

1 kW급 LNG 스티어링 엔진 연소실 수치해석

안 준,^{*1} 이 윤 식,² 김 혁 주²

CFD STUDY ON THE COMBUSTION CHAMBER OF A 1 kW CLASS STIRLING ENGINE

J. Ahn,^{*1} Y.S. Lee² and H.J. Kim²

The availability of the thermal energy has been deeply recognized recently to encourage the cascade usage of thermal energy from combustion. Within the framework, a 1 kW class Stirling engine based cogeneration system has been proposed for a unit of a distributed energy system. The capacity has been designed to be adequate for the domestic usage, which requires high compactness as well as low emission and noise. To develop a highly efficient system with satisfying these requirements, a premixed slot type short flame burner has been proposed and a series of numerical simulation has been performed to establish a design tool for the combustion chamber. The thermal radiation model has been found to highly affect the computational results and a proper resolution to analyze the heat transfer characteristics of the high temperature heat exchanger. Finally, the combustion characteristics of the premixed flame with the metal fiber type burner has been studied.

Key Words : 스티어링 엔진 (Stirling Engine), 전산유체역학 (CFD:Computational Fluid Dynamics), 연소실 (Combustion Chamber), 예혼합 연소 (Premixed Combustion)

1. 서 론

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 1차적으로 전기 에너지로 변환하고 냉난방을 위해 필요한 열은 변환 후에 발생하는 배열을 이용하면 가용에너지가 높은 연소 가스를 직접 열원으로 활용하는 것보다 에너지를 합리적으로 활용할 수 있다.

위와 같은 에너지 이용방식을 열병합 발전이라고 하고 시스템을 소형화하여 에너지 수용가에서 직접 전기 및 열에너

지를 생산하여 활용할 경우, 고압 송전을 위한 변압 과정이나 송배전 과정에서 발생하는 에너지 손실을 줄일 수 있을 뿐 아니라 에너지 수요에 맞추어 에너지를 생산함으로써 에너지 수요, 공급 불일치에 따라 에너지를 변환, 저장하는 경우 발생하는 손실을 줄일 수 있다.

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

Stirling 엔진은 기구학적 메커니즘에 따라 몇 가지 종류로 분류할 수 있는 데 1 kW라는 용량을 고려하여 본 과제에서는 Free piston 방식[4]을 채택하였다 (Fig. 1). Free piston 방식의 Stirling 엔진에 열을 공급하기 위해서는 실린더 형태의 수 열부에 효과적으로 열을 전달하도록 연소기를 설계해야 한다.

접수일: 2011년 8월 9일, 수정일: 2011년 9월 8일,
게재확정일: 2011년 9월 9일.

1 정희원, 국민대학교 기계시스템공학부

2 한국에너지기술연구원

* Corresponding author, E-mail: jahn@kookmin.ac.kr

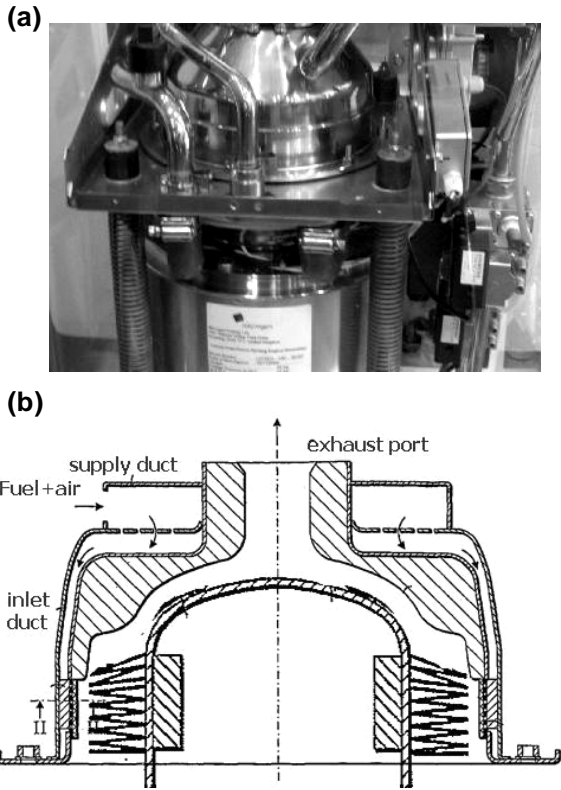


Fig. 1 Piston free Stirling engine and modeling of its combustion chamber; (a) 1 kW class Stirling engine; (b) Cross-section of the combustion chamber

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[5]을 취하는 경우가 많았다.

