

論文

케블라 직물과 전단농화유체로 함침된 케블라 액체 방탄재의
파단모드 연구윤병일^{*+}, 송흥섭^{*}, 백중규^{*}A Study on the Failure Modes of Neat Kevlar Fabric and Kevlar Liquid Armor
Impregnated with Shear Thickening FluidByung-Il Yoon^{*+}, Heung-Sub Song^{*}, Jong Gyu Paik^{*}

ABSTRACT

In this study, the failure modes by ballistic impacts were studied both for a neat Kevlar woven fabric and a Kevlar liquid armor impregnated with shear thickening fluid (STF) containing silica particles. These two materials showed quite different failure modes macroscopically in ballistic impacts tests used by Cal.22 FSP and 9mm FMJ bullet. Yarn pull-out for the neat Kevlar woven fabric and yarn fracture occurred partially through all plies from 1st ply to last one for the STF-Kevlar are an important energy absorption mechanisms. The results observed by S.E.M showed commonly fiber damage which are torn skin in the longitudinal fiber direction, fiber split axially and fiber fracture for two materials. The reasons why STF-kevlar liquid armor material exhibits excellent ballistic performance are as follow: firstly the increased friction forces between yarn-yarn and fabric-fabric covered with silica particles and secondary the evolution of shear thickening phenomenon resulting in suppression of yarn mobility.

초 록

본 연구는 순수 Kevlar 직물과 실리카 입자를 포함하는 전단농화유체가 함유된 Kevlar 액체방탄재(STF-Kevlar)에 대한 방탄충격에 의한 파단모드 연구이다. Cal.22 파편탄과 9mm FMJ 볼탄에 의한 방탄시험에 의하여 이 두 재료는 거시적 측면에서 다른 파단모드를 보여주었다. 순수 Kevlar 직물에서는 안의 뽑힘(Pull-out)이, 그리고 STF-Kevlar 액체방탄재에서는 안의 파단이 충격에너지를 흡수하는 주 기구로 나타났다. 전자주사현미경에 의한 미시적 관찰에서 Kevlar 섬유 표면의 벗겨짐, 섬유가 여러 가닥으로 갈라지는 스프리트, 그리고 섬유의 절단, 이 세가지 파단 모드가 손상 정도의 차이는 있지만 공통적으로 두 재료에서 관찰되었다. STF-Kevlar에서, 안 섬유의 파단은 첫째는 실리카 입자로 덮여있는 안-안, 직물-직물 사이의 마찰력과, 둘째는 충격시 전단농화 현상의 발생으로 안의 이동이 강력하게 억제되기 때문인 것으로 보인다.

Key Words : 전단농화 유체(Shear Thickening Fluid), 액체방탄(Liquid Armour), 안 뽑힘(Yarn pull-out)

1. 서 론

전장에서 병사를 각종 탄으로부터 신체를 보호하기 위한 개

인방탄재 연구가 지난 1차대전 이후 꾸준히 진행되어 왔다. 현대의 개인방탄재료는 초기에 충격 에너지흡수율이 높은 나일론 섬유를 대상으로 한 방탄조끼가 개발이 되었다. 1970년대에 미

* 국방과학연구소 기술연구본부, 교신저자

*+ 국방과학연구소 기술연구본부, 교신저자(E-mail:byungil@add.re.kr)

듀폰사가 나일론 보다도 강도와 탄성률이 수 배 높은 일명 케블라(Kevlar) 섬유를 개발하므로써 방탄재료 분야에 획기적인 전환점을 가져 왔다. '80년대에 들어서서 네델란드의 DSM사가 고성능 폴리에틸렌을 성분으로 구성된 일명 Dyneema 섬유를 개발하였다. 이 섬유는 Kevlar 섬유 보다도 비강도와 비강성의 기계적 물성이 훨씬 높고, 충격에너지 흡수와 음향 전파속도가 커서 오늘날 Kevlar 섬유와 함께 개인방탄재료는 물론 방탄재 전 분야에서 사용이 되고 있다[1,2].

개인 방탄재료로서 방탄복은 가볍고, 부피가 작고 그리고 탄을 정지시키는 역할을 해야 한다. 그러나 기존의 Kevlar 섬유나 Dyneema 섬유로 제조된 방탄복은 무게가 4-5 kg에 달하고, 섬유 직물이 30 층(Ply)이상으로 적층되어 있어 부피가 크며, 또한 유연성이 부족하여 기동성에 큰 불편을 주고 있으며, 또한 방호 부위가 몸통에 한정되는 단점이 있다. 따라서 팔, 다리 등 전신도 보호할 수 있는 새로운 방탄재료 개발이 요구된다. 팔, 다리를 보호하기 위해서는 방탄복은 군복과 같이 얇고, 유연하고, 가벼워야 할 것이다.

오늘날 방탄복에 사용하는 재료로는 직물형, 펠트(felt)형 그리고 일방향 프리프레그(unidirectional prepreg)를 0°/90°로 적층한 3종류가 주로 사용되고 있다. 직물은 경사와 위사로 구성되어 있어 충격에너지를 빠른 시간에 멀리 전파시키지 못하며, 또한 위사/경사의 교차점에서 안의 비틀림(kink)로 마찰이 발생하여 인장강도가 크게 감소하므로써, 충격에 약한 단점을 갖고 있다. 반면에 일방향 프리프레그는 직물과 달리 위사와 경사가 존재하지 않아서 충격에 의한 음향 전파가 빨라 충격에너지를 신속하게 소멸시킬 수 있는 장점을 갖는 것으로 알려져 있다. 충격에너지 흡수 능력은 섬유의 비강도와 파단신율에 비례한다. 또한 음향 전파속도는 비강성에 의존하고 있다[2]. 따라서 방탄섬유는 강도와 강성이 높은 물성을 갖는 섬유가 바람직 하다. 직물의 강도는 일반적으로 일방향 복합체에 비하여 약 50-60%의 강도를 나타내고 있다. 따라서 일방향 프리프레그가 동일 면밀도에서 보다 우수한 방탄성을 나타내고 있으나, 유연성이 부족한 단점을 갖고 있다.

