	4t/15.5t	3.2
Al ₂ O ₃ /kevlar reinforced composite (laminar structure)	5t/12.5t	3.2
Al ₂ O ₃ /kevlar reinforced composite (laminar structure)	6t/9.5t	3.2
Al ₂ O ₃ /kevlar reinforced composite (alternating structure)	6t/9.5t	3.2
Al ₂ O ₃ /S-2 glass reinforced composite	4t/10t	3.2
Al ₂ O ₃ /S-2 glass reinforced composite	5t/8.7t	3.2
Al ₂ O ₃ /S-2 glass reinforced composite	6t/6.6t	3.2

다. 그런데 전자의 경우는 Table 1에서 처럼 평균 면밀도를 일정하게 유지하기 위하여 전면재의 두께를 변화시키면서 동시에 후면재의 두께도 변화시켰다. 본 연구에서는 세라믹 전면재 두께를 6mm 이하로 한정하였는데 그 이유는, 세라믹 전면재가 7mm 이상으로 두꺼워지면 전체 면밀도(3.2g/cm²)를 그대로 유지하기 위해서 후면재가 상당히 얇아져야 하는데(5mm 이하), 이 경우 두꺼운 세라믹과의 이종접착부위에서의 응력집중과 creep 현상이 우려되며, 후면재는 대부분의 경우 방탄기능 외에도 구조유지 역할을 동시에 담당하여야 하므로 상당한 두께를 요하는 경우가 많으므로 얇아질 경우 실제적인 응용성이 거의 상실되기 때문이다. 또한 세라믹 전면재의 두께가 3mm 이하가 되면 높은 공정불량율(90% 이상)과 가공문제로 신뢰성이 없고 경제성을 잃게 되어 현실적으로 응용이 불가능한 상태가 되므로, 본 연구에서는 세라믹 전면재의 두께를 4mm ~ 6mm 범위로 한정하여 실험하였다.

고속 충격실험

본 연구에서는 시험편에 대한 방탄성능을 7.62mm ball탄을 이용하여 오스트리아 AVL사의 model 292 발사장치와 7.62mm 시험총열을 이용하여 구하였으며, 탄자의 충격속도는 미국 MV Ordnance사의 model 4010P 속도 측정장치를, 충격탄이 시험재료를 관통할 때의 파괴현상은 미국 Cordin사의 model 350 high speed camera system을 사용하여 관찰하였으며, 이들 실험 장치의 개략적인 구성도는 Fig. 2와 같다.

실험시 충격탄자의 시험편 관통 여부의 판정과 방탄성능의 평가는 MIL-STD-662E 규격⁵⁾에 준하여 실시하였다. 이때 방탄성능은 충격탄자가 시험편을 관통할 수 있는 확률이 50%일 때의 탄자의 충격속도에 해당하는 방호한계 속도(V₅₀)로 구하였으며, 이 속도는 up-and-down 방법에 의해 측정하여 다음 식에 의해 계산하였다⁷⁾.

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

여기서 N_p는 ZMR(Zone of Mixed Results: 완전관통이 일어나는 최고속도와 부분관통이 일어나는 최저속도의 차)내에서 부분관통(partial penetration)한 회수, N_c는

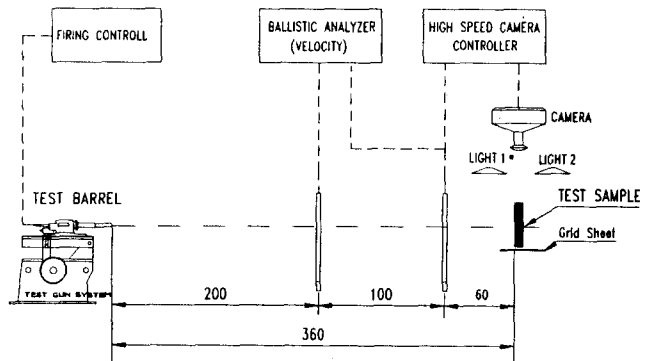


Fig. 2. Schematics of the ballistic range setup for testing armor materials in this study.

ZMR 내에서 완전관통(complete penetration)한 회수이며, K는 장갑판 재료와 피탄각 및 탄두형태에 따라 정해지는 상수로서 일반적으로 $\frac{ZMR}{2}$ (m/s)에 해당한다.

시험편의 관통현상 분석은 Fig. 2에 명시한 바처럼, 고속 카메라를 이용하여 충격탄이 시험편을 관통할 때의 관통과정 및 재료변형 과정이 시험편의 반대편 측면에 수직으로 설치한 격자판(일정한 간격으로 격자면을 그린 판)에 투영된 상태에서 촬영하였다. 이때 사용한 고속 카메라는 초당 35,000 frame까지 촬영할 수 있는데 본 실험에서는 각 frame 간의 간격을 28.6 μs로 하였다.

3. 결과 및 고찰

시험 방탄재료의 방탄성능

Table 1에 열거한 시험 재료에 대하여 MIL-STD-662E 규격에 준하여 7.62mm ball탄 충격시험을 행한 결과 Table 2와 같은 실험 결과를 얻었다.

