

200kW급 마이크로 가스터빈 연소기의 열-구조 연성 해석

박상진¹, 이희남^{2*}, 이상민³

¹순천대학교 대학원 우주항공공학과, ²순천대학교 기계우주항공공학부, ³STX 중공업 신사업팀

Coupled Thermal-Structural Analysis of the Combustor Assembly of 200kW Micro Gas Turbine Engine

Sangjin Park¹, Huinam Rhee^{2*}, Sang Min Lee³

¹Department of Aerospace engineering, Sunchon National University

²School of Mechanical and Aerospace Engineering, Sunchon National University

³STX Heavy Industries Co., Ltd.

요약 본 논문에서는 200 kW급 마이크로 가스 터빈 시스템의 연소기집합체의 열-구조 연성 해석을 수행하였다. 일반적인 연소기집합체는 라이너, 내외 케이스, 버너와 노즐링 등으로 구성되어 있으며, 본 연구에서 개발된 유한요소모델은 연소기집합체 내 다양한 부품들의 다른 열팽창을 보상하기 위해 부품간의 이격과 마찰 요소들이 존재하므로 비선형 간극 및 마찰 요소 등을 포함하고 있다. 본 연구를 통해 연소기집합체의 외부 경계지지조건이 높은 온도구배로 인한 응력에 가장 큰 영향을 주는 인자라는 것을 밝혀냈으며, 과도한 응력이나 변형을 방지하기 위한 적절한 외부 경계지지조건을 찾기 위하여 외부 경계지역에 탄성 지지조건을 가상하여 적절한 경계조건을 도출하여 설계에 사용될 수 있도록 하였다.

Abstract In this study, the thermal-structural behavior of the combustor assembly of 200 kW micro gas turbine system was performed. The typical combustor assembly consists of a Liner, Inner & Outer Case, Burner and Nozzle ring, etc. There are some gaps and friction elements between the components to compensate for the different thermal expansions of various components. Therefore, the developed finite element model includes nonlinear elements. The boundary support conditions of the combustor assembly significantly affect the stress distribution due to the high temperature gradient. This paper deals with parametric studies to quantitatively determine the effects of the variation of the support conditions on the stress distribution and deformation of various components of combustor assembly. These results may be useful for the design of the combustor assembly.

Key Words : Micro Gas Turbine, Combustor, Thermal Stress, Elastic Support

1. 서론

가스 터빈은 작동유체로서 가스를 사용하여 유체 에너지를 유용한 기계적 에너지로 변환해주는 회전 기계 장치이며 일반적인 가스터빈은 발전용과 항공용 제트엔진 등으로 사용되고 있고 용량은 수천 kW에서 수만 kW 급이다. 이에 비하여 대략 1 kW부터 수백 kW 정도의 전

기를 생산할 수 있는 마이크로 가스터빈은 1960년대 미국에서 교통수단에 적용하기 위해 기술개발이 시작되었고 국내에서는 1990년대 이후 연구개발이 수행되어져왔다[1,2].

마이크로 가스터빈의 특징은 소규모 열병합발전(co-generation)이 가능하다는 점과 친환경적이라는 점이다. 소규모 열병합발전은 비교적 낮은 전력이 필요한

본 연구는 미래창조과학부 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원으로 수행되었음 (과제번호 : 20142010102780)

*Corresponding Author : Huinam Rhee(Sunchon National Univ.)

Tel: +82-61-750-3824 email: hnrhee@sunchon.ac.kr

Received March 4, 2014

Revised April 8, 2014

Accepted July 10, 2014

소규모 산업단지 혹은 중소형 주거지역에 전력 및 난방 열을 독립적으로 공급할 수 있으며 증기로 터빈을 구동시켜 전력을 얻고 배기가스로 지역난방을 할 수 있는 시스템을 말한다. 또한 마이크로 가스터빈의 연소 가스는 다양한 종류가 있는데 주로 천연가스를 사용하며 극히 소량의 질소산화물(NOx)을 배출[3]하기 때문에 친환경적이다.

