수소분류확산화염의 연소특성에 관한 실험적 연구

정병국†・조태영*・송규근*・정재연*・김형곤**・鳥居 修一***

An Experimental Study for Combustion Characteristics of Hydrogen Jet Diffusion Flames

Byong-koog Jung, Tae-young Cho, Kyu-keun Song, Jae-youn Jung, Hyung-gon Kim and Shuichi Torii

Key Words : hydrogen jet diffusion flame(수소분류확산화염), split flame(분단화염), flame reignition phenomenon(재착화현상), lift-off(부상), blowout(소염)

Abstract

The present study deals with the unique characteristics of hydrogen jet diffusion flames, such as split flames and reignition phenomenon. The split flames are composed of a small flamelet on the nozzle rim and a lifted main flame at downstream. When mass flow rates of fuel reach a critical point, a small-sized flamelet is found to remain in the vicinity of the nozzle exit and the flame reignition subsequent to blowout of main flame occurs repeatedly. In this study, the non-luminous hydrogen jet diffusion flames are visualized by using schlieren technique in order to analyze the combustion characteristics of hydrogen jet diffusion flames with focus on the flame reignition phenomenon.

기호설명

d : 노즐내경 (mm)
L : 노즐길이 (mm)
L_d : 국소소염거리 (mm)
m : 질량유량 (kg/s)
p_f : 정적용기압력 (MPa)
X_t : 천이거리 (mm)
δ : 노즐림 두께 (mm)
τ : 재착화주기 (ms)

1. 서 론

현재, 세계에서 소비되고 있는 전 에너지의 80% 이상은 화석연료가 대부분을 차지하는 탄화수소연료의 연소에 의해 얻어지고 있고, 에너지 소비량의 급상승에 따른 화석연료의 고갈이라는 심각한 위기에 처해있다. 한편, 화석연료의 사용에 따른 지구 규모의 환경문제가 사회적 관심으로 대두되고 있다. 본 연구에서 사용한 수소연료는 연소시켜도 이산화탄소를 배출하지 않는 청정대체연료로 주목 받고 있다. 또한, 매우 넓은 가연범위를 가지고, 연소속도가 빠르기 때문에 고부하에서 높은 안정성을 가지는 연소기 설계에 적용 가능하다.

통상의 연소장치에는 화염의 안정성이 양호하고, 연소제어가 용이한 분류확산화염이 가장 많이 사용되고 있다. 고부하연소를 실행하기 위해서는 연료분출속도를 크게 할 필요성이 있고, 이에 따른 화염의 부상(Lift-off)과 소염(Blowout)과 같은 화염의 불안정현상[(1)~(9)]은 연소장치에 있어 중요한 문제가 되고 있다. 본 연구에서는 연료분출속도가 1000 m/s 를 넘어도, 화염이 부상하나 안정하게 연소되는 수소고속분류확산화염의 연소특성을 파악하고, 특히 수소분류확산화염의 독특한 특징인 노즐림 위의 화염과 주화염의 분단화염(Split flames), 노즐림상에 작은 잔류화염만 남기고, 주화염이 일단 꺼진 후 간헐적으로 재착화하는 재착화현상(Reignition phenomenon) [(10)~(11)]의 메커니즘을 규명하는 것을 목표로 하였다.

† 전북대학교 자동차신기술연구센터
E-mail : jbkoog71@hanmail.com
TEL : (063)270-4267 FAX : (063)270-2388
* 전북대학교 자동차신기술연구센터
** 가고시마대학원
*** 구마모토대학 공학부

