

유연체 동력학모델을 이용한 에스컬레이터의 승차감 개선에 관한 연구

박찬중*, 권이석**, 박태원***

A Study on the Ride Improvement of an Escalator Using Flexible Body Dynamics Model

Chan Jong Park*, Yi Sug Kwon**, and Tae Won Park***

ABSTRACT

In this paper, 3-dimensional numerical model of an escalator is developed to study the vibration characteristics. This proposed model is able to consider the elastic deformation of the frame during transient dynamic analysis. Deformation modes which are used to calculate the elastic deformation are selected from the FE model analysis. Because low frequency vibration is very important to the ride quality of fore/aft direction, low frequency deformation modes of the frame below 20Hz are considered. To show validity of this dynamics model, longitudinal acceleration of a step is compared with test data in frequency domain. Then robust design technique is applied to determine important design factors and improve ride quality with small number of experiments.

Key Words : Ride (승차감), Flexibility (유연성), Robust Design Technique (강건설계기법), Rolling Contact (구름접촉), Mode Selection (모드선정)

기호설명

F_n = normal contact force
 F_f = tangential contact force
 K_{nom} = nominal stiffness
 μ_{nom} = non-linear friction coefficient
 E = Young's modulus
 D = damping coefficient
 C_r = restitution coefficient
 V_p = normal velocity at the contact point
 V_t = tangential velocity at the contact point

V_g = transition velocity
 δ = normal penetration due to contact

1. 서론

치열한 국제 경쟁체제에 대비하기 위하여 에스컬레이터 설계 시 경량화를 통한 개발비용 절감과 개발기간 단축에 대한 필요성이 대두되고 있다. 이와 동시에 에스컬레이터를 이용하는 고객들은 보다 쾌적한 승차감(ride)과 빠른 이송성능을 요구

* 아주대학교 기계공학과 대학원
 ** LG-OTIS 빌딩시스템연구소
 *** 아주대학교 기계 및 산업공학부

하고 있기 때문에 이에 대한 진동개선 요구도 증가하고 있다⁽¹⁾.

에스컬레이터와 같이 크고 복잡한 시스템의 승차감에 미치는 원인을 파악하거나 개선안을 적용하여 성능을 확인하기 어렵다는 문제점은 늘 제기되어왔다. 따라서 초기 설계과정과 병행하여 진동특성 해석을 수행할 수 있는 방법으로써 설계단계에서 에스컬레이터의 진동특성을 미리 예측하고 저감시킬 수 있는 방법의 개발이 필요하다.

일반적으로 에스컬레이터의 진동을 평가하고 저감시키기 위해서는 진동이 크게 발생할 수 있는 최악의 조건에서 제품을 운전하고 이때 발생하는 문제점을 해결해가는 방법이 주로 사용되어왔다⁽²⁾. 이와 같이 직접 시험을 수행하는 방법은 가장 정확하게 진동을 평가하고 저감 결과를 확인할 수 있으나 시험 준비 및 수행시간과 시험비용이 너무나도 많이 소비된다는 단점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 그동안 간단한 실험식을 설계단계에 부분적으로 적용하여 왔으며 최근에 들어서는 CAD/CAE 기술을 이용하여 전체 에스컬레이터계의 동특성을 2차원으로 해석하려는 시도가 있었다⁽³⁾.

본 연구에서는 에스컬레이터 프레임의 유연성(flexibility)을 고려하여 스텝부의 진동특성을 구현할 수 있는 3차원 전산동력학 모델을 개발하고, 강건설계 기법(robust design technique)을 적용하여 승객이 느끼는 승차감을 향상시킬 수 있는 설계인자를 규명하였다. 또한 개선안을 에스컬레이터 전산모델에 적용하여 승차감에 가장 큰 영향을 미치는 스텝의 전,후 방향 진동을 감소시켰으며 제안된 개선안을 실제 시스템에 적용하여 성능향상을 최종적으로 확인하였다.

