대한기계학회 2001년도 추계학술대회논문집 B pp. 670~675 KSME 01F256

박용 터보챠저 사류 터빈의 공력설계

김 홍 원* · 오 국 택* · 갈 상 학* · 하 지 수*

A Aerodynamic Design of Mixed Flow Turbine of the Marine Turbocharger

Hong-Won Kim, Kook-Taek Oh, Sang-Hak Ghal and Ji-Soo Ha

Key Words : Mixed flow Turbine(사류터빈), Quasi 2-D Prediction(평균유선해석), Off-design Performance Prediction(탈설계 성능예측), Flow Analysis(유동해석)

Abstract

This paper describes aerodynamic preliminary design performance prediction and flow analysis for turbine of the marine middle engine turbocharger. The performance characteristics of turbocharger turbine are investigated at various operating conditions using mass flow rate and computational flow analysis for rotor and nozzle at design point are performed. Preliminary design results are performed by applying mean line and radial equilibrium theory. Performance prediction and flow analysis results show good agreement with experiments. From 3 dimensional flow analysis result, efficiency is 0.6% greater than design point. Therefore, this design approach is useful for preliminary design, and helps to increase the design capability for optimized rotor blade.

기호설명

P: 압력 W: 상대속도

하첨자

0 : total(전)

1 : 노즐 입구

2 : 노즐 출구

1. 서 론

터보챠저의 작동원리는 엔진 연소후 나오는 배가스의 열에너지를 이용하는 것으로 고온 고압의 배기가스가 터빈에서 저온 저압으로 팽창되면서 회전적 기계에너지로 변환되고 이 에너지가 동축으로 연결된 압축기를 회전시킴으로서 대기공기를 압축하여 엔진 실린더 흡기포트로 보내는 역할을 한다. 따라서 엔진으로 흡입되는 공기의 압력 및 밀도를 증대시켜 체적효율 및 연소효율을 높이므로 엔진의 출력을 향상시키는 역할을 한다. 특히, 사류터빈은 디젤엔진 배가스의 압력맥동이 심한 경우에 구심터빈보다는 효용성이 더 나은 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 박용 중형엔진에 사용되는 터보챠저의 사류터빈에 대해서 공력학적 기본설계를 수행하여 기본설계 형상요소기술을 구축하고자 한다. 따라서 축출력을 기준으로 싸이클 해석을 수행하여 설계점을 설정한 후 기본설계 및 탈설계 성능평가를 실시하고 3 차원 점성유동해석을 통해 기본설계 및 3 차원 형상설계의 타당성을 검증하고자 한다.

아래의 Fig. 1 과 2 는 사류터빈에 대한 실물사진이다.

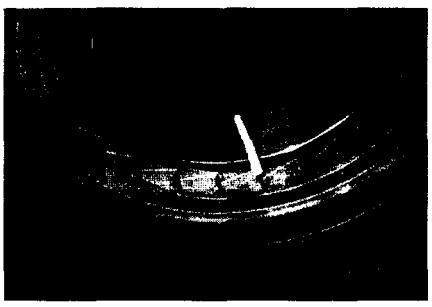

Fig. 1 Nozzle ring

* 현대중공업㈜ 산업기술연구소

Fig. 2 Mixed flow rotor

2. 사류터빈 설계

2.1 기본설계

싸이클 매칭후 설계요구조건과 설계인자가 주어지면 설계요구조건에 부합되도록 설계를 수행하면서 성능을 계산하는 설계해석을 수행하여야 한다. 로터는 회전하는 부품이며 매우 복잡한 흐름형태를 나타내기 때문에 설계 초기단계에서는 3차원 설계대신 간편한 준 2차원 흐름해석을 통하여 설계를 한다. 본 연구에서는 준 2차원 흐름해석 방법을 확장한 것으로 로터 입구에서는 1차원 흐름해석을 수행하고, 직경이 변하는 로터출구에서는 축대칭 흐름해석으로 Radial Equilibrium Theory를 적용하였다. 여기서 고려한 흐름손실은 다음과 같다.

