

디젤엔진용 코로나 방전식 전기집진장치의 개발 과정에서의 배기 정화 성능에 관한 기초연구

손병호* · 배종욱†

(원고접수일 : 2007년 2월 2일, 심사완료일 : 2007년 5월 15일)

A Study on the Performances of Exhaust Gas Purification at Process on the Development of Corona Discharge Type Electrostatic Precipitator for Diesel Engines

Byong-Ho Son* · Jong-Uk Bae†

Abstract : In this study, an experimental research has been conducted to reduce NOx and smoke emission from diesel engine exhaust gas simultaneously by application of corona discharge type electrostatic precipitator(ESP). The ESP was installed between exhaust gas silencer and outlet terminal of exhaust gas system. The operating conditions as input parameters taken in this experiment were corona power input, gas velocity and equivalence ratio of gas. It was found that the corona discharge type ESP has notable effect on reducing smoke in exhaust gas but appeared to bring slight effect on reducing NOx.

Key words : ESP: Electrostatic precipitator(전기집진기), Exhaust gas purification(배기가스 정화), Corona discharge(코로나방전), NOx(질소산화물), PM(particulate matter) smoke(매연)

1. 서 론

오늘날 급속히 증가하는 대기오염 규제에 따라 자동차 및 유해 배출가스 생산업체에서는 배출가스의 유해성분 제거를 위한 많은 노력을 수행하고 있다. 미국, 유럽 등 많은 나라에서는 이러한 공해문제에 대응하기 위하여 자동차 및 공장에서 나오는 배출가스의 규제를 시행하고 있으며 각국에서는 이

규제에 대응하는 많은 노력을 기울이고 있다. 특히 자동차용 디젤 엔진에서는 NOx, 입자상물질(PM)이 가솔린엔진과는 달리 상대적으로 많이 배출되기 때문에 이러한 유해물질의 저감을 위하여 디젤엔진 연소방식의 개선 및 연소의 전·후처리에 관한 연구가 활발히 수행되고 있다. 디젤엔진 유해 배출가스 저감을 위한 전처리 기술로는 사용연료의 개질에 관한 것이 있으며, 연소방식의 개선으로는

† 교신저자(한국해양대학교 기관시스템공학부), E-mail : bae@hhu.ac.kr, Tel:051)410-4276

* 한국해양대학교 대학원 기관시스템공학과

연소실의 개선, 분사계의 개선, 성층급기연소법, 균질급기압축착화연소법(HCCI)⁽¹⁾ 등을 들 수 있으며, 연소 후처리 기술로는 선택적 촉매환원장치(SCR), 디젤분진필터(DPF), 습식·건식의 배출가스 정화장치의 개발⁽²⁾ 및 전기집진방식 등 다양한 연구가 수행되어 오고 있다.

지금까지의 연구보고에 의하면 디젤엔진에서의 NOx와 PM 저감 기술은 상호 교환(trade off)관계에 있기 때문에 이 둘을 동시에 효과적으로 저감시키는 기술은 아직 출현되지 않고 있다. 전기집진방식은 PM의 제거에 탁월한 효과를 갖고 있으며 NOx의 제거에서도 일정한 잠재력을 갖고 있는 것으로 보고되고 있다.

전기집진방식은 배출가스 중의 입자들에 음전하를 띠게 하고 이들이 전극판을 통과할 때 정전기에 의하여 양극 전극판에 부착시켜 제거하는 방법이다. 이를 위하여서는 이온을 발생시키기 위한 전기방전기를 필요로 한다. 전기방전기술은 코로나 방전(corona discharge), 펄스스트리머방전(pulse streamer discharge), 부분방전(partial discharge in ferro-electric pellet layer), 연면 방전(surface discharge) 및 무성 방전(silent discharge) 등이 있으며⁽³⁾, 이들 방법들은 주로 2차적인 환경오염을 발생시키지 않는 첨단 방법으로 인식되고 있으나 종래의 가스 정화 방식에 비해 NO의 산화에 필요한 소비전력이 문제로 되고 있다.

