

# 설계자를 위한 에스컬레이터 전용 시뮬레이션 프로그램 개발

## Development of an Escalator Simulation Program for a Designer

서중휘\*, 박찬중\*\*, 권이석\*\*\*, 박태원\*\*\*

J. H. Seo, C. J. Park, I. S. Kwon, T. W. Park

### Abstract

When an escalator is developed or modified to improve its performance, estimation of dynamic characteristics of the escalator is required. But modeling of the escalator for a design purpose is very difficult and time consuming. Especially, it is very difficult for a designer to use the simulation model during design process because preparing a proper model takes time and also the designer needs to know how to use the simulation program. In order to solve these problems, a graphic user interface program that can predict dynamic characteristics of an escalator is developed for the designer. Since this program makes the necessary escalator model for simulation for itself, the designer does not need to know how to use the simulation program while design is in progress. In this paper, a designer oriented interface program is developed and an example is presented to show the effectiveness of the developed program.

\* 아주대학교 기계공학과 대학원

\*\* LG산전 빌딩시스템 연구소

\*\*\* 아주대학교 기계 및 산업공학부

## 1. 서론

최근 산업사회에서는 제품의 성능, 품질의 향상은 물론 제품 개발기간의 단축, 개발/생산비용의 절감 등이 산업의 성패를 좌우한다. 그 결과 컴퓨터의 성능 향상과 더불어 여러 공학 분야에서 전산응용 해석기술의 적용이 보편화되고 있다. 즉, 실제 제품에 대한 프로토타입의 제작과 시험 없이도 컴퓨터를 이용한 신뢰성 있는 시뮬레이션 모델을 구성함으로써 실제 설계에 필요한 자료를 짧은 시간 안에 저 비용으로 확보할 수 있어 개발기간의 단축은 물론 개발비용의 절감 등으로 제품에 대한 경쟁력을 크게 향상시킬 수 있다. 그러나 설계자들은 이러한 전산응용 해석기술에 대한 전문적인 지식이 부족하여 이를 설계 단계에 적용하기란 쉬운 일이 아니며 모델의 변경이나 개발에 따른 새로운 시뮬레이션 해석 모델의 구성 또한 많은 시간과 노력이 필요하였다. 이러한 문제를 해결하기 위해 자동차나 크레인 등 특정 분야에서 기계계의 동특성 해석을 위한 전용 프로그램 개발이 시도되었다[1,2].

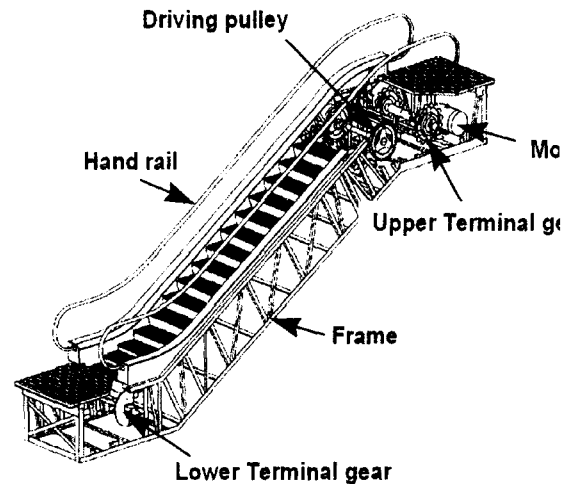
그러나 에스컬레이터와 같이 모델의 크기가 크고 복잡한 동특성을 갖는 기계계를 해석하기 위하여 전체 시스템적으로 접근한 경우는 세계적으로도 드물다. Kwon 등은 다물체동역학 해석이론을 적용하여 전체 에스컬레이터를 2차원으로 모델링하고 시뮬레이션을 통해 동특성을 해석하였다[3].

