

공기 사이클 냉동기에 적용되는 반경 터빈의 개발

권기훈*, 이기호*, 김종선*

Development of Radial Turbine for Air Cycle Refrigerator

Gi-Hun Kwon*, Ki-Ho Lee*, Jong-Seon Kim*

Key Words : Radial Turbine(반경 터빈), Turbo Refrigerator(터보 냉동기), Performance Prediction(성능 예측), Design Optimization(설계 최적화)

ABSTRACT

The radial turbine has been successfully applied to the systems which request relatively small output compared with the axial turbine, and has low manufacturing cost due to its small size and simple structure. Recently, the researches on the development and the efficiency maximization of the radial turbine are in progress corresponding with the trend toward miniaturization in turbo machinery and the development of small dispersed power generation systems.

The radial turbine is to be applied to our turbo refrigerator of which engine speed is 26,000 rpm and turbine efficiency is 88%. Also, as a heat exchanger is accepted instead of a combustor in our turbo refrigerator, the design of radial turbine has been performed to be appropriate to the circumstance of low temperature air, not high temperature combustor gas, into the turbine inlet. This radial turbine is being developed in consideration with not only the aero-dynamic performance but also the simplification of manufacturing and integration, and the durability at operating condition. This paper refer to the performance evaluation about the radial turbine design by comparison with consulting from Russia and the our evaluation about various design factors which are considered in aero-dynamic design process.

1. 서론

반경 터빈은 축류 터빈에 비하여 상대적으로 크기가 작고 구조가 간단하며 제작비용이 저렴한 장점을 가지고 있다. 특히, 축류 터빈과 비교하여 크기가 작은 경우 상대적으로 높은 효율을 획득할 수 있으며 높은 압력비에서도 응용될 수 있다. 터보차저에 적용되는 반경 터빈의 압력비는 4:1 혹은 그 이상에서 사용되며, 몇몇 동력 발생 시스템에 적용되는 경우에는 6:1 이상도 있다.

따라서, 반경 터빈은 해상, 항공기, 우주 동력 시스템 및 소규모 동력 발생을 요구하는 시스템 등에 적용하기에 적당하다. 또한 공기액화공정이나 무거운 디젤

엔진을 대신하여 다양한 산업적인 적용이 가능한 2 MW급 정도의 동력을 공급하는 동력 발생기 등에 많이 활용되고 있다.

지구 온난화 및 성층권에서의 오존층 파괴와 같은 지구 환경 문제의 심각성이 부각되면서 환경 친화적인 기술에 대한 관심이 날로 고조되고 있는 실정이다. 따라서, 당사에서는 환경 친화적 대체 냉매 개발의 한 축으로서 안정하고 싸게 그리고 쉽게 획득할 수 있는 공기를 냉매로 하는 공기 압축식 터보 냉동기를 개발하고 있다.^[1]

공기 압축식 터보 냉동기의 주요 구성 부품인 반경 터빈은 냉매인 공기를 팽창시켜, 저온의 공기를 냉장실로 공급하는 역할을 한다. 이러한 시스템에 적용되는 터빈은 고온에서 작동하는 기존의 동력 발생 터빈과는 달리 낮은 저온의 공기에서 작동하므로 설계나 개발적인 측면에서 고려되어야 할 사항들이 다르게 된

* 터보에너지 연구소, (주)뉴로스

다. 따라서, 본 논문에서는 당사에서 개발하고 있는 공기 사이클 냉동기에 적용되는 반경 터빈의 개발에 대하여 설명하고자 한다.

