

LFG 활용을 위한 기초 연소특성 검토

이창언[†] · 오창보^{*} · 금성민^{**}
(2003년 7월 21일 접수, 2003년 11월 20일 심사완료)

An Investigation of the Fundamental Combustion Characteristics for the Utilization of LFG

Chang Eon Lee, Chang Bo Oh and Sung Min Kum

Key Words: Landfill Gas(LFG), Burning Velocity(연소속도), Combustion Potential(연소속도 지수), Wobbe Index(웨버 지수), Flame Stability(화염 안정성)

Abstract

Fundamental combustion characteristics, such as the combustion potential, burning velocity and flame stability, for the practical utilization of LFG(Landfill gas) and LFG-blended fuels were experimentally investigated. The combustion potentials(CP) of LFG-blended fuels calculated from the previously suggested formulae were compared with burning velocities obtained by present experiments. The results showed that the previous formulae for CP of LFG-blended fuels were not agreed with the experimental burning velocity, and these formulae should be revised. To provide an useful information needed to design the combustion devices, a triangular diagram was suggested for the maximum burning velocity of the mixture of CH₄, LPG and LFG. From the investigation of the burning velocity and the flame stability in a practical combustor, it was noted that the LFG-blended fuels, of which heating values or Wobbe indices were adjusted to that of natural gas, could be used as an alternative fuel of natural gas.

1. 서 론

LFG(Landfill gas)란 쓰레기 매립장에서 발생하는 가스로서, 발생 원리적으로는 유기성 폐기물 또는, 바이오매스(Biomass)의 혐기성 소화(Anaerobic digestion)에 의해 만들어지는 바이오가스(Biogas)의 일종이다. LFG의 조성은 연료 성분인 CH₄ 이외에 CO₂, O₂, N₂ 등으로 구성되어 있으며, 발열량이 약 3,000~6,000kcal/Nm³ 정도로 활용 가치가 충분한 저급연료(Low-calorific fuel)라고 할 수 있다. 국내에도 이와 같은 저급연료의 발

생원은 김포 쓰레기 매립지를 비롯한 폐기물 매립지, 폐수 및 인분 처리장 등 여러 곳에 산재해 있다. 국내의 LFG 발생량은 김포 매립지만 예로 들더라도, 전체 5공구(630만평) 중 제1공구에서만 약 1,500m³/min 정도 발생하며, 향후 20년 동안 매년 약 2,000m³/min이 발생한다고 한다.⁽¹⁾ 이렇듯 적지 않은 양의 LFG가 많은 수의 매립지 등에서 발생하고 있지만, 아직까지 이들 LFG에 대해 충분히 효율적인 이용은 이루어지지 않고 있으며, 포집된 LFG를 태워 버리거나 방치하여 매립지 주변이 오염되는 경우가 많다.

LFG를 효율적으로 활용하는 방안으로는 다음 세 가지를 들 수 있다. 첫째는, LFG 자체만을 연료로 이용하는 경우이다. 이 경우에는 연소 안정성이 나쁘며, 이용 범위도 한정되기 때문에 대량의 LFG를 효과적으로 이용하는 데에는 한계가 있다. 둘째로, LFG에 기존 도시가스(NG)를 적절히 혼합하여 사용하는 경우로, 이 경우 혼합연료

[†] 책임저자, 회원, 인하대학교 기계공학부

E-mail : chelee@inha.ac.kr

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

^{*} 회원, 인하대학교 기계기술공동연구소

^{**} 회원, 한라대학교 기계공학과

Table 1 Components and some properties of LFG and LFG-blended fuels

		LFG(평균) 100%	LPG 100%	NG 100%	LFG 70% + LPG 30% (10A) ¹⁾	LFG 50% + LPG 50% (13A)	LFG 50% + NG 50%	LFG 30% + NG 70%
조	CH ₄	54.5	0.0	89.78	38.15	27.25	72.14	79.20
	C ₂ H ₆	0.0	0.0	7.48	0.00	0.00	3.74	5.24
	C ₃ H ₈	0.0	100.0	2.02	30.00	50.00	1.01	1.41
	C ₄ H ₁₀	0.0	0.0	0.70	0.00	0.00	0.35	0.49
성	CO ₂	37.5	0.0	0.00	26.25	18.75	18.75	11.25
	N ₂	7.0	0.0	0.02	4.90	3.50	3.51	2.11
	O ₂	1.0	0.0	0.00	0.70	0.50	0.50	0.30
고위발열량 (HHV: kcal/m ³)		5215.0	23969.7	10598.4	10860.3	14605.8	7920.2	8901.6
웨버지수 고위발열량/√비중 (kcal/m ³)		5338.7	19389.8	13434.0	10232.4	13109.0	8920.5	10582.0
이론 체적 공연비		5.14	23.80	10.49	10.74	14.47	7.82	8.89
비중(공기=1.0)		0.9542	1.5286	0.6224	1.1265	1.2414	0.7883	0.7220
화학평형온도(K)		2115.7	2290.9	2254.2	2229.2	2257.7	2205.8	2228.2

¹⁾ The values in the brackets of first row also indicate another notation of Wobbe index.

의 발열량은 도시가스보다 낮으나 LFG의 결집인 연소 불안정성을 대폭 개선할 수 있다. 이와 같은 LFG 혼합연료는 대형 플랜트, 발전소, 지역 냉난방 등에 유용하게 사용될 수 있다. 셋째로는 LFG에 LPG를 혼합하여 사용하는 경우이다. 이 경우, LPG의 체적당 발열량이 도시가스의 주성분인 CH₄보다 2배 정도 높기 때문에, 혼합연료는 도시가스와 호환성(Wobbe Index : WI=13A)을 맞추어 가스 라인에 공급할 수도 있으며, 또 발열량만을 도시가스 수준으로 맞추어(WI=10A) 도시가스 대체 연료로 사용할 수도 있다.

