

초음파에 의해 무화된 케로신 분무연소에서의 OH 라디칼 및 CH 라디칼 자발광 특성

김민철^a · 김정수^{b,*}

OH-and CH-Radical Chemiluminescence Characteristics in the Spray Combustion of Ultrasonically Atomized Kerosene

Min Cheol Kim^a · Jeong Soo Kim^{b,*}

^a Department of Material Engineering, Pukyong National University, Korea

^b Department of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Korea

*Corresponding author. E-mail: jeongkim@pknu.ac.kr

ABSTRACT

An experimental study was performed to investigate the chemiluminescence characteristics in the spray combustion of ultrasonically atomized kerosene. The radical intensity of the spray flame was measured using an ICCD camera and the amount of fuel consumed was obtained by a precise flow-rate measurement technique during combustion. Fuel consumption increased linearly with the increase in carrier-gas flow rate, and typical group combustion, which is a characteristic of spray combustion, was observed. It was found from the analysis of chemiluminescence that the maximum emission intensities of OH and CH radicals decrease, and they move downstream resulting in the increase in a vivid reaction zone as the spray flow rate increases.

초 록

초음파 진동자에 의해 미립화된 케로신 분무연소의 OH 라디칼과 CH 라디칼의 자발광 특성을 고찰하기 위한 실험이 수행되었다. ICCD 카메라를 이용하여 분무화염의 자발광 강도를 측정하였으며, 연소 시 소모된 연료량은 정밀유량측정법으로 계측하였다. 그 결과, 연료소모율은 수송기체인 공기 공급유량에 선형적으로 증가하였으며, 분무연소의 특징인 전형적인 그룹 연소가 관찰되었다. OH 라디칼과 CH 라디칼을 분석한 결과, 분사방향으로의 유량 증가에 따라 라디칼 방사강도의 최댓값은 감소하고 그 위치는 후류로 이동하여 반응대의 폭은 증가하였다.

Key Words: Ultrasonic Atomization(초음파 미립화), Spray Combustion(분무연소), Kerosene(케로신), Chemiluminescence(자발광), Slit-jet(슬릿 제트)

고 있으며, 그 취급의 용이함을 장점으로 액체 연료가 상당한 비율로 활용되고 있다. 액체 연료의 연소에는 여러 방법이 있으며, 일반적으로 액체상태의 연료를 미립화하여 반응 표면적을 증대시키는 동시에 반응물들의 혼합을 촉진하는 방식이 주로 활용된다.

초음파를 이용한 액체의 미립화 방법은 1927년 Wood와 Loomis[1]에 의해 소개되었으며, 1962년 초음파 미립화에 관한 기본적인 이론이 Lang[2]에 의해 정립되었다. 그는 초음파에 의한 액체미립화가 표면장력파(capillary wave)에 의해 생성된다고 주장하였으며, 실험을 통해 그 이론을 뒷받침하였다. 이후 많은 연구자가 표면 장력과 외에도 공동화(cavitation) 등 다양한 현상들이 액체의 미립화에 관여한다고 주장하였으며 이를 실험으로 입증하였다. 특히 MHz(메가헤르츠) 단위의 초음파 진동자를 이용해 액체 연료를 미립화 할 경우, 연소기 내부에 추가의 연료증발장치 없이도 즉각적인 연소가 가능한 크기의 연료 액적(droplet)을 얻을 수 있다는 사실도 확인된 바 있다[3]. 초음파에 의해 형성되는 분무는 액적크기의 균일성이 높고, 낮은 유속에서도 사용될 수 있다는 장점 때문에 산업, 의학 등 다양한 분야에서 활용되고 있으며[4] 이 유체 노즐(two-fluid nozzle)이나 압력분사 노즐을 이용한 무화 방법에 비해 소음이 다소 적고 액적의 직경 조절이 용이하므로, 연소 장치로의 이용을 목적으로 한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

초음파를 이용한 액체의 미립화는 Fig. 1에 보이는 바와 같이 크게 직진법(direct vibration method)과 무화법(aerosol method)의 두 가지로 분류된다. 직진법은 초음파 진동자 내부에 액체를 통과시켜 진동자의 표면에 접촉하는 액체를 직접 미립화시키는 방법이며, 무화법은 진동자에서 발생한 초음파에너지를 액체에 통과시킴으로써 발생하는 액주(liquid column)의 표면에서 미립화가 일어나도록 하는 방법이다[5].

