

## 수치계산을 이용한 LFG 혼합연료의 연소속도 상관식에 관한 연구

이창언\* · 오창보\*\* · 정익산\*\*  
(2000년 5월 8일 접수)

### A Study on the Burning Velocity Correlation of LFG Mixed Fuel Using Numerical Analysis

Chang Eon Lee, Chang Bo Oh and Ik San Jung

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

#### Abstract

In this study, the burning velocities of LFG and LFG mixed fuels have been numerically determined. C3 reaction mechanism involving 92 species and 621 reactions was adopted in the calculation. The computed burning velocities using C3 mechanism show good agreements with experimental data. Based on numerical results, the maximum burning velocities of LFG and LFG mixed fuels were correlated as a function of CH<sub>4</sub> and LFG component percentage at stoichiometric conditions. In addition, the correlations of burning velocities of LFG and LFG mixed fuels were obtained over a wide range of the equivalence ratio. The numerical results are well agreed with the burning velocity correlations. The burning velocity correlations for LFG and LFG mixed fuels suggested in this study can be applied to the practical utilization of LFG.

#### 기호설명

$A$  : 단면적  
 $c_p$  : 혼합기의 정압비열  
 $c_{pk}$  : 화학종 k의 정압비열  
 $E_a$  : 활성화에너지(Activation Energy)  
 $h_k$  : 화학종 k의 비엔탈피(Specific Enthalpy)  
 $k$  : 화학종 k  
 $\dot{M}$  : 질량유량(Mass Flow Rate)

$m$  : 총괄 반응차수(Overall Reaction Order)  
 $p$  : 압력  
 $R$  : 가스상수(Gas Constant)  
 $T$  : 온도  
 $T_b$  : 화염온도  
 $T_u$  : 미연 혼합기의 온도  
 $u$  : 혼합기 유속  
 $V_k$  : 화학종 k의 확산속도  
 $\bar{W}$  : 혼합기의 평균분자량  
 $W_k$  : 화학종 k의 분자량  
 $[X]$  : 성분 X의 함유량 퍼센트 (%)  
 $X_k$  : 화학종 k의 몰분율  
 $x$  : 공간좌표

\* 회원, 인하대학교 기계공학과

E-mail : chelee@inha.ac.kr

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

\*\* 인하대학교 대학원 기계공학과

- $Y_k$  : 화학종 k의 질량분율
- $Y_{k,u}$  : 미연 혼합기중의 화학종 k의 질량분율

그리스문자

- $\lambda$  : 혼합기의 열전도계수
- $\rho$  : 혼합기의 밀도
- $\phi$  : 당량비(Equivalence Ratio)
- $\omega_k$  : 화학종 k의 단위체적당 물생성률

1. 서론

최근 매립지에서 발생하는 LFG (Landfill Gas) 는 주변 환경 오염 및 미활용 에너지 이용 측면에서 많은 관심을 유발하고 있다. 이 LFG의 조성은 CH<sub>4</sub> (40~60%), CO<sub>2</sub> (30~40%), N<sub>2</sub> + O<sub>2</sub> (~10%) 및 미량성분 (VOC, BTX 등)으로 구성되어 있으며, 발열량이 약 3,000~6,000 kcal/m<sup>3</sup> 정도가 되기 때문에 활용 가치가 충분한 저급연료 (Low Calorific Fuel)라 할 수 있다. 이 LFG를 활용하는 방안으로 첫째, LFG 자체만을 연료로 사용하는 경우, 둘째, LFG에 도시가스 (NG)를 적절히 혼합하여 사용하는 경우, 셋째, LFG에 LPG를 적절히

혼합하여 발열량을 도시가스 수준으로 증열하여 사용하는 경우를 들 수 있다. 이와 같이 LFG를 활용하기 위해서는 Table 1에 나타난 것처럼 LFG 뿐만 아니라, LFG에 LPG 혹은 NG를 혼합한 다양한 조성을 갖는 연료들 (이하, 이들을 총칭하여 LFG 혼합연료라 하겠다.)의 연소특성에 대한 정확한 정보가 요구된다. 특히, 이 LFG는 조성이 다양할 뿐만 아니라 다량의 불활성가스 (CO<sub>2</sub>)를 포함하고 있기 때문에, 이 LFG 혼합연료를 원활히 활용하기 위해서는 이들 연료의 열역학적 물성치, 연소속도, 화염 안정성 등에 대한 종합적인 정보가 요구된다. 이중 열역학적 물성치는 각 성분들에 대한 기존 자료들을 활용하여 구할 수 있다. 그러나, 연소속도는 연료 조성 및 혼합기의 공연비, 온도, 압력 등에 따라 고유한 값을 갖는 물성치 (Property)라고 할 수 있으나, 그 값은 연료의 산화반응과 밀접한 관련이 있기 때문에 실험 혹은 수치해석적 방법에 의존하여 구할 수밖에 없다. 특히, 연소속도는 연료의 호환성, 연소기 설계 및 운전시 화염 안정성 및 연소부하에 미치는 주요 인자이기 때문에, 이에 대한 정확한 정보를 얻는 것은 매우 중요하다.