이에 본 연구에서는 예혼합 표면연소 방식을 채택한 1 kW 급 Stirling 엔진의 버너를 설계하기 위하여 연소실에 대한 수치해석을 수행하였다. Fig. 1에 제시한 것과 같이 엔진 및 버너는 전체적으로 축대칭 형상으로 볼 수 있으므로 축대칭 2차원 수치해석을 수행하여 2차원 해석을 통한 설계 가능성을 타진하고 격자의 해상도, 난류 및 복사 모형이 수치해석 결과에 미치는 영향을 파악하였다.

2차원 해석 결과를 바탕으로 격자 해상도 및 해석 모형을 결정하여 3차원 해석을 수행하였다. 본 과제에서는 Microgen社의 엔진[6]을 Benchmark 대상으로 채택하였는데 해당 엔진에는 실린더에 Serrated 형태의 3차원 형상의 Fin이 부착되어 있으므로 3차원 해석에서는 Fin의 3차원 형상을 고려하고 다

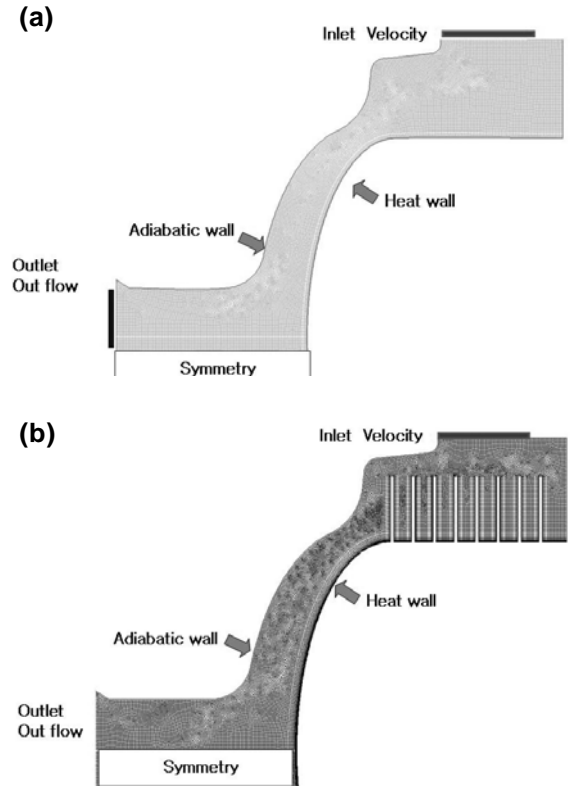


Fig. 2 Two dimensional modeling of the combustion chamber; (a) Engine surface without fins; (b) Engine surface with fins

공성 연소기의 연소 현상을 계산에 포함하여 고온 열교환기를 포함한 연소실에서의 연소, 유동 및 열전달 특성을 파악하였다.

2. Stirling 엔진 연소실의 2차원 해석

2.1 2차원 모형화 및 해석기법

본 연구의 해석에는 상용 프로그램인 FLUENT를 사용하였고 지배방정식으로 연속방정식과 비압축성 운동량 방정식, 에너지 방정식을 해석하였다. 본 과제에서 모델로 삼은 Stirling 엔진[6]의 연소실은 Fig. 1(b)와 같이 축대칭에 가까운 형상으로 되어 축대칭 2차원 해석이 가능하다. 2차원 해석에서는 격자의 해상도, 난류 모형 및 복사 모형 등 3차원 해석으로 찾기 어려운 수치해석 조건을 찾는 것을 목표로 하였다. 따라서 혼합 기체 공급을 위한 유로 및 버너는 계산 영역에서 제외하고 Fig. 2와 같이 연소실만을 계산영역에 포함하였다.