분무연소는 액적의 증발 및 공기와의 혼합 등 많은 과정이 동시에 진행된다. 다양한 크기와 운동량을 갖는 액적은 산화제와 혼합이 불균일하게 이루어질 수 있으며, 그와 같은 불균일성은 연소장의 범위를 기하학적으로 규정하기에 어렵게 한다. MHz 단위의 진동자를 이용한 무화법은 연소효율 증대와 배기 오염물질 저감 등에 관계하는 환경친화적 연소

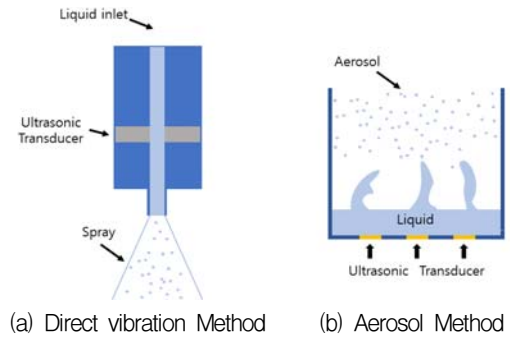


Fig. 1 Ultrasonic atomization.

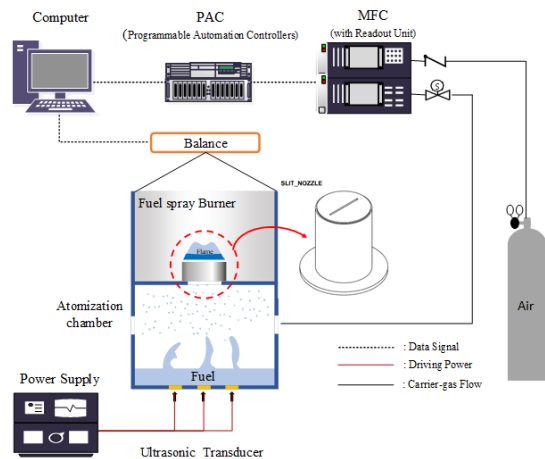


Fig. 2 Experimental setup.

장치의 개발에 활용될 수 있는 바, 본 연구에서는 대표적 탄화수소계 액체연료인 등유(kerosene)를 초음파로 미립화하여 슬릿 노즐을 통하여 대기중으로 분사시켜 얻어지는 액적분무의 연소현상을 고찰하고자 한다.

화염의 물리적 특성을 파악하는 광학적 방법으로, 할로겐램프나 레이저를 외부광원으로 하여 온도나 가스성분 등을 측정하는 방법과 화염에서 자체적으로 발생하는 화학발광특성을 이용하는 기법이 있다. 일반적으로 할로겐램프를 활용하는 방법의 경우, 메탄과 프로판을 주성분으로 하는 천연가스의 화염과 같이 광학 두께(optical thickness)가 얇은 화염에 대해 적용할 수 있고 외부광원을 활용해야 하기 때문에 측정장비와 시스템이 복잡해지는 단점이 있다[6]. 탄화수소계 연료의 화염에서 주요 관심 대상이

되는 화학발광 성분으로는 OH 라디칼(OH*), CH*, C2*가 있으며 다양한 연소 기본반응(elementary reaction)에서 발생하는 중간생성물이다[7-11].

