

# 마이크로파가 인가된 화염에서의 화염안정성 및 오염물질 배출특성

전영훈 · 이의주<sup>†</sup>

부경대학교 안전공학과

(2014. 4. 23. 접수 / 2014. 7. 24. 채택)

## Characteristics of the Microwave Induced Flames on the Stability and Pollutant Emissions

Young Hoon Jeon · Eui Ju Lee<sup>†</sup>

Department of Safety Engineering, Pukyong National University

(Received April 23, 2014 / Accepted July 24, 2014)

**Abstract :** The use of electromagnetic energy and non-equilibrium plasma for enhancing ignition and combustion stability is receiving increased attention recently. The conventional technologies have adapted the electrical devices to make the electromagnetic field, which resulted in various safety issues such as high-maintenance, additional high-cost system, electric shock and explosion. Therefore, an electrodeless microwave technology has an advantage for economic and reliability compared with conventional one because of no oxidation. However, the application of microwave has been still limited because of lack of interaction mechanism between flame and microwave. In this study, an experiment was performed with jet diffusion flames induced by microwaves to clarify the effect of microwave on the combustion stability and pollutant emissions. The results show that microwave induced flames enhanced the flame stability and blowout limit because of abundance of radical pool. However, NOx emission was increased monotonically with microwave intensity except 0.2 kW, and soot emission was reduced at the post flame region.

**Key Words :** jet diffusion flame, microwave, flame stability, emission, soot, NOx

### 1. 서론

기존의 탄화수소계 연료의 연소에서는 화염안정성 및 고효율의 문제가 대두되어 지난 수 십 년간 순산소 연소 등의 기법이 제안되어 상용화 되었고, 환경적 측면에서 NOx 등 오염물질 저감을 위해 EGR, mild combustion 등 여러 가지 방법론이 적용되고 있다. 하지만 재료적 측면이나 경제성 때문에 이러한 방법론들의 성장에는 한계가 있으므로, 이를 해결하기 위해 신기술의 도입이 요구되고 있는 실정이다. 따라서 최근에 실용화 측면에서 비약적인 발전을 하고 있는 전자기 에너지와 비평형 플라즈마의 연소시스템의 적용은 점화화 연소안정성에 대한 잠재력 능력 때문에 많은 관심을 가져왔다<sup>1,2)</sup>. 특히 고효율 열에너지 교환, 가연한계의 확장, 연소측면에서 사용하기 힘든 여러 저급 연료나 합성가스들의 신뢰할 수 있는 점화, 다양한 연소특성을 가지고 있는 물질들의 이용측면에서 활용이

예상된다<sup>3)</sup>. 기존의 연구에서 전자기 에너지가 화학 반응에 제공하는 대략적인 기구를 제시하고 있다<sup>4)</sup>. 하지만, 이를 실제 응용에 적용하기 위한 기초적인 물리적인 기구 규명은 여전히 부족한 실정이어서, 실제 이용측면에서 설계인자를 도출할 수 있는 조건 별 기구는 아직 밝혀지지 않았으며 다양한 오염물질의 생성 등에 대해서도 많은 부분이 불명확하다. 그러므로 이러한 전자기장학과 연소반응의 결합은 더 많은 지식과 연구가 요구된다고 할 수 있다.

플라즈마 상태를 얻기 위한 여러 가지 방법 중 전극 봉이나 전극플레이트를 사용하는 경우에는 유지보수 비용이 많이 들며, 전기적 쇼크나 폭발 등의 안전문제를 일으킨다. 따라서 전자기적 특성이 보이는 마이크로파의 사용은 이러한 안전문제를 해결해 줄 수 있는 미래의 기술로 인식되고 있다. 연소장에서의 마이크로파 인가에 관련한 특성연구는 기존에 소수의 연구가 존재하는데, Ogawa 등<sup>5)</sup>은 2.45 GHz로 여기된 cavity

