

# 제트 확산 화염에서의 불활성기체 소화농도

지정훈 · 이의주<sup>\*</sup>

부경대학교 안전공학부

(2008. 11. 27. 접수 / 2009. 2. 1. 채택)

## Flame-Extinguishing Concentrations of Inert Gases in Jet Diffusion Flames

Jung Hoon Ji · Eui Ju Lee<sup>\*</sup>

School of Safety Engineering, Pukyong National University

(Received November 27, 2008 / Accepted February 1, 2009)

**Abstract** : Extinguishing limits of laminar ethylene/oxygen flames in both normal and inverse co-flow jet burner have been determined experimentally and computationally. An inert gas(N<sub>2</sub>, Ar, CO<sub>2</sub>) was added into the oxidizer to find the critical concentration and the effectiveness of the agents on flame extinction. The experimental results showed that the physical aspect of inert gases was main mechanism for flame blow-out as same as cup burner test, but the flow effect should be considered to determine the extinction concentration. The numerical prediction was performed with modified WSR model and the result was in good agreement with the measurements. The experimental and numerical methods could be used for the assessment of various flame suppression agents such as minimum extinguishing concentration.

**Key Words** : extinguishing concentration, inert gas; minimum extinguishing concentration, jet diffusion flames; well stirred reactor

### 1. 서론

구획실 등에서의 화재를 초기에 진화하기 위하여 여러 가지 소화약제를 사용하고 있다. 소화약제는 역할에 따라 크게 물리적·화학적 작용으로 구분할 수 있다. 물리적 작용은 산소농도를 감소시키는 희석효과와 화염온도를 떨어뜨리는 냉각효과로 구분할 수 있으며, 화학적 작용은 연소반응의 주된 반응기인 H, OH, O 등을 다른 안정한 물질로 결합시켜 반응성을 저하시키는 기구이다.

1990년대까지는 일반적으로 할론(halon) 등과 같이 화학반응 중 활성화된 반응기의 농도를 줄여서 적은 양으로 화염소화가 가능한 화학적 소화약제가 주로 많이 사용되어 왔지만, 지구 대기의 오존층 파괴 물질로 알려짐에 따라 사용이 금지되었다. 따라서 대체 소화약제(halon replacement clean agent)의 필요성이 대두되었고 현재는 할로카본(halocarbon) 화합물과 불활성기체(inert gas) 소화약제가 주로 사

용되고 있다. 할로겐화합물 청정소화약제로는 FM-200의 상품명으로 잘 알려진 헵타프로오르 프로판(HFC-227a) 등 여러 가지 화합물이 있고, 질소, 아르곤, 이산화탄소 등의 불활성 기체를 이용한 소화약제는 각 기체들의 조성에 따라 IG-01, IG-55, IG-541, IG-100 등으로 명명하여 상용화되어 사용되고 있다<sup>1)</sup>.

이러한 소화약제의 소화능력 평가와 소방설비 설계에 있어 가장 중요한 특성은 최소소화농도(MEC, minimum extinction concentration)라고 할 수 있다. MEC는 실험적으로 컵버너(cup-burner)를 이용하여 플화재를 소화시키는 농도를 산정하는 방법을 NFPA (National Fire Protection Association) 2001 Standard<sup>2)</sup> 등에서 제시하고 있지만 화염소화가 버너의 크기나 여러 조건 등에 의존하기 때문에 실제 화재에서 일반화시키기에는 어려움이 있다. 따라서 현재에도 평가기준의 정확성을 높이기 위해 지속적인 연구를 수행하고 있다.

