

농업용 소형버너의 연료절감형 노즐 개발  
Development of Fuel-Saving Nozzle for  
Agricultural Application

연구기관

충북대학교

농림부

## 주 의

1. 이 보고서는 농림부에서 시행한 농림기술개발사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 농림부에서 시행한 농림기술개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.

# 제 출 문

농림부 장관 귀하

본 보고서를 “농업용 소형버너의 연료절감형 노즐 개발” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2005년 11 월 11 일

주관연구기관명 : 충북대학교

총괄연구책임자 : 노수영

연 구 원 : 가브리엘 니 라이

# 요 약 문

## I. 제 목

농업용 소형버너의 연료 절감형 노즐 개발

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

이 연구의 목적은 농산물 건조용 및 시설원예용 난방기 등에 응용할 수 있는 연료 절감 및 환경오염 저감형 최첨단 버너의 노즐을 개발하는데 있다.

현재 시설재배 농가의 난방용 버너의 경우와 농산물 건조용 버너의 경우 생산비에 차지하는 농산물 건조용 비용이 30% 이상을 차지하며 농산물의 가격 경쟁력 하락으로 경쟁력 제고를 위해 기존 버너의 개선이 요구된다. 따라서 농업용 소형 버너에서 효과적인 미립화 기술을 도입하여 연료소비율을 저감시키고 또 이산화탄소, 질소 산화물 등의 유해 배기가스의 배출을 저감시킬 수 있는 버너가 필수적이다.

## III. 연구개발 내용 및 범위

정전대전 버너의 노즐을 설계하여 미립화 실험, 연소실험을 바탕으로 기존 버너의 특성과 비교하고 실제 난방기에서 실증실험을 통해 연료절감형 노즐을 개발한다. 기존 버너 미립화 실험으로 적정 운전조건 규명. 세가지 종류정전대전버너 설계 후 정전대전특성 및 미립화 실험(분무각, 관통거리, SMD측정). CFD코드에 의한 특성해석(전기장 분포, 전압분포). 기존버너의 연소특성 실험. 정전대전 버너의 연소특성 실험. 2개 이상 정전대전 버너 연소특성 실험. 연료소비율 및 배기가스 실험 비교분석. 연소특성(화염온도 및 길이 등) 비교분석. 개발된 정

정전대전버너의 실제건조기 또는 난방기에서 실증실험. 2개 이상 정전대전 버너 실증 실험. 연소효율을 높이기 위한 공기공급 방안 실험. 화염안정성 및 내구성 실험. 최종적으로 현재 건조기용 버너의 53.6~135.6ml/min의 노즐유량을 10% 절감하여 48~122ml/min을 달성하고 액적크기를 감소시켜 유해 배기가스를 10%이상 저감시킨다.

#### IV. 연구개발 결과 및 활용에 대한 건의

정전대전 미립화 기술을 기존 버너의 노즐에 도입한 결과 정전대전 노즐의 미립화 특성이 기존 노즐의 미립화 특성보다 훨씬 우수하였고 연료 절감 10% 달성이 가능하였다. 오염물질 배출의 저감 또한 10%이상 가능하였다.

따라서 이 연구에서 개발된 정전대전 노즐의 제작 단가를 고려한 경제성 분석을 통해 기존 노즐을 대체하는 것이 바람직하다고 생각한다.

## Summary

Spray and combustion characteristics produced by conventional and electrostatic pressure-swirl nozzles for an oil burner have been studied, using kerosine as a test liquid. The charge injection mechanism is used to design the electrostatic nozzle, where specific charge density, breakup length, spray angle and mean diameter are measured and analyzed. Three nozzles with orifice diameters of 0.256, 0.308 and 0.333 mm at injection pressures of 0.7, 0.9, 1.1 and 1.3 MPa are used in the study. In case of the electrostatic nozzle, voltages ranging from 5 to 12 kV are applied. The local furnace temperature, net flue gas temperature, and gas emissions such as CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> and combustion efficiency were also investigated in a furnace and a heater respectively. Comparison between the conventional and electrostatic nozzles was analyzed.

The electrostatic nozzle has a shorter breakup length, produced a wider spray angle and smaller mean diameters (SMD) than the conventional nozzle. Percentage of drop size reduction ranges between 6.9 ~ 8.3 % at injection pressures of 0.7 and 0.9 MPa by using nozzle with orifice diameter of 0.256 mm. The blower affects the atomization process by increasing the drop size. The local furnace temperature increased with an increase in injection pressure but decreased with an increase in axial distance. The flame length increased with an increase in injection pressure and nozzle orifice diameter. Error analysis ranges between 9 ~ 13 %, 8 ~ 12.6 % and 2 ~ 12.8 % for nozzles with orifice diameters of 0.256, 0.308 and 0.333 mm respectively. The flame width increased with an increase in axial distance and then decreased depending on the nozzle orifice diameter. The error analysis from the measured flame width data were in the ranges of 1.6 to 15 %, 4 to 15 % and 7 to 14.2 % for nozzles with orifice diameters of 0.256, 0.308 and 0.333 mm respectively.

At injection pressure of 0.7 MPa, the CO increased with an increase in

nozzle orifice diameter but at an injection pressure of 1.3 MPa, the CO is decreased with an increase in nozzle orifice diameter. NO<sub>x</sub> increased with an increase in injection pressure especially at injection pressure of 1.3 MPa. The increase in nozzle orifice diameter caused an increase in NO<sub>x</sub>. The error analysis obtained from the recorded data was in the ranges of 5 to 10 %, 4 to 13 % and 7 to 15 % for the CO, CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> respectively.

The local furnace temperature decreased with an increase in air velocity and axial distance. At injection pressure of 0.7 MPa and air velocity of 10.24 m/s, combustion could not be initiated for the electrostatic nozzle, as the equivalence ratio ( $\Phi < 0.2$ ) was too lean for combustion process to take place under this condition.

The conventional nozzle produced the highest recorded temperature under the same experimental condition. Maximum furnace temperature increased with an increase in injection pressure and decreased with an increase in air velocity.

The net flue gas temperature increased with an increase in injection pressure for both nozzles and decreased with an increase in air velocity. There was only a slightly difference between the conventional and the electrostatic nozzles at low injection pressures (0.7 and 0.9MPa) and there was a significant difference at higher injection pressures.

With air velocity of 2.75 m/s, the conventional nozzle increased and then decreased with an increase in injection pressure while the electrostatic nozzle continued to increase. NO<sub>x</sub> increased with an increase in injection pressure and the electrostatic nozzle produced less NO<sub>x</sub> concentration level, irrespective of change in air velocity.

SO<sub>2</sub> concentration level increased and decreased with an increase in injection pressure for both nozzles.

The recorded %O<sub>2</sub> concentration was in the range of 13.9-17.8% for injection pressure of 0.7 MPa; 12-17.9% for 0.9 MPa; 10.1-17.4 for 1.1 MPa and 9.8-17.2% for 1.3 MPa.

The combustion efficiency increased with an increase in injection pressure but decreased with an increase in air velocity. No significant difference between the conventional and electrostatic nozzle for combustion efficiency at injection pressure of 0.7 MPa with air velocity of 2.75 m/s. Also at 1.3 MPa with variation of air velocity, there was no significant difference between the conventional and electrostatic nozzle.

The maximum local furnace temperatures for the conventional nozzles are higher than that of the electrostatic type at injection pressures up to 1.1 MPa but changes at 1.3 MPa. The net flue gas temperature increased with an increase in injection pressure irrespective of nozzle diameter. Net flue gas temperature was lower for the electrostatic nozzle at injection pressure of 0.7 MPa but higher than that of the conventional nozzle after injection pressure of 0.9 MPa for nozzle diameters of 0.256 and 0.308 mm. In the case of 0.333 mm the net flue gas temperature was lower for the conventional nozzle.

CO concentration decreased with an increase in injection pressure. There was a significant difference in CO reduction at injection pressures of 0.7 and 0.9 MPa for using electrostatic nozzle for nozzle diameter of 0.256 mm. No significant change in CO concentration after injection pressure of 0.9 MPa for 0.308 mm. CO concentration level decreased and then increased after injection pressures of 0.9 and 1.1 MPa for the electrostatic and conventional nozzle respectively by using 0.333 mm.

NO<sub>x</sub> concentration level increased with an increase in injection pressure for nozzles with orifice diameter of 0.256 and 0.308 mm but decreased with an increase in injection pressure in the case of nozzle diameter of 0.333 mm. NO<sub>x</sub> concentration was reduced by using the electrostatic nozzle. There was a significant reduction at injection pressures of 0.7 and 0.9 MPa for nozzle diameter of 0.256 mm. The difference in NO<sub>x</sub> reduction decreases as injection pressure increase. The voltage had no effect on NO<sub>x</sub> when using nozzle diameter of 0.333 mm.

SO<sub>2</sub> concentration mostly depends on the sulphur content in the fuel and it



is an inherent characteristics. Voltage effect on the SO<sub>2</sub> is still yet to be studied.

Combustion efficiency decreased with an increase in injection pressure. The voltage was effective at injection pressure of 0.7 MPa for nozzle diameter of 0.256 mm and higher than the conventional nozzle for 0.308 mm. The applied voltage was not enough to effect combustion efficiency for nozzle diameter of 0.333 mm.

The net flue gas increased with an increase in injection pressure and the electrostatic nozzle had the lowest temperature at injection pressures of 0.7 and 0.9 MPa. With the electrostatic nozzle, the CO concentration level was reduced at injection pressures of 0.7 and 0.9 MPa (14.3 and 4.4 % respectively). At higher injection pressures, voltage becomes ineffective.

NO<sub>x</sub> concentration level was highly reduced with the electrostatic nozzle especially at injection pressure of 0.7 MPa. The percentage reduction at injection pressure of 0.7 MPa is 27.7 %. SO<sub>2</sub> concentration results from the inherent characteristics (i.e. sulphur content in the fuel).

Combustion efficiency above 90% can be achieved by using the electrostatic nozzle at injection pressures of 0.7 and 0.9 MPa and efficiency was increased by 5.3 and 3.8 % respectively.

The electrostatic nozzle was helpful to achieve good atomization and pollutant reduction by using nozzle with orifice diameter of 0.256 mm and at injection pressures less than 0.9 MPa. SMD was reduced by 6.9 ~ 8.3 % and 3.2 ~ 7.4 % fuel was saved. Also CO and NO<sub>x</sub> concentrations were reduced by 52 ~ 58.5 % and 49.7 ~ 66.6 % for the furnace experiment. In the case of the heater experiment, it was 4.4 ~ 14.3 % and 0.7 ~ 27.7 % for the CO and NO<sub>x</sub> respectively.

# CONTENTS

Chap 1. Introduction of research project

Chap 2. International and domestic status of technology development

Chap 3. Contents and results of project

1. Experiment method

2. Spray characteristics

3. Combustion characteristics

1) Furnace experiment of conventional nozzle

2) Furnace experiment including electrostatic nozzle

3) Furnace experiment of newly designed electrostatic nozzle

4) Heater experiment of newly designed electrostatic nozzle

4. Conclusions

Chap 4. Achievement level and contribution level of related field

Chap 5. Application plan of results from this project

Chap 6. Technology information of foreign country obtained from this research period

Chap 7. Reference

# 목 차

제 1장 연구개발과제의 개요

제 2장 국내외 기술개발 현황

제 3장 연구개발 수행 내용 및 결과

제 4장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

제 5장 연구개발결과의 활용계획

제 6장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

제 7장 참고문헌

## 제 1장 연구개발과제의 개요

이 연구의 목적은 농산물 건조용 및 시설원예용 난방기 등에 응용할 수 있는 연료 절감 및 환경오염 저감형 최첨단 버너의 노즐을 개발하는데 있다.

현재 시설재배 농가의 난방용 버너의 경우와 농산물 건조용 버너의 경우 생산비에 차지하는 농산물 건조용 비용이 30% 이상을 차지하며 농산물의 가격 경쟁력 하락으로 경쟁력 제고를 위해 기존 버너의 개선이 요구된다. 따라서 농업용 소형 버너에서 효과적인 미립화 기술을 도입하여 연료소비율을 저감시키고 또 이산화탄소, 질소 산화물 등의 유해 배기가스의 배출을 저감시킬 수 있는 버너가 필수적이다.

정전대전 버너의 노즐을 설계하여 미립화 실험, 연소실험을 바탕으로 기존 버너의 특성과 비교하고 실제 난방기에서 실증실험을 통해 연료절감형 노즐을 개발한다. 기존 버너 미립화 실험으로 적정 운전조건 규명. 세가지 종류정전대전버너 설계 후 정전대전특성 및 미립화 실험(분무각, 관통거리, SMD측정). CFD코드에 의한 특성해석(전기장 분포, 전압분포). 기존버너의 연소특성 실험. 정전대전 버너의 연소특성 실험. 2개 이상 정전대전 버너 연소특성 실험. 연료소비율 및 배기가스 실험 비교분석. 연소특성(화염온도 및 길이 등) 비교분석. 개발된 정전대전버너의 실제건조기 또는 난방기에서 실증실험. 2개 이상 정전대전 버너 실증 실험. 연소효율을 높이기 위한 공기공급 방안 실험. 화염안정성 및 내구성 실험. 최종적으로 현재 건조기용 버너의 53.6~135.6ml/min의 노즐유량을 10% 절감하여 48~122ml/min을 달성하고 액적크기를 감소시켜 유해 배기가스를 10%이상 저감시킨다.

## 제 2장 국내외 기술개발 현황

국내에서 농약분무에 정전대전 미립화 기술을 도입한 연구는 농림 기술 관리 센터의 지원 하에 현재 연구 개발 중이나 버너에 이 기술을 도입하여 연구 개발한 경우는 전혀 없는 실정이다.

정전 미립화 기술에 당 연구진의 경우 위탁연구로 정전대전 노즐의 특성 규명을 수행하고 있으므로 정전 대전 미립화의 기반 기술을 확보하고 있는 상태이다.

연소를 위한 기존 오일 버너 노즐에서 미립화 기술은 액적으로 연료를 분열시키기 위해 공기나 기계적인 방법을 사용해 왔다. 기존 버너는 미연 탄화수소 연료가 많기 때문에 연료 소비가 크고 따라서 환경오염물질 배출이 많았다. 이런 문제점은 연료 유량과 분무 액적크기를 감소 시켜 결국 미립화의 질을 높이는 것으로 알려져 있다. Cunningham[1]등에 의하면 평균 액적크기를 10% 감소시킬 경우 35% 미연탄화 수소를 감소시킬 수 있다고 한다.

연료가 액적 크기를 감소시키고 좁은 액적 크기분포; 분무액적의 자동 분산, 액적의 합친현상을 제거 할 수 있는 장점을 가진 것이 정전대전 미립화 기술이다. 그러나 단점으로는 소유량의 분무에 적합하고 고점도 액체의 높은 전기 저항성 때문에 응용에 제약이 따른다. 정전대전 미립화 기술은 농업분야에서 농약방제, 꽃가루 분무(수분), 과일 및 식품(육류포함) 코팅 등에 응용이 될 수 있다.[2]

이 중에서 연소에 정전대전 미립화 기술을 위에서 언급한 소유량, 액체연료의 높은 점도, 높은 전기 저항성 등의 문제로 발전 속도가 지연되어 실용화가 잘 이루어지고 있지 않다. Jone 과 Thong[3]의 경우 연료에 계면 활성제(ASA-3)를 3% 추가함에 의해 전기저항성을 반으로 줄일 수 있는 방법을 개발하였다.

보통 대전방법은 유도대전, 코로나대전, 직접대전 등이 있다. 대전방법은 대전 유체의 전기전도도에 따라 달라진다. Abdel-Hameed 등[4]은 공기보조분무에서 유도대전방법에 대하여 연구하였다. 이 방법은 연료가 아주 열등한 전도체이기 때문에 미립화의 질을 높이기에는 어려움이 큰 것으로 판명되었다.[5] 연료와 같이 절연유체의 경우는 직접대전 방법에 속하는 대전 분사방법(charge injection method)이 가장 효율적인 대전 방법이라고 알려져 있어 여러 연구자에 의해 연구되었다.[1,3,5,8-12] 이 방법은 전기전도도를 바꾸기 위해 계면활성제를 섞을 필요가 없이 탄화수소연료를 미립화 시킬 수 있는 방법이다. 이 방법에 의해서 더

효율적인 연소와 더 적은 그을음이 생성된다는 것이 입증되었다.[4] 또 공기와 연료의 혼합이 증진되어 낮은 전기전도도의 액체도 충분히 대전되며 연소를 위한 분산된 분무를 얻을 수 있다는 것이 또한 입증되었다.[5,6] 대전분사방법에 전극으로서는 스테인레스강과 텅스텐선이 사용된다.[3,8,11,13]

전극은 양극 또는 음극이 사용하는 연구가 모두 이루어졌다.[5,21] 그러나 같은 양의 대전양을 분사하기 위해 10배 정도 낮은 전기장 강도가 필요하게 되므로 음의 전위(전자방출)가 양의 전위(전기장 이온화)보다 더 낫다고 알려져 있다.[21]

## 제 3장 연구개발수행 내용 및 결과

### 1절. 실험방법

이 실험에서는 농산물 건조 또는 시설원에 난방용으로 국내에서 널리 사용되는 소형버너(SHG8 F60 신홍, 한국)를 선택하였다. 실험에 사용된 연료의 성질과 이 실험에 사용된 버너의 사양을 표 1과 2에 각각 나타내었다.

노즐의 오리피스 지름은 0.256, 0.308, 0.333mm를 선정하고 분사압력은 0.7, 0.9, 1.1, 1.3MPa로 변화시켰다. 정전대전 노즐의 경우는 -5~-12KV까지 인가하였다. 비전하밀도를 계산하기 위한 분무 전류의 측정은 Faraday pail(쟁반)에 연결된 전위계(Keithley 6514)를 사용하였다. Faraday 쟁반 내에는 되튐현상을 방지하고 모든 분무를 모을 수 있도록 가는 철사 섬유를 넣었다.

3-CCD 비디오 카메라(Sony DCR-VX, 일본)로 분무 영상을 잡기 위해 사용되었고 스트로보스코프를 광원으로 사용하였다. 분무 영상은 컴퓨터에 저장하고 영상처리 소프트웨어를 사용하여 분열길이, 분무각 등과 같은 거시적 분무특성을 분석하였다. SMD는 노즐 출구에서 축 방향으로 20mm거리에서 Malvern 입자 크기 분석기(Master Sizer)로 측정하였다.

분무특성과 연소특성을 파악하기 위한 실험장치의 개략도를 그림 1과 그림 2에 각각 나타내었다. 그림 3은 실험에 사용된 버너의 전후면도의 실제 사진을 나타낸다.

로 내에 공급된 공기속도는 다섯 다른 뎀퍼 개도에 의해 2.75, 5.94, 8.0, 9.5, 10.24m/s로 공급되었고 속도 측정은 버너 슬릿 전면에서 풍속계(TSI 8360-M-GB, 미국)로 측정하였다. 각 속도에 해당하는 공기의 질량은  $2.1 \times 10^{-2}$ ,  $4.53 \times 10^{-2}$ ,  $6.11 \times 10^{-2}$ ,  $7.25 \times 10^{-2}$ ,  $7.82 \times 10^{-2}$  kg/s에 해당된다.

연료 유량은 유량계(Macnaught, M1SSP-1R, 호주)에 의해 측정하였고, 표 3에 각 분사 압력에 대한 기존 노즐과 정전 대전 노즐에서 연료 유량을 나타내었다.

로 내 온도를 측정하기 위하여 6개의 열전대를 디퓨저 끝으로부터 축 방향 거리로 142, 242, 392, 542, 692, 842mm에 설치하였다. 온도를 연소 시작 후 5분후에 자동 기록계(KONICS KM 100, Yokogawa 일본)를 이용하여 기록하였다.

오염물질 배출의 분석을 위해 로의 출구에 샘플을 채취할 수 있는 구멍을 만들어 가스 분석기로 연도가스를 분석하였다. CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, 연소효율 등을 5분 간격으로 가스분석기(Quintox KM9106, Kane-May, UK)로 기록하고 매 30 초마다 데이터를 PC에 저장하였다.

개발된 정전대전 노즐의 로 실험이 끝난 후 난방기 실증실험을 하는 도중 인가전압이 5KV 이상이 되지 않는 것을 확인한 결과 테프론을 사용한 절연체의 두께와 어댑터의 내부 구조가 변수인 것을 파악하였다. 따라서 개발된 정전대전 노즐의 설계를 변경하였고 그림 4와 5에 각각 구 노즐과 신 노즐을 나타내었다.

실험은 분무 특성과 연소특성으로 크게 나누어진다. 이중에서 연소특성을 로 내 실험과 난방기의 실증 실험 두 가지로 구성된다.



Table 1 : Property of the tested fuel (kerosene) at 295K

| <b>Property</b>   | <b>Value</b>           |
|---|------------------------|
| Surface tension [kg s <sup>-2</sup> ]                   | 2.6x10 <sup>-1</sup>   |
| Dynamic viscosity [kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> ] | 1.04x10 <sup>-3</sup>  |
| Density [kg m <sup>-3</sup> ]                           | 790                    |
| Electrical conductivity [m] <sup>-1</sup>               | 1.69x10 <sup>-11</sup> |
| Relative permittivity                                   | 2.2                    |

Table 2. Burner specification

| <b>Kerosine/Light Oil</b> |                    |
|---------------------------|--------------------|
| Power Source [V]          | AC 220V/50Hz, 60Hz |
| Motor [W]                 | 110                |
| Oil Pump                  | Gear pump          |
| Ignition Trans[kV]        | 8.5 kV/18 mA       |
| Pump Pressure [MPa]       | 1.5                |
| Flow rate [mL/min]        | 50 ~ 140           |
| Dosage [MJ/h]             | 125.6 ~ 293.1      |

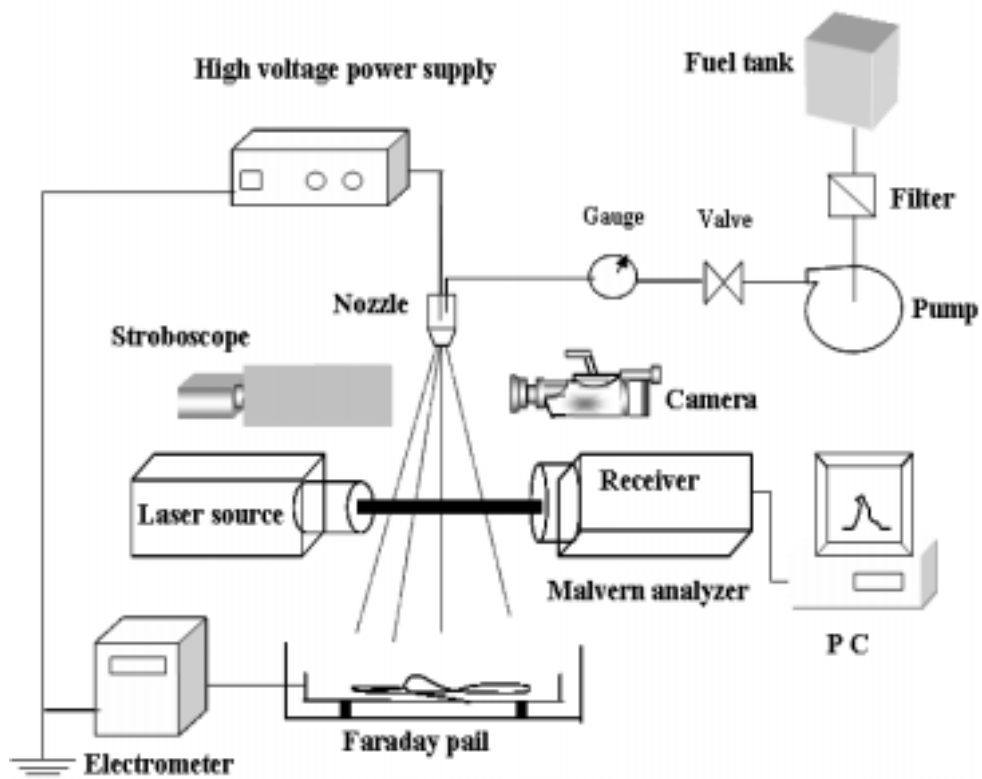


Fig. 1. Schematic diagram of experimental setup

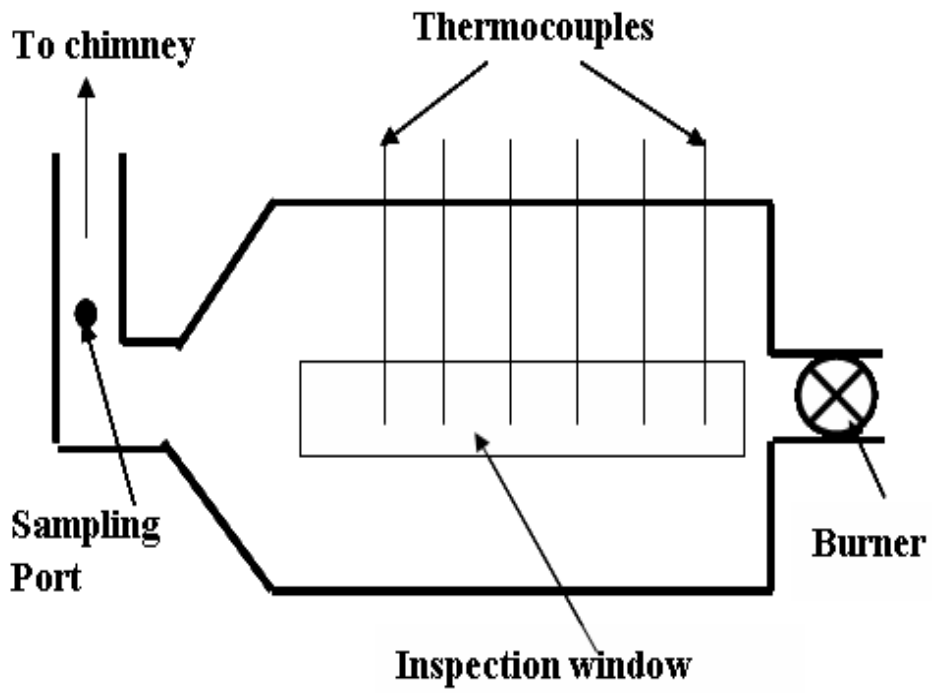


Fig. 2 Schematic diagram of a steel rectangular ceramic-lined tunnel furnace

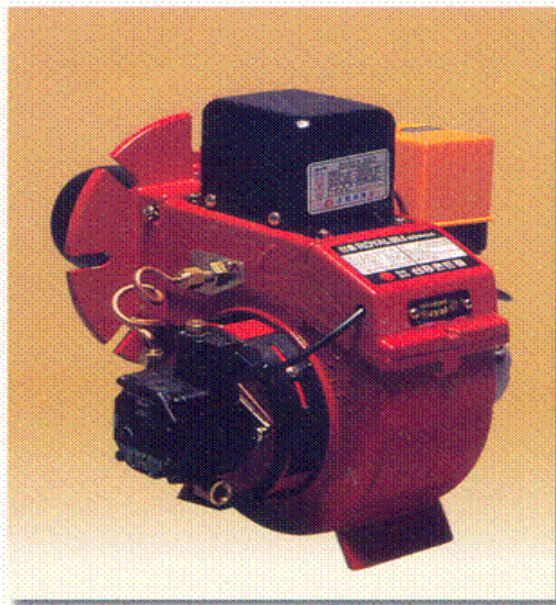
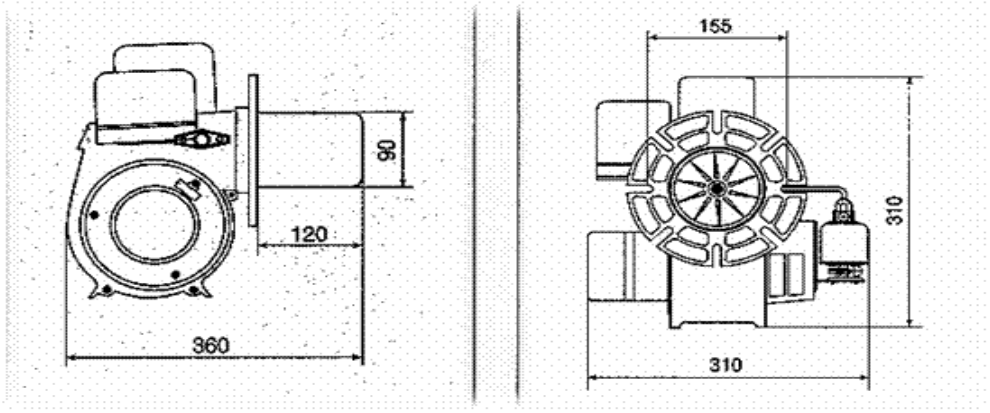


Fig. 3 Front, end and pictorial views of oil burner

Table 3. Liquid flow rate

| Injection pressure [MPa] | Nozzle diameter 0.256 mm |                      | Nozzle diameter 0.308 mm |                      | Nozzle diameter 0.333 mm |                      |
|--------------------------|--------------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|
|                          | Conventional ml/min      | Electrostatic ml/min | Conventional ml/min      | Electrostatic ml/min | Conventional ml/min      | Electrostatic ml/min |
| 0.7                      | 54                       | 50                   | 74                       | 70                   | 100                      | 100                  |
| 0.9                      | 60                       | 58                   | 84                       | 82                   | 114                      | 114                  |
| 1.1                      | 66                       | 66                   | 96                       | 92                   | 126                      | 126                  |
| 1.3                      | 70                       | 70                   | 100                      | 99                   | 137                      | 137                  |

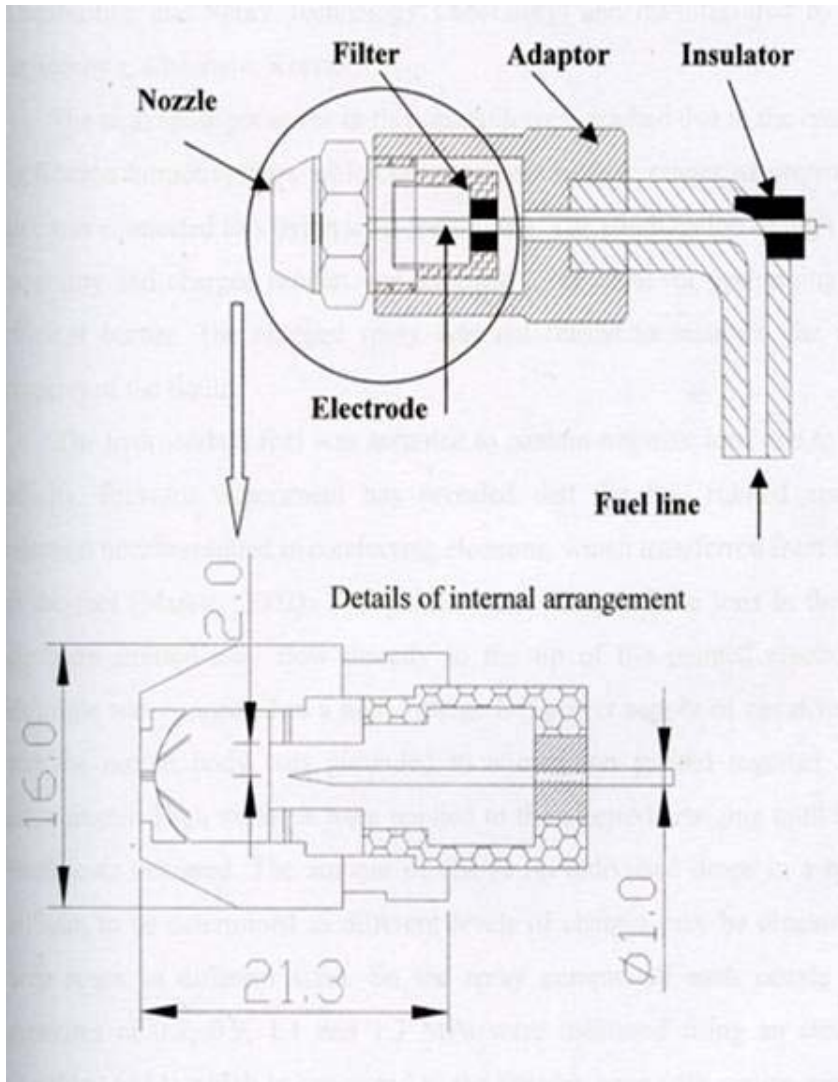


Fig. 4 .A diagram of the old-geometry of the charged injection simplex nozzle, Version III and details of internal arrangement

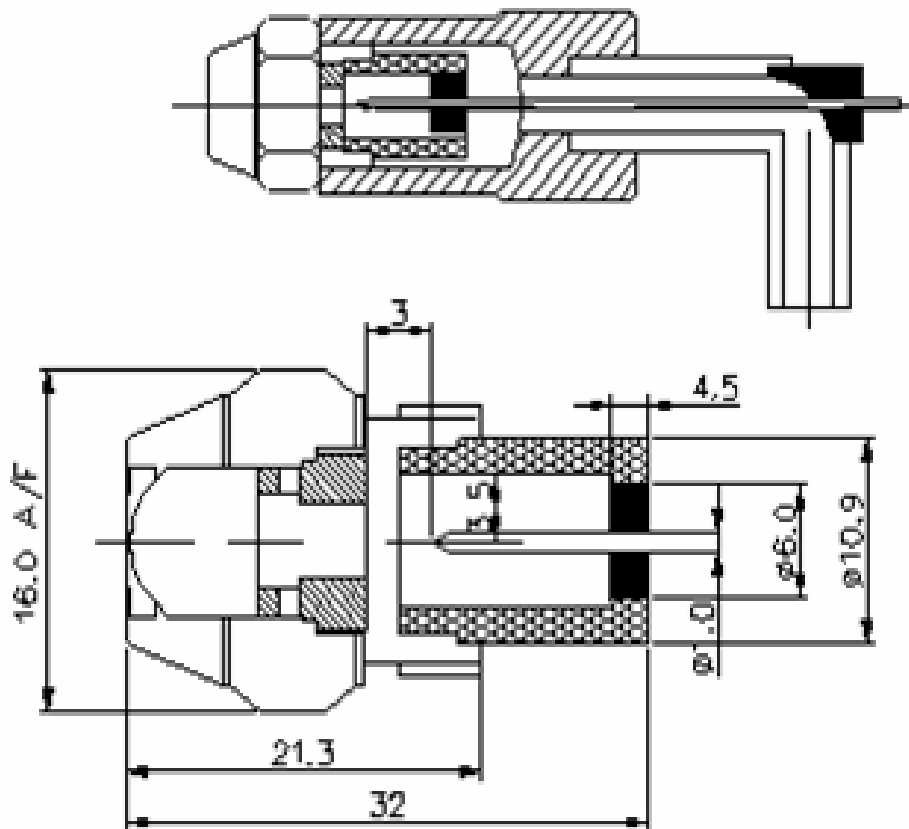


Fig. 5. A diagram of the modified charge injection simplex nozzle, Version III and details of internal arrangement



## 2절. 분무특성

### 1. 인가전압이 비전하 밀도에 미치는 영향

금속표면을 액체가 문지르는 것으로 인한 triboelectric 효과에 기인한 연료 고유의 전류는 분사압력이 증가함에 따라 증가한다. 분무 전류는 인가전압이 증가함에 따라 증가하다가 고압전력공급이 tripped off를 야기시켜 일어나는 전기 breakdown이 생기면 더 이상 지속되지 않는다. 이 임계 인가전압을 각 노즐에 대해 분사압력에 의존한다. 비전하 밀도는

$$\rho_s = \frac{i_s}{Q_v}$$

에 의해 계산된다. 여기서  $i_s$ 는 분무전류의 (A)이고  $Q_v$ 는 체적유량이다( $m^3/s$ ).

인가전압이 비전하 밀도에 미치는 영향을 세 가지 노즐에 대해 그림 6a, 6b, 6c에 나타내었다.

이 세 그림에서 비전하 밀도는 전기적 breakdown이 일어날 때까지 인가전압의 증가에 따라 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 노즐 오리피스 지름 0.308mm의 경우는 이 경향을 따르지 않는다. 고압 분사 즉 높은 연료 유량에서 인가전압의 영향을 미미하였다.

### 2. 기존 노즐과 정전대전 노즐의 분열길이 비교

속빈노즐의 경우 분열길이는 구멍을 기준으로 하느냐와 액적 형성을 기준으로 하느냐 두 가지가 있다[15]. 즉 노즐 출구로부터 구멍이 생긴 곳까지 길이 또는 액적이 생성된 곳까지의 길이로 정의한다. 이 실험에서는 액적 생성을 기준으로 하여 분열길이를 측정하였다.

그림 7에 대표적인 분무 형태와 분열길이 측정을 나타내었고 threshold 80% 값으로 영상 처리하여 평균값을 각각의 노즐에 대해 그림 8a, 8b, 8c에 나타내었다.

그림으로부터 분사압력을 증가시킴에 따라 분열길이가 감소하는 것을 알 수 있다. 더 나아가 정전대전 노즐의 경우 낮은 분사압력에서도 인가전압이 증가함에 따라 분열길이가 감소한다. 정전대전 노즐은 기존 노즐에 비해 더 짧은 분열길이를 만들 수 있다는 것을 알 수 있다. 이것은 전압이 가해짐에 따라 액체의 표면장력이 작아지기 때문이다. 노즐 오리피스 지름 0.333mm의 경우 분열길이에 미치는 인가전압이 영향을 일정치 않은데 그 이유는 유량이 크기 때문인 것으로 생각된다.

### 3. 기존노즐과 정전대전 노즐의 분무각 비교

분무각은 분열길이 측정 지점의 두 점에서 노즐 출구에 선을 그어 이루는 각으로 정의하였다. 분사압력의 증가에 따른 분무각의 변화를 여러 가지 인가전압에 대해 그림 9a, 9b, 9c에 각각 노즐의 경우를 나타내었다.

그림에서 분사압력이 증가함에 따라 분무각은 증가하고 또 정전대전 노즐의 경우에는 인가전압의 증가에 따라 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 낮은 분사압력의 경우 현저하다. 인가전압이 증가하게 되면 연료 점도를 변화시켜 이온의 유동성을 증가시키는 것이 이 경향의 이유로 생각된다.

### 4. 기존 노즐과 정전대전 노즐의 평균입경 비교

평균입경은 노즐 출구에서 축 방향 거리 20mm 떨어진 점의 분무중심에서 측정하였다. 측정된 SMD를 각각의 노즐에 대해 그림 10a, 10b, 10c에 나타내었다. 평균입경은 기존 노즐과 정전대전 노즐 모두 분사 압력이 증가함에 따라 감소함을 알 수 있다. 또 정전대전 노즐의 경우 인가전압이 증가하면 평균입경이 감소한다.

분사압력 0.7MPa의 경우 노즐 오리피스 직경이 0.256mm의 경우 평균입경 8.4%, 0.308mm의 경우 7.1%, 그리고 0.333mm의 경우 3.6% 감소가 이루어졌다. 즉 정전대전 노즐의 경우 기존 노즐의 경우보다 분무의 평균입경이 감소하는 것을 알 수 있다. 그러나 노즐 오리피스 직경 0.333mm의 경우 그 차이는 그다지 크지 않았다.

