

# 에스컬레이터의 동적 모델링 및 실험적 검증

°강규웅\*, 권이석\*\*, 송승봉\*\*, 홍성욱\*\*\*

## Dynamic Modeling and Experimental Validation for Escalators

Gyu-Woong Kang, Yi-Sug Kwon, Seung-Bong Song and Seong-Wook Hong

### ABSTRACT

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 such as the difference between up moving and down moving, and the resonance 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 is useful for analysis and design of escalator systems.

### 1. 서 론

본 연구에서는 구조적인 문제로 발생하는 에스컬레이터의 진동원인을 분석하고 이에 대한 대책을 수립하기 위한 에스컬레이터 동적 모델링 방법에 대해 논의하였다. 에스컬레이터는 체인-스프라켓 구동부에 의해 작동되므로 기어 물림에 의한 가진력으로 부터 자유스러울 수 없고, 특정한 조건에서는 공진에 의한 진동이 발생하기도 한다. 특히, 에스컬레이터가 아래 방향으로 운행할 때 특정 탑승인원 수에서 진동의 크기가 갑자기 커지는 현상이 발견되었으며, 이것에 대한 적절한 원인 규명을 하지 못하고 있는 실정이었다. 본 연구에서는 실제 설치된 에스컬레이터에서 관측된 실험적인 결과를 토대로 동적 모델링(modeling)을 통해 실험 특성을 재현할 수 있는 가상모형을 구축하였다. 또한 모델로부터 계산된 동특성을 실험결과와 비교함으로써 모델의 타당성을 검증하였다. 제안된 모델은 에스컬레이터의 진동저감 방안을 결정하는데 유용하게 활용될 수 있음이 확인되었다[1-4].

### 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 구동체인부와 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 거어물림 주파수인 3.65 Hz는 비교적 저주파수 대역에 존재하게 되어 탑승시의 안락감에 큰 영향을 미치게 된다.

#### 2.2 에스컬레이터 진동 측정 방법

에스컬레이터의 진동은 정상 운행 상태에서 측정하며 전용 3축 진동측정기를 스텝 위에 둔 상태에서 정사면 주행 중 탑승자가 측정 개시와 종료 명령을 입력함으로써 자동 측정, 저장된다. 실험을 통해 얻어진 진동 신호는 인체의 감도를 고려하여 주파수 영역 가중함수(또는 필터)를 거친 후 분석하였다. 진동신호의 변화를 시간영역에서 뿐

\* 금오공과대학교 대학원

\*\* LG-OTIS

\*\*\* 금오공과대학교 기계공학부

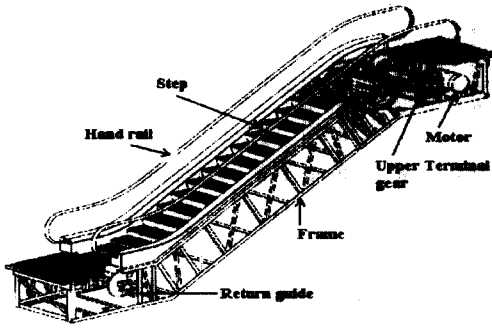


Fig. 1 Configuration of a typical escalator

만 아니라 주 가진 성분인 3.65Hz와 그것의 2배수인 7.3Hz에 관해 측정한다. 하중의 증가에 따른 진동의 변화를 고찰하기 위해 탑승인원을 증가시키면서 실험을 실시한다. 각 인원은 한 개의 스텝에 탑승하도록 하였다.

### 2.3 에스컬레이터의 진동 현상 고찰

에스컬레이터는 상승, 혹은 하강의 두 방향 운행이 가능한데 그 운전 방향에 따라 진동 특성이 다르게 관측되고 있다. Fig. 2는 실제 설치된 에스컬레이터에서 측정된 상승과 하강을 반복하면서 측정된 진동신호의 한 예를 보여주고 있다. 상승과 하강시에 뚜렷한 차이를 보이고 있다. 또한, 하강시에는 특정한 하중조건에서 진동이 급격히 커지는 현상이 발생하고 있다. 한편 탑승인원을 증가시키면 진동응답의 차이가 관측되고 있으며 특정한 하강조건에서 진동이 매우 커지는데 이 조건은 하강시 탑승인원의 자중에 의해 발생하는 역부하가 구동체인과 스텝체인, 핸드레일 등에서 발생하는 주행저항력과 일치할 때 발생된다.

