

근사모델을 이용한 자기부상열차 차체 프레임 구조물의 경량화 설계

Light-Weight Design of Maglev's Car-Body Frame Structure Using Meta-Model

*방제성¹, 한정우¹, 이종민¹

*J. S. Bang(jsbang@kimm.re.kr)¹, J. W. Han(jwhan@kimm.re.kr)¹, J. M. Lee(lee_jm@kimm.re.kr)¹

¹한국기계연구원 시스템엔지니어링연구본부

Key words : Urban Transit Maglev, Light-Weight Design, Design Optimization, Meta Model

1. 서론

도시과밀화로 인한 교통문제와 환경문제로 인하여 기존 교통시스템을 대체할 수 있는 신교통시스템의 필요성이 대두되면서 환경친화적인 자기부상열차가 관심을 받고 있다[1].

자기부상열차는 크게 차체(Car-Body), 실내의 설비, 대차(Bogie) 부분으로 나눌 수 있으며, 이 중 실내의 설비는 대부분 경량화가 힘든 부분이며, 차체와 대차는 경량화의 가능성을 많이 가지고 있다. 대차는 자기부상열차의 핵심장치인 부상/안내용 전자석과 추진용 선형유도전동기를 포함하고 있으며, 차체는 자체중량과 차량에 작용하는 수직 및 수평하중을 감당할 수 있는 경량구조의 알루미늄 압출재로 구성된다. 본 연구에서 우선 차체 프레임 구조물에 대한 경량화를 수행하였으며, 한국기계연구원에서 자체적으로 설계되었던 모델을 경량화 대상으로 정하였다.

2. 설계기준 및 정적해석

설계기준에 의해 참조할 수 있는 재료적 특성값들은 다음과 같다.

재질 : AL6061

탄성계수(Young's modulus) : 7135.6 Kgf/mm^2
포아송비(ν) : 0.33

밀도 : $2.905 \times 10^{-10} \text{ Kgfs}^2/\text{mm}^4$

허용응력 : 12.4 Kgf/mm^2

[인장강도의 70%(18.6)/안전계수(1.5)]

효율적인 해석을 위하여 Fig. 1과 같은 좌측 1/2모델을 사용하였으며, 전체 프레임 구조물에 대하여 ANSYS[2]의 Shell63 요소를 적용하였다. 총 242814

개의 절점과 174752개의 요소가 사용되었다.

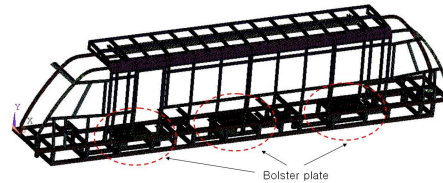


Fig. 1 Finite element model of car-body frame structure (half model)

경량화를 위하여 전체 프레임 구조물을 14개의 부재로 나누었으며, 최적화 시 각 부재별 두께를 설계변수로 정하였다.

대차와 에어스프링으로 연결되는 Bolster Plate는 세 군데이며, 보수적인 설계를 위하여 위 부위들에 단순(Simply) 경계조건을 적용하였다.

구조물에 손상을 가장 크게 주는 자유낙하(2g) 조건[3]을 사용하였으며, Under frame의 중량은 대차 및 에어스프링이 감당하는 중량이므로 부과하지 않았다.

초기 설계변수를 가지는 모델에 대하여 정적해석을 수행한 결과 Von Mises criteria에 의한 최대등가응력(maximum equivalent stress)이 허용응력을 넘지 않으며, 최대처짐(maximum deflection)도 에어스프링에서 감당할 수 있는 수치이다.

최대처짐 : 차체 후방 Cabin 부분에서 발생(5.893 mm)

최대등가응력 : 차체 전방 Bolster Plate 부분에서 발생(11.834 Kgf/mm^2)

3. 최적화

최적화 문제를 식(1)과 같이 정의하였다. 각 절점에서의 최대등가응력(σ_{max})이 허용응력을 넘지 않으며, 최대처짐(δ_{max})이 초기상태를 크게 넘지 않을 정도인 6.0을 넘지 않는다는 제한조건 하에서 전체 프레임 구조물의 중량(W)을 최소화 하는 문제로 정의하였다.

$$\begin{aligned} \text{목적함수 : 중량}(W) \text{ 최소화} & \quad (1) \\ \text{제한조건 : } \sigma_{max} & < 12.4Kg/mm^2 \\ \delta_{max} & < 6.0mm \end{aligned}$$