- 로터내에서의 경계층 흐름에 대한 마찰손실
- 팁 간격에 의한 누설손실
- 원판 마찰손실
- 로터 출구에서의 운동에너지 손실
- 충격파 손실

사류터빈에 대한 기본설계 설계에 대한 주요순서는 다음과 같다.

① 날개수 : 로터의 흐름 유입각이 설계 또는 성능예측에서 가장 중요한 변수이며 이에 따른 Slip Factor를 적절히 선택하여 날개수를 설정한다.

② 로터 입구직경 : 로터 입구직경은 계통설계를 통해 축동력을 얻을 수 있도록 설계되어야 한다. 축동력은 원판마찰손실과 팁 간격손실이 보정된 엔탈피와 질량의 곱이므로 반복계산을 통해 입구 날개속도를 구한 후 주어진 회전수와의 관계속에서 입구직경이 계산된다.

③ 로터 입구폭 : 로터 입구의 절대속도와 열역학적 상태가 결정되면 연속방정식을 통해 입구폭을 결정한다.

④ 로터 출구 : 로터 출구는 반경방향에 따라 같은 간격으로 10구간을 나누어 반경방향 평형식을 적용시킨다. 로터 출구유동은 터빈의 비에너지와 유량의 두 설계요구조건을 만족해야 하므로 두 개의 반복회로를 이용하여 계산된다.

2.2 탈설계점 성능해석

사류터빈의 성능예측은 축류터빈의 그것과 유동흐름방향이 다르듯이 많이 다르다. 축류터빈의 경우에는 기본적으로 손실모델들이 블레이드 반경의 함수로 많이 설정되어 있으나 사류터빈의 경우에는 그렇지 않다.

본 연구에서는 노즐과 로터에 대한 손실모델은 경험식과 각종 손실 계수관계식[2]을 적용하였다.

2.2.1 성능예측 계산

노즐의 성능예측은 주어진 질량에 따른 연속방정식을 만족하기 위하여 노즐출구에서 압력손실을 고려한 출구 마하수를 결정하여 이전에 가정된 마하수(처음에는 노즐입구 마하수로 설정)와의 비교를 통해 수렴조건을 만족할 때까지 계산하는데 질량 또는 회전수의 변화에 따라 쵸킹 여부를 결정한다. 최종 결정된 마하수와 출구 유동각은 로터의 성능을 예측하는 속도삼각형을 결정짓는 가장 큰 변수가 된다.

일반적으로 사류터빈의 노즐손실계수는 0.05 에서 0.1 사이에 있다. 노즐손실계수에 대한 식은 다음과 같다.

$$K = \frac{P_{01} - P_{02}}{P_{02} - P_2}$$

로터의 성능예측은 기본설계에서 적용한 방식과는 정반대로 유량과 회전수 및 형상이 주어져 있으므로 반복계산을 통해 연속방정식과 압력손실(내부손실 및 외부손실)을 만족시키는 로터 출구의 회전방향과 축방향 속도를 결정짓고 로터출구의 최종 상태량을 결정한 후 터빈의 효율을 계산하게 된다.

2.3 유동해석

3차원 유동해석에서는 노즐과 로터간의 상호작용과 로터 블레이드 사이의 유동장해석 및 압력분포를 해석함으로서 3차원설계가 허브부터 쉬라우드까지 적절하게 되었는지를 확인하는 작업으로 블레이드내부의 부하분포가 부적절할 경우 3차원 곡면를 수정하기 위해서 수행하는 방법이다.