이와 같이 LFG는 충분히 활용 가능한 가스연료로서, 이를 효율적으로 이용하는 것은 국가의 에너지 및 환경 정책측면에서 매우 중요하다고 할 수 있다. 그러나, LFG에는 불활성 가스인 CO₂와 N₂가 다량 포함되기 때문에 연소속도나 화염 안정성 등의 연소특성이 일반 가스연료와는 많은 차이를 보일 것으로 예상된다. 현재까지 LFG나 CO₂ 등의 불활성 가스가 포함된 가스연료에 대한 기초연구가 일부 진행되고 있지만,⁽²⁻⁴⁾ LFG를 실제 활용을 위해서는 기초 연소특성에 대해 보다 충분히 검토할 필요가 있다. 특히 LFG의 조성 자체가 일정하지 않기 때문에 LFG의 조성 변화를 고려한 LFG 및 LFG가 혼합된 가스연료의 제반 연소특성에 대한 보다 체계적인 검토가 요망된다.

따라서, 본 연구에서는 매립지에서 발생하는 LFG 및 이를 이용하여 만든 LFG 혼합연료를 대상으로, 이들 가스연료의 연소속도 및 화염 안정성을 포함한 기초 연소특성에 대한 연구를 수행하고자 한다. 이를 통해 LFG를 실제 연소기 등에서 활용하기 위해 필요한 연소특성에 대한 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. LFG 혼합연료 활용상의 문제점 검토

2.1 화염온도 검토

LFG 자체 및 LFG와 NG 혹은 LPG를 적절히 혼합한 연료(LFG 혼합연료)의 활용상의 문제점을 검토하기 위해 우선, 화학평형온도를 계산하였다. 계산에는 주로 CHEMKIN-II Package⁽⁵⁾를 이용하였으며, 이 계산에 필요한 정보는 별도의 프로그램을 작성하여 사용하였다. Table 1에는 김포 매립지에서 발생하는 평균적인 LFG 조성에 LPG 혹은 NG를 적절히 혼합한 경우의 연소관리에 필요한 발열량, 웨버지수(WI), 이론 공연비, 비중 및 화학평형온도를 나타내었다. 여기서, LFG 50% + LPG 50%는 기존 도시가스와 웨버지수(WI=13A)를 맞춘 경우이고, LFG 70% + LPG

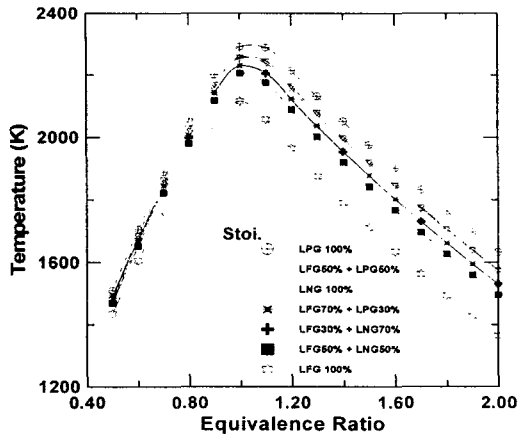


Fig. 1 Chemical equilibrium temperatures of LFG and LFG-blended fuels with the variation of equivalence ratio

30%는 도시가스와 발열량을 맞춘 경우(WI=10A)이다. LFG 30% + NG 70%는 LFG를 도시가스와 적절히 혼합하여 대형 플랜트에 사용하는 경우를 산정한 것이다.

Fig. 1은 Table 1에 나타난 대표적인 LFG 혼합 연료들의 당량비에 따른 화학평형온도를 상용 연료인 NG 및 LPG와 비교 도시한 것이다. 그림에서 보면 순수 LFG는 비록 불활성 가스를 다량 포함하고 있지만, Table 1에서와 같이 이론 공연비가 작기 때문에 화염온도가 2000K 이상의 고온이 되는 것을 알 수 있다. 또한, LPG가 50% 혼합된 연료는 기존 도시가스(NG)와 거의 같은 온도분포를 보이며, LPG 30%인 경우도 기존 도시가스에 비해 약간 온도가 떨어지나 충분히 도시가스를 대응할 수 있음을 보여준다. 이러한 결과로 볼 때, 평균조성의 LFG 및 LFG 혼합연료는 화염온도 측면에서는 충분히 여러 가지 연소기에 사용할 수 있음을 알 수 있다.

2.2 화염 안정성 검토

Fig. 2는 LFG + LPG 혼합연료의 화염 안정화 영역을 CH_4 화염과 비교 도시한 것이다. 이 그림은 연료노즐의 내경이 2.95mm, 주위류 노즐의 직경이 150mm인 제트 확산화염에 대해 화염 안정 영역을 눈으로 관찰하여 얻은 결과이다. 실험은 우선, 주위류 유속을 고정한 후, 연료류 유속을 증가시키는 순서로 진행되었으며, 이후 점차 증

