

베인노즐 출구각도에 따른 100kW급 구심터빈의 성능 및 내부유동의 영향

모장오¹ · 김유탉[†] · 오철² · 이영호³

(원고접수일 : 2011년 6월 24일, 원고수정일 : 2011년 7월 14일, 심사완료일 : 2011년 8월 30일)

Influence of Performance and Internal Flow of a Radial Inflow Turbine with Variation of Vane Nozzle Exit Angles

Jang-Oh Mo¹ · You-Taek Kim[†] · Cheol Oh² · Young-Ho Lee³

요약: 본 연구에서는 폐열회수 발전시스템에 적용가능한 100kW급 구심터빈을 대상으로 베인노즐의 출구각도 변화에 따른 구심터빈의 성능과 내부유동의 영향을 분석하였다. 이를 위해 상용코드를 이용한 3차원 CFD 해석을 수행하였다. 베인노즐 출구각이 커짐에 따라 블레이드 근처 재순환영역은 점차 작아졌으며, 또한 단면축소효과로 인해 베인노즐 출구끝단 마하수는 1까지 관찰되었다. 본 연구를 통해 분석된 해석결과는 목표출력용 구심터빈의 최적 설계파라미터 구성을 위한 설계자료로 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

주제어: 반경류 터빈, 전산유체역학, 베인노즐 출구각, 마하수, 등엔트로피 터빈효율, 기계적 출력

Abstract: In this study, we analysed the influence of the performance and inflow flow of a radial inflow turbine with the variation of vane nozzle exit angles for a 100kW class turbine applicable in the waste heat recovery system. For this, three-dimensional CFD analysis was performed using commercial code called ANSYS Fluent 12.1. As the vane nozzle exit angle was more increased the reattachment region near blades of the vane nozzle got smaller, and also the Mach number at vane nozzle exit was observed to be 1 due to the effect of the cross section reduction. Through this study, we expect that the analysed results will be used as the design material for the composition of the turbine optimal design parameters corresponding to the target output power.

Key words: Radial inflow turbine, Computational fluid dynamics, Vane nozzle exit angle, Mach number, Isentropic turbine efficiency, Mechanical power

1. 서론

구심터빈은 축류터빈에 비하여 그 사용 범위가 넓지는 않으나 소형이며, 구조가 간단하고 큰 압력 비에서 작동되는 등의 장점으로 인하여 근래 내연 기관의 출력증대를 위한 과급기의 구동원으로 많이 사용되고 있다. 그리고 과급기에서는 엔진 회전

수에 따라 배기가스 유량이 크게 변화하게 되며, 이러한 유동조건에서의 효율적인 작동을 위하여 로터와 스크롤 케이싱 사이에 가변 안내깃을 설치하는 예가 많이 있다[1-3].

일반적으로 구심터빈은 로터, 베인노즐, 스크롤 케이싱의 3가지 요소로 구성되며, 그 중 하나인 베

[†] 교신저자(한국해양대학교 기관시스템공학부, E-mail:kimyt@hhu.ac.kr, Tel:051)410-4258)

1 University of Adelaide 방문연구원

2 한국해양대학교 기관공학부

3 한국해양대학교 기계·에너지시스템공학부

인노즐은 작동유체를 가속시키고 로터입구에서 설계된 입사각으로 분사되도록 하는 것이 주된 목적이다. 스크롤 케이싱 또한 타원형 형태의 구조와 입구에서 출구로 갈수록 단면적이 작아지는 형상으로 인해 유체를 가속시키고 선회류를 발생시키지만, 높은 압력비로 작동되는 소형 구심터빈의 경우에는 효율을 높이기 위해서 베인노즐의 사용이 필수적이다[4].

