

〈논문〉 SAE NO. 2000-03-0083

저온 플라즈마 장치를 이용한 디젤기관의 유해배출물질 저감에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Reduction of Diesel Emission Using Low Temperature Plasma Apparatus

김홍석*, 원준희** 정태용***
Hongseok Kim, Junhee Won, Taeyong Chung

ABSTRACT

The increasing use of vehicles is causing air-pollution problems. Diesel vehicles are preferred to gasoline vehicles, because the diesel vehicles are superior to gasoline vehicles in terms of fuel consumption, durability, power and efficiency. But the emission reduction technologies for diesel vehicle are not developed well like those for gasoline vehicles. Moreover, the NOx and smoke emitted from diesel vehicle are recognized as a main source of the air-pollution in the urban areas.

The emission reduction devices have been installed for each of the emission gas components. Using plasma(i.e. electrical energy) only, the emission gas was found to be reduced. The present paper investigates the effects of a low temperature plasma device in engine performance as well as in emission reduction with the change of the applied voltage and the loading rate of the engine.

주요기술용어 : Low Temperature Plasma(저온 플라즈마), Diesel Emission(디젤기관의 유해배출물질), Corona Discharge(코로나 방전)

1. 서 론

최근 자동차 분야가 급성장하면서 대기오염 문제를 발생시키는 주범이 되고 있다. 그 중 디젤기관은 가솔린기관에 비하여 연료소비율, 내구성, 출력, 효율면에서 우수하기 때문에 그 수요가 급증하고 있는 상황이다. 그러나 디젤기관은 가솔린기관에 비하여 그 배

출가스 방지기술이 뒤떨어져 디젤기관에서 배출되는 질소산화물이나 매연 등이 대도시 대기 오염의 주범으로 인식되고 있다.¹⁾

현재 저감 대책으로 채택되고 있는 방법은 배출되는 가스 중에 각각의 유해물질에 대하여 저감하는 제거 장치를 별도로 설치하여 유해물질을 제거하였으나, 플라즈마는 전기적 에너지만을 사용하여 디젤기관에서 배출되는 유해물질들을 동시에 저감시킬 수 있는 새로운 기술이다.^{2,3)}

* 회원, 제주산업정보대학 자동차과

** 국민대학교 기계공학과 대학원

*** 회원, 국민대학교 기계자동차공학부

본 실험에서는 저온 플라즈마 장치를 이용하여 디젤기관의 유해배출물질을 저감시키고자 할 때 플라즈마 반응기가 기관의 성능 변화에 미치는 영향과 플라즈마 반응기에의 공급 전압, 기관 회전속도 및 기관 부하율 변화에 따른 유해물질 배출 저감 특성을 알아보았다.

2. 실험장치

Fig. 1은 저온 플라즈마 장치를 장착하였을 때 유해배출물질 저감 특성과 저온 플라즈마 장치를 장착한 전후의 성능변화를 비교하기 위한 실험장치로서 기관 동력계, 실험기관, 플라즈마 반응기, 계측장비 등의 개략도를 나타낸 것이다. 실험기관의 제원을 Table 1에 나타내었다.

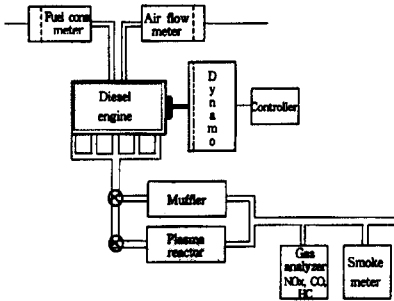


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1 Specification of DE12T engine

Item	Specification
Model	DE12T
Type	In-line 4, Turbocharged
Combustion chamber type	Re-Entrant
Injection type	Direct Injection
Bore×Stroke×Cylinder	123mm×155mm×6
Total cylinder volume	11,051 cc
Compression ratio	17.1:1
Maximum power	300ps/2,200rpm
Maximum torque	1078Nm/1,300rpm
Injection timing	9° BTDC

Fig. 2는 플라즈마 반응기의 개략도를 나타낸 것으로 전자 회로를 사용하여 펄스를 발생시키고 펄스를 증폭시킨 다음, 반응기에 펄스 전압을 15~22kV, 주파수를 17kHz로 가변시켜 반응기의 전극에 공급하였다.

