

2 층열차 차체의 meta model 기반 최적설계

황원주*(한국철도기술연구원), 정재준(한양대학교), 이태희(한양대학교),
김형진(한국철도기술연구원)

Meta Model-Based Design Optimization of Double-Deck Train Carbody

W. J. Hwang(Rolling Stock Research Dept., KRRI), J. J. Jung(Mechanical Design Dept., HKU),
T. H. Lee(Mechanical Design Dept., HKU), H. J. Kim(Rolling Stock Research Dept., KRRI)

Abstract

Double-deck train have studied in the next generation train in KRRI. Double-deck train have more seat capacities compared with single deck vehicles and is a efficient, reliable and comfortable alternative train. Because of heavy weight, weight minimization of double-deck train carbody is imperative to reduce cost and extend life-time of train. Weight minimization problem of the double-deck train car-body is required to decide 66 design variables of thicknesses for large aluminum extruded panel while satisfying stress constraints. Design variables are too many and one execution of structural analysis of double-deck train carbody is time-consuming. Therefore, we adopt approximation technique to save computational cost of optimization process. Metamodels such as response surface model (RSM) and kriging model are used to approximate model-based optimization is described. RSM is easy to obtain and expressed explicit function, but this is not suitable for highly nonlinear and large scaled problems. Kriging model employs an interpolation scheme and is developed in the fields of spatial statistics and geostatistics. Target of this design is to find optimum thickness of AEP to minimize weight of double-deck train carbody. In this study, meta model techniques are introduced to carry out weight minimization of a double-deck train car-body.

1. 서론

2 층열차는 편성차량수를 증가시키지 않고 열차 수송량을 증대시킬수 있고, 복잡한 출퇴근시 교통체증을 덜어주고, 좀더 나은 서비스를 제공해 줄수 있는 광역철도망의 차세대 열차로 고려되고 있다. 2 층열차의 개발은 구조해석, 동역학해석, 그리고 피로강도해석과 같은 다양한 부분의 설계요구사항을 통합적으로 고려하는 설계기법이 요구된다. 이러한 여러부분의 고려사항중 구조강도평가를 통한 차체의 경량화는 필수적인 고려사항 중의 하나이다. 경량화의 장점은 많이 이야기하지만 단점에 대해서 이야기하는 사람은 없다. 차체의 경량화는 제작비용의 절감뿐만아니라, 레일과 바퀴사이의 일어나는 마찰을 감소시켜 차량과 레일의 수명을 향상시키고 탈선등의 사고를 방지할수 있다. 또한 소음동력의 감소, 그리고 고속화를 가능케하는 중요한 인자라고 할수 있다.

2 층열차의 경량 설계는 차체를 이루는 다양한 부재

에 대하여 중량대비 고강도 재료를 사용함으로써 이룰수 있을 것이다. 그래서, 2 층열차 차체는 알루미늄 합금을 제질로 결정하였다. 하지만 가벼운 재료만으로 경량화를 시도하는 것은 근본적인 경량화를 위한 시도라고 보기 어렵다. 보다 근본적인 방법은 차체에 작용하는 하중을 효율적으로 분배시키는 구조설계를 수행하는 것이다. 이를 위해서는 경험이나 설계자의 직관에 의해 이루어지는 설계 개선 방식에서 벗어나 수학적 정식화를 바탕으로 설계변경을 수행하는 최적설계 기법이 도입되어야 한다.

2 층열차는 총 25 종의 알루미늄 압출재(Aluminum Extruded Panel)로 구성되어진다. 2 층열차 차체의 경량화를 이루기 위해서는 차체에 작용하는 응력이 허용응력을 넘지않으면서 차체를 구성하고 있는 여러가지 부재들의 두께를 결정해야 한다. 그런데 2 층열차 차체는 36 개의 설계변수가 있는데, 전통적인 최적설계 기법을 적용하는 것은 시간과 설계비용을 고려해 볼 때 합리적이지 못하다.

