

## 코로나 방전 반응기에서 Carbon Soot 입자의 재비산

이재복\* · 황정호\*\* · 배귀남\*\*\*  
(2000년 2월 15일 접수)

### Reentrainment of Carbon Soot Particles in a Corona Discharge Reactor

Jae-Bok Lee, Jung-Ho Hwang and Gwi-Nam Bae

**Key Words:** Soot Particle(소ot 입자), Corona Discharge(코로나 방전), Reentrainment(재비산), Self Cleaning(자기 청정), Diesel After-treatment(디젤 후처리)

#### Abstract

Among the various types of diesel after-treatment device, the corona discharge reactor may be considered as a powerful process for trapping submicron particles. But after precipitation on the electrodes occurs, the reentrainment of particles is severe and often causes low or negative precipitation efficiency. Experiments were performed to investigate the effect of an applied voltage on the reentrainment of soot particles from the electrodes. A co-annular laminar diffusion flame burner was used as the soot generator. When a highly negative voltage was applied, exfoliation of the deposited soot particles and an increase in concentration of particles smaller than approximately 150 nm were observed. Turbulence induced from the negative tuft corona and sputtering caused particle reentrainment from the corona wire and from plates as well. Under soot laden combustion gas, a streamer corona often occurred in the wire-cylinder reactor. Because of its transient nature, streamer corona violently increased the concentration of reentrained particles and CO gas.

#### 1. 서론

디젤 엔진에서 배출되는 입자상 물질(PM) 저감의 경우, 입자의 포집(Collection) 과정 뿐 아니라 재생(Regeneration) 과정이 필요하며, 내구성 문제도 관계되기 때문에 많은 연구에도 불구하고 뚜렷한 대안이 제시되지 못하고 있는 실정이다.<sup>(1)</sup> 입자상 물질의 후처리 방법은 근래에 DPf(Diesel Particulate Filter) 방식이 성능이 우수하다

고 보고되고 있다.<sup>(2,3)</sup> 최근에는 포집 효율이 좋은 코로나 방전을 이용하는 방법이 입자상 물질뿐 아니라 배출 가스의 저감에도 효과적이기 때문에 이에 대한 관심이 증가하고 있다.<sup>(4~6)</sup>

코로나 반응기에 의한 디젤 입자상 물질의 후처리 방법에 있어서 가장 큰 문제점은 입자상 물질의 효율적인 포집, 포집된 입자에 대한 재생, 그리고 포집된 입자의 재비산(Reentrainment)이다. 대체로 코로나 방전에 의한 포집 방법은 높은 포집 효율을 보이지만, 효과적인 재생이 이루어지지 않으면 포집되었던 입자가 재비산되어 포집 효율이 감소하기 때문이다. 이러한 입자의 재비산 문제는 주로 전극의 오염과도 관련이 되는데, 특히 전기전도도가 높은 soot의 경우 전극의 오염뿐 아니라 이로 인한 재비산은 더욱 심각하다.<sup>(7,8)</sup>

