

대한기계학회 주최

제71회 전국학생설계경진대회(2021년)

설계 최종 보고서

참가부	대학부 (o)				
참가분야	공모주제 (o) / 자유주제 ()				
참가팀명	MD3				
설계제목	반무동력 발전 에스컬레이터				
지도교수/교사	(소속) 인하대학교 (성명) 이철희				
대표자 (신청인)	성명	소속	연락처 (휴대폰)	E-mail	주소
	공경환	인하대학교 기계공학과			

참가팀원 인적사항

NO	성명	소속 / 학년	E-MAIL
1	공경환	인하대학교 기계공학과 / 3학년	
2	구영헌	인하대학교 기계공학과 / 4학년	
3	임국영	인하대학교 기계공학과 / 3학년	
4			
5			
6			

설계 요약문

참가분야	공모주제 (o) / 자유주제 ()
참가팀명	MD3
설계제목	반무동력 발전 에스컬레이터
대표자명	공경환
요약문	<p>전 세계적인 이상기후로 인하여 새로운 에너지 절감법의 필요성이 대두되고 있다. 따라서 이번 설계는 대형 백화점, 지하철 등 인구 밀집 구역에 설치된 에스컬레이터의 에너지 절감을 목적으로 한다. 엘리베이터의 경우에는 이미 승객의 수와 이동 방향에 따라 회생 제동장치를 이용하여 버려지는 에너지를 회수하는 방법으로 에너지를 절약하고 있다. 이를 에스컬레이터로 확장하고자 한다.</p> <p>Inventor를 이용하여 레일, 스탭 그리고 체인 등 기본적인 에스컬레이터의 형태를 3D 모델링 한 이후에, 이를 등속으로 움직일 수 있게 해주는 이스케이프 유닛을 설계하였다. 이스케이프 유닛은 기계식 시계의 구조를 참고하여 설계하였고, 이는 메인 스프링과 이스케이프먼트, 밸런스 휠 등으로 이루어져 있다.</p> <p>이처럼 설계한 이스케이프 유닛을 3DP로 출력 및 제작하였으며, CPU 쿨러를 이용하여 발전 시스템을, 로드셀과 아두이노를 이용하여 제어 시스템을 설계하였다. 이를 통해 기존 구형 특허에 기술되어 있는 하향식 무동력 에스컬레이터의 문제점들을 개선하고, 단순히 방출되는 위치에너지를 회수하여 활용할 수 있다. 또한, 로드셀을 통해 가동에 필요한 최소 구동 하중 조건이 만족되지 않으면 외부 전력을 활용하여 구동이 가능하도록 보조하여 사용자 편의성을 높였다.</p> <p>기존 에스컬레이터는 승객의 수에 따라 전원을 차단하는 소프트웨어적 제어로 에너지 절감을 수행하거나, 유동인구가 적은 시간대에는 전원을 차단하여 계단으로써 활용하였다. 그러나 상기와 같은 방법을 통해, 완전 무동력 에스컬레이터가 기존 전력 소비형 에스컬레이터에 비해 작동이 부자연스러운 점을 해결할 수 있으며, 기존 하향식 에스컬레이터 대비 전력 소모량을 약 91.7%, 기존 모터 대비 구매비용을 약 93.7% 획기적으로 줄일 수 있을 것으로 예상된다.</p>

반무동력 발전 에스컬레이터

공경환*·임국영*·구영헌*·이철희*†

*인하대학교 기계공학과

Development of a semi-powered escalator generating electricity

Gyeong-Hwan Gong*, Guk-Young Lim* and Yeong-Heon Ku*, Chul-Hee Lee*†

* School of Mechanical Engineering, Inha University

(Received September 27, 2021)

Key Words: Semi-Power(반 무동력), Generating(발전하는), Escalator(에스컬레이터)

초록: 본 연구에서는 전력 소모가 큰 기존의 에스컬레이터를 기계식 시계의 작동 메커니즘을 적용해 무동력 에스컬레이터로 개발하는 것을 목표로 한다. 개발된 장치의 적용 범위는 하향의 에스컬레이터로 제한한다. 기존의 에스컬레이터에 적용할 수 있도록 설계하여 제작단가를 낮췄으며, 전기모터가 아닌 승객의 하중을 주 동력원으로 하여 전력 소모를 약 91.7% 감소시켰다. 또한, 에너지 절감을 넘어 내부의 스프링 왕복 운동으로부터 추가 전력을 생산하도록 설계하였다. MATLAB 데이터 분석을 통한 부품 치수의 설정으로 스텝의 매끄러운 구동을 전산 구현하였다. INVENTOR를 기반으로 3D 모델링을 진행하고 3DP를 활용하여 축소모형(Prototype)을 제작함으로써 실제 장치의 구동 가능성을 확인하였다.

Abstract: This study aims to develop non-powered escalators by applying the mechanism of mechanical clocks. The developed device is limited to downward escalators. The cost was reduced by designing it to apply to the existing escalators and power consumption was significantly reduced by about 91.7% using a load of passengers as the main power source. It is also designed to generate power from the movements of internal parts. The smooth driving of the step was computerized through MATLAB data analysis. By conducting 3D modeling based on INVENTOR and manufacturing a reduced model using 3DP, the possibility of driving the actual device was confirmed.

