

비구속 전단농화유체 함침 직물의 충격특성 연구

김일진* 임 건* 김천곤*+

백종규** 윤병일** 이복원***

Ballistic Impact Characterization of Unconstrained STF Impregnated Fabrics

Il-Jin Kim* Gun Lim* Chun-Gon Kim*+

Jong Gyu Paik** Byung-Il Yoon** Bok-Won Lee***

Abstract

Shear thickening is a non-Newtonian behavior. It is one of discontinuous increase in viscosity with increasing shear stress. STF increases the ballistic resistance of fabric by holding yarns pull-out. It has low indentation depth than non-treated fabric of same areal density. However, STF impregnated Kevlar was penetrated in low velocity than neat Kevlar. To increase the ballistic performance of STF, unconstrained STF impregnated fabric was inserted in the middle of non-treated fabrics. For the study, specimens including non-treated Kevlar KM2 fabric and Kevlar KM2 fabric impregnated with SiO₂ colloidal STF were prepared and experiments were carried out.

Key Words: 전단농화유체(Shear Thickening Fluid), 케블라(Kevlar), 비구속(Unconstrained)

1. 서 론

오늘날의 방탄복들은 가볍고 튼튼한 직물을 소재로 제작되고 있으나, 높은 에너지 레벨을 가지는 고속의 탄환에는 쉽게 관통이 되기 때문에 세라믹 소재의 방탄판을 방탄복에 삽입한다. 이러한 방탄복은 무겁고 두꺼우며 거동이 불편하다는 단점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 직물의 방탄효과를 높이는 방법의 하나로써 나노실리카를 이용한 전단농화유체가 함침된 직물에 대한 연구가 몇 년 전부터 수행되어 왔다. 이러한 연구들은 동일한 면밀도에서 전단농화유체 함침 직물이 나타내는 후면 변형량의 감소에 대해

발표되어 왔었다.[1] 하지만 전단농화유체 함침 직물은 특정 영역의 속도에서는 효과가 있지만 고속에서는 오히려 방탄효과가 감소하는 것이 실험결과로 나타났다. 이번 연구에서는 현재 방탄복으로 널리 쓰이고 있는 케블라 KM2 직물을 이용하여[2] 고속에서도 전단농화유체 함침 직물의 특성을 더욱 잘 발휘할 수 있도록 경계조건이 있는 케블라 직물 가운데에 비구속 조건의 전단농화유체 함침 직물을 삽입하여 그 거동을 관찰하였다.

2. 시험장치 및 실험방법

2.1 전단농화유체(Shear Thickening Fluid) 제작

방탄 직물의 유연성을 유지하면서 충격특성을 향상시키기 위해 본 연구에서는 구형 나노입자가 함침된 전단농화유체(Shear thickening Fluid)를 사용하였다. 이 유체는 고체의 입자로 이루어진 나노 입자와 분산액으로 구성되어 그림 1과 같이 전단변형율이 변화함에 따라 점성이 변하는 특성

* 한국과학기술원 항공우주공학과 대학원

*+ 한국과학기술원 항공우주공학과,

교신저자(E-mail:cgkim@kaist.ac.kr)

** 국방과학연구소 기술연구본부

*** 공군항공기술연구소

을 지니며 특히, 특정 전단 변형율(onset shear strain)에서 점성이 급격히 증가하여 고체의 특성을 지니게 된다. 그림 1은 전단농화유체의 일반적인 유변특성을 보여준다.[3] 외부의 자극이 없는 상태에서는 유체상태로 존재하여 직물의 유연성을 저하시키지 않으나 외부 충격에 의한 전단력의 자극이 가해지면 점성이 작아지는 전단담화

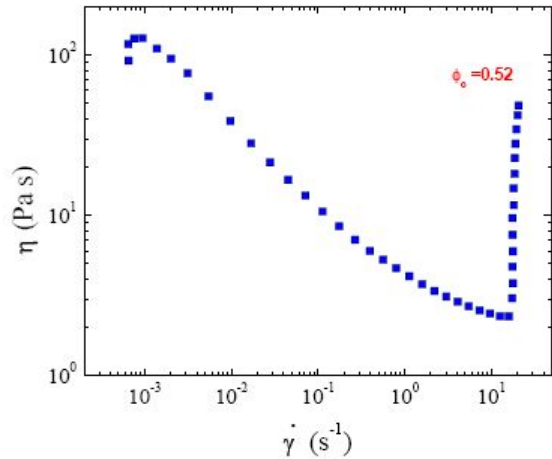


그림 1. Shear rate graph of shear thickening phenomenon

현상이 발생하다가 임계 전단 변형률에 도달하면 입자들이 순간적으로 집중되어 점성이 급격히 증가하는 전단농화(Shear thickening) 현상이 발생하게 된다. 전단농화유체를 제조하기 위해 일본 Shokubai 회사에서 제작한 Seahoster KE-P 계열의 구형 나노 실리카 입자를 사용하였다. 나노 실리카입자의 크기는 직경 100nm 이다.

