

## 반밀폐 연소공간 내 동축관 형상에 따른 DME-공기 확산화염의 안정화 특성

김 고 태\* · 김 남 일†

(2009년 8월 5일 접수, 2009년 9월 30일 수정, 2009년 10월 6일 심사완료)

### Stabilization Characteristics of DME-Air Diffusion Flames Depending on the Configuration of the Fuel-Air Tubes in Half Closed Combustion Spaces

Go Tae Kim and Nam Il Kim

**Key Words :** Coaxial Diffusion Flame(동축분류 확산화염), DME, Flame Stabilization(화염안정화), Schmidt Number(슈미트 수), Half Closed Combustor(반밀폐 연소기)

#### Abstract

The effects of configuration of fuel and air tubes on the flame stabilization were experimentally investigated in half-closed combustors. Flame behaviors and stabilities of methane, propane, and DME flames were compared by changing tube diameters and the locations of the fuel and air tubes. It was found that flammability limits are significantly affected by the outlet boundary condition, which disturbs compositions of burned and unburned mixtures near the flame base. And it was found that there exist critical inner tube heights, over which flame stability is determined only by the fuel flow rate. Conclusively, flame stabilization is governed by the flame propagation velocity in an ordinary mixing flow and the non-uniform mixture concentration in the combustion space which is affected by flow recirculation and the combustor configuration. The compositions of NO<sub>x</sub> and CO were compared to know basic characteristics of methane, propane, and DME flames.

---

#### 기호설명

$D_1$	: 내관 내경
$D_2$	: 중관 내경
$D_3$	: 외관 내경
$H_1$	: 출구로부터 화염까지의 거리
$h$	: 연료노즐과 공기노즐사이의 거리
$\nu_1$	: 동점성계수
$\mathcal{D}$	: 물질확산계수
$Sc_1$	: 슈미트 수( $=\nu/\mathcal{D}$ )
$Q_{f1}$	: 연료유량

#### 1. 서론

최근의 급증하는 에너지 수요와 세계 경제의 불확실성은 화석 연료의 한정성과 연계하여 유가 불안정성을 증대시키고 있다. 에너지 시장의 불안정에 대비하고 에너지 안보 확보를 위해 전세계적으로 다양한 에너지 자원의 활용에 대한 관심이 증대되고 있다. 이러한 분위기 속에서 바이오 메스 및 비교적 풍부한 석탄이나 천연가스 등의 자원을 이용한 각종 합성연료의 활용의 중요성이 대두되고 있으며, 특히 합성연료 중에서도 LPG(liquid petroleum gas)와 유사하게 상온의 비교적 낮은 압력에서 액화가 가능하고 생성물의 청정성이 뛰어난 DME(dimethyl ether)에 대한 관심이 크게 증가하였다.

---

† 책임저자, 회원, 중앙대학교 기계공학부  
E-mail : nikim@cau.ac.kr  
TEL : (02)820-5753 FAX : (02)825-5753

\* 중앙대학교 기계공학부 대학원

---

Table 1 Parameters of some pure gaseous fuels<sup>(1,2)</sup>

Fuel	Range of flammability limit (volume)	Stoichiometric Air-fuel ratio (volume)	Schmidt number (Sc)	Maximum burning velocity (cm/s)
Methane	5~15%	9.52	0.704	37
Propane	2.1~9.4%	23.8	1.376	43
DME	3.4~17%	14.28	1.15	50

현재까지의 DME 연구는 대부분 제조 기술 및 수송 기술에 집중되어 왔으며, DME의 응용기술에 대해서는 발전설비 및 자동차 부분에 대해 제한적으로 연구가 이루어졌다. 따라서 DME 연료의 기본 연소 특성에 대한 연구는 상대적으로 부족하였으며 이에 대한 연구는 비교적 최근인 2005년 이후에 주로 수행되었다.<sup>(1)</sup>

국외에서는 NASA 등의 지원을 통해 2005년 이후 정적연소기를 이용한 DME 연소 실험을 수행한 바가 있다.<sup>(2,3)</sup> 일본에서는 보다 실용적인 관점에서 보일러 및 산업용 DME 버너의 설계 기술에 관한 연구를 수행하였다.<sup>(4)</sup> 국내에서는 DME 연료의 점화 및 연소 특성에 대한 수치해석 연구가 수행된 바 있으며,<sup>(5)</sup> 연소과정에서 발생하는 질소 산화물의 저감을 위한 기초 연구와 대항류 화염에서의 연소 특성에 대한 연구도 이루어진 바 있다.<sup>(6)</sup>

하지만, DME 화염의 열유동 불안정성에 대한 연구는 상대적으로 부족하였다. 특히, DME 화염은 낮은 점화온도와 상대적으로 높은 화염 전파속도를 가지고 있어서 화염의 안정화 특성이 DME 활용의 주 대상이 되는 천연가스나 LPG와 확연히 다를 수 있다고 판단된다. 따라서 DME 화염의 안정화 특성을 이해하는 것은 DME 연료의 다양한 적용을 위한 기본적인 요구이다. 이에 대한 기초연구로서 일반적인 연소기의 가장 기본적인 형태로 한쪽 면이 닫히고 반대쪽이 열린 반밀폐 구조 내에서의 화염의 안정화에 대한 연구를 수행하고자 한다.

동축류 확산화염에 대한 고전적인 연구로서 Burke & Schumann은 좁은 공간의 동축류에서의 확산화염의 특징을 보여주었다.<sup>(7)</sup> 그 연구는 내부 동축관을 통해 연료를 공급하고 바깥쪽 관을 통해 산화제를 공급하여 화염의 특성을 보는 것이다. 충분한 산화제의 공급이 있다면 화염은 원추모양의 안정된 확산화염을 보여주지만 산화제가 부족할 때에는 화염의 끝이 연료노즐의 가장자리에 붙어있는 현상을 나타낸다. 그런데, 유한한 길이를 가지는 연소기의 경우 출구로부터의 산화제의 확산 및 대류에 의한 유입 효과가 화염의 안정화에 영향을 미칠 수 있을 것으로 예상되는데, 이에 대한 실험적인 평가가 부족하였다. 따라서 밀폐단쪽의 동축관을 통한 산화제의 공급을 차단한 극단적인 조건에 대해 화염의 안정성을 실험함으로써 그 영향을 평가할 수 있을 것으로 기대된다.

