

전단농화유체 함침 다층직물의 방탄성능 및 거동 수치해석

문상호¹⁾ · 손권중²⁾ · 조희근³⁾ · 박종규⁴⁾ · 정의경⁴⁾ · 이만영⁴⁾ · 김시조^{*1)}

¹⁾ 안동대학교 기계설계공학과

²⁾ 홍익대학교 기계정보공학과

³⁾ 안동대학교 기계교육과

⁴⁾ 국방과학연구소 제4기술연구본부

Numerical Analysis of the Ballistic Performance and Behavior of STF-Impregnated Multi-layer Fabrics

Sang Ho Mun¹⁾ · Kwon Joong Son²⁾ · Hee Keun Cho³⁾ · Jong Kyoo Park⁴⁾ ·
Euigyung Jeong⁴⁾ · Man Young Lee⁴⁾ · See Jo Kim^{*1)}

¹⁾ Department of Mechanical Design Engineering, Andong National University, Korea

²⁾ Department of Mechanical and Design Engineering, Hongik University, Korea

³⁾ Department of Mechanical Engineering Education, Andong National University, Korea

⁴⁾ The 4th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 4 November 2015 / Revised 17 March 2016 / Accepted 16 May 2016)

ABSTRACT

Impregnation of shear-thickening fluid(STF) into high-strength fabrics makes a considerable improvement on the ballistic performance of fabric armors. Understanding dissipation augmentation due to shear thickening effects on yarn-yarn and yarn-projectile friction is of great importance in liquid armor research. This paper takes a shear-thickening effect into account in numerical simulations by using a velocity-dependent friction model. Impact simulations were performed to validate the friction model as well as to evaluate the ballistic performance of STF-fabrics. Impact simulations on neat fabrics were also conducted to provide baseline results for comparison.

Key Words : Shear-Thickening Fluid(전단 농화 유체), Ballistic Performance(방탄 성능), Friction(마찰), Fabric Array(직물 배열), Multi-Layer Fabric(다층직물)

1. 서론

전투에 임하는 병사는 각종 위협에 노출된 상태에서 임무를 수행하며 생존성 향상을 위하여 방탄복을 착용한다. 개인화기가 본격적으로 사용되기 이전에는 칼이나 화살 공격으로 부터 신체를 보호하기 위해 가죽이나 쇠사슬로 제작된 방호복을 입었으며, 1차 세계대전

* Corresponding author, E-mail: sjkim1@andong.ac.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

중에는 포탄 파편으로부터 병사들을 보호하기 위해 강철계열의 금속판을 삽입한 방탄복을 사용하였다. 그러나 금속판은 무겁고 유연성이 떨어지는 단점이 있어 가볍고 유연한 나일론 계열이나 유리계열의 섬유를 이용한 방탄복이 개발되기 시작하였다^{4,5}. 이후 1970년대 아라미드계열의 케블라 개발로 방탄복의 성능이 혁신적으로 향상되었다⁶.

아라미드계열 강화섬유의 방탄 성능을 향상시키기 위해 전단농화유체(shear-thickening fluid)를 처리한 액체방탄재료에 대한 연구가 시작되었다^{6,7}. 나노 입자가 분산된 유체에 전단력이 가해지면 전단 변형률(shear rate)이 증가하게 되고, 임계전단률(critical shear rate)에 도달하게 되면 점도가 급격히 증가하는 특성을 보인다⁸. 이러한 유변학적인 특성을 지닌 전단농화유체를 방탄직물에 함침하면 탄두 충돌 시 방탄직물의 점성이 높아져 탄두의 운동에너지를 더 효과적으로 흡수할 수 있다. 고강도 섬유직물에 나노입자 분산현탁액을 함침시킨 다음 일정량의 희석액을 건조하고 최종 가공 처리하여 제작한다. 방탄 직물 사이에 분산된 나노 입자에 의해 전단농화와 같은 유변학적 거동이 나타나게 되며, 이는 방탄직물이 총탄에 피격될 때 나노 입자가 안(yarn)과 안 사이에 점성마찰을 높여서 방탄 성능을 향상하는 역할을 한다.

전단농화유체가 함침된 직물의 방탄 성능이 주목을 받게 되면서, 액체방탄재료의 충돌 거동 및 마찰 특성에 대한 실험적 연구 및 수치적 연구가 수행되고 있다. Zhen과 그의 동료들은 이차원 삼 축으로 짠 직물(tri-axially braided fabric)의 마찰력 효과에 대하여 실험적 연구를 수행 하였다⁹. 그 결과 직물의 마찰 효과가 탄두의 충돌에너지 일부를 마찰 에너지로 발산하여 탄두의 잔류속도를 감소시키는 것으로 확인되었다. Lee와 Kim은 직물에서 안 하나를 뽑을 때 발생하는 힘과 에너지를 수치해석과 비교하여 안과 안사이의 마찰계수를 제시하였다¹⁰. Lee와 그의 동료들은 케블라와 전단농화유체 파우치의 배열과 조합이 방탄성능에 미치는 영향을 조사하였다¹¹. Park과 그의 동료들은 8층 비함침 케블라 직물과 5층 케블라 함침직물의 고속 충돌 실험결과를 비교·분석하여 함침 직물이 우수한 방탄 성능을 나타냄을 확인하였다¹².

