

# 천연가스와 LPG/Air 혼합시 가스 호환성 연구

(A Study of Gas Interchangeability on Natural Gas and LPG/Air Mixture)

한정옥\*, 유현석, 방효선(한국가스공사 연구개발원)

**Key Words :** Gas Interchangeability(가스호환성), Lifting(비화), Flash Back(역화), Yellow Tip(황염), Incomplete Combustion(불완전 연소), WI(웨버지수), CP(연소속도지수)

**ABSTRACT :** In order to study the gas interchangeability, a series of tests and analysis were conducted regarding to natural gas and gas mixture. Natural gas was selected as a reference and NG-LPG/Air mixture as a substitute gas. The major interest was placed on the determination of interchangeability limits for different mixing conditions. The parameters of Wobbe Index and Combustion Potential were employed in estimating the gas interchangeability.

The limits obtained by analysis(AGA, WEAVER, KNOY, GILB) were compared with experimental results. The results estimated showed that the mixing limits of LPG/Air in proper conditions were found to vary with analysis and AGA is considered to be the most appropriate one.

## 1. 서     론

호환성은 주어진 연소기에 다른 종류의 연료를 공급했을때 기하학적 형상이나 운전조건을 변화시키지 않고 그대로 사용할 수 있는 대체 가능성을 말한다. 즉, 두 종류의 가스가 호환성이 있다고 하는것은 동일한 출력(power), 화염 안정성(stability), 연소 상태, 점화성능 등을 만족해야 한다.

가스 호환성에 관한 연구는 가스사용이 활발해지면서 수요 공급의 불균형 및 원산지 다변화로 1920년대부터 이루어져 왔으며<sup>(1)</sup> 판정방법은 대부분 경험에 근거를 두고 있으며 그 결과도 적용기준에 따라 서로 차이를 보이고 있다.

따라서 현재 제시된 다양한 판정법을 이론적으로 검토하고 이를 실증실험을 통해 확인하여 국내에 공급되는 천연가스에 대해 가장 타당한 호환성 판정법을 알아내는것은 중요하다고 하겠다. 이결과는 향후 산지 다변화및 수급 불균형 해소에 적극 활용할수 있을 것으로 기대한다.

본 연구에서는 천연가스(NG), 액화 석유가스(LPG) 및 공기(Air)를 혼합한 가스에 대해 호환성 판정방법을 검토하고 이를 실험을 통해 검증함으로써 천연가스와 LPG/Air를 혼합한 천연가스에 대해 가장 적절한 호환 판정법을 제시하고자 한다.

## 2. 이론적 검토

## 2.1 웨버 지수(Wobbe Index)

웨버지수는 가스연료의 출력(단위 시간당 방출에너지)과 관련되는 변수로써, 출력 Q은 단위체적당 발열량 H(Kcal/Nm<sup>3</sup>)과 단위시간당 공급유량 V̇(Nm<sup>3</sup>/h)으로 나타낼 수 있다.

$$Q = H \cdot \dot{V} = H A \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} = A \frac{H}{\sqrt{\rho}} \sqrt{\Delta p} \quad (1)$$

연소기의 노즐 단면적과 가스의 공급압력이 일정할 경우, 즉 연소기의 기하학적 형상이나 운전 조건이 일정할 경우 출력(Q)은 가스발열량과 공기에 대한 가스비중의 제곱근에 비례한다. 이들을 식(2)와 같이 웨버지수(Wobbe Index, WI)로 정의하였다.

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

따라서 동일한 노즐과 압력차가 일정한 연소조건에서는 동일한 웨버지수를 갖는 가스를 사용할 경우 동일한 출력을 얻을 수 있게 된다.

