

반응표면법에 의한 승강장 안전문(PSD) 부재의 최적화

Optimization of the Passenger Safety Door(PSD) Part using Response Surface Method

이 재 환†

김 진 호*

Lee, Jaehwan

Kim, Jinho

(논문접수일 : 2008년 10월 6일 ; 심사종료일 : 2009년 2월 3일)

요 지

본 논문에서는 승객 보호용으로 지하철 역사에 설치된 PSD(승강장 스크린 도어)의 상부 헤더박스 내에 부착되어 개폐용 유리문을 지지하는 알루미늄 구동(레일)부재에 대한 구조해석과 최적설계를 수행하였다. 구동부재의 볼트 체결부에 대한 엄밀한 구조해석을 위하여 물리적 현상과 일치하도록 상세 유한요소 모델링하여 해석의 정확도를 높였다. 또한 유리문이 구동부재에 걸려 있으면서 개폐될 때 발생하는 하중의 이동상태를 고려한 구조해석 결과, 설계 목표치인 내구 수명 20년이 만족되었다. 구동부재 단면의 단면 길이를 설계변수로 하고 설계제약조건(응력의 최소화, 중량의 감소)에 만족할 수 있도록 반응표면법을 적용한 최적화를 수행하여 15%의 감량 결과를 도출하였다.

핵심용어 : 승강장 스크린 도어, 알루미늄 구동부 부재, 유한요소해석, 피로수명, 반응표면법, 최적설계

Abstract

In this paper, the structural analysis and optimization of the door supporting rail structure in the header box located at the top of the aluminum passenger safety door(PSD) at the subway station, which opens and closes regularly, is performed. In case the simple fixed boundary condition is used for the bolt fixture on the supporting rail where the glass door is moving, excessive stresses are obtained. Therefore, more realistic finite element modeling of the bolts is used at the bolt fixture in the whole structure in order to obtain the more physically acceptable FEM results. As a result, fatigue life of twenty years of the structure is obtained to satisfy the design object. Also the optimal design of cross section of the rail part is performed using the response surface method and 15% of weight of the supporting rail part on the door is reduced.

Keywords : platform screen door, aluminium alloy, finite element analysis, response surface method, optimal design

1. 서 론

그림 1의 승강장 스크린 도어(Platform Screen Door : PSD)는 차량이 정거장에 진출입시, 신호를 전달받아 차량의 출입문과 동시에 개폐되는 안전문 시스템으로 승객을 보호하고 신속한 운행으로 효과적인 운송력을 확보할 수 있다. 영국에서 처음으로 도입한 이래 프랑스·일본·홍콩 등의 지하철도 역에서 적용하고 있으며, 우리나라에서는 2004년 개통된 광주지하철 1호선에 최초로 설치되어 운영되고 있다.

스크린 도어의 반복되는 개폐 하중에 의해 가장 영향을 받는 부분은 헤더박스 내부이고 열차의 진입 시 발생하는 풍압은 안전문의 기동부가 지지하고 있다. 헤더박스 내부에는 안전문이 매달려 있는 구동부 레일이 있고, 이 구동부 레일에는 구동장치와 유리문의 무게가 전동차의 개폐(배차)간격으로 작용한다. 이러한 주기적 하중조건에서는 피로파괴가 발생하므로 낮은 응력 레벨에서 파손이 일어날 수 있다. 따라서 반복 하중조건을 반영하여 구조해석을 수행, 안전성을 검토할 필요가 있으며 해석결과를 바탕으로 구조물이 원하는

† 책임저자, 정회원 충남대학교 · 항공우주선박해양공학부 교수
Tel: 042-821-6624 ; Fax: 042-823-5437

E-mail: jaelee@cnu.ac.kr

* 충남대학교 대학원 선박해양공학전공

· 이 논문에 대한 토론을 2009년 4월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2009년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

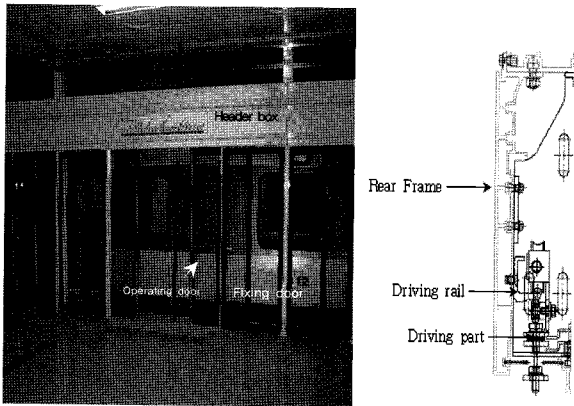


그림 1 승강장 안전문(PSD)과 헤더박스 내부

특성을 갖고 동시에 최소 무게 또는 최대의 목표에 부합할 수 있도록 최적설계를 수행할 필요도 있다(이재환 등 2004; 2007; 정태환 2000).

