

일산화탄소/수소 혼합기의 가열된 동축류 제트에서 자발화된 층류 부상화염의 특성

최 병 철^{*†}, 정 석 호^{**}

* (사)한국선급 환경플랜트팀,

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

Characteristics of Autoignited Laminar Lifted Flames in Heated Coflow Jets of Carbon Monoxide/Hydrogen Mixtures

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 January 6, 2012 ; Revised March 23, 2012 ; Accepted March 26, 2012)

Key Words : Autoignition(자발화), Hydrogen(수소), Carbon Monoxide(일산화탄소), Lifted Flame(부상화염)

초록: 가열된 동축류 공기에서 일산화탄소/수소의 층류 제트에 대한 자발화된 부상화염의 특성을 조사하였다. 그 결과로 자발화가 발생하지 않는 영역에서는 제트속도의 증가에 따라 노즐부착화염에서 안정화된 층류 부상화염을 거치지 않고 바로 화염날림이 발생하였다. 자발화 영역에서, 질소 희석된 일산화탄소의 자발화된 부상화염은 산화제 내의 함유된 수분에 따른 점화지연시간의 변동으로 그 부상높이가 크게 영향을 받았다. 그리고 수소에 의한 저온 자발화 영역에서 자발화된 부상화염은 제트속도의 증가에 따라 부상높이가 감소하다가 증가하는 독특한 현상이 발생하였다. 점화지연시간에 의한 자발화된 층류 부상화염의 안정화 메커니즘을 기반으로, 그 부상높이의 거동은 점화 과정에서 발생하는 열손실의 영향뿐만 아니라 연료제트의 운동량과 질량의 선호 확산에 의하여 영향을 받을 수 있다는 것을 확인하였다.

Abstract: The characteristics of autoignited lifted flames in laminar jets of carbon monoxide/hydrogen fuels have been investigated experimentally in heated coflow air. In result, as the jet velocity increased, the blowoff was directly occurred from the nozzle-attached flame without experiencing a stabilized lifted flame, in the non-autoignited regime. In the autoignited regime, the autoignited lifted flame of carbon monoxide diluted by nitrogen was affected by the water vapor content in the compressed air oxidizer, as evidenced by the variation of the ignition delay time estimated by numerical calculation. In particular, in the autoignition regime at low temperatures with added hydrogen, the liftoff height of the autoignited lifted flames decreased and then increased as the jet velocity increased. Based on the mechanism in which the autoignited laminar lifted flame is stabilized by ignition delay time, the liftoff height can be influenced not only by the heat loss, but also by the preferential diffusion between momentum and mass diffusion in fuel jets during the autoignition process.

1. 서 론

일산화탄소와 수소에 의해서 주로 구성되는 합성가스(Syngas)는 저급의 석탄 또는 석유코크스로부터 부분적 산화에 의해서 생산된다. 그리고 청

정 대체연료로서 가스터빈의 활용에 대한 관심이 급증하고 있다. 그러나 메탄 등과 같은 연료와 비교하여 화염안정화 및 역화 등의 연소특성이 다르게 나타나기 때문에 상용화에 아직 어려움이 있다.

일산화탄소/수소 혼합기의 층류화염 전파속도와 점화 특성 들은 그 혼합비율, 온도 및 압력 등의 다양한 초기 조건에 대하여 연구되었다.^(1~5) 그러나 비예혼합 층류 제트의 자발화 특성에 대한 연구는 제한되어 있다.

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

최근에 고온의 동축류 공기에서 층류 및 난류 연료 제트의 부상화염에 대한 특성이 실험적으로 조사되었다.⁽⁶⁻⁹⁾ 상대적으로 낮은 초기 온도에서 층류 및 난류 부상화염의 안정화 메커니즘에는 초기 온도에 대한 화염 선단의 전파속도가 중요한 역할을 하였다.^(10,11)

동축류 제트가 자발화 온도 이상으로 가열되면, Schmidt number (Sc)와 무관하게 자발화된 층류 부상화염이 생성되었고, 그 안정화 메커니즘에는 유동 특성에 대하여 열손실을 고려한 점화지연시간이 중요한 역할을 하였다.^(9,12,13) 이러한 자발화된 층류 부상화염에 관한 연구는 메탄(CH_4), 에틸렌(C_2H_4), 에탄(C_2H_6), 프로판(C_3H_8), 노말부탄($n-C_4H_{10}$) 및 메탄/수소(CH_4/H_2)의 혼합기에 대하여 체계적으로 연구되었다.^(9,12-15)

본 연구에서는 일산화탄소/수소 연료에 대하여 가열된 동축류 공기에서 자발화된 부상화염의 특성을 조사하였다. 그리고 일산화탄소/수소의 이중 연료에 대한 점화지연시간의 특성을 조사하였다.

