

## 셀요소를 활용한 STF 함침된 Kevlar Fabric의 방탄해석

이덕규\* · 박종규\*\* · 정의경\*\* · 이만영\*\* · 김시조\* · 문상호\* · 손권중\*\*\* · 조희근\*†

### Collision Analysis of STF Impregnated Kevlar Fabric Using the 3D-Shell Element

Duk-Gyu Lee\*, Jong-Kyu Park\*\*, Wui-Kyung Jung\*\*, Man-Young Lee\*\*, See-Jo Kim\*, Sang-Ho Moon\*, Kwon-Joong Son\*\*\*, Hee-Keun Cho\*†

**ABSTRACT:** Ballistic impact analyses have been performed with the Kevlar fabric impregnated with STF (shear thickening fluid). Multi-layer laminates modeled with 3D isoparametric shell elements were used for the performance analysis and their results are compared with experimental results. Both experiments and numerical analyses have been done to verify the usefulness of STF to enhance the impact resistance performance. The results showed that STF increases friction within a bundle of fiber, and this phenomena is more apparent in the velocity range of under near 450 m/s. In this research, it is emphasized that FEA analyses of STF impregnated Kevlar fabric laminate were successfully conducted using shell elements. Moreover, the effectiveness of the technique and accuracy were verified through the comparison with reliable experimental data.

**초 록:** 본 연구에서는 3D 아이소파라메트릭 셸요소 모델을 사용하여 전단농화유체(STF: shear thickening fluid)가 함침된 케블라 페브릭(Kevlar fabric) 복합재의 방탄성능에 대하여 해석을 수행하였다. 다양한 적층복합재(12, 18, 20, 24-layer)를 대상으로 탄두 초기속도에 따른 충돌 후 속도(Residual velocity)를 측정하여 실험치와 비교하였다. STF가 함침된 복합재의 방탄 성능의 효과를 검증하기 위하여 다양한 속도영역에서 STF가 함침된 것과 함침 되지 않은 것의 방탄성능을 비교하였다. STF가 함침된 케블라 페브릭은 450 m/s 이하의 저속에서는 비교적 큰 마찰효과를 일으키며 고속에서는 STF가 함침된 Kevlar fabric의 마찰효과는 기대할 수 없는 수준으로 오히려 역효과를 일으키는 것을 확인할 수 있었다. 연구를 통해 STF가 함침된 케블라 페브릭의 특성을 퇴화 3D 셸 요소를 사용하여 효과적으로 모사할 수 있었으며, 실험 치와의 결과 비교를 통하여 그 유효성을 검증하였다.

**Key Words:** 전단농화유체(Shear thickening fluid), 셸요소(Shell element), 케블라(Kevlar), 유한요소해석(Finite element analysis)

## 1. 서 론

전장에서 안전을 확보하기 위하여 방탄복에 대한 연

구는 지속적으로 진행되어 왔다. 방탄소재는 오랜 시간에 걸쳐 금속재료를 시작으로 섬유강화 복합재에 이르기까지 다양한 소재로 연구개발이 진행되었다. 섬유강화 복합재는

Received 9 November 2015, received in revised form 22 February 2016, accepted 26 February 2016

\*Andong National University Dept. of Mechanical Design

\*†Andong National University Dept. of Mechanical Engineering Education, Corresponding author (E-mail: hkcho@anu.ac.kr)

\*\*Agency for Defense Development (ADD)

\*\*\*Hongik University Dept. of Mechanical Engineering

높은 강도와 경도, 파괴강도 및 항복강도, 고내열성의 특징을 가지고 있으며, 특히 금속재료에 비하여 낮은 무게 밀도와 열팽창계수의 특성을 지니고 있기 때문에 방탄소재로서의 적용성이 매우 뛰어나다. 최근에는 기존의 섬유방탄재의 마찰효과를 극대화시키기 위하여 전단농화유체(STF: shear thickening fluid)를 이용한 액체 방탄재(LBA: liquid body armor) 적용 연구가 진행되고 있다. 전단농화유체는 외부에서 하중이 가해지지 않는 일반적인 상황에서는 유연성을 갖는 액체로서 존재하며, 일반적인 유체의 거동을 보인다. 반면 외부에서 하중이 가해지는 경우에는 전단강성이 순간적으로 변화하면서 고체적 거동을 하게 된다. 이러한 전단농화현상은 외력이 제거되면 원상태로 완전히 회복되는 가역적 반응으로 지속적인 점탄성적 거동을 하며 외력에 저항하는 성질을 가지고 있다.

기존 순수한 섬유강화 복합재에 마찰현상을 극대화하여 방탄효과를 높인다. 섬유가 늘어지는 풀아웃(Pull-out) 현상에 의해 발생하는 탄두에 대한 마찰저항을 크게하기 위하여 전단농화유체를 섬유강화 복합재에 함침한다. 유체에 의해 발생하는 점탄성적 거동에 의한 마찰저항의 추가적인 증가로 기존 순수한 섬유강화 복합재는 방탄효과가 극대화된다.

본 연구는 전단농화유체를 함침한 케블라 페브릭을 대상으로 다양한 초기속도에 따른 충돌 후 잔류속도(Residual velocity)를 3D 셸 요소를 이용한 명시적(Explicit) 시간 적분에 의한 충돌을 해석하고, 이를 실제 실험결과와 비교하여 전단농화 유체의 방탄효과를 검증하고 또한 전단농화 유체가 함침된 페브릭 복합재의 해석에 셸 요소를 적용함으로써 그 적용 가능성을 확인하였다.

## 2. 점탄성학적 배경

### 2.1 전단농화유체

최근 국내에서는 21세기 군사력 기술 확보를 위하여 차세대 섬유 방탄소재에 대한 연구로 전단농화유체를 이용한 액체방탄재에 대한 연구가 활발히 진행되었다.

