

# 케이블 기반 개폐 막 지붕의 오픈형 최적 트롤리 모델 개발

이돈우<sup>1</sup>, 손수덕<sup>1\*</sup>, 최봉영<sup>2</sup>, 이승재<sup>1</sup>

<sup>1</sup>한국기술교육대학교 디자인·건축공학부, <sup>2</sup>한국기술교육대학교 창의융합공학협동과정

## Development of an Open-Typed Optimal Trolley Model for Cable-Based Retractable Membrane Roof

Donwoo Lee<sup>1</sup>, Sudeok Shon<sup>1\*</sup>, Bongyoung Choi<sup>2</sup>, Seungjae Lee<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Industrial Design and Architectural Engineering, Koreatech University

<sup>2</sup>Interdisciplinary Program in Creative Engineering, Koreatech University

**요약** 건축 분야는 최근 기계·로봇 분야와 접목하여 환경에 유동적으로 대응할 수 있는 개폐식 장치를 경기장과 같은 대공간 구조물의 지붕에 많이 적용하고 있다. 이러한 장치 중에서 외관이 수려한 개폐 막은 경량이어서 경제부의 견인 장치만으로 막을 쉽게 개폐할 수 있다. 그러나 막은 주 케이블에 트롤리로 연결되어 이동하므로 지붕의 면적에 비해 트롤리 개수가 늘어난다. 본 연구에서는 이러한 막의 개폐 장치에 많이 사용되는 오픈형 트롤리를 위상 최적 기법을 이용하여 모델을 제안한다. 해석은 ANSYS 프로그램을 사용하였고, 결과를 바탕으로 피드백 과정을 통해서 새로운 모델을 제안하고, 검토하였다. 이 과정에서 트롤리 중량은 줄고, 내구성이 높아진 원형을 개발할 수 있었다. 오픈형 트롤리는 정적 해석 결과와 이에 대한 경계조건을 바탕으로 위상 최적화를 수행하며, 세 가지 타입의 최적 트롤리 원형을 설계하였다. 제안된 트롤리는 기본형 트롤리와 같은 조건에서 비교한 결과, 최대 71.04%의 부피를 감소시켰고, 항복강도는 8.67~11.43%에 달하였다. 결론적으로 본 연구에서 제안된 최적화 트롤리 모델은 경제성과 안정성을 신뢰할 만하였다.

**Abstract** In the field of architecture, retractable devices capable of responding flexibly to the environment have been applied widely to large structures. Among these devices, the aesthetically pleasing retractable membrane is lightweight so that the membrane can be opened easily using only a traction device. On the other hand, because the towed membrane moves as it is connected to the main cable by a trolley, the number of trolleys needed increases in proportion to the roof's area. This study proposes an optimal model for an open-type trolley (OTT), which is used widely in these devices, using topology optimization. The analysis used the ANSYS program. A new model was proposed based on the results and reviewed through the feedback. Through this process, it was possible to develop a prototype with increased durability and reduced weight. For OTT, optimization was performed based on static analysis and the boundary conditions, so three prototypes were designed. A comparison of the proposed trolley with the conventional one under the same conditions revealed an up to 71.04% decrease in volume while the yield-strength reached 8.67 to 11.43%. In conclusion, the optimal trolley proposed was found to be reliable in terms of economy and stability.

**Keywords** : Cable-based Structures, Driving Device, Retractable Membrane, Topology Optimization, Trolley

본 논문은 2020년도 한국기술교육대학교 교수 교육연구진흥과제 지원에 의하여 연구되었음. 또한 본 연구는 한국재단 이공분야 기초연구사업의 연구비지원(NRF-2019R1A2C2010693)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사합니다.

\*Corresponding Author : Sudeok Shon(Koreatech Univ.)

email: sdshon@koreatech.ac.kr

Received November 26, 2020

Revised December 15, 2020

Accepted January 8, 2021

Published January 31, 2021

## 1. 서론

건축물은 움직이지 않는 구조물이라는 인식이 있었지만 기계·로봇 분야의 발전으로 인해 건축 분야와 접목하기 시작했고 이로 인해 움직이는 건축물에 대한 관심이 커지고 있다. 이러한 시대의 흐름에 건축물의 에너지와 환경에 대한 관심도 커지면서 태양과 같은 자연 에너지를 효율적으로 사용하기 위해 노력하고 있다. 스타디움과 같은 대공간 구조물은 날씨와 같이 변화하는 환경에 유동적으로 대응하여 일조량 확보나 자연재해 예방을 위해 개폐가 가능한 지붕 구조를 많이 사용하고 있다.

