

전기집진기와 사이클론을 응용한 디젤 입자상 물질의 후처리장치 기초연구

Basic Study on an Aftertreatment System of Diesel Particulate Matters with Electrostatic Precipitator and Cyclone

최인수*
In-Su Choi

ABSTRACT

An aftertreatment system of diesel exhaust gas was attempted to extract particulate matters. The system consisted of a corona-less electrostatic precipitator to agglomerate soot particles and a counter-flow cyclone to collect them. When the effect of high voltage was examined at different configuration of electrode plates, the case of positive 15kV at both plates showed the maximum reduction of 38% in diesel smoke level. However, the back pressure became quite high as engine speed increased, so that minimizing pressure drop in cyclone should be studied with improving collection efficiency of soot particles.

주요기술용어 : Diesel engine(디젤엔진), Aftertreatment system(후처리장치), Electrostatic precipitator(전기집진기), Cyclone(사이클론), Particulate matters(입자상 물질)

1. 서론

석유연료 가격의 상승으로 승합차에도 디젤 엔진의 비율이 계속적으로 증가추세에 있으며, 자동차에서 배출되는 오염물질 중 입자상 물질의 대부분은 경유차에서 비롯되는 것으로 알려져 있고, 이들의 저감책에 대한 많은 연구가 필요한 실정이다.^{1,2)} 디젤 입자상 물질의 배출저감을 위한 대책으로 엔진내부의 연소조건을 개선시키는 방법과 배출가스의 후처리방법들이 연구되고 있다. 전자는 가장 근본적인 방법이지만 막대한 연구비용과 기간이 필요하다. 하지만 후

자는 보다 단기간 내에 유해배출가스의 농도를 낮출 수 있다는 장점이 있어, 최근에 많은 연구 결과들이 발표되고 있다.^{3,4)} 물론 배출가스의 후처리장치의 개발 및 장착은 차량가격의 상승요인이 되지만, 계속적으로 강화되는 엔진의 유해배출가스 규제치를 만족시키기 위해서는 필수 불가결한 요소로 생각된다.

디젤 입자상 물질의 후처리방법으로는 크게 두 가지로 나눌 수 있는데, 세라믹필터로 입자상 물질을 포집한 후 버너 등을 이용하여 퇴적된 물질을 연소시키거나 촉매장치를 이용하여 필터를 재생시키는 방법들이 있다.³⁾ 다른 하나는 고전압을 이용하여 정전장내의 배출가스 입자들

* 회원, 상주대학교 기계공학부

을 집적시켜 관성력 또는 원심력에 의해 포집하는 방법이다.⁶⁾ 세라믹필터와 촉매장치를 이용하는 방법은 많은 연구가 진행되어 입자상 물질을 80% 이상 저감시킬 수 있는 것으로 알려져 있으며, 적절한 가격 및 내구성이 확보되면 곧 실용화될 것으로 예상된다.^{2,5)} 아울러 국내의 경우는 경유에서 유황성분의 규제수준을 현재보다 매우 낮은 수준으로 낮추는 것이 선행되어야 할 것이다.

이러한 문제점들을 극복하기 위하여 Kittelson 등⁶⁾은 전기집진기와 다단 충돌식 포집장치를 이용하여 배기량 7ℓ 인 디젤엔진의 입자상 물질의 제거 실험을 수행하였고, 포집효율은 최대 40% 정도로 발표하였다. 최근에 Zukeran 등⁷⁾이 발표한 2단식 전기집진기와 흡수팬을 이용한 실험결과를 보면, 전반적인 성능은 50% 수준이며 입자의 크기가 1 μ m 이상인 경우는 포집효율이 오히려 음(-)의 값을 보였다. 한편 Watanabe 등⁸⁾은 전기집적장치를 이용하여 520MW급 석탄보일러에서 배출되는 배출가스의 후처리실험을 시행하였고, 백필터(Bag filter)로 포집한 효율은 95~98% 수준에 이었으나, 1 μ m 이하의 입자들에 대한 효율은 20%로 감소하였다. 그러나 Zhuang 등⁹⁾은 입경이 0.1 μ m 이하인 산화알루미늄과 염화칼슘의 분말로 실험하여 80% 수준의 포집효율이 가능한 것으로 발표하였다.

