

메탄의 대향류 확산화염에 대한 AC 전기장의 영향

최병철^{*†} · 김형국^{**} · 정석호^{***}

* (사)한국선급 환경플랜트팀, ** 삼성테크윈 동력기술그룹,

*** King Abdullah University of Science and Technology, Clean Combustion Research Center, Saudi Arabia

Effect of AC Electric Fields on Counterflow Diffusion Flame of Methane

Byung Chul Choi^{*†}, Hyung Kuk Kim^{**} and Suk Ho Chung^{***}

* Environment & Plant Team, Korean Register of Shipping,

** Automotive System Group, Samsung Techwin Co., Ltd.,

*** King Abdullah University of Science and Technology, Clean Combustion Research Center, Saudi Arabia

(Received March 30, 2012 ; Revised May 2, 2012 ; Accepted May 2, 2012)

Key Words: AC Electric Field(교류 전기장), Counterflow Diffusion Flame(대향류 확산 화염), Oscillation(진동), Ionic Wind(이온풍), Collision Response Time(충돌반응시간)

초록: 대향류 버너에서 질소로 희석시킨 메탄 연료의 확산화염에 대하여 AC 전기장을 인가하여 전압크기 및 주파수 변화에 의한 영향을 실험적으로 조사하였다. 그 결과, 임계주파수를 초과하는 AC 주파수 영역에서 안정한 확산화염이 나타났으며, 인가된 AC 전압크기의 증가에 따라 그 임계주파수는 증가하다가 약 35 Hz 로 일정한 값을 보였다. 반면에, 임계주파수 미만의 AC 주파수 영역에서, 그 확산화염은 인가된 AC 주파수에 동기되어 진동하였다. 화염지역 내에 양이온들은 로렌츠 힘에 의하여 가속되고, 그 양이온과 중성자 간의 분자단위의 충돌에 의한 운동량의 전달에 의해 전체적인 유동장의 변화가 발생하는데, 이러한 이온풍의 효과에 의하여 화염의 진동 현상이 나타날 수 있다.

Abstract: The effect of electric fields on the response of diffusion flames in a counterflow has been investigated experimentally by varying the AC voltage and frequency. The result showed that the flame was stationary with high AC frequency above the threshold frequency, and it increased with the applied voltage and then leveled off at 35 Hz. Below the threshold frequency, however, the flame oscillated with a frequency that was synchronized with the applied AC frequency. This oscillation can be attributed to the ionic wind effect due to the generation of bulk flow, which arises from the momentum transfer by molecular collisions between neutral molecules and ions, where the ions in the reaction zone were accelerated by the Lorentz force.

1. 서 론

화염의 안정화,⁽¹⁻⁵⁾ 화염 전파속도의 증가,⁽⁶⁻¹³⁾ 및연소 배출물의 감소⁽¹⁴⁻¹⁶⁾ 등의 다양한 연소 특성에 대한 전기장의 영향에 관하여 연구되었다. 전기장은 화염 거동에 다양한 방법으로 영향을 미칠 수 있다. 즉, 이온풍의 효과 및 하전 입자들과 연관된 화학적 반응을 및 확산 특성에 의한 영향 등이 주요 원인으로 고려되고 있다.

그 중에서도 이온풍 효과에 대한 연구가 광범위하게 수행되었다. 즉, 탄화수소 비예혼합 화염에

대하여, 반응지역 내에 10^9 - $10^{12}/\text{cm}^3$ 의 차수로 존재하는 H_3O^+ , C_3H_3^+ , CH_3^+ , 및 CHO^+ 등의 양이온이 전기장 내에 로렌츠의 힘(Lorentz force)에 의하여 가속될 수 있다.^(17,18) 그 가속된 하전입자들은 중성자(Neutral molecules)와 분자 단위의 무작위 충돌(Random molecular collision)에 의해서 운동량(Momentum)이 전달되고, 전체적인 기체상 유동이 생성되는데, 이를 일컬어 이온풍(Ionic wind)의 효과라고 한다.

또한, 이온풍의 효과로 인하여 전체적인 유동이 활성화되기 위해서는 가속된 양이온과 중성자 간의 운동량이 전달되는 과정에서 지연시간이 존재한다. 이러한 충돌지연시간은 과도적인 DC 및 50 Hz 이상의 AC 전기장을 인가하여 조사되었고, 그러한 경우에 약 10 ms 의 차수를 갖는다고 보고되

† Corresponding Author, byungchul.choi@gmail.com
© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

었다.^(19,20) 또한 DC 펄스를 갖는 McKenna 버너에서 예혼합화염에 대한 충돌반응시간의 특성이 연구되기도 하였다.⁽²¹⁾

본 연구는 다양한 주파수 및 전압크기의 변화를 갖는 AC 전기장에 의한 질소로 희석된 메탄의 대향류 확산화염에 대한 진동 특성을 실험적으로 살펴보았다.

