

자발화된 메탄 부상화염에 대한 수소 첨가의 영향

최 병 철^{*†} · 정 석 호^{**}

* (사)한국선급 환경플랜트팀,

** Clean Combustion Research Center, King Abdullah University of Science and Technology, Saudi Arabia

Effect of Hydrogen Addition on Autoignited Methane Lifted Flames

Byung Chul Choi^{*†} and Suk Ho Chung^{**}

* Environment & Plant Team, Korean Register of Shipping,

** Clean Combustion Research Center, King Abdullah University of Science and Technology, Saudi Arabia

(Received August 11, 2011; Revised October 18, 2011; Accepted October 18, 2011)

Key Words : Autoignition(자발화), Hydrogen(수소), Methane(메탄), Lifted Flame(부상화염)

초록: 고온의 동축류 공기와 수소가 함유된 메탄 연료제트에서 자발화된 층류 부상화염의 특성을 실험적으로 조사하였다. 그 결과로 순수 메탄 제트에서 자발화되는 경계 온도인 920 K 를 초과하는 초기 온도에서 메탄/수소 혼합기의 자발화된 부상화염은 연료 몰분율에 따라 삼지화염 또는 마일드 연소를 보였고, 제트속도에 따라 부상화염의 높이가 증가하는 전형적인 특성을 보였다. 소량의 수소가 첨가된 부상화염의 높이는 메탄의 경우와 유사하게 단열적 점화지연시간의 2 승에 대한 의존성이 유지되었다. 반면에, 초기 온도가 920 K 미만인 경우에서 화염은 수소의 점화 촉진에 의해서 자발화 되었다. 그리고 제트속도가 증가함에 따라 자발화된 부상화염의 높이는 비선형적으로 감소하는 독특한 특성을 보였으며, 수소의 선회확산이 그 현상에 대해서 중요한 역할을 할 것으로 예상된다.

Abstract: Autoignited lifted flames in laminar jets with hydrogen-enriched methane fuels have been investigated experimentally in heated coflow air. The results showed that the autoignited lifted flame of the methane/hydrogen mixture, which had an initial temperature over 920 K, the threshold temperature for autoignition in methane jets, exhibited features typical of either a tribrachial edge or mild combustion depending on fuel mole fraction and the liftoff height increased with jet velocity. The liftoff height in the hydrogen-assisted autoignition regime was dependent on the square of the adiabatic ignition delay time for the addition of small amounts of hydrogen, as was the case for pure methane jets. When the initial temperature was below 920 K, where the methane fuel did not show autoignition behavior, the flame was autoignited by the addition of hydrogen, which is an ignition improver. The liftoff height demonstrated a unique feature in that it decreased nonlinearly as the jet velocity increased. The differential diffusion of hydrogen is expected to play a crucial role in the decrease in the liftoff height with increasing jet velocity.

1. 서 론

비에혼합 연소기에 대한 수소의 자발화 특성은 난류 유동에 대해서 주로 연구 되었다. 고온의 공기를 갖는 난류의 동축류에서 수소 연료 제트의 자발화 특성이 대기압 조건에서 실험적으로 조사되었고, 다양한 압력 조건에 대해서 수치 해석적으로 연구되었다. 또한 균일한 혼합기에 대한 자발화 특성과 함께 비교되었다.^(1~5)

게다가 대향류 제트의 형태에 대해서 난류강도, 연료 농도 및 초기 압력의 변화에 따라, 질소로 희석된 수소의 연료제트가 점화되기 위해서 요구되는 산화제 공기의 온도인 자발화 온도가 조사되었다. 그 결과들은 층류 유동 조건에 대한 결과들과 비교되었다.^(6,7)

그러나 비에혼합 층류 제트에 대한 자발화 특성에 대한 연구는 제한되어 있다. 최근에 자발화에 대한 유동의 영향을 평가하기 위해서, 고온의 동축류 공기에서 층류 연료 제트의 부상화염에 대한 특성이 실험적으로 조사되었다.^(9,10) 그 동축류 제트가 자발화 온도 이상으로 가열되면, $Sc > 1$ 인 프로판(C_3H_8) 및 노말 부탄($n-C_4H_{10}$)의 자발화된 부

† Corresponding Author, byungchul.choi@gmail.com
© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

상화염이 존재하고, $Sc < 1$ 인 메탄(CH_4), 에틸렌(C_2H_4), 에탄(C_2H_6)의 경우에도 자발화된 부상화염이 존재하였다. 이들 연료 중에 메탄의 경우 초기 온도가 940 K 를 초과하는 조건에서 자발화된 부상화염이 관찰되었다.⁽¹⁰⁾

본 연구에서는 고온의 동축류 공기에서 메탄의 자발화된 부상화염에 대해서 수소 첨가에 대한 영향을 조사하였다. 그리고 점화 촉진제로써 수소의 영향을 확인하였으며, 제트속도에 따른 메탄/수소의 자발화된 부상화염의 특성을 조사하였다.

