

오일 미스트 포집을 위한 저전력 소비형 2단 전기집진기의 집진효율에 대한 연구

송치성[†]

(원고접수일 : 2014년 8월 5일, 원고수정일 : 2014년 9월 5일, 심사완료일 : 2014년 9월 12일)

A study on particle collection efficiency of a low power consumption two-stage electrostatic precipitator for oil mists collection

Chi-Sung Song[†]

요약: 본 연구에서는 마이크로 탄소 브러쉬 하전부와 평판형 금속 집진부로 구성된 저전력 소비형 2단형 전기집진기를 개발하였고, 특히 인체 위해성이 높은 0.3 μm 급의 미세한 오일 미스트에 대한 인가전압 및 소비전력별 집진효율 특성을 실험연구를 통해 고찰하였다. 하전부의 인가전압에 따른 단위 입자당 하전율과 입경별 집진효율을 측정함과 동시에 이론에 근거한 계산값과 비교해 보았으며, 9주 동안의 장시간 운전을 통해 지속적으로 포집된 오일 미스트에 의한 전기집진기의 성능을 열유체역학적인 관점에서 변화를 조사하였다.

주제어: 오일미스트, 전기집진기, 동력소비, 절삭유

Abstract: A two-stage electrostatic precipitator (ESP) using a carbon brush charger and a plate-plate parallel aluminum collector was developed and its application for removal of oil mist aerosols was investigated. Charge number per particle and particle collection efficiency at different applied voltage to the carbon brush charger were measured and compared to those obtained by theoretical calculations. A long-term operation of the ESP during 9 weeks was also performed to evaluate its performance durability for oil mists. Average charge number per mist particle increased with the applied voltage to the charger, and thus the collection efficiency of the mist particles also increased overall at the particle size range of 0.26 - 3 μm . The tendencies of the average charge number per particle and particle collection efficiency obtained from theoretical calculations were considerably consistent with those of the experimental results. Particle collection efficiency of ~99% at 0.3 μm could be achieved by power consumption of only 0.0033 W/(m³/h) at the face velocity of 1 m/s and its collection performance maintained stably during every 8 hr operation per day for 9 weeks with little increase of pressure drop.

Keywords: Oil Mist, Carbon Brush, Electrostatic Precipitator, Power Consumption, Metalworking Fluid

1. 서 론

절삭, 연삭 등의 공작기계를 다루는 작업장에서는 공작물의 냉각 및 윤활을 위해 사용되는 절삭유

가 작업 중에 쉽게 미스트화 되어 작업자의 호흡기 질병을 유발시킬 수 있다[1][2]. 미국의 국립산업안전보건연구원(National Institute for Occupa-

[†] Corresponding Author: Nuclear Engineering International (NEI), 34-12 Chunghyun-ro, Jochiwon-eup, Sejong-si, 339-887, Korea, E-mail: scs1675@hanmail.net, Tel: 044-855-7372

tional Safety and Health; NIOSH)에서는 1998 년도 부터 절삭유 미스트 노출량에 대한 기준치를 0.4 mg/m³로 마련하였으며 최근에는 비수용성에서 수용성 절삭유로 전환됨에 따라 실질적으로는 0.2 mg/m³ 수준에서 관리되고 있다[3].

일반적으로 공작 기계에서 발생하는 오일 미스트는 1 μm 이상의 크기를 나타내고 있으나 용접, 열처리나 연삭 등의 일부 고온 공정에서는 절삭유의 휘발성 성분이 증발, 응축하는 과정에서 1.0 μm 이하의 초미세입자 형태로 발생되기 때문에 더욱 위험할 수 있다[4]. 최근에는 환기장치를 이용하여 작업자를 공작기계로부터 공간적으로 분리시켜 배기시키고 있으나 이러한 공작기계 작업장에서의 미세한 오일 미스트를 처리하기 위한 효율적인 방법이 요구되고 있다.

또한, 숯이나 가스 등의 연료를 사용하여 육류 및 생선류를 직접 구이하는 방식으로 조리하는 직화구이 음식점에서 배출되는 배기가스는 주로 육류의 지방성분인 육즙이 화염과 직접 접촉하여 미스트 형태로 발생하게 되는데 이러한 배기가스 중의 오일 미스트는 인체 위해성이 높은 PM2.5(직경이 2.5 μm 이하의 초미세입자)의 형태로 배출되고 있어 이에 대한 대책 마련도 필요하다[5][6].

이러한 다양한 오일 미스트를 제거하는 방법으로 사이클론 집진기, 필터 집진기, 전기집진기 등의 다양한 방법들이 개발되고 있지만 아직까지도 1 μm 이하급의 미세한 오일 미스트를 처리하는 방법에는 한계를 나타내고 있다. Boundy et al.[7]은 금속 메쉬, 카트리리지 필터, 헤파필터 등의 전처리 필터와 고성능 필터에 대하여 시간에 따른 오일 미스트 처리 성능을 살펴보고, 전처리 필터는 시간에 따른 1 μm 이하의 미스트에 대한 효율 저하가 나타났고, 고성능 필터는 집진효율은 유지되나 압력손실이 지속적으로 증가하는 특성을 나타냄을 확인하였다.

