

연료 분사구 형상 변화 및 당량비 변화에 따른 MEMS 가스터빈 내 연료-공기 혼합에 관한 연구

황유현* · 정동호* · 김선민** · 김대중*†

* 서강대학교 기계공학과, ** 인하대학교 기계공학과

Investigation of the Mixedness of Fuel and Air in MEMS Gas Turbine Engine According to Change of Fuel Injectors and Equivalence Ratio

Yu Hyeon Hwang*, Dong Ho Jung*, Sun Min Kim** and Daejoong Kim*†

* Dept. of Mechanical Engineering, Sogang Univ., ** Dept. of Mechanical Engineering, Inha Univ.

(Received March 19, 2010 ; Revised July 2, 2010 ; Accepted July 7, 2010)

Key Words : Micro-Combustion(마이크로연소), MEMS Gas Turbine(MEMS 가스터빈), Fuel-Air Mixing(연료-공기 혼합), Fuel Injector(연료 분사구), Stoichiometric Ratio(이론공연비), Equivalence Ratio(당량비)

초록: MEMS 가스터빈 엔진에서 연료와 공기의 혼합에 영향을 미치는 중요한 요소중 하나는 연료 분사구 형상의 설계이다. 본 연구에서는 3 개의 연료 주입부와 각 주입부에 연결된 여러 개의 분사구에 의해 연료와 공기가 혼합되는 시스템을 고려하여 분사구의 배열과 연료 공급비율의 변화에 따른 혼합 정도를 당량비를 통하여 정량적으로 해석하였다.

Abstract: The design of the fuel injector is one of the important operating factors that determine the extent of mixing of air and fuel in an MEMS gas turbine engine. In this study, we consider a system with three inlet ports with each port having multiple injectors. We perform a parametric study by varying the arrangement of fuel injectors and difference of ratio of fuel supply. The results are presented in terms of the premixed flow distribution and equivalence ratio.

- 기호설명 -

- ϕ : 당량비(-)
- u : 속도(m/s)
- ρ : 밀도(kg/m^3)
- t : 시간(sec)
- p : 압력(Pa)
- f : Body force(N)
- μ : 점도($kg/m \cdot s$)

1. 서론

최근 다양한 기능을 겸비한 휴대용 전자장비의 대중화로 인해 더 많은 부가기능이 추가되고 있다. 증가된 요구전력을 해결하기 위해 최근까지 사용된 방식은 각 기능에 대한 전기 소모를 최소화하도록

설계하면서 기능을 약간씩 제한하는 것이었다. 그러나 다양한 기능에 대한 수요가 점점 늘어남에 따라 설계의 최적화 외에도 집적화된(integrated) 휴대용 전력 생산기기 또한 요구되고 있다. 현재 널리 사용되고 있는 배터리 방식의 대안으로 초소형으로 전력을 생산할 수 있는 마이크로 연료전지(micro fuel-cell) 등의 개발과 함께 미세전자소자기술(MEMS : micro electromechanical systems)에 기반한 고효율의 가스 터빈엔진의 개발 역시 주목을 받고 있다. MEMS 가스터빈(MEMS gas turbine)은 기존의 배터리 방식보다 에너지 집적도가 높고 연료의 충전으로 재사용이 가능한 장점이 있다.^(1,2)

매사추세츠주 공과대학 (MIT)에서는 Fig. 1(a)와 같이 도넛(doughnut) 형태의 지름 21mm, 두께 3.8mm 크기를 가지는 가스터빈을 설계하였다. 이 가스터빈의 무게는 1g 정도로 내부에서 지름 6mm의 터빈 로터(turbine rotor)가 1분에 100 만회 이상 회전한다.⁽²⁻⁴⁾ 가스터빈의 연료는 혼합

† Corresponding Author, daejoong@sogang.ac.kr
© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

효과를 높이기 위해서 3 개의 연료 주입부(inlet ports)에서 여러 개의 분사구를 통하여 수직으로 분사된다. 이중 2 개의 주입부에서 공급되는 연료는 가스터빈의 축방향으로 공급되고 3 번째 주입부에서 공급되는 연료는 방사상의 방향으로 가스터빈에 공급된다.^(6,7) 연료와 공기가 혼합된 유체는 Fig. 1(b)와 같이 유로를 따라 연소실을 감싸는 형태로 진행하여 위쪽 방향으로 플레임 홀더(flame holder)를 거쳐 연소실로 진입하게 된다.