## 2.2 연소 속도 지수(combustion potential)

연소속도 지수(combustion potential, CP)는 수소의 연소속도를 기준으로하고 각 가스의 연소속도를 normalize시켜 혼합가스의 연소속도를 평가할 수 있도록 아래식과 같이 정의한 것이다.

$$CP = K \frac{1.0H_2 + 0.6(CO + C_n H_m) + 0.3CH_4}{d} \quad (4)$$

K: 가스중 산소함유량에 따른 보상계수

d: 공기에 대한 가스비중

H<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>: 가스중 수소, CO, 메탄의 체적비(%)

C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>: 가스중 메탄 이외의 탄화수소 함유율(%)

웨버지수와 연소속도지수는 가스의 출력과 연소속도를 대표하는 특성변수로서 가스의 특성을 구분하는 그룹군 결정 및 호환성판정에 중요한 변수로 이용된다.

## 2.3 가스 호환성 판정 방법

### 1) GILB(Gilbert & Prigg)판정법<sup>(2)</sup>

영국에서 사용되고있는 Gilbert & Prigg 판정법은 저발열량 합성가스에 적용하기 위해 대체가스의 웨버지수(WI)와 화염속도계수(S)를 구하여 그 결과를 호환성기준과 비교하여 호환여부를 판정하는 방법이다. 화염속도계수는 아래식으로 정의하고 있다.

$$S = \frac{\sum X_i S_i}{\sum X_i A_i + 5Z - 18.8Q + 100} \quad (5)$$

- X = 성분의 체적 %
- A = 연소에 필요한 공기량
- Z = 불연가스(N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> 등) 체적%
- Q = 산소 체적%

대체가스에 대한 연소기기의 호환성 경계는 다음과 같다.

$$\text{불완전 연소 경계} : (WI_s/WI_a) - 0.132(S_s/S_a) = 0.968$$

$$\text{역화 경계} : (WI_s/WI_a) - 0.391(S_s/S_a) = 0.460$$

$$\text{열공급 저경계} : WI_s = 0.9WI_a$$

여기서 첨자 s와 a는 대체가스(substitute gas)와 기준가스(referance gas)를 의미한다.

### 2) A.G.A(American Gas Association)판정법<sup>(3)</sup>

1946년 미국 가스협회는 대체가스의 호환성 판정에 관한 연구보고서를 발표하였다. 이 연구에서는 연소성을 비화(lifting), 역화(flash back) 및 노란불꽃(yellow tip)의 관점에서 기준을 설정하였다. 비화(I<sub>L</sub>), 역화(I<sub>F</sub>), 노란불꽃(I<sub>Y</sub>)의 호환 경계치에 대한 판별식은 다음과 같다.

$$I_L = \frac{k_a}{(k_s f_s / k_a f_a) [k_s - \log(f_a / f_s)]} \quad (6)$$

$$I_F = (k_s f_s / k_a f_a) \sqrt{H_s / 1000} \quad (7)$$

$$I_Y = (f_s a_a Y_a / f_a a_s Y_s) \quad (8)$$

k = 비화경계 지수(비화 경계상수(F)/비중(G))

f = 1차 공기계수( $1000\sqrt{G}/H$ )

H = 총 발열량

a = 100A/H

A = 연소에 필요한 공기량

$$Y = \frac{\sum X_i T_i}{A + 7C - 26.3O_2}$$

T = 노란 불꽃 상수

C = N<sub>2</sub>와 CO<sub>2</sub>의 체적비

노란불꽃 상수와 1차공기 계수는 각 성분에 따른 물성치이다. 위에서 제시한  $I_L, I_F, I_Y$ 에 대한 호환경계치는 다음과 같다.

$$I_L \leq 1.06, I_F \leq 1.20, I_Y \geq 0.80$$

### 3) KNOY formula<sup>(4)</sup>

Knoy는 가스의 호환성 판정기준을焰공(flame hole)에서의 비화(lifting), 노란 불꽃(yellow tipping) 발생, 불완전 연소(incomplete combustion), 공급 열량변화(15% 이상)등으로 구분하고 이러한 특성들이 대체가스에서 발생되지 않는 범위를 호환 범위로 정의하였다.

