

헵탄 풀화재 화염안정성에 관한 산화제 유속 및 농도 효과

정 태 희* · 이 의 주**

* 부경대학교 안전공학과

The Effects of Velocity and Concentration in the Oxidizer of Heptane Pool Fires on the Flame Stability

Tae Hee Jeong* and Eui Ju Lee**

* Dept. of Safety Engineering, Pukyong Nat'l Univ.

(Received October 11, 2011 ; Revised November 22, 2011 ; Accepted December 2, 2011)

Key Words: Pool Fire(풀화재), Cup Burner(컵버너), Burning Rate(연소율), Flame Stability(화염안정성)

초록: 풀화재에서 화염진동은 주위공기와 밀도차에 의한 부력효과에 기인하여 주로 발생한다. 본 연구에서는 부력이 지배적인 풀화재의 불안정성에 대하여 산화제유속의 효과를 검토하기 위해 컵버너 실험을 수행하였다. 실험결과는 진동주파수가 산화제의 유속이 증가함에 따라 감소함을 보인다. 무차원 변수로 표현되는 주파수와 부력의 관계로 도시하였을 때 다양한 속도스케일을 사용할 수 있었지만, 연료와 산화제의 유속차로 정의되는 특성속도인 경우에 정지되어 있는 공기중에서의 풀화재 진동과 일치하는 관계식을 얻을 수 있었다. 이러한 사실은 부력이 지배적인 화염에서 불안정성의 원인은 전단면에서의 Kelvin-Helmholtz 불안정성이 주된 기구라는 것을 증명해준다. 산화제의 농도를 변화시켰을 경우에는 산화제의 불활성기체의 농도가 증가할수록 청염의 길이가 길어지고 컵버너 끝단으로부터 부상되는 것이 관찰된다. 또한 진동주파수는 희석율과는 특정한 관계를 보이지 않는데 이는 국부적 화염구조와 연관성을 가지기 때문으로 판단된다.

Abstract: Flame flickering occurs mainly because of the buoyancy force for pool fires under ambient air. The cup-burner flame was used for experimental investigation of the effect of the oxidizer velocity on the gravitational instability. The results showed that the flickering frequency decreased with increasing oxidizer velocity. The frequency-buoyancy relation with nondimensional variables coincided with that of the buoyant flume and pool fires when the characteristic velocity was defined as the difference between the fuel and oxidizer velocities, which implies that the origin of the gravitational instability is the Kelvin-Helmholtz instability in the shear layer. The effect of the oxidizer composition on the instability was also examined through nitrogen dilution in the oxidizer stream. As the concentration of inert gas increased, the length of the blue flame increased and lift-off behavior was observed. The oscillation frequency was independent of the dilution ratio, but was related to the local flame structure.

1. 서 론

화재현상의 재료적 복잡성과 기하학적 의존성을 고려하면 기존의 화재의 특성과 가장 유사하면서 간단한 구조인 풀화재는 많은 화재연구에서 가장 기본적으로 다루고 있는 방법론이다. 특히 컵버너(cup burner)를 이용하여 여러 소화약제의 소화성능을 평가하는 방법으로도 사용되고 있다. 이 풀화재는 주변 여건에 따라 다양한 진동현상이 있음이 오래전부

터 발견되었는데 이를 주기적 진동(puffing, flickering, pulsation)으로 일반적으로 부르고 있고, 큰 와(vortex)의 형성에 기인하는 것으로 알려져 있다.⁽¹⁻⁴⁾ 풀화재의 진동은 주위공기의 화염으로 유입(entrainment), 화염 높이, 연소효율, 화염으로부터의 복사열전달, 그리고 일산화탄소나 연기(soot)를 포함한 연소생성물에 큰 영향을 주기 때문에 자발적 화염진동의 이해는 화재나 기타 에너지 안전 설계에 있어 매우 중요하다. 따라서 풀화재의 주기적인 진동에 대해 많은 연구들이 수행되었다.⁽⁵⁻¹³⁾ 특히 가장 두드러진 진동현상으로서 축방향 떨림 주파수에 많은 연구가 집중되었고, 진동 주파수는 중력가속도의