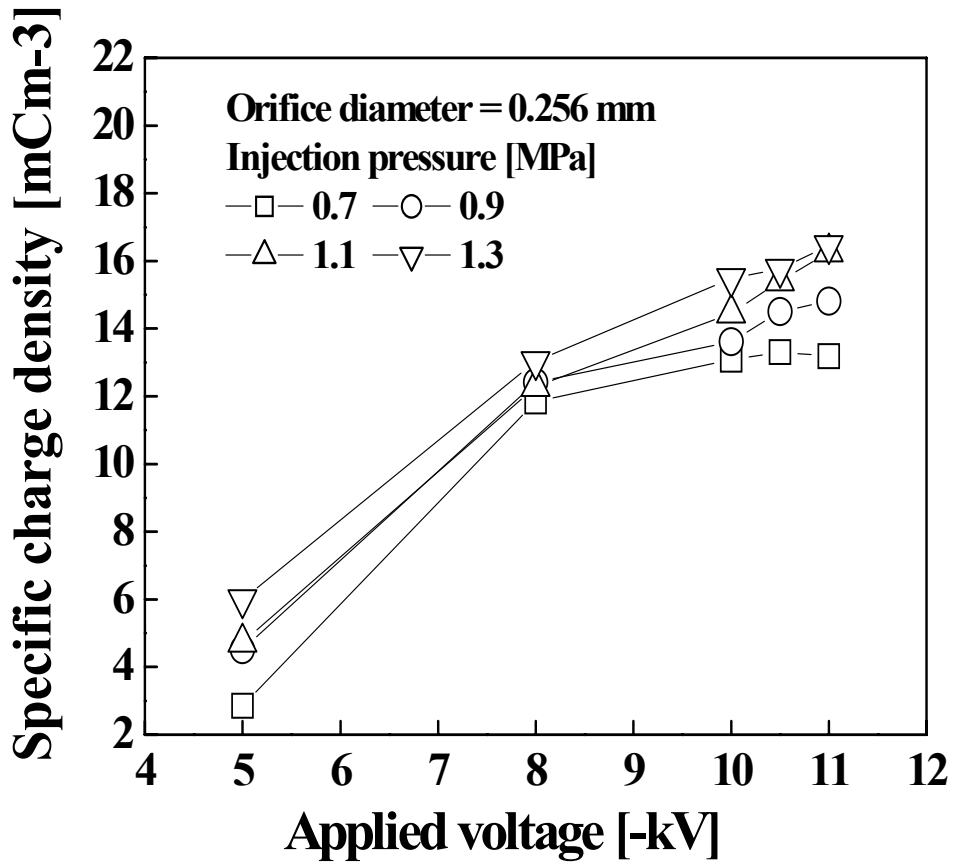


Fig. 6a. Effect of applied voltage on specific charge density for nozzle orifice diameter of 0.256 mm.

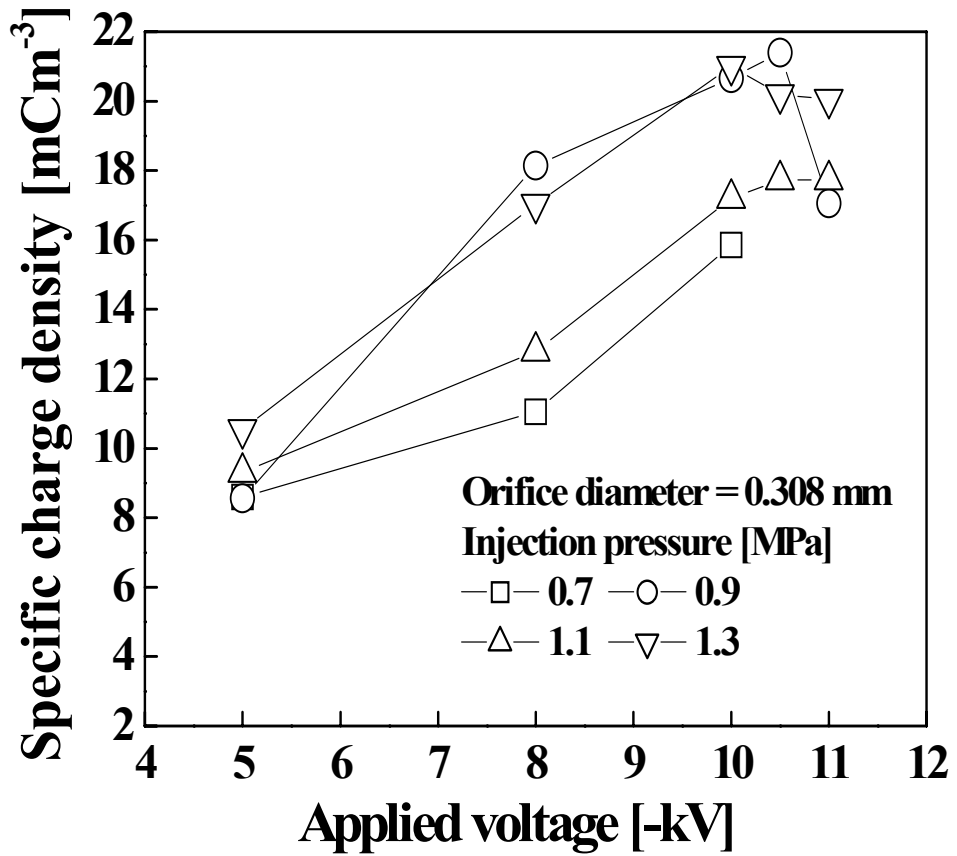


Fig. 6b. Effect of applied voltage on specific charge density for nozzle orifice diameter of 0.308 mm.

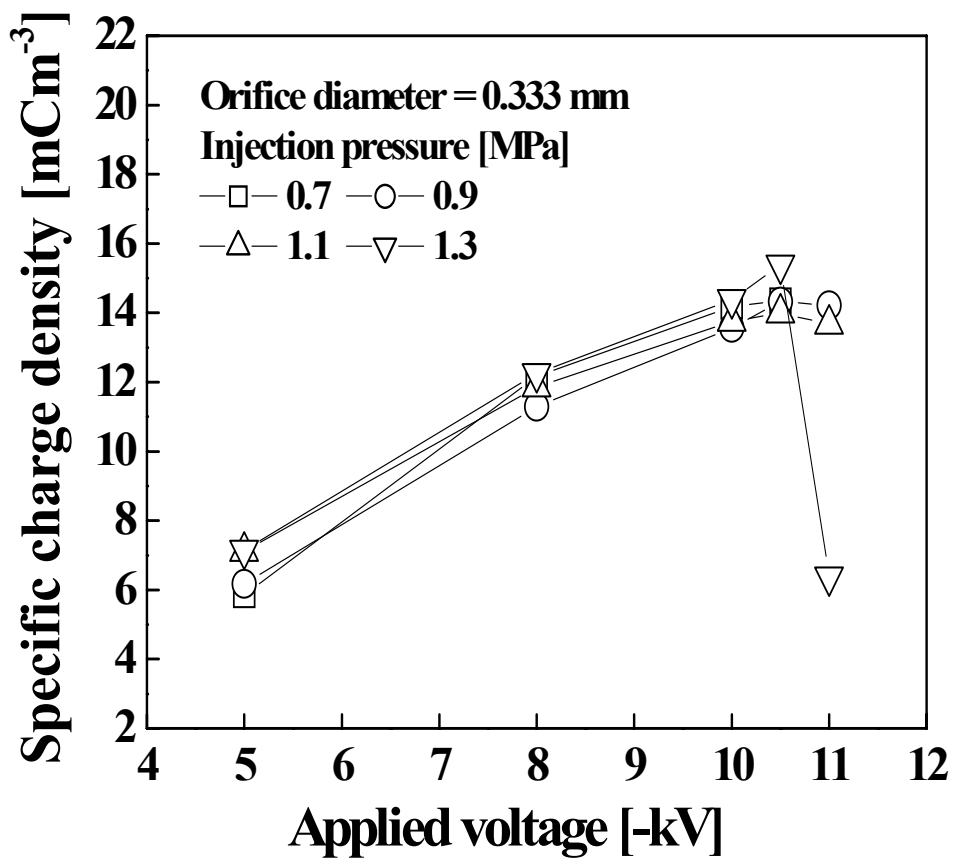


Fig. 6c. Effect of applied voltage on specific charge density for nozzle orifice diameter of 0.333 mm.

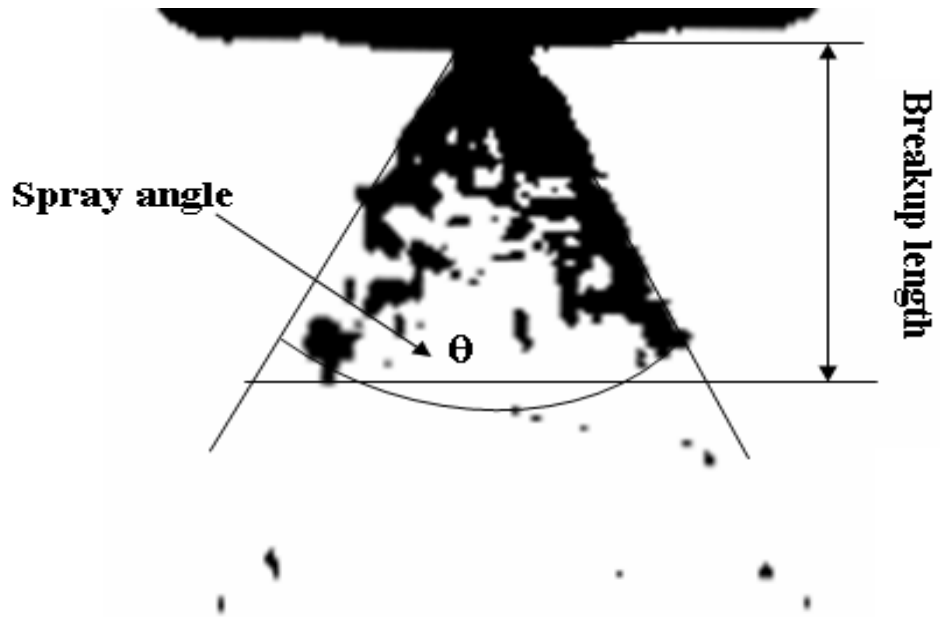


Fig. 7. A typical photograph indicating the measurements procedure for a breakup length and a spray angle.

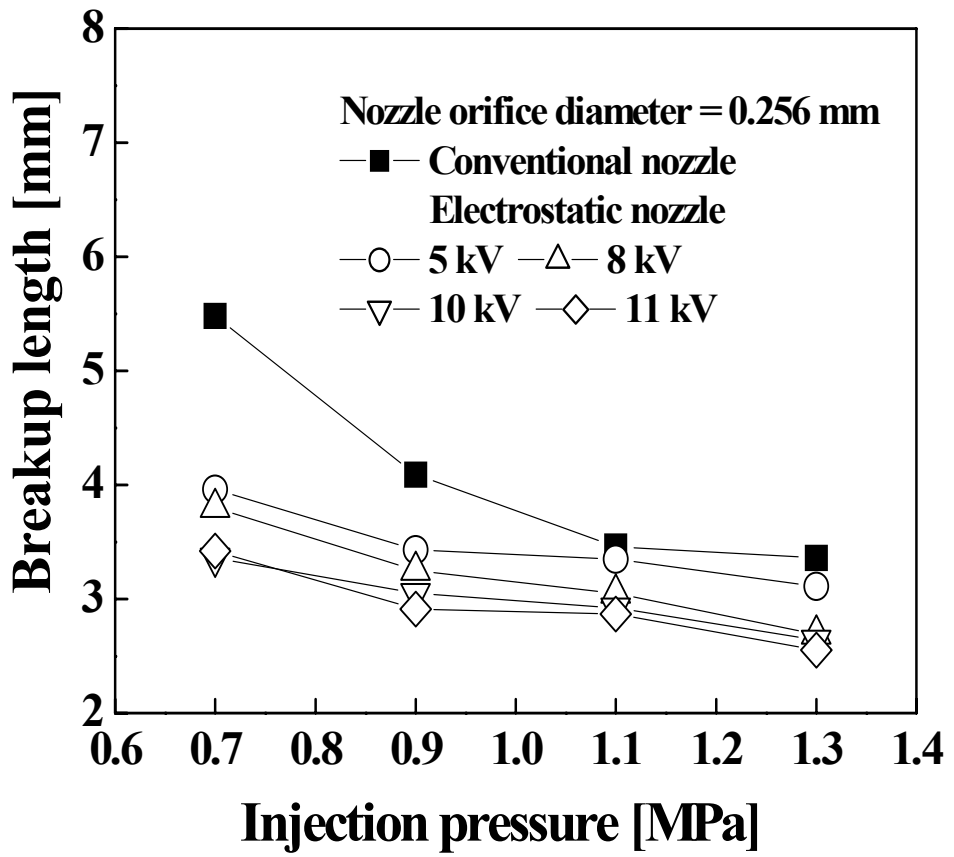


Fig. 8a. Variations of injection pressure on breakup length for conventional and electrostatic nozzles for orifice diameter of 0.256 mm.

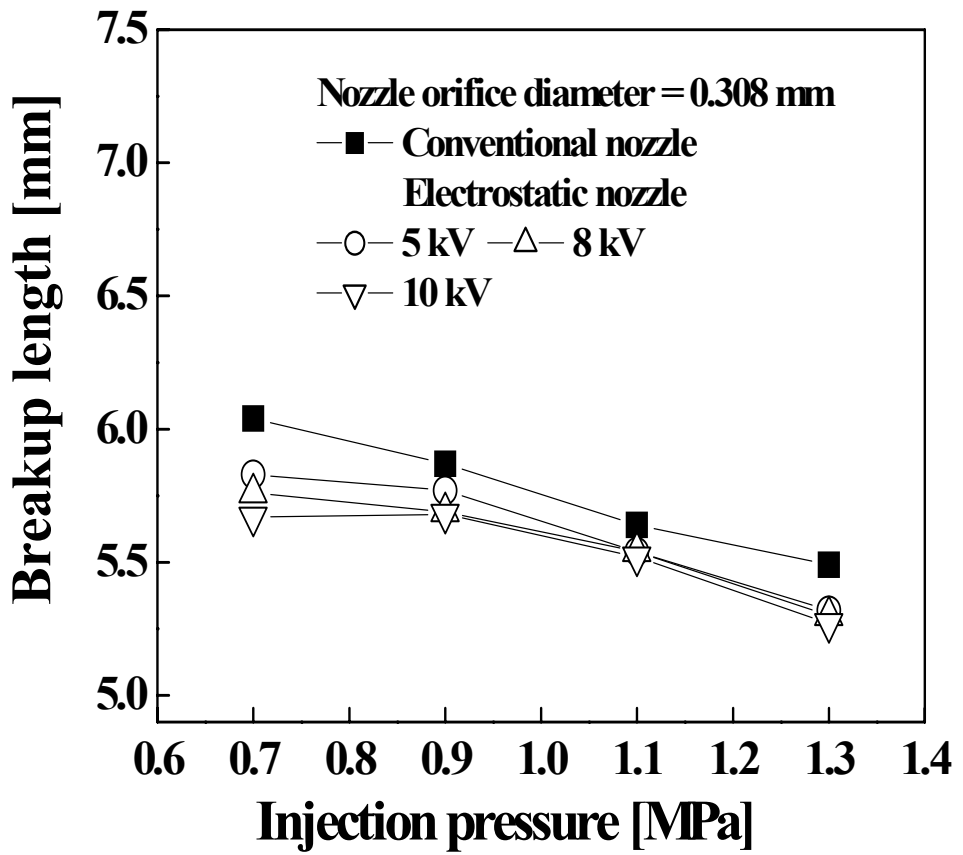


Fig. 8b. Variations of injection pressure on breakup length for conventional and electrostatic nozzles for orifice diameters of 0.308 mm.



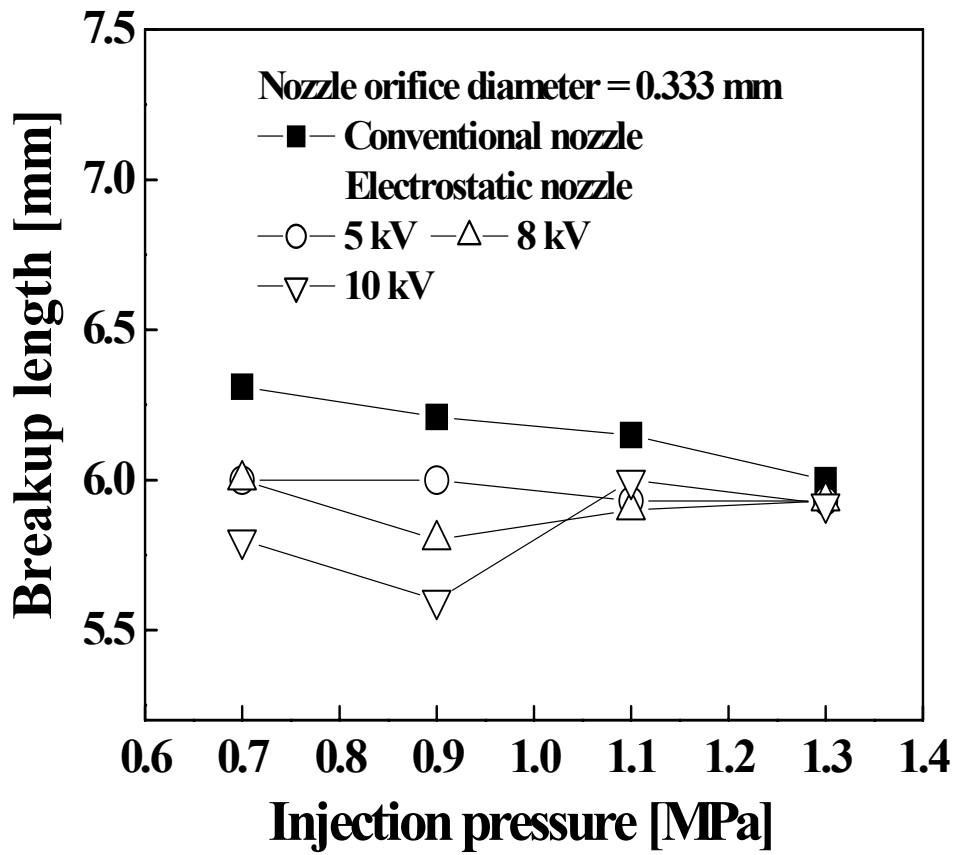


Fig. 8c. Variations of injection pressure on breakup length for conventional and electrostatic nozzles for orifice diameters of 0.333 mm.

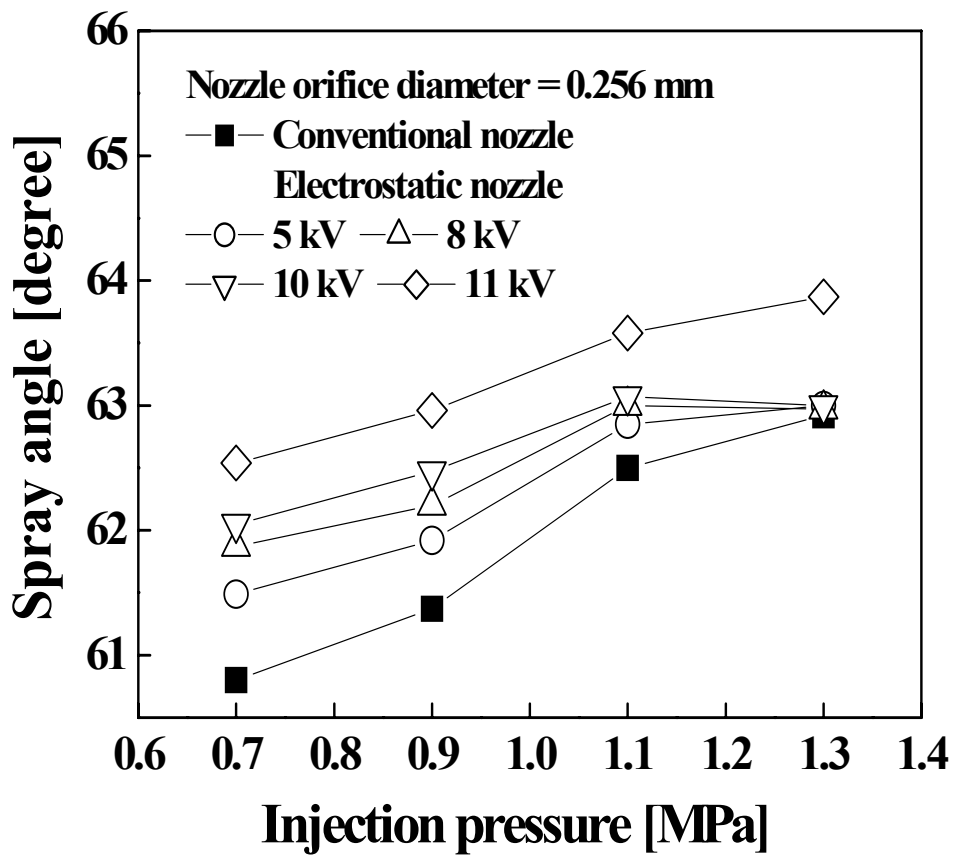


Fig. 9a. Variations of injection pressure on spray angle for conventional and electrostatic nozzles for orifice diameter of 0.256 mm.

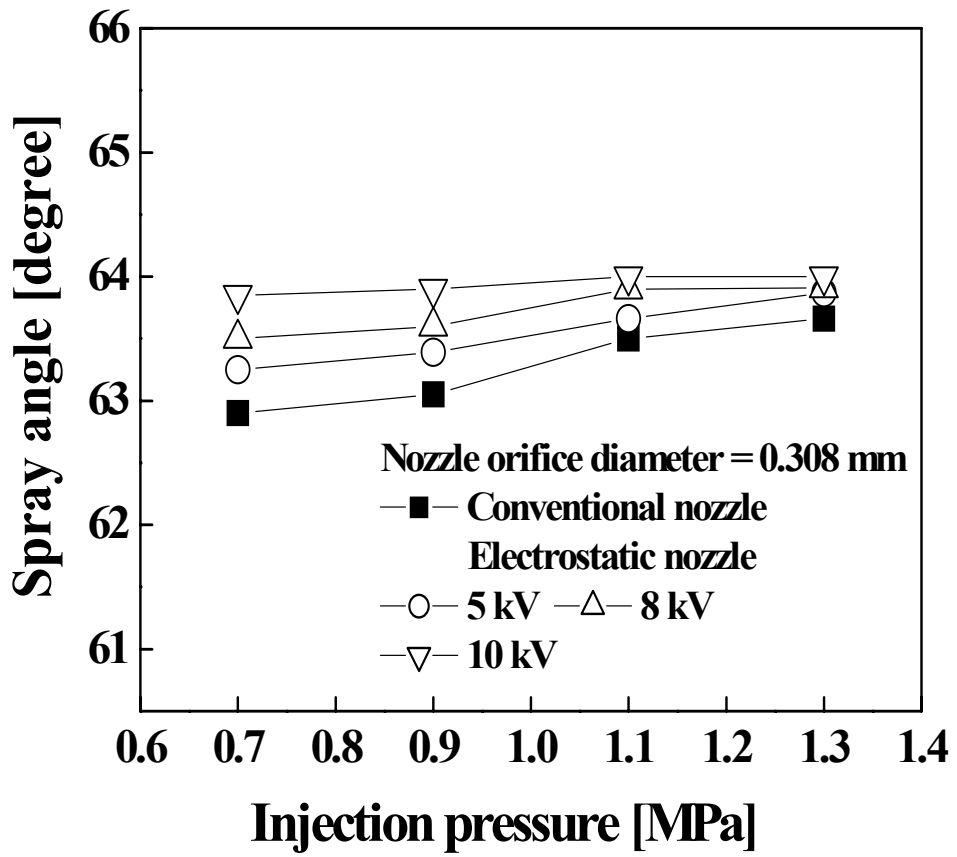


Fig. 9b. Variations of injection pressure on spray angle for conventional and electrostatic nozzles for orifice diameter of 0.308 mm.

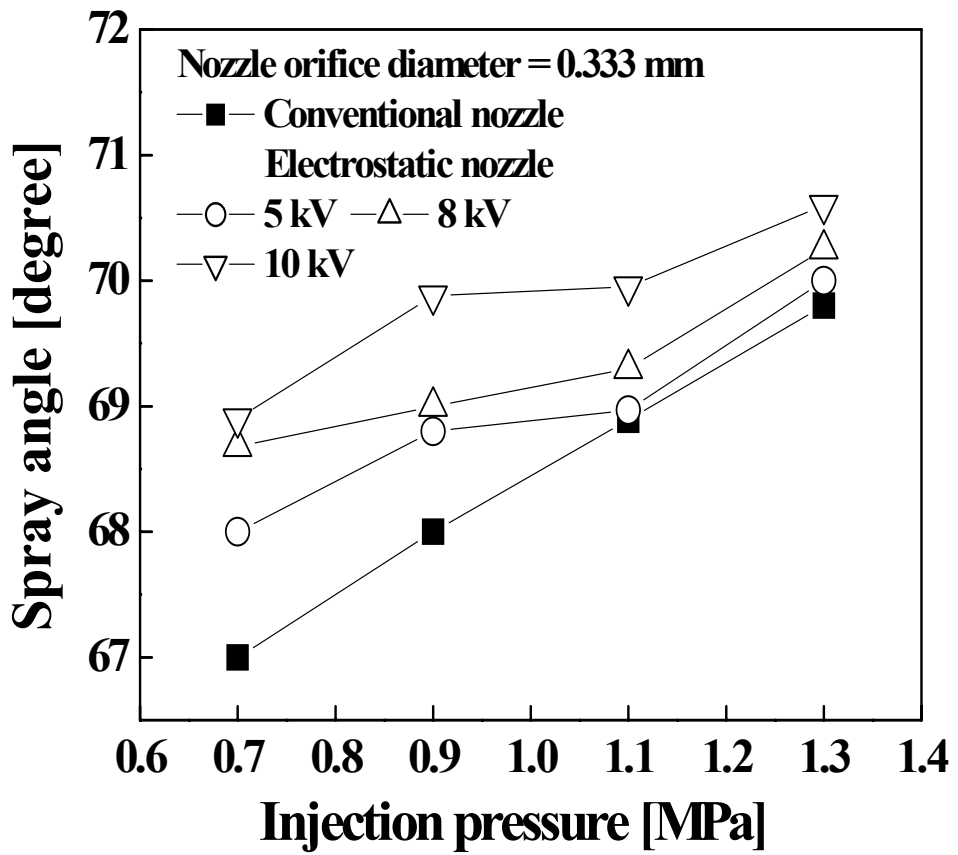


Fig. 9c. Variations of injection pressure on spray angle for conventional and electrostatic nozzles for orifice diameter of 0.333 mm.

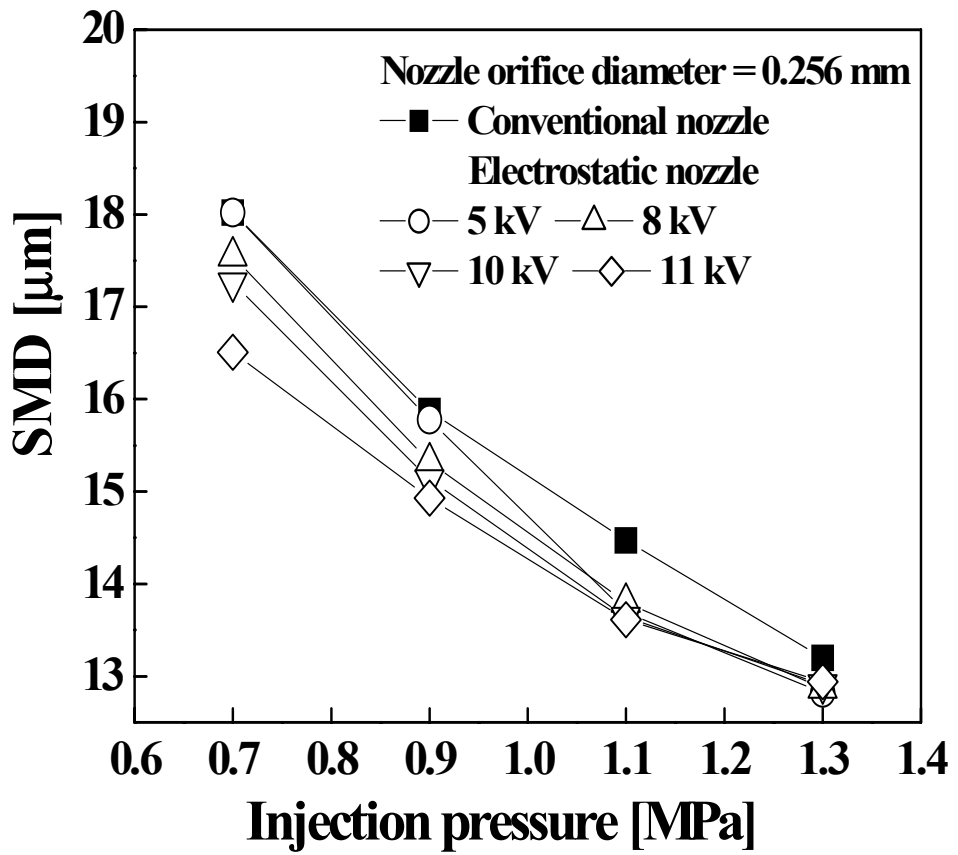


Fig. 10a. Variation of injection pressure on mean diameter for conventional and electrostatic nozzles for orifice diameter of 0.256 mm.

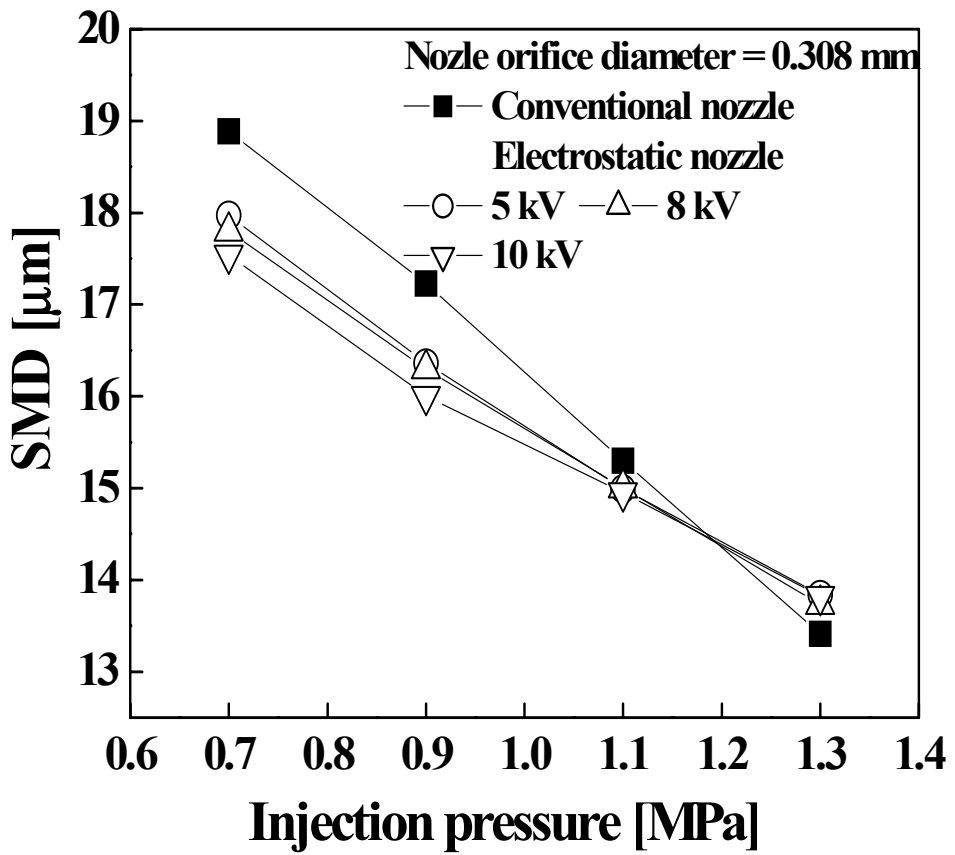


Fig. 10b. Variation of injection pressure on mean diameter for conventional and electrostatic nozzles for orifice diameter of 0.308 mm.

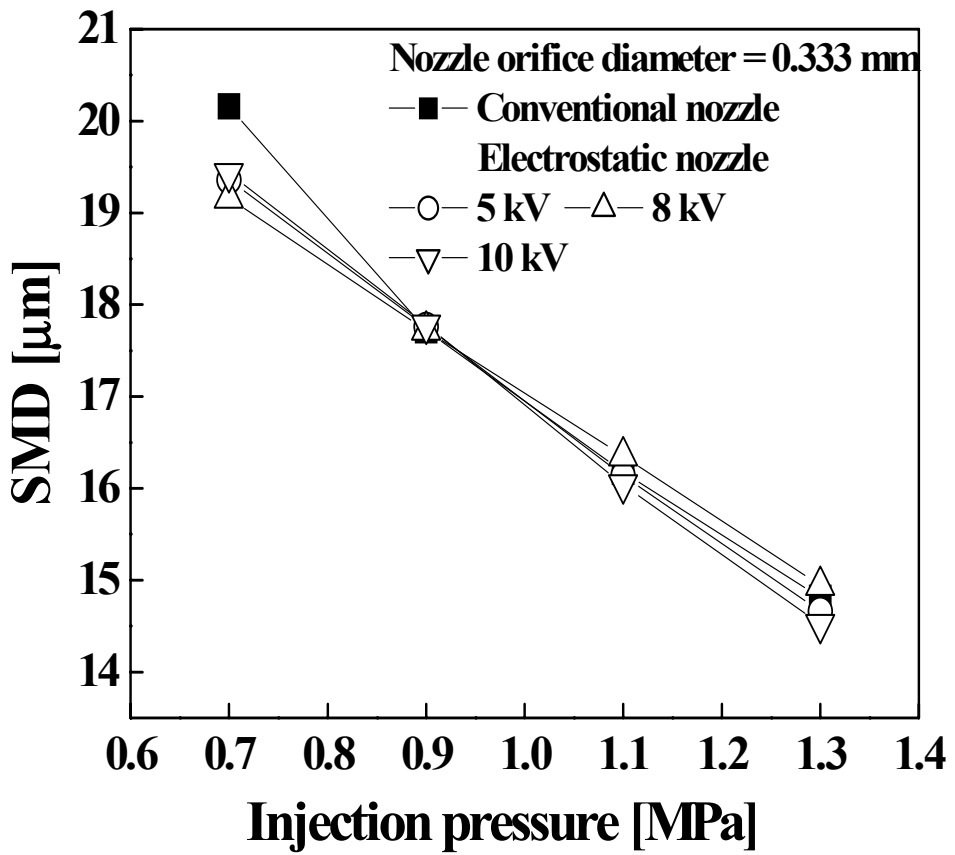


Fig. 10c. Variation of injection pressure on mean diameter for conventional and electrostatic nozzles for orifice diameter of 0.333 mm.

### 3절. 연소특성

연소특성은 로내 실험과 난방기 실증실험으로 나뉘어진다. 이중에서 로내 실험은 기존 노즐과 정전대전 노즐 두 가지 즉 미립화 특성을 끝낸 정전대전 노즐과 새롭게 설계한 정전대전 노즐 실험으로 나뉘어진다. 난방기 실증 실험은 새로 설계한 정전대전 노즐과 기존 노즐과 비교 실험으로 이루어진다.

#### 1. 기존 노즐의 로내 실험.

##### 가. 분사 압력과 축 방향 거리에 따른 온도 분포

분사압력과 축 방향거리가 로내 온도 분포에 미치는 영향을 검토하였다. 온도는 화염이 안정화되는 시간을 택하기 위해 20분 간격으로 측정하였다. 그림 11a, 11b, 11c에 각각의 노즐에 대해 축 방향 거리에 따른 로내 온도 분포를 나타내었다. 분사압력이 증가함에 따라 로내 온도는 증가하였다. 이는 유량의 증가에 따른 액적 크기 밀도가 증가하기 때문으로 생각된다. 축 방향 거리가 증가함에 따라 로내 온도는 감소하였다. 이는 주로 노즐 출구 밖의 일정거리 내에서 연소가 이루어지기 때문으로 생각된다. 1.3MPa의 고압 분사 압력에서는 온도가 디퓨저로부터 거리가 증가함에 따라 증가하다가 다시 감소하는 것을 모든 노즐의 경우에서 볼 수 있다.

최대 온도는 노즐 끝에서부터 축 방향으로 242mm의 거리에서 나타남을 알 수 있다.

##### 나. 분사압력이 화염길이에 미치는 영향

화염길이는 30개의 사진을 가시화 방법에 의해 측정하였다. 그림 12에 분사압력에 따른 화염길이의 변화를 세 가지 노즐에 대하여 나타내었다.

화염길이는 분사압력과 노즐 오리피스 직경이 증가함에 따라 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 분사압력이 증가하면 분열길이가 짧아지지만 노즐 출구에서 멀리까지 연소 가능한 액적이 분포하기 때문으로 추측된다. 더 나아가 액적 직경에



다른 증발속도가 또한 미립화 과정 중에 큰 변수가 될 수 있다.

측정한 데이터의 오차 분석을 통해보면 최소 2%에서 최대 12%까지 분포함을 알 수 있다.

#### 다. 축 방향거리에 따른 화염폭의 변화

화염폭은 30개의 사진을 가시화 방법에 의해 얻은 후 threshold 85%에서 측정하였다. 축 방향거리에 따른 화염폭의 변화를 분사압력 0.7, 0.9, 1.1, 1.3MPa에 대해 그림 13a, 13b, 13c, 13d에 나타내었다.

화염폭은 축 방향거리가 증가함에 따라 커지다가 노즐 오리피스 직경에 따라 다시 감소하는 경향을 보인다. 특히 분사압력 1.1MPa에서 화염폭은 안정적이지 않은데 측정 방법의 문제인 것으로 추측된다.

화염폭에 미치는 노즐 오리피스 지름의 영향을 디퓨저에서부터 아래쪽으로 약 142mm에서 분명하다. 또 분사압력이 증가함에 따라 연소과정이 더 먼 거리까지 이루어지는 것을 알 수 있다.

화염폭의 측정된 결과를 오차 분석한 결과 최소 2%에서 최대 15%인 것을 알 수 있다.

#### 라. 분사압력이 연도가스 배출에 미치는 영향

연도가스 배출 • 측정 실험을 일정한 공기 속도 8.0m/s에서만 수행되었다. 연도가스 분석은 CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>에 대해 이루어졌고 분사압력에 따른 영향을 그림 14a, 14b, 14c에 각각 나타내었다. 그림 14a에서 알 수 있듯이 분사압력 0.7MPa에서 Co는 노즐 오리피스 직경이 증가함에 따라 증가하지만 분사압력 1.3MPa에서는 노즐 오리피스 직경이 증가함에 따라 감소한다.

그림 14b에서 CO<sub>2</sub>는 분사압력과 노즐 오리피스 직경이 증가함에 따라 증가함을 알 수 있다. 이것은 고압 분사에서 더 많은 산소가 연소특성을 증진시키는데 요구된다는 것을 시사한다. 그림 14c에서 분사압력의 증가에 따라 특히 분사압력 1.3MPa에서 NO<sub>x</sub>는 증가하는 것을 알 수 있다. 또 노즐 오리피스 직경이 증가하면 NO<sub>x</sub> 배출도 증가한다. 이것을 로내의 온도가 높아지면서 열적 NO<sub>x</sub> 생성이

증가하기 때문이다.

오차분석 결과 CO의 경우 5~10%, CO<sub>2</sub>의 경우 4~13% 그리고 NO<sub>x</sub> 경우 7~15%의 오차 범위를 나타내었다.

