

# 에스컬레이터 진동 분석 및 대책

°임수영\* · 권이석\*\* · 박선용\*\* · 홍성욱\*\*\*

## Analysis and Countermeasure for Escalator Vibration

Su-Young Lim, Yi-Sug Kwon, Seon-Ryong Park and Seong-Wook Hong

### ABSTRACT

This paper deals with an analysis and countermeasure of escalator vibration. The vibration characteristics of escalators are studied theoretically and experimentally to find the main cause of severe vibration. The main source of vibration in escalators is found to be chordal effect due to the step chain and sprocket system. It is also found that the vibration become significantly large at so called no load condition, in which the load due to passengers, during down-moving, is equal to the resistive force in the driving system. Dynamic absorbers are implemented to suppress the vibration. A theoretical analysis is made to determine the appropriate dynamic absorber. Theoretical and experimental study shows that dynamic absorber is effective to suppress the vibration in escalators.

### 1. 서론

지난 수십년 간의 기술 개발에 따라 에스컬레이터의 안전성이 확보되면서 최근에는 점차 에스컬레이터 탑승시의 쾌적함에 관심이 모아져 왔다[1-3]. 본 연구에서는 에스컬레이터 탑승시의 안락감에 큰 영향을 미치는 진동의 원인을 분석하고 그 대책을 수립, 적용하였다.

본 연구에서는 먼저 실험을 통하여 에스컬레이터의 진동에 영향이 큰 가진원과 에스컬레이터에서의 여러 변수들과의 관련성을 분석하였다. 에스컬레이터의 구조적 진동 저감을 위해 가진원을 제거하는 대단히 어렵다. 특히 기 설치된 에스컬레이터에서는 가진원을 직접 저감하는 것이 매우 어렵다. 본 연구에서 대상이 되는 에스컬레이터에서는 코달효과에 의한 가진원에 항상 노출될 뿐만 아니라 하중의 변화에 따른 특이 진동이 발생하게 되

어 가진원을 제거하는 방식의 진동저감이 어려우며 에스컬레이터의 구조를 크게 바꾸는 방식의 구조 동특성 변경도 적용이 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 조건에 부합될 수 있는 진동 저감 방법으로 동흡진기를 제안하였다. 동흡진기의 효과를 평가하기 위해 개발된 동적 모델[1]을 이용하여 주요 파라미터의 변화에 따른 효과를 분석하였다. 또한 실험을 통하여 동흡진기가 이미 설치된 에스컬레이터의 진동을 저감하는데 효과적으로 활용될 수 있음을 확인할 수 있었다. 마지막으로 이와 같은 수치해석 및 실험을 통해 얻어진 결과를 토대로 실제 설치된 에스컬레이터 용 동흡진기를 제작, 적용하였으며 매우 우수한 진동 저감 효과를 얻을 수 있었다[1-3].

### 2. 에스컬레이터 진동원 분석

#### 2.1 진동 측정 및 특징

에스컬레이터의 구조는 Fig. 1,2와 같다.

