

가스호환성 판정에 편리한 새로운 화염안정영역의 도시법의 제안 및 유용성 검토

이창언* · 김종민** · 황철홍*** · 김종현*

Proposal and Validation of a New Flame Stability Diagram to Gas Estimate Interchangeability

Chang-Eon Lee, Jong-Min Kim, Cheol-Hong Hwang and Jong-Hyun Kim

ABSTRACT

A flame stability diagram in a partially premixed flame is typically expressed using the axis coordinates of heat input rate and equivalence ratio. These diagrams are inadequate for identifying changes in combustion conditions and flame stability when a reference fuel is substituted with other fuels under identical operating conditions. This study proposes a new type of diagram and validates it experimentally. In this new diagram, the axis coordinates are air flow rate and Wobbe fuel flow rate, defined as the fuel flow rate multiplied by the square root of the relative density. The diagram was validated in trials using various fuels, including CH₄, C₃H₈, and LFG-C₃H₈ mixed fuels, in a domestic gas-range and an gas interchangeability test burner. The results of these trials show that the new diagram can provide information useful for assessing gas interchangeability of combustion conditions and flame stability when one fuel is substituted with another under identical operating conditions.

기 호 설 명

Alphabets		Greeks	
A	area (m ²)	ϕ	Equivalence ratio
A/F	air-fuel ratio (kg _a /kg _f)	γ	relative density based on air
A/WF	Wobbe-air-fuel ratio	ρ	density (kg/m ³)
HV	heating value of fuel (kcal/Nm ³)	Subscripts	
LFG	landfill gas	a	air
MF	LFG-C ₃ H ₈ mixed fuel	f	fuel
p	pressure	n	nozzle
Q	volumetric flow rate (l/min)	stoi	stoichiometric
Q _H	heat input rate(kcal/hr)	v	vessel
V	velocity (m/s)	Wf	Wobbe fuel
WI	Wobbe index (kcal/Nm ³)		

* 인하대학교 기계공학과
 ** 인하대학교 기계공학과 대학원
 *** Building and Fire Research Lab., NIST
 † 연락처자, chelee@inha.ac.kr

1. 서 론

최근, 천연가스의 자원 부족 및 가격 상승으로 발열량이 다소 낮은 산지의 천연가스는 물론 석탄층 메탄(coal bed methane), 매립지가스(landfill gas, LFG), 바이오매스 가스(biomass gas) 및 메탄 하이드레이트(methane hydrate)들을 기존 천연가스의 대체가스로 사용하려고 하고 있다. 이들 천연가스 및 대체가스들은 가스 조성 및 연소특성이 서로 다르기 때문에 최근 여러 종류의 가스연료들의 호환성에 관한 연구의 필요성이 다시 주목 받고 있다.

가스연료들의 호환성이란 동일한 연료 공급조건에서 기존에 사용하던 가스(이하 기준가스)를 다른 가스로 대체한 경우(이하 대체가스)에도 화염안정성, 성능 등에서 큰 차이가 없이 사용 가능한 가스를 기준 가스와 호환성이 있다고 정의하며, 이 호환 가능한 범위를 여러 가지 연료물성(Wobbe 지수, 발열량, 비중, 등등) 및 연소특성지수(부상, 불완전연소, 연소속도, 매연 지수, 등등)등을 이용하여 제시하는 것을 호환성 판정법이라 한다. 대표적인 호환성 판정법으로는, 미국에서는 웨버지수(Wobbe Index, WI), 부상지수(lifting index), 역화지수(flash-back index) 및 황염지수(yellow-tip index)를 기준으로 호환성을 판정하는 A.G.A. 판정법[1,2]과 여기에 불완전 연소지수(incomplete combustion index)를 추가한 Weaver 판정법[3]이 사용되고 있다. 이들 판정법에서는 대체가스들의 각종 지수의 상대치(대체가스/기준가스)가 정해진 허용범위에 내에 존재하면 호환성이 있다고 판정한다. 한편, 유럽에서는 기준가스에 대한 호환영역을 도형(diagram)으로 제시하는 방법이 사용되고 있다. 한 예로 Gilert-Prigg 판정법은 웨버지수 및 화염속도지수(flame speed index)를 x , y 축 변수로 하여 기준가스와 호환 가능한 불완전연소, 역화 및 열량의 경계를 제시하고, 대체가스들의 위 두 지수가 이들 영역의 내부에 존재하면 호환성이 있다고 판정하고 있다.[4,5]

