

정전 방식 디젤 PM 포집 장치 성능 및 엔진 적용성 평가

김 학 준 · 한 방 우 · 김 용 진*

한국기계연구원 환경기계연구본부

Evaluation on Performance of an Electrostatic Diesel PM Trap Device and Its Application to Diesel Engine After-treatment

Hakjoun Kim · Bangwoo Han · Yongjin Kim*

Eco-machinery Research Division, Korea Institute of Machinery & Materials(KIMM), 171 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea

(Received 15 May 2008 / Accepted 19 June 2008)

Abstract : Performance of electrostatic diesel PM filtration systems (E-DPS) with different types has been tested using the carbon particles generated by spark discharge in laboratory. Among the five electrostatic precipitators, the multiple wires cylindrical E-DPS with the highest collection efficiency and relatively lower differential pressure at the flow rate of 1 m³/min, as an applicable device to diesel engine as an after treatment system, has been combined with another collection cylinder to improve the collection efficiency of diesel particulate matters generated from diesel engines. The multiple wires cylindrical E-DPS combined with the cylindrical collector showed the collection efficiency of more than 60% at the engine speed of 2,000 rpm with the engine loads of 25 and 50%.

Key words : Diesel engine(디젤 엔진), Diesel particulate matter(디젤 입자상 물질), Electrostatic precipitator(정전 포집 장치), After treatment system(후처리장치), Collection efficiency(포집효율)

Nomenclature

CMM : m³/min

Subscripts

DPF : diesel particulate filter
DPS : diesel particulate filtering system
E-DPS : electrostatic-diesel particulate filtering system
PM : particulate matter

1. 서 론

디젤 엔진(Diesel engine)은 가솔린 엔진(Gasoline

engine)에 비해 연료소비 효율이 높기 때문에 수 년 동안 여러 산업에 걸쳐 널리 사용되어 왔으며, 현재는 대형 운송 장치 뿐만 아니라, 소형 승용차에까지 점차적으로 널리 사용되고 있다. 특히, 이산화탄소(CO₂)저감에 대한 규제가 날로 엄격해 지고 있기 때문에 향후 연소효율이 우수한 디젤 자동차의 수요가 급격히 증가할 것으로 예상되고 있다. 그러나 디젤 엔진은 가솔린 엔진에 비해 배기관 내 배출가스 유해물질 중 질소산화물(NO_x)과 입자상 물질(Particulate matter, PM)이 많이 배출되어 이에 대한 규제가 날로 강화되고 있다.

Fig. 1은 전형적인 디젤 엔진으로부터 배출되는 PM의 질량과 수농도 분포를 나타내고 있다. Fig. 1에서도 알 수 있듯이 50-1,000 nm 크기의 accumu-

*Corresponding author, E-mail: yjkim@kimm.re.kr

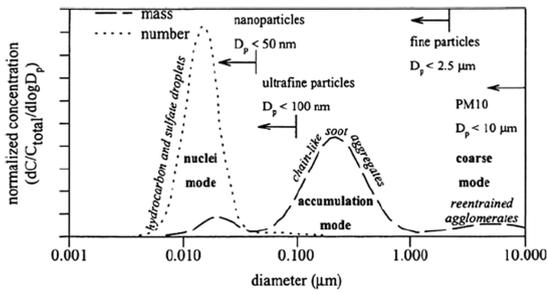


Fig. 1 Particle size distribution of typical engine exhaust, based on number and mass¹⁾

lation 모드에 해당하는 상대적으로 큰 입자들은 질량의 대부분을 차지하고 있다. 그러나 100 nm 이하 nuclei 모드에 해당하는 미세한 입자들은 수농도 관점에서 대부분을 차지하고 있지만, 질량 관점에서는 그 양을 무시할 정도로 적은 것으로 알려져 있다. 그러나 이러한 미세한 입자들은 인체 유해성 관점에서 볼 때 큰 입자들에 비해 폐 혹은 기관지 기관 등의 인체 기관에 상대적으로 쉽게 침투하여 인체에 악영향을 미치기 때문에 현재 German Environmental Agency, UBA 등 여러 국외 환경 기관에서 질량 기준이 아닌 수농도 기준으로 디젤 입자상 물질을 규제해야한다는 주장이 나오고 있다.^{2,3)}