2. 에스컬레이터 스텝부의 구조

에스컬레이터는 크게 탑승객이 승차하는 스텝부와 손으로 붙잡는 핸드레일부로 구성되어있고 좌우대칭 구조로 대부분의 구동력은 스텝부를 구동하는데 사용된다. 따라서 승객이 느끼는 대부분의 승차감은 스텝부에 의해서 결정된다. 스텝부는 구동부, 스텝, 합성고무로 만들어진 스텝롤러, 스텝체인, 상하부 터미널기어와 프레임으로 구성되어있다. 구동부는 모터와 감속기로 이루어져있다. 모터에서 발생한 구동력은 감속기에 전달되고 이

것이 스텝을 이송하는 상부 터미널기어에 전달된다. 상부 터미널기어가 회전하면 기어이(gear tooth)에 맞물려 있는 스텝롤러가 물려 회전하며 스텝체인에 연결되어있는 롤러들이 주 구조물인 트러스(truss)에 고정되어 있는 레일상에 구름접촉(rolling contact)을 하며 이동한다. 합성고무로 만들어진 롤러는 승차 하중에 따라 변형되어 마찰계수가 비선형적으로 증가한다. 또한 하부 터미널기어에는 스텝체인에 초기 장력을 발생시키기 위한 스프링장치가 되어있다.

트러스 구조물인 프레임은 기타 부품들과 용접이나 볼트로 고정되어 있고 설치 시 상하부 각각 2곳을 건물과 단순지지 시킨다. 따라서 프레임은 승차인원의 정도나 구동조건에 따라서 탄성변형을 일으킨다.

3. 유연체 동력학 해석

다물체 동력학 해석 기법의 개발로 에스컬레이터와 같이 매우 복잡한 기계계의 동특성 해석이 가능해졌다. 일반적으로 대부분의 기계 부품들은 강체로 가정하지만 고속으로 작동하는 기계나 에스컬레이터의 프레임과 같이 큰 하중을 지지하는 기계부품은 탄성 변형에 의한 영향이 전체계의 동특성에 중요한 영향을 미치게 되며 이러한 해석 이론은 이미 개발되어 다양한 응용분야에 적용되어 오고 있다.

부품의 유연성을 고려하기 위해서는 절점좌표(nodal coordinate)와 모달좌표(modal coordinate)를 이용한 해석 방법이 있다⁽⁴⁾. 절점좌표는 유연체 부품을 구성하는 각 절점에 6개의 독립자유도를 사용하는 것으로 부품의 탄성효과를 정확하게 고려할 수 있으나 큰 모델의 경우에는 해석하는데 매우 비효율적이다. 최근에는 특정 운동에 중요한 영향을 미치는 부품의 변형모드를 독립변수로 설정하여 탄성효과를 고려한 모달좌표를 이용한 해석이 널리 사용된다. 이 방법은 모델의 크기가 크더라도 절점좌표를 이용한 것보다 효과적으로 적용할 수 있으나 모드선정(mode selection)이 해석 결과에 큰 영향을 미치기 때문에 특별한 주의가 요구된다⁽⁵⁾.

본 연구에서는 모달좌표를 이용하여 유연 다물체 동력학 해석을 수행할 수 있도록 개발된 프로그램인 DADS(Dynamic Analysis and Design

System)를 사용하였다. 또한 프레임의 중요한 변형 모드를 선정하기 위해서 범용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS 를 이용하였다.

4. 에스컬레이터 모델링

4.1 동력학 모델링

모델링 대상 에스컬레이터는 수직높이(rise)가 4.5m, 스텝의 폭이 1.2m이고 구동방식은 상부 구동방식이다. 3차원 동력학 모델의 이동부는 스텝 58개와 체인롤러 232개의 강체로 구성되어 있으며, 스텝체인의 탄성효과를 고려하기 위하여 각각의 체인롤러와 전방 스텝롤러 사이를 348개의 스프링 요소로 연결하였다. 이때 스텝체인의 강성(stiffness)은 인장시험을 통해서 결정하였다.