연소속도에 대한 종래의 연구를 살펴보면 CH<sub>4</sub>나 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>과 같은 상용 가스연료를 대상으로 노즐버너 연소기, 정적 연소기 등을 사용하여 당량비,

Table 1 Components and properties of LFG and LFG mixed fuels

		LFG (평균) 100%	LPG 100%	NG 100%	LFG 70% + LPG 30% (10A)	LFG 50% + LPG 50% (13A)	LFG 50% + NG 50%	LFG 30% + NG 70%
조	CH <sub>4</sub>	54.5	0.0	89.78	38.15	27.25	72.14	79.20
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.0	0.0	7.48	0.00	0.00	3.74	5.24
	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0.0	100.0	2.02	30.00	50.00	1.01	1.41
	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.0	0.0	0.70	0.00	0.00	0.35	0.49
성	CO <sub>2</sub>	37.5	0.0	0.00	26.25	18.75	18.75	11.25
	N <sub>2</sub>	7.0	0.0	0.02	4.90	3.50	3.51	2.11
	O <sub>2</sub>	1.0	0.0	0.00	0.70	0.50	0.50	0.30
고위발열량 (HHV: kcal/m <sup>3</sup> )		5207.62	23826.9	10528.5	10793.4	14517.2	7868.09	8932.28
웨버지수 발열량/√비중		5.33	19.27	13.35	10.17	13.03	8.86	10.51
비중(Air=1.0)		0.9542	1.5286	0.6224	1.1265	1.2414	0.7883	0.7220
단열화염온도(K)		2115.7	2290.9	2254.2	2229.2	2257.7	2205.8	2228.2

혼합기 온도 및 압력 등을 변수로 하여 많은 실험적 연구가 진행되었다.<sup>(1)</sup> 또, 최근에는 이들 연료에 대해 상세 반응기구를 적용한 수치해석적 연구가 수행되고 있으며, 이를 통해 연소속도 예측과 연소속도에 미치는 여러 가지 인자들에 대한 종합적인 검토가 이루어지고 있다.<sup>(2)</sup>

Payman,<sup>(3)</sup> Yumlu<sup>(4)</sup> 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 제안되어 있으나<sup>(5)</sup> 이 식들은 가스 혼합비율이 제한적이고 LFG와 같이 불활성 가스가 다량 혼합된 경우에는 실제 실험치와 잘 일치하지 않는 문제점이 있었다.<sup>(6)</sup>

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 필요한 실용적인 정보를 제공하고자 한다.

## 2. 수치 해석 방법

### 2.1 지배방정식

본 연구에서는 1차원 자유전과 예혼합 화염을 수치 해석적으로 모델링한 Premix Code<sup>(7)</sup>를 이용하였다. 1차원 예혼합화염에 대한 지배방정식은 (1)~(4)와 같고, 복사 열전달은 무시하였다.

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

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

상태 방정식

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

계산에 이용된 경계조건은 식 (5) 및 (6)과 같다.

$$x = -\infty \text{ (미연가스 상류측); } \\ T(-\infty) = T_u, \quad Y_k(-\infty) = Y_{k,u} \quad (5)$$

$$x = \infty \text{ (기연가스 하류측); } \\ \frac{dT}{dx}(\infty) = 0, \quad \frac{dY_k}{dx}(\infty) = 0 \quad (6) \\ (k=1, 2, 3, \dots, K)$$

### 2.2 계산 방법

본 연구에서는 LFG 자체 및 LFG에 LPG를 혼합한 혼합연료를 주 대상으로 하여 계산을 수행하였다. 그러나, 그 밖에 LFG와 NG를 혼합한 경우도 LFG 자체의 조성을 적절히 조절하면 만들 수 있어 본 연구의 범주에 속한다고 할 수 있다.

LFG 자체나 LFG와 NG의 혼합연료의 경우에는 연료의 주성분을 CH<sub>4</sub>로 생각할 수 있으며, 이 경우에는 GRI v-2.11 반응기구(화학종 : 49개, 가역반응기구: 279개)<sup>(8)</sup>를 이용하여 계산이 가능하다. 그러나, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 성분이 포함된 LFG와 LPG의 혼합연료의 경우에는 C2 반응까지만 고려된 GRI v-2.11 반응기구로는 계산을 수행할 수 없으므로 이 경우에는 C3 반응을 포함하는 Law의 C3 반응기구(화학종 : 92개, 가역반응기구 : 621개)<sup>(9)</sup>를 이용하여 계산을 수행하였다. 본 연구에서 LFG 혼합연료의 연소 속도식을 도출하는데 필요한 계산결과는 C3 반응기구를 주로 사용하였다.

반응기구내 각 화학종들의 열역학적 물성치와 전달 물성치의 계산은 Chemkin-II Package<sup>(10)</sup>와 Tranfit Package<sup>(11)</sup>를 이용하여 계산하였다. Premix Code는 수정 뉴턴방법 (Damped Modified Newton Method)과 시간적분법을 이용한 알고리즘<sup>(7)</sup>을 사용하였는데, 이러한 방법은 초기값이 해로 수렴하기 쉬운 구간에서는 빠르게 수렴하지만, 그렇

지 않은 경우에는 수렴이 힘들어 시간적분을 통하여 먼저 계산하여 충분히 수렴시킨 후에 뉴턴 방법을 사용하여 최종 해를 구하게 된다.