경유 자동차에서 배출되는 입자상 물질을 저장하기 위한 방안으로 현재까지는 디젤 매연 여과장치인 DPF(Diesel particulate filter)가 널리 사용되고 있다.⁴⁾ DPF는 경유엔진에서 배출되는 입자상 물질을 세라믹(Ceramic) 필터에 포집하여 태우는 기술로서 PM을 80% 이상 저장할 수 있어 매연저감 측면에서는 아주 우수하나 세라믹 가공비가 비싸고, 필터에 입자상 물질이 포집됨에 따라 엔진 배압이 증가하기 때문에 엔진 출력과 엔진 연료소비율이 다소 희생되는 문제점이 존재한다.⁸⁾

이러한 세라믹 DPF를 대체할 대안으로 배압이 낮고 및 제조 원가가 적은 정전포집방식 매연 여과장치가 활발히 연구 개발되고 있다.⁴⁻⁶⁾

Wright et al.⁵⁾과 Rubino et al.⁶⁾은 와이어-실린더(Wire to cylinder, 원통형 와이어) 방식의 정전포집장치를 디젤 엔진 및 가솔린 엔진에 적용하였으며, 박석주 등⁴⁾는 DPF로 널리 사용되고 있는 세라믹 필터 대신 금속성 폼(Foam) 필터에 핀-플레이트(Pin to

plate) 정전포집방식을 접목하고자 하였다. 그러나 일반적으로 정전포집장치에 사용되는 하전방식은 와이어-실린더 및 핀-플레이트 방식 외 그 종류가 다양할 뿐 만 아니라, 1단 및 2단 정전 포집방식 적용이 가능하다.

따라서 현재까지는 디젤 후처리장치에 적용 가능한 최적의 정전포집 방식에 대한 연구가 부족한 상태이므로, 본 연구에서는 다양한 구조의 하전 방식 및 집진 방식을 디젤 후처리용 정전포집 장치에 적용하여 새로운 DPF 장치 개발의 가능성을 제시하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1 정전 나노 PM 제거 장치 제작

2.1.1 원통형 와이어(Wire) 방전

Fig. 2는 원통 구조의 와이어 방전방식의 정전포집장치의 구조를 나타내고 있다. 원통의 직경은 72 mm이고, 원통의 길이는 620 mm이며, 방전 와이어로 0.5 mm의 텅스텐 재질을 사용하였다. 절연체로 허니컴(Honeycomb) 세라믹을 이용하였고, 와이어의 연결 나사부에서의 스파크 방전을 억제하기 위해서 원통 직경을 100 mm로 확장시켰다. 한편, 허니컴 세라믹 절연체 내에 약간의 불순물이 존재하여 고전압에서 이상 방전(Spark over)이 발생하여 세라믹 절연체를 허니컴 세라믹 중심부내에 추가로 삽입하였다.

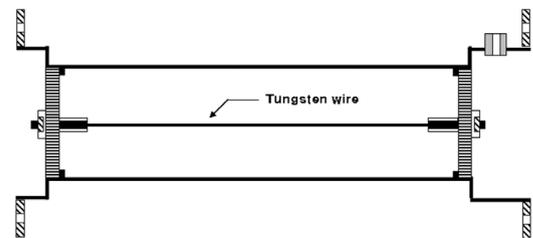


Fig. 2 Schematic of a wire-cylinder type E-DPS

2.1.2 멀티(Multi) 원통형 와이어 방전

인가전압을 낮추고 하전부에서의 체류시간을 증가시키기 위하여 원통형 와이어 방전 정전 포집 장치를 작은 단위 셀 구조로 만들고, 여러 개를 병렬로 구성하는 장치를 제작하였다. Fig. 3은 멀티 원통형

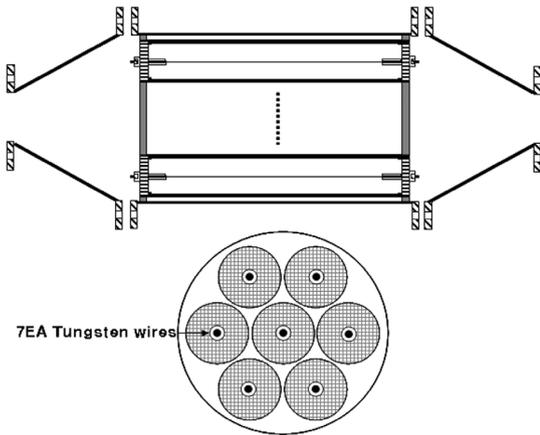


Fig. 3 Schematic of a multi wire-cylinder type E-DPS

와이어 방전 방식의 정전 포집 장치의 구조를 보여 주고 있다. 이는 원통형 와이어 방전 정전포집 장치를 소형화시키고, 소형 포집장치 7개를 병렬로 연결하여 구성하였다. 각 셀의 방전 와이어는 하나로 모아 세라믹 절연체를 통하여 시스템 외부로 연결되도록 구성하였다. 단위 셀의 직경은 42 mm이고, 단위 셀의 길이는 375 mm로 제작하여 체류시간을 와이어 방식의 0.15 sec에 보다 0.07 sec 증가시켰다.