위와 같은 결과들로 비추어볼 때 디젤엔진의 배출가스 후처리도 전기적인 방법이 가능할 것으로 예상된다. 하지만 차량용 디젤엔진의 배출가스 후처리 실험결과는 아직 뚜렷하게 발표되지 않고 있다. 디젤 입자상 물질의 직경이 0.01~10 μ m 정도이고 평균입경의 크기는 1 μ m 이하이므로, 방전 및 집적에 의한 입자의 크기변화는 가능하지만 물리적인 추출에 어려움이 있다. 특히 차량용의 경우는 부대장치의 크기, 비용 및 유지 보수 등의 고려사항이 많고 배출가스의 유량변화가 심하므로 적절한 후처리장치의 개발에 많은 어려움이 있는 것으로 사료된다.

그러므로 본 연구에서는 현재 운행중인 차량

에 적용할 수 있는 비교적 간단하고 소형의 전기집진기와 사이클론을 제작하여, 배기량 2.7ℓ 급의 승합차용 디젤엔진의 배출가스 매연도를 저감시키기 위한 기초적인 연구를 시도하였다.

2. 배출가스 후처리 실험장치

디젤 배출가스의 후처리 실험을 위해 제작된 장치의 구성은 Fig. 1의 개략도와 같이, 엔진동력계 및 제어장치, 디젤엔진, 전기집진기 및 사이클론이다. 엔진동력계는 130kW급 와류식이며, 사용된 엔진은 배기량 2665cc, 최대출력 44kW급의 국내 생산 엔진으로, 그 주요 제원은 Table 1과 같다.

측정장치로는 엔진 입구측에 공기유량계, 연료유량계를 설치하고, 후처리장치 각 부위의 압력 및 온도를 측정하기 위하여 Fig. 1에 나타난

Table 1 Specification of test engine

Engine type	IDI Diesel, 4 stroke
No. of cylinders	4
Bore×Stroke	94.5×95mm
Displacement vol.	2665.2 cc
Compression ratio	21.5
Max. Power	44kW at 2600rpm
Max. Torque	170N·m at 2400rpm

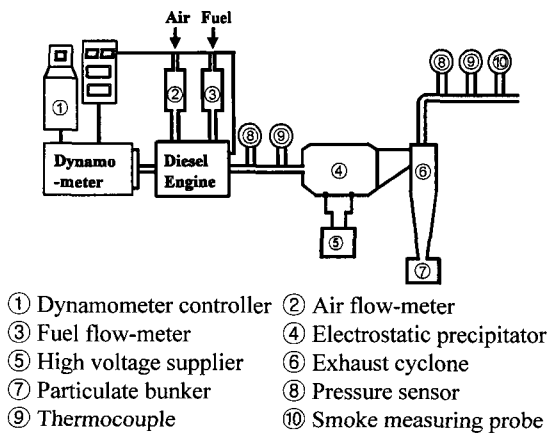


Fig. 1 Schematic diagram of experimental set-up

바와 같이 엔진 출구 및 후처리장치 출구측에 각각 압력센서와 열전대를 설치하였다. 그리고 배기관 끝단에 배출가스 추출구도 설치하였고, 후처리 장치의 작동 여부에 따른 배출가스의 매연도를 측정하여 비교 분석하였다.

전기집진기의 모든 재료는 스테인레스 재질을 사용하였고, Fig. 2와 같이 길이 370mm, 폭 100mm, 그리고 높이가 150mm인 사각 통로 내에 2개의 방전판 조립체를 40mm 간격을 두고 설치하였으며, 몸체와 방전판 사이에 절연체를 삽입하여 서로 통전되지 않도록 하였다. 방전판 조립체는 사각판 12개(가로 120mm, 세로 100mm, 두께 1mm)를 약 4mm 간격으로 직경 10mm인 2개의 봉에 용접제작하였고, 각각의 조립체에 최대 20kV, 1mA 용량의 전원을 연결한 후 가스가 누설되지 않도록 기밀 처리하였다.