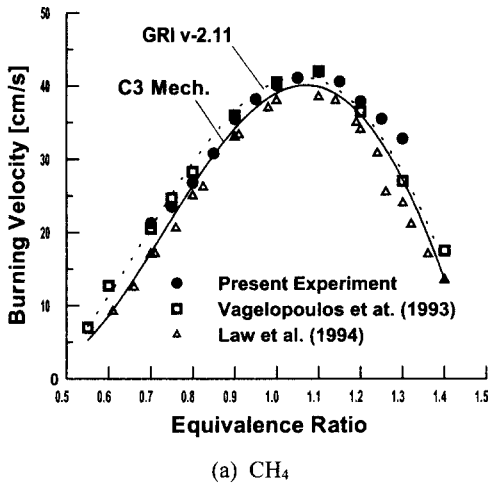
### 3. 결과 및 검토

#### 3.1 수치계산 결과의 타당성 검토

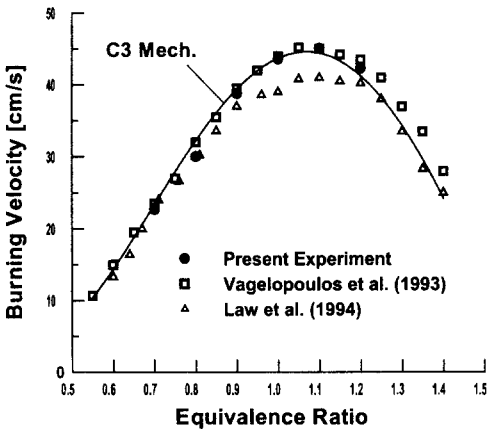
Fig. 1은 순수 연료인 CH<sub>4</sub>과 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 연료의 당량비( $\phi$ ) 변화에 따른 연소속도에 대하여, 실험 및 수치계산 결과를 비교 도시한 것이다. 우선, 실험

결과를 살펴보면, 그림에서 심볼은 여러 연구자에 의해 얻어진 실험값<sup>(12,13)</sup>으로서 그 중 검정 심볼은 본 연구그룹이 노즐버너 연소기에서 측정된 값을 나타낸다. 그림을 보면, 본 실험결과와 다른 연구자들에 의해 얻어진 실험치들의 분산범위 내에 있음을 알 수 있어, 본 연구그룹의 실험결과에 대한 신뢰성을 확인할 수 있다. 수치계산 결과 중에서 Fig. 1(a)에서 CH<sub>4</sub>의 경우 점선은 C2 반응기구 (GRI v-2.11)를 이용한 것이며, 실선은 C3 반응기구를 이용한 계산결과이다. 또한 Fig. 1(b)의 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>의 경우에는 C2 반응기구로는 수치계산이 불가능하기 때문에 C3 반응기구를 이용한 계산결과만 도시하였다. Fig. 1(a)에서 C2 및 C3 반응기구에 의한 두 계산결과를 보면, 두 결과간에 미소한 차이는 있으나, 전 당량비 구간에서 실험결과를 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. 이 결과로부터 두 반응기구중 어느 반응기구가 더 정확하다고 판단하는 것은 어려우며, C3 반응기구에 의해서도 CH<sub>4</sub> 연료의 연소속도를 양호하게 예측한다고 할 수 있다. 그리고, Fig. 1(b)의 계산결과에서 C3 반응기구는 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 연료의 연소속도를 아주 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. 따라서 이하에서는 모든 계산에서 C3 반응기구를 이용하였다.

Fig. 2는 LFG 혼합연료들에 대하여 실험 및 수



(a) CH<sub>4</sub>



(b) C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>

Fig. 1 Comparison of computed and measured burning velocities as a function of equivalence ratio for CH<sub>4</sub> and C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>

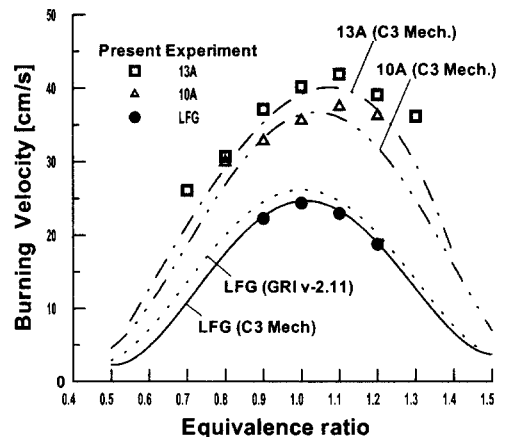


Fig. 2 Comparison of computed and measured burning velocities as a function of equivalence ratio for LFG and LFG mixed fuels