스텝의 전,후방 롤러들은 서로 다른 운동궤적을 갖는 레일을 따라 구름접촉 및 충돌현상을 일으키며 왕복운동을 한다. 이러한 구름접촉/충돌현상은 스텝부의 승차감 해석에 있어서 중요한 역할을 한다.

동력학 해석에 있어서 접촉/충돌문제를 해석하는 방법으로는 크게 운동량-충격법(momentum-impulse method)과 접촉력법(contact force based method)으로 구분된다. 운동량-충격법은 구분적 접촉/충돌해석법(piecewise contact/ impact analysis method) 이라고도 하며 두 물체의 충돌현상이 짧은 시간동안 발생한다고 가정하여 충돌 전,후의 운동량-충격 관계식과 반발계수를 이용하여 비교적 간단하게 적용할 수 있는 방법이다. 그러나 충돌시간 동안 계의 동적 거동에 중요한 변화가 발생하는 중,저속 접촉/충돌문제에는 부적합한 방법으로 알려져 있다. 한편 접촉력법은 두 물체의 접촉 조건과 이에 따라서 발생하는 연속적인 힘과의 관계를 수식화하여 계의 해석에 적용하는 방법으로 헤르쯔 접촉이론(Hertzian contact theory)에 의한 접촉/충돌모델이 가장 많이 사용되고 있다. 따라서 이 방법을 연속 접촉/충돌 해석법(continuous contact/impact analysis method) 이라고도 부르며, 일반적으로 충돌하는 물체의 충돌시간이 긴 경우인 중,저속 충돌문제에 적용하고 있다. 따라서 본 연구에서는 스텝롤러와 레일 간의 저속 접촉/충돌문제를 고려하여 연속접촉/충돌모델을 적용하였다.

스텝롤러 및 체인롤러와 레일간의 구름접촉현상과 롤러의 수직 변형에 따른 마찰계수의 비선형

거동을 모델링하기 위하여 다음과 같은 연속 접촉력 계산모델을 사용하였다⁽⁶⁾.

$$F_n = K_{nom} \left[1 \pm \left(\frac{1 - C_r^2}{1 + C_r^2} \right) \tanh \left(2.5 \frac{V_p}{V_c} \right) \right] \delta^{1.5} + D\dot{\delta} \quad (1)$$

$$F_f = \mu_{nom}(F_n) \tanh \left(2.5 \frac{V_t}{V_c} \right) F_n \quad (2)$$

여기서 δ 는 두 물체의 접촉에 의해서 발생하는 침투량의 속도를 나타낸다. 스텝부의 모든 부품들은 프레임 구조물과 연결되어서 프레임의 탄성변형에 영향을 미친다. 즉 상하부 터미널 기어에 의해서 수평방향의 힘이 그리고 승차구간에서는 수직방향의 힘이 프레임에 전달된다. 승차구간에서의 유연체 프레임과 스텝롤러 및 체인롤러와의 접촉력은 레일과 연결되는 프레임상에 20개의 절점을 통하여 프레임 구조물에 전달된다.

유연체 프레임은 에스컬레이터 설치 시 실제 프레임의 지지상태를 고려하여 상부와 하부 지지부를 기구학적 조인트로 구속하였다. 상부와 하부 터미널기어를 프레임과 각각 회전조인트와 병진조인트로 구속하였고 하부 터미널기어에 장력을 발생시키기 위하여 스프링요소를 사용하였다.

스텝롤러와 레일 및 상하부 터미널기어와의 구름접촉 현상을 동력학적으로 구현하기 위하여 식(1)과 식(2)를 이용하였다. 프레임의 진동모드를 제외한 전체 모델의 총 독립 자유도 수는 871개이다. Fig.1은 에스컬레이터 스텝부의 동력학 해석모델을 보여 주고 있다.

