

LFG(Landfill Gas) 혼합가스의 연소속도에 대한 수치해석적 연구

전익산, 오창보, 이창언*

인하대학교 기계공학과 대학원, 인하대학교 기계공학과*

A Numerical Study on the Burning Velocity of LFG Mixing Gas

Ik San Jung, Chang Bo Oh, Chang Eon Lee*

Inha University Graduate School, Department of Mechanical Eng.

Inha University, Department of Mechanical Eng.*

Abstract

In this study, the burning velocity of LFG and LFG mixing fuels related with flame stabilization have been analyzed numerically using C3 reaction mechanism which consists of 92 species and 621 reaction for using LFG. The results show that the burning velocities of LFG and LFG mixing fuels are obtained as a function of CH₄ and LFG percent in stoichiometric conditions. Also, a correlation of the burning velocities LFG and LFG mixing fuels are obtained over a wide range of equivalence ratio. The comparison of burning velocity from correlation with that calculated numerically show good agreements. From these results, the proposed burning velocity correlations for LFG and LFG mixing fuels can be applied for the practice of LFG.

1. 서론

최근 들어 쓰레기 매립지에서 발생하는 저급가스를 실용에너지로 사용하고자 하는 시도가 이루어짐에 따라 매립지에서 발생하는 LFG(Landfill Gas)에 대한 관심이 증가하고 있는 추세이다. LFG란 매립지에서 발생하는 바이오 가스(Biomass Gas)의 일종으로 그 성분 및 발열량은 Table. 1에 표기한바와 같고, 에너지원으로써 충분한 가치가 있다고 할 수 있다. 이러한 LFG를 활용하는 방법으

로 다음의 세 가지 경우를 예로 들 수 있는데 첫째, LFG 자체만을 연료로 사용하는 경우 둘째, LFG에 기존 도시가스를 적절히 혼합하여 사용하는 경우 끝으로 세 번째는 LFG에 LPG를 적절히 혼합하여 사용하는 경우이다. 그러나, LFG는 다량의 불활성 가스를 함유하고 있고, 그 조성 또한 일정하지 않아 연소 특성이 상용 연료와 상이하고 이에 대한 열역학적 물성치, 연소속도, 화염 안정성 등의 연료 특성에 대한 체계적인 정보가 필요하다. 연소속도란, 미연가스가 화염면에 수직 방향으로 화염대를 통과할 때의 속

도를 말하는 것이며 연료의 성분, 당량비, 화 도식을 실용적으로 이용하는 데는 한계가 있

		LFG 100%	LPG 100%	LNG 100%	LFG70% +LPG30%(10A)	LFG 50% +LPG50%(13A)
조 성	CH ₄	54.5	0.0	89.78	38.15	27.25
	C ₂ H ₆	0.0	0.0	7.48	0.00	0.00
	C ₃ H ₈	0.0	100.0	2.02	30.00	50.00
	C ₄ H ₁₀	0.0	0.0	0.70	0.00	0.00
	CO ₂	37.5	0.0	0.00	26.25	18.75
	N ₂	7.0	0.0	0.02	4.90	3.50
	O ₂	1.0	0.0	0.00	0.70	0.50
저위발열량 (LHV:kcal/m ³)		4692.82	21937.80	9519.84	9866.31	13315.31
고위발열량 (HHV:kcal/m ³)		5207.62	23826.96	10528.56	10793.42	14517.29
웨버지수 (kcal/m ³)		5.33	19.27	13.35	10.17	13.03

Table. 1 The Components of Fuels

염온도 및 압력 등과 관련이 있는 주요 연소 특성 중 하나로 연소기 설계시, 화염 안정성과 부하량 등을 결정하는데 이용되는 중요한 인자이다. 연소속도에 대한 종래의 연구를 살펴보면, 초반에는 노즐버너 타입의 연소기와 정적 연소기(Constant Volume Bomb) 등을 사용하여 연소속도 측정방법에 대한 연구와 당량비 및 압력 등이 연소속도에 미치는 영향에 대한 실험적 연구가 주를 이루었다.⁽¹⁾ 이후, 일부 연료에 대한 상세 반응기구가 비교적 정확히 묘사됨에 따라 1차원 예혼합화염 및 대향류화염을 이용한 수치 해석적 연구가 수행되었고, 이를 통해 연소속도 예측과 연소속도에 미치는 여러 가지 인자들에 대한 검토가 이루어 졌다. 또한 실험적 방법을 통한 연소속도 실험식에 대한 연구도 이뤄졌는데, Payman⁽²⁾, Yumlu⁽³⁾ 등은 여러 성분의 가스가 혼합되어 있을 때, 각 순수 가스의 최고 연소속도와 혼합분율에 대한 상관관계를 혼합법칙(Mixing Rule)으로 나타내어 연소속도를 예측하는 식을 제안한 바 있다. 그러나 이들이 제안한 연소속도 예측식은 가스의 혼합 비율이 제한적이고 정확성에 있어서 많은 차이를 보이고 있어 이 연소속