2. 실험장치 및 방법

대향류 버너, 유량 조절부, AC 전원 공급장치, 및 가시화 장치로 구성되는 실험 장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 대향류 버너는 균일한 출구 유속 조건을 생성하기 위하여 확대-수축 노즐을 사용하였다.⁽²²⁾ 그리고 지름 10 mm의 노즐을 통해서 연료와 산화제를 서로 반대 방향으로 공급하여 확산화염을 만들었고, 버너 사이의 간격은 16 mm로 고정하였다.

연료는 99.98 % 이상의 순도를 갖는 메탄에 99.99 % 이상의 순도를 갖는 질소를 희석하여 사용하였다. 산화제는 99.99 % 이상의 순도를 갖는 산소와 질소를 21:79로 혼합하여 사용하였다. 그 노즐 출구에서 초기 유속 U_0 은 모두 30 cm/s(스트레이치율: 약 72 sec^{-1})로 고정하였으며, 초기 연료분율 $X_{F,0}$ 은 0.3으로 고정시켜 실험을 수행하였다.

노즐출구에서 동심의 슬릿을 통하여 질소를 공급시켜서, 외부의 공기에 의한 유동장의 교란을 차단시킬 수 있는 보호가스로서 사용하였다. 그리고 연료 및 산화제의 유량은 질량 유량계(Mass flow controller)를 사용하여 조절하였으며, 습식가스미터

(Wet gas meter)를 이용하여 보정하였다.

AC 전원장치(Trek, 10/10B-FG)와 함수발생기(NF, WF1943B)를 이용하여 연료가 공급되는 하부 버너에 고전압을 인가하였으며, 산화제가 공급되는 상부 버너와 AC 전원장치의 접지터미널을 모두 하나의 접지에 연결하여 버너 사이에 전기장을 형성하였다. 또한 화염지역에 균일한 전기장이 형성되도록 노즐의 출구영역보다 큰 지름을 갖는 60 mm의 메쉬(mesh)를 사용하였다.

오실로스코프(Tektronics, TDS 1012B)와 1,000:1의 고전압 프루브(Tektronics, P6015A)를 통해서 버너에 인가되는 전압을 측정하였다. 그리고 고속도 카메라(Photron, Fastcam Ultima 1024)를 이용하여 최대 500 fps로 시간에 따른 화염의 이미지를 얻어 내었다.

최대로 7 kV의 전압 실효값(RMS)을 갖고, 최대 100 Hz 주파수의 변화를 갖는 AC 전기장을 인가하여, 그 메탄의 확산화염에 대한 반응 및 화염위치의 변화를 살펴보았다. 여기서, 두 노즐의 중심선 상에서 최대 밝기를 갖는 지점을 화염의 위치(Z_f)라고 정의하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 AC 전기장에 의한 화염진동

100 Hz 및 1.5 kV의 AC 전기장을 인가한 경우에 화염의 변위(a)와 직접사진(b)을 Fig. 2에 나타내었다. 우선, (a)에서 화염 위치는 $Z_f = 8.31 \text{ mm}$ 로 시간에 따라 변화가 없었으며, (b)의 직접사진에 나타난 전기장을 인가한 화염의 모양은 전기장을 인가하지 않은 경우의 전형적인 대향류 확산화염의 모양과 비교하여 화염 위치 및 모양이 동일하게 나타났다. 이는 대향류 확산화염에 대하여, 100 Hz와 같은 높은 주파수를 갖는 AC 전기장에 의한 영향은 거의 나타나지 않는 것을 의미한다.

1.5 kV로 동일한 전압크기에 대하여 8 Hz의 주파수를 갖는 AC 전기장을 인가한 경우에 화염의 거동을 Fig. 3에 나타내었다. 이때, 화염은 일정한 주기로 진동하였고, (a)는 시간에 따른 화염위치의 변화를 나타낸다. 이때, 최고 위치는 $Z_f = 10.8 \text{ mm}$ 및 최저 위치는 $Z_f = 7.4 \text{ mm}$ 로 약 3.4 mm의 진폭을 가졌으며, 정현파 형태의 화염의 거동을 보였다. 한 주기 동안의 시간은 125 ms로 나타났다. 이러한 시간에 따른 화염의 진동 특성을 고속푸리에변환(FFT)을 통하여 주파수 도메인으로 변환하였을 때에, 8.0566 Hz의 주파수에서 최대의 크기를

