

한국에너지공학회(1999년도)
춘계 학술발표회 논문집 P89~93

저 발열량 가스 연료의 화염거동 및 NO_x 발생 특성에 관한 실험적 연구

김용철, 이찬
수원대학교 기계공학과

Experimental Study on the Flame Behavior and the NO_x Emission Characteristics of Low Calorific Value Gas Fuel

Yong Chul Kim* and Chan Lee

Dept. of Mechanical Engineering, Univ. of Suwon

ABSTRACT

Experimental studies are conducted to investigate the flame stability and the thermal/fuel NO_x formation characteristics of the low calorific value(LCV) gas fuel. Synthetic LCV fuel gas is produced through 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, and then the syngas mixture is fed to and burnt with air on flat flame burner. Flame behaviors are observed to identify flame instability due to blow-off or flash-back when burning the LCV fuel gas at various equivalence ratio conditions. Measurements of NO_x 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, and for analyzing ammonia to NO_x conversion mechanism. In addition, the nitrogen dilution of the LCV syngas is preliminarily attempted as a NO_x reduction technique.

1. 서론

최근 에너지 기술개발의 동향을 살펴볼 때 주 에너지원인 석유나 천연가스연료를 사용함에 있어 자원의 고갈이나, 가격문제 또는 자원의 재활용 문제 등을 고려하여 대체연료로서 저 발열량 가스연료의 활용성에 대한 연구가 활발히 진행중이다. 대체연료로 고려될 수 있는 저 발열량 가스연료의 생성 혹은 포집방법에 따른 종류를 보면, 먼저 석탄을 불완전연소하여 가연성 가스를 생성시키는 석탄가스화, 생물학적 반응을 이용한 생물자원 가스화, 매립지에서 생성되는 가연가스를 포획하여 이용하는 매립지 가스포획, 미반응 연료전지 양극가스, 기타 각 산업공정에서 발생하는 각종 부생가스를 포획하여 연료로 이용하기도 한다[1].

이러한 다양한 저 발열량 가스들은 기존의 석유나 또는 천연가스 연료에 의한 system에 그대로 적용되어 사용되는 데에는 무리가 따르는데 이는 석유나 천연가스에 비해서 저 발열량 가스들의 연소특성들이 매우 다를 수 있기 때문이다. 즉 발열량의 차이로 인한 연료유량의 변동, 반응물의 특성에 의한 상이한 연소특성 즉 화염안정성에 대한 문제 그에 따른 환경오염물질의 배출 특성, 또한 저 발열량 가스 연료의 생성이나 포획시의 다양한 문제 등을 들 수 있다.

그러므로, 본 연구에서는 저 발열량 가스 연료의 천연가스 대체 연소 시 예상되는 예혼합 연소 특성 및 화염안정성 그리고 이 때 발생하는 환경오염물질의 배출 특성과 그 저감 방법

에 대한 실험을 flat flame burner를 이용하여 수행하였으며, 그에 따른 실험결과를 검토하였다.

2. 합성가스(Syngas) 연소실험

2-1. 실험장치 구성, 계통 및 분석장치

그림. 1 에서 보여지듯이, 실험장치는 연료 및 공기 공급계통과 연소실험계통으로 구성하였으며, 연료공급을 위해서는 저 발열량 가스의 주성분인 CO, H₂, N₂ 를 혼합하여 실제 가스를 모사 하였고, 여기에 더해 연료 중 에 미량의 NH₃ 를 첨가할 수 있도록 장치를 구성하였다. 연소실험을 위해서는 예혼합된 합성가스 연료를 확대 노즐을 거쳐 다공성 매질(porous material)을 가지는 flat flame burner 로 공급하였고, 이때 합성가스 연소시의 화염거동 및 연소현상은 CCD 또는 digital camera 를 이용하여 기록하였으며 연소가스중의 일부를 채집하여 NO_x 배출량을 분석하였다.

2-2. 천연가스 실험(기준 실험)

합성가스 연소실험의 전 단계로서, 천연가스를 이용한 기준실험을 수행하였다. 천연가스 연료의 양을 0.48 LPM 으로 일정하게 유지시키고, 공기를 변화시키면서 그때의 화염의 연소안정성 범위와 NO_x 발생량을 관찰하였다. 그림. 2 에서 보여지듯이, 당량비가 0.6 - 1.3 범위에서 화염이 매우 안정적으로 유지되었고 NO_x 발생량도 20-50ppm 사이의 값을 가진다. 이러한 결과는 본 기준실험에 의해 결정된 천연가스 연소조건이 이론적 가연한계 범위에 걸쳐 비교적 안정되어 있음을 보여준다.

