

저 발열량 석탄가스 연료의 화염 안정성 및 NO_x 발생 특성에 관한 실험적 연구

이 찬 · 김용철

수원대학교 기계공학과

Experimental Study on the Flame Stability and the NO_x Emission Characteristics of Low-Btu Coal Gas Fuel

Chan Lee and Yong Chul Kim

Department of Mechanical Engineering, University of Suwon

요 약

저발열량 석탄가스의 thermal/fuel NO_x 생성 특성과 화염 안정성을 규명하기 위한 실험적 연구를 수행하였다. 저발열량 합성 연료 가스는 일산화탄소, 수소, 질소 및 암모니아를 천연가스 연료와 동일한 입열량을 가지도록 혼합하여 만들었고, 합성가스는 평면 화염 버너에 공급하여 태웠다. 특정한 합성가스에 대해 당량비를 변화시켜 가며, 비화 또는 역화에 의한 화염안정성을 규명하였고 안정된 화염 영역을 정의하였다. 저발열량 합성가스의 연소시 발생하는 thermal 및 fuel NO_x를 측정하여 천연가스 연소시의 경우와 비교하였다.

Abstract— Experimental studies are conducted to investigate the flame stability and the thermal/fuel NO_x formation characteristics of the low calorific value (LCV) coal derived gas fuel. Synthetic LCV fuel gas is produced by mixing carbon monoxide, hydrogen, nitrogen and ammonia on the basis that the thermal input of the syngas fuel into a burner is identical to that of natural gas. The syngas mixture is fed to and burnt with air on flat flame burner. With the variation of the equivalence ratio for a specific syngas fuel, flame behaviors are observed to identify the flame instability due to blow-off or flashback and to define stable combustion range. Measurements of NO_x content in combustion gas are made for comparing thermal and fuel NO_x emissions from the LCV syngas combustion with those of the natural gas one.

1. 서 론

현대산업사회의 주요한 에너지형태인 전기는 화력, 풍력, 수력, 원자력 또는 태양열 등을 이용하여 발전이 가능하므로, 그 개선에 대한 연구도 활발히 진행되어져왔다. 앞서 열거한 중에서도 주 발전수단으로서 화력발전 시스템이 많은 부분을 담당하고 있으며, 이러한 화력발전시스템의 주 에너지원으로는 석유나 천연가스연료를 사용하여 왔다. 그러나, 최근 에너지기술개발 동향을 살펴볼 때 석유나 천연가스등은 자원의 고갈이나. 가격문제 그리고 그에 따른 수급의 유연성 또는 자원의 재활용 문제 등을 고려하여 대체연료로서 저 발열량 가스연료의 활용성에 대한 연구가 활발히 진행중이다. 대체연

료로 고려될 수 있는 저 발열량 가스연료의 생성 혹은 포집방법에 따른 종류를 보면, 먼저 석탄을 가스화 반응에 의하여 가연성 가스를 생성시키는 석탄가스화, 생물학적 반응을 이용한 생물자원 가스화, 매립지에서 생성되는 가연가스를 포획하여 이용하는 매립지 가스포획, 미반응 연료전지 양극가스, 기타 각 산업공정에서 발생되는 각종 부생가스를 포획하는 방법 등이 있다¹⁾.

이러한 다양한 저 발열량 가스들은 기존의 석유나 또는 천연가스 연료에 의한 발전시스템에 그대로 적용되어 사용되는 데에는 무리가 따르는데 이는 석유나 천연가스에 비해서 저 발열량 가스들의 연소특성들이 매우 다를 수 있기 때문이다. 특히 최근 천연가스연료의 대체 연료로서 석탄가스연료의 활용성에 대한 연구가 활

발히 진행되고 있는데, 이의 일환으로 차세대 화력발전 시스템으로 각광받고 있는 석탄가스화 복합발전(IGCC: Integrated Gasification Combined Cycle)에 대한 연구가 진행중이며, 이러한 석탄가스화 복합발전 즉 IGCC는 석탄가스생성을 위한 석탄의 가스화 공정을 복합발전용 가스터빈시스템과 연계하여 낮은 연료가격과 발전단가로 고효율의 성능과 우수한 환경성을 구현할 수 있다는 장점을 가진다. 우선 IGCC가 기존의 천연가스 또는 경유를 이용한 복합발전방식과 다른 점은 가스화공정, 가스정화공정, 연소공정 및 가스터빈공정 그리고 증기터빈공정으로 구성되어 있다는 점이며, 또한 IGCC 복합발전 시스템의 실용화개발을 위해서는 각각의 하부 공정들간의 개발과 그에 따른 연계문제가 매우 중요한 기술적 과제이다.

IGCC 연계문제 중에서도 가장 중요한 문제는 저 발열량의 석탄가스를 가스터빈 연소기에서 얼마나 효율적으로 안정되게 태우느냐와 이때 발생할 수 있는 환경오염물질을 어떻게 최소화하는가 하는 점이다. 그러나 기존의 가스터빈은 주로 천연가스를 태우도록 설계되어 있으므로, 석탄가스 연료만을 대상으로 하는 특정 가스터빈 모델의 개발은 현실적으로 어려움이 있다. 이러한 이유로, 대부분의 가스터빈 제작사들은 천연가스를 이용하여 충분히 검증된 가스터빈에 천연가스 연소기 대신 석탄가스를 태울 수 있는 저 발열량 연료 연소기를 대체하는 방안을 IGCC 가스터빈 개발에 적용하고자 노력하고 있다¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾.

