

〈논 문〉

에스컬레이터의 구조적 진동 : (I) 동적 모델링

Structural Vibration in Escalators: Part 1 Dynamic Modeling

강 규 응* · 권 이 석** · 홍 성 욱***

Gyu-Woong Kang, Yi-sug Kwon and Seong-Wook Hong

(2000년 5월 22일 접수 : 2000년 6월 29일 심사완료)

Key Words : Escalator(에스컬레이터), Driving Chain(구동체인), Step Chain(스텝체인), Dynamic Modeling(동적 모델링)

ABSTRACT

Escalators are widely used for mass transportation in public places. In recent years, strict requirements on the comfort and reliability for the public transportation have drawn a great attention to vibration in escalators. This paper presents a dynamic model for escalators to be used for the analysis and design of low vibration escalators. The dynamic model is developed so as to reflect the physical observation on peculiar characteristics in escalators such as the difference between up-moving and down-moving, and the abnormal vibration affected by the load applied. For validation of the dynamic model developed, experimental results are compared with numerical results from the model. The numerical study shows that the developed model may be useful for the analysis and design of escalator systems.

1. 서 론

현재와 같은 방식의 에스컬레이터가 최초로 등장했던 100 여 년 전부터 오늘에 이르기까지 안전성과 편의성이 꾸준히 개선됨으로서 현재 에스컬레이터는 백화점, 지하철 등에서 연속적인 대량수송을 담당하는 공공 수송장치로 광범위하게 보급되고 있다. 최근에는 안전성과 편의성 외에 탑승시 사용자의 안락감이 중요하게 대두되면서 에스컬레이터의 진동과 소음 문제를 해결하기 위한 연구들도 활발하게 진행되고 있다.^(1~5) 에스컬레이터에서의 소음 및 진동 문제는 운행시의 간섭과 같은 설치 및 보수 불량 그리고 노화에 의해 크게 증가되는 경향이 있다. 그러나 이와 같은 문제들이 부품 교체 등 간단한 조치에 의해 손쉽게 해결할 수 있는 반면 에스컬레이터의 구조적인 문제에 기

인한 진동은 그 원인이나 대책을 찾기 어렵다.

에스컬레이터는 체인-스프라켓 구동부에 의해 작동되므로 기어 물림에 의한 가진력으로부터 자유스러울 수 없고, 특정한 조건에서는 공진에 의한 진동이 발생하기도 한다. 특히 에스컬레이터가 아래 방향으로 운행할 때 특정 탑승 인원 수에서 진동의 크기가 갑자기 커지는 현상이 발견되었으며, 이것에 대한 적절한 원인 규명을 하지 못하고 있는 실정이었다.

본 연구에서는 이와 같이 구조적인 문제로 발생하는 에스컬레이터의 진동원인을 분석하고 그 대책을 수립하기 위한 에스컬레이터 동적 모델링 방법에 대해 논의하였으며, 실제 설치된 에스컬레이터에서 관측된 실험적인 결과를 토대로 동적 모델링(modeling)을 통해 실험 특성을 재현할 수 있는 가상모델을 구축하였다. 또한 모델로부터 계산된 동특성을 실험결과와 비교함으로써 모델의 타당성을 검증하였다. 제안된 모델은 에스컬레이터의 동적 거동 해석과 설계변수 변경에 따른 진동 특성을 파악하여 진동 저감 방안을 결정하는데 유용하게 활용될 수 있음이 확인되었다.^(4,5)

* 정회원, 금오공과대학교 대학원

** 정회원, LG-OTIS

*** 정회원, 금오공과대학교 기계공학부

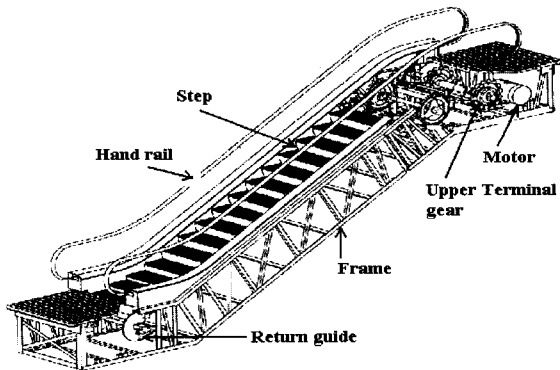


Fig. 1 Configuration of a typical escalator

2. 에스컬레이터의 구조 및 진동 특성

2.1 에스컬레이터의 기본 구조

현재 가장 많이 사용되고 있는 에스컬레이터의 기본 구조를 Fig. 1에 나타내었다. 에스컬레이터는 탑승을 위한 스텝이 체인 전동 방식으로 이송되고 있으며 스텝 체인을 구동하기 위한 구동체인 부와 스텝의 귀환부(return guide) 등이 있다. 구동을 위해 체인과 스프라켓 방식을 채택하고 있으므로 자체적인 가진력이 존재하게 되어 일정 수준 이상의 진동이 유기되는 것을 피할 수 없다. 특히 스텝체인과 스프라켓 사이에서 발생하는 기어몰림주파수(여기서는 3.65 Hz)는 비교적 저주파수 대역에 존재하게 되어 탑승시의 안락감에 큰 영향을 미치게 된다. 또한 에스컬레이터 전체 구동계의 동특성과 스텝체인 구동부의 가진 주파수 성분의 상호관련성에 의해 큰 진동이 발생할 수 있다. 따라서 에스컬레이터의 진동을 저감하기 위해서는 에스컬레이터의 가진력 및 에스컬레이터의 동특성에 대한 충분한 고찰이 필요하게 된다.

2.2 에스컬레이터 진동 측정 방법

에스컬레이터의 진동은 정상 운행 상태에서 측정하며 전용 3축 가속도계를 스텝 위에 둔 상태에서 경사면 주행 중 탑승자가 측정 개시와 종료명령을 입력함으로써 자동 측정, 저장된다. 실험을 통해 얻어진 진동 신호는 인체의 감도를 고려하여 Fig. 2와 같은 주파수 영역 가중치를 적용한 필터를 거친 후 분석하였다.⁽⁶⁾ 그리고 진동신호의 변화를 시간영역에서 뿐만 아니라 주가진 성분인 3.65 Hz와 그것의 2배수인 7.3 Hz에 관해 정리하였다. 하중 증가에 따른 진동의 변화를 고찰하기 위해 탑승인원을 증가시키면서 실험을 실시하였다. 각 인원은 한 개의 스텝에 탑승하도록 하였다. 자세한 측정방법은 참고문헌 (4)와 (5)에 기술되어 있다.

