

論文

전단농화유체가 함침된 Kevlar 재료의 방탄특성

송홍섭^{*+}, 윤병일^{*}, 김창연^{**}, 박종열^{**}, 강태진^{**}

Ballistic Resistance Performance of Kevlar Fabric Impregnated with Shear Thickening Fluid

Heung-Sub Song^{*+}, Byung-Il Yoon^{*}, Chang-Yun Kim^{**}, Jong-Lyul Park^{**}, Tae-Tin Kang^{**}

ABSTRACT

Manufacturing process of the shear thickening fluid(STF) and evaluation of the ballistic penetration resistance performance of the Kevlar-STF composites were studied. STF was made from silica and ethylene glycol, and the Kevlar-STF composite was made by impregnating the STF into the Kevlar fabric. Specimens including neat Kevlar woven fabrics and Kevlar-STF composites with two types of silica were prepared and carried out the ballistic tests. From the results STFs represented shear thickening behavior irrespective of the silica type, and Kevlar-STF composite with spherical silica showed best ballistic penetration resistance performance among them. Especially the specimens of Kevlar-STF composites with spherical silica showed radial fiber deformation by the projectile during the tests, that was somewhat different deformation behavior from those of the neat Kevlar fabrics shown fiber pull-out phenomena or fracture.

초 록

본 연구는 전단농화유체(STF)가 함침된 Kevlar 복합재료(STF-Kevlar composite)의 제조 및 방탄성능 평가에 관한 내용이다. 전단농화유체는 fumed silica와 구형 silica를 에틸렌글리콜에 혼합하여 제조하였고 이 유체를 Kevlar직물에 함침시켜 액체 방탄재료를 제작하였다. 전단농화거동을 조사한 결과 사용된 STF는 모두 전단농화거동이 발현됨을 확인하였다. 그리고 방탄 시험 결과 구형silica STF-Kevlar 복합재료가 보다 우수한 방탄특성을 나타내었다. 한편 방탄시험 시 neat Kevlar 시험편에서는 탄자가 섬유를 pull-out하면서 관통하는 현상이 발생하였으나 LBA시험편에서는 섬유의 pull-out 대신 원주방향으로 섬유가 변형되면서 방탄재료가 변형되는 거동을 보여 서로 다른 변형거동을 각각 나타내는 것으로 관찰되었다.

Key Words : 전단농화 유체(Shear Thickening Fluid), Silica(Silica), 액체방탄재료(Liquid Body Armor), 케블라(Kevlar), 방탄 특성(Ballistic Resistance Performance)

1. 서 론

미래의 개인 병사체제와 관련하여 soft body armor의 일종으로 이른바 액체방탄 재료(LBA : liquid body armor)가 제안되어 연구가 진행되고 있다. 액체방탄재료는 전단 농화 유체(shear

thickening fluid, 이하 STF)를 탄소섬유의 직물에 함침시켜 제조되는데 이에 관련된 연구 중 전단농화 유체가 이 연구의 핵심적인 요소라고 할 수 있다. 이 물질은 평상시 외부 자극이 없는 상태에서는 액체 상태를 유지하여 유연성이 확보되기 때문에 충분한 활동성이 보장되나 외부에서 자극이 가해질 경우 점도가 급

* 국방과학연구소 기술연구본부

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

** 서울대학교 섬유공학과

격히 증가하여 고체와 같이 변화되는 특성을 나타낸다. 이 현상은 외력이 제거되면 원상태로 회복되는 가역적인 반응이다. STF를 개인 방호복에 응용하기 위한 연구는 미 육군연구소(ARL)와 Delaware 대학의 연구팀들이 중심이 되어 수행되고 있으며 현재 방탄과 방검특성 등에 대한 연구결과가 계속해서 발표[1-4]되고 있다. 이 기술의 응용분야로서는 body armor, vehicle armor, helmets, gloves 및 bomb blankets 등 군인들의 생명을 보호하는 목적뿐만 아니라 경찰과 민간 경비체계에도 사용될 수 있다.