2-3. 합성가스 연료조건 결정

본 실험에서 사용된 합성가스는 석탄을 산소로 산화시켰을 때 얻어지는 실제 저 발열량 가스들의 조성(CO: 70 - 90%, H₂: 10 - 30%)과 유사한 조건을 가지도록[2], CO 와 H₂ 가스를 혼합하여 사용하였다. 또한 천연가스를 기준으로 설계된 버너에 저 발열량 가스를 대체연료로 사용하는 경우를 고려하기 위해, 2-2절에서 결정된 천연가스의 입열량(thermal input)과 합성가스의 입열량을 맞추어 전체 연료 유량을 결정하였다. 앞서의 합성가스 연료 조건 결정시 사용된 각 연료가스의 발열량 및 본 연구에서 고려한 3가지 경우의 합성가스의 조성 및 연료량은 표. 1과 2 와 같다.

2-4. 합성가스 연소 및 NO_x 실험결과

연소실험은 표. 2 의 3가지 합성가스들에 대해 공기량을 변화시켜 가며 실행하였으며, 또한 fuel NO_x 발생과 NH₃ 와의 관계를 규명하기 위하여 각각의 연료에 NH₃ 를 첨가한 경우와 그렇지 않은 경우를 구분하여 실험을 수행하였다. 그리고 N₂ 분사에 의한 NO_x 저감효과를 살펴보기 위하여 CO 농도 91%와 82%의 합성가스와 거기에 더하여 NH₃ 포함된 연료에 대하여 연료에 대한 N₂ 희석비율을 50%, 100%로 하는 실험도 수행하였다.

먼저 표. 2 의 3가지 합성가스들에 대해 혼합 공기량을 변화시켜 가며 그때의 화염거동, 안정성 및 NO_x 배출량을 측정하였으며, 그 실험결과가 그림. 3 - 5 에 나타나 있다. 그림 중 사각형 기호로 표현되는 위쪽의 측정치는 1260 ppm의 NH₃ 를 함유하는 연료에 대해 측정된 경우이다. 그림에서 보여지듯이, 3가지 합성가스의 경우 화염안정영역이 이론적 가연한계범위(CO : 0.44 - 37.78, H₂ : 0.1 - 37.78 의 당량비)에 비해 매우 줄어들어 있음을 볼 수

있으며, 이러한 결과는 저 발열량 가스가 천연가스와 동일한 입열량을 가지고 동일한 버너를 통해 연소될 때 안정한 연소영역이 당량비 1 이하의 희박연소조건으로 매우 좁아짐을 의미한다. 그리고 합성가스중의 H_2 의 농도가 증가할수록 화염이 안정된 영역이 더욱 좁아짐을 볼 수 있는데, 이와 같은 현상은 서론에서 기술한바와 같이 H_2 의 화염속도가 매우 커서 합성가스중의 H_2 의 농도가 높을수록 역화가 보다 낮은 당량비 점으로 이동하기 때문이다 [3]. 그리고 전체적으로 H_2 농도의 증가에 따라 NO_x 가 저하되는 경향을 볼 수 있다. NH_3 첨가시 NO_x 는 NH_3 가 없는 경우의 thermal NO_x 에 비해 수백 ppm 이상의 fuel NO_x 가 발생됨을 알 수 있었고, 이때 NH_3 에서 NO_x 로의 전환율은 혼합기의 당량비가 증가될수록 최대 97% 에서 62% 까지 저하되는 경향을 보여주었다[4].

저 발열량 가스 연소시 NO_x 발생의 저감을 위해 고려될 수 있는 연료의 질소회석에 대한 실험을 수행하였다. 질소 회석량은 연료량의 50%, 100%(부피기준)를 고려하였다. Figs. 6 - 7 은 100% 와 50% 질소회석인 경우의 실험결과를 비교하여 나타내고 있다. 그림 중 위쪽의 사각형 기호는 질소회석이 없는 경우이다. 100% 질소회석에 의해서 화염안정영역은 회석전보다 상당히 넓어지며, NO_x 발생량도 질소회석을 하지 않은 경우에 비해 최대 17% 내외의 수준까지 떨어지는 것을 알 수 있었다. 50%인 경우에는 당량비가 높은 경우에 대하여 오히려 화염안정영역이 좁아지는 것을 볼 수 있다.