노즐림상의 잔류화염에 관한 연구를 보면, Mizutani[12] 등은 프로판의 동축류확산화염의 실험을 실시하여, 주위 공기류가 고속일 때 노즐림상의 환류영역 내부에 화염을 남기고, 주화염이 심하게 진동함을 보고하고 있다. Saima[13]도 프로판의 동축류확산화염의 실험을 통하여, 주위 공기류의 유속을 증가시키면 화염의 분단이 일어나기 시작하고, 더욱 증가시키면 노즐림상의 화염만을 남기고 상부의 화염이 소염된다고 보고하고 있다. Vranos[14] 등은 수소/공기의 동축류확산화염의 실험을 수행하여, 공기유량의 넓은 범위에서 노즐림상에 화염이 존재함을 보고하고 있다. 그러나, 이들 모두 노즐내경이 수 미리 오더의 동축류에서의 실험결과이고, 마이크로 오더(150 900 ㎛)의 자유분류확산화염인 본 실험과는 조건이 다르다. 따라서, 본연구에서는 슈리렌법을 사용하여 불휘염인 수소분류화산화염의 가시화를 수행하여, 특히 주화염의 소염 후의 재착화현상에 초점을 두고, 수소고속분류확산화염의 연소특성을 파악하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에 사용된 실험장치의 개략을 Fig. 1 에 나타낸다. 실험장치는 연소기, 연료공급장치, 정용용기의 압력측정장치, 화염촬영장치 및 화상처리 시스템으로 구성되어 있다. 연소기는 스텐레스제의 노즐과 정용용기(236 cm^3)로 구성되어 있고, 연료유량 계산에 사용된 정용용기의 압력은 반도체 트랜스듀서(TOYODA, PMS-500k)를 사용하여 측정하였다. 연료유량은 2 차압을 최대 3kgf/cm^2으로 세팅한 유량조절밸브와 노즐 부근의 니들밸브를 사용하여 조절하였다. 수소연료는 노즐로부터 정지공기중에 수직 상방향으로 분출되어 착화되고, 수소분류확산화염을 형성한다. 본 연구에 사용된

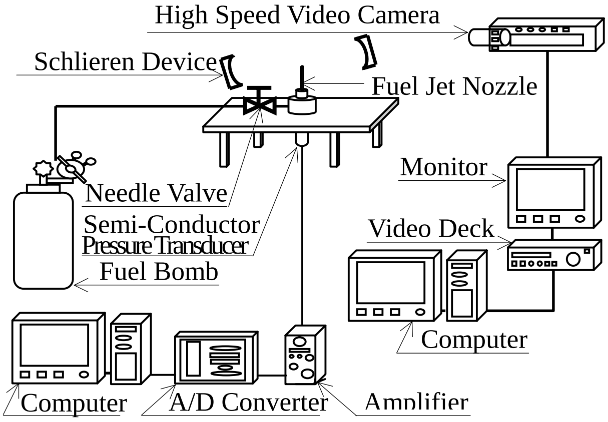


Fig. 1 A schematic diagram of the experimental apparatus

Table 1 Specification of nozzles

L (mm)	d(mm)	δ(mm)	Reignition
60	0.15	0.09	×
	0.30	0.125	○
	0.41	0.15, 0.45, 1.10, 2.30, ∞	○
	0.58	0.15	×
	0.90	0.18	×

노즐은 원관의 스트레이트 노즐로 단면에는 테이퍼 가공을 하지 않았다. Table 1 에 사용된 노즐의 내경 d, 길이 L, 림두께 δ를 나타낸다. 여기서, 노즐의 선단에 직경 100 ㎜ 의 원반을 장착한 경우를 림두께 ∞로 정의하였다.

분류확산화염의 가시화는 연료유량을 증가시켜 가며, 슈리렌법을 이용하여 고속비디오카메라(NAC, HSV-500k)로 실시하였다. 고속비디오카메라의 촬영조건은 조리개 2.8, 셔터스피드를 개방상태로 하여, 1 초간에 250 프레임의 화염화상을 촬영하였다. 촬영된 화상은 화상해석 소프트웨어 [WINROOF]에 의해 화상처리된다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 수소분류확산화염의 안정범위

분류확산화염에서는 연료유량의 증가에 따라 화염이 층류에서 난류로 천이하고, 더욱 연료를 증가시켜 가면 화염은 노즐로부터 부상하고 소염상태에 이른다. 그러나, 본 연구의 수소분류확산화염에서는 이 일련의 과정에 있어서, 노즐림상의 잔류화염 형성이나, 재착화와 같은 독특한 현상을 보인다.