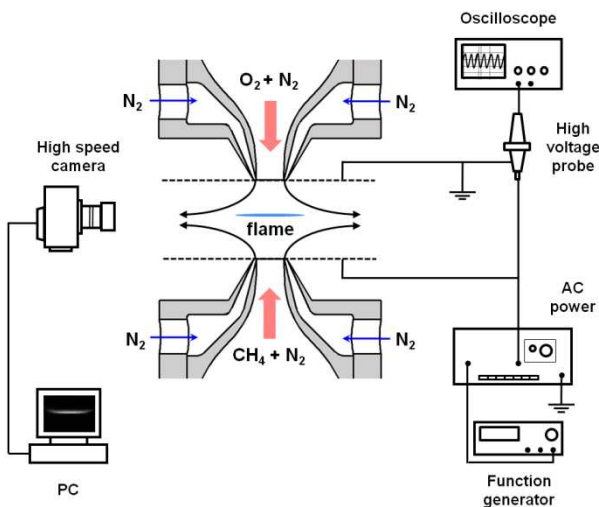


Fig. 1 Schematics of experimental setup

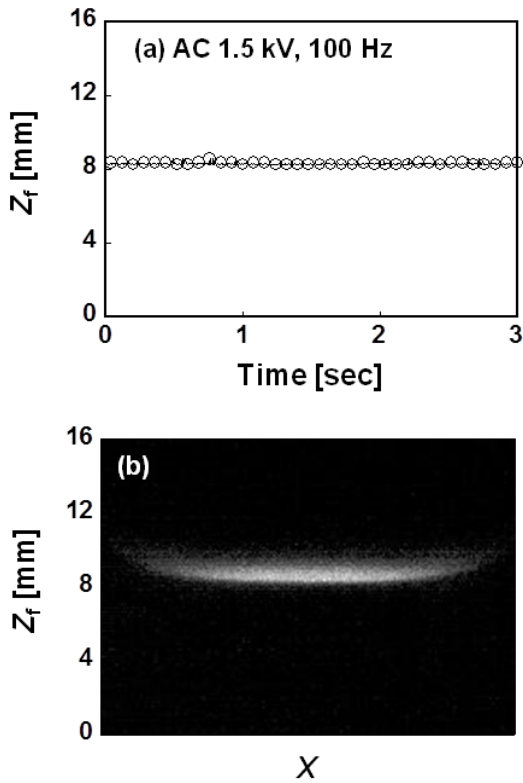


Fig. 2 Flame position (a) with time and direct photos (b) for applied AC electric fields of 1.5 kV and 100 Hz

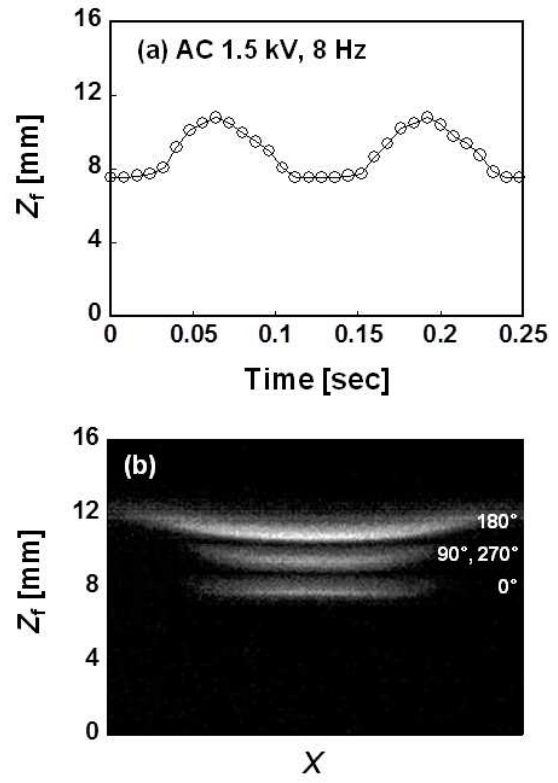


Fig. 3 Flame position (a) with time and direct photos (b) for applied AC electric fields of 1.5 kV and 8 Hz

갖는 것을 확인하였으며, 8 Hz로 인가된 AC 전기장의 주파수와 거의 동일하게 나타났다. 이러한 결과는 상대적으로 저주파수의 AC 전기장에 의하여 화염은 영향을 받으며, 화염위치는 인가된 AC 전기장에 동기화되어 거동하는 것을 의미한다. 단, 인가된 AC 전기장에 대하여 화염위치가 반응하는 동안에 걸리는 지연시간은 아직 판단할 수 없다.

(b)는 시간에 따른 화염의 직접사진을 대표적인 위상 각(Phase angle)에 대하여 90° 간격으로 나타낸 것이다. 이때, 화염의 위치가 최저인 지점을 0°로 기준으로 잡았다. 즉, 화염의 위치가 최고인 지점은 180°이다. 그리고 위상 각이 90°에 대한 화염의 위치와 모양은 위상 각이 270°인 경우와 거의 유사하게 나타났다. 따라서, 직접사진으로 나타난 화염의 형상 및 수평 방향의 화염길이는 위상 각에 따라 변화하였다. 이는 인가된 AC 전기장의 영향으로 화염의 거동이 변동될 수 있을 뿐만 아니라 유동장의 변화도 나타날 수 있는 것을 의미한다.

