≪연구논문≫ Journal of the Korean Magnetics Society, Volume 21, Number 2, April 2011 DOI: 10.4283/JKMS.2011.21.2.061

전기 집진기의 진동 탈진을 위한 전자기 진동 가진기의 집중매개변수 모델링 및 해석

김제훈 · 이정훈 · 김진호*
영남대학교 공과대학 기계공학과, 경북 경산시 대동 214-1, 712-749

정상현 · 한방우
한국기계연구원, 대전시 유성구 장동 171, 305-343

(2011년 1월 27일 받음, 2011년 4월 13일 최종수정본 받음, 2011년 4월 14일 게재확정))

도시철도의 대기 중의 오염 물질을 정화하여 공기 질을 개선하기 위해 사용되는 전기 집집기시스템은 터널 내의 제한된 공간 내의 설치문제로 인해 소형화가 매우 중요하다. 따라서, 집진 시스템의 탈진 설비 또한 소형화가 매우 중요한 실정이다. 이를 위해, 고효율 소형 전자기 진동 가진기를 이용한 전기 집진기 탈진 설비가 최근 활발히 연구 중에 있다. 유한요소해석은 전자기 진동 가진기의 설계 및 동적성능을 해석을 위해서 가장 널리 이용되고 있는 방법이지만, 해석 시간이 매우 길고, 특히 최적화를 위한 반복 계산에서 많은 시간을 소비한다. 집중매개변수해석은 짧은 시간에 정확하게 반복 계산을 할 수 있는 장점 때문에 유한요소해석을 대신하여 많이 사용되고 있다. 본 논문에서는 전기 집진기의 진동 탈진을 위한 전자기 진동 가진기의 집중매개변수 모델링을 생성하고 이를 통해 동적 해석을 수행하였다. 또한, 집중매개 변수 해석 결과를 검증하기 위해 유한요소해석을 수행하고 두 해석 결과를 비교 · 분석하였다.

주제어 : 전기 집진기, 진동 탈진, 전자기 진동 가진기, 집중매개변수 해석, 유한요소해석

I. 서 론

최근 지하철이 대표적인 대중교통수단으로 발전하면서 지하철 열차 내 공기 질에 관한 관심이 증가하고 있다. 열차 운행 시 터널 내에서 30 %의 외부 공기가 객차 안으로 유입되기 때문에 터널 내 공기 정화가 요구된다. 도시철도 터널에서 발생하는 공기 오염 물질을 줄여 공기 질을 개선하기 위해 전기 집진기(electrostatic precipitator, EP)를 사용한다[1].

전기 집진기는 대전-집진-제거의 단계를 거치면서 동작하고, 제거 단계에서 오염 물질을 제거하는 방법에서 집진판의 세정 방식에 따라 습식(wet EP)과 건식(dry EP)으로 구분된다. 도시철도 터널 안의 협소한 공간상의 이유로 펌프 등 부가장치가 필요한 습식방식보다는 간단한 구조의 건식 방식이 보다 적합하다[2]. 건식 전기집진기의 탈진 장치로는 전동 기계식과, 전자 추타식, 진동식 탈진장치가 있다[3].

진동식 탈진 장치는 유도 전동기와 편심 추를 이용한 편심을 통해 진동을 발생시키고, 가진력(excitation force)의 증감을 위해서는 추의 무게를 조절해야하는 단점을 가지고 있다. 하지만 본 논문에서 제안하는 전자기 진동 가진기는 기존 진동식 탈진 장치의 단점을 보완할 수 있고, 입력 전류와 입력 전류의 주파수 조절이라는 간단한 방법을 통해 가진력을 증감할 수 있는 장점을 가지고 있다.

Fig. 1은 진동 탈진을 위한 전자기 진동 가진기(electromagnetic vibration exciter)의 개략도를 보여준다. 가진기는 영구자석, 솔레노이드, 1010 탄소강으로 만들어진 요크와 2개의 판스프링으로 구성되어 있다.

