

자발화된 층류 부상화염에 대한 점화지연시간의 영향

최 병 철*†

* (사)한국선급 환경플랜트팀

Effect of Ignition Delay Time on Autoignited Laminar Lifted Flames

Byung Chul Choi*†

* Environment & Plant Team, Korean Register of Shipping.

(Received June 21, 2011 ; Revised July 27, 2011 ; Accepted August 9, 2011)

Key Words : Autoignition(자발화), Ignition Delay Time(점화지연시간), Heat Loss(열손실), Lifted Flame(부상화염)

초록: 자발화 특성은 디젤 및 PCCI 엔진의 설계에서 중요한 인자이다. 특히, 디젤분무화염은 자발화 현상에 의해서 형성되어 노즐에서 부상된다. 노즐과 부상화염 사이의 영역에서 분무된 디젤의 증상으로 주위 공기의 유입이 발생하기 때문에, 그 부상된 화염은 매연 생성에 영향을 준다. 본 연구에서 간단한 모델로써 동축류 제트를 적용하였고, 점화지연시간에 대한 자발화 과정에서 발생하는 열손실의 영향을 확인하였다. 메탄(CH₄), 에틸렌(C₂H₄), 에탄(C₂H₆), 프로핀(C₃H₆), 프로판(C₃H₈), 및 노말 부탄(*n*-C₄H₁₀)의 연료들을 고온의 공기로 분사하였으며 자발화된 부상화염의 높이를 측정하였다. 그 결과로 자발화된 부상화염의 높이와 열손실을 고려한 점화지연시간과의 상관관계를 결정하였다.

Abstract: Autoignition characteristic is an important parameter for designing diesel or PCCI engines. In particular, diesel spray flames are lifted from the nozzle and the initial flame is formed by an autoignition phenomenon. The lifted nature of diesel spray flames influences soot formation, since air will be entrained into the spray core by the entrainment of air between the nozzle region and the lifted flame base. The objective of the present study was to identify the effect of heat loss on the ignition delay time by adopting a coflow jet as a model problem. Methane (CH₄), ethylene (C₂H₄), ethane (C₂H₆), propene (C₃H₆), propane (C₃H₈), and normal butane (*n*-C₄H₁₀) fuels were injected into high temperature air, and the liftoff height was measured experimentally. As the result, a correlation was determined between the liftoff height of the autoignited lifted flame and the ignition delay time considering the heat loss to the atmosphere.

1. 서 론

압축착화 또는 예혼합압축착화(Premixed Charge Compression Ignition) 방식을 적용한 엔진 내에, 압축에 의한 고온/고압의 공기로 분사된 디젤 연료는 급격하게 미립화되어 증발되고 공기와 혼합된다. 대략 수 msec 의 지연시간 후에, 그 혼합기는 점화되어 연소된다. 이때 생성된 디젤분무화염은 자연적으로 노즐에서 부상되고, 그 화염과 노즐 사이의 영역에서 유입된 공기는 매연의 생성에 영향을 미치게 된다.^(1,2)

불균일한 연료와 공기의 혼합기 내에서 자발화

현상이 발생되기 때문에, 생성된 화염의 선단은 희박 및 농후한 예혼합화염 날개와 길게 뻗은 확산화염으로 구성되는 삼지화염의 구조를 가질 수 있다.⁽³⁾ 그러나 자발화 현상의 기초적 특성에 관한 대부분의 연구들은 충격튜브 실험을 바탕으로 혼합기의 무차원적인 화학반응 특성에 주로 초점을 두고 있다.⁽⁴⁾ 최근에 들어서 비예혼합 난류 및 층류 화염에 대한 자발화 특성에 관한 기초 실험 및 수치해석적 연구가 활발히 수행되고 있다.⁽⁵⁻⁸⁾

본 연구에서는 고온의 동축류 공기로 메탄(CH₄), 에틸렌(C₂H₄), 에탄(C₂H₆), 프로핀(C₃H₆), 프로판(C₃H₈), 및 노말 부탄(*n*-C₄H₁₀)의 연료들을 분사할 때 생성되는 자발화된 층류 부상화염의 높이와 점화지연시간과의 상관관계를 확인하고자 한다.

† Corresponding Author, byungchul.choi@gmail.com
© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

2. 열적 폭발

Semenov 는 점화현상에 대하여 정량적인 방법으로 하나의 열적 폭발 모델을 개발하였다⁽⁹⁾. 화학반응 시스템의 내부 온도는 일정하고 그 시스템 전체 체적의 횡단하는 온도는 동일하며, 그 시스템의 벽면과 외부의 온도는 동일하다고 가정하였다. 이것은 그 시스템의 내부와 외부에서 급격한 또는 일정한 온도변화는 없다는 것을 의미한다.

