

500W급 발전용 초소형 가스터빈 설계

Design of 500W Class UMG T for Power Generation

서정민*
JeongMin Seo

최범석*
Bum Seok Choi

박준영*
Jun Young Park

박철훈**
Cheol Hoon Park

김유일***
You Il Kim

Abstract

Design of 500W class UMG T(Ultra Micro Gas Turbine) for power generation is conducted. Basic design parameters are obtained by cycle analysis. Off-design performances are predicted by 1D aerodynamic design and 1D performance analysis of compressor and turbine. 3D impellers are designed and 3D performance analysis is carried out to predict the performance characteristics of UMG T. 1D and 3D performance analysis show similar results. Structure analysis is conducted to select materials. Titanium Alloy is proposed for structural stability.

Keywords : UMG T(초소형 가스터빈), Micro Gas Turbine(마이크로 가스터빈), Aerodynamic Design(공력 설계)

1. 서론

최근 산업 및 사회 전반에 걸쳐 장시간 사용이 가능한 휴대용 동력원의 필요성이 크게 증가하고 있다. 사용 가능한 동력원의 방식으로는 연료전지, 리튬이온충전지 등 다양하다. 또한 마이크로 가공기술의 급속한 발전과 더불어 마이크로 동력발생장치(MPG : Micro or Mobile Power Generator)의 개발 가능성이 높아지고 있다. MPG는 원리, 제작방식, 에너지원의 종류 및 출력 용량에 따라 다양하게 분류될 수 있다. 하지만 적용처에 따라서 선호되는 방식이나 적용될 수 있는 종류는 제한적인 경우가 많다. 예를 들면 Fig. 1에서 보

는 바와 같이 MP3 플레이어, 무선전화기, 디지털 카메라 등의 일반 디지털 기기의 경우에는 소비전력이 0.1~10W 영역이며, 노트북의 경우에는 10~100W 수준이나, 모터 등을 이용한 구동장치를 가지는 인형로봇, 전동공구, 전동스쿠터 등은 100W 이상의 소비전력을 가진다.

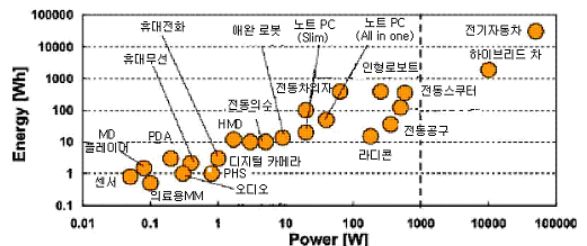


Fig. 1. 대표적인 Mobile 기기의 소비전력과 전력량

최근에는 로봇과 같이 에너지밀도뿐만 아니라 출력 밀도도 높은 동력원을 요구하는 적용처에 적합한 MPG

† 2011년 8월 2일 접수~2011년 11월 4일 게재승인

* 한국기계연구원(KIMM) 에너지기계연구실

** 한국기계연구원(KIMM) 로봇메카트로닉연구센터

*** 국방과학연구소(ADD) 1기술본부 5부

책임저자 : 서정민(jmse0@kimm.re.kr)

의 개발도 이루어지고 있는데, 그러한 고에너지밀도와 고출력밀도의 특징을 갖는 대표적인 마이크로 동력발생장치가 바로 초소형 가스터빈(UMGT : Ultra Micro Gas Turbine)이다^[1].

UMGT는 로봇의 동력원뿐만 아니라 군사용 장비로의 활용가치도 높다. 미국 MPG 전문가들이 군사용 장비에 적합한 MPG 후보들을 비교 분석한 연구 보고서에 의하면 단시간 동안 20W급의 동력을 필요로 할 경우에는 유력한 MPG로 스테링 엔진과 연료전지가 있으나 장시간 사용할 경우 스테링 엔진과 내연기관이 유리하다고 한다. 또한, 100W급 동력을 필요로 할 경우 내연기관, 스테링 엔진이 동력원으로 유리하나 500W급 이상의 군사용 장비의 전원공급 장치로는 UMGT가 유리하다고 알려져 있다.