동축관을 통한 산화제의 공급이 없으면 반밀폐 공간에 존재하는 산화제는 모두 외부에서 유입된다. 따라서 산화제의 농도는 관 출구의 농도가 가장 높고 관 아래로 갈수록 산화제의 농도는 낮아진다. 이러한 현상으로 인하여 화염 안정화는 출구쪽으로부터 확산 혹은 재순환된 유동에 의해 영향을 받게 되는데, 유체의 확산에 대한 스테판의 문제(Stefan problem)와 유사한 특성을 가진다.<sup>(8)</sup> 스테판 문제는 관 내부에 있는 액체의 계면에서 증발된 물질이 관 입구까지 높이에 따른 확산에 대해 설명하고 있다. 스테판의 문제에서 설명하는 것과 같이 출구에서는 산화제의 농도가 높으므로 확산이 급격하게 이루어지고, 아래쪽으로 갈수록 선형적으로 비례하여 줄어들 것이다. 그렇게 되면 연소공간 전체의 공간과 연료노즐의 상대적인 위치(H의 길이)에 따라 가연한계영역이 급격하게 변화하는 부분과 선형적으로 변화하는 영역이 있을 것이라고 예상된다.

화염 부상에 대한 기존의 이론<sup>(9)</sup>에 의하면 슈미트 수(Schmidt number)에 따라 화염은 부상한 형태로 안정화되거나 부상하지 않는 것이 알려져 있다. 슈미트 수는  $\nu/\mathcal{D}$ 로 표시하며( $\nu$ : 동점성계수,  $\mathcal{D}$ : 물질확산계수), 물질이 유체 속을 이동할 때, 확산과 점성에 대한 물질의 고유한 성질을 나타내주는 무차원수이다. 슈미트 수가 1보다 크면 화염이 부상하는 조건이 된다. Table 1에 나타난 바와 같이 슈미트 수가 1보다 큰 프로판과 DME는 연료의 유량이 증가하면 화염의 안정적인 부상이 나타나지만, 슈미트 수가 1보다 작은 메탄의 경우는 연료의 유량이 증가하게 되면 화염의 안정적인 부상없이 날림이 발생하게 된다. 하지만 반밀폐 공간에서는 메탄 같이 그 자체로는 부상 않는 화염이 유동 재순환 등의 이유로 부상하기도 한다. 이러한 특징들은 연소기를 설계할 때 연소공간 하부의 농도 특성이나 유동 특성에 의해 화염의 안정화가 영향을 받음을 의미한다. 따라서 연소공간의 크기와 동축관 내부에 화염이 연소하는 위치에 따라서도 화염의 안정화에 영향을 줄 것이라고 예상된다.

따라서 본 연구에서는 반밀폐 공간을 형성하는 동축관 연소기의 형상에 따라 확산화염 안정화 특성을 고찰하였다. 연소기의 형상을 결정하는 실험 변수로 외관과 연료 분출을 위한 내관의 직경과

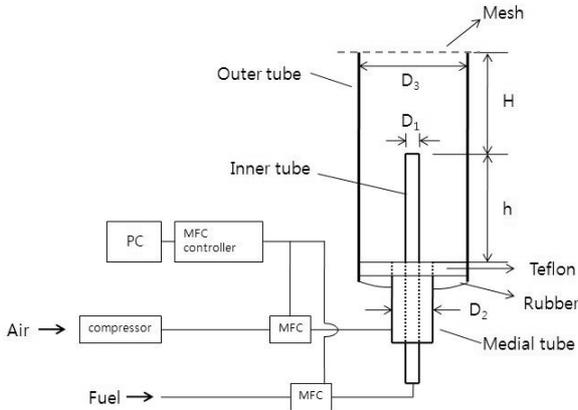


Fig. 1 An experimental setup

위치를 선택하였으며, 추가로 각각의 화염의 연소 가스의 특성을 비교하였다. 메탄, 프로판, DME 3 가지의 연료를 사용하여 연료에 따른 화염 안정화 특성을 비교 실험 하였다.

## 2. 실험 장치

반밀폐 연소공간에서의 DME 화염 특성 비교를 위한 실험장치를 Fig. 1 에 나타내었다. 외관은 파이렉스(Pyrex)로 제작되었고, 내관과 중관은 스테인리스로 제작 되었다. 실험은 일정한 직경  $D_2$  의 중관을 통해 공기를 공급하는 조건과 공급 않는 조건, 내관직경  $D_1$  과 외관직경  $D_3$  의 길이, 외관 출구와 화염과의 거리  $H$ , 화염과 밀폐 단면거리  $h$  의 길이를 바꾸며 행해졌다.

내관과 중관은 위 아래로 움직이며 길이를 조절할 수 있다. 외관은 전체 높이가 500mm 이고, 가스와 공기를 완전발달 시키기 위해 중관은 400mm, 내관은 700mm 를 사용하였고, 칸탈선을 이용한 점화방식을 사용하였다. 외관을 반밀폐로 만들기 위해 아래 쪽에 테프론(Teflon) 원형 디스크를 이용해 평면을 만들었으며 그 아래에 고무막을 사용하여 관의 입구를 막음으로써 기밀을 보장하였다. 출구에서 확산 및 대류에 의한 화염의 영향을 평가하기 위해 연소공간의 출구 위치에서의 철망(mesh) 장착 여부에 따른 화염 거동을 비교하였다. 사용된 철망의 격자 크기는 1mm X 1mm 를 이용하였다.

연료 및 공기는 MFC(mass flow controller)를 이용해 공급했으며 그 유량은 건식가스미터를 이용하여 보정하였다. 공기는 압축공기를 사용 하였으며, 연료로 사용된 메탄, 프로판, DME 는 모두 99.99% 이상의 고순도 가스를 이용하였다. 주요 연소가스의 성분을 분석하기 위해 Testo 330 을 이용하였으며, 화염의 사진촬영은 Nikon D50 을 사용하였다.

