

## 저 발열량 가스 연료의 예혼합 연소시 NO<sub>x</sub> 발생 특성에 관한 실험적 연구

김용철, 이찬, 윤용승\*

수원대학교 기계공학과, 고등기술 연구원 재료/공정 연구실\*

### Experimental Study on the NO<sub>x</sub> Emission Characteristics of Low Calorific Value(LCV) Gas Fuel at Premixed Combustion Condition

Yong Chul Kim, Chan Lee, Yongseung Yun\*

Dept. of Mechanical Engineering, Univ. of Suwon,

Institute for Advanced Engineering, Material/Process Lab.\*

#### ABSTRACT

Experimental studies are conducted to investigate the flame stability and the thermal/fuel NO<sub>x</sub> 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 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<sub>x</sub> content in combustion gas are made for comparing thermal and fuel NO<sub>x</sub> from the LCV syngas combustion with those of the natural gas one. In addition, the nitrogen dilution of the LCV syngas is preliminarily attempted as a NO<sub>x</sub> reduction technique, and its effects on thermal and fuel NO<sub>x</sub> production are discussed.

#### 1. 서론

현대에 이르러 주 에너지원으로 사용되고있는 석유나 천연가스연료는 자원의 제한성이나, 가격문제 등에 따른 에너지 수급의 유동성 또는 자원의 재활용 문제 등으로 인하여 이에 대한 대체연료의 개발이 시급한 현안으로 대두되었다. 이러한 취지에 맞추어 대체연료개발의 한 부분으로서 저 발열량 가스연료의 활용성에 대한 연구가 활발히 진행중이다. 대체연료로 고려될 수 있는 저 발열량 가스연료의 생성원리나 포집방법에 따라 분류해보면 먼저 석탄을 불완전연소하여 가연성 가스를 생성시키는 석탄가스화, 생물학적 반응을 이용한 생물자원 가스화, 매립지에서 생성되는 가연가스를 포획하여 이용하는 매립지 가스포획, 미반응 연료 전지 양극가스, 기타 각 산업공정에서 발생하는 각종 부생가스를 포획하여 연료로 이용하기도 한다[1].

이와 같은 다양한 저 발열량 가스들은 기존의 석유나 또는 천연가스 연료에 의한 system 에 그대로 적용되어 사용되는 데에는 여러 가지 무리가 따르는데 이는 석유나 천연가스에

비교해 볼 때 저 발열량 연료가스들의 연소특성들이 매우 다를 수 있기 때문이다. 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.

이에 대하여 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 방법에 대한 실험을 flat flame burner를 이용하여 수행하고, 그때 나타난 실험결과를 검토하였다.

## 2. 합성가스(Syngas) 연소실험

### 2-1. 실험장치 구성, 계통 및 분석장치

그림. 1 에서 보여지듯이, 실험장치는 연료 및 공기 공급계통과 연소실험계통 그리고 데이터처리계통으로 구성하였으며, 연료공급을 위해서는 저 발열량 가스의 주성분인 CO, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> 를 혼합하여 실제 가스를 모사 하였고, 여기에 더해 연료 중 에 미량의 NH<sub>3</sub> 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<sub>x</sub> 배출량을 분석하였다.

### 2-2. 천연가스 연소실험(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<sub>x</sub> 발생량을 관찰하였다. 그림. 2 에서 보여지듯이, 당량비가 0.6 - 1.3 범위에서 화염이 매우 안정적으로 유지되었고 NO<sub>x</sub> 발생량도 20-50ppm 사이의 값을 가진다. 이러한 결과는 본 기준실험에 의해 결정된 천연가스의 연소조건이 이론적 가연한계 범위에 걸쳐 비교적 안정되어 있음을 보여준다.

