

---

## 전단농화유체를 함침한 케블라 직물의 저속충격 거동 및 마찰특성 연구

이복원\*, 이성현\*, 김천곤\*, 윤병일\*\*, 백종규\*\*

### A Study on the Low Speed Impact Response and Frictional Characteristics of Shear Thickening Fluid Impregnated Kevlar Fabrics

Bok-Won Lee\*, Song-Hyun Lee\*, Chun-Gon Kim\*, Byung-Il Yoon\*\*, Jong Gyu Paik\*\*

#### ABSTRACT

In this study, shear thickening fluid (STF) filled with rigid nano silica particles was impregnated in plain woven Kevlar fabrics to improve the impact resistance performance. The nano silica particles with an average diameter of 100nm, 300nm, and 500nm were used to make shear thickening fluid to estimate the effect of particle size on the impact behavior of STF impregnated Kevlar fabrics. The yarn pull-out and frictional tests were conducted to estimate the effect of impregnated STF on the frictional characteristics. The test results showed that the friction forces were dramatically increased at the STF onset shear strain rates that were measured in preliminary rheology tests. The low speed impact tests were performed using the drop test machine. The results showed that the impregnated STF improved the impact resistance performance of the Kevlar fabrics in terms of the impact energy absorption and the deformation. It has been shown through tests that the impregnated STF affects the interfacial friction which contributes to improve the energy absorption in the Kevlar fabrics. Especially, the impregnation of the STF with the smaller particle size into the Kevlar fabrics showed the better performance in impact energy absorption.

#### 초 록

본 연구에서는 Kevlar 직물에 전단농화 특성을 갖는 나노 실리카 입자를 함침시켜 저속충격 특성 및 마찰특성 실험을 수행하였다. 나노입자의 크기에 따른 영향력을 평가하기 위해 100nm, 300nm, 500nm 직경크기의 구형 실리카 입자를 충전한 전단농화유체를 제작하였으며 유변물성 시험을 통해 전단담화 현상 및 급격히 점성이 증가하는 전단농화현상을 확인하였다. 전단농화유체를 Kevlar 직물에 함침시켜 저속 낙하 충격시험을 수행한 결과 나노입자 처리를 한 Kevlar 직물에서 우수한 충격흡수 특성을 보였으며 특히 함침된 나노입자의 크기가 작을수록 충격흡수량이 증가하였고 변형의 양도 가장 적게 나타났다. Kevlar 직물 내에서의 양의 Pull-out 실험과 직물간 마찰력 실험을 통해 나노입자의 크기가 작을수록 전단농화 현상으로 인한 마찰력의 증가가 더욱 크게 나타남을 확인하였다. 이러한 마찰력의 증가가 양의 Pull-out 에너지를 증가시키게 되어 주요 충격흡수 메커니즘으로 작용하게 되는 것이다.

**Key Words:** 전단농화유체(Shear Thickening Fluid), 액체방탄재(Liquid Body Armor), 양 뽑힘(Yarn Pull-out), 케블라(Kevlar), 입자크기(Particle Size)

---

\* KAIST 항공우주공학과 대학원

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

\*\* 국방과학연구소 기술연구본부

## 1. 서론

아라미드 계열의 고강도 및 고강성의 평직 섬유는 여러 분야의 방호소재로 널리 사용되고 있다. 특히, 방탄 및 방검용 개인방호복 및 항공기나 자동차의 외부 충격에 대한 보호용 구성품에 널리 사용되어 오고 있다. 이러한 고강도 직물의 충격특성에 대한 연구가 지속적으로 수행되어 오고 있으며, 충격특성의 이해를 위한 실험적, 해석적 연구도 고강도 섬유개발과 함께 진행되고 있다. 최근 들어 미육군 연구소(ARL)와 Delaware 대학에서 고강도 Kevlar 직물의 충격흡수 특성을 향상시키기 위해 전단농화유체(STF: Shear Thickening Fluid)를 적용한 액체방탄재(LBA: Liquid Body Armor)에 대한 기초 연구들[1-4]을 수행하고 있다. 전단농화유체를 고강도 직물에 함침시켰을 경우 평상시에는 직물 고유의 유연성에 크게 영향을 미치지 않지만 전단농화유체의 유변학적 특성에 의해 외부에서 일정한 크기 이상의 전단변형이 작용하게 되면 점성이 급격히 증가하여 고강도 직물의 충격흡수 특성을 향상시키게 된다. 따라서 이를 착용한 병사의 기동성에 저해되지 않아 전사환경에서의 생존성이 증가하게 된다. 그러나 아직 전단농화유체의 성질 발현이나 다양한 인자들과 관련된 충격흡수 메커니즘을 명확히 규명하기 위해서는 많은 연구가 필요한 실정이다. Maranzano 등 [5]은 나노 실리카 입자의 크기가 전단농화특성에 미치는 영향력에 대한 평가를 위해 유변물성시험을 수행하였고, 입자가 작을수록 낮은 전단변형률에서 전단농화현상이 개시됨을 보여주었다. Kirkwood 등 [6,7]은 Kevlar 직물의 방탄특성에서 가장 중요한 메커니즘은 양의 Pull-out에 의한 충격에너지 흡수이며 이에 대한 실험적 연구를 수행하였다. Duan 등 [8]은 고속충격에 있어서 Kevlar 직물내의 마찰력의 영향이 충격흡수 메커니즘에 미치는 영향력에 대해 수치해석적인 연구를 수행하였다. 최근 들어 고속충격시험 장비의 성능 및 측정기술이 발전되어 오고 있는 있지만 아직 방탄충격시험에서 측정할 수 있는 데이터에는 한계가 있다. 이에 비해 저속충격시험은 다양한 데이터를 정확하게 측정할 수 있는 시험환경이다. 본 연구의 목적은 전단농화유체를 구성하는 나노입자의 크기가 저속충격특성 및 마찰특성에 미치는 영향력을 정량적으로 평가하여 고속방탄에서의 충격흡수 메커니즘의 이해도를 향상시키기 위함이다. 나노입자의 영향력 평가를 위해 100nm, 300nm, 500nm의 직경 크기를 갖는 구형 실리카를 사용하여 전단농화유체를 제작하였으며 Kevlar 직물에 전단농화유체를 함침시켜 저속 충격시험을 수행하고 충격흡수의 주요 메커니즘인 양 Pull-out 실험 및 직물

에 대한 마찰력 실험을 수행하였다. 본 연구는 개인방호복 설계 및 개발을 위한 기초연구로서 전단농화유체를 함침한 방호복 및 방탄복 설계 인자들에 대한 충격 거동에서의 역할을 충분히 이해함으로써 최적화된 방호복 설계 및 개발을 목표로 하고 있다.

