

# 연료 가스의 화염 특성 및 호환성에 관한 연구

**이성룡, 김형택, 방효선\*, 한정욱\*, 이증성\*,이한구\*\***

아주 대학교 에너지학과/ \*한국가스공사 연구개발원/ \*\*대우 고등기술 연구원

## A study on the flame characteristics and the interchangeability of fuel gases

**Sung Ryong Lee, Hyung Taek Kim, Hyo sun Pang\*, Jeong Ok Han\*, Joong Sung Lee\*,/ Han Goo Lee\*\*.**

Department of Energy, Ajou University.

\*R&D Center, Korea Gas Corporation.

\*\*Institute for Advanced Engineering.

### 1. 서 론

1986년 인도네시아산 천연가스가 국내에 도입되면서 기존에 사용하던 LPG가 천연가스로 대체되고 있으며, 천연가스의 가격 및 수급의 안정화를 피하기 위하여 천연가스 산지를 다변화시키고 있다. 성분이 다른 천연가스들이 국내에 수입됨에 따라 기존의 천연가스와의 연소특성, 즉 stable flame zone, lifting zone, flash back zone, yellow tip zone등이 달라지므로 천연가스들 사이에 동일한 연소기에서의 연소 호환성의 문제가 대두되게 되었다, 따라서 동일한 연소기에서 가스 호환성에 대한 조건을 만족시키는 조건을 찾기 위하여 연료가스들의 화염 특성을 고찰하는 것이 필요하다.

연료 가스의 호환성에 관한 외국의 연구 사례를 살펴보면, Knoy, American gas association(AGA), Weaver등 많은 연구자들 또는 기관에 의해 1900년대 초반부터 시작하여 현재까지 지속적인 연구가 이루어지고 있다. Knoy는 가스의 호환성 판정기준을 염공(flame hole)에서의 비화(lifting), 노란 불꽃(yellow tip) 발생, 불완전 연소(incomplete combustion), 공급 열량변화(15% 이상)등으로 구분하고 이러한 특성들이 대체가스에서 발생되지 않는 범위를 호환 범위로 정의하였고, AGA의 연구에서는 연소성을 비화(lifting), 역화(flash back) 및 노란불꽃(yellow tip)의 관점에서 기준을 설정하여 호환범위를 설정하였다. 또한 Weaver는 AGA 자료 및 Brooklyn Union Gas의 실험자료를 근거로 가스호환성을 비화, 역화, 노란불꽃 및 불완전 연소로 구분하여 가스의 공급열량과 1차 공기량, 화염속도와 가스조성으로 표시하였다.

연소 현상의 복잡성과 난해함으로 이러한 호환성 판별식들은 대부분 실험에 기초를 두고 있으며, 아직까지도 정확한 관계식을 도출해 내지 못하고 있다.

따라서 본 주제는 국내에서 사용중인 인도네시아산 천연가스를 중심으로 여러 종류의 가스들의 화염특성 및 호환성에 관한 연구를 실험을 통하여 고찰하는 것과 함께 이들에 대한 기초 데이터를 확보하는데 그 목적이 있다.

## 2. 이 론

### 1) 가스 호환성의 정의

가스 호환성이란 연소에서 한 연료를 다른 종류의 연료로 치환하여 연소시킬때 버너 장치의 운전 조건이 영향받는 정도로 정의되며, 가스들끼리 호환 가능하다는 것은 동일한 연소에서 버너의 운전조건이나 그밖에 다른 것들을 변화시키지 않고 그대로 사용 가능한 것을 말한다.

### 2) 가스 호환 조건

- 입열 ( heat input ) : 단위 시간당 버너에 들어가는 열이 기준가스에 대해  $\pm 10\%$  이내로 일정해야 한다.
- 화염이 버너 끝단으로부터 떠올라오는 lifting 현상이 일어나지 않아야 한다.
- 화염이 버너 끝단에서 주입 가스 쪽으로 타고 들어가는 flash back 현상이 발생하지 않아야 한다.
- 연소 상태 : yellow tip과 soot이 발생하지 않아야 하며 불완전 연소시 발생하는 일산화탄소와 이산화탄소의 비(CO/CO<sub>2</sub>)가 기준값 이하로 유지되어야 한다.

### 3) 호환성에 관련된 연소 현상 및 특성

(1) Heat input이란 버너로 들어가는 연료의 Heat flux로 정의되며, Heat input이 adjustment value의  $\pm 10\%$  내에서 유지된다면 버너 장치는 만족스러운 performance를 제공할 것이다. 이러한 필요조건에 맞추기 위해서는 가스의 Wobbe index를 평균값의  $\pm 10\%$ 로 유지시켜야만 한다.