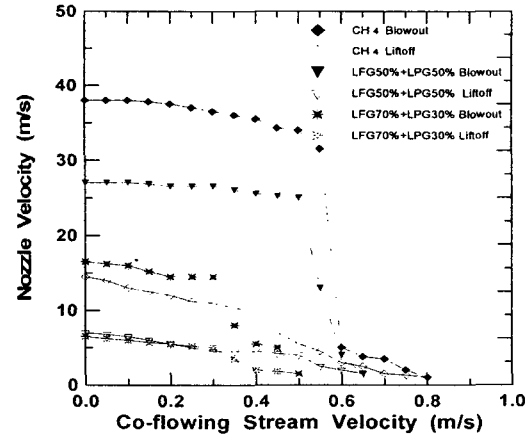


Fig. 2 Flame stability limits of LFG-blended fuels in a jet diffusion flame

가된 주위류 유속조건에서 연료류의 유속을 증가시켜 화염부상(Flame liftoff)과 화염날림(Flame blowout)점을 관찰하였다. 여기서, LFG 연료 단독으로는 안정성이 불량하여 주위류 0.1m/s에서도 화염날림 현상이 발생하기 때문에 실험은 수행하지 못하였다. 또한, CH_4 는 NG를 구성하는 대표적인 성분이므로 본 연구에서는 CH_4 를 NG로 가정하여 화염 안정성 및 기타 기초 연소특성을 검토하였다. 그리고, LFG + NG 혼합연료는 도시가스에 비해 발열량과 웨버지수가 낮아 그 자체만으로는 도시가스를 대체할 수 없기 때문에 비교 대상에서는 제외하였다. 앞서서도 언급한 것처럼, LFG + LPG의 두 가지 연료는 도시가스와 발열량을 맞춘 경우와 웨버지수를 맞춘 경우에 해당된다. 그림에서 각 연료마다 상부의 곡선은 화염날림이 발생하는 한계(Blowout limit)를 의미하며, 하부의 곡선은 화염부상이 발생하는 한계(Lift-off limit)를 나타낸다. 즉 화염부상 한계의 하부 영역은 화염이 노즐에 부착되어 있는 영역을 의미하며, 화염부상 한계와 화염날림 한계 사이의 영역은 화염이 부상되어 있는 상태를 나타낸다. 우선, 순수 CH_4 의 안정화 영역을 살펴보면, 주위류 유속이 작은 영역에서는 연료노즐 유속이 10~15m/s 근방에서 화염부상이 일어나고, 유속이 40m/s 가까이 도달해서야 날림이 발생한다. 그러나, 주위류 유속이 점차 증가하면 부상 및 날림한계는 급격히 낮아지며, 매우 낮은 유속에서도 쉽게 화염

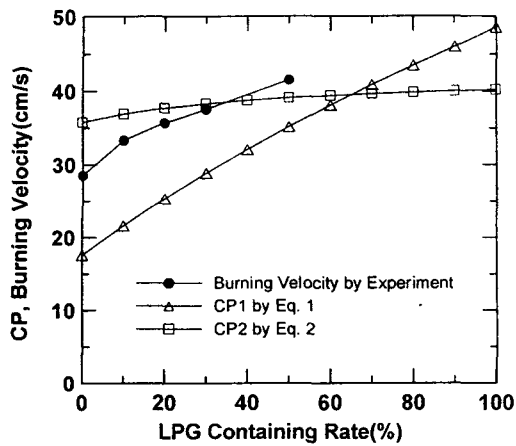


Fig. 3 Comparison of calculated combustion potentials and measured burning velocity

날림이 발생하는 것을 알 수 있다. 그리고, 주위류 유속이 0.8m/s에 도달하면 부상한계와 날림한계가 만나게 되며, 이보다 유속이 증가하면 화염이 형성되지 않는다. 본 연구에서는 화염이 형성되지 않는 주위류 유속을 한계유속(Critical velocity)이라고 정의하였다. 다음에 LFG + LPG 혼합연료의 안정화 영역을 살펴보면, LPG 첨가비율이 증가함에 따라 날림 및 부상한계는 증가하지만 CH₄보다는 낮음을 알 수 있다. 또한, 한계유속도 LPG 첨가비율이 증가함에 따라 증가하지만 CH₄보다는 낮음을 알 수 있다. 이와 같이 LFG + LPG 혼합연료는 발열량 혹은 웨버지수를 도시가스에 맞추었지만 도시가스의 주성분인 CH₄ 화염에 비해 화염 안정성이 많이 나쁘다는 것을 알 수 있다. 따라서, LFG 혼합연료를 사용할 경우에는 주의가 요구되며, 화염 안정성에 대해서는 보다 광범위하게 검토할 필요가 있을 것으로 판단된다.

2.3 기존 연소속도식 검토

Fig. 3에는 국내에서 혼합가스 연료의 연소속도 계산에 사용되고 있는 식 (1)의 유용성을 검토하기 위해, 식 (1)의 연소속도 지수(Combustion Potential : CP)⁽⁶⁻⁷⁾ 결과와 평균조성의 LFG에 LPG의 혼합비율을 바꾸면서 계측한 최대 연소속도를 도시하였다. 또한, 일본에서 혼합가스 연료의 연소속도를 얻기 위해 일부 사용하고 있는 식 (2)의 결과도 참고로 비교 도시하였다. 여기서, 연소속도 계측값은 노즐형 연소기를 이용하여 얻어진

것으로서 연소속도 계측방법은 3장에서 자세히 언급할 예정이므로 여기서는 생략한다. 또한, 여기서 언급한 연소속도 지수란 H₂의 연소속도와 이에 대한 각종 가스의 상대적인 연소속도를 이용하여 가스연료의 연소속도를 얻을 수 있도록 정의한 값을 의미한다. 결과를 보면 실측한 연소속도 값과 계산된 CP 값과는 상당히 차이가 있음을 알 수 있다. 특히, LFG의 혼합비율이 많을수록 즉, LPG의 혼합비율이 적을수록 더욱 차이가 크다는 것을 알 수 있다. 따라서, 국내에서 사용되는 CP 계산식은 LFG와 같이 불활성 가스가 다량 포함된 경우에는 잘 맞지 않아 수정 보완이 필요함을 알 수 있다. 이러한 결과로 볼 때, LFG가 혼합된 연료에 대한 연소속도를 얻기 위해서는 기존에 제시된 CP식을 이용하는 것보다는 실험에 의한 계측값을 이용하는 것이 더 합리적이다. 또한, 향후 실험에서 얻어진 결과를 근거로 CP식에 대한 보정작업도 이루어져야 할 것으로 판단된다.