2. 본 론

2.1 공력 설계

반경 터빈의 설계 절차는 일반적인 터빈 설계 절차와 크게 다르지 않으므로 여기에서는 간단히 언급하기로 한다. 형상에 대한 구속 조건을 고려하여 노즐과 로터의 1차원 형상과 속도 삼각형을 특성을 파악하는 1차원 기본설계를 먼저 수행하게 된다. 다음 단계에서는 1차원 기본 설계를 토대로 한 설계점 및 탈설계점에서의 성능 특성을 예측하는 1차원 성능예측을 수행하게 된다. 이후, 1차원 설계에서 결정된 설계 변수들을 바탕으로 노즐과 로터 블레이드의 형상을 설계하게 되고 설계된 형상에 대한 유동 해석을 수행하게 된다. 유동해석에서는 설계된 형상에 대한 유동 특성을 파악하게 되며, 수행된 유동 해석 결과를 이용하여 형상을 최적화하는 작업을 수행하게 된다. 이 때에는 유동적인 특성 뿐 만 아니라 구조, 진동적인 특성까지 고려하여 최적의 로터와 블레이드 형상을 결정하게 된다.^[2]

다음 절에서는 반경 터빈의 각 설계 단계에서 수행하는 내용과 수행 결과들에 대해서 언급하기로 한다.

2.1.1 기본 공력 설계

반경 터빈을 설계하기 위해서는 설계점에서의 터빈 관련 공력 인자들을 결정하여야 하는데, 이는 사이클 해석 결과로 주어진다. 본 연구에서 반경 터빈의 설계를 수행하는 필요한 설계점 변수들은 Table 1에 나타내었다.

기본 설계 결과, 터빈 출구에서의 온도는 211 K, 절대 마하수는 0.328을 얻었으며 로터 블레이드 입/출구에서의 속도 삼각형은 Fig. 1에 나타내었다. 또한 블레이드 입구에서의 절대 가스각은 22° 이며, 출구에서의 절대 가스각은 6° , 반동도는 0.55 이다.

위의 속도 삼각형에서 보는 바와 같이 터빈 출구에서의 절대 속도는 94.7 m/s이고 공기의 출구각은 3.6° 으로 거의 축방향의 속도 성분을 가지고 배기부로부터 흐르고 있음을 알 수 있다.

Table 1 Turbine Design Parameters

Parameters	Values
Massflow Rate (kg/s)	1.39
Turbine Inlet Temperature (K)	250.96
Turbine Inlet Pressure (MPa)	0.20549
Expansion Ratio (T-T)	1.95
Power (kW)	53.46
Rotational Speed (rpm)	26,000
Efficiency (T-T)	88

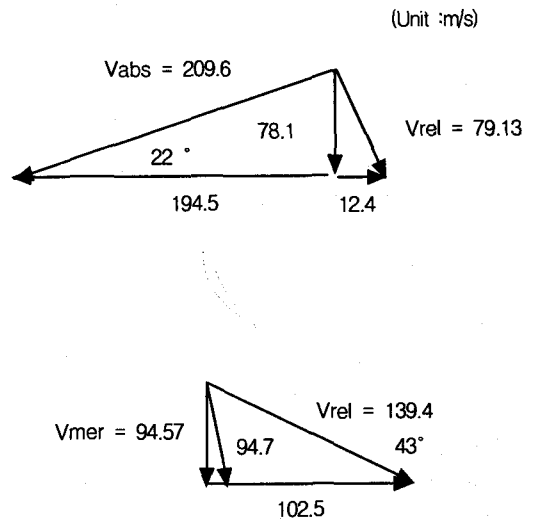


Figure 1 Velocity Triangle at Rotor Blade (Non Scale)

2.1.2 성능 예측

기본 공력 설계에서 획득한 기본적인 설계 변수 값들을 이용하여 특정 회전수 및 팽창비 변화에 따른 반경 터빈의 성능 특성에 대하여 조사하였다. 성능 해석의 주요 입력 데이터는 기본 형상, 회전수, 팽창비 및 손실계수들이며 출력 데이터는 터빈의 작동 조건에서의 효율, 유량, 비속도 등이다.