현재 국내에서는 STX 중공업을 중심으로 200 kW급 용량의 발전용 마이크로 가스터빈이 개발되고 있으며, 본 연구에서는 마이크로 가스터빈의 주요 구성품인 연소기에 대해 수행된 열변형 및 열응력 해석에 대한 연구를 다룬다. 현재 설계 중인 연소기는 최대 약 1900 K 의 고온에서 작동하며 라이너와 그 주위의 다양한 부품들에 열팽창이 크게 발생함에 따라 부품들 간에 상대변위와 유격현상이 생길 가능성이 있다. 만일 열팽창에 의해 생성된 틈으로 연소가스가 새어나가면 심각한 성능 저하를 유발하기 때문에 설계 단계에서부터 열-구조 연성 해석을 통하여 열팽창 차이로 인한 각 부품들 간의 상대 변위와 열응력을 예측하는 것이 필요하다. 변위와 응력을 예측하기 위해서는 정확한 열하중과 구속조건을 적용해야 한다. 그러나 실제 설계 단계에서는 마이크로 가스터빈 시스템의 구조가 매우 복잡하여 부품들 간의 연결조건을 명확히 정의하는 것은 어렵다.

본 논문에서는 개발 중인 200 kW급 마이크로 가스터빈의 연소기를 대상으로 수행한 열-구조 연성해석에 대해 논의하며, 특히 연소기를 구조적으로 지지하는 경계 조건의 변화에 따른 응력과 변형의 변화 추이를 관찰하여 마이크로 가스터빈의 구조적 건전성을 위해서 필요한 적절한 구속조건을 도출한 내용을 논의하고자 한다.

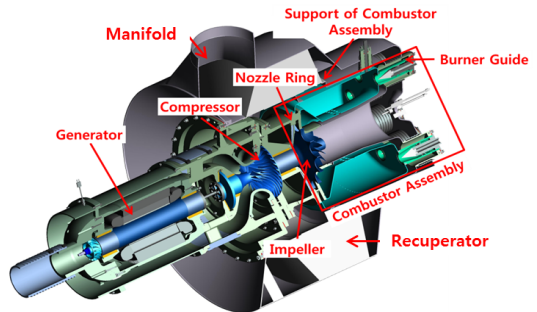
2. MGT 연소기 구조모델

Fig. 1은 STX중공업에서 설계 제작한 200 kW급 용량의 마이크로 가스터빈 시스템의 시험 가동 모습이다. Fig. 2는 단면 구조를 보여주며 실제 연소가 이루어지는 고온부인 박스내의 연소기가 본 논문의 관심대상이다. 연소기 어셈블리는 회전축 방향으로로는 노즐링을 통해 압축기 및 발전기 축과 연결되어 있으며 반경방향으로는 열교환기를 포함한 복잡한 구조물과 미끄럼이 발생할 수

있는 지지 구조물 등에 의해 둘러싸여 비선형적으로 지지되는 등 매우 좁은 공간에 정밀하게 조립되어야 한다. Fig. 1 과 Fig. 2 와 같은 마이크로 가스터빈 시스템 전체를 유한요소 모델링 하는 것은 모델의 크기가 방대하게 커질 뿐 아니라 부품 간의 간극 및 마찰 등 수많은 비선형성 고려가 필요하여 매우 어렵고 열하중 분포를 구하는 것 또한 현실적으로 어려운 일이다. 따라서 연소기 시스템만을 따로 분리하여 모델링하고 구조해석을 수행하는 것이 효율적이나 주변 구조물들과의 실제 경계조건이 불확실하다는 것이 문제점이다. 본 연구에서는, 만일 보수적인 접근방식으로 경계 지지부위를 완전히 구속시킨다면 지나치게 과도한 열응력과 변위가 발생하여 설계가 불가능할 정도임을 확인하였고, 이를 해결하기 위하여 특히 반경방향 구속 경계조건을 탄성 지지조건으로 가정하여 민감도 해석을 수행할 수 있도록 유한요소 모델을 개발하였다.