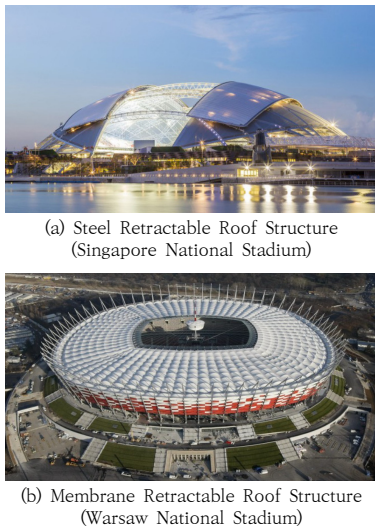


Fig. 1. Retractable Roof System

개폐식 구조물은 Fig. 1과 같이 강성과 연성 구조물로 나누어진다[3, 4]. 강성 구조물은 지붕 요소가 스페이스 프레임과 같은 강체로 이루어져 있으며, 기계적 요소를 이용하여 개폐가 이루어진다. 연성 구조물은 케이블, 막과 같은 유연한 특성을 가진 재료가 기계적 요소를 이용하여 개폐가 이루어진다. 특히 연성 구조물은 강성 구조물보다 지붕이 경량화가 가능하여 많이 채택하여 사용하고 있다.

연성 막 구조물은 기계적 요소인 트랙터(Tractor)와 트롤리(Trolley)가 막과 연결된 상태로 케이블을 이동하여 지붕 구조를 개폐하는 시스템이다(Fig. 2). 트롤리는 구동력을 가지지 않고 케이블을 따라 이동만 하며, 트랙터는 구동력을 가지며 케이블을 따라 트롤리를 견인한다. 최종적으로 막이 펼쳐졌을 때 트랙터는 앵커링

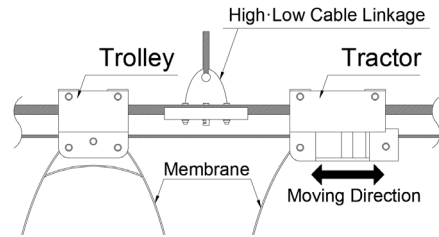


Fig. 2. Open-Type Tractor & Trolley Drawing

(Anchoring)에 고정되어 막의 장력이 고르게 가해질 수 있도록 한다.

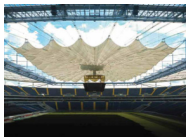
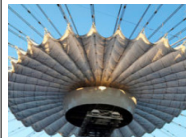



얇은 아치와 같은 공간구조물의 구조적 안전성에 대한 실험적, 해석적 연구는 Shon et al.(2016), Shon et al.(2017)에 의해 진행되었다[1, 2]. 개폐식 구조물에 관한 연구로는 Kang(2015), Kang(2016)에 의해 개폐식 대공간 구조물의 국내·외 기술동향에 대해 조사하였으며 [3, 4], Shon et al.(2015), Hwang et al.(2015)은 개폐식 구조물의 개폐 유형에 따른 기계적 요소의 구동 원리에 대해 조사하였다[5, 6]. Shon et al.(2017)에 의해 연성 막 구조의 형상 해석을 수행하였으며[7], Lee(2018)은 연성 막 구조물의 다양한 구동장치의 유형을 분석 및 분류하였다[8-10]. Kim et al.(2016)은 폐쇄형 트롤리의 재료적 성질에 따른 구조적 안전성을 해석적으로 연구하였다[11]. 하지만 연성 막 구조물의 기계적 요소에 관한 연구는 매우 미흡하며, 특히 트랙터, 트롤리의 형상에 따른 해석적 연구는 매우 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 기존의 연구에서 다루지 않은 오픈형 트롤리를 이용하여 위상 최적화를 진행하고 최적화 모델을 제안하여 구조적 내구성과 경제성을 판단하고자 한다. 본 논문의 구성은 2장에서 오픈형 트롤리의 리뷰, 3장에서는 위상 최적화 기법을 이용한 최적화 모델에 대한 설명, 4장에서는 해석 결과를 통한 결론을 도출한다.

