

# 홈노즐을 이용한 정전분무 확산 연소 특성에 관한 연구

김우진\* · 김경태\* · 김상수†

## Characteristics of the electro spraying combustion using grooved nozzle

Woojin Kim, Kyoungtae Kim and Sang Soo Kim

**Key Words :** Electro spray(정전분무), grooved nozzle(홈노즐), Diffusion combustion(확산연소), Monodisperse(단분산)

### Abstract

Spray combustion characteristics of a conducting fuel electro spray have been studied for clean combustion technology. The multiplexing system which can retain the characteristics of the cone-jet mode is inevitable for the electro spray application. Charged micro droplets can be obtained in almost uniform size during operating the electro spray in the cone-jet mode. This experiment device set up the multiplexed grooved nozzle system with the extractor. Using the grooved nozzle, the stable cone-jet mode can be achieved at the each groove in the grooved mode. This electro spray system was applied to the diffusion combustion. It is the first step to discover the diffusion combustion characteristics of the electro spray. In case of the single grooved nozzle electro spray, the diffusion flames are occurred at each jet of grooved mode and they are quite stable. The exhaust gas analysis was indicated that there is the critical point which can make very stable diffusion combustion.

### 1. 서 론

정전분무장치는 제작이 용이하고 노즐 형태가 간단한 시스템으로서 전기력 만으로 미세한 액적을 생성, 제어 할 수 있는 특징이 있다. 특히 공간 전하 효과(space charge effect)에 의해 발생한 액적들이 단 분산 분포(monodisperse distribution)<sup>(1)</sup>를 가지며 각 액적들이 단 극으로 대전이 되기 때문에 서로 결합하는 것을 막음과 동시에 제어하기에 상당히 용이하다는 장점을 가지고 있다. 지금까지는 이러한 정전분무의 단 분산성과 입자제거의 용이성을 이용하여 금속분말의 생성<sup>(2)</sup>이나 세라믹 박막코팅<sup>(3)</sup> 등에 적용이 되어 왔으나 본 연구에서는 분무되는 액적의 단분산성을 이용하여 확산 연소실험을 수행하였다. 확산연소 시에 산화제와 연료의 혼합시간이 중요

한 변수로 작용하기 때문에 정전 분무 시에 발생하는 단 분산 액적을 연소에 적용시켜 안정된 화염을 생성시킬 수 있는지를 확인하였다. 연소가 이루어지기 위해서는 정전 분무의 단점중의 하나인 저 유량 문제를 극복해야 하는데, 고 유량 정전분무가 가능하게 하는 다중 노즐에 관한 여러가지 연구가 진행되었지만<sup>(4),(5)</sup>,익스트랙터와 (Extractor)<sup>(6)</sup> 홈 노즐을 동시에 적용함으로써 고 유량의 정전분무를 실현하였다.

### 2. 실험 장치와 방법

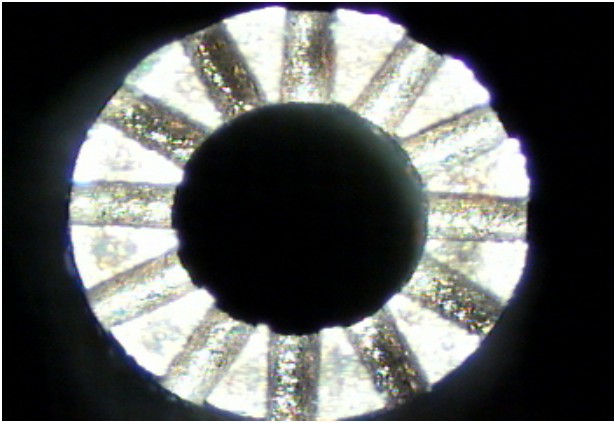
홈 노즐은 스테인리스 재질의 내 경 1.6 mm, 외 경 3.2 mm의 모세관으로써 Fig 1과 같이 텅에 wire electro-discharge machining(EDM) 가공법을 이용하여 폭이 0.5 mm인 12개의 홈(groove)를 만들었다. 이를 이용하여 정전분무를 이용한 확산 연소 장치를 Fig.2과 같이 구성하였다. 테플론으로 제작된 본체(Body)를 중심으로 균일한 공기유량이 주입되도록 세라믹 허니콤을 설치하였다. 밑에서 부터 위로 작동유체가 분무 될 수 있도록 단일 혹은 5개의 홈 노즐을 설치하였으며 그 위에 액적