$$C = \frac{H - 175}{\sqrt{G}} \quad (9)$$

H : Heating value of test gas(BTU/ft<sup>3</sup>)

175: Heating value of primary mixture(BTU/ft<sup>3</sup>)

G : Specific gravity of test gas relative to air

C : Knoy index

여기서 C값이  $\pm 6\%$ 이내에서 대체가스가 100%호환성이 있고  $\pm 10\%$  범위에서도 만족할만한 호환성이 있다고 보고하였다. Boston Gas Company의 경우 LPG/Air 혼합 공급시 가스호환 기준을  $\pm 7\%$ 로 적용하는 것으로 알려져 있다. 이 판별식의 특징으로는 가스연소기의 종류에 따라 1차 혼합기의 발열량이 160BTU/ft<sup>3</sup>에서 200BTU/ft<sup>3</sup>까지 가변적이거나 모든 경우 가스기구에 관계없이 사용될수 있는점이다.

또한 Knoy는 1차혼합기의 발열량(P)과 총발열량(H)을 사용하여 아래의 판별식을 제안하였다. P<sub>s</sub>가  $\pm 15\%$ 에 존재할경우 호환가능함을 제시하였다

$$P_s = \frac{H_s \cdot G_a^{0.5}}{G_a^{0.5} + \left(\frac{H_a - P_a}{P_a}\right) G_s^{0.5}} \quad (10)$$

P : Heating value of primary mixture at burner head

H : Heating value of gas

G : Specific gravity

a,s: subscript of reference gas and substitute one

분석결과 Knoy index(C)에 비하여  $P_s$  기준이 호환 영역이 넓은 것으로 나타났다. Knoy의 판정법은 대체가스의 발열량과 비중값만을 사용하여 간편하게 적용할 수 있는 장점이 있다.

#### 4) Weaver 판정법<sup>(5)</sup>

Weaver의 판별식은 A.G.A Bulletin 36, 1948년과 1949년 A.G.A자료 및 1948년 Brooklyn Union Gas의 실험자료에 근거하였으며 가스호환 특성을 비화, 역화, 노란불꽃 및 불완전 연소로 구분하였다.

$$\text{비화지수}(J_L) : J_L = J_A \cdot \frac{S_s}{S_a} \left( \frac{100 - Q_s}{100 - Q_a} \right) \quad (13)$$

$$\text{역화지수}(J_F) : J_F = \frac{S_s}{S_a} - 1.4 J_A + 0.4 \quad (14)$$

$$\text{노란불꽃지수}(J_Y) : J_Y = J_A + \frac{N_s - N_a}{110} - 1.0 \quad (15)$$

$$\text{불완전연소지수}(J_I) : J_I = J_A - 0.366 \frac{R_s}{R_a} - 0.634 \quad (16)$$

S : 화염 속도 계수

Q : 가스중의 산소 체적

N : 전체 탄소 분자 mole fraction

R : 탄화수소중 탄소원자수에  
대한 수소원자수의 비

$$J_A = A_s \sqrt{G_a} / A_a \sqrt{G_s}$$

G : Specific gravity

A : Theoretical air consumption ratio

a, s : 기준 가스와 대체가스 구분 기호

Weaver가 제시한 호환 판정기준은 아래와 같다.

$$J_L \geq 0.64, J_F \leq 0.08, J_Y \leq 0.14, J_I \leq 0.0$$

### 3. 호환성 판정프로그램

현재 공급하고있는 천연가스(발열량:10,500 Kcal/Nm<sup>3</sup>)에 LPG가스와 공기를 혼합하여 공급할 경우 호환 가능성을 검토하기위해 이미 언급한 호환판정 방법들로 호환 범위를 조사하였다. 적용한 가스 조성의 체적 분율은 다음과 같다.

