

질량/스프링 계를 고려한 리니어 왕복 액추에이터 시스템의 등가 임피던스 모델링과 주파수 특성 해석

論 文
51B-7-6

Equivalent Impedance Modelling and Frequency Characteristic Analysis of Linear Oscillatory Actuator System Considering Mass/Spring System

鄭 相 燮* · 張 錫 明**

(Sang-Sub Jeong · Seok-Myeong Jang)

Abstract - As recent trends in structural construction have been to build taller and larger structures than any time in the past, they have had high flexibility and low damping that can cause large vibration response under severe environmental loading such as earthquakes, winds, and mechanical excitations. The damper with mass and spring is one approach to safeguarding the structure against excessive vibrations. In this paper, the lumped electrical circuit approach of mass/spring system is used to model the mechanical aspects according to the frequency. Therefore, the mass/spring system can be dealt with here and linked with the equivalent circuit of electric linear oscillatory actuator(LOA). Analysis models are two types of vibration control system, active mass damper(AMD) and hybrid mass damper(HMD). AMD consists of the moving coil LOA with mass only. The LOA of HMD with mass and spring is composed of the fixed coil and the movable permanent magnet(PM) field part. The PM field part composed magnet modules and iron yoke, is the damper mass itself. We present the motional resistance and reactance of mass/spring system and the system impedance of AMD and HMD according to the frequency.

Key Words : impedance method, mass/spring system, linear oscillatory actuator(LOA)

1. 서 론

최근의 건축 구조물은 대형화, 고층화, 경량화 및 細長화 되는 추세에 있으며, 이러한 대형 고층 건축 구조물에는 구조물의 큰 유연성 및 작은 감쇠비로 인해 바람 및 지진 등에 의해서 과도한 진동이 쉽게 발생할 수 있다. 따라서 이를 억제하기 위하여 여러 장치들을 이용한 다양한 진동제어 연구가 이루어지고 있다[1],[2]. 특히, 1970년대 이후에는 디지털 신호처리 및 컴퓨터 기술의 발전에 힘입어 고층빌딩이나 교량 등의 대형 구조물의 진동을 액추에이터를 이용하여 능동적으로 제어하는 것이 가능하게 되었으며, 이에 대한 연구는 미국 및 일본 등 국내외에서 활발하게 이루어지고 있다[1]-[5].

그러나 지금까지는 진동제어 시스템의 가동 질량을 움직이는 구동 장치로 유압이나 회전형 서보 모터를 사용하였다. 그런데 유압식의 경우에는 유압펌프, 유압모터, 오일탱크, 냉각장치, 압력계, 각종밸브, 여과기 등 많은 요소가 필요하므로 시스템이 복잡하고 보수유지비가 많이 든다. 또한 회전형 서보 모터식은 캠, 기어, 클러치, 벨트, 스크류 등 기계적인 운동 변환장치를 이용하여 회전운동을 직선운동으

로 변환시키므로 시스템의 효율이 낮고 소음발생, 마모 등이 필수적으로 수반되는 단점을 가진다. 반면에 리니어 모터는 직선방향으로 미는 힘인 추력을 전자기력으로부터 직접 발생시키므로 기계적인 운동 변환장치가 필요치 않고 빠른 응답 속도를 얻을 수 있는 장점이 있다[6]-[10]. 따라서 유압이나 회전형 모터식에 비해 시스템의 효율적인 운전과 기능에 있어서 절대적으로 유리하다. 따라서 본 저자들은 실험실 규모에서 가동코일형 리니어 왕복 액추에이터(Linear Oscillatory Actuator; 이하 LOA)를 구조물의 능동 진동제어에 적용하여 우수한 성능을 확인한 바가 있다[6],[7],[11]. 그리고 대형 건축 구조물의 하이브리드형 진동제어에 적용하기 위해 대용량 LOA를 개발한 바도 있다[12].

한편, 電氣系와 機械系는 모두 에너지를 소모하는 요소와 저장하는 요소로 구성되며 요소들 사이에는 각각 대응관계를 이룬다. 즉, 電氣系의 에너지 소모 요소인 저항은 운동체의 마찰에 의한 제동계수와 대응되고 電氣系의 에너지 저장 요소인 인덕턴스와 캐패시턴스는 운동 에너지와 위치 에너지 저장 요소인 질량과 스프링으로 각각 대응된다. 그런데, 본 논문의 구조물 진동제어 시스템은 가동 질량과 스프링, 전자기 LOA로 구성되므로 전기적 측면에서 시스템을 해석하고 모델링하기 위해서는 질량/스프링 계를 등가 전기 회로로 바꾸어 해석할 필요가 있다[13],[14]. 그리고 이를 통해 주파수에 따른 시스템의 임피던스와 에너지 흐름 특성을 검토함으로써 LOA로 구동되는 진동 제어 시스템의 해석과 제어 알고리즘 설계에 중요한 자료를 얻을 수 있다.

* 正 會 員 : LG 電 子 DA 研 究 所 Comp 그룹 選 任 研 究 員

** 正 會 員 : 忠 南 大 學 校 電 氣 工 學 科 教 授 · 工 學 博 士

接 受 日 字 : 2002年 2月 27日

最 終 完 了 : 2001年 4月 22日

따라서 본 논문에서는 LOA로 구동되는 질량/스프링 진동계를 시스템 측면에서 살펴보기 위해 임피던스법에 의해 질량/스프링 진동계를 등가 전기회로로 표현하였다. 즉, LOA의 등가회로에서 유기전압 요소가 전기 에너지가 운동 에너지로의 변환 요소임에 착안하여 질량/스프링 진동계를 등가 임피던스로 구성되는 전기회로로 모델링하고 이를 통해 전기계 요소인 LOA와 결합하여 진동제어 시스템을 등가 전기회로로 구성하였다. 따라서 LOA로 구동되는 능동 및 복합 진동제어 시스템의 주파수에 따른 임피던스와 에너지 흐름 특성을 검토하였다. 또한 두 시스템의 기계계와 전기계의 제정수에 따른 저항과 리액턴스의 주파수 특성을 비교·검토함으로써 시스템의 구성 요소의 변화에 따른 시스템의 특성 변화를 얻었다.