2.1.3 원통형 원형 핀(Circular pin) 방전

원통형 와이어 방전 방식은 방전부가 와이어로 되어 있어 방전부 끝에서의 국부 전기장이 작기 때문에 코로나를 발생시키기 위한 인가전압이 매우 높아진다. Fig. 4와 같은 원형 핀 방전 장치는 방전부를 와이어 대신 톱니와 같은 형상의 원형 핀을 방전 봉에 등간격으로 여러 개 설치하여 구성하여 핀 끝 부분에서의 국부 전기장을 증가시키고 낮은 인가전압에서도 코로나 방전이 쉽게 발생할 수 있도록 하였다. 외형은 원통형 와이어 방전방식 장치 동일하게 제작하였다.

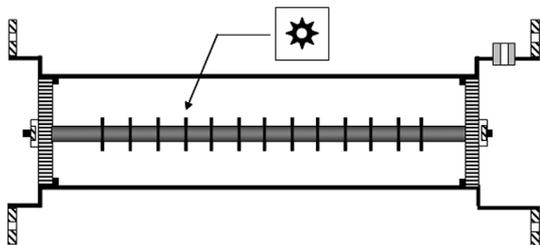


Fig. 4 Schematic of a circular pin type E-DPS

2.1.4 원통형 나선 에지(Twisted edge) 방전

Fig. 5는 원통형 나선 에지 방식 하전장치를 하전부로 사용한 정전 포집 장치를 나타내고 있다. 이 방식은 앞에서 언급했던 와이어, 원형 핀 및 에지 방식 정전 포집장치에 원심력을 부가시키기 위하여 방전부를 나선형의 에지 모양으로 구성하여 유입되는 공기가 방전부를 통과할 때 회전하도록 하여 큰 입자를 효율적으로 제거하고자 제작 하였다. 외형은 원통형 와이어 방전방식 장치와 동일하게 제작하였다.

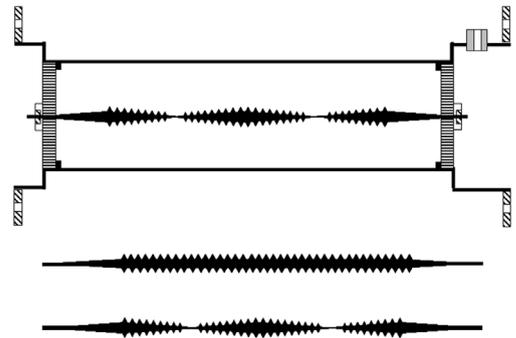


Fig. 5 Schematic of a pipe type twisted edge type E-DPS

2.1.5 2단 집진을 위한 원통형 집진부

한편, 앞서 언급된 정전 포집장치들은 1단 정전포집 형태로 하전과 집진이 동시에 일어나, 하전된 입자가 전부 포집되지 못하고 배출구로 배출될 수가 있다. 따라서 Fig. 6과 같이 하전된 입자의 포집효율을 상승시키기 위하여 원통형 집진부를 추가한 2단 정전 포집장치를 제작하였다. 원통형 집진부 내부에 고전압 인가를 위한 전극봉을 삽입하고 원통외부를 접지시킴으로써, 전극봉과 원통 벽면 사이에 일정한 크기의 전기장을 형성시켜 1단 정전 포집장치에서 포집되지 못한 일부 하전된 입자를 강한 전기장 속에서 추가 포집하도록 하였다.

