

합성천연가스의 수소함량 변화에 따른 가스터빈 연소특성 평가

박세익^{1†} · 김의식¹ · 정재화¹ · 홍진표¹ · 김성철¹ · 차동진²

¹한국전력공사 전력연구원, ²한밭대학교 건축설비공학과

Effects of Hydrogen in SNG on Gas Turbine Combustion Characteristics

SEIK PARK¹, UISIK KIM¹, JAEHWA CHUNG¹, JINPYO HONG¹, SUNGCHUL KIM¹, DONGJIN CHA²

¹KOREA ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE

65 Munji-Ro, Yuseong-Gu, Daejeon, 305-760, Korea

²HANBAT NATIONAL UNIVERSITY, BUILDING SERVICE ENGINEERING DEPT.

San 16-1 Dukmyung-dong Yuseong-gu Daejeon, 305-719, Korea

Abstract >> Increasing demand for natural gas and higher natural gas prices in the recent decades have led many people to pursue unconventional methods of natural gas production. POSCO-Gwangyang synthetic natural gas (SNG) project was launched in 2010. As the market price of natural gas goes up, the increase of its price gets more sensitive due to the high cost of transportation and liquefaction. This project can make the SNG economically viable. In parallel with this project, KEPCO (Korea Electric Power Corporation) joined in launching the SNG Quality Standard Bureau along with KOGAS (Korea Gas Corporation), POSCO and so on. KEPCO Research Institute is in charge of SNG fueled gas turbine combustion test. In this research, several combustion tests were conducted to find out the effect of hydrogen contents in SNG on gas turbine combustion. The hydrogen in synthetic natural gas did not affect on gas turbine combustion characteristics which are turbine inlet temperature including pattern factor and emission performance. However, flame stable region in Φ -Air flow rate map was shifted to the lean condition due to autocatalytic effect of hydrogen.

Key words : Synthetic natural gas(합성천연가스), Gas turbine combustion(가스터빈 연소), Flashback(역화), Lean blow off(희박 날림)

Nomenclature

SNG : synthetic(substitute) natural gas
Re : reynolds number
LBO : lean blow off
TIT : turbine inlet temperature
PF : pattern factor
WI : wobbe index

i : iso - xxx
n : normal - xxx
SLPM : standard liter per minute

1. 서 론

국내외적으로 석탄을 원료로 가스화 하는 기술이 각광을 받고 있는데, 이는 가스화공정을 통해 생산된 석탄가스는 발전용 연료로의 활용 가치도 높지만 다양한 화석연료로 변환이 가능하며 이를 이용한 다양한 화학제품 생산 또한 가능하기 때문이다^{1,2)}.

[†]Corresponding author : seik@kepco.co.kr

[접수일 : 2012.7.17 수정일 : 2012.8.3 게재확정일 : 2012.8.24]