2. 진동제어용 리니어 왕복 액추에이터 모델과 전기/기계 시스템의 임피던스 모델링

2.1 진동제어용 리니어 왕복 액추에이터 모델

구조물의 진동제어 시스템에는 그림 1과 같이 진동을 억제하기 위하여 가동 질량과 스프링, 액추에이터를 부가적으로 설치한다. 이 중 동조 질량 댐퍼(Tuned Mass Damper; 이하 TMD)는 가동 질량의 관성력과 스프링의 탄성력을 이용한 수동 댐퍼이다. 반면, 그림 1(a)와 같은 능동 질량 댐퍼(Active Mass Damper; 이하 AMD)는 다양한 주파수 성분의 진동과 과도 하중을 억제하기 위해 스프링 없이 가동 질량과 이를 구동하기 위한 액추에이터로 구성된다. 한편, 그림 1(b)는 복합 질량 댐퍼(Hybrid Mass Damper; 이하 HMD)로 가동 질량과 스프링, 액추에이터로 구성되는데, 구조물이 약한 진동이 있는 경우에는 액추에이터를 구동시키지 않고도 수동 댐퍼의 역할을 수행할 수 있고 구조물에 과도한 진동이 있는 경우에 가동 질량을 구동시켜 능동 댐퍼의 역할을 수행한다[1]-[5],[12].

그림 1의 두 모델은 로렌츠 법칙에 따라 발생력의 크기와 방향이 정해지므로 구동원리는 동일하나 가동부가 반대이다. 즉, 발생 추력은 식 (1)과 같다.

$$F = 2WNB_g i = k_T i \tag{1}$$

여기서 W : 모터의 폭, N 은 코일 턴수, B_g 는 영구자석에 의한 공극자속밀도, i 는 코일 전류, k_T 는 추력상수이다.

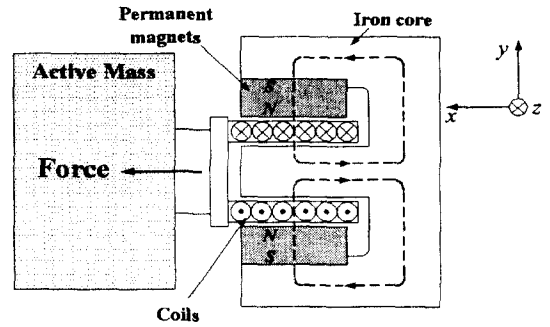
표 1은 그림 1의 두 모델인 AMD와 HMD에 적용된 제정수로서 특성 시뮬레이션을 위한 상수이다[12],[15].

2.2 등가 전기·기계계 모델과 전압·운동방정식

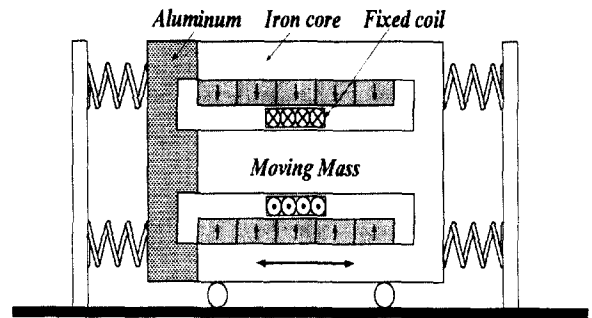
그림 2는 리니어 왕복 액추에이터와 질량/스프링 계의 등가모델이다. 액추에이터는 그림 2(a)와 같이 코일 저항과 인덕턴스, 속도에 의한 유기전압 요소로 구성되므로 전압방정식은 식 (2)와 같이 표현된다.

$$e = R_e i + L_e \frac{di}{dt} + k_E \frac{dx}{dt} \tag{2}$$

여기서 R_e , L_e , dx/dt 는 각각 코일저항, 코일 인덕턴스,



(a) active type



(b) hybrid type

그림 1 구조물 진동제어용 능동형 및 하이브리드형 LOA 댐퍼
Fig. 1 Active and hybrid LOA damper for the structural vibration control

표 1 LOA 댐퍼의 제어 정수
Table 1 Control parameters of LOA damper

예	항 목 [unit]	값
AMD	추력 상수 : k_T [V · sec/m]	65
	가동체 질량 : M [kg]	23
	감쇠 계수 : ζ	0
	코일 저항 : R_e [Ω]	6.04
HMD	코일 인덕턴스 : L_e [H]	0.161
	추력 상수 : k_T [V · sec/m]	150
	가동체 질량 : M [kg]	1,500
	스프링 상수 : k [N/m]	13,218
	감쇠 계수 : ζ	0.079
	코일 저항 : R_e [Ω]	3.2
	코일 인덕턴스 : L_e [H]	1.0

가동자의 속도이다. 식 (2)에서 오른쪽의 두 번째 항과 세 번째항은 각각 변압기 기전력항과 속도 기전력항이다.

또한 그림 2(b)는 질량/스프링 시스템으로 LOA로 구동될 경우의 기계적인 운동방정식은 식 (3)과 같다.

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} = k_T i - kx - C_d \frac{dx}{dt} \tag{3}$$

여기서 M : 가동부 질량, k_T : 추력 상수, k : 등가 스프링 상수, C_d : 마찰계수, d^2x/dt^2 :가동자 가속도이다.

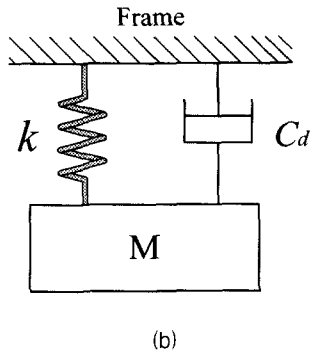
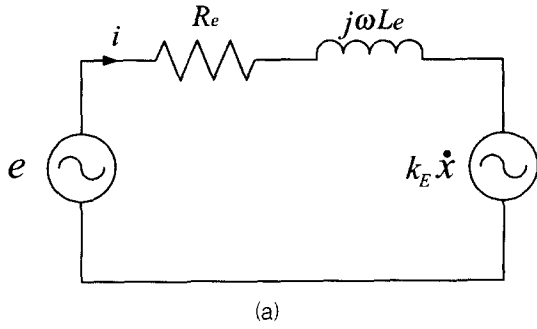


그림 2 액추에이터와 질량/스프링 시스템의 등가 모델
(a) 리니어 왕복 액추에이터의 등가회로
(b) 질량/스프링 시스템

Fig. 2 Equivalent model of actuator and mass/spring system
(a) equivalent circuit of actuator;
(b) mass/Spring system

2.3 임피던스법에 의한 전기·기계계 모델링

그림 2(b)의 질량과 스프링을 갖는 1 자유도 운동계는 식 (3)의 운동방정식으로 표현되는데, 만약 $F = k_T i$ 로 놓으면 식 (2)는 식 (4)로 다시 쓸 수 있다.

