한국에너지공학회지(2003), 제12권 제3호
Energy Engg. J(2003), Vol. 12, No. 3, pp. 207~215

음파에너지가 전기 집진기의 집진 효율에 미치는 영향

정상현 · 홍원석 · 김용진 · 심성훈
한국기계연구원 환경기계기술연구부
E-mail : shjeong@kimm.re.kr

The Effect of Acoustic Energy on the Collection Efficiency of the Electrostatic Precipitator

S.H. Jeong, W.S. Hong, Y.J. Kim and S.S. Shim
Korea Institute of Machinery & Materials, Yuseong, P.O. Box 101, Daejeon 305-343, Korea

요 약

음파 에너지가 인가된 상태에서 전기집진기의 성능 변수 변화에 따른 집진 효율 특성에 대한 실험적인 연구를 수행하였다. 실험을 위하여 주파수 2 kHz 및 음압 141 dB의 음파 에너지를 2단 전기집진기로 유입되는 함진 가스에 인가하였으며, 인가되는 고전압의 크기를 일정하게 유지하고 집진부에서의 가스 유속의 변화를 실험 변수로 사용하였다. 실험의 결과, 음파에너지의 인가에 의하여 전기집진기의 집진 효율은 증가하였으며, 또한 집진효율의 증가 경향은 집진부에서의 가스 유속이 증가할수록 뚜렷하게 나타남을 보였다. 이 결과로부터 음파에너지는 전기집진기의 비집진 면적을 증가시키는 효과로 나타남을 알 수 있었다.

Abstract — An experimental study on the characteristics of collection efficiency for electrostatic precipitator under the action of acoustic energy in the gas stream was performed. In the experiment, the acoustic energy which has 2 kHz and 141 dB was applied to electrostatic precipitator inlet, and the test parameters were used in terms of the magnitude of gas velocity. From the results of experiment, the collection efficiency of ESP was increased due to acoustic energy, and this effect was much clearer at high velocity. This means that the acoustic energy can play an important role in the enlargement of specific collection area of the electrostatic precipitator.

1. 서 론

화력발전소, 소각로 및 일반 산업체 등에서 배출되는 배출가스 속에 포함된 다양한 크기 분포를 가지는 미세한 입자군인 입자상 오염물은 대기오염의 주된 요인이 된다.

이와 같은 입자상 오염물질을 포집하기 위한 집진 장치는 유동 및 외기의 조건, 입자의 종류 및 농도 등에 따라 다양하게 설계되며, 여러 가지의 요인에 의하여 그 성능이 결정될 수 있고, 특히 집진 대상 입자의 직경은 집진 성능에 영향을 미치는 매우 중요한 변수 중의 하나이다.

일반적으로 입자의 직경이 큰 경우에는 집진이 용이하여 집진기의 고효율 설계 필요성이 낮아지나, 입자의 직경이 작은 경우에는 상대적으로 집진기 고효율 설계의 필요성이 높아지고 집진 장치의 제작 원가를 상승시키는 요인이 된다.

화력발전소 등에서 배출되는 대유량의 가스 중에 포함된 분진의 제거를 위하여 가장 많이 사용되는 전기집진기의 경우, 직경이 약 2~3 μm 이상 크기의 입자들에 대하여는 매우 높은 집진 효율을 나타내는 반면, 직경이 1 μm 이하 또는 부근 입자들의 집진에는 성능 감소가 크게 나타나는 경향이 일반적이다.

이와 같은 입경 영역의 분진에 대한 성능 감소를 방지하기 위한 방안으로 방전극에 인가되는 고전압의 크기를 증가시켜 전기력을 증가시키거나, 또는 집진극의 총

면적과 처리 유량과의 비로 정의되는 성능 변수인 비집진면적(SCA : Specfic Collection Area)을 증가시키는 것이 일반적인 방법이지만, 두 경우 모두 전력 소모 및 제작 단가의 상승 등 경제성 측면을 고려하여야 한다.

한편 전기집진기의 집진 효율을 상승시키는 또 다른 방안은 집진기로 유입되는 분진 입자의 직경을 증가시키는 것이다. 즉 동일한 인가 전압의 조건에서 집진 대상 입자 직경 증가는 입자에 대전되는 총 전하량의 증가로 나타나고, 이로 인한 입자와 집진극 사이에 작용하는 전기력 증가에 의하여 집진 성능이 향상된다.

한편, Andrade[1], St. Clair[2], Stokes[3] 등은 미소 입자가 부유된 공간에 음파에너지를 인가하면 미소 입자들은 응집이 된다는 음파 응집의 단순 현상에 대한 초기의 기초적인 연구를 수행하였으며, 이후 미세 입자를 포함하고 있는 함진 가스 유동에 음파에너지를 인가하면, 음파에 의한 진동으로 직경이 서로 다른 입자들은 서로 다른 크기의 병진 운동을 하고, 이로 인한 입자 사이의 상대 운동은 입자 상호간을 충돌시켜 응집이 되는 과정인 충돌 및 응집 모델에 대한 연구가 Mednikow[4]에 의하여 체계적으로 수행되었다.

음파에너지에 의한 미소 입자 응집의 결과로 응집체의 평균 직경은 증가하며, 이것은 결국 입자군 전체의 평균 직경이 증가된 효과로 나타날 수 있다.

이와 같은 음파 응집에 의한 입자 직경의 증가 효과 집진기에 적용하면, 집진 성능 증가에 기여 할 수 있으며, 이와 같은 분야에 대한 연구로, Volk와 Moroz[5]는 탄소입자 및 비산분진 등을 대상으로 음파압력 100~120 dB, 주파수 1,000~6,000 Hz, 분진부하 0.5~2 g/m^3, 그리고 노출시간 10~40 sec의 범위에서 음파에 의한 각각 미세 입자의 응집 현상에 대한 연구를 수행하였다.