전단농화유체는 점탄성적(Visco-elasticity) 특성을 가지는데, 이는 특정한 임계점을 기준으로 고체나 액체의 물리적 성질을 지니게 되는 특징이 있다. 일반적으로 외력에 의하여 유체에 전단력이 가해지면 이에 수반한 전단변형이 일어나게 된다. 외력을 받기 전에는 유체상태로 존재하는 전단농화유체에 점차 외력의 크기와 그 속도를 증가시킬 경우 유체내부의 전단변형속도( $\dot{\gamma}$ )는 점차 증가하게 되는데, 이때 전단농화유체가 가지고 있는 임계전단변형속도( $\dot{\gamma}_{critical}$ )에 도달하는 순간 기준에 가지고 있던 유체의 물리적 특성이 아닌 매우 단단한 고체적 특성을 나타낸다.

이는 분자구조로 볼 때 초기의 전단농화유체의 분자는 무작위하게 분자가 배열되어 있으나, 전단농화유체가 가지

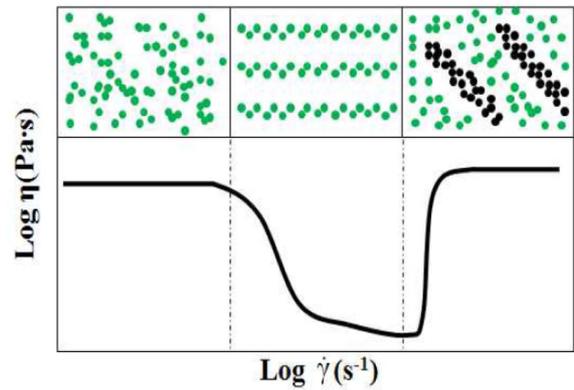


Fig. 1. Relationship with viscosity and shear strain rate[1]

고 있는 특정한 임계전단변형속도( $\dot{\gamma}$ )를 지나게 되면 임의의 한 방향으로 분자배열이 바뀌게 된다. 이에 따라 전단농화유체 자체의 점성계수는 급격히 증가하는 특성이 나타난다. Fig. 1은 전단농화유체의 전단변형속도( $\dot{\gamma}$ )의 증가에 따른 점성계수의 변화를 나타낸다.

Newtonian 유체의 경우에는 전단변형률( $\gamma$ )의 크기와 속도에 관계없이 온도에만 의존하는 점성계수( $\mu$ )를 가지는 유체를 말하며, 이는 전단응력( $\tau$ )과 전단변형률의 관계가 선형 비례관계로 나타난다.

전단농화유체는 전단변형률속도에 큰 영향을 받으며 점성이 변화하는 유체이기 때문에 Non-Newtonian 유체로 분류된다. 따라서 전단응력과 전단변형률속도는 식 (1)과 같은 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$\tau = \mu(\dot{\gamma})\dot{\gamma} \quad (1)$$

일반적인 고체인 경우에도 식 (1)로 그 관계를 표현할 수 있는데, 기존 유체에 비하여 비교적 큰 전단변형저항이 있기 때문에 점성계수를 매우 크게 모델링 하여 적용할 수 있다. 또한 각종 고분자재료 및 전단담화유체, 전단농화유체 같은 경우에도 식 (2)을 적용할 수 있다. 한편 점성계수  $\mu$ 는 재료상수  $\tau_y$ 와  $\gamma_0$ 를 도입하여 다음과 같이 일반식으로 사용한다.

$$\mu = \frac{1}{\gamma} \tau_y + \left( \frac{\dot{\gamma}}{\gamma_0} \right)^{1/n} \quad (2)$$

따라서 전단응력  $\tau$ 는,

$$\tau = \tau_y + \left( \frac{\dot{\gamma}}{\gamma_0} \right)^{1/n} \quad (3)$$

으로 표시할 수 있다. 여기서  $\tau_y$ 는 변형이 일어나기 직전까지의 응력을 말하며 고체의 경우에는 소성변형이 일어나는 탄성구간에서의 항복응력을 의미한다. 일반적으로 유체는 고체가 가지고 있는 항복강도까지의 자체 내부 응력 증가가 존재하지 않는다. 즉,  $\tau_y = 0$ 이기 때문에 유체의 전단응력은 아래 식 (4)로 표시된다.

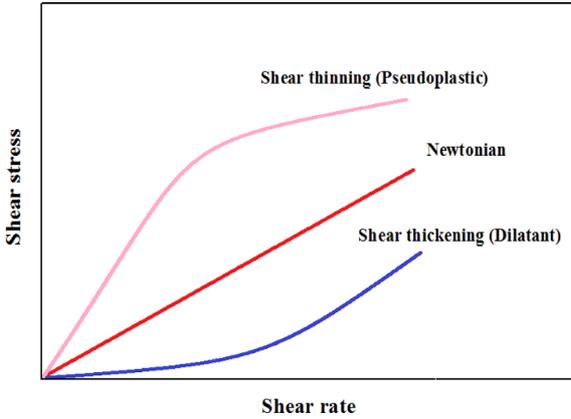


Fig. 2. Behavior of the fluid according to the shear stress and shear strain rate[2]

$$\tau = \left( \frac{\dot{\gamma}}{\gamma_0} \right)^{1/n} \quad (4)$$

식 (4)에서  $\tau_y = 0$ 이면서  $n = 1$ 인 경우에는 Newtonian 유체의 관계를 표현할 수 있으며,  $\tau_y = 0$ 이면서 동시에  $n \neq 1$ 에는 Non-Newtonian 유체를 표현할 수 있다. Fig. 2는 고체를 비롯한 여러 유체의 전단응력과 전단변형률 속도의 관계를 그래프로 나타낸 것이다.

$n = 1$ 일 때는 그 변형률속도에 큰 영향이 없으므로, 변형률속도가 큰 소성체에 주로 적용할 수 있으며,  $\tau_y \neq 0$ 으로 모델링 하면 고체에 대한 해석도 가능하다.

전단농화유체와 같은 경우에는 Non-Newtonian 유체로써 전단변형률속도가 전단응력에 큰 영향을 미치기 때문에 식 (3)을 적용할 수 있다. 그 실제 영향을 지수의 변화를 통하여 수학적 모델링으로 변환이 가능하다.