NG : CH<sub>4</sub>(89.78), C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(7.48), C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>(2.02), i-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>(0.36), n-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>(0.34), N<sub>2</sub>(0.02)

LPG : C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(1.1), C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>(97.5), i-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>(1.0), n-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>(0.4)

Air : O<sub>2</sub>(.21) ,N<sub>2</sub>(.79)

세 가스의 혼합조성을 구하기위해 Fig. 1과 같이 도식적인 방법을 도입하였다.

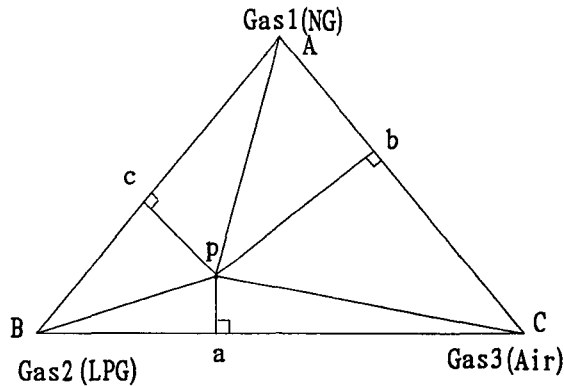


Fig. 1 Ternary diagram of three reference gas mixtures

즉 p점에서의 Gas1과 Gas2, Gas3의 혼합 가스조성비는 점p에서 삼각형의 밑변에 수직한 길이의 비로써 구할수 있다.

### 4. 호환성 판정 결과

천연가스에 이종(異種) 가스를 혼합하여 사용할경우 동일한 출력을 유지하기위해 Wobbe 지수는 변하지 않아야 한다. 따라서 동일한 Wobbe 지수를 유지하면서 연소호환성을 유지시킬수 있는 혼합비율이 요구되며 앞에 언급한 것처럼 이때 LPG/Air의 혼합비율은 63:37이다. 따라서 이상의 판정결과를 토대로 LPG/Air 혼합비가 일정한 상태에서 NG와의 혼합비에 따른 호환성 판정결과가 Table 1에 정리하였다.

A.G.A의 호환 판정 결과는 LPG/Air가 적정 비율로 혼합되었을때 호환 영역이 가장 넓어지며 이때 LPG/Air의 혼합비율이 25~30%까지 가능한것으로 나타

났다. 그 이상의 경우는 황염(yellow flame)이 발생되기 때문에 추가적인 공기가 필요하게 된다. GILB의 경우 호환 영역은 상당히 넓게 분포되어있으며 동일한 Wobbe 조건을 만족 시킬 경우 호환 범위는 전영역에 걸쳐 가능함을 보여 주었다. KNOY의 결과에서도 호환 범위는 LPG/Air의 혼합비에 따라 차이가 있으나 GILB의 경우와 유사한 결과를 보여 주었다. Weaver의 경우는 다른 방법에 비해 구속하는 호환 인자가 많기때문에 최대 혼합 비율이 10~15% 정도로 제일 좁게 나타났다.

각 조건에 대한 호환판별 결과는 서로 차이가 있는것으로 나타났다. 이로 부터 호환성에 대한 정확한 판정방법은 아직 확립되어있다고 볼 수 없으며 실험적 검증을 거쳐 대상가스에 대한 관계식을 도출할 필요가 있음을 보여준다.

Table 1. Results of gas interchangeability tests conducted based on NG and LPG/Air mixture in various condition.

NG/LPG/Air	WI	CP	GILB	AGA	KNOY	WEAVER
(1.0.00.00)	13294	42.0	***	***	**	****
(95.03.02)	13216	41.2	***	***	**	****
(90.07.03)	13362	41.1	***	***	**	***I
(85.10.05)	13302	40.5	***	***	**	***I
(80.13.07)	13249	40.1	***	***	**	***I
(75.16.09)	13204	39.8	***	***	**	***I
(70.20.10)	13366	39.9	***	***	**	***I
(60.20.11)	13239	39.7	***	***	**	***I
(50.32.18)	13256	39.8	***	L*Y	**	***I
(00.62.38)	13225	44.4	***	L*Y	**	***I

L:lifting  
 Y:yellow tip  
 F:flash back  
 I:incomplete combustion

## 5. 실험장치 및 방법

가스호환성을 검증하기위한 실험을 위해 분젠버너와 실용연소기에 대해 적용 하였다. Fig. 2에 실험장치의 개략도를 도시하였다.