따라서, 본 연구에서는 최적설계 과정의 계산비용을 절감하기 위해서 근사모델을 이용하여 최적설계를 수행하였다. 이와 같이 최적설계 과정에서 긴 해석시간이 소요되는 시뮬레이션 모델을 대체한 모델, 즉 '모델의 모델'을 메타모델(metamodel)이라 부른다. 이러한 메타모델을 이용하여 2층열차 차체의 경량 설계를 위한 최적설계 방법론을 제안한다. 메타모델로서 반응표면 모델(Response Surface model)과 크리깅 모델(Kriging model)을 이용하였다. 반응표면법은 회귀모델이며, 크리깅모델은 보간모델이다. 각각의 모델로 차체 경량화를 위한 최적화를 수행하고 결과의 정확성과 효율성을 평가하여 제안된 설계방식의 장단점을 논의한다.

2. 2층열차 차체의 소개 및 초기설계

2층 열차(double-deck train)는 편성 차량수를 증가시키지 않고, 열차 소용량을 증대시킬 수 있는 장점 때문에 대도시 광역철도망의 차세대 열차로 고려되고 있다. 2층 열차는 기존 열차보다 차체의 중량과 부가적인 장비의 부피가 증가하기 때문에 차체 경량화는 필수적인 설계고려 사항이다. 더욱이 차체의 경량화는 소요동력의 절감뿐 아니라 레일과 바퀴사이의 마찰을 감소시킴으로써 차량의 수명을 향상시키고, 2층 열차의 고속화를 실현하기 위한 필수조건이다.

Fig. 1은 본 연구에서 고려된 해석모델과 차체 단면을 구성하고 있는 다양한 압출재들을 나타낸다.⁽⁵⁾

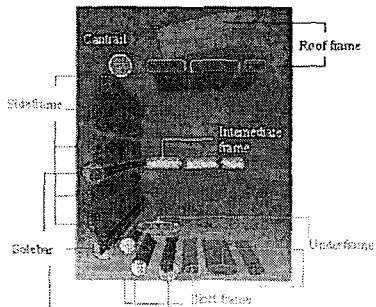
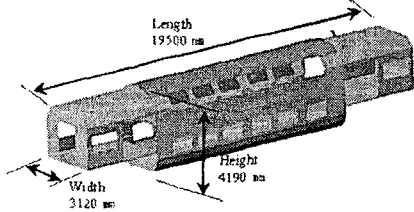


Fig. 1 Analysis model of double-deck train car-body and configuration of aluminum extruded panels

2층열차의 재질로는 경량화를 위해 알루미늄합금이 사용되며 차체를 구성하는 다양한 패널은 알루미늄의 좋은 압출성을 이용하여 제작되기 때문에 다양한 형상을 가진 압출재의 대량 생산이 가능하다. 각각의 압출재는 강성의 향상을 위해서 내부에 삼각비드(triangle bead)를 갖는 이중샌드위치 형태로 설계되었다. Fig. 2는 차체의 단면도에서 압출재의 형상을 나타낸다.

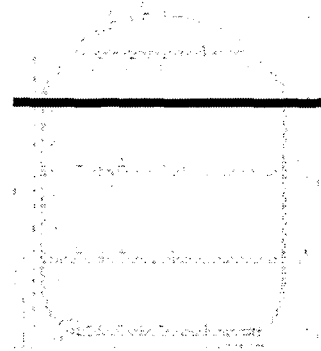


Fig. 2 Cross section of double-deck train car-body

구조해석을 위한 하중조건은 입석 위주의 1층에 대해서는 도시철도하중시험방법에 근거하여 28.3톤의 분포하중이 가해졌고, 좌석 위주의 2층은 국제철도연합의 규약(UIC)에 의거하여 9.093톤이 가해졌다. 경계조건으로는 차체와 대차(bogie)가 접하는 부분의 수직 방향 자유도를 고정하였다. Fig. 3은 2층열차의 구조해석을 위한 하중조건과 경계조건을 나타낸다.

