

케로신/공기 와류 화염의 화학발광 세기 특성에 관한 실험적 연구

이 현 재* · 서 성 현**

* 한밭대학교 기계공학과

Characteristics of Chemiluminescence Intensities of Kerosene/Air Swirl Flames

Hyeonjae Lee* and Seonghyeon Seo**

* Department of Mechanical Engineering, Hanbat Nat'l Univ.

(Received December 12, 2014 ; Revised March 23, 2015 ; Accepted April 8, 2015)

Key Words: Combustion(연소), Swirl(와류), Kerosene(케로신), Chemiluminescence(화학발광), Emission Spectrum(자발광 스펙트럼)

초록: 본 논문은 와류 유동이 존재하는 케로신/공기 화염 자발광 특성을 실험적 접근방법으로 수행한 연구이다. 한국형 발사체 액체로켓엔진에 적용되는 Jet A-1 을 사용하였고, 와류 세기 영향을 파악하기 위해 세 가지의 스월러를 적용해 실험을 진행하였다. 와류 세기, 연소 공기온도 변화에 따른 화염 자발광을 분광기를 활용하여 측정하였다. 자발광 스펙트럼에서 OH*, CH*, C₂* 등의 라디칼에 의한 화학발광 특성을 파악하였다. 케로신 화염의 화학발광 세기는 와류 세기에 민감한 반응을 보였으며, 연소 공기온도에 의한 영향은 적게 받았다. 특히 C₂* 화학발광 방출 세기는 와류 세기와 당량비 변화에 민감하게 반응하였다. 화염 특성을 파악하기 위해 각 라디칼 세기 비로 데이터를 분석한 결과, I_{OH*}/I_{CH*} 화학발광 세기 비는 공기 유량 변화에 의한 당량비 변화를 지시하기가 적합하며, I_{C₂*}/I_{CH*} 화학발광 세기 비는 연료 유량변화에 따른 당량비 변화를 지시하기에 적합하였다.

Abstract: The present study presents experimental results on the characteristics of emission spectra of kerosene/air swirl flames. The aviation fuel Jet A-1, which is used for the liquid rocket engines of the Korea Space Launch Vehicle, is used with three different swirlers to investigate the swirl strength effects. The emission spectra from the flames are measured with a spectrometer as the swirl strength and combustion air temperature are varied. Chemiluminescence intensities of OH*, CH* and C₂* are identified from the spectra. The chemiluminescence intensities from the kerosene flames show sensitivity to the swirl strength and are affected by changes in the combustion air temperature. Among the three radicals of interest, C₂* show the most significant changes in chemiluminescence intensity with the swirl strength and equivalence ratio. The intensity ratios I_{OH*}/I_{CH*} and I_{C₂*}/I_{CH*} are adequate for indicating changes in the equivalence ratio with the air and fuel mass flow rates, respectively.

- 기호설명 -

hν : 방출되는 빛의 에너지
 i_{x*} : 특정 파장에서 여기 된 분자의 방출 세기
 I_{x*} : 식 (4)에서 정의된 화학발광 방출
 ṁ_a : 공기 질량 유량
 ṁ_f : 연료 질량 유량

RI : 식 (5)에서 정의된 Relative increase 의 약어
 s : Swirl vane 의 두께
 T_a : 연소 공기 온도
 X* : 화학반응을 통해 여기 된 상태의 분자 세기
 z : Swirl vane 의 개수
 ψ : Blockage factor [= 2zs / (2π cos φ)]
 φ : Swirl vane 의 각도
 λ_{lower} : 화학반응을 통해 방출되는 여기 된 특정 분자의 최저 파장 값

† Corresponding Author, shseo@hanbat.ac.kr

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

- λ_{upper} : 화학반응을 통해 방출되는 여기 된 특
정 분자의 최고 파장 값
 σ : 접선방향 유입되는 유속과 반경방향으
로 유입되는 유속의 비

1. 서 론

현재 세계는 경기침체에도 불구하고 제 2의 우주 전쟁(space race)으로 불리는 새로운 우주개발 경쟁이 치열하게 진행되고 있다. 국내의 경우 2008년 시행된 한국인 최초 우주 비행에 따른 국제 우주 정거장에서 11 일간의 체류와 2013년 한국 최초인 인공위성발사체인 나로호(KSLV-I)가 세계 11 번째로 지구 저궤도에 인공위성을 쏘아 올리는데 성공하였다. 이후 국내에서는 우주기술과 로켓에 관한 인식과 관심이 증가하고 있다.⁽¹⁾

고성능 연소추진 기관은 가스터빈과 로켓엔진으로 볼 수 있다. 이러한 고성능 연소추진 기관은 연소과정에서 배출되는 환경오염 물질의 생성 억제와 에너지 소모 절감 그리고 열효율 증대를 목적으로 지속적으로 더 높은 압력 또는 터빈 입구 온도에서 작동하도록 요구되고 있다. 이와 같은 연소장치가 설계 요구사항대로 장시간 동안 안정적으로 작동하기 위해서는 무엇보다 화염의 정확한 상태 감시와 제어 기술이 필요하다.⁽²⁻⁵⁾

연소 과정에서 물리적 특성을 파악하는 방법에는 능동적인 방법과 수동적인 방법이 있을 수 있다. 능동적인 방법은 외부 또는 인위적인 에너지를 이용해 연소 과정에서 발생할 수 있는 물리적 특성을 파악하는 것이다. 수동적인 방법으로는 연소 자체에서 방출되는 에너지를 감지하여 물리적 특성을 파악하는 방법이다. 수동적인 방법으로는 열전대를 활용한 온도 측정이나 스트레인 게이지를 활용한 압력 측정, 압전 현상을 이용한 압력 섭동 측정과 화염에서 방출되는 빛 에너지를 활용하는 광학적 방법이 존재한다.⁽⁶⁾

광학적 방법을 이용하여 화염의 물리적 특성을 활용하는 방법으로 할로젠램프나 레이저를 외부 광원으로 온도, 압력, 가스 성분 등을 측정하는 방법과 화염에서 자체적으로 발생하는 광 에너지 특성을 분석하여 물리적 성질을 파악하는 기법으로 나눌 수 있다. 보통 레이저나 할로젠램프를 활용하는 방법의 경우 메탄과 프로판을 주 성분으로 하는 천연가스와 같이 광학적 두께(optical thickness)가 얇은 화염에서 적용이 가능하다. 또한 외부 광원을 활용해야 하기 때문에 측정 장치와 시스템이 복잡해지는 단점이 존재한다.⁽⁷⁾

위와 같은 이유로 본 연구에서는 연소 화염에서 자체적으로 발생하는 자체발광, 즉 화학발광을 이용하여 연소가 지나는 물리적 특성을 파악하기 위한 연구를 진행했다. 탄화 수소 계열 연료의 화염에서 주요 관심 대상이 되는 화학발광 성분으로는 OH*, CH*, C₂*, CO₂*가 있으며 다양한 메커니즘을 통해 생성된다.⁽⁸⁻¹⁵⁾

화학발광 신호를 활용해 당량비 측정을 위한 목적으로 활용하는 연구는 다수 진행되었다. 당량비 측정을 측정하기 위해 연료로써 천연가스를 활용하여 희박 예 혼합 조건에서 가스터빈 연소기에 적용을 위해 진행되었고 대부분의 연구는 예 혼합 메탄 화염을 이용해 연구가 주로 진행되었다.

