

층류제트유동 불안정성에 미치는 교류 전기장 효과

김경택* · 이원준* · 차민석*** · 박 정**** · 정석호**
권오봉**** · 김민국**** · 이상민****

*부경대학교 의생명융합공학협동과정

****부경대학교 기계공학과

****한국기계연구원 환경에너지기계연구본부

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

Effect of AC Electric Fields on Flow Instability in Laminar Jets

Gyeong Taek Kim*, Won June Lee*, Min Suk Cha***, Jeong Park****, Suk Ho Chung**
Oh Boong Kwon****, Min Kuk Kim**** and Sang Min Lee****

*Interdisciplinary Program of Biomedical Engineering, Pukyong National University

****Department of Mechanical Engineering, Pukyong National University

****Environmental & Energy System Research Division, Korea Institute of Machinery and Materials

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

(Received 4 February 2016, Received in revised form 23 May 2016, Accepted 7 June 2016)

ABSTRACT

The effect of applied electric fields on jet flow instability was investigated experimentally by varying the direct current (DC) voltage and the alternating current (AC) frequency and voltage applied to a jet nozzle. We aimed to elucidate the origin of the occurrence of twin-lifted jet flames in laminar jet flow configuration, which occur when AC electric fields are applied. The results indicate that a twin-lifted jet flames originates from cold jet instability, caused by interactions between negative ions in the jet flow via electron attachment as $O_2 + e \rightarrow O_2^-$ when AC electric fields are applied. This was confirmed by experiments in which a variety of gaseous jets were ejected from a nozzle to which DC voltages and AC frequencies and voltages were applied, with ambient air between two deflection plates connected to a DC power source. Experiments in which jet flows of several gases were ejected from a nozzle and AC electric fields were applied in coflow-nitrogen provided further evidence. The flow instability occurred only for oxygen and air jets. Additionally, jet instability occurred when the applied frequency was less than 80 Hz, corresponding to the characteristic collision response time. The effect of AC electric fields on the overall structure of the jet flows is also reported. Based on these results, we propose a mechanism to reduce jet flow instability when AC electric fields are applied to the nozzle.

Key Words : Electric fields, Jet flow instability, Twin jet flame

1. 서론

최근 몇십년 동안 많은 연구자들은 화염의 전기적인 특성과 전기장을 이용하여 화염을 제어하는 방

법에 많은 관심을 가지고 있다[1-3]. 전기장을 화염 내에 인가하면 이온 확산을 및 화학 반응을 급격히 증가시켜 화염 안정화에 기여한다는 것이 알려져 있다. 또한 가속된 전자와 중성 입자가 충돌하여 운동량이 전달하게 되어, 그 결과 중성 입자는 bulk flow가 형성되어 화염에 영향을 미치게 된다[4,5].

전기장을 이용한 제트 화염의 안정화에 있어도 다양한 시도와 연구가 이루어져 왔다. 특히 산업용 버너 설계에 있어 제트 화염의 안정화는 매우 중요한 문제라고 할 수 있다[6-8]. 단일 전극시스템에서 난

† Corresponding Author, jeongpark@pknu.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

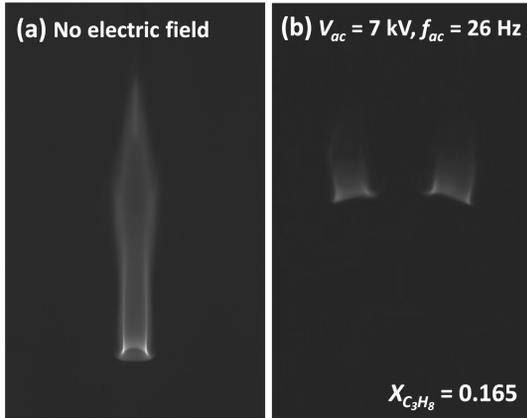


Fig. 1. Dramatic changes in flame morphology with applied electric fields for a nozzle diameter of 4.4 mm; the mole fraction of C_3H_8 in nitrogen was 0.165, and the jet velocity was 1.5 m/s: (a) without an applied voltage and (b) applying 7 kV with an alternating current (AC) frequency of 26 Hz.