$$CP_1 = \frac{K \times 1.0H_2 + 0.6(CO + C_m H_n) + 0.3CH_4}{\sqrt{d}} \quad (1)$$

여기서, K 는 가스중의 산소함량에 따른 계수⁽⁶⁾를 의미한다.

$$CP_2 = \frac{\sum(S_i f_i A_i)}{\sum(f_i A_i)} (1-S) \quad (2)$$

여기서,

$$S = \frac{\sum A_i}{\sum a_i A_i} \times$$

$$\left[\frac{2.5CO_2 + N_2 - 3.77O_2}{100 - 4.77O_2} + \left\{ \frac{N_2 - 3.77O_2}{100 - 4.77O_2} \right\}^2 \right] \quad (3)$$

또한, f_i 는 혼합기 중 가연성 가스의 연소속도, A_i 는 가연성 가스의 계수, a_i 는 혼합기중 가연성 가스 체적 함유율(%), S_i 는 혼합기중 가연성 가스 보정계수를 의미한다.

3. LFG 혼합연료의 연소속도 측정

3.1 연소속도 측정방법

본 연구에서는 LFG 혼합연료의 연소속도 측정을 위해서 단일 노즐형 연소기를 이용하였다. 이

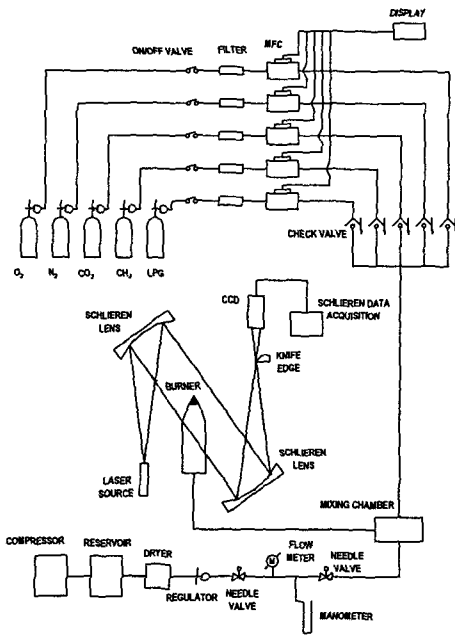


Fig. 4 Schematic diagram of the premixed burner flow system and schlieren system

연소기는 출구에서의 유속이 균일하도록 Morel의 제안⁽⁸⁾에 따라 수축노즐(Contraction nozzle) 형태를 갖도록 제작되었다.

본 실험에 사용된 유로계는 공기 및 연료공급 시스템 그리고, 예혼합실(Premixing chamber)로 구성되어 있다. 전체 유로계의 개략도는 Fig. 4에 나타나 있다. 먼저, 공기는 맥동이 없는 압축기에서 출발하여 건조기(Dryer)에서 수분이 제거되고 유량계(모델명 : Dwyer RMB)에서 원하는 양으로 제어되어 예혼합실로 공급된다. 또한, 연료는 LFG 성분을 모사하기 위해서 CP(Chemically Pure) 등급의 CH₄와 순도 99.9% 이상의 N₂, CO₂, O₂ 가스를 사용하였으며, 여기에 상용 LPG를 혼합하여 LFG 혼합연료를 만들었다. 이들 각 가스는 압력 조절기(Regulator)로 압력이 제어된 후 질량 유량계(모델명: MFC Tylan FS280, 2900 Series)에서 일정 유량으로 제어된 후 예혼합실로 공급되어 공기와 충분히 혼합된 후 연소기로 공급된다.

본 실험에서는 Fig. 4와 같이 화염장의 밀도차를 이용하여 화염면의 굴절된 상을 얻을 수 있는 Schlieren 장치를 이용하여 화염면을 가시화하였다. 광원으로는 10mW He-Ne Laser를 사용하였고 초점거리 3000mm Schlieren Lens를 사용하였다. 화염면

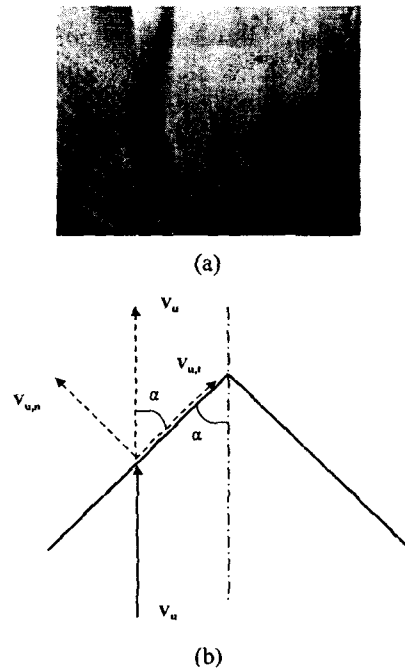


Fig. 5 (a) Typical Schlieren image of methane-air premixed flame and (b) a simplified schematic to obtain the burning velocity in a nozzle-type premixed burner

형상은 접사링과 확대 렌즈가 부착된 CCD 카메라(Hitachi)를 이용하여 얻어졌다. Fig. 5 (a)는 Schlieren을 통해서 얻은 화염상을 보여주고 있다. 노즐출구에서의 화염면상이 거의 직선 형태로 나타나는 것을 통해 노즐출구의 유속이 거의 균일함을 간접적으로 알 수 있다. Schlieren으로 얻은 화염면 형상을 통해 연소속도를 계산하는 과정은 Fig. 5(b)를 이용하여 다음과 같이 설명할 수 있다. 미연 혼합기가 화염면에 α 의 각도로 유입된다면, 미연 혼합기의 유입속도 V_u 는 화염면의 접선방향 속도 $V_{u,t}$ 와 화염면에 수직인 방향의 속도 $V_{u,n}$ 으로 나누어진 다. 여기서, 혼합기의 연소속도 (S_L)는 화염면에 수직인 유속성분이므로 $S_L = V_u \sin \alpha$ 와 같은 관계를 통해 얻어진다.

