

금속 원사의 기계적 특성에 따른 경편 직물의 파단 거동 분석 및 모델링 연구

하수민 · 이종혁 · 이종환 · 차인표 · 심지현[†]

DYETEC연구원 탄소산업연구센터

Analysis and Modeling of the Fracture Behavior of Warp-Knitted Fabrics Based on the Mechanical Properties of Metal Yarns

Sumin Ha, Jong-Hyuk Lee, Jong-Hwan Lee, Inpyo Cha, and Jee-Hyun Sim[†]

Carbon Material Research Center, DYETEC Institute, Jeonbuk 55069, Korea

[†]Corresponding Author: Jee-Hyun Sim
E-mail: maxwell02@dyetec.or.kr

Received January 30, 2026
Revised February 24, 2026
Accepted February 24, 2026

© 2026 The Korean Fiber Society

Abstract: In this study, the fracture behavior of molybdenum metal mesh fabrics was systematically investigated by measuring the tensile strength of molybdenum metal yarns with different diameters and applying the obtained properties to a three-dimensional meso-scale model. Tensile tests were conducted on molybdenum metal yarns with diameters to determine yarn-level mechanical properties, which were subsequently incorporated into the three-dimensional meso-scale structural model to numerically predict the mechanical response and fracture behavior of the metal mesh fabric. In addition, fracture tests were performed on actual molybdenum metal mesh fabrics, and the experimentally measured bursting strength was compared with the modeling results to validate the accuracy and predictive reliability of the proposed three-dimensional meso-scale model. The results of this study are expected to provide fundamental insights for the structural design and advanced fracture prediction of warp-knit metal mesh fabrics.

Keywords: 3D modeling, metallic wire, metallic mesh, warp knit, fracture

1. 서 론

금속 메쉬 원단은 높은 기계적 강도, 열적 안정성 및 전기적 기능성을 요구하는 우주용 전개형 안테나 반사판 등의 산업 분야에서 핵심 소재로 활용되고 있다[1-3]. 이러한 응용 분야에서는 발사 및 전개 과정에서의 기계적 하중, 우주 환경에서의 극한 온도 변화, 그리고 전자기적 성능의 안정적 유지가 동시에 요구되기 때문에, 금속 메쉬 원단의 소재 및 구조적 특성이 반사판 성능에 직접적인 영향을 미친다. 금속 메쉬 원단은 일반적으로 몰리브덴(Mo), 텅스텐(W)과 같은 높은 용점을 갖는 금속 재료로 제작된 와이어를 사용하여 제조되며, 이들 재료는 우수한 내열성과 기계적 강도로 인해 우주 환경에 적합한 소재로 알려져 있다[3,4].

이러한 요구 조건을 충족하기 위한 금속 메쉬 원단의 구조적 설계 또한 반사판 성능을 좌우하는 핵심 요소로 작용한다. 특히 경편(warp-knit) 구조의 금속 메쉬는 루프(loop)

기반의 기하학적 특성으로 인해 높은 유연성과 우수한 복원력을 동시에 확보할 수 있어 전개형 안테나 반사판에 적합한 구조로 주목받고 있다[2,5]. 그러나 하중 인가 시 각 루프가 신장, 회전, 슬라이딩 등의 복합적인 거동을 나타내면서 비선형 변형 특성이 두드러지게 나타나며, 루프 교차부 및 결절부에서는 국부적인 응력 집중이 발생하는 것으로 보고되고 있다. 이러한 구조적 특성으로 인해 금속 메쉬 원단의 거시적 기계적 성능과 파단 메커니즘은 개별 금속 원사의 물성과 편직 구조 간의 상호작용에 의해 지배된다. 따라서 경편 구조 금속 메쉬 원단의 기계적 거동을 정확히 이해하기 위해서는 원사 수준의 물성 특성과 구조적 기하학을 함께 고려한 정밀한 해석적 접근이 요구된다[5-7].

기존 연구들은 금속 메쉬 원단의 형상 모델링 또는 인장 거동 분석에 주로 초점을 두어 왔으며, 원사 수준의 실제 가공 물성을 반영한 구조 파단 예측 연구는 상대적으로 제한적이다. 특히 인발 공정을 통해 제조된 금속 원사는 결

정립 미세화로 인해 벌크 소재와 상이한 항복강도 및 인장 강도 거동을 나타내는 것으로 보고되고 있다[8,9]. 그러나 구조 해석 분야에서는 가공 공정에 따른 물성 변화를 직접 반영하기보다는 문헌값이나 벌크 재료의 대표 물성을 적용하는 경우가 많아, 원사 직경 변화에 따른 물성 차이가 파단 거동에 미치는 영향을 체계적으로 분석한 연구는 제한적인 실정이다.

이러한 한계를 고려하여, 저자들은 선행 연구에서 금속 메쉬의 복잡한 루프 지오메트리를 구현하고 이를 3차원 meso-scale 모델로 생성하는 모델링 프로세스를 개발한 바 있다[10]. 해당 연구를 통해 Atlas-atlas 패턴의 기하학적 형상을 정밀하게 묘사할 수 있는 기반이 마련되었으나, 실제 구조적 안정성과 신뢰성을 평가하기 위해서는 단순 형상 재현을 넘어 구성 원사의 실제 인장 물성과 파단 거동을 반영한 해석 모델로의 확장이 요구된다.

