

전기장이 튜브내 예혼합화염 전파속도에 미치는 영향에 관한 연구

류승관* · 원상희* · 차민석** · 정석호**

Effect of Electric Fields on Flame Speed of Propagating Premixed Flames in Tube

S. K. Ryu*, S. H. Won*, M. S. Cha**, and S. H. Chung**

ABSTRACT

The effect of electric fields on flame speed has been investigated experimentally by observing propagating premixed flames in a tube for methane/air mixtures. The flame speeds were measured in both the normal and micro gravity conditions to substantiate the measurements. The results show that the flame speeds were enhanced by both the AC and DC electric fields, as the flame approached to the high voltage electrode located on the one end of the tube. The enhancement of flame speed was proportional to the square root of the electric field intensity, defined as the voltage applied divided by the distance of flame from the high voltage electrode, when the electric field intensity is sufficiently large. When the electric field intensity was low, there existed critical intensities, below which the electric fields did not influence the flame speed. This critical electric field intensity correlated well with the flame speed.

Key Words : Electric field, Flame speed, Premixed flame, Tube propagation

기 호 설 명

f	frequency	E	Electrical intensity
S_f	flame propagation speed	E_c	critical electrical intensity
S_L	laminar burning velocity	ΔS_f	enhancement of flame speed

1. 서 론

Brande의 연구 이후로 전기장과 플라즈마를 이용한 연소는 많은 관심을 받아왔다[1]. 여러 연구를 통해 전기장 또는 플라즈마를 이용한 화염 안정화, 연소율, 배출물 감소 등과 같은 다양한 화염의 거동의 증진이 관찰되었다 [2-16]. 예혼합화염과 비예혼합화염에서의 전기장의 영향이

광범위하게 연구되어왔으며, 이러한 전기장에 의한 효과들은 화염에 존재하는 이온과 전기장의 상호작용에 의해 발생하는 이온풍에 의한 것으로 설명되어지곤 했다 [2-16].

전기장과 연소의 상호작용에 관한 가장 기초적인 연구 중 하나는 예혼합화염의 화염전파속도에 전기장이 미치는 영향을 살펴보는 것이다. Jagers와 von Engel[4]은 튜브에서 전파하는 예혼합화염에 화염전파 방향에 수직으로 직류와 교류를 걸어줌으로써 탄화수소계 연료의 화염전파속도가 증가함을 보고하였으며, 이러한 현상은 진동으로 여기된 분자들이 반응율을 증가시킬 수

* 서울대학교 기계공학과

** 한국기계연구원

† 연락저자. shchung@snu.ac.kr

있기 때문인 것으로 보였다. 반면에 정지되어 있는 평평한 화염에 대한 실험에서는 화염전파속도의 증가는 관찰되지 않았다[5]. 따라서 화염전파 방향과 평행하게 걸린 직류는 화염전파속도에 영향을 주지 않는 것으로 결론지었다. 하지만 Noorani와 Holmes[6]는 전기장이 평행한 경우에도 튜브 전파실험에서 약간의 화염전파속도 증가함을 관찰하였다.

최근에 Marcum과 Ganguly[13]는 예혼합 분젠 화염에서 화염전파속도의 증가를 보고하였다. 이는 직류전기장 안에서 반응영역에서의 선택적인 이온의 운동으로 인해 열확산 불안정성이 야기되고 이로 인해 화염의 굴곡이 생기고 이로부터 화염전파속도가 증가될 수 있다고 해석하였다. Hu 등[16]은 수치적 해석을 통해 전기장 내에서의 화염 특성의 변화에 대해 화염형상의 변화의 원인은 이온풍에 의한 벨크모션이라고 보았다. 반면, 반응율의 증가에 관한 증거는 관찰되지 않았다.

그러나, 전기장이 반응율을 증가시키는 것인지, 만약 그렇다면 전기장의 효과는 어느 정도인지, 극성의 영향은 있는지 등 화염에서의 전기장의 효과에 대한 데이터는 아직까지 논란이 되고 있으며 명확하지 않다. 더군다나 전기장에 의한 예혼합화염의 화염전파속도 증가에 대한 정량적인 데이터는 매우 부족한 현실이다.