## 2.2 중앙차분법

구조물의 동적평형방정식의 해석에 있어서 시간을 적분하는 방법에는 크게 묵시적 방법(Implicit method)과 명시적 방법(Explicit method)을 사용한다. 이는 수치해석적 해법의 차이로  $t + \Delta t$ 에서의 평형방정식으로부터 거동을 구하는 방법을 묵시적 방법이라 하며,  $t$ 에서의 평형방정식으로부터 해를 구하는 방법을 명시적 방법이라 한다. 명시적 방법에는 직접적분법(Direct Integration Method), 중앙차분법(Central difference method)이 있으며, 묵시적 방법에는 Houbolt 방법, Newmark  $\beta$ -method, Wilson  $\theta$ -Method 등이 있다. 그 중  $t + \Delta t$ 에서의 값을 구하기 위하여  $t$ 에서의 평형방정식을 이용하는 중앙차분법을 사용하여 해석을 진행하였다.

식 (5)는  $t$  시점에서의 구조물의 동적평형방정식을 나타내며 다음과 같다.

$$F^i + F^d + F^e = R(t) \quad (5)$$

여기서  $R(t)$ 는  $F^i$ ,  $F^d$ ,  $F^e$ 는 외력으로 가해지는 동적 하중백

터의 총합이다. 이를 변위의 함수  $u(t)$ 에 대해서 다시 나타내면 수식 (6)과 같다.

$$[M]\ddot{u}(t) + [C]\dot{u}(t) + [K]u(t) = R(t) \quad (6)$$

여기서,  $[M]$ 은 질량행렬,  $[C]$ 는 감쇠행렬,  $[K]$ 는 강성행렬이며,  $u(t)$ 는 변위 벡터,  $\dot{u}(t)$ 는 속도 벡터,  $\ddot{u}$ 는 가속도 벡터를 나타낸다.

중앙차분법에서는 속도와 가속도를 3개의 시간장을 이용하여 구하는데 식 (7),(8)은 가속도를 중앙차분하여 표현한 것이다.

$$\ddot{u}(t) = \frac{\frac{u(t+\Delta t) - u(t)}{\Delta t} - \frac{u(t) - u(t-\Delta t)}{\Delta t}}{\Delta t} \quad (7)$$

$$\ddot{u}(t) = \frac{1}{\Delta t^2} u(t-\Delta t) - 2u(t) + u(t+\Delta t) \quad (8)$$

속도항도 가속도항과 같이 중앙차분법을 이용하여 표현하면 다음과 같다.

$$2\dot{u}(t) = \frac{u(t+\Delta t) - u(t)}{\Delta t} + \frac{u(t) - u(t-\Delta t)}{\Delta t} \quad (9)$$

$$\dot{u}(t) = \frac{1}{2\Delta t} - u(t+\Delta t) + u(t-\Delta t) \quad (10)$$

속도항인 식 (10)와 가속도항인 식 (8)을 동적평형방정식인 식 (6)에 대입하고  $u(t+\Delta t)$ 에 대해서 정리하면 식 (11)을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} & \left( \frac{1}{\Delta t^2} M + \frac{1}{2\Delta t} C \right) u(t+\Delta t) \\ & = R(t) - \left( K - \frac{2}{\Delta t^2} M \right) u(t) - \left( \frac{1}{\Delta t^2} M - \frac{1}{2\Delta t} C \right) u(t-\Delta t) \end{aligned} \quad (11)$$

식 (11)에서의 변위 벡터  $u(t)$ 와  $u(t-\Delta t)$ 의 경우에는 이미 이전에 알고 있는 변위 벡터이기 때문에 이를 통하여 미지수인  $\Delta t$ 만큼 증가한 시간장에서  $u(t+\Delta t)$  항을 구함으로써 시간증가에 따라 증가하는 변위 벡터를 계속적으로 방정식을 세워 구할 수 있다.

## 2.3 전단농화유체에 함침된 복합재 물성

일반적으로 널리 알려져 있는 케블라 안(Kevlar yarn)의 물성치는 페브리 형태의 모델에서는 변형되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 케블라 안 자체를 직조하여 만든 복합재에 전단농화유체를 함침시킨 후, 유연학적 특성 및 역학적 물성치 도출을 위한 시험이 진행되었다. Fig. 3은 전단농화유체의 전단변형률속도에 따른 점성계수의 변화 수치를 나타낸다.

전단변형률속도가 낮은 영역에서는 비교적 전단농화유체의 효과가 있음을 확인한 반면, 특정한 임계 전단변형률

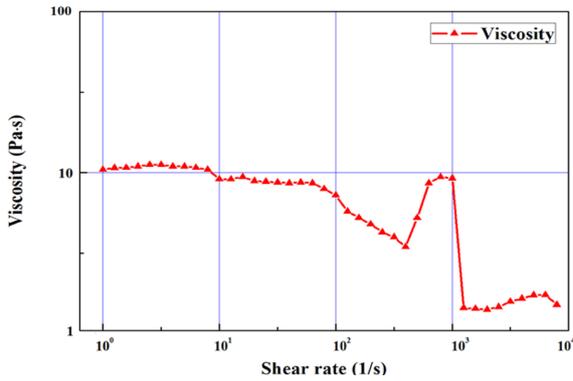


Fig. 3. Viscosity according to shear rate of STF[3]

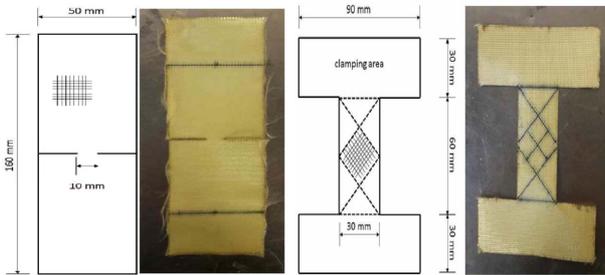


Fig. 4. Mechanical properties test specimen

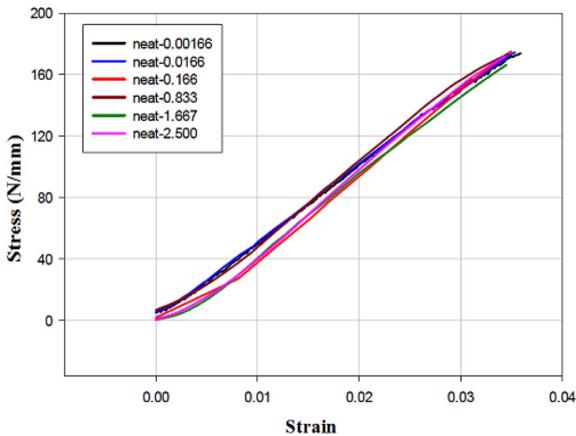


Fig. 5. Tensile test results of neat Kevlar fabric

속도를 넘어가게 되면 특정 속도 이상에서 점성계수가 감소폭이 매우 커져 마찰효과가 상대적으로 없음을 확인할 수 있다.