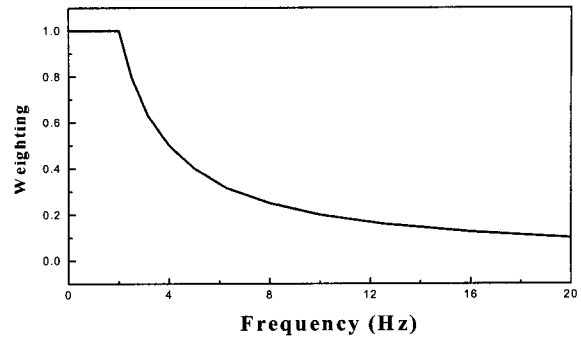


Fig. 2 Weighting function for vibration signal with respect to frequency

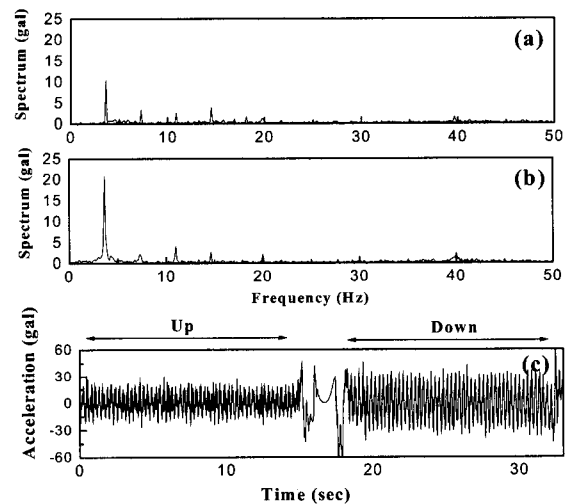


Fig. 3 Typical acceleration signals in escalator steps
(a) linear spectrum for up-moving
(b) linear spectrum for down-moving
(c) time response in consecutive up-moving and down-moving

2.3 에스컬레이터의 진동 현상 고찰

에스컬레이터는 상승 또는 하강의 두 방향 운행이 가능한데 그 운전 방향에 따라 진동 특성이 다르게 관측되고 있다. Fig. 3은 실제 설치된 에스컬레이터의 상승과 하강시에 측정된 진동측정 결과의 한 예를 보여주고 있다. 상승과 하강시에 뚜렷한 차이를 보이고 있다. 또한 하강시에는 특정한 하중조건에서 진동이 급격히 커지는 현상이 발생하고 있다.

Fig. 4에서는 탑승인원을 증가시키면서 측정된 진동특성을 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 탑승인원에 따른 진동응답의 차이가 관측되고 있으며 특정한 조건에서 진동이 매우 커짐을 확인할 수 있다.

이 의사 공진(pseudo resonance) 조건은 하강시 탑승인원의 자중에 의해 발생하는 역부하가 구동체인과 스텝체

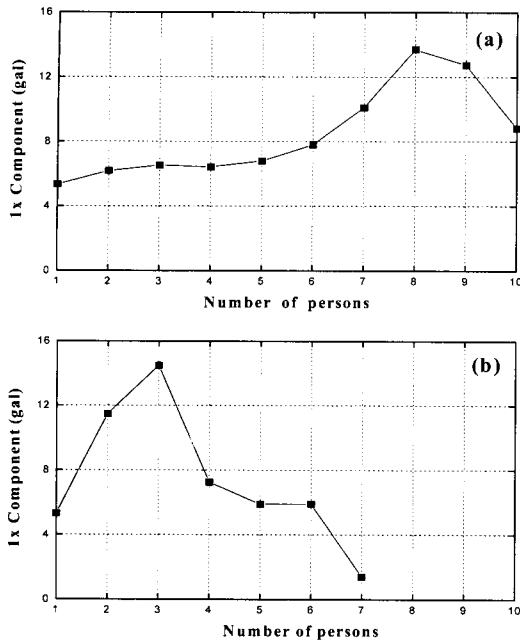


Fig. 4 Typical change in fundamental frequency (3.65Hz) component during down-moving (a) full system, (b) without handrail

인, 핸드레일 등에서 발생하는 주행저항력과 일치할 때 발생된다. 에스컬레이터의 구동체인에 가장 크게 작용하는 하중을 두가지로 나눈다면 탑승자를 이송시키기 위해 걸리는 하중(이하 탑승하중)과 핸드레일을 포함하여 스텝체인과 구동체인 등을 구동시킬 때 필요한 주행저항력으로 나눌 수 있다. 에스컬레이터의 상승 운동시에는 탑승하중방향과 주행저항 방향이 같아서 탑승하중과 주행저항력 전부가 구동계에 하중으로서 작용하게 된다. 그러나 하강 시에는 두 하중이 역방향으로 작용하게 된다. 따라서 주행저항과 같아지는 탑승인원이 되는 순간에 구동체인에는 일종의 무부하 조건이 발생하게 된다. 스텝이 상승할 때 구동 체인은 일정한 접촉조건이 유지되지만 하강할 때 무부하 조건에서 구동 체인과 스프라켓에 비접촉 상태가 발생하게 되고 이 경우 구동 체인의 강성은 급격히 낮아질 수 있다.

