

입팩션 효과에 편극전하 방식을 부가한 다층 다단 다공성 플레이트 시스템의 집진특성 Dust Collection Characteristics of Multi-layer Multi-stage Porous Plate System with Polarization Charge to Impaction Effect

김보배 · 김일규 · 여석준[†]
Bo-Bae Kim · Il-Kyu Kim · Seok-Jun Yoa[†]

부경대학교 환경공학과
Department of Environmental Engineering, Pukyong National University

(2011년 3월 7일 접수, 2011년 8월 29일 채택)

Abstract : The main object of this study is to investigate the Dust Collection Characteristics of multi-layer multi-stage porous plate system with polarization charging mechanism, experimentally. The experiment is carried to analyze the characteristics of pressure drop and collection efficiency for the present system with the experimental parameters such as applied voltage, inlet velocity, inlet concentration and stage number, etc. In results, the pressure drop becomes 18 to 134 mmH₂O, with increment of stage number (1 to 5) at inlet velocity $v_{in} = 3.11$ m/s ($v_t = 18$ m/s) and inlet concentration 3 g/m³ for inflow current. In case of both applied voltage 0 kV and non-inflow current, the collection efficiency of 5 stage is 92.5% at $v_{in} = 2.58$ m/s ($v_t = 15$ m/s), while it is estimated that the collection efficiency becomes about 6% higher than that of 0 kV and non-inflow as 98.5% at $v_{in} = 2.58$ m/s for both alternating polarization charge (applied voltage 2.5 kV) and inflow current system.

Key Words : Multi-layer Multi-stage Porous Plate, Polarization Charge, Collection Efficiency, Pressure Drop

요약 : 본 연구의 주 목적은 다층 다단 다공성 시스템에 편극전하 방식을 부가하여 본 시스템의 집진특성을 실험적으로 해석 하는데 있다. 본 시스템의 압력손실 및 집진효율 특성 해석을 위해 실험은 인가전압, 시스템 유입유속, 유입농도 및 stage 수 등의 실험적 변수들에 의해 수행된다. 실험결과, 기류유입 시 유입유속 $v_{in} = 3.11$ m/s에서 단(stage) 수 변화(1→5단)에 따라 압력손실은 18~134 mmH₂O를 나타낸다. 인가전압 0 kV 및 기류유입이 없을 때, 시스템 유입유속 $v_{in} = 2.58$ m/s인 경우 5 stage 에서 집진효율은 92.5% 인 데 비해, 동일 유속에서 플레이트 별 편극전하(alternating polarization charge-applied voltage 2.5 kV) 및 기류유입 시스템인 경우 5 stage 효율은 98.5%로 전자에 비해 6% 정도 매우 높은 효율 상승을 보인다.

주제어 : 다층 다단 다공성 플레이트, 편극전하, 집진효율, 압력손실

1. 서론

대기오염의 심각성으로 인해 대기오염물질 배출규제가 더욱 더 강화되어짐에 따라 각 산업체에 설치되어 있는 대기 오염방지시설의 교체 및 보안을 위한 저비용·고효율 집진 장치의 개발이 절실히 요구되고 있으며, 이에 따른 연구개발이 국내·외적으로 활발히 진행되고 있다.

일반적으로 산업시설에서는 여과집진장치와 전기집진장치가 사용되고 있다. 그 중 여과집진장치는 기존 산업시설에서 가장 많이 쓰이고 있으며, 미세입자에 대한 집진효율이 높고 배기가스 내에 포함되어 있는 유해입자와 여러 형태의 입자를 집진할 수 있는 장점이 있으나 여과속도가 낮아 장치의 소요면적이 많이 요구되고 배출가스 온도에 따라 여재선택에 대한 제한성, 필터의 폐쇄로 인한 짧은 필터교체주기 및 과도한 압력손실, 탈진에 소요되는 동력비용이 크다는 단점이 있다. 전기집진장치는 낮은 압력손실로 대용량의 배기가스 처리가 가능하고 단순한 구조로 유지 및 보수가 용이한 장점이 있지만 고효율을 얻기 위해서 많은 집진면적이 필요하고 이에 대해 장치의 대형화가 요구되는 단

점이 있다. 따라서 이러한 문제점들을 개선하고 성능향상을 위한 연구가 필요하다. 본 연구에서 수행하는 다층(복층) 다단 다공성 플레이트 시스템은 먼지를 함유한 가스가 튜브를 통과하면서 높은 속도의 분사류를 형성하여 다음 단(stage)의 블랙홀을 향하게 되며, 이 때 높은 관성력의 먼지 입자는 기류를 이탈하여 집진면의 블랙홀을 통해 복층의 블랙박스 내에 포집된다(Fig. 1). 이 때 집진효율을 증대시키기 위해 입팩션(impaction)효과가 중요 메커니즘인 다층 다단 다공성 플레이트 시스템에 편극전하를 부가하는 유전체 방식을 도입하여 필터에 의존하지 않으면서 고효율을 유지할 수 있는 시스템을 연구·개발 하는 것이 본 연구의 중요 목적이다. 본 시스템의 다공성 플레이트는 다층(복층) 다단(5 stage)으로 구성되며, 이웃하는 플레이트 및 단(stage)에 직류 전압을 인가해서 단(stage) 수를 증가시킬 때 마다 절연체를 지그재그로 설치하여 양극 또는 음극의 서로 다른 극성에 의해 편극현상을 부가하였다(Fig. 3). 또한 편극전하 부가에 의한 정전기력으로 미세입자를 포집하고, 전기력에 의한 포집효과를 더욱 증대시키기 위해 블랙박스내로 기류유입을 유도하여 기류와 함께 유입된 미세먼지가 일

[†] Corresponding author E-mail: sjyoo@pknu.ac.kr Tel: 051-629-6526 Fax: 051-629-6523

부 포집될 수 있도록 시스템을 구성하였다.¹⁾

따라서 본 시스템은 입자의 관성력과 편극현상에 의한 정전기력을 이용하여 집진 효율을 증가시킬 수 있으며 기존의 집진장치에 비해 장치의 소형화가 가능하고 높은 처리유속에 의한 대용량의 배기가스를 처리할 수 있을 것으로 기대된다. 더욱이, 필터를 사용하지 않으므로 필터 교체에 대한 비용을 절감할 수 있는 장점을 가질 것이라고 판단된다.²⁻⁴⁾ 본 연구에서는 입력전(impaction) 효과에 편극전하방식을 부가한 다층 다단 다공성 플레이트 시스템의 특성 분석을 위하여 stage 수, 유입유속(튜브 통과유속), 편극전하 부가 및 기류유입에 따른 압력손실 및 집진효율의 특성에 대한 실험적 해석을 수행하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1. 실험장치

본 시스템은 실험장치 본체, 먼지공급장치, 편극전하 및 기류유입방식을 부가한 다층 다단 다공성 플레이트, 인가전압을 공급하는 전압 발생장치, 처리가스가 통과하는 덕트 유로 및 처리유량을 조절하는 흡입 송풍기와 계측시스템으로 구성된다. 유입유속과 압력손실은 각각 Anemometer (model 6162, Kanomax LTD.), Differential Pressure Transmitter (midi LOGGER GL800, GRAPHTEC.)를 사용하여 측정하였고, 집진효율은 중량법(gravi-metric method)을 사용하였다.

