

유전체 방전을 이용한 확산화염에서의 매연저감 특성

이상민[†] · 차민석^{*} · 김관태^{*} · 정석호^{**}

Soot Reduction in Diffusion Flames Using Dielectric Barrier Discharge

Sang Min Lee, Min Suk Cha, Kwan Tae Kim and Suk Ho Chung

ABSTRACT

The effect of non-thermal plasma on diffusion flames in co-flow jets has been studied experimentally by adopting a dielectric barrier discharge technique. The generation of streamers was enhanced with a flame due to increased reduced electric fields by high temperature burnt gas and the abundance of ions in the flame region. The effect of streamers on flame behavior reveals that the flame length was significantly decreased as the applied voltage increased and the yellow luminosity by the radiation of soot particles was also significantly reduced. The formation of PAH and soot was influenced appreciably by the non-thermal plasma, while the flame temperature and the concentration of major species were not influence much with the plasma generation. The results demonstrated that the application of non-thermal plasma can be a viable technique in controlling soot generation in flames with low power consumption in the order of 1 W.

기 호 설 명

E	intensity of electric field	V	applied voltage
n	gas number density		
E/n	reduced electric field		

Key Words : Non-thermal plasma, Dielectric barrier discharge, Soot control, PAH, Ionic wind

1. 서 론

전기장(electric field)이나 플라즈마(plasma)를 가해서 연소를 향상시키는 방법은 오래전부터 연구되어 왔다. 예를 들어 플라즈마를 통한 화염 온도 및 강도의 증가, 아크 방전(arc discharge)

이나 전기장으로 인한 예혼합 화염에서의 가연한계(stability limit) 확장 및 확산화염에서의 매연저감 등의 현상이 보고되어 왔다.[1-3] 하지만 이러한 방법들은 실용적인 측면에서 몇 가지 문제점이 드러났다. 플라즈마나 아크 방전은 연소열에 비해 에너지 소비량이 큰 경우가 발생하였고, 전기장을 통해 매연을 저감시키는 경우 전극에 매연이 침착되거나 화염 밖으로 매연이 배출되는 문제가 발생하였다.[4]

최근들어 특히 유해가스 처리 분야에서 비열 플라즈마(non-thermal plasma) 기법이 급격히

* 한국기계연구원

† 이상민, victlee@kimm.re.kr

** 서울대학교 기계항공공학부

발전하고 있다.[5,6] 특히 유전체 장벽 방전(dielectric barrier discharge, DBD)을 이용한 비열 플라즈마는 펄스 코로나(pulsed corona) 방전이나 아크 방전에 비해 장치 비용과 에너지 소비량이 낮은 장점을 가지고 있다. DBD 방식이 기존의 펄스 코로나 방식에 비해 가지는 가장 큰 특징은 플라즈마 스트리머(streamer)가 무작위로 발생하며, 또한 유전체로 인해 아크로 발전하지 않는다는 점이다. 이로 인해 DBD의 경우 전기방전이 전극사이의 전영역에서 공간적으로 균일하게 발생하게 된다.

본 연구에서는 비열 플라즈마가 화염에 미치는 영향을 규명하고자 와이어-실린더(wire-cylinder) 형태의 DBD 반응기를 동축류 확산화염 버너의 노즐출구에 설치하였고 이에 따른 화염의 거동변화를 관찰하였다.

2. 실험장치

2.1.1 버너 및 플라즈마 발생기

실험장치는 동축류 버너(coflow burner), 유량계, 비열 플라즈마 발생장치로 구성되어 있다. 동축류 버너의 개략도는 그림 1에 나타나 있다. 내경 8mm, 외경 10mm인 내부 노즐을 통해서 프로판(propane)이 평균유속 3.3cm/s로 공급되고, 내경 27mm, 외경 30mm인 외부 노즐에는 압축공기가 59cm/s로 공급되어 프로판 확산화염을 형성하게 된다. 각각의 노즐로는 석영관(quartz tube)을 사용하였으며, 유전체(dielectric)로서의