Fig. 3은 면밀도를 일정하게 유지하면서 세라믹 두께를 4mm, 5mm, 6mm로 1mm씩 증가시킨 경우(세라믹 무게를 증가시킨 것만큼 복합재료의 두께를 감소시킴)로서 후면재가 laminar 구조인 이종재료 방탄재에 대한 방탄성능(V₅₀)을 비교한 것이다. 그림에서 보는 것처럼 전면재인 세라믹은 본 실험에서는 두께가 6mm인 경우가 가장 높은 방탄성능을 보였다. 한편 두께가 4mm인 경우와 5mm인 경우 거의 비슷하게 낮은 방탄성능을 보였는데, 이는 세라믹 재료의 두께

Table 2. Measured ballistic limit of alumina/fiber-reinforced composite materials against 7.62mm ball type projectile.

Materials	Thickness(mm)	Ballistic Limit(m/s)
Al ₂ O ₃ /kevlar reinforced composite (laminar structure)	4t/15.5t	752
Al ₂ O ₃ /kevlar reinforced composite (laminar structure)	5t/12.5t	746
Al ₂ O ₃ /kevlar reinforced composite (laminar structure)	6t/9.5t	786
Al ₂ O ₃ /kevlar reinforced composite (alternating structure)	6t/9.5t	808
Al ₂ O ₃ /S-2 glass reinforced composite	4t/10t	762
Al ₂ O ₃ /S-2 glass reinforced composite	5t/8.7t	756
Al ₂ O ₃ /S-2 glass reinforced composite	6t/6.6t	846

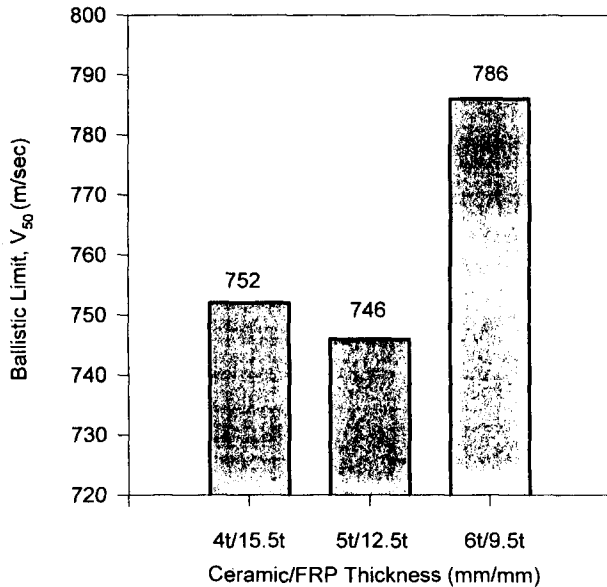


Fig. 3. The effect of the ceramic thickness on the ballistic limit of hybrid armor structure with the same areal density (3.2g/cm²).

가 방탄성능을 발휘하기에 불충분한 것으로 판단되며, 이는 탄자에 의한 세라믹 재료 내의 충격파와 반사파의 전달면적이 두꺼운 경우보다 상대적으로 좁고 파의 전달도 빠르게 일어나기 때문으로 추측된다.

전면재인 알루미늄의 두께를 6mm로 일정하게 유지하면서 후면재인 Kevlar 섬유강화 복합재료를 alternating 구조로 제작하여 방탄성능을 측정 한 후, laminar 구조의 경우와 비교한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 alternating 구조로 제작한 시험편이 laminar 구조인 경우보다 더 높은 방호성능을 나타내었다. 이는 섬유를 3차원 제직구조와 2차원 제직구조를 연속적으로 교대로 배열하여 강화한 복합재료가 3차원 제직구조와 2차원 제직구조를 단일층상으로 각각 배열하여 강화한 복합재료보다 고속 충격에 대한 에너지 흡수 효과가 더 높다는 것을 의미한다. 즉 alternating 구조는 3차원 제직구조와 2차원 제직구조의 적절한 조합효과에 의해 고탄성 특성을 발휘하기에 좋고 또한 층간분리도 많은 층에서 미세하게 일어나므로 많은 충격에너지 흡수가

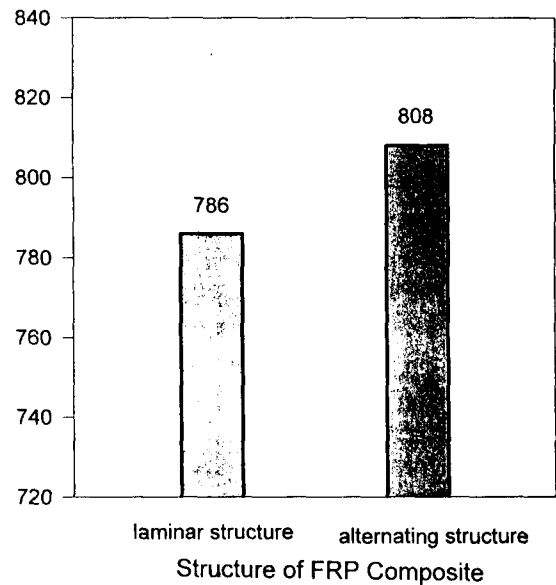


Fig. 4. The effects of the FRP structure on the ballistic limit of hybrid armor with the same areal density(3.2g/cm²).