## 2. 저속 충격 실험

### 2.1 시험 시편 제조

#### 2.1.1 전단농화유체(Shear thickening fluid) 제조

Kevlar 직물의 유연성을 유지하면서 충격특성을 향상시키기 위해 본 연구에서는 구형 나노입자가 충전된 전단농화유체를 사용하였다. Non-newtonian 특성을 갖는 전단농화유체의 전단농화 효과(Shear thickening effect)를 충격흡수 기구로 사용하기 위해서이다. Fig. 1은 전단농화유체의 일반적인 유변특성을 보여주고 있다. 외부의 자극이 없는 상태에서는 유체상태로 존재하여 직물의 유연성을 저하시키지 않으나 외부 충격에 의한 전단변형률이 발생하면 점성이 작아지는 전단담화(Shear thinning) 현상이 발생하다가 임계 전단 변형률(Onset point)에 도달하면 입자들이 순간적으로 집중되어 점성이 급격히 증가하는 전단농화(Shear thickening) 현상이 발생하게 된다.

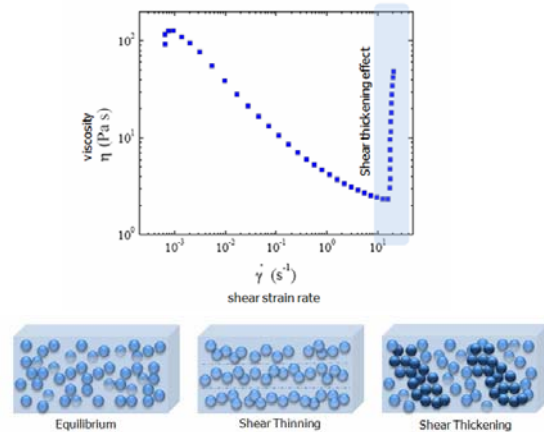
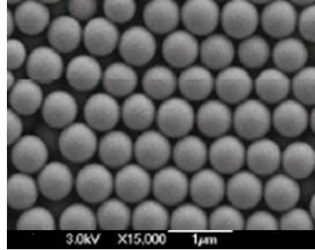


Fig. 1 Schematic diagram of rheology property of STF

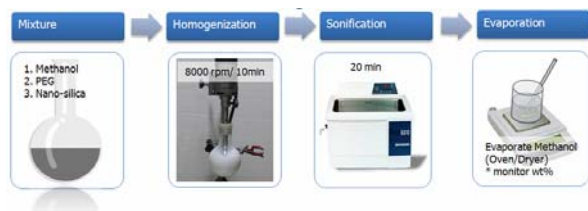


**Fig. 2 SEM image of nano-silica particle (KE-P 30)**

전단농화유체를 제조하기 위해 Seahoster KE-P 계열의 구형 나노 실리카 입자를 사용하였다. 나노 실리카 입자의 크기는 직경 100nm, 300nm, 500nm 이다. Fig. 2는 구형 나노 실리카 입자의 SEM 사진을 보여주고 있으며 Table 1은 제조사인 Nippon Shokubai사에서 제공된 나노 실리카 입자의 특성을 나타내고 있다. 나노 실리카 입자가 충전된 고농축상의 유체를 만들기 위해 낮은 휘발성과 열 안정성을 갖는 PEG(Poly-Ethylen Glycol)을 적용하였다. 또한, 유체에서의 실리카 입자의 분산성 향상을 위해 휘발성이 좋은 메탄올(Methanol)을 희석제로 사용하였다. Fig. 3은 전단농화 유체의 제조과정을 보여주고 있다.

**Table 1 Specification of nano-silica particles**

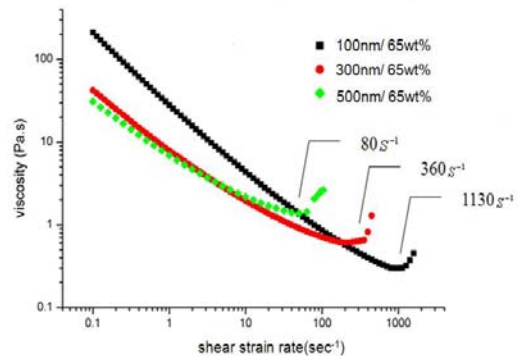
Property	KE-P 10	KE-P 30	KE-P 50
Average diameter (μm)	0.11 (0.08~0.14)	0.28 (0.27~0.34)	0.54 (0.50~0.60)
Surface area (m <sup>2</sup> /g)	40~60	20~40	10~20
gravity(g/cm <sup>3</sup> )	ca. 1.9		



**Fig. 3 Schematic diagram of the STF mixture**

나노 실리카 입자를 먼저 메탄올에 분산시킨 후 PEG를 첨가하여 재분산 시킨다. 전단농화유체를 구성

하는 나노입자의 분산성과 유체의 균질성을 향상시키기 위해 균질기(Homogenizer)를 이용하여 8000 rpm으로 10분간 분산시킨 후 초음파 처리(Sonification)를 수행하였다. 이렇게 제조된 전단농화 유체의 유변물성 측정을 위해 ARES(Advanced rheometric expansion system) V3.00를 사용하여 전단변형률에 따른 점성의 변화를 측정하였다. Fig. 4는 나노 실리카 입자의 크기별로 측정된 전단변형률과 점성의 관계를 보여주고 있다. 나노 실리카 입자의 충전분율이 65%인 경우 입자의 크기별로 전단변형률이 증가함에 따라 점성이 낮아지는 전단담화 현상과 임계전단 변형률에서 점성이 급격히 증가하는 전단농화 영역이 관찰되었다. 입자의 크기가 작을수록 전단농화 현상 개시점(Onset point)이 되는 전단변형률의 크기가 증가함을 확인하였다.