Docquier 등⁽¹⁶⁾은 예 혼합 메탄/공기 화염에서 연소 압력(1-10 bar)과 당량비(0.6-1.1) 변화에 따른 OH*, CH*, C₂*의 화학발광 특성 변화를 관찰하였다. 각각의 라디칼의 화학발광 특성은 다양한 경향을 보였다. 라디칼에서 발생하는 화학발광 신호는 압력과 밀접한 관계를 보였으며, OH*은 CH*, C₂*에 비해 희박 연소 조건에서 강한 세기가 방출되며, CH*과 C₂*은 농후한 조건에서 지시 값(indicator)에서 적당한 값을 나타냈다. 두 개 혹은 세 개의 라디칼 신호를 신호를 활용해 전체 당량비를 지시하는 것을 제시했다. Kojima 등⁽¹⁷⁾은 층류 메탄/공기 화염에서 색수차를 제거하고 공간적 분해능을 높이기 위해 Cassegrain 광학을 적용하여 OH*, CH*, C₂*의 화학발광 세기를 측정하였다. 그 결과로 당량비 1.35 이하 조건에서 I_{OH^*}/I_{CH^*} 화학발광 세기 비의 결과가 당량비와 민감한 상관관계가 있다고 결과를 도출했다. Nori 와 Seitzman⁽¹⁸⁾은 희박 메탄 연소 화염에서 I_{OH^*}/I_{CH^*} 화학발광 세기 비는 일정한 압력과 온도 조건에서 당량비를 지시하기 적당하다고 보고하였다. Orain 과 Hardalupas⁽¹⁹⁾는 프로판, 아이소 옥탄, 에탄올, 메탄올의 다양한 연료를 예 혼합 대향류(counterflow) 화염에 활용하여 OH*, CH*, C₂* 화학발광 세기를 측정하였다. 화염에서 방출되는 열 방출율은 연료 종류와 밀접한 관계를 가지며, 프로판과 아이소 옥탄의 경우 당량비 증가에 따라 I_{OH^*}/I_{CH^*} 화학발광 세기 비가 감소한다고 결과를 도출하였다. Nori⁽⁸⁾는 Jet-A 층류 예 혼합 연소 화염에서 화학발광 세기를 측정하는 연구를 진행했다. 대기압 조건에서 수행하여 I_{OH^*}/I_{CH^*} 화학발광 세기 비는 당량비 대비 증가에 있는 것으로 보고하였다.

본 논문에서는 케로신/공기 화염에서 방출되는 화학발광을 활용하여 화염의 물리적 특성을 파악하

기 위한 연구 결과를 수록하였다. 또한 실제 액체 로켓엔진의 화염을 모의하기 위해 와류 연소기 (swirl combustor)를 활용하였으며, 와류의 영향에 따른 화염 특성을 분석하기 위해 다양한 swirler를 활용하여 실험을 진행했다. 궁극적으로 와류 연소기를 통해 형성되는 케로신/공기 화염에서 방출되는 화학발광 스펙트럼의 세기를 분석하고, 각각의 세기의 방출 특성과 세기 비(intensity ratio)를 분석하여 신호 세기의 비와 당량비의 관계를 분석하였다.

2. 연구방법

2.1 모델 연소기

본 연구에서는 화염에서 발생하는 화학발광을 측정하여 연소 특성을 파악하기 위해 실제 액체 로켓엔진 연소기 연소 현상을 모의하여 연소 화염 특성을 분석하였다. 액체로켓엔진 연소기 내부의 강한 화염을 모의하기 위해 Fig. 1 과 같이 와류 연소기를 활용하였다. 와류 연소기의 와류 유동은 연소기 내부 swirler에 의해 나선형의 유동을 얻게 되며, 형성되는 와류의 세기에 따라 화염의 크기, 모양, 연소 강도 등에 영향을 미친다.

실험에 적용된 swirler는 연소기의 접선 방향으로 유입되는 공기에 의해 와류를 형성하게 된다. 제작된 연소기의 swirl number는 Sheen 등⁽²⁰⁾의 연구 결과를 활용하여 설정하였다.

$$\sigma(\varphi) = \frac{1}{1-\psi} \left(\frac{\tan \varphi}{1 + \tan \varphi \tan(\pi/z)} \right) \quad (1)$$

$$C_1(\text{Re}) = 0.28 \times [1 - \text{sech}(0.026 \text{Re}^{0.67})] \quad (2)$$

$$\text{Swirl Number}(\text{SN}) = C_1(\text{Re}) \times \sigma(\varphi) \quad (3)$$

여기서 φ 는 swirl vane의 각도이며, z 는 vane의 개수이다. SN를 결정하기 위해 위의 식 (1)~(3)을 활용하였다. 식 (1)은 swirl vane의 각도와 날개의 수의 함수로 $\sigma(\varphi)$ 를 결정하고, 식 (2)를 통해 Reynolds number의 함수인 $C_1(\text{Re})$ 을 결정하게 된다. 계산된 두 값을 이용해 SN를 결정할 수 있다. Fig. 2는 SN 0.60의 swirler형상이며, 자세한 연소기 설계는 기존 문헌을 통해 확인할 수 있다⁽²¹⁾. 실험에 적용된 연소기는 강한 와류를 형성할 수 있도록 설계되었으며, 와류의 강도가 화염에 미치는 영향과 방출되는 화학발광 특성의 영향을 파악하기 위해 SN 0.60, 0.83, 1.30의 세 가지 swirler를 이용하여 연소 시험을 진행했다.

연소시험을 위해 산화제로 공기를 활용하였다. 공기는 압축기를 이용해 공급하였고, 전기히터를

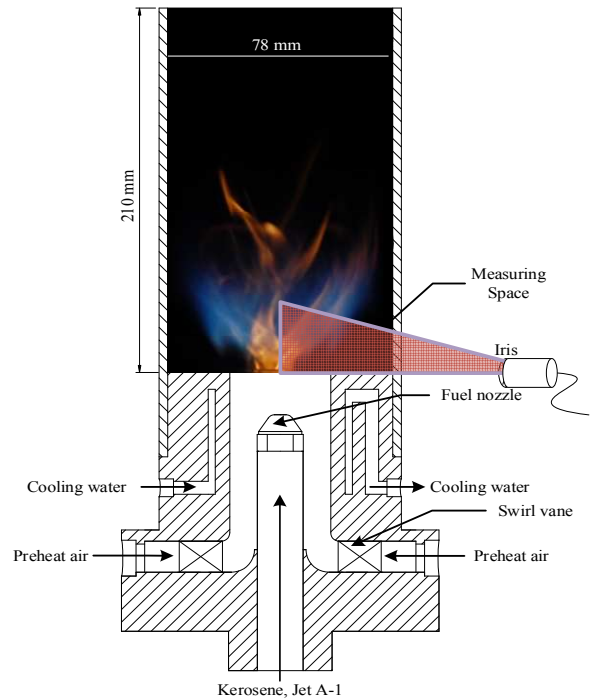


Fig. 1 Cross sectional view of the radial swirl combustor(not to scale)

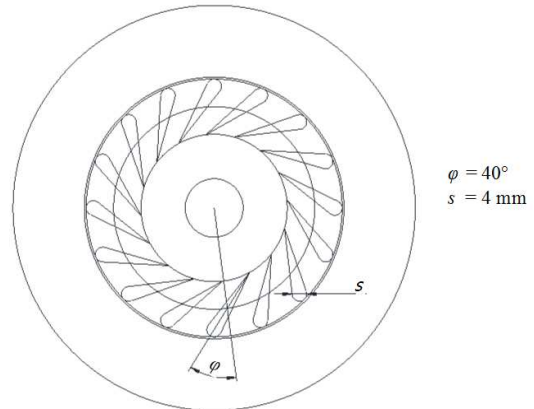


Fig. 2 Top view of the radial swirler at swirl number 0.60

통해 실험 조건에 부합되는 온도로 가열하여 연소기 내부로 공급하였다. 가열된 공기는 4개의 튜브로 분할되어 연소기의 접선 방향으로 유입된다. 또한 유입되는 공기는 히터로 가열되기 전에 위치한 질량유량계(한국계기티앤에스, TSC 145)에 의해 유량을 조절했다. 연소 시험을 진행하며 정확한 당량비 설정과 광학 측정을 위해 내부 직경 78 mm, 길이 240 mm의 석영관을 이용하여 연소실을 형성하였다. 연료의 경우 액체로켓엔진에서 적용하는 케로신(kerosene, Jet A-1)을 활용하였다. 연료 탱크(4 liter)에 저장된 연료를 질소로 가압하여 유량을 조절하였고, 조절된 유량은 터빈 유량 센서

Table 1 Chemiluminescence radicals and their spontaneous emission wavelengths⁽²²⁾

Species	Wavelength (nm)
OH*	306 – 315
CH*	431
C ₂ *	510 – 516
CO ₂ *	broadband

Table 2 Major experimental conditions

Parameter		Value or Range
Equivalence ratio	ϕ (-)	0.6 - 1.3
Swirl number	SN (-)	0.60, 0.83, 1.30
Fuel mass flow rate	\dot{m}_f (g/s)	0.20 - 0.32
Air mass flow rate	\dot{m}_a (g/s)	2.50 – 5.00
Combustion air temperature	T_a (K)	350 - 500

(McMillan, 104)를 통해 모니터링 되었다. 터빈 유량 센서를 통과한 연료는 연소기의 중심으로 연료가 유입되며 연소기 내부에 중공 형태로 연료를 분사하는 노즐(Danfoss, 0.20 g/sec at 7 bar)을 통해 연료를 공급하였다.