2. PSD 구동부 구조해석

헤더박스의 경우 각각의 부품들이 볼트로 조립되어 있다. 유한요소법에 의한 구조해석시, 볼트 체결부를 단순히 고정된 지지 조건으로 할 경우 정확하지 않은 응력값이 산출된다. 즉, 물리적 현상과 일치하는 엄밀한 모델링을 하지 않으면 정확한 해석 결과를 얻지 못하는 잘 알려진 사실이다. 본문에서는 볼트 체결부를 3차원 요소로 사용하여 구조해석에 적용하였다. 볼트 모델링시 ANSYS의 프리프로세서 보다 전문적인 3D CAD 프로그램 CATIA를 이용하여, 헤더박스가 결합되어 있는 상태를 그림 2와 같이 실제처럼 모델링 하였다. 구조해석용 ANSYS/Workbench는 타 CAD 프로그램 파일의 기하학적 형상에 대해 자동으로 절점과 요소를 생성을 해주는데 부피를 가지고 있는 형상이라면 절점의 수가 많은 3차원 솔리드 요소로 생성을 해준다. 3차원 요소로 된 볼트와 구동부레일 연결부는 상호간 미끄럼을 무시하고 요소가 접촉된 조건을 적용하였다.

스크린 도어가 닫혀 있을때 구동부와 유리와 프레임이 포함된 문의 무게인 600N을 4곳으로 분산하여 그림 3의 화살표와 같이 하중조건(Force 1, 2, 3, 4)으로 하였고, PSD가 대칭구조이므로 1/2만 모델링을 하고, 대칭부분에 경계 조건을 부여하여 길이 방향으로의 변위를 고정시켰다.

응력해석의 주된 관심 부위는 레일이 매달려 움직이는 알루미늄 레일부분이다. 그림 3과 같이 문의 구동부가 매달려 움직이는 레일이 헤더박스에 고정되는 접속부분의 볼트를 단순히 고정지지점으로 한 경우(그림 3(a)) 하중이 이곳에 집중하므로 접속점에 310MPa의 과도한 응력이 발생하였다. 접속점을 제외한 헤더박스 대부분은 대개 114MPa 수준이

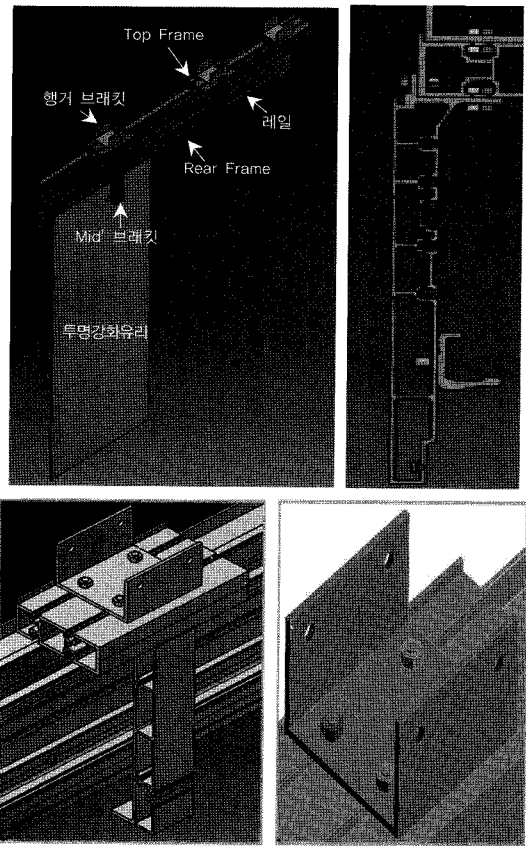


그림 2 PSD 상부에 위치한 헤더박스의 3D 모델링

다. 그러나 그림 3(b)의 경우, 볼트를 직접 모델링하여 해석한 경우에는 볼트 접합부 부근의 최대 응력은 약 75.7MPa으로 알루미늄 합금의 항복응력(270MPa)이하로 안전하다고 할 수 있다.

