전기역학적 힘을 이용한 입자상 물질의 거동을 위한 기초 연구

A feasibility Study on the Movement Control of Particulate Enforced by Electrodynamic Force

윤영한^{*} · 한상종 · 김광수

Younghan Yoon^{*} · Sang Jong Han · Kwang Soo Kim

한국건설기술연구원 환경플랜트연구소

Environmental and Plant Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

(Received September 12, 2017; Revised November 23, 2017; Accepted January 3, 2018)

Abstract : Fine dusts, solid form of IAQ pollutants, can cause severe influences on human health due to the small size, huge surface area and the adsorptive characteristics for various harmful substances within the human respiratory organs. In this study, we tried to develop a technique and prototype to prevent indoor air pollution by removing fine particles from the surface using electrodynamic force. For this purpose, a 3-phased AC power generator with controlled voltage and frequency was applied to 3-electrode substrate for particle control tests, in which an activated carbon powders were used to simulate dust particles. As a results, first, the pitch pattern of the electrode substrate for the efficient generation of the electrodynamic force was found to be higher in the 3-electrode substrate than in the single electrode substrate and in the substrate having the narrow pitch in electrode. Second, the minimum voltage for the carbon powders to move from the surface of 3-electrode substrate were found 0.20 kV and the most efficient removal rate from the electrode substrate was 84.7%, as estimated through the image analysis when 0.50 kV and 0.96 kHz were supplied. As a result of analyzing the particle behaviors through the geometry selection of the electrode substrate using the EDEM, the results were similar to those of the lab experiments. Through these results and analysis, it is possible to reduce the pollution of indoor air quality by moving to a specific position where pollutants can be easily removed if operated with electrical force that matches the physical characteristics of particulate pollutants falling down to the indoor surface by the development system.

Key Words : Indoor Particular Contaminants, Electrodynamic Force, 3-phased AC Generator, 3-electrode Substrate, Discrete Element Method

요약 : 본 연구에서는 인체 내부로 유입되어 공중보건에 유해한 영향을 미칠 수 있는 실내공기 오염물질 중 하나인 미세먼지 형태의 먼지를 대상으로 전기적인 힘을 이용하여 제거하여 실내공기오염을 방지할 수 있는 기술을 개발하기 위한 최적 실험장치의 구현과 운전조건을 도출하고자 하였다. 이를 위하여 전압과 주파수를 변화시킬 수 있는 3상 교류전원 발생기와 전원을 공급받아 전기력을 발생시키는 3극 전극기판을 이용하여 활성탄분말을 대상으로 먼지제거 실험을 수행하였다. 전기적 힘의 효율적인 발현을 위한 3극 전극 기판의 패턴 형태는 단일보다는 3극 기판에서, 전극 간격이 좁은 기판에서 효율이 높은 것으로 나타났다. 또한 대상 오염물질로 선정된 활성탄분말을 표면으로부터 제거시킬 수 있는 최소 전압은 0.20 kV로 나타났고 0.50 kV 및 0.96 kHz가 공급되었을 때 화상분석을 통한 활성탄 분말의 제거율은 가장 높은 약 84.7%로 나타났다. 또한 개별요소법 거동해석 프로그램(EDEM)을 이용하여 전극기판의 형태 선정과 입자의 형태에 따른 입자거동 해석을 수행한 결과 lab 실험과 유사한 결과가 도출되었다. 이러한 결과를 통하여, 본 개발 시스템으로 실내 표면으로 낙하되는 입자상 오염물질에 대하여 물리적 특성에 맞는 전기적 힘이 적용되어 운전된다면 오염물질을 용이하게 제거시킬 수 있는 위치로 이동 시킴으로써 실내공기의 오염도 저감이 가능할 것으로 판단된다.

주제어 : 실내 입자상 오염물질, 전기력, 3상 교류전원, 3극 전극기판, 개별요소법(DEM)

1. 서론

미세먼지는 입자상 오염물질로서 실내오염을 일으켜 건물 의 실내에 거주하는 사람들의 호흡기를 통하여 유입되어 국민건강에 유해를 미치는 가장 대표적인 오염물질이다. 실외에서 꽃가루 또는 도로 노면 및 타이어 마모 등의 배출원으로부터 생성되거나 이후 다양한 물리화학적 반응을 통한 2차 반응에 의해서 생성되고 있다.¹⁾ 가장 일반적으로는 공기역학적 크기에 의해서 PM_{2.5}, PM₁₀ 등으로 구분되고 그 크기에 따라 독성도 매우 달라지는데 이는 입자의 크기에 따라

폐 또는 피부 등을 통한 인체 노출량이 달라지기 때문이다.^{2,3)}

이와 같은 먼지입자 오염물질을 제거하는 기술 중에는 대규모 산업시설에 적용되고 있는 기술로는 직류의 고전압에 의하여 코로나 방전을 발생시켜 입자를 대전시키고 반대 극성으로 대전된 전극판에 흡착시키는 방식인 전기집진장치가 있다. 이러한 기술은 소규모 보다는 대규모로 설치되어 운영되는 것이 보다 효율적인 특징이 있다.⁴⁾ 이외에도 정전기력을 발생시켜 표면으로부터 입자상 먼지를 제거하는 전기커튼(electric curtain) 기술이 있다. 이 기술은 전

