

메탄 마이크로 제트화염의 부상과 NO_x 배출에 대한 마이크로파 효과

전영훈* · 이의주**

*부경대학교 안전공학과

Effects of Microwave Induction on the Liftoff and NO_x Emission in Methane Micro Jet Flames

Young Hoon Jeon* and Eui Ju Lee**

*Department of Safety Engineering, Pukyong National University

(Received 20 April 2016, Received in revised form 7 June 2016, Accepted 7 June 2016)

ABSTRACT

High efficient and environment friendly combustion technologies are used to be operated an extreme condition, which results in unintended flame instability such as extinction and oscillation. The use of electromagnetic energy is one of methods to enhance the combustion stability and a microwave as electromagnetic wave is receiving increased attention recently because of its high performance and low-cost system. In this study, an experiment was performed with jet diffusion flames induced by microwave. Micro jet was introduced to simulate the high velocity of industrial combustor. The results show that micro jet flames had three different modes with increasing oxidizer velocity; attached yellow flame, lifted flame, and lifted partially premixed flame. As a microwave was induced to flames, the overall flame stability and blowout limit were extended with the higher microwave power. Especially the interaction between a flame and a microwave was shown clearly in the partially premixed flame, in which the lift-off height decreased and NO_x emission measured in post flame region increased with increasing microwave power. It might be attributed to increase of reactivity due to the abundance of radical pool and the enhanced absorption to thermal energy.

Key Words : Micro jet diffusion flame, Microwave, Flame stability, NO_x emission, Lift-off height

1. 서론

엔진이나 보일러 등 다양한 산업분야에 적용되는 연소시스템은 오랫동안 개발되어 사용되고 있지만, 현재에도 에너지 전환효율의 향상과 연소과정에서 필수불가결하게 생성되는 환경오염물질의 저감을 위해 지속적인 기술개발이 이루어지고 있다. 즉, 화석 연료로부터 에너지를 얻는 기존의 탄화수소계 연료의 연소에서는 화염안정성 및 고효율의 문제가 대두되어 지난 수 십 년간 순산소 연소 등의 기법이 제안되어 상용화 되었고, 환경적 측면에서 NO_x 등 오

염물질 저감을 위해 EGR, MILD 연소 등 여러 가지 방법론이 적용되고 있다. 일반적으로는 앞의 고효율과 친환경이라는 두 가지의 목표를 이루는 것은 물리화학적으로 서로 반대되는 특성이 있어 함께 충족시키는 기술을 개발하기가 매우 힘들다. 따라서 최근에는 고효율시스템 개발로 연료의 사용을 줄여 간접적인 오염물질의 저감효과로 이해하기도 하여 두 목적이 정량적으로는 상호 보완적인 의미로도 사용하고 있다. 고효율과 친환경 연소기술은 기존의 방식과 다른 형태나 재질의 시스템을 사용하거나 극단적인 조건에서 연소를 진행하므로 의도하지 않게 소화(extinction)나 진동 등의 연소 불안정성이 나타나 는 경우가 많다. 이러한 문제를 개선하기 위한 방법론으로서 최근 비접촉식 방법인 마이크로파를 이용하여 연소기의 안전성과 편의성을 도모하는 시도가 활발히 진행되고 있다.

일반적으로 마이크로파 등의 전자기 에너지의 연

† Corresponding Author, ejlee@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.