1.5 kV 및 8 Hz의 AC 전기장을 인가한 경우에, 화염위치 Z_f 에 대한 화염위치의 시간변화율을 의

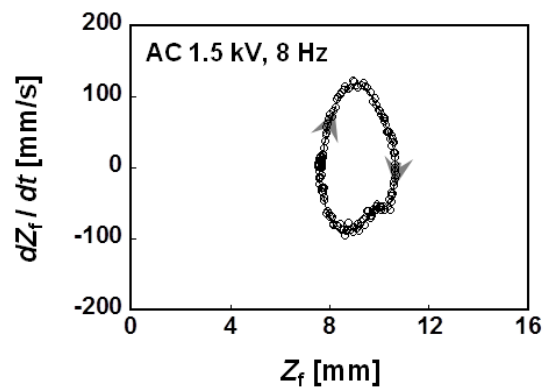


Fig. 4 Phase diagram of displacement speed with flame position for applied AC electric fields of 1.5 kV and 8 Hz

미하는 변위속도 dZ_f/dt 를 Fig. 4에 나타내었다. 화염위치에 대한 변위속도의 점(Open circle)들은 시계 방향으로 회전하는 하나의 폐쇄형 루프의 형태로 반복되는 궤적을 나타내었다. 이러한 하나의 제한된 사이클은 시간에 따른 화염의 위치가 정현파 형태로 진동하는 특성을 나타낸다.

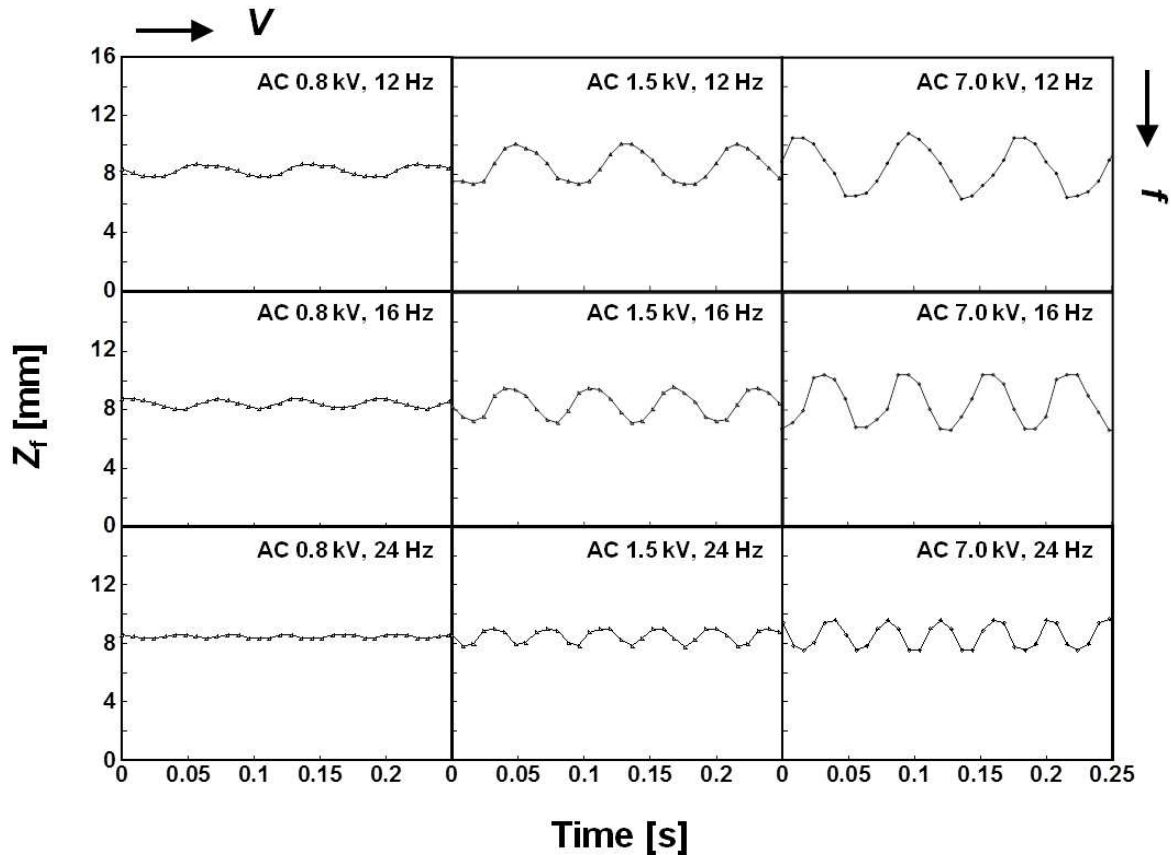


Fig. 5 Oscillating flame behavior with voltage and frequency variation of AC electric fields

