TTX 판토그라프 틸팅 구조물의 경량화 설계

A Weight Reduction Model of TTX Pantograph Tilting Structure

이민수* 한재흥** 김기남*** 고태환****

Lee, Min-Su Han, Jae-Hung Kim Ki-Nam Ko, Tae-Hwan

ABSTRACT

The TTX(Tilting Train eXpress) is designed to achieve high driving speed up to 200 km/h and to run on conventional curved rails without speed reduction. In order to maintain power collection between catenary and pantograph collector while train body is tilted, the TTX pantograph must have tilting structure (or Sledge). The power quality is determined by the tilting structure. Static and dynamic characteristics of tilting structure, therefore, are important to evaluate the pantograph performance. The current prototype of the tilting structure is overweight model and its structural characteristics have not been investigated. In this study, the finite element model of TTX tilting structure is established and static analysis is performed. Finally, using this result, a light weight model is proposed.

1. 서 론

판토그라프(Pantograph)는 기차의 동력차량 상부에 설치되어 가선으로부터 전력을 공급받아 동력차를 운행하는 핵심 부품이며, 판토그라프의 집전 품질에 따라 기차의 주행안정성과 속도성능이 평가된다.

TTX(Tilting Train eXpress)는 국내에서는 최초로 개발되고 있는 틸팅기차(Tilting train)로서, 기존의 기차나 지하철 과는 달리 틸팅 구조물(Tilting structure or Sledge)을 수반하게 된다. 이러한 틸팅 기차는 차량의 곡선부 주행시 차체를 주행 곡선 안쪽으로 기울여 속도를 증가시키고 승차감을 향상시키는 것은 물론, 에너지 소비의 장점 등을 가지고 있다

차량이 틸팅을 하면 그림 1과 같이 차량의 중심축이 가선에서 벗어나게 된다. 따라서 틸팅 구조물은 상하 운동만 하는 판토그라프를 좌우로 이동시켜 가선과의 접촉을 유지시켜주는 역할을

* 한국과학기술원, 항공우주공학전공 석사과정
** 한국과학기술원, 항공우주공학전공 조교수
*** 유진기공산업㈜ 철도차량부품기술연구소
**** 한국철도기술연구원

한다. 판토그라프의 집전 품질은 가선과의 안정적인 접촉으로 이선(Loss of contact)을 최소화함으로써 결정된다[1]. 따라서 외부의 진동 환경은 집전 품질을 결정하는 중요한 요소이며, 판토그라프와 직접 연결되어 판토그라프를 지지, 틸팅시키는 틸팅 구조물의 특성은 판토그라프의 집전 품질과 직결된다.

현재 판토그라프의 틸팅 구조물의 시제품이 제작되었으나 당초 설계 중량의 약 2 배정도 초과하였을 뿐만 아니라 구조물의 안정성 검증도 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 판토그라프 틸팅 구조물의 구조해석으로 안정성을 검증하였고, 해석 결과를 기초로 틸팅 구조물의 경량화 모델을 제시하였다.

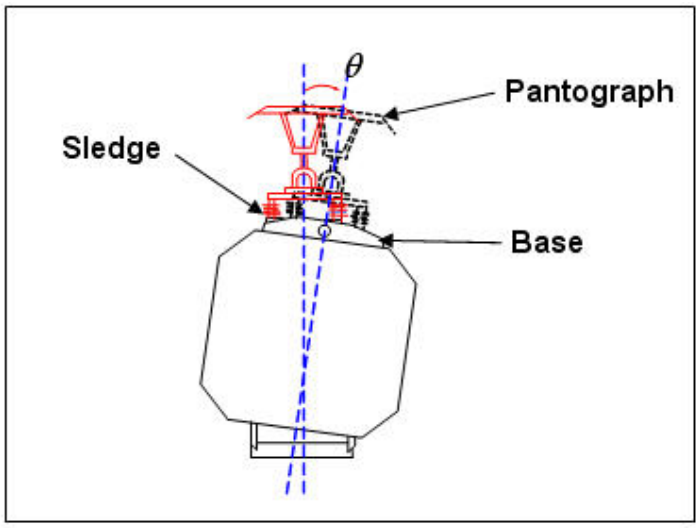

그림 1. Schemetic diagram of pantograph tiling mechanism

2. 틸팅 구조물의 구조 해석

2.1 틸팅 구조물의 3-D 모델링

판토그라프 틸팅 구조물의 3-D 모델링은 Pro/E CAD 프로그램을 사용하였으며, 그림 2와 도표 1에 틸팅 구조물의 그림과 명칭을 나타내었다.

