

이르쿠츠크산 PNG 도입에 따른 가스호환성 판정 및 실증실험

이현찬, 유현석, 이중성
한국가스공사 연구개발원

The Gas interchangeability Distinction and the Verification Experiment of Irkutsk PNG

Hyun-Chan Lee, Hyun-Seok You, Jeong-Seong Lee
Korea Gas Cooperation, Research & Development Div.

1. 서론

러시아 이르쿠츠크시 북방 약 450KM에 위치한 코빅틴스크 가스전을 개발, 배관을 통하여 러시아, 중국을 거쳐 국내에 천연가스를 공급하기 위한 PNG(Pipe Line Natural Gas)사업은 공급규모가 연간 2,000만톤이며 배관거리는 약 4,100KM(한, 중, 러 포함)에 달하는 것으로서 공급시기는 2008 ~ 2010년 예상으로 예상된다. 따라서 본 연구에서는 사전에 이르쿠츠크산 PNG의 국내 천연가스와의 가스호환성을 검토하는데 목적이 있다.

2. 가스호환성 판정법

가스호환성은 주어진 연소기에서 다른 종류의 연료를 공급했을 때 기하학적 형상이나 운전조건을 변화시키지 않고 그대로 사용할 수 있는 대체 가능성을 말한다. 즉, 두 종류의 가스가 호환성이 있다고 하는 것은 동일한 출력, 화염안정성, 연소상태, 점화성능 등을 동시에 만족하는 것을 의미한다.

가스 연소호환성에 관한 연구는 가스사용이 활발해지면서 수요 공급의 불균형 및 원산지 다변화로 1920년대부터 이루어져 왔으며 그 방법으로는 단일 변수, 다수 변수(3,4개 변수도입) 및 그림에 의한 평가방법이 제안되어 왔다. 이러한 판정방법은 대부분 경험에 근거를 두고있으며 그 결과도 적용기준에 따라 서로 다른 결과를 보이고 있다. 다음은 대표적인 가스호환성 판정법에 대하여 알아 보겠다.

2.1 웨버 지수(Wobbe Index)

웨버지수는 가스연료의 출력(단위 시간당 방출에너지)과 관련되는 변수로서 식(1)과 같이 웨버지수(Wobbe Index, WI)로 정의하였다.

$$WI = \frac{H}{\sqrt{d}} \text{-----} (1)$$

여기서 H: 발열량, d: 비중이다. 따라서 노즐의 압력차가 일정한 연소조건에서 는 동일한 웨버지수를 갖는 가스를 사용할 경우 동일한 출력을 얻을 수 있게 된

다.

2.2 연소속도 지수(Combustion Potential)

연소속도 지수는 수소의 연소속도를 기준으로 하고 각 가스의 연소속도를 normalize시켜 혼합가스의 연소속도를 평가할 수 있도록 아래식과 같이 정의한 것이다.

$$CP=K \frac{1.0H_2 + 0.6(CO + C_nH_m) + 0.3CH_4}{\sqrt{d}} \text{-----} (2)$$

여기서 K: 가스중 산소함유량에 따른 보상계수, d: 공기에 대한 가스비중, H_2 : 가스중 수소의 체적비(%), CO : 가스중 CO의 체적비(%), C_nH_m : 가스중 메탄 이외의 탄화수소 함유율(%), CH_4 : 가스중 메탄의 체적비(%)이다.

이상의 웨버지수와 연소속도지수는 가스의 출력과 연소속도를 대표하는 특성 변수로서 가스의 특성을 구분하는 그룹군 결정 및 호환성판정에 중요한 변수로 이용될 수 있다. Fig. 1은 일본 통산성에서 분류한 가스구분 기준이다.

