전류의 전압과 주파수 변화에 의한 입자상 오염물질 거동 기반의 실내공기 오염물질 제어 방안 연구

Movement Control of Particulate Pollutants in Indoor Air Generated by Voltage and Frequency of Alternating Current

윤영한[†] · 김광수
Younghan Yoon[†] · Kwasng Soo Kim

한국건설기술연구원 국토보전연구본부
Department of Land, Water and Environment Research
Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

(Received September 26, 2017; Revised December 29, 2017; Accepted March 28, 2018)

Abstract : The new removal technology was proposed to remove indoor particulate contaminants from the surface in indoor by using the principle that the particulate matter behaves from the surface due to the nonuniform electric field generated by the 3-phased AC power source. In this study, experimental works of dust standard samples, kaolin and activated carbon powder were performed and were compared with simulations through EDEMTM. The smaller the size of the particles, the higher the voltage and frequency are required for the structure to be composed as a homogeneous single element group, and if the element group consists of heterogenous elements, it can deal with a relatively low electric force. In addition, the current intensity for the minimum behavior varies depending on the physical properties of the particles. For effective removal of the particulate matter by the dielectrophoretic force, particles in various sizes and shapes can be easily removed from the surface of the parallel electrodes, in which 0.089 V/mg/cm^2 was at least required for carbon powder in this system.

Key Words : Indoor Particular Contaminants, Nonuniform Electric Field, Dielectrophoretic Force, 3-phased AC Power, EDEM Simulation

요약 : 3상의 교류전원을 이용하여 발생된 불균일 전기파동으로 입자상 물질을 표면으로부터 거동시키는 원리를 이용하여 실내 입자상 오염물질을 제거할 수 있는 기술을 개발하고자 하였다. 본 연구에서는 먼지 표준시료, 카올린, 활성탄 분말을 대상으로 실험하였고 입자의 형태에 따른 입자의 거동을 시뮬레이션을 통한 결과와 비교분석 하였다. 입자의 크기가 작으면 서 균일한 형태의 단일 요소군으로 구성될수록 거동을 위해서는 더 높은 전압과 주파수가 필요하고 비균일한 형태의 요소군 으로 구성되면 상대적으로 낮은 전기적인 힘으로 거동될 수 있다. 또한 입자의 물리적 특성에 따라서 최소거동을 위한 전류 강도가 다르게 나타나 유전영동력에 의한 입자상 물질의 효과적인 거동에는 다양한 크기와 형태로 구성된 입자군이 평행전 극표면으로부터 제거가 용이하며 실험을 통하여 활성탄 분말의 경우는 0.089 V/mg/cm^2 의 전압이 필요한 것으로 분석되었다.

주제어 : 실내 입자상 오염물질, 불균일 전기장, 유전영동력, 3상 교류전류, 개별요소법 시뮬레이션

1. 서론

실내 먼지는 건물 내 거주자들의 건강에 위해를 일으킬 수 있는 입자상 오염물질로서 가스상 물질 및 부유미생물과 함께 실내오염을 일으키는 주요 오염물질로 관리되고 있다. 실내에서 발생하는 입자상 먼지는 다양한 물리화학적 반응을 통하여 생성되고 있으며, 공기역학적 직경 크기에 의해서 $2.5 \mu\text{m}$ 이하의 먼지는 $\text{PM}_{2.5}$, $10 \mu\text{m}$ 이하의 먼지는 PM_{10} 으로 구분되고 있다. 이는 먼지 입자의 크기에 따라서 호흡기 및 피부를 통한 인체 노출량이 달라지고 흡착된 유해성분의 종류 및 양 뿐만 아니라 그 크기에 따라 생체독성이 매우 달라지기 때문이다.¹⁻³⁾

전기적 힘을 이용하여 입자상 오염물질을 제어하는 기술에는 정전필터 및 전기집진 장치가 있다. 이 기술은 정전기에 의해서 대상물질을 잡고 세정제로 세척하여 제거하는

방법으로서 오염된 세정수의 정화방안이 별도로 요구되는 단점이 있고 전기집진장치는 $100 \mu\text{m}$ 이상의 입자물질 제거에 적합한 기술로서 소규모 보다는 대규모의 산업시설에 주로 적용되고 있다.^{4,5)}

