

가정용 열병합 스텔링 엔진을 위한 예혼합 버너의 연소 특성

안 준^{*†} · 이윤식^{**} · 김혁주^{**}

* 국민대학교 기계시스템공학부, ** 한국에너지기술연구원

Combustion Characteristics of a Premixed Burner in a Stirling Engine for a Domestic Cogeneration System

Joon Ahn^{*†}, Youn Sik Lee^{**} and Hyouck Ju Kim^{**}

* School of Mechanical Engineering, Kookmin Univ.,

** Korea Institute of Energy Research

(Received August 9, 2011; Revised November 28, 2011; Accepted November 28, 2011)

Key Words: Stirling Engine(스텔링 엔진), Burner(버너), Premixed Combustion(예혼합 연소), Surface Combustion(표면 연소)

초록: 화석 에너지 고갈에 따라 에너지의 합리적 이용이 요구되면서 가용 에너지를 고려한 열에너지의 계단식 활용이 적극적으로 검토되고 있다. 이와 같은 배경에서 1 kW 급의 스텔링 엔진을 기반으로 한 열병합발전 시스템이 분산 에너지 시스템을 구축하는 단위로서 제안되었다. 1 kW의 용량은 가정용에 적합하며, 가정에서 활용하기 위해서는 공간을 작게 차지하도록 하면서도 소음과 유해가스의 배출을 철저하게 차단해야 한다. 이러한 조건들을 충족시키며 효율이 높은 시스템을 개발하기 위하여 슬롯 형태의 예혼합 버너를 제안하였고 버너의 연소 특성을 파악하기 위하여 일련의 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 화염의 형상을 촬영하여 연소부하 및 공기비에 따른 연소 모드를 관찰하였고 배가스를 분석하여 연소 모드에 따른 배기 특성을 연구하였다.

Abstract: The availability of thermal energy has been widely recognized recently, and the cascade usage of thermal energy from combustion has been encouraged. Within this framework, a 1-kW-class Stirling-engine-based cogeneration system has been proposed as a unit of a distributed energy system. The capacity has been designed to be adequate for domestic usage, which requires high compactness as well as low emissions and noise. To develop a highly efficient system satisfying these requirements, a premixed slot-type short-flame burner has been proposed, and a series of experiments has been performed to understand its combustion characteristics. Flame images have been captured to observe the dependence of the flame mode on the combustion load and air/fuel ratio. The exhaust gas has been sampled and analyzed to study the emission characteristics for each flame mode.

1. 서론

최근 에너지 자원의 고갈과 지구 온난화 문제가 심각하게 인식되면서 장기적으로는 신재생 에너지의 개발이 단기적으로는 에너지의 합리적 이용이 대책으로 제안되고 있다. 에너지의 합리적 이용 방안으로서 가용 에너지 및 엑서지의 개념에 바탕을 둔 계단식 열에너지 이용을 고려할 수 있다. 즉,

연료를 연소함으로써 발생한 고온의 열에너지는 1 차적으로 전기 에너지로 변환하고 냉난방을 위해 필요한 열은 변환 후에 발생하는 배열을 이용하면 가용에너지가 높은 연소 가스를 직접 열로서 활용하는 것보다 에너지를 합리적으로 활용할 수 있다.

위와 같은 에너지 이용방식을 열병합 발전이라고 하고 시스템을 소형화하여 에너지 수용가에서 직접 전기 및 열에너지를 생산하여 활용할 경우, 고압 송전을 위한 변압 과정이나 송배전 과정에서 발생하는 에너지 손실을 줄일 수 있을 뿐 아니라 에너지 수요에 맞추어 에너지를 생산함으로써 에

† Corresponding Author, jahn@kookmin.ac.kr
© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