일반적으로 공기정화장치에 사용되는 전기집진 원리는 와이어에 고전압을 공급하여 전자를 방출시키고, 방출된 전하는 공기중의 먼지입자들을 대전시키게 된다. 대전된 입자들은 정전장내에 떠다니는 반대극성의 전극에 흡착되어 뭉치면 입자의 크기가 커지므로 사이클론에서 원심력에 의해 포집되도록 한다. 하지만 디젤 엔진의 매연입자들은 수개의 대전입자들이 결합된 양극성 입자들로 코로나 방전은 필요하지 않는 것으로 발표되었고,⁶⁾ 음(-)의 코로나 방전은 오존발생 등의 2차적인 오염원을 발생시킬 수도 있는 것으로 알려져 있다.¹⁰⁾ 또한 와이어 형식은 고온의 배출가스에 노출되고 유황성분의 함유률이 아직도 높은 연료를 사용하는 현실

에서 내구성도 문제가 될 수 있으므로 Fig. 2와 같이 스테인레스판을 방전판으로 사용하였다. 이러한 방식은 세라믹필터에 비하여 포집효율은 떨어지지만, 배출가스의 배압손실이 매연부하와는 관계없으므로 막힐 염려가 없다. 그러나 사이클론의 효율적인 포집을 위해서는 입자크기가 5~10 μ m 이상인데¹²⁾ 국내 경유차량에서 배출되는 입자상물질의 평균입경은 100~200nm이므로,⁵⁾ 전기집진장치의 집진능력에 따라 전체적인 포집효율이 좌우될 것이다.

사이클론은 Stairmand¹¹⁾의 표준형을 채택하였으며 Fig. 3과 같이 스테인레스 판재로 제작하였다. 전기집진기를 통과한 배출가스는 사이클론의 접선방향으로 유입되고 내부의 안내판을 따라 선회하면서 하강한다. 이때 매연입자들은 원심력에 의하여 바깥쪽으로 분리되어 하부의 포집상자로 떨어지고 정화된 가스는 사이클론 중심부를 따라 반전되어 배출되도록 하는 것이 기본 원리이다. 동일한 유입속도일 때 사이클론의 직경은 작고 길이가 길수록 사이클론의 포집효율은 증가하나, 유동손실은 커지는 것으로 알려져 있다.

그러므로 사이클론의 유입속도는 높고 크기는 작은 것을 선정하기 위하여 Leith와 Mehta¹²⁾의 결과를 기초로 하여, 입자들의 평균입경이 1 μ m일 때 50% 정도의 효율을 얻을 수 있도록 사이클론의 접선 입구치수를 높이 50mm와 폭 20mm로 선정하였다. 그리고 다른 치수들은 입구치수와 기하학적 상사비에 따라 결정하였고, 추가적으로 배출가스의 선회유입운동을 돕는 안내

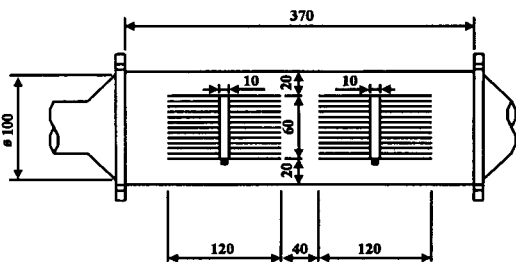


Fig. 2 Structure of electrostatic precipitator

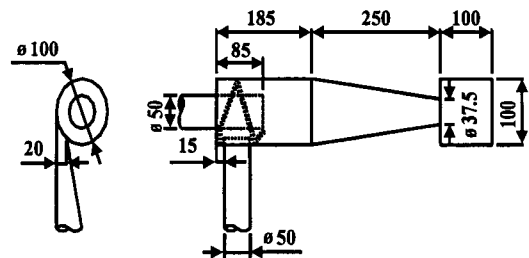


Fig. 3 Structure of exhaust cyclone

판은 내경 54mm을 원판을 절단하여 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 나선형으로 용접 부착하였다.