해석에 필요한 물성치를 얻기 위하여 인장시험과 전단 시험을 진행하였다. 시험을 위하여 전단농화유체가 함침된 케블라 페브릭(STF Kevlar fabric)과 함침되지 않은 케블라 페브릭(neat Kevlar fabric)의 시편을 Fig. 4와 같이 제작하여 인장시험과 전단시험을 진행하였다.

시험속도는 10, 100, 1,000, 5,000, 10,000, 15,000 mm/min 로 총 6개의 시험속도를 사용하여 시험을 진행하였으며, 장비는 Instron 8801 장비를 사용하였다. Fig. 5, 6은 각각 neat

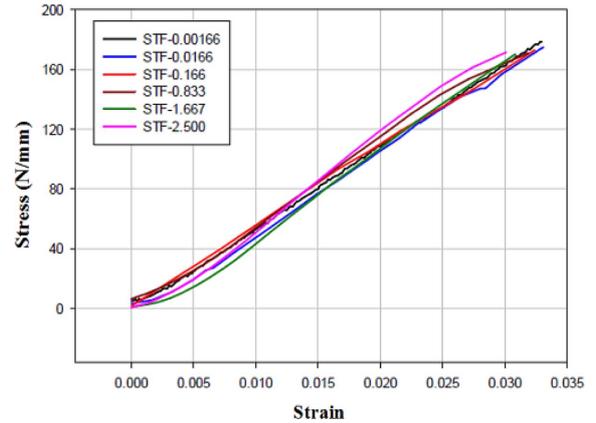


Fig. 6. Tensile test results of STF Kevlar fabric

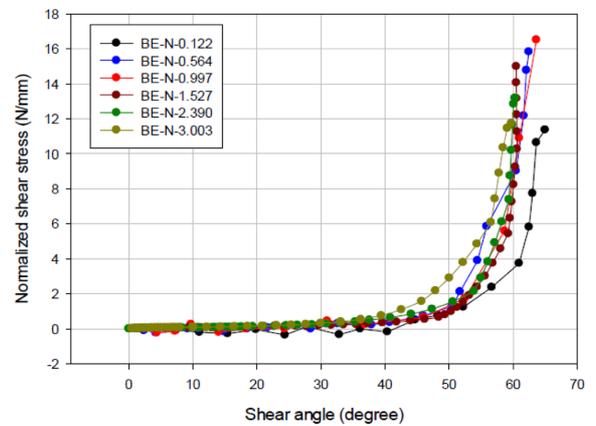


Fig. 7. Shear test results of neat Kevlar fabric

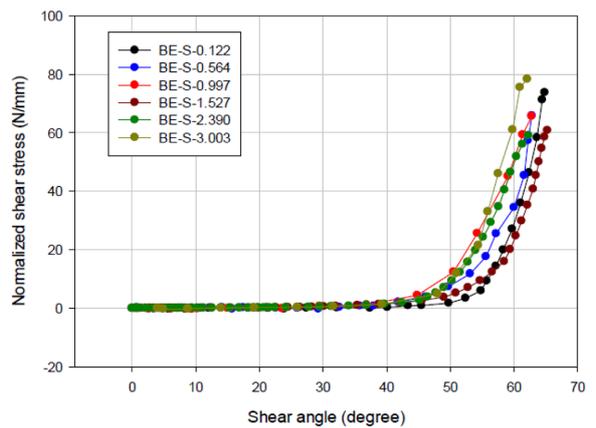


Fig. 8. Shear test results of STF Kevlar fabric

Kevlar fabric과 STF Kevlar fabric의 인장시험 결과를 Fig. 7, 8은 전단시험 결과를 나타낸다.

인장시험 결과 neat Kevlar fabric과 STF Kevlar fabric이 시험속도에 따른 강성과 연신율이 비교적 큰 변화가 없었으며, 그 거동 또한 함침에 상관없이 유사함을 확인하였다. 전단시험의 경우에는 neat Kevlar fabric과 STF Kevlar fabric이 전단각 50도까지는 큰 변화가 없었지만, 전단각 50도 이후

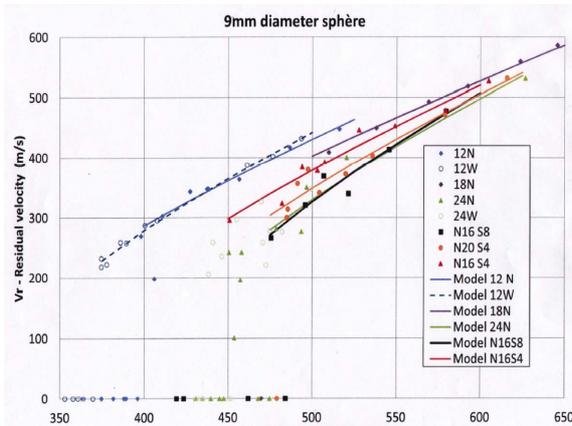


Fig. 9. Collision experimental results

부터 파단 직전까지의 거동이 STF가 함침된 STF kevlar fabric 이 비교적 높은 강성을 지니고 있음을 확인하였다. 이는 STF 함침에 의해 전단농화유체의 유변학적 변화에 따른 강성의 수치 증가로 설명할 수 있다. 각각 시험으로 도출된 응력-변형률 선도를 이용하여 세로탄성계수 및 전단탄성계수를 계산함으로써 수치해석적으로 필요한 기본 물성치를 획득하였다.