본 논문에서는 에스컬레이터 설계자를 위하여 쉽게 3차원 시뮬레이션 모델을 생성하고 동역학 해석을 수행하여 그 결과를 바로 설계 업무에 적용할 수 있는 에스컬레이터 동역학 해석전용 전·후처리 프로그램을 개발하였다. 그리고 컴퓨터를 이용한 시뮬레이션 해석결과와 실제 시험을 통한 결과를 비교함으로써 시뮬레이션 모델의 신뢰성을 검증하였다. 동역학 해석전용 전·후처리 프로그램은 설계자들이 개인용 PC에서 에스컬레이터 시뮬레이션 모델을 새로 생성 혹은 수정하여 상용 동역학 해석 프로그램인 DADS가 탑재된 워크스테이션(Workstation)과 원격으로 연결하여 해석을 수행하고 설계과정에서 필요한 결과만을 확인할 수 있도록 구성되었다.

## 2. 에스컬레이터 구조

### 2.1 전체 모델

에스컬레이터는 <그림 1>에서 보는 바와 같이 크게 탑승객이 승차하는 스텝부와 손으로 붙잡는 핸드레일부로 나뉘며 좌우대칭 구조로 되어있다. 스텝을 구동하는 구동부는 모터와 감속기로 구성되어 있으며 모터에서 발생하는 동력은 감속기에 전달되고 체인에 의해서 스텝을 이송하는 상부 터미널기어와 핸드레일을 이송하는 원동차(Driving pulley)에 전달되어 전체가 구동되게 된다.



<그림 1> 에스컬레이터의 구조

구동력의 대부분은 스텝을 이동하기 위하여 상부 터미널기어에 전달되며 스텝롤러와 체인롤러가 프레임의 가이드 레일(Guide rail)과 터미널기어와 구름접촉 현상에 의하여 전체계의 동적인 거동이 결정된다. 따라서 본 논문에서는 에스컬레이터의 동적 거동에 중요한 영향을 미치는 스텝부를 연구 대상으로 하였다. 상부 터미널기어가 회전하면 기어이(Gear tooth)에 물려있는 스텝롤러들이 가이드 레일을 따라 구름접촉을 하며 이동한다. 이때 합성 고무로 된 스텝롤러들은 승차하중에 따라 변형되어

마찰계수가 비선형적으로 증가하는 현상이 발생한다. 에스컬레이터의 동역학 해석을 위해 이러한 접촉현상을 수학적으로 표현하면 식(1), 식(2)와 같다 [4].

$$F_n = k_{nom} \left[ 1 \pm \left( \frac{1 - C_r^2}{1 + C_r^2} \right) \tanh \left( 2.5 \frac{V_p}{V_\epsilon} \right) \right] \delta^{1.5} \quad (1)$$

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

여기서,

$F_n$  : 접촉에 의한 수직력

$k_{nom}$  : 공칭강성계수  $\left( 0.733E \sqrt{\frac{1}{C_c}} \right)$

$C_c$  : 곡률계수  $\left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$

$R_1, R_2$  : 접촉 물체의 곡률반경

$E$  : 영율 (Young's Modulus)

$C_r$  : 반발계수

$V_p$  : 접촉에 의한 수직변형속도

$V_\epsilon$  : 과도속도

$\delta$  : 접촉에 의한 수직변형량

$F_f$  : 마찰력

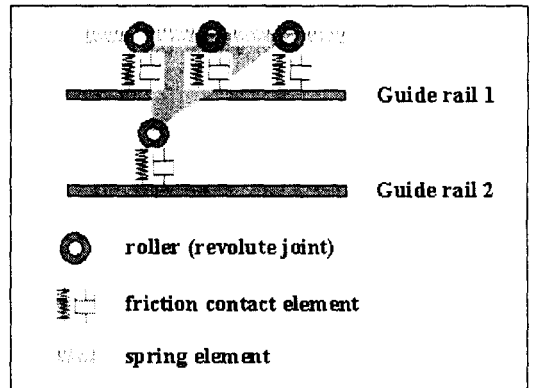
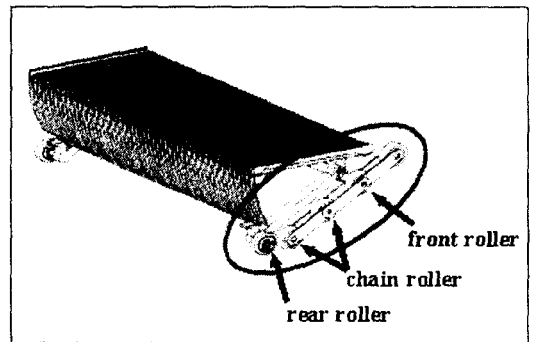
$\mu_{nom}$  : 공칭마찰계수