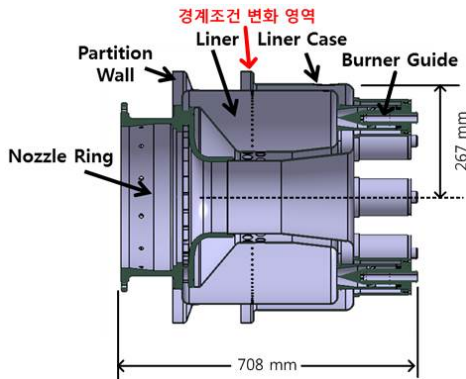
[Fig. 1] 200 kW Micro Gas Turbine under development



[Fig. 2] Cut-off view of Micro Gas Turbine

Fig. 3은 개발 중인 연소기 집합체의 개략도로서 본 연구에서는 이 영역의 유한요소모델을 구성하였으며 구성 부품들은 Liner, Liner Case, Burner Guide, Partition Wall, Nozzle Ring 등 이다. Liner와 Partition Wall의 재질은 Inconel 617, Nozzle Ring은 Inconel 713LC, Liner Case는 STS 321, Burner Guide는 STS 310S 이며 각 재질의 상온기준 물성치는 Table 1과 같다. 한편, 고온 조건에서의 항복강도는 Inconel 617과 STS 310S가 973 K에서 약 405, 315 MPa이고 Inconel 713LC는 1033 K에서 760 MPa, STS 321은 295 K에서 276 MPa이다.

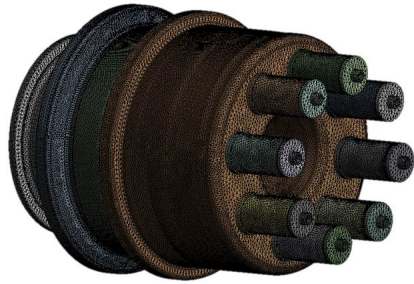
Fig. 4는 개발된 열-구조 연성해석을 위한 비선형 유한요소모델이다. 주로 사면체요소(Tetra-hedral element)가 사용되었고 총 Node 수는 2,091,503 개, Element 수는 1,096,462 개 이다. 후에 설명하는 바와 같이 연소 직후의 고온가스와 직접 접촉하여 고온을 견뎌야 하는 라이너에 발생하는 과도한 열응력을 가능한 줄이기 위해 라이너는 주변 구조물과 용접되지 않고 단순 접촉식으로 지지되므로 비선형 접촉 간극요소들이 사용되었다.



[Fig. 3] Schematic of combustor of MGT

[Table 1] Material properties

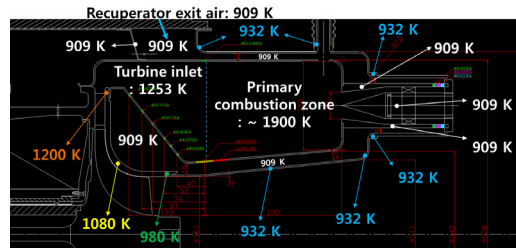
Material	Density (kg/m^3)	Yield Stress (MPa)	C.T.E ($1/^\circ C$)
Inconel 617	8,360	2.1E+11	1.1E-05
Inconel 713LC	7,950	1.9E+11	1.0E-05
STS 321	9,010	1.9E+11	1.6E-05
STS 310S	7,900	2.0E+11	1.5E-05



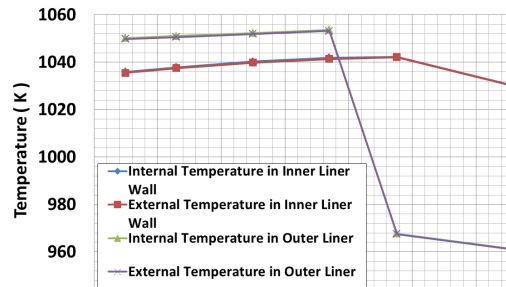
[Fig. 4] Outside view of Finite Element Model of Combustor assembly

3. 열전도해석

열응력 해석을 위해서는 구조부의 온도 분포를 알아야 하며 이를 위해서 열해석 및 시험 데이터로부터 구한 연소기 집합체 주요 위치에서의 온도 데이터를 이용하여 열전도해석을 수행하여야 한다. Fig. 5는 연소기 집합체 여러 구역에서의 연소가스 온도 데이터이다.