† Corresponding Author, ejlee@pknu.ac.kr

제곱근에 비례하고 ($f \propto g^{1/2}$) 버너 직경의 제곱근에 반비례한다고 ($f \propto D^{-1/2}$) 알려져 있다. 따라서 풀화재의 진동모드는 Strouhal-Froude 수 관계식으로 일반화 할 수 있었다.⁽⁵⁻⁸⁾ 또한 이 진동은 임계(critical) 연료속도가 존재하여 그 속도 이하에서는 발생하지 않으며, 그 이상의 속도에서는 연료속도에 무관하였다. 다양한 연료 및 희석 실험을 통해 열방출율과 진동 주파수와는 상관관계가 없으며, 유입모드가 복사 피드백보다 더 크게 주파수에 영향을 주었다.⁽⁷⁾ 최근에는 Cetegen과 그 공동연구자들이 헬륨 등을 사용한 비반응 부력제를 사용하여 풀화재에서 화염상류의 유체역학적 거동을 연구하였다.⁽⁸⁻¹⁰⁾ 그들의 결과에 의하면 Strouhal 수와 Richardson 수의 상관관계로 진동주파수를 보다 적절히 표현할 수 있었으며, 이는 플룸과 주위 기체간의 밀도차를 고려한 것이다. 이러한 주기적 화염 불안정성을 밀도층축화에 기인한 Rayleigh-Taylor 불안정성과 연관되어 있다고 밝혔다. 축방향의 주기적인 진동 외에도 풀화재를 모사한 컵버너에서의 메탄화염은 밀면에서의 반경방향 진동도 관찰되었고, 이 진동수는 축방향 진동수의 절반으로 알려져 있다.⁽¹³⁾

위와 같이 풀화재의 진동에 대해서는 일반적으로 정지되어있는 대기에서 연구가 주로 이루어졌다. 하지만 반밀폐공간이나 주위 유동이 있는 상황에서는 자유연소상태에서의 화염 불안정성과 동일할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 실험적으로 주위 산화제 유동이 있는 경우에 속도효과와 불활성기체 첨가에 의한 농도변화에 대한 불안정성을 컵버너 헵탄 풀화재를 통해 고찰하였다.

2. 실험방법

본 연구에서는 풀화재에서 산화제 유속과 농도 변화에 따른 화염 떨림 주파수를 측정하였다. 컵버너 실험 장치는 NFPA 2001 Standard⁽¹⁴⁾를 참고하여 제작하였으며, 자세한 구성은 Fig. 1과 같다. 연료로는 헵탄(heptane)을 사용하였으며, Leveling Jack으로 연료의 높이를 조절하여 연료의 액위를 원하는 높이에 고정시켰다. 컵버너는 스테인레스 스틸로 제작되었으며, 내경은 30mm 이며, 컵버너 가장자리로 내부에는 45도로 경사가 있다. 유리관 하부에는 산화제의 유속을 유리관 내부 전 구배에 걸쳐 균일하게 하기 위하여 직경 3 mm의 유리구슬(glass bead)로 Cup-burner 높이의 약 1/3정도 채웠다. 유리관의

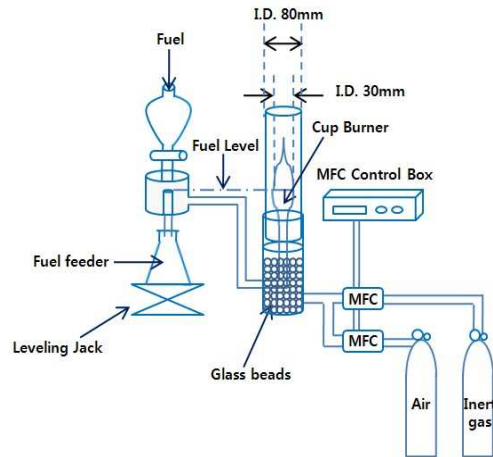


Fig. 1 Schematic of cup-burner and flow system

내경은 80 mm 이다. 산화제 측은 순수 공기와 희석을 위한 소화약제로서 질소를 혼합하여 사용하였다. 산화제 유속은 2 cm/s (2 cm/s ~ 16 cm/s)씩 증가시키면서 실험을 하였고, 버블미터(Bubble meter)로 검증된 MFC(mass flow controller)를 사용하여 유량을 오차범위 $\pm 1\%$ 미만으로 제어하였으며 측정 장치의 하부로 공급된다.

