

동축류 버너에서 층류 부상화염 안정화의 교류 전기장 효과에 관한 실험적 연구

박철수* · 원상희* · 정석호*[†] · 이상민** · 차민석** · 송영훈**

Effects of AC Electric Field on the Stability of Laminar Lifted Flame in Coflow Jet

C. S. Park, S. H. Won, S. H. Chung, S. M. Lee, M. S. Cha, Y. H. Song

ABSTRACT

The effect of electric fields on the stability of non-premixed laminar lifted flame in coflow jets has been investigated by applying high voltage alternative current (AC) to the nozzle of propane fuel. The stable lifted flame which exist in far field of jets, the liftoff height was not effected by applied voltage. This implies that the cold jet between the nozzle and flame base can be analyzed with the previous cold jet theory. Flame liftoff and reattachment velocities were also measured as function of applied voltage and frequency. The fuel jet velocity at flame liftoff and reattachment increased with increasing voltage, implying that the range of flame stability can be extended with the AC charging. However the liftoff velocity increased with frequency of AC charging on nozzle, whereas the reattachment velocity decreases with frequency. The liftoff and reattachment velocities were correlated linearly with voltage considering the effects of frequency.

Key Words : 층류 부상 화염, 화염 부상, 화염 날림, 전기장, 교류, 동축류 제트

1. 서 론

최근에 들어서 실용연소기에 대한 플라즈마를 이용한 안정화 기술에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 이러한 연구에는 플라즈마를 이용한 에너지 공급을 통해 화염의 온도를 상승시키는 등의 다양한 연구가 수행되고 있다. [1, 2] arc discharge 및 전기장의 효과가 예혼합 화염의 안정성을 확장시키고, 확산 화염의 경우에는 매연 생성을 감소시키는 연구된 바가 있다. [1-5] 또한 DBD 방전 효과를 이용하여 화염의 길이를 감소시켜 매연 생성을 급격히 감소시키는 연구가 [6] 보고된 바가 있으며, 직류 전원을 이용한 corona

discharge의 화염에 대한 영향을 관찰하기도 하였다. [7]

최근에는 난류 확산 화염의 안정성에 대한 전기장 및 DBD 플라즈마의 효과에 대한 연구가 수행된 바가 있다. [8 - 10] 일반적으로 노즐에 부착된 난류 화염의 경우 제트의 속도가 증가함에 따라 화염 부상이 발생되게 되고, 과도한 속도에서는 화염 날림이 발생하게 된다. [11] 이러한 난류 부상화염의 경우 전기장의 효과가 존재할 경우 화염의 부상이 지연되어, 제트 속도의 증가에도 불구하고 비교적 안정적인 난류 화염을 유지할 수 있음이 관찰된 바가 있다.

본 연구에서는 기존의 전기장에 의한 난류 부상 화염의 안정성 증진 효과에 대한 심도있는 고찰을 하기 위해 동축류 제트에서 부상 화염의 안정성에 대해 전기장 효과를 관찰하였다. 이러한 동축류 제트에서의 부상화염의 안정화에 대해서는 많은 연구가 수행되어 왔다. [12-15] 층류 부상

* 서울대학교

† 정석호, shchung@snu.ac.kr

** 한국기계연구원

화염의 경우 특정 제트 속도에서 화염은 부상하게 되고 제트 속도의 증가에 따라 화염의 부상 높이는 비선형적으로 증가하다가 화염 날림이 발생하게 된다. 또한 부상 화염의 안정화는 삼지 화염의 전파 속도와 제트의 국부 유속이 균형을 이루는 지점에서 이루어짐이 밝혀진 바가 있다. 또한 연료의 Sc 수가 1보다 큰 경우 이론 당량비를 따르는 국부 속도의 변화로 인해 부상화염의 출구 제트 속도를 감소시킬 경우 초기 부상 높이보다 더 낮은 높이 및 속도에서 재부착이 일어나는 Hysteresis 현상이 존재함이 밝혀진 바가 있다. [14] 따라서 본 연구에서는 이러한 잘 알려진 동축류 제트에서의 층류 부상화염을 이용하여 전기장 효과에 따른 안정성 향상 현상을 관찰하고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

