

CFD를 이용한 10kW급 모델 실험용 프로펠러 수차의 유량 및 러너 베인 갯 수 변화에 따른 성능해석

박지훈* · 김유탉**† · 조용*** · 김병곤**** · 이영호*****

Performance Analysis of 10kW Class Propeller Hydro Turbine by the Change of Flow Rates and the Number of Runner Vane Using CFD

Ji-Hoon Park*, You-Taek Kim**†, Yong Cho***, Byeong-Kon Kim****, Young-Ho Lee*****

Key Words : Small hydro power(소수력), Variable speed control(가변속제어), CFD(전산유체역학), Performance(성능)

ABSTRACT

Small hydro power, among other renewable energy resources, has been evaluated to have enough development value because it is a clean, renewable and abundant energy resource. In addition, small hydro power has the advantage of low cost development by using existing facilities like sewage treatment plants, water works and similar resources. But in the case of small hydro power systems, there are problems with degraded operation efficiency of turbine due to changes in flow rates. In order to overcome this, variable speed control can be achieved by using the power rectifier and permanent magnetic synchronous generator(PMSG) as a possible method to respond to the changes in flow rates. In this study, a commercial ANSYS CFD code was used to analyze the performance of 10kW class propeller hydro turbine and to also investigate flow characteristics at variable flow rates and runner vane.

1. 서 론

국내의 에너지에 대한 대외적 환경은 고유가로 인한 에너지 시장의 수급 불안과 세계 각국의 에너지 자원 확보 경쟁 심화로 날로 어려워지고 있다.⁽¹⁾ 따라서 에너지 해외의존도를 경감시키고 에너지의 수급을 안정시키기 위하여 국내의 부존에너지를 만들어내려는 연구가 활발하게 진행 중이며 이를 위하여 태양열, 지열, 풍력, 조력, 수력 등의 자연 에너지를 이용하여 새로운 에너지를 만들어내려는 연구가 활발하게 진행 중이며 일부는 적용 단계에 이르고 있다. 그 중에서 소수력 발전에 의해 생산된 에너지는 공해가 없는 청정에너지로 다른 대체에너지에 비해 높은 에너지 밀도를 가지고 있어 개발 가치가 충분한 것으로 평가를 받고 있다.⁽²⁾ 이러한

소수력 발전은 일반하천, 농업용저수지, 하수처리장, 정수장 등의 기존 구조물을 이용하여 저비용으로 개발이 가능하다는 장점이 있다. 최근 정부의 신재생에너지 보급 정책에 따른 지역에너지 보급사업, 신재생에너지 의무공급제도(RPS)와 발전차액지원제도로 소수력 개발 필요성이 늘어나면서 공공기관에서 민원발생 우려가 없는 기존 시설물인 댐이나 저수지 등을 이용한 소수력 개발 및 연구가 활발히 진행되고 있다.⁽³⁾

선행 연구로 프로펠러 수차의 실증 및 개발에 앞서 상용 CFD 코드를 이용하여 다양한 변수에 대한 해석을 수행하였으며,^{(4),(5)} 본 연구에서는 Tip clearance 유무, 러너 베인 갯수 및 유량 변화에 따른 10kW급 모델 실험용 프로펠러 수차의 성능해석 및 내부유동을 검토하는 것을 목적으로 하였다.

* 한국해양대학교 대학원 (Graduate School, Dept. Mechanical Engineering, Korea Maritime & Ocean University(KMOU))

** 한국해양대학교 기관시스템공학부 (Department of Marine System Engineering, Korea Maritime & Ocean University(KMOU))

*** 한국수자원공사 (Korea Water Resources Co.)

**** DSK 엔지니어링 (DSK Engineering Co.)

***** 한국해양대학교 기계에너지시스템공학부 (Division of Mechanical and Energy System Engineering, Korea Maritime & Ocean University(KMOU))