2. 실험 장치

실험장치는 동축류 버너, 유량조절부 및 히터부로 구성된다. 동축류 버너의 중심에 내경 3.76 mm 의 스텐레스 스틸관이 연료 노즐로 사용되었고, 관내 완전 발달된 유동장을 얻기 위하여 길이 750 mm 의 사용하였다. 동축류 공기는 균일한 속도장 및 온도장을 가지는 동축류를 얻기 위하여 메탈화이버 매트, 세라믹 비드 및 내경 150 mm 를 갖는 세라믹 하니콤폴을 사용하였다. 또한 버너에서 배출되는 고온 동축류의 열손실을 최소화하면서 유동장 및 화염의 안정성을 유지하기 위하여 길이 500 mm 의 세라믹 단열재 및 파이렉스 튜브를 각각 사용하였다. 그 동축류 버너의 상세한 내부 구조는 이전 연구에서 보고되었다.^(9,11)

연료는 99.95 %의 순도를 갖는 메탄, 99.99 %의 순도를 갖는 수소 및 99.99 %의 순도를 갖는 질소를 사용하였다. 동축류 산화제는 압축된 공기를 사용하였다. 그 연료와 공기의 유량은 질량 유량계를 통하여 제어하였다. 동축류 공기는 2 개의 2.5 kW 실린더형 히터를 통과하여 예열된 후에 버너에 공급되고, 7.5 kW 의 실린더형 히터가 내장된 세라믹 버너에 의해서 원하는 초기 온도까지 가열된다. 그 연료 노즐은 주변의 가열된 공기와 세라믹 히터에 의해서 역시 가열된다.

동축류의 속도는 1.1 m/s 로 고정하였다. 이때에 동축류 공기의 온도 일정성을 확인하기 위하여, 직경이 3 mm 인 K 형 열전대를 사용하여 축방향과 반경방향으로 온도를 측정하였다. 한편, 직경이 0.25 mm 인 K 형 열전대와 비교하였을 때에 온도 편차는 거의 없었고, 1000 K 미만의 본 실험 조건에서는 열전대에서 발생하는 복사열손실의 영향도 미미하였다⁽¹²⁾. 그 온도측정 결과로 노즐출구에서부터 반경방향으로 최대 50 mm 까지 ± 2 K 의 오차를 보였고, 축방향은 노즐 출구에서부터 최대의 경우 300 mm 까지 ± 20 K 의 온도 편차를 가졌다. 그리고 동축류 공기와 노즐 연료의 온도차이는 모

든 실험 조건에서 최대 10 K 편차를 보였다. 따라서, 버너 출구에서 연료의 온도와 동축류 공기의 온도는 같다고 취급하였다.

부상화염의 높이를 측정하기 위하여 디지털 카세트미터를 이용하였고, Nikon 디지털 카메라 D-100 을 이용하여 화염의 직접사진을 획득하였다.

3. 결과 및 토의

초기 온도 T_0 가 특정한 자발화 온도 T_{ig} 를 초과하여 가열되면, 그 화염은 외부의 점화원이 없이도 자발화된다. 본 실험 장치에서는 초기 온도가 940 K 에서 메탄 연료는 자발화되었다. 그리고 연료 물분율 $X_{F,0}$ 이 상대적으로 큰 경우에는 자발화된 화염은 노즐에 부착되었고, $X_{F,0}$ 가 상대적으로 작은 경우에는 부상 화염의 높이가 파이렉스 튜브 밖에서 발견되었다. $T_0 > 940$ K 에서 메탄의 자발화된 부상화염이 관찰되었으며, $T_0 < 940$ K 에서는 순수한 메탄 $X_{F,0} = 1$ 에서도 자발화가 발생하지 않았다. 여기서 하첨자 F 는 연료, 0 는 초기 조건을 의미한다.

수소의 비율 R_H 을 $X_{H,0}/(X_{C,0}+X_{H,0})$ 로 정의하였고, 하첨자 C 와 H 는 각각 메탄과 수소를 의미한다. 초기 온도 $T_0 = 980, 940$ 및 900 K 의 감소 및 수소 비율 R_H 의 변화에 대한 자발화된 부상화염의 특성들을 조사하였다.