따라서 본 연구에서는 선행 연구에서 구축된 3차원 meso-scale 모델링 프로세스를 기반으로, 인발 공정으로 제조된 몰리브덴 금속 원사의 기계적 특성을 인장 시험을 통해 정량적으로 평가하고, 도출된 비선형 물성 및 파단 조건을 3차원 meso-scale 구조 해석 모델에 직접 반영하여 경편 금속 메쉬 원단의 파단 거동을 예측하였다. 또한 실제 금속 메쉬 원단의 파열 시험 결과와 수치 해석 결과를 비교함으로써 제안 모델의 예측 정확성을 검증하였다. 이는 가공 공정에 의해 변화된 원사 수준의 실제 물성을 원단 구조 해석에 직접 연계하고 실험적으로 검증하였다는 점에서 기존의 형상 중심 모델링이나 단순 물성 가정 기반 해석 연구와 구별되며, 경편 금속 메쉬 구조 설계 단계에서 활용 가능한 파단 거동 예측 절차를 제시한다는 점에서 의의를 갖는다.

2. 실험

2.1. 금속 원사 실험 재료

본 실험에서는 몰리브덴 금속 원사의 인장 특성을 비교하기 위해 두께별 원사 시편을 준비하였다. 실험에 사용된 몰리브덴 금속 원사는 직경 30 μm , 50 μm , 100 μm , 500 μm 4종류이며, 몰리브덴 금속 원사는 SMB Corporation에서 인발 공정으로 제조되었다. 실험에 사용된 원사 스펙을 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Molybdenum metal yarn specimens classified by thickness

No.	Material	Fiber diameter (μm)
#1	Molybdenum	30
#2	Molybdenum	50
#3	Molybdenum	100
#4	Molybdenum	500



Figure 1. Image of a warp-knit fabric with an Atlas-Atlas pattern.

2.2. 금속 메쉬 원단 실험 재료

본 연구에 사용된 금속 메쉬 원단은 선행 연구와 동일한 조건으로 제작된 Atlas-atlas 패턴의 경편 조직 원단을 사용하였으며, 시편의 외관 사진은 Figure 1에 제시하였다. 해당 금속 메쉬 원단은 직경 30 μm 의 몰리브덴 금속 원사를 사용하여 편직되었다. 금속 메쉬 원단 제작에는 Karl Mayer의 더블 바늘 경편기(HKS-3-M) 장비를 사용하였으며, 실험에는 동일한 제조 조건에서 생산된 원단을 사용하였다.

2.3. 금속 원사의 인장 시험

인발 공정으로 제조된 몰리브덴 금속 원사의 인장 특성을 평가하기 위하여 KS K 0412 규격(현행 KS K 0440)에 의거하여 실험을 진행하였다.

직경 30 μm , 50 μm 몰리브덴 금속 원사의 인장강도 측정에 사용한 장비는 다이텍연구원에서 보유한 Zwick의 만능재료시험기(Z05 TS)를 사용하였으며, 직경 100 μm 몰리브덴 금속 원사는 다이텍연구원에서 보유한 Zwick의 만능재료시험기(Z005)를 사용하였다. 직경 500 μm 몰리브덴 금속 원사는 FITI시험연구원에서 보유한 Instron의 만능재료시험기(4303)를 사용하였으며, 시험용 시료의 파지 거리는 200 mm, 인장 속도는 100 mm/min으로 진행하였다.

2.4. 금속 메쉬 원단의 파열 시험

금속 메쉬 원단의 파열강도를 측정하기 위하여 다이텍연구원에서 보유하고 있는 Zwick의 만능재료시험기(Z05 TS)를 이용하였으며, KS K 0350 규격에 따라 볼 버스팅 방법으로 실험을 진행하였다.

시험편의 크기는 파열강도 시험기의 링 클램프 기구의 외경을 덮을 정도의 충분한 크기가 되도록 시험편의 너비와 길이 모두 (100 \pm 2) mm로 하였다. 내경 44.45 mm의 링 클램프와 직경 25.40 mm의 강구를 사용하여, 인장강도 시

힘기를 30 cm/min 속도로 가동해 강구가 링 클램프 평면에 수직으로 링의 중심을 통과할 때의 최대 저항을 측정하였다. 직물인 경우는 동일한 경사·위사가 들어 있는 부분에서, 편성물인 경우는 동일한 웨일 및 코스가 들어 있는 부분에서 채취해서는 안 되며, 직물 및 편성물의 양면으로부터 그 폭의 1/10 이상 떨어진 부분에서 시험편을 채취하여 실험을 진행하였다.

2.5. 금속 메쉬 원단의 파단 시뮬레이션

원사 인장 시뮬레이션에 필요한 기본 물성은 폴리브덴 금속 원사의 탄성계수, 항복강도, 신율 등이 사용되었으며, 원사 3D 모델 생성을 위하여 물성 모델링 소프트웨어 (ANSYS LS-DYNA 2025 R2)가 활용되었다.

메쉬 원단 3차원 모델은 TexGen 환경에서 마이크로 CT에서 측정한 3차원 좌표를 적용하고 사용자 스크립트를 사용해 메쉬 원단을 3차원 가시화하여 적절한 모델링 되었는지 확인하는 과정을 거쳤으며, Python으로 원단 모델의 시뮬레이션 검증에 사용할 LS-DYNA 입력 스크립트를 생성하여 기계적 특성 시뮬레이션을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 금속 원사의 인장 특성 분석 결과

순수 폴리브덴의 기계적 물성치는 널리 알려져 있으나, 본 연구에서 사용된 직경 500 μm 이하의 미세 원사는 판재나 봉재 등의 벌크 소재와는 상이한 기계적 거동을 나타낸다. 이는 제조 과정 중 소성 변형을 수반하는 인발 공정으로 인해 결정립이 가공 방향으로 길게 연신 되어 강한 섬유상 조직을 형성하기 때문이다. 이러한 미세조직의 재배열 효과는 벌크 형태와 구별되는 고유한 물성 변화를 유발하므로, 메쉬 구조 해석 시 원사 수준에서의 물성치 적용이 필수적이다[8-10].