IGCC용 석탄가스 연료는 석탄의 가스화방식(습식, 건식), 산화제의 종류(산소, 공기), 탄종 및 가스화기 운전조건(압력, 온도, 석탄/산화제 비율 등)과 가스정제공정의 선택에 따라 그 특성이 좌우되나, 어떠한 경우에도 가스터빈의 연료로 사용되는 석탄가스의 주성분은 CO, H₂이고, 산화제가 공기인 경우는 이외에 N₂도 주성분으로 작용한다. 또한 석탄가스의 발열량은 천연가스에 비해 약 1/4-1/5 수준(산소가 산화제인 경우), 또는 약 1/10(공기가 산화제인 경우) 수준의 발열량을 가진다. 연료 중에 H₂의 함량이 상대적으로 높은 관계로 매우 높은 화염속도 및 화학반응률을 가진다. 또한 단일화염온도도 천연가스에 비교할 때 약 200°C 이상 높은 특성을 가진다. 이러한 석탄가스 연료의 특성으로 인해, 석탄가스는 예혼합 상태에서 화염을 안정화시키기 어렵다. 특히 높은 화염전파속도로 인해, 연료와 공기가 예혼합 영역에서 균일하게 혼합되기 전에 화염이 불규칙적으로 형성되게 된다⁶⁾.

이러한 현상은 화염의 불안정성뿐만 아니라 국부적인 화염온도의 증가를 가져오며, 그에 따라 환경오염물질인 NO_x의 발생량 증가도 수반된다. 또한 석탄가스에

함유된 최대 1000~2000 ppm 정도의 NH₃가 야기 시키는 fuel NO_x의 발생도 천연가스 가스터빈 연소기에서는 볼 수 없는 심각한 환경 문제이다. 그러므로, IGCC용 예혼합 석탄가스 연소기의 개발을 위해서는, 석탄가스 연료의 기초 연소 및 NO_x 배출 특성을 파악할 필요가 있으며, 이러한 기초자료의 확보는 향후 이루어질 IGCC용 석탄가스 연소기의 설계 및 성능시험에 크게 도움이 되리라 보여진다.

그러므로, 본 연구에서는 석탄의 가스화 반응에 의해 생성된 가연성 석탄가스연료의 천연가스 대체 연소 시 예상되는 예혼합 연소 특성 및 화염안정성 그리고 이때 발생하는 NO_x의 배출 특성과 그 저감 방법에 대한 실험적 연구를 위하여 다양한 연료 유입이 가능하도록 자체 제작한 소형의 예혼합 평면화염버너(premixed flat flame burner) 시스템을 구성하였고, 연료/공기 혼합비를 변화시켜 가며 석탄가스 연소시의 화염거동, 화염안정성을 측정하고자 한다. 더 나아가 석탄가스 연소시의 thermal 및 fuel NO_x 발생 메커니즘을 규명하고자 하며, NO_x 저감을 위한 기초연구를 수행하고자 한다.

2. 실험장치의 구성

Fig. 1에 나타나 있는 것은 본 실험의 구성 계통도이다. 그림과 같이 본 실험에서는 석탄가스연료를 모사하기 위하여 주성분인 CO, H₂와 CH₄, N₂, NH₃ 등의 순수가스를 입력용기에 각각 준비하여 각 성분들을 합성할 수 있도록 구성하였고, 공기의 공급은 공기압축기를 사용하였다. 각각의 가스의 압력 제어는 압력조절기를 이용하여 조절하고, 유량은 공기유량계를 사용하여 조절하였으며 부식성이 강한 NH₃는 전용 유량계로 조절하였다. 가스의 정확한 유량조절을 위해 각 가스에 대해서 유량 보정장치(wet-gasmeter)를 사용하여 공기유량계의 눈금과 실제유량을 보정하였다.

다음으로 각각의 가스들을 합성하여 석탄가스를 모사할 수 있도록 혼합탱크(mixing tank)를 설치하였으며, 충분한 혼합이 가능하도록 탱크내의 구조는 입구와 출구 중간에 판을 엮갈려 구성하였다. 그리고 합성된 가스(syngas)가 버너에서 혼합탱크 내부로 불꽃이 역화(flash-back)되는 것을 방지하기 위하여 그 사이에 역화 방지 장치를 설치하였다¹⁰⁾.

