

Heracron 직물의 고속 충돌 해석

김윤호* · 최충현* · Sarath Kumar Sathish Kumar* · 차지훈* · 김천곤*

Computational Analysis of Heracron Fabric at High-velocity Impact

YunHo Kim*, Chunghyeon Choi*, Sarath Kumar Sathish Kumar*, JiHun Cha*, Chun-Gon Kim*

ABSTRACT: Advanced fiber fabrics have been utilized in not only anti-stabbing and bullet-proofing for body armor but also various industrial fields including vehicular armor and spacecraft structure. Furthermore, there have been a number of research to improve the ballistic performance of advanced fabrics introducing many computational approaches. In our research, an advanced fabric, Heracron manufactured in South Korea was modelled firstly using Autodyn, a commercial software specializing in impact and explosion phenomenon. The sensitivity of the input parameters was also confirmed by conducting simulations. To verify the numerical modelling, we measured and compared the simulation results with velocity decrements after impact involving one, three, and five layers of Heracron under 200-500 m/s impacts by an aluminum spherical projectile. The Heracron fabric was successfully modelled using Autodyn.

초 록: 고성능 직물은 방탄, 방검 등의 개인 보호구뿐만 아니라, 우주보호시스템, 차량방탄 등 다양한 분야에서 활용되고 있다. 또한 고성능 직물의 성능향상을 위한 다양한 종류의 연구가 진행되었고, 동시에 많은 해석 방법들이 개발되어 왔다. 본 연구에서는 고속 및 초고속 충돌, 충격 현상 등에 특화된 상용해석 프로그램인 Autodyn을 사용하여 국산 고성능 직물인 Heracron의 고속 충돌 현상을 최초로 모사하였다. Heracron 직물에 사용된 입력 물성치별 민감도를 확인하는 해석을 수행하였다. 시험의 검증을 위해 2단 경 가스건을 사용하여 직물 1, 3, 5장의 시편을 약 200-500 m/s의 알루미늄 구체의 충돌시켜 전 후 속도를 측정하였다. Autodyn 프로그램을 이용하여 Heracron 직물의 고속 충돌 현상을 성공적으로 구현하였다.

Key Words: 헤라크론(Heracron), 오토다인(Autodyn), 고속충돌(High-velocity impact), 민감도(Sensitivity)

1. 서론

고성능 섬유로 제작된 방탄 직물은 다양한 산업분야에 활용되고 있다. 대표적으로 방검, 방탄 및 장갑 등의 보호 용도로 사용된다. 고성능 섬유는 Kevlar를 비롯하여, Twaron, Dyneema, Spectra, Nomex, Zylon와 같은 폴리머 계열 섬유와 탄소섬유, 유리섬유, SiC와 같은 세라믹 계열 섬유 등이 존재한다. 국내에서는 코오롱 인더스트리에서 Heracron이

라는 섬유를 개발하여 판매하고 있다. 이러한 고성능 섬유들은 섬유방향으로의 물성치가 금속재료에 비해 매우 높다. 이러한 고성능 섬유를 이용하여 직물화 하면, 다양한 충돌 환경에서 좋은 보호효과를 기대할 수 있다. 한편 이런 고성능 섬유로 제작된 직물의 충돌 보호 성능 향상을 위한 다양한 시험 및 해석 연구가 활발하게 진행 중이다.

Moon은 고속 충돌 시 직물이 폴리머 판에 pull-out 되는 현상을 이용하여 마찰력을 이용한 에너지 흡수 능력을 최

Received 6 March 2019, received in revised form 8 March 2019, accepted 11 March 2019

*Dept. of Aerospace Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Korea

*Dept. of Aerospace Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Korea, Corresponding author (E-mail: cgkim@kaist.ac.kr)

대화 한 연구를 수행하였다. 직경 5.56 mm 알루미늄 구를 이용하여 약 수백 m/s에서 충돌 시켰으며 이러한 현상을 이용하여 약 9%의 더 많은 에너지를 흡수할 수 있었다[1].

Flattened roll 구조는 고성능 직물을 단순히 롤링하여 평평하게 위치시킨 구조인데, 이러한 특수한 구조는 구속조건을 변화시켜 방탄성을 향상시킬 수 있음이 보고되고 있다[2].

유체전단농화 또는 STF(Shear Thickening Fluid)로 알려진 특수한 기지재료는 고성능 섬유직물에 함침되어 사용된다. 함침된 STF는 섬유사이의 마찰력을 고 전단 변형율하에서 급격하게 증가시켜 추가적인 보호성을 가지게 된다. 이러한 현상을 이용하면 기존의 단단한 판을 사용하지 않더라도 유연하며 충분한 방탄성을 확보 할 수 있다[3-6]. 이러한 유체전단농화 복합재료는 우주공간에서 유연한 형태의 구조물인 우주복 또는 확장형 우주구조물에도 적용될 수 있다[7-9].