Kanazawa 등<sup>(9)</sup>은 담배 smoke에 의해 방전 와이

\* 연세대학교 대학원 기계공학과

\*\* 회원, 연세대학교 기계공학과

E-mail : hwangjh@yonsei.ac.kr

TEL : (02)361-2821 FAX : (02)312-2159

\*\*\* 회원, 한국과학기술연구원 지구환경연구센터

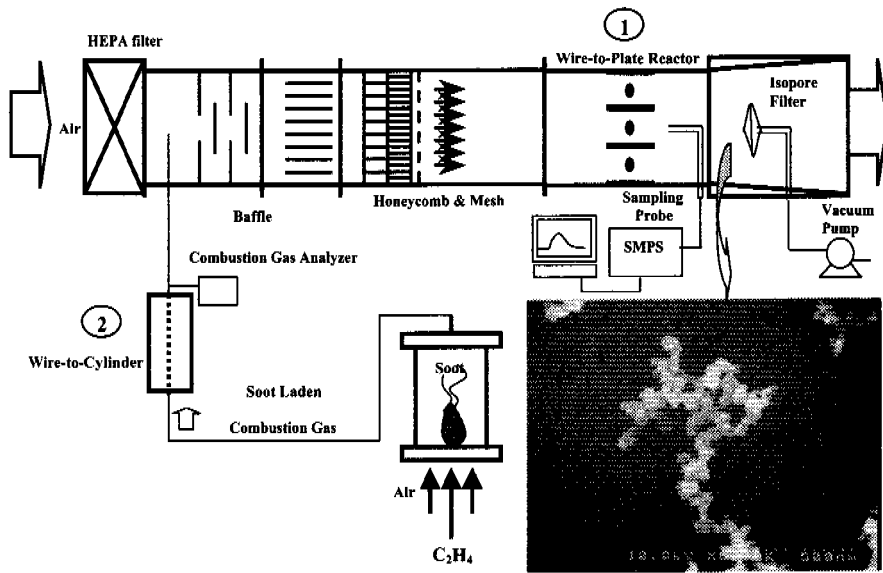


Fig. 1 Experimental set-up

어가 오염되는 과정과 입자로 오염된 방전 와이어의 박리 현상을 확인했다. Dorsey 등<sup>(10)</sup>은 방전 전극의 오염이 장시간 가동되는 실내/산업용 전기 집진기에서도 발생할 수 있으며, 특히 실내 공기 청정의 용도로 사용되는 경우 오존 발생을 유발한다고 보고한 바 있다. 특히 디젤 후처리 장치로의 응용으로서도 연구가 수행되었다. Masuda와 Moon<sup>(11)</sup>은 soot으로 오염된 방전 와이어로부터 자기 청정 반응에 의해 CO/CO<sub>2</sub> 가스가 증가하고 이러한 반응이 특히 음극의 경우에 주로 발생함을 확인한 바 있으며, Penetrante<sup>(12)</sup> 등은 O, OH 라디칼이나 (H<sub>2</sub>O)<sub>n</sub>O<sub>2</sub>-이온에 의해서 soot의 비열 산화 반응을 확인했다.

한편 유동에 의해 입자가 재비산될 수도 있는데, Yamamoto 등<sup>(13)</sup>은 유동 가시화를 통해 EHD 유동이 입자의 재비산에도 영향을 줄 수 있음을 보였다. Kihm<sup>(14)</sup>은 양/음극 코로나에 따라 유동이 영향을 받으며, 특히 음극 코로나의 경우 난류 강도가 증가함을 확인했다. Zukeran 등<sup>(15)</sup>은 재비산에 의해 soot의 크기가 시간에 따라 증가함을 보였고, Cottingham<sup>(16)</sup>은 일반 먼지에 soot이 첨가됨에 따라 효율이 낮아진다고 보고했다.

본 연구에서는 재비산이 입경 분포에 미치는 영향을 고찰하고, 방전 와이어 및 집진판의 상태에 따라 재비산된 입자의 크기 분포를 측정하고,

방전 와이어에서의 자기 청정 작용, CO 가스 농도 변화와 재비산과의 관계를 고찰했다.

## 2. 실험

### 2.1 실험 장치

본 실험을 위한 전체 시스템은 Fig. 1과 같이 크게 입자 생성부, 청정 공기 혼합부, 균일 유동부, 코로나 방전 반응부로 나뉘어 진다. Soot 입자 생성은 화염이 비교적 안정된 Santoro 버너<sup>(17)</sup>를 사용했다. 에틸렌(260ml/min)과 공기(40l/min)를 주입시켜 형성된 확산 화염에서 불완전 연소로 인해 CO 등의 연소 가스와 soot이 배출된다. 배출된 soot은 사슬(chain) 형태의 구조로 이루어졌는데, 이는 화염 내에서 고농도의 soot 입자끼리의 응집에 의해서이다. 사진을 통해 soot의 기본 입자(primary particle)크기는 약 30~50nm임이 확인됐다. 이와 같이 확산 화염에서 생성된 soot은 회석 터널로 들어가 반응기 ①까지 이동된다. 실험 목적에 따라서는 반응기 ②로 주입되기도 하는데 실험 목적과 반응기 ①, ②에 대해서는 뒤에서 설명하기로 한다. 버너로부터 생성된 soot의 농도는 약 10<sup>9</sup>개/cm<sup>3</sup>의 고농도로 입자 계수기의 측정 범위로 회석하기 위해 HEPA(High Efficiency Particulate Air) 필터를 설치했다. 이를 통해 총 배경 농도가 30개/cm<sup>3</sup>미만인 청정 공기

를 공급하였는데, 이때의 입경 별 배경 농도는 대략  $10\text{개}/\text{cm}^3$  이하였다.

혼합부에서는 연소 가스와 청정 공기가 잘 섞이도록 차폐판(baffle)을 설치하고, 하니콤(honeycomb)과 망(mesh)을 이용해 유동과 입자 농도를 균일하게 하였으며, 유속은 soot 입자 사용의 경우 약  $0.5\text{m/s}$ 를 선정했다. Okazaki와 Willeke<sup>(18)</sup>의 모델을 기초로 제작한 프로브로 입자를 샘플링 하였으며, 대상 입자가 서브 마이크론의 입경 범위이므로(Sk 수는 약  $10^6$ ) 입자의 관성력에 의한 샘플링 프로브 입구에서의 손실은 무시할 만하다. 샘플링 위치는 코로나 방전 반응부로부터 약  $50\text{cm}$  위치이며, 반응기 ①의 인가 전압 범위인  $0\sim 13.5\text{kV}$ 에서 측정 위치에 따른 농도 편차가 10% 이내임을 확인하였다.

입자의 크기 및 농도는  $10\text{nm}$ 에서  $1\mu\text{m}$ 의 크기를 측정할 수 있는 SMPS(Scanning Mobility Particle Sizer)를 사용했다. Soot의 평균 입경(NMD)이  $0.28\mu\text{m}$ 이고 기하학적 표준 편차(GSD)는 약 1.63임을 보여준다. 한편 연소 가스의 농도 변화는 연소 가스 측정기(Combustion Analyzer; Model KM 9006)를 사용해 측정했다.

