

전단농화 유체가 함침된 케블라 방탄재의 충돌 성능해석

조희근*,#

*안동대학교 기계교육과

Collision Performance Analysis of Kevlar Bulletproof Material Impregnated with Shear Thickening Fluid

Hee-Keun Cho*,#

*Department of Mechanical Engineering Education, Andong National University, Andong 36729, Korea
(Received 26 September 2017; received in revised form 11 October 2017; accepted 13 October 2017)

ABSTRACT

This study investigated Kevlar fabric impregnated with shear thickening fluid (STF). The STF performance was assessed by comparing bullet-proof characteristics of STF impregnated and pure Kevlar material. The analysis employed a circular steel ball as the nominal warhead, and bulletproof characteristics were evaluated by the warhead residual velocity. Various initial velocity conditions were employed, with different bulletproof characteristics apparent for each velocity region. The results of this study provide effective data for future bulletproof material design and application.

Key Words : Kevlar(케블라), Bulletproof(방탄), FEA(유한요소해석), Residual Velocity(잔류속도)

1. 서 론

국방, 항공, 우주 등 첨단기술 분야뿐만 아니라 일반 산업분야에서도 충돌과 방탄에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 군사무기 및 항공기, 우주 구조체 개발 등의 분야에서는 다양한 첨단 소재를 응용하여 충돌 탄두에 대한 방탄특성을 극대화 하려고 하고 있다. 수 십년 동안 방탄특성이 우수한 첨단재료의 개발이 활발히 진행되었으며, 보편적으로 아라미드 섬유 계통인 케블라(Kevlar)를

많이 사용한다.

케블라는 가볍고 인장강도가 매우 우수해서 각종 군사용, 항공우주용 및 첨단 산업재료로 많이 사용된다. 케블라는 방탄 및 첨단재료로서 그 우수성이 입증되었다. 최근 방탄특성을 극대화하기 위하여 케블라 섬유에 전단농화 유체(STF, shear thickening fluid)를 함침하여 사용하는 연구가 활발히 진행되었다⁽¹⁻⁴⁾. 전단농화유체를 함침하여 방탄 특성을 향상하는 가장 기본적인 원리는 마찰력의 증가다. 직조된 케블라 섬유의 안(yarn)사이로 전단농화 유체가 함침되면 상태 운동에 의한 마찰력이 증가한다. 마찰력이 증가하면 여러 층으로 구성된 방탄재에서 방탄효과를 극대화 할 수 있다.

본 연구에서는 전단농화 유체가 함침된 케블라

Corresponding Author : hkcho@anu.ac.kr
Tel: +82-54-820-5677, Fax: +82-54-820-6379

직조 적층 복합재와, 함침되지 않은 순수한 케블라 직조 적층복합재의 방탄특성을 충돌 해석을 통하여 규명하였다. 충돌 해석을 위해서는 LS-Dyna 해석 코드를 사용하였다⁽⁵⁻⁶⁾. 3D 셀 요소를 사용하여 해석을 수행하였고, 충돌 성능은 충돌 후 잔류속도를 측정하는 방법으로 평가하였다.

2. 전단농화 유체

특수한 목적으로 사용되는 액체는 그 사용하는 목적에 적합한 특수한 성질을 가지고 있다. 전단농화 유체도 마찬가지로 그 고유한 특성 때문에 방탄 성능을 향상시키기 위하여 적용된다. 전단농화 유체는 전단변형률 속도에 큰 영향을 받으며, 점성이 변화하는 유체이기 때문에 비 Newton 유체로 분류된다. 전단응력과 전단변형률 속도는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다⁽¹⁾.

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

여기서 μ 는 점성계수를, $\dot{\gamma}$ 는 전단 변형률을 각각 나타낸다. 점성이 매우 큰 고체나, 각종 고분자재료 및 전단농화 유체, 전단 담화유체의 경우에도 식(1)로 표현이 가능하다. 다만 점성계수 μ 는 재료상수 τ_y 와 초기 전단변형 γ_0 를 사용하여 식(2)와 같은 식으로 나타낼 수 있다.