기존의 방탄재료는 유리섬유 또는 고강력 아라미드섬유를 직조하여 제조하기 때문에 방호능력을 높이기 위해서는 섬유 층을 겹겹이 적층하거나 방호소재의 재질을 변화를 주어 방탄복의 성능을 향상시키고 있으며 특히 방탄성능을 증대시키기 위해서는 많은 수의 방호소재를 적층하는 것이 필수적인 것으로 인식되고 있다. 그러나 이 경우 방호복의 중량을 증대시킬 뿐만 아니라 활동성을 저해한다. 그러므로 병사의 생존성과 기동성 향상을 위해서 가볍고 얇으며 유연성과 방탄성능을 겸비하면서 경제적인 개인 방탄재료가 필수적으로 요구된다. 이와 같은 신개념에 부응하는 방탄소재로서 STF를 이용한 액체방탄재료의 연구가 제안되었다. STF를 적용한 배경은 콜로이드상 나노크기 고상 입자의 유연화적 특성을 이용하기 위함이다. 즉, 이 유체는 전단응력이 증가했을 때 특정 조건을 넘어서면 유체의 점도가 급격하게 증가하여 고체와 같은 거동을 하게 된다[5,6]. 그러므로 STF를 섬유직물에 침투시켜 이 현상을 이용하면 방탄재에 침입하는 탄환이나 칼 등과 같은 물체의 침입을 억제시킬 수 있어 방탄성능을 극대화시키고자하는 것이 이 연구의 목표이다. STF를 이용한 LBA연구는 미국을 중심으로 진행되고 있고 일부 기초적인 연구결과가 발표되고 있으나, 아직 전단농화 현상의 발현이나 정확한 메커니즘 규명이 부족하며, 기동성과 유연성을 보다 크게 증대하기 위해서 직물과의 적합성, STF의 sealing 특성, 함침 및 제조공정, 최적의 조성선정 등에 대한 연구들이 필요한 실정이다.

본 연구에서는 나노크기의 silica입자와 에틸렌글리콜이 혼합된 STF의 특성을 조사하고 이를 Kevlar 재료에 함침시켜 STF-Kevlar 복합재료를 제조하였으며 제조된 STF-Kevlar 복합재료의 방탄특성을 에너지흡수율(EDP:Energy Dissipation Percent)로 평가하였다. 그리고 액체방탄재료의 방탄특성 변화에 따른 직물의 변형거동을 아울러 조사하였다.

2. 시험 방법

2.1. 시험재료의 준비

본 실험에서는 STF가 함침된 Kevlar 재료와 비교를 위하여 순수 Kevlar 시험편을 준비하였다. 순수 Kevlar 시험편은 시험편 조건당 2, 4, 8, 14 층의 직물을 적층하여 적층수에 따른 효과를 조사하고자 하였다. 한편 STF는 silica분말을 에틸렌글리콜에 혼합하여 제조하였으며 사용된 silica는 구형silica와 fumed silica분말이었다. Fumed silica는 Degusa 제품의 Aerosil

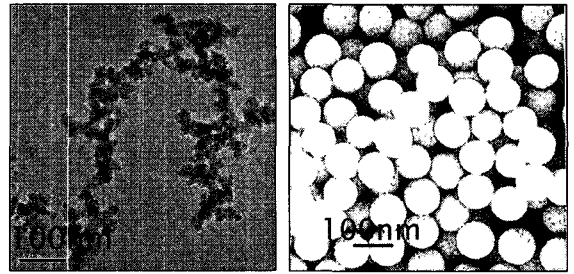


Fig. 1 Morphologies of silica powders : fumed silica (left) & spherical silica (right).

Table 1 Specification of KM-2 Kevlar

Yarn count (yarns/inch)	Areal density (g/m ²)	Thickness (mm)	Fabric system
28*28	149	0.2	Plain weave

200이고 분말입도는 12nm였으며 구형 silica는 Seahostar KE-P-10로서 평균입도는 100nm였다. 이들 silica분말의 형상은 Fig. 1과 같다. 한편 모든 시험편에 사용된 직물은 Kevlar로서 600 denier의 KM-2였으며 규격은 Table 1과 같다. 그리고 구형 silica STF-Kevlar 시험편에서 STF의 함량은 순수 Kevlar 시험편의 무게대비 45%였고 STF내의 silica 함량은 무게비로 65%였다. 그리고 fumed silica STF-Kevlar 시험편의 STF 함량은 구형 silica와 동일한 45%였으나 STF내의 fumed silica 함량은 무게비 21.5%였다. STF의 제조는 silica입자를 희석제인 메탄올에 1:1 비율로 혼합시켰다. 그리고 silica입자와 굴절율이 비슷한 에틸렌글리콜(이하 EG)에 분산시켜서 제조하였다. 전단농화 거동을 보인 fumed silica 21.5% STF와 구형 silica 65% STF를 Kevlar에 함침시키고 그 후 진공오븐에서 80℃에서 20분간 유지하여 메탄올을 완전히 제거하여 STF-Kevlar 복합재료를 제조하였다. STF-Kevlar 복합재료의 모든 시험편은 시험편당 4층의 직물을 적층하여 제작하였다.