실험은 먼저 연료를 점화시킨 후에 2분 동안 충분히 가열한 다음 화염의 안정성을 확인 하였다. 이후, 전체 유속을 고정시키고 공기와 소화약제의 조성 비율을 조절하면서 공급하였다. 이 때, 각 유속에서 10초 동안 적당한 시간을 배분하여 해당 공기와 소화약제(N₂)의 충분한 조성이 이루어 질수 있도록 하였다. 화염의 소화여부 기준은 눈으로 관찰하여 3분 이내에 불이 꺼지면 소화농도로 간주하였다. 또한 유속에 따른 소화기구를 설명하기 위해 단위면적당 연료소모율을 측정하였다. 연료소모율은 경계조건을 일정하게 만들고 일정한 수위를 고정하기 위해 만든 Fig. 1의 장치에서 일정시간동안 공급되는 전체연료량에서 컵버너로 이동하지 못하고 밀로 남은 연료량의 차이로부터 연소로 소모된 유량을 측정하였다. 화염 사진 및 주파수는 초당 30 frames의 촬영이 가능한 디지털 카메라(Nikon)모델을 이용하여 촬영하여 분석하였다.

3. 실험결과 및 토의

3.1 산화제 유속에 대한 화염불안정성

산화제로서 순수 공기만을 사용하였을 경우에 주위류의 산화제 유속을 증가시켜가며 컵버너에

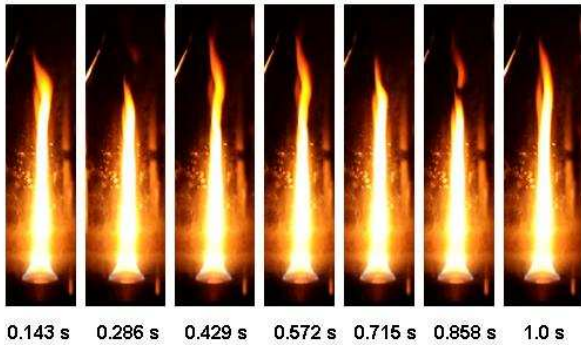


Fig. 2 Flickering motion on the cup burner flame

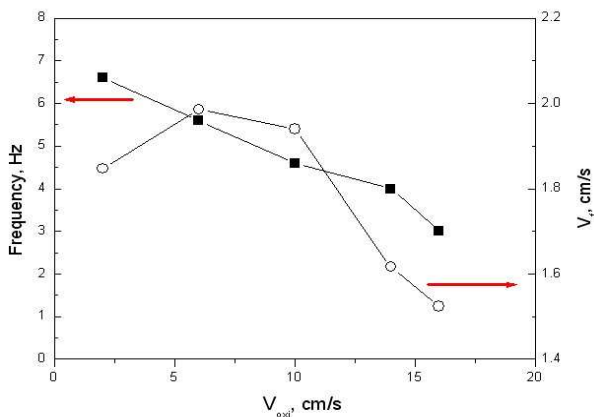


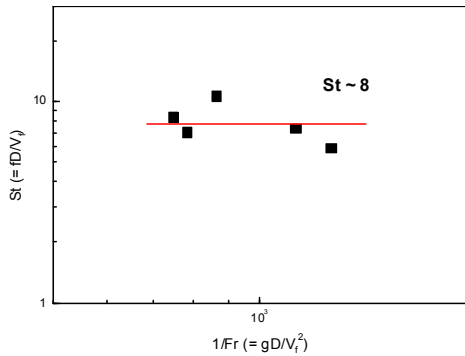
Fig. 3 Measured flame-flickering frequency and fuel velocity evaporated from heptane surface as a function of the oxidizer (pure air) velocity