Fig. 2는 전자기 진동 가진기의 작동원리를 보여준다. 점선은 영구자석의 자기력선을 나타낸다. 코일에 인가되는 입력 전류는 사인파형 형태를 가지고, 입력 전류가 양의 방향일 때 요크와 영구자석이 위쪽으로 움직이게 되고(Fig. 2(a)) 입력 전류의 방향이 음의 방향으로 바뀌면서 요크와 영구자석이 아

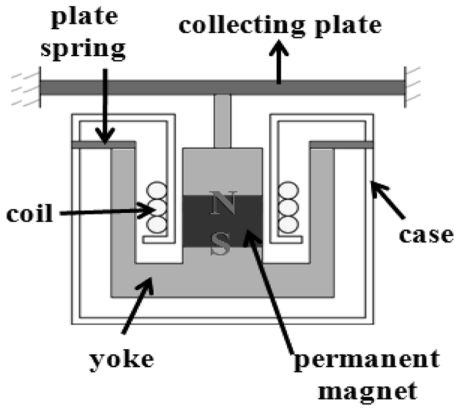

Fig. 1. Schematic diagram of electromagnetic vibration exciter.

*Tel: (053) 810-2441, E-mail: jinho@ynu.ac.kr

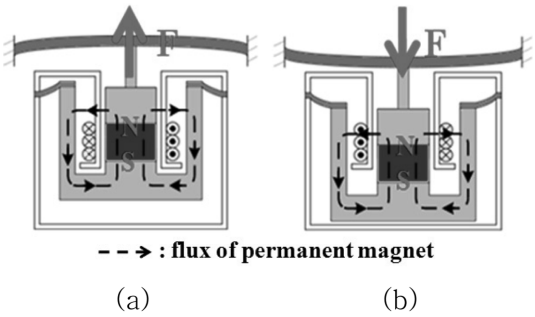

Fig. 2. Operation principle of electromagnetic vibration exciter (a) at upper end (b) at lower end.

래쪽으로 내려오게 된다(Fig. 2(b)). 이러한 과정 속에 요크와 영구자석은 자기력과 스프링의 복원력을 동시에 이용하여 일정한 스트로크(stroke)를 가지고 고속으로 직선 왕복 운동하는 메커니즘으로 동작한다. 전자기 진동 가진기는 다양한 주파수 영역에서 동작이 가능하고 가진력이 크다는 특징을 가지고 있고 입력 주파수의 조절의 간단한 방법으로 가진력을 변화시킬 수 있다.

Fig. 3은 전자기 진동 가진기를 적용한 탈진 장치의 개략도와 집진판의 치수를 보여주고 있다. 0.5 mm 두께의 집진판(collecting plate)을 위 · 아래 양 끝단을 고정하고 중앙 부분에 가진기를 설치하여 집진판의 중앙부분을 가진함으로써 포

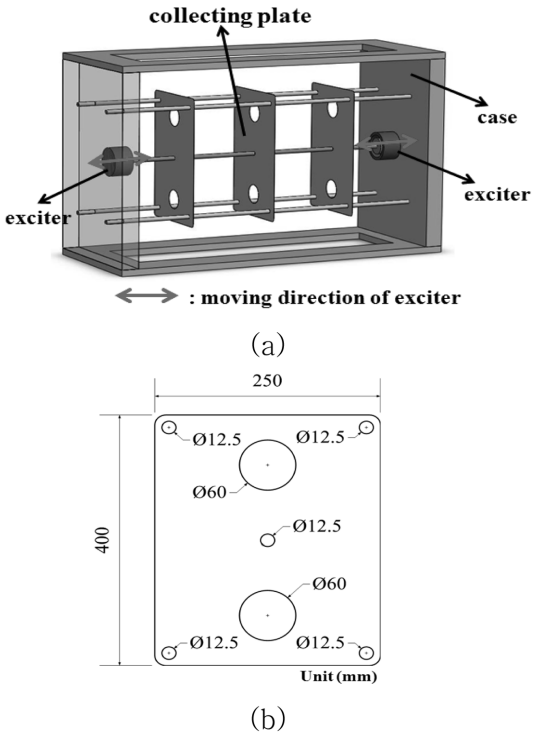

Fig. 3. Schematic diagram (a) of the rapping system using electromagnetic vibration exciter (b) dimension of the collecting plate.