또한, 스크린 도어의 개폐시 문이 이동함으로써 하중의 위치가 변경되는 상황에 대한 구조의 응력도 살펴 볼 필요가 있기 때문에, 다음과 같은 상태에서의 구조해석을 추가하였다.

- 지하철 역사 6곳에서 측정한 값을 토대로 평균 개폐시간은 2초 정도.
- 스크린 도어가 정지해 있는 순간(0초)부터 완전히 개폐되는 순간(2초)까지를 5단계로 나누어 각 단계마다 문의 구동부 바퀴가 지나가는 위치(구동부 레일상)에 하중 조건을 정함.

이와 같이 개폐 중간의 응력상태는 표 1과 같이 시간별로 항복응력 이하로 응력이 발생하고 있다. 발생 최대응력 중 가장 큰 값인 131.14MPa을 토대로 ANSYS에서 제공하는 알루미늄 S-N 선도 기본 데이터와 Goodman식을 사용하여 피로수명을 산출하였는데 80만회가 산출되었다. 이는 스크린 도어가 10분 간격으로 작동하는 지역의 경우, 하루 평균 108회(6회/1시간×16시간) 반복한다고 할 때, 약 20년 정도에 해당하는 횟수로 설계 목표치를 달성하고 있다.

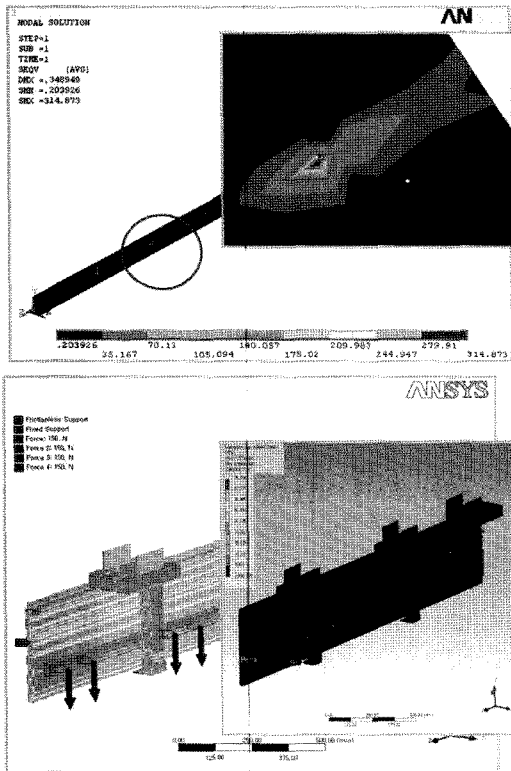


그림 3 안전문 헤더박스의 응력 (a)와 (b)

표 1 하중상태에 대한 최대응력

시 간(초)	발생 최대응력(MPa)
0	131.14
0.5	126.52
1	125.83
1.5	126.11
2	128.71

3. 반응표면법

3.1 반응표면 모형의 설정

만일 부재의 치수(독립변수)가 발생하는 응력(종속변수)에 영향이 있다고 한다면, 그 다음으로 고려해야 할 문제는 “독립변수의 어떤 값에서 종속변수 값이 최대 혹은 최소를 가질 것인가?” 일 것이다. 몇 가지 경우에 대해서만 해석이 이루어진다고 했을 때 해석에 포함되지 않은 나머지 조건들 가운데에서 그 최적점이 존재할 가능성도 있기 때문에 이러한 문제점을 해결하기 위해 실험계획법 중의 하나인 반응표면법(Response Surface Method : RSM)(박성현, 2006; 박찬경, 2000; 박홍선, 2001; 염기선 등, 2001; 이우선, 1999; 홍경진 등 2000)을 이용하여 최적설계를 하였다. 반응표면법은 종속변수의 값이 독립변수들의 영역 내에서 평면

또는 곡면의 모습을 가지고 있다는 가정을 함으로써 최적의 조건을 예측할 수 있게 해준다.

반응함수로서 일반적으로 가정되는 간편하고 실용적인 반응표면모형은 k 개의 독립변수에 대한 중회귀모형(multiple regression model)이다. 이 가정은 독립변수들의 모든 값에서 만족할 필요는 없으며, 흥미영역에서만 만족하면 된다. 독립변수 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$ 를 식 (1)과 같이 선형변환시켜 새로운 독립변수 x_1, x_2, \dots, x_k 를 정의한다.

$$x_i = \frac{\xi_i - \xi_{0i}}{c_i} \tag{1}$$

식 (1)에서 ξ_{0i} 는 보통 ξ_i 의 측정된 값들의 평균치로 취하고, c_i 는 x_i 의 값을 간단하게 해주는 상수이며, x_i 의 값을 -1에서 +1 사이에 되도록 정해준다.

