

산지별 천연가스들의 열 물성치 및 연소 정보 검토

이창언* · 현승호** · 황철홍* · 이성민*** · 하영철*** · 이강진***

Study on the Thermodynamic Properties and Combustion Information of Natural Gases from Various Producing Districts

Chang-Eon Lee^{*†}, Seung-Ho Hyun^{**}, Cheol-Hong Hwang^{*},
Sung-Min Lee^{***}, Young-Cheol Ha^{***}, Kang-Jin Lee^{***}

ABSTRACT

The diversification of import districts of natural gas is trying to prepare an increase in the demand and price. The interchangeability of natural gases should be examined prior to supply to gas appliances, although compositional differences among natural gases are not large. The object of this study is to investigate numerically the thermodynamic and transport properties as well as information on combustion of 6 natural gases. Comparing the properties of BOG1 with those of standard gas, the maximum differences of heating value, Wobbe index, air-fuel ratio, and specific heat are 10%, 4%, 10% and 5.54%, respectively. That is, the BOG1 is required careful application. However, all gases except for BOG1 show the similar properties with standard gas. Finally, the combustion information such as flame temperature and burning velocity are examined. These results will provide the useful information related to the interchangeability of various natural gases in practical combustion appliances.

Key Words : Natural gas, Substitute gas, Wobbe index, Burning velocity, Gas interchangeability.

기 호 설 명

Alphabets		Greeks	
C_p	Specific heat	η	Viscosity
d	Relative density	λ	Thermal conductivity
H	Heating value	ρ	Density
M	Molecular weight	Subscripts	
p	Pressure	k	Species k
R_u	Universal gas constant	mix	Mixture
T	Temperature	air	Air
WI	Wobbe index	stoi.	Stoichiometric
x	Mole fraction	Superscripts	
Z	Compressibility factor	◦	Ideal gas
		—	Property on a molar basis

1. 서 론

* 인하대학교 기계공학과

** 인하대학교 기계공학과 대학원

*** 한국가스공사 연구개발원

† 연락처, chelee@inha.ac.kr

현재 우리나라에서 쓰이고 있는 도시가스는 조성이 거의 일정한 가스가 공급되고 있으나, 천연가스의 가격 및 수요증가에 대비하여 수입산지의

다변화가 요구되고 있다. 여러 산지의 천연가스는 국내에서 기존에 사용하는 표준가스와는 조성이 다르며, 이들 가스를 표준가스의 대체가스 혹은 표준가스와 혼합하여 공급할 경우에는 화염안정성 및 오염물질 배출특성의 변화가 예상된다. 또 산업공정의 생산성, 열효율 및 내구성 등의 추가적인 변화를 초래할 수도 있다. 이러한 문제점을 검증하기 위해서는 도입 예상인 산지별 가스를 이용하여 연소특성에 민감한 연소기기 및 산업공정을 대상으로 가스 호환성에 대한 체계적인 검토가 요구된다.

천연가스의 성분 변화에 따른 호환성 판정법은 1900년대 초기부터 연구되기 시작하였으며, 이들 연구에서는 호환성을 판별하는 지수의 개발이 주요 관심사였다. 이 분야의 초기 연구는 주로 미국가스협회(American Gas Association, A.G.A.)에 의해 수행되었다. 이 결과를 바탕으로 A.G.A. 호환성 판정법[1]이 제시되었으며, 이 판정법에 불완전 연소지수를 추가한 Weaver 판정법[2] 제시되었다. 한편, 유럽에서는 가스의 호환성을 그림(Diagram)으로 제시하는 도식법(Graphic method)을 선호하였다. 이와 같은 방법으로는 Gilbert & Prigg(U.K), Holmqvist(Sweden) 및 Van der Linden(Holland) 등을 들 수 있다.[3, 4] 이와 같은 호환성 판정법은 가스 성분 변화에 따른 기초적인 호환성 판단 근거로 많이 사용되고 있다. 국내에서는 한국가스공사(KOGAS)의 천연가스 열량변동에 따른 연소성 평가시험[5], 천연가스의 열량 조절에 따른 호환성 관련 연구[6]가 시도된 바 있다. 이와 같이 천연가스의 호환성 판정법에 대해 많은 방법이 제시되어 있으나, 연소설비마다 가스의 사용 조건, 연소기의 형태, 연소 방식 등이 다양하기 때문에 기존의 호환성 판정법에 의거하여 가스 호환성을 판단하는 것은 부족한 면이 있어 주위가 요구된다.

가스 종류에 따른 화염 안정성의 차이를 검토하는 가장 정확한 방법은 대상 연소기에서 직접 가스 종을 변경하여 안정 화염영역을 비교하는 것이다. 그러나 천연가스가 사용되는 모든 기기 및 공정에 대한 검토는 시간 및 경제적인 측면에서 많은 어려움이 존재한다. 따라서 가스 호환성에 대해 일반적인 특성을 검토하는 기초실험과 가스 종에 민감한 실용기기를 대상으로 한 실험 결과들을 이용하여 가스 호환성에 대한 일반적인 특성을 도출할 필요가 있다. 이를 위해서는 우선적으로 가스 종류에 따른 열 및 전달 물성치, 연소와 관련한 특성치에 대한 종합적인 정보가 요구된다.