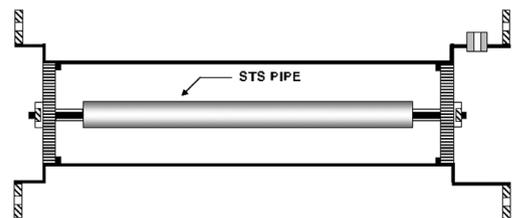


Fig. 6 Schematic of a pipe type collector

2.2 정전 디젤 PM 포집 장치 성능평가용 모의실험

2.2.1 장치 구성

정전 디젤 PM 포집 장치의 성능비교를 위하여 자동차 배기관의 적용 이전의 선행 연구로써, 상온에서 모의입자를 이용한 예비성능 실험장치를 구성하였다. 시험 입자로 는 스파크 방전(Spark discharge)을 이용하여 발생된 탄소 입자를 사용하였으며, 발생된 입자는 입자중화기(Neutralizer; Model 3012, TSI, USA)를 통과시켜 전기적으로 중화시킨 뒤, 시험 덕트 내로 공급하였다. 일반 송풍기를 덕트 입구 쪽에 설치하여 공기를 공급하였고, 헤파(HEPA)필터를 사용하여 흡입 공기의 오염입자를 제거하였으며, 유량은 자체 제작한 오리피스에 의해, 후단의 차압을 측정하여 구하였다. 실험 풍량은 1, 2 m³/min으로 고정하였고, 정전 장치 전·후단에 샘플링장치와 SMPS (Scanning mobility particle sizer, Model 3776, TSI, USA)를 각각 설치하여 전·후단 입자 농도분포를 측정하여 정전 포집장치 포집효율을 계산하였다.

2.3 정전 나노 PM 제거 장치 엔진 적용성 평가용 실험

2.3.1 장치 구성

Fig. 7과 같이, 정전 디젤 PM 포집장치를 실제 디젤 엔진 배기라인 후단에 설치하여 정전 디젤 PM 포집장치 성능평가를 수행하였다. 본 연구는 실제 엔진에 대한 적용성 평가를 위한 기초 연구이므로 엔진 운전조건을 idle 과 2,000 rpm로 고정하고, 부하는 2000 rpm에서 25 및 50 %로 하여 실험을 수행하였다.

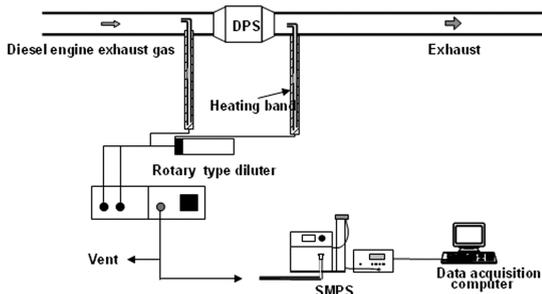


Fig. 7 Schematic for performance test

Table 1 Specifications of a test diesel engine

엔진종류	총배기량(cc)	최대출력(PS/rpm)	최대토크(kgm/rpm)
Santafe(CRDI)	1991	126/4000	29.5/2000

표 1은 본 연구에 사용된 디젤 엔진 제원을 나타내고 있다. 디젤 PM 포집 효율 측정을 위해 정전 PM 포집 장치 전·후단에서 배기가스 샘플링 장치를 설치하였으며, 배기가스 내 가스상 물질의 입자상 물질에 대한 영향을 최소화하기 위해 샘플링 라인을 200°C로 가열하였으며, 회전식 회석장치(Model MD-19, Matt engineering, Switzerland)를 이용하여 고온 회석 후 SMPS를 이용해 입자 농도를 측정하였다.

3. 실험 결과

3.1 정전 디젤 PM 포집장치 모의 성능평가 실험

Fig. 8은 실험 유량이 1 m³/min일 때 1단 정전포집장치 하전부 인가전압/전류에 따른 탄소입자 농도 변화를 보여주고 있다. 하전부 인가 전압이 증가할수록 전 입자 크기 영역에서 수농도가 감소함을 알 수 있다. 이는 하전부 인가전압이 증가할수록 입자 하전량이 증가하고, 하전부 와이어와 포집부에 가해지는 정전기력이 증가하여, 정전포집장치 포집효율이 증가하기 때문이다.

Fig. 9는 실험 유량이 1 m³/min일 때 2단 정전포집장치 집진부 인가전압에 따른 탄소입자 농도 변화

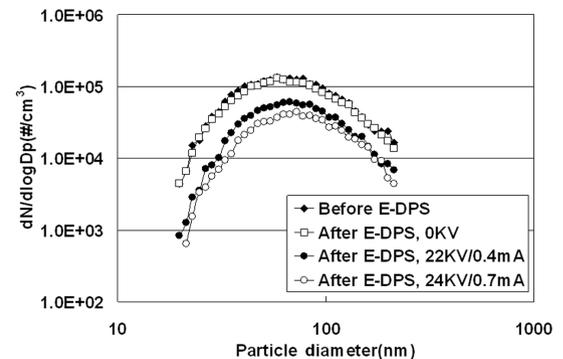


Fig. 8 Changes in number concentrations of particles by applied voltages of an ionizer of 1st stage E-DPS with the wire type ionizer