이러한 소화약제의 평가를 보다 체계적으로 일반화시키기 위한 이론적 예측모델의 개발을 수행하

<sup>\*</sup> To whom correspondence should be addressed.  
ejlee@pknu.ac.kr

고 있다. 불활성기체의 소화능력 평가를 위해서는 물리적 특성값인 소화약제의 비열을 고려하는 연구가 진행되었다<sup>3,4)</sup>. 즉 불활성 기체를 산화제에 첨가하면 연소 반응열(heat of reaction)이 반응에 참여하지 않는 기체의 온도를 상승시키는데 기여하므로 궁극적으로는 화염온도를 저하시키고 더 이상 안정한 연소상태를 유지할 수 없는 온도조건에서 화염소화가 발생한다는 모델이다. 이 때 안정한 화염유지 최소온도의 결정은 평형상태를 가정하여 성공적으로 모델링되었다. 최근에는 완전혼합반응로(WSR, well stirred reactor)에서 자세한 화학반응을 고려하여 소화약제의 소염농도를 추정하였다<sup>5)</sup>. 이 방법에서 소화의 판단기준은 유동효과를 의미하는 체류시간(residence time)을 사용하였고, 연료의 산화반응과 소화약제의 자세한 반응식을 알고 있는 경우에는 물리적 효과와 화학적 효과를 함께 고려할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

본 연구에서는 기존의 컵버너가 아닌 일반제트화산화염(NDF, normal diffusion flame)과 역화산화염(IDF, inverse diffusion flame)에서 여러 가지 불활성기체의 화염소화능도를 실험적으로 구하였다. 그리고 WSR의 수치해석을 통해 불활성 기체의 화염소화온도가 일정하다는 가정을 도입하여 소화능도를 계산하고 실험결과와 비교하였다. 또한 자세한 화학반응을 도입하여 이산화탄소의 경우에 소화에 대한 화학적 효과를 정량적으로 비교하였다.

## 2. 실험방법

제트의 분사형태와 유속에 따른 불활성 기체의 소화능도를 실험하기 위해 본 연구에서는 NDF와 IDF의 두 가지 제트화염을 이용하였다. NDF은 안쪽 관에서 연료가 나오고 바깥쪽 관에서 산화제가 나와 연료를 감싸는 형태로서 일반적인 제트화산화염의 형태를 가지고 있다. 반면 IDF에서는 가장 안쪽의 관에서 산화제를 분출하고, 다음 바깥쪽 관에서는 연료를 분사한다. 이 때, 환형의 연료제트 안쪽과 바깥쪽에서는 산화제뿐 아니라 주위 외부 공기가 만나 또 다른 화염(이중화염)이 생성되므로 질소를 가장 바깥쪽 관에서 흘려주어 안쪽의 화염만을 형성시키도록 하였다. 사용된 질소의 양은 화염을 안정화 시키는 영역 내에서 가장 작은 유량(5~12L/min)을 사용하여 화염에 대한 주위류의 영향을 최소화하였다. NDF에서도 IDF과 결과 비교시 주위류 효과의 배제를 목적으로 유사한 유동조건을 만

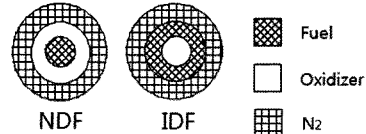


Fig. 1. Nozzle configurations in a normal diffusion flame and an inverse diffusion flame.

들어 주기 위해 질소를 흘려주었다. 위 두 가지 형태의 제트화산화염 버너를 Fig. 1에 개략적으로 나타내었다.

연료는 순도 99.9%의 에틸렌( $C_2H_4$ )을 이용하였고, 산화제는 산소에  $N_2$ , Ar,  $CO_2$ 를 첨가하여 화염의 특성과 소화능도를 측정하였다. 기존의 컵버너 실험<sup>2)</sup>의 경우 공기를 기반으로 하여 그 유량을 40(L/min)으로 고정시키고 불활성기체의 유량을 조금씩 증가시키는 방법을 취했기 때문에 산화제의 전체적인 유속이 계속적으로 변하여 유속조건에 따른 화염소화능도의 측정이 불가능했다. 따라서 본 실험에서는 공기가 아닌 산소를 기반으로 하여 산소와 불활성기체의 전체 유량을 고정시킨 상태에서 그 조성만을 변화시켜가며 화염소화능도를 찾아보았다.

