

엑츠크에이터가 없는 피난 장치의 제동장치 설계

이영걸, 이덕희*, 박원희
한국철도기술연구원 철도중대사고연구실

Design of Brake Device for Evacuation System without Actuator

Yeong Geol Lee, Duckhee Lee*, Won-Hee Park
Department of Railroad Safety Research, Korea Railroad Research Institute

요약 본 논문에서는 엑츠크에이터가 없는 수직형 피난 장치를 소개하고, 안정성을 위한 제동장치를 설계한다. 도시의 거대화 현상의 결과 초고층 건물의 등장으로 안전에 대한 관심이 높아져 왔다. 초고층 건물은 골든타임을 요하는 화재 상황에 안정성이 취약하다. 특히 재난 약자의 경우 신속한 대피가 어렵기 때문에 고층건물의 화재는 재난약자에게 더 치명적으로 다가온다. 본 연구에서는 비상상황에서 재난약자들이 신속하고 안전하게 피난할 수 있는 장치를 설계하고자 한다. 그의 한 방편으로써 침대를 직접 내리는 기구장치를 고안하였고, 신속한 대피를 위해 각층에서 독립적인 구난활동을 펼칠 수 있도록 하였다. 하지만 재난약자들의 다양한 무게로 인해 피난 장치의 안정성이 확보되지 않아 이를 해결하기 위해 별도의 엑츠크에이터가 없는 제동장치를 설계하였다. 이 제동장치는 스프링과 댐퍼로 구성되어 있으며 운동에너지가 스프링의 위치에너지로 전환되고 댐핑에 의한 운동에너지 손실로 제동을 할 수 있도록 하였다. 시뮬레이션 결과 다양한 재난약자의 무게에서도 안정성을 확보하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 별도의 엑츠크에이터가 없기 때문에 전력 공급이 없는 비상상황에서도 안전하게 작동할 수 있으며, 또한 신속한 대피가 가능하도록 한 장치로 초고층 건물의 피난 활동에 높은 효용성을 보일 것으로 예측된다.

Abstract This paper introduces an evacuation system without an actuator and a new brake device. Skyscrapers have poor stability in a fire situation that requires a golden time. In particular, a fire in a high-rise building can be fatal to the vulnerable because it is difficult to evacuate them quickly. This study designed a device that enables the vulnerable to evacuate quickly and safely in an emergency. A mechanism that delivers beds directly downstairs was devised, making it possible to carry out independent rescue activities on each floor for rapid evacuation. On the other hand, the safety of the evacuation device was not secured because of the various weights of the vulnerable. This study designed a braking system without an actuator to overcome this. The system consisted of springs and dampers. The kinetic energy was converted to the potential energy of the springs, resulting in damping and a loss of kinetic energy. Hence, the springs and dampers act as a brake. The simulation confirmed that stability is ensured even under the weight of various vulnerable people. Because there is no actuator, it can be operated safely even in emergencies. Overall, the device enables rapid evacuation and is expected to show high utility in the evacuation of skyscrapers.

Keywords : Evacuation, Spring, Damper, Brake, Actuator

본 논문은 한국철도기술연구원 “대심도 철도 사고대응 피난관제 핵심기술 개발” 및 “재난약자 대피 수직형 도움장치 개발” 연구과제로 수행되었음.

*Corresponding Author : Duckhee Lee(Korea Railroad Research Institute)

email: dhlee@krri.re.kr

Received November 4, 2021

Revised December 14, 2021

Accepted February 4, 2022

Published February 28, 2022

1. 서론

도심 건물의 초고층화가 진행됨에 따라 화재와 같은 재난상황에서 대규모 인명피해가 발생하고 있어 초고층 건물에서의 피난 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 에어컨 실외기 받침대에 설치하는 탈출장치와 같이 추가적인 설비가 필요하지 않고 기존 구조물을 이용하여 탈출하는 장치도 개발이 되었지만, 피난자의 자력으로 대피를 진행해야 한다는 점에서 초고층건물과는 맞지 않는 한계가 있다[1]. 전기동력을 통해 두 개의 풀리 기어의 속도를 3 Ft/s(약 1 m/s)로 제어하여 구난활동을 할 수 있는 장치도 개발되었다[2]. 하지만 비상상황에서는 전력을 활용할 수 없는 경우도 대비하여야 하므로 별도의 액츄에이터 없이 구동되는 구난장치의 개발되어야 한다. 낙하산을 이용한 대피방식(구난슈트)은 극한 상황에서 대피하는데 이용될 수 있지만, 안정성 테스트의 최고높이가 42 m라는 점에서 초고층빌딩 재난상황에 적용하기 어렵다[3]. 접이상자를 이용해 임시 피난장소를 설치하는 방법 또한 수동 설치라는 장점이 있지만, 대피 기구가 아닌 피난 장소를 만드는 기구라는 점에서 한계가 존재한다[4].

