

천연가스를 모사하는 등가가스의 유효성 검토

김종민 · 이승로* · 이창언**

인하대학교 기계공학과 대학원, *인하대학교 기계공학과
(2012년 5월 6일 접수, 2013년 6월 5일 수정, 2013년 6월 5일 채택)

Examination of validation for equivalent gas to replace natural gas

Jong-Min Kim · Seungro Lee · Chang-Eon Lee[†]

Department of Mechanical Eng. Graduate Inha Univ.,

*Department of Mechanical Eng. Inha Univ.

(Received 6 May 2013, Revised 5 June 2013, Accepted 5 June 2013)

요 약

산지마다 상이한 성분을 갖는 천연가스의 가스호환성 및 연소특성을 판정하기 위해서는 많은 시간과 비용이 소비되고 그 범위도 넓어 어려움이 있어, 천연가스를 모사하는 등가가스를 대체하여 사용하는 방법이 사용되고 있다. 등가가스는 천연가스와 발열량, 압축계수, 상대밀도, CO 배출농도 및 연소속도에 차이가 거의 없다고 알려져 있지만, 실제 가스기기에 대한 화염형상, NOx 배출농도 및 효율에 대한 연구는 아직 보고되고 있지 않다. 본 연구에서는 천연가스를 모사하는 등가가스를 대상으로 기존에 보고된 CO 배출농도, 연소속도 및 화염온도 등을 재확인하고, 화염형상, NOx 배출농도 및 효율에 대해서 수치해석 및 실험을 통해 비교 검토함으로써 등가가스의 유효성을 검토하였다. 그 결과 천연가스와 등가가스의 차이는 미세하였으며, 등가가스를 이용하여 천연가스의 연소특성 및 호환성 범위를 검토하는데 문제가 없을 것으로 판단되었다.

주요어 : 천연가스, 등가가스, 연소특성, 가스호환성

Abstract - In order to estimate the combustion characteristics and the gas interchangeability for natural gas with various compositions per each production area, equivalent gas are using to replace natural gas. It is known that an equivalent gas has the same the heating value, the compression factor, the relative density, CO emission and the burning velocity as the original natural gas. However, it is not reported that the flame shape and thermal efficiency and NOx emission by real gas appliance. In this study, equivalent gas was examined the validation to replace natural gas. The CO emission the burning velocity and the flame temperature were reconfirmed, and the flame shape, the NOx emission and the thermal efficiency were numerically and experimentally investigated. As results, there was not a large difference between natural gas and equivalent gas. This result demonstrated that there was no problem using equivalent gas to replace natural gas.

Key words : Natural gas, equivalent gas, Combustion characteristics, Gas interchangeability

1. 서 론

열최근 천연가스의 수요량이 증가하면서 국내에 공급되는 천연가스의 성분이 다변화(저열량화)하고 있어, 기존의 천연가스와는 조성이 다르기 때문에 가

[†]To whom corresponding should be addressed.
School of Mechanical Engineering, Inha University
Tel : 032-860-7323 E-mai : chelee@inha.ac.kr

스호환성에 문제가 발생할 것으로 예측된다. 이러한 문제로 천연가스의 호환성을 판정하기 위해 다양한 천연가스를 이용하여 호환성 범위를 결정하여야 하는데 천연가스를 이용하여 호환성 판정범위를 정하기에는 시간과 비용의 낭비가 크고, 넓은 범위의 호환성 판정을 하기에는 어려운 점이 있기 때문에 일부 국가에서는 등가가스를 이용하여 호환성 판정범위[1,2]를 선정하고 있다.

천연가스를 모사하는 가스를 만들어 비교한 연구는 많지 않지만 Dutton[1,3-6]등이 1978년부터 메탄, 프로판, 이산화탄소, 질소 및 수소를 이용하여 지속적으로 연구를 진행하여 1985년 메탄, 프로판, 질소 및 수소를 이용한 등가가스를 정립하였으며, 2002년 Dagaut[7]는 천연가스를 메탄, 에탄, 프로판으로 대체하여 수치해석적으로 비교하였다. 그러나 Dagaut의 경우는 천연가스를 순수하게 대체하기 위한 연구가 아닌 mechanism 비교를 위한 연구로서 진행을 하였기 때문에 실제로 순수하게 천연가스를 모사하는 등가가스에 대한 연구는 Dutton이 유일하다고 할 수 있다.