분젠 버너의 경우 1차당량비를 1.18, 1.7, 및 2.0의 경우로 구분하였다. NG 100% 실험조건에서 설정된 1차공기량을 LPG/Air 혼합기 실험의 경우에도 그대로 적용하여 호환성 여부를 판단하였다. 이때 LPG와 혼합되는 공기는 별도로 공급되며 전체 공기 유량은 실험조건에 따라 다소 변하게 된다.

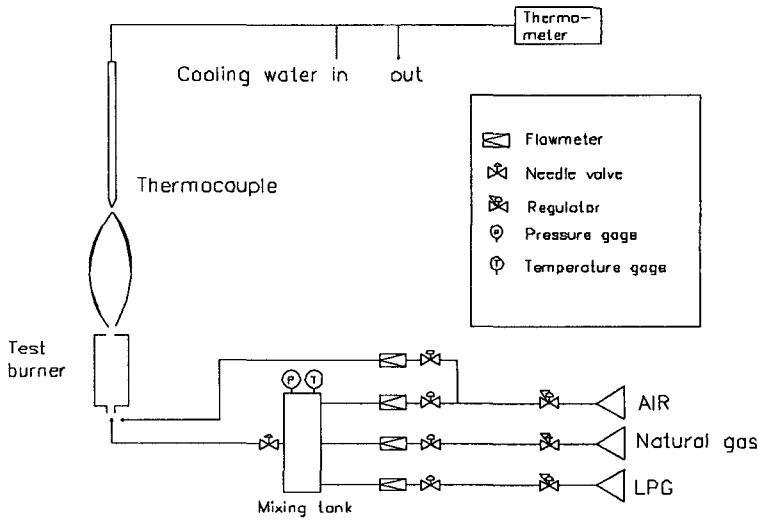


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatuses

상용 연소기에 대한 호환성을 판별하기 위해 GDF 연소기, 산업용 연소기 및 가정용 연소기에 대해 분젠버너와 동일한 조건으로 실험을 진행하였다. GDF 연소기와 가스 렌지는 분젠식이므로 1차공기를 자연 흡입하나, 산업용 노즐의 경우 blast type이므로 1차공기를 예혼합시켜 공급하였다. 이 경우 분젠식형의 경우와 마찬가지로 공기량을 일정하게 유지시키면서 LPG 및 연료공기를 변화시켜 호환여부를 판정하였다.

NG 및 LPG/Air는 질량유량계로 조절되어 혼합기에서 혼합되며 연소용 1차공기도 질량 유량계를 통과한 후 혼합기에서 연소용 가스와 혼합되어 연소기로 유입된다. Wobbe index가 일정한 상태가 되도록 하기위해서, LPG/Air 혼합비를 63:37로 일정하게 유지시켰으며 차압 발생용 노즐을 혼합기와 연소기 중간에 설치한 후 노즐의 단면적과 노즐 전후단 압력차( $\Delta P$ )를 약 200mmAq로 일정하게 유지시켜 주었다. 연소기 노즐에서 평균 분출 속도는 층류 연소속도보다 큰 1~1.5m/sec 정도를 유지하였다.

연소 속도는 원추화염각 측정 방법을 사용하여 결정하였으며 CO, CO<sub>2</sub> 농도는 비분산 적외선방식인 가스분석기(SIEMENS ULTRAMAT 22P)로 측정하였고, 정량화가 어려운 yellow tip 및 lifting 특성은 사진촬영을 통하여 상대적인 변화정도로써 연소상태를 판정하였다. Table 2에 연소기 종류 및 실험 조건을 정리하였다.

