

케이블 기반 개폐 막 시스템의 폐쇄형 이동장치의 최적화 모델에 관한 연구

서건호*, 이돈우**, 손수덕**, 이승재**
 *한국기술교육대학교 미래융합공학전공
 **한국기술교육대학교 건축공학과
 sdshon@koreatech.ac.kr

Optimization Model of Closed Movements in Cable-Based Opening and Closing Membrane System

Geon-Ho Seo*, Don-Woo Lee**, Su-Deok Shon**, Seung-Jae Lee**

*Future Convergence Engineering, Korea University of Technology and Education

**Dept. of Architectural Engineering, Korea University of Technology and Education

요약

본 논문에서는 스타디움과 같이 연성막에 사용되는 기계적 요소인 트롤리에 관한 위상 최적화를 진행하여 최적화 모델 제안과 안전성을 평가하고자 한다. 트롤리의 기본 모델은 원통형으로 하였으며, 재료에 따른 차이를 확인하기 위해 내부 홀더의 재료를 다양하게 사용하여 해석하였다. 최적화된 모델은 트롤리의 부피를 45.6% 감소시킬 수 있었다. 부피를 감소시킴으로써 지붕에 작용하는 하중을 줄일 수 있고, 경제적인 설계가 가능하다. 또한, 트롤리의 재료에 따른 케이블과의 마찰력에 대한 실증적인 연구가 필요하다고 판단된다.

1. 서론

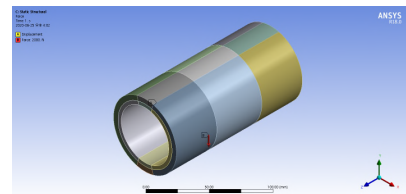
스타디움과 같이 지붕구조를 개폐하여 일조에 능동적으로 대응하고자 하는 구조물은 강성/연성 개폐식 구조 시스템을 많이 사용한다. 특히 지붕구조가 연성막을 사용한 구조물은 트랙터(tractor), 트롤리(trolley)와 같은 기계적 요소를 이용하여 구동한다. 이 중 트롤리는 구동력이 없으며, 구동력을 가지는 트랙터를 따라 이동한다. 트롤리의 모양은 박스형·원통형이 존재하며, 이는 구조물의 규모에 따라 결정된다.

원통형 구조물은 중·소형규모의 개폐식 막 구조물에서 사용하며, 규모에 따라 다르지만 BC Place Stadium(Canada)에서는 약 300개의 트롤리가 사용된다. 하지만 국내에서는 트롤리의 형상에 관한 연구는 미비하다. 따라서 본 연구에서는 원통형 트롤리에 대해 위상 최적화를 진행하여 최적화 모델을 제안하고, 안전성을 평가하고자 한다.

2. 원통형 트롤리 최적화

원통형 트롤리의 최적화 방안을 다루기 위해 일반적으로 많이 사용하는 원통형 모델을 기본 모델로 채택한다. 해석은 기본 모델을 정식화하여 구조해석을 수행하고, 발생하는 응력에 따라 최적의 위상을 결정하여 제안하고자 한다.

2.1 기본 트롤리 모델 해석



[그림 1] ANSYS 해석 기본 모델

해석하고자 하는 트롤리는 기본적으로 원통형을 가지며, 외부 홀더(Outer holder)와 내부 홀더(Inner holder)로 이루어져 있다. 또한 재료에 따른 차이를 확인하기 위해 내부 홀더의 재료를 다양하게 사용하여 해석하였다. 해석은 ANSYS 프로그램을 사용하였으며, 해석 모델의 형상 및 재료의 물성치는 [그림 1], [표 1]과 같다. 트롤리에 작용하는 하중은 문헌 [1]을 참고하여 중력 방향으로 2,000N을 가력하였다.

