

工學碩士 學位論文

디젤엔진용 코로나 방전식 전기집진장치의 개발과  
배기 정화 성능에 관한 기초연구

A Study on the Performances of Exh. Gas Purification of Corona  
Discharge Type Electrostatic Precipitator for Diesel Engines

指導教授 裴 種 旭

2007년 2월

韓國海洋大學校 大學院

機關시스템工學科

孫 炳 護

論文을 孫炳護의 工學碩士學位論文으로 認准함

委員長 崔在星 ①

委員 趙權回 ①

委員 裴鍾旭 ①

2006年 12月

韓國海洋大學校 大學院

機關시스템工學科

孫炳護

# 목 차

Abstract .....	i
제 1 장 서론 .....	1
제 2 장 코로나 방전 특성 .....	4
2.1 코로나 방전 .....	4
2.2 코로나 발생 .....	5
제 3 장 실험 장치 및 방법 .....	10
3.1 코로나 방전 조건 실험 .....	10
3.2 코로나 방전식 집진 장치 .....	14
3.3 실험 장치 구성 .....	16
3.3.1 기관의 제원 .....	19
3.3.2 동력계 .....	21
3.3.3 배기 측정 장치 .....	21
제 4 장 실험 결과 .....	24
4.1 ESP에 의한 배기의 NO <sub>x</sub> 저감 성능 .....	24
4.2 ESP에 의한 배기의 매연(Smoke) 저감 성능 .....	27
4.3 배기 유속 변화에 따른 매연 저감 성능 .....	31
제 5 장 결론 .....	32
참고문헌 .....	33

# A Study on the Performances of Exh. Gas Purification of Corona Discharge Type Electrostatic Precipitator for Diesel Engines

Byongho, Son

*Department of Marine Engineering  
The Graduate School of Korea Maritime University*

## *Abstract*

The diesel engine has long been the most energy efficient powerplant for transportation. Moreover, diesel engines emit extremely low levels of hydrocarbon and carbon monoxide that do not require after combustion treatment to comply with current and projected nitrogen oxides and particulate matter standards.

Traditionally, measures aimed at reducing one of these two exhaust species have led to increasing the other. This physical characteristics, which is known as NO<sub>x</sub>/PM trade-off, remains the subject of an intense research effort. Diesel engine has low specific fuel consumption and it also has a little CO and HC emission, while NO<sub>x</sub> and PM emission are very much, compared with exhaust emission standards.

However, the limit level is more and more strengthened yearly due to the importance of environmental protection. So, the optimal countermeasure for the reduction of NO<sub>x</sub> and PM emission below limit level is required.

In the meantime, many advances were achieved in diesel exhaust after combustion emission control devices technology.

Selective catalytic reduction(SCR), used in the past to reduce NO<sub>x</sub> from large industrial installations, is now being developed for heavy-duty on-highway diesel engines.

Diesel particulate filters(DPF) which are known for their ability in reducing PM have previously suffered from regeneration, reliability and durability problems.

PM can be removed by various filtering processes, but the filter is blocked relatively fast and needs to be regenerated. The SCR solution, however, gives problems with storage of the reducing agent. This is of both inconvenience and safety concern.

An alternative way to access the NO<sub>x</sub> and PM reduction problem is to use an plasma reactor. In plasma reactor, electricity supplied from the vehicle electrical power supply is used to reduce NO<sub>x</sub> and PM.

In this study, an experimental research has been conducted to reduce NO<sub>x</sub> and PM emission simultaneously from combustion flue gases by application corona discharge type electrostatic precipitator(ESP). The ESP was located on the exhaust line after silencer. The operating conditions as inlet parameters taken in this experiment were corona power input, gas velocity and mist concentration. It was found that the corona discharge type electrostatic precipitator could reduce diesel exhaust particles at moderately efficiency but appeared to bring slight effect on NO<sub>x</sub>.

# 1 장 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 공해문제를 대응하기 위하여 자동차 및 공장에서 나오는 배기가스의 규제를 시행하고 있으며 각국에서는 이 규제에 대응하는 많은 노력을 기울이고 있다. 특히 자동차 배출가스에서 발생하는 CO, NO<sub>x</sub>, 입자상물질(PM), SO<sub>x</sub> 등의 유해물질 저감을 위해 엔진 개발 및 연소에 대한 연구를 활발히 수행하고 있다.

디젤엔진에서 배출되는 NO<sub>x</sub>를 감소시키기 위해서 연소 온도를 낮게하면 수트의 생성이 증가될 뿐 아니라 엔진 성능(engine performance)도 현저히 저하된다. 따라서 후처리장치에서 NO<sub>x</sub>를 제거하는 정화시스템이 개발된다면 엔진효율을 증진시킬 수 있을 뿐 아니라 PM을 경제적이고 효율적인 방법으로 억제 시킬 수 있다. 한편 희박연소인 디젤엔진에서 배출되는 NO<sub>x</sub>는 배출가스 중 과잉의 산소와 황 함유량이 가솔린엔진보다 많아 기존 삼원촉매로서는 제거효율이 낮을 뿐 아니라 촉매의 활성저하가 심해서 가솔린 엔진 자동차의 경우와 같은 상용화에 어려움을 겪고 있다.

디젤엔진 배출가스 저감을 위한 방법으로는 연소실에 공급되기 전의 전처리 기술로는 사용연료의 개선, 엔진 연소실 개선, 분무특성 등의 기술과 연소 후 처리 기술로 연소실 배기 후 촉매제 개선, 배기가스 정화장치 개발 등의 기술 등 많은 연구가 수행되어 오고 있다.

배기가스 정화장치 중에서 DPF(diesel particulate filter)는 디젤엔진에서 배출되는 PM을 포집하여 태우는 기술로서 PM을 80% 이상 저감할 수 있어 매연저감 성능 면에서는 아주 우수하나 가격이 높고 내구성이 아직은 부족한 것이 실용화에 장애요인이 되고 있다. 또한 필터에 PM이 포집됨에 따라 엔진에 배압이 걸리며 이것에 의하여 출력과 연료소비율이 다소 희생된다.

선택적 촉매환원법(SCR/selective catalytic reduction)의 NOx 저감율은 90%이상으로 상당히 효율적이거나 주로 공장에 사용되며, 산업용 대형엔진에 사용되기도 하나 자동차에 실용화하기에는 별도의 암모니아 공급장치와 장치 규모 등의 측면에서 어려움이 많다.

위에서 말한 NOx와 PM 저감의 문제점을 해결하는 새로운 방법으로 고전압을 이용한 연구가 진행 중이다. 고전압으로 전자에 에너지를 가하면 발생하는 비열플라즈마(non-thermal plasma)기술은 최근 몇 년 동안 선진 각국에서 활발한 연구가 진행되어 왔다. 플라즈마 반응기(plasma reactor)는 자동차의 전기 공급장치에서 전기를 사용함으로써 편리하고 효율적이다. 비열 플라즈마는 근본적으로 두가지 다른 방법으로 생성될 수 있는데, 전자빔 조사(electron beam irradiation)에 의한 것과 전기적인 방전(electrostatic discharge)에 의한 것이다. 그 한 가지로서 전자빔 조사에 의한 탈질(de-NOx), 탈황(de-SOx)법이 1980년 일본의 Kawamura등에 의하여 제안된 이래 상용화되어 실 시스템에 사용되고 있으며, 더욱 효율이 좋은 리액터를 개발하기 위한 연구가 활발히 행하여지고 있다. 이것은 진공 중에서 직류전원에 의해 수백 keV의 에너지로 가속한 전자빔을 발생시켜 티타늄 등의 박막을 통해 반응 영역으로 도입하고 배기가스에 조사시켜 플라즈마를 발생시키고 그 중에서 생성된 O 나 OH 등의 각종 래디컬에 의해 배기가스에 함유된 NO나 SO<sub>2</sub>를 산화하고 암모니아 등의 알칼리성 약품과 반응시켜 고체상의 미립자로 만들고 이것을 전기집진장치 혹은 백필터에서 포집하여 배기가스를 정화시키는 것이다. 전자빔 오염제거시스템은 X선의 발생을 동반하기 때문에 이에 대한 대책이 필요하고 가속장치 등에 높은 설비비가 소요되는 문제점이 있다. 이 점을 개선함과 동시에 보다 낮은 비용화의 가능성을 가지고 있는 전기적 기체방전현상을 이용한 방전 플라즈마법이 제안되었고 미국, 일본, 독일 및 캐나다 등의 선진각국에서 활발히 연구가 진행되고 있다.