Fig. 3 과 같이 사류터빈의 기하학적인 형상을 3차원적으로 구성하여 격자를 각각 생성하였다. 해석을 위한 격자생성에 대한 cell의 개수는 약 150,000 개(노즐 60,000, 로터 90,000)이며, 회전영역과 비회전영역을 동시에 해석하기 위하여 quasi steady state인 mixing plane method를 사용하였다. 이 방법은 interface 영역에서 area-weighted average를 취하면서 계산되므로 박리나 충격파 같은 비정

상적인 유동은 잡지 못하지만 time-averaged 유동장의 문제의 접근에 신속하게 계산하면서도 충분히 좋은 결과를 나타내준다. 난류모델은 standard κ -ε 모델을 사용하였고 벽면에서는 wall function을 적용하였으며 열전달 효과는 단열로 가정하였다.

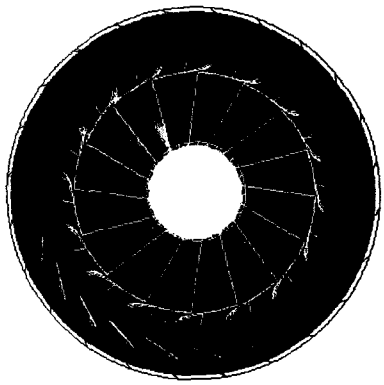

Fig. 3 Grid generation of mixed flow turbine

3. 결과 및 고찰

3.1 사류 터빈의 설계점

앞서 언급한 싸이클 매칭방법으로 몇 번의 반복과정을 거친 후 사류터빈에 대한 설계요구조건은 다음과 같이 결정되었다.

Table 1 Requirement of design point

입구온도	804 K
질량유량	3.6154 kg/s
입구압력	2.8 bar
회전수	38054 rpm
출구 허브직경	81.76 mm
축출력	589 KW
사류터빈 효율	85.4%

3.2 기본설계 평가

Table 2는 설계점을 기준으로 한 기본설계결과와 실제 수치와의 비교를 나타낸 것으로 기존형상 설계데이터와 상당히 일치함을 알 수 있었다. 로터 입구폭과 각도를 제외하고 나머지의 설계치수도 실제 데이터와 매우 근접함을 보였으며 기본설계프로그램의 타당성을 검증하였다. 본 사류터빈의 비속도는 0.998 이며 이 수치는 사류터빈의 범위에서 상당히 좋은 효율을 나타내며 설계의 타당성을 검증하는 방법이기도 하다.

Table 2 Comparison of preliminary design results

설계 변수 (단위 : mm)		Real	Design
로터	입구직경	246.3	255.8
	출구 허브직경	81.76	82.5
	출구 팁직경	205.16	206.2
	입구각	1.42°	9.5°
	출구각	40.13°	57.2°
	날개수	12	12
	출구폭	35.34	32.3
노즐	입구 직경	308.28	305.5
	출구 직경	274.57	271.2
	입구각	33.47°	24.5°
	출구각	25.51°	30°
	날개수	24	25

3.3 성능해석 평가

Fig. 4는 사류터빈의 성능특성을 파악하기 위해 부하가 100% rpm에서 성능예측 프로그램을 통해 유량변화에 따른 탈설계점에서의 성능을 예측하고 유동해석 결과를 비교한 그림이다. 성능예측 결과는 100% rpm에서 가장 넓은 작동범위를 보여주고 있으며 부하가 낮아질수록 효율은 운전범위변화에 따라 급격히 떨어지는 경향을 보여준다. 설계점에서의 유동해석의 효율은 설계점인 85.4%보다 0.6%높은 86%로 계산되었으며 성능프로그램보다 더 잘 예측하였다. Fig. 5는 각각의 부하시에 노즐목 또는 로터의 exducer throat에서의 쵸킹상태를 나타내며 부하와 팽창비가 증가할수록 점진적인 유량감소를 잘 보여주고 있다.