시스템 내의 열생성 및 열손실에 대한 열역학적인 특성은 아래의 식 (1)과 (2)와 같이 각각 정의되었다.^(9,10)

$$\Phi_+ = \rho QcA \times \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (1)$$

$$\Phi_- = \frac{hS}{V}(T - T_a) \quad (2)$$

여기서, Φ_+ 는 열생성 [W], ρ 는 밀도 [kg/m³], Q 는 발열량 [J/kg], c 는 반응물의 농도 [mol/m³], A 는 선-지수함수 인자 [s⁻¹(mol/m³)^{1-m}], m 은 반응차수(≈ 2), E_a 는 활성화 에너지 [J/mol], R 는 일반기체상수(≈ 8.314 J/molK), 그리고 T 는 화학반응 시스템 내의 온도 [K]를 나타낸다. 또한 Φ_- 는 열손실 [W], h 는 대류계수 [W/m²K], S 는 그 시스템의 표면적 [m²], V 는 시스템의 체적 [m³], 그리고 T_a 는 시스템 외부의 온도 [K]를 의미한다.

그 열적 생성과 손실에 따라 3 가지 다른 가능성들이 그 결과로 나타날 수 있다.^(9,10) 첫 번째는, $\Phi_+ < \Phi_-$ 의 경우에서 열적 폭발이 발생하기 위해서는, $T > T_{ig}$ 와 같은 조건을 만족시키기 위해서 그 반응기의 내부 온도는 어떤 외부의 점화원에 의해서 가열되어야 한다. 이때 T_{ig} 는 자발화 온도 [K]이다. 두 번째, $\Phi_+ = \Phi_-$ 의 경우에 대해, 반응기의 온도는 T_{ig} 까지 서서히 상승하게 될 것이고, 열적 폭발에 의해서 갑자기 그 내부 온도가 상승하게 된다. 세 번째, $\Phi_+ > \Phi_-$ 의 경우에는 열생성이 그 열손실을 초과하기 때문에 그 시스템의 내부에서는 항상 열적 폭발이 발생하게 될 것이다.

Frank-Kamenetskii 는 그 시스템의 외부와 시스템 내부의 반응 질량 사이의 온도 기울기를 적용하는 이론을 정립하였다.^(9,10) 유한한 슬랩에서 아래의 식 (3)과 같은 열손실의 항이 고려되었다.

$$\Phi_- = -k \frac{dT}{dx^2} \quad (3)$$

이때, 그 반응물질은 작은 열전도도를 가지며,

그 시스템의 벽면은 높은 열전도도를 갖는다. 그러한 에너지 방정식과 경계 조건은 아래의 식 (4)와 (5)와 같이 각각 나타내어진다.^(10,11)

$$-k \frac{d^2T}{dx^2} = \rho QcA \times \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (4)$$

$$-k \frac{dT}{dx} \Big|_{x=1} = h(T_L - T_a) \quad (5)$$

여기서, k 는 열전도도 [W/mK], L 는 시스템의 x 방향으로의 경계 [m]를 나타낸다.

또한, 아래의 식 (6)과 같이 각각의 무차원수를 정의하고, 그 에너지 방정식과 경계 조건은 식 (7) 및 (8)와 같이 각각 나타낼 수 있다.^(10,11)

$$T^* \equiv \frac{T}{T_a}, \quad x^* \equiv \frac{x}{L}, \quad \theta \equiv \frac{E_a}{RT_a} \quad (6)$$

$$-\frac{d^2T^*}{dx^{*2}} = \frac{\rho QcAL^2}{kT_a} \times \exp\left(\frac{-\theta}{T^*}\right) \quad (7)$$

$$-\frac{dT^*}{dx^*} \Big|_{x^*=1} = \text{Bi}(T_L^* - 1) \quad (8)$$

여기서, $\text{Bi} \left(\equiv \frac{hL}{k} \right)$ 는 무차원 Biot 수이다.