<sup>†</sup> Corresponding Author: Eui Ju Lee, Tel : +82-51-629-6471, E-mail : ejlee@pknu.ac.kr

Department of Safety Engineering, Pukyong National University, 45, Yongso-ro, Nam-gu, Busan 608-737, Korea

resonator에서의 CH<sub>4</sub>/Air층류화염의 마이크로파의 영향을 조사하기 위해 연소 후 가스온도, 밝기, 전자온도 등을 측정하였고, Takita 등<sup>6)</sup>에 의해서 혼합기에서의 반응기 수 증가와 높은 온도에 기인한 반응기들의 첨가에 의한 연소속도(burning velocity) 증가가 보여졌다. Hemawan 등은 cavity 형태의 마이크로파 버너에서의 마이크로파의 세기에 따른 플라즈마 제트화염을 관찰하였다<sup>7)</sup>. 또한, 최근에 많은 연구자들에 의해서 마이크로파와 탄화수소 연료화염과의 상호작용 연구가 진행되고 있지만<sup>8,9)</sup>, 연소속도나 화염안정성에 관한 특성이 조사되고 있으며, 전체적인 물리적인 기구의 규명과 더불어 NO<sub>x</sub>, Soot 등과 같은 오염물질의 배출특성에 관한 연구는 거의 이루어 지지 않았다.

따라서 본 연구에서는 동축류 버너를 이용한 제트화산화염에서 웨이브가이드 시스템을 통한 마이크로파를 인가하여 실험을 수행하였다. 동축류 버너를 통해 기존의 산업에서 가장 많이 사용되고 있는 화염의 형태인 제트화염을 모사하였으며, 플라즈마가 발생하지 않는 수준에서의 마이크로파를 인가하여 안정성과 같은 연소특성 기구를 보다 명확히 조사하였고, 기존연구에서 다루어지지 않았던 NO<sub>x</sub>와 Soot 등의 오염물질 배출 특성을 고찰하였다.

## 2. 실험방법

Fig. 1에 실험의 사용된 기본장비 및 유로계를 나타내었다. 실험에 사용된 동축류 제트 화산화염 버너는 내경이 각각 7.5 mm, 20 mm인 이중관으로 제작하였다. 외측 형상을 컨트랙션 형태로 제작하였고, 그 내부에는 비드(bead)를 채워 버너 팁에서의 초기유속이 버너 직경 전체에 걸쳐 균일하게 하였다. 유량은 MFC를 사용하여 오차범위 ±1% 미만으로 제어 하였으며, 캄

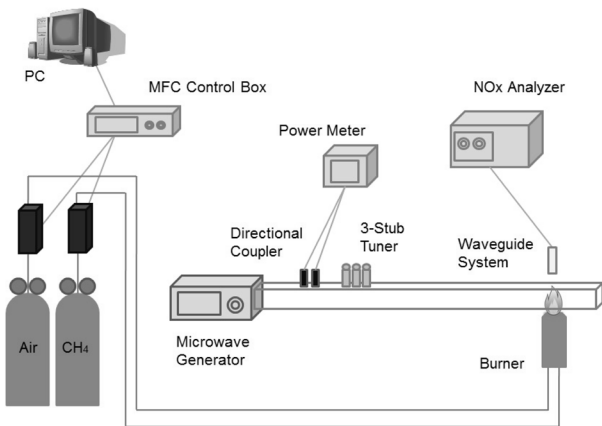


Fig. 1. Schematic of experimental set up.

코더(SONY, HXR-NX30N)를 사용하여 60 fps의 속도로 촬영하여 이미지를 분석하였다. 연료는 순도 99.9% 메탄을 사용하였고 산화제는 압축공기를 사용하였다. 예비실험에서는 생성되는 매연의 양을 크게 하기 위해 에틸렌을 사용하였지만 마이크로파와 큰 상호작용이 없어 보다 마이크로파의 영향이 큰 메탄을 선정하여 실험을 수행하였다.