## 2.2 코로나 방전 반응기

코로나 방전 반응기는 선대 평판형(wire to plate; 반응기 ①)과 선대 원통형(wire to cylinder; 반응기 ②)을 선정했다. 회석 터널의 후단에 위치한 선대 평판형은 연소 가스가 회석 된 후, 반응기로 유입되기 때문에 입자의 입경 별 농도 변화를 관찰하기가 용이하지만 연소 가스의 농도 변화를 감용하기가 어렵다. 반면에, 선대 원통형의 경우는 연소 가스가 직접 반응기로 유입되기 때문에 연소 가스의 농도 변화가 쉽게 감용되지만, 입자의 농도는 너무 높아 같은 위치에서의 측정이 불가능하다. 선대 평판형의 경우, 방전 와이어와 집진판 간의 거리는 약  $1.5\text{cm}$ 이고, 집진판의 길이는  $3\text{cm}$ 이다. 직류  $\pm 20\text{kV}$ 까지 출력되는 고전압 전원을 사용하여,  $0\sim\pm 13.5\text{kV}$ (평균 전기장 강도:  $0\sim 9\text{kV/cm}$ )를 인가했다. 방전 와이어는 니켈 성분으로 굵기가  $0.2\text{mm}$ 인 것과, 구리를 합성한 재질로 꼬인(twisted) 형태를 가지며, 굵기가  $1.1\text{mm}$ 인 2가지를 사용했다. 선대 원통형의 경우, 와이어와 원통간의 거리는 약  $2.5\text{cm}$ , 원통 반응기의 길이는 약  $20\text{cm}$ 이며, 인가 전압은 약  $0\sim\pm$

$18\text{kV}$ (평균 전기장 강도:  $0\sim 7.2\text{kV/cm}$ )이다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 선대 평판형

Fig. 2와 3은 재비산이 입경 분포의 변화에 미치는 영향을 인가 전압의 극성에 따라 비교했다. 먼저 Fig. 2는 양의 전압을  $0\sim 13.5\text{kV}$ 로 증가시키면서 측정된 입자의 크기 분포 변화이다. 인가 전압의 증가에 따라 모든 입경에 대해 농도가 감소하는 경향을 보이며, 인가 전압이  $+13.5\text{kV}$ 인

