

엘리베이터 횡진동 동적 모델링 및 능동진동제어기 설계

Dynamic Modeling and Active Controller Design for Elevator Lateral Vibrations

곽 문 규† · 김 기 영* · 백 광 현**

Moon K. Kwak, Ki Young Kim and Kwang-Hyun Baek

(2010년 12월 1일 접수 ; 2010년 12월 31일 심사완료)

Key Words : Elevator Lateral Vibration(엘리베이터 횡진동), Active Roller Guide(능동 롤러 가이드), Active Vibration Control(능동진동제어)

ABSTRACT

This paper is concerned with the modeling and active controller design for elevator lateral vibrations. To this end, a dynamic model for the lateral vibration of the elevator consisting of a supporting frame, cage and active roller guides was derived using the energy method. Free vibration analysis was then carried out based on the equations of motion. Active vibration controller was designed based on the PID control algorithm and applied to the numerical model. Rail irregularity were considered as external disturbance in the numerical simulations. The numerical results show that the active vibration control of elevator is possible.

1. 서 론

최근에 세계적으로 초고층 건축물이 증가하면서 이러한 건물들 내에서 신속한 이동을 제공할 수 있는 초고속 엘리베이터 시스템의 수요가 지속적으로 증가하고 있다. 엘리베이터의 소음과 진동은 주로 주행 중에 발생하며 이는 엘리베이터의 속도가 증가하면서 주된 문제점으로 대두되었다. 특히 주행 중에 발생하는 소음과 진동은 승객에게 불쾌감과 불안한 승차감을 제공할 뿐만 아니라 세대 내로 전달될 경우 큰 문제로 발전할 수 있다. 엘리베이터의 소음과 진동은 승차감을 결정하는 중요한 요소일 뿐만 아니라 품질의 척도로써 다루어질 수 있기 때문에 다수

의 엘리베이터 업체들은 다양한 방진 대책과 더불어 이를 개선하기 위한 기술들을 개발하고 있다.

엘리베이터의 승차감을 저해하는 진동은 일반적으로 횡진동과 종진동으로 구분하며 이 논문에서는 횡진동을 억제하기 위한 엘리베이터의 동적 모델과 이에 따른 제어기 설계에 대한 내용을 다룬다. 일반적인 고속용 엘리베이터 구조는 Fig.1과 같이 케이지와 프레임, 그리고 롤러가이드로 구성된다. 승객들은 케이지에 탑승을 하기 때문에 내부나 외부에서 전달되는 진동을 줄이기 위해 프레임과 케이지 사이는 방진고무가 삽입되어 있다. 케이지의 하부에 부착된 방진고무는 케이지의 상하 및 횡진동, 전후 진동을 감소시키는 역할을 감당하고, 케이지의 상부에 부착된 방진 고무는 주로 케이지가 흔들리지 않게 하는 역할을 감당한다. 롤러 가이드는 가이드 레일에 접촉하여 일반 차량의 바퀴와 같은 역할을 담당한다. 각각의 롤러 가이드는 세 개의 바퀴로 구성되어 있으며 T자 형태의 가이드 레일에 밀착되어 있다. 각각의 바퀴는 스프링으로 지지되어 있다. 롤러 가이드에

† 교신저자; 정회원, 동국대학교 기계로봇에너지공학과
E-mail : kwakm@dongguk.edu

Tel : (02) 2260-3705, Fax : (02)2263-9379

* 정회원, 동국대학교 대학원 기계공학과,
현 (주)현대엘리베이터

** 정회원, 단국대학교 기계공학과

는 가이드 레일에서 전달되는 진동을 흡수하기 위하여 일반적으로 감쇠 장치가 부착되어 있다.

고속으로 운행 중인 엘리베이터의 횡진동을 유발하는 외부적인 요인으로 Fig. 1에 보이는 바와 같이 레일의 굴곡과 엘리베이터 교차시 발생하는 풍압을 생각할 수 있다. 엘리베이터는 승강로에 설치된 가이드 레일을 따라서 수직으로 운행하기 시스템이기 때문에 가이드 레일 사이의 연결 부분이나 휘어진 가이드 레일 위를 주행할 경우 엘리베이터에서 진동이 필연적으로 발생한다. 이러한 진동을 최소화하기 위해서는 무엇보다도 가이드 레일의 굴곡을 최소화하여야 하는데 이는 현실적으로 매우 어려운 문제이다. 일반적으로 롤러 가이드에 감쇠 장치를 부착하여 케이지로 전달되는 진동을 감소시키는 방법을 사용하는데 수치 실험 결과는 고무 바퀴의 전단강성이 엘리베이터의 고유진동수에 큰 영향을 주는 것으로 나타났다. 두 대의 엘리베이터가 서로 교차할 때 풍압의 영향으로 인하여 발생하는 횡진동을 억제하기 위해서는 유선형 케이지를 이용하는 방법이 현장에서 사용되고 있다.