2.2 실험 방법 및 조건

화염에서 발생하는 화학발광 측정을 위해 분광기(Ocean Optics, USB 2000+)를 활용하였다. 분광기에는 광섬유(Ocean Optics, 600 μ m UV/VIS)를 장착하고 맞은편을 통해 입사되는 광(light)을 통해 화염의 스펙트럼을 측정하였다. 분광기를 통한 화염의 스펙트럼 계측은 반지름 25mm의 반원에 해당하는 영역을 설정하였고, 정확한 계측 영역을 형성하기 위해 iris를 활용하여 계측 공간 영역을 조절하였다. 와류 연소기를 통해 형성되는 케로신 화염은 떨림이 매우 강하고 자발광(luminosity)이 매우 강하기 때문에 분광기 촬영 시 노출시간이 짧을 경우 정확한 화학발광 스펙트럼 측정이 어렵다. 때문에 분광기의 1 회 계측 시 노출시간 200 msec로 100 회 평균하여 스펙트럼을 계측하였다. 또한 전체 파장에서 특정 라디칼(OH*, CH*, C₂*)을 고려하였으며, 각각의 라디칼의 세기(intensity)는 식 (4)와 같이 구하였다.

$$I_{X^*} = \int_{\lambda_{\text{lower}}}^{\lambda_{\text{upper}}} i_{X^*} d\lambda \quad (4)$$

여기서 X*은 특정 분자가 화학반응을 통해 여기된 상태를 의미하며, 화학발광을 야기하는 분자는 OH*와 CH*, C₂*이 있다. λ_{upper} 와 λ_{lower} 는 화

학발광 세기 결정을 위한 최저, 최고 파장 값을 의미한다. 탄화수소 계열에서 주로 발생하는 각 분자에 따른 화학발광 파장 값을 Table 1에 수록하였다.

실험으로 화염에서 발생하는 화학발광 스펙트럼의 대표 파장 대역은 Table 1로 기존 연구 결과를 통해 확인할 수 있다. 본 연구에서는 각 라디칼의 방출 파장 대역을 고려한 I_{X^*} 을 결정하기 위해 각 분자에 의해 화학발광이 시작되는 위치부터 끝나는 위치에 해당하는 영역과 실제 계측 센서의 분해능(resolution)을 고려하여 OH* 라디칼은 305.65 ~ 321.50 nm, CH* 라디칼은 421.72 ~ 433.52 nm, C₂* 라디칼은 512.46 ~ 517.67 nm에 해당하는 파장 대역을 이용하여 화학발광의 세기를 결정했다.

화염을 통해 발생하는 화학발광을 측정하기 위해 Table 2와 같이 실험 조건을 설정하였다. 당량비를 조절하기 위해 첫 번째로 고정된 연료 유량에서 공기 유량을 변화하여 당량비를 조절하였고, 두 번째로는 고정된 공기 유량에서 연료 유량을 조절하여 실험을 진행했다. 공기 유량을 조절하여 당량비를 조절한 경우, 연료 유량을 약 0.2 g/s로 고정한 상태에서 공기 유량을 약 2.50-5.00 g/s로 조절하여 당량비를 조절하였고, 연료 유량을 통한 당량비 조절의 경우 공기 유량을 4.10 g/s로 고정한 상태에 연료 유량을 약 0.2-0.32 g/s로 조절하여 당량비를 변화시켰다. 또한 공급되는 연소 공기 온도는 50 K 간격으로 가열하여 약 350-500 K의 온도 범위에서 실험을 진행하였다. 위와 같은 조건으로 화염의 화학발광 방출 특성을 분석했다.

3. 결 과

Fig. 3는 고정된 연료 유량에 공기의 유량을 조절하여 당량비를 변화한 결과로서 형성되는 화염에서 방출되는 화학발광 스펙트럼의 결과를 나타냈다. 또한 와류의 영향을 확인하기 위해 swirler를 활용해 세 종류의 와류 세기를 비교했다. 모든 스펙트럼 그래프는 SN 1.30의 $i_{C_2^*}$ 최대 값 ($(i_{C_2^*})_{\text{max}}$)으로 나누어 나타내었다. 케로신 화염 스펙트럼은 기존 연구결과와 동일한 파장 대역에서 OH*, CH*, C₂*에 의한 화학발광이 방출되는 것을 확인할 수 있다.⁽²¹⁾ 모든 화학발광 스펙트럼은 낮은 당량비 구간 ($\phi = 0.60 \sim 0.90$)에서 i_{OH^*} , i_{CH^*} , $i_{C_2^*}$ 의 영향이 명확하게 방출되는 것을 확인할 수 있다. 하지만 높은 당량비 구간 ($\phi = 0.90 \sim 1.20$)에서는 525-600 nm 영역에 해당하는 $i_{CO_2^*}$ 의 영향이

급격하게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한 와류의 세기와 당량비가 증가함에 따라 $i_{C_2^*}$ 와 $i_{CO_2^*}$ 는 급격하게 증가하지만, i_{OH^*} 와 i_{CH^*} 의 경우는 와류의 세기와 당량비에 따른 영향이 비교적 작다. 더욱 정확한 비교를 위해 당량비에 따른 I_{OH^*} , I_{CH^*} , $I_{C_2^*}$ 의 변화를 Fig. 4에 수록하였다. 이 경우 당량비와 와류의 세기가 화학발광 스펙트럼 방출 세기에 미치는 영향을 나타내었고, 모든 경우 SN 1.30에서 $I_{C_2^*}$ 의 최대 값($(I_{C_2^*})_{max}$)을 이용해 나누어 나타냈다.

SN 0.60의 결과는 Fig. 4(a)에 수록하였고, 당량비에 따라 각각의 화학발광 스펙트럼 세기는 다른 경향으로 변하는 것을 확인할 수 있다. I_{OH^*} 와 I_{CH^*} 의 경우 당량비가 증가함에 따라 서서히 감소하는 경향을 보인다. I_{OH^*} 의 경우 당량비가 0.67에서 0.76로 증가한 구간에서는 약 1%의 감소를 보였으며, 이후 22%, 24%, 17%, 17%의 감소를 보였다. I_{CH^*} 의 경우, 당량비가 0.67에서 0.76으로 증가하는 구간에서는 약 3% 미만의 증가를 보였다. 하지만 당량비 0.76 이후에서는 당량비가 증가함에 따라 약 17%, 14%, 3%의 감소를 보였으며, 당량비 0.90 이후로는 약 3% 미만의 감소율을 보이는 것을 확인했다. 반면 $I_{C_2^*}$ 는 당량비의 증가에 따라 급격하게 증가했다. $I_{C_2^*}$ 는 초기 4%의 감소를 보였지만 이후 당량비 증가에 따라 약 5%, 23%, 30%의 증가를 보였다.

SN 0.83의 결과를 Fig. 4(b)에 나타내었다. 이 경우도 $I_{C_2^*}$ 를 제외하고 큰 변화를 보이지 않았다. I_{OH^*} 의 경우 당량비에 따라 약 7-13%의 감소를 보였으며, I_{CH^*} 는 초기 12%의 증가를 보이지만 이후 당량비에 따라 3% 미만의 변화율을 보일 뿐 큰 변화를 보이지 않았다. 반면 $I_{C_2^*}$ 는 당량비에 따라 급격한 변화를 보였으며 당량비에 따라 약 20% 정도의 일정한 증가를 보였다.