\* 회원, 한국과학기술원 기계공학과

† 책임 저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과

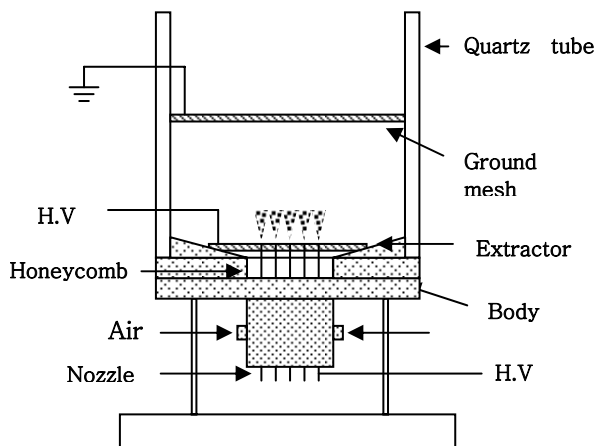
E-mail : sskim@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3021 FAX : (042)869-3095

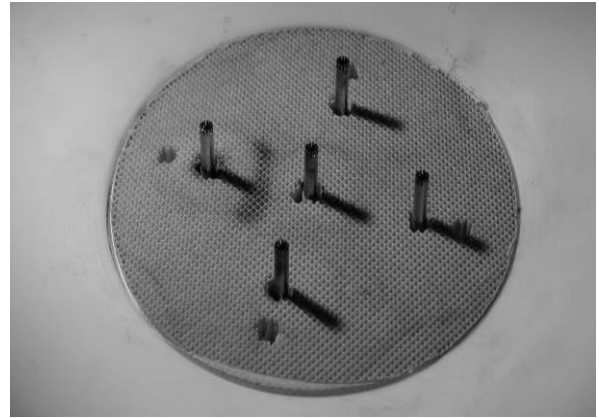


**Fig.1** Picture of the groove nozzle

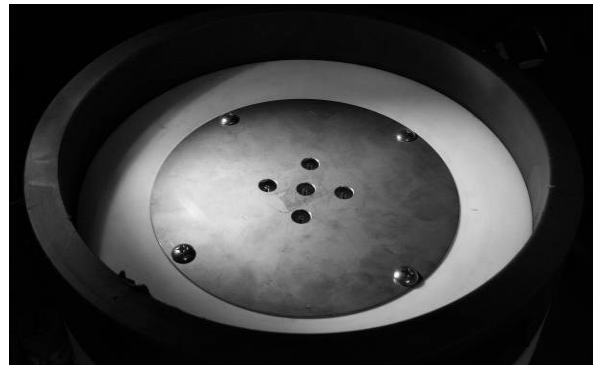
들 간의 간섭을 줄이면서 고 유량을 분무시키기 위하여 익스트랙터를 부착하였다. 또한, 네 방향으로 공기가 주입될 수 있도록 제작한 공기 주입구를 본체 아랫부분에 부착 하고 퀴츠(quartz)관을 설치하여 외부 공기의 유입을 막았다. 익스트랙터와 접지 판의 거리는 17cm 로 고정하였는데 이는 홈 모드가 가능한 최적의 거리임과 동시에 연소 실험 시 형성되는 화염길이를 고려했을 때 작동유체가 연소되면서 기화되는 시간을 충분하게 주기 위해 결정한 길이이다. 익스트랙터는 스테인리스 재질로서, 두께가 3mm 이고, 직경이 180 mm 이며 가운데에 직경이 16 mm 인 홀 5 개가 25 mm 간격으로 가공되어 있다. 이는 고전압 인가에 따라 홈 노즐과 익스트랙터 사이에 발생할 수 있는 코로나 방전현상을 막기 위해 구성된 직경크기 이다. Fig.3 은 실제 제작된 홈 노즐 정전분무 장치의 내부로서 Fig.3(a) 는 세라믹 허니콤 위에 5 개의 멀티 홈 노즐을 설치한 모습이고 Fig.3(b) 는 그 위에 익스트랙터를 올려놓은 모습이다. 실험에 사