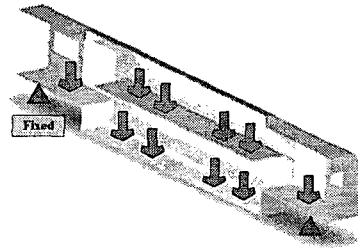


Fig. 3 Loading condition and boundary condition

차체의 재원은 알루미늄 합금 A6005A이 사용되었고, 그 물성치는 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Material properties of A6005A

Material	A6005A
Tensile strength (kgf/mm ²)	26.5
Yield strength (kgf/mm ²)	21.9
Young's modulus (kgf/mm ²)	7300
Poisson's ratio	0.33
Density (kgf s ² /mm ²)	2.857×10 ⁻¹⁰

안정성을 고려한 차체의 강도 평가를 위해서는 재료의 항복강도 21.9 kgf/mm²와 인장강도의 70%인 18.6 kgf/mm² 중에서 작은 값을 기준값으로 채택하는 것이 선호된다. 이 기준값 18.6 kgf/mm²에서 안전율 1.5를 적용하여 12.4 kgf/mm²가 허용응력으로 채택되었다.

초기설계는 국내 지하철의 차량한계 치수 내에서 선진국의 2층열차를 벤치마킹하여 결정되었다. 구조해석 결과, 총중량은 8.8톤으로 산정되었으며 출입문 하단부

에서 최대 von Mises 응력(von Mises stress) 9.569 kgf/mm²이 발생하는 것으로 나타났다.

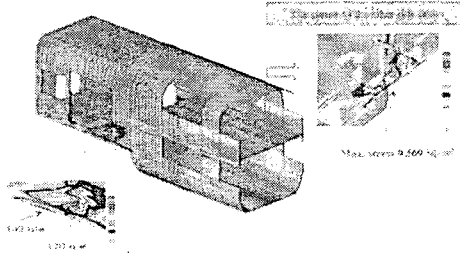


Fig. 4 Von Mises stress contour of initial design

최대응력이 발생하는 위치와 관련된 압출재는 Under-frame 과 Sole-bar 이다. Under-frame 은 분포하중이 직접적으로 작용하고 있는 부분이고, Sole-bar 는 Side-frame 과 Under-frame 을 연결하는 부재이다.

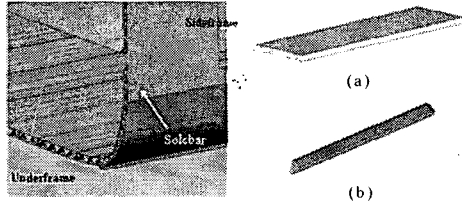


Fig. 5 Aluminum extruded panel related to the location where maximum stress happens: (a) Under-frame and (b) Sole-bar

초기설계의 최대응력 9.569 kgf/mm² 은 허용응력 12.4 kgf/mm² 보다 작으므로 초기설계는 적절한 설계라고 판단된다. 하지만 도시철도표준사양에서 하중자체가 승객 하중의 3 배로 책정되었고, 허용응력 또한 안전계수 효과가 포함되어 있기 때문에 이러한 초기설계의 결과는 전형적인 과잉설계(redundant design)으로 판단된다. 이러한 결과는 2 층 열차의 경량최적설계의 필요성을 다시 한번 말해주는 좋은 근거라고 할 수 있다.

3. 메타 모델

3.1 RMS 모델

반응표면방법(Response Surface Methodology)이란 설계자가 관심을 가지고 있는 반응과 설계 인자들의 관계를 근사적으로 모델링하고 개선 및 최적화하기 위한 유용한 수학적, 통계적 기술들의 집합이라 정의하고 있다. 반응표면모델은 설계변수와 응답함수 사이의 관련성을 규명하기 위해 수학적인 모델을 가정하고, 측정된 데이터로부터 가정된 모델의 계수를 최소자승법으로 추정하는 회귀모델(regression model)이다. 2 층 열차 차체의 경량최적설계에서 고차항을 포함한 반응표면모델은 모델 구성을 위한 전산실험(computer experiment) 횟수를 급격히 증가시키기 때문에 1 차 반응표면모델만이 고려되었다. 1 차 반응표면모델은 실제함수가 다음과 같이 절편과 설계변수들의 선형조합으로 표현될 수 있다고 가정하는 것이다.

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

여기서 x_i 는 설계변수, n_d 는 설계변수의 개수, β_0, β_i 는 최소자승법으로 추정되어야 할 미지의 계수이다.