치 계산에서 얻어진 연소속도를 도시한 것으로, 혼합연료 중의 LFG는 앞의 Table 1에 나와 있는 것처럼 평균조성의 LFG이며, 10A는 평균조성의 LFG와 LPG를 7 : 3의 비율로 혼합하여 발열량을 도시가스와 유사하게 만든 연료, 13A는 LFG와 LPG를 5 : 5의 비율로 혼합하여 웨버지수 (Webbe Index)를 도시가스와 유사하게 만든 연료이다. 이들 LFG 혼합연료는 복사효과가 큰 CO<sub>2</sub> 성분을 다량 포함하고 있으므로 연소속도에 미치는 화염복사의 영향을 검토해 볼 필요가 있다. 따라서 CO<sub>2</sub>를 가장 많이 포함하는 평균조성의 LFG 연료를 대상으로  $\phi=1.0$  근처의 몇 조건에 대해 복사 열전달을 고려한 계산을 수행하였다. 계산결과, 화염온도는 각 조건마다 대략 20~40K 정도 감소하였으나, 연소속도의 감소는 0.3~0.5 (cm/s) 정도로 미소하여 LFG 화염에서는 복사 열전달이 연소속도에 미치는 영향이 매우 작다는 것을 확인하였으며, 이러한 이유로 본 연구에서는 모든 계산에 복사 열전달은 고려하지 않았다. 그림을 보면, LFG 혼합연료의 연소속도에 대한 실험 결과와 C3 반응기구를 이용한 계산결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이 결과는 C3 반응기구는 CH<sub>4</sub>나 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>과 같이 순수 연료뿐만 아니라, LFG 혼합연료와 같이 불활성 가스가 다량 (약 20~40% 정도) 함유되어 있는 연료의 경우에도 연소속도를 잘 예측할 수 있음을 의미한다. 또, LFG 혼합연료들의 당량비 변화에 따른 연소속도를 살펴보면 Fig. 1의 순수 연료의 연소속도보다 전구간에 걸쳐서 낮게 나타나며, LPG 혼합비율에 따라 연료중에 포함된 불활성가스의 비율이 달라지기 때문에 연소속도에 많은 차이가 있음을 알 수 있다.

Fig. 3은 LFG 혼합연료에 포함된 불활성 가스인 CO<sub>2</sub> 및 N<sub>2</sub>가 연소속도에 미치는 영향을 독립적으로 살펴보기 위해, CH<sub>4</sub>에 CO<sub>2</sub> 혹은 N<sub>2</sub>를 혼합한 연료의 당량비 1.0에서의 연소속도를 혼합비율에 따라 도시한 것이다. 그림에서 심볼은 실험 결과를, 실선 및 점선은 C3 반응기구를 이용한 계산결과이다. 결과를 보면 CH<sub>4</sub>에 CO<sub>2</sub>가 혼합된 경우는 N<sub>2</sub>가 혼합된 경우보다 연소속도가 훨씬 더 감소하고 있어, 연소속도에 미치는 효과는 CO<sub>2</sub>가 더 지배적임을 알 수 있다. N<sub>2</sub>의 경우에도 혼합비율이 증가함에 따라 연소속도는 선형적으로 감소하나, 그 감소분은 CO<sub>2</sub>에 비해 작으며 혼

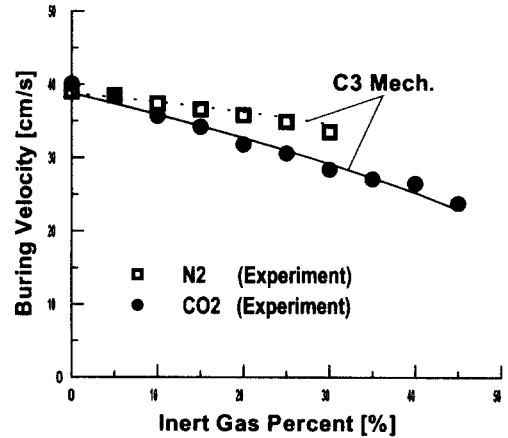


Fig. 3 Comparison of computed and measured burning velocities as a function of inert gas(CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>) percent for CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub> mixtures

합비율이 10% 미만에서는 저감되는 정도가 1~2 (cm/s) 정도로 매우 작음을 알 수 있다. 그리고, C3 반응기구에 의한 계산치는 실험에서 언급한 여러 가지 경향을 잘 예측하고 있으며, 정량적으로도 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

본 연구의 목적인 LFG 혼합연료의 연소속도 상관식을 도출함에 있어서는 여러 경우의 실험 결과를 곡선피팅 (Curve Fitting) 방법에 의해 근사식을 구하는 것이 원칙이라 할 수 있다. 그러나, 실험결과는 측정법에 따라서도 약간 차이가 있으며, 필요로 하는 측정량도 너무 방대하기 때문에 현실적으로는 많은 어려움이 따른다. 위에서 검토한 결과에 의하면 C3 반응기구에 의한 계산결과는 불활성 가스가 다량 포함된 여러 종류의 LFG 혼합연료에 대한 연소속도 실측치를 잘 예측함을 알 수 있었다. 따라서 이 수치계산 결과를 바탕으로 구한 연소속도 상관식은 실험치를 바탕으로 구한 것과 별 차이가 없을 것이라 여겨지며, 또 현실적으로 유용한 방법이라 판단된다. 그래서, 본 연구에서는 수치계산 결과를 바탕으로 LFG 혼합연료들의 연소속도 상관식을 구하고자 한다.

