



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士學位論文

마이크로파가 인가된 메탄 제트화염의
안정성 및 오염물질 배출특성



安全工學科

全煥鏞

工學碩士學位論文

마이크로파가 인가된 메탄 제트화염의
안정성 및 오염물질 배출 특성

指導教授：李 義 周

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함



安全工學科

全 煥 鏞

全煥鏞의 工學碩士 學位論文을
認准함

2015年 2月



主 審 工學博士 吳 昌 備 (인)

委 員 工學博士 李 彰 峻 (인)

委 員 工學博士 李 義 周 (인)

Characteristics of the microwave induced flames on the stability and emissions

Young Hoon Jeon

Department of Safety Engineering, Graduate School,
Pukyong National University

Abstract

The usages electromagnetic energy and non-equilibrium plasma for enhancing ignition and combustion stability has been gaining more attention recently. The conventional technologies have adapted the electrical devices to make the electromagnetic field, due to various safety issues such as high-maintenance, additional high-cost system, electric shock, explosion, etc. Therefore, an electrodeless microwave technology has an advantage in term of efficiency economic and reliability as comparing with conventional one because of no oxidation. However, the application of microwave has been still limited because of the lack of interaction mechanism between flame and microwave. In this study, the experiments were performed with jet diffusion flames and lifted partially premixed flame induced by microwaves to clarify the effect of microwave. The burner used in this experiment consisted of coaxial tubes. Methane and compressed air were used as a fuel and a oxidizer. Waveguide system which designed to provide for more efficient coupling of the microwave power into the flame was used.

There was a noticeable difference on the flame stability according to the

microwave intensity induced on the co-flow diffusion flames. When 1 kW microwave was applied, unstable flames such as rotating flames tended to be stabilized and the blowout limit was extended. The enhancement of stability is mainly due to the heating of combustion field and abundance of radical pool by microwave. NO_x emissions increased according to microwave intensity in most cases. However, decreased at the conditions of high fuel velocity and low microwave intensity. It may be attributed to the competition of CH radical consumption during NO_x and soot formation. Morphology of soot collected in the downstream of microwave induced flames was similar to the early soot, amorphous and not aggregates. This indicates that mature soot generated in flames completely may be oxidized along the longer yellow flame region. In the case of lifted partially premixed flame NO_x emission was increased and lift-off height was decreased with increasing microwave intensity. Those are mainly due to the heating of combustion field and abundance of radical pool by microwave, i.e., increasing NO_x emission by heating effect and decreasing lift-off height by increased burning velocity. When the induced microwave position was changed on the longitudinal axis of flame, NO_x emission and lift-off height were maximized on the lifted partially premixed flame position corresponding to microwave, which implies that the primary reaction zone governs the overall flame characteristics under inducing a microwave.

목 차

ABSTRACT	i
목차	iii
제 1 장 서 론	1
1.1 연구 배경 및 목적	1
1.2 기존의 연구	4
제 2 장 마이크로파가 인가된 제트화산화염	10
2.1 실험장치 및 방법	10
2.1.1 버너와 유로계	10
2.1.2 웨이브가이드 시스템	10
2.1.3 실험방법 및 조건	13
2.1.4 TEM analysis	13
2.2 결과 및 고찰	14
2.2.1 화염 형상 및 안정성	14
2.2.2 오염물질 배출특성	16
2.2.3 주파수 변화에 따른 오염물질 배출 특성	21
제 3 장 마이크로파가 인가된 부분예혼합 부상화염	26
3.1 실험장치 및 방법	26
3.2 실험결과 및 고찰	29
3.2.1 화염안정화 특성	29
3.2.2 부상높이 및 NO _x 배출 특성	35
제 4 장 결론	41
참고문헌	45

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

일반적으로 직류 아크나 유도결합 방전으로 플라즈마 상태로 발생시키는 이온화된 열 유체인 열 플라즈마(thermal plasma)는 재래식 연소에 의한 화학적 반응으로 발생시킬 수 없는 초고온, 대열용량, 고속, 다량의 활성입자를 갖는다. 열 플라즈마는 고온제어와 폭넓은 출력의 자유스러운 조정이 가능하고 빠른 열 및 물질 전달 능력을 가지고 있으며 다양한 기체들이 열 유체로 쉽게 전환될 수 있어서, 한계에 다다른 기존 열 유체 발생기술을 대체하여 신속한 가공 및 공정처리로 효율적이며 환경면에서 깨끗한 초고온 열원으로 제공되어, 제조 및 나노소재 산업과 환경산업의 생산기반과 첨단설비에 핵심이 되는 열 유체로서 이용되고 있다 [1].

열 플라즈마 응용기술은 이미 국내 소재산업에 다방면으로 보급되고 있고, 더욱 고기능화 된 신소재 생산 공정과 보다 친환경적인 폐기물 처리기술에 대한 수요가 증대되고 있는 상황이어서 플라즈마 토치와 같은 열 플라즈마 발생장치의 연구개발이 꾸준히 이루어졌고, 다양한 분야에서 사용되고 있다. 원리적으로 플라즈마 토치는 두개의 전극봉 사이에 아크 플라즈마(arc plasma)를 생성시키는 기구이다. 플라즈마 토치는 dc 아크 토치, induction 토치, 고주파 cavity 토치 등 다양한 종류가 있다. dc 아크 토치는 두 전극봉 사이에 전기장에 의해 작동되는데 수만 암페어의 극단적인 아크 전류의 환경에서 작동된다. 따라서 전기봉은 금속재질 표면의 산화 특성에 의한 제한된 수명 때문에 주기적으로 교체해주어야 하는 불편함이 있다. 거의 모든 라디오파 토치는 inductively coupled discharge로서 일반적인 열효율은

40-50%의 범위에 있다 [2]. 이러한 일반적인 토치는 또한 매우 작은 체적의 플라즈마를 포함하고 있으며 큰 운영비용과 부과적인 고가의 시스템을 동반한다. 비록 일반적인 플라즈마 토치가 많은 산업현장에서 사용되지만 경제적, 내구성 등의 여러 문제에 기인하여 널리 적용되지는 않고 있을 뿐 아니라 환경적인 적용에는 사용되지 못하고 있는 실정이다. 따라서 이러한 일반적인 플라즈마 토치가 가지고 있는 기존의 문제점을 해결하기 위해 전극봉이 없는 대기압 하에서의 마이크로파 플라즈마 토치 등의 시스템이 개발이 필요하다.

한편 기존의 탄화수소 계 연료의 연소에서는 화염안정성 및 고효율의 문제가 대두되어 지난 수십 년간 순 산소 연소 등의 기법이 제안되어 상용화되었고, 환경적 측면에서 NO_x 등 오염물질 저감을 위해 EGR, mild combustion 등 여러 가지 방법론이 적용되고 있다. 하지만 재료적 측면이나 경제성에 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 점화와 연소안정성에 대한 잠재적 능력 때문에 많은 관심을 가져왔다. 특히 고효율 열에너지 교환, 가연한계의 확장, 연소 측면에서 사용하기 힘든 여러 저급 연료나 합성가스들의 신뢰할 수 있는 점화, 다양한 연소특성을 가지고 있는 물질들의 이용측면에서 활용이 예상된다. 또한 차세대 추진시스템에서도 이를 긍정적으로 고려하고 있다 [3].

플라즈마의 연소에의 적용 가능성은 매우 크지만, 이를 실제 응용에 적용하기 위한 기초적인 물리적인 기구규명은 여전히 부족한 실정이어서 플라즈마에 의해 화염반응이 증대되는 정확한 기구는 여전히 활발히 연구되어지고 있다. 기존 연구결과에 의하며 전자기 에너지가 반응 화학에 제공하는 대략적인 기구를 제시하고 있다 [4]. 큰 탄화수소계 연료의 작은 연료로의 분해와 전자와의 충돌에 의한 라디칼

의 생성, 반응기 유도된 전자의 활성화, 열적(Ohmic) 가열에 의한 화염온도 증가, 여기된 상태의 화학종, 이온, 전자의 증가, 순간적인 연료의 개조(reformation)등 이다. 하지만 실제 이용측면에서 설계인자를 도출할 수 있는 조건별 기구는 아직 밝혀지지 않았으며, 다양한 오염물질의 생성 등에 대해서도 많은 부분이 불명확하다. 그러므로 이러한 전자기장학과 연소반응의 결합은 향후 큰 도전과제이며 더 많은 지식과 연구가 요구된다고 할 수 있다. 특히 산업적으로 가장 많이 사용되고 있는 화염의 형태인 제트에 대해서 플라즈마의 적용은 물리적인 기구의 이해와 직접적인 이용측면에서 매우 중요한 대상이라 할 수 있다. 따라서 이러한 화염-플라즈마 결합 및 내구성향상을 위한 마이크로파의 사용이라는 두 가지의 목적에 상응하는 탄화수소계 연료 제트화산화염에 마이크로파를 적용하여 연소특성을 높이는 기초 연구가 필요하다.

본 연구에서는 화염 안정성 및 오염물질 생성에 대해 마이크로파 인가특성을 조사하기 위해, 산업에서 일반적으로 사용하고 있는 제트화산화염과 부분 예혼합화염을 대상으로 연구를 수행하였다. 제트화산화염의 경우 마이크로파의 세기에 따른 화염안정성과 NO_x 및 매연생성 특성을 조사하였다. 부분 예혼합 부산화염의 경우에는 화염안정성과 NO_x 배출특성과 함께 마이크로파의 조사 위치 효과 및 마이크로파 인가 시 발생하는 희석효과, 열적효과 그리고 화학적 효과를 구분하여 조사하였다. 향후 이를 이용하여 사용목적에 맞는 마이크로파 연소기법으로 사용할 수 있을 것으로 기대된다.

1.2 기존의 연구

플라즈마를 이용한 제트형태는 산업적으로 플라즈마 토치가 가장 대표적인 예이다. 연료의 공급 없이 순수한 플라즈마 토치는 기존의 문제점을 해결하기 위해 전극봉(electrode)이 없는 대기압 하에서의 마이크로파 플라즈마 토치가 개발되었다 [5]. 마이크로파 플라즈마 대기압 하에서 작동되며, 특히 waveguide based 플라즈마, 지난 십년간 많은 관심을 가지고 있었다. 이러한 관심은 다양한 분야의 적용 가능한 잠재적 능력과 실제 사용 때문인데, 원소분석을 위한 여기소스, 빛, 환경적으로 해로운 오염물질의 정제 및 개질 등에 사용된다. 또한 다른 글로우 방전플라즈마 등에 비해 마이크로파 토치는 간단하고, 작으며 경제적이다 할 수 있다 [2]. 더 나아가 이전의 연구에서 마이크로파 플라즈마 토치는 다양한 적용분야가 있음이 밝혀졌는데, 카본 나노튜브의 합성 등이 대표적인 예이다. 비록 공기방전에서 마이크로 플라즈마 토치가 저렴한 방법으로 높은 플라즈마 밀도와 가스 온도를 제공하지만, 플라즈마 체적과 온도가 방전튜브 외부에서 급격히 감소하므로 큰 용량의 폐기물을 처리하는데 제한적인 능력을 가지고 있다.

마이크로파 분위기에서 탄화수소 기체나 액체 연료를 연소시키면 매우 큰 고온 플라즈마 화염을 생성할 수 있다. 마이크로파 플라즈마 분위기에서 탄화수소연료의 완전반응은 플라즈마 화염 체적을 증가시키고, 온도를 상승시키며 고온에서의 대상 물질의 체류시간을 증가시키기 때문이다. 따라서 최근 이에 관한 실험적 연구가 시작되고 있는데 연구결과를 크게 두 가지 측면에서 고려할 수 있다. 첫 번째는 마이크로파를 생성시키는 방법론이고, 다른 하나는 마이크로파가 화염특성에 미치는 영향이다. 먼저 마이크로파는 현재까지의 실험에서는 Fig. 1.1과 같이 두 가지의 방법을 응용하여 이용하고 있다. Fig. 1.1(a)에서는 화염이 있는 위치에서 조절 가능한

마이크로파 분위기를 형성시키기 위해 별도의 생성기 및 waveguide를 이용한다 [6]. magnetron에서 생성된 마이크로파는 directional coupler와 tuner를 지나 일정한 파워와 파장의 마이크로파장을 챔버에서 형성시키고, 이 분위기에서 화염의 특성을 측정한다. 이 방법은 비록 부과적인 장치의 크기가 커지는 단점이 있지만 마이크로파의 조절이 매우 용이하고 보다 예측가능하고 정규화 된 마이크로파의 필드를 얻을 수 있다. Fig. 1.1(b)는 마이크로파의 생성기를 버너 내부에 적용하여 cavity 방식으로 제작한 경우이다 [4]. 이 방법은 보다 컴팩트한 설계가 가능하여 소규모 기기제작을 통한 산업에 적용가능성이 하다는 장점이 있지만, 생성되는 전자기장의 분포를 다시 해석하여야한다는 어려운 점이 있다.