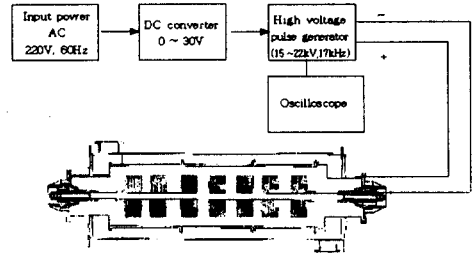


Fig. 2 Block diagram of plasma reactor unit

3. 실험방법

3.1 기관 회전속도 변화에 따른 성능변화 실험

플라즈마 반응기를 장착하지 않은 디젤기관에 기관의 부하율을 100%로 일정하게 유지한 다음, 기관의 회전속도를 1000 rpm에서 2200 rpm까지 200 rpm씩 증가시켜 가면서 일정한 회전 속도에서 토크, 연료소비율 등을 측정하였다. 또한 플라즈마 반응기를 장착한 디젤기관에서 같은 조건으로 실험하여 서로 비교하였다.

3.2 전압 및 부하율 변화에 따른 실험

본 실험에서의 운전 조건으로는 기관 회전속도를 각각 1000, 1400, 1800, 2200 rpm으로 일정하게 유지하였고, 기관의 부하율을 10, 25, 50, 75, 100 %로 일정하게 유지시키면서, 플라즈마 반응기에 전압을 각각 16, 18, 20 kV씩 공급하였다. 먼저 플라즈마 반응기를 장착하지 않은 디젤기관에서, 위와 같은 조건에서 CO, HC, NOx 및 매연량을 측정하였다. 그런 다음, 플라즈마 반응기를 장착한 디젤기관에

서 반응기에의 공급 전압과 기관 부하율을 변화시키면서 CO, HC, NOx 및 매연량을 측정하여 유해물질 저감 특성을 규명하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 플라즈마 반응기를 장착한 디젤기관의 성능변화 특성

Fig. 3은 기관의 전 부하시, 디젤기관에 머플러를 장착하였을 때와 머플러 대신 플라즈마 반응기를 장착한 후, 기관 회전속도 변화에 따른 기관의 토크 및 연료소비율의 변화를 나타낸 그림이다.

본 실험의 범위 내에서, 머플러를 장착한 디젤기관은 기관 회전속도 증가에 따라서 최소 토크는 1000 rpm에서 773.5 Nm, 최대 토크는 1600 rpm에서 1028.7 Nm로 나타났다. 또한, 최소 연료소비율은 1000 rpm에서 201.2 g/kWh, 최대 연료소비율은 2200 rpm에서 232.3 g/kWh로 나타났다. 플라즈마 반응기를 장착한 디젤기관은 기관 회전속도 증가에 따라서 최소 토크는 1000 rpm에서 746.9 Nm, 최대 토크는 1600 rpm에서 998.6 Nm로 머플러를 장착한 기관에 비해 전체적으로 토크가 약간 감소하였으며, 그 변화율은 약 1.9~3.6%로 나타났다. 또한, 최소 연료소비율은 1000 rpm에서 204.1 g/kWh, 최대 연료소비율은 2200 rpm에서 233.8 g/kWh로 머플러를 장착한 기관에 비해 전체적으로 연료소비율은 0.6~2.0% 정도 증가되었다.

따라서, 본 실험의 범위 내에서 전 부하시, 기관의 회전속도 증가에 따라서 플라즈마 반응기가 기관의 성능에 영향을 거의 미치지 않는 것으로 나타났다. 디젤기관에 머플러를 대신하여 플라즈마 반응기를 장착한 경우에 토크는 약간 낮고 연료소비율이 약간 높게 나온 이유는 플라즈마 반응기를 장착한 경우가 머플러를 장착하였을 경우보다 배압이 최고 부하율과 회전속도에서 약 52 mmHg 정도로 약

간 더 걸리기 때문이지만, 기관의 성능에는 거의 영향을 미치지 않는 것으로 사료된다.