## 2. 오픈형 트롤리 장치 리뷰

연성 막 구조물은 지붕 구조의 크기에 따라 사용되는 트롤리의 형상이 구분된다. 중·소형 구조물의 경우 단일 케이블을 사용하여 시공하며, 폐쇄형 단면 트롤리를 사용한다. 중·대형 구조물의 경우 2개의 케이블에 오픈형 트롤리가 케이블을 따라 이동하여 연성 막 지붕을 개폐한다. 1972년 독일 슈투트가르트 대학교 Otto. F. 교수와 연구진에 의해 분류된 바에 따르면 개폐 막 지붕의 타입

Table 1. Structure using Open Type Trolley

	Commerzbank Arena	BC Place	Am Rothenbaum	Kufstein Fort	Bucharest Stadium
Roof Figure					
Location	Germany	Canada	Germany	Austria	Romania
Construction	1925	1983	1999	2006	2011
Purpose	Football	Football	Tennis	Tourism	Soccer
Retractable Type	Bunching/Central				

은 이동 타입과 방향성에 따라서 분류될 수 있었고, Fig. 3과 같이 묶음형(Bunching), 두루마리형(Rolling)의 분류와 이들이 각각 평행하게 또는 중앙으로 이동 가능한 분류로 표현하였다. 특히, 오픈형 트롤리를 이용한 개폐막 구조물의 경우 묶음형/중심(Central)방향을 사용한 구조물이 많이 등장하였다. 이는 이중 케이블을 이용하여 연성 막 지붕이 개폐될 경우 폐쇄형 트롤리는 사용하기 곤란하기 때문이다.

오픈형 트롤리를 사용한 구조물은 Table 1에 나타난 바와 같고, 구조물은 대부분 축구, 테니스, 풋볼 등의 목적으로 사용하는 경기장으로 지붕 구조물의 개폐 면적이 크다. 이동 막을 지지하는 주요 케이블은 지붕의 면적이 넓을수록 부담해야 할 외력이 증가하기 때문에 안전상의 이유로 인해서 단일 케이블로 설치하기보다는 이중 케이블로 시공하게 된다. 이 경우 트롤리는 이동 중에 탈락할 우려가 있으며, 트롤리의 마찰력은 개폐 상태에 따라 달라진다. 특히, 이동 중의 막은 트롤리의 마찰력이 낮을수록 좋지만 고정된 상태에서는 구조물의 안정성을 위해서는 마찰력이 높을수록 유리하다. 폐쇄형 트롤리의 경우 마찰력의 영향을 구조체의 내구성에 주안점을 두고 참고 문헌 [11]에서 다루어졌으며, 다양한 재료에 대한 마찰력

의 영향을 비교하였다. 또한 이러한 상태에 대해서 최적의 상태를 구하려고 여러 가지 시도를 하였다. 그러나 최적화 기법을 이용하여 트롤리의 형상을 연구한 경우는 많지 않다.

개폐막 시스템에서 트롤리는 막과 주 케이블을 연결하는 역할과 주행 장치와 연결되어 이동하는 역할을 한다. 트롤리에 모터를 설치하여 구동력을 가진 경우를 제외하고는 수동적으로 견인되어 개폐되며, 막이 골고루 펼쳐지기 위한 역할을 하므로 시스템에서 가장 많은 수를 필요로 한다. 특히, 원형 경기장의 경우 경기장 지붕의 지름이 증가하면 장치의 개수는 기하급수적으로 늘어날 것이므로 최적화를 통한 재료 절감과 효율성을 높이는 것은 개폐막 시스템의 개선에 매우 중요한 주제가 될 것이다.

### 3. 오픈형 트롤리 최적화 모델 제안

오픈형 트롤리는 Fig. 4와 같이 막의 장력과 같은 하중에 저항하는 몸통부(Body Part), 케이블과 마찰하며 직접적으로 주행하는 레일부(Rail Part), 막이 완벽하게