실험 장치는 버너, 유량제어부, 전원장치, 측정장치로 구성되어 있으며, 장치 개략도는 그림 1에 나타내었다. 연료는 순도 99.5% 이상의 순수 프로판을 사용하였으며, 습식 가스미터로 보정한 질량유량계 (MFC, MKS)를 이용해 유량을 조절하였다. 버너는 노즐과 동축류 공급부로 이루어져 있으며, 연료 노즐은 내경 0.254 mm인 스테인레스 직관을 사용하였다. 또한 외부 유동에 의한 교란을 방지하기 위해 연료 노즐 주위에 동축류 공급장치를 설치하였다. 노즐의 버너는 플라스틱 계열의 재질 (polyacetal) 로 제작하여 노즐 외부로의 전기 흐름을 차단하고, 오직 노즐과 화염간의 전기적 상호작용만 이루어 질 수 있도록

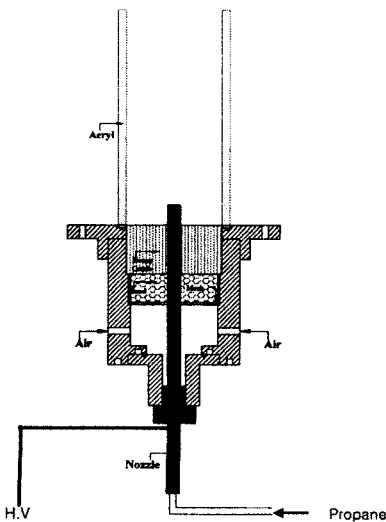


그림 1 실험 장치 개략도

하였다. 또한 동축류 공기의 균일 유동장을 형성하기 위하여 동축 공기 공급부에는 하니콕과 비드(glass bead)를 설치하였다. 모든 실험 조건에서 동축류 공기의 출구 속도는 6.27 cm/s로 고정하였으며, 이 경우 제트 출구 속도에 비해 매우 낮은 값으로 동축 제트의 이론적 해석이 가능하다. [15] 또한 외부 교란과의 완벽한 차단을 위해 내경이 90 mm인 아크릴 재질의 실린더를 동축류 외부에 설치하였다.

측정 장비는 부상 화염의 부상 높이를 측정하기 위해 카세토미터와 디지털 카메라를 사용하였으며, 공급한 전원의 특성을 파악하기 위해 오실로스코프와 고전압 프로브를 사용하였다. 전원은 고전압 교류 및 직류 전원을 사용하였으며, 교류의 경우 50 - 2000 Hz 범위의 주파수를 이용하였으며, 전원은 최대 8000 V 까지 사용하였다. 전원기의 고전압 전극은 노즐에 연결되어 open circuit 구조로 되어 있다.

실험은 동축류 버너에서 부상 화염의 화염 부상 특성과 재부착 현상을 특정 주파수에서 전원 공급에 따라 관찰하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 층류 부상 화염

전기장 효과에 의한 층류 부상화염의 영향을 관찰하기 위해 자유 제트의 경우보다 훨씬 안정적인 부상화염이 관찰되는 동축류 버너에서의 부상화염의 거동을 관찰하였다. 그림 2는 주파수가 60 Hz 일 경우 전압에 따른 부상화염의 부상 높이를 측정한 결과이다. 그림에서 보듯 실험 범위에서 화염의 부상 높이는 전압을 가해도 변화를 보이지 않으며, 안정적으로 부상되어 있음을 알 수 있다. 점선은 기존의 냉간 제트를 적용할 경우 부상 화염의 부상 높이와 제트 출구 속도가