3. 동적 모델의 구성 및 해석 방법

3.1 모델링을 위한 기본 가정

에스컬레이터의 동적 모델을 구성하기 위해 표현한 개략적인 에스컬레이터 모형을 Fig. 5에서 보여주고 있다. Fig. 5에서 볼 수 있는 바와 같이 에스컬레이터는 모터에서 감속기로, 감속기에서 상부 터미널기어(terminal gear, TG)로 그리고 상부 TG와 스텝체인으로 이어지는 직접적인 동력 전달체계를 갖추고 있으며 상부 TG에서는 핸드

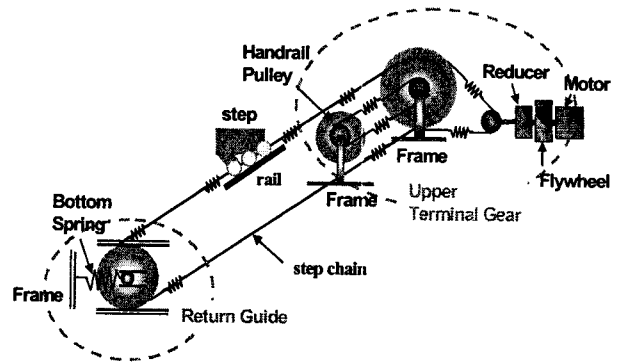


Fig. 5 Schematic drawing of an escalator

레일과 연결되어 핸드레일에서 발생하는 주행저항을 직접 받게된다. 구동 체계 자체는 비교적 단순하게 모형화 할 수 있으나 실제 주행시에는 많은 불확실성이 있다. 예컨대 주행 시 발생하는 마찰저항이나 치차의 백래쉬, 주행계에서 발생하는 불특정 접촉이나 마찰 등이 있을 수 있다. 에스컬레이터 시스템의 진동 현상을 정성적인 관점에서 규명할 수 있는 동적 모델을 수립하기 위해 다음과 같은 가정을 도입하도록 한다.

- (1) 하부스프링에 의해 스텝 체인 전체에 일정 수준 이상의 인장력 인가
- (2) 구동 체인은 종방향 스프링 요소로 모델링.
- (3) 스텝의 이동에 의한 동특성 변화 무시.
- (4) 스텝 체인은 집중 질량 및 강성으로 모델링.
- (5) 스텝은 집중 질량으로 모델링.
- (6) 사람이 탑승하면 하강 방향의 하중으로 작용. 또한 스텝에 가해지는 집중 질량으로도 모델링.
- (7) 핸드레일 체인은 스프링 요소로 모델링.
- (8) 상부 TG에서 스프라켓에 접촉되어 있는 스텝은 2.5개로서 해당 스텝은 상부 TG의 관성모멘트에 포함.
- (9) 상부 TG는 관성모멘트만으로 모델링.
 - i) 하부의 귀환부(return guide)는 수평이동만이 가능한 질량으로 모델링.
 - ii) 감속기 및 커플링은 관성모멘트로 모델링.
 - iii) 핸드레일 풀리는 관성모멘트로 모델링.

3.2 스텝 및 스텝체인부

사람이 직접 탑승하게 되는 스텝은 스텝체인에 의해 정해진 레일 위를 롤러를 이용하여 이동하게 된다. 스텝의 형상은 일정하며 에스컬레이터의 층고에 따라서 그 수가 달라지게 된다. 스텝 및 스텝체인부의 실제 형상은 Fig. 6과 같다. 스텝은 두 줄의 스텝체인을 가로지르는 봉 위에 고정되어 이끌려 이동하며 이 봉은 세 번째의 스텝체인 관절마다 하나씩 있게 된다. 스텝과 스텝체인의 질량을 합쳐서 해

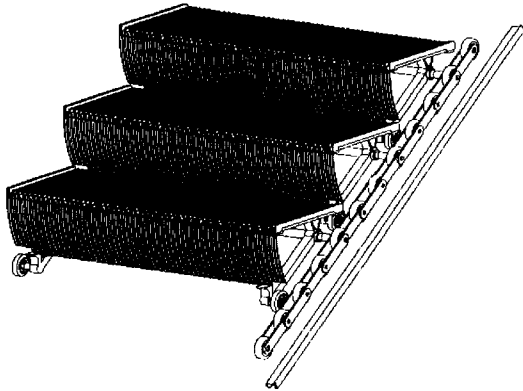


Fig. 6 Step, step roller chain and rail system

당위치에서의 집중질량으로 하였고 스텝체인 링크부의 강성을 선형스프링으로 모델링하였다. 스텝과 스텝체인부를 묶어 다음과 같이 그 질량과 강성계수를 얻을 수 있다.

$$M_e = M_{step} + M_{roller} \times 6 + M_{chain\ link} \times 6$$

$$K_{sc} = \frac{K_{chain\ link}}{3} \times 2$$

여기서 M_e, K_{sc} 은 각각 1개의 스텝과 스텝에 연결된 체인을 포함한 1유닛의 질량과 강성계수를 의미한다.

3.3 상부 구동부

Fig. 7에 에스컬레이터의 주 구동부가 있는 상부 구동부를 보여주고 있다. 상부 TG는 모터에 연결된 감속기와 구동체인에 연결되어있는 구동체인 스프라켓, 스텝체인을 구동시키는 스텝체인 스프라켓 그리고 핸드레일을 돌리기 위해 핸드레일 풀리와 체인으로 연결되어있는 핸드레일체인 스프라켓 등으로 구성된다. 동적 모델링을 위해 상부 구동부를 Fig. 8과 같이 이상화하여 표현하였다.



Fig. 7 Upper terminal gear

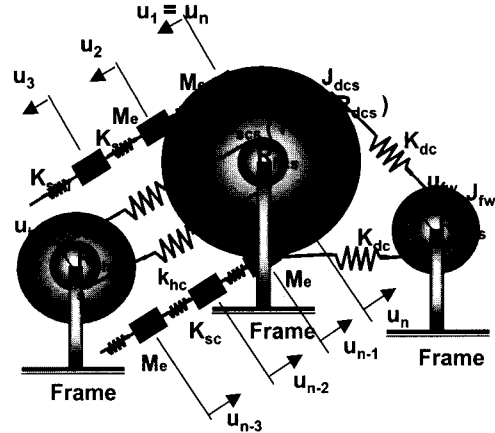


Fig. 8 Schematic drawing for upper TG and driving units

Fig. 8과 같은 이상화된 시스템 구성도로부터 다음과 같이 운동방정식을 유도할 수 있다.