또한 전기력을 이용하는 다른 방안으로는 다상(multi-phased)의 전원을 이용하여 표면으로부터 입자를 밀어내어 거동시켜 제거하는 기술이 일부 분야에 적용되고 있다. 즉, 3개 이상의 평행전극에 전류를 공급하여 불균일 전기장(nonuniform electric field)에 전자기 진행파(electromagnetic traveling wave)를 유도시켜 표면에 쌓이는 입자상 물질을 표면 외부로 이동시켜 제거하게 된다. 최근에는 태양광 모듈 표면으로 쌓이는 물질을 제거하기 위한 방안으로 적용하고 있는 기술로써 전도도가 높은 전극물질 기반의 전압 및 전류의 강도 조절 등으로 오염물질을 제거하기 위한 기술이 있다.⁶⁻⁸⁾ 기술의 원리는 평행판 전극에 여러 상의 전

[†] Corresponding author E-mail: yoyoon74@kict.re.kr Tel: 031-910-0397 Fax: 031-910-0291

류가 공급되면 전기적으로 힘이 발생되고 공급된 면 위의 입자는 입자의 극성 및 진행파의 작용력에 의하여 이동되는 것이다.^{8,9)} 전극기관 상의 입자에 작용하는 주된 힘은 정전력, 점성력, 중력이 작용하게 되는데 낙하되는 표면의 마찰력이 작고 입자에 작용하는 정전기력이 중력을 극복할 수 있도록 작용된다면 낙하되는 대상 물질은 거동될 수 있게 된다. 3상의 전류로 형성된 불균일 전기장에서는 하전되지 않거나 분극성을 갖는 입자는 이들에 작용하는 쌍극자 모멘트에 의해서 유전영동력(dielectrophoretic force)인 전기적 힘이 작용하게 되고 전기장이 발생된 표면 위로 입자는 부양되어 진행파에 의해서 표면을 따라 이동하여 제거할 수 있다.^{10,11)}

실린더 타입의 평행전극과 3상 교류전원을 도입하여 정상파(standing wave)에 의한 입자를 이동시키는 전기커튼이 Masuda and Matsumoto¹²⁾에 의해서 처음 연구되었고 Masuda and Kamimura¹³⁾에 의해서 동일한 시스템에 대한 전자기 진행파에 대한 이론적 연구가 시작되어 현재의 전기커튼(electric curtain) 기술이 완성되었다.^{12,13)} 동일한 원리를 이용하여 Calle 등¹⁰⁾은 에너지를 얻기 위한 태양광 패널에 쌓이는 먼지를 제거하기 위한 방안으로 다중 위상의 전기력에 의하여 입자들을 부양시켜 운반 및 제어하는 기술을 적용하였다. 우주공간에서 발생하는 다양한 범위의 입자가 주파수 변화에 의해서 효과적으로 이동되는 연구결과를 보였고 Cooper 등¹⁴⁾ 및 Novick¹⁵⁾은 직류(direct current)에 의한 정전기력으로 표면 세정 및 미립자 디스펜서 공정의 적용가능성을 연구하였다. 최근 실내공기질 개선을 위하여 전기력을 이용한 입자상 물질의 제거 기술이 제안되었고 낙하된 표면상의 입자를 일정 구역으로 이동시켜 제거하기 위한 방안로서 전기적인 힘에 의한 입자상 오염물질의 제거기술이 연구 중에 있다.^{16,22)} 실제로 실내에서 발생하는 먼지는 매우 다양한 화학적 조성 및 물리적 형태를 갖고며 실외의 먼지와 성분이 유사한 특성을 갖는 것으로 알려져 있다. 실외로부터 유입된 먼지는 모양이 크고 거칠어 불규칙하고 잘 부유되는 작은 크기의 입자는 실내에서 기원된 것으로서 구형의 크기로 작고 균일한 특성을 갖는 것으로 분석되었다.^{23,24)}

본 연구에서는 실내에서 발견될 수 있는 입자상 물질의 형태에 대한 영향을 개별요소법 기반의 입자거동 프로그램인 EDEMTM (DEM Solutions, 2016)에 의한 시뮬레이션을 통하여 검토하고 실내에서 실험실 규모로 수행한 입자거동 실험결과와 비교분석 하여 실내에서 발생하는 입자상 물질의 제어를 위한 정전력 기반의 오염물질 제어 프로토타입 장치의 설계 및 운전 조건의 도출에 활용하고자 하였다.