2.2. 유변특성 측정

STF의 농도에 따른 유변물성을 측정하기 위하여 TA Instruments Inc.사의 AR 2000 레오미터를 사용하였다. 사용된 cone and plate (D:40mm, angle:2°)는 steady state flow mode 상태에서 25℃ 온도로 유지하였다. Loading 효과를 제거하기 위해서 pre shear(1 s⁻¹)를 가하였으며 유변물성 측정은 조건당 각각 4회씩 실험을 수행하였다.

2.3. 방탄 시험

방탄시험에 사용된 화기는 Cal. 22 구경의 총포이며 탄은 NATO의 규격탄인 파편모의탄(FSP: Fragment Simulated Projectile)

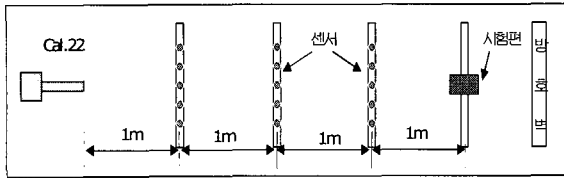


Fig. 2 Schematic layout of firing site for the test.

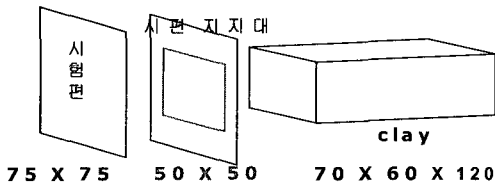


Fig. 3 Details of the specimen & clay at the target.

을 사용하였다. 이 탄의 중량은 1.1 g이며 자세한 치수 및 사양은 규격 MIL-P-46593A에 규정되어 있다. 방탄시험을 수행한 시험장의 배치도는 Fig. 2와 같다. 포구 전방에서 표적까지의 거리는 4m이며 탄의 속도를 측정하기 위하여 laser 센서가 1 m 간격으로 3곳 설치되어 있다. 그리고 시험편의 크기는 75×75mm이며 외부에 노출되는 표적면적이 50×50mm가 되도록 알루미늄 치구를 Fig. 3과 같이 설계 제작하였다. 표적용으로 사용된 clay(Fig. 3)는 유점토로서 크기는 60×70×120(mm)이다. 유점토의 품질을 검증하기 위하여 사전에 경도시험을 수행하였으며 제품 간 경도는 차이가 없었다. 시험편과 clay 및 알루미늄 치구는 Fig. 4와 같이 조립하고 고정된 상태에서 시험을 수행하였다. 시험편은 시험조건당 5개의 시험편을 각각 제작하여 시험하였으며 그 평균값을 취하였다. 탄속은 250m/sec를 기준속도로 시험하였다. 시험방법은 파편탄의 유점토 침투깊이로부터 잔류속도를 구하고 측정된 초기속도와 잔류속도의 자료를 이용하여 에너지 흡수율을 구하였다[1,7,8]. 방탄재료의 흡수에너지(Ed:Dissipated Energy)는 $E_d=1/2 \cdot m(V_i^2-V_r^2)$ 로 표시된다. 여기에서 V_i 는 탄이 방탄재료에 도달하기 직전의 속도이며 V_r 은 탄이 시험편을 통과한 후의 잔류속도(residual velocity of projectile)이다.

탄의 잔류속도는 탄의 속도와 clay의 관통깊이로부터 Fig. 5와 같은 관계식으로 결정되는 값이다. 즉 방탄시험 때에는 측정된 clay의 관통깊이로부터 미리 구해진 관계식을 통하여 V_r 을 계산하여 구하게 된다. 본 시험에서의 이들의 관계식은 $V_r=10.51+2.43 \cdot X$ 이었다. 여기에서 X는 clay에서 탄의 관통깊이(mm)를 나타낸다. 한편 방호력은 탄의 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 $E_i = 1/2 \cdot m \cdot V_i^2$ 이다.

