

고속 화차용 대차프레임의 경량화를 위한 최적설계

김현수*, 안찬우*, 최경호**, 박정호**

Shape Optimization of a Bogie frame for the Reduction of its Weight

Hyun-Su Kim*, Chan-Woo Ahn*, Kyung-Ho Choi**, Jeong-Ho Park**

ABSTRACT

As industry is developed, the faster transportation of freight train is demanded. The optimum design of a structure requires the determination of economical member size and shape of a structure which will satisfy the design conditions and the functions. In this study, it is attempted to minimize the dead weight of bogie frame. From the numerical results in the shape and size optimization of the bogie frame, it is known that the weight can be reduced up to 17.45 % with the displacement, stress, first natural frequency and critical buckling-load constraints. The first natural frequency and the critical buckling load of the optimized model is larger than that of the lowest design value. Stress and displacement conditions are also satisfied within the design conditions. From the results, the optimal model is stable and useful for the improvement of railway carriages.

Key Words : Shape optimization(형상최적화), Size optimization(치수최적화), Bogie frame(대차 프레임), Natural frequency(고유진동수), Dead weight(자중)

1. 서론

산업발달과 수송수요의 증가로 철도차량의 고속화, 경량화를 비롯한 제작비 및 유지보수비의 절감을 목표로 끊임없는 기술혁신이 이루어지고 있다. 특히 경량화는 경제적인 측면에서 에너지 절약과 고속화를 추구하는 철도차량에서는 매우 중요하고 필수적인 과제이다.⁽¹⁾

본 연구에서는 최고 속도 120 km/h, 최대 적재하중이 약 100 ton인 고속화차용 대차프레임(Bogie frame)을 범용 유한요소해석 프로그램(ANSYS 5.6)을 이용하여 구조해석을 한 후, 대차프레임의 중량 감소를 위하여 First order method를 사용하여 최적

설계를 수행하였다.

대차 프레임의 볼스터 부분과 side frame은 두께가 9mm, 12mm, 16mm인 plate를 용접함으로써 구성되어 있다. 따라서 각각의 plate 두께를 설계변수로 하여 중량감소를 위한 치수 최적설계를 수행하였으며 제약조건으로는 매 반복회의 최대 von-Mises 응력과, 최대 변위, 대차의 1차 고유진동수가 허용치를 초과하지 않도록 하였고, 좌굴 임계하중이 최대 하중보다 크도록 하였다.

또한 설계변수의 변화에 따른 목적함수와 제약조건의 변화양상을 살펴봄으로써 각 plate의 두께변화가 중량과 제약조건에 미치는 영향을 알아보았다.

*** 2002년 4월 11일 접수
* 동아대학교 기계산업시스템 공학부
** 동아대학교 기계공학과 대학원

2. 대차프레임의 구조해석

2.1 유한요소모델

대차프레임의 위 판, 아래 판, 리브 그리고 여러 Plate 등은 길이나 넓이에 비하여 두께가 얇기 때문에 4절점 쉘요소(Shell element)를 사용하였고, 사각형요소로 분할하였다.⁽²⁾ 요소는 등방성, 등질성, 선형탄성으로 가정하고, 대차프레임의 유한요소모델은 Fig. 1에 나타나 있으며, 절점은 13,612개이고 요소는 13,356개로 구성되어 있다. 대차프레임에 사용된 재료는 강도, 경계성 등을 고려하여 열에 비교적 강한 용접 구조용 열간 압연재강인 SMA50A를 사용하였으며 기계적 성질은 Table 1에 나타나있다.

Table 1 Material properties of SMA50A

Material property	Value
E(Young's modulus)	21600 kg _f /mm ²
ν (poisson's ratio)	0.33
ρ (density)	7.95 kg · s ² /mm ⁴
yield strength	38 kg _f /mm ²

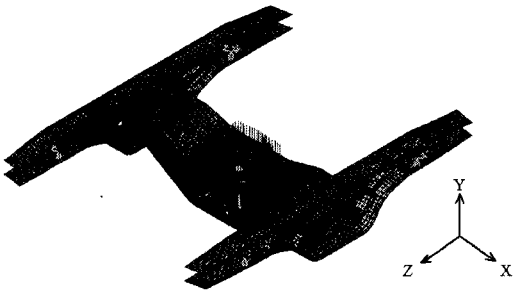


Fig. 1 Loading and boundary condition of bogie frame

2.2 경계조건 및 하중조건

실차와 비슷한 거동을 표현하기 위하여 사이드 프레임과 스프링 박스가 접촉하는 곳을 Fig. 1과 같이 구속한다. (a) 점은 X, Y, Z 방향의 변위를 모두 구속하고, (b) 점은 Y, Z 방향의 변위를 구속한

다. 그리고, (c) 점은 X, Y 방향의 변위를 구속하고, (d) 점은 Y 방향의 변위를 고정한다.