본 연구에서는 케로신 분무화염의 가시화염과 자발광을 고속카메라(High-speed Camera, HSC)와 ICCD (Intensified Charge-coupled Device) 카메라로 포착하여 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.4 MHz의 초음파진동자에 의해 미립화된 케로신 액적을 연소 시키는 버너를 설계/제작 하였고 Fig. 2에 실험장치의 개략도를 도시한다. 실험장치는 크게 연료무화실과 노즐부로 나뉜다. 연료무화실은 PMMA (Polymethyl methacrylate) 재질을 사용하여 원통형으로 제작하였으며, 그 하단 내부에 2.4 MHz의 진동자를 설치하였다. 진동자는 액체에 진동에너지를 부과하여 다수의 미립화된 액적들을 형성한다. 그리고 연료무화실 외벽에 위치한 포트로부터 공기를 공급하여 생성된 액적을 노즐부로 운반하도록 하였다. 이로써 공기와 액적의 혼합성을 증대시키고, 공급유량을 조절함으로써 연소현상을 관찰할 수 있도록 설계하였다. 또한, 버너의 노즐부는 PMMA의 내열 한계를 고려해 Stainless Steel로 제작하였다. 초음파에 의해 무화된 연료는 노즐 상부면 중앙에 중형비 20:1 크기의 slit을 통해 분사된다. 액적의 분사를 위한 수송기체는 공기(O2: 20.9%, N2: 79.0%)를 사용하였으며, 질량 유량제어기(Mass Flow Controller, MFC)를 통해 그 유량을 정밀하게 제어하였다.

연소시 사용된 연료소모율은 정밀저울(capacity: 6,200 g, resolution: 0.01 g)을 이용하여 측정하였고, 높은 신뢰도 확보를 위해 표준 질량 분동을 이용하여 보정곡선(calibration curve)을 획득한 후 질량데이터를 보정하였다. 보정곡선은 Fig. 3와 같으며, 분동의 질량(x)과 측정된 질량(y)의 관계는 다음의 Eq. 1과 같다.

$$y = 1.02388x + 0.00144 \quad (1)$$

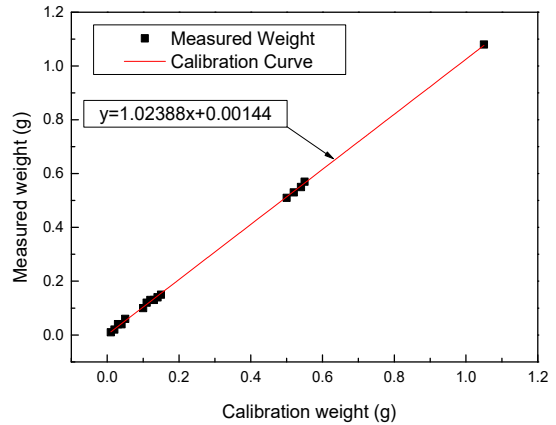


Fig. 3 Calibration curve for fuel-mass weighing.

Table 1. Experimental conditions.

Parameter	Value
Fuel	Kerosene
Carrier-gas	Air
Fuel temperature	60±2°C
Transducer frequency, f	2.4 MHz
Flow-rate Reynolds number of air, $Re_{a,carrier}$	98 - 196
Ambient pressure	1 bar
Ambient temperature	20°C
Transducer input power	54.3 W

케로신은 탄화수소계 연료로써 밀도는 0.78 ~ 0.81 g/cm³ 범위이며, 가연한계 당량비는 0.7 ~ 1.4이다. 이론공연비는 약 14.9이며, 발화점을 고려하여 연료 온도 60±2°C에서 실험이 수행되었다.

케로신 화염은 떨림이 강하여 카메라 노출시간이 짧은 경우 정확한 관측이 어렵다. 따라서, 307.0 nm 및 437.5 nm 필터를 각각 장착한 ICCD 카메라를 이용하여 OH*과 CH* 자발광의 방사강도를 측정함에 있어 200 ms의 노출시간으로 50회 계측하여 평균값을 취하였다. Table 1은 제반 실험조건을 요약하고 있다.