버너의 구조는 Fig. 2와 같은 형태이며, 버너출구에는 flat flame을 형성할 수 있도록 다공성매질인 porous material을 설치하였다. 다공성매질 바로 아래에는 장시간 실험시 다공성매질의 누적가열로 인한 조기 역화의 가능성을 줄이기 위해 냉각장치로 1/8 인치 stainless steel tube를 이용한 수냉방식을 적용하였다. 그리고 화염의 외

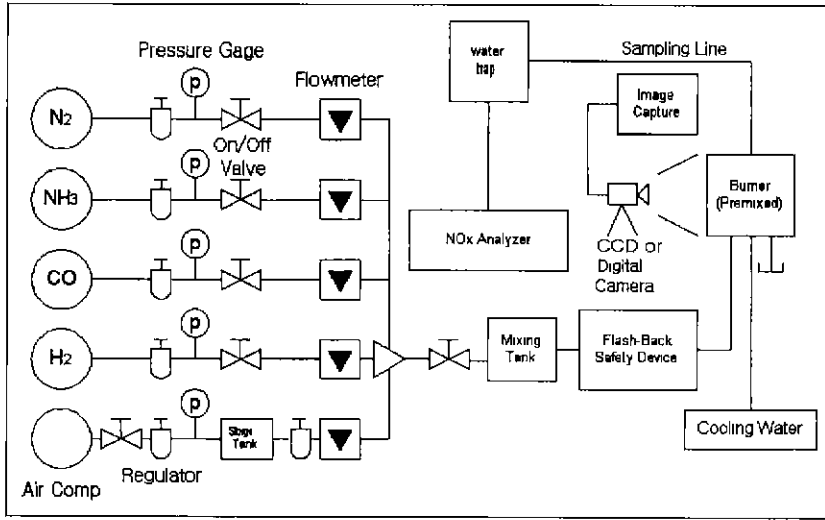


Fig. 1. Schematic Diagram of Combustion Experiment Apparatus.

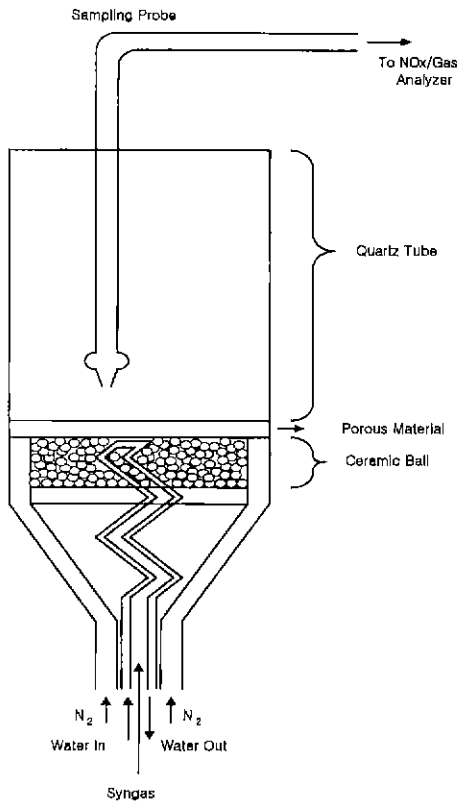


Fig. 2. Flat Flame Burner.

기에 의한 영향을 줄이기 위하여 화염 테두리에 N₂를 이용한 가스막(gas shield)을 형성할 수 있도록 버너의 본

체는 이중의 관 구조를 가지도록 하였다. 또한 유입되는 혼합기의 속도분포 균일성을 위해 버너 하단부는 디퓨저 형태로 설계하였다⁷⁾.

화염의 안정성과 환경오염물질인 NO_x의 측정을 위해 각각 CCD/디지털 카메라를 이용하여 화염사진을 획득했고, NO_x 분석장치를 통해 NO_x의 배출량을 측정하였다. NO_x 분석장치의 calibration에는 제로가스로 N₂를 그리고 표준가스로는, 본 실험의 최대 예측 배출량을 고려하여, 800 ppm N₂ balance NO 가스를 사용하였다. 또한 NO_x 측정시 외기의 유입에 의한 영향을 배제하기 위해 추출관(sampling probe) 삽입부위를 충분히 보호할 수 있도록 석영관을 설치하였다.

3. 실험결과 및 분석

3-1. 천연가스에 의한 기준실험 및 석탄 가스 연료 유량의 결정

석탄가스 연소 실험에 들어가기에 앞서 먼저 가스터빈의 일반적인 연료가스로 사용되고 있는 천연가스를 이용한 기준실험을 실시하였다. 우선 천연가스의 투입량을 자체 제작된 소형의 예혼합 평면화염버너(premixed flat flame burner)의 크기를 고려하여 약 0.48 l/min으로 투입하였으며, 공기의 투입량을 조절하면서 화염의 안정성 영역을 관찰하고 이때의 화염형태를 카메라를 이용하여 촬영하였다. 그리고 화염안정영역 내에서의 NO_x 배출량은 공기의 유량조정이 끝나고 유량계 자체의 안정성이 확보된 후 일정한 시간이 경과된 후 분석기의 출력 데이터가 일정하게 유지되는 경우를 측정 데이터로 기

표 1. 천연가스연료조성.