## 2. 기존 노즐과 정전대전 노즐의 로내 실험 비교

### 가. 공기속도와 분사압력이 로내 온도에 미치는 영향

공기속도와 분사압력이 로내 온도에 미치는 영향을 기존 노즐과 정전노즐에 대해 비교 검토한 것을 표 4-7에 나타내었다. 로내 온도는 공기속도와 축 방향거리가 증가함에 따라 감소하는 것을 알 수 있다. 디퓨저로부터 축 방향거리 142mm와 242mm 사이에서 정전대전 노즐의 로내 온도는 기존 노즐의 경우보다 낮았지만 축 방향거리 692mm와 842mm에서는 정전대전 노즐이 더 높은 온도를 나타내었다. 정전대전 노즐의 경우 기존 노즐보다 로내에 더 고른 온도분포를 보인다는 것을 말해준다. 그리고 이것은 액적이 대전되어 넓은 분무각을 가지게 되어 더 긴거리까지 표면적과 분무 체적이 증가하기 때문으로 추측된다. 분사압력 0.7MPa과 공기속도 10.2m/s에서는 정전대전 노즐의 경우 연소가 시작되지 않았다. 이때 당량비는 0.2 이하로 연소과정이 시작되기에 너무 희박 조건이기 때문이었다.

### 나. 기존 노즐과 정전대전 노즐의 최대온도 비교

노즐 오리피스 직경 0.256mm의 경우 각각 공기속도에서 기존 노즐과 정전대전 노즐의 최대 온도는 분사 압력에 따라 그림 15a~15e까지 나타내었고, 그림으로부터 같은 분사압력에서 기존 노즐의 경우가 정전대전 노즐 경우와 비교하여 더 높은 온도를 나타내는 것을 알 수 있다. 이것은 기존 노즐의 경우가 같은 조건에서 정전대전 노즐 보다 더 많은 연료 유량을 분사하기 때문이다. 두 경우 모두 분사압력이 증가하면 최대온도는 증가하고 공기 속도가 증가하면 최대온도는 감소한다. 온도 강하는 불완전 연소와 함께 높은 공기 속도에 의해 가스를 빠르게 밀어내기 때문으로 추측된다.

#### 다. 기존 노즐과 정전대전 노즐의 순연도 가스 온도 비교

연도내의 가스 배출, 연도 가스온도, 연소 효율 등을 점검한 결과 연도내의 중심에서 가스배출이 가장 적고, 높은 연도가스 온도와 연소효율은 나타내었다. 따라서 모든 측정은 연도의 중심에서 이루어졌다.

순 연도 가스온도의 변화를 여러 가지 공기속도에 대하여 그림 16a~16e까지 나타내었다. 순 연도 가스온도는 두 노즐 모두 분사압력이 증가함에 따라 증가하고 공기속도의 증가에 따라 감소한다.

기존 노즐과 정전대전 노즐의 순 연도 가스온도의 차이는 0.9MPa 이하의 분사압력에서는 작으나 그 이상에서는 그 차이가 큰 것을 알 수 있다.

#### 라. 기존 노즐과 정전대전 노즐의 배출가스의 비교

로의 연도에서 배출되는 가스분석 결과 CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> 농도를 그림 17부터 그림 20까지 나타내었다.

그림 17a부터 그림 17e까지는 각각 다른 공기속도에서 기존 노즐과 정전대전 노즐의 CO 배출농도를 분사압력에 따라 나타낸 것이다. 그림으로부터 정전대전 노즐의 경우 모든 공기속도에서 분사압력이 증가함에 따라 CO 농도가 증가하는 것을 알 수 있다. 모든 공기속도에 대해 CO 배출농도는 기존 노즐보다 정전대전 노즐이 훨씬 크지만 공기 속도의 증가에 따라 그 차이가 줄어드는 것을 알 수 있다. 또 공기속도가 증가함에 따라 두 노즐 모두 CO 배출농도는 감소하였다.

CO 배출농도가 기존 노즐보다 정전대전 노즐이 많으므로 이는 미연소의 결과라고 보여 지므로 좀 더 연소를 증진시키는 방법이 강구되어야 할 것이다.

그림 18a부터 그림 18e까지는 각각 다른 공기 속도에서 기존 노즐과 정전대전 노즐의 NO<sub>x</sub> 배출농도를 분사압력에 따라 나타낸 것이다.

공기속도 10.24m/s의 경우를 제외하면 기존 노즐의 NO<sub>x</sub> 배출 농도가 정전대전 노즐의 NO<sub>x</sub> 배출 농도보다 모든 분사압력에서 훨씬 높은 것을 알 수 있다. 그리고 모든 경우에 대해 NO<sub>x</sub> 생성에서 시간, 온도, 산소 가용성이 주된 변수이며 특히 온도가 가장 영향이 크다. 앞에서 살펴 본 바와 같이 기존 노즐의 최대 국지 노내 온도가 정전대전 노즐의 최대 국지 온도보다 높으므로 NO<sub>x</sub> 생성이

더 현저한 것으로 이해될 수 있다.

그림 19a부터 그림 19e까지는 각각 다른 공기속도에서 기존 노즐과 정전대전 노즐의 SO<sub>2</sub> 배출농도를 분사압력에 따라 나타낸 것이다. 공기속도 2.75m/s와 10.24m/s의 경우를 제외하면 기존 노즐의 SO<sub>2</sub> 배출농도보다 정전대전 노즐의 SO<sub>2</sub>가 낮게 나타났다. 분사압력의 경우 1.3MPa에서 대부분 정전대전 노즐의 SO<sub>2</sub> 배출농도가 기존 노즐보다 높게 나타났다. SO<sub>2</sub>의 배출은 연료 자체 내 유황 성분과 산소가용성의 변수이므로 정전대전에 의한 영향은 더 깊은 연구가 필요하다.

그림 20a부터 그림 20e까지는 각각 다른 공기 속도에서 기존 노즐과 정전대전 노즐의 CO<sub>2</sub> 배출농도를 분사압력에 따라 나타낸 것이다. CO<sub>2</sub> 농도는 분사압력이 증가함에 따라 모든 공기 유속에서 증가하는 것으로 나타났다. 연료 유량의 증가에 따른 결과로 해석된다. 또 모든 공기 유속에서 기존 노즐의 CO<sub>2</sub> 농도보다 정전대전 노즐의 CO<sub>2</sub> 농도가 낮게 나타났다. 이러한 두 노즐의 차이는 앞에서 검토한 CO 농도 배출의 차이로 설명될 수 있다.

#### 마. 기존 노즐과 정전대전 노즐의 연소효율 비교

연소효율은 연도가스에서 산소 함량이나 인산화탄소 함량을 측정함으로써 계산될 수 있다. 이 실험에서 연소효율은 가스분석기 내부에 설치된 컴퓨터 소프트웨어에서 순 연소효율을 선택함으로써 직접 계산 가능하였다.

그림 21a부터 그림 21e까지는 각각의 공기속도에 대해 분사압력에 따른 연소효율을 나타낸 것이다. 그림으로부터 분사압력이 증가함에 따라 연소효율은 증가하지만 공기속도의 증가에 따라 감소하는 것을 알 수 있다.

전체 공기 속도에 걸쳐 분사압력이 1.3MPa의 경우 기존 노즐과 정전대전 노즐의 연소효율은 거의 차이가 없었다. 그리고 2.75m/s와 9.5m/s의 공기속도에서는 분사압력이 0.7MPa에서 그 차이가 없었다. 그러나 그 외의 조건에서 대부분 정전대전 노즐의 연소효율이 기존 노즐보다 낮은 것으로 나타났다. 따라서 이에 대한 대책이 요구된다.

### 3. 새로 설계한 정전대전 노즐의 로내 실험

기존의 개발된 정전대전 노즐의 경우 CO 배출이 기존 노즐보다 더 많고 연소 효율이 낮으며 전기 방전이 일어나는 최대 인가전압이 -12KV이었다. 더 나아가 실증실험을 위한 난방기 예비 실험에서 전기 방전이 더 낮은 인가전압에서 나타나는 등 위의 여러 가지 문제점을 해소하기 위하여 새로 정전대전 노즐을 설계할 필요성이 대두되었다. 따라서 그림 5에 나타난 바와 같이 절연체의 두께를 증가시키고, 어댑터 내부에서 전극의 길이를 조정하여 새롭게 설계 제작하여 로내 실험을 수행하였다.

새롭게 설계한 정전대전 노즐의 경우 전기 방전을 -15KV 바로 전에서 일어났으며 전력 공급원에서 전압과 노즐에서의 전압에 대한 보정값을 그림 22에 나타내었다. 이 값은 신뢰도 95%이었으며 전위계의 고장으로 분무 내 전류측정이 불가능하여 최대 인가전압 설정을 할 수 없었으므로 사용자 보호와 안전한 실험을 위해 실험에 사용된 인가전압을 -10KV로 설정하였다. 더 나아가 난방기 실증실험과 실험조건을 일치시키기 위해 배기가스 중 산소농도 5%이하의 조건에서 실험을 수행하였다.

그림 23a부터 그림 23c까지는 최대 국지 로내 온도를 각 노즐에 대해 분사압력이 변화에 따라 나타낸 것이다. 온도 측정은 연소 시작 후 5분 후에 수행하였고, 배기가스 중 산소농도를 5% 이하 조건을 맞추기 위해 공기속도를 조절하였다. 그림 23a로부터 분사압력 1.1MPa까지는 기존 노즐과 새로 설계한 노즐의 최대 국지 로내 온도는 차이가 없었지만 분사압력 1.3MPa에서 차이가 남을 알 수 있다. 그림 23b와 그림 23c에서 알 수 있듯이 기존 노즐의 최대 국지 로내 온도는 정전대전 노즐의 온도보다 높았지만 분사압력 1.3MPa에서는 약간의 변화를 보였다. 이것은 기록 시간의 오차로 인해 발생한 것으로 추측된다.

그림 24a부터 24c까지는 각 노즐에 대해 순연도 가스온도를 분사압력에 따라 비교한 것이다. 그림 24a에서 알 수 있듯이 노즐 지름 0.256mm의 경우 모든 분사압력에 대해 순연도 가스온도는 두 노즐 차이가 오차 범위 내에 들어 있다. 노즐 지름 0.308mm의 경우(그림 24b) 순연도 가스온도는 전 분사압력에 걸쳐 정전대전 노즐이 기존 노즐보다 낮았다.

이러한 경향은 노즐 지름 0.333mm의 경우 반대로 나타났다. 그 이유는 산소농

도 5% 이하를 유지하기 위해 공기 속도를 변경함에 따른 결과로 추측된다. 따라서 이것은 온도를 기록하는 기록시간에 영향을 준 것으로 생각된다.

그림 25a부터 25c까지는 각 노즐에 대해 CO 배출농도를 분사압력에 따라 나타낸 것이다. 그림 25a에서 분사압력이 증가함에 따라 CO 배출농도는 두 노즐 모두 감소하고 또 정전대전 노즐이 더 낮은 것을 알 수 있다.

그림 25a에서 노즐 지름 0.308mm에서도 같은 경향을 나타내며 분사압력 0.7MPa과 0.9MPa에서 CO 배출농도는 현저하게 감소되는 것을 알 수 있다. CO 배출을 저감시키는데 도움을 주는 미립화 상태를 만들기 위해 인가전압 -10KV가 충분하다는 것을 말해 주고 있다.

이러한 경향은 분사압력 0.9MPa 이후에서는 그다지 크지 않다. 그림 25c에서 노즐 지름 0.333mm의 경우 CO 배출농도는 분사압력 증가에 따라 감소하다가 다시 증가하는 경향을 나타내었다.

그림 26a부터 그림 26c까지는 각 노즐 오리피스 지름에 대해 분사압력의 변화에 따른 NOx 배출농도를 비교한 것이다. 그림 26a와 26b에서 알 수 있듯이 NOx 배출농도는 분사압력의 증가에 따라 증가하고 기존 노즐보다 정전대전 노즐의 경우가 더 낮았다. 그러나 노즐 지름 0.333mm의 경우 그림 26c에서는 분사압력의 증가에 따라 약간씩 증가하는 경향을 나타내었다. 전체적으로 볼 때 분사압력이 증가함에 따라 기존노즐과 정전대전 노즐의 NOx 배출농도 차이는 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 고 유량의 경우 정전대전 미립화 방식의 한계를 나타내는 것으로 일반적인 경우에 해당한다.

그림 27a부터 27c까지는 각 노즐 오리피스 지름에 대해 분사압력의 변화에 따른 SO<sub>2</sub> 배출농도를 비교한 것이다. SO<sub>2</sub> 배출농도는 분사압력의 증가에 따라 0.256mm와 0.333mm의 경우는 1.1MPa까지, 0.308mm 경우는 0.9MPa까지 감소한다. 전체적으로 볼 때 정전대전 노즐이 기존 노즐보다 적은 SO<sub>2</sub> 배출을 보이는데 연료 내 황 함유량이 변수이므로 그 이유는 연료성분과 정전대전 효과에 따른 분석이 요구된다.

그림 28a부터 28c까지는 각 노즐 오리피스 지름에 대해 분사압력의 변화에 따른 CO<sub>2</sub> 배출농도를 비교한 것이다. 분사압력의 증가에 따른 모든 노즐 오리피스 지름에서 급격한 변화를 보이며 일정한 경향을 보이지 않는다.

이는 CO<sub>2</sub> 배출농도의 경우 산소농도에 영향을 받으므로 측정 시 산소농도 5%

이하를 낮추기 위해 공기속도를 변화시킨 결과로부터 유래하는 것으로 추측된다.

그림 29a부터 그림 29c까지는 각 노즐 오리피스 지름에 대해 분사압력의 변화에 따른 연소효율을 비교한 것이다. 세 가지 노즐 오리피스 지름에 대해 분사압력의 증가에 따라 연소효율은 감소하는 경향을 나타내었다.

그림 29a에서 노즐 오리피스 지름 0.256mm의 경우 분사압력 0.7MPa의 경우만 정전대전 노즐의 연소효율이 기존 노즐보다 높았고 나머지 경우는 오차범위 이내로 약간 낮았다.

그림 29b에서 알 수 있듯이 0.308mm 노즐의 경우는 정전대전 노즐의 연소효율이 기존 노즐보다 훨씬 높게 나타났다. 그러나 그림 29c에서 보면 0.333mm 경우는 기존 노즐의 연소효율이 오히려 더 높게 나타났다.

이는 새로 설계한 정전대전 노즐 경우 0.256mm와 0.308mm의 경우만 연소효율이 이전의 정전대전 노즐보다 향상된 것으로 결론지을 수 있다.

#### 4. 난방기 실증 실험

분무특성과 로내 연소실험을 통해 새로 설계한 정전대전 노즐 중 노즐 오리피스 지름 0.256mm 만을 택하여 기존 노즐과 난방기 실증 실험을 비교하였다.

난방기 예비 실험을 통해 정전대전 노즐의 경우 새로 설계 제작하였다.(그림 5 참조) 정전대전 노즐의 인가전압이 최대 5KV이었으므로 내부 파이프 직경을 3mm에서 6mm로, 절연체(테프론) 두께를 6mm하고 노즐 배럴과 전극 끝까지 길이를 5mm로 늘렸다. 결과적으로 전기 방전이 -15KV까지 연장되었다.

난방기 실증실험에서는 두 개의 난방기를 선택하였다. 노즐 오리피스 지름 0.256mm의 경우는 작은 용량의 난방기를 그리고 큰 용량의 난방기에는 지름 0.333mm의 노즐을 장착하여 실험을 수행하였다. 그러나 표 8에 나타난 바와 같이 NOx 배출량, 연소효율, 연료유량 등 특성이 기존 노즐 경우보다 열악한 관계로 더 이상의 실험을 중지하고 노즐 오리피스 지름 0.256mm의 작은 용량 난방기로 실험을 계속하였다.

표 9는 노즐 오리피스 지름 0.256mm, 분사압력 0.7MPa, 인가전압 -14KV일 경우 기존 노즐과 새로 설계한 정전대전 노즐의 실증 실험 결과를 비교한 것이다.

표에서 알 수 있듯이 CO 배출 농도는 50%이상 저감 되었고 환산 NOx 농도

(O<sub>2</sub> 농도 = 5%)로 4.2% 저감되었다. 연료 절감도 6.6%까지 가능하였고 정전대전 노즐 경우는 매연도 없었다.

따라서 노즐 오리피스 지름 0.256mm, 분사압력 0.7MPa, 인가전압 -14KV의 경우 정전대전 노즐의 기존 노즐보다 모든 성능이 우수한 것을 파악하였다.

분사압력의 변화에 따른 새로 설계한 정전대전 노즐(0.256mm)의 성능을 파악하기 위해 이런 실험에서 사용한 인가전압을 비교적 높은 값이므로 -10KV로 낮추어 성능 실험을 수행하였다.

그림 30은 노즐 오리피스 지름 0.256mm의 경우 분사압력에 따른 순 연도 가스온도를 기존 노즐과 정전대전 노즐에 대해 비교한 것이다.

순 연도 가스온도는 분사압력에 따라 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 일반적인 경향으로 분사압력 증가는 연료유량의 증가를 가져오므로 연도 가스온도가 높아지게 된다. 그림에서 0.7MPa과 0.9MPa의 경우 정전대전 노즐이 기존 노즐보다 순 연도 가스온도가 낮았다.

그림 31는 노즐오리피스 지름 0.256mm의 경우 분사압력에 따른 CO배출농도를 기존 노즐과 정전대전 노즐에 대해 비교한 것이다. 정전대전 노즐의 경우 0.7MPa의 분사압력의 경우 CO 배출농도가 14.3%, 0.9MPa의 경우 4.4% 저감되었다는 것을 알 수 있다. 고압의 분사압력에서 정전대전 효과는 없는 것으로 나타났다.

그림 32은 노즐 오리피스 지름 0.256mm의 경우 분사압력에 따른 NOx 배출농도를 기존 노즐과 정전대전 노즐에 대해 비교한 것이다. NOx 배출농도의 경우 기존 노즐보다 정전대전 노즐 경우 분사압력 0.7MPa에서 27.7%의 저감을 보였다.

그림 33는 노즐 오리피스 지름 0.256mm의 경우 분사압력에 따른 연소효율을 기존 노즐과 정전대전 노즐에 대해 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 연소효율의 경우 분사압력 0.7MPa와 0.9MPa에서 기존 노즐은 90%이하인 반면에 정전대전 노즐의 경우 90% 이상이었고 각각 5.3%와 3.8% 증가를 보였다.

표 10은 노즐 오리피스 지름 0.256mm를 새로 설계한 정전대전 노즐에 사용할 경우 분사압력 0.7MPa과 0.9MPa에 대해 미립화 특성과 연소특성을 종합적으로 나타낸 것이다.



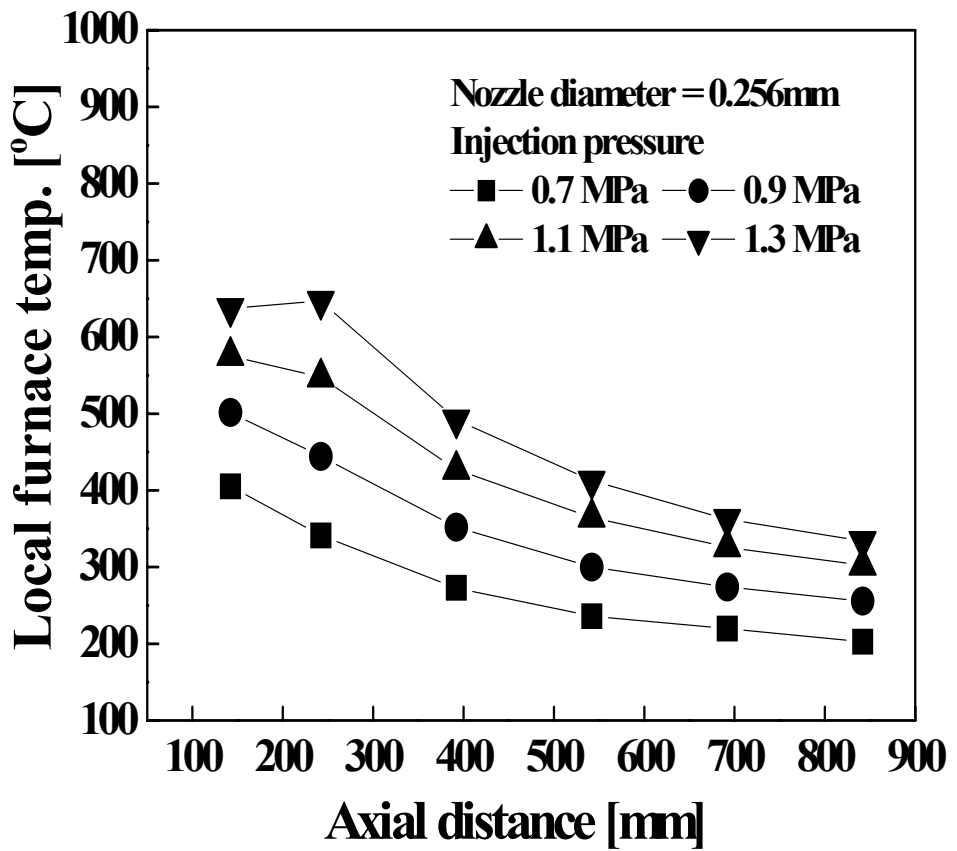


Fig. 11a. Effect of injection pressure and axial distance on local furnace temperature for nozzle orifice diameter of 0.256 mm.

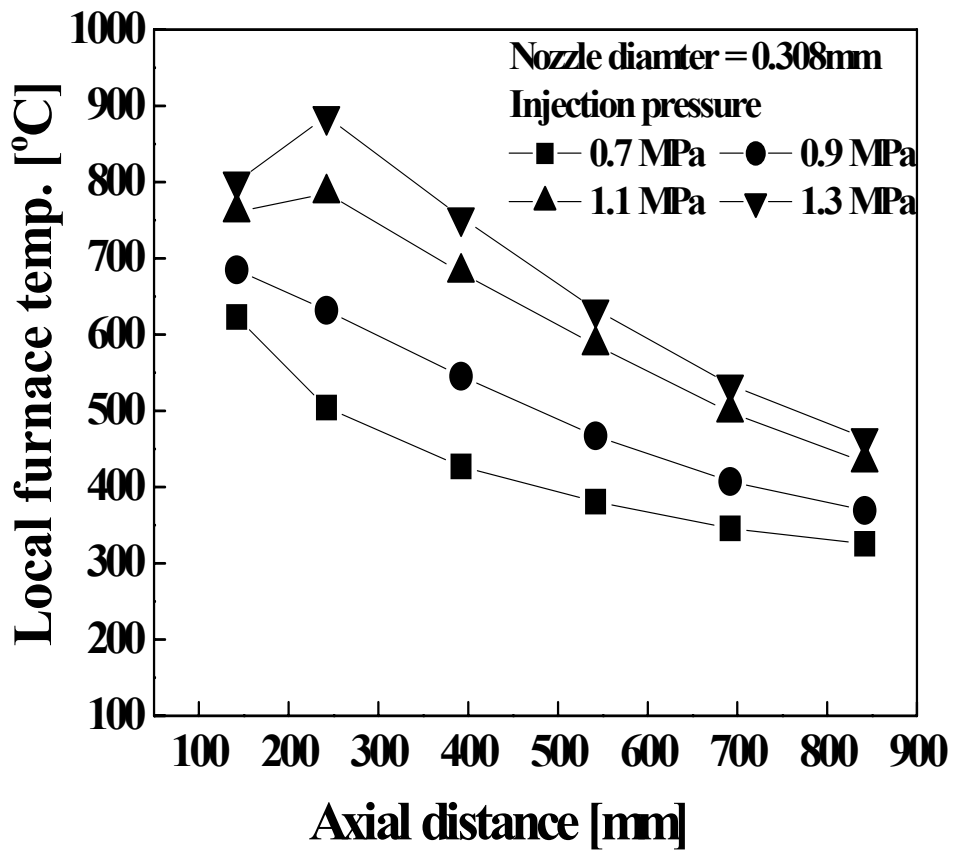


Fig. 11b. Effect of injection pressure and axial distance on local furnace temperature for nozzle orifice diameter of 0.308 mm.

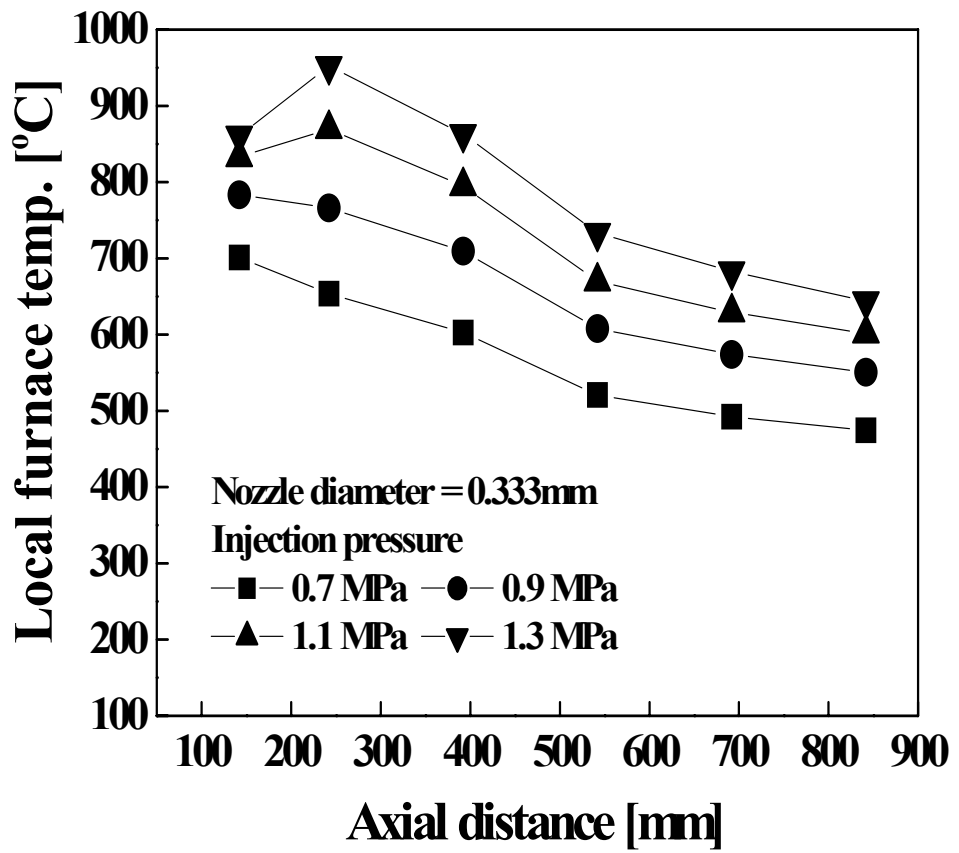


Fig. 11c. Effect of injection pressure and axial distance on local furnace temperature for nozzle orifice diameter of 0.333 mm.

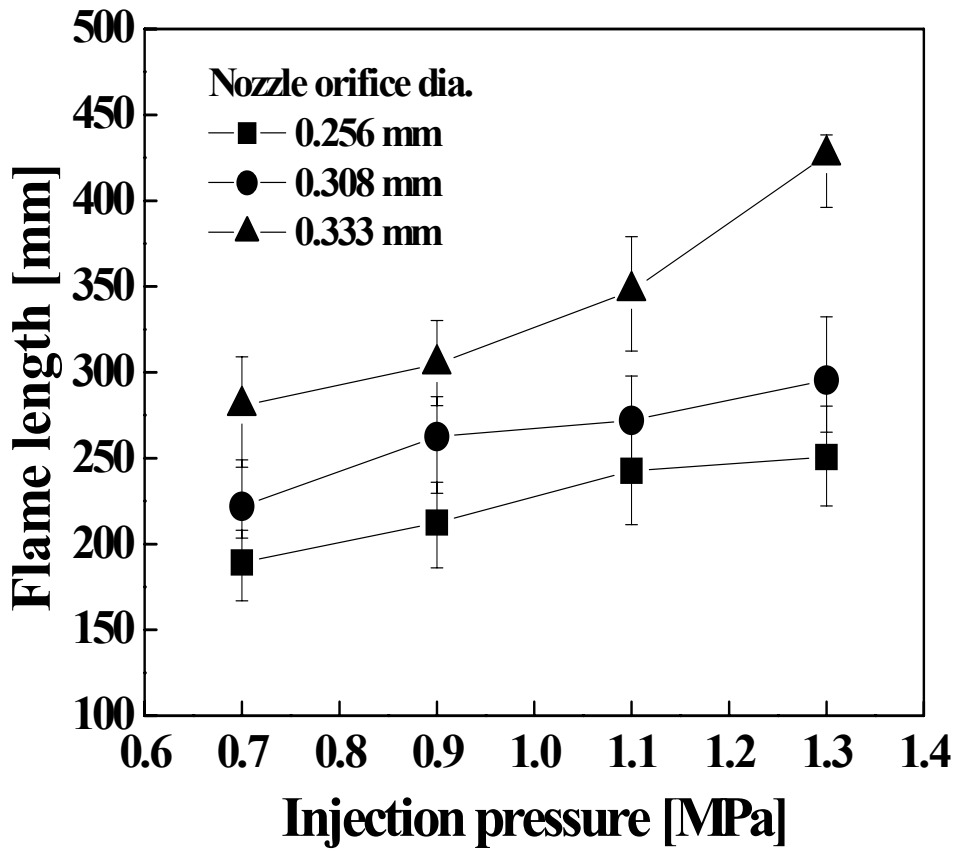


Fig. 12. Effect of injection pressure on flame length for the three nozzles.

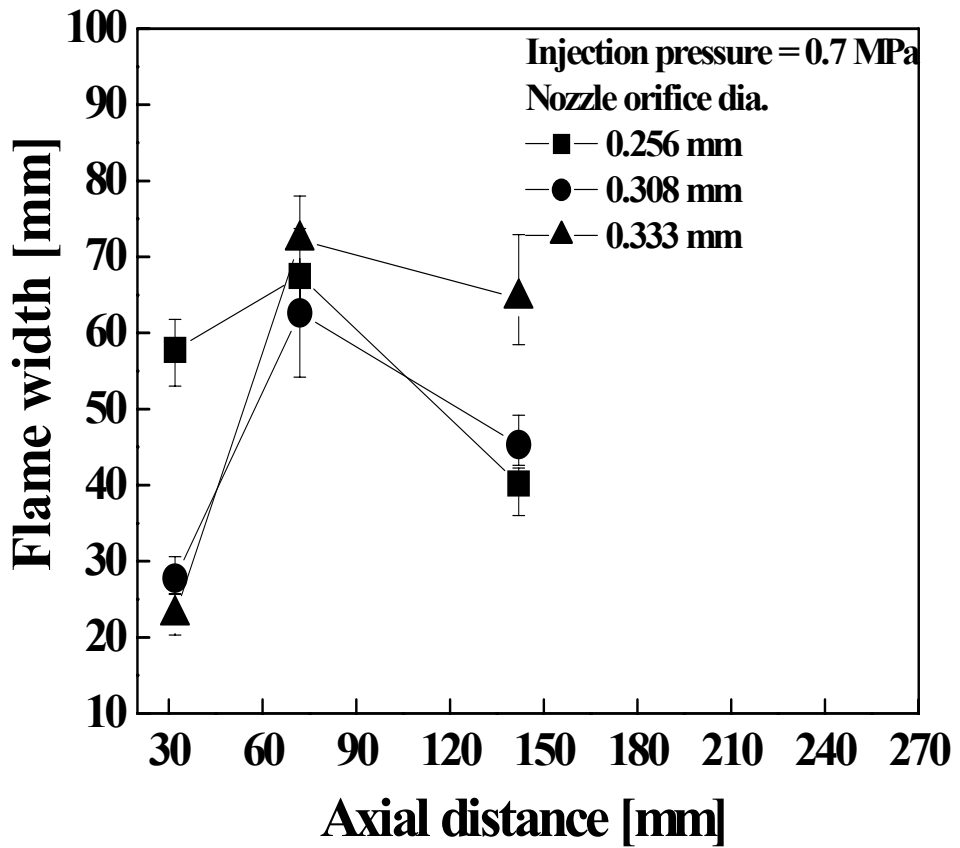


Fig. 13a. Effect of axial distance on flame width for three different nozzles at injection pressure of 0.7 MPa

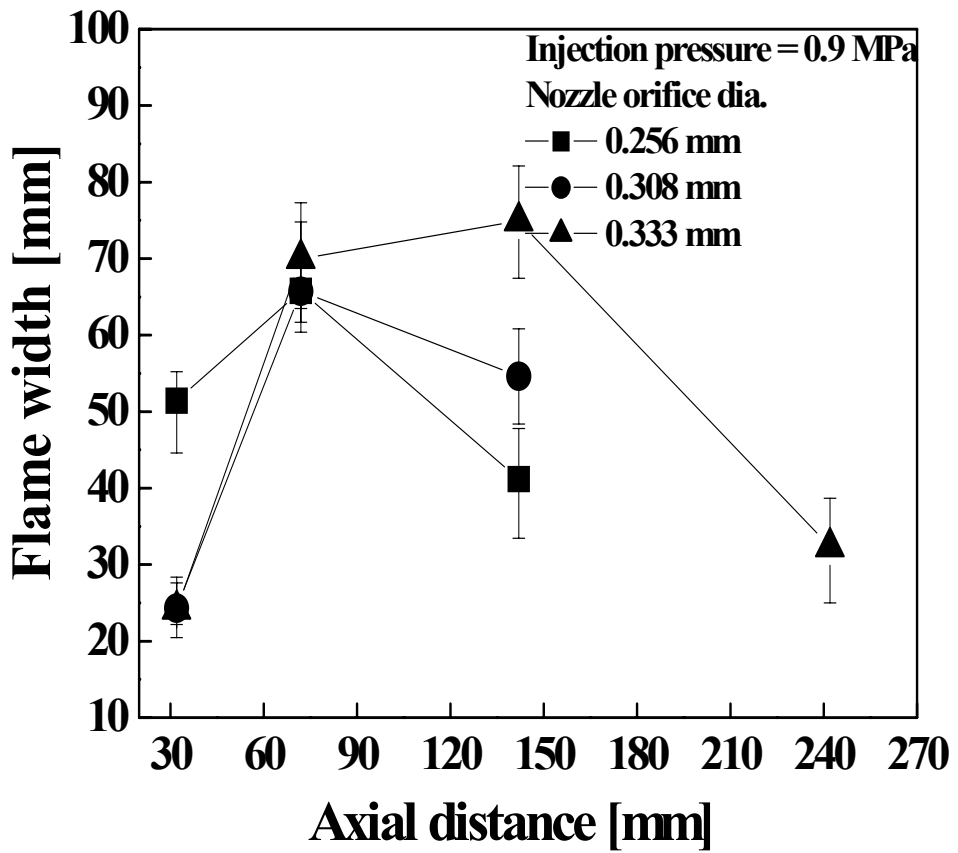


Fig. 13b. Effect of axial distance on flame width for three different nozzles at injection pressure of 0.9 MPa

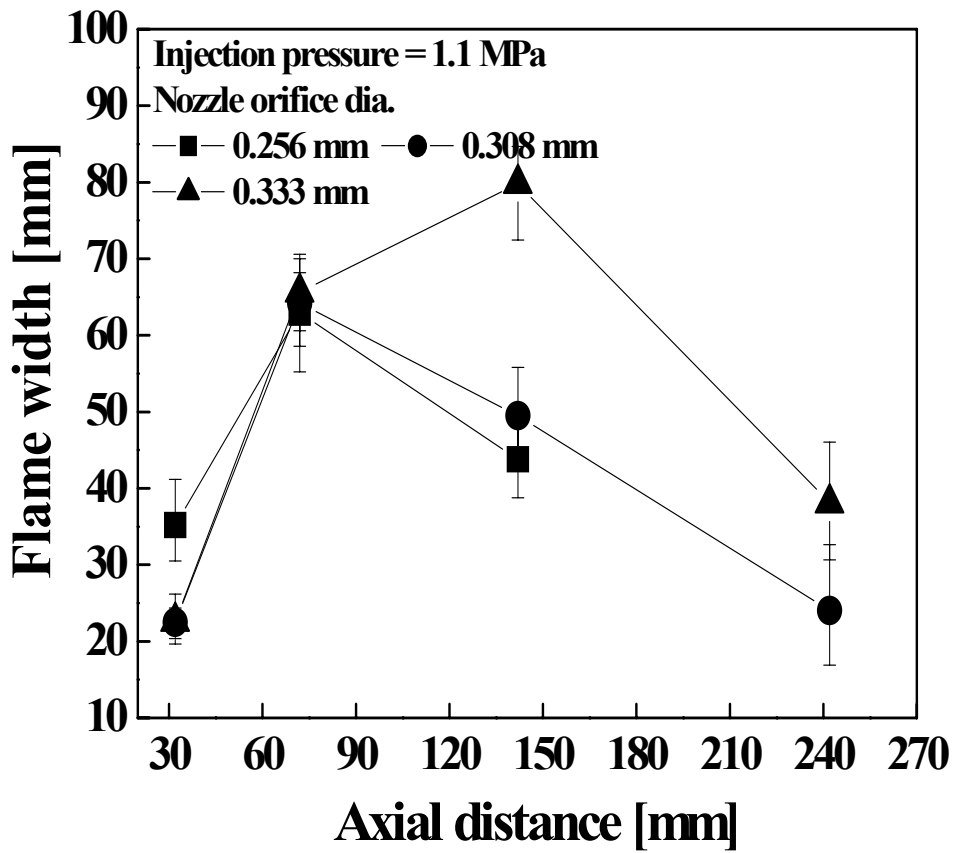


Fig. 13c. Effect of axial distance on flame width for three different nozzles at injection pressure of 1.1 MPa

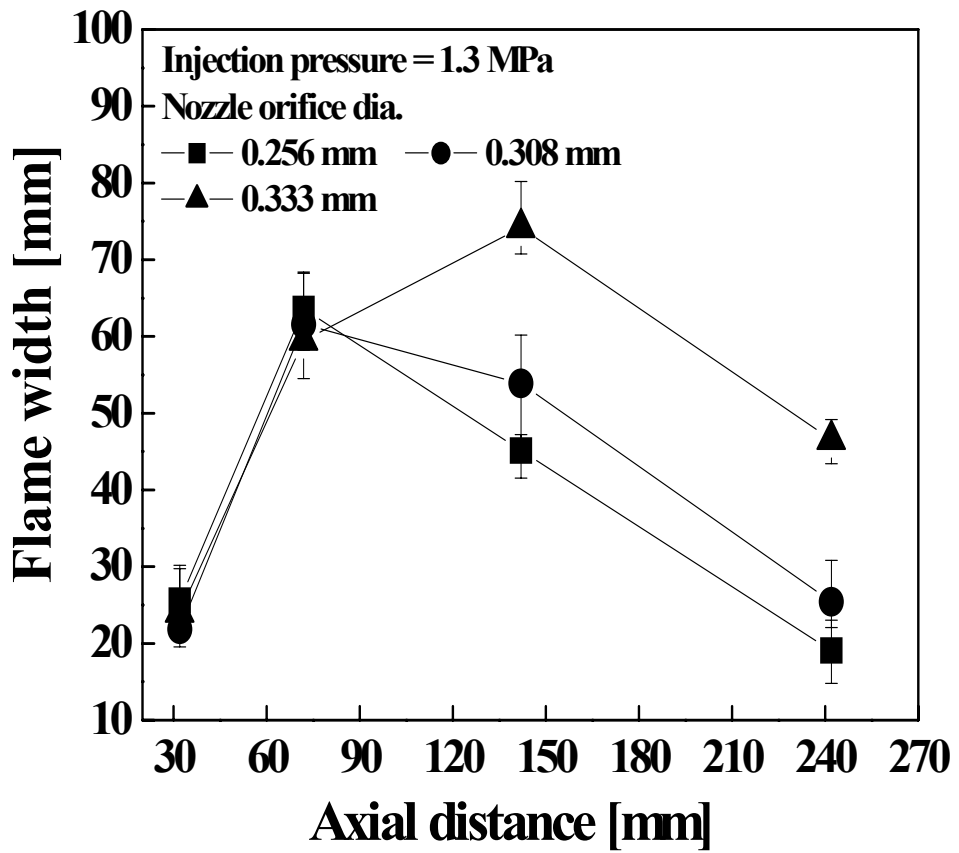


Fig. 13d. Effect of axial distance on flame width for three different nozzles at injection pressure of 1.3 MPa