이러한 배경 하에 본 연구에서는 국내에서 도입산지로 검토되고 있는 대체가스를 대상으로 열 물성치, 전달 물성치 및 연소와 관련한 여러 가

지 정보를 구하여 이들을 정보를 체계화 하고자 한다. 가스의 열 물성치 및 전달 물성치로는 밀도, 발열량, 웨버지수, 비열, 점성계수, 열전도계수를 구하였으며, 가스 종류에 따른 공연비, 화학평형온도 및 연소속도 등의 연소에 필요한 정보(이하, 연소 정보)를 구하였다. 그리고 표준가스를 기준으로 이들 정보를 통해 검토 대상 가스들의 상대적인 차이를 검토하고 데이터베이스화 하였다. 이들 결과는 본 연구의 후속 연구인 각종 연소기에서의 가스 종류에 따른 화염안정성 및 호환성의 차이를 일반화하는데 매우 중요한 자료를 제공할 것으로 생각된다. 또한 본 논문에서 제시한 열 물성치, 전달 물성치 및 연소 정보를 계산하는 종합적인 방법은 연소 관련 종사자들에게 다변화 하는 연료를 대상으로 연소기 설계 및 운전 조건을 결정하는데 매우 유용하게 이용될 것으로 사료된다.

2. 계산 방법

본 연구에서는 Table 1에 제시한 6종의 가스를 대상으로 열 물성치, 전달 물성치 및 연소 정보를 구하였다. Table 1에서 SG(Standard gas)는 현재 대한민국에서 사용하고 있는 표준 도시가스를 의미한다. YG, AG, TG는 각 산지에서 생산되는 가스를 의미하며, 산지 명칭은 보안상 약칭으로 사용하였다. 그리고 BOG1은 LNG 저장탱크에서 발생하는 증발가스(Boil off gas)인 순수 메탄 성분의 가스이며, BOG2는 BOG1을 표준가스와 동일한 웨버지수를 갖도록 증열한 가스를 나타낸다. 이들 가스들은 8종의 탄화수소 성분과 불활성 물질인 N_2 로 구성되어 있으며, 각 가스의 조성 비율은 Table 1에 제시하였다.

각 가스의 열물성치는 Table 1에 제시한 성분비와 Appendix 1에 제시한 각 성분의 물성치 및 압축 인자를 이용하여 ISO 6976 계산법[7]에 따라 계산하였다. 비열, 전달 물성치 및 연소 조건에 따라 결정되는 공기량, 화염온도는 Chemkin-II[8]와 Tranfit[9]을 이용하여 계산하였다. 연소속도는 Premix code[10]를 이용하여 계산하였으며, Schlieren 기법을 통해 실험값을 측정 하였다.[11] 물성치의 단위는 SI 단위를 기준으로 하였으며, 가스의 온도와 압력은 $0^\circ C, 101.325 kPa$ 을 기준조건으로 하여 계산 하였다.

2.1 가스 물성치 계산

각 가스의 물성을 구하기 위해서는 우선 혼합가스의 분자량을 먼저 계산해야 하며, 이 분자량

Table 1 The composition of natural gases with each producing districts

Component	SG	YG	AG	TG	BOG1	BOG2
CH ₄ (%)	90.09	93.49	87.06	91.64	100.00	93.23
C ₂ H ₆ (%)	6.04	5.08	8.40	1.93	0.00	0.03
C ₃ H ₈ (%)	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00	6.60
C ₃ H ₈ (%)	2.54	1.16	3.48	5.65	0.00	0.11
iC ₄ H ₁₀ (%)	0.54	0.08	0.42	0.16	0.00	0.03
nC ₄ H ₁₀ (%)	0.58	0.11	0.54	0.10	0.00	0.00
iC ₅ H ₁₂ (%)	0.02	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00
nC ₅ H ₁₂ (%)	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
N ₂ (%)	0.19	0.06	0.07	0.42	0.00	0.00

은 식 (2-1)과 같이 계산된다. 단위는 (kg/kmol)을 사용하였다.

$$M_{mix} = \sum_{k=1}^N x_k \cdot M_k \quad (2-1)$$

실제가스에서 압축성(Compressibility)을 고려하여 밀도, 발열량 및 웨버지수 등을 계산하기 위해서는 우선 식 (2-2)를 이용하여 그 혼합가스의 압축 인자(Compressibility factor)를 계산하여야 한다. 여기서 압축 인자란 특정 온도, 압력에서 실제 혼합가스의 부피를 이상 기체 혼합가스의 부피로 나눈 것을 의미한다. 이 식에서 각 성분별 압축 인자 Z는 ISO 6976에서 공인된 값을 이용하였으며, 이 값은 Appendix 1에 제시하였다. 검토 대상인 가스들은 기준조건에서 압축 인자가 0.9959~0.9976 정도로 이상기체에 매우 가까우나 고가의 가스를 취급함에 있어서는 이 정도의 편차도 반드시 고려해야 한다.