## 6. 실증실험 결과

전1차식(1차당량비:1.18)인 경우 비화, 역화, 황염은 관찰되지 않았으며 연



Table 2. Test conditions and measuring parameters for burner test

연소기	실험조건	측정 변수
분젠 버너	당량비 : $\phi=1.18, 1.7, 2.0$ 연료유량: $0.98 \sim 1.18 \text{ l/min}$ $\Delta P = 200 \text{ mmAq}$	연소속도 Yellow tip, Lifting Flash back, 화염길이 시간당 발생출력
실험용 (GDF) 연소기	분젠식 노즐직경 : $1.4 \text{ mm}$ 염공직경 : $3 \text{ mm}$ 연료유량: $2.0 \sim 2.2 \text{ l/min}$ $\Delta P = 180 \text{ mmAq}$	Yellow tip, Lifting Flash back, 온도 CO, CO <sub>2</sub>
산업용 노즐	blast type( $\phi=1.8$ ) 1차공기유량 : constant 연료유량: $0.4 \sim 0.45 \text{ l/min}$ $\Delta P = 160 \text{ mmAq}$	Yellow tip, Lifting Flash back, 화염길이 CO, CO <sub>2</sub> , 화염온도 출력
취사용 가스렌지	분젠식 연료유량: $2 \sim 3 \text{ l/min}$ $\Delta P = 182 \sim 185 \text{ mmAq}$	Yellow tip, Lifting Flash back, CO, CO <sub>2</sub> 출력

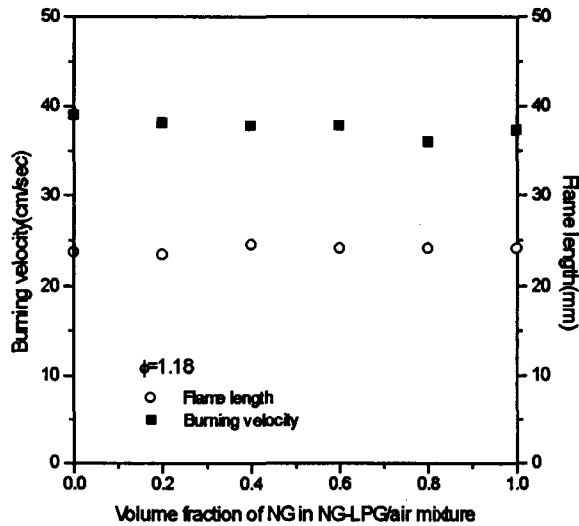


Fig. 3 Comparisons of burning velocity and flame length in various fuel conditions

소상태도 양호하였다. NG 함량에 따른 연소속도 및 화염길이가 Fig 3에 나타

나있다. 화염길이는 Schlieren image에서 노즐 출구와 화염대가 이루는 삼각형의 꼭지점까지의 길이로 화상처리를 통하여 구하였다.

NG 함량에 따른 연소속도 및 화염길이는 거의 무관하게 나타났다. 이는 혼합기가 이혼혼합기 근처이기 때문에 2차연소에 필요한 공기가 상대적으로 적게 요구되기 때문이라 생각된다.

한편 단위시간당 발생열량 변화를 확인하기 위해 일정량의 물을 가열시키는데 소요된 시간을 측정하였다. 동일한 초기온도조건에 대해 조성변화에 따라 투입된 열량을 가열시간과 물의 양으로 환산하여 Fig. 4에 비교하였다. 그림에서

