

조종사 탑승용 복합재 사다리 설계

김태환* · 김위대*†

Analysis and Design of Composite Ladder for Pilot

Tae-Hwan Kim*, Wie-Dae Kim*†

ABSTRACT: There has been a continuous study on the weight reduction of structure by composites. Unlike isotropic materials, the physical properties of composites vary according to the direction of laminate and the order of lamination. Therefore, in the case of composite ladders, it is essential to perform structural analysis to verify the planned design. In this study, ladder was designed by applying fabric material. In addition, the effect of loading position on the ladder was analyzed through finite element analysis, and structural performance was analyzed by selecting the most problematic location. We analyzed the effect of stacking order on the structural strength of the ladder by analyzing the structure by applying various stacking sequence and measuring the failure value in each layer.

초 록: 최근 복합재를 적용한 경량화에 관한 연구가 지속적으로 수행됨에 따라 탄소섬유 복합재료를 사용하여 강성대비 경량화를 목표로 하는 부품 연구가 증가하고 있다. 복합재료는 등방성 재료와는 달리 적층판의 방향과 적층 순서에 따라 물리적 특성이 변화한다. 그러므로 복합재료 사다리의 경우 계획한 설계를 검증하기 위해서 구조 해석을 수행하는 것이 필수적이다. 본 연구에서는 패브릭 소재를 적용하여 사다리를 설계하였다. 또한 유한요소해석을 통하여 하중 위치가 사다리에 미치는 영향을 분석하고 가장 문제가 되는 위치를 선정하여 구조적 성능을 분석하였다. 다양한 적층 순서를 적용하여 구조해석을 실시하고 각 층에서의 파손 값을 측정함으로써 적층 순서가 사다리의 구조 강도에 미치는 영향을 분석하였다.

Key Words: 경량화(Light weight), 복합재료(Composite materials), 패브릭(Fabric), 사다리(Ladder)

1. 서 론

사다리는 소방, 항공 분야, 건설 분야 등의 여러 분야에서 사용되고 있다. 실제 사용되고 있는 사다리에는 소방용 차량에 탑재된 사다리나 항공 분야와 건설 분야에서도 차량 탑재용 사다리 등이 있다. 그러나 아직까지 군용 전투기나 소방 업무의 현장, 건설 현장, 일반 가정 등의 여러 곳에서는 사람이 직접 옮겨서 설치하는 간이 사다리를 많이 사용하고 있다. 일반 건설 분야나 개인의 필요에 의한 사용에는 시간이 크게 영향을 미치지 않지만 군수 분야나 소방 분

야의 구조에 사용하는 경우에는 이야기가 다르다. 전투기의 경우 사다리의 빠른 설치여부에 따라 조종사의 탑승 후 전투기의 이륙까지의 시간이 달라지며 이는 곧 전시상황에서 전투력으로 이어질 수 있다. 또한 소방 분야에서 인명 구조를 위해 사다리를 들고 움직여야 하는데 사다리가 무거우면 이동속도에 영향을 끼치게 되고 그러면 인명구조의 능률이 크게 저하될 수 있으므로 긴급하게 사용되는 사다리는 설치나 이동시간에 영향을 받는 경우에는 무게 감소를 연구 목표로 설정하기에 충분하다. 지속적으로 발전된 연구로 인해 구조적인 변화를 기초로 하는 무게감소는

Received 27 February 2019, received in revised form 24 April 2019, accepted 1 May 2019

*Aerospace Engineering, Pusan National University

*†Aerospace Engineering, Pusan National University, Corresponding author (E-mail: wdkim@pusan.ac.kr)

어렵기 때문에 기존 재료를 복합재료로 대체하여 기존 성능대비 무게 감소를 목표로 하는 연구들이 많이 진행되고 있다[1].

복합재료를 적용한 분야들이 늘어나면서 각 분야의 특성에 부합하는 복합재료의 개발연구가 활발히 진행되고 있다. 물리적 또는 열적 특성을 향상시킨 재료들이 연구됨에 따라 기존의 높은 비강도와 비강성에 피로수명이 길다는 특성으로 인해 지속적인 활용 방안과 응용분야의 확대가 이루어지고 있다[2]. 그러므로 복합재료를 사용하여 개발하는 연구의 경우에는 연구에 적합한 복합재료를 선정하는 것이 중요한 요소로 고려해야 한다. 복합재료는 등방성(isotropic) 재료와는 달리 섬유(fiber)의 방향과 적층 순서에 따라 물리적인 특성이 다르기 때문에 목표 설계에 대한 검증이 필요하며, 이를 위해서는 구조해석을 수행하는 것이 필수적이다[3,4].