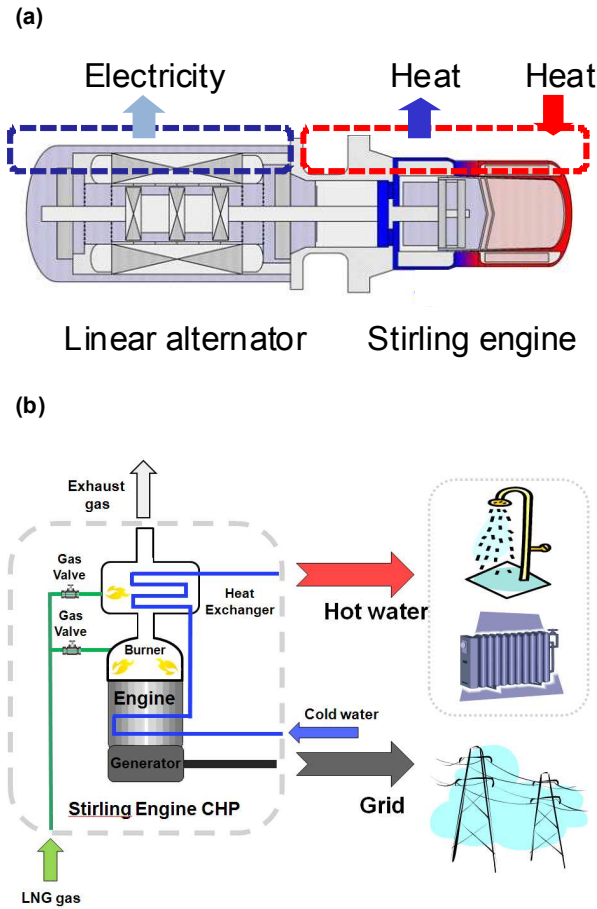


Fig. 1 Stirling engine and CHP system; (a) Free piston Stirling engine; (b) Stirling engine based CHP system

너지 수요, 공급 불일치에 따라 에너지를 변환, 저장하며 발생하는 손실을 줄일 수 있다.⁽¹⁾

이에 본 과제에서는 가정용 분산 전원으로 활용할 수 있는 1 kW 급 소형 열병합 시스템을 개발하고자 한다(Fig. 1(b)). 전기를 생산하는 원동기로는 가정용 분산 전원이라는 용도에 주목하여 경량화할 수 있고 왕복동식 내연기관에 비해 소음 및 배기 특성에서 유리한⁽²⁾ Stirling 엔진을 채택하였다. 본 과제에서는 도시 가스가 공급되는 가구를 대상으로 고려하여 LNG 를 연료로 채택하였으나 Stirling 엔진은 외연 기관이라는 특성 때문에 내연 기관에 비해 연료 또는 열원 선택의 폭이 넓어 장기적으로 바이오매스⁽³⁾나 태양열⁽⁴⁾과 같은 신재생 열원을 활용할 수 있다.

Stirling 엔진은 기구학적 메커니즘에 따라 몇 가지 종류로 분류할 수 있는데 1 kW 라는 용량을 고려하여 본 과제에서는 Free piston 방식⁽⁵⁾을 채택

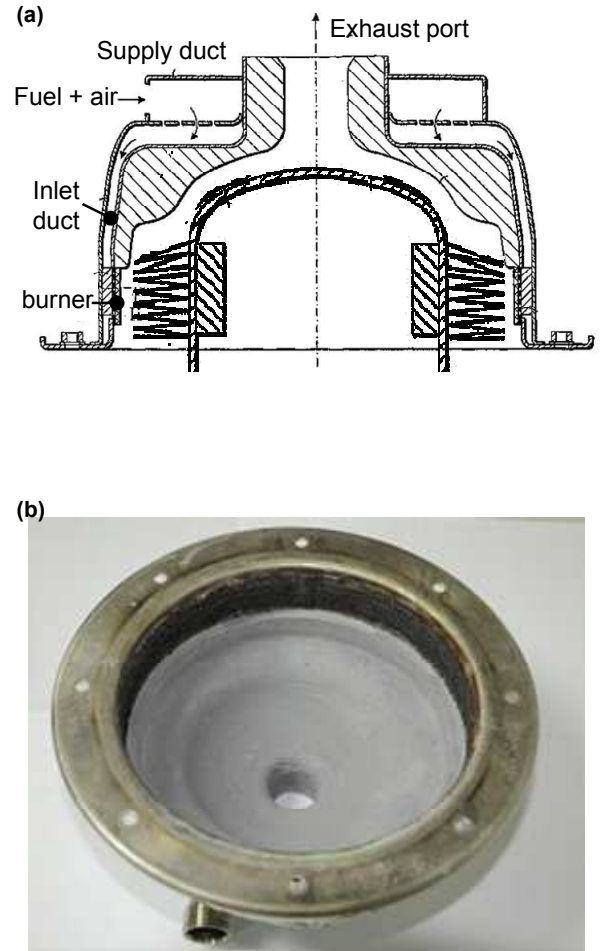


Fig. 2 Burner for the 1 kW class Stirling engine; (a) Cross-section schematic; (b) Photograph