그러나 가스 조성에 따른 보다 정확한 호환성 판정은 실용 버너 혹은 호환성 검증용 버너(Interchangeability Test burner, 이하 IT 버너)를 대상으로 얻어진 화염안정영역(flame stability diagram)의 차이를 이용하여 판정하고 있다. 이 화염안정영역은 일반적으로 Fig. 3과 같이 y 축에 1차 당량비(분체버너 연소방식에서 노즐에서 유입되는 공기량만 고려), x 축에는 공급열량을 좌표로 하여 각 연료의 역화, 부상 및 황염 한계를 제시하는 것이다.[6,7] 분체 연소방식이나 공연비 제어방식을 사용하지 않는 연소시스템에서는 동일운전 조건에서 가스만을 대체하는 경우 대체가스의 밀도 및 발열량에 따라 공급열량은 변하나, 공기 공급량은 기준가스의 경우와 동일하게

공급된다. 따라서 기존의 화염안정영역 도시법(diagram)에서는 기준가스를 다른 가스로 대체한 경우 공급열량(x 좌표치) 및 당량비(y 좌표치)가 달라지기 때문에, 대체가스의 연소조건 즉, 화염안정영역 상의 x , y 위치를 직접 확인하기 어려워 가스의 대체에 따른 화염안정성의 차이를 비교하는데 어려움이 있다. 즉, 기존 화염안정영역 도시법에서는 각종 연료 고유의 당량비-공급열량에 따른 화염안정성을 판단하는 데에는 편리한 측면이 있으나, 기준가스를 다른 가스로 대체하는 경우의 가스 호환성을 직접 비교하는 데에는 어려움이 있다. 따라서 가스 호환성을 용이하게 판단하기 위해서는 연료 종류에 무관한 x , y 축 좌표를 도입하여 화염안정영역을 제시하고, 동일한 x , y 좌표축 값을 이용하여 두 가스의 화염상태를 비교하는 것이 바람직하다.

이러한 배경 하에 본 연구에서는 기준가스를 다른 가스로 대체한 경우의 호환성 판단을 쉽게 하기 위하여, 대체가스의 물성과 무관한 x , y 축 좌표를 도입하여, 동일한 연료공급조건에서 대체한 가스들의 공급열량 변화, 당량비 변화 및 화염상태의 차이를 동일 x , y 좌표값을 이용하여 직접 비교할 수 있는 새로운 좌표계를 제안하고자 한다. 그리고 가스물성이 매우 다른 가스 연료들을 대상으로 기존 좌표계와 새로운 좌표계로 도시된 화염안정영역의 비교를 통하여 새롭게 제안한 좌표계의 유용성에 대하여 검토하고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

실용 가스레인지의 분젠(Bunsen) 연소방식을 채용하고 있어 가스 분출에 의해 유입되는 1차 공기량은 측정이 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 가스레인지의 공기 유입구를 폐쇄하고, 연료량 및 1차 공기량을 제어할 수 있도록 개조한 가스레인지를 이용하여 화염안정영역을 측정하였다. Fig. 1 (a)는 실용 가스레인지(gas range)의 유로를 개조하여, 동일한 가스 공급압력(200mm Aq) 조건에서 연료량(공급열량) 및 1차 공기량(당량비)을 제어할 수 있도록 개조된 가스레인지의 유로도를 나타낸다.

대부분의 실용 가스레인지는 화염구의 직경이 소염거리보다 작아 역화가 발생하지 않으며, 또 황염 및 부상 한계가 화염구의 위치에 따라 다소 다르기 때문에 이들 한계를 정확히 판단하는 것이 곤란하다. 따라서 본 연구에서는 역화를 포함한 각종 안정한계를 정확하게 측정하기 위해, 가스레인지 화염구 1개를 모사한 원통형 노즐 버너를 호환성 검증용(IT) 버너로 이용하였다. Fig. 1 (b)는 이 IT버너를 이용한 실험 장치를 도시한

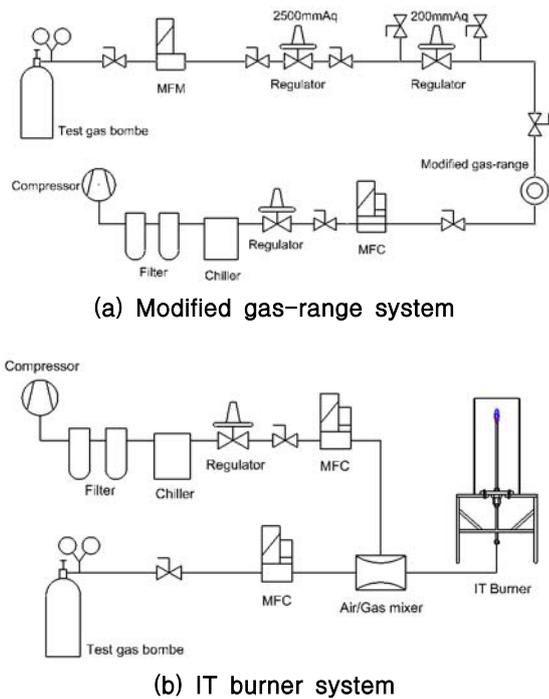


Fig. 1. Schematic diagram of test systems.