Fig. 1은 다층(복층) 다공성 플레이트 시스템에서 입력전(impaction) 효과에 의해 먼지 입자가 블랙박스 내에 포집되는 과정을 나타낸 것이다. 입자를 포함한 기류가 유입될 때 충분한 관성을 가진 입자는 기류를 이탈하여 블랙홀을 통하여 블랙박스 내로 유입되어 포집된다.⁸⁾ 포집되지 않은 미세입자는 기류를 따라 다음 stage로 이동하는데 블랙박스 내로 기류유입을 의도적으로 유도하여 다음 stage로 이동

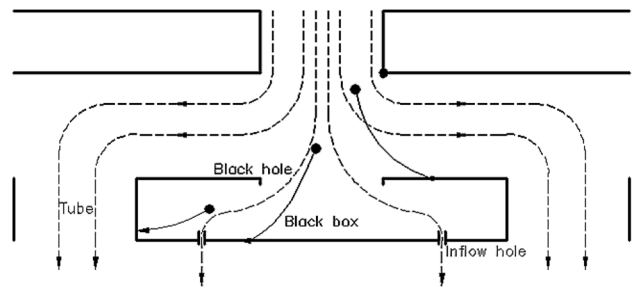


Fig. 1. Schematic diagram of multi-layer porous plate system.

하는 미세입자의 일부를 강제적으로 블랙박스 내로 유입되게 함으로써 미세먼지의 포집효과를 증대시킬 수 있다.^{5,6)}

본 연구는 장치본체에 장착된 다층 다단 다공성 플레이트에 편극전하 방식을 적용하여 압력손실 및 집진효율 특성을 파악하기 위해 실험적으로 수행된다.⁷⁻⁹⁾

Fig. 2는 본 실험장치의 전체 시스템에 관한 모식도를 나타낸다.

Fig. 3에서 본 장치의 다공성 플레이트는 1.2 mm두께의 steel plate (15×18 cm) 및 내경 12 mm tube를 사용하였으며 입력전(impaction) 효과를 증대시키기 위해 다층의 플레이트를 통과하는 튜브는 다음 stage의 블랙홀과 3 mm간격을 유지하며(포집효과증대) 다음 stage의 다층 플레이트를 통과하는 튜브와 교차되도록 하였다.

Fig. 3(a)는 각 stage에서 마주보는 플레이트가 동일 극성을 갖는 stage 별 편극전하(polarization charge)를 적용하기 위해 steel tube로 연결된 stage 상하에 양극과 음극이 유도되도록 전선을 배선하고 전선의 상하에 지그재그 상으로 절연체를 결합하여 설계한 시스템이다.¹¹⁻¹³⁾ 또한 편극전하의 정전기력의 효과를 증대시키기 위해 Fig. 3(b)는 플레이트 별 편극전하(alternating polarization charge)를 적용한 시스템으로서 이는 각 stage를 구성하는 마주보는 플레이트 각각에 다른 전극이 인가되도록 절연 tube로 연결된 플레이트 상하에 절연체를 지그재그로 설치하였다.¹⁴⁾ 블랙박스

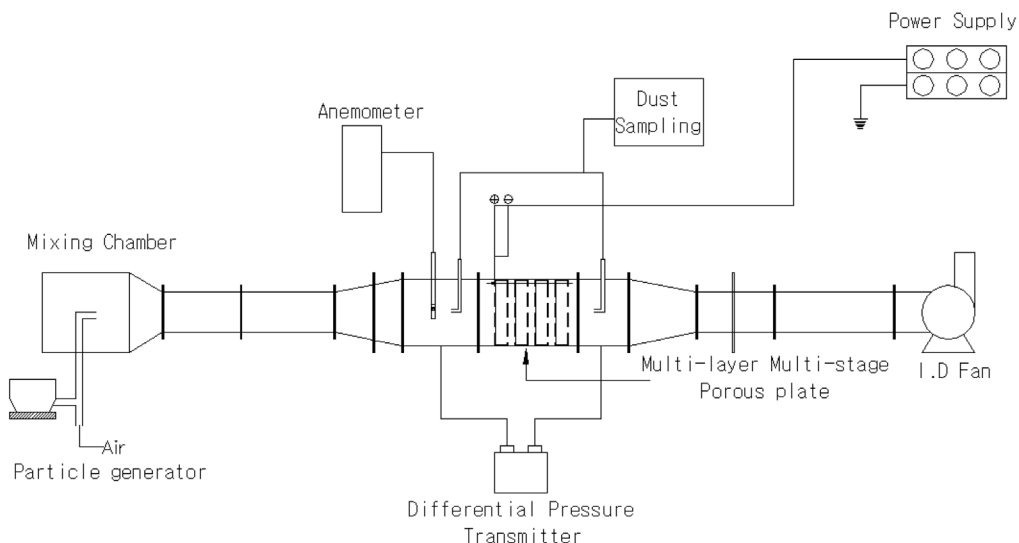


Fig. 2. Schematic diagram of experimental apparatus.