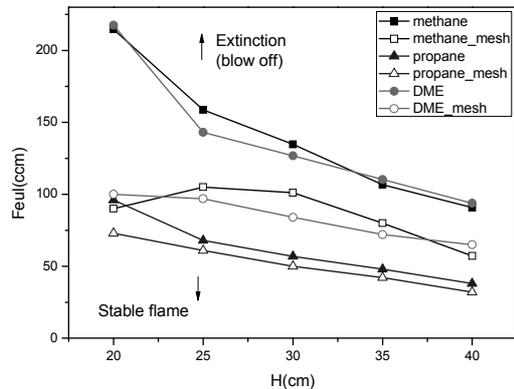


Fig. 2 Comparison between with a mesh and without a mesh at the outlet of the combustion space ( $D_1=4.5\text{mm}$ ,  $D_3=60\text{mm}$ ,  $H=200\sim 400\text{mm}$ , a grid size of mesh : 1mm x 1mm)

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 공기 공급이 없는 경우의 화염 안정화

중관을 통한 공기의 공급이 없는 경우에는 노즐에서 나온 연료가 외부의 산화제와 만나 확산화염을 생성하게 될 것이며, 이러한 조건에서도 확산화염면은 이론혼합비 조건을 따라 생성될 것이다. 이처럼 공기 공급이 없는 조건은 반밀폐 공간에 형성된 화염이 외부조건에 의해 영향을 받는 극단적인 상황을 모사하므로 연소기 설계의 기본 자료가 될 수 있을 것이다.

출구로부터의 산화제 유입이 화염의 가연한계에 미치는 영향을 실험하기 위해 내관과 출구거리  $H$  를 변화시키며 화염의 안정화 영역을 구한 결과를 Fig. 2 에 보였다. 실험은  $D_1=4.5\text{mm}$ ,  $D_3=60\text{mm}$ ,  $H=200\sim 400\text{mm}$  로  $h$  의 길이가 줄어들며  $H$  의 길이를 늘리는 방법으로  $H$  를 변화시켰으며, 중관을 통한 추가적인 공기의 공급이 없는 경우에 대해 메탄, 프로판, DME 세 가지 연료를 비교하였다. 전체적으로 일정한 거리  $H$  에 대해서 연료유량이 낮은 조건에서는 화염이 안정적으로 존재하였으나 연료유량증가에 따라 화염의 날림이 발생하였다. 세 종류의 연료에서 공통적으로  $H$  가 감소함에 따라 가연한계영역이 증가하다가 250mm 보다 짧은 영역에서는 더욱 급격히 증가하게 되는 것을 볼 수 있다. 일반적인 확산화염과 같이 개방된 외기 중에 형성되어 충분한 산화제가 있는 조건에서는 화염 선단의 연료농도 구배와 국부적인 유체속도의 균형에 근거해 화염의 부상 및 날림을 설명할 수 있을 것이다. 하지만 본 실험과 같이 상대적으로 긴 반밀폐 공간에 형성된 화염의 경우에는 앞서 스테판의 문제에서 언급했던 것과 같이 연료노즐과 공기의 농도가 높은 출구 사이의 거리  $H$  가 감소함에 따라 화염 선단 주위의 산화제의 양이 증가함으로써 화염의 가연한계가 급격히 증

가하게 됨을 유추할 수 있다.

프로판, DME의 소화영역에서 나타나는 특징으로는 같은 실험 조건에서 프로판의 가연한계가 나머지 연료보다 적게 나타나고, DME의 가연영역이 가장 넓게 나타난다. 이것은 반밀폐라는 공간적인 특성에 의한 결과로 보인다. 산화제의 공급이 외관의 출구에서 확산에 의해 제한적으로 이루어지는 경우에는 같은 연료 유량 조건에서 프로판이 가장 많은 산화제의 유입을 필요로 하므로 가연한계영역이 가장 적으며, 반대로 메탄이 가장 적은 산화제 유입 유량을 필요로 하므로 메탄의 가연한계영역이 넓게 나타난다.

외부로부터의 산화제 확산 특성을 변화 시키기 위해 연소공간의 출구에 철망을 설치하여 외부로부터 들어오는 공기의 대류와 확산을 방해하게 되면, 전체적인 가연한계의 특성은 철망이 없는 경우와 유사하지만 철망이 없을 때의 실험 결과에 비해 가연한계가 절반 정도로 줄어드는 것을 알 수 있다. 특히, 메탄 화염의 가연한계는 프로판이나 DME와 달리 H가 250mm보다 짧은 영역에서 더욱 급격히 감소하는 차이점을 관찰할 수 있다. 메탄 연료의 비중은 프로판과 DME에 비해 상대적으로 낮아서 공기 중에서 연료 유동의 상승 속도가 상대적으로 크며, 그 결과 주위 공기의 유입이 상대적으로 활발히 발생할 것이다. 그런데, 출구에 철망을 둘 경우 이러한 부력의 효과 감소가 상대적으로 클 것으로 예상되며 메탄의 좁은 가연한계와 높은 확산을 고려할 때 노즐 근처의 화염이 보다 쉽게 가연 범위를 벗어날 수 있다는 점에서 타 연료와의 차이점을 설명할 수 있을 것이다.

이처럼 관 내부에 있는 화염의 가연한계가 연소기 출구로부터의 확산의 영향을 지배적으로 받으므로 공기의 확산이 발생하는 단면적의 넓이에 따라라도 화염 안정화에 영향을 받을 것으로 판단된다. 따라서, 외관의 출구 넓이에 따른 화염의 가연한계의 영향을 알아보기 위한 실험결과가 Fig. 3

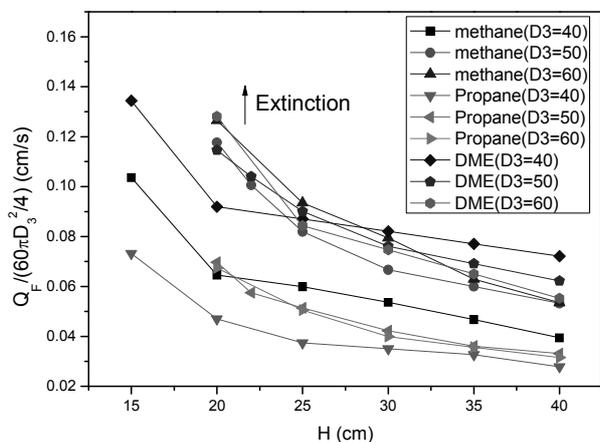


Fig. 3 Flammability limits with the variation of  $D_3$  ( $D_1=4.5\text{mm}$ ,  $H=150\sim 400\text{mm}$ )