본 연구에서 사용한 Dutton의 등가가스는 초기에 메탄, 프로판, 이산화탄소, 수소를 사용하여 연구를 진행하였다. 그러나 이산화탄소를 이용하여 연구를 진행하면서, 이산화탄소가 CO 배출농도와 Soot에 영향을 주기 때문에 이산화탄소의 영향을 최소한으로 줄이기 위하여 질소를 이용하여 연구를 진행하였다. 또한 질소를 사용할 경우 이산화탄소를 사용할 경우보다 발열량 및 상대밀도의 차가 더 적기 때문에 질소를 사용하여 등가가스를 정립하였다.

그러나 당시에는 NO_x의 대한 영향에 대해서 언급하지 않았고, 효율이나 화염형상에 대한 언급이 없었으며, 1985년 등가가스를 정립한 이후 등가가스에 대한 추가적인 검증이 없는 실정이다. 또한 현재 국내에서는 천연가스의 저열량화로 인한 호환성 연구가 활발하게 진행 중에 있는데 천연가스를 등가가스로 모사하여 실제로 검증되지 않은 NO_x 배출농도, 효율 및 화염형상 등에 대한 연구가 진행된바가 없다. 그러므로 국내의 천연가스의 저열량화로 따른 천연가스의 연소특성 및 호환성 판정에 대한 연구를 진행하기 위해서는 Dutton이 정립한 등가가스와 실제 천연가스를 비교하여 기존의 알려진 연소속도, 불완전연소 등에 대한 재확인과 고려되지 않았던 화염형상, NO_x 배출농도 및 효율 등에 대한 연구가 필요하다.

Table 1. Equivalence factors for hydrocarbons

Gas	Equivalent gas	
	Methane(CH ₄)	Propane(C ₃ H ₈)
Methane(CH ₄)	1.0	0.0
Ethane(C ₂ H ₆)	0.5	0.5
Propane(C ₃ H ₈)	0.0	1.0
Butane(C ₄ H ₁₀)	-0.5	1.5
Pentane(C ₅ H ₁₂)	-1.0	2.0
Hexane(C ₆ H ₁₄)	-1.5	2.5
Heptane(C ₇ H ₁₆)	-2.0	3.0
Octane(C ₈ H ₁₈)	-2.5	3.5
propene(C ₃ H ₆)	0.0	1.0
Butene(C ₄ H ₈)	-0.5	1.5

따라서 본 연구에서는 천연가스와 등가가스의 CO 배출농도, 연소속도, 화염온도 등에 대한 기준에 알려져 있는 것들에 대해 재확인하고, NO_x 배출농도, 열효율과 화염현상 등을 수치해석 및 가스레이저를 이용한 실험을 통해 추가적으로 검토하여 실제적인 등가가스와 천연가스의 차이점과 고려해야할 점 등을 알아내고, 다양한 성분을 가지는 천연가스의 연소특성과 호환성 판정 연구에 등가가스를 대신하여 사용해도 문제가 없을지에 대한 유효성검토를 하고자 한다.

2. 수치해석 및 실험방법.

2.1 등가가스

본 연구에서 검토하고자 하는 등가가스[1,3-6]는 다양한 성분을 갖는 임의 천연가스를 원 가스의 물성은 그대로 유지하도록 하면서 메탄, 프로판, 수소 및 질소를 이용하여 4가지 성분의 단순한 가스로 구성된 가스를 말한다. 임의 천연가스에 해당하는 등가가스를 만들 때, 메탄, 프로판 성분을 제외한 모든 탄화수소 성분은 식 (1) 및 table 1과 같이 메탄과 프로판의 조성을 이용하여 C-C 결합, C-H결합의 수를 등가량으로 치환한다. 예를 들어 Fig. 1과 같이 2몰의 에탄의 경우 1몰의 메탄과 1몰의 프로판으로 표현할 수 있다. 수소 성분은 천연가스의 포함되는 수소의 함유량을 그대로 사용하며, 모든 불활성 가스는 N₂로 구성되어 있다고 가정하고, N₂를 이용하여 등가가스의 웨버지수를 본래의 천연가스와 동일하게 한다.