전기적인 방전기술은 형태에 따라 여러 가지로 분류된다. 이들 방법에선 코로나 방전(corona discharge), 펄스스트리머방전(pulse streamer discharge),

부분 방전(partial discharge in ferroelectric pellet layer), 연면 방전 (surface discharge) 및 무성 방전(silent discharge) 등이 있으며, 이들 방법 들은 주로 2차적인 환경오염을 발생시키지 않는 첨단 방법으로 인식되고 있 으나 종래의 가스 정화방식에 비해 NO의 산화에 필요한 소비전력이 문제로 되고 있다. 현재 관련분야의 연구로는 DC 저온 플라즈마를 이용한 디젤엔진 배기가스 유해물질 저감을 위한 연구, 코로나 방전을 이용한 디젤엔진 배기가 스 중 NO<sub>x</sub> 저감에 관한 실험적 연구, 코로나 방전을 이용한 디젤엔진 배출가 스 저감 장치 개발 등이 있다<sup>1)2)3)</sup>.

본 연구에서는 배기 후처리 정화를 위하여 코로나 방전식 전기 집진기를 갖 는 구조로 된 디젤엔진 배출가스 정화장치를 제작하고 그 특성을 평가하고자 한다.



## 제 2 장 코로나 방전 특성

### 2.1 코로나 방전(corona discharge)

공기 중에서 이온을 생성시키는 방법으로는 방사성 방전(radioactive discharge), 자외선 복사(ultraviolet radiation), 불꽃(flame) 및 코로나 방전 등이 있는데, 코로나방전만이 충분한 농도의 단극성 이온을 생성시킬 수 있다.

코로나 방전을 일으키기 위해서는 불균일한 전기장이 필요하다. 공기나 다른 기체들은 보통상태에서는 훌륭한 절연체이나 높은 강도의 전기장이 형성되면 전기적 붕괴(breakdown)를 일으켜 도체가 된다. 전선과 튜브에 의해 전기장을 만들었을 때 전위차가 특정치를 넘는 경우 전선 주위에 코로나 방전 영역이 형성된다. 이 영역내의 전자는 빠른 속도로 가속이 되어 공기분자와 충돌하여 공기분자를 양이온과 전자로 분리시킨다. 이러한 과정을 통하여 전선 주위에는 코로나 방전이라고 부르는 양이온과 전자의 뺑뺑한 구름이 형성된다.

전선의 극이 음이라면 코로나 방전 영역내의 양이온은 전선으로 이동흡수되고, 전자는 바깥의 튜브 쪽으로 이동하게 된다. 전선과 튜브사이의 공간으로 공기 부유입자를 주입시키면 입자는 전선과 같은 극으로 대전된다. 코로나와 이온풍(ion wind)을 형성시킨 전기장은 입자의 전기장 대역에 기여한다. 만일 깨끗한 공기를 고속으로 주입시키면 단극 이온들을 전기장영역 바깥으로 끌어낼 수 있어, 입자의 확산 대전에 이용할 수 있다.

## 2.2 코로나 발생(corona generation)

코로나 방전이란 전기방전의 일종으로 고전압으로 연결된 전극주변에 있는 가스분자의 전기적 파괴를 수반한다. 코로나 방전시 나타나는 특징은 주위 가스가 전기적으로 파괴되어 전극주위에 형광을 발생시킨다.

형광의 모양은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 점, 쏘세지뿔, 리본 등과 같은 각종형태가 있다. 코로나 방전시 나타나는 또 하나의 특징은 전극에 가해진 전압이 코로나 시발(始發)전압을 넘어서면 전류의 급속한 상승을 수반한다. 원래 "코로나"라는 말은 프랑스어에서 유래된 것으로 코로나 발생 모양이 왕관과 같다는데서 붙여진 이름이다. 코로나형상은 코로나 전극 극성에 따라 좌우된다. 양극 코로나는 전극의 전 표면에 균일한 형태로 나타나며 음전극 코로나는 빛나는 점이나 리본 형태로 각 부위에 나타난다. 따라서 코로나는 그 전극의 극성에 따라 양극 코로나 또는 음극 코로나로 명명된다.

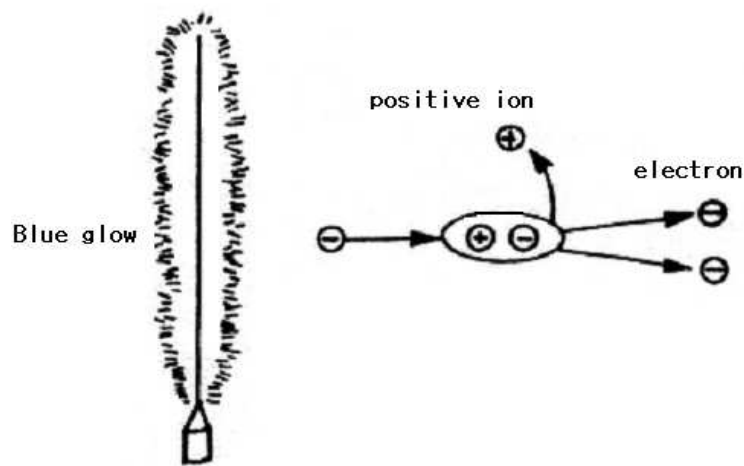


Fig. 1 Model diagram of corona discharge phenomenon

방전극 주위의 강한 전계는 가스 내에 존재하고 있는 자유전자를 가속한다. 이렇게 가속된 자유전자는 상당히 빠른 속도로 이동하면서 분자에 충돌하면 충돌된 분자는 Fig. 1에서와 같이 양이온으로 되면서 자유전자를 하나 내놓는다. 이 자유전자는 연쇄적으로 다른 가스분자와 충돌하여 많은 수의 양이온과 자유전자를 생성시키는데 이와 같은 이온증가과정을 전자 사태 증배 (Avalanche dividend)라 한다.

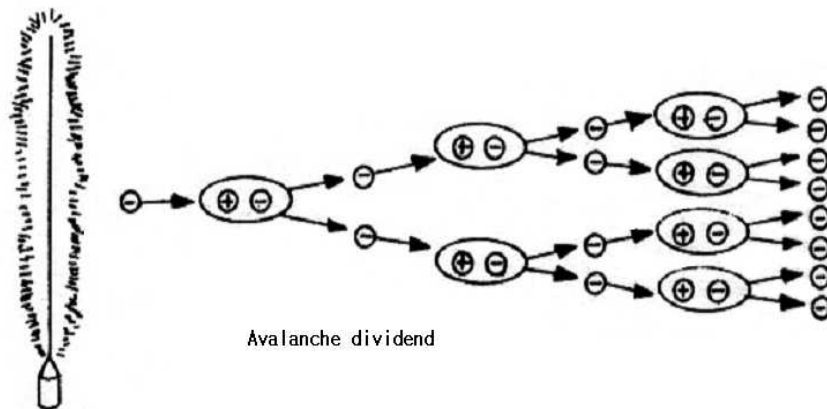


Fig. 2 Model diagram of Avalanche dividend

Fig. 2에서 보는 바와 같이 방전극 즉 코로나 발생 주위에서의 전자 사태 증배는 전장에 의한 고속도의 가속전자가 가스분자와 충돌하여 이온을 생성시킬 수 있는 속도를 갖는 한 계속된다. 즉 전자 사태 증배 현상은 전극간 불평등전계의 강도에 따르며 그 강도가(집진극 쪽으로 갈수록 약해짐) 생성된 자유전자가 가스분자와 충돌하여 가스분자를 이온화 시킬 수 없을 때까지 계속된다. 한편 보다 크고 둔한 양이온은 음극인 방전극을 향하여 이동해 가면서 방전극을 포위하고 있는 가스분자와 음극자체에 충돌하게 되며, 이 충돌로 인하여 새로운 자유전자가 발생된다.

전자 사태 증배 과정에서 발생된 자유전자는 전장(electric field)을 따라 접지되어있는 집진극을 향해서 이동하는 전자군의 흐름을 형성한다. 이와 같은 자유전자의 이동을 통해서 자유전자들은 코로나 범위를 벗어나 극간영역(inter electrode region)에 이르게 된다. 극간영역에서는 전장강도가 코로나 영역보다 작기 때문에 자유전자의 속도 또한 감소하게 된다. 이 영역에서는 전자가 가스분자와 충돌해도 코로나 영역에서와는 달리 속도가 작아져 가스분자를 이온화시키지 못하고 가스분자표면에 흡착되어 Fig. 3에서와 같이 음이온을 띤 가스분자로 만든다. 이렇게 형성된 가스이온은 다시 분진과 충돌 흡착되어 분진 충전기전의 원동력이 된다.

