

論文

전단농화유체가 함침된 Kevlar 직물의 방검 및 방침 특성

이복원*, 김일진*, 이연관*, 김천곤**, 윤병일**, 백종규**

Puncture and Cutting Resistance Characteristics of Shear Thickening Fluid Impregnated Kevlar Fabrics

Bok-Won Lee*, Il-Jin Kim*, Yeon-Gwan Lee*, Chun-Gon Kim**, Byung-Il Yoon**, Jong Gyu Paik**

ABSTRACT

Stab threats using sharp edged or pointed instruments could be easily encountered by police officers or soldiers. In this study, the shear thickening fluids (STF) was impregnated into Kevlar fabrics to improve the stab protection and the resistance of STF impregnated Kevlar fabrics was experimentally investigated. The puncture and cut resistance were tested using a drop test machine with spike and knife indenters fabricated based on the National Institute of Justice (NIJ) standard. The STF was filled with spherical SiO₂ particles having an average diameter of 100nm, 300nm, and 500nm. The effect of particle size on puncture and cut resistance of STF impregnated Kevlar fabrics was also investigated. The measured impact load histories showed that STF impregnation into fabric leads to withstand higher peak loads than that of neat fabrics under spike test. The test results showed that Kevlar impregnated with STF exhibit remarkable improvements in puncture resistance while it is slightly influential on the cut resistance. Specifically, particle size is the one of the dominant factors controlling fabric resistance to puncture under spike impact test.

초 록

칼이나 송곳 같이 날카로운 날이 있거나 끝이 뾰족한 도구를 사용한 위협은 군인 뿐 아니라 경찰이나 경호원들에게 쉽게 일어날 수 있다. 이러한 위협으로부터 보호하기 위한 방호복의 소재로 적용하기 위해 방탄소재로 사용되는 Kevlar 직물을 사용하였으며 방검 및 방침 특성 향상을 위해 나노입자가 충전된 전단농화유체(Shear thickening fluid)를 함침하였다. National Institute of Justice 시험 규격에 따라 송곳과 칼을 제작하여 낙하충격시험기를 사용한 방검 및 방침특성 평가시험을 수행하였다. 전단농화유체는 각각 100nm, 300nm, 500nm 크기의 구형 나노 SiO₂ 입자를 충전시켜 제작하였으며 전단농화유체의 함침과 나노 입자의 크기가 갖는 방검 및 방침 특성에 대한 영향력을 평가하였다. STF를 함침한 Kevlar 직물은 송곳을 사용한 낙하충격시험에서는 미처리 직물에 비해 좀 더 높은 충격하중을 지지하며 견고히 송곳의 침투에 저항하는 우수한 방침 특성을 보여준 반면 칼을 사용한 방검시험에서는 큰 효과를 보여주지 못하였다. 특히 전단농화유체를 구성하는 나노입자의 크기는 방침 특성을 결정하는 주요한 인자임을 확인하였다.

Key Words : 전단농화유체(Shear Thickening Fluid), 케블라(Kevlar), 방침(Puncture resistance), 방검(Cutting resistance), 입자크기 (Particle Size)

* KAIST 항공우주공학과 대학원

*+ KAIST 항공우주공학과, 교신저자(E-mail:cgkim@kaist.ac.kr)

** 국방과학연구소 기술연구본부

1. 서론

칼이나 송곳과 같이 끝이 뾰족하거나 날이 있는 도구를 사용한 위협은 생활주변에서 어렵지 않게 접할 수 있다. 특히나, 치안을 담당하는 경찰들이나 위협으로부터 개인 및 재산 보호를 받고 있는 경호원들의 경우에는 더욱 찌르거나 베임 위협에 쉽게 노출될 수 있다. 총기소지에 대한 제한이 점차 증가하고 있는 유럽에서는 범죄의 도구로도 널리 사용되고 있어 방탄복보다 방검(cutting resistance) 및 방침(puncture resistance) 보호복에 대한 관심이 증가하고 있는 상황이다. 실제로 방탄에 대한 연구는 화약과 총알을 사용한 무기가 개발된 이후로 지속적으로 연구되어 왔지만, 방검 및 방침에 대한 체계적인 연구의 역사는 그리 오래되지 않았으며 이러한 시험절차에 대한 규격[1]도 최근에 제정되었다. 최근 들어 방호복에 대한 연구는 방탄을 포함한 방검 및 방침 등 다양한 위협으로부터 보호할 수 있는 다목적 방호복 개발에 관심을 두고 있다. 특히, 액체방탄재(Liquid body armor)로 알려져 있는 전단농화유체(Shear thickening fluid: STF)를 사용한 방탄특성 향상에 대한 연구[2-4]가 주목을 받고 있으며 이와 함께 전단농화유체를 적용한 방침 및 방검 특성(Puncture and cutting resistance) 향상에 대한 연구[5-7]도 함께 진행되고 있다. 전단농화유체는 외부의 자극으로 인해 전단변형률이 가해지면 급격한 점성의 증가를 보이며 액상으로 존재하던 것이 고체화되는 특성을 가진 나노입자 분산액을 칭한다.