이다. 외관의 지름이 증가할수록 관 내부에 있는 화염의 가연한계가 커지게 되고 가연한계가 급격하게 변하는 H의 위치가 상대적으로 길어짐을 알 수 있었다. 연료 유량과 단면적의 관계를 살펴보기 위해 연료 유량을 출구 단면적으로 나눈  $Q_F / (60 \pi D_3^2 / 4)$  값을 사용하였다. 이러한 변수는 출구에서의 연료의 평균 유속에 해당하며 외부로부터 산화제가 확산되어 유입되기 위해서는 해당 속도보다 큰 확산속도가 요구될 것이다. 외관의 직경이 40mm인 조건에서는 가연한계의 범위가 많은 차이를 보이는 반면 직경이 50mm, 60mm인 조건에서는 메탄과 DME는 유사한 소화 조건을 가지는 것을 알 수 있으며, 프로판의 경우 상대적으로 낮은 속도 조건에서 소화가 발생했다.

이러한 결과는 앞서 언급한 바와 같이 연소기 출구에서의 유속 패턴의 특성과 연관이 있는 것으로 생각된다. Fig. 4(a)와 같이 출구에 철망이 없는 경우에는 연료 노즐 및 화염 후류에서의 대류 현상에 의한 외부로부터의 산화제 유입이 상대적으로 증가하여 화염의 안정화 범위가 넓어지는 것으로 생각된다. Fig. 4(b)와 같이 연료 노즐과 연소기 끝단의 거리가 증가함에 따라 연소공간 내부에서 충분한 유속 발달이 이루어져서 출구에서의 재순환 영역이 상대적으로 억제되면 전체 연소공간 내에서의 산화제 분포가 급격히 감소하여 가연한계 역시 급격히 감소할 것을 알 수 있다. 마찬가지로 Fig. 4(c)와 같이 출구에 철망을 설치할 경우에는 짧은 출구 길이 H에 대해서도 철망으로 인한 유동 균일화를 통해 출구에서의 유동 재순환이 상당히 억제되어 산화제의 유입이 방해되고 그로 인해 가연 조건이 상대적으로 감소할 것을 예상할 수 있다. 지금까지 외관의 직경과 연료 노즐의 위치로 결정되는 연소공간의 크기에 대한 메탄화염의 안정화 특성을 살펴보았다. 이러한 특성은 연소 공간 내에서의 외부로부터의 산화제유입의 특

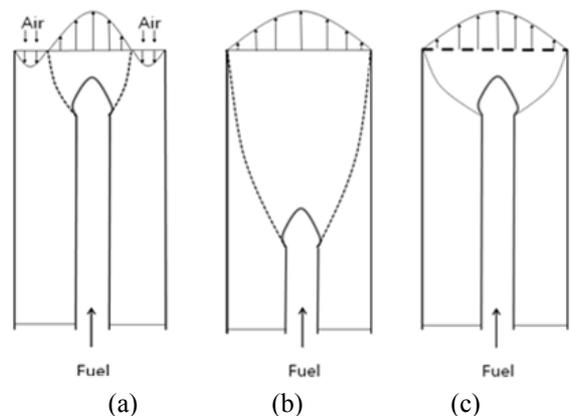
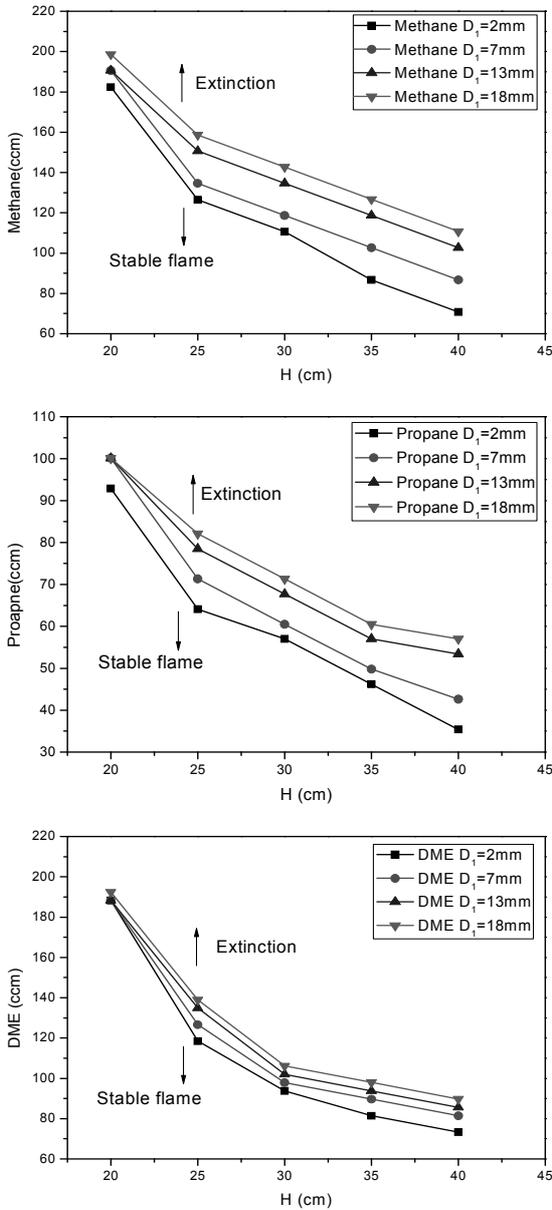


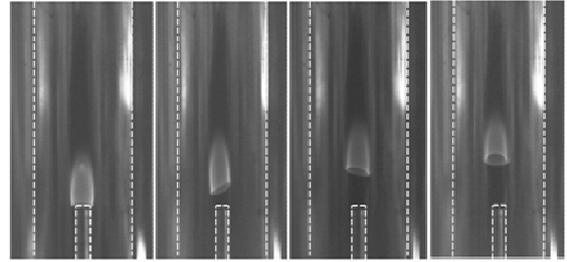
Fig. 4 Schematic diagram of the effects of the outlet boundary conditions depending on the distance H and the existence of the mesh; (a) without mesh & small H, (b) without mesh & large H, (c) with the mesh at the outlet of the combustor



**Fig. 5** Flammability limits with the variation of  $D_1$  ( $D_3=60\text{mm}$ ,  $H=200\sim 400\text{mm}$ )

성을 명확히 보여주었다.