그러나 직물의 이같은 단점에도 불구하고 제작성, 경제성 측면에서 직물형의 방탄복도 많이 사용되고 있다. 직물은 직조의 형태, 직물의 층 수, 면밀도 그리고 탄(projectile)의 질량, 탄 속도, 타격각도, 탄의 형상 같은 충격조건에도 에너지흡수 특성이 영향을 받는다.

직물 사용시에 방탄 특성에 대한 연구가 Roylence[3,4], Laible[5], 그리고 다른 연구자들[1,6]에 의하여 이루어졌다. 이 연구들은 해석과 컴퓨터 모사에 바탕을 둔 것이다. Motamedi 등[7]은 아라미드 직물의 표면 마찰 특성의 효과를 보기 위하여 표면 윤활제를 부가하거나 혹은 표면 처리를 제거하여 필라멘트-필라멘트, 안-안 사이의 마찰 수준의 차이를 연구하였다. Martinez 등[8]도 케블라 직물에 대한 마찰과 마모 거동에 대한 연구를 수행하였다. 앞서의 연구자들은 이윗한 직물 층 사이의 불연속적 접촉, 마찰과 마모, 직물과 탄 계면에서 마찰과 마모

과정, 경사와 위사 안 사이의 미끄러짐 현상과 더불어 응력파장 전파에 대한 직물 교차점의 영향 등을 주 문제점으로 제시하였다. Bazhenov[9]는 방탄복에 사용하는 아라미드 직물에 대하여 방탄특성을 연구하였다. 직물의 높은 방탄저항성은 탄에 충격을 받은 안이 뽑힘(pull-out)에 의하여 일어난다고 하였다. 섬유의 에너지 전달은 뽑힘 지역의 부피에 따라서 증가함을 관찰하였다. 대부분의 연구자들은 거시적 측면에서 아라미드 섬유 등의 방탄 특성 모드를 관찰하였으나, 미시적 관점에서 아라미드 방탄섬유 등이 충격에너지를 흡수하고, 방탄충격 저항성을 크게 나타내는 지에 대한 상세한 연구는 많이 발표되지 않고 있다.

앞서 언급한 바와 같이 직물은 방탄섬유로서 분명한 한계를 갖고 있다. 따라서 이같은 문제를 해결하기 위하여 최근에 Wagner 등[10]은 콜로이드 입자를 함유한 전단농화유체(STF: Shear Thickening Fluid)를 제조하여 이를 아라미드 직물에 함침 시켜서 방탄 특성 연구를 수행하고 있다. 이 연구의 목적은 개인병사의 방탄복을 얇고, 가볍고 그리고 유연하게 만들어 소매나 팬츠 부위에 적용하는데에 있다. 이 재료는 일명 액체방탄재(Liquid body armor)라 칭한다. 지난 20년 동안 레오로지 학자들에게 농축 분산액의 STF 거동은 큰 관심의 대상이었다. 전단농화(shear thickening)라 함은 전단속도가 증가하여 속도가 임계속도에 도달하면 겔모기 점도가 순간적으로 급격하게 상승하는 것이다. 이같은 현상은 각종 산업체에서 농축된 분산액을 다루는 과정에서 나타났다. 전단농화의 현상을 Hoffman[11]은 규칙-불규칙 전이(order-disorder transtion) 메카니즘으로 설명하였다. 이어서 여러 연구자들은 이 원리에 대한 의문점을 제기하여 전단농화 상태는 입자들의 클러스터(cluster)에 의하여 일어남을 보여주었다[12,13]. Kahn[14] 등은 fumed 실리카를 폴리프로필렌 그리플에, Zupancic 등[15]은 TiO₂ 입자를 에폭시나 아크릴 분산매에 혼합하여 유변특성을 관찰하였다. 전단농화유체가 임계 속도에 도달하면 점도가 급 상승하는 원리를 이용하여 Wagner 등[16]은 다양한 크기의 실리카 입자 전단농화유체의 거동에 미치는 영향 연구를 수행하였다.

액체방탄재에서 방탄성능의 증가가 왜, 어떻게 일어나는지는 명확하게 밝혀지지 않고 있다. 특히 미시적 관점에서는 순수한 방탄섬유와 STF액체방탄재가 어떤 메카니즘의 차이로 방어를 나타내는지에 대한 연구 발표는 드물다. 거시적 관점에서 순수 Kevlar 직물에 대한 충격 에너지흡수 기구 연구가 Kirkwood 등[17,18]에 의하여 이루어 졌다. 그들은 Kevlar 방탄재의 중요한 파단기구는 안의 뽑힘임을 설명하였다. 또한 Teo 등[20]도 Twaron 직물을 사용한 액체방탄재가 왜 방탄성능이 증가하는지에 대한 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 기존에 방탄재로 사용하고 있는 Kevlar 섬유 직물과, 그리고 Kevlar 직물에 나노 크기의 실리카 입자를 함침한 액체방탄재에 대한 방탄시험을 수행하여 거시적 및 미시적 측면에서 어떠한 파단모드로 인하여 충격에너지를 흡수하는지를 연구하였다. 파단기구의 정확한 이해는 방탄재를 최적으로 설계하는데에 있어서 큰 도움을 주리라 본다.