고성능 직물은 차량 보호장갑에 혼합되어 사용되면 방탄능력이 증가되어 탑승자의 생존성을 높일 수 있다. 한편 탄환이 차량방탄재와 충돌 후 관통된다면 차량에 파쇄된 다수의 파편이 비산하여 오히려 넓은 범위에 피해를 줄 수 있다. 하지만, 고성능 직물을 후방에 위치시켜 사용하면 활용하여 Spall liner로 구성하여 이러한 피해 범위를 획기적으로 감소시킬 수 있다[10].

고성능 직물로 열거된 것과 같은 연구들 이외에도 많은 연구들이 매우 활발히 진행되고 있다. 한편 관련 연구들을 진행하기 위해 많은 모델링 기법이나 해석코드가 개발되었거나, 개발 중이다. 그 중 Autodyn은 다양한 충돌 환경에 많이 사용되고 있는 상용 프로그램이다. 특별히 고속, 초고속 충돌에 특화되어 있다. 하지만, Autodyn을 이용하여 고성능 직물을 yarn 단위에서 모델링하여 실험과 검증된 연구가 존재하지 않는다. 본 연구에서는 최초로 Heracron 직물을 고속 충돌 하에서 yarn 단위 모델링 하였고 시험을 수행하여 성공적으로 검증하였다.

2. 방 법

2.1 Modelling

본 연구에서 사용된 Heracron 제품 중 하나인 HT-840는 약 200 g/m²의 면밀도를 가지는 평직물이다. 상용프로그램을 이용하여 생성된 IGS 파일을 Ls-prepost 파일로 변환하면 Autodyn 프로그램에서 Import가 가능하다. yarn 한 가닥을 Shell 모델링 하였으며 그 결과는 Fig. 1과 같다. 자세한 HT-840 직물의 치수는 Lee의 현미경 이미지 결과와 공개된 치수를 참고하였다[5]. 직물의 폭면은 사인함수를 이용하여 표현하였다. 직물의 한장의 두께는 0.3 mm이고 yarn 사이의 거리는 0.02 mm로 설정하였다. yarn의 모양은 모델링의 편의를 위해 직사각형으로 표현되었으며 폭과 두께는

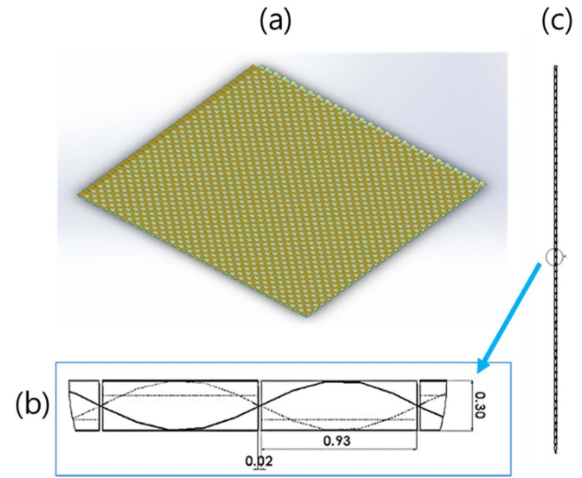


Fig. 1 (a) HT-840 model with plane symmetry condition, (b) Dimension, (c) Cross section

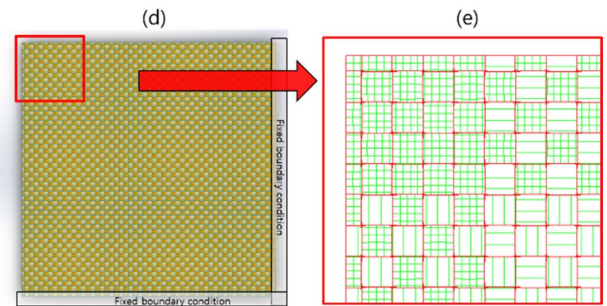


Fig. 2 (d) Plane view, (e) Magnified view of mesh

각각 0.93 mm, 0.066 mm이다. 정확한 해석결과를 위해서 충돌 부분은 Fig. 2와 같이 더 촘촘한 mesh를 사용하였다. 해석의 소요시간을 단축하기 위해 면대칭 조건을 이용하였으며 직물의 크기는 약 100 mm의 변을 가지는 정사각형으로 양끝단에 고정 조건을 부여하였다. 마찰력은 정지마찰계수 μ_s , 운동마찰계수 μ_p , 상쇄계수 β 를 각각 0.15, 0.12, 1.23으로 설정하였다. 식 (1)을 통하여 마찰계수가 결정되며 ν 는 접점에서의 물체 간 상대속도를 나타낸다. 마찰계수값은 Para-Aramid 직물의 결과를 참고하였다[3,5,6].