이에 경편 금속 메쉬 원단의 파단 거동 시뮬레이션을 위한 기초 물성을 확보하기 위해, 폴리브덴 원사의 직경(30, 50, 100, 500 μm) 변화에 따른 기계적 거동을 분석하였다. KS K 0412 규격에 따라 인장강신도를 측정하였으며, 그 결과를 평균값으로 산출하여 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Tensile properties of yarns with different diameters

No.	Yarn diameter (μm)	Load (N)	Elongation (%)	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)
#1	30	1.50	1.79	2118.08	292.25
#2	50	4.09	1.74	2085.26	259.44
#3	100	13.45	1.58	1712.29	228.84
#4	500	290.99	2.92	1482.46	136.81

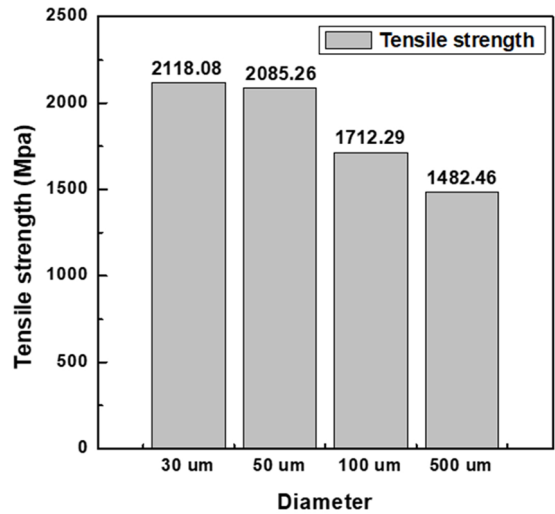


Figure 2. Tensile strength analysis result according to yarn diameter.

직경이 30 μm에서 500 μm로 증가함에 따라 인장강도는 약 2,118 MPa에서 1,482 MPa로 크게 감소하였다. 이를 통해 원사의 직경이 미세화됨에 따라 인장강도가 상승하는 역비례 관계를 확인하였으며, 이를 Figure 2에 나타내었다. 이는 금속 원사의 직경이 가늘어질수록 연신 공정에서 발생하는 강한 소성변형에 의해 전위 밀도가 급격히 상승하고 결정립이 미세화되는 현상이라고 판단된다[11-15].

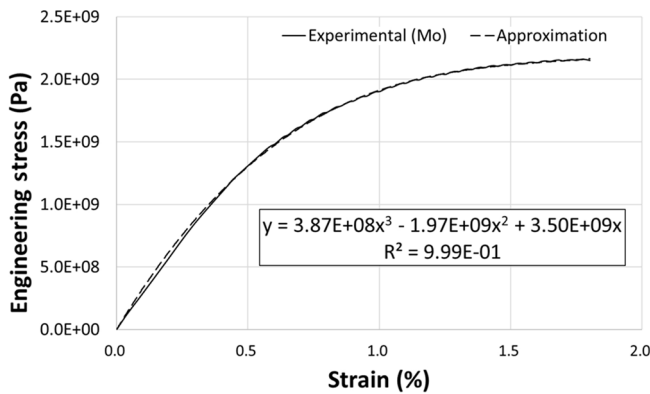
응력-변형률 거동 분석 결과, 모든 직경의 폴리브덴 원사에서 약 1.6-2.9% 수준의 매우 제한적인 연신율이 관찰되었으며, 이는 고강도 금속 나노 및 마이크로 와이어에서 일반적으로 보고되는 전형적인 취성 파단 거동과 일치하였다. 금속 원사 직경 감소에 따른 탄성계수의 상승(약 136.8 GPa에서 292.3 GPa)은 원자 결합 강도의 변화보다는 연신 공정 중 형성된 결정 배향성 및 미세조직 정렬 효과에 따른 영향으로 판단된다[8,15-17].

네 가지 직경의 폴리브덴 금속 원사 중, 직경 30 μm 원사는 가장 높은 인장강도와 탄성계수를 나타내어 안테나 방사면의 구조 강성 확보와 하중 지지 성능 측면에서 유리한 특성을 보였다. 또한, 직경이 감소함에 따라 동일 면적 기준 금속 메쉬 원단의 면밀도가 감소하여 경량화가 중요한 전개형 안테나 구조에서 요구되는 성능 확보에도 적합한 특성을 보였다. 경편 공정에서 30 μm 폴리브덴 원사는 안정적인 루프 형성이 가능하고 조직 균일성 확보에 유리하여, 메쉬 원단의 기계적 특성을 안정적으로 유지할 수 있다. 또한 경량화 효과와 공정 적합성 측면에서도 유리한 조건을 만족한다. 이러한 기계적 성능, 경량화 효과 및 공정 적합성을 종합적으로 고려하여, 본 연구에서는 30 μm 폴리브덴 원사를 메쉬 원단용 원사로 선정하였다.

직경 30 μm 폴리브덴 원사의 대푯값을 인장강도 1.5 N, 변형률 1.8%로 선정하여 해석에 필요한 재료 물성 정보를

Table 3. Material properties of 30 μm diameter molybdenum metal yarn

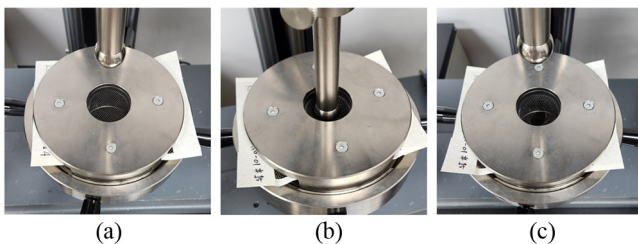
Yarn diameter (μm)	Elastic modulus (GPa)	Poisson's ratio	Density (kg/cm^3)	Elongation at break (%)
30	349.7	0.38	10,220	1.8