$$\frac{J_{ut}}{R_{scs}^2} \ddot{u}_1 - K_{sc} u_2 - K_{sc} u_{n-1} + K_u u_1 \quad (1)$$

$$- 2 \frac{R_{dcs}}{R_{scs}} K_{dc} u_{fw} - 2 \frac{R_{hcs}}{R_{scs}} K_{hc} u_{hp} = 0$$

$$M_e \ddot{u}_2 - K_{sc} u_1 + 2K_{sc} u_2 - K_{sc} u_3 = 0 \quad (2)$$

$$M_e \ddot{u}_{n-1} - K_{sc} u_n + 2K_{sc} u_{n-1} - K_{sc} u_{n-2} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{J_{fw}}{R_{rds}^2} \ddot{u}_{fw} + 2K_{dc} u_{fw} - 2K_{dc} \frac{R_{dcs}}{R_{scs}} u_1 = 0 \quad (4)$$

$$\frac{J_{hp}}{R_{phcs}^2} \ddot{u}_{hp} + 2K_{hc} u_{hp} - 2K_{hc} \frac{R_{dcs}}{R_{scs}} u_1 = 0 \quad (5)$$

여기서 n 은 스텝에 의한 자유도이며 수식에 사용된 변수는 다음과 같다.

J_{fw} : 플라이휠의 관성 모멘트

J_{hp} : 핸드레일 풀리 관성 모멘트

K_{dc} : 구동 체인 강성

K_{hc} : 핸드레일 체인강성

$$K_u = 2K_{sc} + 2K_{dc} \left(\frac{R_{dcs}}{R_{scs}} \right)^2 + 2K_{hc} \left(\frac{R_{hcs}}{R_{scs}} \right)^2$$

R_{dcs} : 구동체인 스프라켓 반지름

R_{hcs} : 핸드레일 구동 측 스프라켓 반지름

R_{rds} : 감속기 구동 체인 스프라켓 반지름

R_{phcs} : 핸드레일 풀리 측 스프라켓 반지름

한편 상부 TG부의 관성 모멘트는 다음과 같이 계산되어진다.

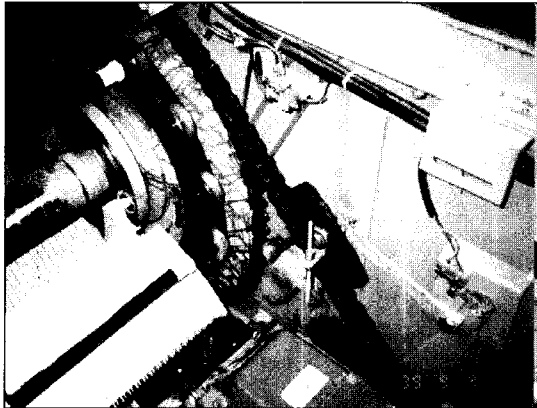
$$J_{ut} = J_{step} \times 2.5 + J_{scs} \times 2 + J_{dcs}$$

여기서

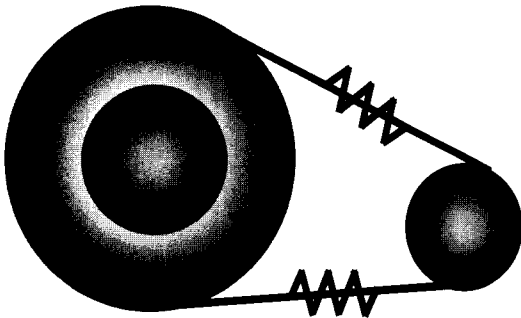
- J_{step} : 스텝의 질량 관성 모멘트
- J_{scs} : 스텝체인 스프라켓의 질량 관성 모멘트
- J_{dcs} : 구동체인 스프라켓의 질량 관성 모멘트

3.4 구동체인부

구동체인은 모터에 직렬로 연결된 감속기로부터 동력을 받아 상부 TG를 구동시키는 연결 부분으로써의 중요성 뿐만 아니라 에스컬레이터의 특성상 비교적 다른 부분에 비해 조건을 변경할 수 있으므로 전체 시스템의 동특성을 바꿀 수 있는 가장 중요한 요소로 취급된다. Fig. 9(a)는 구동체인의 실제 사진이며, Fig. 9(b)에 근사화된 동적 모델을 나타내었다. 에스컬레이터의 상승시에는 구동체인에 탑승하중에 의한 약간의 장력변화만 있게 된다. 그러나 하강시에는 2.3절에서 설명하고 있는 바와 같이 구동 체인에 걸리는 장력이 주행저항과 탑승하중의 상쇄효과에 의해 급격히 낮아지는 조건이 존재한다. 이때 발생하는 구동체인의 강성 변화를 수식화하기 위해 구동체인의 강성이 아래와 같은 식으로 표현된다고 가정한다.



(a) Driving chain and sprocket



(b) Schematic drawing for the driving chain and sprocket

Fig. 9 Driving chain system

$$K_{dc} = \begin{cases} K_o & Up \\ K_o \left[1 - a \exp \left\{ \frac{-(x - n_p)^2}{\beta} \right\} \right] & Down \end{cases} \quad (6)$$

여기서

- K_o : 정상 상태 강성계수
- a : 강성 감소 계수 ($0.5 < a < 1$)
- n_p : 주행 저항 (탑승인원수로 평가)
- x : 탑승 인원
- β : 부하 영향 범위 계수

여기서 K_o 는 직접 측정이 가능한 대개변수이나 나머지 변수들은 기종에 따라 달라질 수 있는 값들으로써 실험적으로 평가될 필요가 있다.

