

둔각 물체를 이용한 엔진 나셀 화재 소화 특성

이정란 · 이의주[†]

부경대학교 안전공학과

(2011. 10. 8. 접수 / 2012. 2. 2. 채택)

The Characteristic of Extinguishment of Engine Nacelle Fire Using a Bluff Body

Jung-Ran Lee · Eui-Ju Lee[†]

Department of Safety Engineering, Pukyong National University

(Received October 8, 2011 / Accepted February 2, 2012)

Abstract : The purpose of the study is to assess the extinguishing concentration of inert gases in engine nacelle fire. The experiment was performed with a two dimensional rectangular bluff body stabilized flames, where the fuel was ejected to counter flow and co-flow against an oxidizer stream. Two inert gases, CO₂ and N₂, were used for extinguishing agent in the oxidizer and methane was used for fuel. The main experimental parameters were the direction of injecting fuel, the kinds of agent and the velocity ratio between air and fuel streams, which controlled the mixing characteristic near bluff body and the strength of recirculation zone in the downstream. The result shows the flame structure and the mode were strongly dependent with fuel/air ratio and the fuel jet direction. For both flow configurations, the extinguishing concentration of CO₂ was smaller than the N₂ because of the large heat capacity of CO₂. However, the concentration of inert gases at blowout was much smaller than those in the cup burner and coflow jet diffusion flames, which implies that the extinction mechanism of bluff body stabilized flames was mainly due to the aerodynamic aspect. Compared to co-flow fuel injection, the extinguishing concentration of inert gases under counter flow configuration was lower. The effect of direction might result from the mixing characteristic and strength of recirculation zone around a bluff body. More details should be investigated for the characteristic of recirculation zone in the wake of bluff body using the LES(Large Eddy Simulation).

Key Words : bluff body, recirculation zone, flame stabilization, engine nacelle fire, extinguishing concentration

1. 서론

국제화·세계화에 따라 타 국가 간의 교류가 활발해지면서 항공기는 중요한 교통수단이 되었고 국가의 경쟁력과 성장을 좌우하는 요소로 작용하므로 향후 항공우주산업은 국가 중점 산업의 하나로 발전할 것으로 예상되어진다. 항공기 화재는 빈번히 발생하지는 않지만 한번 화재가 발생하면 인명 피해와 함께 경제적인 피해가 매우 크다. 이러한 항공기 화재의 주된 원인으로는 동력원인 엔진 나셀에서의 화재이므로 본 연구는 항공기 사고의 주된 원인인 엔진 나셀 화재를 대상으로 하였다. 이전에는 항공기 엔진나셀 소화를 위해 Halon을 소화약제

로 많이 사용해왔었는데 Halon은 Montreal 의정서에 의해 선진국은 1994년부터 생산 및 사용이 중지되었으며, 우리나라를 포함한 개발도상국의 경우는 2004년부터 단계적으로 생산을 감소하고 2010부터는 중단하도록 규제해왔다. 따라서 향후 항공산업에서도 CO₂와 N₂와 같은 불활성 기체 소화약제에 대한 관심과 연구가 증가하고 있다¹⁾.

이전의 많은 연구들에서 소화약제의 성능을 나타내는 지표로서 일반적으로 풀 화재(pool fire)를 이용하는 컵버너(cup burner)를 사용하고 있으나²⁾ 실제 엔진 나셀의 화재는 공기 역학적 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.

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

따라서 보다 실제적인 형상에서의 소화약제의 소화 능력을 평가해야 되는 필요성이 있고, 물리적 소화 기구의 규명이 매우 중요하다.

본 연구에서는 엔진나셀의 여러 복잡한 구조 중 연료 파이프라인에서 연료가 누출되었을 경우 점화되어 생성되는 화염의 소화를 대상으로 하였다. 이러한 간단한 모델링에 대해서는 둔각물체 주위의 유동에서의 화염날림(blow off) 현상으로 모사할 수 있다. 일반적으로 둔각물체가 유체의 유동장에 존재하게 되면 둔각물체의 전면에 정체점이 생기고 유동의 속도가 매우 느려지며 후류에 재순환 영역이 형성되는데 이로 인해 난류가 발생하고 유동을 체류시킴으로써 화염을 고정시키는 화염 안정제 역할을 하게 된다. 또한 기존 연구들에서 예혼합 화염의 화염안정화 매커니즘 해석에 많이 도입되어 온 고유치인 연소속도(Burning velocity) 즉 연소속도 또한 화염안정화에 의한 영향을 받는데 산화제의 유속보다 연소속도가 커지면 역화(flash back)가 일어나게 되고 반대로 연소 속도가 산화제의 유속보다 작아지면 화염날림이 일어나게 된다. 예혼합 화염에서는 매끄러운 층류 화염의 화염면에 비해 난류 화염의 화염면은 화염면이 넓어지게 되므로 난류 화염의 연소속도가 층류화염의 연소속도 보다 빨라지게 된다.