**Fig. 4 Shear strain rate vs. viscosity plot of STF**

### 2.1.2 Kevlar 직물 시편 제작

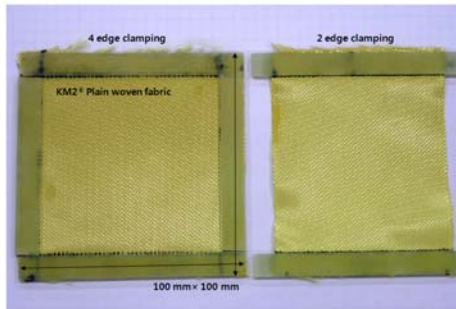
본 연구에서는 Kevlar 섬유계열 중 비강성과 인성을 향상시킨 KM2<sup>®</sup> 섬유를 사용하였다. KM2<sup>®</sup> 섬유는 현재 미육군 방호복의 소재이기도 하다. 직조방식은 일반 평직(Plain woven)형태를 하고 있으며 600 denier의 조밀도를 갖고 있다. Table 2와 3은 제조사 DuPont<sup>TM</sup> 에서 제공된 KM2<sup>®</sup> 양과 직물의 물성치를 보여주고 있다. 제조된 전단 농화 유체를 KM2<sup>®</sup> 직물에 함침하기 위해 중량분율이 약 50wt%가 되도록 약 2시간 동안 직물을 유체에 담가두어 충분히 흡수시킨다. 이렇게 제작된 시편을 100mm×100mm의 크기로 커터를 사용하여 절단하였으며 엇지의 고정을 위해 플라스틱 스트립을 접착하여 4 엇지 고정시편과 2 엇지 고정시편을 Fig. 5와 같이 제작하였다. 시편의 두께는 모두 약 0.23mm로 전단농화유체를 함침하여도 두께 변화는 관찰되지 않았다.

**Table 2 Property of Kevlar KM2® yarn**

Property	Values
Linear density(dtex)	667
Tenacity(cN/tex)	247.1
Breaking strength(N)	165
Elongation at break(%)	3.80
Modulus(cN/tex)	5560

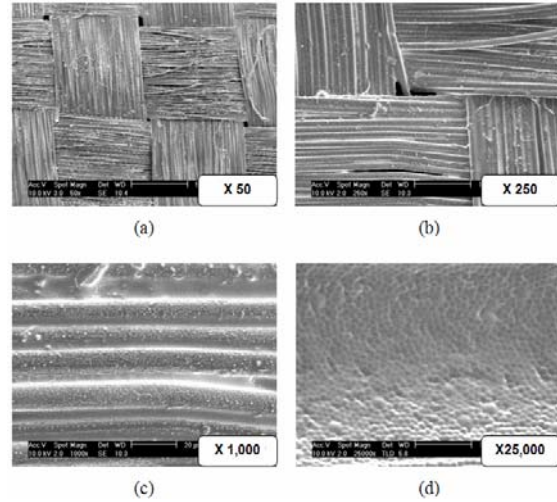
**Table 3 Property of Kevlar KM2® fabric**

Property	Values
Yarn count(denier)	600
Fabric count(yarn/inch)	28×28
Areal density(g/cm <sup>2</sup> )	149
Thickness(mm)	0.2
Fabric system	Plain weave



**Fig. 5 Plain woven fabric specimen for drop impact Testing**

Fig. 6은 Kevlar 직물의 공극에 함침된 나노 실리카 입자의 분산성을 확인하기 위해 SEM으로 촬영한 사진을 보여주고 있다. Fig. 6(a)와 (b)는 Kevlar 직물 표면과 안 사이를 촬영한 저배율 사진으로 표면의 공극과 안과 안사이를 실리카 입자들이 균일하게 채우고 있으며 (c)와 (d)는 fiber filament 사이를 촬영한 고배율 사진으로 구형의 실리카 입자들이 filament의 표면과 공극 사이에 균일하게 분산되어 있음을 보여주고 있다.



**Fig. 6 SEM images of STF impregnated Kevlar fabric**

## 2.2 저속 낙하 충격 실험

전단농화유체가 함침된 Kevlar 직물의 충격특성을 확인하기 위해 낙하충격 실험을 수행하였다. 나노입자의 크기별로 함침된 시편과 나노입자의 영향력을 확인하기 위해 PEG만을 함침한 시편을 포함하여 Table 4와 같이 모두 10가지의 시편을 제작하였다. 함침된 유체의 직물에 대한 중량분율은  $50 \pm 3\text{wt}\%$  가 되도록 제작하였으며 각 시편에 대해 3번의 반복시험을 수행하였다. Fig. 7은 저속 낙하충격 시험에 사용된 장비 Instron Dynatup 8250과 시편고정용 지그를 보여주고 있다. 시편 고정용 지그는 공기압 고정방식으로 300 psi의 공기압으로 시편을 고정하여 충격 시 시편의 미끄러짐을 최소화하도록 하였다.

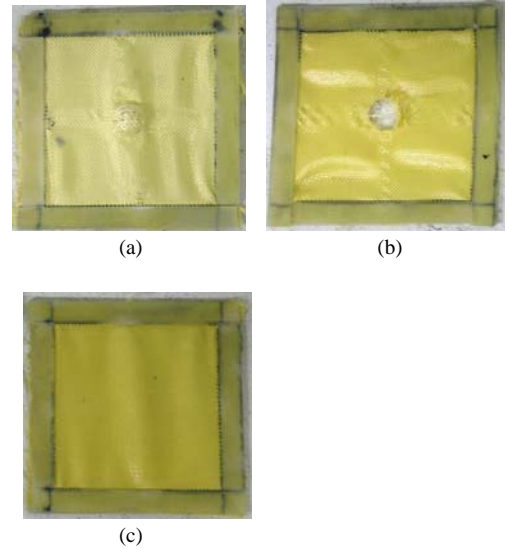
**Table 4 Specimen designation**

Specimen	4 clamp	Specimen	2 clamp
<b>S1</b>	Neat fabric	<b>S6</b>	Neat fabric
<b>S2</b>	PEG	<b>S7</b>	PEG
<b>S3</b>	STF 100nm	<b>S8</b>	STF 100nm
<b>S4</b>	STF 300nm	<b>S9</b>	STF 300nm
<b>S5</b>	STF 500nm	<b>S10</b>	STF 500nm



