

Z형 직물의 고속 충격 에너지 흡수 특성

최충현* · 박유림* · 김윤호* · 노재영* · 김천곤**†

Energy Absorption Characteristics of Z-shape Fabric under High Velocity Impact

Chunghyeon Choi*, Yurim Park*, YunHo Kim*, Jae-young Noh*, Chun-Gon Kim**

ABSTRACT: In this study, the Z-shape fabric design is proposed as the way to enhance the ballistic performance of fabrics which are used as the intermediate layer of stuffed Whipple shield configurations. The Z-shape fabric employs a different boundary condition from those of conventional configurations of fabrics which include 4 edge fixed. Impact analysis on Z-shape aramid yarns and fabrics using LS-DYNA software was performed and the results were compared with 2 edge fixed and 4 edge fixed fabrics to identify the high velocity impact energy absorption characteristics of the Z-shape fabric. It was revealed that the Z-shape showed different impact behavior and higher energy absorption performance than 2 and 4 edge fixed fabrics.

초 록: 본 연구에서는 stuffed Whipple shield의 성능 향상을 목적으로, stuffed Whipple shield의 중간층에 적용되는 직물의 방탄 성능 향상 기법으로서 Z형 직물 디자인을 제안하였다. 직물은 경계조건에 의하여 충격 현상과 방탄 성능이 크게 변화하게 된다. 따라서 기존의 단순 적층식 직물과는 다른 경계조건을 갖는 Z형 직물을 제안하였고, Z형 직물의 방탄 성능을 확인하기 위하여 상용 프로그램 LS-DYNA를 이용한 아라미드 섬유사와 직물에 대한 충격 해석을 수행하여 에너지 흡수 특성을 계산하고, 그 결과를 단순 적층식 섬유사와 직물의 경우와 비교하였다. 그 결과 Z형 직물은 단순 적층식 직물과는 다른 충격 거동을 보이고, 고속 영역에서 2 edge fixed, 4 edge fixed보다 높은 에너지 흡수율을 보이는 것을 확인하였다.

Key Words: Z형 직물 디자인(Z-shape design), 아라미드 직물(Aramid fabric), 경계조건효과(Boundary condition effect), 고속 충격(High velocity impact), 충격 에너지 흡수 특성(Impact energy absorption characteristics), 직물 보강 위플 쉴드(Stuffed Whipple shield)

1. 서 론

우주 구조물은 고진공, 원자 산소, 자외선, 열 사이클, 미소 유성체 및 우주 파편물(MMOD)에 의한 초고속 충격 등 다양한 우주환경에 노출된다. 많은 수의 우주 구조물이 위치하는 저궤도 상에서 미소 유성체의 수에는 큰 변화가 없지만 우주 파편물의 수가 기하급수적으로 증가하고 있어,

그에 의한 초고속 충격의 위험성 또한 증가하고 있다. 미소 유성체 및 우주 파편물은 약 8~70 km/s의 빠른 속도로 이동하며, 이로 인한 우주 구조물체의 초고속 충격은 우주 구조물의 외벽을 관통하여 내부의 기기들을 손상시킴으로써 우주 구조물의 기능을 마비시킬 수 있기 때문에, 이를 막기 위한 다양한 보호시스템들이 제안되어 이용되고 있다. 가장 잘 알려진 보호 시스템으로는 Fred Whipple이 제안한

Received 23 March 2015, received in revised form 19 August 2015, accepted 24 August 2015

*Department of Aerospace Engineering, KAIST

**†Department of Aerospace Engineering, KAIST, Corresponding author (E-mail: cgkim@kaist.ac.kr)

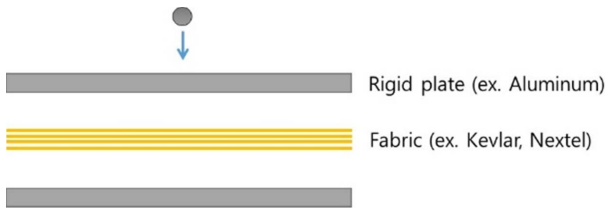


Fig. 1. Stuffed Whipple shield [2]

