

프란시스 수차의 수력학적 성능해석

윤의수* · 오형우** · 박무룡***

Hydraulic Performance Analysis of a Francis Turbine

Eui Soo YOON*, Hyoung Woo OH** and Moo Ryong PARK***

Keywords : Francis Turbine(프란시스 수차), Hydraulic Performance(수력성능), CFD(전산유체해석), 성능특성곡선(Characteristic Curve)

Abstract

The hydraulic performances of a Francis turbine which had been designed and tested by IMHEF were calculated with a commercial code and compared with the IMHEF test results. The non-dimensional specific speed of the turbine is 0.5, the runner exit diameter 0.4m and maximum efficiency 93.1% respectively. To make the calculation of the turbine more exact, the stay vanes, the guide vane, the runner and the draft tube were calculated simultaneously. The calculation results gave a quite good agreement with the IMHEF test data, and therefore it is expected that the present calculation technique will be utilized for the hydraulic design of efficient Francis turbines.

1. 서론

수력발전 분야는 비교적 오랜 기간 동안 기술개발이 이루어져 왔기 때문에 선진 공업국에서는 설계기술이 이미 성숙단계에 달하여 고낙차의 대형 수력발전에서부터 소형의 소수력발전에 이르기까지 다양한 형태의 수차가 개발되어 널리 가동되고 있다. 국내에서도 다양한 방식의 수력발전소가 가동되고 있으며, 수력발전의 핵심부인 대형 발전용 수차는 진량 외국 제품에 의존하지만 소수력용 수차는 국내 제품이 개발되어 널리 쓰이고 있다. 최근 들어 국내의 소수력 수차는 제품의 경쟁력이 향상되어 국내 시장의 대부분을 점유하고 있지만, 효율과 신뢰성의 측면에서 선진 외국 제품에 못 미치고 있기 때문에 고부가가치화 및 해외시장의 진출에 어려움을 겪고 있는 실정이다. 수차의 국제 경쟁력을 확보하기 위한 첫걸음으로서 수력효율이 세계적 수준에 도달하여야 하므로, 고도의 유체역학적 기법이 가미된 수력설계기술의 확보가 절실히 필요하다.

소수력발전용 수차는 저낙차의 수차원 에너지를 활용하기 때문에, 요구되는 수차 출력 및 효율을 얻기 위해서 비교적 높은 비속도에서 작동되어야 한다. 즉, 무차원비속도(non-dimensional specific speed)가 0.3 이상인 프란시스(Francis-type), 카플란(Kaplan-type) 혹은 벌브형(bulb-type) 수차가 사용된다. 본 연구에서는 지금까지 다양한 형식의 펌프 및 압축기의 연구를 통해 축적된 터보기계의 최적설계 및 성능해석기법을 프란시스 수차에 적용함으로써, 프란시스 수차에 대한 국내의 독자설계기술

을 구축할 수 있는 토대를 마련하고자 한다.

이전의 연구에서는 펌프의 연구를 통하여 확보된 수력성능해석기법[1, 2]을 수차에 적용하여 IMHEF에서 설계한 프란시스 수차[3]의 런너(벌류트, 스테이베인 및 안내날개를 제외한)에 대하여 성능해석[4]을 수행한 바 있으나, 본 연구에서는 벌류트만을 제외한 IMHEF 프란시스 수차에 대하여 전산해석을 수행하고, 성능예측결과를 성능시험 결과[5]와 비교, 검토하기로 한다.

2. 프란시스 수차의 성능해석 방법

2.1 프란시스 수차의 형상

Fig. 1은 참고문헌[5]에서 제공하는 IMHEF 프란시스 수차의 3차원 형상 및 자오면 형상/치수를 나타낸 것이다. 수차 입구부분은 벌류트 케이싱, 24 날개의 스테이베인(stay vane)과, 동일한 개수의 안내날개(guide vane)로 구성되어 있다. 수차의 무차원 비속도는 0.5이고, 런너(runner)는 프란시스형으로서 날개수 13개이고 출구측 외부지름이 0.4m이며, 런너의 출구부분에 흡출관(draft tube)이 부착되어 있다.