성분	Vol %
CH ₄	89.8
C ₂ H ₆	7.5
C ₃ H ₈	2.0
others	0.7

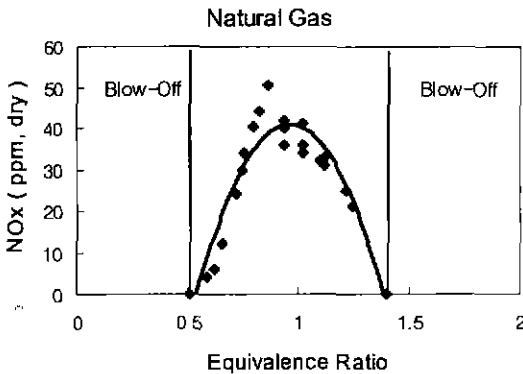


Fig. 3. 천연가스연료의 실험결과.

특하였다. 이와 같이 측정된 NOx 발생량 데이터를 당량비(equivalence ratio)에 대한 그래프로 표현하였으며, 표 1은 기준실험에 사용된 천연가스의 조성이다.

Fig. 3에서 보여지듯이, 화염의 안정영역은 수직선의 중앙부이며 공기의 투입량이 많은 저 당량비 영역과 공기의 투입량이 적은 고 당량비 영역에서 비화(blow-off) 현상이 발생하고 있고, 당량비가 1근처인 영역에서는 NOx의 발생이 최대를 나타내고 있다.

천연가스 연료를 사용하는 버너에 석탄가스 연료를 대체연료로 쓰기 위해서는 연소기로의 입력량(thermal input)이 같아야 하므로, 앞서 실험한 천연가스를 이용한 기준실험에서 쓰인 연료가스와 동일한 입력량을 갖도록 석탄가스(합성가스) 유량을 결정하였다. 표 2는 발열량을 나타낸 것이고, 이것을 이용하여 식(1)로부터 합성가스 유량을 결정하였으며, 그 결과는 표 3에 나타나 있다.

$$\text{입열량} = m_{CG} \cdot LHV_{CG} = m_{NG} \cdot LHV_{NG} \quad (1)$$

이때 m은 연료유량을, LHV는 연료의 저위발열량을 나타내며, 하첨자 CG, NG는 각각 석탄가스, 천연가스를

표 2. 각 가스의 발열량.

Gas	LHV (cal/liter)
CO	2812.13
H ₂	2402.77
NG	9487.30

표 3. 합성가스연료조성(unit : l/min).

Syngas #.	CO	H ₂	CG
1.(CO : 91%)	1.51	0.14	1.64
2.(CO : 82%)	1.36	0.30	1.66
3.(CO : 70%)	1.18	0.51	1.69

의미한다.

3-2. 합성가스연료에 의한 화염안정성 및 thermal NOx 측정결과

본 실험의 첫 단계로 먼저 결정된 3가지 경우의 합성가스 연료 #.1, #.2, #.3 가스 각각에 대하여 화염의 안정영역을 찾아내고, 이때 발생하는 NOx 발생량 측정 결과를 Fig. 4~Fig. 6에 나타내었다. 먼저 #1 가스의 경우 화염안정영역이 천연가스실험에 비하여 좁아져있는 것을 알 수 있는데, 이것은 서론에서 기술한 바와 같이 합성가스 연료의 성분 중 다량의 H₂로 인해 야기된 높은 화염속도 때문인 것으로 보여진다. 또한 이러한 높은 화염속도로 인해 고 당량비 영역에서는 천연가스실험의 경우 볼 수 없었던 역화현상이 나타나고 있다.

이것은 천연가스실험에서의 고 당량비 영역에서 blow-off 현상이 나타난 경우와는 달리 높은 화염속도 때문에 실제 유량이 적어지는 고 당량비 영역에서 오히려 역화현상이 발생하는 것이다 또한 저 당량비 영역에서는 비화되는 화염의 형상이 도립 화염형상을 띠고있는 것을 관찰할 수 있었는데(plate 1 참조), 이 현상 또한 연료가스 중 H₂의 높은 화염속도에 의한 것으로 해석된다.⁽⁸⁾⁽⁹⁾ NOx 배출특성은 당량비 1인 영역에서 최대 200 ppm의 높은 배출특성을 나타내고 있으며, 이러한 결과는 천연

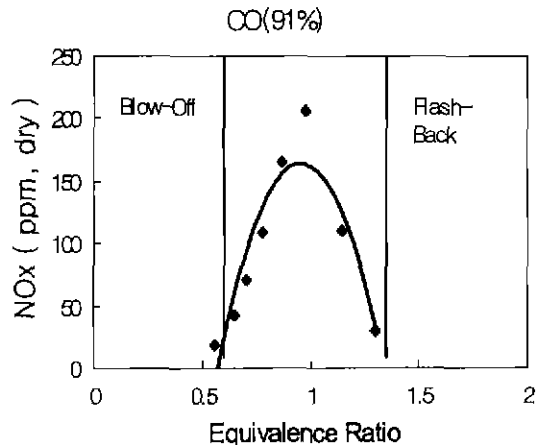


Fig. 4. 합성가스 #.1의 당량비에 따른 thermal NOx 및 화염안정성 특성.