SN 1.30은 Fig. 4(c)에 나타냈다. I_{OH^*} 의 경우 전반적으로 5% 미만으로 화학발광 방출 세기가 변했다. 반면 I_{CH^*} 은 초기 10%의 세기 증가를 보였고 당량비 0.84에서 0.96으로 증가하는 구간에서 21%의 증가를 보였다. $I_{C_2^*}$ 는 당량비에 따라 급격하게 변화를 보였고, 당량비가 0.75에서 0.84로 증가할 때 약 24%의 증가를 보였으며, 당량비가 0.97에서 1.06으로 증가하는 구간에서는 약 50%의 세기가 증가를 보일 정도로 와류와 당량비에

민감한 반응을 보였다.

Table 3은 각 화학발광 세기의 증가율을 나타낸 것으로 식 (5)를 활용해 표현했다. 여기서 $I_{X^*,max}$ 와 $I_{X^*,min}$ 은 당량비에 따른 각 라디칼 세기의 최소 값과 최대 값을 의미하며, 연소 초기 낮은 당량비에서 방출된 라디칼 세기와 연소 시험 후반의 높은 당량비에서 방출된 라디칼 세기를 활용하여 상대적인 증가를 표현했다.

$$RI = (I_{X^*,max} - I_{X^*,min}) / I_{X^*,min} \times 100 \quad (5)$$

Fig. 5는 연료 유량을 조절해 당량비를 변화한 결과이다. 이 경우도 마찬가지로 각각의 그래프는 SN 1.30에서 당량비 1.09의 $i_{C_2^*}$ ($(i_{C_2^*})_{max}$)로 모든 값을 나누어 그래프를 표현하였다.

공기 유량으로 당량비를 조절한 결과에 비해 모든 당량비 구간에서 i_{OH^*} , i_{CH^*} , $i_{C_2^*}$ 가 명확하게 방출되는 것을 확인할 수 있다. 당량비가 증가함에 따라 525~600 nm 영역의 $i_{CO_2^*}$ 가 증가를 보이지만 공기 유량으로 당량비를 조절한 결과에 비해 $i_{CO_2^*}$ 의 증가가 급격하지 않은 것을 확인할 수 있다. 당량비와 와류의 영향에 따른 화학발광 스펙트럼 세기의 변화를 확인하기 위해 Fig. 6와 같이 I_{OH^*} , I_{CH^*} , $I_{C_2^*}$ 의 변화를 수록하였고, SN 1.30의 결과에서 당량비 1.09의 $I_{C_2^*}$ ($(I_{C_2^*})_{max}$)로 나누어 나타내었다.

Fig. 6(a)는 SN 0.60에 따른 화학발광 세기의 결과를 나타냈다. 이 경우는 $I_{C_2^*}$ 를 제외하고 I_{OH^*} 와 I_{CH^*} 가 감소하는 경향을 보였다. I_{OH^*} 의 경우 당량비에 따라 초기 약 5%의 감소율을 보였으며 당량비가 0.96 이후에는 약 19%, 7%, 16%의 감소를 보였다. I_{CH^*} 의 경우 당량비 0.96에서 1.06의 구간에서 10%의 감소를 보였지만, 전반적으로 약 3% 미만의 낮은 감소율을 보였다. 반면 $I_{C_2^*}$ 의 경우 당량비에 따라 약 7~8%로 화학발광 세기가 증가했다.

SN 0.83의 결과는 Fig. 6(b)에 수록하였다. I_{OH^*} 는 당량비가 증가함에 따라 방출 세기가 1% 미만의 변화를 보였지만 전반적으로 큰 변화를 보이지 않았다. 반면, I_{CH^*} 는 당량비가 증가함에 따라 약 5%의 지속적인 증가를 보였으며, $I_{C_2^*}$ 는 당량비가 증가함에 따라 약 12%의 선형적인 증가를 보였다.

Fig. 6(c)는 SN 1.30일 때의 결과로서 모든 경우가 당량비에 따라 증가하는 결과를 도출하였다.

Table 3 Relative increases of chemiluminescence radical intensities along with an equivalence ratio for air mass flow rate variations.

Radical intensity	Swirl number	RI(%)
I_{OH^*}	0.60	-60.8
	0.83	44.6
	1.30	10.9
I_{CH^*}	0.60	-26.7
	0.83	38.2
	1.30	57.0
$I_{C_2^*}$	0.60	76.2
	0.83	117.8
	1.30	227.5

Table 4 Relative increases of chemiluminescence radical intensities along with an equivalence ratio for fuel mass flow rate variations.

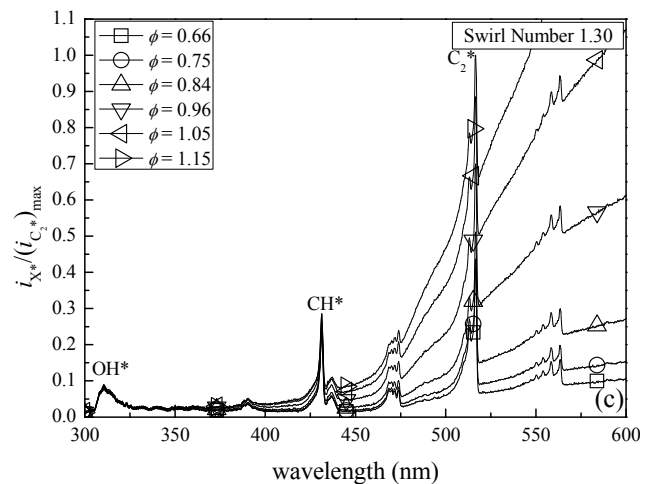
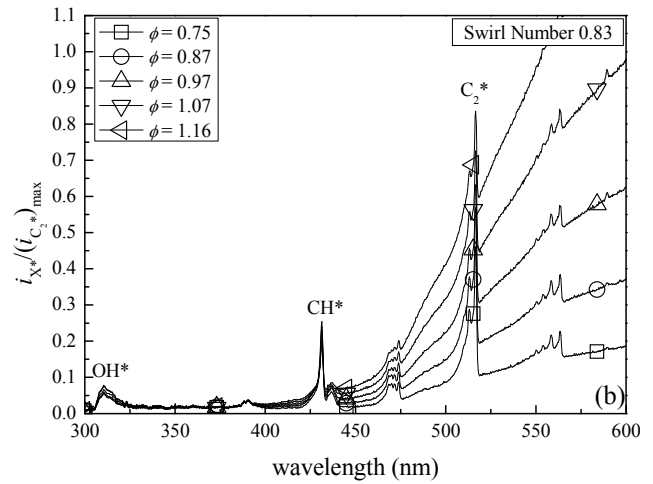
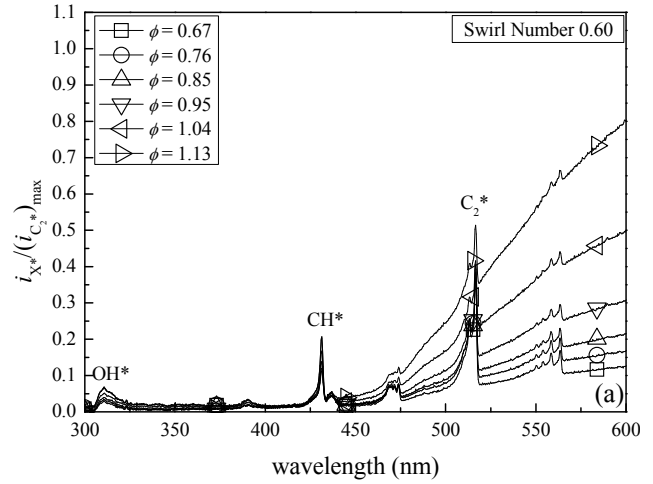
Radical intensity	Swirl number	RI(%)
I_{OH^*}	0.60	-44.2
	0.83	-0.1
	1.30	13.0
I_{CH^*}	0.60	-22.0
	0.83	22.1
	1.30	41.7
$I_{C_2^*}$	0.60	29.6
	0.83	67.8
	1.30	93.8

SN 1.30의 I_{OH^*} 는 당량비가 증가함에 따라 약 3%의 지속적으로 증가했으며, I_{CH^*} 는 당량비에 따라 7~9%로 증가했다. $I_{C_2^*}$ 는 당량비가 0.93에서 0.98로 증가한 구간에서 약 20%로 급격한 증가를 보였고, 전반적으로 13~15%의 증가를 보였다.

