

저주파 교류 전기장 내에서의 부상화염의 재부착 특성에 관한 연구

김용규* · 류승관* · 원상희** · 정석호**

Effect of Electric Fields on Reattachment of Lifted Flame at Low AC Frequency

Y. K. Kim, S. K. Ryu, S. H. Won and S. H. Chung

ABSTRACT

The reattachment characteristics of propane lifted flames in laminar coflow jets influenced by AC electric fields have been investigated experimentally in low AC frequency range. The reattachment velocity and height have been measured by varying the applied AC voltage and frequency. The results showed that the reattachment of lifted flame occurred at relatively higher jet velocity with AC electric fields, comparing to that without having AC electric fields. The effect of AC electric fields became more effective at higher voltage and lower frequency in the AC frequency range larger than 30 Hz. However, in the low frequency range below 30 Hz, the reattachment velocity decreased with decreasing frequency. Consequently, there existed a transition regime, for the frequency smaller than about 30 Hz. Also, when the AC voltage was applied to the fuel nozzle at very low frequency, the reattachment process exhibited an oscillatory behavior, synchronized with the applied AC frequency.

Key Words : Lifted flame, Reattachment, AC Electric field, Low frequency, Oscillation

기 호 설 명

V	Voltage	U_{RA}	Reattachment velocity
f	Frequency	V_a	Applied voltage
H_{RA}	Reattachment height	H_f	Flame Height

1. 서 론

연소 현상에 대한 전기장의 효과는 Brande[1]의 연구 이후로 많은 연구가 이루어져 왔다. 전기장에 의한 화염 안정성의 향상, 전파 속도의 증가, 배출물 감소 등과 같은 다양한 연소현상의 변화가 연구되어 왔다[2-9]. 전기장의 효과에 의한 연소 현상의 변화는 주로 전기장에 의한 이온

풍 효과(ionic wind effect), 화학 반응의 변화와 같은 이유로 설명되고 있다. 한편, 아직까지 비예혼합 제트 화염에서 전기장 효과에 대한 연구들은 다소 한정되어 있다. 비예혼합 제트 화염에서의 전기장 효과에 대해 Lee 등은 난류 비예혼합 제트 화염에서의 전기장에 의한 화염 안정성 증진에 관한 연구를 발표하였으며[10], 최근에는 Won 등이 프로판을 연료로 하는 층류 동축류 제트에서 부상화염의 재부착 특성에 대한 전기장의 영향을 보고한 바 있다[11]. 이 연구에서는 교류 전기장을 연료 노즐에 걸어 주었을 때 전기장이 없었을 때 보다 더 높은 제트 속도에서 재부착이 발생하게 되는 것을 관찰하였으며, 결국 전

* 서울대학교 기계항공공학부

† 연락처, shchung@snu.ac.kr

** 한국과학기술연구원

기장 하에서 화염의 안정화 한계가 확장되는 것을 보고하였다. 이 연구에서 주로 60 - 1800 Hz 범위의 주파수에서 재부착 특성을 관찰하였다. 이 범위의 주파수에서 재부착 높리와 속도는 걸어진 전압의 증가와 주파수 감소에 따라 증가하였으며, 주파수가 감소함에 따라 재부착 높리는 발산하는 형태를 나타내었다. 한편 전기장이 걸리지 않았을 때의 재부착 높리와 관련하여 생각해 볼 때 60 Hz 이하의 구간에서 재부착 높리의 증가가 감소로 변하는 위치가 있을 것으로 예측하였다. 따라서 본 연구에서는 주로 60 Hz 보다 낮은 주파수 영역에서의 부상화염의 거동에 대한 이해를 높이고 이 영역에서의 천이구간의 특성을 살펴보기 위하여 교류 전기장 내에서의 동축류 제트 층류 부상화염의 재부착 특성을 살펴보았다.

