

교류 전기장이 인가된 층류 자유제트유동의 변화에 관한 예비 조사

김경택* · 이원준** · 박정*†

Preliminary Tests on Change of Free Jet Flow in Laminar with Applying Electric Fields

Gyeong Taek Kim*, Won June Lee**, Jeong Park*†

ABSTRACT

The characteristics of gas free jet flows in laminar with having applied electric fields have been investigated experimentally. A single electrode configuration was adopted such that electric fields were applied directly to nozzle and thus the surrounding could be an infinite ground. The experimental results showed that breakdown point at laminar flow has been measured by varying the applied voltage and frequency of AC. The effect of applying electric fields to free jet flow in laminar was discussed in detail.

Key Words : Free jet flow, Breakdown Point, Electric Field, Ionization, Atmospheric pressure discharges, electron avalanche.

서 론

전기장 및 플라즈마를 이용한 연소는 층류 부상 화염의 전파 속도 증가, 화염의 안정화 및 연소 배출물 감소 등에 대해 지금까지도 광범위하게 연구 되어지고 있다[1,2,3]. Electric discharge를 이용한 제트 화염의 안정화에 있어도 다양한 시도와 연구가 이루어져 왔다[4]. 특히 산업용 버너 설계에 있어 제트 화염의 안정화는 매우 중요한 문제라고 할 수 있다. 이런 이유로 제트 화염의 부상에 대한 연구가 진행되어 왔다. Yoon 등은 질소로 희석된 연료를 사용하여 층류 자유 제트 부상화염을 연구하였다[5].

전기장을 화염 내에 인가하면 ion diffusion flux 및 화학 반응율을 급격히 증가시켜 화염 안정화에 기여한다는 것이 알려져 있다. 또한 가속된 하전 입자와 중성 입자가 충돌로 하전 입자의 운동량이 중성 입자로 전달되며, 그 결과 중성 입자는 bulk flow가 형성되어 화염에 영향을 미치게 된다. 화염에 전기장을 인가하였을 경우, 전기장이 화염에 어떤영향을 주는지에 대한 많은

연구들이 보고되고 있지만, 전기장의 영향을 규명하기 위해서는 아직 더 많은 실험과 연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 층류 자유제트 부상화염에 전기장의 영향을 규명하기 보다는 교류 전기장의 인가에 따른 층류 자유제트 유동의 변화에 관한 예비 조사를 수행하고자 한다.

실험 장치 및 방법

본 연구에서 사용한 실험 장치는 노즐, 오실로스코프(Oscilloscope), 증폭기(Amplifier), 유량 조절부, 함수 발생기(Function generator), 유동을 가시화 하기 위한 Paraffin, VD_IVA DPSS LASER DRIVER으로 구성되어 있다. 노즐 내경은 4.5mm, 길이는 노즐출구에서 완전 발달된 유동을 얻기 위해 충분한 500mm로 설정하였다.

연료 노즐은 바깥은 상부와 하부는 메쉬 스크린을 설치하였고 90cm x 90cm x 120cm의 아크

* 부경대학교 기계공학과

** 부경대학교 의생명융합공학협동과정

† 연락처자, jeongpark@pknu.ac.kr

TEL : (051) 629-6141 FAX : (051) 629-6126

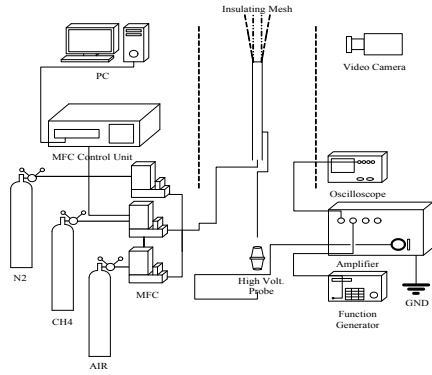


Fig.1 Schematic of experimental set up.

릴 판을 설치하여 유동의 교란을 최소화하였다. 실험에 사용한 기체는 순도 99.95%인 메탄, 순도 99.99%인 질소, 초고순도 공기이다. 기체의 유량은 MFC를 사용하여 제어 하였다.