(2) 역화(flash back)현상은 가스 분출속도와 연소속도가 불균형을 이루고 있는 경우로서 연소속도가 가스 분출속도보다 빨라 불꽃이 버너 안으로 파고 들어가는 현상이다.

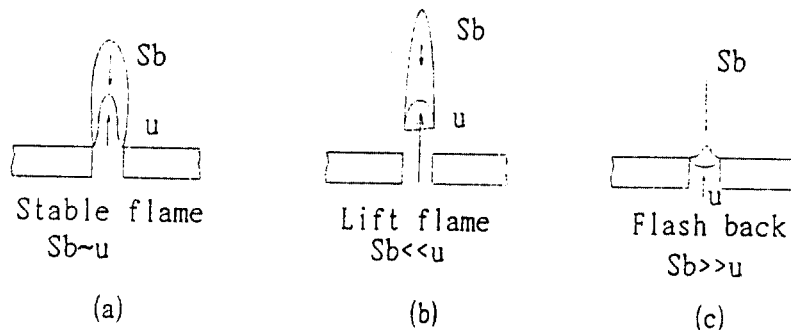


그림1. Comparisons between lift flame and flash back with stable case  
( Sb ; burning speed, u : fuel injection speed )

(3) 화염의 비화(lifting) 현상은 역화현상과 반대로 가스 분출속도가 연소속도보다 빨라 화염이 버너 포트에 부착되어 안정한 화염을 이룰 때와는 달리 버너 포트위에 떠올라 있는 불안정한 상태의 화염으로 정의한다.

(4) 연소 중에 탄화수소가 산화되거나 1차 공기가 부족할 경우 유리 탄소입자가 발생하여 이것이 고온의 열에 의해 적열되어 황색화염이 발생되는데 이러한 연소상태를 황염(yellow tip)으로 정의한다.

(5) 연료가 산화제와 반응할 때 반응이 완료되지 않고 중간 생성물( 일산화탄소, 미연 탄화

수소)이 최종 생성물로 존재하는 상태를 불완전 연소로 정의하고, 불완전 연소의 정도를 측정하기 위해 측정 위치나 측정 방법에 따라 변하는 CO의 절대 값을 측정하기보다는 이러한 것들에 영향을 받지 않고 일정한 것으로 알려진 CO/CO<sub>2</sub>의 값을 측정하여 불완전 연소의 정도를 측정한다.

#### 4) Wobbe index

웨버 지수는 가스연료의 출력과 관련된 변수로서 다음과 같이 나타낼 수 있다. 가스측 노즐의 유량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V = A \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}}$$

여기에 단위 체적당 발열량 H(kcal/m<sup>3</sup>)를 곱하면 전체 방출 열량, Q는 다음과 같이 된다.

$$Q = H \times A = HA \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}} = A \frac{H}{\sqrt{\rho}} \sqrt{\Delta P} \propto \frac{H}{\sqrt{d}} \sqrt{\Delta P}$$

위 식중에 웨버 지수를  $W = \frac{H}{\sqrt{d}}$  로 정의하고, 가스의 power를 계산할 때 중요한 판단 기준으로 사용한다.

따라서 노즐의 압력 차가 일정한 연소조건에서는 동일한 웨버 지수를 갖는 가스를 사용할 경우 동일한 출력을 얻을 수 있다.

#### 5) Combustion potential

연소속도 지수(combustion potential, CP)는 수소의 연소속도를 기준으로 각 가스의 연소속도를 normalize시켜 혼합가스의 연소속도를 이론적으로 계산할 수 있도록 정의한 식으로 다음과 같이 나타낸다.

$$CP = K \frac{H_2 + 0.6(CO + C_{mH_n}) + 0.3CH_4}{d}$$

웨버지수와 연소속도지수는 가스의 출력과 연소속도를 대표하는 특성변수로서 가스의 특성을 구분하는 그룹군 결정 및 호환성 판정에 중요한 변수로 이용될 수 있고, 아래 그림은 일본 통산성에서 분류한 가스 구분 기준이다.