[5]에서는 직선베인, 오목베인, 볼록베인의 서로 다른 3가지 베인형상을 가진 구심터빈에 대하여 압력측정과 유동가시화 등의 실험적 연구를 수행하였으며, [6]에서는 베인노즐 주위의 유동장과 노즐형상을 개선하기 위해 CFD 해석을 수행하였다. 또한 [7]에서는 선박폐열 발전시스템 구성을 위해 비교적 열사이클 구성이 간단한 이상랭킨사이클을 시스템 모델로 구성한 후, 100kW급 구심터빈 설계 및 내부유동 및 효율특성 파악을 위한 CFD 해석을 수행하였다.

본 연구에서는 폐열회수 발전시스템에 적용가능한 100kW급 구심터빈을 대상으로 베인노즐의 출구각도 변화에 따른 구심터빈의 성능과 내부유동의 영향을 분석하기 위해, 상용코드를 이용한 3차원 CFD 해석을 수행하였다. 분석된 결과는 목표출력용 구심터빈의 최적 설계파라미터 구성을 위한 설계자료로 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

2. 구심터빈 형상설계

2.1 로터의 설계형상 및 제원

본 연구에서는 폐열회수 발전시스템에 적용가능한 100kW급 구심터빈을 대상으로 공기역학적 반복설계를 통하여 기본설계를 완성하였다. 로터의 기본설계 형상을 Figure 1에 나타내었다. 로터는 13개의 블레이드로 구성되며, 반경방향으로 유입된 작동유체는 블레이드에 의해 에너지가 추출되면서 수직방향으로 90° 방향전환을 하면서 토출되는데, 이때 발생하는 유동손실을 최소화하기 위해서는 로터의 기하학적인 3차원 설계가 중요하다. 또한 입구에서 출구로 갈수록 블레이드에 의한 에너지

추출에 의해 작동유체가 팽창되므로, 출구로 갈수록 자오면 면적이 증가되도록 설계하는 것이 중요하다. 터빈의 외경과 내경은 각각 138mm, 127mm이며, 로터의 설계형상과 관련된 설계파라미터를 Table 1에 나타내었다.

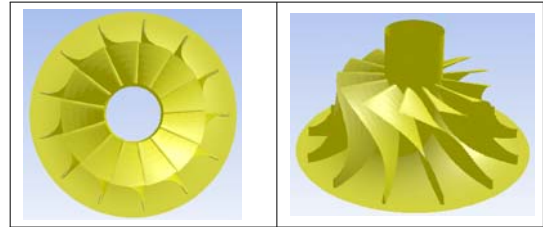


Figure 1: Rotor shape of a radial inflow turbine

Table 1: Design parameters of a radial inflow turbine

Number of rotor blade	13
Number of nozzle vane	18
Inlet diameter of nozzle vane	200mm
Outlet diameter of nozzle	145mm
Inlet diameter of turbine	138mm
Outlet diameter of turbine	127mm

2.2 베인노즐 설계형상

베인노즐은 작동유체를 가속시키면서 동시에 임의의 유동각을 발생시킨다. 이를 통한 작동유체는 로터입구에서 설계된 입사각으로 로터블레이드를 향해 입사하면서 높은 에너지를 전달하게 된다. 따라서 유동손실을 최소화하고 로터의 효율을 극대화하기 위해서는 로터블레이드 입사각에 대응하는 최적의 베인노즐의 출구각 설정이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 베인노즐 출구각을 44.5°에서 74.5°까지 10°간격으로 4가지 조건에 대한 형상설계를 수행하였으며, 이들 형상을 Figure 2에 나타내었다. 로터입구로 유입되는 절대속도와 로터회전에 의한 원주속도에 의해 상대속도가 결정이 되며, 이때 발생하는 상대유동각은 로터의 효율을 결정하는데 중요한 인자로 작용하게 된다.

3. 수치해석 방법

3.1 구심터빈 해석격자

본 연구의 수치해석 대상으로 사용된 구심터빈은 13개의 로터블레이드와 18개의 베인노즐로 구성된다. 로터와 베인노즐의 해석격자를 Figure 3에 나타내었다. 일반적으로 유체기계에 대한 CFD 정상상태 해석에 있어서, 회전영역과 정지영역이 혼합하여 존재하는 경우 MRF(Multiple Reference Frame) 해석기법을 적용하여 정상상태로 수행을 하게 된다.