현재 디젤엔진 배기정화용으로서 유효한 방식으로는 DC 저온 플라즈마를 이용하는 방법, 코로나 방전을 이용하는 방법 등이 있으나⁽⁴⁾ 현재까지 이를 이용한 디젤엔진의 배기 정화를 위한 연구 결과가 최소한 실정이다.

본 연구에서는 배기 후처리 정화를 위하여 코로나 방전식 전기 집진기를 갖는 구조로 된 디젤엔진 배출가스 정화장치를 시험 제작하고 이의 PM 및 NOx 에 대한 동시 저감 특성을 평가하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

Fig. 1 (a)에는 코로나 방전식 배출가스정화장

치(ESP; electrostatic precipitator)의 기본 단면도를 나타낸다. 방전부는 직경 0.1mm, 길이 100mm인 스테인리스 선(stainless steel wire)으로 된 4조의 병렬 양극 전극선과 5개의 음극 스테인리스 판(stainless steel sheet)으로 이루어진다. 음극판과 음극판의 사이에는 테플론(teflon) 절연체를 삽입함으로써 전기적 스파크를 방지함과 동시에 전극판을 지지하도록 하였다. 집진부는 11개의 양극판과 10개의 음극판을 교대로 배치하고 극판 사이에는 운모(mica)를 삽입하여 절연과 지지의 기능을 하도록 하였다. 방전부와 집진부의 가스통로 단면은 100×100mm로 하였다.

Fig. 1(b)에는 코로나 방전부의 전극과 집진부의 전극의 치수를 나타낸다. 방전부 전극의 치수는 100×40mm로 하였으며 전극간 간격과 인가전압은 예비실험에서의 확인된 최적 간격 10mm와 최적 전압 +8kV로 하였으며, 방전전류를 극대화하

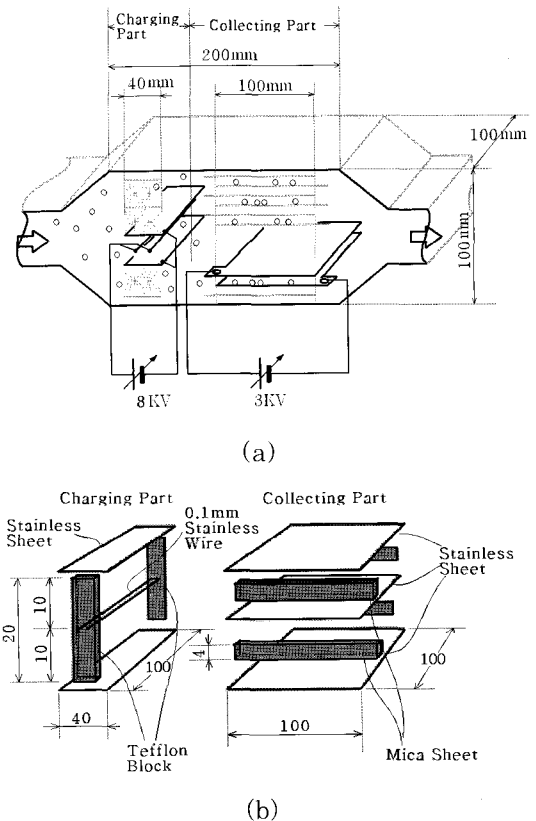


Fig. 1 Schematic diagram of ESP

기 위하여 양극선을 2개씩 직렬로 연결하였다.

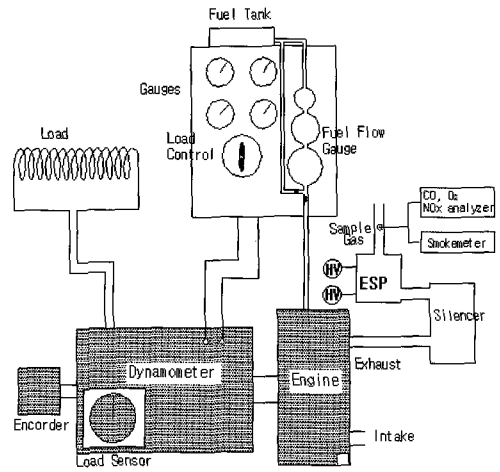
집진부는 전극의 치수를 100×100mm로 하였으며, 극판간 간격이 3mm로 된다. 따라서 인가전압은 극판 사이에서 스파크가 발생하는 최저 전압이 간격 1mm당 1kV임^[5]을 감안하여 3kV로 하였다.