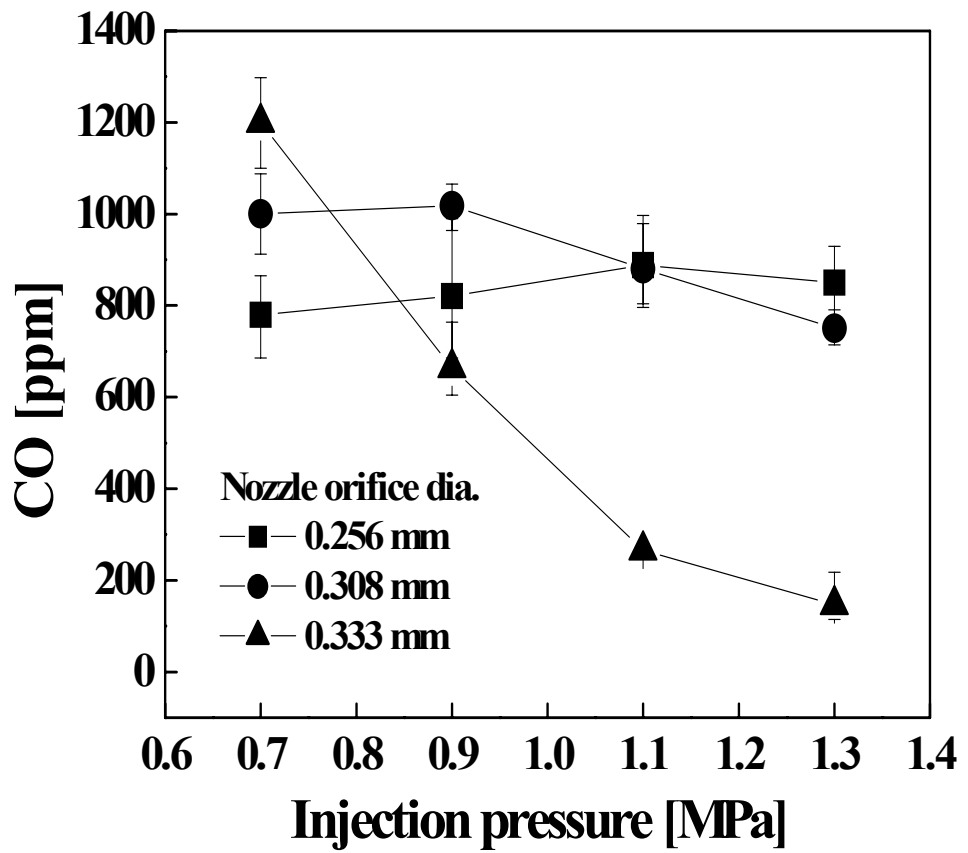


Fig. 14a. Effect of injection pressure on CO for three different nozzles

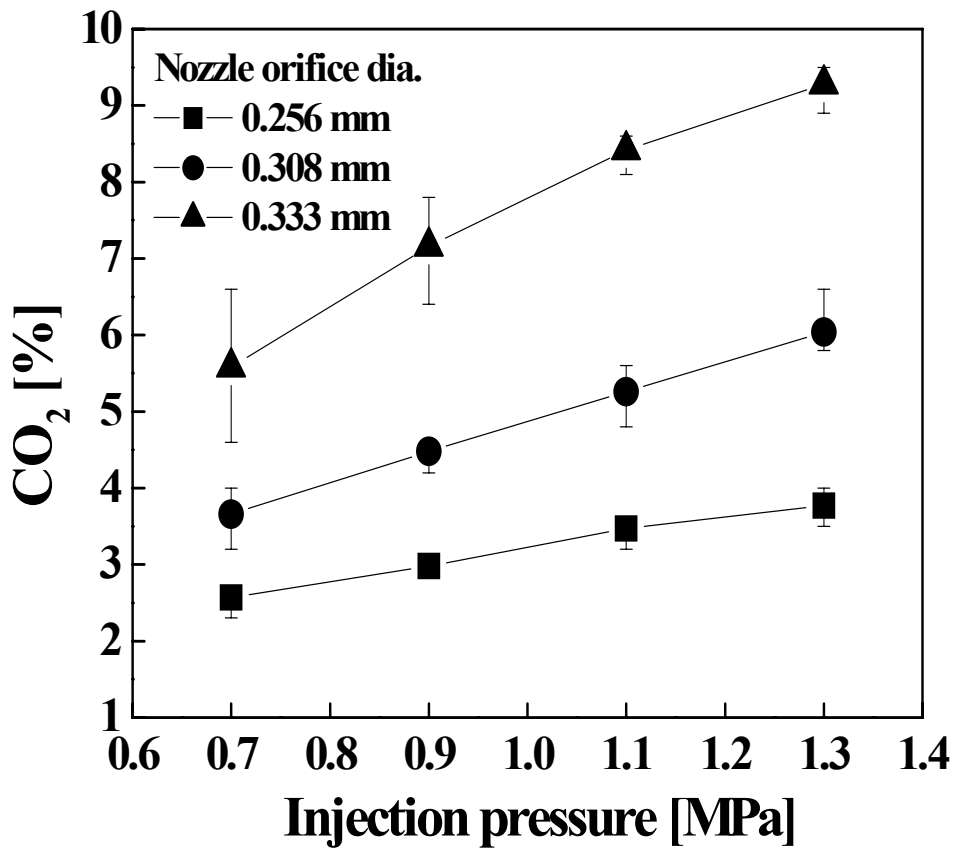


Fig. 14b. Effect of injection pressure on CO<sub>2</sub> for three different nozzles

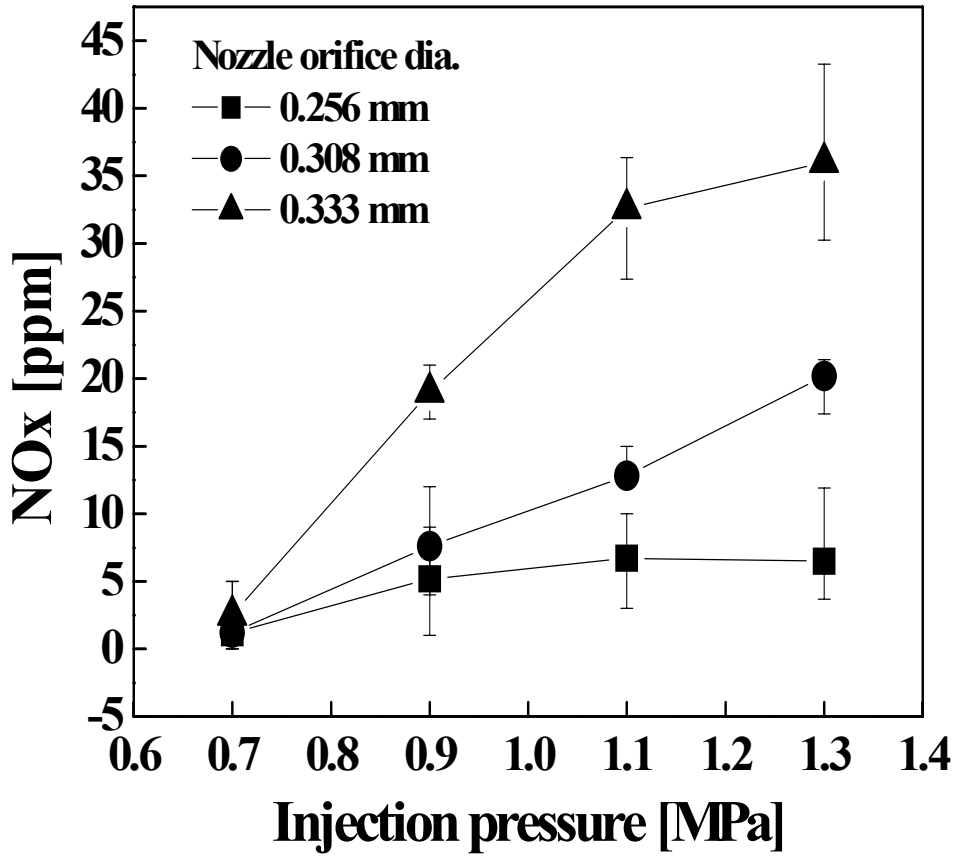


Fig. 14c. Effect of injection pressure on NOx for three different nozzles

Table 4. Local furnace temperature for both conventional and electrostatic nozzle at 0.7MPa

|            | 2.75m/s | Electro. | 5.94m/s | Electro. | 8.0m/s | Electro. | 9.5m/s | Electro. | 10.24m/s | Electro. |
|------------|---------|----------|---------|----------|--------|----------|--------|----------|----------|----------|
| <b>142</b> | 1175.3  | 823.65   | 1018.5  | 635.65   | 932    | 529.5    | 817.4  | 449.2    | 670      |          |
| <b>242</b> | 1019.1  | 824.25   | 759.7   | 587.5    | 701    | 484.75   | 651.3  | 444.5    | 561.3    |          |
| <b>392</b> | 685.4   | 770.7    | 567.7   | 522.45   | 550.8  | 452.6    | 520.8  | 427.1    | 481.8    |          |
| <b>542</b> | 523.3   | 696.4    | 503.6   | 501.4    | 493.2  | 441.2    | 417.7  | 420.85   | 448.3    |          |
| <b>692</b> | 475.1   | 630.35   | 483.1   | 521.25   | 469    | 463.2    | 457.3  | 437.8    | 434.1    |          |
| <b>842</b> | 441.3   | 507.85   | 453.1   | 492.25   | 449.8  | 446.9    | 430.4  | 424.2    | 411.1    |          |

Table 5. Local furnace temperature for both conventional and electrostatic nozzle at 0.9MPa

|            | 2.75m/s | Electro. | 5.94m/s | Electro. | 8.0m/s | Electro. | 9.5m/s | Electro. | 10.24m/s | Electro. |
|------------|---------|----------|---------|----------|--------|----------|--------|----------|----------|----------|
| <b>142</b> | 1188    | 873.6    | 1099.8  | 800.9    | 1016.1 | 689.65   | 915.6  | 624.3    | 747.7    | 549      |
| <b>242</b> | 1169.8  | 878.85   | 855     | 690.55   | 796.3  | 538.7    | 733.6  | 532.45   | 614.9    | 517.45   |
| <b>392</b> | 754.1   | 790.2    | 624.1   | 592.75   | 609.6  | 515.5    | 572.5  | 490.55   | 512.2    | 474.45   |
| <b>542</b> | 564.4   | 689.75   | 543.8   | 551.85   | 533    | 491      | 510.6  | 471.55   | 470.1    | 454.7    |
| <b>692</b> | 487     | 636.6    | 523.2   | 579.65   | 511.1  | 518.05   | 489.8  | 493.5    | 456.8    | 474.4    |
| <b>842</b> | 457.7   | 523.65   | 499.8   | 549.9    | 474.5  | 499.95   | 459    | 479.3    | 429.8    | 455.3    |

Table 6. Local furnace temperature for both conventional and electrostatic nozzle at 1.1MPa

|            | <b>2.75m/s</b> | <b>Electro.</b> | <b>5.94m/s</b> | <b>Electro.</b> | <b>8.0m/s</b> | <b>Electro.</b> | <b>9.5m/s</b> | <b>Electro.</b> | <b>10.24m/s</b> | <b>Electro.</b> |
|------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| <b>142</b> | 1218           | 857.85          | 1155.1         | 760.8           | 1062.7        | 733.2           | 973.7         | 661.35          | 868.7           | 591.65          |
| <b>242</b> | 1271.1         | 871.75          | 949.9          | 659.35          | 866.5         | 605.8           | 817           | 560.75          | 713.1           | 536.3           |
| <b>392</b> | 865.4          | 786.6           | 680.6          | 569.95          | 651.5         | 539             | 621.3         | 506.75          | 576.4           | 485.95          |
| <b>542</b> | 628            | 681.1           | 583.8          | 534.15          | 560.5         | 510.25          | 539.4         | 487.05          | 518.8           | 465.6           |
| <b>692</b> | 524.1          | 633.15          | 553.8          | 557.15          | 534           | 536.9           | 511.4         | 509.05          | 495.8           | 480.4           |
| <b>842</b> | 475.7          | 522.75          | 505.6          | 527.4           | 502.9         | 521.35          | 473.1         | 493             | 465.1           | 460.95          |

Table 7. Local furnace temperature for both conventional and electrostatic nozzle at 1.3MPa

|            | 2.75m/s | Electro. | 5.94m/s | Electro. | 8.0m/s | Electro. | 9.5m/s | Electro. | 10.24m/s | Electro. |
|------------|---------|----------|---------|----------|--------|----------|--------|----------|----------|----------|
| <b>142</b> | 1241.6  | 933.9    | 1172.6  | 812.4    | 1134.6 | 678.9    | 1048.9 | 638.9    | 932.4    | 612.7    |
| <b>242</b> | 1309.4  | 910.1    | 1009.8  | 721.6    | 940.4  | 622.7    | 894.1  | 588.8    | 760.9    | 562.2    |
| <b>392</b> | 940.5   | 823.8    | 721.7   | 659.5    | 702.7  | 567.7    | 669.3  | 535.1    | 609.4    | 521.2    |
| <b>542</b> | 675.8   | 741.9    | 606.4   | 597.6    | 603    | 530.6    | 570.4  | 501.4    | 543.5    | 490.5    |
| <b>692</b> | 550.8   | 705.5    | 573.8   | 574.3    | 569.2  | 532.5    | 546.2  | 507.1    | 519.3    | 490      |
| <b>842</b> | 491.5   | 592.7    | 525     | 555.9    | 519.2  | 525.8    | 503.9  | 502.3    | 490      | 481.2    |

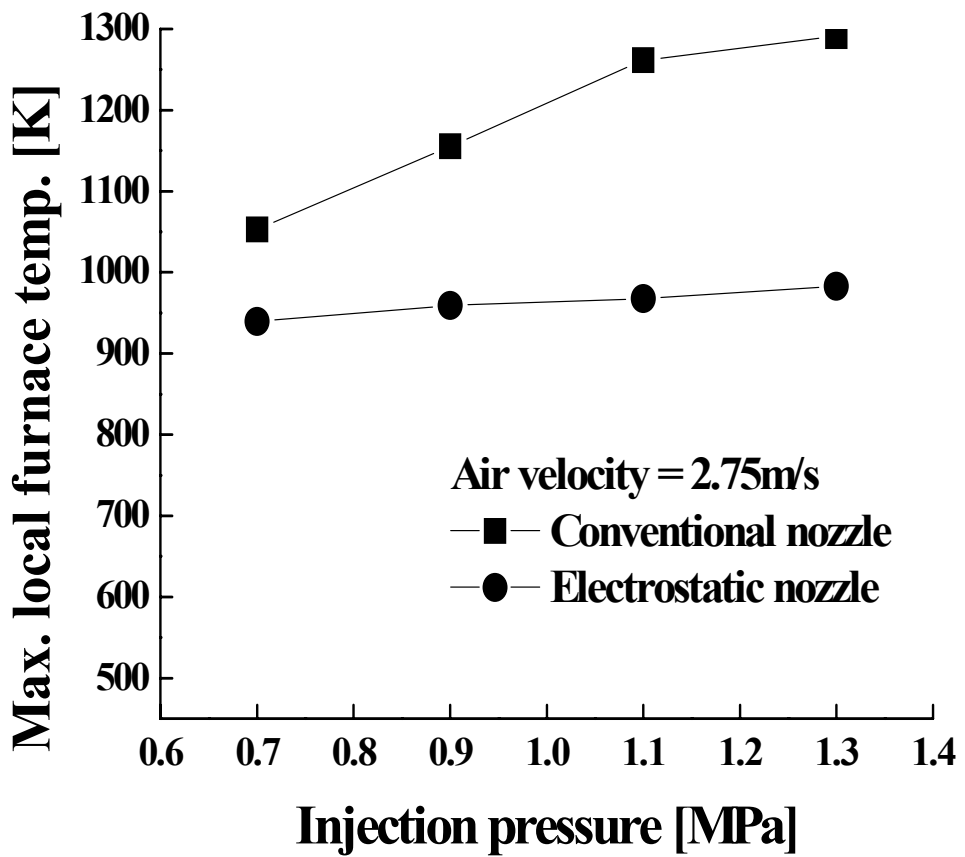


Fig. 15a. Comparison of conventional and electrostatic nozzles on maximum local furnace temperature at air velocity of 2.75m/s



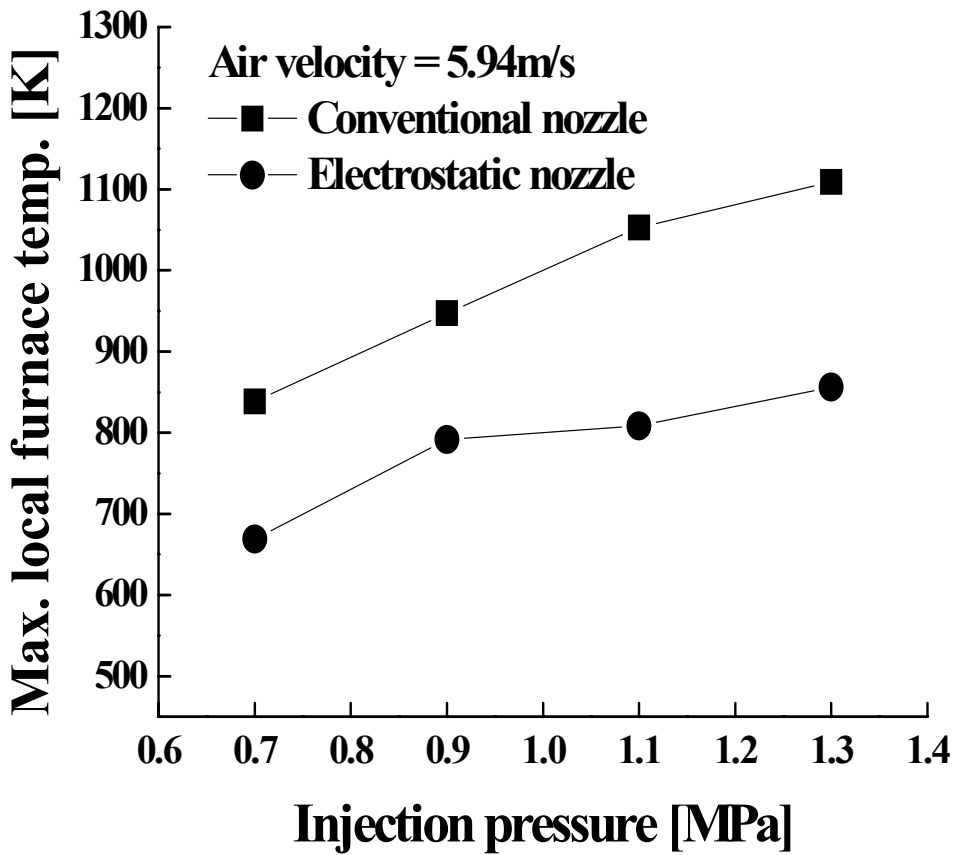


Fig. 15b. Comparison of conventional and electrostatic nozzles on maximum local furnace temperature at air velocity of 5.94m/s

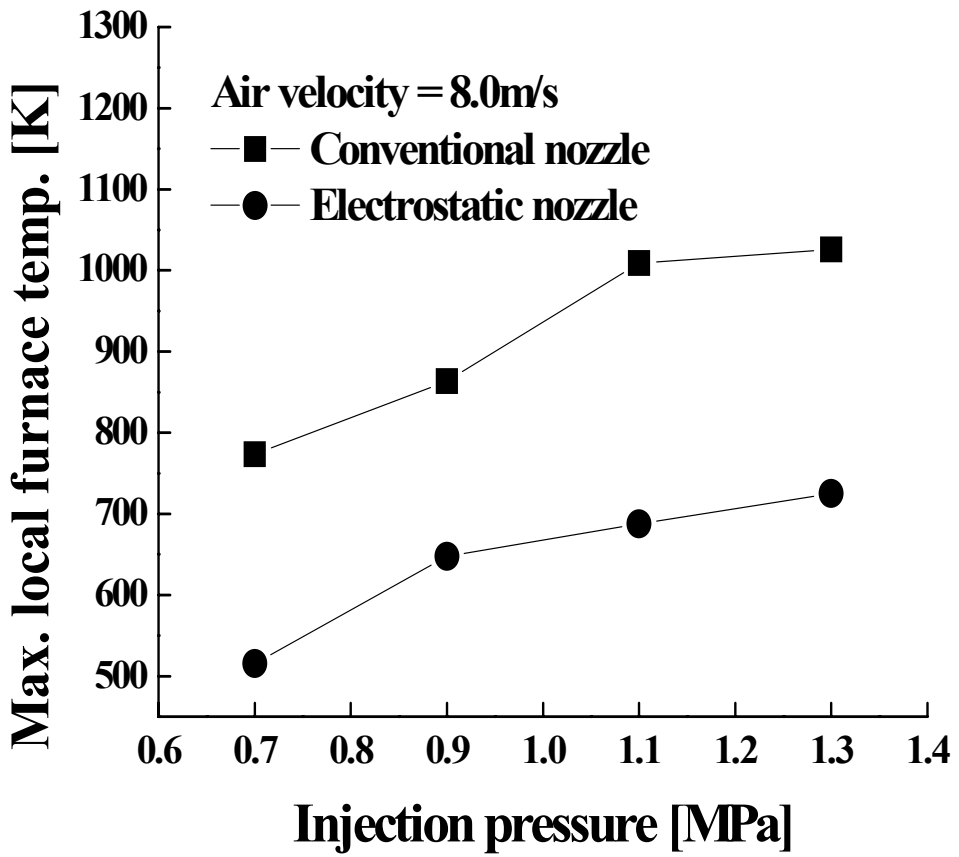


Fig. 15c. Comparison of conventional and electrostatic nozzles on maximum local furnace temperature at air velocity of 8.0m/s

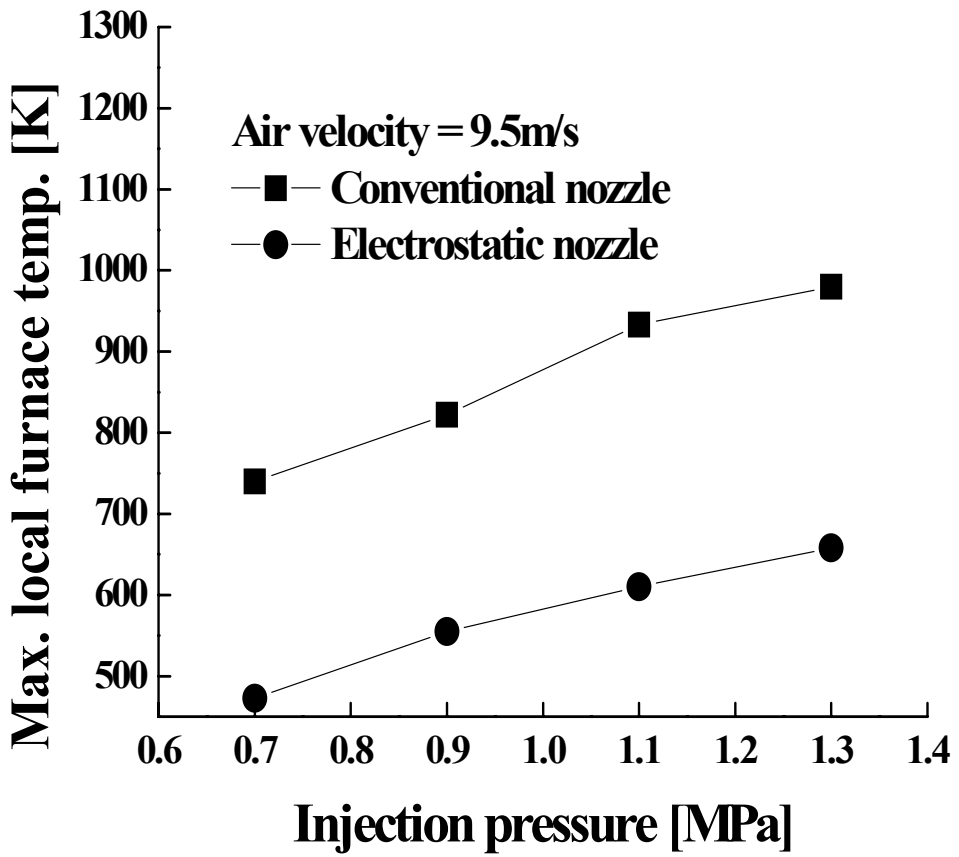


Fig. 15d. Comparison of conventional and electrostatic nozzles on maximum local furnace temperature at air velocity of 9.5 m/s

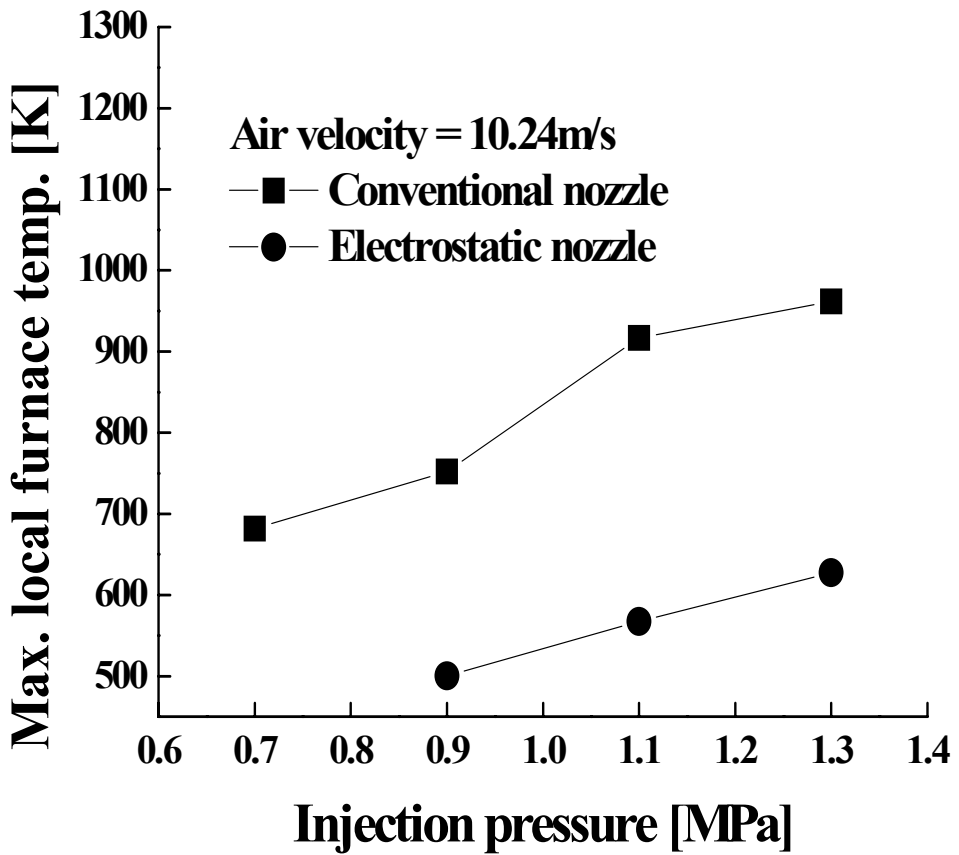


Fig. 15e. Comparison of conventional and electrostatic nozzles on maximum local furnace temperature at air velocity of 10.24m/s

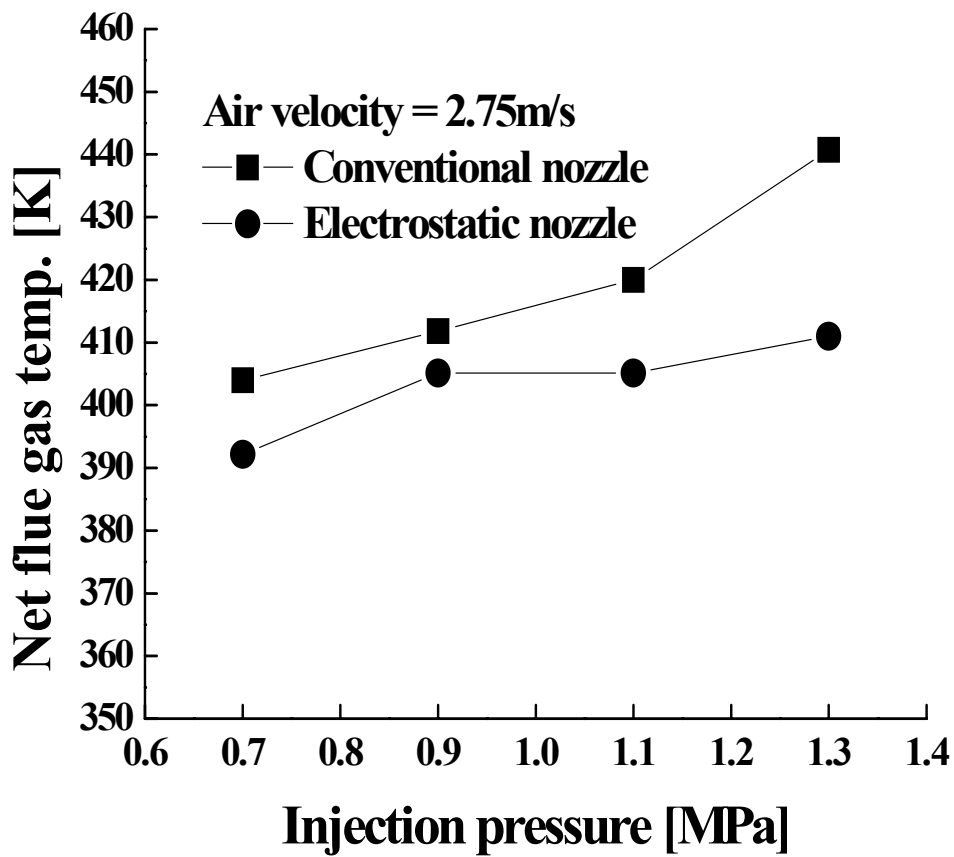


Fig. 16a. Comparison of conventional and electrostatic nozzles on net flue gas temperature at air velocity of 2.75m/s

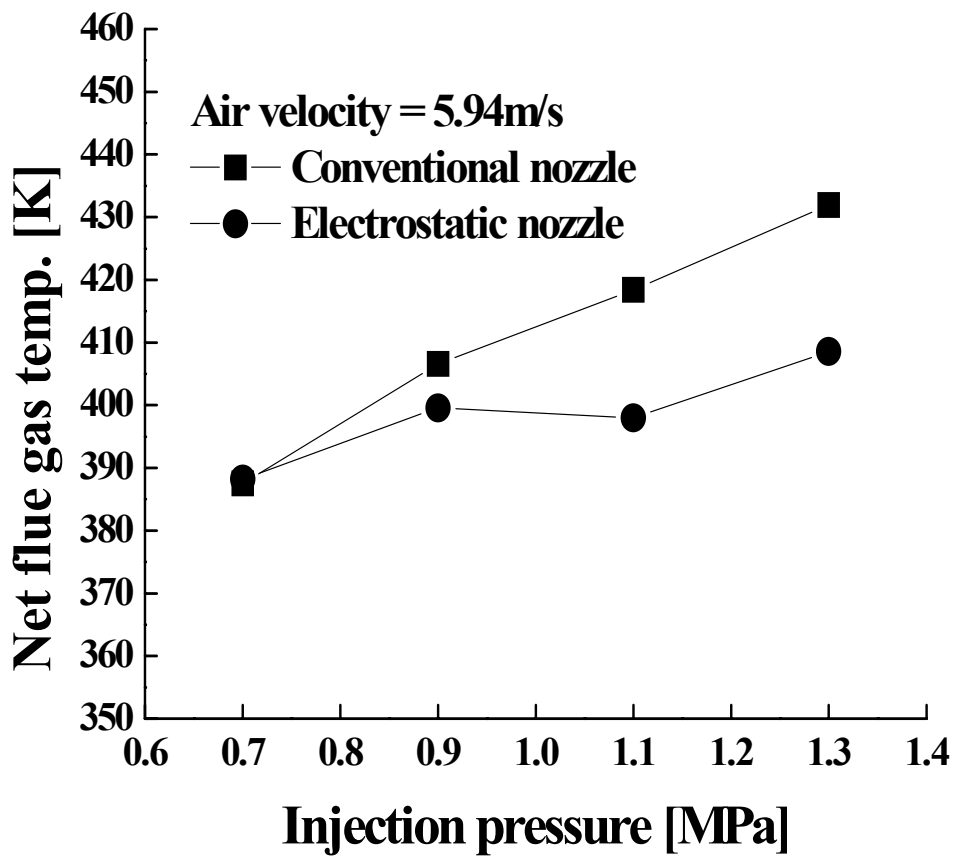


Fig. 16b. Comparison of conventional and electrostatic nozzles on net flue gas temperature at air velocity of 5.94m/s

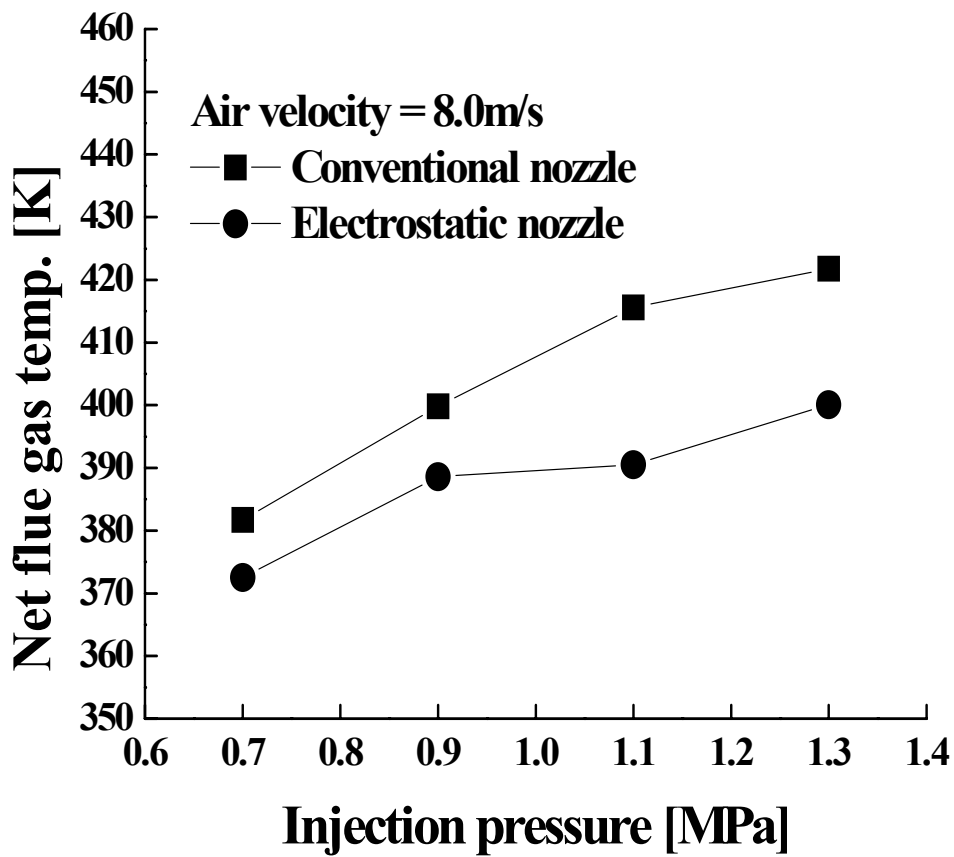


Fig. 16c. Comparison of conventional and electrostatic nozzles on net flue gas temperature at air velocity of 8.0m/s

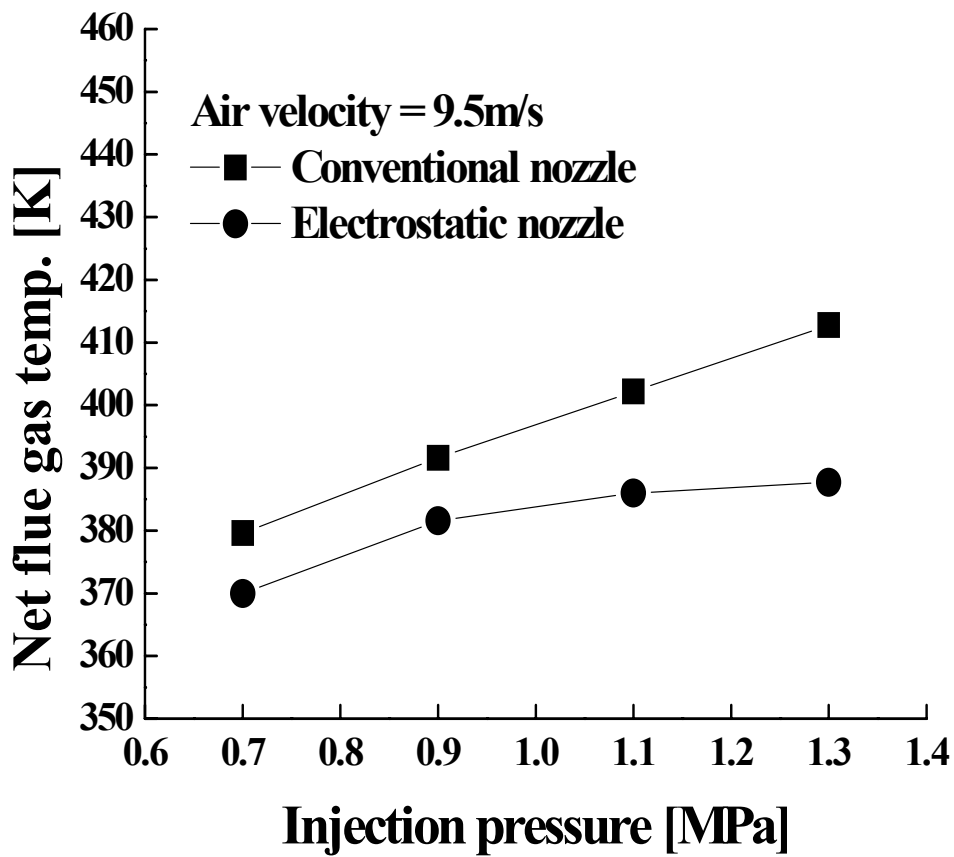


Fig. 16d. Comparison of conventional and electrostatic nozzles on net flue gas temperature at air velocity of 9.5m/s



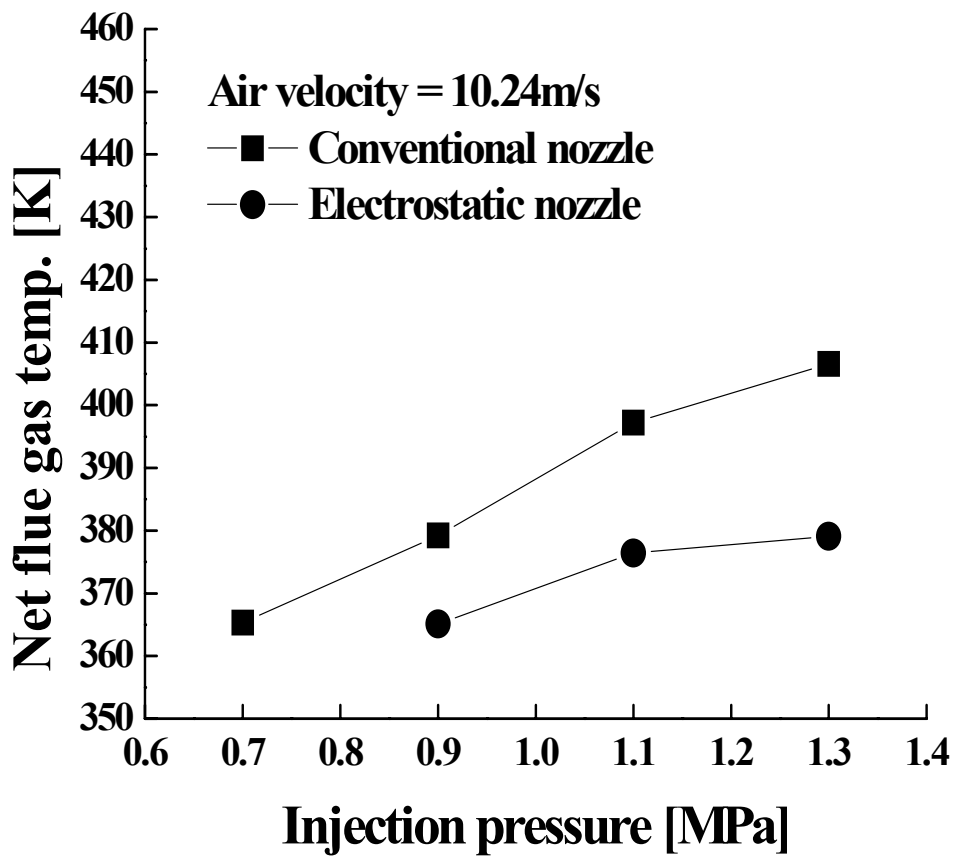


Fig. 16e. Comparison of conventional and electrostatic nozzles on net flue gas temperature at air velocity of 10.24m/s