$V_t$  : 접촉에 의한 수평속도

그리고 상·하부 터미널기어는 프레임과 회전조인트로 구속하였다. 특히 하부 터미널기어에는 전체 스텝들의 연결이 느슨하지 않도록 어느 정도의 힘을 부과하기 위한 장력조절 장치가 있는데 이는 병진조인트 구속과 스프링요소를 이용하여 모델링하였다. 모든 부품은 탄성변형이 없도록 강체(Rigid body)로 가정하였다.

## 2.2 스텝부 모델

하나의 스텝에는 <그림 2>에서 보는바와 같이 전륜롤러(Front roller), 후륜롤러(Rear roller), 그리고 두개의 체인롤러(Chain roller)가 연결되어 있다. 에스컬레이터의 프레임에는 이러한 롤러들이 지나가는 두개의 가이드 레일이 존재하는데 하나는 전륜롤러와 체인롤러가 지나가는 가이드 레일이고 또 하나는 후륜롤러가 지나가는 가이드 레일이다. 스텝부의 시뮬레이션 해석을 위한 모델링 방법은 각각의 스텝을 연결하는 스텝체인을 스프링으로 간주하였으며 스프링상수 값은 인장시험으로 구하였다. 전륜롤러와 체인롤러는 구동부인 상부 터미널기어와 맞물려 돌아가며 전체 에스컬레이터를 작동하게 되고 이때 발생하는 구름접촉력은 식(1)과 식(2)를 이용하여 계산하게 된다. 그리고 공칭마찰계수는 롤러의 수직력에 따라서 비선형적으로 증가시켰다.



<그림 2> 스텝의 구조

### 3. 구속 기계계의 해석

동역학 해석을 수행하기 위해 에스컬레이터와 같은 기계계는 여러 힘 요소와 각 부품의 상대적인 운동을 제한하는 조인트(Joint)들에 대한 기구학적 구속방정식으로 표현된다[5]. 그리고 해석하고자 하는 기계계가 nb개의 강체로 구성되어 있다면 식(3)과 같이 일반좌표를 정의할 수 있다.

$$q = [q_1, q_2, \dots, q_{nb}]^T \quad (3)$$

기계계의 상대적인 운동을 제한하는 구속조건이 m개라면 구속방정식은 식(4)와 같다.

$$\Phi(q, t) = [\Phi_1(q, t), \Phi_2(q, t), \dots, \Phi_m(q, t)]^T = 0 \quad (4)$$

이 구속방정식을 이용하여 속도 및 가속도식을 얻을 수 있다.

$$\dot{\Phi}(q, t) = \Phi_q \dot{q} + \Phi_t = 0 \quad (5)$$

$$\ddot{\Phi}(q, t) = \Phi_q \ddot{q} + (\Phi_q \dot{q})_q \dot{q} + 2\Phi_{q_t} \dot{q} + \Phi_{tt} = 0 \quad (6)$$

그리고 구속 기계계에 대한 운동방정식은 식(7)과 같이 Lagrange multiplier 이론을 이용하여 구할 수 있다.