### 2-3. 합성가스 연료유량의 결정

본 실험에서 사용된 합성가스는 석탄을 산소로 산화시켰을 때 얻어지는 실제 저 발열량 가스들의 조성(CO: 70 - 90%, H<sub>2</sub>: 10 - 30%)과 유사한 조건을 가지도록[2], CO 와 H<sub>2</sub> 가스를 혼합하여 사용하였다. 또한 천연가스를 기준으로 설계된 버너에 저 발열량 가스를 대체연료로 사용하는 경우를 고려하기 위해, 2-2절에서 결정된 천연가스의 유량에 따른 입열량(thermal input)과 합성가스의 입열량을 맞추어 전체 연료 유량을 결정하였다. 앞서의 합성가스 연료조건 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<sub>x</sub> 실험결과

연소실험은 표. 2 의 3가지 합성가스들에 대해 공기량을 변화시켜 가며 실행하였으며, 또한 NH<sub>3</sub> 와 fuel NO<sub>x</sub> 발생의 상관관계를 규명하기 위하여 각각의 연료에 NH<sub>3</sub> 를 첨가한 경우와 그렇지 않은 경우를 구분하여 실험을 수행하였다. 그리고 N<sub>2</sub> 분사에 의한 NO<sub>x</sub> 저감 효과를 살펴보기 위하여 각각의 합성가스와 거기에 더하여 NH<sub>3</sub> 포함된 연료에 대하여 연료

에 대한  $N_2$  희석비율을 50%, 100%로 하는 실험도 수행하였다.

먼저 표. 2 의 3가지 합성가스들에 대해 공급 공기량 즉 당량비를 변화시켜 가면서 그때의 화염거동, 안정성 및  $NO_x$  배출량을 측정하였으며, 그 실험결과가 그림. 3 - 5 에 나타나 있다. 그림에서 보여지듯이, 3가지 합성가스의 경우 화염안정영역이 이론적 가연한계범위 ( $CO : 0.44 - 37.78$ ,  $H_2 : 0.1 - 37.78$  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. 또한 당량비에 따른  $NO_x$ 의 발생경향도 이론적 화염온도(그림. 6-8)의 당량비에 따른 경향과 거의 일치함을 알 수 있다. 그리고 합성가스중의  $H_2$  의 농도가 증가할수록 화염이 안정된 영역이 더욱 좁아짐을 볼 수 있는데, 이와 같은 현상은  $H_2$  의 화염속도가 매우 커서 합성가스중의  $H_2$  의 농도가 높을수록 역화현상이 보다 낮은 당량비에서 발생하기 때문이다 [3]. 또한 이러한 높은 화염속도로 인해 도립화염이 형성되므로 화염의 비화는 더 낮은 당량비 범위로 이동한다. 그리고 전체적으로  $H_2$  농도의 증가에 따라  $NO_x$  가 저하되는 경향을 볼 수 있는데, 이것은 높은 화염속도로 인해 가스가 화염영역에서 체류하는 시간이 적어진 영향으로 해석된다.

$NH_3$  첨가실험에서의  $NO_x$  는  $NH_3$  가 없는 경우의 thermal  $NO_x$  에 비해 수백 ppm 이상의 fuel  $NO_x$  가 발생(그림. 9-11)됨을 알 수 있었고, 이때  $NH_3$  에서  $NO_x$  로의 전환율(그림. 12-14)은 혼합기의 당량비가 증가될수록 최대 97% 에서 62% 까지 저하되는 경향을 보여주었다[4]. 이 때의 3가지 전환율에 대한 그림을 투사하여 보았을 경우(그림. 15)를 보면 전환율이 연료가스의 종류에 관계없이 약 0.6 범위에서 최고치를 가지는 일정한 경향을 나타내고 있다.