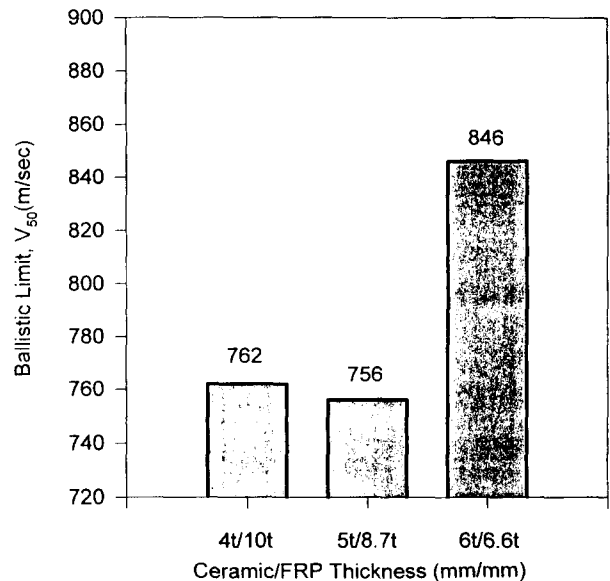


Fig. 5. The effects of ceramic thickness on the ballistic limit of hybrid armor structure (S-2 glass reinforced composite) with the same areal density(3.2g/cm²).

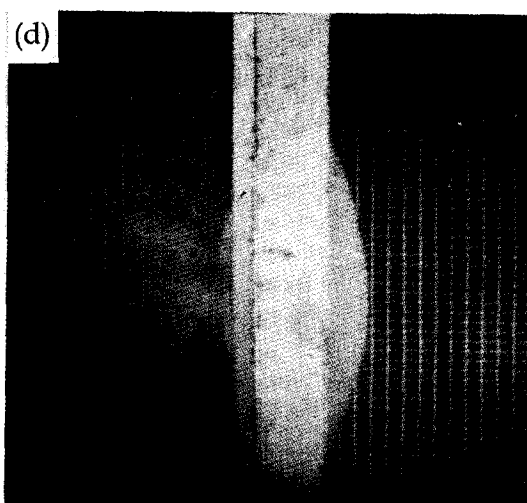
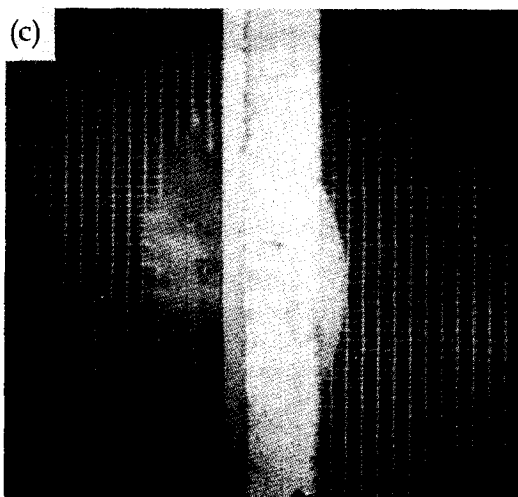
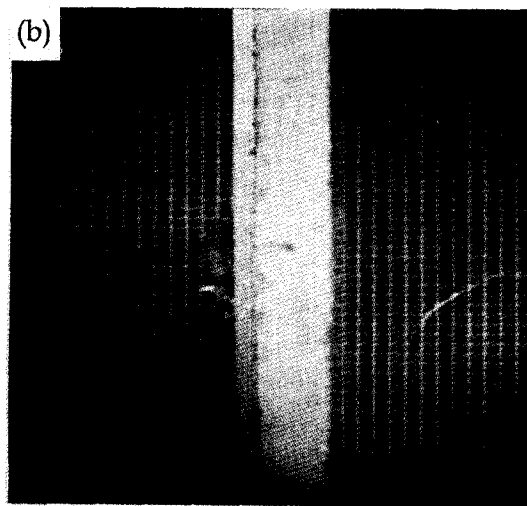
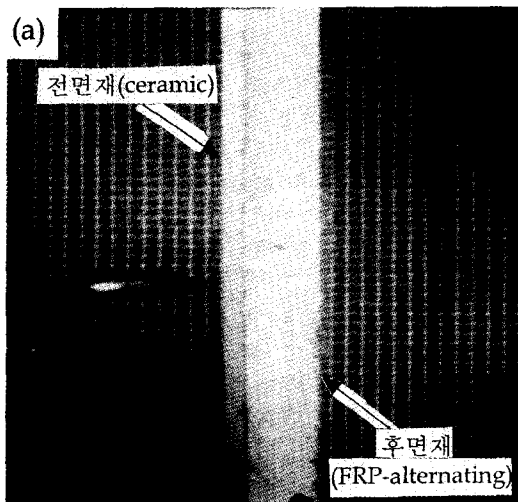
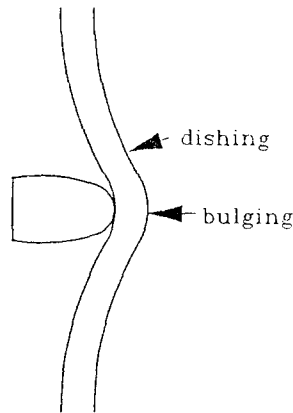
가능한 반면, laminar 구조는 고속충격시 3차원 제직구조와 2차원 제직구조의 층상접착면에서 쉽게 분리되어 파괴되므로 충격에너지 흡수가 그만큼 적어지기 때문이다. 이러한 현상은 후에 설명될 고속촬영사진에서도 잘 나타난다.