500W급의 마이크로터빈 발전기는 무기체계 분야에서 초소형 무인항공기, 무인로봇, 분대/소대급 전원공급 및 충전용 발전기로 활용이 가능하고, 민수 분야에서는 민수용 로봇, 휴대용 발전기, 골프 카트의 동력원으로 활용이 가능하다. 중대형 가스터빈은 높은 연소가스 온도와 그에 부합하는 냉각 및 열관리 기술의 발전에 따라 40%의 효율을 눈앞에 두고 있다. 그러나 소형 가스터빈의 경우 공간의 제약으로 인하여 시스템의 부분별 온도를 관리하기 매우 어려운 구조를 가지고 있다. 이로 인해 발생하는 낮은 연소온도와 열손실은 소형 가스터빈의 실용화에 가장 큰 장애물로 작용하고 있다. 마이크로 터빈 구성품 열설계 기술 및 초소형 고효율 열교환기 기술은 이러한 소형 가스터빈의 효율 및 출력을 향상시킬 수 있는 핵심 기술로 이용될 수 있다.

본 연구는 500W급 초소형가스터빈 발전기의 개발을 위한 열역학적 사이클 해석, 압축기 및 터빈의 공력설계와 특성시험 장치에 대하여 다루고자 한다.

2. UMGT 사이클 해석

본 연구에서 개발하는 초소형 터빈 발전기는 출력이 500W급인 휴대 가능한 크기의 초소형 터빈이다.

UMGT의 사이클 해석은 GasTurb11 프로그램을 사용하였다^[2]. 열교환기를 적용한 1축 터빈을 모형으로 하여 사이클 해석을 수행하였다^[3]. 사이클 해석을 위해서는 UMGT의 구성품인 발전기, 압축기, 연소기, 터빈, 열교환기 등에 대한 가정이 필요하다. Table 1은

사이클 해석을 위한 가정 조건이다. 휴대성을 극대화하기 위한 초소형 터빈이기 때문에 기존의 터빈에 비해 크기가 매우 작다는 점을 고려하여 가정하였다. 일반적으로 크기가 작으면 작을수록 유체기계 즉 압축기, 터빈 등의 효율을 낮아진다. 따라서 기존의 유체기계의 효율보다 낮은 효율값을 가지도록 가정하였다. 이런 가정을 바탕으로 사이클 해석을 수행하였다. 그 결과 Table 2의 압축기 및 터빈의 기본 설계 사양을 도출하였다.

Table 1. UMGT 사이클 해석을 위한 가정 조건

항목	단위	값
발전기 효율	%	80
압축기 효율	%	68
연소기 효율	%	90
터빈 효율	%	70
압축비		3.0
터빈 입구 온도	°K	1200
연소기 입구 압력 저하	%	2
연소기 내의 압력 저하	%	3
터빈 출구 압력 저하	%	4

Table 2. 압축기 및 터빈 기본 설계 사양

항목	단위	값
공통		
질량유량	kg/s	0.02
축직경	mm	6
회전수	rpm	400,000
압축기		
입구 온도	°K	288.15
입구 압력	Pa	101,315
압력비(TT)		3.0
효율(TT)	%	68
터빈		
입구 온도	°K	1,200
입구 압력	Pa	286,000
압력비(TT)	rpm	2.6
효율(TT)	%	70

사이클 해석 결과를 바탕으로 기계적 개략도를 작성한다. 개략도 작성에는 압축기 3:1의 초소형 diffuser-less 원심압축기를 적용하고 터빈입구온도 1,200°K 조건에서도 사용 가능한 초소형 구심터빈을 사용한다. 사이클 효율을 위해 원심형의 열교환기를 적용하고 공간 절약을 위해 원통형 연소기를 적용하도록 구성하였다. 또한 휴대성을 높이기 위해 부피를 최소화하는 설계가 적용되었고, 조립의 편의성까지 고려하여 연소기와 열교환기가 터빈의 뒤쪽 원주 방향으로 배치하는 설계가 적용되었다. 또한 연소기 및 터빈에 의해 발생하여 축을 따라 발전기에 전달되는 열의 영향을 최소화하기 위해 압축기에 공급될 공기는 발전기를 통과하도록 설계하였다^[4]. 작성된 개략도는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 발전기, 원심형 압축기, 연소기, 구심형 터빈, 열교환기로 구성되어 있다.

