

제트화염 소화농도의 비정상 유동효과

지정훈 · 오창보 · 이의주[†]

부경대학교 안전공학부

(2009. 10. 12. 접수 / 2009. 12. 14. 채택)

Unsteady Flow Effects on Extinguishing Concentrations in Jet Diffusion Flames

Junghoon Ji · Changbo Oh · Euiju Lee[†]

Division of Safety Engineering, Pukyong National University

(Received October 12, 2009 / Accepted December 14, 2009)

Abstract : An experimental study on the unsteady effect of the extinction limit was performed in ethene jet diffusion flames. To impose the unsteadiness on jet flames, the amplitude and frequency of a co-flow velocity was varied, and the two inert gases, N₂ and CO₂, were used to dilute the oxidizer for extinguishing concentration. The experimental results shows that large amplitude of velocity induces a low extinguishing concentration, which implies that flow variation affects the blow out mechanism. Also, the flow oscillation effects under high frequency attenuates the flame extinction. These results means that flow unsteadiness extends the extinction limit and finally minimum extinction concentration by inert gases. When the Stoke's 2nd Problem is introduced to explain the flow unsteadiness on extinction concentration, the solution predicts the effect of amplitude and frequency of velocity well, and hence it is concluded the effect of low frequency velocity excitation was attributed only to flow effect.

Key Words : unsteady effect, extinguishing concentration, inert gas, Jet diffusion flames

1. 서론

제트화염은 일반적인 연소기 설계에 사용되는 중요성 때문에 안정화 기구에 관한 연구들이 활발히 수행되었다¹⁻⁵⁾. 또한 화재공학 측면에서는 가스계 소화약제의 성능을 평가하기 위한 시험방법으로서 기존의 컵버너(cup-burner)를 이용한 평가방법이 널리 알려져 있지만⁶⁾, 연료로 사용되는 물질이 수소와 같이 상온·상압에서 기체인 경우, 컵버너의 형상에 따른 유동과 재질의 영향 등으로 실험결과에 있어서 재현성이 크게 떨어졌다. 따라서 기체연료의 소화성능 평가를 위한 새로운 방법이 요구되었고, 동축류 버너를 사용한 제트화염을 통해서 적절한 유속조건을 고려했을 때 컵버너와 동일한 평가와 예측이 가능함을 확인하였다⁷⁾.

층류제트화염의 경우에는 화염안정화는 노즐 출구근처에서 삼지화염(triple flame)이 형성됨이 알려져 있고, 유속이나 농도 등의 변수들에 의한 영향

이 조사되었다. 반면, 난류화염에서 주된 소화 메커니즘으로서 화염밀면의 예혼합모델²⁾을 시작으로 층류화염면모델³⁾, 거대와 구조 혼합모델⁴⁾, 그리고 최근의 삼지화염⁵⁾ 등이 제시되었고 현재에도 난류화염의 화염날림과 더불어 부상(lift off) 특성을 이해하기 위한 연구가 수행되고 있다. 이러한 화염 소화기구는 소화약제에 의한 화재의 소화기구인 화염날림(blow-out)과 같은 현상으로서 화재안전 분야에서도 필수적으로 이해가 요구되고 있다.

그러나 이런 제트화염에서의 대부분의 연구는 정상상태(steady-state)에서 수행되었고, 유동의 변동이 있는 상황에서의 제트의 안전성에 대한 연구는 매우 제한적이다. 연료나 산화제가 비정상상태에 존재하고 있을 경우는 실제 다양한 화재환경을 모사할 수 있다. 왜냐하면 화재가 발생하는 장소는 외부공기의 유입 및 구획실 내의 공조시스템, 난류의 와동(vortex) 등으로 인해 유동의 변동이 있는 경우가 대부분이기 때문이다. 따라서 주위환경이 시간에 따라 다양하게 변할 수 있는 비정상상태에서 이러한 유동에 의한 효과를 적절히 이해할 필요

[†] To whom correspondence should be addressed.
ejlee@pknu.ac.kr

가 있다. 비정상효과(unsteady effect)에 의한 화염의 불안정성 및 소화농도에 대한 기존 연구를 살펴보면 실험적 방법으로 크게 음파가진을 통해 압력장을 변화시키는 것⁸⁻¹¹⁾과 수치해석 및 레이저 기법을 이용하여 와동에 의한 영향을 연구한 것¹²⁻¹⁴⁾, 대향류 버너에서 속도장의 영향을 연구한 것^{15,16)} 등이 있다.