었다. 또한, 불활성가스가 함유된 경우의 연소속도식도 제안된 바 있으나⁽⁴⁾, LFG와 같이 불활성가스가 다량 혼합된 경우에는 실제 실험치와 잘 일치하지 않았다. 따라서, 기존의 식을 이용하여 불활성가스가 다량 혼합된 LFG와 같은 연료의 연소속도에 관한 정확한 정보를 얻는 데는 많은 어려움이 있었다. 이러한 이유로 본 연구에서는 수치 해석적 기법을 이용하여, LFG와 같이 불활성가스가 다량으로 포함된 연료의 연소속도를 정확하게 예측할 수 있는 식을 도출하여 LFG 연소속도에 대한 실용적 정보를 제공하고자 한다.

2. 수치해석적 방법

2.1 지배방정식 및 경계조건

본 연구에서는 1차원 자유전파 예혼합 화염을 수치 해석적으로 모델링한 Premix Code를 이용하였다. 1차원 예혼합화염에 대한 지배방정식은 아래와 같고, 여기서 점성 효과, 중력, 복사 열전달, 듀퍼효과(Dufour Effect) 등을 무시하였다.⁽⁵⁾

연속 방정식:

$$\dot{M} = \rho u A \quad (2-1)$$

화학종 보존방정식:

$$\dot{M} \frac{dY_k}{dx} = - \frac{d}{dx} (\rho A Y_k V_k) + A \dot{w}_k W_k \quad (k=1, 2, 3, \dots, K) \quad (2-2)$$

에너지 보존방정식:

$$\dot{M} \frac{dT}{dx} = \frac{1}{c_p} \frac{d}{dx} \left(\lambda A \frac{dT}{dx} \right) - \frac{A}{c_p} \sum_{k=1}^K \rho Y_k \times V_k c_{pk} \frac{dT}{dx} - \frac{A}{c_p} \sum_{k=1}^K \dot{w}_k h_k W_k \quad (2-3)$$

상태 방정식:

$$\rho = \frac{p \bar{W}}{RT} \quad (2-4)$$

여기서 x 는 화염에 고정된 독립공간좌표, \dot{M} 은 질량유량, A 는 단면적, T 는 온도, p 는 압력, u 는 혼합물의 속도, ρ 는 밀도, Y_k , W_k , c_{pk} , \dot{w}_k , h_k 들은 각각 k 번째 화학종의 질량분률, 분자량, 정압비열, 단위 체적당 몰생성률, 비엔탈피이며, V_k 는 k 번째 화학종의 확산속도로서 열확산을 고려한 Fickian 관계를 이용하여 구해진다. 그 외에 \bar{W} 는 혼합물의 평균 분자량, R 은 가스상수, λ 는 혼합물의 열전도계수, c_p 는 혼합물의 정압비열을 나타내고 있다. 계산에 이용된 경계조건은 다음과 같다.

$$x = -\infty, \quad T(-\infty) = T_u, \quad Y_k(-\infty) = Y_k$$

$$x = \infty, \quad \frac{dT}{dx}(\infty) = 0, \quad \frac{dY_k}{dx}(\infty) = 0$$

where, $k=1, 2, 3, \dots, K$

여기서, T_u 는 반응 전 혼합물의 온도를 나타낸다.

2.2 계산 방법

본 연구에서 고려한 반응기구는 각각, 49개의 화학종과 279개의 가역반응으로 구성된 GRI v-2.11 반응기구와 92개의 화학종, 621개의 가역반응으로 구성된 C3 반응기구이다. 각 화학종들의 기초 물성치 계산은 Chemkin-II Package와 Tranfit Package를 이용하여 계산하였다.⁽⁶⁾ Premix Code는 수정 뉴턴 방법(Damped Modified Newton Method)과 시간적분법을 이용한 알고리즘을 사용하였는데⁽⁷⁾, 이러한 방법은 초기값이 해로 수렴하기 쉬운 구간에서는 빠르게 수렴하지만, 그렇지 않은 경우에는 수렴이 힘들어 시간적분을 통하여 먼저 계산하여 충분히 수렴시킨 후에 뉴턴 방법을 사용하여 최종 해를 구하게 된다.