2. 실험

2.1 재료 준비

본 실험에서 방탄섬유로는 미 Hexcel사가 생산하는 Kevlar 직물 KM-2 상품을 사용하였다.[Table 1]

Table 1 Specification of KM-2 Kevlar Fabric

Yarn count (yarns/inch)	Areal density(g/m ²)	Thickness (mm)	Weaving structure
28 x 28	149	0.2	Plain weave

액체 방탄재로는 STF를 제조한 후에 Table 1의 Kevlar직물에 함침하였다. STF 제조에 사용된 입자는 평균 100nm크기의 구형 실리카 (Nippon Shokubai, KE-P-10)로서 이를 에틸렌그리콜(Ethylene Glycol)에서 분산하였다. STF의 함량은 순수 Kevlar 직물 시편의 무게대비 45%였고, STF내의 실리카 함량은 65W%이다.

2.2 방탄 시험

방탄시험에 사용된 총포는 Cal. 22 (5.56mm) 파편탄(FSP: Fragment Simulated Projectile)과 9mm FMJ (Full Metal Jacket) 권총탄 2종류를 사용하였다. Cal.22 FSP 탄환의 중량은 1.1 g이며, 9mm FMJ 탄은 8.0g으로서 자세한 치수 및 사양은 규격 MIL-P-46593A에 규정되어 있다. 총신 끝에서 표적까지의 거리는 4m이며 탄의 속도는 1m 간격으로 3곳에 설치되어 있는 레이저 센서로 측정하였다. 방탄시험시에 비관통인 경우 시편 후면의 부풀(bulge)깊이 또는 관통 깊이를 측정하기 위하여 시험편 뒤에 유점토(clay)를 설치하였으며, 시편 후면과 유점토(70 X 60 X 120 m/m)는 공간없이 밀착되도록 하였다. 시험편의 크기는 75 X 75 m/m로서 4층으로 적층되어 있다. 탄속은 Cal.22 FSP는 250m/sec로, 9mm FMJ는 340m/s를 기준속도로 하였다.

방탄성능은 식1과 같이 방탄재료의 흡수에너지(E.d: energy dissipated)로 부터 구하여 비교하였다.

$$\text{Eq.1. } E_d = 1/2 \cdot m(u_1^2 - u_2^2)$$

u_1 : 탄환의 초구 속도

u_2 : 시험편을 통과한 후의 탄환의 잔류속도

탄의 잔류속도는 탄의 속도와 점토의 관통깊이 관계로 부터 구하였으며, 본 실험에서의 식은 $u_2 = 10.51 + 2.43X$ 이다. 여기서 X 값은 방탄시험시에 점토의 관통깊이 혹은 시편의 후면 변형 깊이인 부풀을 나타낸다. 한편 방탄성능은 탄환의 에너지 흡수율 (E.D.P:energy dissipation percent)로 평가하였는데 이 값은 다음 식으로부터 구하였다. $E.D.P. = E_d/E_i \times 100$ 이며, 여기서 $E_i = 1/2 \cdot m \cdot u_1^2$ 이다.

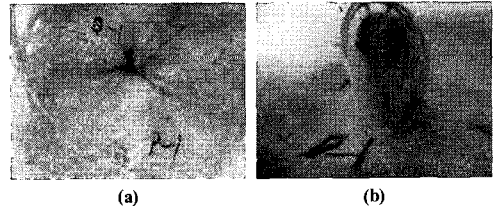


Fig. 1 Photographs of non-penetrated Kevlar fabrics by Cal.22 FSP ((a) Front face, (b) Back face).

Table 2 Summary of the ballistic tests by Cal.22 FSP

Material	D.E(J)	E.D.P(%)	Penetration(mm)	
			Depth	Width
Neat Kevlar	24.47	75.66	34.08	19.24
STF-Kevlar	28.47	92.08	17.56	24.70

2.3 파단 형상 관찰

방탄시험 후에 파단 모드를 관찰하기 위하여 주사전자현미경 (S.E.M: Scanning Electron Microscope Jeol JXA 840A)을 사용하였다. 순수 Kevlar 직물은 Gold 코팅을 하였으며, STF-Kevlar 시편은 50℃의 오븐에서 1일 건조하여 에틸렌그리콜을 제거하거나 혹은 제거하지 않고 S.E.M 관찰을 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 방탄시험 결과

Table 2의 방탄시험 결과에서 보듯이 E.D.P값은 STF-Kevlar가 순수 kevlar에 비하여 약 22% 큰 값을 보여주고 있다. 이것은 액체방탄재 STF-Kevlar가 이 값 만큼 높은 방호력을 가짐을 의미한다. 관통깊이에 있어서도 순수 Kevlar가 STF-Kevlar에 비하여 약 48% 더 관통이 되었다. 또한 시편 후면의 부풀(Bulge)에 의하여 발생한 너비는 STF-Kevlar가 순수 Kevlar에 비하여 약 22% 보다 넓은 값을 나타내었다. 부풀의 크기는 대단히 중요한데, 방탄조끼 경우에 부풀의 크기가 커지면 이로 인하여 신체 내부의 장기를 손상시키어 생명에 위협을 가할 수 있기 때문이다.

3.2 파단모드 관찰

3.2.1 순수 Kevlar 직물의 경우 (Cal.22 FSP탄)

Fig. 1은 Cal.22 FSP 탄에 의한 방탄시험 후에 4층으로 적층된 순수 Kevlar 직물의 전형적인 전후 면의 변형 모습이다. 전면의 중앙에는 파편탄이 관통되지 않고 정지되어 있으며(a), 후면은 직물로부터 안(Yarn) 뽑힘(Pull-out)이 일어난 것을 볼 수 있다(b). 순수 Kevlar 직물에서 뽑힘은 전형적인 파단모드로서 Kirkwood 등[17,18]의 연구와 일치하고 있다.