본 연구에서는 패브릭 소재를 적용한 사다리를 설계하였고, ABAQUS 유한요소 해석프로그램을 사용한 구조해석을 통해 성능을 분석, 검증하였다. 다양한 적층각의 배합과 적층 순서, 하중 조건을 설정하여 Tsai-wu 파손이론을 통해 파손 지수를 측정하고, 설계 목표에 적합한 적층각의 배합과 적층 순서를 제시하였으며, 파손 지수의 고찰을 통해 안정성을 확보하였다.

2. 사다리 해석 모델

2.1 사다리 모델링

연구 목표인 사다리의 형상은 CATIA를 사용하여 설계하였고, 실제 기존 T-50에 사용되는 사다리를 3D 스캐너로 측정하여 기준 도면을 토대로 설계를 진행하였다. 사이드 부와 발판부, 동체와의 연결을 위한 부분으로 구성되어 있으

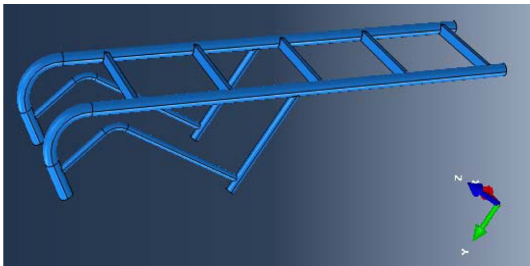


Fig. 1. Composite ladder

며 무게 감소를 위해 부위를 최소화하여 설계하였다. Fig. 1에 연구의 목표 형상을 나타내었으며, 기존 사다리에 비해 연결 부위와 관련하여 부품을 감소시킨 만큼 해석결과와 검증결과 안정성이 보장된다면, 그 무게감소 효과 또한 크게 증가할 것으로 보인다. 또한 동체와의 연결부는 동일하게 알루미늄으로 제작하여 복합재로 대체된 사다리 제작 후 본딩으로 결합할 것이므로 설계에서 제외하였다.

2.2 파괴 이론

해석에 사용된 결과를 검증하기 위해 복합재 파괴이론을 사용하여 해석결과를 비교, 분석 및 검토하였으며, 파괴이론 중에서도 Tsai-wu failure criterion 식을 사용하였다. 해석은 2D 모델을 사용하여 해석을 실시하였으므로 2차원 shell에 대한 failure 값을 확인할 때 사용하는 가장 일반적인 식을 사용하였다[5,6].

$$f(\sigma_k) = F_i \sigma_i + F_{ij} \sigma_i \sigma_j = 1 \quad (k, i, j = 1, 2, \dots, 6) \quad (1)$$

식 (1)의 경우 3D 복합재의 파손이론이므로 본 연구에 사용되는 식은 3방향의 값이 '0'이므로 더욱 간소화하여 사용한다.

2.3 유한요소 해석

해석에 사용된 모델은 2D 모델이며 ABAQUS 유한요소 해석 프로그램을 사용하여 해석을 수행하였으며, 2D-S8R 요소를 사용하여 mesh 작업을 진행하였다. 요소의 수는 79,991 개이며, 노드 수는 241,005개를 가지도록 mesh 작업을 하고 적층순서는 Table 2와 같이 [0]과 [45]의 조합으로 16가지로 설정을 하고 총 3 mm의 두께가 되도록 만들었다. 재료는 fabric 기반인 WSK3K를 사용하였으며, 재원은 Table 1에 나타내었다.

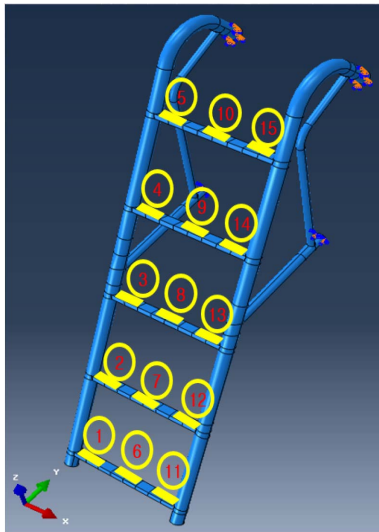
하중 조건은 Fig. 2에 나타난 것과 같이 사람이 사다리를 사용함에 있어 구조적으로 치명적인 하중으로 작용할 것이라 생각되는 15개의 위치를 case로 설정하였다. 조종사들의 평균 질량이 80 kg이라고 가정을 하고, 사다리를 한 발로만 딛었을 때가 가장 극소 부위에 큰 하중이 작용한다고 가정하고 균화의 너비를 고려하여 압력 값으로 하중이 가해지도록 입력하였다. 또한 정하중해석의 경우 동하중인 것을 고려하여 기존 하중에 안전율을 2.5로 적용하였다[7]. 적용하 경계 조건의 경우에도 실제 조종용 사다리가 사용되는 환경을 고려하여 물리적으로 실제 운용환경을 모사

