

# 동축류 제트에서 삼지화염 전파의 전기장 효과에 대한 실험적 연구

원상희\* · 정석호\*\* · 차민석\*\*\*

## Effect of Electric Fields on the Propagation Speed of Tribrachial Flames in Coflow Jets

Sang Hee Won\*, Suk Ho Chung\*\*, and Min Suk Cha\*\*\*

### ABSTRACT

The effect of electric fields on the propagation speed of tribrachial flames has been investigated in a coflow jet by observing the transient flame propagation behavior after ignition. Without having electric fields, the propagation speed of tribrachial flame edges showed a typical behavior by having an inverse proportionality to the mixture fraction gradient at the flame edge. The behavior of flame propagation with the electric fields was investigated by applying high voltage to the central fuel nozzle and the enhancement of propagation speed has been observed by varying the applied voltage and frequency for AC electric fields. The propagation speed of tribrachial flame was also investigated by applying negative and positive DC voltages to the nozzle and similar improvements of the propagation speed were also observed. The propagation speeds of tribrachial flames in both the AC and DC electric fields were correlated well with the electric field intensity, defined by the electric voltage divided by the distance between the nozzle electrode and the edge of tribrachial flames.

**Key Words** : Tribrachial Flame, Propagation Speed, Electric Fields, Edge Flame

### 1. 서 론

전기장 및 플라즈마를 이용한 연소 현상에 대한 연구는 Brande [1] 이후 많은 연구가 이루어져 왔다. 전기장 및 플라즈마를 통해서 다양한 화염의 현상에 대해 반응을 및 화염 안정화 특성의 증진, 또는 배출물 저감 특성 등에 대한 주제로 많은 연구가 진행되었으며 [1-19], 특히 이러한 화염 현상의 전기장에 의한 변화의 주요인으로는 화염 내에 존재하는 이온과 전기장의 상호 효과로 인한 ionic wind 현상으로 설명된 바가 있다. [1-16]

전기장과 화염의 상호 작용에 의한 연소 증진 현상에 대한 기본적인 연구로서, 예혼합 화염의

전파속도에 대한 연구가 Jagers 등에 의해 발표된 바가 있으며 [5], DC 및 AC 전기장이 예혼합 화염면과 수직하게 형성된 경우, 전기장에 의해 반응 지역에 존재하는 분자를 전기적으로 여기함으로써 탄화수소계의 연료의 층류 전파속도가 증진을 발견하였다. 그러나 이러한 전기장에 의한 예혼합 화염의 전파속도의 증진 현상은 화염의 안정화 여부 및 전기장 형성의 특성에 따라 다양한 결과를 보였으며, 특정한 경우에는 이러한 증진 효과가 매우 작을 수도 있음이 보고된 바가 있다. [6, 10]

최근에는 Marcum 등의 분젠 화염에 대한 실험에서, DC 전기장을 가하면 화염면이 국부적으로 전기장에 의해 변형되며 이의 해석 결과 안정적인 예혼합 화염의 경우에도 전파속도가 증진됨이 보고되었다. [9]

화염의 안정화 및 전파속도에 대한 연구는 최근 Edge Flame의 개념의 도입에 따라 많은 연구의 진척이 있어 왔다. [17-22] 특히 이러한

\* 한국과학기술연구원

† 연락처자, wsh@kist.re.kr

\*\* 서울대학교, 기계항공공학부

\*\*\* 한국기계연구원

Edge flame 중, 삼지 화염은 연료와 산화제가 성층화된 경우 관찰될 수 있으며, 희박 및 과농 예혼합 화염과 확산화염이 한 지점에서 공존하는 구조를 가지고 있다. [17-22] 이러한 삼지 화염의 전파속도는 자유 제트 및 동축류 제트에서 실험적으로 측정이 가능하며, 이론 및 실험 해석을 통하여, 전파속도가 연료 및 산화제의 농도 구배 및 예혼합 화염의 곡률과 함수 관계임이 밝혀진 바가 있다. [21-23] 또한, 삼지 화염의 전파 및 안정화 특성에 대해서는 자유 및 동축류 제트에서의 부상화염의 거동을 통하여 관찰될 수 있으며, 최근에는 단순히 연료 노즐에 AC 전기장을 가진하여 부상 화염의 안정화 특성이 증진될 수 있음이 밝혀진 바가 있다. [24] 이러한 하나의 고전압 terminal을 연료 노즐에 연결한 경우에는 electrode로 작용하는 연료 노즐에서부터 전기장은 형성이 되나 직접적의 전류의 흐름이 없기 때문에 소모 전력이 거의 없다. 그러나 전기장과 화염내 이온간의 상호 작용으로 인해 화염의 안정성이 증진될 수 있음은 층류 및 난류 부상화염의 경우 모두 관찰된 바가 있다. [11, 24] 따라서 본 연구는 기존의 전기장에 의한 부상화염의 안정화 증진 현상이 삼지 화염의 전기장에 의한 전파속도의 증진에 의한 것임을 밝히기 위해 동축류 제트에서 전기장이 존재하는 경우 삼지 화염의 전파 속도의 특성을 파악하고자 하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