1. 서 론

이상기온으로 다양한 기후 재난들이 지구 곳곳에서 발생하고 있다. 최근 미국 동부 뉴욕은 태풍, 홍수 등으로 인해 지하철, 차량들이 침수한 반면, 같은 시기 미국 서부 캘리포니아는 섭씨 54도에 육박하여 잦은 대형 산불과 파이어 토네이도가 발생하였다. 이러한 상황 속에 전세계가 온실가스를 줄여 지구 복원력을 높이기 위한 취지로 지난 2018년 송도에서 열린 기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC)에서 채택한 보고서에 따르면, 2030년까지 2010년 대비 이산화탄소 배출량을 45% 줄여야 기후 파국을 막을 수 있다. 따라서 에너지 절약을 위한 혁신적인 방안의 필요성이 대두되고 있다. 건물 내 외부에서 흔히 사용하는 에스컬레이터는 전기모터를 이용해 구동되며 과거에는 상시 가동 되며 에너지를 과도하게 소

† Corresponding Author, chulhee@inha.ac.kr

□ 2021 The Korean Society of Mechanical Engineers

비하였다. 가장 전력 사용량이 많은 백화점 기준으로 월평균 5,641MWh의 전기를 사용하므로, 이를 현재 산업용 전기세 중 산업용(을), 고압A, 선택3, 최대부하 기준으로 환산한 결과 979,841,700원으로 나타났다. 최근에는 에너지 절감의 중요성의 대두와 더불어 경제적인 이유로 승객이 입구에 접근했을 때 센서를 이용하여 간헐적으로 구동하게 하는 시스템이 대부분의 장치에서 갖추어 졌다. 하지만 이 역시 승객 이송을 위해 고중량의 장치를 전기모터로 구동시켜야 하기에 비 효율적으로 에너지가 소모되고 있음은 여전하다. 이에 본 연구의 목적은 하향에 한하여 기계식 시계의 등속회전의 작동 메커니즘을 적용하여, 외부 전기동력을 일부 상황에서만 사용하는 “반무동력 발전 에스컬레이터”를 설계하여 승객 이송에 소모되는 에너지를 대폭 절감하고 결과적으로, 지구 복원력에 기여함을 목표로 한다.

2. 설계 핵심내용

2.1. 에스컬레이터의 이해⁽¹⁾

에스컬레이터의 어원은 라틴어의 'Scala(계단)'와 영어의 'Elevator(엘리베이터)'가 결합되어 '자동으로 오르내리는 계단', '스스로 움직이는 계단'이란 의미를 가진다. 이 말은 찰스 시버거(Charles Seeberger)가 1895년에 이름 붙인 뒤 지금까지 쓰이고 있다. 에스컬레이터는 철골구조의 트러스를 상하층 바닥고에 걸쳐 설치하고 그 안에 좌우 리본에 무단 연속 스텝 체인의 일정 간격으로 스텝을 설치하여 체인의 구동에 의해 스텝을 순환시켜 사람을 수송하는 수단이다. 최초의 에스컬레이터는 정의와 다르게 실용적인 교통수단이 아닌 오락을 위한 장치로 개발되었다고 하며 관련된 최초의 특허는 1859년 매사추세츠주에서 취득했는데 그 시스템은 스팀(Steam)으로 구동되는 장치였다고 한다. 우리가 알고 있는 에스컬레이터는 나중에 1897년 Charles Seeberger에 의해 다시 설계/제작되었다. Charles Seeberger는 오티스 엘리베이터(Otis Elevator Company)와 협력하여 1899년 뉴욕 주 Yonkers에 있는 Otis 공장에서 첫 상업용 에스컬레이터를 생산했다. Otis에 따르면 "1920년대 David Lindquist가 이끄는 Otis 엔지니어는 Jesse Reno와 Charles Seeberger 에스컬레이터의 설계를 결합, 개선하여 오늘날 사용 중인 현대식 에스컬레이터의 수준으로 끌어올려 놓았다.

2.2. 에스컬레이터의 구조⁽²⁾

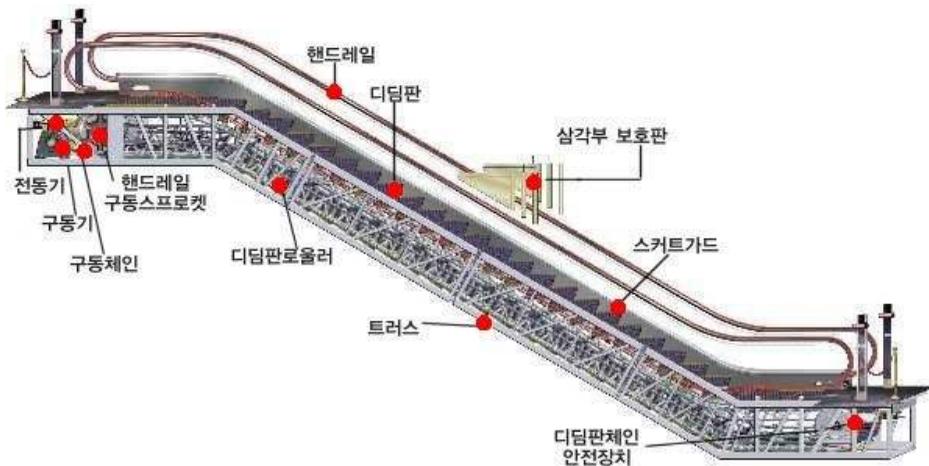


Fig.1 The structure of the escalator

2.2.1. 전동기

에스컬레이터를 구동하기 위해 동력을 제공하는 모터로써 한 대의 전동기로 2대 이상의 에스컬레이

터를 구동시켜서는 안 된다.

2.2.2. 구동기

에스컬레이터를 구동하기 위한 전동기, 감속기, 브레이크 등을 포함한 장치를 말하며, 구동장치는 본체 즉 스텝을 구동시키는 주 구동장치와 핸드레일을 구동시키는 핸드레일 구동장치가 있다. 이 구동장치들은 서로 연동되어 같은 속도로 이동하여야 한다.

2.2.3. 구동 체인

에스컬레이터에 있어서 구동기의 회전력을 구동 스프로킷에 전달하는 장치를 말한다.

2.2.4. 핸드레일 구동 스프로킷

에스컬레이터 구동기의 회전을 구동 체인을 통하여 스텝 체인 스프로킷에 전달하는 장치를 말한다.

