

수치계산을 이용한 LFG 혼합가스의 연소속도 상관식 도출

이창언* · 오창보** · 정익산** · 정영식***

A Suggestion for the Burning Velocity Correlation of LFG Mixed Gas Using Numerical Simulation

Chang Eon Lee, Chang Bo Oh, Ik San Jung and Young Sik Jeong

Key Words: LFG(매립가스), Burning Velocity(연소속도), Velocity Correlation(속도 상관식), Detailed Reaction Mechanism(상세반응기구), Numerical Calculation(수치계산)

Abstract

In this study, for the use of LFG, the burning velocities of LFG and LFG mixed fuels have been numerically analyzed. C3 reaction mechanism which consists of 92 species and 621 reaction was adopted in the calculation. The results show that the burning velocities of LFG and LFG mixed fuels are obtained as a function of CH₄ and LFG percentage at stoichiometric conditions. In addition, the correlations of burning velocities LFG and LFG mixed fuels were obtained over a wide range of the equivalence ratio. The comparison of burning velocity correlated from numerically calculated results with experimental ones shows good agreements. From these results, the suggested burning velocity correlations for LFG and LFG mixed fuels in this study can be applied to the practical utilization of LFG.

1. 서 론

최근 들어 미활용 에너지의 활용 측면에서 쓰레기 매립지에서 발생하는 LFG(Landfill Gas)에 대한 관심이 증가하고 있는 추세이다. LFG의 주 성분은 CH₄과 CO₂이며, N₂ 및 O₂가 미량 포함되어 있다, 그 중 연료성분인 CH₄의 농도가 50% 전후이며, 발열량이 약 3,000~6,000 kcal/m³ 정도로 충분히 활용 가치가 있는 저급연료(Low Calorific Fuel)라 할 수 있다. 이 LFG를 효율적으로 활용하는 방안으로 첫째, LFG 자체만을 연료로 사용하는 경우, 둘째, LFG에 도시가스(NG)를 적절히 혼합하여 사용하는 경우와 세번째로 LFG에 LPG를 적절히 혼합하여 발열량을 도시가스

수준으로 증열하여 사용하는 경우이다. 이와 같이 LFG를 활용하기 위해서는 LFG 자체연료, LFG + NG 연료, LFG + LPG 연료들(이하에서는 이들을 LFG 혼합연료라고 통칭함)의 열역학적 물성치, 연소속도, 화염 안정성 등에 대한 정확한 정보가 요구된다. 이 중 연소속도는 화염 안정성, 연소부하와 관계 있는 주요인자 중의 하나로서 그 정량적인 값을 얻기 위해서는 실험이나, 수치 해석에 의존하게 된다.

연소속도에 대한 종래의 연구를 살펴보면 CH₄나 C₃H₈과 같은 상용연료를 대상으로 노즐버너 연소기, 정적 연소기 등을 사용하여 당량비, 혼합기 온도 및 압력 등을 변수로 하여 많은 실험적 연구가 진행되었다⁽¹⁾. 최근에는 일부 연료에 대해 상세 반응기구를 적용한 수치해석적 연구가 수행되고 있으며, 이를 통해 연소속도 예측과 연소속도에 미치는 여러 가지 인자들에 대한 종합적인 검토가 이루어지고 있다⁽²⁾.

* 인하대학교 기계공학과
 ** 인하대학교 기계공학과 대학원
 *** 인하공업전문대학 기계과 겸임교수

Payman⁽³⁾, Yumlu⁽⁴⁾ 등은 혼합연료를 대상으로 순수 연료의 최고 연소속도에 혼합연료 중의 조성비를 가중 평균하는 방법(Mixing Rule)을 이용하여 혼합연료의 조성에 따른 연소속도 상관식을 제안한 바 있다. 또한, 불활성가스가 함유된 경우의 연소속도 상관식도 제안되었으나⁽⁵⁾ 이 식들은 가스 혼합비율이 제한적이고 LFG와 같이 불활성가스가 다량 혼합된 경우에는 실제 실험치와 잘 일치하지 않는 문제점이 있었다⁽⁶⁾.