3. 계산 결과 및 검토

3.1 순수연료 및 혼합연료의 연소속도

Fig. 1에서는 CH_4 , C_3H_8 , LFG, 혼합연료의 연소속도를 당량비의 변화에 대하여 수치 해석적 방법을 이용한 계산값과 실험값을 함께 비교 도시한 것이다. 그림(a)~(c)에서 실선은 C3 반응기구를 이용하여 계산한 값을, 점선은 GRI v-2.11 반응기구를 이용하여 계산한 값을, 심볼은 본 연구실에서 노즐버너 타입의 예혼합 연소기를 이용한 실험값과 다른 연구자들의 실험값을 나타내고, 그림(d)혼합연료에서 일점쇄선과 실선은 각각 13A와 10A의 수치해석 값을 나타낸다. 또한, 그림(b) C_3H_8 과 (d)혼합연료의 계산은 C3계 화학

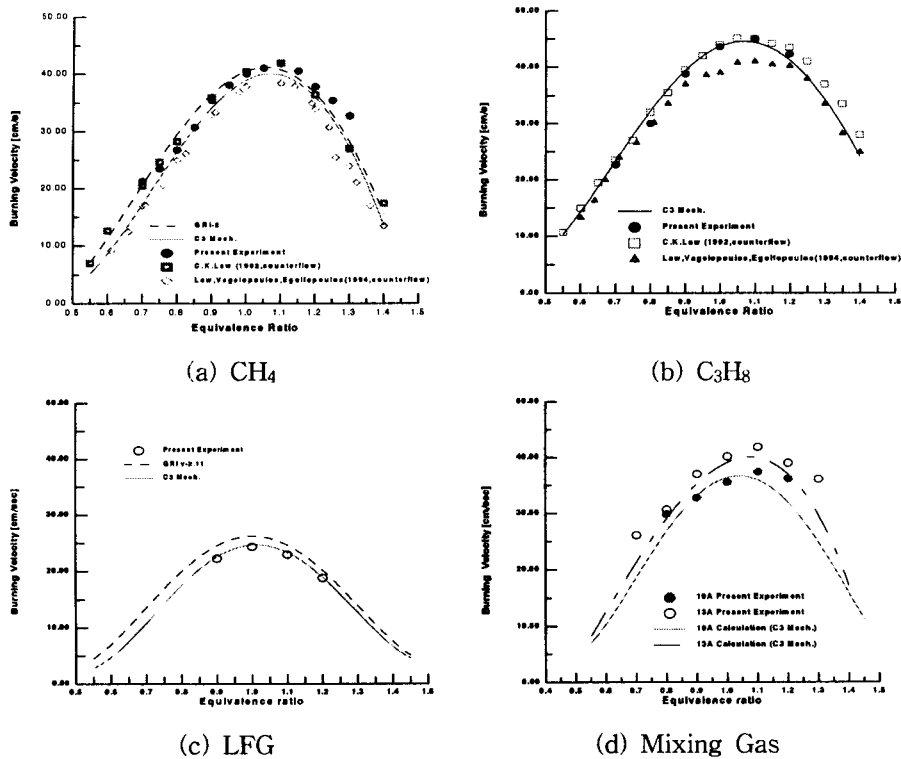


Fig. 1 The Burning Velocities of CH₄, C₃H₈, LFG, and Mixing fuel

중에 대한 반응이 묘사되어 있는 C3반응기구를 이용하여 계산을 수행하였다. 그림에서 알 수 있듯이 전체적으로 각 연료의 계산결과가 전 당량비 구간에 걸쳐서 실험결과를 잘 예측하고 있음을 알 수 있고, 각 연료의 최대 연소속도는 모두 당량비 1.05~1.1부근에서 나타나고 있다. Fig. 1 (a)와 (c)를 보면 각 반응기구간의 차이가 다소 보이나 메탄의 경우 당량비 1.0에서 대략 1.74 [cm/sec]정도의 차이로 그리 크지 않았고, Fig. 1(c)의 LFG의 경우에 역시 반응기구간의 차이는 근소하나, 오히려 C3 반응기구로 계산 경우가 실험값과 더욱 일치함을 보였고, LFG의 당량비 변화에 따른 연소속도변화를 보면 순수 연료에서 보다 전 당량비 구간에 걸쳐서 연소속도가 다소 낮음을 알 수 있다. 이는 LFG내에 다량 함유되어 있는