서 생성되는 화염은 화염 하류에서 주기적인 떨림(flickering) 현상이 발견된다. Fig. 2에는 시간에 따른 화염의 변화를 사진으로 나타내었다. 초기에 화염에서 길이가 증가하여 하류부근에서 화염 중심축으로 화염이 수렴하는 현상(necking)이 발생한다. 일정시간 후에는 이 부근에서 화염이 떨어져 나가고 다시 길이가 작은 화염이 생성된다. 이러한 반복적인 떨림 현상은 일반적으로 풀화재 버너 직경에 의존한다고 알려져 있지만, 본 연구에서는 주위류의 유속을 변화하였을 때 떨림 주파수가 변화함을 확인할 수 있었다.

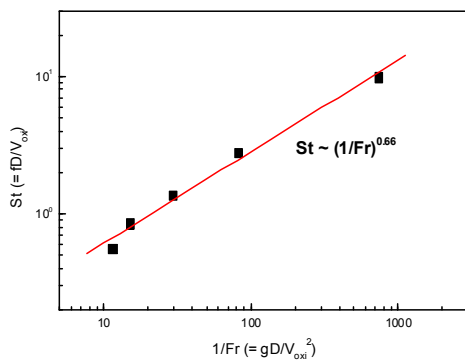
주위류의 산화제 속도(V_{ox})의 변화에 따른 주파수의 변화와 기화된 헵탄의 속도(V_f)를 Fig. 3에 나타내었다. 연료표면에서 기화된 속도를 결정하기 위해서 본 연구에서는 연료 부피 소모율을 측정하였다. 이 정보로부터 헵탄의 밀도, 675 kg/m^3 을 고려하여 단위면적당 연료질량 소모율인 연소율(burning rate)을 계산할 수 있고, 액체 헵탄

이 표면에서 균일하게 증발한다고 가정하면, 비체적(specific volume)을 이용하여 속도를 최종 결정할 수 있다. 사용된 헵탄 비체적 값은 1 atm 포화증기의 값인 $0.29 \text{ m}^3/\text{kg}$ 을 이용하였다.⁽¹⁵⁾ Fig. 3에서 보듯이 주위류 공기의 속도가 증가함에 따라 주파수는 감소하였고, 증발된 연료속도는 초기에 증가하다가 이후에는 크게 감소함을 볼 수 있다. 연료의 증발속도는 독립적인 일반 기체연료 제트와는 달리 화염에서의 열전달에 기인한다. 직경이 10cm 이하인 풀화재 버너에서는 전도에 크게 의존하며, 다음으로 화염으로부터의 복사열전달이 중요하다고 알려져 있다. 주위류 유속증가는 헵탄 화염면의 스트레인을 증가시켜 버너 가장자리(rim) 근처의 화염온도가 낮아지고, 결과적으로 전도 열전달량을 감소시키는 효과를 얻을 수 있다. 또한 공기유속 증가는 화염높이를 증가시키거나, 복사열전달량이 거리의 제곱에 반비례함을 상기하면 후류의 화염은 액면에서의 증발에 상대적으로 큰 영향을 미치지 못한다고 할 수 있다. 따라서 연료속도는 대략적으로 유속에 반비례한다고 할 수 있다.