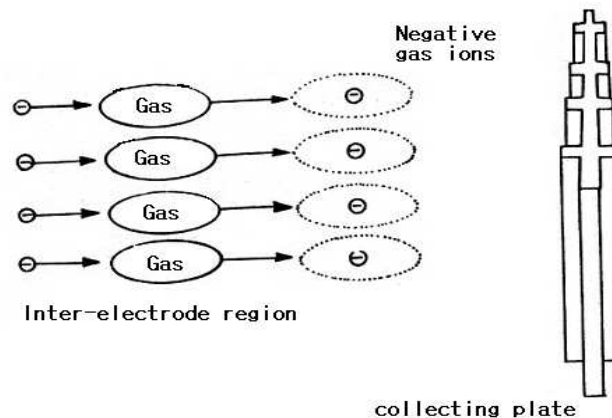
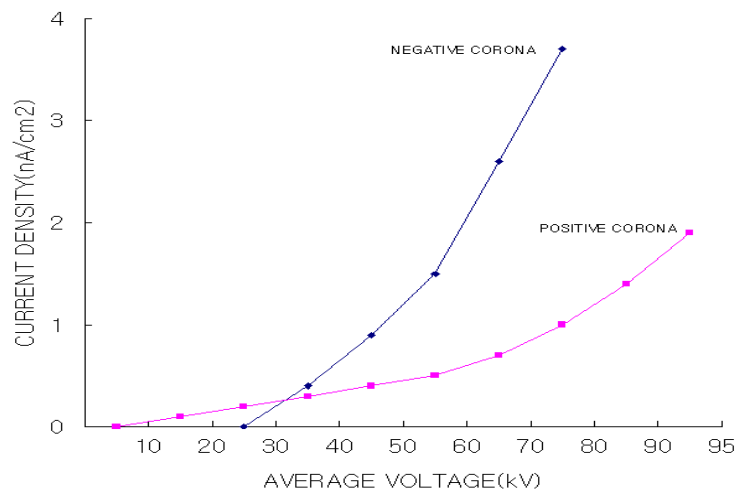


Fig. 3 Model diagram of ionization process

음가스 이온은 접지된 집진극을 향하여 이동하며, 이때 극간 공간 내에는 안정된 음이온 가스가 일정농도에 달한다. 즉 공간전하(space charge)가 형성된다. 전극사이의 전압을 상승시키면 전장강도와 이온형성이 증가되나, 계속해서 전압이 상승하면 불꽃방전이 발생하므로 불꽃방전이 일어나기 직전까지 전압을 올릴 수 있다. 여기서 불꽃 방전이라 함은 방전극과 집진극사이의 공간 내에 발생하는 불꽃을 의미한다. 이는 집진극과 방전극사이의 가스층을 통하여 국소화된 전류의 급작스런 돌진현상이다. 불꽃방전이 일어나면 잠시 동안

전계가 없어진다. 일반적으로 전기집진기를 가동할 때 전압의 크기는 전장이 계속적으로 쇠약하게 되지 않게 할 수 있는 범위 내에서 충분한 불꽃방전이 일어나도록 가동하는 것이 통례이다. 이와 같은 최적가동을 위한 불꽃방전 횟수는 분당 5-100회 정도이다. 이 정도의 값이면 전압을 상승시켜서 얻어지는 집진효율의 이득이 전압을 올렸을 때 발생하는 불꽃방전에 의한 전장의 쇠약에 기인한 가스 이온화의 감소로 인한 효율손실보다 크게 된다. 최적효율을 얻기 위해서는 전장강도는 가능한 한 높을수록 좋다. 이와 같은 상태를 얻기 위해서는 방전극에 고전압을 걸어서 방전극에서 집진극으로 높은 코로나 전류를 흐르게 하여야 한다.



**Fig. 4 Current-voltage relationships of positive and negative corona at high temperature and pressure**

양코로나와 음코로나는 다른 성질과 형상을 가지고 있다. 양코로나는 매우 안정성을 가지며 초록색을 띤다. 그러나 음코로나는 와이어 표면에 깃털모양으로 움직인다. 이러한 깃털모양은 길이가 수 mm이며 대기중의 산소로부터 오존을 발생시킨다. 그래서 음코로나는 양코로나보다 10배이상의 오존을 발생시키므로 실내공조용 전기집진기에는 양코로나를 많이 사용한다. 그러나 산

업용 전기집진기는 고전압을 발생시켜 집진효율을 증가시키기 위해 음코로나를 사용한다. 일반적으로 코로나 발생은 가스온도, 압력, 재질 구성 및 형상에 크게 영향을 받는다.

방전극과 접지전극사이에 더욱더 높은 전압이 걸리면, 둘 사이에서 전류가 흐르기 시작한다. 이 상태를 코로나 개시상태라고 부르며 이때의 전위차를 코로나 개시 전압이라고 한다. 이 상태에서는 기체내의 전자들이 강력한 전기장에 의해 운동에너지를 받아서 중성 기체분자들과 충돌한다. 이 순간에 전자는 중성 기체분자에게 에너지를 전달시키고 대부분의 경우에 한 개의 중성분자는 자신의 전자 하나를 떼어내고 양이온으로 된다<sup>4)</sup>.

## 제 3 장 실험 장치 및 방법

### 3.1 코로나 방전 조건 실험

코로나 방전 조건을 파악하기 위하여 1) 전극선과 극판간의 거리 변화에 따른 코로나 최적 발생량을 측정, 최적의 코로나 발생 간격을 설정 후 엔진의 부하와 rpm을 변화시켜 그에 따른 2) 당량비 변화 3) 가스 유입속도 변화가 코로나 발생량에 어떠한 영향을 미치는지 실험하였다.

첫째, 전극선과 극판간의 거리 변화에 따른 코로나 발생량을 측정하기 위해 Fig. 5와 같이 전극선 및 극판의 길이 20mm, 양극판의 간극 D, 극판 중간에 지경 0.1mm의 스테인리스 전극선을 설치하고, 직류의 인가전압을 6-10kV로 변화해 가면서 코로나 전류를 측정하였다.

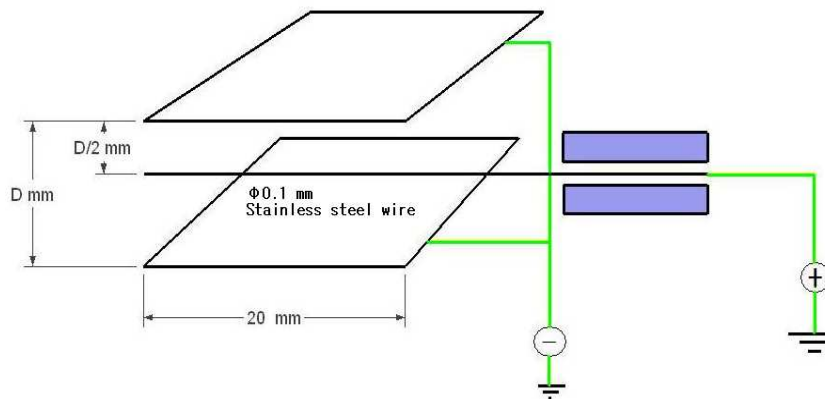


Fig. 5 Schematic diagram of experiment

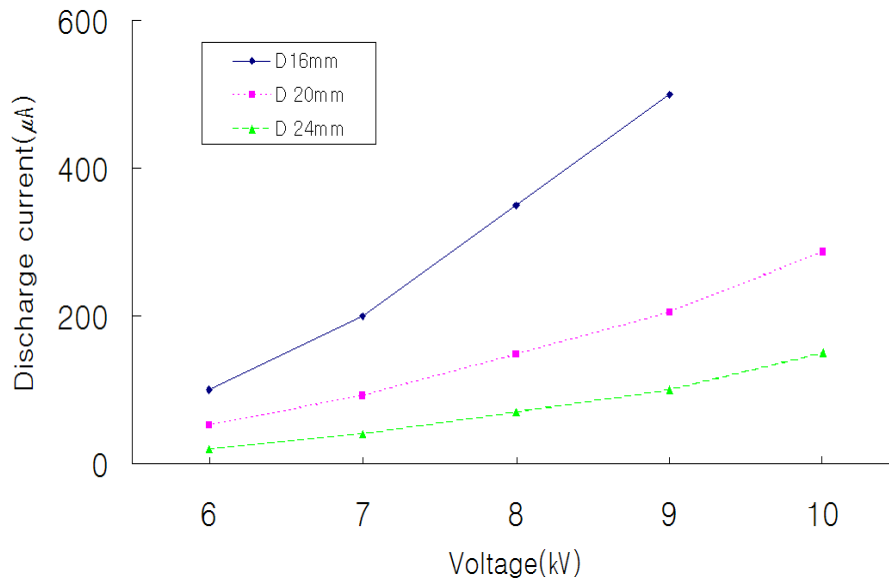


Fig. 6 Time averaged current-voltage characteristics

Fig. 6에서 보이듯이 전압의 증가에 따라 방전 전류는 대략 비례적으로 증가 하였다. 16mm 간극에선 약간의 전압 증가에도 코로나 발생량이 크게 증가 하였고, 9.2kV이상의 전압에서 전계를 파괴하는 스파크가 발생하였다. 20mm 간극에선 전압증가에 따른 코로나 발생량이 완만하게 증가 하였고, 24mm 간극에선 코로나 방전량이 20mm 간격에 비해 다소 낮게 발생하였다.