또한, 지수근사법을 적용하기 위해서 식 (9)의 무차원 온도를 정의하고, 식 (10)과 (11)을 적용하였다.^(10,11)

$$T^* = 1 + \frac{\phi}{\theta} \quad (9)$$

$$\exp\left(\frac{-\theta}{T^*}\right) = \exp\left(-\theta \left[1 + \frac{\phi}{\theta}\right]^{-1}\right) \quad (10)$$

$$\approx \exp(-\theta) \times \exp(\phi) + \dots$$

$$-\frac{d^2T^*}{dx^{*2}} = -\frac{1}{\theta} \frac{d^2\phi}{dx^{*2}} \quad (11)$$

여기서, ϕ 는 외부 온도로부터 측정된 온도편차 [K]이다. 따라서, 그 에너지 방정식과 경계조건은 아래의 식 (12) 및 (13)과 같이 재정리 되었다.^(10,11)

$$-\frac{d^2\phi}{dx^{*2}} = \left[\frac{\theta \rho QAL^2 \exp(-\theta)}{kT_a} \right] \times c \times \exp(\phi) \quad (12)$$

$$-\frac{d\phi}{dx^*} \Big|_{x^*=1} = \text{Bi} \phi \Big|_{x^*=1} \quad (13)$$

Frank-Kamenetskii Parameter (δ)라는 인자를 아래의 식 (14)과 같이 정의하게 되었다.^(10,11)

$$\delta = \frac{\theta \rho QAL^2 \exp(-\theta)}{kT_a} \quad (14)$$

그 시스템 내의 반응물질 농도의 감소가 없는

조건으로 가정한다면, 그 에너지 방정식은 최종적으로 식 (15)과 같이 표현된다.^(10,11)

$$-\frac{d^2\phi}{dx^{*2}} = \delta \times \exp(\phi) \quad (15)$$

따라서, δ 는 $-\nabla^2\phi/\exp(\phi)$ 와 같이 바뀌서 표현할 수 있고, 이것은 열손실과 열발생의 비율과 같은 의미를 갖는다.

Frank-Kamenetskii Parameter 의 조건에 따라 3 가지 다른 결과들이 분류 되었다.^(10,11) 첫 번째는 $\delta < \delta_{cr}$ 와 같이 δ_{cr} 임계 값보다 낮은 아임계 조건인 경우이다. 그 반응 물질은 열적 폭발이 발생할 때까지 가열된다. 두 번째는 $\delta = \delta_{cr}$ 와 같은 임계 조건이다. 그러한 경우에는 반응 물질은 점차적으로 열을 발생할 것이고 급속한 자체 가열이 된다. 세 번째는 $\delta > \delta_{cr}$ 의 초임계 조건이고, 정상상태의 해답이 존재하지 않으며 열적 폭발이 항상 발생하게 될 것이다.

3. 점화지연시간

열적 폭발의 가장 중요한 특성은 그 폭발이 발생하는 유도기간이다. 그러한 점화지연시간은 시간에 대한 시스템 내부의 온도의 변화를 기준으로 결정될 수 있다.^(12,13) 예를 들어, $\delta < \delta_{cr}$ 의 아임계 조건에서는 그 온도가 자발화가 발생하는 임계 온도 이하의 하나의 유한한 값을 갖는다. $\delta = \delta_{cr}$ 의 임계 조건에서는 특정한 시간 이후에 그 내부 온도는 그 임계 온도의 값에 도달하게 된다. $\delta > \delta_{cr}$ 의 조건에서는 시스템의 내부 온도가 특정한 시간 이후에 급격하게 증가하게 되어 임계 온도를 넘어선 무한한 값으로 발산하게 된다.

반면에, 열손실을 갖지 않는 단열 조건에서의 점화지연시간은 그러한 열손실을 갖는 경우의 점화지연시간과 비교하여 가장 짧게 나타난다. 열손실이 없을 때에 그 점화 과정은 시간중속의 과도 방정식으로 설명된다. 그러한 상미분 방정식과 단열 점화지연시간은 아래의 식 (16) 및 (17)과 같이 유도된다.^(12,13)

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = QAc^m \times \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (16)$$

$$t_{ad} = \frac{\rho C RT_a^2}{cQ E_a} \frac{1}{Ac^{m-1} \exp\left(\frac{-E_a}{RT_a}\right)}$$

$$t_{chem} \frac{RT_a^2}{E_a} = \frac{RT_a^2}{\Delta T_{ad}} [s] \quad (17)$$

여기서, C 는 반응물의 비열 [J/kgK], Q 는 반응물의 발열량 [J/mol], $t_{chem} \left(= A^{-1} c^{-m+1} \exp\left(\frac{E_a}{RT_a}\right) \right)$ 는 등온 반응의 시간 스케일 [s]이고, $\Delta T_{ad} \left(= \frac{cQ}{\rho C} \right)$ 는 단열 시스템 내의 완전 연소에 의해 상승하는 내부 온도 [K]이다.