Table 1. Composite material properties

	E_1	E_2	E_3	G_{12}	G_{13}	G_{23}	ν
WSK3K (GPa)	70	70	9.6	3.59	40	40	0.058

Table 2. Stacking sequence

	Stacking sequence
SSCASE1	[0/0/0/0]s
SSCASE2	[0/0/0/45]s
SSCASE3	[0/0/45/0]s
SSCASE4	[0/0/45/45]s
SSCASE5	[0/45/0/0]s
SSCASE6	[0/45/0/45]s
SSCASE7	[0/45/45/0]s
SSCASE8	[0/45/45/45]s
SSCASE9	[45/0/0/0]s
SSCASE10	[45/0/0/45]s
SSCASE11	[45/0/45/0]s
SSCASE12	[45/0/45/45]s
SSCASE13	[45/45/0/0]s
SSCASE14	[45/45/0/45]s
SSCASE15	[45/45/45/0]s
SSCASE16	[45/45/45/45]s

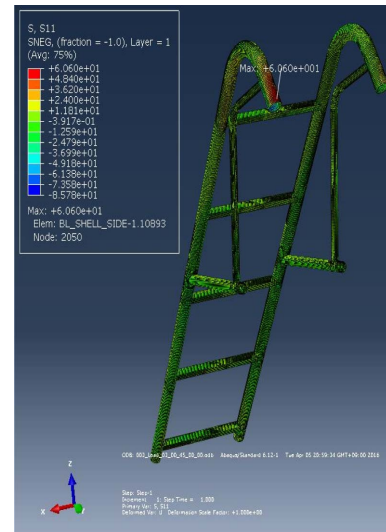
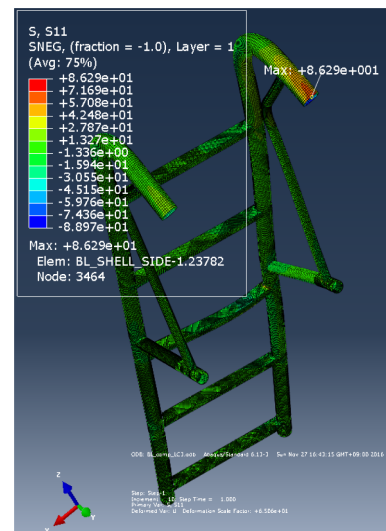
**Fig. 2.** Load case

할 수 있도록 동체에 닿는 부분에 경계조건을 설정하였다. 결과 비교를 위해 각 case에 따라 응력이 취약한 몇몇의 특정 부위에서의 모든 ply에서 응력 및 failure 값을 비교하여 각 case의 대표 값으로 선정하였습니다.

3. 해석 결과

3.1 하중 조건에 따른 결과 비교

초기 설정 값인 [0/45/0/0]s의 적층 순서에 대해 15가지의 하중조건에서 해석을 수행한 결과를 비교하였으며, 그

**Fig. 3.** S_{11} directional stress**Fig. 4.** S_{22} directional stress

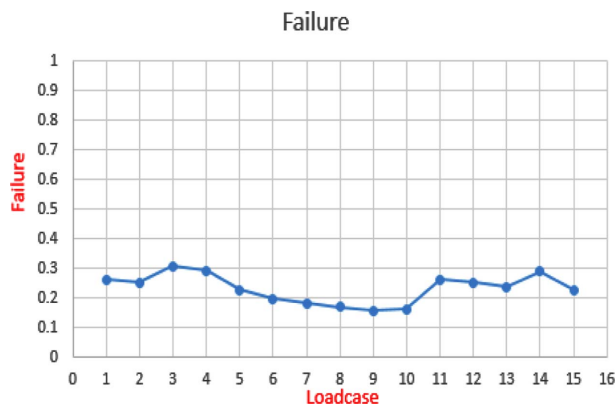
결과를 Table 3에 하중조건에 따른 failure 해석 결과 값을 나타내었다. 또한 Fig. 5에 Table 3의 값을 그래프로 비교하였다.

