

< 기술논문 >

## 다중하중조건에서 2층열차 차체의 최적설계

이태희<sup>†</sup> · 이진민<sup>\*</sup> · 정재준<sup>\*</sup> · 황원주<sup>\*\*</sup> · 김형진<sup>\*\*</sup>

(2006년 3월 28일 접수, 2006년 8월 1일 심사완료)

### Design Optimization of Double-deck Train Carbody Under Multi-loading Condition

Tae Hee Lee, Jin Min Lee, Jae Jun Jung, Won Ju Hwang and Hyeong Jin Kim

**Key Words :** Double-deck Train(2층열차), Screening Technique(스크리닝 기법), Design Optimization (최적설계), Multi-loading Condition(다중하중조건)

#### Abstract

Double-deck train has been attracted growing attention as next generation transportation around metropolis because of high passenger carrying capacity. To develop high-speed double-deck train with low operational costs, the carbody must be designed as light as possible. In addition, the carbody must be strong enough to ensure the safety of passengers. To meet these design requirements, we perform systematically weight minimization that determines thickness of aluminum extruded panels of the carbody. First, to reduce the design variables, we carry out the screening process that select sensitive or/and important design variables through design exploration. Then, weight minimization is accomplished under multi-loading condition such as vertical, compressive and torsional loads, while satisfying strength constraints of the design regulations. Finally, the result of design optimization is discussed by comparison with its initial design.

#### 기호설명

- $b_i$  : 2층열차 차체의 설계변수
- $W$  : 2층열차 차체의 중량
- $\sigma_{max}$  : 2층열차 차체에 작용하는 최대 응력
- $\hat{y}$  : 반응표면모델
- $\hat{\beta}_0$  : 반응표면모델의 상수항
- $\hat{\beta}_i$  : 반응표면모델의 1차항 계수

#### 1. 서론

대도시의 도로교통 체증이 심각해짐에 따라 수

도권 전철 구간의 이용승객 증가에 따른 열차 내 혼잡이 증가되고 있다. 이에 대한 해결책으로 열차의 편성 차량 수를 증가시키지 않고 수송량을 증대시킬 수 있는 2층열차가 차세대 광역철도망 열차로 고려되고 있다. 2층열차의 개발은 구조해석 동역학해석, 피로강도해석과 같은 다양한 설계요구사항을 통합적으로 고려하는 다분야통합설계기법이 요구된다. 이러한 설계 고려사항 중에서 구조강도 평가를 통한 차체의 경량화는 첫 번째 설계 고려사항이다. 2층열차는 기존 열차보다 차체의 중량과 부가적인 장비가 증가하기 때문에 차체의 경량화는 제작비용 감소를 위한 필수과제이다. 더욱이 차체가 가벼워지면 레일과 바퀴 사이의 마찰을 감소시켜 차량의 수명이 연장되며, 소요동력의 감소 및 열차의 고속화를 가능케 할 수 있다.

2층열차의 경량 설계는 크게 두 가지 방안으로 접근할 수 있다. 첫째는 차체를 이루는 다양한 프레임의 재원을 알루미늄 합금과 같이 중량 대비

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학부  
E-mail : thlee@hanyang.ac.kr  
TEL: 02-2220-0449 FAX: 02-2298-4634

<sup>\*</sup> 한양대학교 대학원 자동차공학과

<sup>\*\*</sup> 한국철도기술연구원

고강도 재료를 사용하는 것이다. 두 번째는 구조나 치수를 변경하여 경량화하는 방법으로 설계자의 경험이나 직관에 의해 이루어지는 설계 개선 방식에서 벗어나 수학적 정식화를 바탕으로 구조변경을 자동화 하는 최적설계(design optimization) 기법이 구조 설계 문제에 널리 적용되고 있다.

본 연구에서는 2층열차의 경량화를 위해 차체에 작용하는 수직, 압축, 비틀림 등 다중하중조건(multi-loading condition)에 의해 발생하는 최대 von Mises 응력(von Mises stress)이 허용응력을 넘지 않는 한도 내에서 차체를 이루고 있는 다양한 알루미늄 압출재(aluminum extruded panel: AEP) 두께를 결정하는 최적설계를 수행한다. 2층열차의 차체를 구성하는 총 25종의 알루미늄 압출재는 36개의 설계변수로 이루어져 있기 때문에 이러한 모델에 바로 최적설계기법을 적용하기에는 많은 계산비용이 든다.