류 확산화염의 부상 속도, 층류 부상화염의 재부착 및 삼지화염 전파속도에 대한 전기장의 효과가 실험적으로 확인되었다[9-11]. 또한, Won 등[11]으로부터 교류전기장을 인가하였을 때 자유 제트유동의 변화를 솔리덴 기법을 이용하여 보인 바 있다.

자유 제트유동에 대한 전기장의 효과를 명확하게 하기 위해서 본 연구에서 예비 실험을 하였다. 실효값 7 kV, 26 Hz의 교류전기장을 인가한 경우, Fig. 1에서 보이는 것과 같이 층류 부상화염이 쌍둥이 부상화염으로 급격히 변화하였다. 이는 전기장이 화염에 직접적인 영향을 주는 것 보다는 유동에 영향을 주는 것으로 판단하여 본 연구에서는 전기장으로 인

해 유동 불안정성의 매커니즘을 규명하는데 초점을 두고 실험을 수행하였다.

2. 실험 방법

Fig. 2는 본 실험에서 사용된 실험 장치의 개략도이다. 스테인리스강으로 만들어진 노즐 내경은 0.44 cm이며, 외경은 0.64 cm로 이루어져 있으며, 50 cm 길이를 통하여 제트가 노즐출구에서 완전 발달한 유동을 구성하였다. 주변 유동에 의한 교란을 최소화하기 위하여 길이 30 cm인 석영관을 사용하였다. 본 실험에서 사용된 연료와 희석제의 대전된 전하를 알아보기 위하여 DC전원이 연결된 편향판 (Deflection plate)을 설치하였다(Fig. 2(b)). 연료는 순도 99.95%의 프로판, 질소, 산소, 공기를 사용하였으며, 질량 유량계(mass flow controller; MKS)를 이용하여 유량을 조절하였다.

고전압 전원 장치(Trek, 10/10B-HS)를 노즐에 연결하여, 노즐 자체가 전극의 역할을 하였으며, 노즐 출구로부터 17.5 cm의 거리를 두고 스테인리스강으로 만들어진 원판 형상의 접지 전극(diameter: 20 cm)을 두어 전기장을 형성 하였다. 함수 발생기(NF, WF 1973)를 이용하여 교류 실효 전압으로 0~7 kV, 주파수는 1~1,000 Hz까지 변화 시켰다. 인가된 주파수와 전압을 확인하기 위해서 오실로스코프(Tektronix, TBS 1102)를 사용하였다. 다른 고전압 전원 장치(Trek, 10/10B-HS)를 오른쪽 편향판(너비: 4 cm; 두께: 1 mm; 높이 90 cm)에 연결하여, 직류 전압 +10 kV를 인가 하였다. 유동을 가시화하기 위하여 다이오드 레이저(LVI, VD-IVA)와 아르곤 레이저(Spectra-Physics, Stalbite 2017)를 사용하였으며, 가시화용 입자는 TiO_2