Fig. 2 는 수소분류확산화염의 안정범위를 노즐내경(d=0.15, 0.30, 0.41, 0.58, 0.90 ㎜)에 대하여 나타낸 것이다. (A)의 영역에서는 연료유량의 증가에 따라 층류화염에서 난류화염으로 천이한다. (B)의 영역에서는 층류에서 난류로의 천이점이 노즐 선단 부근까지 이동하고, 노즐림상에 화염을 형성하고 주화염이 부상하고 있는 상태가 된다. (C)의 영역에서는 노즐림상에 화염은 형성되지 않고, 주화염만이 부상하고 있는 상태가 된다. 본 연구에서 특히 주목하고 있는 재착화현상은 (Ⅰ)의 영역에서 일어나고, 노즐경이 d=0.30 과 d=0.41 ㎜ 에서 일어남을 알 수 있다. (Ⅱ)의 영역에서는 노즐림상에 잔류화염만이 남아 있고, 주화염은 존재하지 않는 상태가 된다. d=0.15㎜ 에

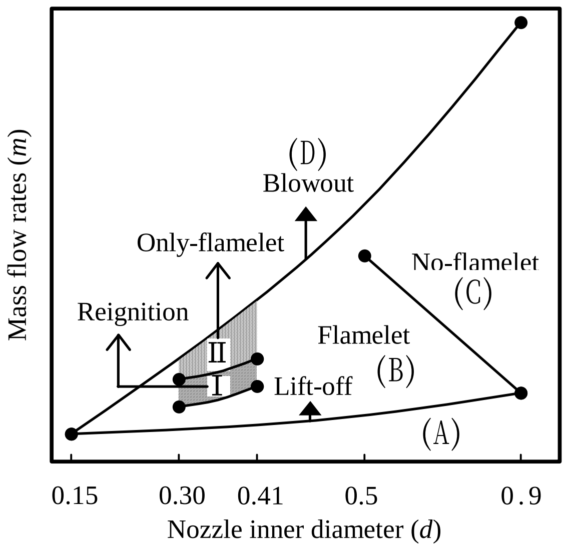


Fig. 2 The stability limits of hydrogen jet diffusion flames against various nozzle inner diameters *d*

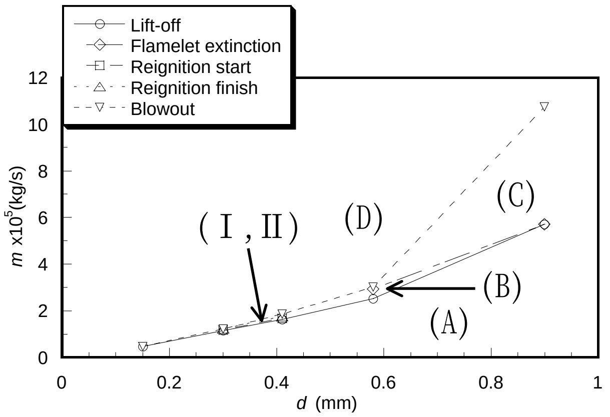


Fig. 3 The stability limits of hydrogen jet diffusion flames with value of mass flow rate *m* clearly depicted on the vertical axis

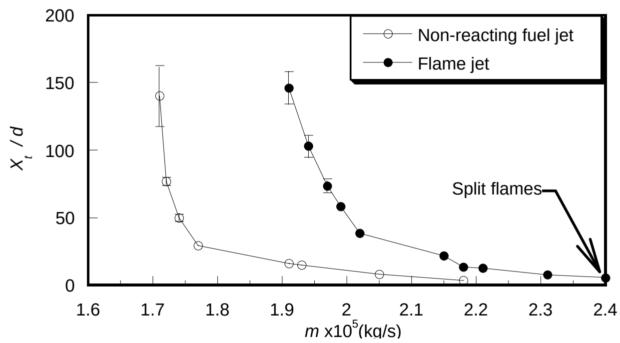
있어서는 화염의 부상 상태가 없고, 일정 유량이 되면 소염된다. (D)의 영역에서는 노즐림상의 잔류화염을 포함한 화염 전체가 완전히 소염되는 상태가 된다. Fig. 3 은 세로축에 연료유량을 표시한 수소분류확산화염의 안정범위를 나타낸 것이다.