3. 실험 결과 및 고찰

연료무화실 하단에 위치하는 초음파 진동자는 교류의 전기신호를 기계적인 진동으로 변환하여 초음파를 생성한다. 생성된 초음파의 강도가 특정 임계점을 넘어가면 파(wave)의 진행방향으로 매질도 이동하게 되고 이로 인해 액주가 만들어진다[12]. 초음파에 의해 액주표면의 불안정성이 증가하여 파동에너지에 의한 신장력이 표면장력을 초과하게 되면 액적이 액주에서 떨어져 나오게 되는데, 이때 생성된 액적은 Lang[2]에 의해 정의된 Eq. 2와 같은 평균입경을 가진다.

$$D_m = 0.34 \left(\frac{8\pi\gamma}{\rho f^2} \right)^{1/3} \quad (2)$$

윗 식에서 γ 는 표면장력, ρ 는 밀도, f 는 주파수를 나타낸다. Eq. 2를 본 실험조건에 적용할 경우 생성되는 액적의 평균입경은 약 1.7 μm 이다.

진동자의 소비전력이 54.3 W인 실험조건 하에서 연소 시, 연료소모율은 다수의 데이터 샘플링(data sampling)을 평균하여 도출하였으며, 분무생성을 위해 공급된 수송기체 공기유량과 소모된 연료량의 비, 즉 겉보기 공연비(apparent Air/Fuel mass ratio,

AFR)는 약 36.7이다.

케로신 액적과 수송기체 혼합물은 약 3 wt.% 미만의 케로신을 포함하고 있으므로, 노즐에서 분사되는 혼합물의 유량은 공급된 공기 즉, 수송기체의 유량과 크게 다르지 않은 것으로 간주할 수 있다. 이로부터 수송기체 유량 변이에 따른 연료의 소모량을 공연비와 레이놀즈수(Reynolds number, $Re_{a,carrier}$)의 관계로 Fig. 4에 도시한다. 레이놀즈수는 점성력에 대한 관성력의 비이며, Eq. 3과 같이 정의 된다.

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{\text{Inertial forces}}{\text{Viscous forces}} \quad (3)$$

윗 식에서 ρ , V , μ 는 각각 공기의 밀도, 속도, 점성계수 그리고 L 은 특성길이에 해당된다. 본 실험의 결과, 수송기체의 유량이 증가하면, 액체연료의 소모량도 증가하여 그 비(AFR)가 일정하게 유지되게 되는데, 이는 수송기체가 케로신 액적을 수송하는 과정에서 무화된 액적의 크기가 매우 작고, 무화실 벽면의 양쪽에서 접선 방향으로 공급되는 수송기체와 액적의 혼합 또한 매우 잘 이루어져 연료-수송기체 2상 혼합물이 마치 단상의 기체인 것처럼 거동하기 때문인 것으로 판단된다.

분무된 연료의 함량이 매우 작지만, 무화된 연료가 액적의 기화성 향상을 야기하여 연료희박연소가 가능한 것으로 사료된다. 이는 초음파를 이용한 액체의 미립화과정에서 초음파 에너지가 액체의 점성저하와 분자의 고리구조 변화 등의 상태변화를 유발하여 화학반응강도를 증대시킬 수 있다[13]는 사실과 그 맥락을 같이한다.

Fig. 5는 공기 유량이 증가할 때 생성되는 화염의 대표이미지를 보이고 있다. Re_a 가 98에서 196까지 증가할 때는 노즐외부에서 생성되는 가시화염의 면적을 증대시킨다는 사실을 그림에서 확인할 수 있고, Re_a 가 196 이상이 되면 분무속도가 화염의 전파

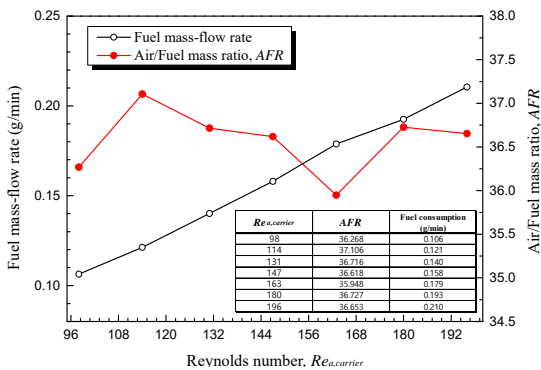


Fig. 4 Variation in fuel consumption and AFR according to the carrier-gas flow-rate.