Whipple shield[1]가 있다. 두 층의 범퍼로 이루어진 Whipple shield는 전방에 위치한 범퍼와의 충돌 이후 충돌체가 debris cloud로 변화하여 후방에 위치한 범퍼는 비교적 쉽게 충격을 흡수할 수 있다. 이러한 Whipple shield는 한 층으로 이루어진 보호 시스템에 비하여 초고속 대역에서의 충격 보호 성능이 비약적으로 증가하지만 Whipple shield만으로는 보호 성능의 한계가 있기 때문에 국제 우주 정거장(ISS)에는 케블라(Kevlar), 넥스텔(Nextel)과 같은 고성능 직물로 이루어진 중간층을 추가하여 방탄 성능을 보강한 stuffed Whipple shield[2]가 주로 쓰이고 있다(Fig. 1). 하지만 증가하는 초고속 충격의 위험과 발사중량의 절감 등의 목적으로 보호 성능이 더욱 향상된 보호 시스템이 요구되고 있다.

본 연구에서는 stuffed Whipple shield의 직물 중간층의 성능 향상을 위한 방법으로서 기존의 단순 적층식 직물을 대체하는 Z형 직물을 제안하였다. 또한 Z형 직물의 성능을 확인하기 위하여 상용 프로그램 LS-DYNA를 이용한 아라미드 섬유사(yarn)와 직물에 대한 충격 해석을 수행하여 에너지 흡수 특성을 계산하고, 그 결과를 단순 적층식 섬유사 및 직물의 경우와 비교하였다.

2. Z형 직물 디자인

본 연구에서는 stuffed Whipple shield의 직물 중간층의 방

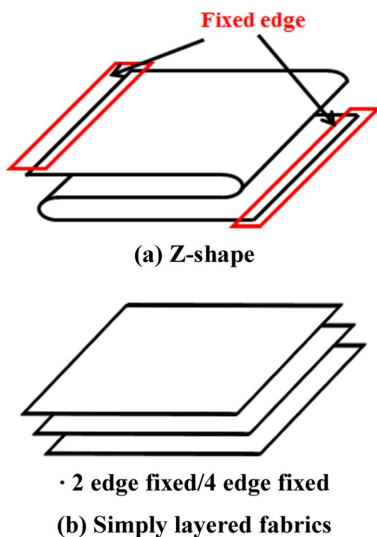


Fig. 2. Z-shape and simply layered fabric configurations

탄 성능 향상을 위하여 Z형 직물을 제안하였다. Z형 직물은 Fig. 2(a)와 같이 긴 직물을 Z자 형태로 접힌 형상을 갖고 있어, Fig. 2(b)와 같이 매 층이 절단되어 있고 매 층의 변이 고정된 경계조건을 갖는 단순 적층식 직물과는 다른 형상과 경계 조건을 갖고 있다. 이러한 차이는 충격 시 발생하는 거동에 영향을 줄 것으로 예상되고, 이러한 거동의 변화가 방탄 성능에도 영향을 줄 것으로 예상된다.

3. 고속 충격 해석 유한요소 모델링

3.1 아라미드 섬유사 모델링

아라미드 직물은 여러 섬유가닥(fiber)으로 이루어진 아라미드 섬유사가 서로 번갈아 교차되는 평직(plain weave) 구조로 되어 있다. 이러한 아라미드 직물을 섬유 단위로 모델링 하는 것에는 어려움이 있기 때문에 섬유보다 상위 단위인 섬유사를 모델링하는 중간 단위(meso-scale) 모델링 기법이 일반적이다[3,4]. 본 연구에서도 Fig. 3과 같이 shell을 통하여 모델링을 수행하였다. 실제 섬유사의 단면은 타원 형태를 하고 있지만 shell로는 타원 형상을 표현할 수 없기 때문에 동일한 단면적을 갖도록 섬유사의 폭과 높이를 결정하였다(Fig. 4).

고속 충격 유한요소해석에는 상용 프로그램 LS-DYNA를 이용하였다. 섬유사의 직교 이방성을 표현하기 위하여 *MAT_ORTHOTROPIC_ELASTIC 재료 카드를 사용하였고, 파손을 표현하기 위하여 *ADD_EROSION을 적용하였다.