Leith et al. [8]은 절삭유 미스트를 효과적으로 처리하는 방법으로 헤파필터를 분석하였으나 헤파필터의 수명을 연장시키기 위해서는 상단에 효과적인 전처리 장치가 요구되고, 안정적인 운전을 위해서는 지속적인 유지관리가 필요하다고 결론지었

다. Letts et al. [9]은 오일 미스트를 효율적으로 처리하기 위해 유리섬유, 폴리에스테르, 폴리아미드 재질에 대한 적절한 필터 미디어 선정 연구를 수행하였고, 폴리아미드와 같은 높은 표면에너지 갖는 섬유가 쉽게 포집된 미스트를 탈착하여 압력 손실의 증가를 억제할 수 있음을 보여주었다. Lee et al. [10]는 직화구이 음식점에서 전기집진기, 백 필터 및 전기집진과 촉매 복합 시스템에 대하여 입자상 물질 제거 성능을 비교했는데, 모든 방식이 0.4 - 10 μm 영역에서는 상당한 제거 효과를 나타내었으나 0.4 μm 이하의 크기에서는 집진 방식에 관계없이 제거 효과가 미약한 것으로 나타났다.

Hwang et al. [11]은 섬유 염색공정에서 발생하는 오일 미스트를 처리하는 과일렛급의 전기식 오일 포집 연구를 수행하여 80 - 93%의 복합악취, 60 - 81%의 TVOC를 처리하였다고 보고하였으나 미스트에 대한 직접적인 처리성과 관련하여는 굴뚝에서의 가시적인 사진 비교만을 수행하였고 집진효율에 대한 세부적인 결과를 제시하지 못하였다. Yi et al. [12]는 오일 미스트 처리를 위한 사이클론 연구를 수행하였고, 배인 개수를 10 개로 증가시켜 사이클론의 절단 입경을 2.5 μm 수준까지 집진 성능을 향상시킬 수 있었으나 압력손실이 250 mmAq 까지 상승하는 결과를 얻었다. Kim et al. [13]은 반도체 공정에서 발생하는 백연 미스트와 부식성 가스를 동시처리하기 위해 전기집진기와 스크러버 복합 시스템을 개발하였고 마이크로급 직경의 탄소 브러쉬 방전극을 사용하여 낮은 소비전력에도 1 μm급 이하의 백연 미스트에 대한 높은 집진효율을 얻을 수 있었다. 하지만 전기집진기 전단에 분무형 스크러버가 설치되어 미세입자의 성장을 유도하였으므로 1 μm급 이하급의 미세입자에 대한 전기집진기의 직접적인 집진효율로 보기 어렵고 부식성 가스를 처리하기 위해 알루미늄 집진판에 PVC 비금속 코팅을 하였기 때문에 인가 전압 상승과 집진효율 저하 문제가 발생할 수 있다.

본 연구에서는 마이크로 탄소 브러쉬 하전부와 평판형 금속 집진부로 구성된 저전력 소비형 2단형 전기집진기를 개발하였고 인체 위해성이 높은

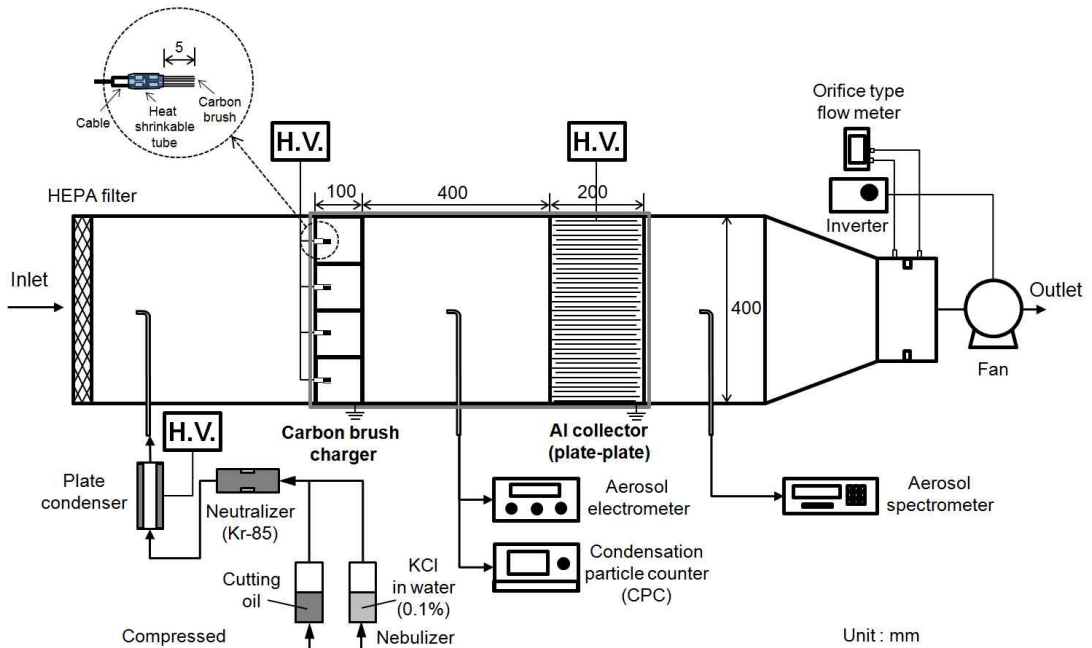


Figure 1: Schematic diagram for oil mist collection tests of the two-stage electrostatic precipitator.