Tan[3]등과 Lee[4]등은 구형의 SiO₂ 입자가 충전된 전단농화유체를 제작하여 방탄직물로 널리 사용되는 Kevlar 직물에 함침시켜 방탄특성을 평가하였다. 그들은 방탄시험을 통해 STF의 충전율이 높을수록 충격에너지 흡수율이 향상됨을 보여주었다. Decker[5]등은 STF를 함침한 다양한 직물에서의 방검 및 방침 특성을 실험적으로 평가하였으며, 직조밀도가 높은 직물에서 우수한 방침 특성이 나타나며 방검특성은 그리 향상되지 않음을 보여주었다. Houghton[6]등은 전단농화유체를 함침한 Kevlar 직물에서 의료용 바늘에 대한 방침특성이 미처리 직물에 비해 향상됨을 보여주었다. 이복원[8]등은 STF의 함침으로 인한 충격에너지 흡수 향상 메커니즘을 규명하기 위해 마찰시험, 안 Pull-out 시험 및 저속낙하충격 시험 등을 수행하였으며 전단농화 현상으로 인한 마찰력의 증가가 주요한 요인임을 보여주었다. 또한 100nm, 300nm 및 500nm 크기의 SiO₂ 입자를 각각 함침한 Kevlar 직물 중에서 100nm 크기 입자를 함침한 경우에 가장 큰 마찰력의 증가를 보여주었다. 하지만, 아직까지 STF의 함침으로 인한 방탄, 방검, 및 방침 등 다양한 환경에서의 충격흡수 메커니즘에 대한 충분한 이해 및 다양한 설계변수들의 영향력에 대한 정량적 평가를 수행한 연

구자료들이 부족한 상태이다. 본 연구에서는 이전의 연구결과를 토대로 전단농화현상을 지배하는 주요한 요인중의 하나인 입자크기가 갖는 방검 및 방침특성에의 영향력을 정량적으로 평가하였으며 STF 함침으로 인한 방침 및 방검 메커니즘을 이해하기 위해 실험적으로 그 특성을 평가하고 분석하였다.

2. 방검 및 방침 실험

2.1 실험 시편 제조

나노 SiO₂ 입자가 함침된 전단농화유체의 제조 및 Kevlar 직물의 함침과정은 참고논문[8]과 동일한 방법을 적용하였다. 전단농화유체를 제조하기 위한 SiO₂ 입자는 각각 100nm, 300nm, 500nm의 크기를 갖는 구형의 입자를 사용하였으며 입자크기에 대한 방검 및 방침 특성을 실험을 통해 정량적으로 평가하였다. 방검 및 방침 실험에 사용된 직물은 Dupont Inc. 사에서 제공되는 Kevlar KM2* 직물을 사용하였다. KM2* 직물은 현재 미육군의 공식 방탄직물로 사용되는 para-aramid 섬유로 고강성 및 고강도의 특성을 지니고 있다. 또한 670 dtex의 직조밀도를 갖고 있으며 면밀도(Areal density)는 149g/m²이다. Table 1은 시험을 위해 준비된 시편의 종류를 보여주고 있다. STF 함침 Kevlar 직물과의 면밀도(Areal density)를 맞추기 위해 미처리 직물은 12장을 적용하였고, STF 함침 직물은 8장을 적용하여 시험을 수행하였다.

Table 1 Description of fabric specimens

Specimens	Description	Areal Density(g/m ²)	STF add-on(wt%)
KN	12 layers KM2*	1788	-
K1	8 layers KM2*+100nm STF	1885	58.2
K3	8 layers KM2*+300nm STF	1860	56.2
K5	8 layers KM2*+500nm STF	1834	53.8

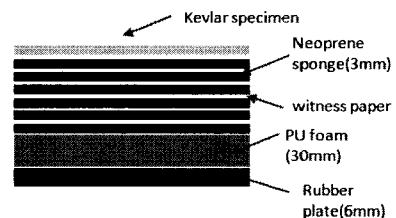


Fig. 1 Configuration of backing materials for stab resistance test.

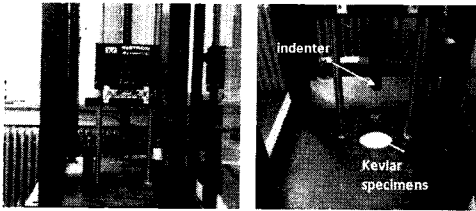


Fig. 2 Stab resistance test setup.

전단농화유체가 함침된 Kevlar 시편크기는 300mm × 300mm 이며 방검 및 방침 실험용 후면재 (Backing material) 위에 얹어 놓은 후 폴리에틸렌 테이플을 사용하여 양 끝단을 고정하였다. 시편의 위치고정을 위해 사용한 폴리에틸렌 테이플의 접착력은 방검 및 방침 시험시 시편에 대한 구속력이 없을 정도로 미미하였다. Fig. 1과 같이 후면재는 NIJ standard 0115에 기술된 재료와 방법을 적용하여 구성하였다. 방침 및 방검 시험시 공업용 송곳 (Engineering spike)과 칼(Engineering blade)의 관통상태를 명확히 확인하기 위해 Neoprene 스폰지 층 사이에 측정종이 (witness paper)를 삽입하였다.