따라서 본 연구에서는 LFG 혼합연료에 대해 상세반응기구를 이용한 연소속도 계산결과를 실험결과와 비교하여 타당성을 검토하고, 이 계산결과를 토대로 하여 조성이 다양한 LFG 혼합연료에 대한 최대 연소속도 상관식과 평균조성의 LFG에 LPG를 혼합한 연료의 당량비에 따른 연소속도 상관식을 제안하여, LFG 활용에 실용적인 정보를 제공하고자 한다.

2. 수치 해석적 방법

2.1 지배방정식

본 연구에서는 1차원 자유전과 예혼합화염을 수치 모델링한 Premix Code를 이용하였다. 계산에 이용된 지배방정식은 식 (1)~(4)와 같으며, 경계조건 등의 수치계산법은 참고문헌 (7)에 자세히 설명되어 있으므로 여기서는 생략한다.

연속 방정식:

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

화학종 보존방정식:

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

에너지 보존방정식:

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

여기서, \dot{M} 은 질량유량, A 는 단면적, T 는 온

도, p 는 압력, u 는 혼합기의 속도, ρ 는 밀도, Y_k , W_k , c_{pk} , \dot{w}_k , h_k 등은 각각 k 번째 화학종의 질량분률, 분자량, 정압비열, 몰생성열, 비엔탈 피이며, V_k 는 화학종의 확산속도, \overline{W} 는 혼합기의 평균 분자량, R 은 가스상수, λ 는 혼합기의 열전도계수, c_p 는 혼합기의 정압비열을 나타낸다.

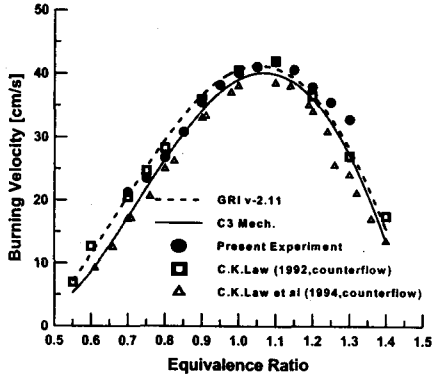
2.2 계산 방법

본 연구에서는 LFG 자체 및 평균조성의 LFG(CH₄ 54.5%, CO₂ 37.5%, N₂ 7%, O₂ 1%)에 LPG를 혼합한 혼합연료를 대상으로 계산을 수행하였다. 그 외, LFG에 NG를 혼합한 혼합연료 조성도 생각해 볼 수 있다. LFG 자체나 LFG + NG의 경우는 연료의 주성분을 CH₄로 생각할 수 있으며, 이 경우에는 GRI v-2.11 반응기구(화학종 : 49개, 가역반응기구: 279개)를 이용하여 계산이 가능하다. 그러나, C₃H₈ 성분이 포함된 LFG와 LPG의 혼합연료의 경우에는 C2 반응까지만 고려된 GRI v-2.11 반응기구로는 계산을 수행할 수 없으므로 이 경우에는 C3 반응을 포함하는 C3 반응기구(화학종 : 92개, 가역반응기구 : 621개)를 이용하여 계산을 수행하였다. 본 연구에서 LFG 혼합연료의 연소 속도식을 도출하는데 필요한 계산결과는 C3 반응기구를 주로 사용하였다.