전기장 인가를 위해 함수 발생기를 이용하여 주파수와 인가전압을 조절하고 증폭기를 통해 RMS 값으로 7 kV까지 증폭하였으며, 주파수와 전압을 확인하기 위해서 오실로스코프를 사용하였다. 증폭기의 고전압부를 연료노즐에 연결하고, 건물에 접지하여 단일 전극의 구성을 갖도록 하였다. 전기장이 인가된 기체의 유동을 관찰하기 위해 Mie Scattering Method를 통해 유동을 가시화 하였다.

결과 및 논의

Fig.2는 (A)는 노즐출구 속도 $U_0 = 1.5\text{m/s}$ 에서 전기장을 인가하지 않은 경우, 질소의 유동을 직접사진으로써 종류를 보여준다. 또한 Fig.2 (B)는 노즐출구 속도 $U_0 = 1.5\text{m/s}$ 에서 주파수 $f_{ac} = 43\text{Hz}$ 로 일정하게 인가하였을 경우, 전압($1\text{kV} \leq V_{ac} \leq 7\text{kV}$)에 따른 질소의 유동의 정면사진과 윗면사진으로써 유동의 변화를 보여준다. Fig.2 (a)는 $V_{ac} = 1\text{kV}$, $f_{ac} = 43\text{Hz}$ 의 교류 전기장이 인가된 상태에서의 정면사진과 윗면사진을 보아도 질소 유동에 변화가 없는 것을 알 수 있다. 그러나 2kV , 43Hz 의 교류 전기장 하에서 윗면사진(b)를 보면 질소의 유동이 x축을 기준으로 45도 위로 기울어져 타원의 모양으로 관측되었다. 또한, 전압 $2\text{kV} \leq V_{ac} < 3\text{kV}$ 에서 특정 높이에서 질소의 유동이 두갈래로 갈라지는 것을 확인 할 수 있다(c-d). 전압을 더 증가시키면 (d-g) 질소의 유동이 세갈래로 갈라지는 것을 알 수 있지만 양갈래의 유량이 중간의 유량보다 더 많다는 것을 알 수 있다. Fig.2 (c-g)를 보면 양갈래로 갈라지는 지점이 존재한다. 이 지점을 Breakdown

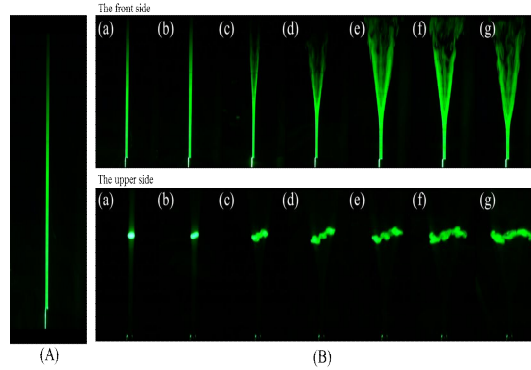


Fig.2 Instantaneous direct photos of N_2 free jet laminar flows (A) without electric field, (B) with electric field when (a) $V_{ac} = 1\text{kV}$, (b) 2, (c) 3, (d) 4, (e) 5, (f) 6, and (g) 7 at $f_{ac} = 43\text{Hz}$ and $U_0 = 1.5\text{m/s}$

Point 라고 명명하였다. 대기에는 자유전자들이 존재한다. 대기압에서 원자나 분자의 이온화 에너지 보다 충분히 강한 전기장이 인가 되었을 때, 자유전자와 원자나 분자의 충돌에 의해 원자나 분자가 전자를 잃어 양이온과 전자들이 만들어진다. 그 후 충분히 강한 전기장은 전자들을 가속시키고 분리시키며, 각 전자들에게 운동에너지를 전달하게 된다. 이러한 강한 에너지의 전자들은 중성 원자들과 충돌하여 electron/positive ion pairs를 생성한다[6]. 이러한 과정을 electron avalanche라고 한다. 노즐에 직접 높은 전압을 인가 할 경우 강한 에너지를 가진 전자들과 양이온이 존재 하며, 양이온과 전자들은 노즐 출구 속도에 의해 유동방향으로 움직일 것이다. 이러한 현상이 종류 자유제트유동의 변화에 기여한다.

