



엔진나셀 화재 모사를 위한 둔각물체 안정화 화염 특성

이정란 · 이의주*

부경대학교 안전공학과

The characteristic of bluff body stabilized flames for simulation of engine nacelle fires

Jung-ran Lee · Eui-ju Lee

Department of Safety Engineering, Pukyong National University

요 약

엔진나셀 화재를 둔각물체에서 분사된 연료제트 화염으로 모사하여 화염안정화 및 소화 특성을 조사하기 위해 실험과 수치해석을 수행하였다. 연료제트는 공기유동에 동축류인 경우와 대향류인 경우에 사각의 둔각물체에서 분사하였고, 소화약제는 이산화탄소와 질소를 사용하여 공기유동에 희석시켜주었으며 연료로는 메탄을 사용하였다. 본 실험의 결과를 해석하고 보충하기 위하여 LES(Large Eddy Simulation)을 기반으로 하는 FDS(Fire Dynamics Simulator)를 이용하여 비반응 유동장에서의 혼합특성과 둔각물체 후류의 유동특성을 살펴보았다.

1. 서 론

이전의 많은 연구들에서 소화약제의 성능을 나타내는 지표로서 일반적으로 풀 화재(pool fire)를 이용하는 컵버너(cup burner)를 사용하고 있으나¹⁾ 실제 엔진 나셀의 화재는 공기역학적 고려가 필요하며 산화제의 방향이 대향류인 경우에만 해석이 가능하기 때문에 컵버너 실험을 적용시켰을 경우 누설연료의 방향성을 고려할 수 없게 되므로 컵버너 실험에서의 소화약제 성능 평가내용을 엔진 나셀화재에 직접 적용시키는 것은 무리가 있다고 판단하였다. 따라서 보다 실제적인 형상에서의 소화약제의 소화능력을 평가해야하는 필요성이 있고, 물리적 소화기구의 규명이 매우 중요하다.

일반적으로 둔각물체가 유체의 유동장에 존재하게 되면 둔각물체의 전면부에 정체점이 형성되고 후류에 재순환영역이 형성되며 화염을 고정시키는 화염안정제 역할을 하게된다. 둔각물체에 의한 후류지역과 혼합, 안정성에 대해서는 예혼합 화염과 관련된 많은 연구들이 수행되었지만²⁾ 확산화염에 대해서는 연료희박 연소 시 버너에서 생성되는 화염의 안정성을 향상시키기 위한 방법으로써 재순환 영역을 형성시키는 목적으로 주로 연구되어져 왔다.³⁾ 본 연구에서는 엔진나셀의 복잡한 구조 중 가장 기본적인 구조인 파이프 또는 벽면에서 연료가 누출되어 주위에 생성된 화염의 소화특성을 살피기 위해 실험적으로 사각

둔각물체를 모사하였다. 또한 파이프 주위에 생성된 확산화염의 소화를 위해 요구되는 N_2 와 CO_2 의 불활성 기체 농도를 조사하였고, 또한 LES를 기반으로 한 수치계산을 진행하였다.

2. 실험방법 및 계산조건

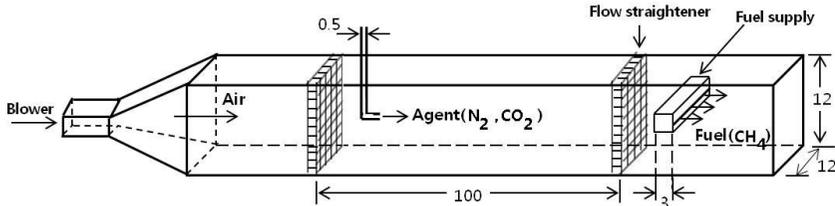


Fig.1 Experimental setup. All dimensions is centimeter(cm).

본 실험 장치(Fig.1)는 항공기 엔진 나셀의 일부분을 둔각물체로 모델링하여 엔진 나셀에서 발생할 수 있는 화재를 모사하였다. 유동장 내부에 두개의 정류기(flow straightener)를 두어 유동을 균질하게 만들어주었고 소화약제를 주입할 수 있는 노즐을 설치하여 유동장의 농도를 제어할 수 있게 하였다. 또한 엔진나셀 연료시스템의 일부에서의 연료누출을 모사하기 위해 둔각물체 내부에서 연료를 분사할 수 있도록 설계하였다. 둔각물체에서 분사되는 연료방향은 공기유동에 대해 대향류와 동축류가 되도록 노즐의 각도를 변화시킬 수 있도록 하였으며 둔각물체는 스테인리스스틸로 제작하였고 연료노즐은 슬릿 형태 ($0.18\text{ cm} \times 6\text{ cm}$)로 둔각물체 한 면에 위치시켰다.