3.2 최적반응조건의 결정

어떤 흥미영역에서 2차 회귀모형이 적절할 것이라고 생각하여 η 의 측정치를 y 로 놓으면, 그 모형은

$$\eta = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i \leq j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \tag{2}$$

으로 가정되며, 최소제곱법에 의하여 적합화된 반응표면(fitted response surface)은

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \sum_{i=1}^k \hat{\beta}_i x_i + \sum_{i \leq j}^k \hat{\beta}_{ij} x_i x_j \tag{3}$$

로 표현된다. 만약 독립변수의 수가 2로서 $k=2$ 이면,

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_1 + \hat{\beta}_2 x_2 + \hat{\beta}_{11} x_1^2 + \hat{\beta}_{22} x_2^2 + \hat{\beta}_{12} x_1 x_2 \tag{4}$$

가 된다. 여기에서 \hat{y} 은 η 의 추정량이고, $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_{ij}$ 는 각각 $\beta_0, \beta_i, \beta_{ij}$ 의 최소제곱 추정량(least squares estimators)을 의미한다.

식 (4)의 회귀계수들은 중회귀를 구하는 방법에 의하여

$$\hat{\beta} = \begin{bmatrix} \hat{\beta}_0 \\ \hat{\beta}_1 \\ \hat{\beta}_2 \\ \hat{\beta}_{11} \\ \hat{\beta}_{22} \\ \hat{\beta}_{12} \end{bmatrix} = (X'X)^{-1}X'y \tag{5}$$

이 되고, 식 (4)를 행렬을 이용하여 바꾸어 쓰면

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + (x_1, x_2) \begin{bmatrix} \hat{\beta}_1 \\ \hat{\beta}_2 \end{bmatrix} + (x_1, x_2) \begin{bmatrix} \hat{\beta}_{11} & \hat{\beta}_{12}/2 \\ \hat{\beta}_{12}/2 & \hat{\beta}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$= \hat{\beta}_0 + x'b + x'Bx$$

으로 표현된다.

모형 (3)에서 \hat{y} 은 $x' = (x_1, x_2, \dots, x_k)$ 의 함수이며 \hat{y} 을 최대 또는 최소화시키는 x 의 값을 구하기 위하여 \hat{y} 을 x 로 미분하면 $\partial\hat{y}/\partial x = b + 2Bx$ 가 되며, 만약 어떤 점 x_0 가 $b + 2Bx_0 = 0$ 을 만족시킨다면, 이 점 x_0 를 정상점(stationary point) 이라고 한다.

$$x_0 = -B^{-1}b/2 \quad (7)$$

3.3 정준분석

정상점 x_0 에서 η 의 추정 값을 \hat{y}_0 라고 한다면, 식 (6)으로 부터 $\hat{y}_0 = \hat{\beta}_0 + x_0'b + x_0'Bx_0$ 이 된다. x 좌표의 원점을 0에서 x_0 로 옮기기 위하여 선형좌표변환 $z = x - x_0$ 을 식 (6)에 대입하여 정리하면 $\hat{y} = \hat{y}_0 + z'Bz$ 가 된다. 만약 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k$ 가 대칭행렬 B 의 고유값이라고 하면, 직교변환 $z = Pw$ 가 존재하여 이차형식 $z'Bz$ 는

$$\begin{aligned} z'Bz &= w'PBPw \\ &= w'\Lambda w \\ &= \lambda_1 w_1^2 + \lambda_2 w_2^2 + \dots + \lambda_k w_k^2 \end{aligned} \quad (8)$$

이 된다. 식 (8)의 결과를 식 $\hat{y} = \hat{y}_0 + z'Bz$ 에 대입시키면

$$\hat{y} = \hat{y}_0 + \sum_{i=1}^k \lambda_i w_i^2 \quad (9)$$

으로 표현된다. 만약 행렬 B 가 양정치(positive definite) 행렬이면 식 (9)의 고유값 λ_i 들은 모두 양수가 되며, \hat{y} 이 가질 수 있는 최소의 값은 \hat{y}_0 이 된다. 따라서 \hat{y}_0 을 주는 정상점 x_0 는 \hat{y} 을 최소로 하는 최소점이다. 이와 반대로, 행렬 B 가 음정치(negative definite) 행렬이면 λ_i 들이 모두 음수이고 \hat{y} 이 가질 수 있는 최댓값은 \hat{y}_0 이며, x_0 는 최댓점이 된다. 만약 행렬 B 가 비정치(indefinite) 행렬이면 λ_i 는 양수와 음수가 섞여 있으며, \hat{y} 는 \hat{y}_0 보다 클 수도 있고 작을 수도 있기 때문에 x_0 는 안부점이 된다.