3.2 연소속도 측정결과 및 검토

본 연구그룹은 선행연구⁽²⁾에서 노즐 연소기를 이용하여 CH₄ 및 C₃H₈ 연료의 연소속도를 측정 한 바 있다. 여기서 얻어진 결과들을 기존의 실험 및 수치계산 결과와 비교하여 본 실험방법의

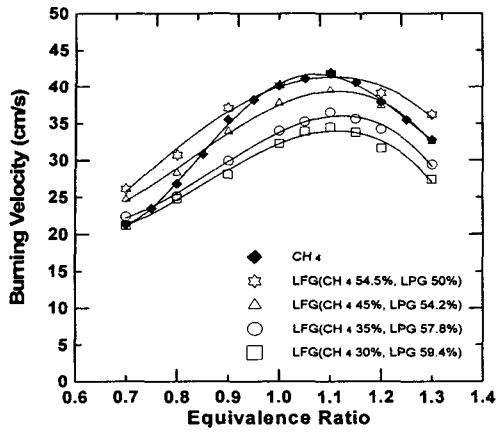


Fig. 6 Burning velocities of LFG-blended gases of which Wobbe Indices are adjusted to that of NG

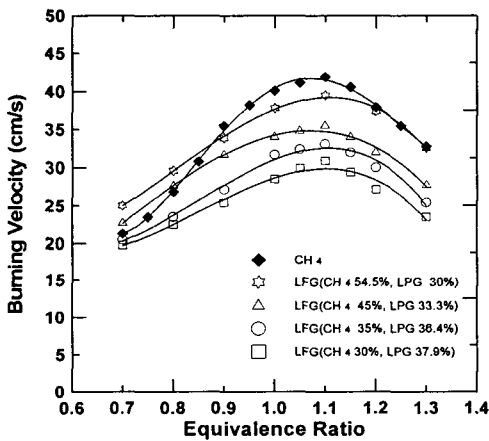


Fig. 7 Burning velocities of LFG-blended gases of which heating values are adjusted to that of NG

타당성을 확인하였다. 따라서, 본 논문에서는 연소속도 실험결과에 대한 별도의 검증 없이 결과들에 대해서만 논의하도록 하겠다.

이후 Fig. 6~10의 결과들은 Fig. 5 (a), (b)에서 설명한 방법을 이용하여 측정된 LFG 및 LFG 혼합연료의 연소속도 결과들을 나타낸다. 먼저, Fig. 6은 조성이 다른 LFG를 이용하여, 도시가스 및 웨버지수가 같도록 LPG를 첨가한 LFG 혼합연료의 연소속도와 순수 CH₄의 연소속도를 비교 도시한 것이다. 그림의 조건 중에서 CH₄ 비율은 LFG 중의 CH₄ 구성비율을 의미하며, CH₄를 제외한 나머

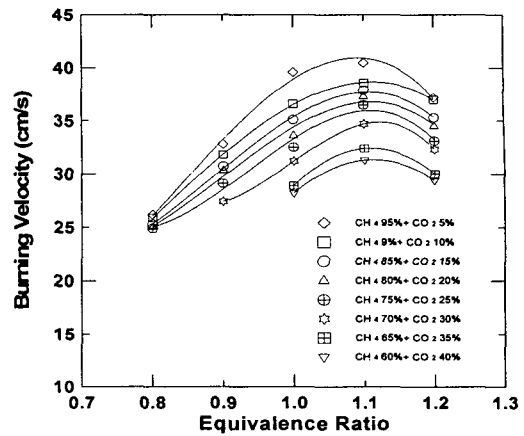


Fig. 8 Burning velocities of blended gases of CH₄ and CO

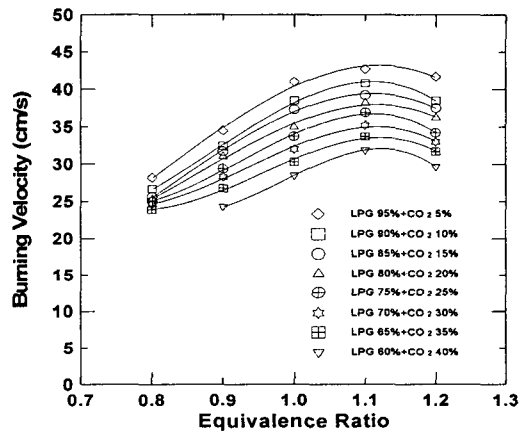


Fig. 9 Burning velocities of blended gases of LPG and CO₂

지 구성비율은 LFG 평균조성에서의 각 비율을 유지하도록 CO₂ : N₂ : O₂ 가 각각 37.5 : 7 : 1로 구성하였다. 또한, 그림의 LPG 비율은 LFG + LPG의 혼합연료 중에서 LPG의 비율을 의미한다. 결과를 보면, 성분 중의 CH₄ 농도가 54.5%인 평균조성의 LFG를 이용하여 도시가스와 웨버지수를 같게 한 경우, 최고 연소속도는 CH₄와 거의 같으나 희박 혹은 과농 영역에서는 오히려 LFG 혼합연료가 높게 나타나고 있음을 알 수 있다. LFG 중의 CH₄ 농도가 30%인 경우에는 불활성 가스인 CO₂가 많이 포함되어 있으므로 최고 연소속도는 CH₄보다 다소 낮게 나타나지만, 과농 영역에서는 두 연료간의 연소속도 차이가 적어짐

을 알 수 있다. 특히, 회박 연소영역에서는 순수 CH₄ 연료와 연소속도의 차이가 거의 없었다. 이와 같은 결과를 통해 평균조성의 LFG와 LPG를 혼합하여 웨버지수를 도시가스와 맞춘 혼합연료는 연소속도 측면에서는 도시가스의 대체연료로서 별 어려움이 사용될 수 있을 것으로 판단된다. 또한, LFG 중의 CH₄ 함량이 적은 경우에도 웨버지수를 도시가스와 일치시킨 혼합연료는 회박 혹은 과농 조건에서는 도시가스와 유사한 연소속도를 갖고 있어 혼합연료를 도시가스의 대체연료로 활용하는 측면에서 매우 긍정적인 사항이라 할 수 있다.