MEMS 가스터빈의 연소기(combustor)는 기존의 대형 가스터빈에 포함되어 있는 연소기에 비해서 터빈 내에 연료와 공기가 혼합(mixing)될 수 있는 공간이 부족하므로, 필수적으로 연료와 공기가 예혼합(premixed)된 상태로 연소실(combustion chamber)에 주입되어야 한다. 따라서 예혼합된 상태로 연소실에 공급되는 연료와 공기의 혼합 정도는 MEMS 가스터빈의 엔진출력과 직접적으로 연관되는 요소로서 중요한 역할을 한다.^(1,9-11)

본 논문에서는 MIT 의 설계를 토대로 모델을 설정하여 이론 공연비(stoichiometric ratio)⁽⁵⁾로 공급되는 연료의 경우에 대하여 분사구의 위치와 형상 변화 및 당량비(equivalence ratio)의 변화를 통한 가스터빈 내 연료-공기 혼합 정도를 가시화 하고 그 결과를 비교하였다.

2. 수치해석

분사구의 위치와 연료 혼합비율 변화를 통한 가스터빈 내 연료-공기 혼합 정도를 해석하기 위하여 전산유동 상용 프로그램인 STAR-CCM+ V3.06⁽¹²⁾을 이용하여 정상 상태에서 내부 유동 현상에 대해서 수치해석을 수행하였다.

2.1 지배방정식

오일러언 이상 유동 모델을 각 phase 의 유동 특성과 분포에 따라 해석하기 위해 연속방정식, 운동량 방정식을 이용하여 풀었고 그 기본 지배방정식은 다음과 같다.⁽⁸⁾

- Continuity equation :

$$\nabla \cdot u = 0$$

- Momentum equation :

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + f$$

2.2 격자형상 및 경계조건

본 연구에서는 MEMS 가스터빈의 내부 전산해석을 표준모델의 형상과 방사상의 연료분사구를 제거한 형태와 축방향 연료 분사구를 1/3 만큼 제거한 형상에 대해 수행하였다. 유동체적은 STAR-CCM V3.06 을 이용하여 Fig. 2(a)와 같이 3D 정렬 격자로 구성하였고 격자수는 기본모델, 형상변화 모델, 연료변화모델에 대하여 각각 70 만개, 30 만개, 40 만개로 구성되었다.

또한 각 케이스별 혼합 정도를 정량적으로 측정하기 위해 Fig. 2(b)에서 보는 바와 같이 연소실 영역에 대하여 여러 개의 노드를 설정하여 전수추출을 수행 하였다. 각 노드(node)는 x, y 축에 대해 각각 0.5mm 단위로 생성하였으며, 총 노드의 개수는 738 개의 지점을 사용하였다.

위의 격자모델을 통하여 공기와 수소가 동시에 공급되는 2-유체 해석을 VOF 모델, 정상 상태의 조건하에 수행하여 MEMS 가스터빈 내부에서 유동 분포 특성을 확인하였다. 해석 단면은 Fig. 2(c)에 나타나 있는 매니폴드의 단면 영역과 연소실의 단면 영역이다. 수소 연료와 공기의 혼합식에 따른 이론 공연비는 계산에 의해 0.029 가 되며 최초 공급되는 공기 질량 유량률은 0.045gm/sec, 수소의 질량 유량률은 0.0013gm/sec 로 정하였고, 압력은 대기압상태에서 해석을 수행하였다.