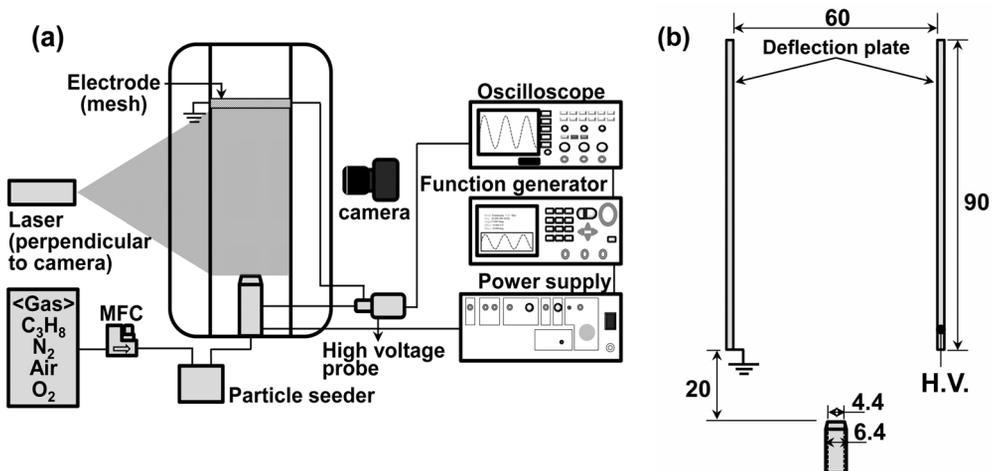


Fig. 2. Schematic diagram of the experimental setup: (a) overall setup and (b) deflection plates used to detect the charged species.

(size~0.2 mm)를 사용하였다. 디지털 카메라(Sony, HDR-CX560)를 이용하여 1/30 sec의 노출시간 동안의 직접 사진과 고속도 카메라(Photron, MC2 and SA4)를 통해 2000 fps로 유동을 관찰하였다.

3. 결과 및 논의

3.1. AC에 의한 유동 불안정성

Fig. 3은 Mie 산란 입자를 통해 자유 제트유동을 가시화한 이미지이다. 유동 조건은 Fig. 1의 조건과 동일하며, 질소로 희석된 프로판 연료분율을 (X_p)은 0.165이고 노즐 출구 속도는 $U_0 = 1.5$ m/s이다. Fig. 3(a)는 전기장을 인가하지 않은 경우, 자유 제트유동이 충류임을 알 수 있다. 3 kV, 26 Hz의 교류전기장을 인가한 경우, Fig. 3(a)에서 보이는 것과 같이 노즐에서 떨어진 어느 지점에서 유동이 두 갈래로 분리됨을 알 수 있다. 인가 전압을 7 kV까지 증가할수록 분리되는 지점이 노즐에 가까워진다(Fig. 3(c)). Fig. 3(d)는 Fig. 3(c)와 동일한 조건에서 노즐로부터 6.4 cm 떨어진곳에서 촬영한 유동의 이미지이다.

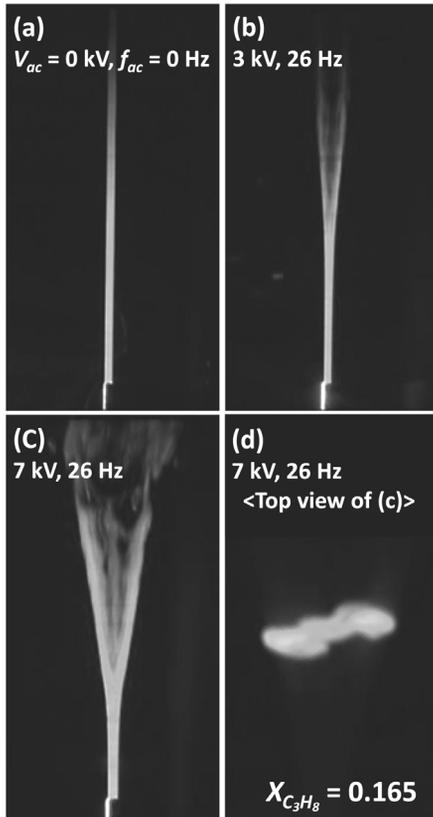


Fig. 3. Cold flow visualization for the flames shown in Fig. 1: (a) $V_{ac} = 0$, (b) 3 kV, (c) 7 kV, and (d) 7 kV (top view of (c)) at $f_{ac} = 26$ Hz.