$$M\ddot{q} + \Phi_q^T \lambda = Q \quad (7)$$

여기서,

$M$  : 질량행렬

$\Phi_q$  : 구속식의 일반좌표에 대한 자코비안 행렬

$\lambda$  : Lagrange Multiplier

$Q$  : 일반 외력

일반좌표  $q$ 는 식(6)과 식(7)을 동시에 만족해야 함으로 식(8)의 행렬형태로 표시 수 있다[5].

$$\begin{bmatrix} M & \Phi_q^T \\ \Phi_q & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q \\ \gamma \end{bmatrix} \quad (8)$$

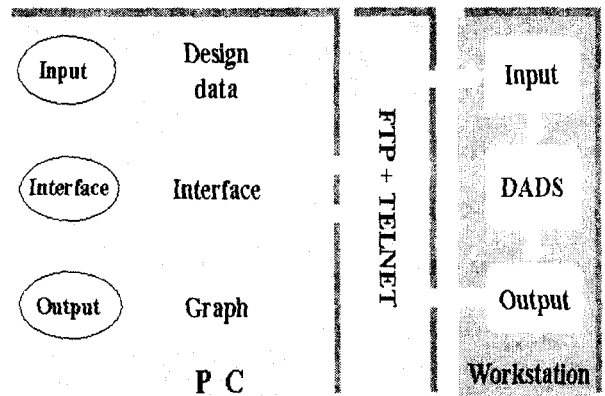
여기서,

$$\gamma \equiv \Phi_q \ddot{q} = -(\Phi_q \dot{q})_q \dot{q} - 2\Phi_{q_t} \dot{q} - \Phi_{tt}$$

결과적으로 기계계의 동역학 해석을 위해서는 식(4), 식(8)을 동시에 해석해야하며 이를 미분-대수방정식(DAE: Differential-Algebraic Equations)이라고 한다. 이에 대한 해법은 여러 가지 수치해석 알고리즘이 개발되어 적용되고 있으며 컴퓨터의 성능향상과 더불어 에스컬레이터와 같이 크고 복잡한 기계계의 동역학 해석도 가능하게 되었다[3,5].

### 4. 시뮬레이션 프로그램의 구조

에스컬레이터 동역학 해석전용 전·후처리 프로그램의 전체적인 구조는 <그림 3>과 같다.



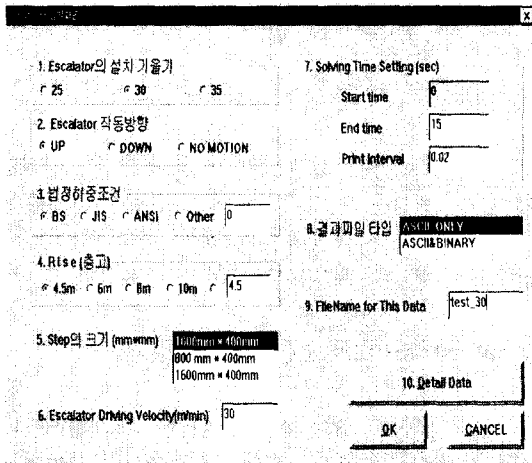
<그림 3> 프로그램의 구조

이 프로그램은 에스컬레이터의 동역학 해석모델 구성을 위해 크게 세 부분으로 나눌 수 있다. 먼저 모델에 대한 기본 설계자료를 입력하는 입력부와 새로 생성된 파일을 DADS가 탑재된 워크스테이션에 보내고 Telnet을 이용하여 해석을 수행하는 인터페이스부, 마지막으로 해석결과를 설계에 필요한 자료로 그래픽처리 하는 출력부이다.

4.1 입력부(Pre-processing part)

입력부는 에스컬레이터의 시뮬레이션 해석모델 구성을 위해 <그림 4>와 같이 전체구조에 대한 설계자료를 입력하는 부분과 <그림 5>와 같이 모델의 세부적인 설계자료를 입력할 수 있는 부분으로 구성되었다.