$$C_nH_{2n+2} = \left[\frac{1}{2} - \frac{1}{2}(n-2)\right]CH_4 + \frac{1}{2}(n-1)C_3H_8 \quad (1)$$

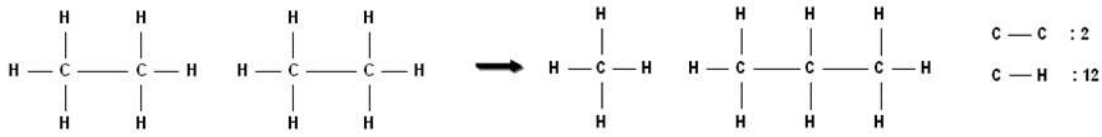


Fig. 1. Substitute equivalent gas(methane+propane) for hydrocarbon(ethan)

이와 같은 방법으로 치환한 등가가스는 원 가스와 발열량의 차이는 0.5% 이내이고, 압축계수에도 차이가 거의 없어서 이로부터 계산되는 상대밀도도 차이가 거의 없는 것으로 알려져 있다. 또한, 천연가스와 등가가스의 연소속도도 거의 차이가 없다고 알려져 있다.

2.2 수치해석 방법

본 연구에서 천연가스와 등가가스의 화학평형온도는 Chemkin-II[8]와 Tranfit[9]를 이용한 Equil code를 이용하여 계산하였으며, 연소속도, CO 배출농도 및 NO 배출농도는 Premix code[10]를 이용하여 계산하였다. 상세 반응기구는 천연가스의 연소속도 계산을 위하여, 92개의 화학종과 621개의 가역반응(Reversible reaction)으로 구성된 C3 반응기구[11]를 사용하였으며, C3 반응기구는 C5 이상의 성분을 포함하지 않기 때문에 천연가스에 포함된 C5H12 화학종(최대 0.03%)을 C4H10로 대체하여 계산을 수행하였다. 또한 Premixed code를 이용한 예혼합화염의 연소속도, CO 배출농도 및 NOx 배출농도 계산에서 점성효과, 중력, 복사 열전달, 듀퍼 효과(Dufour effect) 등을 무시하였으며, 단일화학평형온도 계산에서는 Equil program 중 등압, 단일 조건을 선택하여 계산하고 그 결과를 제시하였다. 계산에 이용한 지배방정식으로 연속, 화학종, 에너지 및 상태방정식은 각각 다음과 같다.

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

$$\dot{M} \frac{dY_k}{dx} = - \frac{d}{dx} (\rho A Y_k V_k) + A w_k \dot{W}_k \quad (3)$$

$$\dot{M} \frac{dT}{dx} = \frac{1}{c_p} \frac{d}{dx} \left(\lambda A \frac{dT}{dx} \right) - \frac{A}{c_p} \sum_{k=1}^K \rho Y_k \times V_k c_{pk} \frac{dT}{dx} - \frac{A}{c_p} \sum_{k=1}^K w_k h_k \dot{W}_k \quad (4)$$

$$\rho = \frac{p \bar{W}}{RT} \quad (5)$$

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{M} 는 혼합물의 평균 분자량, R 은 가스상수, λ 는 혼합물의 열전도계수, c_p 는 혼합물의 정압비열을 나타내고 있다. 계산에 이용된 경계조건은 다음과 같다.

$$x = -\infty \text{ (미연가스 상류 측)} ;$$

$$T(-\infty) = T_u, \quad Y_k(-\infty) = Y_k \quad (6)$$

$$x = \infty \text{ (미연가스 하류 측)} ;$$

$$\frac{dT}{dx}(\infty) = 0, \quad \frac{dY_k}{dx}(\infty) = 0 \quad (7)$$

여기서, $k = 1, 2, 3, \dots, K$ (반응에 포함된 화학종의 수)이며, T_u 는 반응 전 혼합물의 온도를 나타낸다.