**Fig. 7 Drop testing machine(Instron Dynatup 8250) and air pressurized jig**

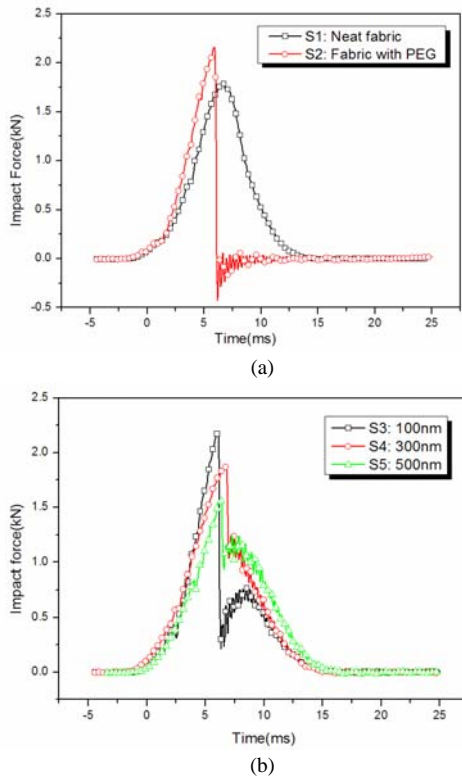
충격자(Indenter)는 반지름 7.54mm의 반구형 팁을 가진 실린더형태를 사용하였고 충격자의 무게는 3.4kg이다. 충격자의 자유낙하 높이 변화를 통해 충격에너지의 크기를 조절하여 시험을 수행하였다. Fig. 8은 4 엣지 고정시편에 대한 낙하충격 시험 후 잔류변형 형태를 보여주고 있다. 충격에너지는  $8.7J \pm 3\%$ 이 적용되었다. Fig. 8(a)는 아무 처리도 하지 않은 Kevlar 시편의 잔류변형을 보여주고 있다. 충격자의 외형과 같이 반구형태의 잔류변형이 충격부위에 나타났으며 충격부위와 에지를 직접적으로 연결하고 있는 안이 Pull-out 되면서 십자형태의 부위에 변형이 발생하고 있음이 관찰되었다. Fig. 8(b)는 케블라 직물에 PEG만을 함침시킨 시편의 변형형태로서 완전히 관통되었으며 충격부위와 에지를 연결하고 있는 안에서 부분적인 변형이 발생함이 관찰되었다. 반면에 Fig. 8(c)와 같이 100nm직경의 나노입자가 충전된 전단농화 유체를 함침시킨 시편의 경우 충격부위에 잔류변형이 거의 발생되지 않았으며 Pull-out된 안도 거의 관찰되지 않았다. 이러한 현상은 300nm 및 500nm의 시편에서도 동일하게 나타났다. PEG 만을 함침한 시편의 경우 PEG가 안과 안 사이 및 filament 사이에서 윤활의 역할을 수행하여 충격발생시 안 사이의 마찰에 의한 충격하중을 분산시키지 못해서 관통된 것으로 보인다. 전단농화유체를 함침한 시편의 경우 충격으로 인해 발생한 전단변형률이 전단농화현상을 개시시켜 안 사이 및 filament 사이에서의 충격하중의 분산을 향상시킨 것으로 보인다.



**Fig. 8 Fabric deformation of the 4 edge clamping specimens after drop impact tests (a) S1: neat fabric (b) S2: fabric with PEG (c) S3: fabric with STF (100nm)**

Fig. 9는 저속낙하 충격시험에서의 시간에 대한 충격하중을 나타내고 있다. Fig. 9(a)는 일반 Kevlar 직물과 PEG만을 함침한 직물의 충격하중을 비교하여 보여주고 있다. PEG만을 함침한 직물의 경우 충격이 진행되면서 관통되기 직전까지 충격하중이 증가하다가 관통 후 급격히 떨어지는 형태를 보이고 있다. 일반 직물의 경우 충격이 진행되면서 충격하중이 증가하여 안이 Pull-out 되고 이와 함께 충격부위가 변형되면서 충격에너지를 흡수하여 최대충격하중 점을 기준으로 대칭적으로 감소하는 형태를 보여주고 있다. 반면에 Fig. 9(b)와 같이 전단농화유체를 함침한 시편의 경우 잔류변형이 발생하지 않았음에도 불구하고 충격하중이 증가하다가 일정 시점에서 급격히 떨어진 후 다시 충격하중을 지지하는 형태를 보이고 있다.

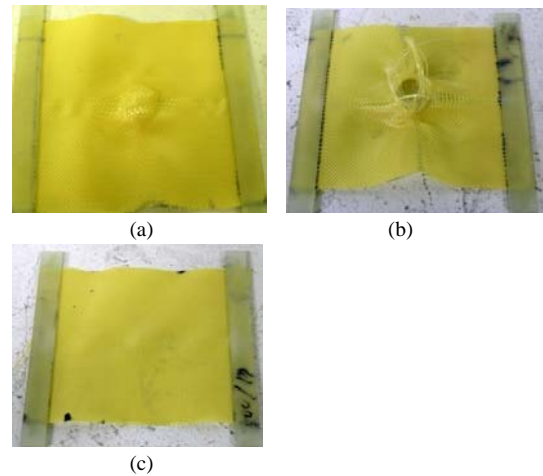




**Fig. 9 Impact force vs. time plot of the 4 edge clamping specimens (a) neat fabric and fabric with PEG (b) fabric with STF**

이러한 거동은 충격이 진행되면서 전단농화현상이 개시되어 증가한 유체의 점성이 직물의 충격하중 지지를 돕다가 최대 충격하중에 도달한 후 충격자의 속도가 떨어지면서 전단농화현상이 릴리스되어 충격하중이 급격히 떨어지는 것으로 보인다. 하중이 떨어진 이후의 일정시점으로부터 전단농화현상이 배제된 직물이 다시 충격을 지지하는 것으로 이러한 충격거동을 이해할 수 있다. 이와 같이 충격특성은 전단농화특성이 발휘되는 영역(최대하중 이전)과 그 이후의 영역(최대하중 이후)으로 구분되어 평가될 수 있다. 낙하충격자가 갖는 낙하충격에너지는 전단농화특성 발휘영역에서 많은 부분 흡수되며, 그 이후의 영역에서는 전단농화현상이 배제된 직물이 남아있는 충격에너지를 지지하게 되는 것이다. 이러한 충격흡수 거동 형태는 다른 나노입자의 크기의 시편에서도 동일하게 나타났으며 나노입자의 크기가 작을수록 전단농화 영역에서의 최대 충격하중이 증가하였다. Fig. 10은 2 엣지 고정시편에 대한 낙하충격 시험 후 잔류변형 형태를 보여주고 있으