본 연구에서는 동축류 제트화염에서 산화제에 불활성기체를 첨가하여 소화농도 측정하였으며, 산화제에 진폭과 주파수를 변화시킨 유동을 주었을 때 소화농도에 미치는 효과를 실험적으로 수행하였고, 결과를 해석하였다. 이때 속도변동의 주파수는 정상상태에서의 소화직전 자체 떨림 주파수(self-excitation frequency)와 유사한 크기에서 변화하여 화학반응시간(chemical time)은 변하지 않게 하고, 유동효과(flow effect)만을 살펴보았다.

2. 실험방법

실험에 사용된 버너는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 내경이 각각 7.5mm와 20mm인 이중관으로 제작하였고, 그 내부에 직경이 약 2mm인 비드(bead)를 채워 버너 팁(tip)에서의 초기유속이 버너 직경 구배에 걸쳐 균질하게 하였다. Bubble meter로 검증된 MFC(Mass Flow Controller)를 사용하여 유량을 오차범위 ±1% 미만으로 제어하였으며, 고속 카메라를 사용하여 200fps의 속도로 화염을 촬영하여 분석하였다. 연료로는 순도 99.9%인 에틸렌(C₂H₄)을 사용하였고 버너의 중앙관에서 분사되도록 하였다. 산화제로는 버너의 바깥쪽 실린더를 통해 분사하였고, 압축공기와 불활성기체인 N₂, CO₂를 각각 혼합하여 사용하였다.

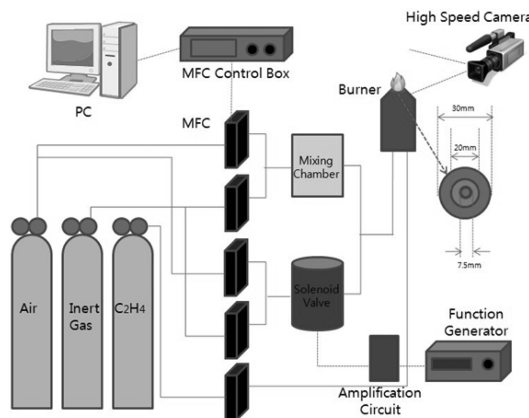


Fig. 1. Schematic of experimental setup.

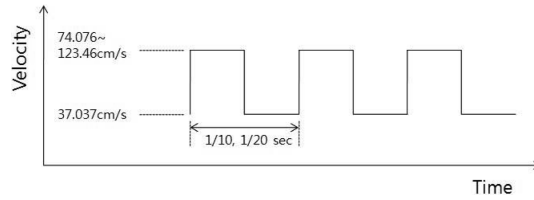


Fig. 2. The pattern of oxidizer velocity.

화산화염의 비정상 유동효과를 실험하기 위한 기초실험으로서 먼저 정상상태에서 산화제의 유속에 따른 최소소화농도의 변화를 알아보았다. 연료는 3.8cm/s로 일정하게 유지하였고, 산화제의 유속 조건은 Table 1에 도시하였다. 일반적인 속도변동 효과에 대한 실험에서는 산화제측 바깥에 원형실린더(chimney)를 위치시키는 것이 일반적이지만, 이러한 실드의 구성은 자체적으로 정현파를 생성하여 유동장에 영향을 주므로¹¹⁾ 부과적인 압력장의 해석이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 실드 없이 실험을 수행하여 실드에 의한 정압파(standing wave) 효과를 배제하였다.

한편 비정상 유동을 만들어내기 위한 장치로서 함수발생기(function generator)와 증폭회로(amplification circuit)를 사용하여 솔레노이드 밸브(solenoid valve)를 구동하였다. 산화제의 농도를 정상상태에서 확인된 소화농도 근처로 맞춘 다음, 산화제의 변동 주파수를 10, 20Hz로 각각 변화시킬 때 소화농도를 정상상태의 결과와 비교하였다.

산화제의 유로계는 Fig. 1과 같이 혼합챔버(Mixing chamber)를 통해서 지나가는 산화제의 유량을 6L/min(37cm/s)으로 고정시키고 Solenoid valve를 통과하는 산화제의 유량을 각각 6, 8, 10, 12, 14L/min로 변화시킨 후 이 두 가지 유량을 합하여 총 유속 구배를 결정하였다. 이때의 유속패턴을 Fig. 2에 나타내었다.