3.2 크리깅 모델

크리깅 모델은 광물자원의 분포와 같은 지질학적 데이터에 대한 분석과 공간자료의 연관관계를 규명하기 위해서 개발된 지질통계학적 모델이다. 이러한 크리깅 모델은 Sacks 에 의해 비선형적인 전산응답을 효과적으로 표현하기 위한 전산실험(computer analysis and computer experiment: DACE)모델로서 공학 분야에 처음으로 적용하였다.⁽³⁾

크리깅 모델은 평균에 해당하는 전역모델 $\mathbf{f}(\mathbf{x})^T \boldsymbol{\beta}$ 와 이것으로부터의 편차를 의미하는 $\mathbf{z}(\mathbf{x})$ 의 합으로 표현할 수 있다고 가정한다.

$$y(\mathbf{x}) = \mathbf{f}(\mathbf{x})^T \boldsymbol{\beta} + z(\mathbf{x}) \quad (1)$$

여기서 $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ 는 설계자가 정의하는 설계변수로 이루어진 회귀함수 벡터이며, $\boldsymbol{\beta}$ 는 미지의 계수이다. $\mathbf{z}(\mathbf{x})$ 는 평균이 0 이고 공분산이 식 (2)와 같이 정의되는 확률과정(stochastic process)을 통해 구현된다.

$$\text{Cov}[z(\mathbf{x}^i), z(\mathbf{x}^j)]_{(1 \leq i \leq n) \times (1 \leq j \leq n)} = \sigma^2 \mathbf{R} \quad (2)$$

여기서 σ^2 는 $y(\mathbf{x})$ 가 정규분포라고 가정할 때 $y(\mathbf{x})$ 의 분산이며, \mathbf{R} 은 두 해석점 \mathbf{x}^i 와 \mathbf{x}^j 사이의 상관관계를 나타내는 상관행렬(correlation matrix)로 다음과 같이 정의한다.

$$\mathbf{R} = [R(\mathbf{x}^i, \mathbf{x}^j, \boldsymbol{\theta})]_{(1 \leq i \leq n) \times (1 \leq j \leq n)} = \left[\exp\left(-\sum_{k=1}^{n_d} \theta_k (x_k^i - x_k^j)^2\right) \right]_{(1 \leq i \leq n) \times (1 \leq j \leq n)} \quad (3)$$

여기서 n_d 는 설계변수 개수이고, 미지수 $\theta_k (k=1, 2, \dots, n_d)$ 는 해석점들간의 상관도를 결정하는 상관계수이다.

n 개의 해석점에 대한 시뮬레이션 응답값들을 $\mathbf{Y} = [y(\mathbf{x}^1), y(\mathbf{x}^2), \dots, y(\mathbf{x}^n)]^T$ 라고 하면 식 (1)에 의해 다음과 같은 식이 성립한다.

$$\mathbf{Y} = \mathbf{F}\boldsymbol{\beta} + \mathbf{Z} \quad (4)$$

여기서 \mathbf{F} 와 \mathbf{Z} 는 각각 다음과 같다.

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}(\mathbf{x}^1)^T \\ \mathbf{f}(\mathbf{x}^2)^T \\ \vdots \\ \mathbf{f}(\mathbf{x}^n)^T \end{bmatrix} \quad \mathbf{Z} = \begin{bmatrix} z(\mathbf{x}^1) \\ z(\mathbf{x}^2) \\ \vdots \\ z(\mathbf{x}^n) \end{bmatrix} \quad (5)$$

크리깅모델은 이들 데이터들로 생성되는 선형예측량(linear predictor)으로 다음과 같이 표현된다.

$$\hat{y}(\mathbf{x}) = \mathbf{c}(\mathbf{x})^T \mathbf{Y} \quad (6)$$

크리깅모델을 구한다는 것은 평균제곱오차(mean squared error: MSE)를 최소로 하는 최량비편향 예측량

(best linear unbiased predictor)을 구한다는 의미이다. 즉,

$$\min E[(\hat{y}(x) - y(x))^2] \quad (7)$$

이때 비편향조건은 다음과 같다.