한편 Braxton Corporation(U.S.A)[6]에서는 EPA의 지원을 받아 저주파 고출력(360 Hz, 165 dB)의 음파 조건에서 큐포라(Cupola)에서 발생된 평균 직경 4 μm의 분진과 화력발전소로부터 발생된 평균직경 6 μm의 비산분진(fly ash)을 대상으로 음파 응집에 대한 연구의 수행결과 낮은 주파수에서는 비록 음파의 압력이 높더라도 입자의 응집 효과는 크게 나타나지 않음을 보였고, George와 Reethol[7]은 일반적인 화력발전소 비산 분진의 응집에 필요한 적정 주파수는 2,500 Hz~3,000 Hz가 적당하다는 연구의 결과를 제시하였다. 한편 Magill[8] 등은 21 kHz의 초음파 에너지를 전기집진기의 가스 흐름에 인가하여, 전기집진기의 집진 효율이 증가하는 경향에 대한 실험적인 연구를 수행하였다.

일반적으로 전기력에 의한 입자의 이동 속도와 비집진 면적은 전기집진기의 집진 효율을 결정하는 매우 중요한 변수가 되며, 입자의 이동 속도의 크기는 집진기에 인가되는 전기력의 크기에 관계되고, 비집진 면적은 집진기의 처리 유량에 직접적인 관계를 가지는 변수이기 때문에, 집진기의 성능은 물론이고, 설치 제작원가에도 크게 영향을 미치는 성능 변수이다.

본 연구에서는 2단 전기집진기를 대상으로, 집진부로 유입되는 함진 가스 흐름에 음파 에너지를 인가하여, 음파에 의한 입자의 응집이 집진부 유속 증가 즉 비집진 면적의 감소로 인한 집진 효율 저감 방지 수단으로 활용될 수 있는 기초 데이터의 확보를 위한 실험적인 고찰을 하고자 한다.

2. 이론적 배경

미세 입자를 포함하고 있는 기체 유동 속에 평면 음파(Plane wave)가 조사되는 경우, 입자에는 방사 압력, 점성 변화 등의 선형적 또는 비선형적인 힘들이 단독 또는 복합적으로 작용하고, 입자는 초기의 위치로부터 이탈하여 병진 운동을 할 것이다. 이때 입자들의 직경이 서로 다른 경우에 각각의 입자들은 서로 다른 크기의 병진 운동을 할것이며, 이 결과 입자들 상호간의 충돌이 일어나고 이와 같은 현상을 orthokinetic interaction이라 한다. 음파장에 존재하는 입자들은 orthokinetic interaction에 의한 상호 충돌에 의하여 초기의 응집이 일어나며, 초기 응집 이후의 직경이 증가된 응집체들은 음파장에서의 기체 흐름, 방사 압력의 크기 등에 의하여 2차적인 응집이 일어나고 이와 같은 현상을 hydrodynamic interaction 이라 한다.

음파장에서 입자들의 상호 충돌 과정에는 음파의 주파수, 음파 압력, 입자의 입경 분포 및 농도 등에 복합적인 영향을 받으며, 각각의 충돌 변수 상호 간의 모델에 대한 연구들이 수행되고 있다(Shaw 등[9]; Song과 Koopermann[10]; Hoffman과 Kooperman[11]; Hoffman[12]).

음파에 의한 응집은 입자가 유동을 추종하는 정도 및 입자 사이의 상대 운동이 주된 요인이라는 기본적인 개념을 근거로 하면, 작은 입자는 큰 입자보다 더욱 음파장에 쉽게 추종되어 큰 상대 운동을 일으켜 큰 입자와의 충돌 기회가 증가할 것이며, 이와 같은 미소 입자의 상대운동에 대하여 간단히 언급하면 다음과 같다.

만일 점성이 고려된 정상 상태의 가스 흐름속에서 운동하는 입자의 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m_p \frac{du_p}{dt} = -6\pi\mu r(u_g - u_p) \quad (1)$$

식 (1)에서 m_p는 입자의 질량, u_p는 입자의 속도, r는 입자의 반경, μ는 유체의 동점성 계수이며, $(u_g - u_p)$는 입자와 가스 사이의 상대운동이다. 식 (1)을 다시 쓰면 다

음과 같이 되며,

$$\frac{du_p}{dt}=-\frac{u_p-u_g}{\tau} \quad (2)$$

여기서 τ는 식(3)과 같이 표시되는 이완시간(Relaxation time)을 나타낸다.

$$\tau=\frac{2}{9}\frac{\rho_p r^2}{\mu} \quad (3)$$

만일 음파 진동으로 인한 가스의 속도가 식(4)와 같이 단일 파장의 운동으로 가정하고, 관성 항은 무시하면, 정상 상태의 입자의 속도는 식(5)와 같이 된다.

$$u_g=u_o\sin(\omega t) \quad (4)$$

$$u_p=\frac{u_o\sin(\omega t-\phi)}{\sqrt{1+\omega^2\tau^2}} \quad (5)$$

식(4)와 식(5)로 부터 입자와 가스 속도의 비를 비산 계수(coefficient of reentrainment)로 정의하고 다음과 같이 나타낸다.

$$\alpha=\frac{u_{p_o}}{u_o}=\frac{A_p}{A_g}=\frac{1}{\sqrt{1+\omega^2\tau^2}} \quad (6)$$

여기서 α는 비산계수, u_{p_o}, u_o는 각각 입자의 최대속도 및 가스의 최대속도, 그리고 A_p, A_g는 각각 입자의 최대 진폭 및 가스의 최대 진폭을 나타낸다. 비산 계수 α가 1인 경우는 입자가 가스 흐름을 이탈하여 운동한다는 의미이고, 이와 반대로 α가 0인 경우는 입자는 가스 흐름을 추종하고 독립적인 운동은 하지 않는다는 의미이다(Mandikow[4]).