Fig. 2는 터빈의 팽창비에 따른 효율 변화의 특성을 보여주고 있다. 100% 회전수, 팽창비 1.95 근방에서 최대의 효율을 보이고 있으며 저 엔진회전수에서는 팽창비가 증가할수록 터빈의 효율이 감소하는 경향을 알 수 있다.

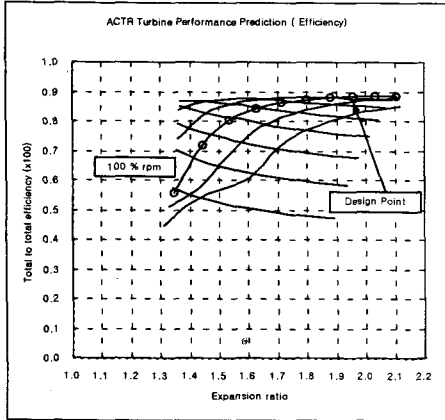


Figure 2 Performance Characteristics of Turbine

2.1.3 형상 설계

기본 공력 설계에서 설계된 입/출구의 속도 삼각형에서 결정되는 가스 각, 터빈의 기하학적 형상 구속 조건 등을 이용하여 노즐과 로터 블레이드의 형상 설계를 수행하였다.

노즐은 2차원 단면 형상을 설계한 후, Conformal Transformation 기법을 이용하여 반경형 노즐로 설계하였다. 이 때, 노즐의 출구 면적은 기본 설계에서 요구하는 면적을 만족하도록 하였다. 그리고, 설계된 노즐의 주요 형상 데이터는 다음의 Table 2 와 같고, 그 형상은 아래의 Fig. 3에 각각 나타내었다. 터빈 출구에서 회전체의 앞쪽으로 보았을 때, 반경 터빈은 시계 방향으로 회전하도록 설계하였다.^[3]

설계된 로터 블레이드의 주요 형상 데이터는 다음의 Table 3과 같고 그 형상은 아래의 Fig. 4에 각각 나타내었다.

Table 2 Nozzle Geometric Data

Geometric Parameter	Values
Diameter at Nozzle Inlet (mm)	220
Vane Height at Nozzle Inlet (mm)	16
Diameter at Nozzle Exit (mm)	170
Vane Height at Nozzle Exit (mm)	16
Nozzle Inlet Blade Angle (deg.)	12.9
Nozzle Exit Blade Angle (deg.)	65.6
Number of Nozzle Vane	30

설계된 로터 블레이드의 최종적인 형상은 다음절에 설명하는 바와 같이 블레이드와 블레이드 사이의 유동장 해석을 수행하여 만족할 만한 압력 및 속도 분포를 가지고 있는가를 확인하는 절차를 반복적으로 수행함에 의해서 결정된다. 이 단계에서는 유동장의 특성 뿐만 아니라 구조적인 특성까지 고려하여 최종 형상 결정에 반영한다.

2.1.4 유동 해석

유동 해석은 로터 블레이드에 대하여 수행하였으며 유동 해석 도구로는 상용 유동 해석 소프트웨어인

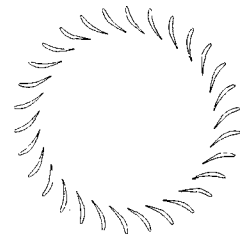


Figure 3 Configuration of Nozzle

Table 3 Rotor Blade Geometric Data

Geometric Parameter	Values
Rotor Blade Number	12
Diameter at Rotor Inlet (mm)	152
Hub Diameter at Rotor Exit (mm)	25.9
Shroud Diameter at Rotor Exit (mm)	109.7
Rotor Exit Blade Angle at rms (deg.)	42.7
Mean Blade Thickness at Rotor Exit (mm)	0.5