$$E[\hat{y}(x)] = E[y(x)] \quad (8)$$

식 (6)의 $c(x)$ 를 구하는 것은 식 (8)을 제약조건으로 하는 식 (7)의 최소화 문제이므로 라그랑지안 승수 정리(Lagrangian multiplier theorem)를 이용하여 풀고 그 결과를 식 (6)에 대입하면 크리깅모델은 다음과 같이 유도된다.^(3,4)

$$\hat{y}(x) = f(x)^T \hat{\beta} + r(x)^T R^{-1}(Y - F\hat{\beta}) \quad (9)$$

여기서 $\hat{\beta}$ 는 일반최소제곱추정량(generalized least square estimator)으로 $\hat{\beta} = (F^T R^{-1} F)^{-1} F^T R^{-1} Y$ 로 표현된다. $r(x)$ 는 예측점(prediction point)과 해석점들간의 상관관계를 나타내는 상관벡터(correlation vector)로 식 (3)을 이용하여 나타내면 아래와 같다.

$$r(x) = \begin{bmatrix} R(x, x^1) \\ R(x, x^2) \\ \vdots \\ R(x, x^n) \end{bmatrix} \quad (10)$$

식 (2)의 모수인 분산은 일반화된 최소제곱법을 이용하여 n 개의 데이터들로 추정된 분산(estimated variance)으로 대체할 수 있다.

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{(Y - F\hat{\beta})^T R^{-1}(Y - F\hat{\beta})}{n} \quad (11)$$

크리깅모델을 나타내는 식 (9)에서 유일한 미지수는 식 (3)의 상관계수 θ_k 이며 이것은 전역최적화 과정인 최우량추정법(maximum likelihood estimateon: MLE)에 의해 구한다. 일반적으로 상관계수는 함수의 특성과 제약조건의 범위에 따라 다양한 전역최적해를 가질 수 있다. 본 연구에서는 응답의 정규화를 통해 경험적 연구에서 얻은 최적화 범위를 사용하였으며, 로그 우량함수와 등가인 다음과 같은 우량함수를 이용하였다.

$$\begin{aligned} \text{Maximize } L(\theta) &= -|R|^{1/n} \hat{\sigma} \\ \text{subject to } 0 < \theta_k &\leq 5, \quad k = 1, 2, \dots, n_d \end{aligned} \quad (12)$$

3.3.2 층열차 차체의 경량화문제 정식화

2 층열차 차체의 경량 최적설계를 위해서는 차체에 작용하는 응력이 허용응력을 넘어서지 않는 한도 내에서 차체를 이루고 있는 다양한 알루미늄 압출재(aluminum extruded panel: AEP) 두께를 결정해야 한다. 2 층열차 차체의 경량최적설계는 다음과 같이 정식화할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{find } & d_1, d_2, \dots, d_{36} \\ \text{Minimize } & W \\ \text{Subject to } & \sigma_{\max} \leq 12.4 \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 d_i 는 알루미늄압출재의 두께, W 는 중량(kg), σ_{\max} 는 차체에 작용하는 최대응력(kgf/mm²)을 나타낸다.

3.4 반응표면모델을 이용한 최적화

앞서 설명한 반응표면모델이 우수한 예측성능을 가지려면 적합한 실험계획법이 수행되어야 한다. 실험계획법

으로는 직교배열표가 사용되었으며 L_{72} 직교배열을 바탕으로 반응표면모델을 생성하였다. 가정한 반응표면모델의 타당성은 분산분석을 통해 계산된 결정계수 R^2 를 이용하여 검증한다. 분산분석 결과, 응력과 중량에 관한 반응표면모델의 결정계수가 각각 0.91과 0.98로 나왔다. 이러한 결과는 반응표면모델이 데이터에 대한 총변동의 90%이상을 설명할 수 있는 매우 정확한 모델임을 나타낸다. 이러한 분석은 반응표면모델과 실제 전산실험값을 나타낸 Fig. 6에서도 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.