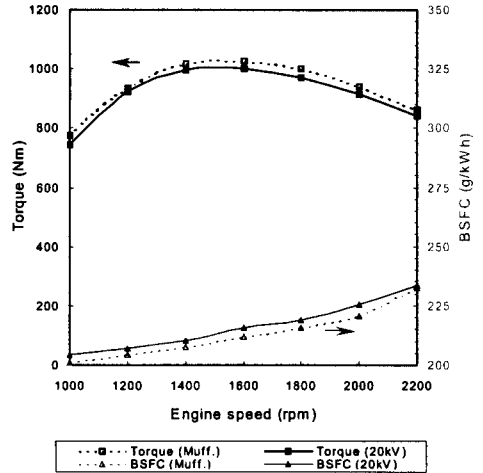


Fig. 3 Performance curves according to engine speed at 100% load rate

4.2 전압 및 부하율 변화에 따른 유해배출물질 저감 특성

4.2.1 일산화탄소(CO)의 저감 특성

Fig. 4는 기관 회전속도가 각각 1000, 1400, 1800 및 2200 rpm일 때 실험기관에서의 CO 배출량을 나타낸 것이다.

기관의 회전속도가 1000 rpm일 때, 머플러를 장착한 실험기관에서는 부하율이 25%일 때가 CO 배출량이 약 119.1g/h로 가장 많았으며, 부하율이 75%일 때가 약 43.95g/h로 가장 적었다. 머플러 대신에 플라즈마 반응기를 장착함으로써 CO 배출량은 공급 전압이 높을수록 CO 배출량이 적어졌으며, 공급 전압 20kV일 때의 CO 배출량은 부하율 25%에서 약 35.2g/h로 가장 많이, 부하율 75%에서 약 14.5g/h로 가장 적게 저감되었다. 공급 전압 20kV, 부하율 10%일 때 CO 배출 저감률이 39.8%로 최대로 저감되었다.