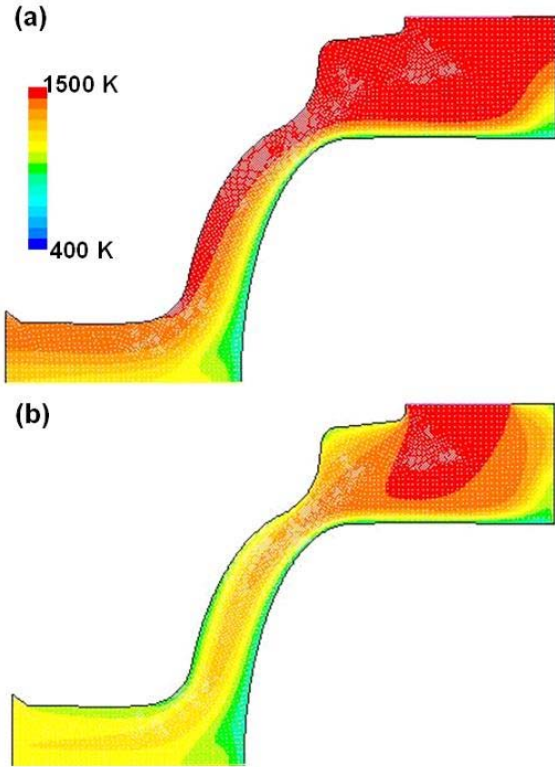


Fig. 3 Temperature distribution inside the combustion chamber with the engine without fins; (a) Air; (b) Combustion gas

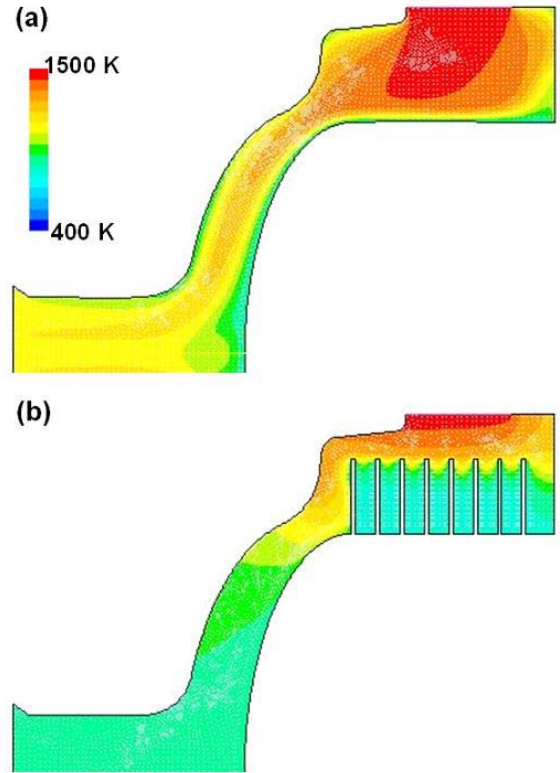


Fig. 4 Temperature distribution inside the combustion chamber; (a) Engine surface without fins; (b) Engine surface with fins

유동 및 Fin의 열전달을 해석하기 위한 격자 해상도를 파악하고 Fin에 의한 열전달 효과를 관찰하기 위하여 Fig. 2(a), (b)와 같이 Fin이 없는 경우와 있는 경우에 대하여 각각 수치 해석을 수행하였다. 격자계는 Fig. 2에 제시한 것과 같이 육면체 격자를 사용하였고 격자 민감도 해석을 통해 Fin이 없는 경우에는 16,000 개, Fin이 있는 경우에는 21,000 개의 격자를 사용하였다. Fin이 있는 경우 성긴 격자를 사용할 경우 Fin으로의 열전달이 작게 해석되어 출구 온도가 Fin이 없는 경우보다 높게 나타나는 결과를 보였다.

경계조건은 대칭축에서는 대칭조건을 부과하였고 단열재로 둘러싸인 연소실 벽면에는 단열 조건을 부과하였다. 계산영역의 입구인 버너 출구에서는 LNG를 연료로 채택한 1kW급 Stirling 엔진을 모형화하기 위하여 발열량이 5kW인 LNG 유량에 대하여 배가스의 산소농도가 3%가 되도록 공기를 공급한 연소가스의 유량을 부과하였다. 버너 출구에서 온도는 1300℃ (1573 K)를 부과하였다. 실린더 표면 온도는 엔진의 사양서[6]를 참조하여 550℃로 고정하였다. 작동 유체의 복사 물성이 계산에 미치는 영향을 파악하기 위하여 공기와 연소

가스 2가지 유체에 대하여 계산을 수행하였다. 유체의 물성치는 조각적으로 선형인 함수를 가정하여 부과하였다.