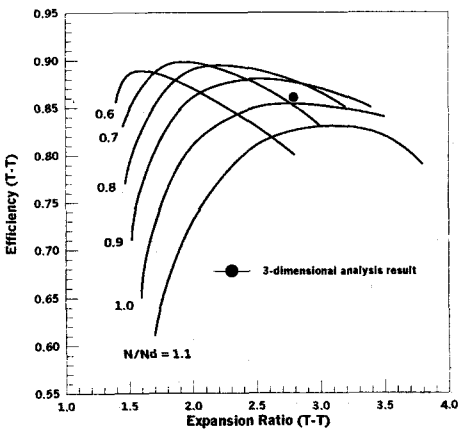

Fig. 4 Comparison of performance prediction and 3-dimension analysis result

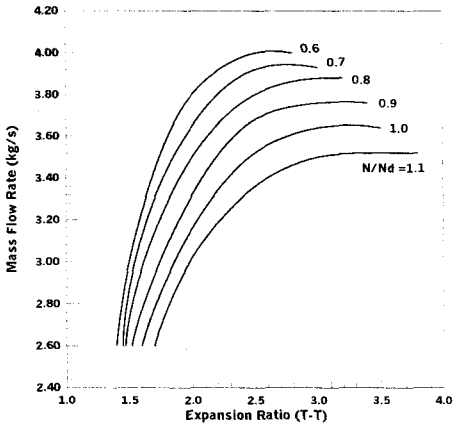

Fig. 5 Mass flow rate variation between rpm and expansion ratio

3.4 유동해석 평가

사류터빈에서 상대속도는 로터 입구에서 출구로 갈수록 꾸준히 증가해야 하며 이때 어느 부분에서 급격하게 상승해서는 안되며 로터 블레이드의 양면에 걸리는 압력차가 최소화 되도록 부하하중이 분포되어야 한다. Fig. 6 은 유동해석 결과를 바탕으로 로터의 쉬라우드면과 허브면에서의 상대마하수를 나타낸 것이며 특히 허브에서 서서히 증가하다가 로터의 exducer throat 에서 더욱 가속(acceleration)되는 점이 주목된다. 쉬라우드면에서는 로터 출구에서 국부적으로 음속을 초과하고 있다. Fig. 7 은 곡면형상 설계 또는 평가시 가장 중요한 결과이다. 허브면에서는 쉬라우드면에 비해 약 2 배의 부하가 걸리고 있으며 압축기와는 마찬가지로 부하가 작으면 작을수록 좋은데 대체로 양호하게 나타났다. 본 설계에서는 쉬라우드면의 중간위치에서 다소 부하가 상승하는 것으로 나타났으며 이 부분에 대한 3 차원 곡면형상 수정이 필요하다.

Fig. 8, 9 에서는 로터의 흡입면과 압력면의 압력분포를 나타내는데 로터의 입구에는 서로 비슷한 압력값을 보이고 있어서 에너지 전달면에서 볼 때 다소 문제가 발생할 수 있음을 보인다. 하류로 내려올수록 유동이 가속화되면서 안정적으로 압력차가 발생함을 볼 수 있다. Fig. 10 과 11 은 전체적인 압력 및 온도분포를 나타내는데 압력강하에 따른 온도강하를 잘 보여주고 있다.

Fig. 12(a) ~ (d)는 로터 블레이드의 허브, 평균단면 , 팁 및 케이싱에서의 압력면과 흡입면에서의 상대마하수를 나타낸 것이며 팁쪽으로 갈수록 양호한 부하상태를 보이고 있다.

