

반응 표면법을 이용한 에스컬레이터의 진동 저감에 관한 연구

°임수영*, 권이석**, 박찬종**, 홍성욱***

Analysis and Reduction of Escalator Vibration Using the Response Surface Methodology

Su-Young Lim, Yi-Sug Kwon, Chan-Jong Park and Seong-Wook Hong

ABSTRACT

This paper deals with an analysis and reduction of escalator vibration by using the response surface model. Optimization of the escalator vibration is performed by minimization of the vibration responses which are measured at steps. The response surface models of the factors are constructed by using the experimental data based on the D optimal design method. The multi-objective optimization is also performed by applying desirability function and overlaid contour plot techniques. The optimal solution, which is obtained for a typical escalator system, is applied to reduce the escalator vibration.

1. 서론

에스컬레이터 운행 시 발생하는 소음이나 진동은 탑승자의 불안감을 야기하거나 승차감을 저하시킬 수 있다. 따라서 에스컬레이터에서 발생하는 진동, 소음을 저감하기 위한 연구가 활발하다[1,2]. 에스컬레이터는 체인과 스프라켓에 의한 구동방식을 채택하고 있으므로 자체적인 가진력이 존재하게 되며, 체인 속도 변동에 의한 코달효과(Chordal Effect)에 의하여 일정 수준 이상의 진동이 유기되는 것을 피할 수 없을 뿐만 아니라, 기어물림주파수가 비교적 저주파수 대역에 존재하게 되어 탑승감에 큰 영향을 미치게 된다. 또한 에스컬레이터의 특성에 따라서 하중의 변화에 따른 특이 진동 현

상이 발생한다[1,2]. 에스컬레이터의 진동을 저감하기 위해서는 에스컬레이터의 가진력 및 에스컬레이터의 동특성에 대한 충분한 고찰이 필요하게 된다. 특히 기 설치된 에스컬레이터에서는 가진원을 제거하는 방식의 진동저감이 어려우며 에스컬레이터의 구조를 크게 바꾸는 방식의 구조 변경도 적용이 불가능하다 할 수 있다.

본 연구에서는 기 설치된 에스컬레이터의 진동을 저감하기 위한 방법으로 주요인자의 동특성 변경 실험에 반응표면법을 적용하였다. 실험계획법(Design of Experiments)과 반응표면모델(Response Surface Model)은 반도체, 항공 및 전자 분야에서 많이 적용되고 있으며 실제로 그 타당성이 입증되고 있다[3-6]. 에스컬레이터의 진동과 시스템 변수들과의 관련성을 분석하기 위한 실험은 현장에 설치된 동일한 모델에 대하여 시험용으로 설치된 에스컬레이터를 대상으로 실시되었다. 시스템의 동적 응답 특성에 영향을 주는 인자의

* : 금오공과대학교 대학원
** : LG - OTIS
*** : 금오공과대학교 기계공학부

수준변경 실험을 통하여 진동크기를 최소화 할 수 있는 인자들의 최적조합을 설정하였다. 실험설계를 위해 D-최적화법기법을 사용하였으며, 측정결과를 이용하여 2차의 반응표면모델을 구성하였다. 반응표면모델과 다중반응표면 최적화법을 이용하여 두 가지 반응값의 요구수준을 동시에 만족하는 조건을 결정하였다. 수행결과 진동을 최소로 하는 변수들의 최적조합을 설정할 수 있었으며, 이 조건을 설치된 에스컬레이터에 적용하여 진동 저감효과를 확인할 수 있었다.

2. 반응표면법(Response Surface Methodology)

2.1 반응표면법

반응표면법은 실험계획법에 의하여 구해진 결과(또는 목표치)를 해석하는 방법으로 실험의 출력(반응: Response)에 대해 여러 가지의 변수(제어인자, 신호인자, 잡음인자 등)에 대한 각각의 영향을 분석하는 목적으로 사용되고 있다. 반응표면모델 해석에서 반응에 대한 단일 설계 인자들의 수준조합은 반응곡선(Response Curve)으로 표현되며 둘 이상의 설계인자들의 수준 조합인 경우에는 반응표면(Response Surface)의 형태로 표현된다. 반응곡선이나 반응표면의 형태를 탐색하여 설계인자와 반응간의 구조적 관계를 분석할 수 있으며, 더 나아가 최적 반응을 주는 조합을 찾을 수 있다. 모델의 정확한 구조를 안다는 것은 불가능 하지만, 실험계획법과 반응표면모델을 반복하면 입력변수와 반응간의 관계를 근사화 할 수 있으며, 이러한 목적을 달성하도록 적용되는 모든 통계 방법을 반응표면법이라고 한다.