† 교신저자(Corresponding Author), E-mail : kimyt@kmou.ac.kr

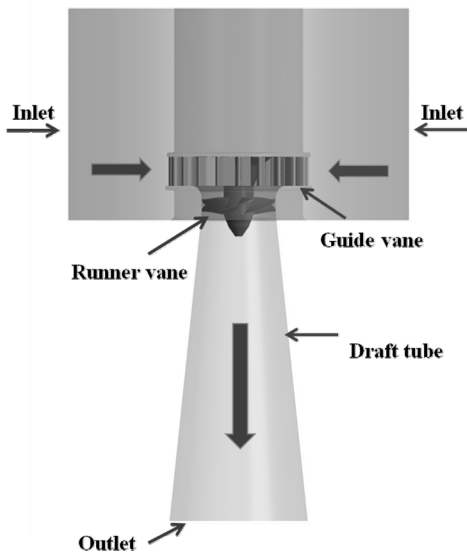


Fig. 1 Schematic view of propeller hydro turbine model

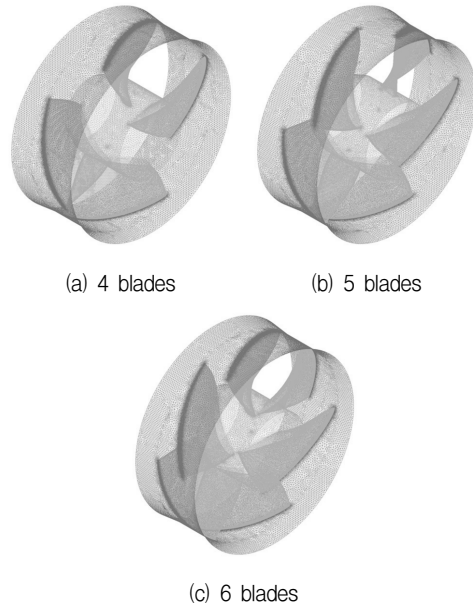


Fig. 2 Numerical grids of three of runner vanes

2. 프로펠러 수차의 형상 및 수치해석방법

2.1. 프로펠러 수차의 형상

Fig. 1은 본 연구에 적용한 프로펠러 수차모델의 개략도를 보이고 있으며, 상부 수조의 작동유체가 가이드 베인으로 유입되어 러너 베인을 구동시키고 흡출관을 통해서 배출되는 구조이다. 러너 베인의 직경은 0.36m이고, 가이드 베인 20매, 러너 베인 6매로 구성되어 있다. 초기의 기초성능해석을 통하여 상부 수조의 유무에 따라 계산 결과에 큰 영향을 미치지 않음을 확인하였으며, 본 논문에서는 상부수조를 제외한 가이드 베인 및 러너 베인, 그리고 흡출관만을 고려한 계산을 수행하였다.

2.1.1. 수치해석방법

본 연구에서 프로펠러 수차의 성능과 내부유동을 상세히 검토하기 위하여 상용코드인 ANSYS-CFX Ver. 12를 사용하여 수치해석을 위한 계산을 수행하였다.

Fig. 2와 3은 본 연구에 적용한 프로펠러 수차의 러너부의 계산 격자 모습을 보이고 있다. 격자는 ICEM CFD Ver. 12를 사용하여 생성하였으며 tip clearance 유무 및 러너 베인 갭 수 변화에 따른 성능해석을 위하여 tetra-prism mesh를 사용하여 약 4,800,000 노드로 전체 도메인을 구성하였으며 이때의 tip clearance는 실제 수차와 동일하게 고려하여 격자를 생성하였다. 그리고 CFD 해석 결과에 대한 러너에서의 압력분포를 알아보기 위하여 Fig. 4에 러너의 hub에서부터 tip까지 10%, 50%, 90% 단면을 나타내었다.