<그림 4>에서는 에스컬레이터의 설치기울기와 작동방향 및 속도를 입력한다. 그리고 승차효과를 고려하기 위해 각 스텝에 부과되어야 할 하중에 대한 각국의 규정을 선택할 수 있으며 에스컬레이터가 설치될 높이(Rise)와 스텝의 크기(Size) 및 해석 조건 등을 입력하게 된다.

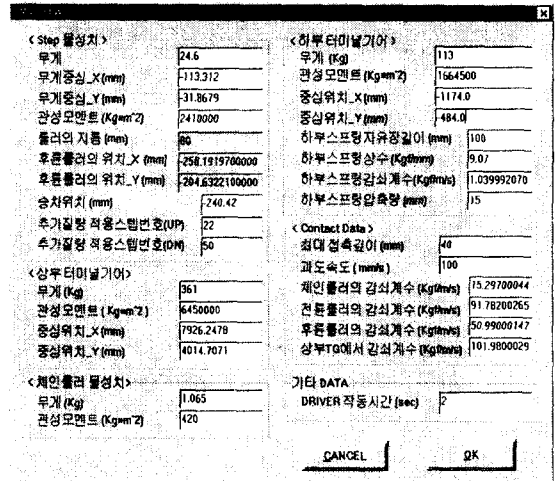


<그림 4> 전체구조 자료 입력부

그리고 <그림 5>에서는 에스컬레이터를 구성하는 각 부품들에 대하여 세부적인 설계자료를 입력할 수 있도록 구성된 대화창을 보여주고 있다.

먼저 에스컬레이터의 가장 많은 부분을 차지하는 스텝들은 동일한 형태와 물성치를 갖게 되므로 하나의 스텝에 대해서만 질량과 관성모멘트를 입력하면 된다. 그리고 <그림 2>의 스텝 구조에서 볼 수 있듯이 스텝의 무게중심에 대한 각 롤러의 좌표와 승객이 승차했을 경우 그 질량을 부과해야 할 위치 등을 결정한다. 상·하부 터미널기어에 대해서는 프레임 좌표에 대한 장착위치를 입력한다. 특

히 하부 터미널기어에서는 장력의 크기를 조절하기 위한 스프링의 변수값을 설정할 수 있다. 이미 언급하였듯이 각 스텝롤러와 프레임의 가이드 레일, 그리고 상·하부 터미널기어 사이에서는 접촉현상이 발생하는데 이를 모델링하기 위한 자료들을 입력할 수 있다. 참고적으로 완성된 시뮬레이션 모델에서 상부 터미널기어를 구동하기 전에 모델이 정적인 상태에 도달한 후 에스컬레이터를 구동할 수 있도록 구동시간의 지연을 줄 수 있게 하였다.

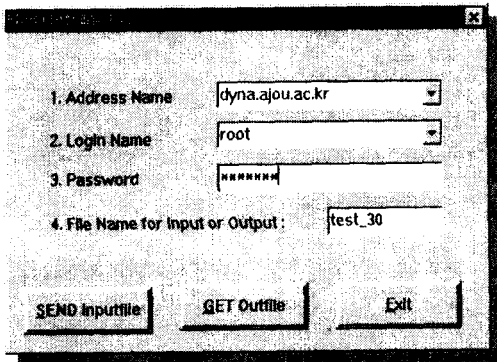


<그림 5> 세부 자료 입력부

이상과 같이 입력부에서 설계자는 시뮬레이션 모델의 동역학 해석에 대해 상용프로그램을 이용할 필요가 없이 설계변수만을 입력하면 시뮬레이션 모델의 해석에 필요한 두 종류의 입력파일이 자동으로 생성된다. 이 해석 파일에는 실제 에스컬레이터 처럼 똑같이 구동되어 동역학 특성들이 구현될 수 있도록 에스컬레이터를 구성하는 각 부품의 복잡한 기하학적 관계와 구속조건들, 그리고 접촉현상에 대한 힘요소 관계 등이 포함되며, 각국의 설치규정에 따른 승차시험이나 즉각적으로 모델을 변경해 볼 수도 있어 매우 경제적이고 신속한 설계를 가능하게 하는 장점을 갖는다.