2.2.5. 디딤판 롤러

스텝의 전륜과 후륜에 설치된 2개의 롤러에 의해 스텝이 움직인다.

2.2.6. 핸드레일

에스컬레이터의 계단이 움직임에 따라 승객이 추락하지 않도록 설치한 측면 벽을 난간이라고 하며, 난간 상부의 이동 손잡이를 핸드레일이라고 한다. 핸드레일은 스텝과 동일한 속도로 승강하여야 한다.

2.2.7. 디딤판

에스컬레이터에 있어서 이동하는 계단의 유닛을 스텝이라 하는데, 스텝은 프레임에 발판(tread board)과 라이저(riser)를 조합한 구조로써 전륜과 후륜 각 2개의 롤러에 의해 원활하게 구동되도록 구성되어 있다.

2.2.8. 트러스

에스컬레이터의 철골구조인 프레임으로서 상하층에 걸쳐 설치된다.

2.2.9. 삼각부 보호판

사람이 삼각부에 충돌하는 것을 경고하기 위하여 25~35cm 전방에 설치하는 신체상해의 우려가 없는 재질의 비고정식 안전보호판이다.

2.2.10. 스커트 가드

에스컬레이터 내측 판의 스텝에 인접한 부분을 일컬으며, 스테인리스판으로 구성된다.

2.2.11. 디딤판 체인 안전장치

스텝 체인의 일정하지 않은 이완이나 파단의 경우에, 기계식 하부에 설치되어 에스컬레이터가 정지하도록 작동한다.

2.3. 기계식 시계 (Mechanical Watch) 장치의 정의

시계의 종류는 크게 전자식 퀴츠(Quartz)시계와 기계식 시계로 나뉜다. 주변에서 보다 흔히 접할 수 있는 전자식 시계를 퀴츠시계라고 하는데 퀴츠란 수정(Crystal)을 뜻하며, 바로 이 수정을 시계의 작동에 이용한다. 얇은 수정판에 전극을 붙인 후 교류전압을 가하면 압전기 현상에 의해 수정판이 진동하고, 이를 전자회로를 통해 유지한다. 발생한 진동을 집적회로를 통해 모터로 전달하여 시계를 구동시키는 원리이다.

이와 달리 기계식 시계는 전력의 공급 없이 추 혹은 스프링의 퍼텐셜에너지와 이 에너지의 소모를 이스케이프먼트(Escapement)라 불리는 등속 제어의 역할을 하는 부분을 통해 구동되는 방식이다.

기계식 시계의 종류는 자동(Automatic)시계와 수동(Manual)시계로 나뉘며 이는 동력원에 따른 분류이다. 자동방식은 내부의 로터가 사용자의 동작과 중력에 의해 회전하며 스프링을 감는 방식이고, 수동방식은 사용자가 직접 외부의 용두(Crown)을 돌려 메인 스프링을 감아줌으로써 구동에너지를 얻는다.

2.4. 기계식 시계 장치의 구조



Fig.2 The structure of a mechanical clock system



Fig.3 The components of Escapement

2.4.1. 메인 스프링(Mainspring)

약 30.48cm의 스프링 코일 형태의 경화된 얇은 금속 Strip이다. 메인 스프링은 크라운으로부터 전달된 에너지를 저장한다. 또한, 라켓 휠 그리고 클릭(Click)과 결합하여, 한 방향으로 회전한다.

2.4.2. 이스케이프먼트(Escapement)

메인 스프링의 에너지를 단번에 방출하지 않고, 일정량을 지속적으로 방출하도록 조절하는 시스템으로, 팔렛 포크(Pallet Fork)와 이스케이프 휠(Escape Wheel)로 구성된다.

2.4.2.1. 팔렛 포크(Pallet Fork)

<Fig.3_1>, 헤어스프링에 의하여 구동된 이스케이프 휠의 이가 팔렛 포크와 충돌 후 회전하면서 구속되어 있던 팔렛 포크의 반대편을 방출시킨다. 위와 반대로 충돌하면, 이스케이프 휠을 구속하도록 팔렛 포크의 반대편을 회전시키게 된다.

2.4.2.2. 팔렛 주얼(Pallet Jewel)

<Fig.3_2>, 팔렛 포크의 홈에 부착되어, 이스케이프 휠과의 접촉을 조절하기 위한 장치

2.4.2.3. 이스케이프 휠(Escape Wheel)

<Fig.3_3>, 팔렛 포크와의 접촉을 통해 에너지 방출을 조절하며 회전하는 기어의 일종이다.

2.4.3. 밸런스 휠(Balance Wheel)

<Fig.3_5>, 밸런스 휠은 일정한 리듬으로 팔렛 포크를 위아래로 스윙(Swing)하도록 하며, 이스케이프 휠을 메인 스프링의 에너지가 일정 간격으로 미세 방출되도록 조절한다.

2.4.4. 머리카락 스프링(Hairspring)

<Fig.3_4>, 밸런스 휠이 회전 왕복 운동하도록 유도한다.

2.5. 기계식 시계 장치의 원리

기계식 시계는 크라운(용두)을 통해 전달된 에너지를 메인 스프링(태엽)에 저장한다. 저장된 스프링 탄성 에너지가 이스케이프 휠을 회전시키는 데 이용된다. 회전을 통한 에너지의 방출을 조절하기 위하여, 팔렛 포크를 통해 이스케이프 휠의 회전/정지를 반복하게 해줌으로써 에너지의 방출을 조절하고 또한 등속 회전하도록 한다. 이때, 팔렛 포크가 이스케이프 휠의 회전을 조절하기 위하여 헤어스프링을 이용한다. 헤어스프링이 일정 범위 내에서 회전 왕복 운동하며 팔렛 포크가 기능하도록 한다. 위의 시스템에 톱니바퀴들이 연결되어 기어비를 통해 각각 시침, 분침 그리고 초침을 구현한다.