교류전기장은 심지어 화염이 없는 상태에서 자유 제트유동의 변화를 야기시킨다. 이러한 변화를 야기할 수 있는 메커니즘은 두가지로 볼 수가 있다. 하나는 강한 전기장으로 인해 가스의 원자나 분자들이 전자를 잃어 양이온을 띠게 된다. 또다른 하나는 우리가 사용한 연료들이 극성을 띠게 되면 이러한 현상이 발생할 수가 있다. 그러나 우리가 사용한 프로판, 질소, 산소의 분자들은 극성을 띠고 있지 않다. 또한, 교류전기장으로 인해 이러한 분자들이 이온화가 되었는지를 확인 할 필요가 있다. 프로판, 질소, 산소의 분자가 이온화되기 위해서는 강한 전기장이 형성되어야 하고 빛을 내며, 코로나 방전, 전자 임팩트와 같이 지글거리는 소리가 나야한다. 그러나 본 실험의 조건으로 볼 때, 코로나 방전으로 보기에 는 힘들다. 또한, 직류전압을 인가하였을 때 이러한 현상이 발생하지 않음을 설명할 수가 없다. 이는 3.3 절에서 자세히 설명하였다.

교류전기장을 인가하였을 경우 유동이 이온화가 되었는지를 알아보기 위하여, 석영관 대신에 편향판을 노즐 중심으로부터 각각 30 cm 거리에 설치하였다(Fig. 2(b)). Fig. 4는 Fig. 3(c)와 같은 조건에서 실험한 결과의 유동이미지이다($X_p = 0.165$, $U_0 = 1.5$ m/s, $V_{ac} = 7$ kV, $f_{ac} = 26$ Hz). 오른쪽에 위치한 편향판에 직류 전압 +10 kV를 인가하고 나머지 편향판에 접지하였다. Fig. 4(b)에서 보이는 것처럼 직류 전압을 인가하였을 경우, 유동들이 양전하로 대전된 판으로 이동하였다. 반면에 편향판에 직류 전압을 인가하지 않은 경우는 아무런 변화가 발생하지 않았다(Fig. 4(a)). 이는 유동의 가스분자들이 음전하로 대전되었음을 의미한다.

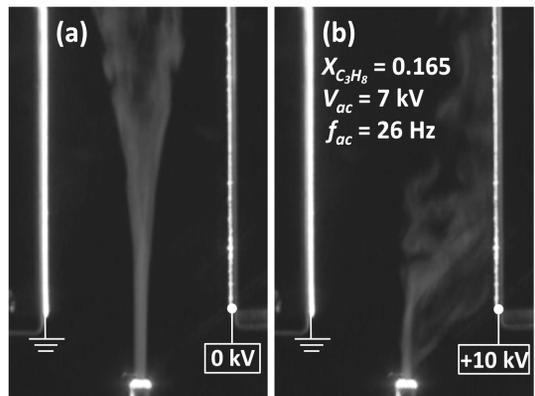


Fig. 4. Evidence of a negatively charged jet stream under $V_{ac} = 7$ kV and $f_{ac} = 26$ Hz: (a) without a deflection voltage and (b) with a deflection voltage of +10 kV applied to the plate on the right side.

3.2. 유동불안정성의 근원

노즐출구 부근의 유동장은 프로판, 질소, 산소를 포함하고 있다. 산소가 전자친화도가 높기 때문에 이 유동의 대부분의 음이온은 산소일 것이다[12]. 이를 명확하게 알아보기 위하여 다음과 같은 실험을 수행하였다. 주위로부터 산소의 유입을 차단하기 위하여 동축류 공기대신에 질소로 사용하였다. Fig. 5는 유동 불안정성의 원인을 밝히는데 중요한 단서를 보여준다. 프로판, 질소, 공기, 산소 각각 노즐출구속도는 1.5 m/s이며, 동축류 질소의 출구속도는 0.25 m/s이다. 노즐에 교류전기장을 인가하였을 경우($V_{ac} = 7$ kV, $f_{ac} = 26$ Hz), 프로판과 질소의 유동은 아무런 반응을 하지 않았다(Fig. 5(a), (b)). 반면에 공기와 산소를 사용한 유동은 하류에서 반응하는 것을 알 수가

