

연료 가스의 연소특성 및 호환성에 관한 연구

김형택 · 이성룡*

아주대학교 에너지학과, *오영산업주식회사

A Study on the Combustion Characteristics of Fuel Gas and Their Interchangability

Hyung-Taek Kim* and Sung-Ryong Lee**

Department of Energy, Ajou University, *Oh Young Industrial CO.

요 약

본 연구는 여러 종류의 연소가스들의 연소 특성변수를 판단하여 각 가스들 간의 교체 가능성을 조사하는 것을 목적으로 하고 있다. 천연가스, 메탄가스, IGCC 생성가스의 연소특성, 즉 역화, 비화, 및 황염 형성을 분제 버너를 이용하여 판단하였고, 실험 데이터는 연소 다이어그램 상에서 이론 공기량 분률과 입열로 표현하였다. 실험 결과, 메탄은 천연가스와 아무런 운전조건의 변화없이 호환가능하나, 천연가스를 IGCC 생성가스로 치환하고자 할 경우는 화염 안정으로 인하여 버너의 운전변수를 조절하여야만 한다. 이러한 연구결과는 다양한 산지에 따른 각종 천연가스들의 교체가능성 및 타 연료와의 호환가능성을 판단하는 기초자료로 사용될 수 있다.

Abstract— The purpose of this study is to investigate the substitution capability between various fuel gases by characterizing the combustion parameters of fuel gas flame. The combustion characteristics, such as flash-back, lift-off and formation of yellow tip were evaluated by using Bunsen-type burner fired with natural gas, methane, and IGCC coal gas. Experimental data were plotted with percent theoretical air vs. heat input in the combustion diagram. The results illustrated that methane can be substitute with natural gas without any change of operating condition. However, when substituting IGCC coal gas with natural gas, operating parameters of burner should be adjusted for flame stability.

1. 서 론

우리나라는 1986년부터 인도네시아산 천연가스가 국내에 도입되어 기존에 사용하던 LPG(liquefied petroleum gas)를 천연가스로 대체하고 있으며, 또한 천연가스의 가격 및 수급의 안정화를 피하기 위하여 천연가스 산지를 다변화시켜 여러 종류의 천연가스가 도입되어 사용되고 있는 실정이다. 천연가스 산지에 따라 천연가스의 연소특성, 즉 화염안정 영역(stable flame zone), 비화 영역(lifting zone), 역화 영역(flash back zone), 황염 영역(yellow tip zone) 등이 달라지므로서 동일한 연소기에서 조성이 다른 천연가스를 사용할 경우 가스 호환성의 문제가 대두되게 되었다. 또한 향후 천연가스의 대

체 연료로는 자원이 풍부하고 저렴한 석탄을 가스화 하여 생산되는 합성석탄가스가 예상되고 있는 바, 합성석탄가스의 천연가스와의 호환성 문제도 고려하여야 한다. 따라서 동일한 연소기에서 조성이 다른 여러 종류의 연료가스를 상호 교환 사용할 수 있는 조건을 찾기 위하여 연료가스들의 화염 특성을 고찰하는 것이 필요하고, 이러한 연구 결과를 토대로 기존 가스 버너에서 호환성 있는 천연 가스들의 조성 범위를 정하는데 중요한 참고 자료로 활용할 수 있을 뿐만 아니라 합성석탄가스의 가스버너에의 적용성에 필요한 정보도 제공될 수 있다.

연료 가스의 호환성에 관한 외국의 연구 사례를 살펴보면 Knoy, American gas association(AGA), Weaver, Dutton 등에 의해 1900년대 초반부터 시작하여 현재까