하였다(Fig. 1(a)). Free piston 방식의 Stirling 엔진에 열을 공급하기 위해서는 실린더 형태의 수열부에 효과적으로 열을 전달하도록 연소기를 설계해야 한다. 비슷한 용량의 개발 중이거나 상용화되어 있는 Stirling 엔진을 분석한 결과 실린더를 둘러싸는 띠 형태의 버너가 널리 채택되고 있으며 좁은 공간에서 안정된 연소 특성을 확보하기 위하여 예혼합 표면연소 방식⁽⁶⁾을 취하는 경우가 많았다.

예혼합 표면연소의 경우 공극률, 연소부하, 공기비에 따라 화염 형태와 배가스 특성이 변화하게 되고,⁽⁷⁾ 본 연구에서는 1 kW 급 스티어링 엔진을 위해 제작된 버너에 대하여 연소부하 및 공기부하에 따른 연소 특성을 실험적으로 파악하였다. 실제 엔진에서 사용하는 버너를 포함한 실험장치를 구성하였고 화염 형상을 촬영하여 화염 모드를 관찰하고 배가스를 분석하여 연소 조건에 따른 NOx 및 CO의 배출 특성을 파악하였다.

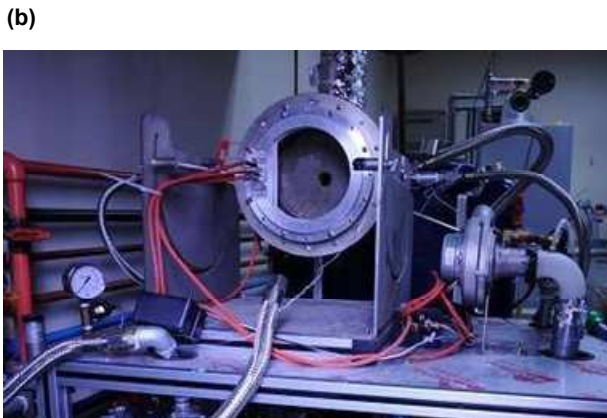
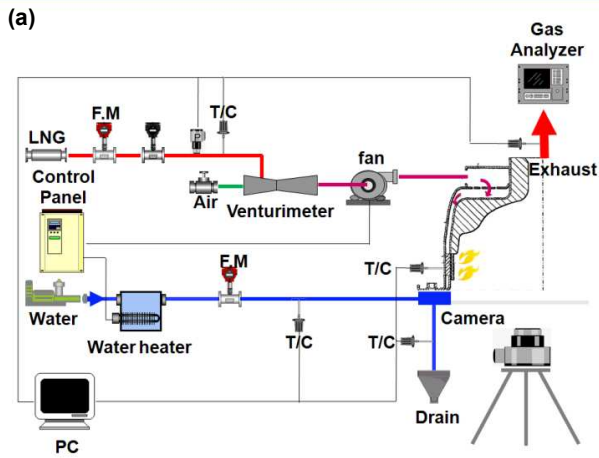


Fig. 3 Experimental apparatus; (a) Schematic diagram; (b) Photograph

2. 실험장치 및 방법

본 연구에서는 Benchmark 대상으로 선정된 Microgen 社의 엔진⁽⁸⁾에 장착된 것과 동일한 버너 (Fig. 2(b))에 대하여 연소 특성 실험을 수행하였다. 버너는 예혼합 버너로서 혼합기가 공급덕트를 통해 공급되며 그 과정에서 열교환을 통해 엔진 배가스의 열을 회수하는 구조를 갖추고 있다(Fig. 2(a)). 버너 출구는 다공성 물질로 구성되어 열재순환을 통해 화염을 안정화시키고 효과적인 열전달이 이루어지도록 하였다. 엔진 헤드에 효율적으로 열을 전달하기 위하여 버너 출구가 원주 방향의 슬롯 형태를 갖추고 있다(Fig. 2(a)). 다공성 물질은 금속 섬유 재질로서 공극률은 0.81 이다.