연소에서의 마이크로파 복사는 이전에는 소수의 연구가 존재하였지만, 최근 많은 연구자들에 의해서 연구되고 있다. 예를 들면 Ogawa 등 [7]은 2.45 GHz로 여기 된 cavity resonator에서의 CH₄/air 층류화염의 마이크로파 영향을 조사하기 위해 연소 후 가스온도, 밝기, 전자온도 등을 측정하였다. 결과는 마이크로파에 의한 연소 증대는 반응영역에서 전체 가스의 마이크로파 가열에 의해 결론지었고, 따라서 높은 온도를 얻을 수 있다고 하였다. Fig. 1.2는 Fig. 1.1(a)의 장치에서 마이크로파와 당량비 0.78의 연료희박 메탄/공기 예혼합화염의 상호작용을 마이크로파의 세기에 따라 PIV로 조사한 결과이다 [6]. 마이크로파의 세기가 증가될수록 연소속도가 증가하고, 정량적으로는 1.2 kW의 마이크로파의 세기에서는 약 35%의 연소속도 증가를 볼 수 있다. 이를 통해 혼합기의 반응성이 마이크로파에 의해 향상됨을 볼 수 있다.

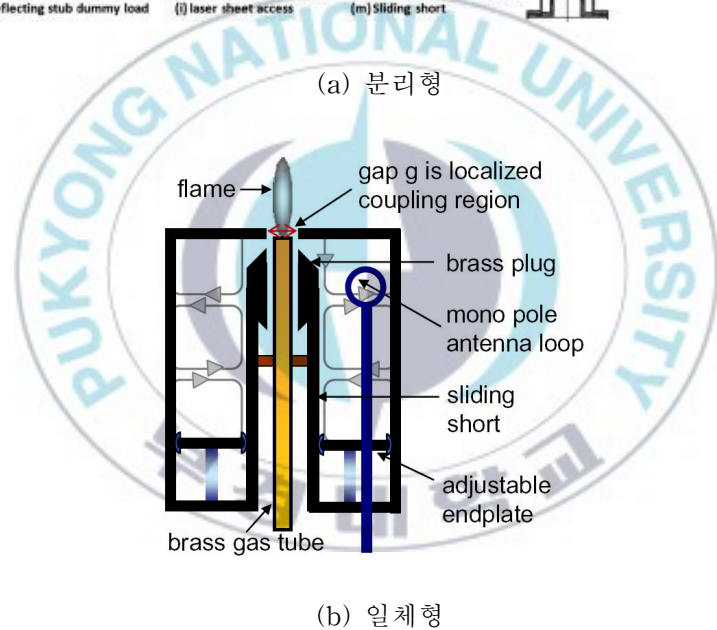
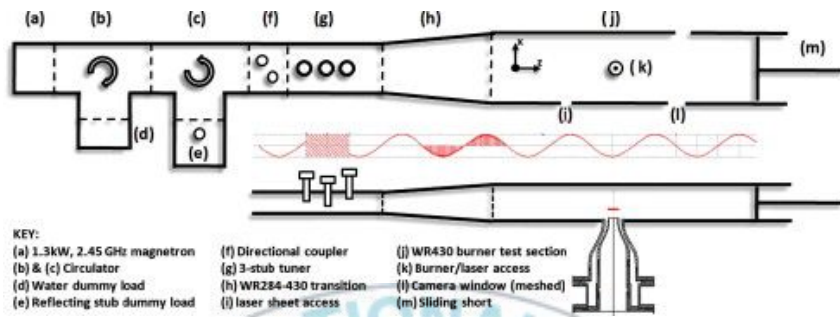


Fig. 1.1 Microwave apparatus of generation and interaction with flame.

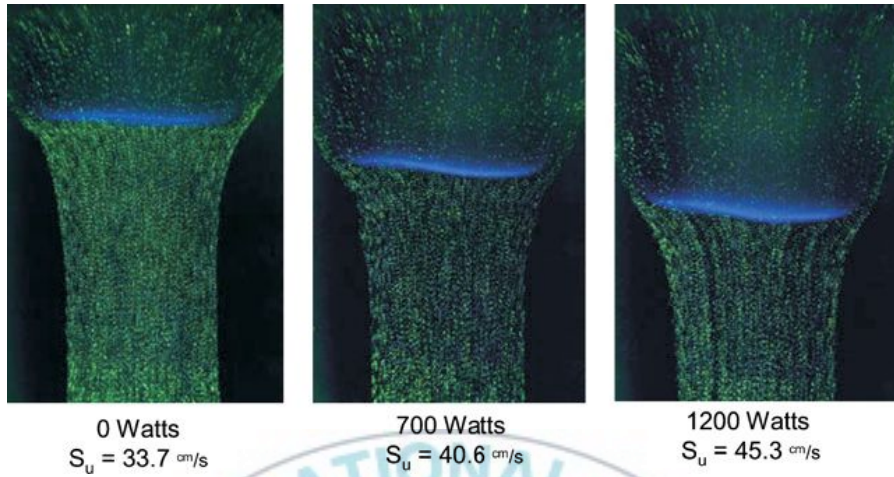


Fig. 1.2 Burning velocity PIV images of premixed flame with microwave intensity.

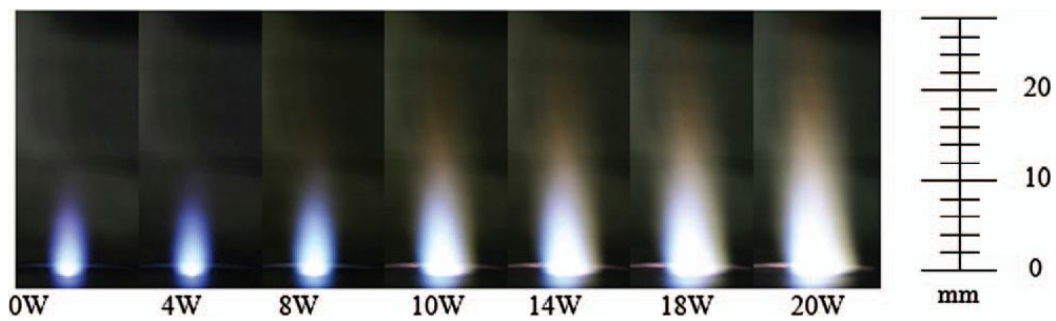


Fig. 1.3 Flame images with plasma intensity.

마이크로파와 연료제트와의 상호작용에 대한 연구는 초기에는 주로 실제적인 문제에서 시작되었다. 특히 1970년대의 플라즈마 토치 점화기에 대한 실험적인 연구로부터 많은 연구가 시작되었는데, 연소에서 플라즈마 토치의 이점은 반응기 풀(radical pool)과 고온의 생성으로서 역할을 정의 할 수 있다. 최근에는 Takita 등 [8]에 의해서 혼합기에서의 반응기 수 증가와 높은 온도에 기인한 반응기들의 첨가에 의한 연소속도(burning velocity)상당한 증가가 보여 졌다. 또한 Masuya 등은 H₂, H₂/air, O₂/N₂의 점화가 아크 토치에 의한 고온 공기에서의 점화를 고찰하였다. Fig. 1.3은 cavity 형태의 마이크로파 버너에서의 마이크로파의 세기에 따른 플라즈마 제트확산화염을 도시하였다 [9]. 마이크로파의 세기가 커질수록 발광하는 화염의 길이가 길어지고 더 강한 화염이 생성되는 것을 볼 수 있다. 이러한 마이크로파에 의한 플라즈마 효과는 Fig. 1.4와 같이 전자기파의 파워에 따라 크게 3영역으로 구분할 수 있다 [4]. OH radical 의 농도를 기준으로 나누면, 파워가 작은 경우에는 약한 전지장의 영향으로 큰 OH radical의 증가가 발견되어지지 않는 “Electrical field enhanced stage”이고, 마이크로파의 세기가 커질수록 플라즈마의 영향이 커져 화염과 플라즈마 상태가 공존하는 “Transition stage”를 지나 플라즈마가 전체 반응을 결정하는 “Full plasma stage”로 바뀌게 된다.

위와 같이 최근에 마이크로파와 탄화수소 연료화염과의 상호작용은 많이 연구되고 있지만 [10], 전체적으로 물리적인 기구의 규명은 아직도 이루어지지 않고 있다. 주된 이유로는 화염은 각 위치별로 서로 다른 특성을 가지고 있는 구조로 되어 있는데 마이크로파와의 상호작용을 전체적인 측면에서만 다루고 있기 때문으로 판단된다. 특히 화염의 안정성과 오염물질의 배출특성 등은 이러한 화염구조와 매우 밀접한 관련이 있으므로 향후 이 기술이 발전하기 위해서는 화염의 각 구조에 따른 마이크로파의 작용에 의한 플라즈마 영향을 반드시 고찰하는 것이 향후 앞으로의

과제라 할 수 있다.

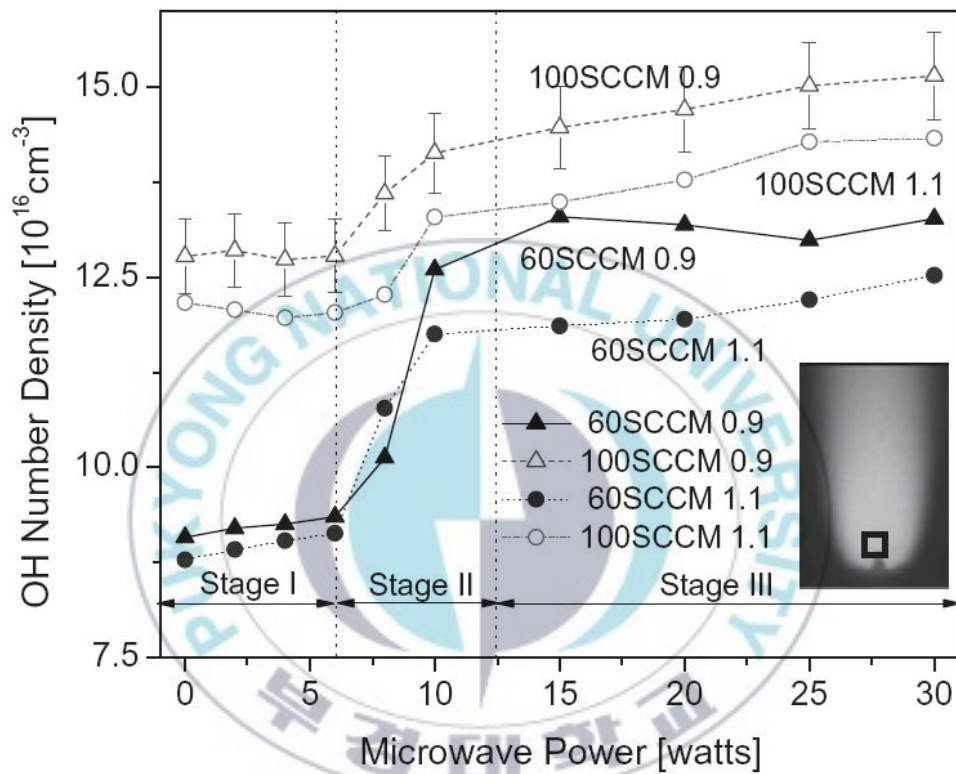


Fig. 1.4 Jet flame field with OH radical density in microwave intensity.

제 2 장 마이크로파가 인가된 제트확산화염

2.1 실험장치 및 방법

2.1.1 버너와 유로계

Fig. 2.1에 실험에 사용된 대략적인 기본장비 및 유로계를 나타내었다. 실험에 사용된 버너는 실린더형 동축류 버너로써, 연료노즐의 내경은 7.5 mm이고 노즐 두께에 의한 영향을 최소로 하기 위해 테이퍼 가공을 하였다. 산화제 노즐의 내경은 20 mm이고 균일한 유속을 얻기 위해 1/6.5의 cut-area 율을 가진 contraction 타입으로 제작 하였다. 또한 그 내부에 직경이 약 2 mm인 비드(bead)를 채워 버너 팁(tip)에서의 초기유속이 버너 직경 전 구배에 걸쳐 균일하게 하였다. bubble meter로 검증된 MFC(Mass Flow Controller)로 유량을 정밀하게(오차범위 $\pm 1\%$ 미만) 제어하였으며, 기초실험으로서 연료는 메탄(CH_4)으로 선정했으며 순도 99.9%를 사용하였고 산화제는 압축공기를 사용하였다.