방진고무와 댐퍼를 이용하는 수동적인 방법으로는 엘리베이터가 초고속으로 운항할 경우 진동 저감에 한계가 있을 수 밖에 없다. 따라서 최근에는 외란에 의한 진동에 능동적으로 대응하기 위해 외국 엘리베이터 업체들은 다양한 작동기(AC servo motor, electromagnet, voice coil actuator 등)를 엘리베이터 진동 제어에 적용⁽¹⁾하였는데 진동 저감 효과를 얻는

다고 보고하고 있다. 이에 비해 엘리베이터 진동 문제에 대한 국내 연구는 거의 전무한 상태이다^(2,3). 이 연구에서는 엘리베이터 횡진동 능동진동제어를 위한 동적 모델링 방법을 토의하고 이에 근거한 이론적인 제어기 설계 방법을 논하였다.

엘리베이터 횡진동 모델에 대한 연구 결과를 살펴보면 다음과 같다. Mutoh et al.⁽⁴⁾은 고속 엘리베이터의 횡진동 모델링 방법을 토의하고 레일이 사인파 형태의 굴곡을 가지고 있는 경우에 대한 수치 해석 결과를 제시하였다. 또한 능동진동제어기 설계 및 실제 실험 결과를 제시하여 능동진동제어의 효용성을 입증하였다. Teshima et al.⁽⁵⁾은 AMD(active mass damper)가 부착된 엘리베이터에 대한 진동 모델을 유도하고 LQR 제어기법을 수치 모델에 적용해 진동제어가 가능함을 보여주었다. Utsunomiya K. et al.⁽⁶⁾은 초고속 엘리베이터의 횡진동을 2자유도 진동계로 간략화하고 레일에 굽힘 변형이 있는 경우와 레일이 비스듬히 연결된 경우, 그리고 레일 간 수평방향 단차가 있는 경우를 고려해 제어기 설치 방법에 따른 제어 성능을 비교하였다. 이와 같은 국외 연구에 비해 국내에서는 엘리베이터의 소음 및 진동에 대한 분석 결과⁽²⁾가 제시된 바 있으며, 엘리베이터의 능동진동제어를 동적 모델링 및 실험에 대한 초기 연구결과⁽³⁾가 발표된 바 있다. 그러나 현재까지 엘리베이터 능동진동제어를 위한 동적 모델링에 대한 연구가 수행된 바 없다.

따라서 이 연구에서는 먼저 엘리베이터의 횡진동을 제어하기 위한 동적 모델링을 에너지 방법을 이용해 유도하고 수치모사를 통해 엘리베이터의 고유진동수와 고유 모드를 계산하여 진동 특성을 분석하였다. 그리고 가이드 레일의 실측 굽힘 데이터와 시뮬레이션 모델을 이용해 운행시 발생하는 진동과 능동진동제어기 작동시의 진동 저감 효과를 예측하였다. 능동진동제어 알고리즘으로는 PID 제어 알고리즘을 사용하였다. 수치 계산 결과는 레일의 굽힘에 의해 발생하는 엘리베이터의 횡진동이 능동적으로 저감되어 케이지와 프레임의 횡진동이 모두 억제될 수 있음을 보여준다.

2. 엘리베이터 동적 모델링

엘리베이터의 동적 모델링을 유도하기 위해 Fig. 1의

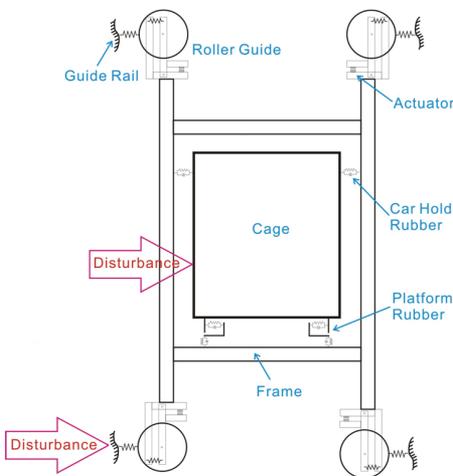


Fig. 1 Structure of elevator

실제시스템을 Fig. 2와 같은 수학모델로 변환하였다. 가이드 롤러의 외륜은 고무로 입혀져 있기 때문에 케이지를 지지하는 방진 고무와 함께 스프링-댐퍼로 가정하였다.