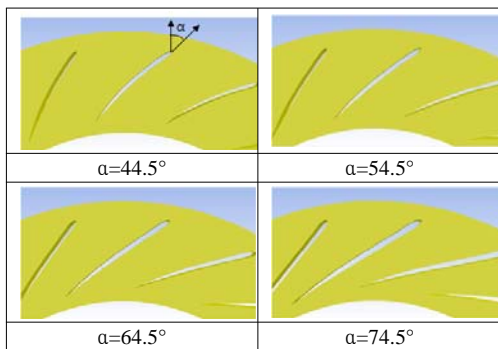


Figure 2: vane nozzle shapes of a radial inflow turbine according to variation of exit angles

MRF 해석기법에 주기경계조건을 적용하게 되면, 신속한 해석결과를 얻을 수가 있게 된다. 이 방법은 로터와 베인노즐의 각각 1개의 블레이드를 포함한 유로에 대하여 회전방향으로 주기경계조건을 부여하게 되고, 이로 인해 격자수가 상당히 감소되어 신속한 결과를 얻을 수 있게 된다. 하지만 회전영역과 정지영역의 경계면에서 복잡한 유동이 발생하는 경우 해를 수렴시키는데 상당한 어려움이 발생하며, 본 연구에서도 이러한 어려움에 봉착하게 되었다. 따라서 신속한 결과보단 해의 안정한 수렴을 위해 13개의 로터블레이드와 18개의 베인노즐을 포함한 전체영역을 대상으로 베인노즐 출구면과 로터입구면의 적절한 경계면 처리를 한 후 해석을 수행하였다. 해석격자는 격자테스트를 통하여 약 215만개 정도의 직육면체의 최적격자를 구성하였으며, 각각의 블레이드 표면에서 수직방향으로 프리즘 격자를 구성하여 박리나 재순환 등의 유동현상을 잘 구현될 수 있도록 하였다.

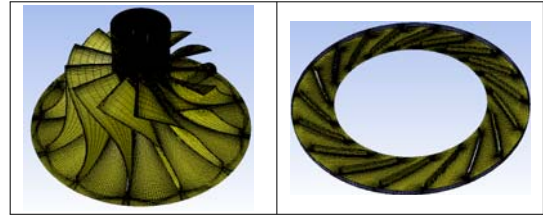


Figure 3: Hexahedral grid configuration of a rotor with 13 blades and vane nozzle with 18 blades

3.2 구심터빈 해석조건

폐열온도는 최고 250°C로 가정하였으며, 회전속도 75,000rpm, 설계유량 0.5kg/s, 가변입구유량은 0.2~0.9 kg/s 범위 내에서 8가지 조건으로 설정하였다. 강한회전 또는 박리나 재순환, 역압력 구배가 있는 경계층 문제인 경우 Realizable $k-\epsilon$ 모델이 잘 예측한다고 알려져 있으므로, 본 연구에서도 이 모델을 사용하였다. Table 2에 해석조건을 정리하여 나타내었다.

Table 2: Analysis condition applied for CFD

Inlet total temperature [°C]	250
Mass flow rate [kg/s]	0.2~0.9
Design flow rate [kg/s]	0.5
Design rotational speed [rpm]	75,000
Exit Angles of Vane nozzle	44.5°~74.5°
Outlet Static Pressure [kPa]	101
Turbulent Intensity	5%
Specific Heat	piecewise-polynomial

3.3 Aungier-Redlich-Kwong 실제기체 모델의 적용

이상기체 방정식은 상대적으로 낮은 압력과 높은 온도에 있는 증기상의 순수 물질들의 거동에 대한 모델이다. 온도가 증가함에 따라서, 그리고 분자량이 감소함에 따라 이상기체 상태방정식의 정확성은 향상된다. 일반적으로 기체의 압력이 임계압력보다 낮고, 온도가 임계온도보다 훨씬 높을 때 그 거동은 이상기체의 거동에 가깝다. 하지만 이상기체 방정식은 모든 상태에서 실제기체의 특성을 정확하게 나타내기에는 한계가 있으며, 물성치 등에 있어서도 다소 오차가 발생하게 된다. 따