집된 오염 물질을 효율적으로 제거할 수 있다.

가진기의 설계 및 동적 성능을 해석하기 위해 해석 결과의 높은 정확성을 가지는 유한요소해석(finite element analysis)이 널리 사용되고 있다. 하지만 유한요소해석 방법은 계산에 시간이 너무 많이 걸리는 단점을 가지고 있다. 이에 반해 집중매개변수모델 해석 방법(lumped parameter analysis)은 짧은 시간에 높은 정확도의 결과를 준다는 장점이 있다[4, 5]. 따라서 본 논문에서는 전기 집진기의 탈진을 위한 전자기 진동 가진기의 동적 성능을 집중매개변수모델 해석 방법을 이용하여 검증하고, 그 결과를 유한요소해석 결과와 비교하고자 한다.

II. 집중매개변수 모델링 및 해석

Fig. 4는 진동 탈진을 위한 전자기 진동 가진기의 단면을 이용한 집중매개변수 모델을 보여주고, Table I에는 각각의 변수를, Table II에는 영구자석의 특징을 나타내었다. Fig. 4에서 아래첨자 g는 공극(air gap), s는 요크, m은 영구자석을

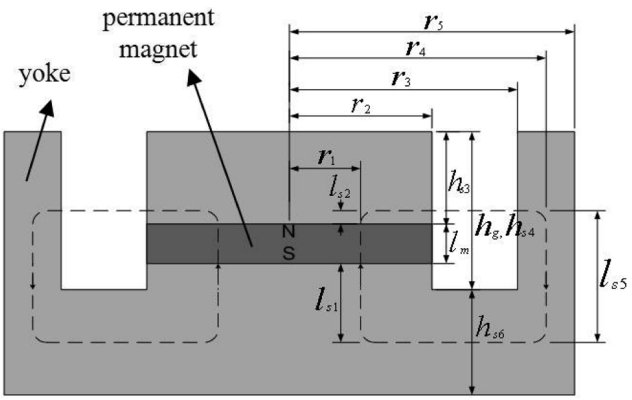

Fig. 4. Lumped parameter model of electromagnetic vibration exciter.

Table I. Design parameter for lumped parameter analysis.

Symbol	Value (mm)	Symbol	Value (mm)
l_m	7	r_4	42.5
l_{s1}	9.75	r_5	45
l_{s2}	2.25	h_{s3}	13.5
l_{s5}	19	h_{s4}	22.5
r_1	16.25	h_{s6}	15.5
r_2	32	h_g	22.5
r_3	40		

Table II. Specification of Neodymium PM.

Symbol	Parameter	Value
B_r	Residual induction	1.23 T
H_c	Coercivity	–890 kA/m
μ	Relative permeability	1.1

의미한다.

집중매개변수 해석을 위한 릴럭턴스 R [A/Wb]는 식 (2)와 같다[6]. l은 각 구성요소의 길이, μ는 각 재료의 투자율(permeability), 는 자속이 흐르는 단면적이다.

$$R = \frac{l}{\mu A} \tag{2}$$

공극의 릴럭턴스는 식 (3)과 같이 표현된다.

$$R_g = \frac{\ln(r_3/r_2)}{\mu_0 \cdot 2 \cdot \pi \cdot h_g} \tag{3}$$

요크의 릴럭턴스는 식 (4)~(10)과 같이 표현된다[6].

