

LFG 혼합 연료의 화염 안정화 특성

김선호* · 오창보* · 이창언** · 이인대***

Characteristics of Flame Stabilization of the LFG Mixing Gas

Sun Ho Kim, Chang Bo Oh, Chang Eon Lee, In Dae Lee

Key Words: LFG, Flame Stability, Swirl Diffusion Flame, Inert Gas

Abstract

Landfill gas has merely half heating value compared with liquified natural gas but can be greatly utilized as a commercial fuel. The authors have examined emission characteristics as well as measured burning velocity of LFG mixed gas which contains plenty of CO₂. With the viewpoint of fuel utilization, flame stability could be one of important characteristics of LFG. In this study, the comparison experiments are conducted between CH₄ and LFG for searching the region of flame stabilization based upon the flame blowout at maximum fuel stream velocity. As a result, it is found that stabilization region of LFG is not improved with that of CH₄ in non-swirl/or weak swirl jet diffusion flame. However, it is also known that flame stability is hardly affected by inert gas in the strong swirl with considering widened flame stabilization region of LFG rather than LNG.

1. 서 론

LFG(Landfill Gas)는 쓰레기 매립지에서 발생하는 가스로서, 주요 성분은 CH₄, CO₂ 및 미량의 N₂, O₂로 구성되어 있으며 발열량이 약 3,000~6,000

kcal/m³ 정도에 이르는 저급가스이다⁽¹⁾. LFG에 LPG 등의 발열량이 높은 연료를 적절히 혼합하면 발열량과 연소속도를 기존 도시가스와 비슷한 수준으로 맞출 수 있어 충분히 활용 가능한 연료라고 할 수 있다. LFG 혼합연료를 실용 연소기에 이용하기 위해서는 연소속도, 화염 안정성 및 오염물질 배출특성 등의 기초

* 인하대 대학원

** 인하대 기계공학과

*** 동아건설산업(주)

적인 연소특성에 대해서 구체적으로 검토해 볼 필요가 있다. 그러나 아직까지 LFG와 같이 불활성 가스가 많이 포함된 저급연료의 연소특성에 관한 연구는 그리 많지 않은 실정이다.

저자들은 이미 LFG 혼합가스의 연소 속도 측정 및 계산에 관한 기초연구⁽²⁾와 불활성 가스인 CO₂를 다량 포함하는 가스연료의 오염물질 배출특성에 관한 연구⁽³⁾를 수행한 바 있는데, LFG 활용을 위해서는 이러한 기초연구 외에 화염 안정성에 대한 연구도 선행될 필요가 있다. 화염 안정성은 연소기 안전, 불완전 연소, 소음 등의 문제와 관련하여 검토해 볼 필요가 있는 중요한 인자 중 하나이다. 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 안정화 특성을 검토하기 위해 LFG 자체 및 도시가스와 호환 가능하도록 만든 LFG 혼합연료를 대상으로 화염 안정화 기구를 갖고 있는 선회 연소기를 이용하여 화염 안정영역을 찾고, 이것을 순수 CH₄

화염과 비교 검토하여, 안정화 특성을 살펴보고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

본 연구에서는 화염의 안정화 영역을 측정하기 위해 연료노즐 직경이 2.95mm 이고 선회발생기가 부착된 확산 연소기를 사용하였다. 유로계는 연소기, 유량 제어 시스템, 공기 공급 시스템 등으로 구성되어 있으며, 개략도는 Fig. 1과 같다. 연소기의 연료가스와 동축 공기의 유량제어는 버블유량계로 보정된 질량유량계(MFC Tylan FS280 series, MFC Hi-Tec)를 이용하였다.

실험에 사용된 가변 블록형 선회 연소기(movable-block type swirl burner)⁽⁴⁾⁽⁵⁾는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 중심축에 대해 동심이 되도록 두 개의 원형판으로 구성되어 있고 갈라진 블록들을 겹쳐 하나의 판에 다른판을 부착시키도록 되어 있다. 겹쳐진 블록들은 반지름 방향과 접선방향으로 교대로 유로에 유입되게 하며 이에 공기 유동은 반지름 방향과 접선방향의 유동으로 분배되어 이것이 결합하여 선회류를 만든다. 밑의 판은 연소기 지지대에 고정되어 있고 윗판은 간단히 회전시킬 수 있는데 이의 회전으