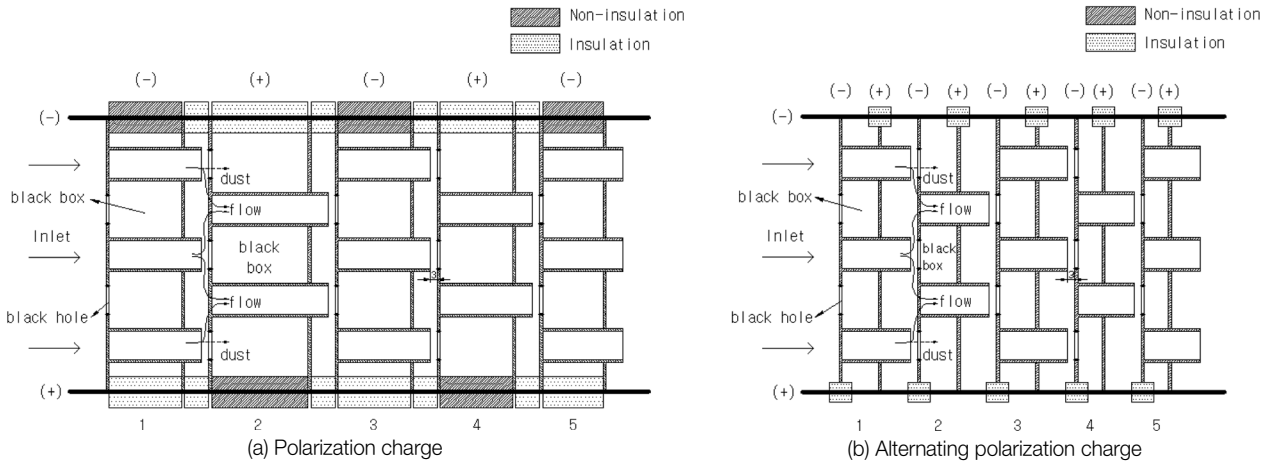


Fig. 3. Schematic diagram of multi-layer multi-stage porous plate system with polarization charge type to impaction effect.

를 구성하는 마주보는 플레이트의 간격은 Fig. 3(a)의 경우 30 mm이며, Fig. 3(b)의 경우 전기장 효과를 높이기 위해 15 mm로 축소 설계되었다.

본 장치의 다층 다단 다공성 플레이트 시스템은 구조적으로 단순하면서도 대유량을 처리할 수 있도록 하였으며, 시스템 유입유속 1.55~3.11 m/s를 적용하여 처리유량 0.73~1.46 m³/min이 되도록 설계하였다. 본 시스템의 특성을 해석하기 위한 실험조건을 Table 1에 나타내었다.

Fig. 4는 기류유입을 유도하기 위해 설계한 각 stage의 후면 플레이트 및 측면 단면도이다. 입자의 임팩션(impaction) 효과에 의해 블랙박스 내로 미세입자를 유입시키는데 한계가 있으므로 각 stage의 후면 플레이트에 내경 4 mm 인 hole을 설계하여 일부 기류는 블랙홀을 통해 블랙박스 내로 유입되어 다음 stage로 이동하도록 하였으며 이 때,

Table 1. Inlet velocity and tube velocity with tube diameter

Tube diameter (mm)	Inlet velocity (m/s)	Tube velocity (m/s)	Flow rate (m ³ /min)
12	1.55	9	0.73
	2.07	12	0.98
	2.58	15	1.22
	3.11	18	1.46

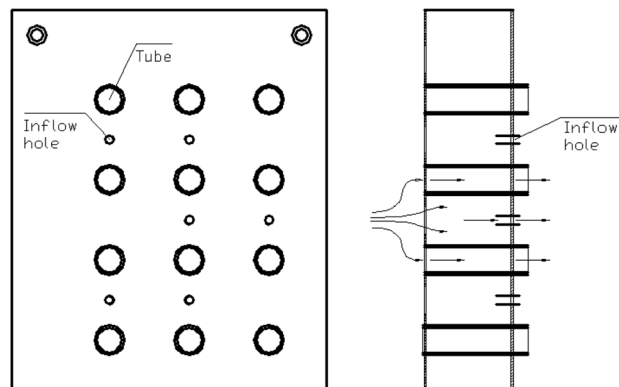


Fig. 4. Schematic diagram of multi-layer porous plate system with inflow current.

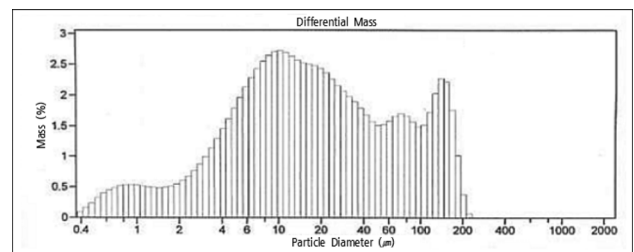


Fig. 5. Size distribution of test dust.

기류와 함께 유입된 미세먼지는 난류확산 및 전기력에 의해 블랙박스 내에서 포집될 수 있다.^{15,16)}

2.2. 실험용 먼지

실험에 사용한 먼지는 국내 석탄 화력발전소에서 채취한 fly ash를 사용하였으며, Fig. 5는 Laser Diffraction Particle Size Analyzer를 사용하여 먼지의 입경분포를 측정된 것이다. 먼지의 입경범위는 0.4~200 μm의 범위를 가지며, 질량 기준 평균 입경은 38.06 μm로 나타났다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 압력손실 특성

다층 다단 다공성 플레이트 시스템의 stage 수에 따른 압력손실은 집진 효율과 더불어 시스템 설계의 중요 인자가 된다. 본 시스템의 압력손실에 영향을 미치는 주요 실험변수로 유입유속(튜브 통과유속), stage 수, 플레이트 간격을 들 수 있다. 압력손실은 다음과 같이 표현될 수 있으며, 이들 변수에 따라 압력손실 특성이 변화 될 수 있다.

$$\Delta P = P_n - P_{n+1} = f(\rho v_i^2, d_i, etc) \quad (1)$$

여기서, P_n 및 P_{n+1} 은 각각 플레이트 전단부 및 후단부에서의 압력, ρ 는 가스밀도, v_i 는 통과유속, d_i 는 플레이트간의 간격을 의미한다.

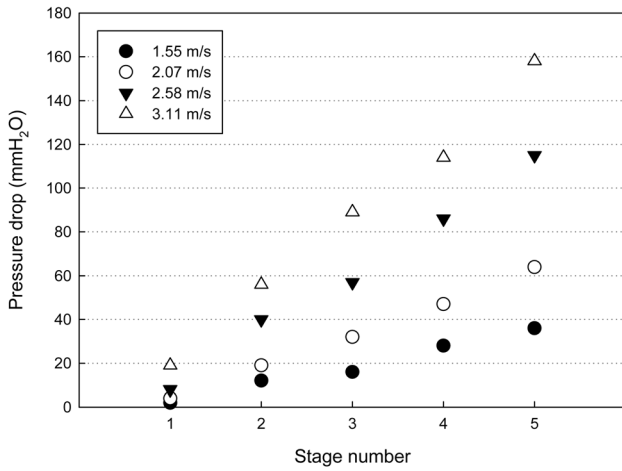


Fig. 6. Pressure drop with increasing stage number and inlet velocity.