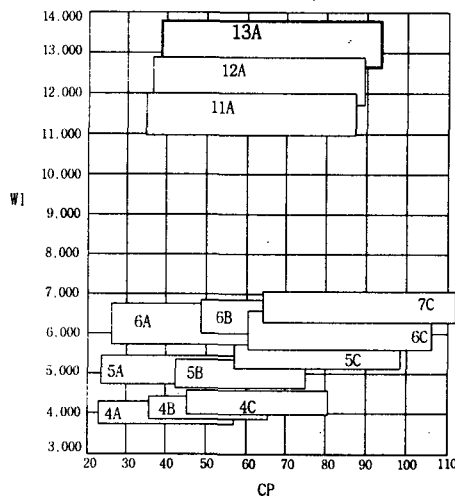


Fig. 1 Classified gas group in terms of Wobbe Index(WI) and combustion potential(CP).

2.3 GILB(Gilbert & Prigg) 판정법

영국에서 사용되고있는 Gilbert & Prigg 판정법은 대체가스의 웨버지수와 화염 속도 계수를 구하여 그 결과를 호환성기준과 비교하여 호환여부를 판정하는 방법이다. 화염속도계수(S)는 아래식으로 정의하고 있다.

$$S = \frac{\sum X_i S_i}{\sum X_i A_i + 5Z - 18.8Q + 100} \text{-----} (3)$$

여기서 X = 성분의 체적 %, A = 연소에 필요한 공기량, Z = 불연가스(N_2 , CO_2 등) 체적%, Q = 산소 체적%이다. Gilbert와 Prigg가 제안한 호환성 경계는 다음과 같다.

불완전 연소 경계: $(W_s/W_a)-0.132(S_s/S_a)=0.968$

역화 경계 : $(W_s/W_a)-0.391(S_s/S_a)=0.460$

열공급 저경계 : $W_s=0.9W_a$

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

2.4 A.G.A(American Gas Association) 판정법

1946년 미국 가스협회는 대체가스의 호환성 판정에 관한 연구보고서를 발표하였다. 이 연구에서는 연소성을 비화(lifting), 역화(flash back) 및 노란불꽃(yellow tip)의 관점에서 기준을 설정하였으며 호환범위를 제시하였다. 기준가스는 다음과 같이 3종으로 구분하여 사용되는 천연가스의 특성을 고려하였다.

기준가스 1 : 고발열량 천연가스

기준가스 2 : 메탄이 주성분인 천연가스

기준가스 3 : 불연가스 성분이 많은 천연가스

비화(I_L), 역화(I_F), 노란불꽃(I_Y)의 호환 경계치에 대한 판별식은 다음과 같다.

$$I_L = \frac{k_a}{(k_s f_s / k_a f_a) [k_s - \log(f_a / f_s)]} \text{----- (4)}$$

$$I_F = (k_s f_s / k_a f_a) \sqrt{H_s / 1000} \text{----- (5)}$$

$$I_Y = (f_s a_a Y_a / f_a a_s Y_s) \text{----- (6)}$$

여기서 k =비화경계 지수(비화 경계상수(F)/비중(G)), $f=1$ 차 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, $C=N_2$ 와 CO_2 의 체적비이다.

노란불꽃 상수와 1차공기 계수는 각 성분에 따른 물성치이며 위에서 제시한 기준식은 A.G.A Precision burner를 사용하여 얻은 각 연소성 결과에 의거한 경험식이다. 각 기준가스에 대한 호환경계치는 Table 1과 같다.

Table 1 Gas interchabgeability limit of three reference gases

가스 지수	기준가스 1		기준가스 2		기준가스 3	
	양호	불량	양호	불량	양호	불량
I_L	1.0≤	1.12≥	1.0≤	1.06≥	1.0≤	1.03≥
I_F	1.18≤	1.20≥	1.18≤	1.20≥	1.18≤	1.20≥
I_Y	1.0≥	0.70≤	1.0≥	0.80≤	1.0≥	0.90≤

2.5 KNOY Formula

Knoy는 가스의 호환성 판정기준을 염공(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 호

환 범위로 정의하였으며 아래 관계식을 제시하였다.