본 연구에서 사용한 실험 장치는 Fig. 1의 개략도와 같이 동축류 버너, 유량 조절부, power supply 시스템, 그리고 측정부로 구성되어 있다. 동축류 버너에는 중심에 내경 0.254 mm, 외경 1.588 mm의 스테인레스 스틸의 노즐이 설치되어 있으며, 그 길이는 10 cm로 내부 유동이 완전발달된 분포를 갖도록 고려하였다. 동축류 공기는 내경이 90 mm인 하니콤포 그 하부에 설치한 glass bead를 거쳐서 균일한 속도 분포를 갖도록 하였으며, 모든 실험 조건에서 동축류 속도는 4.6 cm/s로 고정하였다. 중심의 연료 노즐은 제외한 동축류 버너의 모든 부분을 acetal resin으로 제작하여 전기적 절연이 되도록 하였다. 또한 동축류 출구부에는 내경이 90 mm인 아크릴 실린더를 설치하여 외부 유동에 의한 내부 제트의 교란을 방지하였다. 연료로는 C. P. 등급의 프로판을 사용하였으며, 연료 및 공기의 유량은 wet gas meter로 보정한 질량유량계(MKS)를 이용하여 제어하였다.

실험에서는 AC 및 DC 전원을 사용하였으며, AC의 경우에는 Function generator를 이용하여

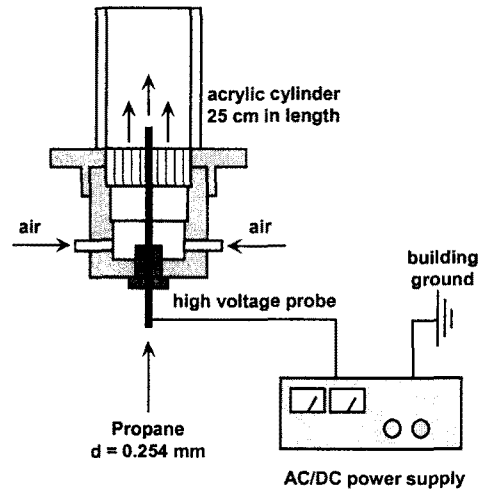


Figure 1. Schematic of experimental setup.

60 Hz에서 1000 Hz의 AC 주파수 영역에서 삼각함수형의 전압 파형을 유지하도록 하였다. 인가 전압은 RMS 값으로 10 kV까지 적용하였다. 실험 중 전압 및 전류의 특성을 모니터링하기 위해 오실로스코프(Lecroy, LT344) 및 1000:1 전압분배기(Tektronix, P6015A) 및 전류 측정기(Tektronix, TCP312)를 사용하였다. 전원기의 고전압부는 연료 노즐에 연결하였으며, 접지부는 건물 접지에 연결하였다. 이러한 경우 실제 전력의 소모량은 측정 결과 약 0(1 W)이기 때문에, 전력 소모로 인한 노즐의 전기적 Joule heating은 무시하였다. 또한 본 실험에서의 접지 방식에 따른 실험 결과에의 영향을 파악하기 위해 두 가지 조건에 대해서 예비실험을 수행하였다. 첫 번째로는 앞서 설명한 바와 같이 전원기 접지를 건물에 접지한 경우이며, 두 번째로는 길이 25 cm인 아크릴 실린더의 출구부에 스틸 mesh를 설치하고, 이에 전원기 접지를 연결한 경우이다. 예비실험의 결과 두 경우 모두 일관성 있는 실험 결과를 보였으며, 두 경우를 비교하여도 거의 같은 결과를 도출할 수 있었다. 따라서 본 실험에서의 전기장은 유한한 노즐 electrode와 무한한 곳에 위치한 ground로 가정할 수 있다. 본 실험에 적용한 전기장에 대한 자세한 설명은 이미 지난 연구에서 언급한 바가 있다. [24]

