

# 헵탄 풀화재에서 불활성기체 소화농도

정태희 · 이의주<sup>†</sup>

부경대학교 안전공학과  
(2011. 10. 10. 접수 / 2012. 4. 30. 채택)

## Extinguishing Concentration of Inert Gases in Heptane Pool Fires

Taehee Jung · Euiju Lee<sup>†</sup>

Department of Safety Engineering, Pukyong National University  
(Received October 10, 2011 / Accepted April 30, 2012)

**Abstract :** The coflow velocity effect on the minimum extinguishing concentration(MEC) was investigated experimentally in heptane cup-burner flames. Various inert gases(N<sub>2</sub>, Ar, CO<sub>2</sub>, He) were added into the oxidizer to find the critical concentration and the effectiveness of the agents on flame extinction. The experimental results showed that the MECs were increased with increasing coflow velocity for most inert gases except helium, but the higher coflow velocity induced the lower burning rates of heptane. This indicated that the increase of coflow velocity resulted in the decrease of fuel velocity evaporated from fuel surface, and hence the stain rate on the reaction zone was also decreased. In the case of helium as a additive, the extinguishing concentration was independent of the coflow velocity because the heat conductivity was ten times larger than the other inert gases and flow effect by a strain rate might be compensated for heat loss to the surroundings.

**Key Words :** pool fire, cup burner, minimum extinguishing concentration(MEC), burning rate

### 1. 서론

가스계 소화약제의 대표적인 물질인 할론(halon)은 대부분의 화재에 적용할 수 있는 매우 효과적인 소화약제로 전 세계적으로 사용되어온 소화약제이다. 그러나 할로겐 화합물이 지구 대기의 오존층 파괴 물질로 알려짐에 따라 몬트리올정서에 의해 여러 선진국에서는 지난 1994년부터 생산을 전면 중단하였으며, 이 정서에 개발도상국에 가입한 국가들은 2010년까지 생산, 소비가 가능하게 되었다. 따라서 세계 각국에서는 할론을 대체할 새로운 소화약제를 개발하기 위하여 많은 노력과 개발연구가 이루어지고 있다. 할론 대체 소화약제는 할로카본(halocarbon)화합물과 불활성기체(inert gas)로 두 가지로 나누어지는데 불활성기체 소화약제인 IG-01, IG-55, IG-541 등은 현재 개발되어 사용되어지고 있다. 이들 소화약제의 구성성분은 대기 중에 존재하는 물질이어서 오존층파괴나 지구온난화에 미치는 악영향이 적고, 소화이후에도 독성이 높은 물질을 생성하지 않는

장점이 있다.

대체소화약제에 있어서 가장 중요시 되는 문제는 최소소화농도(MEC, minimum extinction concentration)를 측정하는 것이다. 이러한 소화농도의 측정방법으로는 여러 가지가 있지만, NFPA(National Fire Protect Association)<sup>2)</sup>, ISO(International Standard Organization) 등의 Fire Code에서는 컵버너(Cup-burner) 시험방법으로 소화농도를 측정하도록 규정하고 있다. 컵버너 장치는 1961년 Creiz가 제작한 장치가 가장 먼저 발표되었다<sup>3)</sup>. 하지만 이 장치는 기체를 연료로 사용하여 측정장치의 미세한 차이에 의해서도 큰 오차가 발생하는 단점이 있다. 또한, ICI의 Hirst와 Booth는 액체연료를 사용하여 컵버너 장치를 발표하였다<sup>4)</sup>. 이 장치에서 얻어진 소화농도의 결과값은 Creiz의 장치에 비해 재현성이 있고 오차가 적어 현재에도 가장 많이 사용되고 있는 방법이다. 하지만 액체 연료를 사용한 컵버너 시험장치에 측정된 소화농도는 연료의 흔들림이나 측정방법의 차이에 따라서 약간의 차이가 있을 수 있다. 화염소화는 주위환경에도 많은 영향을 받기 때문에 컵버너의 직경, 높이, 소화약제등을 달리 하여 정

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

확성을 높이기 위해 연구가 이루어졌다<sup>5)</sup>.