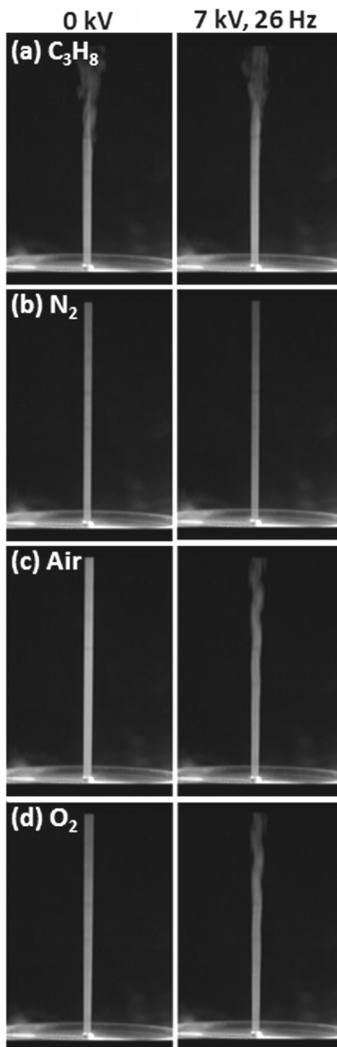


Fig. 5. Effect of an AC field on the jet of (a) C_3H_8 , (b) N_2 , (c) air, and (d) O_2 with nitrogen coflow.

있다(Fig. 5(c), (d)). 이러한 결과로부터 유동불안정성의 원인이 산소라는 것을 알 수 있다.

3.3. AC 인가에 의한 불안정성 기구

유동 불안정성에 대한 물리적 매커니즘을 찾기 위하여 노즐에 직류전압을 인가하였을 경우 유동의 변화에 영향을 주지 못하는 원인을 명확하게 할 필요가 있다. 본 연구에서는 노즐에 음전압과 양전압을 인가하여 공기 유동의 특성을 조사하였다(Fig. 6). 노즐에 직류 전압 $V_{dc} = +7$ kV를 인가하였을 경우, 편향판에 직류 전압 +10 kV가 인가한 경우와 하지 않은 경우에 상관없이 유동의 변화가 없었다(Fig. 6(a)). 이는 산소가 양전압으로 인해 음이온이 되지 않음을 알 수 있다. 반면에 노즐에 음전압 $V_{dc} = -7$ kV를 인가하였을 경우, 유동이 양전압인 편향판 쪽으로 이동하는 것을 알 수 있다. 그러나 음전압을 노즐에 인가하여도 유동의 하류에서 불안정성은 보이지 않는다. 따라서, 산소 분자들은 오직 노즐에 음전압을 인가하였을 때 음이온이 되며, 산소의 음이온만이 이러한 유동의 불안정성을 야기시키는 것이 아님을 알 수 있다. 즉, 산소의 음이온뿐만 아니라 교류전기장이 이 유동의 불안정성에 기여하는 것을 알 수 있다.

Fowler and Nordheim의 이론[13]을 근거로 전자방사(Field electron emission)는 Fig. 6의 결과를 뒷받침한다. 강한 음전압을 노즐에 인가하면 노즐은 음전극이 되고 노즐 끝부분에서 전자들이 방출하게 된

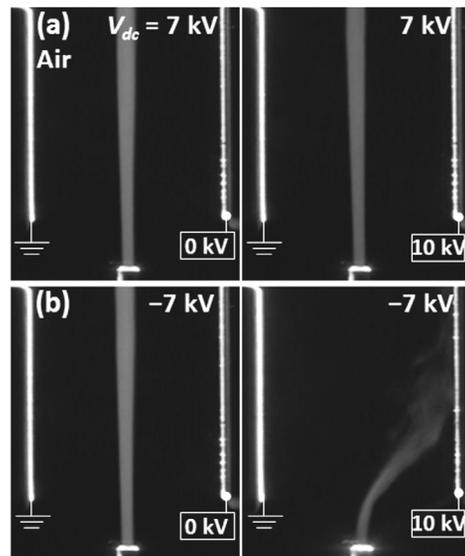


Fig. 6. Effect of DC field on oxygen ionization, with a deflection voltage at 0 kV or 10 kV applied to the air jet: (a) $V_{dc} = 7$ kV and (b) $V_{dc} = -7$ kV.