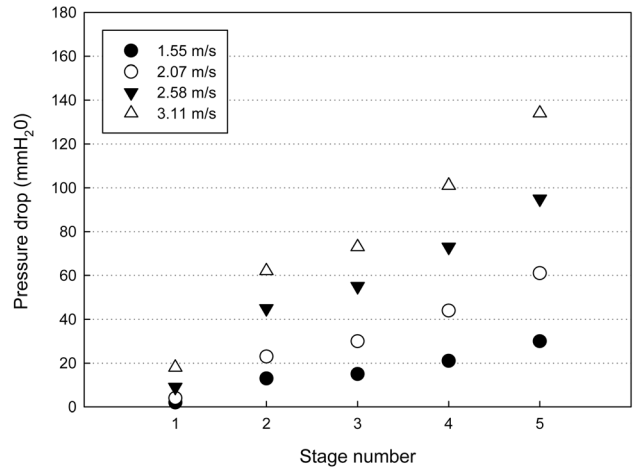


Fig. 7. Pressure drop with increasing stage number and inlet velocity for inflow current.

3.1.1. 단(stage) 수의 증가에 따른 압력손실 특성

Fig. 6은 임팩션(impaction) 효과가 중요 메커니즘으로 적용되는 경우(정전기력, 기류유입효과가 적용 안되는 경우)에서 시스템 유입유속 $v_{in} = 1.55, 2.07, 2.58, 3.11$ m/s(튜브 통과유속 $v_t = 9, 12, 15, 18$ m/s)에 대해 stage 수 증가(1→5단)에 따른 압력손실 변화 특성을 나타낸 것이다. 유입유속 $v_{in} = 1.55$ m/s ($v_t = 9$ m/s)인 경우 2, 12, 16, 28, 36 mmH₂O, $v_{in} = 2.07$ m/s ($v_t = 12$ m/s)에서 4, 19, 32, 47, 64 mmH₂O, $v_{in} = 2.58$ m/s ($v_t = 15$ m/s)에서 8, 40, 57, 86, 115 mmH₂O, $v_{in} = 3.11$ m/s ($v_t = 18$ m/s)에서 19, 56, 89, 114, 158 mmH₂O로 stage 수 증가에 따라 장치저항이 커지면서 압력손실은 증가하며, 유입유속(즉, 처리유량)이 높을 때 압력손실 증가구배는 커짐을 알 수 있다. 또한, 각 stage 수에서 유입유속이 증가할 때 식 (1)에 의해 압력손실은 유속의 자승에 비례하여 증대됨을 알 수 있다.

3.1.2. 기류유입을 유도했을 때 단 수의 증가에 따른 압력손실 특성

Fig. 7은 Fig. 4에서 보는 바와 같이 다층(복층) 플레이트 시스템에서 후면 플레이트에 다수의 홀을 형성하여 블랙박스 내에 기류유입을 유도했을 때 Fig. 6과 동일 실험조건에서 stage 수 증가에 따른 압력손실 특성을 나타낸 것이다. Fig. 6의 실험결과와 유사하게 유입유속 및 stage 수 증가에 따라 압력손실은 증가하며, 유입유속 $v_{in} = 3.11$ m/s ($v_t = 18$ m/s)에서 stage 수(1~5단)에 따라 18, 52, 73, 101, 134 mmH₂O를 나타낸다. 동일 실험조건에서 블랙박스 내로 기류유입을 유도하지 않을 경우와 비교하여 압력손실은 각 stage에서 낮게 나타남을 알 수 있으며, 5 stage 및 $v_{in} = 3.11$ m/s ($v_t = 18$ m/s)에서 134 mmH₂O로 24 mmH₂O 정도 낮게 나타난다. 이는 기류유입에 의한 유량분산에 의해 튜브 통과 속도가 낮아지면서 통과유속의 자승에 비례하면서 압력손실은 작아지기 때문이다.

3.2. 집진효율 특성

본 실험에서 집진효율 특성을 파악하기 위해 장치 입·출구에서 중량농도를 측정하고 다음 식에 의해 집진효율을 계산하였다.

$$\eta_t = 1 - \frac{m_{out}}{m_{in}} \quad (2)$$

여기서, η_t 는 총괄 집진 효율, m_{in} 는 입구 중량농도, m_{out} 는 출구 중량농도를 나타낸다.

본 시스템에서 집진에 관계되는 주요 변수로는 유입유속, stage 수, 인가전압, 플레이트 전극 배열 등이 있으며 집진 주요 메커니즘은 관성력에 의한 임팩션(impaction) 효과와 미세입자에 대한 난류확산 및 브라운 운동 효과, 집진판에 작용하는 편극전하 정전기력이 있다.

3.2.1. 단(stage) 별 편극전하(polarization charge)를 부가했을 때 단 수 증가에 따른 집진효율 특성

Fig. 3(a)에서 보듯이 각 stage의 2개의 마주보는 스틸플레이트(black box)는 동일 극성을 가지며, stage 별로 극성은 (-), (+)극을 반복하는 지그재그 시스템으로 구성되어 있다. Fig. 8은 Fig. 3(a)의 시스템을 적용한 stage 별 편극전하부가의 유전체 방식으로 인가전압 2.5 kV에서 유입유속 및 stage 수 증가에 따른 집진효율 특성을 나타낸 것이다. 유입유속 $v_{in} = 1.55$ m/s (튜브 통과유속 $v_t = 9$ m/s)에서 집진효율은 stage 수 증가(1→5단)에 따라 62.8, 75.0, 80.4, 84.1, 87.3%로 증가하였으며, $v_{in} = 3.11$ m/s ($v_t = 18$ m/s)에서 84.9, 87.7, 89.3, 93.1, 95.7%로 $v_{in} = 1.55$ m/s인 경우보다 높게 나타남을 알 수 있다. 임팩션(impaction) 효과가 중요 메커니즘인 시스템에서 50% 효율의 절단입경에 대한 식, 즉

$$d_{p,cut} = \sqrt{\frac{9\mu w Stk}{\rho_p c_c V}} \quad (3)$$

으로 표현된다.