2. 실험 장치 및 방법

본 연구에 사용된 실험장치의 구성을 그림 1에 나타내었다. 실험 장치는 동축류 버너와 유량 조절부, 교류 전압 공급기, 오실로스코프, 고전압 프로브 등으로 구성 되어 있다. 스테인리스 스틸 연료 노즐은 내경은 0.254 mm, 외경은 1.588 mm 이고 동축류 버너의 중심에 설치하였다. 노즐 길이는 관내 속도 분포가 완전 발달되도록 하기 위하여 10 cm 로 설정하였다. 동축류의 내경은 90 mm 이며, 동축류의 공기 속도는 3.0 cm/s 로 고정하였다. 동축류에서 나오는 공기는 glass beads와 honey comb을 통과하여 균일한 속도 분포를 가지도록 설계하였다.

동축류 버너는 연료 노즐을 제외하고 전기적으로 절연 상태가 되도록 acetal resin으로 제작하였으며, 내경 90 mm, 길이 20 cm 인 아크릴 실

린더를 동축류 공기 출구에 설치하여 외부 교란을 배제하였다. 연료와 산화제는 각각 순수 프로판(C.P. grade)과 순수 공기(Air Zero)를 사용하였으며, 연료와 공기의 유량은 bubble meter와 wet-test gas meter로 보정된 MFC(Mass Flow Controller)를 이용하여 제어하였다.

교류 전원 공급기 (Trek, 10/10B-FG)는 function generator를 조절함으로써 0.5 - 1500 Hz 범위의 교류 주파수에서 사용하였으며, 전압은 RMS 값으로 10 kV 까지 사용하였다. 전압과 전류 분포를 측정하기 위하여 오실로스코프 (Tektronix, TDS1012)와 고전압 프로브 (Tektronix, P6015)를 사용하였으며, 고전압은 연료 노즐에 직접 연결하였고 접지부는 건물 접지에 연결하였다. 이러한 경우 전력 소모량이 1 W 이하로 측정되었기 때문에 전력 소모에 의한 노즐의 Joule heating 영향은 무시하였다. 화염의 반응을 관찰하기 위하여 디지털 카메라와 cathetometer를 이용하였다. 또한 화염 끝단의 진동 현상의 관찰에는 디지털 캠코더와 고속도 카메라 (Photron, Fastcam Ultima 1024)를 이용하였다.

3. 결과 및 토의

동축류 제트 층류 부상 화염의 부상 높리에 대한 전기장의 영향은 미미한 것으로 관찰된 바 있다[11]. 그러나 재부착 높리와 속도는 교류 전기장의 전압과 주파수에 따라 상당한 영향을 받는다. 한편, 본 연구에는 보여주지 않았지만 직류 전기장의 경우에는 부상 화염의 재부착 높리와 속도에 영향을 거의 주지 않는 것으로 관찰되었다.

그림 2는 부상 화염의 안정화에 교류 전기장이 미치는 영향을 잘 보여준다. 그림 2(a)는 제트 출

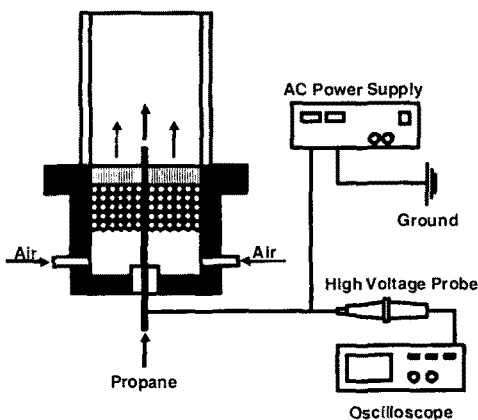


그림 1 Schematic of experimental setup.