\* : 금오공과대학교 대학원

\*\* : LG - OTIS

\*\*\*: 금오공과대학교 기계공학부



Fig. 1 Escalator system

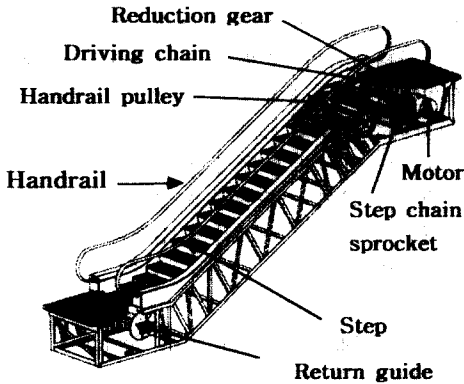


Fig. 2 Schematic of escalator

에스컬레이터 탑승감에는 스텝의 진동이 절대적인 영향을 미치게 된다. 따라서 스텝의 진동을 중심으로 측정, 분석하였다. 스텝 진동의 측정은 고속성상 에스컬레이터의 운전 중 발생하게 되고 스텝이 이동하게 되므로 에스컬레이터가 상승 및 하강 운행될 때 이동 중 측정한다. 측정 방식은 3축 가속도계가 장착된 전용 측정장비를 스텝 위에 두고 승차 구간 중 경사부분에서의 스텝 진동을 이동하면서 측정하게 된다. 그 중에서도 진행방향의 가속도에 대해 A95와 주파수 성분 분석을 실시한다. 여기서 A95란 작업자가 선정한 측정시간 범위에서 100개의 부분 최대, 최소점들을 취하여 이것 중 95번째 최대와 최소점간의 차이를 나타낸다. 주파수 성분 분석에서는 스텝에서 측정되는 가장 중요한 진동 성분인 3.65Hz와, 그 배수 주파수인 7.3 Hz 성분에 대해서 비교 분석을 실시하였다. 측정된 진동 신호를 인체의 감도를 고려하여 저주파 필터를 통과시킴으로서 저주파 신호에 가중치를

주었다[1]. 탑승인원을 변화시켜 하중 조건을 변경시켰으며 한 개의 스텝에는 한 명이 탑승하였으며 다수가 탑승할 시에는 연속적으로 탑승하였다.

Fig. 3는 몇 개의 에스컬레이터에서 측정된 결과를 제시하고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 대체로 하강(Down) 운행중일 때가 상승(Up) 운행중일 때 보다 진동이 더 크게 발생한다. Fig. 4는 탑승인원을 증가시켰을 때의 A95값의 변화를 제시하고 있다. 하강 조건일 경우, 특정 탑승인원수에서 특히 큰 진동이 발생한다는 점이 주파수 영역에서의 공진점과 유사하게 보이고 있다. 이와 같은 현상은 주행저항과 밀접한 관계가 있는 것으로 관측되고 있다. 스텝이 상승하는 조건에서는 핸드레일 및 구동부에서 발생하는 주행저항이 사람이 탑승하여 발생하는 부하와 합해지는 순부하가 되지만, 스텝이 하강하는 경우에는 주행저항과 사

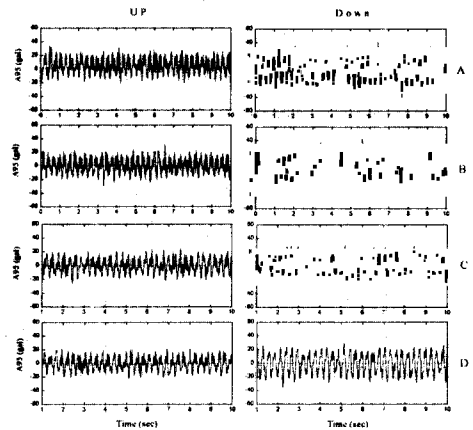


Fig. 3 Comparison of acceleration signals during up-moving and down-moving

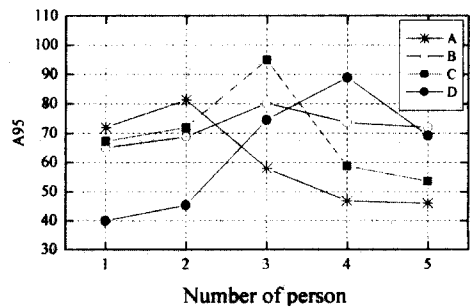


Fig. 4 Examples of A95 values with respect to the number of persons

람의 탑승에 따른 부하가 상호 역방향 하중이 되어 이 두 하중이 거의 같아지는 순간 구동체인에는 일종의 무부하 조건이 형성된다. 무부하 조건에서는 3.65 Hz 성분이 급격히 커지게 되지만 기타의 주파수 성분의 변화는 그리 뚜렷하지 않고 조건에 따라서는 오히려 감소되는 경우도 있다.

## 2.2 주요 가진원 분석

체인기어 구동 방식에서는 다음과 같은 코달 효과(Chordal effect)가 존재한다.

$$\frac{\Delta V}{V} = 1 - \cos\left(\frac{\pi}{N}\right) \quad (1)$$

여기서  $V$ ,  $\Delta V$ 는 각각 평균속도 및 속도 변동량이고,  $N$ 은 기어잇수를 의미한다. 따라서 속도 변동치는 기어 잇수의 증가에 의해 급격히 감소하게 된다. 코달 효과는 치형에 무관하게 발생되며 치형의 변화는 속도변동의 절대치를 바꾸는 것이 아니라 속도변동 패턴을 바꾸게 된다.