한편, 화염위치가 약 $Z_f = 9.2$ mm 인 지점에서 최대의 변위속도는 $dZ_f/dt = +126$ mm/s 로, 진동하는 화염의 위치가 상부로 올라가는 동안에 발생하였다. 그리고 화염의 위치가 다시 하부로 내려오는 동안에 약 $Z_f = 8.5$ mm 인 지점에서 $dZ_f/dt = -97$ mm/s 로 최소의 변위속도를 보였다. 이러한 AC 전기장에 대하여 상부로 약간 이동되어 있는 비대칭 구조를 갖는 화염위치의 거동은, 대향류 유동장의 정체면을 기준으로 초기의 상대적인 화염위치와 연관성이 있을 수 있는 것으로 추측된다. 이에 대한 자세한 연구가 향후 요구된다.

3.2 전압 및 주파수의 변화

AC 전기장의 전압크기 및 주파수의 변동에 따른 대표적인 화염의 진동 특성을 Fig. 5 에 나타내었다. 앞서 언급한 바와 같이, 그 화염의 진동 특성들은 정현파 형태를 보였다. 특히, 주파수를 고정시킨 경우에, 인가된 AC 전기장의 전압크기의 증가에 따라 그 화염의 진폭은 증가하는 경향이 나타났다. 또한, 고정된 전압크기에 대하여, 인가된 주파수를 증가시키기에 따라 그 진폭은 감소하는

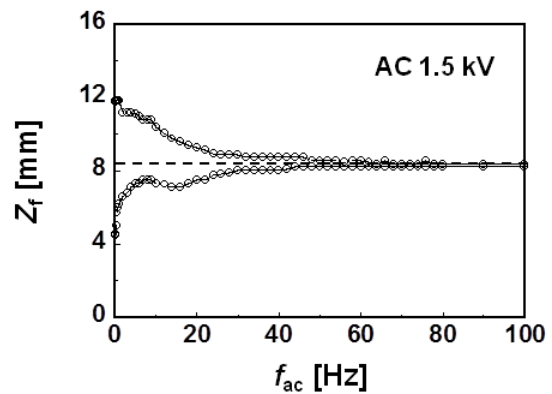


Fig. 6 Maximum and minimum positions of flame oscillation with AC frequency variation at fixed 1.5 kV

특성을 보였다.

AC 전기장의 전압크기 V_{ac} 가 1.5 kV 로 고정된 조건에서, 주파수 f_{ac} 의 0.1-100 Hz 변화에 따른 화염 진동의 최고위치와 최저위치를 Fig. 6 에 나타내었다. AC 전기장이 인가되지 않았을 때의 화염

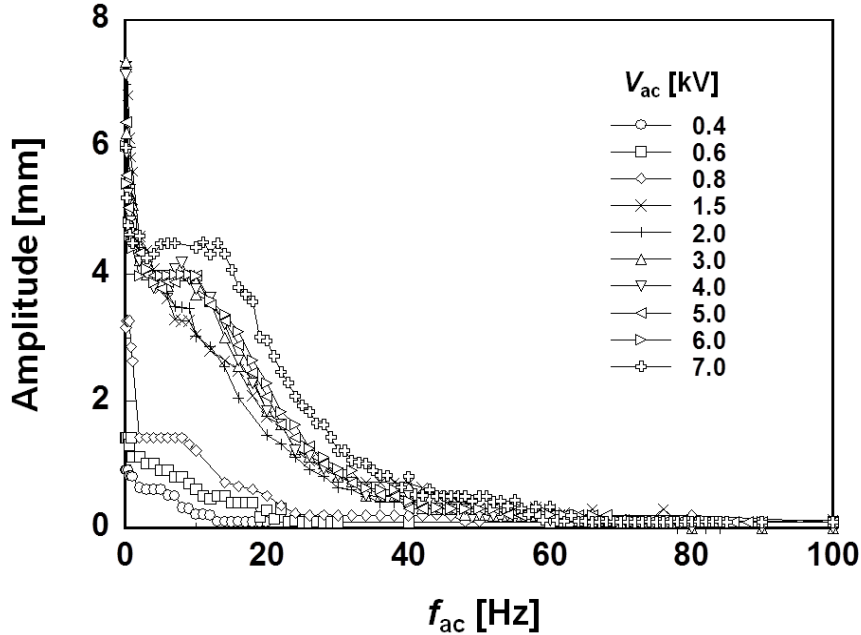


Fig. 7 Oscillation amplitude with frequency at several voltages

위치는 $Z_f = 8.56 \text{ mm}$ 이고, 점선으로 표시하였다. 인가된 AC 전기장의 주파수를 증가시키기에 따라 화염의 진폭은 점차적으로 감소하는 경향을 보였다. 계속해서 주파수를 증가시키면, 약 50 Hz 이상의 영역에서는 진동 현상이 나타나지 않았으며, 결국, 전기장이 없는 경우와 거의 동일한 화염위치에서 멈춰 있게 되었다.