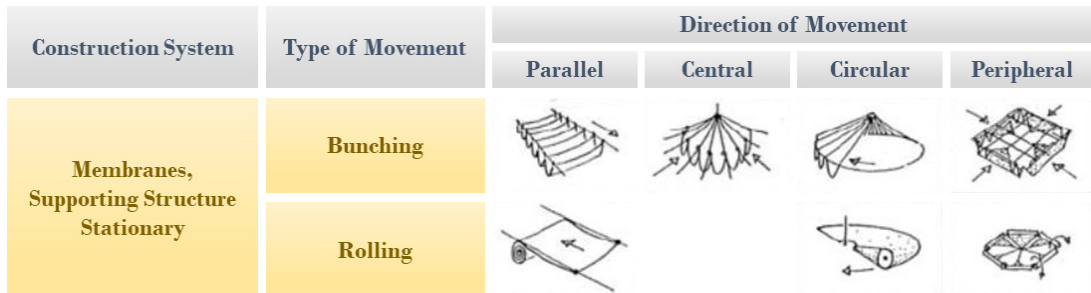


Fig. 3. Classification of the Retractable Roofs

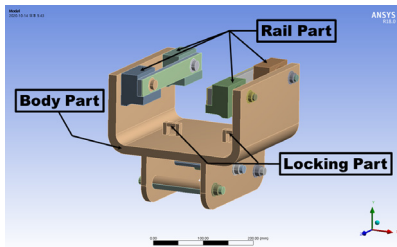


Fig. 4. Default Open Type Trolley

펼쳐졌을 때 트롤리의 위치를 상-하현재 수직 연결고에 완벽하게 정착하기 위한 체결부(Locking Part)로 구분된다. 해석의 간편화를 위해 레일부를 제외한 부분만을 기본 모델로 설정하였다. 해석 프로세스는 Fig. 5와 같이 진행하였으며, 최적화 모델을 제안하기 위해 기본 모델을 정적해석 후 도출된 응력을 이용하여 위상 최적화를 진행하였다. 위상 최적화 결과를 바탕으로 3가지 타입의 최적화 모델을 제안하였으며, 각 모델의 해석 결과를 비교하여 구조적 안전성을 평가하였다.

### 3.1 트롤리 기본 모델 해석

해석을 위한 오픈형 트롤리의 기본 모델은 몸통부와 체결부를 이용했으며, 모델의 형상 및 치수, 물성치는 Fig. 6, Table 2와 같다. 몸통부와 레일부는 볼트접합이 되기 때문에 몸통부의 볼트접합 되는 부분에 지점 조건 ( $D_x, D_y, D_z=0$ )을 설정하였다. 트롤리와 막이 연결되어 직접적으로 막의 장력이 전달되는 부분과 막이 펼쳐졌을 때 상-하현재 수직 연결고에 고정되어 장력을 받는 체결부에 하중을 설정하였다. 하중은 막의 장력이 보통 1,000~2,000N 발생하기 때문에 2,000N을 가력하였다.

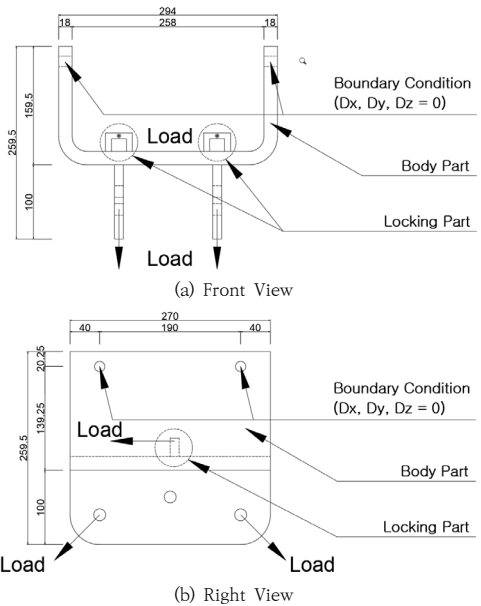


Fig. 6. Default Open Type Trolley

Table 2. Material Property for Analysis

	Steel
Elastic Modulus ( $E$ )	210,000 MPa
Yield Strength ( $F_y$ )	275 MPa
Tensile Strength ( $F_u$ )	410 MPa
Poisson Ratio ( $\nu$ )	0.3

위의 내용으로 유한요소해석프로그램(ANSYS)을 이용하여 해석을 진행하였다. 해석을 진행하기 위한 3D 모델링 및 하중 지점 설정은 Fig. 7과 같다.