난류 모형은 표준 $k-\epsilon$ 모형과 RNG $k-\epsilon$ 모형을 채택하여 계산을 수행하여 비교한 결과 거의 같은 결과를 나타내었다. 복사 모형은 P-1 모형, $02 \times \phi 2$ 및 $05 \times \phi 5$ 의 DO (Discrete Ordinate) 모형을 채택하여 계산을 수행하였다. 난류 모형과 달리 복사 모형에 대해서는 계산 결과가 큰 차이를 보였으며 결과는 2.2에 제시한다.

2.2 2차원 해석 결과

Fin을 설치하지 않은 연소실에 대하여 복사 모형은 2×2 의 DO모형을 채택하고 공기 및 연소가스를 작동 유체로 계산한 결과를 Fig. 3에 제시하였다. 각각의 작동 유체에 대하여 속도 벡터는 유사한 분포를 보이나 온도의 경우 열물성의 차이로 차이를 보인다. 작동 유체가 연소 가스인 경우 (Fig. 3(b)), 공기인 경우 (Fig. 3(a))에 비해 엔진으로의 열전달이 활발하여 최종배가스의 온도가 낮은 것을 관찰할 수 있다. 최종배가스

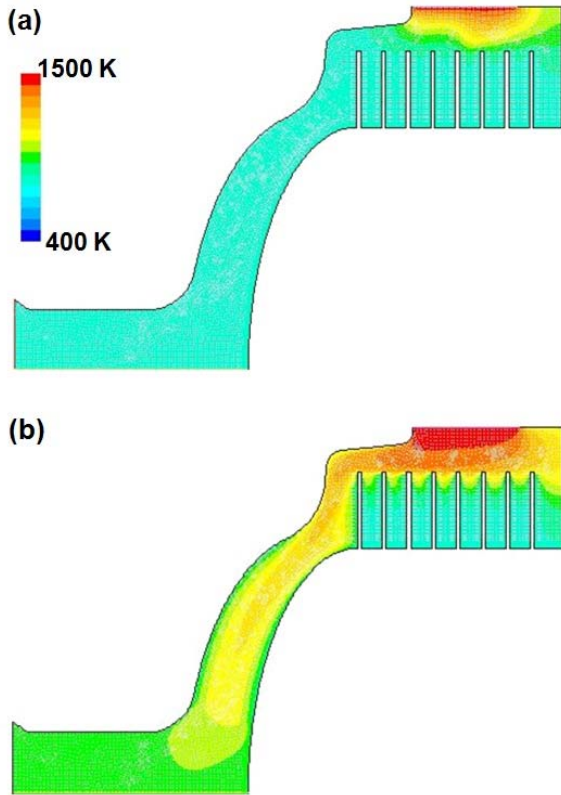


Fig. 5 Effects of radiation model on the temperature distribution inside the combustion chamber; (a) P-1 radiation model; (b) 5x5 DO model

온도는 공기의 경우 1330 K, 연소 가스의 경우 1098 K로 예측되었다.

작동 유체가 연소 가스일 때, Fin을 설치한 경우와 설치하지 않은 경우 수치해석 결과를 Fig. 4에 제시하였다. Fig. 4의 경우 복사 모형은 2x2의 DO모형을 채택하였다. Fin을 설치한 경우 엔진으로의 열전달량이 증가하여 배가스의 온도가 낮아지는 것을 관찰할 수 있다. Fin을 설치할 경우 최종 배가스 온도는 Fin이 없는 경우보다 약 150 K 낮아진 950 K로 계산되었다.