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

여기서 전단응력 τ 는

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

τ_y 는 변형이 일어나기 직전까지의 응력을 말하며 고체의 경우에는 소성 변형이 일어나는 탄성구간에서의 항복응력을 의미한다. 유체의 경우는 $\tau_y = 0$ 이다.

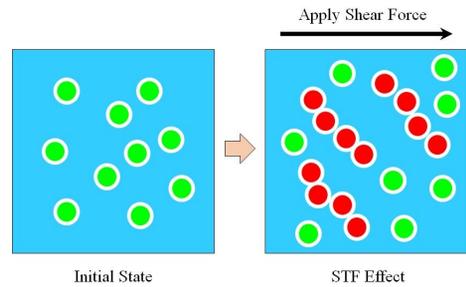


Fig. 1 The function of STF

고체와 액체의 중간상태의 성질을 가지는 것을 점탄성(visco-elasticity)이라고 하며, 전단농화 유체는 전형적인 점탄성 물질이다. 이러한 고체와 액체의 경계에 있는 특정한 임계점을 기준으로 하여 고체와 액체의 물리적 성질을 각각 가지게 된다. 전단농화 유체에 외력의 크기와 속도를 증가시키면 유체내부의 전단변형 속도 ($\dot{\gamma}$)도 점차 증가하게 되는데, 이 값이 어떤 특정한 임계값 ($\gamma_{critical}$)에 도달하게 되면, 유체의 특성은 없어지고 매우 단단한 고체적 특성을 나타낸다. 이러한 특성은 Fig. 1에 나타난 도형에 의해서 설명이 가능하다. 초기상태의 유체는 분자구조로 볼 때 무작위로 배열되어 있으나, 특정한 임계전단변형 속도 ($\gamma_{critical}$)를 지나게 되면 임의의 한 방향으로 분자의 배열이 바뀌게 된다. 이 변형된 분자 배열이 점성계수를 급격히 증가시키는 원인이 된다.

3. 모델링 및 전산 수치해석

3.1 동적해석 평형방정식

구조물의 유한요소 동적해석을 위해서는 전체 구조물의 질량행렬, 강성행렬, 감쇠행렬을 계산하여야 한다. 질량행렬의 계산에서는 크게 연속질량행렬과, 집중질량행렬 계산방법이 있다. 충돌해석과 같이 개별적인 요소가 형상이 심하게 변화하거나, 소멸하는 경우가 있기 때문에 해석에 사용되는 대부분의 요소는 가우스 적분점이 1개인 경우가 대부분이다. 뿐만 아니라 가상변위모드의 발생을 억제하기 위한 적절한 알고리즘도 반드시 필요하다. 동적해

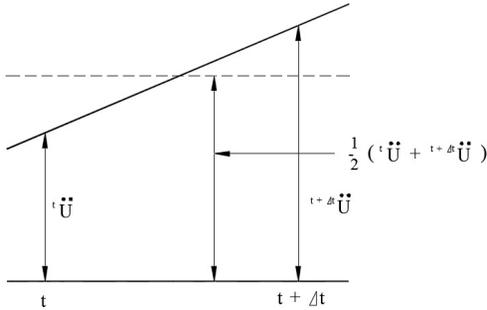


Fig. 2 Trapezoidal rule of Newmark method

석을 위한 수치해석 알고리즘은 중앙차분법(central difference method), 호볼트 방법(Houbolt method), 윌슨 θ 방법(Wilson θ method), 뉴마크방법(Newmark method) 등이 있다. 본 연구에서는 뉴마크 방법을 사용하였다⁽⁷⁾.

시간 $t + \Delta t$ 에서의 동적 평형방정식은 식(4)와 같다. Fig. 2는 t 와 $t + \Delta t$ 사이의 가속도와 속도를 나타낸다. 또한 $t + \Delta t$ 에서의 속도와 변위는 식(5)로 나타낼 수 있다.

$$[M]^{t+\Delta t} \ddot{U} + [D]^{t+\Delta t} \dot{U} + [K]^{t+\Delta t} U = {}^{t+\Delta t} \{R\} \quad (4)$$

$${}^{t+\Delta t} \dot{U} = {}^t \dot{U} + [(1-\delta) {}^t \ddot{U} + \delta {}^{t+\Delta t} \ddot{U}] \Delta t \quad (5)$$

$${}^{t+\Delta t} U = {}^t U + {}^t \dot{U} \Delta t + \left[\left(\frac{1}{2} - \alpha \right) {}^t \ddot{U} + \alpha {}^{t+\Delta t} \ddot{U} \right] \Delta t^2$$