## 3. 동적 모델의 구성 및 해석 방법

에스컬레이터의 동적 모델을 구성하기 위해 표현한 개략적인 에스컬레이터 모형을 Fig. 3에서 보여주고 있다.

### 3.1 스텝 및 스텝 체인부

스텝 및 스텝 체인부의 실제 형상은 Fig. 4와

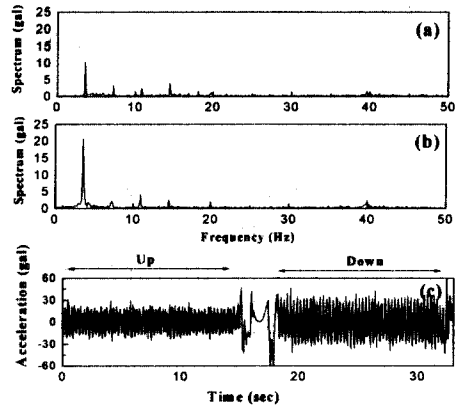


Fig. 2 Typical acceleration signals in escalator steps

- (a) liner spectrum during up-moving
- (b) liner spectrum during down-moving
- (c) time response in consecutive up-moving and down-moving

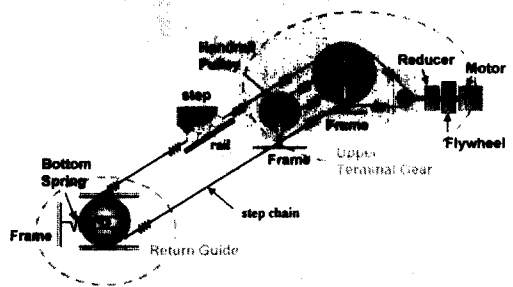


Fig. 3 Schematic drawing of an escalator

같다. 스텝은 두 줄의 스텝체인을 가로지르는 봉 위에 고정되어 이꼴러 이동하며 이 봉은 세 번째의 스텝체인 관절마다 하나씩 있게 된다. 스텝과 스텝체인의 질량을 합쳐서 해당위치에서의 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.

### 3.2 상부 구동부

동적 모델링을 위해 상부 구동부를 Fig. 5와 같이 이상화하여 표현하였다. Fig. 5와 같은 이상화된 시스템 구성도로부터 다음과 같이 운동방정식을 유도할 수 있다

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

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

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

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

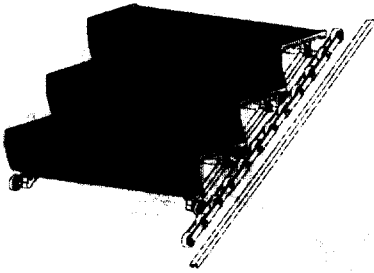


Fig. 4 Step, step roller chain and rail system

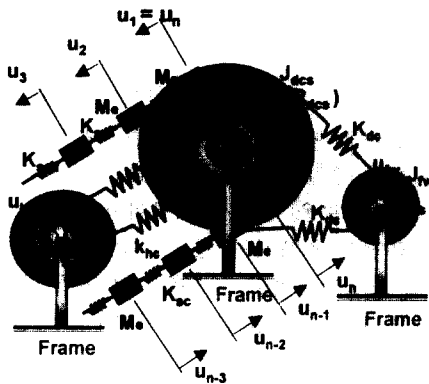


Fig. 5 Schematic drawing for upper TG and driving units

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

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

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

$J_{fw}$  : 플라이휠의 관성 모멘트

$J_{hp}$  : 핸드레일 폴리 관성모멘트

$K_{dc}$  : 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 체인 스프라켓 반지름

$R_{rds}$  : 감속기 구동 체인 스프라켓 반지름

$R_{phcs}$  : 폴리 핸드레일 체인 스프라켓 반지름

### 3.3 구동체인부

에스컬레이터의 상승시에 구동체인에 한쪽 방향으로 장력이 가해지고 있는 것과는 달리 하강시에는 구동체인에 걸리는 장력의 변화에 따른 구동체인의 강성 변화를 수식화하기 위해 구동체인의 강성이 아래와 같은 식으로 표현된다고 가정한다.