CO₂ 라든지 N₂ 같은 불활성 가스가 화염 온도를 저감시키기 때문인 것으로 사료된다. 따라서, CH₄나 C₃H₈ 같은 순수 연료뿐만 아니라 불활성 가스가 다량 함유되어 있는 LFG나 혼합연료의 경우에도 수치해석을 통한 연소속도 값이 실험에서 측정된 값을 잘 예측하고 있어 GRI v-2.11이나 C3의 반응기구에 대한 신빙성을 확보할 수 있었고, 앞으로는 C₃H₈과 같은 C3계 화학종이 포함되어 있는 혼합 연료에 대한 연구가 요구됨으로 이후 이어질 연구에서는 C3계 화학종에 대한 반응이 묘사되어 있는 C3 반응기구를 사용하기로 하겠다. Fig. 2는 당량비 1.0인 경우, 불활성 가스의 혼합에 따른 연소속도의 변화를 비교 도시한 것이다. 그림에서 순수 CH₄에 불활성 가스가 혼합됨에 따라 연소속도가 선형적으로 감소하고 있으며, 이는 실

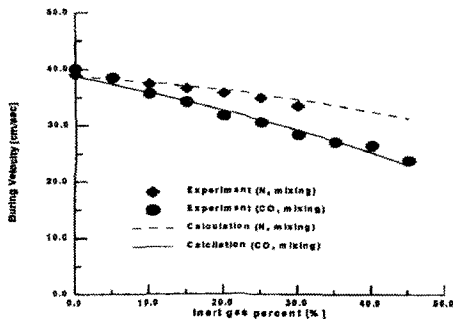


Fig. 2 Burning Velocity of Mixing CH₄ and Inert gas (CO₂, N₂)

험결과와도 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 또한 CO₂를 혼합한 경우가 N₂를 혼합한 경우보다 연소속도가 더 감소함을 알 수 있는데, 그 이유는 Fig. 3의 화염온도와 열 발생률을 보면 잘 알 수 있다.

Fig. 3에는 앞에서 언급한 불활성가스 첨가에 따른 연소속도 경향을 설명하기 위하여 순수 CH₄와 CH₄에 CO₂와 N₂를 각각 40% 혼합한 경우의 화염온도분포와 열 발생률을 도시하였다. 먼저 열발생률을 살펴보면, CO₂를 첨가한 경우가 N₂를 첨가한 경우보다 낮은 경향을 보이고 있는데 이것은 삼원자 가스인 CO₂가 이원자 가스인 N₂ 보다 비열 (C_p)이 더 크기 때문인 것으로 판단되며, 이러한 이유로 인해 화염온도도 CO₂를 첨가한 경우가 N₂를 첨가한 경우보다 더 낮은 것으로 보인다. 일반적으로, 연소속도는 해석적으로 식 (3-1)과 같이 화염온도(T_b)와 활성화 에너지(E_a) 그리고 열역학적 전달 물성치(λ , C_p) 등의 영향을 받는다고 알려져 있다.⁽⁸⁾

$$S_L = b^{(\frac{m}{2}-1)} \sqrt{\frac{\lambda}{C_p}} \exp\left(-\frac{E_a}{2RT_b}\right) \quad (3-1)$$

따라서, CO₂가 N₂보다 비열이 크고 화염온도도 낮기 때문에 식(3-1)에서 연소속도에

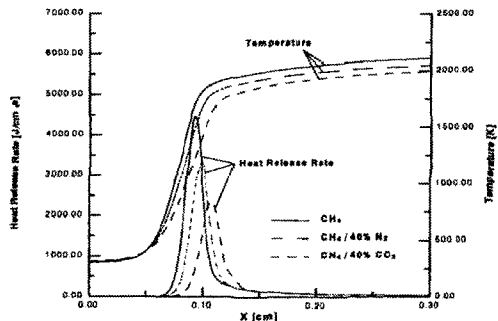


Fig. 3 Distributions of CH₄/Inert gas Temperature and Heat Release Rate

미치는 효과는 CO₂가 N₂보다 더 지배적이며, Fig 2의 연소속도 경향도 이러한 이유에서 기인한 것으로 판단된다.