추가적으로, 연료가 분사되는 내관의 직경  $D_1$ 에 따른 화염의 안정화 특성을 메탄, 프로판, DME 연료에 대해 비교하는 실험을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 5에 제시하였다. 실험은 외관의 직경이  $D_3=60\text{mm}$ 이고,  $H=200\sim 400\text{mm}$ 으로 변화시키는 연소실 형상에 대해 증관을 통한 공기의 공급이 없는 조건에서 행해졌다. 출구로부터 연료노즐 끝단까지의 거리  $H$ 의 변화에 대해서는 연료 노즐의 직경에 무관하게 앞서의 실험 결과와 동일한 특성을 보이고 있다. 한편, 내관의 직경  $D_1$  크기가 커질수록 안정한 화염을 형성할 수 있는 영역이 증가하고 있음을 보여준다. 또한, DME 실험의 경



**Fig. 6** Transient lift-off of a methane diffusion flame in a half closed combustion space ( $D_1=4.5\text{ mm}$ ,  $D_3=60\text{ mm}$ ,  $H=400\text{mm}$ ,  $h=100\text{mm}$ )

우 내관의 직경 변화에 따른 가연 한계의 변화가 메탄이나 프로판의 경우에 비해서는 상대적으로 작은 것을 알 수 있다.

Lingens 등은 동축관 제트 확산화염의 불안정성 요인으로 산화제 종류와 산화제의 속도에 영향을 많이 받으며, 연료속도는 영향을 덜 준다고 나타내었다.<sup>(10)</sup> 이는 일반적인 연료 산화제 동축분류의 경우 이론 공연비에 해당하는 산화제 농도를 가지는 지점은 공기 유동 내부에 존재하기 때문에 산화제의 속도에 의해 화염의 현상이 지배되는 결과로 이해될 수 있다. 추가로 확산화염의 선단 구조에 대한 근래의 연구들을 통해 화염 선단의 산화제와 농도 구배가 화염의 전파속도에 직접적으로 영향을 미치며, 그 결과로 화염의 안정화가 지배됨을 알고 있다.<sup>(11)</sup>

이러한 연구의 결과로부터 반 밀폐의 연소공간에 형성된 화염 역시 화염 주위의 농도구배와 산화제의 유속에 의해 가연한계가 지배될 것을 유추할 수 있다. 다만, 반밀폐 연소공간에 추가적인 산화제의 공급이 없는 조건에서는 연소공간 끝단에서의 확산과 대류를 통한 산화제의 유입특성이 연소공간 내부의 유동과 농도 특성을 결정한다는 점이 차이점이다. 공급된 산화제의 유량이 없으므로 전체적으로 연료의 유량에 의해 화염의 날림이나 가연한계가 결정된다는 점에서는 연료노즐의 직경이 증가할수록 화염 부상 및 날림의 근본 원인이 되는 연료 모멘텀이 감소함으로써 불안정성 요인이 줄어들어서 가연한계가 확대되는 것으로 설명이 가능하다. 또한 연료 확산의 관점에서도 연소공간 내에 연료가 체재하는 시간의 증가로 인해 연료의 농도구배는 정성적으로 감소하게 되고 그 결과 화염 선단의 전파속도가 증가함으로써 화염의 가연한계가 궁극적으로 확대될 수 있을 것이다. 하지만 화염 선단 주위의 산화제의 농도 역시 유동 특성에 따라 영향을 받으므로 이에 대한 추가 고민이 요구된다.

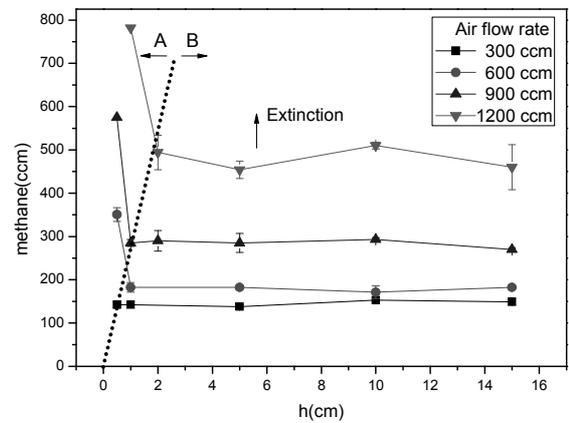
메탄 화염의 안정화 실험을 수행하는 동안 Fig. 6과 같이 시간이 지남에 따라 서서히 부상하여 최종적으로 화염 날림이 발생하는 경우를 관찰할 수 있었다. 연료의 공급은  $100\text{ccm}$ , 공기의 공급은 없으며  $D_1=4.5\text{mm}$ ,  $D_3=60\text{mm}$ ,  $H=400\text{mm}$ ,  $h=100\text{mm}$ 이고 외관 출구에 철망은 없다. 노즐과 출구 간격