3.2 뾰기형 발사물의 모델링

섬유사에 대한 충격 해석에서는 Duan 등[4]의 연구와의 비교를 위하여 Fig. 5(a)와 같은 뾰기형(wedge-tip) 발사물을 사용하였다. 폭과 너비는 1 mm, 길이는 6 mm이다. LS-DYNA의 재료 카드 중 *MAT_RIGID를 사용하였다. 따라서 발사물의 변형은 고려되지 않았다.

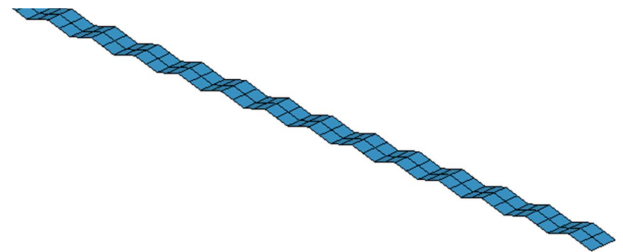


Fig. 3. Mesh and modeling result of yarn

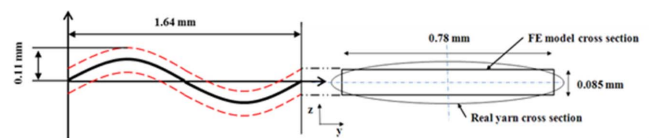
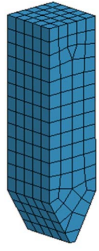
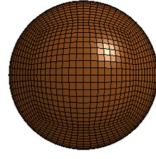


Fig. 4. Schematic diagram of yarn profile [3]



(a) wedge-tipped projectile



(b) Spherical projectile

Fig. 5. Mesh and modeling of wedge-tipped projectile

3.3 구형 발사물의 모델링

직물에 대한 충격 해석에 사용할 발사물은 모델링의 실험을 통한 검증에 위하여 실험에서와 동일하도록 Fig. 5(b)와 같이 5.56 mm의 직경을 갖는 구형 발사물로 모델링이 되었다. Wedge-tip 발사물과 마찬가지로 LS-DYNA의 재료 카드 중 *MAT_RIGID를 사용하였다.

4. 재료의 물성

4.1 아라미드 섬유사의 물성

본 연구에서는 방탄 직물 연구에서 가장 폭넓게 활용되는 케블라 KM2(Kevlar KM2, Dupont, USA)를 이용하였다. 고속 충격에서는 높은 변형률 속도로 변형이 발생하기 때문에, 이에 해당하는 변형률 속도에서의 물성치가 필요하다. 본 연구에서는 고속 충격 해석에서 필요한 섬유사의 물성을 구하기 위하여 Cheng 등[5]에 의하여 구해진 케블라 KM2의 물성치를 이용하였다. 섬유사의 밀도는 섬유사의 단면적이 원형인 섬유로 가득 채울 경우 최대 0.91의 면적비를 갖게 되므로 Rao 등[6]의 연구에서와 같이 섬유가 갖는 밀도 1.44 g/cm³에서 0.91의 비를 적용한 1.31 g/cm³를 적용하였다. 또한 M.P. Rao 등의 연구에서 횡탄성계수 E_{22} , E_{33} 가 종탄성계수 E_{11} 에 비하여 10~100배 작도록 모델링되었음을 참고하여 E_{22} 와 E_{33} 는 E_{11} 의 100분의 1인 846.2 MPa로 설정하였다. 직물의 충격 현상에서 섬유사 간(間)의 마찰과 직물층 간의 마찰은 에너지 흡수율에 큰 영향을 미치기 때문에 마찰력은 아라미드 직물의 모델링에 있어서 중요한 요소 중 하나이다. 마찰계수는 식 (1)로 표현되는 쿨롱 마찰식(equation of coulomb friction)에 이성현[7]에 의하여 실험적으로 얻어진 마찰계수 μ_s , μ_d 를 적용하였다. 전단계수 G_{12} , G_{13} , G_{23} 는 섬유사의 특성상 실제로는 0에 가깝지만 0으로 해석에 적용할 경우 요소가 횡방향으로 극심하게 늘어나는 비정상적인 현상이 발생하기 때문에 해석에는 0이 아닌 값을 적용한다[4,8,9]. 전단강성의 증가는 에너지 흡수율을 증가시키게 되는데, 본 연구에서는 섬유 간의 마찰 등에 해석에서 구현하기 어려운 에너지 흡수 메커니즘을 보완하기 위하여 전단강성을 10 GPa로 상향하여 적용하였다[8]. 해