Copyright © 2012 KHNES

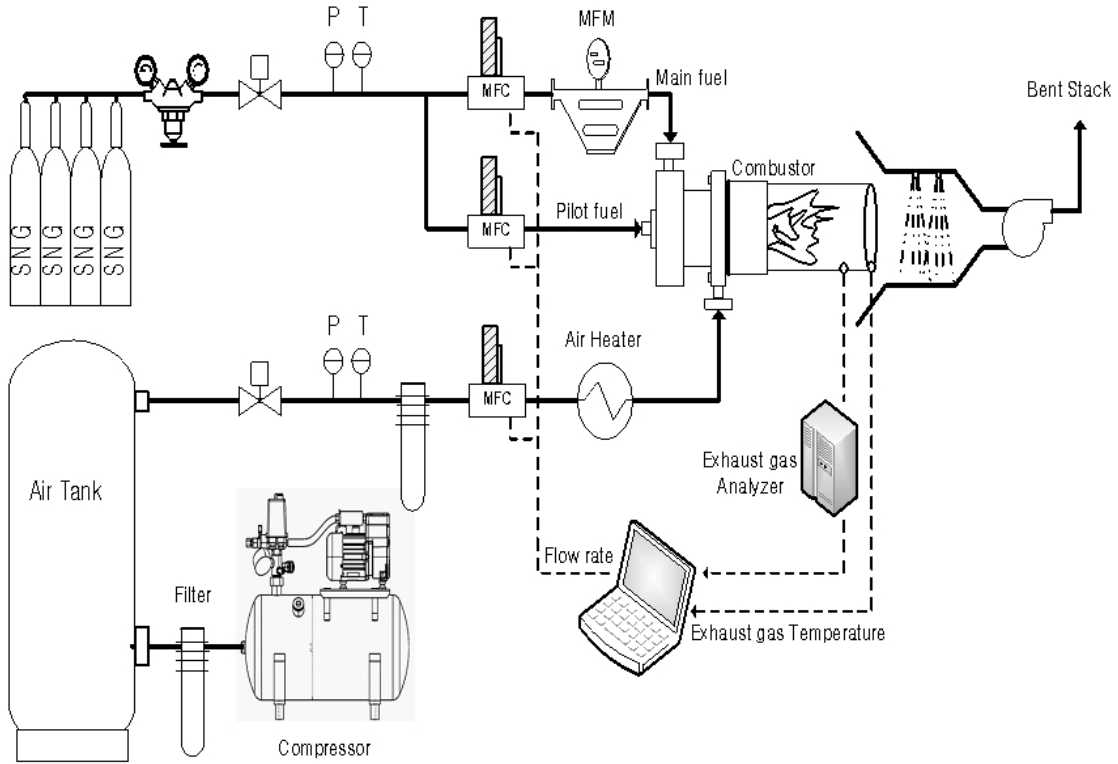


Fig. 1 Experimental setup for combustion test

국내에서도 포스코(POSCO) 및 발전사업자들이 액화천연가스(LNG)의 구입 단가를 절감하기 위하여 석탄을 가스화함으로써 얻어지는 SNG를 LNG 대용으로 사용하려는 계획을 추진함에 따라, 합성천연가스 대체 사용 가능 여부를 검토하기 위해 현행 도시가스사업법 확대방안을 검토 중에 있으며, 가스공사를 간사기관으로 하여 기계연구원, 에너지기술연구원과 공동으로 합성천연가스 사용이 산업용 연소 설비의 안정성과 설비에 미치는 영향에 대한 연구를 공동으로 수행 중이다.

수소함량 변화에 따른 연소특성 평가는 Pennsylvania State Uni.^{3,4)}에서 50%까지 수소함량에 따른 화염의 형상에 대한 연구를 진행한 바 있다. 하지만 본 연구에서는 합성천연가스의 규격을 정해 법제화하기 위한 기초 연구로 수소함량 0~5%내외의 좁은 영역에서 수소가 가스터빈 연소특성에 미치는 영향을 평

가하였다. 이를 위해 전력연구원에서는 합성천연가스의 수소함량이 가스터빈 연소에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하기 위해 합성천연가스의 수소함량에 따른 화염안정화 구간 변화 및 출력과 배기성능을 비교하였다.

2. 시험장치

2.1 실험 설비

가스터빈 연소시험설비는 본 연구기관에서 구축하여 다양한 대체 연료시험을 수행한 바 있다^{5,6)}. Fig. 1에서와 같이 공기 압축기, 공기저장탱크, 공기에열기, 냉각 및 연소용 공기공급라인이 설치되어 있다. 연소기 후단의 온도는 k-type 다점온도센서를 이용하여 온도분포를 측정하였다. 그리고 연소 후 배기가스의

Table 1 Specifications of model combustor

Title	Unit	Specifications
Model combustor	-	Premixing
Mixing length	mm	85
Combustion Air Temp	°C	400 ± 4
Fuel Inlet Temperature	°C	50 ± 1

조성분석을 위해 전기화학식 가스분석법을 적용한 Testo社의 배기가스 분석장비(TESTO 360)를 이용하여 CO, CO₂, NO_x, UHC등을 측정하였다. 연소기 내부 동압 특성은 PCB社 106B 모델을 사용하여 20kHz로 동압신호를 샘플링하였다.