지 지속적인 연구가 이루어지고 있다. Knoy는 가스 호환성 판정기준을 염공(flame hole)에서의 비화(lift-off), 노란 불꽃(yellow tip) 발생, 불완전 연소(incomplete combustion), 공급 열량변화(15% 이상) 등으로 구분하고 이러한 화염이상 현상들이 대체가스에서 발생되지 않는 범위를 호환범위로 정의하였고¹⁾, AGA의 연구에서는 연소성을 비화(lift-off), 역화(flash-back) 및 노란불꽃(yellow tip)의 관점에서 기준을 설정하여 호환범위를 설정하였다²⁾. 또한 Weaver는 AGA 자료 및 Brooklyn Union Gas의 실험자료를 근거로 가스 호환성을 비화, 역화, 노란불꽃 및 불완전 연소로 구분하여 대체 가능한 가스의 공급 열량과 1차 공기량, 화염속도와 가스조성으로 표시하였고³⁾, Dutton은 가스 성분변화를 기준으로 하여 화염 특성 및 가스 호환성에 대한 연구를 수행하였다⁴⁾. 이런 일련의 연구에도 불구하고 연소 현상의 복잡성과 난해성으로 인하여 호환성 판별식들은 대부분 실험결과를 토대로 한 실험식에 기초를 두고 있어 실험 조건과 다른 환경에서는 적용할 수 없는 경향이 있다. 따라서 정확한 관계식을 도출하여 가스 호환성의 기준을 설정하는 연구는 시급한 실정이다.

국내에서의 가스 호환성에 관한 연구 실적을 보면 가스공사 연구개발원에서 기존의 호환 관계식들을 비교 검토한 후 실험용 연소기, 산업용 노즐, 취사용 가스 레인지를 이용해 몇 가지 조건에서 호환성에 관한 실험을 수행하였다⁵⁾. 기존의 연구들이 가스 호환성에 대해 어느 정도 예측 가능한 조건을 찾아 낼 수는 있어도, 다양한 가스들을 연소시킬 때 정확한 관계식을 찾지 못하고 실험에 의존하고 있으므로 가스 연소의 정확한 메커니즘을 규명하기 전까지는 본 주제에 대한 실험이 지속적으로 이루어 질 것으로 예상된다. 따라서 본 연구에서는 천연가스, 메탄, 석탄가스를 bunsen-type 버너에서 연소시켜 화염안정 특성을 비교하여 연료가스 상호간의 대체 가능성을 판별하고자 한다.

2. 이론적 고찰

가스 호환성이란 버너에서 한 연료를 다른 종류의 연료로 치환시켜 연소시킬 경우, 버너 장치의 운전 조건에 영향받는 정도로 정의된다. 연료가스의 성분을 변화시켜 동일 버너에서 연소시켰을 경우 안정된 화염을 형성하고, 즉 버너에서 역화(flash back)나 비화(lift-off)가 발생하지 않고, 또한 불완전 연소 산물인 일산화탄소나 그을음이 기준치 이하로 유지된다면, 연료가스들 사이에 완전히 호환 가능하다고 말할 수 있다. 명확히 용어를 구별할 필요가 있을 때에는 위의 네 가지 조건이 만족될 때에만 완전 호환 가능하다고 하고, 이런 이상적인

조건이 만족되지 않을지라도 한가지 또는 몇 가지에 대해서 서로 동일한 결과를 얻을 수 있다면 그런 동일한 결과를 얻은 조건에서만 호환이 가능하다고 한정해서 말할 수 있다.

통상 버너 설계시에는 현재 사용하고 있는 가스를 기준으로 하여 노란 불꽃이나 불완전 연소가 일어나지 않는 조건을 만족시키면서 동시에 안정한 화염범위를 구하여 이에 상응하는 운전조건 하에서 버너를 제작한다. 그러나 버너가 모든 가스들에 대하여 동일한 운전조건을 만족시키지는 못하므로, 연료가스들은 어떤 한가지 조건에 대해서는 호환이 가능하지만 다른 경우에는 호환이 불가능할 수도 있다. 달리 표현하면 조성이 다른 연료가스들을 동일한 연소기에서 교체 사용하면 심각한 문제가 야기될 수도 있다는 것이다. 예를 들어, 천연가스를 연료로 사용하는 버너에서는 화염 상태가 역화(flash back) 보다는 비화(lift-off)가 상대적으로 더 일어나기 쉬운 운전조건에 있다. 그러므로 비교적 화염속도가 느린 천연가스를 사용하는 버너에 화염속도가 빠른 수소를 일정량 혼합시켜도 역화(flash back)를 유발시키지 않고 안정된 화염상태를 유지시킬 수 있다. 그러나 이와는 반대로 빠른 화염속도에 맞추어 제작된 버너에, 즉 수소가 많이 첨가되어 있는 가스에 맞추어 제작된 버너에 화염속도가 느린 연료가스를 태울 경우에는 비화(lift-off) 현상이 유발될 수도 있다. 그러므로 가스의 호환 조건을 판별하는 것은 동일한 버너에서 각 가스의 화염특성 및 동일한 버너에서 화염이 공통적으로 안정화되는 영역을 판단하는 연구로 귀결된다.