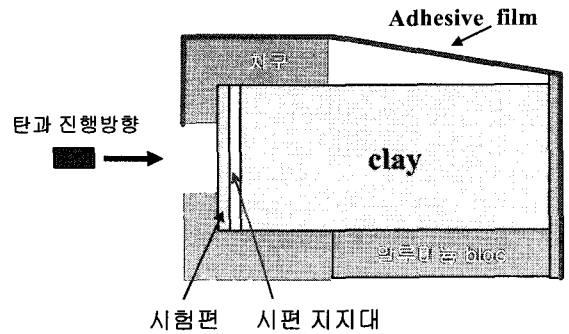


Fig. 4 Assembly of the target including clay & specimen.

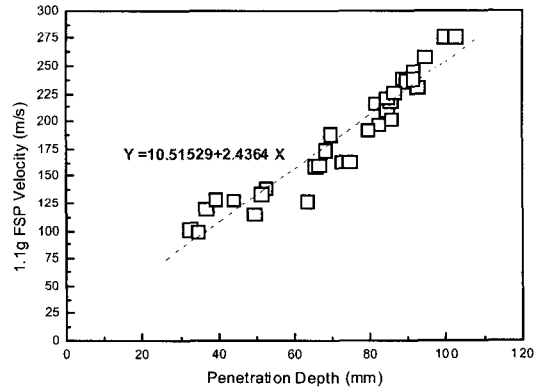


Fig. 5 Relation between residual velocity of projectile and penetration depth in clay.

3. 결과 및 고찰

3.1 전단농화 거동 및 함침 후 시험편 관찰

Fumed silica가 첨가된 STF 시험편의 경우 Fig. 6과 같이 15% 농도 이하에서는 전단농화거동(Shear thickening : 이하 ST)이 발현되지 않은 반면 20% 이상에서는 그림과 같이 ST 현상이 관찰되었으며 또한 silica의 농도가 높아짐에 따라 전단농화 시작점(on set point)이 빨라지는 경향을 나타내었다. 이는 분산입자의 농도가 높아지면서 입자들의 브라운 운동에 제약을 받고 또한 입자간의 거리가 충분하지 않기 때문에 다른 입자들 사이의 상호작용이 강해져 흐름장에 의한 변형으로부터 초기상태로 돌아가려는 복원력이 저하되고 고농도에서는 입자들이 움직일 수 없을 정도로 꽉 들어찬(jam up)상태가 되어서 입자계의 점도가 증가하기 때문인 것으로 판단되며 이는 고체입자가 전단농화거동에 미치는 일반적인 경향중의 하나이다[8,9].

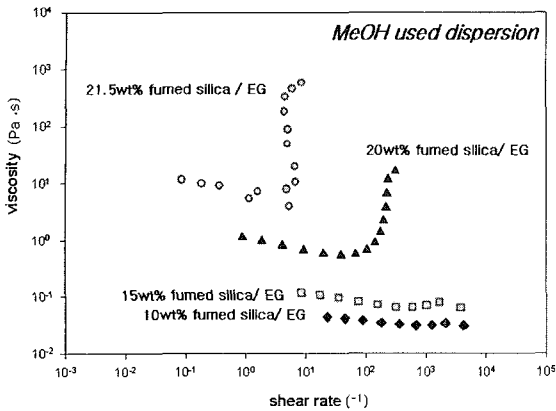


Fig. 6 Shear thickening behavior of the fumed silica-STF.

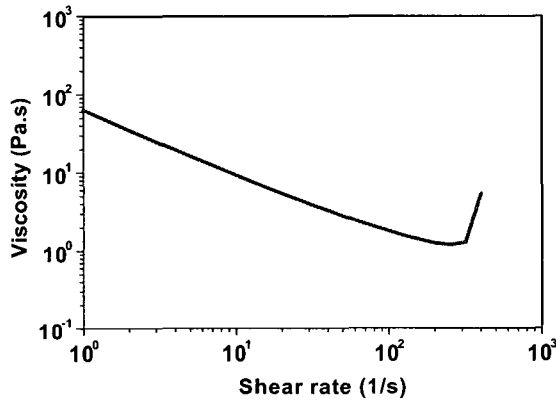


Fig. 7 Shear thickening behavior of the spherical silica STF.

한편 구형 silica 입자의 경우는 그림 7에서와 같이 약 $240s^{-1}$ 에서 전단농화 현상이 시작되는 결과를 나타내었는데 이 값은 유사한 크기를 가지는 colloidal silica 용액의 전단농화 시작점과 비슷한 결과이다[1].