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

직물과 알루미늄 탄환에 적용된 물성치는 Table 1, 2에 정리되어 있다. 직물의 경우 각 방향마다 다른 강성 강도 물성치를 위해 Orthotropic EOS(Equation of state)와 Material stress/strain 기준으로 주 방향 물성치를 기준으로 강성과 강도를 입력하였다. 한편 알루미늄 구의 물성치는 Shock EOS가 적용되었으며 식 (2)와 같이 표현된다. Gruneisen Coefficient, Γ 는 내부에너지가 변할 때 변하는 압력의 비율을 나타낸다. 여기서 C_0 와 S 는 재료내의 충격파 전달 속도의 특성을

나타낸다. 식 (3)과 같이 재료내의 움직임인 u 의 함수로 재료내의 충격파 전달속도, C 를 표현할 수 있다.

$$P = \frac{\rho_0 C_0^2 x \left[1 - \frac{\Gamma_0}{2} x \right]}{(1 - sx)^2} + \Gamma_0 E; \quad x = 1 - \frac{\rho_0}{\rho} \quad (2)$$

$$C = C_0 + Su \quad (3)$$

알루미늄 구의 소성영역을 표현하기 위해 Steinberg-Guinan 모델이 적용되었으며, 파쇄현상을 모사하기 위해 Grady spall 모델이 적용되었다. 일반적인 재료의 경우 연신률이 높아

Table 1 HT-840 properties[5]

HT-804D	Value
Density (g/cm ³)	1.44
EOS : Ortho	
Young's Modulus (GPa) (longitudinal direction)	100
Young's Modulus (GPa) (transverse direction)	4.2
Shear Modulus (GPa)	2.9
Failure: Material Stress/Strain	
Longitudinal Stress (MPa)	3370
Longitudinal Strain	0.034
Erosion: Geometric Strain	
	0.5

Table 2 Al 2017-T4 properties[10]

Al 2017-T4	Value
Density (g/cm ³)	2.785
EOS: Shock	
Gruneisen Coefficient	2
C1 (m/s)	5320
Reference Temperature (K)	300
Specific Heat	863
Strength: Steinberg Guinan	
Shear Modulus (GPa)	28.6
Yield Stress (MPa)	260
Maximum Yield Stress (MPa)	760
Hardening Constant	310
Hardening Exponent	0.185
Derivative dG/dP	1.8647
Derivative dG/dT (MPa/K)	-17.6
Derivative dY/Dp	0.01695
Melting Temperature (K)	1220
Failure: Grady Spall Model	
	0.13
Erosion: Geometric Strain	
	1

지면 강성과 강도가 높아지는 현상이 일어난다. Steinberg-Guinan 모델의 경우 10⁵/s 이상의 고 연신을 상태에서 더 이상의 물성증가가 이뤄지지 않으며 동일한 값으로 수렴하는 것을 가정한 방법이다. Grady spall 모델은 밀도와 재료의 충격파 전달 속도의 함수로 파쇄현상을 모사한 것이다. 이 두 가지 모델은 고속 충격을 효율적으로 모사할 수 있다. Al 2017-T4의 정확한 물성치는 구할 수 없어서 유사한 물성치를 가지는 Al 2024-T4 물성을 사용하였다.

HT-840 모델에 적용된 물성치는 시험적으로 얻은 것이 아니기 때문에 본 연구에서와 같은 조건이 아닐 경우 결과가 달라질 수 있다. 본 연구에서는 각 입력 물성치 별 방탄 성능의 영향을 이해하기 위해 각각의 입력 물성치 별 0.2, 0.5, 2, 5배의 값을 임의로 변경하여 해석 모델의 물성치 별 민감도를 확인해 보았다.