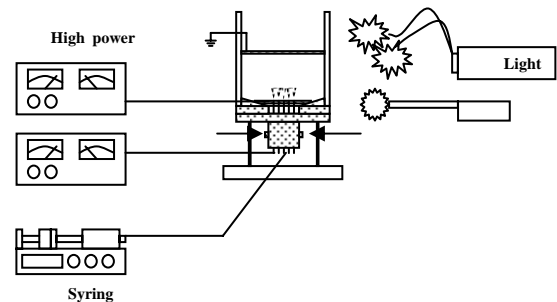
**Fig.2** Electro spraying diffusion combustion system



**Fig.3(a)** Picture of multi grooved nozzles for diffusion combustion.



**Fig.3(b)** Picture of multi grooved nozzles with extractor for diffusion combustion.



**Fig.4** Schematics of the experimental set up

용된 장치들을 Fig.4 에 나타내었다. 두 대의 고전압 발생기를 이용하여 홈 노즐과 익스트랙터에 독립적으로 고전압을 인가하였고, 주사기 펌프를 이용하여 작동유체인 에탄올 유량을 변화시키면서 공급하였다. 질량유량계를 이용하여 정밀하게 공기 유량을 제어하면서 균일하게 공기 주입을 하였고 할로겐 램프 (halogen lamp)를 이용하여 정전분무의 형상을 관찰하였다. 익스트랙터에 인가되는 전압은 홈 모드가 형성 가능한 전압 범위를 측정

하여 설정하였는데 단일노즐과 멀티 노즐일 때, 4 ~10 kV 와 4 ~ 12 kV 에 걸쳐 실험을 수행하였다. 연소 챔버(chamber) 내로 유입되는 공기 유량은 질량 유량계를 통하여 당량비 (Equivalence ratio) 1.1 조건에 맞추어 공급하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 다중 홈 노즐 정전분무 확산 연소

화염 형성을 위해 가장 중요한 요인은 크게 4 가지라고 할 수 있다. 첫 번째로 정전분무를 통해 균일한 액적 분무가 이루어져야 하고 공기 역시 균일하게 공급되어야 하는 것이 중요하다. 또한, 공기 유량과 분무 시 발생하는 연료 액적 유량의 속도를 비슷하게 해 줌으로써 혼합시간(mixing time) 을 최대 해주는 것이 안정된 화염을 형성 하는데 중요한 변수이다. 마지막으로 연료의 양이 저 유량일 때에는 완전연소가 일어나기 위해 필요한 농도에 미치지 못하여 연소가 잘 이루어지지 않는 모습을 보여준다.

첫 번째 실험은 5 개의 홈 노즐을 설치하고 홈 노즐 전체에서 연소가 안정되게 일어나는지를 확인하는 실험이다. 익스트랙터의 인가전압과 에탄올의 유량, 공기의 유량을 변화시키면서 안정적인 화염이 발생하는 구간을 관찰하였다. 익스트랙터에 인가되는 전압이 커질수록 전기적 반발력에 의해 액적 속도가 빨라지게 되는데 공기와의 혼합시간을 늘리기 위해서는 익스트랙터의 인가전압과 공기 유량을 잘 조절해야 한다. 또한, Fig.5 에서 보는 바와 같이 홈 모드 내에서 에탄올의 유량이 증가할수록 액적의 크기도 커지기 때문에 액적을 완전히 기화시키면서 연소를 수행하기 위해서는 에탄올 유량 역시 적절하게 조절해야 한다. 다중 홈 노즐을 이용하여 안정된 화염이 형성되는 전압 구간은 익스트랙터 인가 전압이 4~8 KV 구간이었다. 10 kV 구간에서는 홈 모드 정전분무는 형성이 되었으나 액적 분무 속도가 너무 빨라져서 ( $V=6.69 \text{ m/s}$ ) 연소가 거의 이루어지지 않았다. 인가 전압 간격을 2 kV 단위로 나누어서 4,6,8 kV 에서의 연소 특성을 평가하였고 이 때 홈 노즐에 걸리는 인가 전압은 익스트랙터에 4 kV 인가 시 13.5 kV, 익스트랙터에 6 kV 인가 시 15 kV, 마지막으로 익스트랙터에 8 kV 인가 시 16.4 kV 의 전압이 걸렸다. 익스트랙터에 4 kV 를 인가하였을 때 조건에서는 확산 연소가 지속적으로 이루어지고 있었고 이때의 액적 속도는 3.53 m/s 였으며, 주입되는 에