2.1.2 웨이브가이드 시스템

화염에 마이크로파를 더욱 효과적으로 인가하기 위해 Fig. 2.2에 나타낸 것과 같이 웨이브가이드시스템(Waveguide System) 장치를 제작하여 사용하였고, 주된 목적은 정상파(Standing Wave)를 발생시켜 원하는 위치에 인가함에 있다[11]. 장치

구성은 마이크로파를 손실 없이 전파하기 위해 웨이브가이드(Waveguide, WR-430)를 사용하였으며 2.45 GHz, 1 kW Magnetron을 사용하여 마이크로파를 발생시켰다. 여기에 Sliding Short로 마이크로파의 파장길이를 고려하여 조절, 정상파를 발생시켰고 3-Stub Tuner를 이용하여 위상(Phase)을 조정하여 정상파를 일정하게 만들었다. Directional Coupler로 마이크로파의 입사파, 반사파를 감쇠기를 통해 조금씩 흡수하여 Power Meter를 통해 마이크로파가 화염에 흡수되는 것을 확인하였으며 Circulator와 Dummy Load를 사용하여 반사파가 Magnetron에 충격을 주지 못하게 하였다.



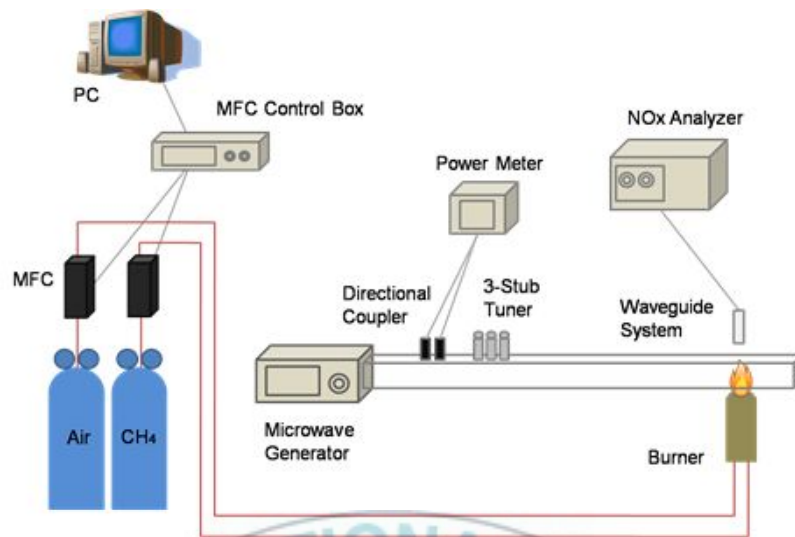


Fig. 2.1 Schematic of experimental set up.

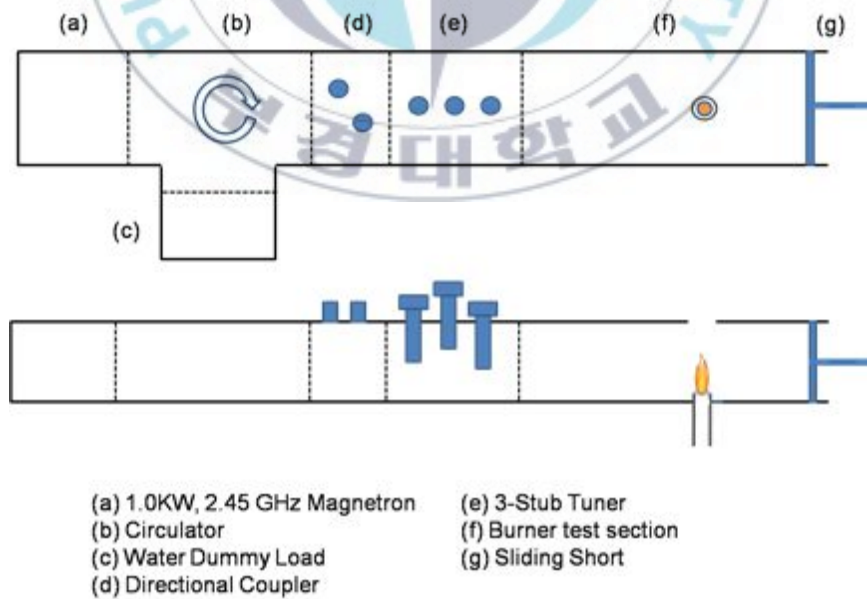


Fig. 2.2 Schematic of waveguide system.

2.1.3 실험방법 및 조건

실험조건은 Test Section의 제한적인 공간과 화염에 대한 마이크로파의 효과를 고려하여 연료유속을 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 연료유속 조건에서 산화제 유속을 증가시키면서 화염에 마이크로파 인가에 따른 영향을 Test Section 가시화창을 통해 관찰하였고 캠코더(SONY, HXR-NX30N)를 통해 60fps의 속도로 촬영하여 이미지를 분석하였다. 화염온도는 화염의 후류에 K type 열전대(thermocouple)를 이용하여 측정하였으며 또한 Test Section hole 수직인 곳에 가스분석기(ECOM, J2KN) probe를 위치시켜 NOx Emission을 분석 하였다.

2.1.4 TEM analysis

매연의 형상학적인 모습을 관찰하기 위해 투과전자현미경(Transmission Electron Microscope, TEM) 촬영을 하였다. 먼저 직경이 2 mm인 원형 탄소 그리드(grid)를 화염 끝단으로부터 1cm 떨어진 지점에서 약 1s 노출시켜 매연을 포집하였다. 이렇게 포집된 매연을 TEM(JEOL 社, model ; JEM-2010)을 사용하여 확대시킨 이미지를 얻었다.

2.2 결과 및 고찰

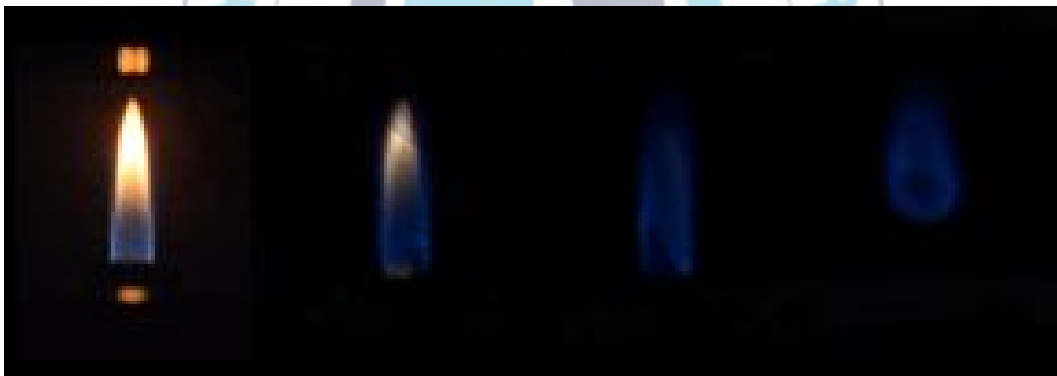
2.2.1 화염 형상 및 안정성

Fig. 2.3에 연료의 유속을 고정하고 산화제의 유속을 증가시켰을 때의 가시화 창을 통한 화염의 형상을 마이크로파를 인가하지 않았을 경우와 1kW의 마이크로파를 인가하였을 경우로 구분하여 나타내었다.

산화제의 유속이 증가함에 따라 화염형상에 따른 3가지의 화염 모드를 Fig. 2.3(a)을 통해 확인할 수 있다. 산화제 유속이 상대적으로 작을 때 메탄/순수공기 화염의 전형적인 모습 형태인 stable flame, 산화제 유속을 더욱 증가시키면 화염이 flickering을 보이다가 화염의 한쪽 부분이 부상(lift) 되는 partially attached flame 발생하였으며 산화제의 유속이 매우 커지면 화염이 부상하여 회전하는 rotating flame이 나타났다. 이후 산화제 유속을 더 증가시키면 화염날림(blow out)이 발생하며 소화 되었다. 하지만 같은 연료/산화제의 유속 조건에서 1kW 마이크로파를 인가하였을 때 산화제 유속이 상대적으로 작아 안정한 화염에서는 화염의 휘염도(luminosity)와 길이가 증가된 것을 확인할 수가 있으며 partially attached flame, rotating flame에서도 화염이 전반적으로 안정해지는 모습을 Fig. 2.3(b)를 통해 확인할 수가 있다. 특히 산화제 유속이 매우 큰 조건에서는 화염날림이 발생하지 않고 부상하며, 소화되지 않는 것을 통해 보다 마이크로파의 직접적인 화염안정성 향상 효과를 알 수 있었다.



(a) No microwave



(b) 1 kW input power of microwave

Fig. 2.3 Direct photos of CH₄-Air flames with increase of Air velocity.

연료와 산화제의 유속을 변화시켰을 때 화염형상에 따른 분류와 화염안정성을 Fig. 2.4에 도시하였다. 전체적으로 화염형상의 경향은 마이크로파의 인가 유무에 따라 크게 바뀌지 않았다. 하지만 모든 유속 영역에서 화염 안정성은 크게 증가한 것을 확인 할 수가 있다. 이와 같은 화염안정성의 증대는 마이크로파를 인가 하였을 때 연소반응에서 반응기 풀(radical pool)이 풍부해지고 연소장(combustion field)의 온도를 증가 시켰기 때문이라고 판단된다 [14]. 화염날림 현상의 경우 높은 연료 유속에서는 안정성이 좋아지지만 상대적으로 저속의 연료 유속인 7.5 cm/s 근처에서는 한계속도가 존재하여 마이크로파의 유무에 크게 영향받지 않음을 확인할 수 있다.

2.2.2 오염물질 배출특성

NO_x Emission은 연료와 산화제 유속을 고정 시킨 상태에서 마이크로파 세기에 따른 NO_x 배출량을 분석하여 Fig 2.5에 나타내었다. 본 실험에서 최고 1 kW의 마이크로파를 인가하였을 때 NO_x 배출량이 인가하지 않았을 때에 비해 약 30%의 증가치를 보였으며, 전반적으로 마이크로파의 세기가 증가함에 따라 NO_x 배출량 또한 증가 되는 경향을 보였다. 이는 기존의 화염온도에서 마이크로파 인가시 화염의 온도가 증가하여 Thermal NO_x의 발생량이 증가했기 때문이라고 판단된다. 하지만 Fig. 2.5(b)에서 보듯이 상대적 높은 연료속도에서는 0.2kW 결과와 같이 낮은 마이크로파 세기에서 오히려 NO_x 발생이 감소됨을 볼 수 있다. 이러한 특성은 NO_x 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.

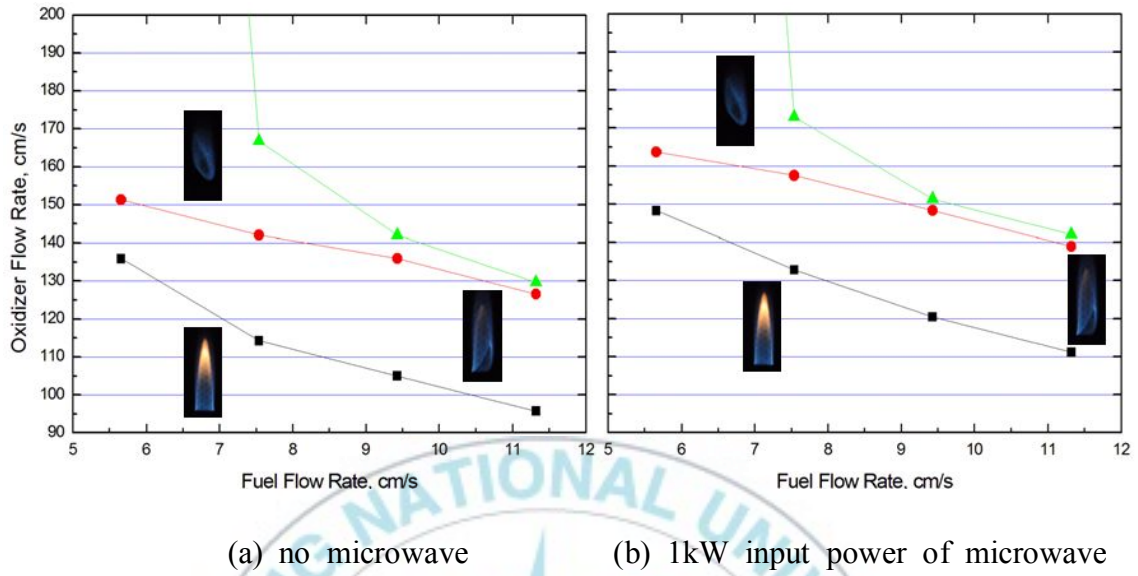


Fig. 2.4 CH₄-Air flames stability curve.