$$F = M \ddot{x} + kx + C_d \dot{x} \tag{4}$$

여기서 $\dot{x} = dx/dt$, $\ddot{x} = (d^2x)/(dt^2)$ 이다. 만약, 질량 M 이 정현적인 운동을 한다면 힘 F 와 변위 x , 속도 \dot{x} , 가속도 \ddot{x} 는 식 (5)와 같이 놓을 수 있다.

$$F = F_m e^{j\omega t} \tag{5a}$$

$$x = x_m e^{j\omega t} \tag{5b}$$

$$\dot{x} = \dot{x}_m e^{j\omega t} = j\omega x_m e^{j\omega t} \tag{5c}$$

$$\ddot{x} = \ddot{x}_m e^{j\omega t} = -\omega^2 x_m e^{j\omega t} \tag{5d}$$

그리고 식 (5)를 식 (4)에 대입하면 식 (4)는 식 (6)과 같이 표현된다.

$$F_m = (k - M\omega^2 + jC_d\omega) x_m \tag{6}$$

또한 최대치 전류 I_p 는 $F = k_T I$ 이므로 식 (7)과 같이 표현된다.

$$I_p = \frac{F_m}{k_T} = \frac{x_m}{k_T} (k - M\omega^2 + jC_d\omega) \tag{7}$$

여기서 피크치 변위 x_m 은 식 (5c)와 식(5d)에 의해 식 (8)과 같이 표현된다.

$$x_m = \frac{x_{pp}}{2} = \frac{\dot{x}_m}{j\omega} = -\frac{\ddot{x}_m}{\omega^2} \tag{8}$$

여기서 x_{pp} 는 피크-피크 스트로크로 가동자의 행정거리이다. 또한, 속도 기전력의 피크치 E_m 은 식 (9)와 같다.

$$E_m = k_E \dot{x}_m \tag{9}$$

식 (7)과 식 (8)을 이용하여 식 (9)에 대입하면 속도기전력의 피크치는 식 (10)과 같이 표현할 수 있다.

$$E_m = \frac{j\omega k_E k_T I_p}{(k - M\omega^2) + jC_d\omega} \tag{10}$$

한편, 속도 기전력과 전류 사이의 비를 운동 임피던스 (Motional Impedance), Z_m 로 식 (11)과 같이 정의한다.

$$Z_m = \frac{E_m}{I_p} \tag{11}$$

따라서 식(10)을 식 (11)에 대입하면 Z_m 은 식 (12)와 같다.

$$Z_m = \frac{\omega^2 k_T k_E C_d}{(k - M\omega^2)^2 + C_d^2 \omega^2} + j \frac{\omega k_T k_E (k - M\omega^2)}{(k - M\omega^2)^2 + C_d^2 \omega^2} \tag{12}$$

여기서 $\alpha = k - M\omega^2$, $\beta = \omega k_T k_E$, $\gamma = \omega C_d$ 이라 정의하면 식 (12)는 식 (13)과 같이 다시 표현할 수 있다.

$$Z_m = R_m + jX_m = \frac{\beta\gamma}{\alpha^2 + \gamma^2} + j \frac{\alpha\beta}{\alpha^2 + \gamma^2} \tag{13}$$

따라서 그림 2의 LOA 등가회로와 식 (12)의 기계계의 수식 모델을 통해 그림 3과 같은 전기계와 기계계가 통합된 등가회로로 표현될 수 있다.

한편, 제동계수를 무시하고 $k_E = k_T$ 이라 하면 식 (13)은 식 (14)와 같다.

$$Z_m = \frac{j\omega k_T^2}{(k - M\omega^2)} = j \frac{\beta}{\alpha} \tag{14}$$

따라서 식 (14)의 분모항이 영(zero)가 되고 Z_m 가 무한대가 되어 질량/스프링 운동계의 공진현상을 나타내는데, 이 때 공진 주파수는 식 (15)와 같이 표현된다.

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{M}} \quad (15)$$

그리고 식 (14)에서 $\alpha = k - M\omega^2$ 의 극성에 따라 유도성과 용량성 부하로 나뉘어 진다. 즉, 인가 주파수 f 가 공진주파수 f_n 보다 작을 경우 유도성 부하로 작용함으로써 코일 전류가 인가 전압보다 뒤지는 현상이 발생하고, 인가 주파수 f 가 공진주파수 f_n 보다 클 경우에는 용량성 부하로 작용함으로써 반대 현상이 발생한다.

$$\alpha = k - M\omega^2 > 0 \quad \rightarrow \quad f < f_n : \text{유도성}$$

$$\alpha = k - M\omega^2 < 0 \quad \rightarrow \quad f > f_n : \text{용량성}$$

한편, 그림 3의 리니어 왕복 액추에이터로 구동되는 질량/스프링 시스템의 전기계 임피던스 Z_e 와 기계계 임피던스 Z_m 의 합성인 시스템 임피던스 Z_s 는 식 (16)과 같다.

$$Z_s = Z_e + Z_m = \left\{ R_e + \frac{\beta\gamma}{\alpha^2 + \gamma^2} \right\} + j \left\{ \omega L_e + \frac{\alpha\beta}{\alpha^2 + \gamma^2} \right\} \quad (16)$$

따라서 그림 3의 시스템에 공급되는 유효전력 P 와 무효전력 Q 은 각각 식 (17)과 식 (18)과 같다.

$$P = I^2 \left[R_e + \frac{\beta\gamma}{\alpha^2 + \gamma^2} \right] \quad (17)$$

$$Q = I^2 \left[\omega L_e + \frac{\alpha\beta}{\alpha^2 + \gamma^2} \right] \quad (18)$$

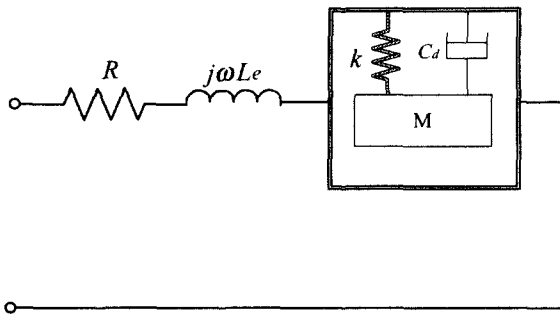


그림 3 질량/스프링 시스템의 전기·기계계 모델
Fig. 3 Electrical/mechanical model of mass/spring system

3. 주파수에 따른 시스템 임피던스와 에너지 흐름 특성

2.3절에서 LOA로 구동되는 질량/스프링 진동계를 등가적인 전기회로로 모델링한 결과, 액추에이터에 입력되는 주파수에 따라 시스템이 용량성 또는 유도성을 갖게된다. 이는 모터의 입력 전압과 출력 변위와의 응답 지연 시간에 의해 나타나는 에너지 수수문제이다. 따라서 본 절에서는 스프링이 없고 질량만을 갖는 AMD와 질량과 스프링을 갖는 HMD의 주파수에 따른 등가 저항과 리액턴스 특성, 유·무효 전력과 역률 특성을 검토한다.