Table 1. Properties of Kevlar KM2 yarn

Properties	Values
Longitudinal modulus (E_{11}) [5]	84.62 GPa
Transverse modulus (E_{22} , E_{33})	846.2 MPa
Shear modulus (G_{13} , G_{23} , G_{12}) [#]	10.0 GPa
Poisson's ratio (ν_{12})	0.01
Longitudinal strength of fiber (σ_1) [5]	3.5 GPa
Density (ρ) [6]	1.31 g/cm ³
Static coefficient of friction (μ_s) [7]	0.4 (layer-to-layer) 0.26 (yarn-to-yarn)
Dynamic coefficient of friction (μ_d) [7]	0.2 (layer-to-layer) 0.18 (yarn-to-yarn)
Exponential decay coefficient (c)	1.23

Table 2. Mechanical Properties of Al 2017-T4

Properties	Values
Density (ρ)	2.79 g/cm ³
Young's modulus (E)	72.4 GPa
Poisson's ratio (ν)	0.33

석에 적용한 케블라 KM2의 물성은 Table 1에 정리하였다.

$$\mu = \mu_d + (\mu_s - \mu_d)e^{-c|\dot{\gamma}|} \quad (1)$$

4.2 발사물의 물성

직물과 충돌하게 될 발사물로는 우주 구조물에 많이 사용되고, 실제 우주 파편물에서 대다수를 차지하는 알루미늄 중, 실험에서 사용할 발사물과 동일한 Al2017-T4를 사용하였다. 물성치는 Table 2에 정리하였다.

5. 고속 충격 해석 결과

5.1 아라미드 섬유사 충격 해석 결과

Duan 등은 섬유사에 대한 해석을 통하여 경계 조건 효과에 의한 충격 거동의 차이를 확인하였다. 본 연구에서도 직물에 대한 해석에 앞서 섬유사에 대한 충격 해석을 수행함으로써 Z형 직물의 효과를 확인하였다. 섬유사 3개를 섬유사 중심간 거리를 0.055 mm로 하여 배치하였고, 섬유사의 길이는 50 mm로 하였다. 경계 조건은 both ends fixed와, Z형 디자인을 적용하였다. 발사물은 wedge-tip 발사물을 사용하였고, 발사물의 초기 속도는 300 m/s이다. 충격 해석 결과 Fig. 6과 같이 Z형으로 접힌 섬유사는 both ends fixed 상태의 섬유사와 다른 충격 거동을 보이는 것을 알 수 있었다. 섬유사에 대한 해석이기 때문에 실제 직물의 충격 에너지 흡수 특성을 평가하기는 어렵기 때문에 다음으로 직물에 대한 충격 해석을 통하여 Z형 직물의 충격 에너지 흡수 특성을 확인하였다.

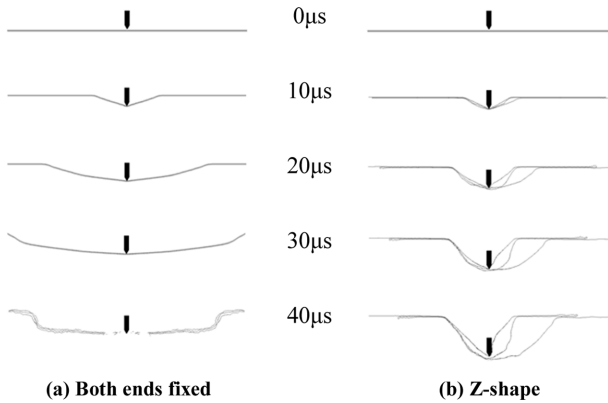


Fig. 6. Time history of Impact analysis for 3-layer aramid yarn analysis

Table 3. Absorbed energy of 1-layer Kevlar fabric

	Experiment results			Analysis results
$V_{initial}$ (m/s)	267.3	315.2	286.2	289.6
$V_{residual}$ (m/s)	164.9	234	189.9	190.32
$E_{absorbed}$ (J)	5.53	5.57	5.73	5.95
	Mean: 5.61			