마지막으로 Fin이 설치된 경우에 복사 모형에 따른 계산 결과를 보면 (Fig. 5) 복사 모형에 따라 배가스 온도가 큰 차이를 보이는 것을 확인할 수 있다. Fig. 5(b)에 제시한 5x5의 DO 모형의 경우 배가스 온도가 970 K로서 Fig. 4에 제시한 2x2의 DO 모형과 비교했을 때 20 K의 차이를 보이지만 Fig. 5(a)에 제시한 P1 모형의 경우 730 K로서 220 K의 차이를 보인다. 적합한 복사 모형에 대한 관점은 실험을 수행한 후에 내릴 예정이다.

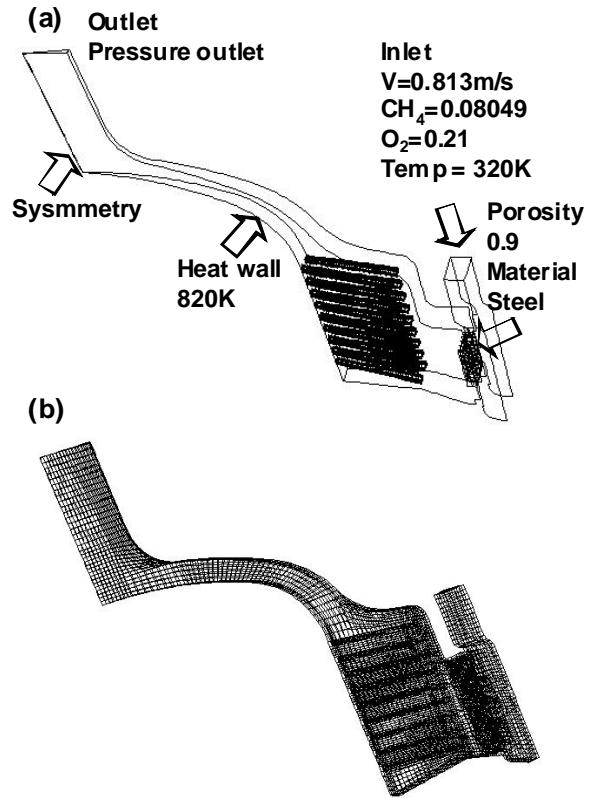


Fig. 6 Three dimensional modeling of the combustion chamber; (a) Computational domain and boundary conditions; (b) Grid system

3. Stirling 엔진 연소실의 3차원 해석

3.1 3차원 모형화 및 해석 기법

3차원 해석에서는 microgen社의 엔진과 같이 Serrated Fin을 형상에 포함시켰고 다공성 금속 섬유 버너에서의 연소 현상을 포함하여 계산을 수행하였다. 연소계산에서 LNG는 메탄으로 단순화 하였고 지배방정식에는 화학종 방정식을 추가하여 해석하였다. Serrated Fin은 축대칭 형태로 접선 방향으로 배열되는 데 접선 방향으로 2개의 Fin이 포함되도록 계산영역을 설정하고 절단면에는 대칭조건을 부과하였다 (Fig. 6(a)).

버너의 연소현상 해석을 위해 Fig. 6(a)와 같이 혼합 기체 공급을 위한 유로를 계산 영역에 포함시켰으며 금속 섬유로 구성된 버너는 다공성 매질로 처리하였다. 버너에 해당하는 다공성 매질의 재질은 철, 공극률은 0.9로 설정하였다. 격자계는 육면체 격자로 구성하였으며 2차원 해석 결과를 바탕으로 해상도를 결정하여 230,000개 및 1,100,000 격자를 사용하여 결과를 비교하였다.