상기 실험 결과 및 이론에 기초하고 본 연구를 위하여 제작한 ESP (electrostatic precipitator)에서는 극판간의 간격이 20mm, 전극선과 극판의 간격 10mm로 하였다. 전극선과 극판은 4sets로 구성되었으며 전극선의 총길이는 80mm이다. 상기 방식으로 제작된 ESP로 디젤엔진 배기 중에서 부하를 변화시켜 당량비 변화에 대해 코로나 발생량을 실험하였다.

Fig. 7은 1400rpm에서 부하변경에 따른 공기과잉계수를 측정하여 당량비로 환산하고, 인가전압 7-9kV에서 당량비의 변화에 따른 코로나 방전전류의 변화를 측정하였다. 당량비 증가에 따라 코로나 발생량이 약간 증가됨을 볼 수 있다. 이는 가스 유입량의 증가로 하전입자도 증가되기 때문인 것으로 생각된다.

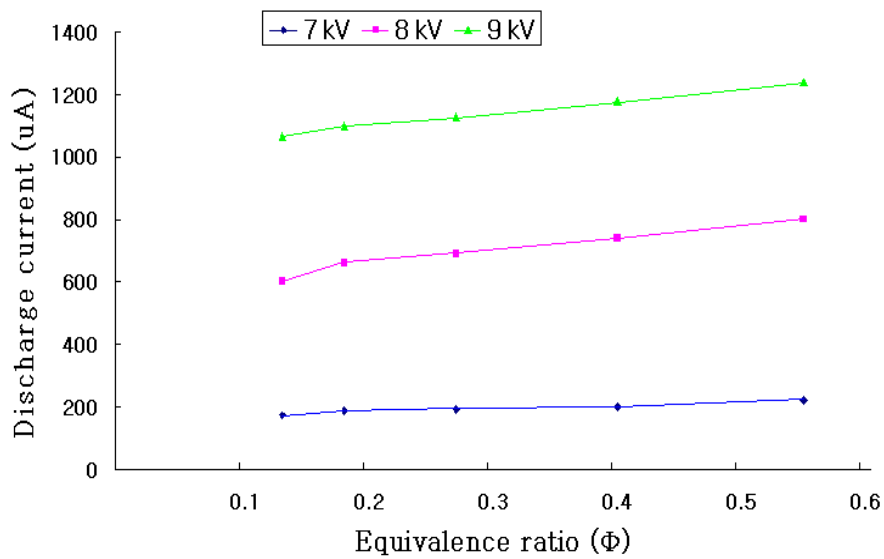


Fig. 7 Dependence of equivalence ratio for discharge current

코로나 방전 조건 실험의 다른 한가지 조건인 가스유입속도 변화에 따른 코로나 방전량을 측정하기 위해 N.m의 동일한 토크 상태에서 회전수 변화를 주어 ESP를 통과하는 배기의 속도를 변화시켜 실험하였다. Fig. 8에서 보이듯이 배기 유속증가에 따라 코로나 발생량 또한 증가함을 발견하였다.

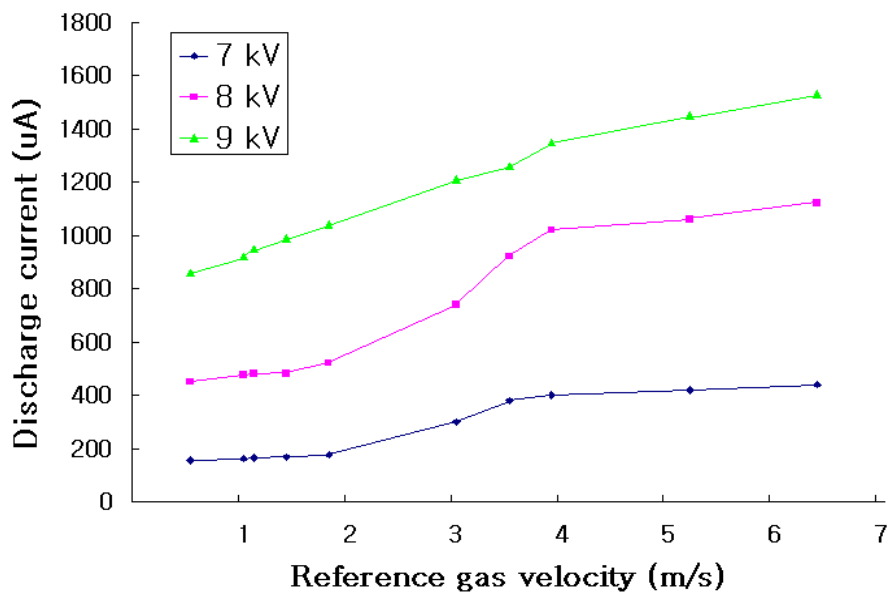


Fig. 8 Dependence of reference gas velocity for discharge current

상기 3가지 실험에서 보이듯이 코로나 발생량은 전극선과 극판의 간극에 따라, 당량비 변화에 따라, 그리고 RPM 변화에 따른 가스 유속에 따라 코로나 방전량이 변화함을 발견하였다.

코로나 전압-전류의 관계를 좌우하는 주요 요인은 가스성분, 온도, 압력, 밀도 먼지 저항계수 등으로 알려져 있다<sup>5)</sup>.

코로나 방전에 의해서 발생하는 이온강도는 일정전압 이상에서 운전될 경우

방전의 전리 현상에 의한 전류흐름의 저하가 두드러져 전체적으로 감소현상이 일어날 수 있다. 따라서, 전계강도가 증가하면 이온형성이 증가하지만 이와 동시에 전압을 증가시키면 전류의 전리현상이 증가된다. 이 현상은 전류흐름의 돌진 현상이 발생함으로 인해 잠시 동안 전장이 쇠약해지므로 코로나 방전 전압은 플라즈마 발생을 위한 반응과정에 영향을 미친다. 최적효율을 얻기 위한 전압은 이온강도의 증가를 위해 부착력의 방해에 의한 집진효율 저하가 무시될 수 있는 한계까지의 전압이다<sup>6)</sup>.

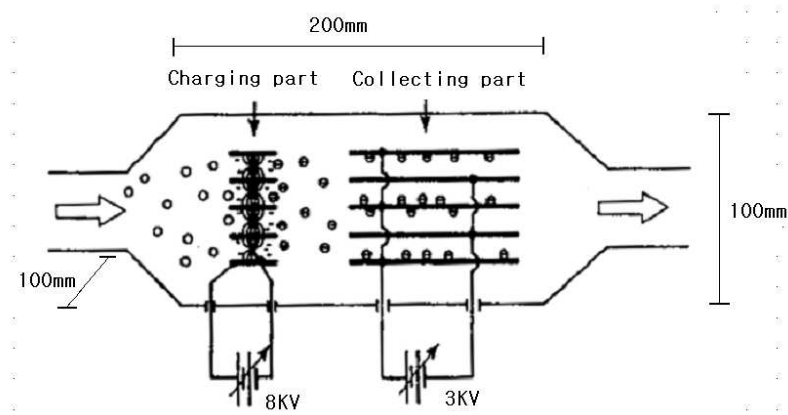
상기 조건들로 수회의 실험 결과 자계를 흐트리지 않고 안정된 코로나를 발생하는 최고의 전압은 본 실험에서는 8kV였다.

### 3.2 코로나 방전식 집진장치

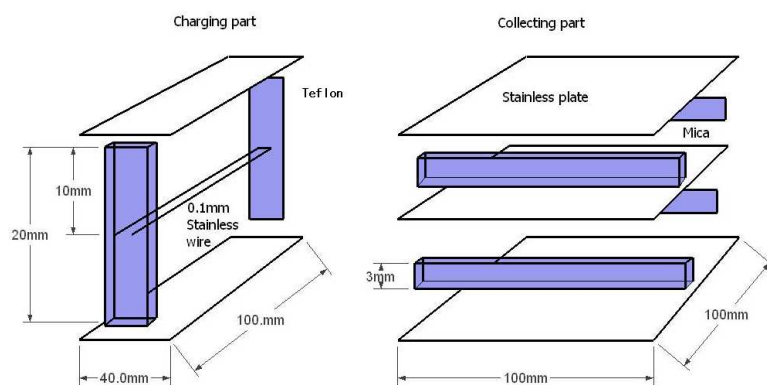
Fig.9(a) 은 본 실험을 위해 제작한 코로나 방전식 집진장치의 개략도이다. 그림과 같이 고전압 발생회로 장치를 사용하여 고전압(Max-10kV)을 발생시키고, 유입되는 배기가스가 방전부(charging part)를 통과하면서 고전압에 의한 코로나 방전에 유해가스가 분해 및 이온화 되고, 집진부(collecting part)에서 집진되는 방식이다.