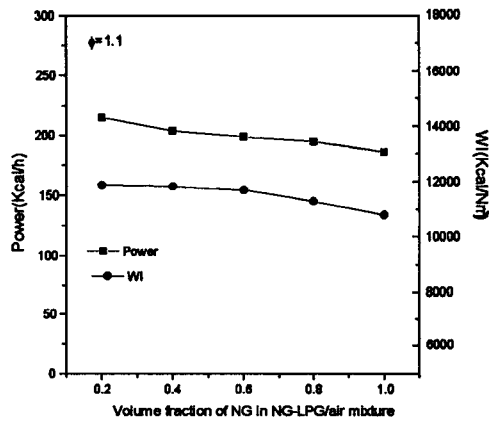


Fig. 4 Trends of power outputs and Wobbe Index with variation of NG volume fraction

나타난 바와 같이 NG의 비율이 증가하고 LPG/Air가 감소할수록 출력은 감소하는 경향을 보이고 있다. 이때 웨버지수 조건은 NG의 비율이 증가할수록 일정 웨버지수 조건이 아니라 약간 감소하는 조건으로 출력과 비례함을 알수있다.

분젠식(1차당량비:1.7)은 연소에 필요한 공기량의 60%정도가 미리 1차공기로 공급되어 부분예혼합되는 방식이므로 전1차식에 비하여 화염의 길이가 길어짐이 관찰된다. 그러나 비화, 역화는 관찰되지 않았으며 황염은 NG 50%에서 약간씩 발생하기 시작했다. 세미분젠식은 연소용 공기의 50%정도가 예혼합되므로 분젠식에 비하여 연소속도가 느려 화염이 길어지고 내염이 희미해지는것이 관찰되었다. 그리고 비화, 역화는 관찰되지 않았으나 황염은 1차공기량의 부족으로 NG 70% 부터 관찰되었다. 실험에 사용된 화염은 버너화염이므로 주위공기와의 2차연소로 인하여 불완전 연소성분은 전1차식, 분젠식, 세미분젠식 모두 양호하였다.

이상의 분젠버너 실험에서 전1차식, 분젠식은 NG 50% 까지는 호환성이 있으나 세미분젠식은 1차공기의 부족으로 NG 70%에서 부터 황염이 발생되므로

안정성을 고려하여 NG 80%, LPG/Air 20% 까지가 호환이 있다고 판단된다.

실증 실험으로 수행한 GDF 연소기 경우, 실험범위내에서 비화, 역화는 발생하지 않았으나 황염은 NG 70%에서부터 발생되었다. 이는 분젠버너의 세미분젠식과 일치하는 결과이다. 웨버지수는 일정하게 유지되었으므로 화염선단 약 10mm 에서 측정된 배기온도는 거의 일정하게 유지되었다. 산업용 노즐은 브라스트식으로 작은 염공들로 구성되었다. 황염은 분젠버너경우 NG 50%에서 발생되었으나 산업용 노즐경우에는 NG 20%에서 부터 약하게 관측되었으며 화염의 길이도 거의 일정하게 타나났다. 다공노즐 형태이므로 단공(single hole) 노즐에 비해 주위공기 유입이 유리하기 때문에 황염이 분젠버너에 비해 발생하기 어려운것으로 보인다.

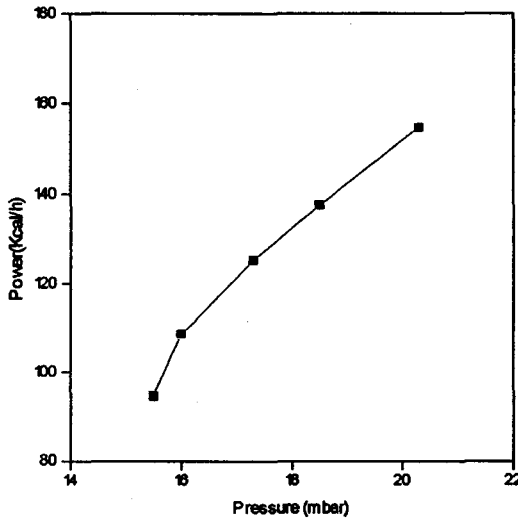


Fig 5 Variations of power of NG+LPG/air mixtures as a function of pressure in an industrial burner

노즐 전후단의 압력차( $\Delta P$ )의 변화에 따른 연소기의 출력변동이 Fig 5에 나타나 있다. 식(1)에서 알 수 있듯이  $\sqrt{\Delta P}$ 는 출력에 비례적이기 때문에  $\Delta P$ 가 증가할 수록 출력이 포물선형으로 증가함을 알수 있다.