Fig. 2와 같이 버너는 내경이 각각 7.5mm 20mm, 30mm인 3중관 실린더형으로 제작하였고, 버블미터(bubble meter)를 사용하여 검증된 질량유량계(MFC)로 유량을 제어하였다. 초기의 화염 자체의 불안정성이 화염소화에 영향을 줄 수가 있으므로 순수한 불활성 기체의 농도에 의한 영향을 고려하기 위해서는 각 버너에서 연료와 산화제의 유속을 결정할 때 층류화염으로서 버너 팁에 잘 부착되어 있는 조건을 속도비로 채택하였다. Fig. 3에 NDF의 안정화 선도를 그려 안정한 영역에서 유속 조건을 채택하였고, IDF의 경우에는 같은 크기의 버너를 사

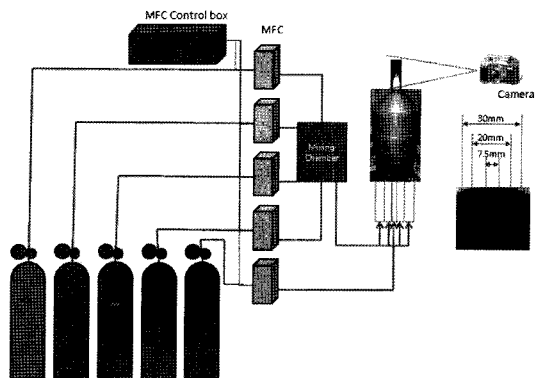


Fig. 2. Schematics of experimental apparatus.

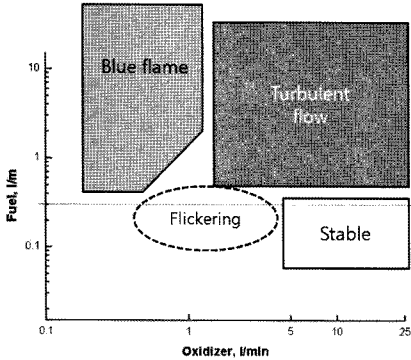


Fig. 3. Stabilization diagram of ethylene/air NDF.

Table 1. Fuel and oxidizer velocities on experiments

Cases	Burner	Velfuel (cm/s)	Veloxi (cm/s)
1	NDF	11.3	49.4
2	NDF	11.3	98.8
3	NDF	41.5	5.7
4	IDF	6.2	37.7
5	IDF	6.2	75.5
6	IDF	6.9	34.9

용한 기존연구<sup>6)</sup>의 안정화선도를 이용하였다. 실험에 사용한 연료와 산화제의 유속 조건은 Table 1에 도시하였다. Case 1과 2, 4와 5는 각각 산화제의 유속을 2배 증가시켜 유속차이가 화염소화농도에 미치는 영향을 알아보았다.

### 3. 수치해석

수치해석을 통해 실험결과를 비교하고 여러 불활성기체의 소화농도를 예측하기 위해 WSR 모델을 도입하였다. WSR모델에서는 정상상태를 가정하였고 CHEMKIN 3.0의 PSR 코드를 이용하였다<sup>7)</sup>. 이 조건에서 방정식은 식 (1)과 (2)의 대수방정식으로 간략화된다.

$$\dot{m}(Y_k - Y_k^*) - \dot{\omega}_k W_k V = 0 \tag{1}$$

$$\dot{m} \sum_{k=1}^K (Y_k h_k - Y_k^* h_k^*) + Q = 0 \tag{2}$$

여기서  $\dot{m}$ 은 질량유량,  $Y_k$ 는  $K$  화학종의 질량분율,  $\dot{\omega}_k$ 는 화학종의 몰생성율(molar production rate),  $W_k$ 는 화학종의 분자량,  $V$ 는 체적을 의미한다.  $h_k$ 는 화학종의 단위질량당 엔탈피(specific enthalpy)이고,  $Q$ 는 반응로의 외부 열손실을 의미하는데 본 연구

