◎ 논 문
◎ Original Paper

DOI: http://dx.doi.org/10.5293/kfma.2013.16.4.010
ISSN (Print): 2287-9706

유출각 변화에 따른 프란시스 수차 성능해석

전진현* · 변순석* · 최영철** · 박준식** · 김윤제***†

Hydraulic Performance of Francis Turbine with Various Discharge Angles

J.-H. Jeon*, S.-S. Byeon*, Y.-C. Choi**, J.-S. Park** and Y.-J. Kim***†

Key Words : Francis turbine(프란시스 수차), Discharge angle(유출각), Inlet angle(유입각)

ABSTRACT

In this study, we have numerically investigated the hydraulic efficiency with various values of discharge angle(11°, 12°, 14°, 15°, 17°, 18°, 20°) in the Francis turbine of hydropower generation under 15MW with fixed values of head range of 151m and flow rate(10.97m³/s). We also conducted the numerical analysis with constant inlet angle in the Francis turbine using the commercial code, ANSYS CFX. Hydraulic characteristics for different values of the runner blade angle are investigated. The results showed that the change of discharge angles significantly influenced on the performance of the turbine hydraulic efficiency.

1. 서 론

인간은 에너지를 기반으로 쾌적한 생활과 고도의 경제활동을 영위하고 있으며, 이러한 에너지의 85%를 석탄, 석유 및 천연가스 등 화석연료를 통하여 얻고 있다. 석유로 대표되는 최근 에너지 환경은 에너지의 불확실성 증대에 따른 유가 상승과 수급 불안이 동반되고 있으며, 세계 각국의 에너지 자원 확보 경쟁이 갈수록 심화되고 있다. 우리나라의 경우 에너지 자원이 절대 부족하여 에너지 해외 의존도가 97% 이상이며, 이를 경감시키고 에너지 수급을 안정시키기 위하여 국내 부존 에너지를 최대한 활용하는 것이 매우 중요하다. 또한, 지구온난화에 대처하는 범세계적인 규제에 대비하기 위하여, 청정에너지를 적극 개발하여 에너지 자립도를 향상시켜야 한다.

이러한 연구 동향의 일환으로서 국내에서도 신재생에너지에 대한 연구개발이 활발히 진행되고 있다. 국내 소수력발전 분야의 경우 프로펠러 수차 및 카프란 수차에 대한 설계기술은 확립되어 있으나 중·저낙차 프란시스 수차에 대한 설계기술은 전무한 상태로서 수차에 대한 설계기술 확립이 시급하다. 최현준 등[1,2]은 프란시스 수차 유동특성 분석을 통한 설계기술 향상 및 성능개선 연구를 위하여 수차 설계 및 기초자료 분석과 CFD 결과를 통하여 설계변수를 도출하고 효율 향상을 도모하였다. 최주석 등[3]은 10kW 미만 상용 프란시스 수차에 대해 유동 특성 및 성능 검토를 위한 수치해석 결과 안내깃의 유출각 증가는 이론출력 및 회전차의 회전력을 증가시키지만 상대적으로 유효낙차가 큰 폭으로 커짐으로 많은 수의 안내깃과 큰 유출각은 오히려 성능을 감소시킴을 확인하였다. 윤의수 등[4] 은 CFD를 이용하여 프란시스형 IMHEF(Institut de Machines Hydrauliques et de Mecanique des Fluides)수차의 수력학적 성능특성을 연구하였고 해석기법을 개발하였다. 이철형과 박완순[5]은 프란시스 수차 국산화 시제품 제작 및 검사까지 전과정을 체계적으로 수행하였고, 기계적인 특성과 수력학적인 성능을 분석함으로써 프란시스 수차의 국산화 및 상용화를 추진하였다.

실험을 통하여 프란시스 터빈의 성능 평가를 수행하는 것이 바람직하지만, 성능개선을 위한 설계조건 을 제작과정에서 변경하는 것은 현실적으로 많은 어려움이 있다. 하필수

* 성균관대학교 대학원 기계공학과 (Graduate School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University)
** 대양수력(주) (Daeyang Hydro co., Ltd.)
*** 성균관대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University)
† 교신저자(Corresponding Author), E-mail : yjkim@skku.edu