2. 실험 장치

실험장치는 동축류 버너, 유량조절부 및 히터부로 구성된다. 동축류 버너의 중심에 내경 3.76 mm의 스텐레스 스틸관이 연료 노즐로 사용되었고, 관내 완전 발달된 유동장을 얻기 위하여 길이 750 mm의 사용하였다. 동축류 공기는 균일한 속도장 및 온도장을 가지는 동축류를 얻기 위하여 메탈화이버 매트, 세라믹 비드 및 내경 150 mm를 갖는 세라믹 하니콧을 사용하였다. 또한 버너에서 배출되는 고온 동축류의 열손실을 최소화하면서 유동장 및 화염의 안정성을 유지하기 위하여 길이 500 mm의 세라믹 단열재 및 파이프 튜브를 각각 사용하였다. 그 동축류 버너의 상세한 내부 구조는 이전 연구에서 보고되었다.⁽⁶⁻⁹⁾

연료는 99.90%의 순도를 갖는 일산화탄소, 99.99%의 순도를 갖는 수소 및 99.99%의 순도를 갖는 질소를 사용하였다. 동축류 산화제는 압축된 공기 및 산소:질소가 21:79의 비율로 혼합된 건조한 공기를 사용하였다. 그 연료와 공기의 유량은 질량 유량계를 통하여 제어하였다. 동축류 공기는 2개의 2.5 kW 실린더형 히터를 통과하여 예열된 후에 버너에 공급되고, 7.5 kW의 실린더형 히터가 내장된 세라믹 버너에 의해서 원하는 초기 온도까지 가열된다. 그 연료 노즐은 주변의 가열된 공기 및 세라믹 히터에 의해서 역시 가열된다.

동축류의 속도 V_{CO} 는 1.1 m/s로 고정하였고, 단, 초기 온도 T_0 가 300 및 600 K에 대해서는 $V_{CO} = 0.5$ m/s를 사용하였다. 이때에 동축류 공기의 온도 일정성을 확인하기 위하여, 직경이 3 mm인 스테인리스 스틸 관에 삽입된 K형 열전대를 사용하여 축방향과 반경방향으로 온도를 측정하였다. 한편, 직경이 0.25 mm로 노출된 K형 열전대와 비교하였을 때에 온도편차는 거의 없었고, 1000 K 미만의 본 실험 조건에서는 열전대에서 발생하는 복사열 손실의 영향도 미미하였다.⁽¹⁶⁾ 그 온도측정 결과로 노즐출구에서부터 반경방향으로 최대 50 mm까지 ± 2 K의 오차를 보였고, 축방향은 노즐 출구에서부터 최대의 경우 300 mm까지 ± 20 K의 온도 편차를 가졌다. 그리고 동축류 공기와 노즐 연료의 온도차이는 모든 실험 조건에서 최대 10 K 편차를 보였다. 따라서, 연료와 동축류 공기에 대한 버너 출구에서의 온도는 같다고 취급하였다.

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

3. 결과 및 토의

초기 온도 T_0 , 연료몰분율 $X_{F,0}$ 및 수소 비율 R_H 의 변화에 대한 자발화된 부상화염의 특성들을 조사하였다. 하첨자 0는 초기 조건, F는 연료를 의미한다. 수소의 비율 R_H 을 $X_{H,0}/(X_{C,0}+X_{H,0})$ 로 정의하였고, 여기서 하첨자 C와 H는 각각 일산화탄소와 수소를 의미한다.

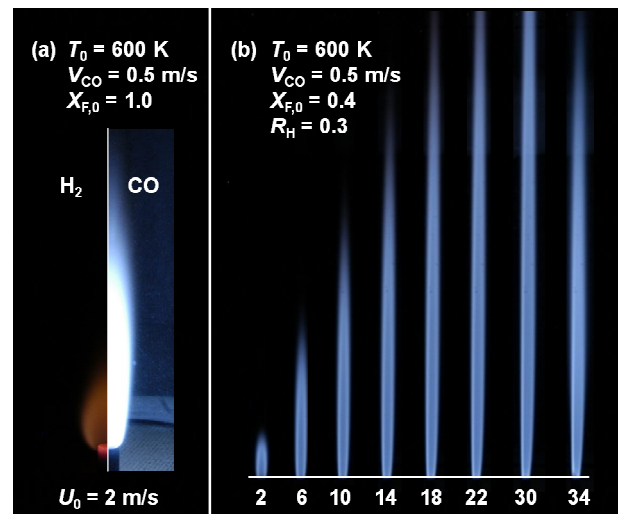


Fig. 1 Direct photographs of nozzle attached flame for pure CO/H₂ (a) and their mixture (b)

3.1 자발화되지 않은 영역

초기 온도 600 K 에서 $X_{F,0} = 1$ 의 수소(좌) 및 일산화탄소(우)에 대한 제트속도 $U_0 = 2$ m/s 에서 노즐부착화염의 직접사진을 Fig. 1(a)에 나타내었다.