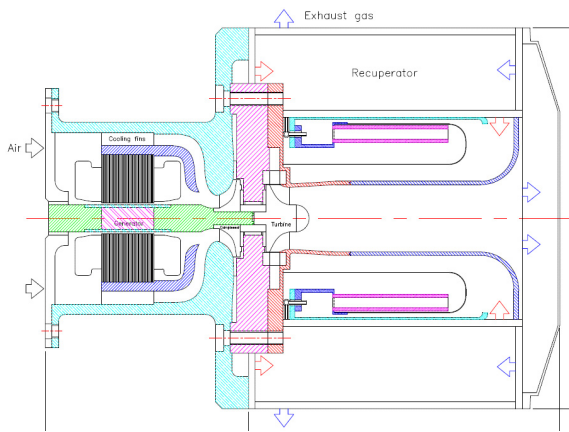


Fig. 2. UMGТ 개략도

3. 1D 설계 및 성능 해석

결정된 설계사양에 대하여 압축기 및 터빈의 내부 유로, 블레이드 형상, 디퓨저, 출구요소부의 형상 등을 결정하였다. 주어진 설계 사양을 바탕으로 1D 설계 및 성능 해석, 3D 설계 및 성능 해석, 3D 구조 해석을 반복적으로 수행하여 최적화의 과정을 거친다^[5]. Fig. 3은 이러한 과정을 도식화하여 보여준다.

압축기 1D 설계는 NREC사의 COMPAL 프로그램을 사용하였고 터빈 1D 설계는 NREC사의 RITAL 프로그램을 사용하였다^[6,7]. 이들 프로그램을 이용하여 1D 설계는 일차원적인 평균유선법으로 공력설계를 수행

한다. 압축기는 크기를 최소화하기 위하여 vaneless diffuser를 채택하였다. Table 3은 1D 형상 설계의 결과를 보여주고, Fig. 4는 압축기 및 터빈의 자오면 형상을 보여준다.

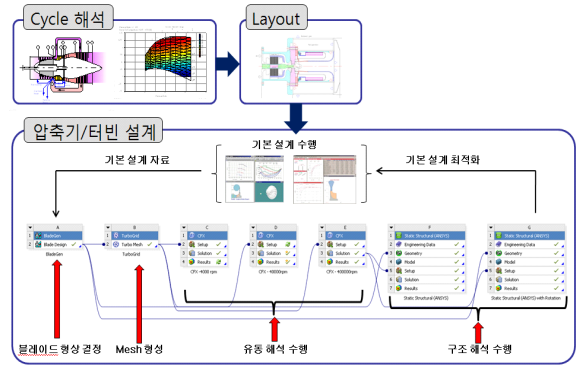


Fig. 3. 압축기 및 터빈 설계 및 해석 흐름도

Table 3. 압축기 및 터빈 1D 형상 설계 결과

항목	단위	값
압축기		
날개 수		7+7
출구 각	deg	-43
팁 간격	mm	0.1
총 압력비		3.055
효율(TS Isentropic)	%	74.61
Input Power	W	2910
터빈		
날개 수		8
출구 각	deg	-43
팁 간격	mm	0.1
압력비(TT)		2.52
압력비(TS)		2.98
효율(TS Isentropic)	%	70.0
Output Power	W	4521
터빈 노즐		
날개 수		14
기준 반경	mm	16
출구 각	deg	73.9

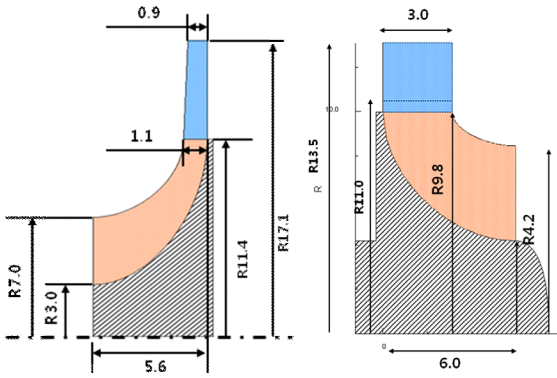


Fig. 4. 자오면 형상 : (좌)압축기, (우)터빈

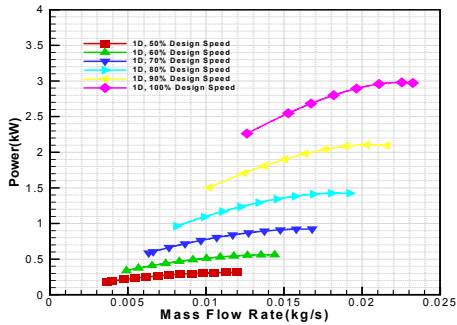
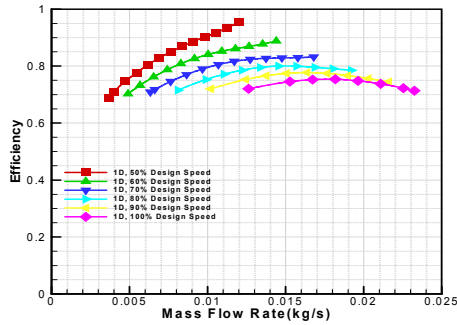
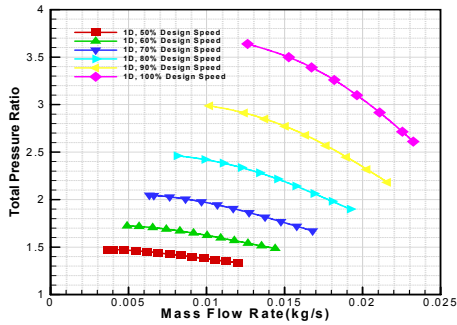