연소 특성을 파악하기 위하여 Fig. 3 과 같이 실험장치를 구성하였다.

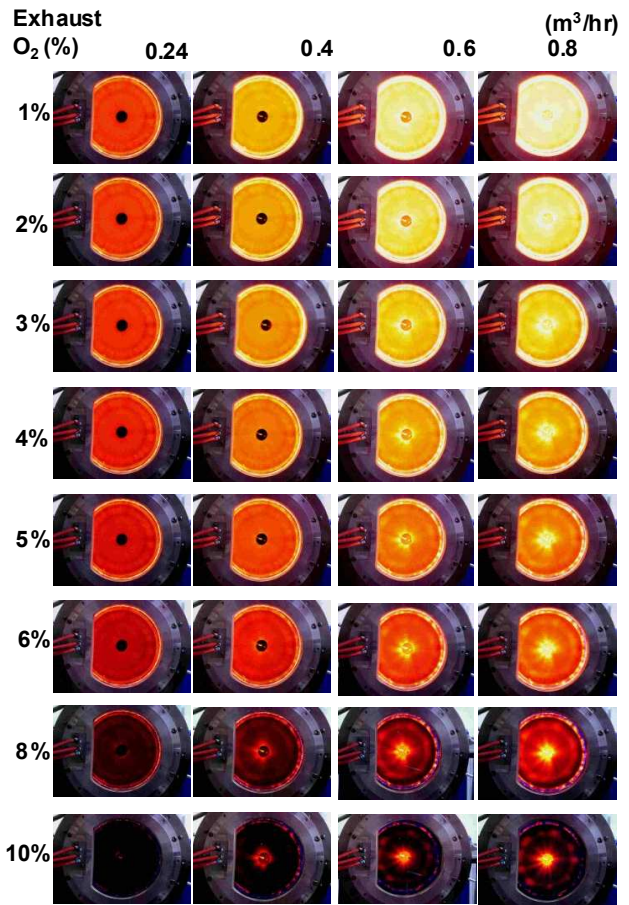


Fig. 4 Flame images (front view)

연료는 LNG 를 사용하였고 예혼합 버너이므로 공기와 혼합되어 버너로 공급 된다. 버너는 전기출력 1 kW 의 Stirling 엔진을 위해 제작되었고 최대 0.8 Nm³/h 까지 연료 공급이 가능하다. 본 연구에서는 설계 turn down 이 3:1 인 것을 고려하여 연료유량 0.24, 0.4, 0.6, 0.8 Nm³/h 에 대하여 실험을 수행하였다. 공기비는 화염 모드를 관찰하기 위하여 배가스 중 산소농도를 1%에서 10%에 해당하는 범위를 실험하였다.

혼합기 상류에 연료 유량계를 설치하여 연료량을 측정 및 제어할 수 있도록 하였고 온도와 압력도 함께 측정하여 유량을 표준 상태로 환산할 수 있도록 하였다. 공기유량은 배가스 산소농도를 관찰하여 실험 조건으로 설정한 값이 되도록 송풍기를 제어하였다. 혼합기는 공급덕트를 거쳐 금속 섬유로 구성된 버너 출구에 공급된다. 버너 출구에는 점화기를 설치하여 초기 점화가 이루어지도록 하였다.