본 실험에서는 화염에 마이크로파를 더욱 효과적으로 인가하기 위해 Fig. 2에 나타난 것과 같이 웨이브가이드 시스템 장치를 사용하였는데 주된 목적으로는 정상파(Standing wave)를 발생시키는데 있다. 웨이브가이드 시스템의 장치 구성은 마이크로웨이브를 손실 없이 전파하기 위해 웨이브가이드(WR-430)을 사용하였으며 2.45 GHz, 1 kW Magnetron을 사용하여 마이크로파를 발생시켰다. Sliding short는 마이크로파의 파장길이를 조절하여 Standing wave를 발생시키며, 3-stub tuner를 이용하여 마이크로파의 위상(phase)을 조절 하여 Standing wave를 안정적으로 만들었다. directional coupler는 마이크로파의 입사파, 반사파를 감쇠기를 통해 조금씩 흡수하여 power meter를 통해 대략적으로 나타내었다. 그리고 circulator와 dummy load를 사용하여 마이크로파의 반사파가 magnetron에 충격을 주지 못하게 하였다. 실험은 Fig. 2와 같이 3-stub tuner와 Sliding short 사이의 Test Section에서 진행하였고, 테스트섹션은 위 수직방향으로 직경 3 cm hole과 정면으로 5 cm × 3 cm의 가시화 창을 만들어 연소 후 가스의 포집과 화염이미지를 얻도록 설계되었다.

본 실험에서의 실험조건은 test section의 제한적인 공간과 화염에 대한 마이크로파 효과를 고려하여 연료 유속을 5.7 cm/s에서 조건 별로 11.3 cm/s까지 단계별로 증가 시켰고 산화제 유속은 연료유속에 따라 61.8 cm/s에서 617.6 cm/s까지 증가시켰다. 실험은 일정한 연료 유속조건에서 산화제 유속을 증가시켜 화염상태를 관찰하였고 마이크로파 인가에 따른 영향을 관찰하였다.

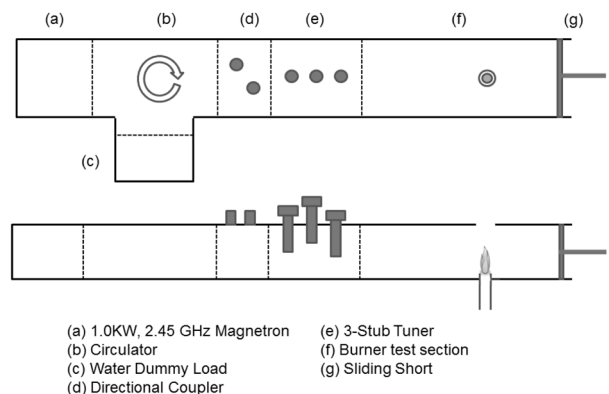


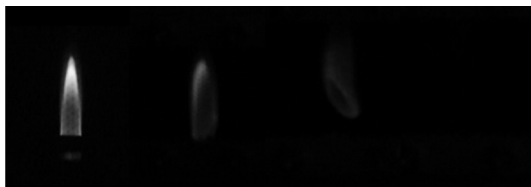
Fig. 2. Schematic of waveguide system.

또한 Test section hole 윗 부분에 가스분석기(ECOM, J2KN) probe를 위치시켜 NOx Emission 분석을 하였다. 매연입자 분석을 위해 NOx Emission 분석과 같이 Test section hole 윗 부분에 짧은 시간 동안 TEM Grid를 통과시켜 매연을 포집, 투과전자현미경(Transmission Electron Microscopy, TEM)을 사용하여 매연입자의 형상(Morphology)을 관찰하였다.