5.2 아라미드 직물 단층 충격 해석 결과

실제 Z형 직물의 충격 흡수 특성을 확인하기 위해 앞서 아라미드 직물 단층에 대한 충격 해석을 통하여 모델 검증을 수행하였다. 100 mm × 100 mm 크기의 정사각형으로 절단된 아라미드 직물에 spherical 형태의 알루미늄 발사물을 발사하였을 때 발사물로부터 직물이 흡수한 에너지($E_{absorbed}$)의 시험값과 해석값을 비교하였다. 충격 시험은 2단식 경가스 건(2 stage light gas gun)을 이용하여 수행되었고, 에너지 흡수량은 식 (2)를 통하여 계산하였다. 이렇게 구해진 시험값과 해석값을 Table 3에 정리하였다. 에너지 흡수량의 시험값은 발사물의 초기속도가 260 m/s에서 320 m/s 범위에서 얻어진 에너지 흡수량이고, 해석 값은 초기속도가 시험에서의 초기속도의 평균 속도인 289.57 m/s에서 충격이 발생했을 때의 에너지 흡수량이다. 시험과 해석을 통해 구해진 에너지 흡수량은 0.34 J의 차이를 보였고, 또한 Fig. 7의 충격 해석의 Von mises 응력 결과에서 알 수 있듯이 응력이 섬유사를 따라 전달되는 것을 잘 묘사한 것을 통해 본 모델이 충격 중에 발생하는 아라미드 직물의 거동을 적절하게 구현하고 있다고 할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 E_{absorbed} &= E_{initial} - E_{residual} \\
 &= \frac{1}{2}m(v_{initial}^2 - v_{residual}^2)
 \end{aligned} \quad (2)$$

Where

$E_{absorbed}$: absorbed kinetic energy of projectile by fabric

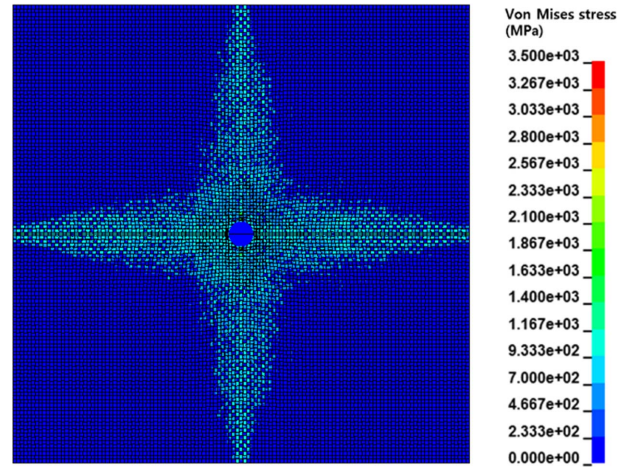


Fig. 7. Von Mises stress result of 1-layer aramid fabric impact analysis ($V_{initial} = 289.57$ m/s, $t = 30 \mu s$).