2.2 방검 및 방침 실험

방검 및방침 실험은 Fig. 2와 같은 낙하충격 실험용 Instron Dynatup 8250 모델을 사용하여 수행하였다. Indenter 상부에 위치한5kN의 Load cell을 통해 방검 및 방침 시험시 정량적인 충격하중 측정이 가능하다. 제작된 Kevlar 시편은 구속이 없는 상태(free edge)로 후면재 위에 위치시켰으며 동일한 조건의 실험을 3회 반복하여 수행하였다. 낙하 Indenter assembly의 높이를 0.1m, 0.15m, 0.2m로 각각 조절하여 방검 및 방침 실험에서의 충격에너지를 3 단계로 적용하였다.

Fig. 3과 같이 방침 및 방검 실험을 위한 공업용 송곳 (Engineering spike) 및 칼(Engineering blade)은 NIJ 규격[1]에 명시된 형태로 제작되었으며 송곳은 0.151kg, 칼은0.146kg의 질량을 갖고 있다. 송곳과 칼은 규격에 명시된 경도를 갖도록 열처리된 SUS303 소재를 사용하였으며 칼은 한쪽에만 칼날이 있는 형태를 채택하였다.

충격에너지는 Indenter의 질량과 낙하 높이에 따라서방침 실험시 2.48J, 3.72J, 4.96J 로 실험하였으며, 방검 실험시 2.47J, 3.71J, 4.95J의 3단계로 실험하였다. 방검 실험에서는 직물에 대한 칼날의 방향성에 따른 영향력을 평가하기 위해 직물의 직조 방향과 칼날의 방향을 각각 90도와 45도가 되도록 정렬하여 실험을 수행하였다. 실험 수행 후 후면재의 Neoprene 스폰지 사이에 삽입된 측정종이에 대한 육안 검사를 통해 송곳 및 칼의 관통형태와 깊이를 측정하였다.

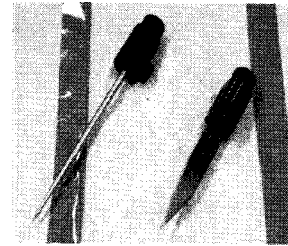


Fig. 3 Engineering spike and Engineering blade.

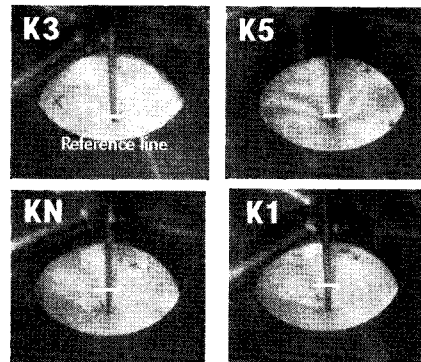


Fig. 4 Photographs of spike drop tests.

3. 실험 결과 및 토론

3.1 방침실험(Puncture Resistance Test) 결과

Fig. 4는 송곳을 사용한 방침실험의 사진을 보여주고 있다. 실험에서 사용한 송곳의 관통깊이를 육안으로 확인하기 위해 송곳 끝에서부터 1inch (2.54mm)의 위치에 참조선(Reference line)을 표시하여 비교하였다. 그림에서와 같이 미처리 직물 (KN)에서는 거의 관통되었으며 100nm 입자가 함침된 직물 (K1)에서는 2/3정도 관통되었고, 300nm와 500nm가 함침된 직물(K3, K5)에서는 약 1/3정도가 관통됨을 보여주고 있다. 또한 100nm 크기 SiO₂ 입자가 함침된 직물(K1)에서는 송곳이 직물을 찌르면서 큰 주름이 나타나는 반면 K3와 K5 시편에서는 직물의 주름이 거의 나타나지 않았다.

Fig. 5는 각 시편의 가장 윗면에 위치하고 있는 Kevlar 직물의 손상형태를 보여주고 있다. 미처리 직물에서는 송곳의 직경과 거의 같은 크기로 관통된 형태를 보이고 있으며 100nm 크기의 입자가 함침된 시편에서는 부분적인 관통형태를 보이며 300nm와500nm 크기의 입자가 함침된 시편의 경우에는 짙은 흔적 정도만 관찰되었다. 이와 같이 함침된 구형 SiO₂ 입자 크기가 방침에 매우 큰 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있다.