그리고 연소기로 공급되는 연료는 메인(main)과 파일럿(pilot)으로 나누어 공급 가능하도록 설계되었다. 합성천연가스의 유량계측 및 제어기, 배기가스냉각용 살수장치, 상압연소기, 제어시스템, 외부의 스택(stack)으로 시스템은 구성되어 있다. 본 설비 용량은 60kW급 가스터빈과 동급이고, 공급공기는 0.2kg/s, 500°C까지 공급 가능하다.

2.2 연소기

실험용 연소기의 경우 예혼합 모델 연소기를 사용

하였고, 상세 사양은 Table 1 및 Fig. 2에 제시하였다. 예열된 공기는 스윌러 후단에서 연료와 혼합되어 85mm의 혼합구간(Mixing length)을 거쳐 연소영역(Combustion chamber)으로 공급된다.

가스터빈 설계 시 터빈 출구 측 열 구배 성능(thermal gradient performance)을 정량화하기 위하여 Fig. 3과 같이 상온에서 1200°C까지 측정 가능한 k-type 다점 온도센서를 설치하고, 16포인트에서의 온도 값으로 Pattern factor(PF)를 식 (1)과 같이 정의하여 평가에 활용하였다.

$$Pattern\ factor = \frac{(T_{peak} - T_{avg})}{T_{avg} - T_{inavg}} \tag{1}$$

- 단, T_{peak} : maximum exit temperature
- T_{avg} : mean exit temperature
- T_{inavg} : mean inlet air temperature

실제 can-annular 형식의 가스터빈 연소기의 배기구 형상은 transition piece후단이 부분 방사형이나 시험 설비 및 계측장비 제작의 용이성을 고려하여 원형관으로 제작하고, 원형좌표계가 아닌 직교좌표계로 구

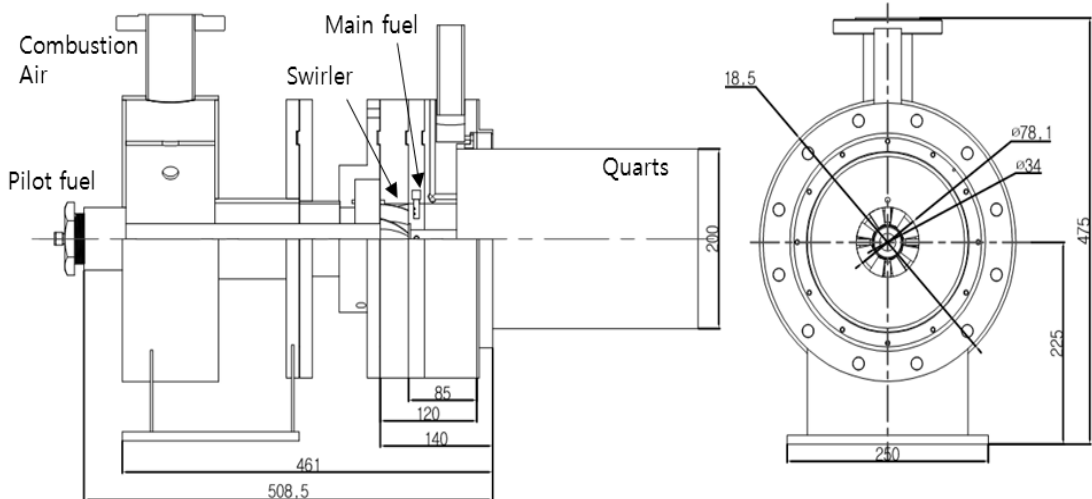


Fig. 2 Model combustor for SNG combustion test

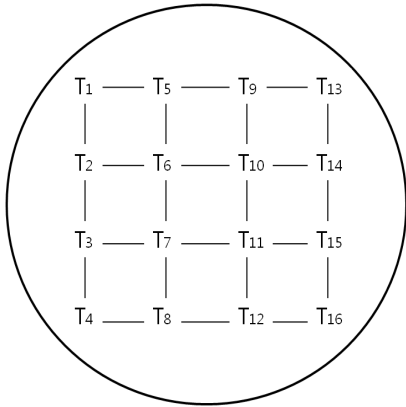


Fig. 3 Temperature measurement arrangement at combustor outlet

성된 출구온도분포를 측정하였다. 이는 실제 pattern factor를 구하는 방법과는 다소 차이가 있으나 본 실험에서는 수소함량에 따른 배기부 출구온도의 분포 변화의 정도를 확인하는데 의의를 두기에 그 정성적인 경향만을 파악하기에는 충분한 정보를 파악할 수 있는 설비 구성이라 할 수 있다.