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

여기서

$K_o$  : 정상 상태 강성계수

$\alpha$  : 강성 감소 계수 ( $0.5 < \alpha < 1$ )

$n_p$  : 주행 저항 (탑승인원수로 평가)

$x$  : 탑승 인원

$\beta$  : 부하 영향 범위 계수

여기서  $K_o$ 는 직접 측정이 가능한 매개변수이나

나머지 변수들은 기중에 따라 달라질 수 있는 값들로서 실험적으로 평가될 필요가 있다.

### 3.4 귀환부(Return Guide, RG) 모델링

Fig. 6은 동적 모델 유도를 위한 하부 귀환부의 모형이다. 이 부분은 에스컬레이터의 스텝이 귀환하는 곳일 뿐 아니라, 하부 스프링을 이용하여 스텝체인에 항상 어느 정도의 긴장 상태를 유지시켜 주는 역할을 한다. RG는  $\eta$  방향으로만 변위가 있을 수 있으며 회전이 없도록 제한된다. 따라서 하나의 질량체로 모델링할 수 있다. RG 부에 진입된 스텝들과 RG 사이에 접촉상태가 유지된다는 가정과 RG부를 돌아서 거쳐가는 스텝들에 의해 RG에 걸리는 모멘트 평형조건으로부터 다음 식을 유도해낼 수 있다.

$$u_a = \frac{1}{2} u_j + \frac{1}{2} u_{j+2} + \eta \quad (9)$$

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

따라서 Fig. 6으로부터 다음과 같은 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$M_a \ddot{u}_j - K_{sc} u_{j-1} + \frac{3}{2} K_{sc} u_j - K_{sc} u_{j+1} - \frac{1}{2} K_{sc} u_{j+2} = 0 \quad (11)$$

$$M_M \ddot{u}_{j+1} - K_{sc} u_j + (K_M + 2K_{sc}) u_{j+1} + K_{sc} u_{j+2} = 0 \quad (12)$$

$$M_a \ddot{u}_{j+2} - \frac{1}{2} K_{sc} u_j + K_{sc} u_{j+1} + \frac{3}{2} K_{sc} u_{j+2} - K_{sc} u_{j+3} = 0 \quad (13)$$

### 3.5 전역 운동방정식의 구성

에스컬레이터 전체 구조에 대한 운동방정식은 앞에서 나열한 요소 운동방정식을 조합함으로써 다음과 같이 얻을 수 있다.

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

여기서 시스템 전체의 자유도는 전체 스텝의 수에 플라이 휠과 핸드레일 폴리 자유도 더한 만큼 갖는다. 그러나 여기서 두 개의 스텝이 상부 TG 위에 항상 결합되어 있기는 것으로 두면 결국 전체 자유도는 전체 스텝의 수와 일치하게 된다.

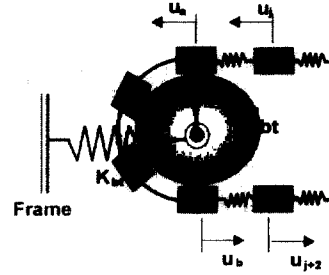


Fig. 6 Schematic drawing for the return guide

## 4. 실험 및 모델의 검증

본 실험에 사용된 에스컬레이터는 총고 4.5m로서 남선에 많이 설치되어있는 가장 보편적인 사양의 모델이다.

### 4.1 모드 형상

Fig. 7은 모델로부터 얻어진 첫번째 진동 모드를 보여주고 있다. 스텝 진행방향의 진동을 횡방향 변위로 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 확인할 수 있다. 하부 스프링을 이용하여 적당한 스텝 체인의 긴장 상태를 유지해주면 하부스프링의 강성은 동특성에 큰 영향을 주지 못함을 확인할 수 있었다.