2.2 Experimental

해석 모델링의 검증을 위해 보유하고 있는 2단경 가스건을 이용하여 시험을 수행하였다. 충돌속도의 조절을 위하

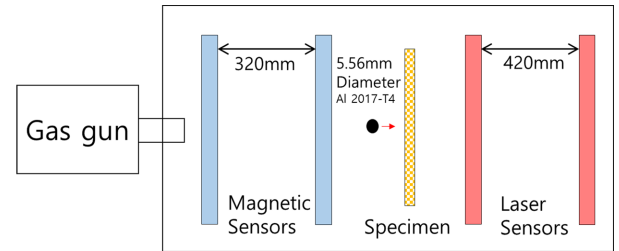


Fig. 3 Experiment set-up

Table 3 Calibration with magnetic, laser intervelometer

Test date	Velocity measured by magnetic sensors (m/s)	Velocity measured by laser sensors (m/s)	Velocity difference (m/s)
20180416	470.9	470.3	0.6
20180502	528.5	526.9	1.5
20180510	477.1	475.9	1.2
20180511	222.2	220.3	1.9
20180514	347.5	346.6	0.9
20180724	500.0	499.7	0.3
20181022	484.9	483.9	1.0
20181022	286.8	287.6	-0.7
20181201	592.6	594.4	-1.8
20181201	566.4	566.5	-0.2
20181210	529.1	530.1	-1.0
20181211	152.4	150.4	2.0
20181211	153.6	154.3	-0.7
20181221	515.1	515.2	-0.1

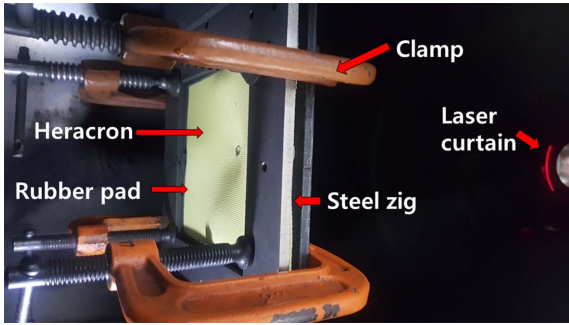


Fig. 4 Heracron fabric after impact

여 1단 가스건으로 개량하여 사용하였으며 Fig. 3과 같이 시편의 전 후로 마그넷 코일 속도센서와 레이저 커튼 속도센서를 사용하여 속도를 측정하였다. 속도 측정의 정확성 확인을 위해, 시편없이 검증용 시험을 수행하였으며 결과는 Table 3에 정리하였다. 시험결과 2 m/s 이내로 속도차이가 발생하였다. 발사물의 속도를 고려할 때 충돌속도는 약 150-530 m/s 범위에서 1% 이내의 정확도를 가지는 것으로 판단되었다.

Fig. 4는 Heracron 직물에 고속 충돌 후 시편을 중심으로 촬영한 것이다. 직물이 충돌하면서 밀리지 않도록 스틸 지그와 직물의 충돌 면 사이에 고무패드를 위치시키고 스틸 지그를 완력기 4개를 이용하여 고정하였다. 모든 시험은 10⁰ Torr 이하 수준의 진공에서 진행되었고, 공기저항으로 인한 속도감소는 무시할 만큼 작은 수준이다.

3. 결과 및 토론

충돌 전후의 속도와 충돌 후 형상을 비교하여 모델링을 검증하였다. Fig. 5와 Fig. 6은 5장 적층된 직물이 477 m/s의 속도로 충돌되었을 때의 충돌 후 형상을 비교한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 충돌 후 섬유가 pull-out 된 것이 잘 묘사되어 있으며, 충돌 후 생성된 볼록한 부분이 잘 묘사되고 있다.

Figs. 7-9는 실험과 해석을 수행한 결과이다. 충돌 후 속도를 해석에서 매우 잘 예측하고 있으며, 추세도 비슷하다.

본 연구에서는 국산 고성능 직물인 Heracron의 모델링을

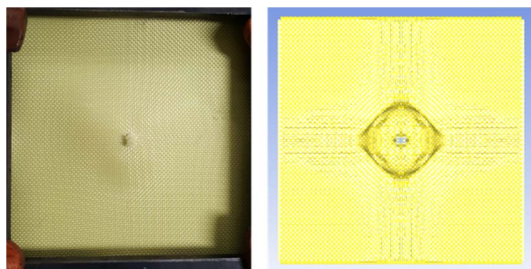


Fig. 5 Experiment and simulation results of five layers of fabric after impact (t=100 μs)

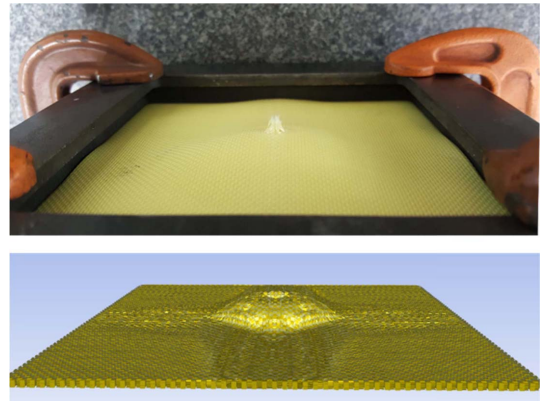


Fig. 6 Experiment and simulation results of five layers of fabric after impact (t=100 μs)