3.5 귀환부(Return Guide, RG)

하부의 귀환부(RG)는 Fig. 10과 같다. Fig. 11은 동적 모델 유도를 위한 개략도이다. 이 부분은 에스컬레이터의 스텝이 귀환하는 곳일 뿐 아니라, 하부 스프링을 이용하여 스텝체인에 항상 어느 정도의 긴장 상태를 유지시켜주는 역할을 한다. RG는 η 방향으로만 변위가 있을 수 있으며 회전은 없도록 제한된다. 따라서 하나의 질량체로 모델링할 수 있다. RG 부에 진입된 스텝들과 RG 사이에 접촉상태가 유지된다는 가정으로부터 다음과 같은 경계조건을 얻을 수 있다.

$$\eta = \frac{u_a - u_b}{2} = u_{j+1} \quad (7)$$

또한 RG부를 돌아서 거쳐가는 스텝들에 의해 RG에 걸리는 모멘트 평형조건으로부터 다음 식을 유도해낼 수 있다.

$$u_j - u_a + u_{j+2} - u_b = 0 \quad (8)$$

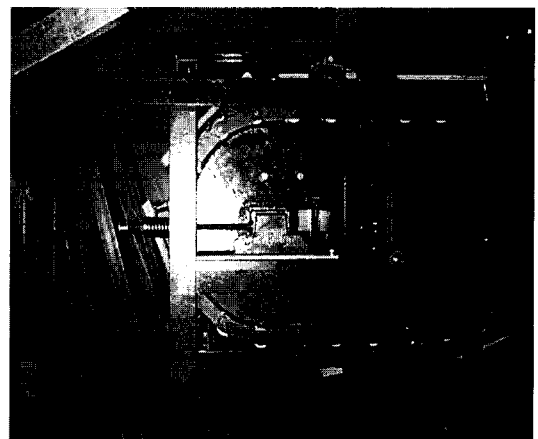


Fig. 10 Return guide

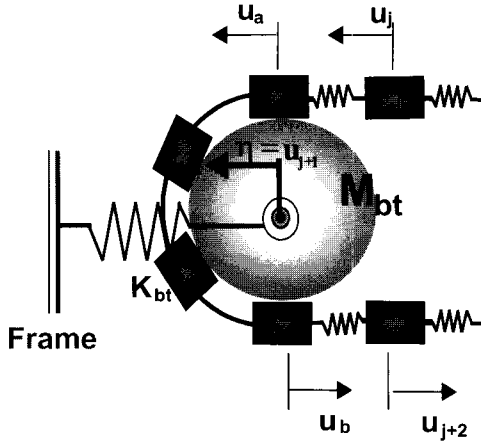


Fig. 11 Schematic drawing for the return guide

위의 두 식을 이용해 다음의 식들을 유도할 수 있다.

$$u_a = \frac{1}{2} u_j + \frac{1}{2} u_{j+2} + \eta \tag{9}$$

$$u_b = \frac{1}{2} u_j + \frac{1}{2} u_{j+2} - \eta \tag{10}$$

따라서 Fig. 11로부터 다음과 같은 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$M_e \ddot{u}_j - K_{sc} u_{j-1} + \frac{3}{2} K_{sc} u_j - K_{sc} u_{j+1} - \frac{1}{2} K_{sc} u_{j+2} = 0 \tag{11}$$

$$M_{bt} \ddot{u}_{j+1} - K_{sc} u_j + (K_{bt} + 2K_{sc}) u_{j+1} + K_{sc} u_{j+2} = 0 \tag{12}$$

$$M_e \ddot{u}_{j+2} - \frac{1}{2} K_{sc} u_j + K_{sc} u_{j+1} + \frac{3}{2} K_{sc} u_{j+2} - K_{sc} u_{j+3} = 0 \tag{13}$$

3.6 전역 운동방정식의 구성

에스컬레이터 전체 구조에 대한 운동방정식은 앞에서 나열한 요소 운동방정식 (1)~(13)을 조합함으로써 식 (14)를 얻을 수 있으며 부록에 전역 행렬을 정리하였다.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\} \tag{14}$$

여기서 시스템 전체의 자유도는 전체 스텝의 수에 플라 이 휠과 핸드레일 폴리 자유도를 더한 만큼 갖는다. 하지만 여기서 두 개의 스텝이 상부 TG 위에 항상 결합되어 있는 것으로 두면 결국 전체 자유도는 전체 스텝의 수와 일치하게 된다. 또 [C]는 감쇠행렬으로써 여기서는 비례감쇠(Proportional damping)라고 가정한다.

3.7 시스템의 동적 해석 방법

시스템에 대한 운동방정식으로부터 다음과 같은 고유치

문제를 얻을 수 있다.

$$([K] - \omega^2 [M])\{u_0\} = 0 \tag{15}$$

고유치 문제로부터 얻어지는 고유벡터는 다음과 같은 직교성을 갖도록 정규화될 수 있다.

$$u_i M u_k = \delta_{ik}, \quad u_i K u_k = \omega_i^2 \delta_{ik} \tag{16}$$

*i*번째 모드의 감쇠비를 ζ_i 라하면 모드 확장 이론에 의해 주파수 응답 함수를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$[H(\omega)] = \sum_{i=1}^N \frac{u_i u_i^t}{\omega_i^2 - \omega^2 + j2\zeta_i \omega_i \omega} \tag{17}$$

4. 실험 및 모델의 검증

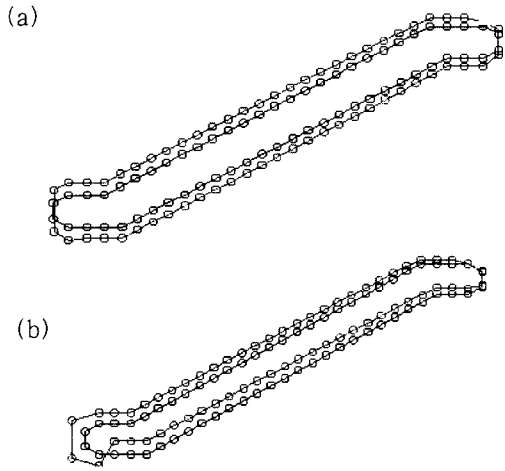
개발된 동적 모델과 실험 결과를 비교 분석하였다. 본 실험에 사용된 에스컬레이터는 총고 4.5 m로서 납선에 많이 설치되어있는 가장 보편적인 사양의 모델이다.

식 (14)~식(17)과 같이 얻어진 모델에 대해 컴퓨터 프로그램을 작성하고 에스컬레이터에서의 진동 특성을 분석하였다. 모델에서 필요로 하는 변수들은 부분적으로는 요소에 대한 실험으로부터 얻었으며 나머지는 계산을 통해 확보하였다. 그러나 시스템 전체에 걸쳐 영향을 미치고 있는 마찰력 등에 기인한 감쇠의 크기와 가진력의 크기와 조건 등을 파악하기 어렵기 때문에 계산에서 얻어지는 결과와 실험 결과를 정량적으로 비교하는 것은 매우 어렵다. 여기서는 에스컬레이터의 진동 모드 형상 분석 및 고정된 한 위치에서의 주파수 응답 계산을 통해 실험적으로 나타난 현상과의 비교를 수행하였다.