Fig. 2의 동적 모델에 대해 운동에너지와 탄성에너지, 그리고 가상일을 유도하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 T = & \frac{1}{2}m_c\dot{x}_c^2 + \frac{1}{2}J_c\dot{\theta}_c^2 + \frac{1}{2}m_b\dot{x}_b^2 + \frac{1}{2}J_b\dot{\theta}_b^2 \\
 & + \frac{1}{2}m_g[\dot{x}_c - (h_p + r_g)\dot{\theta}_c - r_g\dot{\theta}_1]^2 \\
 & + \frac{1}{2}m_g[\dot{x}_c - (h_p + r_g)\dot{\theta}_c + r_g\dot{\theta}_2]^2 \\
 & + \frac{1}{2}m_g[\dot{x}_c + (h_q + r_g)\dot{\theta}_c + r_g\dot{\theta}_3]^2 \\
 & + \frac{1}{2}m_g[\dot{x}_c + (h_q + r_g)\dot{\theta}_c - r_g\dot{\theta}_4]^2 \\
 & + \frac{1}{2}J_g(\dot{\theta}_c + \dot{\theta}_1)^2 + \frac{1}{2}J_g(-\dot{\theta}_c + \dot{\theta}_2)^2 \\
 & + \frac{1}{2}J_g(\dot{\theta}_c + \dot{\theta}_3)^2 + \frac{1}{2}J_g(-\dot{\theta}_c + \dot{\theta}_4)^2
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
 V = & k_{b1}r_b^2(\theta_b - \theta_c)^2 + k_{b2}(x_b + l_b\theta_b - x_c - l_c\theta_c)^2 \\
 & + k_{b3}(x_b - h_b\theta_b - x_c + h_c\theta_c)^2 \\
 & + \frac{1}{2}k_s l_s^2 \theta_1^2 + \frac{1}{2}k_r[R_1 - (x_c - (h_p + l_g)\theta_c - l_g\theta_1)]^2 \\
 & + \frac{1}{2}k_s l_s^2 \theta_2^2 + \frac{1}{2}k_r[R_2 - (x_c - (h_p + l_g)\theta_c + l_g\theta_2)]^2 \\
 & + \frac{1}{2}k_s l_s^2 \theta_3^2 + \frac{1}{2}k_r[R_3 - (x_c + (h_q + l_g)\theta_c + l_g\theta_3)]^2 \\
 & + \frac{1}{2}k_s l_s^2 \theta_4^2 + \frac{1}{2}k_r[R_4 - (x_c + (h_q + l_g)\theta_c - l_g\theta_4)]^2 \\
 & + \frac{1}{2}k_f[R_1 - (x_c - (h_p + l_f)\theta_c)]^2 \\
 & + \frac{1}{2}k_f[R_2 - (x_c - (h_p + l_f)\theta_c)]^2 \\
 & + \frac{1}{2}k_f[R_3 - (x_c + (h_q + l_f)\theta_c)]^2 \\
 & + \frac{1}{2}k_f[R_4 - (x_c + (h_q + l_f)\theta_c)]^2
 \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
 \delta W = & M_1\delta\theta_1 + M_2\delta\theta_2 + M_3\delta\theta_3 + M_4\delta\theta_4 \\
 & + f_w(\delta x_c - h_w\delta\theta_c)
 \end{aligned} \tag{3}$$

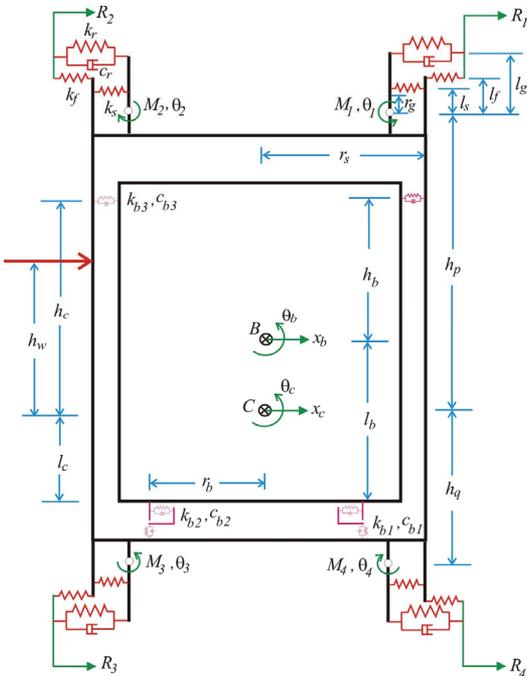


Fig. 2 Mathematical model for elevator vibration

여기서 m_c, m_b, m_g 는 프레임, 케이지, 롤러 가이드의 질량을 나타내며, J_c, J_b, J_g 는 프레임, 케이지, 가이드 롤러의 질량중심에 관한 질량관성모멘트를 나타낸다. $k_s, k_r, k_f, k_{b1}, k_{b2}, k_{b3}$ 는 Fig. 2에 보이는 스프링의 강성을 나타내며, $c_s, c_r, c_f, c_{b1}, c_{b2}, c_{b3}$ 는 점성감쇠계수를 나타낸다. 나머지 변수들은 Fig. 2에 나타난 제원들이다. 식 (1), 식 (2), 식 (3)을 라그랑지 방정식에 대입하면 다음과 같은 운동방정식이 유도된다.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = B_c f_c + f_r + B_w f_w \tag{4}$$