또한 둔각물체 근처의 유동특성과 혼합상태를 관찰하기 위하여 비반응 유동장에서의 2차원 수치해석을 진행하였다. 수치해석은 LES를 기반으로 한 FDS를 사용하였다. 계산이 수행되어진 공간은 실험에서 수행했던 풍동의 실제 크기로 두었으며 실험방법과 동일하게 상황을 모사하였다. 격자크기는 $2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 로 모두 동일하며 전체격자는 600×65 로 구성되어 있다. 본 실험에서의 레이놀즈 수의 범위는 $428 < Re < 19,235$ 로 특성길이는 둔각물체 한 변의 길이로 설정하였다.

2.1 실험 결과 및 수치해석 결과

본 실험은 공기의 유동방향과 동축류인 경우와 대향류인 경우 두가지로 나누어 수행하였다. 연료와 공기유속에 따른 화염모양과 안정화를 조사하였고 화염날리(blow-out)이 발생하는 공기 유속을 관찰하였다. 각 점으로 나타내어진 것은 실험을 수행한 조건을 나타낸다. 대향류인 경우 화염안정화 선도는 Fig. 2(a)에 나타내었다. 둔각물체에 형성된 화염의 형태는 휘염의 유무로 크게 2가지로 구분할 수 있는데 연료 유속이 작은 경우 전체적인 화염형상은 둔각물체를 둘러싸는 형태를 나타내고 있고, 화염은 대부분 휘염의 형태(Regime I)로 존재한다. 연료의 양이 증가함에 따라 후류의 화염길이가 증가하였으며 화염의 대부분은 청염으로 변한다(Regime II). 공기의 유속이 보다 증가하면 결국 화염이 소

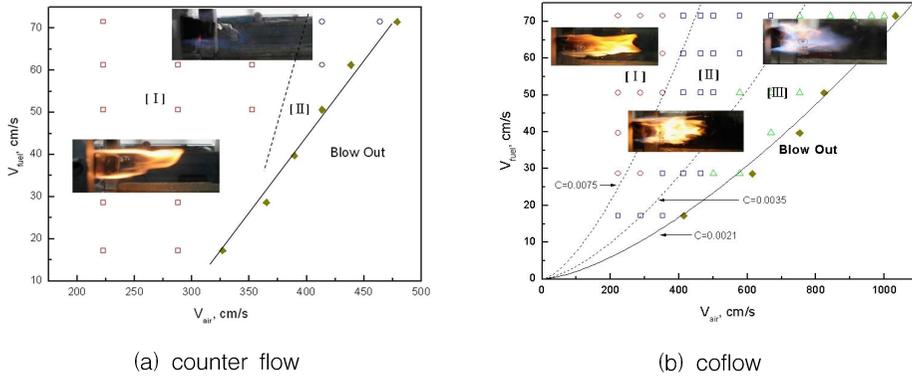


Fig.2 Flame modes and stability maps.

화되는데 이는 진형적인 화염날림현상이다. 연료의 유속이 증가할수록 화염이 소화되는 공기의 유속이 높아지는 것을 알 수 있는데 이는 둔각물체 후류에 형성된 재순환 영역에서의 혼합된 연료와 산화제의 희박소화한계(lean limit)가 존재할 수 있다는 것을 나타내고 있다. 동축류인 경우 화염의 형태는 크게 3가지(Fig. 2(b))로 구분할 수 있었다. 고정된 연료유속에서 공기의 속도가 커지면 노즐근처에 부착되어 안정화된 화염(Regime I)이 떨림이 매우 크고 불규칙하게 발생하는 불안정한 휘염(Regime II)으로 천이된다. 작은 연료 속도와 큰 공기유속에서는 휘염이 청염으로 바뀌게 되고 (Regime III) 공기유속이 더 커지면 소화된다. 동축류인 경우 화염형태 사이의 경계선은 $V_f / V_{air}^{3/2} = Const.$ 로 나타내었다.