0.3 μm 급의 미세한 오일 미스트에 대한 인가전압 및 소비전력별 집진효율 특성을 살펴보았다. 하전부의 인가전압에 따른 단위 입자당 하전율과 입경별 집진효율을 측정하였고 Cochet 이론[14]에 근거한 계산값과 비교해 보았으며, 9주 동안의 장시간 운전을 통해 지속적으로 포집된 오일 미스트에 의한 전기집진기의 성능 변화를 살펴보았다.

2. 실험방법

미스트 포집장치로는 탄소 브러쉬 하전부와 평판형 집진부의 2단형 전기집진기를 사용하였다. 탄소 브러쉬 하전부는 가로 400 mm, 세로 400 mm, 두께 100 mm의 크기이고, 16 개의 탄소 브러쉬 방전극이 4x4 채널로 이루어진 사각 덕트형 접지극의 중간에 배치되도록 구성하였다. 평판형 집진부는 가로 456 mm, 세로 467 mm, 두께 260 mm의 외형 크기로 이루어져 있고, 내부에 400 mm x 200 mm 크기 및 1 mm의 두께를 갖는 알루미늄 판이

다수개가 평행하게 판 간격 3 mm으로 배열되어 집진판의 유효면적은 약 8.0 m^2 가 되는 집진부를 사용하였다. Fig. 1은 탄소 브러쉬 하전부와 평판형 집진부로 이루어진 오일 미스트 포집용 전기집진기를 400 mm x 400 mm의 시험덕트에 연결하여 풍량과 입자 하전량 및 오일 미스트 집진효율을 측정하기 위한 실험장치 구성도를 나타내고 있다. Fig. 1의 상단에 확대된 그림과 같이 탄소 브러쉬는 직경이 5 - 10 μm 크기의 탄소섬유 수백 개를 5 mm 길이로 수축 튜브를 이용하여 엮어서 다발로 만들어 사용하였다.

시험입자로는 절삭유가 담겨진 의료용 네블라이저(nebulizer)에 필터링한 압축공기를 주입하여 미스트화 하여 발생시켰고 분무 과정에서 발생하는 초기의 하전 특성을 줄이기 위해 Kr-85 방사성물질 중화기와 20 kV의 고전압이 인가된 길이 300 mm, 폭 100 mm, 높이 20 mm의 평판형 콘덴서를 통과시켰다. 덕트로 주입된 오일 미스트는 헤파필터를 통과한 유입 공기와 혼합되어 탄소 브러쉬

하전부와 평판형 집진부로 이루어진 2단형 전기집진기를 통과하고 오리피스 유량계를 거쳐 밖으로 배출되도록 구성하였다. 탄소 브러쉬 하전부 후단에는 하전된 입자의 평균 하전량을 측정하기 위해 Aerosol Electrometer (Model 3068A, TSI)와 Condensation Particle Counter (Model 3776, TSI)을 연결하였고, 평판형 집진부 후단에는 오일 미스트의 전기집진기 작동 전후의 크기분포를 측정하기 위해 Aerosol Spectrometer (Model 1.109, Grimm)을 연결하였다.

탄소 브러쉬 하전부에서 하전된 미스트의 평균 하전량(\bar{q})은 다음 식을 통해 구할 수 있다.

$$\bar{q} = \frac{Q_p}{N} \quad (1)$$

여기서, Q_p 는 Aerosol Electrometer로 측정된 미스트 입자의 총 하전량(개/cm³)을 나타내고, N 은 Condensation Particle Counter로 측정된 미스트 입자의 총 입자개수(개/cm³)를 나타낸다.

한편, 본 2단형 전기집진기의 오일 미스트에 대한 집진효율은 전기집진기의 하류측에서 집진기를 작동하지 않았을 때와 작동했을 때의 입자 농도를 Aerosol Spectrometer로 측정하고 다음 식으로 산출하였다.

$$\eta (\%) = \left(1 - \frac{n_2}{n_1} \right) \times 100 \quad (2)$$

여기서, η 는 전기집진기의 입경별 집진효율(%), n_1 은 집진기 가동 전의 미스트 입경별 개수농도 (개/m³), n_2 는 집진기 가동 후의 미스트 입경별 개수농도(개/m³)를 의미한다.

또한 2단형 전기집진기의 입자 특성에 따른 차이를 살펴보기 위해 일반적인 공기청정기 성능시험(SPS-KACA002-132, 2006)에 사용되는 시험입자인 KCl 입자를 0.1% 수용액 상태로 네블라이저로 분무시키고[15] 중화기와 평판형 콘덴서를 통과시켜 발생시켜서 오일 미스트와의 집진효율을 비교해 보았다.