Semenov 및 Frank-Kamenetskii 는 각각의 상이한 경계 조건에 대해서 점화지연시간의 특성을 조사하였다.^(12,13) Semenov 경계 조건은 시스템 내의 일정한 반응물 온도 분포를 갖고, $Bi \rightarrow 0$ 조건을 갖는 Newtonian 열손실 특성을 그 경계에서 갖는다. 이때에 상미분 방정식과 점화지연시간은 아래의 식 (18) 및 (19)과 같이 유도된다.^(12,13)

$$V\rho C \frac{dT}{dt} = QVAc^m \times \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) - hS(T - T_a) \quad (18)$$

$$\frac{t_{ig}}{t_{ig,ad}} = \frac{a}{\left(\frac{\psi}{\psi_{cr}} - 1\right)^{1/2}} \quad (19)$$

여기서, a 는 일정한 상수, t_{ig} 는 실질적으로 점화되는 시간 [s], ψ 는 Semenov 수 $\left(= \frac{Vc^m Q E_a A \times \exp\left(\frac{-E_a}{RT_a}\right)}{hSRT_a^2} = \frac{t_{ig,N}}{t_{ig,ad}} \right)$, $t_{ig,N} \left(= \frac{V\rho C}{hS} \right)$ 는

Semenov 경계 조건의 열손실을 고려한 시간 스케일 [s]이고, 그리고 $t_{ig,ad}$ 는 단열적 점화지연의 시간 스케일 [s]이다.

한편, Frank-Kamenetskii 의 경계 조건은 시스템 내부에 분산된 온도조건을 갖는다.^(12,13) Fourier 열손실 때문에 유한한 슬랩에 대해서 $Bi \rightarrow \infty$ 의 경우에는 x 방향으로 온도 구배가 존재한다. 여기서 그 점화 과정은 시간과 공간의 중속성을 포함한다. 따라서, 그러한 조건에 대해서, 편미분 방정식과 점화지연시간은 아래의 식 (20) 및 (21)과 같이 유도된다.^(12,13)

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = QAc_o^m \times \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) + k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (20)$$

$$\frac{t_{ig}}{t_{ig,ad}} = \frac{b}{\left(\frac{\delta}{\delta_{cr}} - 1\right)^{1/2}} \quad (21)$$

여기서, b 는 일정한 상수,

$$\delta = \left[\frac{QE_a L^2 Ac^m \exp\left(\frac{-E_a}{RT_a}\right)}{kRT_a^2} = \frac{t_{ig,F}}{t_{ig,ad}} \right] \text{ 는 Kamenetskii}$$

Parameter 이고, $t_{ig,F} \left(= \frac{\rho CL^2}{k} \right)$ 는 Frank-Kamenetskii

의 경계 조건의 열손실을 고려한 점화지연시간 스케일 [s]이다.

최종적으로 Semenov 및 Frank-Kamenetskii 이론들을 모두 포함하는 경계 조건으로써 임의의 Bi 에 대하여 열손실을 포함하는 점화지연시간과 단열 점화지연 사이의 관계가 조사되었다.^(12,13) 이때, $\delta_{cr} < \delta < 2\delta_{cr}$ 의 근소한 초임계 조건에서, 열손실을 고려한 점화지연시간이 아래의 식 (22)와 같이 유도되었다.⁽¹²⁾

$$\frac{t_{ig}}{t_{ig,ad}} = \frac{f(Bi)}{\left(\frac{\delta}{\delta_{cr}} - 1\right)^{1/2}} \quad (22)$$

여기서, $f(Bi)$ 는 Bi 수에 대한 함수로써 하나의 시스템 상수이다. 즉, 시스템의 경계에서 발생하는 다양한 열손실의 조건으로써 Bi , 형상, 및 L 스케일의 변화에 대해서 특정한 상수값을 갖는 것을 의미한다. 따라서, $0 < Bi < \infty$ 에서 다양한 경계 조건의 열손실을 고려한 $t_{ig,N}$ 및 $t_{ig,F}$ 를 포함하는 점화지연시간 t_{ig} 은 열손실이 없는 단열적 점화지연시간 $t_{ig,ad}$ 에 대하여 식 (22)와 같은 상관관계를 항상 유효하게 적용할 수 있다.