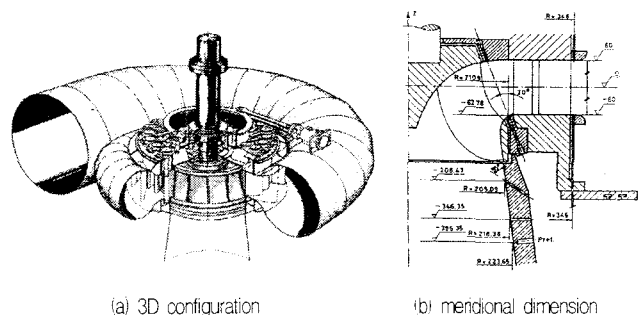


Fig. 1 IMHEF Francis turbine

* 한국기계연구원 에너지기체센터. esyoon@kimm.re.kr

** 충주대학교 기계공학과. hw_oh@chungju.ac.kr

*** 한국기계연구원 에너지기체센터. mrpark@kimm.re.kr

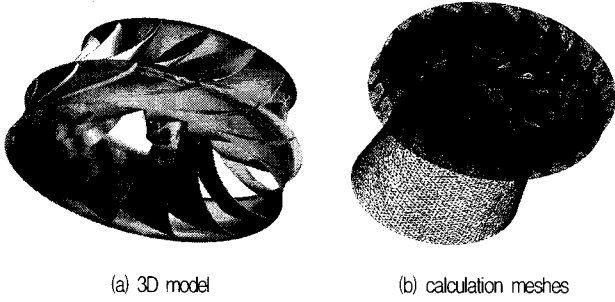


Fig. 2 IMHEF turbine modeling

2.2 전산해석 방법

Parkinson의 보고서[5]에 의하면, 수차의 내부유동을 해석할 때에 수차 입구부분의 벌류트를 포함시키지 않고 수차를 계산할 경우, 스테이베인 입구의 유동각(접선방향 기준)을 29.0°로 두면 된다고 한다. PC를 사용하여 계산하므로 유동해석의 계산용량을 줄이기 위해 스테이베인은 날개 2개만을 계산하는 주기조건을 사용하였으나, 유동에 큰 영향을 주는 안내날개 및 런너에 대해서는 전체 날개를 계산하였다.

본 논문에서는 이미 유체기계분야에서 해석(solver)의 신뢰성이 검증된 상용 소프트웨어인 ANSYS CFX 10.0[6]을 사용하여 프란시스 수차의 내부유동을 해석하고, 수력성능특성을 분석하기로 한다. Fig. 2는 ANSYS ICEM CFD 10.0[7]을 이용하여 생성한 IMHEF 수차의 3차원 모델과 전산해석용 격자계를 나타낸다. 이전에 수행한 IMHEF 수차에 대한 유사한 연구[4]에서 4가지 격자계(총 노드수: 628,914개, 648,921개, 680,133개 및 726,226개)에 대한 격자의존도를 계산 및 검토한 결과, 총 노드수 628,914개는 양호한 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 이와 유사하게 616,846개의 노드수와 2,269,916개의 요소(1,974,405개의 사면체, 475,265개의 각주 그리고 246개의 오면체)로 구성된 격자계를 채택하기로 한다. 계산영역은 스테이베인, 안내날개, 런너 및 흡출관으로 구성된다. 전산해석에 사용된 난류모델은 유동박리현상을 동반한 3차원 유동을 비교적 잘 예측하는 $k-w$ 기반의 전단응력전달모델(SST, shear stress transport model)[6]이다. 한편, $y^+ \leq 200$ 을 만족시킬 수 있도록 벽면 근처에서 격자요소의 크기를 결정하였다[6]. 입구경계에서 질량유량을, 출구경계에서 평균정압(50,000 Pa)을 경계조건으로서 각각 설정해 주었다. 스테이베인, 안내날개 및 흡출관은 고정좌표계에서, 그리고 런너는 회전좌표계에서 해석하고 각 좌표계 사이의 경계면은 혼합면(mixing plane; 스테이베인-안내날개)과 frozen rotor(안내날개-런너, 런너-흡출관)로서 처리하였다. 앞에서 언급하였듯이 수차 전체를 동시에 계산하였으나 스테이베인은 주기조건을 이용하여 날개 2개만을 계산하였다.