3.1 980 K 의 초기온도

Fig. 1 은 초기 온도 980 K 에서 $R_H = 0.02$ 의 경우에서 자발화되어 안정화된 부상화염의 직접사진을 나타낸다. 초기의 제트 속도 U_0 가 20.0 m/s 로 고정된 상태에서 $X_{F,0} = 0.20$ (a)의 경우에 자발화된 부상화염의 선단은 삼지화염의 구조를 보인다. 그



Fig. 1 Direct photographs of autoignited lifted flames at $(T_0, R_H, U_0) = (980 \text{ K}, 0.02, 20.0 \text{ m/s})$ for $X_{F,0} = 0.20$ (a), 0.15 (b), and 0.10 (c)

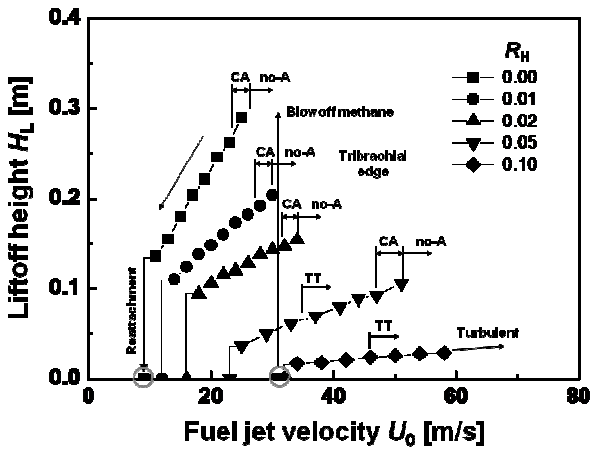


Fig. 2 Liftoff height with jet velocity by varying R_H at $(T_0, X_{F,0}) = (980 \text{ K}, 0.20)$

삼지화염은 중심에서 농후 예혼합화염, 희박 예혼합 화염의 날개 및 늘어진 확산화염으로 구성되며 하나의 삼중점에서 뻗어있다.^(13,14)

연료 몰분율이 $X_{F,0} = 0.15$ (b) 및 0.10 (c)로 감소함에 따라, 그 자발화된 부상화염의 선단은 뚜렷한 삼지화염의 구조가 아닌 마일드 연소를 갖는 점차적으로 희미한 밝기로 변화해 간다.^(9,10)

초기 온도가 980 K 및 연료 몰분율이 0.20 인 경우에서, 수소 비율의 변화에 따른 자발화된 부상화염의 높이 특성을 Fig. 2 에 나타내었다. 우선, 수소 첨가가 없는 $R_H = 0$ 인 순수 메탄 연료의 조건에서, 제트 속도가 증가함에 따라 노즐 부착화염에서 바로 화염날림(Blowoff)이 $U_0 = 31.0 \text{ m/s}$ 에서 발생하였다. 그 화염날림 조건에서 제트 속도를 다시 감소시키기에 따라, 제트 속도가 $U_0 \geq 26.0 \text{ m/s}$ 에서는 자발화된 부상화염이 발생하지 않았고 (No autoignition, no-A), $24.0 < U_0 < 26.0 \text{ m/s}$ 의 범위에서는 소염과 재점화가 반복되는 임계 자발화 (Critical autoignition, CA) 현상이 관찰되었다.^(9,10) 계속해서 제트속도를 감소시키면 삼지구조의 선단 (Tribrachial edge)을 갖는 자발화된 부상화염으로 안정화되었다. 또한 제트 속도가 감소함에 따라 부상화염의 높이는 거의 선형적으로 감소하였고, $U_0 = 9.0 \text{ m/s}$ 에서 다시 노즐로 재부착(Reattachment) 되었다.

$X_{F,0} = 0.20$ 에 대해서 메탄 연료에 수소를 첨가함에 따라, 자발화된 부상화염의 높이는 크게 감소하였다. 예를 들어, $U_0 = 20.0 \text{ m/s}$ 로 고정된 조건에서 수소의 비율을 $R_H = 0, 0.01$ 및 0.02 로 증가에 따라 부상높이는 0.233, 0.148, 0.106 로 감소하였다.

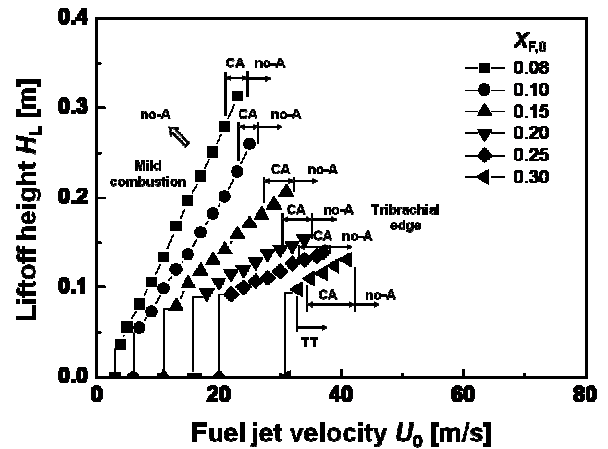


Fig. 3 Liftoff height with jet velocity by varying $X_{F,0}$ at $(T_0, R_H) = (980 \text{ K}, 0.02)$

이는 약 2 %의 수소첨가에 대하여 자발화 온도가 민감하게 영향을 받는 것을 의미한다.