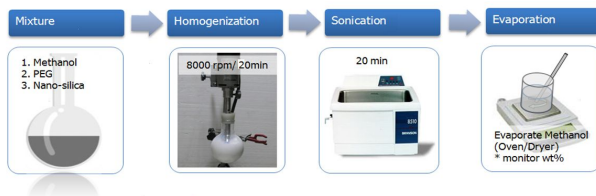


그림 2. Schematic of the fabrication process of STF

그림 2는 전단농화유체의 제조과정을 나타낸 그림이다. 실리카 입자는 PEG와 혼합이 어렵기 때문에 희석제인 Methanol과 PEG를 실리카 입자와 함께 섞어서 Homogenizer를 사용하여 8000rpm으로 약 20분간 혼합한 뒤 sonicator로 40kHz, 50℃에서 20분간 처리를 하였다. 혼합물의 중량 비율은 65 : 35 : 70 = SiO2 : PEG :

Methanol이며 혼합이 완료된 후 Methanol은 약 80℃에서 20분간 증발시켰다. 이렇게 처리된 전단농화유체를 직물에 함침 시키면 그림 3과 같이 분산이 고르게 된 전단농화유체 함침 케블라 직물이 제작된다.

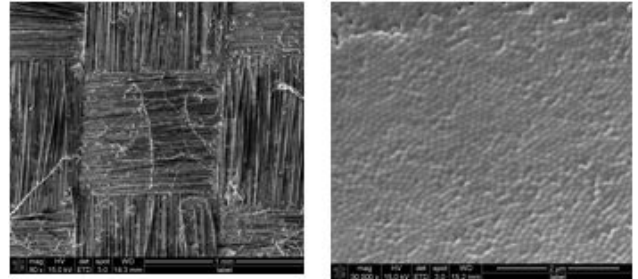


그림 3. SEM image of Kevlar impregnated with SiO₂-STF

2.2 실험 방법

본 실험에서는 연구실에서 자체 제작한 그림 4의 2차 압축 가스건을 사용하였다. 가스건은 Ar 가스를 이용해 1차 압축으로 diaphragm을 파열시킨 후 pump tube에 있는 Piston을 밀어내며 He가스를 다시 압축시키고, 압축된 He가스가 2차 diaphragm을 파열시키며 순간적으로 분출되는 He가스가 barrel 내부의 탄두를 밀어내는 방식이다. 탄두의 속도는 탄두가 광원아래의 일정 거리를 지나갈 때 그림자가 맺히는 시간으로 속도를 계산하는 Digital Chronograph를 이용해 측정하였다.



그림 4. Photo-image of the two-stage gas gun

탄두는 SUS 304소재로 제작된 7.62mm 직경의 반구 형태(hemispherical)의 탄두를 2.8g의 무게로 제작하여 실험하였다. 실험은 그림 5의 지그

에 120×100mm 시편을 고정시킨 후 후면에 Polymer clay를 대고 300m/s의 속도로 사격을 실시한 후 후면 변형량을 측정 하였다.

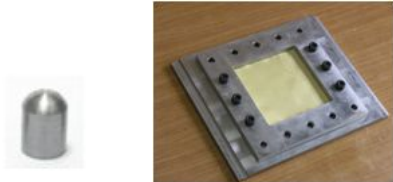


그림 5. Projectiles and fixture jig

3. 실험결과

3.1 전단농화유체의 방탄특성

실험에 앞서 선행연구로서 전단농화유체의 방탄특성에 대해 언급하기로 하겠다. 전단농화유체는 그림 6과 같이 직물에 함침 되었을 때 yarn의 Pull-out현상을 억지 시켜 trauma의 크기와 관통 깊이를 모두 줄이는 효과를 가진다.[4] 그림 6은 100nm 사이즈의 나노 실리카 입자가 충전된 전단농화유체를 약 40%의 중량분율로 함침시킨 케블라 KM2 직물을 Polymer clay에 Two-edge clamped 시켜 214m/s의 속도로 사격한 결과이다. 좌측은 케블라 Neat 즉, 아무 처리도 하지 않은 케블라 직물에 사격을 한 후의 결과이고, 우측은 100nm의 실리카를 케블라 직물에 함침시킨 시편에 대해 사격한 결과이다. 하지만 전단농화유체 함침 직물은 이보다 더 높은 속도에서는 오히려 그 효과가 줄어 관통이 되어 버리게 된다.