4.1 모드 형상

Fig. 12는 모델로부터 얻어진 2개의 진동 모드를 보여주고 있다. 스텝 진행방향의 진동 모드를 표현하기 어렵기 때문에 횡방향 변위 형태로 나타내었다. 진동응답에 많은 영향을 주는 첫 번째 진동모드에 의하면 스텝의 진동이 아래로 갈수록 더 커져 가는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 현상은 실험을 통해서도 확인해 볼 수 있다.

Fig. 13은 두 개의 센서를 이용하여 에스컬레이터의 상부와 하부에서 동시에 측정된 진동신호를 비교한 것이다. 항상 하부의 진동이 크게 관측됨을 볼 수 있다. 한편 하부 RG의 움직임이 거의 없다는 것을 알 수 있다. 실제로 에스컬레이터의 진동저감을 위한 초기 연구에서는 하부 스프링의 강성을 변화시키거나 댐퍼를 삽입하는 등 RG에 대한 동특성 변화 방법을 집중 연구하였으나 효과적이지 못하거나 그 경향이 일정하지도 않았다. 따라서 이 부분은



(a) 1st Mode (b) 2nd Mode
Fig. 12 Mode shapes

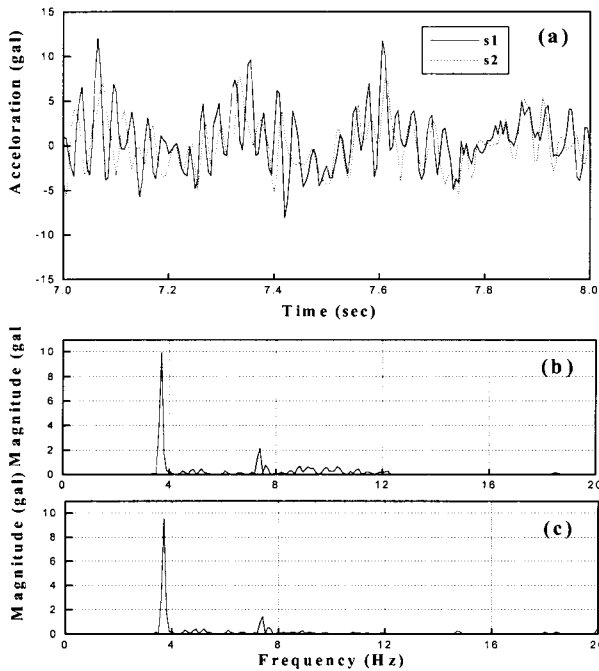


Fig. 13 Signal for comparison of two sensors located at two different steps under down-moving
(a) time response
(b) linear spectrum for sensor 1 (lower)
(c) linear spectrum for sensor 2 (upper)

진동저감을 위한 동특성 변경에는 효과적인 위치가 아니라는 결론을 얻을 수 있다. 실제 실험에서도 하부 스프링을 이용하여 적당한 스텝 체인의 긴장상태를 유지해주면 하부스프링의 강성은 큰 영향을 주지 못함을 확인할 수 있었다.

4.2 상승 실험

Fig. 14는 에스컬레이터의 상승시에 얻어진 가속도 신호에 대해 스펙트럼 분석을 통해 얻은 3.65 Hz와 7.30 Hz의 크기를 나타내고 있다. 탑승인원의 증가에 따라 진동의 크기에 큰 변화가 없음을 볼 수 있다. 이것은 상승시에 탑승 하중방향과 핸드레일구동에 따른 하중의 방향이 같아지기 때문에 구동 체인부의 긴장/이완 상태가 일정하게 유지되므로 동적인 변화가 탑승인원의 증가에 의한 질량 증가 정도로 미미하기 때문인 것을 보인다. 또한 실험을 통해 상승시에는 기어물림주파수 주성분인 3.65 Hz보다 2배수인 7.3 Hz 성분에 의한 가진이 더 큰 영향을 주고 있음을 알 수 있다. Fig. 15는 개발된 프로그램을 이용해서 탑승인원수의 증가에 따른 주파수 응답 함수 변화를 도시한 것이다. 그리고 Table 1에는 아래 3기 고유진동수의 변화를 비교해서 보여주고 있다. Fig. 15와 Table 1을 통해 탑승인원의 증가에 따라서 1차 고유진동수는 주 가진성분인 3.65 Hz와 상당히 차이가 있는 반면 2차 고유진동수는 그것의 2배수인 7.3 Hz와 비교적 근접해 있음을 알 수 있을 수 있다. 이와 같은 결과로부터 실험에 의해 얻은 Fig. 14가 잘 설명됨을 알 수 있다. 수치실험을 통해 얻은 가속도에 대한 주파수 응답 함수에서 3.65 Hz와 7.3 Hz 일

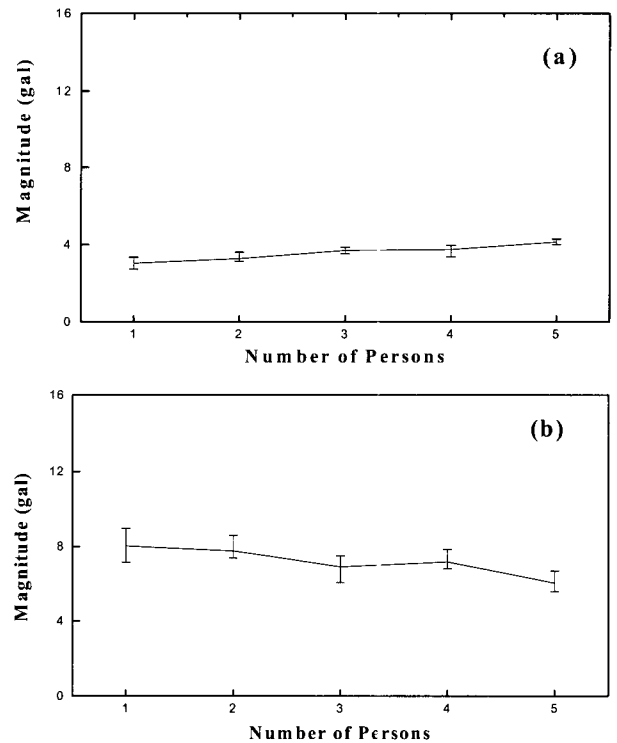


Fig. 14 Experiment: 1X, 2X components with increasing the number of persons during up-moving
(a) 1X (3.65 Hz), (b) 2X (7.3 Hz)