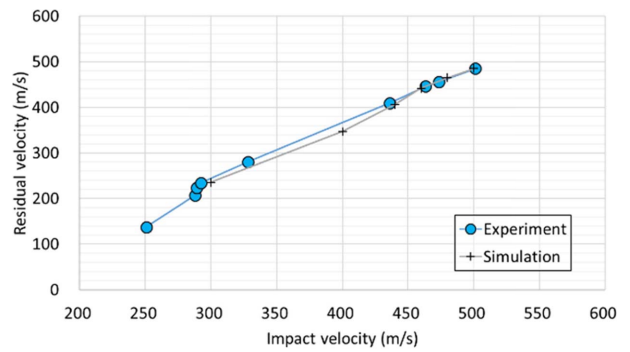


Fig. 7 Experiment and simulation results of HT-840 single layer

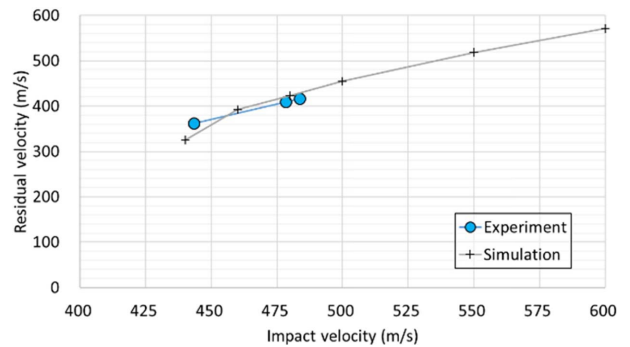


Fig. 8 Experiment and simulation results of HT-840 three layer

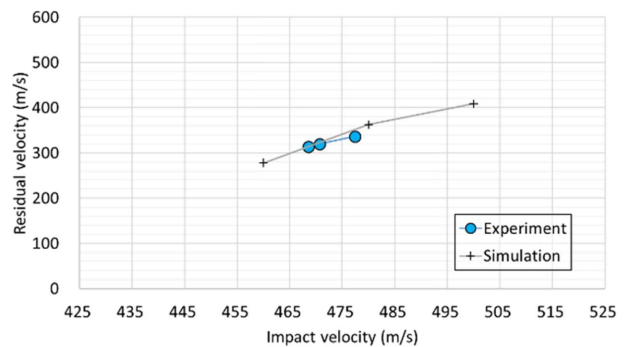


Fig. 9 Experiment and simulation results of HT-840 five layer

위해서, 유사한 성능을 가지는 Kevlar KM2의 물성치를 주로 참고하여 해석 모델링과 검증을 수행하였다. 또한 직물의 구속조건, Shell 모델링 기법의 한계, 고 연신율 조건 시험 물성치 부족 등이 존재한다. 하지만, 이러한 오차요인에도 불구하고, 1, 3, 5장 적층된 직물의 고속 충돌을 준수하게 모사하는 것을 확인할 수 있었다.