2. 연구방법 및 내용

2.1. 교류전원 발생기 및 평행 전극기관

전류의 전압(0.01-0.60 kV) 및 공급된 전압에 대한 주파

수(0.00-0.999 kHz)를 제어 및 공급할 수 있는 전원 발생기는 3상의 교류 전류를 평행 전극기관으로 공급할 수 있도록 제작하였다. 제작된 교류전원 발생기와 전극기관의 세부내용은 사전연구에서 수행된 장치와 동일한 장비를 이용하였다.¹⁶⁾

2.2. Laboratory 실험 장비구성과 실험방법 및 분석

3상의 전원을 발생시킬 수 있는 교류전원 발생기와 전원을 공급받아 전기장을 형성하여 낙하되는 입자를 이동시키기 위한 3극 평행전극기관을 아크릴 챔버(300×300×750 mm) 내부에 위치시켰다(Fig. 1). 전극기관은 선행연구 결과를 반영하여 전극의 두께는 1.0 mm, 전극간 간격은 0.1 mm로 등간격 패터닝(patterning)한 3개의 구리 전극기관을 사용하였다. 입자들의 종류에 대한 거동 분석을 위하여 실험에 적용한 대상 입자상 물질로는 먼지 표준물질로 사용되는 시료(JIS test powder), 나노입자로 사용되는 카올린(kaolin clay, Aldrich-sigma), 낮은 밀도로 거동분석이 용이한 활성탄 분말(activated carbon powder, ACP)을 표준망체(testing sieve)로 50 µm 이하 크기로 분류하여 사용하였다. 각 입자들에 대한 구성과 크기 및 밀도는 Table 1에 요약하였다.

선정된 전극기관에서의 구성과 모양이 다른 대상 물질의 거동을 검토하기 위하여 Table 2의 조건으로 각각의 시료에 대하여 100 mg을 임의로 채취하여 소형 아크릴 챔버의 상단으로부터 실내 먼지가 발생되어 낙하되는 현상과 유사하

Fig. 1. Lab-scaled test facility (lab scaled acrylic chamber, electrode board and AC power generator).

Table 1. Tested types of reagent for analyzing particle movement

Particle type	Shape & composition property	Average size (µm)	Average density (g/cm ³)
Test powder	irregular heterogeneous composition	less than 50 (about 40,2)	3.0
Kaolin clay	rod, aspect ratio, 3:1, homogeneous composition	less than 1.0	2.53
Activated carbon powder	irregular homogeneous composition	less than 50 (about 44,5)	1.12

Table 2. Control condition of the lab scale test

Test	Case 1	Case 2	Case 3
Voltage (kV)	0.00 - 0.60	0.40 - 0.60	0.40 - 0.55
Frequency (kHz)	0.06 - 0.99	0.20 - 0.99	0.20 - 0.99
Particulate (mg)	Test powder, kaolin clay, activated carbon powder(ACP)		ACP
	100	50, 100	

게 구현하기 위하여 소량씩 균일하게 전극기관 표면으로 고르게 자유낙하 되도록 하였다. 적용한 전압과 주파수는 기 수행된 연구 결과(최적전압 및 주파수:0.45-0.50 kV, 0.56-0.96 kHz)를 기반으로 입자모양과 구성이 다른 실험대상 물질로 반복 실험하여 거동을 분석하였다. 본 실험은 실내 실험실 조건(실온 27℃ 및 습도 28%)에서 수행하였다.

또한, 전기적 힘에 의하여 입자상 물질이 거동되어 전극 기관으로부터 제거된 효율을 측정하기 위하여 이미지 분석 (InnerView™, Total Imaging Solution)으로 제거효율을 검토 하였다. 즉, 낙하되는 시료의 크기와 양이 적고 실험 후 시료의 별도 샘플링에 어려움이 있어 무게차이에 의한 분석 보다는 입자들에 의해서 가려지는 면적의 비율에 의한 제거 효율로 평가하였다.

2.3. 입자 형태에 따른 거동 모사 분석

실내에서 발생되는 입자상 오염물질은 크기가 작고 전극 기관에서 입자의 거동추이를 시료 샘플링에 의한 분석에는

한계가 있어 개별요소법(Discrete Element Methods, DEM) 기반의 시뮬레이션에 의한 거동분석을 수행하였다. 개별요소법은 입자를 구 형태의 강체로 가정하여 입자간 및 입자와 표면간의 물리적 특성과 외력에 의한 입자의 거동해석이 가능하다. 본 연구에 적용된 프로그램은 개별요소 거동 해석 시뮬레이션으로 EDEM™ (DEM Solutions, 2017)을 적용하였으며 입자-입자간, 입자-기하학적 입자군간(Geometry) 간의 접촉 모델의 설정이 가능하여 조건의 변화에 따라서 입자의 거동을 모사하고 그 결과를 3차원 그래픽으로 파악할 수 있는 특징이 있다.^{17,18)} Table 3은 시뮬레이션 상에서 힘이 작용하는 대상인 입자(dust), 구리전극(copper), 전극기관(steel)의 물리적 특성인자를 나태고 있다. 입자의 형태는 입자형(particle), 피라미드형(pyramid), 선형입자형(linear) 요소군으로 구분하여 입자의 형태에 따른 거동을 분석하기 위하여 조합별(T1~T8)로 시뮬레이션을 수행했고 각각의 입자의 성분비는 100%가 되도록 하였고 모든 입자의 직경은 약 40 μm로 가정하여 모사하였다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1. 입자상 물질의 거동을 위한 전압 및 주파수 조건