것이다. IT 버너의 노즐의 내경은 12mm로 하였으며, 원통관의 길이를 100cm로 길게 하여 출구에서 완전히 발달한 유속을 분포를 가지도록 하였다. 그리고 내경, 25cm, 길이 150cm인 아크릴 원통을 이용하여 외부의 교란을 방지하였다. 가스량과 공기량은 각각 MFC(mass flow meter)에 계량된 후 Air/Gas mixer에서 균일하게 혼합되어 노즐로 공급된다.

본 연구에서 기존 좌표계와 새로운 좌표계의 기본적인 검증은 도시가스(LNG), 순수 CH₄ 및 C₃H₈ 가스를 대상으로 IT 버너(Fig. 1 b)에서 얻어진 화염안정영역을 대상으로 설명하는 하였다. 그리고 새로운 좌표계의 유용성은 상용 가스와의 물성이 많이 다른 LFG-C₃H₈ 혼합가스[8,9,10]를 대상으로 실용 가스레인지 (Fig. 1 a)에서 얻어진 화염안정영역을 이용하여 검토하였다.

Table 1은 위 실험에 사용한 가스들의 물성치(연료조성, 고위발열량(HV), 비중(γ), 웨버지수(WI), 이론공연비(A/F))를 나타낸다. 여기서 웨버지수는 연료의 발열량을 밀도의 제곱근으로 나눈 값이다. LFG-C₃H₈ 혼합가스 (Mixed Fuel, MF)는 저자들의 김포 매립지에서 발생하는 LFG를 도시가스 대체가스로 활용할 목적으로 수행한 연구에서 사용된 가스들이다. Table 1에서 MF₀₀(HV) 혼합가스는 고위 발열량이 LNG와 동일하게 만들어진 것이며, MF₀₀(WI) 혼합가스는

Wobbe Index가 LNG와 동일하게 만들어진 것이다. 혼합가스 표기법에서 MF 아래첨자는 LFG에 포함된 CH₄의 몰분율을 나타내며, 괄호내의 C₃H₈ 수치는 목적하는 가스를 만들기 위해 혼합한 C₃H₈ 몰분율을 나타낸다.

3. 새로운 좌표계의 도입

본 절에서는 가스 공급압력 및 연소기 사양 등의 동일한 상태 ($\Delta p = \text{constant}$, $A_n = \text{constant}$)에서 기준가스를 다른 가스로 대체하는 경우의 호환성 판정에 유용하다고 여겨지는 새로운 x, y 좌표계를 유도하고자 한다.

첫째로, 새로운 좌표계에서 x축으로 사용할 Wobbe 연료유량에 대하여 기술하겠다. 가스 중에 따른 공급 연료량은 위치에너지를 무시하면, 압력용기와 노즐 출구에 적용한 식(1)의 Bernoulli 방정식으로부터 식(2)와 같이 구해진다.

$$\frac{V_v^2}{2} + \frac{p_v}{\rho_f} + gz = \frac{V_n^2}{2} + \frac{p_n}{\rho_f} + gz \quad (1)$$

$$Q_f = A_n \times V_n = A_n \sqrt{2\Delta p / \rho_f} \quad (2)$$

where, $\Delta p = p_v - p_n$

공급압력(Δp)이 동일하다고 가정하면, 식(2)를 변형한 식(3)에서 알 수 있듯이, 공급 연료유량에 공기를 기준으로 한 상대 밀도, 즉 비중($\gamma_f = \rho_f / \rho_a$)의 제곱근을 곱한 값은 항상 동일하다. 본 연구에서는 식(4)로 정의된 변환유량 Q_{WF} 를 밀도를 고려한 공급 연료유량을 나타내기 위해 Wobbe 연료유량이라 명하였다.

$$\sqrt{2\Delta p} = \frac{Q_f \sqrt{\rho_f}}{A_n} = \frac{Q_f \sqrt{\rho_f / \rho_a} \sqrt{\rho_a}}{A_n} = \frac{Q_{WF} \sqrt{\rho_a}}{A_n} \quad (3)$$

$$Q_{WF} \equiv Q_f \times \sqrt{\gamma_f} \quad (4)$$

대체가스에 따른 공급열량의 변화는 식(5)와 같이 Q_{WF} 에 WI를 곱한 값으로 구할 수 있으며, 새로운 좌표계에서는 이 공급열량의 변화를 x축 상단에 표기하여 화염안정영역 도표(diagram)에서 바로 읽을 수 있도록 하였다.

$$Q_H = Q_{WF} \times WI = Q_f \times \sqrt{\gamma_f} \cdot \frac{HV}{\sqrt{\gamma_f}} = Q_f \times HV \quad (5)$$