2.6 무동력 에스컬레이터 유사 특허 사례 분석⁽³⁾

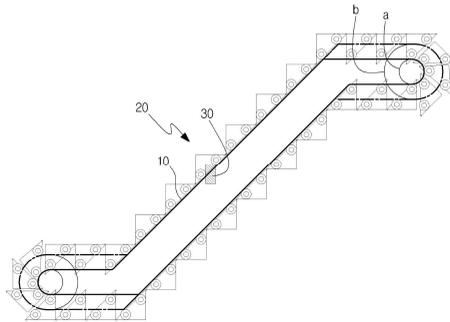


Fig.4 Similar patent model

기존 특허 <특허번호 : KR101465344B1>은 본 아이디어와 유사한 무동력 에스컬레이터에 대한 특허이다. 상기 특허에 따르면 스텝의 이송을 등속으로 유지하기 위해 에스컬레이터의 레일 부위에 이스케이프 유닛(등속 제어 유닛)이 부착되어 있다. 해당 유닛은 기계식 시계의 작동 메커니즘을 적용하였으며, 헤어스프링, 팔렛 포크 그리고 이스케이프 휠로 구성된다. 그러나 에스컬레이터를 구성하는 각 스텝은 기존 에스컬레이터처럼 체인을 통해 상호 결합된 방식이 아닌, 스텝 각각에 포함되어 있는 홈이 이스케이프 유닛과 맞물려 동작하는 형태이다. 스텝 간의 상호 연결이 되어있지 않으므로, 하단으로 이동한 스텝을 상단으로 끌어올리기 위해서는 외부 전력을 통해 모터가 상시 구동해야 하는 형태이다. 또한, 스텝 간의 간극이 구속되어 있지 않기에 승객이 탑승한 스텝과 비어있는 스텝 간의 거리가 유동적이다. 따라서 어느 한 부분에서 큰 유격이 발생할 수 있어 기능 고장이나 끼임 사고가 발생할 위험이 예상된다.

2.7. 새로운 무동력 에스컬레이터 시스템의 설계

본 문 2.6에서 서술한 기존 방식의 문제점을 해결하기 위하여 새롭게 설계를 진행하였다. 스텝 간의 유격 발생을 방지하고자, 체인을 통해 스텝 전체가 결합되어 있는 형태의 기존 에스컬레이터를 활용할 수 있도록 설계하였다. <Fig.5>에서 볼 수 있듯이 상단의 구동 스프로킷으로부터 뺏어 나오는 샤프트에 이스케이프 유닛을 부착하는 방식을 고안해 적용하였다. 이 시스템은 스텝 간의 유격 발생의 위험을 제거함으로써 안전성을 높였고, 기존 에스컬레이터를 활용할 수 있는 구조이므로 제작과정에 있어서 경제적 효과까지 확보하였다. 3D 설계 툴인 Inventor를 기반으로 모델링하였고, 그 형상은 아래 <Fig.5>와 같다.

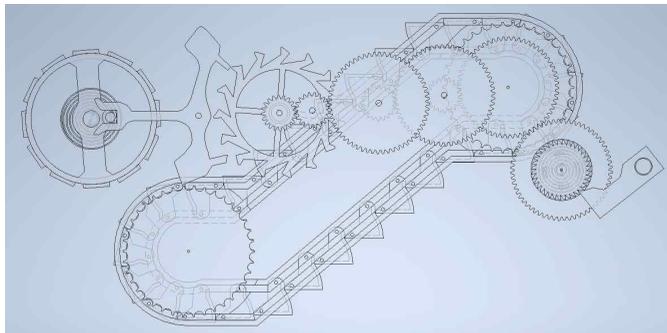


Fig.5 A draft of a new semi-powered escalator model with Escapement Unit

2.7.1. 이스케이프 유닛 (등속 제어 유닛)

기존 에스컬레이터는 동력원이 전력이기에 전동기가 필수적이었으나, 기계식 시계의 원리(본 문 2.5)를 적용함으로써 전동기를 제외하고, 이를 대체하는 이스케이프 유닛을 새롭게 설계하였다.

2.7.1.1. 등속 구동에 필요한 설계 요소의 치수 결정

에스컬레이터의 부드러운 구동을 위해서는 유닛을 설계하는 과정에서 독립변수로서 기어비, 이스케이프 휠의 잇 수, 팔렛 포크의 팔길이 그리고 헤어스프링의 비틀림 상수를 적절하게 결정해야 한다. 하지만 이 중, 비틀림 상수(Spring rate)를 결정하는 데 있어서 제작의 어려움으로 인해 시중에 판매되는 스프링의 비틀림 상수에 맞추어 다른 변수들의 값에 대한 일련의 조정이 필요하였다.

무동력 에스컬레이터의 등속 제어유닛의 핵심은 헤어스프링의 원활한 왕복 운동이다. 이를 위해서는 실제 설계에 적용했을 때, 스프링 재질과 스프링 상숫값을 모두를 합리적으로 결정하여야 한다.

헤어스프링은 기계요소로서 실제 산업현장에서 사용되는 비틀림스프링의 일종이다. 주로 인성이 높은 탄소강(Carbon Steel)으로 만들어져 사용되므로 본 설계에서는 헤어스프링의 재질을 탄소강으로 선정하고 이 외의 부품들은 알루미늄 6061로 선정하여 치수 결정 및 시스템 설계를 진행하였다.