한 예로 Fig. 1은 음파장이 인가된 가스 흐름속에서 입자의 밀도가 2,300 kg/m^{3}인 경우에 대하여 음파의 주파수와 비산계수 α 사이의 관계를 나타낸다. 그림에서

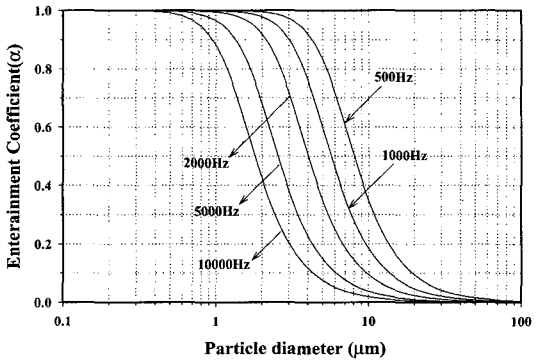

Fig. 1. Enterainment coefficient for various frequencies.

α가 0.5의 값을 가지는 경우의 입자의 직경을 절단직경(cut-off diameter)로 정의하며, 절단직경 보다 작은 입자는 가스 흐름을 추종한다는 의미이다. 즉 입자의 직경이 절단 직경 보다 큰 입자는 음파장에서 정지되어 있고, 절단 직경 보다 작은 입자는 가스 흐름을 이탈하여 운동하며 큰 입자와 충돌하여 Vander Wals 힘에 의하여 상호 응집이 된다.

이와 같이 입자 사이의 상대 운동은 각각의 입자가 서로 다른 비산을 가질 때 최대가 될 것임을 예측 할 수 있다. 따라서 함진 가스 속에 적절한 주파수의 음파 에너지를 인가하면, 작은 입자들은 큰 진폭으로 진동하고, 큰 입자들은 관성 때문에 작은 진폭으로 진동하여, 입자와 입자 사이의 상대 운동을 유발하며, 그 결과 입자들은 상호 충돌하여 응집된다.

3. 실험장치 및 방법

음파 응집이 전기집진기의 성능에 미치는 영향을 실험적으로 고찰하기 위한 장치는 2단 전기집진기, 음파 응집부, 흡입팬, 입자발생기, 함수발생기, 신호증폭기, 고전압 발생장치 등으로 크게 구성되며, 장치의 개략도를 Fig. 2에 나타내었다.

실험에 사용된 입자는 비산 분진(fly ash)를 사용하였으며, 분진 이송장치(screw feeder)를 사용하여 일정량의 비산 분진을 싸이클론 입자발생기로 유입시키고, 싸이클론으로 유입되는 입자 발생용 공기 유량의 조절에 의하여 입자가 싸이클론의 내벽에 부착되지 않고 싸이클론으로부터 배출되는 유동에 포함되어, 음파 발생기의 전단에 설치된 분진 유입구를 통하여 음파 응집부로 유입시켰다.

유입된 비산 분진을 음파 에너지에 의하여 응집시키기 위한 음파 응집부는 1 kHz~6 kHz의 작동 주파수 범위를 가지는 상용 음파발생기(S전자 Model SR-12A300)를 사용하였으며, 음파의 진행 방향과 가스 흐름이 동일한 방향으로 설치하였다. 실험 조건에 적합한 음파의 파형은 함수발생기(Spectra Model 2130)로부터 발생시키고, 발생된 음파 파형의 신호를 신호 증폭기(Lotte Model 2130)에서 증폭 시킨 후 음파 발생기로 공급하여 고에너지의 음파를 발생시켰으며, 음파 발생기로 공급되는 신호의 파형 및 입력 전압의 크기는 오실로스코프에 의하여 계측되어 컴퓨터에 모니터링 되도록 하였다.

또한 음파 발생기로부터 발생되어 응집부로 공급되는 음파에너지는 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 음파 발생기로부터 1.2 m 지점에 설치된 microphone(B&K model 3774)에 의하여 측정하였으며, 측정된 신호는 음파분석기(B&K model 3214)에 의하여 주파수 및 음압(SPL;

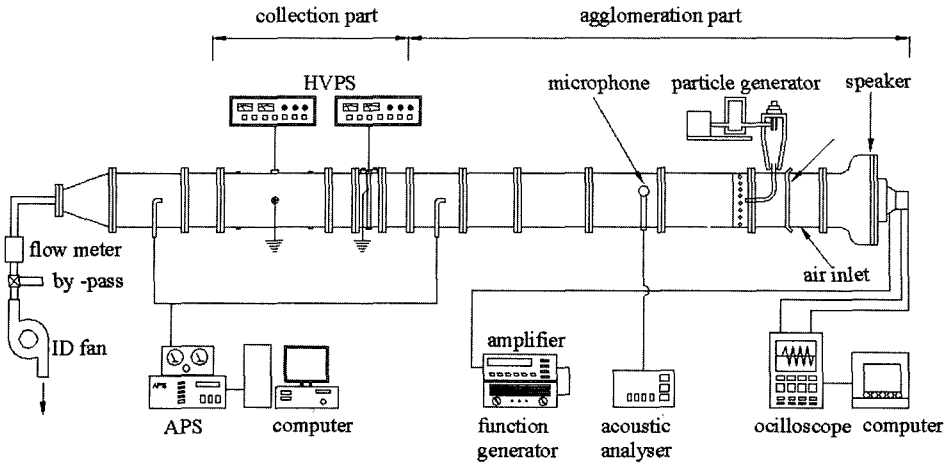

Fig. 2. Schematic of experimental set up.

Sound Pressure Level)을 분석하였다.