여기서, μ = 점성계수(viscosity), w = 튜브의 직경, Stk = Stokes 수, c_c = Cunningham 보정계수, ρ_p = 입자의 밀도, V = 튜브통과유속이다.

식 (3)에서 보는 바와 같이 유속증가에 따라 절단입경 $d_{p,cut}$ 은 감소되며, 즉, 임팩션(impaction) 효과의 증대에 의해 집진효율은 상승함을 알 수 있다. 더욱이, 2.5 kV의 전압을 인가하여 편극전하부가에 의한 정전기력을 형성시켜 미세 입자에 대한 포집효과의 상승으로 인해 5 stage, $v_{in} = 3.11$ m/s에서 95.7% 정도의 높은 집진효율을 나타낼 수 있으며, 인가전압 0 kV, 즉 정전기력이 고려되지 않은 경우의 결과와 비교·분석은 Fig. 9에서 설명된다.

3.2.2. 단 별 편극전하(polarization charge) 유무에 따른 집진효율 특성

Fig. 9는 유입유속 $v_{in} = 3.11$ m/s ($v_t = 18$ m/s)에서 stage 별 편극전하(polarization charge) 유무에 따른 stage 수 증가

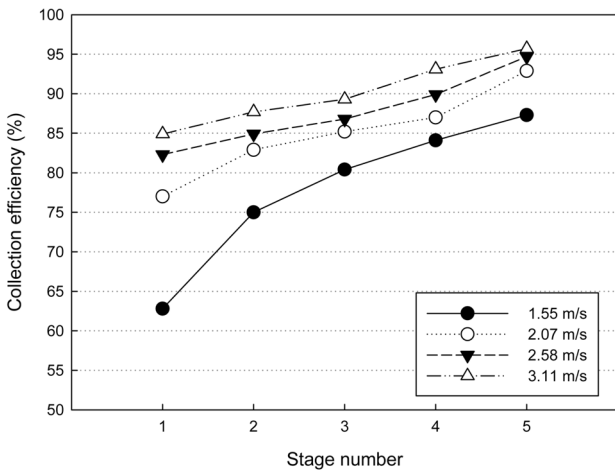


Fig. 8. Collection efficiency with increasing stage number, applied voltage and inlet velocity (fly ash, inlet concentration 3 g/m³, non-inflow current).

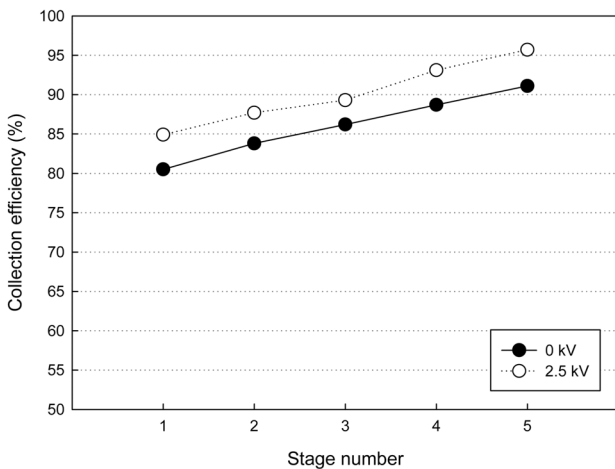


Fig. 9. Collection efficiency with increasing stage number and various applied voltage for non-inflow current (fly ash, inlet concentration 3 g/m³, inlet velocity 3.11 m/s).

에 따른 집진효율 특성을 비교한 그림이다. 편극전하 효과가 고려되지 않은 인가전압 0 kV, $v_{in} = 3.11$ m/s에서 stage 수 증가에 따라 80.5, 83.8, 86.2, 88.7, 91.1%로 인가전압 2.5 kV인 경우 84.9, 87.7, 89.3, 93.1, 95.7%에 비해 5% 정도 낮게 나타남을 알 수 있다. 이는 기류 중에 부유되어 있는 먼지는 인위적으로 대전을 시키지 않아도 (-) 또는 (+) 극으로 하전되어 있는 경우가 많으며, 하전된 먼지입자는 유전체 방식의 편극전하가 부가된 본 장치 시스템에서 쿨롱힘(Coulomb Force)의 전기력에 의해 포집효과가 증대되기 때문이다.¹⁷⁾

쿨롱 힘은 다음과 같이 표현된다.¹⁸⁾

$$F_c = \frac{qQ}{4\pi\epsilon r^2} \quad (4)$$

여기서 q, Q = 각각의 전하(C), ϵ = 유전율, r = 두 전하(q, Q)사이의 거리이다.

3.2.3. 기류유입을 유도했을 때 단 수 증가에 따른 집진효율 특성

Fig. 4는 기류유입을 위한 장치구조도로 2개의 마주보는 플레이트와 튜브로 결합되어 있는 블랙박스의 후면 플레이트에 여러 개의 홀을 형성(재비산 방지를 위해 표면에서 돌출된 홀)시켜 블랙홀을 통해 블랙박스 내부로 유입된 일부 기류는 후면 플레이트의 홀을 통해 다음 stage로 통과할 수 있는 시스템이다. Fig. 10은 Fig. 4의 구조도에서 기류유입을 유도했을 때 유입유속 및 stage 수 변화에 따른 집진효율 특성을 나타낸 그림이다.

그림에서 보듯이, 유입유속 및 stage 수 증가(1→5단)에 따라 집진효율은 상승함을 알 수 있다. 인가전압 0 kV, 유입유속 $v_{in} = 1.55$ m/s ($v_t = 9$ m/s)에서 stage 수(1→5단) 변화에 따라 집진효율은 72.3, 78.1, 80.9, 82.9, 86.4%이며, $v_{in} = 3.11$ m/s ($v_t = 18$ m/s)에서 84.9, 86.3, 87.3, 90.9, 94.1%

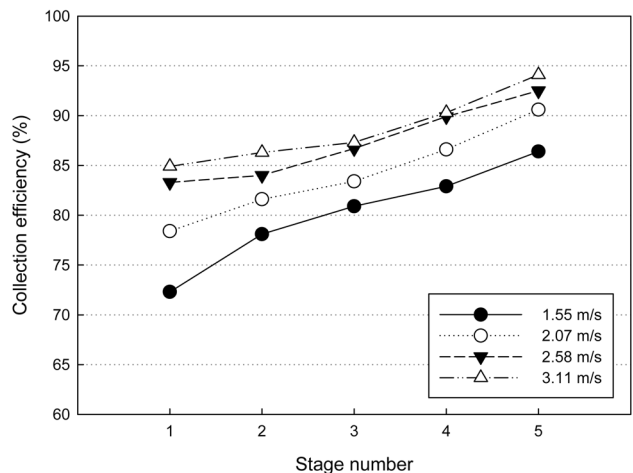


Fig. 10. Collection efficiency with increasing stage and inlet velocity for inflow current (fly ash, inlet concentration 3 g/m³, 0 kV).