베이스 프레임(Base frame)은 차량 상부에 직접 연결되어 있으며, 판토그라프와 슬러쥐 프레임(Sledge frame), 그 외의 틸팅 시스템을 탑재하고 있다. 또한 베이스 프레임은 강도를 보강하기 위해 기차 진행 방향의 전후 프레임에 다수의 보강재(Rib)들이 설치되어 있다.

슬러쥐 프레임은 측면 방향에 연결되어 있는 두 개의 동일한 스프링(Main spring)에 의해 베이스 프레임의 가운데에 위치하게 되며, 스프링의 초기 변위는 약 100mm이다.

슬러쥐의 틸팅 구동은 회전형 능동 구동기(Driving set)가 구동되면서 시작된다. 구동기가 회전하면 구동기와 연결되어 있는 Teeth wheel이 돌아가게 되어 벨트를 통하여 슬러쥐 프레임에 구동력

이 전달된다. 따라서 슬러쥐 프레임은 베이스 프레임에 위치한 틸팅 가이드를 따라 세 개의 롤러에 의해 좌우로 움직인다. 슬러쥐 프레임의 최대 변위는 좌우로 약 400mm이다[2].

틸팅 가이드 역할을 하는 부품은 Rear track과 Front track 이며, 베이스 프레임에 탑재되어 있다. 틸팅 가이드는 곡선 궤도로 되어 있어, 틸팅 시에도 판토그라프 집전판의 지면과의 수평을 유지시켜 준다. 벨트는 항상 일정한 장력을 유지하는데 Pre - force set에 있는 두 개의 스프링이 그 역할을 한다.

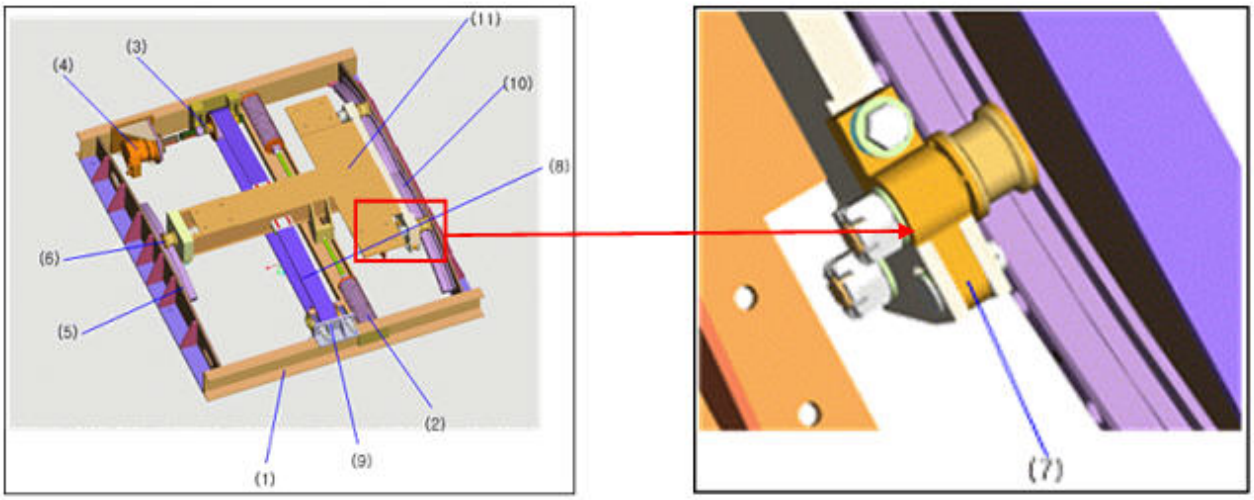

그림 2. 3-D model of total sledge

도표 1. Each part of sledge

Mark	Part	수량	Mark	Part	수량
1	Base frame	1	7	Below roller set	3
2	Main spring	2	8	Teeth belt	1
3	Teeth wheel	1	9	Pre-force set	1
4	Driving set	1	10	Front track	1
5	Rear trak	1	11	Sledge frame	1
6	Roller set	3			

2.2 경계 조건 및 하중 조건

슬러쥐 프레임은 판토그라프와 Insulator의 중량 및 판토그라프의 공기 저항과 가선과의 접촉력 등을 지지한다. 판토그라프와 Insulator의 중량은 150kg 이며, 본 연구에서는 판토그라프에 작용하

