

## LFG 혼합연료의 화염 안정화 특성

이창언<sup>†</sup> · 황철홍<sup>\*</sup> · 김선호<sup>\*</sup>  
(2001년 8월 17일 접수, 2001년 11월 5일 심사완료)

### Characteristics of Flame Stabilization of the LFG Mixing Gas

Chang-Eon Lee, Chul-Hong Hwang and Sun-Ho Kim

**Key Words:** Landfill Gas(LFG, 매립지 가스), Flame Stability(화염 안정성), Swirl Flame(선회 화염), Inert Gas(불활성 가스), Heating Value(발열량)

#### Abstract

In this study, experiments were performed to investigate the characteristics of flame stabilization of the LFG mixing gas. LFG has merely half heating value compared with liquified natural gas but can be greatly utilized as a commercial fuel. In order to use LFG in practical combustors, Webbe Index and heating value of LFG mixing gas were adjusted by mixing LPG with LFG. The comparisons were conducted between CH<sub>4</sub> and LFG mixing gas for searching the region of flame stabilization based upon the flame blowout at maximum fuel stream velocity. As a result, the flame stability of LFG mixing gas was not improved with that of CH<sub>4</sub> in non-swirl and weak swirl diffusion flame. However, LFG mixing gas had wide flame stabilization region rather than CH<sub>4</sub> with increasing ambient flow rate in strong swirl. It was also found that flame stability was affected by included quantity of inert gas such as CO<sub>2</sub> in the weak swirl but by heating value of fuel in strong swirl.

#### 1. 서 론

LFG(Landfill Gas)는 쓰레기 매립지에서 발생하는 가스로서, 주요 성분은 CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> 및 미량의 N<sub>2</sub>와 O<sub>2</sub>로 구성되어 있으며, 발열량이 약 3,000~6,000 kcal/m<sup>3</sup> 정도로 충분한 활용 가치가 있는 저급가스이다. 그러나 LFG 활용기술의 부족으로 인하여 국내에서는 미활용 에너지로 인식되어 왔으며, 이를 자체 소각 혹은 대기에 그대로 배출시키고 있어 환경오염을 초래하고 있다. 이러한 LFG의 활용방안으로 LFG에 LPG 등의 발열량이 높은 연료를 적절히 혼합하여 발열량과 연소속도

를 기존 도시가스과 비슷한 수준으로 맞추는 LFG 혼합연료의 사용이 시도되고 있다.<sup>(1)</sup>

기존 LFG 혼합연료에 대해 LFG 혼합가스의 연소속도 측정 및 계산에 관한 기초연구<sup>(2)</sup>와 불활성 가스인 CO<sub>2</sub>를 다량 포함한 연료의 오염물질 배출특성에 관한 연구<sup>(3,4)</sup>가 수행된 바 있는데, 실용 연소기에 대한 LFG 활용을 위해서는 이러한 기초연구와 더불어 화염 안정성에 대한 연구도 진행될 필요가 있다. 따라서 불활성 가스가 다량 포함되어 있는 LFG 혼합연료의 안정화 특성을 검토하는 것은 LFG의 활용에 중요한 정보를 제공할 수 있으며, 불활성 가스를 포함한 저급가스의 연소특성을 이해하는데 많은 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 LFG 혼합연료의 화염 안정화 특성을 검토하기 위해 LFG 자체 및 도시가스과 호환 가능하도록 만든 LFG 혼합연료를 대상으로 화염 안정성 기구를 갖고 있는 선회 연소기를 이

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 인하대 기계공학과

E-mail : chelee@inha.ac.kr

TEL : (032)860-7323 FAX : (032)868-1716

<sup>\*</sup> 회원, 인하대학교 기계공학과 대학원

용하여 화염 안정영역을 찾고, 이것을 순수 CH<sub>4</sub> 화염과 비교 검토하여, 안정화 특성을 살펴보고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

확산 화염에서 LFG 혼합연료의 안정성을 검토하기 위한 실험장치의 구성은 Fig. 1에서와 같이 공기 공급시스템, LFG 자체 및 혼합연료의 제조를 위한 연료유량 제어시스템, 가변 블록형 선회연소기 등 세부부분으로 구성되어 있다. LFG 모사를 위해 관련된 각 연료와 동축 공기의 유량제어는 버블유량계로 보정된 질량유량계(MFC Tylan FS280 series, MFC Hi-Tec)를 사용하였다.