#### 2.4 충돌시험

전산해석의 신뢰성을 확인하기 위하여 neat Kevlar fabric 과 STF Kevlar fabric 12, 18, 20, 24-layer의 실제 충돌시험을 진행하였다. 직경이 9 mm인 총알 탄두를 이용하여 탄두의 초기속도 350 m/s, 400 m/s, 450 m/s, 500 m/s, 550 m/s, 600 m/s, 650 m/s 등 총 7가지 종류로 진행하였다. 20-layer와 24-layer에서는 추가적으로 STF Kevlar fabric을 먼저 적층 후 neat Kevlar fabric을 적층하여 시험을 하였다. 사각 시편에서의 양 모서리 4곳을 고정 하였으며, 시험을 여러번 수행한 다음 외삽을 통하여 그 경향성을 예측하였다. Fig. 9는 실제 충돌시험 결과를 나타낸다. Neat kevlar fabric의 경우에는 저속에서(450 m/sec) STF Kevlar fabric에 비해 상대적으로 방탄효과가 적음을 확인할 수 있었으며, STF가 함침된 STF Kevlar fabric의 경우에는 저속에서는 큰 마찰효과를 보이는 반면 450 m/s 속도 이상으로 넘어가는 경우에는 비교적 적은 마찰 효과를 나타내어 방탄효과가 감소하는 경향을 보인다.

#### 3. 전산 구조유한요소 해석

본 연구에서는 충돌해석에서 중요한 erosion을 적절히 시키기 위하여, 소성변형률 파손 모델을 적용함으로써 해석간 적절한 erosion이 진행되도록 설정하였다.

$$\epsilon_{plastic} > \epsilon_{set\ value} : Failure \quad (12)$$

또한 탄두는 Steel 4340을 사용하였으며, 파손모델은 소성 모델 중 하나인 'Johnson-Cook strength 모델'을 사용하였다. Johnson-Cook strength 모델은 소성모델의 대표적인 모델로서, 일반적으로 충돌과 같은 높은 속도의 충격력에 의한 비교적 큰 변형률과 변형률속도를 가지면서 온도가 고온으로 올라가는 상황에 주로 사용하는 모델이다. Johnson-Cook strength 모델은 항복강도가 변형률, 변형률속도, 온도에 의존되는 특징을 가진다. 아래 수식 (13)은 Johnson-Cook Strength 모델을 나타낸다.

$$Y = [A + B\epsilon_p^n][1 + C\ln\dot{\epsilon}_p^*][1 - T_H^m] \quad (13)$$

$\epsilon_p, \dot{\epsilon}_p^*, T_H = (T - T_{room}) / (T_{melt} - T_{room})$ 는 각각 소성변형률, 소성변형률속도, 물질의 온도를 나타낸다. 추가적으로 A, B, C, n, m은 5개의 재료상수를 나타낸다. 재료상수는 각각 Initial Yield stress, Hardening constant, Hardening exponent, Strain rate constant, Thermal softening exponent, Melting temperature이다.

충돌해석에 사용되는 상용소프트웨어는 Autodyn, Ansys WB LS-dyna, LS-dyna, explicit STR과 같이 다양하게 있다. 본 연구에서는 LS-dyna 소프트웨어를 사용하여 해석을 진행하였다.

전산 충돌해석은 본 연구수행 중 실제 시험을 진행하였던 12, 18, 20, 24-layer에 대해 진행하였다. 페브릭 복합재를 해석하기 위한 모델링으로서 페브릭을 구성하는 개별적인 안을 전부 모델링하는 미시적 방법과, 전체 페브릭의 평균 물성치를 가지고 일괄적으로 모델링하는 거시적 방법이 있다. 현재까지의 연구는 거의 대부분 미시적 방법에 의한 해석에 의존해 왔다. 이러한 미시적방법에 의한 해석은 해석량의 증가와 마찰에 의한 오차의 누적 등으로 인하여 해석에 제한이 있었다. 즉 1~2 layer 등의 간단한 해석 모델에서는 해석이 가능하고 어느 정도 신뢰성 있는 값을 나타내지만 그 이상의 층에서는 해석량이 기하급수적으로 증가하기 때문에 해석이 어려우며 또한 해석결과 신뢰성이 많이 떨어진다. 따라서 본 연구에서는 평균적인 물성치를 가지고 전체 페브릭을 모델링하는 거시적 방법을 택하였고 셀요소를 사용하여 모델링 하였다.

탄두는 직경이  $\phi = 9$  mm인 스틸 볼로 모델링하였으며, 케블라 페브릭은 크기가 500 mm × 500 mm × 0.24 mm인 3D-shell 형상으로 모델링하였다. 모델의 대칭성으로 인하여 1/4 모델로 모델링하였으며, 각 x, y 축에 축대칭(Symmetric) 조건을 부여함으로써 전체 모델의 효과를 구현하였다.

해석 시 사용한 요소는 케블라 페브릭의 경우에는 육면체요소(Hexagonal element)를 사용하였으며, 스틸 볼의 경우에는 사면체요소(Tetrahedral element)를 사용하여 해석을 진행하였다.

케블라 페브릭의 모델이 스틸 볼에 비하여 매우 큰 모델이기 때문에 해석의 정확성을 위해 스틸 볼과 같은 크기의

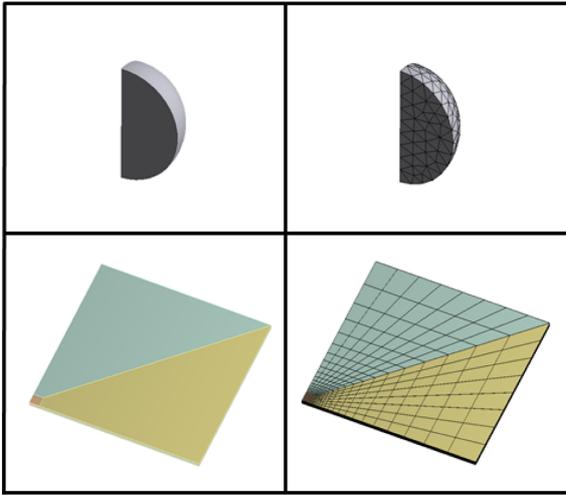


Fig. 10. 3D-quarter model and FE model

요소 분할을 하게 되면 계산량이 많아지는 단점이 생긴다. 이를 보완하기 위하여 케블라 페브릭의 3D 셸을 3분할하여 실질적으로 스틸 볼과 충돌이 일어나는 부분은 요소밀도를 높였으며, 비교적 충돌의 직접적인 영향이 적은 부분에 대해서는 요소 밀도를 작게 함으로서 해석 시간을 단축하였다.