둔각물체에 의한 후류지역과 혼합, 그리고 안정성에 대해서는 예혼합화염과 관련된 많은 연구들이 수행되었지만³⁾ 확산화염에 대해서는 연료희박 연소시 버너에서 생성되는 화염의 안정성을 향상시키기 위한 방법으로써 재순환 영역을 형성시키는 목적으로 주로 연구되어져 왔다⁴⁻⁹⁾. 이를 위해서는 일반적인 확산화염의 경우 동축류를 사용하게 되는데 연료와 산화제의 노즐 사이에 둔각물체를 두어 상류에 재순환 영역을 형성시키고 이에 관한 화염 안정성을 조사하였다. 하지만 이와 같은 축대칭 구조의 화염의 해석은 매우 어렵기 때문에 2차원의 실린더형태에서 연구를 수행하여 기본적인 유동장 정보 및 난류의 강도 그리고 화염 안정화에 대한 소수의 실험적, 수치적 연구가 진행되었다¹⁰⁻¹²⁾. 이 때 둔각물체의 형상은 사각형 및 원형단면을 사용했지만 모든 경우에 연료와 공기유동의 방향은 모두 같은 방향의 분사로만 사용하였으며 연구의 결과는 화염 소화는 연료/산화제의 유속비 및 유속범위, 연료의 종류, 희석조건, 면적차폐율(blockage ratio), 그리고 둔각물체의 형상에 크게 의존하였다.

본 연구에서는 엔진나셀의 복잡한 구조 중 가장

기본적인 구조인 파이프가 주위에서 생성된 화염의 소화특성을 살피기 위해 실험적으로 사각 둔각물체를 모사하였다. 또한 파이프 주위에 생성된 확산 화염의 소화를 위해 요구되는 N₂와 CO₂의 불활성 기체 농도를 조사하였고, 방향성 효과를 모사하기 위해 공기와 같은 동축류(coflow)방향과 대향류(counterflow)방향의 두 가지 연료분사를 통해 비교하였다.

2. 실험 방법

Fig. 1(a)와 같이 본 실험 장치는 항공기의 엔진 나셀의 일부분을 둔각물체로 모델링하여 엔진 나셀에서 발생할 수 있는 화재를 모사하였다. 전체 형상은 12 cm × 12 cm × 200 cm 정사각형 단면의 풍동을 제작하였다. 단면은 열강화유리로 제작되어 가시화가 가능하게 하였다. 유동장 내부에는 두개의 정류기(Flow Straightener)를 세라믹 허니컴을 이용해 설치하여 유동을 균질하게 만들어주었다. 상류에 설치된 정류기 후면에 소화약제를 주입할 수 있는 노즐을 설치하여 유동장의 농도를 제어할 수 있게 하였고, 공기와 소화약제가 잘 혼합되도록 두 Flow

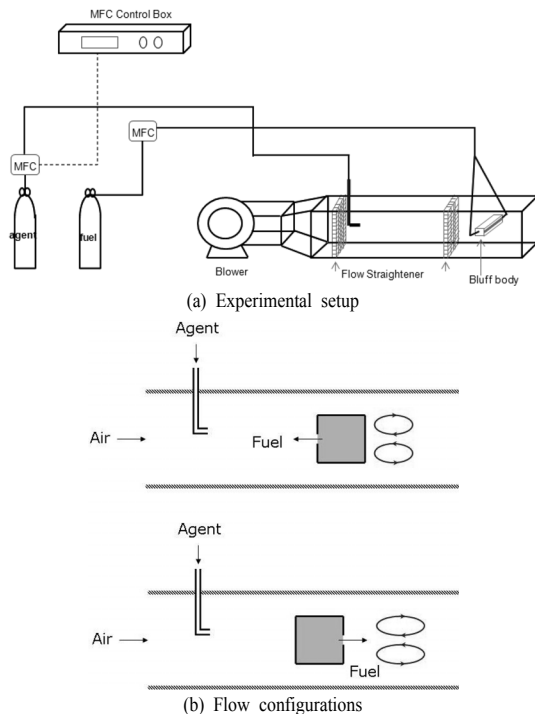


Fig. 1. Schematics of experiments, (a) experimental setup, (b) flow configurations; counterflow(up) and coflow (down) systems.