후면재를 Kevlar 섬유 대신 S-2 glass 섬유로 강화하고, 면밀도를 일정하게 유지하면서 전면재인 알루미늄 두께를 변화시켜 제작한 시험편에 대한 방탄성능을 Fig. 5에 나타내었다. 이 경우에도 Fig. 3의 결과와 마찬가지로 세라믹 두께가 6mm인 경우가 가장 우수한 방탄성능을 보여 주었으며, 두께가 5mm인 경우는 4mm인 경우보다 약간 낮은 방탄

성능을 보여 주었는데, 이러한 실험결과는 앞의 실험결과와 동일하였다. 이러한 실험결과로부터 이종재료 방탄재에서 전면재인 세라믹의 두께에 대하여, 본 연구의 실험범위내에서는 6mm에서 가장 좋은 결과를 얻었는데 이는 충격탄자 직경(7.62mm)의 80% 정도에 해당된다.

고속촬영 기법을 이용한 파손현상 분석

방탄 실험후 파괴된 시험편의 최종 변형상태만을 이용하여 재료 파손거동을 분석하는 것은 한계가 있어서 고속촬영 기법을 이용하여 고속 충격탄자가 시험편을 관통하는 전 과정을 고속 카메라를 이용하여 관찰하고자 하였다. 그러나



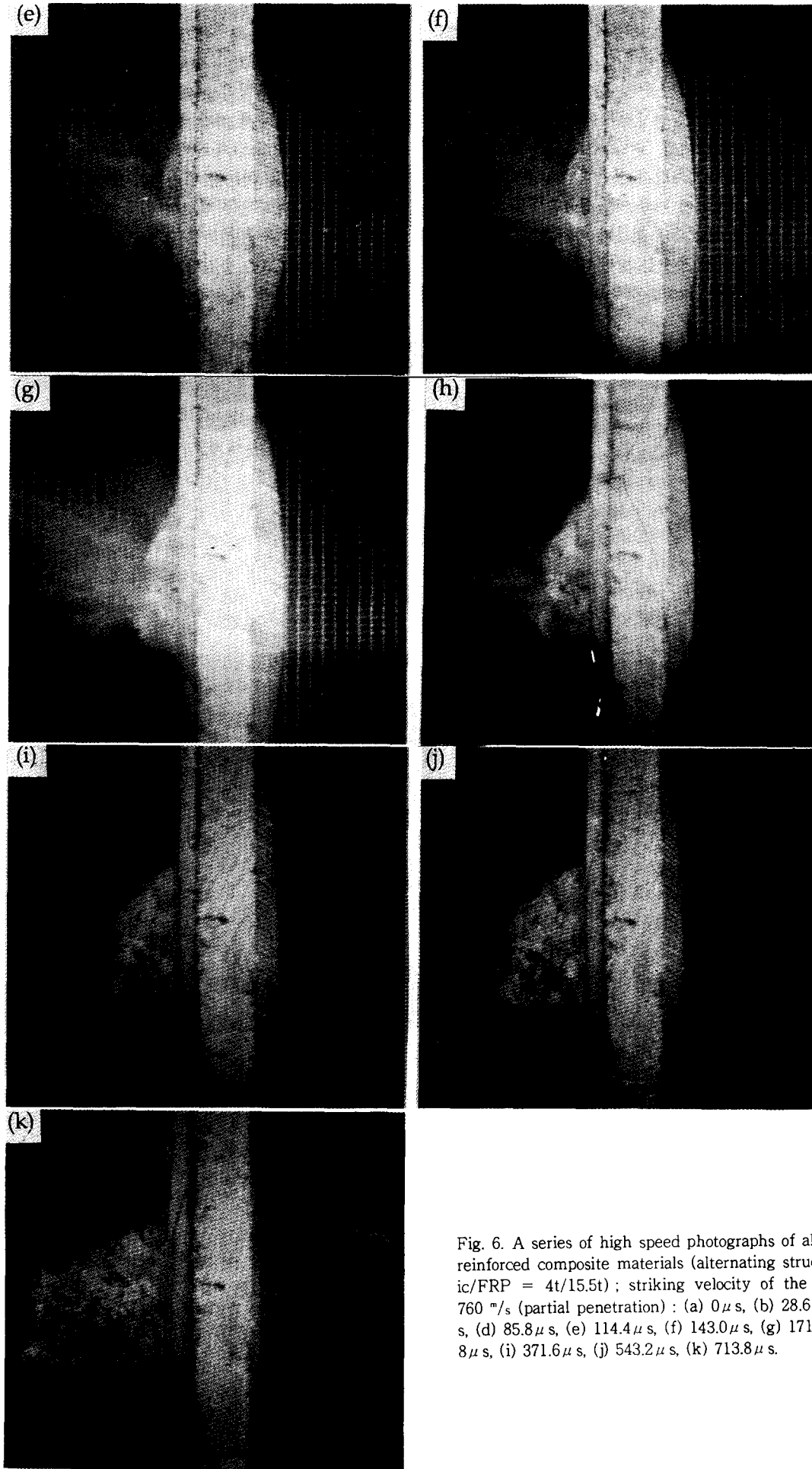


Fig. 6. A series of high speed photographs of alumina/Kevlar reinforced composite materials (alternating structure ; ceramic/FRP = 4t/15.5t) ; striking velocity of the projectile was 760 m/s (partial penetration) : (a) $0\mu\text{s}$, (b) $28.6\mu\text{s}$, (c) $57.2\mu\text{s}$, (d) $85.8\mu\text{s}$, (e) $114.4\mu\text{s}$, (f) $143.0\mu\text{s}$, (g) $171.6\mu\text{s}$, (h) $228.8\mu\text{s}$, (i) $371.6\mu\text{s}$, (j) $543.2\mu\text{s}$, (k) $713.8\mu\text{s}$.