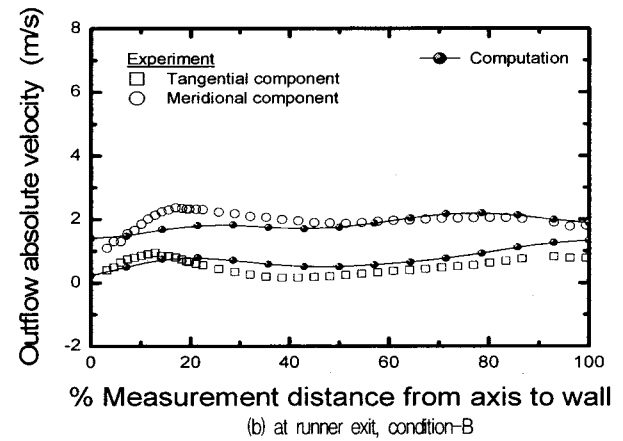
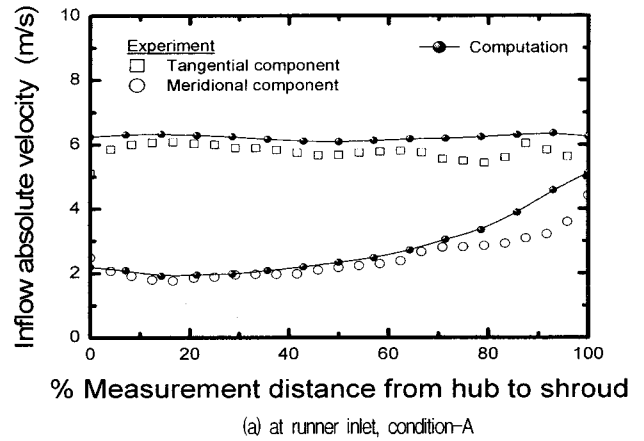


Fig. 3 Absolute velocity at runner inlet and exit

3. 성능해석의 결과 및 분석

3.1 프란시스 수차 런너의 유동해석 결과 및 분석

Parkinson[5]의 성능시험 데이터와 동일한 가동조건에 대하여 수차의 내부유동을 해석하고 실험결과와 비교하였다. Fig. 3(a)는 운전조건 condition-A (안내날개 열림각 $\alpha=25.0^\circ$, 유량 $Q=0.361\text{m}^3/\text{s}$, 회전수 $n=500\text{rpm}$, 양정 $H=6\text{m}$, 온도 $t=21.7^\circ\text{C}$)에서 런너 입구측 절대유동속도의 접선방향 및 자오면방향 속도성분에 대하여 계산값과 실험값을 비교한 것이며, 그림에 나타나 있듯이 곡률이 심한 쉬라우드 영역(허브측으로부터 80~100% 위치, Fig. 1(b) 참조)을 제외하고 전체 날개길이(span)에 걸쳐서 계산과 실험이 잘 일치하고 있다. 특히 수차 런너의 각운동량에 가장 큰 영향을 주는 접선방향의 속도성분을 아주 정확하게 예측하고 있다. 여기서 절대속도는 Fig. 1(b)의 런너 입구부분에