3.2 LFG 및 LFG 혼합연료의 연소속도 상관 관계

LFG 조성은 매립지 상태에 따라 일정하지 않고 조금씩 변화하며 LFG의 연소속도도 그 조성에 따라서 조금씩 달라지게 된다. 우선, 당량비가 1.0인 경우에 조성이 변화하는 LFG와 LFG 혼합연료에 대한 연소속도를 조사하였다. 보통의 경우 최대 연소속도에 대하여 조사하는 것이 일반적이나, 본 연구에서 고려한 탄화수소계 연료의 최대연소속도는 대략 당량비 1.05~1.1부근에서 나타나며 당량비가 1.0인 경우의 연소속도와 별 차이가 없으므로 본 연구에서는 당량비가 1.0인 경우에 대하여 LFG 및 LFG 혼합연료의 연소속도 상관관계를 도출하였다. LFG의 조성 중 O₂의 함유량 및 그 변화량이 매우 작아 연소속도에 미치는 영향이 매우 작고, 또한 N₂도 앞에서 살펴 본 것처럼 CO₂에 비하여 연소속도에 미치는 영향이 작기 때문에 그 함유량을 완전히 배제하여도 무방하지만, LFG내 N₂와 O₂ 성분비율이 더 많은 경우도 있을 수 있으므로 완전 배제하는 것보다는

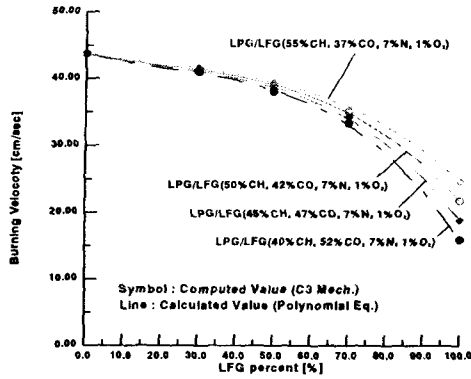


Fig. 4 Burning Velocities of Mixing gas having arbitrary components

N₂와 O₂의 함유량을 각각 LFG 평균조성인 7%, 1%로 가정하는 것이 좀 더 합리적인 LFG 연소속도 예측이 가능하리라고 판단된다. 따라서, LFG의 조성은 CH₄의 함유량을 x%라 보았을 때 CO₂의 함유량은 92-x%, N₂와 O₂는 각각 7%와 1%로 모사하였다.

Fig. 4는 앞에서 언급한 조성을 갖는 LFG와 C₃H₈을 혼합한 LFG 혼합연료의 연소속도의 변화를 LFG의 함유량에 대하여 도시한 것이다. 그림에서 심볼은 각 연료조성 변화에 따른 수치해석 결과를 나타낸다. 이와 같은 수치해석 결과를 토대로 혼합연료의 연소속도 식을 (3-2)과 같이 LFG 함유율에 대한 3차 다항식의 형태로 도출하였으며, 각 항의 계수는 LFG내의 CH₄의 함유량[%]에 대한 함수로 나타내었다. 몇 가지 임의의 경우에 대해 3차 다항식을 통해 얻은 결과를 그림에 선으로 함께 나타내었는데, 수치해석 결과와 비교하여 본 결과, 두 값이 상당히 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다. 그림에 나타내지는 않았지만 식 (3-2)을 이용하여 N₂ 조성을 평균조성보다 많은 10% 및 평균조성보다 적은 5%의 조성을 갖는 LFG 혼합연료의 연소속도를 계산해 본 결과도 최대오차 ±1~3[cm/sec]로 수치해석 결과와 잘 일치하는 것을 확인하였다. 따라서, 식 (3-2)를 이용하

여 임의의 조성을 갖는 LFG와 LFG 혼합연료의 연소속도를 합리적으로 예측할 수 있으며, 이러한 연소속도 식은 LFG 활용을 위해 중요한 정보를 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

$$S_{MIX} = A[LFG]^3 + B[LFG]^2 + C[LFG] + D \quad (3-2)$$

Where, $[LFG] = 100 - [LPG]$

$$A = 1.27 \times 10^{-6} [CH_4] - 9.33 \times 10^{-5}$$

$$B = -1.05 \times 10^{-4} [CH_4] + 0.0072$$

$$C = 0.0036 [CH_4] - 0.2945$$

$$D = 43.77$$

$$(0\% \leq [LFG] \leq 100\%, 40\% \leq [CH_4] \leq 92\%)$$

또한, LFG 및 LFG 혼합연료의 활용을 위해서는 당량비 1.0에서의 연소속도뿐만 아니라 당량비 변화에 따른 연소속도에 대한 정보도 필요하다. 그러나, 조성이 변화하는 LFG의 연소속도에 당량비 변화를 고려할 경우, 고려해야 할 경우의 수가 너무 많아 연소속도 식을 도출하기 쉽지 않다. 따라서, 여기서는 연소속도식을 평균조성을 갖는 LFG를 대상으로 하여 LFG 및 LFG 혼합연료의 연소속도를 당량비 변화에 대한 상관관계식으로 도출하고자 한다. 먼저 수치해석결과로부터 연소속도의 상관관계에 대해 아래와 같은 세 가지 기본 가정을 세웠다.