3. 실험결과

3.1 탄소섬유 하전부의 방전전류 및 소비전력

Fig. 2는 탄소 브러쉬 하전부의 인가전압에 따른 방전전류와 그에 따른 소비전력을 나타내고 있다. 하전부를 통과하는 공기의 유속은 1 m/s로 고정하였고 하전부의 인가전압을 본 연구의 작동 범위인 최대 10 kV 까지 인가해 보았다. 인가전압이 4 kV에서 전류값이 0.01 mA로 코로나 방전이 일어나기 시작하였고, 6 kV에서 0.04 mA, 8 kV에서는 0.10 mA, 10 kV에서는 0.19 mA를 나타내었다. 탄소 브러쉬 하전부에서의 소비전력은 인가전압과 방전전류의 곱으로 표현할 수 있으므로 탄소 브러쉬 하전부에서의 소비전력은 6 kV에서 0.24 W, 8 kV에서 0.8 W 및 10 kV에서 1.9 W를 나타내어 형광등 하나(소비전력 10-50 W)의 1/10 이하 수준의 매우 낮은 소비전력을 나타내고 있음을 알 수 있다.

3.2 오일 미스트와 KCl 입자의 크기분포 비교

Fig. 3는 네블라이저로 발생시킨 오일 미스트와 KCl 입자의 크기분포를 나타내고 있다. 오일 미스트의 경우는 기하학적 평균직경이 약 0.38 μ m를 나타내었고, 기하학적 표준편차는 약 1.28을 나타내어 상당히 균일한(monodisperse) 크기의 입자들이 발생되었음을 확인할 수 있었다. 한편 KCl 입자의 경우는 너무 작은 입자가 형성되어 0.25 - 32 μ m의 측정 범위를 갖는 Aerosol Spectrometer에서는 1.0 μ m 이하 영역의 일부 입자만이 측정되었다.

KCl 입자의 경우 보다 작은 영역을 측정할 수 있는 Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS; Model 3936, TSI)로 추가적으로 분석해본 결과, 기하학적 평균직경은 약 0.09 μ m이고 기하학적 표준편차는 약 1.70 정도로 측정되어 오일 미스트 보다는 미세한 크기로 훨씬 넓은(polydisperse) 분포의 상태로 발생하는 것을 알 수 있었다.

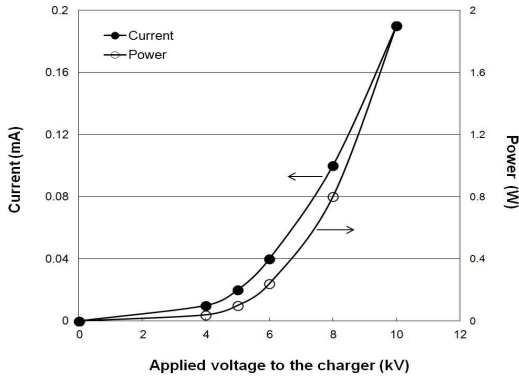


Figure 2: Discharging current and power consumption with applied voltage to the carbon brush charger.

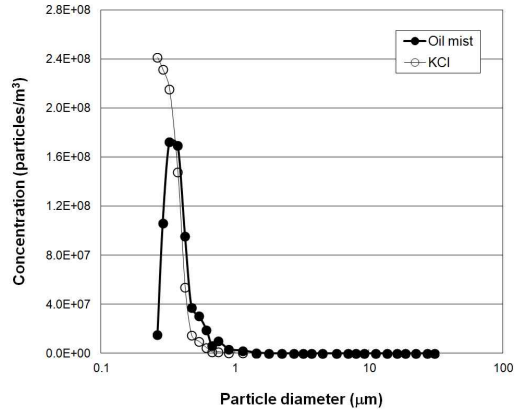


Figure 3: Size distributions of the generated oil mist and KCl particles.

3.3 하전된 오일 미스트의 단위 입자당 평균 하전수

Fig. 4는 탄소 브러쉬 하전부에서 하전된 오일 미스트의 단위 입자당 평균 하전수를 인가 전압별로 측정된 결과를 보여주고 있다. Fig. 4의 점선은 입경별 입자의 이론적인 포화 하전수를 Fig. 3의 크기분포에 따라 단위 입자당 평균값으로 나타낸 결과를 보여주고 있다. 입경별 입자의 포화 하전수(q_p)는 다음 식으로 구할 수 있다[14].

$$q_p = \left\{ \left(1 + 2\lambda/d_p \right)^2 + \left(\frac{2}{1 + 2\lambda/d_p} \right) \left(\frac{\kappa - 1}{\kappa + 2} \right) \right\} \pi \epsilon_0 d_p^2 E_1 \quad (3)$$