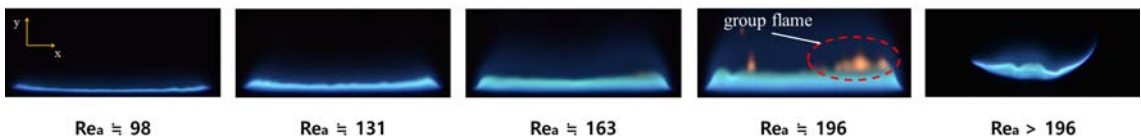


Fig. 5 High-speed camera images of visible flames according to the change in carrier-gas flow-rate.

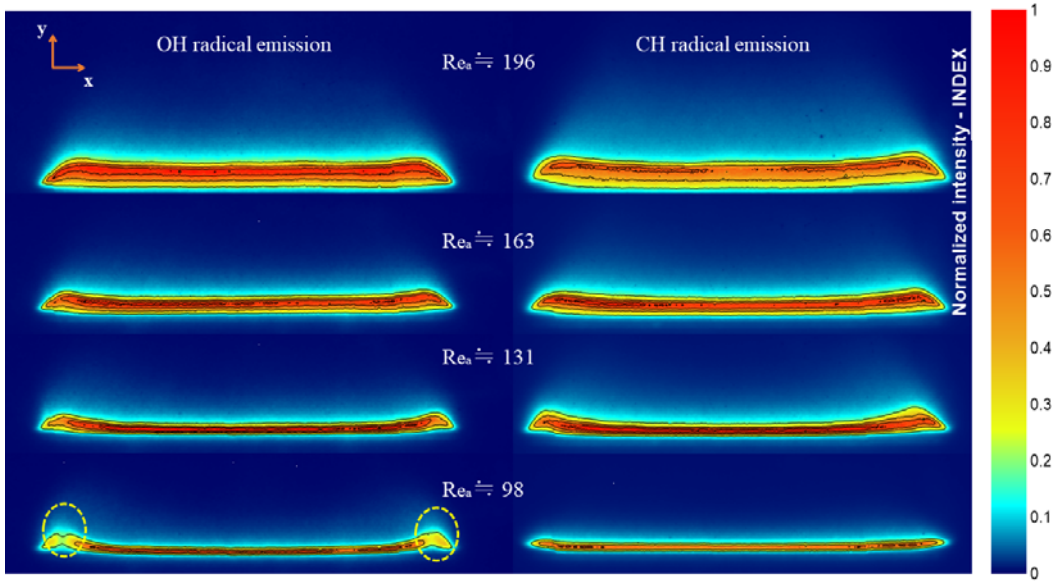


Fig. 6 Radical emission intensity distribution according to Re_a .

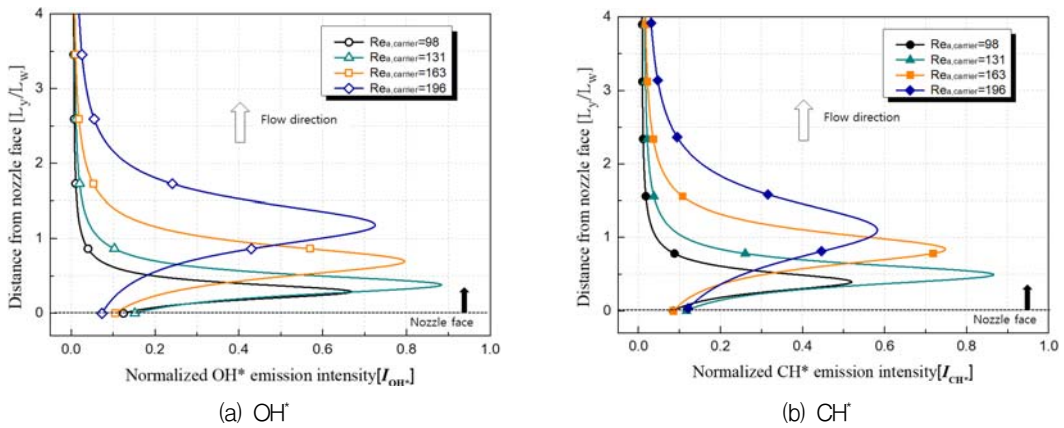


Fig. 7 Variation in radical intensity according to Re_a at the center line of slit-jet flame.