Table 1 Components and properties of the fuels used in this study

	LNG	CH ₄	C ₃ H ₈	MF ₅₅ (HV) (C ₃ H ₈ 30.0%)	MF ₃₅ (HV) (C ₃ H ₈ 36.4%)	MF ₅₅ (WI) (C ₃ H ₈ 50.0%)	MF ₃₅ (WI) (C ₃ H ₈ 57.8%)
CH ₄ (%)	89.78	100.00	0.0	38.15	22.26	27.25	14.77
C ₂ H ₆ (%)	7.48	0.00	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
C ₃ H ₈ (%)	2.02	0.00	100.0	30.00	36.40	50.00	57.80
C ₄ H ₁₀ (%)	0.70	0.00	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
CO ₂ (%)	0.00	0.00	0.0	26.25	34.07	18.75	22.61
N ₂ (%)	0.02	0.00	0.0	4.90	6.36	3.50	4.22
O ₂ (%)	0.00	0.00	0.0	0.70	0.91	0.50	0.60
HV (kcal/Nm ³)	10528.56	9618.84	23826.96	10793.42	10821.47	14517.29	15192.68
γ	0.61	0.56	1.53	1.13	1.27	1.24	1.36
WI (kcal/Nm ³)	13495.14	12898.90	19272.67	10169.48	9589.46	13029.95	13036.64
(A/F) _{stoi}	10.36	9.56	23.89	10.79	10.79	14.53	15.20
(A/WF) _{stoi}	13.24	12.82	19.33	10.17	9.56	13.04	13.04

둘째로, 새로운 좌표계의 y축으로 사용할 공기 유량에 대하여 기술하겠다. 가스를 대체한 경우에도 공급되는 공기량은 대부분 기준가스의 경우와 동일하게 공급된다. 즉, 분제연소 방식에서는 공급 공기량은 가스의 분사 운동량 즉 공급 압력에 비례하기 때문에 가스 밀도에 상관없이 일정하다. 그리고 강제 송풍하는 경우에도 공기 공급량은, 공연비 제어 방식을 제외하면, 기준가스와 동일하게 유지한 상태에서 가스만 교체하기 때문에 동일하다고 할 수 있다. 그래서 새로운 좌표계의 y축으로는 대체가스의 물성과 무관한 실제 공기유량으로 선정하였다.

이와 같이 Wobbe 연료유량, 공기유량을 각각 x, y축 좌표로 이용하면, 대체가스의 경우에도 x, y축의 값은 기준가스와 동일하다. Fig. 2는 이 사실을 확인하기 위해 가스레인을 대상으로 동일 연소조건에서 가스만 교체한 경우의 공기유량 및 Wobbe 연료유량을 도시한 것이다. 이 경우 1차 공기 유입량의 측정은 개조 가스레인의 화염을 개조하지 않은 실용 가스레인지와의 동일하게 조정하여 그 때의 개조 가스레인지에서의 공기 유량을 측정하였다. 그림에서 CH₄, LNG 및 C₃H₈ 3종의 가스 모두 동일 압력 조건에서 공기유량 및 Wobbe 연료유량이 거의 같음을 알 수 있다.

새로운 좌표계에서는 기존 당량비-공급열량 좌표계와는 달리, 임의 연소 조건에서의 당량비 혹은 공기비에 대한 정보는 직접적으로 나타나지 않는다. 그러나 새로운 좌표계에서 임의 연소 조건의 실제 공연비 (A/F)는, 식(6)에서 알 수

있듯이, 공기 대 Wobbe 연료유량의 비(Q_a/Q_{WF}), 즉 그림상의 기울기에 비중의 제곱근을 곱하면 구할 수 있다 (Fig. 4 참조). 또 이론 공연비 ($\frac{A}{F}$)_{stoi} (혹은 당량비 1)에 해당하는 기울기를 새로운 좌표계에 나타내면 식(7)과 같이 해당 연료의 이론 공연비를 비중의 제곱근으로 나눈 값으로 구할 수 있다. 식(7)로 정의된 공연비 ($\frac{A}{WF}$)_{stoi}는 공급되는 가스의 밀도를 고려하는 것으로 Wobbe 공연비로 정의하였다.

$$\left(\frac{A}{F}\right) = \left(\frac{Q_a}{Q_f}\right) = \left(\frac{Q_a}{Q_{WF}}\right) \cdot \sqrt{\gamma_f} \quad (6)$$

$$\left(\frac{Q_a}{Q_{WF}}\right)_{stoi} = \left(\frac{A}{F}\right)_{stoi} / \sqrt{\gamma_f} \equiv \left(\frac{A}{WF}\right)_{stoi} \quad (7)$$

4. 새로운 좌표계의 유용성 검토

Fig. 3은 기존의 당량비-공급열량 좌표계로 도시한 LNG, CH₄ 및 C₃H₈ 가스의 화염안정영역을 나타낸 것으로, 실험결과는 앞에서 언급한 IT 버너에서 얻어진 것이다. 화염안정성의 한계곡선은 AGA (American Gas Association) 코드를 기준으로 판단하였으며, 이 코드에서는 화염상태를 화염지수 -5부터 +5까지 분류하고 있으며, 이에 따르면 안정영역은 다음 3가지 한계 곡선의 내부