$R_H = 0.05$ 및 0.10 에 대하여, 각각의 제트 속도가 $U_0 > 35.0$ 및 46.0 m/s 에서 화염의 후류는 난류로 천이(Transition to turbulent, TT) 되었고, 이때의 Reynolds 수는 $Re = U_0 d / \nu = 1080$ 및 1410 이며, 이때 ν 는 연료의 동점성도이다.

모든 R_H 조건에서 제트 속도의 증가에 따라 바로 화염날림이 발생하였으며, 그 이하에 제트속도 범위에서 노즐 부착화염과 부상화염이 동시에 존재하는 히스테리시스 거동을 보였다. R_H 가 증가함에 따라 그 노즐 부착화염이 발생하는 제트 속도와 자발화된 부상화염이 발생하는 상부의 제트속도는 증가하는 경향을 보였다.

동일한 초기 온도인 980 K 와 수소 비율이 0.02 로 고정된 상태에서, 연료 몰분율의 변화에 대하여 제트 속도에 따른 자발화된 부상화염의 높이 특성을 Fig. 3 에 나타내었다. 연료 몰분율이 $X_{F,0} \geq 0.20$ 인 조건에서는 제트 속도에 따라 Fig. 2 에서 삼지화염을 갖는 자발화된 부상화염의 경우와 유사한 거동을 보였다.

연료 몰분율이 0.20 미만으로 감소함에 따라 자발화된 부상화염은 Fig. 1c 와 같이 점차적으로 희미한 밝기를 보였다. $X_{F,0} = 0.08$ 에서 부상화염의 높이는 제트속도에 따라 거의 선형적으로 증가하였다. 상대적으로 낮은 제트속도에서는 부착화염을 갖고, 상대적으로 높은 제트속도에서는 임계 자발화 현상을 보였다. 이러한 영역은 $T_0 > T_{ig}$ 에서 $(T_{max} - T_0) / T_{ig} < 1.3$ 의 조건을 만족하는 마일드 연소(Mild combustion) 조건에 해당한다.^(9,10)

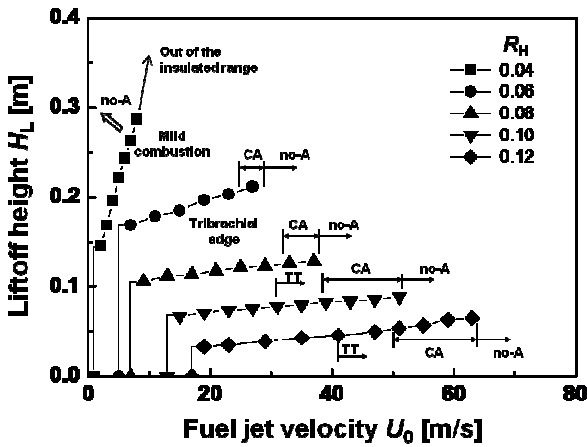


Fig. 4 Liftoff height with jet velocity by varying R_H at $(T_0, X_{F,0}) = (940 \text{ K}, 0.20)$

여기서 T_{\max} 는 단일화염온도 T_{ad} 로 대체되었고, T_{ig} 는 메탄 연료($R_H = 0$)의 자발화 온도를 선택하였다. 한편, $X_{F,0} < 0.08$ 의 조건에서는 자발화가 발생하지 않았다.

3.2 940 K의 초기온도

Fig. 4는 초기온도 $T_0 = 940 \text{ K}$ 및 $X_{F,0} = 0.2$ 로 고정된 조건에서 다양한 R_H 의 변화에 따른 자발화된 부상화염의 높이를 나타낸다. 우선 순수 메탄 $R_H = 0.0$ 의 경우는 자발화가 발생하지 않았다. R_H 의 비율을 증가시키기에 따라 $R_H = 0.04$ 에서 마일드 연소를 갖는 자발화된 부상화염이 나타나기 시작하였다.