**Figure 3.** Material properties of 30 μm diameter molybdenum metal yarn.

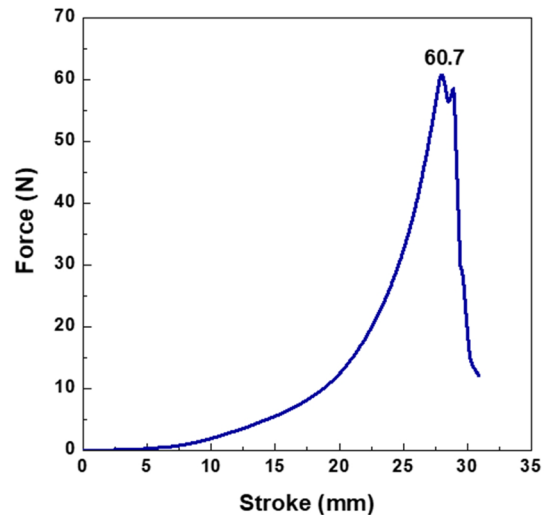
산정하였다. 인장강신도 시험을 통해 응력-변형률 곡선을 획득한 후, 해당 실험 데이터를 기반으로 3차 다항식 형태의 일반식으로 커브 피팅을 수행하였다. 커브 피팅된 함수의 미분 값인 $y'(0)$ 을 통해 초기 탄성계수를 도출하였으며, 그 값은 349.7 GPa로 설정하였다. 재료의 파단 조건은 인장 시험 결과를 바탕으로 변형률 1.8%에서 파단이 발생하는 것으로 설정하여 비선형 정적해석에 적용하였으며, 재료 물성 및 해석 입력 값은 결과를 Table 3에 나타내었다. Figure 3에는 인장 시험을 통해 획득한 응력-변형률 곡선과 이를 기반으로 수행한 커브 피팅 결과를 함께 나타내었다.

3.2. 금속 메쉬 원단의 파열 특성 분석 결과

금속 메쉬 원단의 파열 특성을 평가하기 위해 파열 강도 측정 시험을 수행하였다. 시험 장치 및 시험 방식은 Figure 4에 나타내었고, 파열 강도 측정 결과는 Table 4에 정리하여 제시하였다. 파열 시험은 강구가 수직 방향으로 링의 중심을 통과하도록 하중을 가하는 방식으로 진행되었다.

**Figure 4.** Measurement of bursting strength of molybdenum metal fabric; (a) measurement setup, (b) bursting test, and (c) measurement end.**Table 4.** Bursting strength of molybdenum metal fabric

Material	Diameter (μm)	Fabric type	Bursting strength (N)
Molybdenum	30	Atlas-atlas	60.7

**Figure 5.** Bursting strength of molybdenum metal fabric.

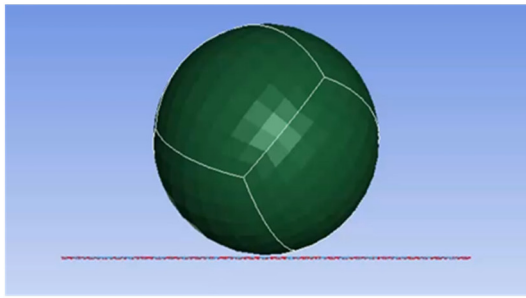
시험 초기에는 하중 인가에 따라 원단이 점진적으로 변형되면서 변위 증가에 비례하여 하중이 비교적 완만하게 증가하는 거동을 보였다. 이러한 초기 거동은 Figure 5에 제시된 파열 시험 결과 그래프의 완만한 기울기 구간에서 확인할 수 있으며, 하중이 원단 전체에 비교적 균일하게 분산되어 전달되는 특성을 나타낸다. 이후 변위가 증가함에 따라 원단의 변형 저항이 점차 증가하면서 하중 증가율이 뚜렷하게 상승하는 경향이 관찰되었고, 이는 하중-변위 곡선에서 기울기가 급격히 증가하는 구간으로 나타난다.

변위가 더욱 증가하여 하중이 최댓값에 근접하면 국부적으로 응력이 집중된 원사에서 파단이 개시되었으며, 하중이 급격히 감소하면서 원단의 파열이 발생하였다. 금속 메쉬 원단이 일정 변형 한계에 도달한 이후 원사 수준의 파단을 기점으로 구조적 붕괴가 진행되는 파열 메커니즘을 명확히 보여준다.

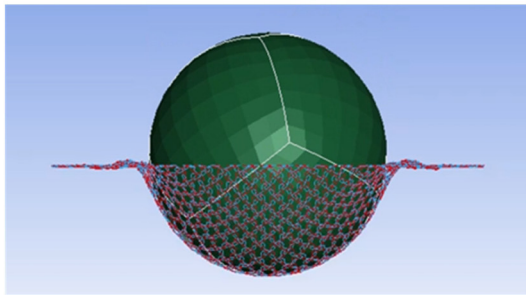
파열 시험 결과, 금속 메쉬 원단의 최대 파열 강도는 60.7 N으로 측정되었으며, 해당 결과는 국부적인 하중 집중 조건에서 경편 금속 메쉬 원단이 견딜 수 있는 한계를 평가한 것으로 판단된다. 본 시험에서 측정된 파열 강도 값은 이후 수행되는 파단 시뮬레이션에서 구조적 파괴 한계를 검증하기 위한 기준 물성으로 활용되었다.