우선, 수소(좌)의 노즐부착화염은 붉은 색을 나타내었다. 그 화염은 노즐의 상단부분의 약간 아래에 위치하였고, 화염에서 방출된 열이 노즐로 전달되어 노즐을 가열시켰다. 그 수소의 노즐 부착화염은 제트속도의 증가에도 화염날림이 발생하지 않았다. 이러한 특성은 노즐 출구에서 $Sc < 0.5$ 를 갖는 수소의 상대적으로 큰 질량확산에 의하여 발생되는 것으로 보고되었다.^(10,11)

일산화탄소(우)의 노즐 부착화염은 밝은 하늘색을 보였고, 수소화염에 비하여 약 3 배정도로 화염 길이가 길게 나타났다. 그 노즐부착화염은 제트속도 $U_0 = 2.6$ m/s 에서 부상화염을 거치지 않고 바로 화염날림(Blowoff)이 발생하였다. 특히, $V_{CO} = 0.5$ m/s 및 $T_0 = 300$ K 에서, 순수 일산화탄소는 낮은 제트속도에서도 노즐 부착화염이 나타나지 않았다 (no flame). 단, 산화제 중에 산소농도를 약 30% 이상으로 증가된 경우에서는 일산화탄소의 노즐 부착화염이 관찰되었다.

Fig. 1(b)는, $(X_{F,0}, R_H) = (0.4, 0.3)$ 의 질소로 희석된 일산화탄소/수소의 혼합기에 대해서, $T_0 = 600$ K 의 동축류 제트에서 제트속도에 따른 노즐부착화염의 직접사진을 나타낸다. 제트속도의 증가에 따라 화염길이는 선형적으로 증가하였고, $U_0 = 30$ m/s 를 초과하면 화염의 후류에서부터 난류로 천이되어 화염길이가 다시 감소하였다. $U_0 = 35$ m/s 에서 화염날림이 발생하였다.

순수 일산화탄소 및 수소의 경우와 일산화탄소/수소의 혼합기에 대하여, 자발화가 발생하지 않는 상대적으로 낮은 초기 온도에서는 외부 점화원에 의하여 노즐부착화염을 생성시켰다. 반면에 제트속도에 따라 노즐에서 부상되어 안정화된 층류 부상화염은 관찰되지 않았다.

3.2 일산화탄소의 자발화 영역

일산화탄소/수소 혼합기에 대하여 자발화 온도를 초과하는 초기 온도에서는 외부 점화원이 없이도 점화되어 노즐부착화염과 자발화된 부상화염이 발생하였다. 특히, 주위 공기에 대한 상대습도의 변화에 따라 일산화탄소의 자발화된 부상화염은 그 부상높이가 크게 영향을 받았고, 그에 따른 실험 오차를 표시하였다. 이러한 영향은 저온의 초기 온도에서 노즐부착화염에 비하여, 고온에서 자발

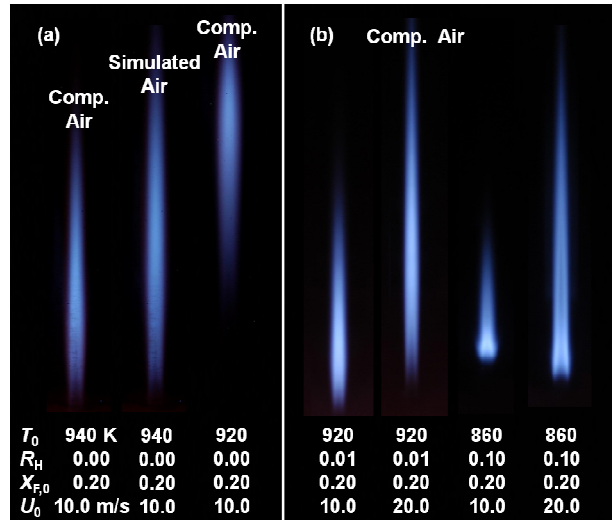


Fig. 2 Direct photographs of autoignited lifted flame for $R_H = 0$ with the variation between compressed air and synthetic air (a) and $R_H = 0.01$ with the variation of T_0 and U_0 (b)

화된 부상화염의 부상높이에 대하여 그 영향이 상대적으로 크게 나타났다. 이러한 산화제 내의 수분 함유량이 일산화탄소의 자발화된 화염에 미치는 영향에 대하여 정량적인 실험이 요구된다.

일반 압축공기(Compressed Air)와 21% 산소/79% 질소의 건조공기(Simulated Air)를 산화제로 사용하여, $U_0 = 10$ m/s 로 고정되어 질소로 희석된 순수 일산화탄소($X_{F,0} = 0.20, R_H = 0$)의 연료제트에 대한 자발화된 부상화염의 직접사진을 Fig. 2a 에 나타내었다. 압축공기의 산화제에 대하여 초기 온도가 940 K 인 경우에 그 자발화된 부상화염은 희미한 파랑색을 보였으며, 그 선단의 삼지화염 구조는 선명하게 나타나지 않았다. 그리고 건조공기의 경우에 그 부상높이가 압축공기의 경우에 비하여 상대적으로 약간 높게 나타났다. 한편, $T_0 = 920$ K 에서, 압축공기의 경우에는 자발화된 부상화염이 나타났으며, 건조공기의 경우에는 자발화가 발생하지 않았다.