4. 결과 및 토의

고온의 동축류 공기에서 층류 부상화염은 초기 온도 T_0 [K]에 따라, $T_0 < T_{ig}$ 인 경우의 자발화되지 않은 부상화염과 $T_0 > T_{ig}$ 인 경우의 자발화된 부상화염으로 나뉜다.^(7,8) 또한 자발화된 부상화염에 대해서도 그 연료의 농도에 따라 삼지화염을 갖는 경우와 마일드 연소를 갖는 경우로 나뉜다.^(7,8) 이러한 부상화염에 대하여, 연료제트의 초

기 속도 U_0 [m/s]에 따른 부상높이의 기율기 특성은 3 가지 경우에 대하여 초기 온도, 연료물분율, 및 연료에 따라 크게 차이가 있다.

4.1 자발화되지 않은 부상화염

$T_0 < T_{ig}$ 에서, 자발화되지 않은 부상화염의 거동은 다음과 같다. 연료제트의 속도가 상대적으로 작을 때에 그 화염은 노즐에 부착된다. 이때 그 제트속도의 증가에 따라 화염은 노즐에서 부상되고, 그 부상높이는 비선형적으로 증가한다. 과다하게 증가된 제트속도에서는 화염날림이 발생한다. 또한 부상화염의 조건에서 제트속도를 감소시키면 그 화염은 노즐에 재부착 된다.

이러한 자발화되지 않은 부상화염은 삼지화염의 전파속도와 지역적 유동속도의 균형을 기초로 그 안정화 메커니즘이 설명된다.^(14,15) 초기 온도의 변화에 따른 그 전파속도는 이론당량비 층류연소속도 $S_L^0|_{sr}$ 에 의해서 지배되기 때문에,⁽¹⁶⁻¹⁸⁾ $T_0 < T_{ig}$ 의 범위 내에서 제트속도에 대한 부상높이는 아래의 식 (23)과 같이 그 부상높이는 무차원 제트속도의 함수로 나타낼 수 있다.⁽¹⁶⁾

$$H_L = a \left(\frac{U_0}{S_L^0|_{sr}} \right)^n \quad (23)$$

여기서, a 는 상수이고, n 은 $H_L \sim U_0^n$ 의 상관식에서 속도지수 $n = (2Sc - 1)(Sc - 1)$ 에 대하여 초기 온도의 영향 및 질소 희석효과를 고려할 때에 적절한 값을 갖는다.

이러한 경우에 대하여, 운동량과 질량의 확산율 비로 정의되는 Schmidt 수가 $Sc > 1$ 값을 갖는 프로판(C_3H_8)과 노말부탄($n-C_4H_{10}$)의 자발화되지 않은 부상화염의 높이는 식 (23)과 같은 상관관계를 갖는다. 따라서, 자발화 온도 미만으로 상승한 초기 온도에서 자발화되지 않은 부상화염의 안정화에는 $S_L^0|_{sr}$ 의 특성이 중요한 역할을 하는 것을 의미한다. 그러나 자발화 온도를 초과한 초기 온도에서 자발화된 부상화염에 대해서는 식 (23)에 대하여 일관성을 보이지 않는다.^(7,8) 이것은 자발화된 부상화염의 안정화에는 $S_L^0|_{sr}$ 의 특성보다는 다른 요소에 의해서 더 큰 영향을 받는다는 것을 의미한다.

4.2 자발화된 부상화염

$T_0 > T_{ig}$ 에서, Sc 와 무관하게 메탄(CH_4), 에틸렌(C_2H_4), 에탄(C_2H_6), 프로핀(C_3H_6), 프로판(C_3H_8), 및

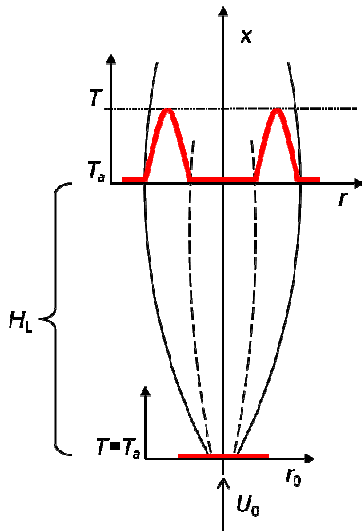


Fig. 1 Schematic of thermal explosion process on mixing layer of fuel jets in a heated coflow air.

노말 부탄($n\text{-C}_4\text{H}_{10}$)의 모든 연료에 대하여 자발화된 부상화염이 생성되며, 연료제트의 속도에 따른 그 거동은 자발화되지 않은 부상화염의 특성과 유사하다. 특별히, 화염날림 부근의 제트속도 조건에서 재점화와 소염이 반복적으로 발생하는 임계 현상이 나타난다.^(7,8)

자발화되어 안정화된 부상화염 내에서 자발화가 발생하는 초기 위치는 명백히 밝혀진 바는 아직 없지만, 재점화와 소염이 반복적으로 발생하는 임계 현상을 보이는 지점은 부상높이와 거의 일치한다. 이러한 경우에 대하여, 자발화된 부상화염의 높이와 단열적 점화지연시간과의 상관관계를 자세히 살펴보았다.