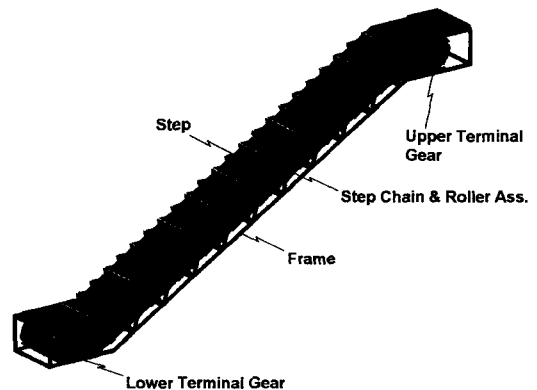


Fig. 1 Dynamic simulation model of an escalator step part

4.2 프레임의 탄성효과

프레임의 유한요소 모델은 Fig. 2와 같으며 트러스 구조물을 보요소(beam element)로 모델링 하였다. 절점 수는 총 449개이며 요소 수는 571개이다. 프레임을 지지하는 4곳의 절점에서는 실제 프레임 설치 조건에 따라 단순지지를 시켜서 진동해석을 수행하였다. 스텝의 구동에 의하여 발생하는 힘이 프레임에 전달되는 경로를 고려해볼 때 프레임의 상하방향 굽힘이 중요한 역할을 한다. 따라서 승차감에 영향을 미치는 저주파 진동인 20Hz 이하의 진동형을 동력학해석에 적용하였으며 그 결과는 Fig.3과 같다.

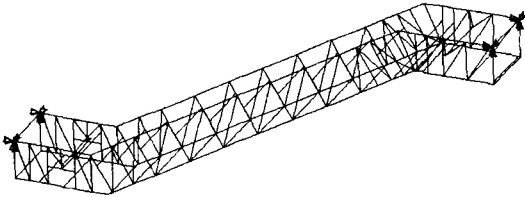


Fig. 2 Finite element model of the flexible frame

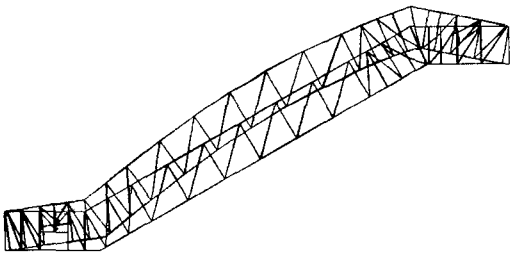


Fig. 3 Vertical bending mode (15.07Hz)

5. 모델 검증 및 평가

이상과 같이 구성된 동력학 해석 모델을 이용하여 설계과정에서 필요한 해석결과를 다양한 구동조건에서 확인이 가능하다. 해석결과 중에서 승객이 직접적으로 느끼는 승차감에 영향을 미치는 스텝의 전,후 방향 가속도를 시험 결과와 비교함으로써 해석모델의 신뢰성을 검증하였다.

5.1 시험조건 및 장치의 구성

승객이 탑승하는 스텝의 전,후 방향 가속도를 측정하기 위하여 저주파용 3축 가속도계(tri-axial accelerometer)를 사용하였다. Fig. 4에서는 가속도

측정 과정을 개략적으로 보여주고 있다. 가속도계는 스텝과의 상대운동이 발생되지 않도록 스텝의 중앙 위치에 견고하게 부착되었으며 측정된 신호는 디지털 자료로 저장된다.

