



# 헵탄 풀화재에서 화염안정성에 관한 주위류 효과

정태희 · 이의주\*

부경대학교 안전공학과

## The coflow effects on the flame stability of Heptane pool fire

Tae-hee Jeong · Eui-ju Lee

Department of Safety Engineering, Pukyong National University

### 요 약

풀화재에서 화염화염진동은 주위공기와의 밀도차에 의한 부력효과에 기인하여 주로 발생한다. 본 연구는 풀화재의 화염불안정성에 대해 산화제 유속 및 농도 변화에 따른 효과를 검토하기 위하여 컵버너 실험을 수행하였다. 실험결과는 산화제의 농도를 변화시켰을 경우에는 산화제의 불활성기체의 농도가 증가할수록 청염의 길이가 길어지고 컵버너 끝단으로부터 부상되는 것이 관찰된다. 한편, 산화제의 유속이 증가함에 따른 진동주파수가 감소함을 보인다. 이는 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. 그리고 진동주파수는 산화제 회석율과는 특정한 관계를 보이지 않는데 이는 국부적 화염 구조와 연관성을 가지기 때문으로 판단된다.

### 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. 풀화재는 주변 여건에 따라 다양한 진동현상이 있음이 오래전부터 발견되었는데 이를 주기적 진동(puffing, flickering, pulsation)으로 일반적으로 부르고 있고, 큰 와(vortex)의 형성에 기인하는 것으로 알려져 있다<sup>1)</sup>. 따라서 풀화재의 주기적인 진동에 대해 많은 연구들이 수행되었다. 특히 가장 두드러진 진동현상으로서 축방향 떨림의 주파수에 많은 연구가 집중되었고, 진동 주파수는 중력가속도의 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<sup>2)</sup>. 축방향이 주기적인 진동 외에도 풀화재를 모사한 컵버너에서의 메탄화염은 밀면에서의 반경방향 진동도 관찰

되었고, 이 진동수는 축방향 진동수의 절반으로 알려져 있다<sup>4)</sup>. 이와 같이 플화제의 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 산화제의 유동이 있는 경우에 속도효과와 불활성 기체에 첨가에 의한 농도변화에 대한 불안정성을 컵버너 헵탄 플화제를 통해 고찰하였다.

## 2. 실험방법

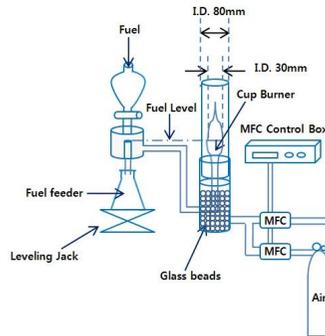


Fig. 1 Schematic of cup-burner and flow system.

본 연구에서 실험한 컵버너 측정 장치는 NFPA 2001 Standard<sup>3)</sup>를 참고하여 제작하였으며, 자세한 구성은 Fig. 1과 같다. 연료로는 헵탄(heptane)을 사용하였으며, level로 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 채웠으며, 유리관의 내경은 80 mm 이다. 유속을 2 cm/s (2 cm/s ~ 16 cm/s)씩 증가시켜가면서 실험을 하였고, 산화제 측의 공기와 희석을 위한 질소는 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. 화염의 소화여부 기준은 눈으로 관찰하여 3분 이내에 불이 꺼지면 소화농도로 간주하였다. 또한 유속에 따른 소화기구를 설명하기 위해 단위면적당 연료소모율을 측정하였으며, 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

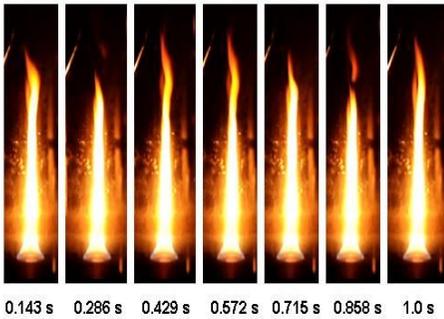


Fig. 2 Flickering motion on the cup burner flame.

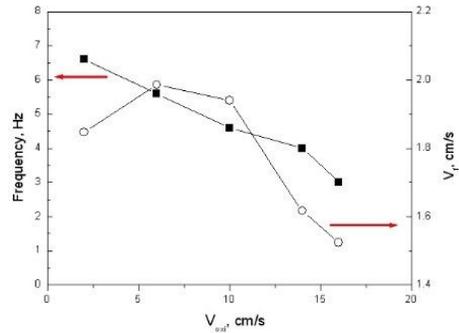


Fig. 3 Measured flame-flickering frequency and fuel velocity evaporated from heptane surface as a function of the oxidizer (pure air) velocity.