4. 구동부 레일 부재의 최적 설계

그림 4(a)는 구동부 레일의 단면으로, A, B, C 길이가 최적설계시 고려될 독립변수이나, 레일단면 길이 A의 경우 구조해석에서 응력 발생이 현저히 낮으므로 제거 가능하다고 판단할 수 있어, 이 부분을 제거하고 간략화한 것이 그림 4(b)가 되며, 새 치수의 단면 계산시 질량은 약 9.2%정도 감소한다(3.84kg → 3.48kg). 그림 4의 h_1, h_2 가 발생 등가 응력(종속변수)에 영향을 미치는 독립변수라고 할 때, 이 변수들 간의 어떠한 영향 관계가 있는지를 알기 위하여 표 2의

표 2 반응표면법의 사용 변수

	실제 독립변수		선형 변환된 독립변수		응력(MPa) y
	$h_1(\xi_1)$	$h_2(\xi_2)$	x_1	x_2	
1	36.5	3.441	1	0.98	71.65
2	36.5	1.770	1	0.02	78.47
3	36.5	0	1	-1	66.05
4	31.25	3.441	0	0.98	59.29
5	31.25	1.770	0	0.02	62.42
6	31.25	0	0	-1	88.40
7	26	3.441	-1	0.98	62.46
8	26	1.770	-1	0.02	80.01
9	26	0	-1	-1	121.92

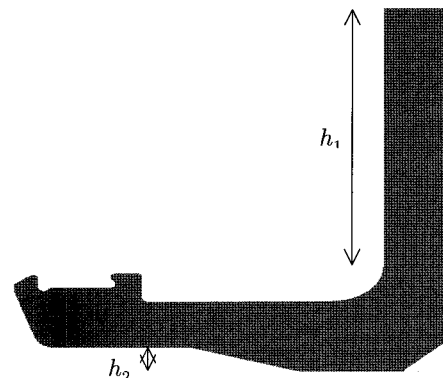
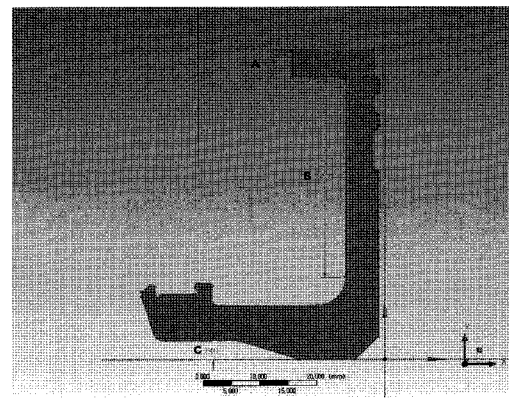


그림 4 구동부 레일 단면의 설계변수 A, B, C (a)와 독립변수 h_1 and h_2 (b)

데이터를 이용하고, 각각의 독립변수는 식 (1)을 이용하여 선형변환을 시켜 새로운 독립변수 x_1, x_2 를 생성하였다. h_1 의 상한치는 36.5mm이며, 레일 부재에 볼트가 체결되는 위치에 구멍이 있기 때문에 하한치를 26mm로, 중간값은 상한치와 하한치 사이의 평균값을 고려하였다. h_2 도 h_1 과 마찬가지로 원래의 높이인 3.441mm를 상한치, 높이가 존재하지 않을 때(0mm)를 하한치, 중간값을 선정하여 총 9개의 설계점을 정하였다. 그리고 응력값들은 각 점에 대한 치수를 이용, ANSYS/Workbench을 이용, 각각 계산한 것이다.

9개의 데이터점을 그래프에 그려보면 $-1 \leq x_1 \leq 1, -1 \leq x_2 \leq 1$ 인 정사각형 내부에 위치하고, 2차 회귀모형이 반응관계를 나타내는데 적합하다고 가정하여 식 (4)와 같은 모형으로 고려한다.