Fig. 8-10은 주사전자현미경(SEM)으로 관찰한 미세조직 사진으로서 순수 Kevlar직물과 STF가 Kevlar직물에 함침된 상태를 각각 보여주고 있다. Fig. 9는 65%의 구형 silica STF-Kevlar 복합재료의 SEM사진으로서 구형의 silica나노입자가 섬유사이에 비교적 균일하게 분포되었음을 알 수 있다. 그러나 21.5% fumed silica STF-Kevlar 복합재료인 Fig. 10의 경우는 Fig. 9에 비하여 silica의 분포가 불균일함을 알 수 있다. 이는 fumed silica의 경우 입자의 평균크기가 12nm로 매우 작아 비표면적이 매우 크기 때문에 혼합성이 나쁠 뿐만 아니라 입자간은 사슬구조로 연결되어 EG와의 혼합성도 불량하기 때문에 나타난 현상으로 판단된다. 이는 fumed silica의 경우 EG와의 최대 혼합량이 구형silica의 경우 65%에 비하여 이보다 훨씬 낮은 20%대에 머물고 있음에서도 알 수 있다.

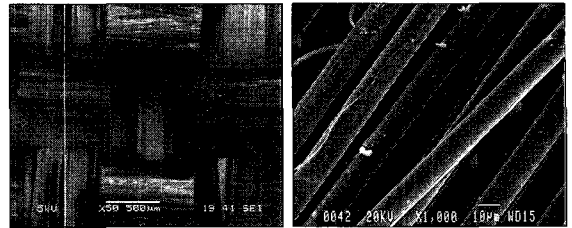


Fig. 8 SEM images of the Kevlar fabric(KM-2).

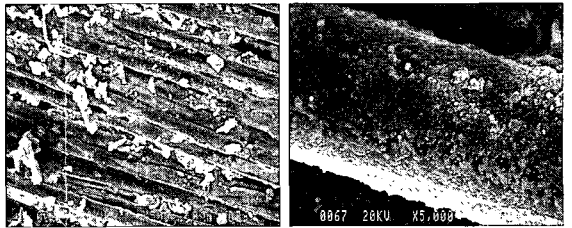


Fig. 9 SEM images of the STF-Kevlar composite impregnated with spherical silica 65%-STF.

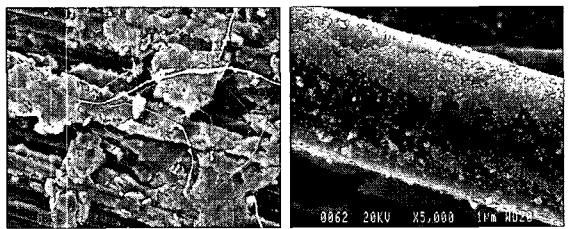


Fig. 10 SEM images of the Kevlar composite impregnated with fumed silica 21.5%-STF.

3.2 방탄 시험 결과 및 고찰

3.2.1 순수 Kevlar재료의 방탄시험 결과

기준탄속 250m/s의 조건하에서 2층의 순수kevlar 시험편은 모두 완전관통(complete penetration)되었으나 동일 탄속에서 4층 이상의 재료에서는 부분관통(partial penetration)되었다. Kevlar 층수에 대한 관통깊이는 Table2 에서와 같이 Kevlar의 적층 수에 반비례한 반면 에너지흡수율(E.D.P. : energy dissipated percent)은 2층의 경우 49.3에서 4층에서는 76으로, 8층에서는 90.9, 그리고 14 층에서는 95.1로 Kevlar의 적층 수에 비례하여 각각 증가하였다. 시험 후 시험편에서는 2층의 경우 섬유 pull-out 현상이 심하게 발생되었으며 이와 함께 섬유의 파단도 동시에 관찰되었다. 그러나 4층 이상 8층의 순수 Kevlar 시험편에서는 Fig. 11과 같이 부분 관통되면서 섬유의 pull-out과 함께 bulge 현상이 동시에 나타난 반면 14층의 Kevlar의 시험편에서는 섬유의 pull-out은 발생하지 않았고 대신 bulge현상만 관찰되었다. 이와 같이 Kevlar 층수에 따라 방탄거동이 각기 다르게 나타난 것은 방탄재료의 방호에너지가 Kevlar 층수에 따라 다르기 때문에 나타난 현상으로 판단된다.