이러한 관점에서 본 연구는 전기장에 의한 예혼합화염의 전파속도 증가에 대한 이해를 좀 더 높이기 위해 수행되었다. 이를 위해 튜브 내에서의 예혼합화염 전파 실험을 수행하였으며, 튜브의 양쪽 끝을 각각 고전압 전극과 접지로 놓아 튜브 내에 전기장을 걸어주었다. 걸어진 직류 또는 교류의 전압과 주파수에 따라 화염전파속도의 증가를 정량적으로 측정하였으며, 지상실험의 검증을 위해 무중력 실험을 함께 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치 및 실험조건

실험 장치는 연소튜브, 예혼합기 충전 시스템, 전기전원장치, 가시화장치로 구성되어있으며, 연소튜브는 내경 20mm, 길이 180mm이며, 절연을 위해 아크릴과 아세탈로 제작되었다. 장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 본 실험에서는 두 가지 형태의 전극 구성이 테스트 되었다. 튜브 아래쪽의 수직철심 또는 평평한 철망에 고전압 전극을 설치하였고, 접지 전극은 고전압 전극으로부터 159mm 떨어진 곳의 평평한 철망에 설치하였다. 점화장치는 고전압 전극과의 간섭을 피하기 위해 고전압 전극에서 139mm 떨어진 곳에

설치하였다. 0에서 9kV 사이의 고전압의 교류 또는 직류가 전원공급장치를 통해 공급되었다. 교류의 경우에 함수발생기를 통하여 60에서 600Hz 범위에서 주파수를 변화시켰다. 전압과 전류 파형은 오실로스코프(Lecory, LT344), 1000:1 전압분배기(Tektronix, P6015A), 그리고 전류 프로브(Tektronix, TCP312)를 통해 관찰하였다.

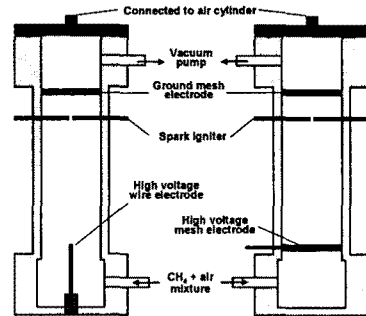


Fig. 1 Schematic of experimental setup

연료는 혼합 챔버에 화학적으로 순수한 메탄에 공기를 섞어 사용하였다. 실험순서는 다음과 같다. 진공펌프를 사용하여 연소튜브의 압력을 2kPa까지 떨어뜨린 후에 예혼합기를 1기압까지 채운다. 화염이 전파되는 동안에 튜브안의 압력은 1기압으로 유지시켜주기 위해 점화가 일어나기 약 1초전에 접지 철망이 있는 쪽의 튜브 끝단을 공압실린더를 이용하여 개방한다. 개방된 출구 면적은 320mm²이다. 화염영상은 고속도카메라(Photon, Fastcam ultima 1024)를 이용하여 125에서 250fps로 촬영하였다.

화염전파속도 측정에 있어서 부력의 영향을 확인하기 위하여 포물선 비행을 통해 만들어진 무중력환경(Gulfstream II)에서의 실험을 수행하였다. 비행중에 기내 압력이 약 0.8기압이 되기 때문에 튜브의 바깥쪽에 용량 50L의 압력버퍼 탱크를 설치하였으며 back-pressure 레귤레이터를 이용하여 탱크 내부의 압력을 1기압으로 유지시켰다. 비행기내 실험동안 연소튜브와 버퍼탱크의 압력 변화를 체크하였으며 그 정도는 매우 작았다.

3. 결과 및 고찰

당량비 1.32 일 때 화염이 전파하는 동안의 직접사진을 32ms 간격으로 Fig. 2에 나타내었다. 철망형태의 전극이 설치된 경우에 전압을 걸지 않았을 때 튜브 안에서 전파하는 모양은 전형적인 예혼합화염의 선단 모습을 보이고 있다(a). 화염의 구조는 전파하는 동안 어떠한 주목할 만한 변화도 보이지 않았다. 철망에 6kV의 교류전압

이 걸렸을 때 화염전파 속도는 전압이 걸린 철망에 다가갈수록 점점 빨라지고 화염의 선단은 전압이 걸린 철망에 근접함에 따라 비대칭이 된다 (b). 이러한 현상은 철망에 연결된 고전압 터미널로 인한 교류전기장의 불균일성에 기인한 것으로 추정된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 철망 전극 대신에 수직철심 전극을 튜브 하단에 설치함으로써 균일한 전기장을 얻을 수 있도록 하였다. Fig. 2(c)는 수직철심을 사용한 경우에 화염전파시 화염 선단의 모양이 대칭임을 보여준다. 화염이 수직철심에 근접함에 따라 작은 곡률을 갖게 됨으로써 화염선단의 중앙부분이 더 가속되고 있다.