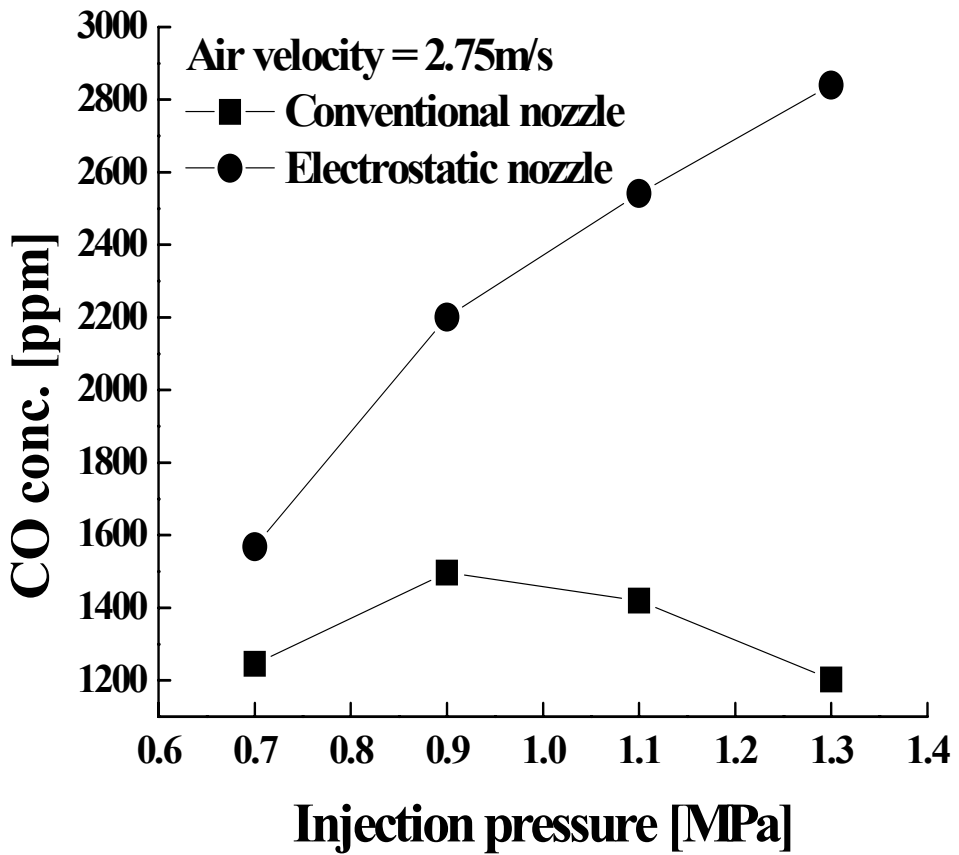


Fig. 17a. Comparison of conventional and electrostatic nozzles on CO concentration at air velocity of 2.75m/s

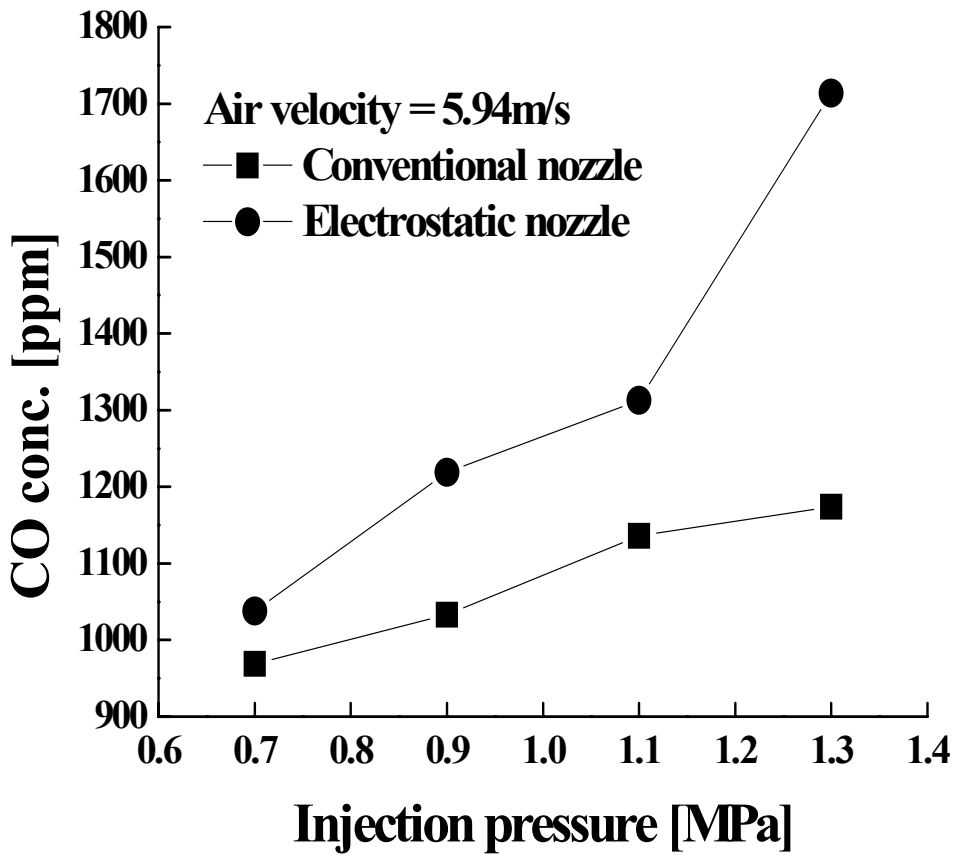


Fig. 17b. Comparison of conventional and electrostatic nozzles on CO concentration at air velocity of 5.94m/s.

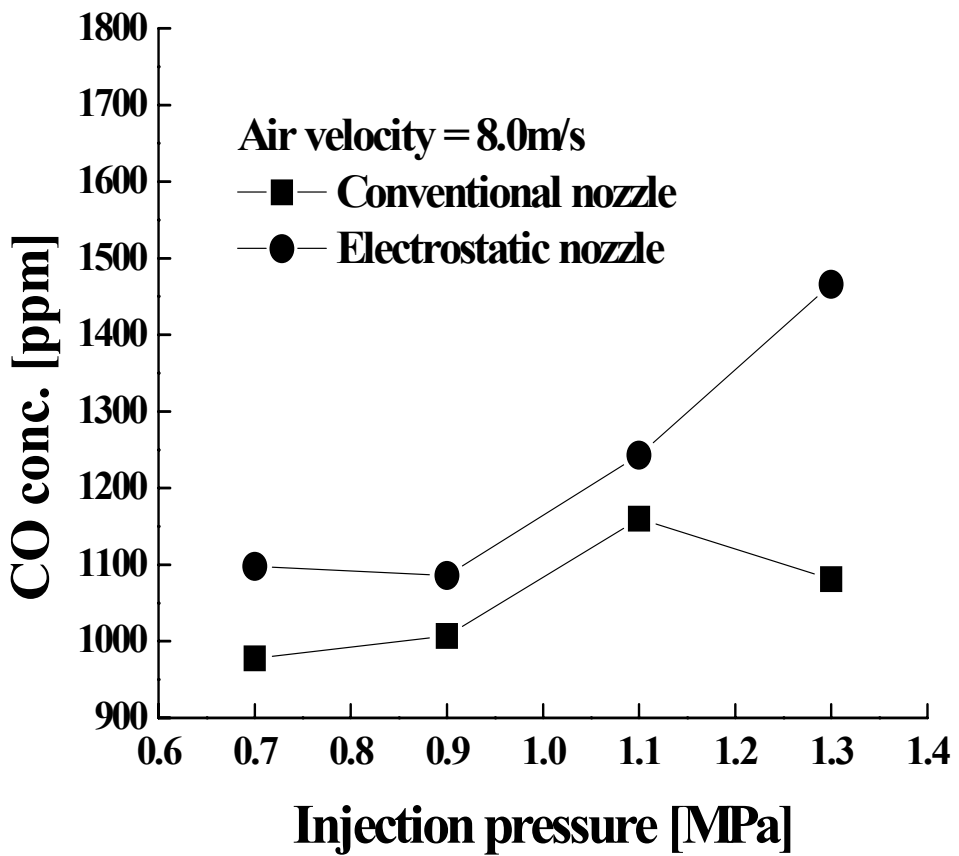


Fig. 17c. Comparison of conventional and electrostatic nozzles on CO concentration at air velocity of 8.0m/s

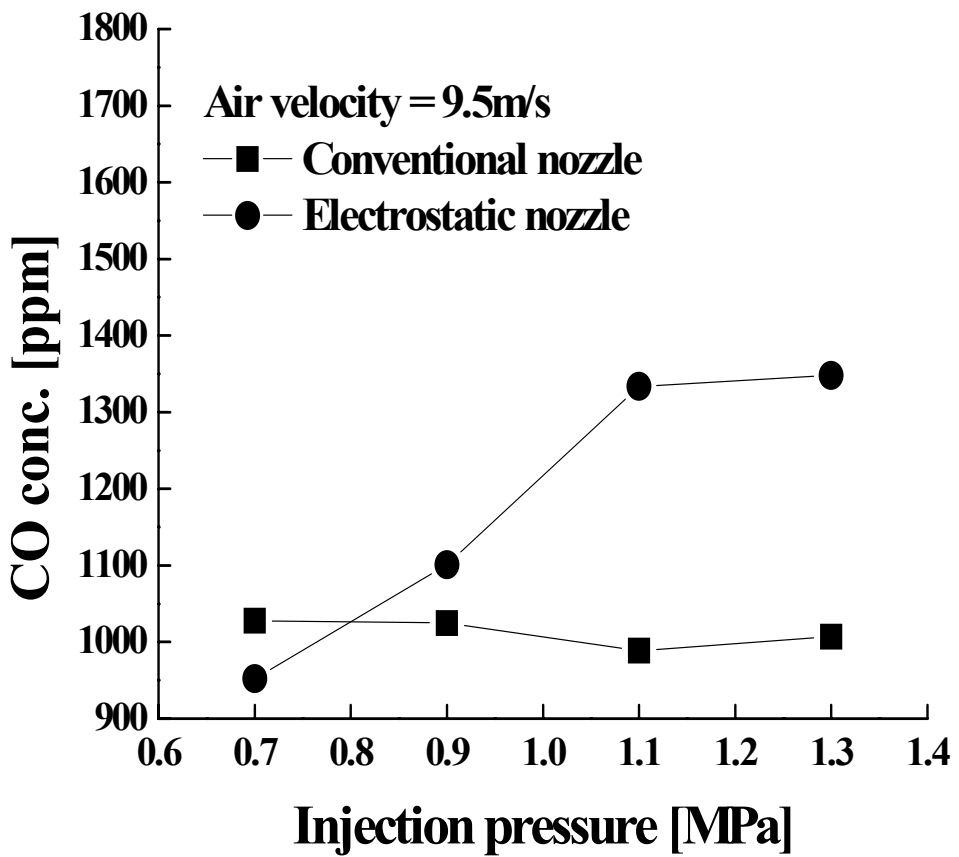


Fig. 17d. Comparison of conventional and electrostatic nozzles on CO concentration at air velocity of 9.5m/s

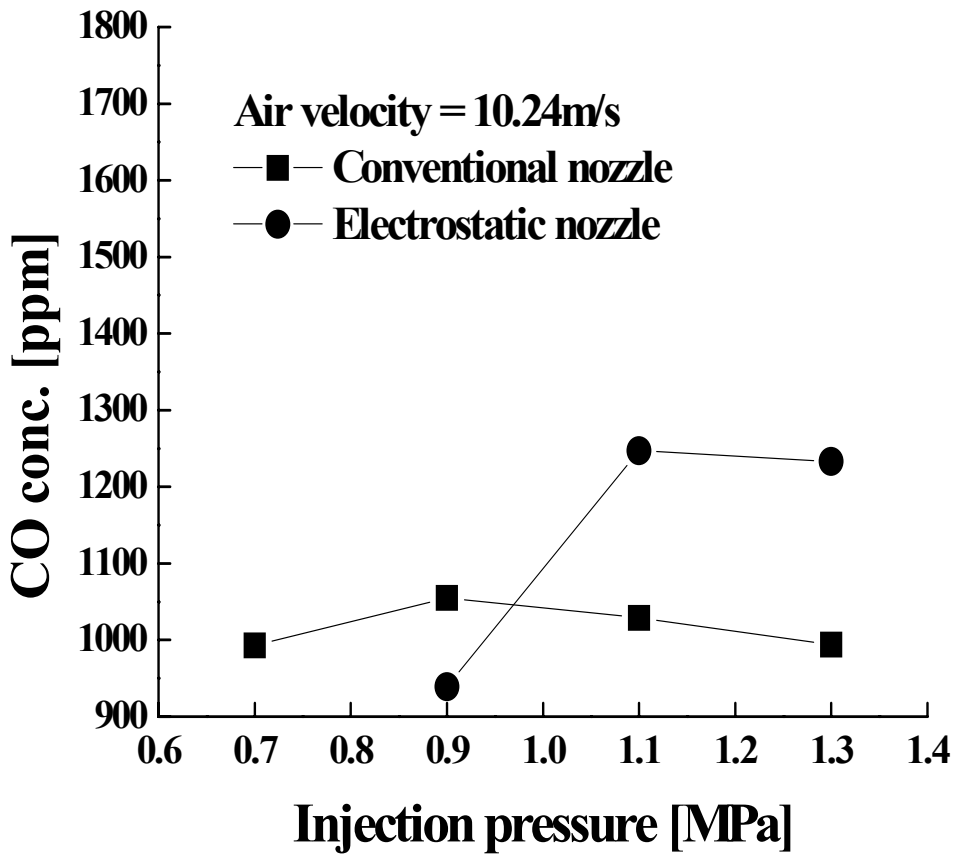


Fig. 17e. Comparison of conventional and electrostatic nozzles on CO concentration at air velocity of 10.24m/s

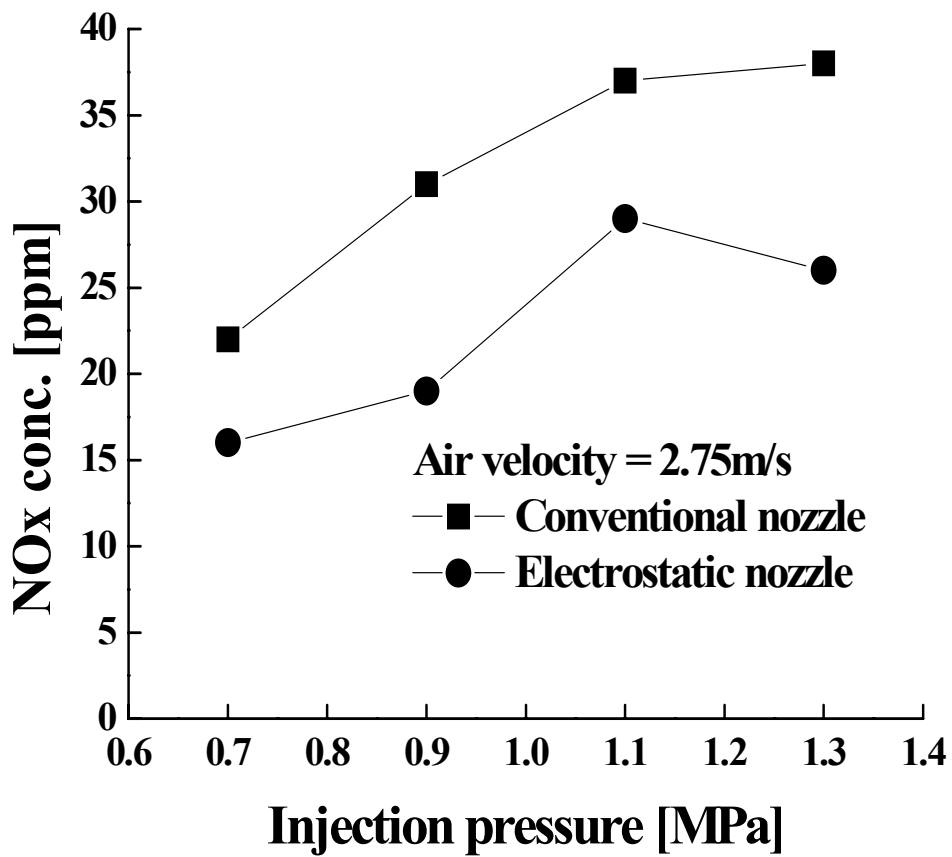


Fig. 18a. Comparison of conventional and electrostatic nozzles on NOx concentration at air velocity of 2.75m/s

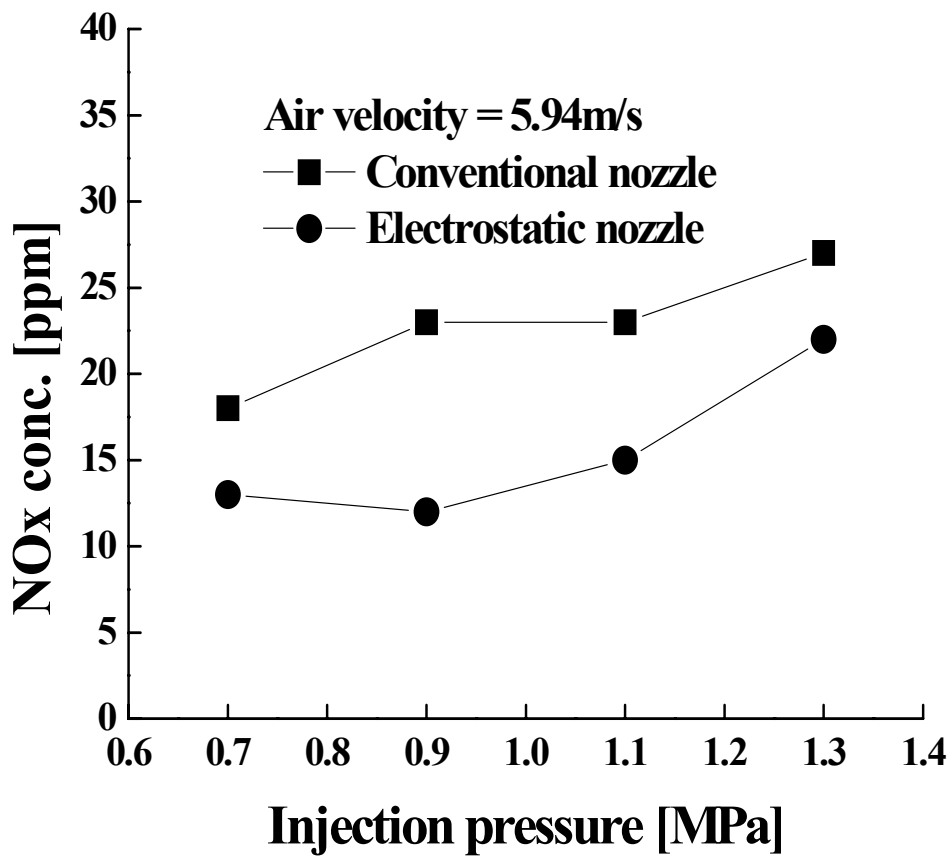


Fig. 18b. Comparison of conventional and electrostatic nozzles on NOx concentration at air velocity of 5.94 m/s



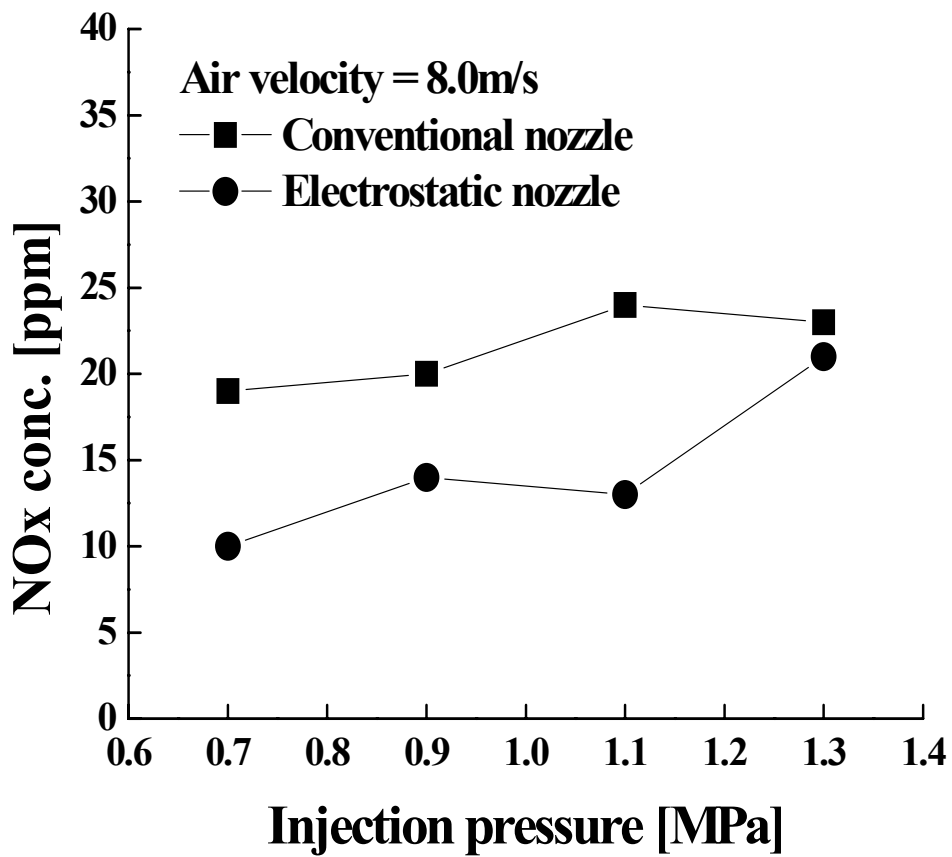


Fig. 18c. Comparison of conventional and electrostatic nozzles on NOx concentration at air velocity of 8.0m/s

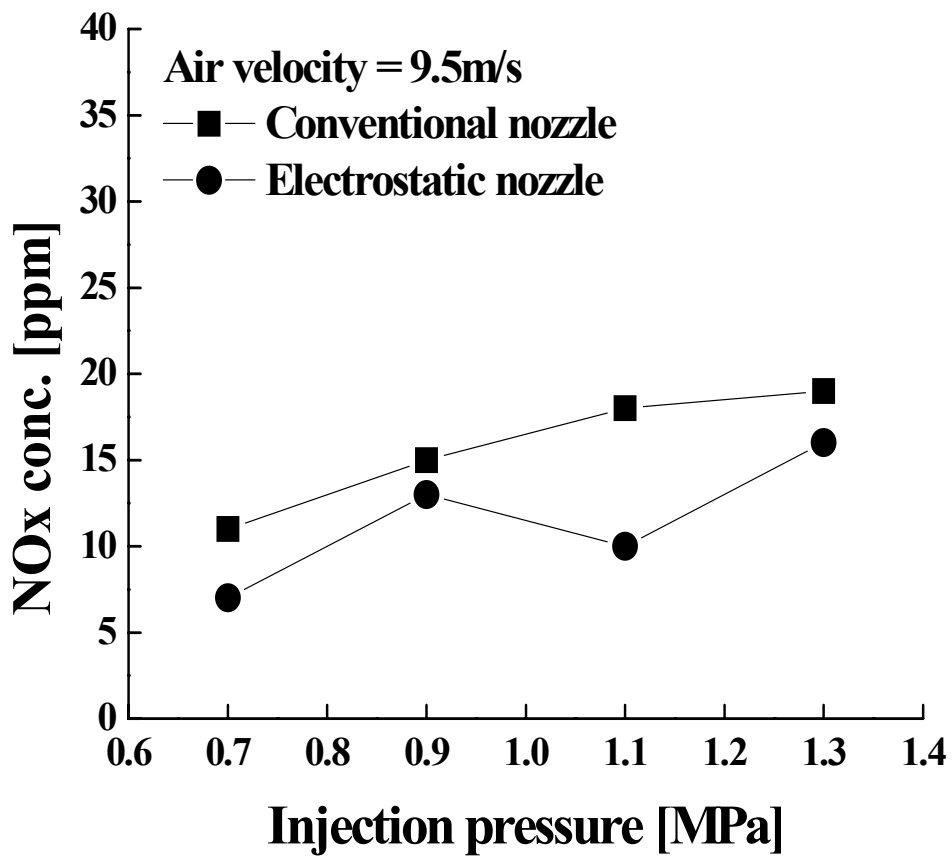


Fig. 18d. Comparison of conventional and electrostatic nozzles on NOx concentration at air velocity of 9.5m/s

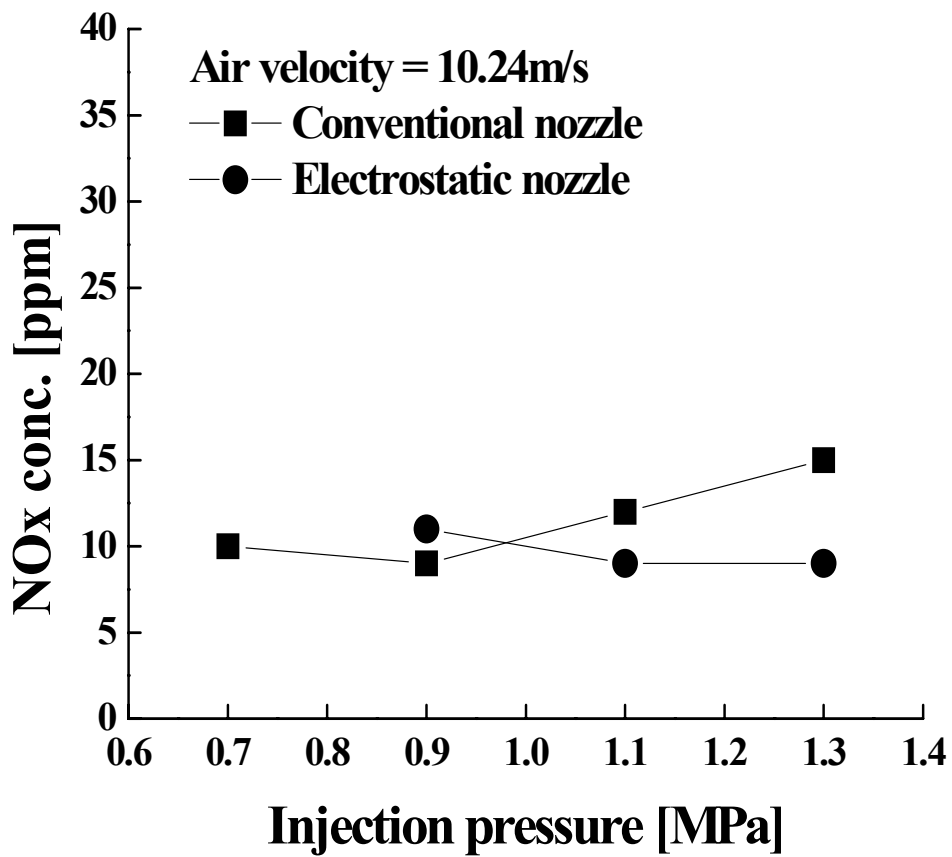


Fig. 18e. Comparison of conventional and electrostatic nozzles on NOx concentration at air velocity of 10.24m/s

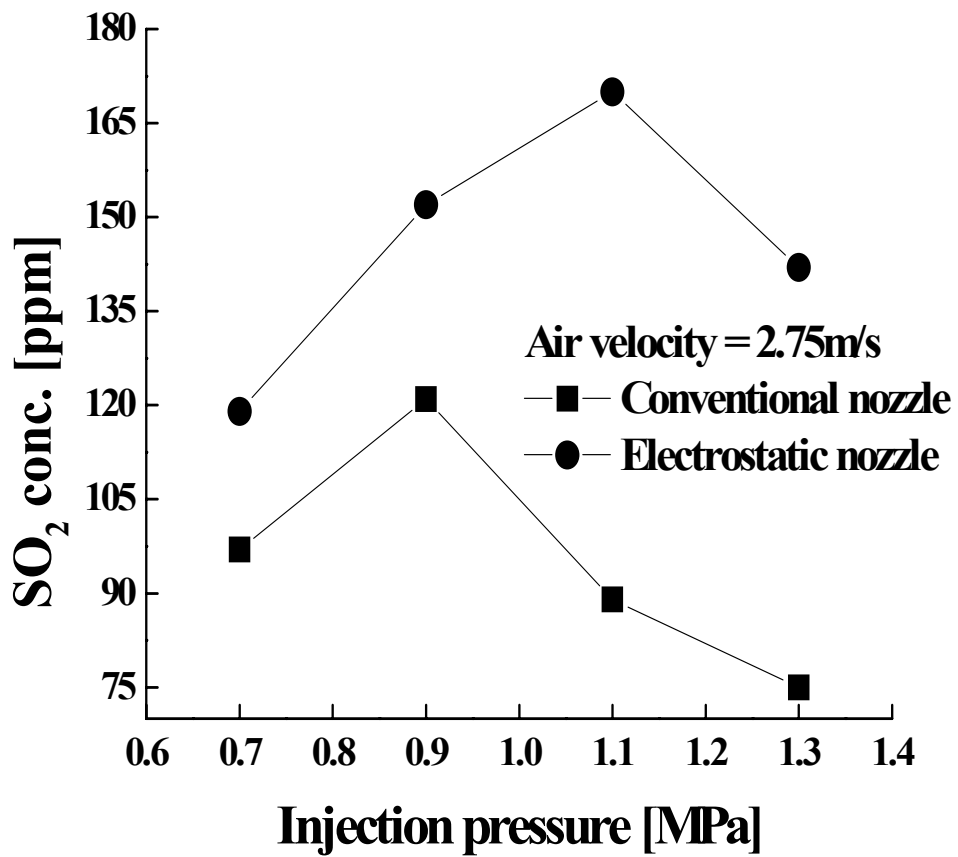


Fig. 19a. Comparison of conventional and electrostatic nozzles on SO<sub>2</sub> concentration at air velocity of 2.75m/s

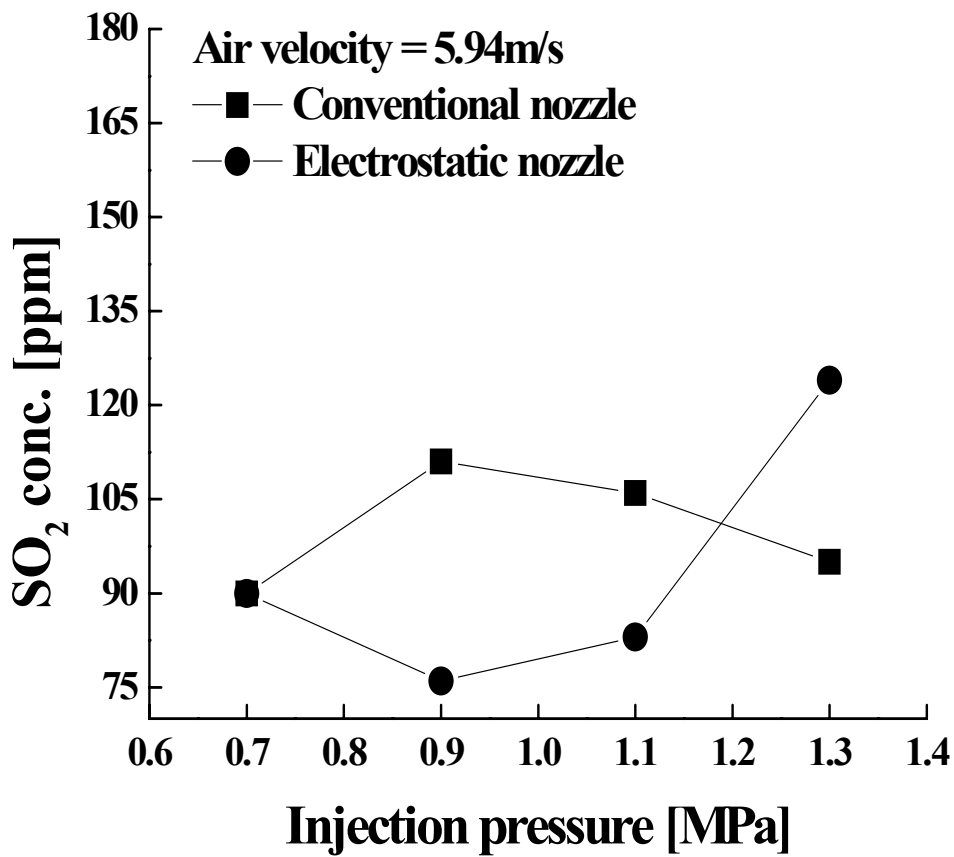


Fig. 19b. Comparison of conventional and electrostatic nozzles on SO<sub>2</sub> concentration at air velocity of 5.94m/s

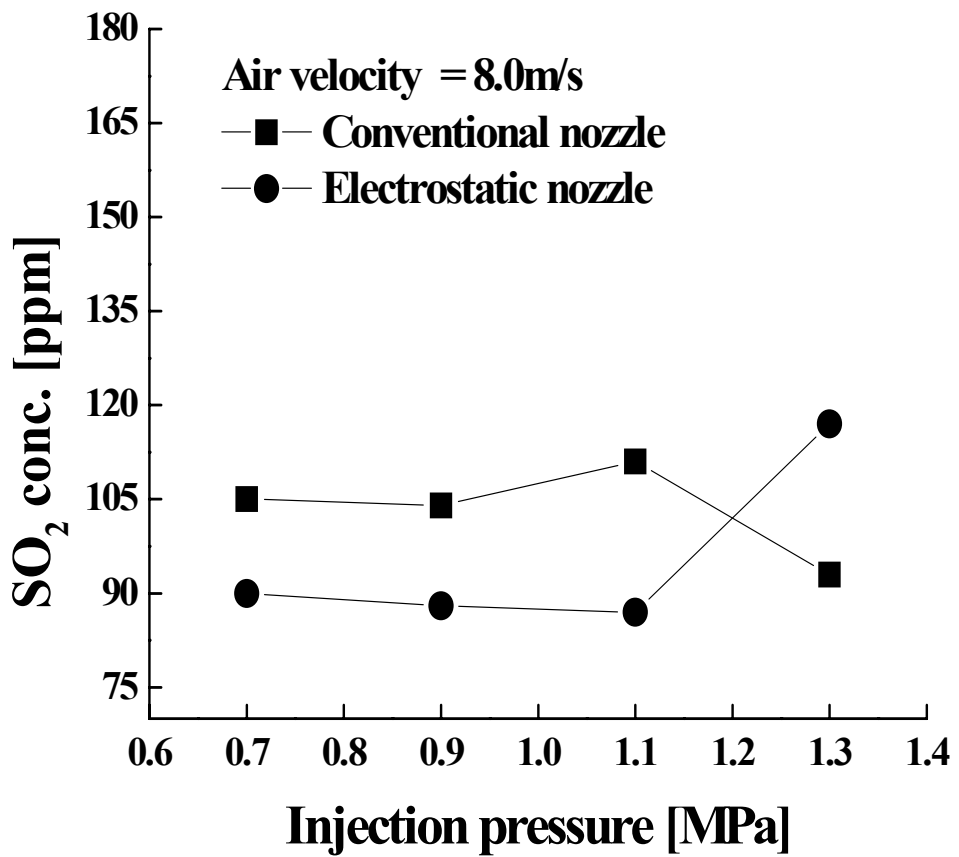


Fig. 19c. Comparison of conventional and electrostatic nozzles on SO<sub>2</sub> concentration at air velocity of 8.0m/s

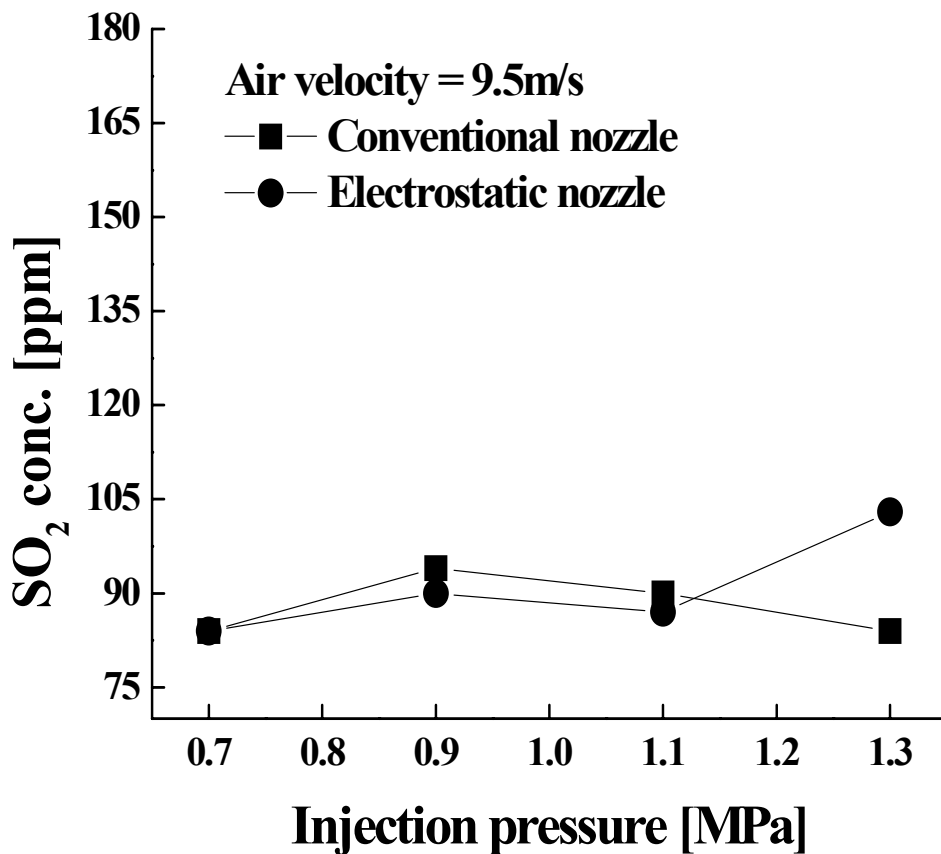


Fig. 19d. Comparison of conventional and electrostatic nozzles on  $\text{SO}_2$  concentration at air velocity of 9.5m/s