2.2 수학적 모델

반응함수로서 일반적으로 가정되는 간편하고 실용적인 모델은 여러 개의 독립변수에 대한 중회귀모형(Multiple Regression Model)이다. 모델을 구축하기 위해 설계변수에 대한 영역에서 다음 식과 같이 설계변수의 영역이 대체로 $[-1,1]$ 의 영역에 있도록 설정한다.

$$X_i = \frac{x_i - \bar{x}_i}{c_i}, \quad c_i^2 = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x}_i)^2 \quad (1)$$

여기서 \bar{x}_i 는 설계변수 x_i 의 평균값을 의미한다. 실험자가 좁은 범위의 관심영역에서 결과치를 X_i 들의 1차 선형관계로 근사하게 표현할 경우, 새로 정의된 독립변수와 반응변수간의 관계는 제한적인 교호작용을 갖는 1차 회귀모형(First Order Regression Model) 식(2)와 같이 표현할 수 있다.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \epsilon \quad (2)$$

k 개 ($k \geq 2$)의 입력변수일 경우 반응변수와의 2차 곡면의 관계에 있을 때 식(3)과 같은 이차회귀모형(Second Order Model)으로 나타낼 수 있다.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{\substack{i,j \\ i < j}} \beta_{ij} X_i X_j + \epsilon \quad i, j = 1, 2, \dots, k$$

또는

$$Y = X^T \beta + \epsilon \quad (3)$$

여기서 $Y = [Y_i]$, $X = [X_i, (X_i)]$ 이다. 위 식의 반응표면 모델의 미지 계수 $\beta = [\beta_i]$ 는 최소오차사승법(Least Square Error Method)을 적용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\beta = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (4)$$

본 연구에서는 식 (4)에서 구한 반응표면 모델의 통계적인 정확도를 결정계수 R^2 와 R_{adj}^2 를 이용하여 평가하였다[3,4].

반응 표면 모델을 구성하기 위한 실험 계획의 선택은 반응 표면 모델의 정확도와 해석 시간에 큰 영향을 미치게 된다. 반응표면 구성을 위한 수치 실험 점의 선택 기법으로 D-최적화 조건을 이용할 수 있다. D-최적화 기법은 설계 공간 내에서 임의수의 설계 점들을 선택하되, 선택된 설계 점들의 특성이 $|X^T X|$ 를 최대화 되도록 조정하는 것이다. 이는 일련의 시행 착오적 기법을 통해 설계 점

들의 집합을 찾는 방법으로서 도출되는 반응 모델 계수의 불확실성이 최소화되기 때문에 반응 모델에 의해 예측되는 반응값의 최대 분산이 최소화된다. 또한 설계변수 값의 상대적인 좌표변화에 대해서 $|X^T X|$ 의 값이 불변이 된다[5].

3. 반응표면법에 의한 에스컬레이터 진동 실험 및 분석

3.1 인자, 반응값 설정

현장에 설치된 에스컬레이터에 대해 적용 가능한 실험으로서 구동체인 처짐량(DCT: Driving Chain Tension)조정, 리턴가이드부 스프링장력(RGST: Return Guide Spring Tension) 조정 및 스프링강성(Stiffness)변경, 스프링 내부의 댐퍼(Damper)설치, 축간길이(SPAN) 변화 등이 있으며 각각을 하나의 인자로서 설정하였고 Fig. 1, 2에서 주요 인자들을 그림으로 보여주고 있다.