가스 호환성을 판단하기 위하여는 여러 가지 연소특성 변수를 변화시키며 연소실험을 수행한 결과를 토대로 상기 서술한 호환성 결정변수들을 체계적으로 묘사한 지수들을 구하여 호환성의 척도로 사용한다. 대표적인 연소특성 변수인 웨버 지수는 가스연료의 단위 시간당 방출 에너지와 관련된 변수로서 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Wl = k_1 \frac{H}{\sqrt{d}} \tag{1}$$

식 (1)에서 k_1 은 연료가스 중의 산소 함유율에 대한 보정계수이고 산소농도가 커질수록 k_1 값은 증가한다. 또 H 는 단위체적당 발열량, d 는 공기에 대한 연료가스의 비중비를 뜻한다. 웨버지수는 가스의 에너지 출력(단위시간당 에너지 발생량)을 계산할 때 중요한 판단 기준으로 노즐의 압력 차가 일정한 연소조건에서 동일한 웨버 지수를 갖는 가스를 사용할 경우에 동일한 출력을 얻을 수 있다.

연소속도를 이용한 호환성 판정법은 혼합가스의 연소

속도를 측정하지 않고 각각의 가스성분들에 대한 연소 속도를 독립적으로 측정하여 이 값을 수소 화염속도를 기준으로 하여 각 성분들의 연소속도가 혼합물에서도 독립적으로 연소속도에 기여한다는 가정 하에 선형적인 방법으로 계산한 식을 사용한다. 총류 연소속도를 비교적 정확하게 측정할 수 없었던 시기에 만들어진 식이라 정확하게 실제 연소속도와 일치하지 않을 때도 있지만 탄화수소 계열의 가스들에 대해서는 비교적 정확한 값을 제공하고 있고, 현재 국내 가스 법규서적에도 연소속도 지수, CP를 가스회환성의 기준으로 삼고 있다.

연소속도지수(combustion potential, CP)는 수소의 연소속도를 기준으로 각 가스의 연소속도를 normalize시켜 혼합가스의 연소속도를 이론적으로 계산할 수 있도록 정의한 식 (2)와 같이 표현된다.

$$CP = k_2 \frac{(H_2) + 0.6[(CO) + (C_mH_n) + 0.3(CH_4)]}{\sqrt{d}} \quad (2)$$

식 (2)에서 (H₂), (CO), (CH₄)는 연료가스속의 각성분에 대한 용적 %이며 (C_mH_n)은 메탄을 제외한 탄화수소의 용적 %이다. 또 d는 공기를 1로 했을 때의 연료가스의 비중이고 k₂는 O₂ 성분에 대한 보정계수이다.

웨이치수와 연소속도지수는 가스의 출력과 연소속도를 대표하는 특성변수로서, WI는 발열량의 대소를 나타내고 CP는 연소속도 등의 반응성을 나타내는 지표이다. 이러한 WI와 CP를 이용하여 직교좌표계에서 안정된 화염 영역을 판별하면 연료 가스의 특성을 구분하는 그룹군 결정 및 호환성 판정에 중요한 변수로 이용될 수 있다.

일반적으로 동일한 버너에서 연료가스의 호환조건은 다음 사항을 만족하여야 한다. 첫째, 입열량 (heat input)을 기준으로 단위 시간당 버너에 들어가는 열량이 기준 가스에 대하여 ±10% 이내로 일정해야 한다. 둘째, 화염이 버너 끝단으로부터 떠올라오는 비화(lift-off) 현상이 일어나지 않아야 한다. 셋째, 화염이 버너 끝단에서 주입 가스 쪽으로 타고 들어가는 역화(flash back) 현상이 발생하지 않아야 한다. 넷째, 연소시 유리된 탄소(liberated carbon)를 발생시키는 yellow tip이 발생하지 말아야 한다. 마지막으로, 불완전 연소시 발생하는 일산화탄소와 이산화탄소의 비(CO/CO₂)가 기준값 이하로 유지되어야 한다. 이상의 5가지 조건을 만족시키면 연료가스가 특정 버너에 대해 완전히 호환 가능하다고 판별된다.