Table 1 Comparison of first three natural frequencies

Number of persons	First	Second	Third
1	6.22151	7.86560	16.38870
2	6.08291	7.74382	16.37857
3	5.94303	7.65298	16.37004
4	5.80659	7.58518	16.36338
5	5.67667	7.53417	16.35858

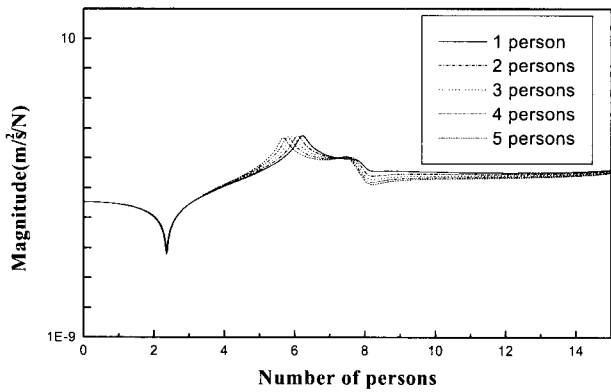


Fig. 15 Change in inertance due to the number of person

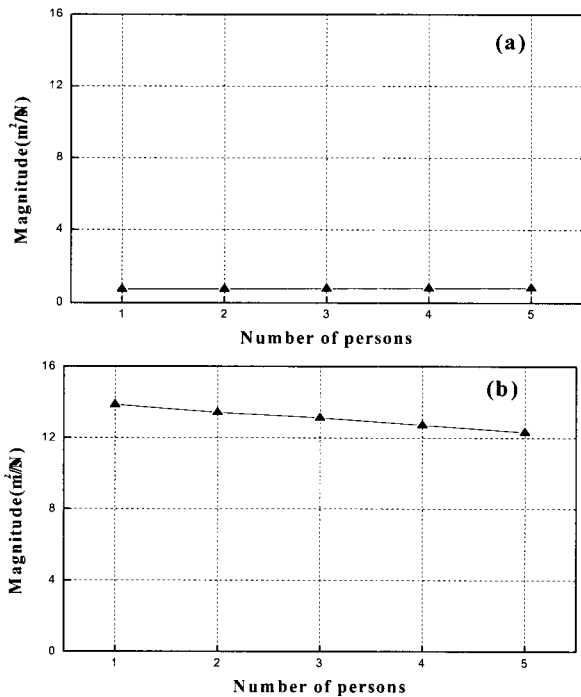


Fig. 16 Simulation: 1X, 2X components in inertance with increasing the number of persons during up-moving
(a) 1X(3.65 Hz), (b) 2X(7.3 Hz)

때의 크기를 Fig. 16에 도시하였다. Fig. 16에서는 실험을 통해 얻은 결과처럼 3.65 Hz가 진동에 크게 영향을 주는 성분이 아닌 것을 알 수 있으며 사람수의 변화에 따라서도 그 변화가 거의 없음을 확인할 수 있다. 7.3 Hz성분을 나타내고 있는 그림에서도 실험 결과와 유사한 경향을 나타내는 것을 볼 수 있다.

4.3 하강 실험

Fig. 17은 탑승인원 증가에 따른 진동신호 스펙트럼 변화를 3.65 Hz와 7.3 Hz에 대해 정리한 것이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 탑승인원의 증가에 따라 3.65 Hz 성분이 점차 커지다가 특정한 탑승인원수(여기서는 4명)에서 큰 값을 가지고 다시 탑승인원이 더욱 증가하면 다시 응답이 줄어들게 된다. 그러나 2배수인 7.3 Hz의 성분은 인원수의 증가에 따라 전체적으로 감소해가는 것을 알 수 있었다. 이와 같은 특성은 특정하중조건에서 가진력의 증가가 아니라 동적 특성 변화에 의한 것임을 시사하고 있다. 에스컬레이터의 하강시에는 Fig. 4에서 볼 수 있듯 탑승하중과 주행저항이 같아지는 조건에서 진동이 급격히 커지는 것을 실험을 통해 알 수 있다.

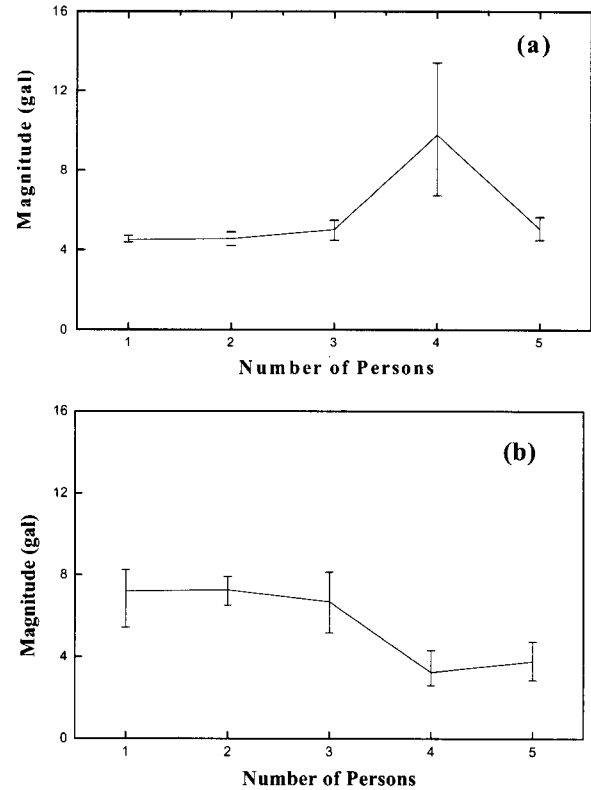


Fig. 17 Experiment: 1X, 2X components with increasing the number of persons during down-moving
(a) 1X (3.65 Hz), (b) 2X (7.3 Hz)