3.1 AMD 시스템

그림 4는 가동코일형 LOA로 구동되는 AMD 시스템의 전기 등가회로로 표 1의 제어정수와 식 (12)를 통해 얻을 수 있다. 여기서 스프링 계수 $k = 0$ 이고 제동계수 C_d 를 무시하였기 때문에 식 (12)의 허수부인 용량성 리액턴스 성분만 존재한다.

그림 5는 AMD 시스템의 주파수에 따른 등가 리액턴스와 임피던스의 특성 곡선이다. 질량만을 갖는 진동계의 등가 임피던스는 $k = 0, C_d = 0$ 이므로 운동 임피던스는 모든 주파수 대역에서 용량성 리액턴스 성분만 존재한다. 그러나 식 (16)에서 나타낸 바와 같이 코일 인덕턴스에 의한 유도성 리액턴스를 고려하면, 시스템 리액턴스 X_t 는 5.4 Hz를 기점으로 용량성에서 유도성으로 바뀌고 이 주파수에서는 리액턴스 성분이 영(zero)가 되어 코일 저항 성분만이 존재하게 된다. 따라서 시스템 임피던스의 크기 Z_t 는 5.4 Hz에서 최소가 된다.

그림 6은 일정 전압을 LOA에 인가할 경우, 입력 주파수에 따른 유효·무효 전력, 전류의 특성곡선을 보여준다. 시스템 임피던스의 크기가 5.4 Hz에서 가장 작으므로 LOA에 입력되는 전류와 유효전력은 이 주파수에서 최대값을 나타낸다. 즉, 기계계의 에너지 저장 요소인 질량과 전기계의 에너지 저장 요소인 코일 인덕턴스에 의해 직렬 공진 현상이 5.4 Hz에서 발생함을 알 수 있다. 그리고 무효전력은 5.4 Hz에서 용량성에서 유도성으로 바뀔을 알 수 있다.

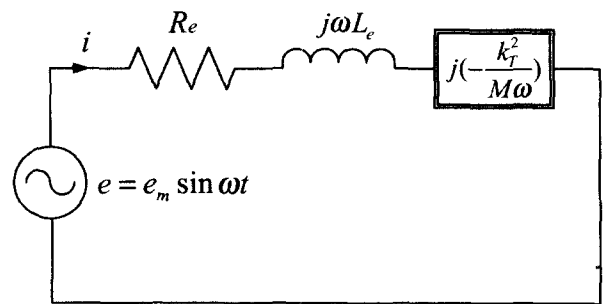


그림 4 AMD 시스템의 전기 등가 회로
Fig. 4 Electrical equivalent circuit of AMD system

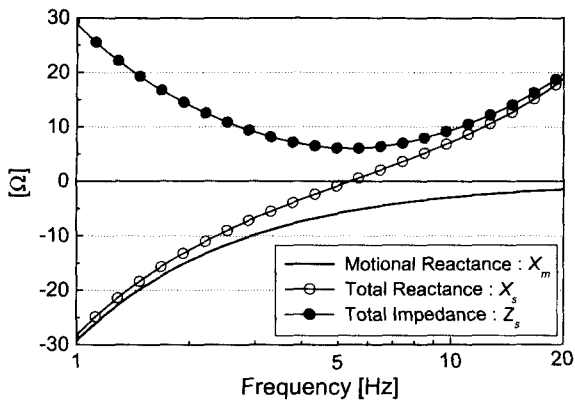


그림 5 주파수에 따른 AMD 시스템의 임피던스 특성
Fig. 5 Impedance of AMD system according to frequency

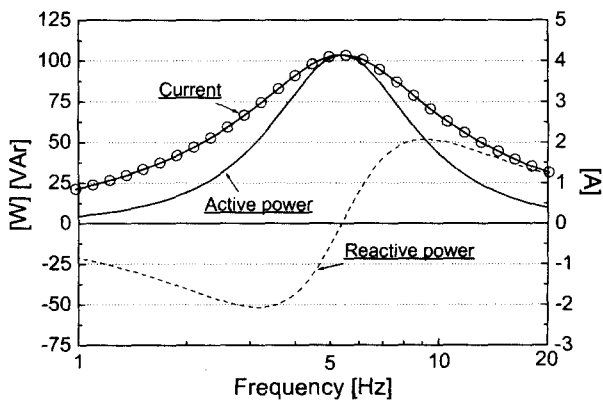
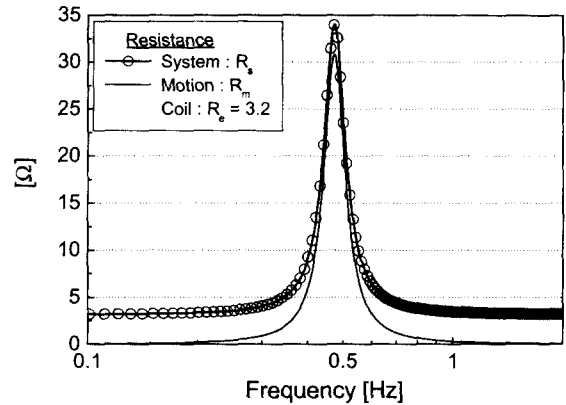


그림 6 일정전압 인가시 주파수에 따른 AMD 시스템의 전류, 유효·무효 전력 특성
Fig. 6 Current, active and reactive power of AMD system according to frequency at constant voltage