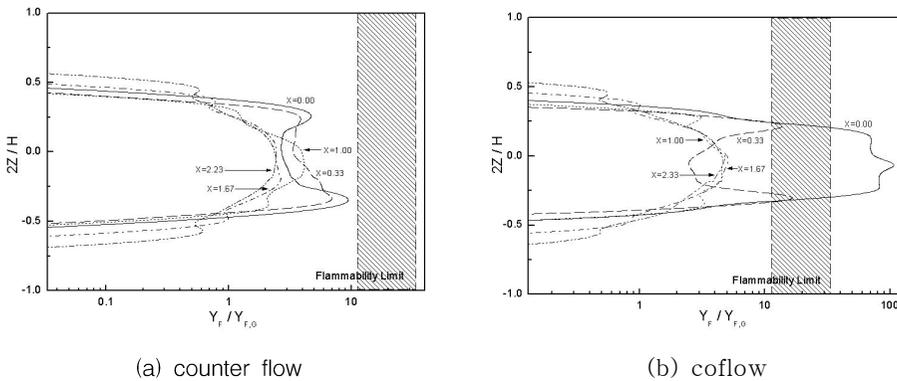


Fig.3 Time-averaged mass fraction of fuel in counter flow and coflow configuration, $V_{fuel}=17.6\text{cm/s}$ $V_{air}=287.8\text{cm/s}$.

둔각물체 후류의 유동장분포를 확인하고 실험결과를 보충하기 위해 비반응 유동장에서의 후류 유동장에 대하여 살펴보았다. 그러나 연소시의 유동은 동점성 계수의 증가함으로써 온도가 증가하게 됨으로 레이놀즈 수의 범위가 감소한다⁴⁾. 따라서 둔각물체 후류에서는 비대칭적인 와의 발생이 일어나지 않고 안정한 한쌍의 와가 형성될 것이라 예상된다.

Fig. 3(a)는 연료유속이 17.2 cm/s인 경우 비반응 유동장에서의 시간평균 된 질량분율을 나타낸 것이다. X축은 수치해석으로 계산된 질량분율 Y_F 와 사용된 연료와 공기가 완전히 혼합되었다고 가정하였을 때의 질량분율 $Y_{F,G}$ 의 비로 나타내었다. 연료속도가 낮은 경우는 후류에서의 모든 질량분율이 가연한계의 범위에서 벗어나는 것을 볼 수 있다. 그러나 연료유속이 큰 경우는 둔각물체 후류의 질량분율이 가연한계범위 내에 존재하였다.

따라서 낮은 연료에서 형성된 화염은 확산화염의 특징을 가지며 대향류인 경우의 소화농도의 전반적인 경향은 연료속도에 의존한다고 판단할 수 있다. 동축류인 경우 같은 조건에서의 연료 질량분율은 Fig. 3(b)에 나타내었다. 유속이 낮은 경우임에도 질량분율이 가연한계에 포함되는 것을 알 수 있으므로 동축류인 경우의 화염은 둔각물체에 의해 안정화되어진다고 판단할 수 있다. 또한 동축류에서의 안정화 메커니즘은 예혼합 된 후류에 의존하며 소화농도는 연료유속과는 상관없이 일정한 경향을 가지고 있음을 알 수 있다.

3. 결 론

대향류인 경우 소화농도는 연료유속에 많은 영향을 받았는데 이는 연료유속에 따라 혼합율이 변하기 때문이며 동축류인 경우는 공기유속이 증가할수록 감소하는 경향을 보였다. 동축류 제트화염의 소화농도 실험 결과와 비교했을 때 둔각물체에서 안정화된 화염의 소화 메커니즘은 공기역학적인 측면과 관련이 있다고 판단된다.

비반응 유동장에서의 결과로써 대향류인 경우 낮은 연료유속에서 형성되는 화염은 예혼합 화염으로 분류되어지며 소화농도는 전반적으로 연료속도에 의존함을 알 수 있으며 동축류인 경우 높은 연료유속에서의 둔각물체 후류에서의 축방향 속도는 감소하며 와의 강도는 약해진다. 이것은 이 때 공기 유동과는 반대방향인 와를 형성하기 때문이다. 연료의 질량분율 분포 또한 낮은 연료속도인 경우와 비교할 수 있는데 동축류인 경우의 화염은 부분적인 예혼합상태로써 안정화되어지고 따라서 화염이 소화되는 소화농도는 연료유속과는 무관한 경향을 가지게 된다.

참고문헌

1. Anon, "Standard on Clean Agent Fire Extinguishing System", National Fire Protection Agency, NFPA (2001)
2. A. Hamins, C. Presser, L. Melton, "Suppression of a baffle-stabilized spray flame by Halogenated Agents", The Combustion Institute, pp. 1413-1420, (1996)
3. F. Takahashi, W.J. Schmoll, V. M. Belovich, "Suppression of bluff-body stabilized diffusion flames", AIAA 98-3529 (1998)
4. I. Glassman and R.A. Tetter, Combustion, Elsevier, London,U.K., (2008).