3. 결론

본 연구를 통해 저발열량 가스의 화염거동 및 NO_x 발생 특성을 규명할 수 있는 기초 연소실험장치를 구성하였다. 천연가스와 동일한 발열량을 가지는 3가지 저 발열량 가스의 flat flame burner 실험을 통해, 저 발열량 가스 연료의 화염안정영역이 당량비 1 이하의 매우 좁은 범위로 줄어들음을 알 수 있었고, H_2 의 농도가 많아질수록 역화(flashback)현상에 의해 화염안정영역이 더 낮은 당량비 범위로 줄어들음을 알 수 있었다. NH_3 첨가에 의한 fuel NO_x 발생 메카니즘은 당량비의 변화에 따라 NH_3 의 NO_x 전환율이 62 - 97% 의 변화를 보이며, 이로 인해 전체 NO_x 발생량이 thermal NO_x 에 비해 200-300 ppm 이상 증가되었다. 질소회석에 의한 NO_x 저감 효과는 매우 현저하게 나타나고 있으며, 동시에 화염안정화 영역도 상대적으로 넓어짐을 알 수 있었다. 또한 그림.6,7에 나타났듯이 질소회석이 50%일 때 오히려 질소회석을 하지않은 경우에 비하여 화염안정영역이 좁아지는 경향을 보이는데 이것은 연료가스의 연소속도와 연료가스유량에 의한 연료가스배출속도에 대한 상관관계에 의한 것으로 예측되어지며 이에 대한 보다 명확한 해석을 연구 중이다.

후기

본 연구는 한국과학재단 지정 지역협력연구센터인 수원대학교 환경청정기술연구센터의 일부 지원을 받았음을 밝히며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] G.L.Borman and K.W.Ragland, Combustion Engineering, McGraw-Hill, 1998
- [2] R.H.Perry, Perry's Chemical Engineers' Handbook, McGraw-Hill, 1984
- [3] K. Döbbling, H. P. Knöpfel, W. Polifke, D. Winkler, C. Steinbach, T. Sattelmayer, "Low- NO_x Premixed Combustion of MBtu Fuels Using the ABB Double Cone Bunner(EV Bunner)", Transactions of the ASME Vol. 118, JANUARY 1996.
- [4] T. Nakata, M. sato, T. Ninomiya, T. Yoshine, M. Yamada, "Effect of Pressure on Combustion Characteristics in LBG-Fueled 1300°C-Class Gas Turbine", Transactions of

the ASME Vol. 116, JULY 1994.

[5] C. S. Cook, J. C. Corman, D. M. Todd, "System Evaluation and LBTU Fuel Combustion Studies for IGCC Power Generation", Journal of Engineering for Gas Turbines and Power Vol. 117, OCTOBER 1995.

표. 1 각 조성가스의 입열량

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

표. 2 합성가스의 유량 & 조성

Syngas No.	CO(%)	H ₂ (%)	Total flow rate(LPM)
1	91.0	9.0	1.64
2	82.0	18.0	1.66
3	70.0	30.0	1.69