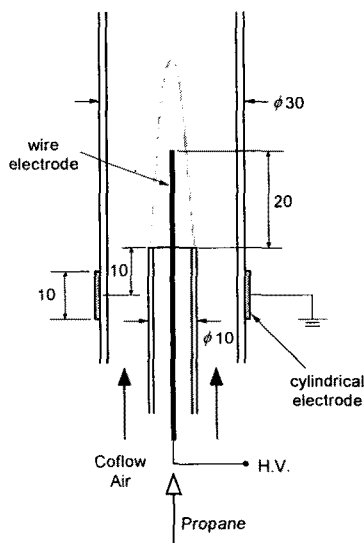


Fig. 1 Schematic of coflow burner and plasma reactor

역할을 하였다.

비열플라즈마 발생장치는 DBD 반응기와 전원 발생장치로 구성되는데, DBD 반응기는 그림 1에서 보듯이 와이어-실린더(wire-cylinder) 형태로 동축류버너에 설치되었다. 와이어 전극으로는 직경 1mm의 스테인레스 봉을 사용하였고 내부 노즐을 관통하게 하였으며, 실린더 전극으로는 10mm 폭을 갖는 스테인레스 메쉬 (1mm×1mm)를 외부 노즐 바깥에 설치하였다. 와이어는 연료 노즐 위로 20mm를 노출시켰고, 실린더 전극은 연료노즐 아래 10mm 위치에 설치하였다. 사전실험결과 이 위치에서는 가시화 실험에 방해가 되지 않으면서 화염지역에 플라즈마를 발생시킬 수 있었다.[7]

와이어 및 실린더 전극의 양단은 AC 400Hz 전원장치에 연결되는데, 이 전원은 인가전압을 2.9kV에서 18.6kV까지 변화시킬 수 있다. 플라즈마 반응기에 전달되는 전력은 Lissajous diagram을 통해서 측정되었고, 전압 및 전류 패턴은 디지털 오실로스코프(LeCroy, LT334, 10000:1 전압 강하계(voltage divider; Tektronix, P6015A) 및 전류 프로브(current probe; Tektronix, A6303)를 사용하여 측정하였다.[8]

기연가스(burnt gas) 온도는 K-type 열전대(thermocouple)를 사용하여 측정하였고, 기연가스의 농도분포는 FTIR(Bruker, Bector 31)로부터 측정하였다.

2.1.2 가시화 측정 장치

플라즈마 스트리머, OH 라디칼, 다중고리방향족(polycyclic aromatic hydrocarbon, PAH) 및 매연의 공간적인 분포를 측정하기 위하여 다양한 가시화 실험을 수행하였다.

공기 중에서 스트리머의 자발방출(spontaneous emission)은 대부분 질소의 천이기에 기인하며, 특히 337.1nm의 천이영역($C^3\Pi_u - B^3\Pi_g$)에서 상대적으로 방출량이 강하다고 알려져 있다.[9] 이로부터 330nm의 협대역 필터(narrow bandpass filter, FWHM=10nm)와 ICCD카메라(Princeton Instrument, ICCD-MAX)를 이용하여 스트리머를 가시화할 수 있었다.

레이저유도 형광법(laser induced fluorescence, LIF)을 사용하여 화염 단면에서의 OH 라디칼과 매연의 전구물질인 PAH의 분포를 계속하였다. Nd:YAG 레이저(PL8000, Continuum)와 다이 레이저(ND6000, Continuum)를 이용하여 자외선 영역의 레이저광을 발생시킬 수 있었다. OH 측정 시 신호의 포화현상(saturation)을 방지하기 위하여 펄스당 에너지를 약 7mJ로 제한하였다. OH 라디칼의 $Q_1(6)$ 밴드($A^2\Sigma - X^2\Pi(1,0)$)를 여기하기 위하여 282.95 nm의 레이저 광을 사용하였고, 이

에 따른 OH LIF 신호는 UG-11과 WG-305 (305nm 이하의 광을 차단함) 필터를 사용하여 측정하였다.[10]

매연의 전구물질로 알려져 있는 PAH 화학종들은 흡수 및 여기가 넓은 파장대에서 일어나게 된다.[11] 본 실험에서는 283nm에서 여기시켜 400nm 부근에서 방출하는 형광신호를 측정하였다.[12] OH 및 PAH 형광신호 이미지는 ICCD 카메라를 통하여 개측되었다.

