

교류전기장이 프로판 난류제트 화염의 부상특성에 미치는 영향

박철수* · 이상민** · 차민석** · 정석호**

A Study on the Effect of AC Electric Field on the Liftoff Characteristics of Turbulent Propane Jets.

Chul Soo Park*, Sang Min Lee**, Min Suk Cha** and Suk Ho Chung**

ABSTRACT

High voltage AC electric field has been applied to turbulent propane jets to investigate the effect of electric field on liftoff characteristics. Liftoff velocity and liftoff height have been measured by varying the applied voltage and frequency. Liftoff velocities were delayed and liftoff heights were reduced by applying AC, not by DC. The electric effect became disappeared with further increasing jet velocities, which shows that the effect can be explained by the balance between inertia force and electric force. The flame stabilization effect was intensified as either applied voltage or frequency increased. Plasma streamers were generated between the flame and the jet under high voltage conditions. Liftoff velocity in the absence of plasma can be well correlated by the function of voltage and frequency.

Key Words : Liftoff Height, Liftoff Velocity, AC Electric Field, Flame Stabilization, Turbulent Jet.

기 호 설 명

H_L	Liftoff Height	E	Electric field intensity = V/H_L
$H_L _L$	Liftoff Height at liftoff	V	Applied Voltage
U_0	Jet Velocity	f	Frequency
$U_0 _L$	Liftoff Velocity	B	Velocity Derivation = $U_0 _L/V$

1. 서론

가스버너를 설계하는 데 있어 중요한 요소 중의 하나는 화염부상(liftoff)이 발생하지 않도록 하는 것이다. 실용 버너에서 발생하는 화염부상은 미연가스의 유출 및 불완전 연소의 원인이 될 뿐만 아니라 부상화염 한계이상

에서 점화를 어렵게 한다. 또한 부상화염은 위치조절이 힘들고 소염(blowoff) 및 소음의 원인이 되기도 한다.[1]

전기장이 화염에 미치는 영향에 대해서는 예전부터 많은 연구가 진행되었다. 전기장에 의해 예혼합 화염의 가연한계가 확장되고 확산화염에서는 매연이 저감 되는 등의 현상이 보고되어 왔다.[2-5] 최근에는 교류전기장에 의해 화염길이가 짧아지면서 매연 생성이 억제되는 연구결과가 발표되었다.[6]

본 연구에서는 전기장이 부상화염의 안정화에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 프로판 난류 제트 화염에 고압의 전기장을 인가하였을

* 서울대학교 대학원

** 한국기계연구원 환경기계기술연구부

*** 서울대학교 기계항공학부

† 연락처, shchung@snu.ac.kr

때 부상화염의 변화특성에 대한 실험을 수행하였다.

2. 실험방법 및 장치

실험장치는 유량조절부, 연료제트, 전원, 측정장치로 구성되어 있으며, 장치 개략도는 그림 1에 나타내었다. 연료는 순도 99.5%이상의 프로판(propane)을 사용하였으며 질량유량계(mass flow controller; MKS)를 이용해 유량을 조절하였다. 유량계는 습식가스미터(wet gas test meter)를 사용하여 보정하였다.

노즐은 내경 1.84mm, 외경 3.20mm인 스테인레스(stainless steel) 튜브를 사용하였다. 노즐 홀더를 폴라스틱(polyacetal) 재질로 제작하여 노즐 외부로의 전기흐름을 차단하고 오직 노즐과 화염 간의 전기적 상호작용만 일어나도록 하였다.

외부 유동장 교란을 최소화하기 위해서 제트 외부로 1mm×1mm 메쉬(mesh)로 이뤄진 컨파인먼트(confinement)를 설치하였다. 이 컨파인먼트는 직사각형 구조물로 크기는 가로, 세로, 높이 각각 1m, 1m, 2m이다.

측정 장비로서 화염의 부상높이는 카세토미터(cathetometer)를 이용하여 측정하였고, 이때 부상높이는 노즐로부터 부상된 최단 거리로 정의하였다. 디지털사진기(Fujifilm 6900z)를 이용하여 화염 사진을 촬영하였다.