해석 결과에서 가장 큰 failure 값을 가지는 LC-3에 대해서는 Fig. 3-4에 S_{11} 값과 S_{22} 값에 대한 첫번째 층에서의 contour를 나타내었으며, 각 값들의 최대 값의 지점이 다르므로 각각 비교하여 최대 failure 값을 가지는 지점의 값을 기준으로 결과값을 비교 분석하였다. 또한 case 옆에 괄호를 사용하여 해석에 사용된 ply정보를 표기하였다.

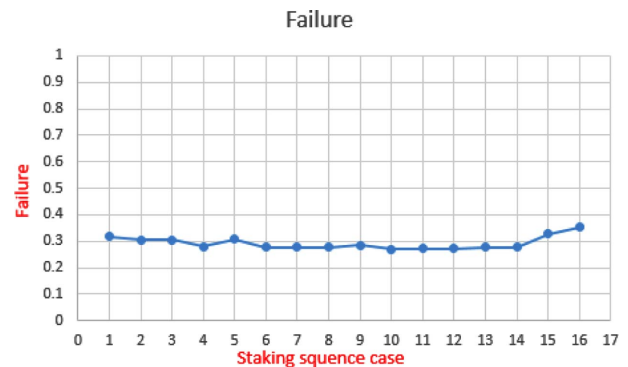
적층각은 [0/45/0/0]s으로 고정하고 해석을 수행한 결과, 전체적으로 failure 값이 '1' 이하의 값으로 안정적인 것을 확인할 수 있으며 LOADCASE-3일 때 side 부분에서 가장 큰 failure 값의 응력이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

Table 3. Comparison of failure for load case

	S_{11} (MPa)	S_{22} (MPa)	S_{12} (MPa)	Failure
LC-1(7)	-35.645	-45.39	5.348	0.262
LC-2(7)	-34.221	-43.552	5.427	0.251
LC-3(1)	-85.781	-8.434	-6.848	0.308
LC-4(1)	-82.829	-6.985	-8.112	0.292
LC-5(7)	-31.103	-280711	5.832	0.228
LC-6(1)	-63.266	3.04	2.043	0.196
LC-7(1)	-59.65	3.342	-2.365	0.183
LC-8(1)	-55.912	3.134	-4.36	0.17
LC-9(1)	-53.826	4.471	-5.27	0.157
LC-10(1)	-54.046	3.379	4.817	0.162
LC-11(7)	-45.118	-35.958	5.473	0.262
LC-12(7)	-43.212	-34.464	5.55	0.251
LC-13(7)	-41.145	-32.765	5.653	0.238
LC-14(1)	-82.066	-7.323	8.422	0.29
LC-15(7)	-39.303	-31.16	5.959	0.227

**Fig. 5.** Loadcase vs Failure**Table 4.** Comparison of failure for stacking sequence

	S_{11} (MPa)	S_{22} (MPa)	S_{12} (MPa)	Failure
SSCASE1(1)	-82.547	-15.264	-9.048	0.317
SSCASE2(1)	-84.498	-8.819	-7.254	0.305
SSCASE3(1)	-84.910	-8.709	-7.110	0.306
SSCASE4(1)	-90.272	5.288	-6.454	0.279
SSCASE5(1)	-85.781	-8.434	-6.848	0.308
SSCASE6(1)	-91.165	6.646	-6.172	0.278
SSCASE7(1)	-91.631	7.357	-6.040	0.277
SSCASE8(1)	-102.431	19.101	-5.867	0.277
SSCASE9(2)	-80.640	-7.356	-8.771	0.284
SSCASE10(1)	-67.317	-25.677	12.868	0.269
SSCASE11(1)	-67.064	-26.268	12.969	0.272
SSCASE12(1)	-65.954	-26.731	16.101	0.272
SSCASE13(1)	-66.592	-27.404	13.209	0.277
SSCASE14(1)	-65.536	-28.106	16.323	0.278
SSCASE15(1)	-61.234	-40.886	-13.708	0.328
SSCASE16(1)	-61.713	-46.496	-19.414	0.353

**Fig. 6.** Staking sequence case vs Failure

3.2 적층 순서에 따른 해석 결과

앞서 가장 큰 failure 값을 가지는 LOADCASE-3을 기준으로 다른 적층순서에서의 해석을 통해 결과 비교 후 본 연구에 더욱 적합한 적층 순서를 찾기 위해 유한요소 해석을 수행하고 그 결과를 Table 4에 나타내었다. 또한 그 결과를 Fig. 6에 그래프로 나타내었다. case 옆에 괄호를 사용하여 해석에 사용된 ply정보를 표기하였다.