이러한 문제를 해결하기 위해 목적함수와 제한조건에 대해 중요하고 민감한 설계변수를 선택하는 스크리닝(screening) 기법을 적용하여 최적설계 과정에서 고려할 설계변수의 수를 줄인다. 스크리닝은 직교배열(orthogonal array)<sup>(1)</sup>을 바탕으로 생성한 반응표면모델(response surface model)의 전역민감도(global sensitivity)에 의해 수행되며, 파레토 그림(pareto plot)에 의해 선택된 설계변수들의 타당성을 판단한다. 이렇게 선정된 주요 설계변수들로 차원축소된 2층열차의 다중하중조건에서의 최적설계를 수행한 후 초기설계와 비교하여 최적설계에 의해 얻어진 결과에 대해 논의한다.

## 2. 2층열차 차체의 초기설계

2층열차의 초기설계는 국내 지하철의 차량한계치수 내에서 선진국의 2층열차를 벤치마킹 하여 결정되었다. 차체의 재질은 경량화를 위해 알루미늄 합금을 사용한다. 알루미늄 압출재는 강성의 향상을 위해 내부에 삼각비드(triangle bead)를 갖는 이중샌드위치 형태로 설계되었다. Fig. 1은 본 연구에서 고려된 해석모델과 차체 단면을 구성하고 있는 다양한 압출재들을 나타내며,<sup>(2)</sup> Fig. 2는 차체의 단면도로 압출재의 형상을 나타낸다. 압출재는 알루미늄 합금 A6005A가 사용되었고, 물성치는 Table 1과 같다. 차체의 강도평가는 표준전동차 하중시험 적용기준에 의해 수행한다. 이 기준에 따라 수직 및 압축 하중조건에서 재료의 항복강도 21.9 kgf/mm<sup>2</sup>와 인장강도의 70%인 18.6 kgf/mm<sup>2</sup>중 작은 값을 기준 값으로 선택한다. 여기에 안전계수 1.5를 적용하여 12.4 kgf/mm<sup>2</sup>를 허용응력으로

책정한다. 또한 비틀림 하중조건에서는 8.7 kgf/mm<sup>2</sup>의 허용응력이 책정된다.<sup>(3)</sup>

2층열차의 초기설계는 수직(vertical), 압축(compressive), 비틀림(torsional) 하중에 대한 최대 von Mises 응력이 각각 11.4 kgf/mm<sup>2</sup>, 5.57 kgf/mm<sup>2</sup>, 1.32 kgf/mm<sup>2</sup>로 모두 제한조건을 만족하지만 허용응력이 안전계수가 포함되어 있기 때문에 이러한 초기설계는 과잉설계(redundant design)로 판단된다. 이는 2층열차의 경량 최적설계의 필요성을 말해주는 좋은 근거라고 할 수 있다.

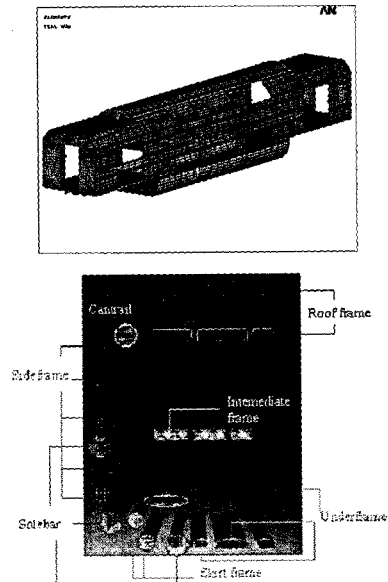


Fig. 1 Finite analysis model of double-deck train carbody and configuration of aluminum extruded panels

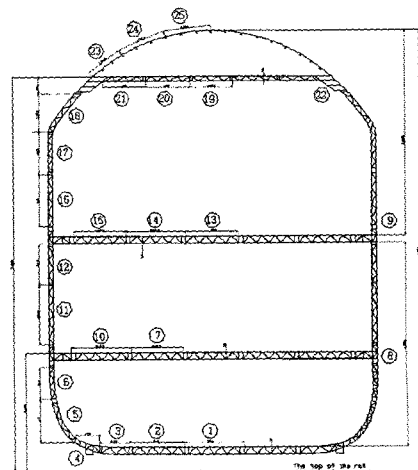


Fig. 2 Various cross sections of double-deck train carbody made of aluminum extrude panels