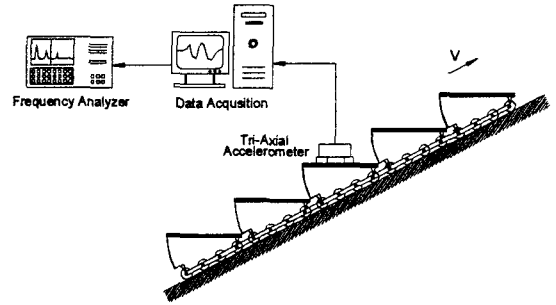


Fig. 4 Acceleration measuring device

스텝이 상부로 이동하도록 상부 터미널기어를 일정 각속도인 1.538rad/s로 회전시켰을 때 발생하는 스텝의 전,후 방향 가속도는 1/128 초 간격으로 시간영역에서 측정하였다. 그리고 측정된 가속도 자료 중에서도 특히 정상상태 구간에서의 응답을 분석 대상으로 결정하였다. 이렇게 저장된 가속도 자료는 주파수분석기(frequency analyzer)를 사용하여 주파수영역에서의 응답특성을 확인할 수 있다.

5.2 동력학 해석모델의 검증

에스컬레이터 전산모델의 신뢰성을 검증하기 위하여 승객을 탑승 시키지 않았을 때 스텝의 전, 후 방향 가속도에 대한 주파수특성을 시험 결과와 비교하였다. 본 연구의 목적은 승차감 평가 및 저감을 위한 것이므로 승차감에 큰 영향을 미치는 20Hz 이하의 가속도 성분만을 고려하였으며 결과는 Fig.5와 같다. 동력학 해석모델은 스텝부만 모델링하였기 때문에 핸드레일의 구동에 의해서 발생하는 14.5Hz의 가속도성분을 제외하고는 실제로 승차감에 큰 영향을 미치는 3.6Hz와 7.4Hz, 11Hz 및 18.3Hz의 가속도 성분을 잘 추정하고 있다. 만약 핸드레일부도 함께 고려하였다면 핸드레일의 구동효과로 인해 프레임의 굽힘변형과 스텝의 수직 및 수평 운동에 영향을 미칠 것이다.

가속도의 크기에 있어서도 유연체 프레임을 고려한 해석모델이 실제 시스템의 응답에 근접한 결과를 보이고있다. 따라서 승차감을 개선하기 위한 설계기법 적용에 실제 시스템 대신 유연체 프

리임을 고려한 전산해석모델을 사용하여도 무방하다고 할 수 있다.

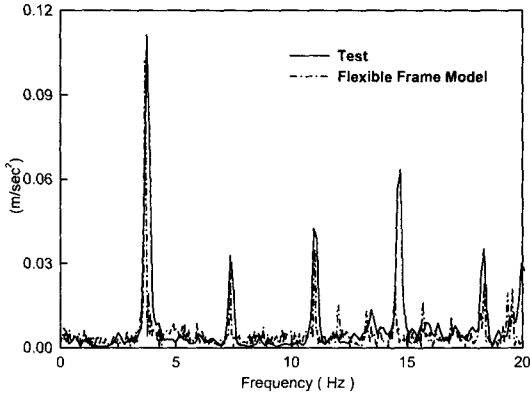


Fig. 5 Comparison with flexible frame model

6. 강건설계기법의 적용

강건설계기법은 설계인자의 조건을 최적화하는 공학적인 도구로 공학 분야에 널리 적용되고 있다⁽⁷⁻⁹⁾. 본 연구에서는 망소특성(the-smaller-the-better characteristic)에 대한 강건설계를 수행하였다.

6.1 평가 특성치의 설정단계

일반적으로 차량 탑승 시 전,후방향 진동은 1~3Hz사이에서, 수직방향 진동은 4~8Hz사이에서 승객에게 가장 민감하게 영향을 미친다⁽¹⁰⁾. 특히 에스컬레이터에서는 승객의 전,후방향 진동특성이 승차감에 가장 큰 영향을 미친다.

따라서 본 연구에서는 스텝의 전,후 방향 가속도를 주파수 분석하여 나온 피크값들을 중요도에 따라 가중치를 고려하여 합한 값을 계의 평가 특성치로 고려하였다. 가중치는 저주파 성분일수록 큰 값을 취하였다. 실제로 작동하는 에스컬레이터에서도 3.6Hz 성분이 가장 큰 영향을 미치고 있으므로 이 성분에 대한 개선 방안이 중요한 관심사가 되고 있다.