여기서 $[M]$ 은 질량행렬, $[D]$ 는 감쇠행렬, \dot{U} 는 속도벡터, \ddot{U} 는 가속도벡터, α 와 δ 는 적분의 정확성과 안정성을 위하여 정의되는 파라미터이다.

$${}^{t+\Delta t} U = {}^t U + \frac{\Delta t}{2} ({}^t \dot{U} + {}^{t+\Delta t} \dot{U})$$

$${}^{t+\Delta t} \dot{U} = {}^t \dot{U} + \frac{\Delta t}{2} ({}^t \ddot{U} + {}^{t+\Delta t} \ddot{U}) \quad (6)$$

$${}^{t+\Delta t} \ddot{U}^{(k)} = \frac{4}{\Delta t^2} ({}^{t+\Delta t} U^{(k-1)} - {}^t U + \Delta U^{(k)}) - \frac{4}{\Delta t} {}^t \dot{U} - {}^t \ddot{U}$$

Fig. 1의 trapezoidal rule을 사용하여 변위, 속도,

가속도의 항들을 증분형의 형태로 나타내면 식(6)과 같다. 동적평형방정식 식(4)를 실제 유한요소 수치 해석방법으로 풀기 위하여, 비선형 증분형 평형방정식으로 나타낼 필요가 있다. 가상일의 원리에 기초한 내력과 외력의 평형방정식으로부터 비선형 적분 동적 평형 방정식을 텐서의 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\int_{V_0} {}^t \ddot{u}_i \rho \delta {}^t u_i \delta V + \int_{V_0} D_{ijrs} e_{rs} \delta e_{ij} \delta V \quad (7)$$

$$+ \int_{V_0} {}^t S_{ij} \delta \eta_{ij} \delta V = {}^{t+\Delta t} R - \int_{V_0} {}^t S_{ij} \delta e_{ij} \delta V$$

여기서 ρ 는 밀도, δ 크로네커 델타(kronecker delta), e 선형 변형을 텐서, η 비선형 변형을 텐서, S 는 응력텐서, D 는 재료 물성치 텐서이다. 위의 식(7)의 적분 식을 변분법을 통하여 실제 해석을 위한 행렬의 형태로 변환할 수 있다. 이렇게 변환된 행렬식이 식(8)이다.

$$\left([{}^t K_L + {}^t K_{NL}] + \frac{4}{\Delta t^2} [M] + \frac{2}{\Delta t^2} [C] \right) \Delta U^{(i)}$$

$$= {}^{t+\Delta t} R - {}^{t+\Delta t} F^{(i-1)}$$

$$- [M] \left\{ \frac{4}{\Delta t^2} ({}^{t+\Delta t} U^{(i-1)} - {}^t U) - \frac{4}{\Delta t} {}^t \dot{U} - {}^t \ddot{U} \right\}$$

$$- [C] \left\{ \frac{2}{\Delta t} ({}^{t+\Delta t} U^{(i-1)} - {}^t U) - {}^t \dot{U} \right\} \quad (8)$$

기본적인 동적 수치해석뿐만 아니라 각 스텝 해석마다 요소의 접촉, 소멸 등의 알고리즘을 계산해야 한다.

3.2 충돌 파괴 모델

본 연구의 충돌 모델은 스틸 볼의 강구가 케블라 직물에 충돌하는 것이다. 서로 다른 성질을 가지는 재료의 충돌에 있어서는 각각의 재료에 적합한 충돌 모델을 적용하여야 한다. 스틸 강구에 대해서는 탄소성 파손모델인 Johnson-Cook 모델을 사용하였다^(6,8-10). Johnson-Cook 모델은 대표적인 탄소성 모델