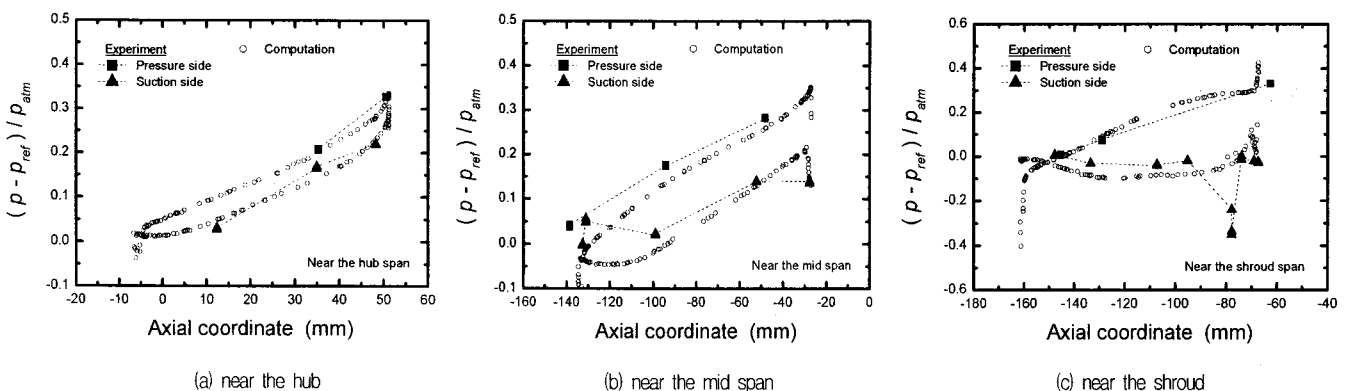


Fig. 4 Blade loading at runner, condition-C

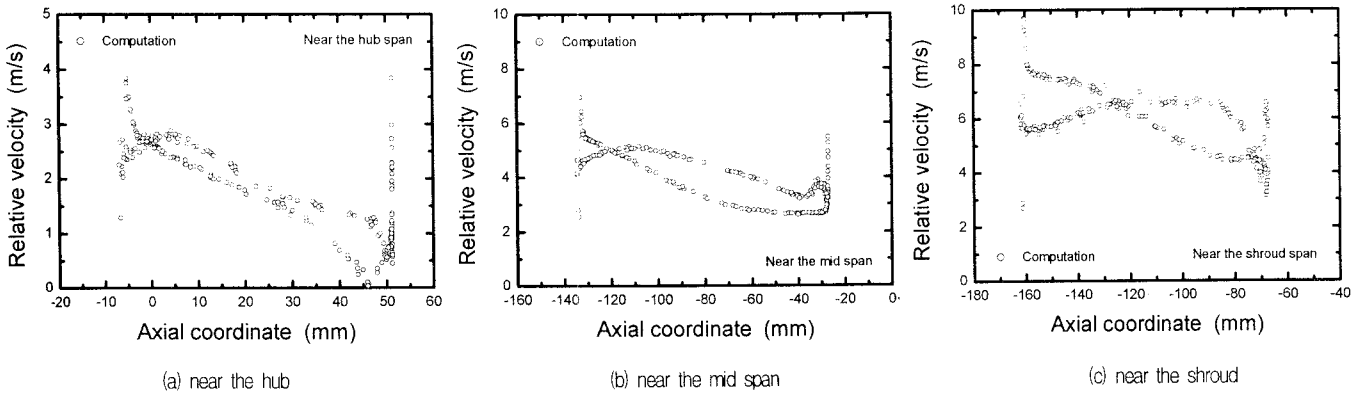


Fig. 5 Relative velocity at the runner blade surfaces, bep condition

표시되어 있는 일점쇄선(축방향과 20° 기울어져 있는 선)을 따라서 측정 또는 계산된 것이다. 운전조건 condition-B ($\alpha=25.0^\circ$, $Q=0.293\text{m}^3/\text{s}$, $n=409\text{rpm}$, $H=4\text{m}$, $t=22.9^\circ\text{C}$)에 대하여 계산한 후, 수차 출구($z=-396.35\text{mm}$)에서의 절대속도를 실험과 비교하여 Fig. 3(b)에 그려두었다. 그림에 보이고 있듯이 접선방향속도와 자오면속도는 잘 일치하며, 자오면속도는 1.0m 이내인 것으로 나타났다.

수차 러너의 대표적인 날개길이(span의 허브, 중간 및 쉬라우드 근처)에 대하여 전산 해석된 표면압력 날개부하분포(blade-loading distribution for blade surface pressure)를 실험 데이터[5]와 비교하였다. 이때 수차의 운전조건은 condition-C ($\alpha=25.5^\circ$, $Q=0.234\text{m}^3/\text{s}$, $n=500\text{rpm}$, $H=6\text{m}$, $t=10.4^\circ\text{C}$)이다. Fig. 4에서 p_{ref} 는 흡출관의 축방향 좌표 -396.35mm 에서 측정 및 계산된 정압을 의미하고, p_{atm} 은 대기압을 나타낸다. Fig. 4(a)~(c)에서 축방향 좌표가 작은 쪽(각각 -20mm , -160mm , -180mm)이 수차 러너의 출구방향을 의미한다. Fig. 4(a)~(c)에서 보이고 있는 전체적인 날개부하성능을 보면, 정량적인 측면에서 국부적으로 다소 차이를 보이고 있으나, 예측결과는 정성적으로 실험 결과와 잘 일치하고 있다.