소시스템에의 적용은 토치와 같은 플라즈마의 연소 시스템을 개발하는데 일찍부터 사용되어왔다[1,2]. 하지만 플라즈마 상태의 이용이 아니더라도 가연한계의 확장, 연소측면에서 사용하기 힘든 여러 저급 연료나 합성가스들의 신뢰할 수 있는 점화, 다양한 연소특성을 가지고 있는 물질들의 이용측면에서 활용이 예상된다[3]. 기존의 연구에서 마이크로파가 전자기 에너지로서 화학반응에 제공하는 대략적인 기구를 제시하고 있지만[4], 연소장에서의 마이크로파 인가에 관련한 특성연구는 제한적이다. Ogawa 등[5]은 2.45 GHz로 여기된 cavity resonator에서의 CH₄/Air 층류화염의 마이크로파의 영향을 조사하기 위해 연소 후 가스온도, 밝기, 전자온도 등을 측정하였고, Takita 등[6]에 의해서 혼합기에서의 반응기의 증가와 높은 온도에 기인한 반응기들의 첨가에 의한 연소속도 (burning velocity) 증가를 확인하였다. Hemawan 등은 cavity 형태의 마이크로파 버너에서의 마이크로파의 세기에 따른 플라즈마 제트화염을 관찰하였다[7]. 또한, 여러 연구자들에 의해서 마이크로파와 탄화수소 연료화염과의 상호작용 측면에서 연소속도나 화염안정성에 관한 특성연구가 진행되었다[8,9]. 최근에는 마이크로파 인가화염의 환경적 측면과도 관련하여 동축류 제트화염을 이용하여 마이크로파의 인가가 화염안정성, NOx Emission 그리고 매연의 생성과 성장에 미치는 영향연구가 수행되었다[10]. 산화제 유속을 증가시켜 화염의 상태에 따라 마이크로파를 인가하였을 때 화염은 전반적으로 안정해지는 것을 확인하였고, 마이크로파의 세기에 따른 NOx 배출은 증가하는 경향을 보였다. 또한 마이크로파가 화염에 인가되었을 때 매연은 생성과 성장이 제한되고 입자군을 제대로 형성하지 못하여 전형적인 형상의

매연과는 다른 형상을 보였다.

본 연구에서는 마이크로 제트를 이용하여 일반적으로 큰 속도의 산업연소기를 모사하였고, 화염에서 존재하는 불안정한 영역에서 마이크로파를 인가하여 화염안정성을 살펴보았다. 또한 대표적 환경오염물질로서 NOx의 배출에 대한 마이크로파의 특성을 고찰하였다.

2. 실험 방법

Fig. 1에 실험의 사용된 기본장비 및 유로계를 나타내었다. 마이크로제트를 이용한 화염을 생성하기 위하여 마이크로 노즐을 이용하여 버너를 제작하였다. 실험에 사용된 버너는 실린더형 동축류 버너로서, 연료노즐의 내경은 1 mm이고 마이크로파에 의한 영향을 최소화 하기 위해 석영으로 제작 하였다. 산화제 노즐의 내경은 26 mm이고 주변 유동의 영향을 최소화 하기 위하여 외경 30 mm, 길이 150 mm인 석영관을 싨드로서 후류에 사용하였다. 연료는 순도 99.9% 메탄을 사용하였고 산화제는 압축공기를 사용하였다. 이전연구에 의하면 에틸렌이나 프로판 화염은 마이크로파와 큰 상호작용이 없어 보다 마이크로파의 영향이 큰 메탄을 선정하여 실험을 수행하였다.

본 실험에서는 화염에 마이크로파를 더욱 효과적으로 인가하기 위해 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 웨이브가이드시스템 장치를 사용하였는데 주된 목적으로는 정상파(standing wave)를 발생시키는데 있다. 웨이브가이드시스템의 장치 구성은 마이크로파를 손실 없이 전파하기 위해 109.22 mm (W) × 54.61 mm (H) 규격을 가지는 도파관(waveguide, WR-430)을 사

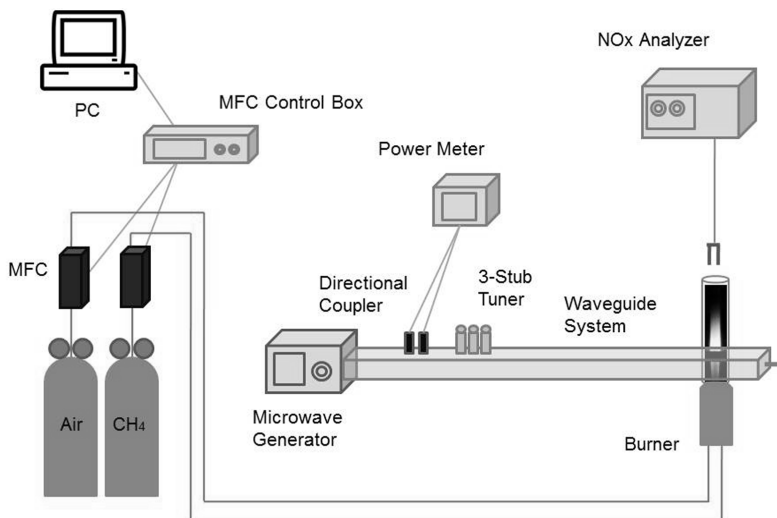


Fig. 1. Schematic of experimental set up.