3.3. 금속 메쉬 원단의 파단 시뮬레이션 결과

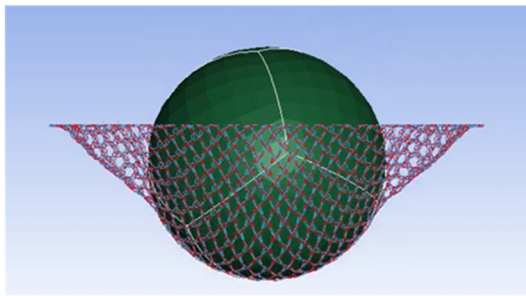
파열 강도 시험 조건을 모사하기 위하여 Atlas-atlas 패턴의 폴리브텐 금속 메쉬 원단을 파열강도 시험기 링 클램프 내경에 맞게 직경 44.45 mm의 형상으로 모델링 하였으며,



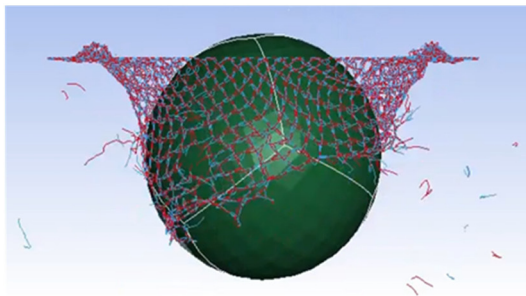
(a)



(b)



(c)

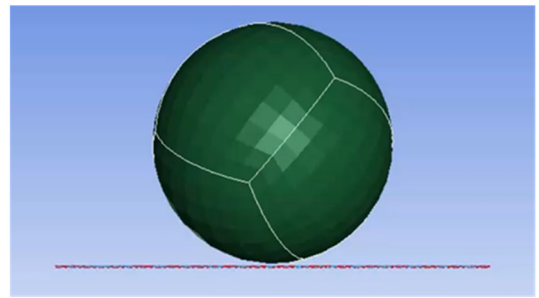


(d)

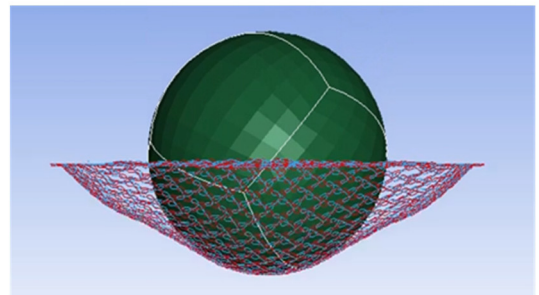
Figure 6. Fracture simulation results in the course directions.

유한요소 해석은 LS-DYNA를 이용하여 수행하였다. 3D 모델을 기반으로 원단 구조를 구현하였으며, 총 58,939개의 BEAM 요소를 적용하였다. 각 원사의 기계적 거동을 정밀하게 모사하기 위해 Hughes-Liu formulation을 적용한 beam 요소를 사용하였다[18]. 이는 대변형(large displacement) 및 대회전(large rotation) 해석에 유리한 방법으로 직물 구조와 같이 원사가 꼬이고, 굽혀지며, 심하게 회전하는 거동을 효과적으로 모사할 수 있어 본 연구에 적합하다고 판단하였다.

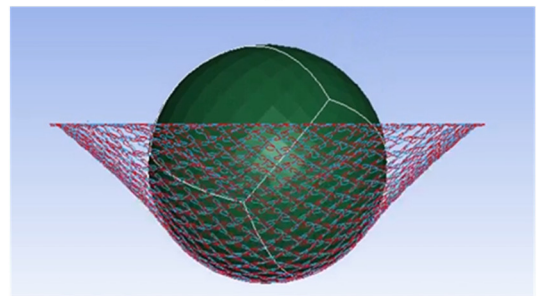
파단 거동 모사를 위해 직경 25.40 mm의 강구를 LS-



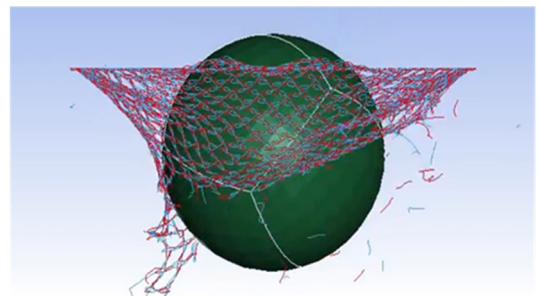
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 7. Fracture simulation results in the wale directions.

DYNA에서 제공하는 *RIGIDWALL 키워드를 이용하여 구형 강체로 정의하였으며, 강구에는 원단 표면에 대해 수직 방향의 변위를 부여하여 시험 조건을 모사하였다. 해당 결과로부터 course 방향에서의 파단 양상은 Figure 6에, wale 방향에서의 파단 양상은 Figure 7에 나타내었다.

생성된 금속 메쉬 원단 모델에 대하여 직경 25.40 mm의 강구가 30 cm/min의 속도로 하강하는 조건을 부여하여 원단 파열 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 과정에서 강구와 원단 간의 접촉 거동을 고려하였으며, Z축 방향으로

강구에 작용하는 반력을 기반으로 파열 시점까지의 하중-변위 거동을 도출하였다. 이때, Z축 방향 하중-변위 곡선으로부터 산출된 파열 강도를 기준으로 원단의 파열 거동을 비교하였다.

시뮬레이션 결과, 원단 파열 시 Z축 방향으로 강구에 작용하는 최대 하중은 66.0 N으로 나타났으며, 파열 이후 급격하게 하중이 저하되는 거동이 관찰되었다. 이러한 거동은 강구 접촉부 인근의 금속 원사에 응력이 집중되면서 국부적인 원사 파단이 발생하고, 이후 하중을 지지하는 능력이 상실되는 과정에 기인한 것으로 해석된다. 실제 파열 시험과 비교한 결과, 파열 하중 기준 오차율은 8.7%로 나타났으며, 하중-변위 곡선의 전반적인 경향이 정성적으로 잘 일치하였다(Figure 8). 본 연구에서 도출된 8.7%의 오차는 직물 구조 기반 수치해석 연구에서 보고된 실험-모델 비교 범위 내에 해당하는 수준으로 판단된다[19,20].