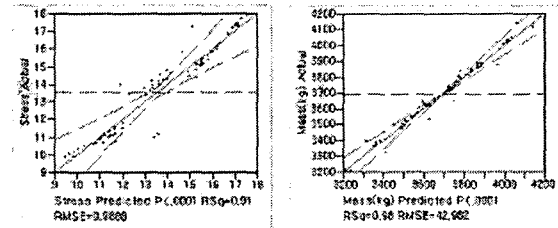


Fig. 6 Scatter plot of actual value with respect to response surface model

3.5 크리깅모델을 이용한 최적화

크리깅 모델을 적용하기에 앞서 많은 설계변수를 줄이기위해서 응력과 중량의 변화에 실질적으로 영향력이 있는 변수들만을 선별하였다. 이를 위해 앞에서 언급하였던 L_{72} 직교배열을 바탕으로 반응표면모델을 생성하고 반응표면모델의 전역민감도와 파레토 그림을 이용하여 주요 설계변수를 선정하는 스크리닝(screening)기법도 도입되었다. Fig. 7은 응력에 대한 전역민감도 그림을 나타낸다. 대부분의 설계변수들은 응력의 변화에 많은 영향을 미치지 못하고, $d_1, d_{17}, d_{18}, d_{31}, d_{32}$ 의 설계변수들만이 응력과 관련된 주요 설계변수임을 알 수 있다. 이러한 결과는 스크리닝의 필요성을 명확하게 보여주는 것이라고 할 수 있다.

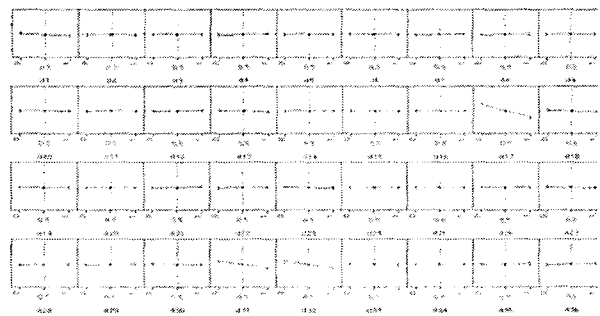


Fig. 7 Global sensitivity of stress with respect to design variables

Fig. 8 은 중량에 대한 전역민감도 그림을 나타낸 것이다. $d_1, d_{17}, d_{31}, d_{32}, d_{33}, d_{34}, d_{35}$ 의 설계변수들이 중량에 대한 주요설계변수들로 파악되었다.

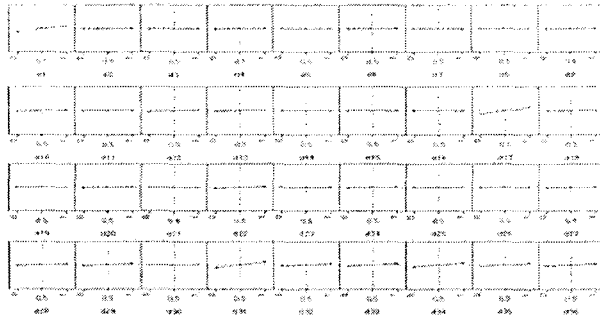


Fig. 8 Global sensitivity of mass with respect to design variables

지금까지의 결과를 바탕으로 응력과 중량 감소를 위해 우선적으로 선택될 수 있는 설계변수들은 총 8 개이다. 이들 설계변수 중에서 상충관계(trade-off)가 존재하여 세부적인 치수를 정하는 것이 필요한 설계변수들은 $d_1, d_{17}, d_{31}, d_{32}, d_{33}$ 이다. 설계변수 1 번은 Under-frame 의 상하 부재의 두께이며, 17 번은 Side-frame 의 상하 부재의 두께, 그리고 31, 32, 33 번은 각각 Solebar-frame 의 세로, 가로, 대각선 부재의 두께를 나타낸다.

앞에서 선택한 주요 설계변수들의 타당성은 파레토 그림에서 판단할 수 있다. 즉, 반응표면모델에서 각 설계변수에 대한 계수의 절대값이 클수록 그 설계변수는 응답에 대한 변동을 설명하는데 더 중요한 변수라고 볼 수 있다. Fig. 8 에서 전체 설계 변수 중, 5 개의 설계변수가 차지하는 비율은 응력과 중량에 대해 각각 90%와 50% 이상을 차지한다. 따라서 스크리닝 과정을 통해서 선별된 5 개의 설계변수들은 충분한 근거를 가진다고 판단된다.