매연의 가시화를 위해서 레이저유도 백열법 (laser induced incandescence, LII)이 사용되었다. LII는 매연입자가 강한 레이저광의 에너지를 흡수하여 방출하는 복사현상으로 신호강도는 매연 체적분율에 비례하는 것으로 알려져 있다.[13] 본 실험에서는 Nd:YAG 레이저의 2차 조화광인 532nm의 레이저 광을 입사광으로 사용하였고 400nm 부근의 복사신호를 측정하였으며, 매연입자 크기의 영향을 최소화하기 위해서 LII 신호의 포화영역에서 측정하였다.[13]

3. 결과 및 토의

3.1 화염이 플라즈마 발생에 미치는 영향

화염이 비열플라즈마 발생에 미치는 영향을 규명하기 위하여 프로판 확산화염에서 스트리머의 생성 특징을 살펴보았다.

그림 2는 화염이 있는 경우와 없는 경우 오실로스코프로 측정된 전류 및 전압 패턴을 나타낸다. 전류 그래프에서 스파이크 형태로 튀는 패턴이 나타나는데, 하나의 전류 스파이크는 하나의 스트리머를 나타내게 된다.[14] 화염이 존재하는 경우 스파이크의 개수가 훨씬 많은 것을 관찰할 수 있으며 따라서 화염으로 인해 플라즈마 생성이 활발해진다는 사실을 입증할 수 있었다.

인가전압에 따른 전력의 변화를 그림 3에 나타내었다. 화염이 존재하는 경우 12.0kV 이상에서 전력이 급격히 증가하는 반면, 화염이 없는 경우에는 16.1kV 이상에서 급격히 증가한다. 이러한 문턱값은 전기방전이 시작됨을 의미하며, 화염으로 인해 비열 플라즈마가 쉽게 발생함을 나타낸다. 예를 들어 인가전압이 18.9kV인 경우 발생전력이 화염의 존재 여부에 따라 21.9W/3.6W로 화염에 의해 플라즈마 발생이 크게 향상됨을 입증한다.

이러한 플라즈마 발생의 향상 요인은 다음의 두 가지 원인에 기인한다고 볼 수 있다. 첫째, 전기방전(electrical breakdown)은 전기장의 세기 E 를 기체의 수밀도(number density) n 으로 나눈 reduced field intensity E/n 에 연관되는 것으로 알려져 있다. 화염으로 인해 온도가 급격히 증가하게 되고 이로 인해 수밀도가 감소하여 E/n 이

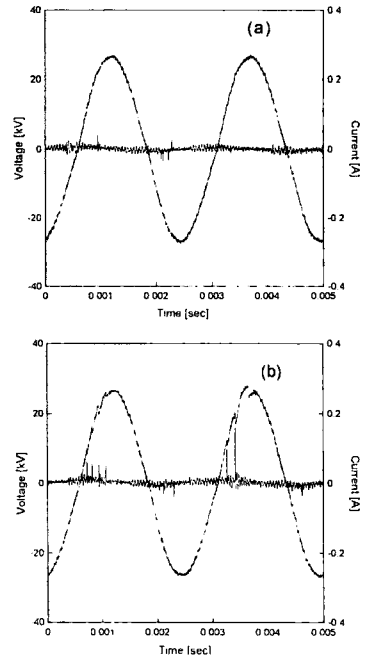


Fig. 2 Voltage and current diagram acquired by oscilloscope for $V = 18.6$ kV; (a) without flame and (b) with flame

커져서, 전자의 평균 자유 행로(mean free path)가 증가하기 때문이다. 둘째, 화염 내부에 양이온들과 이에따른 전자들이 풍부하게 존재한다. 예를 들어, H_3O^+ , CHO^+ , $C_2H_3^+$, $C_{13}H_9^+$ 등의 양이온들이 화염 내부에 존재하는 것으로 알려져 있다.[15] 또한 매연 입자의 30% 정도가 양이온화되어 있다고 보고되고 있다.[16] 이러한 양이온들과 전자들로 인해 전류의 흐름, 즉 스트리머의 발생이 촉진되는 것이다.