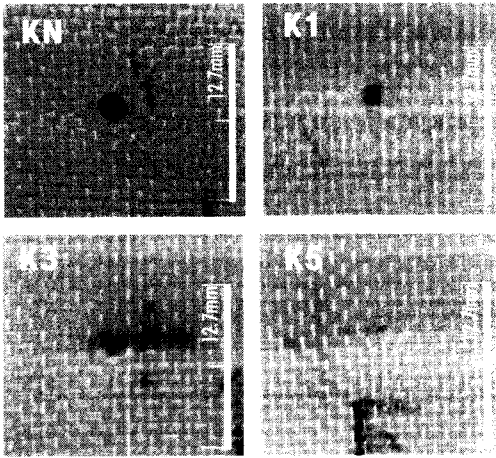
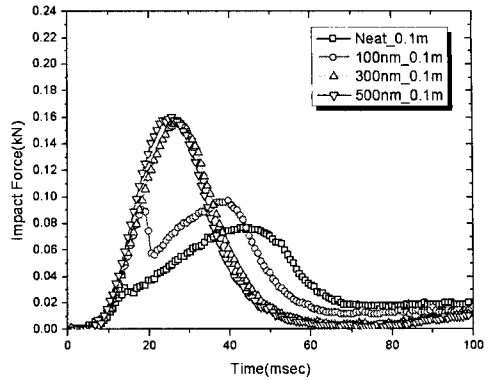


Fig. 5 Photographs of fabric damage of the first layer at $m=2.527\text{kg}$ and $h=0.2\text{m}$.

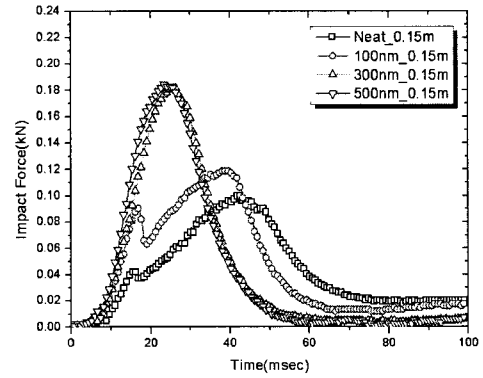
Fig. 6은 시간에 대한 충격하중 곡선으로 STF 함침 및 STF를 구성하고 있는 나노입자의 크기에 대한 영향력을 살펴 볼 수 있다. 충격하중 곡선은 송곳의 상부에 달려있는 Load cell에서 측정된 것으로 시편종류별로 각기 다른 에너지에 따른 하중분포의 경향은 유사함을 보여주고 있다. 300nm와 500nm 입자가 함침된 Kevlar 직물에서 가장 높은 충격하중을 지지하면서 직물의 손상정도도 가장 적게 나타났으며, 100nm 입자가 함침된 직물에서는 에너지 레벨과는 무관하게 모두 90N 근처에서 급격한 하중의 감소가 있는 후 하중을 계속 지지하는 경향을 보여주고 있다. STF를 함침한 8장의 직물 모두에서 12장의 미처리 직물보다 높은 하중을 지지하고 있으며 전체적인 충격흡수 에너지도 큰 것을 확인할 수 있다.

STF 함침으로 인한 직물의 방침특성 향상 메커니즘 및 100nm 크기의 입자가 함침된 직물에서 나타나는 급격한 충격하중의 감소와 시편의 손상정도는 Fig. 7의 개념도를 통해 이해할 수 있다. 'A'는 송곳이 초기에 직물에 접촉한 상태이고, 'B'는 관통이 발생하기 이전에 직물이 변형되면서 하중을 지지하는 상태로 하중곡선이 기울기를 갖고 증가하는 상태이다. 'C'는 상부에 위치한 직물이 관통되어 아래 쪽에 있는 직물들이 하중을 지지하는 상태로 하중곡선에서는 첫 번째 Peak로 나타나며, 'D'는 직물시편 전체가 관통되어가는 상태로 가장 큰 손상범위를 갖게 되고, 'E'는 완전 관통되어 직물이 지지하고 있는 하중이 완전히 릴리스된 상태를 나타내고 있다.

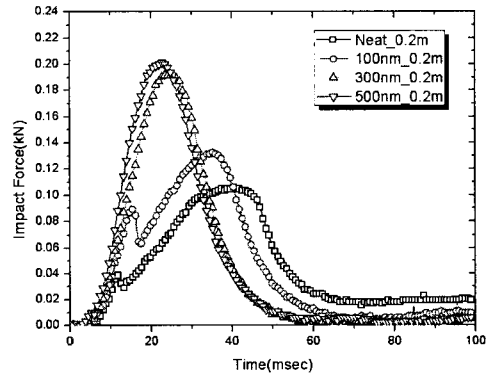
Fig. 7(b)는 송곳이 직물에 낙하되어 관통되는 단계에서의 변형형태를 평면에서 표현한 그림이며 하나의 선은 수백 개의 섬유(filament)로 구성된 안(Yarn)을 나타낸다. 미처리 직물에서는 'B' 단계가 충격하중분포에서 매우 적은 부분을 차지하며



(a)



(b)



(c)

Fig. 6 Time vs. impact force curves for spike drop tests (a) at $h=0.1\text{m}$, 2.48J (b) at $h=0.15\text{m}$, 3.72J (c) at $h=0.2\text{m}$, 4.96J

평면에서의 변형은 안들이 송곳의 끝을 지지하지 못하고 좌우로 넓게 벌어지면서 관통되는 'I'와 같은 변형을 보여주고 있다. 반면에 STF를 함침한 직물에서는 전반적으로 안들이 STF

의 전단농화현상으로 인해 상호작용을 하면서 송곳의 끝을 지지하여 'B'의 단계가 충격하중분포에서 많은 부분을 차지하게 된다. 100nm 크기의 입자가 함침된 시편에서는 'II'와 같이 송곳 끝을 지지하는 섬유 일부가 손상을 입으며 송곳을 관통시켜 하중곡선의 중간에 Peak를 형성하게 된다. 300nm와 500nm 크기의 입자로 구성된 STF를 함침한 시편에서도 'III, IV'와 같은 패턴의 섬유 손상이 관찰되지만 송곳을 관통시킬 만큼의 손상이 발생하지 않아 하중곡선의 급격한 감소 없이 지속적으로 증가하다 릴리스되는 경향을 보여지게 된다.