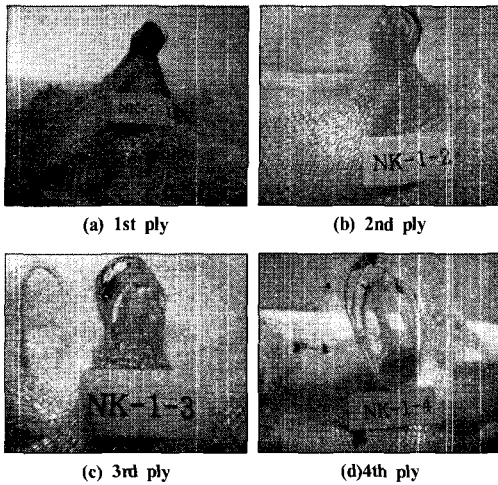


Fig. 2 Photographs of pulled-out yarns by Cal.22 FSP ballistic test for neat kevlar specimen layered of 4 plies.

다음은 각 층별로 분리하여 파단형태를 관찰하였다(Fig. 2). 1번째 층에서 Cal.22 FSP 탄은 Kevlar 직물을 관통하지 못하고 정지해 있음을 볼 수 있으며, 충격 부위에서 안의 뽑힘 현상을 뚜렷하게 볼 수 있으나, 안의 뽑힘의 높이는 길지 않다. 1번째 층에서 탄이 멈추었음에도 불구하고 1번째 층에서 마지막 층까지 순차적으로 안의 뽑힘의 정도가 심하게 일어났으며, 마지막 층에서는 상당수의 안이 파단되었음을 관찰할 수 있다. 이같은 현상은 순수 Kevlar의 경우에 충격에너지가 인접한 층으로 전달이 일어나 안 뽑힘을 일으키어 충격에너지를 흡수하는 것으로 보인다.

안의 뽑힘에 대하여 보다 상세하게 살펴보고자 한다. Fig. 3에서 탄이 충격을 가한 중앙 위치를 중심으로 안의 이동이 네 방향에서 일어났음을 볼 수 있다. 사진 b는 안의 이동을 확대한 사진이다.

안의 이동은 탄의 충격에너지가 안의 파단강도보다 작을 경우에는 충격에너지는 직물의 안을 따라서 시편의 끝으로 전파가 일어나며, 이로 인하여 경사와 위사가 만나는 교차점이 풀리게 되며, 풀린 안은 탄의 충격력에 의하여 밀려 날 것이다. 이때에 안의 이동이 일어나며 이것이 결국에는 안의 뽑힘 결과인 뽑힘(pull-out)을 가져 올 것이다. 안의 이동 정도는 직물의 위사와 경사 교차점에서 안-안 사이의 마찰력에 따라서 이동 거리가 달라질 것이다. 마찰력이 클수록 안의 이동은 적으며 이것은 안의 뽑힘의 크기를 작게 만들 것이다. 마찰력을 증가시키기 위한 연구도 이루어진다. Martinez[8]는 Kevlar 직물로부터 안의 마찰과 마모에 대한 실험을 통하여 안의 파괴기구를 규명하고자 하였다. 안의 뽑힘은 또한 직물의 구조에도 관계된다. 본 실험에서 사용한 KM-2 Kevlar는 600 데니어(denier)의 안을 사용하여 단위 인치 당 28개의 안으로 구성된 치밀한 직조 조직(fine weaving)을 갖고 있어, 거칠은 직조 구조 즉 단위 거리 당 안의 수가 적은

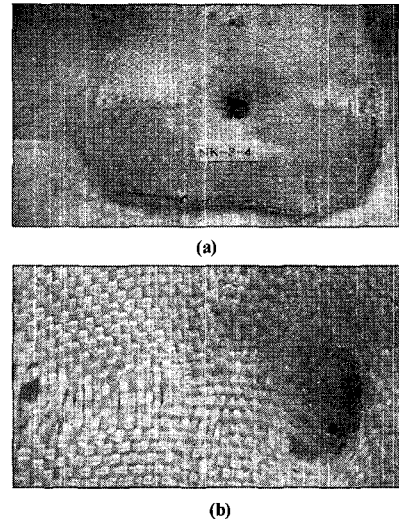


Fig. 3 Front view of 4th ply showing yarn translation.

경우보다도 마찰력이 크리라 예상된다. Fig. 3서 보듯이 안은 5개가 이동을 하였고, 폭은 탄의 직경 보다도 훨씬 넓다. 이같은 현상은 Bazhenov[9]의 실험 결과와도 잘 일치하고 있다.

한 가지 관찰된 특이한 현상은 시편의 마지막 층에서 뽑힘 안의 상당수가 파단이 되었다는 것이다. 이것은 탄에 의하여 후면 변형인 부풀(Bulge)이 점토대로 들어가면서 마지막 층은 점토와의 심한 마찰이 일어나므로써 안의 일부 또는 전부에서 파단이 발생하는 것으로 예측된다. 이와 같이 순수 Kevlar 직물의 경우에 거시적 관점에서 주 파단모드는 안의 뽑힘이다. 따라서 안의 뽑힘의 정도를 조절할 수 있다면 이는 방탄력을 증가시키는 한 방법이 될 것이다.

3.2.2 STF- Kevlar 직물의 경우(Cal.22 FSP탄)

STF를 함유한 Kevlar 재료의 충격흡수 모드는 앞서 언급한 순수 Kevlar와는 전혀 다른 형태를 보여주었다. Fig. 4는 초기 탄속이 243m/s인 경우로서, D.E값은 30J, D.E.P는 94%이다. 충격에너지 흡수 퍼센트 값이 순수 Kevlar에 비하여 16% 이상 높음에도 불구하고 탄에 의한 손상 면적은 순수 Kevlar에 비하여 훨씬 작게 나타났다.