3. 가스 호환성 실험장치 및 방법

서로 다른 조성의 연료가스들의 호환성을 판별하고자

표 1. 본 실험에 사용된 연료가스(test gas)들의 물성치.

	천연가스	메탄	합성석탄가스	
조성 (%)	CH ₄	89.78	100.0	0
	C ₂ H ₆	7.48	0	0
	C ₃ H ₈	2.02	0	0
	iC ₄ H ₁₀	0.34	0	0
	nC ₄ H ₁₀	0.36	0	0
	N ₂	0.02	0	10.08
	H ₂	0	0	24.28
	CO	0	0	57.07
	CO ₂	0	0	7.05
	O ₂	0	0	1.52
비중(공기: 1)	0.625	0.557	0.794	
발열량(kcal/m ³)	10522.7	9525.9	2465.0	
WI	13314.7	12764.9	2766.5	
CP	41.82	40.2	65.68	
필요공기량(m ³ /m ³)	10.52	9.55	1.87	

Bunsen 형 소형 버너를 이용하여 2장에서 서술한 역화, 비화, 황염 등의 이상 연소현상을 관찰하였다. 본 실험에서는 천연가스, 메탄, 합성석탄 가스를 사용하여 호환성 실험을 하였으며 각 가스의 물성치들은 표 1과 같다.

표 1에서 알 수 있듯이 메탄이 주성분인 천연가스와 순수한 메탄의 물성치는 비슷하지만 질소, 수소, 일산화탄소가 주성분인 석탄가스의 물성치들은 이들과 상이하다는 것을 알 수 있다.

연료가스 호환성 실험에서는 두 종류의 유량계, 즉 오리피스와 MFC(mass flow controller)를 이용하여 연료가스와 공기의 유량을 버너에 들어가기 전에 개별적으로 측정하였으며, 연료가스의 유량을 먼저 조절한 후 공기의 유량을 조절하면서 비화, 역화, 황염 등의 경계값들을 관찰하여 연소 다이어그램을 도시하였다.

연료가스 유량조절에 사용한 오리피스는 최대 운전 압력이 100 psig이고 오리피스 직경 범위는 0.0012 inch~0.0252 inch인 사파이어 오리피스 (O'Keefe Controls Co.)를 사용하였다. 오리피스 유량계의 장점은 오리피스의 외형의 모양과 크기가 동일하여 필요한 유량 범위에 따라 32가지의 오리피스를 쉽게 교체하여 사용할 수 있으며, 정밀도와 재현성이 우수한 것으로 알려져 있다⁹⁾. 이들 밸브와 압력 게이지를 설치하여 압력 대 유량에 대한 관계식을 얻은 후 동일한 압력에서의 가스 유량으로 환산시키는 방법을 사용하였다. 공기의 유량을 조절하기 위해서 0~3 l/min까지 사용 가능한 MFC(mass flow controller)를 사용하였고, 그 이상의 유량 속도에서는 상기와 같은 오리피스 유량계를 제작하여 습식 가스 계량기(wet gas meter)로 보정하여 압력 대 유량식을 만들어 사용하였다. 현재 사용하고 있는 습식 가스 계량기의 측정 한계값이 0.3 l/min이었기 때문에 현재의 기기로는

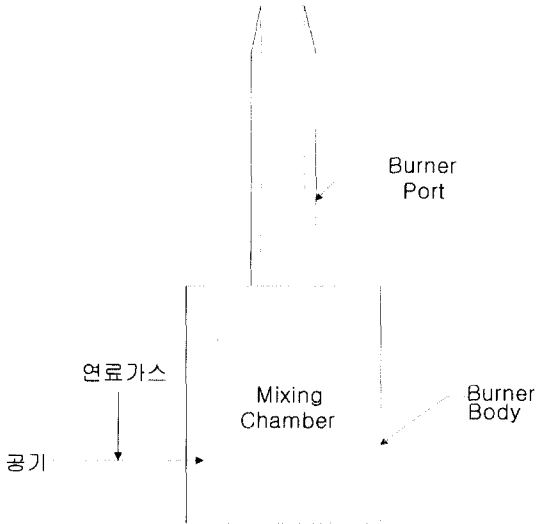


그림 1. 버너 세부도.