4.2 인터페이스부(Interface Part)

입력부에서 생성된 동역학 해석용 입력파일들을 해석 프로그램이 탑재된 특정 호스트로 FTP를 이용하여 전송한다. 그리고 Telnet을 통해 원격으로 접속한 후 전송된 입력파일을 이용하여 식(9)에 대한 해석을 수행하게 되면 해석 결과 파일이 생성된다. 이 결과 파일 또한 <그림 6>의 FTP창을 이용하여 간편하게 PC의 작업 디렉토리로 가져올 수 있다.



<그림 6> 파일 송수신을 위한 FTP 화면

4.3 출력부(Post-processing part)

동역학 해석에 의한 결과 파일을 이용하여 설계자가 필요로 하는 에스컬레이터의 동적 특성 즉, 프레임의 가이드 레일을 따라 움직이는 스텝의 속도, 가속도는 물론 스텝 체인에 걸리는 인장력과 에스컬레이터를 구동하는 상부 터미널기어의 토크 및 동력(Power)등의 결과를 확인할 수 있다. 또한 FFT(Fast Fourier Transform) 기능과 Curve Fitting과 같은 기능을 추가하여 출력결과의 분석을 용이하게 하였다.

5. 시뮬레이션 모델의 해석 결과 검증

5.1 시험조건

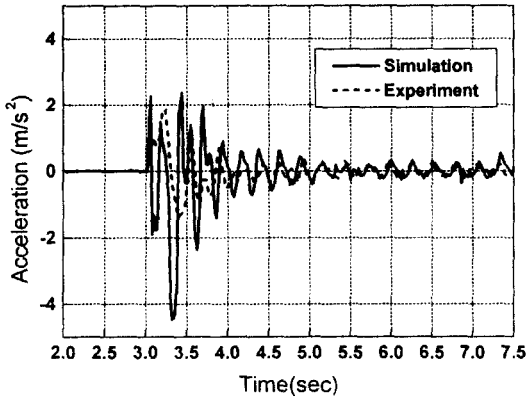
<표 1> 에스컬레이터의 제원

모 델 링		제 원	단 위
전체 모델	설치 기울기	30	Degree
	설치 높이	4.5	m
	구동 속도	0.5	m/sec
	승차인원	0	man
스텝의 모델	총 스텝의 개수	58	개
	스텝의 크기 (가로×세로)	1000×400	mm <sup>2</sup>
	질량	24.6	kg

시뮬레이션은 현재 설치되어 가동중인 Table.1 과 같은 제원을 가진 특정 에스컬레이터에 대하여 수행하였으며 시험장치를 통하여 측정결과와 비교함으로써 해석결과의 신뢰성을 확인하였다[6].

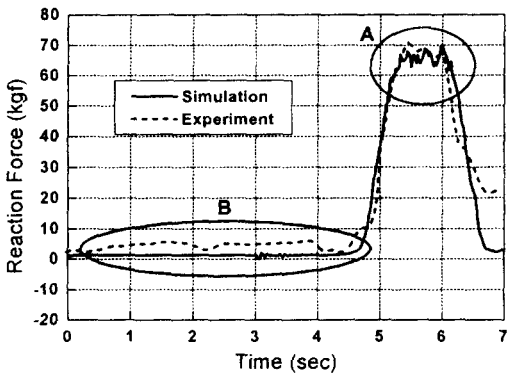
5.2 해석결과 비교

승객하중이 없는 4.5m급 기본 에스컬레이터의 시뮬레이션 모델과 실제 모델을 상부방향으로 0.5m/sec의 속도로 구동시켰다. 이때 가이드 레일을 따라 진행되는 실제 스텝의 가속도는 저주파용 3축 가속도계와 주파수분석기를 이용하여 측정하였다. 이에 대한 시뮬레이션 해석결과와 시험결과는 <그림 7>과 같다. 시뮬레이션 모델은 실제 에스컬레이터 모델의 가속도 진동주기를 거의 정확하게 구현하고 진동량도 정상상태에서 0.4m/sec<sup>2</sup>, 0.45m/sec<sup>2</sup>로 약 10%의 오차를 보인다. 여기에서 발생하는 오차는 모터, 감속기와 각종 체인을 시뮬레이션 모델에서 제외한 것에 의한 영향으로 판단된다.