$$R_{s1} = \frac{l_{s1}}{\mu_s \cdot A_{s1}} \tag{4}$$

$$R_{s2} = \frac{l_{s2}}{\mu_s \cdot A_{s2}} \tag{5}$$

$$R_{s3} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{\mu_s \cdot 2 \cdot \pi \cdot h_{s3}} \tag{6}$$

$$R_{s4} = \frac{\ln(r_4/r_3)}{\mu_s \cdot 2 \cdot \pi \cdot h_{s4}} \tag{7}$$

$$R_{s5} = \frac{l_{s5}}{\mu_s \cdot A_{s5}} \tag{8}$$

$$R_{s6} = \frac{\ln(r_4/r_1)}{\mu_s \cdot 2 \cdot \pi \cdot h_{s6}} \tag{9}$$

$$R_s = R_{s1} + R_{s2} + R_{s3} + R_{s4} + R_{s5} + R_{s6} \tag{10}$$

영구자석의 릴럭턴스는 식 (11)과 같이 표현된다.

$$R_m = \frac{l_m}{\mu_m \cdot A_m} \tag{11}$$

Fig. 5는 원형 실린더의 양 끝 사이에서 발생하는 누설 자속(leakage flux)을 나타낸다. 누설 자속의 릴럭턴스는 식 (12)와 같다[7].

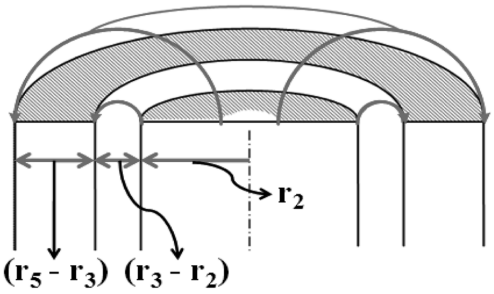

Fig. 5. Leakage flux between ends of circular cylinder.

$$R_L = \frac{1}{2 \cdot \mu_0 \cdot \left(r_2 + \frac{r_3 - r_2}{2}\right) \cdot \ln\left[1 + \frac{2(r_5 - r_3)}{r_3 - r_2}\right]} \tag{12}$$

영구자석에 의해 생성되는 기자력 F_r은 식 (13)과 같이 표현된다. 여기서 B_r은 영구자석의 잔류 자속 밀도이다. 따라서 공극에서의 자속 밀도 B_r는 식 (14)와 같이 영구자석에 의해 생성되는 기자력을 공극의 단면적과 릴럭턴스로 나누어 구할 수 있다[6].

$$F_r = \frac{B_r \cdot l_m}{\mu_m} = (R_g + R_s + R_m + R_L) \cdot B_g \cdot A_g \tag{13}$$

$$B_g = \frac{F_r}{(R_g + R_s + R_m + R_L) \cdot A_g} \tag{14}$$

전자기 진동 가진기의 운동 지배방정식은 각각 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_{magnetic} \tag{15}$$

$$F_{magnetic} = nB_g i l_{eff} \tag{16}$$

$$i = i_0 \sin(2\pi f t) \tag{17}$$

식 (15)에서 m은 요크와 영구자석 질량의 합, k는 스프링의 강성, c는 댐핑 계수이다. Lorentz force로 표현되는 자기력은 식 (16)로 표현되며 n은 코일의 감김 수, B_g는 공극에서의 영구자석의 자속 밀도(flux density), i는 입력 전류, l_{eff}는 공극의 자속 밀도 속에서 반응하는 코일의 길이를 나타낸다. 여기서 코일에 흐르는 전류 i는 식 (17)과 같이 사인파형으로 주어지고 따라서 식 (16)의 자기력 또한 사인파형의 형태를 가지게 된다. Table III과 Table IV는 지배방정식의 파

Table III. Specification of mechanical subsystem.