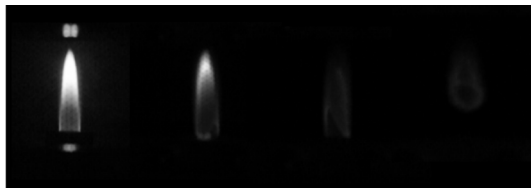
### 3. 실험결과 및 토의

Fig. 3에 연료의 유량을 고정하고 산화제의 유량을 증가시켰을 때의 가시화 창을 통한 화염의 모양을 마이크로파를 인가하지 않았을 경우와 1 kW의 마이크로파를 인가하였을 경우로 구분하여 나타내었다.

아래의 사진들에서 보듯이 마이크로파의 영향이 극명하게 나타난다. 본 실험에서는 마이크로파를 인가하지 않았을 때 초기화염에서부터 전체적으로 flickering과 같은 불안정성이 나타났고 산화제 유속이 증가함에 따라 불안정성이 더욱 증대되어 화염의 한쪽 부분 떠있는 partially attached flame, 산화제 유속이 더욱 증가 되었을 때 화염이 노즐에 붙었다 떨어 졌다는 반복하며 회전하는 rotating flame이 나타났고 더 증가된 유속에서는 화염날림(blowout)이 발생되었다. 하지만 같은 연료/산화제의 유속 조건에서 1kW 마이크로파를 인가하였을 때는 산화제유속이 낮아 비교적 안정한 화염에서는 마이크로파 인가시 화염의 휘도(luminosity)와 길이가 증가된 것을 확인 할 수가 있으며, 산화제 유속을 증가시킨 불안정한 화염 조건에서는 화염이 전반적으로 안정해지는 모습을 볼 수 있다. 특히 산화제 유속이 매우 큰 조건에서는 화염날림이 발생하지 않고 부상(lift-off)되어 존재하는 사실을 통해 보다 직접적인 안정성 향상 효과를 얻을 수 있었다.



(a) No microwave



(b) 1kW input power of microwave

Fig. 3. Direct photos of CH<sub>4</sub>-Air flames according to the increase of Air velocity.

연료와 산화제의 유속을 변화하였을 때 화염의 형상에 따른 분류와 화염안정성을 Fig. 4에 도시하였다. 전체적으로 화염형상의 경향은 마이크로파의 인가 유무에 따라 크게 바뀌지 않는다. 즉, 전 유속 영역에서 연료와 산화제의 유속을 증가시키면 안정한 화염에서 부분적으로 버너 림에 부착된 화염으로 바뀌고 이후 화염소화가 발생함을 볼 수 있었다. 특히 부상화염의 경우에는 마이크로파를 인가하였을 때 같은 유속에서 화염 안정성이 크게 증가하여 안정한 화염으로 바뀌는 현상을 볼 수 있다. 하지만 화염날림 현상은 높은 연료 유속에서는 안정성이 좋아지지만 상대적으로 저속의 연료 유속인 7.5 cm/s 근처에서는 한계속도가 존재하여 마이크로파의 유무에 크게 영향 받지 않음을 확인할 수 있다. 이와 같은 화염안정성의 증대는 마이크로파