화염은 전기 스파크를 이용하여 노즐 출구부에서 약 10 cm 하류지역에서 점화하였다. 전기 점화 후 화염핵 형성을 거친 후, 화염은 삼지 화염의 구조를 갖으며 전파하여 최종적으로는 노즐 부착화염이 형성되었으며, 일련의 화염 전파 과정은 고속도 카메라(Photron, Fastcam ultima 1024)를 이용하여 측정하였다. 삼지화염의 전파속도는 고속도 카메라를 이용하여 측정할 시간에 따른 화염면의 이동거리를 측정하고 미분하여 구

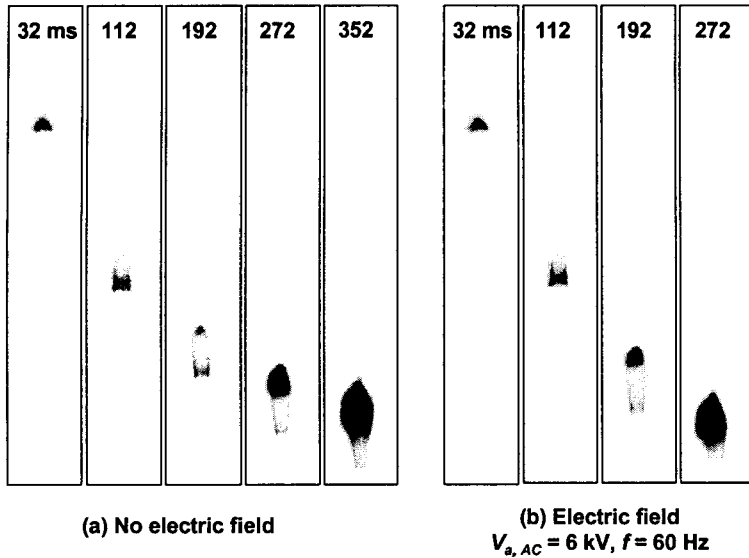


Figure 2. Instantaneous direct photos of propagating tribrachial flame for  $U_0 = 6.27$  m/s (a) without electric field, (b) with electric field when  $V_a = 6$  kV,  $f = 60$  Hz.

하였다.

### 3. 결과 및 토의

삼지 화염의 전파속도는 실험적으로 2D 혼합 경계층 [23], 대향류 버너 [25], 그리고 제트 [21, 22] 특성을 이용하여 측정을 할 수 있다. 특히 층류 제트의 경우, 동축류가 존재할 경우 매우 안정적인 제트 형상을 얻을 수 있을 뿐만 아니라, 국부 속도 및 농도 정보를 virtual origin을 고려한 상사해를 이용하여 이론적으로 정확히 구현할 수 있다는 장점으로 인하여 그동안 많은 연구에서 적용이 되어 왔다. [20-22]

Figure 2는 제트 출구 속도  $U_0$ 가 6.7 m/s인 경우 전기 점화 후 화염의 전파되는 과정을 보여주는 직접사진이다. 비록 사진에서는 명확히 보이지는 않지만 전파되는 동안 화염은 회박 및 과농 예혼합화염 및 확산화염이 공존하는 삼지 화염의 구조를 갖고 있음을 알 수 있다. [17] 이러한 삼지화염의 경우에는 예혼합 화염의 존재로 인하여 독특한 전파 특성을 갖는다. 또한 확산화염이 공존하기 때문에 삼지점은 항상 연료와 산화제의 혼합 상태가 이론 당량비인 지점에 존재하게 된다. 이러한 경우 삼지 화염의 전파속도는 연료의 농도구배에 의해 영향을 받음이 이미 밝혀진 바가 있다. [21-23]

Figure 2a에서 보듯이 점화후 화염은 노즐을 향해 전파하게 된다. 전기장이 없는 경우 화염이 점화 후 노즐까지 전파하는 데 걸리는 시간은 약

350 ms인 것에 비해 Fig. 2b에서 보듯이 6 kV, 60 Hz의 AC 전압을 노즐에 가한 경우에는 전파 소요 시간이 약 270 ms로 감소하는 것을 알 수 있다.