Table 1 각 연료의 특성

		LFG 100%	LNG 100%	LFG70%+ LPG30%	LFG50%+ LPG50%	CH ₄ 100%	CH ₄ 95%+ CO ₂ 5%	CH ₄ 90%+ CO ₂ 10%	CH ₄ 85%+ CO ₂ 15%
조 성	CH ₄	54.5	89.78	38.15	27.25	100	95	90	85
	C ₂ H ₆	0.0	7.48	0.00	0.00	0	0	0	0
	C ₃ H ₈	0.0	2.02	30.00	50.00	0	0	0	0
	C ₄ H ₁₀	0.0	0.70	0.00	0.00	0	0	0	0
	CO ₂	37.5	0.00	26.25	18.75	0	5	10	15
	N ₂	7.0	0.02	4.90	3.50	0	0	0	0
	O ₂	1.0	0.00	0.70	0.50	0	0	0	0
고위발열량(HHV:kcal/m ³)		5207.62	10528.56	10793.42	14517.29	9468.92	8995.47	8522.03	8048.58
웨버지수(kcal/m ³)		5.33	13.35	10.17	13.03	12.81	11.67	10.64	9.70

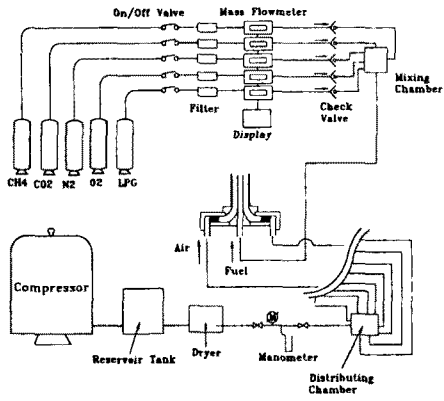


Fig. 1 Schematic diagram of swirl burner flow system

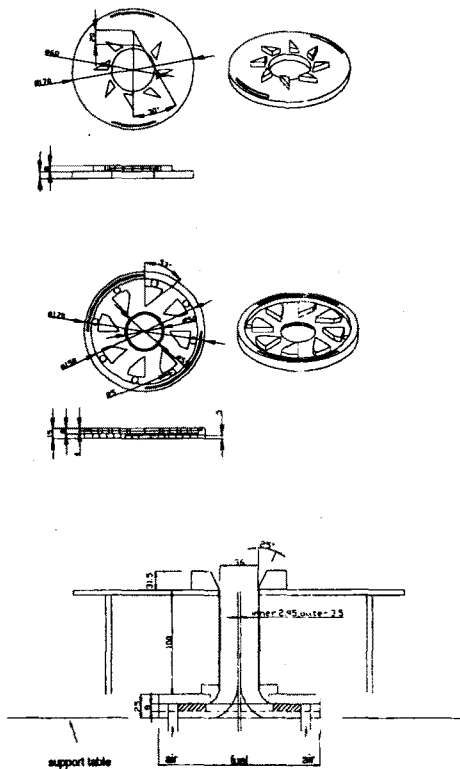


Fig. 2 Schematic diagram of movable block type swirl burner

로 각운동량의 flux가 연속적으로 0에서 최대치까지 변하고 이 값들은 공기 유동비와 선회발생기의 형상에 의존하게 된다. 이와 같이 유입된 공기는 8개의 수렴통로(Convergent Tunnel)를 통과하면서 균일한 단면속도 분포를 갖게되고 선회 발생기 블록(Swirl Generator Block)을 경유하면서 연소용 분출구에서 지면에 대해 수직 방향으로 분출된다. 이 때 연소용 분출구 중앙에 위치한 연료 노즐관에서 유입된 연료가스와 혼합하게 된다. 선회 발생기의 블록은 윗판의 회전에 의해 블록각을 0에서 20도까지 연속적으로 변화시킬 수 있으며 이 블록각으로부터 선회도를 구한다. 또한 강선회를 얻을 수 있도록 연료, 공기 분출구 하류에 Quarl 반각을 25도로 하여 부착하였다⁶⁾.