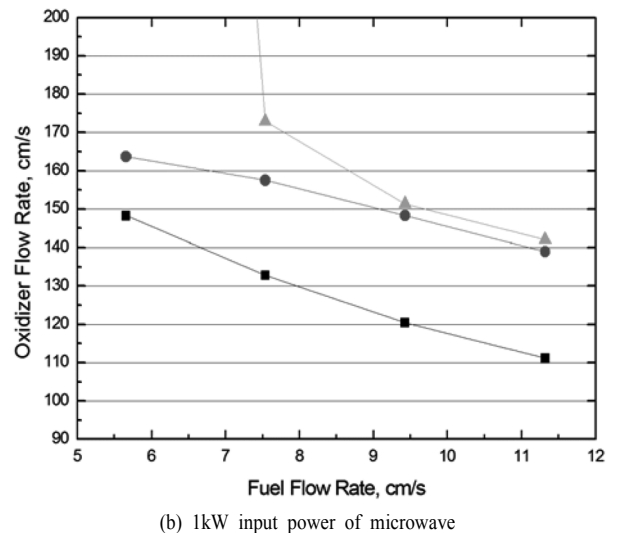
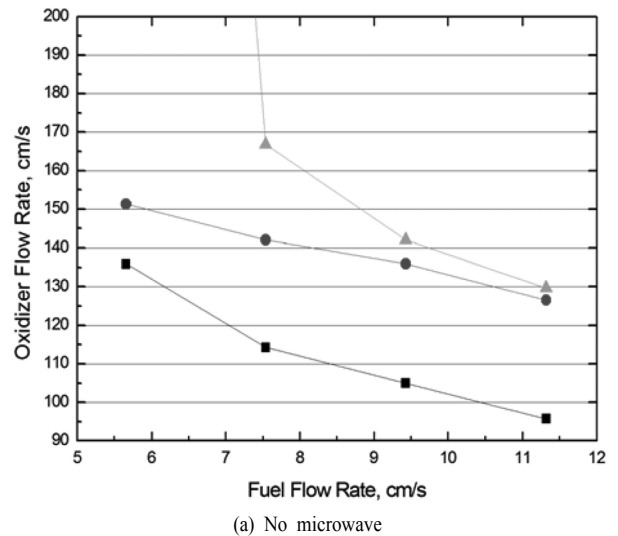


Fig. 4. CH<sub>4</sub>-Air flame stability curve.

를 인가하였을 때 연소반응에서 반응기 풀(radical pool)이 풍부해지고 연소장(combustion field)의 온도를 증가시켰기 때문이라고 판단된다. 실제 배기가스의 온도를 열전대로 측정하면 마이크로파가 인가되었을 경우 세기에 따라 증가함을 확인할 수 있었다. 하지만 이러한 정보는 화염의 반응영역 온도는 아니므로 향후 주파수 분석을 통해 화염면의 온도 상승효과를 정량화 할 수 있을 것이다.

NOx Emission은 연료와 산화제 유속을 고정 시킨 상태에서 마이크로파 세기에 따른 NOx 배출량을 분석하여 Fig. 5에 나타내었다. 본 실험에서 최고 1 kW의 마이크로파를 인가하였을 때 NOx 배출량이 증가하지 않았을 때

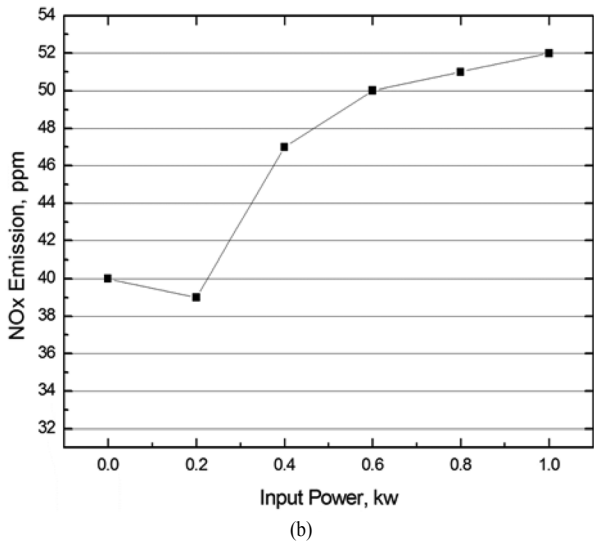
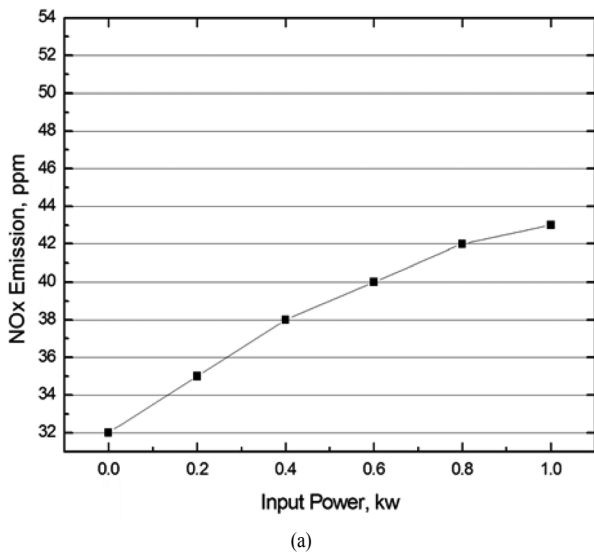