로써 고속충돌에 의한 큰 변형율과 변형속도를 잘 표현할 수 있을 뿐만 아니라, 온도가 고온으로 올라가는 조건에서도 계산이 원활하다. Johnson-Cook 모델은 항복강도가 변형율, 변형율 속도, 온도 등의 함수이며 식(9)와 같이 표현된다.

$$\sigma_y = (A + B \bar{\epsilon}^n) (1 + c \ln \dot{\epsilon}^*) (1 - T^{*m}) \quad (9)$$

여기서 A, B, C, n, m 은 재료상수를 나타내며 각각 initial yield stress, hardening constant, hardening exponent, strain rate constant, thermal softening exponent, melting temperature exponent 이다. $\bar{\epsilon}^n$ 는 유효 소성변형율, $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0$ 는 유효 소성변형율 비, $T^* = (T - T_{room}) / (T_{melt} - T_{room})$ 이다. 그리고 캐블라의 파괴모델로는 Tsai-Wu 모델을 적용하였다. Tsai-Wu 모델은 특히 섬유강화 복합재의 파괴 모델로 매우 적합하며 해석 결과의 신뢰도가 매우 높다. 이 모델에서는 섬유(fiber)의 파괴 모드와 기지(matrix)의 파괴로 구분하여 정의 되고 있다⁽⁶⁾.

I) 강화섬유 인장 파괴 모드

$$e^2 = \left(\frac{\sigma_{aa}}{X_t} \right)^2 + \beta \left(\frac{\sigma_{ab}}{S_c} \right) - 1 \begin{cases} \geq 0 & failed \\ < 0 & elastic \end{cases} \quad (10)$$

ii) 강화섬유 압축 파괴모드

$$e^2 = \left(\frac{\sigma_{aa}}{X_c} \right)^2 - 1 \begin{cases} \geq 0 & failed \\ < 0 & elastic \end{cases} \quad (11)$$

iii) 기지의 인장-압축 파괴모드

$$e^2 = \frac{\sigma_{bb}^2}{Y_c Y_t} + \left(\frac{\sigma_{ab}}{S_c} \right)^2 + \frac{(Y_c - Y_t) \sigma_{bb}}{Y_c Y_t} - 1 \begin{cases} \geq 0 & failed \\ < 0 & elastic \end{cases} \quad (12)$$

여기서 β 는 0, 혹은 1을 가지는 상수이며, X, Y 는 재료의 각축방향 강도, S 는 전단강도를 나타낸다.

3.3 전산해석 모델링

충돌해석을 위해 3D 쉘 요소를 사용하여 모델링 하였다. 캐블라 직조물의 사이즈는 500mm × 500mm(H×V)인 정사각형 모델로써 형상의 대칭성으로 인하여 1/4만 모델링하였다. 강구의 지름은 9mm이며 물성치는 Table 1에 나타내었다.

캐블라 직조물 1 layer 의 두께는 0.24mm이다. 12, 18, 24 layer에 대해서 방탄 충돌 해석을 수행하였다. 방탄에 사용되는 직조물의 모델링 기법에는 크게 두 가지가 있다. 직조물의 개별 안(yarn)을 세부적으로 모델링하여 안의 물성치를 가지고 해석하는 미시적인 방법과, 전체 직조물의 평균적인 물성치로 균일함을 가정하여 해석하는 거시적인 방법이 있다. 미시적 방법에 의한 해석은 다수의 층을 가지고 있는 직조물의 해석에서는 거의 수행이 불가능 하다. 해석 량이 기하급수적으로 증가하여 해석의 오차에 의한 에러 및 결과의 부정확성이

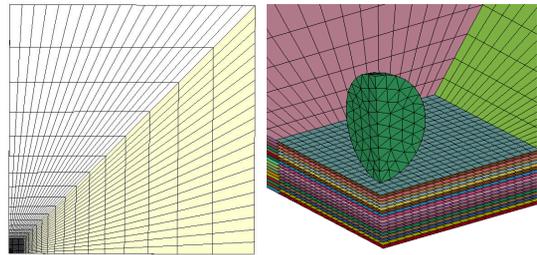


Fig. 3 FEA model for collision analysis

Table 1 Material properties of steel ball

Properties	Value
ρ (kg/m ³)	7830
specific heat (J/kg·C)	477
E (MPa)	2.1e5
initial yield stress(MPa)	792
hardening constant(MPa)	510
hardening exponent	0.26
strain rate constant	0.014
thermal softening exponent	1.03
melting temperature	1519.9
bulk modulus(MPa)	1.59e5
shear modulus(MPa)	8.18e4

증가한다. 그리고 안과 안 사이의 마찰을 모두 정의해 주어야 하며 특히 주면의 다른 안과의 마찰도 고려하여야 한다.