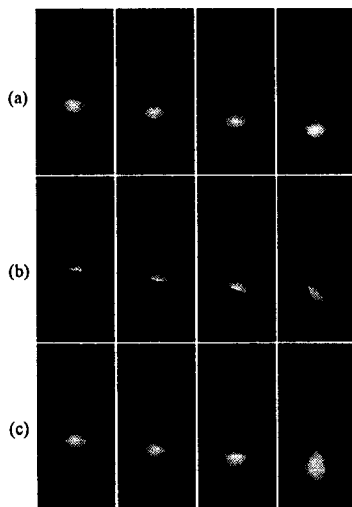


Fig. 2 Direct photographs during the propagation with time t ($\Delta t = 32$ ms) for $\phi = 1.32$: (a) $V = 0$ kV, (b) $V_{AC} = 6$ kV and $f = 60$ Hz with mesh electrode, and (c) $V_{AC} = 6$ kV and $f = 60$ Hz with wire electrode.

화염전파속도를 측정하기 위해 화염선단을 추적하였다. 전기장이 걸리지 않았을 경우에 고전압 전극과 화염선단 사이의 거리 X_f 는 시간에 따라 선형적으로 감소하였다. 중력상태와 무중력상태에서 측정된 당량비에 따른 화염전파 속도 S_f 를 Fig. 3에 나타내었다. 점선으로 표시된 층류화염 전파속도 S_L 은 GRI 3.0을 이용한 1D PREMIX 코드를 사용하여 계산하였다. 당량비가 과농하거나 희박한 경우에 수치적으로 계산된 S_L 과 측정된 S_f 는 잘 일치하는 결과를 보여준다. 반면에 이론당량비인 경우에 S_L 은 40cm/s , S_f 는 55.5cm/s 인 것에서 보듯이 이론당량비 근처에서의 S_f 는 S_L 보다 크다. 혼합기가 희박한 경우에 화염의 모양은 과농하거나 이론당량비 근처에서

의 화염모양보다 평평하다. 튜브실험에서의 화염전파속도 측정은 화염곡률, 상류로의 유동장 교란, 화염 스트레치, preferential diffusion, 그리고 열손실 등의 다양한 효과로 인한 오차를 포함하고 있다. 그러나 본 연구에서 이러한 효과들은 고려하지 않았다. 화염전파속도에 영향을 미치는 전기장 효과와 결합된 이러한 효과들은 차후에 연구되어야 할 것이며 대신에 전기장이 걸리지 않았을 경우의 화염전파속도 S_f 로부터 전기장에 의해 영향을 받은 화염전파속도의 증가분 ΔS_f 에 중점을 두고 살펴볼 것이다.

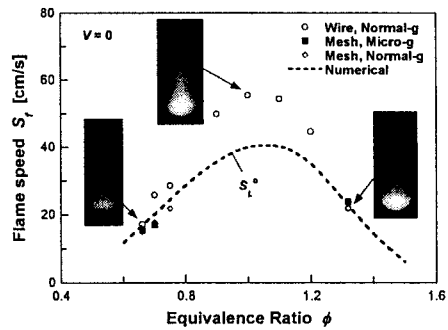


Fig. 3 Measured flame speed with equivalence ratio.

당량비 0.66, $f = 60\text{Hz}$ 에서 $V_{AC} = 0, 3, 6$, 그리고 9 kV 일 때 화염전파속도에 미치는 교류전기장의 영향을 Fig. 4에 나타내었다. 점화초기에는 화염 커널의 성장으로 인해 점화 후 0.1초까지의 데이터는 제외하였다. 데이터간의 변별을 위해 걸린 전압에 따라 초기 시간을 미세하게 조절하였다.