에서는 단열조건이라 가정하여  $Q=0$ 으로 가정하였다. 그리고 상첨자 (\*)은 입구조건을 의미한다. 반응로에서의 체류시간,  $\tau$ 는 식 (3)으로 정의되는데 혼합기의 체류시간이 매우 크면 평형상태로 간주될 수 있다.

$$\tau = \rho V / \dot{m} \tag{3}$$

화학반응에 사용한 상세 반응기구는 GRI 3.0를 이용하였다<sup>8)</sup>. 이 반응기구는 비록 메탄/공기의 산화반응에 최적화되어 있지만, 본 연구에서 사용된 에틸렌에 대해서 온도비교만을 목적으로 하기 때문에 검증없이 사용되었다.

WSR에서 불활성기체의 농도를 변화시킬 때 화염소화 여부를 결정하기 위해서는 판단조건이 필요하다. 본 연구에서는 정상상태에서 확산화염면은 완전화학반응으로 연소된다는 가정과 화염안정화에 요구되는 최소온도가 존재한다는 두 가지의 가정을 도입하였다. 이 때 기준 최소 화염안정화 온도는 질소로 희석된 산화제의 실험결과를 사용하였고, 다른 불활성기체의 경우에도 이 온도를 기준으로 하여 화염소화를 결정하였다. 또한 사용된 여러 기체에 대해 체류시간에 대한 온도변화를 계산해 본 결과 100s 이상에서는 온도가 더 이상 증가하지 않는 평형상태를 얻을 수 있어, 이 시간으로 고정시켜 계산하였다.

기존 MEC 예측방법<sup>5)</sup>과는 화염소화조건을 WSR의 체류시간을 최소안정화 온도로 사용한 것에 차이점이 있으며, 수정된 새로운 방법은 향후 체류시간을 독립적인 변수로 만들어 유효효과의 모사가 가능할 수 있을 것으로 기대된다.

### 4. 결과 및 고찰

Fig. 4는 불활성기체의 첨가에 의한 산소농도 감소에 따른 일반적인 화염 형상의 사진이다. 불활성기체의 농도가 증가할수록 화염은 부상되고 최종에

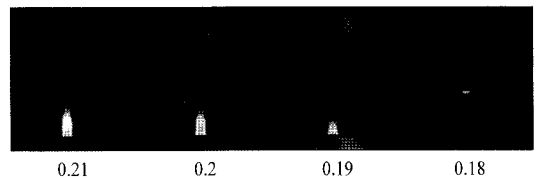


Fig. 4. Flame direct photos as decreasing oxygen mole fraction,  $X_{O_2}$ , in oxidizer stream.

Table 2. Critical oxygen mole fraction at extinction limit

Cases	N <sub>2</sub>	Ar	CO <sub>2</sub>
1	0.143	0.091	0.21
2	0.154	0.108	0.222
3	0.143	0.095	0.182
4	0.179	0.111	0.238
5	0.189	0.125	0.25
6	0.167	0.1	0.21

는 화염날림(blow-off)을 통해 화염소화가 발생함을 확인할 수 있다. 이러한 소화현상은 컵버너 화염에서 주위 산화제의 농도가 낮아질 때 발생하는 소화기구인 화염날림 현상과 동일하므로<sup>9)</sup>, 산소농도 감소에 대해 컵버너와 제트화산화염 모두 동일한 물리적 소화기구를 갖는다고 할 수 있다.