Table 1 Material properties of A6005A

Material	A6005A
Tensile strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	26.5
Yield strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	21.9
Young's modulus (kgf/mm <sup>2</sup> )	7300
Poisson's ratio	0.33
Density (kg/mm <sup>3</sup> )	2.802E-6

3. 다중하중조건에서의 2층열차 차체의

경량 최적설계

3.1 2층열차 차체의 설계변수 정의

2층열차의 경량 최적설계를 위해서는 표준전동차 하중시험 적용기준에 의한 허용응력 한도 내에서 차체를 이루고 있는 다양한 알루미늄 압출재 두께의 치수를 결정해야 한다. 설계변수의 선택은 설계자의 경험에 의해 초기 36개로 선정되었다.

Fig. 3의 좌측 상단에 있는 첨부도면 1은 승객과 좌석의 하중을 지탱하는 언더프레임(under frame)의 형상을 나타낸다. 여기서 5종류 언더프레임 상하부재의 두께와 각각의 수직 및 대각부재의 두께를 설계변수로 선정한다.

Fig. 3의 우측 상단에 있는 도면 5번은 2층열차의 중앙부의 1층 바닥면과 양끝의 1층 바닥면 사이에 있는 부분으로서 스커트프레임(skirt frame)의 형상을 나타낸다. 여기서 2종류 스커트프레임 상하부재의 두께와 각각의 수직 및 대각부재의 두께를 설계변수로 선정한다.

Fig. 3의 좌측 하단에 있는 도면 11번은 2층열차의 1층 바닥, 2층 바닥, 지붕부위를 연결시켜 주는 부분으로 차체의 길이 방향으로 용접 시 용접변형과 좌굴 현상이 일어나지 않도록 설계된 사이드프레임의 형상을 나타낸다. 여기서 5종류 사이드프레임 상하부재의 두께와 각각의 수직 및 대각부재의 두께를 설계변수로 선정한다.

Fig. 3의 우측 하단에 있는 도면 4번은 언더프레임과 사이드프레임을 연결시켜 주는 부분으로써 차체의 직·간접적인 하중을 지지하는 솔바프레임(solebar frame)의 형상을 나타내며, 3종류 솔바프레임들 각각의 세로, 가로, 대각부재의 두께를 설계변수로 선정한다. 따라서, 설계변수의 개수는 언더프레임 11개, 스커트 프레임 5개, 사이드 프레임 11개, 솔바 프레임 9개 등 총 36개가 된다.

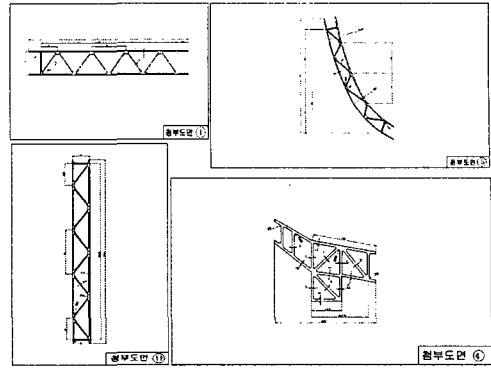


Fig. 3 Configuration of aluminum extruded panels and design variables

3.2 2층열차 차체의 구조해석

운영 중 다양한 하중을 받게 되는 2층열차 차체의 경량 최적설계를 수행하기에 앞서 다중하중 조건에서 구조해석이 선행되어야 한다. 여기서, 다중하중조건은 수직, 압축, 비틀림 하중조건을 의미한다. 2층열차 차체의 모델링과 구조해석은 상용유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 사용하여 수행한다.

Fig. 4는 2층열차의 수직하중에서 구조해석의 하중조건과 경계조건을 나타낸다. 하중조건은 입석 위주의 1층에 대해서는 도시철도 하중시험기준에 근거하여 62톤의 분포하중을, 좌석 위주의 2층은 국제철도연합의 규약(UIC)에 의거하여 9톤을 가했다. 경계조건은 차체와 대차(bogie)가 접하는 부분의 수직, 수평, 길이 방향 자유도를 고정하였다.