구동체인의 처짐량은 구동체인 SPAN 중앙부를 8 kgf로 누를 때의 처짐량으로 15~45 mm 범위에서 설정하였다. 리턴가이드부위 스프링은 강성이 9, 12, 14 kgf/mm인 것을 사용하였으며, 스프링 장

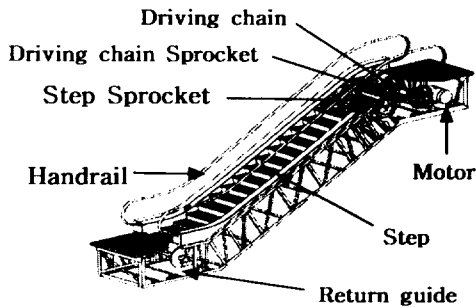


Fig. 1 Schematic of escalator

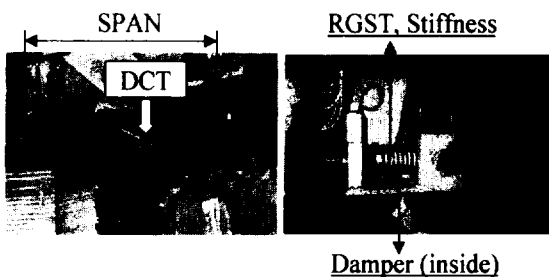


Fig. 2 Driving Chain and Return Guide

력은 각각의 스프링의 압축량을 조절함으로써 132 ~ 378 kgf 범위에서 조절하였다. 에스컬레이터 승차감은 스텝의 진동이 절대적인 영향을 미치게 되는데 에스컬레이터가 하강으로 운행 중일 때 스텝의 진행방향의 가속도에 대해 A95값을 구하고 주파수 성분 분석을 실시한다. A95와 주파수 성분분석에서 가장 주요한 성분으로 나타난 3.65 Hz 성분을 반응값으로 설정하였다. 여기서 A95란 에스컬레이터의 측정 척도의 하나로 작업자가 선정할 측정시간 범위에서 평균 Peak-to-peak 값의 95% 값을 의미하며, 3.65 Hz 성분은 스텝체인과 스텝 스프라켓의 기어 물림주파수에 해당된다. 시스템의 조건에 따라 탑승자 수를 변경하였으며 과진동이 발생하는 구간에서 상대적으로 응답이 큰 값 2개의 평균을 취하였다.

3.2 실험 계획 설정

반응표면법을 위한 실험계획과 결과 분석, 최적 조건 설정 등의 분석과정은 통합 통계프로그램인 MINITAB을 사용하여 수행하였다.

실험은 초기 6가지 인자를 고려한 실험을 하였으나 실제현장에서 적용할 수 있는 조건을 고려하여 핸드레일과 SPAN을 제외한 구동체인 처짐량, 리턴가이드부 스프링장력, 스프링강성과 댐퍼의 4가지 인자를 고려하여 실험을 실시하였다. 선행한 45회의 실험 설계 후보점 중에서 D-최적화 조건을 이용하여 Table 1과 같이 20가지의 실험계획을 하였다.

3.3 실험 및 분석

D-최적화 조건을 이용한 실험조건에서 측정된 응답값과 변수의 값을 이용해 2차 반응표면의 계수를 결정하였다. 실험에 의해 얻어진 데이터들이 2차 다항식의 반응표면으로 적합하게 대변되는지를 나타내주는 척도로 결정계수 R^2 를 이용한다. 보다 현실적인 판단 근거로 R^2_{adj} 를 사용하며 Table 2에서 구성된 반응표면이 매우 좋은 특성을 보여주고 있음을 알 수 있다.

4. 반응표면 모델에 의한 진동 최소화

4.1 다중 반응표면의 최적화

다중 반응표면의 최적화는 반응표면설계 (Multi

Table 1 Experiment design based on D-Optimal method

No.	DCT	RGST	Stiffness	Damper
1	1	1	1	1
2	-1	1	-1	-1
3	0	-1	1	1
4	1	0.17	-1	-1
5	-1	1	1	1
6	0	0.17	0.2	1
7	0	-1	-1	-1
8	1	0.17	0.2	1
9	-1	-1	0.2	-1
10	-1	-1	0.2	1
11	1	1	0.2	1
12	0	-1	0.2	1
13	0	0.17	-1	-1
14	1	-1	-1	-1
15	-1	1	-1	-1
16	0	1	1	1
17	1	0.17	1	1
18	1	1	1	1
19	-1	0.17	-1	-1
20	0	-1	0.2	1

