

# 반응표면 모델을 이용한 2층열차 차체의 경량화 설계

## Weight Minimization of a Double-Deck Train Carbody using Response Surface Method

황원주\*  
Hwang, Won-Ju

김형진\*\*  
Kim, Hyeong-Jin

### ABSTRACT

Weight minimization of double-deck train carbody is imperative to reduce cost and extend life-time of train. It is required to decide 36 thickness of aluminum extruded panels. However, the design variables are too many to tract, moreover, one execution of structural analysis of double-deck carbody is time-consuming. Therefore, we adopt approximation technique to save computational cost of optimization process. Response surface model is used to approximate static response of double-deck carbody. To obtain plausible response surface model, orthogonal array is employed as design of experiment(DOE). Design improvement by approximate model-based optimization is described. Accuracy and efficiency of optimization by using response surface model are discussed.

Keyword : AEP(알루미늄 압출재, Aluminum Extruded Panel), Optimum Design(최적설계), Double-deck Train(2층열차), Response Surface Method(RSM, 반응표면법), Design of Experiment(DOE)

### 1. 서론

2층 열차(double-deck train)는 원형 차량수를 증가시키지 않고, 열차 수송량을 증대시킬 수 있는 장점 때문에 대도시 광역권도망의 차세대 열차로 고려되고 있다. 2층 열차의 개발은 구조해석, 동역학해석, 그리고 피로강도해석과 같은 다양한 학계의 설계요구사항을 통합적으로 고려하는 설계기법이 요구된다. 이러한 설계 고려사항 중에서 구조강도 평가를 통한 차체의 경량화는 필수적인 설계고려 사항 중의 하나이다. 차체 경량화는 제작비용 감소뿐만 아니라 레일과 마퀴사이의 마찰을 감소시킴으로써 차량의 수명을 향상시키고, 소요동력의 감소, 2층 열차의 고속화를 가능케 하는 중요한 설계인자이다.

2층 열차의 경량 설계는 자체를 이루는 다양한 프레임의 재원을 중앙 대비 고강도 재료로 사용함으로써 구현할 수 있다. 이러한 이유로 2층 열차 차체는 알루미늄 합금이 사용되고 있다. 하지만 보다 근본적인 설계방식은 차체에 작용하는 하중을 효과적으로 분배시키는 구조설계를 수행하는 것이다. 이를 위해서는 경험이나 설계자의 직관에 의해 이루어지는 설계 개선 방식에서 벗어나 수학적 정성화를 바탕으로 설계 변경을 수행하는 최적설계 기법(optimum design)이 도입되어야 한다.

2층 열차의 경량 최적설계를 위해서는 차체에 작용하는 응력이 허용응력을 넘어지지 않는 한도 내에서 자체를 이루고 있는 다양한 알루미늄 압출재(aluminum extruded panel: AEP) 두께를 결정해야 한다. 그러나 차체를 구성하는 총 25종의 알루미늄 압출재는 36개의 설계변수로 이루어져 있기 때문에 전통적인 최적설계기법을 적용하는 것은 설계기간과 계산비용을 고려할 때 합리적이지 못한 면이 있다.

따라서 본 연구에서는 최적설계 과정의 계산비용을 절감하기 위해 근사모델(approximate model)을 이용

\* 한국철도기술연구원 연구원, 정회원

\*\* 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원

한 경량화적설계를 수행한다. 근사모델로는 반응표면모델(response surface model: RSM)이 채택되었고, 우수한 예측성능을 가진 반응표면모델을 얻기 위해 직교배열표(orthogonal array)에 의한 실험계획(design of experiment: DOE)이 수행되었다. 반응표면모델을 이용하여 최적화를 수행하고 그 결과의 정확성과 효율성을 살펴본 후, 제안된 설계방법론의 타당성을 검증한다.

## 2. 본 론

### 2.1 2층 열차 차체의 경량최적설계를 위한 문제 정식화

2층 열차 차체의 경량 최적설계를 수행하기 위해서는 먼저 문제 정식화가 이루어져야 한다. 차체 경량화를 위한 최적설계 정식화는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Find } l_1, l_2, \dots, l_{36} \\
 & \text{Minimize } W \\
 & \text{Subject to } \sigma_{\max} \leq \sigma_{\text{allowable}}
 \end{aligned} \tag{1}$$

목적함수(objective function)는 차체의 무게이고, 제한조건(constraint)은 차체에 작용하는 응력이 허용응력 이내로 되는 것이다. 설계변수(design variable)는 차체를 구성하는 총 36개의 알루미늄압출체의 무게이다. Fig. 1은 본 연구에서 고려된 해석모델과 차체 단면을 구성하고 있는 다양한 압출체들을 나타낸다.