충격 파단모습에서 첫 번째 층과 마지막 층인 네 번째 층에서 뚜렷한 안의 뽑힘 현상이 보이지 않는다. 다만 안이 직물로부터 완전 뽑히기 전에 일어나는 안의 이동 현상이 약간 보이고 있다. 사진(b)는 파편탄에 의해서 충격을 받은 부위에서 집중적으로 변형이 발생한 것을 볼 수 있다. 여기서 안의 일부가 파손이 일어난 것을 관찰할 수 있다. 그러나 마지막 층에서는 안의 파단은 나타나지 않고 있다. STF-Kevlar의 경우의 이같은 결과는 첫째는 실리카 나노 입자가 안-안 사이에서 마찰력을 상승시키고, 둘째는 충격 지점에서 STF의 전단능화

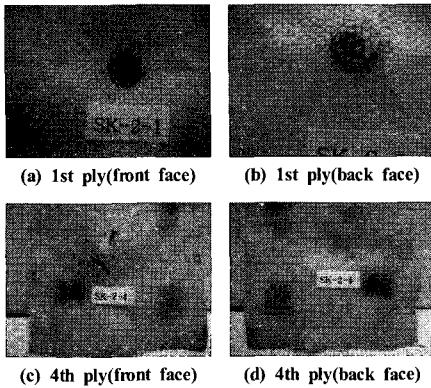


Fig. 4 Photographs of 1st and 4th ply of an 4 layers in STF-Kevlar impacted by Cal.22 FSP at Projectile velocity of 243m/s.



Fig. 5 S.E.M image of yarn pull-out of neat Kevlar fabric.

현상 발생으로 점도가 상승하여 실리카 입자의 뭉침을 일으키어 양의 이동을 강력하게 억제하기 때문이라 본다. 충격에너지 흡수에 대한 상세한 원인은 전자주사현미경 결과에서 논의하고자 한다.

3.3 전자주사현미경 관찰 결과

3.3.1 순수 Kevlar 경우

앞에서는 거시적 측면서 순수 Kevlar 직물의 파단형태를 관찰하였다. 여기서는 미시적 측면에서 순수 Kevlar 직물이 어떤 종류의 파단모드가 발생하는지를 전자주사현미경(S.E.M)을 사용하여 관찰하였다. 순수 Kevlar 직물은 탄에 의한 충격시에 양의 뿔힘이 주된 파단임을 앞에서 보았다.

Fig. 5는 첫 번째 층에서 Cal.22 탄에 의하여 충격을 받은 중심 부위에서 양의 뿔힘이 일어난 전형적인 모습이다. 위사와 경사 방향의 양 다발(yarn bundle)이 많이 뿔쳐 나온것을 볼 수 있다. 또한 양의 일부는 절단이 일어났다.

Fig. 6은 Fig. 5에서 관찰된 절단된 양들의 확대된 모습으로서, 양은 연신이 일부 일어나면서 파단이 일어나 섬유가 크게 뭉그러져 있음을 볼 수 있다. 첫 번째 층에서 양의 파단은 양의 파단강도보다 탄의 충격에너지가 컸기 때문이라 사료된다. 다음에 언급하겠지만 이같은 형태의 양의 파단은 순간적인 충격에 의하여 발생하는 취약(Brittle)한 형태의 파손으로 보여진다.

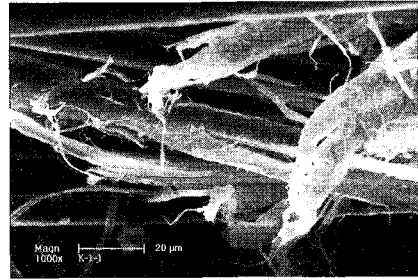


Fig. 6 S.E.M image of yarn failure at the 1st ply.



Fig. 7 S.E.M images of torn skin of Kevlar fibers in the form of a helical form.



Fig. 8 S.E.M image of the elongated fiber body of Kevlar

앞서 언급한 바와 같이 직물 구조에서 양의 이동시에 위사와 경사의 교차점에서 마찰이 일어난다. 이같은 이유로 인하여 Fig. 7에서 보듯이 양-양 사이의 마찰로 인하여 Kevlar 섬유 표면이 벗겨졌으며, 벗겨진 양들은 나선형의 모양을 형성하고 있음을 관찰할 수 있다.

그러나 섬유 표면의 벗겨짐 상태는 탄-직물 사이의 충격에너지에 의존한다. 두 번째 층에서 일부 섬유는 양의 표면 벗겨짐과 함께 Kevlar 섬유의 형상이 원형의 모양을 유지하지 않고 연신되면서 섬유의 직경이 변함을 볼 수 있다.(Fig. 8)

세 번째 층에서도 섬유 표면의 벗겨짐 현상이 관찰이 되었다. 섬유 표면의 벗겨짐은 섬유의 방향을 따라서 일어난다. 섬유의 벗겨짐은 Kevlar 섬유의 표면 구조상 표면이 아주 작은 크기의 마이카(Mica)같은 형태를 갖고 있어 마찰에 의하여 쉽게 벗겨지는 것으로 보인다 [20].

섬유의 표면이 섬유 방향을 따라서 길게 벗겨지기 시작하고, 또한 섬유의 형상의 변형이 일어나면 섬유 자체는 여러가닥으로 쪼개지는 현상인 "스프리트(split)" 파단 모드를 일으킨다. 이

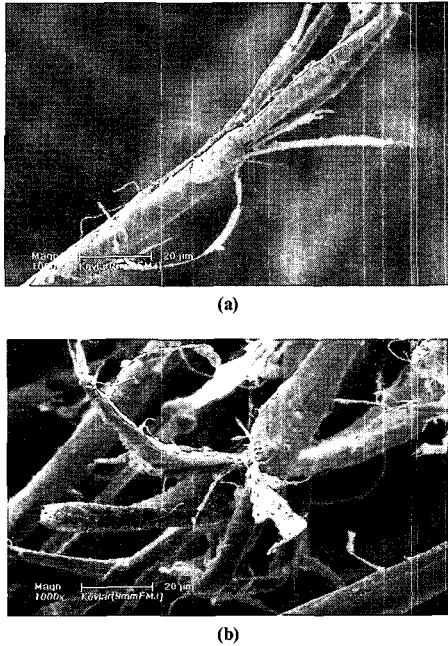


Fig. 9 S.E.M images of fractured split Kevlar fibers that failed in ballistic impact by 9mm FMJ bullet.