본 연구에서는 다층 방탄직물 구성 시 전단농화유체 함침 직물(STF fabric)과 비함침 직물(neat fabric)의 적층 배열에 따른 방탄성능의 차이를 유한요소 프로그램인 LS-DYNA를 이용하여 확인하고자 한다. 얻어진 수

치해석 결과로부터 충돌자의 속도 및 운동에너지를 계산하고 충돌과정에서 방탄직물의 변형 및 응력 분포를 살펴봄으로써 STF 함침 직물과 비함침 직물의 충돌 거동을 비교·분석하고자 한다.

2. 방탄직물 충격 거동 모델링

2.1 방탄직물의 형상 및 경계조건

수치해석에 사용된 직물형상은 평직물 시험편의 직조방법과 같이 위사(weft)와 경사(warp)가 반복적으로 교차한 형태로 생성하였다. 직물형상을 안 단위로 생성하면 안의 풀림(pull-out) 현상을 가시화할 수 있고, 안과 안 사이에 전단농화 효과에 의한 마찰력을 표현할 수 있는 장점이 있다. 그리고 전산해석 시 필요한 안 한 가닥의 인장(tension)실험 물성치^{13,14}는 기존의 연구 결과를 통해 쉽게 확보할 수 있다.

Fig. 1은 해석을 위해 셀 형태의 위사와 경사를 직조하여 생성한 4층 직물과 구형 탄두를 탄두의 진행방향에서 바라본 모습이다. 탄두는 직물 중심에 충돌하며 대칭 조건에 의하여 전체의 1/4만을 수치 해석하였다. 대칭면을 제외한 2개의 면에는 완전 구속조건을 설정하였다. Fig. 1에서 정사각형 직물의 한 변 길이는 46.35 mm이며, 탄두의 지름은 8.9 mm이고, 충돌 속도는 250 m/s이다. 수치해석 연구를 위해 6가지 형태의 4층 직물을 채택하였고 각 형태별 함침 직물(S)과 비함침 직물(N)의 배열 조합을 Table 1에 정리하였다.

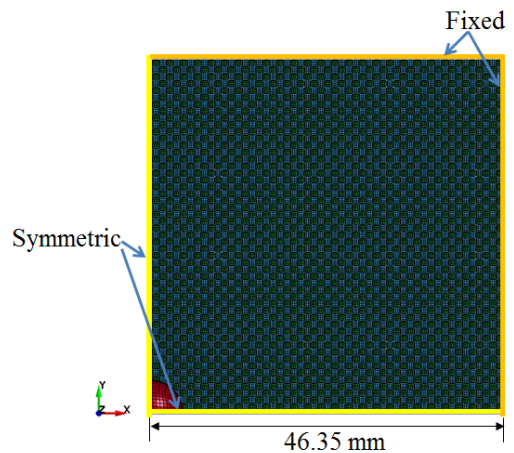


Fig. 1. 3-D multi-layer fabric geometry and the boundary conditions

탄두와 직물의 재료 물성치는 Table 2와 같다. 전단농화 효과를 고려한 마찰계수는 안과 안 사이에만 적용하였다. 탄두는 탄소성 재료(Johnson-Cook model)를 사용하였고, 직물 재료모델은 운동학적 소성 모델(plastic kinematic model)을 사용하였다.

Table 1. Construction of 6 four-ply fabric targets

Layer number	Target number					
	1	2	3	4	5	6
1	N*	S**	S	N	N	S
2	N	S	S	N	S	N
3	N	S	N	S	S	N
4	N	S	N	S	N	S

* 비함침 직물(N), ** 함침 직물(S)

Table 2. Material properties of a projectile and fabric

Projectile – Johnson–Cook Model			
Density (g/mm ³)	Shear modulus (MPa)	Young's modulus (MPa)	Poisson's ratio
0.784E-3	0.770E+5	0.200E+6	0.30
Yield stress (MPa)	Hardening constant (MPa)	Hardening exponent	Strain rate constant
0.792E+3	0.510E+3	0.260	0.014
Thermal softening exponent	Melting temp. (K)	Reference temp. (K)	Specific heat (J/kg.K)
1.03	1793	300	477
Fabric – Plastic Kinematic Model			
Density (g/mm ³)	Young's modulus (MPa)	Poisson's ratio	Yield stress (MPa)
0.144E-3	0.80E+5	0.36	0.280E+4
Tangent modulus (GPa)	Hardening parameter	Failure strain	
0	0	0.035	

2.2 STF 효과 적용

탄두가 액체방탄직물에 충돌하는 과정에서 안과 안 사이에는 전단농화 효과가 작용하게 된다. 이때 직물에 분산된 나노 실리카 입자로 인한 전단농화효과를 다음과 같이 상대속도에 의존하는 마찰계수로 모델링할 수 있다^[10].

$$\mu = \mu_d + (\mu_s - \mu_d)e^{-Cvel} \quad (1)$$

여기서 μ_d 는 동마찰계수(dynamic friction coefficient), μ_s 는 정마찰계수(static friction coefficient), C 는 감쇠상수(exponential decay constant), vel 는 접촉하는 두면에서 질점 사이의 상대 속도이다.