연료제트에 대한 특성유동시간 t_{flow} 를 H_L/U_0 로 정의한다면, 직관적으로 그 t_{flow} 는 단열 점화지연시간 $t_{ig,ad}$ 과 비례하는 상관관계가 있을 것으로 유추할 수 있다. 그러나, $t_{flow} \sim t_{ig,ad}$ 의 관계는 찾을 수 없었다. 따라서 점화가 발생하는 과정에서의 열손실의 영향을 아래에서 살펴보았다.

고온의 동축류 공기 내로 연료제트 분사되어 열적 폭발과정을 통하여 발생하는 자발화된 부상화염의 대한 개념도를 Fig. 1 과 같이 나타내었다. 수평 방향에서 r 은 이론공연비의 혼합층 두께의 반지름을 나타내고, 수직 방향에서 시간에 따라 자발화되어 안정화된 부상화염의 높이 H_L [m]를 나타낸다. 초기의 연료와 공기의 온도는 동일 ($T_0 = T_a$)하다고 가정하였다. 앞서 설명한 열적 폭

발이론을 토대로, 시간에 따른 화학반응에 의한 열생성으로 인하여 혼합층 내부의 온도가 상승하게 된다. 그 혼합층 외부의 온도는 초기 온도와 동일하게 유지된다. 따라서, 혼합층 내부에서 외부로의 열손실이 발생하기 때문에 Fig. 1 과 같은 온도분포를 갖게 된다.

식 (22)로부터 $\delta \sim (t_{ig,ad}/t_{ig})^2$ 와 같은 관계를 갖는 것을 알 수 있다. 이때 δ 는 t_{flow}/t_{ig} 로 정의되는 Damkhöler 수와 일치한다. 따라서, 앞서 정의한 유동시간을 대입시키면, $t_{ig} \sim t_{ig,ad}^2/t_{flow}$ 와 같은 결과를 얻게 된다. 즉, 열손실을 포함하는 점화지연시간은 단열적 점화지연시간의 제곱에 비례하는 상관관계를 갖는 것을 의미한다. 그 결과로, 임계 현상이 발생하는 자발화된 부상화염에 대하여 아래의 식 (23)과 같은 상관관계가 성립하는 것을 밝힌 바 있다.^(7,8)

$$t_{flow} \sim t_{ig,ad}^2 \quad (23)$$

이러한 조건의 초기 온도와 연료물분율에서 자발화된 부상화염의 높이는 제트속도에 대하여 아래의 식 (24)와 같은 상관관계가 있다는 것을 보였다.^(7,8)

$$H_L \sim (U_0 t_{ig,ad}^2)^n \quad (24)$$

여기서, 지수 n 의 구체적인 물리적 의미는 아직 분명하지 않고 향후 더 연구되어야 한다. 이러한 결과는 자발화된 부상화염의 안정화에 대해서 $S_L^0|_{st}$ 가 아닌 열손실을 고려한 점화지연시간 $t_{ig,ad}^2$ 이 더 큰 영향을 미친다는 것을 층류 조건에서 실험적으로 최초로 규명한 가치 있는 결과이다.

4.3 자발화 위치와 부상높이의 관계

앞선 점화지연시간에 대한 연관성은 자발화 위치와 부상높이가 거의 일치하는 임계 자발화가 발생하는 실험적 조건을 기준으로 전개되었다. 그러나, 본 동축류 실험 장치에서 그 임계조건 이하의 제트속도에 대해서 자발화가 발생하는 정확한 지점을 실험적으로 찾기에는 어려움이 있다.

아래에서는 노즐출구로부터 분사된 연료가 점화지연시간 이후에 열적 폭발이 발생하는 지점까지의 거리를 자발화되어 안정화된 부상화염의 높이와 일치한다고 가정하고, 그 부상높이와 점화지연시간 사이의 이론적인 연관성을 살펴보았다.