탄올의 양이 늘어날수록 에탄올 액적의 크기가 커지기 때문에 커진 액적들이 제대로 연소되지 않고 집지판으로 향하면서 불완전 연소가 심해짐을 알 수 있었다. Fig.5 에 나타나듯이 하나의 홈 노즐 당 공급 연료 유량이 40 ml/h 일 때는 연료 액적의 크기가 21.5 , 60 ml/h 에서는 26.4 , 80 ml/h 에서는 29 , 그리고 100 ml/h 에서는 31.6 로 측정되었다. 익스트랙터에 인가되는 전압이 4 kV 일 경우에는 확산 연소가 쉽게 꺼지지 않고 오랫동안 유지할 수 있다. 반면에 익스트랙터에 6 kV 를 인가하였을 때 는 앞선 실험보다 액적 분무 속도가 빨라지게 됨으로서 (액적 분무속도: 4.42 m/s) 같은 공기 유량을 넣었을 때 혼합 시간이 줄어들게 되며 연소 특성 또한 나빠지게 된다. 이에 따라 연소가 앞의 조건보다 제대로 이루어지지 않게 되고 실제로 화염의 지속 시간도 30 초 이내로 줄어들었다. 익스트랙터에 8 kV 를 인가한 조건에서도 화염은 형성이 되었으나 화염가능 조건에서는 액적 분무 속도가 가장 빠르기 때문에(액적 분무속도: 5.75 m/s) 연소가 가장 불안정 했고, 특히 각 노즐에서 발생하는 12 개의 젯 중에 화염이 형성 되지 않는 경우도 빈번히 발생하는 모습을 보였으며, 실제 화염의 지속 시간도 15 초 이내에서 꺼지는 현상이 발생하였다. 따라서 좀 더 완전 연소에 가까운 연소 조건을 찾기 위해 단일 홈 노즐을 가지고 연소 실험을 수행하였다.

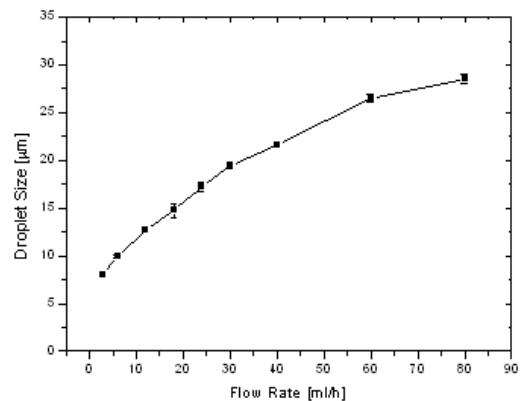


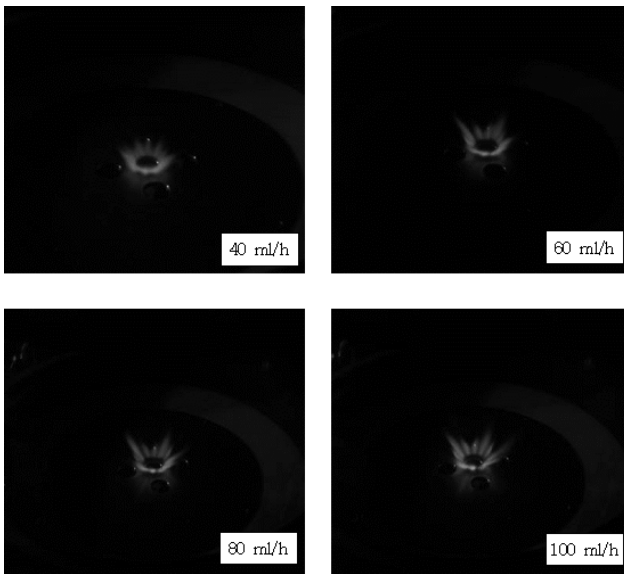
Fig.5 Droplet size verse flow rate for the grooved mode.

#### 3.2 단일 홈 노즐 정전분무 확산 연소

단일 홈 노즐 정전분무 연소를 위해 외각에 있는 네 개의 홈 노즐은 더미 노즐로 사용하고 중심에 있는 홈 노즐에만 연료를 공급하였다. 단일 홈 노즐을 이용한 정전분무 확산 연소를 실험할 때도

화염 형상이 익스트랙터 인가전압이 4~8 kV 구간 일 때 가장 안정적으로 나타났다. Fig.6 에서 나타나는 사진들은 익스트랙터에 4 kV 의 인가전압이 걸릴 때 발생하는 화염의 형상이다. 에탄올 유량이 40 ml/h 인 경우에는 저 유량 조건이기 때문에 간헐적으로 12 개의 젯에 모두 화염이 형성되지 않는 경우가 발생하였고, 유량이 60 ml/h 와 80 ml/h 일 때는 화염이 안정적으로 유지되었다. 또한 공급되는 에탄올의 유량을 높일수록 액적의 크기가 커지게 되면서 화염의 길이가 길어지고 불완전 연소가 되는 모습을 보였다.