기존의 컵버너 실험은<sup>6-9)</sup> 다양한 소화약제의 소화농도 측정 및 해석에 관하여 많은 연구가 수행되었지만 화염소화에 관한 물리적 기구 및 산화제의 유속변화 효과에 대해서는 연구가 매우 제한적이었다. 이와 관련된 연구는 주로 컵버너에서 메탄과 같은 기체 연료를 사용하여 규명되었는데<sup>10-12)</sup>, 액체 연료의 경우 비균질 특성에 의해 액체연료 표면에서 증발하는 연료의 유량 등 물리적 기구가 기체연료보다 복잡한 특성이 있다. 따라서 본 연구에서는 불활성 가스 중 현재 불활성 기체 소화약제로 사용되고 있는 N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, Ar, He를 공기와 혼합하여 산화제의 전체 유속을 고정시킨 상태에서 조성 비율만을 변화시켜가며 화염소화농도를 측정하였고, 전체 유속 변화에 따라 유속이 화염의 최소소화농도에 미치는 영향을 고찰하였다.

## 2. 실험방법

본 연구에서는 각 유속에 대한 최소소화농도(MEC)를 알아보기 위하여 유속을 2 cm/s 간격으로 16 cm/s 까지 증가시켜가면서 실험을 하였다. 사용한 소화농도의 측정 장치는 NFPA 2001 Standard<sup>1)</sup>에서 발표한 장치를 참고하여 제작하였으며, 그 개도도는 Fig. 1에 나타내었다.

공기와 소화약제는 포말유량계(bubble meter)로 검증된 MFC(mass flow controller)를 사용하여 유량을 오차범위 ±1%미만으로 제어하였으며 측정 장치의 하부로 공급된다. 연료로는 헵탄(heptane)을 사용하였으며, level로 연료의 높이를 조절하여 연

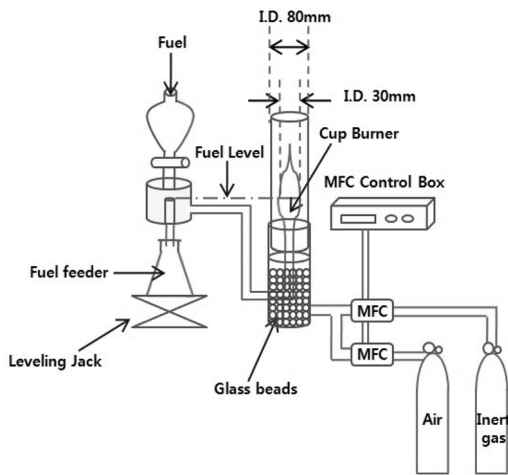


Fig. 1. Schematic of cup-burner and flow system.

료의 액위를 원하는 높이에 고정시켰다. 컵버너는 스테인레스스틸(stainless steel)로 제작되었으며, 내경은 30mm 이고 가장자리로 내부에는 45도의 경사가 있다. 유리관 하부에는 산화제의 유속을 유리관 내부 전 구배에 걸쳐 균일하게 하기 위하여 직경 3 mm의 유리구슬(glass bead)로 컵버너 높이의 약 1/3정도 채웠다.

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 소화약제의 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 일정한 수위를 유지하기 위해 만든 Fig. 1의 장치에서 일정 시간동안 공급되는 전체연료량에서 컵버너로 이동하지 못하고 밑으로 남은 연료량의 차이로부터 연소로 소모된 유량을 측정하였다.

## 3. 실험결과 및 토의

### 3.1. 주위류 유속에 따른 화염소화 농도

주위류의 산화제 유량을 고정시키고 소화약제의 몰분율을 변화시켜 가며 컵버너에서 생성되는 화염의 모양을 Fig. 2에 가시화 하였다. 그림에서 알 수 있듯이 소화약제의 유량이 증가함에 따라 초기에는 화염의 길이가 증가함을 알 수 있다. 이는 소화약제의 유량이 증가하면서 연소에 필요한

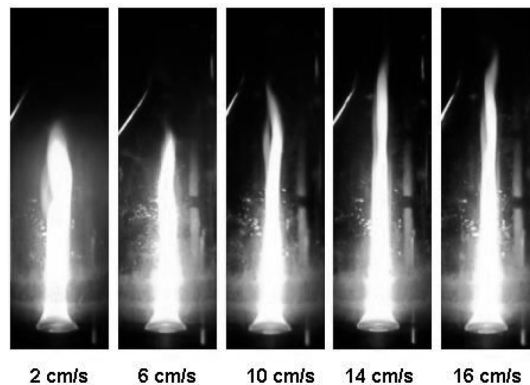


Fig. 2. Cup-burner flame shape with increasing the oxidizer velocity. The values of the picture indicates the air velocity.