다음으로 저 발열량 가스 연소시  $NO_x$  발생의 저감을 위해 고려될 수 있는 연료의 질소 희석에 대한 실험을 수행하였다. 질소 희석량은 연료량의 50%, 100%(부피기준)를 고려하였다. 그림. 16-17 은 100% 와 50% 질소희석인 경우의 실험결과를 비교하여 나타내고 있다. 그림 중 위쪽의 사각형 기호는 질소희석이 없는 경우이다. 100% 질소희석에 의해서 화염안정영역은 희석전보다 상당히 넓어지며,  $NO_x$  발생량도 질소희석을 하지 않은 경우에 비해 최대 17% 내외의 수준까지 떨어지는 것을 알 수 있었다. 50%인 경우에는 당량비가 높은 경우에 대하여 오히려 화염안정영역이 좁아지는 현상을 나타내었다.

더 나아가  $NH_3$  를 첨가한 경우에 대하여  $NO_x$  저감을 위해 연료에 질소를 희석한 경우의 실험을 수행하였다. 그리고 그에 따른  $NH_3$  의  $NO_x$  로의 전환율을 산출하였다. 그림. 18-19 에서 보여지듯이 연료가스의 종류별 화염안정영역의 당량비 범위에 따라 전환율은 크게는 90%이상의 높은 영역에 있거나, 화염안정영역이 넓은 범위에 대하여는 50% 수준까지 낮아지기도 한다.

### 3. 결론

본 연구를 통해 저 발열량 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 줄어드는 것을 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% 또는 50 - 97%(질소희석)의 변화를 보이며, 이로 인해 전체  $NO_x$  발생량이 thermal  $NO_x$  에 비해 200-300 ppm 이상 증가되었다. 질소희석에 의한  $NO_x$  저감 효과는 매우 현저하게 나타나고 있으며, 동시에 화염안정 영역도 상대적으로 넓어짐을 알 수 있었다.  $NH_3$  의  $NO_x$  로

의 전환율은 질소회석을 하지않은 경우 연료가스의 종류에 무관하게 3가지 경향이 모두 일정한 경향하에 분포되어 있는 것을 볼 수 있다. 또한 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. 그리고, 질소 회석을 하였을 때 질소회석이 화염안정영역에 미치는 영향이 비교적 적은 것으로 나타나고있는데, 이와 같은 경향으로 미루어 연료가스에 대한 질소회석이 화염안정영역에 미치는 영향이 그 연료가스의 조성에 따라 매우 민감함을 볼 수 있다.

### 후기

본 연구는 에너지 관리공단 R&D 본부의 에너지기술 학술진흥사업(대체에너지 분야)의 연구비 지원에 의해 수행되었음을 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-NOx 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 <sub>2</sub>	2402.77
NG	9487.30

표 2 합성가스의 유량 & 조성

Syngas #.	CO(%)	H <sub>2</sub> (%)	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