삼지화염의 전파속도는 삼중점에서의 삼지화염의 전파속도  $S_e$ 와 국부 속도  $u_{st}$ , 화염이동속도  $S_d$ 를 포함한 balance mechanism을 이용하여 구할 수 있다. 이를 위해서는 점화 후 화염 선단의 위치 변화를 추적할 필요가 있다. Figure 3은 점화 후 전기장이 없는 경우와 있는 경우, 화염 선단의 위치 변화를 고속도 카메라로 측정하여 시간에 따라 나타낸 그림이다. 점화 후 약 50 ms는 화염 kernel이 형성되는 기간이며, 이 이후

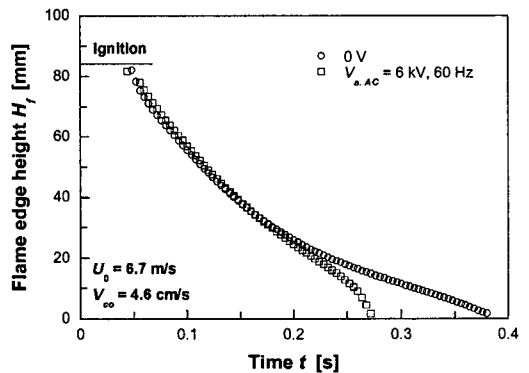


Figure 3. Behaviors of flame edge height during propagation for  $U_0 = 6.27$  m/s with and without electric fields.

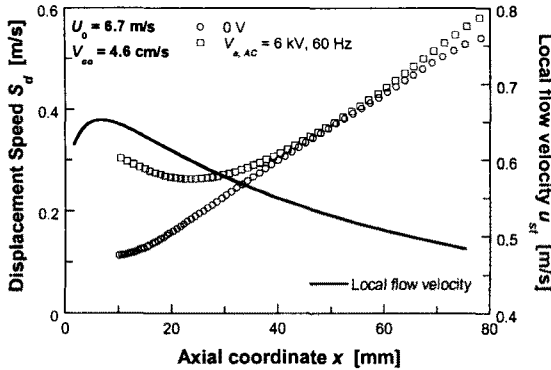


Figure 4. Local axial flow velocity along the stoichiometric contour and displacement speed of tribrachial flame with and without electric fields.

염은 선명한 삼지화염의 구조를 갖게 된다. 화염 선단의 이동 속도  $S_d$ 는 시간에 따른 선단의 위치 변화를 추적하고 다항 함수꼴로 Curvefit을 한 후 미분하여 구할 수 있다. Figure 4에서 보듯이 전기장이 없는 경우 화염 선단의 이동 속도  $S_d$ 는 축방향 거리에 대해 거의 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 이러한 선형적 특성은 그 동안이 연구결과에서 보였던 제트에서의 삼지화염 전파의 선형적 특성이라 할 수 있다. [21, 22] 그러나 전기장이 존재하는 경우에는 이러한 선형적 특성에서 벗어나 화염의 노즐과 가까워질수록 화염전파 속도가 증가함을 보이고 있다.

삼지화염의 전파속도  $S_e$ 를 도출함에 있어서는 삼지화염의 선단이 확산화염의 공존으로 인해 이론 당량비 선을 따라서 전파하기 때문에 이론 당량비 선을 따른 제트의 국부 속도  $u_{st}$ 의 정확한 정보가 필요하다. 동축류가 존재할 경우에 대한 제트의 이론 상사해가 virtual origin을 고려할 경우, 제트의 속도가 동축류 속도보다 매우 큰 경우에 한하여 존재함을 기존의 연구에서 이미 밝힌 바가 있다. [20] Figure 4의 실선은 이론 상사해로부터 구한 이론당량비 선을 따르는 축방향 국부 속도  $u_{st}$ 를 나타낸 것이다. virtual origin을 고려하지 않은 일반적인 제트의 상사해는 노즐 출구부인  $x = 0$ 인 지점에서 singular 한 특성을 갖으나 그림에서 보이듯이 virtual origin을 고려한 경우, 특히 연료의 Schmidt 수가 1보다 큰 경우에는 초기 국부속도가 증가하는 영역이 존재하고 (Developing region) 이후 기존의 상사해와 유사한 감소하는 영역 (Developed region)이 존재한다. [20, 22] 비록 virtual origin을 고려하여 노즐 근처에서의 국부 속도 및 농도의 정보를 얻을 수는 있으나, 실제로 노즐 외경면에서의 경계층 발달 및 유입현상에 대한 정확한 모사는 이론적으로 불가능하기 때문에 본 연구에서는 삼지

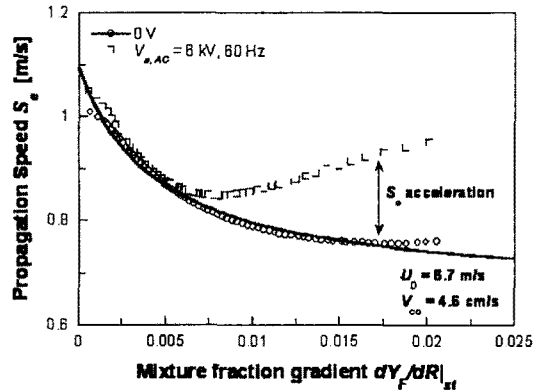


Figure 5. Propagation speed of tribrachial flame in terms of mixture fraction gradient with and without electric fields.