본 연구에서 고려하고 있는 에스컬레이터의 스텝체인 스프라켓은 15개의 기어 잇수를 갖고 있어 기어 몰림 주파수(약 3.65 Hz) 및 그 고조파에 해당되는 주파수(7.3 Hz 등)의 진동이 전체 시스템에서 가장 중요한 진동원이 되고 있다. 특히 3.65 Hz와 7.3 Hz의 진동은 인체에 민감한 주파수 대역에 있을 뿐만 아니라 전체 시스템의 고유진동수에도 근접해 있어 비교적 큰 진동이 발생한다. 코달 효과에 의한 속도 변동률은 2.19 %이 된다. 속도의 변화를 정현파형으로 가정하여 측정 단위계인 가속도로 환산하면 약 24 gal이다. 그러나 시스템 전체의 동적 특성에 의존하여 진동 응답이 증폭되거나 감소될 수 있다.

감속기 스프라켓의 기어 잇수가 20개이므로 구동 체인 자체의 속도에 약 1.2 %의 변동성분이 약 20 Hz의 기본주파수로 발생된다. 실제 이와 같은 성분은 스텝체인에 전달되어 진동을 유발시키지만 인체의 민감도가 매우 낮은 편이다. 그러나 구동 체인의 장력이 낮으면 체인 자체 진동을 일으키는 중요한 요인이 된다.

하부 RG의 스프링에 의한 인장력 변화는 스텝진동에 큰 변화를 일으키지는 못하나 과부족이거

나 과다하면 영향을 줄 수 있으므로 적절한 양을 선정할 필요가 있다. 핸드레일 부는 구동계 전체에서 주행저항에 가장 큰 영향을 미치는 부분으로서 핸드레일에서 발생하는 주행저항에 의한 부하가 체인 구동계에 영향을 미치게 된다.

한편, 모터에 의해서도 직접 진동 발생 성분이 전달될 수 있는데, 모터에 의한 직접 변동 성분으로는 회전속도 성분이나 회전속도의 2배수 성분 그리고 토크 리플 주파수 등이 있으나 실제 실험에서는 거의 관측되지 않고 있다.

## 2.3 납선 에스컬레이터 진동 분석

설치 상태에서의 문제점을 파악하기 위해 현장에 설치된 에스컬레이터를 대상으로 진동 특성을 분석하였다. 현장에 설치된 에스컬레이터에 대해 적용 가능한 실험으로 구동체인 장력 변화, 하부스프링 장력 그리고 스프링강성 변화가 있으며 인자들에 대하여 Table 1과 같은 실험계획에 의해 실험을 실시하였다.

Table 1 Experiment design

Factor	Driving chain deformation	Spring stiffness	Spring tension
	A	B	C
Unit	mm	kgf/mm	kgf
Level 1	10	8	80
Level 2	20	23	200
Nominal value	15	14	150

Table 2 Experimental results

No	Factor			Down (gal)			Up (gal)		
	A	B	C	A95	3.65Hz	7.3Hz	A95	3.65Hz	7.3Hz
1	1	1	1	50.2	15.5	2.1	34.6	8.5	5.4
2	1	1	2	54.4	17.1	1.9	35.0	10.4	2.6
3	1	2	1	56.8	16.3	2.1	35.4	10.0	2.7
4	1	2	2	69.6	20.8	2.2	37.4	10.5	3.3
5	2	1	1	51.8	15.4	2.0	35.6	10.1	2.6
6	2	1	2	45.4	13.4	1.8	34.2	9.9	2.8
7	2	2	1	56.0	16.0	2.2	36.2	8.2	6.4
8	2	2	2	52.4	13.6	2.7	36.8	9.3	2.8

Table 2에는 실험결과가 기술되어 있다. 실험 결과 상승시와 하강시의 차이가 모든 경우에 대해 뚜렷이 관측되었으며 특히 하강시에 진동이 크게 나타남을 알 수 있다. 구동체인 치집이 20mm인 경우(상대적으로 장력이 작을 경우)와 하부장력이 큰 경우 진동이 상대적으로 우수한 것으로 나타나고 있는 것으로 고려했던 변수들만으로는 진동을 충분히 저감하기 어려운 것으로 판단하게 되었다.