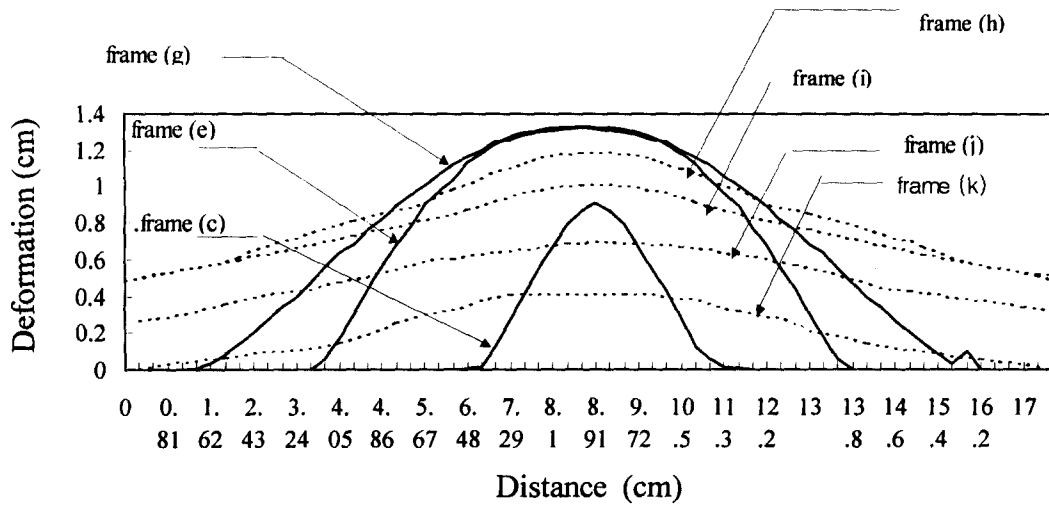


Fig. 7. Cross-sectional deformation behavior of the target materials during penetrating the projectile incompletely.

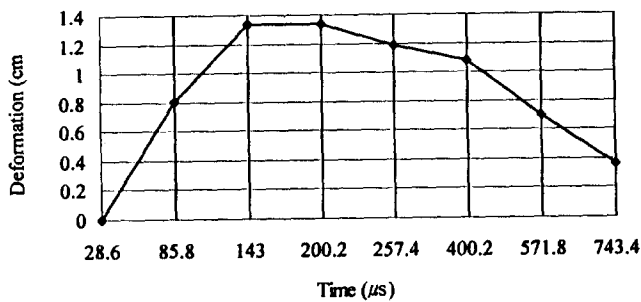


Fig. 8. Instantaneous maximum deformation of the alternating type ballistic materials after impacting loading.

이 분석 방법⁷⁾도 관통 과정중 발생한 재료의 변형정도를 규명하는데는 어려움이 있어, 일정한 크기로 제작한 격자면을 카메라의 반대편에 Fig. 2에 예시한 것처럼 설치하여 재료의 순간적인 변형상태가 격자면에 투영된 상태에서 기록 되도록 하는 방법⁸⁾을 이용하였다. 이 방법을 이용하여 후면재를 Kevlar 섬유를 alternating 구조로 제작한 경우와 laminar 구조로 제작한 경우의 시험편에 대하여 동적 파괴 거동을 비교 관찰하였다.

Fig. 6은 세라믹/FRP 두께 4t/15.5t를 기준으로 후면재를 alternating 구조로 제작한 시험편에 고속 충격탄자가 충돌한 경우에 발생하는 일련의 관통과정 및 시험 방탄재료의 동적변형 과정을 28.6 μ s 간격으로 고속촬영한 것이다. Fig. 6의 (a)~(g) 사이에는 탄 충격에 의하여 후면 복합재료가 점차적으로 탄자 충격방향의 반대방향으로 탄자충격점인 중앙부위가 부풀어 오르는 bulging 현상과 중앙부위를 중심으로 전체적으로 부풀어 오르는 dishing 현상을 일으키며 변형되는 단계를 보여준다. 또한 (h)~(k) 사이는 복합재료가 탄성변형된 부분이 복원되는 현상을 보여주고 있다. 이 경우 (g)에서 복합재료가 충격탄자에 의해 최대의 변형을 보인 최대 저항한계를 나타내었다. Fig. 6의 (h)부터는 바로 앞 frame과 비교하면 후면재료의 최대 변