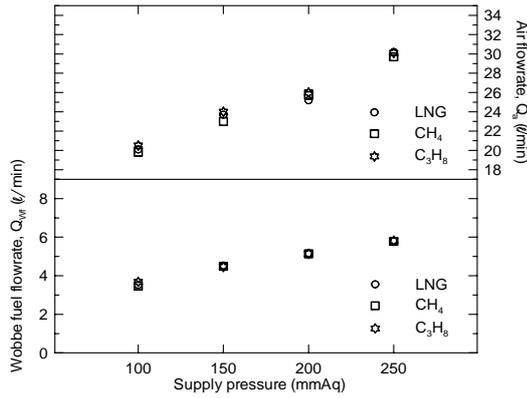


Fig. 2. Wobbe fuel flowrates and air flowrates of LNG, CH₄ and C₃H₈ according to the supply pressure on gas-range.

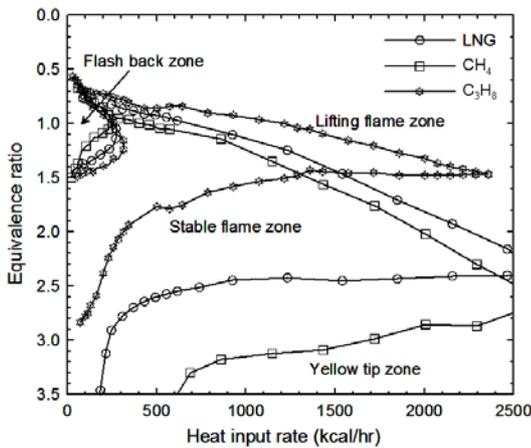


Fig. 3. Flame stability regions of LNG, CH₄ and C₃H₈ on IT burner using existing flame stability diagram.

로 정의된다. (1) 부상한계: 낮은당량비 영역에서 발생하며 노즐 출구에서 화염면(Flame base)이 노즐면적의 약25% 이상 부상된 화염(code +5). (2) 황염한계: 당량비가 높은 영역에서 발생하며 화염 끝 부분에 명확하게 노란 불꽃이 보이는 화염(code -5). (3) 역화한계: 공급열량이 적은 영역에서 발생하며 내염이 노즐출구 내부로 침투하려는 화염. 여기서 가스 중에 따른 안정영역의 차이에 대한 상세한 논의는 본 연구의 목적과 다르기 때문에, 필요한 사항만 간략히 언급하고자 한다. 그림에서 부상한계는 가스의 연소속도에 의존하기 때문에 연소속도가 커지는 CH₄, LNG 및 C₃H₈ 순으로 당량비가 낮은 쪽으로 이동한다. 역화한계도 같은 이유로 인해 연소속도에 비례하여 공급열량이 낮은 쪽으로 이동함

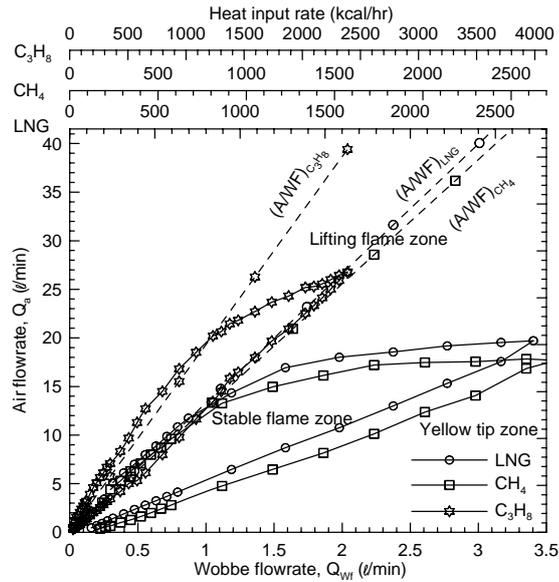


Fig. 4. Flame stability regions of LNG, CH₄ and C₃H₈ on IT burner using new flame stability diagram.

을 알 수 있다. 황염은 연료중의 고탄화수소 비율이 높을수록 잘 발생하기 때문에, 황염한계는 CH₄, LNG 및 C₃H₈ 순으로 당량비가 낮은 쪽으로 이동하여, 결과적으로 안정영역이 작아진다. 특히, C₃H₈의 경우 다른 가스에 비해 황염한계에 해당하는 당량비가 매우 낮아 안정영역이 매우 작아지고 있음을 알 수 있다.

위와 같이 당량비-공급열량 좌표로 도시한 화염안정영역의 자료로부터도 화염안정성에 대한 연료 고유의 특성 및 연료에 따른 안정 한계의 차이를 비교할 수 있다. 그러나 이 자료로부터 기준가스를 다른 가스로 대체한 경우, 대체한 가스의 연소조건(공급열량 및 당량비)의 변화가 그림 중에 직접 제시되어 있지 않기 때문에, 대체한 가스의 연소상태를 확인하는 것이 어렵다는 문제점이 있다.