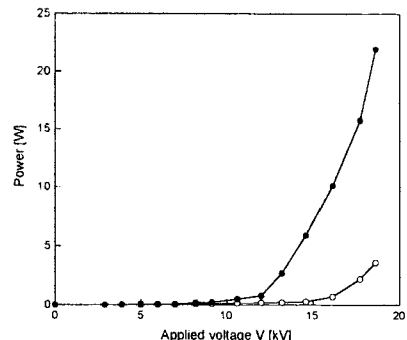


Fig 3. Electric power as function of applied voltage

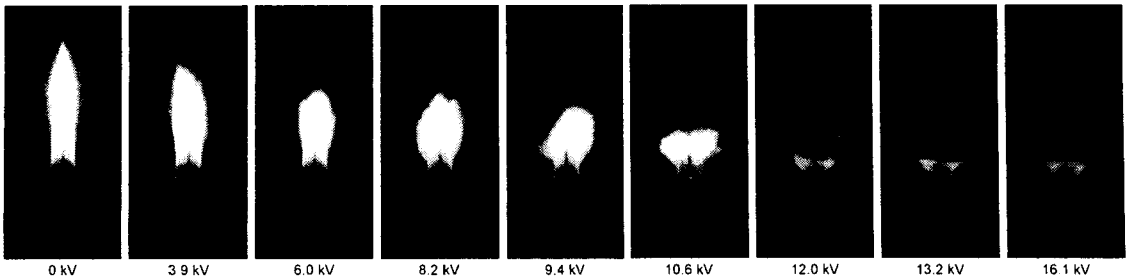


Fig. 4 Flame images taken by digital camera with 0.5 s exposure by varying applied voltage

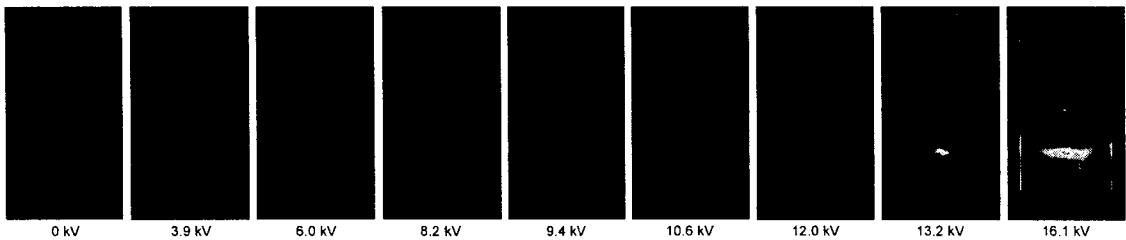


Fig. 5 Plasma images taken by ICCD camera through 330 nm filter with 1 s exposure by varying applied voltage

3.2 비열플라즈마가 화염에 미치는 영향

비열 플라즈마가 동축류 확산화염에 미치는 영향에 대하여 연구되었다. 그림 4는 인가전압을 증가시켰을 때 화염 모양의 변화를 직접사진으로 찍은 이미지이다. 전압증가에 따라 세 가지 뚜렷한 현상이 관찰되는데, 첫째 화염 길이의 감소, 둘째 화염 발광의 감소, 셋째 콘 형태에서 왕관 형태로의 화염모양 변화가 그것이다. 화염길이는 중심축에서의 발광 경계로 정의하였다. 전기장이 걸리지 않은 경우 최초의 화염길이는 45mm였는데, 13.2kV까지 점차 감소하여 이상의 전압에서는 7mm의 화염길이를 유지하게 된다.