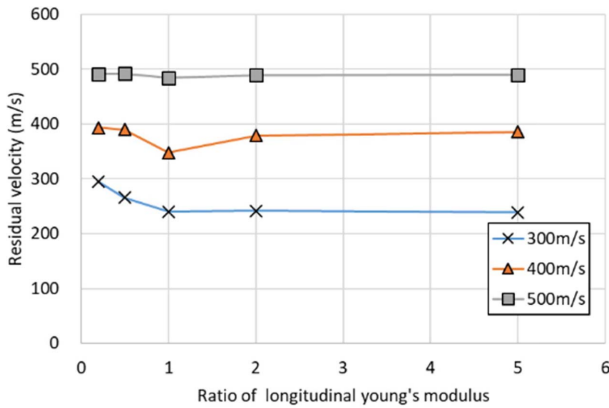


Fig. 10 Residual velocity and longitudinal young's modulus of fiber

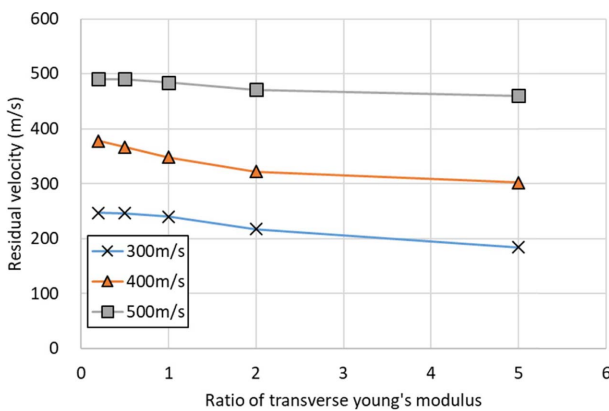


Fig. 11 Residual velocity and transverse young's modulus of fiber

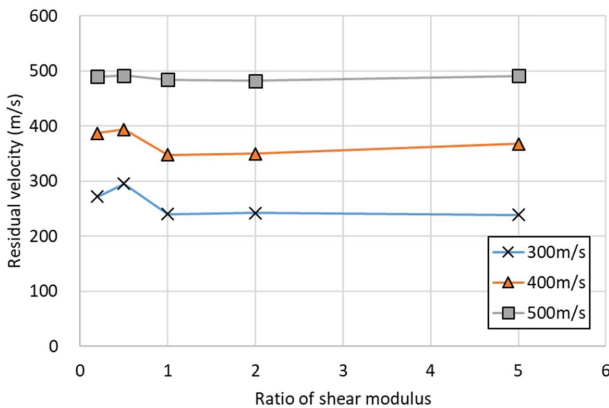


Fig. 12 Residual velocity and shear modulus of fiber

Fig. 10-15는 HT-840의 입력물성치와 충돌 후 속도를 비교한 것이다. Table 1에 나와있는 기준으로 입력 값을 1이라 가정하였을 때 2배와 5배 증가하거나 감소하였을 경우의 충돌 후 속도에 대한 영향을 비교하였다. Fig. 10-12의 결과로 볼 때 강성물성치의 변화가 충돌 후 속도에 많은 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 방향에 상관없이 강성이 증가할수록 더 많은 속도 감소가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 다만, 400 m/s에서 기준 시편의 경우 다른 섬유 방향의 강성 값들에 비해서 높은 속도 감소를 가지고 있다. 재료의 강성이 증가하게 된다면 파단 응력이 동일 할 때 재료의 파단 연신율 또한 감소하게 된다. 따라서, 단위 섬유 당 흡수할 수 있는 총 에너지의 양이 줄어들 수 있다. 하지만, 강성이 증가하면 넓은 범위의 섬유들과 메커니즘에 관여하여 더 많은 양의 에너지를 흡수 할 수 있다. 그러므로, 충돌 조건에 따라서 직물 모델에 충돌 후 속도의 감소가 증가되거나 감소될 수 있다. 이러한 복합적인 원인 때문에, Fig. 12의 300, 400 m/s의 조건인 경우에도 전단강성이 0.2배에서 0.5배 조건으로 증가할 때 충돌 후 속도의 증가가 발생한 것으로 보인다. 하지만, 강성의 증가하면 전반적으로 많은 에너지가 흡수되어 속도 감소폭이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 한편 섬유와 수직인 방향의 강성은 다른 강성물성치에 비해 충돌 후 속도에 매우 민감하게 작용하는 것을 알 수 있다. 실제로 shell mesh로 표현하고 있는 하나의 실(yarn)은 다수의 섬유(fiber)로 이루어져 있으며, 경우에 따라 꼬여 있기 때문에 단순히 일정한 강성 물성치 값으로 표현하는 것은 올바르지 않다. 하지만 shell 모델링을 위해서 적절한 값을 사용해야만 한다. 본 연구에서는 섬유와 수직인 방향의 강성을 이전에 논문들에 사용된 값을 참고하여 결정하였다[3,5,6].

Fig. 13은 섬유방향의 파단응력 및 연신율 변화의 민감도를 나타내고 있다. Table 1에 명시되어 있는 응력과 연신율의 파단 조건을 동시에 2배, 5배 증감하여 해석을 수행한 결과이다. 5배에 해당하는 연신율은 17%로 기본 요소제거조

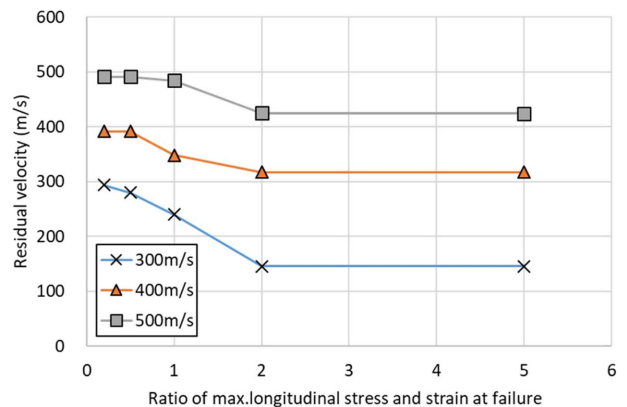


Fig. 13 Residual velocity and maximum longitudinal stress and strain at failure ratio