실험에 이용된 연료가스는 C.P. (Chemically Pure)등급의 CH₄과 순도 99.9% 이상의 CO₂, N₂, O₂ 가스와 상용 LPG를 조합하여 실험에 필요한 가스를 제작하여 이용하였으며, 각 연료가스의 조성 및 발열량 등은 Table 1과 같다.

실험은 Table에 나타난 평균적인 조성의 LFG와 웨버지수를 기존 도시가스와 호환 가능하도록 LPG와 혼합하여 만든 LFG 혼합연료, 발열량을 기존 도시가스와 일치시킨 LFG 혼합연료를 고려하여 실험을 하였다. 각종 가스의 원활한 혼합을 위해 mixing chamber에 접선 방향으로 가스가 유입되도록 하였다. 선회도는 각 연료별로 0에서 1.02까지 변화시켰으며 각 연료의 조성을 바꿔가며 유속을 1m/s 씩 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.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 3에는 노즐버너를 이용하여 측정 한 순수 CH₄와 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 CH₄보다 다소 높게 나타나고 있으나, 최대 연소속도는 대략 40cm/s 전후로 순수 CH₄와 비슷함을 알 수 있다. 그러나 LFG는 불활성 가스인 CO₂가 다량 함유되어 있으므로 연소속도가 다른 연료가스의 연소속도보다 많이 낮은 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 가스레인을 개량한 실용연소에서 CH₄ 및 각 LFG 혼합연료의 안정 연소범위를 측정하여 나타낸 것이다. 각 LFG 혼합연료의 안정 연소영역

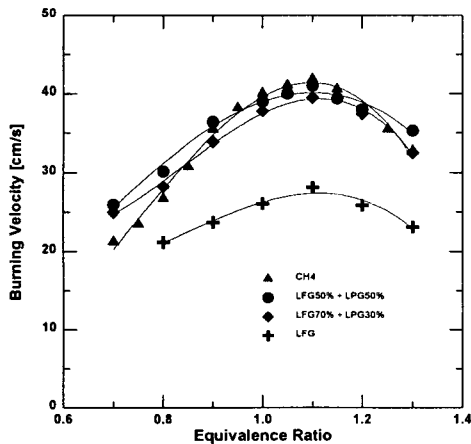


Fig. 3 The comparison of burning velocity for LFG+LPG, CH₄ with LFG premixed flame as a function of the equivalence ratio

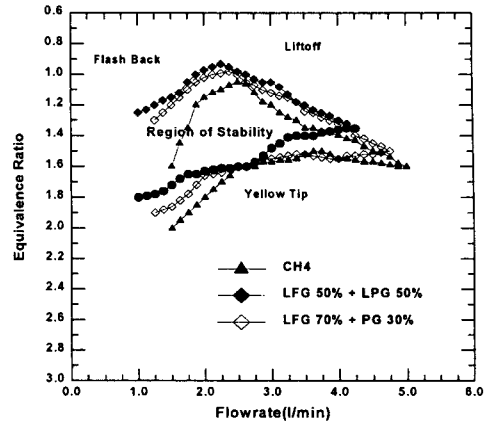


Fig. 4 CH₄, LFG 50% + LPG 50% and LFG 70% + LPG 30% stability limits of practical experiment

은 CH₄에 비해 다소 당량비가 희박한 곳에서 나타났으나 전체적인 안정 연소 영역은 CH₄ 화염과 유사한 경향을 보이고 있으며, 이러한 안정 영역은 Fig. 3에서 설명한 각 연료의 연소속도 경향과

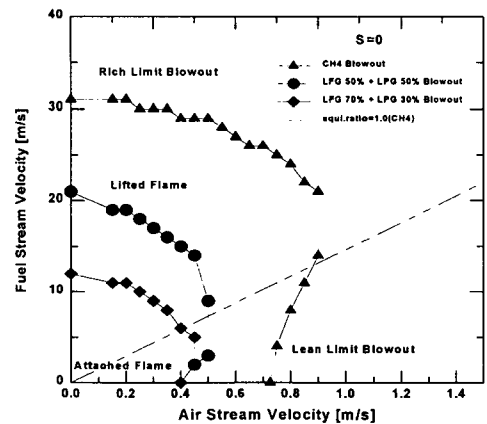


Fig. 5 Stable region of CH₄, LFG+LPG jet flame as a function of the co-flowing stream velocity

대략 일치함을 알 수 있다.