Symbol	Parameter	Value
m	Mass of yoke and PM	1.7 kg
c	Damping coefficient	48 N · s/m
k	Spring coefficient	34 kN/m
ω_n	Natural frequency	22.5 Hz

Table IV. Specification of electrical subsystem.

Symbol	Parameter	Value
i_0	Maximum current	10 A
f	Input frequency	50 Hz
n	Number of coil turns	64

라미터의 값을 나타낸다. 각 파라미터의 값은 현재 개발되어 사용되어지고 있는 가진기에 대한 값으로써, 요크와 영구자석의 질량의 합은 1.7 kg, 스프링 계수는 34 kN/m으로 가진기의 고유 진동수는 22.5 Hz이다. 코일에 인가되는 최대 전류는 10 A로 주어지고, 입력 전류의 주파수는 50 Hz로 주어졌다. 식 (15)~(17)의 운동방정식을 매틀랩 ODE45 명령어를 활용하여 샘플링 주파수 5 kHz(타임스텝 0.0002 s)로 0~1.5 s까지 시뮬레이션 하였다.

III. 결 론

상용 자기장 해석 소프트웨어인 맥스웰(MAXWELL)을 사용하여 Fig. 6과 같은 2D 축대칭(axis-symmetric) 유한요소 모델을 생성하고 전자기 진동 가진기의 동적 성능을 시뮬레이션 하였다.

Fig. 7(a)는 유한요소 모델에 대하여 초기 위치에서의 자기력선을 보여주고 Fig. 7(b)는 요크와 영구자석이 위쪽으로 움직였을 때 자기력선을 보여주고, Fig. 7(c)는 반대로 요크와 영구자석이 아래쪽으로 움직였을 때의 자기력선을 보여준다.

모든 시뮬레이션 조건은 집중매개변수모델링을 통한 시뮬레이션과 동일하다. Fig. 8~Fig. 11은 입력 주파수 50 Hz에서 전자기 진동 가진기의 동적 성능을 시뮬레이션 한 결과를 보여주고 있다. Fig. 8~11은 각각 요크와 영구자석의 이동변위, 자기력, 스프링력, 가진력등 가진기의 동적 성능을 보여준다. 가진기의 응답이 집중매개변수 해석의 경우 0.3 s 이후에, 유한요소해석의 경우 0.2 s 이후가 되면 정상 상태에 응답을 가진다. 따라서 본 논문에서 제안한 가진기는 과도상태의 응답이 매우 짧은 시간동안 이루어지며 통상 가진기는 정상상태에서 사용되어지므로 정상상태 이후 임의의 1초간의

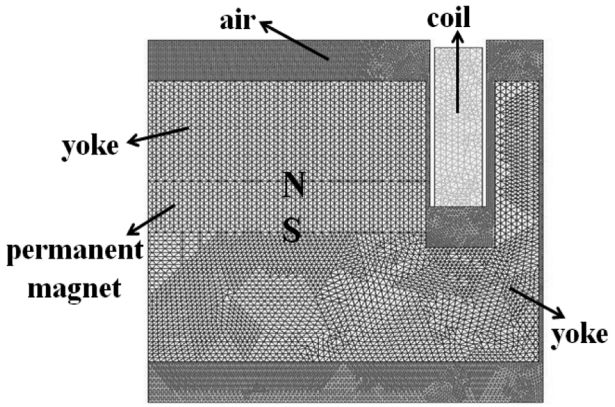

Fig. 6. Finite element model of electromagnetic vibration exciter.

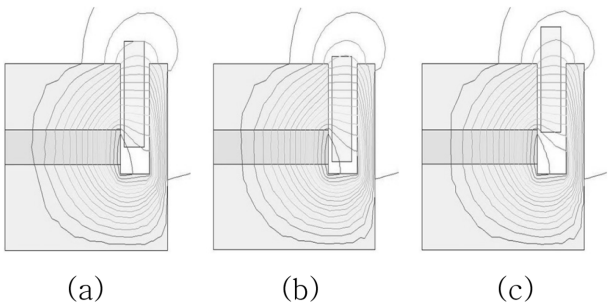

Fig. 7. Plot of flux distribution (a) at initial position (b) at upper position (c) at lower position.