압축하중은 차량의 진행방향의 충격에 의한 하중으로 Fig. 5와 같이 차체 한쪽 커플러 중심 위치를 압축봉으로 고정한 상태에서 반대 쪽 커플러 중심 위치에 압축하중 50톤을 부가한다.

비틀림하중은 차량이 곡선로를 주행할 때 생길 수 있는 하중으로 Fig. 6과 같이 한쪽 볼스터(bolster)는 수직으로 지지하며, 반대쪽에는 차체의 회전이 가능하도록 볼스터 중앙에 비틀림 프레임틀을 넣어 지지한 후 지지점 부근에 4 ton·m의 하중을 부가한다.

유한요소해석 프로그램을 사용한 구조해석 결과 수직하중 조건에 대해 출입문 하단부에서 11.4 kgf/mm<sup>2</sup>의 최대 본미세스 응력이 발생하였다. 압축 하중조건에서는 차체와 대차를 연결해주는 볼스터와 차체 사이에 5.57 kgf/mm<sup>2</sup>의 최대 본미세스 응력이 발생하였다. 비틀림 하중조건에서는 승객과 좌석의 하중을 지탱하는 언더프레임과 차체의 옆면을 이루는 사이드 프레임을

연결하는 출입문의 양쪽 슬바프레임에 1.32kgf/mm<sup>2</sup>의 최대 본미세스 응력이 발생하였다.

모든 하중조건에서 초기설계의 최대응력이 허용응력보다 작으므로 2층열차 차체의 최적설계 수행시 초기설계는 유용영역(feasible region)에 존재함을 확인할 수 있다. Table 2는 구조해석에 의한 초기설계 모델의 수직, 압축, 비틀림 하중조건에 대한 각각의 최대 본미세스 응력과 표준전동차 하중시험 적용기준에 의해 구한 허용응력 값을 비교한다. 총 중량은 8.1ton으로 산정되었다.