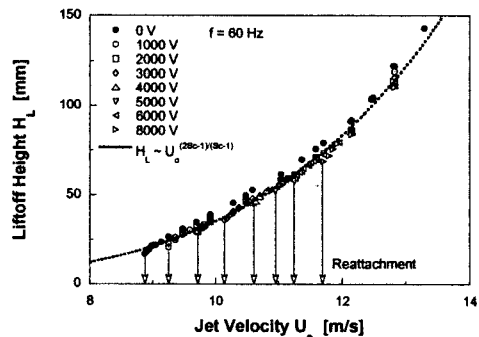


그림 2 교류 전기장에서 부상 화염의 높이 변화

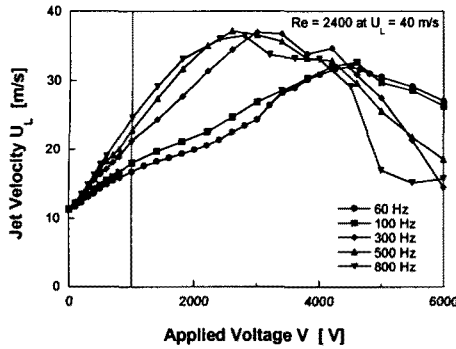


그림 3 전기장 효과에 따른 화염 날립 속도

$H_L \sim U_0^{(2Sc-1)/(Sc-1)}$ 의 관계를 [12-15] 값을 고려하여, 프로판 연료의 경우 $Sc = 1.366$ 로 하여 도식한 결과이다. 이 결과 역시, 부상화염에 있어서 노즐에 가한 전압의 특성과 상관 없이 노즐과 화염간의 영역에서 냉간 제트에의 전기장의 효과가 없음을 보여주고 있다. 이를 확인하기 위해 화염면 상류의 프로판 연료의 특성을 슬리켄 가시화를 통해 확인하였다. 비록 그림으로 나타내지는 않았지만, 전압과 주파수의 변화에 따라 본 실험의 범위에서는 프로판 연료의 제트 확산에 있어서 전혀 변화가 없음을 확인하였다. 그러나 전압이 10000 V에 이를 경우 노즐에서부터 전체적인 공간영역까지 냉간제트의 불규칙한 교란이 발생함을 확인하였다. 실제 부상화염이 존재하는 경우, 이러한 고전압 영역 ($V > 10000$ V)에서는 제트의 교란으로 인해 부상 화염이 불규칙한 진동을 하다가 소멸됨을 관찰하였다. 따라서 본 연구에서는 화염의 부상 특성과 재부착 현상을 냉간 제트의 교란이 존재하지 않은 영역으로 한정시켰다. 그림 2의 실험 결과, 교류 전압의 전기장 효과의 부상화염의 안정성에 대한 효과는 비록 부상 화염의 높이 변화에는 영향을 주지 않음을 확인하였으나, 그림에서 보듯이 전압차에 따라 부상화염의 재부착 현상에는 많은 영향을 주고 있음을 알 수 있었다.

3.2 화염 부상 속도에 대한 영향

그림 3은 고정된 주파수에서 전압의 변화에 따라 노즐에 부착된 화염이 부상되는 순간의 제트 출구 속도를 측정된 결과이다. 제트 출구 속도 U_0 가 40 m/s일 경우 $Re = 2400$ 이므로 실험은 층류 제트 영역에서 수행되었음을 알 수 있다. 전압이 증가할수록 화염 부상 속도는 증가하다가 각 주파수에서 특정 전압에서 최대값을 갖을 후 점차로 감소함을 보이고 있다. 실험 결과 대체로