### 3.2 LFG 혼합연료의 연소속도 상관식 도출

#### 3.2.1 LFG 혼합연료의 최대 연소속도 상관식

본 연구에서 대상으로 하는 LFG 혼합연료들의

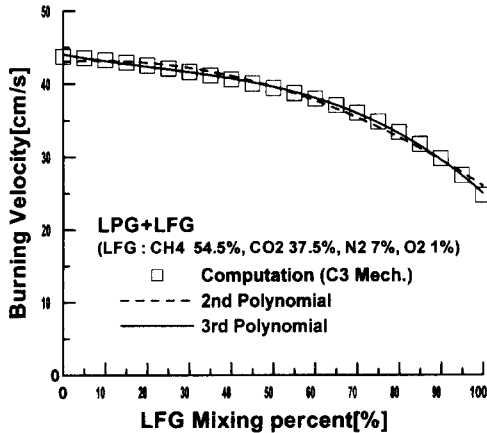


Fig. 4 Polynomial fittings for computed burning velocities as a function of LFG mixing percent for LPG/LFG mixtures

최대 연소속도는 Fig. 1, 2에서 확인할 수 있듯이 대략 당량비 1.0~1.1 부근에서 나타나고 있으나, 이 값과 당량비 1.0에서의 연소속도와는 별 차이가 없다. 따라서 본 연구에서는 표준상태 (25°C, 1atm)에서 당량비 1.0인 혼합기의 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 혼합도에 따른 최대 연소속도의 변화를 도시한 것이다. 그림에서 심볼은 C3 반응기구를 이용한 수치계산 결과이며; 점선과 실선은 이 계산결과를 각각 2차, 3차 다항식을 이용하여 최적 피팅 (Best Fitting)한 결과를 나타낸다. 그림을 보면 3차 다항식을 이용한 것이 계산 결과를 보다 잘 근사함을 알 수 있다. 물론, 다항식의 차수가 높으면 정확도가 다소 증가하나 3차 다항식을 이용한 근사식과 별 차이가 없음을 확인하였다. 그래서 본 연구에서는 상관식의 기본 형태는 식 (7)와 같이 혼합연료중의 LFG 함유율을 독립변수로 한 3차 함수의 형태로 표현하는 것이 적합하다고 판단하였다. 이와 같이 표현할 경우 식 (7)의 계수 중 상수항 D는 순수 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>의 연소속도인 43.77로 정해진다. 나머지 계수 A, B, C는 LFG의 조성이 일정할 경우 상수로 표현할 수 있으나, LFG의 조성이 일정하지 않기 때문에 LFG의 조성의 함수로 표현되어야 한다. 이에 대해서는 아래에 상세

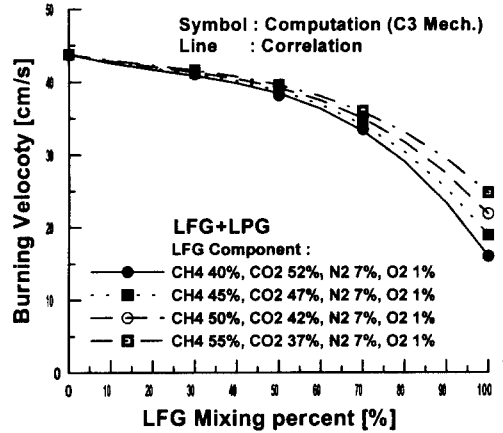


Fig. 5 Maximum burning velocities as a function of LFG mixing percent for LFG mixed fuels having arbitrary components

히 설명하겠다.

$$S_{MIX} = \frac{A [LFG]^3 + B [LFG]^2 + C [LFG] + D}{(7)}$$

여기서

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

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

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

$$D = 43.77$$

(단, 40% ≤ [CH<sub>4</sub>] ≤ 92%)

LFG의 조성은 매립년수, 포집방법 등에 따라 달라지는데 여기에 포함된 각종 성분을 독립변수로 하여 조성 변화를 모사하기에는 변수가 너무 많아 LFG 조성모델을 단순화할 필요가 있다. 우선, LFG에 포함된 O<sub>2</sub> 및 N<sub>2</sub> 성분이 각각 공기 조성의 몰수비와 같은 1 : 3.7 이라면, 이들 성분은 외부에서 공급된 공기와 같다고 할 수 있기 때문에 연소속도에는 아무런 영향도 미치지 못한다. 따라서 불활성가스에 포함된 O<sub>2</sub> + N<sub>2</sub> 중에서 공기조성을 제외한 여분의 질소(평균조성의 LFG의 경우 약 3%)만이 연소속도에 영향을 미치나, 그 영향은 Fig. 3에 도시한 바와 같이 여분의 N<sub>2</sub>가 5% 정도까지는 1 (cm/s) 정도 밖에 영향을 미치지 않는다. 그래서, 본 연구에서는 LFG에 포함된 N<sub>2</sub>와 O<sub>2</sub> 함유율을 평균치와 동일한 7%와 1%