### 4.2 상승 실험

Fig. 8은 에스컬레이터의 상승시에 얻어진 가속도 신호에 대해 스펙트럼 분석을 통해 얻은 3.65Hz와 7.30Hz의 크기를 나타내고 있다. 탑승인원의 증가에 따라 진동의 크기에 큰 변화가 없음을 볼 수 있다. 이것은 동적인 변화가 탑승인원의 증가에 의한 질량 증가에 나타나는 정도로 미미하기 때문인 것을 보인다. 또한 실험을 통해 상승시에는 기어물림주파수 주성분인 3.65Hz보다 2배수인 7.3Hz 성분에 의한 가진이 더 큰 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 수치실험을 통해 얻은 주파수 응답함수(가속도에 대한 주파수 응답 함수)에서 3.65Hz, 7.3Hz일 때의 크기를 Fig. 9에 도시하였다.

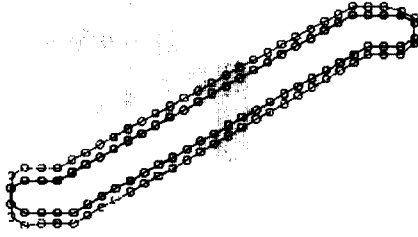


Fig. 7 First mode shape

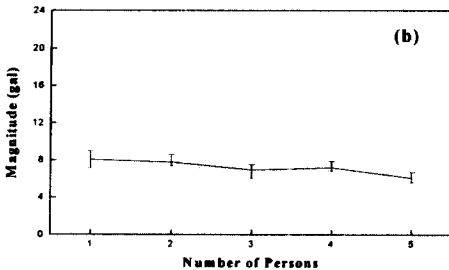
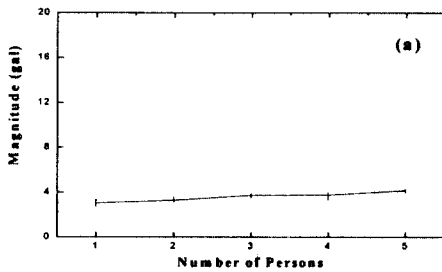


Fig. 8 Change frequency components due to the number of persons during up-moving (a) 1X (3.65 Hz), (b) 2X (7.3 Hz)

Fig. 9에서는 실험을 통해 얻은 결과처럼 3.65Hz가 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.

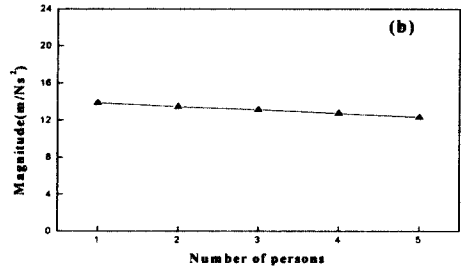
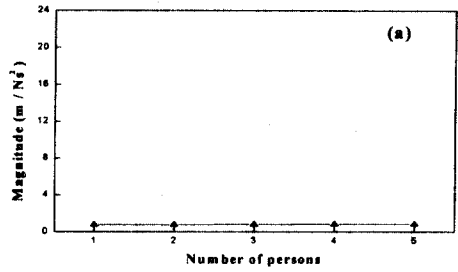


Fig. 9 Simulation: 1X, 2X components in inertance with increasing the number of persons during up-moving; (a) 1X(3.65 Hz), (b) 2X(7.3 Hz)

### 4.3 하강 실험

Fig. 10은 탑승인원 증가에 따른 진동신호 스펙트럼 변화를 3.65Hz와 7.3Hz에 대해 정리한 것이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 탑승인원의 증가에 따라 3.65Hz 성분이 점차 커지다가 특정한 탑승인원 수(여기서는 4명)에서 큰 값을 가지고 다시 탑승인원이 더욱 증가하면 다시 응답이 줄어들게 된다. 그러나 2배수인 7.3Hz의 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 앞에서 설명했듯이 탑승하중과 주행저항이 같아지는 조건에서 진동이 급격히 커지는 것을 실험을 통해 알 수 있다. 본 실험에서 사용된 기종은 탑승자가 4명일 때 이와 같은 상태가 되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 11에는 탑승인원의 증가에 따른 주파수 응답함수 변화를 보이고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 탑승인원이 4명일 때 주파수 응답함수가 피크