1. 연소속도는 당량비만의 함수로 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$S_L = f(\phi) \quad (3-3)$$

2. 최대 연소속도는 당량비 1.05 부근에서 나타나고, 연소속도의 분포는 당량비 1.05를 기준으로 양쪽이 대칭적인 포물선형 경향을 나타내고, 당량비 1.05 이하인 경

	C ₃ H ₈ Polynomial Fitting Coeff.		LFG Polynomial Fitting Coeff.	
	($\phi \geq 1.05$) Polynomial Coeff.	($\phi \leq 1.05$) Polynomial Coeff.	($\phi \geq 1.05$) Polynomial Coeff.	($\phi \leq 1.05$) Polynomial Coeff.
d	-752.08	-6.17	-1029.96	44.02
c	1875.70	-71.34	2614.02	-250.32
b	-1424.01	259.60	-2116.05	429.64
a	343.23	-138.38	555.37	-198.72

Table. 2 Correlation-Equation Coefficients for the burning velocities of C₃H₈ and LFG

우와 1.05 이상인 경우에 대하여 각각 3차 다항식의 함수로 표현할 수 있다. 그리고, 이 두 다항식은 당량비가 1.05에서 일치한다.

3. 혼합연료의 연소속도는 LFG와 C₃H₈의 연소속도에 가중계수를 곱한 형태로 표현할 수 있다.

$$S_{mix}(\phi) = Af(\phi)_{C_3H_8} + Bf(\phi)_{LFG} \quad (3-4)$$

위와 같은 가정을 토대로 수치해석 결과를 이용해 순수 C₃H₈과 평균조성을 갖는 LFG의 연소속도를 두 구간의 당량비 1.05 이하와 1.05 이상에 대하여 식 (3-5)과 같이 3차 다항식의 형태로 도출해 내었으며, 각 항의 계수는 Table. 2에 표시하였다.

$$S_L(\phi) = a\phi^3 + b\phi^2 + c\phi + d \quad (3-5)$$

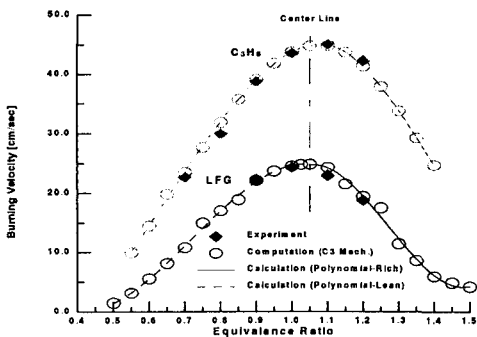


Fig. 5 C₃H₈ and LFG Polynomial Fits

Fig. 5는 LFG와 C₃H₈에 대하여 3차 다항식을 이용하여 얻은 값과 실험값, 수치해석 값들을 함께 도시하여 비교한 것이다. 그림의 결과는 3차 다항식을 이용한 계산값이 수치해석 및 실험값과 매우 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다. 그림에서 실선과 점선은 각각 당량비 1.05이상과 이하인 경우에 다항식을 이용하여 얻은 값을 나타내고, 심볼 중 색이 있는 것은 실험값을 무색인 것은 수치해석 값을 나타낸다.

LFG 혼합연료의 연소속도는 세 번째 가정에서 언급한 것처럼 C₃H₈과 평균조성의 LFG의 3차 다항식을 이용하여 식 (3-6)과 같이 가중계수를 곱한 형태로 나타내었다.

$$S_{MixingGas}(\phi) = A S_{C_3H_8}(\phi) + B S_{LFG}(\phi) \quad (3-6)$$

Where A, B : 가중계수

$S_{C_3H_8}(\phi)$: C₃H₈의 연소속도 식

$S_{LFG}(\phi)$: LFG의 연소속도 식

여기서 가중계수는 다음과 같이 구하였다. 먼저, 혼합연료 10A의 경우에 대해 당량비 0.7, 1.05, 1.3에서의 연소속도를 수치해석으로 계산하여 식 (3-6)과 같은 형태로 나타내었다. 이를 당량비 1.05를 기준으로 1.05이상인 경우($\phi=1.05, 1.3$)와 이하인 경우($\phi=0.7, 1.05$)로 나누어 각각 2개의 연립 방정식을 풀어 해당 당량비 구간의 가중계수를 얻었다. 이러한 가중계수들을 다시 식 (3-6)과