현상은 충격에너지의 정도에 따라서 발생 정도가 다른 것으로 확인이 되었다. 스프리트 모드는 한개의 섬유에서 여러 가닥으로 찢겨지는 현상이다. 스프리트의 상세한 현상은 9mm FMJ 방탄시험에서 잘 관찰할 수 있다. 스프리트 파단 모드 발생은 Kevlar 섬유가 충격을 받아 바로 파단이 일어나지 않고 여러 가닥으로 갈라지면서 충격하중을 흡수하게되며, 또한 크랙이 횡 방향으로 진행됨을 방지하는 역할을 하여 섬유가 바로 절단되지 않기 때문에 이로 인하여 Kevlar 섬유 자체가 방탄충격을 크게 흡수하는 능력을 갖는 것으로 보인다. Cal.22 탄에 의한 충격시험에서는 스프리트 모드는 주 파단 형태는 아니다.

네 번째 층에서는 뽑힌 양의 일부가 파단이 일어 났음을 관찰할 수 있다(Fig. 2). 또한 섬유 표면의 벗겨짐 현상만은 공통적으로 나타났다. 이와 같은 양의 파단은 앞서 설명하였듯이 직물과 점토 사이의 마찰에 기인한 것으로 보인다.

다음은 9mm FMJ탄에 의한 방탄시험 관찰 결과이다. 이 탄의 충격에너지는 58J이며 Cal.22 FSP 탄에 비하여 약 53%나 높은 충격에너지를 갖는다. 9mm FMJ의 충격에너지가 높음에도 불구하고 Cal.22 FSP와 유사한 파단현상을 보여 주었으나, 다만 손상 정도가 다를 뿐이다. 관찰된 주요 파단모드는 섬유 표면의 벗겨짐, 스프리트, 그리고 섬유파단이다. 특히 이 시험에서는 Fig. 9에서 보듯이 스프리트 파단모드가 선명하게 나타났다.

스프리트는 양 섬유의 최종 파단 전에 발생하는 것으로, 이는 Kevlar 섬유의 독특한 파단모드로서 유리섬유나 탄소섬유에서는

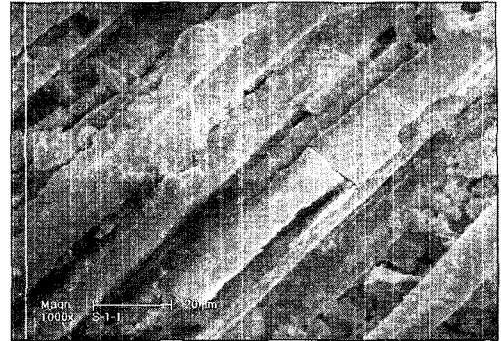


Fig. 10 S.E.M image of kevlar fiber filled with silica particles.

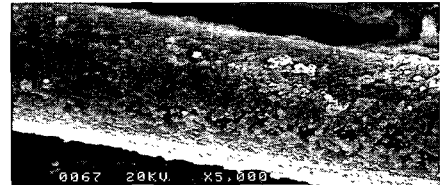


Fig. 11 S.E.M image of a Kevlar single fiber coated with silica particles.

나타나지 않는다. Fig. 9에서 보듯이 양 섬유가 여러 가닥으로의 찢개짐은 동시에 일어나지 않고 파단이 진행되는 동안 한가닥 한가닥씩 갈라지는 것으로 판단된다. 스프리트 모드도 외부서의 충격이 양의 파단강도 보다도 훨씬 높으면 발생하지 않고 양은 바로 절단이 될 것이다. 따라서 스프리트 파단 모드는 충격에너지가 양의 파단강도보다 크게 낮은 경우에는 잘 발생하지 않으며(Cal.22 경우), 충격에너지가 큰 조건(9mm FMJ경우)에서는 잘 일어나는 것으로 보인다. Kevlar 섬유의 경우에 스프리트 모드는 아주 중요한 에너지 흡수 형태로서 이에 대한 상세한 연구를 통하여 방탄력을 예측할 수 있을 것이다.

3.3.2 STF-Kevlar 액체방탄재 경우

거시적 파단 측면에서 순수 Kevlar와 STF-kevlar는 상당히 다른 거동으로 파단됨을 앞서 관찰하였다. 액체방탄재는 Kevlar 직물에 전단농화유체를 함침시킨 것이다. 따라서 Fig. 10에서 보듯이 Kevlar 섬유 필라멘트 표면과, 안-양 섬유 사이에 나노 크기의 실리카 입자들이 충전되어 있음을 볼 수 있다.

Fig. 11은 Kevlar 양 섬유 표면이 실리카 입자로 균일하게 코팅되어 있음을 보여주고 있다.

Fig. 10의 전자주사현미경 사진은 충격 지점의 중앙에서 나타난 결과이다. 250m/s로 비행하는 Cal.22 탄에 의하여 전단농화 현상이 발생한다면 순간적으로 실리카 입자들의 뭉침이 일어날 것이다. 사진에서 보듯이 실리카 입자들의 뭉침이 관찰되었다. 전단농화현상은 임계 전단속도에 도달하면 순간적으로 점도의 변화가 일어나 액상이 고상으로 다시 고상이 액상으로 전이하는 것으로 알려져 있다. 그러므로 물질의 현상



Fig. 12 S.E.M image of fractured Kevlar fibers in STF-Kevlar.