$V_{AC} = 0$ 일 때 화염의 위치 X_f 는 시간에 따라 선형적으로 감소한다. 화염전파속도는 linear fitting을 통해 14.98cm/s 값을 얻었으며 correlation factor $R = 0.99$ 이다. 걸린 교류전압에 따라 X_f 는 초기에는 선형적으로 감소한다. 그 후에 화염 선단이 철망 전극에 가까워짐에 따라 화염선단은 가속된다. 더 높은 교류전압의 경우에 X_f 의 빠른 감소는 더욱 현저해진다. 이러한 현상은 화염전파속도가 걸린 교류전압에 따라 증가함을 보여준다.

화염전파속도에 대한 교류전기장 주파수의 효과를 시험하기 위해 주파수를 변화시켜가며 실험을 수행하였다. Fig. 5는 $V_{AC} = 9\text{kV}$ 에서 시간에 따른 화염의 위치를 나타낸다. 결과에서 보듯이 $60 < f < 600\text{Hz}$ 사이에서 화염전파속도에 주파수의 변화가 미치는 영향은 미미하다. 이전의 연구에 따르면 반응영역에서 이온과 전자의 운동에 있어

서 이온과 전자는 교류 또는 직류 전기장에 의해 여기될 수 있다고 설명되어져 왔다[4]. 특히 $O(1\text{MHz})$ 이상의 고주파수 교류전기장의 경우에 전자의 온도는 상승하게 되고 다른 라디칼들과의 충돌의 증가로 인해 반응율이 증가할 수 있을 것으로 보았다[4]. 낮은 주파수의 교류와 직류 전기장의 경우에 전기장의 변화 동안에 이온이 영향을 받을 충분한 시간을 갖기 때문에 반응영역에서의 이온의 움직임이 좀 더 효과적으로 나타날 수 있다.

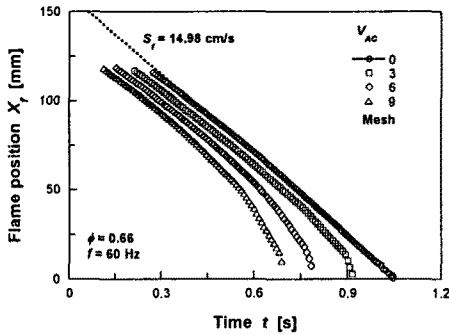


Fig. 4 Variation of flame positions with time in AC electric fields for $V_{AC} = 0, 3, 6,$ and 9 kV with $f = 60$ Hz and $\phi = 0.66$.

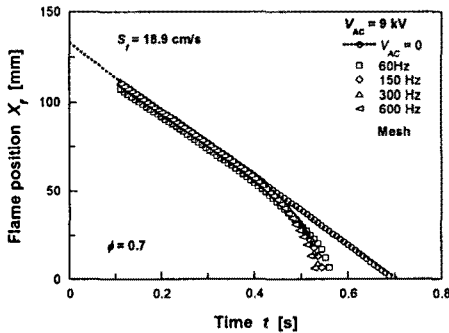


Fig. 5 Variations of flame position with time in AC electric fields for $f = 60, 150, 300,$ and 600 Hz with $\phi = 0.7$ and $V_{AC} = 9$ kV.

본 연구 결과에서 보듯이 화염전파속도에 영향을 주는 전기장의 영향은 화염이 고전압 전극에 접근했을 때만 나타난다는 것을 보여준다. 접지전극은 화염선단으로부터 멀리 떨어져있으므로 화염이 겪게 되는 효과적인 전기장 강도는 고전압 전극과 화염 내에서 이온, 전자의 상호작용에 의

한 거리 X_f 에 따라 결정될 수 있다. 이를 확인하기 위해 수도관 접지 또는 전원공급기 자체의 접지 등을 사용한 실험을 수행하였으며, 접지의 변화에 따른 화염전파속도의 변화는 관찰되지 않았다.

유효전기장강도 E ($E=V/H_f$)는 거리에 반비례한다. 결국 화염선단이 전극에 가까워짐에 따라 E 는 무한대로 근접해 간다. 이는 전기장 강도 변화의 타임스케일이 교류의 주파수 변화 타임스케일보다 작아질 수 있다는 것을 의미한다. 전기장이 전자 운동에 효과를 미치려면 $O(1\text{MHz})$ 이 필요하다[4]. 반면에 본 실험의 주파수는 1kHz 미만이다. 이는 직류에서의 비정상 튜브 전파 실험[4]과 정적인 예혼합화염 실험[5] 사이의 화염전파속도 현상의 차이를 정성적으로 이해할 수 있게 해준다. 즉, 직류전기장에서도 화염이 전파하는 동안 전기장 강도의 변화가 일어날 수 있고 이는 교류전기장의 효과와 유사할 수 있다. 전기장 강도 변화에 따른 상세한 이해는 차후 연구에서 수행될 것이다. 지금부터는 전기장 강도의 측면에서 화염전파속도의 증가에 대해 논의할 것이다.