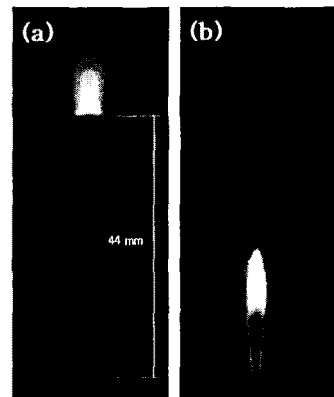


그림 2 Direct photos for lifted flame (a)without and (b)with electric fields ; 3 kV, 30 Hz

구 속도가 10.3 m/s 인 경우 전기장이 걸려있지 않은 부상 화염의 모습이고, 그림 2(b) 사진은 30 Hz, 3 kV의 교류 전기장이 걸려있을 경우의 화염이 노즐 방향으로 전파한 후 노즐에 부착된 사진이다. 같은 제트 출구 속도에서 이러한 차이는 교류 전기장에 의한 화염 안정성의 확장을 의미한다.

그림 3 은 교류 전기장의 전압과 주파수의 변화에 따른 재부착 높이 H_{RA} 의 변화를 나타내었다. 전기장이 걸려 있지 않을 때의 재부착 높이는 15.7 mm로서 그림에 open circle로 표시하였다. 그림 3(a)에서 볼 수 있듯이 걸어준 교류 전압의 주파수가 60 Hz 이상일 때, 이전의 연구결과[11]와 마찬가지로 재부착 높이는 전압이 증가할수록, 주파수가 감소할수록 증가한다. 이 경향의 추세에 따르면 재부착 높이는 주파수가 감소함에 따라 계속해서 증가할 것처럼 보인다.

한편, 그림 3(b)에서 볼 수 있듯이 3 - 60 Hz 범위에서는 위 경향과 다르게 재부착 높이가 두 개의 구간으로 나누어지는 현상을 보였다. 전압

이 증가할수록 재부착 높이가 증가하는 현상은 60 Hz 이상일 때의 경향과 동일하지만 주파수 영역에 따라 재부착 높이의 변화 경향에 차이가 있음을 알 수 있다. 대략 30Hz 이상 주파수 범위에서는 60 Hz 이상일 때와 마찬가지로 재부착 높이는 주파수 증가에 따라 감소하는 반면에, 30 Hz 이하의 주파수 범위에서는 재부착 높이가 주파수 증가에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 따라서, 이전 연구에서 예측되어진 매우 작은 교류전기장 주파수 영역에서 주파수 감소에 따른 재부착 높이의 증가의 경향이 감소로 돌아서는 천이구간(30 Hz 부근)이 존재함을 확인할 수 있었다.

30 Hz 이하의 낮은 주파수 영역에서는 부상 화염 선단이 진동하면서 재부착이 일어나는 현상이 관찰되었다. 이러한 부상 화염의 진동은 주파수가 감소함에 따라 더 확연히 관찰되어졌다. 이와 같은 화염의 진동 현상으로 인하여 약 3 Hz 이하의 주파수 범위에서는 재부착 높이와 속도의 정의가 모호하였다. 이렇게 약 3 Hz 미만의 낮은 주파수 영역에서의 교류 전기장의 영향에 의한 부상 화염의 진동 특성은 차후에 더 자세히 논의할 것이다.

다양한 교류전기장의 주파수와 전압에 따른 화염의 재부착 속도를 그림 4에 나타내었다. 재부착 속도는 전체 주파수 영역에서 6000 V까지 거의 선형적으로 증가하였다. 또한 재부착 속도는 주파수가 감소함에 따라 증가함을 알 수 있다. 이 그림에서 전기장이 걸려 있지 않을 때 화염의 재부착 속도는 8.34 m/s 이며, 교류전기장 효과에 의해 더 높은 제트 속도에서 재부착이 발생하게 됨으로써 부상 화염의 안정성이 확장됨을 잘 나타내준다.