Fig.9 (b)는 코로나 방전식 집진장치의 기본 단면도로서, 방전부는  $\varnothing$  0.1mm 길이 20mm인 스테인리스 선(Stainless steel wire) 4개를 병렬로 연결한 양극 전극선과 8개의 음극 스테인리스 판(Stainless steel plate)을 테프론(teflon)절연체를 사용하여 연결함으로써 전기적 스파크(spark)를 방지함과 동시에 전극선과 전극판을 지지하는 효과를 가진다. 집진부는 집진효율을 극대화하기 위해 100\*100mm의 집진판 간극을 3mm 설정하고, 11개의 양극판과 10개의 음극판을 교대로 배치하고 극판 사이에는 고온에도 견디고 전기적으로도 안전한 운모(mica)를 사용하여 극판을 지지하도록 제작하였다.

본 실험에서 사용된 인가전압은 앞선 기본 실험에서의 최적 전압인 +8kV를 방전부의 전극선에 인가하고, 집진부는 양극판 사이에서 스파크가 발생하는 조건이 mm당 1kV 임을 감안하여 3kV를 인가하였다.



(a)



(b)

Fig. 9 Schematic diagram of ESP

### 3.3 실험장치의 구성

Fig. 10은 실험장치 구성의 개략도를 나타낸다. 실험장치는 기관, 동력계, 연료유량계, 배기 샘플링 및 분석계, 그리고 ESP(electrostatic precipitator)로 구성된다. 연료는 저장탱크에서 중력에 의해 유량계를 거친 후 엔진에 공급된다. 기관의 냉각수는 60°C에서  $\pm 3^{\circ}\text{C}$  정도로 일정하게 유지하였으며 ESP를 통과하는 유속의 변동을 최소화하고 샘플 가스 채취시의 맥동을 감소시키기 위해서 소음기(silencer)를 설치하였다. Fig. 11은 실험장치의 사진들이다.

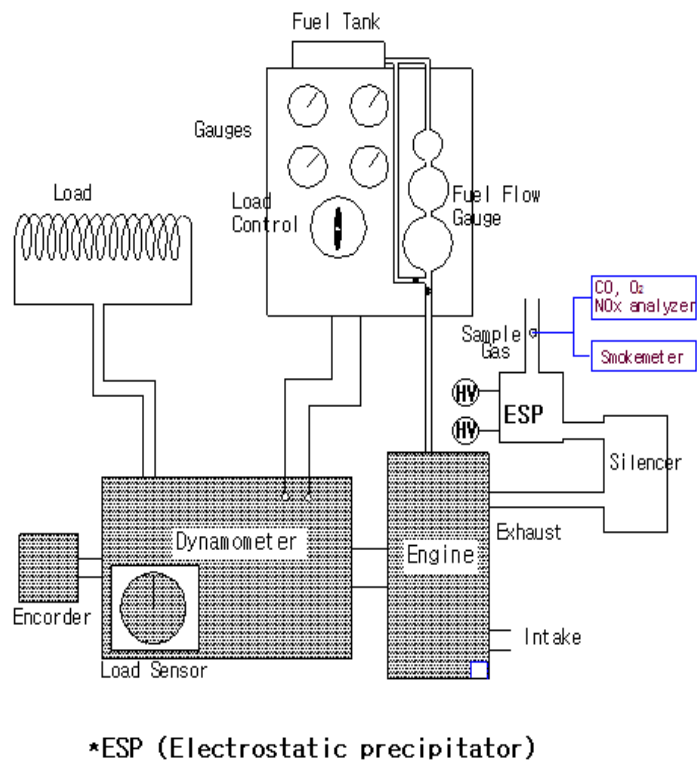
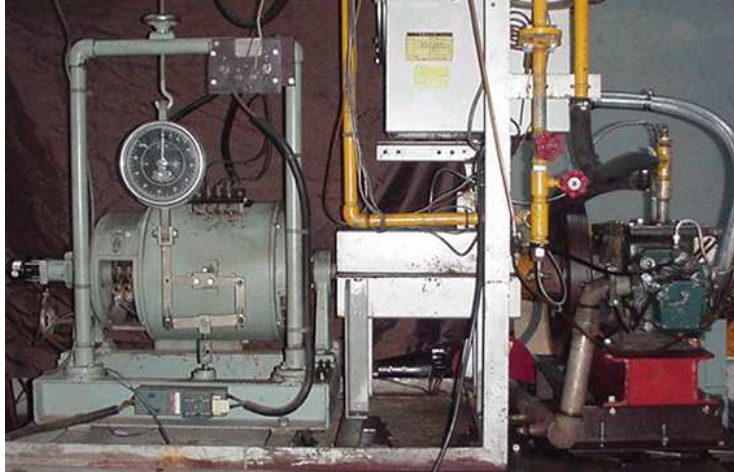
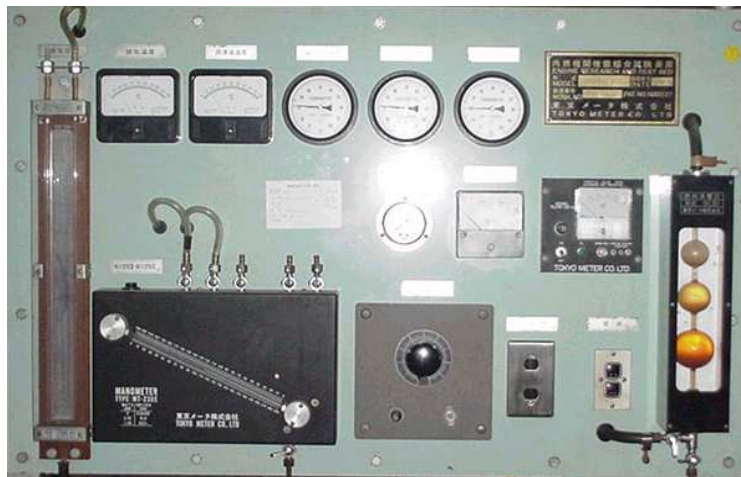


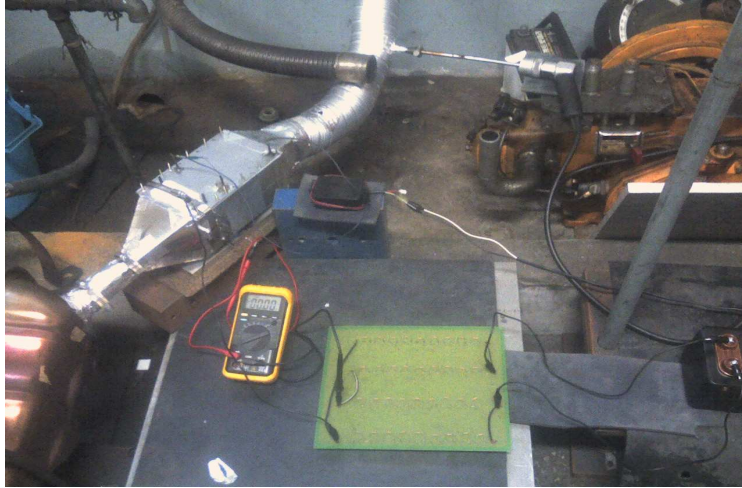
Fig. 10 Schematic diagram of experimental apparatus



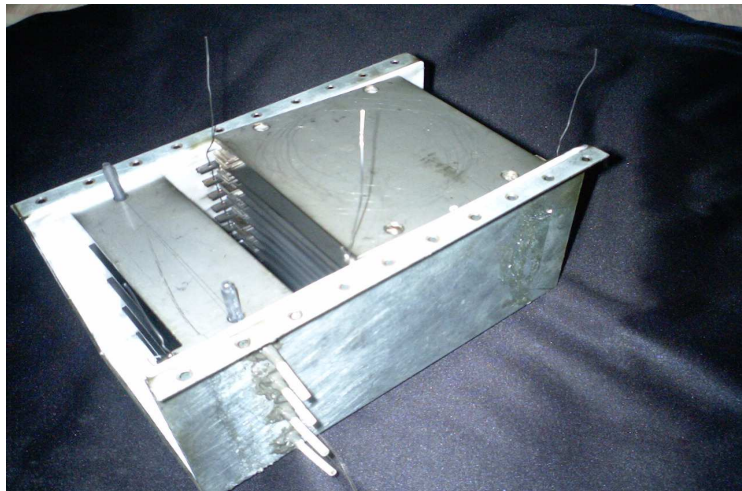
a) Diesel engine and dynamometer



b) Control panel



c) High voltage power supply and ESP



d) Corona discharge type precipitator

Fig. 11 Systems for experiment

### 3.3.1 기관의 제원

본 실험에 사용된 기관은 631cc, 단기통 4행정 직접분사식 디젤엔진으로 기관의 주요 사항은 Table 1과 같다.