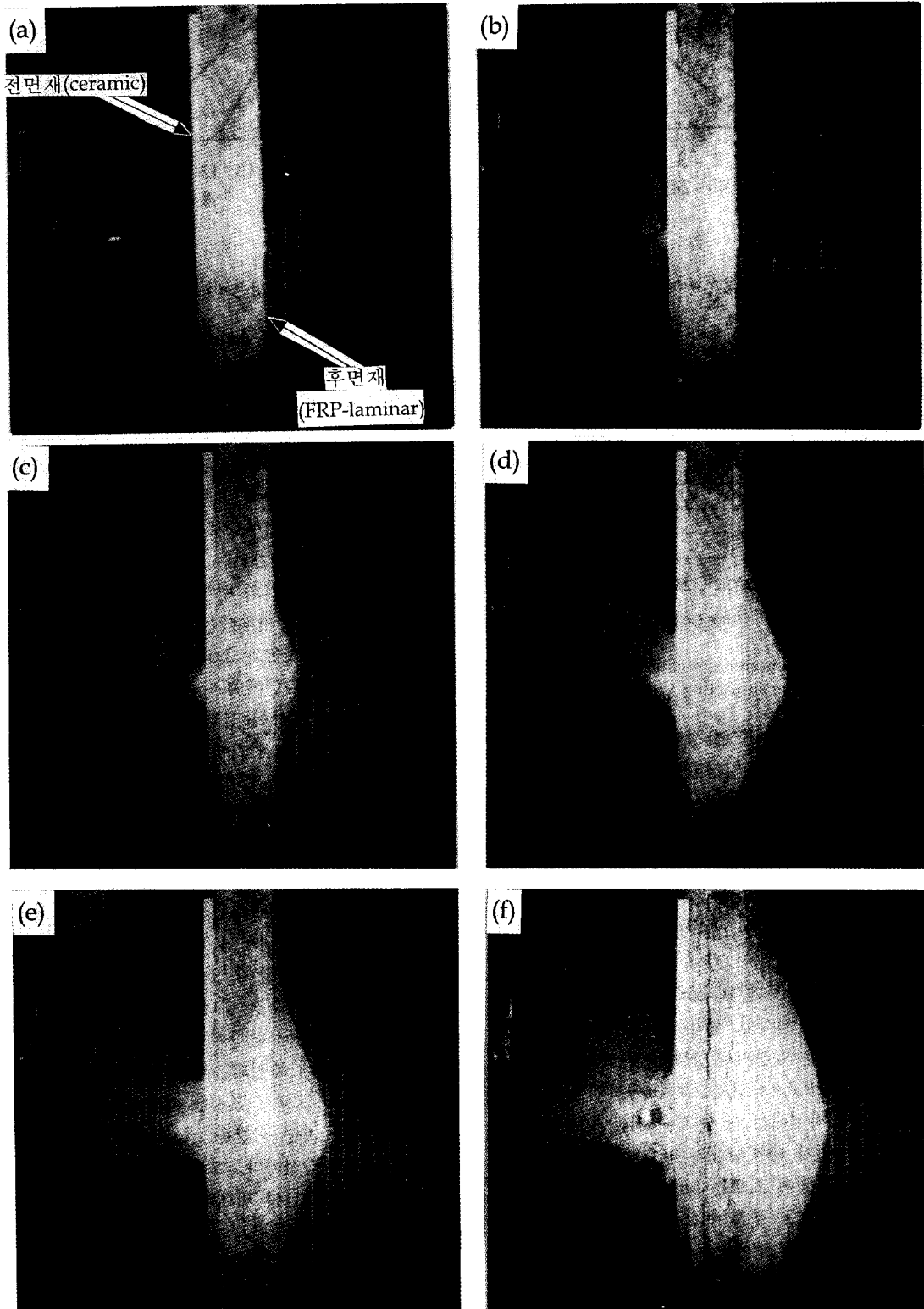
형량은 점차 감소하나 dishing 영역은 더 넓게 분포되고 있음을 보이고 있다. 이러한 현상은 재료의 변형이 종료되었다고 판단되는 (k)까지 계속되어, 최종적으로는 충격 전에 비하여 약간의 소성변형만 남았음을 보이고 있다.

Fig. 7은 Fig. 6에서 (c), (e), (g)~(k)의 재료변형을 격자면의 규격을 이용하여 실제의 변형 크기의 2차원 측면도로 나타낸 재료 변형도로서, 실선은 고속탄자의 충격에 의해 재료 변형이 증가하는 구간을, 점선은 탄성변형이 제거면서 복원되는 구간의 변형을 보이고 있다. 이 재료 변형도를 참조하면 충격 직후에는 후면 복합재료는 충격점인 중앙부위가 부풀어 오르는 bulging 현상이 지배적으로 일어나지만 시간이 경과함에 따라 충격점 주변으로 변형이 퍼져 나가는 dishing 현상이 점점 증가함을 보임을 알 수 있다. 이러한 결과는 충격 초기에 충격 탄자가 고경도의 세라믹 재료에 부딪쳐 탄두가 무디어지거나 파손되고 탄자의 경로가 후면재 내부에서 변화되면서 충격 에너지가 크게 감소되고 그에따라 후면재의 변형이 점차 국부적인 bulging에서 전체적인 dishing 현상으로 이행하기 때문으로 여겨진다. 그림에서 점선으로 표시된 frame (h)~(k)의 경우는 back-up 재료의 탄성변형 현상을 나타내는 것으로 고속촬영기법으로만 확인할 수 있는 부분이다. 그림에서 보이는 것처럼 충격탄자의 충격 에너지가 소진된 경우에 해당하는 최대 변형상태로부터 변형이 종료할 때까지는 거의 일정한 비율로 재료변형이 복원되는 것을 나타내고 있다.