등속 제어유닛의 헤어스프링의 회전각(θ), 사람의 하중(m) 그리고 헤어스프링의 상수(k)를 변수로 설정하고 각 값의 변화에 따른 데이터 값을 통해 <Fig.6> 에너지 보존식에 의거, 헤어스프링 왕복 운동의 회전각(θ)과 스프링 상숫값(k)에 대한 사람의 하중(m) 결과를 도출하였다. 유닛의 크기를 합리적으로 설정하기 위하여 도출한 데이터를 바탕으로 <Fig.7> 중 적절한 탄소강 비틀림스프링의 스프링 상숫값(0.1837 Nm/rad)을 참고하여 실제 가동이 가능한 승객의 하중이 도출되도록 반복 계산하였다.⁽¹⁰⁾

$$T = \frac{1}{2} m \dot{x}^2 + \frac{1}{2} J_0 \dot{\theta}^2$$

Fig.6 Equation of Energy conservation

Input parameters section									Results section							
Item / Material	t	b	OD	ID	Free State Coils	Begin and End Length	Tensile Stress of Material	Modules of Elasticity	θ degree	Spring Rate	Pitch	L	T	Operating Stress	Allowed Operating Stress	Life Cycles Prediction
	mm	mm	mm	mm	coils	mm	N/mm ²	N/mm ²		N.mm / degree	mm	mm	N.mm	N/mm ²	N/mm ²	Cycles
Carbon Steel	1	20	104	36	8.5	20	1210	206000	383	3.206	4	1869	1228	368	1089	Over 100K
Carbon Steel	0.5	8	68	12	8	20	1380	206000	440	0.238	3.5	1005	104.9	629	1242	Over 100K
Carbon Steel	2	190	1300	60	5	290	1300	206000	1804	42.64	124	10681	76916	607	1170	Over 100K
1 : Material thickness		OD : Outside diameter			T : moment or torque		θ : Angular deflection in degree			b : Material width		ID : Inside diameter		L : Length of active material		

Fig.7 The property table of commercial Carbon steel springs

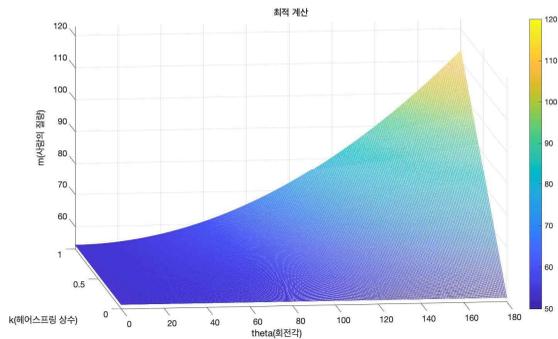


Fig.8 The graph of mass values according to Spring rotation angle(θ) and spring rate(k)

요인 (1)	2013									
	19~24세	25~29세	30~34세	35~39세	40~44세	45~49세	50~54세	55~59세	60~64세	65세 이상
사례수	219	148	187	169	197	213	197	215	145	141
평균	72.2	75.6	74.9	75.3	71.9	72.4	71.2	68.6	68.4	63.8
표준편차	11.22	10.78	10.19	8.81	8.24	8.29	8.87	7.78	8.27	7.22
최소값	45.5	51	54	55	49.1	54.9	51.7	51.6	51.5	46.2
최대값	120	116.7	100	100	95	100.8	105	92	95	85
백분위수95	97.2	94.8	94	91.4	88	87.2	86	83	84.2	76.5
백분위수90	85	91.1	90	87	83.5	83.6	82	78.6	78.3	72.5
백분위수10	60	63.5	61.7	63.8	62.8	61.8	60	59	58.6	53.8
백분위수5	56	60.5	60.1	61	60.8	59.9	56.8	55.9	54	52.4

Fig.9 The average weight of an adult male

반복 계산 결과, 회전각이 90°이고 스프링 상수 k가 0.1837 Nm/rad인 경우 최소 구동 하중은 109.004kg으로 계산되었다. <Fig.9> KOSIS 기준 2013년 성인 남자 25~29세 평균 몸무게는 75.6kg이다.⁽⁷⁾ 에스컬레이터가 유동인구가 많은 건물에 설치되는 점을 고려하면, 1인 탑승 상황이 드문 만큼 구동에는 무리가 없을 것으로 예상된다.

2.8. 반 무동력 에스컬레이터의 제어 시스템 설계

승객이 탑승/하차하는 Foot Plate에 로드 셀을 장착하여, 승객의 하중을 측정한다. 로드 셀의 결과에 맞추어 제어 보드는 승객들의 하중 합을 계산하고, 이 값이 무동력 구동에 요구되는 최소 하중보다 작다면 클러치 형태의 기어가 맞물려 회전하여 유닛을 작동시킨다.

제어 시스템의 결선도는 아래<Fig.10>와 같다. 회로의 명확한 표현을 위하여 모터와 로드 셀을 각 1개씩만 결선하였다.

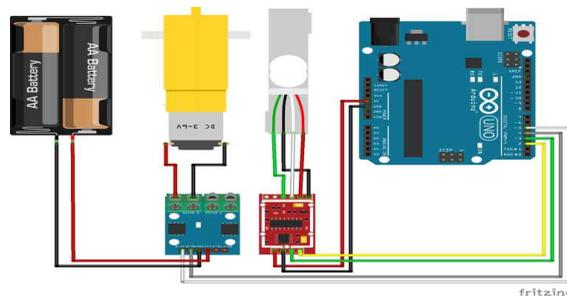


Fig.10 The Circuit of Control system

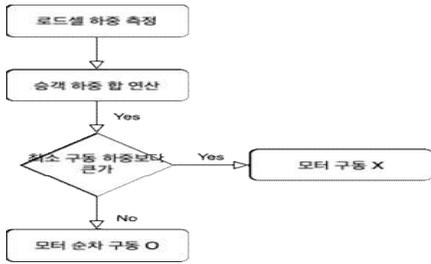


Fig.11 The flowchart of Control system



Fig.12 A part of Control system code

2.9. 반 무동력 발전 에스컬레이터의 발전 시스템 설계

2.9.1. 패러데이 법칙

$$V_L = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

Fig.13 Faraday's law of induction

패러데이 법칙에 따르면 시간당 자기선속의 변화율과 코일 고리 개수가 독립변수이고, 유도 전압은 종속 변수이다. 따라서 발전량을 높이기 위하여 시간당 자기선속의 변화율을 높이거나, 코일 고리 개수를 높여야 한다.