Fig. 3과 Fig. 4를 전반적으로 살펴보면, 본 연구의 상용코드(ANSYS CFX 10.0)를 사용한 프란시스 수차의 해석기법은 예측성능의 측면에서 타당성이 있다고 판단된다.

3.2 프란시스 수차의 성능특성해석 결과 및 분석

Fig. 5(a)~(c)는 각각 러너의 허브, 중간, 쉬라우드의 날개표면 근처에서 예측된 상대속도분포를 나타낸다. 이때 수차는 최대효율점(bep; $\eta=93.1\%$, $\alpha=24.0^\circ$, $Q=0.381\text{m}^3/\text{s}$, $n=500\text{rpm}$, $H=6.625\text{m}$)에서 가동된다. 터보기계가 효율적으로 작동되기 위해서는 날개부하분포가 교차되지 않으며, 압력면(pressure surface)에서의 상대속도는 흡입면(suction surface)에서의 상대속도보다

작은 것이 바람직하다. 이러한 조건에 부합되지 않을 경우, 러너의 블레이드면 사이(blade-to-blade)에서 유동구조가 왜곡되어 재순환영역 등이 발생하고, 이것이 러너 출구 후류에 영향을 줌으로써 유체계의 효율을 저하시키는 요인이 된다. Fig. 4(a)~(c)에서 본 바와 같이 표면압력 날개부하는 만족스러운 형상을 보이고 있는 반면, 상대속도분포(Fig. 5(a)~(c))는 전체 날개길이(spanwise)에서 교차점(흡입면과 압력면의 속도가 역전되는 점)이 발생하고 있다. 이 문제는, 입사각을 고려하면서 러너 입구의 날개각도를 적절히 선정하거나 유선방향으로의 날개각도 및 날개두께를 적절히 분포시킴으로써 해결할 수 있다.

IMHEF 수차 러너의 성능특성곡선을 분석하기 위해 최대효율점(bep)의 운전조건[5]을 기준으로 여러 유량(혹은 유효양정) 범위에서 유동해석을 수행하였다. 유동해석에 의한 성능특성곡선을 Fig. 6(a)~(c)에 실어두었으며, 이 그림에서 전체적인 성능곡선을 살펴보면, 해석결과는 통상적인 프란시스 수차의 수력학적 성능특성을 아주 잘 예측하고 있는 것으로 나타났다. Fig. 6(c)에서 예측된 효율은 bep에서 실험보다 낮게 예측하고 있는데, 펌프의 경우[1, 2]도 이와 같은 경향을 보인다.

지금까지의 해석결과를 살펴보면, 본 연구의 전산해석기법은 수차의 성능특성은 물론 내부유동장을 물리적으로 타당하게 예측하는 것을 확인할 수 있다. 전체 운전범위에 대한 성능특성곡선을 도출함으로써 프란시스 수차의 설계점(bep) 및 탈설계점 성능을 예측할 수 있으며, 이 기법을 이용하여 날개부하의 교차 및 재순환 등 수차의 성능저하 요인을 억제하는 방향으로 수차를 설계한다면 효율이 93.1%인 IMHEF 수차보다 효율이 높은 수차를 개발할 수 있을 것이라고 판단된다.