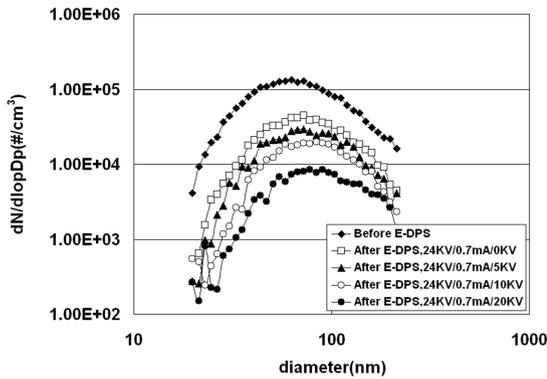


Fig. 9 Changes in number concentrations of particles by applied voltages of a collector of 2nd stage E-DPS with the wire type ionizer

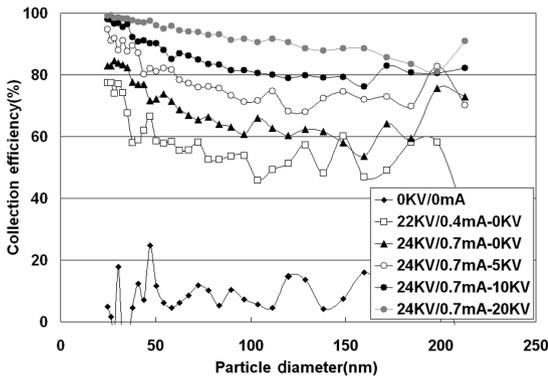


Fig. 10 Changes in removal efficiency of 1st and 2nd stage E-DPS by applied voltages of the pipe type collector

를 보여주고 있다. 2단 집진부 전극봉의 인가 전압이 증가할수록 입자 수송도가 급격히 감소함을 알 수 있다. 이는 인가전압 증가로 인해 2단 집진부 정전기력이 증가하기 때문이다. Fig. 10은 1단 및 2단 정전포집장치의 인가전압과 인가전류가 변화하였을 때 포집 효율변화를 종합적으로 보여주고 있다. Fig. 10에서 보는 것과 같이 1단 및 2단 집진부 인가전압이 증가할수록 집진효율이 증가하는 것을 알 수 있다.

특히, 2단 집진부 인가전압이 20 kV일 경우, 집진효율이 전 입자 영역에서 1단 정전포집장치 집진효율보다 약 30% 상승하였다. 하전부 인가전압을 24 kV/0.7 mA로 고정하고, 집진부 전압을 10 kV 이상 인가시켰을 때, 전영역의 입자 포집효율이 80~100%로 높게 나타났다. 2단 정전포집장치의 경우 1단 집

진장치에서 보다 체류시간이 길어지고, 또한 추가적인 정전기력이 작용하여 1단 집진부에 포집되지 않은 하전 입자가 쉽게 포집되기 때문에 포집효율이 상승하였다.

Fig. 11은 유량을 2 m³/min으로 증가시켰을 때 1단 및 2단 정전포집장치의 입자제거효율 변화를 변화 주고 있다. 유량을 두배로 증가시켰을 때 동일한 인가전압/전류조건에서 집진효율이 20~30% 감소하였고, 전 입자영역에서 60~80%의 포집효율을 나타내었다. 이는 유량 증가에 따른 체류시간 감소하여 입자 하전률이 감소하였기 때문이다.

Fig. 12는 제작된 5종류 정전 포집 장치와 상용 세라믹 DPF의 동일한 유량 조건에서 효율 및 차압을 비교하였다. 1단 정전포집 방식의 경우 원통형 원형 핀방식 < 원통형 나선 에지방식 < 원통형 와이어방식 < 멀티 원통형 와이어방식 순으로 포집효율이 높았다. 원통형 원형 핀 방식 및 나선 에지 방식의 경우 인가되는 전압/전류값이 다른 방식에 비해 높았으나, 포집효율은 상대적으로 60% 이하로 낮게 나타났다. 원형 핀 방식의 경우 원형 핀 끝부분과 원통 내부면간의 간격이 좁아 코로나가 안정적으로 쉽게 발생하는 장점이 있으나, 상대적으로 원통벽면으로 하전된 입자를 밀어내는 정전기력이 약하고, 원형 핀이 없는 부분은 코로나가 발생되지 않는 사각지대(Dead zone)가 되어 미세 입자 하전률이 낮은 단점을 가졌다. 반면 원통형 와이어 방전 방식의 경우, 포집효율이 70% 대로 높았다. 이 방식의 경우 와이