익스트랙터의 인가전압을 6 kV, 8 kV 로 올렸을 경우 발생하는 액적 속도는 4.42 m/s, 5.75 m/s 로 4 kV 일 때의 3.53 m/s 보다 증가하였으며 화염의 형상이 불안정해지고 화염이 유지되는 시간도 줄어들었다. 하지만 공급되는 공기의 유량을 증가시켜 공기의 유속과 액적의 속도를 동일하게 조절하면 안정된 화염을 얻을 수 있었다.



**Fig.6** visualization for various fuel flow rates at 4 kV extractor voltage.

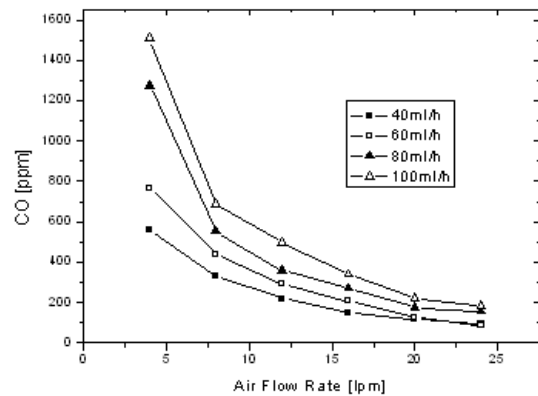
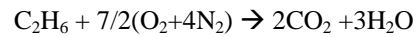
### 3.3 흡 노즐 정전분무 확산 연소의 가스 분석

다중 흡 노즐을 사용했을 때와 단일 흡 노즐을 사용했을 때를 비교해 보면 단일노즐에서의 연소가 다중노즐에서보다 안정되고 또한 완전 연소의 형태를 나타내기 때문에 단일 노즐 연소를 중심으로 가스분석을 수행하였다. 가스 분석은 CO와 CO<sub>2</sub>를 측정하였고 에탄올의 유량과 공기의 유량을 변화시키면서 그에 따른 변화를 관찰하였다.

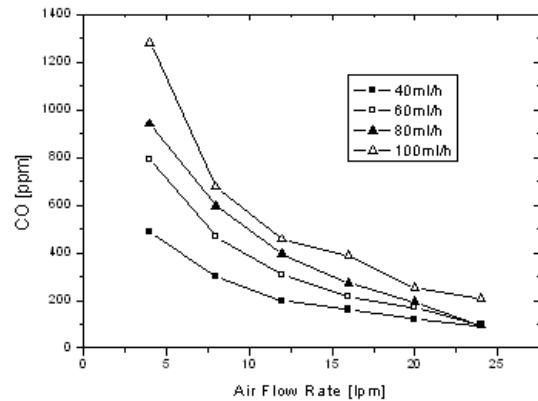
Fig.7 은 가스 분석기(HORIBA, PG-250A)를 통하여 공기 유량의 변화에 따른 CO 성분의 변화를

나타낸 것이다. 에탄올의 유량은 40 ml/h 부터 20 ml/h 간격으로 100 ml/h 까지 주입하였으며 공기의 유량은 4 lpm 부터 24 lpm 까지 공급하면서 CO 의 변화를 살펴보았다. 익스트랙터에 인가되는 전압이 4, 6, 8 kV 일 때 실험을 수행하였는데, 결과를 살펴보면 주입하는 산화제가 많아질수록 CO 가 줄어드는 것을 알 수가 있고, 에탄올 유량이 많아질수록 CO 가 늘어나는 것을 알 수가 있다. 이러한 효과는 크게 두 가지 원인에서 비롯된다. 첫째는 산화제의 양이 많아짐으로써 연료와 산화제간의 반응이 잘 일어나기 때문에 줄어드는 것이 있겠고, 두 번째로는 연소에 필요한 산화제의 유량보다 많은 공기가 유입이 되면서 희석(dilution)에 의한 효과도 있을 것이라 예상이 된다.