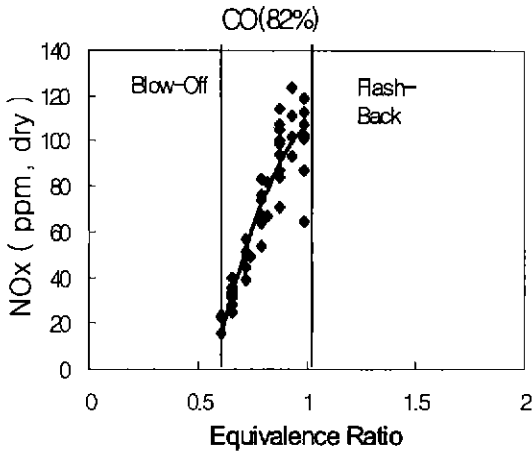


Fig. 5. 합성가스 #.2의 당량비에 따른 thermal NOx 및 화염안정성 특성.

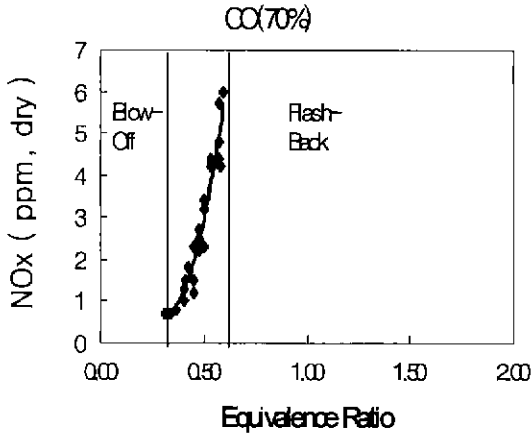
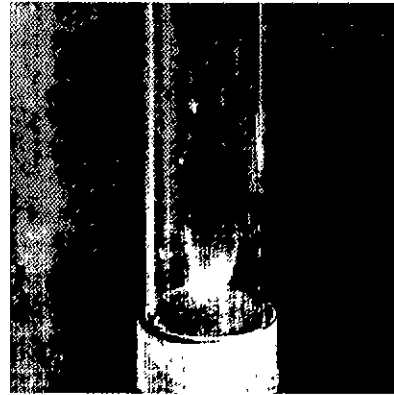
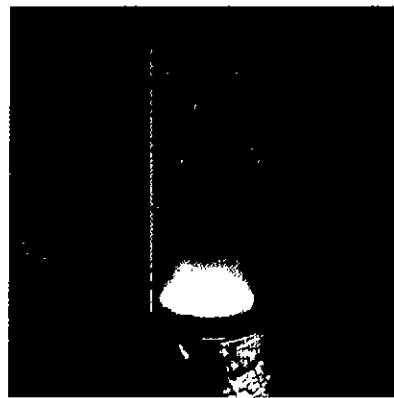


Fig. 6. 합성가스 #.3의 당량비에 따른 thermal NOx 및 화염안정성.

가스에 비해 합성 석탄가스가 화염온도가 높기 때문이다^[10].
 다음으로 #.2 합성가스의 경우로서, Fig. 5에서 보여 지듯이, 이 경우 화염의 안정영역중 고 당량비쪽 영역 이 매우 줄어들어 결과적으로 #.1 가스에 비하여 화염 안정영역이 상당히 좁아지는 양상을 보인다. 이는 #.2 가스의 연료가스 내 H₂ 함량증가로 인해 더욱 높은 화염 속도를 나타내고, 이에 따라 #.1 가스의 경우보다 저 당량비 범위에서 역화가 발생하기 때문이며, 비화염영역의 저 당량비 영역에서는 도립화염의 양상이 보다 뚜렷한 경향을 보여주었다. #2와 #1 가스의 NOx 배출특성을 비교하여 보면, #2 가스가 #1 가스의 경우 보다 동일 당량비 조건에서 현저히 NOx 배출량이 줄어든 것을 알 수 있는데, 이러한 현상의 원인은 #2 가스의 경우 H₂의 함량증가로 인해 보다 높은 반응률을 갖게되고 이에 따라



flash-back



stable flat flame



blow-off

Plate 1. 합성가스 #.1의 당량비에 따른 화염형상.

가스가 통과하는 화염대 두께가 작아지고 이로 인해 가스가 화염영역을 통과하는 시간이 매우 짧아져, NOx 발

생의 중요한 요인중 하나인 화염영역 내에서의 체류시간이 적어지는 것에 그 이유를 들 수 있다^[11]. 더 나아가 H₂의 함량 증대로 인해 합성가스의 화염 안정영역이 당량비 1 이하의 영역으로 줄어들는 것을 볼 수 있으며, 이로 인한 화염온도의 저하로 인해 NO_x 발생량이 줄어드는 경향도 Fig. 5에서 볼 수 있다.

이러한 H₂의 함량 증가로 인한 화염속도 증가에 따른 화염안정 범위감소 및 NO_x 배출량의 감소는 #3 가스의 경우(Fig. 6 참조)에서 보는바와 같이 더욱 뚜렷이 나타나고 있다. 또한 #3 가스의 경우에는 도립화염의 양태가 더욱 뚜렷하였으며, 화염안정 영역이 전체적으로 저당량비 범위로 이동되는 것을 볼 수 있었다. 이러한 결과는 석탄가스를 천연가스 연소기 버너에 대체연료로 사용하고자 할 때, 연료내 수소의 함량이 증가할수록 기존의 천연가스 버너로는 석탄가스를 연소시킬 수 있는 운전조건이 매우 국한됨을 의미한다.