전원으로는 고전압 교류 전원이 사용되었는

데, 주파수(frequency)는 50Hz에서 1000Hz의 범위에서 전압은 200V에서 4000V의 범위에서 진동수와 전압을 동시에 가변 할 수 있는 진원장치를 사용하여 실험하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 화염부상에 미치는 교류 전기장의 영향

진기장이 부상화염에 미치는 영향을 알아보기 위하여 프로판 제트 부상화염에 직류 및 교류 전원을 인가하였다. 그림 2는 13.1m/s에서 11mm 부상된 화염에 4kV의 직류 전원 및 4kV, 1kHz의 교류전원을 인가했을 때 화염사진을 보여주고 있다. 직류전원을 걸어준 경우 화염의 변화가 거의 관찰되지 않은 반면에 교류전원을 걸어준 경우 부상화염이 부착화염으로 진이되었다. 이는 교류전기장에 의해 화염의 부상특성이 변화할 수 있음을 나타낸다.

우선 교류를 인가하였을 때 제트 유속에 따른 부상높이의 변화를 알아보았다. 그림 3은 4kV, 1kHz의 교류전기장을 인가한 경우 부상곡선의 변화를 나타내고 있다. 진기장에 의한 가장 큰 변화는 부상속도(liftoff velocity)의 지연 및 부상높이(liftoff height)의 감소이다. 부상속도는 0V, 1kHz 800V에서 각각 9.65m/s에서 14.4m/s로 크게 증가하였고, 이 속도 이상에서 부상이 되더라도 부상높이가 감소하는 결과가 나타났다. 이러한 결과는 부상화염에 교류전기장을 인가함으로써 화염을 안정화시킬 수 있다는 것을 보여준다. 하지만 출구 속도가 증가함에 따라서 화염의 부상 억제 효과는 작아지고 부상 높이는 증가하게 되며 전기적 효과가 점차 작아진다. 결국에는 전원에