AC 전기장에 의한 화염진동 현상은 이온풍의 영향으로 이해될 수 있다. 연소반응 지역 내에 존재하는 양이온들은 전기장에 대한 로렌츠의 힘에 의해서 가속된다. 이때, 로렌츠의 힘 qE 은 전기장의 세기 E 와 입자의 전하량 q 의 곱으로 표현된다. 여기서, 전기장의 세기는 인가된 AC 전기장의 전압크기에 비례하고, 연료 및 산화제의 노즐인 양전극 사이의 간격 L 에 반비례한다. 따라서 일정한 전기장 하에서 양이온들은 선형적으로 가속될 것이다. 그리고 가속된 양이온들은 중성자와 입자단위의 무작위 충돌에 의하여 운동량을 전달하게 된다. 이러한 양이온의 평균속도인 표류속도 (Drift velocity)는 qE/f_c 의 특성을 갖고 f_c 는 충돌주파수를 의미한다.

인가된 AC 전기장은 양(+)극과 음(-)극을 갖기 때문에, 이온풍 효과가 나타나기 위하여 양이온들이 가속되는 주기는 $1/2f_{ac}$ 로 제한된다. 따라서,

양이온들이 중성자로 운동량을 전달하는 동안에 유효한 시간은 인가된 AC 전기장의 주파수가 증가함에 따라 감소하게 된다. 그러한 입자간의 운동량 전달에 의하여 전체적인 운동장의 변화가 발생하게 된다. 결과적으로 인가된 AC 전기장의 전압크기가 증가할수록, 주파수가 감소할수록 이온풍의 효과가 크게 나타나서 화염의 진동폭은 더 크게 발생하게 된다.

3.3 임계주파수

Figs 5 및 6 과 같이 인가된 AC 전기장의 전압크기 V_{ac} 및 주파수 f_{ac} 의 변동에 따른 진동하는 화염의 최고와 최저의 화염위치에 대하여, 그 전압크기 및 주파수에 대한 진폭을 Fig. 7 에 나타내었다. 그림에 나타난 주파수에 대한 진폭의 관계로부터 외삽법(Extrapolation)을 적용하여, AC 전기장에 의해서 화염이 반응하는 데에 요구되는 지연시간의 특성을 분석하였다.

예를 들어, $V_{ac} = 6 \text{ kV}$ 인 경우의 주파수에 대한 진폭을 나타내는 Fig. 8 에서, 데이터로부터 최대 음의 기울기를 갖는 직선에 대하여 진폭이 0 인 지점을 임계주파수(Threshold frequency) f_{th} 로 결정하였다.

Fig. 7 로부터 추출된 임계주파수를 인가된 AC

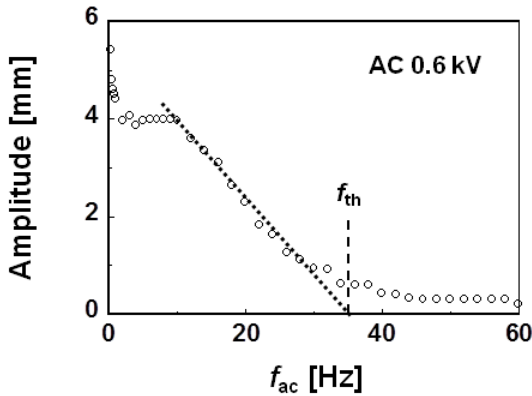


Fig. 8 Determining threshold frequency from extrapolation to zero amplitude in frequency-amplitude relation at $V_{ac} = 0.6 \text{ kV}$

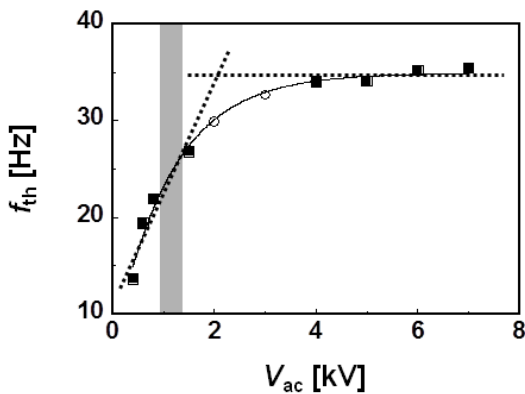


Fig. 9 Threshold frequency as a function of AC voltage

전기장의 전압크기의 함수로 Fig. 9 에 나타내었다. 특히, 불투명하게 표시된 $V_{ac} = 0.9\text{-}1.2 \text{ kV}$ 의 범위에서는 중심축에서 기울어져서 비대칭적인 화염모양을 보이며 진동하는 구간으로 데이터 분석에서 제외시켰다. 그 결과로 V_{ac} 의 증가에 따라 임계주파수 f_{th} 는 증가되는 특성을 보이다가 일정하게 유지되었다. 그 사각형(Closed squares)으로 표시되고 증가되는 영역에 대하여, 임계주파수는 인가된 AC 전기장에 따라 아래의 식 (1)과 같은 특성을 보였다.

$$f_{th}[\text{Hz}] = 23.14 \times V_{ac}^{0.491}[\text{kV}^{0.491}] \quad (1)$$

여기서, 상관계수 $R = 0.966$ 을 갖는다. 따라서 전압크기에 따라 임계주파수가 증가되는 영역에서, 대략적으로 $f_{th} \sim V_{ac}^{0.5}$ 의 관계를 갖는다는 것을 의미한다.