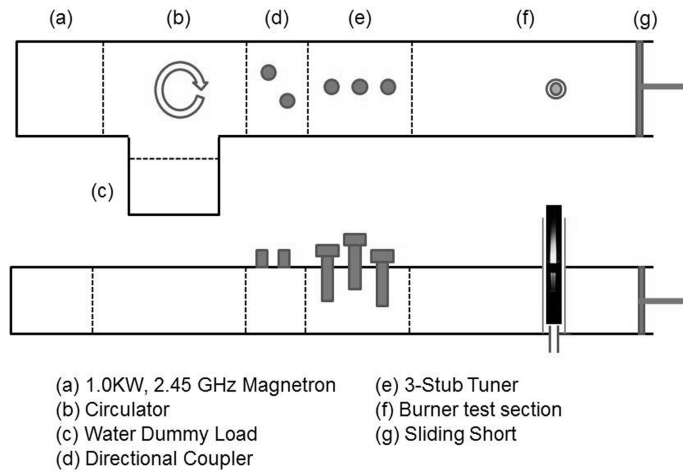


Fig. 2. Schematic of waveguide system.

용하였으며, 2.45 GHz, 1 kW magnetron을 사용하여 마이크로파를 발생시켰다. Sliding short는 마이크로파의 파장길이를 조절하여 정상파를 발생시키며, 3-stub tuner를 이용하여 마이크로파의 위상(phase)을 조절하여 정상파를 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 진행하였다. 테스트섹션은 위 수직방향으로 직경 3 cm 홀을 통해 화염의 관통을 허락하며 연소 후 가스의 포집을 가능하게 하였고, 정면으로 5 cm × 3 cm의 가시화 창을 만들어 화염이미지를 관찰하고 기록할 수 있도록 설계되었다.

버너노즐의 팁(tip)을 도파관 밀면에 위치시켜 상류에서 마이크로파와의 상호작용을 실험하였다. 연료와 산화제의 유량은 MFC를 사용하여 오차범위 ± 1% 미만으로 제어하였으며, 캠코더(SONY, HXR-NX30N)를 사용하여 60 fps의 속도로 촬영하여 이미지를 분석하였다. 또한 test section 홀 윗 부분에 가스분석기(ECOM, J2KN) probe를 위치시켜 NO_x 농도 분석을 하였다.

3. 결과 및 토의

3.1. 동축류 마이크로 제트화염

마이크로 제트화염의 자체의 특성을 조사하기 위해 먼저 마이크로파를 인가하지 않았을 경우에 제트화염 특성을 살펴보았다. 연료의 유량을 고정하고 산화제의 유량을 증가시켰을 때의 가시화 창과 후류

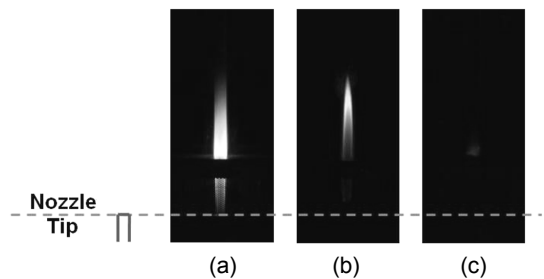


Fig. 3. Direct photos of CH₄/air micro jet flames as increasing oxidizer velocity at $V_f = 1274$ cm/s. (a) attached yellow flame (b) lifted yellow flame (c) partially premixed lifted flame.