^{*} Corresponding author E-mail: yoyoon74@kict.re.kr Tel: 031-910-0397 Fax: 031-910-0291

자기 진행파를 발생시키기 위하여 전극을 평행하게 배치시킨 평행 전극(parallel electrode)을 이용한 것으로서 교류전원 발생기에 의해서 전원을 공급하여 오염물질을 일정 위치로 이동시키기 위한 기술로 연구 중에 있으며 태양광 모듈 표면으로 쌓이는 먼지를 제거하기 위한 방안으로 적용한 사례도 보고되고 있다.⁵⁻⁷⁾

이는 평행판 전극에 다상(multi-phased)의 교류전력을 공급하여 전기력을 발생시키고 공급된 전력에 의하여 발생된 전기장 위에 있는 입자가 입자의 극성과 진행파의 힘에 의하여 이동되는 현상에 근거한다.^{7,8)} 다상 교류전원이 공급되면 단상 전원과 비교하여 입자의 이동을 보다 정확하게 제어할 수 있는 비균일한 전기파동을 생성시키게 되고 대상 입자는 힘을 받게 되고, 결국 진행방향에 대하여 전기력, 점성력, 중력이 작용하게 되어 입자가 받는 힘은 식 (1)과 같이 표현된다.⁹⁾

$$F = m \frac{d^2 r}{dt^2} = qE \cos \omega t - 6\pi\eta \frac{dr}{dt} - mg \quad (1)$$

여기에서, m 은 입자의 질량, r 은 입자의 위치, η 은 유체의 점성, q 는 입자의 전하, g 는 중력을 나타낸다. 대상 입자에 대하여 점성 및 중력이 매우 낮고 낙하되는 지점의 표면 마찰력이 낮은 경우, 점성력과 중력을 무시할 수 있을 정도의 높은 전기력이 작용된다면, 하전되지 않거나 분극성을 갖는 입자는 이들에 작용하는 쌍극자 모멘트에 의해서 전기적 힘이 작용되고 주변에 전기장이 발생된 표면 위로 입자는 부양되어 진행파에 의해서 표면을 따라 이동될 수 있게 된다.

충돌하는 입자군에 뉴턴의 제 2법칙을 적용하여 각 입자에 작용하는 힘과 모멘트를 산정하고 이를 기반으로 입자의 이동방정식을 계산하여 이동하는 새로운 위치를 산출할 수

있는 방법으로 개별요소법(또는 이산요소법, DEM, Discrete Element Method)이 있다. 개별요소법은 1956년 처음 제안되어 70년대에 Cundall에 의해서 발전되었고, 최근에는 지반함몰 메커니즘 분석, 자갈도상으로 구성된 레일 궤도의 유지관리를 위한 거동특성 연구, 효율적인 태양광 발전을 위한 정전기적 입자제어 시스템 개발 등에 입자의 거동에 대한 수치해석 방안으로 적용되고 있다.¹⁰⁻¹²⁾ 본 연구에서 사용된 프로그램인 개별요소법 수치해석 프로그램 EDEMTM (DEM Solutions, 2016)은 입자 거동 해석이 가능한 프로그램으로 입자-입자, 입자-Geometry 간의 접촉 모델을 설정할 수 있으며, 입자 유입량을 조절하거나 명확한 위치에 대하여 입자의 생성이 가능하여 거동을 모사하고 파악하는데 유용한 특징이 있다. 입자 및 Geometry는 실제 모습과 유사한 다양한 형상으로 디자인이 가능하여 전극기판으로 낙하되는 먼지를 모사하거나, 이에 대한 조밀한 입자의 거동 모사결과를 그래픽으로 파악할 수 있는 특징이 있고 입자의 거동과 관련된 많은 연구에 활용되고 있다.¹²⁻¹⁴⁾

본 연구에서는 표면으로 낙하하는 미세먼지와 같은 입자상 물질을 대상으로 전기장이 형성된 전극판에 전류에 의한 전기적 힘을 발생시켜 표면으로부터 제거시키는 기술을 개발하고자 하였다. 낙하하는 입자상 물질이 표면으로부터 거동될 수 있도록 하기 위하여 전극기판의 패터닝 형태와 전극으로 공급되는 전류의 최적 전압 및 주파수를 결정하기 위한 아크릴 챔버의 Lab 실험을 수행하였고 결과검증을 위하여 개별요소법(Discrete element method, DEM) 기반의 시뮬레이션 결과와 비교 검토 하였다. 또한 미세입자 대상 물질을 선정하여 전극기판으로부터 제거되기 위한 전류의 최적 전압 및 주파수를 검토함으로써 실내 입자상 오염물질 제거에 적용하기 위한 최적 실험장치의 구현과 운전조건을 검토하고자 하였다.