각 산화제에서 $(X_{F,0}, R_H) = (0.20, 0)$ 의 연료에 대하여 제트속도에 따른 자발화된 부상화염의 높이를 Fig. 3 에 나타내었다. 압축공기를 사용한 940 K 의 초기 온도에 대하여, $U_0 \leq 3$ m/s 에서 노즐부착화염이 생성되었고, $U_0 = 4$ m/s 에서 화염이 노즐에서 부상하였다. 그 제트속도에 따라 거의 선형적으로 부상높이가 증가하였고, $U_0 \geq 30$ m/s 에서 화염의 후류에서부터 난류화염으로 천이(Transition to Turbulence, TT)되었다. 사용된 질량유량계의 범위

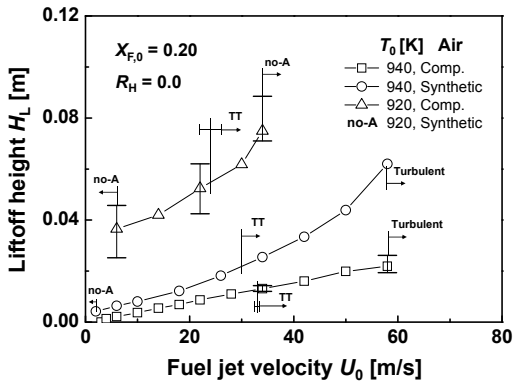


Fig. 3 Liftoff height of autoignited lifted flames with $(X_{F,0}, R_H) = (0.20, 0.0)$ for several T_0 and air type

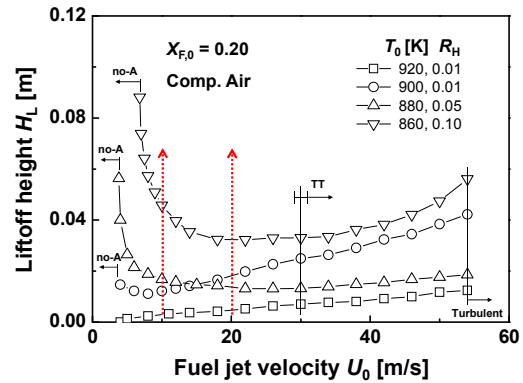


Fig. 5 Liftoff height with jet velocity for various R_H and T_0 with fixed compressed air and $X_{F,0} = 0.20$

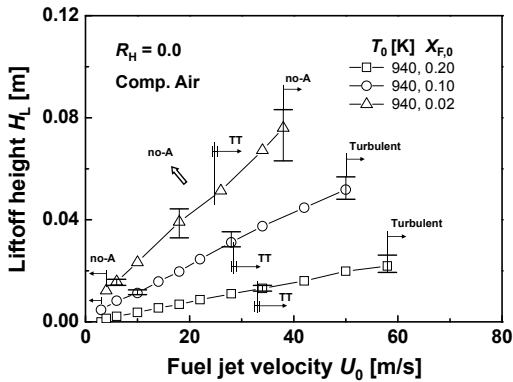


Fig. 4 Liftoff height with jet velocity for various $X_{F,0}$ with fixed compressed air and $T_0 = 940$ K

내에서 약 $U_0 = 58$ m/s 까지 난류(Turbulent) 부상화염을 유지하였다. 다시 제트속도를 감소시켰을 때에, $U_0 = 3$ m/s 에서 그 부상화염은 노즐로 재부착되었고, 제트속도에 따른 분명한 히스테리 거동이 나타나지 않았다. 또한 부상높이는 대략 $\pm 1\%$ 이하의 오차범위를 보였다.

동일한 초기 온도 940 K 의 건조공기에 대하여, $U_0 < 2$ m/s 에서는 자발화된 화염이 발생하지 않았다(no-A). 제트속도가 증가함에 따라 자발화된 부상화염의 부상높이는 다소 비선형적으로 증가하였고, 압축공기를 사용한 경우에 비하여 더 높게 위치하였다.

$T_0 = 920$ K 의 압축공기인 경우, 자발화된 부상화염의 높이는 제트속도에 따라 비선형적으로 증가하였고, 940 K 의 경우보다도 더 큰 부상높이를 보였다. 그리고 $6 \leq U_0 \leq 34$ m/s 의 범위 내에서 자발화된 부상화염이 존재하였고, 이외의 범위에서는 자발화된 화염이 나타나지 않았다. 또한 920 K 에서 부상높이의 오차범위는 940 K 의 경우에

비하여 상대적으로 더 크게 발생하였다. 특히, $T_0 = 920$ K 의 건조공기인 경우, 일산화탄소의 자발화된 화염은 제트속도의 변화에 대해서도 관찰되지 않았다(no-A).

Fig. 4 는 고정된 940 K 의 압축공기에서 일산화탄소의 자발화된 부상화염에 대하여 연료몰분율 $X_{F,0}$ 를 가변시켰을 때에, 제트속도에 따른 그 부상높이를 나타낸다. $X_{F,0} < 0.02$ 인 경우에는 자발화된 화염이 나타나지 않았다. 예를 들어, $U_0 = 34$ m/s 로 고정된 조건에서 연료몰분율의 증가에 따라, 그 부상높이는 $X_{F,0} = 0.02, 0.10$, 및 0.20 에 대하여 $H_L = 67.3, 37.5$, 및 13.1 mm 로 각각 감소하였다. 그리고 그 부상높이의 오차범위도 연료몰분율이 상대적으로 증가할수록 감소하였다.