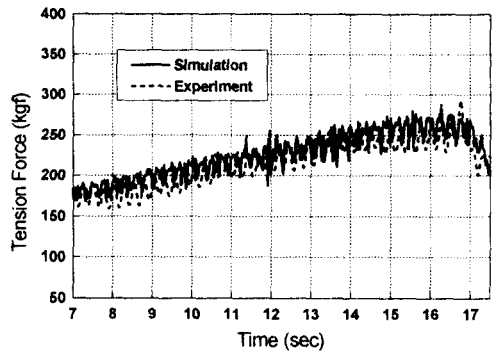
<그림 7> 스텝의 진행방향 가속도 비교

프레임의 가이드 레일에서 스텝롤러의 반력에 대한 시뮬레이션 결과와 200kgf의 압축형 로드 셀 (Load cell)을 이용하여 에스컬레이터의 구동시에 측정된 스텝롤러의 반력시험 결과는 Fig.8과 같다. 승객의 하차구역인 A에서의 시뮬레이션에 의한 해석결과와 측정장비에 의한 반력은 각각 70.8kgf, 66.6kgf로 약 6%의 오차를 보이고 있다. 승객의 이동구역인 B에서의 반력은 각각 1.33kgf, 3.60kgf로 약 2.3kgf의 차이를 보이는데 이는 반력 측정장비의 무게차이로 시뮬레이션 모델에서는 이것을 고려하지 않았기 때문으로 판단된다.

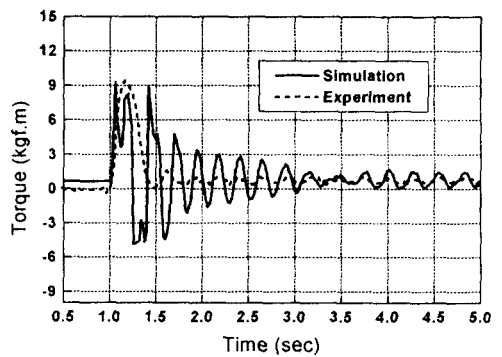


<그림 8> 스텝롤러의 반력 비교

각 스텝을 연결하는 스텝체인 인장력에 대한 측정장치는 에스컬레이터의 구동 시 스텝체인의 변동 인장력을 측정할 수 있도록 500kgf의 인장형 로드 셀을 이용하였으며 이에 대한 시험결과와 시뮬레이션에 의한 해석결과는 <그림 9>와 같다. 상부에서의 최대 인장력은 약 3%의 오차를 보인다. 또한 에스컬레이터의 상부방향 진행시 인장력이 증가할 때 기울기는 약 2%의 오차를 보이고 있다.



<그림 9> 스텝체인의 인장력 비교



<그림 10> 상부 터미널기어 모터축의 토크

에스컬레이터를 구동하는 상부 터미널기어의 모터축에 걸리는 토크의 측정은 20kgf·m급 스트레인 게이지형 토크센서, 신호증폭기 그리고 신호를 수신, 처리할 수 있는 오실로스코프를 이용하였다.

시물레이션 결과와 측정장비에 의한 시험결과는 <그림 10>과 같으며 정상상태에서  $0.64\text{kgf} \cdot \text{m}$ ,  $0.7\text{kgf} \cdot \text{m}$ 로 약 9%의 오차를 보인다. 여기에서의 오차는 감속기 및 체인전동에 의한 영향으로 판단된다.