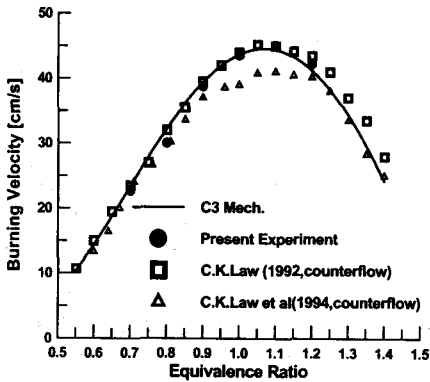
3. 결과 및 검토

3.1 수치계산 결과의 타당성 검토

Fig. 1은 순수 연료에 대하여 실험 및 수치계산에서 얻은 당량비 변화에 따른 연소속도를 도시한 것이다. Fig. 1 (a)의 CH₄ 경우에서 점선은 C2 반응기구, 실선은 C3 반응기구를 이용하여 계산한 결과이며, Fig. (b)의 C₃H₈의 경우에는 C3 반응기구를 이용한 계산결과만 도시하였다. 그림에서 심볼은 실험값이며, 그 중 검정 심볼은 본 연구그룹이 노출버너 연소기에서 측정한 값을 나타낸 것으로서, 다른 실험치들의 분산범위 내에 있으므로 본 그룹이 측정한 실험결과와의 신뢰성을



(a) CH₄



(b) C₃H₈

Fig. 1 Computed and measured burning velocities of CH₄ and C₃H₈

확인할 수 있다. 또, Fig. 1 (a)에서 C2 및 C3 반응기구에 의한 계산결과를 보면 두 결과는 미소한 차이를 보이고 있으나, 모두 당량비 전구간에서 실험결과를 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. 이 결과로부터 어느 반응기구가 더 적합하다고 판단하는 것은 부적절하다고 생각되며, C3 반응기구에 의해서도 CH₄ 연료의 연소속도를 충분히 예측 가능하다고 할 수 있다. 그리고, Fig. 1(b)의 계산결과에서 C3 반응기구는 C₃H₈ 연료의 연소속도를 아주 잘 예측하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 2는 LFG 혼합연료에 대한 연소속도를 도시한 것으로서, 그림 중에 LFG는 앞에서 언급한 평균조성의 LFG이고, 10A는 평균조성의 LFG에 LPG를 7 : 3의 비율로 혼합하여 발열량이 도시가스와 거의 동일하게 만든 혼합연료이며, 13A는 Webbe 지수가 도시가스와 거의 동일하도록 LFG

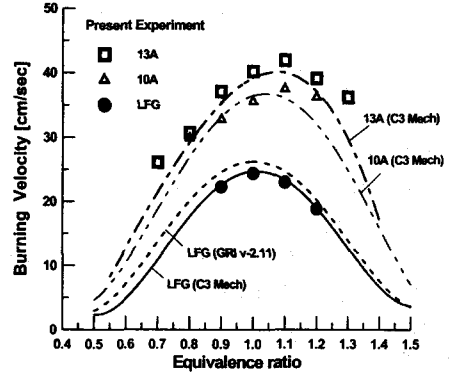


Fig. 2 Burning velocities of LFG and LFG mixed gas

와 LPG의 혼합비율을 5 : 5로 만든 혼합연료이다. 결과를 보면 C3 반응기구를 이용한 수치해석 결과는 CH₄나 C₃H₈와 같이 순수 연료뿐만 아니라 불활성 가스가 다량 함유되어 있는 LFG 혼합연료의 경우에도 실험값을 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. LFG의 당량비 변화에 따른 연소속도를 보면 Fig. 1의 순수 연료의 연소속도보다 당량비 전구간에 걸쳐서 다소 낮음을 알 수 있다. 이는 LFG내에 다량 함유되어 있는 CO₂, N₂ 같은 불활성 가스가 화염온도를 저감시키기 때문이다.