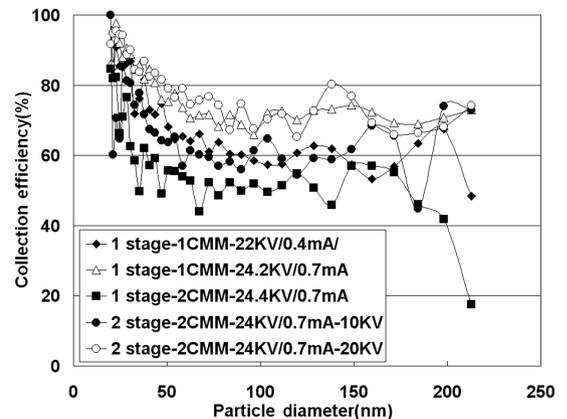


Fig. 11 Changes in removal efficiency of 1st and 2nd stage E-DPS by flow rates

정전 방식 디젤 PM 포집 장치 성능 및 엔진 적용성 평가

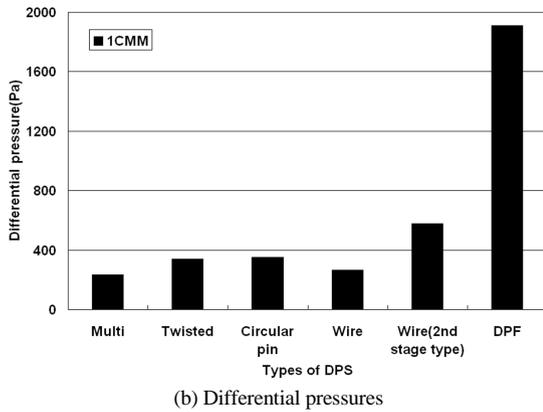
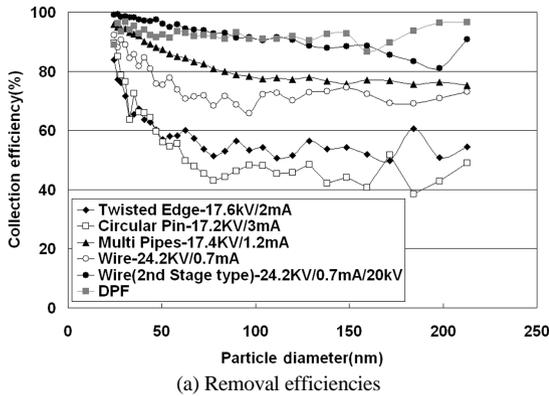


Fig. 12 Comparison of removal efficiencies and differential pressures among DPSs at $1 \text{ m}^3/\text{min}$.

어와 원통 벽면간 간격이 넓으므로 인가되는 전압이 높고 코로나 전류는 낮으나, 코로나가 원통 전체에서 균일하게 발생하기 때문에 하전률이 높고, 정전기력 역시 다른 방식에 비해 높은 장점이 있다. 그러나 이 방식 역시 높은 인가 전압으로 인해 디젤 엔진의 높은 배기가스 온도 조건에서 코로나가 불안정하게 발생할 수 있는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하고, 체류시간을 원통형 와이어 방식에 비해 0.07 sec만큼 증가시킨 멀티 원통형 와이어 방전 방식의 경우 인가전압이 17.4 kV로 낮았으며, 포집효율은 70~100%로 가장 높았고, 차압 또한 234 Pa로 나선형 방식 및 원형 핀 방식에 비해 낮았다. 끝으로, 1단 원통형 와이어 방식의 하전부에 집진부를 추가로 장착한 2단 정전포집방식의 경우 포집효율이 1단 정전 포집 방식에 비해 30% 상승하였으나, 차압은 264 Pa에서 580 Pa로 증가하였다. 특히, 2단

정전포집방식 집진 장치는 동일한 유량조건에서 세라믹 DPF와 유사한 포집성능을 보였음에도 불구하고 차압이 세라믹 DPF의 1910 Pa에 비해 30% 수준으로 매우 낮았다. 따라서 본 연구에서는 디젤 엔진 후처리장치로 적용할 정전집진방식으로 멀티 하전 방식과 2단 집진 방식 복합구조로 선정하였다.