**Table 1 Engine Specification**

MODEL	ND80DI	비 고
Company(nation)	DAEDONG (Korea)	
Type of Engine	Single Cylinder Water-cooled 4 Stroke Diesel Engine	
Purpose	Agricultural	
Combustion Chamber	Direct Injection	4 hole nozzle
Displacement Volume (cc)	631 cc	
Cylinder bore ×Stroke(mm)	92 × 95	
Continuous Maximum Power (kw/rpm)	5.9 / 2200	
Compression Ratio	19 : 1	
Fuel Injection Pressure	180 bar	
Fuel Injection Timing	BTDC 22°	



실험에 사용한 연료는 시판의 경유로서, 유류시험 분석 업체에 의뢰하여 얻은 유류분석 결과는 Table 2와 같다.

**Table 2 Properties of test fuel**

<b>Parameter</b>	<b>Value</b>
Density, 15℃	0.836 g/cm <sup>3</sup>
Kinematic Viscosity, 40℃	2.75 mm <sup>2</sup> /s
Flash Point	69 ℃
Sulfur	0.031 W/W %
Water & Resident	0.005 V/V %
Calorific Value(Net)	10,300 kcal/kgf
Carbon Residue	0.08 W/W %
Cetane Index	54
Ash	0.001 W/W %
Nitrogen	40.7 mg/kgf
Carbon	86.6 W/W %
Hydrogen	13.3 W/W %
Stoichiometric Ratio	14.4 kgf/kgf

### 3.3.2 동력계

기관 운전 및 동력 측정에 사용된 동력계의 제원은 Table 3과 같다. 직류 발전기식 동력계의 출력 측에는 전기 저항을 설치하였으며, 로드 센서는 kgf 단위로 측정되는 저울이 설치되었다.

**Table 3 Dynamometer Specifications**

Model	D-10A (Japan)
Max Capacity	7.4 kW
Max Speed	2200 rpm
Max Measuring Torque	49 Nm

### 3.3.3 배기 측정 장치

배기의 측정은 NO를 포함한 기타의 배출가스의 성분을 분석할 수 있는 KANE-MAY 9006의 QUINTOX 연소분석기와 Smoke의 양을 %단위로 측정할 수 있는 smoke meter를 사용하였다.

각 계측기의 사양은 Table 4와 Table 5와 같다.

**Table 4 QUINTOX Specifications**

Measuring Object	Range (accuracy)
O <sub>2</sub>	0 - 25 % (±0.2)
CO	0 - 4000ppm (±20)
NO	0 - 5000ppm (±5%)
NO <sub>2</sub>	0 - 800ppm (±5%)

Table 5 Smoke Meter Specifications

Model, Company(nation)	P8340, G Cussions (England)
range	0 - 100 %

아래의 계산식에 의해 연료소비율과 공기과잉률 및 연료의 조성으로부터 가스량을 계산하고 ESP의 유로면적으로부터 가스의 유속을 계산하였다.

$H_2$ ,  $C$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $S$  및 수분의 질량비가  $h$ ,  $c$ ,  $o$ ,  $n$ ,  $s$  및  $w$ 인 탄화수소 연료 1kg이 완전연소할 때의 발생 연소가스량  $q_g$  [ $Nm^3$ ]는

$$q_g = \lambda q_0 + 0.7(8h + o + \frac{16}{9}w) \quad (1)$$

여기서,  $\lambda$ 는 공기과잉률,  $q_0$ 는 이론 공기량으로서 (2)에 의하여 계산된다.

$$q_0 = 3.335(8h + \frac{8}{3}c + s - o) \quad (2)$$

실제의 계산에서는 식(1),(2) 중의  $h$ 로서 0.133,  $c$ 로서 0.866,  $o, n, s$  및  $w$ 는 모두 다 0.0을 사용하였다.

연료소비율이  $b$  [ $kg/kW \cdot hr$ ]일 때 kW당 시간당 연소가스량  $Q_g$  [ $Nm^3/kW \cdot hr$ ]는

$$Q_g = q_g \cdot b \quad (3)$$

이다<sup>7)8)</sup>.

가스의 체적  $Q_0$ 는 출력이  $P$  kW 배기온도  $T$  K 일때

$$Q_o = \frac{T \cdot Q_g \cdot p}{298 \cdot 3600} \quad \text{m}^3/\text{sec} \quad (5)$$

대표 유속  $V_r$  는

$$V_r = \frac{Q_0}{A} \quad \text{m}/\text{sec} \quad (6)$$

(6)식에서 대표 유속  $V_r$ 은 시간당 가스체적  $Q_0$  [m<sup>3</sup>/sec] 에 코로나 방전식 전기집진기의 집진부 단면적  $A$  [m<sup>2</sup>]로 나눈 값으로 정의 한다.

## 제 4 장 실험 결과

### 4.1 ESP에 의한 배기의 NOx 저감 성능

Fig. 12- Fig. 14는 코로나 방전식 집진장치의 시스템 on/off 시의 NOx ppm 을 비교하여 나타낸다.

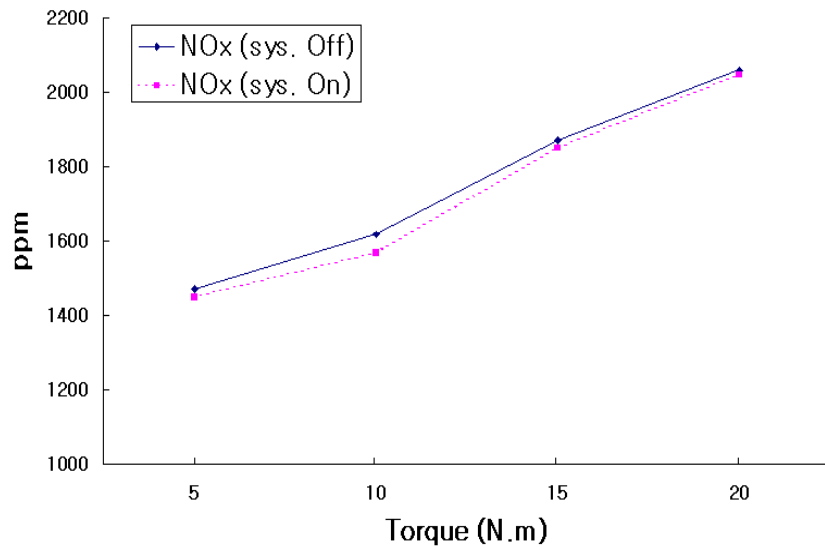


Fig. 12 Comparison of NOx ppm between that of system off and on at 1000rpm

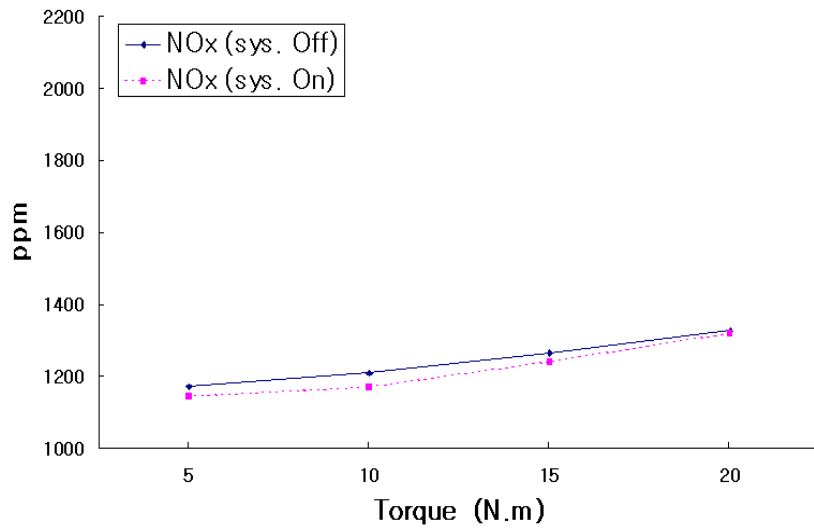


Fig. 13 Comparison of NOx ppm between that of system off and on at 1400rpm

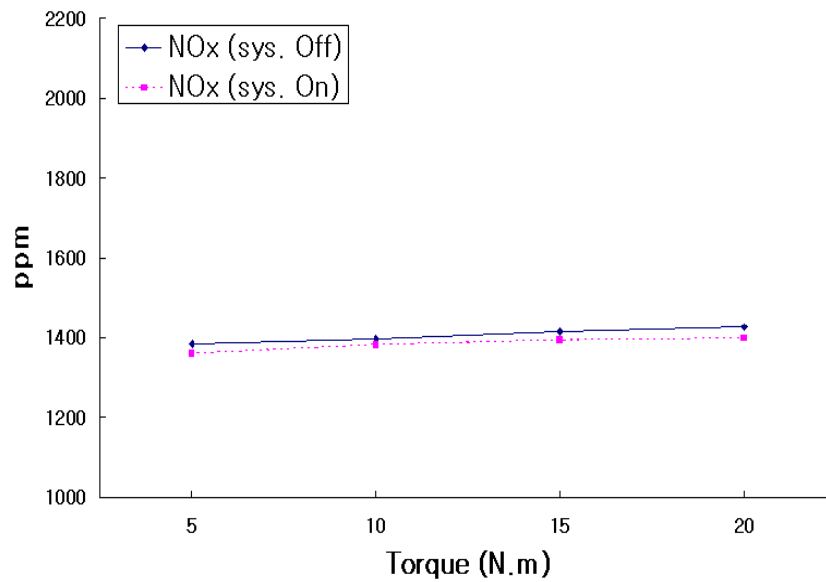
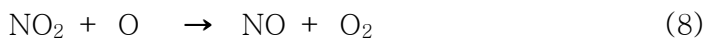
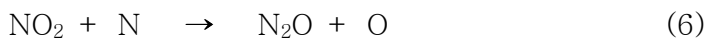
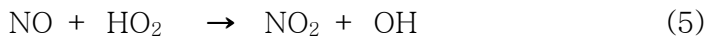
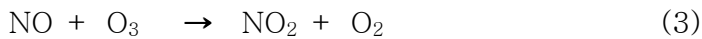
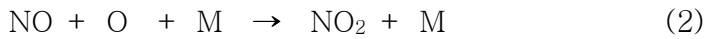
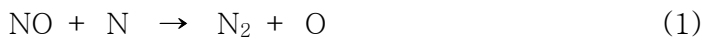