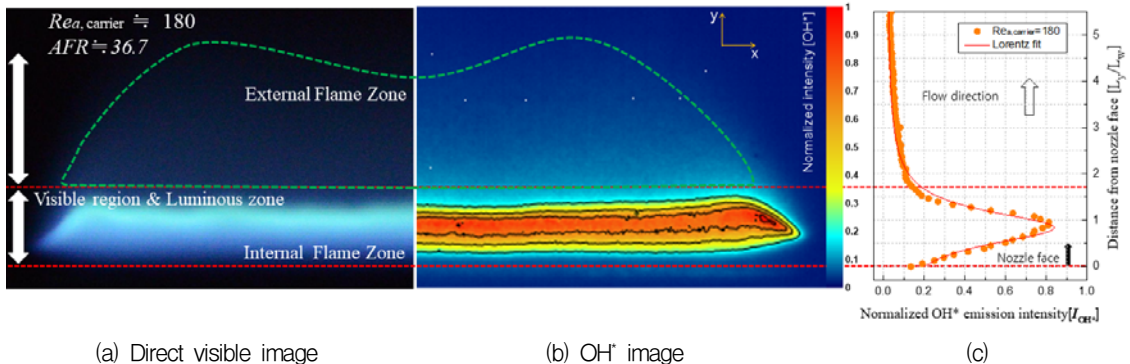


Fig. 8 Comparison of visible and OH^* images in kerosene spray flame.

속도를 초과하여 화염은 노즐 출구로부터 부상되기 시작하고 궁극적으로는 blow-out이 발생하게 된다.

연소 시에 간헐적으로 생성되는 국소적 황염은 액적의 밀집된 영역 내부에서 일시적으로 연료 과농상태가 되기에 나타나는 것으로 보이며, 액적의 개별 연소가 아닌 액적 그룹 연소(droplet group combustion) 현상으로 사료된다. 미립화에 의해 생성되는 액적은 본질적으로 입경의 분포를 가지며 액적의 크기 차이가 연소현상을 더욱 복잡하게 하는 원인이 된다. 이와 같은 분무에는 액적들의 밀도가 상대적으로 높은 영역이 존재하게 되며, 그러한 액적들의 밀집효과가 국소적인 연료과농 영역을 만들어 내는 결과를 낳는다.

Fig. 6에 제시된 라디칼 이미지에서 OH*와 CH*의 반응영역은 큰 차이를 보이지 않는다. 그러나 상대적으로 낮은 유속($Re_a=98$)의 화염 양끝단에서 확연하게 관찰되는 낮은 강도의 2차원적 OH* 분포는 slit 노즐형상의 2차원적 끝단효과와 양끝단에서 발생하는 flame quenching에 기인하는 것으로 판단된다.