에서의 화염 형상을 Fig. 3에 나타내었고, 각 사진에서 화염 중간의 횡방향 어두운 띠는 이미지 촬영시 가시화 창 위쪽의 도파관 옆면에 의하여 가려져 발생하였다. 연료와 산화제의 유속에 따라 크게 세 가지의 화염모드가 형성 되었다. Fig. 3(a)는 부착 휘염(attached yellow flame)으로 산화제 유속이 상대적으로 작은 조건의 메탄/순수공기 화염의 전형적인 모습을 보여준다. 산화제 유속을 증가시키면 부상화염(lifted flame)이 나타났는데 산화제 유속이 상대적으로 작은 경우에는 하류의 대부분이 휘염인 상태로 부상되어 있는 부상 휘염(lifted yellow flame)이 나타났고, 산화제 유속을 더욱 증가시켰을 때는 휘염이 모두 사라지고 난류 예혼합화염과 같은 형태를 보이는 부상 부분 예혼합화염(lifted partially premixed lifted flame)이 나타났다. 이 화염은 하류의 특정위치에서 진동하며 존재한다. 이후 산화제 유속을 더욱 증가시키면 화염날림(blow-out)이 발생된다. 이외에도 실험을 진행하면서 화염날림이 발생하는 조건에서 예상하지 못하게 나타난 화염으로 연료유속과 산화제

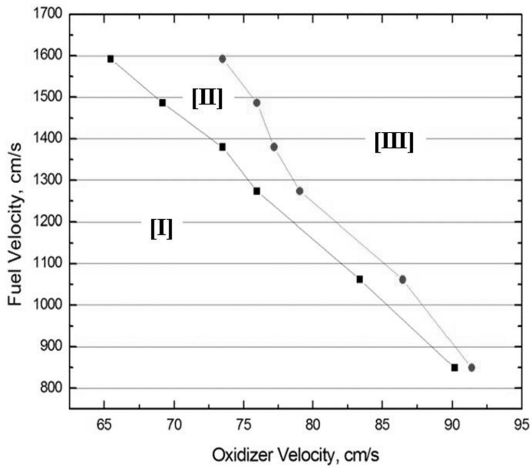


Fig. 4. Flame map of micro jet diffusion flames.

유속을 증가시켰을 때 화염날림이 발생하지 않고 주위류의 간섭을 막기 위해 씌운 석영관 내 부상화염과 별도로 석영관 팁에 확산화염이 생성되었다. 이러한 이중화염(double flame)의 발생은 연료의 유속이 매우 큰 경우에 반응장에서 연소되지 못한 연료가 석영관 끝단에서 다시 연소되는 것으로 판단되는데, 본 연구방향과는 차이가 있어 본 논문에서는 다루지 않았다.

연료와 산화제의 유속 변화에 따른 화염 모드를 Fig. 4에 도시하였고, 그림에서 기호(symbol)는 각 모드변화 경계를 실험한 조건을 의미한다. 주어진 연료와 산화제의 유속범위에서 낮은 연료의 유속과 높은 산화제 속도에서 연료노즐 팁에 부착되어 있는 안정화된 화염을 관찰할 수 있다(Regime I). 화염 하류를 제외하고는 휘염의 형태를 가지고 있다. 안전한 화염에서 산화제나 연료의 유속을 증가시키면 화염 밑(base)이 부상하는 화염이 되고, 보다 큰 유속에서는 부상높이가 증가하다가 부상된 높이에서 진동하는 난류 예혼합 화염으로 천이된다(Regime II). 이러한 영역의 두 경계는 Fig. 4에서 보듯이 연료와 산화제 유속과 반비례하는 특성이 있고, 부상화염의 영역은 높은 연료속도와 낮은 산화제 속도에서 존재 범위가 확장되는 경향이 있다. 부상화염에서의 유속증가는 화염날림(blow out)을 발생하고 소멸된다(Regime III).

1 kW의 마이크로파를 인가한 경우의 연료와 산화제의 유속에 따른 화염모드를 Fig. 5에 도시하였다. 전체적으로 각 모드의 경계 산화제 및 연료 속도가 보다 큰 값으로 이동함을 볼 수 있었고, 부상화염의 영역은 마이크로파를 인가하였을 때 높은 산화제유속에서는 오히려 좁아짐을 볼 수 있었다. 또한 그림에서 모드의 도시영역이 보다 축소된 이유