여기서 $x = [x_c \ \theta_c \ x_b \ \theta_b \ \theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ \theta_4]^T$ 는 프레임, 케이지의 횡방향 변위와 회전각, 그리고 각 롤러 가이드의 회전각으로 이루어진 벡터를 나타낸다. $f_c = [M_1 \ M_2 \ M_3 \ M_4]^T$ 는 각 롤러 가이드에 작용하는 제어 모멘트로 구성되는 제어력벡터이고 f_r 는 가이드 레일의 변형으로 인한 외력, f_w 는 공기 압력 변동으로 인한 교란을 의미한다. 그리고 각 행렬 및

벡터는 다음과 같다.

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & 0 & 0 & -M_{15} & M_{15} & M_{15} & -M_{15} \\ M_{12} & J_{ct} & 0 & 0 & J_{gt} & -J_{gt} & J_{gs} & -J_{gs} \\ 0 & 0 & m_b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_b & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -M_{15} & J_{gt} & 0 & 0 & J_{gg} & 0 & 0 & 0 \\ M_{15} & -J_{gt} & 0 & 0 & 0 & J_{gg} & 0 & 0 \\ M_{15} & J_{gs} & 0 & 0 & 0 & 0 & J_{gg} & 0 \\ -M_{15} & -J_{gs} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_{gg} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$f_r = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^4 ((c_r + c_f)\dot{R}_i + (k_r + k_f)R_i) \\ f_r\theta \\ 0 \\ 0 \\ f_{r1} \\ f_{r2} \\ f_{r3} \\ f_{r4} \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} & C_{17} & C_{18} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} & C_{27} & C_{28} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_{15} & C_{25} & 0 & 0 & C_{55} & 0 & 0 & 0 \\ C_{16} & C_{26} & 0 & 0 & 0 & C_{66} & 0 & 0 \\ C_{17} & C_{27} & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{77} & 0 \\ C_{18} & C_{28} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{88} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$K = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & K_{14} & K_{15} & K_{16} & K_{17} & K_{18} \\ K_{12} & K_{22} & K_{23} & K_{24} & K_{25} & K_{26} & K_{27} & K_{28} \\ K_{13} & K_{23} & K_{33} & K_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ K_{14} & K_{24} & K_{34} & K_{44} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ K_{15} & K_{25} & 0 & 0 & K_{55} & 0 & 0 & 0 \\ K_{16} & K_{26} & 0 & 0 & 0 & K_{66} & 0 & 0 \\ K_{17} & K_{27} & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{77} & 0 \\ K_{18} & K_{28} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{88} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$B_C = \begin{bmatrix} 0_{4 \times 4} \\ I_4 \end{bmatrix}, B_W = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 -h_w \ 0 \ 0]^T \quad (8)$$