2.3 실험 연료

합성천연가스의 연소특성 실증실험에 필요한 실험가스 조성은 석탄-SNG 품질기준 공동연구 추진단에서 제공한 가스를 사용하였다. Table 2와 같이 일반 천연가스를 비교대상 표준가스 정하고, 연소용 가스의 조성은 수소의 함량을 증가시키되 저위발열량을 일정하게 유지하기 위해 부피당 발열량이 높은 프로판으로 발열량 같도록 제조하였다. 해당 연료는 C0(수소 0%), C1(수소 1%), C3(수소 3%), C5(수소 5%) 수소의 함량이 0~5%까지 변한다. 조성이 다른 실험가스의 발열량은 맞추었으나, 웨버(wobbe) 지수는 매우 적은 차이가 있다.

2.4 실험 방법

Table 2와 같이 SNG의 조성 중 수소함량 변화가 가스터빈 연소 특성에 미치는 영향을 평가하기 위해

수소함량이 다르고 발열량이 같은 표준가스를 제조하여 실험에 사용하였다. 실험용 표준가스를 부피기준으로 연료를 일정량씩 증가시키며 실험을 진행하였고, 연소기의 경우 메인과 파이럿으로 구분하여 공급이 가능하며, 이러한 비율차이에 따른 출력 및 배기성능의 차이가 존재한다⁷⁾. 하지만 본 실험에서는 예혼합 연료 공급조건을 모사하여 합성천연가스의 수소함량의 영향을 평가하기위해 파이럿 연료는 점화 시에만 공급하도록 하여 시험하였다. 흡기온도 조건은 표준조건(15℃, 1기압)의 대기 상태를 모사한 실험을 수행하였다.

메탄 대비 수소의 연소특성 중 다른 점은 크게 세 가지로 나뉜다. 첫째는 화염전파속도가 빠르며, 둘째는 동일 당량비 기준으로 단열화염온도가 160℃ 이상 높다. 마지막으로 수소는 부피당 발열량이 메탄의 30% 수준으로 낮다.

첫째, 수소의 빠른 화염전파속도에 따른 영향을 평가 하기위해 SNG내의 수소의 함량은 0%에서 1%, 3%, 5%까지 증가 시키며, 수소화염에 의한 역화(Flashback) 현상과 저 당량비 조건에서의 날림에 의한 소멸한계(blow-off extinction limit) 변화를 연구하였다.

둘째, SNG에 수소함량이 증가할 경우 입열량이 동일하더라도 단열 화염온도가 160℃(수소:2,210K, 메탄:1,950K) 이상 높아 출력 및 배기성능에 미치는 영향이 달라진다⁸⁾. 상승된 화염온도에 의해 추가적으로 발생되는 Thermal NOx의 배출량을 배기 규제치(20ppm @ O₂ 15%)에 맞추기 위한 연구를 진행하였다.

셋째, 수소의 낮은 부피당 발열량으로 인해 프로판으로 열조하여 발열량을 맞추고, 입열량(heat input)을 변화시키며, 수소함량이 다른 연료의 연소 시 연소불안정에 의한 연소 동압의 크기를 비교하였다.