Fig. 1. Section view of 3-electrode substrate on PCB board(top) and lab-scaled test facility (bottom).

2. 연구방법 및 내용

2.1. 3극 전극기판 및 3상 전원 발생기 제작

Fig. 1은 PCB에 제작된 3극 전극기판의 단면과 3상 교류 전원 발생기를 포함한 Lab test 실험장비의 전경을 보여주고 있다. 전기적 힘이 발현되는 전극은 구리(Cu) 재질로 1 mm의 너비두께(width)로서 두 가지의 전극간격(pitch)을 등간격으로 평행하게 패터닝된 두께 0.1 mm의 구부러질 수 있는 정사각형(100×100 mm)의 얇은 PCB 재질 위에 각각 제작하였다. 전기적 힘에 의한 입자의 이동을 위해서 3상의 교류전원에 대응하도록 3개의 구리전극을 코일 형태로 제작하였고 전극의 표면은 외부 오염물질 등으로부터의 오염방지와 마모, 충격, 온도 등에 대한 저항력 제공을 위해서 절연코팅으로 보호하였다. 3상 교류전원 발생기는 3극 전극 기판으로 다상의 교류전원을 공급하기 위하여 전압조절(0.01 - 0.60 kV)과 해당되는 전압에 대한 주파수(0.00 - 0.999 kHz)를 변화시킬 수 있도록 주문제작 하였다.

2.2. 실험 장비 구성 및 실험 방법

입자상 오염물질이 전극기판으로 떨어지면서 외부의 공기흐름, 분무 등에 의한 영향을 최소화시키고 입자의 거동을 관찰하기 위하여 투명 아크릴 재질의 실험용 소형 챔버(300×300×750 mm)를 제작하였고 챔버의 상단에는 오염물질을 투입시킬 수 있는 작은 입구를 만들어 시료가 자유낙하로 전극기판 표면으로 떨어질 수 있도록 하였다.

우선, 다양한 범위의 3상 교류전원 공급에 대하여 효율적인 거동을 유도하기 위한 3극 전극기판의 전극 패턴을 검토하였다. 이를 위하여 단일 전극으로 전극 간 간격을 등간격(0.1 mm)으로 패터닝된 기판과 3개의 전극을 0.1 및 0.2 mm로 등간격 패터닝한 3극 전극기판에 대한 입자상 물질의 거동을 Lab 아크릴 챔버에서 검토하였고 실험결과를 시뮬레이션 결과와 비교 분석하였다.

다음으로, 공급된 전원에 의하여 발생된 힘으로 입자거동을 분석하기 위한 다양한 입자상 대상물질에 대하여 거동을 검토하였다. 카올린(kaolin, Aldrich-sigma), 먼지 표준물질(clay, JIS test powder), 활성탄 분말(activated carbon powder, ACP)을 대상으로 하였고 카올린(10 µm 이하) 및 표준물질(50 µm 이하)은 기성 제품을 사용하였고 활성탄 분말은 정수장에서 사용되는 활성탄을 분쇄시켜 표준망체(testing sieve)를 이용하여 60 µm 이하 크기로 분류시켜 실험 시료로 사용하였으며 각 물질별로 100 mg을 각각 챔버 상단에서 균일하게 자유 낙하시켜 전기적 힘에 의해서 거동되는 현상을 분석하였다.

앞서 수행한 전극기판과 입자상 대상물질에 대하여 전기적 힘에 의한 입자 거동 현상이 확인한 기판과 시료를 실험대상 물질로 선정하고 선정된 시료가 전극기판으로부터 전기적인 힘에 의해서 효과적으로 거동되기 위한 전류의 전압 및 주파수 조건을 검토하기 위하여 3상 교류전원 발생

Table 1. Control conditions of the lab scale test

Test	Case 1	Case 2	Case 3
Voltage (kV)	0.05 - 0.60	0.05 - 0.60	0.15 - 0.50
Frequency(kHz)	-	0.06 - 0.999	0.06 - 0.999
Particle sample and amount	kaolin, clay, activated carbon powder (ACP)/100 mg		
Electrode pattern (pitch, mm)	Single electrode substrate	0.1	
	3-electrode substrate	0.1, 0.2	

기로부터 다양한 전압(0.01 - 0.60 kV)과 공급된 전압에서의 다양한 주파수 변화(0.0 - 0.999 kHz)를 발생시켜 Table 1과 같은 경우로 거동현상을 검토 및 분석하였다.