실험에 사용된 가변 블록형 선회연소기(Movable-block type swirl burner)<sup>(5,6)</sup>는 Fig. 2와 같이 중심축에 대해 동심이 되도록 만든 두 개의 원형판 위의 블록들을 겹치게 하여 공기 유동이 반경과 접선 방향으로 분배되어 선회류를 만들도록 하였다. 즉 공기 공급장치로부터 유입된 공기는 8개의 수렴통로(Convergent Tunnel)를 통과하면서 균일한 단면속도 분포를 갖게되고 선회발생기 블록(Swirl Generator Block)을 경유하면서 연소용 분출구에서 지면에 대해 수직 방향으로 분출하게 된다. 선회 발생기 블록은 윗판의 회전에 의해 블록각(Block angle)을 0° 에서 20° 까지 연속적으로 변화시킬 수 있으며, 이 블록각에 대해 가변블록 선회기에서의 선회도(Swirl Number: S) 계산법을 적용하여 선회도 값을 계산하였다.<sup>(7)</sup> 또한 강선회를 얻을 수 있도록 연료, 공기 분출구 하류에 Quarl 반각을 25° 로 하여 부착하였다.<sup>(8)</sup>

연료로는 C.P. 등급의 CH<sub>4</sub>와 순도 99.9% 이상의 CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> 그리고 상용 LPG를 조합하여 실험에 필요한 가스를 제작하여 이용하였으며, 각 연료의 조성 및 발열량 등은 Table 1과 같다. 실험은 평균적인 조성의 LFG와 웨버지수를 기존 도시가스와 호환 가능하도록 LPG와 혼합하여 만든 LFG 혼합연료, 발열량을 기존 도시가스와 일치시킨 LFG 혼합연료를 대상으로 실험을 하였다. 그리고 LFG와 LNG를 혼합한 경우의 주성분을 CH<sub>4</sub>와 CO<sub>2</sub>로 가정하여, 순수 CH<sub>4</sub>와 비교 검토하였다. 선회도는 각 연료별로 0에서 1.02까지 변화시켰으며 각 연료의 조성을 바꿔가며 유속을 1m/s씩 증가시켰고, 주위류는 측정 범위에 따라

0.05m/s, 0.25m/s, 0.5m/s, 1m/s 간격으로 변화시키며 실험을 수행하여 화염날림이 발생하는 최대 연료 유속 및 한계 주위류 유속을 측정하였다.

또한 본 실험에 앞서 예혼합 화염에서 LFG 혼합연료의 기초 연소특성을 검토하기 위해 직경 20mm의 노즐버너를 대상으로 솔리렌(Schlieren)

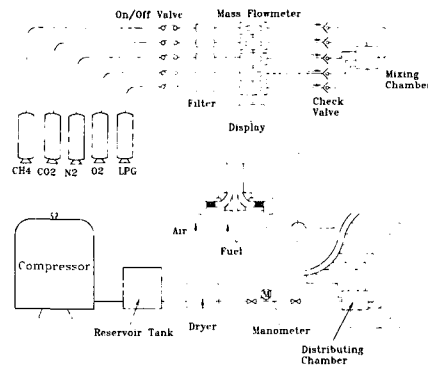


Fig. 1 Schematic diagram of swirl burner flow system

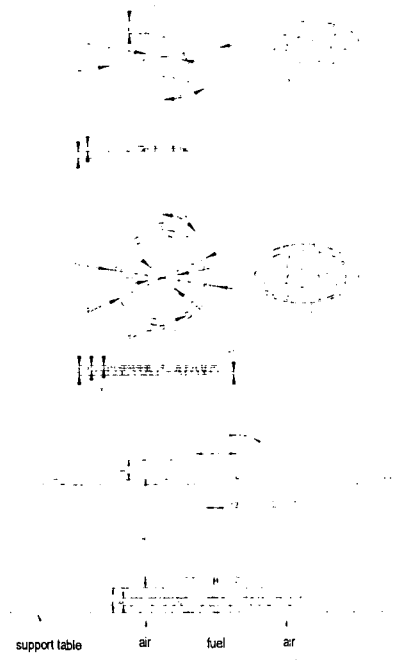


Fig. 2 Schematic diagram of movable block type swirl burner (mm)