Table 4는 입자의 모양이 상이한 실내먼지 표준시료, 카울린, 활성탄 분말 100 mg을 대상으로 사전연구 결과에 의한 전류의 전압과 주파수의 범위 조건(Case 2)으로 전극기관

Table 3. 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	$4,6 \times 10^6$ 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			
Particle property	simulated shape figure					
Particle group (38-40,5 μm)				T-1	4P	
				T-2	3P+4P	
				T-3	1P+3P+4P	
Element shape Type (Total : 10,000)	Pyramid group (40-41,5 μm)				T-4	P4
					T-5	P4+P5
					T-6	P4+P5+P6
	Linear group (39-42,0 μm)				T-7	4PL
					T-8	4P+P4+4PL

Table 4. Removal efficiency of particulate types in 3-electrode substrate at 0.50 kV and 0.56 kHz

Test	Test powder	Kaolin clay	ACP
Removal efficiency (%)	0.0	0.0	78.6

에 낙하시켜 이미지 분석으로 거동효율을 분석한 결과로서 전압 및 주파수의 조건은 0.50 kV 및 0.56 kHz이다. Case 1 및 Case 2의 조건에서 실험한 결과, 표준시료와 카올린은 전극의 외부로 거동되는 현상이 나타나지 않았고 활성탄 분말의 경우는 전극기관으로 낙하됨과 동시에 공급된 전류에 의한 전기적 힘의 작용으로 거동되었고 제거율은 78.6%로 나타났다.

표준시료(평균직경 및 밀도: 40.2 μm , 3.0 g/cm^3)와 카올린(1.0 μm 이하, 2.53 g/cm^3)은 평균 입자의 크기와 밀도가 활성탄 분말(44.5 μm , 1.12 g/cm^3)과 비교하여 표준시료는 유사한 입경 크기와 높은 밀도를 갖고 카올린은 보다 작은 입경과 높은 밀도를 갖는 입자상 물질이다. 물질 조성은 표준시료의 경우 SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , CaO , MgO , TiO_2 등의 불균일한(heterogeneous) 조성을 갖고 있고 카올린의 경우, 조성은 균일한(homogeneous) 막대형(rod, aspect ratio, 3:1)의 형태를 갖는 물질이다. 활성탄 분말의 입경은 표준시료와 유사하고 밀도는 실험 대상물질 중에서 가장 작으며 탄소만으로 구성된 균질한 조성을 갖는다.

표준시료는 입경의 크기가 활성탄 분말과 유사하지만 불균일한 물질로 구성되어 있고 밀도가 상대적으로 높아서 공급된 전압과 주파수에 의해서 발생된 입자의 쿨롱력, 유전영동력, 입자간의 van der Waals 힘이 입자의 중력과 접촉면의 부착력을 극복하지 못하여 거동이 나타나지 못한 것으로 판단된다. 카올린 클레이는 입경이 매우 작은 나노 입자상 물질(수십 nm)이고 평균 밀도도 활성탄 분말보다 높아서 작은 입경에 의한 표면적 및 표면과의 부착력에 따른 마찰력 증가로 인해서 공급된 전기력이 낮아져서 거동이 나타나지 않은 것으로 판단된다. 또한 입자의 형태가 막대형으로서 시뮬레이션 결과와 유사하게 본 실험의 거동에 영향을 준 것으로 사료된다.

Kawamoto 등^{7,19)}의 연구에서도 1.0-3.0 kV의 높은 전압에

대하여 일정 범위의 입자들에 대해서 거동되는 효율이 감소되었고 이는 표면에 잔류되어 대상표면으로 공급되는 전류에 대한 고유 임계치에 의한 영향에 의해서 정치된 것으로 판단되고 대상물질인 표준시료와 카올린과 같은 물질의 거동을 위해서는 보다 높은 전압의 힘이 필요한 것으로 사료된다.^{7,19)} 그리고 평균적인 실내면지의 밀도는 1.57-1.92 mg/cm^3 으로 분석되어 밀도가 이에 근접한 활성탄 분말이 공급된 전압과 주파수에 의해서 효과적으로 전극의 외부로 거동된 것으로 판단된다.²⁰⁾