2.3 실험방법

천연가스와 등가가스의 비교검토를 위해서 본 연구에서는 국내에서 가장 많이 사용하는 가정용 가스 기기인 가스레인을 이용하여 실험을 진행하였으며, 화염형상, 효율, CO 배출농도와 NOx 배출농도를 비교하였다. Fig. 2는 천연가스와 등가가스의 비교를 위하여 사용한 실험장치의 개략도이다. Fig. 2(a)와 Fig. 2(b)에서 보는 바와 같이 천연가스와 등가가스를 각각 공급하여 실험을 진행하였으며, 천연가스는 국내에 수입되는 천연가스를 사용하였고, 등가가스는 메탄 99.9%, 프로판 99.9%, 질소 99.999%의 가스를 이용하여 가스믹서를 통해 제조하였다. 화염형상은 디지털 카메라(Canon EOS 400D)를 이용하여 촬영을 하였으며, 효율 및 배기가스 배출농도는 KS B

Table 2. Comparison of composition and gas properties between natural gas and the equivalent gas

	Natural gas			Equivalent gas		
	AG	SG	YG	AG	SG	YG
CH4(%)	87.06	92.26	93.49	90.76	94.24	95.92
C2H6(%)	8.40	4.87	5.08	-	-	-
C3H8(%)	3.48	1.87	1.16	9.18	5.51	4.03
iC4H10(%)	0.42	0.37	0.08	-	-	-
nC4H10(%)	0.54	0.42	0.11	-	-	-
iC5H12(%)	0.02	0.01	0.01	-	-	-
nC5H12(%)	0.01	-	0.01	-	-	-
N2(%)	0.07	0.20	0.06	0.06	0.25	0.06
SUM(%)	100	100	100	100	100	100
WI(kcal/m3)	13488.2	13174.0	13091.1	13488.2	13174.0	13091.1
HHV(kcal/m3)	10835.3	10295.0	10096.4	10831.6	10287.1	10093.4
RD	0.64533	0.61069	0.59481	0.64480	0.61055	0.59446

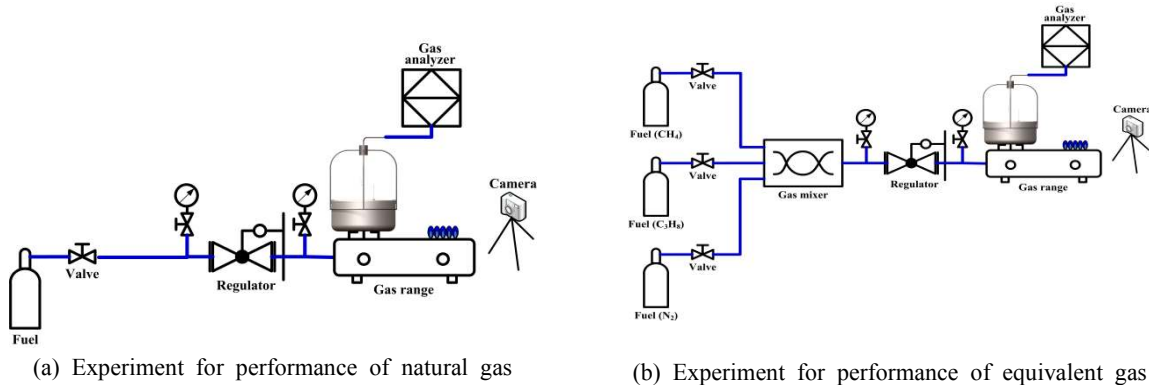


Fig. 2. Schematic diagram of experimental apparatus

8101[12] 및 KS B 8114[13]의 표준 방법을 이용하였다. 배기가스 측정에 사용한 연소가스분석기는 Testo 340K를 사용하였으며, 효율 계산에 필요한 온도는 K-type 열전대 및 데이터로거(HP34970A)를 이용하여 측정하였다. 한편, 연소속도는 실험을 통하여 측정하지 않았는데 이는 기존의 유사한 연구결과[14]에서 앞의 방법으로 계산한 연소속도는 실험에서 구한 연소속도와 거의 동일하기 때문에 본 연구에서는 실험적 방법을 통한 연소속도를 구하지는 않았다.

2.4 천연가스 및 등가가스의 성분 비교

Table 2는 본 연구에서 사용한 천연가스와 등가가스의 성분, 웨버지수, 발열량 및 비중 등을 비교한 것이다. Table 1에서 AG, SG 및 YG는 각 산지에서 생

산되는 가스를 의미하며, 산지 명칭은 보안상 약칭으로 사용하였다. 산지에서 생산되는 천연가스와 등가가스의 웨버지수(WI)는 차이가 없으며, 웨버지수를 동일하게 하기위하여 질소의 성분을 조절하기 때문에 발열량(HHV) 및 상대밀도(RD)의 차이가 발생(발열량 최대 : 0.08%, 상대밀도 최대 : 0.08%)하는 것을 알 수 있다. 이는 실제로 아주 미세한 차이로 화염온도, 연소속도, 효율, CO 배출농도 및 NOx 배출농도에 영향을 크게 미치지 않을 것으로 사료된다.