6.2 인자 및 실험행렬의 결정단계

정적인 계를 대상으로 하였으며 컴퓨터 시뮬레이션 특성상 시간이 변함에 따라서 평가 특성치가 영향을 미치는 오차인자는 고려하지 않았다. 3:한 에스컬레이터의 설계, 제조, 설치 그리고 보

수 전문가의 의견과 예비시험을 통하여 스텝의 전, 후 방향 진동에 영향을 미치는 제어인자를 도출하였으며 분석을 통하여 최종적으로 8개의 제어인자를 선정하였다.

Table 1은 선정된 제어인자와 해당하는 수준을 보여주고 있으며 선정 배경은 다음과 같다. 제어인자 A는 스텝롤러를 연결하는 스텝체인에 감쇠를, B인자는 레일의 표면 거칠기에 의한 주행저항을 나타낸다. 인자 C는 스텝 내부에 임의의 질량과 스프링으로 구성된 동흡진장치(dynamic absorber)의 설치 유무를 나타낸다. 인자 D와 H는 하부 터미널기어에 설치된 장력장치의 스프링 강성과 감쇠의 정도를 나타낸다. 인자 E는 상부 터미널기어의 구동 시 발생하는 맥동주파수의 영향을 감소시키기 위하여 반대 위상으로 구동 시켜주는 장치의 설치 유무를 나타낸다. 그리고 F인자는 터미널기어의 형상을 결정하는데 필요한 반경의 개수를, G인자는 상부 터미널기어와 레일이 연결된 곳에 설치된 롤러 가이드의 위치로 구동 시 롤러들이 터미널기어에 결합되는 조건을 결정한다.

이들 제어인자의 변동 범위는 관련 부품의 설계 및 설치 범위 내에서 수준을 나누어 결정하였다. 특히 C와 E인자는 2수준만이 선정되었기 때문에 더미법(dummy treatment)을 이용하여 C인자의 3수준은 2수준과 동일하게 하였고 E인자의 3수준은 1수준과 동일하게 하였다⁽⁹⁾. 그리고 실험에 적용할 직교배열표는 L18(2¹×3⁷) 행렬로 선정하였다.

Table 1 Control factors and levels

Control Factors		Levels		
		1	2	3
A	Damping of step-chain	High	Low	
B	Rail roughness	High	Medium	Low
C	Dynamic absorber	No	Yes	
D	Stiffness of lower tensioner	High	Medium	Low
E	Fluctuation control	No	Yes	
F	Tooth type	1R	2R	3R
G	Location of terminal guide	Low	Medium	High
H	Damping of lower tensioner	Low	Medium	High

6.3 실험 및 분석단계

평가 특성치 분류상 에스컬레이터의 진동은 작을수록 좋으며 이러한 특성을 망소특성 이라고 한다. 망소특성에 대한 S/N비(Signal to Noise ratio)는 아래의 식과 같이 정의되며⁽⁷⁾ 이 값이 클수록 우수한 진동특성을 나타냄을 의미한다.

$$\eta = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (3)$$

여기서 y_i 는 정의된 진동 특성치이며 n 은 실험 횟수이다. 직교배열표에 의해 실험을 하는 이유는 제어인자의 설계범위 내에서 최대의 S/N비를 갖게 하는 수준을 결정하려는 것이다. 앞서서도 언급했듯이 반복되는 컴퓨터 모의실험을 통한 오차특성은 없으므로 S/N비는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta = -20 \log y \quad (4)$$

각 제어인자가 성능특성에 미치는 영향도는 기여율(percent contribution)로 알 수 있으며 다음의 식과 같이 정의된다.