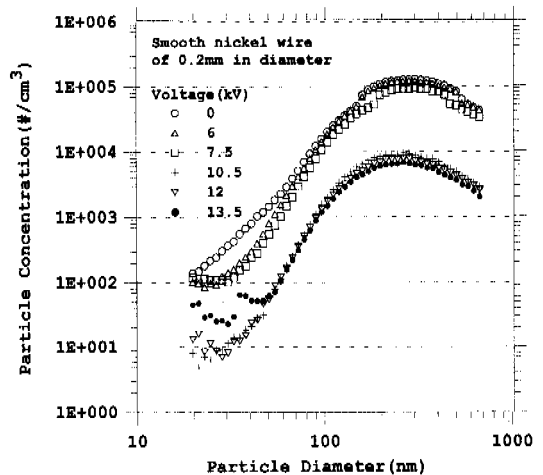


Fig. 2 Effect of positive applied voltage on size distribution

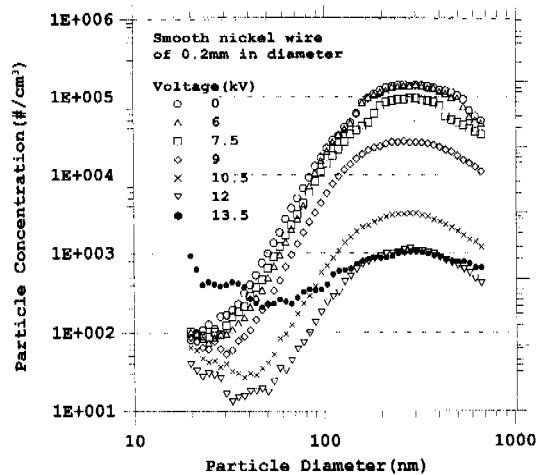


Fig. 3 Effect of negative applied voltage on size distribution

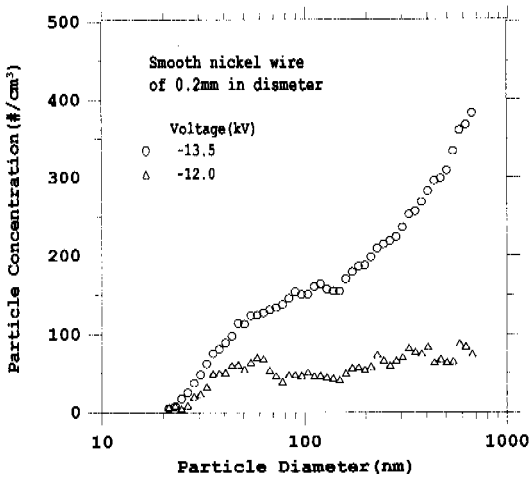


Fig. 4 Reentrainment from soot agglomeration plate

경우에는 50nm 이하의 영역에서 약간의 농도 증가 경향이 있었다. 인가 전압이 음인 경우인 Fig. 3에서도 같은 전압에서 150nm 이하의 영역에서 농도가 증가했다. 이 외에도 Fig. 3에서는 300nm 이상의 영역에서 -13.5kV가 인가된 경우에 -12kV가 인가된 경우보다 농도가 증가했다. 이러한 재비산 입자는 주로 방전 와이어나 집진판에 부착되어 응집되었던 soot 입자들이 재비산되기 때문이다. 특히 음극 코로나의 경우는 난류 강도의 증가로 인해 양극 코로나의 경우보다, 재비산 경향이 심하게 발생한다. 입자의 재비산 현상은 유동에 주로 좌우되지만, 입자의 전기전도도의 영향도 중요하다. 전기전도도가 낮은 입자의 경우, 집진층 상에서 역전리가 발생하여 재비산이 촉진되며, 전기전도도가 높은 입자의 경우는 전하를 쉽게 잃고 비산되는 경향이 있다. Soot은 전기전도도가 약  $3 \times 10^4 \Omega^{-1}m^{-1}$ 으로 매우 높아 역전리 현상은 발생하지 않지만, 집진판 상에서 유동에 의해서 쉽게 재비산되는 성향을 갖는다.

집진판에서 재비산되는 입자의 입경 분포 특성은 다음의 실험을 통해 확인할 수 있다. 집진판은 soot이 덮여 있고, 방전 전극은 깨끗이 닦아낸 상태에서 청정 공기를 유입시켜, 인가 전압의 변화에 따라 집진판으로부터 재비산 되는 입자의 입경 분포를 비교했다. 그 결과 Fig. 4에서 보듯이 인가 전압이 -12kV, -13.5kV인 경우에 입경이 증가할수록 재비산 농도가 증가했으며, +13.5kV의 경우에는 동일 상태의 집진판에서 재비산이

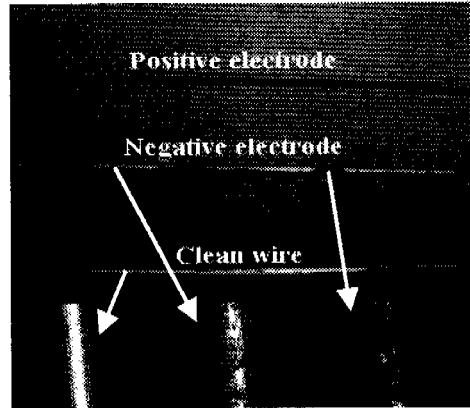


Fig. 5 Effect of corona polarity on self-cleaning of wire

거의 이루어지지 않았으며, 배경 농도에 준하는 농도이기 때문에 데이터화 시키지 않았다. 음극 코로나의 경우, 같은 전압의 양극 코로나에 비해 2차 유동 뿐 아니라 난류 유동이 증가하기 때문에 집진판의 입자 재비산이 양극 코로나에 비해 상대적으로 활발하기 때문이다. 이러한 사실로 미루어 볼 때, Fig. 2-3에서 보인 50nm 혹은 150nm 이하 영역에서의 농도 증가는 주로 방전 와이어로부터의 재비산 때문이라 생각된다. 방전 와이어의 재비산 현상은 서로 다른 실험 조건 하에서 와이어 사진을 통해 그 변화를 확인할 수 있었다. 초기의 깨끗한 와이어(Fig. 5의 clean wire 상태) 2개를 각각 재비산 현상이 발생하지 않는 약 6kV에서 약 30분 동안 방치하면, 두 개의 와이어는 soot으로 덮여 검게 변한다(Fig. 5의 positive electrode 상태와 유사). 그 후 인가 전압을 각각  $\pm 13.5kV$ 로 증가시키고 30분이 경과한 뒤의 와이어 상태를 비교했다. 먼저 +13.5kV를 인가한 경우는 전체적으로는 거의 변화가 없었던 반면에, -13.5kV를 인가한 경우는 부분적으로 상당한 박리 현상이 발생하여 soot이 벗겨지고 있음을 확인했다. 이러한 자기 청정(self-cleanign)작용에 의해 soot이 연소되어 CO나 CO<sub>2</sub>로 변환됨을 확인한 바 있으며, 코로나 방전에 의해 발생한 산소 라디칼(O, OH 등)때문이라고 보고된 바 있다.<sup>(11)</sup>

지금까지의 결과를 통해 음극 코로나에서 방전 전극의 자기 청정 현상은 다음의 두 가지 원인에 의해서라고 생각된다. 첫째는 코로나 방전에 의

한 soot 산화 작용이고, 둘째는 방전 와이어에 부착되어 있던 입자의 박리에 의해서이다. 즉 전기 전도도가 큰 soot 입자들 중 일부는 높은 에너지를 갖는 코로나 tuft에 의한 sputtering으로 비산될 수 있다.