Fig. 5. Variation in NOx emission with microwave input power in a CH<sub>4</sub>-Air flame. (a) 7.5 cm/s CH<sub>4</sub> and 61.8 cm/s Air (b) 9.4 cm/s CH<sub>4</sub> and 61.8 cm/s Air.

에 비해 약 30%의 증가치를 보였으며, 전반적으로 마이크로파세기가 증가함에 따라 NOx Emission 또한 증가되는 경향을 보였다. 이는 기존의 화염온도에서 마이크로파 인가시 화염의 온도가 증가하여 Thermal NOx의 발생량이 증가했기 때문이라고 판단된다. 하지만 Fig. 5(b)에서 보듯이 상대적으로 높은 연료속도에서는 0.2 kW 결과와 같이 낮은 마이크로파 세기에서 오히려 NOx 발생이 감소됨을 볼 수 있다. 이러한 특성은 NOx 생성에 관한 반응기와 관련있을 것으로 판단되지만 현시점에서는 판단이 불가능하고 보다 상세한 실험이 요구된다. 향후 연구를 통해 이러한 점을 규명한다면 마이크로파의 오염물질 저감 범위 등을 보다 상세히 규명할 수 있을 것으로 기대된다.

Fig. 6은 매연입자의 형상학적 모습을 알아보기 위해 TEM을 이용해 촬영한 매연의 사진이고, 사진의 스케일바는 50 nm와 10 nm이다. Fig. 6(a)와 Fig. 6(b)는 마이크로파를 인가하지 않은 순수 연료와 산화제 조건에서 촬영된 것으로 전형적인 매연 입자군(aggregate)의 모습을 잘 보여준다. Fig. 6(c)와 Fig. 6(d)는 1 kW의 마이크로파를 인가한 조건에서의 매연형상 사진이다. (a)와 (b)에 비해 매연이 성장하지 못해 입자군을 이루지 못한 초기입자들과 비슷하나 일부 액화된 물질과 결합된 형상을 보였다. 화염에 마이크로파를 인가하면 매연의 생성 및 성장이 제한되고 매연형상이 크게 달라질 수 있음을 확인할 수 있었다. 이는 마이크로파가 화염에 인가되었을 때 매연이 화염에서 입자군을 형성하지만 바로 배출되지 못하고, 증가된 휘염영역에서

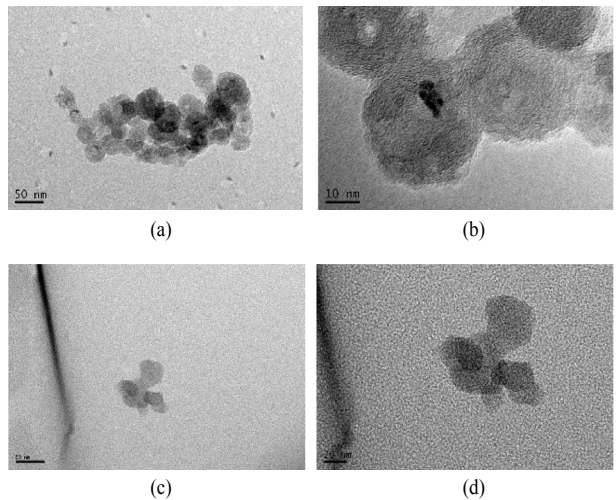


Fig. 6. TEM images of soot according to the velocity of 11.3 cm/s CH<sub>4</sub> and 61.7 cm/s Air. (a) and (b) are sampled at no microwave condition, and (c) and (d) are sampled under 1 kW input power of microwave.