Fig. 7에는 조성이 다른 LFG와 LPG를 혼합하여 도시가스와 발열량을 동일하게 만든 LFG 혼합연료의 연소속도 측정값을 도시하였다. 그림에 표기된 CH₄와 LPG 조성은 Fig. 6에 표기된 것과 동일한 의미를 갖는다. 결과를 보면, 모든 LFG 혼합연료의 최고 연소속도는 CH₄보다는 다소 낮음을 알 수 있다. 특히, LFG 중의 CH₄ 농도가 30%인 경우에 최고 연소속도는 CH₄보다 10cm/s 이상 낮음을 알 수 있다. 즉, Fig. 7은 Fig. 6에서 설명한 웨버지수를 동일하게 만든 연료와 당량비 변화에 따른 연소속도의 경향은 유사하지만 그 크기는 다소 낮은 것을 알 수 있다. 이들 연소속도는 화염 안정성과 밀접한 관련이 있기 때문에 Fig. 12~13에서 연소속도와 화염 안정성을 연관하여 설명하였다.

Fig. 8과 9에는 LFG의 주성분 중 하나인 CO₂가 포함된 혼합연료의 연소속도 측정값을 도시하였다. 여기서, CO₂와 혼합될 연료로는 Table 1의 LFG 혼합연료의 주성분인 CH₄와 LPG 두 가지 경우로 하였으며, 이들 연료에 CO₂를 5~40%까지 첨가하면서 연소속도를 측정하였다. 참고로, LFG에서 CH₄ 성분을 제외하면 CO₂가 가장 많은 양을 차지하며, CO₂는 비열값이 N₂에 비해 큰 불활성 가스이므로 연료성분을 제외하면 연소속도에도 매우 큰 영향을 미치게 된다. 따라서, Fig. 8의 CH₄ + CO₂ 연료는 조성이 다른 LFG의 연소속도와 유사한 경향을 보일 것으로 예상된다. 결과에서 CO₂ 첨가량이 크고 당량비가 낮은 조건에서는 화염이 형성되지 않았기 때문에 연소속도 측정값을 제시할 수 없었다. 우선, Fig. 8에서 CO₂의 함유율이 증가함에 따라 연소속도는 점점 낮아지는 것을 알 수 있다. 특히, CO₂의 첨가를

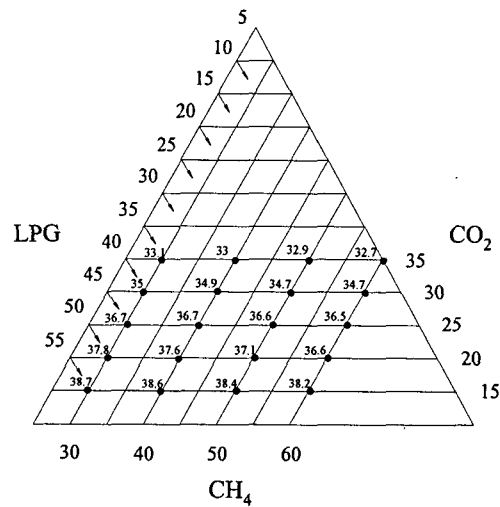


Fig. 10 Triangular diagram for the maximum burning velocity of the mixture of CH₄, LPG and CO₂

이 40%일 때의 최고 연소속도는 약 31cm/s 정도로서, CO₂가 첨가되지 않았을 때에 비해 약 10cm/s 정도 값이 낮아지는 것을 알 수 있다. 그러나, 회박 조건인 당량비 0.8에서는 CO₂가 다량 첨가된 경우를 제외하면 연소속도가 CO₂ 첨가에 따라 큰 차이를 보이지는 않았다. 이것은 회박 조건으로 갈수록 연료(CH₄ + CO₂)의 성분이 줄어들어 연료에 함유된 CO₂ 절대량에 큰 차이를 보이지 않기 때문으로 추정된다. 그러나, 좀 더 구체적인 이유는 수치계산 등을 이용하여 자세히 검토해 볼 필요가 있을 것이다.

Fig. 9의 LPG와 CO₂ 혼합연료에 대한 연소속도 결과도 Fig. 8과 비교하여 전체적으로 연소속도가 약간 높은 경향과, 조금 더 낮은 당량비에 대해서도 연소속도를 측정할 수 있었던 것을 제외하면 두 그림간의 결과는 유사한 것을 알 수 있다. 이들 Fig. 8와 9의 결과는 CH₄ 및 LPG 연료에 불활성 가스인 CO₂가 포함된 혼합연료의 연소속도 값을 제공하여 향후 수치계산으로 연소속도를 예측할 경우 비교 검증에 유용하게 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 3에서 언급한 바와 같이 연소속도 계산식(CP₁, CP₂)으로는 LFG와 같이 불활성 가스가 다량 혼합되어 있을 때의 연소속도를 합리적으로 예측하는데 한계가 있음을 알았다. 따라서, Fig.