Fig. 5. 압축기 1D 성능예측곡선도 : (상) 전압력비, (중) 효율, (하) 출력

Fig. 5는 압축기의 1D 성능해석에 의한 탈설계점에서의 성능예측곡선을 보여주며, 충분히 안정적인 운전영역을 확보하고 있음을 알 수 있다. Fig. 6은 터빈의 1D 성능해석에 의한 탈설계점에서의 성능예측곡선을 보여주며, 터빈 또한 충분히 안정적인 운전영역을 확보하고 있음을 보여준다.

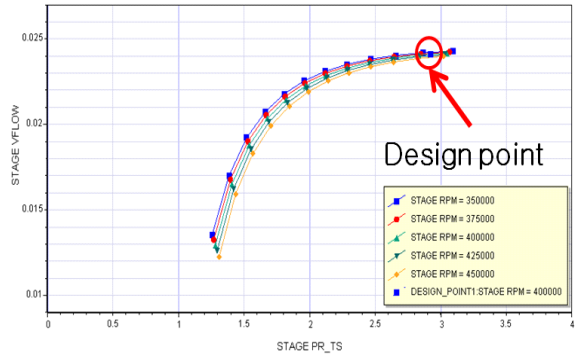
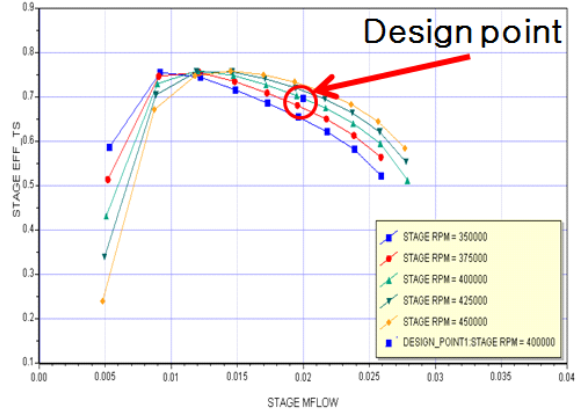


Fig. 6. 터빈 1D 성능예측곡선도 : (상)효율, (하)부피유량

4. 3D 설계 및 성능 해석

1D 설계를 바탕으로 ANSYS사의 Bladegen을 이용하여 압축기 및 터빈 임펠러의 3D 형상 설계를 수행하였다. 설계된 형상은 Fig. 7에 나타낸다.

설계된 3D 형상은 ANSYS사의 Turbogrid 12.0을 이용하여 전산 해석용 격자계를 제작하였다. 사용된 격자수는 압축기 약 100,000개, 터빈 로터 약 240,000개, 터빈 노즐 약 100,000개이다. Fig. 8은 3D 성능해석을 위해 사용된 격자계를 나타낸다.