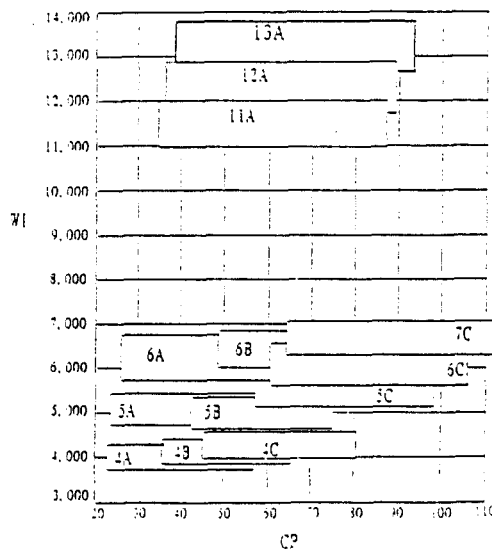


그림 2. Classified gas group in terms of Wobbe index ( WI ) and combustion potential ( CP )

### 3. 실험 장치 및 방법

실험 장치는 그림3과 같이 오리피스와 MFC를 이용하여 측정 가스와 공기의 유량을 버너에 들어가기 전에 개별적으로 측정하였으며, 각 유량을 따로 조절하면서 화염의 한계 값들을 측정하여 combustion diagram을 도시하였다. 이때 가스의 유량 범위는 약 0.03 liter/min 에서 3.5 liter/min, 공기의 유량 범위는 0.1 liter/min 에서 12 liter/min 이었다. 버너는 유량이 오리피스에서 화염 선단까지 도달하는 시간을 줄이기 위해 내경 5cm, 높이 15cm, 버너 포트 (burner port) 길이 2cm인 소형 예혼합 버너를 제작하였고, 직경 3.9mm, 7.1mm, 9.6mm, 13.6mm의 버너 포트를 준비하여 천연가스 화염 특성을 실험하였다. 버너 포트위에서 recirculation이나 포트가 가열되어 화염 성질에 영향을 끼치는 효과를 배제하기 위하여 테이퍼 (taper) 형태로 버너 포트 선단을 처리하였다.

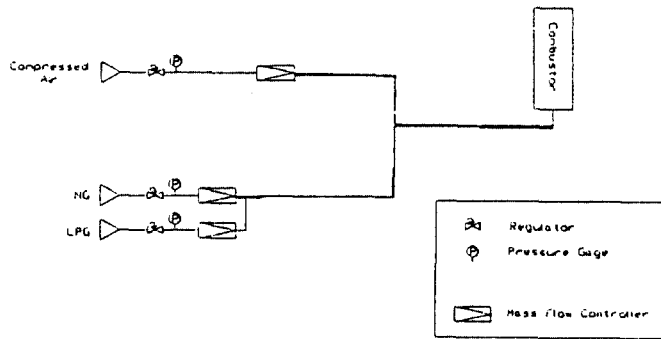


그림 3. 실험 장치 개요도

지금까지 실험한 11가지 가스들의 성분 및 연소 특성 값들을 테이블1에 나타내었다.

	NG	Methane	Ethane	LPG	Mix1	Mix2	Mix3	Mix4	Mix5	Mix6	Mix7
CH4	89.78	100.0	0	0	80.0	75.0	90.0	85.0	85.51	81.62	85.51
C2H6	7.48	0	100.0	1.1	15.5	22.5	4.0	4.0	11.89	15.89	7.12
C3H8	2.02	0	0	97.5	2.3	2.5	2.0	2.0	1.92	1.84	1.92
iC4H10	0.34	0	0	1.0	0	0	0	0	0.32	0.31	0.32
nC4H10	0.36	0	0	0.4	0	0	0	0	0.34	0.33	0.34
N2	0.02	0	0	0	2	0	4.0	9.0	0.019	0.018	4.78
H2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CO2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
O2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
비 중	0.625	0.557	1.05	1.548	0.667	0.685	0.613	0.634	0.645	0.663	0.641
발열량 kcal/m <sup>3</sup>	10522.7	9525.9	16820.8	24118.6	10833.2	11413.3	9730.3	9254.0	10822.6	11095.2	10021.6
WI	13314.2	12764.9	16415.4	19383.4	13269.1	13790.0	12426.6	11623.7	13476.9	13623.3	12516.1
CP	41.82	40.2	58.55	48.05	42.63	44.95	39.08	36.55	42.76	43.59	39.32
필요공기량 (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	10.52	9.55	16.71	23.78	10.83	11.4	9.74	9.26	10.82	11.08	10.02