산화제로서 순수 공기만을 사용하였을 경우에 주위류의 산화제 유속을 증가시켜가며, 컵버너에서 생성되는 화염은 화염 하류에서 주기적인 떨림(flickering) 현상이 발견된다. Fig. 2에는 시간에 따른 화염의 변화를 사진으로 나타내었다. 초기에 화염에서 길이가 증가하여 하류부근에서 화염중심축으로 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 변화에 따른 주파수의 변화와 헵탄의 기화된 속도를 Fig. 3에 나타내었다. 주위류 공기의 속도가 증가함에 따라 주파수는 6.6 HZ에서 3 HZ까지 선형적으로 감소하였고, 증발된 연료속도는 초기에 증가하다가 이후에는 크게 감소함을 볼 수 있다. 주위류의 유속 증가는 헵탄 화염면의 스트레인율을 증가시켜 버너가장자리(rim)에 화염 온도감소가 감소하고, 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.

### 3.2 산화제 희석에 의한 화염불안정성

주위류의 산화제 유속을 고정시키고 소화약제의 물분율을 변화시켜 가며 컵버너에서 생성되는 화염의 모양을 Fig. 4에 가시화하였다. 실험에서 산화제의 유속은 10 cm/s로 고정하였고, 일반적으로 화재에서 소화약제의 소화농도를 결정하는 방법과 같이 질소를 물분율은 산화제 중 공기에 대한 비율을 나타낸다. 그림에서와 같이 질소의 물분율이 증가함에 따라 초기에는 화염의 길이가 성장함을 알 수 있다. 이후 질소의 분율을 더욱 증가시키면 컵버너의 끝단으로부터 화염이 부상되며, 청염의 길이가 증가되고 휘염은 짧아지며 결국

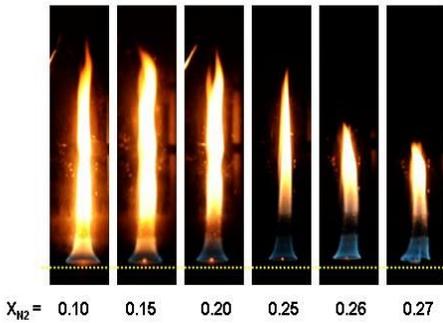


Fig. 4 The photos of Cup burner flame according to nitrogen mole fraction in the oxidizer. The oxidizer velocity was fixed at 10 cm/s.

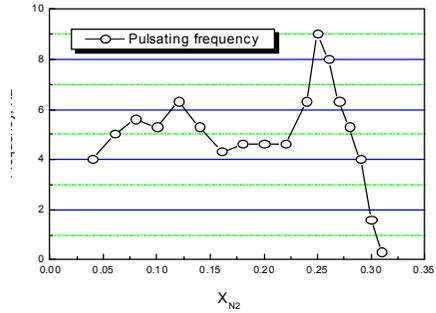


Fig. 5 Flickering frequency as a function of nitrogen concentration in oxidizer stream. The oxidizer velocity was fixed at 10 cm/s.

소화된다. 이는 불활성 기체의 분율이 증가하면서 연소에 필요한 산소 농도 감소에 따른 현상이다. Fig. 5에는 질소 몰분율의 증가에 따른 진동 주파수를 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.

#### 4. 결 론

컵버너에서의 형성된 헵탄 풀화재는 부력 지배 화염으로 화염진동이 후류에서 발생하며, 속도가 커질 수록 이 불안정성은 감소한다. 또한, 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.

#### 참고문헌

1. Chamberlin, D. S. and Rose, A., "The flicker of luminous flames", Industrial Engineering Chemistry, Vol. 20, pp. 1013 - 1016 (1928).
2. Cetegen, B. M. and Ahmed, T., "Periodic instability of plumes and fires", Combustion and Flame, Vol. 93, pp. 157 - 184 (1993).
3. Anon, "Standard on Clean Agent Fire Extinguishing System", National Fire Protection Agency, NFPA (2001)
4. Takahashi, F., Linteris, G. T., Katta, V. R., "Vortex-coupled Oscillations of edge diffusion flames in coflowing air with dilution", Proceedings of the combustion Institute, Vol. 31, pp. 1575-1582 (2007).