로 $v_{in} = 1.55$ m/s인 경우 보다 매우 높게 나타남을 볼 수 있다.

3.2.4. 기류유입 유무에 따른 집진효율 특성 비교

Fig. 11은 인가전압 0 kV, 유입유속 $v_{in} = 3.11$ m/s에서 기류유입 유무에 따른 stage 수 증가에 따른 집진효율을 비교한 그림이다. 기류유입이 없을 때 stage 수 증가에 따라 집진효율은 80.5, 83.8, 86.2, 88.7, 91.1%이며, 기류유입 유도 시 84.9, 86.3, 87.3, 90.9, 94.1%로 기류유입 유무에 따라 4~5% 정도 차이가 나는 것을 알 수 있다. 이는 기류유입이 없을 때는 높은 관성력에 의해 기류를 이탈한 먼지만 블랙홀을 통해 블랙박스 내로 유입되어 포집되지만, 기류유입 시 낮은 관성력에 의해 기류를 벗어나지 못한 미세먼지도 블랙박스내로 유입되는 기류에 편승하여 블랙박스 내에서 일부 포집되기 때문인 것으로 판단된다.

3.2.5. 단 별 편극전하(polarization charge) 및 기류유입 방식 유무에 따른 집진효율 특성

Fig. 12는 stage 별 편극전하(polarization charge) 유무(0, 2.5 kV) 및 기류유입 유무에 따라 유입유속 $v_{in} = 2.58, 3.11$ m/s에서 stage 수 증가에 따른 집진효율 특성을 나타낸 그림이다.

Fig. 12(a)로부터 유입유속 $v_{in} = 2.58$ m/s에서 편극전하 및 기류유입이 고려되지 않은 경우 stage 수 증가(1→5단)에 따라 집진효율은 77.3, 80, 82.5, 87.1, 90.4%를 나타내며, 편극전하 및 기류유입이 도입되었을 때 인가전압 2.5 kV에서 86, 87.5, 87.9, 92.4, 96.5%로 전자에 비해 높은 효율을 나타낸다. 또한 Fig. 12(b)의 $v_{in} = 3.11$ m/s에서(0 kV + non-inflow)의 경우 stage 수 변화에 따라 80.5, 83.8, 86.2, 88.7, 91.1%로 임팩션(impaction) 효과의 증가에 의해 $v_{in} = 2.58$ m/s 의 결과보다 약간 높게 나타나며, (2.5 kV + inflow)의 경우 88.2, 89, 89.7, 93.6, 97.9%로 $v_{in} = 2.58$ m/s에서 편극

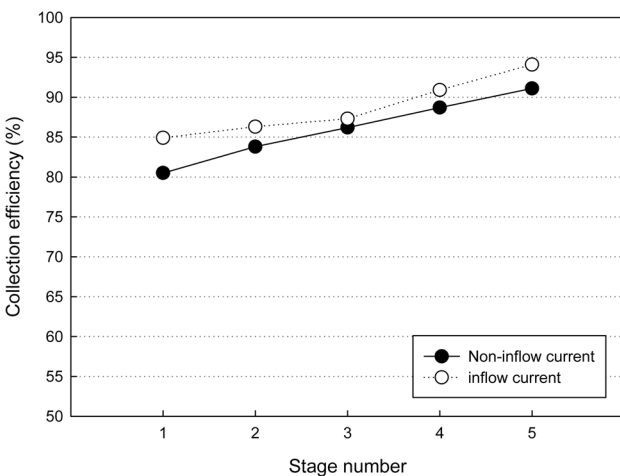


Fig. 11. Comparison of collection efficiency with increasing stage number for non-inflow and inflow current (fly ash, inlet concentration 3 g/m³, 0 kV, inlet velocity 3.11 m/s).

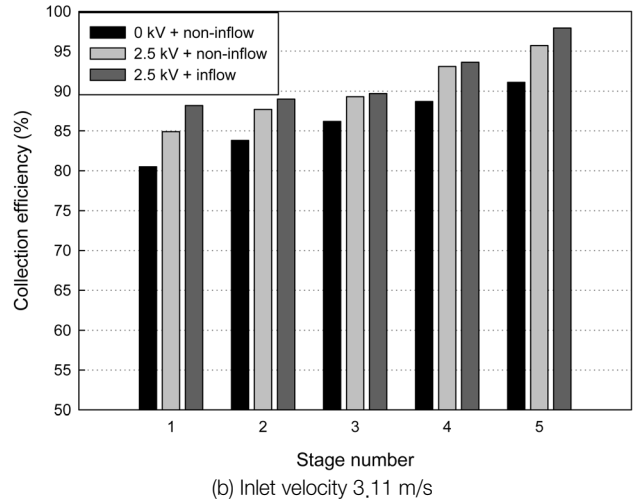
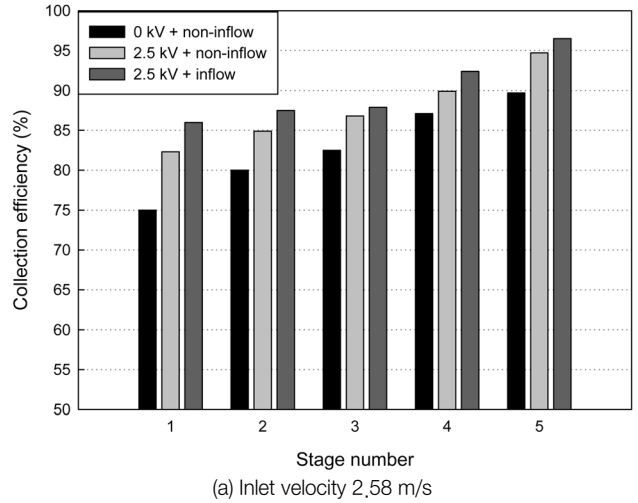


Fig. 12. Collection efficiency with increasing stage and applied voltage for non-inflow and inflow current at inlet velocity 2.58, 3.11 m/s (fly ash, inlet concentration 3 g/m³).