여기에서 λ 는 공기의 평균 자유경로 (mean-free path)를 나타내고, d_p 는 입자의 직경, κ 는 입자의 유전 상수, ϵ_0 는 자유공간에서의 유전율, E_1 은 하전부에서의 전기장의 공간평균 크기를 나타낸다. 간단한 계산을 위해 상온에서 공기의 평균자유경로 $\lambda = 0.0665 \mu\text{m}$, 일반적인 절삭유나 윤활유의 유전상수 $\kappa = 2.2$ 로 하였고, 탄소 브러쉬 방전극과 접지극의 거리가 50 mm 이므로 5 kV 인가할 때 평균 전기장은 $E = 1 \times 10^5 \text{ V/m}$ 로 가정하였다. 입경별 입자의 하전수를

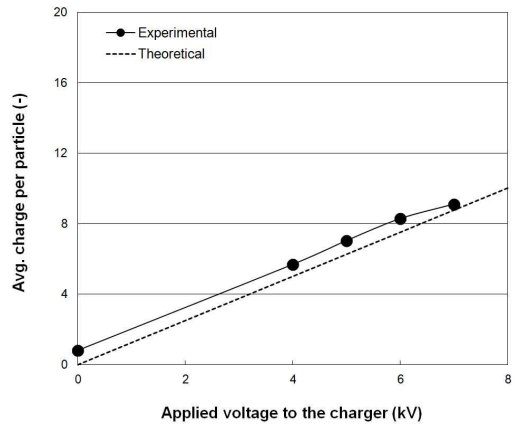


Figure 4: Experimental and theoretical average charge per particle of oil mists at different applied voltage to the carbon brush charger.

알면 크기분포를 이용하여 단위 입자당 평균 하전수는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\bar{q} = \frac{\sum(q_{p,i} n_i)}{N} \quad (4)$$

여기에서 n_i 는 입경별 농도(개/ m^3)을 나타내고 N 은 총 입자개수(개/ m^3)를 나타낸다.

Fig. 4에서 알 수 있듯이, 실험적으로 구한

단위 입자당 평균 하전수가 식 (3)으로부터 이론적으로 계산한 입경별 하전수와 Fig. 3의 미스트 크기분포의 입경별 수농도로부터 식 (4)를 통해 구한 평균 하전수와 거의 유사한 것을 확인할 수 있다.

3.4 하전부의 인가전압에 따른 오일

미스트의 입경별 집진효율

Fig. 5는 1 m/s의 유속에서 평판형 집진부를 3 kV의 인가전압으로 고정하였을 때 하전부의 인가전압에 따른 입경별 집진효율 변화를 나타내고 있다. 하전부의 인가전압을 6 kV에서 10 kV로 증가시킬 때 0.25 - 3 μm 범위에서 전체적으로 집진효율이 상승하였고, 집진효율이 가장 낮은 0.27 μm 크기에서는 약 70 %에서 94 %까지 집진효율이 상승하였다. Fig. 5에서 점선은 이론적으로 계산하여 추정한 집진효율을 나타내고 있다. 이론값은 다음의 Deutsch-Anderson 식을 사용하였다[16].

$$\eta(\%) = \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{w_m A_c}{Q}\right) \right\} \times 100 \quad (5)$$

여기에서 w_m 은 입자의 이동속도(migration velocity, m/s), A_c 는 집진부의 유효면적(m²), Q 는 집진부를 통과하는 공기의 유량 (m³/s)를 나타낸다. 입자의 이동속도는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$w_m = \frac{q_p E_2 C_c}{3\pi\mu d_p} \quad (6)$$

여기에서 q_p 는 식 (3)에서의 입자의 포화 하전수, E_2 는 집진부에서의 전기장의 세기, μ 는 공기의 동점성계수, C_c 는 Cunningham slip correction factor를 나타낸다. C_c 는 다음 식으로 구할 수 있다[17].

$$C_c = 1 + \frac{2\lambda}{d_p} \left\{ 1.257 + 0.4 \exp\left(-\frac{1.1d_p}{2\lambda}\right) \right\} \quad (7)$$

계산을 위해 집진부의 유효면적 $A_c = 8.0$

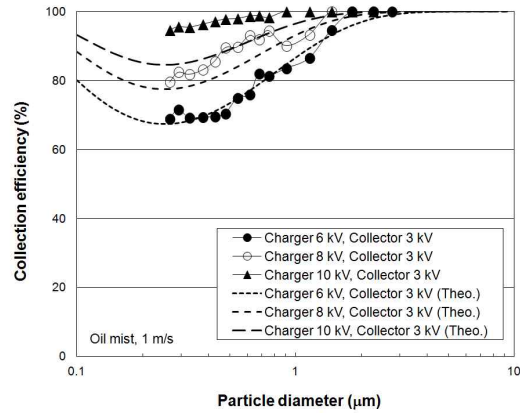


Figure 5: Collection efficiency of oil mist with different applied voltages to the charger at the air flow velocity of 1 m/s.

m², 유량 $Q = 576 \text{ m}^3/\text{hr}$, 공기의 20 °C에서의 동점성계수 $\mu = 1.84 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $E_2 = (3000 \text{ V}) / (0.003 \text{ m}) = 1 \times 10^6 \text{ V/m}$ 을 사용하였다.