결과적으로, 앞서의 3가지 합성가스 실험들에서 관찰되듯이, 석탄가스를 천연가스와 동일 입열량의 조건으로 태우는 경우에는, 합성가스의 H₂ 함량이 증가될수록 화염안정구간이 저 당량비 범위로 매우 축소됨을 알 수 있었고, 이로 인해 화염온도 및 고온영역에서의 체류시간도 줄어들어 thermal NO_x 발생량도 급격히 감소됨을 알 수 있다.

3-3. NH₃가 첨가된 합성가스연료의 fuel NO_x 측정결과

다음 단계의 실험으로 연료가스 내 NH₃ 포함에 따른 NO_x 발생특성을 살펴보았다. NH₃의 첨가량은, 실제 IGCC용 석탄가스 연료의 유입조건을 고려하여^[13], 3가지 합성가스 연료에 대해 각각 2485 ppm, 1898 ppm, 1280 ppm

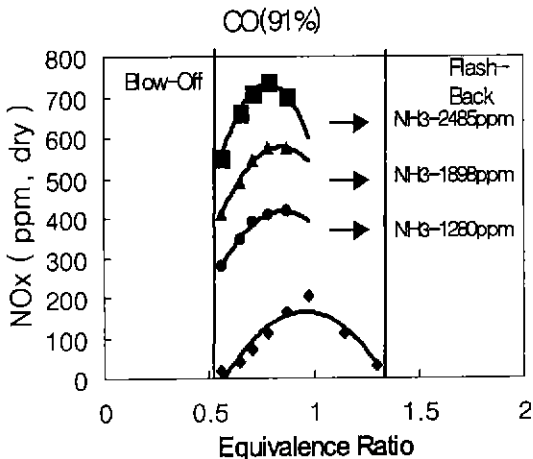


Fig. 7. 합성가스 #.1의 NH₃ 첨가에 따른 NO_x 배출 및 화염안정성 특성.

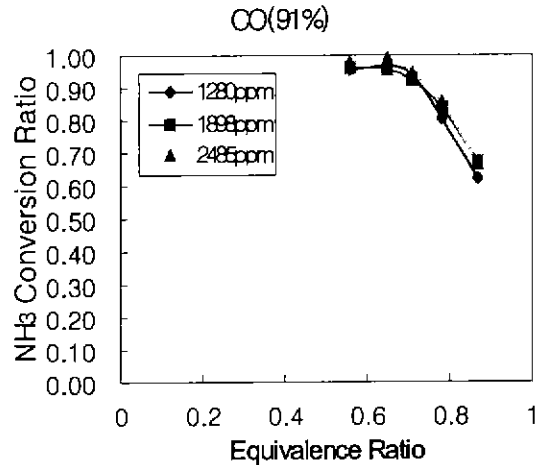


Fig. 8. 합성가스 #.1의 NH₃ 전환율.

ppm으로 첨가하여 총 9가지 경우를 실험하였다. 우선 첫째로 #.1 가스에 NH₃를 첨가하였을 경우를 Figs. 7과 8에 나타내었다.

이때 NH₃의 NO_x로의 전환율은 다음과 같이 환산하였다.

$$\text{Ammonia conversion to NO}_x = \frac{\text{Overall NO}_x - \text{Thermal NO}_x}{\text{NH}_3 \text{ in fuel gas}}$$

Fig. 7에서 보여지듯이, NO_x의 발생이 NH₃가 첨가되지 않았을 경우에 비해, 즉 thermal NO_x에 비해, 수백 ppm 이상 증가한 것을 볼 수 있다. 이는 NH₃를 첨가하여 발생한 fuel NO_x가 매우 심각한 NO_x 발생의 원인을 나타낸다. 또한 NO_x 발생의 최대점이 저 당량비 영역으로 이동한 것을 볼 수 있는데 여기에서 나타난 최대점은 thermal NO_x와 NH₃에 의한 fuel NO_x의 배출량을 합한 것이므로 실제 fuel NO_x의 최대 발생점은 약간 더 낮은 당량비 영역이다 이에 따라 fuel NO_x의 발생의 최대영역은 당량비 1 이하의 저 당량비 영역에서 발생하는 것을 알 수 있다. 그리고 이때 NH₃의 NO_x로의 전환율을 살펴보면, Fig. 8에서 보여지듯이, 당량비 0.6 범위에서 최고 90% 이상이고 고 당량비 영역으로 이동할수록 최저 60% 정도까지 낮아지는 것을 볼 수 있다.