며 4 엣지 고정시편과 유사한 변형형태를 보이고 있다. 충격에너지는  $5.3J \pm 3\%$  가 적용되었다. Fig. 11은 2엣지 고정시편의 시간에 대한 충격하중을 보여주고 있다. Fig. 11(a)는 일반 Kevlar 직물과 PEG만을 함침한 직물의 충격하중을 비교하여 보여주고 있으며 Fig. 11(b)는 전단농화유체를 함침한 시편에서의 충격하중을 보여주고 있다. PEG를 함침한 2 엣지 고정시편의 경우는 Fig. 10(b)와 같이 완벽한 관통이 이루어지지 않고 얇이 Pull-out 되다가 끊어지는 파손형태를 보이고 있으며 Fig. 11(a)와 같이 톱니 형태의 충격하중형태를 보여주고 있다. 일반 Kevlar 직물의 경우에는 4 엣지 고정시편과 유사한 충격흡수 거동을 보이고 있다. 반면에 Fig. 11(b)와 같이 전단농화유체를 함침한 시편의 경우 4 엣지 고정시편과 마찬가지로 잔류변형이 발생하지 않았음에도 불구하고 충격하중이 증가하다가 일정 시점에서 급격히 떨어진 후 다시 충격하중을 지지하는 거동을 보이고 있다. 또한, 나노입자의 크기가 작을수록 최대 충격하중이 증가하는 경향이 나타났다.



**Fig. 10 Fabric deformation of the 2 edge clamping specimens after drop impact tests (a) S6: neat fabrics (b) S7: fabrics with PEG (c) S8: fabrics with STF (100nm)**

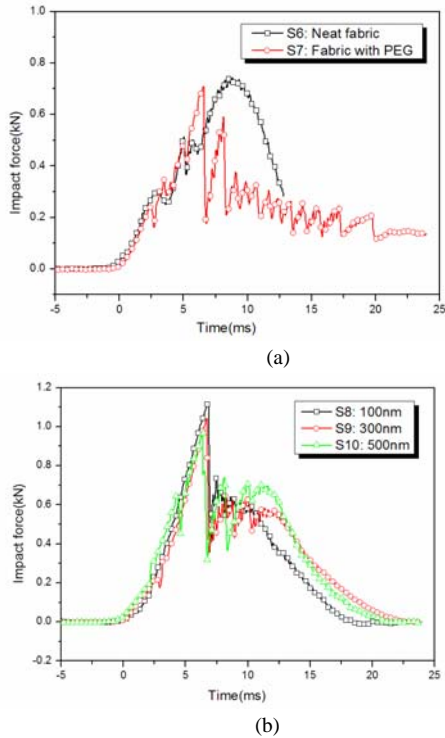


Fig. 11 Impact force vs. time plot of the 2 edge clamping specimens (a) neat fabrics and fabrics with PEG (b) fabrics with STF

### 3. 마찰특성 실험

저속 충격시험을 통해서 전단농화유체를 함침한 Kevlar 직물의 충격특성이 일반 직물에 비해 변형의 정도나 충격흡수 특성이 현저히 우수함을 확인할 수 있었다. 하지만, 전단농화유체가 충격흡수 거동에서 어떠한 메커니즘으로 작용하고 그 주요 인자들에 대한 정량적 분석은 아직 미흡한 실정이다. 본 장에서는 전단농화유체가 함침된 직물에 있어서 주요 인자중의 하나인 마찰력의 증가가 충격흡수 거동에 미치는 영향력을 평가하기 위해 마찰 특성 시험을 수행하였다.

#### 3.1 안 Pull-out 실험

전단농화현상으로 인한 마찰력의 증가가 안의 Pull-out 특성에 미치는 영향력을 알아보기 위해 Fig. 12와 같이 단일층의 직물 내에서 안을 Pull-out하는 실험을 수행하였다. Pull-out 실험은 Instron 8848 (micro tensile test) 장비를 사용하였으며 50mm/min~1400mm/min의

crosshead 속도 범위 안에서 Pull-out 하중을 측정하였다. Fig. 4에서 측정된 나노입자의 크기별 전단농화 개시점(Onset point)의 임계 전단변형률( $\gamma$ )과 안과 안 사이 간격의 거리( $L$ )를 이용해서 Strain velocity gradient 식(1)을 통해 각 시편의 전단농화현상이 개시되는 Onset Pull-out 속도를 계산하여 Table 5에 나타내었다. Kevlar 직물내에 함침된 나노입자의 크기가 작을수록 전단농화 현상이 빠른 속도에서 개시됨을 알 수 있다.



Fig. 12 Yarn pull-out test setup

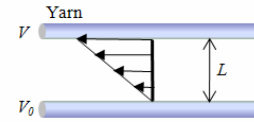


Fig. 13 Strain rate gradient of fluid between yarns

Critical shear strain rate ( $\text{sec}^{-1}$ )

$$\frac{dV}{dL} = \gamma \quad (1)$$

Table 5 Onset pull-out speed of each specimen

Specimen	100nm STF/Kevlar	300nm STF/Kevlar	500nm STF/Kevlar
Speed	1356 mm/min	432 mm/min	96 mm/min

Fig. 14는 안이 Pull-out되는 전형적인 하중형태를 보여주고 있다. 초기에는 위사(weft) 사이에 경사(warp)가 crimping 된 상태로 있다가 Pull-out 되면서 crimping이 풀리며 위사 사이를 통과하기 시작한다. 충분히 crimping이 풀린 후부터 위사 사이를 통과하면서 마찰력이 작용하여 최대하중에 도달했다가 첫 번째 위사를 지난 후 일시적으로 하중이 떨어진 후 두 번째 위사를

통과하면서 다시 하중이 증가하는 하중형태를 보이게 된다. 하중 진폭은 남아있는 위사의 개수에 비례하여 Pull-out이 진행되면서 점차 진폭이 감소하게 된다.