대상체의 자유도(D.O.F)가 크기 때문에 본 연구에서는 효율적인 설계최적화를 위하여 반응면기법(Response Surface Method)을 이용한 근사모델(meta model)을 이용하였다. Saturated design method [4]를 사용하였으며 각 설계변수의 초기상태를 기준으로 하여 초기상태 값의 20%에 해당하는 설계 영역을 근사하였다. 또한, 실제 설계문제에서는 많은 제약사항으로 인해 설계영역의 조절이 필요하며, 이를 위하여 변수로 α 를 정의하였다. 여기서 X_i^{init} 은 각 설계변수의 초기 값이다.

$$(1 - 0.2\alpha) X_i^{init} \leq X_i \leq (1 + 0.2\alpha) X_i^{init} \quad (2)$$

또한 다음과 같이 목적함수와 두 개의 제한조건을 normalize한 설계변수(U_i)에 대한 2차항까지 근사하였다.

$$\begin{aligned} U_i &= \frac{X_i - X_i^{init}}{0.2X_i^{init}} & (3) \\ W &\approx W^{approximated} = a_0 + \sum_{i=1}^{14} a_i U_i + \sum_{i=1}^{14} b_i U_i^2 \\ \sigma_{max} &\approx \sigma_{max}^{approximated} = c_0 + \sum_{i=1}^{14} c_i U_i + \sum_{i=1}^{14} d_i U_i^2 \\ \delta_{max} &\approx \delta_{max}^{approximated} = e_0 + \sum_{i=1}^{14} e_i U_i + \sum_{i=1}^{14} f_i U_i^2 \end{aligned}$$

설계변수가 14개이므로 세 개의 식마다 29개의 계수를 얻어야 한다. 이를 위하여 위의 식을 잘 근사할 수 있는 29개의 추출점에서 유한요소해석을 수행하였다.

4. 결과 및 결론

식(2)에서 언급했던 설계영역을 조절하기 위한 변수 α 를 이용하여 설계영역을 변화해 가면서 최적해를 찾아보았다. 최적화 프로그램으로는 Matlab

Optimization Toolbox를 사용하였다. $\alpha=0.5\sim 2.0$ 인 각 설계영역에 대해 각각 최적해를 구해 보았으며, 이 중 $\alpha=1.9$ 인 설계영역에서 가장 이상적인 최적해를 얻을 수 있었다. Table 1과 같이 129.35Kg(12.4%)의 중량감소 효과를 얻을 수 있었으며, Under frame 1, Under frame 2, Cabin 1, Cabin 2, Cabin 3 부재는 두께를 늘리고, 나머지 부재는 두께를 줄임으로써 최적해를 얻을 수 있었다. 응력집중과 처짐을 많이 감당하는 부재는 두께를 늘림으로써 응력집중과 처짐을 완화하고 여유가 있는 부재는 두께를 줄임으로써 최종적으로 경량화에 이룰 수 있음을 보여준다.

Table 1 initial and optimal value of each structural parts and weight decrease

X_i^{init} : 부재별 초기두께 (mm)
 $X_i^{optimal}$: 부재별 최적두께 (mm)
 ΔW_i : 부재별 중량 변화량 (Kg)

Part	X_i^{init}	$X_i^{optimal}$	ΔW_i
Under frame 1	7.0	8.094	35.8
Under frame 2	10.0	12.013	16.8
Under frame 3	7.0	4.340	-35.7
Under frame 4	7.0	5.695	-31.1
Under frame 5	7.0	4.340	-19.2
Side frame 1	3.0	1.860	-37.0
Side frame 2	5.0	3.100	-31.7
Side frame 3	5.0	3.100	-18.0
Roof 1	3.0	1.860	-20.8
Roof 2	4.0	2.480	-11.7
Roof 3	5.0	3.100	-7.59
Cabin 1	5.0	6.900	10.5
Cabin 2	5.0	6.900	5.47
Cabin 3	5.0	6.900	15.5
Total			-129.35

참고문헌

1. 김인근, 유문환, “자기부상열차 개발을 위한 시스템 엔지니어링기술”, 기계와 재료, 9권 2호, pp.6-19
2. ANSYS Release 11.0 Documentation
3. 도시형 자기부상열차 개발사업, 연구개발 결과 요약서, 1998.8
4. Achintya Halder, "Reliability Assessment Using Stochastic Finite Element Analysis", John Wiley, 2000