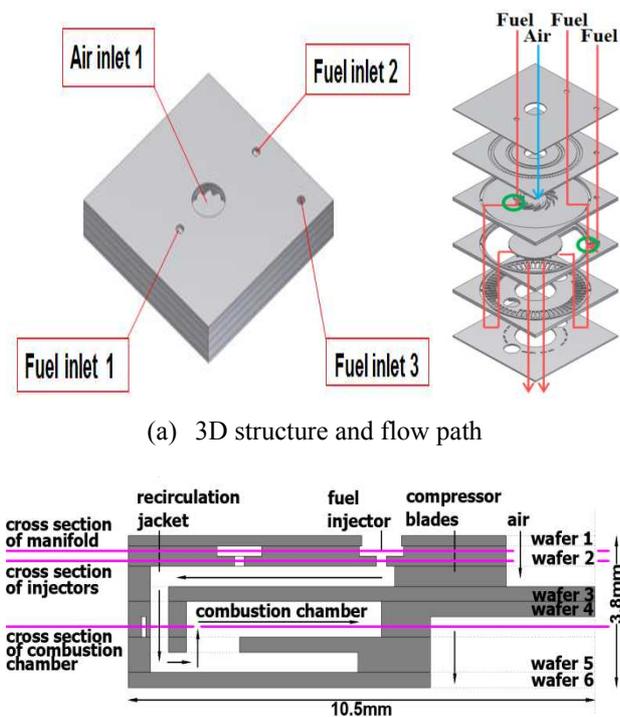


Fig. 1 Schematics of MEMS gas turbine

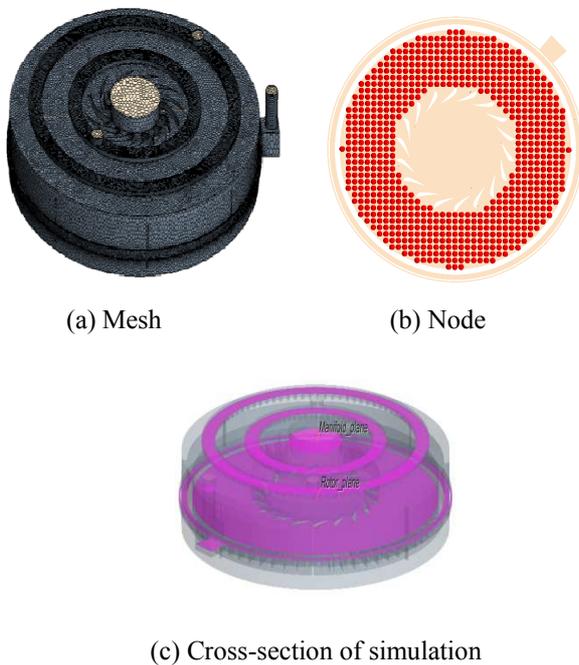


Fig. 2 Grid system

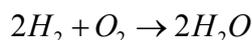
2.3 공연비 및 당량비

수소와 공기의 이론 공연비를 통해 해석 모델에서 수소와 공기의 질량 유량률을 결정할 수 있다. 공연비는 연소반응이 이루어졌을 때의 공기와 연료의 비를 나타내는 값으로 다음과 같이 표현된다.

$$F/O \equiv \frac{F}{O} = \frac{\text{mass of fuel}}{\text{mass of oxidant}}, \quad \phi = \frac{(F/O)}{(F/O)_{st}}$$

위 식에서 $0 < \phi < 1$ 인 경우 희연료 상태(fuel-lean condition), $\phi = 1$ 인 경우 이론공연상태(stoichiometric condition), $1 < \phi < \infty$ 인 경우 농연료 상태(fuel-rich condition)를 나타낸다. 이론 공연비는 이상적인 조건에서 연소에 필요한 공기와 연료의 질량비를 나타내는 값으로 이 값과 실제 공연비와의 비율인 당량비를 통하여 연소조건이 농연료 연소(fuel-rich combustion)인지 희연료 연소(fuel-lean combustion) 인지를 판단할 수 있다.

이론 공연비는 수소연료의 연소반응식을 통해 구할 수 있다.



21%의 산소(oxygen)기체와 79%의 질소(nitrogen) 기체를 포함하는 공기를 가정하여 계산하면 2 몰(mole)의 수소 연료 연소에 필요한 공기는 4.762 몰이다. 수소와 공기의 물성치를 넣어 이론 공연비를 계산하면 약 4g의 수소연료를 연소시키는데 필요한 공기의 질량은 137.3g으로 이론 공연비는 0.029가 된다.