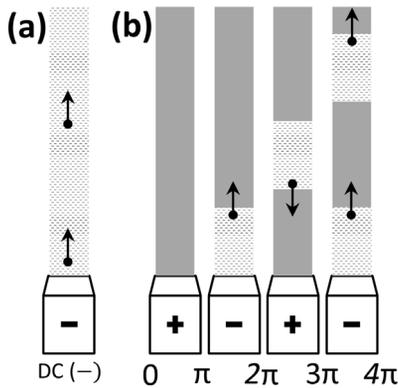


Fig. 7. Schematic diagram of the force acting on a negatively ionized flow volume due to an electric field produced by: (a) negative DC and (b) AC energized nozzles.

다. 방출된 전자들은 산소와 결합하여 다음과 같은 음이온을 형성하게 된다($O_2 + e \rightarrow O_2^-$). 이렇게 형성된 음이온들만으로는 유동의 불안정을 야기시킬 수 없다(Fig. 7(a)). 그러나 Fig. 7(b)에서 보는 것처럼, 교류전기장이 인가한 경우 음이온으로 된 유동은 노즐의 음전극에 의해 힘을 받아 밀리게 된다. 비록 양전압이 인가되었을 때는 산소의 음이온을 발생하지 않지만 이미 음이온이 된 유동의 속도를 늦추게 된다. 이로 인해 노즐 끝부분에서부터 미미한 유동이 불안정하게 되어 하류로 갈수록 뚜렷하게 나타남을 알 수 있다.

비반응 유동의 불안정을 발생시키는 교류전기장을 명확하게 알아보기 위하여 두 갈래로 나누어지는 지점의 shedding 주파수를 분석하였다. Fig. 8은 노즐 출구 속도 $U_0 = 1.5 \text{ m/s}$, 인가 전압 $V_{ac} = 7 \text{ kV}$ 에서 다양한 인가 주파수에 따른 공기의 shedding 주파수이다. 인가 주파수 10에서 70 Hz를 인가하였을 때 shedding 주

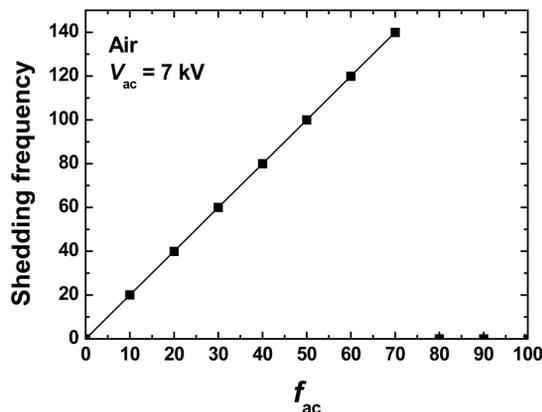


Fig. 8. Shedding frequency of the main jet for various AC frequencies at $V_{ac} = 7 \text{ kV}$.

파수는 인가 주파수의 2배를 보여준다. 또한, 더 높은 주파수를 인가하였을 경우 유동의 변화가 없었다. 이는 유동이 부분적으로 이온화된 음전하가 노즐전극에 의한 전기적 체적력에 영향을 받기 때문이다.

Kono[14] 등으로부터 부분적으로 가속된 분자에서 중성분자로의 운동량의 전이하는 동안 분자 충돌 반응시간이 14 ms라는 것을 측정한 바가 있다. 이에 해당되는 충돌 주파수는 약 ~71 Hz이다. 이보다 더 높은 인가 주파수일 경우 유동은 외력에 반응할 충분한 시간이 없다. 이는 본 실험에서와 같이 인가 주파수가 80 Hz보다 높은 경우 유동이 변화가 없는 것을 설명할 수 있다. 비록 shedding 주파수가 2배가 되는 것은 명확하게 설명하지 못하지만 교류전기장이 유동에 중요한 역할을 하는 것을 알 수 있다.