Lee와 Kim은 식 (1)의 모델 파라미터를 결정하기 위해서 평직물에서 단일 안을 등속도로 뽑을 때 필요한 힘과 에너지를 유한요소 프로그램인 LS-DYNA를 이용하여 계산하였다^[10]. Fig. 2와 같이 전산해석 결과가 실험 결과를 근사할 수 있도록 쿨롱 마찰계수를 선정하였으며, 도출된 마찰계수는 Table 3에 정리하였다.

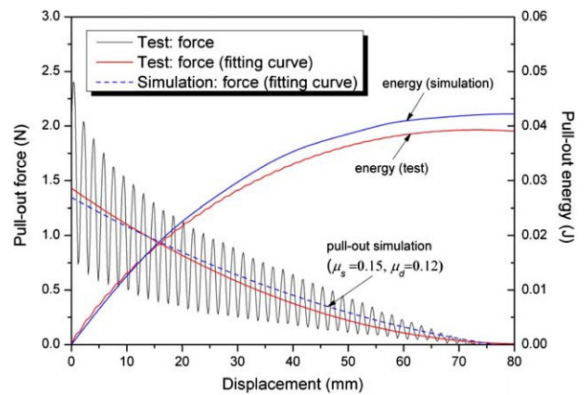


Fig. 2. Comparison of the pull-out force and energy of the simulation and experiments for neat fabric at a pull-out speed of 50 mm/min^[10]

Table 3. Model parameters for the semi-empirical coefficient of friction in Eq. (1)^[10]

	Neat fabric	STF fabric
μ_s	0.15	0.79
μ_d	0.12	0.87
C	1.23	0.82

3. 수치 결과 및 분석

3.1 방탄직물 조합에 따른 탄두의 속도 변화

방탄직물은 빠른 속도로 충돌하는 탄두의 운동에너지를 분산시키고 흡수하여 유사시 장비 및 인명을 보호한다. 그러므로 충돌 전후의 탄두 속도 변화는 방탄직물의 성능을 분석하는 데 있어서 중요한 물리량이다. Fig. 3은 Table 1에 정리한 6가지 형태의 4층 직물에 지름 8.9 mm의 구형 탄두가 250 m/s로 충돌했을 때 시간에 따른 탄두의 속도 변화를 보여주는 그래프이다. 탄두의 잔류 속도는 비함침 직물만으로 이루어진 Target 1의 경우에 가장 높았으며, 함침 직물만으로 이루어진 Target 2의 경우에 가장 낮았다. 여기서 주목할 점은 탄두와 처음 충돌하는 직물 층이 전단농화유체에 함침 되어있는 다층직물(Target 2, Target 3, Target 6)의 경우에 그렇지 않은 다층직물(Target 1, Target 4, Target 5)의 경우 보다 탄두의 잔류속도가 낮다는 사실이다. 탄두와 처음 충돌하는 직물의 함침 유무에 따라서 방탄 성능의 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 탄두와 처음 충돌하는 직물이 비함침 직물인 경우에 Target 1의 잔류속도가 가장 높으며 Target 5보다 Target 4가 높은 잔류속도를 보이고 있다. 그리고 탄두와 처음 충돌하는 직물이 함침 직물인 경우에는 Target 3와 Target 6이 비슷하며 Target 2의 잔류속도가 가장 높다. 이러한 잔류 속도의 차이를 보이는 것은 안과 안 사이에서 발생하는 마찰의 효과와 함침 직물과 비함침 직물의 배열 차이로 볼 수 있다. 안과 안 사이의 마찰이 작용하면 안이 변형하는데 더 높은 힘을 필요로 하며 이로 인해 안에서는 더 높은 인장응력이 작용하게 된다. 이러한 안의 서로 다른 변형률로 인해 내부에너지 및 운동에너지에 차이를 보이게 된다.

해석에서 사용한 탄두는 강성이 높고 다층직물은 얇아 충돌 과정에서 파손에 의한 탄두의 질량 변화는 없다. 질량이 일정한 경우에 탄두의 운동에너지는 탄두의 속도의 제곱에만 비례한다. 따라서 충돌 전후의 운동에너지 차이는 방탄직물에 충돌의해 분산 및 전달된 에너지로 간주하여 방탄성능을 측정하는 물리량으로 사용할 수 있다. Fig. 3에서 감소한 탄두 속도의 제곱은 Fig. 4에서 감소한 탄두의 운동에너지 양과 비례함을 알 수 있다. Fig. 4에서 전단농화 유체가 함침된 Target 2의 경우 운동에너지 감소율이 높아 방탄성능이 가장 우수하며, 비함침 된 Target 1은 운동에너지

감소율이 낮아 방탄성능이 가장 저조함을 알 수 있다. Target 3와 Target 6이 비슷한 운동에너지 감소량을 가지므로 방탄성능이 비슷하며 Target 5, Target 4 순서로 방탄성능이 높은 것을 알 수 있다.