음파 에너지에 의하여 비산 분진이 응집되는 부분인 음파 응집부의 설계 시 주어진 음파의 주파수에 대하여 파동 수를 충분히 확보하는 것은 중요한 일이며, 충분한 파동의 확보를 위하여 응집기의 길이가 길 수록 유리 하지만, 음파 발생기로부터 거리의 증가에 따른 음압의 감소 역시 동시에 고려되어야 하고, 또한 음파 응집기가 실제의 집진기에 적용될 경우 응집기의 길이로 인한 제작 단가의 상승 등의 경제적인 면도 고려되어야 한다. 일반적으로 음파 응집기의 길이의 산정은 경험에 의존하는 경우가 많으며, 본 연구에서는 실험 주파수 2 kHz인 경우를 기준으로 하여, 파장의 약 40배를 응집기의 길이로 설계하였다.

실험용 공기는 음파-전기집진기의 후단 출구부에 설치되어 있는 흡입팬의 작동에 의하여, 음파발생기가 설치된 지점으로부터 길이 200 mm의 상, 하, 좌, 우 면이 개방된 공기 유입 통로를 통하여 유입된다. 공기 유량의 조절은 흡입팬의 전단부에 설치된 2방향 밸브(by-pass)의 개폐에 의하여 조절하였으며, 직관식 공기 유량계를 사용하여 공기량을 측정하였다.

실험을 위한 모델 전기집진기는 비산 분진을 전기적 대전을 시키는 하전부와 하전된 분진을 집진하는 집진부로 구성된 2단 전기집진기를 사용하였으며, 전기적 간섭을 제거하기 위하여 하전부와 집진부 사이에 50 mm의 공간을 두었다.

집진부는 길이 0.4 m 높이 0.3 m의 동(copper) 재질의 평행판 집진극을 사용하였으며, 각각의 집진극 사이의 간격은 0.03 m인 2개의 통로로 구성하였다.

집진부로 유입되는 비산 분진을 전기적 대전시키기 위한 하전부는 SUS 재질의 날카로운 모서리(edge)를 가지는 형상의 방전극과 동(copper) 재질의 접지극으로 구성하였으며, 접지극과 방전극 사이의 거리는 0.03 m로 고정하였다.

하전부의 방전극과 집진부의 집진극에는 각각 DC -60 kV, 10 mA, 및 DC +30 kV, 10 mA 사양의 고전압 공급 장치를 사용하여 고전압을 인가하였다. Fig. 3은 2단

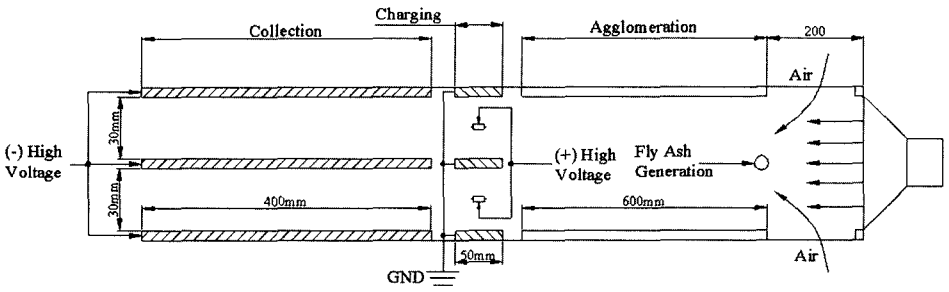

Fig. 3. Schematic of two stage ESP.

전기집진기 및 음파 응집부의 개략도를 나타낸다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 4는 집진부 유속이 1.39 m/s 인 경우, 싸이클론형 입자발생기로부터 발생되어, 집진부로 유입되는 비산분진의 시간의 증가에 따른 수 농도 변화를 나타낸 결과이다. 그림에서 수 농도는 전기집진기의 대전부로 유입되기 전의 측정구에서 입자농도 측정기(APS, TSI Model 3306)를 사용하여 측정을 하였으며, 그림에서 나타나는 바와 같이 입자발생기로 부터 발생되는 입자 농도의 시간에 대한 변화의 폭은 약 ±10% 이내로, 균일하게 공급되고 있음을 볼 수 있다.

본 실험에 요구되는 음파에너지는 다음과 같은 방법으로 생성된다. 먼저 함수발생기에서 음파 파형의 신호를 생성하고, 이때 생성된 음파 신호는 매우 작아 그 상태로 음파 발생기에 공급을 하게되면 음파 발생기로부터 발생되는 음파는 분진을 응집시킬 만큼의 충분한 음파 에너지를 가지지 못한다. 따라서 높은 에너지의 음파를 발생하기 위하여 함수 발생기로부터 생성된 파형을 증폭기(Amplifier)로 유입시켜, 증폭기로부터 나오는 음파의 진폭이 증폭된 출력 신호를 음파 발생기로 공급한다. 이때 증폭기로부터 음파 발생기로 유입되는 신호는 전압의 형태로 나타나고, 이 전압의 크기와 음파 발생기에서 발생된 음파의 압력 사이의 관계를 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이, 음파 발생기의 주파수가 1 kHz인 경우에는 충분한 음파 압력의 발생이 가능하였으나, 상대적으로 매우 높은 소음의 발생으로 실험이 불가능하였으며, 주파수가 4 kHz 및 6 kHz인 경우에는, 음파 응집에 필요한 충분한 음파 압력이 확보되지 않았다. 이와 같은 상용 음파 발생기에서 나타나는 주파수와 음파 압력 사이의 특성으로 인하여, 본 연구에서는 2 kHz의 주파수와 최대 음파 압력을 음파 에너지의 인가 조건으로 설정하고, 전기집진기의 집진부 유속을 변수로 하여 실험을 수행하였다.

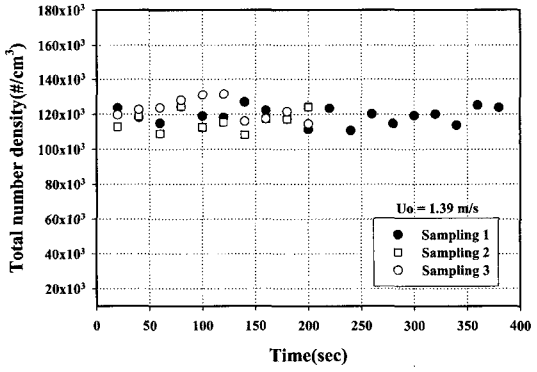

Fig. 4. Time dependency of total number density of generated particles.