3. 실험결과 및 토의

N₂를 불활성기체로 사용했을 때 고속카메라를 사용하여 소화농도 부근에서의 화염형상 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3(a)은 속도변동을 부과하지 않은 화염의 현상으로서 자체 떨림 현상이 관찰되고, 떨림 주파수는 약 20Hz로 측정되었다. 또한 10Hz와 20Hz로 주위류를 가진하였을 때는 전체적인 주된 화염떨림 주파수는 Fig. 3(b)와 (c)에서와 같이 가진 주파수를 추종하고 있지만, 자체떨림 현상과 중첩되어 화염의 형상은 상대적으로 불규칙한 모습을

보이고 있다. 또한 화염길이를 화염이 항상 존재하는 길이(continuous length)로 정의할 때, 주파수가 증가할수록 화염길이가 짧아지는 것을 볼 수 있고 화염의 휘염도(emission)도 약해지는 것을 관찰할 수 있다. CO₂의 경우에는 자체 떨림 강도가 N₂에 비해 매우 미약하게 나타났지만 가진을 주었을 때 결과적으로는 유사한 패턴이 나타났다.

정상상태에서 유속에 따른 최소소화농도를 Table 1에 나타내었다. 유속이 증가함에 따라 소화농도가 비교적 일정하게 낮아지는 모습을 보였다. 다시 말해서, 비활성기체를 포함한 산화제의 유속이 증가할수록 화염이 소화되기 더 쉽다는 것을 나타내는 것으로, 이는 유속증가에 따라 반응에 참여하지

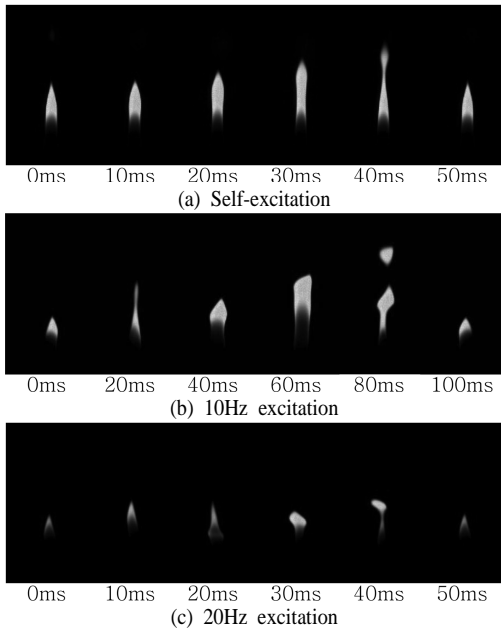


Fig. 3. Excitation frequency photograph using N₂ as a inert gas; V_{oxi}=37cm/s, X_{N2}=0.2.

Table 1. Extinguishing concentration by oxidizer velocity in steady-state

Cases	V _{oxi} (cm/s)	X _{N2,ext}	X _{CO2,ext}
1	37.04	0.33	0.23
2	49.38	0.32	0.22
3	61.73	0.31	0.21
4	74.08	0.30	0.20
5	86.44	0.29	0.19
6	98.77	0.26	0.18
7	111.11	0.25	0.17
8	123.46	0.24	0.16

Table 2. Extinguishing concentration by oxidizer velocity variation in unsteady-state

Maximum velocity (cm/s)	X _{N2,ext}		X _{CO2,ext}	
	10Hz	20Hz	10Hz	20Hz
74.08	0.31	0.32	0.22	0.23
86.44	0.29	0.30	0.20	0.22
98.77	0.27	0.28	0.19	0.21
111.11	0.26	0.27	0.19	0.20
123.46	0.25	0.26	0.18	0.19

않는 비활성기체의 열용량(heat capacity)만큼 화염면의 열손실이 커지기 때문이다⁷⁾.

한편 비정상상태에서의 결과는 Table 2에 나타내었다. 최대유속을 기준으로 Table 1의 정상상태 소화농도와 비교했을 때, N₂와 CO₂ 모두 비정상유동하에서의 소화농도가 증가하였다. 따라서 유속변동에 의한 비정상효과에 의해 소화한계가 확장되었다고 판단된다.

Fig. 4에는 Table 2의 결과를 무차원화된 속도변동 진폭(u' / U_{min})으로 소화농도를 도시하였다. 질소와 이산화탄소 모든 경우에 20Hz의 높은 주파수에의 소화농도가 10Hz보다 커짐을 알 수 있다. 또한 이산화탄소의 경우에는 속도변동의 진폭에 대한 소화농도에의 영향이 질소의 경우보다 변화의 폭이 작음을 볼 수 있다.