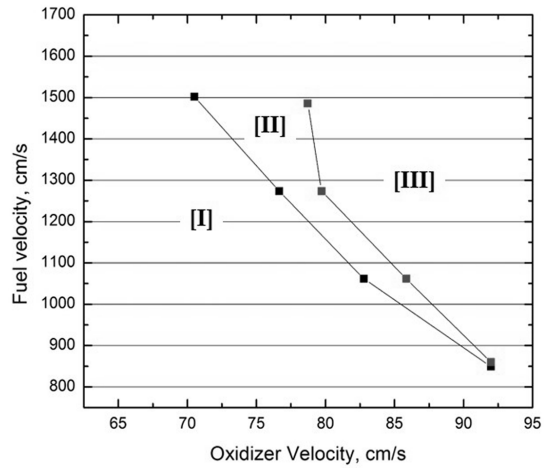


Fig. 5. Flame map of micro jet diffusion flames under 1 kW microwave.

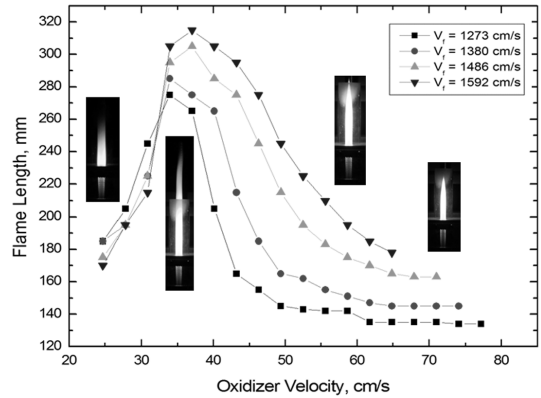


Fig. 6. Flame length with increasing oxidizer velocity.

는 마이크로파에 의해 플라즈마 현상이 나타나는 조건은 배제하였기 때문이다.

Fig. 6은 마이크로파를 인가하지 않은 부착 휘염에 산화제 유속을 증가시켰을 때 화염길이를 나타낸 것이다. 고정된 연료유속에 산화제 유속을 증가시켰을 때 화염의 길이는 산화제 유속이 상대적으로 작았을 때에는 화염 길이가 증가하다가 산화제 유속이 점점 증가함에 따라 화염 길이가 짧아지는 것을 확인할 수가 있다. 산화제 유속에 따라 증가하는 구간은 일반적인 층류화염처럼 체류시간(residence time)의 감소가 주된 이유인 것으로서 설명될 수 있고, 길이가 감소하는 큰 유속의 구간은 산화제 유속이 증가할수록 화염의 휘도(luminosity)가 증가하므로 반응성의 증가로 이해될 수 있다. 하지만 반응성의 증가가 반응기의 풀(pool)을 증가시킨 것인지 수증기 등과 같은 반응에 참여하는 화학종에 의한 에너지 흡수에 의한 열적 효과인지는 추후 검토할 필요가 있다.

3.2. 마이크로파가 인가된 마이크로 제트화염

앞과 같이 동축류 마이크로 제트화염은 연료와 산화제 유속에 따라 다른 특성의 화염이 관찰되었고, 각각의 화염에 Fig. 2의 장치를 통해 마이크로파를 인가하여 화염특성을 살펴보았다. 사용된 마이크로파 시스템은 1.2 kW가 인가할 수 있는 한계 강도였다.

Fig. 7에는 1 kW의 마이크로파를 인가한 화염의 사진을 도시하였다. 각 연료와 산화제의 유속조건은 Fig. 3의 경우와 정확히 일치한다. 같은 연료/산화제의 유속 조건에서 1 kW 마이크로파를 인가하였을 때는 산화제유속이 낮아 비교적 안정한 화염에서는 마이크로파 인가시 화염의 휘도(luminosity)와 길이가 증가된 것을 Fig. 7(a)와 (b)에서와 같이 확인할 수가 있었다. 산화제 유속을 증가시킨 불안정한 화염 조건에서는 화염이 전반적으로 안정해지는 모습을 볼 수 있었는데, 특히 산화제 유속이 매우 큰 조건에서 진동하는 부분 예혼합화염이 1 kW의 마이크로파의 인가된 경우에 전체적으로 부상높이가 현저히 줄어드는 청염상태의 부상화염으로 바뀌는 것을 Fig. 7(c)에서 볼 수 있었고, 이러한 사실을 통해 마이크로파의 인가가 제트화염의 직접적인 안정성을 향상시키는 효과가 있고, 따라서 화염 안정화 범위가 보다 넓어짐을 확인할 수 있었다.