Table 1 Components and properties of LFG and LFG-mixed fuels

		LFG 100%	LFG75%+ LPG25%	LFG70%+ LPG30%	LFG50%+ LPG50%	LFG40%+ LPG60%	CH <sub>4</sub> 100%	CH <sub>4</sub> 95%+ CO <sub>2</sub> 5%	CH <sub>4</sub> 90%+ CO <sub>2</sub> 10%	CH <sub>4</sub> 85%+ CO <sub>2</sub> 15%
조 성	CH <sub>4</sub>	54.50	40.88	38.15	27.25	21.80	100.00	95.00	90.00	85.00
	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0.00	25.00	30.00	50.00	60.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	CO <sub>2</sub>	37.50	28.13	26.25	18.75	15.00	0.00	5.00	10.00	15.00
	N <sub>2</sub>	7.00	5.25	4.90	3.50	2.80	0.00	0.00	0.00	0.00
	O <sub>2</sub>	1.00	0.75	0.70	0.50	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00
고위발열량 (HHV:kcal/Nm <sup>3</sup> )		5214.97	9924.38	10860.28	14605.82	16478.59	9618.84	9137.90	8656.96	8176.01
웨버지수 (kcal/Nm <sup>3</sup> )		5366.23	9472.15	10232.22	13109.02	14459.17	12898.59	11752.18	10712.49	9761.57

가시화법<sup>(9)</sup>을 사용하여 당량비에 따른 각 연료의 연소속도를 비교하였으며, 실용 연소기에 대한 안정 연소영역의 검토를 위해 상용 가스레인지에 사용하였다. 이때 당량비 및 혼합기량을 제어할 수 있도록 공기 조절장치를 별도로 제작하였다.<sup>(1)</sup>

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 예혼합 화염의 안정화 특성

Fig. 3에는 노즐버너를 이용하여 측정된 순수 CH<sub>4</sub>와 LFG+LPG 혼합연료의 연소속도를 도시하였다. 그림에서 각 연료는 당량비가 1.1 근처에서 최대 연소속도를 가지며, 도시가스와 웨버지수를 맞춘 LPG 50% 혼합연료와 발열량을 맞춘 LPG 30% 혼합연료의 희박한 당량비에서 연소속도가 순수 CH<sub>4</sub>보다 다소 높게 나타나고 있으나, 최대 연소속도는 대략 40cm/s 전후로 순수 CH<sub>4</sub>와 비슷함을 알 수 있다. 그러나 LFG는 불활성 가스인 CO<sub>2</sub>가 다량 함유되어 있으므로 연소속도가 다른 연료의 연소속도보다 상당히 낮게 측정됨을 확인할 수 있다.<sup>(2)</sup>

Fig. 4는 실용 연소기에서의 LFG 혼합연료의 안정성을 검토하기 위하여, 개량한 가스레인지에서 CH<sub>4</sub> 및 각 LFG 혼합연료의 안정 연소범위를 측정하여 나타낸 것이다. 각 LFG 혼합연료의 안정 연소영역은 CH<sub>4</sub>에 비해 다소 당량비가 희박한 곳에서 나타났으나 전체적인 안정 연소영역은 CH<sub>4</sub> 화염과 유사한 경향을 보이고 있으며, 이러한 안정 영역은 Fig. 3에서 설명한 각 연료의 연소속도 경향과 대략 일치함을 알 수 있다.

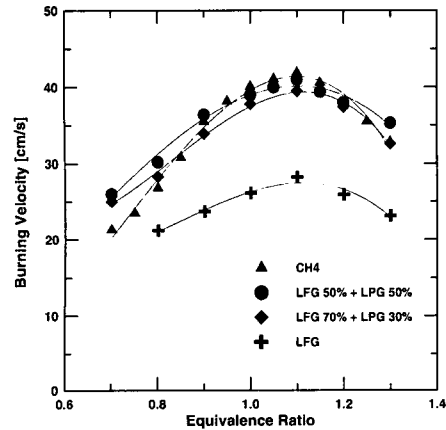


Fig. 3 Comparisons of burning velocity for LFG+LPG, CH<sub>4</sub> with LFG premixed flame as a function of the equivalence ratio

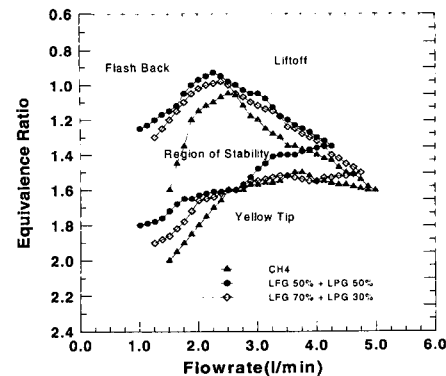


Fig. 4 CH<sub>4</sub>, LFG 50% + LPG 50% and LFG 70% + LPG 30% stability limits of practical experiment