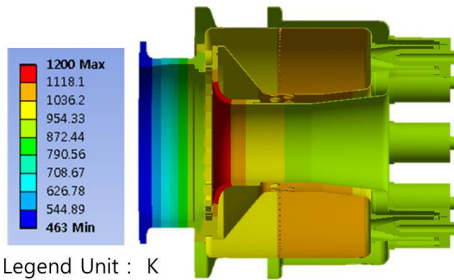
[Fig. 5] Temperature distribution of gas in Combustor assembly



[Fig. 6] Temperature distribution of Liner

Fig. 6은 실제 제작된 모형을 이용하여 시험 가동시 연소기의 Liner 내외벽에서 측정된 온도데이터이다. Fig. 6

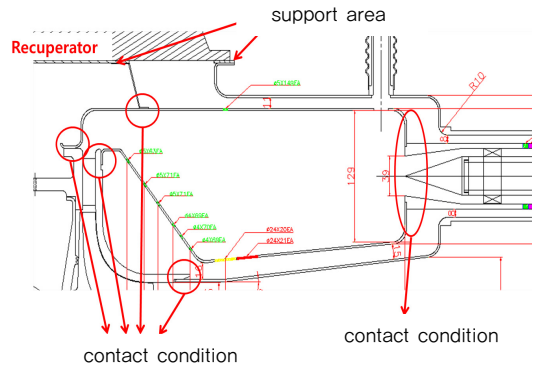
의 가로축은 연소기 우측단으로부터의 왼쪽 방향으로의 거리를 의미한다. 가장 온도가 높은 위치는 연소가 일어나는 지점이며 Burner 바로 앞에서 점화기에 의해 연소가 일어난다. 연소기의 앞부분에서 Nozzle Ring의 위치로 갈수록 질소산화물을 줄이기 위하여 Liner의 희석구멍(Dilution Hole)으로부터 주입되는 상대적으로 낮은 온도의 공기에 의해 연소가스 온도가 떨어지고 연소 가스는 Nozzle Ring을 통과하여 Liner Case 밖으로 배출된다. Liner의 내외벽 온도는 주위 연소가스의 온도에 기반으로 하여 계산되었다. 따라서 Liner의 내외벽 온도 또한 연소영역 이후 희석구멍 근처에서 온도가 급감하며 배출구에 근접할수록 계속 감소된다. Nozzle Ring의 온도는 1200 K 수준이고 배출구까지 온도는 대략 선형적으로 감소한다. Fig. 7은 열전도 해석결과이며 온도 분포 데이터는 구조해석 입력 정보로 사용되었다.



[Fig. 7] Temperature distribution from steady state thermal analysis

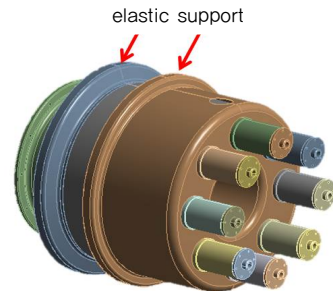
4. 열하중에 대한 구조해석

앞에서 구한 온도 분포 데이터를 적용하여 열응력 및 열변형 해석을 수행하기 위한 구조해석 모델이 Fig. 4와 같이 개발되었다. Liner와 Nozzle Ring, Burner Guide, Partition Wall 등 연소기 세부 부품들은 각각 온도 및 열팽창계수의 차이로 인한 상대 운동을 할 수 있도록 부품들이 접합 연결되지 않은 상태로 단순 접촉되어 있고, 따라서 가동 중에는 간극이 발생할 수도 있다. Fig. 8은 연소기 구조해석 모델에서 비선형 간극 요소가 적용된 영역을 보여준다.