한편 soot 입자 외에도 금속 와이어의 일부도 강한 산화 에너지에 부식되어 떨어져 나갈 수 있다고 알려졌다.<sup>(19)</sup> 일반적으로 이 경우는 농도가 매우 낮아 무시되기도 하지만, 박리된 입자가 와이어 금속인지, soot 입자인지를 확인할 필요가 있다. 이를 위해 본 실험에서 주로 사용된 니켈 와이어(smooth surface nickel wire; 직경 0.2mm)뿐

아니라 구리 합성된 꼬인 와이어(twisted copper wire; 직경 1.1mm)를 방전 와이어로 사용하여, 코로나 반응기로 청정 공기를 유입시키면서 인가 전압 및 시간의 경과에 따른 농도 측정을 했다. Fig. 6-8은 방전 와이어 주변에서 높은 에너지를 갖는 tuft에 의해 와이어가 sputtering되면서 corrosion된 와이어 중 일부 금속 입자가 비산된 농도 분포이다. 먼저 구리 와이어의 경우 Fig. 6에서 보듯이 음의 인가 전압이 증가할수록 와이어 corrosion에 의한 농도가 증가했으며, -14.3kV에서는 100nm 이하의 입자가 증가하는 현상이 발견됐다. 반면 같은 조건의 +15.0kV에서는 농도 변화가 거의 없었다. 이때 -14.3kV, +15.0kV는 각각 Fig. 2, 3의 실험에서 구한 전류값 0.45mA (-13.5 kV일때)와 같은 값을 갖는 전압을 선정된 것이다. Fig. 7은 -14.3kV를 인가한 후 시간이 경과하면서 농도가 전차 감소한다는 것을 보여준다. 이는 와이어의 corrosion으로 인한 입자 재비산이 와이어의 표면 상태에 따라 달라진다는 것을 의미한다. 반면에 앞의 경우도 마찬가지로 0.45mA에 해당하는 -15.8kV를 인가한 니켈 와이어를 사용했을 때에는 Fig. 8에서 보듯이 금속 재비산 입자가 거의 발생하지 않았다. 이는 니켈 와이어가 구리 와이어보다 sputtering에 대한 내구성이 뛰어난 것을 의미한다.