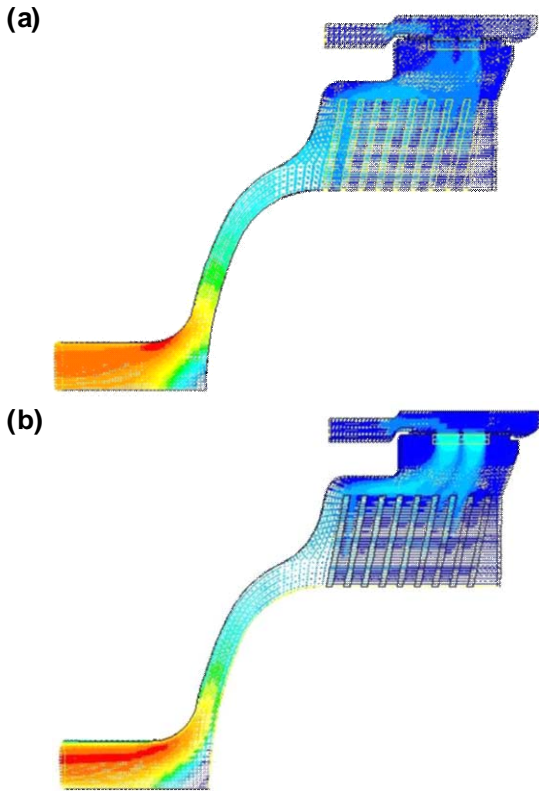


Fig. 7 Velocity vectors from the 3D simulation; (a) Coarse grid result (230,000 cells); (b) Fine grid result (1,100,000 cells)

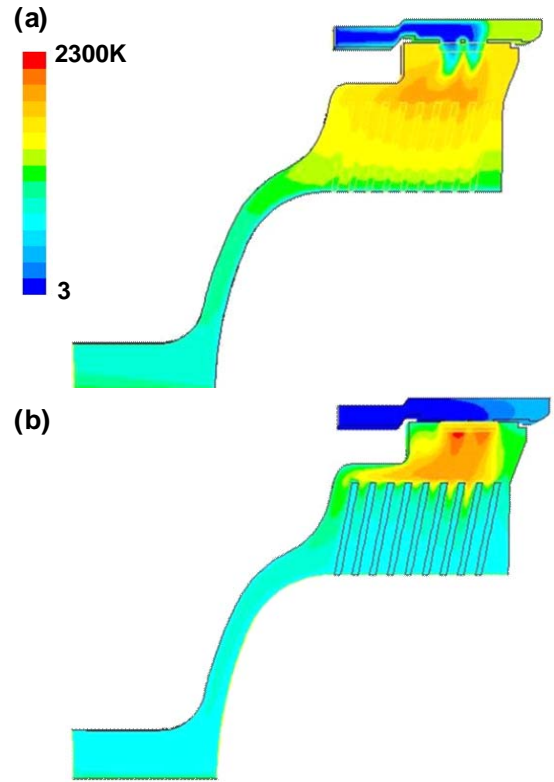


Fig. 8 Temperature fields from the 3D simulation; (a) Coarse grid result (230,000 cells); (b) Fine grid result (1,100,000 cells)

입구 및 출구의 경계조건으로서 먼저 계산 영역의 입구에 해당하는 공기-연료 혼합기체의 공급유로 입구에서 메탄의 유량은 발열량을 기준으로 8 kW가 되도록 하였고 공기의 유량은 배가스의 산소농도가 3%가 되도록 설정하였다. 유로 입구에서 혼합기체의 온도는 50°C로 부과하였다. 출구에는 압력출구 조건을 부과하였다. 벽면에는 점착조건을 부과하고 온도 경계조건의 경우 연소실 벽면은 단열 조건, 엔진 표면은 820 K의 등온 조건을 주었다.

난류 모형은 2차원 해석 결과에서 모형별로 큰 차이를 보이지 않았으므로 본 계산에서는 표준 $k-\epsilon$ 모형을 사용하였다. 복사 모형은 2차원 해석 결과 2x2와 5x5의 DO 모형이 계산 결과에서 큰 차이를 보이지 않아 계산 시간 절약을 위하여 2x2의 DO 모형을 적용하였다. 화학종 방정식에서 LNG는 메탄으로 가정하여 CH_4 -Air 2 Step 방법으로 연소 현상을 모사하였다. 난류-화학반응 관계는 EDC (Eddy Diffusivity Concept) 모형으로 고려하였다.

3.2 3차원 해석결과

수치해석을 통해 구한 연소실 내부의 속도분포를 보면 (Fig. 7), 버너에서 공급된 연소 가스가 Fin에 충돌하며 가속된 후에 유로를 따라 출구로 빠져나가는 형태를 보이며 전체적인 유동 형태는 앞서 수행한 2차원 해석 결과와 유사하다. 본 연구에서 수치해석을 수행한 2가지 격자계에서 유동형태나 속도 크기 분포는 큰 차이를 보이지 않는다.