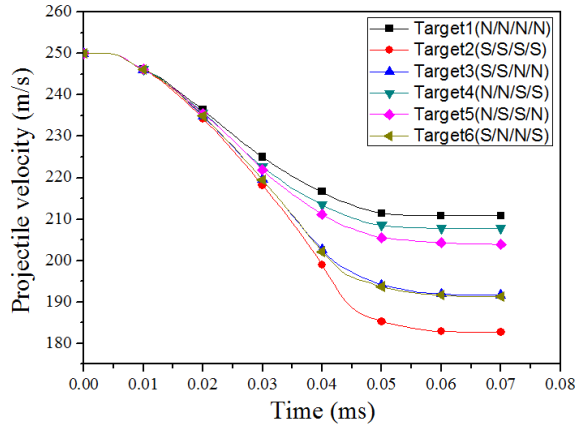


Fig. 3. Projectile velocity versus time curves for simulated fabric targets

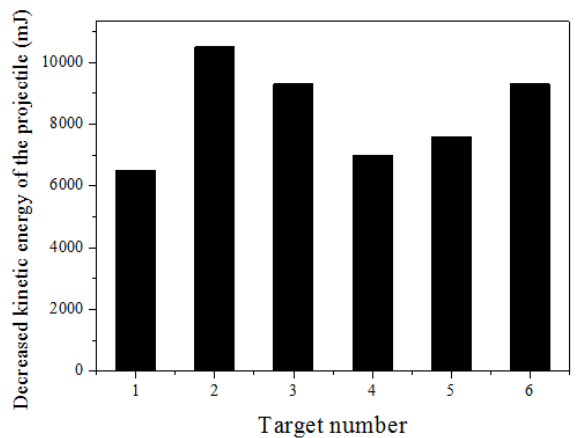


Fig. 4. Decreased kinetic energy of projectile after penetrating fabric targets

3.2 방탄직물 조합에 따른 직물에 작용하는 마찰에너지와 총에너지 변화

탄두가 충돌하기 전 직물은 정적 평형상태를 유지하기 때문에 직물의 변형에너지나 운동에너지는 모두 없는 상태이다. 탄두가 직물에 충돌하는 동안 탄두가 가지고 있는 운동에너지의 일부 혹은 전부가 직물의 운동에너지와 변형에너지 그리고 접촉 계면사이에서 작

용하는 에너지로 변환되어 탄두의 속도는 점차 감소하다가 잔류속도에 이르게 된다. Fig. 5는 해석에 이용된 6가지 형태의 4층 직물이 충돌 시간에 따른 총에너지(total energy)의 변화를 보여주는 그래프이다. 이 때 직물의 총에너지는 운동에너지(kinetic energy)와 내부에너지(internal energy)의 합이다. 운동에너지는 식 (2)과 같이 각 질점에서 작용하는 가속도를 이용하여 계산할 수 있으며, 내부에너지는 식 (3)과 같이 응력과 변형률을 통해 계산되는 에너지와 상태방정식을 통해 계산되는 에너지의 차이로 계산할 수 있다.

$$K.E = \frac{1}{2} \int_V \rho \{ \dot{u}^2 + \dot{v}^2 + \dot{w}^2 \} dV \quad (2)$$

$$I.E = e^{n+1} = e^{*n+1} - \frac{1}{2} \Delta V p^{n+1} \quad (3)$$

$$e^{*n+1} = e^n - \frac{1}{2} \Delta V \left(p^n + q^{n-\frac{1}{2}} + q^{n+\frac{1}{2}} \right) + V^{n+\frac{1}{2}} S_{ij}^{n+\frac{1}{2}} \Delta \epsilon_{ij}^{n+\frac{1}{2}}$$

여기서 $\dot{u}, \dot{v}, \dot{w}$ 는 각 방향의 속도이다. V 는 요소의 체적, ΔV 는 요소의 체적 변화이며, p 는 상태방정식으로부터 계산되어진 압력이다. q 는 체적점성(bulk viscosity)이며, S_{ij} 는 편차응력요소(deviatoric stress component), $\Delta \epsilon_{ij}$ 는 편차변형률요소(deviatoric stress component)의 변화량이다.

Fig. 5를 보면 시간 0.005 ms부터 탄두가 직물에 충돌을 시작하면서 탄두의 운동에너지는 전달되어 직물의 총에너지가 증가하는 것을 볼 수 있다. 직물의 총에너지는 Fig. 3의 탄두 잔류속도와 같이 두 그룹으로 분류할 수 있다. 탄두와 처음 충돌하는 직물이 함침 직물일 경우 비함침 직물일 경우보다 총에너지가 높은 것을 볼 수 있다. 탄두의 운동에너지는 직물과 충돌하면서 전달되기 때문에 탄두의 감소한 운동에너지 일부는 직물의 총에너지로 전달된다. 식 (1)과 같이 안과 안 사이에는 상대적인 속도 차이에 의해 마찰력이 발생하게 되는데, 각 직물 층 사이에서 발생하는 마찰력이 다르며 직물의 내부에서 발생하는 응력 및 변형량 또한 다르다. 따라서 각 직물 층에서 흡수하는 운동에너지 양은 서로 다르게 된다.