반면 거시적 모델링은 평균적인 물성치 값으로 단일 평면 요소 모델링하기 때문에 다수의 층을 가진 복합재로 쉽게 해석이 가능하고 결과 또한 신뢰성이 높다⁽¹¹⁻¹²⁾. 본 해석에서는 케블라 직조물의 안을 일일이 모델링하지 않고 전체 층을 균일한 단일 요소로 분할하는 거시적 모델링 방법을 택하였다. Table 2는 케블라의 직조물의 물성치를 나타낸다.

직조물 층의 모델링에서는 스틸 강구가 직접 충돌하는 영역은 요소의 사이즈를 충분히 작게하여 해석결과와의 정확도를 높였고, 충돌부와 멀어질수록 요소가 점점 커지도록 요소를 분할하였다. 전체 영역의 1/4 모델링으로 인한 대칭 경계조건 및 최 외곽선의 구속조건 등이 정의 되었다.

전단농화 유체가 함침된 케블라 직조물의 경우는 미세한 실리카 입자가 섬유조직에 부착된다. 이러한 미세 실리카는 충돌 시 섬유와 섬유가 서로 마찰을 일으킬 때, 마찰계수를 증가시키는 역할을 한다. 마찰계수의 증가는 충돌에너지의 흡수를 증가시켜서 방탄특성을 향상시키는 것을 의미한다 이러한 마찰효과는 정마찰계수, 동마찰계수, 상대속도에 의한 감쇠 상수 등을 종합하여 식(13)으로 계산하며 이러한 계수 및 상수들은 충돌 및 방탄 특성에 결정적인 역할을 한다.

Table 2 Material properties of Kevlar fabric

Properties	Value
ρ (kg/m ³)	1440
E ₁₁ (MPa)	18.75
E ₂₂ (MPa)	18.75
E ₃₃ (MPa)	2.03
G ₁₂ (MPa)	0.380
G ₂₃ (MPa)	0.046
G ₁₃ (MPa)	0.046
ν_{12}	0
ν_{23}	0
ν_{31}	0
Strength x=y (MPa)	840
Shear Strength xy (MPa)	190

Table 3 Friction coefficient of pure Kevlar and STF Kevlar

	Pure Kevlar fabric	STF Kevlar fabric
μ_d	0.15	0.79
μ_s	0.5	0.87
c	1.23	0.82

$$\mu = \mu_d + (\mu_s - \mu_d)e^{-c(v_{rev})} \quad (13)$$

식(13)에서 μ_d , μ_s , c , v_{rev} 는 각각 동마찰계수, 정마찰계수, 지수 감쇠상수 및 마찰대상의 상대속도를 각각 나타낸다. Table 3에는 해석에 사용된 순수 케블라 직물과 전단농화유체가 함침된 케블라 직물의 마찰계수 및 감쇠상수를 나타내었다.

3.4 해석 결과

전단농화 유체가 함침된 케블라 직물 적층복합재와 순수한 케블라 직물 적층복합재의 방탄특성을 평가하기 위하여 3.3절에서 언급한 조건에 따라 해석을 수행하였다.

충돌해석에서 각 layer 간의 접촉 및 스틸 강구와 각 layer 간의 접촉 조건을 모두 정의하여 해석을 수행하였으며, 순수한 케블라 직물과 전단농화 유체가 함침된 케블라의 마찰 특성이 상이하다.