### 3.2 확산 화염의 안정화 특성

#### 3.2.1 비선회 및 선회 확산 화염의 안정성 비교

Fig. 5에는 동축 분류 확산화염에서의 안정성을 검토하기 위하여, 선회 확산 연소기에서 선회가 없는 경우 각 연료의 화염 안정화 영역을 도시하였으며, 주위류가 없는 경우에는 Kalghatgi에 의해 제안되었던 혼합연료에 관한 상관관계식으로부터 계산된 화염 날림유속을 도시하였다.<sup>(10)</sup> 세로축과 가로축은 각각 연료 유속 및 주위류의 유속을 나타낸다. 또한 그림에서 대각선은 CH<sub>4</sub>의 양론 혼합비선을 나타내며, 이 양론 혼합비선을 기준으로 위쪽이 연료 유속을 증가시켜 날림이 발생하는 한계유속(Rich Limit Blowout : RLM)이며, 아래쪽은 부상화염에서 연료유속을 감소시켰을 때 화염이 재 부착되지 않고 날림이 발생하는 한계유속(Lean Limit Blowout : LLM)을 나타낸다. 화염 안정화 영역은 이 두 한계유속 내의 영역으로 정의하였다. LFG 혼합연료의 양론 혼합비선은 CH<sub>4</sub>와 비슷하므로 그림에서 생략하였다. 본 실험에서 LFG 자체만으로는 안정성이 매우 불량하여 작은 주위류에서도 날림현상이 쉽게 발생하였기 때문에 LFG 단독 실험은 수행하지 못하였다. 순수 CH<sub>4</sub>의 경우 주위류 유속이 작은 경우에는 부상이 일어난 후 연료 유속이 31m/s에서 화염날림이 발생한다. 또한, 주위류 유속이 0.9m/s 이상에서는 화염이 형성되지 않는다. LFG 혼합연료의 안정화 영역을 살펴보면 LPG 첨가 비율이 증가함에 따라 날림유속, 한계 주위류 유속이 높아지

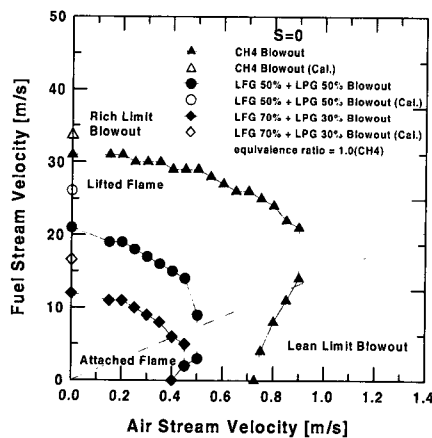


Fig. 5 Stable regions of CH<sub>4</sub>, LFG+LPG jet flame as a function of the co-flowing stream velocity

나 순수 CH<sub>4</sub> 보다는 크게 낮음을 알 수 있다. LFG 혼합연료는 순수 CH<sub>4</sub>와 비교해 연소속도 및 실용 연소기에서의 안정 연소영역에서는 큰 차이가 없음에도 불구하고, 동축 분류 확산 화염에서의 안정화 영역에는 많은 차이가 있음을 알 수 있다. 이 결과는 Kalghatgi에 의해 제안된 상관관계식으로부터 계산된 화염날림 유속보다 약간 낮게 측정되었지만, 전체적으로 비슷한 경향을 보임을 알 수 있다. Kalghatgi는 버너 출구로부터 양론 혼합위치까지의 거리가 짧게 되면 날림유속이 작아지게 된다고 제안한 바 있다. LFG 혼합연료는 양론 혼합비 상태에서의 필요 공기량이 CH<sub>4</sub>에 비해 작아 양론 혼합위치까지의 거리가 짧으며, 날림유속은 CH<sub>4</sub>보다 작아지게 된다. 이것은 LFG 활용에 있어 중요한 현상으로, 연소속도와 더불어 불활성 가스의 함유량이 화염 안정성과 밀접한 관련이 있음을 의미하는 것이다.