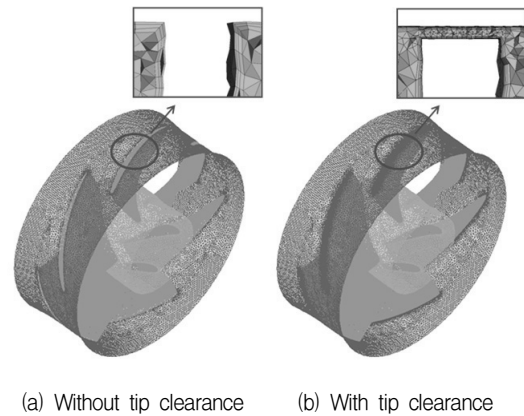


Fig. 3 Numerical grids of runner vane of 10kW class propeller turbine

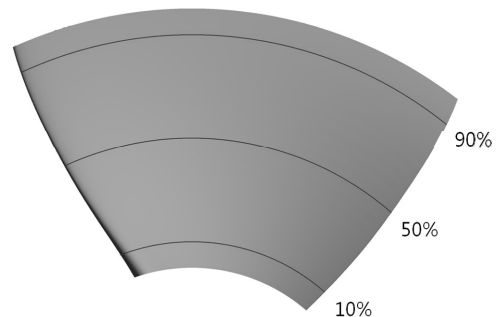


Fig. 4 Sectional arrangement of runner vane

Table 1에서 보이듯이 모든 계산은 정상상태 계산을 수행하였으며, 계산 수행에 사용된 난류모델로서는 k- ω SST 모델을 적용하였다. 계산경계조건으로는 입구에는 질량유입

Table 1 Boundary condition

Simulation type	Steady state	
Turbulence model	SST model	
Cavitation model	Rayleigh Plesset model	
Rotational speed	750 [rev/min]	
Fluid	Water at 25°C Water Vapor at 25°C	
Inlet	70%	0.241 [m³/s]
	80%	0.276 [m³/s]
	90%	0.311 [m³/s]
	100%	0.345 [m³/s]
	110%	0.379 [m³/s]
	120%	0.414 [m³/s]
Outlet	Average static pressure 1 [atm]	

조건을 부여하였고 출구에는 대기압에 해당하는 압력조건을 부여하였다. 또한, 러너부 주위에서 포화증기압 이하의 압력 분포를 보이는 경우에는 보다 정확한 성능해석을 위하여 ANSYS-CFX에서 제공하는 Cavitation model인 Rayleigh Plesset model을 적용하여 계산을 수행하였다. 러너부의 회전수는 설계회전수인 750rev/min으로 모두 동일하게 설정하였으며, 회전부와 정지부 사이의 경계면 처리를 위하여 interface 조건으로 frozen rotor 모델을 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. Tip clearance 유무에 따른 성능해석

Fig. 5에서 수차 러너부의 tip clearance 유무에 따른 성능비교곡선을 보인다. 고정 회전수 및 가이드 베인 각도를 유지하였기 때문에 유량이 증가함에 따라서 유효 낙차 및 출력이 증가함을 보인다. Tip clearance 유무에 따라서 tip clearance가 고려되지 않았을 때 성능치가 더 높았으며 평균적으로 효율 4%, 출력 7%, 낙차 2%의 차이를 보이는 것을 확인할 수 있다. 최고 효율점은 동일하게 90% 유량인 0.311m³/s에서 보이며, tip clearance를 고려하였을 때에는 88%의 효율을 고려하지 않았을 경우에는 91%의 효율을 보인다.

Fig. 6에서는 tip clearance를 고려하였을 때 러너 베인 표면에서의 유량 변화에 따른 압력분포를 보인다. 왼쪽 그림인 러너 베인의 압력면에서는 유량이 증가할수록 고압부의 위치가 후연부 부근에서 전연부쪽으로 이동하는 것을 볼 수 있으며, 90% 유량에서부터 전연부부터 후연부까지의 고른 압력분포를 보이며 유량이 증가할수록 압력면에 작용하는 압력이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 오른쪽 그림인 부압