Fig. 2에는 실험장치의 개략적 구성을 나타낸다. 실험장치는 엔진, ESP로 구성된다. 측정 장치는 동력계, 연료유량계, 배기가스분석기(QUINTOX KANE- MAY 9006) 및 매연 측정기(smoke meter; G Cussions P8340 이 연구의 공시엔진은 디젤엔진이므로 배기가스 중의 PM 저감 효과를 측정하기 위하여 대신하여 사용됨), 그리고 용적식 연료유 유량계로 구성 된다. 기관의 냉각수는 60℃에서 ±3℃ 정도로 일정하게 유지하였으며 ESP를 통과하는 유속의 변동을 최소화하고 샘플 가스 채취시의 맥동을 감소시키기 위해서 소음기(silencer)를 설치하였다.

배기가스의 당량비는 공시연료의 CH 조성비, 가스분석기에 의한 잔존산소농도와 CO농도로부터 분석되어진 값을 사용하였으며, 집진기를 통하는 가스의 유속은 동 데이터들에 연료소비량, ESP에서의 가스온도 및 ESP의 통로 단면적으로부터 계산된 값을 사용하였으며 본고에서는 이하 참고가스 유속(reference gas velocity)이라 칭한다. 사용된 디젤 엔진의 제원은 Table 1과 같다.

Table 1 Engine Specification

MODEL	DAEDONG ND80DI
Type of engine	Single cylinder water-cooled 4 stroke diesel Engine
Combustion chamber	Direct injection
Displacement volume (cc)	631 cc
Cylinder bore ×stroke(mm)	92 × 95
Continuous maximum power (kw/rpm)	5.9 / 2200
Compression ratio	19 : 1



*ESP (Electrostatic precipitator)

Fig. 2 Schematic Diagram of Experimental Apparatus

그리고 유속의 증가에 따라 코로나 방전에 있어서 전자승사태과정(electron avalanche process)의 종자가 되는 자유전자의 유입량이 증가하며 이에 따라 방전전류가 증가하는 것으로 분석된다. 그리고 이러한 특성은 코로나 방전식 전기집진기의 방식이 회전수의 증가에 추종하는 집진 성능에 긍정적 효과를 줄 수 있는 특성으로 판단된다.

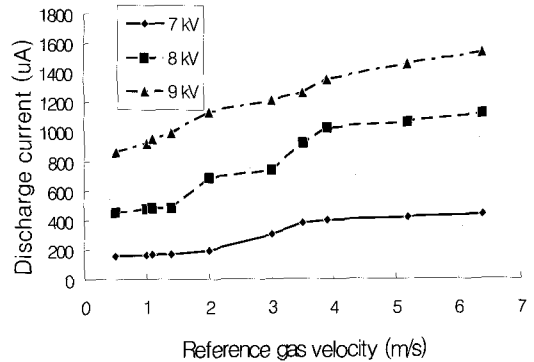


Fig. 3 Dependence of discharge current upon reference gas velocity

3.2 배기가스의 당량비에 따른 코로나 방전 특성

Fig. 4는 1400rpm의 일정한 엔진회전수와 인가전압 7, 8, 9kV에서의 엔진의 부하 즉 연료공기

혼합기의 당량비의 변화에 따른 배기가스를 통할 때의 코로나 방전전류의 변화를 측정한 결과를 나타낸다. 가스의 당량비 증가에 따른 코로나 방전전류는 약간의 증가를 나타내고 있다. 이는 엔진부하의 증가에 따라 자유전자의 증가의 원인에도 기인하겠지만 이에 따른 가스 유입량의 증가도 동시에 기여하기 때문인 것으로 생각된다^[6].