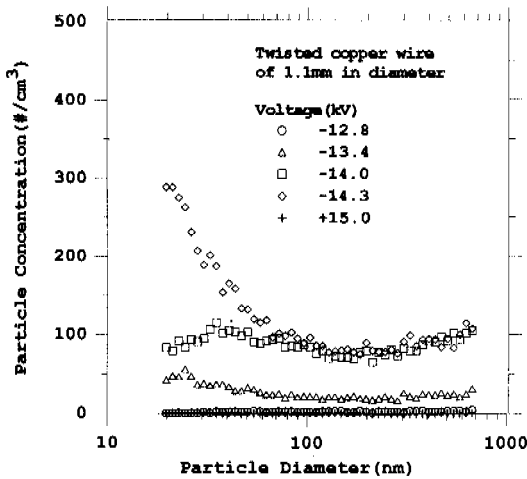


Fig. 6 Effect of applied voltage on size distribution

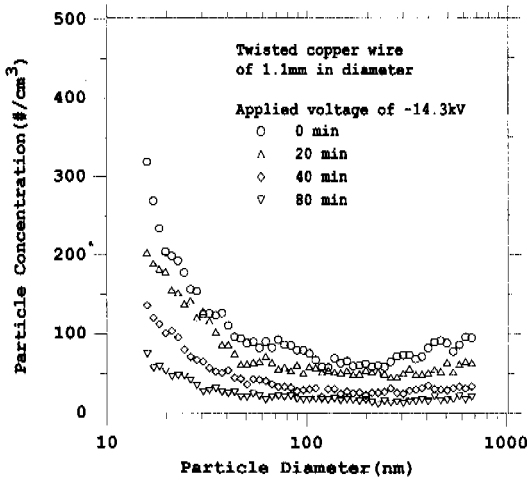


Fig. 7 Effect of reactor operating time on particle reentrainment

### 3.2 선대 원통형 반응기

코로나 방전이 응용된 soot의 산화 반응은 CO

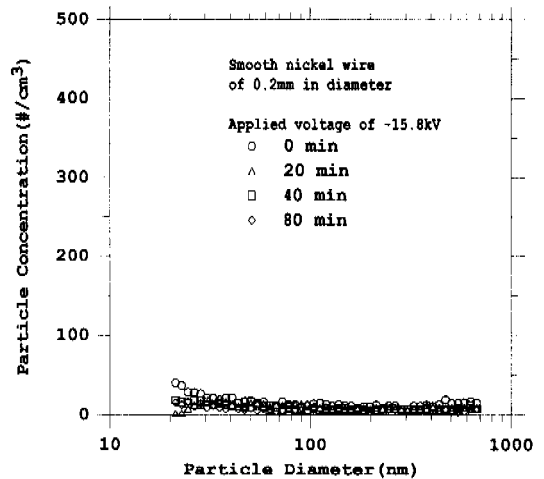


Fig. 8 Effect of reactor operating time on particle reentrainment

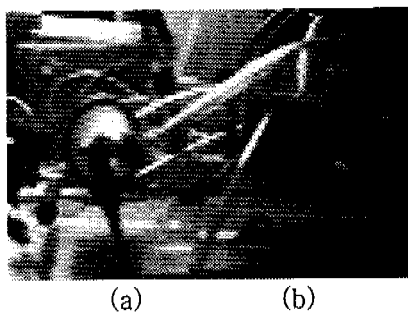


Fig. 9 Photographs of the (a) streamer corona and (b) tuft corona in the wire-to-cylinder reactor

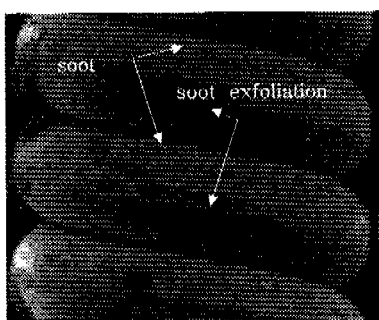


Fig. 10 Exfoliation of the soot deposit

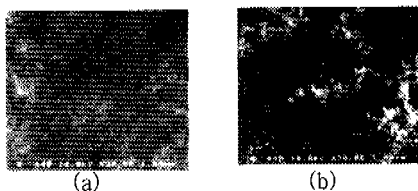


Fig. 11 SEM photographs for aluminum foil wrapped in the reactor wall (— 1 $\mu$ m)

가스의 농도 변화를 통해 확인할 수 있다. 연소가스가 화염에서 희석 공기 없이 직접 선대 원통형 반응기로 유입되면 CO 농도의 변화를 직접적으로 측정할 수 있다.

표면이 매끄러운 니켈 와이어와는 달리 꼬인 형태의 구리 와이어에서는 스트리머 코로나로의 전이 현상이 +15kV와 +18kV 사이에서 쉽게 관찰됐으며, 그 이상에서는 스파크로 전이됐다. 반면에 같은 크기의 음의 전압에서는 스트리머가 발생하지 않았다. 이러한 스트리머 코로나는 보통 인가 전압이 양인 경우에 나타난다고 알려졌다

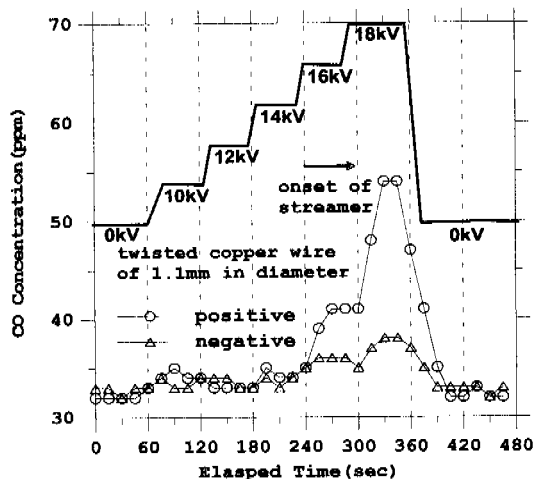


Fig. 12 CO gas concentration change

다.<sup>(20)</sup> Fig. 9(a)에서 보듯이 스트리머 코로나는 방전 와이어 주변 뿐 아니라 반응기 내의 상당한 공간까지 전파된다. Fig. 9(b)는 클로우 혹은 실 코로나 방전의 경우로, 스트리머에서와 같은 발광 현상은 생기지 않았다. Fig. 10은 이러한 스트리머 방전 반응이 발생한 후, 꼬인 와이어 전극의 상태인데, 나사골에 soot이 많이 붙어있는 반면에 돌출부인 나사산에는 soot이 박리되어 있음을 확인했다. 이는 방전 와이어로 부착된 soot 입자 중에서 와이어의 돌출부에 부착된 입자들은 스트리머 방전에 의한 영향을 받아 재비산 혹은 산화 반응을 일으키지만, 오목한 지점에 부착된 soot은 그러한 영향을 크게 받지 않음을 의미한다. Kanazawa 등<sup>(9)</sup>은 이러한 스트리머 방전에 의해 방전 와이어에 부착되어 있던 일부 smoke 입자가 재비산 되는 현상을 관찰한 바 있다. 한편 Fig. 11은 실 코로나 및 스트리머 코로나의 영향을 보기 위해 반응기 벽에 알루미늄 박을 부착하고,  $\pm 15$ kV를 인가한 뒤, 서로 비교한 사진이다. Fig. 11(b)에서는 별다른 변화없이 soot 입자가 붙어있었지만, 스트리머 코로나가 발생한 Fig. 11(a)에서는 알루미늄 박이 부분적으로 탄 흔적이 보였으며, Fig. 11(b)과 비교해 같은 시간 동안 soot의 구조에도 차이가 있었다. 실제로 스트리머는 반응기 벽까지 도달하였고, 온도가 수 100K까지 증가할 수 있다고 알려졌다.<sup>(21)</sup> 이러한 사실로 미루어 스트리머 코로나에 의해 발생한 산소계 라디칼의 연소 반응에 의한 것임을 추정할 수 있었다. 즉, 실 코로나가 주로 와이어 주변에서 산화