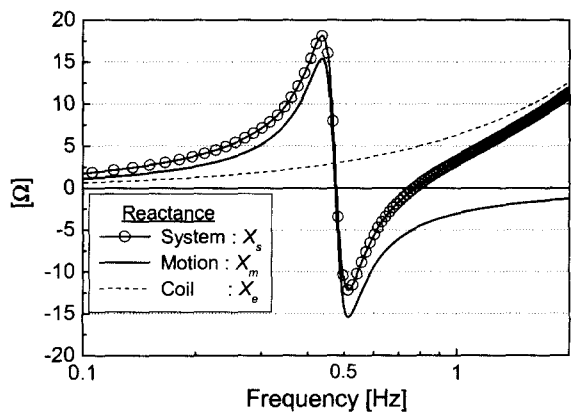
3.2 HMD 시스템

그림 7은 주파수에 따른 HMD 시스템의 저항과 리액턴스, 임피던스 특성 곡선이다. 그림 7(a)는 저항 특성 곡선으로 시스템 저항은 운동계 저항에 코일 저항이 더해져 올랐었다. 그리고 공진 주파수인 0.47 Hz 부근에서 최대값을 가지며 좌우 대칭 특성을 갖는다. 그림 7(b)는 리액턴스 특성으로 운동계 리액턴스는 공진 주파수인 0.47 Hz에서 유도성에서 용량성으로 바뀐다. 그러나 코일 인덕턴스에 의한 리액턴스 성분에 의해 시스템 리액턴스는 0.75 Hz에서 다시 유도성으로 바뀐다. 결과적으로 그림 7(c)의 시스템 임피던스는 공진 주파수에서 최대가 되며 0.8 Hz 부근에서 최소를 갖는다.

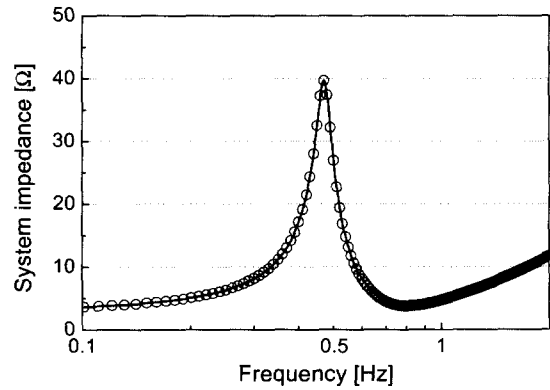
그림 8은 일정전압을 HMD 시스템의 LOA에 인가할 경우, 입력 주파수에 따른 유효·무효 전력, 전류의 특성곡선이다. 시스템 임피던스의 크기가 0.47 Hz 부근에서 가장 크므로 LOA에 입력되는 전류와 유효전력은 이 주파수에서 최소값을 갖는다. 즉, 기계계의 에너지 저장 요소인 질량과 스프링에 의해 기계적 공진이 0.47 Hz 부근에서 발생하므로



(a) resistance



(b) reactance



(c) impedance

그림 7 주파수에 따른 HMD 시스템의 임피던스 특성
Fig. 7 System impedance of LOA damper vs. frequency

이 주파수에서 최소 에너지가 소비된다. 그리고 0.8 Hz 부근에서는 전기계의 유도성 성분과 기계계의 용량성 성분에 의해 직렬공진 현상이 발생하므로 입력 전류와 유효 전력은 최대가 되었다. 또한 무효전력은 0.47 Hz에서 0.8 Hz까지는 용량성, 다른 주파수 영역에서는 유도성 전력이 LOA에 입력된다.

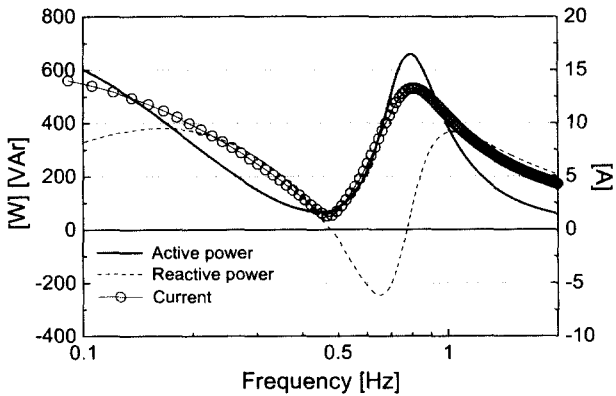


그림 8 일정전압 인가시 주파수에 따른 AMD 시스템의 전류, 유효·무효 전력 특성
 Fig. 8 Current, active and reactive power of AMD system according to frequency at constant voltage

4. 제정수 변화에 따른 시스템 저항과 리액턴의 주파수 특성

4.1 기계계 제정수 변화에 따른 주파수 특성

질량/스프링 시스템은 등가 저항과 리액턴스로 표현되며 식 (12)의 변수인 질량, 스프링 상수, 추력 상수, 댐핑 계수에 따른 등가 저항과 리액턴스의 주파수 특성 변화를 살펴볼 필요가 있다. 따라서 표 1의 두 모델의 제정수 중에서 어느 한 요소를 고정시키고 다른 정수값을 변화시켜서 주파수에 따른 등가 저항과 리액턴스의 특성을 살펴본다.

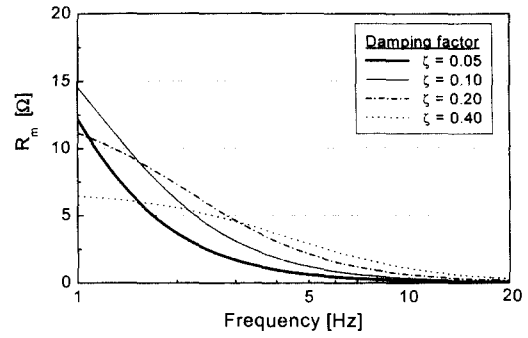
(1) AMD 모델

그림 9에서부터 그림 11까지는 스프링이 없고 질량만을 부하로 갖는 AMD 모델의 경우, 제정수 변화에 따른 기계계의 등가 저항과 리액턴스 특성이다.

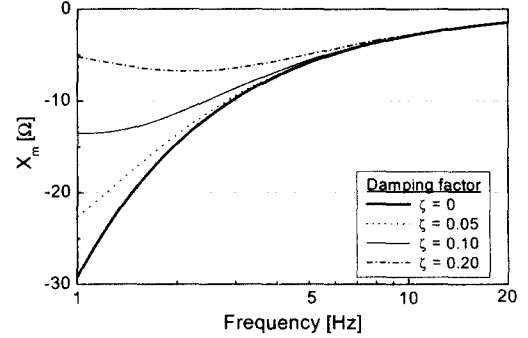
그림 9는 감쇠계수에 따른 주파수 특성으로 감쇠계수가 증가함에 따라 등가 저항과 리액턴스는 전체적으로 감소하는 경향을 갖는다.