3. 시험결과

3.1 수소함량 변화에 따른 화염의 정적 안정성

합성천연가스의 가스터빈 연소 시 화염의 정적안정

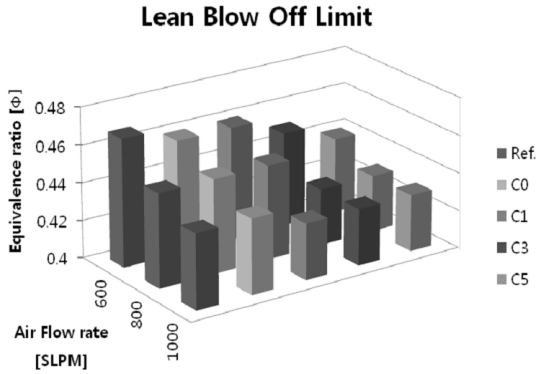


Fig. 4 The effect of hydrogen concentration on static stability limit(lean blow off limit)

성을 평가하기 위해 수소의 함량 변화에 따른 역화 및 소염 구간을 당량비 기준으로 확인 하였다. Fig. 4에서와 같이 연소기로 공급되는 공기 유량이 600 SLPM에서 1,000 SLPM 구간에서 천연가스와 수소함량이 다른 모사 합성천연가스의 소염구간은 일정한 경향을 갖고 확장됨을 확인하였다.

첫째, 수소함량증가에 따라 희박소염구간(lean blow off) 구간이 확대 된다. 이는 수소를 포함한 혼합기의 층류화염속도는 수소의 강한 반응성에 의한 자가촉매 작용(autocatalytic effect)의 영향으로 증가한다. 즉, H₂와 O₂의 산화과정이 아래의 기본 반응들로 구성되는데, 이 과정에서 반응성이 높은 수소라디칼(Hydrogenradical)이 생성되어 나타난 결과이다⁹⁾.

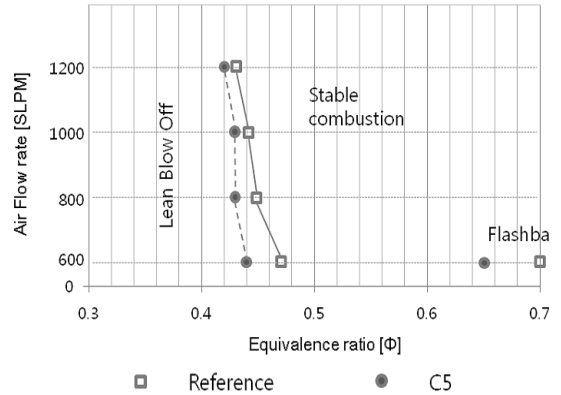
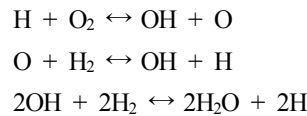


Fig. 5 The effect of hydrogen concentration on the limits of lean blow off and flashback



둘째, 공급되는 공기(산화제)의 절대량이 증가 할수록 희박소염구간이 확대된다. 이는 공기유량 증가에 따른 혼합기의 동일당량에서의 열량 증가로 인한 효과와 혼합 강도 증가로 희박소염구간이 확대된 것으로 판단된다.

결론적으로, 수소함량의 증가는 반응속도를 개선하고, 공기의 공급유량증가는 난류에 의한 혼합 시간 스케일을 줄여 희박소염구간 당량비 한계 값이 낮아

Table 2 Specifications of test fuel

Analysis item	Unit	Natural gas	CO	C1	C3	C5
Chemical composition						
CH ₄	mol %	92.46	95.27	93.82	90.95	88.12
C ₂ H ₆	mol %	5	0	0	0	0
C ₃ H ₈	mol %	1.46	4.73	5.18	6.05	6.88
i-C ₄ H ₁₀	mol %	0.31	0	0	0	0
n-C ₄ H ₁₀	mol %	0.34	0	0	0	0
i-C ₅ H ₁₂	mol %	0.02	0	0	0	0
N ₂	mol %	0.4	0	0	0	0
H ₂	mol %	0	0	1	3	5
LHV	MJ/Nm ³	42.71	42.71	42.71	42.71	42.71
WI(Wobbe index)	MJ/Nm ³	55.47	55.53	55.10	55.14	55.18