3.2 재착화현상을 수반하지 않는 화염의 연소특성

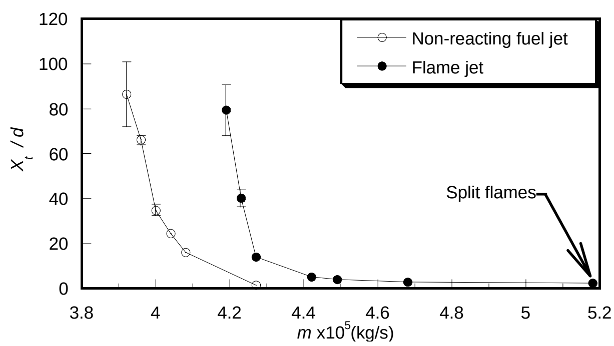
Fig. 4 는 d=0.58 mm, L=60 mm, δ=0.15 mm 의 경우, 각 연료유량에 대한 화염형태의 변화를 나타낸 것이다. 슈리렌화상은 연료분류와 주위의 고온가스(연소생성물) 간의 선명한 밀도변화를 나타낸다. 분류 중심축상의 밀도가 균일한 부분은 연료분류를 나타내고 있고, 화염의 천이점(B)는 연료분류가 분열하는 위치(A) 보다 약간 하류부에 있음을 알 수 있다. 연료분류와 고온가스의 난류구조의 혼합은 미연의 연료분류가 분열하는 위치부터 시작되어 하류부로 확대되고, 층류화염면에 이른다. 이 위치로부터 층류화염은 난류화염으로 천이된다. 이로부터 화염의 천이는 연료분류 중심부의 유동 불안정성에 기인되는 것으로 판단된다.

연료유량의 증가에 따라 화염의 천이는 상류로 이동하여 노즐 선단 부근까지 접근한다. m =2.57×10^{-5} (kg/s)가 되면 노즐림상에 작은 잔류화염을 남기고 주화염이 부상하기 시작하며, 연료유량의 증가에 따라 점점 부상된다. m = 2.92×10^{-5} (kg/s)가 되면 노즐림상의 잔류화염은 갑자기 소실되고, 주화염만이 부상하여 화염기부가 상하로 변동하는 상태가 된다. m = 3.01×10^{-5} (kg/s)가 되면 주화염도 소염되고, 이는 화염기부에서 미연혼합기로의 화염전파 밸런스가 깨지는 것에 기인하는 것으로 판단된다.

Fig. 5 는 수소분류화염 및 미연분류에 있어서 천이점의 위치와 연료유량과의 관계를 나타낸 것이다. 세로축은 노즐 출구에서 천이점까지의 거리 Xt를 노즐내경 d로 무차원화한 것이며, 가로축은 연료유량 m을 나타낸다. 그림중의 ○는 미연분류, ●는 분류화염의 무차원천이점거리 Xt/d를 나타낸



(a) *d* = 0.58m



(b) *d* = 0.90 mm

Fig. 5 Dimensionless transition point *Xt/d* against mass flow rate *m* for both the hydrogen jet flames and the non-reacting fuel jet