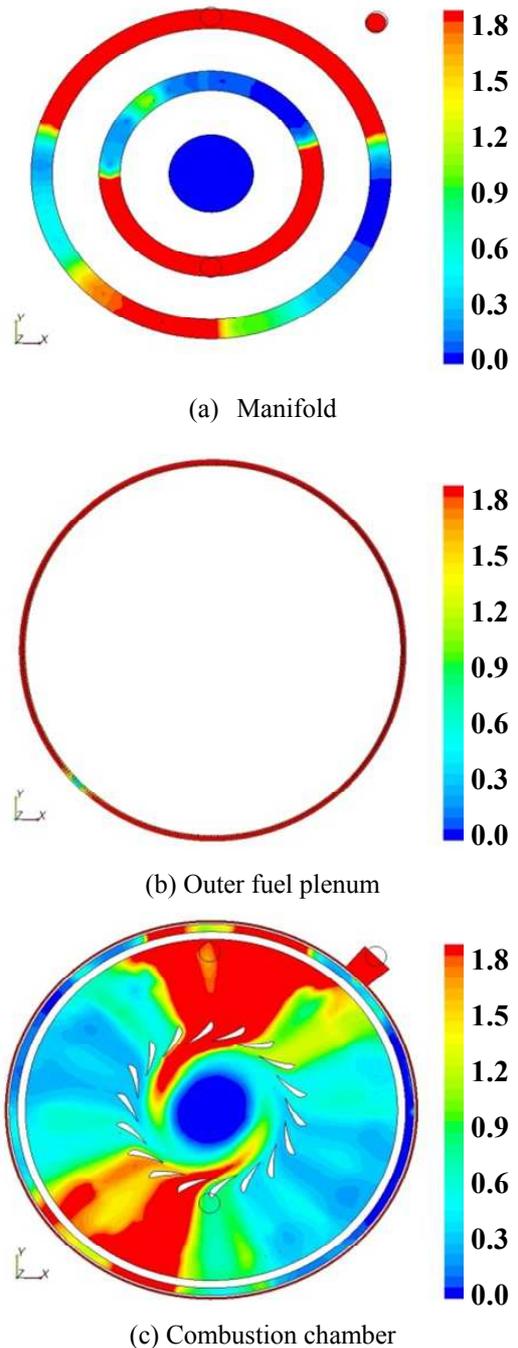


Fig. 3 Flow distribution in base model

3. 결과 및 고찰

3.1 가스터빈 내부에서의 유동해석

Fig. 3은 연료와 공기가 공급 되었을 때의 각 단면에서의 유동특성을 나타낸다. Fig. 3(a)에서 확인할 수 있듯이 매니폴드(manifold) 부분에서의 유동은 연료 주입부의 바로 아래쪽에 당량비가 집중되어 나타난다.

매니폴드가 공급된 연료를 각각의 분사구에 고르게 분배시키는 역할을 제대로 수행하지 못하여 대부분의 연료는 주입부 근처의 분사구에서 순환로로 바로 공급된다. 연소실로 진입되는 혼합기체 (mixed gas)의 혼합 정도는 분사구의 크기와 위치 보다는 주입부의 위치에 의해 결정되는 것을 확인할 수 있다. 방사상의 주입부에서의 혼합은 분사구를 통해 바깥쪽에서 연료가 주입되는 공간(fuel plenum)에 당량비가 2에 가까운 순수 연료가 분배되는 것을 Fig. 3(b)에서 확인할 수 있다. Fig. 3(c)를 확인하면 연소실 내 분배는 주입부에서 먼 부분의 공간에서 당량비가 1이 안되는 수치를 보이는 영역이 나타난다.

3.2 방사상의 연료 분사구를 제거한 유동해석

Fig. 4는 방사상의 연료 분사구를 제거한 상태로 같은 유량을 공급하였을 때의 연소실 내 연료의 당량비를 나타낸다. 전체적인 연료의 분포 형상 자체는 위의 해석과 비슷한 형태를 지니지만 연료분사구 부분의 당량비가 더 높게 나타난다. Fig. 3(c)와 비교를 통해 방사상의 분사구쪽 공간에 가득 차 있는 고밀도의 연료가 실제 순환로에 조금씩 진입하여 분배에 도움을 주고 있음을 확인할 수 있다. 결과적으로 방사상의 연료 분사구는 연료의 혼합정도에 있어 매니폴드에서의 집중된 연료공급을 완화시켜주는 역할을 수행하고 있다.

3.3 분사구를 1/3 가량 제거한 유동해석

Fig. 5는 연료 주입부 아래쪽의 분사구를 일정부분 제거한 형태의 내부 혼합유동을 해석한 결과이다. 3.1의 해석을 통해 매니폴드가 제 역할을 하지 못하는 것을 확인하였기 때문에 Fig. 5(a)와 같이 주입부 바로 아래쪽을 1/3 가량 제거하여 매니폴드에서의 유동을 강제한 상태에서 해석을 수행하였다.