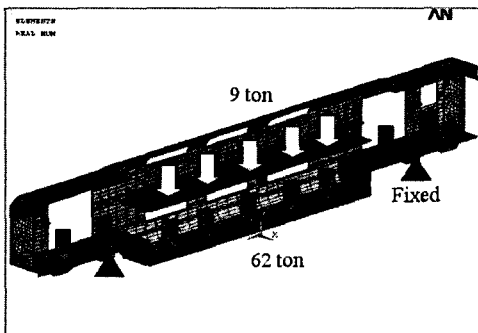


Fig. 4 Loading and boundary conditions of vertical loading

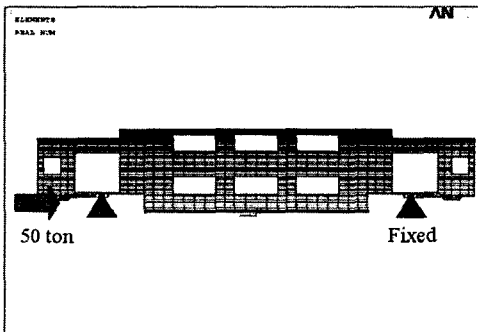


Fig. 5 Loading and boundary conditions of compressive loading

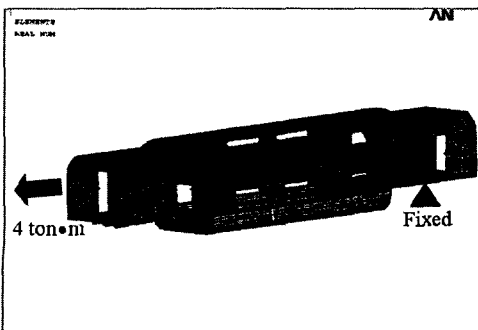


Fig. 6 Loading and boundary conditions of torsional loading

### 3.3 다중하중조건에서 2층열차 차체의 경량 최적설계

앞에서 선정된 36개의 설계변수와 응력 제한조건 그리고 총 중량인 목적함수로 구성된 2층열차 차체의 경량 최적설계는 식 (1)과 같이 정식화할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Find} && b_i \quad (i=1, \dots, 36) \\
 & \text{Minimize} && W \\
 & \text{Subject to} && \sigma_{\max}^{\text{vertical}} - 12.4 \leq 0 \\
 & && \sigma_{\max}^{\text{compressive}} - 12.4 \leq 0 \\
 & && \sigma_{\max}^{\text{torsional}} - 8.7 \leq 0 \\
 & && b_i^{\text{lower}} \leq b_i \leq b_i^{\text{upper}}
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서  $b_i$ 는 알루미늄 압출재의 두께,  $W$ 는 중량(kgf),  $\sigma_{\max}^{\text{vertical}}$ 는 차체에 작용하는 수직하중에 대한 최대 본미세스 응력(kgf/mm<sup>2</sup>),  $\sigma_{\max}^{\text{compressive}}$ 는 압축하중에 대한 최대 본미세스 응력,  $\sigma_{\max}^{\text{torsional}}$ 는 비틀림하중에 대한 최대 본미세스 응력을 나타낸다. 그리고  $b_i^{\text{lower}} \leq b_i \leq b_i^{\text{upper}}$ 는 설계변수들의 상한값과 하한값을 나타낸다.

그러나 36개의 설계변수로 이루어져 있는 대형 설계문제는 상당한 계산비용이 소요되기 때문에 합리적인 접근 방식이 아니다.

따라서 본 연구에서는 반응표면모델을 이용하여 3개의 응력과 중량의 변화에 실질적으로 영향을 주는 변수들만을 선별하여 최적화를 수행한다.

### 3.4 스크리닝 기법(screening technique)

최적화 문제의 목적함수와 제한조건에 대해 중요하고, 민감한 설계변수를 선택하는 과정을 스크리닝이라 한다. 이 스크리닝 기법을 36개의 설계변수로 이루어져 있는 대형 설계문제에 적용함으로써 주요설계변수로 이루어진 효율적인 최적화 문제로 재정식화 하고자 한다. 설계변수의 선정은  $L_{72}$  직교배열에 의한 반응표면모델의 전역민감도를 이용한다. 반응표면모델은 실험수의 감소를 위해 식 (2)와 같은 1차 반응표면모델이 고려되었다.

Table 2 Comparison of von Mises stresses and allowable stresses under each load

Vertical		Compressive		Torsional	
Max	Allow	Max	Allow	Max	Allow
11.4	12.4	5.56	12.4	1.32	8.7

Unit: (kgf/mm<sup>2</sup>)

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \sum_{i=1}^{n_d} \hat{\beta}_i x_i \quad (2)$$

가정한 반응표면모델의 타당성은 분산분석을 통해 계산된 식 (3)의 결정계수  $R^2$  를 이용하여 검증한다.  $n_v$  는 검증점의 개수,  $y(x_i)$  는 실제응답값,  $\hat{y}(x_i)$  는 반응표면모델의 응답값,  $\bar{y}$  는 실제응답값의 평균을 나타낸다.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n_v} \{y(x_i) - \hat{y}(x_i)\}^2}{\sum_{i=1}^{n_v} \{y(x_i) - \bar{y}\}^2} \quad (3)$$

분산분석 결과, 3개의 응력과 중량에 관한 반응표면모델의 결정계수가 각각 0.95, 0.89, 0.94, 1.0으로 나왔다. 이런 결과는 반응표면모델이 데이터에 대한 총변동의 89%이상을 설명할 수 있는 매우 정확한 모델임을 나타낸다. 이러한 검증을 바탕으로 반응표면모델의 전역민감도를 이용하여 설계변수의 스크리닝을 수행하였다.(4)

Fig. 7~9는 각각 수직하중, 압축하중, 비틀림하중에 대한 응력의 전역민감도를 나타낸다. 전역민감도의 기울기가 큰 변수가 각각의 응답에 영향을 주는 변수로 고려된다. 따라서 수직하중은  $b_1, b_{10}, b_{11}, b_{32}, b_{17}, b_{23}$  의 설계변수들이, 압축하중은  $b_1, b_8, b_{31}, b_{32}, b_{33}$  의 설계변수들이, 비틀림하중은  $b_1, b_{31}, b_{32}, b_{33}$  의 설계변수들이 응력에 영향을 주는 주요 설계변수임을 알 수 있다. Fig. 10은 중량에 대한 전역민감도를 나타낸다. 여기서  $b_1, b_{17}, b_{31}, b_{32}, b_{35}$  의 설계변수들이 중량에 영향을 주는 주요 설계변수임을 알 수 있다.