Fig. 4는 Fig. 3의 화염안정영역을 새로운 공기량-Wobbe 연료유량 좌표계로 도시한 것이다. 단, Fig. 3의 공급열량이 적은 영역에 나타나는 역화한계는 실용 버너에서는 나타나지 않은 한계라 생략하였다. 그림에서 x축은 식(4)로 정의한 Wobbe 연료유량으로, 각 가스의 실제 유량은 x축 수치에 해당 가스의 비중의 제곱근으로 나누면 구해지며, 또 공급열량은 식(5)와 같이 WI를 곱하면 구해진다. 본 좌표계에서는 공급열량의 변화를 x축의 상단에 표기하여 직접 확인이 가능하도록 하였으나, 표 1과 같은 물성자료가 주어지면 생략해도 무방하다. 그림에서 y축은 실제

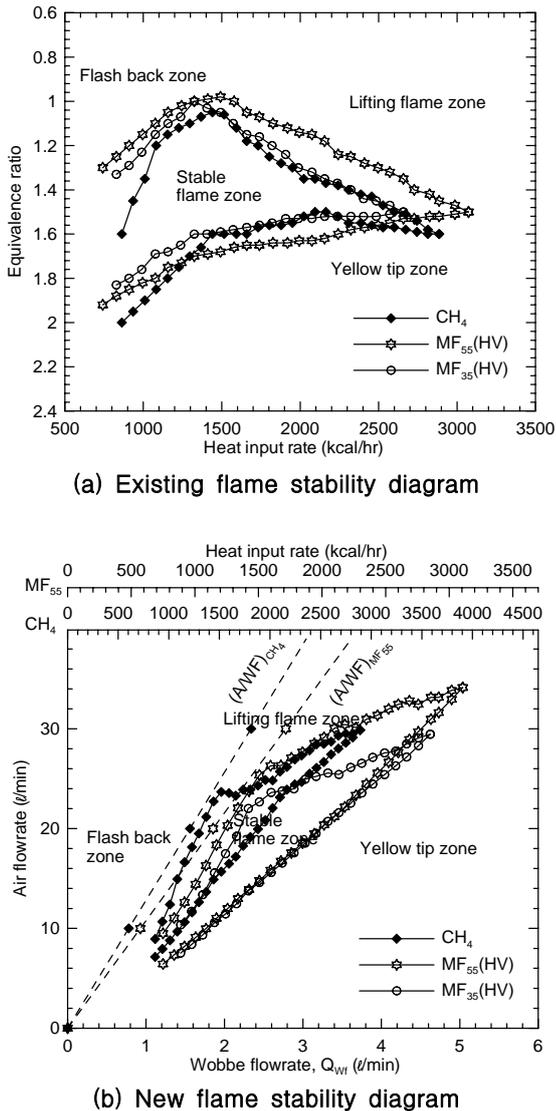


Fig. 5. Comparison of existing and new flame stability diagrams for CH_4 and $\text{MF}(\text{HV})$ s having equivalent heating value on gas-range.

공기량을 의미하며, 이 공기량은 가스를 대체한 경우에도 일반적으로 변하지 않는다. 그림 중의 점선 기울기 (A/WF) 는 식(7)과 같은 해당 연료의 이론 공기비(혹은 이론당량비) 경계를 나타낸 것으로, 경계의 하부 영역이 과농한 1차 공기비 영역을 의미한다. 그리고 임의 연소 위치에서의 공기비는 식(6)과 같이 그 위치의 기울기에 비중의 제곱근을 곱해주면 구해진다.

새로운 좌표계로 도시된 화염안정영역을 이용하면 대체가스의 호환성을 판정하는 측면에서 다

음과 같은 장점들을 가지고 있다.

첫째로, 가스 종에 관계없이 x, y 축의 값은 서로 동일하기 때문에, 앞에서 설명한 바와 같이 동일점에서 각 가스의 연소 조건(가스공급량, 공급열량, 공기비 등)을 구할 수 있다.