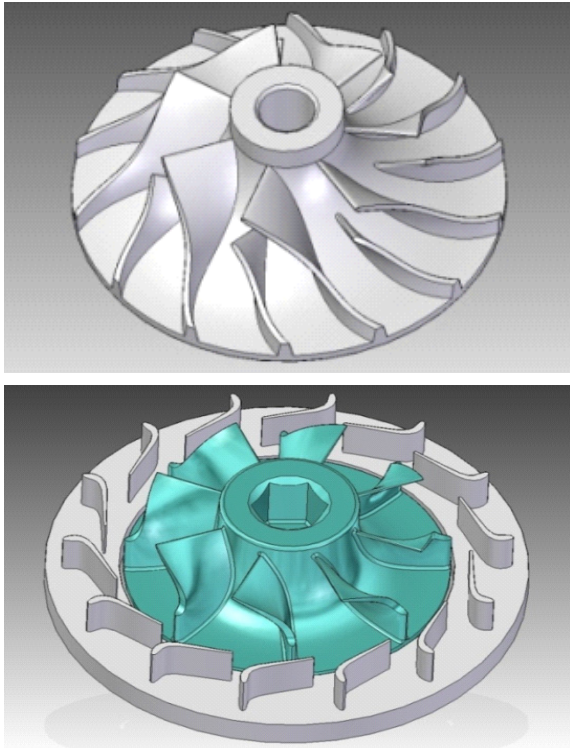


Fig. 7. 블레이드 3D 형상 : (상)압축기, (하)터빈

압축기^[8] 및 터빈의 3D 성능 해석은 ANSYS CFX 12.0을 사용하였다^[9]. 3D 성능 해석을 통하여 압축기 및 터빈의 설계 건전성을 평가하였다. 난류유동을 계산하기 위해 $k-\omega$ SST 모델을 사용하였다. 압축기 해석을 위한 경계조건으로 임펠러 입구에서 전압과 전온도를 고정하였으며, 출구에서는 질량 유량을 고정하였다. 터빈해석을 위한 경계조건으로 입구에서의 전압과 전온도를 고정하였고, 출구에서는 정압과 질량 유량을 고정하였다.

Fig. 9는 50% span에서의 임펠러에 작용하는 압력 분포를 나타낸다. 임펠러에서 부하가 전반적으로 균일하게 작용함을 알 수 있다. 그림에서의 x축은 자오면(meridional plane)에서 블레이드 길이로 무차원화한 길이(normalized M)이다.

Fig. 10은 자오면에서의 전압 분포를 나타낸다. 유동 방향으로 전압이 안정적으로 상승(압축기의 경우) 또는 하강(터빈의 경우)한다.

Fig. 11은 50% span에서의 속도분포를 나타낸다. 통로 내에서 박리현상 거의 없이 블레이드를 따라 유동이 형성되었음을 보여준다.

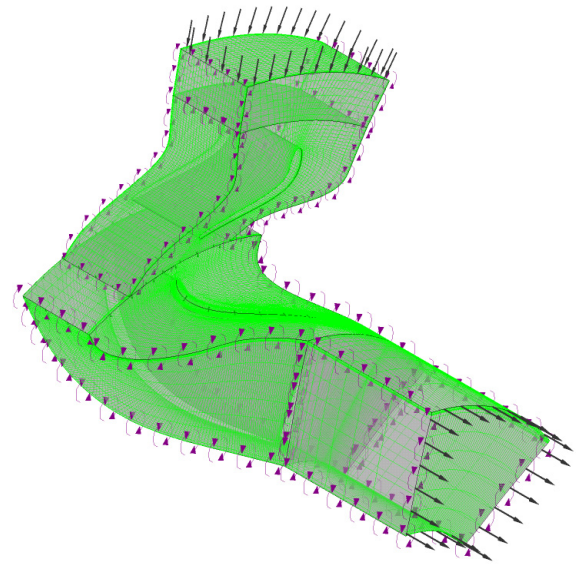
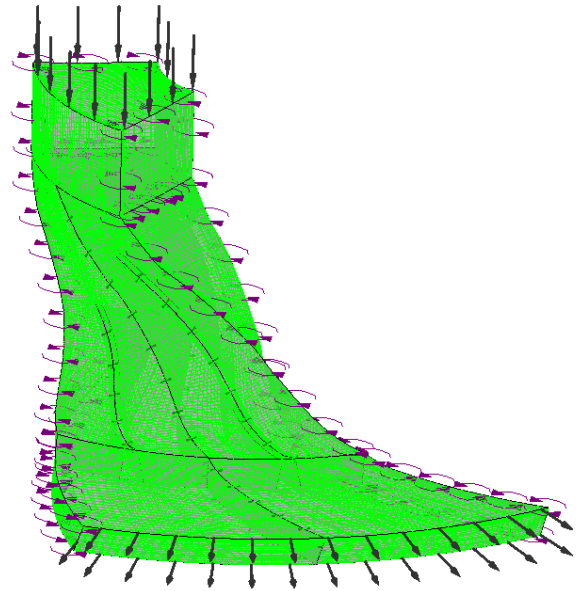


Fig. 8. 해석용 격자계 : (상)압축기, (하)터빈

Fig. 12는 터빈 노즐과 터빈 로터에서의 마하수의 변화를 나타낸다. 터빈 내의 유동은 아음속이며 따라서 초크가 발생하지 않는다. 따라서 UMGT 설계에 있어 초음속에 따른 shock이나 chock 등에 대해 고려할 필요가 없다.

Fig. 13은 1D 성능해석과 3D 성능해석 결과를 비교한 성능곡선도이며 거의 유사한 결과를 보여준다.