전역민감도분석의 결과를 바탕으로 3개의 응력과 중량 감소를 위해 총 8개의 변수를 선택한다. 이들 설계변수 중에서 상충관계(trade-off)가 존재하여 세부적인 치수를 정하는 것이 필요한 설계변수들은  $b_1, b_{17}, b_{31}, b_{32}, b_{33}$  등 5개이다. 설계변수 1번은 언더프레임의 상하 부재의 두께이며, 17번은 사이드프레임의 상하 부재의 두께, 31, 32, 33번은 각각 슬바프레임의 세로, 가로, 대각부재의 두께를 나타낸다. 앞에서 선택한 주요 설계변수들의 타당성은 파레토 그림에서 판단할 수 있다. 즉, 반응표면모델에서 계수의 절대값이 클수록 그 계수와 관련된 설계변수는 응답의 변동을 설명하는데 더 유의한 변수라고 볼 수 있다.

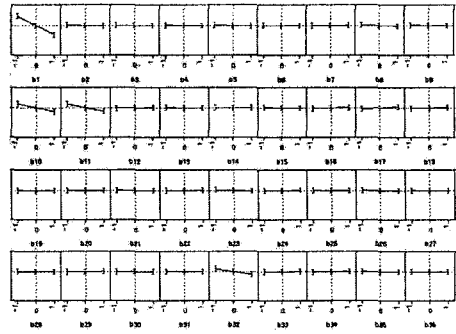


Fig. 7 Global sensitivity of stress under vertical loading with respect to design variables

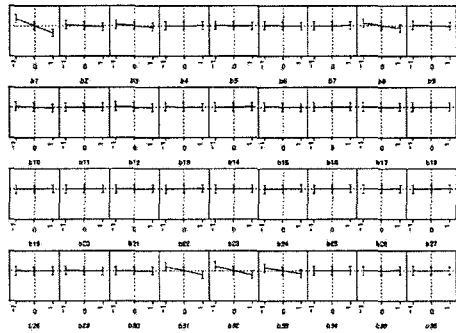


Fig. 8 Global sensitivity of stress under compressive loading with respect to design variables

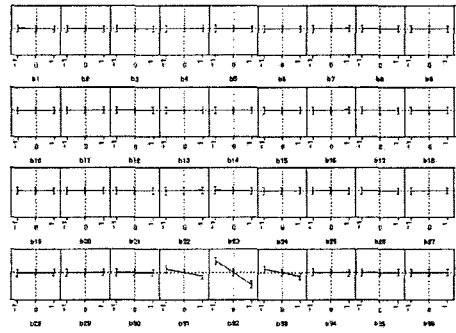


Fig. 9 Global sensitivity of stress under torsional loading with respect to design variables

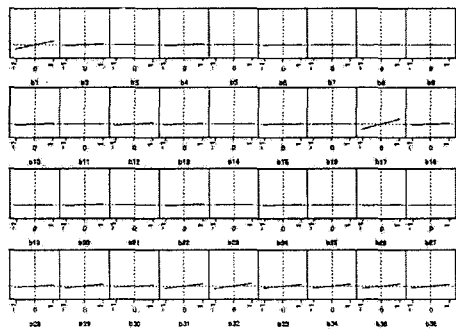


Fig. 10 Global sensitivity of weight with respect to design variables

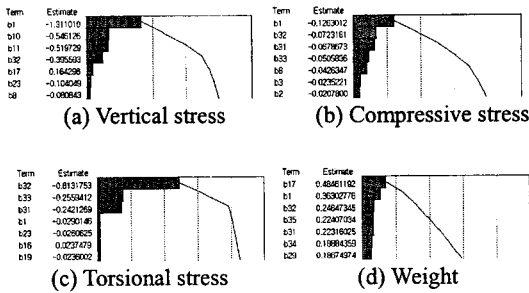


Fig. 11 Pareto plots for stresses and weight

Fig. 11의 파레토 그림에서 (a) 수직, (b) 압축, (c) 비틀림 하중에 대한 응력과 (d) 중량에 대해서 전체 설계 변수 중 5개의 설계변수가 차지하는 비율은 각각 49%, 61%, 81%와 44%를 넘는다. 따라서 스크리닝 과정을 통해서 선별된 5개의 주요 설계변수들은 4개의 응답에 대한 주요 설계변수라는 충분한 근거를 가진다고 판단할 수 있다.