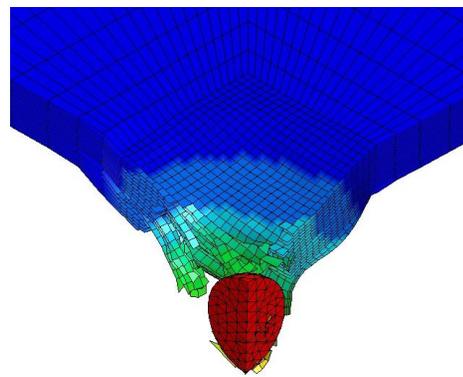
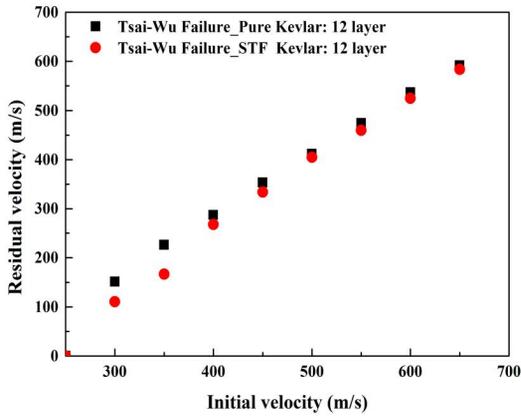
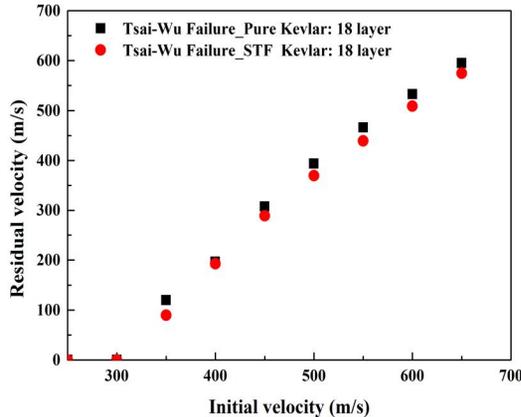


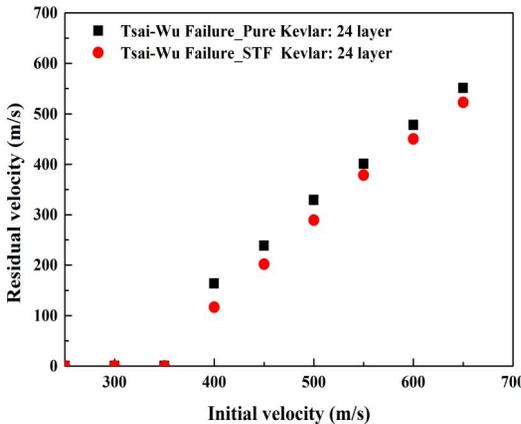
Fig. 4 Kevlar laminate penetration analysis of steel ball



(a)



(b)



(c)

Fig. 5 Pure & STF Kevlar fabric collision analysis for (a) 12 layer, (b) 18 layer, (c) 24 layer

다양한 형태의 충돌에 관한 많은 연구결과를 참고하여 본 해석을 수행하였다⁽¹³⁻¹⁶⁾. 해석에서는 초기 속도를 250m/s에서부터 60m/s까지 50m/s의 단위로 증가시키면서 해석을 수행하였다. 방탄성능을 정량적으로 평가하기 위하여 탄두로 간주되는 강구의 충돌후의 속도를 측정하였다. Fig. 4는 스틸 강구가 케블라 직물 면직 복합재를 관통하는 순간을 나타낸다. 충돌해석에서는 각 요소의 변위 혹은 에너지가 일정 수준이상이면 요소가 없어지는 알고리즘을 사용한다. Fig. 5는 케블라 직물 12 layer, 18 layer, 24 layer 각각에 대한 강구 탄두의 초기속도에 따른 충돌 후의 잔류속도(residual velocity)를 나타낸다. 해석의 결과를 바탕으로 유추해 보면 12 layer는 강구의 속도가 약 200m/s에서 관통이 시작되었고, 18 layer 에서는 약 300m/s, 24 layer 에서는 약 350m/s 부근에서 관통이 시작 되었다. 복합재의 파괴모드는 Tsai-Wu 파괴모델을 적용하였다. Fig. 5에서와 같이 순수한 케블라 직물에 비해서 전단농화 유체가 함침된 케블라 직물의 방탄 특성이 우수함을 알 수 있다. 12 layer의 해석에서는 초기 충돌 속도가 약 400m/s이하에서 전단농화 유체에 함침된 케블라의 방탄 성능이 상대적으로 더 높았고, 초기 속도가 고속으로 갈수록 이러한 차이가 점점 줄어들었다. 18 layer, 24 layer의 경우에도 이러한 경향은 비슷하게 나타났다. 충돌현상을 수치해석 적으로 분석 할 때 많이 사용되는 것이 에너지이다. 초기에 탄두가 가지고 있는 운동에너지가 충돌로 인한