3. 결과 및 검토

배출가스 후처리장치의 시험에 앞서, 기존 엔진의 배기관 상태에서 엔진회전수 및 부하를 변화시키면서 매연측정기로 매연도를 측정하였다. 그러나 최대 회전속도 2400rpm까지 80% 이하의 부하에서는 매연도가 5% 이하로 극히 낮았다. 하지만 부하를 100%로 증가시켰을 때는 급격히 높아지다 1800rpm 이상에서는 다시 5% 이하로 낮아졌다. 그러므로 후처리장치의 성능 비교가 뚜렷한 1800rpm 이하의 100% 부하를 실험조건으로 선정하여 실험하였다.

3.1 매연도 변화

Fig. 4는 전부하 상태를 유지하며 1050rpm부터 200rpm씩 증가시키면서 후처리장치가 없는 (소음기를 장착한) 기존 배기계를 사용한 경우, 사이클론만 사용한 경우 그리고 사이클론과 전기집진기를 복합적으로 사용하였을 경우의 매연도를 비교한 것이다.

엔진의 초기 예열운전시간에 따라 매연도는 약 10%정도 차이가 발생하여 처음 시동한 후 30분 이상 예열 운전하였고, 엔진 출구의 냉각수 온도 및 엔진유탄유 온도가 80°C정도 도달하였을 때 시험을 시행하였다. 그리고 엔진 입구의 냉각수 온도는 15~20°C로 조절하였고, 외기온도는 7~12°C의 범위에서 실험하였다. 하지만 연속적인 실험을 동일한 조건에서 정확하게 반복 재현하기는 곤란하였으므로, 각각의 실험조건별로 매연측정기를 사용하여 매연도를 3회 측정하였고, 실험일자 및 조건별 실험순서를 바꾸어 다시 3회 반복한 결과를 평균하여 Fig. 4에 나타내었다.

배출가스 후처리장치가 없는 기존의 배기계에서 엔진의 매연오염도는 회전수가 증가할수록 감소하였다. 공연비는 약 17:1로 모두 비슷하

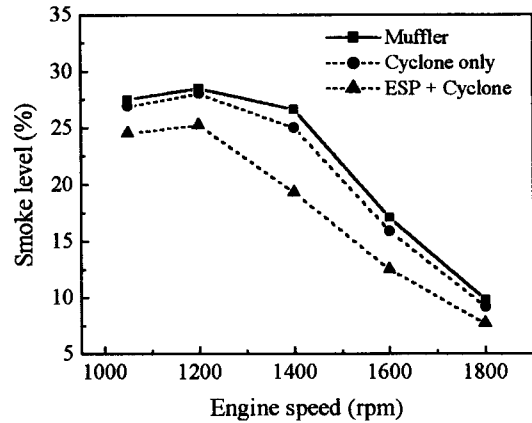


Fig. 4 Comparison of smoke level at varying engine speed with 100% load

지만, 저속에서 유입공기의 속도가 낮아 실린더 공기유동이 약하여 연료와 공기의 혼합이 불충분하다. 따라서 확산연소가 효율적으로 이루어지지 못하므로 저속에서 매연도가 높게 나타나는 것이다. 사이클론만 사용하였을 경우 매연도는 후처리장치가 없는 경우에 비하여 약간 감소하였으나 현저한 감소는 보이지 않았다. 일반적으로 유입속도가 클수록 사이클론의 분리효율은 높아지지만, 중속영역으로 갈수록 매연도는 매우 낮아지므로 사이클론의 장착에 따른 매연도의 감소는 크지 못한 것으로 보인다. 하지만 전기 집진처리없이도 매연도가 다소 감소한 이유는 고부하로 갈수록 매연입자들의 크기가 커지고¹³⁾ 사이클론의 입구에서 배출가스 유속은 30m/s 이상이었으므로 소수의 크기가 큰 입자들은 사이클론 효과에 의하여 분리 추출되었을 것으로 사료된다.