Fig. 5에서 정상상태와 비정상상태에서의 소화농도를 직접적으로 대조함으로써 비정상유동효과를 직접적으로 비교하였다. 기준선을 중심으로 하여 멀

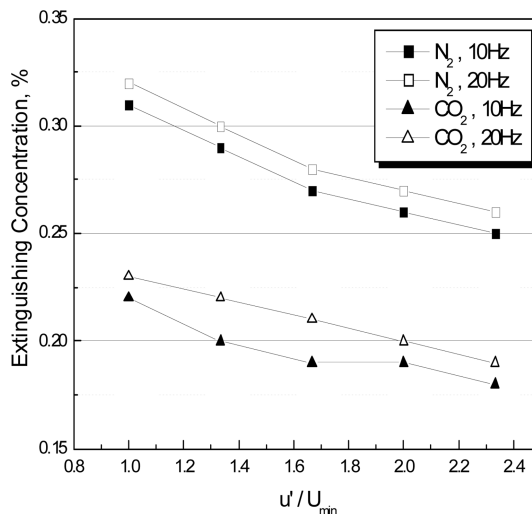


Fig. 4. The effect of a coflow velocity fluctuation on the minimum extinguishing concentration.

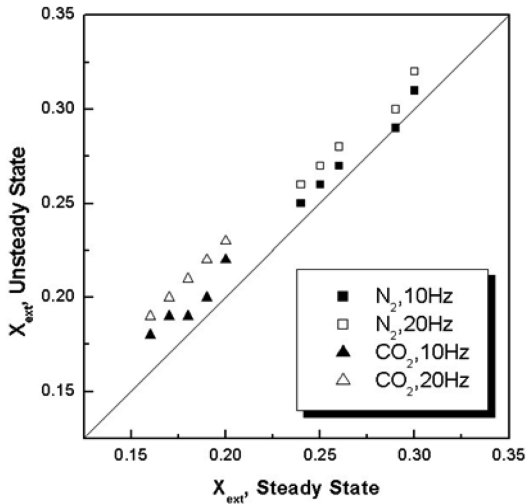


Fig. 5. Comparison of minimum extinguishing concentration between steady-state and unsteady-state.

어질수록 비정상효과가 큰 것을 나타내는데, 20Hz의 경우가 10Hz보다 비정상효과가 더 크게 나타났다. 따라서 유동의 비정상성(unsteadiness)이 소화농도를 높이므로 화염의 소화한계를 지연시킬 수 있다는 결과이다.

이러한 주위류 속도변동에 의한 소화농도의 확장은 순수하게 유동의 효과로서 설명할 수 있다. 화염소화에 관여하는 화학반응시간스케일(chemical reaction time scale)은 확산화염의 경우에 확산시간(diffusion time)과 유사한 오더라고 가정하면 최소 10ms 이상이다. 하지만, 본 연구에서 사용된 속도변동의 시간스케일은 100ms이므로, 이러한 속도변동 주파수는 화학반응에는 영향을 끼치지 못한다.

따라서 속도변동의 화염특성을 순수한 유동효과로 생각하면 이러한 유동변동의 효과는 잘 알려져 있는 Stoke's second problem¹⁷⁾으로 상사하여 이해될 수 있다. 제트확산화염은 연료와 산화제 제트의 전단층(shear layer) 안의 이론당량비 농도에 위치한다고 가정할 수 있다. 따라서 제트에서 산화제 측의 속도변동이 화염면에 미치는 실질적 속도변동을, 점성이 있는 유체에서 경계면에 유동의 변동을 주었을 때의 점성층 유체의 속도변동으로 모사할 수 있다. Stoke's second problem의 해에서 속도절대값은 다음의 식 (1)과 같다.

$$u = U_0 \exp(-\eta), \quad \eta = \delta \sqrt{\frac{\omega}{2\nu}} \quad (1)$$

여기서 u 와 U_0 는 실제속도변동과 가진 속도가

고, 상사변수(similarity variable) η 에서 δ 는 유체층 높이, ω 는 가진주파수, ν 는 점성계수를 의미한다.

본 연구의 결과에서 속도변동(U_0)이 크면 실제 속도변동을 더 크게 느끼므로 소화농도가 작아지고, 높은 주파수에서는 상사변수가 커지므로 식 (1)에 의해 실제 반응대에서는 작은 속도변동을 보이므로 소화농도가 커짐을 알 수 있다. 이와 같이 Stoke's problem을 이용하면 본 연구결과를 유동효과를 이용한 물리적 설명이 가능하다.