Fig. 6은 선회도(Swirl Number ; S) 변화에 따른 화염 날림 한계에 근거한 CH<sub>4</sub>의 안정화 영역을 나타낸 것이다. 먼저 선회도 0.58까지는 주위류 유속이 증가함에 따라 화염 날림이 점차로 빨리 발생하며, 1.5m/s 이상에서는 화염이 형성되지 않았다. 선회도가 작은 경우 화염 안정화 효과를 갖긴 하지만 비선회에 비해 큰 차이를 보이지는 않는다. 그러나 선회도가 0.68과 1.02인 강선회의 경우 초기 주위류 유속 증가로 날림유속이 낮아졌으나, 주위류 유속이 더 증가하면 날림유속 또한 증가하는 경향이 나타난다. 즉 이러한 강선회

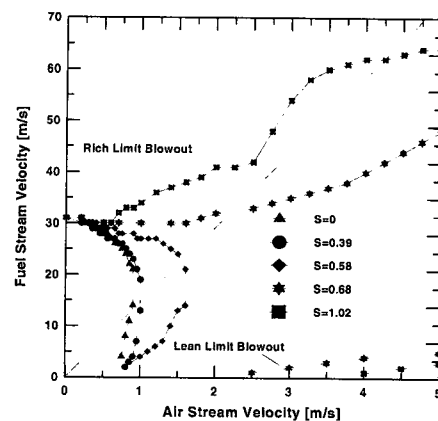


Fig. 6 Stable regions of CH<sub>4</sub> as a function of the swirl number

는 화염의 안정영역을 매우 증가시키는 효과가 있음을 확인할 수 있다. 본 실험에서는 강선회의 경우 공기 공급 시스템의 용량 한계로 인해 최대 날림유속을 측정하진 못했으나, 일반적으로 날림 유속은 단순 분류 화염의 4.5배까지 증가한다고 알려져 있다.<sup>(11)</sup>

3.2.2 LFG 혼합 연료의 화염 안정화 특성

Fig. 7은 비선회와 약선회에서의 LFG 혼합연료의 안정화 영역을 CH<sub>4</sub> 연료와 비교 도시한 것이다. LFG 혼합연료인 경우 LPG 첨가율이 증가하면 안정화 영역이 다소 증가하지만 CH<sub>4</sub> 보다는 작음을 확인할 수 있다. 또한 선회도 증가에 따라 안정화 영역은 미소하게 증가하지만 약선회에서는 아직 화염 안정화 영역이 그리 크지 않으며 화염 날림유속은 주위류 증가에 따라 여전히 낮게 도달하고 있다. 또한 연료별 화염 안정화 영역도 비선회에서와 마찬가지로 여전히 큰 차이를 보이고 있다.

Fig. 8은 선회도 1.02의 강선회일 경우 CH<sub>4</sub>와 LFG 혼합 연료의 안정화 영역을 도시한 것이다. 각 연료의 화염 안정화 영역은 약선회에 비해 매우 증가함을 알 수 있으며, 안정성 불량으로 비선회 및 약선회에서 실험을 수행할 수 없었던 LFG 연료 자체도 강선회에서는 안정화 영역이 크게 개선됨을 보여주고 있다. 특히 LFG 50% + LPG 50% 혼합연료의 경우 주위류 유속 3.5m/s부터는 CH<sub>4</sub>의 안정화 영역을 넘어서고 있으며, LFG 70% + LPG 30%의 혼합연료도 주위류 유속

이 더 증가되면 CH<sub>4</sub>의 안정화 영역과 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. Table 1에 나타난 각 연료의 발열량을 참조해서 살펴보면, 일정한 주위류 유속 이상에서는 발열량 크기와 유사한 순서로 안정화 영역이 나타나고 있다. 또한 CH<sub>4</sub>보다 발열량이 반정도 작은 LFG 자체 연료는 CH<sub>4</sub>의 안정화 범위를 넘지 못하고 있음을 알 수 있다. 기존에 알려진 선회가 화염 안정화에 미치는 영향 중 하나는 재순환 vortex에 의해 뜨거운 연소 생성물이 상류로 이동되어 예혼합된 반응물들과 고온으로 혼합되며 점화에 필요한 에너지를 공급해 주므로 화염 안정성이 증가하는 것으로 알려져 있다. 그림에서 보이는 바와 같이 발열량이 높은 순서로 안정화 영역이 나타나는 것도 이

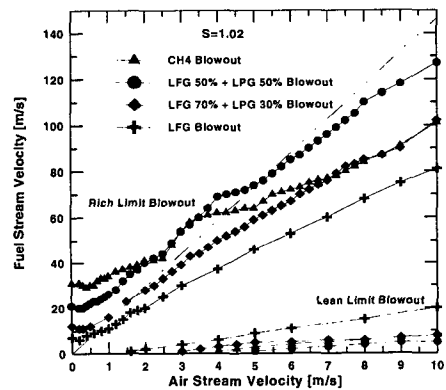


Fig. 8 Stable regions of CH<sub>4</sub>, LFG+LPG in strong swirl(S=1.02)