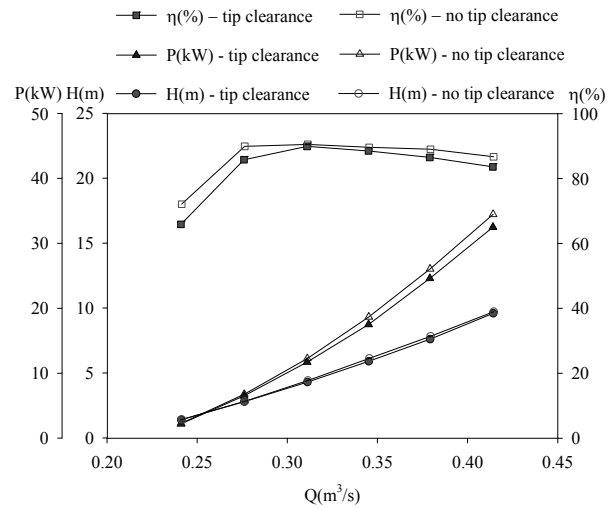


Fig. 5 Performance comparison curves between tip clearance and no tip clearance

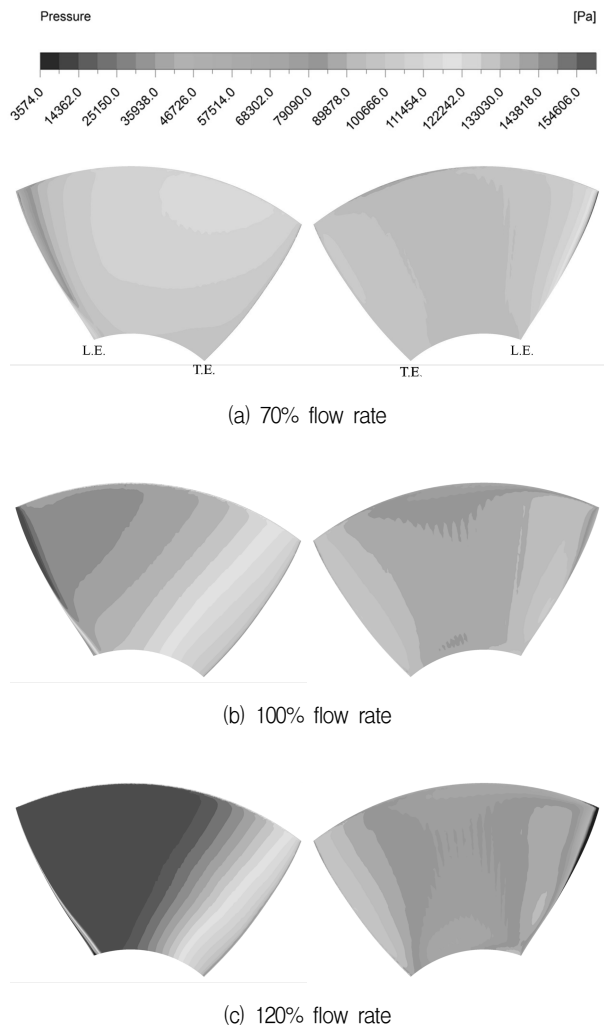
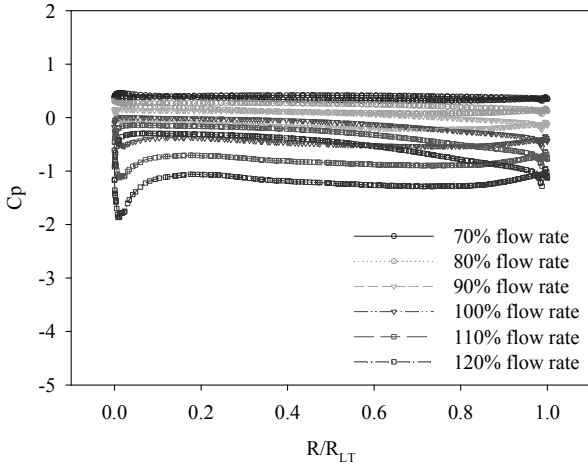


Fig. 6 Pressure distributions on runner vane surface pressure side(left) and suction side(right)

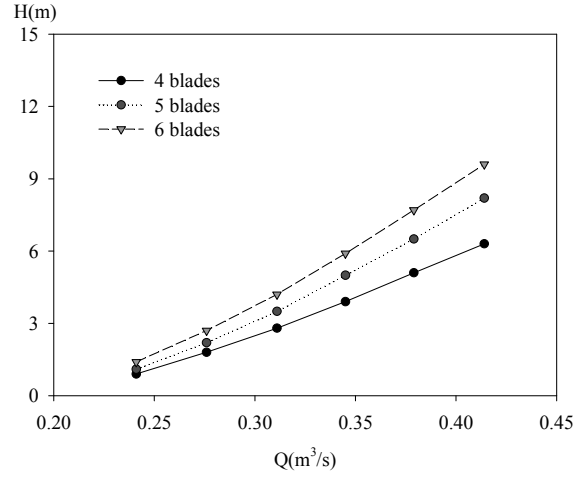
면에서는 유량이 작은 경우에는 이상고압부가 러너 베인의 전연부에서 발생하였으나 유량이 증가함에 따라서 이상고압부가 사라지며, 설계 유량 이상의 고유량에서는 전연부에서

포화증기압 이하의 압력분포가 발생하였으며 유량이 증가할 수록 그 영역이 점차 확대됨을 보인다.