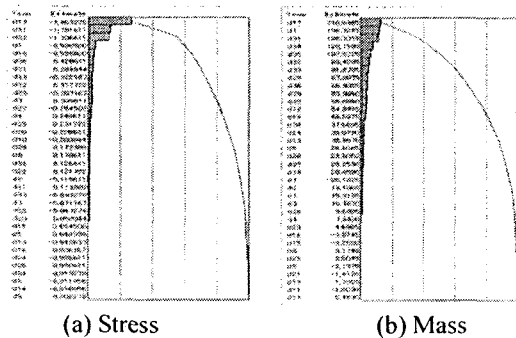


Fig. 9 Pareto Plot

주요 설계변수들은 강한 상충관계가 존재하기 때문에 최적설계 과정에서 상세한 치수를 정하기 위해 반응표면모델보다 국부적인 정확성이 뛰어난 근사모델이 필요하다. 본 연구에서는 이러한 이유로 크리깅모델이 상세설계를 위한 근사모델로 채택되었다. 크리깅모델은 반응표면모델과 달리 보간모델(interpolation model)이기 때

문에 설계영역을 고르게 채우는 전산실험계획법이 필요하다. 이러한 이유로 본 연구에서는 최대엔트로피 샘플링기법이 적용되었다. 최대엔트로피 샘플링은 상관행렬의 행렬식을 최대화하는 샘플점을 얻는 최적샘플링(optimality sampling)방법이다. 5 개의 주요설계변수들에 대해 새롭게 42 개의 최대엔트로피 샘플링이 수행되었다. 이때 42 개의 전산실험 횟수는 5 개의 설계변수를 가지고 2 차 반응표면모델을 생성할 때 필요한 샘플점의 수 ($6 \times 7 / 2 = 21$) 의 2 배에 해당한다.

한편 선별된 주요 설계변수들을 제외한 다른 설계변수들은 응력의 전역민감도를 이용하여 하한치와 상한치 또는 중앙값으로 설정되었다. 즉, 응력에 대한 전역민감도가 음수이고 중량에 대한 설계변수의 민감도가 양수이면, 이 설계변수는 상충관계가 존재하므로 중앙값으로 설정한다. 반면 응력에 대한 전역민감도가 양수이고 중량에 대한 설계변수가 양수가 되면, 응력과 중량감소를 위한 설계경향성에 따라 하한치로 설정한다.

따라서 크리깅모델을 이용한 차체의 경량 최적화문제는 다음과 같이 정식화 할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{find } d_1, d_{17}, d_{31}, d_{32}, d_{33} \\ & \text{Minimize } \hat{W} \\ & \text{Subject to } \hat{\sigma}_{\max} \leq 12.4 \end{aligned} \quad (15)$$

4. 최적화 결과

4.1 반응표면모델을 이용한 최적설계결과

응력과 중량에 대해 정확성이 검증된 반응표면모델을 이용하여 최적설계를 수행하였다. 최적화알고리즘은 SQP 가 사용되었으며, 설계변수 36 개에 대한 최적해를 구하였다. 최적해를 살펴보면 모두 36 개의 설계변수 중에서 skirt frame 의 upper/lower 부재, sideframe 의 upper/lower 부재, solebar frame 의 부재의 값이 액티브한 값을 가짐을 확인할 수 있었다. 또한 이러한 근사모델을 이용한 최적설계의 정확성을 검증하기 위하여 최적해로 나온 값에 대해서 실제 구조해석을 수행해 보았다. 그 결과 근사모델의 최적해는 실제 구조해석결과와 비교할때 3.1%의 상대오차를 보이고 있다. Fig. 10 은 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.

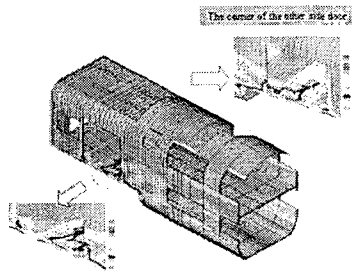


Fig. 10 von Mises contour of optimum design(RSM)

4.2 크리깅모델을 이용한 최적설계결과

Table 2 는 직교배열과 반응표면모델의 전역민감도를 이용하여 설계경향성만으로 설계 개선을 수행한 결과와 주요 설계변수들을 가지고 크리깅모델을 생성한 후 최적화를 수행한 결과를 나타낸다. 크리깅모델을 이용한 경량최적화 결과는 초기중량의 27.3%를 개선하는 효과를 보였다. 이러한 결과는 직교배열과 반응표면모델을 이용하여 대략적인 최적해를 찾고 주요 설계변수들에 대해서는 크리깅 모델을 이용하여 상세최적설계를 수행한 결과이다. Fig. 11 는 크리깅모델을 이용하여 구해진 최적해로 실제 구조해석을 수행한 결과를 나타낸다.