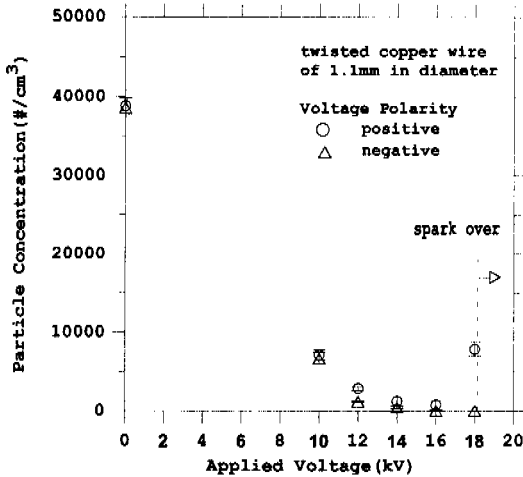


Fig. 13 Particle concentration change

반응을 일으킬 수 있는데 비해, 스트리머 코로나 방전에서는 반응기 내의 전 영역에서 코로나 산화 반응을 일으킬 수 있음을 의미한다. 한편 코로나 산화 반응과 입자의 재비산의 정성적인 관계를 Fig. 12, 13에서 알 수 있다. Fig. 12, 13은 두 가지 코로나 방식에 따라 코로나 반응기 내에서의 CO 가스 농도와 입자 농도 변화를 나타낸 것이다. 먼저 Fig. 9(b)에서와 같이 인가 전압이 음인 경우에는 CO 가스 농도는 초기에 약 33ppm 이었는데, 인가 전압 -14kV(5.6kV/cm)에서 CO 가스 농도가 증가하기 시작하고, 최고 전압인 -18kV (7.2kV/cm)에서 38ppm이다. 반면에 인가 전압이 양인 경우는 스트리머가 형성되면 급격히 증가하여 +18kV에서 약 55ppm까지 증가했다. 스트리머 코로나는 자체가 스파크로 전이되기 전의 과도적인 상태로, 매우 불안정하다.<sup>(20)</sup> 그렇기 때문에 CO 가스의 농도도 측정시간에 대해 요동이 매우 심했다. Soot 농도는 인가 전압에 관계없이 꾸준히 감소하다가 스트리머 코로나가 발생했던 약 16~18kV에서 오히려 증가한다. 선대 평판형(집진판 길이: 3cm)과는 달리 선대 원통형(집진판 길이: 20cm)의 경우, 이론적인 집진 효율이 90% 이상(유속: 0.1m/s)임을 고려할 때 스트리머 코로나에 의한 입자의 재비산은 무시할 수 없을 정도로 크다는 것을 알 수 있다. CO 농도의 증가는 반응기 내의 soot이 코로나 방전에 의해 형성된 라디칼과 반응해 연소된 것이라는 선행 결과가 있지만, CO<sub>2</sub> 가스 중 일부가 해리 될 수 있다는

연구 결과도 존재하는 매우 복잡한 반응임을 고려할 때 좀 더 연구가 필요하다.

#### 4. 결론

코로나 방전 반응기에서의 soot 입자의 재비산 특성에 관해 입경 분포 및 CO 가스 농도 측정용 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

인가 전압이 양인 경우는 크기 분포에서 큰 차이가 없었지만, 음의 전압이 인가된 경우(약 9kV/cm) 150nm보다 작거나 300nm 보다 큰 범위의 입자들이 재비산되었다. 후자의 경우(300nm 이상) 집진판에 응집되어 있던 입자들이 코로나 이온에 의해 형성된 난류 유동의 영향을 받아 재비산 됐기 때문이다. 전자의 경우(150nm이하), 특히 니켈 와이어를 사용한 경우에는 이온 sputtering이나 코로나 산화 반응에 의해 주로 와이어로부터 재비산된 입자임을 다음과 같은 결과를 통해 유추할 수 있었다. 즉, 구리 와이어를 사용한 경우는 150nm 이하의 금속 파편 조각들이 와이어로부터 비산될 수 있었던 반면에 니켈 와이어에서는 거의 무시될 정도로 적은 양만이 비산되었다. 그리고 soot으로 덮여있던 방전 와이어가 양의 코로나에서는 큰 변화가 없지만, 음극 코로나에서는 자기 청정 작용으로 원상태로 복원되었다. 이는 이온 sputtering이나 코로나 산화 반응에 의해서이다. 이온 sputtering은 입자의 재비산을 유발하며, 코로나 산화 반응에서는 CO 농도가 증가하면서, 산화되지 못한 일부 입자가 비산되는 것이다. 특별한 경우로 양의 전압에서 스트리머 코로나가 발생할 수 있으며, CO 농도가 매우 격렬히 증가했다. 한편 어떠한 경우든 CO 농도의 증가는 산화 반응 뿐 아니라 CO<sub>2</sub>의 해리 반응도 일부 기여했을 것으로 추정된다.