방전판에 양(+)의 20kV를 공급하고 후처리장치의 몸체를 접지시켰을 때는 후처리가 없는 경우에 비하여 11~27%의 매연도가 감소하였다. 대체적으로 중속영역에서 후처리에 의한 매연도의 감소율이 높고 저속에서는 낮았는데, 비교적 간단한 장치로도 디젤엔진의 매연도를 낮출 수 있는 가능성이 보였다.

Fig. 5는 전·후 방전판에 인가된 전압의 변화

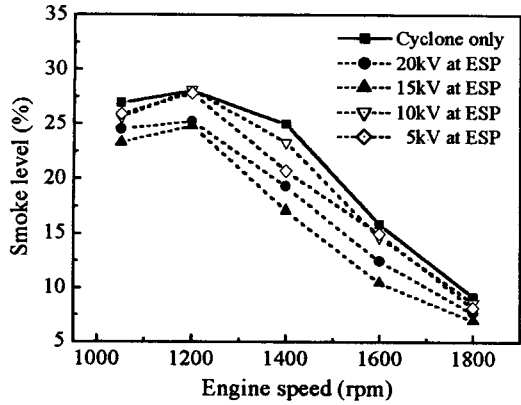


Fig. 5 Smoke level at different high voltage(DC positive at both plates)

에 따른 엔진 배출가스의 매연도를 회전수에 따라 나타낸 것이다. 실선은 사이클론만 사용하였을 경우의 매연도이며, 점선들은 전기 집진장치와 사이클론을 복합적으로 사용하여 방전전압의 영향을 비교한 것이다.

인가전압이 5kV에서 20kV로 높아짐에 따라 매연도는 감소하다가, 15kV에서 최소치를 나타내고 20kV에서는 다시 높아지는 현상을 보였다. 이는 인가전압이 높아짐에 따라 매연입자들의 집적률도 높아지나, 일정 크기 이상이 되면 물리적인 충돌에 의하여 다시 분할되어 사이클론의 하부로 포집되지 않았을 것으로 추정된다. 아울러 인가전압이 낮을 때 미세입자들을 집적시킬 수 있는 에너지가 부족하여 매연감소효과가 줄어드는 것으로 나타났다. 하지만 효과가 가장 높은 15kV의 경우는 15~38% 정도의 매연감소치를 보였고, 엔진 회전수가 높아질수록 매연 감소율이 높았다. 그러나 1800rpm에서 감소율이 다시 낮아지는 것은 배출가스중의 매연 입자수가 적으므로 사이클론 효과로 분리될 수 있는 크기 이상으로 집적될 확률도 낮아졌기 때문으로 사료된다. 그러므로 실제 차량의 넓은 운전영역에서는 입자상물질의 포집효율은 본 실험결과보다 떨어질 것으로 예상된다.

두 개의 방전판에 인가전극을 달리하면서 매연저감에 대한 미치는 영향을 고찰하여 보았다.

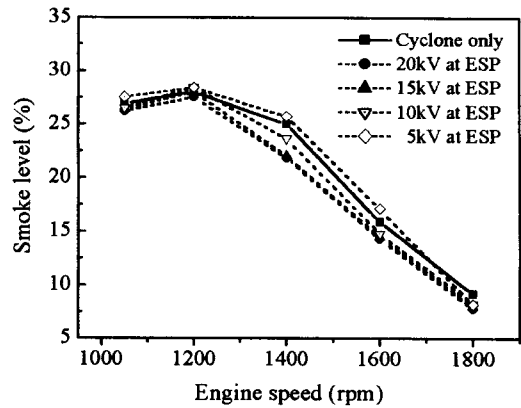


Fig. 6 Smoke level at different high voltage(DC negative at the front and positive at the rear plates)

Fig. 6은 앞쪽의 방전판에 음극을 그리고 뒤쪽에는 양극을 연결시켜 인가전압에 따라 매연도의 변화를 나타낸 그림이다.

전·후의 방전판 모두에 양의 전압을 인가하였을 때보다 전반적으로 매연감소도는 떨어진 것으로 나타났다. 하지만 주로 앞쪽에 와이어를 사용하여 음의 전압을 인가하는 방법이 일반적이나, 판 조립체를 사용하였을 경우도 매연도 감소현상은 뚜렷이 나타났다.