Fig. 6은 집진부 유속이 1.39 m/s인 경우 음파 에너지가 인가되지 않은 경우와 주파수 2 kHz 및 음압이 141 dB의 음파 에너지가 인가된 경우에 대하여 집진기 출구에서 비산 분진의 공기역학적 입경 별 수 농도 분포를 나타내었다.

그림으로부터 나타나듯이 음파 에너지가 인가되지 않은 초기 분진의 공기역학적 입경 분포는 약 1~5 μm의 범위를 가짐을 볼 수 있고, 2 μm 정도의 범위에서 최대 분포를 나타낸다.

음파 에너지가 인가된 경우의 공기역학적 입경 분포는 초기 분진의 입경 분포와 유사하게 나타나나, 약 1~6 μm 범위의 입경 영역에서 수 농도가 감소하였음을 볼 수 있다. 그러나 1 μm 이하의 작은 입경 범위의 수 농도는 음파 가진으로 인한 응집 형상이 명확하게 나타나

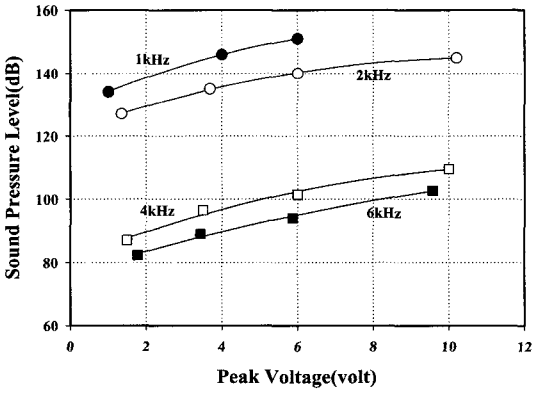

Fig. 5 Relation between the frequency and SPL.

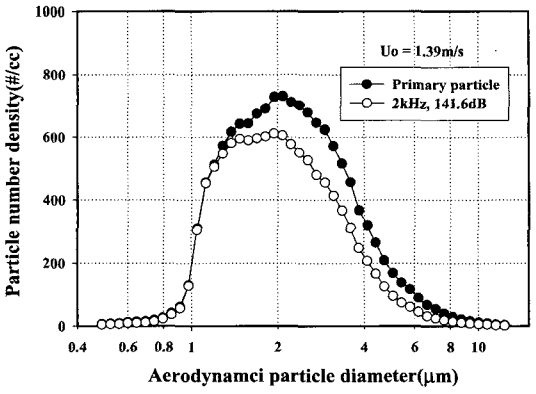

Fig. 6. Size distribution of fly ash at ESP outlet.

지 않으며, 이것은 다음과 같은 이유로 사료된다.

만일 음파 에너지가 인가되는 응집부가 제한된 공간이고, 또한 응집부에서의 유동이 없다면 음파 에너지로 인하여 비산 분진의 전체 입경 영역에서 수 농도의 급격한 감소가 발생될 것이다.

그러나 본 실험에서와 같이 집진기의 유입부로 부터 연속적으로 분진이 공급되어 응집부에서는 지속적인 분진의 유입 및 유출이 형성되고, 이에따라 작은 입경 영역에서는 응집된 입자의 수 농도 감소와 연속적으로 공급되는 분진 입자들이 혼합되어 있기 때문에 작은 입경 범위의 입자들의 수 농도 감소 현상은 명확하게 나타나지 않은 것으로 사료된다.

음파에너지가 전기집진기의 집진부 유속 증가에 따른 집진특성에 미치는 영향에 대한 실험을 위하여, 동일한 인가전압에서 각각의 집진부 유속에 대하여, 음파가 인가되는 경우와 인가되지 않는 경우에 대한 집진 효율을 측정하였으며, 집진 효율의 측정 시에 실험 조건의 불안정성에 대한 오차를 없애고 측정 결과의 신뢰성 확보를 위하여 각각의 실험 조건에 대한 측정 시에 집진판에 부착된 분진을 깨끗하게 탈진하여 전기장의 상태를 최적으로 유지하였다. 또한 집진 실험을 위한 하전부에서의 전압전류 특성은 코로나 발생전압(corona onset voltage)이 약 5.3 kV이었으며, 인가 전압의 크기가 약 20 kV에서 전기적인 스파크가 발생하였다.

따라서 본 실험에서는 안정적인 코로나 발생을 위하여 스파크 전압보다 낮은 인가 전압 18 kV인 양극(+)의 고전압을 하전부에, 그리고 5 kV의 음극(-)의 고전압을 집진극에 인가하여 운전을 하였다.

한편 집진 효율은 식(7)과 같이 정의하였으며, 여기서는 집진기 입구에서의 입자의 입경별 수 농도 분포이고는 집진기 출구에서의 입자의 입경별 수 농도 분포를 나타낸다.

$$\eta = 1 - \frac{N_o(d_p)}{N_i(d_p)} \times 100\ (\%) \qquad (7)$$

Fig. 7은 집진부의 유속이 0.93 m/s인 경우의 음파 에너지의 유무에 대한 각각의 집진 효율 실험의 결과이다. 그림에서 η_{esp}는 음파 에너지가 인가되지 않은 경우의 집진 효율을 나타내고, η_{eap}는 음파에너지가 인가된 경우의 집진 효율을 나타내며, 또한 V1은 방전부에 인가된 전압의 크기이고, V2는 집진부에 인가된 전압의 크기를 나타낸다.