$$C = \frac{H-175}{\sqrt{G}} \text{-----} (7)$$

여기서 H: Heating value of test gas(BTU/ft3), 175: Heating value of primary mixture(BTU/ft3), G: Specific gravity of test gas relative to air, C: Knoy index 이다. C 는 Knoy지수(index)이며 C값이 ±6%이내에서 대체가스가 100%호환성이 있고 ± 10% 범위에서도 만족할만한 호환성이 있다고 주장하였다. 또한 Knoy는 1차혼합기의 발열량(P)과 대체가스의 총발열량(H)을 사용하여 아래의 판별식을 제안하였다. Ps가 ±15% 에 존재할 경우 호환가능함을 제시하였다.

$$P_s = \frac{H_s \cdot G_a^{0.5}}{G_a^{0.5} + \left(\frac{H_a - P_a}{P_a}\right) G_s^{0.5}} \text{-----} (8)$$

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 이다.

2.6 Weaver 판정법

Weaver의 판별식은 A.G.A Bulletin 1936, 1948년과 1949년 A.G.A자료 및 1948년 Brooklyn Union Gas의 실험자료에 근거하였으며 가스호환 특성을 비화, 역화, 노란 불꽃 및 불완전 연소로 구분하여 가스의 공급 열량과 1차공기량, 화염속도와 가스조성으로 표시하였다.

기본 함수로서 열량 공급비(J_H)와 공기비(J_A)를 아래와 같이 정의 하였다.

$$J_H = H_s \sqrt{G_a} / H_a \sqrt{G_s} \text{-----} (9)$$

$$J_A = A_s \sqrt{G_a} / A_a \sqrt{G_s} \text{-----} (10)$$

H: Heating value, G: Specific gravity, A: Theoretical air consumption ratio 이다.

식(9)는 기준가스와 대체가스의 웨버지수 비로써 연소기에서 발생하는 출력성능을 표시하며 식(10)는 이론공기량의 상대적인 비로서 불완전 연소가능성을 표시하는 지수이다.

Weaver의 가스 호환성 판정지수는 다음과 같다.

$$\text{비화지수}(J_L): J_L = J_A \cdot \frac{1}{S_a \sqrt{100 - Q_a}} \text{-----} (11)$$

$$\text{역화 지수}(J_F): J_F = \frac{S_s}{S_a} - 1.4 J_A + 0.4 \text{-----} (12)$$

$$\text{노란 불꽃 지수}(J_Y): J_Y = J_A + \frac{N_s - N_a}{110} - 1.0 \text{-----} (13)$$

$$\text{불완전 연소지수}(J_I): J_I = J_A - 0.366 \frac{R_s}{R_a} - 0.634 \text{-----} (14)$$

S: 화염 속도 계수, Q: 가스중의 산소 체적, N: 전체 탄소 분자 mole fraction, R: 탄화수소 중 탄소원자수에 대한 수소원자수의 비, a, s: 기준 가스와 대체가스 구

분 기호이다. Weaver가 제시한 호환 판정기준은 Table 2와 같다.

Table 2 Gas interchangeability limit suggested by Weaver

지수	완전 호환성	호환 경계치
J_L	1.0	0.64 이상
J_F	0.0	0.08 이상
J_Y	0.0	0.14 이상
J_I	0.0	0.00 이하

3. 이르쿠츠크 PNG 가스호환성 판정방법

이르쿠츠크산 천연가스의 가스호환성을 검토하기 위하여 앞 절에서 검토한 판별법과 실증실험을 병행하였다. 호환성 판정법은 연구개발원에서 개발된 프로그램을 사용하였으며 판별결과에 대한 신뢰성을 확인하기 위하여 테스트용 버너로 실증실험을 실시하였다.

3.1 실증 실험 장치

Table 3에 이르쿠츠크산 천연가스의 실증실험을 위해 제작한 표준가스와 이르쿠츠크산 천연가스의 물성치 비교가 나타나 있다.