Table 4는 화학발광 세기의 증가율을 식 (5)를 활용해 수록한 결과로서 각 화학발광 방출 세기는 와류의 영향과 당량비에 따라 방출 세기의 변화를 보였다.

전반적으로 I_{CH^*} 와 $I_{C_2^*}$ 은 I_{OH^*} 에 비해 와류의 영향에 민감한 것을 확인할 수 있다.

케로신 화염의 화학발광 스펙트럼을 더욱 명확하게 비교하기 위해 하나의 화학발광 세기가 아닌 I_{OH^*} , I_{CH^*} , $I_{C_2^*}$ 을 이용해 화학발광 세기 비의 형태로 비교하여 결과를 도출하였다. 본 논문에서 적용한 화학발광 세기 비는 I_{OH^*}/I_{CH^*} 와 $I_{C_2^*}/I_{OH^*}$,

**Fig. 3** Chemiluminescence emission spectra as a function of an equivalence ratio with air mass flow rate variations at swirl numbers of (a) 0.60, (b) 0.83 and (c) 1.30, $\dot{m}_a = 2.40-4.90$ g/s, $\dot{m}_f = 0.21$ g/s, $T_a = 401$ K

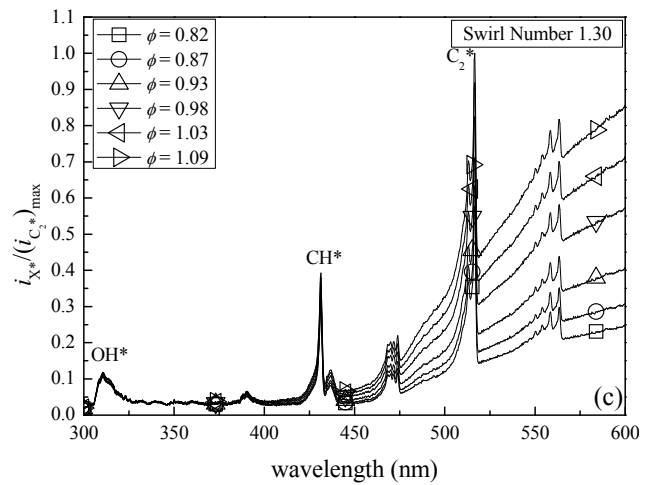
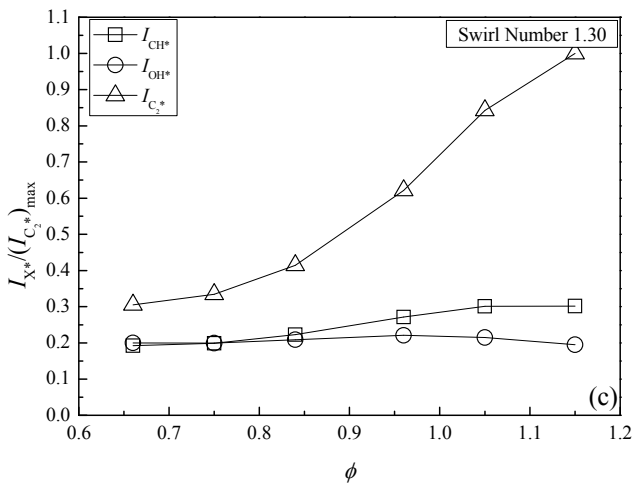
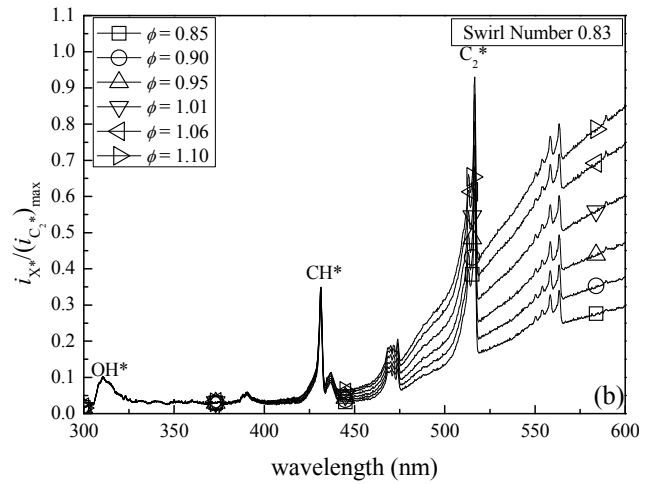
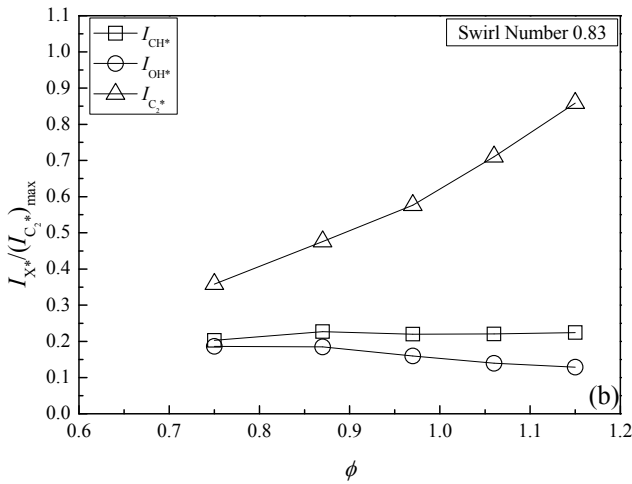
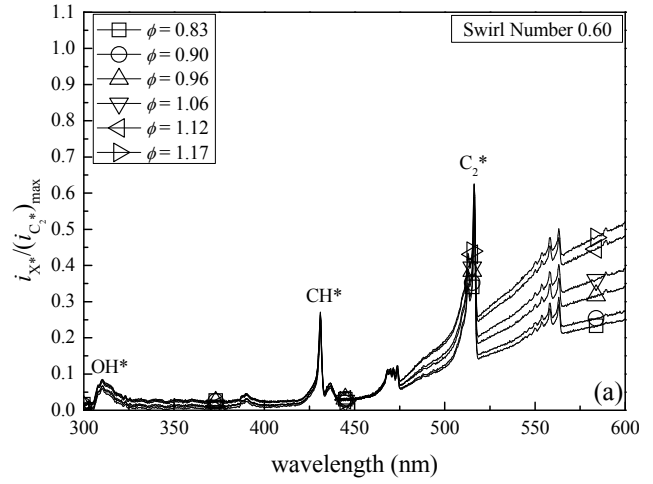
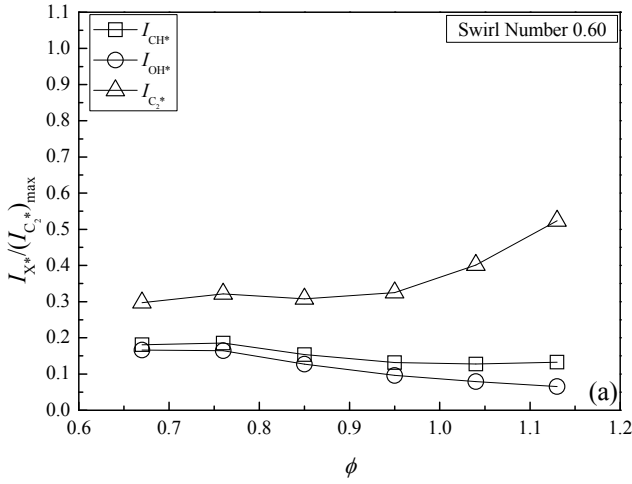


Fig. 4 Integrated radical intensities of CH*, OH* and C₂* as a function of an equivalence ratio with air mass flow rate variations at swirl numbers of (a) 0.60, (b) 0.83 and (c) 1.30