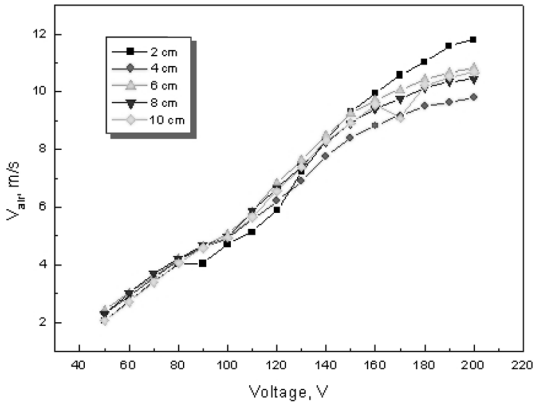


Fig. 2. Calibrated air velocity as a function of voltage of imposed fan voltage.

Straightener 사이에 약 1 m 정도의 충분한 공간을 두었다. 본 연구에서 소화약제로는 불활성 기체인 CO₂와 N₂를 사용하였다.

또한 엔진나셀 연료시스템의 일부에서 발생한 연료누출을 모사하기 위해 단각물체 내부에서 연료를 분사할 수 있도록 설계하였으며 사용한 연료는 99.995 순도의 메탄(CH₄)을 사용하였다. 단각물체에서 분사되는 연료방향은 Fig. 1(b)와 같이 공기유동에 대해 대향류와 동축류가 될 수 있도록 노즐의 각도를 변화시킬 수 있다. 단각물체는 3 cm × 3 cm 스테인리스스틸 정사각형 관으로 제작하였으며 연료분사 노즐은 1.8 cm × 6 cm의 슬릿 형태로 단각물체 한 면에 위치시켰다.

2차원적인 해석이 가능하도록 설계된 장치에서 연료의 유속을 공기의 유속에 비해 작은 실험조건을 채택하였는데 이는 일반적으로 단각물체 후류의 재순환영역을 형성시키기 용이하기 때문이다.

주위 공기를 유입하기 위해 송풍기를 이용하였는데 송풍기에서 불어나오는 공기의 유속은 모터 구동전압을 변화시켜줌으로써 조절하였다. Fig. 2는 연료노즐 앞에서 풍동의 높이에 따른 공기의 유속을 구동전압에 따라 측정한 결과이다. 속도는 피토크관(pitot tube)과 마이크로 마노미터를 이용하여 측정하였다. Fig. 2에서 보듯이 높이별 속도의 차이가 그리 크지 않아 풍동의 중심 높이인 6 cm 지점의 횡방향 평균값을 이용하여 공기유속 결정하였다.

3. 실험결과 및 토의

실험방법에서 언급한 것처럼 연료제트는 공기 유동에 대하여 대향류와 동축류, 두가지 방향에 대하

여 실험하였다. 각 방향에 대해서 연료와 공기의 유속에 따른 화염 모양 및 안정화 영역을 조사하였으며, 불활성 기체를 소화약제로 사용하여 공기유동에 혼합시킨 후 소화농도를 측정하였다.

대향류의 경우에 화염 모양 및 안정화 선도를 Fig. 3에 도시하였고, 그림에서 점(point)으로 표시한 부분은 실험을 수행한 조건을 나타낸다. 단각물체에 형성된 화염의 형태는 휘염의 유무로 크게 2가지로 구분할 수 있는데, 연료속도가 공기유속에 비해 화염의 형태를 결정하는데 보다 민감하다. 연료 유속이 작은 경우 전체적인 화염형상은 단각물체를 둘러싸는 형태를 나타내고 있고, 화염은 대부분 휘염의 형태로 존재한다(Regime I). 연료의 양이 증가함에 따라 후류의 화염 길이가 증가하였으며 연료의 양이 더 늘어나게 되면 화염의 대부분은 청염으로 변하고 후류의 일부만 휘염이 관찰된다(Regime II). 또한 공기의 유속이 증가하게 되면 후류 화염의 떨림 현상이 심해졌고 소화되기 직전에는 연료분사노즐 면에는 화염이 형성되지 않는다. 공기의 유속이 보다 증가하면 결국 화염이 소화되는데 이는 전형적인 화염날림현상이다. 연료의 유속이 증가할수록 화염이 소화되는 공기의 유속이 높아지는 것을 알 수 있는데 이는 단각물체 후류에 형성된 재순환 영역(recirculation zone)에서의 혼합된 연료와 산화제의 희박소화한계(lean limit)가 존재할 수 있다는 것을 나타내고 있다.