$$Z_{mix} = 1 - \left[\sum_{k=1}^N x_k \cdot \sqrt{b_k} \right]^2 \quad (2-2)$$

각 가스의 밀도는 식 (2-3)과 같이 이상기체로 가정된 가스(이하 이상가스)의 밀도를 계산하고, 식 (2-4)와 같이 압축인자를 고려하여 실제 혼합가스의 밀도를 계산한다. 여기서, 위첨자 °는 이상가스의 값을 의미한다.

$$\rho_{mix}^{\circ} = \left(\frac{p}{R_u \cdot T} \right) \sum_{k=1}^N x_k \cdot M_k \quad (2-3)$$

$$\rho_{mix} = \frac{\rho_{mix}^{\circ}}{Z_{mix}} \quad (2-4)$$

이상가스의 단위 몰당 발열량은 식 (2-5)를,

단위 부피당 발열량은 식 (2-6)을 이용하여 구하였다. 실제 가스의 발열량은 식 (2-7)을 이용하여 계산하였다.

$$\overline{H^{\circ}} = \sum_{k=1}^N x_k \cdot \overline{H_k^{\circ}} \quad (2-5)$$

$$H^{\circ} = \overline{H^{\circ}} \times \frac{p}{R_u \cdot T} \quad (2-6)$$

$$H = \frac{H^{\circ}}{Z_{mix}} \quad (2-7)$$

각 가스의 웨버지수는 호환성 판정에 있어서 가장 많이 이용되는 지수로서, 가스기기에서 단위 시간당 연소하는 열량(일반적으로 출력, 혹은 열발생량이라고 표현하기도 함)과 비례적인 관계를 갖는 지수이다. 이상가스의 웨버지수는 식 (2-8)과 같이 구한다. 여기서 d° 는 공기 밀도를 기준으로 한 상대 밀도를 의미하며, 식 (2-9)와 같이 구한다. 그리고 압축성을 고려한 실제 가스의 상대 밀도 및 웨버지수는 식 (2-10)과 식 (2-11)로 계산할 수 있다.

$$WI^{\circ} = \frac{H^{\circ}}{\sqrt{d^{\circ}}} \quad (2-8)$$

$$d^{\circ} = \sum_{k=1}^N x_k \times \frac{M_k}{M_{air}} \quad (2-9)$$

$$d = \frac{d^{\circ} \cdot Z_{air}}{Z_{mix}} \quad (2-10)$$

$$WI = \frac{H}{\sqrt{d}} \quad (2-11)$$

각 가스의 비열은 이상가스라는 가정 하에 Chemkin II의 CKCPOR 서브루틴에서 계산하였다. Chemkin II에서 제공되는 정압비열은 식 (2-12)와 같은 다항식 형태로 주어진다.

$$\frac{C_{pk}}{R} = a_{1k} + a_{2k} T + a_{3k} T^2 + a_{4k} T^3 + a_{5k} T^4 \quad (2-12)$$

각 가스의 점성계수는 Wilke에 의해 고안된 Semi-Empirical 공식을 사용한다. Wilke 공식은 식 (2-13)과 같으며, Tranfit Library의 MCAVIS 서브루틴을 이용하여 구하였다.

$$\eta_{mix} = \sum_{k=1}^N \frac{x_k \eta_k}{\sum_{j=1}^N x_j \Phi_{kj}} \quad (2-13)$$

여기서,

$$\Phi_{kj} = \frac{1}{\sqrt{8}} \left(1 + \frac{M_k}{M_j}\right)^{-\frac{1}{2}} \left(1 + \left(\frac{\eta_k}{\eta_j}\right)^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{M_k}{M_j}\right)^{\frac{1}{4}}\right)^2,$$

$$\eta_k = \frac{5}{16} \frac{\sqrt{\pi m_k k_B T}}{\pi \sigma_k^2 \Omega^{(2,2)*}} \text{이다.}$$

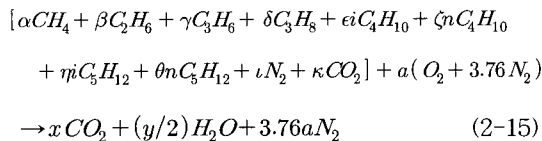
각 가스의 열전도 계수는 식 (2-14)에서 구해지며, Tranfit library의 MCACON 서브루틴을 이용하였다.

$$\lambda_{mix} = \frac{1}{2} \left(\sum_{k=1}^N x_k \lambda_k + \frac{1}{\sum_{k=1}^N x_k / \lambda_k} \right) \quad (2-14)$$

여기서 λ_k 는 순수 화학종의 열전도계수이다

2.2 연소 정보 계산

각 가스의 이론(Stoichiometric) 연소반응식은 식 (2-15)와 같고, 이론 공연비는 식 (2-16), 당량비에 따른 공연비는 식 (2-17)에 의해 계산할 수 있다. 여기서, $\alpha \sim \kappa$ 는 혼합가스에 포함된 해당 가스성분의 몰분율이며, 이들 몰분율의 합은 1이 된다.



$$(A/F)_{stoi.} = \frac{4.76 a}{1} \frac{M_{air}}{M_{mix}} \quad (2-16)$$

$$(A/F) = \frac{(A/F)_{stoi.}}{\phi} \quad (2-17)$$

여기서, ϕ 는 당량비를 의미한다.