본 논문에서는 초고층 건물에서 화재나 재난 시 전력이 차단된 상태에서도 자동으로 동작이 가능하며, 각 층마다 독립적인 구난활동이 가능하게 하는 수직형 비상 피난 장치를 소개한다. 이 장치는 별도의 동력이 필요 없도록 스프링 댐퍼와 제동장치로 구성된다. 이는 별도의 조종장치가 필요하지 않기 때문에 노약자나 장애인 등 재난약자들이 탑승한 침상장치를 직접 하강시킬 수 있어 병원에서의 피난 효율성을 극대화할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 수직형 피난 장치

2.1 수직형 피난 장치

고층빌딩에서 재난 상황 발생 시 신속하게 대피할 수 있도록 도와주는 침상 이동이 가능한 옥외 승강기를 설계하고자 한다. Fig. 1은 하강 대기 중인 침상을 보여준다. 이 대피 장치는 전력을 사용하지 않으며, 각 층의 신속한 대피를 위해 층마다 독립적인 구난활동을 가능하도록 한다. 또한 승강기(혹은 침상)를 아래층으로 계속 전달하여 건물 1층에 도달하는 연속적인 대피방식을 사용한다.

수직형 피난 장치는 초고층 건물에서의 화재와 같은 재난 상황에 재난약자가 탑승한 침상을 직접 하강시키는 장치로, 다양한 침상무게에 대해 신속성과 안정성을 모두 확보하여야 한다. 본 논문에서는 환자를 포함한 침상 무게 150 kg ~ 200 kg에 대해 침상을 다음 층으로 20 초 이내에 전달할 수 있어야 하며, 전달 시 속도는 0.5 m/s 이내로 제어하는 것을 목표로 한다. 각 층 간격을 3 m라고 가정한다. 이는 스프링과 댐퍼를 이용해 시스템 자체적으로 전달 및 제동을 할 수 있도록 하여 모든 요구 조건을 별도의 액츄에이터 없이 달성하고자 한다.

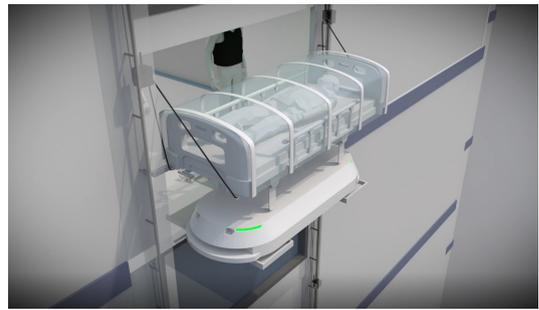


Fig. 1. Vertical evacuation device for vulnerable

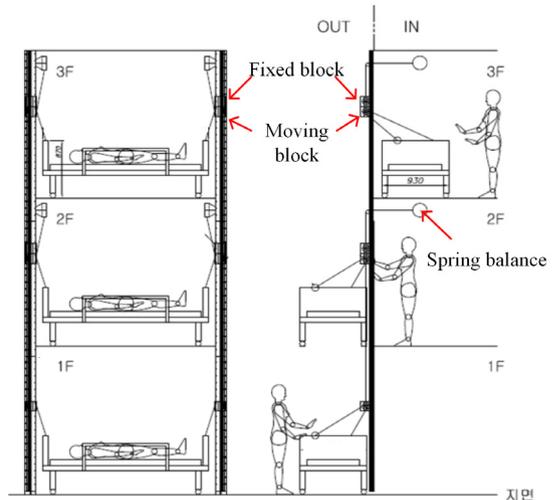


Fig. 2. Concept of evacuation device

2.2 수직형 피난 장치 전달 원리

Fig. 2는 수직형 피난 장치의 개념도를 보여준다. 이를 참고하면 3층에서 출발한 침상이 2층으로 전달된 다음 1층으로 전달된 것을 볼 수 있다. 전달 장치는 샤프트