$$\begin{aligned} M_{11} &= m_c + 4m_g, M_{12} = 2m_g(h_q - h_p), \\ M_{15} &= m_g r_g, \\ J_{ct} &= J_c + 4J_g + 2m_g(h_p + r_g)^2 + 2m_g(h_q + r_g)^2, \\ J_{gt} &= J_g + m_g r_g(h_p + r_g), \\ J_{gs} &= J_g + m_g r_g(h_q + r_g), \\ J_{gg} &= J_g + m_g r_g^2, C_{11} = 4c_r + 4c_f + 2c_{b2} + 2c_{b3}, \\ C_{12} &= 2(c_r + c_f)(h_q - h_p) + 2c_{b2}l_c - 2c_{b3}h_c, \\ C_{13} &= -(2c_{b2} + 2c_{b3}), C_{14} = -(2c_{b2}l_b - 2c_{b3}h_b), \\ C_{15} &= -c_r l_g, C_{16} = c_r l_g, C_{17} = c_r l_g, C_{18} = -c_r l_g, \\ C_{22} &= 2c_r(h_p + l_g)^2 + 2c_r(h_q + l_g)^2 \\ &\quad + 2c_f(h_p^2 + h_q^2) + 2c_{b1}r_b^2 + 2c_{b2}l_c^2 + 2c_{b3}h_c^2, \\ C_{23} &= -(2c_{b2}l_c - 2c_{b3}h_c), \\ C_{24} &= -(2c_{b1}r_b^2 + 2c_{b2}l_b l_c + 2c_{b3}h_b h_c), \\ C_{25} &= c_r l_g(h_p + l_g), C_{26} = -c_r l_g(h_p + l_g), \\ C_{27} &= c_r l_g(h_q + l_g), C_{28} = -c_r l_g(h_q + l_g), \\ C_{33} &= 2c_{b2} + 2c_{b3}, C_{34} = 2c_{b2}l_b - 2c_{b3}h_b, \\ C_{44} &= 2c_{b1}r_b^2 + 2c_{b2}l_b^2 + 2c_{b3}h_b^2, \\ C_{55} &= c_r l_g^2 + c_s l_s^2, C_{66} = c_r l_g^2 + c_s l_s^2, \\ C_{77} &= c_r l_g^2 + c_s l_s^2, C_{88} = c_r l_g^2 + c_s l_s^2, \\ K_{11} &= 4k_r + 4k_f + 2k_{b2} + 2k_{b3}, \\ K_{12} &= 2(k_r + k_f)(h_q - h_p) + 2k_{b2}l_c - 2k_{b3}h_c, \\ K_{13} &= -(2k_{b2} + 2k_{b3}), K_{14} = -(2k_{b2}l_b - 2k_{b3}h_b), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 K_{15} &= -k_r l_g, \quad K_{16} = k_r l_g, \quad K_{17} = k_r l_g, \quad K_{18} = -k_r l_g, \\
 K_{22} &= 2k_r (h_p + l_g)^2 + 2k_r (h_q + l_g)^2 + 2k_f (h_p^2 + h_q^2) \\
 &\quad + 2k_{b1} r_b^2 + 2k_{b2} l_c^2 + 2k_{b3} h_c^2, \\
 K_{23} &= -(2k_{b2} l_c - 2k_{b3} h_c), \\
 K_{24} &= -(2k_{b1} r_b^2 + 2k_{b2} l_b l_c + 2k_{b3} h_b h_c), \\
 K_{25} &= k_r l_g (h_p + l_g), \quad K_{26} = -k_r l_g (h_p + l_g), \\
 K_{27} &= k_r l_g (h_q + l_g), \quad K_{28} = -k_r l_g (h_q + l_g), \\
 K_{33} &= 2k_{b2} + 2k_{b3}, \quad K_{34} = 2k_{b2} l_b - 2k_{b3} h_b, \\
 K_{44} &= 2k_{b1} r_b^2 + 2k_{b2} l_b^2 + 2k_{b3} h_b^2, \\
 K_{55} &= k_r l_g^2 + k_s l_s^2, \quad K_{66} = k_r l_g^2 + k_s l_s^2, \\
 K_{77} &= k_r l_g^2 + k_s l_s^2, \quad K_{88} = k_r l_g^2 + k_s l_s^2, \\
 f_{r0} &= -c_r (h_p + l_g)(\dot{R}_1 + \dot{R}_2) + k_r (h_p + l_g)(R_1 + R_2) \\
 &\quad + c_r (h_q + l_g)(\dot{R}_3 + \dot{R}_4) + k_r (h_q + l_g)(R_3 + R_4) \\
 &\quad - c_f (h_p(\dot{R}_1 + \dot{R}_2) - h_q(\dot{R}_3 + \dot{R}_4)) \\
 &\quad - k_f (h_p(R_1 + R_2) - h_q(R_3 + R_4)), \\
 f_{ri} &= -c_r l_g \dot{R}_i - k_r l_g R_i, \quad i = 1, 4, \\
 f_{ri} &= c_r l_g \dot{R}_i + k_r l_g R_i, \quad i = 2, 3
 \end{aligned} \tag{10}$$

식 (4)는 matlab을 이용한 수치계산이나 제어기 설계에 적합하지 못하다. 수치계산을 위해 상태방정식으로 변환하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{z} = \bar{A}z + \bar{B}f_c + d \tag{11}$$

여기서

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}, \quad \bar{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}B_c \end{bmatrix} \tag{12a,b}$$

$$d = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}(f_r + B_w f_w) \end{bmatrix} \tag{12c}$$

3. 자유진동해석

(주)현대엘리베이터에 설치된 타워 5호기의 제원

을 바탕으로 다음과 같은 파라미터 값이 추출되었다. 감쇠계수는 비례감쇠로 아래와 같이 가정되었다.

$$\begin{aligned}
 m_c &= 2268 \text{ kg}, \quad m_b = 1858 \text{ kg}, \quad m_g = 1858 \text{ kg}, \\
 m_s &= 5 \text{ kg}, \quad J_c = 10829 \text{ kgm}^2, \quad J_b = 3922 \text{ kgm}^2, \\
 J_g &= 0.2 \text{ kgm}^2, \quad r_g = 0.14 \text{ m}, \quad r_b = 1.1 \text{ m}, \\
 r_s &= 1.2 \text{ m}, \quad l_g = 0.153 \text{ m} \\
 l_s &= 0.223 \text{ m}, \quad h_p = 3.309 \text{ m}, \quad h_q = 2.961 \text{ m}, \quad h_b = 1.622 \text{ m} \\
 h_c &= 1.450 \text{ m}, \quad l_b = 1.704 \text{ m}, \quad l_c = 1.291 \text{ m}, \\
 k_s &= 12.46 \times 10^3 \text{ N/m}, \quad k_r = 65 \times 10^4 \text{ N/m}, \quad k_f = 25 \times 10^4 \text{ N/m}, \\
 k_{b1} &= 12 \times 10^5 \text{ N/m}, \quad k_{b2} = 20 \times 10^5 \text{ N/m}, \quad k_{b3} = 65 \times 10^4 \text{ N/m}, \\
 c_s &= 0.02k_s, \quad c_r = 0.001k_r, \quad c_f = 0.02k_f, \quad c_{b1} = 0.02k_{b1}, \\
 c_{b2} &= 0.02k_{b2}, \quad c_{b3} = 0.02k_{b3},
 \end{aligned}$$