화학평형온도의 계산은 EQUIL program을 이용하였다. 이 프로그램에서는 엔탈피(H)와 압력(P)이 일정한 경우(등압단열 화염온도), 내부에너지(U)와 체적(V)이 일정한 경우(등적 단열화염온도)등의 9개 조건에 대해 계산이 가능하다. 본 계산에서는 등압단열 조건에서의 화염온도에 해당하는 화학평형온도를 구하여 제시하였다. 이에 대한 상세한 계산방법은 참고문헌 [8, 9]를 참고바란다.

연소속도란, 미연가스(Unburned gas)가 화염면에 수직 방향으로 유입하는 속도를 말하는 것으로 층류 화염속도(Laminar flame speed)[12]라고도 한다. 이 연소속도는 가스 조성, 혼합기 초기 온도, 당량비 및 압력 등의 연소조건에 따라 변하며, 연소기 설계 및 운전조건의 결정에 주요 검토 대상인 화염 안정성에 매우 중요한 인자이다. 본 연구에서는 1차원 자유전파화염에서 연소속도를 구하는 Premix code를 이용하였다. 본 계산에서는 C₃ 반응 기구[13]를 사용하였다. 단, 이 C₃ 반응 기구는 C₅이상의 성분을 포함하지 않기 때문에 가스에 포함된 극미량(최대 0.03%)의 C₅H₁₂는 C₄H₁₀로 대체하여 계산을 수행하였다. 이에 대한 상세한 계산 방법은 참고문헌 [10]에 제시되어있다.

3. 결과 및 검토

3.1 가스 물성치의 차이점 검토

Table 2는 2절에 언급한 계산 방법을 이용하여 구한 6종 가스의 주요 열 물성치 및 전달 물성치를 나타낸 것으로서, Table에 제시된 발열량은 고위 발열량이다. 아래에서는 이들 6종 가스의 물성치를 표준가스(SG)를 기준으로 한 상대적 차이를 상세히 비교하고, 표준가스를 다른 가스로 대체한 경우에 이들 가스 물성 및 연소 정보의 차이로 인한 각종 연소 기기의 연소성능의 차이 즉, 가스 호환성에 미칠 영향에 대해 검토하였다.

Fig. 1은 가장 기본적인 가스물성 즉, 밀도, 발열량 및 웨버지수에 대하여 기준조건에서의 5종의 대체가스의 물성치를 표준가스(SG)의 물성치로 무차원하여 도시한 것이다. 우선, BOG2와 TG의 이들 모든 물성의 상대적 차이가 1% 이내로 표준가스와 거의 동일함을 알 수 있다. 이하에서는 그 외 가스들의 물성을 검토하겠다. 밀도의 상대치를 비교해 보면, YG와 BOG1(순수

Table 2 Thermodynamic properties of 6 natural gases

	Molecular weight (kg/kmol)	Density (kg/m ³)	Heating value (kcal/Nm ³)	Wobbe index (kcal/m ³)	Specific heat (J/g K)	Viscosity (Pa. s)	Thermal conductivity (A/F) _{stoi} (W/m K)
SG	18.1080	0.8105	10549.72	13324.87	2.0661	1.0006x10 ⁻⁵	2.8163x10 ⁻²
YG	17.1793	0.7686	10096.37	13094.75	2.1112	1.0092x10 ⁻⁵	2.8821x10 ⁻²
AG	18.6266	0.8339	10835.25	13492.15	2.0407	0.9888x10 ⁻⁵	2.7661x10 ⁻²
TG	18.0864	0.8094	10500.81	13271.34	2.0665	1.0006x10 ⁻⁵	2.8349x10 ⁻²
BOG1	16.0430	0.7175	9523.38	12784.19	2.1812	1.0264x10 ⁻⁵	2.9958x10 ⁻²
BOG2	17.9578	0.8037	10499.72	13317.65	2.0792	0.9992x10 ⁻⁵	2.8518x10 ⁻²

CH₄)의 상대치는 표준가스보다 각각 5%, 12% 낮다. 반면에 AG는 상대치가 약 3% 높게 나타나고 있다. 이들 대체가스의 밀도는 Table 1에서 알 수 있듯이 가스 성분 중 밀도가 가장 낮은 CH₄의 분율에 반비례한다. 단위 부피당 발열량의 상대치를 비교해보면, YG와 BOG1의 경우 각각 약 4%와 10% 정도의 낮은 값을 나타내며, 반면에 AG는 약 3% 높아진다. 이들 발열량은 각 가스 중에 포함된 고탄화수소 분율이 높을수록 발열량이 증가함을 알 수 있다. 그리고 발열량을 밀도의 제곱근으로 나눈 웨버지수의 상대치는 YG는 약 2%로 낮아지며, BOG1은 약 4% 낮음을 알 수 있다. 반면에 AG는 약 1% 높음을 확인 할 수 있다.