한편, Figure 8에서 스트로크 약 10-25 mm 구간에서는 실험 결과와 시뮬레이션 결과 간 상대적인 차이가 나타났다. 해당 구간은 경편 구조 금속 메쉬 원단에서 각 루프가 신장, 회전 및 슬라이딩을 동반하며 재배열되고, 동시에 접촉 면적이 증가하는 기하학적 비선형 거동 영역에 해당한다. 이와 같은 루프 기반 구조에서는 하중 증가에 따라 원사 간 접촉 조건이 단계적으로 변화하며, 마찰에 의한 에너지 소산 효과가 구조 응답에 민감하게 작용하는 것으로 보고되어 있다. 본 연구에서는 원사 간 접촉을 고려하여 해석을 수행하였으나, 실제 편성 공정에서 형성되는 국부적 접촉 강성 변화, 미세 슬라이딩, 초기 형상 편차 및 잔류 응력 분포까지 완전하게 반영하기에는 한계가 있다. 이러한 요인들이 중간 변형 구간에서의 강성 차이로 나타났을 가능성이 있다[5,21-23].

반면, 스트로크 약 25-30 mm 구간은 강구 접촉부 인근에서 응력 집중이 극대화되며 원사 파단이 개시되는 영역으로, 이 단계에서는 구조 거동이 재료의 파단 조건에 크게 영향을 받는 것으로 해석된다. 볼 버스팅 조건을 모사한 기존 수치해석 연구에서도 최종 파단 단계에서는 재료 모델의 정의가 예측 정확도에 중요한 영향을 미치는 것으로 보고되어 있다[25]. 이를 고려하여, 본 연구에서는 원사 인장 시험을 통해 도출된 파단 변형률(1.8%)을 재료 모델의 파단 조건으로 적용하였으며, 이에 따라 파단 구간에서 실험 결과와의 정량적 일치도가 상대적으로 높게 나타났다.

또한 인발 공정에 의해 변화된 원사 수준의 비선형 인장 물성과 파단 조건을 구조 해석 모델의 재료 입력값으로 직접 반영하였다. 이에 따라 파단이 재료 거동에 의해 지배되는 25-30 mm 구간에서는 실험 결과와 높은 정합성을 보였으며, 이는 원사 물성과 구조 응답 간의 연계성이 해석 모델에 일관되게 구현되었음을 의미한다. 이를 통해 원사 수준의 가공 물성을 구조 수준의 파열 거동과 직접 연결하

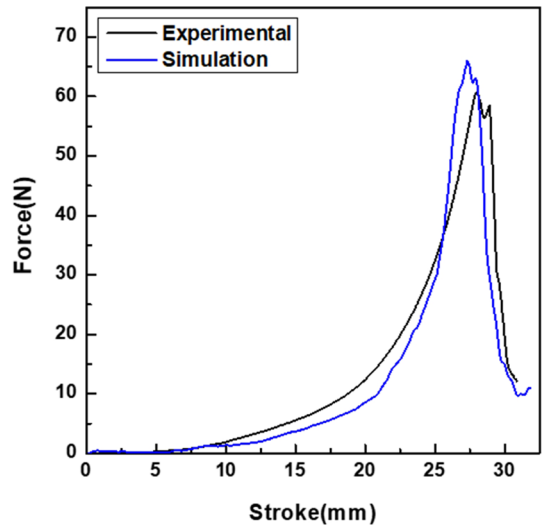


Figure 8. Comparison of burst strength between test and simulation results.

는 meso-scale 기반 해석 절차를 제시하였으며, 구조적 비선형 거동과 재료 파단 거동을 구분하여 해석할 수 있는 기반을 마련하였다. 이러한 접근은 금속 메쉬 원단의 파열 거동을 정량적으로 예측하고 설계 변수 변화에 따른 응답을 분석하는 데 활용될 수 있다는 점에서 의의를 갖는다.

3.4. 파단 메커니즘 해석

원사 물성과 경편 루프 구조의 상호작용에 따른 구조적 파단 메커니즘을 규명하기 위하여, 하중 증가에 따른 변형률 분포 변화를 단계적으로 분석하였다. 원사 인장 시험을 통해 도출된 파단 변형률을 재료 모델의 파단 조건으로 적용함으로써, 해석에서 예측되는 국부 변형률이 임계값에 도달할 경우 원사 파단이 개시되도록 설정하였다.

Figure 9는 하중 작용 전 상태부터 원사 파단 및 원단 파열이 개시되는 단계까지의 변형 거동을 순차적으로 제시한 것이다. Figure 9(a)는 하중 인가 전의 초기 형상을 보여주며, 이 단계에서는 루프 간 간격이 일정하게 유지되며 변형률 분포는 거의 발생하지 않는다. Figure 9(b)-(e)는 하중이 점진적으로 증가하는 과정에서 루프가 경사 방향으로 신장되고 인접 루프 간 간격이 감소하는 거동을 나타낸다. 이러한 루프 기반 구조의 대변형 및 회전 거동은 기존 경편 구조 해석 연구에서도 보고된 바 있으며, 루프 교차부 및 결절부에서는 기하학적 구속과 접촉 조건의 영향으로 국부적인 응력 및 변형률 집중이 발생하는 것으로 알려져 있다. 본 해석에서도 하중 증가에 따라 교차부에서 변형률이 점진적으로 국부화되는 경향이 확인되었다[7,18].