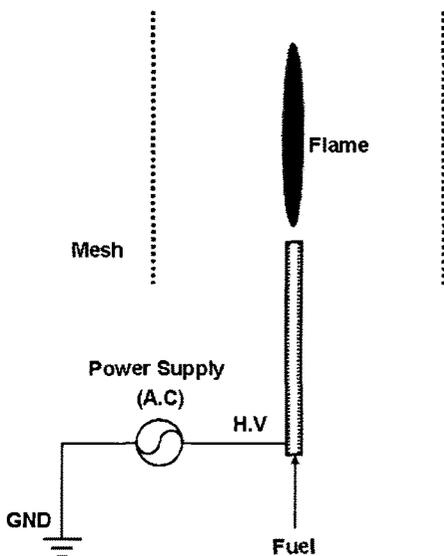


Fig.1 Schematic of Experimental Setup

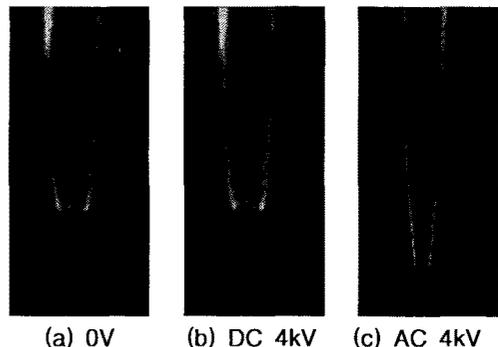


Fig. 2 Flame Images of Propane Jets with and without Electric Field

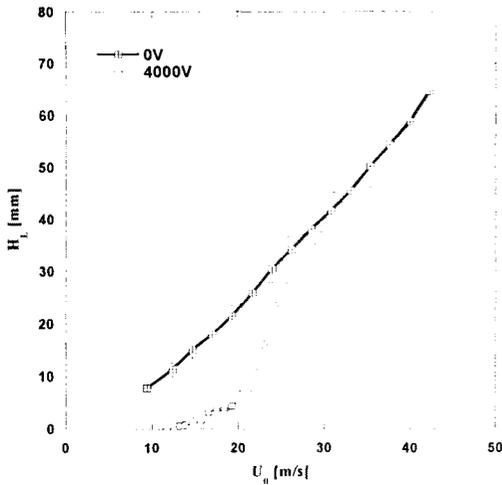


Fig. 3 Graph of Liftoff Height with Increasing Jet Velocity at 4kV, 1kHz

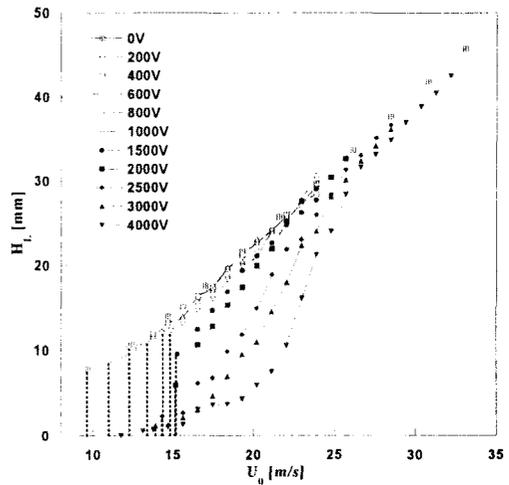


Fig. 5 Liftoff Height as a Function of Jet Velocity by Varying Applied Voltages at 1kHz

의한 영향이 없어지는 지점이 발생하며 일반 부상 높이가 경향과 일치하게 된다. 이는 속도 증가로 인해 관성력이 전기력을 극복하기 때문이다. 전기장은 화염 날림(blowout)에도 영향을 미치지 않았다.

그림 4는 유속의 증가에 따른 화염형태의 변화를 촬영한 이미지들이다. 출구 속도가 비교적 낮은 경우에 그림 4(a)에서와 같이 부상 화염은 전압의 인가에 의해 부착화염으로 바로 전이하게 된다. 출구 속도가 더 높아지면 화염은 전원 인가에 의해 부착과 부상의 반복적인 특성을 보이는데, 화염의 형상(그림 4(b))은 한쪽이 날카롭게 노즐에 잡혀있는 모양을 하게 된다. 이때 화염 끝단과 노즐 사이에서는 방전 현상이 발생하고 보랏빛의 스트리머(streamer)가 육안으로 관찰된다. 이는 화염과 노즐사이에서 플라즈마(plasma)가 발생함을 의미한다.[7] 전압이 낮은 경우에는 플라

즈마가 발생하지 않는다. 출구 속도가 더욱 증가하게 되면 화염은 항상 부상된 상태로 존재하게 된다. 화염 선단의 부상 높이의 변동폭은 점차로 줄어들다가 거의 변동이 없는 지점을 통과하여 점차적으로 부상높이 변동폭이 큰 화염으로 발전하게 된다. 이때의 화염은 그림 4(c)와 같은 형상으로 화염 선단이 전체적으로 내려오지 못하고 화염면에서 노즐과의 거리가 가장 가까운 곳에서부터 한쪽으로 급격히 끌리게 되어 비대칭적이고 시간에 따라 위치와 높이가 크게 변화하는 화염이 된다. 출구 속도가 더 커지면 결국에는 비대칭적 화염 끌림 현상은 없어지고 일반 부상 화염의 부상 특성곡선을 따르게 되며 그림 4(d)에서와 같이 두 화염의 형상과 부상높이의 차이는 거의 없어짐을 알 수가 있다. 따라서 이 이후의 화염의 부상특성은 일반 부상화염의