Fig. 5는 선회 확산 연소기에서 선회가 없는 경우 각 연료의 화염 안정화 영역을 도시한 것이다. 세로축과 가로축은 각각 연료유속 및 주위류의 유속을 나타낸다. 또한 그림에서 대각선은 CH_4 의 양론혼합비선을 나타내며, 이 양론혼합비선을 기준으로 위쪽이 연료유속을 증가시켜 날림이 발생하는 한계유속(Rich Limit Blowout)이며, 아래쪽은 부상화염에서 연료유속을 감소시켰을 때 화염이 재부착되지 않고 날림이 발생하는 한계유속(Lean Limit Blowout)을 나타낸다. 화염 안정화 영역은 이 두 한계유속 내의 영역으로 정의하였다. LFG 혼합연료의 양론혼합비선은 CH_4 와 비슷하므로 그림에서 생략하였다. 본 실험에서 LFG 자체만으로는 안정성이 매우 불량하여 작은 주위류에서도 날림 현상이 쉽게 발생하여 LFG 단독 실험은 수행하지 못하였다. 순수 CH_4 의 경우 주위류 유속이 작은 경우 부상이 일어난 후 연료 유속이 31m/s에서 화염날림이 발생한다. 그러나 주위류 유속 증가하여 0.9m/s 이상에서는 화염이 형성되지 않는다. LFG 혼합연료의 안정화 영역을 살펴보면 LPG 첨가 비율이 증가함에 따라 날림 유속, 한계 주위류 유속이 높아지나 순수 CH_4 보다는 크게 낮아짐을 알 수 있다. LFG 혼합연료는 CH_4 와 연소속도 및 실용 연소기에서의 안정 연소 영역에서는 큰 차이가 없음에도 불구하고 동축분류 확산 화염에서의 안정화 영역에는 많은 차이가 있음을 알 수 있다. 이 결과는 Kalghatgi의 혼합가스의 화염 날림에 대한 실험결과와 유사한 경향을 보인다⁽⁷⁾. Kalghatgi는 버너 출구로부터 양론혼합 위치까지의 거리가 짧게 되면 날림 유속이 작아지게 된다고 제안한 바 있

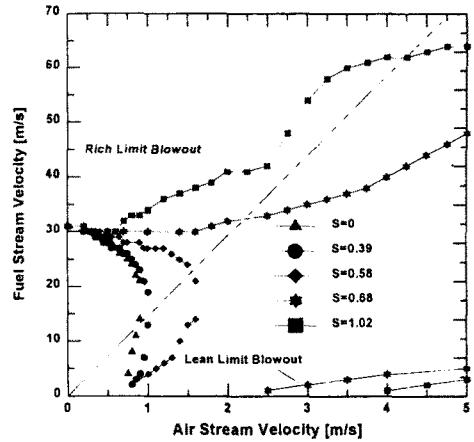


Fig. 6 Stable region of CH_4 as a function of the swirl number

다. LFG 혼합연료는 양론혼합비 상태에서의 필요 공기량이 CH_4 에 비해 작아 양론혼합 위치까지의 거리가 짧으며, 날림유속은 CH_4 보다 작아지게 된다. 이것은 LFG 활용에 있어 중요한 현상으로, 연소속도와 더불어 불활성 가스의 함유율이 화염 안정성과 밀접한 관련이 있음을 의미하는 것이다.

Fig. 6은 선회도(Swirl Number ; S) 변화에 따른 화염 날림 한계에 근거한 CH_4 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 작을 경우 화염 안정화 효과를 갖긴 하지만 비선회에 비해 큰 차이를 보이지는 않는다. 선회도가 0.68, 1.02의 강선회의 경우 초기 주위류 유속 증가로 날림 속도가 낮아졌으나, 주위류 유속이 더 증가하면 날림 유속 또한 증가하는 경향이 나타난다. 이러한 강선회는 화염의 안정영역을 매우 증가시키는 효과가 있음을 알 수 있다. 본 실험에서는 강선회의 경우 공기