비열은 가스의 예열, 착화, 자발화 및 화염온도 등에 영향을 미치는 매우 중요한 물성치이다.

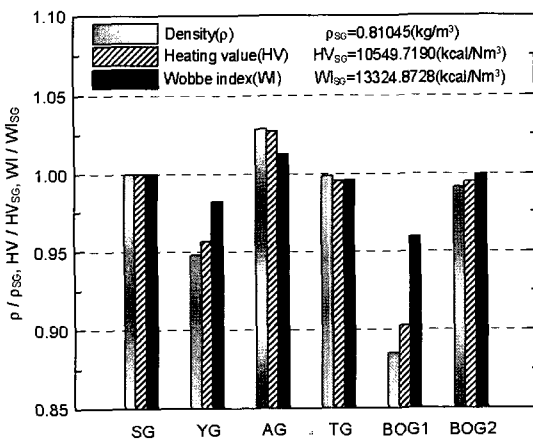


Fig. 1 Relative densities, heating values and wobble indices of 5 natural gases on the basis of SG

Fig. 2는 기준조건의 대체가스와 단일 조건인 당량비 0.9에서 연소생성물의 비열을 표준가스의 경우로 무차원하여 도시한 것이다.

이들 두 경우의 비열은 모두 밀도, 발열량과는 정반대로 BOG1 > YG > BOG2 > TG > SG > AG 순으로 작아진다. 가스자체의 BOG1의 경우가 표준가스보다 약 5.5% 정도 높아지며, 다른 가스들은 모두 약 2.0% 범위 내에서 차이를 보이고 있다. 한편, 연소생성물의 경우는 표준가스와의 차이가 모두 약 2.5% 범위 내에 있다.

Fig. 3은 가스 자체 및 당량비 0.9에서 연소생성물의 점성계수를 상대적 차이를 도시한 것이다. 우선, 각 가스의 점성계수를 표준가스와 비교해보면 BOG1은 약 3% 정도 높으나, 그 외 가스는 약 1% 범위 내에서 차이를 보이고 있다. 한편, 연소생성물의 경우에는 모두 그 차이가 약

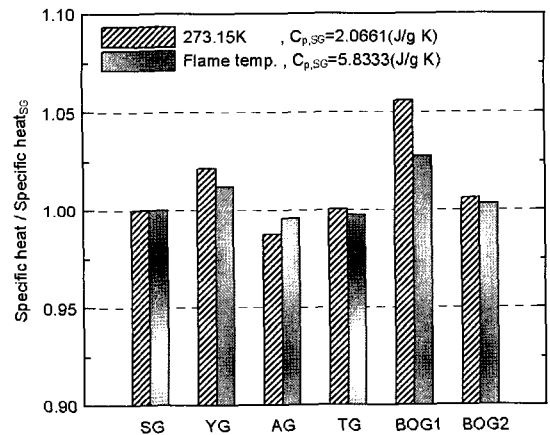


Fig. 2 Relative specific heats of 5 natural gases on the basis of SG at 273.15K and flame temperature

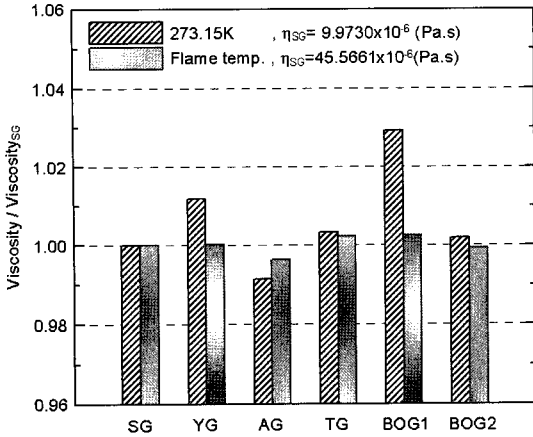


Fig. 3 Relative viscosities of 5 natural gases on the basis of SG at 273.15K and flame temperature

1% 범위 내의 미소한 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 이들 가스의 점성계수는 가스 공급 시에 압력 손실과 비례적인 관계가 있기 때문에 BOG 1의 경우가 가스 공급 시에 압력손실이 증가할 것으로 예상된다. 한편, 연소장의 점성계수의 차는 미소하기 때문에 가스에 따른 연소장의 난류유동 특성에는 별 차이가 없을 것으로 예상된다.

Fig. 4는 대체가스와 당량비 0.9에서 연소생성물의 열전도계수를 상대적 차이를 도시한 것이다. 대체가스 종류에 따른 열전도계수의 변화 경향은 앞에 제시한 점성계수와 동일하다. 우선, 각 가스의 경우를 비교해보면 BOG1은 표준가스에 비해 약 7% 정도 높으나, 그 외 가스의 상대적 차이는 약 2% 범위 이내에 있음을 알 수 있다. 한편, 연소생성물의 경우는 상대 차이가 모두 2% 범위내에 있음을 알 수 있다. 화염대 영역에서의 열전도는 화염의 두께 및 예열대에서의 상세반응속도의 차이를 유발시킬 수 있는 중요한 자이나, 가스 중에 따른 연소 생성물의 열전도계수의 차가 2%이내이기 때문에 화염의 두께 및 예열대에서의 상세반응속도에 큰 차이가 없으리라 예상된다.