3. 수치해석 및 실험결과

3.1 수치해석 결과

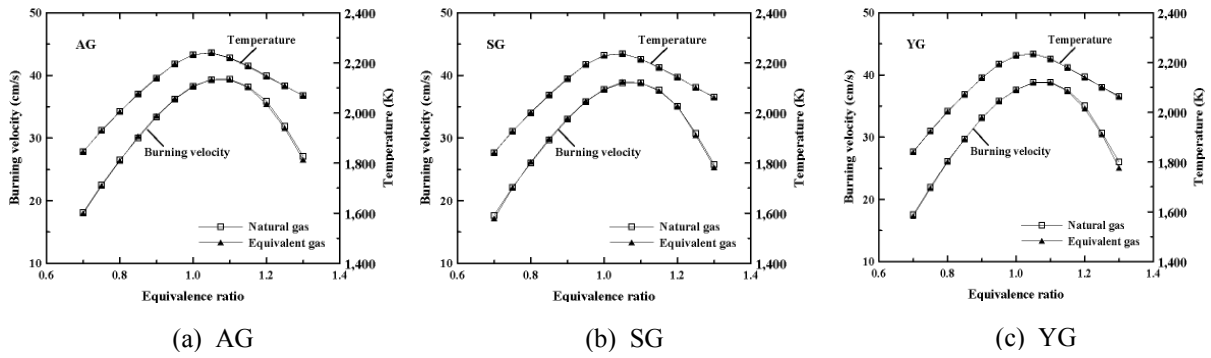


Fig. 3. Comparison of the burning velocity and the maximum flame temperature between natural gas and the equivalent gas

