

## 연료의 열분해특성과 비예혼합 제트화염의 부상특성에 관한 기초실험

진민규\* · 이민정\*\* · 김남일\*†

## Basic Experimental Study on Characteristics of Fuel Pyrolysis and Lift-off of Non-premixed Jet-flame

Minkyu Jeon\*, Min Jung Lee\*, Nam Il Kim\*†

## ABSTRACT

In general, high temperature combustion technique has been adopted as an efficient one. However, hydrocarbon-based fuel can be decomposed under high temperature, and it can affect the stabilization mechanism of edge flame. In this research, basic experimental study was conducted to identify the effect of fuel pyrolysis on the lift-off flame stabilization by changing the temperature of the plug flow reactor. Schmidt number of the gas fuel can be changed with temperature variation due to the fuel pyrolysis. Eventually, this study will help to establish and clarify the stabilization mechanism of lift-off edge flame.

**Key Words** : Lift-off flame, Fuel pyrolysis, Non-premixed flame, Thermal decomposition

비예혼합 삼지화염에 대한 안정화 및 진과속도에 대한 연구는 부상화염을 포함하여 다양한 화염의 특성을 파악하는 점에 있어 중요한 이론적 뒷받침을 하고 있다. Chung.(1991)에 진행되었던 제트부상화염의 안정화 매커니즘 연구는 연료 유량의 슈미트 수에 따른 부상화염 안정화 조건을 밝히는 계기가 되었다[1]. 슈미트 수( $Sc \equiv \nu/D$ )가 1보다 큰 프로판의 경우에 안정적인 부상화염이 관찰될 수 있고, 1보다 작은 메탄과 수소 연료의 경우에는 부상화염이 존재하지 못한다는 사실을 밝혔다. 보다 최근에는, 혼합된 연료의 조성 또는 온도 조건에 따른 부상화염의 특성이 변화된다는 연구가 진행되었다[2-3]. 초기조건에 따른 슈미트 수의 변화가 화염 안정 매커니즘에 영향을 미친다는 점도 후속연구를 통해서 밝혀졌다.

고온 연소기술은 고효율 연소기 개발에 있어 중요하게 다루어져 왔으며, 이에 따라 고온 조건에서의 부상화염의 특성에 대한 기초 연구가 필요하다. 또한 최근 연구에서도 고온 조건에서의 부상화염의 특성에 관하여 연구가 수행된 사례가 있지만, 고온 조건에서 연료의 분해반응까지 고려된 기초 연구는 진행되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 연료의 열분해 현상이 제트화염의 부

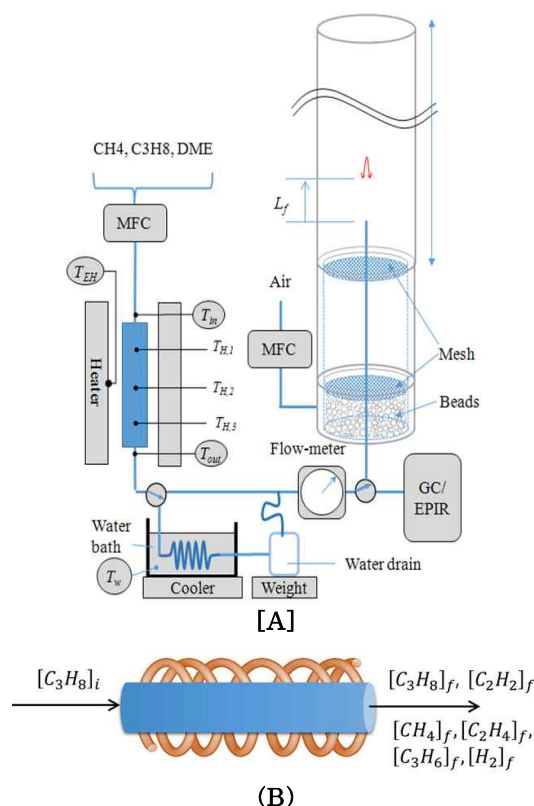


Fig. 1 (A) Overall flow scheme of Experimental setup [4] and (B) plug flow reactor

\* 한국과학기술원 기계공학과

\*\* 한국과학기술원 기계기술연구원

† 연락처자, nikim@kaist.ac.kr

TEL : (042)350-3211

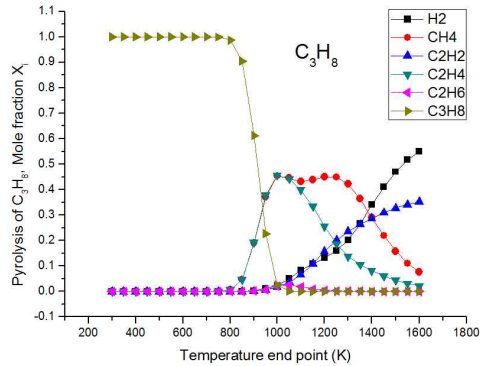


Fig. 2 Propane pyrolysis mechanism

상안정화에 미치는 영향을 파악하기 위한 기초 실험을 수행하였다.