기관의 회전속도가 1400 rpm일 때, CO 배출

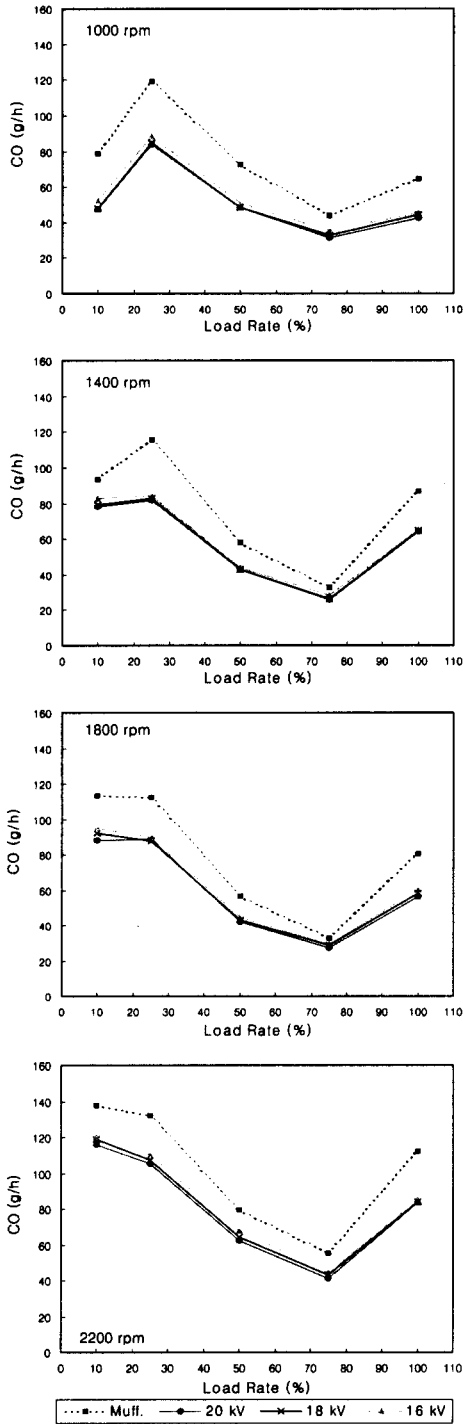


Fig. 4 CO concentration according to load rate

량은 기관 회전속도 1000 rpm일 때와 비슷한 경향을 나타냈으나, 부하율에 따른 CO 배출량 변화율은 약간 더 크게 나타났다. 실험 기관에서의 CO 배출량은 부하율 25%에서 약 115.6 g/h로 최대이며, 부하율 75%에서 약 34.6 g/h로 최소로 배출되었으며, 플라즈마 반응기에 20 kV를 공급했을 때 CO 배출 저감량은 부하율 25%에서 약 33.9 g/h, 부하율 75%에서 약 8.9 g/h이었고 평균 CO 배출 저감률은 약 25.4%이었다

기관의 회전속도가 1800 rpm일 때, 부하율이 10%에서 75%로 증가할 때까지는 실험기관의 CO 배출량이 감소하다가 부하율 100%에서는 증가하였다.

부하율이 일정할 때 플라즈마 반응기에 공급하는 전압이 높을수록 CO 배출 저감량은 최저 약 7.7 g/h에서 최고 약 25.1 g/h까지이었고 평균 CO 배출 저감량은 약 23.9 g/h이었다.

기관의 회전속도가 2200 rpm일 때, 실험 기관에서의 CO 배출량은 부하율 10%에서 약 137.5 g/h로 가장 많고, 부하율 75%에서 약 55.0 g/h로 가장 적었다. 전압 20 kV로 공급된 플라즈마 반응기를 통과한 후의 CO 배출량은 부하율 100%에서 약 112.4 g/h에서 약 86.4 g/h로 약 26 g/h가 저감되어 CO 배출 저감률은 약 23.1%이었고, 부하율 75%에서는 약 13.9 g/h이 저감되어 CO 배출 저감률은 약 25.3%로 가장 컸다.

4.2.2 탄화수소(HC)의 저감 특성

Fig. 5는 1000, 1400, 1800 및 2200 rpm일 때 실험기관에서의 HC 배출량을 나타낸 것이다. 기관 회전속도가 1000 rpm과 1400 rpm일 때, HC 배출량은 서로 비슷한 경향을 나타냈으며 기관 부하율이 증가함에 따라 증가하다가 감소한 후 다시 증가하였다. HC 배출량은 1000 rpm일 때, 부하율 10%에서 약 15.5 g/h로 가장 적고 부하율 25%에서 약 23.1 g/h로 가장

많았다. 1400 rpm에서는 부하율 75%에서 약 29.1 g/h로 가장 적고 부하율 100%에서 약 37.9 g/h로 가장 많았다. 머플러 대신에 플라즈마 반응기를 장착한 후 공급 전압을 16 kV에서 18 kV 및 20 kV로 증가시키기에 따라 HC 배출 저감량은 증가하여 기관 회전속도 1000 rpm에서는 공급 전압 20 kV이고 부하율 100%에서 HC 배출 저감량이 약 7.7 g/h이고 HC 배출 저감률은 약 36.6%로 가장 크고, 기관 회전속도 1400 rpm에서는 부하율 100%에서 HC 배출 저감량이 약 11.7 g/h로 가장 크고 이때의 HC 배출 저감률은 약 30.9%이었다.