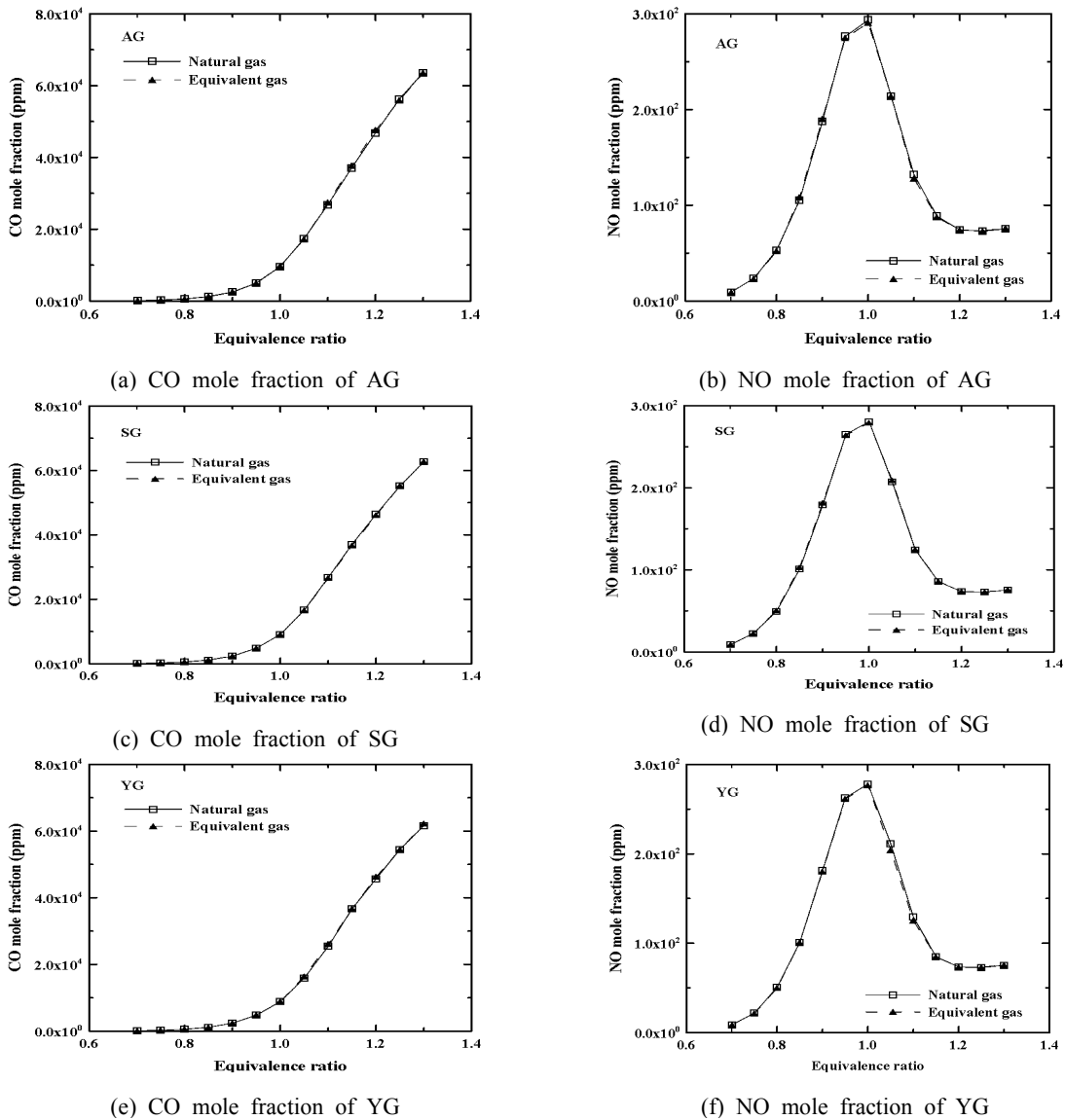


Fig. 4. Comparison of the burning velocity and the maximum flame temperature between natural gas and the equivalent gas

Fig. 3은 천연가스와 등가가스의 당량비별 단열화염온도 및 연소속도를 계산하여 비교한 결과이다. 천연가스의 단열화염온도가 등가가스보다 다소 높게 나타난다. 이는 Table. 2에서 알 수 있듯이 천연가스의 발열량이 미세하게 높기 때문으로 사료된다. 또한 연소속도도 최대 다소 높게 나타나는데 이는 연소속도에 영향을 미치는 화염온도가 등가가스보다 천연가스가 다소 높기 때문으로 사료된다.

Fig. 4는 천연가스와 등가가스의 동일한 당량비 조건에서 CO 배출농도와 NO 배출농도의 계산결과를 비교한 것이다. 먼저, CO 배출농도는 미세한 차이를 보이거나 등가가스가 다소 높은 것을 알 수 있다. 이는 Table. 1과 Table. 2에서 보는바와 같이 천연가스의 연료성분 중 에탄의 성분이 없어지면서 대부분 프로판으로 치환되고 C4이상의 고탄화수소 역시 메탄의 성분은 줄면서 주로 프로판의 성분이 늘기 때문이다. NO 배출농도는 천연가스가 다소 높게 배출되는 것을 알 수 있는데 이는 천연가스의 화염온도가 미세하나 다소 높기 때문으로 판단된다.

3.2 실험결과

Fig. 5는 가스레인지에서 동일한 공급 압력 조건으로 천연가스와 등가가스를 공급하였을 때 가스레인지의 화염을 비교한 것이다. 천연가스와 등가가스의 화염모양, 형상, 크기 등에서 전혀 차이가 없는 것을 알 수 있다. 이는 C-C 결합과 C-H 결합의 수와 공급압력이 동일한 조건에서 공급되는 공기량이 같고, 천연가스와 등가가스의 웨버지수가 동일하여 당량비가 동일하기 때문으로 사료된다[15].

Fig. 6은 가스레인지의 KS규격 실험방법을 이용하여 AG, SG 및 YG 천연가스와 등가가스의 CO 배출농도와 NOx 배출농도를 측정된 결과를 비교한 것이다. 먼저, CO 배출농도의 경우 수치해석 결과와 마찬가지로 등가가스가 미세하게 높은 것을 확인할 수 있다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 천연가스 중 에탄과 고탄화수소의 대부분이 프로판으로 치환되기 때문으로 사료되며, 그 차이는 5 ppm(1%)이하로 미세한 것을 확인할 수 있다. 반면에 등가가스의 NOx 배출농도가 수치해석결과와 다르게 천연가스의 NOx 배출농도보다 최대 5 ppm(측정농도 1ppm)으로 미세하게 높은 것을 알 수 있다. 이는 천연가스의 성분 중 대부분이 프로판으로 치환되고, 이를 통해 화염의 고온 영역이 증가하기 때문으로 사료된다.