Table 3 The comparison of the property value of matter between Irkutsk PNG and manufactured gas

NO	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Component	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	He	Ar	CO ₂	N ₂
PNG(vol%)	90.14	4.85	1.07	0.57	1.42	0.21	0.14	0.08	1.52
Heating value(kcal/Nm ³)	10335								
Specific gravity	0.63								
Manufactured gas(vol%)	90.16	4.78	1.06	0.54	1.41	0.29	0.13	0.13	1.5
Heating value(kcal/Nm ³)	10309								
Specific gravity	0.63								
Heating valuedeviation(%)	0.24(↓)								

연소용 공기를 버너에 공급하는 방식에는 크게 연료측의 압력에너지를 이용하여 공기를 자연흡입시키는 벤츨리 버너와 송풍기와 같은 동력을 이용한 강제급기 버너가 있다. 강제급기버너의 경우 이론공기량의 변화가 미미할 경우 큰 문제가 되지 않는다. 그러나 자연흡입방식인 벤츨리 버너는 연료의 성분변화에 따라 흡입되는 공기량이 변하게 된다.

따라서 PNG 가스호환성 실증실험을 위해 테스트용 버너로 벤츨리 버너를 선택하였다. Fig. 2는 실험에 사용된 벤츨리버너의 설계도이다.

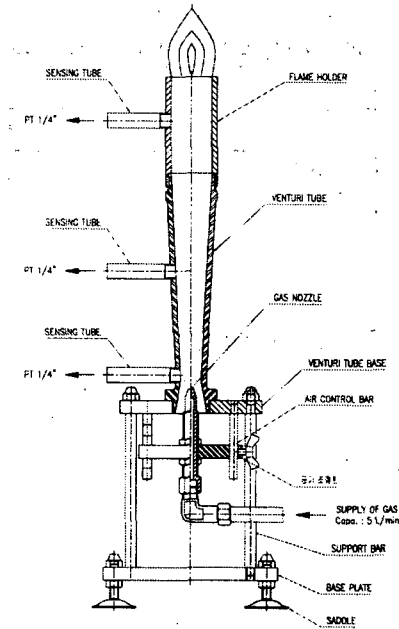


Fig. 2 Schematic diagram of venturi burner for verification experiment

1차흡입공기량 조절을 위해 연료노즐의 위치를 가변할 수 있는 구조(air control bar)로 제작하였으며 버너의 수직성을 확보하기 위해 지지대는 3점 지지 방식을 취하였다. 1차공기량 계산을 위한 산소농도 측정부는 flame holder 옆에 sensing tube를 설치하였다. 또한 1차 흡입되는 공기량의 조절범위를 넓게 하고자 연료노즐과 벤츄리 관을 다수 제작하여 사용하였다.

3.2 실험방법

실험의 독립변수로는 1차공기량으로 정의하였다. 현장에서 사용되어 예혼합연소는 1차공기량에 따라 전일차식, 분질식(80~40%), 세미분질식(40%이하)으로 구분되므로 실험변수로서 1차공기량을 달리하여 실시하였다. 이때 공급되는 가스의 압력은 일반용의 공급압력인 250mmH₂O로 공급하였다. 1차공기량의 산출은 1차 혼합가스중의 산소농도를 측정 분석하여 다음 식으로 환산하여 계산하였다.

$$m \times x = y$$

$$\frac{0.21y}{y+1} = z$$

$$\therefore x = \frac{z}{m(0.21 - z)}$$

m : 이론공기량(NG 10.52, PNG 10.39 Nm³/Nm³), x : 이론공기량 중 1차 흡입예혼합된 공기분율, y : 흡입된 1차공기량(Nm³/Nm³), z : 측정된 1차혼합기중 산소분율이다.

종속변수로는 blow-off, flash-back, yellow-tip, 불완전연소 등을 정의하였다. blow-off, flash-back, yellow-tip은 실험용 버너(벤츄리 버너)에 형성된 화염을 디지털 카메라(KODAK DC120)로 촬영하여 판정하였으며, 불완전연소는 가스분석기(SIEMENS ULTRAMAT 5)로 측정한 CO, CO2를 이용하여 판정하였다. 이때 측정위치는 가시적 화염의 끝부분에서 측정하였다.