$$\rho_i = \eta_{\max ji} - \eta_{\min ji} \quad (5)$$

$$\gamma_i = \frac{\rho_i}{\sum \rho_i} \times 100 \quad (6)$$

여기서 $\eta_{\max ji}$ 와 $\eta_{\min ji}$ 는 각각 인자의 수준 중 최대와 최소치의 S/N비이다. 위의 식을 기초로 하여 실험에 적용된 각 인자의 S/N비와 기여율을 계산하였으며 Table 2에 정리하였다. 기여율이 클수록 특성치에 미치는 영향이 큰 것을 의미한다. Table 2에 의하면 E인자의 2수준이 진동 저감에 가장 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

6.4 최적화 및 재현성 평가단계

일반적으로 설계인자 중 기여도가 가장 큰 인자와 수준을 선정하는 것을 최적화라고 할 수 있다. 실험 및 분석단계에서 스텝의 진행방향 진동에 대해 기여율이 큰 4개의 제어인자와 이들의 최적수준을 선정하였다. 여기서 기존의 조건에 비해 최적조건에서의 개선효과를 추정할 것을 추정

개선효과(anticipated improvement)라고 하며 다음의 식으로 정의된다.

Table 2 S/N Ratios & percent contributions

Control Factors	Levels	S/N Ratio	Contribution (%)
A	1	-30.89	7.86
	2	-28.69	
B	1	-28.84	2.93
	2	-27.84	
	3	-28.42	
C	1	-33.83	17.56
	2	-27.84	
	3	-28.42	
D	1	-29.23	10.96
	2	-32.30	
	3	-28.56	
E	1	-33.23	21.49
	2	-25.20	
	3	-33.07	
F	1	-27.07	17.44
	2	-33.02	
	3	-30.01	
G	1	-31.53	11.20
	2	-31.08	
	3	-27.71	
H	1	-31.31	10.56
	2	-31.08	
	3	-27.71	

$$\lambda = \sum_{i=1}^m (\eta_{(opt)ji} - \eta_{(nor)ji}) \quad (7)$$

여기서 $\eta_{(opt)ji}$ 와 $\eta_{(nor)ji}$ 는 각각 최적인자의 최적 수준 S/N 비와 최적인자의 기존수준 S/N 비이며, m 은 선정된 최적인자의 수이다. 최종적으로는 최적화한 인자의 수준을 설정하고 나머지 인자들은 기존의 조건으로 설정한 후 실험하여 나온 S/N 비인 검증개선효과(verified improvement)를 통해 재현성(reproducibility)을 평가하게 된다.

선정된 최적인자와 수준, 식(7)에 의해서 계산된 추정개선효과, 최적인자의 수준을 적용하여 계산된 S/N 비인 검증개선효과 그리고 이 두 개선효과와의 오차를 Table 3에 정리하였다. 4개 설계인자의 최적조건을 적용하여 15% 이내의 오차를 갖는 재현성을 보임을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 Table 3의 개선안과 나머지 인자들은 초기 설계값을 적용했을 때의 승차감 개선효과를

컴퓨터 시뮬레이션을 통해 보여주고 있다. 강건 설계기법을 통하여 스텝의 전,후 방향 진동 중 승차감에 가장 큰 영향을 미치는 3.6Hz 가속도 성분의 크기를 크게 감소시킨 것을 확인할 수 있다. 그리고 개선안을 실제 에스컬레이터 시스템에 최종적으로 적용하여 Fig. 7에서 보이는 것과 같은 승차감 개선 결과를 얻을 수 있었다.

7. 결론

본 논문에서는 에스컬레이터의 개발 및 설계 단계 이전에 승차감에 영향을 미치는 스텝부의 진동 특성을 프레임 구조물의 탄성 거동현상을 포함하여 예측, 평가할 수 있는 3차원 동력학 해석모델을 개발하였다. 이 모델은 실제 에스컬레이터 스텝부에서 측정된 가속도의 주파수분석 결과와 비교하여 승차감에 중요한 영향을 미치는 저주파 진동특성을 잘 나타내고 있음을 보였다. 이와 같이 구성된 전산동력학모델에 강건설계기법을 적용하여 스텝부의 전,후 방향 승차감에 민감한 설계인자 4개와 이들의 최적수준을 결정하였다. 이때의 추정개선 효과는 15% 이내의 오차로 우수한 재현성을 얻었다.