한편, 산화제 내에 수분(H_2O)의 질량분율이 0-0.01 에 대하여, $(T_0, X_{F,0}) = (920$ K, 0.20)에서 0-D 단열적 점화지연시간은 $t_{ig,ad} = 0.1-1000$ sec 로 가변되었다. 여기서 단열적 점화지연시간은 COMP 코드⁽¹⁷⁾와 일산화탄소/수소에 최적화된 메커니즘⁽¹⁸⁾을 사용하여 계산하였다. 이러한 수치적 결과는 산화제 내의 수분과 같은 H 성분에 의하여 일산화탄소의 점화지연시간이 상당한 영향을 받는 것을 의미한다. 따라서 실험적으로 관찰된 일산화탄소의 자발화와 안정화된 부상화염의 높이 특성들에 대하여 그 점화지연시간이 중요한 역할을 하고 있다는 것을 의미한다.

3.3 수소에 의한 저온 자발화 영역

압축공기를 사용한 경우에 일산화탄소/수소의 자발화된 부상화염의 직접사진을 Fig. 2b 에 나타내었다. 동일한 $X_{F,0} = 0.20$ 에 대하여, $T_0 = 920$ K 에서 1%의 수소가 혼합된 연료 조건에서, $U_0 = 10$

m/s 인 경우보다 $U_0 = 20$ m/s 의 경우에 자발화된 부상화염의 높이가 더 높게 증가하였다. 반면에, $T_0 = 860$ K 에서 10 %의 수소가 혼합된 연료 조건에서는 $U_0 = 20$ m/s 의 경우의 부상높이가 상대적으로 더 감소하였다. 이러한 독특한 특성은 최근에 메탄/수소의 자발화된 부상화염에 관한 연구에서 처음으로 관찰되어 보고된 바가 있다.^(14,15) 이러한 상대적으로 저온의 자발화 영역에 대한 특성을 아래에서 보다 자세히 살펴보겠다.

Fig. 5는 압축공기의 산화제 및 $X_{F,0} = 0.20$ 의 일산화탄소/수소의 연료에 대하여 (T_0, R_H)의 변화에 대하여 제트속도에 따른 자발화된 부상화염의 높이를 나타낸다. (T_0, R_H) = (920 K, 0.01)에서 자발화된 부상화염의 높이는 (T_0, R_H) = (920 K, 0)의 경우에 비하여 더 낮은 값을 보였고, 제트속도의 증가에 따라 거의 선형적으로 증가하였다.

(T_0, R_H) = (900 K, 0.01)의 경우에, 제트속도의 증가에 따라 그 자발화된 부상화염의 높이는 초기에는

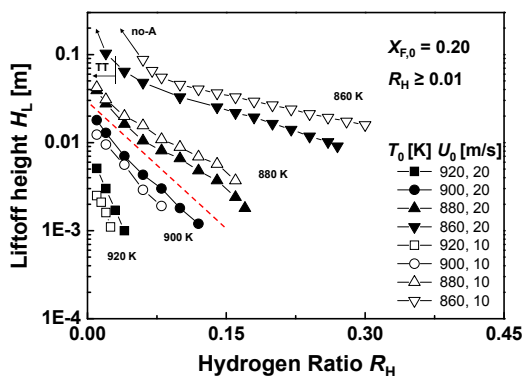


Fig. 6 Liftoff height in terms of R_H for $U_0 = 10$ and 20 m/s with $X_{F,0} = 0.20$ with compressed air and various T_0

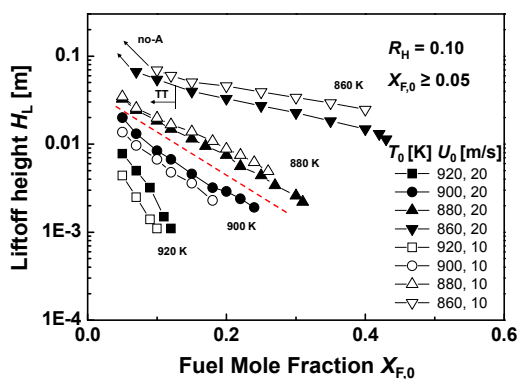


Fig. 7 Liftoff height in terms of $X_{F,0}$ for $U_0 = 10$ and 20 m/s with $R_H = 0.10$ with compressed air and various T_0

감소하다가 다시 증가하는 특성을 보였다. 이러한 독특한 특성은 (T_0, R_H) = (880 K, 0.05) 및 (860 K, 0.10)로서 상대적으로 저온인 경우에 자발화된 부상화염을 생성시키기 위한 수소의 비율이 더 크게 요구되었다. 그리고 저온의 조건에서 제트속도에 따른 그 부상높이의 변동폭이 더 크게 발생하였다. 한편으로 1 % 이상의 수소가 혼합된 경우에서, 압축공기의 사용에 따른 측정된 부상높이의 오차는 ± 1 mm 이내로 나타났다.