한편, Fig. 9 내에 모든 데이터에 대하여 $f_{th}\text{-}V_{ac}$ 의 관계는 아래의 식 (2)와 같은 특성을 보였다.

$$f_{th}[\text{Hz}] = 34.93 - 28.48 \exp(-0.889 \times V_{ac}[\text{kV}]) \quad (2)$$

여기서, 상관계수 $R = 0.995$ 를 갖는다. 이에 대하여 인가된 AC 전압의 크기를 계속해서 증가시킨다면 $f_{th} = 34.93 \text{ [Hz]}$ 인 점근선(Asymptotic line)으로 무한히 가까워지게 된다.

약 35 Hz 로 제한된 임계주파수는 충돌반응시간을 토대로 이해될 수 있다.^(19,20) 이는 이온풍 효과에 의하여 전체적인 유동장이 반응하는 데에 지연시간이 존재하는 것으로 보고된 바 있다. 그러한 충돌반응시간 t_c 은 아래의 식 (3)과 같이 정의된다.

$$t_c = (n_0/n_i)/(1.4\pi\sigma^2 v_m/v_0) \quad (3)$$

여기서, n_0 및 n_i 는 각각 중성자 및 양이온의 수 밀도, σ 는 충돌지름, v_m 는 분자의 평균속도, 및 v_0 는 분자의 초기속도를 나타낸다. 그리고, 화염에 대하여 그 충돌반응시간은 대략 $t_c = 14 \text{ ms}$ 를 갖는 것으로 평가되었다.⁽²¹⁾

본 실험에서 인가된 AC 전기장의 극성에 따라 이온풍의 효과가 나타나는 방향이 변경될 수 있기 때문에, 하전된 입자들의 가속에 대한 시간 스케일은 $1/2f_{ac}$ 로 나타낼 수 있다. 따라서, $f_{th} = 34.93 \text{ [Hz]}$ 의 임계주파수를 적용하면, 본 실험에서의 충돌반응시간은 $t_c = 1/2f_{th} = 14.31\text{ms}$ 로 이전의 연구 결과⁽²¹⁾와 잘 일치하였다.

이러한 결과는, 확산화염의 진동현상에 대하여 인가된 주파수가 임계주파수를 초과하는 $f_{ac} > f_{th}$ 조건에서, 이온풍의 효과가 발생하기에 불충분한 시간을 갖기 때문에 최소화가 되는 것을 의미한다. 그리고, 인가된 AC 전기장의 전압의 크기가 낮은 경우에 그러한 임계주파수는 AC 전압에 의해서 영향을 받았다.

4. 결론

대향류 버너에서 질소로 희석시킨 메탄 연료의 확산화염에 대하여 AC 전기장을 인가하여 전압크기 및 주파수 변화에 의한 영향을 실험적으로 조사하였다. 우선, 100 Hz 의 고주파 영역에서, 전기장이 인가되지 않은 경우의 전형적인 확산화염의 모양과 화염위치를 보였으며, AC 전기장에 대하여 거의 반응하지 않았다.

대략 10 Hz 의 차수의 주파수 영역에서, 화염은

이온풍의 효과에 의하여 인가된 주파수와 유사한 주기를 갖는 정현파 형태로 진동하는 특성을 보였다. 그리고 인가된 AC 전기장의 전압크기가 증가할수록, 주파수가 감소할수록 그 진동폭은 감소하는 경향을 보였다.

또한 인가된 AC 전기장의 주파수에 대하여, 화염이 반응하는 동안의 지연시간을 고려한 임계주파수 f_{th} 를 분석하였다. 전압의 크기가 상대적으로 낮은 영역에서, 그 임계주파수는 인가된 전압크기에 대하여 $f_{th} \sim V_{ac}^{0.5}$ 의 관계를 갖는 것을 확인하였다. 반면에, AC 전압의 크기가 상대적으로 큰 영역에서, 그 임계주파수는 $f_{th} = 34.93$ [Hz]로 나타났다. 이는 양극/음극의 AC 전기장에 대한 극성 변화를 고려하여, 이온풍 효과가 발생하기 위한 충돌반응시간은 $t_c = 1/2f_{th} = 14.31ms$ 로 이전의 연구 결과⁽²¹⁾와 잘 일치하는 것으로 파악되었다.