Table 2 Characteristic of Response Surface Fitting for A95 and 3.65

Response	R^2	R^2_{adj}
A95	94.3 %	90.3 %
3.65 Hz	92.0 %	87.3 %

Response Surface Design)에서 여러 가지 설계변수에 대한 여러 반응표면들의 요구수준을 동시에 만족시키는 최적값을 찾아내는 것이다.

본 연구에서는 다중 반응표면의 최적화 방법 중 만족함수를 이용한 Derringer-Suich방법과 등고선 겹치기 방법을 이용하였다[4]. 만족함수를 이용한 방법은 반응변수가 여러 개일 때 이들 반응변수의 목표값을 만족시키는 조합을 찾아 낼 수 있으며, 등고선 겹치기 방법은 하나의 반응변수에 대한 최적 세팅이 다른 반응 변수에 대해서도 동일하게 적용되기가 어려우므로 여러 반응 변수들을 동시에 고려한 세팅을 위하여 여러 반응변수들의 타협 영역을 시각적으로 확인시켜 줄 수 있는 방법이다.

(1) 만족함수를 이용한 방법

만족함수를 이용한 방법은 모든 반응변수들에 대하여 만족함수(Desirability Function)를 적용하여 여러 반응변수들을 동시에 만족시키는 방법이다. 반응값에 대한 만족의 정도에 따라 반응값이 [0,1] 사이의 값으로 변환된다. 먼저 반응값의 형태를 최대값(max), 최소값(min), 그리고 특정 목적값(Fixed Target Value)으로 설정할 수 있다. 최소값을 구할 경우, 예측치 Y 의 값이 작을수록 만족도가 좋게 되며 s 를 가중지수로 둘 때, 만족함수는 식(6)과 같이 정의할 수 있다.

$$d = \begin{cases} 1, & Y \leq A \\ \left(\frac{Y-B}{A-B} \right)^s, & A < Y < B \\ 0, & Y \geq B \end{cases} \quad (6)$$

Y 값의 크기에 따라 만족함수 크기가 달라지게 되는데 여러 반응변수들에 대한 각각의 만족함수에 대하여 d 값의 기하평균(Geometric Mean)을 최대로 하는 처리조합을 찾게된다.

$$D = (d_1 \times d_2 \times \dots \times d_k)^{\frac{1}{k}} \quad k: \text{반응변수의 개수}$$

기하 평균을 사용하는 이유는 어느 한 반응값이 기대하는 수준에서 크게 벗어날 때, 즉 $d=0$ 일 때 기하 평균 D 가 0이 되어 모든 반응들이 균형적으로 최적 상태에 놓여 있지 않는 상태가 되기 때문이다. 이 때, 반응값을 강조하는 정도에 따라 0.1~10의 가중치를 부여하게 되며, 기준을 1로 하고, 목표값을 강조하게 될 때 1보다 큰 값을, 그렇지 않을 경우 1보다 작은 값을 부여한다.

실험계획에 따른 실험결과에서 반응값 크기가 최소가 되는 것을 목적값으로 하였으며 A95와 3.65 Hz성분에 대한 만족함수를 구하였다. Table 4에서는 작업자가 요구하는 목적값 범위를 설정하였고, Fig. 7은 요구 수준을 만족하는 조건중의 한 가지 예를 보여주고 있다. A95값과 3.65 Hz 성분 각각의 만족도가 $d=1$ 이 되어 결국 전체적인 만족도 $D=1$ 로, 원하는 목표값을 만족하고 있음을 알 수 있다.