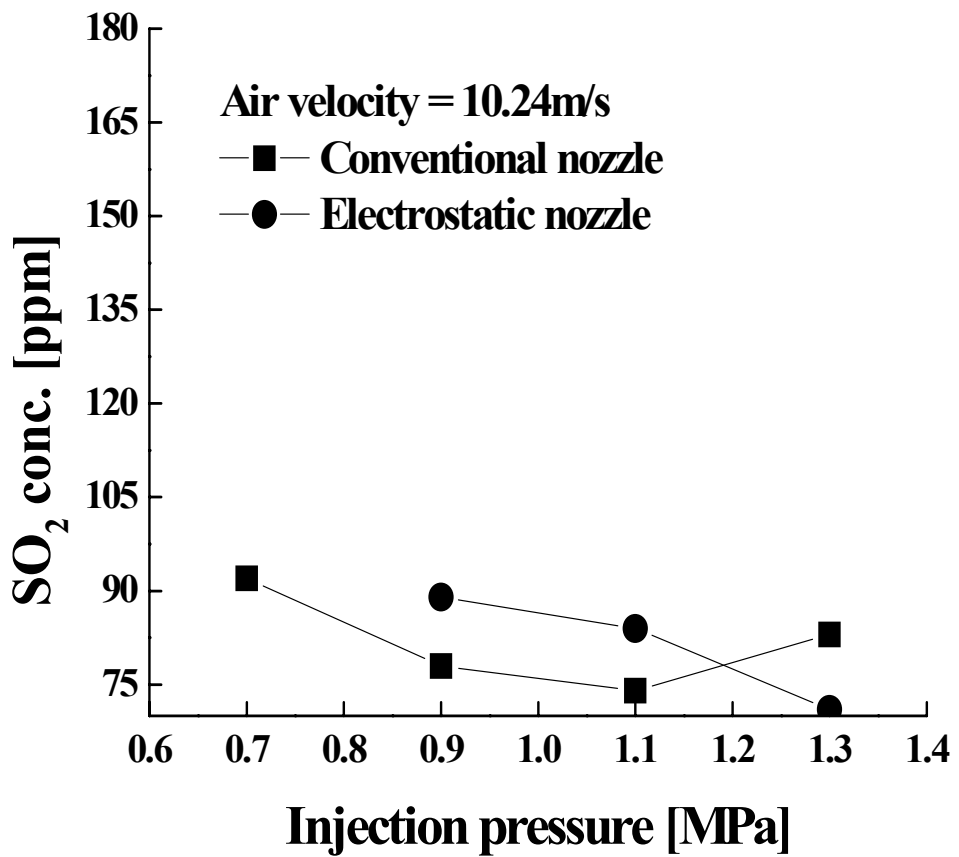


Fig. 19e. Comparison of conventional and electrostatic nozzles on SO<sub>2</sub> concentration at air velocity of 10.24m/s



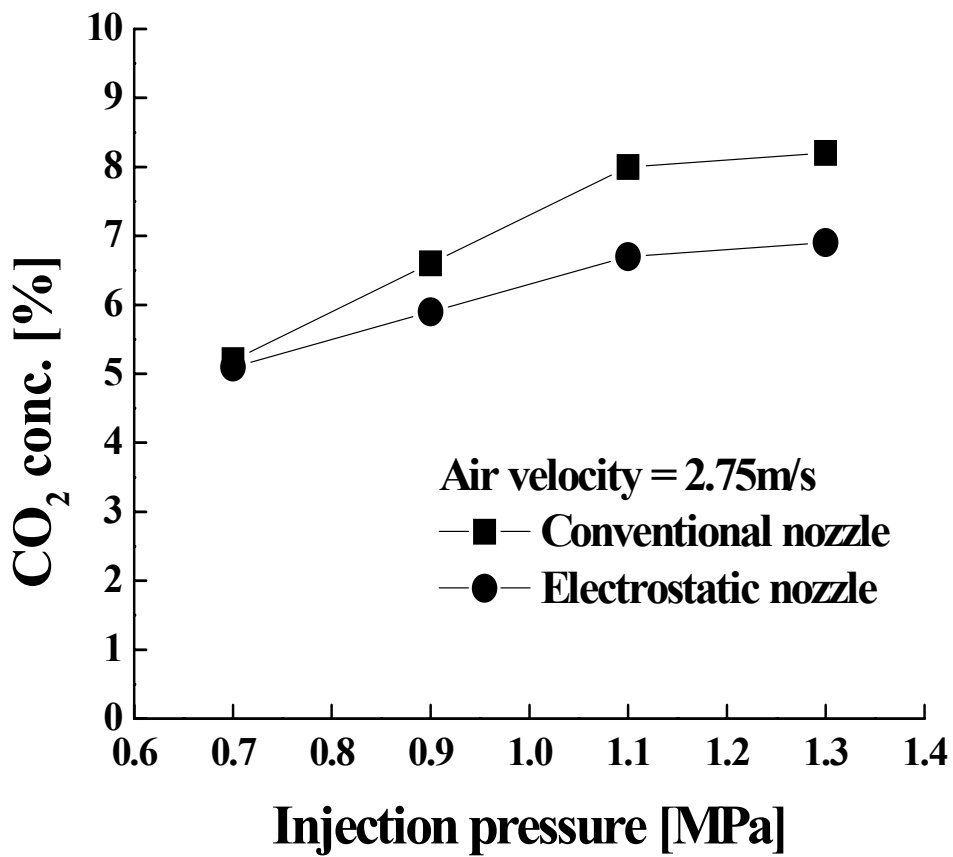


Fig. 20a. Comparison of conventional and electrostatic nozzles on CO<sub>2</sub> concentration at air velocity of 2.75m/s

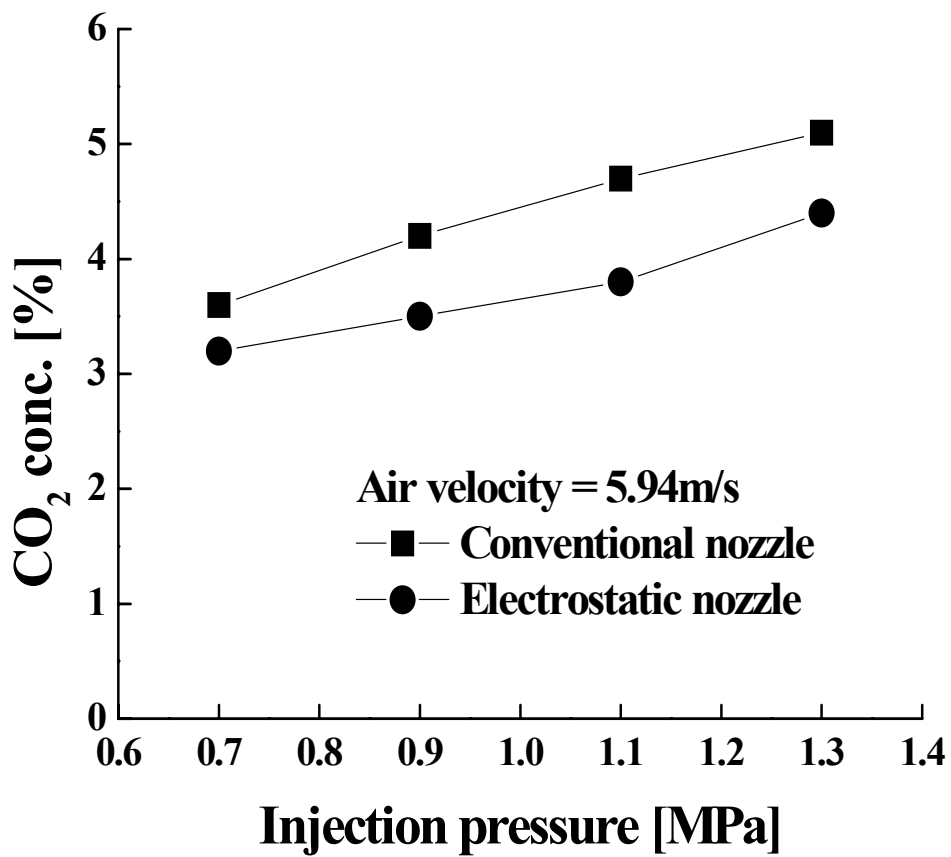


Fig. 20b. Comparison of conventional and electrostatic nozzles on CO<sub>2</sub> concentration at air velocity of 5.94m/s

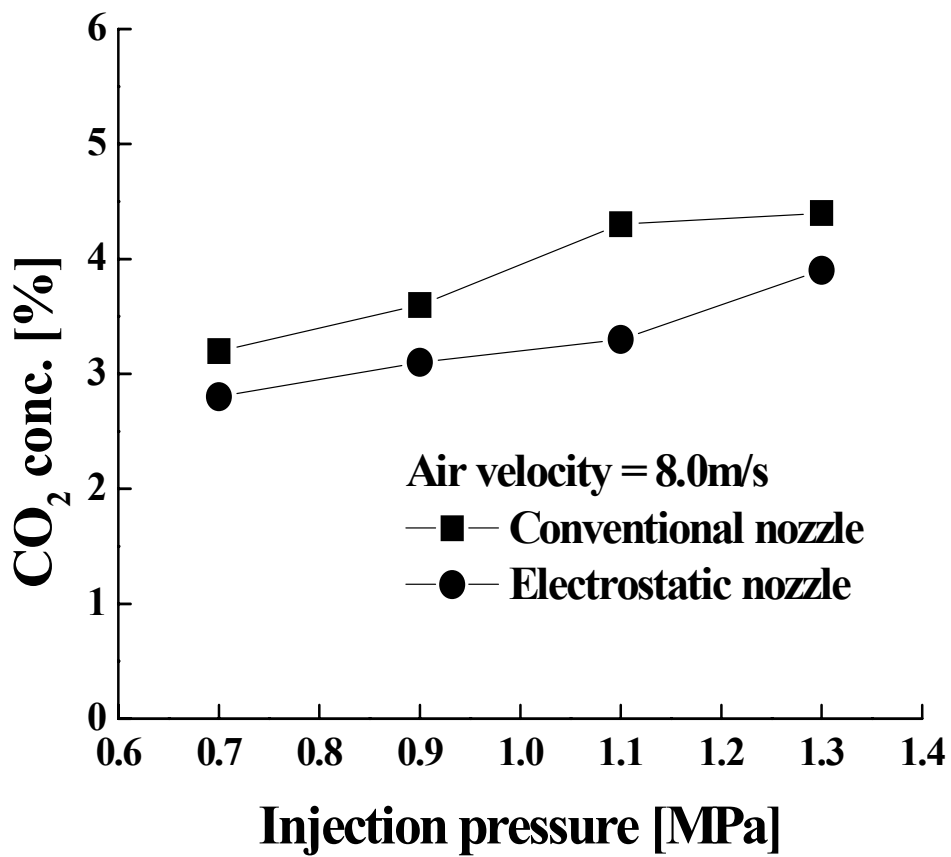


Fig. 20c. Comparison of conventional and electrostatic nozzles on CO<sub>2</sub> concentration at air velocity of 8.0m/s

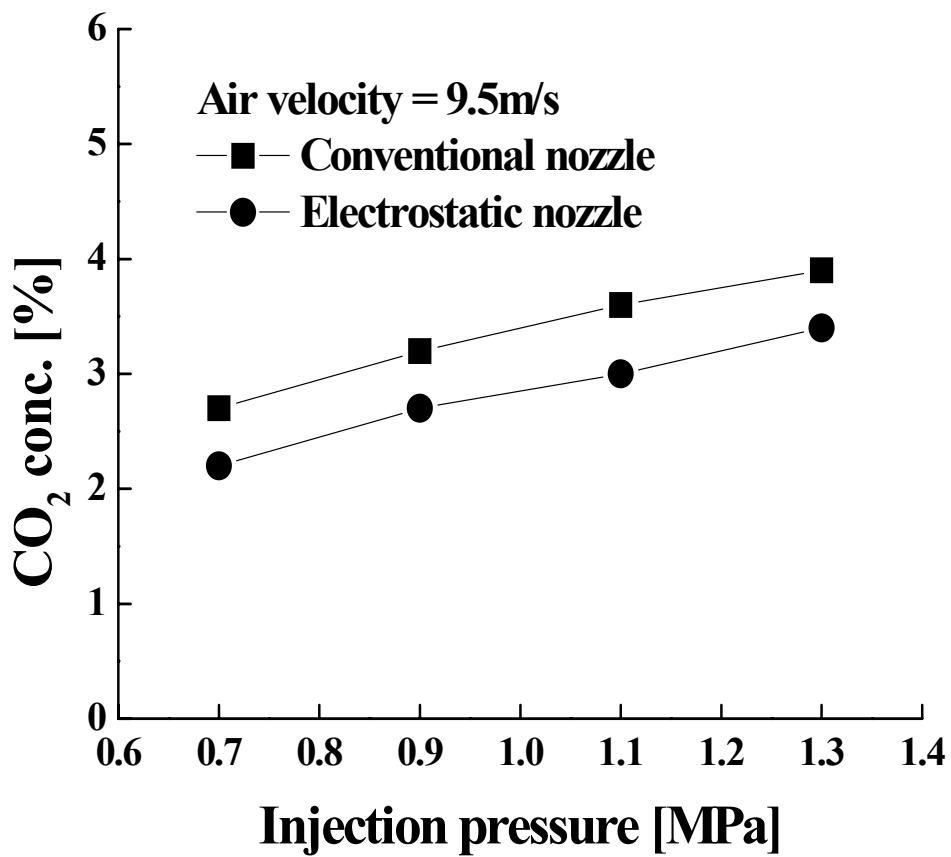


Fig. 20d. Comparison of conventional and electrostatic nozzles on CO<sub>2</sub> concentration at air velocity of 9.5m/s

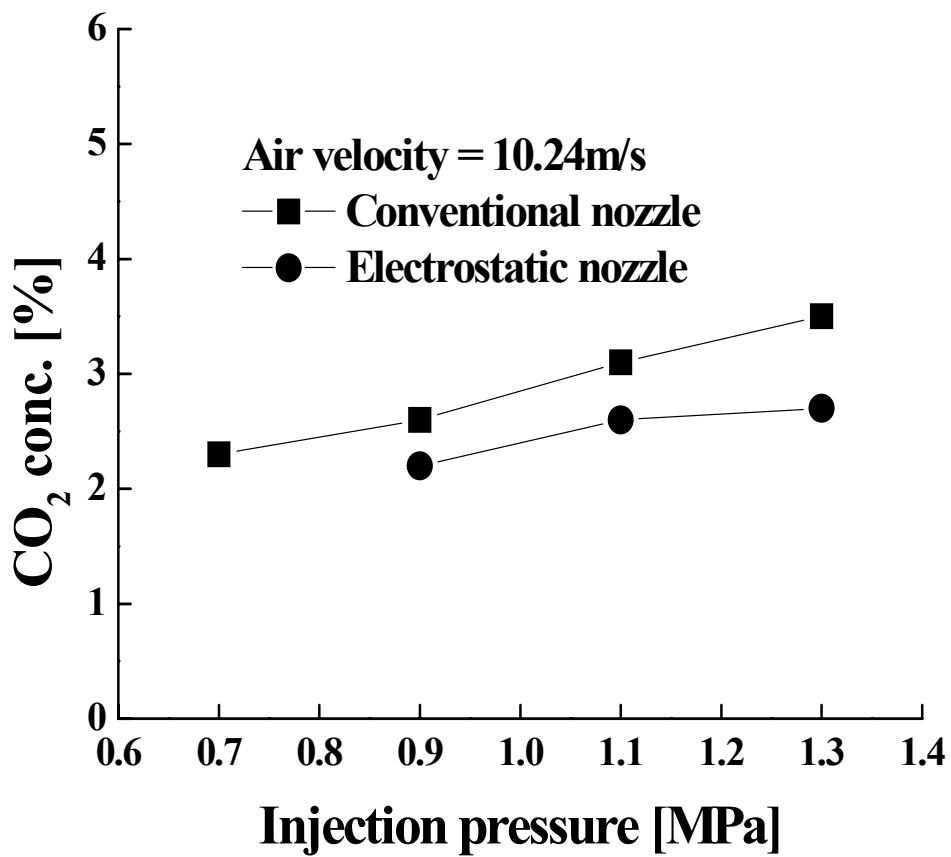


Fig. 20e. Comparison of conventional and electrostatic nozzles on CO<sub>2</sub> concentration at air velocity of 10.24m/s

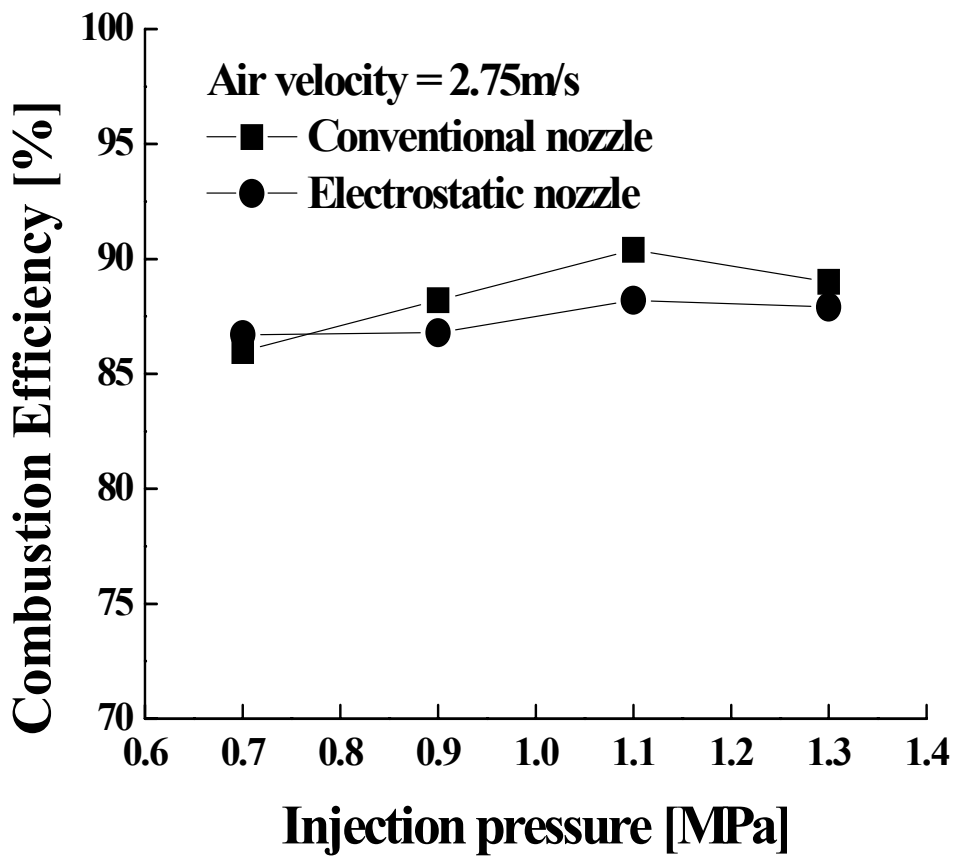


Fig. 21a. Comparison of conventional and electrostatic nozzles on combustion efficiency at air velocity of 2.75m/s

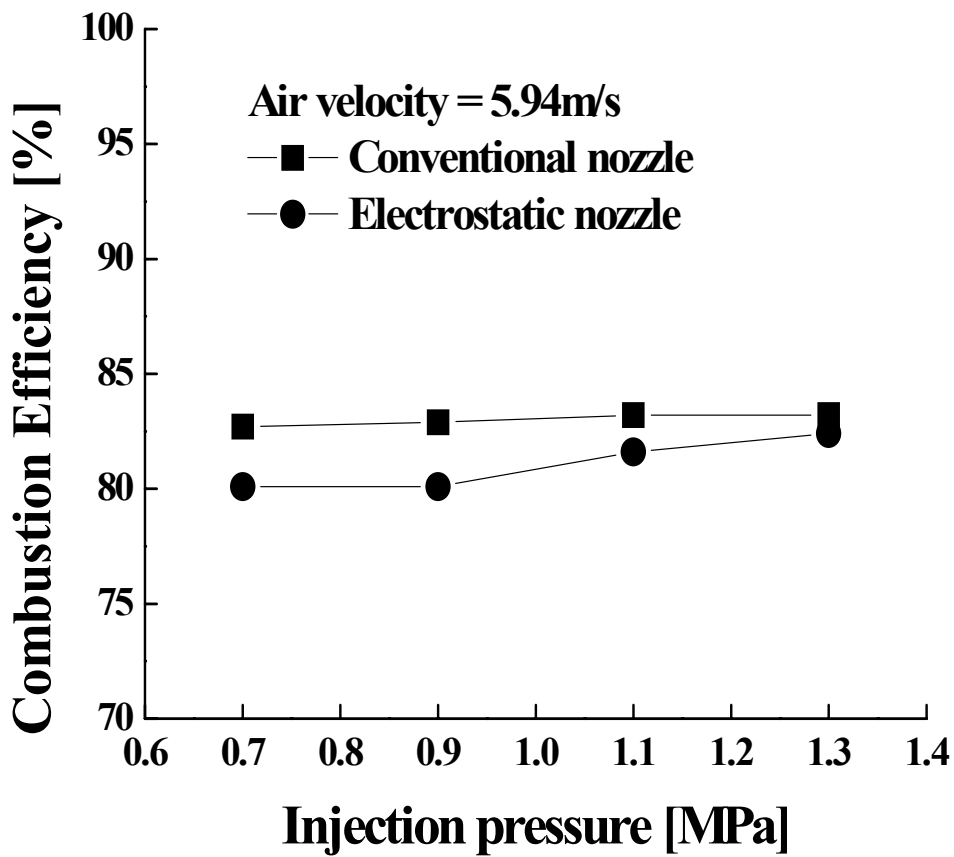


Fig. 21b. Comparison of conventional and electrostatic nozzles on combustion efficiency at air velocity of 5.94m/s

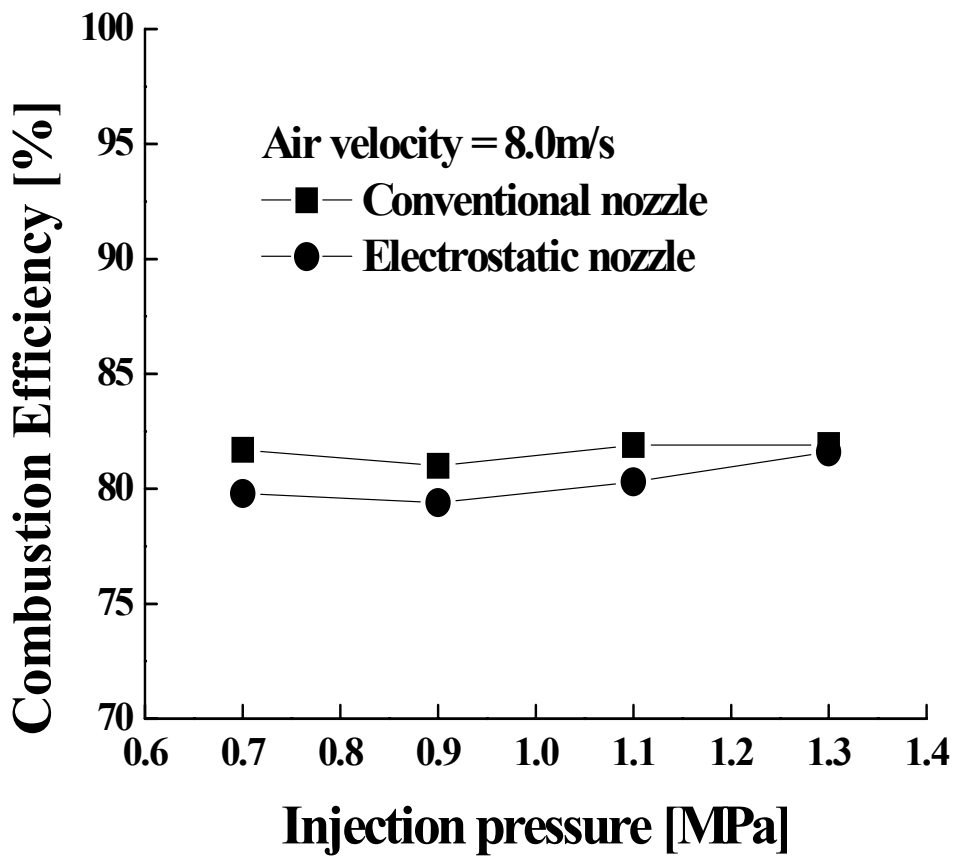


Fig. 21c. Comparison of conventional and electrostatic nozzles on combustion efficiency at air velocity of 8.0m/s



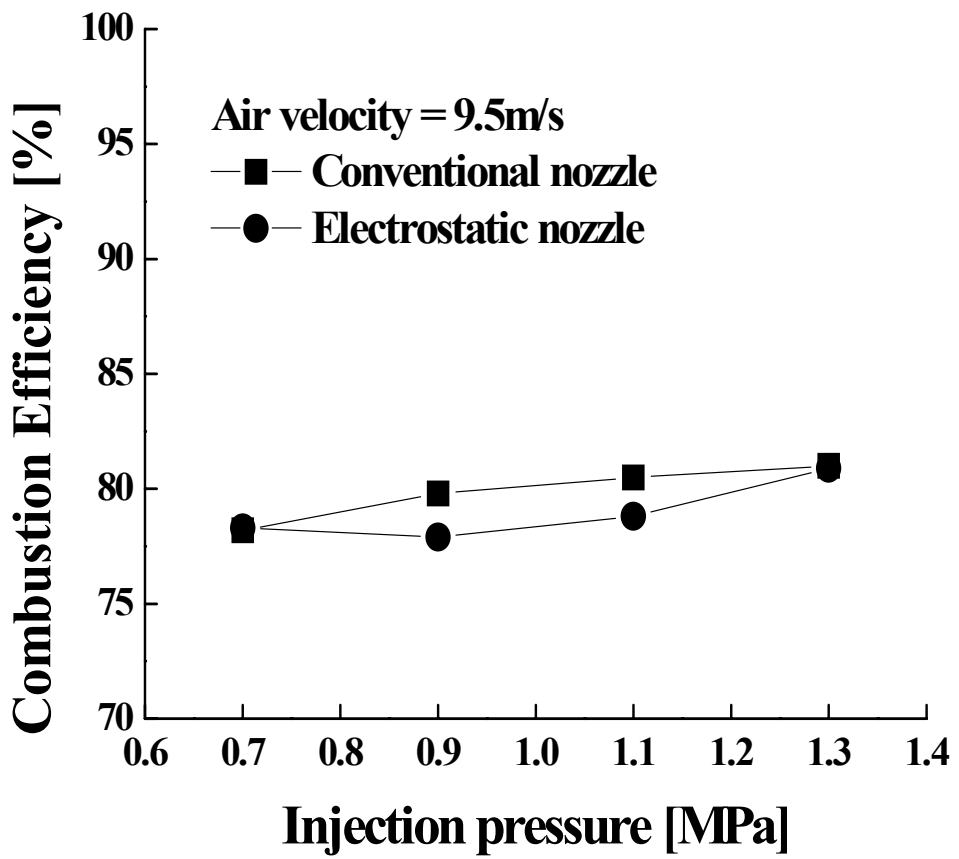


Fig. 21d. Comparison of conventional and electrostatic nozzles on combustion efficiency at air velocity of 9.5m/s

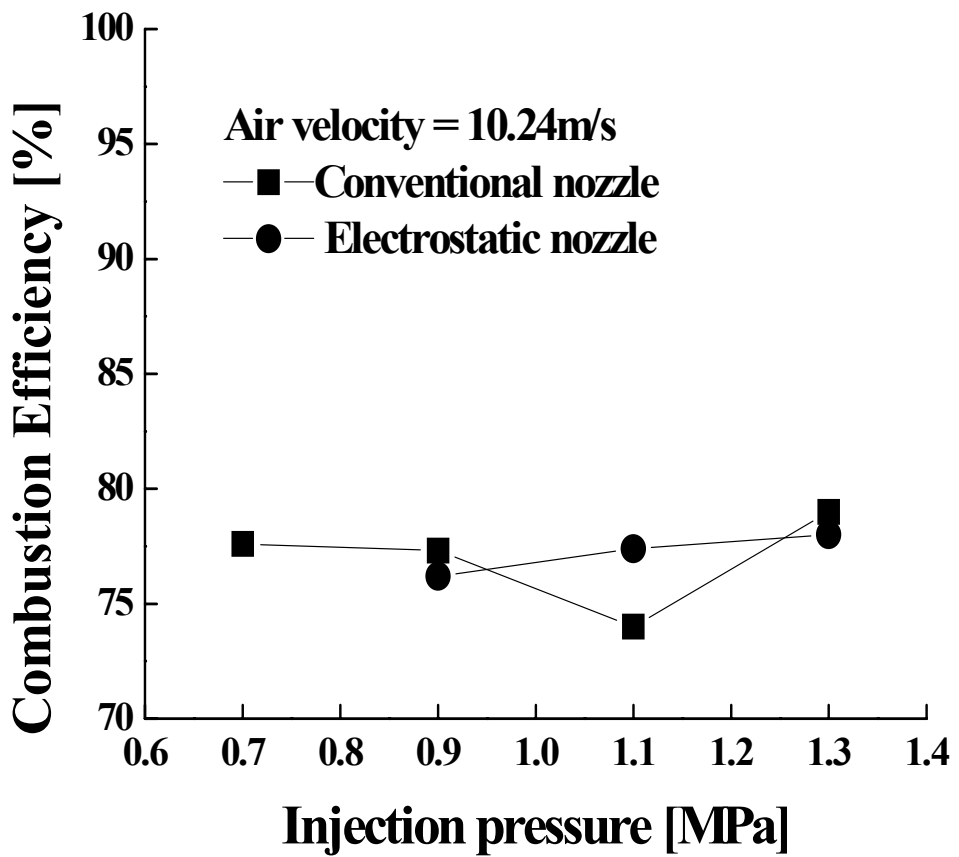


Fig. 21e. Comparison of conventional and electrostatic nozzles on combustion efficiency at air velocity of 10.24m/s

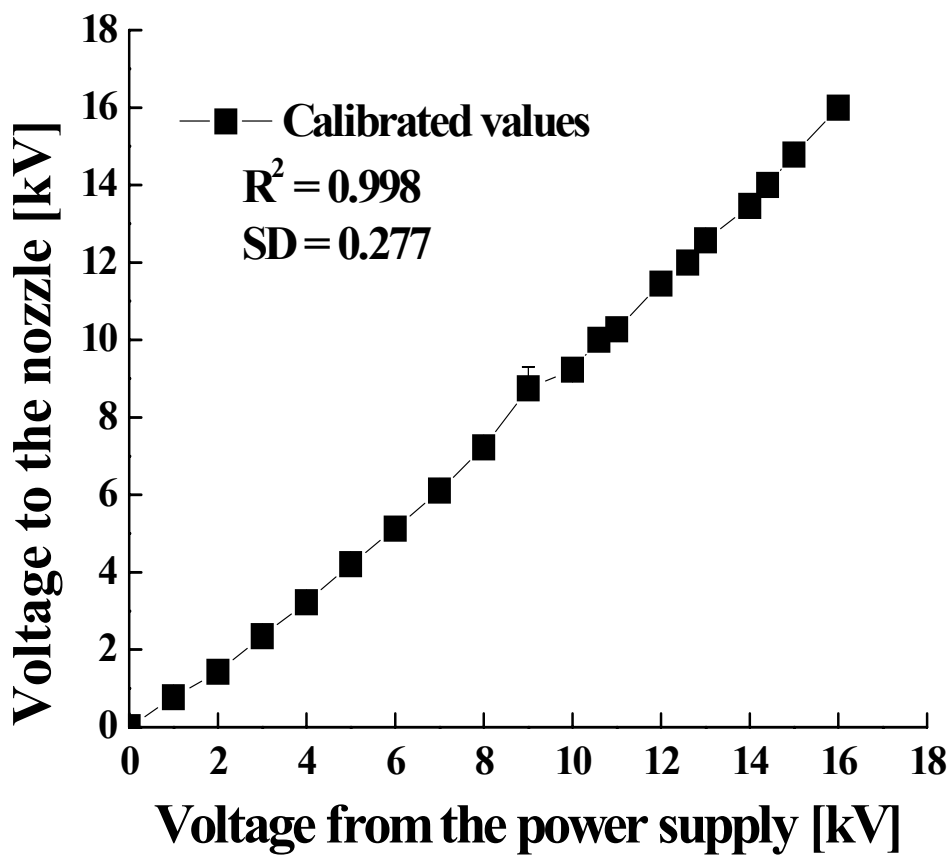


Fig. 22. Calibrated values of the high voltage power supply

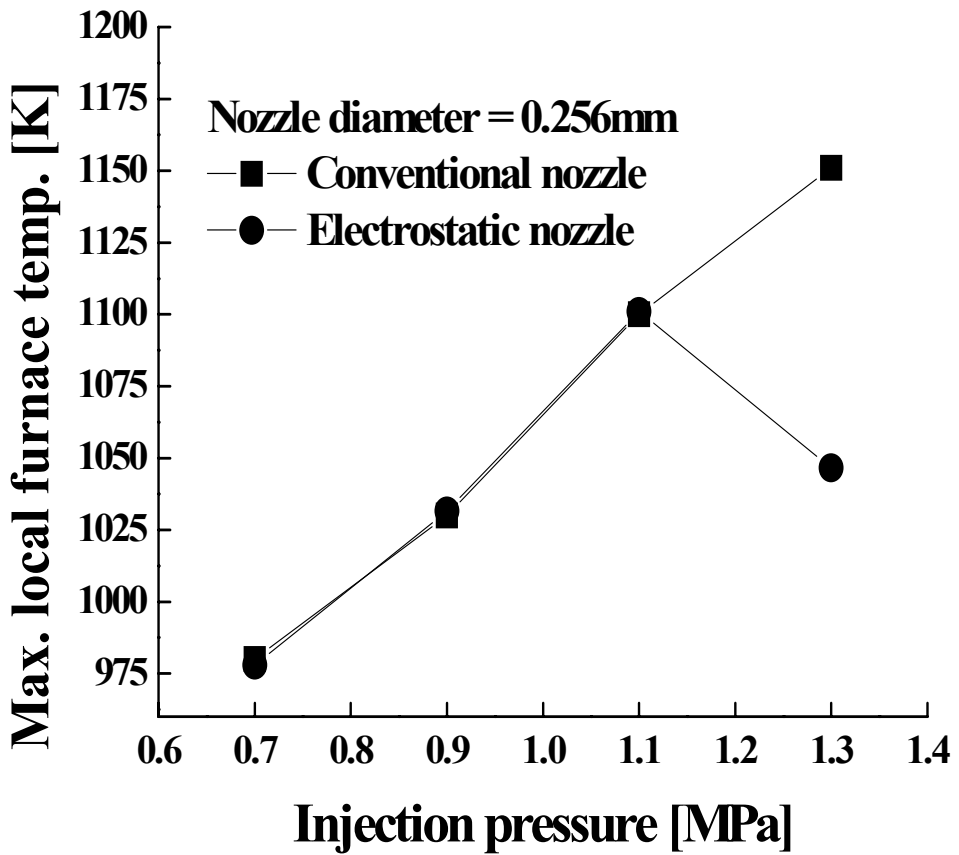


Fig. 23a. Comparison of conventional and electrostatic nozzles ( $d_o = 0.256\text{mm}$ ) on maximum local furnace temperature with  $\%O_2 < 5\%$

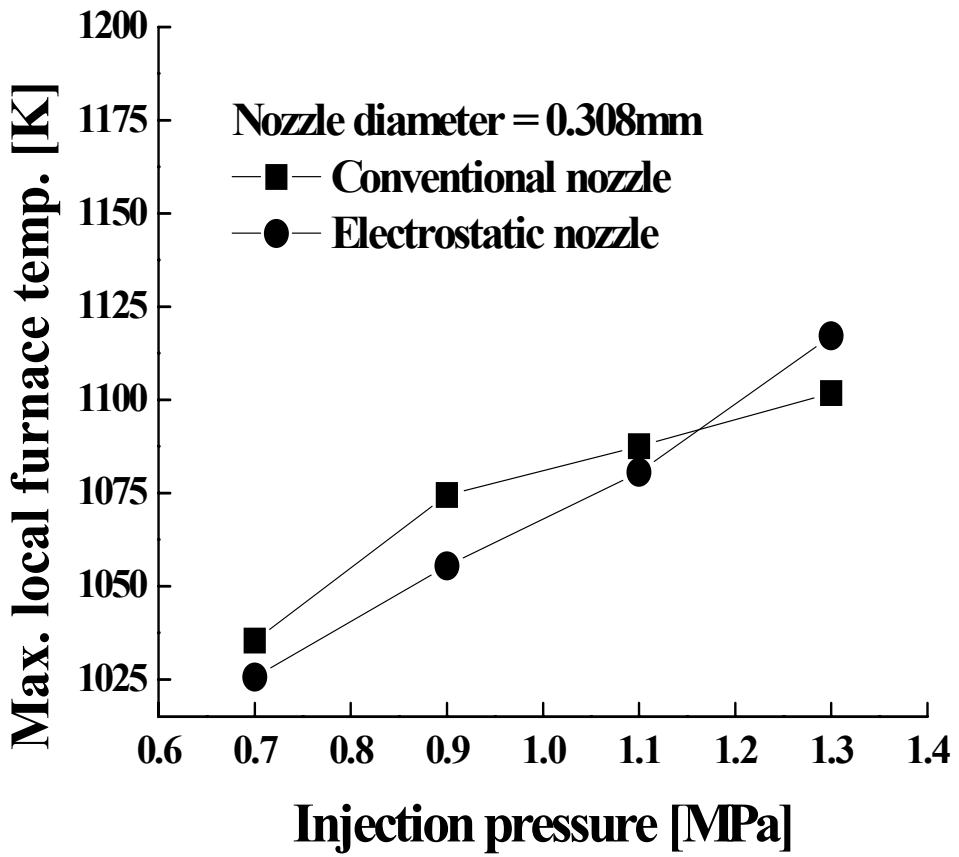


Fig. 23b. Comparison of conventional and electrostatic nozzles ( $d_o = 0.308\text{mm}$ ) on maximum local furnace temperature with  $\%O_2 < 5\%$

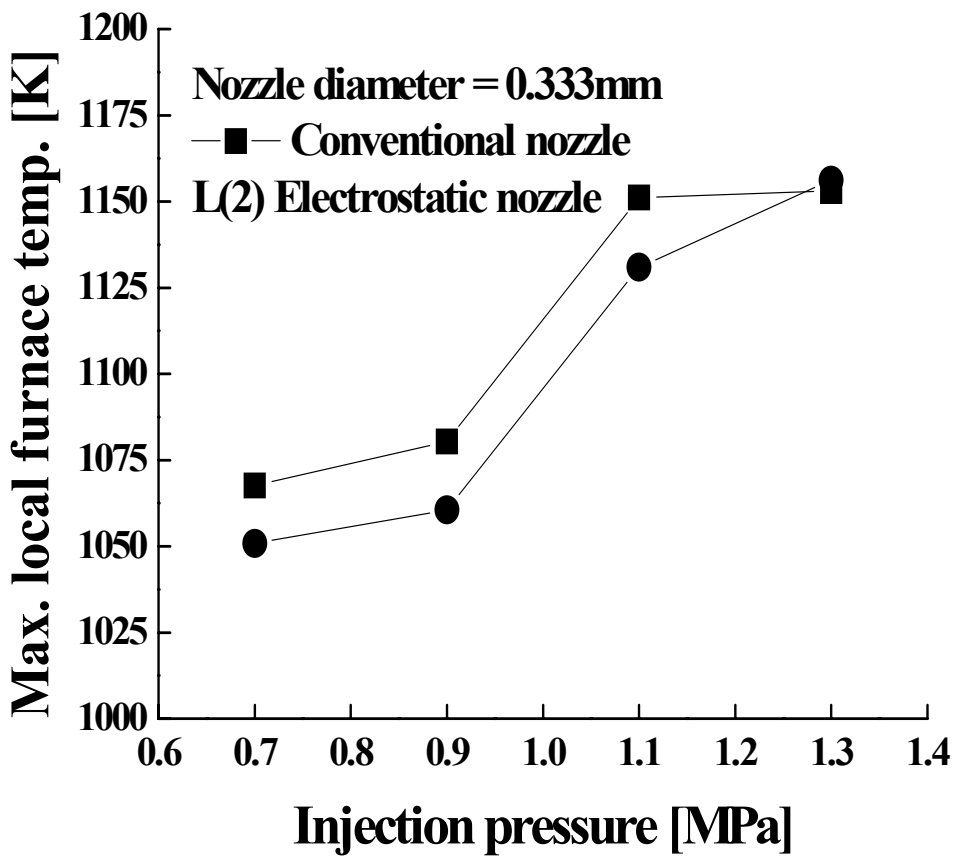


Fig. 23c. Comparison of conventional and electrostatic nozzles ( $d_o = 0.333\text{mm}$ ) on maximum local furnace temperature with  $\%O_2 < 5\%$