Fig. 5에서 총에너지는 시간 0.042 ms까지 상승하였으며, 이 후에는 직물 사이에 작용하는 마찰력과 속도

및 변형률의 감소로 총에너지는 감소하게 된다. Fig. 5 총에너지 변화 중 시간 0.042 ms까지는 총에너지가 상승하는 구간으로 Fig. 4에서 감소한 탄두의 운동에너지 결과와 함께 비교할 수 있다. Fig. 4에서 탄두의 감소한 운동에너지가 클수록 Fig. 5에서 보여주는 직물의 총에너지는 상승하게 된다. Target 2가 가장 높은 총에너지를 보이며 Target 3와 Target 6, Target 5, Target 4, Target 1 순서로 높은 것을 볼 수 있다. 탄두가 관통 후 직물은 변형 속도의 감소로 운동에너지가 감소하며, 내부에서 작용하는 응력 및 변형률의 감소로 내부에너지가 감소하게 된다. Fig. 6은 시간경과에 따라서 직물 사이에 작용하는 마찰에너지의 변화이다.

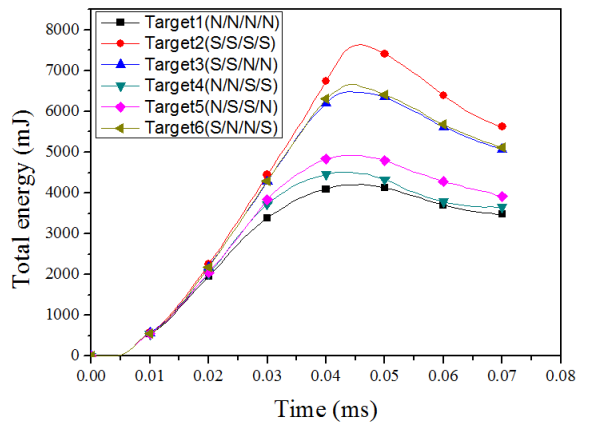


Fig. 5. Fabric total energy histories for arranged combination of neat and STF fabrics

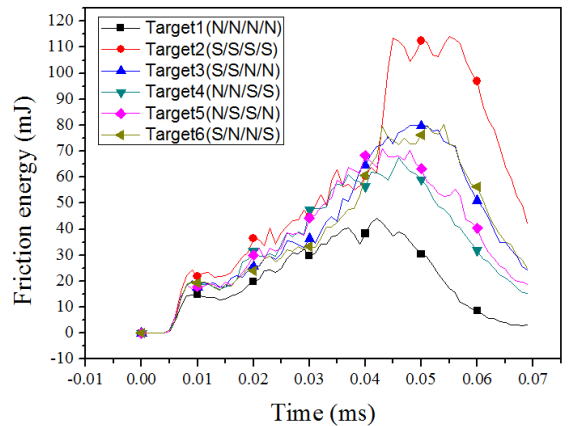


Fig. 6. Fabric friction energy histories for arranged combination of neat and STF fabrics

Target 2는 모든 층에 함침 직물의 마찰계수를 적용하여 가장 높은 마찰력이 작용함을 알 수 있으며, Target 3와 Target 6는 2개 층에는 함침 직물의 마찰계수를 적용하였고 남은 2개의 층에는 비함침 직물의 마찰계수를 적용하여 Target 2보다 낮은 마찰력이 작용함을 알 수 있다. 시간에 따라 Target 2가 Target 3와 Target 6 보다 더 높은 마찰력이 작용하여 상대적으로 변형이 적으므로 총에너지는 Fig. 5에서 보여주는 것과 같이 Target 2가 Target 3와 Target 6 보다 빠르게 감소한다. 그리고 Target 3, Target 6은 2개의 층에 함침 직물의 마찰계수를 적용하였으므로 총에너지 감소율은 동일한 것을 볼 수 있다. Target 1, Target 4, Target 5 경우에서도, 0.045 ms까지는 비함침 직물로 이루어진 Target 1보다 2개의 층에 함침직물을 적용한 Target 4와 Target 5가 높은 총에너지를 보였다. Target 3, Target 6은 총에너지가 동일하게 감소하는 것을 볼 수 있지만 Target 4와 Target 5는 감소비율이 다른 것을 볼 수 있다. 그리고 Target 1은 모든 층에 비함침 직물의 낮은 마찰력이 작용하였으므로 총에너지 감소율이 가장 낮은 것을 볼 수 있다. Fig. 7의 충돌 시간동안 작용한 마찰 에너지의 총합에서도 같은 결과를 확인할 수 있다. Target 2에서 가장 높은 마찰에너지가 작용하였으며 Target 3와 Target 6이 비슷하고 Target 5와 Target 4, Target 1 순서로 높은 마찰에너지 총합을 보여주고 있다. 따라서 다층직물에서 함침직물을 사용한 층의 수에 따라서 마찰력에 차이가 있으며 적층 배열의 조합에 따라 마찰에너지의 차이가 생기게 된다.