이번 실험에서 사용된 연소기를 그림 1에 나타내었다. 동축 구조의 연소기 (내경 120mm) 과 미소노즐 (내경 0.36mm)을 설치하여 연구를 진행하였다. 노즐 주변에는 공기 유동 (5-20L/min)을 흘려주면서 연료 동축 분류가 층류 유동 조건을 유지할 수 있도록 충분히 느리게 흘림으로써 연소기 공기 투입구와 연료 동축분류의 일정한 조건을 유지할 수 있도록 하였다. 연소기의 길이는 공기 유동의 레이놀즈수( $Re \equiv \rho D/\nu$ )를 고려하여, 연소기의 길이를 충분하게 하였으며, 연소기 외부에서의 유동 교란 방지와 화염 관찰을 위해 아크릴 관을 설치하였다.

한편, 고온 조건에서 연료의 열분해 특성 연구를 위해, 수평형 전기 히터를 설치하여 최고 온도 1300K까지 실험을 진행하였다. 히터를 설치한 후에는 연료가 실온이 되어 연소기의 노즐로 유입될 수 있도록 하였다. 연료로는 프로판 ( $C_3H_8$ , >99.95%)을 사용하였으며, 수분을 제거한 공기를 사용하여 연소기에 공급하였으며, 유량 제어를 위해 질량유량계(Linetech)를 사용하였고, 습식 가스 미터기(W-NK-0.5A, Shinagawa)를 사용하여 유량을 보정하였다.

우선, 프로판이 고온의 전기히터를 통과하면서 수반하는 열해리반응을 CHEMKIN을 통해 경향을 예측할 수 있다. 프로판 1.0 mole이 plug flow reactor를 통과하는 동안 발생하는 화학종들의 온도에 따른 경향은 그림. 2에 나타난 바와 같다. 프로판 연료가 전기 히터의 고온 조건에서 일어나는 열해리반응에 의해 생성되는 주요 생성물과 관련하여 다음과 같이 해리 반응식으로 나타낼 수 있다.

식. P-01과 같이 프로판은 800 K부터 급격하게 분해되기 시작하여, 에틸렌과 메탄이 생성된다. 생성된 에틸렌 가스는 온도 1000 K이후부터, 에틸렌이 열분해가 되어 메탄과 수소가스가 생성

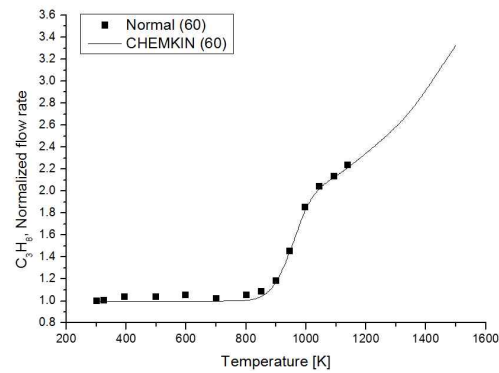
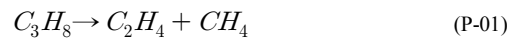


Fig. 3 Normalized volume flow rate of Propane under high temperature heat chamber. Flow rate is  $60\text{cm}^3/\text{min}$ .



되며, 온도가 증가할수록 지속적으로 물분율이 증가하는 경향을 나타내고 있다. 전기히터를 통과한 연료 가스는 열분해에 의해 생성된 다른 생성물들과 함께 부피팽창이 발생된다. 이를 정확하게 측정하기 위하여, 온도에 따른 체적유량 (Volume flow rate)를 측정하였다. 이 결과로부터, 실제 실험결과와 CHEMKIN을 통해 예측된 데이터의 일치성을 확인하기 위해, 생성물의 유량 변화를 그림 3에 나타내었다.

프로판을 60 ccm을 흘려준 경우, 실온(298 K)에서 약 800 K까지는 부피팽창이 이루어지지 않지만, 그 이후부터는 급격한 부피팽창이 두 단계에 걸쳐 발생하는 것으로 알 수 있다. 1000 K 부근에서는 처음의 유량에 비해 약 2배정도 증가하였으며, 온도가 증가할수록 유량의 증가가 더욱 커지는 것을 알 수가 있었다. 프로판 가스의 열분해는 궁극적으로 노즐에서의 연료 유속 증가로 이어진다. 따라서 화염안정화에 직접적인 영향을 미치게 된다.