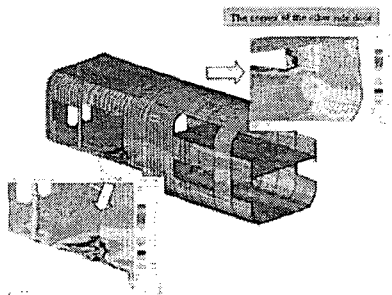


Fig. 11 von Mises contour of optimum design(kriging)

2 층열차의 실제 총중량은 6270(kg), 최대 본미세스 응력은 12.7 kgf/mm²으로 나타났다. 총중량과 최대 본미세스 응력의 상대오차는 각각 0.3%와 2.36%의 오차를 보이지만 중요한 것은 제한조건이 위배되었다는 사실이다. 그러나 항복조건과 하중자체에 이미 안전계수가 포함되었기 때문에 이러한 제한조건의 위배는 2 층열차의 안정성을 크게 훼손하지는 않는다고 판단된다. Table 2 에 RSM 과 kriging 모델의 최적화의 결과를 정리하여 나타내었다.

Table 2 Result of the proposed design methodology

	Mass (kg)	Stress (kgf/mm ²)
Initial design	8800	9.569
Design by using global sensitivity	6678	12.253
Optimum design by RSM	6250	12.4
Optimum design by kriging	6250	12.400

5. 결론

설계변수가 많고 해석시간이 오래 걸리는 최적설계 문제를 효과적 풀 수 있는 근사모델 기반 최적설계방법론을 제안하였다. 반응표면모델과 크리깅모델을 이용하여 이층열차의 두께를 최적화하고 경량화를 꾀하였다. 반응표면법에서는 직교배열표를 이용하여 응력과 중량에 대해 정확성이 검증된 반응표면모델을 구하고 최적설계를 수행하였다. 최적화알고리즘은 SQP 가 사용되었으며, 설계변수 36 개에 대한 최적해를 구하였다. 모두 36 개의 설계변수중에서 skirt frame 의 upper/lower 부재, sideframe 의 upper/lower 부재, solebar frame 의 부재의 값이 액티브한 값을 가짐을 확인할 수 있었다. 이는 실제 해석모델과 3.1%의 오차를 가지는 신뢰성이 있는 RSM 모델이었다. 또한 설계변수의 수를 줄이기 위해 앞서 수행한 직교배열표와 반응표면모델을 이용하여 주요 설계변수를 효과적으로 선별하였다. 목적함수와 제한조건에 영향력이 큰 설계변수들로 이루어진 최적화 문제는 크리깅모델을 이용하여 최적설계 결과를 도출하였다. 그 결과, 초기 설계에 대해 27.3%의 중량감소를 얻는 우수한 설계안을 얻었다. 하지만 근사모델이 제한조건의 경계를 정확하게 근사화하지 못하여 최적결과가 제한조건을 다소 위배하는 결과를 낳았다. 따라서 향후 경량설계로 생길 수 있는 안정성의 저하를 합리적으로 고려하기 위해 근사모델의 정확도를 높이는 한편, 압출재의 제작과정과 설계과정에서 생길 수 있는 불확실성을 고려한 신뢰성기반 최적설계를 수행하여야 할 것이다.

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) Shewry, M.C. and Wynn, H.P., 1987, "Maximum entropy sampling," Journal of Applied Statistics, Vol. 14, No. 2, pp. 165~170.
- (3) Sacks, J., Welch, W.J., Mitchell, T. J. and Wynn, H.P., 1989, "Design and Analysis of Computer Experiments," Statistical Science, Vol. 4, No. 4, pp. 409~435.
- (4) T.H., Lee and J.J., Jung, 2005, "Generalized Kriging Model for Intepolaton and Regression," Trans. of KSME, Vol. 29, No. 2, pp.277~283.
- (5) W.J., Hwang, H.J., Kim, H.M., Hur, B.B., Kang, 2002, "Concept Design and Structural Strength Analysis for Double-Deck Train Carbody using Alluminum Extruded Panels," 철도학회 춘계 학술대회논문집, pp. 364~369.