에 고정된 고정블록과 가이드 샤프트를 따라 움직이는 이송블록으로 구성되며 이들은 각 층에 비치되어 있다. Fig. 3은 이송블록이 스프링밸런스에 연결되어 있어 평상시에는 고정블럭과 스프링에 의해 고정된 것을 보여준다. 침상에 연결된 와이어 뭉치를 이송블록에 고정하면 침상 자체 무게에 의해 이송블록과 함께 아래층으로 이동하며, 이 이송블록이 다음 층 고정블록에 도달하면 Fig. 4와 같이 와이어 뭉치를 고정블록에 전달하게 된다. 이 때 고정블록 아래에 이송블록이 있다면 와이어 뭉치를 바로 이송블록으로 전달하고, 독립적인 피난 작업으로 인해 이송블록이 이미 내려가 있는 상태라면 고정블록에 고정된 상태를 유지한다. 이처럼 위층의 이송블록에서 아래층 고정블록을 거쳐 아래층 이송블록으로 와이어 뭉치가 전달되면서 연속적으로 침상이 1층까지 하강하는 장치이다. 이송블록이 아래층에 와이어 뭉치를 전달하면 스프링밸런스의 복원력에 의해 이송블록은 다시 제자리로 돌아와 구난활동을 이어갈 수 있다.

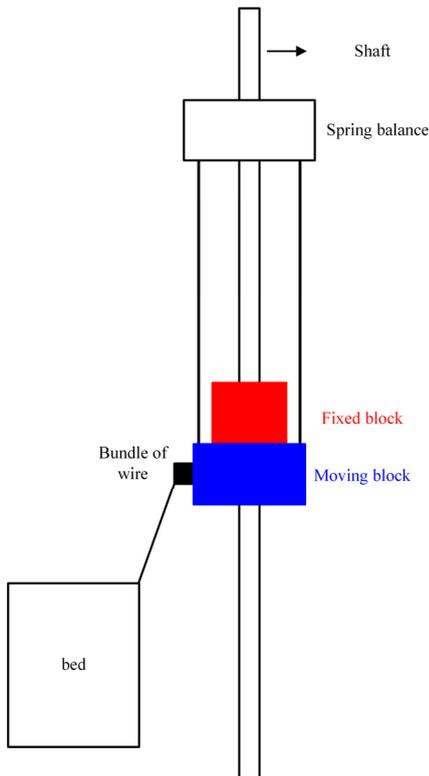


Fig. 3. Evacuation system consisting of fixed and moving blocks

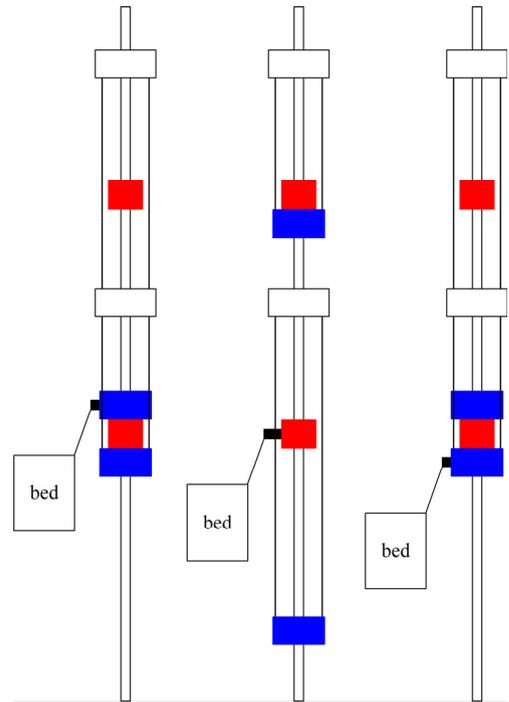


Fig. 4. Evacuation method to transfer beds downstairs

3. 제동장치

3.1 운동방정식

위에서 제시된 수직형 피난 장치는 스프링밸런스의 인장력과 침상 하중의 차이로 인해 침상을 1층까지 자동으로 전달할 수 있다. 주어진 침상의 무게에 대해 스프링 상수를 조절함으로써 침상 전달 속도를 조절할 수 있지만 급박한 상황에서의 스프링밸런스 인장력 조절은 현실적이지 않다. 반대로 스프링밸런스의 인장력을 고정하면 환자를 포함한 침상의 무게 150 kg ~ 200 kg에 대해 단일 스프링 상수로는 충분한 제동력을 확보할 수 없어 안전한 피난 활동을 할 수 없다. 150 kg 침상 하강을 가능한 스프링밸런스는 200 kg 침상의 빠른 하강 속도로 이송블록과 고정블록 간의 충돌로 인해 안정성을 확보할 수 없고, 200 kg 침상 하강 속도를 줄이기 위해 강한 인장력을 지닌 스프링을 이용하면 150 kg 침상이 하강할 수 없게 된다. 그러므로 다양한 침상무게의 신속하고 안전한 대피를 위해서 별도의 제동장치가 필요하다.