Fig. 5 Chemiluminescence emission spectra as a function of an equivalence ratio with fuel mass flow rate variations at swirl numbers of (a) 0.60, (b) 0.83 and (c) 1.30, $\dot{m}_a = 4.11$ g/s, $\dot{m}_f = 0.23 - 0.30$ g/s, $T_a = 404$ K

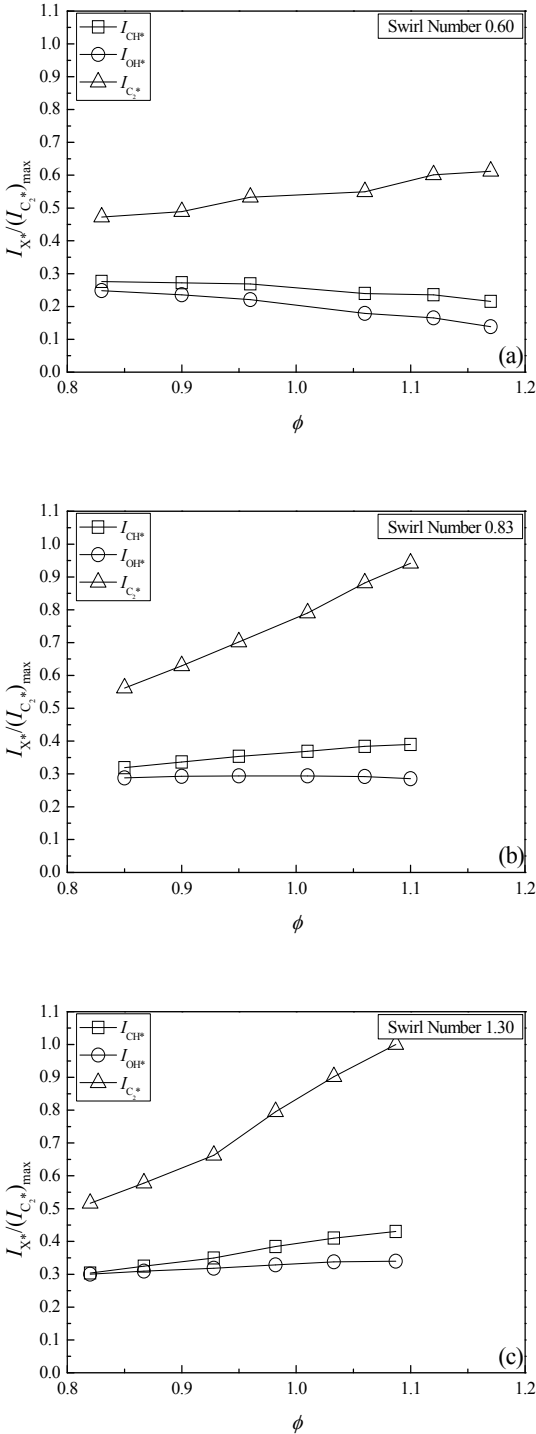


Fig. 6 Integrated radical intensities of CH*, OH* and C₂* as a function of an equivalence ratio with fuel mass flow rate variations at swirl numbers of (a) 0.60, (b) 0.83 and (c) 1.30

$I_{C_2^*}/I_{CH^*}$ 로 세 형태를 활용했으며, 결과를 Fig. 7과 8에 수록하였다. 또한 공급되는 연소 공기 온도의 영향을 고려하고자 350-500 K의 다양한 범위의 결과를 수록하였다.

Table 5 Gradients of chemiluminescence radical intensity ratios as a function of an equivalence ratio with air mass flow rate variations.

Intensity ratio	Swirl number	Gradient
I_{OH^*}/I_{CH^*}	0.60	-0.85
	0.83	-0.90
	1.30	-0.89
$I_{C_2^*}/I_{CH^*}$	0.60	4.83
	0.83	4.50
	1.30	4.34
$I_{C_2^*}/I_{OH^*}$	0.60	12.40
	0.83	11.55
	1.30	11.62

Table 6 Gradients of chemiluminescence radical intensity ratios as a function of an equivalence ratio with fuel mass flow rate variations.

Intensity ratio	Swirl number	Gradient
I_{OH^*}/I_{CH^*}	0.60	-0.54
	0.83	-0.69
	1.30	-0.73
$I_{C_2^*}/I_{CH^*}$	0.60	2.90
	0.83	2.40
	1.30	1.83
$I_{C_2^*}/I_{OH^*}$	0.60	6.20
	0.83	4.93
	1.30	3.44

첫 번째로 공기 유량 변화로 당량비를 조절한 연소 시험 결과는 Fig. 7에 나타났다. Fig. 7(a)는 I_{OH^*}/I_{CH^*} 의 결과로 와류의 영향은 당량비의 증가와 관계없이 모두 일정하게 분포되어 있는 것을 확인할 수 있다. I_{OH^*}/I_{CH^*} 는 당량비에 따라 일정한 감소를 보이며, 각 와류의 영향에 따른 기울기를 나타냈다. SN 0.60은 직선으로 기울기를 나타냈으며, SN 0.83은 쇄선으로 나타냈다. SN 1.30은 점선으로 화학발광 세기 비의 기울기를 나타냈다. 전반적으로 와류의 영향이 화학발광 세기 비에 큰 영향을 미치지 않고 일정한 경향을 보인다.

$I_{C_2^*}/I_{CH^*}$ 의 결과를 Fig. 7(b)에 수록하였다. 이 경우도 와류의 세기가 강해짐에 따라 기울기는 감소하지만 와류의 영향은 크지 않고, 세 경우가 모두 기울기가 유사하다.

$I_{C_2^*}/I_{OH^*}$ 는 Fig. 7(c)에 나타냈으며, 이 경우도

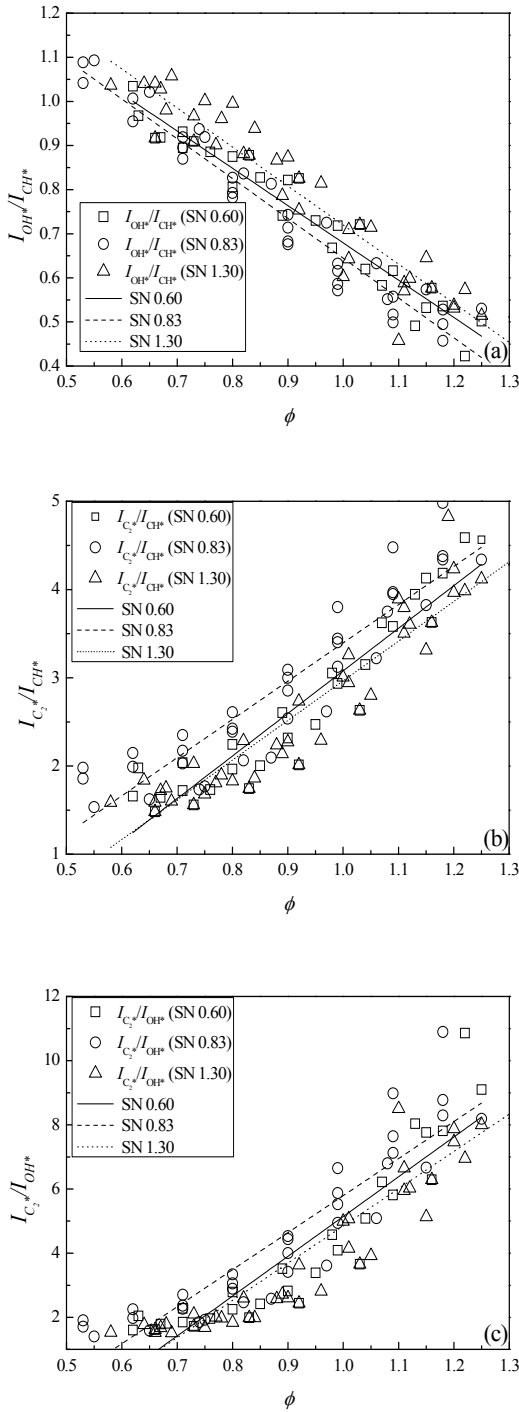


Fig. 7 Chemiluminescence intensity ratios of (a) I_{OH^*}/I_{CH^*} , (b) $I_{C_2^*}/I_{CH^*}$, and (c) $I_{C_2^*}/I_{OH^*}$ at a combustion air temperature range of 350-500 K as a function of an equivalence ratio with air mass flow rate variations