그림에서 나타나는 바와 같이, 집진부 유속이 0.93 m/s(처리유량 100 m^3/h)인 경우 음파에너지의 인가에 의한 집진 효율의 증가는 미미하게 나타남을 볼 수 있으며, 이것은 다음과 같은 이유로 설명 될 수 있다.

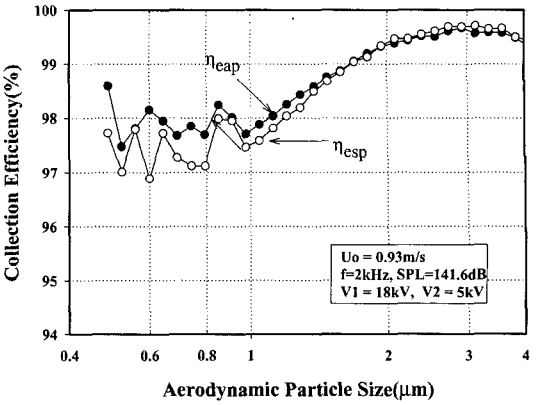

Fig. 7. Effect of acoustic energy on the collection effieicncy (U_o=0.93 m/s).

동일한 크기의 고전압이 인가되는 경우에 전기집진기의 집진 효율은 비집진 면적이 증가 할수록 증가하며, 또한 비집진 면적은 집진부 유속에 반비례한다. 따라서 그림에서와 같이 낮은 집진부 유속의 경우 높은 비집진 면적에 의한 집진 효율의 상승이 입자 직경 증가에 의한 집진 효율 상승에 비하여 상대적으로 크게 나타나고, 따라서 음파 응집에 의한 집진 효율 증가는 뚜렷하게 나타나지 않는다. 즉 다시 말하면 낮은 운전 유속으로 인하여 전기집진기 자체의 집진 효율이 이미 크게 높기 때문에, 음파 응집에 의한 입자의 이동 속도의 증가로 인한 집진 효율이 증가하는 현상은 명확하게 나타나지 않기 때문이다.

집진부의 유속이 1.16 m/s인 경우 음파 에너지가 인가된 경우와 인가되지 않은 경우에 대한 각각의 집진 효율을 Fig. 8에 나타내었다. 그림에서 보듯이 집진부 유속이 0.93 m/s인 Fig. 7의 경우에 비하여 음파 에너지로

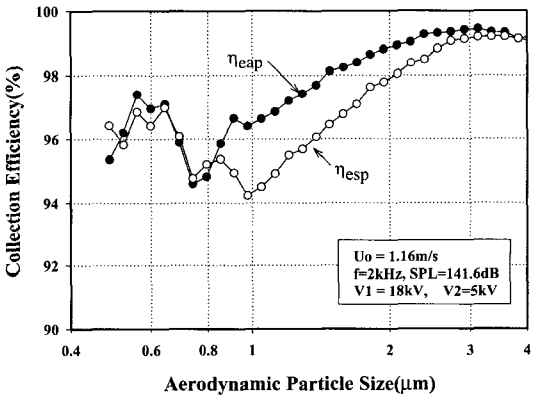

Fig. 8. Effect of acoustic energy on the collection effieicncy (U_o=1.16 m/s).

인한 집진 효율의 증가가 명확하게 나타남을 볼 수 있고, 특히 직경 1 μm 부근의 입자에 대한 집진 효율의 증가 폭이 가장 크게 나타나고 있음을 보인다.

한편 음파 에너지가 인가되지 않은 경우, 입자의 직경이 약 4 μm 부근에서의 전기 집진 효율은 최대치를 보이나, 음파 에너지가 인가된 경우에는 이 범위의 입경에 대한 집진 효율의 증가폭은 1 μm 부근의 입경에 비하여 상대적으로 작게 나타남을 볼 수 있으며, 이것은 다음과 같이 설명 될 수 있다.

음파장 속에서 입자의 상대 운동은 입자의 직경이 작을수록 크고, 따라서 음파 에너지에 의한 응집은 작은 입경 범위의 입자에서 더욱 활발하게 나타나고, 반면에 큰 입경 범위의 입자는 상대적으로 응집 효과가 작아 질 것이다.

동일한 전기장의 세기 및 유속 조건에서 전기집진기의 집진 효율은 입자의 하전량이 증가할수록 증가하며, 입자의 하전량은 입자 직경의 제곱과 전기장의 세기에 비례한다. 따라서 음파 응집에 의하여 증가된 작은 입경 범위의 입자는 직경 증가에 상당하는 전기력의 증가로 집진 효율이 급상승 하나, 큰 입경 범위의 입자는 음파 응집에 의한 입경 증가가 상대적으로 작고, 또한 입경 증가 전의 직경에 대한 하전량이 이미 매우 크기 때문에, 음파 응집에 의한 입경 증가에 상당하는 전기력의 증가로 인한 집진 효율의 상승 분은 상대적으로 작게 나타난다.

Fig. 9는 집진부 유속이 1.39 m/s인 경우, 음파 에너지가 인가된 상태와 인가되지 않은 상태에서 각각 전기집진기를 운전한 경우 입자의 공기역학적 입경 별 집진 효율을 나타낸다. 그림에서 나타나듯이 음파 에너지가 인가되지 않은 경우에 비하여 음파 에너지가 인가된 경우, 전체 입경 영역에 대하여 집진 효율의 상승은 매우 뚜렷하게 나타남을 볼 수 있으며, 특히 공기역학적 입경이 1 μm 부근에서의 집진 효율의 경우 약 77%에서 약 88% 정도로 약 10% 정도 증가하였음을 볼 수 있고, 공기 역학적 입경이 증가할수록 음파 응집으로 인한 집진 효율의 증가폭은 점점 작아짐을 볼 수 있다.