이 수치값을 이용해 자유진동해석을 수행한 결과 처음 네 개의 고유진동수가 각각 2.5, 4.3, 9.1, 12.7 Hz로 계산되었다. 각각의 고유진동수에 대한 고유진동모드는 Fig. 3과 같다. 첫 번째 고유진동모드인 Fig. 3(a)를 살펴보면 엘리베이터의 1차 모드는 좌우 병진운동으로 프레임과 케이지가 동일한 방향으로 움직이는 것을 확인 할 수 있다. 2차 고유진동모드를 보여주는 Fig. 3(b)는 케이지와 프레임이 동일한 방향으로 회전하는 즉, in-phase회전 진동을

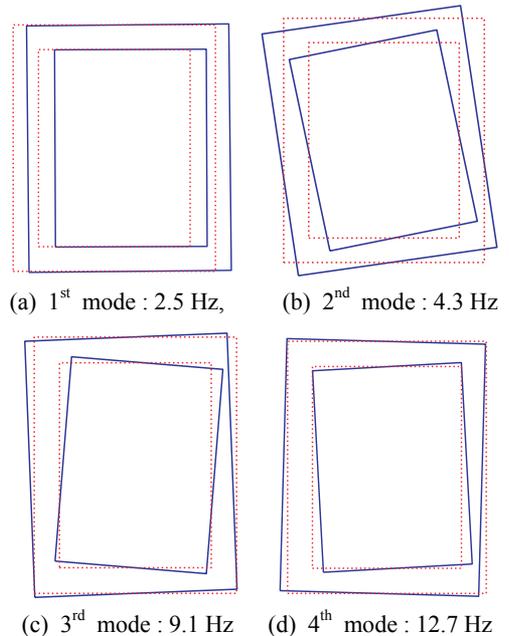


Fig. 3 Natural modes and frequencies

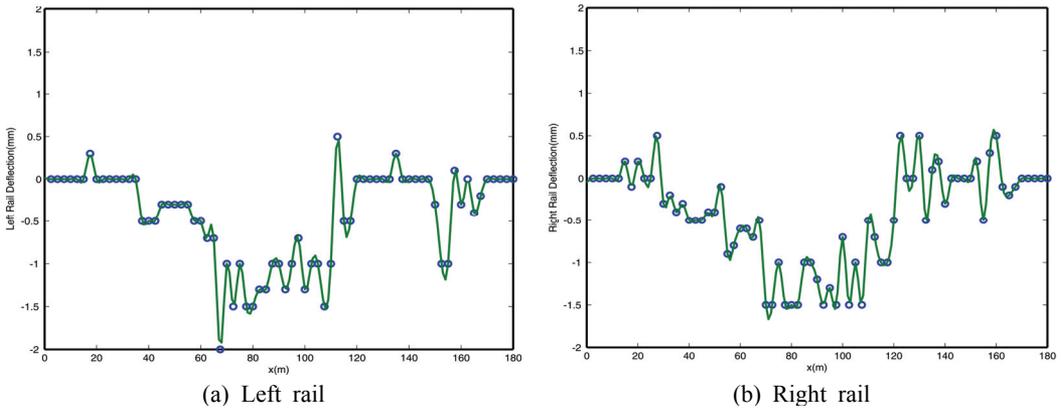


Fig. 4 Rail deformation data

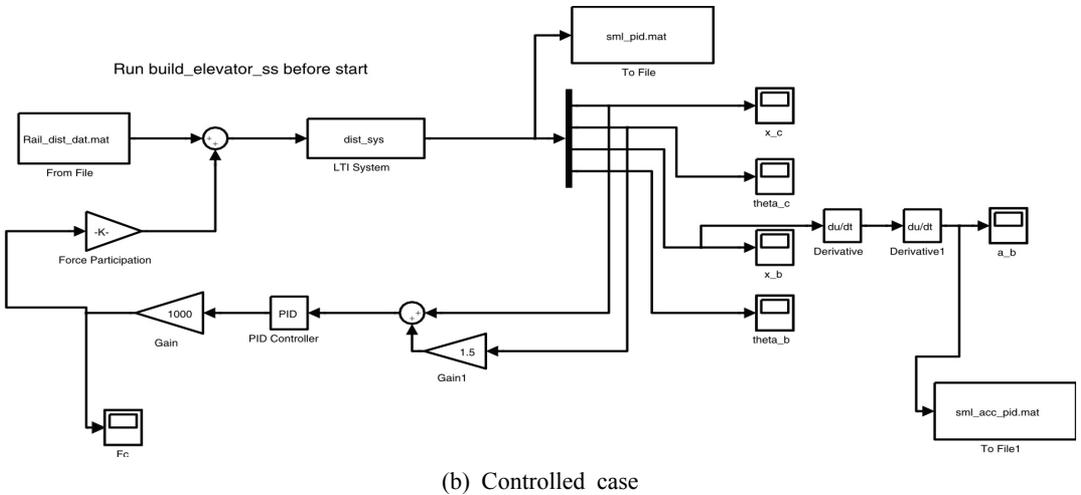
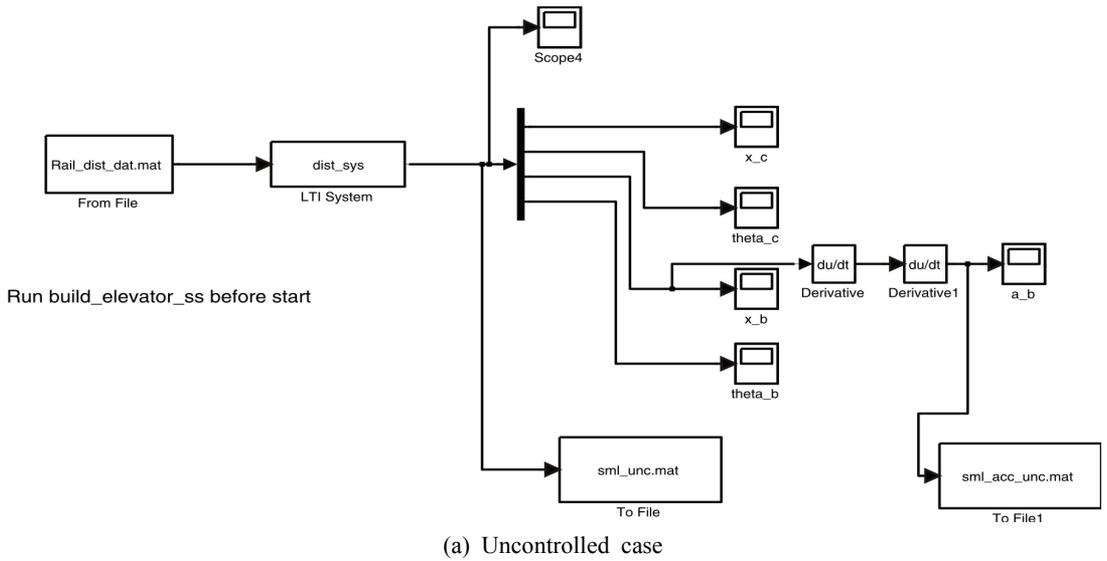


Fig. 5 Simulink model for responses of elevator by rail irregularity

보여준다. 3차 고유진동모드를 보여주는 Fig. 3(c)는 회전이 서로 엇갈리는 즉 out-of-phase 회전 진동을 보여준다. Fig. 3(d)도 회전이 엇갈리는 형태의 회전 진동 모드를 보여준다. 이와 같은 고유진동수는 실제 엘리베이터의 고유진동수와 거의 일치하는 것으로 관찰되었다.

4. 진동제어기 설계 및 수치모사