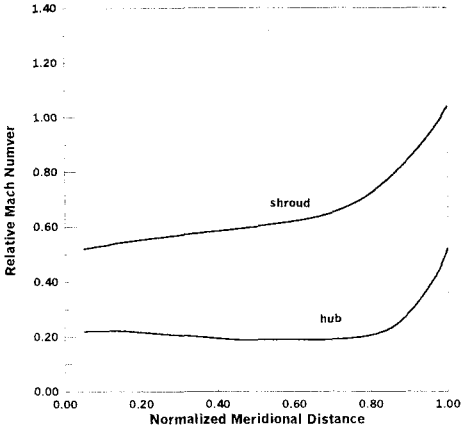

Fig. 6 Relative mach number along meridional plane at both shroud and hub

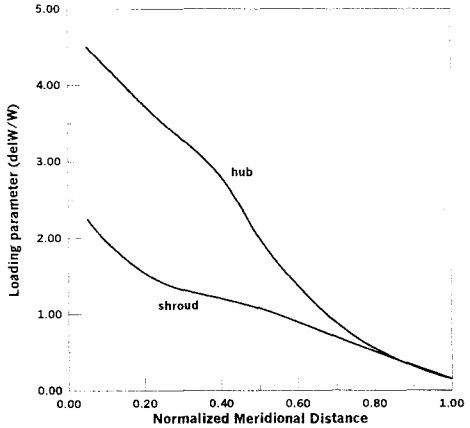

Fig. 7 Loading variation along meridional plane at both shroud and hub

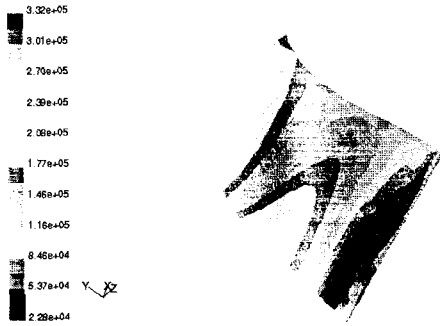

Fig. 8 Pressure distribution of suction side

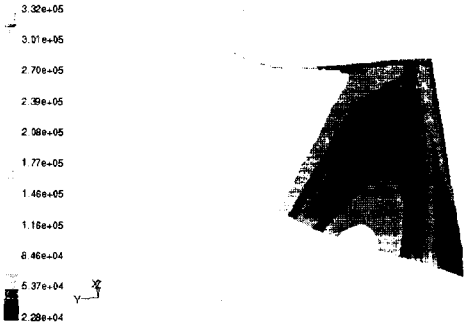

Fig. 9 Pressure distribution of pressure side

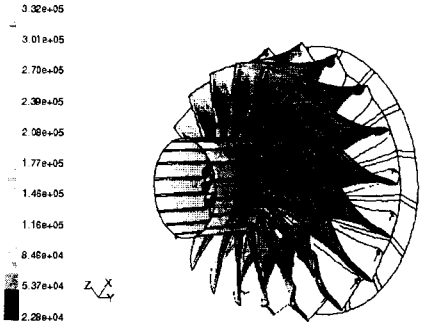

Fig. 10 Pressure distribution of rotor

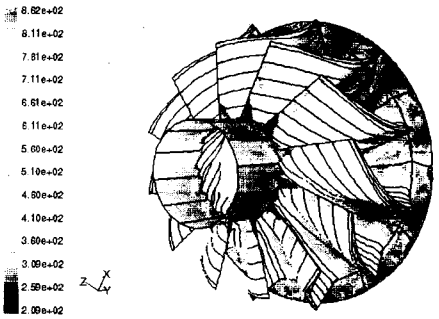

Fig. 11 Temperature distribution of rotor

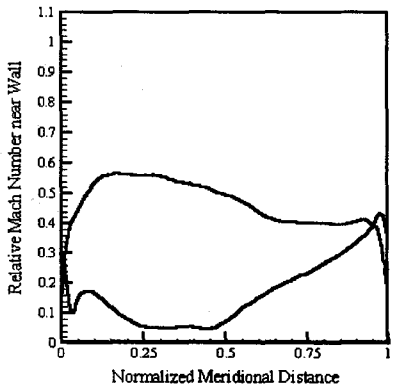

Fig. 12(a) Near hub around blade

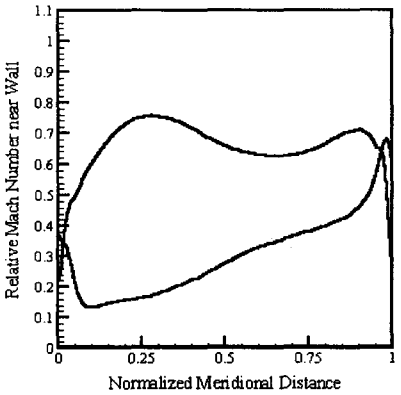

Fig. 12(b) Near mid span around blade

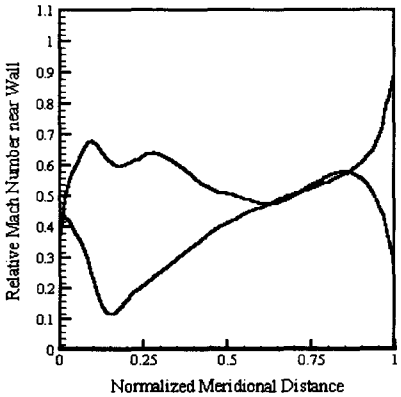

Fig. 12(c) Near tip around blade

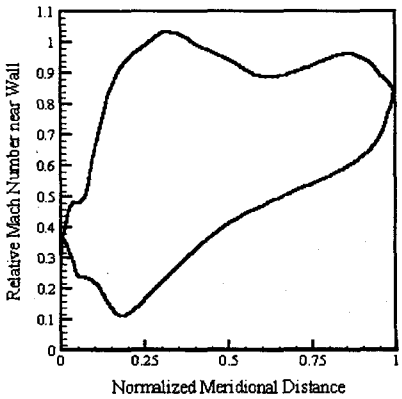

Fig. 12(d) Near casing around blade

4. 결 론

본 연구에서는 박용엔진 중형 터보챠저 설계를 위한 기초연구로서 사류터빈에 대한 공력학적 기본설계와 성능평가 및 유동해석을 수행하였으며

결론은 다음과 같다.