4. 결론

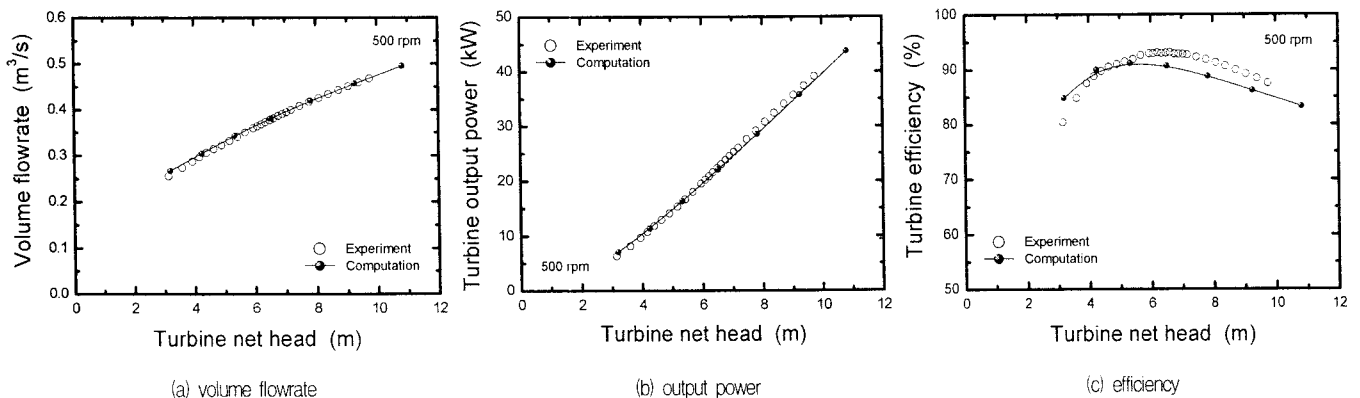


Fig. 6 The characteristic curves of the head

상용 CFD코드를 이용하여 프란시스형 IMHEF 수차의 수력학적 성능특성을 해석하였다. 이 해석에서는 벌류트를 제외하고 스테이베인, 안내날개, 런너 및 흡출관 수차의 수력부품 모두를 동시에 계산하였다. 런너 날개표면에서의 압력분포와 수력성능에 대한 해석결과를 실험 데이터와 비교하였을 때, 본 수력학적 해석기법은 신뢰할 수 있는 범위 내에서 수차성능을 잘 예측하는 것으로 나타났다. 유량(혹은 유효양정)변화에 따른 탈설계점 성능을 계산하여 전체 운전범위에 대한 성능특성곡선을 도출하였다. 해석기법은 양정-유량과 양정-출력의 특성곡선을 아주 정확하게 예측하지만, 양정-효율 특성곡선은 bep에서 약간 과소하게 예측하는 것으로 나타났다.

본 연구를 통해 소수력발전에 활용도가 높은 수차형식인 프란시스 수차에 대한 해석기법을 개발하였으며, 이를 이용하여 유동 재순환, 날개부하 교차 및 유동박리 등 수차의 효율을 감소시키는 요인을 배제시키는 방향으로 설계와 해석 과정을 반복한다면 세계적 수준의 고효율 수차의 설계가 가능하다고 판단된다.

참고문헌

[1] Hyoung Woo OH, Eui Soo YOON, Ki Sup KIM and Jong

Woo AHN, 2003, "A practical approach to the hydraulic design and performance analysis of mixed flow pump for marine waterjet propulsion", IMechE, Journal of Power and Energy, (Pt. A), Vol. 217, pp. 659~664.

[2] Hyoung Woo OH, Eui Soo YOON and Sang Jin PARK, 2006, "Hydraulic performance analysis of an axial-flow main coolant pump for the system-integrated nuclear reactor," IMechE, Journal of Power and Energy, (Pt. A), accepted.

[3] Avellan F., Dupont Ph., Farhat M., Gindroz B., Henry P., Hussain M., Parkinson E., Santal O., 1990, "Flow survey and blade pressure measurements in a Francis turbine model," IAHR International Symposium, Belgrade.

[4] 윤의수, 오형우, 박무룡, 2006. 5. 25, "프란시스 수차런너의 수력학적 성능해석," 제5회 소수력기술연구회 세미나, 수안보 상록호텔, pp. 199~208.

[5] Parkinson E., 1995, "Turbomachinery workshop ERCOFTAC II - Test case 8 : Francis turbine," Turbomachinery Workshop ERCOFTAK, EPFL.

[6] ANSYS CFX 10.0, ANSYS, Inc.

[7] ANSYS ICEM CFD 10.0, ANSYS Inc.