실험적으로 구한 오일 미스트의 집진효율은 하전부 6 kV에서는 이론값과 거의 유사한 특성을 나타내었으나 하전부 8 kV 및 10 kV에서는 실험값이 이론값보다 다소 높게 나타났다. 이는 이론적으로 계산할 때에는 하전부에서 입자 손실이 거의 없이 집진부에서만 포집되는 것으로 가정하였으나 하전부의 인가전압이 높아질수록 하전부에서도 일부 하전된 입자가 하전부의 접지판에 포집되어 실험적인 집진효율이 이론값보다 높게 형성된 것으로 보인다.

Fig. 6은 유속 0.6 m/s 및 1.0 m/s에서 하전부의 소비전력에 따른 0.3 μm 크기의 오일 미스트의 집진효율을 나타내고 있다. 0.6 m/s의 유속 조건에서는 집진부에 3 kV만 인가하더라도 0.24 W의 소비전력에서도 99 % 이상의 높은 집진효율을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 한편, 1 m/s의 유속 조건에서는 소비전력을 증가시킬수록, 집진부의 인가전압을 3 kV에서 6 kV로 상승시킬수록 오일 미스트의 집진효율이 상승하는 것을 확인할 수 있다. 하전부에 10 kV를 인가할 때 집진부의 인가전압을 3 kV에서 6 kV로 증가시키면 0.3 μm 미스트의 집진효율을 94 %에서 99

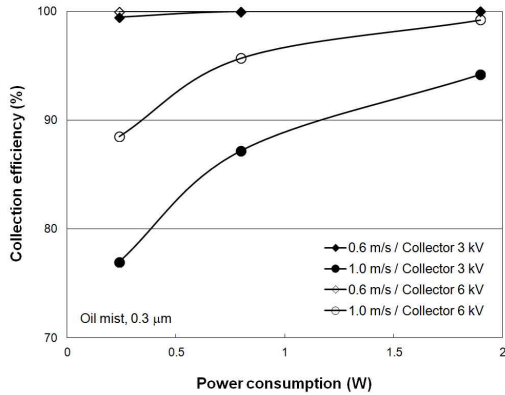


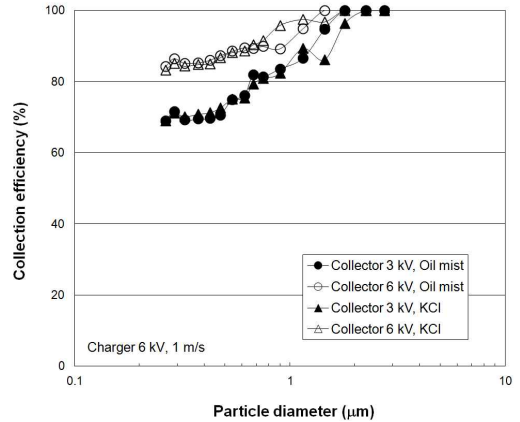
Figure 6: Collection efficiency of oil mist with different powers of the charger at the air flow velocity of 0.6 and 1.0 m/s.

% 까지 추가적으로 상승시킬 수 있었다. 따라서 집진부에 6 kV를 인가할 경우 아주 적은 하전부의 소비전력인 1.9 W의 사용에도 99% 이상의 높은 집진효율을 1 m/s의 유속 조건에서도 얻을 수 있었다. 1 m/s의 유속 조건은 약 576 m³/h의 유량 조건이므로 본 탄소섬유 전기집진기는 0.0033 W/(m³/h)의 단위 유량당 소비전력에서 높은 집진효율을 나타내어 기존의 1,000 m³/h의 유량에서 50 - 300 W를 사용하는 전기집진기의 운전조건인[18] 0.05 - 0.3 W/(m³/h) 보다 훨씬 낮은 소비전력에도 우수한 집진효율을 나타내고 있음을 알 수 있다.

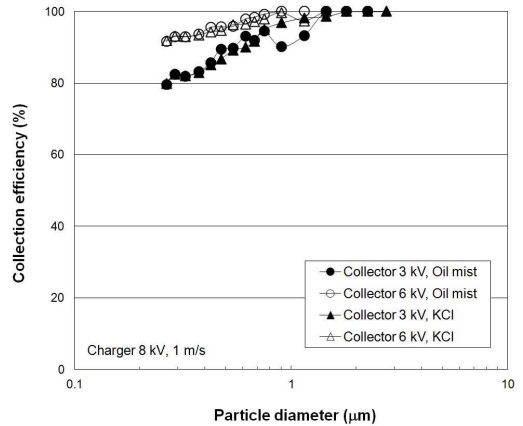
3.5 오일 미스트와 KCl 입자의 집진효율 비교

오일 미스트는 발생하는 오일의 종류(수용성, 비수용성) 및 작업 환경에 따라 크기와 성분 차이가 나타난다[19].