1) 터보챠저의 싸이클 매칭 및 기본설계를 통하여 사류터빈에 대한 설계인자를 확보하였고 설계형상이 실제형상과 잘 일치함을 보여주고 있어 향후 상세설계시 활용할 수 있게 되었다.

2) 사류터빈의 탈설계점 영역에서 평균반경법을 적용한 준 2 차원 프로그램을 통해 성능을 예측한 결과 전체적으로 양호하게 나타났다. 추후에 실험결과를 바탕으로 성능예측 프로그램을 보완하고자 한다.

3) 점성을 고려한 3 차원 유동해석을 수행하여 터빈내부의 3 차원 유동특성을 살펴보았으며 설계점과의 효율오차는 0.6%로 조금 높게 나타났으나 디스크에 의한 누설손실 등의 부차적인 손실을 감안하면 차이가 조금 더 줄어들 것으로 판단된다. 또한, 블레이드의 압력면과 흡입면의 부하계수를 살펴보고 진단함으로서 3 차원 블레이드 곡면설계에 대한 적절성 여부를 평가하였다.

참고문헌

(1) 오국택, 김홍원, 갈상학, 하지수, 유승찬, "박용 터보챠저 원심압축기의 공력설계에 대한 해석적 연구", 대한기계학회 2001 년도 춘계학술대회논문집 E 권 pp. 649 ~ 654.

(2) A, Whitfield and N. C. Baines, Design of radial turbomachines, Longman Science & Technical

(3) David Japikse and Nicholas C. Baines, Introduction to Turbomachinery, Concepts ETI, Inc and Oxford University Press

(4) Galvas M. R, 1973, "Fortran Program for Predicting Off-Design Performance of Centrifugal Compressors", NASA TN D-7487

(5) Wiesner, 1967, "A Review of Slip factor for Centrifugal Impellers", Journal of Engineering for Power, Trans. ASME, Vol. 89

(6) Fluent user's guide vol. 1-4, Fluent. Inc