3.2. 활성탄 분말을 통한 입자상 물질의 제어를 위한 최적 조건 도출

입자상 물질의 효율적인 제어를 통한 실내 오염물질을 제거하는 시작품(prototype) 장치의 설계 및 운전 조건의 도출을 위해서 전압과 주파수에 대한 거동을 검토하기 위한 실험(Case 3, 100 mg)을 수행하였고 그 결과의 이미지 분석을 통한 제거율을 Table 5에 요약하였다. 공급된 전류의 낮은 전압에서는 주파수의 변화에도 입자의 거동이 거의 나타나지 않았고 높은 전압에서는 주파수가 높아짐에 따라서 거동되는 정도가 증가하여 0.50 kV와 0.96 kHz에서는 85.2%의 제거율을 갖는 것으로 분석되었고 Table 6과 같이 전극판의 가장자리로 모이는 결과를 보였다. 이는 Kawamoto and Miwa¹⁹⁾ 및 Kawamoto and Hara²¹⁾의 결과와 유사한 경향으로 나타났으며 보다 효과적인 제거를 위해서 대상표면에 기울기(inclination) 또는 진동(vibration)의 기능을 부여하였고 이에 대한 영향을 연구결과로 제시하였다.^{19,21)}

대상물질의 양의 변화에 따른 거동(Case 3) 결과를 검토하기 위하여 Table 5의 결과와 비교하여 Table 7에 정리하

Table 5. Removal efficiency (%) of particle movement (100 mg) and removal by voltage and frequency

Voltage (kV)	Frequency (kHz)			
	0.06	0.26	0.56	0.96
0.20	0.00	9.7	10.2	11.0
0.40	71.9	74.0	75.8	78.6
0.50	73.6	74.5	78.6	84.7

Table 6. Particle movement and removal efficiency on supplied voltage and frequency

Power (voltage (kV) / frequency (kHz))				
	0.15/0.06	0.20/0.56	0.40/0.26	0.50/0.96
Particle movement on substrate board
Re (%)	0.0	10.2	74.0	84.7

Table 7. Results of removal efficiency (%) in different particle mass by various change of voltage and frequency

Frequency (kHz)	50 mg ACP			100 mg ACP		
	0.26	0.56	0.96	0.26	0.56	0.96
0.20	8.9	13.7	16.6	9.7	10.2	11.0
Voltage (kV)	0.35	77.3	80.1	84.8	25.3	26.4
	0.50	83.7	85.1	87.7	74.5	78.6
	0.57	84.7	86.9	88.0	79.8	81.8
				85.2		

였다. 전압의 변화에 의한 분석으로부터 입자상 물질, 50, 100 mg의 거동을 위한 최소 전압조건은 0.20 kV로 동일했고 주파수 조건은 각각 0.26, 0.56 kHz로 차이가 있었다. 일정 전압에 대하여 주파수의 변화에 의한 거동 실험에서는 낮은 전압에서는 주파수가 증가되어도 입자의 거동이 적었으나 높은 전압에서는 주파수에 의한 거동 영향이 상대적으로 더 많은 입자에 영향을 주어 확연한 거동이 나타나 Table 5와 6의 결과와 동일한 경향으로 나타났다. 그러나 전압과 주파수를 지속적으로 증가시켜 공급해도 제거율이 비례하여 증가되지 않는 것으로 나타났고 Kawamoto⁷⁾의 연구에서도 일정한 전원에 대하여 초기 중량과 관계없이 실험 후 잔류된 입자상 물질의 양은 일정하게 유지되는 결과를 보였다. 또한 전압이 0.35 kV (0.089 kV/g/cm²) 이하로 공급되면 거동되는 입자의 양이 매우 적었고 이때 주파수가 증가될 때 입자의 거동이 관찰되었으며 입자의 양이 증가된 100 mg에 대해서는 0.50 kV (0.127 kV/g/cm²) 이상의 전압 공급에서 75% 이상의 제거율을 보였으며 주파수의 증가가 입자거동에 더 많은 영향을 주는 것으로 나타났다.

실험과 분석을 통하여 활성탄 분말 50 mg에 대한 제거율 80.0%와 유사한 거동을 위해서 100 mg에 공급된 전류의 전압과 주파수는 상대적으로 높은 0.50 kV (0.56 kHz) 또는 0.57 kV (0.26 kHz)로 나타났다. 줄어든 활성탄 분말의 양과 비례하여 전압 또는 주파수의 세기가 줄어들지 않았으나 적은 양의 활성탄에 대해서는 낮은 전압과 주파수의 상호 보완을 통해서 일정 제거율이 도출될 수 있는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 입자상 물질이 전극기판 위로 낙하될 때의 환경조건(온도, 습도, 기류변화), 낙하 속도 및 쌓이는데 소요되는 시간 등을 고려한 입자상 물질의 제거방안이 검토되어야 할 것으로 판단되고, 또한 지속적인 전압과 주파수를 증가시킨 실험에서 과전류 및 평행전극기판의 고유 저항의 한계로 전기단락(short-circuit)이 발생되어 이에 대한 보완이 필요할 것으로 판단된다.