Fig. 7은 가스레인지의 KS규격 실험방법[12]을 이

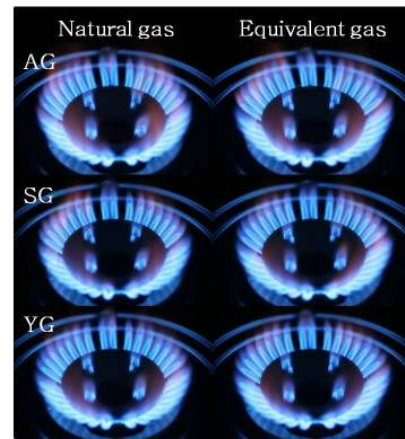
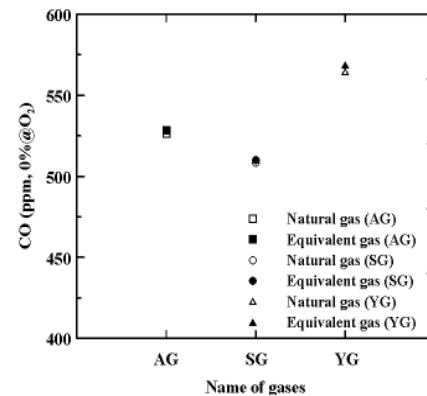
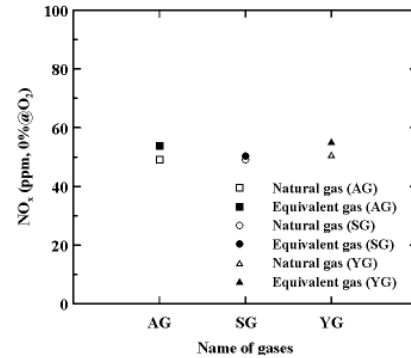


Fig. 5. Comparison of the flame configuration between natural gas and the equivalent gas



(a) CO mole fraction



(b) NOx mole fraction

Fig. 6. Comparison of CO and NOx mole fraction between natural gas and the equivalent gas.

용하여 AG, SG 및 YG 천연가스와 등가가스의 효율을 측정된 결과이다. 등가가스의 효율이 약 1% 높은 것을 확인할 수 있다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 실제 실험조건에서 등가가스의 화염이 고온영역의 분

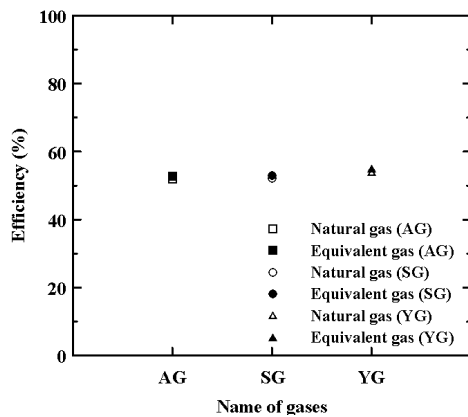


Fig. 7. Comparison of efficiency between natural gas and the equivalent gas

포가 넓어 실험에서 사용하는 KS규격 냄비와 열전달이 더 잘되기 때문으로 판단된다.

5. 결 론

산지에서 공급되는 천연가스와 등가가스의 유효성 검증을 위하여 산지에서 공급된 천연가스와 공급된 천연가스를 등가가스로 모사하여 실험과 수치해석 방법을 통해 기준에 검증된 화염온도, 연소속도, CO 배출농도와 새롭게 검증이 필요한 화염형상, NO_x 배출농도 및 효율을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 수치해석결과 천연가스가 화염온도, 연소속도 및 NO 배출농도가 다소 높게 나타났다. 천연가스의 화염온도가 미세하게 높아 연소속도가 다소 높게 나타나며, 또한 화염온도가 높기 때문에 천연가스의 NO의 배출농도가 다소 높게 나타나는 것을 알 수 있다.
- (2) 반면에 CO 배출농도는 등가가스가 다소 높게 나타났는데, 이는 천연가스를 등가가스로 치환하면서 천연가스의 포함되어 있는 에탄과 C4 이상의 고탄화수소가 대부분 프로판으로 치환되기 때문으로 사료된다.
- (2) 화염형상은 차이가 거의 없는 것을 알 수 있는데, 이는 공급가스 압력이 동일하여 공기량이 일정하게 공급되고, 공급열량(웨버지수)이 동일하여 당량비가 같아지기 때문으로 사료된다.