와류의 세기가 화학발광 세기 비에 영향이 크게 미치지 않지만, I_{OH^*}/I_{CH^*} 와 $I_{C_2^*}/I_{CH^*}$ 에 비해 당량비가 증가함에 따라 기울기가 급격하게 증가한다. Table 5는 공기 유량 조절로 당량비를 변화한 결과로 와류의 영향에 따른 화학발광 세기 비의

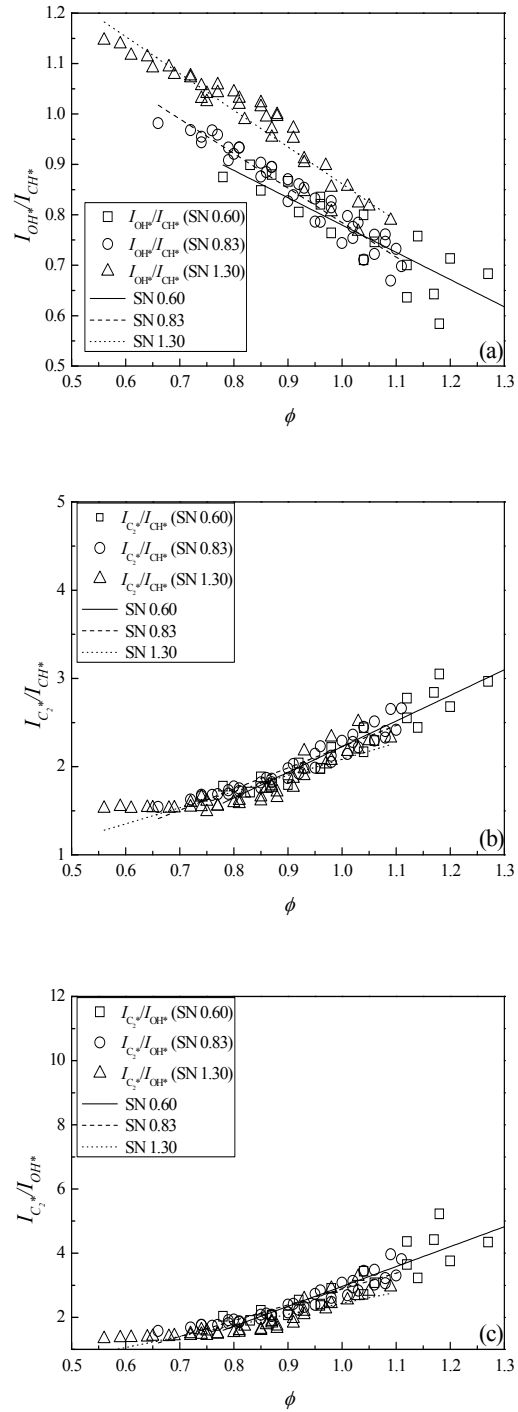


Fig. 8 Chemiluminescence intensity ratios of (a) I_{OH^*}/I_{CH^*} , (b) $I_{C_2^*}/I_{CH^*}$, and (c) $I_{C_2^*}/I_{OH^*}$ at a combustion air temperature range of 350-500 K as a function of an equivalence ratio with fuel mass flow rate variations

기울기 변화 결과이다.

연료 유량을 조절하여 당량비를 변화한 결과를 Fig. 8에 수록하였다. 이 경우도 마찬가지로 온도의 영향을 고려하고자 350-500 K의 다양한 온도 범위에 해당하는 결과를 수록하였다. 또한 와류의

세기에 따라 직선과 쇄선, 점선으로 기울기를 나타냈다.

첫 번째로 Fig. 8(a)은 I_{OH^*}/I_{CH^*} 의 결과를 수록했다. 이 경우 공기 유량 조절로 당량비를 변화한 결과와 경향이 유사하다. 전반적으로 와류의 세기에 따라 기울기가 -0.54, -0.69, -0.73으로 차이를 보이지만, 당량비 증가에 따라 일정하게 감소하며 와류의 영향이 크게 발생하지 않은 것을 확인할 수 있다.

$I_{C_2^*}/I_{CH^*}$ 의 결과를 Fig. 8(b)에 수록하였다. 이 경우 와류의 영향에 따라 기울기가 2.90, 2.40, 1.83으로 와류의 세기가 화학발광 세기 비에 크게 영향을 미치지 않으며, 당량비가 증가함에 따라 유사한 기울기를 보인다.

$I_{C_2^*}/I_{OH^*}$ 의 결과는 Fig. 8(c)에 수록했다. 이 경우도 마찬가지로 와류의 영향은 크지 않다. 하지만 SN 1.30의 경우 당량비가 0.5-0.7 구간에서는 큰 변화를 보이지 않았지만, 당량비가 0.7 이상에서는 와류 세기에 관계없이 유사한 기울기를 보인다. 또한 $I_{C_2^*}/I_{OH^*}$ 는 다른 경우에 비해 기울기 차이가 크다. Table 6은 연료 유량 조절로 당량비를 변화한 결과로서 화학발광 세기 비의 기울기를 나타냈다.

전반적으로 와류 세기 영향은 화학발광 세기 비에 영향을 미치지 않고 당량비에 따라 유사한 기울기를 갖는 것을 확인할 수 있다. 또한 350-500 K의 다양한 온도 범위에 해당하는 결과이지만 공급되는 연소 공기 온도는 화학발광 세기 비에 큰 영향을 미치지 않는다.

4. 결론

본 연구는 케로신 화염의 자발광 물리적 특성을 파악하기 위해 수행된 연구로서, 화염에서 방출되는 화학발광 스펙트럼을 계측하여 실험을 진행하였다. 또한 세 개의 swirler를 이용해 와류의 세기 변화가 화염 상태와 방출되는 화학발광 스펙트럼에 미치는 영향을 확인하였다. 당량비에 따른 화염의 상태를 확인하기 위해 공기 유량 조절로 당량비를 변화한 실험과 연료 유량을 조절하여 당량비를 변화하여 화염의 특성을 파악하고 비교하였다.

화염에서 방출되는 화학발광 스펙트럼은 와류 세기에 따라 그리고 당량비에 따라 각각 차이를 보이며 방출된다. 실험 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 케로신 화염을 통해 화염에서 방출되는 화학발광 측정을 진행하였다. 케로신 화염은 Alkane 계열(메탄, 프로판)의 화염과 동일한 파장 대역에서 OH^* , CH^* , C_2^* 라디칼이 방출되지만 메탄과 프로판을 주 성분으로 하는 천연가스보다 OH^* 의 방출 세기가 CH^* 와 C_2^* 의 방출 세기에 비해 매우 작으며, 당량비가 증가함에 따라 525-600 nm 영역에 해당하는 CO_2^* 가 매우 강하게 방출된다.

(2) 케로신 화염에서 방출되는 화학발광 스펙트럼은 화염의 당량비에 따라 서로 다른 경향을 보이며 방출된다. 그 중 $I_{C_2^*}$ 는 당량비 증가에 민감하게 반응하며 방출량이 급격하게 증가한다.

(3) OH^* 와 CH^* 라디칼의 경우 일반적으로 당량비 1.0을 기준으로 peak을 형성하고 당량비와 strain rate에 큰 영향을 받는다고 보고되었다⁽²³⁾. 하지만 본 연구 결과 와류 세기가 상대적으로 약한 경우(SN 0.60) 당량비 0.7-0.8 사이에서 peak을 형성한다. 또한 SN 0.83의 I_{OH^*} 는 특정 peak을 형성하지 않고 당량비 관계없이 일정한 수준을 유지된다. 이런 영향은 화염 전체의 영향을 고려하지 않고 화염 상류의 한정된 영역만을 측정된 결과로 볼 수 있으며, 추후 화염의 일부 영역이 아닌 화염 전체의 화학발광 스펙트럼을 측정된 결과 분석이 요구된다.