[표 1] 내부/외부 홀더 재료 물성치

	E	F_y	F_u	ν
Steel	210,000	275	410	0.3
Aluminum	71,000	280	310	0.33
Titanium	96,000	930	1,070	0.36

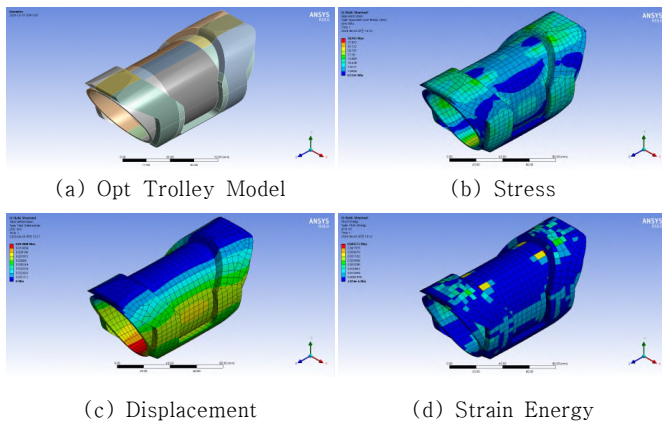
[표 2] 기본 해석 모델의 해석 결과

	CT-St	CT-Ti	CT-Al
Volume	Outer Holder	142,940 mm ³	
	Inner Holder	86,975 mm ³	
	Total	229,915 mm ³	
Stress σ_{def} (MPa)	21.623	17.114	16.877
Displ. d_{def} (e ⁻³ mm)	6.186	9.043	10.664
Strain Energy E_{def} (e ⁻³ mj)	22.381	31.951	37.772

기본 모델을 해석한 결과는 [표 2]에 나타났다. 해석 결과 내부 홀더의 재료가 강재일 경우 응력은 21.623MPa, 변위는 6.186e⁻³mm, 변형에너지는 22.381e⁻³mJ로 도출되었다.

2.2 원통형 트롤리의 위상 최적화

원통형 기본 트롤리의 기본 해석 결과를 바탕으로 형상에 대한 제약조건과 외력 조건을 고려하여 위상 최적화를 진행하였다. 위상 최적화를 통해 도출된 트롤리의 형상은 [그림 4(a)]와 같다.



[그림 4] 원통형 트롤리의 최적화 모델

최적화 모델 해석 결과는 [그림 4(b)]~[그림 4(d)]와 같다. 도출된 최적화 모델의 응력, 변위, 변형에너지 값은 [표 3]에 정리하였다. 최적화 모델은 부피가 125,021mm³이며, 기존 모델의 부피 229,915mm³와 비교해 54.4%로 줄어들었다. 응력은 30.963MPa(Steel)로 기본 모델에서 발생한 응력보다 9.34MPa가 증가하였지만, 45.6%의 부피를 줄일 수 있었다.

3. 결론

원통형 트롤리의 위상 최적화 진행한 결과를 바탕으로 다음과 같은 결과를 도출하였다.

[표 3] Analysis Results of Optim

Model Name	Stress (MPa)			Displ. (e ⁻³ mm)	
	σ_{opt}	$\frac{\sigma_{opt}}{\sigma_{def}}$ (%)	$\frac{\sigma_{opt}}{F_y}$ (%)	d_{opt}	$\frac{d_{opt}}{d_{def}}$
CT-St-Opt	30.963	143.2	11.3	11.808	190
CT-Ti-Opt	26.929	157.4	9.6	17.967	198
CT-Al-Opt	30.248	179.2	3.3	21.440	201

- 1) 원통형 트롤리를 위상 최적화 진행한 결과, 외부 홀더는 45.65%, 내부 홀더는 31.28%의 부피가 감소하였다. 이를 통해 트롤리의 부피를 45.6% 감소시킬 수 있다.
- 2) 최적화 모델은 기본 모델과 비교하여 강재일 경우 최대 응력이 143.2% 증가하였지만, 항복강도에 대해서 11.3%의 내구성을 확보할 수 있었다.
- 3) 최적화 모델의 최대 응력 발생 위치는 내부 홀더의 재료에 따라 다르게 나타날 수 있다. 강재와 티타늄인 경우는 내부 홀더의 지지점에서 최대 응력이 발생하였으며, 알루미늄의 경우는 외부 홀더의 하중 지지점에서 발생하였다.

제안된 트롤리의 최적화 모델은 45.6%의 부피를 감소시킴으로써 지붕에 작용하는 하중을 줄일 수 있고, 경제적인 설계가 가능하다. 또한, 트롤리의 재료에 따른 케이블과의 마찰력에 대한 실증적인 연구가 필요하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단 이공분야 기초연구사업의 연구비 지원(NRF-2019R1A2C2010693)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사합니다.

참고문헌

[1] 김윤진, 이승재, 이유한, 황경주, "다양한 재료의 마찰계수를 고려한 중소규모 연성 개폐식 트롤리의 수직하중에 대한 적용성 평가", 한국공간구조학회, 제 16권 4호, pp. 83~89, 12월, 2016년.