1800 rpm, 2200 rpm일 때, HC 배출량은 기관 부하율이 증가함에 따라 감소하다가 증가하였으며, 1800 rpm에서는 부하율 75%에서 약 42.9 g/h로, 2400 rpm에서는 부하율 50%에서 약 56.9 g/h로 가장 작았으며, 부하율 100%에서 각각 약 53.8 g/h와 약 66.5 g/h로 가장 많았다. 머플러 대신에 플라즈마 반응기를 장착한 후 공급 전압을 20 kV로 하였을 때 기관 회전속도 1800 rpm에서는 HC 배출량은 약 32.5 g/h에서 약 39.6 g/h의 범위이며, 부하율 10%에서 HC 배출 저감량이 약 15.4 g/h로 최대이고 HC 배출 저감률도 약 32.1%로 최대이며, 2200 rpm에서는 HC 배출 저감량은 약 44.6 g/h에서 약 50.8 g/h의 범위이며 부하율 10%에서 HC 배출 저감량 및 HC 배출 저감률이 가장 크며 그 값은 각각 약 16.3 g/h와 약 25.9%이었고, 평균 HC 배출 저감률은 약 22.9%로 실험이 이루어진 기관속도에서 가장 작았다. 이것은 기관 회전속도가 증가할수록 배출 가스량이 증가하여 플라즈마 반응기를 통과하는 속도가 증가되어 반응기에서의 체류시간이 짧아지기 때문이다.

4.2.3 질소산화물(NOx)의 저감 특성

Fig. 6은 1000, 1400, 1800 및 2200 rpm일 때 실험기관에서의 NOx 배출량을 나타낸 것이다.

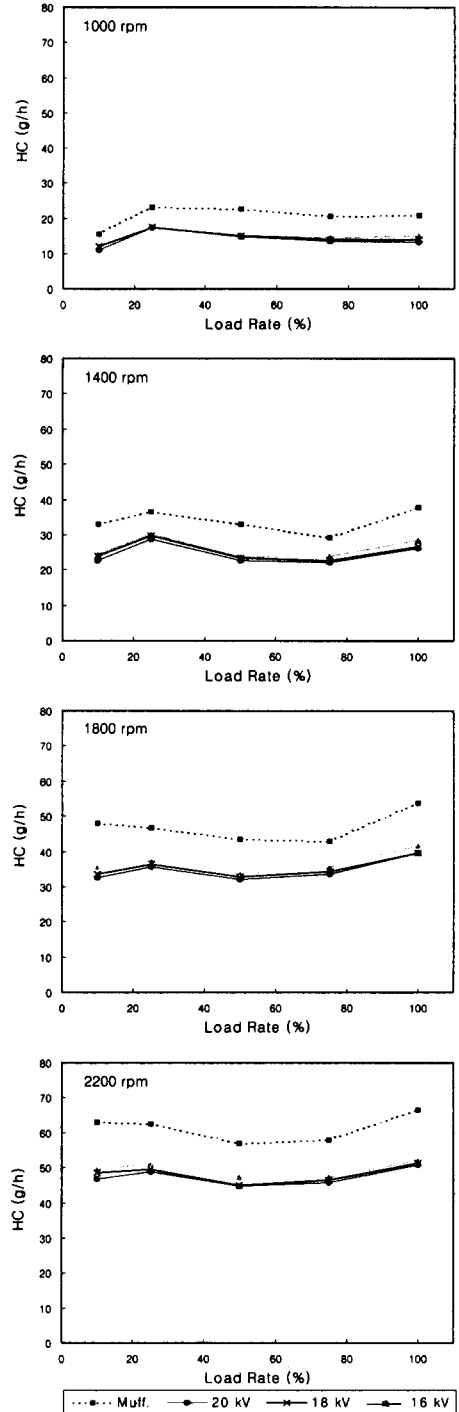


Fig. 5 HC concentration according to load rate

1000 rpm과 1400 rpm일 때, 머플러를 장착한 실험기관의 NO_x 발생량은 기관의 회전속도가 일정할 때 기관 부하율이 증가할수록 선형적으로 증가하였다.

본 실험의 범위 내에서 NO_x의 최저 배출량은 10%의 부하율일 때 회전속도가 1000 rpm에서 약 87.87 g/h, 1400 rpm에서 약 144.15 g/h로 나타났다. 또한 NO_x의 최대 배출량은 100%의 부하율일 때 1000 rpm에서 약 735.94 g/h, 1400 rpm에서 약 1473.34 g/h로 나타났다.