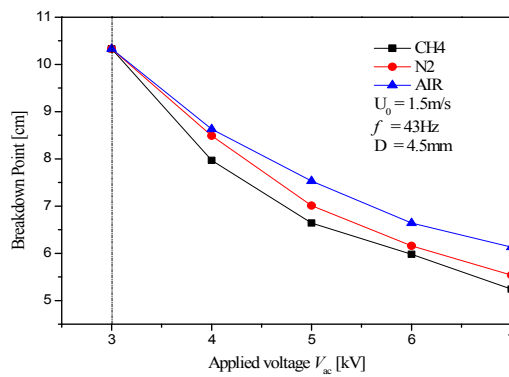


Fig.3 Breakdown Point with applied voltage at various gases

Fig.3은 $f_{ac} = 43\text{Hz}$ 의 고정 주파수에서 3가지 가스(N_2 , CH_4 , Air)를 사용하여 전압에 따른 노즐로부터 Breakdown Point까지의 높이를 나타낸 것이다. 질소(N_2) 뿐만아니라 메탄(CH_4)과 공기(Air)의 경우에도 이와 같이 Breakdown Point가 있음을 알 수 있었다. 3kV 미만에서 가스의 유동 변화가 전압의 변화에 크게 영향을 받지 않았지만 3kV 이상에서 전압이 증가함에 따라 Breakdown Point가 노즐 방향으로 가까이 존재함을 알 수 있었다. 또한, 가스의 따라 Breakdown Point의 위치가 다르다. 3kV에서는 Breakdown Point의 위치가 같았으나, 그 이상의 전압에서 Breakdown Point의 위치는 공기(Air) > 질소(N_2) > 메탄(CH_4)이다.

Fig.4는 질소(N_2) 자유 제트 유동에서 주파수 $f_{ac} = 43\text{Hz}$ 로 일정하게 인가 하였을 경우, 전압과 노즐 출구 속도에 따라 유동의 변화를 나타내었으며 다음과 같이 영역으로 구분하였다. 노즐 출구 속도가 1m/s 이하에서 유동의 변화가 전압의 변화에 크게 영향을 받지 않는다. Regime I은 $Re_b \leq 1062.83$ 이하인 층류 영역에서 특정 속도를 넘어서면 유동의 변화가 전압의 변화에 영향을 받는 Breakdown Point가 존재하는 영역이다. Regime II는 전기장이 인가되지 않았을 경우, 질소(N_2)의 유동은 $Re_b \leq 1184.21$ 이하인 층류이지만, 전압을 1kV 이상 인가 하였을 경우 유동은 층류영역에서 난류영역으로 변하는 영역이다. 노즐 출구 속도가 4m/s 이상일 경우, 질소(N_2)의 유동은 전기장을 인가하지 않아도 난류 영역에 속한다. $V_{ac} = 4\text{kV}$, $f_{ac} = 43\text{Hz}$ 로 교류 전기장을 일정하게 인가 하였을 경우, 노즐 출구 속도에 따라 Breakdown Point가 존재하는 구간이 있다.

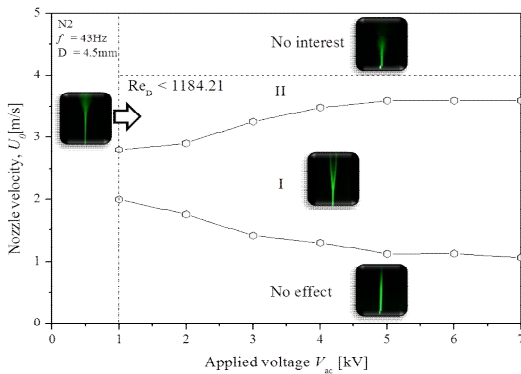


Fig.4 Regions of different types of N_2 free jet laminar flows for $f_{ac} = 43\text{Hz}$ at various applied AC voltages.

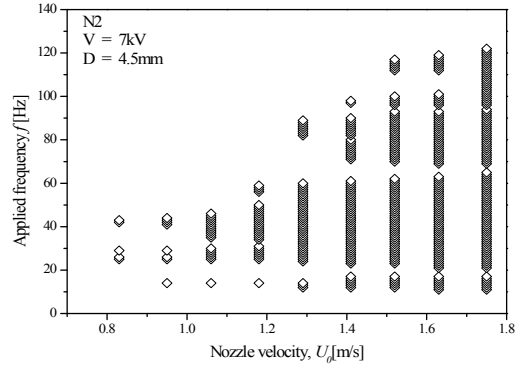


Fig.5 N_2 flow change with applied frequency and nozzle velocity.