3.2 디젤 PM 제거 성능 실험 결과

본 연구에서는 멀티 원통형 와이어 하전 방식에 2단 집진구조를 가진 정전후처리장치를 다이노모가 장착된 디젤 엔진에 장착하여 성능평가를 실시하였다. Fig. 13은 idle 운전조건에서 하전부 및 집진부 인가전압을 변화시켰을 때 포집효율 변화를 나타내었다. 전압을 18.4 kV 이상 인가하였을 때 50 nm 이하 입자 영역의 포집효율이 80% 이상으로 높게 나타났다. 이는 idle 조건에서 엔진에서 배출되는 대부분의 입자는 nuclei모드에 해당하는 50 nm 이하의 초미세 입자이고, 이때 엔진 배출온도 80~100°C 조건에서 입자간 브라운 운동이 활발히 진행되기 때문에 상온에서 보다 쉽게 포집되게 된다. 특히 하전부에 22.7 kV/0.36 mA, 집진부에 20 kV를 인가하였을 경우 전 입자영역에서 80% 이상의 높은 포집효율을 나타내었다.

Fig. 14는 엔진 정상 운전조건에서 멀티 원통형 와이어 방식 2단 정전후처리장치의 포집효율 변화를 보여주고 있다. 엔진 속도는 idle, 2000 rpm으로 변화시켰으며, 부하는 25~50%로 변화시켰다.

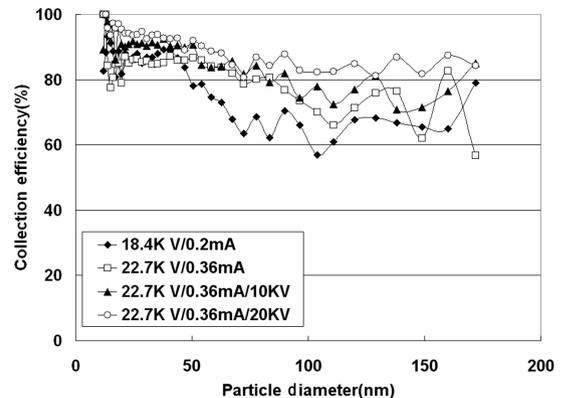


Fig. 13 Changes in removal efficiency of multi type E-DPS at idle by applied voltages

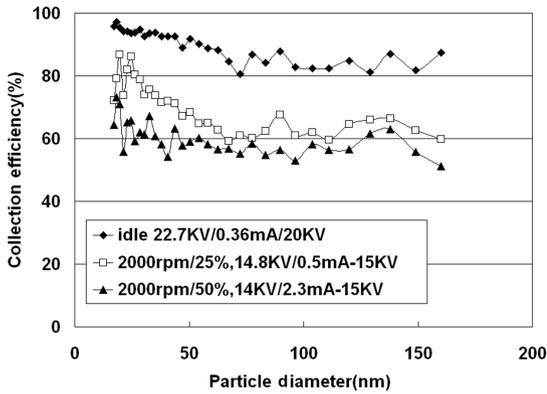


Fig. 14 Removal efficiencies of multi type E-DPS at different engine conditions

idle, 2000 rpm/25% 부하 및 2000 rpm/50% 부하 조건에서 엔진 배출가스 온도는 각각 100, 280, 370°C 이었으며, 하전부 인가 전압/전류 및 집진부 인가 전압은 idle시 22.7 kV/0.36 mA/20 kV 이었고, 2000 rpm/25% 부하 시 14.8 kV/0.5 mA/15 kV, 2000 rpm/50% 부하 시 14 kV/2.3 mA/15 kV 였다. 속도 및 부하가 증가할수록 엔진 온도가 증가하였기 때문에, 동일 전압에서 코로나 전류가 급격히 증가하였다. 이는 온도가 낮은 경우에는 기체 분자간의 거리가 조밀하여 이동 전자들이 분자와의 충돌로 인한 이온화로 안정되는 공간전하 분포를 가지지만, 상대적으로 온도가 높아지면 기체분자간의 거리가 증가되어 전자들이 분자와의 충돌에 의한 이온화가 감소되고, 벽면으로의 급속한 운동에 의하여 전류의 증가가 급격하게 되어 코로나 전류가 상승한다. 또한 온도가 증가할 수록 코로나가 불안정해지고 이상방전 발생 전압도 낮아져, 최대로 인가할 수 있는 전압 또한 감소하게 된다.⁷⁾ 이와 같은 전기적 불안정성 및 낮은 인가 전압으로 인해 포집 효율이 idle에 비해 2000 rpm/50% 부하 조건에서 20% 정도 감소하였고 전 입자영역에서 60%의 포집 효율을 나타내었다.