확산화염에 연료와 산화제의 유속을 각각 고정시킨 뒤 다른 하나의 유속을 파라미터로 하여 마이크로파를 인가하였을 때 화염길이와 부상높이를 측정하여 Fig. 8에 도시하였다. Fig. 8(a)의 경우 연료 유속을 고정하고 산화제 유속을 증가시키며 마이크로파 인가 시 산화제 유속효과를 살펴보았는데 같은 산화제 유속 조건에서 마이크로파의 인가가 화염모드를 보다 안정화시키는 방향으로 변화시키는 것을 명확히 관찰된다. 하지만 전체적인 화염길이와 부상높이는 마이크로파를 인가 전·후 차이가 미미했다. Fig. 8(b)는 산화제 유속을 고정하고 연료 유속을 증가시켜 마이크로파의 연료 유속효과를 보았다. 마이

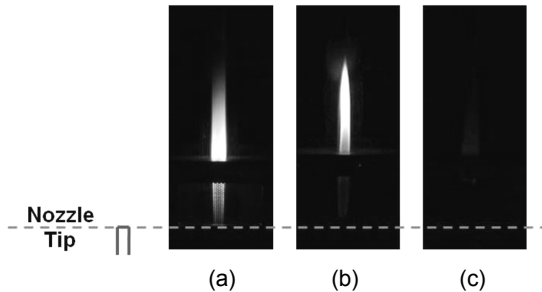


Fig. 7. Direct photos of 1 kW microwave induced CH₄/air micro jet flames as increasing oxidizer velocity at V_f = 1,274 cm/s. (a) attached yellow flame, (b) lifted yellow flame, (c) lifted blue flame.

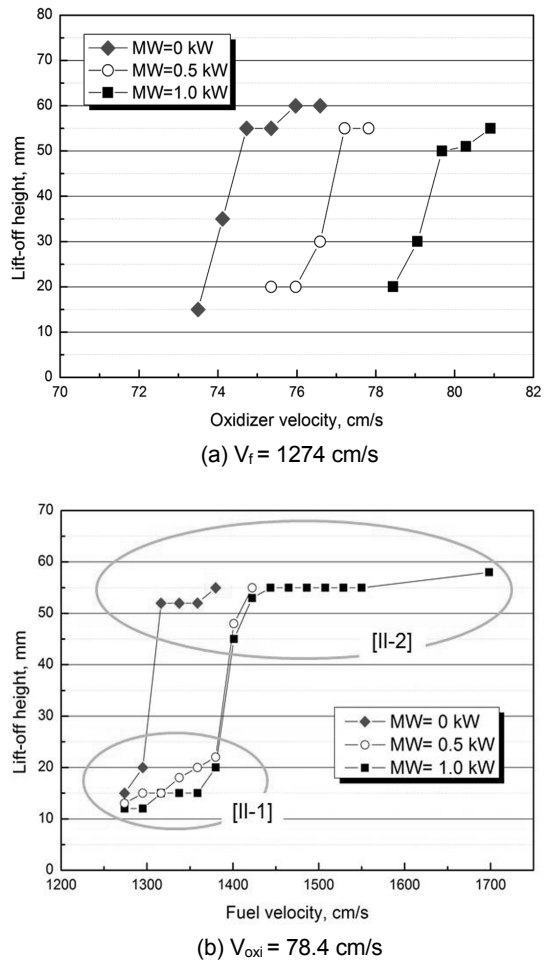


Fig. 8. Lift-off heights with increasing fuel or oxidizer velocities in the microwave induced jet flames.