첨가된 수소에 의한 저온 자발화 영역에서 나타나는 그 독특한 특성의 원인을 살펴보기 위하여, 우선, 대표적인 U_0 에 대하여 R_H 및 $X_{F,0}$ 의 변화에 따른 자발화된 부상화염의 높이를 아래와 같이 조사하였다.

Fig. 5($X_{F,0} = 0.2$)에서 $U_0 = 10$ 및 20 m/s로 각각 고정된 연료제트에 대하여, $T_0 = 920-860$ K 및 $R_H \geq 0.01$ 에 따른 자발화된 부상화염의 높이를 Fig. 6에 나타내었다. 전체적으로 수소비율의 증가에 따라 자발화된 부상화염의 높이는 비선형적으로 감소하는 특성을 보였으며, 계속해서 수소비율을 증가시키면 부상화염은 노즐로 부착되었다.

$T_0 = 920$ 및 900 K에서, 그 부상높이는 $U_0 = 20$ m/s인 경우가 $U_0 = 10$ m/s인 경우보다 더 높게 위치하였다. 반면에 $T_0 = 880$ 및 860 K에서는 $U_0 = 10$ m/s인 경우의 부상높이가 상대적으로 더 높게 나타나는 역전된 현상을 보였다.

$R_H = 0.1$ 의 $U_0 = 10$ 및 20 m/s로 각각 고정된 연료제트에 대하여, $T_0 = 920-860$ K 및 $X_{F,0} \geq 0.05$ 에 따른 자발화된 부상화염의 높이를 Fig. 7에 나타내었다. 그 연료몰분율이 증가함에 따라 자발화된 부상화염의 높이는 비선형적으로 감소하였고, 계속해서 연료몰분율을 증가시키면 부상화염은 노즐로 부착되었다.

$T_0 = 880$ 및 860 K에서 $U_0 = 10$ m/s인 경우의 부상높이가 $U_0 = 20$ m/s의 경우보다 더 높은 경향도 유사하게 나타났다.

자발화된 층류 부상화염의 안정화에는 점화지연 시간이 중요한 역할을 한다고 보고 되고 있으며, 수소에 의하여 점화가 촉진된 자발화 영역에서도 점화지연시간이 역시 중요한 역할을 할 것으로 추측된다.^(9,12-15) 그리고 그 첨가된 수소가 점화지연 시간에 미치는 영향을 아래에서 구체적으로 살펴 보겠다.

3.4 점화지연시간 특성

자발화되지 않은 부상화염은 비반응 제트 유동

장에서 이론 공연비 선을 따라 삼지화염의 전파속도와 지역적인 유동속도가 균형을 이루는 지점에서 안정화된다.^(10,11) 반면에, 본 실험에서는 연료제트가 노즐에서 분출되는 순간부터 고온의 산화제에 의하여 그 연료와 산화제의 혼합층 내에서는 자발적인 화학반응이 진행되고, 특정한 지연시간이 지난 후에 급격한 점화가 발생한다. 따라서, 자발화된 부상화염은 그 자연점화가 발생하는 위치에서 안정화될 수 있기 때문에, 노즐출구의 초기 조건들에 대하여 간단하게 유동시간이 정의되었고, 0-D 에서 계산된 단열적 점화지연시간을 이용하여 열적 폭발 이론을 기반으로 자발화된 부상화염에 대한 안정화 메커니즘이 설명되었다.^(9,12-15)

본 연구에서는 자발화된 부상화염의 안정화에 중요한 영향을 미치는 점화지연시간을 토대로, 일산화탄소/수소의 자발화된 부상화염의 특성에 대하여 아래와 같이 고찰하였다.

대기압에서 일산화탄소 및 수소의 이중 연료에 대한 단열 점화지연시간은 아래의 식 (1)와 같이 Arrhenius 형식으로 나타낼 수 있다.^(12,13,19)

$$t_{ig,ad} \sim Y_{CO}^b Y_{H_2}^c \exp\left(\frac{T_A}{T_0}\right) \quad (1)$$

여기서, b 는 일산화탄소 질량분율 Y_{CO} 의 지수이고, c 는 수소 질량분율 Y_{H_2} 의 지수이고, T_A 는 활성화 온도 [K]이다.

그 자발화된 층류 부상화염에 대하여, 아래의 식 (2)와 같이 안정화된 높이를 제트속도로 나눈 유동시간 t_{flow} ($= H_l/U_0$)과 열손실을 고려한 점화지연시간 $t_{ig,ad}^2$ 에 대한 상관관계는 열적 폭발이론을 토대로 유도되었다.⁽⁹⁾

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

열적 폭발이 발생하는 지점과 자발화되어 안정화된 부상화염 선단의 높이와 일치한다는 가정 하에 식 (1)을 식 (2)에 대입해서 정리하면 아래의 식 (3)과 같은 함수의 형태로 표현될 수 있다.

$$t_{flow}^{0.5} = a Y_{CO}^b Y_{H_2}^c \exp\left(\frac{T_A}{T_0}\right) \quad (3)$$

여기서, a 는 상수이다.