재부착 속도와 주파수 사이의 관계를 확인하기 위하여 주파수에 따른 걸어준 전압에 대한 재부

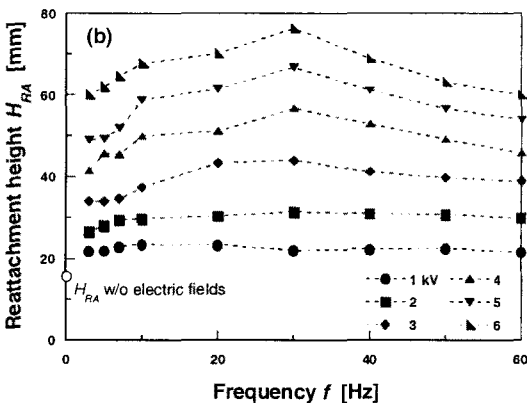
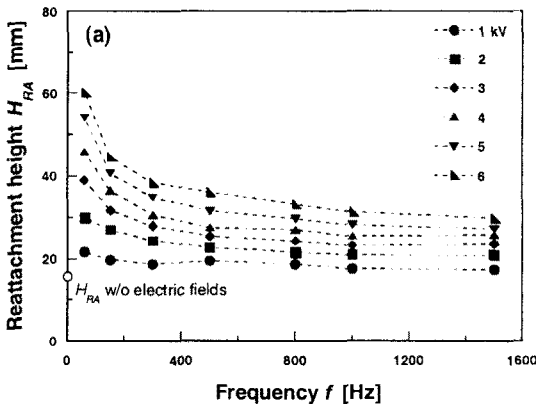


그림 3 Reattachment height with frequency at various applied voltages ; (a) 60 - 1500 Hz, (b) 3 - 60 Hz

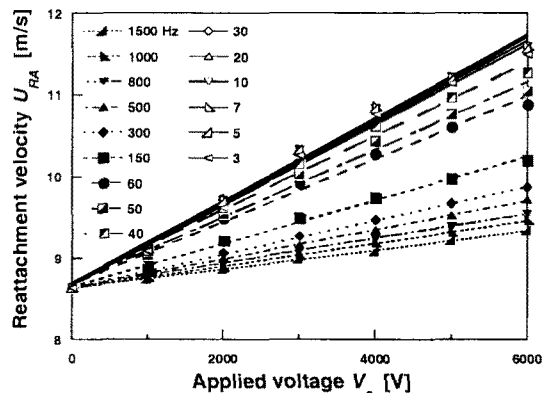


그림 4 Reattachment velocity with applied voltage at various frequencies.

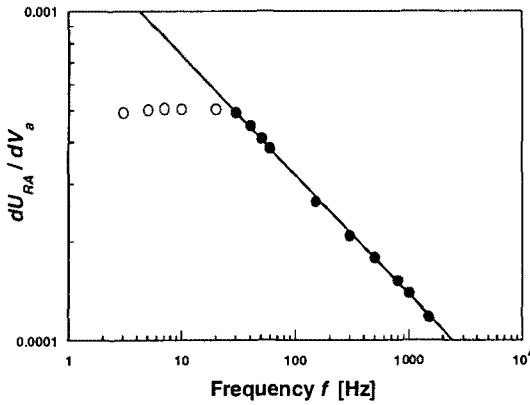


그림 5 Rate of change in the reattachment velocity with the applied voltage related to applied frequencies.