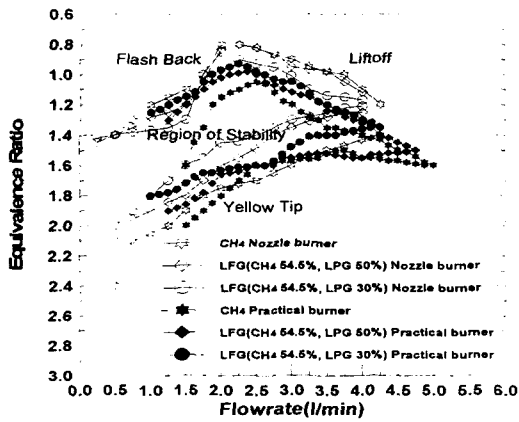


Fig. 11 Comparison of the flame stability region for the nozzle-type burner and practical burner

10에는 LFG + LPG 혼합연료의 대표적인 구성 성분을 CH₄, LPG, CO₂라고 가정하고, LFG의 조성도 계절별로 차이가 있음을 고려하여 CH₄의 함유율이 최저 30%부터 평균값(54.5%)을 포함할 수 있도록 60%까지 변화시켰다. 또한, 이때의 CO₂ 및 LPG의 함유율은 도시가스와 웨버지수 및 발열량을 일치시킨 경우를 포함하도록 그 범위를 결정하여 최고 연소속도를 측정하였고 이를 삼각형 다이어그램으로 작성하였다. 이 삼각형 다이어그램의 각 축은 CH₄, LPG, CO₂ 가스 중의 한 가지 성분비율을 의미한다. 삼각형 다이어그램을 읽는 방법은 예를 들어 CH₄와 CO₂의 성분비율이 각각 30%와 15%일 경우, CH₄와 CO₂ 두 축상의 각 성분비율을 나타내는 실선이 만나는 점(38.7 cm/s)이 이때의 최고 연소속도를 나타낸다. 또한, 이때 LPG의 성분비율은 이 점에서 대각선으로 화살표를 따라 LPG축에 연결하여 만나는 점인 55%가 된다. 본 다이어그램에서 세가지 가스 성분비율 영역내에 포함되어 있으면서 최고 연소속도가 표시되지 않은 영역은 주위의 표기된 연소속도 값들에 보간법(Interpolation)을 적용하여 계산하면 된다. 이 다이어그램에서 보간법으로 얻은 결과를 실제 실험으로 얻은 결과와 비교하였을 때 5% 이내의 오차범위에서 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 이 다이어그램은 본 연구에서 측정하지 않은 LFG 혼합연료의 성분비율에 따른 최고 연소속도를 제공하여 LFG 혼합연료를 이용할 연소기 설계에 유용한 자료로

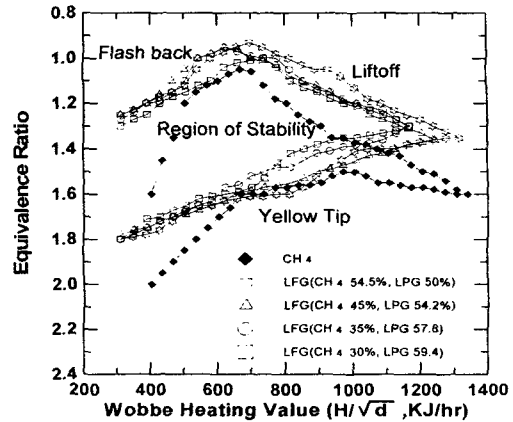


Fig. 12 Flame stability region of LFG-blended fuels of which Wobbe indices are adjusted to that of NG

활용될 수 있을 것으로 사료된다.

4. 실용 연소기에서 LFG 활용 가능성 검토

본 장에서는 연소속도와 밀접한 관계를 가지고 있는 LFG 혼합연료의 화염 안정성을 검토하고자 한다. 이를 위해 단공 노즐 연소기와 당량비 및 혼합기 유량을 제어할 수 있도록 개량한 가정용 가스 레인지를 실용 연소기로 선정하여 안정 연소영역을 관찰하였다. 안정 연소영역은 가시적 관찰에 의해 역화영역(Flash back), 부상영역(Liffoff), 황염영역(Yellow tip)으로 구분하였다.

우선, Fig. 11에는 단공 노즐 연소기와 가스 레인지를 대상으로 측정한 CH₄ 및 LFG 혼합연료의 안정 연소영역을 도시하였다. 그림에서 좌측 상부의 경계선 외부는 역화가 발생하는 영역, 우측 상부의 경계선 외부는 부상이 발생하는 영역, 그리고 하부 경계선 외부(아래)는 황염이 발생하는 영역을 나타낸다. 그리고, 이들 경계로 둘러싸인 안쪽 영역은 안정 연소영역에 해당된다. 그림을 보면, 노즐 연소기의 경우는 CH₄ 연료의 전체적인 안정 연소영역이 LFG 혼합연료에 비해 넓다는 것을 알 수 있다. 또한, LFG 혼합연료의 경우만을 살펴보면, LPG 함유율이 50%인 경우가 30%인 경우 보다 약간 넓은 안정 연소영역을 가지고 있다는 것을 확인할 수 있다. 그러나, 실용

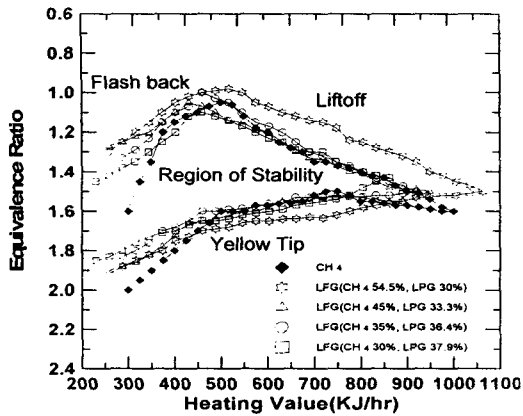


Fig. 13 Flame stability region of LFG-blended fuels of which heating values are adjusted to that of NG

연소기인 가스 레인지의 경우를 살펴보면 노즐 연소기와는 달리 LFG 혼합연료와 CH₄의 안정 영역 사이에는 당량비 변화에 대해 약간의 전위 (Shift)가 있음을 제외하면 큰 차이는 없음을 알 수 있다. 따라서, 가스 레인지 연소기는 노즐 연소기보다 연료변화에 민감하지 않아서 불활성 가스가 다량 포함된 LFG 혼합연료도 충분히 사용 가능할 것으로 판단된다. 이것은 가스 레인지에 의 화염은 단공 노즐 연소기와는 달리 주위 염공에 형성된 화염간의 상호작용으로 인한 보염 등의 안정화 효과가 있기 때문으로 추정된다.