미소 유량(0.02~0.3 l/min)을 측정할 수 없어, 미소 유량은 버블 미터(bubble meter)를 이용하여 압력 대 유량곡선을 만들어 유량 관계식을 구하였다.

연료가스와 공기는 버너의 혼합실(mixing chamber)로 주입시킬 때 수직으로 혼합되어 버너에 유입되도록 유량계를 설치하였다. 연료가스/공기 흐름을 이런 방법으로 주입시키지 않으면 가스와 공기가 불완전하게 혼합되어 버너 포트에서 화염이 뒤틀리는 현상이 나타나면서 화염이 요동하였다. 또한 유량이 오리피스에서 화염 선단까지 도달하는 시간을 줄이기 위해 그림 1와 같이 버너 혼합실의 내경 50 mm, 높이 150 mm로 제작하였으며 그 위에 길이 210 mm, 직경 7.1 mm인 버너 포트를 장착하여 각 가스의 화염 특성을 실험하였다. 버너 포트 위에서 재순환(recirculation)이나 포트가 가열되어 화염 성질이 변하거나 다른 장치에 의해 화염에 영향을 미치는 효과를 배제하기 위해 버너 포트 선단을 테이퍼(taper) 형태로 만들었고 보염기는 설치하지 않았다.

4. 실험 결과 및 고찰

연료가스 호환성 실험에서는 대상 연료가스의 유량을 조절하여 입열량과 이론 공기 요구량을 변화시키며 역화, 비화, 황염이 생성되기 시작하는 영역들을 관찰하였다. 본 실험을 수행하는 과정에서 화염의 비화 현상은 정확하게 관찰할 수 없었다. 따라서 현재 설치된 버너 시스템에서는 화염의 비화로 인하여 버너 포트(burner port) 위에서 꺼지는 현상이 발생되어 비화염보다는 버너 포트에 화염이 완전히 부착되지 못하고 흔들리는 불

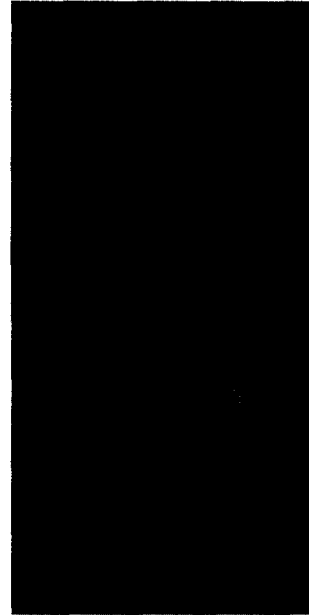


사진 1. 안정한 화염(burner port 7.1 mm).

안정한 화염(unstable flame) 조건을 비화현상에 대응시켰다. 화염의 역화(flash back) 현상은 내부 화염(inner cone)이 버너 포트 아래로 완전히 내려갔을 때를 역화 현상이 일어나는 기준으로 삼아 실험을 수행하였다. 노란 불꽃(yellow tip)의 측정은 실험 초반부에 570 nm~575 nm의 노란색 파장대를 선택적으로 흡수하는 광학 필터를 사용하여 측정하고자 하였으나 직접 눈으로 측

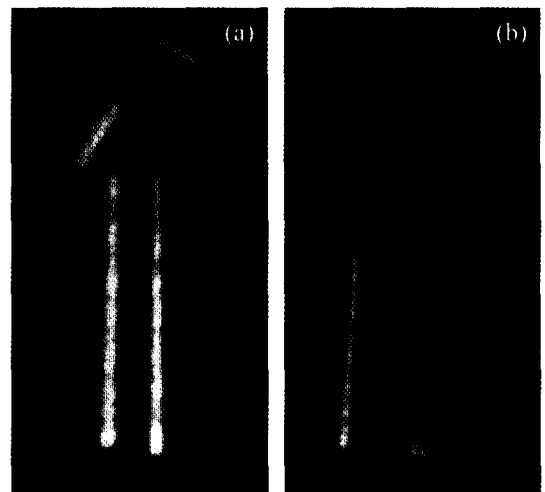


사진 2. 역화, 비화 화염(burner port 7.1 mm).