3.3. 개별요소분석에 의한 입자의 형태별 거동 분석

입자의 형태에 따른 거동을 분석하기 위하여 개별요소법 기반의 입자거동 프로그램인 EDEM™ (DEM Solutions, 2017)을 이용하여 분석 하였다. 소형 챔버에서 실험된 조건과 동일하게 구현하기 위하여 Table 3의 10,000개의 입자를 3가지의 입자별 형태에 대하여 구성비를 달리하여 전극판 위로 고르게 낙하시켜 시뮬레이션을 수행하였다. 이때 전극

Table 8. Total amount and consuming time as the particle movement in simulation

Shape type	Combination type	Consuming time (s) as removal efficiency		Average number of particles on electrode board (EA)
		70%	100%	
Particle (-P)	T1 4P	0.71	0.82	5351
	T2 3P+4P	0.71	0.84	5296
	T3 1P+3P+4P	0.87	0.97	5070
Pyramid (P-)	T4 P4	0.71	0.81	5148
	T5 P5+P6	0.72	0.83	5119
	T6 P4+P5+P6	0.87	0.96	5065
Linear (-PL)	T7 4PL	0.72	0.84	5702
Combination	T8 4P+P4+4PL	0.89	0.99	4216

판 표면의 마찰은 거의 없으며 입자와 입자, 입자와 전극 및 전극판 표면 간의 동마찰만 있는 것으로 가정하였다. Table 8과 Fig. 5~7은 입자가 낙하된 후 1초 동안에 입자의

Fig. 5. Number of particles on the electrode board after simulation for particle type. **Fig. 6.** Number of particles on the electrode board after simulation for pyramid type

Fig. 7. Number of particles on the electrode board after simulation for combination.

형태와 형태별 구성에 따라 시간에 따른 잔류된 입자의 수량 변화를 보여주고 있다.

모든 시뮬레이션 결과, 낙하되는 모든 입자는 1초 이내에 전극판의 외부로 이동되는 것으로 모사되었으나 각 입자에 대하여 요소군별로는 살펴보면 평균적으로 잔류되는 시간과 입자의 양 등에서 다른 특징을 갖는 것으로 결과가 도출되었다. 제거되는 소요시간은 입자형 요소군(particle type)과 피라미드형 요소군(pyramid type) 대상의 실험에서 3가지 형태가 혼합된 입자군(T-3, -6)의 경우는 0.95초 이후에, 그리고 단일 입자군(T-1, -2, -4, -6)인 경우는 0.84초 이후에 제거율 100%에 이르는 것으로 나타나 모두 제거되기까지 시간적 차이가 있었고, 입자형 요소군이 피라미드형 요소군보다 전극판 상에 더 많은 양이 잔류하는 것으로 나타남에 따라서 형태가 평면형보다는 구형인 경우에 더 쉽게 외부로 이동되는 것을 확인할 수 있었다.

제거되는 소요시간 동안 전극판에 잔류되는 양을 비교분석하면, 선형 요소군(linear type)의 경우(T7)는 동일한 제거율에 이르는 시간이 평균적으로 더 소요되는 것으로 나타났다. 잔류하는 양도 평균 5,702개로 입자형 및 피라미드형 입자의 평균 잔류량(5,175개) 보다 높게 나타나 전극판에 작용된 같은 힘에 대하여 이동이 어려운 것으로 나타났다(Fig. 7). 이는 요소군의 형태가 막대형태에 가깝고 거동하면서 입자간의 작용하는 기회가 적어 힘이 상대적으로 낮아서 잔류된 양이 많았던 것으로 판단되고 형태가 구형에 가까운 그룹일수록 더 빈번하게 작용하여 힘이 높아져 전극판에 잔류된 입자의 양이 적어진 것으로 판단된다. 각 요소군이 모두 혼합된 T8에서는 평균 잔류 입자의 양이 4,216개로서, 단일 형태의 입자군(T-1, -2, -4, -5, -7)과 유사한 혼합 형태를 갖는 입자군(T-3, -6)의 결과와 비교하여 평균 1,034개(849~1,468개)로 나타나 보다 많은 양의 입자가 외부로 이동되었다. 이는 입경이 유사하고 다양한 형태로 혼합된 요소군일수록 입자간의 충돌에 의한 반발력, 쌍극자 입자에 대한 유전영동력 및 van der Waals 힘, 쿨롱력(Coulomb