2012 유체기계 연구개발 발표회 발표 논문, 2012년 12월 5-7일, 부산
The KSFM Journal of Fluid Machinery: Vol. 16, No. 4, August, 2013, pp.10~14(Received 5 Oct. 2012; revised 21 Jan. 2013, 4 Mar. 2013; accepted for publication 9 Apr. 2013)
10 한국유체기계학회 논문집: 제16권, 제4호, pp.10~14, 2013(논문접수일자: 2012.10.05, 논문수정일자: 2013.01.21, 2013.03.04, 심사완료일자: 2013.04.09)

등[6]은 새로운 런너를 설계하여 소수력 수차 유동특성 분석을 통한 설계규격 최적화 및 설계인자 도출로 수차 효율 향상 및 온실가스 감축연구를 수행하였다. 본 연구에서는 참고문헌[7,8]에서 제공하는 수차 형상을 모델로 하여 소수력 발전소용 프란시스 수차의 효율 및 출력을 계산하였으며, 수치해석기법을 이용하여 기존 설계된 프란시스 수차 유출각 변화에 따른 수력효율 변화를 고찰하였다.

2. 수치해석

2.1. 프란시스 수차 형상

본 연구에서는 15MW급 프란시스 수차의 수치해석을 위해 Fig. 1과 같이 수차 입구 부분의 스파이럴 케이스(spiral case), 9개 스테이 베인(stay vane), 18개 안내날개(guide vane), 13개 런너(runner), 흡출관(draft tube) 영역으로 구성하였다. 런너의 기본형상은 참고문헌[6]에서 제공하는 프란시스 수차의 비속도를 고려하였으며, 형상을 결정짓는 주요 설계치인 허브(hub)와 슈라우드(shroud)는 Fig. 2에 표시된 지점을 기준으로 생성하였다. 비압축성 3차원 정상유동에 대한 연속방정식, 운동량방정식, 난류모델을 사용하여 유출각 변화에 의한 런너 휨 정도에 따른 수력학적 특성을 고찰하였고, 기존 설계된 모델과 수력효율을 비교 검토하였다.

2.2. 지배방정식

프란시스 수차 유출각 변화에 따른 수력효율 확인을 위해 지배방정식으로 연속방정식과 운동량방정식을 사용하였고 해를 구하기 위해 범용 유한체적해석(FVM) 소프트웨어인 ANSYS CFX를 활용하였다.

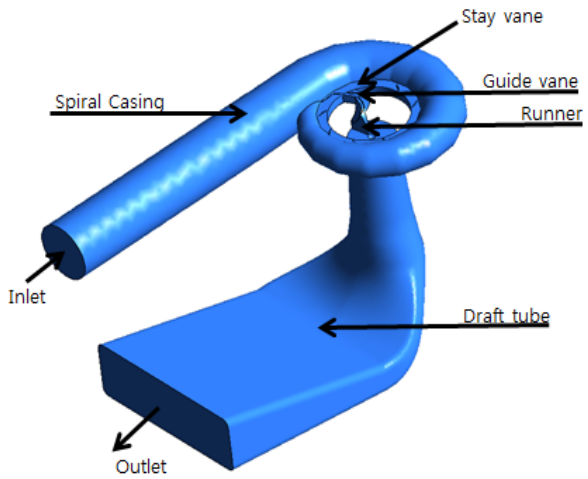


Fig. 1 3-D view of the Francis turbine geometry

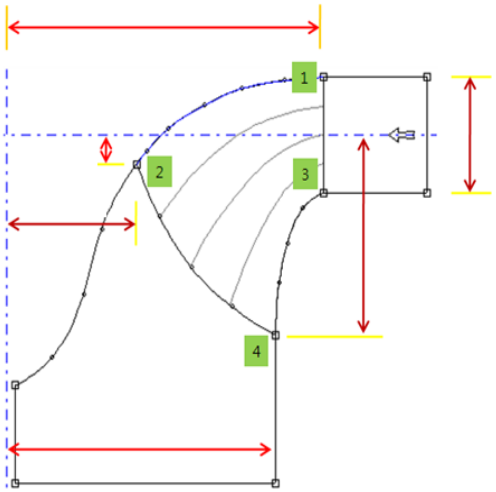


Fig. 2 Design element of a runner blade

Table 1 Operating conditions.