모두 재연소 되어 입자군을 제대로 이루지 못하고 액화된 물질과 결합된 매연만이 검출되었다고 판단된다.

#### 4. 결론

본 논문은 동축류 제트화염을 이용하여 마이크로파의 인가가 화염안정성 및 NOx Emission, Soot의 생성과 성장에 미치는 영향을 연구하였다. 실험결과 해석으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 산화제 유속을 증가 시켜 화염의 상태에 따라 마이크로파를 인가하였을 때 화염은 전반적으로 안정해지는 것을 확인하였고, 이는 마이크로파를 인가하였을 때 연소반응에서 반응기 풀이 풍부해지고 연소장의 온도를 증가 시켰기 때문이라고 사료된다.

2) 안정된 화염에 마이크로파를 인가하였을 때 마이크로파의 세기에 따른 NOx Emission은 증가하는 경향을 보였다. 이는 기존의 화염온도에서 마이크로파 인가시 화염의 온도가 증가하여 Thermal NOx의 발생량이 증가했기 때문이라고 사료된다.

3) TEM으로 매연의 형이상학적 특징을 살펴본 결과 마이크로파가 화염에 인가 되었을 때 매연은 생성과 성장이 제한되고 입자군을 제대로 형성하지 못하여 전형적인 형상의 매연과는 다른 형상을 보였다. 이는 매연이 화염에서 입자군을 형성하지만 배출되지 못하고 마이크로파에 의해 증가된 휘염에서 모두 재연소 되어 입자군을 제대로 이루지 못한 초기 매연만이 검출되었다고 사료된다.

**감사의 글 :** 이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2013년)에 의하여 연구되었음.

#### References

- 1) F.J. Weinberg, K. Hom, A.K. Oppenheim and K. Teichman, Ignition by Plasma Jet, Nature Vol. 272, No. 5651, pp 341-343. 1978.
- 2) P. Fauchais and A. Vardelle, Thermal Plasmas, IEEE Trans. Plasma Sci. Vol. 25, No. 6, pp 1258-1280, 1997.
- 3) S. M. Starikovskaia, "Plasma Assisted Ignition and Combustion", J. Phy.D : Appl. Phys.. Vol. 39, No. 16, R265-R299. 2006.
- 4) X. Raoa, K. Hemawanb, I. Wichmana, C. Carterc, T. Grotjohnb, J. Asmussenb and T. Leea, "Combustion Dynamics for Energetically Enhanced Flames using Direct Microwave Energy Coupling", Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 33, Issue 2, pp. 3233-3240, 2011.
- 5) S. Ogawa, Y. Sakai, K. Sato and S. Sega, "Influence of Microwave on Methane-air Laminar Flames", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 37, No. 1, pp. 179-185, 1998.
- 6) K. Takita, G. Masuya, T. Sato and Y. Ju, "Effect of Addition of Radicals on Burning Velocity", AIAA J. Vol. 39, No. 4, pp. 742-744, 2001.
- 7) K. W. Hemawan, I. S. Wichman, T. Lee, T. A. Grotjohn and J. Asmussen, "Compact Microwave Re-entrant Cavity Applicator for Plasma-assisted Combustion", Rev. Sci Instrum., Vol. 80. Issue 5, pp. 053507, 2009.
- 8) Y. C. Hong, S.C. Cho, C. U. Bang, D. H. Shin, J. H., Kim, H. S. Uhm and W. J. Yi, "Microwave Plasma Burner and Temperature Measurements in its Flame", Appl. Phys. Lett., Vol. 88, Issue 20, pp. 201502-201504, 2006.
- 9) E. S. Stockmana, S. H. Zaidia, R. B. Milesa, C. D. Carterb and M. D. Ryanc, "Measurements of Combustion Properties in a Microwave Enhanced Flame", Combustion and Flame, Vol. 156, Issue 7, pp. 1453-1461, 2009.