Case 1은 3상 교류전원 발생기로부터 전류에 대한 전압의 세기만을 변화시켜 입자의 거동되기 시작하는 최소 전압을 찾고 Case 2는 모든 전압에 대하여 각각 주파수를 변화시킬 경우의 입자거동을 살펴보기 위한 실험이다. Case 3에서는 Case 1 및 2의 실험 결과를 바탕으로 최적 전압과 이에 대한 주파수를 바탕으로 입자의 거동을 검토하기 위한 실험으로 수행하였다. 전류에 대한 전압과 주파수 변화는 각각 0.05 kV, 0.06 kHz 씩 증가시켰고 실험은 전극 간격이 0.1 및 0.2 mm인 3극 전극기판과 3가지의 입자상 대상물질 시료를 이용하여 실내 실험실 조건(실온 25℃ 및 습도 35%)에서 실험하였다.

2.3. 입자상 물질의 제거 효율 분석

전기력에 의한 입자상 물질의 제거효율을 측정하기 위하여 이미지 분석(InnerView™, Total Imaging Solution)으로 분석하였다. 아크릴 챔버의 상부에서 낙하되는 시료의 크기와 양이 적어서 실험 후에 이동된 시료를 별도 채취하여 무게 측정으로 제거효율을 분석하는 것은 시료의 샘플링 과정에서 오차가 크게 발생할 수 있어서 표면으로 모두 낙하된 실험 전과 공급 전류에 대한 일정한 전압 및 주파수에 의하여 전극판 외부로 거동된 실험 후의 이미지를 촬영

Fig. 2. Removal efficiency evaluation using Image analysis before and after tests; origin (a) and analyzed image (b).

하고 이를 대상으로 전극판에 쌓인 입자에 의해서 가려지는 면적에 대한 비율로 본 시스템의 제거효율을 검토하였다. Fig. 2는 본 연구에서 실험 전후의 촬영 파일을 이용해서 화상 분석 소프트웨어로 분석된 결과 이미지를 나타내고 있다.

2.4. 입자상 물질 거동 모사에 의한 분석

실내의 입자상 오염물질은 크기가 작고 실험양이 적어서 3극 전극기관 및 Lab-scale 챔버에서의 시료 샘플링에 의한 입자의 거동분석에는 제한이 있고 결과의 비교분석을 위하여 개별요소법(Discrete Element Method) 기반의 시뮬레이션에 의한 거동분석을 별도로 수행하였다. 본 연구에 적용된 프로그램은 개별요소 수치해석 상용 소프트웨어인 EDEMTM을 적용하였고 입자의 거동모사를 위하여 힘이 작용하는 대상인 먼지입자(dust), 구리전극(copper), 전극기관(steel)의 물리적 가정은 Table 2과 같이 적용하였다.

전극기관의 전극간격에 따른 입자거동의 Lab 실험 결과와의 비교 분석을 위하여, Lab 실험에 사용된 것과 동일한 패턴의 전극인 구리전극이 한 개로 구성된 전극기관(pitch: 0.1 mm)과 3개로 이루어진 3극 전극기관(pitch: 0.05, 0.1 및 0.2 mm)을 Geometry로 구성하였다. 추가적으로 입자거동을 위한 전극간격의 영향을 검토하기 위하여, Lab 실험에서 구현하지 못한 전극간 간격이 0.05 mm인 3극 전극기관을 Geometry로 구성하여 시뮬레이션을 실시하여 분석하였고 모든 전극기관의 전극두께는 1 mm로 동일하게 하였다.

Table 2. Simulation conditions of EDEM for particle movement

	Dust	Copper	Steel
Poisson's ration	0.25	0.343	0.3
Shear modulus	1×10^6 Pa	4.6×10^6 Pa	1×10^{12} Pa
Density (kg/m ³)	1,020	77,600	7,800
Work function	-	3 eV	-
	Dust-Dust	Dust-Copper	Dust-Steel
Coefficient of restitution	0.3	0.05	0.5
Coefficient of static friction	0.4	0.9	0.5
Coefficient of rolling friction	0.01	0.01	0.01

Table 3. Simulation conditions of electrode and particle

Simulation Conditions	Description
Particle type and amount	<div> 10,000 EA </div>
Electrode type and pitch	single electrode substrate 0.1
patterning (mm)	3-electrode substrate 0.05, 0.1, 0.2

본 연구에서 수행된 전극기관의 입자거동 시뮬레이션 조건을 Table 3에 요약 정리하였다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1. 입자상 대상물질에 따른 거동 분석

입자상 물질의 종류에 대한 거동을 분석하기 위하여 카올린, 먼지 표준물질, 활성탄 분말을 대상으로 각각에 대하여 Table 1의 조건에 대하여 실험하였고 Fig. 3은 각 대상 물질에 대하여 전극간격 0.1 mm의 3극 전극기관에 전압 0.45 kV 및 주파수 0.36 kHz의 전류가 공급된 Case 3의 실험후 모습을 촬영한 이미지이다. 각각의 시료를 대상으로 Case 1 및 2의 실험을 수행한 결과, 카올린과 표준물질에 대해서는 전극기관 외부로 이동되는 거동변화가 나타나지 않았고 활성탄 분말을 사용한 실험에서만 전극기관으로 낙하됨과 동시에 공급된 전류에 의한 전기적 힘의 작용으로 입자들은 전극판 외부로 이동되는 현상이 Fig. 3과 같이 관찰되었다.