본 연구에서는 발생 입자의 차이에 따른 성능 변화를 살펴보기 위해 오일 미스트의 집진효율을 공기청정기의 성능 시험의 시험 입자로 사용되는 KCl 입자의 집진효율과 비교해 보았다. Fig. 7(a)와 7(b)는 각각 하전부에 6 kV와 8 kV를 인가했을 때 집진부 3 kV, 6 kV에서의 오일 미스트와 KCl 입자의 입경별 집진효율 변화



(a)



(b)

Figure 7: Comparison on collection efficiency of oil mist and KCl particles at the applied voltage of the charger (a) 6 kV and (b) 8 kV.

를 나타내고 있다. 오일 미스트와 KCl 입자의 집진효율이 같은 전기집진기 운전 조건에서 거의 유사한 값을 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 입자 하전수는 입자의 유전상수의 차이에 따라 다소 차이가 발생할 수 있으나 그 영향은 매우 미미하므로 결국 입자의 집진효율은 입자의 성분보다는 입자의 크기에 좌우되는 것을 확인할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 0.3 μm 근처의 미세한

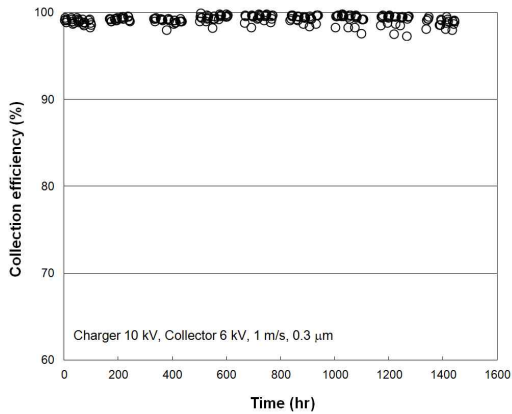


Figure 8: Change of the collection efficiency of oil mist for 9 weeks operation.

오일 미스트를 발생시켜 집진효율을 99% 이상 확보하는 조건을 얻었으므로 다양한 작업 조건에서 1 μm 이상의 오일 미스트가 발생하는 조건에서는 보다 쉽게 높은 성능의 집진효율을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

3.6 운전 시간에 따른 오일 미스트의 집진효율 변화

Fig. 8은 본 연구의 2단형 전기집진기를 장시간 사용할 때 0.3 μm의 오일 미스트에 대한 집진효율 변화를 나타낸 결과이다. 집진부에는 6 kV를 인가하였고, 하전부에도 오일 미스트의 장시간 포집에 따른 성능 저하를 유도하기 위해 10 kV의 인가 전압으로 운전하였다. 오일 미스트를 주 5일 8시간 운전 조건으로 0.26-0.35 μm 사이의 입자 크기에서 2-7 × 10⁷ 개/m³ 범위의 수농도로 공급하였고, 2시간 단위로 집진효율을 측정하였으며 9주 동안 진행하였다.

그림에서 보는 것과 같이 9주 동안 집진효율이 98-99% 이상 수준으로 꾸준히 유지되는 것을 확인할 수 있다. 5주 이상 부터는 일부 측정 시점에서 97%로 다소 낮아지는 순간들이 존재하였으나 이는 측정날 아침에 집진기를 가동하고 측정한 첫 번째 결과 값에서만 나타난 현상이었고 그 후 2시간 이후의 측정부터는 다

시 집진효율이 99% 이상으로 회복되는 것으로 보아 집진기에 포집되어 있던 일부 오일이 집진기를 가동할 때 일부가 후단으로 재비산되어 1-2% 정도 감소하는 영향을 준 것으로 보인다.

한편 전기집진기의 압력손실은 5 Pa 미만에서 장기 운전 시간에 관계없이 꾸준히 유지되는 것을 확인할 수 있었다. 필터 방식의 경우는 4주만 지나도 집진효율이 20% 이상 감소되거나 압력손실이 지속적으로 증가하므로(Boundy et al., 2000) 본 전기집진 방식의 오일 미스트 포집장치는 필터 방식 대비 장기 운전성 측면에서도 우수한 특성을 보이고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 탄소 브러쉬 하전부와 평행형 금속 집진판으로 구성된 오일 미스트 포집용 2단형 전기집진기를 개발하여 하전부의 인가전압별 미스트 입자의 평균 하전율과 유속별 집진효율을 살펴보고 9주 동안의 장시간 운전을 통해 집진효율 성능 저하 특성을 살펴보았다. 또한 Cochet의 이론 하전율을 이용하여 단위 입자당 평균 하전율과 하전부 인가전압별 집진효율을 계산하여 실험값과 비교해 보았다. 탄소 브러쉬 하전부의 인가전압을 증가시킬수록 단위 입자당 평균 하전율은 증가하였고, 입경별 집진효율도 측정 입경 범위 내에서 전체적으로 증가하는 특성을 나타내었으며, 이론적인 계산과도 거의 일치하였다.