Fig. 14 Comparison of NOx ppm between that of system off and on at 1800rpm

코로나 방전식 집진장치의 시스템 ON시 약간의 NO<sub>x</sub> ppm이 감소 되는 것을 보인다.

일반적으로 알려진 화학반응식중 공기중에서 다른 첨가물이 없는 경우에 NO, NO<sub>2</sub> 와 관련된 다음의 화학 반응식의 총합 반응이 일어나는 것으로 알려져 있다<sup>9)</sup>.



(1)-(8)의 화학식에서 알 수 있듯이 이들 반응은 일반 배기가스 상태에서는 일어나기 어려운 화학 반응으로 각각의 경우에 O, O<sub>3</sub>, OH, N, HO<sub>2</sub> 등 배기가스 성분으로부터 파생된 원자나 활성기(radical) 들이 있어야 가능하게 되며, 본 실험에서의 코로나 방전이 이들 원자나 래디컬을 근소하게나마 생성시키며 이로 인해 NO<sub>x</sub>가 저감되는 것으로 판단된다.

#### 4.2 ESP에 의한 배기의 매연(Smoke) 저감 성능

Fig. 14- Fig.16은 코로나 방전식 집진장치 시스템 On/Off 시 시험 엔진의 회전수 1000,1400,1800rpm 시의 토크 변동에 따른 매연 저감 성능을 나타낸다.

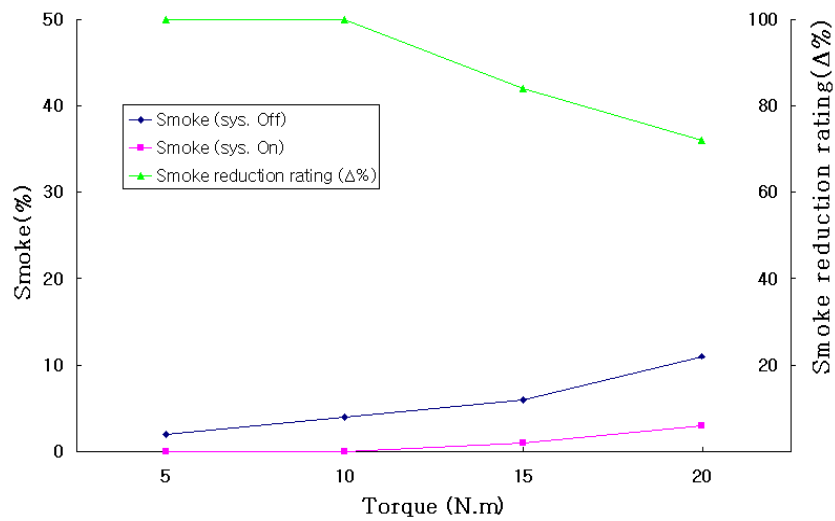


Fig. 14 Comparison of smoke(%) between that of system off and on at 1000rpm



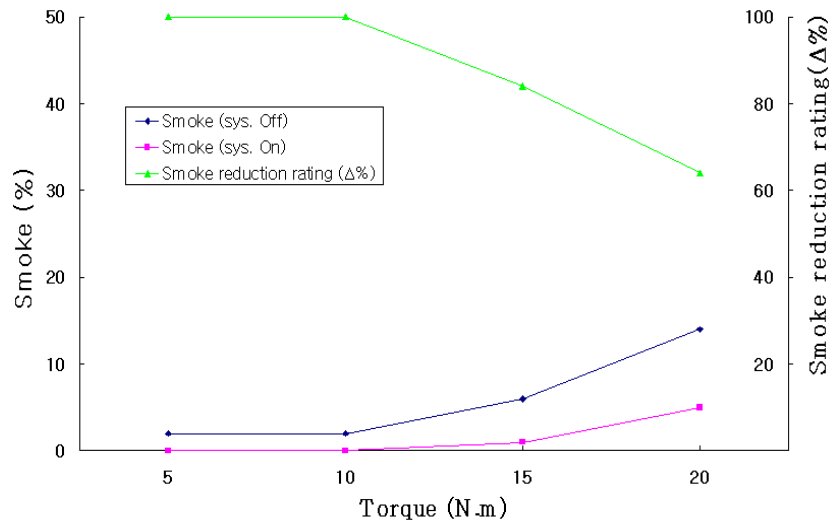


Fig. 15 Comparison of smoke(%) between that of system off and on at 1400rpm

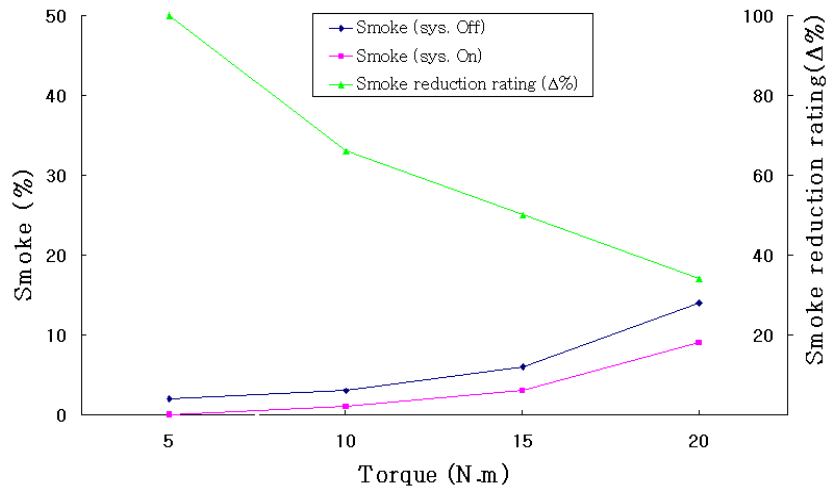


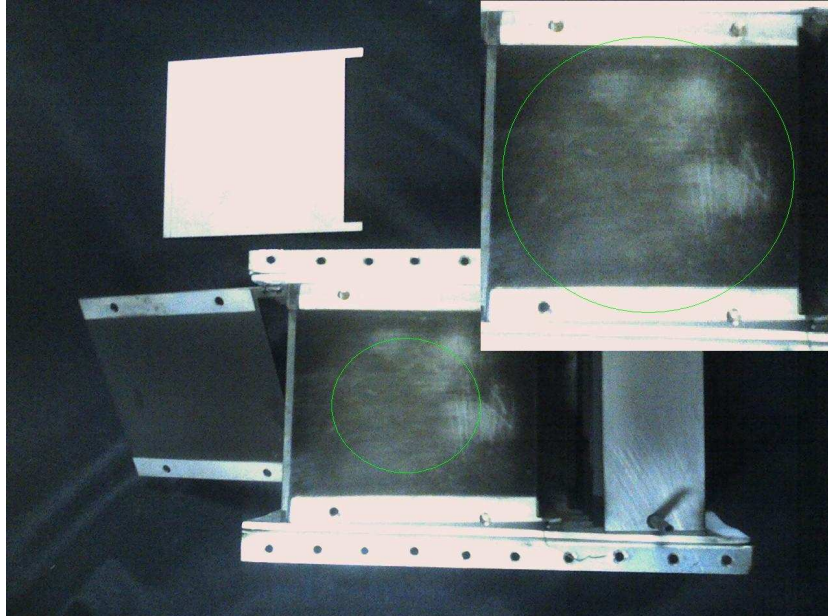
Fig. 16 Comparison of smoke(%) between that of system off and on at 1800rpm

Fig. 14,15의 rpm 1000,1400에서 토크 15 N.m이하의 운전시 smoke% 저감율은 대체적으로 만족스럽게 나타나고 있다. 그러나 토크 20 N.m에서는 smoke 저감율이 60% 정도로 저하되고 있다.