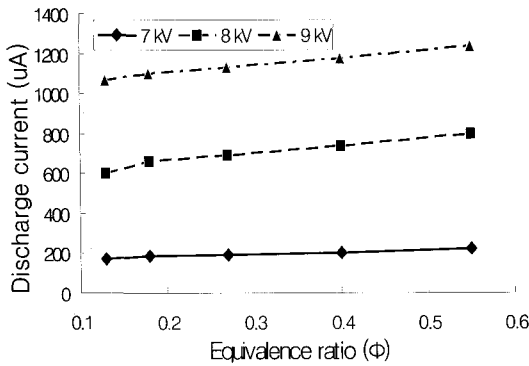


Fig. 4 Dependence of discharge current upon equivalence ratio of gas

3.3 ESP에 의한 배기의 NOx 저감 성능

Fig. 5, Fig 6 및 Fig. 7은 ESP의 ON/OFF 시의 NOx의 배출농도(ppm)를 비교하여 나타낸다. 실험 결과 NOx의 배출농도(ppm)의 엔진 회전수와 토크에 따른 특성은 일반적인 경향을 잘 나타내고 있으며 토크의 증가에 따라 NOx 배출량은 증가 하고 있다. 그러나 회전수의 증가에 따라 증가경향은 약하게 나타나며 1800rpm에서는 거의 변화가 없다. 이는 NOx를 생성하는 고온상태의 체류시간이 짧아짐에 따른 결과로 해석된다. 또한 특이한 점은 1400rpm의 경우 전 토크 범위에서의 NOx 배출의 수준은 1000rpm과 1800rpm보다도 낮게 나타난다. 이는 이 회전수 부근에서 체적효율이 높고, 따라서 공기과잉율도 높게 되기 때문에 연소온도가 낮아지기 때문으로 해석된다. ESP의 ON, OFF에 따른 NOx배출농도(ppm)를 비교하면 전 운전 범위에서 근소하나마 일관되게 감소효과가 확인된다.

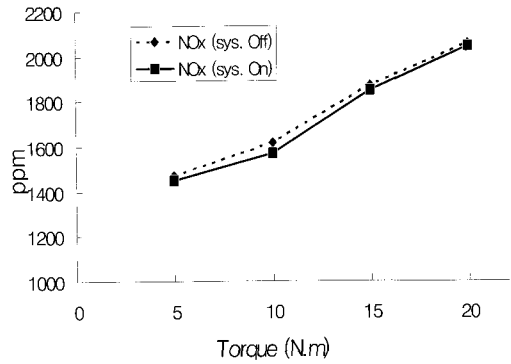


Fig. 5 Comparison of NOx ppm between that of system off and on at 1000rpm

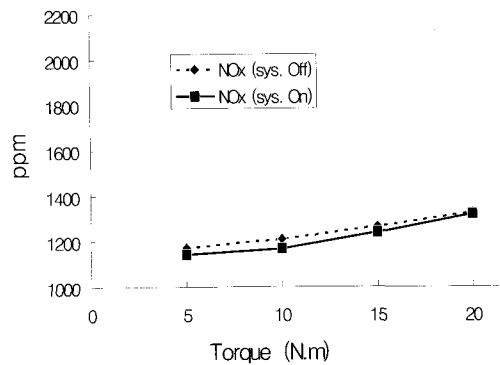


Fig. 6 Comparison of NOx ppm between that of system off and on at 1400rpm

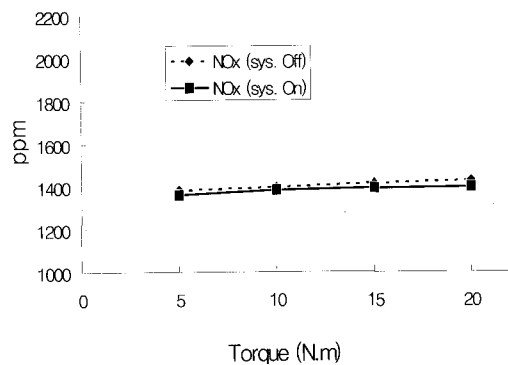


Fig. 7 Comparison of NOx ppm between that of system off and on at 1800rpm

고온의 분위기에서는 잔존산소의 농도에 따라 NO, NO₂ 와 관련된 다양한 총합 반응이 일어나는 것으로 알려져 있다^[7]. 그러나 디젤엔진의 배