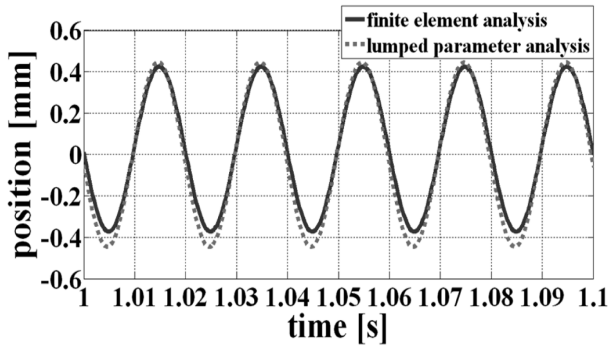

Fig. 8. Plot of moving position at input current frequency of 50 Hz by simulation.

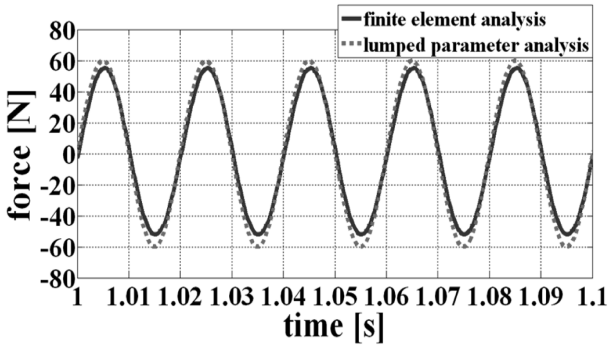

Fig. 9. Plot of magnetic force at input current frequency of 50 Hz by simulation.

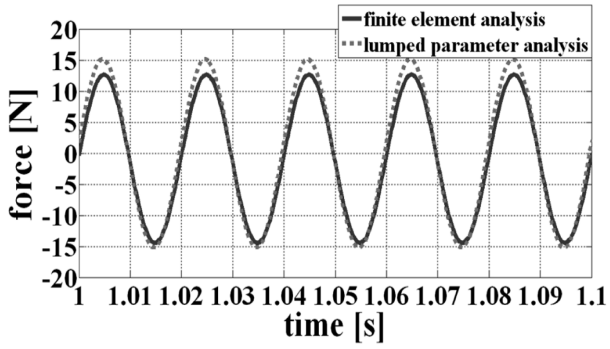

Fig. 10. Plot of spring force at input current frequency of 50 Hz by simulation.

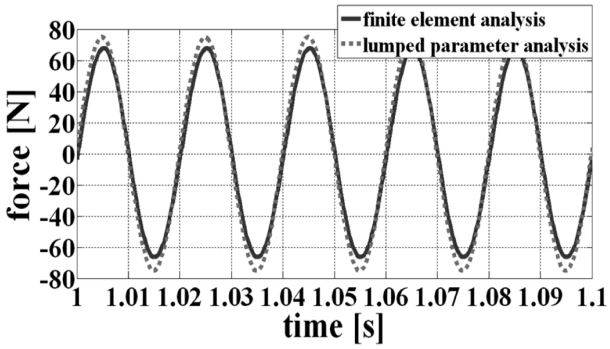

Fig. 11. Plot of excitation force at input current frequency of 50 Hz by simulation.

시간동안의 응답을 나타내었다. 점선은 집중매개변수 해석의 결과이며 실선은 유한요소해석으로 얻은 결과이다. 입력 주파수 ω와 가진기의 고유진동수 ω_n의 비(ratio)로 인해 자기력과 이동변위 간에 180o의 위상 차이를 보이고 있다[8]. 집중매개변수 해석의 결과와 유한요소해석 결과가 오차범위 10 % 이내에서 일치함을 보이고 있다.