대차에 가해지는 하중에는 수직, 좌우, 전후, 비틀림 방향 하중과 제동하중이 있으며, 각각의 크기는 Table 2와 같다.

Table 2 Loading conditions

Loading Conditions	Magnitude of Load (tonf)		Remarks
	Static load	Dynamic load	
Vertical load	33.75	43.88	$P_a = (W_1 + W_2 - W_0) / 2$
			$P_b = P_a \times (g + 1)$
Lateral load	10.13		$P_c = P_a \times 0.3$
Longitudinal load	10.13		$P_d = P_a \times 0.3$
Torsional load	33.75		$P_e = P_a \times 1.0$
Breaking load	4.2		$P_f = 4 \times (B \times \mu)$

여기서

- W_1 : 공차 중량
- W_2 : 최대 적재량
- W_0 : 대차 중량
- g : 동하중 계수 (0.3)
- B : 제동력 (5250kg)
- μ : 제동마찰력 (0.2)

Table 2 의 하중 상태 중 수직 동하중은 만차 상태의 수직 정하중에 상하 진동에 의한 동적 효과를 고려한 하중이며 구조해석시 가장 높은 최대 응력 값을 나타내므로 5가지의 하중상태중 가장 가혹한 경우에 해당한다고 볼 수 있다.⁽³⁾⁽⁶⁾ 따라서 본 연구에서는 대차의 볼스터와 센터 피봇이 접촉하는 면에 수직 동하중을 접촉면으로 나눈 값인 4.6575(N/mm²)를 수직 압력으로 가한다.

3. 대차프레임의 최적설계

3.1 최적설계의 정식화

대차프레임의 최적설계 정식화는 다음과 같다.

$$\text{Minimize ; } F(X) = \sum_{i=1}^N A_i \cdot t_i \quad (1)$$

Subject to ;

$$\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{al}} - 1 \leq 0 \quad (2)$$

$$\frac{|u_{\max}|}{u_{al}} - 1 \leq 0 \quad (3)$$

$$10 - f_{1st} < 0 \quad (4)$$

$$\frac{P_{opt}}{P_{ini}} - 1 \leq 0 \quad (5)$$

식 (1)의 $F(X)$ 는 최소화의 기준이 되는 목적함수로서 계산의 편의상 대차프레임의 체적으로 선정하였고, N 은 요소의 개수이고 A_i 는 i 번째 요소의 면적, t_i 는 i 번째 요소의 두께이다. σ_{al} 는 허용응력으로 항복강도에 안전계수 1.6을 고려하여 270Mpa로 주었고, σ_{\max} 는 매 반복회의 최대 von-mises 응력이다. u_{al} 은 허용변위로서 초기모델의 유한요소해석을 한 후에 얻어지는 변위보다 크게 하여 4mm로 하고, u_{\max} 는 매 반복회의 최대변위를 나타낸다.

f_{1st} 는 대차의 초기 모델이 가지는 1차 고유진동수이며 통상 속도 110km/h 이하의 철도차량은 상하진동에 의한 승차감과 화물의 안전성 등을 고려하여 완성차량 구조체 자체의 고유진동수가 10 Hz 이상이 되어야 하므로 1차 고유진동수의 하한 값을 10Hz로 하였다.⁽⁷⁾

또한 P_{ini} 값은 초기 모델의 임계 좌굴 하중 값이며 P_{opt} 는 매 반복회에서 계산되어지는 좌굴 하중 값이다. 일반적으로 압축하중을 받는 평판에서는 임계 좌굴 하중 값은 평판의 두께가 감소함에 따라 작아지는 경향을 보이나, 최대 작용하중보다 클 경우에는 좌굴에 대해 안전하다고 판단할

수 있으므로 최대 작용하중의 3배에 이르는 값을 임계 좌굴 하중의 하한치로 설정하여 최적화를 수행하였다.⁽⁸⁾

Table 3 은 각 설계변수의 초기치와 상한, 하한을 나타내고 있으며 Fig. 2, Fig. 3은 대차 모델 각 부분에 적용된 설계변수를 보여주고 있다.