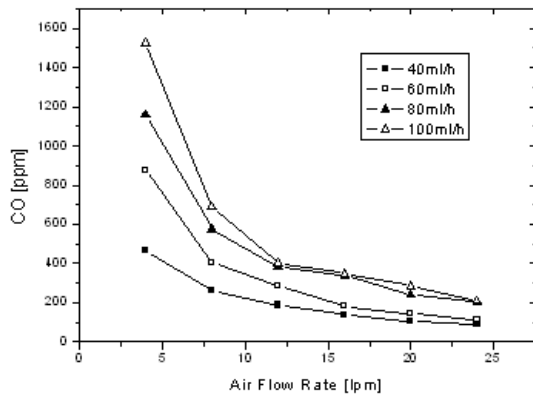
자세하게 연소 효율을 알아보기 위하여 CO/CO<sub>2</sub> [%]를 계산해 보았다. 일반적으로 에탄올이 완전 연소를 하게 되면



(a) 4 kV



(b) 6 kV



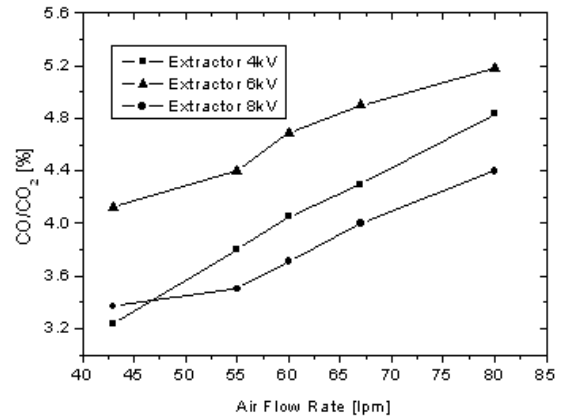
(c) 8 kV

**Fig.7** Variation of CO as change of the air flow rate for various extractor voltages.

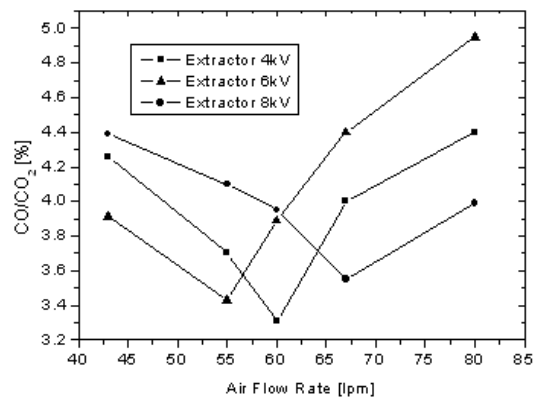
의 화학식을 만족하게 되어서 이론적으로는 CO<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O 만이 배출되어야 한다. 그러나 완전연소는 현실적으로 힘든 것이고 이로 인해 불완전 연소 시 NO<sub>x</sub>와 CO가 배출이 되게 되는 것인데 이를 적용하여 CO와 CO<sub>2</sub>의 배출 비를 따짐으로써 얼마나 연소가 효율적으로 잘 되었는지를 알 수 있는 것이다. Fig.8에 CO/CO<sub>2</sub>를 나타내었고, 에탄올의 유량에 따라 (40, 60, 80 ml/h) 엑스트랙터에 인가되는 전압이 4, 6, 8kV일 때 CO와 CO<sub>2</sub>의 배출량을 측정하여 계산하였다. 이 때 공기 유량은 43 lpm ~ 80 lpm까지 공급하였다. 결과에서 확인할 수 있듯이 각 연소 조건마다 연소 효율이 좋아지는 최적 구간이 존재한다는 것을 확인할 수 있다. 에탄올의 유량이 40 ml/h가 공급되고 있을 시에는 공기 유량이 43 lpm일 때 가장 높은 연소 효율을 나타냈으며, 에탄올 유량이 60 ml/h일 때는 공기 유량 55-65 lpm 사이에서, 에탄올 유량이 80 ml/h일 때는 공기유량 80 lpm일 때 가장 높은 연소 효율을 보이고 있었다.