라서 본 연구에서는 과열증기의 유체거동을 잘 모사할 수 있도록 식 (1)과 같이 Redlich-Kwong 모델에서 개선된 Aungier-Redlich-Kwong 실제기체 모델을 이용하여 해석을 수행하였다. 열유체 해석코드는 전세계적으로 가장 널리 사용되고 있는 ANSYS FLUENT 12.1를 이용하였다[8].

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a_0}{V(V+b)T_r^{0.5}} \quad (1)$$

(여기서, P, R, V, T, T_r, a₀, b는 절대압력, 일반기체 상수, 비체적, 온도, 환산온도 임계압력, 임계온도를 의미한다)

4. 해석결과

Figure 4는 설계유량에서, 베인노즐 출구각 변화에 따른 마하수 분포를 스펠방향 0.5지점에 나타내었다. α=44.5°조건인 경우, 마하수는 입구에서는 0.22의 값을 보이며, 출구로 갈수록 단면적이 축소되면서 마하수는 최대 0.65 정도 까지 증가하였다. 또한 출구각이 커짐에 따라 동일 위치 대비 마하수는 커지며, α=74.5°조건에서 출구끝단 마하수가 1까지 관찰된다.

일반적으로 노즐의 유체가속원리는 베르누이의 정리에 입각하여 음속 이하로 유체속도는 유체가 통과하는 단면적을 좁히면 커지고, 넓히면 작아진다. 그러나 흐름의 속도가 음속에 도달하면 기체의 압축성이 현저해져서 단면적을 좁혀도 가속되지 않는다. 본 연구에서 적용된 베인노즐의 경우 출구각이 커질수록 노즐 끝단 단면적이 좁아지는 것과 같은 효과를 가지게 된다. 베인노즐 끝단에서 토출된 유체는 로터입구로 유입하게 되는데, 이때 노즐끝단 속도와 출구각 그리고 로터의 회전속도에 의해 상대유속이 결정된다. 따라서 이들의 상관관계를 고려한 최적의 노즐 파라미터를 선정하는게 중요하다.

Figure 5는 설계유량에서, 베인노즐 출구각 변화에 따른 속도분포를 스펠방향 0.5지점에 나타내었다. 이때 기준벡터 크기는 530m/s 이다. α=44.5°조건인 경우, 입구로 유입된 유체는 블레이드 전연부(leading edge)를 거치면서 바리류가 발생되며, 이로 인해 블레이드 전연부에서 후연부(trailing edge)