본 실험에서는 이 경우 20kV의 인가전압에서 매연도가 가장 낮게 나타났지만, 감소율이 약 18% 정도로 양쪽 모두 양극을 연결하여 15kV를 인가하였을 경우의 절반정도에 불과하였다. 특히 5kV를 인가하였을 경우는 사이클론만 사용하였을 경우보다 매연도가 높게 나타났다. 이 조건에서 사이클론의 포집상자에 추출된 매연입자가 사이클론만 사용하였을 경우와 비슷하였다. 그러므로 미세입자들이 앞쪽의 방전판 사이를 통과하며 일부 전자를 얻어 뒤쪽의 양극판에서 응집되나, 사이클론에서 추출된 만큼 충분한 크기로 집적되지는 않고 매연여과지에는 걸러질 정도가 되어 오히려 매연도가 증가한 것으로 판단된다.

Fig. 7은 앞쪽 방전판에 양극을 그리고 뒤쪽에는 음극을 연결시켰을 때 인가전압에 따른 매연도의 변화를 나타낸 그림이다.

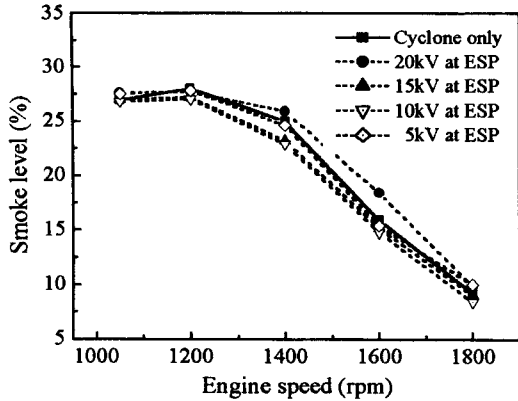


Fig. 7 Smoke level at different high voltage(DC positive at the front and negative at the rear plates)

이 경우는 자속의 흐름방향과 배출가스의 유동방향이 서로 반대이므로 전반적으로 매연감소효과가 떨어지는 것으로 나타났다. 그러므로 5kV의 인가전압시에는 매연도 감소가 거의 없으며, 10kV에서는 다소 감소하였다. 이는 앞쪽의 양극에 연결된 방전판의 영향에 의한 것으로, 뒤쪽의 음극에 연결된 방전판은 매연도 감소에 거의 영향을 주지 못한 것으로 사료된다. 오히려 15kV의 인가전압시에는 다시 매연도가 높아졌고, 20kV에서는 사이클론만 사용하였을 경우보다 매연도가 높게 나타났다. 앞쪽의 양극판에 응집된 일부 입자들이 음극판을 통과하면서 역효과가 일어나 분리되므로 사이클론에서 추출되지 못하고 가시적인 매연도는 증가한 것으로 해석된다.

3.2 입자상 물질의 포집량

후처리장치의 궁극적인 목적은 가시적인 매연도의 감소보다는 배출가스중의 입자상 물질을 사이클론의 포집상자로 최대한 포집하는 것이다. 하지만 전부하로 장시간 운전을 계속하면 사이클론 출구에서 배출가스온도가 540°C 이상으로 상승하였고, 탄화수소의 결합체인 입자상 물질은 베기계를 통과하면서 산화되는 현상을 보였다. 그러므로 배출가스의 온도가 입자상 물질의 산화가능온도인 540°C 이상일 경우, 사이

클론의 포집상자에 포집되는 양도 거의 없고 매연측정기로 측정된 매연도 값도 5% 이하로 나타났다. 또한 입자상물질의 중량이 매우 적어 엔진을 단시간 운전하였을 때는 비교 가능한 충분한 양의 입자상물질을 얻기가 곤란하였다. 그리고 고부하로 장시간 운전시에는 엔진오일의 온도가 100°C 이상으로 상승하여, Table 2에 나타난 엔진회전수별로 약 3분간 전부하로 운전하고 2분간 무부하 운전하여 작동온도를 낮추면서 약 30분간 각 경우별로 운전하였다.