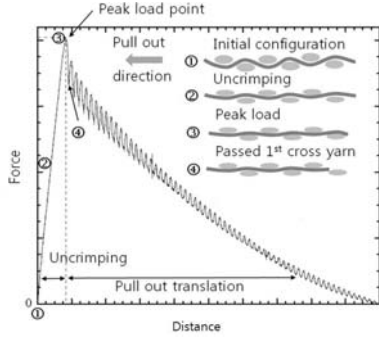


Fig. 14 Diagram of pull-out mechanism

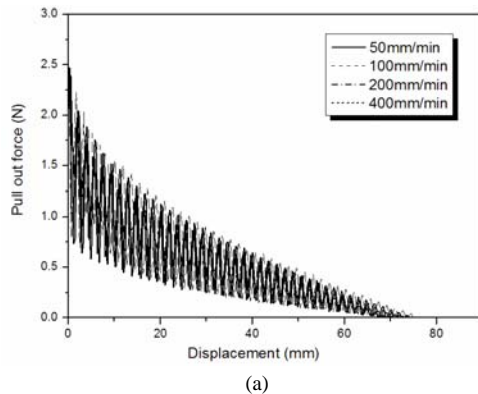
시편마다 crimping의 정도가 서로 상이하므로 각 실험에서의 초기조건을 맞추기 위해 preload 0.1N을 적용하여 crimping에 의한 영향력을 제거하였다. Fig. 15는 나노입자 처리를 하지 않은 Kevlar 직물의 crosshead 속도별 Pull-out 하중을 보여주고 있으며 진폭을 가진 전형적인 Pull-out 하중 스펙트럼을 보이고 있다. 하중 분포는 Pull-out 속도에 따라 서로 유사하여 중첩된 형태를 보이지만 Fig. 15(b)와 같이 수식(2)에 의해 계산된 Pull-out 에너지를 비교해보면 Pull-out 속도가 증가함에 따라 다소 감소하는 경향을 확인할 수 있다.

$$E_p = \int_0^L F_{P(x)} dx \quad (2)$$

Where  $E_p$ : Pull-out energy

$F_p$ : Pull-out force

$x$ : Pull-out distance



(a)

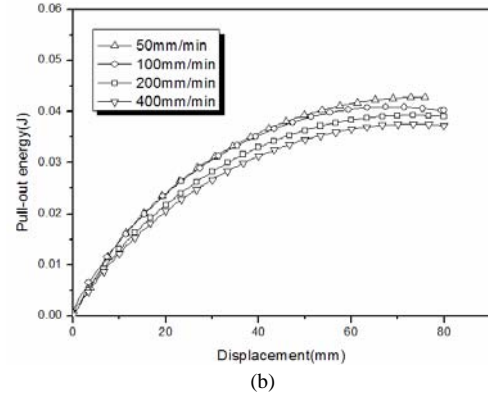
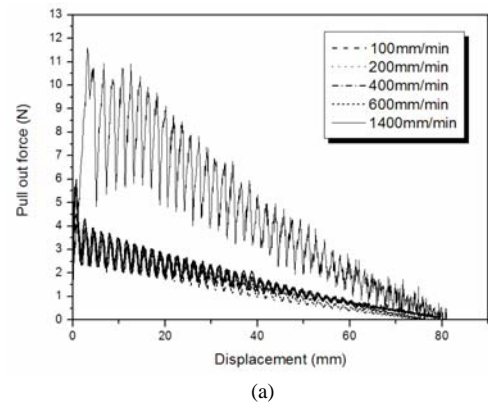


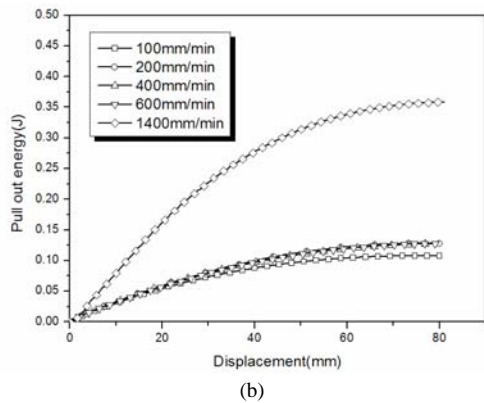
Fig. 15 (a) Pull-out force history and (b) energy curve of neat fabric according to pull-out speed

Fig. 16은 100nm의 직경크기를 갖는 실리카 입자를 함침시킨 Kevlar 직물에 대한 Pull-out 속도별 Pull-out 하중을 보여주고 있다. Fig. 16(a)는 Pull-out 하중분포를 보여주고 있는데 Table 5에서 예측한 100nm 실리카 입자에서의 전단농화 개시속도 이상의 속도인 1400mm/min에서 Pull-out 하중의 급격한 증가현상을 나타내고 있다. 반면에 그 이하의 Pull-out 속도 영역에서는 속도별 영향이 거의 나타나지 않고 있다. 이러한 경향은 Pull-out 에너지 그래프를 확인해 보면 더욱 명확하게 확인할 수 있다. 전단농화현상이 발생할 것으로 예측되는 Pull-out 속도 이상에서는 약 200%이상의 Pull-out 에너지 증가를 보여주고 있다.



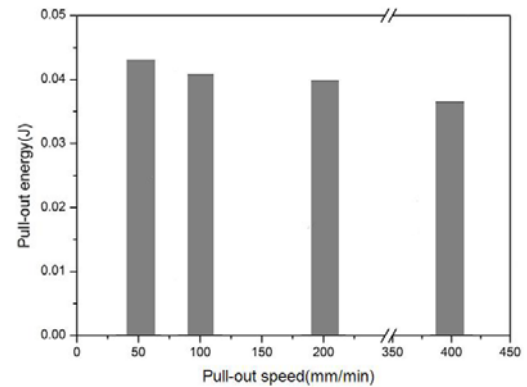
(a)