$E_{initial}$: initial kinetic energy of projectile

$E_{residual}$: residual energy of projectile after impact

$V_{initial}$: Initial velocity of projectile

$V_{residual}$: residual velocity of projectile after impact

5.3 아라미드 직물 3층 충격 해석 결과

본 절에서는 30 mm × 30 mm 크기의 정사각형으로 절단된 아라미드 직물 3층을 섬유사 중심간의 거리를 0.055 mm 로하여 배치하였고, 직물 중심에 spherical 형태의 알루미늄 발사물의 초기 속도를 200 m/s에서 420 m/s까지 20 m/s씩 증가시켜가며 충격 해석을 수행하여 Z형 직물과, 2 edge fixed, 4 edge fixed 직물의 충격 에너지 흡수 특성을 확인하였다. 발사물의 초기 에너지($E_{initial}$)와 아라미드 직물에 의하여 흡수된 에너지($E_{absorbed}$)의 비를 비교한 결과를 Fig. 8에 정리하였다. 충격 해석 결과 대부분의 속도 대역에서 Z형 직물, 2 edge fixed 직물, 4 edge fixed 직물 순으로 에너지 흡수율이 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 특히 발사물의 초기속도가 320 m/s일 때 Z형 직물은 11.6 J, 2 edge fixed 직물은 6.11 J, 4 edge fixed 직물은 5.47 J을 흡수하여, Z형 직물이 2 edge fixed 보다는 1.9배, 4 edge fixed 직물 보다는 2.1배 더 많은 에너지를 흡수하였다. 더 높은 자유도를 지닐수록 Fig. 9에서와 같이 관통 과정에서 직물이 발사물과 함께 발사물 진행 방향으로 이동하는 경향이 증가하는 것으로 보인다. 이러한 현상으로 인해 발사물과 직물간의 접촉 시간은 늘어나게 되어 발생하는 것으로 보인다. 하지만 속도가 380 m/s 이상에서는 각각의 에너지 흡수율이 큰 차이를 보이지 않고 특정 값에 수렴하는 것을 알 수 있다. 이는 충격에 의하여 발생한 변위, 응력 등이 경계면에 도달하여 다시 발사물까지 돌아와 충격 흡수 특성에 영향을 미치지 전에 빠르게 관통이 발생하였기 때문으로 보인다. 또한 발사물 초기 속도 220 m/s 이하에서는 Z형 직물이 약간 낮은 에너지 흡

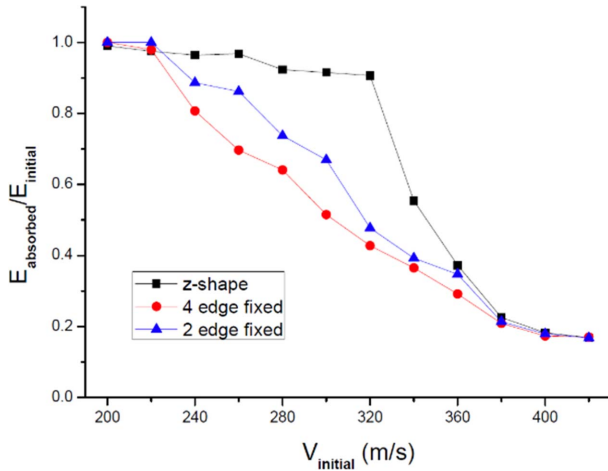


Fig. 8. The ratio of absorbed energy to initial projectile kinetic energy as a function of projectile initial velocity

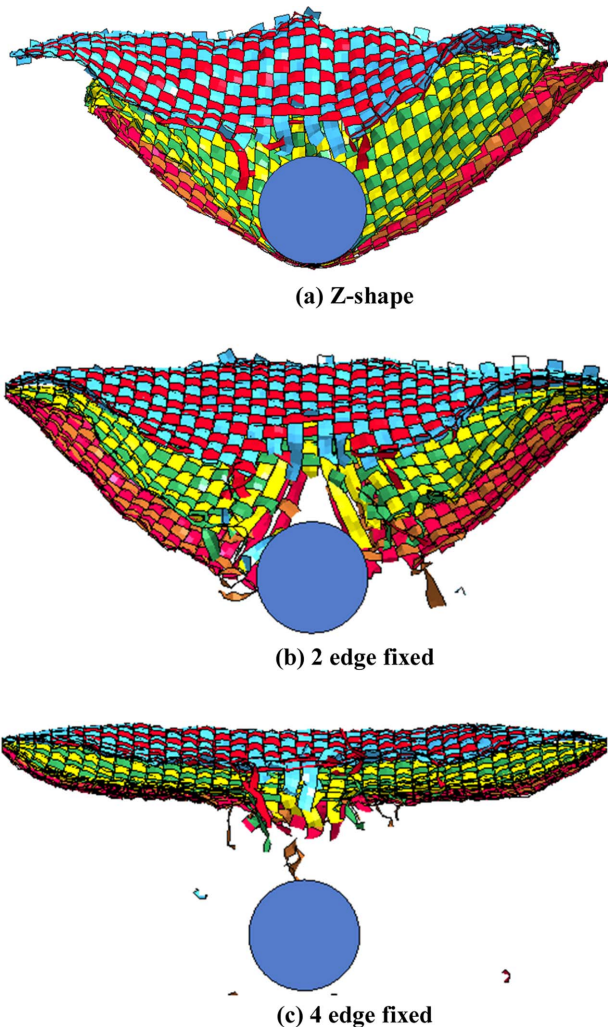


Fig. 9. Visualized impact analysis results of 3-layer of aramid fabric ($V_{\text{initial}} = 320 \text{ m/s}$, $A = 30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$, $t = 50 \text{ }\mu\text{s}$)

수율을 보였다. 이러한 현상은 발사물의 낮은 초기 속도로 인하여 Z형 직물이 적은 힘으로도 풀리는 현상이 발생하게 되고 이 과정에서 발사물에 가해지는 힘이 줄어들어 에너지 흡수율이 줄어드는 것으로 보인다.