(a) 역화 직전의 뒤틀린 화염(tilted flame) (b) 비화직전의 불안정한 화염

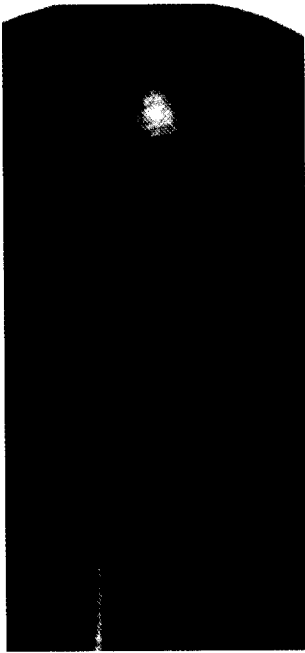


사진 3. 화염.

정하여 노란 불꽃의 발생여부를 감지하는 것보다 훨씬 감도가 떨어져 노란 불꽃도 직접 시각적으로 측정하였다. 사진 1은 안정한 예혼합 화염(stable flame)을 나타낸다. 사진 2(a)는 역화가 발생하기 바로 전 뒤틀린 화염(tilted flame)을 사진으로 촬영한 것이고, 사진 2(b)는 비화 현상이 발생하기 바로 전 불안정한 화염(unstable flame)을 촬영한 것이다. 사진 3은 화염 현상을 사진으로 촬영한 것이다.

수소가 첨가된 혼합가스에서 안정된 화염 영역을 찾는 실험을 수행하는 도중 정상적인 원뿔형 화염과는 다른 삼각형, 사각형, 오각형, 육각형의 불안정한 다각 화염(polyhedral flame)을 관찰할 수 있었으며, 이런 다각 화염 중에서도 오각형, 육각형 화염이 지배적으로 나타나는 것을 관찰할 수 있었고 사진 4는 그 한 예이다⁷⁾.

동일한 버너에서 연료를 교환하여 사용할 수 있는 조건을 고찰하기 위하여, 현재 국내에서 사용중인 천연가스의 연소 다이어그램(combustion diagram)을 일차적으로 작성하였다. 천연 가스에 대하여 도시된 운전 조건에서 가스와 공기의 압력을 각각 계산하여 이것들을 나머지 실험 가스에 모두 대응시켜 천연가스와 동일한 압력 범위에서 실험 가스들이 어떠한 화염 영역에 존재하는지 관찰하였다. 유량대신 압력으로 계산한 이유는 현재 사용중인 대부분의 가스기기들이 출구 압력을 기준으로 유량이 조절되고 있기 때문에 본 논문에서도 압력을 기

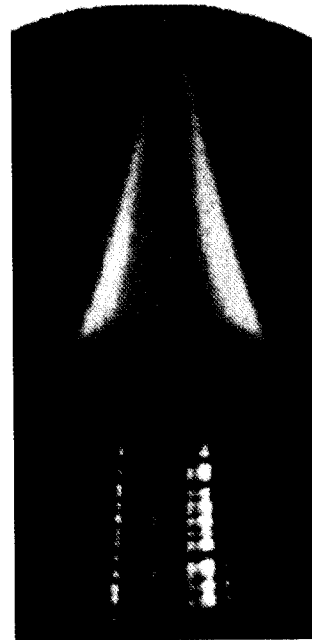


사진 4. 다각화염(polyhedral flame).

준으로 택했다. 이렇게 계산된 각 가스의 운전 조건을 연소 다이어그램으로 표현하여 기준 천연 가스의 운전 조건과 비교할 수 있도록 하였다.