다.

- (3) 실험결과 등가가스의 CO 배출농도와 NO_x 배출농도가 다소 높은 것을 확인할 수 있었다. CO 배출농도의 경우에는 수치해석과 동일하게 등가가스가 다소 높은 것을 확인할 수 있었다. 반면에, 수치해석 결과와 달리 NO_x 배출농도의 경우 등가가스가 최대 5 ppm(O₂ 0% 환산기준)으로 다소 높게 나타났는데 이는 등가가스의 성분 중 프로판의 성분이 증가하고, 이로 인해 화염의 고온 영역이 증가하기 때문으로 사료된다.
- (4) 천연가스와 등가가스의 효율의 경우 등가가스가 전체적으로 약 1% 정도 높음을 알 수 있었는데, 이는 에탄과 C4 이상의 고탄화수소 대부분이 프로판으로 대체되어 화염의 고온영역이 넓게 분포하고, 그에 따라 KS규격 실험에서 사용하는 냄비와 열전달이 더 잘 일어나기 때문으로 사료된다.
- (5) 따라서 천연가스를 모사하는 등가가스의 유효성을 검토한 결과 천연가스와의 차이가 미세하게 발생하지만 이를 고려하면 천연가스의 연소특성 및 호환성 연구를 진행하는데 유용하게 사용될 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Dutton, B. C. A new dimension to gas interchangeability, The institution of gas engineers, 1984, Communication 1246.
2. Economic regulation authority. Gas exchangeability in western Australia, 2007
3. Dutton, B. C. Interchangeability prediction-the framework for a new approach, Journal of the institute of fuel, 1978, 51, 225-229
4. Dutton, B. C.; Gimzewski E. Gas interchangeability : prediction of flame lift, Journal of the institute of fuel, 1983, 56, 107-108
5. Dutton, B. C.; Wood, S. W. Gas interchangeability : prediction of soot deposition on domestic gas appliances with aerated burners. Journal of the institute of energy, 1984, 57, 381-382

6. Dutton, B. C.; Souchard, R. J. Gas interchangeability : prediction of incomplete combustion. *Journal of the institute of energy*, 1985, 58, 210-212
7. Dagart, P., On the kinetics of hydrocarbons oxidation from natural gas to kerosene and diesel fuel. *Physical chemistry and chemical physics*, 2002, 4, 2079-2094
8. Kee, R. J.; Rupley, F. M.; Miller, J. A., Chemkin-II : A fortran chemical kinetics package for the analysis of gas phase chemical kinetics. 1989, SAND89-8009B.
9. Kee, R. J.; Dixon-Lewis; Wamatz, G. J.; Coltrin, M. E.; Miller, J. A. A fortran computer code package for the evaluation of gas-phase multicomponent transport. 1994, SAND86-8246.
10. Kee, R. J.; Grcar, J. F.; Smooke, M. D.; Miller, J. A. A fortran program for modeling steady laminar one-dimensional premixed flame. 1994, SAND85-8240.
11. Sung, C. J.; Li, B.; Wang, H.; Law, C. K. Structure and sooting limits in counterflow methane/air and propane/air diffusion flames from 1 to 5 atmospheres. *Proceedings of the combustion Institute*, 1998, 27, 1523-1529
12. Korean agency for technology and standards. KS B 8101-Test methodes of gas burning appliances. 2007
13. Korean agency for technology and standards. KS B 8114-Gas range. 2008
14. 이창언; 현승호; 황철홍; 이성민; 하영철; 이강진. 산지별 천연가스들의 열 물성치 및 연소 정보 검토. *한국연소학회지*, 2007, 12, 38-47
15. Kim, J. M.; Lee, S.; Lee, C. E.; Ha, Y. C. Effect of gas composition on combustion characteristics using the equivalent gas. *8H-ASPACC*, 2010, 799-804