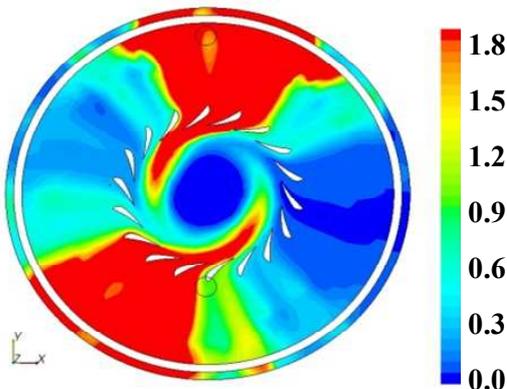
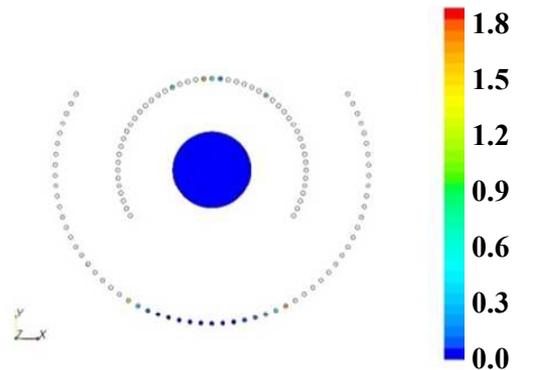
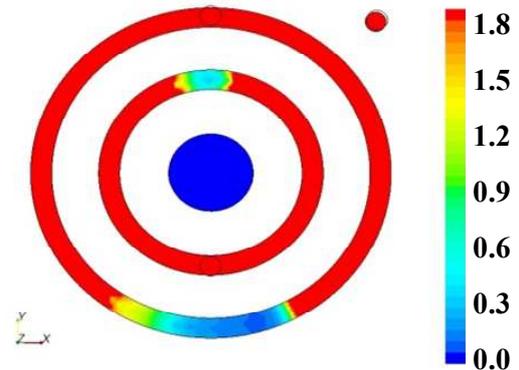


Fig. 4 Flow distribution in combustion chamber (no inlet 3 model)

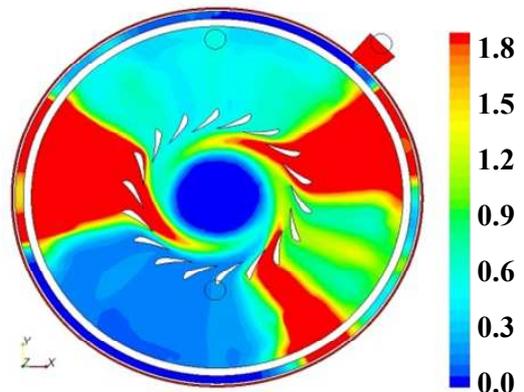
제거된 분사구에 의해 주입된 연료는 우선적으로 매니폴드를 따라 원주방향으로 일정부분 진행한 후 순환로로 공급된다. 이과정을 통해 Fig. 5(b)와 같이 매니폴드 내에서는 표준 모델보다는 유동 분배가 좋아진 결과를 보인다. 그러나 연소실에서의 유동 결과인 Fig. 5(c)를 Fig. 3(c)와 비교하였을 시에 뚜렷하게 좋아진 부분을 확인하기 어렵다.



(a) Injectors



(b) Manifold



(c) Combustion chamber

Fig. 5 Flow distribution in 2/3 injectors model

3.4 당량비를 증가시킨 유동해석

Fig. 6 은 수소의 질량 유량률을 증가시킨 당량비(equivalence ratio)가 10 인 농연료(fuel-rich)상태에서의 유동특성을 나타낸다. Fig. 6(a)를 확인하면 Fig. 5(b)에서와 같이 매니폴드에서의 분배는 잘 이루어지는 것을 확인할 수 있다. 분사구를 1/3 가량 제거한 유동해석이 매니폴드에서의 분배효과는 있었지만, 동시에 연소실에서의 혼합효과 상승에 대해서는 확인하기 힘들었던 것과는 달리 수소의 질량 유량률을 증가시킨 해석에서의 유동은 매니폴드에서의 분배효과의 상승과 더불어 매니폴드에서 분배된 연료에 의한 연소실에서의 혼합도 잘되었음을 Fig. 6(b)에서 확인할 수 있다.