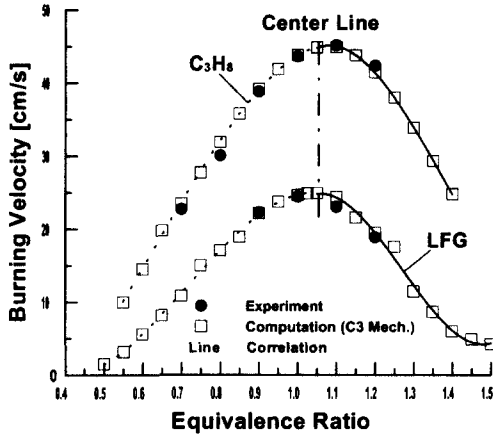


Fig. 6 Correlations of computed burning velocities as a function of equivalence ratio for LPG and LFG

로 일정하다고 가정하였다. 이와 같이 가정하면, LFG 조성은 CH<sub>4</sub>의 조성 x (%)가 주어지면 CO<sub>2</sub>의 조성은 92-x (%)로 정해지기 때문에 LFG의 조성변화는 단지 x만의 함수로 나타낼 수 있다. 이와 같이 단순화한 여러 경우의 LFG를 대상으로, LFG + LPG의 혼합비율을 체계적으로 변화시킨 혼합연료에 대한 계산결과를 토대로 식 (7)의 계수 A, B, C 결정하였다. 단, LFG 중의 CH<sub>4</sub> 농도는 대부분 40% 이상 되기 때문에 이 범위에서 한정하여 검토하였다.

Fig. 5는 식 (7)의 타당성을 검토하기 위해 임의의 조성을 갖는 LFG에 LPG를 혼합하여 만든 연료의 최대 연소속도에 대하여, 위 식 (7)로 정의된 연소속도 상관식(선)과 C3 반응기구를 이용한 계산결과(심볼)를 비교한 것이다. 그림에서 두 결과가 상당히 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그리고 식 (7)은 임의의 조성을 갖는 LFG에 LPG를 혼합한 연료를 대상으로 작성된 것이나, LFG 혼합율 및 LFG 중의 CH<sub>4</sub> 농도를 적절히 선정하면, 연료에 포함된 CH<sub>4</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, CO<sub>2</sub> 등의 조성을 거의 독립적으로 변화시킬 수 있어 그 사용 범위는 광범위하다고 할 수 있다. 단, 식 (7)은 LFG에 포함된 N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> 조성이 각각 7%, 1%로 가정하여 도출한 식이지만, LFG 중의 N<sub>2</sub> 및 O<sub>2</sub> 성분이 이 가정치와 다른 경우에도 공기조성에 해당하는 N<sub>2</sub>를 제외한 여분의 N<sub>2</sub> 농도가 5% 미만의 경우에는 Fig. 3에서 알 수 있듯이 오차가 작기 때문에, 합리적으로 적용 가능하리라 여겨진다.

Table 2 Correlation coefficients for the burning velocities of LPG and LFG (for Eq. (9))

C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> 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

3.2.2 당량비 변화에 따른 연소속도 상관식

LFG 혼합연료의 활용을 위해서는 앞에서 구한 최고 연소속도뿐만 아니라, 당량비 변화에 따른 연소속도도 필요하다. 그러나, LFG 조성변화까지 고려하여 LFG 혼합연료의 당량비 변화에 따른 연소속도 상관식을 도출하기는 쉽지 않다. 그래서 본 연구에서는 평균조성의 LFG에 LPG를 혼합한 연료에 한정하여 당량비 변화에 따른 연소속도 상관식으로 도출하고자 한다.

Fig. 6은 평균조성의 LFG와 순수 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>에 대한 연소속도의 측정치 및 계산결과를 도시한 것으로서, 심볼 중 검정색은 실험값을, 무색인 것은 수치해석값을 나타낸다. LFG 혼합연료의 당량비에 따른 연소속도는 이들 두 연료의 연소속도 사이에 존재하며, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>의 혼합비율이 높을수록 그 값은 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>의 연소속도에 가깝게 위치하게 된다. 따라서, 혼합연료의 연소속도 형태는 LFG와 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>의 연소속도에 가중계수를 곱한 식 (8)의 형태로 표현하는 것이 적합하다고 판단되었다. 그리고, 각 연료의 당량비에 따른 연소속도는  $\phi=1.05$  경계로 두 구간에 대하여 식 (9)와 같이 3차 다항식으로 표현하는 것이 비교적 단순하다고 판단되었다. 그림에서 실선과 점선은 각각  $\phi=1.05$  이상과 이하인 영역에서의 3차 다항식을 도시한 것으로, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>과 LFG에 대한 각 항의 계수는 Table 2에 나타내었다. 그림을 보면, 이들 다항식의 결과가 수치해석 및 실험에서 구한 연소속도를 매우 잘 피팅하고 있음을 보여주고 있다.