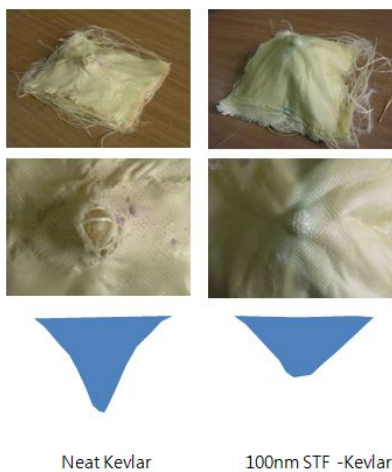


그림 6. Comparison of trauma depth of Kevlar KM2 fabric with different treatment

3.2 비구속 전단농화유체의 방탄 특성

전단농화유체를 함침한 직물이 조기에 관통이 되어버리는 현상을 방지하기 위해 다양한 방법들을 생각해 볼 수 있으나 직물의 변형이 적게 일어나고, yarn의 Pull-out 현상이 거의 일어나지 않는 것으로 보아 전단농화유체 함침을 통해 직물의 변형량을 적게하면, 경계의 구속조건 즉 clamping조건에 의해 더욱 변형이 적게 일어나 오히려 더욱 쉽게 관통이 되어버리는 것으로 예측할 수 있다. 따라서 yarn의 움직임을 최소화 되는 이 함침직물을 경계조건을 없게 하여 고정시킨다면 관통효과를 줄이는 방향으로 직물을 사용할 수 있으리라 생

Boundary condition

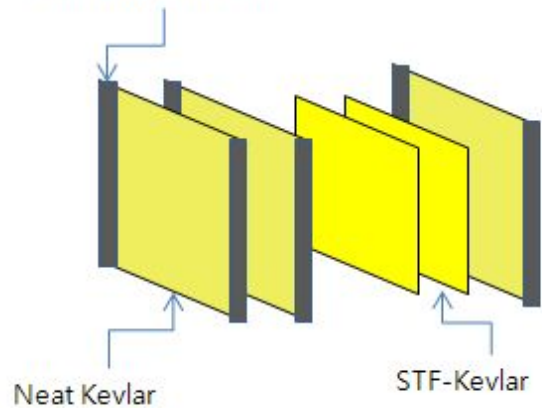


그림 7. Concept of unconstrained STF impregnated fabrics

각하였다. 따라서 그림 7과 같이 경계조건을 준



그림 8. Trauma depth of different specimens

시편을 동일한 면밀도의 다른 시편과 함께 300m/s의 속도로 충격을 시켰을 시 그림 8과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 시편에서 볼 수 있는 KKSSK에서 K는 케블라 KM2 neat fabric이고, S는 STF-impregnated 케블라 KM2를 말한다. KKSSK unconstrained는 그림 7과 같이 STF 함침 케블라 직물이 구속조건을 가지지 않는 시편을 의미한다. 그림에서 볼 수 있듯이 300m/s에서 구속 조건이 주어진 모든 전단농화유체 함침 직물들은 쉽게 관통이 되어 버리는 데에 반하여 구속조건을 주지 않은 전단농화유체 함침 직물을 적용한 시편은 관통 깊이가 적게 나타나는 것을 볼 수 있다. 다만 이번 실험에서는 비슷한 면밀도의 neat Kevlar가 비구속 조건 시편과 비슷한 관통깊이를 가지지만 속도가 증가하면 neat Kevlar는 관통이 되어 버리는 데에 반하여 비구속 조건 시편은 관통이 되지 않는 현상을 관찰할 수 있다.

4. 결 론

전단농화유체는 직물에 함침 되었을 시 저속에서는 후면 변형량 감소 효과를 가지지만, 고속에서는 전단농화현상으로 인해 직물의 변형량이 적은 반면, 더욱 큰 힘이 가해지므로 응력이 피탄지에 집중되어 오히려 효과가 감소하기 때문에 직물의 움직임을 원활하게 하도록 비구속 조건의 전단농화유체 함침 직물을 이용해 방탄효과를 실험해 보았다. 비구속 전단농화유체 함침 직물을 삽입한 시편이 모든 직물을 고정시킨 시편보다 관통방지 효과 및 관통깊이 감소 효과는 좋았지만 Neat fabric에 비해 경제성이 부족하여 이러한 디자인을 이용한 다른 연구가 더욱 필요하다.

후 기

This research was supported by the Dual use Technology Center(DUTC) of Korea under grant number 07-DU-MP-02. Supports for this work and permission to publish by the Agency for Defense Development(ADD) are also gratefully acknowledged.

참고문헌

- (1) Maranzano, B.J., and Wagner, N.J. "The Effect of Inter-particle Interactions and Particle Size on Reversible Shear Thickening: Hard Sphere Colloidal Dispersions", *Journal of Rheology*. 2001, 45(5): 1205-1222.
- (2) Kevlar KM-2 Brand Product Specification, DuPont co. USA, February. 2002
- (3) Lee, Y.S., Wetzel, E.D., and Wagner, N.J. "The Ballistic Impact Characteristics of Kevlar Woven Fabrics Impregnated with a Colloidal Shear Thickening Fluid", *Journal of Material Science*, 2004, 38(13): 2825-2833
- (4) 이복원, 이성현, 김천곤, 윤병일, 백종규, "전단농화유체를 함침한 케블라 직물의 저속충격 거동 및 마찰특성 연구," 한국복합재료학회, Vol. 21, 2008, pp. 15-24