이러한 현상은 카올린 및 표준물질 입자와 활성탄 분말 입자의 물리적 특성의 차이에 일차적으로 기인된 것으로 판단된다. 즉, 실험에 사용된 카올린 또는 표준물질의 입자 크기는 활성탄 분말보다는 평균 입경이 각각 10 및 50 μ m 이하의 작고 균일한 입자들이고 밀도가 상대적으로 높은 각각 2.53 및 2.86 g/cm³로서, 낙하 후에는 입자와 전극판 표면과의 접촉면적이 증가하여 마찰력이 증가하고 물질의 밀도가 상대적으로 높아서 3상 교류전원에서 발생한 전류

Fig. 3. Particle distribution of 3-electrode board at current supply (0.45 kV and 0.36 kHz) resulted from Case 3.

의 전압과 주파수 변화에 의한 전기적 힘에 의해서 전극의 외부로 밀려나기 보다는 낙하된 위치에 그대로 정지된 것으로 판단된다. 실내의 미세먼지는 주방 또는 거실에서의 조리 및 전열기구의 사용 등과 같이 실내에서도 발생하고 평균적으로 $1.57 - 1.92 \text{ mg/cm}^3$ 으로 보고되고 있어서¹⁵⁾ 크기가 작고 균일하며 고밀도의 카올린이나 표준물질은 활성탄 분말보다는 동일한 전기적 힘이 작용할 경우에 거동변화가 낮은 것으로 판단된다.

Moesner 등⁸⁾은 정전기력을 이용하여 다양한 종류의 물질을 효과적으로 이송시키기 위하여 전압 및 주파수 조건, 기기 장치의 구성, 전극판의 형태 등에 따른 실험을 수행하였다. 실험결과, 공급된 전류는 3상에서 6상으로 다중 전원일수록, 2.0 kV의 높은 전압에 대해서 효과적인 거동이 있는 것으로 나타났다. Biris¹⁶⁾은 표면으로 침전된 입자의 제거를 위하여 전기 파형에 대한 변화(사인파형(sinusoidal), 스퀘어파형(square), 삼각파형(triangular), 펄스파형)을 기반으로 평균 입경 $38 \mu\text{m}$ 의 시료 50 g에 대하여 전압(7-10 kV)과 주파수(5-15 Hz)의 변화에 대한 분석을 수행하였다. 그 결과 90% 이상의 제거를 위해서는 8 kV 및 5-15 Hz의 전류가 요구되는 것으로 나타나 주파수 보다는 전압의 영향이 높은 것으로 나타났다. 입자의 입경이 작을수록 표면과의 접착력(adhesion force)이 전기적 쿨롱힘과 유전 영동력 보다는 크기 때문에 $25 \mu\text{m}$ 이하의 물질에 대해서는 거동효과가 작다는 연구결과도 있다.¹²⁾ 따라서 본 실험의 카올린 및 표준물질의 거동을 위해서는 입자와 전극 기관 표면간의 마찰력과 밀도차이에 대한 무게를 극복할 수 있는 상대적으로 높은 전압의 전류 공급이 요구될 것으로 판단되고 실험을 위하여 제작한 교류전원 발생기에 의한 입자 거동 Lab 실험을 위해서는 활성탄 분말을 이용하는 것이 이후 추가실험에 대한 거동 분석에 적합한 것으로 판단된다.

3.2. 전극기관 패터닝에 따른 입자거동 비교분석

3상 교류전원과 3극 전극기관으로 구성된 시스템에서 미세먼지와 같은 입자상 물질이 전류가 흐르는 표면으로 낙하되었을 때 효과적인 거동을 유도하기 위한 전극기관의 형태를 검토하였다. Table 4는 전극기관의 패터닝에 따른 시뮬레이션 및 Lab 실험 결과를 보여주고 있다. 각각의 패터닝이 다른 전극기관을 대상으로 구형태의 입자상 물질, 10,000 개를 전극기관으로 자유낙하 시켰을 경우, 시뮬레이션에서는 전극기관 외부로 입자가 모두 이동될 때 까지 소요된 시간을 나타내고 있고 Lab 실험에서는 0.45 kV 및 0.96 kHz의 전류가 전극기관으로 공급되었을 때, 입자가 전극판으로 낙하된 이후, 외부로 거동되고 남은 시료에 의해서 가려진 기관면적에 대한 이미지 분석으로 제거율을 산정하였다. 동시에 Lab 실험에서 입자의 거동이 더 이상 없을 때까지의 시간을 측정하였다.