3.1 화염전파속도 증진

전기장에 의한 화염전파속도의 증가는 시간에 따른 X_f 데이터를 미분한 값에서 전압이 걸리지 않은 경우의 S_f 값을 빼줌으로써 계산될 수 있다. Fig. 6은 당량비 0.66, $f = 60\text{Hz}$ $V_{AC} = 3, 6, 9$ kV일 때의 화염전파속도의 증가 ΔS_f 를 전기장 강도 E 에 대한 함수로 나타내었다. 첫째, 모든 실험 데이터들이 E 에 적절히 상관관계를 가짐을 알 수 있다. 둘째로 ΔS_f 의 기울기는 log-log 그래프에서 0.5로 접근해간다. 즉 전기장이 큰 경우에 $\Delta S_f \rightarrow E^{1/2}$ 이다. 셋째로 전기장이 작은 경우에 ΔS_f 는 $\Delta S_f \sim E^{1/2}$ 를 확연히 벗어나기 시작해 0값으로 다가간다. 이는 어느 일정값 아래의 전기장에서는 화염전파속도에 효과적으로 영향을 주지 못하는 임계 전기장 강도 E_c 가 존재함을 의미한다.

임계전기장 강도 E_c 와 E 에 대한 ΔS_f 의 상관관계를 나타내기 위해 두 가지 형태의 fitting 함수 ($\Delta S_f \sim E^{1/2} + C$, $\Delta S_f \sim |E - E_c| R \sqrt{E/H_f}$)를 하였다.

$\Delta S_f \sim E^{1/2} + C$ 을 이용한 fitting을 Fig. 6에 파선으로 표시하였으며 이 때 $R = 0.93$ 이다. 이는 특히 전기장강도가 충분히 클 때 화염전파속도의 증가가 전기장강도의 1/2승과 큰 상관관계를 가짐을 보여준다. 반면에 위 fitting은 E 가 감소함에 따라 부정확해지며, 임계전기장 강도를 적절히 정의하기 위해서는 적절치 않은 것으로

보인다. 임계전기장 강도를 정의하기 위해 $\Delta S_f \sim |E - E_c|^{0.66}$ 한 fitting을 테스트하였으며 Fig. 6에 점선으로 나타내었다. 이 때 $n = 0.521$, $R = 0.93$ 이다. Fitting은 E에 대한 ΔS_f 실험 데이터의 경향을 적절히 잘 따라간다.

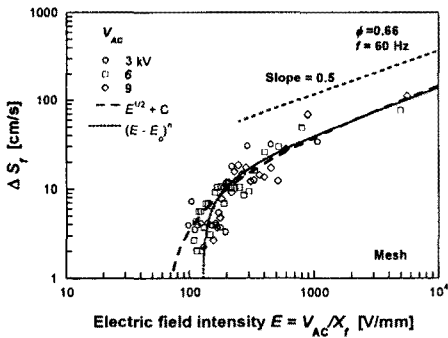


Fig. 6 Flame speed Enhancement with AC electric field intensity for mesh electrode.

ΔS_f 가 $E^{1/2}$ 에 비례함은 일부분 정성적으로 다음과 같이 설명될 수 있다. 층류화염전파속도는 frequency factor의 1/2승에 비례한다. frequency factor는 평균 분자 속도에 정비례하므로 층류화염전파속도는 평균분자속도의 1/2승에 정비례하게 된다. 전기장내에서 이온의 여기된 속도는 전기장 강도에 정비례하여 유도된다[2]. 만약 이러한 효과들이 주요한 역할을 한다면 분자 충돌과 같이 많은 경우에 있어서, 특히 화염전파속도의 증가에 있어서 $\Delta S_f \sim E^{1/2}$ 이 될 수 있다. 그러나 이러한 해석에 있어서 여기된 속도와 화염전파속도에 대한 분자속도의 효과의 추가와 같은 문제가 존재한다. 이에 대한 자세한 연구가 추후에 요구되어진다.