Fig. 6 과 7 의 자발화된 층류 부상화염 높이 값들에 대해서, 식 (3)을 이용하여 초기 온도와 각 연료의 질량분율에 대한 회귀분석을 수행하였다. 그 결과는 Fig. 8 과 9 에 나타내었고, 그 경험적 계수 및 상관계수 R 들을 Table 1 에 표기하였다. 그 결과로 $U_0 = 20$ 및 10 m/s 의 모든 데이터를 포함시키는 상관계수를 찾을 수 없었고, 각각의 $U_0 = 20$ 및 10 m/s 의 경우에 대하여 $R = 0.945$ 및 0.956 로 높은 상관관계를 보였다.

Table 1 Fitting coefficients in Arrhenius form.

U_0 [m/s]	a	b	c	T_A [K]	R
20	1.29E-15	-0.13993	-0.38206	24335.57	0.945
10	1.59E-17	0.02596	-0.35973	28964.55	0.956

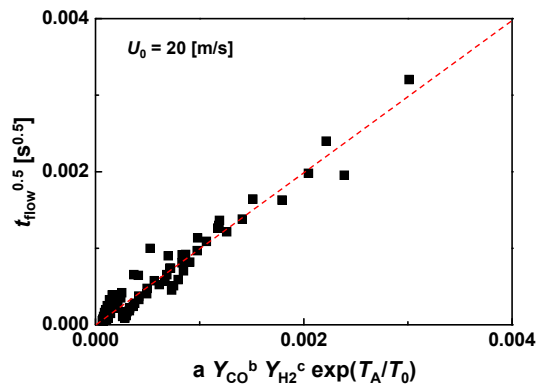


Fig. 8 Correlation of $t_{flow}^{0.5}$ with Arrhenius form in case of $U_0 = 20$ m/s

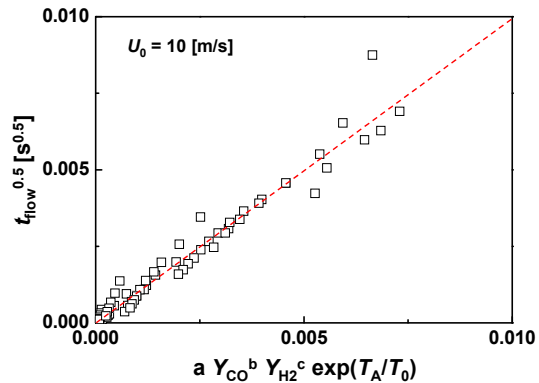


Fig. 9 Correlation of $t_{flow}^{0.5}$ with Arrhenius form in case of $U_0 = 10$ m/s

이는 열적 폭발이 발생하는 과정에서 외부로 열전도 되는 시간스케일 $t_{flow}^{0.5}$ 과 단열 열생성 시간스케일 $t_{ig,ad}$ 에 대한 선형적인 상관관계를 보여준다. 즉 전도 열손실 특성이 점화지연시간에 영향을 미치는 것을 의미하며, 이는 일산화탄소/수소 제트에서 자발화된 부상화염의 안정화에 대해서 역시 중요한 역할을 하고 있는 것을 의미한다.

반면에 그 점화지연 시간스케일에서 일산화탄소 및 수소의 질량분율에 대한 각각의 지수값 b 및 c 에 대하여, $U_0 = 20$ m/s 인 경우에서 각각의 b 및 c 의 지수값은 음의 값을 갖지만, $U_0 = 10$ m/s 인 경

우에 대해서 b 의 값이 특히 양의 값을 갖는다. 이는 수소의 비율이 낮을수록 $t_{\text{flow}}^{0.5}$ 시간스케일이 더 길어지는 특성을 갖는다는 것을 나타낸다.

또한 $U_0 = 10$ m/s 경우의 T_A 가 20 m/s의 값보다 더 큰 값을 갖기 때문에, $U_0 = 10$ m/s인 경우의 자발화된 부상화염에 대한 $t_{\text{flow}}^{0.5}$ 시간스케일이 초기 온도 T_0 에 대하여 상대적으로 더 민감하게 반응하는 것을 알 수 있다. 이러한 일산화탄소/수소의 제트속도 $U_0 = 20$ 및 10 m/s에 따른 식 (3)에 대한 회귀분석 결과의 차이는, 그 점화지연시간은 열손실에 대한 영향뿐만 아니라 수소의 빠른 질량확산에 의하여 영향을 받고 있음을 나타낸다.