### 2.4 시험 설비를 이용한 실험

여기서는 앞에서 관측된 무부하 공진 현상을 확인하기 위해 시험용으로 설치된 에스컬레이터를 이용하여 주요 요소의 특성을 변화시키면서 진동을 측정, 분석하였다. 따라서 실험은 무부하 공진이 발생하는 하강 경우를 위주로 실행하였으며, 스텝 위의 하중은 탑승인원을 변경시킴으로서 변화시켰다. 시스템의 조건에 따라 1명~5명의 탑승조건 또는 1명~10명의 탑승 조건으로 실험을 실시하였다. 주요인자로는 구동체인 장력, 하부장력, 스프링 강성, 하중을 고려하였다.

Fig. 5는 구동체인 장력과 하부 스프링 강성 계수에 따른 진동 수준 A95의 변화를 3차원 형태로 나타낸 것이다. 구동 체인의 장력은 일정한 수직 하중에 대한 체인의 처짐량으로 구분하였으며 단계별로 15mm~55mm로 구분하였다. 구동 체인 장력이 약한 경우(45mm, 55mm)에 무부하 공진 현상이 잘 관찰되었으며 체인 처짐량이 15mm~25mm 정도일 때 진동이 가장 작아짐을 확인할 수 있다.

하부스프링의 장력은 스프링의 압축길이를 변화시킴으로서 조절 가능하며 80~350 kgf로 구분한다. 하부장력의 값은 280kg~320kgf의 큰 값에서 가장 응답이 좋게 나타났으며 그 이상이나 그 이하에서는 진동 응답이 증가하는 경향을 보이고 있다. 구동체인 장력이 매우 작은 경우에는 하부장력에 큰 영향을 받지 않는 특성을 보이고 있다.

## 3. 동흡진기를 이용한 진동 저감

### 3.1 개요

구동 체인은 하강시 주행저항과 탑승자 하중의 크기에 따라 긴장축과 이완축이 바뀌게 되면서 특

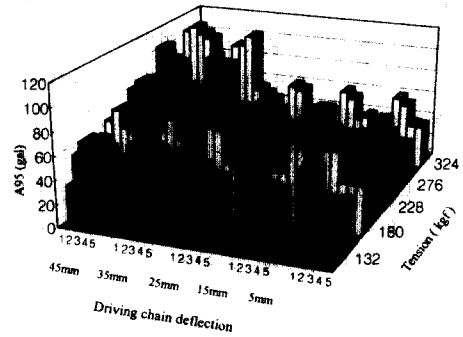


Fig. 5 A95 values with respect to driving chain tension and spring tension

성의 변화가 있게 되는데 변화의 양상이 모델별로, 조건별로 달라지기 때문에 정확한 예측이 어려우며 측정된 결과를 이용한 간접적인 계산에 의존할 수밖에 없다. 따라서 현재 발생되고 있는 진동을 개선하기 위해서는 주변 여건에 의해 수시로 변화될 수 있다는 전체 조건에서의 진동 저감 방안이 필요하다.

이와 같은 조건을 만족하는 진동 저감 방법이 동흡진기의 적용이다. 에스컬레이터의 진동은 모델 별, 조건 별로 차이가 날 수 있지만 가장 중요한 진동원은 체인 스프라켓의 물림 주파수 성분(3.65 Hz)이다. 따라서 모델이나 조건에 무관하게 항상 3.65 Hz 대역의 주파수 성분이 문제가 되고 있으며 이러한 특정 주파수 성분의 진동을 효과적으로 억제할 수 있는 방법으로 동흡진기이다.

### 3.2 수치실험

동흡진기는 자체의 고유진동수를 가진 주파수와 동조시키는 조건에서 사용된다 [4]. 본 연구에서는 기본 주파수인 3.65 Hz에 동조시킨 동흡진기를 고려하였다. 먼저, 개발된 동적 모델[1]을 이용하여 동흡진기를 부착하였을 때의 진동 특성을 분석하였다. 스텝체인과 스텝부의 전체의 질량이 클 뿐만 아니라 탄성 변형이 예상되므로 동흡진기의 질량과 개수 등을 변경시키면서 진동 저감 효과를 검토함으로써 적절한 동흡진기를 선택할 수 있도록 하였다.