본 실험 기관은 터보 과급기를 장착하였기 때문에 충전 효율이 높고 연소 온도가 높아 다른 가스상 물질에 비하여 NO_x 배출량이 상대적으로 많이 배출되었다. 머플러 대신에 플라즈마 반응기를 장착한 후 공급 전압을 16, 18 및 20 kV를 공급하였을 때, 공급 전압에 따라서는 저감률 차이가 약 2%이내로 별 영향을 미치지 않았고, 최대 저감률은 기관 부하율이 100%일 때로 1000 rpm에서 약 23.49%, 1400 rpm에서 약 17.3%로 나타났다.

1800 rpm, 2200 rpm일 때, 머플러를 장착한 실험 기관에서의 최소 배출량은 부하율이 10%일 때 1800 rpm에서 약 190.0 g/h, 2200 rpm에서 약 225.6 g/h로 나타났고 최대 배출량은 부하율 100%에서 1800 rpm에서 약 1979.0 g/h, 2200 rpm에서 약 2080.8 g/h로 나타났다. 머플러 대신 플라즈마 반응기를 장착한 후의 최대 NO_x 저감률은 부하율 100%에서 회전속도가 1800 및 2200 rpm일 때 각각 약 13.67%, 약 13.33%로 나타났고, 부하율이 증가함에 따라서 NO_x 배출 저감률 차이는 약 4% 증가하였다. 기관의 회전속도가 1800 및 2200 rpm일 때 기관의 부하율이 증가함에 따라서 공급 전압에 따른 저감률 차이는 약 2% 이내로 별 영향을 미치지 못 하였다.

4.2.4 매연(smoke)의 저감 특성

Fig. 7은 1000, 1400, 1800 및 2200 rpm일 때

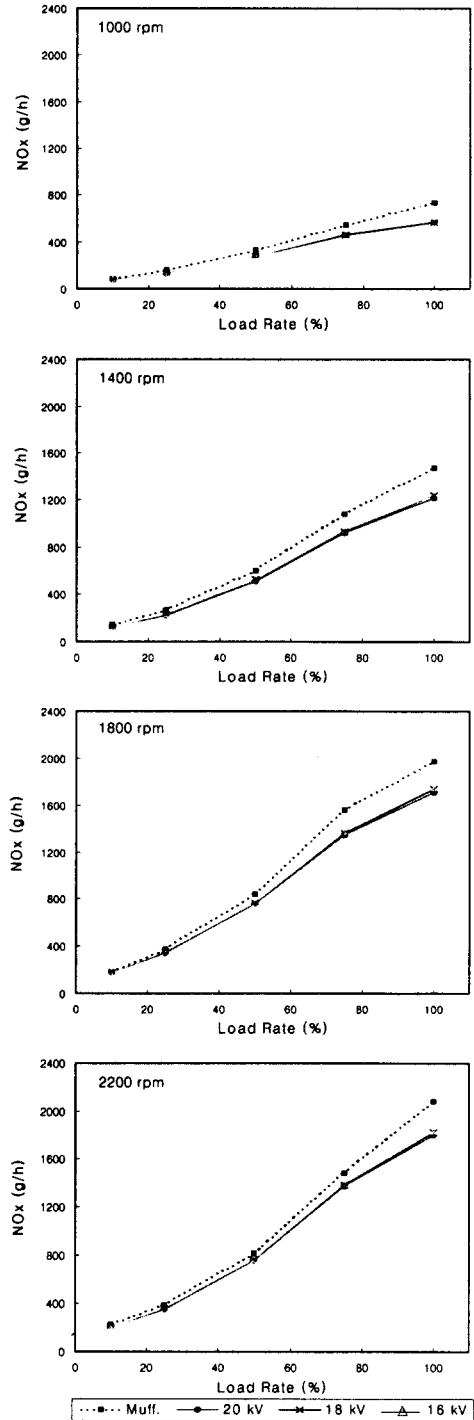


Fig. 6 NO_x concentration according to load rate

실험기관에서의 매연(smoke) 배출량을 나타낸 것이다.

1000 rpm, 1400 rpm일 때, 머플러를 장착한 실험기관의 매연 배출량은 기관의 부하율이 75%까지는 완만하게 증가하다가 100%의 부하율에서 급격하게 증가하였다. 본 실험의 범위 내에서 매연의 최저 배출량은 10%의 부하율일 때 회전속도가 1000 rpm에서 약 0.7%, 1400 rpm에서 약 0.9%로 나타났다.