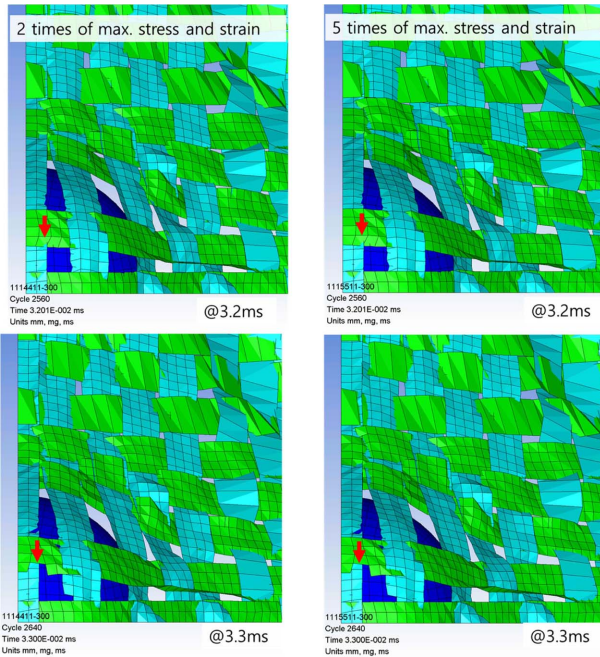


Fig. 14 Bottom view (blue: projectile, skyblue and green: fabric)

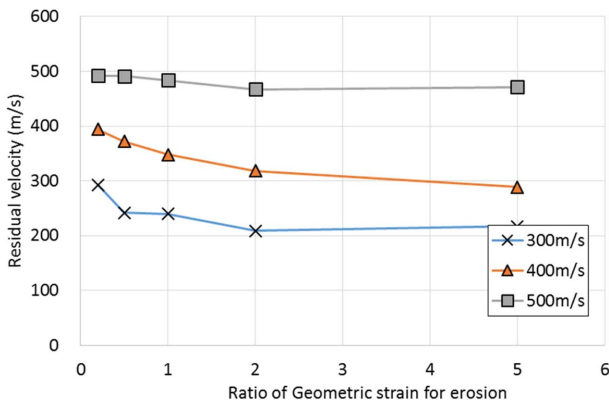


Fig. 15 Residual velocity and geometric strain for erosion

건인 50%에 비해 작은 값이다. 따라서, 파단 기준값이 2-5 배일 경우 요소제거조건때문에 속도감소의 변화가 동일했다고 볼 수 없다. Fig. 15의 파단응력과 연신률 조건은 각각 2배와 5배임에도 불구하고 동일한 파단형상을 보여주고 있다. 이는 Fig. 14에서와 같이 두 섬유가 만나는 지점에서 섬유의 두께로 인하여 요소에 과도한 변형이 발생하였고, 50% 이상의 변형율이 발생하여 요소제거조건과 파단조건을 만족해 버리게 되었다. 이러한 영향으로 2-5배의 파단조건을 가지는 물성치 입력 값은 충돌 후 속도 변화에 더 이상 영향을 주지 않는다. Fig. 15에 나와 있는 요소제거 조건의 민감도 결과도 동일하게 해석된다. 하지만 400 m/s 조건에서는 속도감소가 이뤄지는데, 이는 형상의 특성에 기인한 것으로 보인다.