한편, 탄소 브러쉬 하전부의 1.9 W 수준의 낮은 소비전력에도 유량 576 m³/h 조건에서 0.3 μm 미스트 기준으로 99% 수준의 높은 집진효율을 얻을 수 있었다. 한편 9주 동안의 운전에도 초기 성능인 98-99% 수준의 집진효율을 지속적으로 유지하여 장기 연속 운전에 따른 성능저하가 크지 않은 것을 확인할 수 있었다.

하지만 향후 추가적인 연구를 통해 고농도의 미스트 농도 분위기에서 20-50주 이상의 장시간 운전 과정에서의 집진 내구성 시험을 통해

하전부와 집진부의 교체 또는 세정 주기를 파악해야 할 것이고, 오일 미스트 발생 작업장 또는 직화구이 현장에서의 실증 연구를 수행하여 개발된 탄소 브러쉬 전기집진기의 최적의 작동 운전 조건과 유지 관리 방안을 마련할 필요가 있다.

참고문헌

[1] A. Rønneberg and K. Skyberg, "Mortality and incidence of cancer among oil exposed workers in a Norwegian cable manufacturing company Part I Exposure conditions 1920-79", *British Journal of Industrial Medicine*, vol. 45, no. 9, pp. 589-594, 1998.

[2] J. Thornburg and D. Leith, "Mist generation during metal machining," *Transactions of the ASME*, vol. 122, pp. 544-549, 2000.

[3] J. M. Yacher, W. A. Heitbrink, and E. G. Burroughs, "Mist control at machining center, Part 2: Mist control following installation of air cleaners", *Journal of the American Industrial Hygiene Association*, vol. 61, pp. 282-89, 2000.

[4] W. A. Heitbrink, D. E. Evans, T. M. Peters, and T. J. Slavin, "Characterization and mapping of very fine particles in an engine machining and assembly facility", *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, vol. 4, pp. 341-351, 2007.

[5] M. P. Fraser, Z. W. Yue, and B. Buzcu, "Source apportionment of fine particulate matter in Houston, TX, using organic molecular markers", *Atmospheric Environment*, vol. 37, pp. 2117-123, 2003.

[6] J. B. Lee, K. H. Kim, H. J. Kim, S. J. Cho, K. Jung, and S. D. Kim, "Emission rate of particulate matter and Its removal efficiency by precipitators in under-fired charbroiling restaurants", *Journal of the Scientific World*, vol. 11, pp. 1077-1088, 2011.

[7] M. Boundy, D. Leith, D. Hands, M. Gressel, and G. E Burroughs, "Performance of industrial mist collectors over time", *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, vol. 15, pp. 928-935, 2000.

[8] D. Leith, J. Volckens, M. G. Boundy, and D. Hands, "Control methods for mineral oil mists", *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, vol. 18, pp. 883-889, 2003.

[9] G. M. Letts, P. C. Raynor, and R. L. Schumann, "Selecting brush materials to improve mist filters", *Aerosol Science*, vol. 34, pp. 1481- 1492, 2003.

[10] J. B. Lee, K. H. Kim, H. J. Kim, S. J. Cho, K. Jung, and S. D. Kim, "Emission rate of particulate matter and Its removal efficiency by precipitators in under-fired charbroiling restaurants", *Journal of the Scientific World*, vol. 11, pp. 1077-1088, 2011.

[11] Y. S. Hwang, H. J. Park, G. H. Chung, D. H. Kim, and B. K. Na, "Odor removal of discharge gas from tenter facility in textile industry using pilot-scale EFC (Electric Fume Collector)", *Korean Journal of Odor Research and Engineering*, vol. 10, pp. 136-141, 2011.

[12] C. S. Yi, H. J. Shin, and C. W. Lee, "A study on dust collection efficiency of axial-vane type cyclone for oil mist", *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, vol. 21, pp. 415-420, 2012.

[13] H. J. Kim, B. Han, Y. J. Kim, S. J. Yoab, and T. Oda, "Integration of a nonmetallic electrostatic precipitator and a wet scrubber for improved removal of particles and corrosive gas cleaning in semiconductor manufacturing industries", *Journal of the Air & Waste Management Association*, vol. 62, pp. 905-915, 2012.

[14] R. Cochet, "Lois charge des fines particules

(submicroniques) etudes théoriques-contrôles récents spectre de particules”, Colloque International La Physique Des Forces Electrostatiques Et Leurs Application, vol. 102, pp. 331-338, 1961.

- [15] SPS-KACA002-132, “Indoor air cleaner”, Korea Air Cleaning Association Standard (KACAS), 2006.
- [16] W. C. Hinds, Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particle, 2nd ed. Wiley, New York, 1999.
- [17] R. C. Flagan and J .H. Seinfeld, Fundamentals of Air Pollution Engineering, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1988.
- [18] L. K. Wang, N. C. Pereira, and Y. T. Hung, Air Pollution Control Engineering, Humana Press, Totowa, NJ, 2004.
- [19] W. A. Heitbrink, D. E. Evans, T. M. Peters, and T. J. Slavin, “Characterization and mapping of very fine particles in an engine machining and assembly facility”, Journal of Occupational and Environmental Hygiene, vol. 4, no. 5, pp. 341-351, 2007.