또한 이 결과는 집진부 유속이 약 1.23 m/s, 인가전압의 크기가 -60 kV인 전기집진기의 유입부에 21 kHz, 400 W의 초음파 에너지를 인가한 경우, 최대 수 농도를 가지는 공기역학적 입경에 대하여 약 7~8% 집진 효율이 증가함을 보인 Margil[8]의 연구 결과와 유사한 결과를 나타낸다. 본 연구에서 인가된 음파의 주파수는 2 kHz로 Margil[8]의 실험 조건에 비하여 10배 이상 낮으나, 집진 효율의 증가 결과는 매우 유사한 경향을 보였다는 점은 명확히 설명을 할 수는 없으나, 전기집진기의 집진 효율 증가를 위하여 인가되는 음파에너지의 크기와 전기집진기의 운전 변수 사이의 상관 관계에 기인한 것으로 사료되며, 특히 직접적인 비교는 할 수 없었으나, Margil[8]의 경우와 본 연구에서의 경우 모두 인가된 음파에너지가 400 W와 161 dB로 높은 에너지를 가지기 때문에, 주파수 보다는 인가된 음파에너지가 집진효율 증가에 더욱 크게 작용하였기 때문인 것으로 사료된다. 음파 에너지의 크기에 따른 집진효율의 변화에 대한 향 후 추가되는 실험에 의하여 명확히 분석될 수 있을 것이다.

한편 위의 3가지 유속의 결과에서 입자의 직경이 0.8 μm 이하의 영역에서는 음파에너지에 의한 집진효율의 증가 경향은 뚜렷하게 나타나지 않음을 볼 수 있는데, 이것은 Fig. 6에서 나타낸 바와 같이 본 연구에서 사용된 비산분진의 공기역학적 직경이 0.8 μm 보다 작은 입경 영역에서의 수 농도의 값은 매우 낮으며, 이로 인하여 비록 음파에너지에 의한 응집이 일어났어도 낮은 수 농도로 인하여 집진 효율의 산정 시에 상대적으로 큰 오차를 가지기 때문이다.

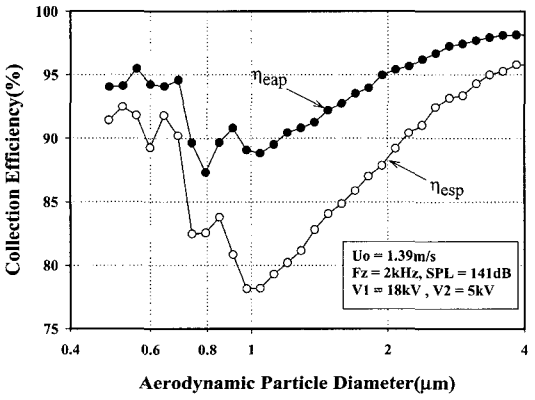

Fig. 9. Effect of acoustic energy on the collection efficiency (U_o=1.39 m/s).

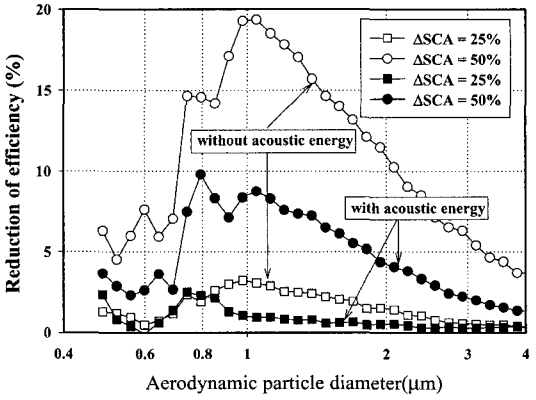

Fig. 10. Effect of acoustic energy on the reduction of SCA.

Fig. 10은 앞의 Fig. 7~9의 결과를 재정리하여, 전기집진기의 비집진면적(SCA) 감소량에 대한 집진 효율의 감소량을 나타낸 결과이다.

그림에서 ΔSCA는 처리 유량 100 m^3/h인 경우의 비집진 면적을 기준으로 하여, 처리 유량의 증가로 인한 비집진 면적 감소량의 백분율을 의미하며, 본 실험에서의 처리유량 100 m^3/h의 조건은 집진부 유속이 0.96 m/s인 경우에 해당된다.

먼저 음파 에너지가 인가되지 않은 경우의 집진 효율은 비집진 면적이 감소 함에 따라 급격하게 감소됨을 볼 수 있으며, 그림에서 나타나듯이 공기역학적 직경이 1 μm 부근의 입경 영역에서 ΔSCA가 25%인 경우 약 2~3%, ΔSCA가 50%인 경우 약 20%의 집진 효율의 감소가 나타남을 볼 수 있다. 이에 비하여 음파 에너지가 인가된 경우에는 ΔSCA가 25% 일 때 집진 효율의 감소량은 약 1~2%, 그리고 ΔSCA가 50%인 경우에는 약 10% 정도의 집진 효율 감소가 나타나, 동일한 크기로 비집진 면적이 감소하였을 때 음파 에너지로 인한 집진 효율의 감소 폭은 크게 작아짐을 볼 수 있다. 따라서 이 점은 음파에너지의 이용은 비집진 면적의 감소로 인한 전기집진기의 성능 저하를 방지하는 방안이 될 수 있음을 의미한다.

한편 본 실험에서와 같이 동일한 집진 면적인 경우, 비집진 면적의 감소는 집진부 유속의 증가를 의미한다. 이와 같은 관점에서 음파에너지의 인가에 의한 전기집진기의 집진 효율 상승 효과은 집진부 유속이 증가함에 따라 더욱 뚜렷하게 나타난다는 점은 흥미로운 일이다. 즉 집진부 유속이 감소하면 응집부 내에서의 입자의 체류시간이 증가하고, 이로 인하여 음파 응집의 효과가 더욱 크게 나타날 것으로 예측될 수 있으나, 이 사실과 반대되는 현상을 나타내고 있다는 점이 흥미로운 일이며, 다음과 같은 이유로 사료된다.