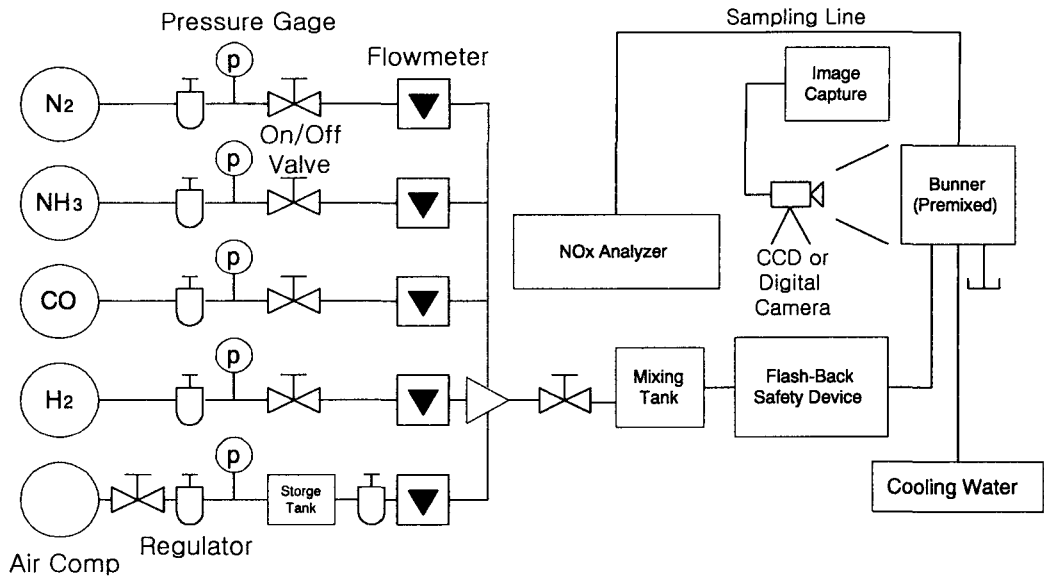


그림. 1 실험장치 계통도

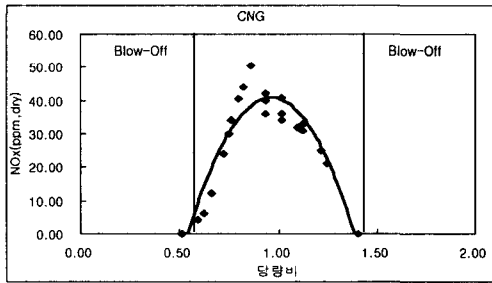


그림. 2 당량비에 대한 NOx 특성 (천연가스)

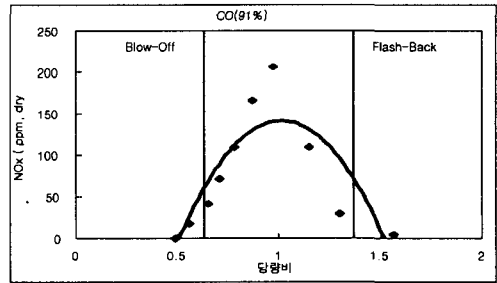


그림. 3 당량비에 대한 NOx 특성 (Syngas #. 1)

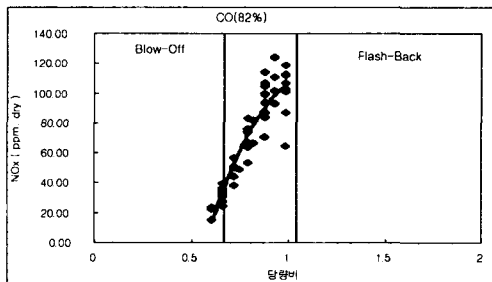


그림. 4 당량비에 대한 NOx 특성 (Syngas #. 2)

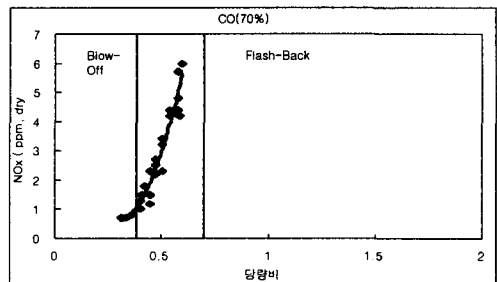


그림. 5 당량비에 대한 NOx 특성 (Syngas #. 3)

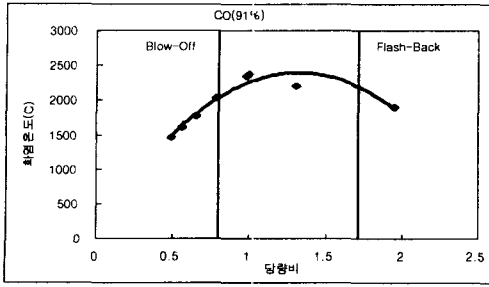


그림. 6 당량비에 대한 이론적 화염온도 (Syngas #. 1)

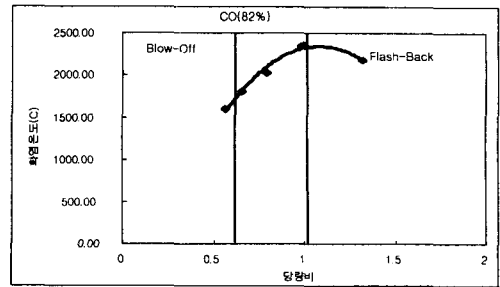


그림. 7 당량비에 대한 이론적 화염온도 (Syngas #. 2)