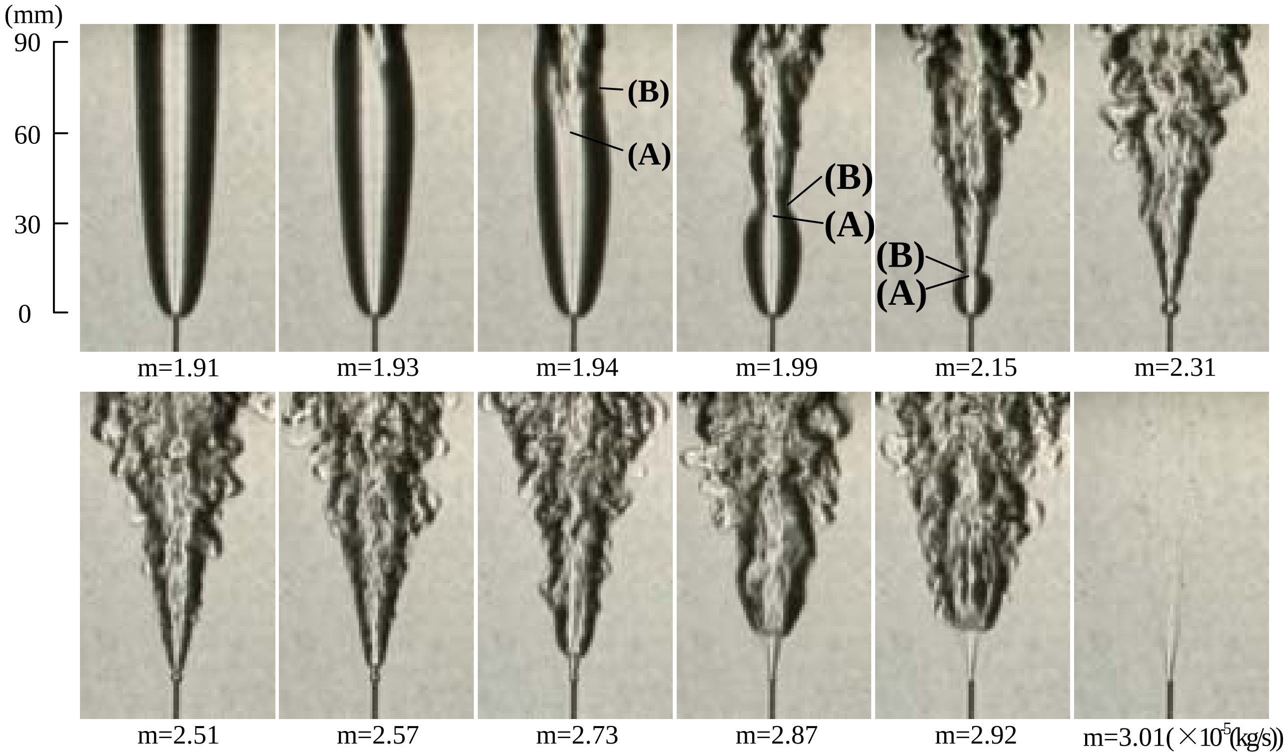


Fig. 4 A series of images subject to different mass flow rates *m* when *d*=0.58, *L*=60 and δ=0.15mm

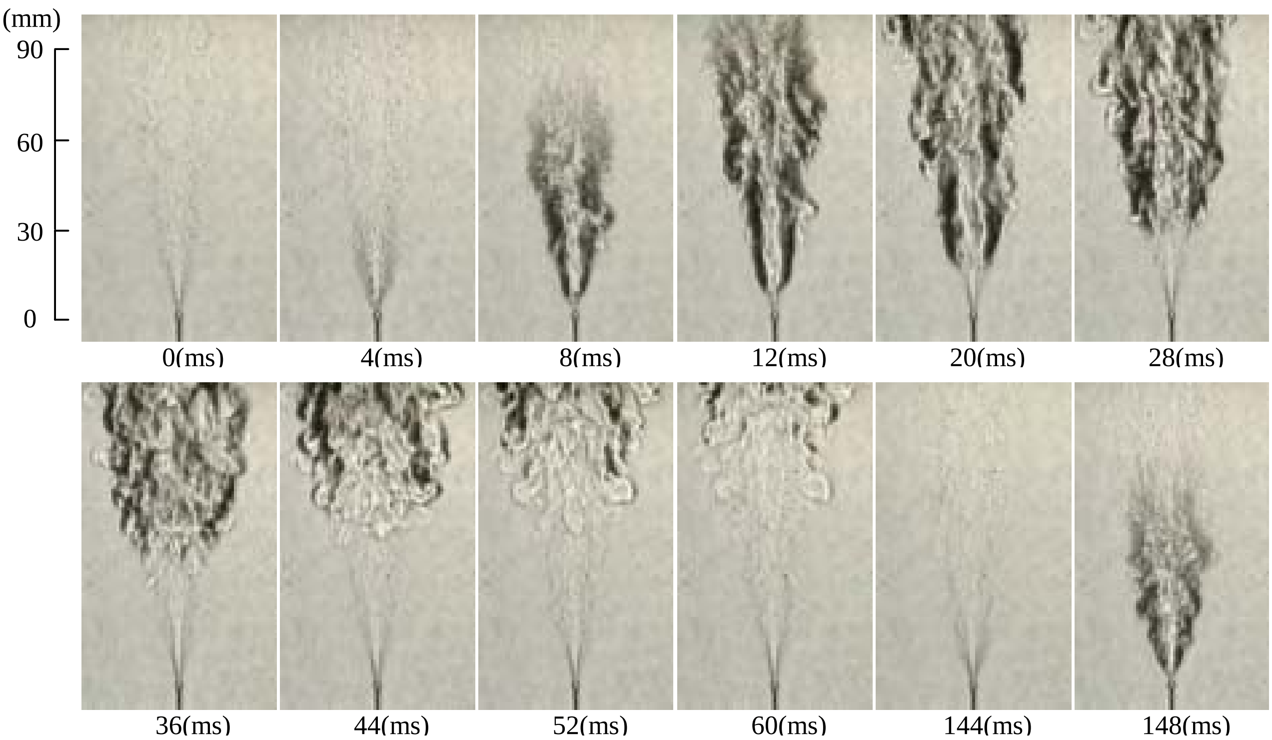


Fig. 6 A series of timewise flame reignition images at *d*=0.41, *L*=60, δ=0.15mm and *m*=1.68×10^{-5}(kg/s)