최소제곱법에 의하여 식 (5)와 같이 추정할 때에 필요한 행렬 X 와 벡터 y 는 다음과 같고,

$$X = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0.98 & 1 & 0.9604 & 0.98 \\ 1 & 1 & 0.02 & 1 & 0.0004 & 0.02 \\ 1 & 1 & -1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & 0.98 & 0 & 0.9604 & 0 \\ 1 & 0 & 0.02 & 0 & 0.0004 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 0.98 & 1 & 0.9604 & -0.98 \\ 1 & -1 & 0.02 & 1 & 0.0004 & -0.02 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad y = \begin{bmatrix} 71.65 \\ 78.47 \\ 66.05 \\ 59.29 \\ 62.42 \\ 88.4 \\ 62.46 \\ 80.01 \\ 121.92 \end{bmatrix}$$

회귀계수들의 추정값은 다음과 같다.

$$\hat{\beta} = \begin{bmatrix} \hat{\beta}_0 \\ \hat{\beta}_1 \\ \hat{\beta}_2 \\ \hat{\beta}_{11} \\ \hat{\beta}_{22} \\ \hat{\beta}_{12} \end{bmatrix} = (X^T X)^{-1} X^T y = \begin{bmatrix} 67.205 \\ -8.0367 \\ -13.881 \\ 10.057 \\ 4.3327 \\ 16.535 \end{bmatrix}$$

따라서, 반응표면의 추정식은 식 (10)이 된다.

$$\hat{y} = 67.205 - 8.0367x_1 - 13.881x_2 + 10.057x_1^2 + 4.3327x_2^2 + 16.535x_1x_2 \quad (10)$$

식 (6)에서 사용된 벡터 b 와 행렬 B 는

$$b = \begin{bmatrix} -8.0367 \\ -13.881 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 10.057 & 8.2675 \\ 8.2675 & 4.3327 \end{bmatrix}$$

이므로, 정상점 x_0 는 식 (7)로 부터

$$x_0 = -B^{-1}b/2 = \begin{bmatrix} 1.6132 \\ -1.4763 \end{bmatrix}$$

이 얻어진다. 정상점의 성격을 알기 위하여 행렬 B 의 고유값을 구하면

$$|B - \lambda I| = \begin{vmatrix} 10.057 - \lambda & 8.2675 \\ 8.2675 & 4.3327 - \lambda \end{vmatrix} = 0$$

으로부터 $\lambda_1 = -1.5541, \lambda_2 = 15.9438$ 을 얻게 된다. 또 정상점 x_0 에서의 추정값 \hat{y}_0 를 계산해 보면 식 (6)으로부터 70.97이 되고, 식 (9)의 표현은

$$\hat{y} = \hat{y}_0 + \sum_{i=1}^k \lambda_i w_i^2 = 70.97 - 1.5541w_1^2 + 15.9438w_2^2$$

이 된다. 두 고유값이 하나는 양수이고 하나는 음수이므로, $x_0 = (1.6132, -1.4763)$ 이 안부점이라는 것을 알 수 있으며, \hat{y} 의 값이 감소되는 방향과 증가하는 방향이 있음을 알 수 있다.

안부점을 중심으로 흥미영역에서 발생응력이 어떠한 변화를 갖는가를 알아보기 위하여 MATLAB을 이용, \hat{y} 의 반응표면과 등고선 표를 작성하여 보면 각각 그림 5(a), (b)와 같다. 그림 5의 (b)의 흥미영역 내에서 비교적 낮은 응력을 보여주고 있다. 이 영역을 최적영역(optimal region)이라 가정하고 수학적 방법으로 표현하면, 흥미영역 $-1 \leq x_1 \leq 1, -1 \leq x_2 \leq 1$ 과 부등식 $-8.0367x_1 - 13.881x_2 + 10.057x_1^2 + 4.3327x_2^2 + 16.535x_1x_2 < -7.205$ 을 동시에 만족시키는 모든 (x_1, x_2) 의 점들로 구성된 영역이 된다. 여기서 부등식은 추정식 (10)의 \hat{y} 을 60MPa 이하가 되게 하는 부등식으로부터 얻어진 것이다. 위의 제한조건 식들을 만족시키는 x_1, x_2 의 값 중에서 추정식 (10)을 최소로 하는 x_1, x_2 의 최적해는 MATLAB에서 제공하는 CONSTR 함수를 이용하여 구하였다. 그 결과 $x^* = \begin{bmatrix} x_1^* \\ x_2^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.4225 \\ 1.0 \end{bmatrix}$ 이 되고, 이 점에서 \hat{y} 의 값은 약 55.8MPa 정도가 된다. x^* 에서 실제값은

$$-0.4225 = \frac{\xi_1 - 31.25}{5.25}, \quad 1.0 = \frac{\xi_2 - 1.737}{1.737}$$

로부터 $h_1(\xi_1) = 29.03\text{mm}, h_2(\xi_2) = 3.47\text{mm}$ 으로 초기값에 비해 각각 7.47mm 감소, 0.03mm 증가하였음을 알 수 있다.