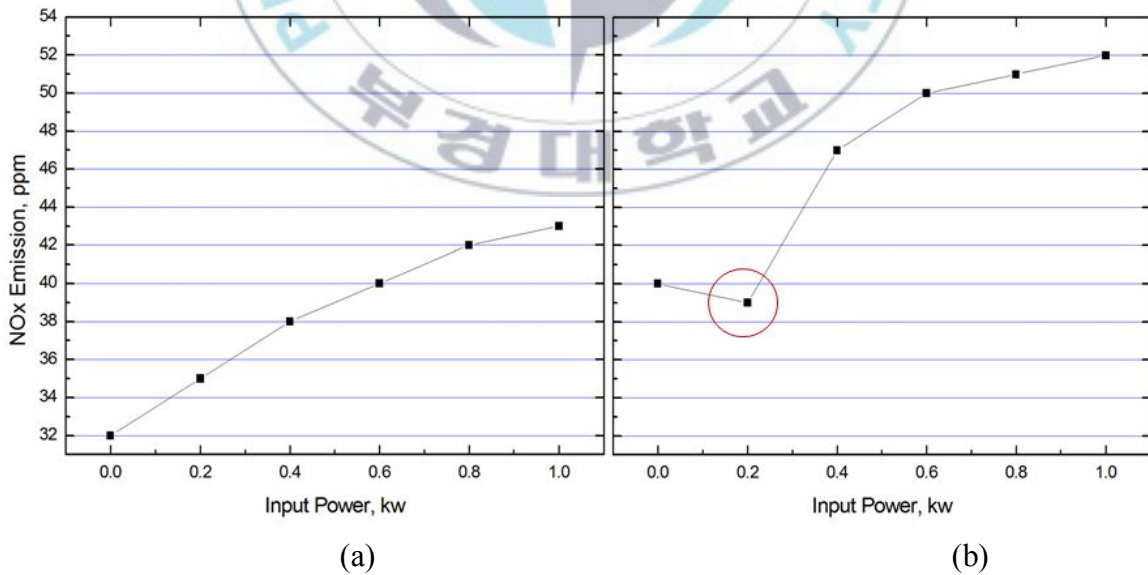
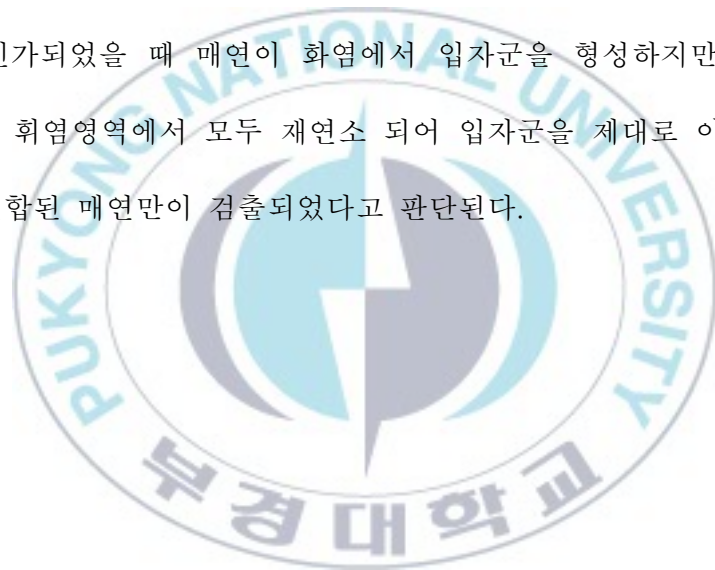
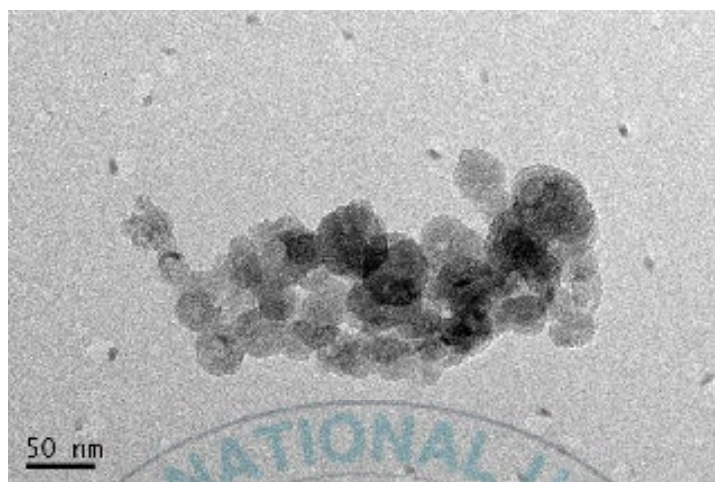


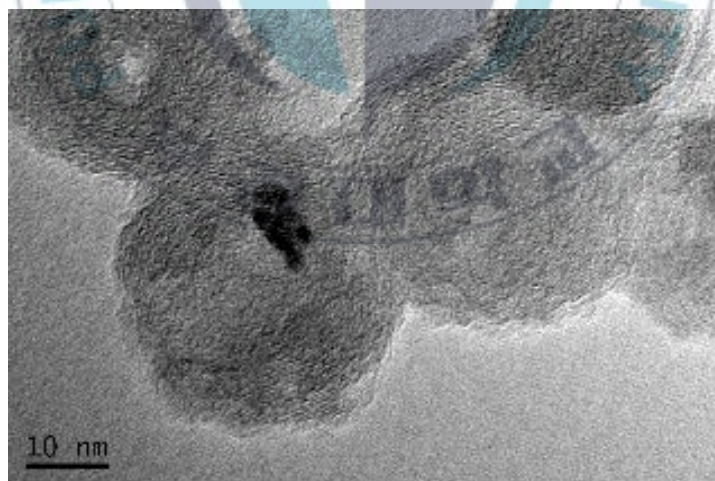
Fig. 2.5 Variation in NO_x emission with microwave input power in a CH₄-Air flame. (a) 7.5cm/s CH₄ and 61.8 cm/s Air (b) 9.4cm/s CH₄ and 61.8cm/s Air.

Fig. 2.6은 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. 2.6(c)와 Fig. 2.6(d)는 1kW의 마이크로파를 인가한 조건에서의 매연형상 사진이다. (a)와 (b)에 비해 매연이 성장하지 못해 입자군을 이루지 못한 초기입자들과 비슷하나 일부 액화된 물질과 결합된 형상을 보였다. 이를 통해 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 모두 재연소 되어 입자군을 제대로 이루지 못하고 액화된 물질과 결합된 매연만이 검출되었다고 판단된다.





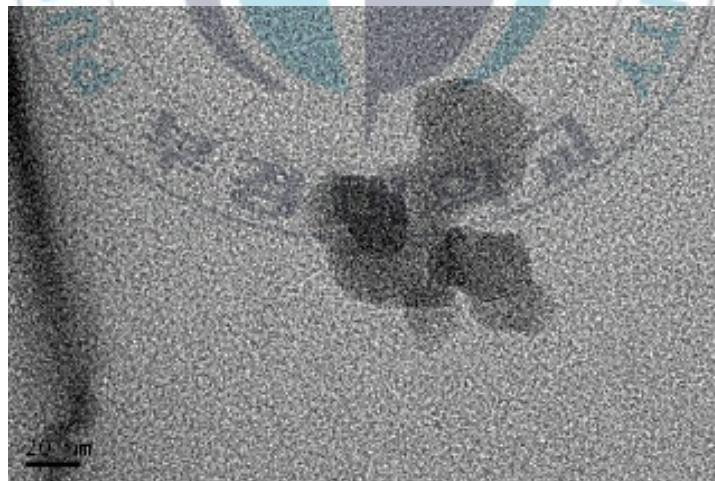
(a) scale bar: 50 nm



(b) scale bar: 10 nm



(c) scale bar: 20 nm



(d) scale bar: 10 nm

Fig. 2.6 TEM images of soot with the velocity of 11.3 cm/s CH₄ 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.

2.2.3 주파수 변화에 따른 오염물질 배출 특성

실험은 연료의 유속을 각 조건에 따라 고정시키고 산화제 유속을 화염부상이 발생하는 순간까지 높여가면서 수행하였다. Fig. 2.7에서 나타낸 것과 같이 화염의 주파수에 따라 Flickering frequency와 Oscillation frequency 나누었다. Flickering frequency의 경우 화염 전체가 축방향으로 진동을 하며 이는 화염 주변 공기가 화염에 의해 온도가 상승하여 상승된 주변공기의 밀도가 낮아져 발생하는 부력 때문에 나타난다. Oscillation frequency는 화염의 tip 부분에서 부분적으로 진동하는 것으로 Flickering frequency 모드에서 산화제 유속을 증가시켰을 때 나타났다. 이것은 산화제 유속이 증가하면서 화염에 의한 주변 공기의 온도가 충분히 상승하지 못했기 때문이다. Fig. 2.8은 고정된 연료조건에서 산화제 유속을 증가시켰을 때 마이크로파에 따른 화염의 주파수 특성을 도시하였다. 마이크로파의 인가에 따른 주파수 특성은 증가되는 경향을 보였다. 또한 특정한 지점에서는 마이크로파에 의한 주파수 특성이 바뀌는 것 또한 확인 할 수 있다. 이는 리차드슨 수(Richardson number)정의에 마이크로파로 인한 화염의 온도 상승효과 때문에 같은 유속에서 혼합기의 밀도 차의 증가로 frequency가 증가 되었다고 사료된다. 마이크로파로 인한 화염의 온도 상승효과는 Fig. 2.9에 나타내었다. 다음은 리차드슨 수 정의이다..

$$f = f(Ri), Ri = \frac{\Delta\rho g L}{\rho U^2} = \frac{\Delta\rho}{\rho} \cdot \frac{1}{Fr}, Fr = \frac{U^2}{gL} = \frac{(V_{fuel} - V_{oxi})^2}{gL}$$

여기서 ρ 는 밀도, g 는 중력가속도, L 은 대표길이, U^2 은 연료유속과 산화제유속 차의 제곱을 의미한다. 위 식에서 다른 변수들은 거의 변화가 없는데 반해 밀도차(Δ

p)는 마이크로파로 인한 온도 상승효과로 증가하여 주파수가 증가되는 것을 알 수 있다. 이와 같이 리차드슨 수를 이용하면 본 연구결과의 주파수 증가 설명이 가능하다. 주파수 특성에 따른 NOx Emission은 Fig. 2.10에 나타냈다. NOx Emission의 경우 주파수 모드에는 크게 영향을 받지 않는 것으로 확인 되었다. 앞에서 확인한 것과 같이 마이크로파로 인한 화염온도 상승으로 NOx Emission 증가만이 확인 되었다.