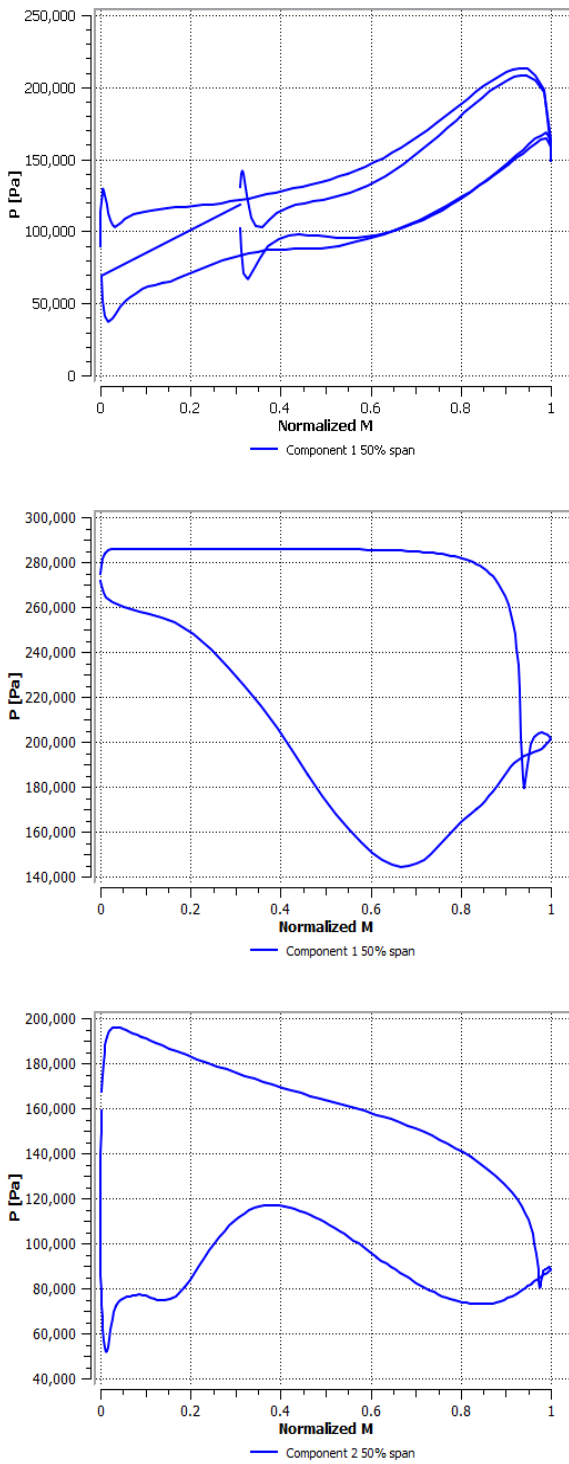


Fig. 9. 50% span 임펠러에서 압력 분포 : (상)압축기, (중)터빈 노즐, (하)터빈 로터

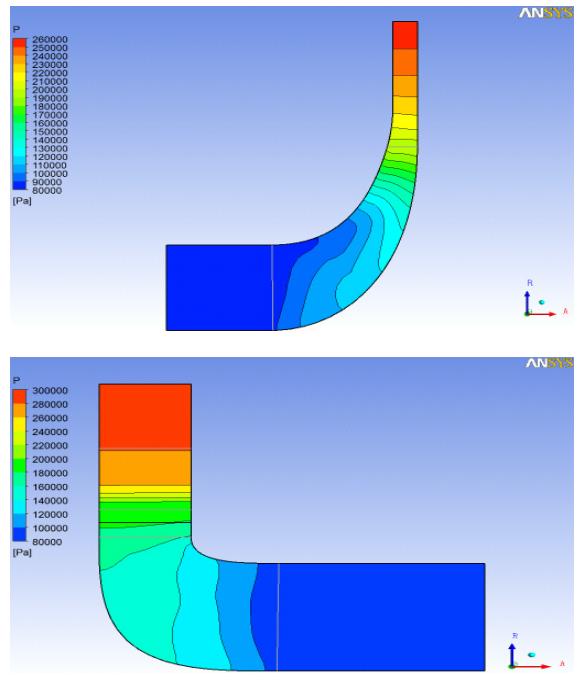


Fig. 10. 자오면에서 전압 분포 : (상)압축기, (하)터빈

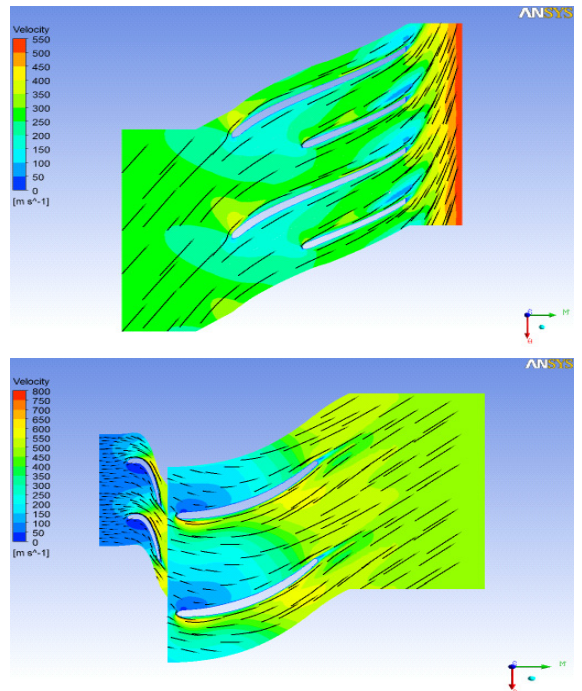


Fig. 11. Blade to Blade에서의 속도분포 : (상)압축기, (하)터빈

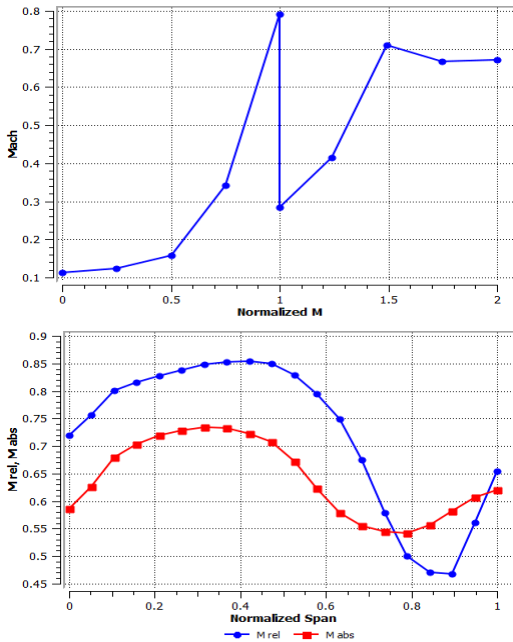


Fig. 12 마하수 분포 : (상)터빈 노즐, (하)터빈 로터

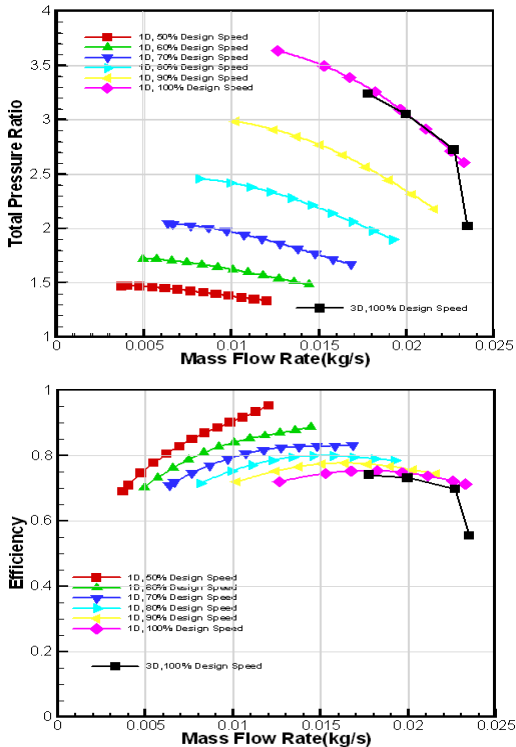


Fig. 13. 1D & 3D 성능해석에 의한 성능곡선도 : (상)전압, (하)효율

5. 3D 구조 해석

초소형 가스터빈을 제작하기 위해 박형의 임펠러가 적용되어, 구조적 안전성 검증이 중요하다. 설계된 압축기 및 터빈의 경우 블레이드의 두께는 1~2mm 수준이다. 3D 성능 해석을 통해 도출된 압력 분포를 경계 조건으로 하여 ANSYS Static Structural tool을 사용하여 구조해석을 수행하였다. Fig. 14는 임펠러 표면의 응력값을 나타낸다. 압축기에는 최고 575MPa의 응력이, 터빈에는 최고 802MPa의 응력이 작용한다. 구조적 안전성을 위해 마진을 고려하여 항복강도가 903MPa인 Titanium 합금을 적용하기로 한다.