참고문헌

- (1) Won, S.H., Cha, M.S., Park, C.S. and Chung, S.H., 2007, "Effect of Electric Fields on Reattachment and Propagation Speed of Tribrachial Flames in Laminar Coflow Jets," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 31, pp. 963~970.
- (2) Lee, S.M., Park, C.S., Cha, M.S. and Chung, S.H., 2005, "Effect of Electric Fields on the Liftoff of Nonpremixed Turbulent Jet Flames," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, Vol. 33, No. 5, pp. 1703~1709.
- (3) Ryu, S.K., Kim, Y.K. and Chung, S.H., 2007, "Effect of Electric Fields on Reattachment of Lifted Flame at Low AC Frequency," *5th US Combust. Meeting*, A38.
- (4) Weinberg, F., Carleton, F. and Dunn-Rankin, D., 2008, "title," *Combust. Flame*, Vol. 152, pp. 186~193.
- (5) Kim, W., Do, H., Mungal, M.G. and Cappelli, M.A., 2008, "title," *Combust. Flame*, Vol. 153, pp. 603~615.
- (6) Won, S.H., Ryu, S.K., Kim, M.K., Cha, M.S. and Chung, S.H., 2008, "Effect of Electric Fields on the Propagation Speed of Tribrachial Flames in Coflow Jets," *Combust. Flame*, Vol. 152, pp. 496~506.
- (7) Marcum, S.D. and Ganguly, B.N., 2005, "Electric Field Induced Flame Speed Modification," *Combust. Flame*, Vol. 143, pp. 27~36.
- (8) Jagers, H.C. and Engel, A.V., 1971, "The Effect of Electric Fields on the Burning Velocity of Various Flames," *Combust. Flame*, Vol. 16, pp. 275~285.
- (9) Ryu, S.K., Won, S.H., Cha, M.S., Fujita, O. and Chung, S.H., 2007, "Effect of Electric Fields on Flame Displacement Speed of Propagating Premixed Flames in Tube," *6th Asia-Pacific Conference on Combustion*.
- (10) Bowser, R.J. and Weinberg, F.J., 1972, "The Effect of Direct Electric Fields on Normal Burning Velocity," *Combust. Flame*, Vol. 18, pp. 296~300.
- (11) Jagers, H.C., Bowser, R.J. and Weinberg, F.J., 1972, "The Effect of Electric Fields on Burning Velocity," *Combust. Flame*, Vol. 19, pp. 135~136.
- (12) Ju, Y., Macheret, S.O., Shneider, M.M., Miles, R.B. and Sullivan, D.J., 2004, "Numerical Study of the Effect of Microwave Discharge on the Premixed Methane-Air Flame," *40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, Fort Lauderdale, Florida, AIAA 2004-3707.
- (13) Van Den Boom, J.D.B.J., Konnov, A.A., Verhasselt, A.M.H.H., Kornilov, V.N., De Goey, L.P.H. and Nijmeijer, H., 2009, "The Effect of a DC Electric Field on the Laminar Burning Velocity of Premixed Methane Air Flames," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 32, pp. 1237~1244.
- (14) Saito, M., Arai, T. and Arai, M., 1999, "Control of Soot Emitted from Acetylene Diffusion Flames by Applying an Electric Field," *Combust. Flame*, Vol. 119, pp. 356~366.
- (15) Cha, M.S., Lee, S.M., Kim, K.T. and Chung, S.H., 2005, "Soot Suppression by Nonthermal Plasma in Coflow Jet Diffusion Flames Using a Dielectric Barrier Discharge," *Combust. Flame*, Vol. 141, pp. 438~447.
- (16) Ohisa, H., Kimura, I. and Horisawa, H., 1999, "Control of Soot Emission of a Turbulent Diffusion Flame by DC or AC Corona Discharges," *Combust. Flame*, Vol. 116, pp. 653~661.
- (17) Lawton, J. and Weinberg, F.J., 1969, *Electrical Aspects of Combustion*, Clarendon Press, Oxford.
- (18) Weinberg, F.J., 1986, *Advanced Combustion Methods*, Academic Press.
- (19) Kono, M., Iinuma, K. and Kumagai, S., 1981, "The Effect of DC to 10 MHz Electric Field on Flame Luminosity and Carbon Formation," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 18, pp. 1167~1174.
- (20) Kono, M., Carleton, F.B., Jones, A.R. and Weinberg, F.J., 1989, "The Effect of Electric Field on Sooting Flame," *Combust. Flame*, Vol. 78, pp. 357~364.
- (21) Sun, L., Lins, G. and Hammer, T., 2005, "Interaction of a Low-Pressure Flat Flame with an Electric Field," *Proc. European Combust. Meeting*.
- (22) Morel, T., 1975, "Comprehensive Design of Axisymmetric Wind Tunnel Contractions," *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, Vol. 97, pp. 225~233.