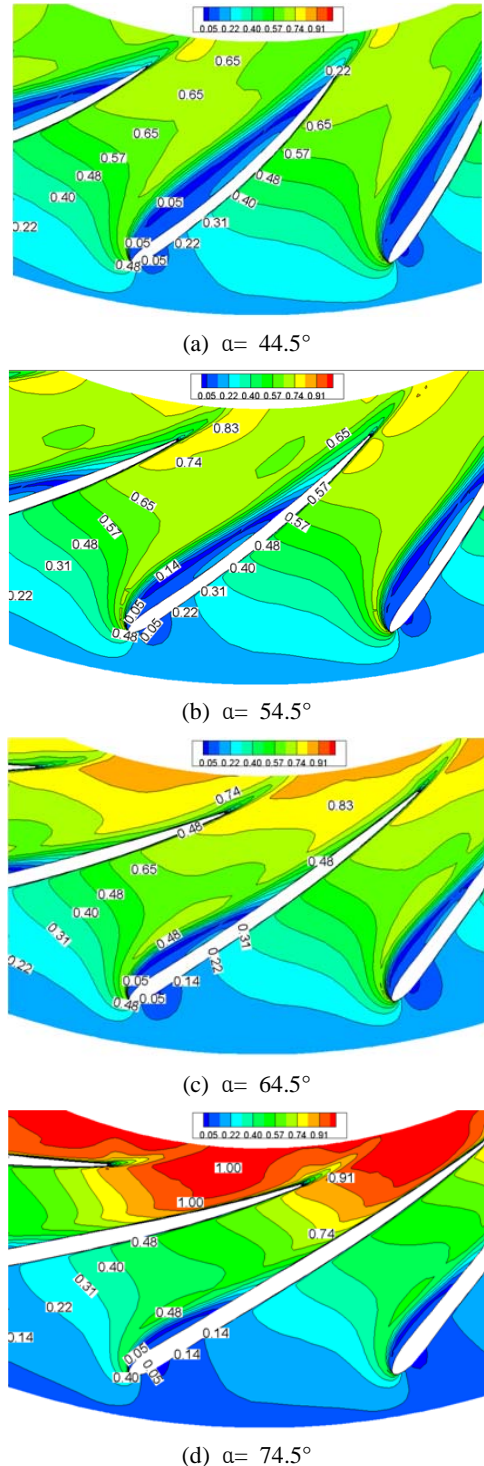
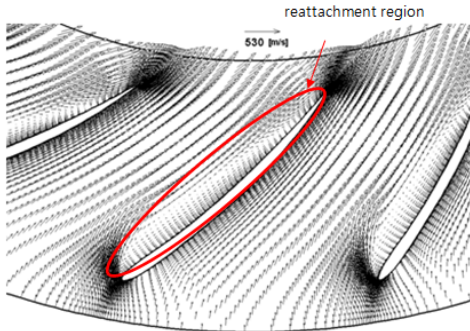
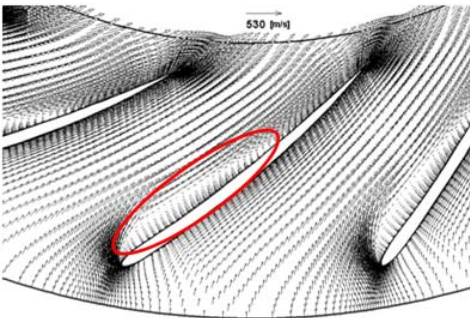


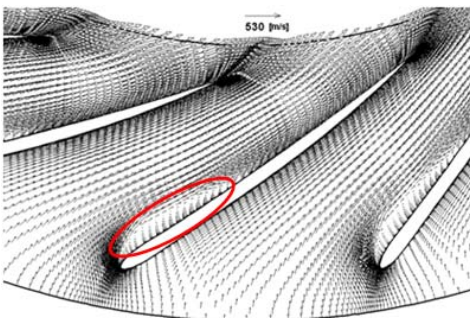
Figure 4: Mach number contour for various exit angles of vane nozzle at mid span ($\dot{m}=0.5\text{kg/s}$)



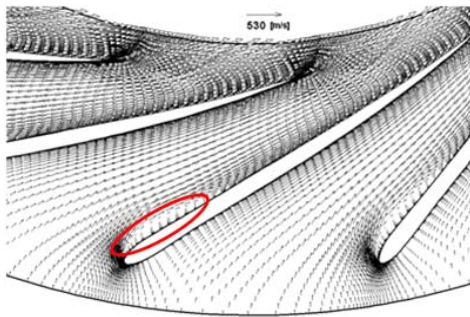
(a) $\alpha = 44.5^\circ$



(b) $\alpha = 54.5^\circ$



(c) $\alpha = 64.5^\circ$



(d) $\alpha = 74.5^\circ$

Figure 5: Velocity vector for various exit angles of vane nozzle at mid span ($\dot{m}=0.5\text{kg/s}$)