Table 3 Range of design variables

D.V \ Range	Initial	Lower	Upper
t_1 (mm)	12	4	20
t_2 (mm)	16	8	24
t_3 (mm)	12	4	20
t_4 (mm)	16	8	24
t_5 (mm)	9	5	13

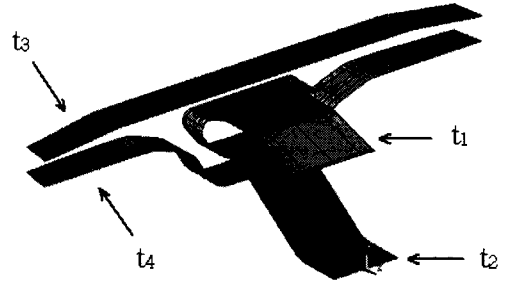


Fig. 2 Design variables of bogie frame (1)

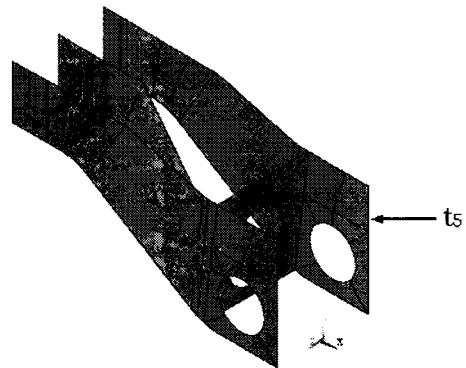


Fig. 3 Design variables of bogie frame (2)

3.2 최적설계 알고리즘

앞 절과 같이 목적함수와 제약조건을 가진 제약 최적화 문제는 비제약 문제를 논리적으로 확장한 것으로 볼 수 있다. 이는 제약함수와 목적함수를 모두 포함하는 Lagrange 함수를 구성하여 쿤터커 필요조건에 의하여 최적점을 구하게 된다. 이를 수식으로 나타내면

$$Q(x, q) = \frac{f}{f_0} + \sum_{i=1}^n P_x(x_i) + q \left[\sum_{i=1}^{m_1} P_g(g_i) + \sum_{i=1}^{m_2} P_h(h_i) + \sum_{i=1}^{m_3} P_w(w_i) \right] \quad (6)$$

; f : 매 반복에서 얻어지는 목적함수

g_i, h_i, w_i : 제약조건 함수

P_x, P_g, P_h, P_w : 제약함수를 포함하는 벌칙 함수

q : 벌칙매개 변수

비제약 최적화 문제의 경우 목적함수의 강하 방향을 정하는 데는 여러 가지 방법이 있으며 최속강하법이나 경사도법이 비제약 최적화의 가장 단순하고 오래전부터 알려진 수치법이다.

최속강하법은 목적함수의 경사도를 계산하여 탐색방향을 구하는데 사용하며, 이 경사도 벡터는 점 x^* 에서 함수 $f(x)$ 의 최대 증가율 방향을 나타낸다.

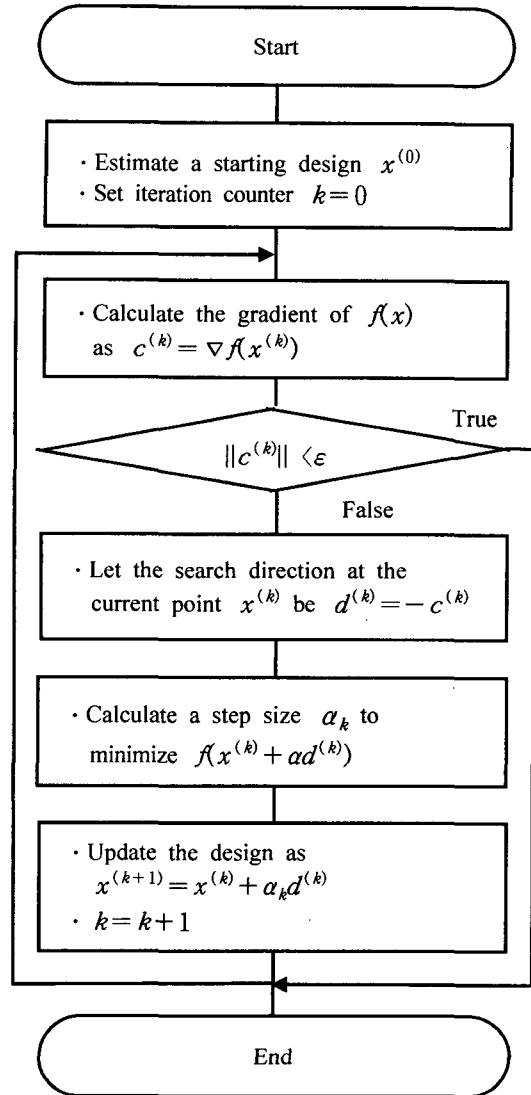
이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.^{(9),(10)}

$$\nabla f(x) = \left[-\frac{\partial f(x^k)}{\partial x_i} \right] = c^{(k)} \quad (7)$$

; i : 설계변수의 수

k : 벡터의 계산 단계

이러한 경사도 벡터의 성질을 이용하여 비제약 최적화 문제에 대해 반복적 알고리즘을 적용하면 다음과 같다.