이 충분히 큰 조건에서는 출구에서의 확산에 의한 영향이 적은 것을 앞서 확인하였으며 철망 따른 차이가 적으므로 철망을 제거하고  $H=400\text{mm}$  에서 실험한 결과다. 일반적으로 슈미트 수가 1 보다 작은 메탄화염의 경우 안정적인 화염의 부상이 이론적으로 불가능 하지만 연소가스가 재순환 되고 있는 조건에서는 화염 선단 주위의 산화제의 조성 변화로 인해 마치 부분예혼합 메탄화염의 부상과 같은 현상을 관찰할 수 있다. 비록 본 실험에서는 시간 경과에 따라 최종적으로 화염의 부상거리가 증가하여 소멸이 되었지만 그 과정이 1 분 이상이 걸린 점을 고려할 때 연소가스 혹은 미연가스의 재순환을 통한 슈미트수 1 이하의 연료에 대해서도 안정적인 부상화염의 획득 가능성은 충분하다고 판단된다. 유사한 실험 결과를 이산화탄소 희석 조건에서 발견할 수 있는데,<sup>(12)</sup> 산화제에  $\text{CO}_2$  를 혼합하여 공급하게 되면 화염 기저부에 산화제의 농도가 낮아져서 화염이 부상하게 되는 것으로 설명되었다. 본 실험에서도 화염 기저부의 산화제의 농도가 낮아져서 화염이 부상하게 되는 것으로 생각되지만, 반밀폐 공간 안에서는 재순환의 영향으로 화염이 불안정해져서 안정된 상태로 있지 못하고 날림이 발생하는 것으로 보인다.

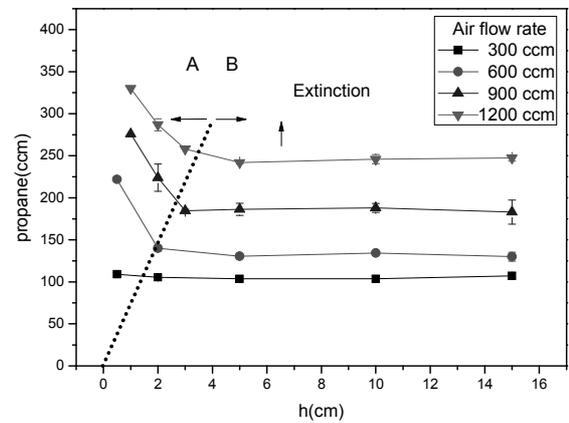
### 3.2 공기 공급이 있는 경우 화염 안정화

공기의 공급이 있을 경우에 연료노즐과 공기노즐 사이의 길이  $h$  에 따른 화염안정화의 변화를 실험하였으며 그 결과를 Fig. 7 에 보였다. 실험은  $D_1=4.5\text{mm}$ ,  $D_2=20\text{mm}$ ,  $D_3=60\text{mm}$  에  $H=300\text{mm}$  조건에서  $h$  를 5, 20, 50, 100, 150mm 로 조건을 바꾸며 행해졌다.  $H=300\text{mm}$  조건에서 실험한 이유는 앞의 Fig. 4 에 대한 고찰에서  $D_3$  가 60mm 인 조건에서  $H$  가 250mm 이하 가연조건 변화가 심하게 되므로 확산에 의한 효과가 상대적으로 적은 조건에서 실험하기 위해서이다.

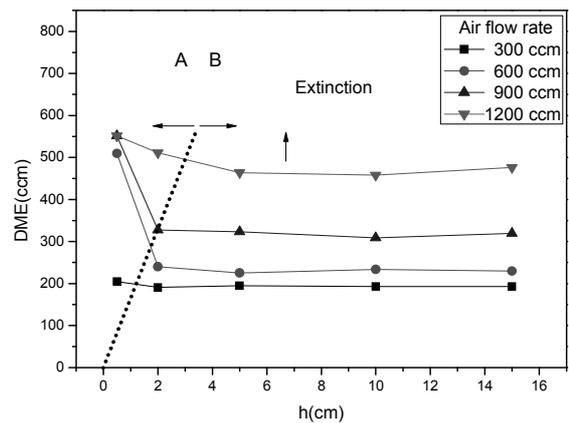
Fig. 7 에서 A 로 표시된 영역은 불안정한 상태의 화염을 보여주지만 가연한계는 큰 영역이고, B 는 공기유량에 대해 일정한 가연한계영역을 보여주고 있다. A 영역에서와 같이 연료노즐과 공기노즐이 가까워지면 연료노즐부근에 산화제의 농도가 높아지게 되고 화염의 안정화에 긍정적인 영향을 준다. B 영역과 같이 일정 이상의  $h$  의 거리에서는  $h$  거리가 화염에 특별한 영향을 주지 않고 단순히 그 공기 유량에 따라 연소영역이 결정된다. 특히 A 영역에서는 화염이 연료과잉으로 부력 등의 영향을 받아 화염이 유동방향으로 비대칭적인 섭동을 일으키며 불안정한 형태를 나타낸다.<sup>(13)</sup> 그리고 연료유량이 더욱 많아지게 되면 화염은 공기노즐에 더욱 가까워지고 나중에 공기노즐에 화염이 붙는다. 중관을 통한 공기의 공급이 많아지게 되면 연료노즐하부에 산화제의 농도가 높게 되므로 A



(a)



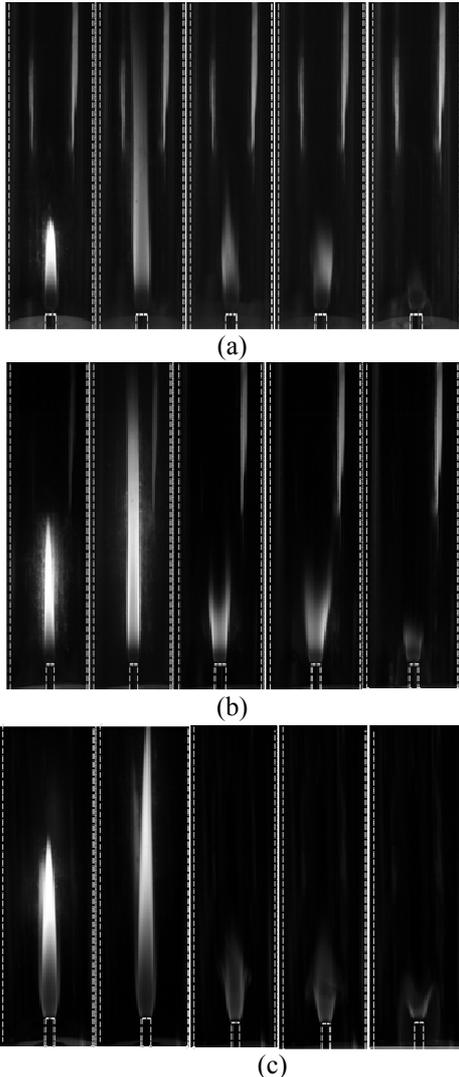
(b)