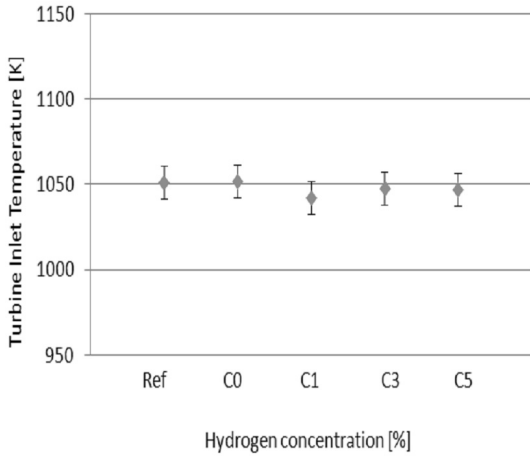


Fig. 6 The effect hydrogen concentration on turbine inlet temperature, air: 1,000 [SLPM], Load : 67 [%], Main fuel 100%

Table 3 Pattern factor for each test fuel

	Ref	C0	C1	C3	C5
PF (%)	10.8	10.6	11.0	11.0	10.9

지는 결과를 확인할 수 있다. 이는 정적안정성 측면에서 수소첨가에 따른 소염구간 확대는 긍정적인 영향이지만, 수소의 빠른 화염 점파 속도에 의한 역화 현상은 반대로 운전범위를 제한할 수 있다.

Fig. 5는 수소함량 5% 연료와 천연가스의 소염한계 및 역화 발생구간을 보여준다. 수소함량이 5%로 증가할 경우 소염한계는 확대 되지만, 역화로 인한 운전 범위가 제한됨을 확인하였다. 즉, 수소를 포함한 연료의 화염 정적안정화 구간은 당량비-air flow rate 평면 상에서 좌측으로 이동하는 경향이 있음을 확인하였다.

3.2 수소함량 변화에 따른 출력 및 배기가스 조성변화

합성천연가스의 수소함량이 증가할 경우 입열량이 동일하더라도 수소의 단열 화염온도가 160℃(수소:2,210K, 메탄:1,950K) 이상 높아 출력 및 배기 성능에 미치는 영향을 평가하였다. 상승된 화염온도에 의해 추가적으로 발생하는 Thermal NOx의 배출량을 배기 규제치(20ppm @ O₂ 15%)와 비교하였다.

Fig. 6에서와 같이 합성천연가스 조성 중 수소함

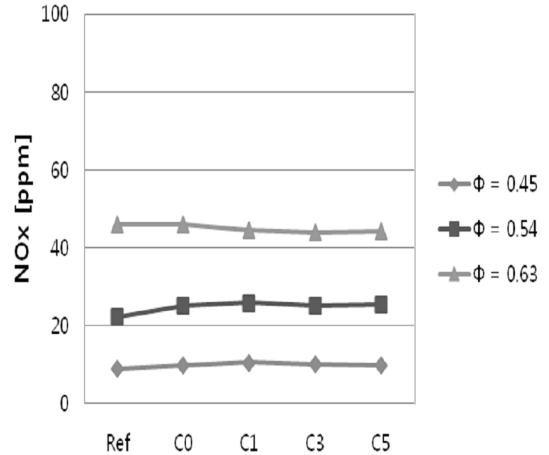


Fig. 7 The effect hydrogen concentration on NOx emission, air: 800 [SLPM], : $\Phi = 0.45, 0.54, 0.63$, Main fuel 100%

량이 5%까지 증가하더라도 터빈 입구온도에 미치는 영향은 없다고 볼 수 있다. 수소함량이 0%에서 5%까지 증가하더라도 Pattern factor의 경우 Table 3에서와 같이 10% 내외의 수치로 유사한 경향을 보였다.