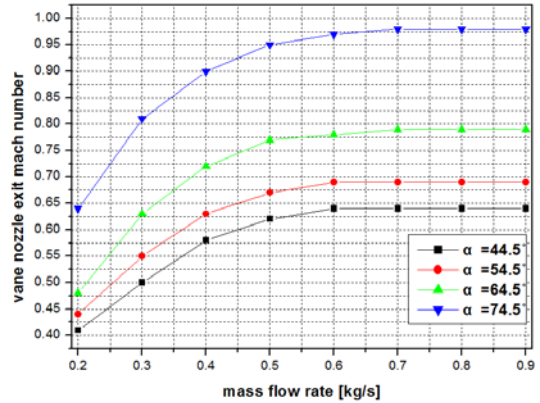


Figure 6: Averaged mach numbers of vane nozzle exit in various mass flow rates

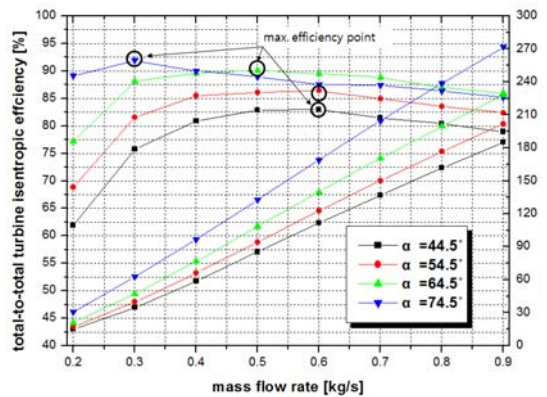


Figure 7: Mass flow rate vs. total-to-total turbine isentropic efficiency & mechanical power curves

에 걸친 넓은 재순환영역이 관찰된다. 하지만 출구각이 커짐에 따라 이러한 재순환영역은 점차 작아짐을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 출구각이 커질수록 노즐출구 단면적은 축소가 되며, 각 조건별 동일한 유량을 토출하기 위해서는 입구유입 압력은 커져야 한다. 따라서 증가된 유입압력으로 인해 재순환 영역은 점차 작아지는 것으로 판단된다. 또한 블레이드 전연부에서 발생하는 재순환 영역은 로터와 베인노즐만이 포함된 해석영역에서는 불가피한 것으로 판단된다. 그 이유는 입구 원주상의 각 지점에서 수직방향으로 유입되도록 설정되는 경계조건상의 문제라고 볼 수 있다. 따라서 현 모델에서 접선류를 발생시킬 수 있는 가이드 베인의 포함이 된다면, 이러한 재순환영역

은 현재의 형태보다 훨씬 적거나 발생하지 않을 것으로 판단된다.

Figure 6은 입구유량 별 노즐 출구에서의 평균마하수를 정량적으로 나타내었다. 출구각이 커질수록 노즐출구단면적 축소효과로 인해 마하수가 커짐을 알 수 있다. 또한 마하수는 유량이 0.6kg/s까지 계속해서 증가하다가 그 이후부터는 거의 일정해짐을 알 수 있다. 등엔트로피 식 (2)에 의하면 유량이 증가할수록 p_1/p_{t2} 의 비는 지수적으로 감소하며, 따라서 베인노즐 출구속도 V_2 는 지수적으로 증가하게 된다. 그러므로 베인노즐 설계시 이 식에 근거한 근사적인 토출속도의 계산과 이를 반영한 로터의 설계가 필요하다고 판단된다.

$$V_2^2 = 2C_p T_{t1} \left[1 - \left(\frac{p_1}{p_{t2}} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right] \quad (2)$$

(여기서, $V_2, C_p, T_{t1}, p_1, p_{t2}, \gamma$ 는 노즐끝단속도, 정압비열, 노즐입구 전압온도, 노즐입구 정압, 노즐출구 전압, 비열비를 의미한다)

Figure 7은 입구유량 별 전압효율과 기계적 출력을 그래프로 나타내었다. 등엔트로피 전압효율, 기계적 출력, 최대이용가능출력의 정의는 식 (3),(4), (5)로 정의된다.