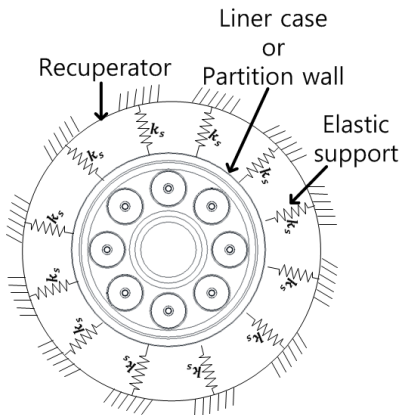


[Fig. 8] Contact and support conditions

연소기 집합체는 재생기(Recuperator)에 의해 반경방향으로 원형 지지되어 있다. 이 지지부위의 경계조건은 재생기가 마이크로 가스터빈 가동 중에 반경방향으로 열팽창 등의 이유로 움직일 것이므로 완전 고정과 자유단 중간 정도의 상태로 판단되지만 지지부의 정확한 변위를 구하는 것은 현실적으로 매우 어렵다. 본 연구에서는 지지부위를 고정단으로 가정하면 실제에 비해 보수적인 설계가 가능하겠지만 열응력이 항복응력에 비해 매우 과도하게 예측되는 문제가 있는 것을 파악하였다. 이를 해결하기 위하여 Fig. 9와 Fig. 10에서 볼 수 있는 바와 같이 지지부를 탄성지지조건으로 모델링하였다. Fig. 9는 여러 가지 탄성지지조건을 적용하였을 때 거동을 효율적으로 분석하기 위하여 선형화된 단순 모델이며, 만일 원본 모델을 사용한다면 민감도 해석을 위한 다양한 해석은 거의 불가능할 정도로 전산 해석 소요시간이 길다.



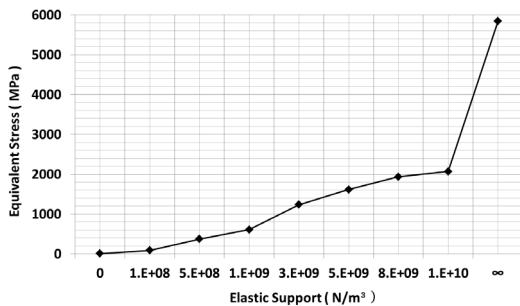
[Fig. 9] Elastic support location



[Fig. 10] Schematic of elastic support condition

Fig. 10에서 단위 면적 당 탄성계수 k_s 가 $k_s = \infty \text{ N/m}^3$ 이면 고정경계조건, $k_s = 0 \text{ N/m}^3$ 인 경우는 자유경계 조건에 해당한다.

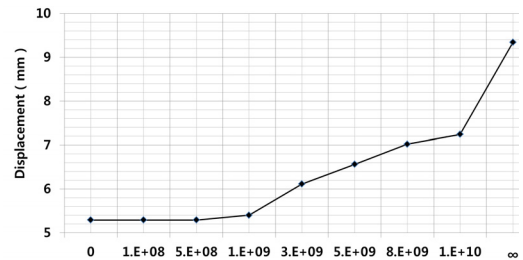
Fig. 11은 탄성계수 값의 변화에 따른 지지부 부근에서의 응력결과이다. 탄성지지조건의 강성계수 값이 증가함에 따라 경계조건 부근의 응력이 심각하게 증가하는 것을 볼 수 있으며, 강성계수가 이론적으로 무한대인 고정지지조건의 경우에는 약 5,800 MPa가 발생하였다. 반면 탄성계수가 10^8 N/m^3 일 때 약 80 MPa 정도의 작은 응력이 발생하는 것으로 확인되었다. 따라서 마이크로 가스터빈 연소기에 발생하는 열응력의 지지조건에 대한 민감도를 파악할 수 있었다.