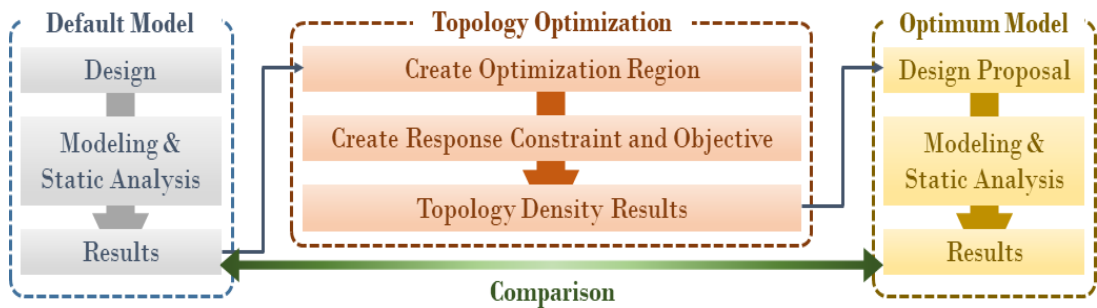


Fig. 5. Topology Optimization Process

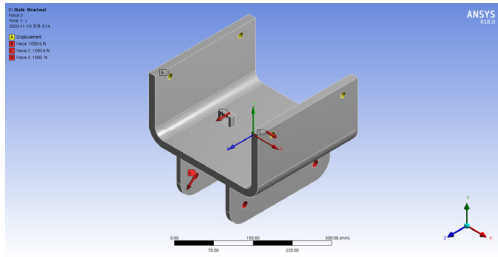


Fig. 7. Trolley 3D Modeling by ANSYS

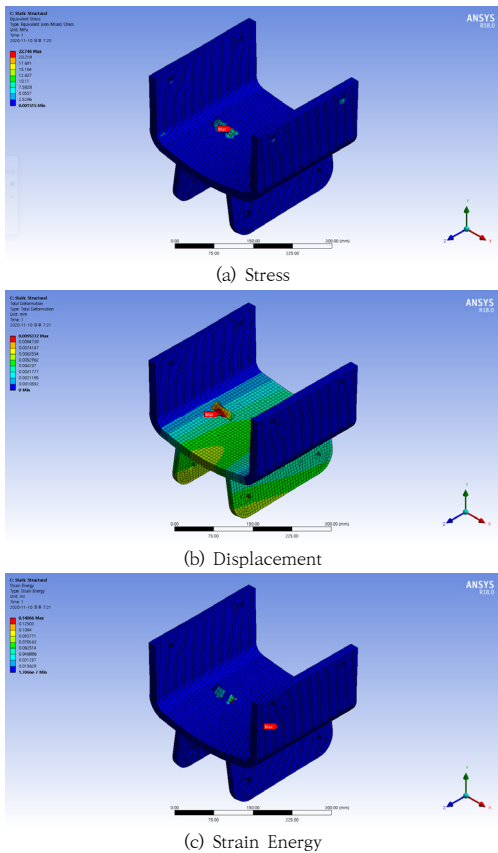


Fig. 8. Results of OTT Model

Table 3. Material Property for Analysis

	OTT Model
Volume ( $mm^3$ )	$3.3025e+6$
Mass ( $kg$ )	25.925
Stress ( $MPa$ )	22.746
Displ. ( $mm$ )	0.00953
Strain Energy ( $mJ$ )	0.14066

오픈형 트롤리 몸통부의 해석 결과는 Fig. 8과 Table 3에 정리하여 나타났다. OTT는 Open Type Trolley로 오픈형 트롤리의 모델명이다. OTT 모델의 몸통부 부피는  $3.3025e+6mm^3$ , 무게는  $25.925kg$ 이다. 최대 응력, 최대변형, 최대 변형에너지는  $22.746 MPa$ ,  $0.00953 mm$ ,  $0.14066mJ$ 이 발생하였으며, 상·하현재 수직 연결고에 의해 막의 장력하중이 가해지는 체결부에서 가장 크게 발생하였다.

### 3.2 OTT 모델의 최적 설계 모델 제안

OTT 모델의 최적 설계 모델을 제안하기 위해 정적 해석 결과를 바탕으로 위상 최적화를 진행하였다. 최적 설계는 주어진 제약 조건하에서 구조체가 최고의 성능을 발휘할 수 있도록 설계하는 기술이며, 기계-메카 등 다양한 분야에서 사용하고 있다. 최적 설계는 치수 최적화 (Size Optimization), 형상 최적화(Shape Optimization), 위상 최적화(Topology Optimization) 3가지로 분류할 수 있다[12]. 이중 위상 최적화 이론은 1906년 Rozvany 와 Drager에 의해 처음 발표되었으며, 유한요소개의 모든 절점을 연결하여 트러스 요소를 만든 후 각 트러스 요소에 대한 단면계수를 조정하는 방법이다. 위상 최적화는 균질화법(Homogenization Method)과 밀도법(Density Method)으로 분류할 수 있으며, 계산이 수월하여 밀도법이 많이 사용된다[13-15].

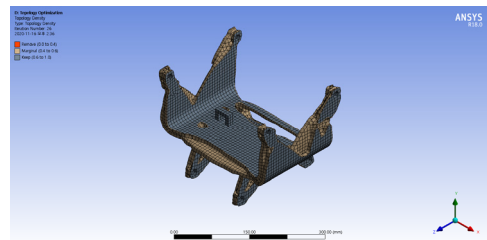


Fig. 9. Topology Optimization Results(TOT Model)

Table 4. Material Property for Analysis

		TOT Model
Volume ( $mm^3$ )	$V_{TOT}$	$1.3793e+6$
	$\frac{V_{TOT}}{V_{OTT}}$ (%)	41.77
Mass ( $kg$ )		10.828