Fig. 3은 당량비 1에서 불활성 가스인 CO₂ 및 N₂ 첨가에 따른 연소속도를 나타낸 것으로서 실선 및 점선은 C3 반응기구를 이용한 계산결과, 심볼은 실험결과를 의미한다. 실험결과를 보면 불활성 가스의 혼합비율이 증가함에 따라 연소속도가 선형적으로 감소하며, CO₂가 혼합된 연료가 N₂가 혼합된 연료보다 연소속도가 더 감소하여 연소속도 저감에 미치는 효과는 CO₂가 더 지배적임을 알 수 있다. 또한 C3 반응기구에 의한 계산치는 실험에서 언급한 여러 가지 경향을 잘 예측하고 있으며, 정량적으로도 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

본 연구에서 목적으로 하는 LFG 혼합연료의 연소속도 상관식을 도출함에 있어서는 실험 데이터를 이용하는 것이 원칙이라 할 수 있다. 그러나, 실험결과는 측정법에 따라서 약간 상이하며, 측정량도 너무 방대하기 때문에 현실적으로는 많은 어려움이 따른다. 위에서 검토한 바와 같이 C3 반응기구를 이용한 연소속도 수치계산 결과는 실험결과를 잘 예측함을 알 수 있었다. 따라서

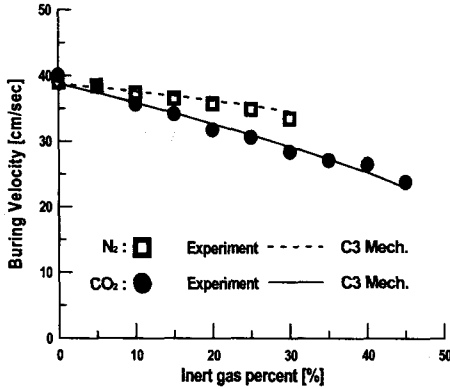


Fig. 3 Burning velocities of mixed gas of CH₄ and inert gas (CO₂ and N₂)

수치계산 결과를 바탕으로 연소속도 상관식을 구하여도 실험치를 바탕으로 구한 것과 별 차이가 없을 것이라 여겨지며, 또 현실적으로 유용한 방법이라 판단되어 본 연구에서는 수치계산 결과를 바탕으로 연소속도 상관식을 구하고자 한다.

3.2 LFG 혼합연료의 연소속도 상관식 도출

3.2.1 혼합 연료의 최대 연소속도

본 연구에서 대상으로 하는 LFG 혼합연료들의 최대 연소속도는 Fig. 1, 2에서 확인할 수 있듯이 대략 당량비 1.0~1.1부근에서 나타나며, 당량비 1.0에서의 연소속도와 별 차이가 없다. 따라서 본 연구에서는 당량비가 1.0인 경우의 연소속도를 최대 연소속도로 정의하여 LFG의 조성변화 및 LPG와의 혼합비율을 고려 할 수 있는 연소속도 상관식을 제안하고자 한다.

Fig. 4는 연소속도 상관식의 기본 형태를 결정하기 위해, LPG에 평균조성인 LFG의 혼합정도에 따른 최대 연소속도의 변화를 도기한 것이다. 그림에서 심볼은 C3 반응기구를 이용한 수치계산 결과이며, 점선은 이 계산결과를 2차 다항식, 실선은 3차 다항식을 이용하여 얻은 최대 연소속도 상관식을 나타낸다. 그림을 보면 3차 다항식을 이용한 것이 수치해석의 결과를 보다 잘 근사하고 있으며, LFG 혼합연료의 연소속도 상관식은 식 (4)와 같이 혼합연료중의 LFG 함유율을 독립 변수로 한 3차 함수의 형태로 표현하는 것이 적당함을 알 수 있다. 이와 같이 표현할 경우 식 (4)의 계수 중 상수항 D는 순수 C₃H₈의 연소속도

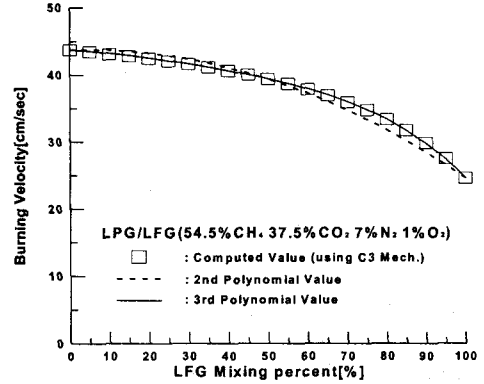


Fig. 4 Burning velocity of mixture of C₃H₈ and LFG

인 43.77로 정해진다. 나머지 계수 A, B 및 C는 LFG의 조성변화를 고려할 수 있도록 결정되어야 한다. 이에 대해서는 다음에 상세히 설명하겠다.