Fig. 4에는 공기에 혼합한 소화약제의 소화농도를 Fig. 4에 도시하였다. 연료와 공기의 유속을 변화시키고 측정된 소화약제의 소화농도를 연료/공기 유속비로 도시하였다. 질소의 경우 연료유속이 작은 9.67 cm/s 조건을 제외하고는 모두 연료/공기 유속

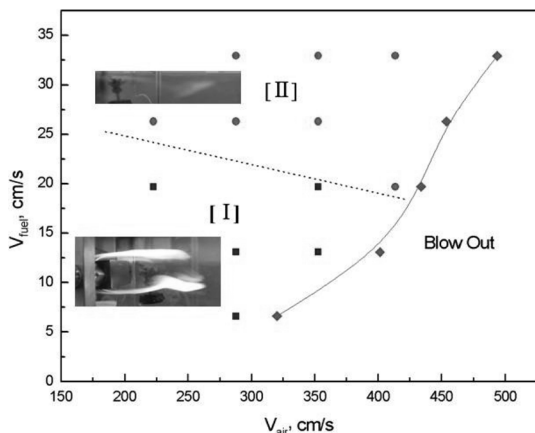


Fig. 3. Flame stability map of counter flow configuration.

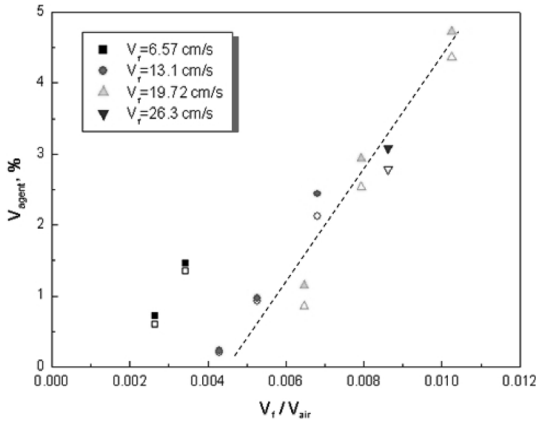


Fig. 4. Extinguishing concentrations of agent at counter flow configuration, Solid symbol and hollow symbol indicate the nitrogen and carbon dioxide as diluents, respectively.

비에 선형적인 소화농도의 변화를 보이고 있다. 즉, 연료의 유속이 일정할 때 공기의 유속이 느릴수록 소화농도가 높아지고 공기의 유속이 같을 때에는 연료의 유속이 빠를 때 소화농도가 높아지는 것이 관찰되었다. 연료유속이 작은 경우에도 유사한 경향성을 관찰할 수 있지만 데이터를 외삽(extrapolation)하여 확장해보면 같은 연료/공기 유속비에서 더 큰 소화농도가 예측된다. 이러한 차이는 화염의 구조에 의존한다고 할 수 있다. 상대적으로 연료의 속도가 작은 경우에는 Fig. 3의 화염모드 [I]과 같이 연료와 공기의 혼합이 완전히 이루어 지지 않고 화염의 구조가 여전히 확산화염의 특성을 가지고 있다고 판단된다. 따라서 화염소화가 잘 이루어 지지 않고 보다 높은 소화약제의 농도를 요구하게 된다. CO₂의 소화농도는 N₂의 소화농도와 유사한 경향을 보이고 있지만 같은 연료/공기 유속비에서 CO₂의 소화농도가 약간 더 낮다는 것을 알 수 있다. 이는 CO₂가 N₂보다 소화능이 좋다는 것을 나타내며 이것은 두 소화약제의 열용량 차이에 의한 것이라 판단된다. 하지만 전체적으로 큰 차이는 발견되지 않는다.