4. 결과 및 고찰

4.1 초기모델의 유한요소해석

대차프레임의 초기모델을 유한요소해석 한 결과, 하중을 가하는 부분인 볼스터 아래에 있는 Plate에 응력이 집중되며 최대응력은 168.78Mpa이고 최대변위는 2.376mm이며, 1차 고유진동수는 68.53Hz, 임계 좌굴하중은 19.93N/mm²이다.

Fig. 4 와 Fig. 5에서 최대 응력 발생부와 최대 변위 발생부를 대차 구조물의 단면을 통해서 보여 주고 있다.

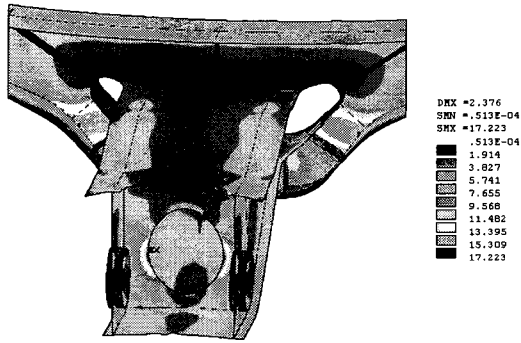


Fig. 4 Maximum stress of initial model of bogie frame

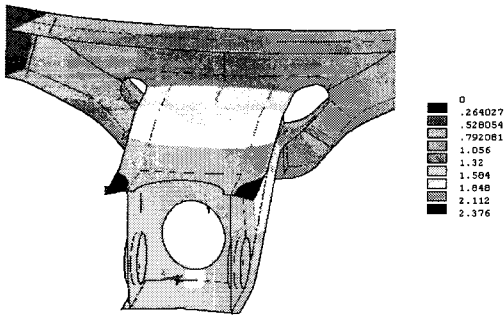


Fig. 5 Maximum displacement of initial model of bogie frame

4.2 대차프레임의 최적설계

Table 4에서 대차 프레임의 각부 plate 두께를 치수 최적화한 결과를 보여주고 있다.

대차의 사이드 프레임과 볼스터 부분 위쪽 plate에 적용된 설계 변수 t_1 , t_2 가 아래쪽 plate t_3 , t_4 보다 감소량이 큰 것을 알 수 있으며, 응력과 변위는 각각 215.14MPa 과 3.42mm 로 증가하였으나 모두 허용치를 초과하지 않는 값을 나타내고 있다. 고유진동수의 경우 68.54Hz에서 65.59Hz 로 감소하

였으나 이는 하한치인 10Hz를 크게 웃도는 값이며, 임계 좌굴 하중 또한 19.92에서 14.99로 감소하였으나, 이 또한 최대 작용하중보다 3배 이상 큰 수치로서 최적화된 모델이 구조적으로 안정함을 알 수 있다.

Table 4 Result of size optimization

D.V	Initial	Optimum	S.V	Initial	Optimum
t_1	12	8.06	σ_{max}	168.78	215.14
t_2	16	10.64	u_{max}	2.37	3.42
t_3	12	10.16	f_{1st}	68.54	65.59
t_4	16	14.02	P_{opt}	19.92	14.99
t_5	9	7.11	-	-	-
Volume	Reduction of 17.45 %				

4.3 민감도 해석

4.2 절의 최적설계 결과를 이용하여 설계변수의 변화에 따른 목적 함수와 제약조건의 변화를 알아보았다. 세로축의 체적과 응력에 대해 가로축은 정규화된 설계변수의 변화를 나타내고 있다. 설계변수의 최적치에서 하나의 설계변수가 하한에서 상한까지 변해갈 때 체적, 응력의 변화를 살펴보았다. Fig. 6의 체적 변화에서 설계변수 t_1 , t_2 가 t_3 , t_4 보다 일찍 최적점을 벗어남을 알 수 있다. 이는 정규화된 설계변수의 영역에서 위쪽 plate의 변화에 의한 중량감소의 영향이 크다는 것을 의미하며, 또한 Fig. 7의 응력 변화에서는 t_5 가 최적점 이전에 민감하게 반응하여 유용영역을 벗어남을 볼 수 있으며 최적점 이후에는 t_1 , t_2 가 t_3 , t_4 보다 민감하게 반응함을 알 수 있다.⁽¹¹⁾

이로서 대차의 두께 변화에 따른 경량화의 경우 각부분 별로 두께에 대한 영향이 다르므로 실제 현장에서 이를 고려한 설계 시 상당한 비용절감의 효과가 기대된다.