Table 2에는 여러 유속조건에서 불활성기체들의 소염농도를 나타내었다. Case 1과 2, Case 4와 5를 각각 살펴보면 연료와 산화제의 유속에 따른 소염농도의 차이를 볼 수 있다. 두 가지의 버너 형태에서 산화제의 유속이 2배가 증가했지만 소화시 산소농도는 증가는 7% 미만이다. 따라서 같은 형태의 화염에서는 유속 증가가 소화농도에는 비교적 작은 영향을 미치는 것으로 보인다. 하지만, NDF와 IDF의 결과는 큰 차이가 존재함을 볼 수 있으므로 버너의 형태에 따라서는 차이가 매우 큼을 알 수 있다. 한편, 불활성기체의 종류에 따른 화염소화농도를 살펴보면 기존의 연구에서와 같이 불활성기체의 비열에 매우 큰 영향을 받는 것으로 나타났고, 비열이 가장 큰 CO<sub>2</sub>의 소화능력이 가장 우수하다고 할 수 있다.

Table 3에는 WSR를 이용하여 예측된 소염농도를 나타내었다. 실험결과와 비교하면 Case 1의 결과와 소화농도가 매우 유사한데, 이는 사용한 모델이 적절한 유량범위의 NDF 모사에 보다 적합함을 의미한다. 한편 불활성 기체의 화학적 효과를 알아보기 위해 CO<sub>2</sub>의 경우에 물성치는 같고 화학반응이 없는 경우를 가정한 순수한 물리적 소화약제 특성을 계산하여 Table 3에 도시하였다. 화학적 효과를 배제한 경우의 예측된 소염 산소농도는 21.2%로서 실제 값과 비교하여 약 0.6%의 감소를 보이고 있다. 이것은 CO<sub>2</sub>가 열분해 되기 위한 특정온도에 도달하지 못했거나, CO<sub>2</sub>의 화학적 효과가 비교적 작기 때문인 것으로 판단할 수 있는데 전체적으로 CO<sub>2</sub>의 화염소화에 대한 화학적 효과는 그리 크지 않음을 알 수 있다.

Table 3. Predicted oxygen mole fraction at flame extinction with various inert gases

	N <sub>2</sub>	Ar	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2,NR</sub>
XO <sub>2,pred</sub>	0.142	0.095	0.218	0.212

Table 4. Comparison of MEC

This work	NIST <sup>10)</sup>	Saito et al. <sup>3)</sup>	Senecal et al. <sup>4)</sup>	Liu et al. <sup>5)</sup>
31.9	32.0	33.6	31.9	32.4

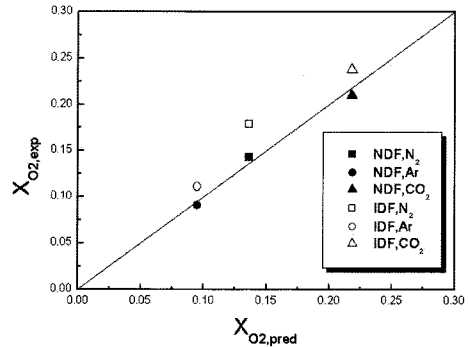


Fig. 5. Comparison of measurement and prediction values on flame extinction concentration.

두 가지 형태의 화산제트화염에서 실험된 소염농도의 타당성을 검토하기 위해 기존의 컵버너 실험에서 조사된 N<sub>2</sub>의 MEC 값<sup>13-5,10)</sup>과 본 연구의 Case 1 결과를 Table 4에 나타내었고 매우 유사함을 볼 수 있다. 컵버너를 통한 MEC는 공기에 대한 불활성기체의 농도를 나타내므로 본 연구와 직접적인 비교는 질소의 경우만 가능하다. NDF의 소염농도가 기존의 컵버너 실험결과와 잘 일치하는 이유는 컵버너 화염은 NDF의 기하학적 특성을 가지고 있기 때문으로 판단된다. 따라서 제트화산화염버너를 사용하여 MEC를 측정하는 것이 가능하다고 판단된다.