Table 4. Results of simulation and lab tests for particle movement on various patterning

Electrode types and patterning pitch (mm)		Simulation	Lab test	
		Time (sec)	Removal rate* (%)	Time (sec)
Single electrode substrate	0.1	1.14 (1.08-1.24)	62.6	2.43 (2.40-2.48)
	0.05	0.77 (0.75-0.79)	-	-
3 electrode substrate	0.1	0.81 (0.78-0.84)	74.8	1.87 (1.81-1.90)
	0.2	0.87 (0.83-0.89)	42.7	1.54 (1.49-1.67)

* Results from lab tests supplied with the current of 0.45 kV and 0.96 kHz

Fig. 4. Electrode patterning test with ACP on various power supply.

시뮬레이션 결과, 0.1 mm의 등 간격으로 패터닝된 단일 구리전극판의 경우, 낙하된 입자가 전극의 외부로 모두 이동되기 위해서는 평균 1.14 (1.08~1.24)초가 소요되는 것으로 나타나 3개의 전극으로 구성된 3극 전극기관 대상의 결과보다는 더 많은 시간이 소요되어 입자를 거동시킬 수 있는 능력이 낮은 것으로 나타났다. 3극 전극기관의 경우, 전극간 간격이 0.05 mm일 때, 0.77초, 0.1 mm인 경우, 0.81초, 0.02 mm일 때, 0.87초로 측정되어, 전극간 간격이 좁을수록 단시간 내에 모든 입자를 전극판 외부로 이동시킬 수 있는 것으로 나타났고, 간격이 줄어들거나 늘어나면서 같은 비율로 거동되는 소요시간도 변화하지는 않고 전극간 간격이 넓어질수록 더 많은 시간이 소요되는 것으로 나타났다.

Lab 실험결과(Fig. 4 및 Table 4)에서는 활성탄 분말이 전극간 간격이 동일한 전극판에 대한 제거율이 단일 전극에서는 62.6% 및 3극 전극판에서는 74.8%로 나타났고 최종 제거율 도달까지 소요된 시간은 2.43 및 1.87초로서, 단일 전극판보다는 3극 전극판에서 짧은 시간 내에 높은 효율로

시료를 제거할 수 있는 것으로 나타났다. 전극간 간격이 0.2 mm인 전극판은 동일한 전류가 공급되었을 때 1.54초 만에 제거율 42.7%를 나타내어, 넓어진 전극간격으로 인하여 활성탄 분말은 이동되지 못하고 제거율도 낮아진 것으로 판단된다. 이러한 시물레이션 및 실험 결과는 3상 및 6상의 평행전극을 적용한 Tube 및 Dot 형태의 입자제어 전기 장치를 제안한 Moesner⁸⁾의 연구와 전극간 간격이 넓어질수록 동일한 이송을 위한 임계치 전압의 크기가 증가되어 동일한 전압으로는 전극간 간격이 큰 경우에는 입자의 거동이 적은 것으로 나타난 Kawamoto¹²⁾의 연구결과와도 유사한 것으로서 나타났다.

이러한 결과를 통하여 전극판의 형태는 단일 전극보다는 전극이 등간격으로 패터닝된 3극 전극판을 사용하는 것이 효과적인 것으로 나타났고 이때 전극의 간격은 0.1 mm 이하의 좁은 간격으로 제작된 기판이 효과적으로 입자상 물질을 거동시킬 수 있는 것으로 판단된다. 그러나 전극간격을 0.05 mm로 구리전극 기판을 제작하는 것은 기술적으로 어려움이 있어 Lab 실험장치의 구현에는 0.1 mm 간격의 3극 전극판을 선택하였다.

3.3. 전압 및 주파수 변화에 의한 입자상 물질의 거동 분석

앞서 수행된 실험 결과를 바탕으로 전극간격을 0.1 mm로 등간격 패터닝한 3극 전극과 활성탄 분말을 이용하여 입자상 물질의 거동을 위한 3상 교류전원의 최적 전압 및 주파수를 검토하였다. 시물레이션과 Lab 실험을 통하여, 전

극기판으로 3상의 교류전원의 공급으로 입자는 전기력으로 발생된 진행파에 의해서 표면으로부터 부양되어 전극기판의 외부로 이동됨을 확인하였다. 이를 바탕으로 입자상 물질의 효율적인 제어를 통한 대상 표면으로부터의 제거를 위해서 전압과 주파수에 대한 영향을 검토하기 위하여 Table 1의 조건으로 아크릴 챔버에서 수행하였고 그 실험결과를 Table 5에 요약하였다.