그리고 공급공기 유량이 일정할 경우 가스터빈으로 공급되는 입열량이 동일할 경우 같은 수준의 배기 특성을 보이는 것을 Fig. 7과 Fig. 8 그리고 Fig. 9를 통해 확인할 수 있다. 실제 가스터빈의 경우 기저부하(base load)조건에서 압축기 회전수가 일정하

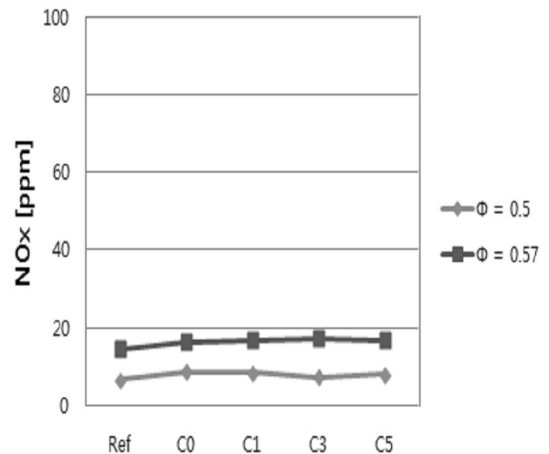


Fig. 8 The effect hydrogen concentration on NOx emission, air: 1,000 [SLPM], $\Phi = 0.5, 0.57$, Main fuel 100%

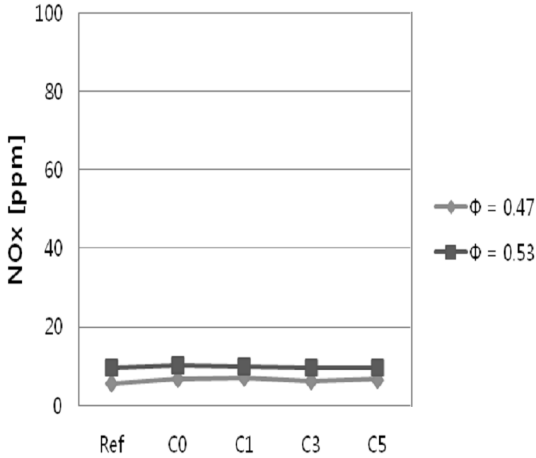


Fig. 9 The effect hydrogen concentration on NOx emission, air: 1,200 [SLPM], $\phi = 0.47, 0.53$, Main fuel 100%

여 일부 터빈냉각을 위해 추가되는 양을 제외하고 동일한 연소용 공기가 연소기 및 라이너로 공급되어진다. 본 연소기의 경우 라이너를 통한 냉각용 공기의 흐름이 차단된 형태로 부하조건에 따른 배기배출 특성을 논하기보다는 실제 연소에 사용된 공급 공기와 당량비를 이용하여 NOx 배출특성을 비교하였다. 일산화탄소 배출량은 1ppm 수준으로 연소효율은 99.9% 이상 수준이다. 배기가스중의 산소의 양을 측정하여 O₂ 15%로 보정한 NOx 데이터를 비교 분석에 활용하였다.

3.3 수소함량 변화에 따른 화염의 동적 안정성

수소의 낮은 부피당 발열량으로 인해 프로판을 첨가하여 발열량을 맞추고, 입열량(heat input) 변화 시 수소 함량 변화에 따른 연소 동압의 크기를 비교하였다. 연소동압(dynamic pressure)의 경우 연소기 덤프면(dump plane)에 동압센서를 장착하고, 20kHz로 동압 신호를 취득하여 RMS 평균한 값을 저장한다.

Fig. 10에서와 같이 공기유량이 일정할 경우 수소 함량이 5%까지 다른 연료를 동일한 입열량 조건으로 공급하여 연소시킬 경우 연소불안정에 의한 동압의 크기 변화는 없는 결과를 보였다. 입열량이 변화

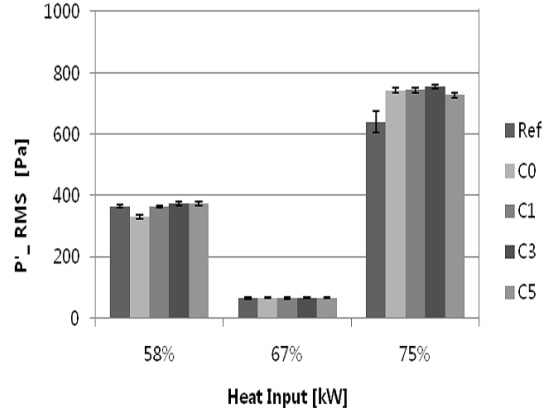


Fig. 10 The effect hydrogen concentration on NOx emission, air: 1,200 [SLPM], $\phi = 0.47, 0.53$, Main fuel 100%

에 따른 동압특성은 쿼츠 튜브로 이루어진 연소기의 특성에 따라 변화는 있으나, 동일한 입열량 조건에서는 신뢰도 95%수준에서 서로 다르다고 할 수 없는 수준의 결과를 보였다.