이 오차는 유한요소해석의 경우 전자기학적 특성인 히스테리시스 손실(hysteresis loss)과 와전류 효과(eddy current effect)를 고려하여 해석하지만, 집중매개변수 해석은 이러한 특성을 고려하지 않기 때문에 오차가 발생한 것으로 사료된다. 또한 집중매개변수해석에서는 공극에서 영구자석의 자속밀도가 공극 전체에 일정하게 분포된다고 가정하고 있지만, 유한요소해석에서는 공극에서의 영구자석에 의한 자속밀도가 공극 내의 위치에 따라 일정하지 않음을 반영한 해석 결과이므로 집중매개변수 해석에서 자기력이 조금 더 높게 나타난다. 이로 인해 집중매개변수 해석이 유한요소해석에 비해 각각의 동적 성능이 더 높게 해석되는 결과를 보이고 있다.

집중매개변수 모델의 해석은 유한요소해석과 비교하여 약간의 오차를 보이고는 있지만 해석 시간 측면에서 유한요소해석에 비해 훨씬 더 적은 시간으로 전자기 진동 가진기의 성능을 예측할 수 있는 장점을 보이고 있다. 따라서 유한요소해석 전에 가진기의 동적 성능을 예측할 수 있는 해석 방법으로 그 의미가 크다고 할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 미래도시철도기술개발사업의 연구비 지원(09 미래도시철도 A-01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

[1] 노성찬, 김윤호, 김수홍, 이수원, 유광균, 한국철도학회 2004년도 춘계학술대회논문집, 256 (2004).
[2] D. K. Song, S. H. Jeong, and Y. J. Kim, Journal of the SAREK **36**, 13 (2007).
[3] J. M. Na, K. B. Lee, and J. S. Yang, Journal of the KOSME **20**, 56 (1996).
[4] J. H. Kim, J. Magnetics **11**, 151 (2006).
[5] J. P. Wang, D. K. Lieu, W. L. Lorimer, and A. Hartman, IEEE Trans. Magn. **33**, 4092 (1997).
[6] H. D. Chai, Electromechanical Motion Devices, Prentice Hall, New Jersey (1998) pp. 34~79.
[7] H. C. Roters, Electromagnetic Devices, J. Wiley & Sons Inc., New York (1941) pp. 138~139.
[8] G. F. Franklin, J. D, Powell, and A. E. Naeini, Feedback Control of Dynamic Systems, Prentice Hall, New Jersey (2004) pp. 370~473.

Lumped Parameter Modeling and Analysis of Electromagnetic Vibration Exciter for Vibrating Rapper of Electrostatic Precipitator

Je-Hoon Kim, Jung-Hun Lee, and Jin-Ho Kim*
School of Mechanical Engineering, Yeungnam University, Gyeongsangbukdo 712-749, Korea

Sang-Hyun Jeong and Bang-Woo Han
Korea Institute of Machinery & Materials, Daejeon 305-343, Korea

(Received 27 January 2011, Received in final form 13 April 2011, Accepted 14 April 2011)

The miniaturization of electrostatic precipitator is becoming a key element to the success of the efficient electrostatic precipitator due to the limited space allowed to install electrostatic precipitator in subway tunnel. Nowadays, a research on electrostatic precipitator in urban railroad equipment technology is under an active study. Finite element method has been used one of the most popular techniques, but it consumes a lot of time especially in computation iterations. Accordingly, the lumped parameter analysis can be an alternative tool to FEM because of its computation iteration capability with fair accuracy. In this paper, lumped parameter model and the simulation results are presented. In addition, the result of lumped parameter analysis is compared with those obtained from finite element analysis for verification.

Keywords : electrostatic precipitator, vibrating rapper, electromagnetic vibration exciter, lumped parameter analysis, finite element analysis