R_H 를 0.06 및 0.08로 더 증가시키면 부상화염의 선단에서 삼지화염의 구조를 갖는 자발화된 부상화염이 나타났다. 계속해서 R_H 를 0.10 및 0.12로 증가시키면, 제트속도의 증가에 따라 부상화염의 후류에서 난류화염으로 천이되는 현상이 나타났다. 전체적인 거동은 제트속도에 따라 부상높이가 증가하였고, 제트속도의 위쪽 경계에서 임계 자발화 현상이 나타났다. 이러한 경향은 $T_0 = 980 \text{ K}$ 의 Fig. 2의 경우와 유사하였다.

3.3 900 K의 초기온도

연료 물분율이 $X_{F,0} = 0.20$ 으로 고정된 상태에서 초기온도를 900 K로 더 감소시켰다. 이때 역시, 순수 메탄 $R_H = 0.0$ 인 경우에는 자발화된 화염이 발생하지 않았다.

R_H 를 증가시키기에 따른 자발화된 부상화염의 거동을 Fig. 5에 나타내었다. 우선, $R_H < 0.14$ 의

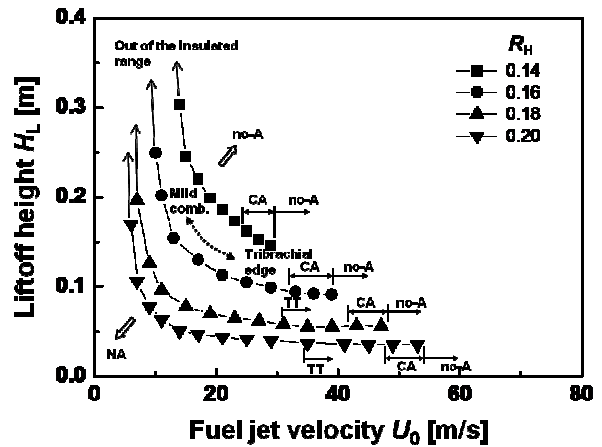


Fig. 5 Liftoff height with jet velocity by varying R_H at $(T_0, X_{F,0}) = (900 \text{ K}, 0.20)$

경우에서는 자발화된 부상화염이 발생하지 않았고, $R_H = 0.14$ 의 경우에 자발화된 부상화염이 나타나기 시작하였다. 이때에 제트속도의 증가에 따라, 자발화된 부상화염의 높이가 비선형적으로 감소하는 독특한 현상이 발견되었다.

Fig. 6(a)는 $(R_H, T_0, X_{F,0}) = (0.14, 900 \text{ K}, 0.20)$ 의 경우에 대하여 제트속도에 따른 자발화된 부상화염의 직접 사진을 나타내었다. 상대적으로 작은 제트속도 U_0 에 대해서, 아주 희미한 밝기를 갖는 자발화된 부상화염이 단일 튜브의 범위 밖에서 나타났다. 점차적으로 제트속도를 증가시키면, $U_0 = 14 \text{ m/s}$ 의 경우와 같이 희미한 밝기의 마일드 연소를 갖는 자발화된 부상화염이 상대적으로 높은 부상높이에 위치하였다. 계속해서 제트속도를 증가시키면 부상높이는 비선형적으로 감소하였고, 그 부상화염의 선단은 점차적으로 선명한 삼지화염의 구조를 보였다. 또한 $24.0 \leq U_0 \leq 29.0 \text{ m/s}$ 의 범위에 대해서 소염과 재점화가 반복되는 임계 자발화 현상이 제일 낮은 부상높이에서 발생하였다. 계속해서 제트속도를 더 증가시키면 자발화는 발생하지 않았다.

$R_H = 0.16$ 으로 증가시키면 동일한 제트속도에서의 자발화된 부상높이는 전체적으로 감소하였고, 동일한 부상높이에 대한 제트속도가 감소되는 독특한 특성이 유지되었다. $R_H = 0.18$ 및 0.20으로 더 증가시키면 제트속도에 따라 난류화염으로 천이되는 구간이 발생하였다. 전체적으로 R_H 의 증가에 따라 임계 자발화 현상이 발생하는 제트속도의 영역이 증가하는 특성을 보였다. 또한 수소 비율이 $R_H > 0.20$ 인 경우에서 자발화된 노즐 부착(Nozzle attached, NA) 화염이 발생하였다.