둘째로, 대체가스에 따른 호환성 정도 및 대체가스의 최적 연소 조건을 달성하기 위한 개선 방향을 제시할 수 있다. 예로, LNG를 CH_4 로 대체하는 경우에는 중첩하는 화염안정영역이 매우 넓기 때문에 연소조건에 아무런 변경 없이 호환이 가능함을 알 수 있다. 그러나 LNG를 C_3H_8 로 대체하는 경우, LNG 안정영역의 중심부근이 C_3H_8 의 화염영역에 해당하기 때문에 C_3H_8 화염은 화염이 형성됨을 알 수 있다. 또 중첩하는 화염안정영역이 매우 작아 연소조건 변경 없이 호환이 불가능함을 알 수 있다. 그리고 C_3H_8 로 대체하기 위해, C_3H_8 의 $(A/WF)_{stoi}$ 가 LNG의 그것과 일치하도록 기울기를 변경하여 주면 두 가스의 화염안정영역이 중첩하게 되어 안정한 화염을 형성함을 알 수 있다. 이를 위해서는 동일공급압력 조건에서 Table 1에 제시한 두 가스의 $(A/WF)_{stoi}$ 의 비율(1.46)만큼 C_3H_8 의 Wobbe 연료유량이 감소하도록 노즐출구 면적을 축소하여 주면 된다.

셋째로, Fig. 3, 4를 비교해 보면, 공급열량이 작은 경우 기존 좌표계에서는 화염안정영역이 매우 넓게 보인다. 기존 좌표계에서는 매우 소량의 가스를 연소하는 경우에는 다소 과농한 조건에서도 화염이 발생하지 않기 때문에 이를 무차원(연료/공기량)하여 표기하다 보니 넓게 보이는 착시현상이 발생한다. 또 Fig. 3에서는 LNG와 C_3H_8 간에 중첩하는 화염안정영역이 비교적 넓으나, Fig. 4에서 보면 중첩하는 영역은 매우 작음을 알 수 있다. 이와 같이 기존 좌표계에서는 안정 화염 영역에 대한 착시현상을 유발하는 단점이 있으나, 새로운 좌표계에서는 그 단점이 개선됨을 알 수 있다.

Fig. 5, 6은 새로운 좌표계의 유용성을 검토하기 위해, 가스 물성이 상용 가스와는 매우 다른 LFG-LPG의 혼합연료를 순수 CH_4 과 호환성을 검토하여 보았다.

Fig. 5는 발열량이 기존 LNG와 유사한 혼합가스(표1의 $\text{MF}_{55}(\text{HV})$, $\text{MF}_{35}(\text{HV})$ 가스)를 대상으로 새로운 좌표계의 유용성을 검토한 것이다. 우선, 기존 좌표계로 도시한 화염안정영역을 보면, CH_4 및 혼합연료들의 안정영역이 거의 일치한다. 이 결과는 단지 혼합연료들도 공급열량 및 당량비를 CH_4 과 유사하게 조정하여 주면 CH_4 과 유사한 화염안정성을 얻을 수 있다는 것을 의미하는 것이고, 이들 연료 간에 호환성이 높음을 확인해주는 것은 아니다. 한편, 새로운 좌표계에

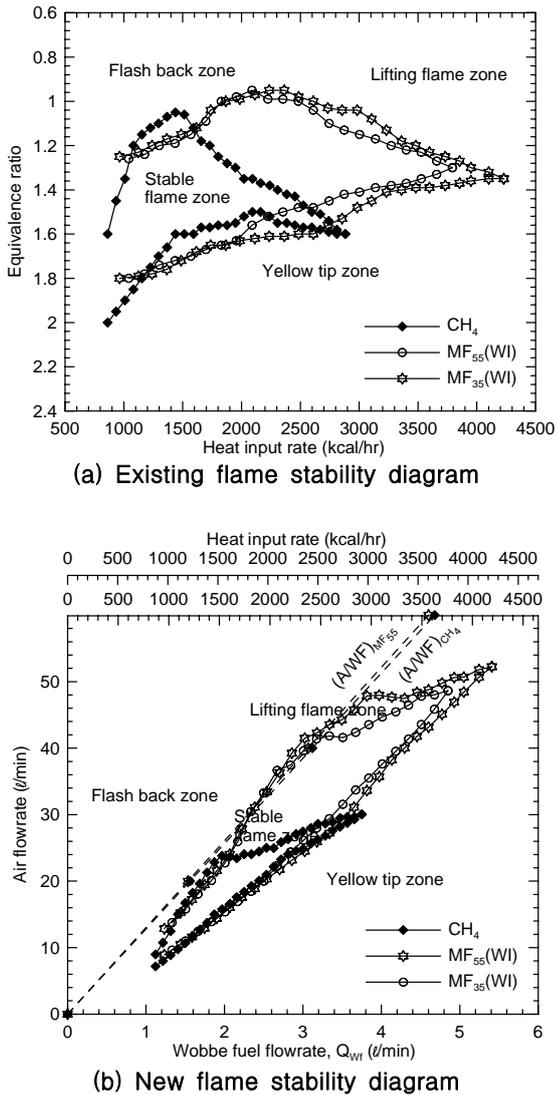


Fig. 6. Comparison of existing and new flame stability diagrams for CH₄ and MF(WI)s having equivalent Wobbe index on gas-range.