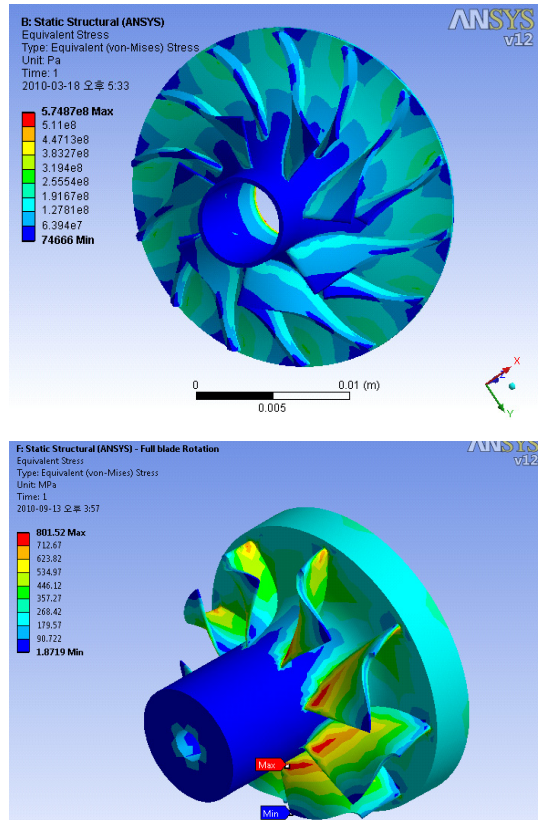


Fig. 14. 응력 분포 : (상)압축기, (하)터빈

6. 결론

초소형 가스터빈을 개발하기 위한 압축기 및 터빈을 설계하였다. 사이클 해석을 통해 기본 설계 사

양을 도출하였다. 기본 설계 사양을 바탕으로 기계적 개략도를 설계하였다. 1D 형상 설계 및 성능 해석을 통해 탈설계점에서의 성능예측곡선을 도출하였고, 성능예측곡선은 안정적인 운전영역을 확보하였음을 나타내었다. 1D 설계를 통해 도출된 결과값을 바탕으로 3D 형상설계를 진행하였다. CFD 해석을 통해 3D 형상설계의 성능 해석을 진행하였고 임펠러에서의 유동이 안정적인임을 알 수 있었다. 또한 3D 성능 해석을 통해 도출한 압력 분포를 구조해석에 적용하여 설계된 임펠러의 구조적 안정성을 확보하기 위해서는 재질이 항복강도가 802MPa 이상인 재료를 사용해야 함을 알 수 있었고 임펠러 재질로 Titanium 합금을 적용해야 한다는 결론을 도출하였다.

후 기

본 연구는 방위사업청 및 국방과학연구소 지원으로 수행되는 차세대 군용전원특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다.

본 논문은 한국군사과학기술학회 2011년 종합학술대회에서 “초소형 가스터빈 공력 설계 및 성능 해석”으로 발표^[10]된 내용을 바탕으로 작성되었습니다.

References

- [1] C. B. Oh, B. S. Choi, “Classification and Characteristic of Micro Power Generators”, Journal of Fluid Machinery, Vol. 9, No. 6, pp. 63~66, 2006. 12.
- [2] Kurzke, J., “GasTurb 11 Design and Off-Design Performance of Gas Turbine”, Germany, 2007.
- [3] S. J. Han, J. Y. Park, M. R. Park, B. S. Choi, “Ultra-Micro Gas Turbine Cycle Analysis”, Proceedings of the KSME 2010 Spring Annual Meeting, pp. 357~358, 2010. 5.
- [4] J. S. Park, S. W. Yoon, S. J. Han, H. H. Cho, “Numerical Investigation of the Heat and Flow in the Micro Gas Turbine”, Proceedings of the KFMA Annual Meeting 2010, pp. 146~147, 2010. 12.
- [5] Sangjo Han, et al., “Design and Simulation of 500W Ultra-Micro Gas Turbine Generator”, Proceedings of the 10th Workshop on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications, pp. 247~250, 2010. 12.
- [6] NREC, COMPAL, Version 7.11.6
- [7] NREC, RITAL, Version 7.13.14
- [8] J. M. Seo, J. Y. Park, M. R. Choi, E. S. Yoon, “Development of Centrifugal Compressor for Micro Gas Turbine”, Proceedings of the KSME 2010 Spring Annual Meeting, pp. 349~350, 2010. 5.
- [9] ANSYS, CFX and TurboGrid, Version 12.0.
- [10] J. M. Seo, B. S. Choi, J. Y. Park, C. H. Park, Y. I. Kim, “Aerodynamic Design and Performance Analysis for UMG”, Proceedings of the KIMST 2011 Annual Conference, pp. 1587~1590, 2011. 6.