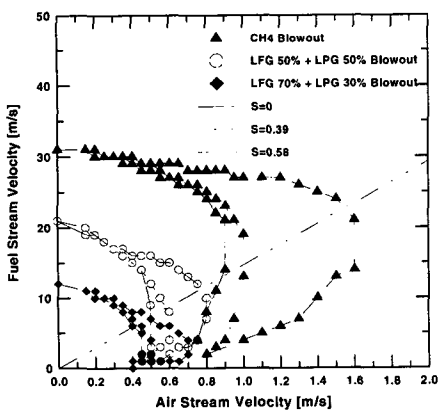


Fig. 7 Stable regions of CH<sub>4</sub>, LFG+LPG in weak swirl(S=0 ~ 0.58)

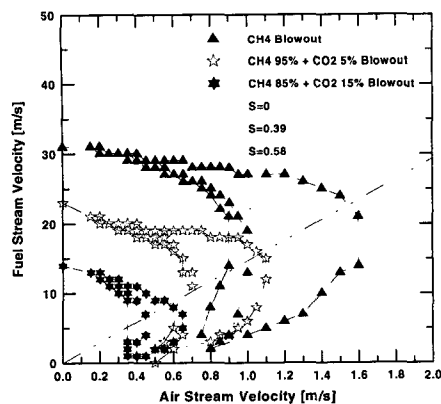


Fig. 9 Stable regions of CH<sub>4</sub>+CO<sub>2</sub> in weak swirl(S=0 ~ 0.58)

와 같은 이유에서 비롯된 것으로 사료된다.

### 3.2.3 CH<sub>4</sub>+CO<sub>2</sub> 혼합연료의 화염 안정화 특성

Fig. 9는 LFG에 LNG를 혼합하였을 경우, 주성분을 CH<sub>4</sub> 및 CO<sub>2</sub>로 가정하였을 때 비선회와 약선회(S=0.58)에서의 화염 날림유속을 순수 CH<sub>4</sub>의 경우와 비교한 것이다. CO<sub>2</sub> 함유량이 늘어남에 따라 날림은 점차로 빨라지며 한계 주위류 유속은 더 느려짐을 알 수 있다.<sup>(12)</sup> 그리고 비선회, 약선회에서 LFG 혼합연료와 불활성가스인 CO<sub>2</sub>가 혼합된 연료의 화염 안정성은 정성적으로 비슷한 경향을 보임을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 재순환 vortex가 충분히 생성된 강선회도(S=1.02)에서 CH<sub>4</sub>+CO<sub>2</sub> 혼합연료의 안정화 영역을 도시한 것이다. 초기 주위류에서 CH<sub>4</sub>+CO<sub>2</sub>의 안정화 영역은 CO<sub>2</sub> 함유량이 늘어남에 따라 많은 차이를 보이나, 선회류 증가에 따라서는 안정화 영역의 차이는 점차 감소하고 있다. 그러나 LFG 자체의 경우와 같이 CH<sub>4</sub>의 안정화 영역을 아직 넘어서진 못하고 있다. 이도 강선회에서 LFG 혼합연료의 경우와 같이 CH<sub>4</sub>+CO<sub>2</sub> 혼합연료가 CH<sub>4</sub>의 발열량보다 낮기 때문이며, 불활성 가스는 화염의 불안정에 영향을 줄지라도, 강선회도의 일정 선회량 이상에서는 그리 큰 영향을 끼치지 않는 것을 예측할 수 있다.