주파수의 변화 없이 전압의 변화만으로 활성탄 분말의 거동실험(Case 1)과 이미지 분석을 수행한 결과, 전압이 0.15 kV 이하로 공급된 전극에서는 입자의 거동이 거의 나타나지 않았고(제거율, 0%) 입자상 물질의 거동을 위한 최소한의 전압은 약 0.20 kV로 나타나 9.7-11.0%의 제거율을 보였다. 또한 전극 외부로 70.0% 이상의 제거율(73.3-77.4%)을 보이는 전압은 0.45 kV로 측정되었고 0.50 kV에서는 주파수 0.26, 0.56, 0.96 kHz에 대하여 각각 76.5, 78.6, 84.7%의 제거율을 보여, 활성탄 분말의 제거율이 크게 향상되는 결과는 나타나지 않았다. 즉 직경이 매우 작은 입자들은 직경 감소에 의한 표면과의 접착력(adhesion force)이 증가되어 전압 및 주파수에 의한 전기적 힘에 의해서 전극 외부로의 거동이 상대적으로 작아서 전극판 표면에 잔류되어 높은 전압과 주파수의 변화에도 거동효율에는 변화가 적은 것으로 판단된다. Kawamoto 등^{12,17)}의 정전기적 힘으로 먼지를 분리 및 제거를 위한 연구에서도 직경 25 μm 이하의 입자에 대해서는 제거효율이 낮아지고 잔류되는 결과가 도출되어 전극판에 해당되는 전류에 대한 전압의 고유 임계치에 의한 영향으로 판단된다. Case 2, 3의 실험 결과에서는 낮은 전압일수록 입자의 거동변화에 주파수의 영향이 미미했으며 높은 전압에서는 주파수의 영향이 상대적으로 높은 것으로 나타났다.

실험된 전극기판을 대상으로 이미지분석 결과, 전압 0.20 kV의 전류가 공급되었을 때 입자의 거동이 시작되었고 주파수 변화에 대한 분석에서는 제거율 9.7%에서 11.0%로 1.7%의 변화가 있었고 보다 높은 전압인 0.45 kV가 공급되었을 때는 주파수가 0.26 kHz에서 0.96 kHz로 증가하면 제거율이 73.9%에서 78.4%로 4.5%의 활성탄 분말이, 0.50 kV에서는 10.2%의 분말이 이동되어 높은 전압에서 주파수의 영향이 높아져 입자가 거동되는 것으로 나타나, 전압의 세기가 높아질수록 높은 주파수에서 입자의 거동 현상이 뚜렷이 나타나는 것으로 확인되었다.

결과적으로, 실내 표면으로 낙하되는 미세먼지와 같은 입자상 오염물질의 제거를 위하여 전류에 의한 정전기적 힘과 유전영동력을 이용한 효과적인 제어장치의 최적 전압과 주파수는 각각 0.45-0.50 kV 및 0.56-0.96 kHz로 나타났고 이때 가장 많은 양의 입자상 물질이 전기적인 힘에 의해서 전극기판의 외부로 이동되는 것으로 나타났다. 그러나 0.60 kV 이상의 전원이 전극기판으로 공급되었을 경우에는 과전류에 의하여 전극기판에 불꽃이 발생되어, 개발 기술의 안전성 보안을 위해서는 쌓이는 오염물질의 양, 구

Table 5. Results of particle control by varied voltage and frequency

Voltage (kV)	Frequency (kHz) and Removal (%)					
	0.26	Re	0.56	Re	0.96	Re
0.15		0.0		0.0		0.0
0.20		9.7		10.2		11.0
0.45		73.9		75.3		78.4
0.50		74.5		78.6		84.7

리전극의 고유저항 및 전극 표면처리에 의한 임계전압이 고려된 입자상 물질의 제어 방안이 고려되어야 할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 3상 교류전원을 3극 전극기판에 공급하여 발생하는 정전기적인 힘을 이용하여 표면으로부터 입자상 물질의 제어를 통한 실내공기 오염물질 제어방안을 개발하고자, 실험장치 구성 및 운전조건의 도출을 위하여 Lab 규모의 아크릴 챔버에 기초실험을 수행 하였다. 동시에 개별 요소법에 의한 시뮬레이션을 통하여 비교 분석하여 효과적인 전극기판의 전극패턴을 검토하였고 검토된 결과를 바탕으로 대상 입자상 물질의 제어를 위한 3상 교류전원의 최적 전압 및 주파수 조건을 결정하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 3상 교류전류에 의한 전기적 힘의 발생으로 표면으로 낙하하는 입자를 효과적으로 거동시키기 위해서는 극성을 갖는 입자가 다상의 전류공급에 의한 비균일한 전기파동에 의해 일정방향으로 이동되도록 하는 것이 필요하다. 이를 위해서 단일 전극에 의한 전기력 발생 보다는 3극 전극기판을 통한 장치구성이 유리하고, 각 전극의 간격은 0.1 mm 이하로 등간격 패터닝하는 것이 효율적으로 입자상 물질을 거동시킬 수 있는 것으로 나타났다.

2) 제거할 대상입자의 밀도 및 크기와 같은 물리적 특성에 따라서 낙하되는 지점의 면과의 접착력으로 인하여 거동효율이 제한되는 것으로 나타남에 따라, 정전기적 힘에 의한 입자상 물질의 효과적인 거동을 위해서는 입자특성에 맞는 전압 및 주파수가 적용되어야 하거나 진동, 경사각 등의 추가적인 제어방안이 필요할 것으로 판단된다.