착 속도의 변화량 (dU_{RA}/dV_a)을 그림 5에 나타내었다. 30 Hz 이상의 주파수 영역에서 전압에

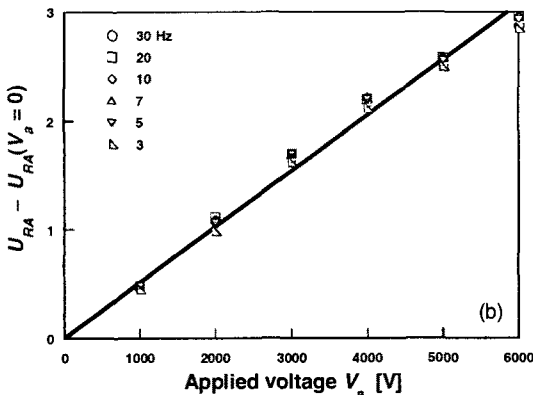
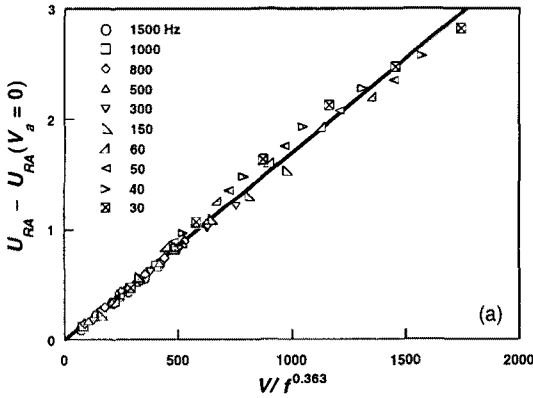


그림 6 Correlation among reattachment velocity, applied voltage, and frequency ; (a) higher frequency regime, (b) lower frequency regime

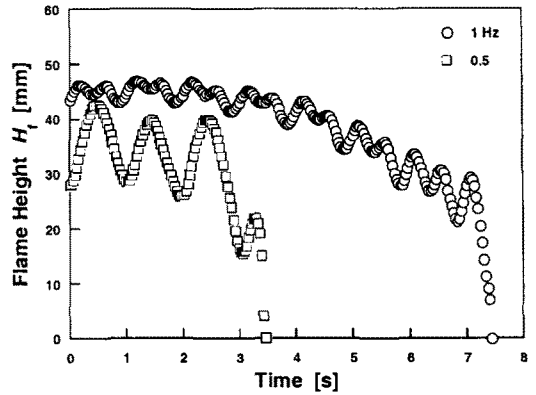


그림 7 Reattachment process affected by electric fields for $f = 1$ and 0.5 Hz

대한 재부착 속도 변화량은 전압과 주파수에 대한 관계식으로 다음의 식으로 표현될 수 있다.

$$(dU_{RA}/dV_a) = 0.0016971 f^{-0.363}$$

여기서, 상관계수 값 $R = 0.999$ 이며, U_{RA} , V_a , f 의 단위는 각각 [m/s], [V], [s^{-1}]이다. 한편 30 Hz 이하 주파수 범위에서 dU_{RA}/dV_a 값은 거의 일정한 값을 가지는 경향을 보이며 더 이상 주파수 변화에 따른 추가적 효과는 나타나지 않는다. 이러한 결과를 고려할 때, 주파수 효과에 따른 부상 화염의 재부착 현상은 앞서 그림 3 (b)에서 재부착 높이의 변화를 약 30 Hz 근처를 기준으로 두개의 영역으로 나눈 것처럼 재부착 속도의 특성도 약 30 Hz 근처의 천이구간을 사이로 두개의 다른 영역으로 나눌 수 있음을 의미한다. 이렇게 구분되어진 두 영역의 차이를 확인하기 위하여 그림 6에 주파수가 높은 영역(30 Hz 이상)과 낮은 영역(30 Hz 이하)을 각각 구분하여 전압 및 주파수에 따른 전기장 효과에 의한 재부착 속도의 증가분을 나타내었다. 주파수가 높은 영역의 경우 주파수와 전압에 따라 전기장에 의한 재부착 속도의 증가분이 선형적으로 잘 일치하며, 주파수가 낮은 영역에서는 주파수 값과 무관하게 전압에 따라서만 선형적인 관계를 나타낼 수 있다.