기가스와 같은 비교적 낮은 온도의 분위기에서는 반응의 속도가 매우 낮기 때문에 총합반응이 일어나지 않으며, 배기가스 중에 O, O₃, OH, N, HO₂ 등 배기가스 성분으로부터 파생된 원자나 활성기(radical) 등이 잔류하여 있어야 가능하게 된다. 그런데 코로나 방전은 이들 원자나 활성기를 근소하게나마 생성시키는 것으로 알려져 있으며 따라서 본 실험에서도 이에 상당하는 근소한 NO_x의 저감이 이루어진 것으로 추정된다.

3.4 ESP에 의한 배기의 매연(smoke) 저감 성능

Fig. 8, Fig. 9 및 Fig. 10은 ESP의 ON/OFF 시 엔진회전수 1000, 1400 및 1800rpm에서의 엔진부하 변동으로서 토크에 따른 매연 저감 성능을 나타낸다.

Fig. 8 및 Fig. 9에 나타난 1000, 1400rpm에서 토크 15 N·m이하에서의 매연%저감율은 80% 이상이였으며, 그 이상의 토크에서도 대체적으로 만족스럽게 나타나고 있다. 그러나 Fig. 10에 나타난 1800rpm에서의 토크 15 N·m이상에서의 매연%저감율은 50% 이하로 저하되고, 토크 20 N·m에서는 30%정도의 저조한 성능을 나타낸다.

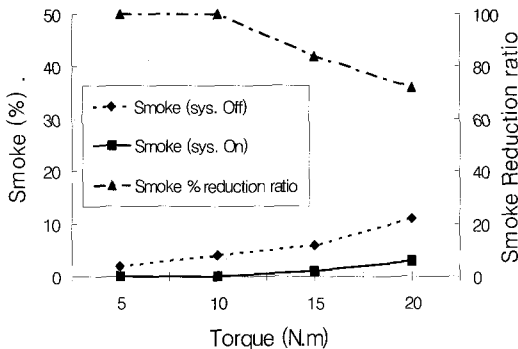


Fig. 8 Comparison of smoke % between that of system off and on at 1000rpm

이는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 엔진회전수 증가에 따른 가스의 유속의 증가로 인한 코로나 방전 전류의 증가가 있음에도 불구하고 하전 가습입자들이 가스의 유속이 빨라짐에 따라 집진 전극판 사이

의 공간에 체류하는 시간이 짧아지게 되기 때문으로 분석된다. 또한 소음기가 작용하고 있기는 하지만 부하의 증가에 따른 배기분출 압력파가 강하여 짐으로 집진판의 사이를 흐르는 가스의 난류강도가 크게 되어 매연이 층류 상으로 집진판으로 이동하여 부착되는 것이 방해받거나 심할 경우에는 집진판에 부착된 매연이 이탈되어서 매연 저감 성능이 저하하는 요인이 될 수 있을 것이라 추정된다.