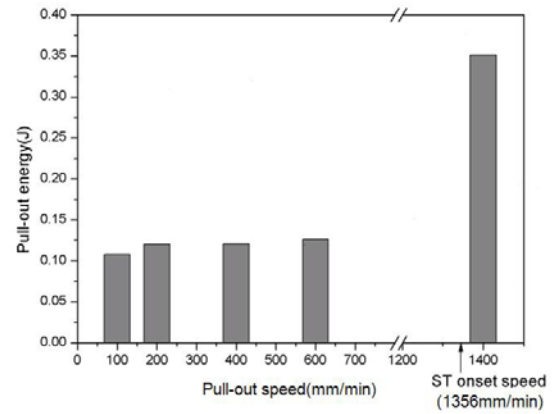


**Fig. 16 (a) Pull-out force history and (b) energy curve of fabrics with STF(100nm) according to pull-out speed**

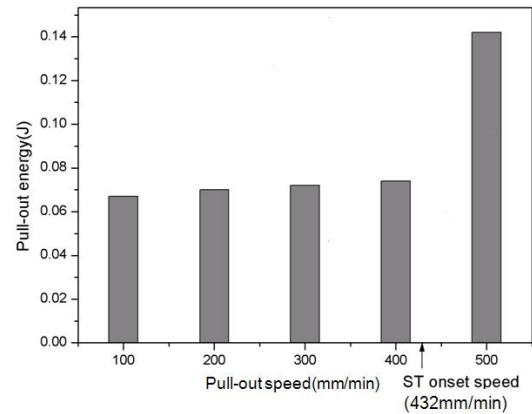
Fig. 17은 Pull-out 속도에 따른 각 시편의 Pull-out 에너지를 보여주고 있다. Fig. 17(a) 에서와 같이 미처리 Kevlar 직물에서는 Pull-out 속도가 증가함에 따라 다소 에너지가 감소하는 경향을 보이는 반면 Fig. 17(b)~(d) 와 같이 전단농화 유체를 함침함 시편에서는 모두 전단농화 개시 예측 Pull-out 속도에서 급격한 에너지의 증가를 나타내었다. 300nm 실리카 입자를 함침시킨 시편의 경우 전단농화 개시 예측 Pull-out 속도인 432mm/min 이상의 속도 500mm/min에서 약 100%의 Pull-out 에너지 증가를 보였다. 500nm의 경우에도 유사한 경향이 나타났으며 Pull-out 에너지는 약 50% 정도 증가하였다. 나노 실리카 입자를 함침시킨 모든 시편에서 전단농화현상으로 인한 급격한 Pull-out 에너지의 증가현상이 나타났으며 입자의 크기가 작을수록 전단농화현상으로 인한 마찰력의 증가에 미치는 영향이 큰 것으로 보인다. 결국 이러한 마찰력의 증가는 안의 Pull-out 하중의 증가와 함께 Pull-out 에너지가 증가하게 되고 이는 주요한 충격흡수 메커니즘으로 작용하게 되는 것이다. 따라서, 안의 Pull-out으로 많은 에너지가 흡수되기 때문에 나노입자 처리를 한 직물의 변형의 양도 적어지게 되는 것이다. 본 실험에서 적용한 저속 충격 실험의 에너지 레벨에서는 나노입자 크기가 가장 작은 100nm의 실리카 입자를 함침시킨 시편에서 가장 큰 Pull-out 하중의 증가와 Pull-out 에너지의 증가가 나타났다.



(a)



(b)



(c)

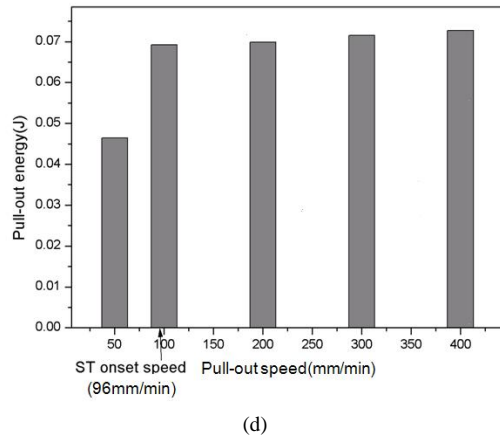


Fig. 17 Comparison of energy curves for (a) neat fabric (b) fabrics with STF(100nm) (c) fabric with STF(300nm) (d) fabric with STF(500nm) at different pull-out speeds

### 3.2 직물 표면 마찰 실험

나노입자 처리를 한 Kevlar 직물을 실제로 방호복에 적용하기 위해서는 여러 겹으로 구성해야 요구되는 충격에너지를 흡수할 수 있다. 따라서, Kevlar 직물과 직물 사이의 마찰력 변화에 대한 이해가 필요하다. 전단농화 유체의 함침에 따른 Kevlar 직물 표면의 마찰력 변화를 측정하기 위해 ASTM D 4917을 참고로 STF/Kevlar 직물간의 표면마찰 실험을 수행하였다. Fig. 18과 같이 STF/Kevlar 를 300mm×150mm 크기로 절단하여 평판위에 수평으로 고정시키고 10mm 두께의 강판을 STF/Kevlar 로 포장한 뒤 Instron 장비를 사용하여 일정거리를 당긴 후 강판의 자중과 인장력의 관계를 통해 마찰력의 변화를 평가하였다. 하부의 지그에 Pulley를 설치하여 crosshead의 수직운동을 수평운동으로 전환하였으며 Pulley에 작용되는 마찰력은 무시하였다.

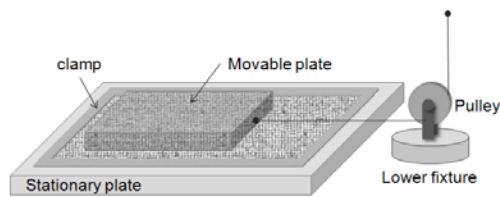
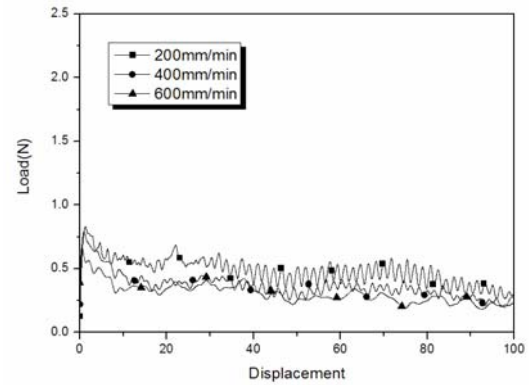


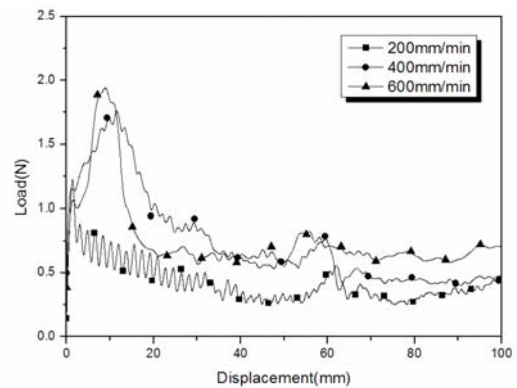
Fig. 18 Surface frictional test set up

Fig. 19는 crosshead 속도에 따른 Kevlar 직물 표면에서의 마찰하중을 나타내고 있다. 100nm와 300nm 직경

의 실리카가 함침된 STF/Kevlar 시편의 경우 직물표면 마찰하중이 일반 Kevlar 시편에 비해 크게 증가하였다. 또한, 일반 Kevlar 직물의 경우 crosshead 속도에 관계없이 일정한 크기의 마찰하중을 갖는 반면 STF/Kevlar의 경우 crosshead 속도가 증가함에 따라 마찰하중이 점차 증가하며, 특히 전단농화 현상이 개시되는 속도 범위에서는 하중의 급격한 증가를 보였다. 일반 Kevlar 시편과 비교했을 때 300nm 직경의 나노입자를 함침한 시편은 마찰하중이 최대 2.2배 증가하였으며 100nm 직경의 나노입자를 함침한 시편은 최대 9배 이상 증가하였다. 이는 직물 외부에 노출되어 있는 STF의 전단농화 현상에 의해 마찰력이 크게 작용한 결과이다. 또한 안 Pull-out 실험결과에 비해 높은 마찰력의 증가현상은 상대적으로 넓은 표면적에서 동시에 발휘되는 전단농화 효과의 영향으로 판단된다.