이와 같은 현상은 송곳의 충격부위를 확대한 Fig. 8에서도 확인할 수 있다. 미처리 Kevlar 직물인 KN에서는 안이 송곳의 끝을 지지하기 보다는 뾰족한 송곳 끝에 밀려 쉽게 좌우로 벌어지면서 섬유의 손상이 많이 나타나는 않았다. 반면에 100nm 크기의 입자가 함침된 K1 시편의 경우에는 섬유의 손상이 송곳의 끝이 닿는 부위에 심하게 나타났으며 K3나 K5 시편보다 손상범위가 넓게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 송곳 끝이 찌르는 위치에 따라 경향은 다소 다르게 나타날 수 있지만 손상범위가 K1 시편에서 다른 시편에서보다 넓게 나타났다. 300nm와 500nm 크기의 입자를 함침한 시편에서는 비교적 유사한 경향이 나타났다.

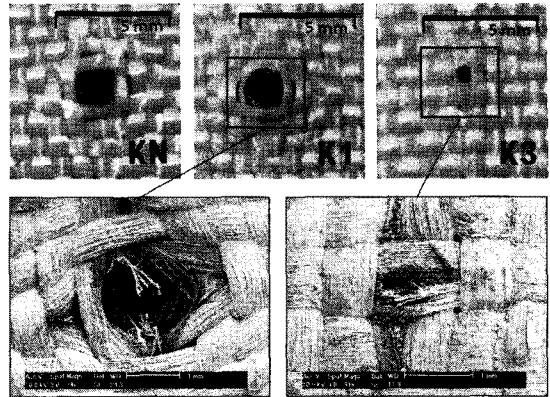


Fig. 8 Photographs and SEM images of the rear surface of the first layer at $n=2.527\text{kg}$ and $h=0.2\text{m}$.

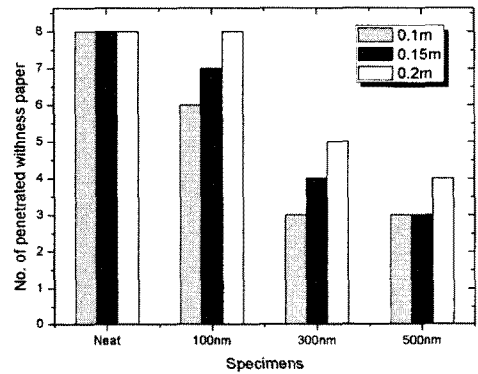


Fig. 9 Number of penetrated papers after spike drop tests.

Fig. 9는 방침실험 후 시편의 후면재에 삽입한 측정종이가 관통된 숫자를 보여주고 있다. 12층이 적층된 미처리 직물은 측정가능한 8장 모두 관통되었으나 STF를 함침한 8장의 직물에서는 이보다 적은 관통수를 보여주었으며, 300nm와 500nm 크기의 입자가 함침된 시편에서 좀더 적은 관통수가 확인되어 우수한 방침특성을 갖고 있음을 보여 주었다.

이와 같은 STF를 구성하는 나노 입자크기의 영향력은 기존 연구[8]의 결과와 함께 그 메커니즘을 이해할 수 있다. 연구결과에 의하면 STF를 함침한 Kevlar 직물에서 안의 Pull-out을 위한 하중과 에너지가 미처리 시편에 비해 크게 필요하며 특히, 100nm 크기의 SiO₂ 입자가 함침된 직물에서 이보다 큰 입자가 함침된 직물에서보다 큰 Pull-out 에너지가 소모되었다. 이는 안과 안사이, 섬유와 섬유사이에서 STF의 전단농화현상이 발생하여 상호작용력이 증가하게 되며, 결과적으로 마찰력의 증가로 나타나 직물내부에서 충격에너지의 효율적 분산을 돕게 되어 우수한 충격특성을 보이게 되는 것이

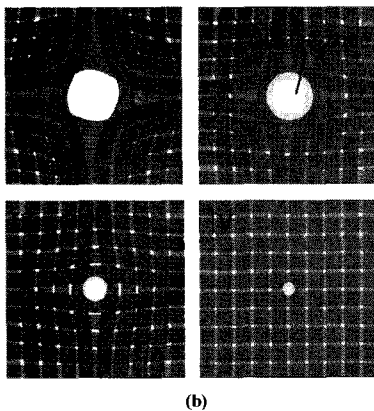
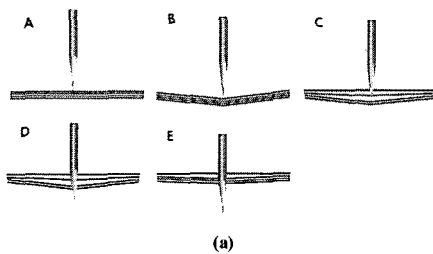