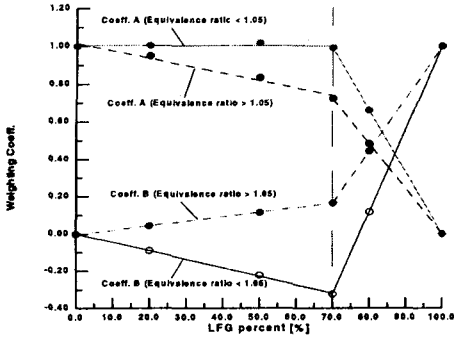


Fig. 6 The correlations for weighting coefficients A, B and LFG percent in mixing gas

같은 형태로 표현하면, 당량비 1.05를 기준으로 두 개의 연소속도 다항식을 얻을 수 있는 것이다. 13A의 경우도 동일한 방법으로 가중계수를 구하였다. 여기서, 가중계수 계산시 과농한 영역의 당량비 구간을 1.3이상으로 택하여 계산할 경우, 당량비 변화에 따른 연소속도의 오차가 당량비 1.3이상에서는 적으나, 당량비 1.0에서 1.2부근에서 오차를 보여 연소속도예측에 적절하지 못하였다.

Fig. 6은 앞에서 구한 A, B 두 가중계수의 변화를 혼합연료 중 LFG 함유량에 대하여 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 혼합연료 내에 LFG 함유율 70%를 중심으로 선형적인 경향을 나타내었고, 이는 다음과 같은 LFG 함유율에 대한 함수로 얻을 수 있었다. 이와 같은 가중계수는 LFG, C₃H₈의 연소속도 다항식과 함께 식(3-6)과 같은 형태로 표현되어 혼합연료의 당량비에 대한 연소속도 식을 나타내게 된다.

가중계수 A

($\Phi \leq 1.05$)

$$A_{lean1} = -3.53 \times 10^{-5} [LFG] + 1.004 \quad ([LFG] \leq 70\%)$$

$$A_{lean2} = -0.033 [LFG] + 3.305 \quad ([LFG] \geq 70\%)$$

($\Phi \geq 1.05$)

$$A_{rich1} = -0.004 [LFG] + 1.014 \quad ([LFG] \leq 70\%)$$

$$A_{rich2} = -0.024 [LFG] + 2.414 \quad ([LFG] \geq 70\%)$$

가중계수 B

($\Phi \leq 1.05$)

$$B_{lean1} = -0.0046 [LFG] + 0.0017 \quad ([LFG] \leq 70\%)$$

$$B_{lean2} = 0.044 [LFG] - 3.411 \quad ([LFG] \geq 70\%)$$

($\Phi \geq 1.05$)

$$B_{rich1} = 0.0024 [LFG] - 0.0047 \quad ([LFG] \leq 70\%)$$

$$B_{rich2} = 0.0278 [LFG] - 1.779 \quad ([LFG] \geq 70\%)$$

Fig. 7은 각각 10A와 13A에 대하여 식(3-6)을 이용하여 얻은 연소속도와 수치해석에서 얻은 연소속도를 함께 비교 도시한 것이다. 그림에서 심볼은 수치해석 값을 나타내고, 선은 다항식을 이용한 값을 나타낸다. 그림에서 당량비가 1.3이상인 영역에서 약간의 오차를 오차를 보이는데 이는 앞에서 언급한 것처럼 가중계수의 계산시 당량비를 1.05와 1.3으로 선택하여 계산하였기 때문인 것으로 사료된다. 그러나, 당량비 1.0부근에서 다항식에 의한 값이 수치해석 값을 비교적 잘 예측하고 있음을 알 수 있었다.