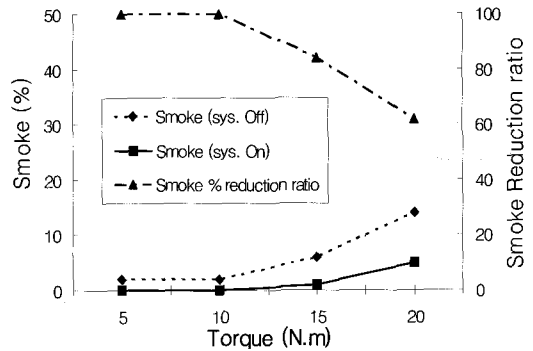


Fig. 9 Comparison of smoke % between that of system off and on at 1400rpm

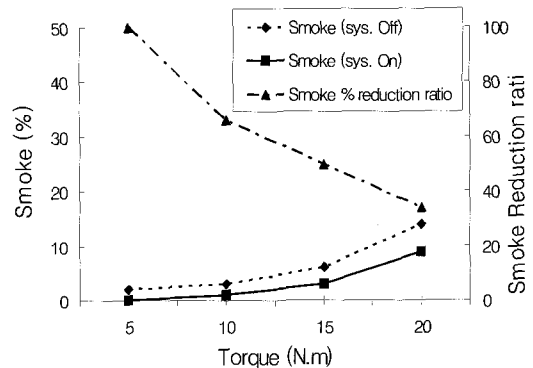


Fig. 10 Comparison of smoke % between that of system off and on at 1800rpm

Fig. 11은 양극 집진판에 부착된 매연의 부착 상태를 나타내고 있다. 그림에서와 같이 집진판 전체에 골고루 매연이 부착된 것을 볼 수 있다. 원호로 표시된 부분은 매연의 부착된 부분의 확대도로서 티슈로서 닦아 냈을 때에 쉽게 제거될 수 있을 정도이나 엔진의 운전 중에 배출 가스에 의하여 용이하게 탈락되지는 않을 것으로 보이는 부착물이

형성된 것이 나타내보인다.

그러나 전극선과 집진판에 매연이 부착되어 감에 따라 특히 전극선은 코로나 방전전류를 감소시키며, 집진판에서의 매연%저감율이 감소하게 되는 것이 운전 중 관찰되었으므로 주기적으로 과도하게 부착된 매연을 제거하여 원상회복시킬 수 있는 기술이 필요하다고 판단되었다.

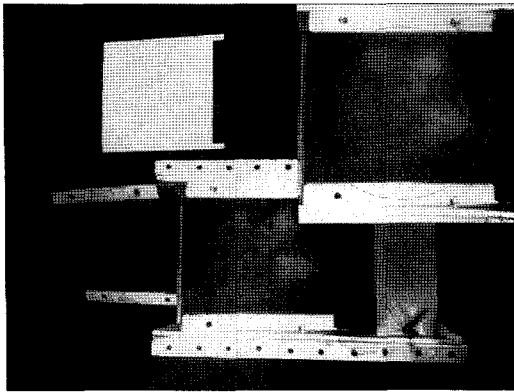


Fig. 11 Photograph of surface condition of precipitator after precipitation

3.5 배기 유속 변화에 따른 매연 저감 성능

코로나 방전실험에 관한 김은호의 보고⁽⁸⁾에 의하면, 배기 유속 2.7m/sec 이하의 조건에서 배기가스 속에 함유된 화학종이 이온이나 활성기 등과 같은 활성화된 입자들로 변화되어 매연이 제거되고, 코로나 방전에 의해 인가된 에너지에 의해서 O₂, N₂와 H₂O 등이 높은 에너지를 갖는 활성기로 바뀌며, 이들이 수증기와 결합함으로써 미세입자가 상호 응집되고 대전된 PM들이 효과적으로 집진부에서 집진되어 제거된다고 하였다.

Fig. 12는 Fig. 8, Fig. 9 및 Fig. 10에서의 토크변화와 엔진회전수 변화를 통합하여 참고가스 유속으로 환산하고, 이의 변화에 따른 매연%저감율로 재구성한 것을 나타낸다.

본 실험에서의 매연%저감율의 추세선은 참고가스 유속 2.5m/s 이하에서 80%이상의 안정된 매연 저감 성능을 보이고 있으며 그 이상의 유속에서는 매우 저하되는 현상이 나타나고 있다. 이러한 현상은 김은호의 데이터와 상당히 일치하는 것으로서

매연 저감 성능은 배기 유속에 밀접한 의존 관계임을 알 수 있다.

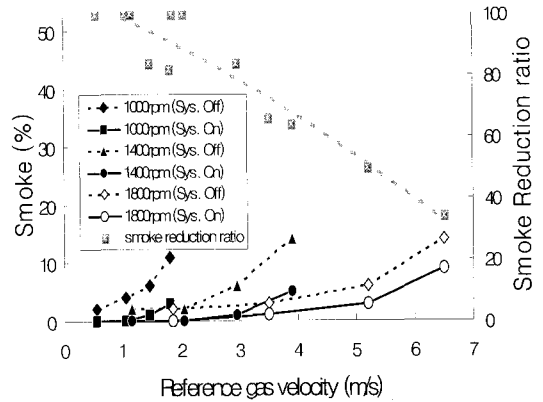


Fig. 12 Reduction plotted on reference gas velocity axis

4. 결 론

디젤 엔진 배기정화용의 ESP를 직접 시험제작하고 배기가스 중에서 코로나 방전 특성과 NOx 및 PM 저감 성능을 시험 조사한 결과 다음의 결론을 얻었다.