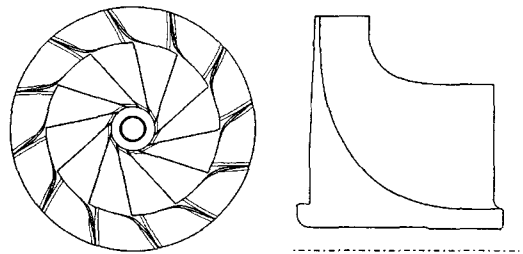


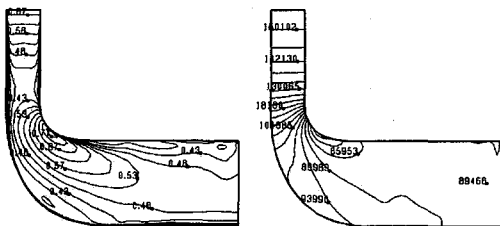
Figure 4 Configuration of Rotor Blade

Fine Turbo(Version 4.1, Numeca)를 이용하였고 적용된 난류 모델은 Baldwin- Lowmax이다.

Fig. 5는 초기 반경 터빈 형상 설계에 대한 유동장 해석을 수행한 결과이다. (a)는 Meridional 단면에서의 상대 마하수 분포, (b)는 Meridional 단면에서의 정압력 분포를 각각 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 블레이드 쉬라우드의 곡률이 급격히 변함에 따라 유동의 가속이 급격히 진행되고 이후에는 거의 이루어지지 않고 있음을 볼 수 있다. 이러한 유동장 특성은 블레이드 내부의 유동장이 균일하게 팽창되어야 높은 효율을 갖는 터빈의 설계라는 측면에서 효율을 저해하는 큰 손실적인 요인으로 작용하게 된다.

Fig. 6은 초기 반경 터빈 형상 설계에서 노즐의 출구각을 5° 변경한 경우에 대한 유동장 해석을 수행한 결과이다 (a)는 Meridional 단면에서의 상대 마하수 분포, (b)는 Meridional 단면에서의 정압력 분포를 각각 나타낸다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 블레이드 쉬라우드의 곡률이 급격히 변함에 따라 유동의 가속이 급격히 진행되고 이후에는 거의 이루어지지 않는 거의 같은 결과를 보여주고 있다.

이 경우에는 설계점의 변경으로 인하여 터빈 입구에서의 유량이 감소하였고, 유량이 감소한 만큼 노즐의 출구 면적을 줄여 설계하고자 하였다. 따라서 로터 블레이드의 형상은 기존의 형상과 동일하며 단지 로터 블레이드 입구의 유동 특성이 달라진 것만을 고려하였다. 이러한 터빈의 설계는 유량의 변화가 크지 않거나 터빈의 블레이드 입구각의 변화 폭이 5° 정도의 범위 내에 있을 경우에 적용하는 사례가 종종 있다.



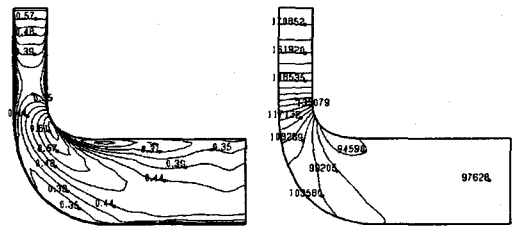
(a) (b)
Figure 5 Flowfield Analysis Result-Original Design
(a) Relative Mach Number Contour
(b) Static Pressure Contour

위의 두 경우에서의 유동장 해석 결과를 검토하면, 로터 블레이드 쉬라우드의 곡률이 완만하도록 설계가 변경되어야 한다는 판단을 하게 되었다. 이러한 작업은 로터 블레이드의 3차원 형상을 최적화하는 작업으로 3차원 유동장 해석이 반드시 필요한 부분이다. 이와 더불어 허브면의 곡률도 최적화하는 작업이 필요하다는 결론을 얻었고 따라서, 현재 전반적인 로터 블레이드의 형상을 최적화하는 작업을 수행 중에 있다.