다. (a)는 노즐내경 *d*=0.58 ㎜, (b)는 *d*=0.90 ㎜인 경우의 결과를 나타내며, 두 경우 모두 분류화염 및 미연분류에 있어서 천이점거리는 연료유량의 증가에 따라 급격히 감소해 간다. 그 이후는 완만히 감소해 가는 경향을 보이고, 노즐선단의 약간 부분을 제외하고 완전히 발달한 난류상태가

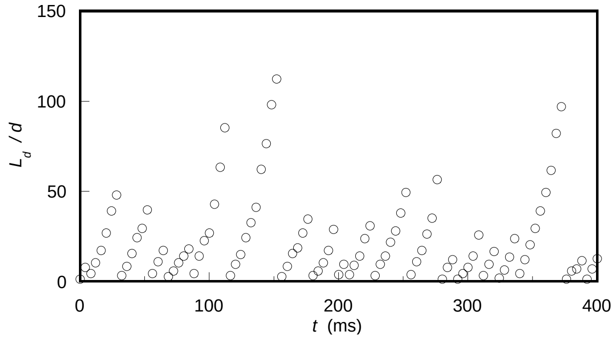
된다. 연료유량을 일정하게 유지하여도 천이점은 상하로 변동하나, 어느 유량을 넘으면 분류화염 및 미연분류의 천이점 변동은 거의 없게 된다. 한편, 같은 연료유량에 있어서 분류화염의 Xt 는 미연분류의 Xt 보다 매우 큼을 알 수 있다. d=0.58 mm, 0.90 mm 의 노즐에 있어 림상의 잔류화염과 주화염의 분단현상은 각각 m = 2.40×10^{-5} (kg/s), m = 5.18×10^{-5} (kg/s)에서 일어나고, 이 유량을 초과하면 노즐림상에 화염을 남기고, 주화염이 부상하기 시작한다.

3.3 재착화현상을 수반하는 화염의 연소특성

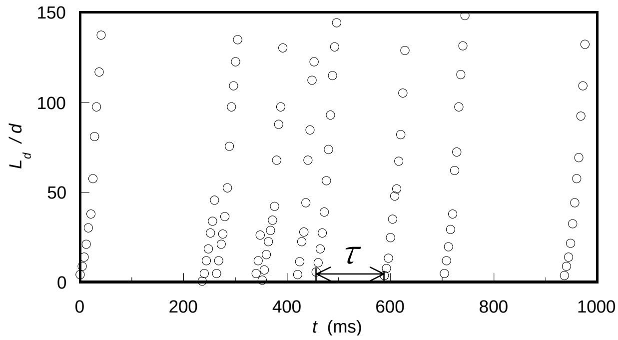
Fig. 6 는 d=0.41mm, L=60mm, δ=0.15mm, m = 1.68×10^{-5}(kg/s)의 경우, 재착화현상의 연속화염화상을 나타낸 것이다. 4(ms)는 재착화가 개시되는 순간의 영상이고, 수소분류확산화염의 주화염은 성장하며 서서히 부상하고(8ms¯60ms), 노즐림상의 잔류화염을 남기고 일단 소염된 주화염이 다시 착화되어 연소를 재개함을 알 수 있다(144ms). 그 후 다시 소염되고, 재착화하는 현상을 반복한다. 여기서 주목할 점은, 재착화가 일어나는 연료유량에서는 노즐림상에 길이 1 2 mm 정도의 잔류화염이 남아 있고, 유량이 증가하여 이 화염이 없어지면 재착화현상은 일어나지 않게 된다.

소선경 ϕ0.3 mm 의 CA Type 열전대를 사용하여 잔류화염의 온도를 측정한 결과 890¯920 ℃의 온도범위를 가지고, 주화염의 소염 후의 재착화현상은 이 잔류화염으로부터 수소분류 및 주위공기로의 열, 활성기 등의 이동에 의한 것으로 판단된다. 같은 연료유량에서 재착화가 간헐적으로 일어나는 현상에 관해서는, 고속분류에 따른 난류에 의해 수소와 공기의 혼합상태가 불안정하게 되고, 이 혼합기의 점화에 필요한 에너지가 림상의 잔류화염으로부터 공급되고 있는가의 여부로 설명 가능하다고 판단되어진다.