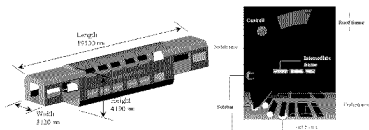


Fig. 1 Analysis model and type of aluminum extruded panels

각각의 압출체는 강성 향상을 위해서 내부에 삼각비드(triangle bead)를 갖는 샌드위치 구조로 설계되었다. Fig. 2는 차체의 단면도와 압출체의 세부적인 형상을 나타낸다.

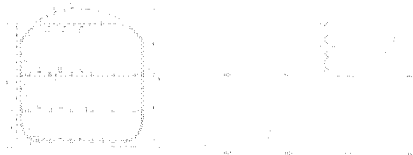


Fig. 2 Cross section of double-deck train and configuration of AEPs

구조해석을 위한 하중조건(loading condition)은 일직 위주의 1층에 대해서; 도시전도하중시위방법에 근거하여 28.3톤의 분포하중이 가해졌고, 좌석 위주의 2층은 국제열도연합의 규약(International Union of railways: UIC)에 의거하여 9.093톤이 가해졌다. 경계조건(boundary condition)으로 자체와 대지가 접하는 부분의 수직 방향 자유도를 고정하였다. Fig. 3: 2층연자의 구조해석을 위한 하중조건과 경계조건을 나타낸다.

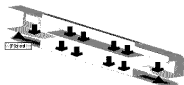


Fig. 3 Loading and boundary condition

2층 연자의 자체; 알루미늄은 합금 A6005A이 사용되었고, 재료의 기계적성질을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Material properties of aluminum alloy

| 재료     | 인장강도<br>( $\text{kgf}/\text{mm}^2$ ) | 항복강도<br>( $\text{kgf}/\text{mm}^2$ ) | 탄성계수<br>( $\text{kgf}/\text{mm}^2$ ) | 포아송비 | 밀도<br>( $\text{kg}\cdot\text{s}^2/\text{mm}^4$ ) |
|--------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|------|--|
| A6005A | 26.5                                 | 21.9                                 | $7.3 \times 10^3$                    | 0.33 | $2.857 \times 10^{-10}$                          |

자체의 실제적인 강도 평가를 위해서 모재(work piece)의 항복강도 21.9 $\text{kgf}/\text{mm}^2$ 와 인장강도의 70% 값인 15.6 $\text{kgf}/\text{mm}^2$  중에서 작은 값을 기준으로 선택하였다. 그러하여 15.6 $\text{kgf}/\text{mm}^2$ 의 기준값에 안전율 1.5를 적용한 12.4 $\text{kgf}/\text{mm}^2$ 를 허용응력으로 채택하였다.

초기설계는 국내 지하철의 차량체계 차수 내에서 전진국의 2층연자를 벤치마킹하여 결정되었다. 총중량은 8.8톤으로 선정되었으며, 구조해설 결과는 손잡문 하단부에서 최대 분자세스응력(von Mises stress) 9.569 $\text{kgf}/\text{mm}^2$ 이 발생하는 것으로 나타났다.

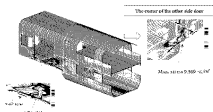


Fig. 4 von Mises contour of initial design

초기설계의 최대 응력 9.569 $\text{kgf}/\text{mm}^2$ 는 허용응력 12.4 $\text{kgf}/\text{mm}^2$ 내에 있으므로 초기 설계는 적절한 설계라고 할 수 있다. 하지만 도시전도하중시위방법에서 하중자체가 승객하중의 3배로 결정되었고 합복

강도에도 이미 안전계수가 포함되었기 때문에 이 초기설계의 결과는 전형적인 과잉설계(redundant design)로 판단할 수 있다. 이러한 결과는 2중 열차의 경량최적설계의 필요성을 다시 한번 말해주는 중요한 근거이다.

## 2.2 근사모형을 이용한 2중 열차 차체의 경량 최적설계

2중 열차 차체의 경량최적설계는 유한요소모형이 상당한 해석시간을 요구하고 설계변수가 많은 대량 설계문제(large-scale design problem)이기 때문에 전통적인 최적설계방법으로 최적결과를 얻는 것은 막대한 계산비용을 요구한다. 왜하면 최적화 과정은 설계변경을 위해 유한요소모형의 반복해석이 필수적이기 때문이다. 예를 들어, 유한차분법(finite difference method; FDM)에 의해 민감도해석이 수행된다고 했을 때, 2중 열차의 최적설계에서 한번의 설계변경(iteration)을 수행하는 데도 74번의 구조해석이 요구된다. 더구나 목적함수와 제한조건이 비선형적일 때는 최적화를 위해 필요한 구조해석의 횟수는 기하급수적으로 증가한다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하고 최적설계 과정의 효율성을 향상시키기 위해 근사모형을 이용한 경량최적설계를 수행한다. 근사모형을 이용한 경량최적설계는 정식화된 최적화 문제에서 목적함수와 제한조건을 실제함수와 유사한 근사모형으로 대체함으로써 계산비용을 줄이고 궁극적으로는 설계최적화를 가능하게 하는데 그 목적이 있다. 앞에서 고려된 설계 정식화 문제는 다음과 같이 중량과 응력에 대한 근사모형  $\hat{W}$ 와  $\hat{\sigma}_{max}$ 으로 대체된다.