(a)



(b)

Fig. 2.7 Direct photos of CH₄-Air flames with frequency. (a) flickering frequency, $V_f = 9.4$ cm/s $V_{oxi} = 6.2$ cm/s. (b) oscillation frequency, at $V_f = 6.2$ cm/s $V_{oxi} = 18.5$ cm/s

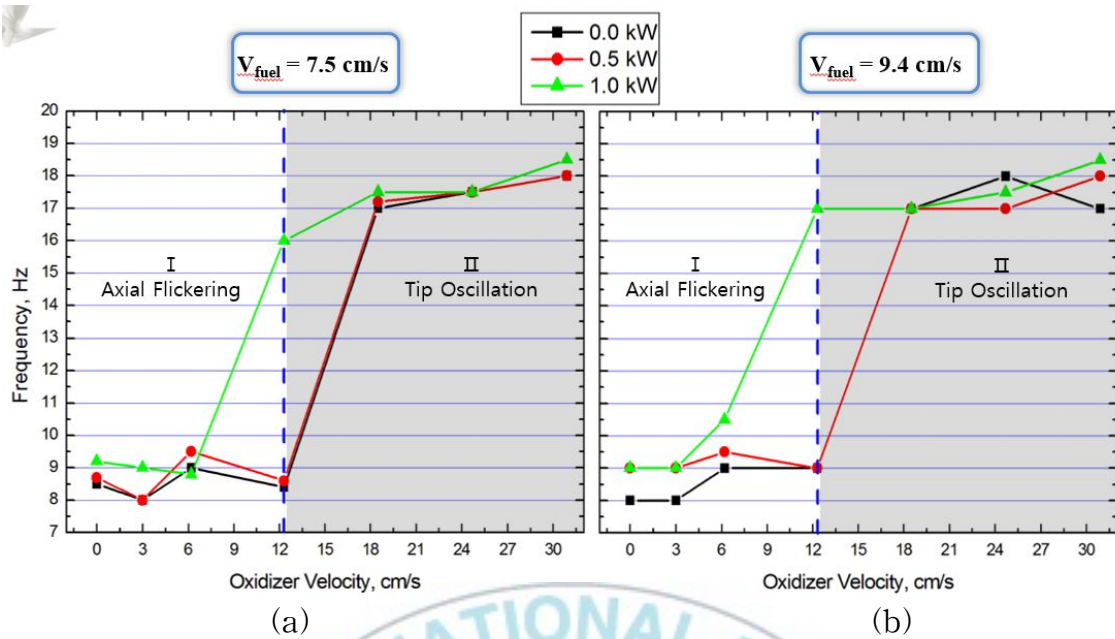


Fig. 2.8 Variation in frequency with microwave input power and oxidizer velocity in a CH₄-Air flame. (a) 7.5cm/s CH₄ (b) 9.4cm/s CH₄

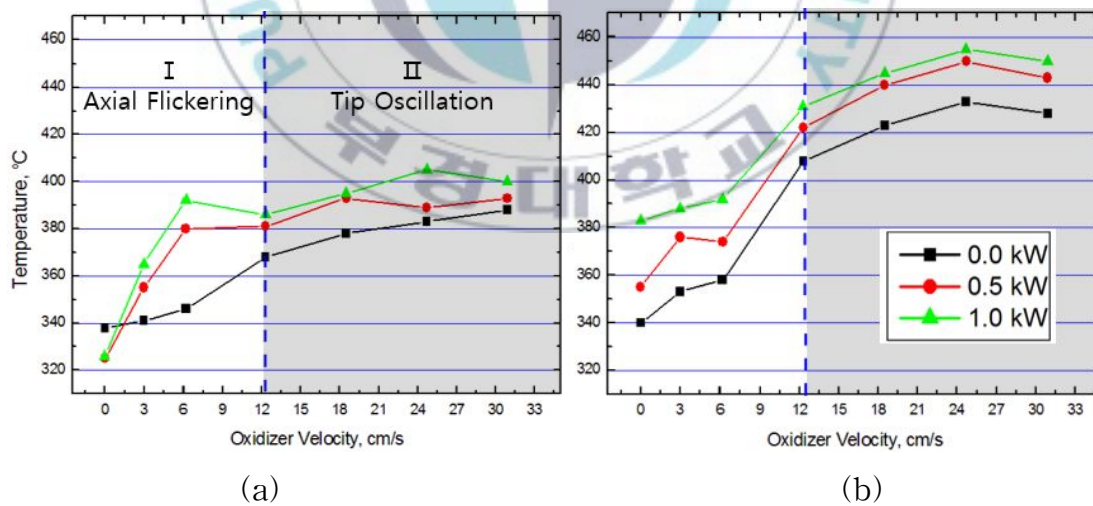


Fig. 2.9 Variation in Temperature with microwave input power and oxidizer velocity in a CH₄-Air flame. (a) 7.5cm/s CH₄ (b) 9.4cm/s CH₄

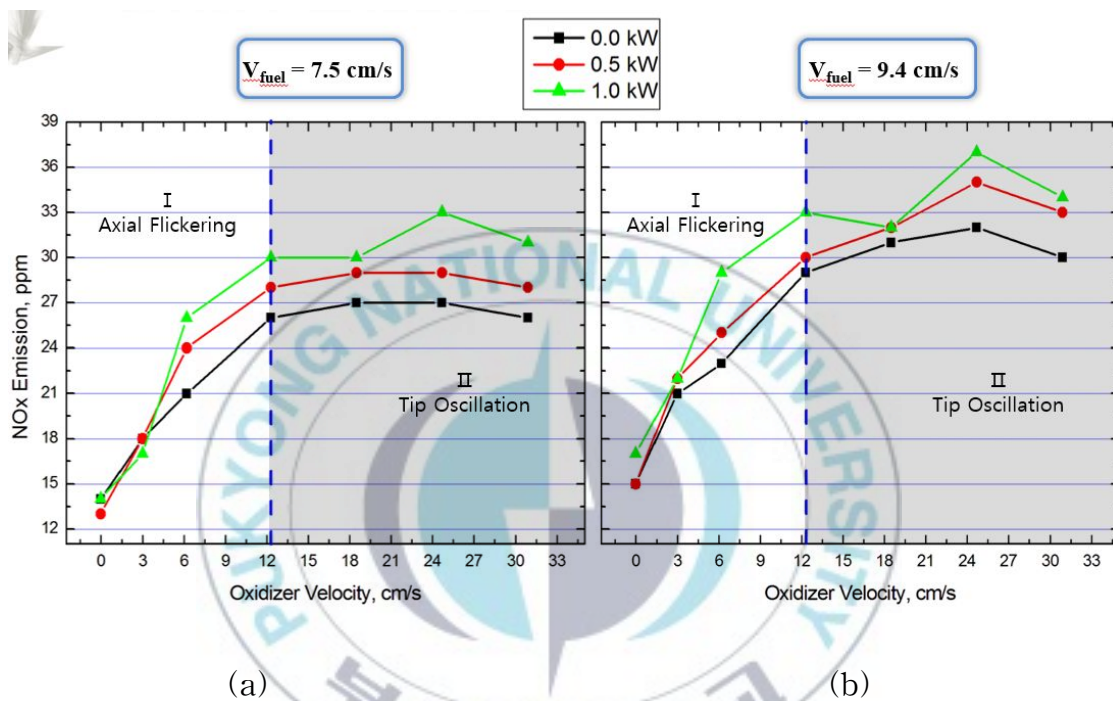


Fig. 2.10 Variation in NOx Emission with microwave input power and oxidizer velocity in a CH₄-Air flame. (a) 7.5cm/s CH₄ (b) 9.4cm/s CH₄

제 3 장 마이크로파가 인가된 부분예혼합 부상 화염

3.1 실험장치 및 방법

마이크로파 인가를 위한 시스템은 앞의 2.1절에 기술한 시스템과 동일하게 사용하였고, 부분예혼합 부상화염을 생성하기 위하여 마이크로 노즐을 이용하여 버너를 제작하였다. 실험에 사용된 버너는 실린더형 동축류 버너로서, 연료노즐의 내경은 1mm이고 마이크로파에 의한 영향을 최소로 하기 위해 석영으로 제작 하였다. 산화제 노즐의 내경은 26mm이고 주변 유동의 영향을 최소화 하기 위하여 외경 30mm, 길이 150mm인 석영관을 후류에 사용하였다.

앞 절과 다른 실험방법으로는 마이크로파의 온도효과를 디커플링(decoupling)하여 회석효과를 조사하였고, 마이크로파의 인가위치 효과를 살펴보았다. 회석효과를 위해서는 첨가제로 질소를 사용하였고, 실험은 화염이 부상 되고 소화되지 않는 특정한 조건을 선정하여 연료와 산화제 유속을 고정하고 온도, 부상높이, NO_x Emission을 마이크로파의 세기에 따라 측정하였다. 또한 온도효과를 없애고 순수한 회석효과를 고려하기 위해 같은 조건에서 마이크로파 인가 후 인가하지 않았을 때의 화염온도와 같아 질 때 까지 질소가스를 회석, 회석한 만큼의 산화제를 감소시켜 온도를 맞춘 뒤 부상높이, NO_x Emission을 측정 하였다 [17]. 실험조건은 연료로는 메탄(CH₄)을 사용하였고, 산화제는 압축공기(Air)를 사용하였다. 화염의 부상(lift)을 고려하여 연료유속을 850 cm/s에서 조건 별로 2400 cm/s까지 단계별로 증가 시켰고 산화제 유속은 연료유속에 따라 0 cm/s에서 95 cm/s까지 증가시켰다.

마이크로파의 인가 위치별 부상 높이 및 질산화합물 배출 특성을 위해 마이크로

파의 위치는 Fig. 3.1에서 나타낸 것처럼 화염이 부상된 조건에서 버너위치를 조절하며 마이크로파를 인가하였다.



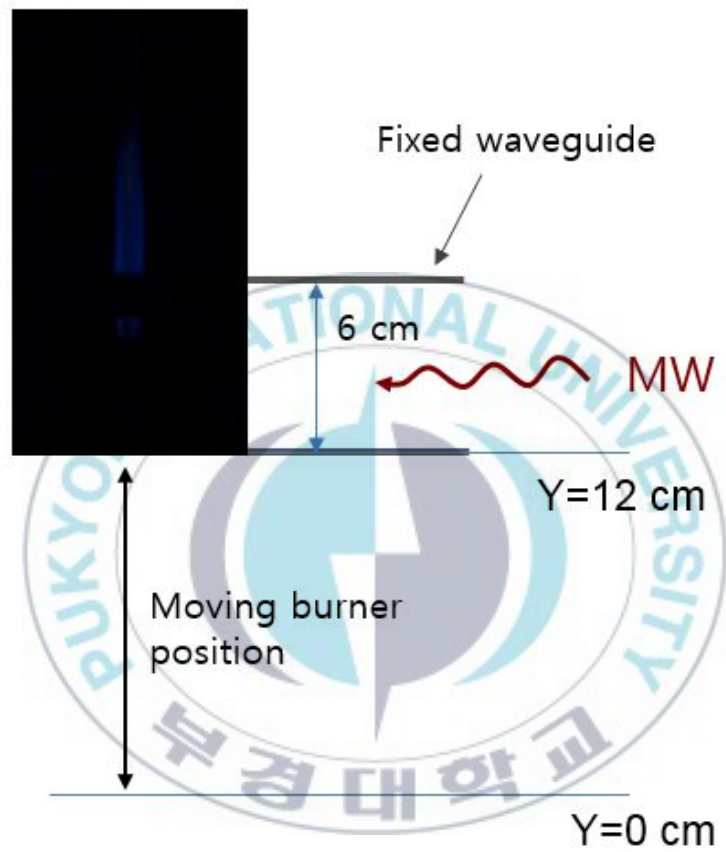


Fig. 3.1 Schematic of experiment.

3.2 실험결과 및 고찰

3.2.1 화염안정화 특성

연료와 산화제의 유속에 따라 크게 세 가지의 화염모드가 형성 되었으며 Fig. 3.2에 나타내었다. Fig. 3.2(a)는 부착 화염(attached yellow flame)으로 산화제 유속이 상대적으로 작을 때(region I) 메탄/순수공기 화염의 전형적인 모습을 보여준다. 산화제 유속을 증가시키면(region II) 부상화염(lifted flame)이 나타났는데 산화제 유속에 따라 상대적으로 작을 때는 부상(lift)은 되었지만 부분적으로 화염을 띄고 있는 부상 화염(lifted yellow flame)이 나타났고 산화제 유속을 더욱 증가시켰을 때 화염이 모두 사라지고 예혼합화염과 같은 형태를 보이는 부분 예혼합 부상화염(lifted partially premixed lifted flame)이 나타났다. 이후 산화제 유속을 더욱 증가시키면(region III) 화염날림(blow-out)이 발생되는데 이는 화염이 부상과 동시에 소멸되는 것을 말한다. Fig. 3.2(d)는 실험을 진행하면서 화염날림이 발생하는 조건에서 예상하지 못하게 나타난 화염으로 연료유속과 산화제 유속을 증가시켰을 때(region IV) 화염날림이 발생하지 않고 주위류의 간섭을 막기 위해 씌운 석영관 내 부상화염과 별도로 석영관 tip에 확산화염이 생성 되었다. 이중화염(double flame)의 발생은 연료의 유속이 매우 커 다 연소되지 못한 연료가 석영관 tip에서 재연소 된 것으로 사료된다. 하지만 본 실험과는 거리가 있어 이중화염은 다루지 않았다.

Fig. 3.3에 연료/산화제 유속 변화에 따른 화염 모드를 도시하였다. 그래프에서 매우 큰 연료 유속조건을 제외 하면 확산화염의 특징이 잘 나타난 것을 확인 할 수가 있다.