한편, 전기 히터를 통과한 연료에 대해 주어진 온도에 따른 부상 화염 높이 변화는 다음과 같다. 3가지 유량, 60.29, 72.01, 79.81 ccm 으로 실험을 진행하였다. 그림. 4에서 제시하는 바와 같이, 통과하는 연료 유량이 많을수록 부상 화염의 위치가 높아지고, blow out이 이루어지는 온도점이 낮은 곳에서 이루어지는 것을 알 수 있다. 이러한 실험 결과, blow out이 이루어지는 지점에 대한 설명을 위해서는 노즐에서의 유속과 부상 화염이 존재할 수 있는 물 분율이 동시에 고려되

**Table 2** Physical properties of reactant and products from propane pyrolysis reaction

Species	$MW_i$	$D_i(m^2/s)$	$\mu_i(kg/m/s)$
$C_3H_8$	44.10	1.1E-5	1.75E-5
$C_2H_4$	28.05	1.2E-5	1.75E-5
$CH_4$	16.04	1.5E-5	1.8E-5

어야 한다는 것을 시사하고 있다.

부상화염의 부상높이와 슈미트 수와의 관계는 Chung, (1991)에 의해 연구가 진행된 바가 있다. 선행 연구에 따르면, 슈미트 수와 높이의 관계는 다음과 같다.

$$H_L/d^2 = const \times u_o^{(2Sc_F-1)/(Sc_F-1)} \quad (1)$$

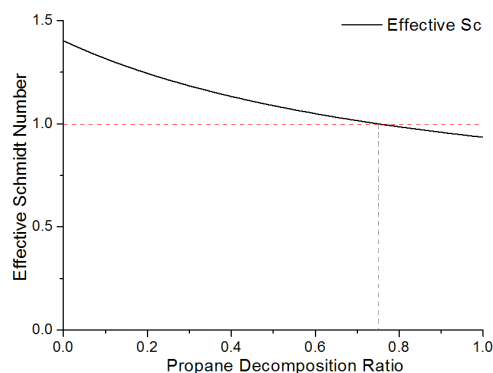
여기서 연료의 슈미트 수가 1보다 작은 경우에는 부상화염의 불안정화를 일으키는 것을 알 수 있으며, 부상화염의 높이에 대한 임계 슈미트 수는 1이라고 본다[1].

본 연구에서 연료의 해리에 따른 슈미트 수의 변화를 살펴보기 위해, 온도 변화에 따른 혼합물의 슈미트 수의 경향을 살펴보았다. 혼합물의 슈미트 수를 계산하기 위해, Lee, B. J. (2006) 에서 사용한 방법을 이용하였으며, 해리된 분자들의 물성치들은 다음의 표. 2에서 정리하였다. 물질확산 계수( $D_i$ )는 Turns, (1996) 을 참고하여 혼합물의 슈미트 수를 도출하였다.[5]

그림 4.에서 보여주는 바와 같이, 열분해된 프로판 연료의 슈미트 수의 경향은 분해율(Decomposition ratio)이 커짐에 따라 점차 낮아지고 궁극적으로 1.0보다 작아지는 경향을 보여주고 있다. 이는 열해리를 통해 프로판이 분해되어 에틸렌과 메탄의 비율이 증가하여 발생하는 결과라는 점을 알 수 있다. 프로판의 분해율이 0.75정도가 되었을 때 슈미트 수가 1.0보다 작아진다. 따라서 프로판의 열분해반응 정도를 예측가능하다면 고온 조건에서 프로판 가스의 부상화염의 특성을 파악할 수 있을 것이다. 이러한 연구 결과는 고온 조건에서의 연료 해리에 따른 부상화염의 안정화에 대한 이해를 도울 것으로 기대된다.

## 후 기

본 연구는 2013년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(2013T100200071).



**Fig. 4** Effective Schmidt number with Propane decomposition ration from 0 to 1.

## 참고 문헌

- [1] Chung, S. H., and B. J. Lee. "On the characteristics of laminar lifted flames in a nonpremixed jet." *Combustion and Flame* 86.1 (1991): 62-72.
- [2] Lee, B. J., and S. H. Chung. "Determination of schmidt number of mixed fuels by the characteristics of laminar lifted jet flames." *Fuel* 85.1 (2006): 68-74.
- [3] Kim, K. N., S. H. Won, and S. H. Chung. "Characteristics of laminar lifted flames in coflow jets with initial temperature variation." *Proceedings of the Combustion Institute* 31.1 (2007): 947-954.
- [4] 조문수, 이민정, and 김남일. "고온에서의 연료 해리에 의한 동축분류 비예혼합화염의 부상 특성." *KOSCO SYMPOSIUM 논문집*. 2014.
- [5] Turns, Stephen R. *An introduction to combustion*. Vol. 287. New York: McGraw-hill, 1996.