Fig. 5는 별도의 액추에이터가 없는 제동장치를 보여준다. Fig. 6에서처럼 제동장치는 스프링과 바퀴로 구성

되며, 이 바퀴는 굴곡이 존재하는 판을 따라 굴러간다. 이 제동장치의 효용성을 검증하기 위해 이 피난 시스템의 운동방정식을 세우고자 한다. Eq. 1은 라그랑지안 방정식이다.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) = \frac{\partial L}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial \dot{x}} \quad (1)$$

where

$$L = T - V \quad (2)$$

where T is the total kinetic energy of the system, V is the potential energy of the system, and P is dissipation function.

이 시스템 전체의 운동에너지와 위치에너지는 다음과 같다.

$$T = \frac{1}{2} m \dot{x}^2 \quad (3)$$

$$V = -mgx + k_1(x + L_0)^2 + k_2\{y_1(x)\}^2 + k_2\{y_2(x)\}^2 \quad (4)$$

where m is the mass of bed containing a patient, L_0 is initial length of the stretched spring balance, g is gravity acceleration, k_1 and k_2 are respectively spring constants of spring balance and brake, and $y_1(x)$ and $y_2(x)$ are compression length of braking devices.

이 시스템의 산일 함수는 제동장치의 바퀴에 설치되어 있는 댐핑에 대한 것이며 이는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P = -\frac{1}{2} c k_2 y_1(x) \dot{x}^2 - \frac{1}{2} c k_2 y_2(x) \dot{x}^2 \quad (5)$$

where c is damping coefficient.

Eq. 3과 Eq. 4와 Eq. 5를 Eq. 1과 Eq. 2에 대입하면 다음과 같은 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} m\ddot{x} = & mg - 2k_1(x + L_0) - 2k_2y_1 \frac{dy_1}{dx} \\ & - 2k_2y_2 \frac{dy_2}{dx} - ck_2(y_1 + y_2)\dot{x} \end{aligned} \quad (6)$$

3.2 제동장치 설계

제동장치는 다양한 침상 무게에 대해서도 시스템이 안정성을 갖도록 하는 것을 목표로 한다. Fig. 5를 보면 침상 하강 시 제동장치의 바퀴는 굴곡을 따라서 내려가 별도 액츄에이터 없이 제동하도록 한다. 이 때 굴곡의 모양은 다음과 같이 제안한다.

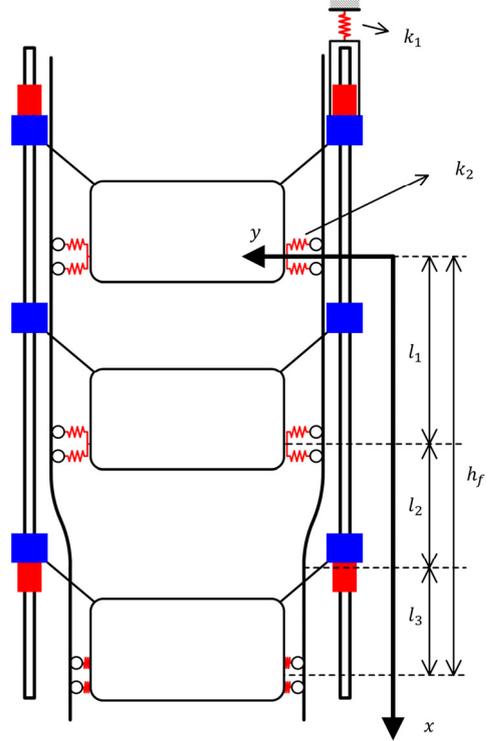


Fig. 5. Evacuation system with brake devices

$$y_1 = d_0 \quad \text{for } 0 \leq x < l_1 \quad (7)$$

$$y_1 = \frac{d}{2} \left\{ 1 - \cos \left(\frac{\pi}{\ell_2} (x - \ell_1) \right) \right\} + d_0$$

$$y_1 = d + d_0 \quad \text{for } l_1 + l_2 \leq x < h_f$$

and

$$y_2 = d_0 \quad \text{for } 0 \leq x < l_1 + w \quad (8)$$

$$y_2 = \frac{d}{2} \left\{ 1 - \cos \left(\frac{\pi}{\ell_2} (x - \ell_1 - w) \right) \right\} + d_0$$

$$y_2 = d + d_0 \quad \text{for } l_1 + l_2 + w \leq x < h_f$$

where y_1 and y_2 are the compression length of the first and second brake springs, respectively, d is the height of the curve, d_0 is the initial