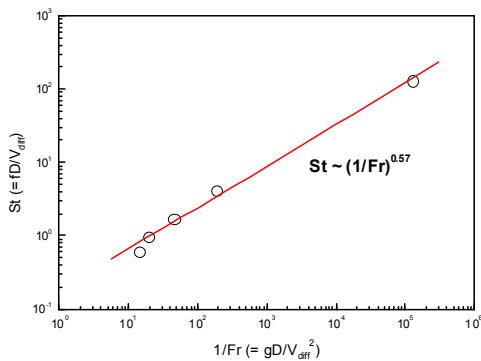
풀화재는 모멘텀보다 부력이 지배적인 화염이고, 이 때 발생하는 진동은 화염의 부력 효과로 인하여 버너 가장자리 근처에서 화염과 주위류와의 밀도차에 의한 거대 와동(vortex)이 발생하여 후류에서 불안정성이 나타난다고 보고되어왔다.⁽¹³⁾ 이러한 불안정성에 관한 주파수는 일반적으로 무차원 변수인 Strouhal 수($St=fD/V$)로 나타내고 부력은 Froude 수($Fr=gD/V^2$)로 스케일링하여 상사관계를 얻고 있다. 여기서, f 는 화염 진동 주파수, D 는 버너 직경, V 는 특성속도, g 는 중력 가속도이다. 일반적인 풀화재나 자유제트에서는 주위 산화제가 정지해 있으므로 주위류 속도는 무시할 수 있다. 하지만 본 연구에서는 주위류의 유속을 변화시켰고, 연료의 유속 또한 주위류의 유속에 따라 변하기 때문에 두 무차원 변수에서 특성속도를 연료 속도, 산화제 속도, 연료와 산화제 속도차 등 3가지의 속도로 표현하여 보았다. Fig. 4(a)의 연료속도로 특성화를 한 결과 Fr 수로 표현한 부력이 화염의 진동불안정성에 아무런 영향을 끼치지 않는 것을 알 수 있다. 이는 부력의 영향을 받지 않는다는 결과이므로 대표 속도로서는 부적합하다. 반면에 Fig. 4(b)와 (c)를 보면 산화제측의 유속이 감소할수록 부력의 영향은 커지



(a) Based on the fuel velocity



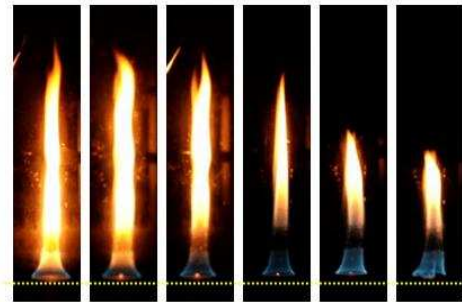
(b) Based on the oxidizer velocity



(c) Based on velocity difference between fuel and oxidizer stream

Fig. 4 The Strouhal number as a function of the inverse Froude number for heptane pool fires. Three different characteristic velocities were used for the non-dimensional groups

고, 진동불안정성이 증가하는 것을 알 수 있다. 두 그래프 모두 log 스케일에 대해서 선형적인 결과를 얻을 수 있었지만, 그 변화율에는 산화제의 유속을 고려한 경우에 보다 큰 지수를 보이고 있다. 기존의 주위류 속도가 없는 경우 부력 지배 화염의 많은 실험데이터를 가지고 해석한 결과를 보면 St 수와 1/Fr 수의 log 스케일 관계식에서



$X_{N_2} = 0.10 \quad 0.15 \quad 0.20 \quad 0.25 \quad 0.26 \quad 0.27$

Fig. 5 The photos of Cup burner flame according to nitrogen mole fraction in the oxidizer. The oxidizer velocity was fixed at 10 cm/s

0.57의 지수를 나타낸다.⁽⁷⁾ 본 연구에서도 Fig. 4(c)에서 같은 관계식을 얻을 수 있었고, 이는 초기에 상류에서 생성되는 와는 연료와 산화제 전단면(shear layer)에서의 속도차에 의해서 생성됨을 입증하고 있다.

3.2 산화제 희석에 의한 화염 불안정성

주위류의 산화제 유속을 고정시키고 공기에 대한 질소의 몰분율(X_{N_2})을 변화시켜 가며 컵버너에서 생성되는 화염의 모양을 Fig. 5에 가시화하였다. 실험에서 산화제의 유속은 10 cm/s로 고정하였고, 질소몰분율은 순수공기에 추가로 혼합된 질소의 비율을 의미하는데 이는 일반적인 화재연구에서 소화약제의 소화농도 정의와 같다. Fig. 6과 같이 질소의 몰분율이 증가함에 따라 초기에는 화염의 길이가 성장함을 알 수 있다. 이는 불활성 기체의 몰분율이 증가하면서 연소에 필요한 산소 농도 감소에 따른 현상이다. 질소의 몰분율을 더욱 증가시키면 컵버너의 끝단으로부터 화염이 부상되며, 청염의 길이가 증가되고 휘염은 짧아지며 결국 소화된다. 풀화재는 초기에는 컵버너 팁에 화염이 부착되어 있지만 소화농도에 가까워지면 컵버너 팁에서 2mm 부상됨을 볼 수 있다. 또한 주위류의 속도가 매우 큰 경우에는 부상 높이는 매우 증가한다.