4. 결론

본 논문은 동축류 제트화염에서 산화제의 유동에 변동성분을 주었을 때 그 진폭과 주파수에 따른 불활성기체의 소화농도에 영향을 연구하였다. 실험결과와 해석으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 정상상태 제트화염에서 산화제의 유속이 증가함에 따라 최소소화농도가 낮아지는데 이는 유동시간(flow time)을 변화시키기 때문으로 판단된다.
- 2) 산화제에 유동변동을 주었을 경우에 변동폭에 따라 정상상태의 소화농도보다 높은 값에서 소화된다. 따라서 유동변동에 따른 비정상 유동효과가 존재하고 이로 인해 소화한계가 확장되는 결과를 보인다.
- 3) 비정상 유동에 의한 주파수 영향은 비교적 낮은 주파수 영역에서는 10Hz 보다 20Hz에서 더 정상상태에 가까운 소화농도가 관측된다. 따라서 큰 주파수에서는 유동의 비정상성이 커진다.
- 4) 사용된 불활성기체 종류별로 소화농도에 국한시키면 CO₂의 경우 비정상 유동효과가 N₂보다 조금 더 크게 나타난다.
- 5) 실험적 결과를 이론해가 잘 알려져 있는 점성 유체의 무한평판 진동(oscillation)문제로 상사할 경우, 정성적인 소화한계의 확장을 물리적 설명이 가능하다.

참고문헌

- 1) J. Lee, S.H. Won, S.H. Jin, S.H. Chung, "Lifted flames in laminar jets of propane in coflow air", *Combust. Flame*, Vol. 135, pp. 449~462, 2003
- 2) L. Vanquickenborne and A. Tigglen, "The stabilization mechanism of lifted diffusion flame", *Combustion and Flame*, Vol. 10, pp. 59~69, 1966.

- 3) Peters, N. and Williams, F. A. "Liftoff Characteristics of Turbulent Jet Diffusion Flames", AIAA J, Vol. 21, pp. 423 ~429, 1983.
- 4) Broadwell, J. E., Dahm, W. J. A. and Mungal, M. G. "Blowout of Turbulent Diffusion flame", Proceedings of Combustion Institute. Vol. 20, pp. 303 ~310, 1984.
- 5) Miller, C. M., Breitbach, H. and Peters, N. "Partially Premixed Turbulent Flame Propagation in Jet Flames", Proceeding of Combustion Institute, Vol. 25, pp. 1099 ~ 1016, 1994.
- 6) NFPA 2001, "Standard on Clean Agent Fire Extinguishing System", 1996.
- 7) 지정훈, 이의주, "제트확산화염에서의 불활성기체 소화농도", 한국안전학회지 Vol.24, No.1, pp. 21 ~ 25, 2009.
- 8) S.G. Kim, K.T. Kim, J. Park, C.B. Oh, "Behavior of Partially Premixed Flame Fronts Excited with a Fuel Tube Resonance Frequency", Combustion and Flame, Vol. 139, pp. 351 ~357, 2004.
- 9) Athena Wangher, Geoff Searby, Joel Quinard, "Experimental Investigation of the Unsteady Response of Premixed Flame Fronts to Acoustic Pressure Waves", Combustion and Flame, Vol. 154, pp. 310 ~318, 2008.
- 10) Marc Furi, Paul Papas, Peter A. Monkewitz, "Non-Premixed Jet Flame Pulsations Near Extinction", Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 28, pp. 831 ~838, 2000.
- 11) S. Farhat, D. Kleiner, Y. Zhang, "Jet diffusion flame characteristics in a loudspeaker-induced standing wave", Combustion and Flame, vol. 142, pp. 317 ~ 323, 2005.
- 12) A. Lemaire, K. Zahringer, T.R. Meyer, J.C. Rolon, "Unsteady Effects on Flame Extinction Limits during Gaseous and Two-Phase Flame/Vortex interactions", Proceedings of the Combustion Institute, vol. 30, pp. 475 ~483, 2005.
- 13) D.C. Kyritsis, V.S. Santoro, A. Gomez, "Quantitative Scalar Dissipation Rate Measurements in Vortex-Perturbed Counterflow Diffusion Flames", Proceedings of the Combustion Institute, vol. 29, pp. 1679 ~ 1685, 2002.
- 14) P.H. Renard, D. Thevenin, J.C. Rolon, S. Candel, "Dynamics of Flame/Vortex Interactions", Progress in Energy and Combustion Science, vol. 26, pp. 225 ~ 282, 2000.
- 15) H.G. Im, J.K. Bechtold, C.K. Law, "Counterflow Diffusion Flames with Unsteady Strain Rates", Combustion Science and Technology, Vol. 106, pp. 345 ~361, 1995.
- 16) U.D. Lee, H.D. Shin, K.C. Oh, K.H. Lee, E.J. Lee, "Extinction Limit Extension of Unsteady Counterflow Diffusion Flames Affected by Velocity Change", Combustion and Flame, Vol. 144, pp. 792 ~808, 2006.
- 17) F.M. White, "Viscous fluid flow", 2nd ed. McGraw-Hill, 1991.