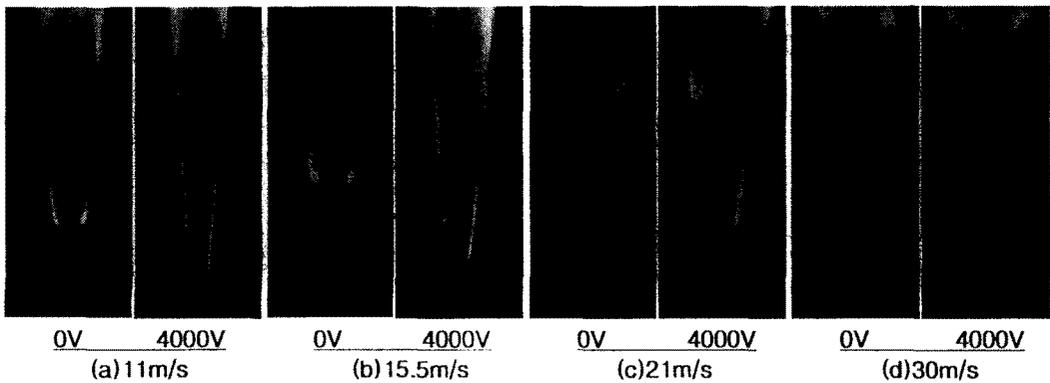


Fig.4 Flame Images of Propane Jets at 1kHz, 4kV with Increasing Jet Velocities

부상특성을 따라가 결국에는 화염날림속도나 높이의 차이는 없게 된다.

전압에 따른 부상곡선의 변화를 그림 5에 나타내었다. 전압을 증가시키에 따라서 부상속도 및 부상높이를 관찰하면 부상현상은 전압에 따라 각기 다른 특징을 갖는 영역으로 분류가 가능하다. 전압이 800V까지의 저전압에서는 부상속도가 전압에 따라 일정하게 증가하게 되고 부상속도지연 폭도 크며, 부상시의 부상높이는 일반부상화염의 부상곡선에 거의 합류하게 된다. 800V 이상에서는 부상지연 폭이 감소하면서 부상속도가 점차 특정 속도로(15.2m/s) 포화되고 이와 더불어 부상 시의 부상높이는 전압증가에 따라서 점차적으로 낮아지고 부상높이의 변동폭도 점차적으로 줄어든다. 전압이 2500V 이상에서는 화염 선단과 노즐사이의 방전현상이 관찰되면서 오히려 부상속도가 저전압에 비해서 낮아지는 결과를 보인다. 플라즈마가 발생한 이후의 부상속도 및 부상높이를 정의하기가 힘들게 되는데 그 이유는 방전에 의한 스트리머와 화염의 선단을 구분하기가 어렵기 때문이다.

3.2 주파수 변화효과

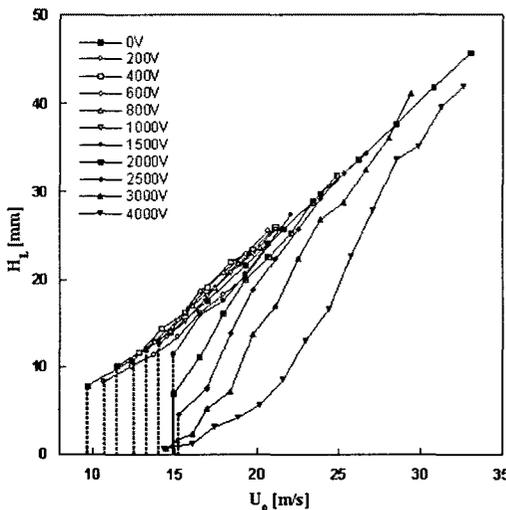
위에서 언급한 바와 같이 직류전원에서는 전기장에 의한 부상현상의 변화를 관찰할 수 없었다. 따라서 전원의 주파수가 화염의 부상특성에 중요한 인자로 작용할 것으로 예상된다.

다. 앞 절에서 언급한 바와 같이 1000Hz에서의 부상특성은 전압의 증가에 따라 부상속도가 지연되지만 특정 전압에서는 방전현상의 발생으로 인해서 포화되고 낮은 전압과 높은 전압에서의 부상특성이 달라진다.