force), 전기적 반응에 의한 표면과의 작용기회 등이 입자 형태가 균일한 요소군 보다는 더 빈번하여 전극판 상에 잔류된 양이 적은 결과가 나왔으며 최종적으로 대부분의 입자가 전극판 외부로 이동될 수 있었던 것으로 판단된다. 정전기적 힘과 유전영동력에 의한 입자 이동에 대한 수치 분석 및 실험을 수행한 Kawamoto 등²⁵⁾의 연구에서도 평행전극에 작용된 전기장에 의한 전하와 쿨롱력이 다른 힘에 비해서 입자를 이동시키는 주된 힘으로 작용하는 것을 밝혔고 전기장의 세기, 진행파의 주파수, 입자의 직경에 따라서 입자의 이동방향이 변화하여 이동하는 연구결과를 보였다.²⁵⁾

앞서 수행된 전기적 힘에 의한 대상물질 거동실험에서 사용된 활성탄 분말은 야자 및 코코넛 등을 탄화시킨 균질한 물질로 구성되어 있고 나노크기의 막대형 모양(aspect ratio, 3:1)을 갖는 카올린보다는 밀도가 낮고 전극판 표면과의 마찰력이 낮아 입자상 물질거동에 유리한 것으로 판단된다. 또한 막대형 모양을 갖는 선형 요소군(aspect ratio, 3.5:1)의 시뮬레이션 결과(T7, Fig. 7)에서도 다른 형태의 입자군보다 더 많은 양이 잔류되는 것으로 나타남에 따라서 막대형 입자를 갖는 카올린 시료의 거동에 영향을 미칠 것으로 판단된다. 따라서 동일한 양에 대하여 활성탄 분말의 평균입경이 상대적으로 크고 균질한 성분의 입자로 구성되어 시뮬레이션 결과와 유사하게 동일한 힘이 작용할 경우 더 많은 양이 전극표면으로부터 거동될 수 있는 것으로 해석될 수 있다. 그러나 실내 공간에서의 입자 거동은 온도, 습도, 실내 기류, 표면특성 등의 환경조건의 영향을 크게 받으므로 이에 대한 추가 조건설정에 의한 검토도 필요한 것으로 판단된다.

4. 결론

전기적 힘을 이용하여 표면으로부터 입자상 물질을 부상시켜 제어하여 실내공기를 정화시킬 수 있는 기술을 개발할 목적으로 입자 거동에 대한 실험과 입자 형태 및 구성별 시뮬레이션 결과를 비교 검토하였다. 선행연구와 문헌연구를 통하여, 3극 평행전극기판으로 3상의 전류공급에 의해서 발생된 전기력과 유전영동력(dielectrophoretic force)으로 쌍극자 모멘트 작용에 의해서 입자가 부양되어 표면을 따라 이동하는 것을 검토하였다. 본 연구에서는 개발기술이 적용된 프로토타입 장치의 설계와 운전 조건의 도출을 위하여, 입자의 형태 및 총량에 대한 시뮬레이션을 수행하였고 실험 결과의 비교분석을 통해서 기본 운전조건 및 향후 개선방향에 대하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) Lab 실험 결과를 통하여 유전영동력 및 전기력에 의한 입자 거동에 적합한 대상물질로는 입자의 구성이 균질

하고 다양한 크기와 형태로 구성된 활성탄 분말 입자 그룹이 동일한 힘을 받았을 때 표준시료 및 카울린보다 용이하게 거동되는 것을 확인하였다.

2) 시뮬레이션 결과 분석을 통하여, 평행전극기관에 형성된 전기장의 진행파에 의해서 입자의 구성이 균일한 형태(homogeneous)가 불균일한 형태(heterogeneous)의 입자군보다 거동이 어려워 평균적으로 더 많은 양이 잔류되는 결과가 도출되어 Lab 실험결과와 유사한 것으로 나타났다.

3) 전극기관 상에 있는 활성탄 분말의 거동을 위한 교류 전류의 최적 조건 도출 실험에서 전류의 전압이 높을수록 효과적 거동을 나타냈고 높은 전압에서 주파수의 증가가 입자의 거동에 유리한 영향을 미치는 것으로 관찰되었고 최소 거동을 위하여 요구되는 전류의 전압은 0.089 V/mg/cm^2 로 분석되었다.

4) 3종류의 입자모양(입자형; particle, 피라미드형; pyramid, 선형; linear)에 대하여 시뮬레이션을 수행한 결과, 동일한 전기적 힘에 대하여 입자의 구성이 균일할수록 잔류되는 양이 높았고 입자 요소군 형태가 피라미드형 및 선형인 경우에도 잔류량이 많은 것으로 나타나 표면으로부터 제거가 어려운 것으로 나타났다.