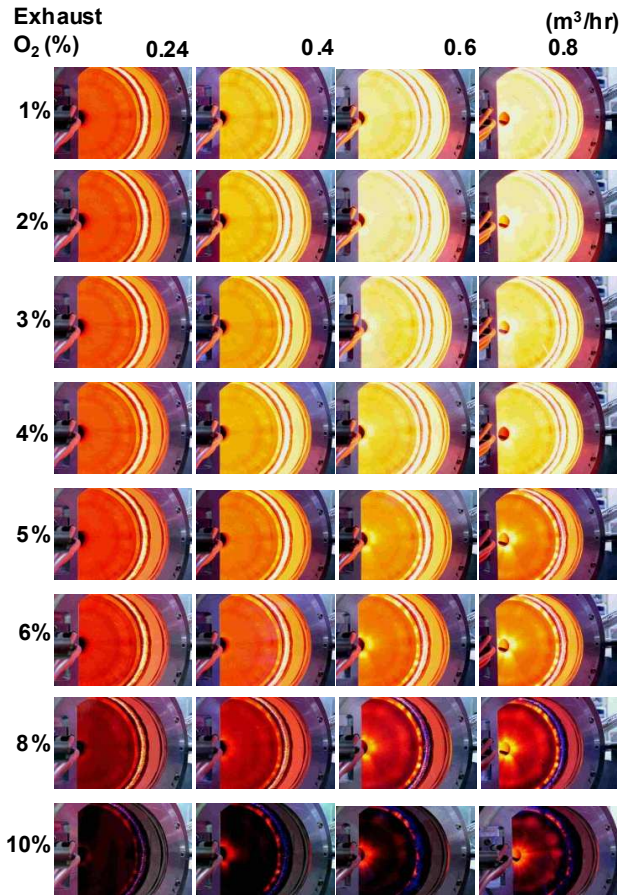


Fig. 5 Flame images (side view)

화염 형상을 관찰하기 위하여 연소실의 출구 맞은편에 석영 소재의 관측창을 설치하였다. 관측창 내부의 화염 형상은 연소 모드를 정확하게 파악하기 위하여 정면과 측면 두 곳에서 촬영하였다. 본 실험에서는 정확한 화염 형상을 파악하기 위하여 엔진 헤드에 해당하는 열교환기를 장착하지 않고 실험을 진행하였다. 따라서 관측창이 화염에 직접 노출되게 되므로 수냉 자켓을 설치하여 관측창이 파손되지 않도록 하였다.

연소실 출구에서는 배가스를 포집하여 실시간으로 성분을 분석하였다. 배가스에 포함된 산소농도를 확인하여 공기비를 제어하고 CO 및 NOx의 농도를 측정하여 화염 모드에 따른 연소 특성을 확인하였다. CO 및 NOx의 농도는 SIEMENS Ultramat 23 가스분석기를 이용하여 측정하였고 측정 범위에서 최대 오차가 각각 2.3, 2.6 ppm 이 되도록 범위를 설정하고 교정을 수행하여 측정하였다. 또한 연소실 출구에서는 배가스의 온도를 측정하여 부하율 및 공기비에 따른 열전달 특성을

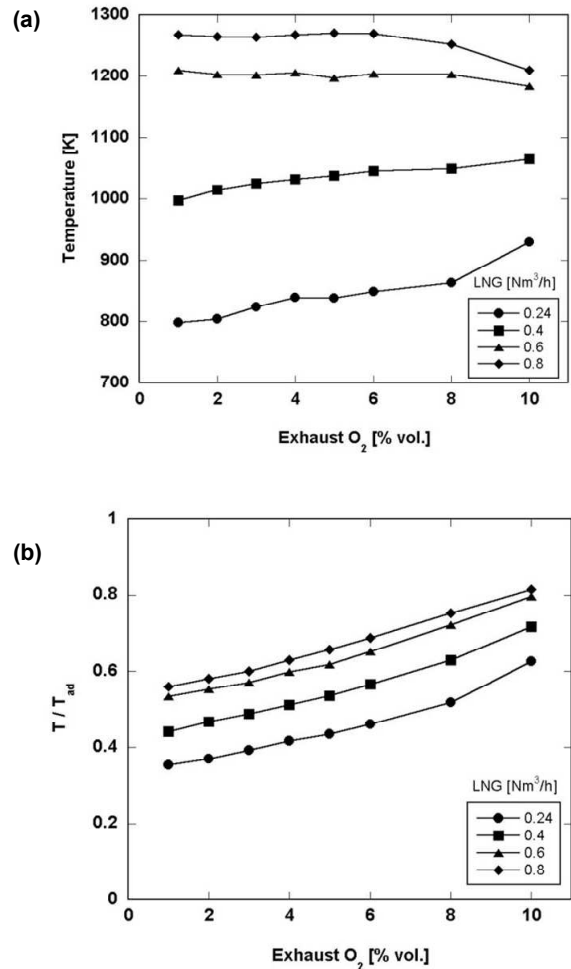


Fig. 6 Temperature at the exit of the combustion chamber; (a) temperature; (b) normalized temperature