Table 2 Ballistic resistance properties of the neat Kevlar with ply number

Kevlar 층수	무게 (g)	충돌속도 (m/s)	관통깊이 (mm)	흡수 에너지(J)	에너지 흡수율 (E.D.P.)
2	1.53	234	63.8	15.3	49.3
4	3.39	250	45.4	26.4	76.0
8	6.19	261	27.9	34.5	90.9
14	10.57	263	19.5	36.4	95.1

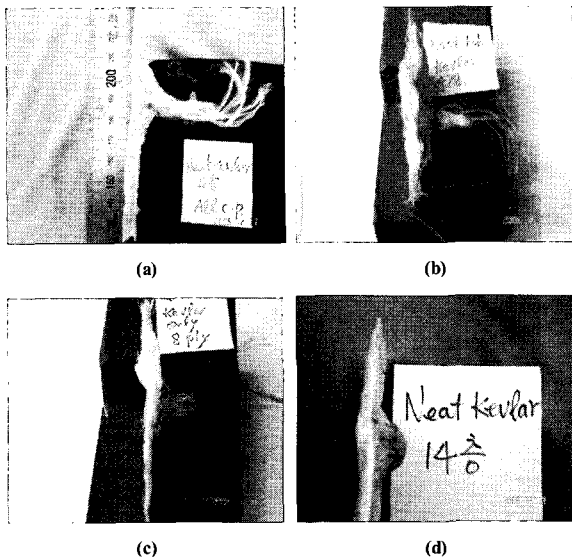


Fig. 11 Photographs of the Kevlar fabrics after ballistic test with ply number : (a) 2, (b) 4, (c) 8 and (d) 14 plies.

보고[10]에 따르면 순수 Kevlar재료의 면밀도에 따른 V50 값과 그때의 방호에너지를 예측한 바 있는데 그 결과에 본 시험에 사용된 Kevlar 직물의 면밀도 값을 고려하면 4층의 경우 방호에너지는 약 21J, 8층의 경우 약 42J 이다. 그리고 이를 V50 값으로 환산하면 4층의 경우 약 200m/s, 8층의 경우는 약 280m/s로 추정된다. 따라서 4층의 Kevlar 시험편의 경우 추정되는 V50 값보다 본 시험에서의 탄속(250m/s)이 높으므로 방탄재의 방호력보다 탄이 지닌 에너지가 더 크게 되고 이 때문에 직물의 변형 보다는 pull-out 또는 파단 등이 발생될 것으로 예측된다. 이는 본 시험에서 4층의 순수 Kevlar 직물의 흡수에너지 26.4J(Table 2)이 Kevlar 직물의 추정된 방호에너지 21J 보다 큰 사실로 부터도 확인된다. 한편 8층이 되면 방호력이 탄의 운동 에너지보다 높게 된다. 따라서 이때에는 섬유 부분적인 pull-out과 함께 섬유의 변형이 동시에 나타나는 것으로 판단되며 더욱더 직물의 층수가 늘어나 14층이 되면 방탄재료의 방호력이 더욱 높아지게 되어 결국 섬유의 pull-out 현상은 사라지고 직물은 변형되는 현상만 관찰되는 것으로 판단된다.

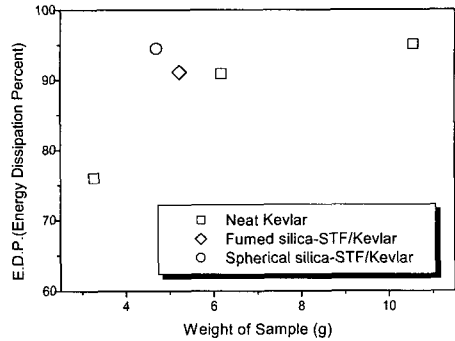


Fig. 12 Relationship between EDP and sample weight for the neat Kevlar fabric and STF-Kevlar specimens.