Fig. 10은 탄두 및 케블라 페브릭 적층복합재의 FEA 모델을 나타낸다. 케블라 페브릭은 섬유가 직조되어 존재하는 형태이기 때문에 주어진 체적 안에서 완전히 차있는 상태가 아닌 비어있는 공간이 존재한다. 또한 층과 층 사이에 공간이 존재한다. 따라서 이러한 효과를 부여하기 위하여 셸과 셸 사이에는 미세한 공간이 존재하며 각각의 층은 접촉(Contact) 경계조건을 부여하였다. 층의 두께를 고려하였을 때 그 사이의 공간을 층 두께의 10% 정도로 하여 모델링 하였다. 경계조건은 실제 충돌시험과 같이 사각 양쪽 4개의 모서리의 자유도를 모두 고정하여 해석을 진행하였다.

전단농화유체가 함침된 액체방탄재는 케블라 페브릭에 미세한 실리카(Silica) 입자가 부착된 것이며 이것은 상대운동이 발생할 경우 마찰계수의 증가 현상을 일으킨다. 따라서 이러한 마찰 효과를 나타내기 위하여 마찰계수를 상대속도와 정마찰계수, 동마찰계수 효과를 모두 고려한 아래 식(14)을 사용하여 마찰효과를 구현하였다[3].

$$\mu = \mu_d + (\mu_s - \mu_d)e^{-c(v_{rel})} \quad (14)$$

식 (14)에서 나타난  $\mu_d$ ,  $\mu_s$ ,  $c$ 는 각각 동마찰계수(Dynamic coefficient of friction), 정마찰계수(Static coefficient of friction), 지수 감쇠상수(Exponential decay constant)를 나타낸다.  $v_{rel}$ 은 섬유간 상대속도를 나타낸다. 식 (14)을 이용하여 마찰계수를 여러 상황이 고려된 함수형태로 사용함으로써 STF효과를 구현할 수 있다. STF가 함침되지 않은 케블라 페브릭과 STF가 함침되어 큰 마찰효과를 내는 케블라 페브릭의 각각의 마찰계수항은 Table 1과 같다.

Table 1. Friction coefficient of Kevlar fabric

|         | Neat Kevlar fabric | STF Kevlar fabric |
|---------|--------------------|-------------------|
| $\mu_s$ | 0.15               | 0.79              |
| $\mu_d$ | 0.5                | 0.87              |
| $c$     | 1.23               | 0.82              |

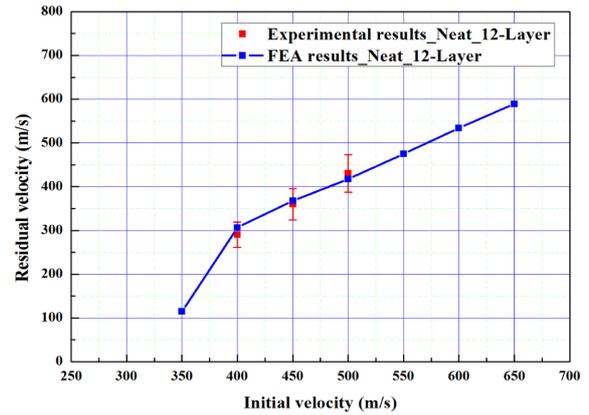


Fig. 11. Neat Kevlar 12-layer results

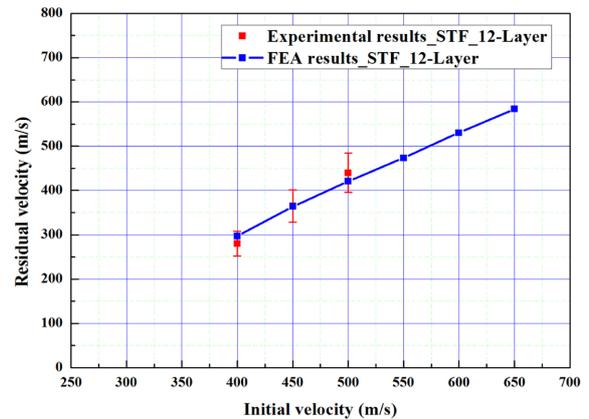


Fig. 12. STF Kevlar 12-layer results

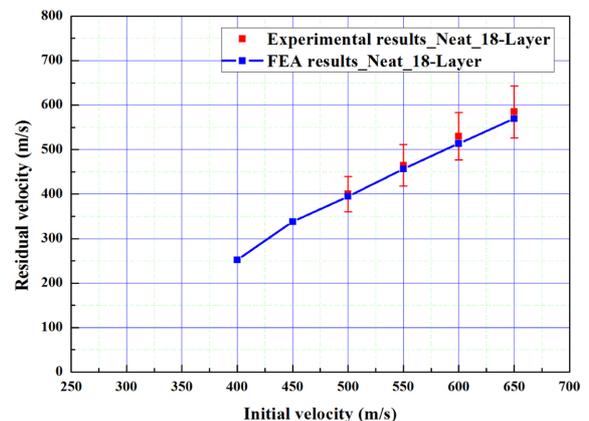


Fig. 13. Neat Kevlar 18-layer results

스틸 볼의 초기속도에 따른 해석의 종류는 총 9가지 경우로써 250 m/s, 350 m/s, 400 m/s, 450 m/s, 500 m/s, 550 m/s, 600 m/s, 650 m/s에 대한 해석을 수행하였다. 충돌 해석은 매우 짧은 미소시간 내에 대변형이 일어나는 현상이며 해석에 시간이 많이 소요될 뿐만 아니라 수렴에 어려움이 있다. 9가지 해석종류 각각 1 ms까지 시간적분법(Time integration method)을 통하여 해석을 수행하였다. 인장시험을 통해 얻었던 단위길이당 응력-변형률선도에서의 변형률을 토대로 Erosion이 원활히 일어나도록 설정하였다.