Gross head	151[m]
Flow rate	10.97[m³/s]
Angular velocity	514[rpm]
Specific speed	118.7[m-kW]
Rated output	14,934 [kW]
Efficiency	92 [%]

연속방정식:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \tag{1}$$

운동량 방정식:

$$\frac{\partial (\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \cdot U) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau \tag{2}$$

여기서,

$$\tau = \mu (\nabla U + (\nabla U)^t - \frac{2}{3} \delta \nabla \cdot U) \tag{3}$$

난류모델로는 경계층 및 유동 박리 모사에 우수한 SST (Shear Stress Transport) 모델을 사용하였다.

2.3. 해석모델 및 격자계

프란시스 수차의 입구부터 출구까지 전체 유동 영역에 대하여 해석하였다. 본 연구에 사용된 모델의 운전조건은 Table 1에 표기하였으며, 이러한 조건들에 의해 설계 완료된 기초모델은 고정 입수각(105.17°)과 기준 유출각(17°)을 변화

시켜가며 해석하였다(Table 2 참조). 수치해석을 위한 격자계 형성은 ANSYS CFX 및 BladeGen을 사용하여 대략 1,400,000개 격자로 구성하였으며, 각각 영역에 대한 격자수는 Table 3에 나타내었다. Figure 3은 프란시스 수차 형상 각 부분의 격자를 나타낸 그림이다.

2.4. 경계조건 및 해석방법

해석에 사용된 프란시스 수차가 반동터빈이고 온도와 중력에 의한 영향을 거의 받지 않기 때문에 해석 소요시간과 수렴 정확도를 고려하여 열전달 및 부력 조건을 무시하였으며 25℃ 물을 작동유체로 사용하였다. 수치해석을 위한 경계조건은 Table 4에 나타내었다. 수차의 회전부분인 런너는 MRF(Multiple Rotating Frames)법을 이용하여 해석하였다. MRF법은 회전에 의한 영향을 해석하고자 할 때 사용되는 방법으로서 격자를 회전시키지 않고 회전하는 유체 격자 내부에 상대속도를 더해 계산하는 방법이다. 즉, 수차와 같은 유체기계를 해석하는데 있어 고정된 격자계를 사용하여 계산의 편의성과 정확성을 확보하는 방법이다.

Table 2 Discharge angles of Francis turbine.

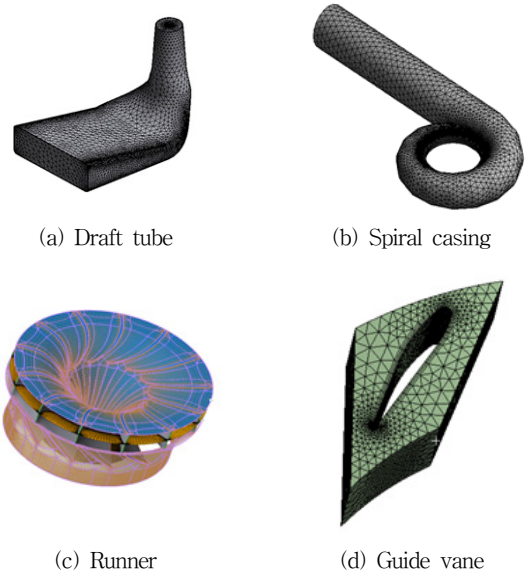
Discharge angle(β_2)	Cases
11	A
12	B
14	C
15	D
17	E(Basic model)
18	F
20	G

Table 3. Number of grid systems in the analysis model.

Total 1,400,000	
Guide vane	110,000
Draft tube	200,000
Runner	30,000
Spiral case	1,100,000

Table 4. Specifications of boundary conditions.

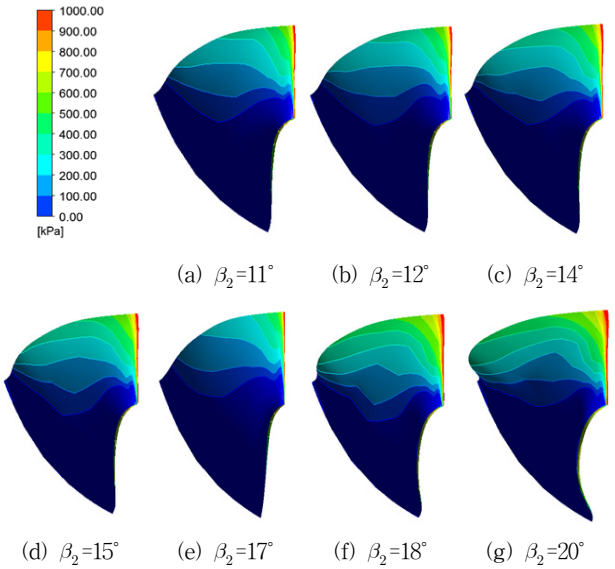
Inlet	10.97[m³/s]
Outlet	1 [atm]
Blade	no silp wall
Wall	no silp wall