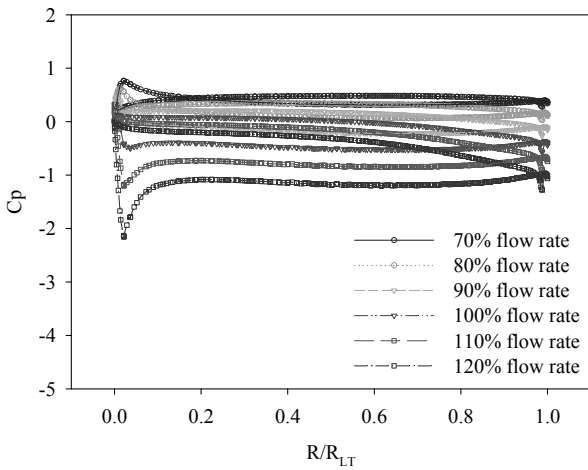
유량 변화에 따른 러너 베인 10%, 50%, 90% 단면에서의



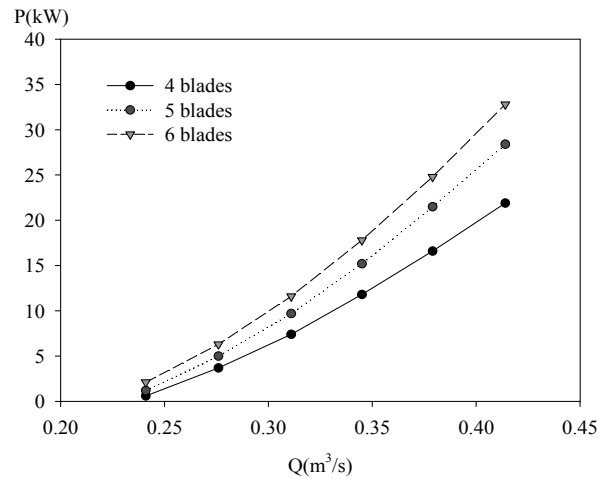
(a) 10% section



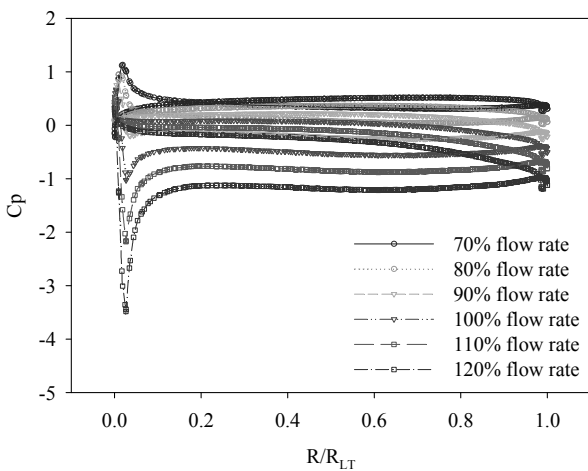
(a) efficiency



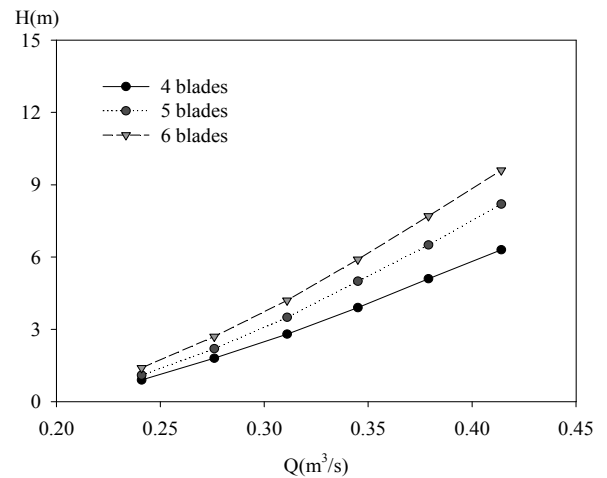
(b) 50% section



(b) output power



(c) 90% section



(c) effective head

Fig. 7 Pressure coefficient distributions at runner vane sections

Fig. 8 Performance comparison curves by various the number of runner vane

압력계수 그래프를 Fig. 7에서 보인다. 유량 변화가 증가함에 따라서 압력계수 분포는 음의 방향으로 향하며 압력면과 부압면의 압력계수 차가 점차 커지는 것을 확인할 수 있다. 또한, Fig. 6에서 보았듯이 압력면과 부압면의 압력 차이가 크게 발생하는 러너 베인의 tip부근인 90% 단면에서 압력계수 차가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