그러나, 온도분포의 경우 (Fig. 8) 격자해상도에 따라서 예측하는 화염 모드가 달라지는 것을 볼 수 있다. 성긴 격자에서 해석한 결과는 화염 위치에 해당하는 고온 영역이 버너 표면에서 분리되어 부상 평면화염 (Lifted Planar Flame)[5]에 가까운 분포를 보인다 (Fig. 8(a)). 조밀한 격자에서는 연소가 다공체 내부에서 이루어지는 복사화염 (Radiant Flame)에 해당하는 온도분포를 보인다 (Fig. 8(b)). 각각의 격자계에 대하여 수치해석으로 현재의 계산 조건에서 화염의 Blow off가 발생하지 않는 것은 확인하였다. 실험을 수행한 결과, 수치해석을 수행한 버너에서 두 가지 화염모드가 모두 관찰되었는데[7] 계산을 수행한 연료유량과 공기비에서는 조밀한 격자계에서 얻은 결과와 같은 복사화염이 관찰되었다.

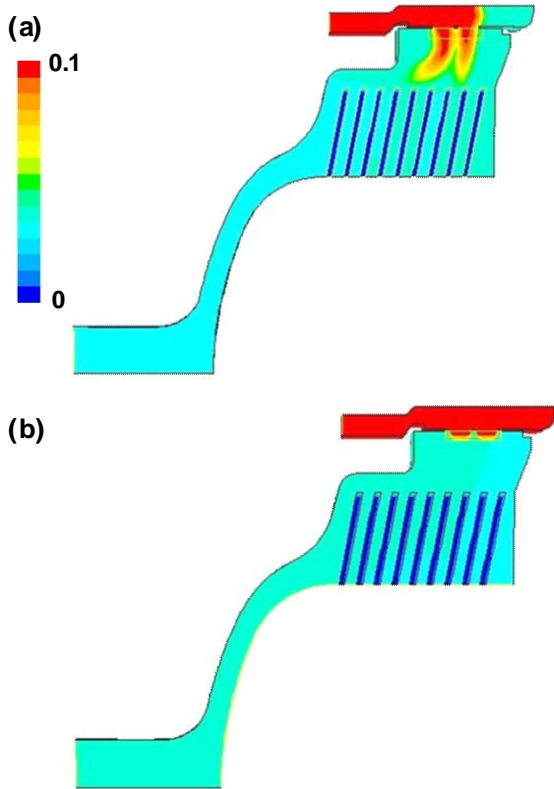


Fig. 9 Molar concentration of CH₄ inside the combustion chamber; (a) Coarse grid result (230,000 cells); (b) Fine grid result (1,100,000 cells)

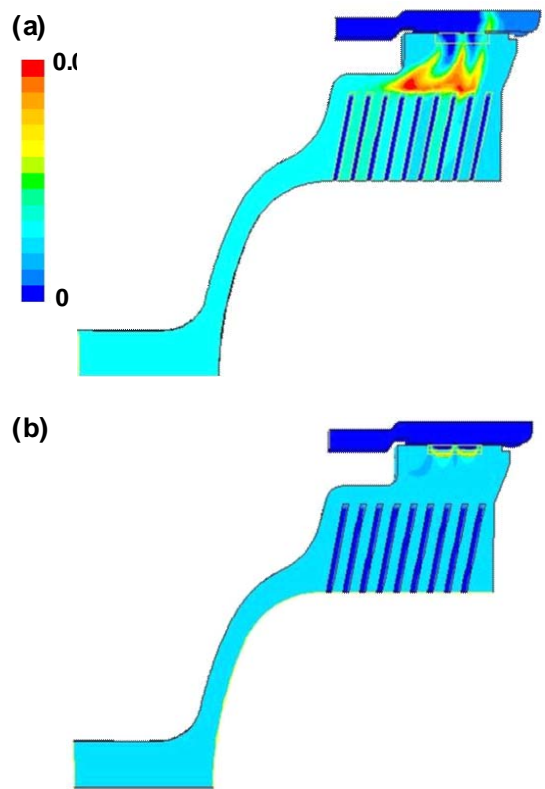


Fig. 10 Molar concentration of CO inside the combustion chamber; (a) Coarse grid result (230,000 cells); (b) Fine grid result (1,100,000 cells)