Fig. 8는 LPG와 LFG를 임의로 조성한 경우에 수치해석 값과 다항식을 이용한 계산 값을 비교한 그림이다. 여기서, 혼합연료의

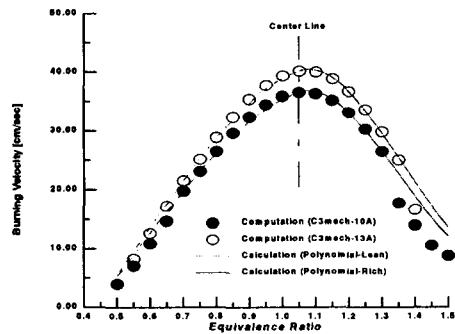


Fig. 7 Mixing fuel Polynomial Fits

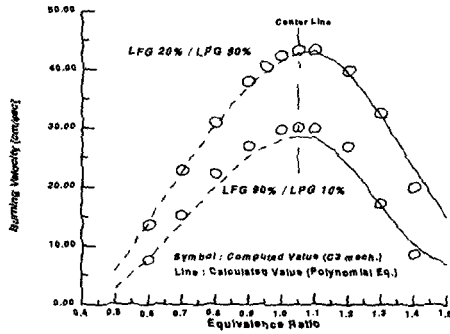


Fig. 8 Polynomial fits of Arbitrary Component Mixing fuel

조성은 LPG 80%, LFG 20%와 LPG 10% LFG 90%의 두 경우로 하여 검토를 수행하였다. 그림에서 LPG 80%, LFG 20%의 경우, 당량비 1.3이상에서 오차가 최대 3 [cm/sec]정도를 보이지만, 다항식을 이용한 연소속도 값이 수치해석 값을 전 당량비 구간에 걸쳐서 비교적 정확하게 예측하고 있음을 알 수 있었다. LPG 10% LFG 90%의 경우도 비슷한 경향을 보였다. 따라서, 앞서 정의한 식(3-6)을 이용하여 임의의 조성을 갖는 LFG 혼합연료의 연소속도를 당량비 변화에 대해서도 충분히 예측할 수 있어, LFG 활용시 연소속도에 대한 유용한 정보를 제공할리라 생각된다.

4. 결론

상세 반응기구를 이용한 수치 해석적 방법으로 LFG 및 LFG 혼합연료들의 연소속도를 조사하여 본 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 불활성가스를 다량함유하고 있는 LFG는 CO₂와 N₂로 인하여 반응대에서의 열발생률 감소와 화염온도의 감소로 인해 연소속도가 감소된다. 또한, N₂보다 CO₂에 의한 연소속도 감소가 더 지배적임을 알았다. 당량비가 1.0인 경우, 조성이 변화하는 LFG와 C₃H₈을 혼합한 혼합연료에 대해서

연소 속도식을 3차 다항식으로 표현하였다. 평균조성의 LFG와 C₃H₈의 연소속도를 당량비에 대한 3차 함수로 표현하였고, 이 식들에 가중계수를 이용하여 임의의 조성을 갖는 혼합연료의 연소속도도 당량비에 대한 함수로 표현하였다. 이러한 식들의 결과와 수치 해석 결과가 모두 잘 일치함을 알 수 있었고, 임의의 조성을 갖는 LFG 및 LFG 혼합연료의 활용측면에서 연소속도를 예측하는데 충분히 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

5. 후기

본 연구는 에너지자원기술개발센터(주관 동아건설, 위촉 인하대)의 대체 에너지 기술 개발사업의 연구비로 진행되었습니다. 이에 감사드립니다.

6. 참고 문헌

- (1) Andrews G.E. and Bradley D., 1972, "The Burning Velocity of Methane-Air Mixtures", *Combustion and Flame*, Vol. 19, p.275
- (2) W. Payman and R. V. Wheeler, 1922, "The composition of gaseous fuel in relation to their utilization", *Fuel in Science and Practice*
- (3) V. S. Yumlu, 1968, "The effects of additives on flames and their possible prediction by a mixing rule", *Combustion and Flame*, Vol. 12, p.14
- (4) "JSME combustion Handbook", 1995, p.275~276
- (5) R. J. Kee, J. F. Grcar, M. D. Smooke, and J. A. Miller, 1994, "A Fortran Program for Modeling Steady Laminar One-Dimensional Premixed Flame", *Sandia Report 85-8240*

- (6) R. J. Kee, F. M. Rupley, and J. A. Miller, 1989, "Chemkin-II : A Fortran Chemical Kinetics Package for the Analysis of Gas Phase Chemical Kinetics" , Sandia Report 89-8009B
- (7) J. F. Grcar, R. J. Kee, M. D. Smooke, and J. A. Miller, 1986, "A hybrid Newton/Time-integration Procedure for the solution of steady, laminar, one-dimensional, premixed flames" , 21st, Symposium (international) on combustion, p.1773~1782
- (8) William H.C., Richard S.B. and Robert N.P., 1953, "Burning Velocities of Methane with Nitrogen-Oxygen, Argon-Oxygen, and Helium-Oxygen Mixtures" , 4th Symposium (international) on Combustion, p.310~313
- (9) C. H. Sohn, Y. G. Aum, S. H. Chung, S. W. Hong, and H. D. Kim, 1999, "A Burning Velocity Correlation for Premixed Hydrogen/Air/Steam flame s" , KSME International Journal, Vol. 13, No. 3. p.294~303