Table 3 Ballistic resistance properties of the Kevlar fabric impregnated with fumed silica STF & spherical silica STF

	무게 (g)	충돌속도 (m/s)	관통깊이 (mm)	흡수 에너지 (J)	에너지 흡수율 (E.D.P.)
구형 silica STF-Kevlar	4.69	243	19.0	30.6	94.5
Fumed silica STF-Kevlar	5.22	246	24.6	31.1	91.1

3.2.2 STF-Kevlar 복합재료의 방탄시험 결과

STF-Kevlar 시험편은 모두 Kevlar 4층의 시험편에 전단능화 용액을 함침시켰으며 시험편은 구형 silica 65%를 함침시킨 것과 fumed silica 21.5%를 함침시킨 시험편 두 종류였다. Table 3은 이들 두 시험편의 시험내역과 시험결과를 정리한 것이다. Table 에서와 같이 구형 silica의 경우 에너지흡수율(E.D.P.)이 94.5인 반면 fumed silica를 사용한 시험편은 91.1로서 구형silica를 사용한 시험편의 경우가 fumed silica를 사용한 시험편에 비하여 우수한 방호능력을 보였다. STF는 직물과 직물간의 마찰력을 증대 시킴으로써 방탄성능을 향상시키는 것으로 알려져 있다[4]. 특히 silica는 직물간과 직물과 탄자간의 마찰력을 증가시키고 이 마찰력은 silica의 함량에 비례하기 때문에 구형 silica 시험편의 경우 silica의 함량이 fumed silica를 함침시킨 시험편에 비하여 상대적으로 높아 방탄성능이 더 나은 것으로 판단된다. 특히 구형 silica STF를 4층의 Kevlar에 함침시킨 시험편의 에너지흡수율은 순수 Kevlar를 14층을 적용한 시험편의 에너지흡수율 값인 95.08에 근접하는 값으로서 STF를 함침시킨 시험편의 방호능력이 크게 향상되었음을 보여준다. 그리고 시험편의 무게를 기준으로 Fig. 12에서와 같이 비슷한 방탄성능을 가지는 조건하에서 STF-Kevlar 복합재의 시험편은 순수Kevlar의 무게의 약 45%에 불과하여 상당한 무게감량 효과가 기대된다. 한편 구형silica가 함침된 STF-Kevlar 복합재의 경우 순수 Kevlar시험편과는 달리 Fig. 13-(a)와 같이 탄환의 진행방향으로 섬유의 파단이 관찰되지 않았음은 물론 pull-out 현상도 거의 발생되지 않은 반면 직물의 원주방향으로 섬유의 변형이 상대적으로 많이 발생되었다.

Table 4 Effect of the ply number of the neat Kevlar on the penetration depth and hole diameter at the target

Kevlar 층수	무게 (g)	관통깊이 (mm)	관통직경 (mm)
2	1.53	63.8	12.0
4	3.39	45.4	17.2
8	6.19	27.9	17.7
14	10.57	19.5	19.1

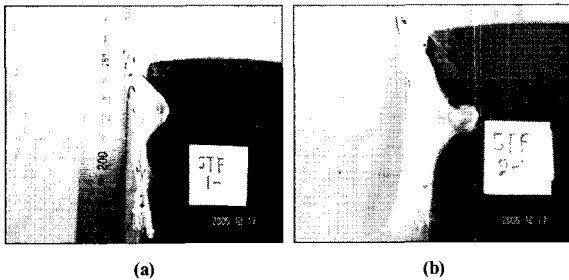


Fig. 13 Photographs of the STF-Kevlar composites after ballistic test : (a) Spherical silica & (b) fumed silica.

3.2.3. 방탄재료의 변형거동

순수 Kevlar 시험편의 방탄 시험시 2층의 Kevlar 시험편은 Fig. 11-(a)와 같이 시험편 모두에서 직물은 완전관통이 일어나면서 섬유가 절단되거나 pull-out된 반면 4층 이상의 순수 Kevlar 시험편에서는 부분관통이 발생되었다. 그리고 시험편은 부분관통과 함께 탄환의 진행방향과 수직 방향으로 섬유의 변형이 발생하였다. 14층의 Kevlar를 적층한 시험편(Fig. 11-(d))에서는 탄환의 진행방향과 직각인 시험편의 원주방향으로 변형이 보다 심하게 발생하고 bulge가 형성되었다. Table 4는 시험 후 Kevlar 층수에 따른 표적에서의 관통깊이와 관통직경과의 관계를 나타낸 결과로서 표적에서와 같이 Kevlar 층수가 많아질수록 관통깊이는 줄어드는 반면 관통직경은 증가하는 경향을 나타내었는데 이는 진술한 내용을 뒷받침하는 결과이다.