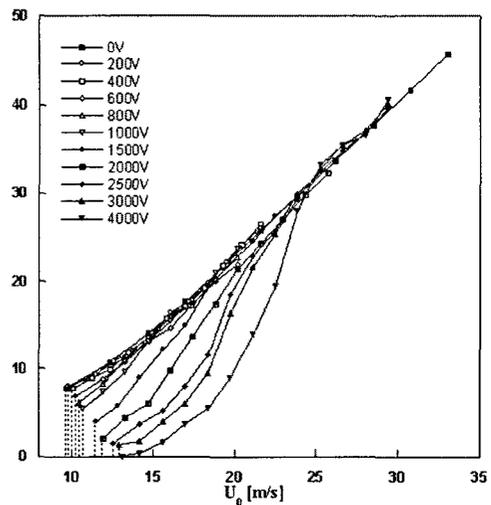
그림 6에서는 진동수가 60Hz, 400Hz인 경우의 부상특성 변화를 나타내고 있다. 진동수가 400Hz인 경우에도 그림 6(a)에서 보는 바와 같이 부상속도는 전압이 증가함에 따라 증가하게 되고 부상높이는 점차적으로 줄어드는 전반적으로 1000Hz와 유사한 특성을 나타낸다. 하지만 유속증가에 따른 부상속도지연 폭은 1000Hz에 비해서 좁게 관찰된다. 그림 6(b)는 60Hz인 경우인데 부상속도 지연 폭이 매우 좁으며, 저압에서도 부상직후 부상속도가 짧아지는 독특한 특성을 나타낸다. 주파수에 따라 상대적으로 비교하면 200V가 인가되었을 때 1000Hz는 11.02m/s, 400Hz에서는 10.7m/s, 60Hz에서는 9.8m/s에 부상된다. 따라서 주파수가 높아짐에 따라서 부상속도지연 정도가 커짐을 알 수 있다.

3.3 부상속도의 상관관계식

이상과 같이 부상지연현상은 전압 및 주파수에 의해서 결정되게 된다. 그림 6은 여러 주파수 조건에서 전압을 증가시키면서 부상속도를 측정 한 그래프이다. 앞절에서 설명한 바와 같이 주파수를 증가할수록 부상지연이 빨



(a) $f = 400\text{Hz}$



(b) $f = 60\text{Hz}$

Fig.6 Lift-off Height as a Function of Jet Velocity by Varying Applied Voltages at 1kHz at (a) 400Hz and (b) 60Hz

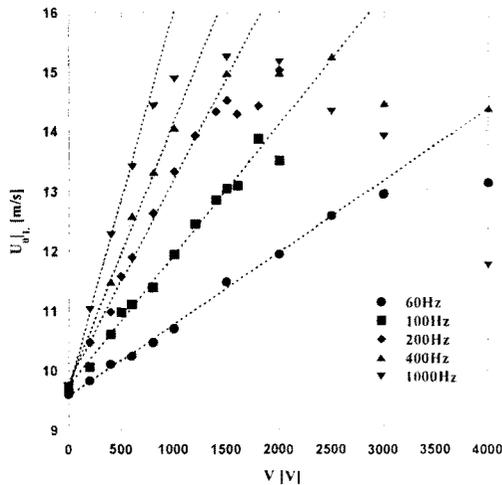


Fig. 7 Lift-off Velocity with Increasing Applied Voltage at Various Frequencies

라지는 것이 관찰된다. 또한 모든 주파수 조건에서 전압을 증가시키에 따라 부상속도가 초기에는 선형적으로 증가하다가 특정 전압 이상에서는 비선형적인 특성을 보이게 된다. 이렇듯 비선형구간으로 전환되는 지점은 단순히 전기장 뿐만 아니라 플라즈마에 의한 영향이 작용하는 것으로 예측된다.

부상속도가 선형적으로 증가하는 구간에 대해서 전압과 부상속도를 선형화(linear fitting)하여 구한 기울기를 주파수에 따라 그래프에 나타낸 결과를 그림 7에 나타내었다. 진동수의 증가에 따라 선형구간에서의 부상속도 그래프의 기울기는 증가한다. 저주파수에서는 기울기가 급격하게 감소하는데, 참고로 직류