Fig. 7에는 질소 몰분율에 따른 헵탄의 연소율을 도시하였다. 같은 속도에서 순수 공기를 주위류로 사용하였을 경우인 $0.067 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 의 연소율과 비교하면 질소희석이 헵탄의 연소율을 감소시킨다. 이는 화염길이 및 화염온도의 감소에 따른 화염으로부터 연료표면으로의 열피드백 감소에 기인하

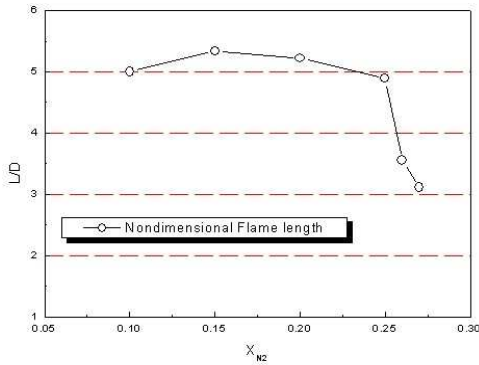


Fig. 6 Flame length non-dimensional to burner diameter according to the nitrogen mole fraction in the oxidizer

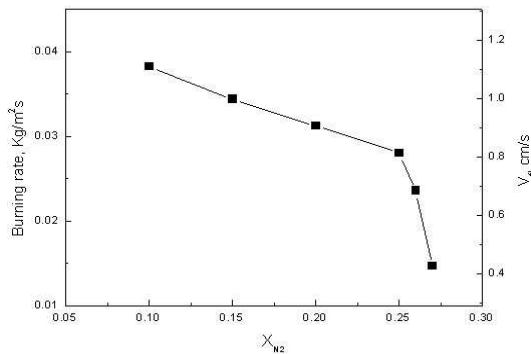


Fig. 7 Measured burning rate and fuel velocity evaporated from heptane surface as a function of nitrogen mole fraction in the oxidizer. The oxidizer velocity was fixed at 10 cm/s

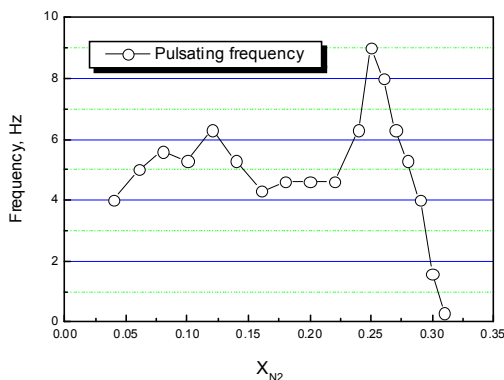


Fig. 8 Flickering frequency as a function of nitrogen concentration in oxidizer stream. The oxidizer velocity was fixed at 10 cm/s

고,⁽¹⁶⁾ 매연의 급격한 감소가 복사열전달을 매우 감소시킨 결과라 판단된다.

Fig. 8에는 질소 몰분율의 증가에 따른 진동 주

파수를 나타내었다. 순수 공기를 산화제로 사용하여 속도 효과를 본 Fig. 3과는 달리 매우 불규칙한 진동수를 나타내고 있다. 이러한 불규칙성은 질소의 농도에 따라 화염의 특성이 크게 바뀌게 되고, 이에 따라 부력 뿐 아니라 다른 물리적 현상이 불안정성의 원인이 되기 때문이다. 따라서 향후 불활성 기체의 농도를 변화시켜가며 화염의 구조를 보다 명확히 하면 진동모드를 규명할 수 있을 것으로 기대된다.

5. 결론

본 연구에서는 컵버너에서 형성된 폴화재에 대한 화염불안정성을 산화제의 속도 및 농도변화에 대해 실험하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 컵버너에서의 형성된 헵탄 폴화재는 부력 지배 화염으로 화염진동이 후류에서 발생한다. 속도가 커질 수록 이 불안정성은 감소한다.