3.2 연소 정보의 차이점 검토

가스 호환성 검토 시 공연비의 변화는 화염의 부상(Lifting), 역화(Flash-back) 및 황염(Yellow tip)과 같은 화염 안정성에 큰 영향을 미치기 때문에 각 가스에 대한 정확한 공연비 정보는 매우 중요하다. Fig. 5는 대체가스들의 이론 공연비

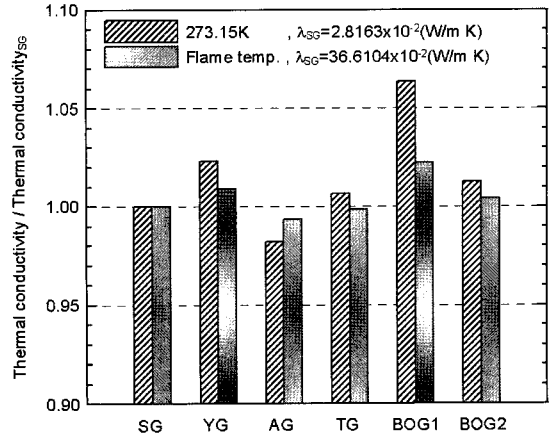


Fig. 4 Relative thermal conductivities of 5 natural gases on the basis of SG at 273.15K and flame temperature

(Stoichiometric air-fuel ratio)를 표준가스의 공연비로 무차원하여 도시한 것이다. 각 가스에 따른 공연비는 BOG1이 약 10%정도 감소하여 가장 큰 차이를 보인다. 그리고 YG은 약 4% 감소하나, AG의 경우는 약 3% 증가한다. 이와 같은 변화는 가스중의 고탄화수소(C₂이상) 성분의 농도가 높을수록 공연비가 증가하기 때문이다. 이들 결과로부터 표준가스를 대체하고자 할 때 BOG1과 YG의 경우에는 공연비의 적합성에 주의가 요구됨을 알 수 있다.

Fig. 6은 화염온도의 차이를 살펴보기 당량비에 따른 단일 화학평형 화염온도를 도시한 것으로, 복잡성을 피하기 위해 표준가스와 온도가 가장

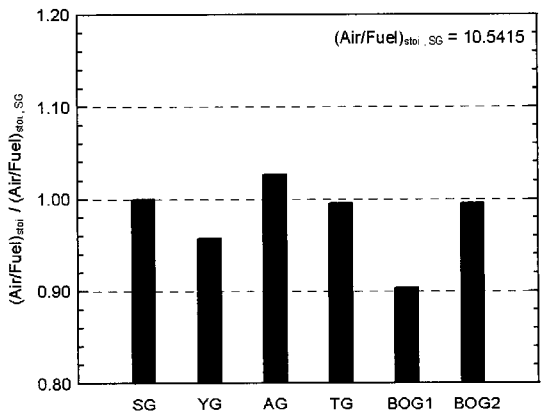


Fig. 5 Relative stoichiometric air/fuel ratios of 5 natural gases on the basis of SG

Table 3 Data of maximum burning velocities by the calculation

	SG	YG	AG	TG	BOG1	BOG2
Velocity(cm/s)	40.93	40.84	41.29	41.00	40.10	41.07
Equivalence ratio (Ø)	1.06	1.08	1.08	1.06	1.10	1.08

높은 AG 및 가장 낮은 BOG1만을 제시하였다. 그림 중의 막대그래프는 최대 화염온도의 차이를 명확히 하기 위해 당량비 1.0에서의 화염온도를 표준가스로 무차원하여 도시하였다. 그림에서 화염온도의 순서는 AG > SG > TG > BOG2 > YG > BOG1과 같으며, 이 순서는 비열의 순서와 반대가 됨을 알 수 있다. 당량비 1.0에서 가장 큰 차이를 보이는 BOG1의 경우도 화염온도가 7K 차이가 나며, 다른 모든 가스는 차이가 약 2K로 이내로 거의 동일하다. 이와 같이 가스 중에 따른 화염온도의 차이는 매우 미소하기 때문에 가스 중에 따른 화염온도의 차는 무시할 수 있다고 할 수 있다.