4. 결론

교류전기장을 인가하였을 때 쌍둥이 부상화염이 관찰되어 화염이 없는 동축류에서 유동의 불안정성에 대하여 실험적으로 연구하였다. 이러한 불안정성의 원인과 매커니즘을 찾는데 초점을 두었으며, 편향판과 동축류를 이용하여 오직 산소분자만이 음이온이 됨을 알 수가 있었다. 또한 노즐에 음전압을 인가하였을 때 전자의 방출로 인해 전자는 산소분자와 결합하여 일정한 유동량이 음전하를 띠는 것을 알았다. 그러나, 교류전기장만이 이러한 유동의 불안정성을 야기시키는 것으로 볼 수 있어 다음과 같은 매커니즘을 알 수가 있었다. 노즐에 교류전기장을 인가할 경우 노즐이 처음 양전극일 때 유동에 변화가 없으며, 음전극이 되면 전자를 방출하여 주위의 산소와 결합하게 되어 노즐 부근에서 일정한 유동량이 음전하를 띠게 된다. 다시 노즐이 양전극이 되었을 때 중성인 유동이 흐르지만, 이미 만들어진 음전하에 영향을 주게 된다. 즉 음전하를 당기게 된다. 이것이 반복이 되어 결국 어느 지점에서 유동이 두 갈래로 나누어짐을 확인 할 수 있었다.

후기

본 연구는 한국에너지기술평가원 산업기술혁신사업(2013102000030)에 의해 지원을 받았고 이에 감사드립니다.

References

[1] J. Lawton, F.J. Weinberg, *Electrical Aspects of Combustion*, Clarendon Press Oxford, (1969).
 [2] F. Carleton, F. Weinberg, *Electric fields-induced*

- flame convection in the absence of gravity, *Nature*, 330 (1987) 635-636.
- [3] A.B. Fialkov, INVESTIGATIONS ON IONS IN FLAMES, *Progress in Energy and Combustion Science*, 23 (1997) 399-528.
- [4] M.S. Cha, Y. Lee, Premixed Combustion Under Electric Field in a Constant Volume Chamber, *Ieee Transactions on Plasma Science*, 40 (2012) 3131-3138.
- [5] Y. Xiong, M.S. Cha, S.H. Chung, AC electric field induced vortex in laminar coflow diffusion flames, *Proceedings of the Combustion Institute*, 35 (2015) 3513-3520.
- [6] K. Criner, A. Cessou, J. Louiche, P. Vervisch, Stabilization of turbulent lifted jet flames assisted by pulsed high voltage discharge, *Combust. Flame*, 144 (2006) 422-425.
- [7] A. Yu. Starikovskii, Plasma supported combustion, *Proc. Combust. Inst.*, 30 (2005) 2405-2417.
- [8] W. Kim, H. Do, G. Mungal, M. A. Cappelli, Investigation of NO production and flame structure in plasma enhanced premixed combustion, *Proc. Combust. Inst.*, 31 (2007) 3319-3326.
- [9] S. M. Lee, C. S. Park, S. H. Chung, Effect of Electric Fields on the Liftoff of Nonpremixed Turbulent Jet Flames, *ICCC Trans. Plasma Sci.*, 33(5) (2005) 1703-1709.
- [10] S.H. Won, S.K. Ryu, M.K. Kim, M.S. Cha, S.H. Chung, Effect of electric fields on the propagation speed of tribrachial flames in coflow jets, *Combustion and Flame*, 152 (2008) 496-506.
- [11] S.H. Won, M.S. Cha, C.S. Park, S.H. Chung, Effect of electric fields on reattachment and propagation speed of tribrachial flames in laminar coflow jets, *Proceedings of the Combustion Institute*, 31 (2007) 963-970.
- [12] W.P. Allis, *Motions of Ions and Electrons*, Springer, 1956.
- [13] R.H. Fowler, L. Nordheim, *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 119 (1928) 173-181.
- [14] M. Kono, F.B. Carleton, A.R. Jones, F.J. Weinberg, The Effect of Nonsteady Electric Fields on Sooting Flames, *Combustion and Flame*, 78 (1989) 357-364.