해석 결과 SSCASE11과 SSCASE12가 failure 값이 가장 낮게 나오는 것을 확인했으며 본 연구의 구조적 적층 순서에 가장 적합하다고 할 수 있다. 또한 나머지 CASE들의 결과도 failure 값이 크게 높지 않은 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 기존에 사용되고 있는 알루미늄으로 제

작한 항공기 조정사 사다리를 패브릭 소재로 대체함으로써 강도를 유지하며 무게 감소의 효과를 얻기 위한 연구를 수행하였다. 그 과정에서 본 연구의 검증에 위해 유한요소 해석을 실시하고 해석 결과를 파손이론을 사용하여 검증하였다.

1) 15개의 LOADCASE를 설정하고 해석을 수행하고 비교한 결과, 하중 위치별 최대 failure 값을 가지는 절점의 위치가 다르며, LOADCASE-3의 위치에 하중이 작용할 때 본 연구에서 설계한 사다리에 최대 failure 값이 발생하는 것을 확인하였고, 이는 기존 형상에는 LOADCASE-3의 위치에서 작용하는 하중에 가장 치명적인 것을 나타낸다.

2) LOADCASE 연구를 통해 확인한 것을 바탕으로 본 연구에서 목표로 하는 사다리에 가장 적합한 적층 순서를 찾기 위해 16가지의 적층 순서를 설정하고 해석을 수행하였다. 그 결과, [45/0/45/0]s와 [45/0/45/45]s의 CASE에서 가장

낮은 failure 값이 나오는 것을 확인하였고, 연구 목표에 가장 적합하다는 것을 검증하였다.

3) 기본적인 물성정보를 통해 형상의 질량을 계산한 결과, 3~4 kg의 무게 감소효과를 얻을 수 있으며, failure 값을 통한 안전도를 고려했을 때, 대체 후 사용이 충분하다는 것을 확인하였다.

유한요소 해석을 통해 기존의 항공기 조정사 탑승용 사다리를 패브릭 복합재로 대체하는 것에 성공하였고, 그 결과로 기존 강도 대비 무게 감소의 효과를 볼 수 있다는 것을 확인하였다. 본 연구의 결과로는 하중에 안전계수를 2.5로 고려했음에도 불구하고 failure 값에 여유가 있으므로 향후 형상의 일부분에서 추가적인 두께 감소를 통한 무게 감소 효과를 볼 수 있을 것으로 기대된다. 이로 인한 사다리의 사용현장에서 기동성이 더욱 향상될 것이라 사료된다.

후 기

본 연구는 부산대학교 기본연구지원사업(2년)의 지원으로 수행된 것이며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. Tabakov, P.Y., and Summers, E.B., "Lay-up Optimization of Multilayered Anisotropic Cylinders Base on a 3-D Elasticity Solution," *Computers and Structures*, Vol. 84, No. 5-6, 2006, pp. 374-384.
2. Lee, K.K., and Kim, W.D., "Behavior and Optimization of Cylinder Applied by Composite Tape Wrapping Method," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 24, No. 2, 2011, pp. 22-29.
3. Kim, T.H., Kim, W.D., and Jung, C.G., "Finite Element Analysis for the Design of Fiber Reinforced Metal Cylinder," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 26, No. 1, 2013, pp. 7-13.
4. Lee, K.K., and Kim, W.D., "Behavior and Optimization of Cylinder Applied by Composite Tape Wrapping Method," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 24, No. 2, 2011, pp. 22-29.
5. Jones, Robert M., *Mechanics of Composite Materials*, Taylor & Francis Pub. Co., Philadelphia, USA, 1999.
6. Gibson, R.F., *Principles of Composite Material Mechanics*, McGraw-Hill Inc., New York, 1994.
7. Budianto, Wahyudi, M.T., Dinata, U., Ruddianto, and M.M. Eko P., "Strength Analysis on Ship Ladder Using Finite Element Method," *The 2nd International Joint Conference on Science and Technology*, 2017.