LFG의 평균조성은 매립년수, 포집방법 등에 따라 달라지는데 LFG에 포함된 각 성분을 변수로 하여 상관식을 구하기에는 변수가 너무 많다. 그리고, LFG 연소시 공기조성(O₂+3.76N₂)에 해당하는 양은 외부에서 덜 공급하기 때문에 여분으로 존재하는 질소(평균조성의 경우 약 3%)만이 문제가 된다. 그래서, 본 연구에서는 LFG에 포함된 N₂와 O₂ 함유율을 평균치와 동일한 7%와 1%로 일정하다고 가정하여 LFG 조성변화를 모사하였다. 이와 같이 하면, 임의의 LFG에서 공기성분을 제외한 질소 함유율에서 3%를 뺀 양이 아래에서 구할 연소속도 상관식의 정확도에 영향을 미친다고 할 수 있다. 그러나 그 영향은 Fig. 3에 도기한 바와 같이 여분의 N₂가 5%까지는 연소속도에 1~2 cm/sec 정도로 작으므로 무시할 수 있다. 위와 같이 LFG 중의 N₂와 O₂의 양을 7%와 1%로 가정하면, CH₄의 체적 함유율(x%)이 주어지면 CO₂의 함유율도 (92-x)%로 정해지기 때문에 LFG의 조성변화는 CH₄ 함유율(x%)만의 함수로 나타낼 수 있다. 이와 같이 LFG의 조성변화를 모사하여, 식 (4)의 계수 A, B, C의 결정은 여러 경우의 LFG에 대한 수치해석 결과를 토대로 결정하였다. 단, LFG 중의 CH₄ 농도는 대부분 40% 이상 되기 때문에 이 범위에서 한정하여 검토하였다.

$$S_{MX} = A[LFG]^3 + B[LFG]^2 + C[LFG] + D \quad (4)$$

where,

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

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

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

$$D = 43.77$$

(단, $40\% \leq [CH_4] \leq 92\%$)

Fig. 5는 임의의 조성을 갖는 LFG를 LPG에 혼합하여 만든 LFG 혼합연료의 최대 연소속도에 대하여, 위 (4)식으로 정의된 연소속도 상관식(선)과 C3 반응기구를 이용하여 계산한 값(심볼)을 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이, 두 결과가 상당히 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 위 식은 LPG에 LFG를 혼합한 연료를 대상으로 작성하였으나, LFG의 혼합을 및 LFG 중의 CH_4 농도를 적절히 선택하면, 연료에 포함된 CH_4 , C_3H_8 , CO_2 등의 조성을 거의 독립적으로 변화시킬 수 있어 그 사용 범위는 광범위하다고 할 수 있다.

3.2.2 당량비에 따른 연소속도 상관식

LFG 혼합연료의 활용을 위해서는 앞에서 구한 최고 연소속도뿐만 아니라, 당량비(ϕ) 변화에 따른 연소속도도 필요하다. 그러나, LFG 조성변화까지 고려하여 LFG 혼합연료의 당량비 변화에 따른 연소속도 상관식을 도출하기는 쉽지 않다. 따라서, 본 여기서는 평균조성의 LFG를 이용하여 LFG 혼합연료의 당량비 변화에 따른 연소속도 상관식으로 도출하고자 한다. 먼저 연소속도의 상관식을 도출하기 위해 상관식의 형태를 다음과

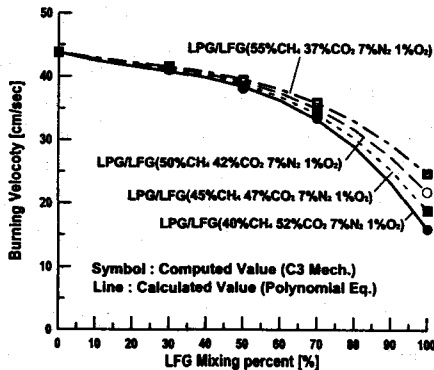


Fig. 5 Burning velocities of mixed gas having arbitrary components

같은 원칙 하에 결정하였다.