1. 코로나 방전식 집진기에서 코로나 방전량은 통과하는 가스의 참고가스유속의 증가에 따라 대략 선형적으로 증가하며, 당량비의 증가에 따라 완만하게 증가한다.
 2. 코로나 방전식 집진기는 디젤엔진의 매연 배출량을 대폭 저감시킬 수 있다. 그러나 매연%저감율을 높게 유지할 수 있는 참고가스유속의 한계점을 가진다.
 3. 코로나 방전분위기에서 NOx의 배출 농도는 경미하게나마 감소시킬 수 있다.
 4. 매연은 집진판 전체에 균일하게 부착된다.
- 앞으로 보다 향상된 집진성능을 실현하기 위하여서는 안정적인 코로나 방전전류를 발생하는, 더욱 높은 인가전압의 ESP 방전부와 제한된 공간 내에서 가능한 한 넓은 집진부의 통로면적과 집진판의 면적의 조건 하에서 운전되는 전기집진기가 필요함을 제시한다. 그리고 사용시간의 경과에 따른 집진장치 성능 저하특성과 이의 재생을 위한 부

작 PM 제거기술에 관한 연구 또한 후속 연구로서 진행되어야 할 것으로 사료된다.

참고 문헌

- [1] Chang Sik Lee Ki Hyung Lee, Dae Sik Kim, "Experimental and numerical study on the combustion characteristics of partially premixed charge compression ignition engine with duel fuel", Fuel 82, pp553-560, 2003
- [2] 한국발명진흥회, "자동차 배출가스 후처리장치", 특허청, 2004년도 PM보고서, pp49-63
- [3] 박재윤, "코로나 방전 시스템을 이용한 연소가스중의 NOx, SOx 제거", The Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers. Vol. 10, No. 8, pp.830- 835, 1997
- [4] 신귀수, 조성남, 류신열, 김근주, "자동차 배기가스 정화용 건식 고전압 방전 필터의 제작", 한국자동차 공학회, 2004년도 추계 학술대회 논문집 pp.67-71.
- [5] 신귀수, 김창영, 김근주, 오영택, "코로나 방전에 의한 디젤엔진 배기가스 저감특성 평가", 한국자동차 공학회, 2004년도 추계 학술대회 논문집 pp.183-187.
- [6] 하상안, 정장표, "코로나 방전극 구조에 따른 입자상물질의 집진효율에 관한 특성연구", 대한환경공학회 논문 J. of KSEE, Vol. 21, No.4 pp.677-688, 1999.
- [7] 차민석, 이재욱, "저온 플라즈마와 NH₃ SCR 복합공정을 이용한 디젤엔진 배기가스의 NOx 저감 기술", 제25회 KOSCO SYMPOSIUM 논문집, pp.89-95, 2003.
- [8] 김은호, "충격식 코로나 방전 플라즈마를 이용한 배연가스로부터 먼지 제거에 대한 특성", 한국 환경 과학 회 지, 제 12 권 (제 12 호), pp.1261-1267, 2003.

저 자 소 개



손병호(孫炳護)

1977년4월생, 2000년 한국해양대학교 운항시스템공학과 졸업(학사), 2007년 한국해양대학교 기관공학 졸업과졸업(석사), WARTSILA KOREA근무, e-mail: byongho.son@wartsila.com



배종욱(裴鍾旭)

1948년 2월생, 1971년 한국해양대학기 관학과졸업(학사), 1985년 부산수산대학 기관학과졸업(석사), 1990년 부산수산대학기 관학과졸업(박사), 한국해양대학교 기관시스템공학부교수, 내연기관연소에 관심, e-mail: bae@hhu.ac.kr