특히 곡률이 큰 교차부에서는 인장 변형과 굽힘 변형이 동시에 작용하여 변형률이 급격히 상승하였다. 국부 변형률이 원사 인장 시험에서 도출된 파단 변형률 1.8%에 도달

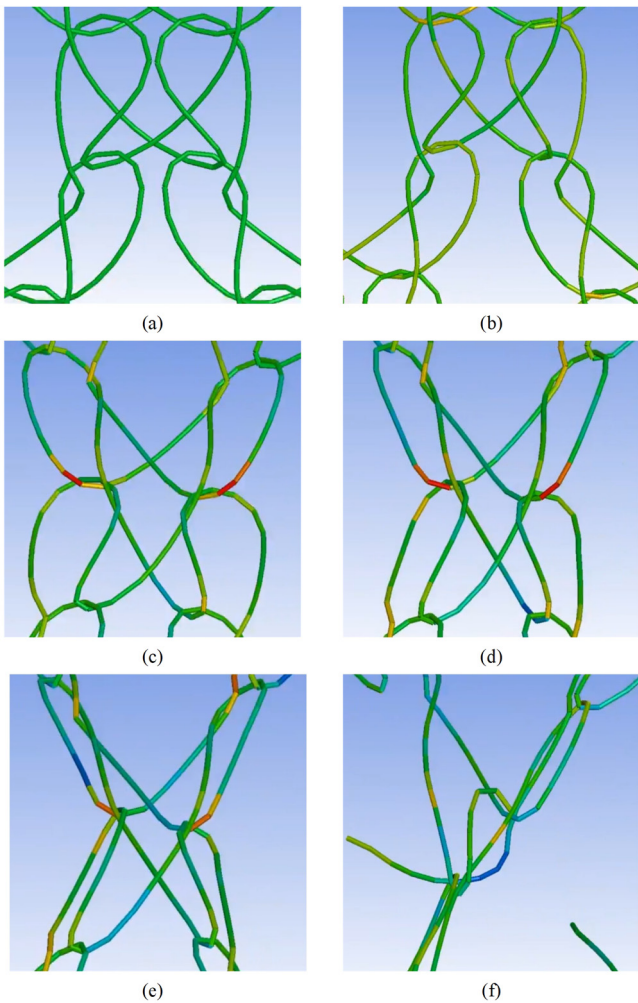


Figure 9. Deformation and fracture behavior under load.

하면 해당 원사에서 파단이 개시되며, 이는 Figure 9(f)에서 확인할 수 있다. 원사의 최초 파단 이후에는 인접 원사로서 하중이 재분배되면서 주변 루프에서도 변형률이 추가로 증가하고, 그 결과 파단이 연쇄적으로 발생하여 최종적으로 원단의 파열로 이어진다. 이러한 점진적 파괴 및 하중 재분배 거동은 직물 기반 구조의 파단 해석 연구에서도 보고된 바 있다[25]. 본 해석 결과 역시 동일한 파단 전개 양상을 재현함으로써, 제안된 모델이 구조적 파단 전개 과정을 합리적으로 구현하고 있음을 뒷받침한다.

4. 결 론

본 연구에서는 폴리브덴 금속 원사의 직경 변화에 따른 인장 특성을 실험적으로 도출하고, 이를 3차원 meso-scale 구조 해석 모델에 반영하여 경편 금속 메쉬 원단의 파단 거동을 예측하였다. 30 μm 폴리브덴 원사를 적용한 Atlas-Atlas 경편 조직을 대표 조건으로 설정하여 해석 결과와 실

험 결과를 비교함으로써, 제안된 모델의 파단 하중 및 파단 위치 예측 가능성을 검증하였다.

1. 네 가지 직경의 폴리브덴 금속 원사에 대해 인장 시험을 수행하여 기계적 물성을 확보하였으며, 해당 물성치를 3차원 meso-scale 모델의 입력 변수로 적용함으로써 금속 메쉬 원단의 기계적 응답과 파단 거동을 수치적으로 예측하였다.
2. 실제 폴리브덴 금속 메쉬 원단을 대상으로 파열 시험을 수행한 결과는 60.7 N이었으며, 실험을 통해 측정된 파열 강도와 시뮬레이션 결과는 66.0 N로 오차율은 8.7%였다. 시험 결과와 시뮬레이션 결과를 비교함으로써 제안된 모델의 타당성과 예측 신뢰성을 검증하였다. 그 결과, 원사 수준의 인장 물성을 고려한 meso-scale 모델이 금속 메쉬 원단의 응력 분포 및 파단 거동을 합리적으로 모사할 수 있음을 확인하였다.
3. 실험을 통해 확보된 폴리브덴 금속 원사의 실제 인장 물성을 기반으로, 경편 금속 메쉬 원단의 경편 금속 메쉬 원단의 변형 및 파단 거동을 해석할 수 있는 적용 절차를 정립하였다. 제안된 해석 절차는 원사 직경, 조직 패턴, 경사 및 위사 밀도와 같은 주요 설계 변수를 반영할 수 있도록 구성된 구조 기반 해석 체계이다. 따라서 변수 변경에 따른 동일 절차 적용이 가능하며, 파단 거동 비교를 통해 모델의 적용 범위를 단계적으로 확장할 수 있다. 본 해석 체계는 경편 금속 메쉬 원단의 구조 설계 단계에서 기계적 안정성과 파단 가능성을 사전에 평가할 수 있는 분석 기반을 제공한다. 아울러 구축된 3차원 모델은 실제 운용 환경을 고려한 열-전기-구조 연성 해석으로 확장 가능하며, 우주 및 극한 환경용 금속 메쉬 구조물의 구조적 신뢰성 검증에 활용될 수 있다.

감사의 글: 본 연구는 대한민국정부(산업통상자원부 및 방위사업청) 재원으로 민간협력진흥원에서 수행하는 민간 기술협력사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다(22-CM-EC-32).