3.2. 러너 베인 깃 수 변화에 따른 성능해석

러너 베인 깃 수 변화에 따른 프로펠러 수차의 효율, 출력 및 낙차에 대한 비교곡선을 Fig. 8에서 보인다. 러너 베인 깃 수가 원래 형태인 6매보다 줄어들수록 유효 낙차 및 출력은 감소함을 보인다. 효율의 경우, 설계유량 이상의 유량에서는 차이를 보이지 않으나 이하의 유량에서는 러너 베인 깃 수에 따라서 상당한 효율 차이를 보이며 특히 70% 유량에서 러너 베인 깃 수가 줄어들수록 약 15% 정도의 효율이 감소함을 보인다. 각 러너 베인 깃 수에서의 성능비교곡선에서 최고 효율이 발생하는 유량은 달랐으나 약 90% 정도로 비슷한 효율을 보였으며, 4매 및 5매에 비하여 6매일 때 전체 유량 구간에서 비교적 안정적인 효율을 보인다.

Fig. 9, 10에서는 러너 베인 깃 수 변화에 따른 설계 유량인 100% 유량에서의 러너 표면 압력분포 및 압력계수 그래프를 보인다. 러너 베인 깃 수가 증가할수록 압력면에 작용하는 압력분포가 고압부와 저압부의 영역이 뚜렷해지는 것

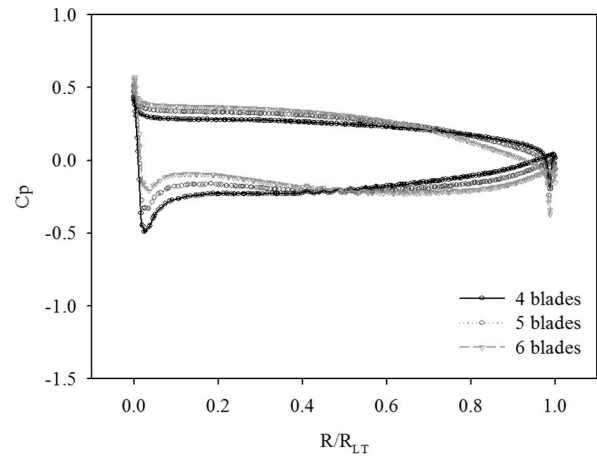
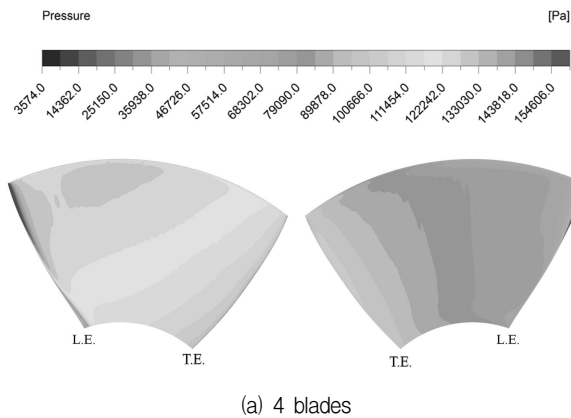


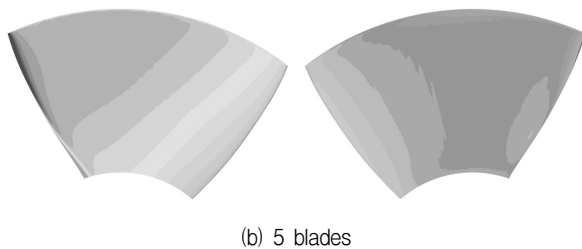
Fig. 10 Pressure coefficient distributions at 50% section of runner vane (70% flow rates)