(a) Draft tube (b) Spiral casing

(c) Runner (d) Guide vane

Fig. 3 Grid systems



(a) β_2=11° (b) β_2=12° (c) β_2=14°

(d) β_2=15° (e) β_2=17° (f) β_2=18° (g) β_2=20°

Fig. 4 Pressure distributions with various discharge angles of Francis turbine

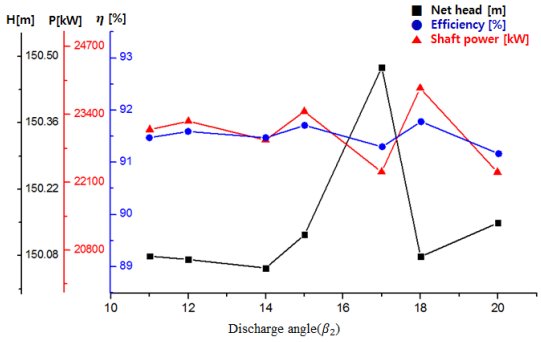
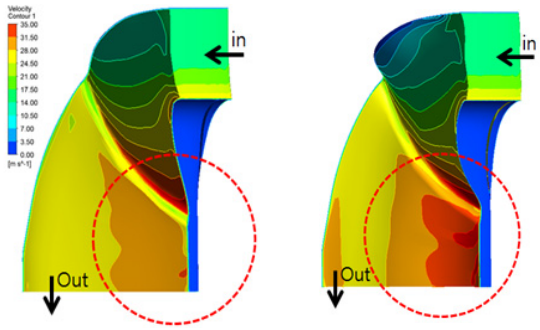
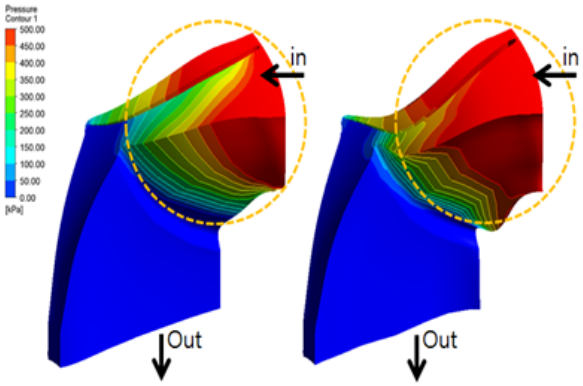


Fig. 5 Hydraulic characteristics for different values of the runner blade discharge angle



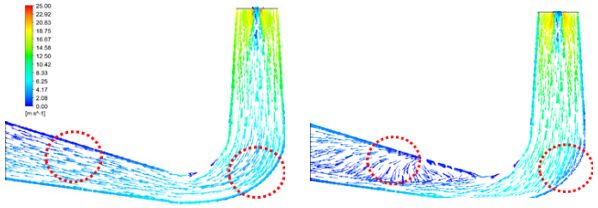
(a)Case E(β_2=17°) (b)Case F(β_2=18°)

Fig. 6 Velocity distributions on the surface of runner blade



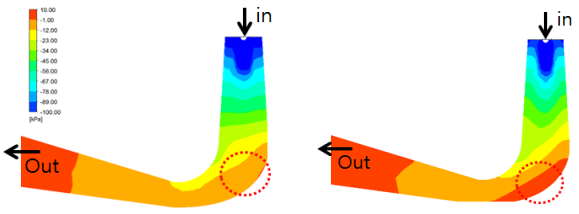
(a)Case E(β_2=17°) (b)Case F(β_2=18°)

Fig. 7 Pressure distributions on the surface of runner blade



(a)Case E(β_2=17°) (b)Case F(β_2=18°)

Fig. 8 Velocity vector distributions on the cross-sectional area of the draft tube



(a)Case E(β_2=17°) (b)Case F(β_2=18°)

Fig. 9 Pressure at the center of cross-sectional area.