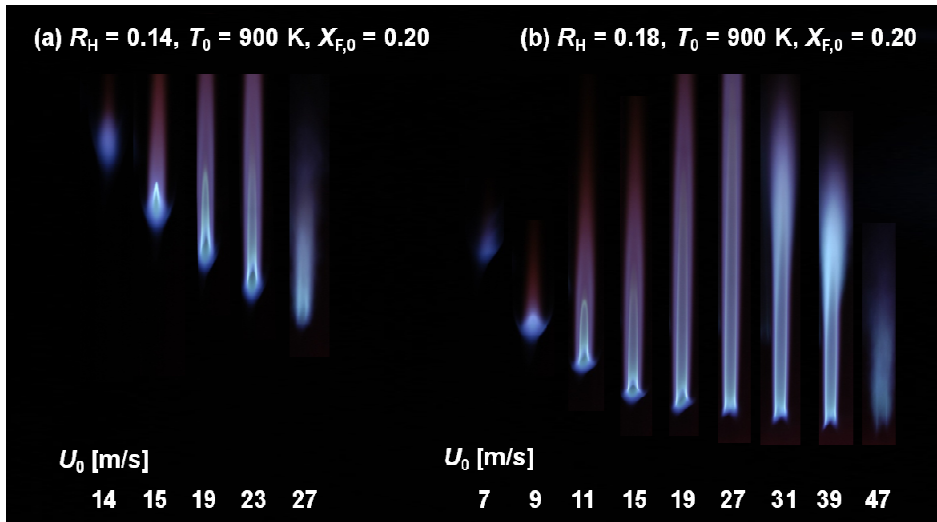


Fig. 6 Direct photographs of autoignited lifted flames with jet velocity at $(R_H, T_0, X_{F,0}) = (0.14, 900 \text{ K}, 0.20)$ (a) and $(0.18, 900 \text{ K}, 0.20)$ (b)

Fig. 6(b)는 $(R_H, T_0, X_{F,0}) = (0.18, 900 \text{ K}, 0.20)$ 의 경우에 대하여 제트속도에 따른 자발화된 부상화염의 직접사진을 나타낸다. 자발화가 발생하지 않는 상대적으로 낮은 제트속도에서 점차적으로 제트속도를 증가시키면, $U_0 = 7.0 \text{ m/s}$ 에서 처음으로 자발화된 부상화염이 나타났다. 그 화염은 희미한 마일드 연소를 갖는다. 제트속도의 증가에 따라 부상화염의 높이는 비선형적으로 감소하였으며, 선명한 삼지구조의 선단을 갖는다. 그리고 부상화염의 길이는 $U_0 = 27.0 \text{ m/s}$ 까지 제트속도에 따라 길어졌으며, 이후로 화염 후류에서 난류로 천이되면서 다시 부상화염의 길이는 감소하게 된다. $U_0 = 47.0 \text{ m/s}$ 는 소염과 재점화가 반복적으로 발생하는 임계 자발화 현상이 나타나는 지점이다. 제트속도가 더 증가되면 자발화된 부상화염이 나타나지 않았다.

3.4 점화지연시간과의 상관관계

수소가 혼합된 메탄 연료의 자발화된 부상화염에 대하여 H_L/U_0 로 정의된 연료제트의 특성유동시간 t_{flow} 와 단열 점화지연시간 $t_{\text{ig,ad}}$ 간의 상관관계를 살펴보았다. 열적 폭발이론을 기반으로, 점화 과정에 있어서 열손실을 고려한 점화지연시간은 유동시간에 의하여 나누어진 단열 점화지연시간의 2 승에 비례하는 $t_{\text{ig}} \sim (t_{\text{ig,ad}})^2/t_{\text{flow}}$ 의 관계가 있다는 것이 현상학적으로 유도된 바 있다.⁽⁹⁾ 이때, $t_{\text{ig,ad}}$ 는 CONP 코드를 이용한 계산값이다.^(15,16) 다양한 가스 연료의 실험적 결과로부터 임계 자발화 현상이 발생하는 자발화된 부상화염에 대하여 $t_{\text{flow}} \sim t_{\text{ig,ad}}^2$

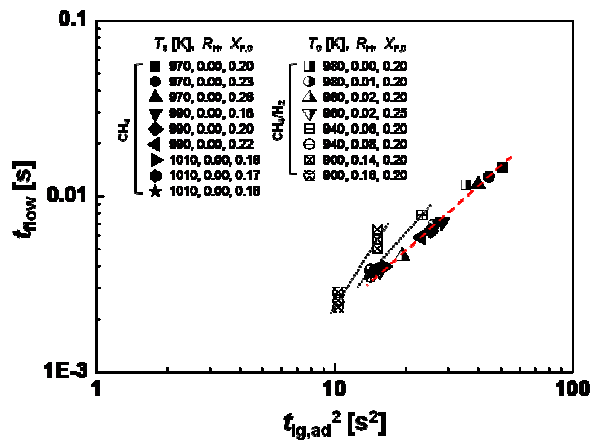


Fig. 7 Correlation of t_{flow} with $t_{\text{ig,ad}}^2$ for the critical autoignition with tribrachial edge

의 상관관계가 성립하는 것을 밝힌 바 있다.^(9,10)