파악하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 화염 형상

관측창을 통해 촬영한 화염형상을 보면 (Figs. 4, 5) 연소 부하가 증가할수록, 배가스 산소농도가 감소할수록 캐스터블이 밝게 적열되어 촬영한 화상의 휘도가 높아지고 반대로 갈수록 화상이 어두워 지는 것을 관찰할 수 있다. 배가스 산소농도가 4% 이내로 작은 경우에는 화염이 원주방향으로 밝게 형성되어 있다. 이는 화염이 금속 섬유 내에 형성되고 금속 섬유 표면에서 강한 복사 열전달을 나타내는 복사(Radiant) 화염^(6,7) 형태로 볼 수 있다.

배가스 산소농도 6% 부근에서는 금속 섬유 표면의 화염은 휘도가 약해지며 주황색에 가까워지

고 청염(Blue flame)이 나타나기 시작한다. 배가스 산소농도가 10%까지 증가하면 복사 화염은 관찰할 수 없고 금속 섬유 표면에서 조금 떨어진 위치에 청염 형태로 나타나는 것을 볼 수 있다. 청염은 Fig. 5 에 제시한 측면 사진을 보면 보다 분명하게 관찰할 수 있다.

3.2 열전달 특성

본 연구에서 실험을 수행한 장치(Fig. 3)에서 연소가 이루어지면 화염면과 연소실 벽면 및 관측창 사이의 복사열전달 및 연소 가스가 연소실을 통과하면서 생기는 대류 열전달에 의해 연소 가스가 단열화염온도보다 낮은 온도로 냉각되어 연소실을 빠져나가게 된다. 엔진 헤드가 설치되지 않은 상태에서의 기준 열전달 특성을 파악하기 위하여 연소실 출구의 온도를 측정하여 Fig. 6 에 제시하였다.

버너 출구 온도는 부하율이 증가할수록 열손실이 차지하는 비율이 감소하면서 온도가 증가하는 경향을 보인다(Fig. 6(a)). 설계 용량인 LNG 유량 0.8 Nm³/h 의 경우에는 연소실 출구온도가 1270 K 부근을 나타내지만 설계 턴다운인 3:1 부근인 0.24 Nm³/h 의 경우에는 출구온도가 엔진의 설계 작동 온도인 800 K 부근까지 낮아지는 것을 볼 수 있다.

공기비에 대해서는 LNG 유량이 0.8 및 0.6 Nm³/h 의 경우 공기비가 증가할수록 출구온도가 감소하는 경향을 보이고 낮은 부하율에서는 반대로 공기비가 증가할수록 출구온도가 증가하는 경향을 보인다. 전체 발열량과 배가스로 배출되는 엔탈피의 비율을 보기 위하여 배가스 출구 온도를 단열화염온도로 무차원화하여 Fig. 6(b)에 제시하였다. 결과를 보면 모든 부하율에서 공기비가 증가할수록 무차원 출구온도가 증가하는 특성을 나타낸다.

3.3 배가스 성분 분석

연소실 출구에서 배가스 성분을 분석해보면 NOx 의 농도는 연소 부하가 증가할수록 높은 농도를 보이고 모든 연소 부하에 대하여 공기비가 증가할수록 감소하는 경향을 나타낸다(Fig. 7(a)). 화염 형태와 연관 지으면 복사 화염 모드보다는 청염 모드에서 NOx 의 생성이 작은 것을 관찰할 수 있고 배가스 산소농도가 3%이상이 되면 모든 연소부하에 대하여 NOx 의 발생량이 40 ppm 이하로 낮아지는 것을 볼 수 있다.