(4) 전반적으로 케로신 화염에서 방출되는 화학발광은 다음과 같은 특성을 갖는다.

a) 공기 유량 조절한 경우 당량비를 변화하기 위해 비교적 많은 양의 공기를 유입시키기 때문에 당량비 변화에 따라 공기의 유속이 크게 작용한다. 공기의 유속과 연소기 내부의 swirler에 의해 와류의 영향이 연료를 조절한 결과보다 크게 작용한다. 이러한 영향은 strain rate에 변화를 가져오며, 그 결과 화학발광 방출 특성의 변화를 보였다.

b) 연료 유량 조절의 경우, 공기 유량이 고정된 상태에서 strain rate의 변화가 상대적으로 작다. 이 상태에서 방출되는 화학발광은 연료 유량에 관계가 있으며, 특히 I_{CH^*} 와 $I_{C_2^*}$ 는 연료 유량에 영향을 받는 것을 확인할 수 있다.

(5) 와류의 세기에 따라 방출되는 화학발광 스펙트럼은 서로 다른 경향을 보인다.

a) SN가 0.83, 1.30의 경우 OH^* 화학발광 세기는 와류의 영향이 크지 않은 것을 확인할 수 있다. 반면 SN 0.60의 경우 SN 0.83과 1.30에 비해 와류의 강도가 약하게 작용하기 때문에 SN 0.60에서 방출되는 OH^* 방출 세기는 당량비에 의해 감소하는 경향을 보였다. 이 결과는 낮은 와류의 영향은

OH* 화학발광 방출 세기에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다.

b) 공기 유량 변화의 결과로 확인된 와류의 영향은 비교적 높은 당량비 구간($0.8 \leq \phi$)에서 I_{CH^*} 와 $I_{C_2^*}$ 에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 낮은 당량비 구간($0.8 > \phi$)의 I_{CH^*} 와 $I_{C_2^*}$ 는 당량비가 증가함에 따라 비교적 작은 변화를 보이지만, 높은 당량비 구간($0.8 \leq \phi$)에서는 당량비가 증가함에 따라 최고 50%의 증가를 보였다.

(6) 화학발광 세기 비는 와류의 영향에 관계없이 모두 유사한 경향으로 증가하거나 감소한다. 또한 이 경우 350-500 K의 다양한 온도의 실험을 포함한 결과로서 화학발광 세기 비의 결과에는 큰 영향을 미치지 않는 것을 확인하였다.

(7) 공기 유량을 통해 당량비를 조절한 결과는 I_{OH^*}/I_{CH^*} 가 당량비 변화를 지시하기 적합하며, 연료 유량 조절을 통해 당량비를 변화한 결과는 $I_{C_2^*}/I_{CH^*}$ 가 당량비 변화를 지시하기 적합하다.

후 기

본 논문은 한국연구재단(교육부)의 일반 연구자 지원사업(NRF-2013R1A1A2005304)과 2014년도 한국항공우주연구원의 위탁사업으로 지원받은 "고성능 액체엔진 연소기에서 열 발생 섭동 계측을 위한 광학 프로브와 신호 분석 방법 개발" 과제의 일환으로 수행된 연구결과의 일부분임을 밝힙니다.

참고문헌

(References)

- (1) Press Release, Ministry of Education and Science Technology(MEST), <http://www.mest.go.kr/>
- (2) Correa, S. M., 1998, "Power Generation and Aero-propulsion Gas Turbines: From Combustion Science to Combustion Technology," *Twenty-Seventh Symposium (International) on Combustion*, Vol. 27, No. 2, pp. 1793-1807.
- (3) Smith, J. J., Schneider, G., Suslov, D., Oschwald, M. and Haidn, O., 2007, "Steady-State High Pressure LOx/H2 Rocket Engine Combustion," *Aerospace Science and Technology*, Vol. 11, pp. 39-47.
- (4) Lieuwen, T., Chang, M. and Amato, A., 2003, "Stationary Gas Turbine Combustion: Technology Needs and Policy Considerations," *Combustion and Flame*, Vol. 160, pp. 1311-1314.
- (5) Ballester, J. and García-Armingol, T., 2010, "Diagnostic Techniques for the Monitoring and Control of Practical Flames," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 36, pp. 375-411.
- (6) Eckbreth, A., 1988, "Laser Diagnostics for Combustion Temperature and Species," *Abacus Press*, Cambridge MA.
- (7) Docquier, N. and Candel, S., 2002, "Combustion Control and Sensors: a Review," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 28, pp. 107-150.
- (8) Nori, V. N., 2008, "Modeling and Analysis of Chemiluminescence Sensing for Syngas, Methane and Jet-A Combustion," Ph.D. Dissertation, Georgia Institute of Technology.
- (9) Yu, K. H., Trouve, A. and Daily, J. W., 1991, "Low-frequency Pressure Oscillations in a Model Ramjet Combustor," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 232, pp. 47-72.
- (10) Samaniego, J. M., Yip, B., Poinso, T. and Candel, S., 1993, "Low-Frequency Combustion Instability Mechanisms in a Side-Dump Combustor," *Combustion and Flame*, Vol. 94, pp. 363-380.
- (11) Richards, G. A., Janus, M. and Robey, E. H., 1998, "Control of Flame Oscillations with Equivalence Ratio Modulation," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 15, pp. 232-240.
- (12) Broda, J. C., Seo, S., Santoro, R. J., Shirhattikar, G. and Yang, V., 1998, "An Experimental Study of Combustion Dynamics of a Premixed Swirl Injector," *Twenty-Seventh Symposium (International) on Combustion*, pp. 1849-1856.
- (13) 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, pp. 775-782.
- (14) Docquier, N., Belhafaoui, S., Lacas, F., Darabiha, N. and Rolon, C., 2000, "Experimental and Numerical Study of Chemiluminescence in Methane/Air High-Pressure Flames for Active Control Applications," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 28, pp. 1765-1774.
- (15) Krishnamachari, S. L. N. G. and Broida, H. P., 1961, "Effect of Molecular Oxygen on the Emission Spectra of Atomic Oxygen-Acetylene Flames," *The Journal of Chemical Physics*, Vol. 34, No. 5, pp. 1709-1711.
- (16) Docquier, N., Belhafaoui, S., Lacas, F., Darabiha, N. and Rolon, C., 2000, "Experimental and Numerical Study of Chemiluminescence in Methane/Air High-Pressure Flames for Active Control Applications," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 28, pp. 1765-1774.
- (17) Kojima, J., Ikeda, Y. and Nakajima, T., 2005, "Basic Aspects of OH(A), CH(A), and C2(d) Chemiluminescence in the Reaction Zone of Laminar Methane-Air Premixed Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 140, pp.34-45.
- (18) Nori, V. N. and Seitzman, J. M., 2009, "CH* Chemiluminescence Modeling for Combustion Diagnostics," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 32, pp. 895-903.

- (19) Orain, M. and Hardalupas, Y., 2010, "Effect of Fuel Type on Equivalence Ratio Measurements using Chemiluminescence in Premixed Flames," *Comptes Rendus Mecanique*, Vol. 338, pp. 241~254.
- (20) Sheen, H. J., Chen, W. J., and Jeng, S. Y., 1996, "Correlation of Swirl Number for a Radial-Type Swirl Generator," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 12, No. 4, pp. 444~451.
- (21) Lee, H. and Seo, S., 2014, "Experimental Study on Emission Spectra of Kerosene Swirl Combustion," *Asia Joint Conference on Propulsion and Power 2014(AJCPP 2014)*, pp. 1~4.
- (22) Morrel, M. R., Seitzman, J. M., Wilensky, M., Lubarsky, E., Lee, J. and Zinn, B., 2001, "Interpretation of Optical Emission for Sensors in Liquid Fueled Combustors," *AIAA 39th Aerospace Sciences Meeting*, pp. 557~584.
- (23) Panoutsos, C. S., Hardalupas, Y. and Taylor, A. M. K. P., 2009, "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.