보다 정량적인 분석을 위하여 Fig. 7에 slit-jet 노즐의 중심부를 기준으로 slit의 폭(width)으로 무차원화된 y축 길이(L_y/L_w)에 따른 OH*와 CH* 방사강도를 도시한다. Re_a 증가에 따라 대류강도(convection strength)가 증가함으로써, I_{CH^*} 와 I_{OH^*} 의 최대 라디칼 방사강도가 나타나는 지점은 y축 방향으로 이동하게 되고, 최댓값의 감소와 함께 반응대 폭이 점차 증가하는 전형적인 부분예혼합 확산화염의 구조를 보이게 된다. 수송기체의 유량과 관계없이 노즐의 출구에 해당하는 위치에서의 라디칼 강도는 상대적으로 낮은 것을 확인할 수 있는데, 이는 노즐 표면으로의 화염의 열손실로 인해 발생하는 flame quenching의 결과이다. 대류강도가 낮아 화염이 노즐에 가장 접근해 있는 $Re_a=98$ 의 경우, OH* 및 CH*의 최댓값이 $Re_a=131$ 의 경우보다도 낮게 나타나는 이유 또한 노즐에 의한 flame quenching 효과와 그 맥락을 같이 한다. 전술한 반응대 폭의 증가는 일반적으로 화학반응물의 감소를 동반하는 화염 신장(flame stretch)의 결과이다. 또 I_{CH^*} 와 I_{OH^*} 는 일반적으로 당량비와 신장률(strain rate)에 크게 영향을 받는 것으로 보고된 바[14], 본 실험조건에서 공연비의 큰

변화가 없다는 점을 고려하면 I_{CH^*} 와 I_{OH^*} 의 변화가 화염신장의 지표가 됨이 자명하다.

Fig. 8은 고속카메라에 의한 가시광 이미지와 ICCD를 이용해 화염으로부터 방출되는 OH* 자발광 방사강도를 정규화(normalize)하여 비교한 이미지이다. Masato 등[15]은 분무화염이 내부화염 영역(internal flame zone)과 외부화염 영역(external flame zone)으로 이루는 구조로 이루어져 있다고 주장한 바 있다. 본 실험의 결과, 고속카메라로 촬영한 가시광 이미지에선 구분이 안되지만 OH*와 CH* 이미지를 통해 그 구조를 명확히 확인할 수 있다. 또한, 분무되는 유량의 증가는 내부화염의 영역뿐만 아니라 외부화염의 영역 또한 확대한다는 사실이 Fig. 6에서 관찰된다. 이 화염은 주변으로부터 공기의 과도한 유입으로 인해 화학반응물이 현저히 낮아 매우 약한 I_{CH^*} 와 I_{OH^*} 를 보이고(Fig. 8) 가시광으로도 희미하게나마 관찰된다.

내부화염 영역에서는 연료와 공기가 미리 혼합된다는 점과 액적내부로의 충분한 열전달로 인해 반응대 부근에서 연료를 완전히 기화시켜 반응물이 예혼합기체로 거동하게 하기 때문에, 예혼합화염과 유사한 거동을 보인다. 이때, 미증발 액적을 포함한 미연가스가 액적의 증발과 함께 국소적 팽창이 발생하면 내부화염은 불규칙적인 떨림(oscillation)을 동반하기도 한다. 이와 같은 현상은 Fig. 5에서 고르지 못한 화염의 형상으로 확인할 수 있다. 더불어, 연소생성물은 내부화염 영역에 열에너지를 공급하는 역할을 하게 되는데, 내부화염의 연소반응에 참여하지 못한 미연가스와 내부화염을 통과한 액적이 후류에서 내부화염의 열에너지를 공급받아 외부화염대를 형성하게 된다.

4. 결 론

수송기체의 유량을 변화시켜 발생하는 분무화염의 형태와 자발광의 세기를 파악했다. 실험에 의해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 본 실험 조건에서 조성된 걸보기 공연비의 평균은 약 36.7이며, 무화된 연료는 화학반응대에 진입하기전 기화성 향상으로 연료희박연소가 가

능하다.

- 2) 연소 시 내부화염 영역 또는 외부화염 영역에서 간헐적인 황염이 발생하였으며, 이는 분무연소에서 주로 나타나는 그룹 연소의 특징이다.
- 3) Re_a 가 196 이상으로 증가하면 분무속도가 화염의 전파속도를 초과하여 blow-out이 된다.
- 4) 케로신 화염에서 방출되는 OH 라디칼과 CH 라디칼의 반응영역은 큰 차이를 보이지 않으며, 각각 최대 라디칼 방사강도는 내부화염 영역에서 발생한다.
- 5) Re_a 증가에 따라 I_{CH^*} 와 I_{OH^*} 의 최대 라디칼 방사강도가 나타나는 지점은 y축 방향으로 이동하게 되고, 최댓값의 감소와 함께 반응대 폭이 점차 증가하는 전형적인 부분예혼합 확산화염의 구조를 보인다.
- 6) 미중발 액적을 포함한 미연가스가 액적의 증발과 함께 국소적 팽창이 발생하면 내부화염은 불규칙적인 떨림(oscillation)을 동반한다.