한편, CO 농도는 (Fig. 7(b)) 연소 부하가 증가할수록 증가하는 경향을 보인다. 연소 부하가 크고 공기비가 작은 경우에는 상대적으로 금속 섬유 버너 표면보다 깊은 곳에서 연소가 시작되어 CO 가 발생하는 것으로 보인다. 설계부하인 LNG 유량 0.8 m³/h 의 경우 배가스 산소농도가 3% 이상인 영역에서는 CO 발생량이 30 ppm 이내로 제어되는 것을 확인할 수 있다. 청염이 형성되기 시작하는 (Fig. 5) 배가스 산소농도 6% 이상의 영역에서는 모든 연소부하에서 CO 농도가 20 ppm 이하의 낮은 값을 보인다. 단, 실험을 수행한 최저 연소부하인 LNG 유량 0.24 m³/h 의 경우, 배가스 산소농도가 10%가 되면 부분적으로 취염(blow out)이 이루어지면서 다량의 CO 가 생성되는 것을 볼 수 있다.

부하율에 따른 배가스 특성을 파악하기 위하여 단위 연료유량당 NOx 및 CO 의 배출량을 계산하

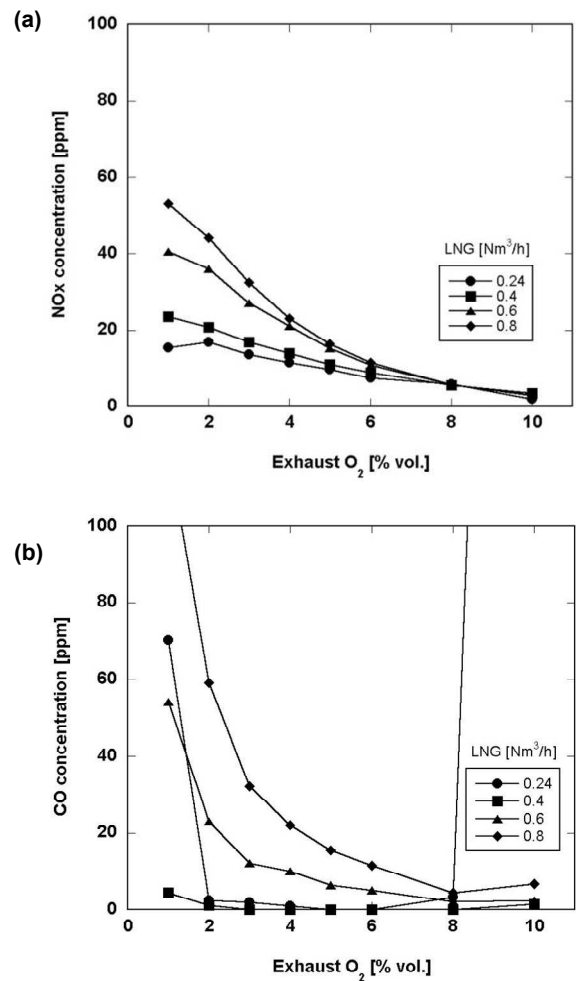


Fig. 7 NOx and CO concentration of the exhaust gas (a) NOx concentration; (b) CO concentration