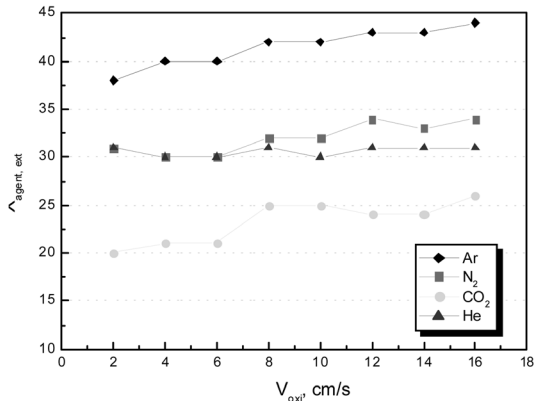


Fig. 3. Minimum extinguishing concentration with velocity in the cup-burner.

산소 농도 감소에 따른 현상이다. 소화약제의 유량을 더욱더 증가시키면 컵버너 가장자리로부터 화염이 부상되며, 청염의 길이가 증가되면서 결국에는 화염이 소화된다. 폴화재는 초기에는 컵버너 팁에 화염이 부착되어있지만, 소화농도에 가까워지면 컵버너 팁에서 약 2 mm 부상됨을 볼 수있다. 또한 주위류의 속도가 매우 큰 경우에는 부상 높이는 매우 증가한다.

산화제 전체유속을 증가시키면서 공기와 소화약제의 유량 조성을 변화하여 각 유속에 대해 측정된 최소소화농도 결과를 Fig. 3에 나타내었고, 그림에서 소화농도는 주위류의 공기에 대한 불활성기체의 부피비인 몰분율,  $X_{agent}$ 로 도시하였다.

기존의 연구결과<sup>4)</sup>에서는 확산화염에서의 소화약제의 소화농도는 산화제 유속의 증가에 따라 어느 지점까지 증가하다가 그 이후에는 유속이 증가해도 소화농도가 바뀌지 않는 “plateau region”이 있다고 보고되었고 그 유속영향이 없는 영역에서 standard의 속도를 결정하였다<sup>5)</sup>. 본 연구와 같은 산화제 유속에서 수행된 컵버너 결과는 가스계연료인 메탄의 경우에만 존재한다<sup>10)</sup>. 이 결과에 의하면 본 연구에서 사용한 산화제 속도범위에서는 He를 제외한 Ar,  $N_2$ ,  $CO_2$  등 모든 불활성가스에 대해서 소화농도가 바뀌지 않았다. He의 소화농도는 산화제 유속에 영향을 받지 않았고, 다른 모든 가스에 대해서는 산화제 유속이 증가 할수록 최소소화농도는 증가하였다. 이러한 상반되는 결과는 연료의 차이에 기인한다고 판단되며, 뒤에 보다 자세한 해석을 수행하였다.

불활성기체의 화염소화 과정은 연소가 중단되는 지점까지 산소 농도를 낮추는 희석효과와 활성화된 원자나 자유 라디칼이 형성되지 않은 지점까지

화염 온도를 낮추는 냉각효과로 주로 물리적 효과를 통하여 이루어진다<sup>6-8)</sup>. 이 때 열용량은 화염의 온도를 낮추는데 있어서 매우 중요한 역할을 한다. 소화농도는 낮을수록 소화능력이 우수하므로 본 연구결과 Fig. 3에서 나타났듯이 상대적인 저속의 산화제 유속에서는 다음과 같은 소화효과를 얻을 수 있다.

$$CO_2 > N_2 \approx He > Ar$$

하지만 높은 산화제 유속에서는 He의 소화능력이  $N_2$ 보다 약간 증가한다. 앞서 설명한 바와 같이 열용량이 크면 최소소화농도는 감소한다는 사실과 기존의 연구결과를 통하여 확인 할 수 있듯이<sup>9)</sup> 4가지의 불활성가스 중에서 열용량이 가장 큰 이산화탄소의 소화농도가 가장 우수하였다. 하지만 헬륨의 경우에는 열용량이 가장 낮은 반면에 소화농도가 두 번째로 우수하다. 이는 헬륨의 열전도도(thermal conductivity)가 나머지 소화약제들 보다 약 10배 정도 높기 때문이다<sup>12)</sup>. 다양한 기존 실험결과를 표 1에 정리하였다. 이 모든 실험은 약 3 cm/s의 산화제 유속에서 수행되었고, Fig. 1의 결과와 비교하면 오차범위 내에서 일치함을 볼 수 있다.