을 확인할 수 있으며, 부압면의 압력분포 및 압력계수 그래프를 통하여 전연부에서 발생하는 저압부가 러너 베인 깃 수가 증가함에 따라서 영역이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 11, 12에서는 러너 베인 깃 수 변화에 따른 최저 유량에서의 러너 표면 압력분포 및 압력계수 그래프를 보이고 있다. 최저유량에서는 모든 깃 수에서 Fig.11과 같이 러너 베인 전연부에서 압력면과 부압면의 압력분포가 역전되어있는 상태를 보인다. 이러한 현상은 압력계수 그래프를 통하여 더욱 명확하게 확인할 수 있으며, 러너 베인의 깃 수와는 상관없

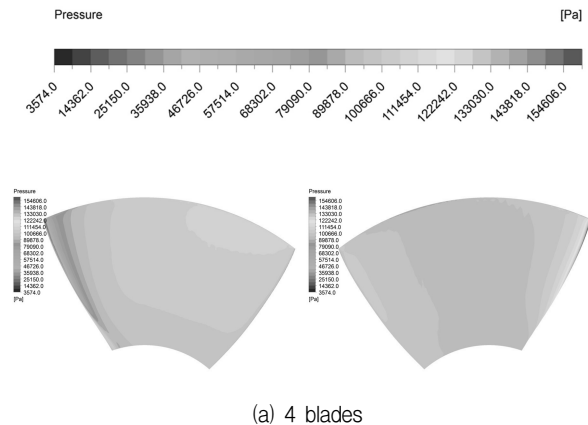


(a) 4 blades

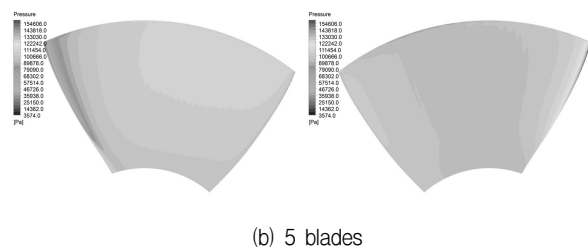


(b) 5 blades

Fig. 9 Pressure distributions at 100% flow rates on runner vane surface - pressure side(left) and suction side(right)



(a) 4 blades



(b) 5 blades

Fig. 11 Pressure distributions at 70% flow rates on runner vane surface - pressure side(left) and suction side(right)

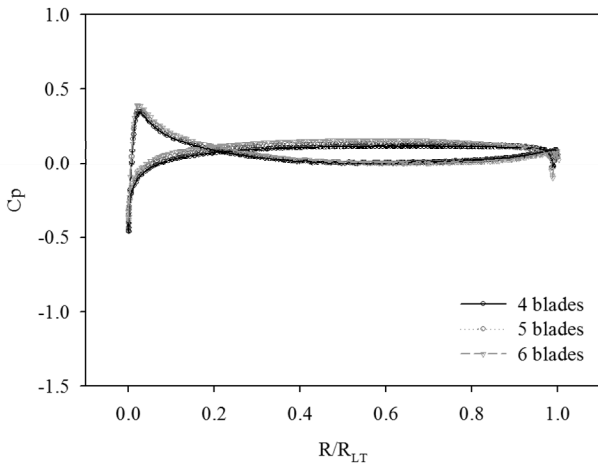


Fig. 12 Pressure coefficient distributions at 50% section of runner vane (70% flow rates)

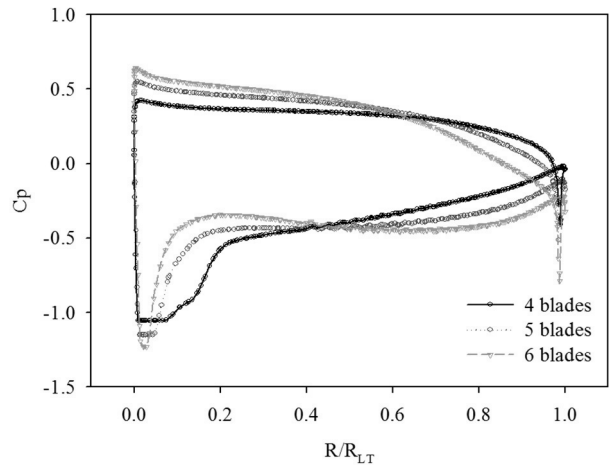


Fig. 14 Pressure coefficient distributions at 50% section of runner vane (120% flow rates)