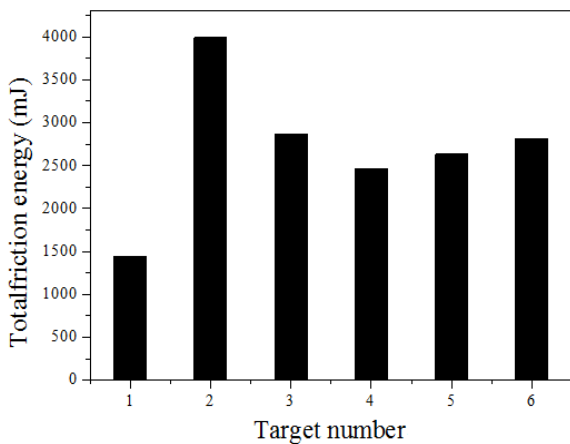


Fig. 7. Total friction energy for arranged combination of neat and STF fabrics

3.3 방탄직물 조합에 따른 직물의 응력분포

방호 재료는 탄두와 충돌하는 지점을 중심으로 많은 에너지를 흡수하며 높은 응력이 작용하게 된다. 일반 평판의 경우에는 충돌 지점을 중심으로 높은 응력이 작용하며 반경방향으로 나갈수록 응력이 낮아지지만, 직물의 경우에는 주응력이 작용하는 안(principal yarns)에서만 높은 응력이 작용하게 된다. Fig. 8과 9는 시간 0.042 ms 일 때 비함침 직물 Target 1과 함침 직물 Target 2의 각 층에서 응력분포(von Mises stress)를 보여주고 있다. Fig. 8 비함침 직물의 경우 1층과 2층은 관통자와 충돌 후 안이 파괴되었으며 끊어진 것을 볼 수 있다. 그리고 3층과 4층에서는 안이 파괴되지 않았으며 더 넓은 면적에서 응력이 작용하는 것을 볼 수 있다. Fig. 9 함침 직물의 경우에는 비함침 직물과는 달리 1층과 2층에서 안이 파괴되지 않았으며 넓은 면적에서 높은 응력이 작용하는 것을 볼 수 있다. 이는 함침 직물에서 변형이 발생했을 때 안 사이에서 발생하는 마찰력에 의해서 변형에 대한 저항이 작용하기 때문에 더 높은 응력이 작용하게 된다. 그리고 Fig. 8과 9를 통해서 안이 파괴되는 시간이 다른 것을 알 수 있는데 이는 탄두의 운동에너지를 전달 할 수 있는 시간 차이가 생기며 Fig. 3와 Fig. 4와 같이 잔류속도 및 운동에너지 감소량에 영향을 주게 된다. 그리고 주응력이 작용하지 않는 안에서는 응력변화가 적은 것을 볼 수 있으며 관통자의 운동에너지 흡수에는 영향을 주지 않음을 알 수 있다.

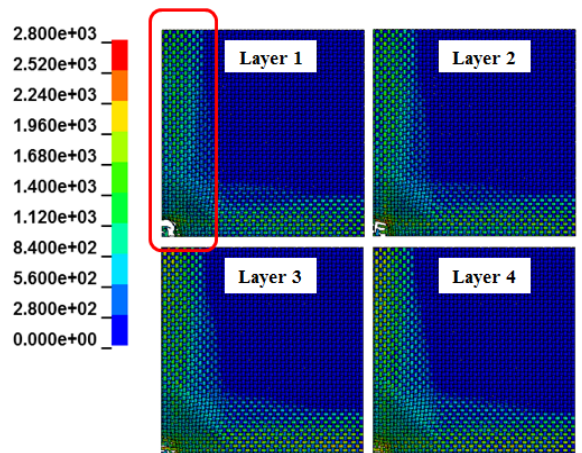


Fig. 8. Fabric stress contour for neat fabrics at 0.042 ms

Fig. 10은 탄두와 충돌하는 주응력이 작용하는 양의 시간경과에 따른 평균 von Mises stress를 나타낸 것이다. 주응력이 작용하는 양은 탄두와 접촉하는 6개의 위사와 경사 양을 사용하였다. 평균 von Mises stress는 시간 경과에 따라 0.04 ms까지는 상승 하였으며 이후 감소하는 경향을 보인다. Target 2에서 가장 높은 응력이 나타나며 Target 6, Target 3, Target 5, Target 4, Target 1 순서로 Fig. 4 탄두의 감소한 운동에너지와 Fig. 5 총에너지 변화 경향성과 일치하는 것을 볼 수 있다.