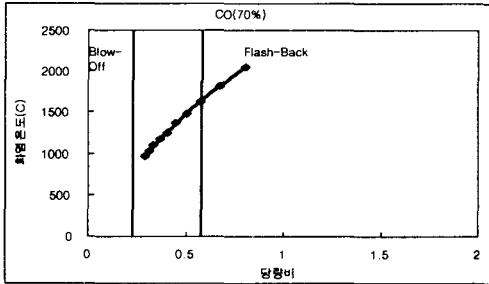


그림. 8 당량비에 대한 이론적 화염온도 (Syngas #. 3)

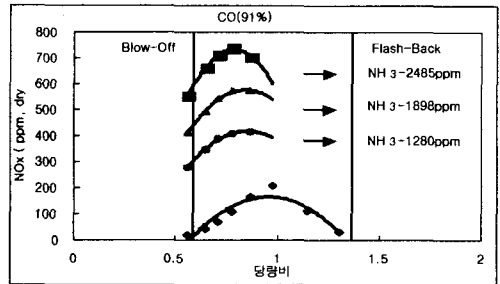


그림. 9 당량비에 대한 NOx 특성 (Syngas #. 1 with NH3)

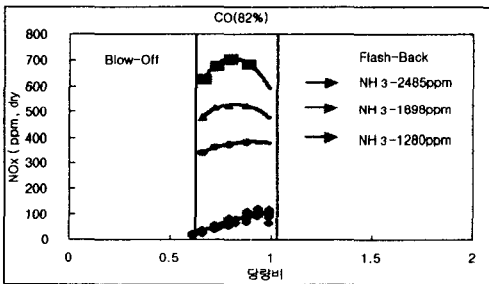


그림. 10 당량비에 대한 NOx 특성 (Syngas #. 2 with NH3)

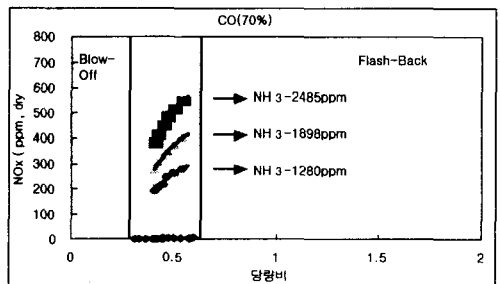


그림. 11 당량비에 대한 NOx 특성 (Syngas #. 3 with NH3)

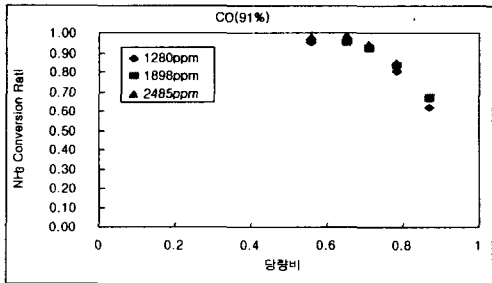


그림. 12 NH3의 NOx로의 전환율 (Syngas #. 1 with NH3)

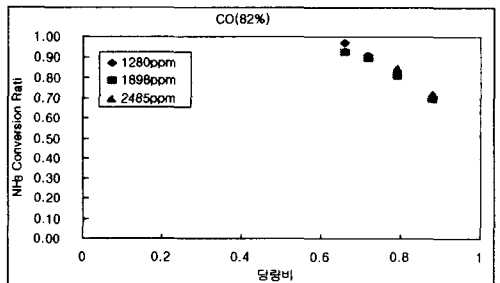


그림. 13 NH3의 NOx로의 전환율 (Syngas #. 2 with NH3)