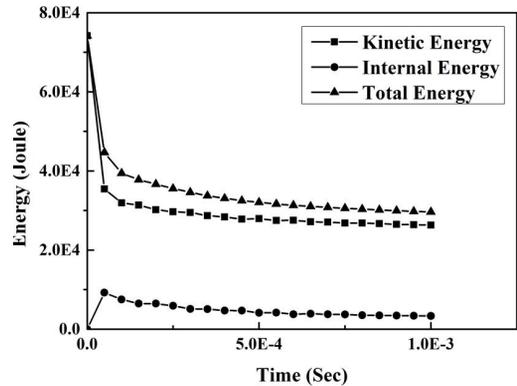


Fig. 6 Energy variation during collision

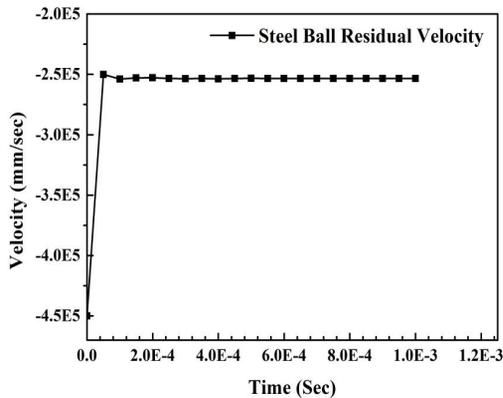


Fig. 7 Velocity profile of the steel ball

요소변형 및 마찰에 의한 열에너지 등으로 소멸되고 나머지 에너지는 잔류속도로 나타난다. 잔류속도가 크다는 것은 충돌로 인한 에너지의 소비가 작다는 것이고 이것은 다시 방탄성능이 낮은 것을 의미한다. Fig. 6에서 나타낸 바와 같이 스틸 강구가 케블라와 충돌할 때 에너지가 급격히 감소한다. 이 소모된 에너지는 일부는 열 및 변형을 위한 에너지로 소비되고 나머지는 내부에너지로 저장된다.

Fig. 7은 24 layer의 케블라 적층복합재의 충돌 해석을 통하여 얻은 강구의 시간에 따른 속도변화를 나타낸다. 충돌 순간 속도가 급격히 감소하고 일정하게 잔류속도가 유지되고 있다.

4. 결론

전단농화 유체가 함침된 케블라 직물 복합재의 방탄특성 및 성능을 규명하기 위하여 똑 같은 조건의 순수 케블라 직물 복합재의 방탄 성능과 결과를 비교하였다. 충돌 전산 해석을 통하여 성능을 규명하였고, 해석을 위한 이론적 수식을 정립하였다. 전단농화 유체가 함침된 케블라 복합재의 유한요소해석을 위해 수많은 시행착오를 거쳐 적합한 모델을 개발하였다.

해석결과 전단농화 유체가 함침된 케블라 직물의 경우 똑같은 조건의 순수한 케블라 직물에 비해서 방탄특성이 우수하였다. 12 layer의 충돌에 대한 해석의 경우 전단농화 유체가 함침된 케블라의 경

우 순수한 케블라에 비해서 약 40m/s 정도 투과 후 속도(잔류속도)가 작게 나타났다. 이러한 현상은 적층수의 변화, 초기속도의 변화 등에 따라서 다소 차이를 나타내었지만 경향성은 분명하게 확인할 수 있었다. 이러한 연구는 차후 충돌뿐만 아니라 다양한 최적화 설계로 연구의 확장이 가능하다^{(17-18)}}.