### 3.2.4 선회 확산화염의 주요 안정화 특성

Fig. 11은 주위류 0.6m/s로 약선회도(S=0.58)인 경우에 주요 불활성 가스인 CO<sub>2</sub>의 영향을 보

다 자세히 알아보기 위해 발열량이 다른 각 연료에 포함하고 있는 CO<sub>2</sub> 함유량에 따른 화염 날림 유속을 나타낸 것이다. 세로축은 화염 날림(Rich limit Blowout)의 연료 유속을, 가로축은 각 연료의 CO<sub>2</sub> 함유량을 나타낸다. CH<sub>4</sub>+CO<sub>2</sub> 혼합연료는 CH<sub>4</sub>에 CO<sub>2</sub> 함유량이 늘어남에 따라 화염 날림이 더 빨리 일어나며, LFG 혼합연료의 경우도 불활성 가스 함유량에 비례하여 화염 날림유속이 감소함을 알 수 있다. CO<sub>2</sub> 함유량이 15%로 동일한 경우인 CH<sub>4</sub> 85% + CO<sub>2</sub> 15%와 LFG 40% + LPG 60%를 비교해보면, 발열량의 차이로 인하여 약 13m/s의 화염 날림유속의 차이를 보이고 있다. 그러나 발열량이 비슷한 경우인 CH<sub>4</sub>(HHV=9618.84 kcal/Nm<sup>3</sup>)와 LFG 75% + LPG 25%(HHV=9924.38 kcal/Nm<sup>3</sup>)를 비교해 보면 약 26m/s의 날림유속 차이를 보이며, 동일 CO<sub>2</sub>의 경우에 비해 큰 차이를 보이고 있다. 이는 약선회 범위에서 화염 안정화에 영향을 주는 주 요인으로 발열량보다 불활성 가스인 CO<sub>2</sub>의 함유량이 지배적임을 나타낸다.

Fig. 12는 주위류가 8m/s인 강선회도(S=1.02)에서 CO<sub>2</sub> 함유량에 따른 각 연료에 대한 화염 날림유속을 나타낸 것이다. 약선회에서와 유사하게 CO<sub>2</sub> 함유량이 증가할수록 CH<sub>4</sub>+CO<sub>2</sub>와 LFG 혼합연료 모두 선형적으로 감소함을 볼 수 있다. Fig. 11에서와 같이 CO<sub>2</sub> 함유량이 15%로 동일한 경우를 비교해 보면, 약 43m/s의 화염 날림유속의 차이를 보이고 있다. 그러나 발열량이 비슷한 경우인 CH<sub>4</sub>와 LFG 75% + LPG 25%를

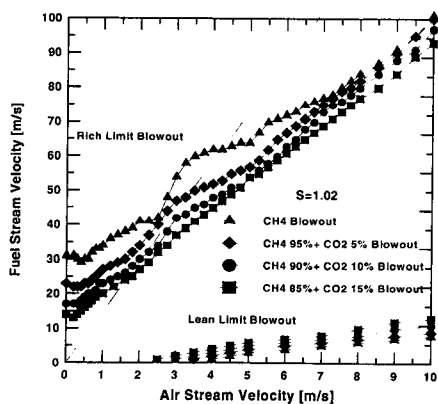


Fig. 10 Stable regions of CH<sub>4</sub>+CO<sub>2</sub> in strong swirl(S=1.02)

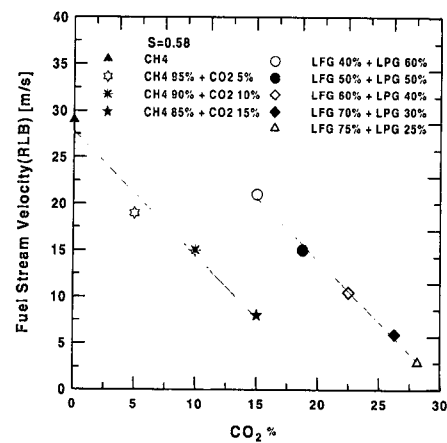


Fig. 11 Effect of inert gas on blowout limits in weak swirl(S=0.58)

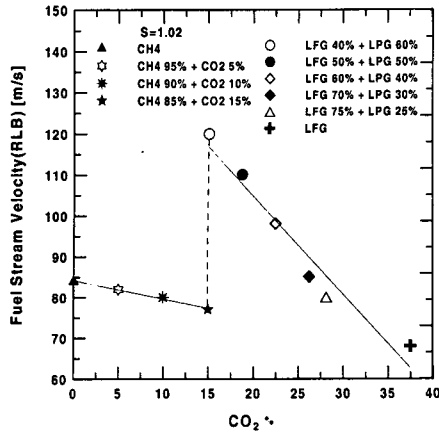


Fig. 12 Effect of inert gas on blowout limits in strong swirl(S=1.02)

비교해 보면 약 4m/s의 미소한 날림유속 차이를 보이고 있다. 즉 강선회에서 화염 안정화에 영향을 주는 주 요인으로 불활성 가스의 함유량보다는 연료의 발열량이 지배적임을 확인할 수 있다. 이는 연료의 발열량과 선회도 간에 유기적 관련성이 있음을 나타내며, LFG 혼합연료의 활용에 있어 중요하게 고려해야 할 사항임을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 순수 CH<sub>4</sub>, LFG 혼합연료 및 CH<sub>4</sub>+CO<sub>2</sub> 혼합연료에 대해 화염 안정성을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 내렸다.