후 기

본 논문은 교육부와 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2016R1D1A3B010121622)과 우주핵심기술개발사업(NRF-2016M1A3A3A02018009)의 연구결과임.

References

1. Wood, R.W. and Loomis, A.L., "The Physical and Biological Effects of High-frequency Sound-Waves of Great Intensity," *Philosophical Magazine*, Vol. 4, No. 22, pp. 417-436, 1927.
2. Lang, R.J., "Ultrasonic Atomization of Liquid," *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 34, No. 1, pp. 6-8, 1962.
3. Takuya, F., Yasuki, H., Noriyuki, K., Masanobu, H. and Yoshio, T., "Characteristics of Low Vapor Pressure Oil Ignition Developed with Irradiation of Mega Hertz Level Ultrasonic," *Fuel*, Vol. 83, No. 16, pp. 2205-2215, 2004.
4. Topp, M.N. and Eisenklam, P., "Industrial and Medical Uses of Ultrasonic Atomizers," *Ultrasonic*, Vol. 10, No. 3, pp. 127-133, 1972.
5. Ju, E.S., La, W.J. and Choi, W.C., "A Study on Characteristics of the Liquid Atomization by Ultrasonic," *Trans. Korea oc. Auto. Eng.*, Vol. 7, No. 5, pp. 31-39, 1996.
6. Docquier, N. and Candel, S., 2002, "Combustion Control and Sensors: a Review," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 28, No. 2, pp. 107-150, 2002.
7. Nori, V.N., "Modeling and Analysis of Chemiluminescence Sensing for Syngas, Methane and Jet-A Combustion," Ph.D. Dissertation, Aerospace Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, G.A., U.S.A., 2008.
8. Yu, K.H., Trouve, A. and Daily, J.W., "Low-frequency Pressure Oscillations in a Model Ramjet Combustor," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 232, pp. 47-72, 1991.
9. Richards, G.A., Janus, M. and Robey, E.H., "Control of Flame Oscillations with Equivalence Ratio Modulation," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 15, No. 2, pp. 232-240, 1999.
10. Broda, J.C., Seo, S., Santoro, R.J., Shirhattikar, G. and Yang, V., "An Experimental Study of Combustion Dynamics of a Premixed Swirl Injector," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 27, No. 2, pp. 1849-1856, 1998.
11. Lee, S.-Y., Seo, S., Broda, J.C., Pal, S. and Santoro, R.J., 2000, "An Experimental Estimation of Mean Reaction Rate and Flame Structure during Combustion Instability in a Lean Premixed Gas Turbine Combustor," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 28, No. 1, pp. 775-782, 2000.
12. Ryu, J.I., "Atomization Technology of Liquid Fuels," *Journal of Korea Society of Automotive Engineers*, Vol. 15, No. 4, pp. 59-68, 1993.

13. Bae, S.T., Lee, S.H., Seok, J.Y., Kim, C.H. and Sa-Gong, G., "The Characteristics of an Ultrasonic Sprayer by using Piezoelectric Ceramic Resonator," *Journal of the Korean institute of electronic material engineers*, Vol. 22, No. 5, pp. 405-410, 2009.
14. Panoutsos, C.S., Hardalupas, Y. and Taylor, A. M.K.P., "Numerical Evaluation of Equivalence Ratio Measurement using OH* and CH* Chemiluminescence in Premixed and Non-premixed Methane-Air Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 156, pp. 273-291, 2009.
15. Masato, M., Kazuhiro, Y., Osamu, M. and Naoya, K., "Combustion of partially premixed spray jets," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 30, No. 2, pp. 2021-2028, 2004.