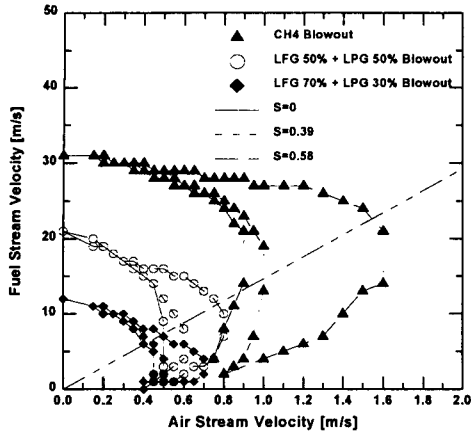


Fig. 7 Stable region of CH_4 , LFG+LPG in weak swirl($S=0\sim 0.58$)

공급 시스템의 용량 한계로 인해 최대 날림 유속을 측정하진 못했으나, 일반적으로 날림유속은 단순 분류 화염의 4-5 배까지 증가한다고 알려져 있다⁽⁸⁾.

Fig. 7은 비선회와 약선회에서의 LFG 혼합연료의 안정화 영역을 CH_4 연료와 비교 도시한 것이다. LFG 혼합 연료인 경우 LPG 첨가율이 증가하면 안정화 영역이 다소 증가하지만 CH_4 보다는 작다. 또한 선회도 증가에 따라 안정화 영역은

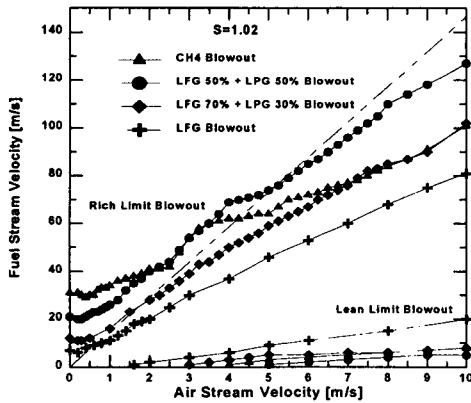


Fig. 8 Stable region of CH_4 , LFG+LPG in strong swirl($S=1.02$)

미소하게 증가하지만 약선회에서는 아직 화염 안정화 영역이 그리 커지지는 않음을 알 수 있다.

Fig. 8은 선회도 1.08의 강선회일 경우 CH_4 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_4 의 안정화 영역을 넘어서고 있으며, LFG 70% + LPG 30%의 혼합연료도 주위류 유속이 더 증가되면 CH_4 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_4 보다 발열량이 반정도 작은 LFG 자체 연료는 CH_4 의 안정화 범위를 넘지 못하고 있음을 보이고 있다. 기존에 알려진 선회가 화염 안정화에 미치는 영향

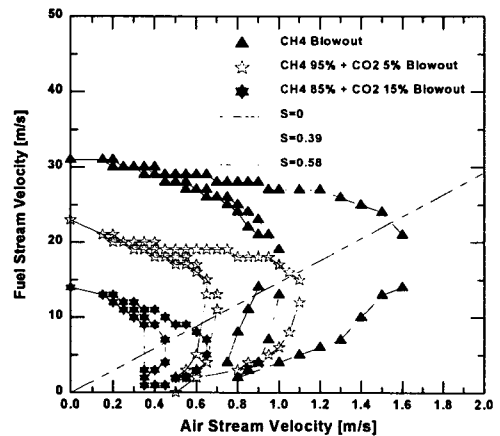


Fig. 9 Stable region of CH_4+CO_2 in weak swirl($S=0\sim 0.58$)

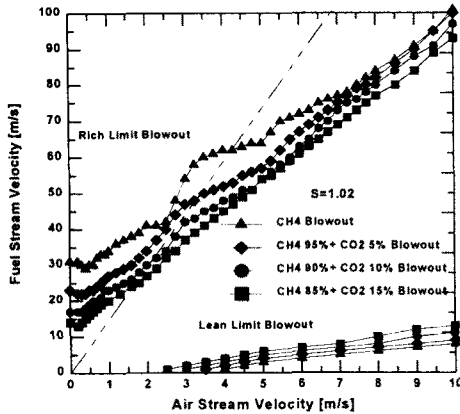


Fig. 10 Stable region of CH₄+CO₂ in strong swirl(S=1.02)

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⁽⁸⁾. 그림에서 보이는 바와 같이 발열량이 높은 순서로 안정화 영역이 나타나는 것도 이와 같은 이유에서 비롯된 것으로 사료된다.