서 호환성을 검토하여 보면, 혼합연료로 대체한 경우, CH₄ 안정영역의 중심위치가 혼합연료의 부상영역에 접근하기 때문에 혼합연료의 화염은 불안정해짐을 알 수 있다. 그리고 새로운 좌표계에서는 다른 가스로 대체한 경우의 연소조건을 변화를 직접 파악할 수 있다. 예로, CH₄ 화염의 최적 연소조건(안정영역의 중심점: Q_{wf}=2, Q_a=20)에서 혼합가스 MF₅₅(HV) 로 대체한 경우, 공급열량은 약1,500 kcal/h에서 약 1200kcal/h로 변하며, 1차 공연비는 식(6)으로부터 7.5 (이론공

연비 9.56)에서 10.6 (이론공연비 10.1)으로 변한다. 또 이들 혼합연료의 대체하기 위해서는 Fig. 4에서 설명한 바와 같이 두 가스의 (A/WF)_{stoi} 경계가 서로 일치하도록 혼합연료의 Wobbe 유량을 증가시킬 필요가 있음도 알 수 있다.

Fig. 6은 WI가 기존 LNG와 동일한 혼합가스(표1의 MF₅₅(WI), MF₃₅(WI) 가스)를 대상으로 새로운 좌표계의 유용성을 검토한 것이다. 기존 좌표계로 도시한 화염안정영역(Fig. 6a)을 보면, 혼합연료의 화염안정영역은 기준가스의 안정영역에서는 물론 더 높은 공급열량 조건에서도 안정한 화염이 형성됨을 알 수 있다. 이와 같은 경향은 새로운 좌표계(Fig. 6b)에서도 동일하다. 그리고 가스를 교체한 경우에도 발열량도 일치하며, 이론 Wobbe 공연비 (A/WF)_{stoi}도 일치함을 알 수 있다. 이 결과로부터 WI를 LNG와 동일하게 만들어 준 LFG-C₃H₈ 혼합연료는 연소조건에 아무런 변경없이 기준가스와 완전히 호환하여 사용할 수 있으며, 추가적으로 기준가스보다 더 높은 공급열량 조건에서도 안정한 화염이 형성됨을 알 수 있다.

5. 결론

기존의 당량비(y축)-공급열량(x축)을 좌표로 하여 제시하는 화염안정영역에서는 가스를 변경하는 경우 공급열량 및 당량비가 변하기 때문에 가스 호환성이 차이를 직접 비교하는데 어려움이 있다. 본 연구에서는 가스의 종류에 무관한 공기량(y축)-Wobbe 연료유량(x축)을 좌표로 하는 새로운 화염안정영역 도시법을 제안하였으며, 이 두 좌표계에서의 화염안정영역의 비교를 통하여 새로운 좌표계가 다음과 장점들을 가지고 있음을 확인하였다.

새로운 좌표계에서는 가스 중에 관계없이 x, y 축의 값은 서로 동일하기 때문에 대체 가스의 연소 조건을 쉽게 구할 수 있다. 또 가스에 따른 호환성 정도 및 대체가스의 연소 조건 개선 방향을 제시할 수 있다. 그리고 기존 좌표계에서는 공급열량이 작은 영역에서는 착시현상을 유발하는 단점이 있으나, 새로운 좌표계에서는 그 단점이 개선됨을 알 수 있다.

참고문헌

[1] AGA laboratories. Interchangeability of other fuels gases with natural gases (Research Bulletin 36). Cleveland Ohio, 1946.
 [2] AGA laboratories. Interchangeability of various fuel gases with manufactured gases

- (Research Bulletin 60). Cleveland Ohio, 1950.
- [3] Weaver ER. Formulas and graphs for representing the interchangeability of fuel gases. J. of Research of the National Bureau of Standards, 46(3), 215-45, 1951.
- [4] Gilbert MG, Prigg JA. Prediction of the combustion characteristics of town gas. Trans Inst Gas Eng, 106, 530-89, 1956.
- [5] Boyer W, Liss WE, Rue DM. Natural gas composition and fuel quality, Gas Technology Institute Information Report, 2005.
- [5] Boyer W, Liss WE, Rue DM. Natural gas composition and fuel quality. Gas Technology Institute Information Report, 2005.
- [6] Johnson F, Rue DM. Gas interchangeability tests: evaluating the range of interchangeability of vaporized LNG and natural gas. Final Report, Gas Research Institute, GRI-03/0519, 2002.
- [7] Borman GL, Ragland KW. Combustion engineering. McGraw-Hill, 204-6, 1998.
- [8] Lee CE, Hwang CH. An experimental study on the flame stability of LFG and LFG mixed fuels. Fuel 86, 649-55, 2007.
- [9] Lee CE, Hwang CH, Lee HY, A study on the interchangeability of LFG-LPG mixed fuels with LFG quality in domestic combustion appliances. Fuel 2007, in press.
- [10] Hwang CH, Lee CE. Flame blowout limits of LFG-mixed fuels in a swirling nonpremixed combustor. Fuel 2007, submitted.