Fig. 7(a)와 7(b)는 화염 안정성의 판단에 가장 중요한 인자인 연소속도에 대한 수치해석 및 실험 결과를 도시한 것이다. 각 가스에 대한 연소속도는 복잡성을 피하기 위해 편의상 두 그룹으로 나누어 도시하였다. 우선, 실험 및 계산결과를 비교해 보면 계산 결과는 오차범위 내에서 실험결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 또 본 계산에 사용한 C₃ 반응 기구는 C₅ 화학종을 고려하지 못하여 미량(최대 0.03 %)의 C₅ 화학종을 C₄ 화학종으로 대체하였음에도 불구하고 C₅ 화학종을 포함하는 표준가스, YG 및 AG의 연소속도

도 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 가스의 성분이 변한 경우에도 쉽게 데이터를 획득할 수 있는 수치해석 결과를 기준으로 대체가스의 연소속도의 차이를 논하겠다. 우선, 대체가스들의 최대 연소속도는 매우 중요한 정보이기 때문에 Table 3에 해당 당량비와 함께 제시하였다. 계산결과를 기준으로 대체가스에 따른 연소속도의 차이를 살펴보면, BOG1이

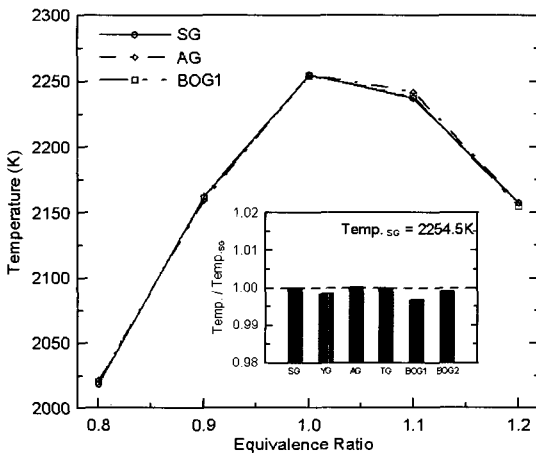
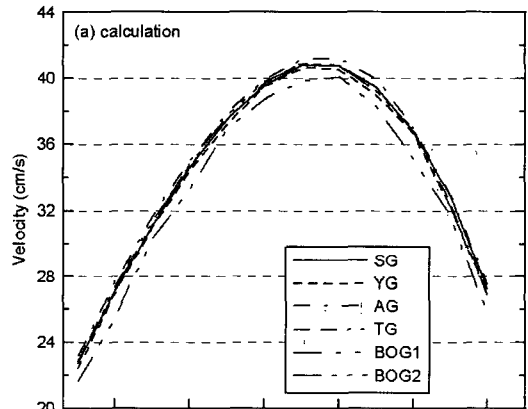
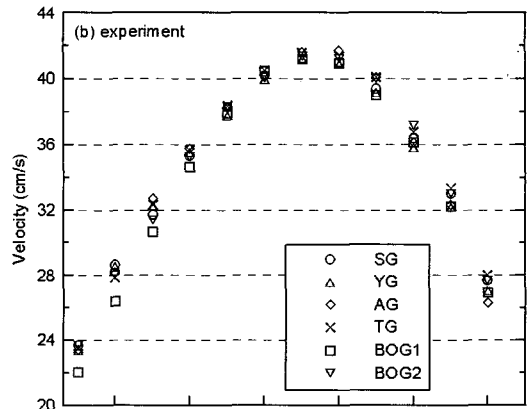


Fig. 6 Adiabatic equilibrium temperature of 3 natural gases in the range of Ø=0.8~1.2 and relative value on the basis of SG



(a) calculation results



(b) experiment results

Fig. 7 Burning velocities of 6 natural gases with equivalence ratio

모든 당량비에서 연소속도가 가장 작으며, 다른 모든 가스는 매우 유사한 값을 가지고 있다. 정량적으로는 BOG1의 경우에는 표준가스와 약 1cm/s 차이가 존재한다. 그러나 그 외 가스는 거의 차이가 없음을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 가스의 조성변화에 따른 열 및 전달 물성치와 연소 정보를 계산하는 방법을 종합적으로 제시하였으며, 이 방법을 이용하여 계산한 결과를 기준으로 표준가스 및 대체가스들의 차이점을 비교 검토하였다. 열/전달 물성치로는 밀도, 발열량, 웨버지수, 비열, 점성계수, 열전도계수가 검토 되었으며, 연소 정보로는 공연비(체적기준), 단열화학적평온도 및 연소속도를 검토하였다. 이러한 열/전달 물성치와 연소정보의 검토를 통하여 아래의 결과를 얻을 수 있었다.

1. 본 연구에 제시한 가스의 조성변화에 따른 열/전달 물성치와 연소 정보를 계산하는 방법은 연소 관련 종사자들에게 다양한 가스를 대상으로 연소기 설계 및 운전 조건을 결정하는데 매우 유용하게 이용될 것으로 사료된다.
2. 대체가스 중 BOG1의 경우에는 표준가스에 비해 발열량 10%, 웨버지수 4% 및 공연비 10%, 비열 5.54% 정도 낮아지기 때문에 가스 호환성 측면에서 충분한 검토가 요구된다.
3. BOG1을 제외한 다른 대체가스는 표준가스에 비해 최대 상대 차이가 발열량 4%, 웨버지수 2% 및 공연비 4%, 비열 2.5% 범위 이내 이므로 연소 호환성은 매우 양호할 것으로 판단된다.
4. 대체가스의 연소생성물 점성계수 및 열전도계수는 표준가스와의 상대 차이가 각각 1% 및 2%에 이내이기 때문에 가스 호환 시 화염안정성, 화염의 두께 및 예열대에서의 상세반응속도에 큰 차이가 없다고 할 수 있다.
5. 대체가스들의 최대연소속도는 BOG1의 경우 1cm/s 차이가 존재하나, 그 외 가스는 거의 차이가 없음을 확인하였다.