Fig. 7 은 위의 해석과는 반대로 공기의 질량 유량률을 감소시켜 당량비(Equivalence Ratio)가 10 인 농연료(fuel-rich)상태에서의 유동특성을 해석한 결과이다. 이번 해석은 수소의 질량 유량률 변화가 없기 때문에 매니폴드 영역의 유동은 Fig. 7(a)와 Fig.3(a)에서처럼 같지만 Fig. 7(b)를 통해 연소실에서의 유동을 Fig. 3(c)와 비교해보면 조금 더 잘 분배된 형태의 유동을 보인 것을 확인할 수 있다.

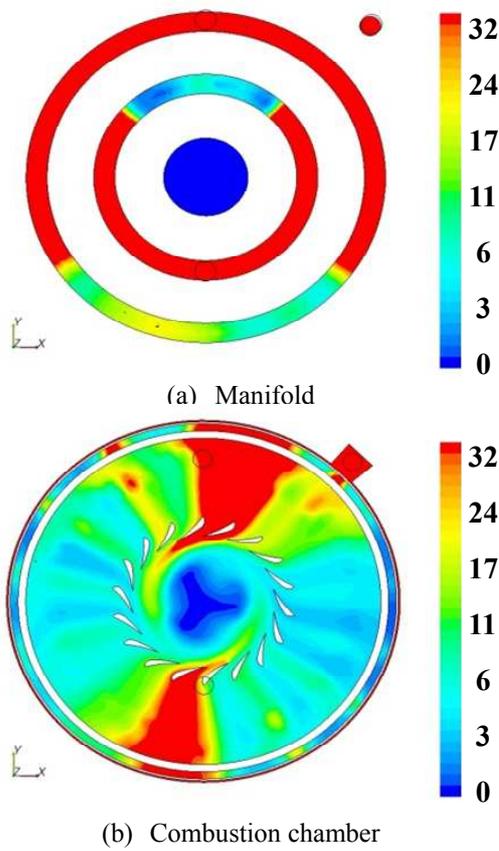


Fig. 6 Flow distribution in Equivalence Ratio : 10, H_2 : 0.013gm/sec

3.5 가스터빈 내부 혼합의 정량해석

해석 모델에서의 혼합정도를 정량적으로 측정하기 위해 연소실에서의 해석결과에 738 개의 노드(node)를 설정하여 각 설정된 지점에서의 당량비에 대한 평균(average), 표준편차(standard deviation)를 계산한 결과를 Fig. 8~9 에 나타내었다.

기본적으로 표준편차가 적을수록 분배가 잘 되었다고 판단할 수 있다. 다만 수소유량과 공기의 유량의 변화를 준 모델의 경우 평균값 자체가 다른 모델에 비해 크고 또한 전체 지점에서의 해석이 아니기 때문에 당량비의 평균값에도 각 모델별로 오차가 존재한다. 따라서 실제 혼합 지표로 사용되는 값은 계산된 표준편차를 각 모델별 평균 당량비로 나눈 값을 택하였다.

Fig. 8 은 시스템의 형상 변화에 따른 혼합 정도를 비교한 그래프이다. 좌측의 그래프는 각 모델에서의 표준편차이며 우측의 그래프가 지표로 선택한 편차/평균 값이다. 방사상의 분사구를 제거한 해석에서의 편차값은 표준모델보다 더 크게 나타났고 축방향 분사구를 1/3 가량 제거한 모델에서는 편차가 약간 하락한 결과를 보였다.