Fig. 6은 동흡진기의 질량을 변경시키면서 계산한 서로 다른 주파수 응답 함수에서 3.65 Hz 성분만을 비교한 것이다. 그림에서 보듯이 질량의 증가에 의해 3.65 Hz 성분이 확연히 감소하는 것을 확인할 수 있다. 실용적인 응용을 고려하여 여러 개의 동흡진기를 부착하였을 때의 효과를 검토하였다. Fig. 7은 총 질량의 합이 50 Kg이 되는 조건에서 여러 개의 동흡진기를 부착하였을 때의 결과를 비교해서 보여주고 있다. 대체로 유사한 정도의 저감효과가 있음을 확인할 수 있다.

### 3.3 시험용 동흡진기를 이용한 실험

동흡진기에 의한 진동 저감 효과를 확인하기 위해 Fig. 8과 같은 구조의 동흡진기를 제작, 설치하였다. 흡진기의 설치는 Fig. 8에서 확인할 수 있는 바와 같이 진행방향으로 하여 흡진 효과를 극대화하였다. 스프링으로 이용된 보의 길이를 조정하거나 설치되는 질량을 바꿈으로서 여러 가지 동흡진기를 설치, 실험하였다.

Fig. 9는 질량을 달리하는 동흡진기를 부착했을 때의 시간영역 데이터와 사용하지 않았을 때의 진동신호를 시간영역에서 비교한 것이다. 급격한 변화를 관측할 수 있다. 또한 Fig. 10은 질량을 증가시켰을 때의 3.65 Hz 진동성분의 저감 효과를 비교한 것이다. 질량의 증가에 의해 진동의 크기가 크게 저감됨을 알 수 있다.

### 3.4 실제 적용 모델 실험

수치실험 및 실험 결과를 바탕으로 Fig. 11과 같이 실제 남산 에스컬레이터에 적용 가능한 동흡진기를 제작하였다. 개발된 동흡진기는 16 Kg의 질량을 갖도록 제작되었다. 실험을 통한 검증과정을 거친 후 실제 남산 에스컬레이터에 적용하였다. 적용 대상이 된 에스컬레이터는 구동체인의 장력도 이완되었고 감속기 상태도 좋지 않아 진동관점에서 매우 좋지 않은 조건으로서 비교적 큰 진동을 보이고 있다. 개발된 동흡진기를 실제 적용한 결과로서 동흡진이 결합된 스텝 6개를 등간격으로 나누어 전체에 균등하게 배치하여 실험하였다. Fig. 12는 적용결과로서 A95 진동수준의 변화를 보여주고 있다. 약 60% 이상의 큰 진동 저감을 확인할 수 있었으며 부하에 따른 응답 크기 변화

도 크게 나타나지 않았다.

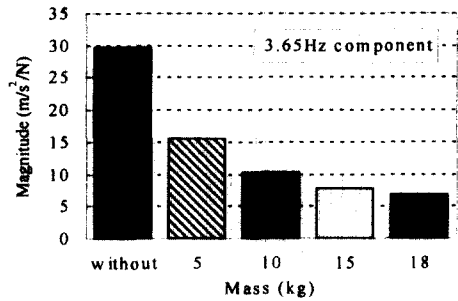


Fig. 6 Simulation: vibration reduction by dynamic absorber with changing the mass of dynamic absorber

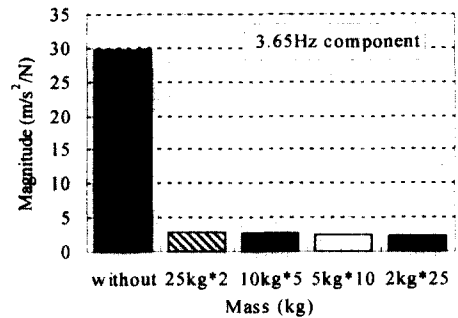


Fig. 7 Simulation: vibration reduction by multiple dynamic absorbers with increasing the number of dynamic absorbers