Fig. 7 Schematic of (a) the stages of puncture process and (b) in-plane fabric deformation

다. 100nm 크기의 입자가 함침된 시편에서 발생하는 섬유 손상은 이러한 직물내부 안 사이의 마찰력 증가로 인한 Pull-out의 역재로 송곳 끝이 닿는 섬유에서 하중이 집중되어 Fig. 8에서와 같이 섬유의 파손이 발생되고 이러한 파손으로 주변의 안이 밀려나가 부분적인 관통현상을 보이게 되는 것이다. 반면에 300nm, 500nm 입자가 함침된 시편에서는 전단농화현상으로 인한 안사이의 상호작용으로 인해 Pull-out 역재가 일어나긴 하지만, 그 영향력이 K1 시편에 비해 크지는 않아 송곳이 관통될 정도의 섬유파손이 발생하지는 않았다. 전반적으로 STF를 함침한 시편에서 우수한 방침특성이 나타났으며 입자크기에 의한 영향력이 뚜렷이 나타났다. 이러한 입자크기의 영향력은 단순히 입자의 크기만을 고려하기 보다는 입자의 충전율(Add on wt%)을 함께 고려하여야 한다. 기존 연구[3,4]에 의하면 STF 함침 직물의 방탄특성은 충전율에 따라 큰 영향을 받으며 충전율이 높을수록 우수한 특성을 보인다고 하였다. 따라서 입자 충전율과 함께 적절한 입자 크기의 선정이 우수한 방침특성을 결정하는 중요한 요소이다.

3.2 방검 실험(Cutting Resistant Test) 결과

Fig. 10은 칼을 사용한 방검실험의 사진을 보여주고 있다. 미처리 Kevlar 직물과 STF 함침 직물에서 거의 유사한 현상과 동일한 깊이로 관통되었음을 보여주고 있다.

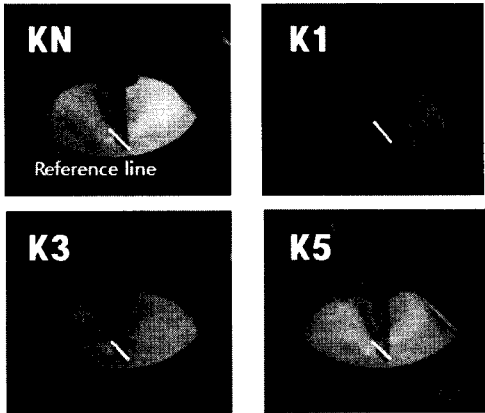


Fig. 10 Photographs of knifedrop tests.

Fig. 11은 방검실험을 수행한 후 직물의 손상형태를 보여주고 있다. 모든 시편에서 유사한 절단현상이 나타났으며 STF를 함침한 시편에서 오히려 깨끗하게 섬유의 안이 절단되었음이 관찰되었다. 칼날의 방향에 따른 영향력을 확인하기 위해 45도의 각도로 Kevlar 직물에 칼날을 낙하시킨 시편에서도 거의 유사한 절단현상이 나타났다.

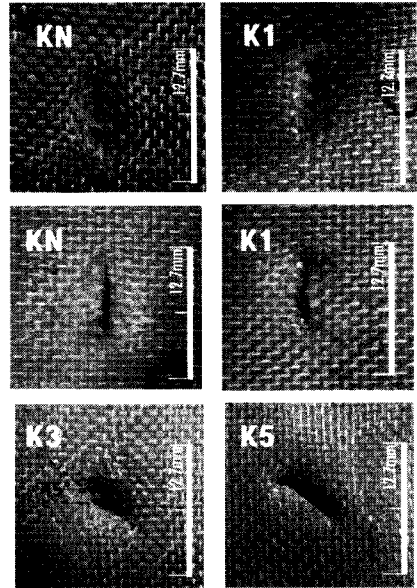


Fig. 11 Photographs of fabric damage of the first layer at $m=2.527\text{kg}$ and $h=0.2\text{m}$.

이러한 방검 실험에서 관통의 단계는 Fig. 12의 개념도로 설명할 수 있다. 'A'는 칼날의 끝이 직물에 접촉한 상태이고 'B'와 'C'는 칼날이 직물층을 차례로 절단하며 관통되는 상태를 보여주고 있으며 'D'는 완전 관통된 상태를 나타낸다. 이와 같이 방검실험에서는 방침실험에서와 같이 직물의 안들이 침입하는 충격자를 지지하는 단계가 없이 바로 칼날에 의해 절단이 되면서 관통되는 특성을 보여주고 있다.