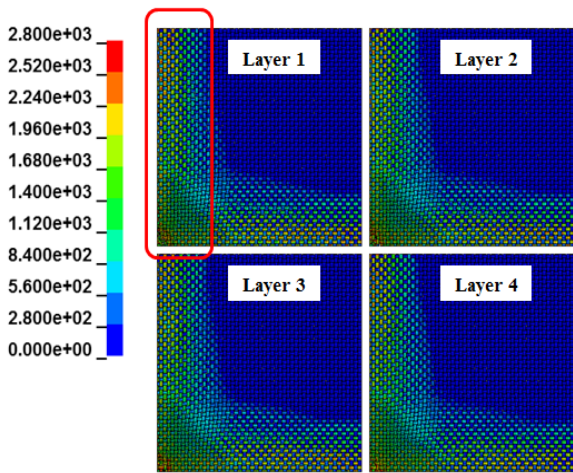


Fig. 9. Fabric stress contour for STF fabrics at 0.042 ms

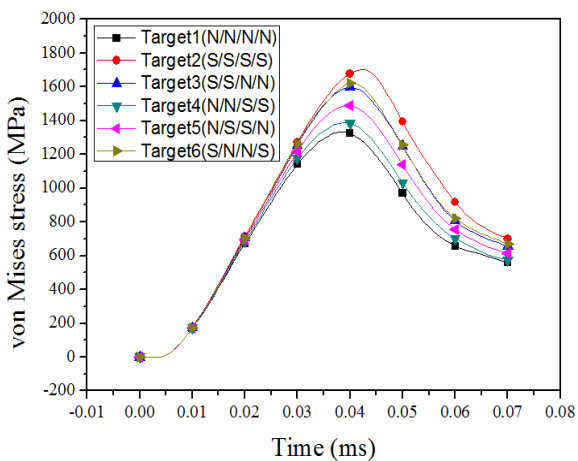


Fig. 10. Fabric von Mises stress histories for arranged combination of neat and STF fabrics

3.4 충돌 속도에 따른 탄두의 속도 변화 비교

탄두가 고속으로 직물에 충돌 할 때 적층 직물의 배열에 따른 방탄 효과를 알아보고자 충돌속도 500 m/s 일 때 관통자의 속도를 비교하였다. Fig. 11은 Table 1에 정리한 6가지 형태의 4층 직물에 지름 8.9 mm의 구형 탄두가 500 m/s로 충돌했을 때 시간에 따른 탄두의 속도 변화를 보여주는 그래프이다. 탄두의 잔류속도는 Fig. 3의 경우와 마찬가지로 비함침 직물만으로 이루어진 Target 1의 경우에 가장 높았으며, 함침 직물만으로 이루어진 Target 2의 경우에 가장 낮았다. Target 2 다음으로 Target 3의 잔류속도가 낮은 것은 일치한다. 그러나 Target 5와 Target 6의 잔류속도가 비슷하게 나왔으며, 함침 직물을 배열한 Target 4와 함침 직물을 배열하지 않은 Target 1이 비슷한 결과가 나타났다. 그리고 250 m/s로 충돌시 속도의 편차는 28.1372 m/s이며 500 m/s로 충돌시 속도의 편차는 0.4983 m/s로 고속 충돌 결과 STF 함침직물의 마찰력으로 인한 방탄에 대한 영향력이 떨어지는 것을 볼 수 있다. 탄두가 높은 속도로 충돌하면 직물을 관통하는 동안 접촉하는 시간 이 짧아진다. 따라서 운동에너지를 전달할 수 있는 시간이 짧아지며 짧은 시간동안 전달할 수 있는 에너지가 작기 때문이다. 저속 충돌과 동일한 점은 충돌 전면에 함침직물을 배열하면 탄두의 잔류속도가 낮아지는 점은 같다. 그리고 Target 1과 Target 2를 제외하고 적층 순서에 따른 방탄 성능을 비교해보면, Target 3(S/S/N/N)이 가장 높고, Target 6(S/N/N/S),

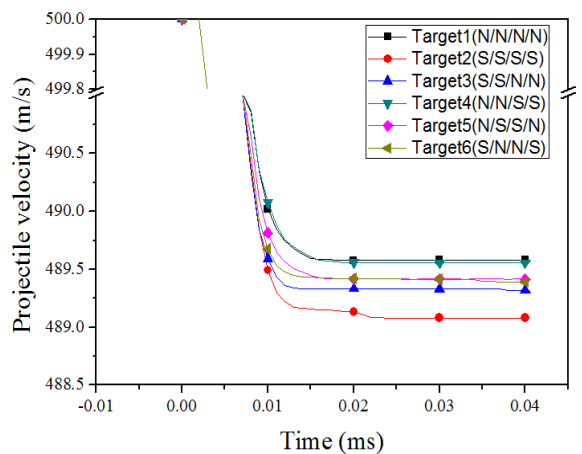


Fig. 11. Projectile velocity versus time curves for simulated fabric targets at impact velocity 500 m/s

Target 5(N/S/S/N), Target 4(N/N/S/S) 순서이다. Target 3, Target 6와 같이 탄두와 충돌하는 제일 앞에 함침 직물층(S)이 올수록 방탄 성능이 높고 Target 4, Target 5와 같이 비침 직물층(N)이 올수록 방탄 성능이 나쁜 것을 볼 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 다층 방탄직물 구성 시 전단농화유체 함침 직물(STF fabric)과 비함침 직물(neat fabric)의 직물 조합으로 만들어진 6가지 형태의 적층 배열에 따른 방탄성능의 차이를 확인하고자 수치해석을 진행하였다. 방탄직물을 관통한 탄두의 속도 및 운동에너지를 계산하고 충돌과정에서 방탄직물의 변형 및 응력 분포를 확인하였다. 그리고 고속충돌에서 탄두의 잔류속도 비교를 통해 속도에 대한 영향력을 확인하였다. 이를 통해 STF 함침 직물과 비함침 직물의 충돌에 대한 경향성을 에너지와 마찰의 개념을 사용하여 분석하였다.