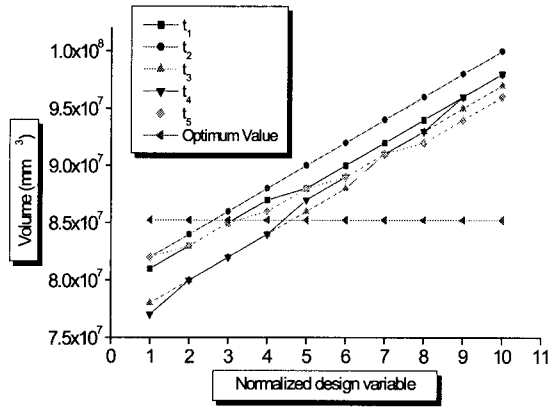


Fig. 6 Sensitivity analysis of volume in dimension optimize

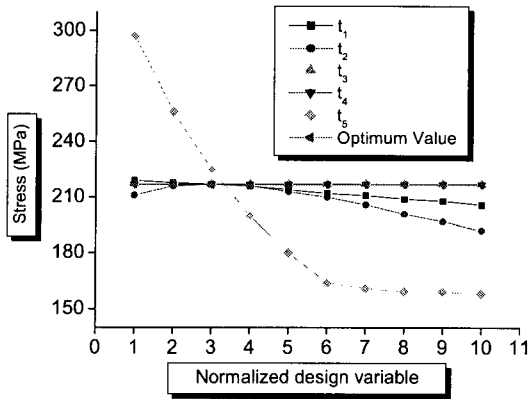


Fig. 7 Sensitivity analysis of stress in dimension optimize

5. 결론

고속 화차용 대차 프레임에 사용된 plate의 두께를 설계변수로 하여 중량감소를 위한 치수 최적 설계를 수행한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 대차 프레임의 중량감소를 위해 볼스터의 위 · 아래 판, 사이트 프레임의 위 · 아래 판, 볼스터 부의 수직 방향지지 판을 설계변수로 하여 치

수 최적 설계를 수행하여 초기 모델보다 17.45% 중량을 줄인 경량화 된 모델을 얻었다.

- (2) 대차 프레임의 경량화의 경우 사이트 프레임과 볼스터의 위판이 아래판보다 경량화에 더 민감한 영향을 준다.
- (3) 초기 모델과 최적화된 모델 모두 고유진동수와 좌굴의 영향에 대하여 안정함을 보인다.
- (4) 중량과 응력에 대해 위쪽 plate가 아래쪽 plate 보다 더 영향을 미친다.

후 기

이 논문은 2000 학년도 동아대학교 학술연구조성비(국외연구과제)에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. 김현수, 박정호, "철도화차용 bogie의 경량화에 관한 연구," 컨소시엄 기말보고서, 1996.
2. ANSYS 5.6 Theory Manual
3. 한국 산업 규격(KS) R 9210 "철도 차량용 대차 스톱 - 설계 통칙".
4. 日本工業規格(JIS) E 4207, "鐵道車輛用台車の荷重試驗方法," 1988.
5. 日本工業規格(JIS) E 4208, "鐵道車輛用台車の荷重試驗方法," 1988.
6. 고속전철 차량시스템의 기계기술개발(II), 한국 기계연구원.
7. 이영신, 김재훈, "3D 복합재료 샌드위치 구조물의 2층 경전철 철도차량 구조체 적용성에 관한 연구," 한국철도학회논문집, 제 3권, 제 2호, pp. 92-99, 2000.
8. Erich Wolf, "Structure Analysis Manual Vol 1, Vol 2," General Dynamics, 1988
9. Jasbir S. Arora, "Introduction to Optimum Design," McGraw-Hill Book Company, 1989.
10. Garret N. Vanderplaats "Numerical optimization Techniques for Engineering Design," McGraw-Hill Book Company, 1984.

11. 홍도관, 최석창, 한근조, 안찬우, "천정 크레인
거더의 최적설계에 관한 연구," 한국항만학회,
제15권, 제2호, pp. 183-189, 2001.