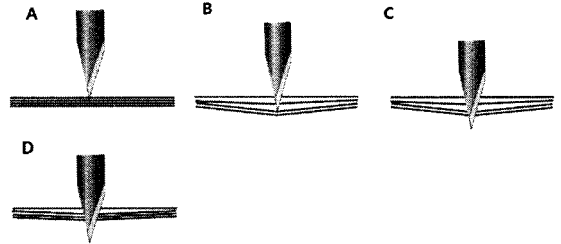


Fig. 12 Schematic of the stages of cutting process.

Fig. 13은 방검실험에서의 시간에 대한 충격하중 곡선을 보여주고 있다. Fig. 13(a)는 칼날방향이 안의 직조방향과 수직일 때의 시편별 충격하중곡선을 보여주고 있으며 Fig. 13(b)는 직조방향과 수직일 경우와 45도의 각도로 낙하하는 경우의 하중곡선을 비교해서 보여주고 있다. 각 시편 별로 충격하중분포의 차이가 거의 나타나지 않으며 칼날방향에 대한 영향력도

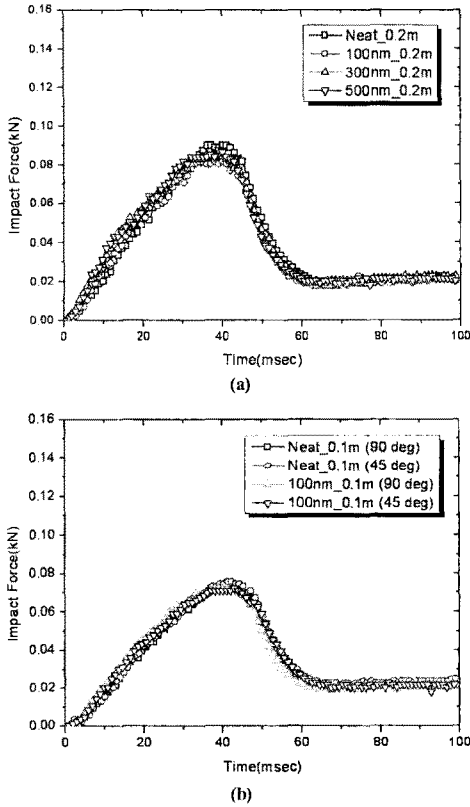


Fig. 13 Time vs. impact force curves for knife drop tests (a) perpendicular blade orientation to woven direction at h=0.2m, 4.95J (b) 45° blade orientation to woven direction at h=0.1m, 2.47J.

나타나지 않았다. 충격하중의 크기를 방침실험과 비교해 보면 현저히 작은 하중을 지지하며 하중곡선의 급락이 없는 것으로 보아 개별적인 직물층이 칼날의 침투에 거의 저항하지 못하고 순차적으로 절단된 것으로 보인다.

Fig. 14는 관통된 층정종이의 숫자를 나타내고 있으며 STF의 함침으로 인한 영향력이 매우 미세하게 나타나고 있다. STF의 함침으로 인한 Kevlar 섬유층의 절단 저항성에는 큰 영향력이 없으며 또한 입자 크기에 의한 영향력도 크게 나타나지 않음을 확인할 수 있다. 미세하게 나타나는 영향력은 칼날이 침투될 때 실험에 사용된 칼의 끝은 방침실험에 사용된 송곳과 같은 침형태로 되어 있기 때문에 적용된 직물을 절단하는 단계(Fig. 12 'B')에서 아랫쪽에 위치한 일부 층의 직물에서 STF의 전단능화현상이 충격하중의 일부분을 흡수하는 것으로 판단된다. 따라서, STF의 함침 Kevlar 직물의 방검특성을 보완하기 위해서는 칼날의 초기 침투를 어느 정도 저지하도록 직물의 표면층을 보강하면 후면에 위치한 직물들 내부에

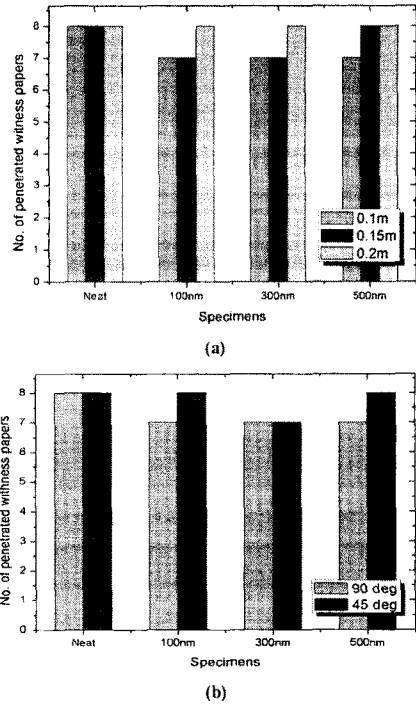


Fig. 14 Number of penetrated papers after knife drop tests (a) perpendicular blade orientation to woven direction at different drop height (b) different blade orientation to woven direction at h=0.1m, 2.47J