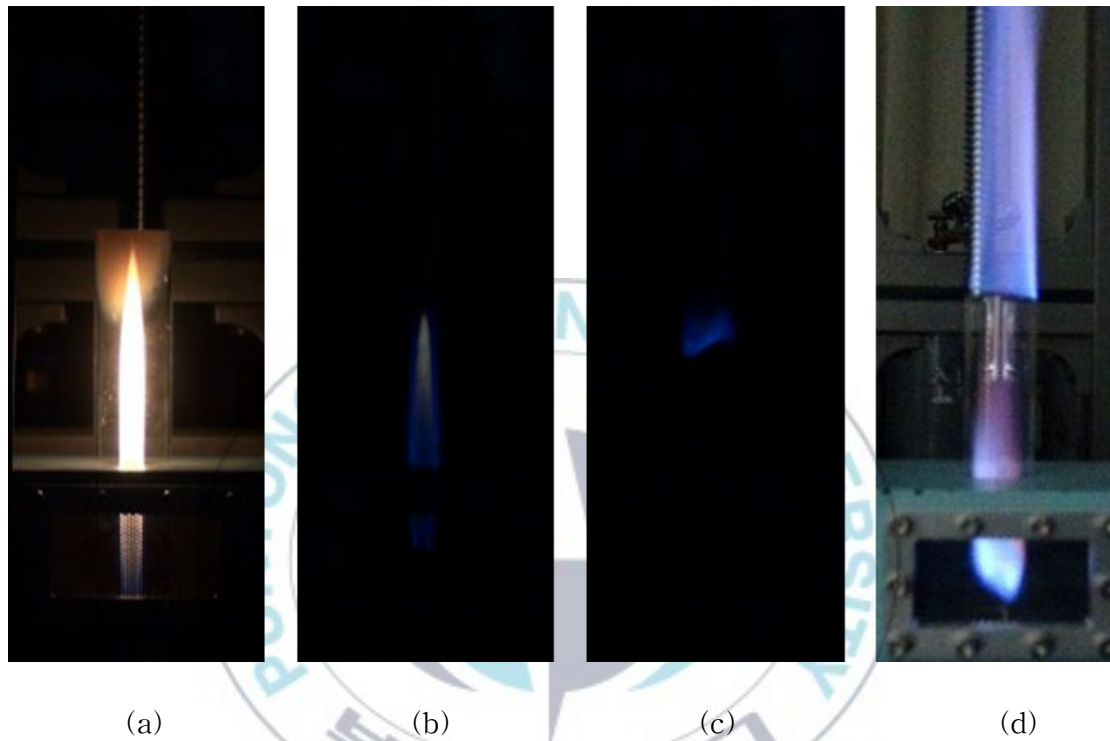


Fig. 3.2 Flame with increased oxidizer velocity direct photos of various regions just before Blow-out at $V_f = 1274$ cm/s. (a) attached yellow flame (b) lifted yellow flame (c) partially premixed lifted flame (d) double flame

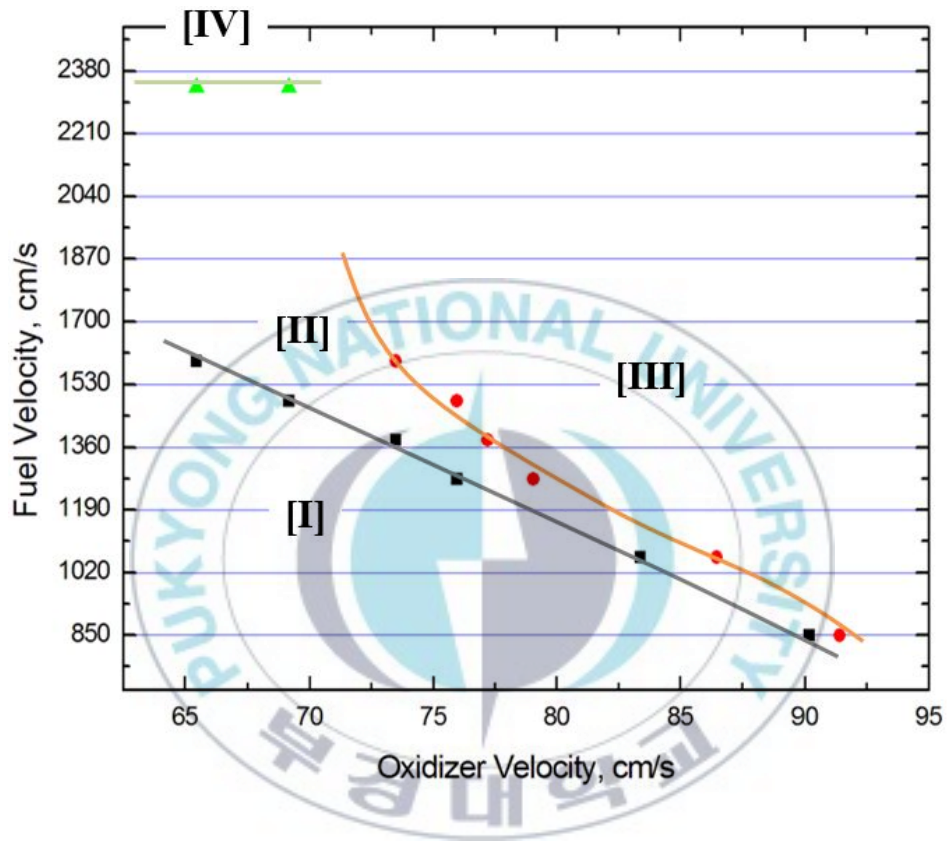


Fig. 3.3 Jet diffusion flame stability curve.

Fig. 3.4는 마이크로파를 인가하지 않은 부착 회염에 산화제 유속을 증가시켰을 때 화염길이를 나타낸 것이다. 고정된 연료유속에 산화제 유속을 증가시켰을 때 화염의 길이는 Fig. 3.4와 같이 나타났다. 이는 화염이 산화제 유속이 상대적으로 작았을 때에는 층류(laminar)여서 화염 길이가 증가하다가 산화제 유속이 점점 증가함에 따라 난류(turbulent)로 천이 되어 화염 길이가 짧아지는 것을 확인 할 수가 있다.

Fig. 3.5은 확산화염에 연료와 산화제의 유속을 번갈아 가며 고정시킨 뒤 마이크로파를 인가하였을 때 화염길이와 부상높이를 측정하여 도시하였다. Fig. 3.5(a)의 경우 연료 유속을 고정하고 산화제 유속을 증가시키며 마이크로파 인가 시 산화제 유속효과를 살펴보았는데 화염길이와 부상높이는 마이크로파 인가 전·후 차이가 미미했다. 하지만 그래프에서도 볼 수 있듯이 마이크로파 인가 전에는 화염부상이 산화제 유속이 75-76 cm/s에서 나타났는데 인가 후에는 조금 더 증가된 유속 구간인 78-79 cm/s 에서 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 마이크로파로 인해 화염이 안정해졌다는 것을 알 수 있다. Fig. 3.5(b)은 산화제 유속을 고정하고 연료 유속을 증가시켜 마이크로파의 연료 유속효과를 보았다. 마이크로파 인가 시 화염길이와 부상높이는 큰 차이가 없으나 산화제 유속효과와 달리 연료를 증가시켰을 때에는 화염길이가 증가하였고 화염부상 시 부분 예혼합 부상화염이 조금 더 넓게 나타났다. 연료 유속효과는 앞서 산화제 유속효과와 같이 마이크로파에 대해서는 화염이 안정해지는 것이 확인 되었는데 이는 마이크로파로 인한 연소장(combustion field)의 온도상승과 반응기 풀(radical pool)이 풍부해졌기 때문으로 사료된다 [16].

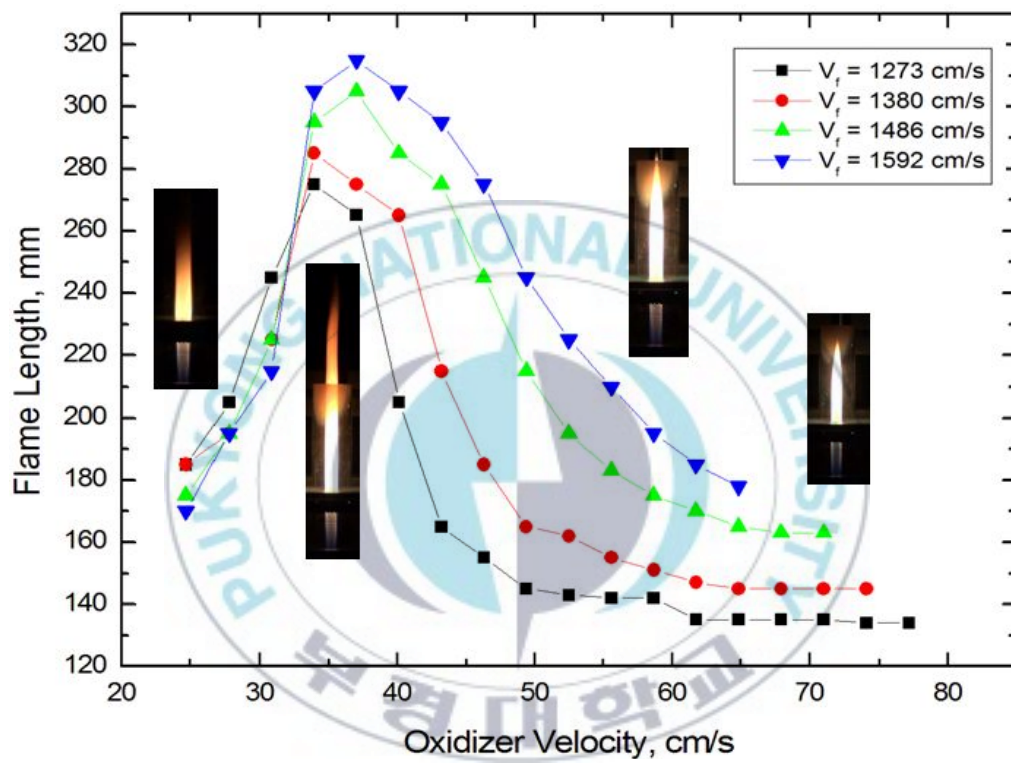
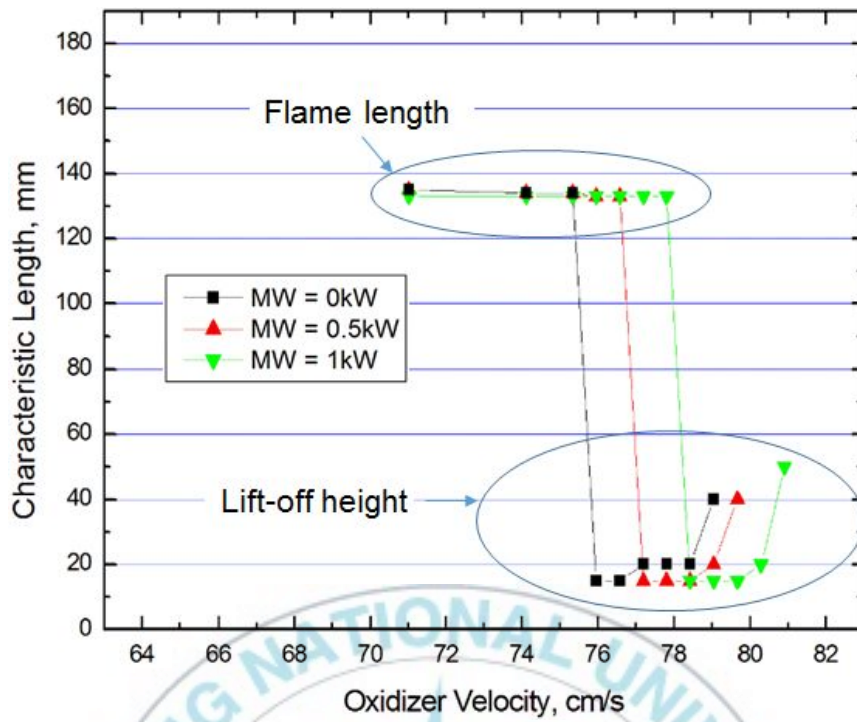
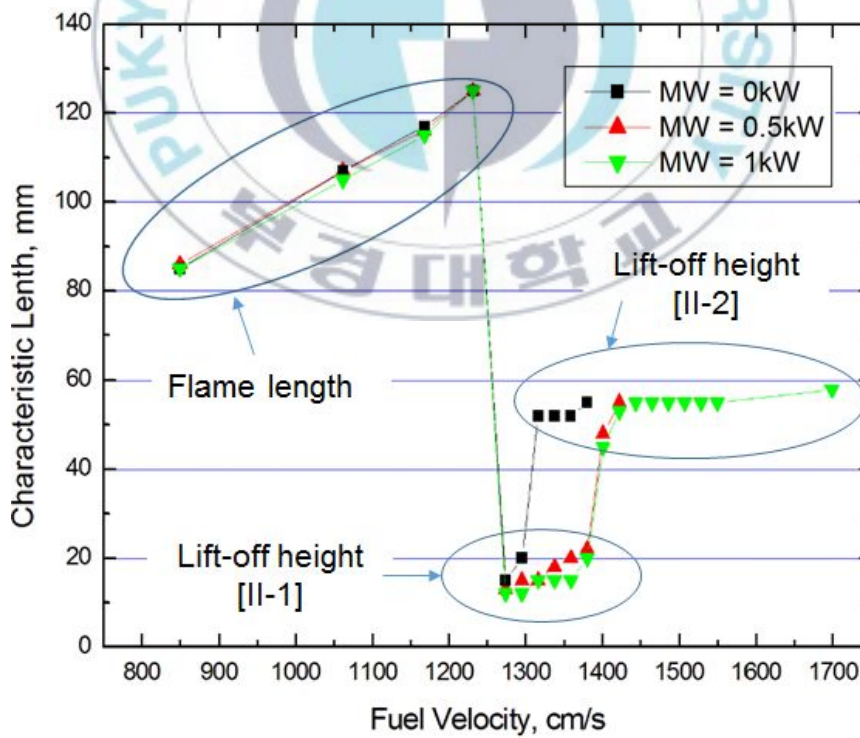


Fig. 3.4 Flame length with fuel/air velocity.