2.2 구조 설계

2.2.1 재질 선정

-40 °C 이하에서 운용되는 반경 터빈의 특성 때문에 재료는 저온 특성이 우수한 Austenitic Steel(SUS 304)를 사용하였다. 그리고, SUS304의 항복강도는 280 MPa 이고, Ultimate Tensile Stress는 570 MPa의 값을 적용하였다. 반경 터빈의 질량 특성은 다음의 Table 4와 같다.



(a) (b)
Figure 6 Flowfield Analysis Result-New Design
(a) Relative Mach Number Contour
(b) Static Pressure Contour

Table 4 Mass Properties of Turbine

Parameters	Values
Mass Center (Z, mm)	43
Mass (kg)	1.43
Polar Moment of Inertia (kg-m ²)	1.948 e-3
Transverse Moment of Inertia (kg-m ²)	1.305 e-3

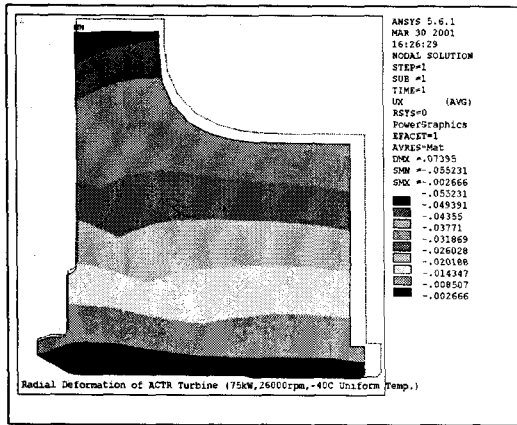


Figure 7 Radial Deflection of Disk

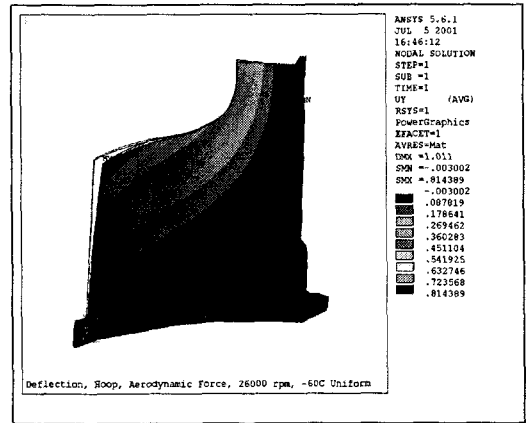


Figure 8 Circumferential Deflection of Rotor Blade

2.2.2 응력 해석

디스크 응력 해석

디스크의 응력 해석은 범용 구조 해석 도구인 ANSYS를 사용하였고, 축대칭, 평면 응력 요소로 모델링하였다.

2-D 디스크의 응력 해석 결과를 보면 디스크의 변형량은 반경에 비례함을 볼 수 있다. 그리고, 최대 반경 변위는 디스크의 팁에서 일어나며 그 변형량은 0.055 mm이며 그 분포는 아래의 Fig. 7에 나타내었다. 그리고, 최대 Von Mises 응력은 디스크 Bore에서 생기며 그 크기는 117 MPa이다.

블레이드 응력 해석

블레이드의 응력 해석은 범용 구조 해석 도구인 ANSYS를 사용하였고 8절 점 고체 요소(Solid Element)로 3-D 모델링하였다. 블레이드에 작용하는 Aerodynamic Loading을 고려하였으며 온도 분포는 -40 °C로 균일하다고 가정하여 해석을 수행하였다.^[4]

3-D 블레이드 응력해석 결과, 최대 원주방향 변형은 블레이드 팁에서 발생하고 그 변형량은 0.814 mm이며 변형량의 분포는 Fig. 8에 나타내었다. 그리고, 최대 Von Mises 응력은 블레이드 뿌리에서 생기고 그 크기는 626 MPa이며 블레이드 응력의 분포는 Fig. 9에 나타내었다. 블레이드에서 발생하는 응력의 원인은 원심력에 의한 굽힘에 의해서 발생한 것으로 사료된다.