연료분사를 공기와 같은 동축류로 분사하였을 경우에 화염의 모양변화 및 소화한계를 Fig. 5에 나타내었다. 화염의 형태는 연료와 공기의 유속에 따라 크게 3가지로 구분할 수 있다. 큰 연료속도와 작은 공기유속 조건에서는 휘염의 형태로 화염이 존재한다. 고정된 연료유속에서 공기의 속도가 커지면 노즐근처에 부착되어 안정화된 화염(Regime I)의 떨림이 매우 크고 불규칙하게 발생하는 불안정한 휘

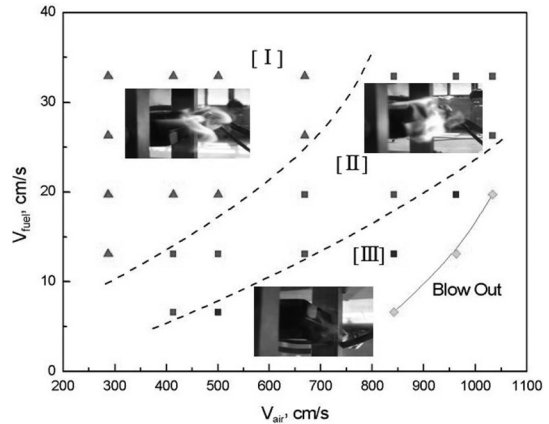


Fig. 5. Flame stability map of coflow configuration.

염(Regime II)으로 천이된다. 작은 연료속도와 큰 공기유속에서는 휘염이 청염으로 바뀌게 되고 (Regime III) 공기유속이 더 커지면 소화된다. 안정한 휘염의 경우는 공기의 유속이 비교적 느릴 때 형성되는 화염의 형태로 떨림 현상이 거의 일어나지 않고 안정적이다. 불안정한 휘염의 경우 화염모양은 청염과 비슷하나 청염이 아닌 휘염이 나타나고 청염의 경우는 화염의 길이가 매우 짧게 형성되고 화염이 매우 불안정하여 떨림 현상이 심하게 발생한다. 이러한 속도에 따른 화염의 분류는 둔각물체의 후류에서 생성되는 재순환영역의 강도와 연료/공기의 혼합특성이 지배적으로 작용한 결과로 판단된다. Fig. 3의 대향류 경우와 비교하면 혼합특성이 반대되는 경향이 발견되어진다. 즉, 청염의 존재를 혼합이 잘되었다고 판단하면 대향류는 큰 연료속도에서 동축류는 작은 연료속도에서 혼합이 잘된다고 볼 수 있다. 또한 화염소화 데이터를 비교하면 전체적으

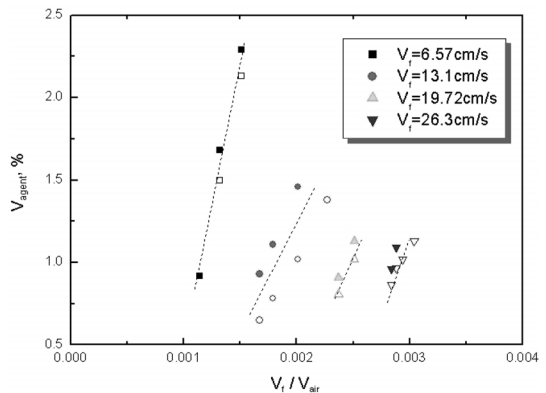


Fig. 6. Extinguishing concentration at co-flow configuration, Solid symbol and hollow symbol indicate the nitrogen and carbon dioxide as diluents, respectively.

로 동축류의 경우에 보다 안정화가 잘 이루어진다고 판단할 수 있다.

동축류의 경우에 공기에 혼합한 소화약제의 소화농도를 연료/공기 유속비로 Fig. 6에 도시하였다. 소화농도의 변화는 Fig. 4의 대향류 경우와 유사하지만 연료/공기 유속비에 대하여 소화농도의 변화가 둔감하다. 또한 연료의 유속에 따라 소화농도가 연료/공기 유속비에 각기 다른 경향성을 보이고 있다. 이러한 동축류 결과는 연료 및 산화제의 유속에 따라 화염의 형상 및 특성이 매우 바뀌고 있고, 결과적으로는 안정화 기구가 다양하다고 판단된다. 특히 Fig. 6의 동축류 경우는 이전의 연구에서 많이 진행해왔던 일반적인 동축류 제트버너에서의 소화농도 실험결과와 비교하면 직접적으로 둔각물체의 효과를 비교할 수 있다¹³⁾. 같은 메탄을 연료로 사용했을 경우에 동축류 제트버너에서는 N₂의 소화농도가 약 30% 그리고 N₂과 CO₂의 소화농도 차이는 2배 이상이었다. 하지만 본 실험에서는 제트화산화염 실험결과보다 소화농도가 현저히 낮고 두 소화약제의 소화농도의 차가 크지 않았다. 이는 소화 매커니즘이 공기역학적인 측면과 소화약제의 열용량등이 혼재되어 둔각물체 주위의 화염소화는 공기역학적 특성이 가장 주된 소화기구로써 작용된다고 판단할 수 있다.