Fig. 16의 rpm 1800에서는 토크 15 N.m에서부터 smoke%의 저감율은 50% 이하로 떨어지고 토크 20 N.m에서는 30%정도의 저조한 성능을 나타낸다.

이는 Fig. 8에 나타낸 바와 같이 회전수 증가에 따른 유속의 증가로 인한 코로나 발생량의 증가가 있음에도 불구하고 하전된 가습입자들의 유속이 빨라 집진 전극판의 공간에 체류하는 시간이 부족하게 되기 때문으로 분석된다. 또는 부하의 증가에 따라 소음기를 통과한 후라 하더라도 배기분출의 맥동이 매연 저감 성능을 떨어뜨리는 요인이 될 수도 있음을 고려해야 한다.

일반적으로 배기 유속 2.7m/sec 이하의 조건에서 코로나 방전실험에 의하면, 배기가스 속에 함유된 화학종이 이온이나 활성기 등과 같은 활성화된 입자들로 변화되어 매연이 제거되고, 코로나 방전에 의해 인가된 에너지에 의해서 O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O 등이 높은 에너지를 갖는 활성기로 바뀌고 이들이 수증기와 결합됨으로써 미세입자가 상호 응집되어 PM이 제거 되고, 대전된 PM들이 집진부에서 집진되기 제거된다<sup>10)</sup>.



**Fig. 17 Collecting plate surface condition**

Fig. 17은 집진판에 부착된 PM의 부착 상태를 나타내고 있다. 그림에서와 같이 집진판 전체에 골고루 PM이 부착된 것을 볼 수 있다. 원호로 표시된 부분은 PM의 부착된 부분의 확대도로서 티슈로서 닦아 냈을 때에 쉽게 제거될 수 있을 정도이나 운전 중 재 탈락되지는 않을 것으로 판단되는 부착물이 형성된 것으로 생각되었다.

그러나 전극과 집진판에 PM이 부착되면 전극에선 코로나 발생량이 감소하고, 집진판에선 집진율이 감소하므로 이를 제거하는 기술이 필요하다.

### 4.3 배기 유속 변화에 따른 매연 저감 성능

Fig. 17은 대표 배기 유속(Reference gas velocity) 변화에 따른 매연 저감 성능을 비교하였다.

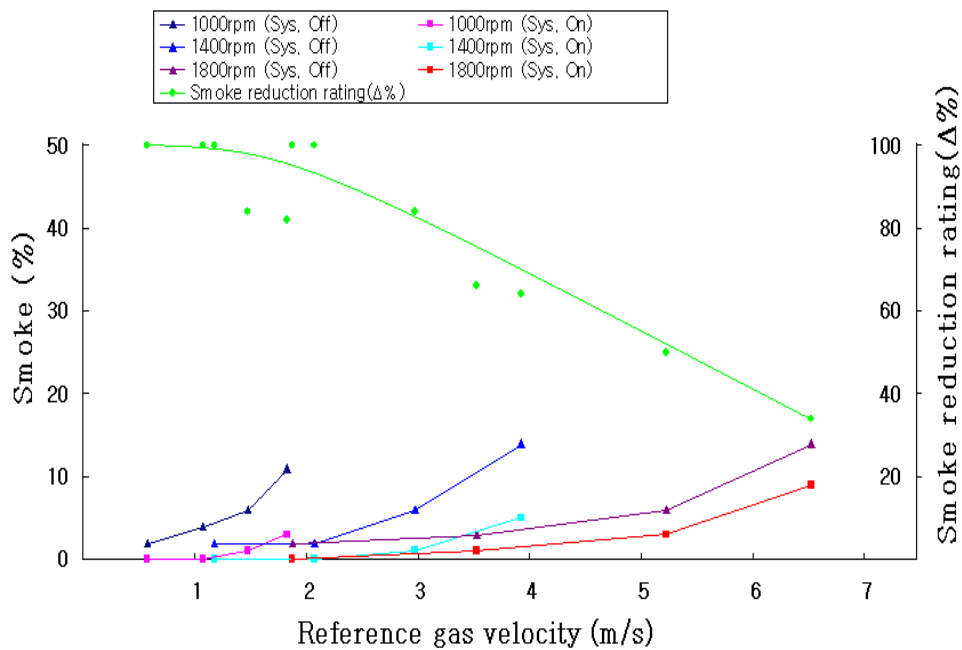


Fig. 18 Reduction plotted on reference gas velocity axis

Fig. 18에서 보는 바와 같이 본 실험에서의 대표유속 2.5m/s 이하 배기 유속에서는 smoke reduction rating(Δ%)상 80%이상의 안정된 매연 저감 성능을 보이고 있으며 그 이상의 유속에서는 급격히 저하되는 현상이 나타나고 있다. 이 현상으로부터 매연 저감 성능은 배기 유속에 의존하고 있음을 알 수 있다.

## 제 5 장 결 론

디젤 엔진의 배기를 정화시키고자 ESP를 직접 제작하였고, 디젤기관의 배기관에 장착하여 배기 공해 물질 저감 성능을 확인하였다. 직접 제작한 ESP의 코로나 발생특성과 디젤엔진의 배기로 실험한 ESP의 배기 저감 성능은 실험 결과 다음의 결론을 얻었다.

1. 코로나 발생량은 전극선과 극판간의 거리, 당량비 및 배기유속에 따라 변화하였다.
2. 디젤엔진의 매연은 ESP를 통과하면서 집진되어 대폭 저감하였으나 유속이 일정 수준이상이면 저감성능은 현저히 감소되었다.
3. 코로나 방전에 따른 화학반응으로 NO<sub>x</sub> 또한 경미하게나마 감소하였다.
4. 매연은 집진판 전체에 균일하게 부착되는 것을 발견하였다.

본 연구에서의 ESP는 매연 감소성능은 뛰어나지만, NO<sub>x</sub>는 경미한 감소효과를 나타냄을 확인하였다.

이 후 연구에선 ESP의 방전부에선 더욱 높은 전압을 이용하여 배기유속에 관계없이 정밀한 코로나 발생이 가능하도록 제작하고, 집진부의 집진면적을 크게 한 집진장치를 제작하여 실험하면 보다 높은 효율의 집진성능이 기대된다. 그리고 집진장치의 재생을 위해선 전극과 집진판에 부착한 PM을 제거하는 연구 또한 이어서 진행되어야 할 것으로 사료된다.

## 참고 문헌

1. 신귀수, 김창영, 김근주, 오영택 “코로나 방전에 의한 디젤엔진 배기가스 저감특성 평가” 한국자동차 공학회 2004년도 추계 학술대회 논문집 pp.183-187.
2. 신귀수, 조성남, 류신열, 김근주 “자동차 배기가스 정화용 건식 고전압 방전 필터의 제작” 한국자동차 공학회 2004년도 추계 학술대회 논문집 pp.67-71
3. 박재윤 “코로나 방전 시스템을 이용한 연소가스주의 NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> 제거” The Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers. Vol. 10, No. 8, pp.830-835, 1997
4. Chang, J.S. and Kelly, A.J., (1995), "Handbook of Electrostatic Processes", Marcel Dekker, Inc.
5. 하상안, 정장표 “코로나 방전극 구조에 따른 입자상물질의 집진효율에 관한 특성연구” 대한환경공학회 논문 J. of KSEE Vol. 21, No.4 pp.677-688, 1999.
6. 김은호 “충격식 코로나 방전 플라즈마를 이용한 배연가스로부터 먼지 제거에 대한 특성” 한국환경과학회지 제12권(제12호), pp.1261-1267, 2003.
7. 전효중, <<내연기관강의>> 일증출판사, pp.98-108, 1983
8. 채재우, 안수길, 홍명석, <<연소공학>>, 원창출판사, pp.32-36, 1994

9. 차민석, 이재욱 “저온 플라즈마와  $\text{NH}_3$  SCR 복합공정을 이용한 디젤엔진 배기가스의  $\text{NO}_x$  저감 기술” 제25회 KOSCO SYMPOSIUM 논문집 pp.89-95, 2003.

10. 김은호 “충격식 코로나 방전 플라즈마를 이용한 배연가스로부터 먼지 제거에 대한 특성” 한국환경과학회지 제12권(제12호), pp.1261-1267, 2003.

## 감사의 글

이 작은 결실이 있기까지 많은 도움을 주신 고마운 분들께 감사를 드립니다.

부족함이 많은 저에게 학문의 의미를 가르쳐 주시고 지도하여 주신 배종욱 교수님께 진심으로 감사를 드립니다.

바쁘신 와중에도 세심한 조언과 지도를 아끼지 않으셨던 최재성 교수님과 조권희 교수님께도 깊이 감사를 드립니다.

아낌없는 조언과 격려를 해주신 많은 친구들, 동기, 후배들에게도 감사의 뜻을 포함합니다.

끝으로 묵묵히 지켜봐주신 부모님과 형, 동생들에게 이 작은 결실을 바칩니다.

2006년 12월 21일