4. PNG 가스호환성 판정 결과

4.1 판정법 결과

2절에서 검토한 판정법을 사용하여 분석한 결과가 Table 4에 정리되어 있다. 결과는 이르쿠츠크산 PNG가 5종류의 판정법에 모두 만족하는 결과를 나타냈다.

Table 4 The results of gas interchangeability between Irkutsk PNG and NG

판정법		천연가스와의 호환범위	이르쿠츠크 가스	
			계산값	판정
13A	웨버(WI)	12600~13800	13012	0
	연소속도(CP)	39.0~94.7	40.0	0
GILB	불완전연소경계(WIC)	WIC>WI	14587	0
	역화경계(WLB)	WLB<WI	11206	0
	열공급저경계(WHI)	WHI<WI	11964	0
A.G.A	비화(IL)	1.06>IL	1.03	0
	역화(IF)	1.20>IF	1.05	0
	노란불꽃(IY)	0.80<IY	1.02	0
KNOY	Knoy 지수(C)	1119.6~1262.5	1163	0
	발열량 지수(P)	148.8~201.3	172	0
WEAVER	비화지수(JL)	0.64이상	0.96	0
	역화지수(JF)	0.08이하	0.0088	0
	노란불꽃지수(JY)	0.14이하	-0.038	0
	불완전연소지수(JI)	0.00이하	-0.019	0
범위를 벗어난 지수		없음		
판정결과		각 판정에 만족할 만한 결과를 얻음		

4.2 실증실험 결과

가스호환성 판별 인자 중 황염(yellow tip), 역화(flash back), 비화(blow off)를 판정한 결과가 Photo. 1에 나타나 있으며 여기서 괄호안의 %숫자는 이론공기량 중 1차흡입된 공기량의 백분율을 나타내는 것이다. 사진에서도 쉽게 알 수 있듯이 국내 도입되는 천연가스(NG)와 이르쿠츠크산(PNG)의 화염형상은 거의 유사한 것으로 나타났으며 황염이나 역화, 비화는 관측되는 않았다. 이는 앞 절의 판정법에서 나온 결과를 입증하는 것이다. 물론 보다 더 정밀한 호환성 여부를 판별하기 위해서는 각 각의 연료에 대한 화염안정영역에 대한 세밀한 결과가 필요하겠다. 한편 1차공기량이 증가할수록 화염의 길이가 짧아지고 휘도(luminosity)도 밝

아 지는 것을 알 수 있다.