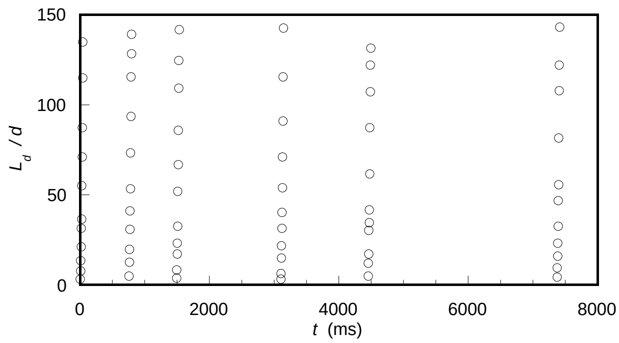
Fig. 7 은 d=0.41mm, L=60mm, δ=0.15mm 의 경우, 각각의 연료유량에 있어서 재착화현상시의 무차원 국소소염거리의 시간변동을 나타낸 것이다. 세로축은 잔류화염의 상부에서 주화염 기부까지의 거리, 즉 국소소염거리의 무차원수 L_d/d 를 4ms 의 간격으로 나타낸 것이다. 그림의 (a), (b), (C)에 있어서, 각 열의 가장 하부의 데이터는 재착화가 개시한 순간을 나타내고, 시간의 경과와 함께 주화염은 노즐림상에 잔류화염을 남기고 부상하기 시작한다. 재착화 개시 후 40 ms 정도까지는 부상한 주화염의 기부를 확인할 수 있으나, 그 이후는 화염기부 및 주화염이 불명확하게 된다. 일정 시간이 경과한 후 주화염이 재착화되고, 이러한 현상은 주기적으로 반복된다. (a)(m = 1.67×10^{-5} (kg/s))의 경우는 모든 재착화에 있어서 주화염이 부상하는 도중에 다음의 재착화가 일어남을 알 수 있다. 연료유량이 (a) 보다 큰 (b)(m = 1.68×10^{-5} (kg/s))의 경우는 주화염이 완전히 소염된 후 재착화하는 경우와 부상하는 도중에 재착화하는 경우가 혼재함을 볼 수 있다. (c)(m = 1.72×10^{-5} (kg/s))의 경우는 비교적 긴 시간 주화염이 꺼진 후 재착화하는 것을 볼 수 있다. 이로부터 화염이 착화되고 다시 재착화가 일어날 때까지의 시간으로 정의한 재착화주기(τ)는 연료유량의 증가에 따라 길어짐을 알 수 있다.



(a) m=1.67×10^{-5}(kg/s)



(b) m=1.68×10^{-5}(kg/s)



(c) m=1.72×10^{-5}(kg/s)

Fig. 7 A time series of dimensionless local extinction distance L_d/d for d=0.41, L=60 and δ=0.15mm

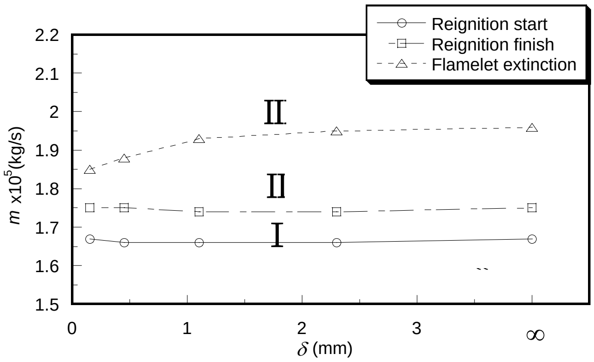


Fig. 8 Mass flow rates *m* at reignition start, reignition finish and flamelet extinction against rim thickness of nozzle (*d*=0.41, *L*=60 mm)

Fig. 8은 *d*=0.41 mm, *L*=60 mm의 노즐에 있어서 재착화개시유량(○), 재착화종료유량(□), 잔류화염소실유량을(△) 노즐림 두께에 대하여 나타낸 것이다. 이 그림에서 재착화현상은 Ⅰ의 영역에서 일어나고, Ⅱ는 노즐림상에 잔류화염만이 존재하는 영역이다. Ⅲ은 화염이 완전히 소염되는 영역이다. 각각의 림두께에 있어서 재착화의 개시/종료시의 연료유량은 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 그러나, 노즐림상에 잔류화염이 소실되는 유량은 δ가 커질수록 크게 됨을 알 수 있고, 이는 주위공기의 혼입구조의 차에 기인되는 것으로 판단된다.