330nm 필터를 사용하여 플라즈마 스트리머를 가시화한 결과를 그림 5에 나타내었다. 낮은 전압에서 관찰되는 신호는 화염자발광으로부터의 잡음이다. 인가전압이 13.2kV가 되면서 스트리머로부터의 강한 신호가 관찰이 되며 전압 증가에 따라 신호의 강도가 점차 세진다. 한편 스트리머들은 왕관모양의 화염면에 집중되어 있다. 앞서 그림 3에서 보다시피 플라즈마 전력이 12kV 이상에서 급격히 증가하는데, 이는 스트리머가 관찰되기 시작하는 부분과 일치한다. 이러한 실험 결과를 토대로 인가전압에 따라 두 가지 영역으로 분리하였다. 12kV를 기준으로 그 이하는 정전기영역(electro-static regime), 그 이상은 플라즈마 영역(plasma regime)으로 나누었는데, 각각

의 영역에서 뚜렷한 차이를 나타내고 있다.

정전기 영역에서는 인가전압의 증가에 따라 화염 길이 및 매연 발광이 점차 감소하였다. 하지만 이 영역에서는 매연 입자들이 화염면 바깥으로 누출되거나 매연이 전기집진과 마찬가지로 와이어 전극에 침착하는 현상이 발생하였다. 그림 6a는 2.9kV에서의 화염직접사진으로 화염 끝단에서 매연입자가 누출되는 모습을 보여주고, 그림 6b는 2.9kV 상태를 15분간 유지한 경우로 전극에 침전된 매연입자를 보여주고 있다. 매연 유출 및 전극 침전 현상은 전압을 증가시키면서 감소시키는 하지만 12kV가 될 때까지 완전히 제

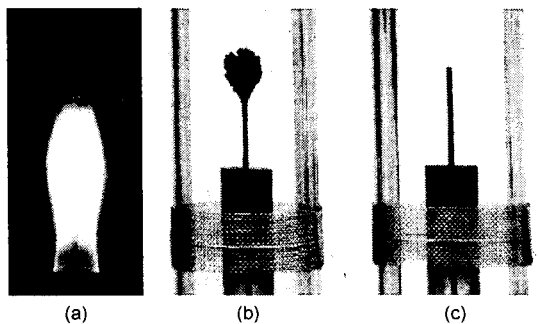


Fig. 6 Images showing (a) soot leakage through flame front for $V = 2.9$ kV, (b) deposited soot on wire electrode after 15 min operation for $V = 2.9$ kV, and (c) disappearance of soot deposit for $V = 18.6$ kV

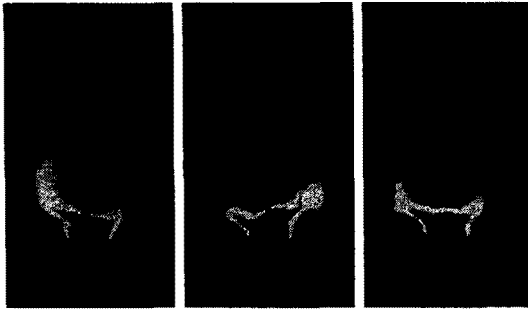


Fig. 7 Instant OH PLIF images for $V = 18.6$ kV

거되지 않는다.

플라즈마 영역에서는 화염길이가 7mm로 유지가 되며, 매연으로부터의 발광이 거의 사라져 푸른 색의 화염만이 관찰된다. 또한 이 영역에서는 스트리머로부터 발생하는 자갈거리는 소리가 들리게 된다. 플라즈마 영역에서는 매연이 발생하지 않을 뿐만 아니라 와이어에 매연이 침전되지도 않으며, 전기장영역에서 침전되어있던 매연도 그림 6c에서 보다시피 전극에서 떨어져나가서 제거된다. 이러한 현상은 이온이 전극을 때리면서 입자를 띄워내는 이온 스퍼터링(ion sputtering) 효과에 기인하는 것으로 보인다.[16]

그림 7은 18.6kV에서 OH PLIF 이미지의 원샷 이미지들을 보여준다. 왕관모양의 화염면이 심하게 변동하게 되는데, 이러한 요동(fluctuation)에도 불구하고 OH 영역은 연료영역을 완전히 감싸고 있으며 이로부터 노즐에서는 화염 소멸(quenching)이 발생하지 않는다고 볼 수 있다.