테이블1. test gas들의 특성값

## 4. 실험 결과 및 토론

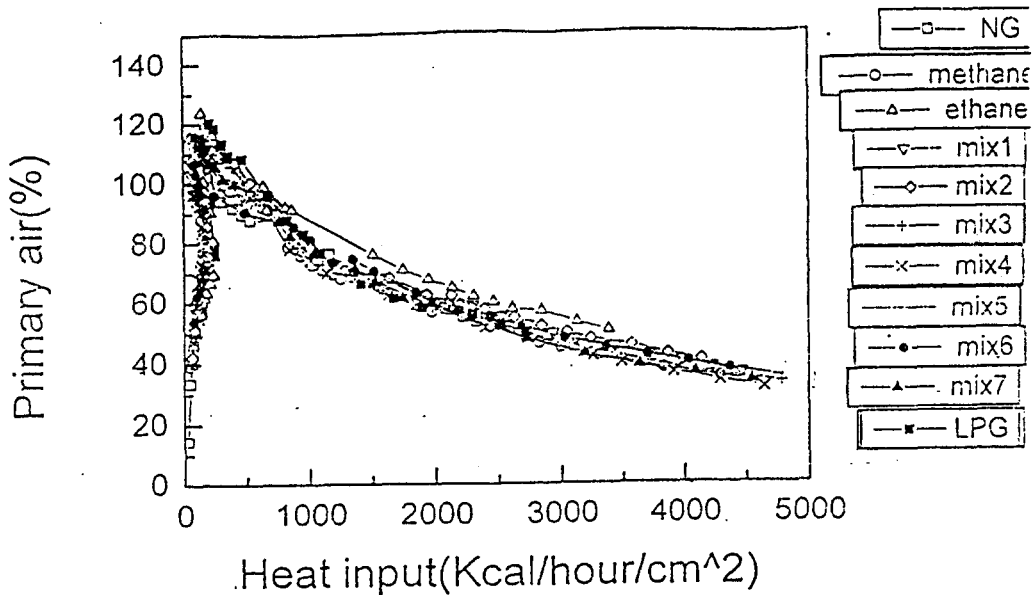


그림 4. natural gas의 combustion diagram.

11A, 12A, 13A 그룹에 속하고 있는 가스들을 7.1mm의 버너 포트(burner port)에서 실험한 결과를 heat input과 primary air percent에 대해 도시하면 그림4를 얻을 수 있다. 서로 다른 성질을 갖는 가스들로 분류되어 있지만 본 실험을 수행한 결과 heat input과 primary air percent에 대해서 도시한 combustion diagram에서는 flash back과 lifting의 조건이 거의 일치하는 것을 관찰할 수 있다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 LPG가스와 같은 고발열량의 가스도 천연가스와 동일한 운전조건에서 안전하게 연소시킬 수 있는 것을 알 수 있다. 그러나 LPG나 에탄과 같은 천연가스보다 비교적 발열량이 높은 가스들은 작은 heat input 조건에서부터 yellow tip이 발생하는 것을 관찰하였다. 그림에서 LPG나 에탄이 다른 가스들과 같이 5000Kcal/hour/cm<sup>2</sup> 근처까지 plotting 되어 있지 않은 것은 이러한 연유에 기인한다.

## 5. 결론

Wobbe index의 범위가 약 12500 - 24000, combustion potential의 범위가 약 36 - 48정도인 가스들을 가지고 현재까지 실험한 flash back과 lifting이 일어나는 조건만으로 결론을 도출하면, Wobbe index나 calorific value가 상대적으로 큰 가스들도 heat flux와 primary air의 조건을 동일하게 해서 연소시키면 동일한 연소기에서 flash back이나 lifting 현상이 일어나지 않는 조건에서 사용이 가능하다는 것을 알 수 있다. 그러므로 flash back이나 lifting 현상에 영향을 미치는 주된 요소는 Wobbe index나 calorific value가 아니라 flame velocity라는 것을 결론으로 도출할 수 있다.

## 참고문헌

1. B. C. Dutton, "interchangeability prediction : the framework for a new approach", Journal of the institute of energy.

2. M. G. Gibert and J. A. Prigg "The prediction of the combustion characteristics of town gas", Research communication GC35.
3. Elmer R. Weaver, "Formulas and graphs for representing the interchangeability of fuel gases", Journal of research of the national bureau of standards, Vol. 46. No. 3. March 1951.
3. G. H. Guidge and J. R. Dewhurst, "The tolerance of aerated-burner appliances to variations in the combustion characteristics of town gas", communication no. 477.
4. Stephen R. Turns, "An introduction to combustion", McGraw-Hill, Inc.
5. R. M. Ristrom and A. A. Westenberg, "Flame structure", McGraw-Hill, Inc.
6. B. C. Dutton, S. W. Wood, "Gas interchangeability : prediction of soot deposition on domestic gas appliances with aerated burners", Journal of the institute of energy, 1984.
7. "천연가스 예혼합 화염에 관한 연구", 한국가스공사 연구보고서, 1994.