전하 및 기류유입이 도입되지 않은 경우보다 매우 높은 효율을 나타낸다.

더욱이, 5 stage, $v_{in} = 3.11$ m/s에서(0 kV + non-inflow), (2.5 kV + non-inflow) 및 (2.5 kV + inflow)의 경우 집진효율은 각각 91.1, 95.7, 97.9%를 나타내며($v_{in} = 2.58$ m/s에서는 각각 90.4, 94.7, 96.5%), 위의 결과로부터 기류유입 및 편극전하가 집진효율 상승에 중요한 변수로 작용할 수 있다는 것을 알 수 있다.

3.2.6. 플레이트 별 편극전하(alternating polarization charge) 시스템에서의 집진효율 특성

Fig. 3(b)에서 보듯이 각 stage의 마주보는 2개의 스틸 플레이트는 서로 다른 극성을 가지며 플레이트별로 (-), (+)극을 반복하는 시스템으로 구성되어 있다. Fig. 13은 Fig. 3(b)의 장치시스템에서 기류유입 시 인가전압 2.5 kV, 유입유속 $v_{in} = 1.55, 2.07, 2.58$ m/s 에서 집진효율을 나타낸 그림이다. $v_{in} = 1.55, 2.07, 2.58$ m/s에서 집진효율은 78.3, 85.6, 91.2, 95.7, 97%, 83.6, 88.3, 85.4, 96.8, 97.7%, 87, 91.2,

96.6, 98.1, 98.5%로 유입유속 및 stage 수 증가에 따라 효율은 증대되며, 특히 $v_{in} = 2.58$ m/s, 5 stage인 경우 98.5%로 매우 높은 효율을 나타낸다.

Fig. 14는 Fig. 3(a), (b)의 시스템을 적용한 stage 별, plate 별로 극성을 달리하는 편극전하 부가 방식에 따른 집진효율 특성을 비교한 그림이다. 기류유입 방식에서 인가전압 2.5 kV, 5 stage, $v_{in} = 1.55, 2.07, 2.58$ m/s 인 경우 plate 별 편극전하 방식(alternating polarization charging system)에서, 집진효율은 97, 97.7, 98.5%이며, stage 별 편극전하 방식에서 효율은 92, 94.9, 96.5%로 나타나며 전자의 경우 더 높은 효율을 보인다. 이는 플레이트 별 편극전하 방식에서는 먼지가 블랙홀을 통해 포집되는 블랙박스의 마주보는 플레이트가 서로 다른 극성을 가지므로 고전압이 인가될 때 마주보는 플레이트 사이에 걸리는 평균 전기장 강도 $E = V/S$ (여기서 V : Voltage, S : 플레이트간의 거리)로 표현되는 전기장의 효과가 식 (4)의 쿨롱힘(Coulomb Force)에 부가하여

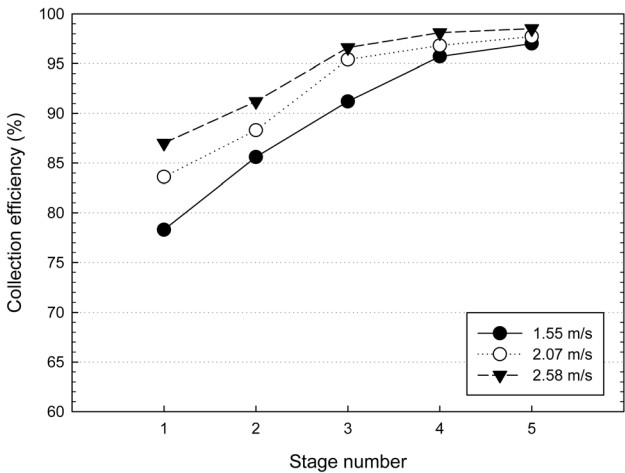


Fig. 13. Collection efficiency with increasing stage for alternating polarization charging system (fly ash, inlet concentration 3 g/m^3 , applied voltage 2.5 kV).

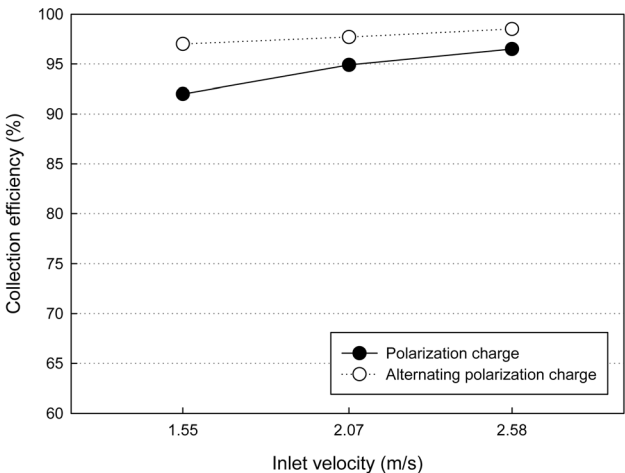


Fig. 14. Collection efficiency with polarization charge type for various inlet velocity (fly ash, inlet concentration 3 g/m^3 , applied voltage 2.5 kV, 5 stage).

전기력 $F_E = qE$ (여기서, q 는 먼지의 하전량)에 의해 블랙박스 내에서 포집되는 효과가 높게 나타나기 때문이다.

4. 결론

편극전하 방식을 부가한 다층 다단 다공성 플레이트 시스템의 집진특성을 해석하기 위해 인가전압, 유입유속, 유입농도 및 stage 수 등의 다양한 실험변수에 따른 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1) 임팩션(impaction) 효과가 중요 메커니즘으로 적용되는 경우(정전기력, 기류유입효과가 적용 안되는 경우)에서 유입유속 및 단 수 증가(1→5단)에 따른 압력손실은 유입유속 $v_{in} = 2.07$ m/s ($v_t = 12$ m/s)인 경우 압력손실은 4, 19, 32, 47, 64 mmH₂O, $v_{in} = 3.11$ m/s ($v_t = 18$ m/s)인 경우 19, 56, 89, 114, 158 mmH₂O로 유입유속 및 단 수 증가에 따라 압력손실은 증가하였으며, 동일 실험조건에서 기류유입을 유도했을 때 $v_{in} = 3.11$ m/s에서 18, 52, 73, 101, 134 mmH₂O로 5 stage에서 전자에 비해 20 mmH₂O 정도 낮게 나타남을 알 수 있다.