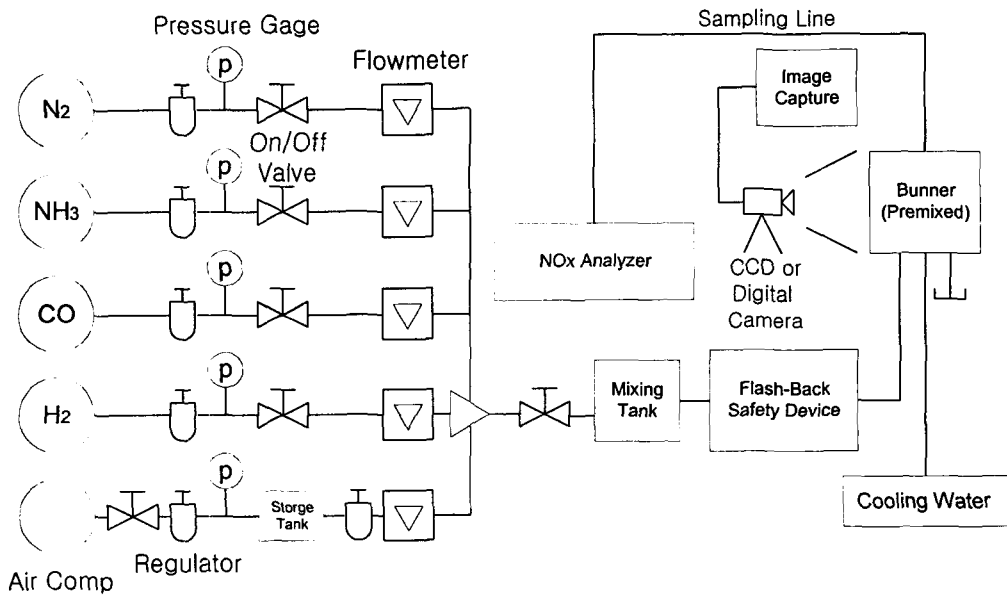


그림. 1 실험장치 계통도

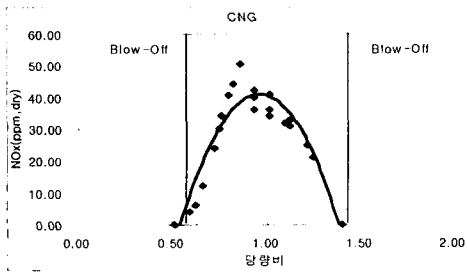


그림. 2 당량비에 대한 NOx 특성

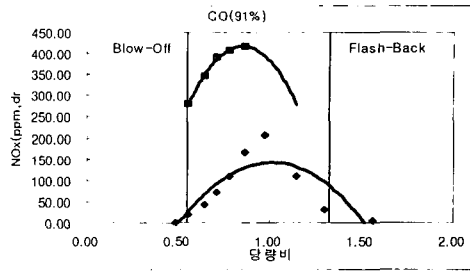


그림. 3 당량비에 대한 NOx 특성
(Syngas No. 1)

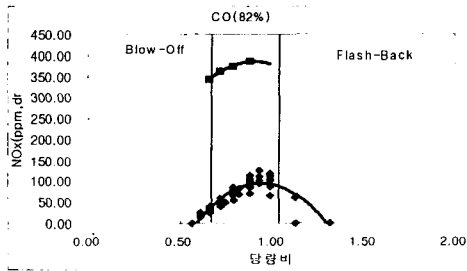


그림. 4 당량비에 대한 NOx 특성
(Syngas No. 2)

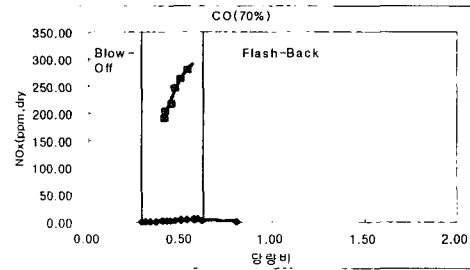


그림. 5 당량비에 대한 NOx 특성
(Syngas No. 3)

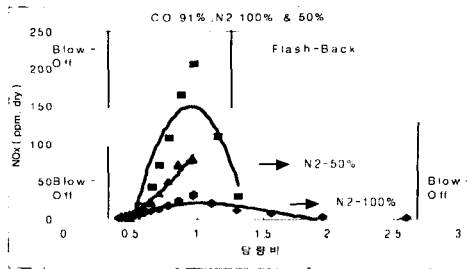


그림. 6 당량비에 대한 NOx 특성
(Syngas No. 1)

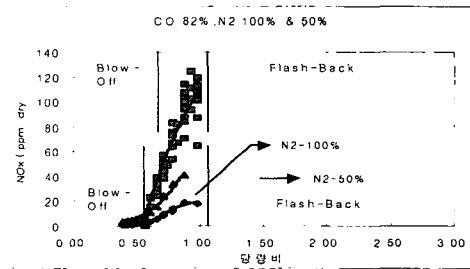


그림. 7 당량비에 대한 NOx 특성
(Syngas No. 2)