(a)



(b)

Fig. 3.5 Variation in characteristic length with fuel/oxidizer velocity. (a) 1247 cm/s fuel velocity (b) 78.4 cm/s oxidizer velocity.

3.2.2 부상높이 및 NO_x 배출 특성

Fig. 3.6은 부분 예혼합 부상화염조건에서 버너의 위치를 수직방향으로 바꿔가며 화염 위치별 마이크로파 인가 시 NO_x와 부상높이를 나타내었다. 버너는 도파관(waveguide)에서 수직방향으로 12cm까지 위치를 조절하였으며 도파관에서 먼 곳을 기준점(0cm)으로 두고 가장 가까워졌을 때를 최대점(12cm)으로 두었다. 버너위치범위는 화염길이와 화염의 부상높이를 고려하여 설정하였다. NO_x Emission과 lift off height 두가지 모두 버너가 10cm에 위치 할 때 최대값, 최소값을 보이고 0cm로 갈수록 NO_x Emission은 감소하고 부상높이는 증가하였다. 버너가 10cm에 위치하였을 때에는 화염의 밑면이 도파관의 중심부에 위치하였으며 0cm에 가까워질수록 화염의 상단부가 위치하였다. 이러한 결과는 연소반응에서 가장 반응이 활발한 primary reaction zone이 화염밑면에 형성되어 있어 마이크로파가 이러한 primary reaction zone에 인가되어 높은 NO_x Emission과 낮은 lift off height를 보였다고 사료된다 [18]. 또한 마이크로파 인가 시 primary reaction이 전체의 화염특성을 지배한다고 볼 수 있다.

Fig. 3.7는 부분 예혼합 부상화염에 마이크로파 세기에 따른 NO_x Emission과 부상높이를 나타냈다. 마이크로파의 세기가 커질수록 NO_x Emission는 증가하였고, 부상높이는 감소하였다. 이는 높은 세기의 마이크로파가 화염온도를 상승시키고 온도상승효과로 인해 thermal NO_x가 증가되었고, 라디컬의 농도가 풍부해져 반응성 증대에 기인한 연소속도의 증가로 부상높이가 낮아졌다고 사료된다 [12],[15].

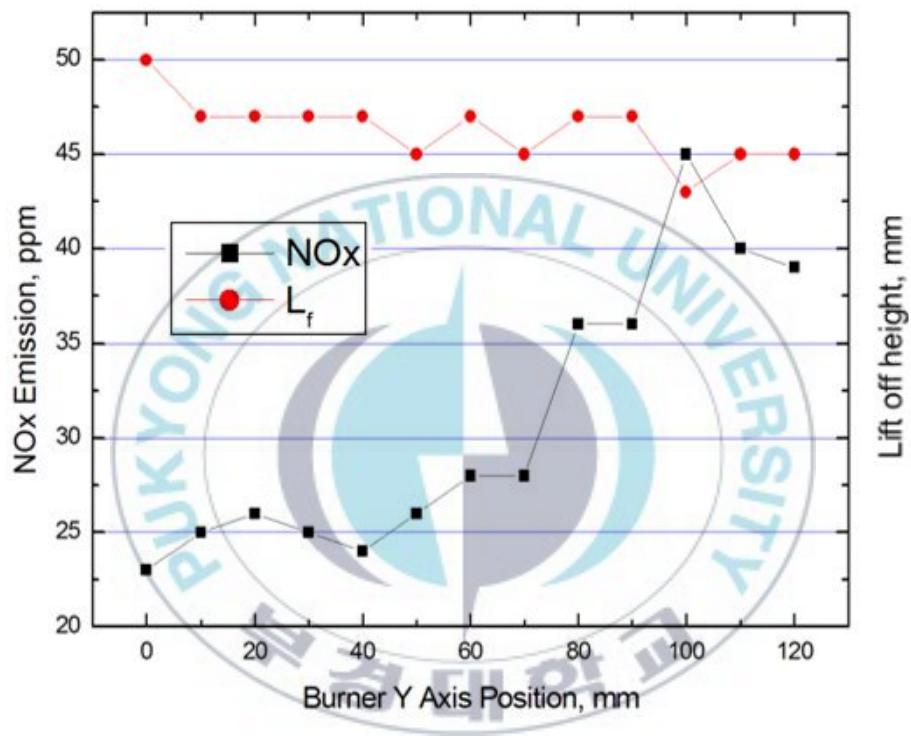


Fig. 3.6 Variations in NO_x Emission and lift off height with Y axis position at $V_f = 1486$ cm/s $V_{oxi} = 76$ cm/s.

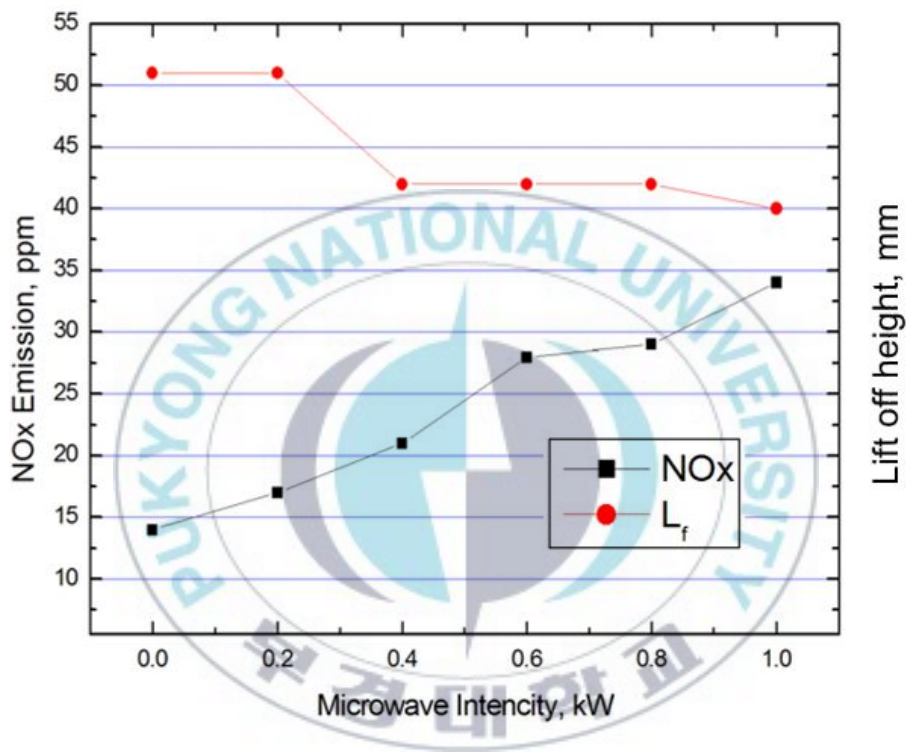


Fig. 3.7 Variations in NOx Emission and lift off height with microwave intensity at $V_f = 1486$ cm/s $V_{oxi} = 74.1$ cm/s.

일반적으로 화염에 마이크로파를 인가하였을 때 화염온도 상승효과 같은 열적(thermal)효과와 라디칼 풀이 풍부해져 반응성 향상과 같은 화학적(chemical)효과가 함께 나타난다. 여기에 부상화염의 NO_x Emission과 부상높이와 관련하여 열적효과와 화학적효과를 구분하기 위해 질소가스를 희석하여 Fig. 3.8과 Fig. 3.9에 나타내었다. Fig. 3.8은 부분 예혼합 부상화염에서 마이크로파 인가 시 질소가스를 희석하여 마이크로파를 인가하지 않은 조건과 화염온도를 같게 만들어 NO_x Emission을 비교하였고 Fig. 3.9은 부상높이를 비교하였다. NO_x Emission의 경우 마이크로파를 인가 후 질소가스를 희석 시켰을 때가 마이크로파를 인가하지 않았을 경우보다 낮게 나왔다. 이는 NO_x 배출에 있어서는 마이크로파의 화학적 효과가 NO_x 배출을 억제했다고 볼 수 있고 화염에 마이크로파를 인가하였을 때 증가되는 NO_x의 양은 전적으로 화염의 온도상승효과로 인한 열적효과라는 것을 확인 할 수가 있었다. 하지만 이러한 질소가스희석으로 NO_x 발생이 감소한 이유로는 화염에 질소가스의 첨가로 온도효과를 없앴지만 질소가스로 인해 화염의 반응성이 감소되어 나타났다고 볼 수도 있기 때문에 불활성기체의 희석방법이 아닌 고온공기를 통해 온도를 decoupling 시키는 방법으로 검증이 요구되며 향후 연구가 필요하다고 사료된다. 부상높이 또한 질소가스 희석 시 더 증가 된 것을 확인할 수가 있었다. 이것 역시 부상높이에 화염온도 효과가 차지하는 부분이 크다고 볼 수 있지만 질소가스 희석으로 인해 화염자체의 반응성이 낮아져 부상높이가 높아졌다고 볼 수도 있기 때문에 향후 추가 연구가 필요하다고 사료된다.

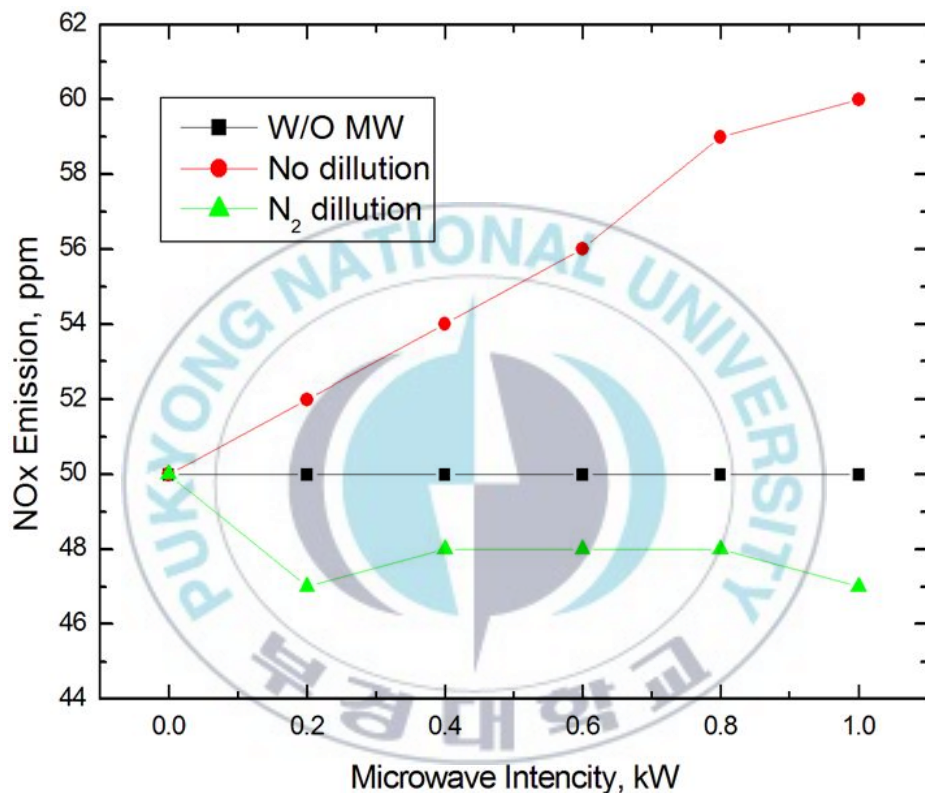


Fig. 3.8 Variation in NO_x Emission with microwave intensity at $V_f = 1698$ cm/s
 $V_{oxi} = 74.12$ cm/s.