는 환자의 무게가 일정하지 않기 때문에 안정성을 확보 하는데 어려움이 있다. 이를 극복하기 위해 본 연구에서는 엑츄에이터가 따로 필요 없는 제동장치를 설계하였다. 제동장치는 스프링과 댐퍼로 구성된다. 이 장치의 핵심은 하강 시 침상의 운동에너지는 스프링의 위치에너지를 전환되어 이와 함께 마찰력에 의한 운동에너지 손실로 제동을 한다는 것이다. 운동방정식을 세우고, 시뮬레이션한 결과는 다음과 같다.

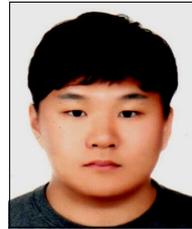
- 1) 100 N/m와 10000 N/m 스프링 상수를 갖는 스프링과 5 cm의 굴곡을 활용하여 최대 250 kg까지 도달속도 0.6 m/s, 도달시간 16초로 다양한 환자 무게에 대해 수직형 피난 장치의 안정성 및 신속성을 확보하였다.
- 2) 스프링 상수가 지나치게 커져야 한다는 한계점이 존재한다. 이는 스프링 개수를 늘려 구현 가능하지만 공간적 한계로 실제 제품 설계에 어려움이 있다. 엑츄에이터가 없는 제동장치를 이론적으로 설계할 수 있었으나 구현화 과정에서 어려움이 있었다. 스프링 상수는 굴곡의 모양 및 높이로 조절이 가능할 것으로 예상되어 실험을 통해 보완해나갈 예정이며 추후 실제 시제품에 적용할 예정이다.

References

- [1] W. Guo-rong, Y. Li, C. Liu, "Discussion and research on the high building fire escape devices and TRIZ", *2011 IEEE 18th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, IEEE, Changchun, China, pp.1676-1678, Sept. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIEEM.2011.6035483>
- [2] H. G. Ghuge, R. A. Kulkarni, U. R. Kulkarni, K. V. Thakur, "Fire Rescue System for High Rise Building". *2019 5th International Conference On Computing, Communication, Control And Automation (ICCUBEA)*, IEEE, Pune, India, pp.1-5, Sept. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICCUBEA47591.2019.9128377>
- [3] G. Li, Y. Huang, C. Chen, "Secondary Evacuation Systems for Skyscrapers: Post 9/11 Tall Building Safety Research.", *Advanced Materials Research*, Vol. 250, pp. 3263-3270, May 2011. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.250-253.3263>
- [4] S. H. Min, J. C. Sa, Y. J. Jang, J. M. Lee, J. O. Nam, "A Study on the Development of Evacuation Equipments for Units in High-rise Apartment", *2011 Korean Institute of Fire Science & Engineering Autumn Academic Conference*, Korean Institute of Fire Science & Engineering, Asan, Korea, pp.183-186, 2011.

이 영 겐(Yeong Geol Lee)

[정회원]



- 2020년 8월 : 연세대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2020년 9월 ~ 2021년 6월 : 연세대학교 기계공학과 산학협력단 박사후연구원
- 2021년 7월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 박사후연구원

<관심분야>

기계설계, 소음진동

이 덕 희(Duckhee Lee)

[정회원]



- 1996년 8월 : 연세대학교 물리학과 (이학석사)
- 2016년 8월 : 연세대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2014년 5월 ~ 2015년 4월 : 캐나다 Carleton Univ. 방문연구원
- 1997년 9월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 책임연구원

<관심분야>

화재안전, 환경소음

박 원 희(Won-Hee Park)

[정회원]



- 2000년 2월 : 중앙대학교 기계공학과 (기계공학석사)
- 2004년 2월 : 중앙대학교 기계공학과 (기계공학박사)
- 2009년 6월 ~ 2009년 12월 : 호주 Victoria Univ. 연구원
- 2004년 3월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 책임연구원

<관심분야>

철도 열유체, 화재안전