Fig. 8은 사이클론만 사용한 경우와 두 개의 방전판에 인가전극을 달리하여 Table 2와 같이 운전하여 포집한 입자상물질의 질량을 비교한 그림이다.

모든 경우에서 엔진의 운전조건을 동일하게 유지하기가 곤란하여 측정오차를 배제할 수는 없지만, 전반적으로 두 개의 방전판에 모두 양의 전압을 인가하였을 때 포집량이 가장 많았고, 15kV에서는 사이클론만 사용하였을 때보다 2배 정도로 최대치를 나타냈다. 하지만 앞에서 기술한 바와 같이 앞쪽의 방전판에 양극을 뒤쪽에 음극을 연결한 경우는 전기집적효과가 거의 없는 것으로 판단된다.

Table 2 Engine operation modes

Engine speed (rpm)	Torque (N · m)	Duration (min)
1050	0	2
1050	148	3
1200	0	2
1200	155	3
1400	0	2
1400	160	3
1600	0	2
1600	159	3
1800	0	2
1800	164	3
1050	0	5

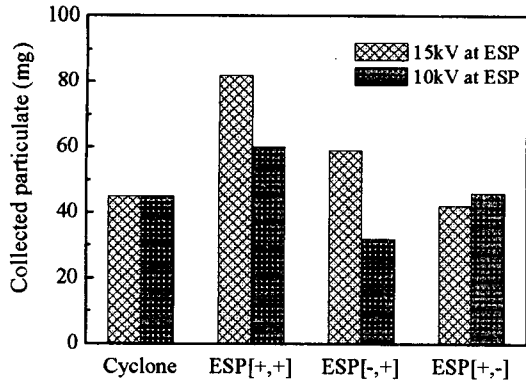


Fig. 8 Amount of particulate collected at different configuration of electrode plates

3.3 엔진 배압

Fig. 9는 전기집진기와 사이클론을 직렬로 연결시켰을 때, 배기다기관에서 측정된 엔진배압과 사이클론 입구에서의 배출가스 속도를 나타낸 그림이다. 엔진회전수의 증가에 따라 유속과 배압이 동시에 거의 선형적으로 증가하며, 1800 rpm에서는 소음기를 장착한 기존 배기계일 때보다 배압이 약 6.5kPa 정도 높아졌다. 이는 주로 사이클론 입구에서의 단면축소와 내부에서 반전되는 유동현상으로 야기되는 저항 때문으로 판단된다.

후처리장치 입구의 배출가스 온도와 압력을 기준으로 배출가스유량에서 산출한 사이클론 입구의 평균 유속은 1800rpm에서 약 56m/s로 상

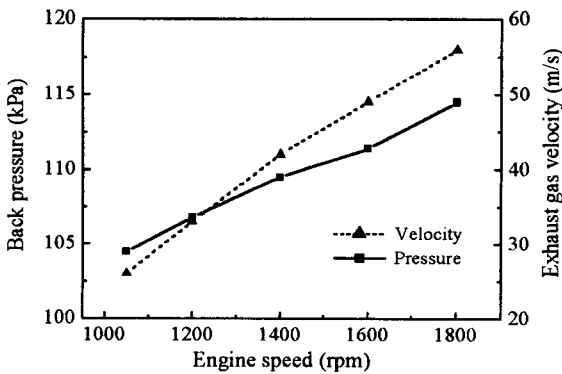


Fig. 9 Back pressure and exhaust gas velocity at cyclone inlet with engine speed

당히 높은 편이다. 하지만 1050rpm에서 26m/s의 입구유속도 전기집적정도에 따라 충분한 것으로 사료된다. 아울러 Leith 등¹²⁾은 사이클론 입구의 유속이 3~4m/s 이상이면 사이클론 내에서 분리된 입자들이 반전되어 배출되는 가스의 기류로 재유입되는 현상이 일어날 수 있다고 하였다. 그러므로 포집효율은 보다 높이면서 엔진배압을 낮추기 위해서는 소형의 다수 사이클론을 병렬로 연결시킨 멀티사이클론을 사용하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

4. 결론

차량용 디젤엔진에서 배출되는 입자상물질을 분리 추출하기 위하여 고전압을 인가시킨 전기집적판들과 사이클론을 사용한 배출가스 후처리 실험을 수행하였고, 실험결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 와이어를 사용하지 않고 다수개의 평판으로 구성된 방전판에 고전압을 인가시켜 매연 포집효과를 얻을 수 있다.