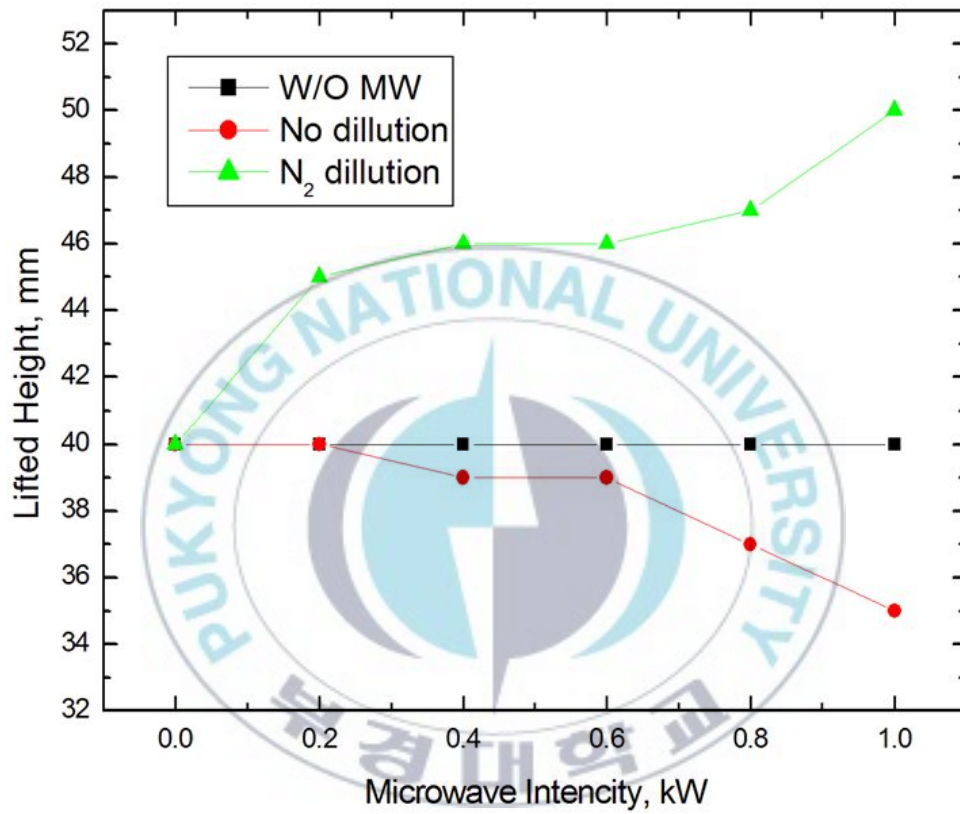


Fig. 3.9 Variation in lifted height with microwave intensity at $V_f = 1698$ cm/s
 $V_{oxi} = 74.12$ cm/s.

제 4장 결론

본 연구에서는 화염형상에 따른 마이크로파 인가 시 화염안정성 및 오염물질 배출특성과 화염불안정성이 오염물질 배출에 미치는 영향, 화염의 위치별 마이크로파 인가 시 안정성과 오염물질 배출에 대해 초점을 맞추어 알아보았으며 다음과 같은 결론들을 얻었다.

제트확산화염

1. 산화제의 유속이 증가함에 따라 세 가지의 화염모드가 관찰되었다. 산화제의 유속이 상대적으로 낮을 때(low velocity) 전형적인 메탄 확산화염 모습 형태인 stable flame, 산화제 유속을 증가시키면서 화염이 부분적으로 부상(lift)되는 partially attached flame, 산화제 유속이 매우커지면 화염이 부상과 동시에 회전하는 rotating flame을 보였다.
2. 세 가지 화염모드에서 마이크로파 인가 시 화염의 휘염도와 길이가 증가된 것을 관찰 하였고 화염이 전반적으로 안정해지는 모습을 확인할 수 있었다. 또한 마이크로파에 의해 화염날림(blow out)조건이 지연되는 것을 확인 하였다. 이러한 화염안정성 증가는 마이크로파 인가 시 화염의 연소반응에서 반응기 풀(radical pool)을 풍부하게 하고 연소장(combustion field)의 온도를 상승시켰기 때문이라고 판단된다.
3. 고정된 연료와 산화제 유속조건에서 마이크로파를 인가한 경우 NO_x 배출량이 가하지 않았을 때에 비해 약 30%증가치를 보였으며 전반적으로 마이크로파의 세

기가 증가함에 따라 NOx 배출량 또한 증가 되는 경향을 보였다. 이는 마이크로파로 인한 화염의 온도가 증가하여 thermal NOx의 발생량이 증가했기 때문으로 판단된다.

4. 화염에 마이크로파 인가 시 soot의 경우 생성 및 성장이 제한되는 모습을 보였다. 마이크로파가 인가되었을 때 매연이 화염에서 입자군을 형성하지만 바로 배출되지 못하고, 증가된 휘염영역에서 대부분 재연소 되어 입자군을 제대로 형성하지 못했기 때문으로 판단된다.

5. 산화제 유속이 증가시켰을 때 화염의 주파수에 따라 두 가지 화염 모드로 나눌 수 있었다. 비교적 낮은 산화제 유속에서 화염 전체가 축방향으로 진동을 하는 flickering frequency와 증가된 산화제 유속에서 화염의 tip 부분에서 부분적으로 진동하는 oscillation frequency를 확인하였다.

6. 화염의 주파수 특성은 마이크로파 인가에 따라 증가되는 경향을 보였다. 그리고 특정한 지점에서는 마이크로파에 의한 주파수 특성이 바뀌는 것 또한 확인 하였다. 이는 리차드슨 수(Richardson number)정의에 따라 마이크로파로 인한 화염의 온도 상승효과로 같은 유속에서 혼합기 밀도 차의 증가로 주파수가 증가 되었다고 사료 된다.

7. NOx Emission의 경우 주파수 모드에는 크게 영향을 받지 않는 것으로 확인 되었으며 마이크로파의 화염온도 상승효과만이 확인 되었다.

부분 예혼합 부상화염

1. 연료와 산화제 유속에 따라 세 가지의 화염모드가 관찰 되었다. 상대적으로 낮은 산화제 유속일 때 전형적인 확산화염 형태인 부착화염(attched yellow flame), 산화제 유속을 증가시켰을 때 부상화염(lifted flame)이 나타났는데 증가된 산화제 유속에 따라 부분적으로 화염을 띄고 있는 부상 화염(lifted yellow flame)과 더욱 큰 산화제 유속에서 화염이 모두 사라지고 예혼합화염과 같은 형태를 보이는 부분 예혼합 부상화염(lifted partially premixed lifted flame)이 확인 되었다.
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. 부분 예혼합 부상화염조건에서 버너의 위치를 바꾸어 가며 NO_x Emission과 부상높이를 보았다. 화염의 밑면에 형성되는 primary reaction zone이 도파관 중앙에 위치하였을 때 NO_x가 최대값을 보였고 부상높이는 최소값을 나타냈다. 이는 마이크로파 인가 시 primary reaction이 전체의 화염특성을 지배한다고 판단된다.
4. 부분 예혼합 부상화염조건에서 마이크로파의 세기에 따라 NO_x Emission과 부상 높이를 관찰하였다. 마이크로파의 세기가 증가할수록 부상높이는 감소하였으며, NO_x 배출량은 증가하였다. 이는 마이크로파 인가로 인한 반응성 증가로 연소속도가 증가하여 부상높이가 낮아졌으며 NO_x Emission의 경우 화염의 온도상승효과로 증가되었다고 사료된다.
5. 화염에 마이크로파의 열적효과(thermal effect)와 화학적 효과(chemical effect)를 구분하기 위해 부분 예혼합 부상화염에 마이크로파를 인가하고 질소가스를 희석하

여 화염온도를 감소시켜 마이크로파에 의한 열적효과를 제거하여 NOx Emission과 부상높이를 관찰하였다. 질소가스 희석시 NOx Emission의 경우 마이크로파가 인가되지 않았을 때에 비해 오히려 감소하였으며 부상높이 또한 증가하였다. 이는 마이크로파의 열적효과가 NOx Emission의 경우 매우 dominant하다는 것을 나타내었고, 부상높이의 경우도 마찬가지로 열적효과가 큰 것으로 나타났다. 하지만 두 경우 모두 질소가스 첨가로 인한 화염의 반응성이 감소하여 비록 온도상승효과는 제거하였지만 향후 불활성기체의 희석이 아닌 다른 방법에서의 검증이 요구된다.



참 고 문 헌

- [1] Weinberg, F.J., Hom, K., Oppenheim, A.K. & Teichman, K., (1978) *Ignition by plasma jet*, Nature Vol. 272, No. 5651, pp 341-343.
- [2] Fauchais, P. & Vardelle, A., (1997) *Thermal plasmas*, IEEE Trans. Plasma Sci. Vol. 25, No. 6, pp 1258-1280, ISSN 0093-3813.
- [3] S.M. starikovskaia, (2006) *Plasma assisted ignition and combustion*, J.Phy.D: Appl. Phys. 39 R265-R299.
- [4] Xing Raoa, Kadek Hemawanb, Indrek Wichmana, Campbell Carterc, Timothy Grotjohnb, Jes Asmussenb and Tonghun Leea, (2011) *Combustion dynamics for energetically enhanced flames using direct microwave energy coupling*, Proceedings of the Combustion Institute, Volume 33, Issue 2, Pages 3233-3240.
- [5] Ogawa, S., Sakai, Y., Sato, K. & Sega, S., (1998) *Influence of microwave on methane-air laminar flames*, Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 37, No. 1, pp 179-185.
- [6] Takita, K., Masuya G., Sato T. & Ju, Y., (2001) *Effect of addition of radicals on burning velocity*, AIAA J. Vol. 39, No. 4, pp 742-744.
- [7] Hemawan KW, Wichman IS, Lee T, Grotjohn TA, Asmussen J., (2009) *Compact microwave re-entrant cavity applicator for plasma-assisted combustion*, Rev Sci Instrum., 80(5):053507.
- [8] Hong, Y.C., Cho, S.C., Bang, C.U., Shin, D.H., Kim, J.H., Uhm, H.S. & Yi, W.J., (2006) *Microwave plasma burner and temperature measurements in its flame*, Appl. Phys. Lett. Vol. 88, No. 20, pp 201502-201504.
- [9] Emanuel S. Stockmana, Sohail H. Zaidia, Richard B. Milesa, Campbell D. Carterb

- and Michael D. Ryanc, (2009) *Measurements of combustion properties in a microwave enhanced flame*, Combustion and Flame, Volume 156, Issue 7, Pages 1453-1461.
- [10] Hong, Y.C., Cho, S.C., Bang, C.U., Shin, D.H., Kim, J.H., Uhm, H.S. & Yi, W.J., (2006) *Microwave plasma burner and temperature measurements in its flame*, Appl. Phys. Lett. Vol. 88, No. 20, pp 201502-201504.
- [11] Daniel J. Sullivan., (2004) *Microwave techniques for combustion enhancement of laminar flames*, Fort Lauderdale, FL, 11-14 July 2004, AIAA-2004-3713.
- [12] Jagers, H. C., von engel, A., (1971) *The effect of electric fields in the burning velocity of various flames*, Combustion and Flame, Vol. 16, pp. 275-285.
- [13] MacLachy, C. S., Clements, R. M., and Smy, P. R., (1982) *An experimental investigation of microwave radiation on a propane-air flame*, Combustion and Flame, Vol. 45, pp. 161-169.
- [14] Groff, E. G., Krage, M. K., (1984) *Microwave effects in premixed flames*, Combustion and Flame, Vol. 56, pp.293-306.
- [15] Zaidi, S. H., Macheret, S. O., Ju, Y., Miles, R. B., Sullivan, D. J., (2004) *Increased speed of premixed laminar flames in a microwave resonator*, 35th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, Portland, OR, AIAA-2004-2721.
- [16] Ward, M. A. V., Wu, T. T., (1978) *A theoretical study of the microwave heating of a cylindrical cell, flame-front electron plasma in an internal combustion engine*, Combustion and Flame, Vol. 32, pp. 57-71.
- [17] J.H. Ji and E.J. Lee, (2010) *The Effect of Coflow Velocity on the Flame-Extinguishing Concentrations of Inert Gases in Jet Diffusion Flames*, Energy

and Fuels, submitted.

- [18] S.H Zaidi, E. Stockman, X. Qin, Z. Zhao, S. Macheret, Y. Ju, R.B. Miles, D.J.Sullivan, J.F. Kline, (2006) *Measurements of hydrocarbon flame speed enhancement in high-Q microwave cavity*, in: 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, pp. 1206-1217.