이 최저유량에서는 비슷한 형태의 압력계수 분포를 보이는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 13, 14에서는 러너 베인 깃 수 변화에 따른 최고 유량에서의 러너 표면 압력분포 및 압력계수 그래프를 보인다. 러너 베인 압력면에 작용하는 고압 분포가 러너 베인 깃 수가 증가할수록 영역이 확대되는 것을 확인할 수 있으며, 설계 유량인 100% 유량일 때와 마찬가지로 부압면의 전연부에서 발생하는 저압부가 러너 베인 깃 수가 증가함에 따라서

영역이 축소되는 것을 확인할 수 있다. 압력계수 그래프에서 확인할 수 있듯이 깃 수가 많을수록 전연부에서의 압력 차이가 크게 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 깃 수가 적을 때에는 전연부에서의 압력 차이는 줄어들으나 저압부의 영역이 넓게 분포되는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

유량 및 러너 베인 깃 수 변화에 따른 10kW급 모델 실험용 프로펠러 수차의 CFD 성능해석을 통하여 다음과 같은 내용을 알 수 있었다.

- 1) Tip clearance 유무에 따라 효율 4%, 출력 7%, 유효낙차 2%의 성능 차이를 보였으며, 최고 효율점은 유량 0.311m³/s에서 보였다.
- 2) 고유량에서는 러너 베인 깃 수의 영향이 거의 없었으며, 저유량에서는 깃 수가 증가할수록 높은 효율을 보였다.
- 3) 러너 베인 표면에서의 압력 분포 및 성능비교곡선을 통하여 러너 베인 6깃일 때 전체 유량에서 비교적 안정적인 효율 및 내부유동을 보였다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 신재생에너지기술개발사업(No.2011T100200136) 및 해양수산부의 지원으로 수행한 해양에너지 전문인력 양성 사업의 결과입니다.

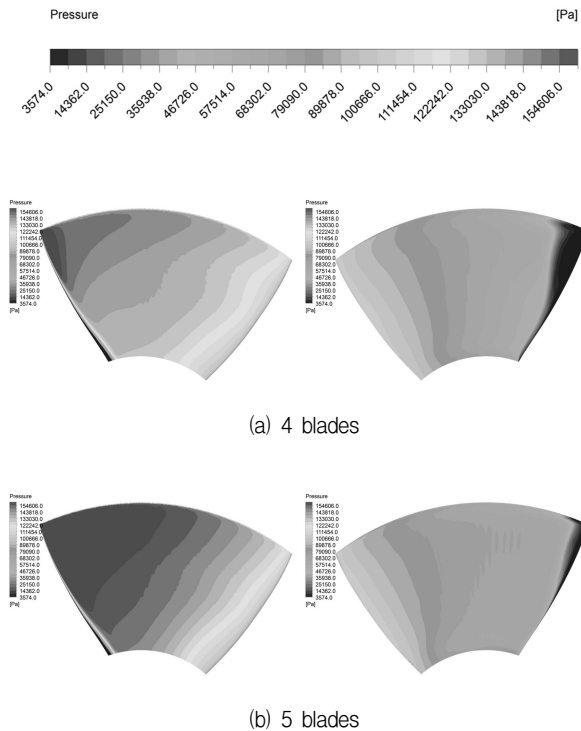


Fig. 13 Pressure coefficient distributions at 50% section of runner vane (120% flow rates)

REFERENCES

- (1) 박완순, “기존 구조물을 이용한 소수력개발 사례”, 태양에너지, Vol. 3, No. 4, 2004.
- (2) 김길호, “소수력 개발을 위한 타당성 분석 방안”, 인하대학교 석사학위논문, 2008.
- (3) 나동훈, “구미하수처리장 방류구에서의 소수력 발전 설치 타당성 평가에 관한 연구”, 금오공과대학교 박사학위 논문, 2010.
- (4) 박지훈, 김유택, 김병근, 이영호, “CFD에 의한 수직축 저낙차용 마이크로 프로펠러 수차의 유량변동특성”, 2012 한국신재생에너지학회 춘계학술대회, pp. 145.
- (5) JH Park, YT Kim, BG Kim, YH Lee, “CFD ANALYSIS OF A MICRO PROPELLER-TYPE HYDRO TURBINE BY VARYING THE NUMBER OF RUNNER AND GUIDE VANES”, AFOR 2012, JEJU.