2) 방전판 조립체에 15kV의 전압을 인가시킬 때 입자상물질의 포집량이 최대이었으며, 이 때 매연도의 감소는 최대 38% 정도로, 디젤 입자상물질의 제거효과가 기대되는 방법 중 하나이다.

3) 두 개의 방전판 조립체에 양의 전압을 인가시킬 때 포집효과가 높고 엔진시스템과 별도의 절연장치가 필요하지 않아서, 비교적 간단하고 저가의 후처리장치가 가능하다.

4) 입자상물질의 효율적인 추출을 위해서는 사이클론 입구에서 배출가스 유속이 가능한 높아야 하지만, 유동저항과 함께 엔진배압도 상당히 증가하여 멀티사이클론의 적용과 같은 지속적인 연구가 필요하다.

참고 문헌

- 1) 엄명도, "자동차 공해와 대책," 한국자동차 공학회지, 제21권 제1호, pp.13-18, 1999.
- 2) 정용일, "경유자동차 PM 및 NOx 대책 기술

- 동향,” 한국자동차공학회지, 제22권 제1호, pp.17-21, 2000.
- 3) 박동선, 김재업, 이만복, “디젤 입자상물질 제거장치에 적용되는 버너의 설계개념 및 기초실험,” 한국자동차공학회 논문집, 제4권 제3호, pp.50-60, 1996.
 - 4) 이재복, 황정호, 배귀남, “DC 코로나 특성 및 플라즈마 반응기 조건이 Soot 및 연소가스의 농도변화에 미치는 영향,” 한국자동차공학회 추계학술대회 논문집, Vol.I, pp.230-235, 1999.
 - 5) 정인록, 엄명도, 김종춘, 김태승, 류정호, 이규원, “경유자동차의 입자상물질 입경별 배출 특성,” 한국자동차공학회 추계학술대회 논문집, Vol.I, pp.321-326, 1999.
 - 6) D. B. Kittelson, J. Reinertsen, J. Michalski, “Further Studies of Electrostatic Collection and Agglomeration of Diesel Particles,” SAE 910329, 1991.
 - 7) A. Zukeran, Y. Ikeda, Y. Ehara, M. Matsuyama, T. Ito, T. Takahashi, H. Kawakami, T. Takamatsu, “Two-Stage-Type Electrostatic Precipitator Re-entrainment Phenomena Under Diesel Flue Gases,” IEEE Trans. on Industry Applications, Vol.35, No.2, pp.346-351, 1999.
 - 8) T. Watanabe, F. Tochikubo, Y. Koizumi, T. Tsuchida, J. Hautanen and E. I. Kauppinen, “Submicron Particle Agglomeration by an Electrostatic Agglomerator,” J. of Electrostatics, Vol.34, pp.367-383, 1995.
 - 9) Y. Zhuang, Y. J. Kim, T. G. Lee and P. Biswas, “Experimental and Theoretical Studies of Ultra-fine Particle Behavior in Electrostatic Precipitators,” J. of Electrostatics, Vol.48, pp. 245-260, 2000.
 - 10) M. Crawford, “Air Pollution Control Theory,” McGraw-Hill, pp.298-359, 1976.
 - 11) C. J. Stairmand, “The Design and Performance of Cyclone Separators,” Trans. Inst. Chem. Engr., Vol.29, pp.356-373, 1951.
 - 12) D. Leith and D. Mehta, “Cyclone Performance and Design,” Atmospheric Environment, Vol. 7, pp.527-549, 1973.
 - 13) H. Burtscher, S. Künzel, C. Hüglin, “Characterization of Particles in Combustion Engine Exhaust,” J. of Aerosol Science, Vol.29, No.4, pp.389-396, 1998.