- 1) 탄두와 처음 충돌하는 직물의 함침 유무에 따라서 탄두에 대한 방탄 성능 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 탄두와 처음 충돌하는 직물이 함침 직물일 경우 비함침 직물일 경우보다 낮은 잔류속도를 보였다. 탄두와 처음 충돌하는 직물이 함침 직물인 Target 2가 가장 낮은 잔류 속도이므로 많은 운동 에너지를 전달하였으며, 탄두와 처음 충돌하는 직물이 비함침 직물인 Target 1이 낮은 운동에너지를 전달한 것을 알 수 있다.
- 2) 탄두와 처음 충돌하는 직물이 함침 직물일 때 비함침 직물일 경우보다 직물에서 작용하는 총에너지가 높은 것을 볼 수 있다. 그리고 탄두가 직물을 관통 후 직물의 총에너지 변화는 함침 직물과 비함침 직물의 층수에 따라서 총에너지 감소율은 비슷한 경향을 나타 내었다. 이는 함침 직물과 비함침 직물 사이에서 각각 일정한 마찰력이 작용하게 되므로 직물의 종류와 수가 같다면 마찰력에 의해 감소하는 총에너지 비율은 같게 된다.
- 3) 직물은 충돌지점을 중심으로 주응력이 작용하는 안에서 높은 응력이 작용하고 있으며 이외의 영역에서는 낮은 응력분포를 보이고 있다. 그리고 비함침 직물보다 함침 직물에서 높은 응력 응력분포가 나

타났으며 von Mises stress 그래프에서 차이를 확인할 수 있다.

- 4) 저속과 고속 충돌 모두 충돌 전면에 함침직물을 배열하면 탄두의 잔류속도가 낮아지는 효과를 보이지만 고속 충돌에서는 STF 함침 직물의 방탄 효과가 작게 나타난다. 따라서 설계적인 측면에서 방탄복은 전면에서 탄두의 속도를 줄일 수 있는 매개체가 있고 그 후면에 저속에서 방탄 효과가 큰 STF 함침 직물을 배열하면 좋은 효과를 이끌어 낼 수 있을 것이라 판단된다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소의 기초연구(계약번호 : UE135046GD)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- [1] G. Susich, L. M. Dogliotti and A. S. Wrigley, "Microscopical Study of a Multilayer Nylon Body Armor Panel After Impact," *Textile Research Journal*, Vol. 28, No. 5, pp. 361-377, 1958.
- [2] W. R. Beye, "Design Information for Construction of Light Personnel Armor," *Midwest Research Institute, Final Report*, ADA954904, 1950.
- [3] E. C. O. Erickson and C. Norris, "Tensile Properties of Glass-fabric Laminates with Laminations Oriented in Any Way," 1960.
- [4] R. C. Laible, "Ballistic Materials and Penetration Mechanics," Elsevier, North-Holland inc., pp. 26-27, 2012.
- [5] J. R. Vinson and J. A. Zukas, "On the Ballistic Impact of Textile Body Armor," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 42, pp. 263-268, 1975.
- [6] Y. S. Lee, E. D. Wetzel and N. J. Wagner, "The Ballistic impact Characteristics of Kevlar[®] Woven Fabric Impregnated with a Colloidal Shear Thickening Fluid," *Journal of Materials Science*, Vol. 38, pp. 2825-2833, 2003.
- [7] M. J. Decker, C. J. Halbach, C. H. Nam, N. J.

- Wagner and E. D. Wetzel, "Stab resistance of Shear Thickening Fluid(STF)-Treated Fabric," *Composite Science and Technology*, Vol. 67, pp. 565-578, 2007.
- [8] R. G. Green and R. G. Griskey, "Rheological Behavior of Dilatant(Shear-Thickening) Fluids. Part I. Experimental and Data," *Transactions of the Society of Rheology*, Vol. 12, pp. 13-25, 1968.
- [9] D. Zheng, J. Cheng, W. K. Binienda and M. Staniszewski, "Numerical Modeling of Friction Effects on the Ballistic Impact Response of Single-Ply Tri-Axial Braided Fabric," 9-th International Ls-Dyna Users Conference, Detroit MI, pp. 4.29-4.38, 2006.
- [10] B. Lee and C. Kim, "Computational Analysis of Shear Thickening Fluid Impregnated Fabrics Subjected to Ballistic Impacts," *Advanced Composite Materials*, Vol. 21, No. 2, pp.177-192, 2012.
- [11] Y. Lee, E. D. Wetzel, R. G. Egres Jr, and N. J. Wagner, "Advanced Body Armor Utilizing Shear Thickening Fluids," 23rd Army Science Conference, 2002.
- [12] Y. Park, Y. Kim, A. H. Baluch and C. Kim, "Empirical Study of the High Velocity Impact Energy Absorption Characteristic of Shear Thickening Fluid(STF) Impregnated Kevlar Fabric," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 72, pp. 67-74, 2014.
- [13] M. Cheng, W. Chen and T. Weerasooriya, "Mechanical Properties of Kevlar[®] KM2 Single Fiber," *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 127, pp. 197-203, 2005.
- [14] B. Sanborn, N. Racine and T. Weerasooriya, "The Effect of Weaving on the Strength of Kevlar KM2 Single Fibers at Different Loading Rates," *Army Research Laboratory(Project Report)*, ARL-TR-6280, 2012.