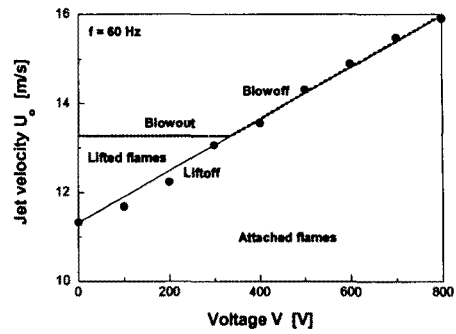


그림 4 전압과 제트 속도에 따른 화염 특성 변화

제트의 Re 수가 2000 미만인 경우 ($U_0 < 30$ m/s), 즉 층류 영역에서는 전압에 대해 화염 부상 속도는 비교적 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 그러나 제트가 층류에서 난류로의 천이 과정에 들어서게 되면 전압에 대한 화염 부상 속도는 대체로 감소하는 경향을 보이고 있다. 그러나 기존의 연구 결과에서는 [8] 난류영역의 경우 역시 전압에 따라 부상 속도가 선형적으로 증가함이 보고된 바가 있다. 하지만 본 연구에서는 제트의 Re 수가 2300 근처로 천이 영역에 해당하여, 이러한 반비례 관계는 제트의 Breakup 현상과 전압과의 상관관계에 의한 것으로 유추할 수 있다. 본 연구에서는 층류 부상화염에 대한 전압 효과만을 고려하기 위해서 화염 부상에 대해서는 그림에서 보듯 $V < 1000$ V 인 영역에 대해서만 고찰하였다.

그림 4는 화염 부상 속도에 대해 앞서 언급한 듯이 전압에 따라 매우 선형적 관계를 갖는 $V < 1000$ V인 영역에 대해 화염 특성을 나타낸 결과이다. 통상적으로 동축류 제트에서의 부상화염의 부상 속도와 화염날립속도는 동축류 속도에

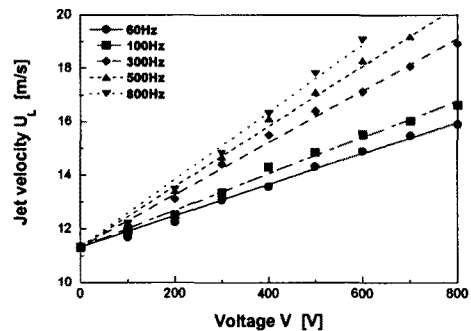


그림 5 전압에 따른 화염 부상 속도 변화

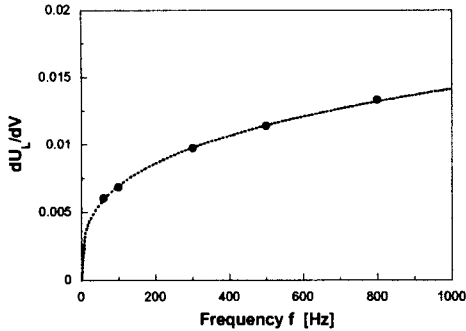


그림 6 주파수에 따른 dU_L/dV

각각 비례 및 반비례의 선형적 관계를 갖고 있으며[15], 본 실험에서 설정한 동축류 속도가 6.27 cm/s인 경우 화염 부상 속도는 $V = 0$ 인 경우 8.9 m/s, 화염 날림 속도는 13.3 m/s 이다. 그림에서 보듯이 전압이 낮을 경우 ($V < 300$ V), 화염의 부상 속도는 전압에 따라 선형적으로 증가하고, 부상된 후에는 화염 날림은 전압 크기에 상관없이 일정한 속도에서 발생하며, 또한 부상된 후 화염은 전압이 0 V일 경우에 해당하는 부상 높이에서 안정화가 이루어진다. 그러나 전압이 높을 경우에는 일단 부상이 일어난후, 해당제트 속도에서는 총류 제트에서는 제트 속도가 높기 때문에 안정적 위치가 존재하지 않음으로 인해 화염 부상과 함께 바로 화염 날림 (Blowoff) 이 일어나게 된다.