화염의 전파 속도를 도출함에 있어서 노즐로부터 10 mm까지의 이러한 Developing region에서의 정보는 배제하였다.

삼지화염의 전파속도는 앞서 언급한 바와 같이 Balance mechanism을 이용하여 다음의  $S_e = S_d + u_{st}$ 의 관계식에 따라 구할 수 있다. 이의 관계를 이용하여 Fig. 4에서의 결과를 통해 Fig. 5에 기존의 연구에서 밝힌 바와 같이 삼지화염의 전파속도를 연료의 농도구배  $dY_F/dR$ 에 대해 도시하였다. 여기서  $Y_F$ 는 연료의 질량분율이며,  $R$ 은 노즐 반경으로 무차원화된 반경방향 거리이다. 전기장이 없는 경우, 본 실험의 결과는 기존의 연구에서 예견한 바와 같이 농도구배에 반비례 관계를 갖음을 알 수 있다. 물리적으로 농도구배는 삼지화염의 선단에서의 연료와 산화제의 혼합 경계층을 대변하는 요소이며, 이로 인해 예혼합 화염의 곡률이 결정된다고 알려져 있다. [21] 따라서 이러한 농도구배에 의한 화염 곡률은 삼지화염 선단에서의 Flow redirection 효과에 영향을 주게 되며, 이로 인해 화염의 전파속도는 지배 받게 된다. [23] 본 실험에서 전기장이 없는 경우 삼지화염의 전파속도는 기존의 연구에서 밝힌 바와 같이 다음과 같은 관계식으로 구현될 수 있으며, Fig. 5에 실선으로 표시하였다.

$$S_e = \frac{0.00199}{dY_F/dR + 0.00460} + 0.66 \quad (1)$$

상관계수는 0.99 이상이다. 농도 구배가 0이 되는 삼지화염 전파속도의 최대값은 위의 식 (1)에서 1.09 m/s로 이는 기존의 이론해석 결과인  $S_{e,max} = S_L^0(\rho_{unburned}/\rho_{burnt})^{1/2}$ 의 중력장 및 무중력 실험 결과와 비교적 잘 일치한다. [22,

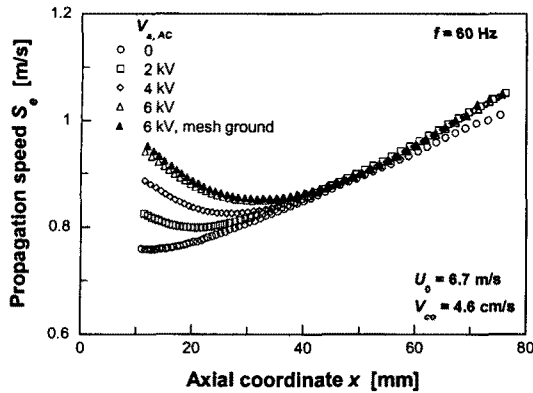


Figure 6. Propagation speed of tribrachial flame in terms of axial coordinate as varying the applied AC voltage.

23]

노즐에 6 kV의 AC 전압이 인가된 경우 비교적 작은  $dY_F/dR$ 에서, 즉 노즐에서 멀리 떨어져 있는 경우에는 전기장이 없는 경우와 거의 같은 전파속도를 갖음을 알 수 있다. 그러나 화염 선단이 노즐 electrode에 접근함에 따라, 즉  $dY_F/dR$ 가 커짐에 따라  $dY_F/dR$ 이 약 0.006 이상이 되는 지점에서부터 혼합경계층 두께의 감소하여 flow redirection 효과가 감소함에도 불구하고 오히려 화염의 전파속도가 점진적으로 다시 가속되어 증가함을 보이고 있다. 이러한 삼지화염 전파속도의 증진 현상은 전기장 효과에 의한 것으로 실험 결과 유추할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 삼지화염 전파 속도의 전기장에 의한 영향을 체계적으로 관찰하기 위해 AC 및 DC 전기장에 대해 삼지화염의 전파 특성을 관찰하고자 하였다.