이상과 같이 결정된 설계인자의 최적수준을 동력학 해석모델에 적용하여 승차감 향상을 확인하였으며 이 개선안을 실제 에스컬레이터 시스템에 적용하여 승차감을 크게 향상시킬 수 있었다.

Table 3 Reproducibility test

Selected Factors	Vibration			
	C	E	F	G
Optimum level	2	2	1	3
Anticipated Improvement	23.0 (dB)			
Verified Improvement	19.6 (dB)			
Error	14.8 (%)			

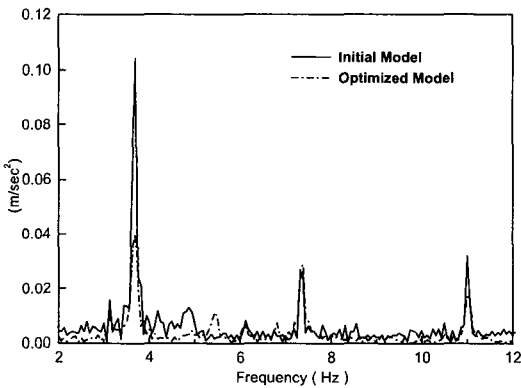


Fig. 6 Longitudinal acceleration of a step : simulation

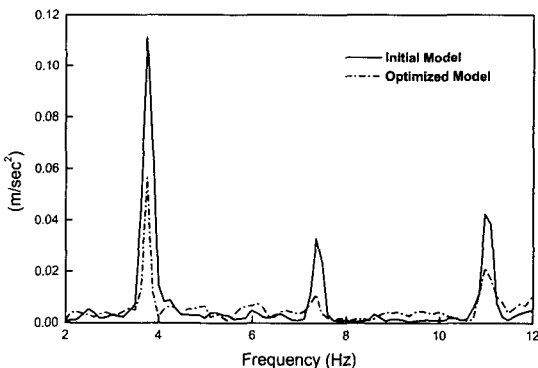


Fig. 7 Longitudinal acceleration of a step : test

참고문헌

1. Ho, J., "Elevator/Escalator Trends in Southeast Asia," Hitachi Review, Vol. 42, No. 5, pp. 179~184, 1993.
2. 一柳健, "The Study of Noise and Vibration Reduction of Escalator," 日立評論, 第48卷, 第6號, pp. 704~709, 昭和41年.
3. Kwon, Y.S., and Park, C.J., "Dynamic Characteristics Analysis of an Escalator Using the Computational Dynamics Program," ASME Design Engineering Technique Conference, pp.1~6, 1998.
4. Yoo, W.S., and Haug, E.J., "Dynamics of Articulated Structures:Part I, Theory," J. Struct. Mech., Vol. 14, No. 1, pp. 105~126, 1986.
5. Kim, S. S., and Haug, E. J., "Selection of Deformation Modes for Flexible Multibody Dynamics," Mech. Struct. & Mach., Vol. 18, No. 4, pp. 565~586, 1990.
6. Lankarani, H. M., and Nikravesh, P. E., "A Contact Force Model with Hysteresis Damping for Impact Analysis of Multibody Systems," ASME Journal of Mechanical Design, Vol. 112, pp. 369~376, 1990.

7. Phadke, M.S., Quality Engineering Using Robust Design, Prentice-Hall, 1989.
8. 이종원, "Taguchi 방법에 의한 실험 계획," 한국 자동차공학회지, Vol. 11, No. 6, pp. 3~16, 1989.
9. 박성근, 권호철, 지수윤, 다구찌기법, 희문사, 1995.
10. Gillespie, T.D., Fundamentals of Vehicle Dynamics, Society of Automotive Engineers, Inc., pp. 125~189, 1992.