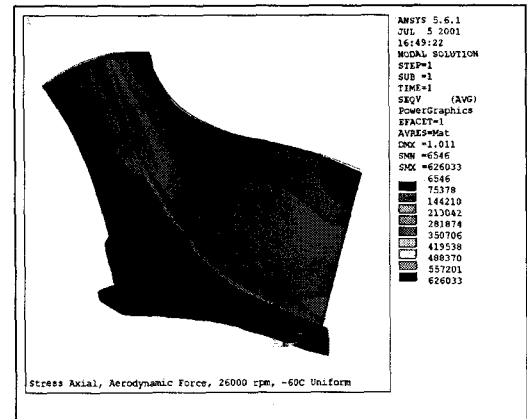


Figure 9 Von Mises Stress of Rotor Blade

진동 해석

블레이드 응력 해석에 적용된 모델 및 해석 도구를 사용하였고, 해석 결과는 다음의 Fig. 10에 Campbell Diagram으로 나타내었다.

그림에서 보는 바와 같이 설계 회전수 26,000 rpm에서의 고유 진동수와 겹치는 1~4까지의 Engine Order(엔진회전수 배수)는 없는 것으로 확인되었다. 그리고 터빈 노즐의 개수가 30개이므로 30 EO는 설계 회전수 26,000 rpm과 상당히 떨어진 곳에서 겹치고 있음을 알 수 있다. 따라서, 설계된 터빈은 설계 회전수에서 공진이 발생할 가능성은 거의 없는 것으로 판단된다.

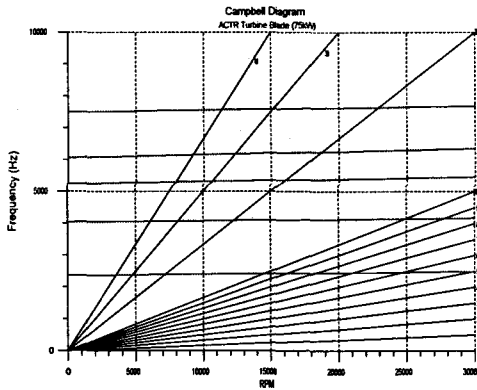


Figure 10 Campbell Diagram

3. 결론

공기 사이클 냉동기에 적용되는 반경 터빈의 개발에 대하여 설명하였다.

회전수 26,000 rpm, 효율 88%인 반경 터빈의 설계 과정에 대하여 언급하였으며 공력 설계인 경우, 노즐과 로터 블레이드의 형상 설계를 완료하였고 형상 최적화 작업을 수행 중에 있다. 구조 설계인 경우, 기본적으로 결정된 디스크 및 로터 블레이드에 대한 응력

및 진동 해석을 수행하였다. 진동해석 결과, 현재 설계된 반경 터빈은 공진에 의한 영향을 받지 않는다는 것을 확인 할 수 있었다. 디스크의 응력은 설계마진을 많이 가지고 있으나, 로터 블레이드의 응력은 설계 마진이 거의 없는 것으로 확인되었다 이는 로터 블레이드의 형상 최적화 과정을 통하여 해결할 것이다.

설계와 동시에 제작된 반경 터빈에 대한 성능 시험을 준비하고 있으며 성능시험 결과와 설계 결과를 비교함으로써 설계 도구의 신뢰도를 향상시킬 수 있도록 진행할 것이다.

참고문헌

- [1] 공기 압축식 터보 냉동기 개발 보고서, 뉴로스
- [2] David Japikse, 1994, Introduction to Turbomachinery, Concepts ETI, Inc and Oxford University Press
- [3] 공기 압축식 터보 냉동기 터빈 상세설계 보고서, 뉴로스
- [4] 공기 압축식 터보 냉동기 터빈 구조설계 보고서, 뉴로스