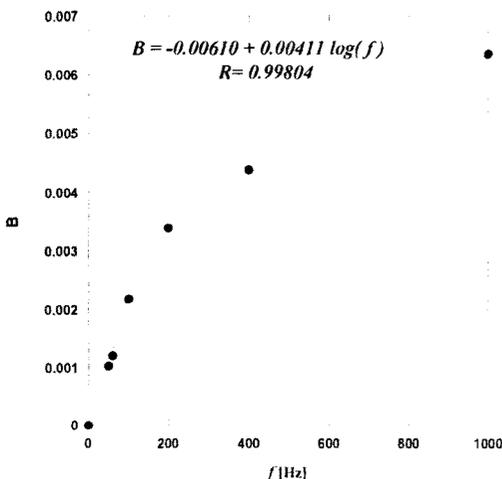


Fig. 8 Velocity Derivation as a Function of Frequency

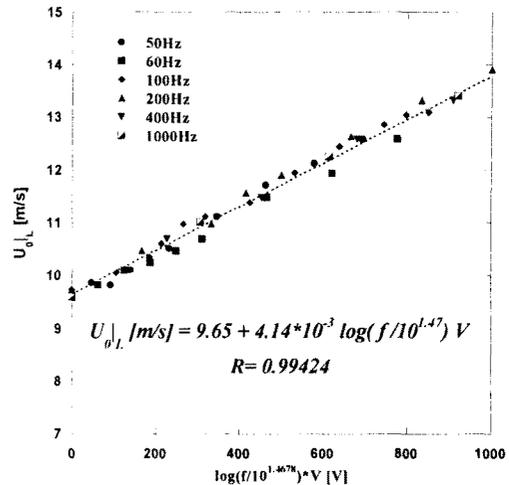


Fig. 9 Correlation between Lift-off Velocity and a Function of V, f

전원을 가했을 경우 부상속도의 변화는 관찰되지 않았다. 이 기울기는 주파수에 대해서 다음과 같이 로그함수로 피팅(fitting)이 가능하다. 주파수에 대한 기울기의 관계식은 다음 식(1)과 같다.

$$\frac{dU_{0L}}{dV} = -0.00610 + 0.00411 \log(f) \quad (1)$$

(R = 0.99804)

이상으로부터 부상속도의 기울기는 주파수의 함수이므로 부상속도는 주파수와 전압의 상관식으로 나타낼 수 있다. 즉, $U_{0L} = fn(f, V)$ 가 된다. 위의 관계식을 사용하여 그림 7의 선형구간에 대해서 상관식을 구하면,

$$U_{0L} = 9.65 + 0.00414 V \log(f/10^{1.47}) \quad (2)$$

(R = 0.99424)

와 같은 식을 구할 수 있다. 즉, 플라즈마 영향을 받지 않는 구간에서는 부상속도를 전압과 주파수의 함수로 예측할 수 있음을 보여준다.

4. 결론

노즐에 교류전원이 인가되면 화염의 부상특성이 변화하게 된다. 교류전기장으로 인해 부상속도가 지연되며 부상높이가 감소하게 되는데, 이는 화염의 안정화를 의미한다. 유속이 빨라질수록 전기장의 영향은 사라져서 부상곡선에 합류하며 화염날림에는 영향을 미치지

못한다. 전압이 클수록, 주파수가 빠를수록 교류전기장이 미치는 영향은 더 큰 것으로 나타났다으며, 플라즈마의 영향이 미치지 않는 부분에서는 부상속도가 전압과 주파수의 함수로 나타낼 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

- [1] S. Turns. "An Introduction to Combustion: Concepts and Applications", *McGraw-Hill*, 1996.
- [2] J. Lawton and F. Weinberg, "Electrical Aspects of Combustion", *Claredon Press*, 1969.
- [3] F. Weinberg, "Advanced Combustion Methods", *Academic Press*, 1986.
- [4] 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, 1999.
- [5] M. Saito, T. Arai and M. Arai, "Control of Soot Emitted from Acetylene Diffusion Flames by applying an Electric Field", *Combust. Flame* 119, 1999.
- [6] 이상민, 차민석, 정석호, "유전체 방전을 이용한 확산화염에서의 매연저감 특성", 제27회 KOSCO SYMPOSIUM 논문집, 2003.
- [7] Y. Raizer, "Gas Discharge Physics", *Springer-Verlag*, 1987.