스크리닝 과정을 통해 선택된 5개의 주요 설계변수에 의한 2층열차 차체의 최적화는 식 (4)와 같이 재정식화할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 &\text{Find} && b_1, b_{17}, b_{31}, b_{32}, b_{33} \\
 &\text{Minimize} && W \\
 &\text{Subject to} && \sigma_{\max}^{\text{vertical}} - 12.4 \leq 0 \\
 &&& \sigma_{\max}^{\text{compressive}} - 12.4 \leq 0 \quad (4) \\
 &&& \sigma_{\max}^{\text{torsional}} - 8.7 \leq 0 \\
 &&& 2.5 \leq b_1, b_{17} \leq 4 \\
 &&& 3 \leq b_{31}, b_{32}, b_{33} \leq 10
 \end{aligned}$$

최적화 알고리즘은 순차적이차계획(sequential quadratic programming: SQP)을 사용한다. 한편 선별된 5개의 주요 설계변수들을 제외한 다른 설계변수들은 초기 설계 값으로 선정한다.

### 3.5 경량 최적설계의 결과

경량 최적설계의 결과는 3개의 응력 제한조건을 모두 만족하면서 초기설계에 비해 약 700kg의 중량이 감소하여 8.5%의 설계개선 효과를 보였다. 초기설계에서 수직하중에 대한 최대 von Mises 응력이 허용응력 값과 거의 근접한 활성화 제한조건(active constraint)이라는 것을 고려한다면 8.5%의 중량 감소는 효과적이라 할 수 있다.

최적화 과정은 Fig 12와 같이 총 4번의 반복(iteration)과 28번의 함수호출(function call)을 수행하고 있다. Fig 12 그래프의 가로축은 반복수를 나타내고, 세로축은 목적함수의 값을 나타낸다. 만약 스크리닝 기법을 적용하지 않았다면 함수호출 횟수는 기하급수적으로 증가하였을 것이다.

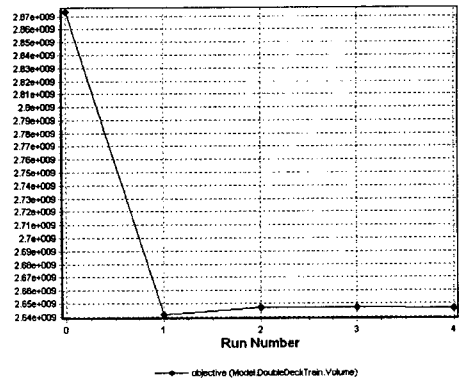


Fig. 12 von Mises stress history of ANSYS model under torsional loading

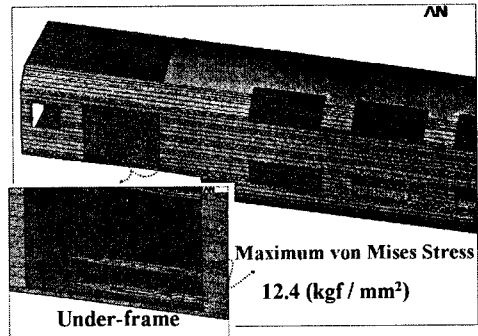


Fig. 13 von Mises stress contour under vertical loading

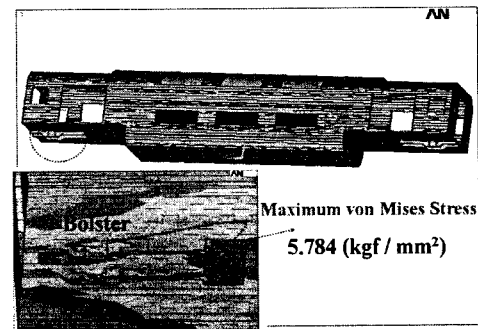


Fig. 14 von Mises stress contour under compressive loading

Fig. 13~15는 각각 최적설계 된 2층열차 차체에 작용하는 수직, 압축, 비틀림 하중에 대한 최대 von Mises 응력을 나타내고 있다.

Table 3은 스크리닝 과정을 통해 선택된 주요 설계변수에 의한 최적화 결과를 초기설계와 비교한 결과이고, Table 4는 설계변수들의 값을 초기 설계 변수 값과 비교한 결과이다.