2.9.2. 모형 재료의 선정

모터는 전기적 에너지를 기계적 에너지로 변환하는 반면, 발전기는 이와 반대로 작용한다. 시중 발전기를 활용하고자 하였으나, 적절한 크기와 발전량에 맞는 제품의 선정에 어려움이 있어 CPU쿨러를 발전기로 개조하여 사용하기로 하였다.

따라서 본 모형 설계에서는 패러데이 법칙에 따라 코일 고리의 개수가 고정적이므로 자기선속의 변화율을 높이기 위하여, CPU쿨러 중에서 RPM 수가 높으면서 분해가 가능한 제품을 아래와 같이 <Fig.14> 선정 및 <Fig.15> 개조하였다.



COOLERTEC
CT-12025SH12DBA-3P



Fan Dimension	120 x 120 x 25mm
Bearing Type	2 Ball Bearing
Fan Speed	4000RPM±10%
Rated Voltage	12VDC
Rated Current	0.60A
Input Power	7.2W
Air Flow	175.8CFM
Noise	58.6dBA
Connetor	3Pin
Line length	300mm

Fig.14 The Specification of CPU cooler



Fig.15 The Renovated CPU cooler

실제 설계에서는 코일 고리 개수가 많고, 강한 자성을 띄는 발전기를 사용하고, 높은 진동수를 갖는 헤어스프링을 장착한 밸런스 휠에 장착하여 발전량을 더욱 증가시킬 수 있다.

2.10. 반 무동력 발전 에스컬레이터의 소비 전력 및 비용 계산



Fig.16 The Specification of one kind of motor for escalator

<Fig.16>은 실제 에스컬레이터용 모터로서 ‘(주)시대전기’에서 현재 판매 중인 제품의 사양이다.

에스컬레이터의 소비 전력이 모터에 따라 다르지만, 에스컬레이터용 모터 한 종을 선정하여 최대 전력 기준으로 계산하였다.

또한, 전력사용량이 많은 백화점 기준으로 월평균 5,641MWh(2010년 기준, 약 5억 7천 300만 원)의 전력을 사용하므로, 현재 산업용 전기세부가 기준 중 산업용(을)/고압 A/선택 3/최대부하의 기준이 적용된다.⁽⁶⁾ 따라서 이를 기준으로 기존 에스컬레이터 1대의 전력사용량을 계산하였다.

산업용(을)

광업, 제조업 및 기타사업에 전력을 사용하는 계약전력 300kW 이상의 고객에게 적용

구분	기본요금 (원/kW)	전력량 요금(원/kWh)				
		시간대	여름철(6~8월)	봄·가을철(3~5,9~10월)	겨울철(11~2월)	
고압A	선택 I	7,220	경부하	56.6	56.6	63.6
			중간부하	109.5	79.1	109.7
			최대부하	191.6	109.8	167.2
	선택 II	8,320	경부하	51.1	51.1	58.1
			중간부하	104.0	73.6	104.2
			최대부하	186.1	104.3	161.7
	선택 III	9,810	경부하	50.2	50.2	57.5
			중간부하	103.4	72.3	103.6
			최대부하	173.7	96.0	150.5
고압B	선택 I	6,630	경부하	55.0	55.0	62.0
			중간부하	107.3	77.3	107.3
			최대부하	188.5	107.6	163.5
	선택 II	7,380	경부하	51.2	51.2	58.2
			중간부하	103.5	73.5	103.5
			최대부하	184.7	103.8	159.7
	선택 III	8,190	경부하	49.5	49.5	56.6
			중간부하	101.8	71.9	101.8
			최대부하	183.1	102.2	158.0
고압C	선택 I	6,590	경부하	54.5	54.5	61.4
			중간부하	107.4	77.4	107.0
			최대부하	188.3	107.8	163.6
	선택 II	7,520	경부하	49.8	49.8	56.7
			중간부하	102.7	72.7	102.3
			최대부하	183.6	103.1	158.9
	선택 III	8,090	경부하	48.7	48.7	55.6
			중간부하	101.6	71.6	101.2
			최대부하	182.5	102.0	157.8

Fig.17 Electric rates table

한 달 하루 12시간 가동을 기준으로 기존 에스컬레이터의 전력사용량과 그 요금은 아래와 같다.

$$22\text{kW} * 12\text{h} * 173.7\text{원} * 30\text{일} = 1,375,704\text{원}$$

본 연구를 통해 개발한 반 무동력 발전 에스컬레이터 모델의 전력사용량과 요금을 몇 가지 가정을 통해 예상해보았다. 최소 하중을 초과하면 작동하는 본 모델의 특성으로 인해 승객의 수가 많은 장소일수록 그 절약 효과가 클 것으로 기대된다. 이를 근거로 이용 승객이 많은 부산 센텀 시티를 기준으로 계산하였다. 센텀 시티의 일일 방문객 수는 약 14,000여 명⁽⁴⁾이다. 이때, 운영 시간 동안 전체 스텝에 걸쳐 단 1명의 승객만이 탑승하는 경우는 드물 것으로 가정하면, 구동 최소 하중 값인 109.004kg을 대부분 충족한다. 따라서 전기모터가 보조적으로 구동되는 시간은 12시간 개장 시간 중 한 시간이 채 되지 않으리라고 판단한다. 이를 편의상 1시간으로 가정하여 계산하면 결과는 아래와 같다.

$$22\text{kW} * 1\text{h} * 173.7\text{원} * 30\text{일} = 114,642\text{원}$$

2.11. 기존 에스컬레이터와 반 무동력 발전 에스컬레이터의 효율 비교

본문 2.10.의 계산 결과를 근거로 보았을 때, 한 달 동안의 전력사용량 및 요금 부분에서 각각 약 91.7%의 에너지 절감률, 에스컬레이터 1대당 연간 15,132,744원의 절감효과를 예상한다.