### 3.1 전기장의 효과

본 실험에 적용한 전기장의 안정성을 파악하기 위해서 접지 상태의 변화에 따른 삼지화염의 전파속도를 관찰하였다. 위에서 언급한 바와 같이 전원기의 접지가 건물 접지에 연결된 경우와 아크릴 실린더 출구부에 설치한 스틸 mesh에 연결된 경우에 대해 전파속도를 측정하고 Fig. 6에 AC 전압  $V_{a,AC} = 6$  kV, 주파수  $f = 60$  Hz에 대한 결과를 도시하였다. 그림에서 보듯 실험 결과 접지 상태에 따른 변화는 없는 것으로 관찰되었으며, 일관성 있는 결과를 도출할 수 있었다. 앞서 언급한 바와 같이 본 연구의 전기장은 유한한 노즐 electrode와 무한한 곳에 위치한 접지로 상정할 수 있으며, 화염 내에  $O(10^{11} \text{cm}^{-3})$ 개의 이온이 존재하기 때문에 전기장과 이온의 상호 작용

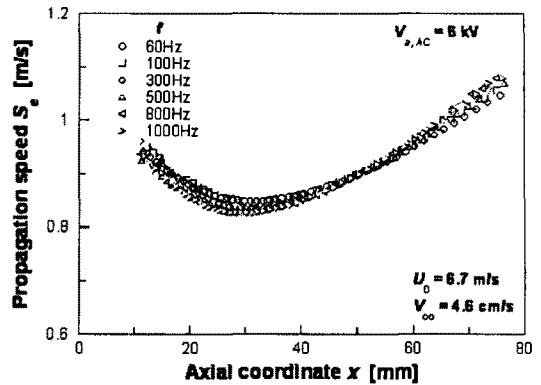


Figure 7. Propagation speed of tribrachial flame in terms of axial coordinate as varying the applied AC frequency.

에 의하여 전파속도가 영향을 받음을 유추할 수 있다. [2, 8]

AC 전기장에서 삼지화염의 전파속도를 인가 전압의 변화에 따라  $f = 60$  Hz인 경우에 대해 측정을 하였다. Fig. 6에서 보듯이 삼지화염의 전파속도가 노즐 근처에서 인가 전압에 따라 증가함을 알 수 있다. 이러한 전기장에 의해 영향을 받기 시작하는 위치는  $V_{a,AC} = 2$  및 6 kV의 경우, 각각 측방향 거리  $x$ 가 30 및 45 mm임을 보이고 있다.

반응지역에 존재하는 이온과 전자의 운동을 고려한 기존의 연구에서는 AC 및 DC 전기장에 의해 화염 내에 존재하는 이온 및 전자가 동적 변화할 수 있음을 보고한 바가 있으며, 특히 전기장의 주파수가 매우 높은 경우, 즉  $O(1 \text{ MHz})$ 일 경우 전자 온도의 증가로 인한 동적 특성 증가 때문에 전자의 충돌 횟수 및 가능성이 증가하여 반응률을 증진시킬 수 있다고 설명된 바가 있다. [5] 이러한 경우에는 전자의 온도 증가는 급격한 주변 기체로의 열전달로 인하여, 주로 화염 전파 속도 및 연소의 증진이 thermal plasma 등의 온도 증가에 의한 것으로 해석이 되어 왔다. [8] 그러나 본 실험에서 적용한 전기장의 주파수는 이에 비해 매우 낮은 영역인  $O(0.1 \sim 1 \text{ kHz})$ 이기 때문에 온도 증가에 의한 전파속도 증진으로 설명할 수는 없다. 따라서 본 연구에서 이러한 낮은 주파수 영역에서의 전기장 특성이 화염 내에 존재하는 이온의 부가적 움직임을 유도하고, 이로 인해서 화염의 반응특성이 증진, 전파속의 증진이 가능할 것이라고 유추하고 있다. [5, 9]

AC 전기장의 경우, 주파수의 변화에 의한 전파속도의 증진의 변화를 관찰하기 위해, AC 주파수를 1000 Hz까지 변화시켜 가면서 삼지화염의 전파속도를 측정하였고, 그 결과를 Fig. 7에

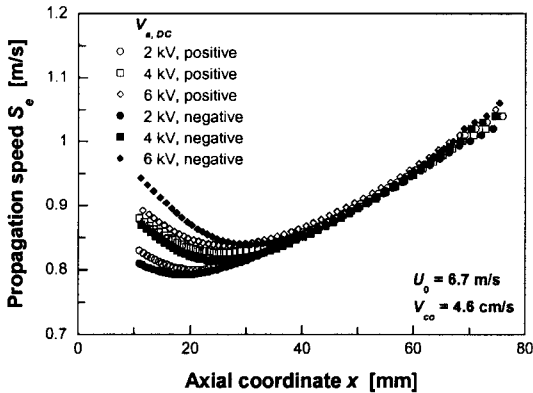


Figure 8. Propagation speed of tribrachial flame in terms of axial coordinate as varying the applied negative and positive DC voltages.