그림 5는 앞서 언급한 화염 부상 속도가 전압에 대해 선형적 관계를 갖는 $V < 1000$ V인 영역에서 주파수 변화에 따른 부상 속도 변화를 측정 한 결과이다. 그림에서 보듯 화염 부상 속도는 주파수 변화에 따라 각각 선형적 관계를 갖음을 알 수 있다. 이는 노즐에 가한 전압의 영향으로 인한 화염 부상의 속도에 대한 지연 효과가 선형적

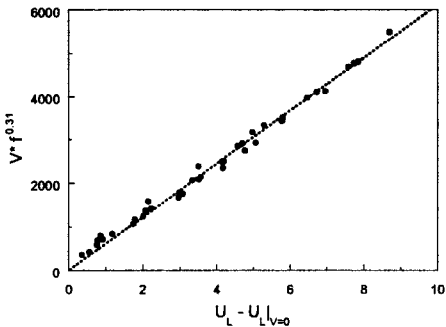


그림 7 전기장에 의한 화염 부상 속도 특성

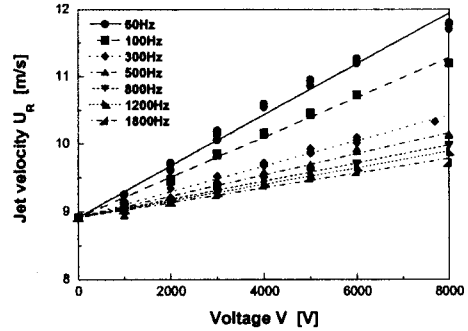


그림 8 전압에 따른 화염 재부착 속도 변화

으로 증가함을 암시하고 있다. 또한 주파수 변화에 대해서는 기존의 난류부상화염에 대한 실험 [8] 과 마찬가지로 주파수가 증가할수록 부상 속도가 증가함을 보이고 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 부상 속도의 지연이 전압에 대해 선형적 관계를 갖음을 착안하여 그림 6에 이의 기울기 변화에 대해 주파수에 대해 도사하였다. 그림에서 보듯이 전압 변화에 따른 부상 속도 증가율 dU_L/dV , 즉 기울기는 다음과 같이 비선형적 관계 $dU_L/dV \sim f^{0.31}$, 를 갖음을 알 수 있다. 앞서 언급한 바와 같이 일정한 주파수에서 화염의 부상 속도는 전압에 따라 선형적 관계를 갖음과 동시에 주파수에 대해서는 비선형적으로 증가함에 착안하여 화염 부상 속도의 교류 전기장의 전압과 주파수에 대한 특성을 그림 7과 같이 나타낼 수 있었으며 다음과 같다.

$$U_L - U_L|_{V=0} = 612V \times f^{0.31} \quad (1)$$

여기서 상관계수 $R = 0.99$ 이다.

3.3 화염 재부착 속도에 대한 영향

앞서 설명한 바와 같이 화염이 부상된 후에는 부상 높이는 전압의 변화에 무관하다. 그러나 그림 2에서 보인 바와 같이 비록 부상화염의 부상 높이에 영향이 없었으나, 전압에 따라 부상 화염의 재부착 속도는 전압에 따라 많은 영향을 주고 있음을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 전압과 주파수 변화에 따른 재부착 속도 변화를 관찰하였으며 그 결과를 그림 8에 도사하였다. 그림에서 보듯이 부상 화염의 재부착 속도는 전압의 증가에 따라 화염 부상시와 마찬가지로 선형적 관계를 갖음을 알 수 있다. 이는 전기장의 효과가 전압에 따라 선형적으로 증가하기 때문으로 설명할 수 있다. 그러나 그림에서 보듯 주파수에 따른 영향은 부상시와는 반대로 주파수 증가에