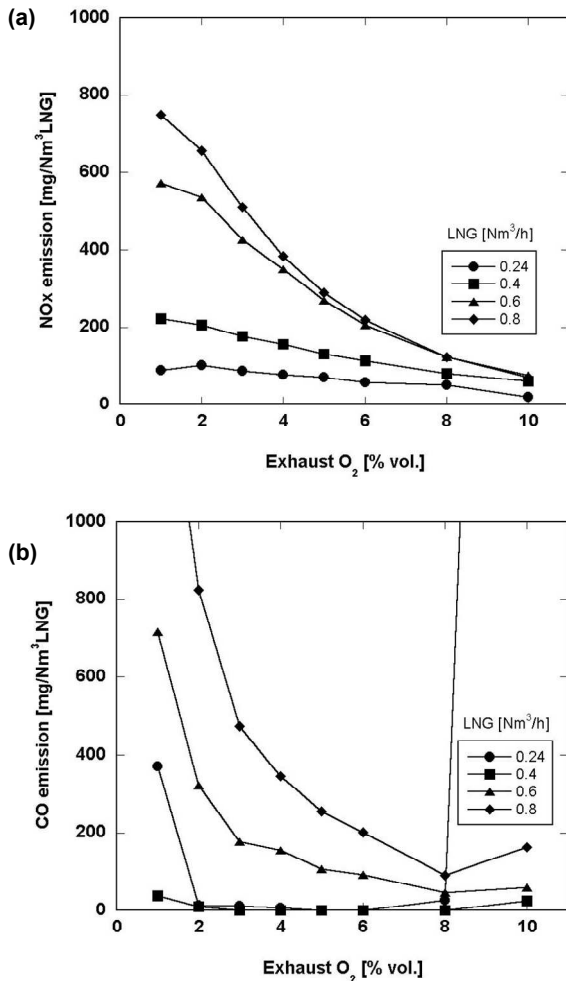


Fig. 8 NOx and CO emission per unit fuel consumption (a) NOx emission; (b) CO emission

여 Fig. 8 에 제시하였다. 전체적으로 Fig. 7 에 제시한 배가스 농도와 유사한 경향을 보이지만 연료 유량에 따른 차이가 확대된 것을 관찰할 수 있다. 단위 연료량당 CO 및 NOx 배출량은 연료 유량이 증가할수록 증가하고 공기비가 증가할수록 감소하는 경향을 보인다. 설계조건인 연료유량 0.8 Nm³/h 의 경우 배가스 산소농도 3% 이상인 조건에서 연료 1 Nm³/h 당 NOx 및 CO 발생량이 각각 500 mg 이내로 제어되는 것을 볼 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 1 kW 급 스텔링 엔진에 사용되는 예혼합 버너의 연소 특성을 실험적으로 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 본 연구에서 실험을 수행한 버너에서는 배가스 산소농도 기준으로 1~10%까지 공기비를 변

화시키는 과정에서 배가스 산소농도 6% 부근에서 복사 화염 모드에서 청염 모드로 변화하는 것이 관찰되었다.

(2) 부분 부하 조건에서 부하율이 증가할수록, 공기비가 증가할수록 연소실에서의 상대적 열손실은 감소한다.

(3) 0.24 Nm³/h 이상인 연료 유량에 대하여 배가스 산소 농도 3% 이상의 공기비에서는 CO, NOx 모두 40 ppm 이내로 제어되는 성능을 나타내었다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 에너지·자원기술개발사업에 의해 수행되었고 2010 년도 국민대학교 교내 연구지원금으로부터 일부를 지원받았으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Ahn, J., Lee, Y. S. and Kim, H. J., 2010, "CFD Study on the Combustion Characteristics of a 1 kW Class Stirling Engine," *Proc. of the 2010 KSCFE Spring Annual Meeting*, pp. 252~257.
- (2) Onovwiona, H. I. and Ugursal, V. I., 2006, "Residential Cogeneration Systems: Review of the Current Technology," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 10, pp. 389~431.
- (3) Nishiyama, A., Shimojima, H., Ishikawa, A., Itaya, Y., Kambara, S., Moritomi, H. and Mori, S., 2007, "Fuel and Emission Properties of Stirling Engine Operated with Wood Powder," *Fuel*, Vol. 86, pp. 2333~2342.
- (4) Kongtragool, B. and Wongwises, S., 2007, "Performance of a Twin Power Piston Low Temperature Differential Powered by a Solar Simulator," *Solar Energy*, Vol. 81, pp. 884~495.
- (5) Brandhorst, H. W. and Chapman, P. A., 2008, "New 5 kW Free Piston Stirling Space Converter Developments," *Acta Astronautica*, Vol. 63, pp. 342~347.
- (6) Mujeebu, M. A., Abdullah, M. Z., Barkar, M. Z. A., Mohamad, A. A. and Abdullah, M. K., 2009, "Applications of Porous Media Combustion Technology: a Review," *Applied Energy*, Vol. 86, pp. 1365~1375.
- (7) Jurng, J. and Lee, G. W., 1996, "NOx and CO Emission from a Premixed Flame Stabilized in a Porous Ceramic Matrix Burner," *Trans. of the KSME B*, Vol. 20, No. 10, pp. 3243~3250.
- (8) BAXI Ltd., 2007, "BAXI Micro CHP," pp. 1~3.