다음으로 두 번째 가스연료의 경우를 Fig. 9에 도시하였으며, 역시 앞서와 비슷한 경향으로 NO_x 발생 최대점이 저 당량비 영역으로 이동한 것을 볼 수 있으며 그 발생량은 NH₃에 의한 fuel NO_x의 발생이 지배적인 영향을 끼치고 있으므로 순수히 thermal NO_x의 발생량의 차이만큼 줄어든 것을 볼 수 있다. NH₃의 NO_x로의

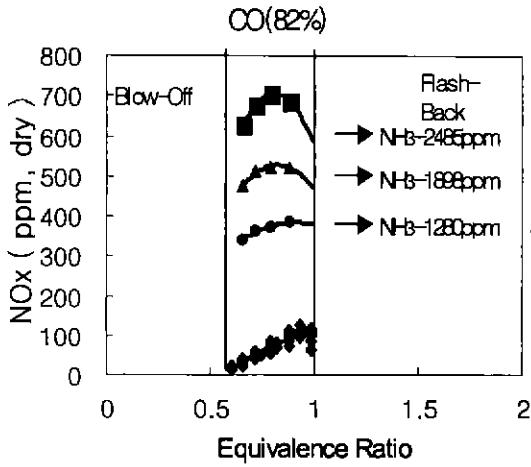


Fig. 9. 합성가스 #.2의 NH₃ 첨가에 따른 NOx 배출 및 화염안정성특성.

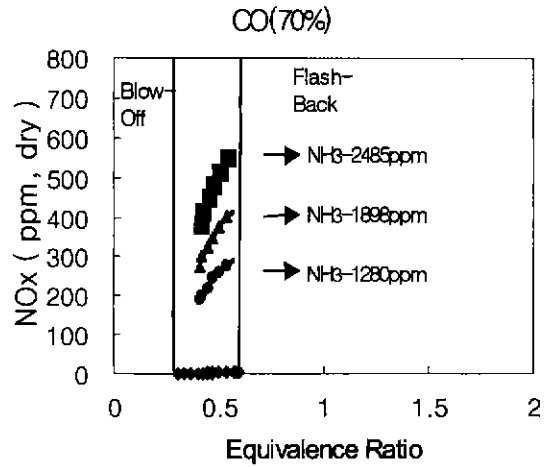


Fig. 11. 합성가스 #.3의 NH₃ 첨가에 따른 NOx 배출 및 화염안정성특성.

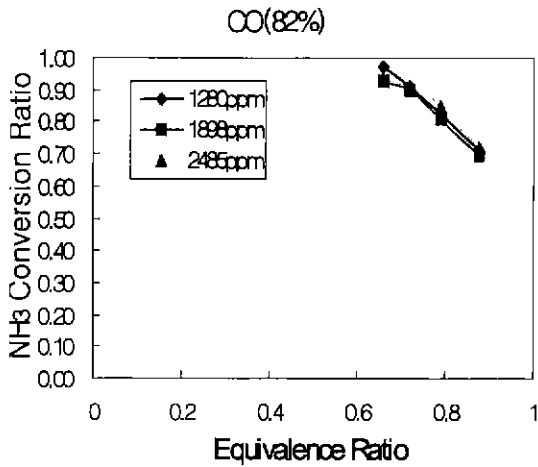


Fig. 10. 합성가스 #.2의 NH₃ 전환율.

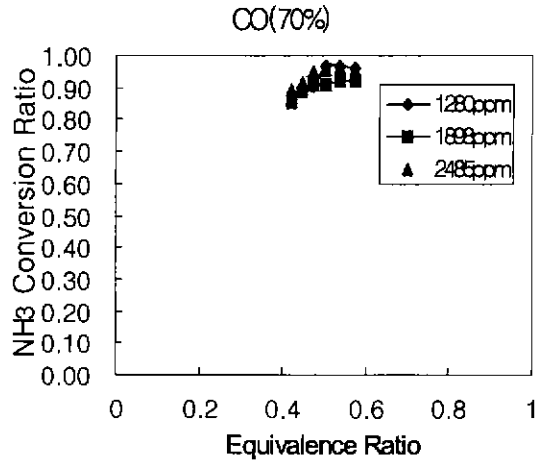


Fig. 12. 합성가스 #.3의 NH₃ 전환율.

전환율을 살펴보면, Fig. 10에서 보여지듯이, 최고 90% 이상 최저 70% 정도까지의 추세를 보이고 있다^[6].

그리고 마지막으로 #.3 가스에 NH₃를 첨가하였을 경우를 Figs. 11-12에 나타내었다. Fig. 11의 결과를 살펴보면 앞서의 #.1 가스에서 #.2 가스의 NOx 측정결과와 유사한 추세를 따른다고 볼 수 있고, 화염안정영역의 심한 축소와 #.3 가스의 자체 thermal NOx 발생량의 감소로 인하여 NOx 발생의 최대량은 100 ppm 이상의 차이를 나타내고 있다. 이에 따라 NH₃ 전환율의 변화폭도, Fig. 12에서 보여지듯이, 최고 90% 이상 최저 80%의 분포를 나타내고 있다.

또한 여기에 덧붙여 #.1, #.2, #.3 가스의 각각의 NH₃의 NOx로의 전환율을 전체적으로 비교하기 위하여 각

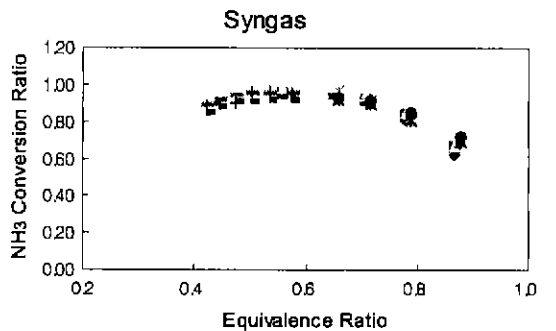


Fig. 13. 합성가스 #.1, #.2 및 #.3의 NH₃ 전환율.