### 3.2. 불활성가스계 물리적 소화기구

컵버너에서 생성된 폴화재의 소화기구를 설명하기 위해서 기존연구는 각 소화약제의 소화되는 농도에서 비열을 비교한 방법과<sup>6-8)</sup> WSR(well-stirredreactor)를 이용하여 평형상태에서의 반응이 더 이상 지속되지 못하는 농도를 소화농도로 결정하는 방법론을<sup>9,13)</sup> 제시하였다. 본 연구에서는 산화제의 유속변화가 존재하므로 WSR 모델을 이용할 경우 산화제 속도변화를 모사할 수 있는 대한 모델링이 필요하다. 기존의 연구에서는 WSR의 변수인 체류시간(residence time),  $\tau$ 를 본 연구에서 사용한 변수인 산화제 유속과의 관계를 얻었다<sup>13)</sup>.

$$\tau \propto 1 / V_f V_{oxi}^{1/2} \quad (1)$$

식 (1)에서  $V_f$ 는 연료의 속도,  $V_{oxi}$ 는 산화제 속도를 의미한다. 가스연료와는 달리 액체연료는 화염의 특성에 따라 증발되는 연료의 속도가 바뀌는 특성

Table 1. Flame-extinguishing concentrations (%) for n-heptane cup-burner flames

Agent	NFPA <sup>3)</sup>	Sheinson et al. <sup>8)</sup>	Saito et al. <sup>6)</sup>
$N_2$	32	30	33.6
$CO_2$	23	21	22.0
He	31	-	-
Ar	41	41	43.3

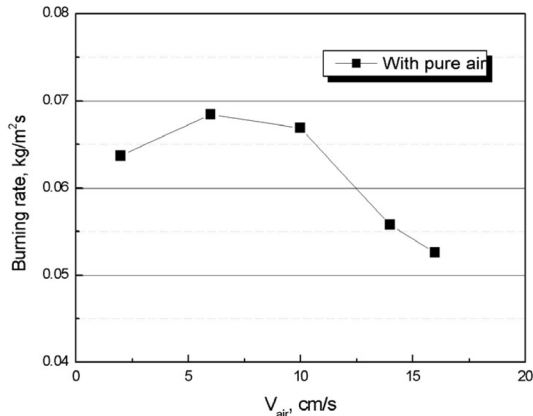


Fig. 4. Burning rate of heptane with coflow velocity of pure air in the cup-burner.

이 있다. 따라서 산화제의 유속에 따른 액체 연료의 속도변화를 예측하기 위해 풀화재의 연소소모율(burning rate)을 실험적으로 측정하였고 그 결과는 Fig. 4에 나타내었다.

공기를 산화제로 사용해 주위류의 속도를 변화시켰을 경우에는 Fig. 4와 같이 주위류 속도가 증가할수록 연료소모율은 감소함을 볼 수 있다. 이는 액체연료 표면에서의 증발량이 감소하는 것을 의미하므로 표면적이 일정한 본 풀화재에서는 연료증발 속도가 감소한다.

일반적으로 풀화재의 연속적인 연소를 위해서는 화염에서 액체연료 표면으로의 열량이 공급되어야 하고, 전도, 대류, 복사 등 모든 열전달 기구가 적용된다<sup>15-17)</sup>. 또한 다양한 연료소모율에 관한 연구결과<sup>16)</sup>로서 버너의 직경이 매우 작은 층류화염인 경우에는 전도의 효과가 가장 크고 직경이 커지면 난류화염으로서 복사의 효과가 가장 중요한 열전달 기구로 알려져 있다. 본 연구에 사용된 컵버너의 크기는 층류와 난류의 사이에 있는 천이지역에 있으므로 전도와 복사가 유사한 크기로 기여한다고 할 수 있다.