1. 각 연료의 당량비(ϕ)에 따른 연소속도는 식 (5)와 같이 3차 다항식으로 표현할 수 있다.

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

2. LFG 혼합연료의 연소속도는 LFG와 C_3H_8 의 연소속도 식에 가중계수를 곱한 식 (6)의 형태로 표현한다.

$$S_M(\phi) = AS(\phi)_{C_3H_8} + BS(\phi)_{LFG} \quad (6)$$

Fig. 6은 평균조성의 LFG와 순수 C_3H_8 에 대한 연소속도의 측정치 및 계산결과를 도시한 것으로, 심볼 중 색이 있는 것은 실험값을, 무색인 것은 수치해석 값을 나타낸다. LFG 혼합연료의 연소속도 상관식을 도출하기 위해서는 앞에서 언급한 바와 같이 우선 평균조성의 LFG 및 순수 C_3H_8 에 대한 당량비에 따른 연소속도 상관식이 필요하다. 이를 위해 Fig. 6의 계산결과를 검토한 결과, 상관식은 당량비 1.05 경계로 두 구간에 대하여 각각의 다항식의 계수를 구하여 표현하는 것이 적합함을 알았다. 그림에서 실선과 점선은 각각 당량비 1.05이상과 이하인 영역에서의 상관식을 도시한 것으로, 각 항의 계수는 Table. 2에 나타내었다. 그림을 보면, 이 둘 상관식의 결과가 수치해석 및 실험에서 구한 연소속도와 매우 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다.

LFG 혼합연료의 연소속도를 식 (6)과 같이 가

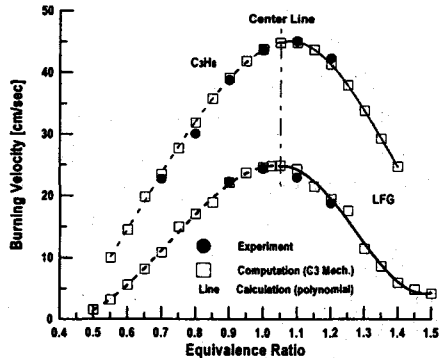


Fig. 6 Correlation of burning velocities of C_3H_8 and LFG

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

Table. 2 Correlation-equation coefficients for the burning velocities of C₃H₈ and LFG

중계수를 곱한 형태로 나타내기 위해서는 LFG 혼합비율에 따른 가중계수를 구해야 하는데, 가중계수를 구하는 법을 아래에서 설명하겠다.

Fig. 7은 혼합연료 10A와 13A에 대한 연소속도를 도시한 것으로서 그림의 심볼은 수치해석에 의한 연소속도를, 선은 가중계수를 이용하여 표현한 연소속도 상관식의 결과를 나타낸다. 여기서 가중계수는 다음과 같은 방법으로 구하였다. 임의의 혼합연료에 대해 $\phi=1.05$ 을 경계로 두 구간에서 수치해석에서 얻어진 두 개의 연소속도, 여기서는 1.05이하인 구간에서는 $\phi=0.7, 1.05$ 과 1.05 이상인 구간에서는 $\phi=1.05, 1.3$ 에서의 값을 이용하여 가중계수 A, B를 2원 연립방정식을 이용하여 구하면, 각 구간에서 식 (6)과 같은 형태의 연소속도 상관식이 얻어진다. Fig. 7을 보면, 이와 같이 구한 상관식의 결과(점선, 실선)는 0.7~1.3인 영역에서 수치해석 결과를 잘 근사하고 있음을 알 수 있다. 단, $\phi=1.3$ 이상인 영역에서 약간의 오차를 보이는데, 이는 가중계수 계산시 당량비를 1.05와 1.3으로 선택하여 계산하였기 때문인 것으로 사료된다. 그러나, 가중계수 계산시 $\phi=1.05$ 보다 큰 구간에서 1.3 이상인 점을 택하여 가중계수를 구하면 $\phi=1.3$ 이상에서는 잘 일치하나, 실제로 많이 이용하는 $\phi=1.0$ 근방에서 오차가 있기 때문에 실용적 측면에서 볼 때 적절하지 못하다