(1) LFG 혼합연료는 순수 CH<sub>4</sub>와 연소속도 및 실용 연소기인 가스레인지에서의 화염 안정 영역은 비슷한 경향을 보이나, 선회가 없는 동축 분류 확산 화염에서의 안정화 영역에는 많은 차이가 있음을 확인하였다.

(2) 약선회의 경우, 화염 안정화 효과를 갖긴 하지만 비선회에 비해 큰 차이를 보이지 않으나, 선회도가 0.68 이상의 강선회에서는 주위류 유속 증가에 따라 날림유속 또한 증가하여 안정화 영역이 크게 증가한다.

(3) LFG 혼합연료의 경우, 강선회에서는 LFG 연료 자체만으로 안정화 영역이 생성되며, 주위류 증가에 따라 LFG 혼합연료의 안정성은 순수 CH<sub>4</sub>에 비해 더 개선되어 질 수 있음을 확인하였다.

(4) CH<sub>4</sub>+CO<sub>2</sub> 혼합연료의 경우, 강선회에서 선회류의 증가에 따라 CO<sub>2</sub>에 의한 화염 날림유속의 차이가 감소함을 알 수 있다.

(5) 화염 안정성에 미치는 주요 원인으로 약선회의 경우 연료의 불활성 가스 함유량이 지배적이나, 강선회의 경우에는 불활성 가스 함유량에 비해 연료의 발열량이 중요하게 고려되어짐을 알았다.

#### 참고문헌

- (1) 이창언, 오준석, 정익산, 오창보, 이인대, 1999, "LFG(Landfill Gas) 활용을 위한 연소특성 검토," 제18회 KOSCO SYMPOSIUM 논문집, pp. 21~29.
- (2) 이창언, 오창보, 정익산, 2000, "수치계산을 이용한 LFG 혼합연료의 연소속도 상관식에 관한 연구," "대한기계학회논문집(B), 제24권 제11호, pp. 1513~1522.
- (3) Qin, W., Egolfopoulos, F. N. and Tsotsis, T. T., 2001, "Fundamental and Environmental Aspects of Landfill Gas Utilization for Power Generation," *Chemical Engineering Journal*, Vol. 82, pp. 157~172.
- (4) Lee, C. E., Lee, S. R., Han, J. W. and Park, J., 2001, "Numerical Study on Effect of CO<sub>2</sub> Addition in Flame Structure and NO<sub>x</sub> Formation of CH<sub>4</sub>-Air Counterflow Diffusion Flames," *International Journal of Energy Research*, Vol. 25, No. 4, pp. 343~354.
- (5) Beer, J. M. and Chigier, N. A., 1972, "Combustion Aerodynamics," Applied Science Publishers, London.
- (6) 명현국, 1982, "선회화염의 구조에 관한 실험적 연구," 한국과학기술원 기계공학과 석사학위논문.
- (7) Gupta, A., K. Lilley, D. G. and Syred, N., 1984, "Swirl Flows," *Energy and Engineering Science Series*, Abacus Press.
- (8) Fricker, N. and Leuckel, W., 1976, "The Characteristics of Swirl-stabilized Natural Gas Flames, Part 3: The Effect of Swirl and Burner Mouth Geometry on Flame Stability," *Journal of the institute of fuel*, Vol. 49, pp. 152~158.
- (9) 유현석, 한정옥, 방효선, 1997, "천연가스의 연

- 소속도 측정에 관한 실험적 연구," 대한기계학회논문집(B), 제21권 제2호, pp. 195~201.
- (10) Kalghatgi, G.T., 1981, "Blowout Stability of Gaseous Jet Diffusion Flames," *Combustion Science and Technology*, pp.233~239.
- (11) Douglas Feikema, Ruey-Hung Chen, and James F. Driscoll, 1990, "Enhancement of Flame Blow-out Limits by the Use of Swirl," *Combustion and Flame*, Vol. 80, pp. 183~195.
- (12) Karbasi, M. and Wierzb, I., 1998, "Prediction and Validation of Blowout Limits of Co-Flowing Jet Diffusion Flames Effect of Dilution," *ASME Journal of Energy Resources Technology*, Vol. 120, pp.167~171.