[Fig. 11] Equivalent stress in the vicinity of support area for various support stiffness values

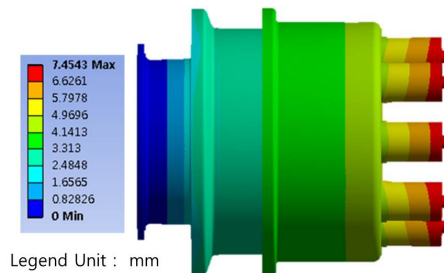
Fig. 12는 지지부의 탄성계수 값 변화에 따른 축방향 변형량을 보여준다. 열응력 해석 결과와 유사하게 탄성계수 k_s 값이 증가함에 따라 축방향 변형량이 증가함을

알 수 있다. 그 이유는 연소기 구조상 연소기 라이너 외부 케이스의 반경방향 열팽창이 억제될수록 이를 수용하기 위하여 연소기 내부 구조물이 축방향으로 변형할 수 밖에 없기 때문인 것으로 파악되었다. 만일 축방향 변형량이 과도하면 각 부품들간에 축방향 간극이 지나치게 커질 수 있고 이에 따라 고온고압의 연소가스가 터빈입구로 분출되기 전에 새어 나갈 수 있으므로 심각한 성능 저하를 유발할 수 있다.



[Fig. 12] Axial displacement for various support stiffness values

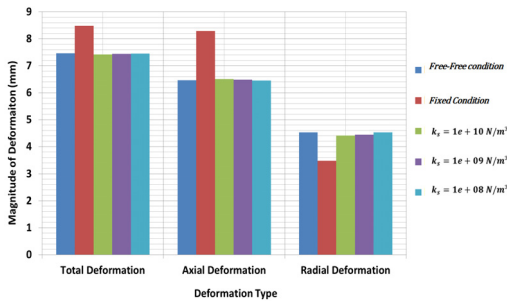
이와 같이 수행한 민감도 해석을 통하여, 현재 개발 중인 마이크로 가스터빈의 열하중에 대한 구조적 건전성을 확보하기 위해서는 연소기집합체의 재생기 영역에서의 지지 조건이 고정 조건에 가까우면 안되고 탄성지지조건 이어야 함을 알 수 있었으며 단위 면적 당 탄성계수 값은 10^8 N/m^3 수준 이어야 한다고 판단할 수 있다.



[Fig. 13] Total deformation of combustor assembly

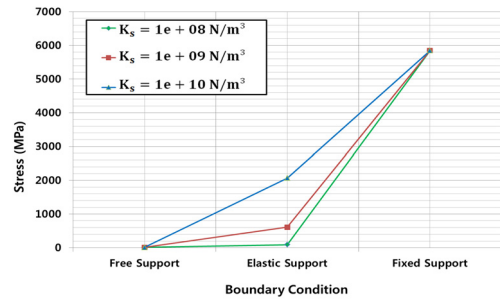
Fig. 13은 이러한 조건을 적용하였을 때 연소기의 전체 변형량을 보여주고 있으며 연소기 버너가이드의 축방향 최대 변형량은 7.45 mm 이며 연소기 내부 구조 부품들의 변형과 상대적인 위치 변화가 만족할 만한 양임을 확인할 수 있었다.

Fig. 14는 Liner Case 외곽면에 고정지지조건, 자유단 조건 및 세가지의 탄성지지조건 ($k_s = 10^8, 10^9, 10^{10} N/m^3$)을 부여하였을 때의 전체변형량, 축방향 변형량 및 반경방향 변형량을 비교하고 있다. 고정지지조건인 경우에는 반경방향으로 억제된 열팽창을 흡수하기 위하여 여러 부품들에 상대적으로 큰 축방향 변형이 발생하며 이는 연소기에 대한 버너 끝단의 상대 위치를 변화시키는 등 연소기 성능 저하의 원인이 될 수 있다. 그러나 탄성지지 조건을 부여하게 되면 세가지 탄성계수 값에 무관하게 거의 자유단 조건일 경우와 유사한 양의 변형이 발생하여 과도한 변형이 방지되므로 설계시 탄성지지 조건이 형성되도록 하는 것이 반드시 필요함을 확인할 수 있다.