(2) 연료와 산화제 속도차를 특성속도로 사용하였을 경우에 St 수와 1/Fr 수의 log 스케일 관계식에서 기존의 결과와 일치하는 결과를 얻었다. 이는 초기에 상류에서 생성되는 와는 연료와 산화제 전단면(shear layer)에서의 속도차에 의해서 생성됨을 입증하고 있다.

(3) 질소 몰분율의 증가에 따른 진동 주파수는 매우 불규칙한 진동수를 보이고 있다. 이러한 불규칙성은 질소의 농도에 따라 화염의 특성이 크게 바뀌게 되고, 이에 따라 부력 뿐 아니라 다른 물리적 현상이 불안정성의 원인이 되기 때문이다.

후 기

본 연구는 지식경제부 에너지자원기술개발사업의 일환(20102030200051)으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Chamberlin, D. S. and Rose, A., 1928, "The Flicker of Luminous Flames," *Industrial Engineering Chemistry*, Vol. 20, pp. 1013~1016.
- (2) Barr, J., 1953 "Diffusion Flames," *4th Symposium (International) on Combustion*, Vol. 4, pp. 765~771.
- (3) Rasbash, D. J., Rogowski, Z. W. and Stark, G. W. V., 1956, "Properties of Fires of Liquids" *Fuel*, Vol. 35, pp. 94~107.

- (4) Grant, A. J. and Jones, J. M., 1975, "Low Frequency Diffusion Flame Oscillations," *Combustion and Flame*, Vol. 25, pp. 153~160.
- (5) Malalasekera, W. M. G., 1996, "A Review of Research and an Experimental Study on the Pulsation of Buoyant Diffusion Flames and Pool Fires," *Fire and Materials*, Vol. 20, Issue 6, pp. 261~271.
- (6) Joulain, P., 1998, "The Behavior of Pool Fires: State of the Art and New Insights," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 27, pp. 2691~2706.
- (7) Hamins, A., Yang, J.C. and Kashiwagi, T., 1992, "An Experimental Investigation of the Pulsation Frequency of Flames," *Proceedings of the 24th International Symposium on Combustion*, Vol. 24, pp. 1695~1702.
- (8) Cetegen, B. M. and Ahmed, T., 1993, "Periodic Instability of Plumes and Fires," *Combustion and Flame*, Vol. 93, pp. 157~184.
- (9) Cetegen, B.M. and Kasper, K.D., 1996, "Experiments on the Oscillatory Behavior of Buoyant Plumes of Helium and Helium-Air Mixtures," *Physics of Fluids*, Vol. 8, pp. 2974~2984.
- (10) Cetegen, B.M., 1997, "Behavior of Naturally Unstable and Periodically Forced Axisymmetric Buoyant Plumes of Helium and Helium-Air Mixtures," *Physics of Fluids*, Vol. 9, pp. 3742~3752.
- (11) Furi, M., Papas, P. and Monkewitz, P. A., 2000, "Non-Premixed Jet Flame Pulsations Near Extinction," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 28, pp. 831~838.
- (12) Delichatsios, M.A., 1996, "Gravitational Fluctuations in Pool Fires and Pool Buoyant Flows," *Combustion Science and Technology*, Vol. 112, pp. 355~358.
- (13) Takahashi, F., Linteris, G. T. and Katta, V. R., 2007, "Vortex-Coupled Oscillations of Edge Diffusion Flames in Coflowing Air with Dilution," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 31, pp. 1575~1582.
- (14) Anon, NFPA 2001, "Standard on Clean Agent Fire Extinguishing System," *Proceedings National Fire Protection Agency*, Quincy, MA, 2000.
- (15) NIST, "Thermophysical Properties of Fluid Systems," <http://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>
- (16) Klassen, M., Gore, J. P., Sivathanu, Y. R., Hamins, A. and Kashiwagi, T., 1992, "Radiative Heat Feedback in a Toluene Pool Fire," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 24, pp. 1713~1719.