경우의 전환율을 동일한 당량비 영역에 대해 Fig. 13에 도시하여 보았다. 이 그래프를 살펴보면, NH₃ 전환율이

가스의 종류에 상관없이 당량비에 따라 거의 일정한 경향을 보이고 있는 것을 알 수 있는데, 90% 이상의 전환율을 나타내고 있는 영역이 당량비 0.6 범위에서 이루어지고 있는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 결과는 전환율이 각 연료의 조건과는 무관하게 당량비에 따라 주로 좌우되는 것을 의미하며¹⁶⁾, 이러한 결과는 향후 이루어질 IGCC용 NO_x 저감형 예혼합 가스터빈 연소기 개발에 있어서 버너의 당량비 선정이 매우 중요함을 의미한다.

4. 결 론

저 발열량 석탄가스연료의 천연가스 대체성 여부를 화염안정성과 NO_x 발생특성 측면에서 평가하기 위한 기초적인 연소실험을 수행하였다. 우선적으로 천연가스연료의 입열량과 동일한 입열량을 가지도록 석탄가스연료의 투입량을 산정하였으며, CO/H₂ 비율이 9.0, 4.5, 2.5인 3가지 합성가스를 대상으로 고려하였다. 석탄가스 연료의 thermal NO_x 배출량은 당량비가 1 근처에서 최대치를 보이며, 화염안정영역은 연료 내 H₂의 함량이 증가될수록 역화현상으로 인해 당량비 1 이하의 영역으로 점차 좁아지는 양상을 보여준다. 석탄가스 연료에 NH₃를 첨가하였을 경우 NO_x의 발생량이 급격히 증가하는 경향을 보여주었으며, 이로 인해 석탄가스 연료의 연소시 fuel NO_x의 발생량이 thermal NO_x의 발생량보다 매우 커, fuel NO_x의 발생이 전체 NO_x 발생의 주원인을 알 수 있었다. 또한 NH₃의 NO_x로의 전환율은 연료가스의 종류에 관계없이 당량비에 대하여 일정한 경향을 가지는 것을 볼 수 있었고, 약 0.6의 당량비 영역에서 전환율이 최대치를 보여주었다.

후 기

본 연구는 에너지관리공단 R&D 본부의 '98 에너지기술 학술진흥사업(대체 에너지 분야)의 연구비 지원에 의해 수행되었음을 밝히며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Borman, G.L. and Ragland, K.W.: Combustion Engineering, McGraw-Hill (1998).
2. Kelsall, G.J., Smith, M.A. and Cannon, M.F.: "Low Emissions Combustor Development for Industrial Gas Turbine to Utilize LCV Fuel Gas", Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, vol. 116, 559 (1994).
3. Cook, C.S., Corman, J.C. and Todd, D.M.: "System Evaluation and LBTU Fuel Combustion Studies for IGCC Power Generation", Journal of Engineering for Gas Turbines and Power vol. 117, 673 (1995)
4. Dobbeling, K., Knöpfel, H.P., Polfke, W., Winkler, D., Steimbach, C and Sattelmayer, T.: "Low-NO_x Premixed Combustion of MBtu Fuels Using the ABB Double Cone Bunner (EV Bunner)", Transactions of the ASME vol. 118, 46 (1996).
5. Nakata, T., Sato, M., Ninomiya, T., Yoshine, T. and Yamada, M.: "Effect of Pressure on Combustion Characteristics in LBG-Fueled 1300°C-Class Gas Turbine", Transactions of the ASME vol. 116, 534 (1994).
6. Firstrom, R.M. and Westenberg, A.A.: Flame Structure, McGraw-Hill (1965).
7. 이용일: "격자형 다공질 연소기의 상, 하부 화염거동에 관한 연구", 한국과학기술원 박사학위논문 (1995).
8. Scholte, T.G. and Vaags, P.B.: "Burning Velocity of Mixtures of Hydrogen, Carbon Monoxide and Methane with Air", Combustion & Flame, vol. 3, 511 (1959).
9. 이성용: "연료가스의 화염 특성 및 가스 호환성에 관한 연구", 아주대학교 대학원 석사학위논문 (1997).
10. Lewis, B. and von Elbe, G.: Combustion. Flames and Explosions of Gases, 3rd ed., Academic Press (1987).
11. Kuo, K.K.: Principles of Combustion, John Wiley & Sons (1986).
12. Sato, M. *et al.*: "Coal Gaseous Fuel, Low Fuel NO_x Gas Turbine Combustor", ASME Paper no. 91-GT-384 (1991).
13. Lindstedt, R.P. and Selim, M.A.: "Reduced Reaction Mechanism for Ammonia Oxidation in Premixed Laminar Flames", Combustion Science & Technology, vol. 99, 277 (1994).