일반적으로 점화지연시간은 아래의 식 (25)와 같이 표현되는 반응률(RR)의 역수에 비례하는 관계를 갖는다.⁽¹³⁾

Table 1 Fitting coefficients in Arrhenius form for autoignited laminar lifted flames including the critical autoignition conditions together with temperature range and correlation coefficient

	T_0 [K]	a	b	T_A [K]	n	R
CH ₄	970-1010	1.22E-17	-0.437	19,002.7	1.0143	0.996
C ₂ H ₄	870-910	3.67E-18	-0.529	21,282.4	0.718	0.995
C ₂ H ₆	890-930	3.61E-81	-0.268	19,003.8	3.957	0.982
C ₃ H ₆	940-980	1.01E-19	-0.194	13,235.3	1.552	0.980
C ₃ H ₈	880-920	7.17E-45	-0.287	17,453.3	2.301	0.991
<i>n</i> -C ₄ H ₁₀	880-900	1.48E-37	-0.470	18,356.9	1.818	0.996

$$RR \sim \exp\left(\frac{-E_a}{RT_0}\right) [O_2]^a [Fuel]^b P^c \quad (25)$$

여기서, []는 몰분율, a 는 산소몰분율의 지수, b 는 연료몰분율의 지수이고, c 는 압력 P 의 지수이다.

따라서, 고온의 대기압 하에 일정한 산화제 조건에서, 초기 온도 및 연료의 질량분율 $Y_{F,0}$ 에 대한 단일 점화지연시간과의 상관관계를 열적 폭발 이론을 토대로 하여 아래의 식 (26)와 같이 Arrhenius 형식으로 나타낼 수 있다.^(8,13)

$$t_{ig,ad} \sim Y_{F,0}^b \exp\left(\frac{T_A}{T_0}\right) \quad (26)$$

여기서, b 는 연료질량분율의 지수이고, T_A 는 활성화 온도 [K]이다.

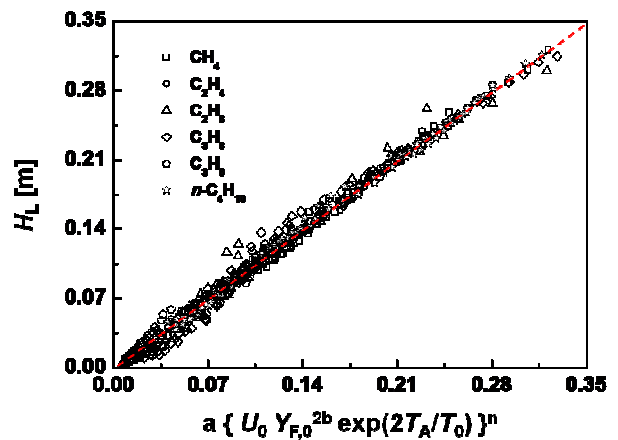
열적 폭발이 발생하는 지점과 자발화되어 안정화된 부상화염 선단의 높이와 일치한다고 가정하여 식 (26)을 식 (24)에 대입하여서 정리하면 자발화된 부상화염의 높이를 아래의 식 (27)과 같은 함수의 형태로 표현될 수 있다.

$$H_L = a \left\{ U_0 Y_{F,0}^{2b} \exp\left(\frac{2T_A}{T_0}\right) \right\}^n \quad (27)$$

여기서, a 는 상수, b 는 연료질량분율의 지수, n 은 $U_0 t_{ig,ad}^2$ 의 지수이다.

$T_0 > T_{ig}$ 에서 실험적으로 측정된 각 연료의 삼지화염을 갖는 자발화된 층류 부상높이 값들에 대해서, 식 (27)을 이용하여 초기 온도와 연료의 질량분율에 대한 회귀분석을 수행하였다.

그 결과는 Fig. 2에 나타내었고, 그때의 경험적 계수 및 상관계수 R 들을 모든 연료들에 대하여 Table 1에 표기하였다. $R=0.98-0.99$ 의 높은 상관관계를 보였다. 한편, 그림으로 표시하지 않았지만 열손실을 고려하지 않은 단일적 점화지연시간과의 부상높이의 상관관계는 회귀분석에 의한 관련성이 거의 나타나지 않았다. 따라서 이러한 결과는 부상화염의 선단 부근에서 자발화가 처음으로 발생

**Fig. 2** Correlation of height of autoignited lifted Flame with Arrhenius form for methane, ethylene, ethane, propene, propane, and *n*-butane

될 수 있고, 이때에 열손실을 고려한 점화지연시간이 중요한 역할을 할 수 있다는 것을 의미한다.

한편, 점화지연시간에 대한 b 와 T_A 는 값들은 대기압 및 상대적으로 낮은 온도 조건에 대한 화학반응 메커니즘의 개발에 있어 유용한 정보가 될 수 있을 것이다

5. 결론

다양한 열손실 조건을 고려한 Semenov 및 Frank-Kamenetskii의 열적 폭발 이론을 검토하였고, 단일적 점화지연시간과 열손실을 포함한 점화지연시간에 대한 이론적 관계에 대해서 살펴보았다.