Fig. 5에 두 가지 형태 버너에서의 가장 안정된 화염의 실험값(Case 1과 Case 4)과 계산된 예측값을 도시하였다. 앞에서 언급한 바와 같이 NDF의 경우에 보다 일치되는 결과를 얻을 수 있었고, IDF은 전체적으로 계산값이 실험값보다 높은 소염농도의 예측결과를 얻을 수 있다. 이것은 소염농도가 화염의 형상과 산화제/연료유속에 따라 달라지기 때문으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구의 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 제트화염으로부터 기존의 컵버너 결과와 매우 유사한 불활성기체의 소염농도를 얻었고, 불활성기체의 MEC를 결정하는데 제트화염버너 등의 다양한 화염을 이용할 수 있다.

2) 최소소화농도는 연료와 산화제의 유속 차이 뿐 아니라 화염의 형상에 따라 달라지므로 제트화염의 경우에는 유속효과를 고려하여야 한다.

3) WSR의 반응기구를 이용하여 소염온도를 구하고 이 값이 일정하다는 가정을 통해 구한 소염농도는 실험결과와 잘 일치되었다. 따라서 향후 화학반응효과가 있는 소화약제의 예측에도 사용될 수 있다.

4) CO<sub>2</sub>의 경우에 열분해에 의한 화학적 효과가 매우 작고 주된 소화특성은 물리적 효과이다.

**감사의 글 :** 이 논문은 2007년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2007-331-D00051).

### 참고문헌

- 1) "The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering", 3rd ed, NFPA, 2002.
- 2) NFPA 2001, "Standard on Clean Agent Fire Extinguishing System", 1996.
- 3) Naoshi Saito, Yoshio Ogawa, Yuko Saso, Chihong Liao, Ryuta Sakei, "Flame-Extinguishing Concentrations and Peak Concentrations of N<sub>2</sub>, Ar, CO<sub>2</sub> and their Mixtures for Hydrocarbon Fuels", Fire Safety Journal, Vol. 27, pp. 185~200, 1996.
- 4) J.A. Senecal, "Flame Extinguishing in the Cup-burner by Inert Gases", Fire Safety Journal, Vol. 40, pp. 579~591, 2005.
- 5) Shiling Liu, M.C. Soteriou, M.B. Colket, J.A. Senecal, "Determination of Cup-burner Extinguishing Concentration using the perfectly stirred Reactor Model", Fire Safety Journal, Vol. 43, pp. 589~597, 2008.
- 6) E.J. Lee, K.C. Oh, H.D. Shin, "Soot Formation in Inverse Diffusion Flames of Diluted Ethene", Fuel, Vol. 84, pp. 543~550, 2005.
- 7) R. J. Kee, F. M. Rupley, J. A. Miller, M. E. Coltrin, J. F. Grcar, E. Meeks, H. K. Moffat, A. E. Lutz, G. Dixon-Lewis, M. D. Smooke, J. Warnatz, G. H. Evans, R. S. Larson, R. E. Mitchell, L. R. Petzold, W. C. Reynolds, M. Caracotsios, W. E. Stewart, P. Glarborg, C. Wang, O. Adigum, The Chemkin Thermodynamic Databass, CHEMKIN Collection, Release 3.0, Reaction Design, Inc., San Diego, CA, 1997.
- 8) G. P. Smith, D. M. Golden, M. Frenklach, N. W. Moriarty, B. Eiteneer, M. Goldenberg, C. T. Bowman, R. K. Hanson, S. Song, W. C. Gardiner Jr., V. V. Lissiansky, Z. Qin, "GRI-Mech 3.0", [http://www.me.berkeley.edu/gri\\_mech/](http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/).
- 9) V. R. Katta, F. Takahashi, G. T. Linteris, "Suppression of Cup-burner Flames using Carbon Dioxide in Microgravity", Combustion and Flame, Vol. 137, pp. 506~522, 2004.
- 10) Grosshandler, W. L., Gann, R. G. & Pitts, W. M., eds, "Evaluation of Alternative In-flight Fire Suppressants for Full-scale Testing in Simulated Aircraft Engine Nacelles and Dry Bays", NIST SP 861, National Institute for Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 1994.