비록 실험적으로는 정상상태에서 자발화의 위치를 결정할 수는 없지만, 소염과 재점화가 반복되는 임계 자발화 현상에 대한 분석 결과와 열손실을 고려한 점화지연시간과 자발화된 부상화염의 높이에 대한 이론적인 회귀분석 결과들을 통하여, 열손실을 고려한 점화지연시간은 자발화된 부상화염의 높이(선단)에 중요한 영향을 미치는 것으로 보고되었다.^(9,10,17)

삼지구화염을 갖는 자발화된 층류 부상화염에서 임계 자발화 현상을 갖는 조건에 대하여, $T_0 \geq 970 \text{ K}$ 에서 $R_H = 0.0$ 인 순수 메탄의 경우와 메탄/수소가 혼합된 $T_0 = 980, 940$ 및 900 K 경우에 대한 t_{flow}

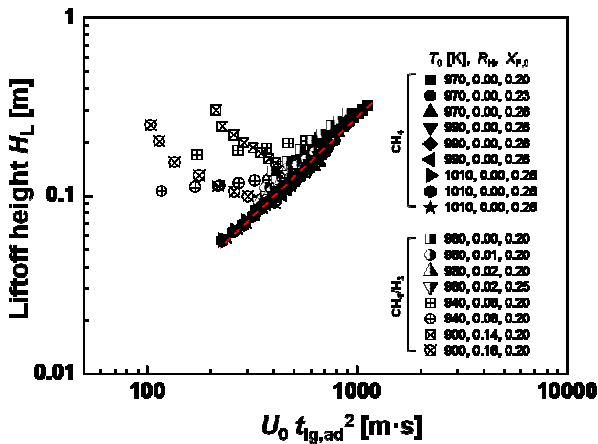


Fig. 8 Liftoff height for autoignited lifted flames with tribrachial edge as the function of $(U_0 t_{ig,ad}^2)$

와 $t_{ig,ad}^2$ 의 상관관계를 Fig. 7 과 같이 확인하였다. 그 결과로 순수 메탄의 경우와 980 K의 $R_H = 0.0-0.02$ 의 메탄/수소의 데이터들은 상관계수 $R = 0.991$ 을 갖는 $t_{flow} [s] = -0.00121 + 0.000316 \times t_{ig,ad}^2 [s^2]$ 와 같은 선형적인 관계를 보였다.

그러나, 940 및 900 K에서 메탄/수소의 혼합연료에 대해서는 $t_{flow} \sim t_{ig,ad}^2$ 의 관계에서 벗어나기 시작하였다.

자발화되어 안정화된 층류 부상화염의 높이에 대하여, Fig. 8에서 제트속도와 점화지연시간에 대한 상관관계를 나타내었다. 그 결과로 $R_H = 0.0$ 의 순수 메탄과 $R_H = 0.0-0.02$ 의 메탄/수소 혼합연료에 대하여 삼지구조의 선단을 갖는 부상화염의 높이는 상관계수 $R = 0.979$ 를 갖는 $H_L [m] = 0.000114 \times (U_0 t_{ig,ad}^2)^{1.13}$ 의 함수관계를 보였다. 그러나, Fig. 7의 결과와 같이 $T_0 = 940$ 및 900 K에서 메탄/수소의 혼합연료에 대한 데이터는 그 관계에서 모두 이탈되었다.

$T_0 = 940$ 및 900 K에서 메탄/수소의 혼합연료를 갖는 경우에 자발화된 부상화염은 앞서 연구된 열손실을 고려한 점화지연시간에 대한 상관관계에서 모두 유효하지 않았다. 이러한 현상을 자발화된 부상화염의 안정화 메커니즘을 $t_{flow} \sim t_{ig}$ 의 상관관계를 기반으로 설명한다면, 그 실험 결과들은 자발화 과정에서 열손실의 영향뿐만 아니라 다른 요인이 중요하게 작용하였다는 것을 의미한다.

상대적으로 많은 양의 수소가 첨가되어 향상된 자발화 온도 범위인 $T_0 \leq 940$ K에서의 실제적인 점화지연시간은 $T_0 \geq 970$ K의 경우와 비교하여 상이한 특성을 보일 것으로 판단된다. 즉, 그러한 온

도범위에서 운동량과 질량 확산에 대한 비율로 정의되는 Schmidt 수가 $Sc < 0.5$ 값을 갖는 수소의 특성이 점화지연시간에 영향을 미치는 것으로 추측할 수 있다. 따라서, 상대적으로 낮은 제트속도의 경우에는 상대적으로 큰 수소의 질량 확산으로 인하여 지역적인 수소의 비율이 감소하여 점화지연시간이 상대적으로 증가되었을 가능성이 있다. 또한 상대적으로 높은 제트속도의 경우에는 상대적으로 큰 운동량 확산으로 지역적인 수소의 비율 감소가 적어 점화지연시간이 상대적으로 감소된 것으로 유추할 수 있다. 이러한 현상에 대한 명백한 이해를 위해서는 앞으로 더 많은 연구가 요구된다.