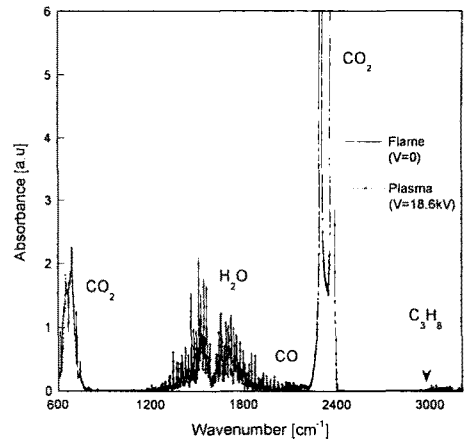


Fig. 8 FTIR results of propane diffusion flames for $V = 0$ and 18.6 kV

연소특성을 확인하기 위하여 기연가스의 출구 온도 및 농도분포를 각각 열전대와 FTIR을 사용하여 계측하였다. 출구에서의 속도 및 온도분포 효과를 배제하기 위해서 300mm 하류 지역에서 직경 27mm의 외부 노즐을 8mm로 축소, 확장시킨 다음 측정하였다. 전기장이 걸리지 않은 경우 ($V=0$ kV)와 18.6kV를 인가한 경우를 비교하였을 때 온도차이는 10K 미만으로 무시할 수 있는 정도였으며, 그림 8에서 보다시피 FTIR 결과에서도 프로판, 이산화탄소, 수증기 등 주요 화학종의 농도차이를 관찰하기 힘들었다. CO 농도만이 300ppm에서 두 배 정도 증가하였으나 전체 연소 특성을 변화시켰다고 볼 수 있는 정도는 아니다.

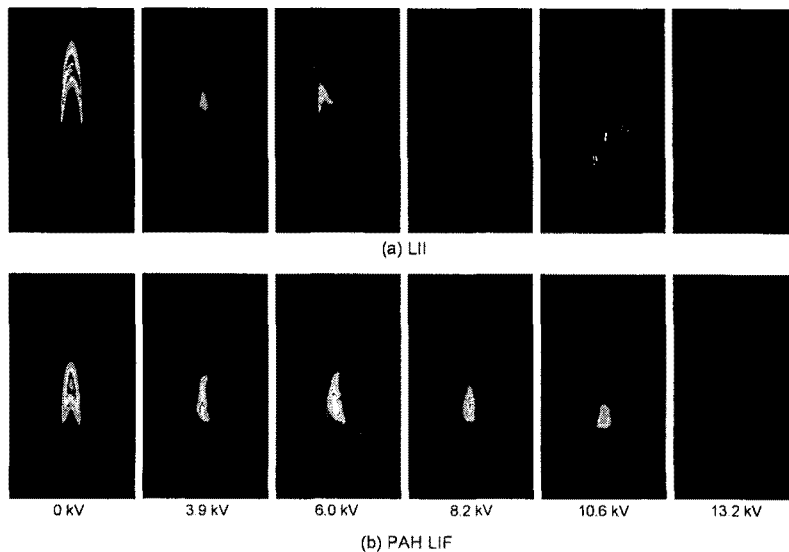


Fig. 9 Time averaged (a) LII and (b) PAH LIF images at several applied voltages

3.3 매연거동의 변화

비열 플라즈마에 의한 매연 저감 특성을 그림 9에 나타내었다. LII 및 PAH LIF 기법을 사용하여 매연과 PAH 화학종의 공간적인 분포 및 농도를 파악할 수 있었다. LII 신호는 6kV 이하의 낮은 전압에서도 공간적으로 뒤틀리는 현상(distortion)이 발생하고 또한 LII 신호 강도도 급격히 감소하였다. 반면에 PAH LIF는 뒤틀림 현상도 적을뿐더러 최대 강도에서도 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 매연 생성이 전기장에 크게 영향을 받는 것을 나타낸다. 또한 그림 4에서도 보다시피 전기장에 의해 매연으로부터의 황색 발광부는 크게 변화하지만 매연이 없는 화염 하단의 청색 발광부에는 거의 변화가 없었다. 따라서 이러한 화염 형상 및 화염 길이의 변화는 이온화된 매연입자로 인한 이온풍(ionic wind) 효과에 기인하는 것으로 보인다.[17]

전압을 더욱 증가시켜 플라즈마 영역에서는 LII 및 PAH LIF 신호가 계속되지 않았다. 플라즈마 영역에서의 매연이 갑작스럽게 제거되는 현상은 PAH의 급격한 감소 때문으로 추측된다. 플라즈마 영역에서 2W 정도의 전력소모로 매연 및 PAH가 제거되었는데, 이는 연소에너지에 비해 매우 적은 양이다. 이에 대한 보다 정확한 원인 규명을 위해서는 추후 연구가 필요하다.