Acknowledgement

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

KSEE

References

1. Park, Y. O., "Pollution properties and control technology of fine dusts in indoor space," *J. The Korean Soc. Living Environ. Syst.*, **9**(2), 122~128(2002).
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 PM_{2.5} and PM₁₀ concentration distribution at public facilities in Korea," *J. Korean Soc. Indoor Environ.*, **9**(3), 229~238 (2012).
3. Jones, B. and Molina, C., "Indoor Air Quality," *Encyclopedia of Sustainable Technologies*(2017).
4. Brincat, J. P., Sardella, D., Muscat, A., Decelis, S., Grima, J. N., Valdramidis, V. and Gatt, R., "A review of the state-of-the-art in air filtration technologies as may be applied to cold storage warehouses," *Trends in Food Sci. & Technol.*, **50**, 175~185(2016).
5. Heinsohn, R. J. and Cimbala, J. M., "Indoor air quality engineering: environmental health and control of indoor pollutants," CRC press(2003).
6. Sayyah, A., Horenstein, M. N., Mazumder, M. K. and Ahmadi, G., "Electrostatic force distribution on an electrodynamic screen," *J. Electrostatics*, **81**, 24~36(2016).
7. Kawamoto, H., "Some techniques on electrostatic separation of particle size utilizing electrostatic traveling-wave field," *J. Electrostatics*, **66**(3), 220~228(2008).
8. Jones, T. B., "Electromechanics of Particles," Cambridge University Press(2005).
9. Moesner, F. M. and Higuchi, T., "Traveling electric field conveyor for contactless manipulation of microparts," *IEEE Ind. Applicat. Soc., Annual Meet. New Orleans*, **3**, 2004~2011 (1997).
10. 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).
11. Wang, X. B., Hughes, M. P., Huang, Y., Becker, F. F. and Gascoyne, P. R. C., "Non-uniform spatial distributions of both the magnitude and phase of AC electric fields determine dielectrophoretic forces," *Biochim. et Biophys. Acta (BBA)-General Subjects*, **1243**(2), 185~194(1995).
12. Masuda, S. and Matsumoto, Y., "Theoretical characteristics of standing wave electric curtains," *Electrical Eng. Japan*, **93**(1), 71~77(1973).
13. Masuda, S. and Kamimura, T., "Approximate methods for calculating a non-uniform travelling field," *J. Electrostatics*, **1**(4), 351~370(1975).
14. Cooper, D. W., Wolfe, H. L., Yeh, J. T. and Miller, R. J., "Surface cleaning by electrostatic removal of particles," *Aerosol Sci. and Technol.*, **13**(1), 116~123(1990).
15. Novick, V. J., Hummer, C. R. and Dunn, P. F., "Minimum dc electric field requirements for removing powder layers from a conductive surface," *J. Appl. Phys.*, **65**(8), 3242~3247 (1989).
16. Yoon, Y. H., Han S. J. and Kim, K. S., "A feasibility study on the movement control of particulate enforced by electrodynamic force," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **40**(3), 131~138(2018).
17. 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).
18. Kawamoto, H. and Shibata, T., "Electrostatic cleaning system for removal of sand from solar panels," *J. Electrostatics*, **73**, 65~70(2015).
19. Kawamoto, H. and Miwa, T., "Mitigation of lunar dust adhered to mechanical parts of equipment used for lunar exploration," *J. Electrostatics*, **69**(4), 365~369(2011).
20. 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).
21. Kawamoto, H. and Hara, N., "Electrostatic cleaning system for removing lunar dust adhering to space suits," *J. Aerospace Eng.*, **24**(4), 442~444(2011).

22. Yoon, Y. H., Joo, J. C., Ahn, H. S. and Nam, S. H., "Analyses of the current market trend and research status of indoor air quality control to develop an electrostatic force-based dust control technique," *J. the Korean Academia-Ind. Cooperat. Soc.*, **14**(12), 6610~6617(2013).
23. Chithra, V. S. and Nagendra, S. S., "Chemical and morphological characteristics of indoor and outdoor particulate matter in an urban environment," *Atmos. Environ.*, **77**, 579~587(2013).
24. Górka-Kostrubiec, B., "The magnetic properties of indoor dust fractions as markers of air pollution inside buildings," *Building and Environ.*, **90**, 186~195(2015).
25. Kawamoto, H., Seki, K. and Kuromiya, N., "Mechanism of travelling-wave transport of particles," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **39**(6), 1249~1256(2006).