4. 결론

본 연구를 통해 합성천연가스의 조성이 가스터빈 연소에 미치는 영향을 예혼합 모델연소기를 이용하여 연구를 수행하고, 합성천연가스의 수소함량 변화 따른 화연안정화 구간 변화 및 출력과 배기성능을 비교하였다.

- 1) 수소함량 증가에 따라 lean blow out(희박날림)이 발생하는 당량비 한계가 낮아져서 낮은 당량비에서의 안정연소 구간이 확대되었으나, 역화현상에 있어서는 천연가스 보다 더 낮은 당량비에서 발생하여 정적화염안정화 구간이 0.03~0.05 정도 좌측으로 이동하였다. 즉 전체적으로 천연가스 내에 수소의 함량증가는 정적 연소안정 구간의 낮은 당량비 쪽으로 이동시켰다.
- 2) 합성천연가스의 수소함량이 5%수준까지는 터빈 입구온도, pattern factor, 연소진동 및 NOx 등 유해 배기가스에 미치는 영향은 매우 미미 했다.

3) 본 연구를 통해 수소함량 1~5%를 가지는 합성천연가스의 예혼합 형태의 가스터빈에서 안정적 연소가 가능함을 확인하였고, 추가적으로 장기운전 실증을 거쳐 포스코 광양 SNG 플랜트로부터 생산되는 연료가스를 이용하여 가스터빈 발전이 가능할 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 “석탄-SNG 품질기준 공동연구 추진단”의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. S. I. Park, J. W. Lee and H. K. Seo, “Effects of different coal type on gasification characteristics” Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 21, No. 5, 2010, pp. 470-477.
2. I. M. Smith, “Gas Turbine technology for syngas/hydrogen in coal-based IGCC”, CCC/155, IEA Clean Coal Center, 2009.
3. L. Figura, J. G. Lee, B. D. Quay and D. A. Santavicca, “The effects of fuel composition on flame structure and combustion dynamics in a lean premixed combustor”, ASME Turbo Expo, GT2007-27298, 2007.
4. K. T. Kim, J. G. Lee, H. J. Lee, B. D. Quay and D. A. Santavicca, “Characterization of forced flame response of swirl-stabilized turbulent lean-premixed flames in a gas turbine combustor”, ASME Turbo Expo 2009, 2009, pp. 823-831.
5. M. C. Lee, S. B. Seo, J. H. Chung, Y. J. Joo and D. H. Ahn, “Industrial gas turbine combustion performance test of DME to use as an alternative fuel for power generation”, J. of Fuel, Vol. 88, 2009, pp. 657-662.
6. M. C. Lee, S. B. Seo, J. H. Chung, S. M. Kim, Y. J. Joo and D. H. Ahn, “Gas turbine combustion performance test of hydrogen and carbon monoxide synthetic gas”, J. of Fuel, Vol. 89, 2010, pp. 1485-1491.
7. P. M. Park, H. M. Kim, Y. H. Choi, S. S. Yang and M. H. Chon, “Performance test of 5MW Gas turbine engine combustor”, The Journal of the Korean Society of Combustion, Vol. 13, No. 4, 2008, pp. 37-46.
8. http://en.wikipedia.org/wiki/Adiabatic_flame_temperature
9. R.W. Francisco Jr., F. Rua, M. Costa, R. C. Catapan and A. A. M. Oliveria, “Combustion characteristics of gaseous fuels with low calorific value in a porous burner”, Proceedings of the European Combustion Meeting, 2009.