후 기

이 논문은 2016학년도 안동대학교 국제학술 교류 보조금에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. Moon, S. H., "3D-Modeling and Simulation of the STF Fabric," M. D. Thesis, Andong National University, Republic of Korea, 2011.
2. Decker, M. J., Halbach, C. J., Wagner, N. J. and Wetzel, E. D., "Stab Resistance of Shear Thickening Fluid(STF)-treated Fabrics," Composites Science and Technology, Vol. 67, No. 3, pp. 565-578, 2007.
3. Lee, B. W., and Kim, C. G., "Computational Analysis of Shear Thickening Fluid Impregnated Fabrics Subjected to Ballistic Impacts," Advanced Composite Materials, Vol. 21, No. 2, pp. 177-192, 2012.
4. Lee, Y. S., Weizel, E. D. and Wagner, N. J., "The Ballistic Impact Characteristics of Kevlar Woven Fabrics Impregnated with a Colloidal Shear Thickening Fluid," Journal of Materials Science, Vol. 38, No. 13, pp. 2825-2835, 2003.
5. Barauskas, R. and Abraitienė, A., "Computational Analysis of Impact of a Bullet Against the Multilayer Fabrics in LS-DYNA," International Journal of Impact Engineering, Vol. 34, No. 7, pp. 1286-1305, 2007.
6. LSTC, LS-DYNA User's Manual Revision 1275, LSTC Inc., pp. 238-240, 2012.
7. Bathe, K. J., Finite Element Procedures, Prentice Hall, pp. 768-815, 1996.

8. Coron, E., and Orient, G. E., "An Evaluation of the Johnson-Cook Model to Simulate Puncture of 7075 Aluminum Plates," Sandia National Laboratories(SNL-NM), SAND2014-1550, 2014.
9. Sobolev, A. V., and Radchenko, M. V., "Use of Johnson-Cook Plasticity Model for Numerical Simulations of the SNF Shipping Cask Drop Tests," Nuclear Energy and Technology, Vol. 2, No. 4, pp. 272-276, 2016.
10. Banerjee, A., Dhar, S., Acharyya, S., Datta, D. and Nayak, N., "Determination of Johnson Cook Material and Failure Model Constants and Numerical Modeling of Charpy Impact Test of Armour Steel," Materials Science & Engineering A, Vol. 640, pp. 200-209, 2015.
11. Duan, Y., Keefe., M., Bogetti., T. A. and Cheeseman, B. A., "Modeling the Role of Friction During Ballistic Impact of a High-strength Plain-weave Fabric," Composite Structures, Vol. 68, No. 3, pp. 331-337, 2005.
12. Duan, Y. Keefe., M., Bogetti., T. A., Cheeseman, B. A. and Powers, B., "Modeling Friction Effects on the Ballistic Impact Behavior of a Single-ply High-strength Fabric," International Journal of Impact Engineering, Vol. 31, No. 8, pp. 996-1012, 2005.
13. Lim, C. T., Shim, V. P. W. and Ng, Y. H., "Finite-element Modeling of the Ballistic Impact of Fabric Armor," International Journal of Impact Engineering, Vol. 28, No. 1, pp. 13-31, 2003.
14. Lee, J. G., Kim, S., Kim, G. and Cho, M., "Study on Bullet-Proof Performance of Multi-Layered Hybrid Armor Against 9mm FMJ Projectile," Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea, Vol. 25, No. 6, pp. 487-495, 2012.
15. Ramadhan, A. A., Talib, A. R. A., Mohd, A. S. and Zahari, R. R., "High Velocity Impact Damage in Kevlar-29/Epoxy- Al_2O_3 ," Journal of Advanced Science and Engineering Research, Vol. 2, No. 2, pp. 138-154, 2012.
16. Cho, J. U., Min, B. S. and Han, M. S., "Basic Study on Impact Analysis of Automobile," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 8, No. 1, pp. 64-70, 2009.
17. Kang, H., et al, "Prediction of Impact Energy Absorption in a High Weight Drop Tester by Response Surface Methodology," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 15, No. 3, pp. 44-51, 2016.
18. Byon, S. K., "Optimization of Boss Shape for Damage Reduction of the Press-fitted Shaft End," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 14, No. 3, pp. 85-91, 2015.