엘리베이터 타워 현장에서 계측한 레일 굴곡 데이터는 Fig. 4와 같다. 180 m의 총 레일 길이에 걸친 굴곡 변위는 약 1 mm 내외의 편차를 보이는 것으로 계측되었다.

이 연구에서 고려한 능동진동제어기는 단일 입출력 PID 제어기이다. 먼저 엘리베이터 프레임의 질량 중심 1.5 m 아래에 프레임의 가속도를 계측할 수 있는 가속도계가 부착되어 있다고 가정하였다. 그리고 이 가속도계의 출력으로부터 제어력을 산출하고 하단에 위치한 두 개의 액추에이터, M_3 , M_4 를 동시에 구동한다고 가정하였다. 그림 2에 보이는 바와 같이 M_3 , M_4 의 방향이 반대이기 때문에 제어력, M_c 를 계산한 후에는 $M_4 = -M_3 = M_c$ 로 변환하여 액추에이터에 제어신호를 보내는 것으로 가정하였다. 실제 엘리베이터 진동제어식 (11)의 모든 상태 벡터를 계측하는 것은 불가능하기 때문에 이와 같은 단순한 가정을 수치계산에 도입하였다. 더 나아가서 엘리베이터 운행에 대한 가정이 필요한데 Fig. 4에 보이는 180 m 레일을 처음 9초 동안 1080 m/min의 속도까지 가속하고 1초 동안 이 속도를 유지하고 그 다음 감속하는 것으로 운행 조건을 가정하였다. 초고층건물에 사용될 1080 m/min의 엘리베이터에 대한 능동진동제어 실험을 위해서는 보다 높은 타워에서의 실험이 요구되는데 현재 국내에서 실험에 사용될 수 있는 엘리베이터 타워의 최고 높이는 약 180 m이다. 이 점을 고려하여 이와 같은 엘리베이터 운행조건을 가정하였다. Fig. 5는 앞에서 유도한 엘리베이터 모델과 운행조건, PID제어 알고리즘을 적용한 Simulink 모델을 보여주고 있다.