4. 결론

확산화염에 미치는 비열 플라즈마의 영향을 파악하기 위한 실험이 수행되었다. 비열 플라즈마의 발생은 화염으로 인해 상당히 향상되었는데, 이는 방전 전압이 낮아지고 소모전력이 증가하기 때문이다. 이러한 향상효과는 온도증가로 인한 reduced electric field의 증가 및 이온농도의 증가로 설명될 수 있다.

DBD 반응기에 인가전압을 증가시키면 화염길이 및 매연발광량이 감소하였다. 화염길이의 감소는 이온풍에 의해 반경방향의 대류량이 증가하기 때문이다. 인가전압에 따른 화염 및 매연의 거동변화 특성으로부터 정전기 영역과 플라즈마 영역으로 분리해석할 수 있었다. 정전기 영역에서는 매연의 침전 및 누출현상이 큰 문제가 되었지만 플라즈마 영역에서는 매연이 발생조차 되지 않았다.

기연가스의 온도 및 농도 측정결과 전반적인 연소현상은 플라즈마 발생에도 거의 영향을 받지 않음이 관찰되었다. 따라서 본 연구 결과는 DBD 방전을 이용한 비열플라즈마 방식이 낮은 전력소모로도 매연 발생 및 화염길이를 제어할 수 있는

유용한 방법이 될 수 있음을 보여준다.

후 기

본 연구는 국가지정연구실 사업 및 한국기계연구원 자체연구사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] Lawton, J., and Weinberg, F., "Electrical Aspects of Combustion", Clarendon Press, 1969.
- [2] Weinberg, F., "Advanced Combustion Methods", Academic Press, 1986.
- [3] Ohisa, H., Kimura, I., and Horisawa, H., Combust. Flame 116, pp. 653-661, 1999.
- [4] Saito, M., Arai, T., and Arai, M., Combust. Flame 119, pp. 356-366, 1999.
- [5] Chang, J.-S., Lawless, P. A., and Yamamoto, T., IEEE Trans. Plasma Sci. 19, pp. 1152-1165, 1991.
- [6] Eliasson, B., and Kogelschatz, IEEE Trans. Plasma Sci. 19, pp. 1063-1077, 1991.
- [7] 이상민, "Soot Formation Characteristics in Diffusion Flames Using Laser Diagnostics", 서울대학교 박사학위논문집, 2003.
- [8] Feng, R., Castle, G. S. P., and Jayaram, S., IEEE Trans. Ind. App. 34, pp. 563-570, 1998.
- [9] Kim, Y, Hong, S. H, Cha, M. S, Song, Y.-H., and Kim, S. J., J. Adv. Oxid. Technol. 6, pp. 17-22, 2003.
- [10] Cha, M. S, Kim, H. G., and Chung, S. H., Combust. Flame 132, pp. 601-609, 2003.
- [11] Smyth, K. C., Shaddix, C. R., and Everest, D.A., Combust. Flame 111, pp. 185, 1997.
- [12] Lee, S. M., Yoon, S. S., Hwang, J. Y., Choi, M., and Chung, S. H., Combust. Flame (Submitted).
- [13] Vander Wal, R. L., Appl. Optics 35, pp. 5548, 1996.
- [14] Fialkov, A. B., Prog. Energy Combust. Sci. 23, pp. 399-528, 1997.
- [15] Balthasar, M., Mauss, F., and Wang, H., Combust. Flame 129, pp. 204-216, 2002.
- [16] Ehrlich, E. and Hudda, F., J. Chem. Phys. 44, pp. 1039, 1966.
- [17] Fialkov, A. B., Prog. Energy Combust. Sci. 23, pp. 399-528, 1997.