는 공기력과 가선간의 힘은 고려하지 않고 자체 중량에 하중계수(Load factor) 2를 가하여 수직하중을 결정하였다[3]. 각 작용점의 수직하중은 판토그라프를 지지하는 슬러쥐 프레임 세 곳에 동일하게 작용한다고 가정하였다. 수평하중은 크게 벨트의 장력과 구동기에서 발생하는 구동력, 스프링의 탄성력 등으로 나누어진다. 벨트의 장력은 2000N으로 가정하였으며[3], 벨트의 장력은 슬러쥐 프레임 양쪽에 동일하게 적용하였다. 스프링에 의한 탄성력은 스프링의 탄성계수와 슬러쥐 프레임의 최대 변위로 결정하였다. 양쪽에 스프링이 연결되어 있으나 슬러쥐 프레임의 구조상 늘어난 스프링의 탄성력만 받기 때문에, 한쪽의 스프링에 의해서만 하중이 걸린다. 구동기의 구동력은 수평하중의 평형 상태로부터 결정되며, 슬러쥐 프레임의 경계조건으로 베이스 프레임과 연결되는 세 점에 두개의 병진 자유도(x, y)를 구속하였으며, 틸팅 가이드가 전개되는 방향(z)은 정적 해석 시 직선으로 가정하였다.

베이스 프레임의 수직 하중은 판토그라프, Insulator, 슬러쥐 프레임 중량의 합으로 계산되며, 수직하중은 슬러쥐 프레임과 연결된 세 곳에 동일하게 분포한다고 가정하였다. 한편, 베이스 프레임의 수평하중은 슬러쥐 프레임의 수평 반발력과 같으며 방향은 반대이다. 베이스 프레임의 경계조건으로는 차량 상부에 고정되는 10 곳에 대해 각각 세 개의 병진자유도(x, y, z)를 구속하였다.

2.3 틸팅 구조물의 구조 해석

구조물의 안정성 평가 및 경량화를 위하여 슬러쥐 프레임과 베이스 프레임에 대해 MSC PATRAN/NASTRAN 을 이용한 정적해석을 수행하였다. 슬러쥐 프레임과 베이스 프레임의 응력분포 결과는 그림 3에 나타내었다. 슬러쥐 프레임과 베이스 프레임의 재질은 스틸 종류의 하나인 SS400 으로 제작되었으며 인장항복강도(Tensile yield strength)는 250MPa 이다. 슬러쥐 프레임과 베이스 프레임의 최대 응력은 각각 82.9MPa 와 44.2MPa 이다. 이 결과는 재료의 인장항복강도 250MPa보다 매우 작은 값으로써 구조물의 안정성 및 경량화 가능성을 보여준다.