Table 5. Specification of SUGT Model

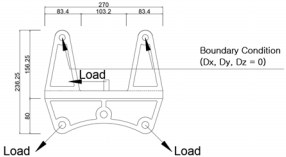
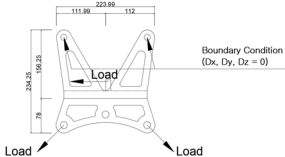
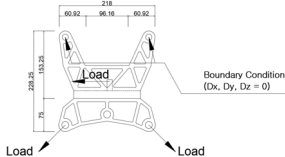
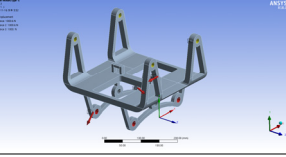
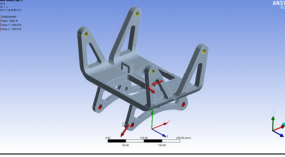
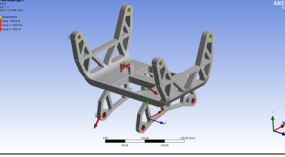
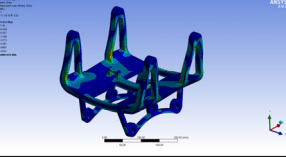
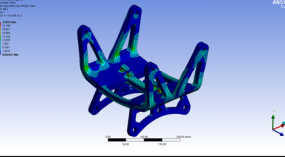
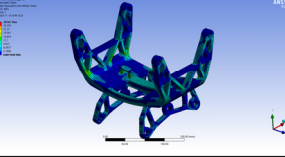
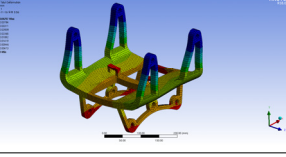
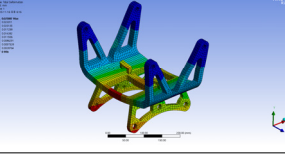
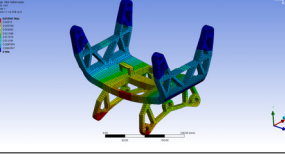
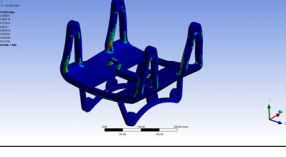
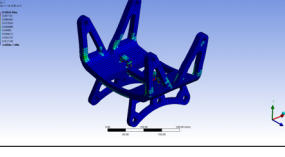
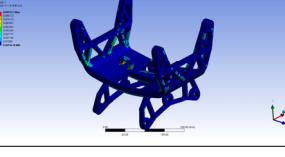
		A-Type	B-Type	C-Type
Drawing				
3D-Modeling				
Volume ( $mm^3$ )	$V_{SUGT}$	1.3160e+6	1.2505e+6	9.5645e+5
	$\frac{V_{SUGT}}{V_{OTT}}$ (%)	39.85	37.87	28.96
Mass (kg)		10.33	9.8162	7.5081

Table 6. Analysis Results of SUGT Model

		A-Type	B-Type	C-Type
Stress (MPa)	3D Shape			
	$\sigma_{SUGT}$	31.432	23.835	28.567
	$\frac{\sigma_{SUGT}}{\sigma_{OTT}}$ (%)	138.19	104.79	125.59
	$\frac{\sigma_{SUGT}}{F_y}$ (%)	11.43	8.67	10.39
Displ. (mm)	3D Shape			
	$d_{SUGT}$	0.04257	0.02589	0.03954
	$\frac{d_{SUGT}}{d_{OTT}}$ (%)	446.69	271.67	414.90
Strain Energy (mJ)	3D Shape			
	$E_{SUGT}$	0.11029	0.10924	0.09531
	$\frac{E_{SUGT}}{E_{OTT}}$ (%)	78.41	77.66	67.76

설계영역은 몸통부를 설정하였으며, 레일부와 부속철 물과의 볼트결합으로 인해 필수적으로 필요한 볼트구멍은 설계영역에서 제외하였다. 목적함수는 컴플라이언스(Compliance)의 최소화, 구속조건은 Mass 40%, 설계변수는 요소 형상의 밀도로 설정하였으며, 상용프로그램(ANSYS)을 사용하여 해석을 진행하였다. 해석 진행 결과 Fig. 9, Table 4를 도출하였다.

TOT는 위상 최적화 모델을 말한다. TOT 모델의 부피는  $1.3793e+6mm^3$ 로 OTT 모델과 비교하여 약 58.23%를 줄일 수 있다. 부피가 감소한 만큼 무게도 줄어들기 때문에 케이블에 가해지는 기계적 요소의 하중을 크게 줄일 수 있다.