그림 9(a)에서 감쇠계수가 영(zero)인 경우에는 등가 저항이 무한대이므로 나타나지 않았다. 그림 9(b)의 운동계의 리액턴스는 주파수 전구간에서 용량성 부하로 작용한다.

그림 10과 그림 11은 각각 질량과 추력 상수의 변화에 따른 리액턴스 특성을 보여주는데, 질량과 추력 상수가 증가할수록 감소하는 경향을 보인다. 이 때 감쇠계수는 영(zero)으로 가정하였으므로 등가 저항은 무한대이다.



(a) resistance



(b) reactance

그림 9 감쇠계수에 따른 AMD의 운동 임피던스
 Fig. 9 Motional impedance of AMD according to damping

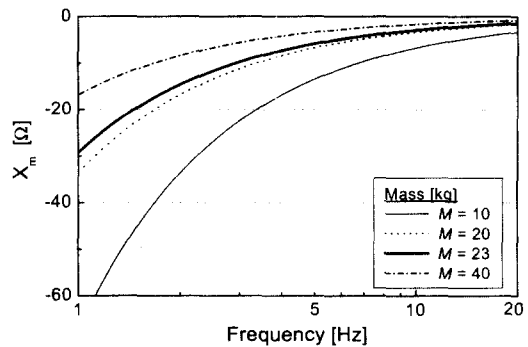


그림 10 질량에 따른 AMD의 등가 리액턴스
 Fig. 10 Motional reactance of AMD according to mass

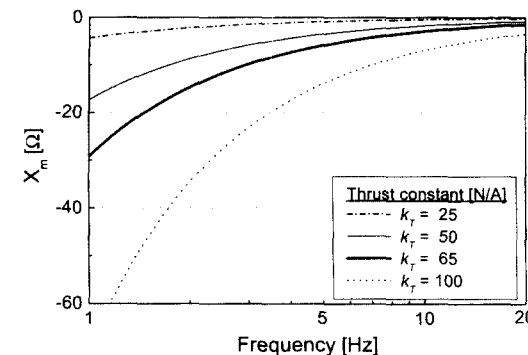


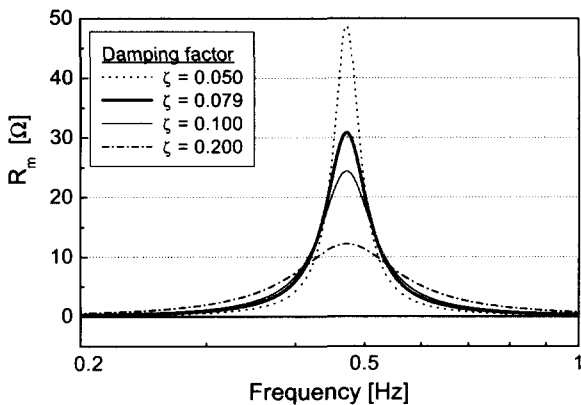
그림 11 추력상수에 따른 AMD의 등가 리액턴스
 Fig. 11 Motional reactance of AMD according to thrust constant

(2) HMD 모델

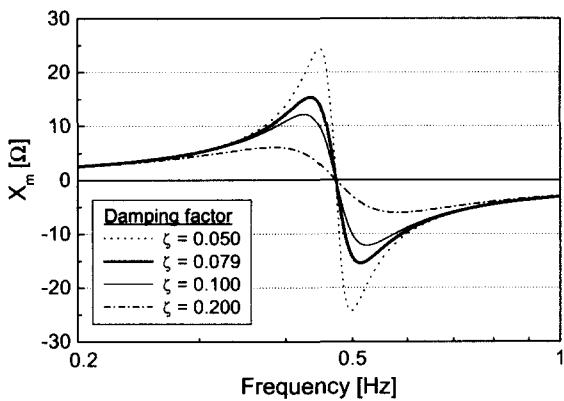
그림 12에서부터 그림 15까지는 질량과 스프링을 부하로 갖는 표 1의 HMD 모델의 경우, 제정수 변화에 따른 기계계의 등가 저항과 리액턴스 특성이다.

그림 12는 감쇠 계수에 따른 기계계의 등가 저항과 리액턴스의 주파수 특성이다. 등가저항은 감쇠 계수가 증가할수록 동일 주파수에서 최대값은 감소하고 좀 더 완만한 곡선을 갖는다. 반면 등가 리액턴스는 최대값과 그 주파수도 감소하는 특성을 보이며 공진 주파수를 기점으로 유도성에서 용량성으로 변화한다.

그림 13은 질량 변화에 따른 주파수 특성으로 스프링과 함께 공진 주파수에 영향을 미친다. 즉, 질량이 증가할수록 운동계의 저항과 리액턴스, 공진 주파수는 함께 감소한다. 그림 14는 추력 상수에 따른 저항과 리액턴스의 주파수 특성으로 변화 경향은 그림 14의 감쇠계수에 따른 주파수 특성 곡선과 유사하다. 그러나 추력 상수가 증가할수록 저항과 리액턴스의 최대값은 동일 주파수에서 증가하는 경향을 갖는다. 그림 15는 스프링 계수에 따른 주파수 특성으로 질량과 함께 공진 주파수에 영향을 미친다. 그러나 스프링 계수에 관계없이 저항과 리액턴스의 최대값과 특성 곡선의 변화 추이는 동일하게 나타났다.

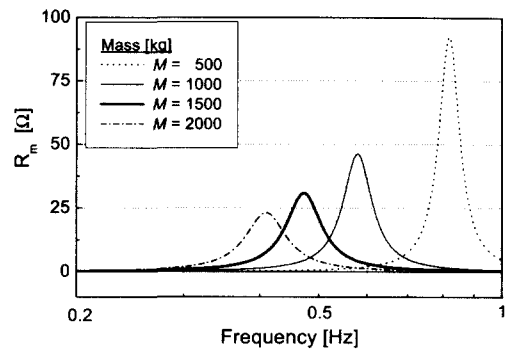


(a) resistance

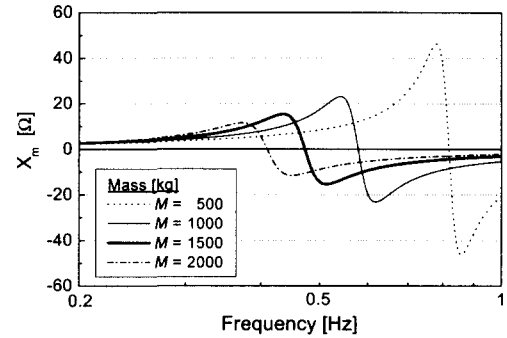


(b) reactance

그림 12 감쇠계수에 따른 HMD의 운동 임피던스
Fig. 12 Motional Impedance of HMD according to damping