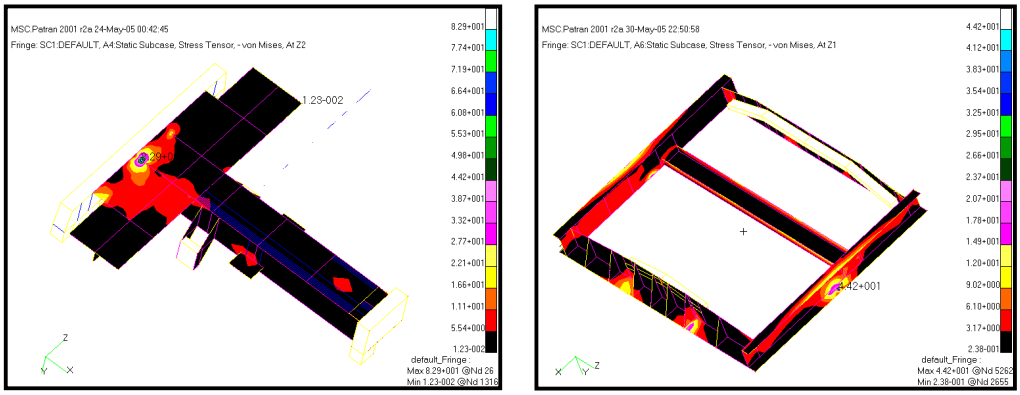

그림 3. Static analysis results of sledge and base frame

3. 틸팅 구조물의 경량화 모델링과 재해석

경량화 모델는 구조물의 응력 분포 결과를 근거로, 각각의 구조물들의 안전 계수(Safety factor)를 1.5이상 유지하며 두께를 감소시켜 얻었다. 총 무게가 약 650kg인 구조물을 약 50%의 경량을 목표로 응력 분포를 고려하여 구조물의 두께를 약 40~60% 감소시켜 재해석하였다. 경량화 모델의 정적 해석 결과는 그림 4에 나타내었다. 경량화 후 슬러쥐 프레임과 베이스 프레임의 전반적인 응력 상승이 나타났으나, 각각의 최대 응력은 122MPa과 145MPa로 여전히 안정적인 구조로 판단되었다. 슬러쥐 프레임과 베이스 프레임의 질량은 초기 487kg에서 경량화 후 각각 113kg, 117kg, 총 230kg으로 약 53%가 감소하였고, 결과적으로 전체 슬러쥐는 654kg 에서 397kg으로 약 40% 감소하였다.

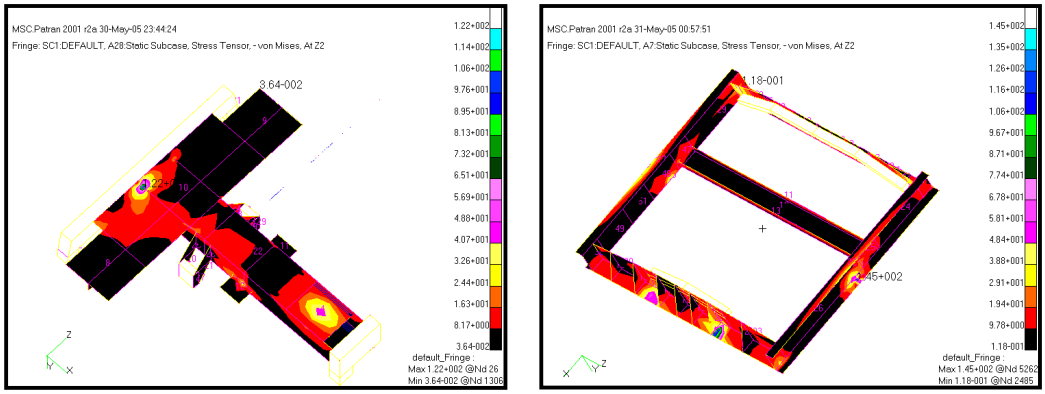

그림 4. Static analysis results of light sledge and base frame

4. 결론

판토그라프를 지지하고 틸팅시키는 틸팅 구조물인 슬러쥐의 적합한 모델 수립을 위하여 슬러쥐에 대한 정적 해석 및 경량화를 수행하였다. 유진기공산업㈜에서 제작한 슬러쥐 시제품의 도면을 이용하여 슬러쥐의 3-D CAD 모델을 수립였으며, MSC PATRAN/NASTRAN을 이용하여 베이스 프레임과 슬러쥐 프레임의 유한 요소 모델을 수립하였다.

판토그라프 틸팅 구조물의 강도 측면에서 틸팅 구조물의 안정성 판별과 모델 개선을 위하여 정적 해석을 수행하였으며, 베이스 프레임과 슬러쥐 프레임에 대하여 독립적으로 수행되었다. 최종적으로 설계 중량을 초과한 초기 슬러쥐 모델에 대한 정적 해석 결과를 바탕으로 구조물의 경량화 모델를 제시하였고, 수립된 경량화 모델에 대해 정적해석을 수행하여 안정성을 판별하였다. 또한 현재 판토그라프 틸팅 구조물의 외부진동조건에 대한 동적 응답을 해석을 수행 중에 있다.

5. 감사의 글

본 연구는 건설교통부의 철도기술연구개발사업으로 수행되었으며, 도움주신 한국철도기술연구원, 유진기공산업㈜ 관계자 여러분의 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. J.Y. Mok, Y.G. Kim, C.S. Park, and K.H. Kim(2004), “Variation Trends of the Contact Force between Pantograph - Catenary and Acceleration Behavior According to the Train Running Speed and Driving Pattern in Korean High Speed Train,” KSNVE Annual Spring Conference.
2. 유진기공산업㈜(2005), “Development of Core Component”
3. 유진기공산업㈜(2004), “Development of Core Component”
4. 한국철도기술연구원(2004), “Technical Specification and Interface Document”
5. 한국철도기술연구원(2003), ”Developments of Practical Technology for Tilting System”
6. 한국철도기술연구원(2004), ”Developments of Practical Technology for Tilting System”
7. Schneider, R.(1998), “Pantograph for Tilting Trains,” IEE.