TOT 모델 해석으로 도출된 부피값 이하로 Table 5와 같은 3가지 타입의 트롤리를 제안한다. SUGT는 Suggestion Trolley로 본 논문에서 제안한 트롤리 모델을 말한다. 각 타입의 부피는 A타입은  $1.3160e+6mm^3$ , B타입은  $1.2505e+6mm^3$ , C타입은  $9.5645e+5mm^3$ 로 TOT 모델의 부피보다 60.15~71.04% 작게 설계하였다. 각 타입의 안전성을 평가하기 위해 기본 해석 모델의 정적해석과 동일하게 지점 조건, 하중 조건을 설정하여 해석을 진행하였다.

해석 결과는 Table 6에 정리하여 나타내었다. 각 타입의 응력은  $31.432MPa$ ,  $23.835MPa$ ,  $28.567MPa$ 로 OTT 모델과 비교하여 증가하였다. 하지만 OTT 모델과 달리 체결부에 집중되던 응력이 몸통부 전체에 고르게 분포하며, 항복강도 대비 최대 11.43%로 충분한 내구성을 유지할 수 있다. 최대 변위는  $0.04257mm$ ,  $0.02589mm$ ,  $0.03954mm$ 가 발생하였으며, 체결부에서 발생하던 최대 변위가 몸통부의 하단부로 옮겨졌다. 최대 변위는 OTT 모델에 비해 크게 증가하였으나, 실제적인 수치로는 미소한 값으로 판단된다. 변형에너지는  $0.11029mJ$ ,  $0.10924mJ$ ,  $0.09531mJ$ 이 발생하였으며, OTT 모델과 비교하였을 때 21.59%, 22.34%, 32.24% 감소하는 양상을 확인하였다.

따라서 3가지 타입의 SUGT 모델 모두 재료의 항복강도 대비 최대 응력이 매우 작은 값이기 때문에 개폐 막 지붕의 기계적 요소 역할을 충분히 할 수 있을 것이다. 특히 C-Type 모델과 OTT 모델을 비교하였을 때 71.04%의 무게를 줄일 수 있어 케이블에 작용하는 기계적 요소의 하중을 크게 줄일 수 있다.

## 4. 결론

본 연구에서는 개폐 막 지붕의 기계적 요소인 오픈형 트롤리를 위상 최적화하여 새로운 타입의 모델을 제안하고 제안된 모델들의 내구성과 안전성을 평가하였다. 오픈형 트롤리 모델의 정적해석과 제안된 모델들의 해석 결과를 비교한 결과 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- 1) OTT 모델 해석을 바탕으로 위상 최적화를 수행한 결과, TOT 모델의 부피는  $1.3793e+6mm^3$ 로 58.23%의 부피를 감소하였고, 무게도  $10.828kg$  감소하였다.
- 2) TOT 모델의 부피값 이하로 3가지 타입의 SUGT 모델을 제안하였다. 특히 C-Type의 경우 71.04%의 부피를 감소하였지만  $28.567MPa$ 로 항복강도 대비 10.39%이다. 이는 부피를 약 70%나 감소시켰음에도 불구하고 충분한 안전성 확보가 가능하다고 판단된다.
- 3) 부피가 줄어든 만큼 기존에 사용하는 OTT 모델과 비교하여 약 60~71%의 무게를 감소시켜 구조물 지붕에 가해지는 하중의 크기도 상당수 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

OTT 해석 기본 모델을 정적해석 및 위상 최적화 결과를 바탕으로 SUGT 모델을 제안하였다. 제안한 모델은 3가지 모두 연성 막 구조물의 기계적 요소로서 충분한 안전성을 가지고 있어 실제 적용이 가능할 것으로 판단되며, 약 70%의 부피를 감소시켜 경제적인 것으로 판단된다.

추후 트롤리뿐만 아니라 구동력을 가진 트랙터와 경계부의 정착을 위한 앵커링의 최적 설계에 관한 연구가 필요하며, 정적인 하중이 아닌 개폐가 진행되는 과정에서의 안전성을 검토하여 설계에 반영하는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## References

- [1] S. Shon, S. Choi, H. Ha, D. Lee, E. Kwak, "Structural Stability and Design of Shallow Spatial Truss Dome", Journal of the Korean Association for Spatial Structures, Vol. 16, No. 2, pp. 4-11, June, 2016.
- [2] S. Shon, S. Lee, "Design and Spline Cutting Pattern of Membrane Structures", Journal of the Korean Association for Spatial Structures, Vol. 17, No. 1, pp.