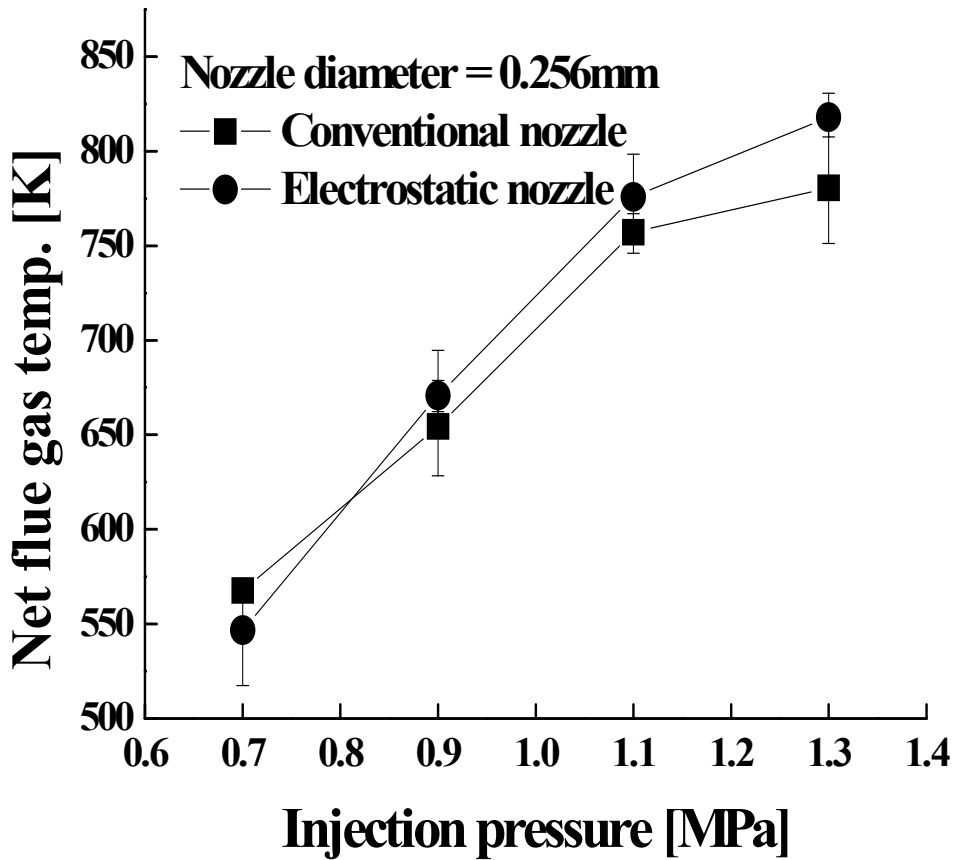


Fig. 24a. Comparison of conventional and electrostatic nozzles ( $d_o = 0.256\text{mm}$ ) on net flue gas temperature with  $\%O_2 < 5\%$

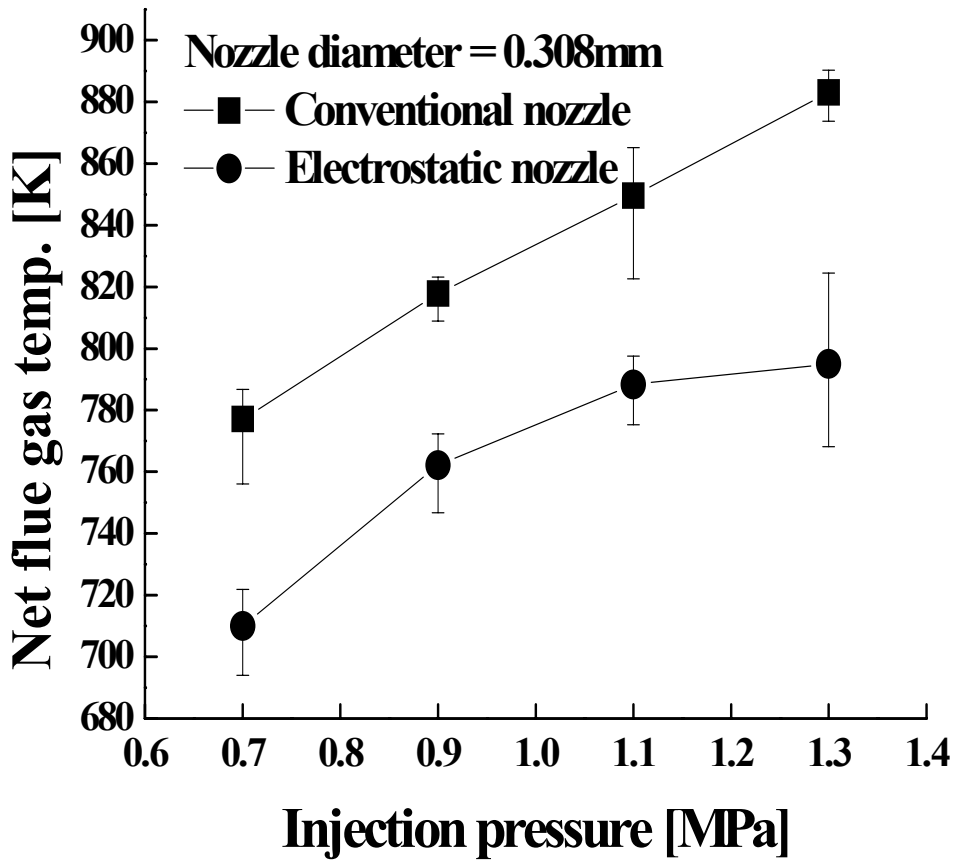


Fig. 24b. Comparison of conventional and electrostatic nozzles ( $d_o = 0.308\text{mm}$ ) on net flue gas temperature with  $\%O_2 < 5\%$



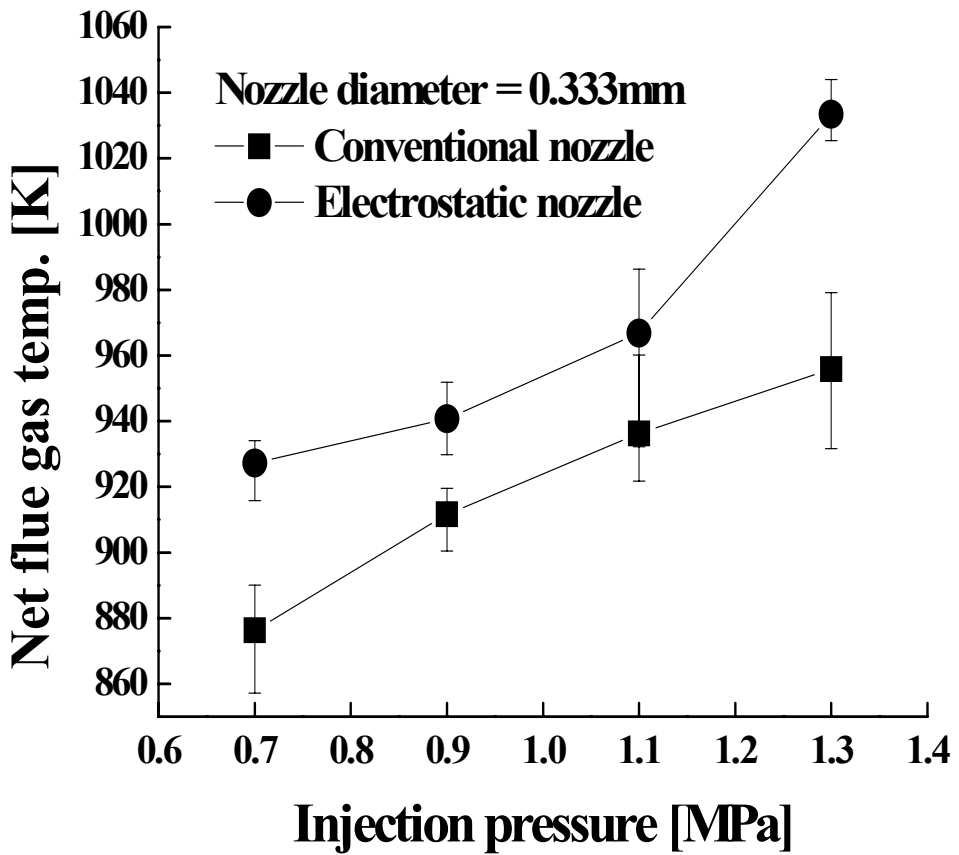


Fig. 24c. Comparison of conventional and electrostatic nozzles ( $d_o = 0.333\text{mm}$ ) on net flue gas temperature with  $\%O_2 < 5\%$

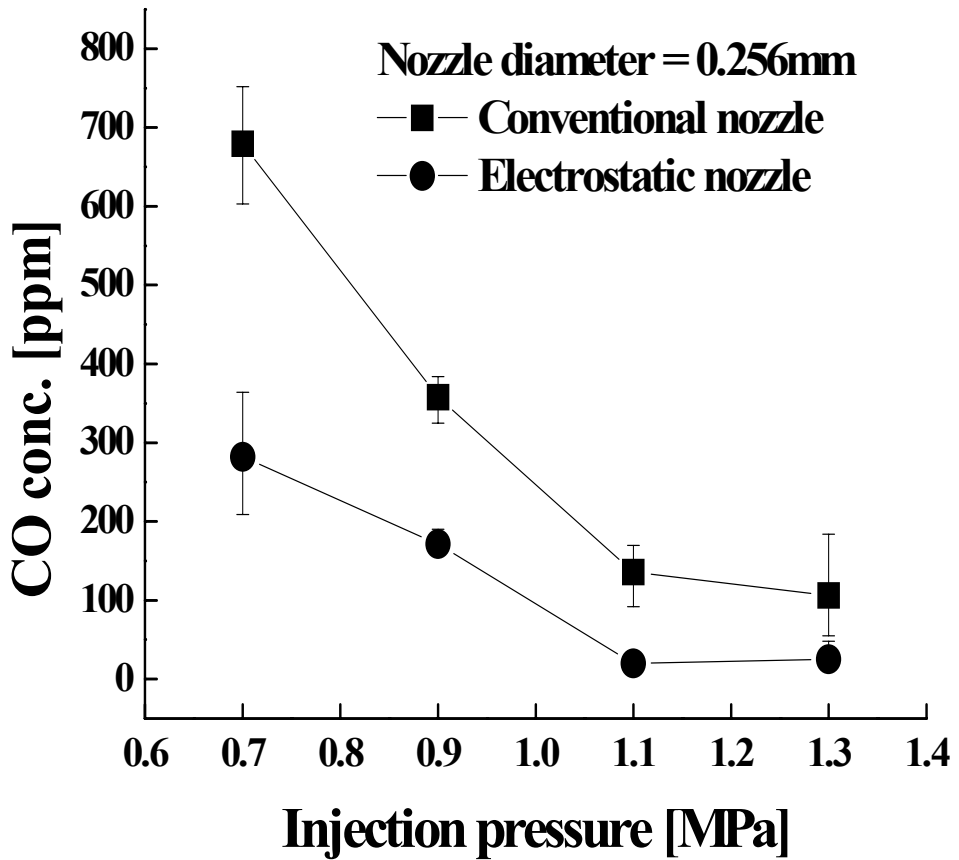


Fig. 25a. Comparison of conventional and electrostatic nozzles ( $d_o = 0.256\text{mm}$ ) on CO concentration with  $\%O_2 < 5\%$ .

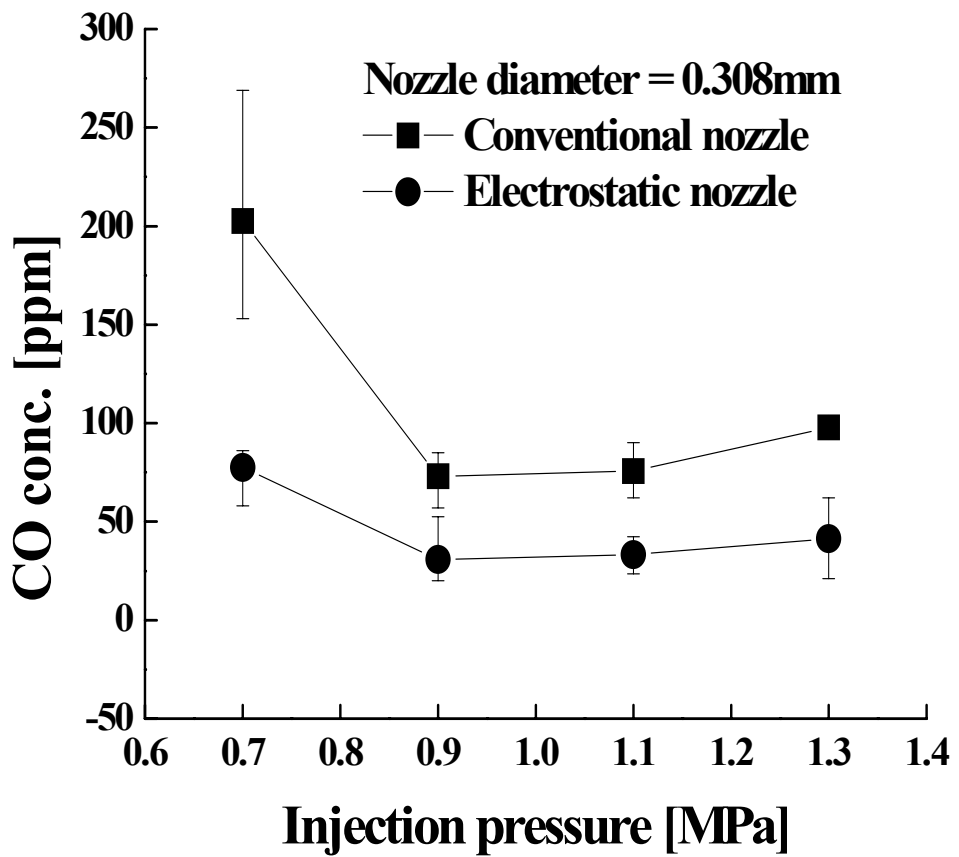


Fig. 25b. Comparison of conventional and electrostatic nozzles ( $d_o = 0.308\text{mm}$ ) on CO concentration with  $\%O_2 < 5\%$ .

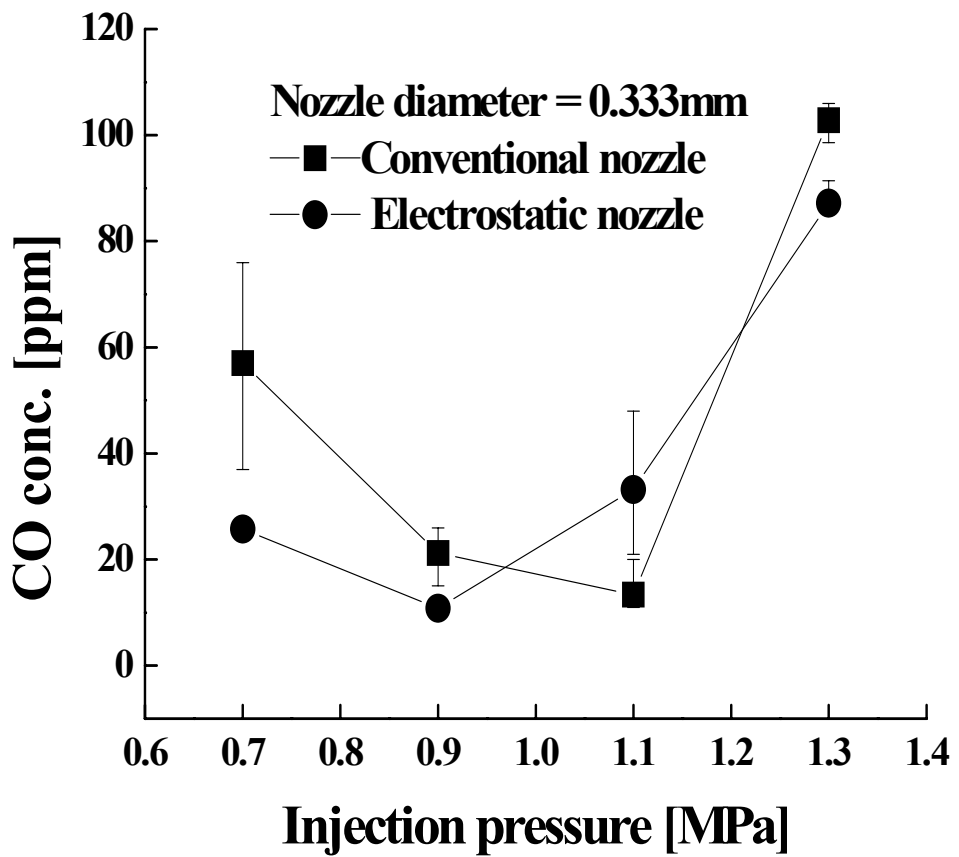


Fig. 25c. Comparison of conventional and electrostatic nozzles ( $d_o = 0.333\text{mm}$ ) on CO concentration with  $\%O_2 < 5\%$ .

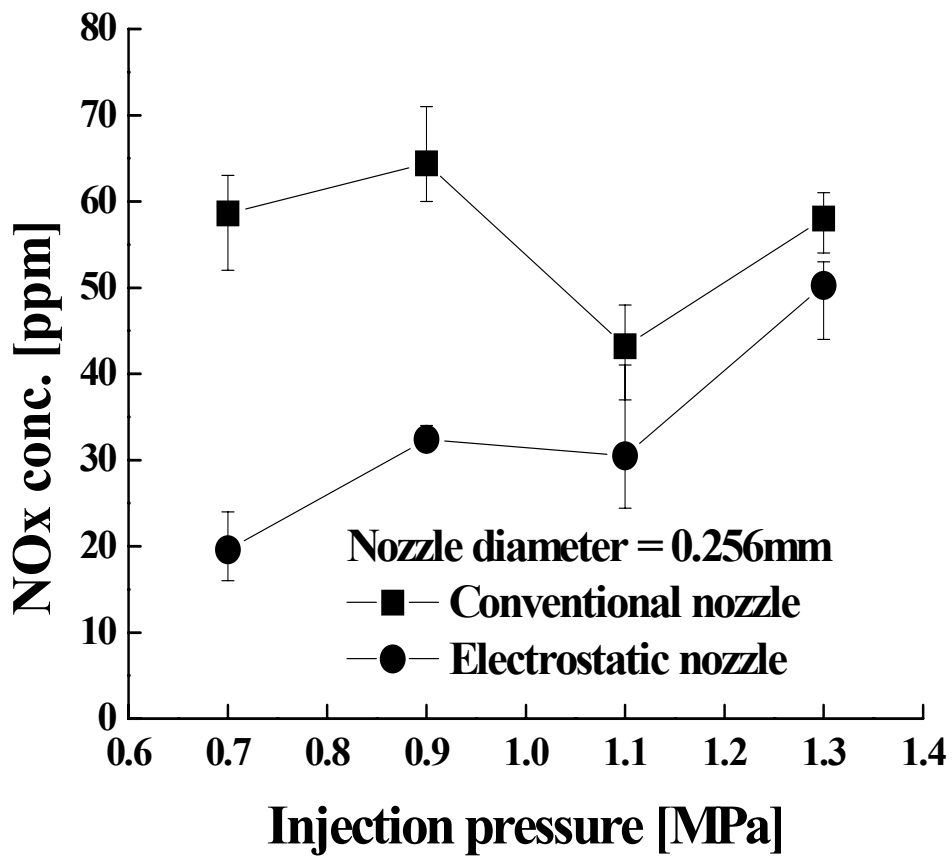


Fig. 26a. Comparison of conventional and electrostatic nozzles ( $d_o = 0.256\text{mm}$ ) on NOx concentration with  $\%O_2 < 5\%$

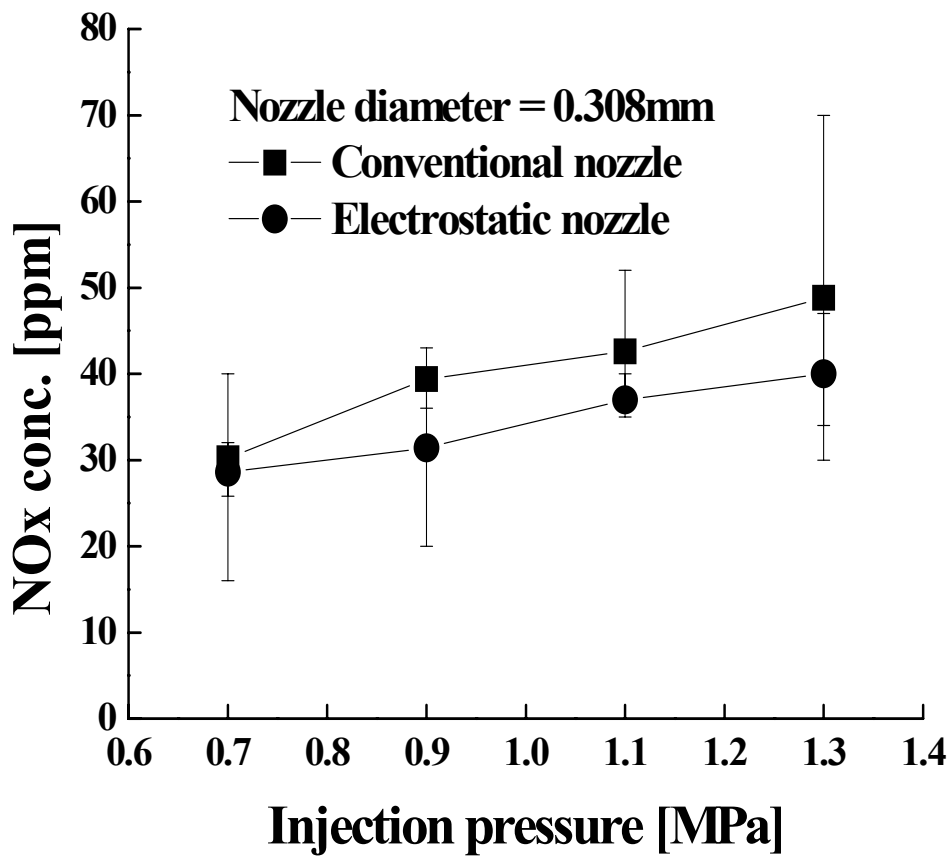


Fig. 26b. Comparison of conventional and electrostatic nozzles ( $d_o = 0.308\text{mm}$ ) on NOx concentration with  $\%O_2 < 5\%$

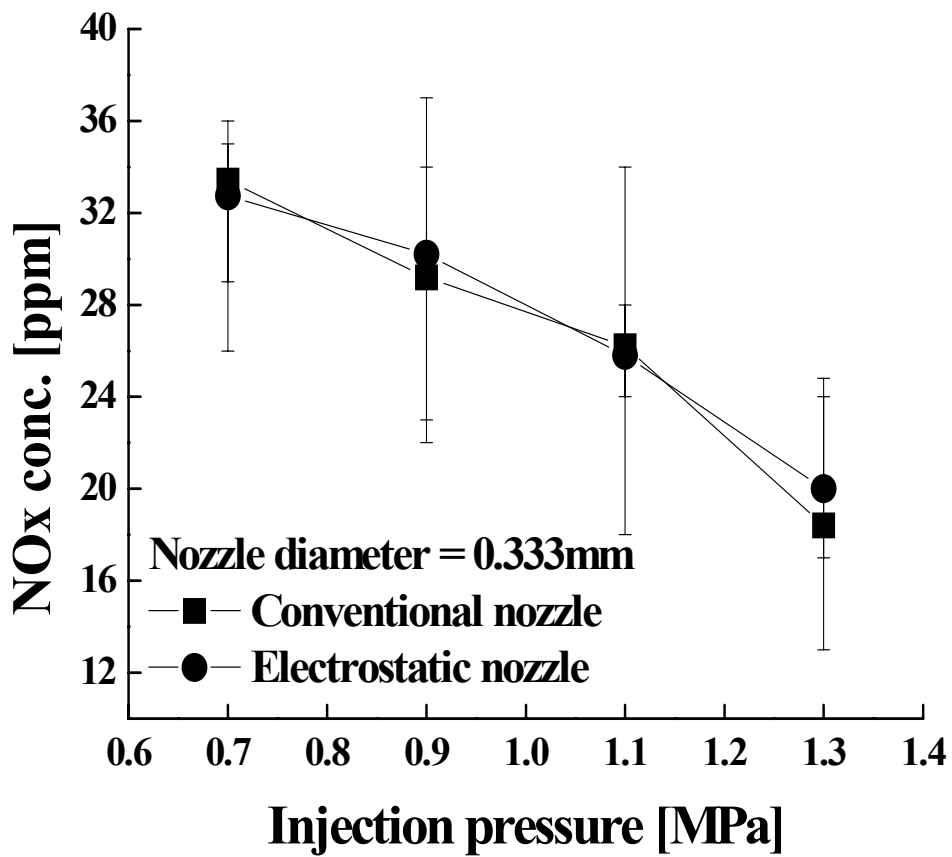


Fig. 26c. Comparison of conventional and electrostatic nozzles ( $d_o = 0.333\text{mm}$ ) on NOx concentration with  $\%O_2 < 5\%$

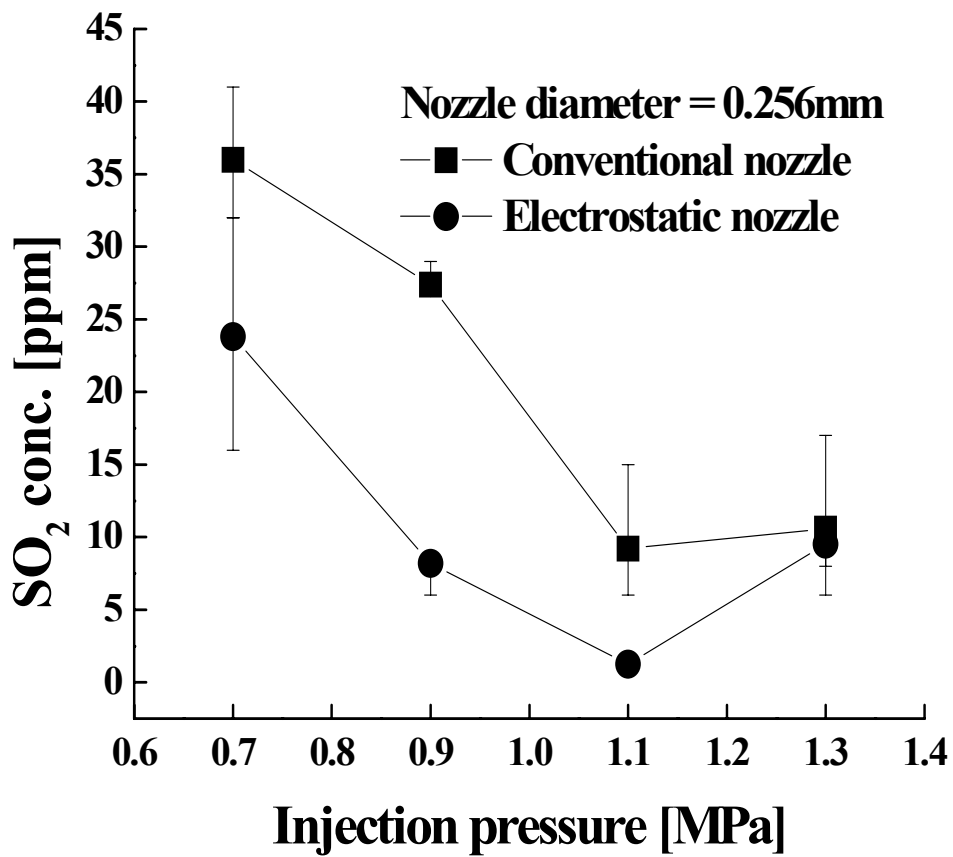


Fig. 27a. Comparison of conventional and electrostatic nozzles ( $d_o = 0.256\text{mm}$ ) on  $\text{SO}_2$  concentration with  $\%O_2 < 5\%$



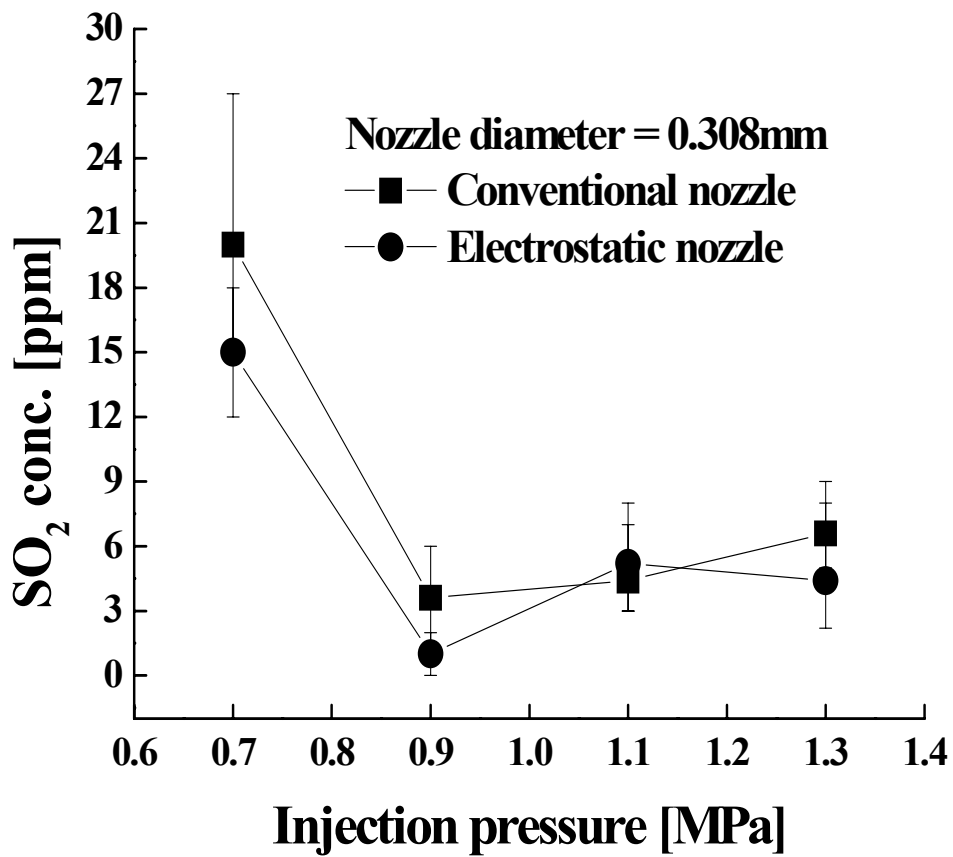


Fig. 27b. Comparison of conventional and electrostatic nozzles ( $d_o = 0.308\text{mm}$ ) on  $\text{SO}_2$  concentration with  $\%O_2 < 5\%$

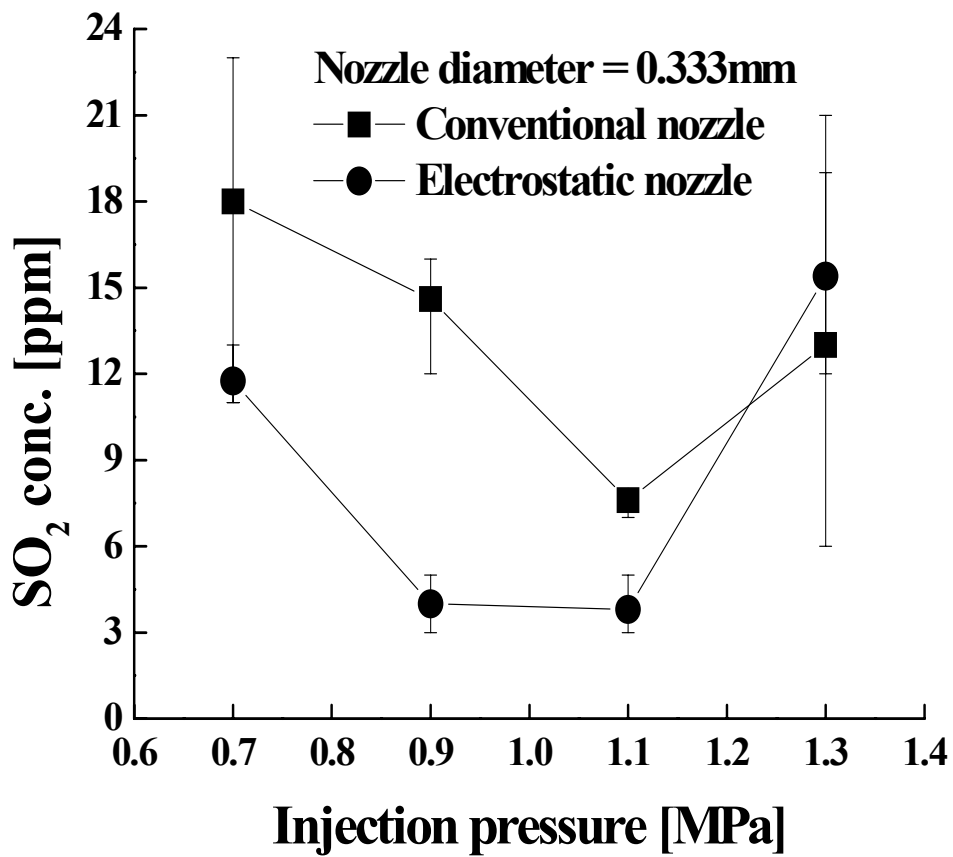


Fig. 27c. Comparison of conventional and electrostatic nozzles ( $d_o = 0.333\text{mm}$ ) on  $\text{SO}_2$  concentration with  $\%O_2 < 5\%$

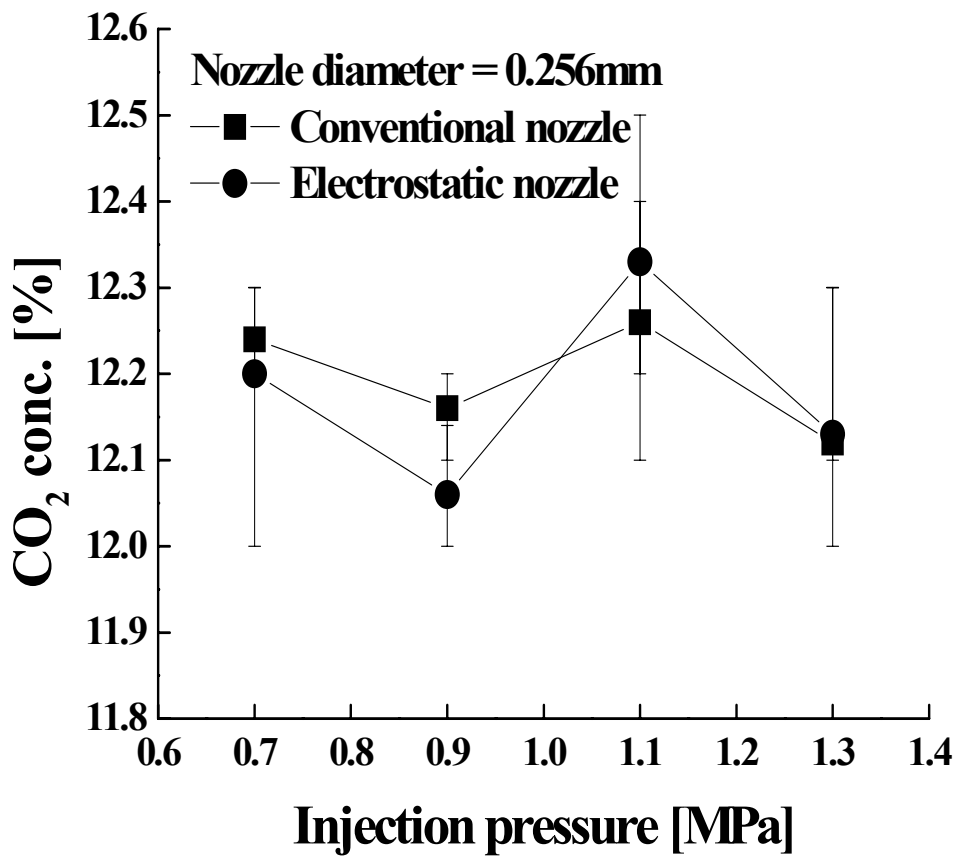


Fig. 28a. Comparison of conventional and electrostatic nozzles ( $d_o = 0.256\text{mm}$ ) on  $\text{CO}_2$  concentration with  $\%O_2 < 5\%$

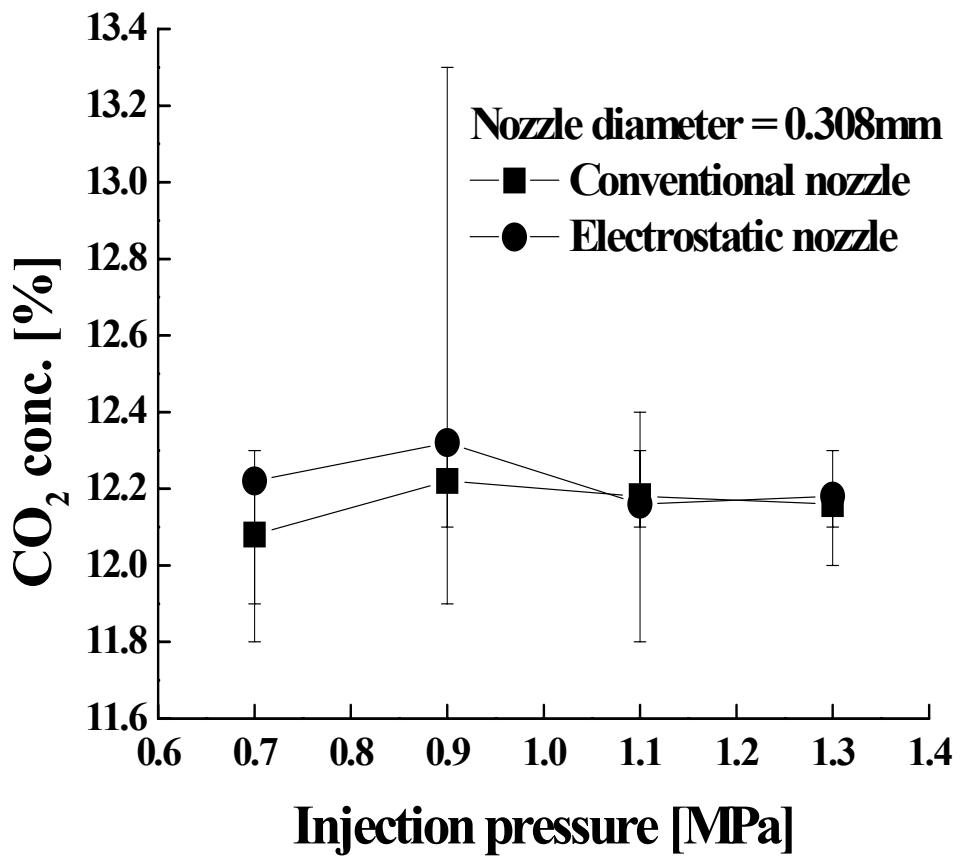


Fig. 28b. Comparison of conventional and electrostatic nozzles ( $d_o = 0.308\text{mm}$ ) on  $\text{CO}_2$  concentration with  $\%O_2 < 5\%$