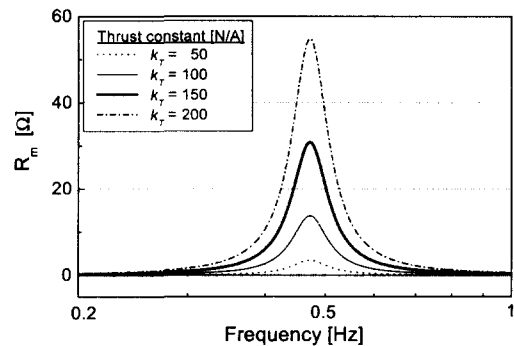


(a) resistance

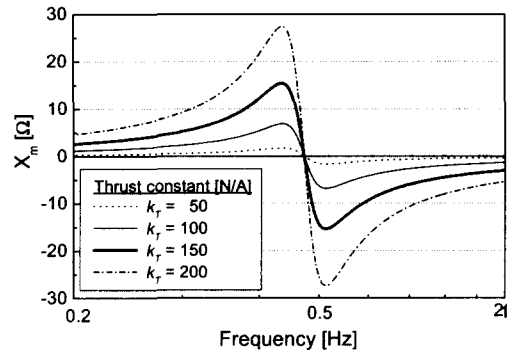


(b) reactance

그림 13 질량에 따른 HMD 모델의 운동 임피던스
Fig. 13 Motional impedance of HMD according to mass

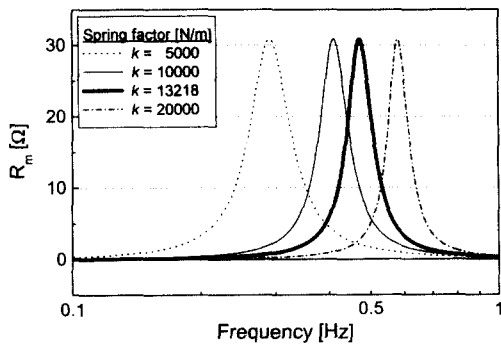


(a) resistance

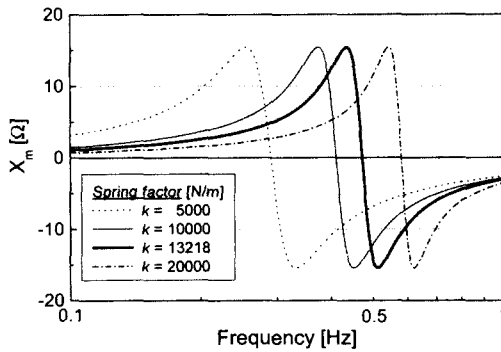


(b) reactance

그림 14 추력상수에 따른 HMD의 운동 임피던스
Fig. 14 Motional impedance of HMD according to thrust constant



(a) resistance



(b) reactance

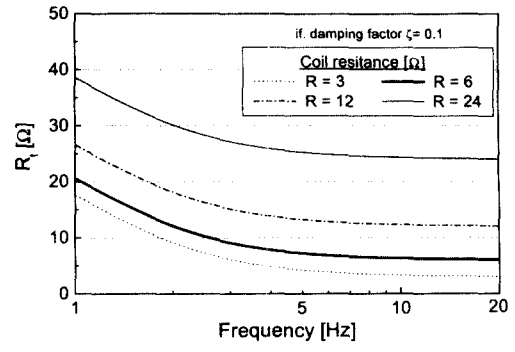
그림 15 스프링 상수에 따른 HMD 모델의 운동 임피던스
Fig. 15 Motional impedance of HMD according to spring factor

3.2 전기계 제정수 변화에 따른 주파수 특성

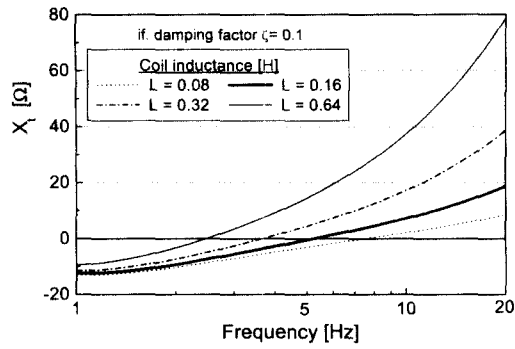
LOA로 구동되는 질량/스프링 진동계의 시스템 저항과 리액턴스는 전기계 제정수인 코일 저항과 인덕턴스 변화에 따라 식 (16)에 의해 표현된다.

그림 16은 감쇠 계수 $\zeta=0.1$ 인 조건에서 코일 저항과 인덕턴스 변화에 따른 AMD 모델의 시스템 저항과 리액턴스의 주파수 특성이다. 코일 저항이 증가할수록 시스템 저항은 증가하고 주파수 낮을수록 감쇠계수, 즉 운동계 저항의 영향으로 시스템 저항은 증가한다. 또한 시스템 리액턴스는 코일 인덕턴스가 증가할수록 용량성과 유도성 리액턴스가 같아지는 주파수는 낮아진다.

그림 17은 코일 저항과 인덕턴스 변화에 따른 HMD 모델의 시스템 저항과 리액턴스의 주파수 특성이다. 그림 17(a)에서 코일 저항이 증가할수록 공진 주파수 부근에서의 시스템 저항은 크게 변하지 않으나 그 외의 주파수 영역에서는 변화가 크다. 이는 공진 주파수에서의 시스템 저항은 기계계의 등가 저항에 의해 좌우됨을 의미한다. 또한, 기계계의 리액턴스는 그림 17(b)에서처럼 공진 주파수를 기점으로 유도성에서 용량성으로 바뀌지만, 시스템 리액턴스는 코일 인덕턴스의 영향으로 주파수가 높은 영역에서는 다시 유도성으로 바뀐다.