3.2 다양한 전기장의 효과

고전압 터미널 연결의 구조적 문제로 인하여 고전압 철망 전극을 사용한 경우 화염 선단이 기울어졌다. 전파하는 동안 대형인 화염선단을 얻기 위해 수직 철심을 테스트하였다. 전파하는 동안 화염의 화염 최선단 위치를 추적하였으며 화염전파 속도의 증가 ΔS_f 를 측정하였다. 당량비 0.66 $f = 60\text{Hz}$ 일때 전기장에 따른 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 철망을 사용한 결과와 철심을 사용한 결과는 서로 일치하였다. 또한 두 가지 경우의 화염선단의 모양이 다름에도 불구하고 전기장의 강도에 따른 화염전파속도의 증가는 거의 일치하였다. 화염의 위치는 화염을 이끄는 선단을 따라 측정되었기 때문에 이는 화염선단과 고전압 전극사이의 짧은 거리에 의한 화염전파속도의 증

가에 있어서는 전기장 강도의 중요성이 더욱 중시됨을 의미한다.

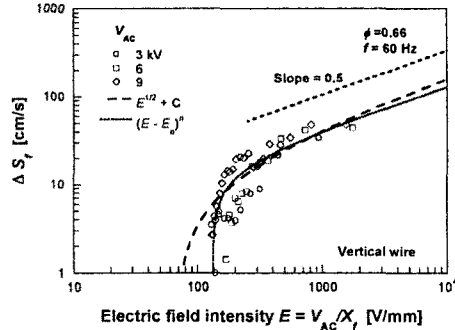


Fig. 7 Flame speed Enhancement with AC electric field intensity for wire electrode.

$V_{DC} = 3, 6\text{kV}$ 인 경우에 철심 전극에 양과 음의 직류를 걸어줌으로써 직류전기장이 화염전파속도의 증가에 미치는 영향을 분석하였다. 당량비 0.7인 경우에 전기장의 극성이 화염전파속도의 증가에 큰 영향을 주지 못함을 Fig. 8에 나타내었다. 직류전기장에서의 모든 데이터들이 전기장 강도에 따라 적절한 상관관계를 갖으며, 당량비 0.7의 교류의 경우와 비교해보면 직류의 경우에도 거의 유사한 화염전파속도의 증가가 관찰되었다. 결국 직류와 교류 전기장 사이에 주목할 만한 큰 차이는 관찰되지 않았다.

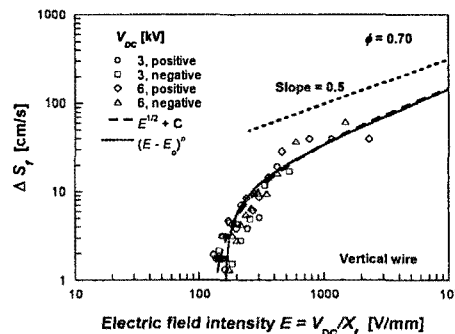


Fig. 8 Flame speed Enhancement with DC electric field intensity for wire electrode.

임계전기장강도 E_c 를 모든 실험 조건에 대해 계산하였다. 임계 전기장 강도는 당량비에 영향을 많이 받는 반응 영역에서의 이온 농도에 의해 영향을 받을 수 있다[17]. 이전의 연구에서 이론의 농도는 이론 당량비 근처에서 최대가 되고 이론 당량비를 벗어남에 따라 화염전파속도와 비슷하

경향을 갖으며 감소하는 것으로 알려져있다. 이러한 측면에서 임계전기장강도를 전기장이 걸리지 않았을 경우의 화염전파속도 S_f 에 따라 Fig. 9에 나타내었다. 이 결과를 통해 전기장이 걸리지 않았을 경우의 화염전파속도와 임계전기장강도는 선형적인 관계를 가지며 이때의 $R = 0.96$ 이다. 이는 화염전파속도가 큰 경우에 화염전파속도에 영향을 주기 위해서는 좀 더 큰 전기장 강도가 필요함을 의미한다. 화염전파속도는 반응율과 분자 충돌 빈도를 나타내는 대표값이다. 혼합기의 상태가 이론당량비 근처로 감에 따라 단일화염온도는 최대가 된다. 이에 따라 반응영역에서의 평균 분자속도는 더욱 빨라지게 된다. Fig. 10에서의 결과는 혼합기의 조건이 이론당량비에 가까워짐에 따라 전기장에 의한 추가적인 이온의 운동이 화염전파속도에 미치는 영향은 더욱 커짐을 의미한다.