Fig. 9는 LFG의 주요 불활성 가스인 CO₂를 첨가했을 때 마찬가지로 비선회와 약선회에서 안정화 영역을 CH₄와 비교 도시한 것이다. CO₂ 함량이 늘어남에 따라 날림은 점차로 빨라지며 한계 주위류 유속은 더 느려짐을 알 수 있다⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾. 비선회, 약선회에서의 LFG 혼합 연료와 불활성가스인 CO₂가 혼합된 연료의 화염 안정성은 같은 경향을 보이고 있다.

Fig. 10은 선회도 1.02의 강선회에서 CH₄ + CO₂ 혼합연료의 안정화 영역이다. 초기 주위류에서 CH₄ + CO₂의 안정화 영역은 CO₂ 함량이 늘어남에 많은 차이를 보이거나 선회류 증가에 따라 안정화 영역 차이는 감소하고 있다. 그러나 LFG 자체의 경우에서처럼 CH₄의 안정

화 영역을 아직 넘어서진 못하고 있다. 이도 CH₄ + CO₂ 혼합연료가 CH₄의 발열량보다 낮기 때문이며 불활성 가스는 화염 안정화에 좋지 않으나 강선회도의 일정 선회량 이상에서는 그리 큰 영향을 끼치지 않는다.

4. 결론

순수 CH₄, LFG 혼합연료 및 CH₄ + CO₂ 혼합연료에 대해 화염 안정성을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 내렸다.

1) 가스레인지에서 LFG 혼합연료의 안정화 영역은 기존 도시가스의 안정영역과 비슷한 경향을 나타내었으나 선회가 없는 동축 분류 확산 화염에서의 안정화 영역에서는 많은 차이가 남을 확인하였다.

2) 공기 유동에 약선회를 가하면 각 연료의 안정성은 미소하게 개선되지만 주위류 증가에 따라 날림 최대 연료 유속은 여전히 낮아진다. 강선회를 가하면 화염 안정성은 모든 연료에 대해 크게 개선된다.

3) LFG 혼합연료의 화염 안정성은 강선회의 경우 기존 도시가스보다 더 개선되어질 수 있으며, 이는 선회효과와 더불어 각 연료의 발열량 차이에 의한 것으로 사료된다.

4) LFG 혼합연료 및 CO₂를 포함하는 연료의 안정 연소 범위를 얻기 위해선 선회도 0.6 이상의 강선회가 요구되며, 이 때 불활성가스는 화염 안정성에 큰 영향을 끼치지 않음을 알았다

후기

본 연구는 에너지자원기술개발센터(주관 동아건설, 위촉 인하대)의 대체 에너지

지 기술개발사업의 연구비로 진행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 매립가스 처리시설 설치효율 분석 조사 연구용역 보고서, 수도권 매립지 운영관리조합, Dec. 1997
- (2) 이창언, 오준석, 정익산, 오창보, 이인대, "LFG(Landfill Gas) 활용을 위한 연소특성 검토", 제18회 KOSCO SYMPOSIUM 논문집, pp.21-29
- (3) 이승로, 한지용, 이창언, "CO₂가 CH₄/Air 대향류 확산화염의 구조 및 NO_x 생성특성에 미치는 영향", 1999, 한국 자동차 공학회 추계학술대회 논문집, 제출중
- (4) J. M. Beer and N. A. Chigier, "Combustion Aerodynamics", Applied Science Publishers, London, 1972
- (5) 명현국, "선회화염의 구조에 관한 실험적 연구", 한국과학기술원 기계공학과 석사학위 논문, 1982
- (6) N. Fricker and W. Leuckel, "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, 49, 152-158, 1976(September)
- (7) Kalghatgi G.T., "Blowout Stability of Gaseous Jet Diffusion Flames", Combustion Science and Technology, pp.233-239, 1981
- (8) Douglas Feikema, Ruey-Hung Chen, and James F. Driscoll, "Enhancement of Flame Blowout Limits by the Use of Swirl", Combustion and Flame, 80, 183-195, 1990
- (9) Papanikolaou N. and Wierzbza I., "Effect of Burner Geometry and Fuel Composition on the Stability of a Jet Diffusion Flame", ASME Journal of Energy Resources Technology, Vol. 119 pp. 265-270, 1997
- (10) Karbasi M. and Wierzbza I., "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, 1998