참고로 주요물성들에 대한 대체가스들의 상대 차이는 매우 중요한 정보이기 때문에 이들 정보를 Appendix 2에 제시하였다.

후 기

본 연구는 한국가스공사 연구과제의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] AGA Testing Laboratories, "Interchangeability of Other Gases with Natural gas", *AGA Research Bulletin NO. 36*, 1946
- [2] E. R. Weaver, "Formulas and Graphs for Representing the Interchangeability of Fuel Gases", *J. Research of the National Bureau Standards*, Vol.46, No.3, 1951, pp.213-245
- [3] Gilbert, M. G. and Prigg, J. A., "The Prediction for the combustion Characteristics of Town Gas", *Tans Inst Gas Eng*, 1956, pp.530-589
- [4] Gas Technology Institute, "National Gas Composition and Fuel Quality Information Report".
- [5] 한국가스공사, "천연가스 열량변동에 따른 연소성 평가시험", 1988.
- [6] 허재영, "천연가스의 열량조절", *유체기계저널*, Vol.9, No.4, 2006.
- [7] ISO 6976 "Natural gas - Calculation of calorific values, density, relative density and Wobbe index from composition", 1995.
- [8] R. J. Kee, F. M. Rupley and J. A. Miller, "Chemkin-II : A Fortran Chemical Kinetics Package for the Analysis of Gas Phase Chemical Kinetics", *Sandia Report SAND89-8009B*, 1989.
- [9] R. J. Kee, G. Dixon-Lewis, J. Warnatz, M. E. Coltrin and J. A. Miller, "A Fortran Computer Code Package for the Evaluation of Gas-Phase Multicomponent Transport Properties", *Sandia Report SAND86-8246*, 1986.
- [10] R. J. Kee, J. F. Grcar, M. D. Smooke, J. A. Miller, "A Fortran Program for Modeling Steady Laminar One-Dimensional Premixed Flame", *Sandia Report 85-8240*, 1994.
- [11] C. J. Rallis and A. M. Garforth, "The Determination of Laminar Burning Velocity", *Energy Combustion sci.*, 1980.
- [12] Stephen R. Turns, "An Introduction to

Combustion", 1996.

- [13] Sung CJ, Li B, Wang H, Law CK., Structure and sooting limits in counterflow methane/air and propane/air diffusion flames from 1 to 5 atmospheres. *Proc Combust Inst* 1998;27:1523-9
- [14] Irvin Glassman "Combustion 3rd edition" Academic press, 1996.
- [15] Chang-Eon Lee, et al., "A study on the determination of burning velocities of LFG and LFG-mixed fuels", *Fuel*, 2002.
- [16] Rosemarie H. H. and Robert D. W., "AGA Bulletin #36 and Weaver Interchangeability Methods: Yesterday's Research and Today's Challenges", 2006.
- [17] Andrews G. E. and Bradley D., "The Burning Velocity of Methane-Air Mixtures", *Combustion and Flame*, 1972.
- [18] Coffee, T. P. and Heimerl, J. M., "Transport Algorithms for Premixed Laminar, Steady-state Flames", *combustion and Flame*, 1981.

Appendix 1 The properties of 6 natural gases with each producing districts

Symbol	Molecular weight (kg/kmol)	Compressibility factor	Z-factor	Heating value (kJ/kmol)
Symbol	M	Z	\sqrt{b}	\bar{H}
CH ₄	16.043	0.9976	0.0490	892.97
C ₂ H ₆	30.070	0.9900	0.1000	1564.34
C ₃ H ₆	42.081	0.9810	0.1378	2061.57
C ₃ H ₈	44.097	0.9789	0.1453	2224.01
iC ₄ H ₁₀	58.123	0.9580	0.2049	2874.20
nC ₄ H ₁₀	58.123	0.9572	0.2069	2883.82
iC ₅ H ₁₂	72.150	0.9370	0.2510	3535.98
nC ₅ H ₁₂	72.150	0.9180	0.2864	3542.89
N ₂	28.014	0.9995	0.0224	0.00

Appendix 2 Relative difference of principal thermodynamic property on the basis of SG

	YG	AG	TG	BOG1	BOG2	SG
Density	(%) -5.16	2.88	-0.14	-11.5	-0.84	0.8105 (kg/m ³)
Heating value	(%) -4.30	2.71	-0.46	-9.73	-0.47	10549.72 (kcal/m ³)
Wobbe index	(%) -1.73	1.26	-0.40	-4.06	-0.05	13324.87 (kcal/m ³)
Specific heat	(%) 2.18	-1.23	0.02	5.57	0.63	2.0661 (J/g K)
Viscosity	(%) 1.19	-1.18	0	2.93	-0.14	9.9730x10 ⁻⁶ (Pa. s)
Thermal conductivity	(%) 2.34	-1.78	0.66	6.37	1.26	2.8163x10 ⁻² (W/m K)
(A/F) _{stoi.}	(%) -4.29	2.68	-0.47	-9.69	-0.44	10.5415