$$\eta_{is} = \frac{\dot{W}_D}{\dot{W}_{is}} \quad (3)$$

$$\dot{W}_D = T \times \omega \quad (4)$$

$$\dot{W}_{is} = \dot{m} C_p T_{t,1} \left[1 - \left(\frac{p_{t,2}}{p_{t,1}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \quad (5)$$

(여기서, $T, \omega, p_{t,2}$ 는 토크, 각속도, 로터출구 전압을 의미한다)

출구각 $\alpha=44.5^\circ$ 조건인 경우, 설계유량이 아닌 0.6kg/s에서 최대효율 82.91%, 기계적 출력 85.29kW를 보이며, 가변유량에 따라 전체적으로 포물선 형태의 매끄러운 곡선을 보이고 있다. 또한 출구각이 커짐에 따라 효율곡선은 전체적으로 상승하였다. 하지만 출구각 $\alpha=74.5^\circ$ 인 경우 0.3kg/s

유량에서 최대효율 88.94%, 기계적 출력 132.73kW를 보이며, 설계유량 작동범위 0.4kg/s에서 0.6kg/s에서는 출구각 $\alpha=64.5^\circ$ 보다 다소 낮은 효율값을 보이고 있다. $\alpha=64.5^\circ$ 조건인 경우, 설계유량조건에서 최대효율 90.13%, 기계적 출력 108.62kW를 보이며, 작동범위내의 효율곡선도 완만한 곡선의 형태를 취하고 있다. 따라서 실제 유량작동 범위가 0.2에서 0.6kg/s라 한다면, $\alpha=64.5^\circ$ 조건이 목표출력과 성능 측면에서 타 조건들보다 우수한 결과를 보여준다.

Table 3은 Figure 7의 결과로부터 최대효율과 그에 해당하는 유량을 정리한 표이다. 설계유량과 효율, 목표출력 측면에서 $\alpha=64.5^\circ$ 출구각이 모든 면에서 만족스러운 결과를 보임을 알 수 있다.

Table 3: Maximum efficiency and corresponding mass flow rate for vane nozzle exit angles

$\alpha [^\circ]$	\dot{m} [kg/s]	$\eta_{is} [\%]$	\dot{W}_D [kW]
44.5	0.6	82.9	85.3
54.5	0.6	86.1	94.3
64.5	0.5	90.1	108.6
74.5	0.3	88.9	132.7

5. 결 론

본 연구에서는 폐열회수 발전시스템에 적용가능한 100kW급 구심터빈을 대상으로 베인노즐의 출구각도 변화에 따른 구심터빈의 성능과 내부유동을 검토하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 베인노즐 출구각 $\alpha=64.5^\circ$ 조건인 경우, 설계유량에서 등엔트로피 터빈효율 90.1%, 기계적 출력 108.6kW의 결과를 보였으며, 이는 타 조건들보다 목표출력과 성능측면에서 아주 우수한 결과이다.

(2) 베인노즐 출구각 $\alpha=44.5^\circ$ 조건인 경우, 노즐입구에서 마하수는 0.22정도이며, 출구로 갈수록 단면적이 축소되면서 마하수는 최대 0.65 정도까지 증가하였다. 또한 출구각이 커질수록 단면적

축소효과로 인해 출구끝단 마하수가 1까지 관찰되었다.

(3) 블레이드 전연부와 후연부에 걸쳐 넓은 재순환영역이 관찰되었으며, 베인노즐 출구각이 커질수록 재순환영역은 점차 작아지는 결과를 보였다.

(4) 출구각이 커질수록 노즐출구 단면적 축소효과로 인해 마하수는 지수적으로 커지며, 유량이 0.6kg/s 이후부터는 거의 일정한 결과를 보였다. 이 결과는, 최적의 로터설계에 대응하는 베인노즐의 유동각과 토출속도 계산에 적용될 것으로 판단된다.