함침된 STF의 전단능화현상이 충격에너지를 분산시켜 효율적으로 방검층을 구성할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 방탄소재로 사용되는 Kevlar 직물에 전단능화 특성을 갖는 구형 SiO₂ 입자를 함침시켜 방검 및 방침 특성을 실험적으로 평가하였다. STF의 함침에 의한 영향력과 STF를 구성하는 나노 SiO₂ 입자 크기의 영향력을 관찰하기 위해 100nm, 300nm 및 500nm의 입자크기를 갖는 SiO₂를 50~60wt%의 충진율을 갖도록 함침시켜 방검 및 방침 시험을 수행하였다. 송곳을 사용한 방침실험에서는 12장의 미처리 직물에 비해 STF를 함침한 8장의 Kevlar 직물에서 현저하게 우수한 방침 특성을 확인할 수 있었다. 미처리 Kevlar 직물에서는 끝이 뾰족한 송곳의 침투를 저항하는 특성은 거의 나타나지 않았으며 쉽게 안들이 좌우로 밀려 송곳의 관통을 허용한 반면 STF를 함침한 Kevlar 직물에서는 함침된 STF의 전단능화 현상으로 인한 안의 Pull-out 억제 및 직물을 구성하는 안사이

의 마찰력의 증가와 같은 상호작용의 증가로 송곳의 침투를 견고하게 저지하는 특성을 보여주었다. 이러한 전단농화현상으로 인한 양사이의 마찰력의 증가 정도는 입자의 충전율 뿐 아니라 입자의 크기에 의해 지배되며 100nm 입자크기에서는 이러한 마찰력의 증가가 직접 송곳 끝에 닿게 되는 섬유 부위에 응력집중을 초래하여 미처리 직물에 비해 초기에 손상될 수 있음을 확인하였다. 이러한 손상범위는 300nm 및 500nm 크기입자를 함침한 시편에서 적게 나타났으며 결과적으로 좀더 우수한 방침특성을 보여주었다. 한쪽에 칼날을 가진 칼을 사용한 방침 실험에서는 STF의 함침으로 인한 영향력 및 입자크기에 의한 영향력은 관찰되지 않았으며 찌르는 칼날이 직물의 직조방향과 이루는 각도도 방침특성에 큰 영향력이 없음을 확인하였다. 칼이 직물을 절단하면서 관통되는 과정의 분석을 통해서 직물의 표면층을 보강하여 칼날이 충격 초기에 직물을 절단하며 침투하는 것을 저지한다면 후면에 위치한 직물내의 STF로 인한 전단농화현상이 에너지 흡수를 증가시켜 효율적으로 방침층을 구성할 수 있을 것으로 판단된다. 우수 한방탄특성과 더불어 향상된 방침 및 방검 특성을 가진 다목적 보호복의 조기개발을 위해 이와 같은 실험결과를 토대로 연구방향을 설정하여 추진할 계획이다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소 민군겸용기술센터의 지원으로 수행된 연구과제(07-DU-MP-02)로 지원에 대해 진심으로 감사드립니다.

참고문헌

- 1) National Institute of Justice, "Stab Resistant of Personal Body Armor," NIJ Standards-0115.00, Sept. 2000.
- 2) M. J. Decker, R.G. Erges, E.D. Wetzel, and N.J. Wagner, "Low Velocity Ballistic Impact Properties of Shear Thickening Fluid (STF)-fabric Composites," *In Proceedings of the 22th International Symposium on Ballistic*, 2005, pp. 777-784.
- 3) V.B.C. Tan, T.E. Tay, and W.K. Teo., "Strengthen Fabric Armour with Silica Colloidal Suspensions," *International Journal of Solids and Structure*, Vol. 42, 2005, pp. 151-157.
- 4) Y. S. Lee, E. D. Wetzel, and N. J. Wagner, "The Ballistic Impact Characteristics of Kevlar Woven Fabrics Impregnated with a Colloidal Shear Thickening Fluid," *Journal of Materials Science*, Vol. 38, 2003, pp. 2825-2833.
- 5) M. J. Decker, C. J. Halbach, C. H. Nam, N. J. Wagner, and E. D. Wetzel, "Stab Resistance of Shear Thickening Fluid (STF)-treated Fabrics," *Composite Science and Technology*, Vol. 67, 2007, pp. 565-578.
- 6) J. M. Houghton, B. A. Schiffman, D. P. Kalman, E. D. Wetzel, and N. J. Wagner, "Hyperdermic Needle Puncture of Shear Thickening Fluid (STF)- Treated Fabrics," *In Proceedings of SAMPE*, Baltimore, MD, June 2007.
- 7) H. Mahfuz, F. E. Clements, and J. Stewart, "Development of Stab Resistant Body Armor using Fumed SiO₂ nanoparticles Dispersed into Polyethylene Glycol(PEG) through Sonic Cavitation," *In Proceedings of 2006 NSTI Nanotechnology Conference*, Vol. 1, 2006, pp. 358-361.
- 8) 이복원, 이성현, 김천곤, 윤병일, 백종규, "전단농화유체를 함침한 케블라 직물의 저속충격 거동 및 마찰특성 연구," *한국복합재료학회*, Vol. 21, 2008, pp. 15-24.