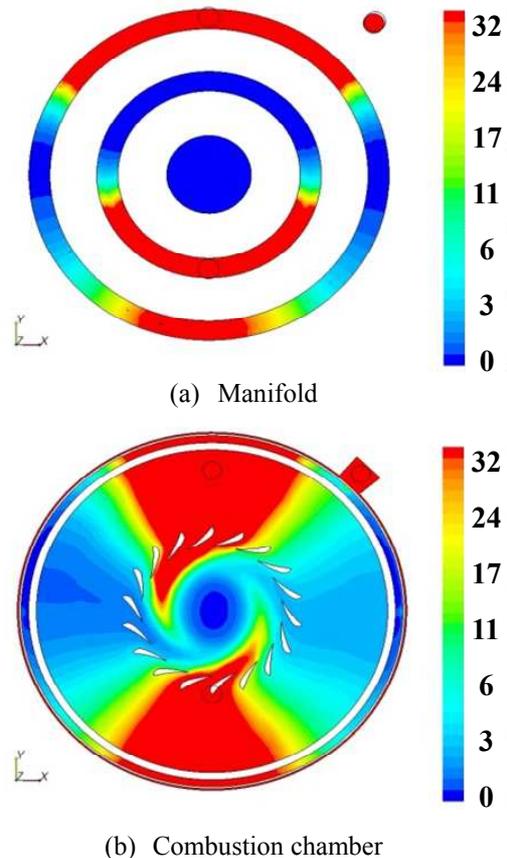


Fig. 7 Flow distribution in Equivalence Ratio : 10, Air : 0.0045gm/sec

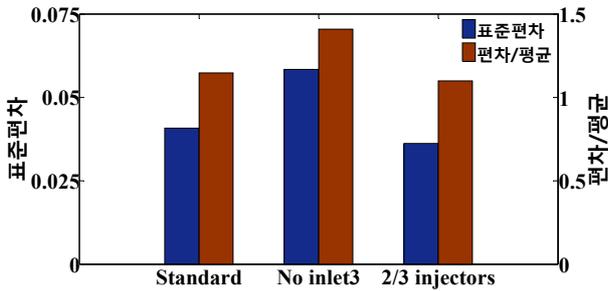


Fig. 8 Standard deviation according to the shape changes

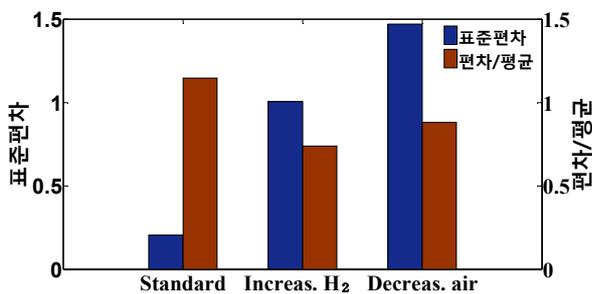


Fig. 9 Standard deviation according to the fuel changes

Fig. 9 는 시스템의 공급되는 연료 변화에 따른 혼합정도를 비교한 그래프이다. 마찬가지로 좌측의 그래프는 표준편차를 나타내며 우측의 그래프가 편차/평균값을 나타낸다. 연료를 변화시킨 두가지 모델 모두 설정한 지점에서의 편차값이 줄었으며 특히 수소를 증가시킨 경우의 편차값이 가장 크게 줄어들었다.

처음 주어진 조건에서의 축방향으로 주입되는 매니폴드에서의 분배효과에 의해 분사구들은 역할을 제대로 수행하지 못하였다. 분사구의 형상과 위치 변화를 통하여 진입 초기의 수소기체 유동을 강제한 경우에는 매니폴드 내 분배는 어느정도 이루어져 활용되지 않는 분사구가 줄어들어 연소실에서의 분배가 잘 되었다. 또한 방사상의 연료 주입부의 경우에는 상대적으로 작은 분사구에 의해 연료주입공간 내 분배의 효과가 있고 이로 인해 순환로에서 분배된 연료가 공급되기에 연소실에 진입하는 연료 혼합에 도움을 주는 결과가 나타났다.

질량 유량률을 변화시킨 상태에서의 유동해석은 수소의 질량 유량률을 증가시킨 것과 공기의 질량 유량률을 감소시킨 두가지 형태의 해석을 수행하였다. 수소의 질량 유량률을 증가시킨 유동해석에서는 매니폴드에서의 확산이 보다 더 잘 이루어진 것을 확인할 수 있는데, 이를 통해 해당 모델 크기의 MEMS 가스터빈에서의 매니폴드가 제 역할을

을 하는 연료의 공급수준을 파악할 수 있다. 공기의 질량 유량률을 감소시킨 유동해석에서는 매니폴드에서의 확산형태가 첫번째 해석결과와 동일하게 나타나지만 순환로에서의 혼합이 조금은 더 잘 이루어져 연소실 내부의 혼합정도가 더욱 고른 형태의 결과를 보였다.