초기 3.84kg에서 3.48로 감소하고 최적화과정 후 3.24kg으로 15%의 중량 감소가 되었다.

또한, 최적화과정으로 산출된 최적값을 검증하기 위하여 최적값 대로 형상을 수정하고, 유한요소해석을 한 결과 반응표면법에 의해 계산된 추정값과 거의 비슷한 응력값(최대 발생응력 : 약 57.7MPa)이 발생하였고(그림 6), 질량이 약 6.7%정도(3.48kg → 3.24kg) 감소하여 산출된 최적값이 적합한 것으로 보인다.

ANSYS/Workbench에는 실험계획법을 이용한 최적화 기능이 있어, 본 논문의 반응표면법으로 계산된 추정값과 비교·검토하였다. 각각의 길이에 대한 상·하한치를 입력변수로 하였으며, 최대 발생응력과 질량을 반응변수로 하였다(그

림 7(a)). 해석에 필요한 설계 포인트의 수와 값은 입력변수의 수 및 값을 기준으로 자동으로 생성되며, 각각의 설계 포인트에 대해 해석이 수행된다(그림 7(b)). 해석이 완료된 후에 입력변수와 반응변수의 관계인 반응표면을 확인할 수 있고, 생성된 반응표면 그림 7(c)는 그림 5(a)와 같은 형태임을 알 수 있다. 도출된 h_1 (29.03mm), h_2 (3.44mm)에서의 반응변수들의 값을 보면(그림 7(d)) 최대 발생응력은 약 58.7MPa, 질량은 3.24kg으로, 앞에서 최적화과정을 통해

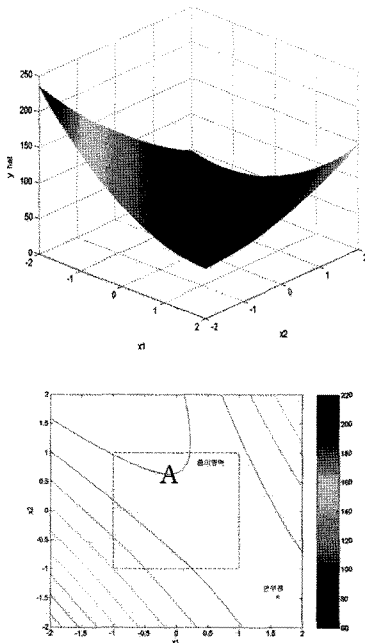


그림 5 해석 모델의 반응표면 (a)와 등고선 (b)

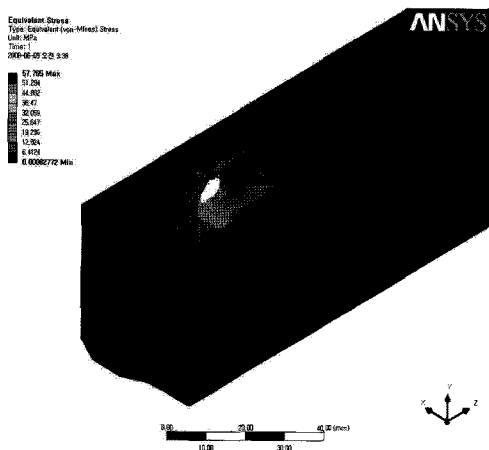
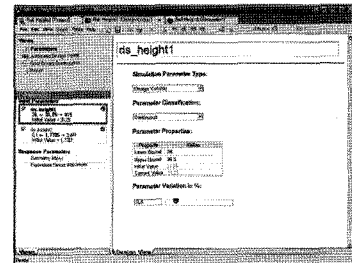
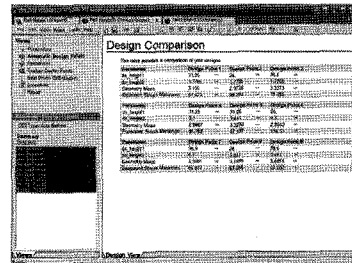