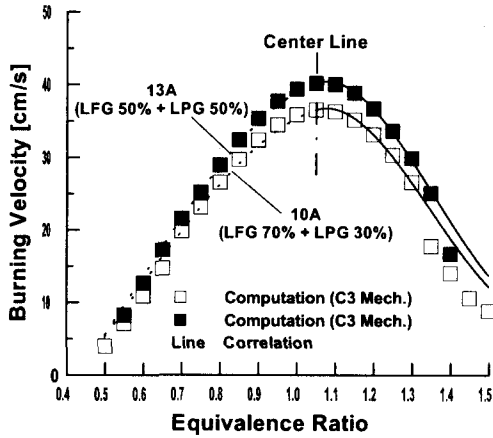


Fig. 7 Correlations of computed burning velocities as a function of equivalence ratio for LFG mixed fuels (10A and 13A)

$$S_M(\phi) = AS(\phi)_{C_3H_8} + BS(\phi)_{LFG} \quad (8)$$

$$S(\phi) = a\phi^3 + b\phi^2 + c\phi + d \quad (9)$$

LFG 혼합연료의 연소속도를 식 (8)과 같이 가중계수를 곱한 형태로 나타내기 위해서는 LFG 혼합비율에 따른 가중계수를 구해야 하는데, 가중계수를 구하는 법은 아래에서 설명하겠다.

Fig. 7은 LFG 혼합연료 10A와 13A에 대한 연소속도를 도시한 것으로서 그림 중의 심볼은 수치해석에 의한 연소속도, 선은 가중계수를 이용하여 식 (8)과 같이 표현한 연소속도 상관식의 결과를 나타낸다. 여기서 가중계수는 다음과 같은 방법으로 구하였다. 각각의 혼합연료에 대해  $\phi=1.05$ 을 경계로 1.05 이하인 구간에서는  $\phi=0.7, 1.05$  지점에서 구한 수치계산 값을 이용하고,  $\phi=1.05$  이상인 구간에서는  $\phi=1.05, 1.3$ 에서의 수치계산 값을 이용하여 식 (8)의 가중계수 A, B를 2원 연립방정식을 이용하여 구하면, 각각의 혼합연료에 대한 연소속도 상관식이 얻어진다. Fig. 7을 보면, 이와 같이 구한 상관식의 결과(점선, 실선)는  $\phi=0.7\sim 1.3$ 인 영역에서 수치해석 결과를 잘 근사하고 있음을 알 수 있다. 단,  $\phi=1.3$  이상인 영역에서 약간의 오차를 보이는데, 이는 가중

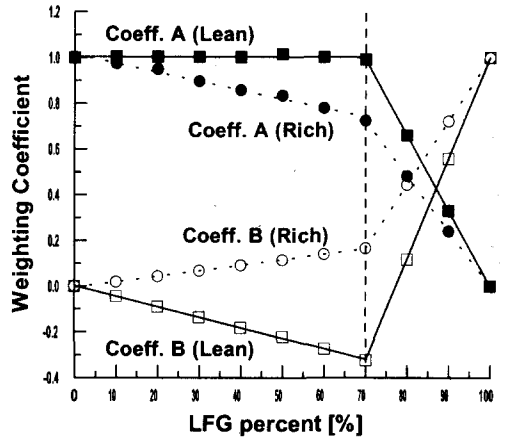


Fig. 8 Correlations of weighting coefficient A and B of Eq. (8) as a function of LFG percent

계수 계산시 당량비를 1.05와 1.3으로 선택하여 계산하였기 때문이며,  $\phi=1.3$  이상인 점을 택하여 가중계수를 구하면  $\phi=1.3$  이상에서는 잘 일치하나, 실제로 많이 이용되는  $\phi=1.0$  근방에서 오차가 발생하기 때문에 실용적 측면에서 불 때 부적절하였다.

Fig. 8은 Fig. 7에서 설명한 방법으로 혼합연료의 LFG 혼합비율을 10% 단위로 변화시키면서 구한 가중계수 A, B의 변화를 도시한 것이다. 그림에서 실선은  $\phi=1.05$  이하인 경우의 가중계수에 해당하며, 점선은  $\phi=1.05$  이상의 경우에 해당한다. 그림에서 가중계수 A, B는 LFG 함유율 70%를 경계로 각 구간에서 거의 선형적임을 알 수 있다. 이 결과를 바탕으로 LFG 혼합비율에 따른 가중계수를 70% 전후의 두 구간에서 각각 1차함수로 표현하였으며, 그 결과 식 (8)의 계수 A, B는 다음과 같이 나타낼 수 있었다.

1. LFG 혼합비율이 70% 이하인 경우

$$A = 3.53 \times 10^{-5}[LFG] + 1.004 \quad (\phi \leq 1.05)$$

$$= -0.004[LFG] + 1.014 \quad (\phi \geq 1.05)$$

$$B = -0.0046[LFG] + 0.0017 \quad (\phi \leq 1.05)$$

$$= 0.0024[LFG] - 0.0047 \quad (\phi \geq 1.05)$$

2. LFG 혼합비율이 70% 이상인 경우



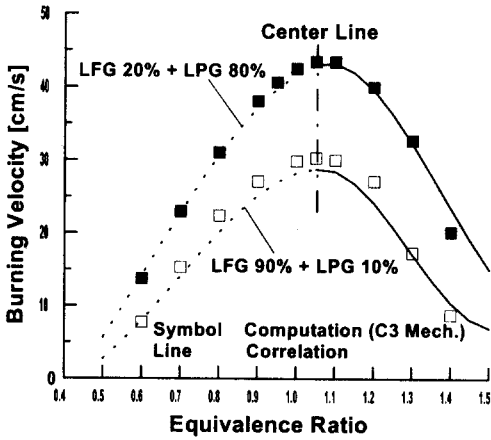


Fig. 9 Polynomial fittings for the burning velocities as a function of equivalence ratio for LFG/LPG mixtures (LFG 20% + LPG 80% and LFG 90% + LPG 10%)