또한 높은 전압을 인가 할수록 Breakdown Point가 존재하는 노즐 출구 속도 구간이 넓어짐을 알 수 있었다.

다양한 전압과 주파수에 따라 질소(N_2)의 유동은 변화한다. 특히 노즐 출구 속도와 전압을 일정하게 인가 하였을 경우, 질소(N_2)의 층류 자유 제트 유동은 다양한 형태와 방향이 존재한다. Fig.5는 그 다양한 유동 중에서 $V_{ac} = 7\text{kV}$ 로 인가하여 층류 자유 제트 유동이 Breakdown Point가 존재하는 인가된 주파수를 나타낸 것이다. 노즐 출구 속도가 0.83m/s 이하에서 높은 전압과 주파수를 걸어도 Breakdown Point는 존재하지 않는다. Fig.5를 보면 노즐 출구 속도가 0.95m/s 이상에서 $V_{ac} = 7\text{kV}$, $f_{ac} = 43\text{Hz}$ 를 인가 하였을 때 층류 자유 제트 유동은 항상 Breakdown Point가 존재한다. 또한 전압 7kV에서 노즐 출구 속도가 증가함에 따라 Breakdown Point가 존재하는 층류 자유 제트 유동에 인가된 주파수의 영역이 증가함을 알 수 있다. 하지만 Breakdown Point가 존재하는 인가된 주파수는 임계 주파수가 존재하고 그 주파수를 넘어서면 유동에 Breakdown Point가 존재하지 않는다.

결론

전기장이 인가된 층류 자유 제트 유동의 변화에 대한 예비 실험을 수행 하였고, 다양한 전압 및 주파수 조건에서 층류 자유 제트 유동의 변화를 측정 하였으며, Breakdown Point가 존재하는 영역이 있었다. 전기장에 따른 층류 자유 제트 유동의 변화에 따라 서로 다른 영역으로 구분 하였다. 전기장의 영향이 층류 제트 유동에 끼치는 영향이 매우 적은 영역이 존재하고, Regime I 에서는 특정 전압과 주파수를 인가 하였을 경우,

층류 제트 유동에 Breakdown Point가 존재하는 영역이다. Regime II는 전기장을 인가 하였을 경우 층류 유동에서 난류 유동으로 변하는 영역이다. 이러한 결과들은 좀더 많은 실험을 통해 확인하는 것이 향후 연구로 남아 있다.

후 기

본 연구는 한국기계연구원의 “300kW급 가스 터빈 연소기의 NO_x 5ppm 이하 배출성능 구현을 위한 전기장 응용 초회박 연소기 원천기술 개발” 과제의 일부로 수행 되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] M.K. Kim, S.K. Ryu, S.H. Won, S.H. Chung. “Electric fields effect on liftoff and blowoff of nonpremixed laminar jet flames in a coflow.” *Combustion and Flame* 157 (2010)
- [2] S.H. Won, S.K. Ryu, M.K. Kim, M.S. Cha, S.H. Chung. “Effect of electric fields on reattachment and propagation sepped of trivrachial flames in laminar coflow jets.” *Proceedings of the Combustion Institute* 31 (2007) 963-970.
- [3] J. Lawton, F. Weinberg, “Electrical Aspect of Combustion”, Clarendon Press, 1969.
- [4] K. Criner, A. Cessou, J. Louiche, P. Vervisch, “stabilization of turbulent lifted jet Flames assisted by pulsed high voltage discharge”, *Combus. Flame*, 144, 2006, pp 422-425
- [5] S. H. Yoon, J. K. Han, Park, J. H. Yun, S. I. Keel., “Self-excitation in laminar lifted flames diluted with nitrogen.”, *combust lame*. Vol. pp. 1960-1969
- [6] Little, P.E.(1956). “Secondary effects”. In Flugge, Siegfried. *Electron-emission Gas discharges I. Hadnbuch der Physik XXI*. Berlin Heidelberg New York : Springer- Verlag. pp. 574-663