도시하였다. 그림에서 보듯이 본 실험의 AC 주파수의 범위에서는 삼지화염의 전파속도에 있어서 주파수 변화의 효과는 없었다.

최근에 부상화염의 안정성에 대한 연구에서 AC 전기장이 존재할 경우 부상화염의 재부착 속도가 증가하며, AC 전기장의 주파수가 낮을 경우 같은 전압에서 재부착 속도가 더욱 증가한다고 발표된 바가 있다. 또한 DC 전기장을 인가한 경우에는 부상화염의 재부착에 있어서 전혀 효과가 존재하지 않았었다. [24] 따라서 본 실험에서는 삼지화염의 전파 특성에 있어서 DC 전기장의 효과의 존재 여부를 파악하였다.

Figure 8은 DC 전기장의 경우 삼지화염의 전파속도를 축방향 거리에 대해서 도시한 것이다. AC 전기장의 경우와 마찬가지로 노즐 electrode 근처에서 화염의 전파속도의 증진 현상이 관찰되었다. 실험 결과 양전압이 인가된 경우와 음전압이 인가된 경우가 미세한 차이를 보이고 있다. 실질적인 두 전압 특성의 차이가 화염의 전파속도에 미치는 영향을 정량적으로는 파악하기 힘들지만, 삼지화염의 전파속도 증진 현상에 있어서 DC 전기장 또한 영향을 미치며, 과도한 전압이 인가된 경우, 화염 내에 많이 존재하는 양의 이온과 electrode와의 Coulomb force에 의한 효과를 배제할 수 없음을 유추할 수 있다.

삼지화염의 전파속도의 증진 현상에 있어서 전기장의 효과는 앞서 언급한 바와 같이 AC 및 DC 전기장, 그리고 AC 전기장의 주파수 변화에 상관없이 거의 유사한 증진 특성을 보이고 있음을 알 수 있다. 이러한 삼지 화염 전파속도의 증진이 전기장에 의한 것임을 고려할 경우, 증진 특성이 전기장의 강도와 밀접한 관련이 있음을 유추할 수 있다. 따라서 본 실험에서는 전기장의 특성 변수로 인가전압과 노즐 electrode와 화염

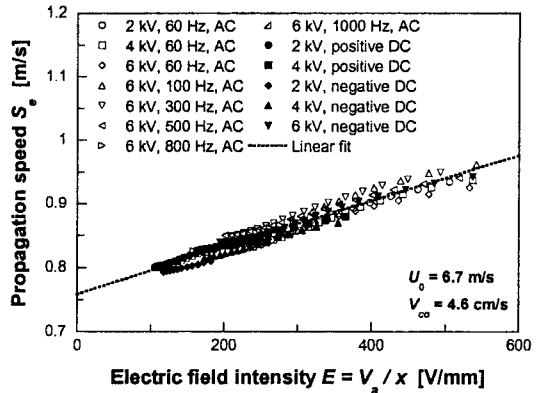


Figure 9. Correlation between propagation speed of tribrachial flame and electric field intensity.

선단간의 거리로 정의된 전기장 강도  $E = V_e/x$ 에 대해서 삼지화염의 전파속도를 전기장에 의해서 가속되는 부분만을 Fig. 9에 도시하였다. 그림에서 보듯이 전파속도가 증진되는 실험 영역에서 삼지화염 전파속도가 전기장 강도에 대해서 다음과 같은  $S_e = 0.76 + 0.00036 E [V/mm]$ 의 선형적인 상관 관계를 갖고 있음을 알 수 있었다. 여기서 상관계수는 0.96이다. 그러나 본 실험의 결과 삼지화염의 전파속도가 전기장에 의해 증진될 수 있음이 관찰되었으나, 실질적인 화염의 전파속도 및 반응물과 전기장 사이의 상호작용의 메커니즘을 파악하기 위해서는 더 많은 연구가 필요할 것이다.