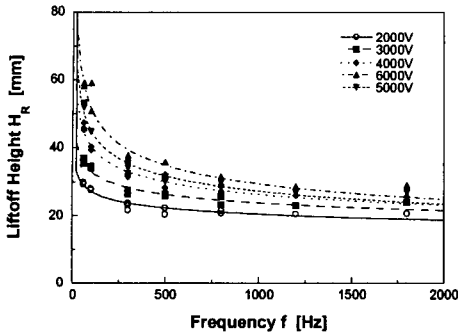


그림 9 주파수에 대한 재부착시 부상 높이 변화

따라 반비례관계를 갖음을 알 수 있다. 기존의 부상화염에 대한 많은 연구[12-15]를 통해서 부상화염의 부상 높이는 부상 속도에 따라 $H_L \sim U_o^{(2Sc-1)/(Sc-1)}$ 의 관계를 갖음이 밝혀진 바가 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 전기장의 효과가 미치는 축방향 거리, 즉 화염 재부착이 일어나는 부상화염의 부상 높이에 대해 그림 9에 도시하였다. 그 결과 이러한 전기장의 효과가 미치는 축방향 거리는 주파수가 감소할수록 급격히 증가함을 알 수 있었다. 이 결과가 암시하는 바는 직류 전기장의 경우, 그 영향을 미치는 거리가 무한대에 이르게 되어 화염 재부착 및 부상에 매우 큰 영향을 미침을 암시하고 있다. 따라서 본 연구에서는 주파수가 0인 경우, 즉 직류 전기장의 효과에 대해서 실험을 수행하였다. 그러나 실험 결과, 비록 그림에 나타내지는 않았으나 직류의 경우 재부착 속도 및 화염 부상에 전혀 영향이 없음을 확인하였다. 이러한 결과가 암시하는 바는 화염 안정화에 있어서 전기장의 효과만이 존재하는 것이 아니라 전기장의 시간에 따른 변화가 매우 큰 요소임을 알 수 있다.

그림 10은 앞서 부상시와 마찬가지로 일정한 주

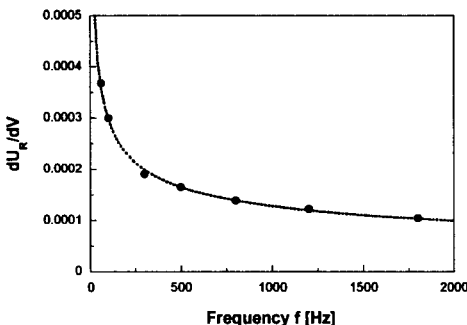


그림 10 주파수에 따른 dU_R/dV

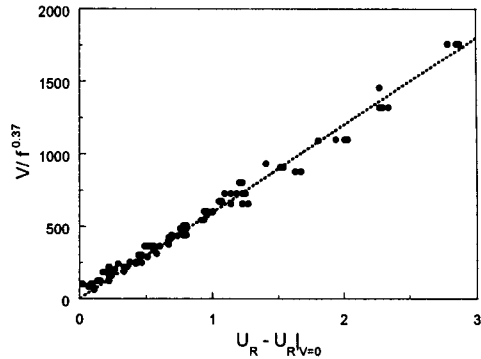


그림 11 전기장에 의한 화염 재부착 속도 특성

파수에 따라 재부착 속도가 전압에 대하여 선형적 관계를 갖음에 착안하여 주파수에 따른 재부착 속도의 증가율, dU_R/dV 에 대해 도시하였다. 앞서 설명한 바와 같이 재부착 속도에 대한 전기장 효과는 주파수에 대해 반비례관계를 갖음을 알 수 있다. 따라서 재부착 속도에 대한 전압 및 주파수에 대한 효과는 그림 11과 같은 관계를 갖으며, 식 (2)와 같다.

$$U_R - U_R|_{V=0} = 599 V / f^{0.37} \quad (2)$$

여기서 상관계수 $R = 0.99$ 이다.