(c)

Fig. 7 Flammability limit of flame depending on air flow rates ( $D_1=4.5\text{mm}$ ,  $D_3=60\text{mm}$ ,  $H=300\text{mm}$ ); (a) methane, (b) propane, (c) DME

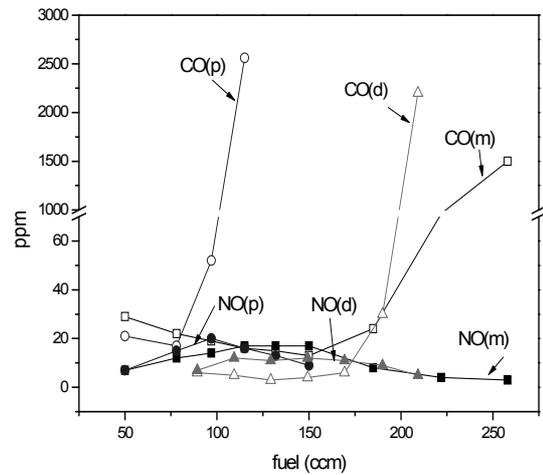
영역은 커지게 된다. 이와 같이 화염의 안정화가 공기 노즐의 거리에 따라 영향을 받게 되는 A, B 영역의 경계선 기울기를 비교하면 메탄의 기울기가 가장 크고, DME, 프로판 순이다. 다시 말해, 프로판의 경우에 가장 먼 거리에서 주위 공기의 영향을 받아 가연한계가 증가함을 의미한다. 프로판



**Fig. 8** Flame direct images with the increase of the fuel flow rates (right hand direction has higher fuel flow rates in arbitrary)  $D_1=4.5\text{mm}$ ,  $D_3=60\text{mm}$ ,  $H=400\text{mm}$ ); (a) Methane ( $h=10\text{mm}$ ), (b) propane ( $h=20\text{mm}$ ), (c) DME ( $h=20\text{mm}$ )

의 경우 화염 형성을 위한 이론 공기비의 크기가 타 연료에 비해 상대적으로 커서 화염면이 공기 유동 쪽에 상대적으로 가깝게 존재하므로 공기 유동의 영향을 더 크게 받게 되기 때문으로 생각된다. 더욱이 프로판의 높은 비중은 공기의 상방향 흐름을 방해하여 노즐 근처의 유속 변화를 증대시키게 될 것으로 예상되므로 결과적으로 더 멀리 위치한 공기 노즐의 영향을 받게 된다. 메탄 화염의 경우는 상대적으로 낮은 공기 요구량과 낮은 비중으로 인해 프로판과 반대의 경향을 가져서 공기 노즐에 의해 영향 받는 거리가 상대적으로 작은 것으로 생각된다.

Fig. 8 은 관의 직경이 각각  $D_1=4.5\text{mm}$ ,  $D_2=20\text{mm}$ ,  $D_3=60\text{mm}$  이고,  $H=400\text{mm}$  로 동일한 연소기 형상에서,



**Fig. 9** Measurement of the burned gases ( $D_1=4.5\text{mm}$ ,  $D_3=60\text{mm}$ ,  $H=300\text{mm}$ ,  $h=150\text{mm}$ , air flow rate=  $900\text{ccm}$ ; m : methane, p: propane, d : DME)

메탄은  $h=10\text{mm}$ , 프로판과 DME 는  $h=20\text{mm}$  인 조건으로 실험한 결과로, 공기  $2500\text{ccm}$  을 공급하였을 때 A 지역 조건의 화염 구조의 변화를 보여주고 있다. 화염은 전형적인 층류확산화염의 구조를 보여주는데 연료유량이 많아지면 화염의 길이는 길어진다. 그런데 연료유량이 일정 값 이상으로 증가하면 확산 화염의 휘염부분이 오히려 짧아지며 점점 사라지게 된다. 그리고 화염의 선단부 화염면이 공기노즐로 붙게 된다. 이것은 화염이 스스로 이론혼합비를 갖는 안정된 형태로 맞춰가기 위한 현상으로 보여진다. 연료의 유량이 많아지면 전체 당량비가 연료의 가연한계 영역을 벗어나게 된다. 그렇게 되면 soot 가 발생할 수 있는 화염의 온도는 낮아지게 되고 산화제가 부족해져서 휘염은 사라지게 되어 청염이 지배적으로 나타난다.<sup>(14)</sup> 그리하여 화염면은 산화제와의 혼합이 잘 이루어지는 공기 노즐로 이동하게 된다.

### 3.3 메탄, 프로판, DME 연소가스 비교

DME 는 프로판과 비슷한 분자량을 가지고 있지만, 합산소의 연료이기 때문에 프로판과 다른 특징을 가지고 있으며, 메탄과 비슷한 연소가스 특성을 지닌다. Fig. 9 는 메탄, 프로판, DME 의 CO, NO 의 배출특성을 비교한 것이다.

실험은  $D_1=4.5\text{mm}$ ,  $D_2=20\text{mm}$ ,  $D_3=60\text{mm}$  에  $H=300\text{mm}$ ,  $h=150\text{mm}$ , 공기  $900\text{ccm}$  을 공급하는 조건이다. 프로판의 경우 적은 유량에서 CO 가 급격하게 배출됐고, 메탄과 DME 는 비슷한 유량에서 CO 가 발생하기 시작했다. 연료에 산소를 포함하고 있는 DME 는 그늘음도 거의 없고 CO 발생률이 메탄과 비슷한 분포를 가지며 CO 가 증가하는 유량은 메탄보다 많은 연료 유량에서 생성된다. NO 는 연소되는 연료유량이 증가하면 같이 배출량이 늘어가다가 CO 가 급격히 배출되기 시작하면 NO 의 배출은 줄어들게 된다. CO 가 급격히 발생하기

시작되는 지점은 화염이 불완전연소가 시작되고 화염의 휘염 부분이 희미해지게 된다. 불완전연소가 되어 CO 는 급격하게 증가하지만, 화염의 온도는 떨어지게 되어 고온영역에서 발생하는 NO 의 배출량이 줄어들게 된다. 그리고 DME 가 NO 의 생성이 가장 적은 이유는 동일한 탄소, 수소 개수를 가지는 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 화염과 DME 화염을 비교한 이전 연구를 통해 고찰 된 바 있는데, 탄화수소계열은 C-C 결합으로 존재하지만, DME 의 경우는 C-O 의 결합에 의한 반응구조의 차이로 설명된 바 있다.<sup>(15)</sup>

#### 4. 결 론

반밀폐 공간에서 동축관의 형상에 따른 메탄, 프로판, DME 의 연소특성을 비교 실험하였다.