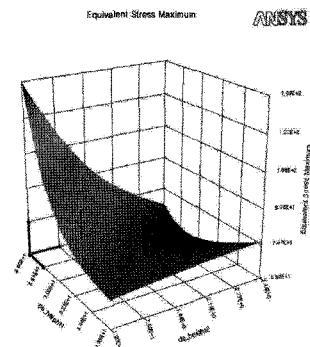
그림 6 최적화된 형상과 응력



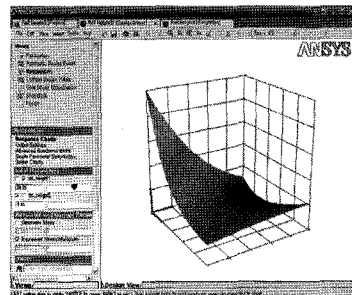
(a) 반응표면용 변수 입력



(b) 설계변수 생성과 구조해석 과정



(c) 반응표면 결과



(d) 계산된 반응표면 변수 h_1 과 h_2 값

그림 7 ANSYS/Workbench 반응표면법을 사용한 최적화 결과

나온 값을 토대로 단면의 형상을 수정하고, 유한요소해석을 한 결과(최대 발생응력 약 57.7MPa, 질량 3.24kg)와 비교 하였을 때 거의 동일함을 확인할 수 있다.

5. 결 언

본 연구를 통하여 도출된 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 단순 모델링에 의해 유한요소해석시 발생하는 수치 해석 에러 감소를 위해, 실제와 가깝게 3D CAD로 모델링(볼트 및 너트 포함)을 하여 해석을 수행하였고, 스크린 도어의 개폐시 발생하는 응력에 대한 안전성을 검토하기 위하여 하중의 이동 단계로 나누어 해석을 수행한 결과, 정지시와 개폐시 모두 부재의 허용응력 이하로 응력이 발생하여(문 정지시 : 최대 75.7MPa, 문 개폐시 : 평균 128MPa) 안전한 것으로 판단된다. 또한 10분마다 개폐시의 예측수명은 약 20년(80만회)이 산출되어 도시철도용품 품질인증의 내구성 50만회를 상회하는 수치결과가 도출되었다.
- 2) 구동부 레일의 강성을 유지하며 경량화를 위해 레일 단면의 주요 길이 및 두께를 변수로 하여 반응표면법을 이용한 최적화를 수행하였으며, 그 결과 최초설계안보다 약 15% 중량이 감소되는 설계안이 도출되었다. 또한 본 연구에서 수행된 반응표면법을 적용한 최적화 결과 검증에 위하여, ANSYS/Workbench에서 제공하는 반응표면법 최적화를 수행한 결과, 양쪽 최적값이 동일함으로 본 연구 결과가 적합한 것으로 판단된다.
- 3) 본 논문에서는 구동부와 유리의 무게만을 가지고 해석을 수행하였으나, 향후에는 스크린 도어에 일정 기준의 풍하중 시험을 하여 나온 압력 분포 데이터를 사용한

추가적인 구조해석을 수행함으로써 안전설계에 대한 신뢰성 향상의 제고가 필요하다고 판단된다.

후 기

본 연구는 '2007년 산학연 공동기술개발 컨소시엄사업' 연구과제의 결과물로서 중소기업청, 대전광역시, (주)동양인터내셔널의 지원에 감사를 드린다.

참 고 문 헌

- 박성현 (2006) 개정판 현대실험계획법, 민영사.
- 박찬경, 이광기 (2000) 반응표면모델에 의한 철도 차량 대차의 탄성조인트 최적설계, 대한기계학회 논문집, 24(3), pp.661~666.
- 박홍선 (2001) SAS를 이용한 실험계획과 분산분석, 자유아카데미.
- 염기선, 허재성, 광병만 (2001) 반응표면법을 이용한 구조물 최적설계 프로그램의 개발, 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, pp.580~585.
- 이우선 (1999) 최신 실험설계, 영풍문고.
- 이재환, 김영중, 김진섭 (2007) 네트워크 통신장비의 진동해석, 한국전산구조공학회 논문집, 20(4), pp.463~468.
- 이재환, 허유정, 정태환, 이종무(2004) 심해용 무인잠수정 구조의 민감도 해석에 의한 최적설계, 대한조선학회 논문집, 41(3), pp.28~34.
- 정태환 (2000) 선박해양구조용 알루미늄 압출재의 단면 설계, 충남대학교 석사논문.
- 홍경진, 전광기, 조영석, 최동훈, 이세정 (2000) 최적설계를 위한 반응표면의 생성에 관한 연구, 대한기계학회 논문집, 24(6), pp.1408~1418.