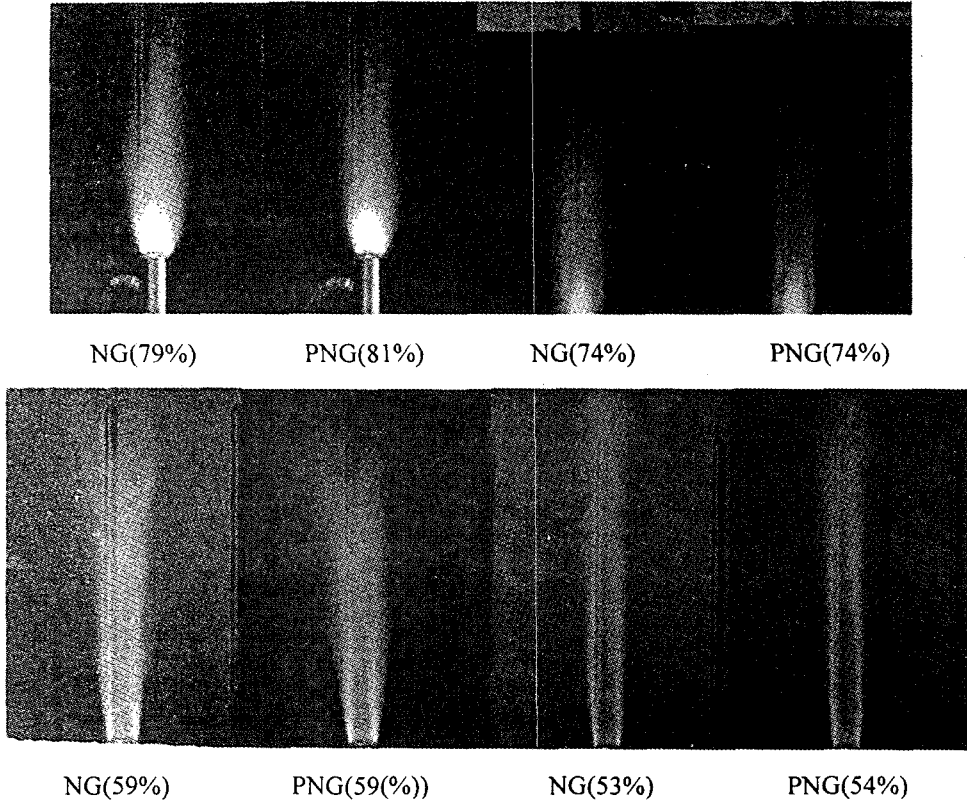


Photo 1 The variations of flame shapes according to primary air ratio

다음은 불완전연소에 대한 결과가 Table 5에 정리되어 있다. 두 연료간 큰 차이를 보이지 않고 있다.

Table 5 The variation of CO/CO₂ according to primary air rate

1차공기량(%)	NG	PNG
80	0.003	0.001
74	0.0006	0.002
59	0.003	0.005
54	0.0007	0.0009

5. 결론

1) 이르쿠츠크산 PNG에는 C₅H₁₂가 1.4% 포함되어 있으므로 증발온도를 고려해 볼 때 공급압력을 17bar(겨울철 온도 0°C 기준)이상으로 하게 되면 배관내 C₅H₁₂의 응축이 발생될 수도 있으므로 이에 대한 충분한 고려가 필요하겠다.

2) Table 6에서 알 수 있듯이 강제급기방식의 연소기에서는 연료성분이 변하여

도 웨버지수(연소기 출력)가 호환이 되고 이론공기량의 변화가 크지 않다면 문제가 되지 않는 것이다.

Table 6 Wobbe index and the stoichiometric air of PNG and NG

가스종류	웨버지수	이론공기량(Nm ³ /Nm ³)
NG	13,288	10.52
PNG	13,012	10.39(↓ 1.2%)

3) 자연흡입방식의 연소기는 실증실험결과 호환성이 있는 것으로 나타났으며 5종의 판별법에 의한 판별결과도 NG와 이룩크츠크산 PNG가 호환성이 있는 것으로 나타났다.

4) 고품질의 제품이 요구되는 업종(식품, 유리, 금속 등)과 화염의 직접 접촉에 의한 제품 생산 업종들은 각각의 설비에 대해 고려해 보아야 하나 대부분 이런 경우 설비가 자동제어에 의해 정밀제어가 이루어지고 있어 큰 문제는 없을 것으로 판단되나 이에 대한 구체적인 검토는 유럽이 발열량기준으로 공급되고 있는 점을 감안할 때 이에 대한 벤치마킹이 필요하겠다.

참고문헌

1. M. F. Knoy, "Graphic Approach to the Problem of Interchangeability", A.G.A. Proceedings, 1953, pp.938~947.
2. E. R. Weaver, "Formulas and Graphs for Representing the Interchangeability of Fuel Gases", J. Research of the National Bureau of Standards, vol. 46, no. 3, 1951, pp.213~245.
3. Humphery & Glasgow Ltd., " Gas Combustion Characteristics", Chemical Engineering Design Data, 1961.
4. F. Schuster, "Interchangeability of Gases", IGU/4-61, 1961, pp. 7~14.
5. A.G.A. Testing Laboratories, "Interchangeability of Other Gases with Natural Gas", A.G.A. Research Bulletin no. 36. 1946.