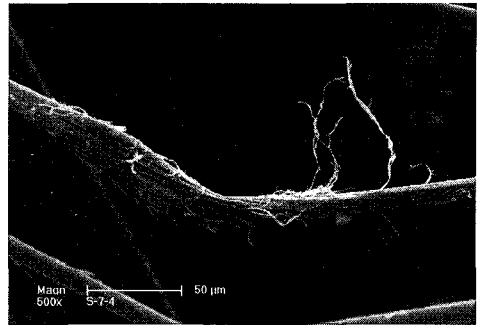


Fig. 14 S.E.M image of fractured split Kevlar fiber impregnated with STF.

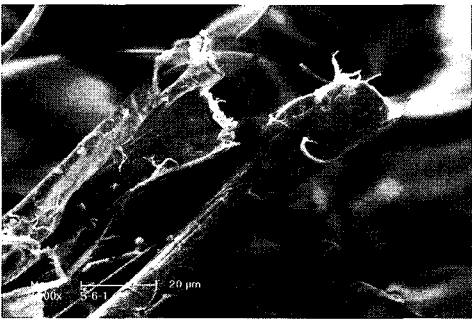


Fig. 13 S.E.M images of brittle fracture of Kevlar fibers at high velocity of impact(270m/s).

변화를 관찰하기는 거의 불가능하다고 본다. 따라서 Fig. 10의 실리카 입자들의 뭉침이 전단농화에 의하여 발생한 것인지는 확실하지 않으나, 충격 지점에서 멀리 떨어진 곳에 비하여 입자들이 많이 모여 있음이 관찰되었다.

앞에서 보았듯이 STF-Kevlar는 양의 뿔침 조차도 아주 미미하게 일어나지 않는 반면에 국부적으로 시편 후면의 부풀(Bulge) 높이는 낮고 폭은 넓게 발생함을 관찰하였다. STF-Kevlar의 경우에 양의 파단은 파단된 정도의 차이는 있지만 첫 번째 층부터 마지막 층인 네 번째 층까지 양의 파단이 조금씩 발생하였다(Fig. 12). 섬유 표면이 실리카 입자로 덮여있음을 또한 관찰할 수 있다. 이같은 양의 파단 결과는 순수 Kevlar에서는 관찰되지 않는 다른 현상이다. STF-Kevlar의 경우에 양의 절단은 아주 중요한 파단모드의 하나로 보인다. 직물이 충격을 받으면 양-양, 적층된 인접한 직물의 층 사이에 분포되어 있는 나노 실리카 입자로 인하여 마찰이 발생하여 양의 이동이 강력하게 억제된다. 미시적 측면에서 보면 경사-위사가 만나는 교차점에서 특히 심한 마찰이 일어날 것이다. 또한 앞서 언급한 전단농화 현상의 발생으로 인하여 양의 미끄러짐이나 풀림 등이 더욱 억제 될 것이다. 이동이 억제된 양은 탄의 충격에너지를 그대로 흡수하므로써, 일부 양의 파단이 일어나는 것으로 보인다. 결과적으로 양 섬유의 파단으로 충격에너지를 상당히 흡수하므로써 후면 변형을 크게 줄여 준다고 할 수 있다.

Kevlar 섬유의 파단은 탄속에도 영향을 받는다. 탄속이 270m/s에서는 4겹의 시편은 Cal.22탄에 의하여 관통이 되었다. 이 조건에서 Kevlar 섬유는 탄속이 240m/s의 경우와는 전혀 다른 파단 모드를 보여 주었다. Fig. 13에서 보듯이 Kevlar 섬유는 횡으로 절단이 일어났다. 이것은 전형적인 취약한 파단모드와 유사하다. 따라서 이같은 파단모드의 발생은 탄의 충격에너지가 Kevlar 양의 파단강도 보다 큰 경우에 일어나는 것으로서 파단 전에 스프리트 같은 모드는 보이지 않고, 그 대신에 약간의 섬유의 연신이 일어나면서 절단이 된다.

순수 Kevlar에서와 같이 탄속 240m/s에서 STF-Kevlar도 스프리트 모드가 나타났다(Fig. 14). 여기에서 1개의 양에서 십여개의 가닥으로 갈라지는 현상이 뚜렷하게 발생함을 볼 수 있다.

STF-Kevlar의 파단모드는 순수 Kevlar와 거의 동일하나, 가장 큰 차이는 양의 파단이 전 층에 걸쳐서 조금씩 발생하였다는 것이다. 양의 뿔침 대신에 결국 양의 파단으로 방탄 충격 에너지를 흡수하게 되어 후면 변형이 적게 일어나는 것으로 보인다. 이같은 주 원인은 전단농화유체에 들어있는 나노 실리카 입자의 마찰효과와 탄이 Kevlar 직물과 충돌시에 발생하는 전단농화 현상의 발생에 기인한다고 본다.

4. 결론

본 연구에서는 Kevlar섬유의 방탄성능을 높이기 위하여 나노 크기의 실리카 입자가 들어 있는 전단농화유체를 제조하여 이를 Kevlar 직물에 함침하여 방탄시험을 수행하였다. 본 연구를 통하여 STF-Kevlar 재료가 왜 방탄력이 우수한지를 확인할 수 있었다.

순수 Kevlar 섬유는 양의 이동으로 인한 양의 뿔침(pull-out)이 대표적인 충격 에너지흡수 기구이며, 미시적 측면에서 관찰한 결과로 순수 Kevlar는 섬유 표면의 벗겨짐, 섬유가 여러 가닥으로 갈라지는 스프리트, 그리고 섬유의 절단이 주 파단모드이었다.