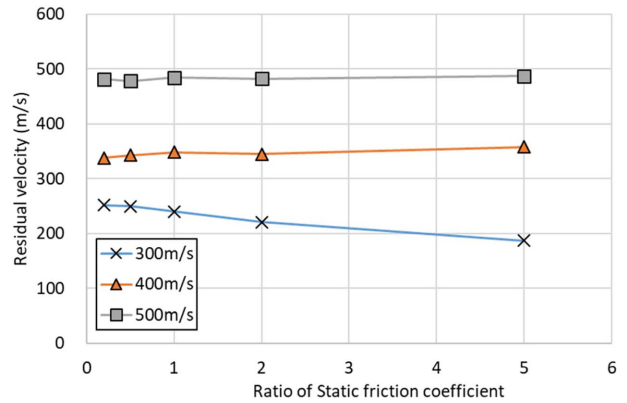


Fig. 16 Residual velocity and friction coefficient

Fig. 16은 직물간의 마찰계수의 변화와 충돌 후 속도 변화를 나타낸 결과이다. 정지마찰계수 0.15와 운동마찰계수 0.12를 기준으로 하여 동일한 비율로 마찰계수 값들을 설정하여 민감도를 비교하였다. 300 m/s의 경우에는 마찰계수의 증가로 인하여 충돌 후 속도가 두드러지게 감소되는 것이 확인되었다. 이는 저속일 경우 섬유간의 마찰력으로 인하여 에너지 흡수 메커니즘에 관여하는 섬유의 범위가 증가하며 pull-out 메커니즘을 통하여 흡수되는 에너지가 증가하는 것을 의미한다. 한편 500 m/s 충돌속도의 경우에는 마찰력의 변화에 대한 효과가 미미하다. 400 m/s 충돌 속도의 경우에는 오히려 충돌 후 속도가 약간 증가하는 경향을 보이는데, 이는 마찰력의 증가로 인하여 더 좁은 공간에서의 직물이 운동에너지 흡수에 관여하게 되는 것으로 해석된다. 하지만, 이런 영향은 크지 않으며, 마찰계수가 증가할수록 고속에서의 약간에 에너지 흡수능력의 감소가 있더라도 직물 전체의 관통 속도가 효과적으로 감소할 수 있음을 예상할 수 있다. 이런 점에 착안하여 속도가 높은 충돌면은 마찰이 적도록 구성하고 속도가 감소된 후면은 마찰이 강하도록 한다면 향상된 보호 효과를 기대할 수 있을 것이다.

4. 결 론

본 연구를 통해서 충돌 충격에 특화된 해석프로그램인 Autodyn을 이용하여 최초로 고성능 직물의 피단 해석을 수행하였다. 1, 3, 5장 적층된 HT-840 Heracron 직물을 Shell element를 이용하여 모델링 하였다. 또한 Heracron 직물의 물성치 입력값의 민감도 연구를 수행하였다. 본 연구는 고속 충돌 시 직물의 에너지 흡수능력과 메커니즘을 연구하기 위한 기초로, 충돌 폭발 연구에 많이 쓰이는 Autodyn으로 고성능 직물을 최초로 구현하고 직물 모델에 사용된 물성치의 민감도 연구를 수행하였다. 2단 경 가스건의 시험 결과로 해석결과를 검증하였다. 본 연구는 향후 직물을 사

용한 충돌 시험 및 해석 연구에 통찰력있는 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 2019년도 과학기술정보통신부 재원으로 한국 과학기술원 글로벌산학협력연구센터의 지원을 받아 수행된 연구임(N11180130).

REFERENCES

1. Moon, J.B., Yoon, S.H., and Kim, C.G., "High Velocity Impact Test of a Hybrid Sandwich Composite Shield with Unrestrained Boundary Fabric", *Composite Structures*, Vol. 153, 2016, pp. 60-68.
2. Kim, C.G., Kim, I.J., Lim, G., and Yoon, B.I., "The Ballistic Impact Characteristics of Woven Fabrics Impregnated with a Colloidal Suspension and Flattened Rolls", *Advanced Science and Technology*, Vol. 71, 2010, pp. 74-79.
3. Park, Y., Baluch, A.H., Kim, Y.H., and Kim, C.G., "High Velocity Impact Characteristics of Shear Thickening Fluid Impregnated Kevlar Fabric", *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 14, No. 2, 2013, pp. 140-145.
4. Tan, V.B.C., Tay, T.E., and Teo, W.K., "Strengthening Fabric Armour with Silica Colloidal Suspensions", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 42, No. 5-6, 2005, pp. 1561-1576.
5. Lee, B.W., "Ballistic Impact Characterization of SiO₂ Colloidal Suspension Impregnated Fabrics and Application to Armor Systems", *Doctoral Thesis, KAIST*, 2009.
6. Park, Y., Kim, Y.H., Baluch, A.H., and Kim, C.G., "Numerical Simulation and Empirical Comparison of the High Velocity Impact of STF Impregnated Kevlar Fabric Using Friction Effects", *Composite Structures*, Vol. 129, 2015, pp. 284.
7. Kim, Y.H., Park, Y., Cha, J.H., Ankem, V.A., and Kim, C.G., "Behavior of Shear Thickening Fluid (STF) Impregnated Fabric Composite Rear wall under Hypervelocity Impact", *Composite Structures*, Vol. 204, 2018, pp. 52-62.
8. Cwalina, C.D., Dombrowski, R.D., McCutcheon, C.J., Christiansen, E.L., and Wagner, N.J., "MMOD Puncture Resistance of EVA Suits with Shear Thickening Fluid (STF) - Armortm Absorber Layers", *Procedia Engineering*, Vol. 103, 2015, pp. 97-104.
9. Kim, Y.H., Choi, C., Kumar, S.K.S., Cha, J., Ankem, V.A., and Kim, C.G., "Flexible Hypervelocity Impact Shield by Dragon skin Bumper and Hybrid Fabric Rear Wall", *AIAA Scitech 2019 Forum*, 2019, pp. 1-8.
10. Erbil, Y., Ekşi, A.K., and Bircan, D.A., "Spall Liner: From Fiber to Protection", *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, 2011, pp. 16-18.