6. 결 론

본 연구에서는 아라미드 섬유사와 아라미드 직물에 대한 고속충격 해석을 통하여 Z형 디자인의 충격 거동과 충격 에너지 흡수 특성을 확인하였다. 아라미드 섬유사에 대한 충격 해석을 통하여 Z형 디자인이 기존의 both ends fixed 된 섬유사와는 다른 충격 거동을 보이는 것을 확인하고, 아라미드 직물에 대한 충격 해석을 통하여 발사물 초기 속도 영역 240 m/s~340 m/s에서 두드러진 충격 에너지 흡수율 증가가 나타나는 것을 확인하였다.

본 연구의 결과는 기존의 경계조건 기준으로 3장에 대한 결과로, 실제 방탄에 사용되는 직물과 비교하여 매우 적은 수이므로, 실제 방탄 성능을 보이기 위한 수십 층 이상일 경우에 대한 충격해석을 수행할 필요가 있다. 또한 본 연구에서 수행한 고속 충격 해석은 우주에서 발생하는 초고속 충격에 비하여 낮은 속도 대역에 해당한다. 따라서 초고속 충격에서의 효과를 확인하기 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

후 기

본 연구는 한국연구재단을 통해 교육과학기술부의 우주기초원천기술개발 사업(NSL, National Space Lab)으로부터 지원받아 수행되었습니다(NRF-2014M1A3A3A02034828).

REFERENCES

- Whipple, F.L., "A Comet Model. I. The Acceleration of Comet Encke," *The Astrophysical Journal*, Vol. 111, 1950, pp. 375-394.
- Christiansen, E.L., Crews, J.L., Williamsen, J.E., Robinson, J.H., and Nolen, A.M., "Enhanced Meteoroid and Orbital Debris Shielding," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 17, 1995, pp. 217-228.
- Moon, J.-B., Park, Y., Son, G.-S., and Kim, C.-G., "Computational Analysis of Sandwich Shield with Free Boundary Inserted Fabric at Hypervelocity Impact," *Composites Research*, Vol. 24, No. 3, 2011, pp. 1-8.
- Duan, Y., Keefe, M., Bogetti, T.A., and Powers, B., "Finite Element Modeling of Transverse Impact on a Ballistic Fabric," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 48, No. 1, 2006, pp. 33-43.
- Cheng, M., Chen, W., and Weerasooriya, T., "Mechanical Properties of Kevlar® KM2 Single Fiber," *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 127, No. 2, 2005, pp. 197-203.

6. Rao, M.P., Duan, Y., Keefe, M., Powers, B.M., and Bogetti, T.A., "Modeling the Effects of Yarn Material Properties and Friction on the Ballistic Impact of a Plain-weave Fabric," *Composite Structures*, Vol. 89, No. 4, 2009, pp. 556-566.
7. Lee, S.H., Lee, B.W., and Kim, C.G., "Friction Effects on the Low Speed Impact Characteristics of STF/Kevlar Fabric," *Proceedings of the Fall Conference of the Korean Society for Composite Materials*, Pohang, Korea, Nov. 2007, pp. 148-151.
8. Deju Zhu, Barzin Mobasher and S.D. Rajan, "Finite Element Modeling of Ballistic Impact on Kevlar 49 Fabrics," *Dynamic Behavior of Materials*, Vol. 1. Springer New York, 2011, pp. 249-258.
9. Duan, Y., Keefe, M., Bogetti, T.A., and Cheeseman, B.A., "Modeling Friction Effects on the Ballistic Impact Behavior of a Single-ply High-strength Fabric," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 31, No. 8, 2005, pp. 996-1012.