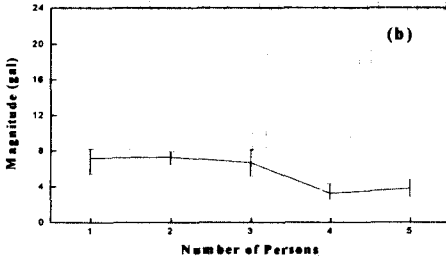
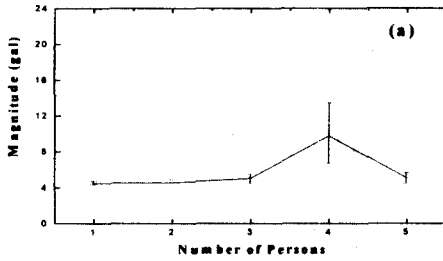


Fig. 10 Experiment: 1X, 2X components in inertance with increasing the number of persons during up-moving  
(a) 1X (3.65 Hz), (b) 2X (7.3 Hz)

점이 급격히 3.65 Hz 근처로 옮겨가는 것을 볼 수 있다. Fig. 12에는 주파수 응답에서 탑승인원 증가에 따른 3.65Hz와 7.30Hz의 응답 크기를 나타낸 것이다. 여기서도 실험에서와 같은 경향이 나타나는 것을 알 수 있다.

### 5. 결론

본 연구에서는 에스컬레이터 진동원 분석 및 대책 수립에 활용하기 위한 동적 모델을 구축하였으며 실험적인 현상과의 분석을 통해 모델의 적합성을 검증하였다. 개발된 모델은 실제 진동 저감을 위해 활용되어 그 유용성을 확인할 수 있었다 [3].

### 참고문헌

[1] 권이석, 박선용, 김성대, 서장원, 김석관, 이종원, 1996,

“다꾸찌기법을 이용한 에스컬레이터의 소음 저감에 관한 연구,” 한국소음진동공학회 춘계학술대회는 문집, pp142-147

[2] 박찬중, 권이석, 박태원, 1999, “전산모델을 이용한 에스컬레이터의 동특성 해석,” 한국정밀공학회지, 제16권 제4호, pp.95-101.

[3] 홍성욱 외 3인, 1999, “에스컬레이터 진동 분석 및 저감 대책 수립,” LG OTIS 최종보고서.

[4] 임수영, 권이석, 박선용, 홍성욱, 2000, “에스컬레이터 진동 분석 및 대책,” 한국소음진동공학회 춘계학술대회, 제주대학교.

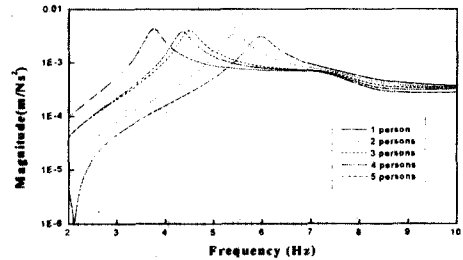


Fig. 11 Change in inertance with increasing the number of persons

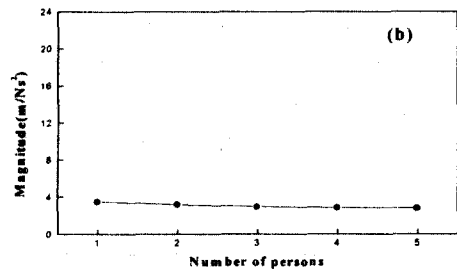
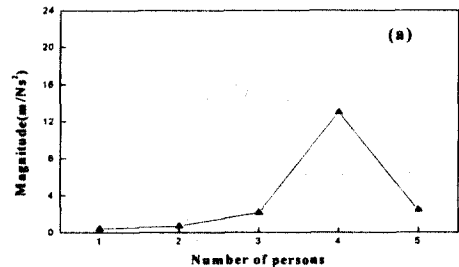


Fig. 12 Simulation: change in 1X, 2X components with increasing the number of persons during down-moving: (a) 1X(3.65 Hz), (b) 2X (7.3 Hz)