4. 결론

메탄 연료제트의 자발화된 층류 부상화염에 대하여 점화 촉진제로써 수소를 첨가하여 초기온도 980-900 K의 범위에서 40 K 간격으로 자발화된 부상화염의 특성을 실험적으로 조사하였다.

그 결과로 980 K의 초기온도에서 메탄/수소가 혼합된 연료의 자발화된 부상화염은 연료 물분율에 따라 삼지구화염 또는 마일드 연소를 보이고, 제트속도에 따라 부상화염의 높이가 증가하는 전형적인 특성을 보였다. 또한 $R_H = 0.01-0.02$ 의 수소가 첨가된 자발화된 부상화염의 높이는 $R_H = 0$ 의 순수 메탄의 데이터와 함께 단열적 점화지연시간의 2승에 대한 상관관계가 유효하였다. 반면에 940 및 900 K의 초기온도에서 메탄/수소의 자발화된 부상화염은 그러한 상관관계에서 벗어났다.

특히, 수소의 점화 촉진에 의해서 자발화되는 900 K 경우에서, 제트 속도가 증가함에 따라 자발화된 부상화염의 높이는 비선형적으로 감소하는 독특한 특성을 보였다. 이러한 현상은 수소의 선택 확산이 점화 과정에서 중요한 영향을 미친 것으로 예측된다.

참고문헌

- (1) 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.
- (2) Echekki, T. and Gupta, K.G., 2009, "Hydrogen Autoignition in a Turbulent Jet with Preheated Co-Flow Air," *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 34, pp. 8352~8377.
- (3) Yoo, C.S., Sankaran, R. and Chen, J.H., 2009,

- “Three-Dimensional Direct Numerical Simulation of a Turbulent Lifted Hydrogen Jet Flame in Heated Coflow: Flame Stabilization and Structure,” *J. Fluid Mech.*, Vol. 640, pp. 453~481.
- (4) Richardson, E.S., Yoo, C.S. and Chen, J.H., 2009, “Analysis of Second-Order Conditional Moment Closure Applied to an Autoignitive Lifted Hydrogen Jet Flame,” *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 32, pp. 1695~1703
- (5) Lu, T.F., Yoo, C.S., Chen, J.H. and Law, C.K., 2010, “Three-Dimensional Direct Numerical Simulation of a Turbulent Lifted Hydrogen Jet Flame in Heated Coflow: a Chemical Explosive Mode Analysis,” *J. Fluid Mech.*, Vol. 652, pp. 45~64.
- (6) Blouch, J.D., Sung, C.J., Fotache, C.G. and Law, C.K., 1998, “Turbulent Ignition of Non-Premixed Hydrogen by Heated Counterflowing Atmospheric Air,” *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 27, pp. 1221~1228.
- (7) Blouch, J.D. and Law, C.K., 2003, “Effects of Turbulence on Nonpremixed Ignition of Hydrogen in Heated Counterflow,” *Combust. Flame*, Vol. 132, pp. 512~522.
- (8) Fotache, C.G., Kreutz, T.G. and Law, C.K., 1997, “Ignition of Hydrogen-Enriched Methane by Heated Air,” *Combust. Flame*, Vol. 110, pp. 429~440.
- (9) 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.
- (10) 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.
- (11) 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.
- (12) Shaddix, C.R., 1999, “Correcting Thermocouple Measurements for Radiation Loss: A Critical Review,” *Proceedings of the 33rd National Heat Transfer Conference*, Albuquerque, New Mexico.
- (13) 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
- (14) 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
- (15) Kee, R.J., Rupley, F.M. and Meeks, E., 1996, “CHEMKIN-III: A Fortran Chemical Kinetics Package for the Analysis of Gas-Phase Chemical and Plasma Kinetics,” SAND96-8216.
- (16) Li, J., Zhao, Z., Kazakov, A., Chaos, M., Dryer, F.L. and Scire, J.J., 2007, “A Comprehensive Kinetic Mechanism for CO, CH₂O, and CH₃OH Combustion,” *Int. J. Chem. Kinet.* Vol. 39, pp. 109~136.
- (17) Choi, B.C., 2011, “Effect of ignition delay time on autoignited laminar lifted flames,” *Trans. KSME (B)*, Vol. 35 No. 10, pp. 1025~1031.