Table 4 Response optimization parameters

	Goal	Lower Target	Upper	Weight	
A95	Minimum	45	55	60	1
3.65Hz	Minimum	10	18	22	1

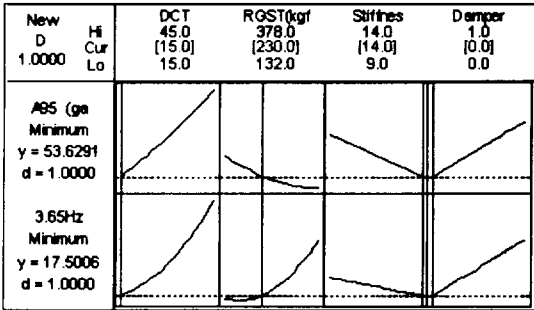


Fig. 7 Optimal solution from response surface model

Fig. 7로부터 개별적인 인자의 수준을 선정하면 발생하게 될 반응값을 예측할 수가 있게 된다. 스프링강성은 크게 하는 것이 좋을 수 있다. 또, 댐퍼는 적용하지 않았을 경우 응답이 좋게 나타나고 있으므로 이 결과를 근거로 하여 댐퍼의 적용을 배제하였다.

(2) 등고선 겹치기(Overlay Method)

등고선 겹치기 방법은 여러 반응변수에 대한 개별적인 등고선을 겹쳐보는 방법으로서 한 반응변수 Y_1 을 중심으로 만족하는 등고선의 범위를 정한 후 다른 반응변수 Y_2 를 최대 만족하는 처리조합을 구하게 된다.

이 방법은 독립변수 혹은 반응변수가 늘어날수록 현실적으로 최적의 처리조합을 찾기가 불가능하다는 약점을 가지고 있으나 반응변수가 적을 경우 효과적으로 최적값을 구할 수 있으며, 절차나 방법이 쉽고 결과치 영역을 시각적으로 쉽게 확인할 수가 있다.

Fig. 8-10은 등고선 겹치기 방법을 사용하여 구한 결과로서 두 가지 요인들의 상관관계에 따른 최적값을 나타내는 구역을 설정할 수 있다. 해당 인자 외의 요소는 앞서 구한 최적 조건에서의 값을 기본 값으로 설정하였다. A95값과 3.65 Hz성분값의 목표치에 대하여 발생하는 최대치와 최소값

을 만족하는 등고선을 겹쳤을 때 교차되는 부분이 원하는 수준값의 범위가 된다. 구동체인의 처짐이 작고, 스프링의 강성이 큰 경우 응답이 좋게 나타나고 있다. 리턴 가이드부의 스프링 장력은 일정값 이상에서 비슷한 응답 특성을 나타내고 있다.

4.3 최적 조건 적용 검증 실험

반응분석을 통해 구한 최적 조건을 에스컬레이터 모델에 적용하였다. Fig. 11,12는 과진동이 발생하는 구간에서 구동체인 처짐량과 리턴가이드부 스프링장력의 크기변화에 따른 응답을 보여준다. 최적해를 적용한 조건을 기준으로 구동체인 처짐량과 스프링 장력의 크기 변화에 따른 A95값과