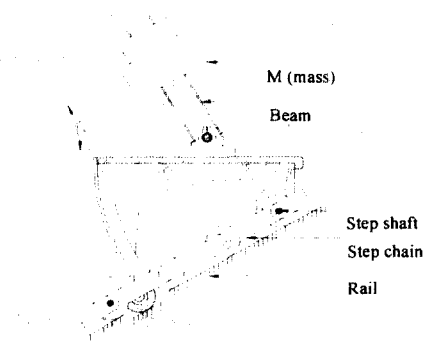


Fig. 8 Implementation of the test dynamic absorber to a step

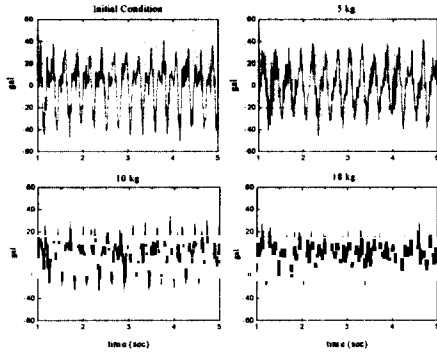


Fig. 9 Comparison of time responses with increasing the mass of dynamic absorber.

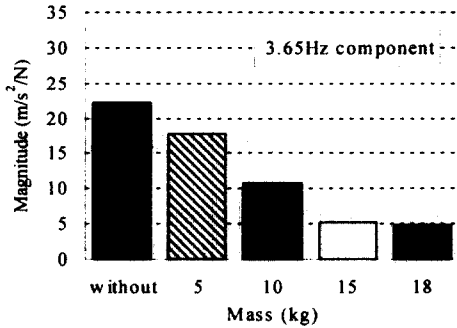


Fig. 10 Experiment: response at pseudo resonance with increasing the mass of dynamic absorber

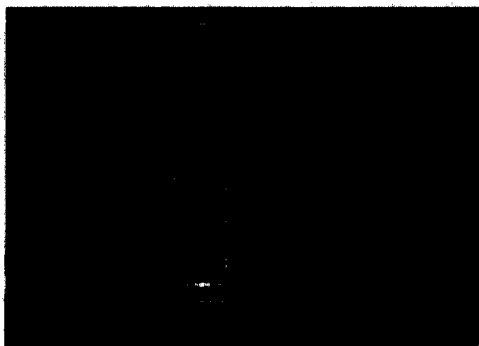


Fig. 11 Actual dynamic absorber implemented to a step.

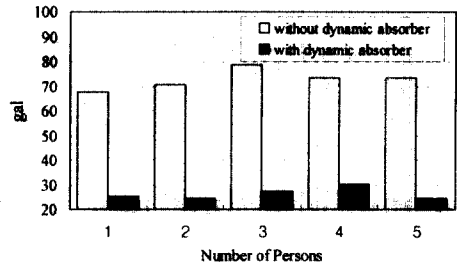


Fig. 12 Comparison of A95 levels when 6 identical dynamic absorbers with mass of 16 Kg are implemented to the escalator.

#### 4. 결론

본 연구에서는 납선 및 시험설비 에스컬레이터 모델을 이용하여 에스컬레이터의 진동 특성을 분석하였고 이에 대한 대책을 수립하였다. 에스컬레이터에서의 진동은 스텝 체인과 스프라켓에 기인하는 코달효과가 주 가진원이 되고 있으며 탑승인원에 의한 부하와 주행저항에 의한 부하가 상쇄되는 조건에서 큰 진동이 발생한다. 이와 같은 진동을 효과적으로 저감하기 위해 동흡진기를 제안하였으며 수치실험과 실험을 통해 진동 저감 효과를 확인할 수 있었다.

#### 참고문헌

- [1] 강규용, 권이석, 홍성욱, 2000, "에스컬레이터의 동적 모델링 및 실험적 검증," 한국소음진동공학회 춘계학술대회, 제주대학교.
- [2] 박찬중, 권이석, 박태원, 1999, "전산 모델을 이용한 에스컬레이터의 동특성 해석," 한국정밀공학회지, 제 16권 4호, pp.95-101.
- [3] 권이석, 박선용, 김성대, 서장원, 김석관, 이종원, 1996, "다꾸찌기법을 이용한 에스컬레이터의 소음저감에 관한 연구," 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집, pp142-147.
- [4] Hartog, J.P.D., 1956, Mechanical Vibration, McGraw Hill Co. Vol. 59, No. 567