Fig. 8은 Fig. 7에서 설명한 방법으로 LFG 혼합연료 내의 LFG 혼합비율을 10%단위로 변화시키면서 구한 A, B 두 가중계수의 변화를 도시한 것

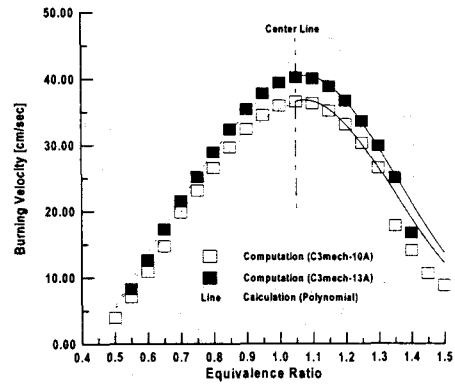


Fig. 7 Correlation of burning velocities of mixed gas (10A and 13A)

이다. 그림에서 실선은 당량비가 1.05이하인 경우에 사용되며, 점선은 당량비 1.05 이상의 경우에 해당한다. 그림에서 가중계수 A, B는 LFG 함유율 70%를 경계로 하여 두 구간에서의 기울기가 많이 다르나, 각 구간에서는 거의 선형적임을 알 수 있다. 이 결과를 바탕으로 LFG 혼합비율에 따른 가중계수를 70% 전후의 두 구간에서 각각 1차함수로 표현하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

LFG 혼합비율이 70%이하인 경우

$$\begin{aligned}
 A &= -3.53 \times 10^{-5} [LFG] + 1.004 \quad (\phi \leq 1.05) \\
 &= -0.004 [LFG] + 1.014 \quad (\phi \geq 1.05) \\
 B &= -0.0046 [LFG] + 0.0017 \quad (\phi \leq 1.05) \\
 &= 0.0024 [LFG] - 0.0047 \quad (\phi \geq 1.05)
 \end{aligned}$$

LFG 혼합비율이 70% 이상인 경우

$$\begin{aligned}
 A &= -0.033 [LFG] + 3.305 \quad (\phi \leq 1.05) \\
 &= -0.024 [LFG] + 2.414 \quad (\phi \geq 1.05) \\
 B &= 0.044 [LFG] - 3.411 \quad (\phi \leq 1.05) \\
 &= 0.0278 [LFG] - 1.779 \quad (\phi \geq 1.05)
 \end{aligned}$$

Fig. 9는 앞에서 제안한 연소속도 상관식을 검증하기 위해 LPG와 LFG를 임의로 혼합한 경우에 대한 수치계산과 상관식에서 얻은 연소속도를 비교한 그림이다. 여기서, 혼합연료의 조성은 LPG 80%, LFG 20%와 LPG 10%, LFG 90%의 두 경우에 대해 검토하였다. 그림에서 LPG 80%, LFG 20%의 경우, $\phi=1.3$ 이상에서 약간의 오차를 보이지만, 실용적으로 많이 사용하는 당량비 구간에서 비교적 정확하게 예측하고 있음을 알