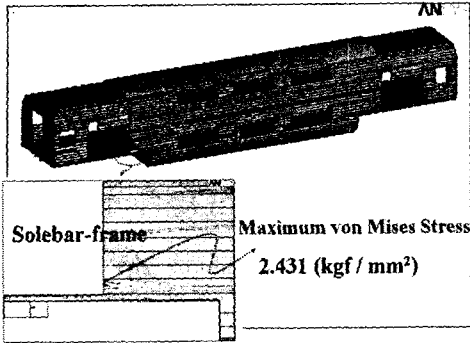


Fig. 15 von Mises stress contour of ANSYS model under torsional loading

Table 3 Results of the design optimization

	Mass (ton)	Vertical stress (kgf/mm <sup>2</sup> )	Compress stress (kgf/mm <sup>2</sup> )	Torsional stress (kgf/mm <sup>2</sup> )
Initial Design	8.052	11.399	5.565	1.323
Design Optimization	7.415	12.400	5.784	2.431

Table 4 Optimum values of design variables

	$b_1$	$b_{17}$	$b_{31}$	$b_{32}$	$b_{33}$
Initial Design	3.0	3.0	7.0	7.0	7.0
Design Optimization	2.50	2.50	3.43	3.00	3.00

앞의 최적설계 결과에서 활성화 제한조건인 수직응력에 대한 제한조건이 허용응력의 경계치에 존재하지만 항복조건과 하중자체에 이미 안전계수가 포함되었기 때문에 2층열차의 안정성을 크게 훼손하지는 않을 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

2층열차와 같이 복잡한 대형설계문제는 설계자의 경험이나 직관에만 의존한 설계개선 방식만으로는 한계가 있다. 본 연구에서는 초기설계가 과잉설계로 판단되는 개발단계의 2층열차 차체의 설계 대형구조문제에 최적설계 방법론을 적용하여 설계자의 경험이나 직관에 의해 설계된 초기설계를 보완할 수 있는 결과를 얻을 수 있었다. 연구

의 내용과 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 표준전동차 하중시험 적용기준에 따른 다중하중조건에 대한 허용응력을 제한조건으로 정의하고 36개의 설계변수로 이루어져 있는 경량 최적화 문제를 정식화 하였다.

(2) 많은 계산비용 때문에 최적설계를 수행하기에 비효율적인 36개의 설계변수로 구성된 최적설계문제를 스크리닝 기법을 적용하여 목적함수와 제한조건에 영향력이 큰 5개의 주요 설계변수들로 이루어진 최적화 문제로 축차 정식화 하여 최적설계를 수행하였다.

(3) 반응표면모델을 이용한 전역민감도를 스크리닝 기법으로 사용하여 주요 설계변수를 효과적으로 선별하였으며 파레토 그림을 통해 선정된 설계변수의 타당성을 판단하였다.

(4) 축차 정식화 된 최적설계의 결과는 3개의 응력 제한조건을 모두 만족하면서 초기 설계에 대해 8.5%의 중량감소를 얻는 개선된 설계안을 얻을 수 있었다.

최근 실제 설계문제에 도입되고 있는 최적설계 문제는 해석모델이 복잡해지면서 상당한 계산비용이 소요되거나 최적화가 불가능한 경우가 발생한다. 따라서 이런 복잡한 문제의 최적설계를 위해서 효율적인 근사모델의 적용을 제안한다.

#### 참고문헌

- (1) Rao, C. R., 1947, "Factorial Experiments Derivable from Combinatorial Arrangements of Arrays," *Journal of the Royal Statistical Society*, Vol. 9, pp.128~139.
- (2) W.J., Hwang, H. J., Kim, H. M., Hur, and B.B., Kang, 2002, "Concept Design and Structural Strength Analysis for Double-Deck Train Carbody using Aluminum Extruded Panels," *Korean Society for Railway spring Annual Meeting*, pp. 364~369.
- (3) Hwang, W. J. and Kim, H. J., 2004, "FEM Results of Double-Deck Train Carbodies," *Korean Society for Railway spring Annual Meeting*.
- (4) Jung, J. J., Hwang, W. J., Kim, H. J. and Lee, T. H., 2005, "Kriging Model-based Design Optimization of Double-deck Train Car-body," *Proceedings of the KSME 2004 Spring Annual Meeting*, pp.1577~1582.
- (5) Hwang, W. J. and Kim, H. J., 2005, "Weight Minimization of a Double-Deck Train Carbody using Response Surface Model," *Korean Society for Railway spring Annual Meeting*.