한편 실리카 입자를 함유한 STF-Kevlar 액체방탄재의 경우

에서는 거시적 측면에서 후면 변형의 높이는 낮고, 폭은 보다 넓게 일어나므로써, 충격에너지의 흡수와 전달이 우수함을 알 수 있었다. 동일 적층 수에서 에너지흡수율(E.D.P) 값이 순수 Kevlar에 비하여 약 23% 높게 나타났다. STF-Kevlar의 경우에 파단모드는 섬유질의 절단이 전 층에서 조금씩 발생하였으며, 섬유의 파단 이전에는 섬유의 스프리트와 섬유 표면의 벗겨짐도 관찰되었다. 따라서 STF-Kevlar에서는 주 충격에너지 흡수 기구는 섬유의 파단이라 본다. 이와 같은 파단모드의 차이는 나노 실리카 입자의 존재로 인하여 안-입자, 입자-입자, 탄-입자 사이에 마찰이 발생하여 안의 이동을 강력히 억제하기 때문이다. 또 다른 큰 이유로는 충격을 받을 때에 전단농화 현상의 발생으로 나노 입자가 뭉침으로써 안의 이동을 한층 더 억제하는 것으로 보인다.

STF-Kevlar에서 나노 입자들에 의한 마찰력과 전단농화 발생 중 어느 현상이 방탄력 상승에 더 기여하는지에 대한 추가적인 연구가 요구되며, 전단농화 발생으로 나노 입자가 뭉치는 것으로 알려져 있는데 이 같은 현상을 입증하는 연구도 이루어져야 한다.

참고문헌

- 1) Ray C. Laible, *Ballistic Materials and Penetration Mechanics*, Elsevier Amsterdam, 1980.
- 2) M.J.N Jacobs and J.L.J. Van Dingenen, "Ballistic Protection Mechanics in Personal Armor," *J. of Materials Sci.*, Vol. 36, 2001, pp. 3137-3142
- 3) D. Roylance, "Ballistic of Transversely Impacted Fibers," *Text. Res. J.*, Vol. 10, 1977, pp. 679-684.
- 4) D. Roylance, "Stress Wave Propagation in Fibers: Effect of Crossover," *Fiber Sci. Technology*, Vol. 13, 1980, pp. 385-395.
- 5) R.C. Laible and Figucia, "The Application of High Modulus Fibers to Ballistic Protection," *J. Macromol Sci. Chem A*, Vol. 7, No. 1, 1973, pp. 295-322.
- 6) P.M. Cunniff, "An Analysis of the System Effects in Woven Fabrics under Ballistic Impact," *Text. Res. J.*, Vol. 62, No. 9, 1992, pp. 495-509.
- 7) B.J. Briscoe and F. Motamedi, "The Ballistic Impact Characteristics of Aamid Fabrics: The Influence of Interface Friction," *Wear*, Vol. 158, 1992, pp. 229-247.
- 8) M.A. Martinez, C. Navarro, R. Cortes, and J. Rodriguez, "Friction and Wear Behavior of Kevlar Fabrics," *J. of Mater. Sci.*, Vol. 28, 1993, pp. 1305-1311.
- 9) S. Bathenov, "Dissipation of Energy by Bulletproof Aaramid Fabrics," *J. Mater. Sci.*, Vol. 32, 1997, pp. 4167-4173.
- 10) Y.S. LEE, E.D. Wetzal, N.J. Wagner, "The Ballistic Impact Characteristics of Kevlar Woven Fabric Impregnated with a Colloidal Shear Thickening Fluid," *J. of Mater. Sci.*, Vol. 38, 2003, pp. 2825-2833.
- 11) R.L. Hoffman, "Discontinuous and Dilatant Viscosity Behavior in Concentrated Suspensions. I. Observation of a Flow Instability," *J. Reol.*, Vol. 40, 1996, pp. 531-548.
- 12) J.W. Bender and N.J. Wagner, J., *Colloidal Interface Sci.*, Vol. 172, 1995, pp. 171.
- 13) E.A. Collins, D.J. Hoffman and P.L. Soni, *J. Colloidal Interface Sci.*, Vol. 71, 1995, pp. 21.
- 14) R.S. Raghavan and S.A. Khan, "Shear-Thickening Response of Fumed Silica Suspensions under Steady and Oscillation Shear," *J. Colloid and Interface Sci.*, Vol. 185, 1977, pp. 57-67.
- 15) A. Zupancic, R. Lapasin and M. Zumer, "Rheological Characterization of Shear Thickening TiO₂ Suspensions in Low Molecular Polymer Solution," *Progress in Organic Coating*, Vol. 30, 1997, pp. 67-78.
- 16) B.J. maranzano and N.J. Wagner, "The Effects of Particle Size on Reversible Shear Thickening of Concentrated Colloidal Dispersions," *J. Chemical Physics*, Vol. 114, No. 23, 2001, pp. 10514-10527.
- 17) J.E. Kirwood, E.M. Kirwood, Y.S. Lee, R.G. Egres Jr, and N.J. Wagner, "Yarn pull-out as a Mechanism for Dissipating Ballistic Impact Energy in Kevlar KM-2 Fabric," *Part I. Quasi-static Characterization of Yarn Pull-out, Text. Res. J.*, Vol. 74, No. 11, 2004, pp. 939-948.
- 18) J.E. Kirwood, E.M. Kirwood, Y.S. Lee, R.G. Egres Jr, and N.J. Wagner, "Yarn pull-out as a Mechanism for Dissipating Ballistic Impact Energy in Kevlar KM-2 Fabric, Part II. Predicting Ballistic Performance," *Text. Res. J.*, Vol. 74, No. 11, 2004, pp. 938-948.
- 19) V.B.C. Tan, T.E. Tay and W.K. Teo, "Strengthening Fabric Armor with Silica Colloidal Suspensions," *Inter. J. of Solid and Structures*, Vol. 42, 2005, pp. 1561-1576.
- 20) Stuart M. Lee, *International Encyclopedia of Composites*, VCH N.Y, 1990, pp. 37-48.