#### 참고문헌

- (1) 엄명도, 1999, "자동차 배출가스 저감을 위한 후처리 기술 동향," 자동차공학회지, Vol. 21, No. 6, pp. 33~35.
- (2) Hawker, P., Huthwohl, G., Henn, J. and Koch, W., 1998, "Effect of a Continuous Regenerating Diesel Particulate Filter on Non-Regulated Emissions and Particle Size Distribution." SAE

paper 980189.

- (3) Durnholz, L. and Luders, H., 1997, "Effects of a Diesel Particulate Filter on Particle Size Distribution of a Heavy Duty Diesel Engine," *Corning Particle Sizing Program-Final Report*.
- (4) Colletta, A., Costa, G., Pinti, M. and Scorsone, V., 1995, "Self-Cleaning Electrostatic Muffler for Diesel Vehicles," *SAE Paper 952389*.
- (5) Harano, A., Sadakata, M. and Sato, M., 1991, "Soot Oxidation in a Silent Discharge," *J. Chem. Eng. of Japan*, Vol. 24, pp. 100~106.
- (6) Morimune, T., 1997, "Reduction of NO<sub>x</sub> and Smoke in Diesel Exhaust Gas by DC Corona Discharge Process," *Exp. Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics*, pp. 2581~2588.
- (7) Flagan, R. C. and Seinfeld, J. H., 1988, *Fundamentals of Air Pollution Engineering*, Prentice-Hall, p. 417.
- (8) Lin, C. H., Chao, B. T. and Soo, S. L., 1993, "Effect of Soot Particles on Corona Discharge," *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 13, pp. 434~449.
- (9) Kanazawa, S., Ohkubo, T., Namoto, Y., Adachi, T. and Chang, J. S., 1997, "Simultaneous Measurements of Wire Electrode Surface Contamination and Corona Discharge Characteristics in an Air-Cleaning Electrostatic Precipitators," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 33, pp. 279~284.
- (10) Dorsey, J. A. and Davidson, J. H., 1992, "Ozone production in Electrostatic Air Cleaners with Contaminated Electrodes," *Proc. of IEEE/IAS*, pp. 1560~1566.
- (11) Masuda, S. and Moon, J. D., 1983, "Electrostatic Precipitation of Carbon Soot from Diesel Engine Exhaust," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. IA-19, pp. 1104~1111.
- (12) Penetrante, B. M., Brusasco, R. M., Merritt, B. T., Pitz, W. J. and Vogtlin, G. E., 1999, "Feasibility of Plasma Aftertreatment for Simultaneous Control of NO<sub>x</sub> and Particulates," *SAE paper 1999-01-3637*.
- (13) Yamamoto, T., Mieno, M., Shibata, K. and Sakai, K., 1998, "Studies of Rapping Reentrainment from Electrostatic Precipitators," *Proc. 7th Int. Conf. on Electrostatic Precipitation*, KyungJu, pp. 163~170.
- (14) Kihm, K. D., 1987, *Effects of Nonuniformities on Particle Transport in Electrostatic Precipitators*, Ph.D. thesis, Stanford Univ.
- (15) Zukeran, A., Ikeda, Y., Ehara, Y. and Ito, T., 1997, "Investigation of Two-Stage Type Electrostatic Precipitator Reentrainment Phenomena under Diesel Flue Gases," *IEEE Trans. Ind. Applications, Society Annual Meeting*, New Orleans, Louisiana.
- (16) Cottingham, C., 1998, "An Analysis of the Effect of Carbon in Ash Levels on ESP Performance," *Proc. 7th Int. Conf. on Electrostatic Precipitation*, KyungJu, pp. 84~92.
- (17) Santoro, R. J., Semerjian, H. G. and Dobbins, L. D., 1983, "Soot Particle Measurements in Diffusion Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 51, pp. 203~218.
- (18) Okazaki, K. and Willeke, K., 1987, "Transmission and Deposition Behavior of Aerosols in Sampling Inlets," *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 7, pp. 275~283.
- (19) Hobbs, P. C. D., Gross, V. P. and Murray, K. D., 1991, "Reviewing Clean Corona Discharge, Laser-Produced Plasma Ionization Technologies," *Microcontamination*, June. pp. 19~26.
- (20) Chang, J. S., Lawless, P. A. and Yamamoto, T., 1991, "Corona Discharge Process," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 19, pp. 1152~1165.
- (21) Chang, J. S., 1999, Personal Communication.