한편 STF-4층 Kevlar 복합재료 시험편의 방탄시험 후 변형 양상은 순수 Kevlar의 경우와는 다른 경향을 나타내었다. 특히 방탄성능이 가장 우수한 것으로 나타난 구형 silica-STF 방탄재료의 경우의 시험편은 방탄시험 후 Fig. 13-(a)에서와 같이 섬유는 pull-out되는 양상은 보이지 않았으며 그 대신 시험편의 원주방향으로 섬유가 변형되는 경향을 나타내었는데 이는 순수 Kevlar 14층 시험편의 결과와 유사한 형태였다. 특히 시험 후 탄환에 의하여 가장 심한 변형이 발생된 bulge의 중심 부분에서는 흰색의 silica분말이 노출되면서 이 부위는 다른 부위에 비하여 매우 딱딱해졌다. 그러나 이러한 현상은 다른 시험편에서는 관찰되지 않았다.

4. 결론

본 연구를 통하여 제시된 평가방안으로 시험평가를 수행한 결과 재현성이 확보된 결과를 획득할 수 있어 신뢰성 있는 평가방안으로 제시될 수 있음을 확인하였다. 구형 silica와 fumed silica 나노입자가 함유된 STF를 제조하고 시험한 결과 전단농화 현상이 발현됨을 확인하였다. 특히 fumed silica-STF에서는 입자의 크기에 따른 전단농화 거동의 차이도 확인되었다. 제조된 STF를 Kevlar 직물에 함침시킨 STF-Kevlar 복합재료의 방탄특성을 평가한 결과 구형 silica 입자가 함유된 STF-Kevlar 복합재료의 시험편이 fumed silica 입자가 함유된 시험편에 비하여 우수한 방탄특성을 보였다. 특히 구형 silica STF-4층 Kevlar 복합재료의 에너지흡수율(E.D.P.)은 순수 Kevlar 14층의 시험편의 에너지흡수율 값에 근접하여 방탄특성이 매우 향상되었다. 이는 STF-Kevlar 복합재료를 이용하면 기존의 순수 Kevlar 방탄재료에 비하여 방탄성능의 향상과 함께 상당한 무게감량효과를 기대할 수 있음을 보여준다. 그러나 STF를 이용한 방탄재료의 자세한 방탄기구나 직물의 변형기구 및 제조 등에 관해서는 차후에도 계속 연구가 진행되고 규명되어야 할 분야이다.

참고문헌

- 1) Y.S. LEE, E.D. Wetzel, 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.
- 2) Y.S. LEE, E.D. Wetzel, R.G. Erges Jr, N.J. Wagner, "Advanced Body Armor Utilizing Shear Thickening Fluids," *23rd Army Science Conf.* Orlando, FL, Paper #A0-01.
- 3) M.J. Decker, R.G. Erges, E.D. Wetzel and N.J. Wagner, "Low Velocity Ballistic Properties of Shear Thickening Fluid (STF)-fabric Composites," *22nd International Symp. on Ballistics*, 2005, pp. 777-784.
- 4) V.B.C. Tan, T.E. Tay, and W.K. Teo., "Strengthening Fabric Armour with Silica Colloidal Suspensions," *Intern.. J. Solids and Structure*, Vol. 42, 2005, pp. 151-1576.
- 5) Maranzano, B.J., Wagner, N.J. "The Effects of Inter-particle Interactions and Particle Size on Reversible Shear Thickening : Hard Spher Colloidal Dispersions," *J. of Rheology*, Vol. 45, 2001, pp. 1205-1222.
- 6) Bender, J., Wagner, N.J., "Reversible Shear Thickening in Mono Disperse and Bidisperse Colloidal Dispersions," *J. of Rheology*, Vol. 40, 1996, pp. 899-916.

- 7) B.J. Briscoe, F. Motamedi, "The Ballistic Impact Characteristics of Aramid Fabrics : the Influence of Interface Friction," *Wear*, Vol. 158, 1992, pp. 229-247.
- 8) Barnes H.A., "Shear Thickening in Suspensions of Non-aggregating Solid Particles Dispersed in Newtonian Liquids," *J. of Rheology*, Vol. 33, 1989, pp. 329-366.
- 9) R.L. Hoffmann, "Explanations for the Cause of Shear Thickening in the Concentrated Colloidal Suspensions," *J. of Rheology*, Vol. 42, 1998, pp. 111-123.
- 10) Frank Figucia, "Energy Absorption of Kevlar Fabrics under Ballistic Impact," *AD A090390*, 1990.