크로파 인가 시 화염길이와 부상높이는 큰 차이가 없으나 산화제 유속효과와 달리 연료를 증가시켰을 때에는 화염길이가 증가하였고 특히 화염부상시 부상부분 예혼합화염이 마이크로파의 인가 경우에 매우 넓은 영역으로 존재하였다. 마이크로파 세기에 따른 화염의 특성은 모든 조건에서 1.0 kW의 마이크로파 세기의 경우에 0.5 kW 보다 화염안정화가 두드러지지만 Fig. 8(b)의 경우에는 두 가지의 마이크로파 강도에서 큰 다른 효과가 발견되어지지 않는다. 이러한 마이크로파의 인가는 반응장의 온도상승과 반응기 풀(radical pool)을 풍부하게 만들기 때문에 판단되어지고, 마이크로파의 세기에 따라 선형적인 특성이 아니라 특정 마이크로파 강도 이상에서 화염안정성에 영향을 주는 문턱값(threshold)이 존재함을 간접적으로 보여준다. 또한 Fig. 8(b)는 (a)와 달리 부상높이가 큰 화염이 관찰되지 않고 바로 부상화염에서 부분 예혼합화염으로 천이됨을 확인할 수 있다.

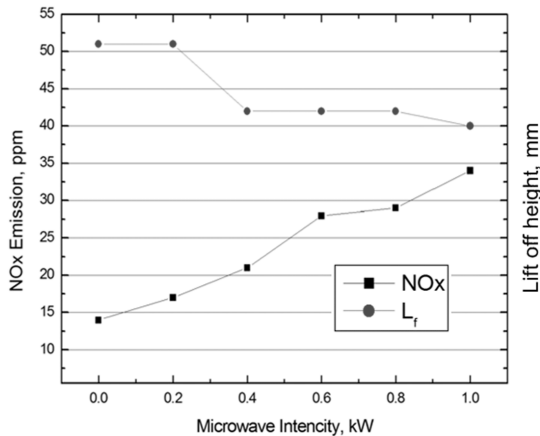


Fig. 9. Variations of NOx Emissions and lift-off heights with respect to the microwave intensity at $V_f = 1486$ cm/s and $V_{oxi} = 74.1$ cm/s.

Fig. 9는 부상된 부분 예혼합화염에 마이크로파를 인가하였을 때 마이크로파의 강도에 따른 NOx 농도와 부상높이의 변화를 나타냈다. 전체적으로 마이크로파의 세기가 커질수록 NOx 농도는 증가하였고, 부상높이는 감소함을 볼 수 있다. 하지만 부상높이는 0.2-0.4 kW 사이에서 변하고 이후에는 마이크로파의 세기에 따른 영향이 크지 않은 반면 NOx의 배출 농도는 인가된 마이크로파의 강도에 따라 선형적으로 단조 증가함을 볼 수 있다. 마이크로파에 의한 부상높이의 감소는 연소속도의 증가로 이해할 수 있다. 기존 연구의 연료희박 메탄/공기 예혼합화염의 상호작용을 마이크로파의 세기에 따라 PIV로 조사한 결과에서 마이크로파의 세기가 증가될수록 연소속도가 증가하고, 정량적으로는 1.2 kW의 마이크로파의 세기에서는 약 35%의 연소속도 증가를 볼 수 있었다[6]. 따라서 예혼합화염과 유사한 부상 부분 예혼합화염의 경우에도 같은 해석이 가능하다. 또한 큰 마이크로파 세기에서 NOx의 증가는 연소속도의 증가처럼 반응성(reactivity)의 증가로 이해할 수 있고, 실제 후류에서의 열전대를 이용한 온도측정의 결과 1 kW의 마이크로파 세기에서는 약 40°C의 온도증가가 측정되었다. 하지만, NOx 생성기구 측면에서 결과를 이해하기 위해서는 마이크로파 인가에 의한 반응성의 증가 원인을 보다 구체화 할 필요가 있다. 즉, 반응성의 증가는 열적인 온도와 화학적인 반응기 농도 측면에서 생각할 수 있는데 현재의 실험을 통해서만 자세히 구분하기 어렵다. 전자기파의 강도에 따라 OH radical의 농도를 기준으로 3개의 영역으로 구분한 기존연구 결과[4]를 참조하면 마이크로파의 강도를 증가시켜 화염과 플라즈마 상태가 공존하는 “Transition stage”에 도달하기 전까지 OH radical 농도의 증가가 발견되어지지 않았으

므로 본 연구범위에서도 반응기에 의한 효과 보다 열적인 효과가 클 것으로 판단된다. 따라서 마이크로파에 의한 NOx의 증가는 thermal NOx 기구가 주된 생성기구로서 예측되고, 추후에 두 효과를 구분하여 보다 정확한 반응성 향상의 기구를 이해할 필요가 있다.