Fig. 8은 Fig. 7에서 표시한 각 frame의 최대 변형점을 충격후의 시간(기준 시간을 Fig. 6(a)의 순간으로 잡음) 함수로 나타낸 곡선이다. 그림에서 변형 초기(28.6, 85.8 μ s)에는 작용 시간에 비례하여 변형이 증가하였으나, 기준시간으로부터 약 200 μ s 경과한 후에는 최대 변형점을 지난 후 변형이 감소하는 현상을 볼 수 있는데 이는 재료가 탄성응력에 의하여 수축하기 때문으로 고려된다. 이러한 결과에서 alternating 구조의 복합재료는 탄자의 충격에너지를 대부분 탄성변형하면서 흡수하므로써 비교적 우수한 방탄성능을 가진 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 세라믹/FRP의 두께가 4t/15.5t이며, 후면재가 laminar 구조인 이종재료 장갑이 고속 충격탄자에 의하여 변형 또는 층상 분리되는 현상을 나타낸 고속촬영 사진이다. frame (a)~(d)까지는 Fig. 6의 경우와 유사한 동적 변형 거동을 보이나, frame (e)~(f)까지는 laminar 구조

의 복합재료 층이 충격 에너지에 의하여 크게 분리되고 있음을 보이고 있다. 이는 alternating 구조로 제작한 섬유강화 복합재료는 섬유의 고탄성 특성과 각 층마다의 미세한 층간 분리에 의해 주로 충격 에너지를 흡수하는 반면에, laminar 구조로 제작한 경우는 일부의 충격 에너지가 3차



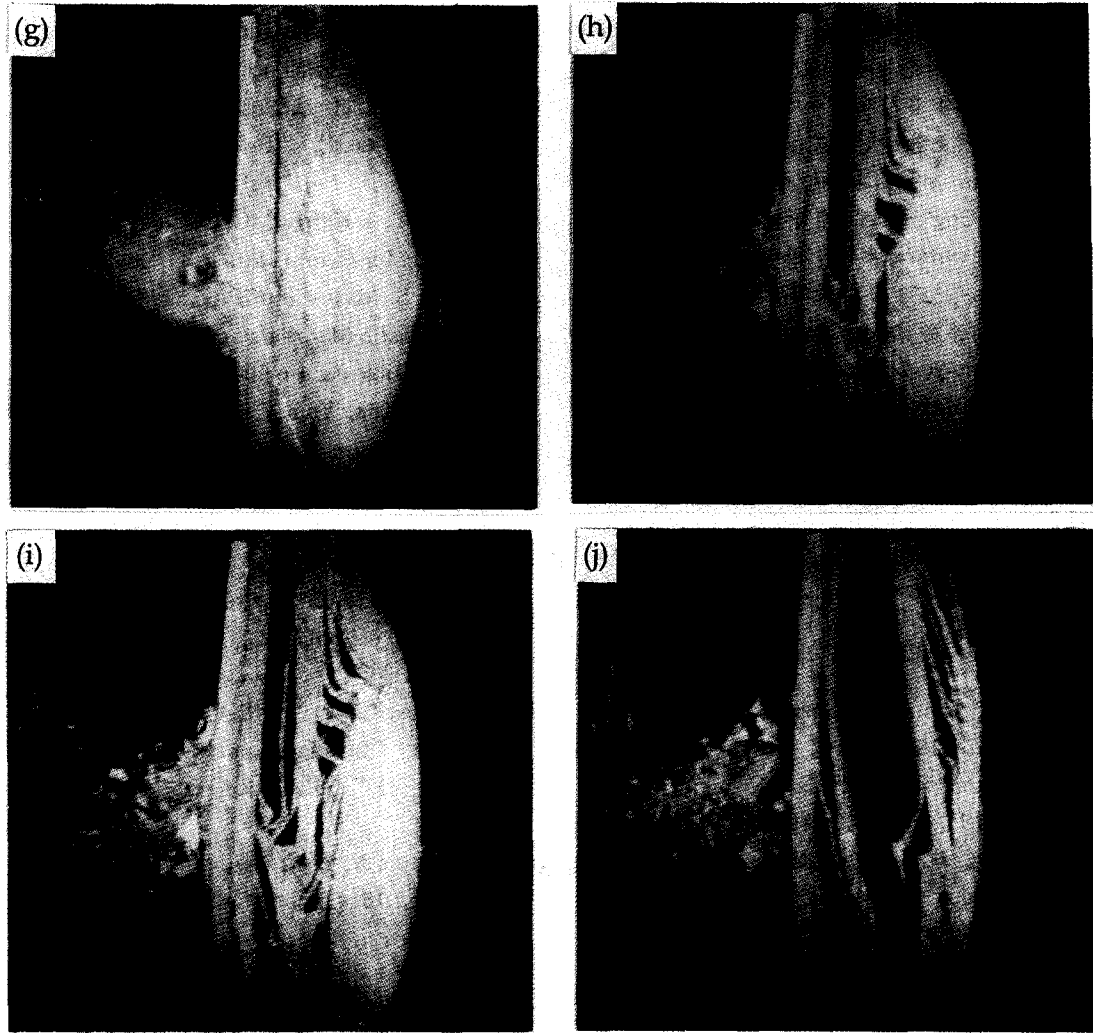


Fig. 9. A series of high speed photographs of alumina/Kevlar reinforced composite materials (laminar structure ; ceramic/FRP = 4t/15.5t) ; striking velocity of the projectile was 790 m/s (partial penetration) : (a) 0 μs, (b) 28.6 μs, (c) 57.2 μs, (d) 85.8 μs, (e) 114.4 μs, (f) 143.0 μs, (g) 171.6 μs, (h) 200.2 μs, (i) 543.0 μs, (j) 868.8 μs.

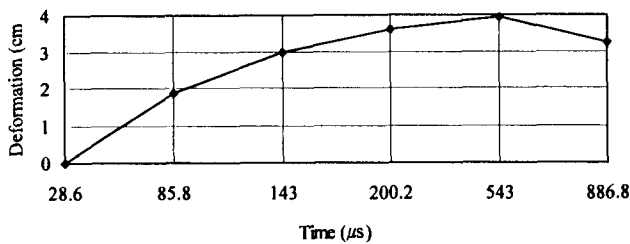


Fig. 10. Instantaneous maximum deformation of the laminar type ballistic materials after impacting loading.