$$\begin{aligned} & \text{find } t_1, t_2, \dots, t_{36} \\ & \text{Minimize } \hat{W} \\ & \text{Subject to } \hat{\sigma}_{max} \leq \sigma_{allowable} \end{aligned}$$

본 연구에서는 반응표면모형이 근사모형로 사용되었다. 반응표면모형은 설계변수와 응답함수 사이의 관련성을 규명하기 위해 수학적인 모델을 가정하고, 측정된 데이터로부터 가정된 모델의 계수를 최소자승법으로 추정하는 회귀모델(regression model)이다. 2중 열차 차체의 경량최적설계에서 3차항을 포함한 반응표면모형은 모델 구성을 위한 전산실험(computer experiment) 횟수를 급격히 증가시키기 때문에 1차 반응표면모형만이 고려되었다. 1차 반응표면모형은 실제함수가 다음과 같이 절편과 설계변수들의 선형 조합으로 표현될 수 있다고 가정하는 것이다.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{n_f} \beta_i x_i$$

여기서  $x_i$ 는 설계변수,  $n_f$ 는 설계변수의 개수,  $\beta_0, \beta_i$ 는 최소자승법으로 추정되어야 할 미지의 계수이다.

설계변수가 많은 2중열차 최적설계 문제의 복잡성, 반응표면모형을 생성하기 위한 실험계획법은 전산 실험의 횟수를 줄일 수 있는 일부실험법(fractional factorial design)이 적용되어야 한다. 왜하면 전조합 실험법(full factorial design)은 각 설계변수를 2수준으로 나누어 실험을 한다하더라도  $2^{36}$ 번의 전산실험이 필요한 고가의 실험계획이기 때문이다. 이러한 이유로 본 연구에서는  $L_{72}$ 의 직교매열3(orthogonal array: OA)가 사용되었다.

## 2.3 직교매열표에 의한 반응표면모형의 정작성 검증

반응표면모형을 생성하기 위해 2수준으로 구성된  $L_{72}$ 의 직교매열을 사용하였다. 즉, 72번의 전산실험을

통해 2층 열차의 중량과 최대응력에 대한 데이터를 얻고 반응표면모델로 근사화하였다. 반응표면모델의 정확도를 나타내는 수정결정계수  $R_a^2$ 은 중량과 최대응력에 대해서 각각 0.96274와 0.82254가 나왔다. 이러한 결과는 중량과 최대응력에 대한 근사모델로 반응표면모델이 매우 정확한 예측성능을 나타낸다는 것을 나타낸다. 즉, 최대응력에 대한 반응표면모델은 총변동의 82% 이상을 설명할 수 있는 모델이고, 중량에 대한 반응표면모델의 거의 96%의 설명력을 가지는 모델임을 나타낸다. 이러한 분석은 반응표면모델과 실제 전산실험값을 나타낸 Fig. 5에서도 확인할 수 있다. 직선은 이상적으로 반응표면모델과 실제 전산실험 결과가 일치하는 선을 나타내고, 두 개의 점선은 95% 신뢰대(confidence band)를 나타낸다. 많은 데이터들이 95% 신뢰대 내에 분포하고 있는 것을 확인할 수 있다.