또한, 에스컬레이터가 주로 대형 건물, 즉 계약 전력 300kW 이상의 시설에 설치되어 있다는 점을 고려했을 때 산업용(을)을 기준으로 전국의 에스컬레이터의 전력량 요금과 그에 따른 절감효과를 계산하였다. 국가 승강기 정보센터에 따르면 전국 에스컬레이터의 대수는 2021년 6월 기준 31,689대이다.⁽⁸⁾ 그 중 하향식 에스컬레이터가 50%를 차지한다고 가정하면 최대 약 2,398억 원의 비용 절감효과를 예상한다.

2.12. 반 무동력 발전 에스컬레이터 제작 비용

에스컬레이터 자체의 구조는 기존과 같으므로 필요한 비용은 등속 제어유닛을 제작하기 위한 것이다. 유닛을 구성하는 부품을 탄소강과 알루미늄 6061을 이용해 제작하는데 필요한 비용을 아래 표와 같다.

부품	체적(mm ³)	무게(g)	가격(USD)	가격(KRW)
이스케이프 휠	797791.2		41.0	48,400
팔렛 포크	601080.0		30.9	36,500
랙 앤 피니언	1524039.2		78.4	92,500
밸런스 휠	207962.0		53.5	64,100
헤어스프링 축	216313.2		11.1	13,100
헤어스프링		796.0	1.7	2,000
계			433.1	255,600

Table 1 The costs of Escapement Unit

또한, 기존 에스컬레이터의 동력 전달 축에다 등속 제어유닛만 추가로 결합하는 형태이므로, 에스컬레이터 전체의 제작이 요구되지 않는다. 따라서 위의 <Table 1>에 표기된 자료에 따라 그 제작 비용은 약 255,600원으로 예상한다.

그뿐만 아니라, DONGYANG ELEVATOR CO. LTD.사에 따르면 에스컬레이터용 모터는 약 6,800,000원이다.⁽⁹⁾ 그러나 본 설계의 에스컬레이터는 사람의 하중을 이용하므로 모터는 최소 구동 하중을 보조해 줄 수 있는 역할만 필요하다. 따라서 에스컬레이터보다 출력이 다소 낮은 보트용 4.9kW 모터를 이용하여 구동할 수 있고, 해당 모터의 가격은 약 40만 원이다. 이는 기존 에스컬레이터용 모터의 6,800,000원 대비 약 93.7%의 비용 절감이 가능하다.

3. 결과 및 토의

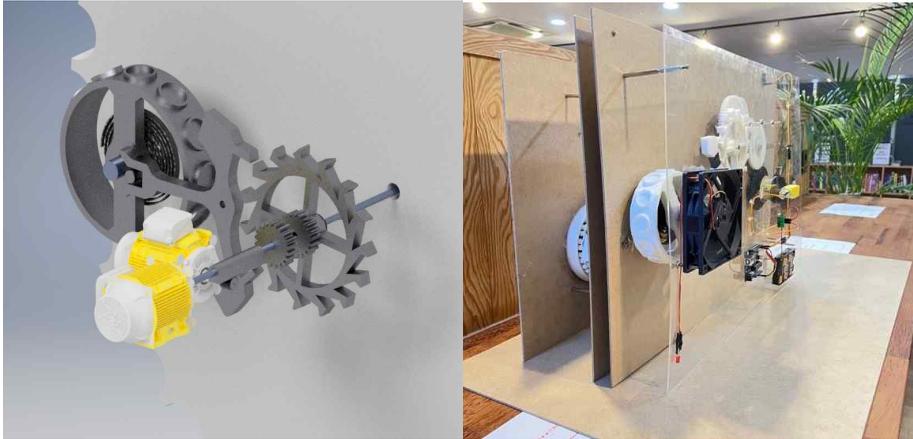


Fig.18 Development of a semi-powered escalator generating electricity

첨부한 그림은 본 연구를 통해 설계한 반 무동력 에스컬레이터의 모형이다. 에스컬레이터의 상단에 승객이 진입하여 첫 스텝 위에 위치하게 되면 그 하중으로 인해 레일 기어가 회전하기 시작하며 연결된 축을 통해 등속 제어유닛에 구동력을 전달한다. 전달받은 구동력을 통해 이스케이프 휠이 회전하고, 이 회전력이 팔렛 포크를 구속된 각 만큼 회전시킨다. 팔렛 포크의 회전에 의해 맞물려있는 이스케이프 휠과 헤어스프링이 일정 각 회전하게 되고, 회전 왕복 운동을 시작한다.

헤어스프링의 회전 왕복 운동을 통해 팔렛 포크는 위아래로 진동하고, 이는 이스케이프 휠의 이가 구속과 방출을 반복하면서 일정 속도로 회전할 수 있게 한다. 결과적으로 스텝에 오른 승객은 일정한 속도로 하강하게 된다.

한편, 팔렛 포크에 의해 구속과 방출을 반복하며 기어가 회전하는 동작 특성으로 인해, 에스컬레이터가 동작과 멈춤을 반복하면서 부드럽지 않게 구동할 우려가 있다. 이는 무동력 에스컬레이터 모델의 설계에 있어서 해결해야 할 중요한 과제이다. 과제의 해결을 위해 이스케이프 휠의 잇 수를 늘려 팔렛 포크가 높은 진동수를 가지도록 하였다. 이를 통해 한 주기당 스텝의 이동 거리는 줄고, 초당 이동 횟수를 높여 부드러운 이동을 가능케 하였다.