구동체인이 무부하 상태가 되는 이 특정 하중을 기준으로 이보다 적은 탑승인원 일 때는 에스컬레이터의 구동체인의 아래쪽이 긴장상태로 운행되지만 이 특정하중 이상이 탑승한 이후에는 구동체인의 위쪽이 긴장상태가 되고 아래 쪽은 이완 상태가 된다. 이와 같이 상태가 바뀌는 천이영역에서 진동현상은 일종의 공진 상태가 된다. 이런 탑승하중은 시스템에 따라 정도의 차이를 보이지만 모든 기종에서 반드시 나타나는 현상이다. 본 실험에서 사용된 기종은 탑승자가 4명일 때 이와 같은 상태가 되는 것을 확인할 수 있다. 그러나 핸드레일 저항을 증가시키거나 이와 유사한 방법으로 주행저항을 증가시키면 무부하 공진 조건이 변화하게 된다. 따라서 동일한 기종에서도 주행저항에 따라 서로 다른 탑승 인원수에서 무부하 공진이 일어난다.

Fig. 18에는 탑승인원의 증가에 따른 주파수 응답함수 변화를 보이고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 탑승인원이 4명일 때 주파수 응답함수가 피크점이 급격히 3.65 Hz 근처로 옮겨가는 것을 볼 수 있다. 이것은 무부하 공진점에서의 특이현상을 구동체인의 강성변화로 모델링하여 표현한 것이다. Table 2에는 처음 3개의 고유진동수를 정리하였다. Fig. 19에는 수치계산을 통해 얻은 주파수 응답에서 탑승인원 증가에 따른 3.65 Hz와 7.30 Hz의 응답 크기를 나타낸 것이다. 이는 실험결과와 같은 경향이 나타나는 것을 알 수 있다.

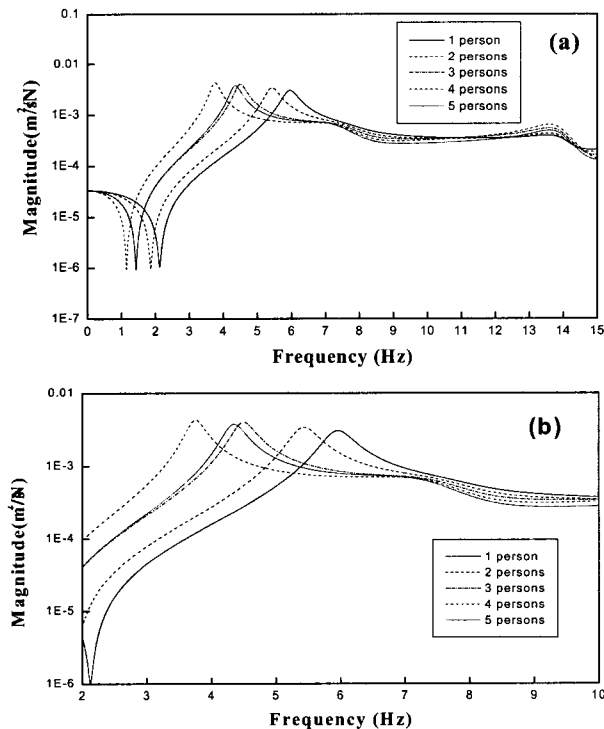


Fig. 18 Change in inertance with increasing the number of persons during down-moving (a) wide range, (b) zoomed

Table 2 Comparison of first three natural frequencies

Number of persons	First	Second	Third
1	5.945796	7.862776	13.966752
2	5.420859	7.723463	13.932772
3	4.490474	7.586704	13.868224
4	3.748858	7.462277	13.816311
5	4.342999	7.395858	13.855673

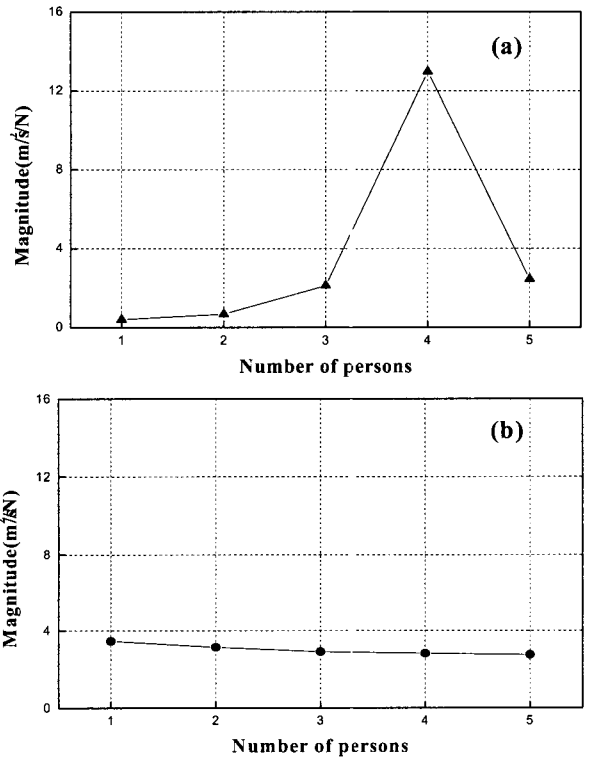


Fig. 19 Simulation: change in 1X, 2X components with increasing the number of persons during down-moving (a) 1X(3.65 Hz), (b) 2X (7.3 Hz)

5. 결 론

본 연구에서는 에스컬레이터 진동원 분석 및 대책 수립에 활용하기 위한 동적 모델을 구축하였으며 실험적인 현상과의 분석을 통해 모델의 적합성을 검증하였다. 특히 에스컬레이터의 상승과 하강시의 진동특성 차이를 표현하기 위해 하강시의 구동체인부의 강성계수를 주행저항의 함수로 표현함으로써 정성적으로 상승시와 하강시를 모두 설명할 수 있는 모델이 되었다. 개발된 모델은 실제 진동 저감을 위해 활용되어 그 유용성을 확인할 수 있었다.^(4,5)