반밀폐라는 공간의 특성으로 외부에서 연소공간 내부로 들어오는 확산과 대류의 영향이 있었으며, 그것으로 인하여 가연한계가 출구부근에서는 급격하게 늘어났고, 관 아래에서는 선형적으로 변하였다. 그리고 외관 지름 D<sub>3</sub> 가 커지면 외부에서의 확산이 증가하게 되어 가연한계영역이 증가하였다. 또한 연료공급을 위한 내관 지름 D<sub>1</sub> 의 크기가 커지면 연료 모멘텀의 영향이 줄어들어 화염이 안정한 상태가 될 수 있다. 연료노즐과 공기노즐 사이의 길이인 h 의 길이가 일정 이상 길면 h 의 길이에 상관없이 일정한 가연한계를 가지게 되지만, h 의 길이가 짧아지면 화염이 불안정한 상태에서도 연료노즐에 붙어 있는 형태가 된다.

관 내부에 화염이 있게 되면 부력으로 인하여 관 외부에서 공기가 유입되며 화염 불안정성이 증가할 수 있으며, 중관으로 공기의 공급이 없을 때에는 화염 하부의 산화제의 농도가 감소하여 화염이 부상할 수 있는 조건이 생기게 된다.

메탄, 프로판, DME 세 가지 연료의 특성을 비교하면 메탄이 반밀폐 내부에서의 가연한계영역이 다른 두 연료보다 넓으며, 공급하는 공기의 유량이 많아지면 DME 와 메탄의 가연한계영역의 차이는 줄어든다. 적은 연료 유량에서의 연소가스 CO 와 NO 의 생성은 DME 가 가장 적게 측정되었고, 불완전연소로 인하여 CO 가 급격히 생성되기 전의 NO 의 생성도 DME 가 가장 적었다.

#### 후 기

본 연구는 지식경제부의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-2008-20) 주관으로 수행된 과제임.

#### 참고문헌

(1) Lee, M.C., Ahn, D.H., Seo, S.B. and Jung, J.H., 2005, "A

- Basic Experimental Study of DME Combustion for the Development of the Application Technique for a Combined Thermal Power Plant" *Annual Symposium of Korea Society for Energy Engineering in fall*, pp. 220~225.
- (2) Yuan Xue, Yiguang Ju, 2006, "Studies on the Liftoff Properties of Dimethyl Ether Jet Diffusion Flames," *Combust. Sci. and Tech*, Vol. 178, No. 12, pp. 2219~2247
- (3) Xiao Qin, Yiguang Ju., 2005, "Measurements of Burning Velocities of Dimethyl Ether and Air Premixed Flames at Elevated Pressures," *Proc. Combust. Inst.* 30, pp. 233~240.
- (4) Ryosuke Matsumoto, Mamoru Ozawa, Isao Ishihara, Shingo Sasaki, Masahiro Takaichi., 2006, "Development of Low-NOx DME Multi-port Burner," *JSME International Journal*, Series B, Vol. 49, No. 2
- (5) Mohamed H., Morsy, S.H. Chung, D.H. Ahn, 2006, "Pilot Injection of DME for Ignition of Natural Gas at Dual Fuel Engine-like Condition," *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 7, No.1
- (6) Chun, K.W., Chung, S.H. and Cho Eun-Sueong, 2006, "Numerical Study on Characteristics of Combustion and NOx formation for Non-premixed DME Flame," *3rd Asian DME Conference*.
- (7) Burke, S.P. and Schumann, T.E.W., 1928, Diffusion Flames, *proc. Combust. inst.* 1-2, 2~11.
- (8) Stephen R. Turns., 2000, "An Introduction to Combustion Concepts and Applications Second Edition," *McGraw-Hill International editions Mechanical Engineering Series*.
- (9) Chung, S.H. and Lee, B.J., 1991, "On the Characteristics of Laminar Lifted Flames in a Nonpremixed jet," *Combust. Flame*, 86, pp. 62~72.
- (10) Lingens, A., Neemann, K., Meyer, J. and Schreiber., M., 1996, "Instability of Diffusion Flames," *Twenty-Sixth symposium (International) on combustion*, The Combustion Institute, pp. 1053~1061.
- (11) Kim, N.I., Seo, J.I., Oh, K.C. and Shin, H.D., 2005, "Lift-off Characteristics of Triple Flame with Concentration Gradient," *Proc. Combust. Inst.* Vol. 30 No.1, pp. 367~374.
- (12) Min Suk Cha, Ho Keun Kim, Han Seok Kim, Kook Young Ahn, 2003, "Effects of CO<sub>2</sub> Recirculation on Turbulent Jet Diffusion Flames with Pure Oxygen," *KOSCO SYMPOSIUM 26th*. pp. 255~260.
- (13) Cetegen, B.M. and Dong, Y., 2000, "Experiments on the of Instability Mode of Buoyant Diffusion Flames and Effects Ambient Atmosphere on the Instabilities," *Experiments in Fluids* 28. pp. 546~558.
- (14) Shim, S.H. and Shin, H.D., 2002, "Soot Generation in a Coaxial Laminar Diffusion Flame," *Journal of the Korean Society of Combustion* Vol.7, No.3, pp 9~15.
- (15) Kim, T-H., Kim, J-H. and Lee, C-E., 2008, "Fundamental Studies on NOx Emission Characteristics in a DimethylEther/Air Nonpremixed Flame," *Annual symposium of the KSME in fall*, pp. 1973~1978.