Fig. 5에 유속의 변화에 따른 화염높이를 도시하였다. 주위류 유속증가는 스트레인율의 버너근처의 화염의 반응성을 저하시키고 따라서 복사량을 감소시킨다. 또한 화염높이를 증가시키는데 이는 복사열 전달량이 거리의 제곱에 반비례함을 상기하면 후류의 화염은 액면에서의 증발에 상대적으로 큰 영향을 미치지 못한다고 할 수 있다.

결과적으로 유속의 증가는 연료의 증발을 저해하여 연료유속을 감소시키기 때문에 전체적인 스트레인율이 감소하여 화염소화가 지연된다고 할 수 있

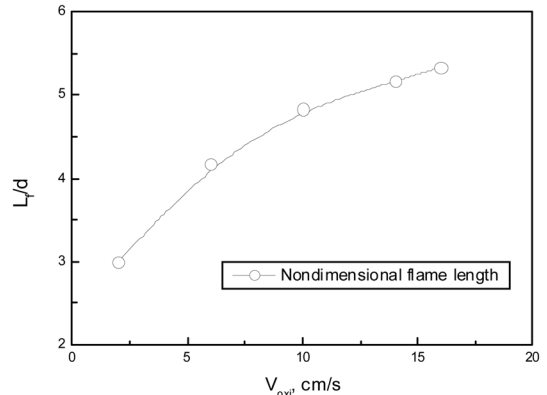


Fig. 5. Flame length according to oxidizer velocity in pure air.

다. 이러한 현상은 식 (1)을 통해서도 WSR 모델링에서 연료속도의 감소는 반응대에서의 전체 체류시간의 감소로 보다 활발한 연소가 가능하다. 이러한 현상은 기체연료에서는 적용되지 않는데 기체연료의 경우는 연료의 속도가 주위류인 산화제 속도와는 독립적인 변수이기 때문이다. 따라서 기체연료와 달리 풀화재 소화농도에서는 연료속도의 변화를 반드시 고려해 줘야한다.

Fig. 6에서는 산화제의 전체유속을 10 cm/s로 고정시킨뒤 공기와 질소의 몰분율을 변화에 따른 연료소모율을 도시하였다. 전체적인 경향은 순수 공기만을 사용했을 때와 같이 산화제 유속에 따라 선형적으로 감소하지만 연료의 질량소모량은 약 40% 감소한다. 이는 주위류에 질소를 희석하였을 때는 화염의 온도가 상대적으로 낮아 화염에서 연료표면으로 피드백되는 열전달량이 감소하고 이에 따라 증발하는 연료량이 감소한다고 볼 수 있다. 이 결과를 Fig.

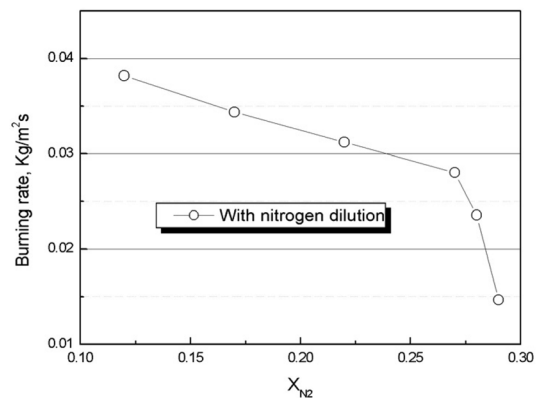


Fig. 6. Burning rate of heptane with coflow velocity of air/nitrogen mixture in the cup-burner. The oxidizer velocity was fixed at 10 cm/s.

4와 비교하여보면 산화제의 유속증가는 불활성기체의 물분율을 증가시키는 경우와 유사하게 연료소모율을 감소시키는 작용을 한다. 이는 유체역학적 영향과 산화제 화학적 조성의 변화가 액면으로의 열전달율을 변화시키고 궁극적으로는 액체 표면에서 증발하는 연료의 양을 조절한다고 할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, Ar, He 등 다양한 불활성가스의 산화제 유속 변화에 따른 소화농도 특성을 컵버너에서 형성된 풀화재에서 검토하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 헬륨을 제외하고는 모든 불활성 기체의 최소 소화농도는 산화제 주위류의 속도가 증가할수록 커지는 경향을 보인다.