4. 결론

본 연구에서는 MEMS 가스터빈에서 분사구의 형상 변화와 당량비에 따른 공기와 연료 혼합에 대하여 연구하였다. 표준 모델에서는 연료와 공기의 혼합을 위하여 축방향의 분사구와 방사상의 분사구로 나누어 설계하였는데 이는 공기의 유로에 3 가지 경로의 연료를 혼합함으로써 연소실에서의 공기 혼합정도를 최적화하려 한 시도였다.

방사상의 분사구는 집중된 연료를 고르게 분배해주는 역할을 제대로 수행해 내는 결과를 보였으나 축방향 주입부의 매니폴드에서는 각 분사구들에 고른 연료를 공급하지 못하였다. 이를 해결하기 위해 일정 분사구를 제거한 모델을 제안하였고 해석결과 연소실에서의 유동 분배가 잘 되었다.

다음으로는 연료 자체의 비율을 변화 시킴으로써 해석을 수행하였는데, 수소연료의 질량 유량률을 증가시킨 해석은 매니폴드에서의 좋은 확산 유동으로 연소실 내부의 혼합 또한 잘 되었다. 반대로 수소연료의 질량 유량률을 줄인 해석 역시 표준 모델보다 좋은 결과를 보였다.

본 연구를 통해 MEMS 가스터빈 내에서의 연료 혼합을 개선하기 위해 제안된 2 가지 방법 모두 성능향상을 기대할 수 있는 것을 확인하였다. 그러나 여전히 구조 변경에 따른 연료혼합 정도의 개선 여지가 남아있다고 판단되기 때문에 차후 매니폴드에서의 정상 분배가 될 수 있도록 하는 형상 변화에 대한 연구와 더불어 좀더 최적화된 공기와 연료의 공급 유량률 조절에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 방위사업청 지정 국방 MEMS 특화연구센터의 지원으로 수행되었음.(계약번호:UD090024FD)

참고문헌

(1) Jeon, B. S., Park, K. J., Song, S. J. and Min, K. D., 2005, "Design, Fabrication, and Testing of a MEMS

- Microturbine," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol.19, No.2, 696~705.
- (2) Mehra, A., 2000, "Development of a High Power Density Combustion System for a Silicon Micro Gas Turbine Engine," *Massachusetts Institute of Technology*, pp.69~74.
- (3) Mehra, A., Zhang, X., Ayon, A. A., Waitz, A. I., Schmidt, A. M. and Spadaccini, C. M., 2000, "A Six-Wafer Combustion System for a Silicon Micro Gas Turbine Engine," *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol.9. No.4, pp.517~525.
- (4) Spadaccini, C. M., Lee, J., Lukachko, S., Waitz, A. Ian, Mehra, A. and Zang, X., 2002, "High Power Density Silicon Combustion Systems For Micro Gas Turbine Engines," *Proceedings of ASME TURBO EXPO 2002*, pp.1~13.
- (5) Kuo, K. K., 2005, "Principles of Combustion," *John Wiley & Sons, INC.*, United States of America, pp.9~10.
- (6) Matgason, R. J., 1968, "The path of a Jet directed at Large Angles to a Subsonic Free Stream," *National Aeronautics and Space Administration*, NASA TN D-4919.
- (7) Joseph, A. S., 1980, "Injection and Mixing in Turbulent Flow," *AIAA Prog. In Aeronautics and Astronautics*, Vol. 68.
- (8) Versteeg, H. K. and Malalasekera W., 1995, "An Introduction to Computational Fluid Dynamics the Finite Volume Method," *Prentice Hall*, Seoul, pp.12~14.
- (9) Tzeng, Y. S., 1995, "An Investigation of Micro-combustion Thermal Phenomena," *Massachusetts Institute of Technology*, pp.15~18.
- (10) Spadaccini, C. M., 2004, "Combustion Systems for Power-MEMS Applications," *Massachusetts Institute of Technology*, pp.25~39.
- (11) Waitz, A. I., Gautam, G. and Tzeng, Y. S., 1998, "Combustors for Micro-Gas Turbine Engines," *Journal of Fluids Engineering*, March 1998, Vol. 120, pp. 109~117.
- (12) CD-Adapco, 2008, "Star-CCM+ (v 4.02.007) Manual."