고온의 동축류 공기와 메탄, 에틸렌, 에탄, 프로핀, 프로판, 및 노말 부탄의 연료 제트에서 자발화된 층류 부상화염의 높이를 실험적으로 측정하였다. 그 부상높이와 열손실을 고려한 점화지연시간 사이의 상관관계를 회귀분석을 수행하여 살펴보았다. 그 결과로 자발화의 위치는 자발화된 부상화염의 선단에서 발생할 수 있다는 가능성을 확인하였다.

참고문헌

- (1) Flynn, P.F., Durrett, R.P., Hunter, G.L., zur Loye, A.O., Akinyemi, O.C., Dec, J.E. and Westbrook, C.K., 1999, "Diesel Combustion: An Integrated View Combining Laser Diagnostics, Chemical Kinetics, And Empirical Validation," *SAE* 1999-01-0509
- (2) Siebers, D. and Higgins, B., 2001, "Flame Lift-Off on Direct-Injection Diesel Sprays Under Quiescent Conditions," *SAE* 2001-01-0530
- (3) Domingo, P. and Vervisch, L., 1996, "Triple Flames and Partially Premixed Combustion in Autoignition of Non-Premixed Turbulent Mixtures," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 26, pp. 233~240
- (4) Spadaccini, L.J. and Colket, M.B., 1994, "Ignition Delay Characteristics of Methane Fuels," *Prog. Energy Combust.*, Vol. 20, pp. 431~460.
- (5) Markides, C.N. and Mastorakos, E., 2005, "An Experimental Study of Hydrogen Autoignition in a Turbulent Co-Flow of Heated Air," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 30, pp. 883~891.
- (6) Gordon, R.L., Masri, A.R., Pope, S.B. and Goldin, G.M., 2007, "Transport Budgets in Turbulent Lifted Flames of Methane Autoigniting in a Vitiated Co-Flow," *Combust. Flame*, Vol. 151, pp. 495~511.
- (7) Choi, B.C., Kim, K.N. and Chung, S.H., 2009, "Autoignited Laminar Lifted Flames of Propane in Coflow Jets with Tribachial Edge and Mild Combustion," *Combust. Flame*, Vol. 156, pp. 396~404.
- (8) Choi, B.C. and Chung, S.H., 2010, "Autoignited Laminar Lifted Flames of Methane, Ethylene, Ethane, and n-Butane Jets in Coflow Air with Elevated Temperature," *Combust. Flame*, Vol. 157, 2348~2356.
- (9) Semenov, N.N., 1935, *Chemical Kinetics and Chain Reactions*, Oxford at the Clarendon Press, pp.79~87.
- (10) Wheatley, M., <http://www.leeds.ac.uk/fuel/tutorial>, Thermal Ignition Tutorial.
- (11) Frank-Kamenetskii, D.A., 1969, *Diffusion and Heat Transfer in Chemical Kinetics (2nd ed.)*, New York-London: Plenum Press, pp. 374~421.
- (12) Boddington, T., Feng, C.G. and Gray, P., F.R.S., 1983, *Proc. R. Soc. Lond. A*, 385, pp. 289~311.
- (13) Zeldovich, Y.B., 1985, *The Mathematical Theory of Combustion and Explosions*, Consultants Bureau, pp. 1~185.
- (14) Chung, S.H. and Lee, B.J., 1991, "On the Characteristics of Laminar Lifted Flames in a Nonpremixed Jet," *Combust. Flame*, Vol. 86, pp. 62~72
- (15) Lee, B.J. and Chung, S.H., 1997, "Stabilization of Lifted Tribachial Flames in a Laminar Nonpremixed Jet," *Combust. Flame*, Vol. 109, pp. 163~172
- (16) Kim, K.N., Won, S.H. and Chung, S.H., 2006, "Characteristics of Turbulent Lifted Flames in Coflow Jets with Initial Temperature Variation," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 31, pp. 1591~1598.
- (17) Kim, K.N., Won, S.H. and Chung, S.H., 2007, "Characteristics of Laminar Lifted Flames in Coflow Jets with Initial Temperature Variation," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 31, pp. 947~954.
- (18) Choi, B.C. and Chung, S.H., 2008, "Characteristics of Methane Turbulent Lifted Flames in Coflow Jets with Initial Temperature Variation," *Trans. KSME (B)*, Vol. 32 No. 12, pp. 970~976.