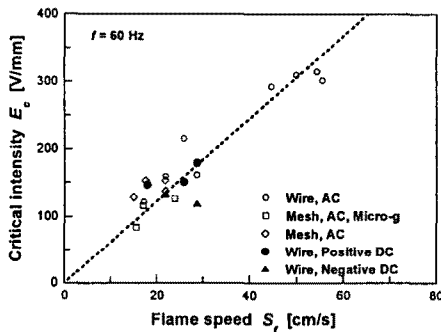


Fig. 9 Critical electric field intensity E_c with flame speed.

4. 결론

메탄/공기 혼합기에 대해 튜브에서의 화염전파 관측을 통해 화염전파속도에 전기장이 미치는 영향을 실험적으로 연구하였다. 전기장이 걸리지 않았을 경우에 중력장과 무중력장에서의 화염전파속도를 측정하였으며 이는 당량비가 희박하거나 과농한 경우에 계산되어진 화염전파속도와 잘 일치하였다. 반면에 이론당량비 근처에서의 화염전파속도는 좀 더 큰 것으로 나타났다.

고전압 전극과 화염선단 사이의 거리의 감소와 공급되는 전압의 증가를 보면서 전기장이 화염전파속도의 증가에 미치는 영향이 분석하였다. 직류와 교류전기장 모두에서 비슷한 화염전파속도의 증가가 관측되었다. 교류의 경우에 $60 < f < 600\text{Hz}$ 범위에서 주파수 변화에 따른 효과는 작았다.

전기장에서의 화염전파속도의 증가는 전기장강도와 적절한 상관관계를 갖는다. 전기장강도가 충분히 클 경우에 화염전파속도의 증가는 전기장강도의 1/2승에 정비례한다. 반면에 전기장강도가 작은 영역에서는 임계전기장 강도가 존재하며, 이 강도보다 작은 값은 화염전파속도에 영향을 주지 못한다. 이러한 임계전기장강도는 화염전파속도에 따라 선형적으로 증가한다.

후 기

본 연구는 미래형 자동차 배기가스 제로화 기술 개발 사업단의 지원으로 이루어졌으며, 류승관, 원상희는 BK-21사업과 연소기술연구센터(CERC)의 지원을 받았기에 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] H. C. Jagers, A. von Engel, Combust. Flame 16 (1971) 275-285.
- [5] R. J. Bowser, F. J. Weinberg, Combust. Flame 18 (1972) 296-300.
- [6] R. I. Noorani, R. E. Holmes, AIAA J. 24 (1) (1986) 190-192.
- [7] R. I. Noorani, R. E. Holmes, AIAA J. 23 (9) (1985) 1452-1454.
- [8] A. Yu. Starikovskii, Proc. Combust. Inst. 30 (2005) 2405-2417.
- [9] M. S. Cha, S. M. Lee, K. T. Kim, S. H. Chung, Combust. Flame 141 (2005) 438-447.
- [10] M. Saito, T. Arai, M. Arai, Combust. Flame 119 (1999) 356-366.
- [11] H. Ohisa, I. Kimura, H. Horisawa, Combust. Flame 116 (1999) 653-661.
- [12] A. Sakhrieh, G. Lins, F. Dinkelacker, T. Hammer, A. Leipertz, D. W. Branston, Combust. Flame 143 (2005) 313-322.
- [13] S. D. Marcum, B. N. Ganguly, Combust. Flame 143 (2005) 27-36.
- [14] K. Criner, A. Cessou, J. Louiche and P. Vervisch, Combust. Flame, in press.
- [15] H. F. Calcote, C. H. Berman, in: S. N.

Singh (Ed.), Fossil Fuels Combustion Symposium PD, vol. 25, ASME Book No. H00453, 1989, p. 25.

[16] J. Hu, B. Rivin, E. Sher, Experimental Thermal and Fluid Science 21 (2000) 124-133.

[17] 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.