가정용 가스레인지의 세미분젠식으로 비화와 역화는 발생하지 않았으나 NG 40% 에서 황염이 관찰되었다. Fig 6에 NG 변동에 따른 출력변화의 추이가 나타나 있는데 실험영역에 있어 거의 일정하게 나타났다. 이는 호환가스를 대체하여 동일한 WI 조건을 유지할 경우 출력이 같아야 한다는 사실을 입증해주는 결과이다.

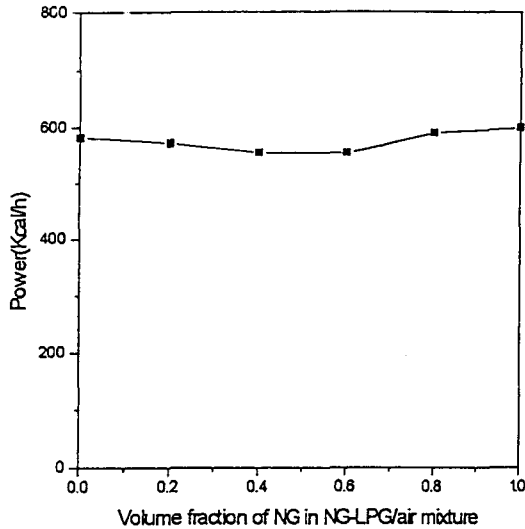


Fig. 6 Variations of heat power in NG+LPG/air mixtures for a gas range

## 7. 결론

1) NG를 대체한 NG+LPG/Air 혼합가스에 대한 호환성 판별법 검토결과 웨버지수, 연소속도지수만을 판별인자로한 GILB, KNOY 판별법은 웨버지수가 일정할 경우 LPG/Air가 NG를 완전히 대체할 수 있는 것으로 나타났다. 그러나 비화, 역화, Yellow tip, 불완전 연소를 고려한 A.G.A 및 Weaver 판별법은 웨버지수가 일정할 경우 호환경계범위가 각각 20%, 10%로 나타났다.

2) 분젠버너를 이용한 실증실험결과 1차 혼합기의 당량비가 1.2인 경우 LPG/Air가 NG를 완전히 대체할 수 있으나 rich( $\phi=1.7$ )해질 수록 1차공기 부족으로 Yellow tip 발생영역이 넓게(LPG/Air 50%) 나타나는 것을 볼 수가 있었다.

3) 실용연소기에 대한 실증실험의 경우 모두 분젠식으로 1차 당량비가 약 1.7 정도이므로 LPG/Air 50~70%부터 Yellow tip이 발생되었다. 그러나 일부 산업용 연소기 경우 노즐의 형상 효과로 Yellow tip은 거의 발생되지 않았다.

4) 호환판정 프로그램과 실증실험을 비교해본 결과 A.G.A 판별법이 실증실험과 가장 유사하게 나타났다.

## 참 고 문 헌

- (1) Symposium papers " New Fuels and Advances in Combustion Technologies ", IGT, 1979
- (2) M. G. Gilbert & J. A. Prigg " The Prediction of the Combustion Characteristics of Town Gas ", Trans Inst Gas Eng, 1956
- (3) AGA Testing Laboratories " Interchangeability of other gases with natural gas", AGA Bulletin NO. 36, 1946
- (4) M. F. Knoy " Graphic Approach to the Problem of Interchangeability", AGA Proceedings, 1953
- (5) E. R. Weaver " Formulas and Graphs for Representing the Interchangeability of Fuel Gases", J of Research of the National Bureau of Standards, Vol 46, NO3, 1951