(5) 본 연구를 통해 분석된 해석결과는 목표출력에 해당하는 구심터빈의 최적 설계파라미터 구성을 위한 설계자료로 유용하게 활용될 것으로 기대한다.

후 기

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(No. 2010T100101102)

본 논문은 국토해양부 “해양에너지전문인력양성사업”의 지원사업과 한국해양대학교 산학협력과제 “선박용 폐열회수 발전시스템 개발에 관한 기초연구(주관기관(주)효정알이티)”의 지원사업으로 수행된 연구결과물이며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

[1] 한기수, 김광호, “가변안내깃이 존재하거나 없는 구심터빈의 탈설계 성능해석”, 대한기계학회논문집, 제15권, 제6호, pp. 2171-2180, 1991.

[2] Harman, R.T.C., “Gas Turbine Engineering”, The MacMillan Press LTD, 1981.

[3] Turton, R.K., “Principles of Turbomachinery”, E. and F. N. Spon LTD, 1984.

[4] A Simpson, S. W. T Spence, D. W. Artt and G. McCullough, “Experimental and numerical investigation of varying stator design parameters for a radial turbine”, ASME Turbo Expo 2006, 2006.

[5] H. Maki and Y. Mori, “On the study of flow through an impeller of mixed and inward-flow radial turbines”, Bulletin of the JSME, vol 16, no. 91, pp. 81-92, 1973.

[6] A. Reichert and H. Simon, “Numerical investigations on the optimum design of radial inflow turbine guide vanes”, International Gas Turbine and Aeroengine Congress, ASME Paper:94-GT-61, 2006.

[7] 모장오, 김유택, 김만응, 오 철, 김정환, 이영호, “선박 폐열을 이용한 100kW급 구심터빈 공력설계 및 CFD에 의한 성능해석”, 한국마린엔지니어링학회지, 제35권, 제2호, pp. 175-181, 2011.

[8] R.H. Aungier, “A fast, accurate real gas equation of state for fluid dynamic analysis application”, Journal of fluids engineering, vol. 117, pp. 277-281, 1995.

저 자 소 개



모장오(牟槎翕)

1977년 4월생 2001년 한국해양대학교 기계공학과 공학사, 2003년 한국해양대학교 기계공학과 공학석사, 2009년 한국해양대학교 기계공학과 공학박사, 2004년 3월~2009년 10월 ANSYS KOREA 지사 (에이티이에스(주)) CFD 컨설팅 사업부 과장, 2010년 4월~

2011년 8월 한국해양대학교 해양에너지전문인력양성사업단 전임연구원, 2011년 9월~현재 University of Adelaide 방문연구원, 관심분야 CFD, 풍력발전단지 최적설계 및 평가, 블레이드 최적설계 및 국산소프트웨어 개발, 풍력터빈 공력소음, 해수온도차 및 폐열회수 발전 등



김유택(金由澤)

1990년 한국해양대학교 기관공학과 졸업(공학사), 1996년 한국해양대학교 대학원 졸업(공학석사), 2000년 일본 큐슈공업대학 대학원 졸업(공학박사), 2008년~2010년 University of British Columbia 방문교수, 1990년~1993년 SK해운 엔지니어, 2001년~현재 한국해양대학교 재직 (해사대학, 기관시스템공학부), 당학회 종신회원



오 철(吳 喆)

1958년생, 1983년 한국해양대학교 기관학과 졸업, 1985년 한국해양대학교 대학원 박용기관학과졸업(공학석사), 1998년 북해도대학 대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 현재 한국해양대학교 해사대학 기관공학부 교수.



이영호(李英浩)

1958년 2월 24일생, 1980년 한국해양대학교 기관 공학과 공학사, 1982년 한국해양대학교 기관공학과 공학석사, 1992년 동경대학 공학부 기계공학과 공학박사, 현재 한국해양대학교 기계·에너지시스템공학부, 교수, 현(사)한국풍력에너지학회 부회장, (사)유체기계공업학회 부회장, (사)신재생에너지학회 부회장