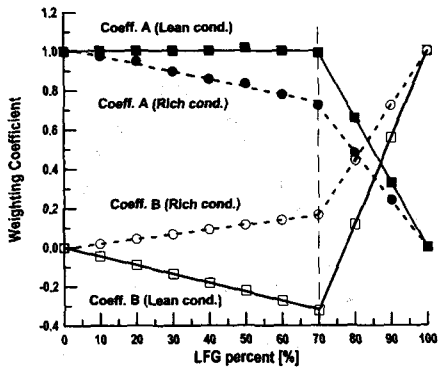


Fig. 8 Correlations for weighting coefficients A, B and LFG percentage in mixed gas

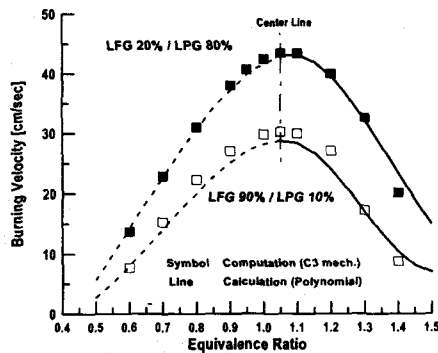


Fig. 9 Polynomial fits of burning velocities of arbitrarily mixed gas

수 있다. 또 LPG 10% LFG 90% 혼합연료나 Fig. 7에 도시한 10A, 13A의 경우 도 식 (6)을 이용한 것이며, 이들 결과도 실용적으로 많이 사용하는 당량비 구간에서 비교적 정확하게 예측하고 있음을 알 수 있다. 위 결과들로부터 앞에서 제안한 식 (6)은 임의의 혼합된 LFG 혼합연료의 당량비 변화에 따른 연소속도를 합리적으로 예측할 수 있다고 사료되며, LFG 활용시 연소속도에 대한 유용한 정보를 제공하리라 생각된다.

4. 결론

상세 반응기구를 이용한 수치 해석적 방법으로 LFG 및 LFG 혼합연료들의 연소속도를 계산하고 연소속도 상관식을 도출하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

- (1) 불활성 가스를 다량 포함하는 LFG 혼합연료의 연소속도를 상세반응기구를 이용한 수치계산을 통해 실험치를 정량적으로 매우 잘 예측함을 알 수 있었다.
- (2) 수치계산 결과를 근거로 하여, 당량비가 1.0인 경우, 조성이 변화하는 LFG와 C_3H_8 을 혼합한 혼합연료에 대해서 연소속도식을 3차 다항식으로 표현할 수 있었다.
- (3) 평균조성의 LFG와 C_3H_8 의 연소속도를 당량비에 대한 3차 함수로 표현하였고, 이 식들에 가중계수를 이용하여 임의의 조성을 갖는 혼합연료의 연소속도도 당량비에 대한 함수로 표현하였다.
- (4) 본 연구에서 제시한 연소속도 상관식의 결과와 수치해석 결과는 모두 잘 일치하였으며, 이 연소속도 상관식은 임의의 조성을 갖는 LFG 및 LFG 혼합연료의 활용측면에서 연소속도를 예측하는데 매우 유용하게 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

참고 문헌

- (1) Andrews G. E. and Bradley D., 1972, "The Burning Velocity of Methane-Air Mixtures", *Combustion and Flame*, Vol.19, pp.275
- (2) 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 flames", *KSME International Journal*, Vol.13, No.3. pp.294-303
- (3) W. Payman and R. V. Wheeler, 1922, "The Composition of Gaseous Fuel in Relation to Their Utilization", *Fuel in Science and Practice*
- (4) V. S. Yumlu, 1968, "The Effects of Additives on Flames and Their Possible Prediction by a Mixing Rule", *Combustion and Flame*, Vol.12, pp.14
- (5) "JSME Combustion Handbook", 1995, pp.275
- (6) 이창언 외, 1999, "LFG 활용을 위한 연소특성 검토", 제18회 KOSCO Symposium 논문집, pp.21-29
- (7) R. J. Kee, J. F. Garcar, M. D. Smooke and J. A. Miller, 1994, "A Fortran Program for Modeling Steady Laminar One-Dimensional Premixed Flame", *Sandia Report 85-8240*