온도 T_0 , 연료몰분율 $X_{F,0}$ 및 수소비율 R_H 의 초기 조건들은 고정되었지만, 특히 수소에 의한 저온 자발화 영역에서 연료제트의 운동량과 질량의 선호 확산에 의하여 점화지연시간이 영향을 받을 수 있다. 즉, 상대적으로 제트속도가 감소될수록 수소의 빠른 질량확산으로 인하여 자발화 과정에서 혼합층 내의 이론공연비를 이루는 연료 중의 수소농도가 상대적으로 감소되고, 상대적으로 일산화탄소가 차지하는 비율이 더 커진다. 그 결과로 그 혼합기의 점화지연시간이 길어질 수 있다. 이는 제트속도의 감소에 따라 그 부상높이가 증가되는 현상이 나타날 수 있다는 것을 의미한다.

한편, 고온의 연료와 산화제의 혼합층 내에서 자발적인 화학반응을 하는 동안에 생성 및 소멸되는 다양한 화학종의 농도 변화에 대한 정보를 레이저 계측을 통하여 실험적으로 파악할 필요가 있다. 이에 대한 적절한 화학반응 메커니즘의 검증을 통하여 점화지연시간의 특성 등에 관한 수치해석적 연구가 향후 요구된다.

4. 결론

가열된 동축류 공기에서 일산화탄소/수소의 층류 제트에 대한 자발화된 부상화염의 특성을 조사하였다. 자발화가 발생하지 않는 초기 온도 영역에서는 외부 점화원에 의하여 화염을 생성시켰고, 순수 일산화탄소 및 수소와 일산화탄소/수소의 혼합기에 대하여 제트속도에 따라 노즐에 부착된 화염에서 바로 화염날림이 발생하였다. 그리고 안정화된 층류 부상화염은 발생하지 않았다.

자발화 온도를 초과하는 초기 온도에서는 외부 점화원이 없이도 점화되어 노즐부착화염과 자발화된 부상화염이 생성되었다. 질소 희석된 일산화탄소의 자발화된 부상화염은 산화제 내의 수분 함유량에 따른 점화지연시간의 변동으로 그 부상높이

가 크게 영향을 받았다.

수소에 의한 저온 자발화 영역에서는 제트속도의 증가에 따라 부상높이가 감소하다가 증가하는 독특한 현상이 발생하였다. 이에 대하여 열적 폭발 이론을 토대로 점화지연시간에 대한 회귀분석을 수행하였다. 그 결과로 수소의 선호 확산이 점화 과정에서 발생하는 열손실의 영향뿐만 아니라 연료제트의 운동량과 질량의 선호 확산에 의하여 점화지연시간이 영향을 받을 수 있다는 것을 확인하였다.

참고문헌

- (1) Natarajan, J., Lieuwen, T. and Seitzman, J., 2007, "Effect of Hydrogen Addition on Autoignited Methane Lifted Flames," *Combust. Flame*, Vol. 151, pp. 104~119.
- (2) Natarajan, J., Kochar, Y., Lieuwen, T. and Seitzman, J., 2009, "Effect of Hydrogen Addition on Autoignited Methane Lifted Flames," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 32, pp. 1261~1268.
- (3) Dong, C., Zhou, Q., Zhao, Q., Xu, T. and Hui, S., 2009, "Effect of Hydrogen Addition on Autoignited Methane Lifted Flames," *Fuel*, Vol. 88, pp. 1858~1863.
- (4) Fotache, C.G., Tan, Y., Sung, C.J. and Law, C.K., 2000, "Effect of Hydrogen Addition on Autoignited Methane Lifted Flames," *Combust. Flame*, Vol. 120, pp. 417~426.
- (5) Walton, S.M., He, X., Zigler, B.T. and Wooldridge, M.S., 2007, "Effect of Hydrogen Addition on Autoignited Methane Lifted Flames," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 31, pp. 3147~3154.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) Choi, B.C., Kim, K.N. and Chung, S.H., 2009, "Autoignited Laminar Lifted Flames of Propane in Coflow Jets with Tribrachial Edge and Mild Combustion," *Combust. Flame*, Vol. 156, pp. 396~404.
- (10) 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.

- (11) 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.
- (12) 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.
- (13) Choi, B.C., 2011, "Effect of ignition delay time on autoignited laminar lifted flames," *Trans. KSME (B)*, Vol. 35 No. 10, pp. 1025~1031.
- (14) Choi, B.C. and Chung, S.H., 2012, "Effect of Hydrogen Addition on Autoignited Methane Lifted Flames," *Trans. KSME (B)*, Vol. 32 No. 1, pp. 75~81.
- (15) Choi, B.C. and Chung, S.H., 2012, "Autoignited Laminar Lifted Flames of Methane/Hydrogen Mixtures in Heated Coflow Air," *Combust. Flame*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.combustflame.2011.11.016>.
- (16) Shaddix, C.R., 1999, "Correcting Thermocouple Measurements for Radiation Loss: A Critical Review," *Proceedings of the 33rd National Heat Transfer Conference*, Albuquerque, New Mexico.
- (17) 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.
- (18) Davis, S. G., Joshi, A. V., Wang, H. and Egolfopoulos, F., 2005, "An Optimized Kinetic Model of H₂/CO Combustion," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 30, pp.1283~1292.
- (19) Zeldovich, Ya.B., 1985, *The Mathematical Theory of Combustion and Explosions*, Consultants Bureau, pp. 1~185.