References

1. T. Li, J. Jiang, T. Shen, and Z. Wang, "Analysis of Mechanical Properties of Wire Mesh for Mesh Reflectors by Fractal Mechanics", *Int. J. Mech. Sci.*, 2015, **92**, 90–97.
2. I. Bettermann, H. Löcken, C. Greb, T. Gries, A. Oses, J. Pauw, N. Maghaldadze, and L. Datashvili, "Review and Evaluation of Warp-knitted Patterns for Metal-based Large Deployable Reflector Surfaces", *CEAS Space J.*, 2023, **15**, 477–493.
3. J. S. Choi, T. Y. Park, B. G. Chae, and H. U. Oh, "Development of Lightweight 6 m Deployable Mesh Reflector Antenna Mechanisms Based on a Superelastic Shape Memory Alloy",

- Aerospace*, 2024, **11**, 738.
4. C. H. Lee, D. G. Kim, R. H. Do, S. H. Kim, G. H. Bae, K. R. Koo, Y. P. Lee, and I. O. Jung, "Development of Truss-Type Deployable Mesh Reflector Antenna, Part 1: 1.5 m-Scale Mesh Antenna", *Appl. Sci.*, 2025, **15**, 11529.
 5. H. Shao, J. Li, N. Chen, G. Shao, J. Jiang, and Y. Yang, "Experimental Study on Bi-axial Mechanical Properties of Warp-knitted Meshes with and Without Initial Notches", *Materials*, 2018, **11**, 1999.
 6. T. Yang, P. Yang, Z. Zou, and P. Ma, "Mechanical Properties of Warp-knitted Metal Mesh Fabric under Biaxial Tension Loading", *Text. Res. J.*, 2021, **91**, 1368–1379.
 7. H. Y. Xu, J. H. Jiang, N. L. Chen, F. B. Lin, and H. Q. Shao, "Finite Element Modeling for the Uni-axial Tensile Behaviour of Metallic Warp-knitted Fabric", *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 2018, **26**, 49–54.
 8. G. J. Zhang, G. Liu, Y. J. Sun, F. Jiang, L. Wang, R. Wang, and J. Sun, "Microstructure and Strengthening Mechanisms of Molybdenum Alloy Wires Doped with Lanthanum Oxide Particles", *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2009, **27**, 173–176.
 9. Y. Ohba, "Secondary Recrystallization of Pure Molybdenum Wires", *Acta Metallurgica*, 1986, **34**, 1329–1334.
 10. J. H. Lee, J. H. Park, J. H. Lee, and J. H. Sim, "3-Dimensional Modeling Process Development of Warp-knitted Metallic Meshes", *Text. Sci. Eng.*, 2023, **60**, 432–440.
 11. K. H. Lin, B. Y. Liao, S. P. Ju, J. S. Lin, and J. Y. Hsieh, "Mechanical Properties and Thermal Stability of Ultrathin Molybdenum Nanowires", *RSC Adv.*, 2015, **5**, 31231–31237.
 12. S. Wang, Z. Shan, and H. Huang, "The Mechanical Properties of Nanowires", *Adv. Sci.*, 2017, **4**, 1600332.
 13. F. Yang, L. Dong, L. Cai, L. Wang, Z. Xie, and F. Fang, "Effect of Cold Drawing Strain on the Microstructure, Mechanical Properties and Electrical Conductivity of Low-oxygen Copper Wires", *Mater. Sci. Eng.: A*, 2021, **818**, 141348.
 14. L. Fella and Z. Boumerzoug, "Experimental Investigation of Industrial Copper Deformed by Wire Drawing Process", *J. Fundam. Appl. Sci.*, 2018, **10**, 97–112.
 15. A. Kistrane-Bouzidi, M. Zidani, M. C. Nebbar, T. Abid, A. L. Helbert, F. Brisset, and T. Baudin, "Mechanical Properties and Texture Evolution of High-carbon Steel Wires during Wire Drawing: Strand Manufacturing", *Int. J. Eng. Res. Africa*, 2020, **49**, 130–138.
 16. Y. Hu, S. Ding, Y. Zhang, J. Xu, H. Zhou, W. Wu, and R. Xia, "Fracture Characteristics in Micron Molybdenum Wires Under Cyclic Torsion Loading", *J. Mater. Sci. Technol.*, 2024, **191**, 220–232.
 17. D. C. Li, C. Bu, Y. A. Zhu, and J. Wang, "Microstructures and Properties of Molybdenum Wire Doped with Minim La_2O_3 ", Proceedings of the Korean Powder Metallurgy Institute Conference, The Korean Powder Metallurgy Institute, 2006, pp.1015–1016.
 18. Y. Mahadik and S. R. Hallett, "Finite Element Modelling of Tow Geometry in 3D Woven Fabrics", *Compos. Part A: Appl. Sci. Manuf.*, 2010, **41**, 1192–1200.
 19. Y. Gao and X. Chen, "A Study of Woven Fabrics Made of Helical Auxetic Yarns", *Appl. Compos. Mater.*, 2022, **29**, 109–119.
 20. M. Nguyen, I. Herszberg, and R. Paton, "The Shear Properties of Woven Carbon Fabric", *Compos. Struct.*, 1999, **47**, 767–779.
 21. M. Duhovic, D. Bhattacharyya, "Simulating the Deformation Mechanisms of Knitted Fabric Composites", *Compos. Part A: Appl. Sci. Manuf.*, 2006, **37**, 1897–1915.
 22. Y. Ji, G. Jiang, M. Tang, N. Mao, and H. Wang, "Three-dimensional Simulation of Warp Knitted Structures Based on Geometric Unit Cell of Loop Yarns", *Text. Res. J.*, 2020, **9**, 2639–2647.
 23. H. Shao, J. Li, N. Chen, G. Shao, J. Jiang, and Y. Yang, "Experimental Study on Bi-axial Mechanical Properties of Warp-knitted Meshes with and Without Initial Notches", *Materials*, 2018, **11**, 1999.
 24. H. Zhou, X. Xiao, K. Qian, and Q. Ma, "Numerical Simulation and Experimental Study of the Bursting Performance of Triaxial Woven Fabric and Its Reinforced Rubber Composites", *Text. Res. J.*, 2020, **90**, 561–571.
 25. F. G. Yuan and S. Yang, "Fracture Behavior of Stitched Warp-knit Fabric Composites", *Int. J. Fracture*, 2001, **108**, 73–94.