2) 불활성기체의 소화는 열용량에 많은 영향을 받아서 사용된 소화약제중 열용량이 가장 큰 이산화탄소가 우수하였다. 헬륨은 다른 소화약제들 보다 더 열전도도가 10배 이상 높기 때문에 열용량이 낮음에도 불구하고 소화성능이 우수하다.

3) 산화제의 유속 증가는 연료소모율을 감소시켜 액체표면에서 증발되는 연료속도를 감소시킨다. 따라서 산화제의 유속증가에 따른 MEC 증가효과는 연료속도 감소에 기인한 전체 스트레인의 감소때문으로 설명할 수 있다.

4) 산화제의 불활성기체 물분율을 증가시키는 경우는 유속증가와 유사하게 연료소모율을 감소시키는 작용을 한다. 이는 유체역학적 영향과 산화제 화학적 조성의 변화가 액면으로의 열전달율을 변화시키고 궁극적으로는 액체 표면에서 증발하는 연료의 양을 조절한다.

**감사의 글 :** 이 논문은 2010학년도 부경대학교의 지원을 받아 수행된 연구임(PK-2010-082)

#### 참고문헌

- 1) T. R. Barfknecht, "Toxicology of Soot", Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 9, pp. 199-237, 1983.
- 2) Anon, "Standard on Clean Agent Fire Extinguishing System", National Fire Protection Agency (NFPA 2001), Quincy, MA, 2000.
- 3) E. C. Creitz, "Inhibition of Diffusion Flames by Methyl Bromide and Trifluoromethyl Bromide Applied to

- the Fuel and Oxygen Sides of the Reaction Zone", J. Res. NBS(US), Vol. 65A, No. 4, pp. 389, 1961.
- 4) R. Hirst, and K. Booth, "Measurement of Flame-Extinguishing Concentrations", Fire Tech., Vol. 13, No. 4, pp. 296, 1977.
- 5) T. A. Moore, A. Martinez, R. E. Tapscott, "Comparison of the NMERI and ICI-style Cup-burners", Proceedings of the 6th Halon Options Technical Working Conference (HOTWC-97), Albuquerque, NM, pp. 388-395, 1997.
- 6) N. Saito, Y. Ogawa, Y. Saso, C. Liao, R. 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.
- 7) J. A. Senecal, "Flame extinguishing in The Cup-burner by Inert Gases", Fire Safety Journal, vol. 40, pp. 579-591, 2005.
- 8) R. S. Sheinson, J. E. Penner-Hahn, D. Indritz, "The Physical and Chemical Action of Fire Suppressants", Fire Safety Journal, Vol. 15, pp. 437-450, 1989.
- 9) S. 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.
- 10) F. Takahashi, G. T. Linteris, V. R. Katta, "Extinguishment Mechanisms of Coflow Diffusion Flames in a Cup-burner Apparatus", Proceeding of Combustion Institute, Vol. 31 pp. 2721-2729, 2007.
- 11) 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.
- 12) V. R. Katta, F. Takahashi, G. T. Linteris, "Fire-suppression Characteristics of CF<sub>3</sub>H in a Cup Burner", Combustion and Flame, Vol. 144, pp. 645-661, 2006.
- 13) R. J. Kee, F. M. Rupley, J. A. Miller, "CHEMKIN-II, A FORTRAN Chemical Kinetics Package for The Analysis of Gas-phase Chemical Kinetics", Sandia Report SAND89-8009B, 1991.
- 14) J. H. Ji, E. J. Lee, "The Effect of Coflow Velocity on The Flame Extinguishing Concentration of Inert Gas in Jet Diffusion Flames", 8th Asia-Pacific Conference on combustion(ASPACC), India, pp. 1252-1257, 2010.
- 15) A. Nakakuki, "Heat Transfer in Hot-zone-forming Pool Fires, Combustion and Flame", Vol. 109, pp. 353-369, 1997.

- 16) M. Klassen, J. P. Gore, Y. R. Sivathanu, A. Hamins, T. Kashiwagi, "Radiative Heat Feedback in a Toluene Pool Fire", *Proceeding of Combustion Institute*, Vol. 24, pp. 1713~1719, 1992.
- 17) P. Joulain, "The Behavior of Pool Fires: State of The Art and New Insights", *Proceeding of Combustion Institute*, Vol. 27, pp. 2691~2706, 1998.