각 layer별 시험결과는 Fig. 11~18에 나타내었으며 실제 충돌시험 결과와 해석결과를 비교하였다. 실제 충돌시험 결과는 정상상태의 분포를 가지는 확률론적 결과이기 때문에 약 10%의 범위를 두고 비교하였다.

Fig. 11과 12는 STF가 함침되지 않은 순수 케블라 페브릭(neat Kevlar fabric)과 STF에 함침된 케블라 페브릭과 관통 후 잔류속도(Residual velocity)를 나타낸다. STF가 함침된 페브릭의 경우 최소 관통속도가 약 350 m/s로써 STF가 함침되지 않은 순수 페브릭의 약 300 m/s에 비해서 약 17%의 방탄 특성이 높은 것을 알 수 있다.

그러나 속도가 높아질수록 이러한 효과는 감소하며 초기속도가 약 450 m/s 이상의 영역에서는 큰 차이가 나타나지 않았다.

24-layer의 경우는 세 가지 경우에 대해서 해석 및 실험을 수행하였다. STF가 함침되지 않은 순수 케블라 페브릭 24-layer(neat 24-layer)(N24), STF 함침 8층 비함침(neat) 16층

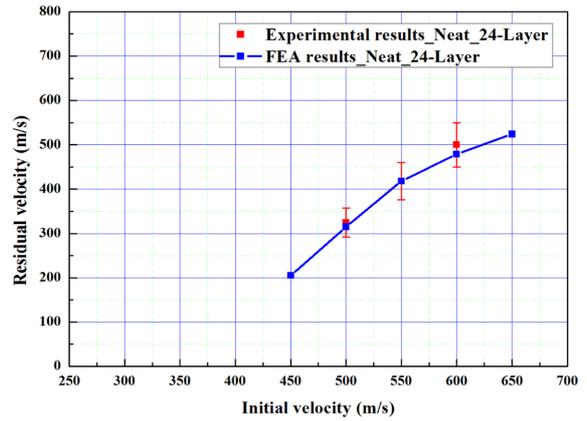


Fig. 16. Neat Kevlar 24-layer results

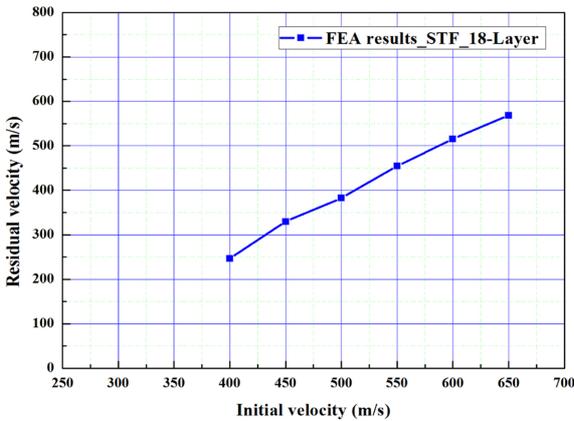


Fig. 14. STF Kevlar 18-layer results

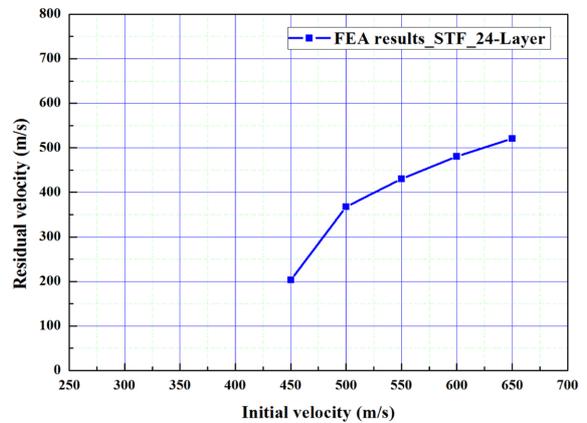


Fig. 17. STF Kevlar 24-layer results

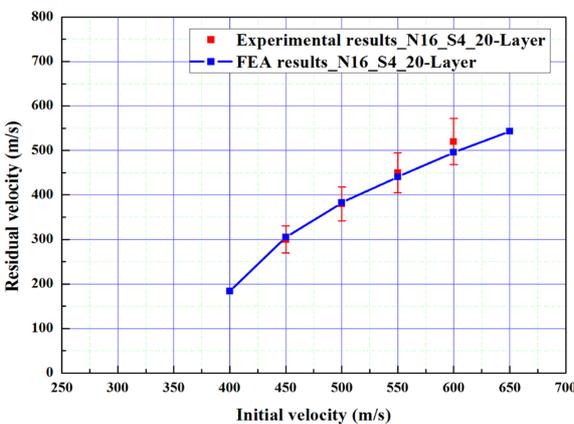


Fig. 15. Mixed Kevlar 20-layer results (N16+S4)

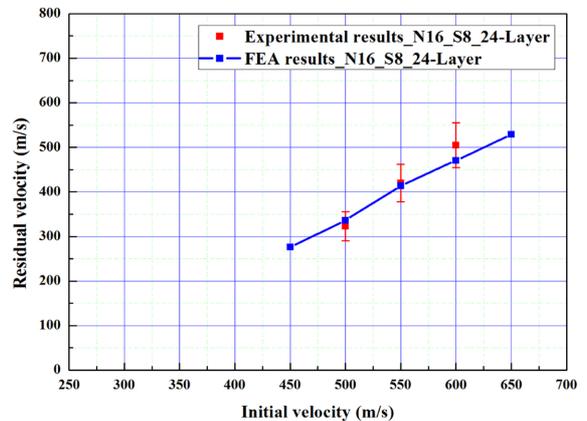


Fig. 18. Mixed Kevlar 24-layer results (N16+S8)

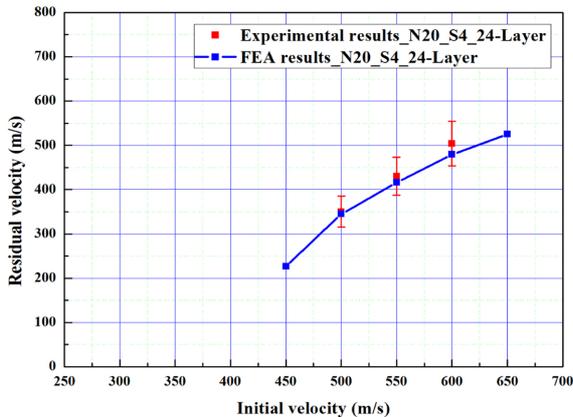


Fig. 19. Mixed Kevlar 24-layer results (N20+S4)

(N16\_S8), 그리고 비함침 20층 STF 함침 4층(N20\_S4)의 하이브리드 복합재의 경우에 대해서 방탄 시험 및 해석을 수행하였다. N24,N16\_S8과 N20\_S4 의 세 가지 경우 모두 초기속도 약 400m/s에서 처음 관통이 되었으며 대부분 실험치와도 일치하였다.