Fig. 12는 Fig. 6과 동일한 혼합연료를 대상으로 측정된 안정 연소영역을 도시한 것이다. 그림에서 가로축은 각 혼합연료의 발열량을 비중의 제곱근으로 나눈 값(H/\sqrt{d})으로, 연료공급 압력이 동일한 경우 발생하는 가스레인지의 시간당 발열량 즉, 웨버지수에 해당된다. 결과를 보면, LFG 중의 CH₄ 함량은 변하여도 웨버지수를 동일하게 맞추면 혼합연료의 화염 안정영역은 대략 비슷한 것을 알 수 있다. CH₄를 제외한 LFG 혼합연료들의 최적 연소조건은 당량비 1.4 근처와 출력 700 KJ/hr 근처로서, 이 영역에서는 LFG 혼합연료는 CH₄의 안정영역을 충분히 포함하므로 CH₄가 주 성분인 도시가스와 충분히 호환 가능할 것으로 판단된다.

Fig. 13은 Fig. 7과 동일한 혼합연료를 대상으로 측정된 안정 연소영역을 도시한 것이다. 그림에

서 가로축은 앞의 Fig. 12과는 달리 연소시의 발열량을 의미한다. 결과를 보면, 혼합연료를 사용한 경우 발생하는 열량에 따른 화염 안정성은 거의 CH₄의 경우와 동일하며, LFG 중의 CH₄ 함량 54.5%의 경우에는 오히려 더 많은 열량을 발생시킬 수 있는 조건에서도 화염이 안정됨을 알 수 있다. 단, 이 경우 혼합연료들의 비중이 CH₄보다 높기 때문에 동일 열량을 발생하기 위해서는 연료의 공급압력을 높여주든지 아니면 연료노즐의 크기를 조절할 필요가 있다. 이와 같은 조절은 비교적 간단히 할 수 있으므로, 발열량을 도시가스와 일치시킨 혼합연료의 경우에도 연료 공급조건 혹은 연소기 노즐의 간단한 개량에 의하여 도시가스의 대체 에너지로서 충분히 활용할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 LFG 및 LFG 혼합연료에 대하여 연소속도, 화염 안정성 등의 기초 연소특성에 대한 검토를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 기존에 제안된 혼합연료의 연소속도 계산식은 LFG와 같이 불활성 가스가 다량 포함된 경우에는 잘 맞지 않으므로 수정, 보완이 필요하다.

(2) 본 연구에서는 CH₄, LPG, CO₂의 3 가지 성분을 대표적으로 갖는 LFG 혼합연료의 최고 연소속도를 삼각형 다이어그램으로 제시하였으며, 이를 통해 얻은 연소속도 값은 LFG 혼합연료의 활용에 유용할 것으로 판단된다.

(3) 웨버지수를 도시가스와 같도록 만든 LFG 혼합연료의 경우, 최고 연소속도는 CH₄와 비교적 차이가 크지 않으며, 화염 안정성도 양호하기 때문에 도시가스와 별다른 문제없이 호환 가능하다.

(4) 발열량을 도시가스와 일치시킨 LFG 혼합연료의 경우에는 최고 연소속도가 CH₄보다는 낮지만, 실용 연소기에서는 연료 공급압력 혹은 노즐 직경을 적절히 조절한다면 화염 안정성이 양호하여 도시가스의 대체 연료로서 충분히 사용할 수 있다.

후 기

본 연구는 과학기술부에서 주관하는 지역기술

개발용역사업(인천-0104)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Sudokwon Landfill Site Management Corporation, 1997, "A Research Report for the Analysis on the Establishment Efficiency of Landfill Gas Treatment Facilities," December.
- (2) Lee, C. E., Oh, C. B., Jung, I. S. and Park, J., 2002, "A Study on the Determination of Burning Velocities of LFG and LFG-mixed Fuels," *Fuel*, Vol. 81, pp. 1679~1686.
- (3) Lee, C. E., Hwang, C. H and Kim, S. H., 2002, "Characteristics of Flame Stabilization of the LFG Mixed Gas," *Transaction of KSME B*, Vol. 26, No. 2, pp. 328~335.
- (4) Lee, C. E., Lee, S. R., Han, J. W. and Park, J., 2001, "Numerical Study on Effect of CO₂ Addition in Flame Structure and NO_x Formation of CH₄-Air Counterflow Diffusion Flames," *International Journal of Energy Research*, Vol. 25, pp. 343~354.
- (5) Kee, R. J. Rupley, F. M. and Miller, J. A., 1989, "Chemkin-II : A Fortran Chemical Kinetics Package for the Analysis of Gas Phase Chemical Kinetics," *Sandia Report SAND89-8009B*.
- (6) KOGAS Research Institute, 1994, "The Study on the Natural Gas Combustion Characteristics," *KB-GC-018-91049309*.
- (7) JSME, 1995, "Combustion Handbook," pp. 275~276.
- (8) Morel, T., 1975, "Comprehensive Design of Axisymmetric Wind Tunnel Contraction," *Journal of Fluid Engineering*, pp. 225~233.