#### 4. 결론

전기장에 의한 삼지화염의 전파속도 증진 특성에 대해서 동축류 제트에서 전기적 점화 이후 제트의 이론 당량비선을 따라 전파하는 삼지화염의 선단을 추적하고 분석하여 파악하였다. 전기장이 존재하지 않는 경우, 삼지 화염의 전파속도는 기존의 연구결과에서 예측한 바와 같이 농도 구배에 반비례하는 특성을 보였다. 전기장의 인가 방법으로는 동축류 버너 중심의 연료 노즐에 단순히 고전압 terminal를 연결하는 Single Electrode Method를 이용하였다. 실험 결과 AC 전기장이 인가된 경우, 삼지화염의 전파속도는 노즐 electrode 근처에서 급격히 가속되었으며, 이러한 전파속도의 증진 특성은 본 실험영역의 AC 전기장의 주파수와는 무관하였다. 유사한 전파속도의 증진 현상은 DC 전기장인 경우에도 역시 관찰되었다. 이러한 증진 현상에 대해서 전기장과 화염 내 이온의 상호작용으로 인한 반응물 등의 증진에 의한 것임을 유추할 수 있었지만, 자세한 설

명을 위해서는 향후 관련 연구가 필요할 것이다. 최종적으로 삼지화염의 전파속도가 증진된 영역에서의 전파속도는 인가전압과 거리로 정의된 전기장의 강도로 선형적 관계를 갖음을 알 수 있었다.

## 후 기

이 연구는 산업자원부 지원의 "미래형 자동차 배기가스 제로화 기술개발"과제의 일부로 수행되었으며, 연구비 지원에 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] A. Y. Starikovskii, *Proc. Combust. Inst*, 30 (2005) 2405-2417.
- [5] H. C. Jagers, A. von Engel, *Combust. Flame*, 16 (1971) 275-285.
- [6] H. C. Jagers, R. J. Bowser, F. J. Weinberg, *Combust. Flame*, 19 (1972) 135-136.
- [7] R. J. Bowser, F. J. Weinberg, *Combust. Flame*, 18 (1972) 296-300.
- [8] Y. Ju, S. O. Macheret, M. M. Shneider, R. B. Miles, D. J. Sullivan, *40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, Fort Lauderdale, Florida (2004) AIAA 2004-3707.
- [9] S. D. Marcum, B. N. Ganguly, *Combust. Flame*, 143 (2005) 27-36.
- [10] R. I. Noorani, R. E. Holmes, *AIAA J.*, 23 (9) (1985) 1452-1454.
- [11] S. M. Lee, C. S. Park, M. S. Cha, S. H. Chung, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 33 (5) (2005) 1703-1709.
- [12] K. Criner, A. Cessou, J. Louiche, P. Vervisch, *Combust. Flame*, 144 (2006) 422-425.
- [13] A. Sakhrieh, G. Lins, F. Dinkelacker, T. Hammer, A. Leipertz, D. W. Branston, *Combust. Flame*, 143 (2005) 313-322.
- [14] H. Ohisa, I. Kimura, H. Horisawa, *Combust. Flame*, 116 (1999) 653-661.
- [15] M. Saito, T. Arai, M. Arai, *Combust. Flame*, 119 (1999) 356-366.
- [16] M. S. Cha, S. M. Lee, K. T. Kim, S. H. Chung, *Combust. Flame*, 141 (2005) 438-447.
- [17] S. H. Chung, B. J. Lee, *Combust. Flame*, 86 (1991) 62-72.
- [18] B. J. Lee, S. H. Chung, *Combust. Flame*, 109 (1997) 163-172.
- [19] J. Lee, S. H. Chung, *Combust. Flame*, 127 (2001) 2194-2204.
- [20] J. Lee, S. H. Won, S. H. Jin, S. H. Chung, *Combust. Flame*, 135 (2003) 449-462.
- [21] Y. S. Ko, S. H. Chung, *Combust. Flame*, 118 (1999) 151-163.
- [22] J. Lee, S. H. Won, S. H. Jin, S. H. Chung, O. Fujita, K. Ito, *Combust. Flame*, 134 (2003) 411-420.
- [23] G. R. Ruetsch, L. Vervisch, A. Liñán, *Phys. Fluids*, 7 (1995) 1447-1454.
- [24] S. H. Won, M. S. Cha, C. S. Park, S. H. Chung, *Proc. Combust. Inst*, 31 (2007) to appear.
- [25] M. S. Cha, P. D. Ronney, *Combust. Flame*, 146 (2006) 312-328.