N16\_S8의 경우는 450 m/s의 속도를 기점으로 전후 부분이 어느 정도 불연속적인 특성을 나타낸다. 이것은 속도 약 450 m/s를 기점으로 STF의 특성이 변화를 나타내는 것을 의미하며 이전의 결과에서와 같이 약 400~450 m/s의 속도를 기점으로 이것보다 낮은 속도 영역에서는 SFT가 효과를 나타내지만, 이것보다 높은 속도의 영역에서는 오히려 STF가 미세하지만 역효과를 나타내는 경향을 나타내었다.

Fig. 11~19에서 알 수 있는 바와 같이 전산해석 결과가 방탄시험 결과와 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 전단농화유체가 함침된 케블라 페브릭 적층 복합재와 함침되지 않은 적층복합재의 방탄 특성에 대하여 실험과 해석한 결과를 제시하였다. 해석에서는 기존의 미시적 얇은 모델에서 벗어나 페브릭의 층을 3D 셸 요소로 모델링하여 전산구조 수치해석을 수행하였다. 케블라 페브릭에 전단농화 유체가 함침된 후 액체 상태로 남아있지 않고 건조된 상태의 재료를 사용하여 실험이 진행되었다. 현재의 연구는 대부분 전단농화 유체가 건조된 상태에서의 방탄성능 특성에 관한 부분에 집중되어 있다. 전단농화 유체가 액체 상태로 남아 있는 경우는 실제 군용 방탄 구조 적용에는 많은 어려움이 있다. 착용감, 무게, 씰링, 재료 특성의 불균일성 등의 많은 문제점이 있기 때문에 현재로서는 실제 적용이 타당하지 않으며 차후 이러한 문제점이 해결되어야 한다.

실험을 통하여 케블라 페브릭 적층복합재 12-layer, 하이브리드 20-layer 등을 대상으로 방탄시험과 해석을 병행하

였다. 전단농화유체가 함침된 페브릭의 경우 방탄특성의 변화가 나타나는데, 이러한 방탄 특성을 3D 셸요소를 사용하여 구현하였다. 전단농화유체에 의한 마찰특성을 고려하여 해석에 적용하였으며 해석의 결과는 시험 결과와 잘 일치하였다.

실험과 해석을 통하여 전단농화 유체가 함침된 케블라 페브릭의 방탄특성은 저속에서는 분명한 효과가 관찰되지만 고속에서는 의미 있는 방탄특성이 발견되지 않았다. 즉 전단농화 함침 방탄재는 저속에서만 효과가 검증되었다. 이러한 특성이 있기 때문에 일반 복합재 레이어와 전단농화 함침 복합재 레이어를 최적으로 배열하여 방탄의 성능을 극대화 하는 것이 바람직하다. 즉 탄환의 속도가 저속이 되는 지점에 전단농화유체가 함침된 복합재를 배치하는 것이다. 탄환의 속도가 고속인 전방에는 일반 방탄복합재를 배치하여 탄환의 속도를 낮추고, 탄환의 속도가 낮은 후방에 전단농화유체 함침 방탄복합재를 배치하여 방탄효과를 극대화 하는 방법으로 많은 연구가 진행되고 있다.

본 연구는 차후 전단농화유체에 의한 방탄특성을 연구하는 기초 자료로 활용될 수 있으며 이 분야에 대한 더욱더 진일보 된 연구를 위한 훌륭한 자료로 활용될 수 있다.

#### 후 기

본 연구는 국방과학연구소(ADD)가 지원하는 연구과제로(계약번호 UE135046GD) 수행된 것이며, 지원에 대해 진심으로 감사드립니다.

#### REFERENCES

- (International Journal) Wagner, N.J. and Brady, J.F., "Shear Thickening in Colloidal Dispersions", *Physics Today*, Vol. 62, No. 10, pp. 27-32, pp. 2009.
- (Thesis) Bae, Y.H., Protective Performance of Fiber Composites Impregnated with Shear Thickening Fluid (STF), M.D Thesis, Chungnam National University, Korea, 2009.
- Assessment of Liquid Bulletproof Material for Soldier Defense and Study on the Design Optimization Methodology, Agency for Defense Development, 2015.
- (Korean Journal) Lee, B.-W. and Kim, C.-G., "Computational Analysis of Shear Thickening Fluid Impregnated Fabrics Subjected to Ballistic", *Advanced Composite Materials*, Vol. 21, No. 2, April 2012, pp. 177-192.
- (Book) Kim, Y.S., Tensor&Continuum Mechanics, Hongrung Pub. Co., Korea, 2014.
- (International Journal) Gopinath, G., Zheng, J.Q., and Batra, R.C., "Effect of Matrix on Ballistic Performance of Soft Body Armor", *Composite Structures*, Vol. 94, Issue 9, 2012, pp. 2690-2696, 2012.
- (Korean Journal) Jo, J.H., Lee, Y.S., and Kim, H.L., "Numerical Simulation of Steel/kevlar Hybrid Composite Helmet Subjected

- to Ballistic Impact”, *Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 36, No. 12, pp. 1569-1575, 2012.
8. (Thesis) Moon, S.H., 3D-Modeling and Simulation of the STF Fabric, M.D Thesis, Andong National University, Korea, 2011.
  9. (Book) Choi, C.K., Finite Element Method, Techno-press Pub. Co., Korea, 2002.
  10. Ansys Workbench Software Help File.