(a)



(b)

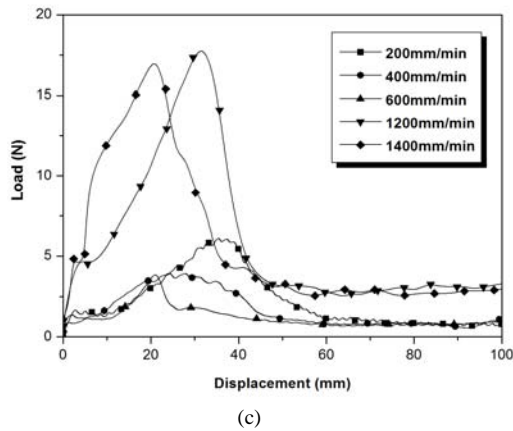


Fig. 19 Surface frictional forces of (a) neat fabrics (b) fabrics with STF(300nm) (c) fabrics with STF(100nm) according to crosshead speed

## 결론

본 연구에서는 방탄소재로 사용되는 Kevlar 직물의 충격흡수 특성을 향상시키기 위하여 전단농화 특성을 갖는 구형 나노 실리카 입자를 직물에 함침하였다. 이러한 전단농화유체의 함침으로 인한 저속충격 특성 및 안과 안 사이 그리고 직물간의 마찰특성에 미치는 영향력을 평가하기 위한 실험을 수행하였다. 나노입자 크기에 대한 전단농화 특성을 평가하기 위해 100nm, 300nm, 500nm의 직경을 갖는 구형 실리카 입자를 이용하여 실리카의 중량분율이 65wt%인 전단농화유체를 제작하였으며 입자 크기별 유변물성을 측정하였다. 나노입자 크기에 상관없이 모든 전단농화유체에서 전단담화현상과 함께 점성이 급격히 증가되는 전단농화현상이 관찰되었으며 특히, 전단농화 현상의 개시점은 나노입자의 크기가 작을수록 높은 전단변형률에서 나타났다. 이러한 특성을 갖는 전단농화유체를 Kevlar 직물에 50wt% 함침시켜 저속 충격시험을 수행한 결과 STF/Kevlar 직물에서는 충격시험 후의 잔류변형이 거의 나타나지 않은 반면 PEG만을 함침한 직물에서는 직물이 완전히 관통되었고, 아무 처리도 하지 않는 Kevlar 직물에서는 충격부위에 반구 형태의 잔류변형이 확인되었다. 특히, 나노입자의 크기가 가장 작은 100nm 실리카를 함침시킨 시편에서 가장 우수한 충격흡수 특성이 관찰되었다. 직물에서의 충격흡수 메커니즘은 안 사이의 마찰력으로 인한 Pull-out 메커니즘과 직물과 직물 사이의 마찰력이 중요한 메커니즘으로 작용한다. 전단농화유체의 함침으로 인해 안의 Pull-out

하중이 급격히 증가하였으며 이는 전단농화현상의 개시로 인한 점성의 급격한 증가가 안과 안 사이의 마찰력을 증가시킨 결과로 판단된다. 이러한 마찰력의 증가는 나노입자의 크기가 작을수록 크게 나타났다. 결과적으로 전단농화유체의 함침으로 인한 안 Pull-out 하중의 증가는 Kevlar 직물내에서 안의 Pull-out 에너지의 증가에 기여하여 주요한 충격에너지 흡수메커니즘으로 작용하게 된다. 향후 이러한 특성을 이용하여 개인용 방호복 및 방탄복의 개발에 실질적 적용을 위해서는 나노입자의 크기에 대한 영향력 이 외에도 다양한 파라미터에 대한 특성평가 연구가 필요할 것이다.

## 후기

본 연구는 국방과학연구소(ADD)가 지원하는 연구과제로 수행된 것이며, 지원에 대해 진심으로 감사드립니다.

## 참고문헌

- 1) 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.
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 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
- 5) B.J. Maranzano, N.J. Wagner, "The effect of Interparticle Interactions and Particle Size on Reversible Shear Thickening: Hard Sphere Colloidal Dispersions," *Journal of Rheology*, Vol. 45, 2001, pp. 1205-1222
- 6) K. M. Kirkwood, J. E. Kirkwood, Y. S. Lee, R. G. Egres Jr and N. J. Wagner, Yarn Pull-out as a Mechanism for Dissipation of Ballistic Impact Energy in Kevlar KM-2 Fabric, Part I : Quasi-static Characterization of Yarn Pull-out, *U.S. Army Research Laboratory Technical Report*, 2004.
- 7) J. E. Kirkwood, K. M. Kirkwood, Y. S. Lee, R. G. Egres

---

Jr, E. D. Wetzel and N. J. Wagner, "Yarn Pull-out as a Mechanism for Dissipation of Ballistic Impact Energy in Kevlar KM-2 fabric, Part II: Prediction of Ballistic Performance," *U.S. Army Research Laboratory Technical Report*, 2004.

8) Y. Duana, M. Keefe, T.A. Bogetti, B.A. Cheeseman, and B. Powers, "A Numerical Investigation of the Influence of Friction on Energy Absorption by a High-strength Fabric Subjected to Ballistic Impact", *International Journal of Impact Engineering*, Vol.32, 2006, pp. 1299-1312

9) 윤병일, 송홍섭, 백종규, "케블라 직물과 전단농화 유체가 함침된 케블라 액체 방탄재의 파단모드 연구," *한국복합재료학회지*, Vol. 20, 2006, pp. 17-24.

10) 송홍섭, 윤병일, 김창연, 박종열, 강태진, "전단농화유체가 함침된 Kevlar 재료의 방탄특성," *한국복합재료학회지*, Vol. 20, 2006, pp. 1-7.