2) 본 시스템에서 유입유속 $v_{in} = 3.11$ m/s ($v_t = 18$ m/s), 유입농도 3 g/m^3 , 편극전하가 고려되지 않은 인가전압 0 kV 인 경우 단 수 증가(1→5단)에 따른 집진효율은 80.5, 83.8, 86.2, 88.7, 91.1%였으나 동일 실험조건에서 2.5 kV의 전압을 인가하였을 경우 84.9, 87.7, 89.3, 93.1, 95.7%로 단 별 편극전하 부가에 의한 정전기력을 형성시켜 미세입자에 대한 포집효과의 증대로 인해 효율이 상승함을 알 수 있다.

3) 유입유속 $v_{in} = 3.11$ m/s ($v_t = 18$ m/s), 인가전압 0 kV 및 유입농도 3 g/m^3 에서 기류유입이 없을 때 단 수 변화(1→5단)에 따른 집진효율은 80.5, 83.8, 86.2, 88.7, 91.1%이었으나 기류유입 유도시 84.9, 86.3, 87.3, 90.9, 94.1%로 증가하였으며, 기류유입 유무에 따라 4~5% 정도 차이가 나는 것을 알 수 있다.

4) 단(stage) 별 편극전하(polarization charge) 및 기류유입 방식을 부가한 시스템에서, 인가전압 2.5 kV, 유입유속 $v_{in} = 3.11$ m/s ($v_t = 18$ m/s), 유입농도 3 g/m^3 인 경우 단 수(1→5단)에 따라 집진효율은 88.2, 89, 89.7, 93.6, 97.9%로 인가전압 0 kV, 기류유입이 없는 경우에 비해 높은 집진효율을 보이며 특히, 5단에서 6% 이상의 효율 증가를 나타낸다.

5) 플레이트 별 편극전하(alternating polarization charge) 및 기류유입 시스템에서 인가전압 2.5 kV, 유입유속 $v_{in} = 2.58$ m/s ($v_t = 15$ m/s)인 경우 단 수 변화(1→5단)에 따라 87.0, 91.2, 96.6, 98.1, 98.5%로 고효율을 유지하며 단 별 편극전하 방식(2.5 kV, $v_{in} = 2.58$ m/s에서 86, 87.5, 87.9, 92.4, 96.5%)에 비해서도 높은 효율을 나타낸다.

6) 본 시스템은 필터 사용 없이 고효율을 안정적으로 유지하면서 높은 처리 유속에 의한 대유량 처리가 가능하고, 장치의 소형화에 의한 설치비용 및 유지·관리 측면에서

효과적일 것으로 판단된다.

KSEE

참고문헌

- Jaworek, A. and Krupa, A., "Corona discharge from a multi-point electrode inflow air," *J. Electrostatics*, **38**, 187~197 (1996).
- Kim, H. J., Han, B. W., Kim, Y. J., Yoon, J. P. and Han, K. S., "Performance Tests on ESP with Indirect Discharge and Dielectric Collector," *J. Kor. Soc. Atmospheric Environ.*, 453~454(2008).
- Yang, H. M. and Kim, S. S., "Visualization of Particle Trajectories with Different Particle Sizes in Electrostatic Precipitator," *J. Kor. Soc. Mechanical Eng. (II)*, 191~194(1994).
- Kim, H. J., Han, B. W., Hong, W. S., Shin, W. H., Oh, W. S., Yoon, J. P., Han, K. S. and Kim, Y. J., "Collection of Submicron Particles via an ESP with Electrostatic Dielectric Collectors," *J. Kor. Soc. Atmospheric Environ.*, 559~560(2009).
- Parcker, C. R., "Aerosol science and technology," McGraw-Hill Inc., 131~132(1993).
- Swanson, P. D., Muzzio, F. J., Annappagada, A. and Adjei, A., "Numerical analysis of motion and deposition of particles in cascade impactors," *Int. J. Pharmaceutics*, **142**, 33~51(1996).
- Daniel, M., Pierre, P. and Marcel, B., "A Versatile Flat-Deposit Impactor-Type Aerosol Collector, Part 1 : Design and Qualitative Study," *Aerosol Sci.*, **31**, 323~337(1999).
- Bae, G. N., Ji, J. H. and Moon, K. C., "Collection characteristics of a MOUDI cascade impactor for coarse particles," *J. Kor. Soc. Atmospheric Environ.*, **15**(6), 799~804 (1999).
- Ji, J. H., Bae, G. N. and Hwang, J., "Design and Performance Evaluation of a Three Stage Impactor," *Kor. Soc. Atmospheric Environ.*, **17**(6), 441~450(2001).
- Novick, V. J. and Alvarez, J. L., "Design of a Multistage Virtual Impactor," *Aerosol Sci. Technol.*, **6**, 63~70(1987).
- Kim, J. I. and Yoa, S. J., "An Experimental Study on Characteristics of Electrostatic Bag Filter with Precharging Type," *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, **20**(1), 93~106(1998).
- Park, J. Y., Han, S. B. and Park, S. H., "A Study on the Effect of Magnetic Field in Electrostatic Precipitator for improving Precipitation Efficiency of Particulate Matter," *J. Kor. Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, **22**(12), 122~129(2008).
- Kim, J. I. and Yoa, S. J., "Investigation of Characteristics of Electrostatic Bag Filter with Discharge Electrode Shapes and Filter Properties," *J. KAPRA*, **14**(3), 237~250(1998).
- Kasap, S. O., "Principles of Electronic Materials and Devices-3rd Edition," New York, McGraw-Hill(2005).
- Klaus Willeke, Xuejun Lin, and Sergey A. Grinshpun, "Improved Aerosol Collection by Combined Impaction and Centrifugal Motion," *Aerosol Sci. Technol.*, **28**, 439~456(1998).
- Lee, K. M., Jo, Y. M. and Li, K., "Theoretical Study on the Electrostatic Effect for Aerosol Filtration," *J. Kor. Soc. Waste Manage.*, **26**(1), 52~58(2009).
- Oglesby, S. and Nichols, G. B., "Electrostatic Precipitation Technology," New York, Marcel Dekker Inc.(1978).
- 안병원, 엄상오, "전기공학개론," 효성출판사(1999).