4. 결론

본 연구에서는 디젤 엔진 후처리 장치용 세라믹 DPF를 대체하기 위하여 5가지의 정전 후처리 장치를 제작하여 디젤 입자상 물질 모사용 탄소입자를

이용한 모의 성능 평가 및 디젤 엔진의 입자상 물질을 이용한 엔진 적용성 평가 실험을 수행하여, 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

- 1) 스파크 방전으로 발생시킨 모의 탄소 입자를 이용하여 원통형 와이어, 멀티 원통형 와이어, 원통형 원형 핀, 원통형 나선 에지 및 2단 정전 방식 정전 후처리장치 및 세라믹 DPF의 미세입자 성능평가를 실시한 결과, 와이어 타입의 하전방식의 포집방식이 가장 효율적임을 확인하였고, 원통형 와이어 방식의 높은 인가전류에 의한 전기적 불안정성을 해결하기 위하여 멀티 원통형 와이어 방식을 적용하여 10~20% 효율 상승효과를 확인 하였다.
- 2) 하전된 미세 입자의 포집 효율을 상승시키기 위하여 2단 정전포집방식을 적용한 결과, 전 입자 크기 영역에서 30% 효율 상승효과를 확인하였으며, 이는 상용 세라믹 DPF의 미세입자 포집효율과 유사할 뿐만 아니라 차압면에서 세라믹 DPF에 비해 70% 저감 성능을 나타내었다.
- 3) 미세입자 포집효율 및 차압 측면에서 우수한 멀티 원통형 와이어 방식에 2단 정전포집방식의 정전 후처리 장치를 디젤 엔진에 장착하여 idle 상태에서 인가전압전류를 상승시켜 디젤 PM 제거 성능을 평가한 결과, 상대적으로 낮은 배기 온도 조건에서는 상온 모의 성능 실험 결과와 같은 80% 이상의 높은 포집효율 성능을 나타내었다. 이로써 50 nm 이하의 미세 디젤 입자가 다량 발생하는 낮은 배기가스 조건에서 정전 후처리 방식 적용성이 매우 높음을 알 수 있었다.
- 4) 엔진 속도를 상승시키고, 부하를 증가시킬 경우, 엔진 배기 온도가 증가하여 코로나의 전기적 불안정성으로 인해 정전 후처리 장치 포집효율이 60%대로 낮게 나타났다. 그러나 고온 배기가스 조건에서 이상방전 현상을 억제하고, 안정적인 전압/전류 공급을 위하여 하전부 절연방식 개조 및 교류 및 직류 중첩 전원공급 장치와 같은 추가적인 장치개발로 문제점을 보완할 경우 고온에서 입자상 물질 포집성능을 향상시킬 수 있고, DPF 대비 저배압 및 유사 포집 성능을 가진 신개념 후처리 장치 개발이 가능할 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 지원으로 시행되는 “성장도력/중기거점/차세대신기술 개발사업”의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- 1) A. P. Walter, “Controlling Particulate Emissions from Diesel Vehicles,” Topics in Catalysis, Vol.28, Nos.1-4, 2004.
- 2) D. E. LEE, “Effects of Trace Metals on Particulate Matter Formation in a Diesel Engine: Metal Contents from Ferrocene and Lube Oil,” Int. J. Automotive Technology, Vol.7, No.6, pp.667-673, 2006.
- 3) D. Kittelson, W. Watts, V. Baltensperger, E. Weingartner, V. Matter, S. Pandis, N. Clark and M. Gautum, Diesel Aerosol Sampling Methodology, University of Minnesota Center for Diesel Research Report, 1999.
- 4) S. Park, D. Lee, J. Kim, G. Cho, H. Kim and Y. Jeong, “Filtration Characteristics of Metal Foam Filters for DPF Combined with Electrostatic Precipitation Mechanism,” Vol.15, No.2, pp.151-158, 2007.
- 5) J. Wright, P. Kukla, A. Ball, F. Gu and J. Bann, “A Novel Electrostatic Method of Ultrafine PM Control Suitable for Low Exhaust Temperature Applications,” SAE 2003-01-0771, 2003.
- 6) L. Rubino, R. I. Crane, J. S. Shirimpton and C. Arcoumanis, “An Electrostatic Trap for Control of Ultrafine Particles Emissions from Gasoline-engined Vehicles,” J. Automobile Engineering, Proc. IMechE., Vol.219, Part D, 2004.
- 7) Y. Kim, T. Hwang and J. Yoo, “A Study on the Collection Characteristics of Submicron Particles in an Electrostatic Precipitator-I. Electrical Characteristics,” Journal of Air-conditioning and Refrigeration, Vol.13, No.7, pp.572-578, 2001.
- 8) Y. Jeong and J. Yoon, Automobile Engineering and Environment, Hansung Publication, Seoul, Korea, 2000.