그림 7은 교류 전기장의 주파수가 1 Hz 와 0.5 Hz이고 인가된 전압이 6000 V 인 경우에 교류 전기장 하에서 부상 화염의 재부착 과정의 특성을 나타낸 것으로 제트 속도는 주파수가 1 Hz 와 0.5 Hz 일 때 각각 11.1 m/s 와 10.9 m/s 이다. 앞서 재부착 높이와 교류전기장 주파수와 관계 설명할 때 언급되어진 것처럼 화염의 재부착시 부상 화염의 진동 현상은 매우 낮은 주파수 영역에서 나타나기 시작한다. 주파수가 감소

함에 따라 부상 화염의 진동은 더 심해져 진동 폭 또한 증가함을 알 수 있었다. 화염의 재부착 시 부상 화염 선단은 진동하면서 점차 노즐 쪽으로 가까워지는데 1 Hz 와 0.5 Hz 의 경우에 재부착이 되기까지 화염 선단의 진동 주파수는 걸어진 교류 주파수의 약 2배로 나타남을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 낮은 주파수의 교류 전기장 내에서의 부상화염의 재부착 속도와 높이를 측정함으로써 교류전기장 효과가 동축류 층류 부상 화염의 재부착에 미치는 영향을 주파수의 특성을 중심으로 살펴보았다. 그 결과로서 교류 전기장 하에서 화염의 재부착 특성은 세 개의 주파수 영역으로 구분되어 질 수 있다. 첫째, 30 Hz 이상의 주파수 영역에서 재부착 높이와 속도는 주파수의 증가에 따라 감소하였다. 둘째, 30 Hz 이하의 주파수 영역에서 재부착 높이는 주파수의 증가에 따라 증가하는 반면에 재부착 속도는 주파수의 영향을 거의 받지 않게 된다. 셋째, 약 3 Hz 이하의 매우 낮은 주파수 영역에서는 재부착 시 화염선단의 진동현상의 증가로 인해 재부착 속도 및 높이의 정의가 매우 모호하다. 또한 이 영역에서 1 Hz 와 0.5 Hz 의 경우 화염선단이 진동하면서 재부착하는 과정에서 화염의 실제 거동은 걸어진 교류 전기장의 주파수 값의 2배와 유사하게 진동하는 현상을 관찰하였다.

후 기

본 연구는 연소기술센터(CERC)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] W. T. Brande, *Philos. Trans. R. Soc.* 104 (1814) 51.
- [2] J. Lawton, F.J. Weinberg, *Electrical Aspects of Combustion*, Clarendon Press, Oxford, 1969.
- [3] F.J. Weinberg, *Advanced Combustion Method*, Academic Press, New York, 1986.
- [4] M.S. Cha, S.M. Lee, K.T. Kim, S.H. Chung, "Soot suppression by nonthermal plasma in coflow jet diffusion flames using a dielectric barrier discharge", *Combustion and Flame* 141 (2005) 438 - 447.
- [5] S.D. Marcum, B.N. Ganguly, "Electric

field induced flame speed modification", *Combustion and Flame* 143 (2005) 27 - 36.

[6] A. Sakhrieh, G. Lins, F. Dinkelacker, T. Hammer, A. Leipertz, D.W. Branston, "The influence of pressure on the control of premixed turbulent flames using an electric field", *Combustion and Flame* 143 (2005) 313 - 322.

[7] H. Ohisa, I. Kimura, H. Horisawa, "Control of soot emission of a turbulent diffusion flame by DC or AC corona discharges", *Combust and Flame* 116 (1999) 653 - 661.

[8] M. Saito, T. Arai, M. Arai, "Control of soot emitted from acetylene diffusion flames by applying an electric field", *Combustion and Flame* 119 (1999) 356 - 366.

[9] A. Yu. Starikovskii, "Plasma supported combustion", *Proceedings of Combustion Institute* 30 (2005) 2405 - 2417.

[10] S.M. Lee, C.S. Park, M.S. Cha, S.H. Chung, "Effect of electric fields on the liftoff of nonpremixed turbulent jet flames", *IEEE Trans. Plasma Sci.* 33 (5) (2005) 1703 - 1709.

[11] S.H. Won, M.S. Cha, C.S. Park and S.H. Chung, "Effect of electric fields on reattachment and propagation speed of tribrachial flames in laminar coflow jets" *Proceedings of Combustion Institute* 31 (2007) 963-970