먼저 전기집진기의 집진 효율은 일반적으로 식(8)과 같이 나타낼 수 있으며, 여기서 SCA는 비집진 면적의 크기를 나타내고, ω_e는 입자의 이동 속도를 나타낸다.

$$\eta = 1 - \exp(-\omega_e SCA) \quad (8)$$

식(8)로 부터 비집진 면적이 증가하거나 또는 입자의 이동 속도가 증가하는 경우에 전기집진기의 집진 효율은 증가한다는 것을 예측 할 수 있으며, 동일한 전기장의 크기에서 입자의 전기이동 속도는 입자에 대전된 전하량의 크기에 비례하고, 또한 입자에 대전된 전하량은 입자 직경이 증가할수록 증가한다.

따라서 전기집진기의 비집진 면적이 작아진 경우, 음파에너지의 인가로 인하여 집진 효율의 급격한 감소의 방지는 음파 응집에 의한 입자의 이동 속도 증가로 인한 집진 효율의 증가량이 비집진 면적 감소에 의한 집진 효율의 감소량에 비하여 상대적으로 더 크다는 것을 의미한다.

이 점은 다음과 같은 관점에서 매우 중요한 의미를 가질 수 있다. 만일 기존의 전기집진기에서 처리 유량을 증가시킬 경우에, 동일한 비집진 면적을 유지하기 위하여는 집진실의 증설을 하여야 하나, 이 경우 경제적인 측면에서 큰 부담이 될 수 있다.

따라서 집진부의 증설 없이 처리 유량을 증가시키는 수단으로 집진부로 유입되는 함진 가스를 음파 응집에 의한 전처리를 하여, 처리유량 증가 전의 경우와 동일한 집진 효율을 유지하는 수단으로 음파에너지를 사용할 수 있고, 결국 음파에너지의 이용은 상대적으로 비집진 면적의 증가 효과로 나타난다고 할 수 있다.

5. 결 론

Pilot 2단 전기집진기의 유입부 함진 가스에 2 kHz, 141 dB의 음파에너지를 공급하여, 음파에 의한 입자의 응집이 전기 집진기의 집진 효율에 미치는 영향에 대하여 실험적인 연구를 수행하였다. 연구의 결과 음파에너지가 전기집진기의 집진 효율에 미치는 영향은 처리 가스의 유속이 낮은 경우에는 뚜렷한 효과를 보이지 않았으나, 처리 가스의 유속이 증가하여 전기집진기의 집진 효율이 급격하게 감소하는 경우에 음파에 의한 집진 성능 증가는 뚜렷하게 나타났다. 또한 음파에너지는 비집진 면적의 감소로 인한 집진 효율의 감소를 방지할 수 있는 방안으로 사용될 수 있음을 실험적으로 볼 수 있었다. 음파에너지의 이용은 상대적으로 비집진 면적을 증가시키는 효과가 된다.

기호설명

m_p : 입자의 질량(kg)
τ : 이완시간(relaxation time)
u_g : 가스 속도(m/s)
ω : 각속도(rad/sec)
u_p : 입자의 속도(m/s)
SCA : 집진극 면적(m^2)/처리유량(m^3/s)
u_o : 기체의 최대 속도(m/s)
ω_e : 입자 이동 속도($Cc\ q_p\ E/3d_p\pi\mu$)
u_{po} : 입자의 최대 속도(m/s)
q_p : 입자 대전량($3\varepsilon E\ d_p^2/(2+\varepsilon)4$)
a : 입자의 반경(m)
E : 평균 전기장 강도(kV/m)
μ : 유체의 동점성 계수

ε : 입자의 유전율
α : 비산 계수(entrainment coefficient)
d_p : 입자의 직경(μm)
t : 시간(sec)
Cc : 보정계수

참고문헌

1. Andrade, E.N.: "The Coagulation of Smoke by Supersonic Vibrations", Pro. Royal Society, 134, 1111-1115 (1936).
2. St. Clair: "Agglomeration of Smoke, Fog or Dust Particles by Sonic Waves", Industrial Engineering Chem., 2434-2438 (1949).
3. Stokes, C.: "Sonic Agglomeration of Carbon Black Aerosols", Chemical Engineering Process, 46, No. 8, 423-432 (1950).
4. Mednikow, E.P.: "Acoustic Coagulation and Precipitation of Aerosols", Translated from Russian, Consultants Bureau (1965).
5. Volk, Jr. M. and Moroz, W.J.: "Aerosol Coagulation in an Acoustic Field", CAES Technical Report No. 354-74, The Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania, 80 (1974).
6. Braxton Corporation: "Sonic Agglomeration", Report to Environmental Protection Agency, Report No. PB234146 (1974).
7. George, W. and Reethof, G.: "On the Fragility of Acoustically Agglomerated Submicron Fly Ash Particles", Transactions ASME, 108, 322-328 (1986).
8. J. Magill, Ph. Carpran, J. Somers and K. Richter: "Characteristics of an Electro-Acoustic Precipitator", J. Aerosol. Sci., 23, suppl 1. s803-s806 (1992).
9. Shaw, D.T. and Tu, K.W.: "Acoustic Particle Agglomeration Due to Hydrodynamic Interaction Between Monodisperse Aerosols", SUNY at Buffalo, NY (1979).
10. Song, L., Koopmann, G.H. and Hoffmann, T.L.: "An improved theoretical model of acoustic agglomeration", Trans. ASME, 116, 208-214 (1992).
11. Hoffmann, T.L. and Koopmann, G.H.: "Visualization of acoustic particle interaction and agglomeration; theory and experiments", J. of Acostic Sci. Am. 99 part 1, 2130-2141 (1996).
12. Hoffmann, T.L.: "An extended kernel for acoustic agglomeration simulation based on the wake effect", J. Aerosol Sci., 28, No. 6, 919-936 (1997).