공기비 및 연료 유량에 따라 화염의 모드가 변화하는 특성을 수치해석이 정확하게 예측하는 지 여부는 추가적인 계산을 통하여 규명할 것이고 실험결과와 차이가 관찰될 경우 다공성 매질의 특성을 조절하여[8] 실제 현상을 가장 정확하게 모사할 수 있는 수치해석 기법을 도출할 예정이다. 본 수치해석 결과에서 구한 최종 배가스 온도는 두 격자계 모두 약 1100 K으로서 설계조건보다 다소 높게 예측되었다.

연소실 내부에서의 화학종 분포로부터 연소 특성을 살펴보면, 연료인 CH₄는 (Fig. 9) 온도장 결과 (Fig. 8)와 마찬가지로 성긴 격자에서 얻은 결과는 부상 화염 (Lifted Flame)의 화염면 내부에 집중적으로 분포하고(Fig. 9(a)), 조밀한 격자에서 얻은 결과는 다공체 버너 내부에서 완전 연소를 이루어 화염면 밖에는 존재하지 않는 것을 관찰할 수 있다(Fig. 9(b)).

연소 안정성을 나타내는 CO의 경우 (Fig. 10), 두 격자계 모두 화염면 부근에 집중적으로 분포하고 하류로 진행하면 농도가 희박해지며 생성영역이 넓게 퍼지는 것을 볼 수 있다. 성긴 격자계의 경우 (Fig. 10(a)), 고온열교환기 Fin과 만나는

부분에서 농도가 높게 나타나고 조밀한 격자계의 경우 (Fig. 10(b)), 다공체 버너 표면에서 CO가 집중적으로 생성되는 것을 볼 수 있다.

4. 결 론

- (1) Stirling 엔진 연소실에 대한 2차원 수치 해석 결과 난류 모형의 영향은 크지 않았지만 복사 모형은 특히 Fin이 설치된 경우에 계산 결과에 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다.
- (2) 금속 섬유 버너를 다공성 매질로 모사하여 연소 해석을 수행한 3차원 수치해석 결과 격자 해상도에 따라 화염 모드가 다르게 예측되는 결과를 얻었고 비반응장 해석에서 충분한 격자량의 2배 이상의 해상도 조건에서 실험과 같은 화염 모드가 예측되었다.
- (3) 금속 섬유 버너를 적용한 1 kW급 LNG Stirling 엔진 연소실 수치해석에 공기비, 연료유량에 따른 화염 모드 변화와

열전달 특성을 가장 정확하게 예측하는 복사 모형 및 다공성 매질 설정은 해당 조건에서 실험을 수행한 후에 규명할 것이다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 에너지·자원기술개발 사업에 의해 수행되었고 2010년도 국민대학교 교내 연구지원금으로부터 일부를 지원받았으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 2006, Onovwiona, H.I. and Ugursal, V.I., "Residential cogeneration systems: review of the current technology," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.10, pp.389-431.
- [2] 2007, Nishiyama, A. et al., "Fuel and emission properties of Stirling engine operated with wood powder," *Fuel*, Vol.86, pp.2333-2342.
- [3] 2007, Kongtragool, B. and Wongwises, S., "Performance of a twin power piston low temperature differential powered by a solar simulator," *Solar Energy*, Vol.81, pp.884-895.
- [4] 2008, Brandhorst, H.W. and Chapman, P.A., "New 5 kW free piston Stirling space convertor developments," *Acta Astronautica*, Vol.63, pp.342-347.
- [5] 2009, Mujeebu, M.A. et al., "Applications of porous media combustion technology: a review," *Applied Energy*, Vol.86, pp.1365-1375.
- [6] 2007, BAXI Ltd., "BAXI micro CHP." pp.1-3.
- [7] 2011, J. Ahn., et al., "Combustion Characteristics of a Premixed-Burner of a Stirling Engine for a Domestic Cogeneration System," *Trans. KSME B*, in press.
- [8] 1988, Yoshizawa, Y. et al., "Analytical study of the structure of radiation control flame," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.31, pp.311-319.