4. 결론

본 실험은 엔진나셀을 형상화한 둔각물체를 이용하여 공기와 연료의 유속에 따른 화염특성과 그에 따른 소화농도를 관찰하였다. 실험결과 해석으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) CO₂와 N₂의 소화성능은 CO₂가 조금 더 높았는데 이는 비활성 기체의 열용량 차이 때문이라 판단된다.

2) 형성된 화염이 예혼합 화염일 때 소화농도는 화염속도와 관련이 있다. 연료/공기 비율이 큰 경우에 소화농도가 높아지는데 이는 화염의 특성이 화산화염에서 예혼합 화염으로 천이되면서 연소속도의 변화가 유동의 속도와 부합하지 못하기 때문이라 판단된다.

3) 동축류 제트버너의 실험결과와 비교하면 두 소화약제의 소화농도 차이가 크지 않았는데 이는 사용한 연료가 다르며 소화 매커니즘이 공기역학적인 측면과 소화약제의 열용량에 의한 물리적 기구가

복합되어 있지만 주로 공기역학적 기구가 화염소화에 큰 영향을 미친다고 판단된다.

4) 대향류 경우 보다 동축류의 경우 소화농도가 더 높는데 이는 둔각물체 후류에 재순환 영역을 형성하고 동축류인 경우 화산화염의 특징을 갖게 되기 때문이라 판단된다.

감사의 글 : 이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2009-0067043).

참고문헌

- 1) NFPA, "The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering", 3rd ed, 2002.
- 2) Anon, "Standard on Clean Agent Fire Extinguishing System", National Fire Protection Agency, NFPA 2001, Quincy, MA, 2000.
- 3) Santosh J. Shanbhogue, Sajjad Husain, and Tim Lieuwen, "Lean blowoff of bluff body stabilized flames: Scaling and dynamics", Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 35, 98~120, 2009.
- 4) I. Esquiva-Danoa, H. T. Nguyen, and D. Escudiea, "Influence of a bluff-body's shape on the stabilization regime of non-premixed flames", Combust. Flame Vol. 127, pp. 2167~2180, 2001.
- 5) B. B. Dallya, A. R. Masria, R. S. Barlowb, G. J. Fiechtnerb, and D. F. Fletcher, "Measurements of no in turbulent non-premixed flames stabilized on a bluff body", Proc. Combust. Inst. Vol. 26, pp. 2191~2197, 1996.
- 6) A. Kempf, b, R. P. Lindstedt, and J. Janickab, "Large-eddy simulation of a bluff-body stabilized nonpremixed flame", Combust. Flame Vol. 144, pp. 170~189, 2006.
- 7) B. B. Dallya, D. F. Fletcherb, and A. R. Masria, "Flow and mixing fields of turbulent bluff-body jets and flames", Combustion Theory and Modelling, Vol. 2, Issue 2, pp. 193~219, 1998.
- 8) Y. Chen, C. Chang, K. Pan, and J. Yang, "Flame Lift-off and Stabilization Mechanisms of Nonpremixed Jet Flames on a Bluff-body Burner", Combustion and flame, Vol. 115, pp. 51~65, 1998.
- 9) A. Hamins, C. Presser, and L. Melton, "Suppression of a baffle-stabilized spray flame by Halogenated Agents", The Combustion Institute, pp. 1413~1420, 1996.

- 10) A. G. Bakrozis, D. Papailiou, and P. Koutmos, "A study of the turbulent structure of a two-dimensional diffusion flame formed behind a slender bluff-body", *Combust. Flame* Vol. 119, pp. 291~306, 1999.
- 11) P. Koutmos, C. Mavridis, and D. Papailiou, "A study of turbulent diffusion flames formed by planar fuel injection into the wake formation region of a slender square cylinder", *Proc. Combust. Inst.* Vol. 26, pp. 161~168, 1996.
- 12) D. Papailiou, P. Koutmos, and A. G. Bakrozis, "Simulations of fuel injection and flame stabilization in the wake formation region of a slender cylinder", *Proc. Combust. Inst.* Vol. 28, pp. 91~99, 2000.
- 13) 지정훈, 이의주, "제트확산화염에서의 불활성기체 소화농도", *한국안전학회지*, Vol. 24(1), pp. 21~25, 2009.