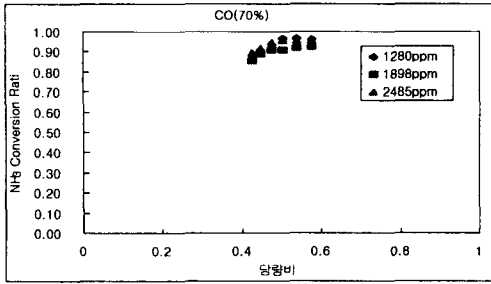


그림. 14 NH<sub>3</sub>의 NO<sub>x</sub>로의 전환율 (Syngas #. 3 with NH<sub>3</sub>)

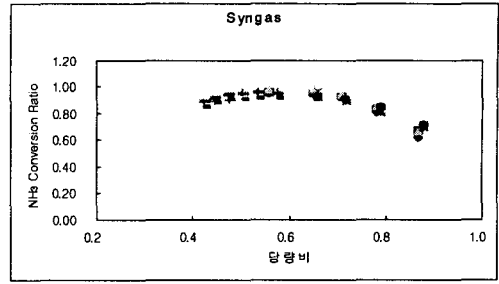


그림. 15 NH<sub>3</sub>의 NO<sub>x</sub>로의 전환경향 (Syngas #. 1,2,3 with NH<sub>3</sub>)

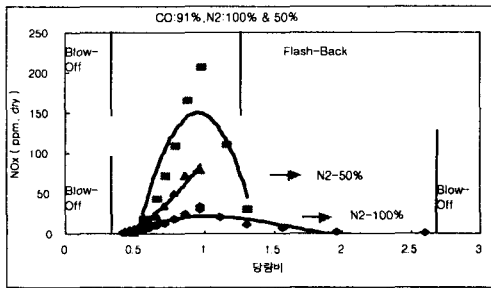


그림. 16 당량비에 대한 NO<sub>x</sub> 특성 (Syngas #. 1 dilute N<sub>2</sub>)

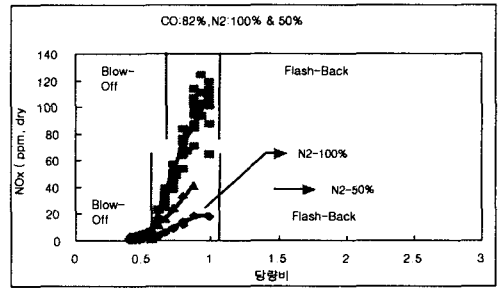


그림. 17 당량비에 대한 NO<sub>x</sub> 특성 (Syngas #. 2 dilute N<sub>2</sub>)

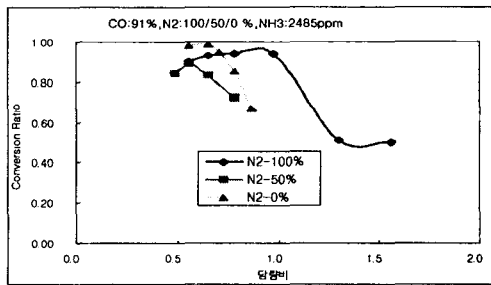


그림. 18 NH<sub>3</sub>의 NO<sub>x</sub>로의 전환율 (Syngas #. 1 dilute N<sub>2</sub>)

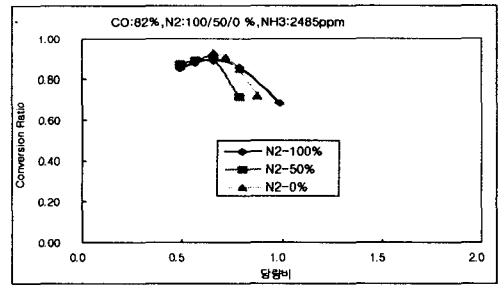


그림. 19 NH<sub>3</sub>의 NO<sub>x</sub>로의 전환율 (Syngas #. 2 dilute N<sub>2</sub>)