3) 3상 교류전원 발생기와 3극 전극기판으로 구성된 장치에 활성탄 분말을 이용한 Lab 실험을 통하여 전극기판으로 낙하된 활성탄 분말의 제거를 위하여 요구되는 최소 전압은 0.20 kV로 나타났고 낮은 전압보다는 높은 전압에서 주파수가 높아질수록 입자상 물질이 효과적으로 제거되는 결과를 나타냈다. 그러나 0.60 kV 이상의 전원공급에서는 과전류에 의한 불꽃이 발생되어서 개발기술의 안전한 활용을 위해서는 전극표면에 쌓이는 오염물질의 양과 전극의 재질에 따른 허용전류 등이 고려된 기술제어 방안의 수립이 필요할 것으로 사료된다.

4) 호흡기 환자가 많은 병원이나 중환자실, 군주배양 항균 실험실 등과 같은 특수한 환경에서는 미세먼지에 의한 영향의 최소화가 필수적이고 또는 실내 먼지로 인해서 거주민의 공중보건에 위해를 줄 수 있고 인위적 제거가 어려운 곳에 본 연구에서 고안한 시스템을 적용한다면 효율적

인 실내 입자상 오염물질의 제거를 통한 실내공기질 제어가 가능할 것으로 판단된다.

Acknowledgement

본 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업(2017-0115)의 연구비지원에 의해 수행되었고 이에 감사드립니다.

KSEE

References

1. Hinds, W. C., "Aerosol Technology: Properties, Behaviour and Measurement of Airborne Particles," John Wiley and Sons(1999).
2. Won, S. R., Lim, J. Y., Shim, I.-K., Kim, E. J., Choi, A. R., Han, J. S. and Lee, W. S., "Characterization of PM2.5 and PM10 concentration distribution at public facilities in Korea," *J. Korean Soc. Indoor Environ.*, **9**(3), 229~238 (2012).
3. Liu, G., Xiao, M., Zhang, X., Gal, C., Chen, X., Liu, L., Pan, S., Wu, J., Tang, L. and Clements-Croome, D., "A review of air filtration technologies for sustainable and healthy building ventilation," *Sust. Cities and Soc.*, **32**, 375~396(2017).
4. Heinsohn, R. J. and Cimbala, J. M., "Indoor air quality engineering: environmental health and control of indoor pollutants," CRC press(2003).
5. Sayyah, A., Horenstein, M. N., Mazumder, M. K. and Ahmadi, G., "Electrostatic force distribution on an electrodynamic screen," *J. Electrostatics*, **81**, 24~36(2016).
6. Kawamoto, H., "Some techniques on electrostatic separation of particle size utilizing electrostatic traveling-wave field," *J. Electrostatics*, **66**(3), 220~228(2008).
7. Jones, T. B., "Electromechanics of Particles," Cambridge University Press(2005).
8. Moesner, F. M. and Higuchi, T., "Electrostatic devices for particle microhandling," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, **35**(3), 530~536(1999).
9. Calle, C. I., Buhler, C. R., McFall, J. L. and Snyder, S. J., "Particle removal by electrostatic and dielectrophoretic forces for dust control during lunar exploration missions," *J. Electrostatics*, **67**(2), 89~92(2009).
10. Kim, J. B., You, S. K., Han, J. G., Hong, G. G. and Park, J. B., "A Study on Simulation of Cavity and Relaxation Zone Using Laboratory Model Test and Discrete Element Method," *J. Korean Geosynthetics Soc.*, **16**(2), 11~21(2017).
11. Kim, K. J., Lee, S. J., Jang, S. Y., Hwang, S. H., "Evaluation of the Influence Factors on the Ballast Settlement by using the Discrete Element Method," *J. Korean Soc. Civil Eng.*, **36**(4), 715~722(2016).
12. Kawamoto, H. and Shibata, T., "Electrostatic cleaning system

- for removal of sand from solar panels,” *J. Electrostatics*, **73**, 65~70(2015).
13. González-Montellano, C., Ayuga, F. and Ooi, J. Y., “Discrete element modelling of grain flow in a planar silo: influence of simulation parameters,” *Granular Matter*, **13**(2), 149~158(2011).
 14. Ketterhagen, W. R., Curtis, J. S., Wassgren, C. R. and Hancock, B. C., “Predicting the flow mode from hoppers using the discrete element method,” *Powder Technol.*, **195**(1), 1~10(2009).
 15. Kim, S. D., Kim, C. H. and Hwang, U. H., “A Study on the Particles Density Estimation in Seoul Metropolitan,” *Korean J. Environ. Health*, **34**(2), 131~136(2008).
 16. Biris, A. S., Saini, D., Srirama, P. K., Mazumder, M. K., Sims, R. A., Calle, C. I. and Buhler, C. R., “Electrodynamic removal of contaminant particles and its applications,” Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2004 IEEE. 2, 1283~1286(2004).
 17. Kawamoto, H. and Hara, N., “Electrostatic cleaning system for removing lunar dust adhering to space suits,” *J. Aerospace Eng.*, **24**(4), 442~444(2011).