실험을 통하여 홈 노즐을 이용한 확산 연소장치를 제작할 수 있었다. 특히 정전분무를 이용한 확산 연소에서는 액적의 크기, 액적과 산화제의 혼합시간이 안정된 연소를 하는데 가장 큰 영향을 가진다는 것을 실험을 통해 알 수 있었다. 단일 홈 노즐 정전분무 장치를 기준으로 가스 분석을 해보면 실험에 사용된 조건에 따라 87~1500 [ppm], NO는 0.1~1.9 [ppm]의 분포를 가지며 공기 유량이 커질수록 희석의 영향이 크다는 것을 알 수 있었고, 안정적인 연소 구간을 찾기 위해 CO/CO<sub>2</sub> 효율을 계산하여 각 특정 조건마다 안정적인 연소를

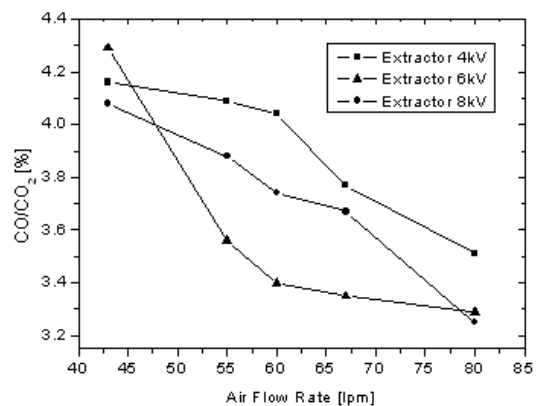
위한 최적 조건이 존재한다는 것을 실험적으로 알 수 있었다.



(a) 4 kV



(b) 6 kV



(c) 8 kV

**Fig.8** Variation of CO/CO<sub>2</sub> as change of the air flow rate for various extractor voltages.

#### 4. 결 론

단일/다중 흡 노즐을 이용한 정전분무 실험으로 인해 고집적, 고 유량 정전분무 시스템을 개발한 것을 바탕으로 정전분무를 이용한 확산연소 장치를 개발하였다. 익스트랙터를 설치하여 연소에 필요한 충분한 연료를 공급할 수 있도록 하였고, 균일한 액적이 분무되는 조건을 유지시키고 일정한 공기 유량을 주입하면서 서로간의 혼합 시간을 극대화시켜 안정된 연소가 진행되도록 하였다. 단일 흡 노즐을 설치하였을 때와 다중 흡 노즐을 설치하였을 때의 실험을 수행하였고 특히 단일 흡 노즐을 이용한 연소실험을 통해 익스트랙터의 인가 전압과 공기 유량, 에탄올 유량 등을 조절하면서 안정된 화염이 발생하는 구간을 찾는데 성공하였다. 연소가 이루어지는 구간에서의 CO, NO, CO<sub>2</sub> 가스 분석을 실시하였고, 안정적인 연소구간 내에서 NO 와 CO 가스가 감소하는 것을 확인하였으며, 최적의 연소효율이 나타나는 구간을 CO/CO<sub>2</sub> 를 이용해 찾을 수 있었다. 따라서 단일/다중 흡 노즐을 이용한 최초의 확산연소 시스템을 구현했으며 앞으로 입자 코팅 시 필요한 연소시스템에 적용할 수 있는 기술을 확보하였다

#### 후 기

본 연구는 환경부의 지원으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Tang, K., and Gomez, A., 1994, "On the structure of an electrostatic spray of monodisperse droplets," *Phys. Fluid*, Vol. 6, pp. 2317~2332.
- (2) Lohmann, M., Beyer, H., and Schmidt-Ott, A., 1997, "Size and charge distribution of liquid metal electro spray generated particles," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 28(Suppl. 1), pp. S349~350.
- (3) Miao, P., Blalchandran, W., and Xiao, P., 1999, "Formation of ceramic thin films using electro spray in cone-jet mode," *IEEE Trans. On Ind. Appl.*, Vol. 4, pp. 2487~2496.
- (4) Lozano, P., Martinez-Sanchez, M., and Lopez-Urdiales, J. M., 2004, "Electro spray emission from nonwetting flat dielectric surfaces," *J. Colloid Interface Sci.*, Vol. 276, pp. 392~399.

- (5) Bocanegra, R., Galan, D., Marquez, M., Loscertales, I. G., and Barrero, A., 2005, "Multiple electro sprays emitted from an array of holes," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 36, pp. 1387~1399.
- (6) Park, H. Kim, K., and Kim, S., 2004, "Effects of a guard plate on the characteristics of an electro spray in the cone-jet mode," *J. Aerosol Sci.*, Vol.35, pp. 1295~1312.