Fig. 6은 Fig. 5의 Simulink 수치모사 결과를 비교한 그림이다. 이 그림으로부터 엘리베이터의 운행속도가 최대가 되는 구간에서 최대 진폭이 발생함을 알 수 있다. 또한 제어기를 구동할 경우 최대 진폭이

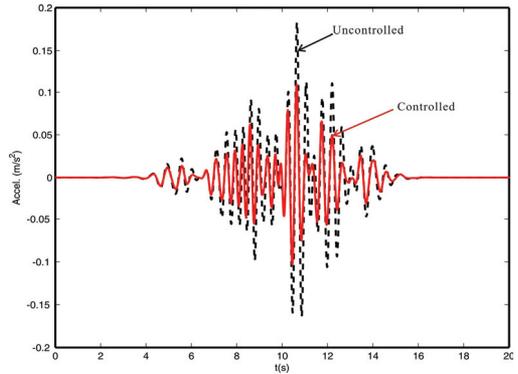


Fig. 6 Uncontrolled and controlled responses of elevator by rail irregularity

약 50% 정도 감소됨을 알 수 있다. 진동 저감에 대한 실제 실험 결과는 다음 논문에서 발표될 예정인데 이 연구에서 수치 모사를 통해 나타난 엘리베이터 진동 성향과 유사한 것으로 관찰되었다.

5. 토의 및 결론

이 연구에서는 엘리베이터의 횡진동 동적 모델을 에너지 방법을 이용해 유도하였다. 그리고 고유진동 해석을 통해 엘리베이터 횡진동 특성을 분석하였다. 엘리베이터의 레일 굴곡 데이터, 운행 조건, 계측 조건과 PID 제어 알고리즘을 이용해 능동진동제어의 타당성을 검증하였다. 수치모사를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 엘리베이터의 주요 제어 대상 횡진동 고유진동수는 10 Hz 미만으로써 기본 진동 모드인 병진진동을 제어하는 것이 효과적일 것으로 판단된다.
 - (2) 이 연구에서 유도한 엘리베이터의 횡진동 모델은 고유진동수 계산 및 능동진동제어기 설계를 위해 효과적으로 사용될 수 있다.
 - (3) 비교적 간단한 능동진동제어 알고리즘을 사용하더라도 엘리베이터의 진동을 효과적으로 억제할 수 있을 것으로 예상된다.
- 다음 연구에서는 실제 엘리베이터에 제어 알고리즘을 적용한 실험 결과를 제시할 예정이다.

후 기

이 연구는 (주)현대엘리베이터의 위탁과제 “초고층

엘리베이터용 횡진동 제어기의 개발”로 수행되었다.
관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Fumai, K., Araki, H. and Higaki, J., 2001, Control Technology of Elevators for Ultra High Rise Buildings, Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers(Series C), Vol. 104, No. 997, pp. 834~837.
- (2) Lee, S.-C., Kim, J.-H., Kim, D.-H., 1994, A Study on the Cause of Noise and Vibration of an Elevator, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 94~99.
- (3) Kim, K. Y. and Kwak, M. K., 2008, Dynamic Modeling and Controller Design for Active Vibration Control of Elevator, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 71~76.
- (4) Mutoh, N., Kagomiya, K., Kurosawa, T., Konya, M. and Andoh, T., 1999, Horizontal Vibration Suppression Method Suitable for Super-high-speed Elevator, Electrical Engineering in Japan, Vol. 129, No. 1, pp. 59~73.
- (5) Teshima, N., Kamimura, K., Magai, M., Kou, S. and Kamada, T., 1999, Vibration Control of Ultra High Speed Elevator by Active Mass Damper(1st Report, Study by Optimal Control Theory), Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers(SeriesC), Vol. 65, No. 637, pp. 3479~3485.
- (6) Yamazaki, Y., Tomisawa, M., Okada, K. and Sugiyama, Y., 1994, Vibration Control of Super High Speed Elevators, Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers(Series C), Vol. 60, No. 579, pp. 3776~3781.