[Fig. 14] Deformation for different boundary conditions

Fig. 15는 앞에서 언급한 여러가지 지지조건이 적용되었을 때의 최대 열응력 예측 값들을 보여주고 있으며 고정지지조건이 적용되는 경우와의 단순 모델을 이용한 결과와 유사하게 대략 6,000 MPa 정도 응력이 발생하는 것으로 예측되며 이는 Liner Case의 재료인 STS 321의 항복강도 276 MPa와 비교할 때 연소기의 구조적 건전성을 보장할 수 없는 수치이다. Fig. 16에 의하면 탄성지지조건이 적용되면 최대응력은 대폭 감소되며 특히 $k_s = 10^8 N/m^3$ 의 수준이면 최대 응력이 항복강도보다 작아져서 아주 미약한 탄성 특성, 즉 매우 강한 강성을 가지고 있는 지지조건일지라도 고정지지조건에 비하여 열응력을 매우 현저하게 효과적으로 감소시켜서 구조적 건전성 확보가 가능할 것으로 예측된다. 이와 같은 해석 결과는 마이크로 가스터빈 연소기의 설계시 구조적 건전성 확보를 위해 중요한 정보로 활용될 예정이다.



[Fig. 15] Stress results for three boundary cases

5. 결론

본 연구에서는 현재 개발 중인 200 kW 급 마이크로 가스터빈 연소기의 열-구조 연성해석을 수행하였으며 이를 위해서 비선형 간극 요소를 포함한 유한요소 모델을 개발하였다. 특히 불확실한 연소기 외곽부 지지조건에 따른 열변형 및 열응력을 예측 할 수 있는 방법을 제안하였으며, 고온 가동 조건 하에서 연소기의 구조적 건전성을 확보하기 위해서 연소기의 지지 구조물이 가져야 하는 적절한 탄성지지조건에 대한 정보를 도출하여 연소기집합체 설계에 반영될 수 있도록 하였다.

References

- [1] P. E. Jang, "Concept of Micro Gas Turbine Generator and Cogeneration", *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, No 30(1), pp. 46-50, 2001.
- [2] Korea Energy Management Corporation, "Guide book of Cogeneration", No 8, pp. 206-249, 2003.
- [3] W. S. Sohn, K. S. Choi, H. S. Kim, J. O. Han, "Study of Performance Exhaust Gas Characteristics on 27kW Class Micro-GasTurbine Cogeneration System", *Proceedings of Air-Conditioning and Refrigeration*, pp. 179, 2004.

박 상 진(Sangjin Park)

[정회원]



- 2013년 3월 ~ 현재 : 순천대학교 대학원 우주항공공학과 (공학석사 과정)

<관심분야>

진동학, 공진자이로

이 희 남(Huinam Rhee)

[정회원]



- 1985년 2월 : 인하대학교 대학원 기계공학과 (공학석사)
- 1998년 2월 : 카이스트 대학원 기계공학과 (공학박사)
- 1985년 3월 ~ 1996년 12월 : 한국 원자력연구원 선임연구원
- 1997년 1월 ~ 2001년 2월 : 한국 전력기술(주) 원자로설계개발단 기계설계처 부장
- 2001년 3월 ~ 현재 : 국립순천대학교 기계우주항공공학부 교수

<관심분야>

기계진동 및 소음, 내진설계, 유동유발진동, 진동형 자이로스코프, 다물체동역학, 수중음향

이 상 민(Lee-Sang Min)

[정회원]



- 2005년 2월 : 영남대학교 기계공학부
- 2011년 9월 ~ 현재 : STX중공업(주) 기술연구소 근무

<관심분야>

난류유동, 열전달, 신재생 에너지