4. 결론

본 논문은 동축류 마이크로 제트화염을 이용하여 마이크로파의 인가가 화염안정성 및 NOx 배출에 미치는 영향을 연구하였다. 실험결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 연료와 산화제 유속에 따라 세 가지의 화염모드가 관찰 되었다. 상대적으로 낮은 산화제 유속일 때 전형적인 확산화염 형태인 부착화염이 관찰되었다. 연료 및 산화제 유속을 증가시키면 부상화염이 나타났는데, 부분적으로 휘염을 특성을 가지는 부상 휘염이 더욱 큰 산화제 유속에서는 휘염이 모두 사라지고 예혼합화염과 같은 형태를 보이는 부상 부분 예혼합화염(lifted partially premixed lifted flame)이 확인되었다.

2) 연료와 산화제 유속을 번갈아 고정 시켜 마이크로파 인가 후 화염길이와 부상 높이를 측정하여 연료유속효과와 산화제유속효과를 보았다. 두 가지 경우 모두 마이크로파로 인해 화염안정성이 증대되는 것을 확인 하였고, 화염길이의 경우 산화제 유속에 비해 연료유속의 영향이 더 큰 것을 확인하였다.

3) 부상 부분 예혼합화염 조건에서 마이크로파의 강도에 따라 배출되는 NOx 농도와 부상높이를 측정하였다. 마이크로파의 강도가 증가할수록 부상높이는 감소하였으며, NOx 배출량은 증가하였다. 이는 마이크로파 인가로 인한 반응성 증가로 연소속도가 증가하여 부상높이가 낮아졌으며 배출되는 NOx 농도는 화염의 온도상승효과로 증가되었다고 판단된다.

후기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2014년)에 의하여 연구되었음.

References

- [1] F.J. Weinberg, K. Hom, A. K. Oppenheim, K. Teichman, “Ignition by plasma jet”, Nature Vol. 272, No. 5651, 1978, pp. 341-343.
- [2] P. Fauchais, A. Vardelle, “Thermal plasmas”, IEEE

- Trans. Plasma Sci., Vol. 25, No. 6, 1997, pp. 1258-1280.
- [3] S. M. Starikovskaia, "Plasma assisted ignition and combustion", J. Phy. D: Appl. Phys., Vol. 39, 2006, pp. 265-299.
- [4] X. Raoa, K. Hemawanb, I. Wichmana, C. Carterc, T. Grotjohnb, J. Asmussenb, T. Leea, "Combustion dynamics for energetically enhanced flames using direct microwave energy coupling", Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 33, 2011, pp. 3233-3240.
- [5] S. Ogawa, Y. Sakai, K. Sato, S. Segal, "Influence of microwave on methane-air laminar flames", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 37, No. 1, 1998, pp. 179-185.
- [6] K. Takita, G. Masuya, T. Sato, Y. Ju, "Effect of addition of radicals on burning velocity", AIAA J., Vol. 39, No. 4, 2001, pp 742-744.
- [7] K. W. Hemawan, I. S. Wichman, T. Lee, T. A. Grotjohn, J. Asmussen, "Compact microwave re-entrant cavity applicator for plasma-assisted combustion", Rev. Sci. Instrum., Vol. 80, No. 5, 2009, 053507.
- [8] Y. C. Hong, S. C. Cho, C. U. Bang, D. H. Shin, J. H. Kim, H. S. Uhm, W. J. Yi, "Microwave plasma burner and temperature measurements in its flame", Appl. Phys. Lett., Vol. 88, No. 20, 2006, pp. 201502-201504.
- [9] E. S. Stockmana, S. H. Zaidia, R. B. Milesa, C. D. Carterb, M. D. Ryanc, "Measurements of combustion properties in a microwave enhanced flame", Combustion and Flame, Vol. 156, No 7, 2009, pp. 1453-1461.
- [10] Y. H. Jeon and E. J. Lee, "Characteristics of the microwave induced flames on the stability and pollutant emissions", Journal of the Korean Society of Safety. Vol. 29, No. 4, 2014, pp.2 3-27.