상기와 같은 등속 제어유닛은 기존 에스컬레이터에 부착되어 재활용할 수 있다는 장점이 있지만, 승객의 하중으로 에스컬레이터 전체가 구동해야 하기에 구동에 필요한 최소값이 존재한다는 제약조건이 있다. 하지만 유닛 전체의 크기와 기어비 조절을 통해 도출한 하중 최소값이 109.004kg임을 보았을 때, 지하철, 공공장소, 고층 건물, 대형 백화점 등 대부분 승객이 많은 장소에 에스컬레이터가 설치되어 구동되고 있으므로 최소 하중 조건을 대부분 만족할 것으로 판단한다.

해당 유닛을 부착한 에스컬레이터를 통해 본 문 2.10의 자료와 같이 기존의 에스컬레이터와 비교하여 약 91.7%의 에너지 절감효과와 약 1,739억 원의 경제적 효과를 얻을 수 있다.

또한, 상대적으로 출력이 낮은 모터를 사용해도 구동할 수 있다는 점과 기존의 에스컬레이터 구조를 활용한다는 이점을 통해 제작에 필요한 비용 역시 약 93.7% 절감됨을 확인하였다.

이외에도 실제 구동 시 승객의 불편함을 최소화하기 위하여 하중의 최소값을 불만족할 경우, 랙 앤 피니언기어를 통해 전후로 이동하는 클러치 형태의 기어를 사용하여 필요할 때 접지되어 구동력을 더해 주는 시스템을 설계하였다. 더하여, 에스컬레이터가 구동할 때 높은 진동수로 회전 왕복 운동하는 헤어스프링 축에 발전기를 결합하여 추가 전력의 생산까지 가능하다.

4. 결 론

본 연구는 기계식 시계의 작동 원리를 적용한 반 무동력 에스컬레이터를 제작하는 것이다. 설계한 등속 제어유닛을 기존 에스컬레이터의 전기모터 대신 부착함으로써 반 무동력 에스컬레이터는 전력이 아닌 부품 간의 물리적인 동작을 통해 구동한다. 사람의 하중을 활용하는 방식으로 탑승하여 하강하는 동안에 등속을 유지할 수 있으며, 추가적인 제어 시스템과 발전 시스템을 부착하여 자연스러운 작동과 발전까지 이끌어 낼 수 있다.

유동인구가 많고 규모가 큰 부산 센텀 시티 신세계 백화점을 기준으로 전력 소모량을 계산하고, 이를 전국의 에스컬레이터로 확장하여 그 전력 사용요금을 산정하였을 때, 기존 에스컬레이터와 비교하여 약 91.7%, 즉 약 1,739억 원의 절감효과를 추정할 수 있었다. 제작에 필요한 비용 역시 기존 모델과 비교하면 약 93.7%, 즉 대당 약 6,370,000원을 절감효과가 있다.

후 기

본 연구는 기계식 시계의 물리적인 작동 원리를 이용하여 에스컬레이터로 소모되는 에너지를 줄이며, 더하여 제어 시스템과 발전 시스템의 부착을 통해 에너지를 대폭 줄일 가능성을 제시하였고, MATLAB을 통한 데이터 계산으로 작동에 요구되는 결괏값을 확인하였다. 실제로 1/N배로 설계한 부품을 활용하여 제작해봄으로써 제작 가능성 또한 입증해 보았다. 제작품의 부품 크기가 작아 3DP의 출력 한계로 인해 부품들의 정교함이 높지 않았다. 이로 인해 제작품의 작동이 어려웠고, 스텝의 부드러운 구동 여부, 발전량 등 실제 크기에서의 효과를 직접 확인하기는 어려웠으나 데이터 계산을 통해 에너지소모와 그 비용의 감소 효과는 충분히 알 수 있었다. 연구를 통해 친환경적 반 무동력의 발전 에스컬레이터의 모델을 제안하며, 이는 무분별하게 소모되는 에너지와 비용의 절약으로 이어져 환경보존과 지속 가능한 미래를 위한 새로운 혁신이 될 것을 기대한다.

참고문헌

- (1) Kim, B.W., 2019, "A Study on energy measurement and energy-saving method of escalator with operation mode", A Thesis submitted to the faculty of INHA UNIVERSITY in partial fulfillment of the requirements for the degree of MASTER OF ENGINEERING, pp. 18~19.
- (2) WOOSUNGIDS ELEVATOR LTD, 2013, The structure of an escalator http://www.wsids.co.kr/m6_3_4.htm
- (3) 석창정, 박건태, 2013, "Downward escalator without power supply", The Korean Intellectual Property Office KR101465344B1, pp. 08.
- (4) FnNews, 2015, The number of visitors to Centum City in Busan, <https://www.fnnews.com/news/201512290938375964>
- (5) Busan Metropolitan City, 2021, 2020 Busan Tourism Industry Trend Analysis data, <https://www.busan.go.kr/pr/reference/1480220?curPage=&srchBeginDt=2016-05-19&srchEndDt=2021-05-19&srchKey=&srchText=>, pp. 05
- (6) KEPCO, 2021, Electric Rates Table, <https://cyber.kepco.co.kr/ckepeco/front/jsp/CY/E/E/CYEEHP00103.jsp>
- (7) KOSIS, 2018, The average weight of an adult male in 2013 https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=113&tblId=DT_113_STBL_1020215
- (8) Ministry of the Interior and Safety, The number of elevators and escalators, <https://www.elevator.go.kr/stat/NationPossStats.do>

- (9) DONGYANG ELEVATOR Co. LTD., 2019, Elevator parts price and replacement cycle data,
<http://www.dongyangel.co.kr/news/?mod=document&uid=134>
- (10) TECH SPRING MANUFACTURING CORP., The property table of commercial Carbon steel springs,
- (11) https://www.da-yi.com.tw/ko/product/spiral-torsion-springs_flat-coil-springs.html