- 11-18, March. 2017.
- [3] J. W. Kang, "Trend of Retractable Roof Structures Technology", Journal of the Korean Association for Spatial Structures, Vol. 15, No. 4, pp. 4-11, Dec. 2015.
- [4] J. W. Kang, "Trend of Large spatial Structures Technology by Internal and External", Journal of the Korean Association for Spatial Structures, Vol.16, No.4, pp.16-23, Dec. 2016.
- [5] S. Shon, K. Hwang, D. Lee, S. Lee, "Technical Status and Classification of Steel Retractable Roof", Journal of the Korean Association for Spatial Structures, Vol. 15, No. 4, pp. 12-17, Dec. 2015.
- [6] K. Hwang, S. Shon, D. Lee, and S. Lee, "Technical Status and Driving Mechanism of Retractable Membrane Roof", Journal of the Korean Association for Spatial Structures, Vol.15, No.4, pp.18-23, Dec. 2015.
- [7] S. Shon, S. Lee, "A Semi-analytical Solution of Shallow Sinusoidal Arches by using Multistage Homotopy Perturbation Method", Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, Vol. 31, No. 4, pp. 21-28, Apr. 2015.  
DOI: [https://doi.org/10.5659/IAIK\\_SC.2015.31.4.21](https://doi.org/10.5659/IAIK_SC.2015.31.4.21)
- [8] K. Hwang, S. Shon, S. Lee, "Driving System of Retractable Membrane Roof Structures", Magazine of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, Vol. 20 No. 3, pp. 43-47, March. 2016.
- [9] Y. Lee, Y. Kim, S. Lee, K. Hwang, "Type Analysis and Classification of Driving Devices Applied to Retractable Membrane Structures", Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol. 17, No. 3, pp. 19~24, Sep. 2017.
- [10] Y. H. Lee, Research on the Structural Design and Driving Device of Retractable Membrane Structures -Focused on the Application of Engineering Plastics-, Master's thesis, The University of Seoul, pp. 1-210, 2018.
- [11] Y. J. Kim, S. J. Lee, Y. H. Lee, K. J. Hwang, "Trolley Adaptability of Membrane Retractable Roof Under Vertical Load Considering Friction of Various Materials", Journal of the Korean Association For Spatial Structures, Vol. 16, No. 4, pp. 83-89, Dec. 2016.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.9712/KASS.2016.16.4.083>
- [12] S. Y. Han, "About Topology Optimization Method", Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 10, No. 3, pp. 52-57, Nov. 2001.
- [13] Y. O. Park, S. J. Min, "Topology Optimization Using Compliance Pattern Based Genetic Algorithm", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 1, No. 8, pp. 1852-1857, Nov. 2005.
- [14] S. H. Cha, S. W. Lee, S. H. Cho, "Experimental Validation of Topology Design Optimization", Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea, Vol. 26, No. 4, pp. 241-246, Aug. 2013.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.7734/COSEIK.2013.26.4.241>
- [15] D. S. Ko, H. K. Lee, D. J. Hur, "Using Topology Optimization, Light Weight Design of Vehicle Mounted Voltage Converter for Impact Loading", Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea, Vol. 31, No. 6, pp. 353-358, Dec. 2018.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.7734/COSEIK.2018.31.6.353>

이 돈 우(Donwoo Lee)

[정회원]



- 2016년 2월 : 한국기술교육대학교 건축공학과 (공학석사)
- 2019년 8월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 건축공학과 (박사과정)
- 2019년 9월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 산학협력단 개인교원수탁연구

<관심분야>

건축구조, 내진공학, 셸 및 공간구조, 최적화

손 수 덕(Sudeok Shon)

[정회원]



- 1997년 8월 : 경북대학교 건축공학과 (공학석사)
- 2003년 8월 : 경북대학교 건축공학과 (공학박사)
- 2011년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 디자인-건축공학부 연구교수

<관심분야>

건축구조, 셸 및 공간구조, 최적화, 형상제어



최 봉 영(Bongyoung Choi)

[준회원]



- 2020년 2월 : 한국기술교육대학교 건축공학과 (공학사)
- 2020년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 창의융합공학협동과정 미래융합공학전공 재학중 (석사과정)

<관심분야>

건축구조, 내진공학, 최적화

---

이 승 재(Seungjae Lee)

[종신회원]



- 1995년 3월 : 동경대학교 건축학과(공학석사)
- 1998년 3월 : 동경대학교 건축학과(공학박사)
- 1998년 4월 ~ 2003년 2월 : 동경대학교 문부과학 교관
- 2003년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 디자인·건축공학부 교수

<관심분야>

건축구조, 내진공학, 모듈러, 셸 및 공간구조