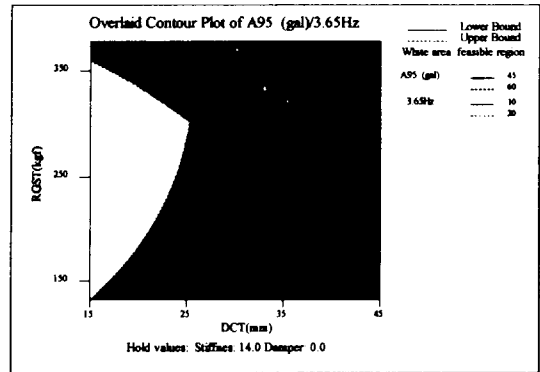


Fig. 8 Overlaid contour plot for DCT and RGST

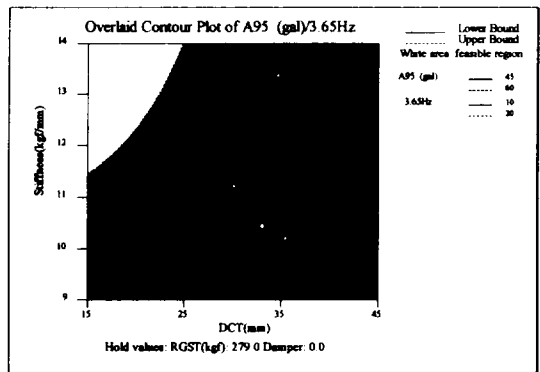


Fig. 9 Overlaid contour plot for DCT and stiffness

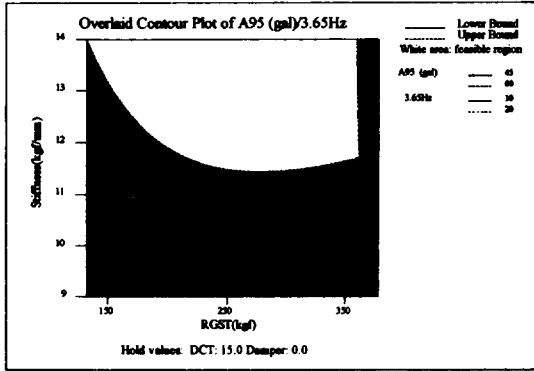


Fig. 10 Overlaid contour plot for RGST and stiffness

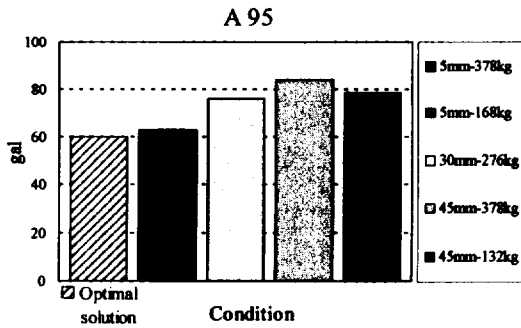


Fig. 11 Comparison of A95 values when the optimal solution is applied.

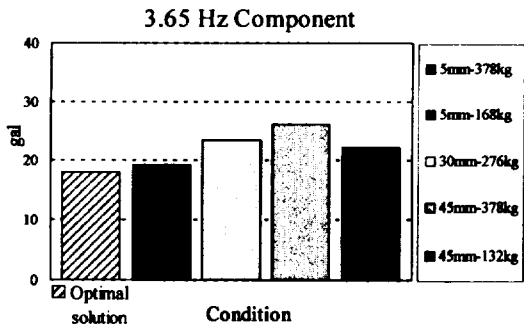


Fig. 12 Comparison of 3.65Hz components levels when the optimal solutions is applied.

3.65 Hz값을 비교한 결과 최적 조건에서의 응답이 가장 좋게 나타났으며, 최악 조건과 비교할 때 25 %~30 % 정도의 감소효과가 나타났다.

5. 결론

에스컬레이터의 진동을 저감하는 대책으로 진동 특성에 영향을 주는 요소들에 대한 관련성을 살펴 보았다. 주요 요소의 동특성을 변화시키는 실험에 반응표면법을 적용함으로써 반응값에 대한 각 인자들의 민감도 해석과 변수 선택을 효율적으로 수행 할 수 있었다. 반응표면 모델을 구성하고 성능 인자들에 대한 최적설계를 수행한 결과 최적해를 구할 수 있었다. 이를 시스템의 설치상태에 초기조건으로 부여함으로써 기 설치된 에스컬레이터에 큰 구조 변경 없이 쉽게 진동저감 효과를 확인할 수 있었다.

참고 문헌

- [1] 강규웅, 권이석, 홍성욱 2000, "에스컬레이터 구조 최적 진동:(I) 동적 모델링." 한국소음진동공학회 지제 10권 제4호, pp.95 ~ 101.
- [2] 임수영, 권이석, 박선용, 홍성욱 2000, "에스컬레이터 진동 분석 및 대책." 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집, pp.984 ~ 989.
- [3] 박성현, 1995, 현대실험계획법. 민영사
- [4] 이우선, 1998, 최신실험설계, 영풍문고
- [5] 이정환, 안재권, 이수갑, 2000, "반응면 기법을 이용한 자동차 엔진 냉각팬의 저소음설계," 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집, pp.407~412.
- [6] 이광기, 구자겸, 2000, "실험계획법/반응표면모델을 이용한 자동차 진동저감," 한국소음진동공학회지 제 10권 제2호 207.