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

Fig. 9는 앞에서 제안한 연소속도 상관식을 검증하기 위해 LFG와 LPG를 임의의 비율로 혼합한 경우에 대한 수치계산과 상관식에서 얻은 연소속도를 비교한 것으로, LFG 혼합연료의 조성은 LFG (20%) + LPG (80%)와 LFG (90%) + LPG (10%)의 경우이다. 그리고, 앞에 제시한 Fig. 7도 동일한 방식으로 도시한 것으로서, 이 경우 13A는 LFG (50%) + LPG (50%)에 해당하며, 10A는 LFG (70%) + LPG (30%)에 해당한다. 이 두 그림에서 알 수 있듯이, 본 연구에서 제안한 당량비에 따른 LFG 혼합연료의 연소속도 상관식 (8)은  $\phi=1.3$  이상에서 약간의 오차를 보이지만, 실용적으로 많이 사용하는  $\phi=0.7\sim 1.3$  구간에서는 계산결과와 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 위 결과로부터 앞에서 제안한 식 (8)은 LFG 혼합연료의 당량비 변화에 따른 연소속도를 합리적으로 예측할 수 있다고 판단되며, LFG 활용시 연소속도에 대한 유용한 정보를 제공하리라 생각된다. 단, 여기서 제안된 상관식은 평균조성의 LFG에 LPG를 혼합한 경우를 대상으로 하였으나, 이

식에 앞절에 제안한 LFG 조성변화를 고려한 최고 연소속도 상관식 (7)을 참고하면, 실제 LFG 혼합연료를 이용함에 있어서 매우 유익한 정보를 제공하리라 여겨진다.

#### 4. 결론

상세반응기구를 이용한 수치계산 및 실험을 바탕으로 LFG 및 LFG 혼합연료들의 연소속도를 비교, 검토하고, 연소속도 상관식에 관한 연구를 수행하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) C3 반응기구를 이용한 수치계산은 불활성 가스를 다량 포함하는 LFG 혼합연료의 연소속도를 정량적으로 매우 잘 예측함을 알았다.

(2) 수치계산 결과를 근거로 하여, LFG 조성변화까지 고려한 LFG 혼합연료 (LFG + LPG)의 최대 연소속도 상관식 (본문 식 (7))을 제안할 수 있었다.

(3) 평균조성의 LFG와 LPG의 혼합연료를 대상으로 하여 이들 혼합연료의 당량비에 따른 연소속도 상관식 (본문 식 (8))을 도출하였다.

(4) 본 연구에서 제시한 연소속도 상관식은 LFG 혼합연료의 활용시 연소속도를 예측하는데 매우 유용하게 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

#### 후 기

본 연구는 1998년도 인하대학교 교내연구비 지원에 의해서 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

#### 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) Sohn, C. H., Aum, Y. G., Chung, S. H., Hong, S. W. and Kim, H. D., 1999, "A Burning Velocity Correlation for Premixed Hydrogen/Air/Steam flames," *KSME International Journal*, Vol. 13, No. 3, pp. 294~303.
- (3) Payman, W. and Wheeler, R. V., 1922, "The

- Composition of Gaseous Fuel in Relation to Their Utilization," *Fuel in Science and Practice*.
- (4) Yumlu, V. S., 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, 오준석, 정익산, 오창보, 이인대, 1999, "LFG 활용을 위한 연소특성 검토," 제18회 KOSCO Symposium 논문집, pp. 21~29.
- (7) Kee, R. J., Garcar, J. F., Smooke, M. D. and Miller, J. A., 1994, "A Fortran Program for Modeling Steady Laminar One-Dimensional Premixed Flame," *Sandia Report SAND85-8240*.
- (8) GRI Mech. Ver 2.11, Web address : [http://www.me.berkeley.edu/gri\\_mech/](http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/).
- (9) C3 Mech. Web address : <http://www.princeton.edu/~cklaw/>.
- (10) Kee, R. J., Rupley, F. M. and Miller, J. A., 1989, "Chemkin-II : A Fortran Chemical Kinetic-Chemical Kinetics," *Sandia Report, SAND 89-8009B*.
- (11) Kee, R. J., Dixon-Lewis, G., Warnatz, J., Coltrin, M. E. and Miller, J. A., 1994, "A Fortran Computer Code Package for the Evaluation of Gas-Phase Multicomponent Transport Properties," *Sandia Report, SAND86-8246*.
- (12) Vagelopoulos, C. M., Egolfopoulos, F. N. and Law, C. K., 1994, "Further Considerations on the Determination of Laminar Flame Speeds with the Counterflow Twin-Flame Technique," *25th Symposium (Int.) on Comb.*, pp. 1341~1347.
- (13) Law, C. K., 1993, "A Compilation of Experimental Data on Laminar Burning Velocities," *Reduced Kinetic Mechanisms for Applications in Combustion Systems*, N. Peters and B. Rogg (Eds.), Springer-Verlag, pp. 15~26.