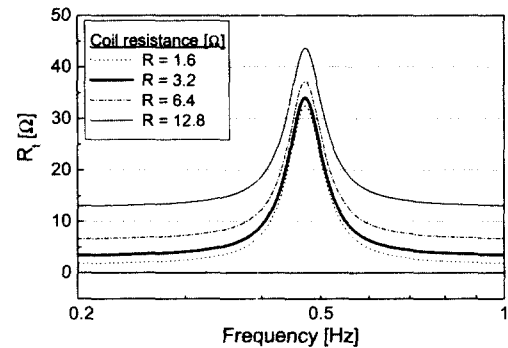


(a) resistance

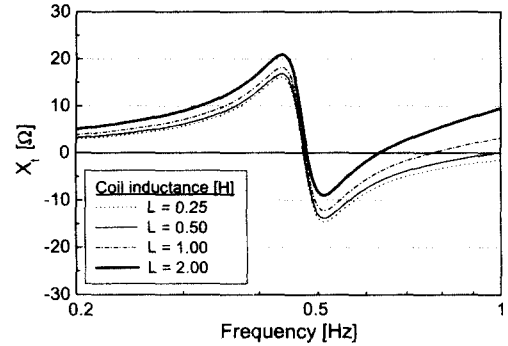


(b) reactance

그림 16 코일 저항과 인덕턴스에 따른 AMD 임피던스 특성
Fig. 16 System impedance of AMD according to the coil resistance and inductance



(a) resistance



(b) reactance

그림 17 코일 저항과 인덕턴스에 따른 HMD 임피던스 특성
Fig. 17 System impedance of HMD model according to coil resistance and inductance

5. 결 론

본 논문에서는 LOA로 구동되는 질량/스프링 진동계를 시스템 측면에서 살펴보기 위해 임피던스법에 의해 질량/스프링 진동계를 등가 전기회로로 모델링하였다. 따라서 질량/스프링 진동계는 질량에 저장된 운동에너지와 스프링에 저장된 위치에너지 사이의 수수관계에 따라 공진 주파수를 기준으로 시스템이 용량성 또는 유도성 부하로 나타난다. 또한, 질량/스프링 계의 등가 전기회로 모델링을 통해 LOA로 구동되는 진동제어 시스템인 AMD와 HMD의 주파수에 따른 임피던스와 에너지 흐름 특성을 살펴보았다. 제동계수를 무시하고 질량만을 부하로 갖는 AMD의 경우, 질량 진동계는 용량성 리액턴스 성분만 존재하지만 코일 인덕턴스에 의해 특정 주파수에서 용량성에서 유도성을 바꾼다. 그리고 질량과 스프링을 갖는 HMD의 경우, 질량/스프링 진동계는 인가 주파수에 따라 시스템 임피던스의 크기와 성질이 결정되며 결과적으로 입력 전압과 전류의 위상차, 전력 흐름이 결정된다. 한편, 기계계와 전기계의 제정수에 따른 저항과 리액턴스의 주파수 특성을 비교·검토함으로써 시스템의 구성 요소의 변화에 따른 시스템의 특성 변화를 살펴볼 수 있었다. 따라서 이러한 연구 내용과 결과는 리니어 왕복 액추에이터로 구동되는 진동 제어 시스템의 해석과 제어 알고리즘 설계에 중요한 자료가 될 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

[1] B.F.Spencer, Jr. and M.K.Saint, "Controlling Buildings : A New Frontier in Feedback," Special Issue of the IEEE Control Systems Magazine on Emerging Technology, vol.17, no.6, pp.19-35, 1997

[2] "관제탑 사용성 개선을 위한 제진장치 타당성 조사," 연구결과보고서, 서울대학교 공학연구소, 1997

[3] A.M, Reinhorn, "Full-Scale Implementation of Active Control. II: Installation and Performance," Journal of Structural Engineering, vol.119, no. 6, 1993

[4] Salloway, A.J., Miller, C.E., "Active vibration and noise control," GEC Review, vol. 11, pp.138-145, 1996

[5] M.C. Constantinou, T.T. Soong, G.F. Dargush, "Passive energy dissipation systems for structural design and retrofit," Monograph series, Mutidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, 1998

[6] T.Y.Chung, S.J.Moon and S.M.Jang, "Active Control on the structural vibration under base excitations using a linear oscillatory actuator," Int. J. Applied Electromagnetics and Mechanics, vol.10, pp. 203-214, 1999

[7] 정태영, 문석준, 정종안, 박희창, 장석명, "Linear Oscillatory Actuator를 이용한 구조물 진동의 능동제어 연구," 한국소음진동공학회지, 제7권 2호, pp.311-317, 1997

[8] 고 임달호 박사 추모회, "電磁에너지 변환기기의 해석과 응용", 한양대학교 출판원, 1997

[9] 山田 一, "리니어모터 응용핸드북", 일본공업조사회, 1985

[10] S.A. Nasar, "Linear electric motors: theory, design, and practical applications," Prentice-Hall, Inc., 1987

[11] 장석명 외, "능동 진동제어 시스템에의 보이스코일형 LOA응용", 전기학회 논문지, 제 46권 제6호, pp. 862-868, 1997.6

[12] 장석명, 정상섭, 이성호, 함상용, 김병인, 박해동, 정태영, "구조물 진동제어용 리니어 모터 댐퍼의 제작 및 특성 실험," 대한전기학회 EMECS학회 추계학술대회 논문집, pp85-87, 2001

[13] R. Fair, H.R. Bolton, "Analysis and design of electromagnetic moving coil vibration generators," Electrical machines and drives, 1993

[14] K.S. Alfredsson, "Active and reactive structural energy flow," Transactions of the ASME, Journal of vibration and acoustics, vol.119, pp. 70-79, 1997

[15] 장석명 외, "리니어 왕복운동 제어시스템 구동용 가동코일형 리니어 액추에이터의 설계제작 및 제어정수 도출", 전기학회 논문지, 제 48B권 제 5호, pp241-248, 1999

저 자 소 개



정 상 섭 (鄭 相 燮)

1971년 1월 29일생, 1996년 충남대 전기공학과 졸업(공학사), 1998년 동 대학원 석사 졸업, 2002년 충남대 대학원 박사과정 졸업(공학박사), 현재 LG 전자 디지털 어플라이언스(DA) 연구소 컴프레서 그룹 선임연구원
Tel : 017-438-9137
e-mail : jsangsub@lge.com



장 석 명 (張 錫 明)

1949년 7월 3일생, 1986년 한양대 대학원 박사과정 졸업(공학박사), 1989년 미국 Univ. of Kentudy(Post-doc), 1978년~현재 충남대 전기공학과 교수, 현재 당학회 평의원, 편집이사
Tel : (042) 821-5658
e-mail : smjang@ee.chungnam.ac.kr