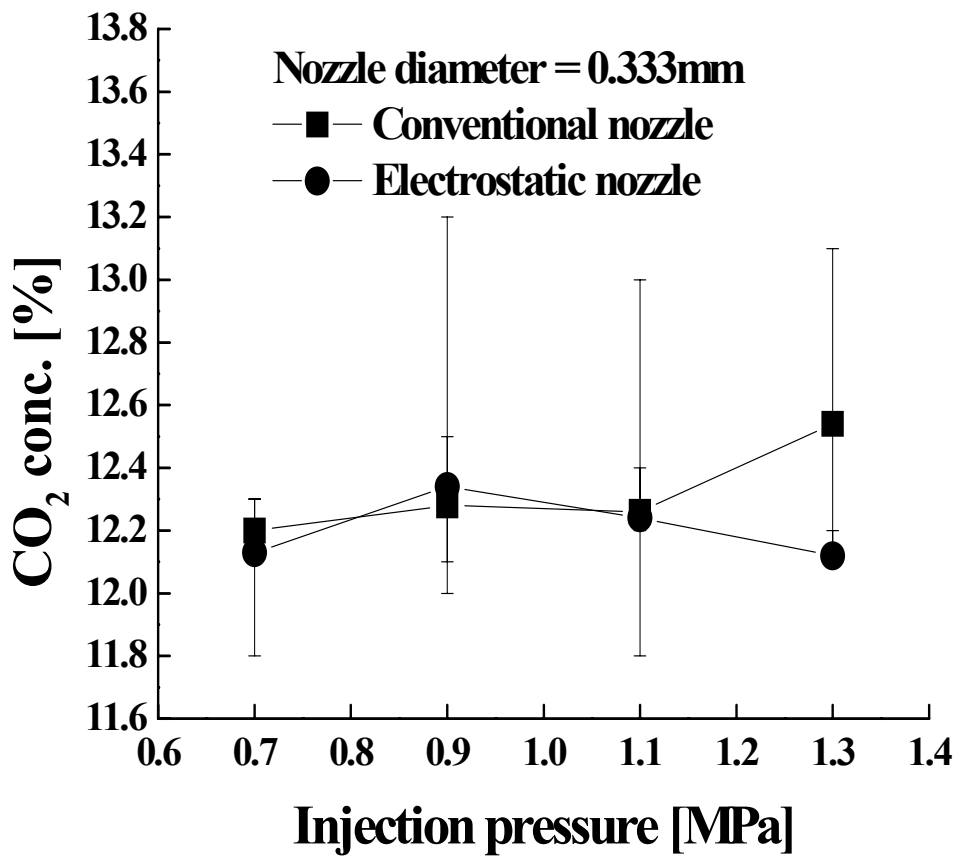


Fig. 28c. Comparison of conventional and electrostatic nozzles ( $d_o = 0.333\text{mm}$ ) on  $\text{CO}_2$  concentration with  $\%O_2 < 5\%$

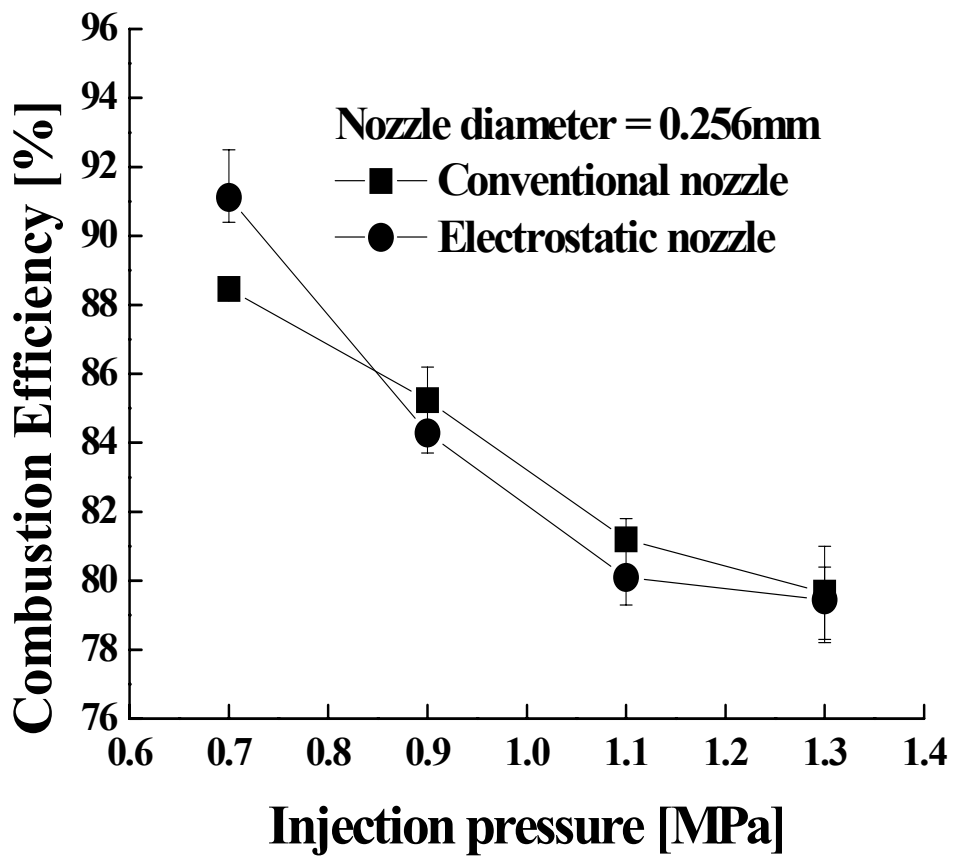


Fig. 29a. Comparison of conventional and electrostatic nozzles ( $d_o = 0.256\text{mm}$ ) on combustion efficiency with  $\%O_2 < 5\%$

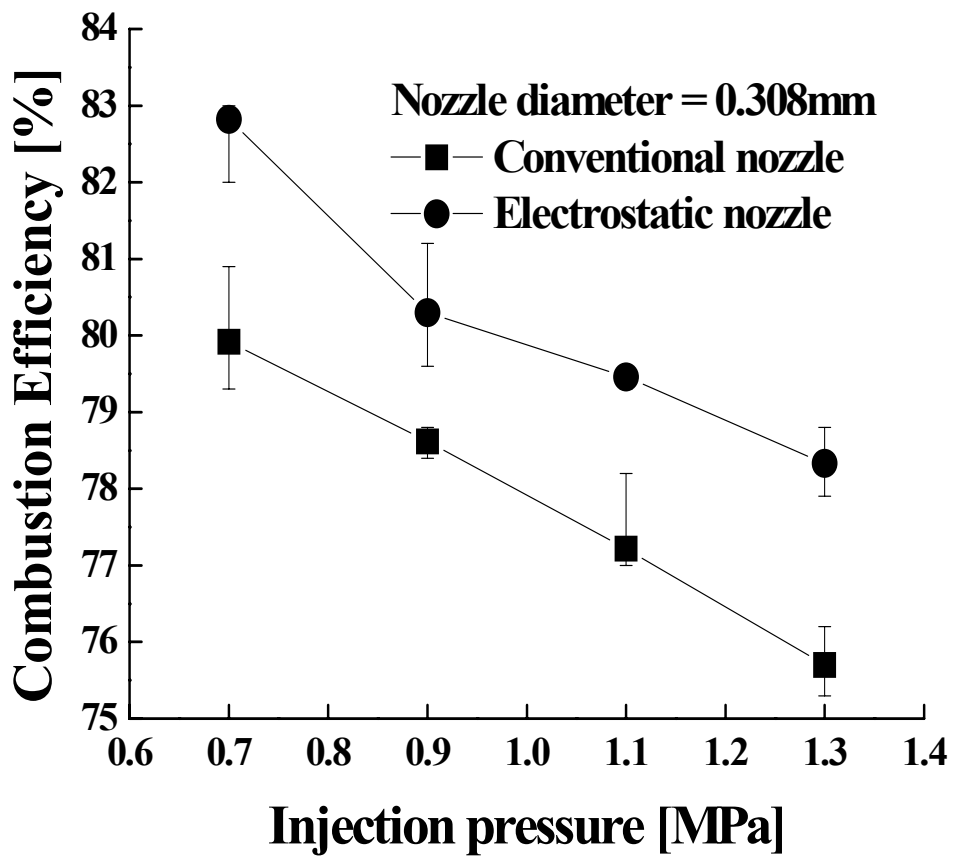


Fig. 29b. Comparison of conventional and electrostatic nozzles ( $d_o = 0.308\text{mm}$ ) on combustion efficiency with  $\%O_2 < 5\%$

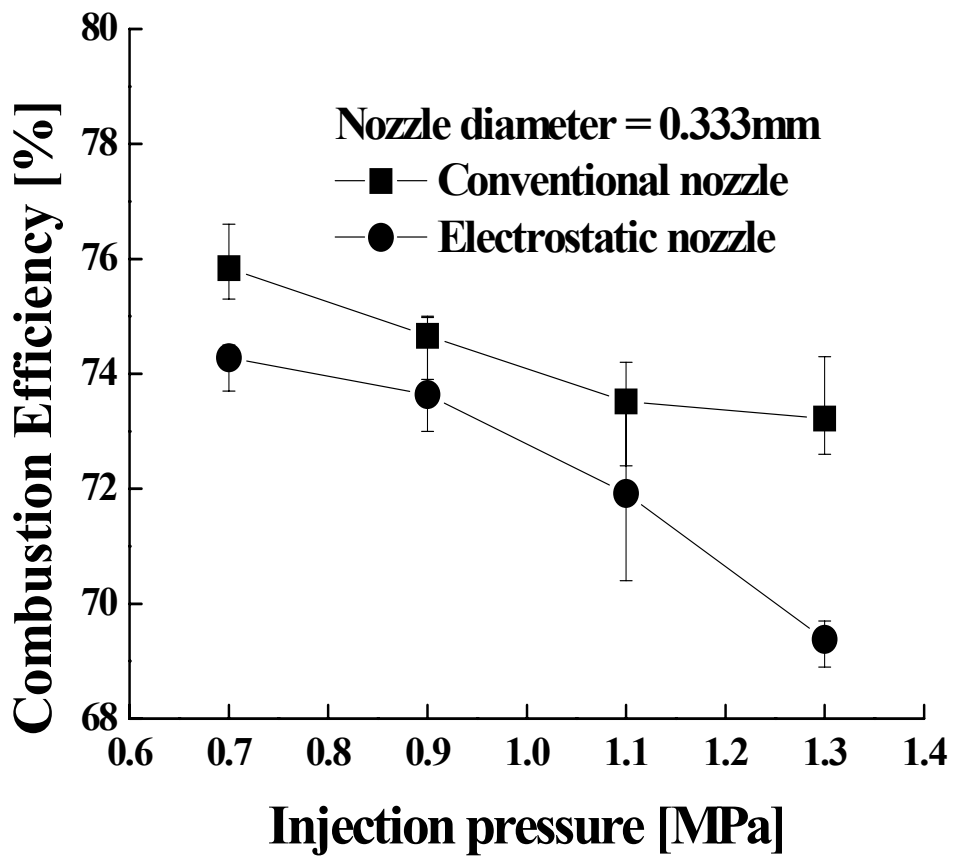


Fig. 29c. Comparison of conventional and electrostatic nozzles ( $d_o = 0.333\text{mm}$ ) on combustion efficiency with  $\%O_2 < 5\%$



Table 8. Combustion analyzes for conventional and electrostatic nozzles  
for orifice diameter of 0.333 mm

|                                  | <b>Conventional</b> | <b>5kV</b> | <b>10kV</b> | <b>15kV</b> |
|----------------------------------|---------------------|------------|-------------|-------------|
| <b>O2[%]</b>                     | 4.5                 | 4.3        | 4.3         | 4.1         |
| <b>CO2[%]</b>                    | 12.2                | 12.3       | 12.3        | 12.4        |
| <b>CO[ppm]</b>                   | 86                  | 37         | 26          | 19          |
| <b>NOx[ppm]</b>                  | 30                  | 35         | 36          | 37          |
| <b>SO<sub>2</sub>[ppm]</b>       | 3                   | 1          | 0           | 1           |
| <b>Flue gas temp.<br/>[deg.]</b> | 113                 | 133        | 127         | 136         |
| <b>Efficiency[%]</b>             | 96.3                | 95.4       | 95.7        | 95.5        |
| <b>Fuel flow rate<br/>[kg/h]</b> | 4.87                | 4.74       | 4.72        | 4.8         |
| <b>Scale</b>                     | 2                   | 0          | 0           | 0           |

Table 9. Combustion analyzes for conventional and electrostatic nozzles  
for orifice diameter of 0.256 mm

|                       | Conventional | Electrostatic [14kV] |
|-----------------------|--------------|----------------------|
| O <sub>2</sub> [%]    | 4.6          | 4.4                  |
| CO <sub>2</sub> [%]   | 12           | 12.2                 |
| CO[ppm]               | 12.1         | 6                    |
| NO <sub>x</sub> [ppm] | 49(48*)      | 48(46*)              |
| SO <sub>2</sub> [ppm] | 1            | 1                    |
| Flue gas temp. [deg.] | 110.8        | 123                  |
| Efficiency[%]         | 96.4         | 96.4                 |
| Fuel flow rate [kg/h] | 2.57         | 2.4                  |
| Scale                 | 2            | 0                    |

\* - Corrected concentration: for %O<sub>2</sub> concentration = 5%

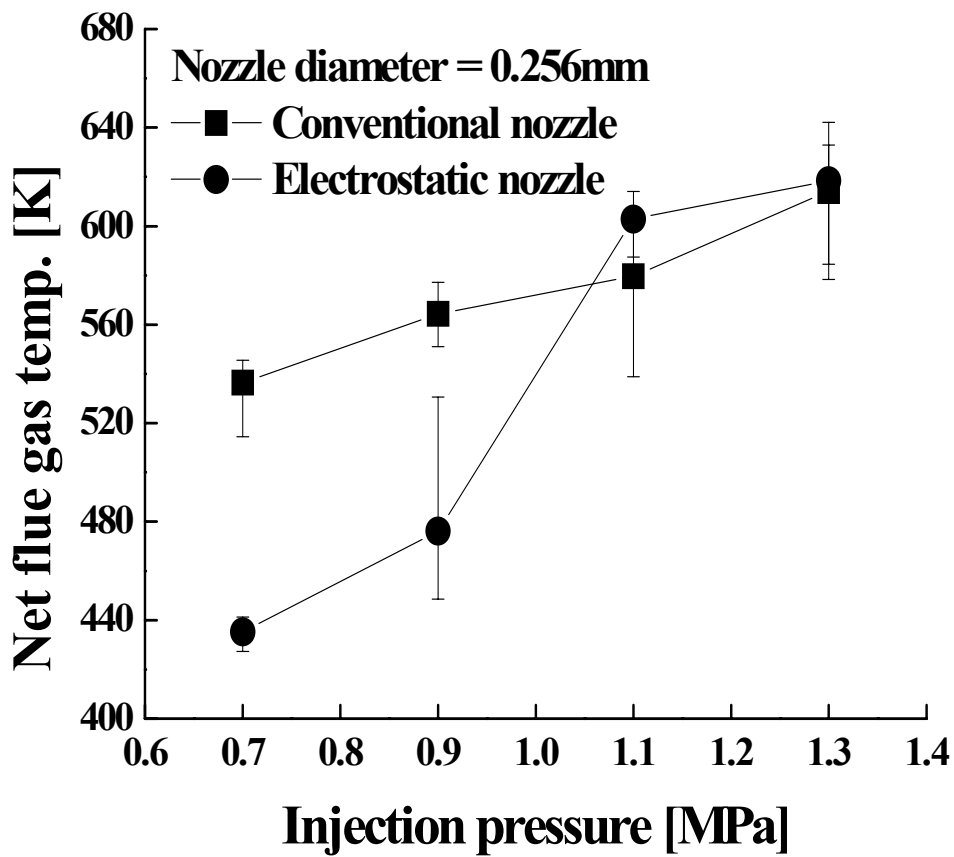


Fig. 30. Comparison of conventional and electrostatic nozzles on net flue gas temperature with %O<sub>2</sub> < 5%

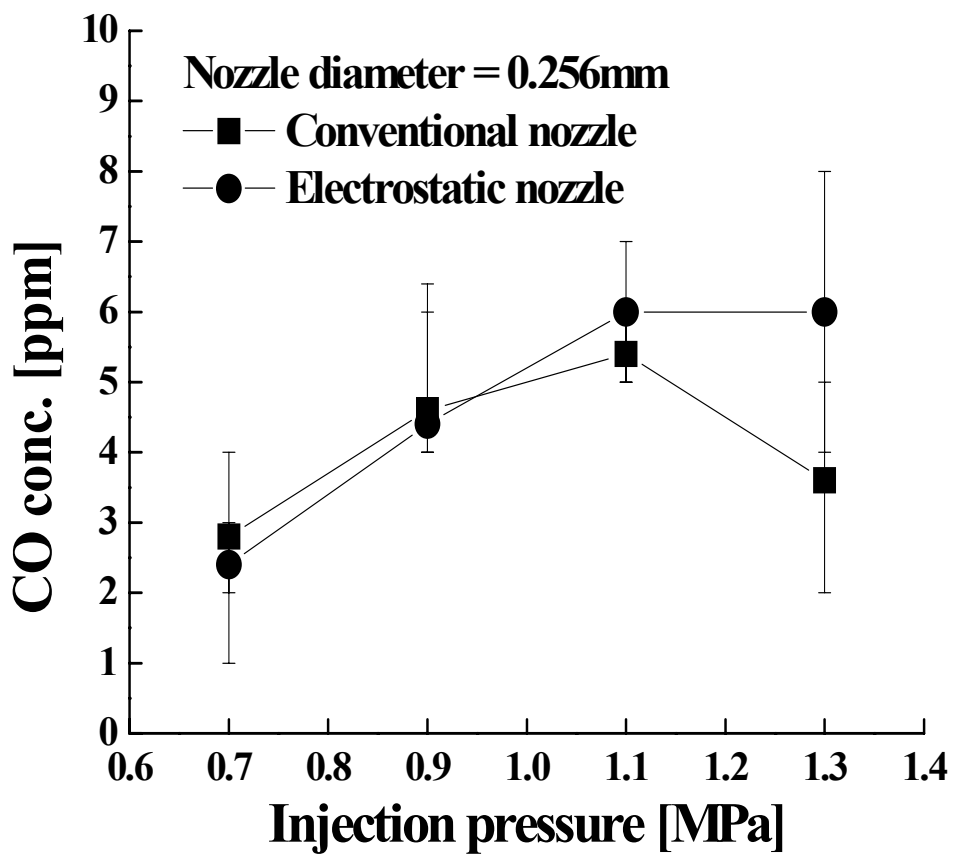


Fig. 31. Comparison of conventional and electrostatic nozzles on CO concentration with %O<sub>2</sub> < 5%

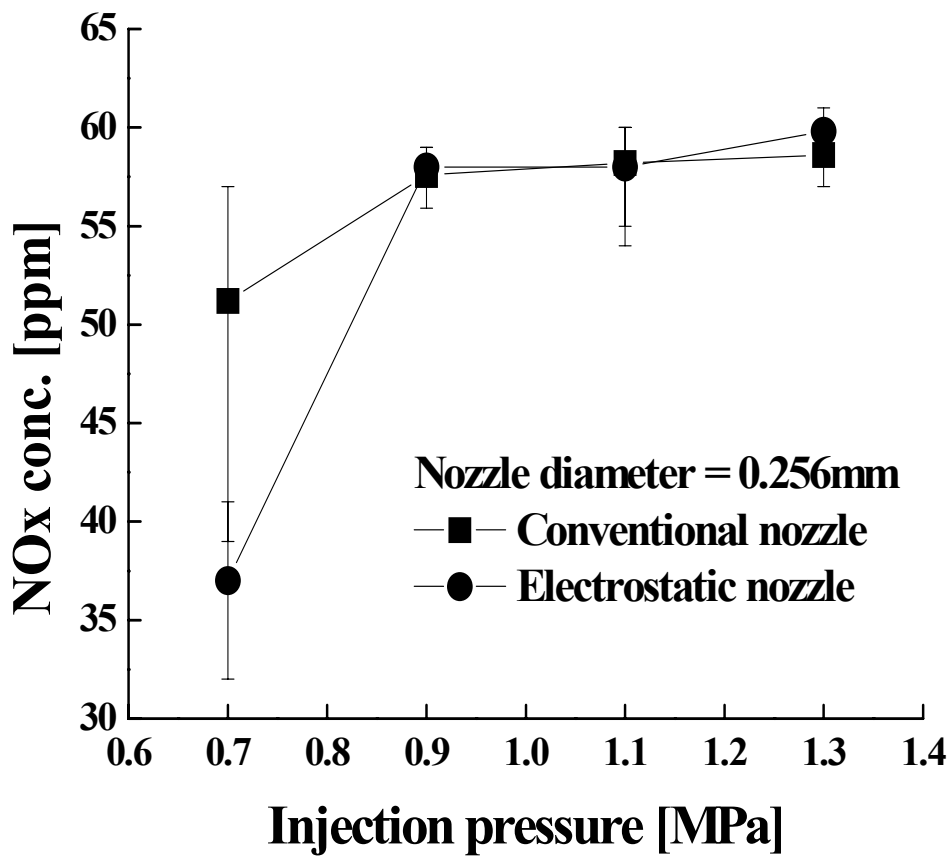


Fig. 32. Comparison of conventional and electrostatic nozzles on NOx concentration with %O<sub>2</sub> < 5%

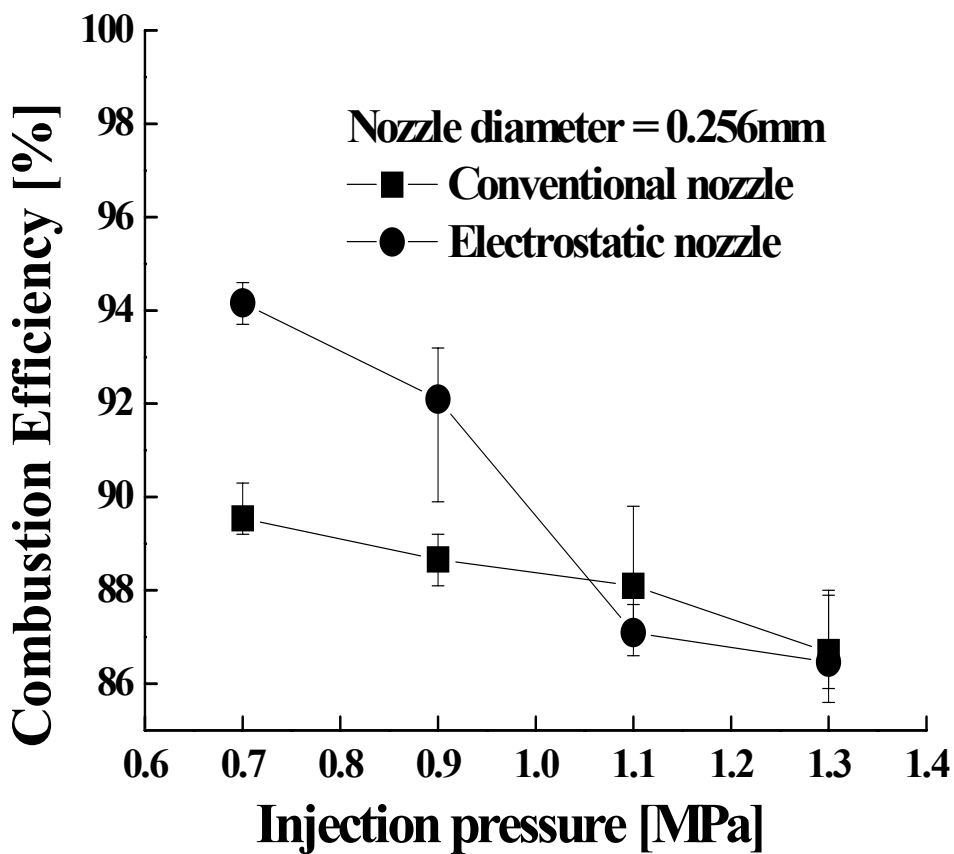


Fig. 33. Comparison of conventional and electrostatic nozzles on combustion efficiency with %O<sub>2</sub> < 5%.

Table 10. Summary of experimental results

Suitable nozzle : orifice diameter = 0.256 mm (0.85kg/h)

| Test rig |                            |                              | Injection pressure = 0.7MPa |                  |         | Injection pressure = 0.9MPa |                  |         |
|----------|----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|---------|-----------------------------|------------------|---------|
|          |                            |                              | # Conv.                     | * Electro.       | % Diff. | # Conv.                     | * Electro.       | % Diff. |
|          |                            | Fuel consumption<br>[ml/min] | 54<br>(2.57kg/h)            | 50<br>(2.57kg/h) | 7.4     | 60<br>(2.57kg/h)            | 58<br>(2.57kg/h) | 3.2     |
|          |                            |                              |                             |                  |         |                             |                  |         |
|          | Spray characteristics      | Breakup length[mm]           | 5.48                        | 3.34             | 39      | 4.1                         | 2.91             | 29      |
|          |                            | Spray angle[q]               | 60.8                        | 62.4             | +2.6    | 61.3                        | 62.9             | +2.6    |
|          |                            | SMD[mm]                      | 18                          | 16.5             | 8.3     | 15.9                        | 14.8             | 6.9     |
|          |                            |                              |                             |                  |         |                             |                  |         |
|          | Combustion characteristics |                              |                             |                  |         |                             |                  |         |
| Furnace  |                            | CO[ppm]                      | 679.2                       | 282              | 58.5    | 357.6                       | 171.6            | 52      |
|          |                            | NOx[ppm]                     | 58.6                        | 19.6             | 66.6    | 64.4                        | 32.4             | 49.7    |
|          |                            | Efficiency[%]                | 88.5                        | 91.1             | +2.9    | 85.2                        | 84.3             | -1.06   |
|          |                            | Smoke scale                  | 2                           | 1                |         | 2                           | 1                |         |
|          |                            |                              |                             |                  |         |                             |                  |         |
| Heater   |                            | CO[ppm]                      | 2.8                         | 2.4              | 14.3    | 4.6                         | 4.4              | 4.35    |
|          |                            | NOx[ppm]                     | 51.2                        | 37               | 27.7    | 57.6                        | 58               | +0.69   |
|          |                            | Efficiency[%]                | 89.5                        | 94.2             | +5.25   | 88.7                        | 92.1             | +3.83   |
|          |                            | Smoke scale                  | 1                           | 0                |         | 1                           | 0                |         |

N. B. # - Conventional nozzle  
 \* - Electrostatic nozzle  
 %O<sub>2</sub> concentration < 5%

## 4절. 결론

3년간에 걸쳐 농업용 소형 버너의 연료 절감형 노즐 개발에 관한 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

### 1. 미립화 특성

기존 노즐보다 정전대전 노즐의 경우 분열길이가 짧다. 미립화 특성이 우월하다. 분무각은 전기장 내에 존재하는 전하된 액적끼리 서로 미는 효과로 인해 정전대전 노즐 경우가 더 크다.

Sauter 평균 입경은 기존 노즐보다 정전대전 노즐의 경우 더 작게 나타났다. 액적 크기 저감 정도는 0.256mm의 노즐 경우 0.7MPa과 0.9MPa의 분사압력에서 각각 6.9%, 8.3%를 보였다.

### 2. 연소 특성

최종적으로 새로 설계한 정전대전 노즐의 로내 실험과 난방기 실증실험을 통해 얻은 결론을 정리하면 다음과 같다. 최대 로내 온도는 기존 노즐이 분사압력 1.1MPa까지 정전대전 노즐보다 높게 나타났다. 순 연도 가스온도는 노즐 지름에 관계없이 분사압력의 증가에 따라 증가한다. CO 배출농도는 노즐 오리피스 지름 0.256mm의 경우 분사압력 0.7MPa과 0.9MPa에서 현저하게 저감되었다. NO<sub>x</sub> 배출 농도는 노즐 오리피스 지름 0.256mm의 경우 분사압력 0.7MPa과 0.9MPa에서 정전대전 노즐에서 저감되었다.

난방기 실증 실험의 경우 순 연도 가스온도는 분사압력 0.7MPa과 0.9MPa의 경우 정전대전 노즐이 기존 노즐 보다 낮았다. CO 배출 농도는 분사압력 0.7MPa에서 14.3%, 0.9MPa에서 4.4%의 저감을 정전대전 노즐에서 보였다. NO<sub>x</sub> 배출농도는 분사압력 0.7MPa에서 정전대전 노즐의 경우 기존 노즐에 비해 27.7% 저감 되었다.

연소 효율 분사압력 0.7MPa과 0.9MPa에서 기존 노즐의 경우 90% 이하이지만 정전대전 노즐은 90%이상을 보였고 5.3%와 3.8%의 증가를 각각 보였다.



결론적으로 이 연구에서 개발된 정진대전 노즐의 경우 노즐 오리피스 지름 0.256mm에서 분사압력 0.9MPa이하의 조건에서 연료 소비는 3.2%~7.4% 저감 가능하고 미립화 및 분무 특성이 기존 노즐 보다 우월하여 환경 오염물질의 배출 대폭 저감 가능하였다.

## 제 4장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

1차년도 연구개발 목표는 정전대전버너 노즐설계 및 미립화 실험이었다. 우선 기존 버너의 미립화 실험으로 적정 운전조건 즉 분사압력 0.7 ~ 0.9 MPa를 찾아내었다. 세 가지 종류의 정전대전 버너를 설계 후 정전대전 특성 및 미립화 실험을 수행하였다. 그 결과 가장 대전특성과 미립화 특성이 우수한 노즐을 선정하였다. 또한 CFD코드에 의한 특성 해석에 의해 자기장 분포 및 전압분포를 얻었다.

2차 년도에는 1차 년도에서 선정된 정전대전 노즐을 이용한 버너의 연소실험이 연구개발목표로 우선 기존버너의 연소특성 실험을 수행하였다. 그리고 정전대전 버너의 연소실험에서 연료 소비율 및 배기가스 실험결과를 비교 분석하였다. 그 외 화염길이 및 화염온도 등 연소특성을 비교분석한 결과 0.256mm 지름의 노즐 경우 분사압력 0.7 MPa에서 기존의 버너에서 보다 연료 소비율은 7.4% 저감시킬 수 있었다. 당초 계획의 10% 절감에 근접하는 결과를 얻을 수 있었다고 본다.

또 배기가스의 경우 CO는 58.6%, NOx는 66.6% 저감시키는 결과를 얻었고, 연소효율은 2.9% 증가된 결과를 얻을 수 있었다. 스모크 지수도 50% 저감되는 실험결과를 얻었다.

반면에 같은 크기의 노즐 오리피스 지름에서 분사압력을 0.9MPa로 증가시킬 경우 연료소비율은 3.2% 저감시킬 수 있었고 CO는 52%, NOx는 49.7%저감시킬 수 있었지만 연소효율은 오히려 1% 정도 감소된 결과를 얻었다.

위와 같은 결과로 볼 때 0.256mm 지름의 노즐 경우 분사압력 0.8MPa 이상의 운전조건은 바람직하지 않았다.

3차년도의 경우 정전대전 버너의 실증실험을 통해 최종적으로 연료 절감형 노즐 개발이 최종목표이다. 개발된 정전대전 버너를 실제 난방기에서 실증실험을 수행하였다. 그 결과 CO는 14%, NOx는 28% 저감을, 연소효율은 5% 증진을, 스모크 지수는 50% 저감을 보이는 실험결과를 얻었고, 노즐지름 0.256mm, 분사압력 0.7MPa 조건에서 얻을 수 있었다. 그러나 분사압력은 0.9MPa로 증가시킬 경우는 CO는 4% 정도 저감되지만 NOx는 1% 정도 증가하고 연소효율은 4% 증가하며 스모크 지수도 50% 저감하는 결과를 얻었다.

따라서 개발된 정전대전 노즐을 실제 난방기의 버너에 응용할 경우 노즐지름 0.256mm 의 경우 분사압력 0.8MPa 이하에서 운전할 경우 소기의 목적을 달성할 수 있다는 결론을 얻었다. 최종 평가로서 개발된 연료 절감형 노즐의 경우 연료 절감 여부는 계획의 10% 절감에서 7.4% 절감 시킬 수 있는 결과를 수치적으로 약간 떨어지지만 70% 이상 성공적인 결과라고 볼 수 있다. 그러나 환경 오염물질 저감 경우 당초계획 10% 보다 훨씬 상회하는 결과를 얻어 달성도는 100% 이상이라고 할 수 있다. 실용화 가능 여부의 경우 충분히 실용화 가능성이 있는 것으로 판단된다.

## 제 5장 연구개발 결과의 활용 계획

이 연구에서 개발된 정전대전 노즐을 활용하기 위한 방법 및 계획으로 두 가지를 들 수 있다. 우선 개발된 정전대전 노즐의 제작 생산과 제작된 노즐의 건조기 또는 난방기에의 응용이다. 제작 생산 측면의 경우 참여기업인 시흥 컨트롤에서 직접 제작 생산할 가능성은 크지 않다고 본다. 따라서 기존 상용 노즐인 덴마크의 Danfoss회사와 접촉하여 제작 개발 가능성을 타진할 수 있다.

이 경우 Danfoss는 다국적으로 노즐을 수출하는 회사이므로 연료의 종류가 나라마다 조금씩 상이함에 따른 물리적 특성 차이에 따른 분무 및 연소특성을 검토해야 한다.

더 나아가 고전압 공급 방법을 노즐회사가 담당해야 할 것 인가 노즐 응용 회사가 담당할 것인가도 검토가 되어야 한다.

고전압 공급 방법에 따른 경제성 검토도 이루어 져야한다.

종합적으로 참여기업 신흥컨트롤에서 기존 상용 건조기나 난방기에 개발된 정전대전 노즐을 응용할 경우 전반적인 단가 분석 등 경제성 분석이 수행된 후 차후 계획을 세울 수 있을 것으로 생각된다.

## 제 6장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

본 연구를 통해서 얻은 결과를 정리하여 주로 국제 학술회의와 국제적 저널에 투고를 하면서 얻은 정보를 요약하면 다음과 같다.

1. 노즐 어댑터와 전극 사이의 관계가 대전에 미치는 영향
2. 전극을 삽입할 경우 절연체 두께가 노즐 성능에 미치는 영향
3. 압력 선회 노즐을 정전대전 노즐로 응용하지 않았다는 사실

## 제 7장 참고문헌

- [1] Jones, A. R. and K. C. Thong. The Production of Charged Monodisperse Fuel Droplet by Electrical Dispersion, *J. Phys. D: Applied Phys.*, 4(8): 1159-1166, 1971.
- [2] Kim, K. and R. J. Turnbull. Generation of Charged Drops of Insulating Liquids by Electrostatic Spraying, *J. Appl. Phys.* 47(5): 1964-1969, 1976.
- [3] Kelly, A. J. The Electrostatic Atomization of Hydrocarbons. *J. Inst. Energy.* 57: 312-320, 1984.
- [4] Jido, M. Burning Characteristics of Electrostatically Sprayed Liquid Fuel and Formation of Combined Droplets of Different Fuels. *IEEE trans. Ind. Appl.* 2: 2058-2065, 1987.
- [5] Balachandran, W., D. Hu., A. J. Yule., J. S. Shrimpton and A. P. Watkins. Electrostatically Produced Fuel Sprays for Combustion Applications. *Proc. ICLASS'94, Rouen, France*, pp. 994-1000, 1994.
- [6] Shrimpton, J. S. and Yule, A. J. Atomization, Combustion and Control of Charged Hydrocarbon Sprays, *Atomization and Sprays*, 11: 365-396, 2001.
- [7] Cunningham, A. T. S., Gliddon, P. K. and Jones, A. R., *Proc. Roy Soc. Lond. A* vol. 423, pp. 233-265, 1988.
- [8] Yule, A. J., Shrimpton, J. S., Watkins, A. P., Balachandran, W., and Hu, D., Electrostatic Atomized Hydrocarbon Sprays, *J. Fuel* 74(7) : 1094-1103, 1995.
- [9] Laryea, G. N. and No, S. Y. Spray Characteristics of Electrostatic Pressure-Swirl Nozzle for Burner Application, 24<sup>th</sup> KOSCO Symposium, Yoeng-pyeong, Korea, pp. 16-23, 2002.
- [10] Laryea, G. N and No, S. Y. Spray Characteristics of Charged Injected Electrostatic Pressure-Swirl Nozzle, *Proceedings of ICLASS-Europe, Zaragoza, Spain*, 2002.
- [11] Laryea, G. N. and No, S. Y. Macrostructure of Fuel Spray by Charge Injected Pressure Swirl Nozzle, *Proceedings of ICLASS-Korea, Anseong*,

- Korea, pp. 55-61, 2003.
- [12] Laryea, G. N. and No, S. Y., Spray Angle and Breakup Length of Charged Injected Electrostatic Pressure-swirl Nozzle, *Journal of Electrostatics*, 60 (1) : 37-47, 2004.
  - [13] Laryea, G. N. Development of Electrostatic Simplex Nozzles for Agricultural Applications, Ph.D Thesis, 2004.
  - [14] Marcic, M., Spray Evaporation, Atomization and Sprays, 12: 145-161, 2002.
  - [15] Rhim, J. H. and No, S. Y. Spray Characteristics of Water/Oil Emulsified Fuel, ICLASS'2000, Pasadena, California, USA, pp. 52-59, 2000.
  - [16] Lefebvre, A. H., Atomization and Sprays, Hemisphere Pub. Co., New York, 1989.

Published papers under this research project:

- [1] D. Li and S. Y. No., Spray Characteristics of Pressure-Swirl Nozzle for a Small-Scale Burner Application, Proceedings of ILASS-Asia, Tokyo, Japan, 2003, 105-112
- [2] G. N. Laryea and S.Y. No., Spray Angle and Breakup Length of Charged Injected Electrostatic Pressure-Swirl Nozzle, Journal of Electrostatic, 60(1): 37-47, 2004.
- [3] G. N. Laryea and S. Y. No., Spray and Combustion Characteristics of Pressure-Swirl Nozzle for a Small-Scale Oil Burner, Proceedings of ILASS-Asia 2004, Shanghai, P. R. China, 2004, pp. 328-334.
- [4] G. N. Laryea and S. Y. No., Spray and Combustion Characteristics of Hydrocarbon Fuel Injected from Pressure-Swirl Nozzles, Journal of ILASS-Korea, 9(4): 31-37, 2004.
- [5] G.N. Laryea and S.Y. No., Verification of Empirical Correlations for Spray Characteristics using Pressure-Swirl Nozzle, Proceedings of ILASS-Korea, 2004, 78-84.
- [6] G.N. Laryea and S.Y. No., Effect of Air Velocity on Combustion Characteristics in Small-Scale Burner, Proceedings of the KSAM 2005 Winter Conference, 76-82, 2005.
- [7] G.N. Laryea and S.Y. No., Influence of Air Velocity on Combustion Characteristics in Mini-Furnace, 30<sup>th</sup> KOSCO symposium, Jeju, Korea, 2005.
- [8] G. N. Laryea and S. Y. No., Effect of Air Velocity on Combustion Characteristics in Small-Scale Burner, Journal of Korea Society Combustion Institute, 10(1): 1-6, 2005.
- [9] G.N. Laryea and S.Y. No., Spray Characteristics Produced by Conventional and Electrostatic Pressure-Swirl Nozzles, Proceedings of ILASS-Europe 2005, Orleans, France, 2005, 229-234.



- [10] G.N. Laryea and S.Y. No., Comparison of Spray Characteristics between Conventional and Electrostatic Pressure-Swirl Nozzles, Journal of ILASS-Korea (submitted), 2005.