원 제직구조와 2차원 제직구조의 층상접착면에서 크게 분리되면서 흡수되기 때문으로 생각된다. 특히 Fig. 9의 (h)~(j)의 경우를 보면 전면 세라믹재료가 탄 충격 전면방향으로 탄성변형되는 현상을 보이고 있는데, 이는 충격탄자가 재료 전면에 충격할 때 압축응력에 의해 발생한 충격파가 후면의 자유표면에 반사되어 재료에 인장응력으로 작용하여 나타나는 현상이다^{5, 9~11)}. 이러한 반사된 인장응력이 작용함으로 인하여 이때부터 복합재료의 층간분리현상이 나

타나기 시작함을 Fig. 9의 (h)~(j)에서 알 수 있다. 이러한 동적 변형현상의 관찰을 통하여 볼 때, laminar 구조의 복합재료는 고속탄자의 충격시 입사하는 압축파와 재료 후면의 자유표면에 반사되어 발생하는 인장파의 두 응력이 재료층내에서 동시에 작용하여 서로 다른 섬유구조 층간에 큰 층간분리 현상을 유발하는 것으로 판단된다.

Fig. 10은 Fig. 9의 경우에 대하여 실 시간적 최대 변형 정도를 시간의 함수로서 나타낸 곡선으로, 이 경우도 Fig. 8의 경우처럼 충격 초기에는 후면재가 거의 선형으로 비례하는 변형이 일어남을 보이고 있으나, 최대 변형은 Fig. 8의 경우 보다 약 4배 이상 크게 나타났다. 이는 앞에서 설명된 것과 마찬가지로 후면 복합재료의 큰 층간분리로 인하여 전체적인 후면재의 두께가 증가하였기 때문으로 판단된다.

4. 결 론

세라믹/섬유강화 복합재료의 조합으로 이루어진 이중재료 방탄재에 대하여 7.62mm ball탄의 충격에 대한 방탄성능

을 실험분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 세라믹 전면재를 알루미늄, back-up 재료를 Kevlar 섬유강화 복합재료로 제작한 이중재료 방탄재에서, 면밀도를 $3.2\text{g}/\text{cm}^2$ 로 일정하게 유지한 경우 세라믹 전면재의 두께가 6mm일때 가장 양호한 방탄성능을 나타내었다.

2) 알루미늄/Kevlar 섬유강화 복합재료의 경우, 후면재에서 섬유를 alternating 구조로 제작한 경우가 laminar 구조로 적층한 경우에 비하여 우수한 방탄성능을 나타내었다. 이는 alternating 구조로 적층한 경우는 충격탄자에 대하여 적층구조의 고탄성 특성과 각 층마다의 미세한 층간분리로 탄자의 충격에너지를 흡수하기 때문으로 고려된다. 반면에 laminar 구조로 제작한 경우는 충격후 발생하는 인장응력파에 의해 3차원 제직구조와 2차원 제직구조의 층상접착면이 크게 분리되면서 충격 에너지를 흡수하였다.

3) 알루미늄/S-2 glass 섬유강화 복합재료로 제작한 이중재료 방탄재의 경우도 면밀도 $3.2\text{g}/\text{cm}^2$ 에서 전면재인 세라믹의 두께가 6mm일때 우수한 방탄성능을 나타내었다.

참 고 문 헌

1. I. Gilath, S. Eleizer and Y. Gazit, *J. Material Sci.*, **26**, pp 2023-2025 (1991)
2. J.G. Hetherington and B. P. Rajagopalan, *Int. J. Impact Eng.*, **11**(1), pp 33-40 (1991)
3. W. P. Schonberg, *Int. J. Impact Eng.*, **10**(1), pp 509-523 (1990)
4. J. Jang, R. Park, Y. Yun, J. Park, and H. Kim, "Failure of Ceramic/fiber-reinforced plastic Composites under hypervelocity impact loading", *Journal of Materials Science*, **32**, pp 23-33, (1997).
5. Department of U.S. Defense, Military Standard MIL-STD-662E, "Ballistic Test for Armor", (1968).
6. C. Kim, T. J. Kang, S. G. Lee and J. I. Yuck, *J. Korean Soc. for Comp. Mat.*, **9**(4), pp 37-46 (1996)
7. Francis S. Mascinica, "Ballistic Testing Methodology", *Ballistic Materials and Penetration Mechanics*, Roy C. Laible ed., pp 60-63. (1980)
8. Hee Jae Kim, Young Sun Kim, and Kyeng Heum Yang, "An analysis of penetration phenomena of a ballistic material using a high speed photography technique", *Proc. SPIE Vol. 2513*, pp 968-974, (1994).
9. M. Ravid, S.R. Bodner and I. Holcman, *Proc. 10th Int. Symp. on Ballistics*, San Diego, California, Oct. 1987, pp 1-9
10. J. K. Park, Y. J. Yun, S. G. Lee, S. H. Choi and J. I. Yuck, "Development of Lightweight Hybrid Armors (I)" ADD Report **ATRC-411-940275** (1994)
11. V. P. Shim, V. B. C. Tan and T. E. Tay, *Int. J. Impact Eng.*, **16**(4), pp 585-605 (1995)