## 6. 결론

본 논문에서는 에스컬레이터의 동역학적 특성 해석을 위한 컴퓨터 시물레이션 모델을 전문적인 지식이 없는 사용자도 적은 변수 값의 입력만으로도 쉽게 생성할 수 있고, 각 설계변수 값의 변화에 따른 동적인 거동을 확인할 수 있는 에스컬레이터 동역학 해석 전용 전·후 처리 프로그램을 개발하였다. 이 프로그램은 각자의 개인용 컴퓨터에서 원격으로 워크스테이션에 접속하게 함으로써 활용성도 높이고 실무적용이 쉽도록 구성하였다. 또한 개발한 프로그램을 이용한 시물레이션 결과를 실제 시험결과와 비교하여 매우 작은 오차를 갖는 만족할 만한 결과를 구현하여 프로그램의 신뢰성을 검증하였다.

개발한 프로그램을 이용하여 앞으로 에스컬레이터의 프로토타입 제작 없이도 설계자가 쉽게 컴퓨터 시물레이션 모델을 생성하고 이를 해석하여 짧은 시간 안에 저비용으로 설계데이터를 확보할 수 있게 됨으로써, 제품 개발 기간의 단축은 물론 비용절감으로 인하여 경쟁력 향상이 크게 기대된다.

향후, 에스컬레이터의 새로운 모델뿐만 아니라 구조가 다른 무빙워크(moving work) 및 다른 기계계의 시물레이션을 위한 연계 프로그램 개발에도 쉽게 적용이 가능하다.

## 참고문헌

- [1] 박찬중, 박태원, 김종현, 붐의 유연성을 고려한 트럭크레인의 설계 전용 동력학 해석 프로그램 개발, 한국공작기계학회지, 제7권 제6호 (1998), pp. 28-35
- [2] 박동철, 강연준, 이장무, 자동차 차실소음 해석을 위한 전용 프로그램의 개발, 한국소음진동 공학회, 춘계학술대회(1991), pp. 57-61
- [3] Kwon, I. S., Park, C. J., Park, T. W., "Dynamic Characteristics Analysis of an Escalator Using The Computational Dynamics Program", Proceedings of DETC98/MECH- 5813(1998), pp. 1-6
- [4] Lankarani, H. M., and Nikraves, P. E., A Contact Force Model with Hysteresis Damping for Impact Analysis of Multibody Systems, Journal of Mechanical Design, Vol. 112(1990), pp. 369-376
- [5] Haug, E. J., *Computer-Aided Kinematics and Dynamics of Mechanical Systems Vol. I : Basic Method*, Allyn and Bacon, 1989.
- [6] McConnell, K. G., *Vibration Testing : Theory and Practice*, John Wiley & Sons, Inc., 1995.
- [7] Press, W. H., *Numerical Recipes in C : The Art of Scientific Computing*, CAMBRIDGE University Press, 1992.
- [8] DADS 8.5 Reference Manual, CADSI, 1997.



● 저자소개 ●



박태원

1977년 서울대학교 기계설계학과 학사  
 1982년 University of Iowa 기계공학 석사  
 1985년 University of Iowa 기계공학 박사  
 경력 1983.8 - 1990 Computer Aided Design Software Inc. 연구원  
 현재 아주대학교 기계 및 산업공학부 교수  
 관심분야 Vehicle Dynamics, CAD/CAE,

권이석

1992년 금오공대 기계공학과 학사  
 1995년 금오공대 기계공학과 석사  
 경력 1995 - 현재 엘지산전 빌딩시스템연구소 근무  
 관심분야 CAD/CAE, Computational Dynamics, 소음 및 진동



박찬중

1993년 아주대학교 생산자동화공학과 학사  
 1995년 아주대학교 기계공학과 석사  
 현재 아주대학교 기계공학과 박사과정  
 관심분야 Vehicle Dynamics, 시뮬레이션



서중휘

1998년 아주대학교 생산자동화공학과 학사  
 2000년 아주대학교 기계공학과 석사  
 관심분야 CAD/CAE, Optimize Design for Mechanics.