그림 2는 국내에서 사용중인 천연가스의 화염 특성을 연소 다이어그램을 통하여 나타낸 것으로 고발열량의 탄화수소는 연소 속도가 느리므로 낮은 입열값에서 역화 현상이 발생하는 것을 관찰할 수 있다. 그림 2에는 안전한 화염 영역에서 통상적으로 버너를 운전할 때 버너에서 혼합될 수 있는 가스/공기 혼합비의 한 곡선을 천연 가스에 대해서 설정하였고, 이 곡선을 이용하여 동일한 압력 조건으로 대체 연료 가스/공기를 혼합하여 연

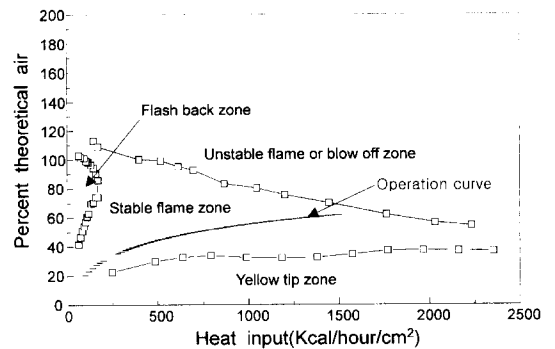


그림 2. 기준 천연 가스의 연소 diagram 및 운전 조건.

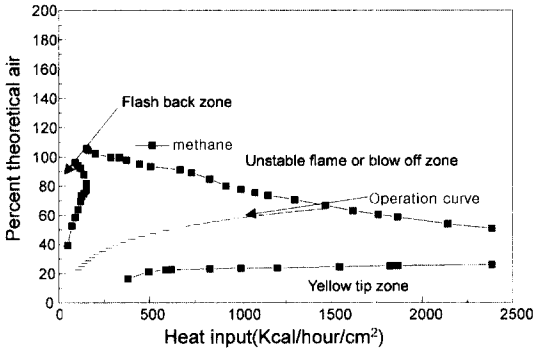


그림 3. 메탄의 연소 다이어그램과 천연 가스와 동일한 조건에서의 운전 상태.

소시커 가스들의 화염 특성 및 호환 가능 조건을 조사하는 기준으로 택했다. 그림 3은 메탄의 연소 다이어그램으로 천연 가스와 동일한 압력 조건을 메탄에 적용시킬 때 그림 3과 같이 메탄은 안정한 화염영역내에 존재하므로 동일한 연건에서 메탄은 천연가스와 호환 가능함을 관찰할 수 있었다. 합성석탄 가스의 화염 특성으로 관찰하면 그림 4와 같은 연소 다이어그램을 얻을 수 있으며 역화 영역이 탄화수소 계열의 가스들 보다 상당히 높은 입열값까지 확장되고 있음을 확인할 수 있고 비화 영역도 실험한 모든 가스 중 가장 높은 이론 공기량 퍼센트에 대응함을 관찰할 수 있었다. 따라서 수소와 일산화탄소가 주성분인 저발열량 석탄가스는 천연 가스와 메탄과는 상이한 화염 특성을 가지고 있다고 할 수 있다. 연소 속도가 빠르기 때문에 천연 가스와 메탄 가스 보다 역화 현상이 높은 입열값까지 나타나고 있으며, 비화 현상은 이들 보다 높은 공기/가스 혼합비에서 발생하여 비화가 비교적 발생하지 않는 것을 관찰할 수 있다. 또한 석탄가스는 발열량도 적을 뿐만 아니라 비중도 적으므로 천연가스와 동일한 운전조건을 적용할 때 운전곡선이 가

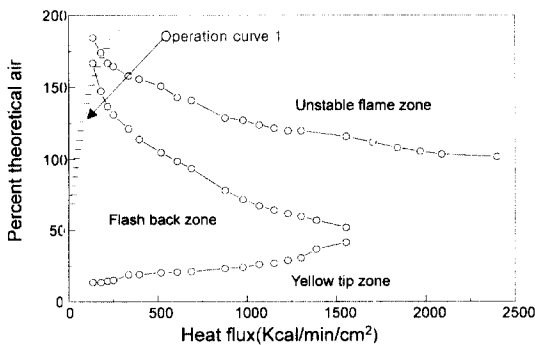


그림 4. IGCC 생성 가스의 연소 다이어그램과 천연가스와 동일한 조건에서의 운전 상태.