또한 매연의 최대 배출량은 100%의 부하율일 때 1000 rpm에서 약 9.3%, 1400 rpm에서 약 9.2%로 나타났다. 본 실험 기관은 터보 과급기를 장착한 디젤기관이므로 공기가 과잉 공급되기 때문에 연소 압력이 높아져서 매연 배출량이 상대적으로 낮았다. 머플러 대신에 플라즈마 반응기를 장착한 후 공급 전압을 16, 18 및 20 kV를 공급하였을 때, 공급 전압에 따른 매연 저감률 차이가 부하율 10%에서 약 10%, 부하율 100%에서 약 4.6%로 나타났다. 최대 매연 저감률은 공급 전압이 20 kV일 때 1000 rpm에서는 매연 배출량이 약 9.3%에서 약 2.1%로 저감되어 약 77.74%, 1400 rpm에서는 매연 배출량이 9.23%에서 2.43%로 저감되어 약 73.67%로 매우 높게 나타났다.

1800 rpm 및 2200 rpm일 때, 머플러를 장착한 실험 기관에서의 최소 배출량은 부하율이 10%일 때 1800 rpm에서는 약 1.33%, 2200 rpm에서는 약 1.9%로 나타났고 최대 배출량은 부하율 100%일 때 1800 rpm에서는 약 7.9%, 2200 rpm에서는 약 6.9%로 나타났다. 머플러 대신 플라즈마 반응기를 장착한 후의 최대 매연 저감률은 공급 전압 20 kV와 부하율 100%에서 나타났으며, 회전속도 1800 rpm에서 매연 배출량은 약 7.9%에서 약 2.1% 저감되어 약 73.4%로 나타났고, 2200 rpm에서는 매연 배출량이 약 6.9%에서 약 2.1%로 저감되어 약 69.1%로 매우 높게 나타났다.

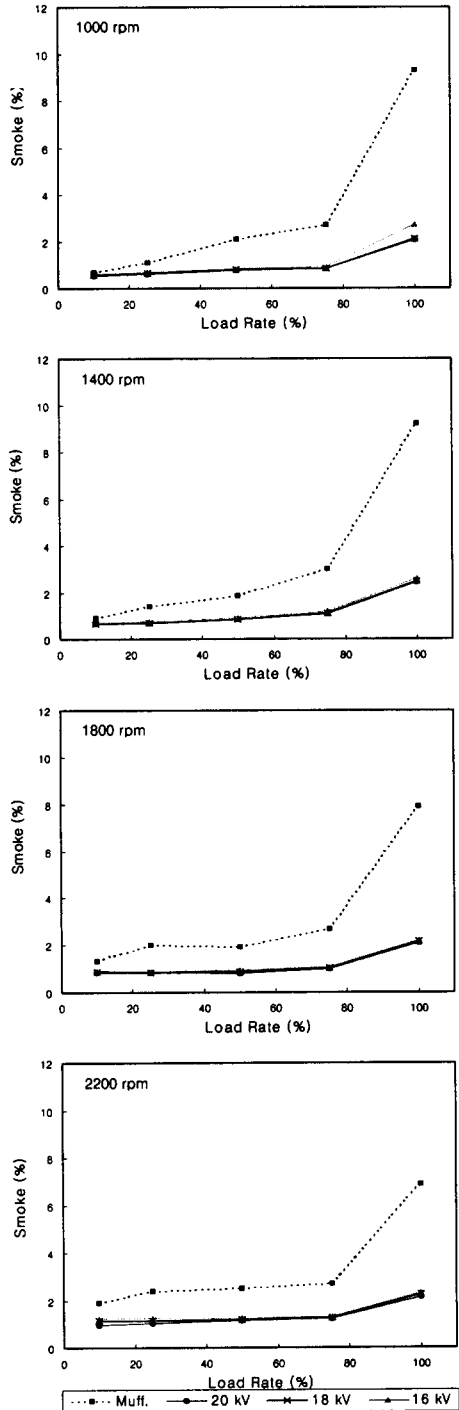


Fig. 7 Smoke concentration according to load rate

전압 20 kV를 공급한 플라즈마 반응기를 통과한 후의 매연 배출량은 부하율 10%에서 100%로 증가함에 따라 기관 회전속도 1800 rpm에서는 약 0.8%에서 2.1%의 범위, 2200 rpm에서는 약 0.95%에서 약 2.1%의 범위로 배출되었다.