4. 결 론

마이크로 오더(150 900 μm)의 노즐을 이용한 수소분류확산화염의 연소특성에 관한 실험적 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 본 연구의 수소분류확산화염에서는 노즐림상의 잔류화염과 주화염의 분단화염(Split flames), 노즐림상에 잔류화염만 남기고, 주화염이 일단 꺼진 후 간헐적으로 재착화하는 재착화현상(Reignition phenomenon) 등 다른 가스연료의 분류확산화염에는 없는 독특한 거동을 나타낸다.
2. 수소분류확산화염의 재착화현상은 한정된 노즐경(*d*=0.30, 0.41 mm)과 소염직전의 좁은 유량범위에서 일어난다.
3. 재착화가 일어나는 연료유량에서는 노즐림상에 길이 1 2 mm 정도의 잔류화염이 남아 있고, 유량이 증가하여 이 화염이 없어지면 재착화현상은 일어나지 않게 된다.
4. 재착화의 발생주기는 연료유량의 증가에 따라 길어진다. 한편, 노즐림상의 잔류화염이 소실되는 연료유량은 림두께의 영향을 받는다.

참고문헌

(1) Vanquickenborne, L. and van Tiggelen, A., 1966, “The stabilization mechanism of lifted diffusion flames”, Combustion and Flame, vol. 10, pp. 59-69.
(2) Eickhoff, H., Lenze, B. and Leuckel, W., 1984, “Experimental investigation on the stabilization mechanism of jet diffusion flames”, Twentieth Symposium (International) on Combustion, pp. 311-318.
(3) Birch, A. D. and Hargrave, G. K., 1988, “Lift-off heights in underexpanded natural gas jet flames”, Twenty-Second Symposium (International) on Combustion, pp. 825-831.
(4) Broadwell, J. E., Dahm, W. J. A. and Mungal, M. G., 1984, “Blowout of turbulent diffusion flames”, Twentieth Symposium (International) on Combustion, pp. 303-310.
(5) Pitts, W. M., 1988, “Assessment of theories for the behavior and blowout of lifted turbulent jet diffusion flames”, Twenty-Second Symposium (International) on Combustion, pp. 809-816.
(6) Peters, N. and Williams, F. A, 1983, “Liftoff characteristics of turbulent jet diffusion flames”, AIAA Journal, vol. 21, No. 3, pp. 423-429.
(7) Brockhinke, A., Haufe, S. and Kohse-Hoinghaus, K., 2000, “Structural properties of lifted hydrogen jet flames measured by laser spectroscopic techniques”, Combustion and Flame, Vol. 121, pp. 367-377.
(8) Takahashi, F., Mizomoto, M., Ikai, S. and Futaki, N., 1984, “Lifting mechanism of free jet diffusion flames”, Twentieth Symposium (International) on Combustion, pp. 295-302.
(9) Takahashi, F. and John Schmoll, W., 1990, “Lifting criteria of jet diffusion flames”, Twenty-Third Symposium (International) on Combustion, pp. 677-683.
(10) Byong-koog Jung, Toshiaki Yano, Shuichi Torii and Hiroaki Mochizuki, 2001, “Flame reignition phenomenon of hydrogen jet diffusion flames”, Trans. JSME, Vol. 67, No. 661, pp. 2347-2352.
(11) Shuichi Torii, Byong-koog Jung and Toshiaki Yano, 2002, “Reignition phenomenon of high-speed hydrogen jet diffusion flame”, International Journal of Energy Research, Vol. 26, pp. 1045-1053.
(12) Y. Mizutani and K. Yano, 1978, “Flame stability and attachment mechanism of diffusion flame in co-flowing air”, Trans. JSME, Vol. 44, No. 379, pp. 1036-1052.
(13) Atsushi Saima, 1960, “The Blow-off of Diffusion Burner Flames”, Trans. JSME, Vol. 26, No. 168, pp. 1144-1150.
(14) Vranos, A, Taback, E. D. and Shipman, C. W., “An experimental study of the stability of hydrogen-air diffusion flames”, Combustion and Flame, Vol. 12, pp. 253-260.