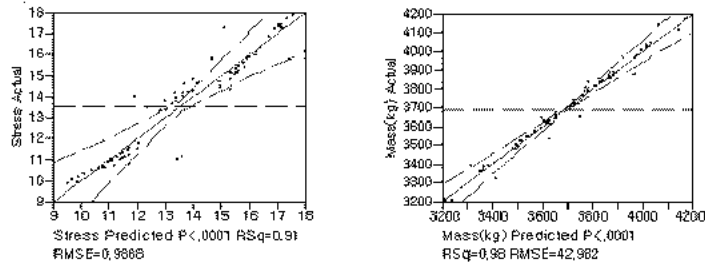


Fig.5 Scatter plot of actual value with respect to response surface model

#### 2.4 반응표면모델을 이용한 최적설계결과

응력과 중량에 대해 정확성이 검증된 반응표면모델을 이용하여 최적설계를 수행하였다. 최적화알고리즘은 SQP가 사용되었으며, 설계변수 36개에 대한 최적해는 Table 2에 나타내었다. 최적해를 살펴보면 모두 36개의 설계변수중에서 skirt frame의 upper/lower 부재, sideframe의 upper/lower부재, solebar frame의 부재의 값이 액티브한 값을 가짐을 확인할 수 있었다. 또한 이러한 근사모델을 이용한 최적설계 결과의 정확성을 검증하기 위하여 최적해로 나온 값에 대해서 실제 구조해석을 수행해 보았다. Table 3에 32개의 최적해를 나타내었다. 그 결과 Table 4에 나타낸 것과 같이 근사모델의 최적해는 실제 구조해석결과와 비교할 때 3.1%의 상대오차를 보이고 있다. Fig. 6은 근사모델 최적해를 이용한 실제구조해석 결과를 나타낸 것이다. 처음 모델의 구조해석에서는 출입문 부위에서 높은 응력이 분포하였는데 최적해를 가지고 구조해석 한 결과는 전반적으로 응력이 다소 줄어든 것을 확인할 수 있었다. 이는 최적화를 통해 압출재의 두께에 변화가 생기면서 집중부위의 응력이 분산되고 해당 부재에 내력이 발생하여 응력을 상쇄시켰기 때문이라 판단된다.

Table 3 RSM의 최적해(단위 : mm)

| 설계 변수 | 최적해      | 설계 변수 | 최적해      | 설계 변수 | 최적해      | 설계 변수 | 최적해      | 설계 변수 | 최적해 |
|-------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|-----|
| d1    | 2.5      | d9    | 2.5      | d17   | 3.512126 | d25   | 2.5      | d33   | 3   |
| d2    | 2.5      | d10   | 2.5      | d18   | 4        | d26   | 2.5      | d34   | 3   |
| d3    | 2.5      | d11   | 2.5      | d19   | 4        | d27   | 2.500082 | d35   | 3   |
| d4    | 2.5      | d12   | 2.5      | d20   | 2.5      | d28   | 3        | d36   | 3   |
| d5    | 2.5      | d13   | 2.5      | d21   | 2.5      | d29   | 3        |       |     |
| d6    | 2.5      | d14   | 3.965213 | d22   | 2.5      | d30   | 3        |       |     |
| d7    | 3.999734 | d15   | 2.67206  | d23   | 4        | d31   | 3        |       |     |
| d8    | 2.5      | d16   | 3.999987 | d24   | 2.5      | d32   | 10       |       |     |

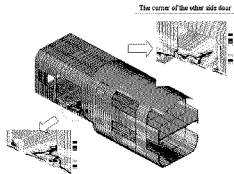


Fig. 6 수직하중해석 결과(RSM 이용, Von-Mises 응력)

Table 4 RSM을 이용한 최적설계값의 비교

|                         | 근사모델 | 실제해석  | 상대오차(%) |
|-------------------------|------|-------|---------|
| 중량(ton)                 | 6.25 | 6.45  | 3.1     |
| 응력(kg mm <sup>2</sup> ) | 12.4 | 12.19 | 1.7     |

### 3. 결론

반응표면모델을 이용한 근사최적설계기법이 2중연차 차체의 경량화를 위해 도입되었다. 정확한 근사모델을 만들기 위해 직교배열표에 의한 설계계획을 수행하였다. 생성한 반응표면모델을 이용하여 최적화를 수행한 결과 6.25 ton의 최적해를 얻었다. 이러한 결과는 초기설계보다 28.9%의 중량감소를 나타내는 우수한 결과이다. 그 최적해는 실제 해석결과와 비교해 분배 중량과 응력이 각각 3.1%와 1.7%의 오차를 나타내었다. 따라서, 본 논문에서 제안한 방법은 최적해를 얻기 위한 구조해석횟수를 획기적으로 줄이면서도 정확한 해를 얻는 방법이라고 할 수 있다.

### 4. 참고문헌

- 한국철도기술연구원, "2중 급행열차 운영을 위한 기술 개발 및 설계기준에 관한 연구", 2001년 건설기술기반구축사업 제3차년도 최종보고서, 2004
- 황원주의 3인, "알루미늄 압출제를 적용한 2중열차 차체의 기초설계 및 구조강도해석", 철도학회논문집, pp364-369, 2002
- 이태희의 2인, "반응표면차 크리깅메타모델을 이용한 CRT 팽창최적설계", 대한기계학회논문집A, 권. 제 27권 3호, pp381 ~ 386, 2003
- 이택성의 2인, "공하해석 소프트웨어의 신기술 동향", 전산구조공학회지, Vol.16, No.4, pp23 ~ 28, 2003
- Timothy W. Simpson, Kriging Models for Global Approximation in Simulation-Based Multidisciplinary Design Optimization, AIAA, Vol.39, No.12, 2001
- Ashok D. Belgundu, "Optimization concepts and applications in engineering", Prentice hall
- Raymond H. Myers, "Response Surface Methodology", WILEY-INTERSCIENCE