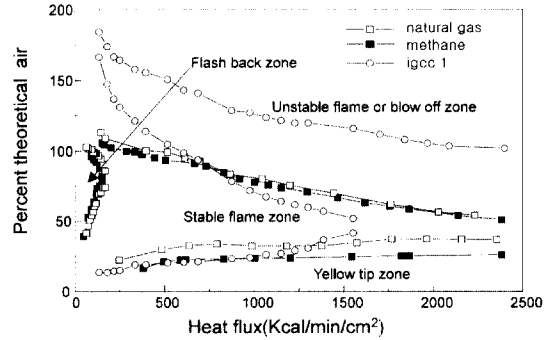


그림 5. 천연가스, 메탄, IGCC 가스의 연소 다이어그램.

파르게 상승하여 호환이 되지 않음을 알 수 있다.

그림 5는 천연 가스와 메탄, IGCC 생성 가스의 화염 특성을 비교하기 위해서 각 가스의 연소 다이어그램을 하나로 나타내었다. 그림에서처럼 천연 가스와 메탄의 화염특성은 비슷하지만 IGCC 생성 가스는 이들과 상이한 것을 관찰할 수 있다. IGCC 생성 가스의 역화 현상이 천연 가나 메탄 가스의 안정한 화염 영역 전체에 걸쳐 있어 동일한 연소기에서 호환이 불가능한 것을 알 수 있다.

5. 결 론

화염의 특성 및 동일 버너에서 연료가스간 상호 호환성을 관찰하고자 현재 국내에서 사용중인 천연가스를 기준으로 메탄 및 석탄가스를 대상으로 하여 화염특성을 비교검토하였다. 이상의 실험결과로부터 메탄을 주성분으로 하는 고발열량 가스들(천연가스, 순수 메탄)의 화염 특성은 본 연소기에서 비슷한 성질을 나타내고 있어 호환이 가능하며, 이들 모두가 역화가 일어나기는 어려운 반면 비화 현상이 일어날 가능성이 가스 보다 높다. 반면에, CO/H₂를 주성분으로 하는 저 발열량의 석탄 가스는 수소뿐만 아니라 일산화탄소의 화염 속도가 다른 탄화수소의 화염 속도 보다 상대적으로 크기 때문에 역화가 발생하는 영역이 다른 가스들에 비해 대단히 큰 반면, 비화 현상이 일어날 가능성이 가장 낮고 고발열량의 탄화수소 계열의 가스들과 호환이 불가능하다. 따라서 결론적으로 천연가스를 메탄으로 대체할 경우는 아무문제가 없으나 석탄가스로 대체할 경우는 버너의 운전조건 내지는 설계를 달리해야 함을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 고등기술연구원 위탁과제 "석탄가스화기

운전기술 및 IGCC 부분 요소기술 개발"의 일환으로 또 한국가스공사가 연구개발원 연구생 파견 프로그램으로 수행된 연구입니다.

참고문헌

1. Knoy, F.: "Combustion Experiments with Liquefied Petroleum Gases", Gas, Vol. 17, pp. 14-19, (1941).
2. American Gas Association: "Graphic Approach to the Problem of Interchangeability", AGA Proc. pp. 38-47, (1953).
3. Weaver, E.R.: "Formulas and graphs for representing the interchangeability of fuel gases", Journal of Research of the NBS, Vol. 46, No. 3, (1951).
4. Dutton, B.C.: "Interchangeability Prediction: The Framework for a new approach", Journal of the Institute of Energy, Vol. 12 No. 409, pp. 225-229, (1978).
5. 한정옥, 유현석: "천연가스 예혼합 화염에 관한 연구", 한국가스공사 연구 개발원, 12, (1994).
6. Kim, H.T.: "Temperature and particle size Effect of Sodium Bicarbonate Inhibition of Methane/Air Flames", M.S. Thesis in Fuel Science, Pennsylvanis State University, (1983).
7. Gaydon, A.G. and Wolfhard, H.G.: Flame, Their Structure, Radiation and Temperature, 4th edn, Chapman and Hall, London, UK, (1979).