4. 결론

동축류 제트에서 층류 부상화염의 안정화 특성에 대해 고찰하였다. 실험을 통하여 층류 부상화염의 안정화에 대해 교류 전기장 효과에 대한 실험을 통하여 부상 화염의 부상 높이에 대한 전기장의 영향이 없음을 확인하였다. 그러나 화염 부상의 경우 부상 속도는 전압에 선형적으로 비례하며, 주파수에 대해 비선형적으로 증가함을 알 수 있었다. 또한 화염 재부착 현상에 대해서는 재부착 속도 또한 전압의 증가에 따라 증가하였으나, 주파수에 대해서는 비선형적으로 감소하는 것을 관찰하였다. 이러한 실험을 바탕으로 화염의 부상 및 재부착 속도에 대해 전압과 주파수의 함수로 각각 상관관계식을 도출하였다. 그러나 이러한 전기장의 효과가 전압 및 주파수의 변화에 따른 화염의 안정화에 있어서의 실질적 영향 메커니즘에 대해서는 향후 심도 있는 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 배기가스 제로화 사업의

지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] J. Lawton and F. Weinberg, "Electrical Aspect of Combustion," Clarendon Press. (1969).
- [2] F. Weinberg, "Advanced Combustion Methods," Academy Press. (1986).
- [3] H. Ohisa, I. Kimura, and H. Horisawa, "Control of Soot Emission of a Turbulent Diffusion Flame by DC or AC Corona Discharges," *Combust. Flame*, 116, 653-661 (1991).
- [4] M. Saito, T. Arai and M. Arai "Control of soot emitted from acetylene diffusion flames by applying an electric field," *Combust. Flame*, 119, 356 - 366 (1999).
- [5] E. I. Mintoussov and A. Y. Starikovskii, "Flame Control by means of Non-Equilibrium Low-Temperature Nanosecond Silent Gas Discharge Plasma," *CD Proc. Symp. Plasma Chem.*, 16 (2003).
- [6] M. S. Cha, S. M. Lee, K. T. Kim and S. H. Chung, "Interaction between a Non-Thermal Plasma and a Flame," 2003 IEEE Int. Conf. Plasma Sci., Korea, June 2-5 (2003).
- [7] J. Vinogradov, E. Sher, I. Rutkevich and M. Mond, "Voltage-current characteristics of a flame-assisted unipolar corona," *Combust. Flame*, 127, 2041 - 2050 (2001).
- [8] S. M. Lee, C. S. Park, M. S. Cha, and S. H. Chung, "Effect of Electric Fields on the Stability of Non-Premixed Turbulent Jet Flames," *IEEE trans. Plasma Sci.*, submitted
- [9] R. Delorme and P. Vervisch, "Lifted Flame Stabilization by a Nanosecond Pulsed DBD discharge," *CD Proc. Symp. Plasma Chem.*, 16, (2003).
- [10] A. Y. Starikovskii, "Plasma Supported Combustion," 30th Int. Symp. Comb., Chicago, Jul 25-30 (2004).
- [11] M. S. Cha and S. H. Chung, "Characteristics of Lifted Flame in Nonpremixed Turbulent Confined Jet," *Proc. Combust. Int.*, 26, 121 - 128 (1996).
- [12] S. H. Chung, and B. J. Lee, "On the Characteristics of Laminar Lifted Flames in a Nonpremixed Jet," *Combustion Flame*, 86:62-72 (1991).
- [13] B. J. Lee, and S. H. Chung, "Stabilization of Lifted Tribrachial Flames in a Laminar Nonpremixed Jet," *Combustion Flame*, 109:163-172 (1997)
- [14] J. Lee, and S. H. Chung, "Characteristics of Reattachment and Blowout of Laminar Lifted Flames in Partially Premixed Propane Jets," *Combustion Flame* 127:2194-2204 (2001).
- [15] J. Lee, S. H. Won, S. H. Jin, and S. H. Chung, "Lifted Flames in Laminar Jets of Propane in Coflow Air," *Combustion Flame* 135:449-462 (2003).