5. 결론

저온 플라즈마 장치를 이용하여 디젤기관의 유해배출물질을 저감시키고자 할 때 플라즈마 반응기가 기관의 성능 변화에 미치는 영향과 플라즈마 반응기에의 공급 전압, 회전속도 및 부하율 변화에 따른 유해물질 배출 저감 특성을 알기 위한 실험에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 일반적으로 기존의 저감 기술은 디젤기관에서 배출되는 유해물질 중 1~2 종류의 유해물질에 대해서만 저감하였지만, 저온 플라즈마 반응기는 디젤기관에서 배출되는 여러 유해물질들을 동시에 저감할 수 있다는 것을 본 실험을 통하여 확인하였다.

2) 저온 플라즈마 반응기를 장착한 디젤기관은 머플러를 장착한 기존의 기관에 비하여 토크 및 연료 소비율의 변화가 적었으므로 기관의 성능에는 영향을 거의 미치지 않았다.

3) 본 실험이 이루어진 범위 내에서 유해배출물질 저감률은 대체로 플라즈마 반응기에 공급하는 전압이 높을수록, 기관 회전속도가 느릴수록 증가하였으나 기관 부하율에 대한 영향은 유해물질의 종류에 따라 다른 경향이 나타났다.

4) 최대 CO 배출 저감률은 부하율 10%, 기관 회전속도 1000 rpm 및 플라즈마 공급 전압 20 kV에서 약 39.8%이었고, 최대 HC 배출 저감률은 부하율 100%, 기관 회전속도 1000 rpm 및 플라즈마 공급 전압 20 kV에서 약 36.6%이었다.

5) NOx 배출 저감률은 일반적으로 다른 유

해 배출물에 비해 낮았으며 최대 NOx 배출 저감률은 부하율 100%, 기관 회전속도 1000 rpm 및 플라즈마 공급 전압 20 kV에서 약 22.2%이었다.

6) Smoke 배출 저감률은 다른 유해배출물질에 비하여 가장 높았으며, 부하율 100%, 기관 회전속도 1000 rpm 및 플라즈마 공급 전압 20 kV에서 약 77.7%이었다.

7) 본 연구에서 사용한 실험기관은 터보 과급기를 장착한 대형 디젤기관이므로 고부하, 고회전 부근에서는 NOx가 많이 배출되었다. EGR이나 촉매 장치 장착 시 문제가 되었던 smoke 배출량을 플라즈마 반응기를 장착하여 많은 양을 저감할 수 있으므로, 이 장치들을 부가적으로 기관에 장착하면 NOx 배출량도 현저히 줄일 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- 1) 조강래 외 4인, "디젤자동차 입자상물질 여과장치의 성능평가 및 재생 기술개발", 국립환경연구원 자동차공해연구소, 제 3차년도 최종 보고서, pp. 1-5, 1996.
- 2) R.H.Amirov, E.I.Asinosky, I.S.Samoilov, and A.V.Shepelin "Experimental Studies on NO Removal from Methane Combustion Products Using Nanosecond Corona Discharge", Non-Thermal Plasma Techniques for Pollution Control, NATO ASI Series G, Ecological Sciences, Vol. 34, Part B, 1993.
- 3) Senichi Masuda, Hideyuki Nakao, "Control of NOx by Positive and Negative Pulsed Corona Discharges", IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 26, NO. 2, pp. 374-383, 1990.
- 4) J. Reece Roth, "Industrial Plasma Engineering", Institute of Physics Publishing, Vol 1, pp.25-26, pp. 148-274, 1995.