3. 결과 및 고찰

3.1. 유출각 변화에 따른 수력학적 특성

본 논문에서 채택한 수차 형식은 반동수차로 유출각 변화를 통하여 성능 향상을 확인하였다. 런너 블레이드 유출각 변화는 허브와 슈라우드 각도 변화를 통하여 Fig. 4와 같이 생성하였다. 유출각 변화에 따른 수력효율을 Fig. 5에 도시하였다. 그 결과 각도 변화에 따라 수력효율은 큰 차이를 보이진 않았지만, Case F(β_2=18°)의 경우 다른 모델에 비해 높은 축동력을 보이며, 수두 감소로 인하여 높은 수력 효율을 나타내었다. 이에 비해 Case G(β_2=20°)의 경우 낮은 축동력과 높은 수두 증가로 인하여 낮은 수력 효율을 보이고 있는데 수두 및 축동력 변화에 따른 효율 변화로 판단된다.

축동력, 유효낙차 및 효율을 확인한 결과 이론적 설계에 근접할수록 효율이 높아지는 것을 알 수 있으며, 수력효율은 고찰한 바와 같이 Case F(β_2=18°)일 때 정격효율(92%) 및 정격출력(14,934 kW)에 가장 근접하여 높은 효율을 나타내는 것을 알 수 있다.

3.2. 런너 주위의 압력 및 속도 분포

Figure 6은 프란시스 수차 내부 유동특성을 고찰하기 위하여 런너 영역에 속도 분포를 나타내었다. 본 연구에서는 지면 절약을 위해 기준모델(Case E)과 가장 효율이 우수한 Case F(β_2=18°)의 결과만을 도시하였다. 앞서 진행한 수치해석 결과 Case F일 때 가장 높은 효율을 나타내었으며, 기준 모델과 차이가 발생하는 원인 분석을 위해 수치해석 결과를 비교하였다.

그 결과 유출각이 증가함에 따라 속도증가를 보였으며, 이는 수력효율 증가의 주된 원인이 될 것으로 판단된다. Figure 7은 모델 런너 부분의 압력 분포를 도시하였는데 압력이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. Case E 모델이 Case F에 비해 중앙 부분에서 압력을 받는 면적이 작은 것을 확인하였으며, 이것은 Case F가 수차성능 면에서 우수함을 입증한다고 할 수 있다. 또한, 균일한 높은 압력과 속도 증가로 인하여 향상된 수력효율을 보이며, 수치해석에 사용된 모델 중 가장 성능이 우수함을 알 수 있다.

3.3. 흡출관 유동 특성

흡출관(draft tube)은 런너를 통하여 유입된 작동유체의 관성을 이용하여 전수두(total head)를 증가시키며, 유효낙차를 증가시키는 역할을 하는 수차의 중요한 부분이다. 유출각 변화에 따른 성능 분석을 위하여 Case E, F에 따른 속도벡터 분포를 고찰하였다.

Figure 8은 흡출관 입구에서 출구까지 유로의 중앙 횡단면에서의 속도벡터를 나타내고 있다. 흡출관 입구에서는 비

교적 균일한 유속을 보이지만 곡관부를 지나면서 크게 변하는 것을 알 수 있다. 흡출관 안쪽에 비해 바깥쪽은 느린 유속을 보이고 있다. 이는 곡관의 곡률반경에 따른 일반적 특징이며, 흡출관 설계시 중요한 설계인자에 속한다.

곡관부 통과 후 속도는 상부에 비해 매우 낮은 영역을 발생하는데, 이것은 흡출관 하류에서 발생하는 박리에 의한 흐름으로 판단된다. Case E의 결과로 부터 곡관부에서 발생한 불균일한 흐름은 출구로 흘러가면서 조금씩 안정화되고 있음을 확인할 수 있으나 상부와 하부에서의 속도 차가 존재함을 알 수 있다. Case F은 입구 근처에서 비교적 균일한 흐름을 보이며 곡관부를 지나면서 단면 상부의 양쪽으로 흐름이 치우치는 경향을 확인할 수 있다. 이와 같은 흡출관에서의 와류 형성은 흡출관 입구로 전파되어 수차 운전 상태에 영향을 미치는 것으로 유추할 수 있다.

Figure 9는 흡출관내의 압력을 나타낸다. 압력분포는 속도분포와 밀접한 관계가 있으며, 곡관부 형상에 따라 압력 차이를 볼 수 있다. 입구에서 출구로 갈수록 내부유동 압력이 상승함을 알 수 있으며, 단면형상이 확대됨에 따라 압력이 증가한다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 런너 블레이드 배출 각도 변화로 인한 프란시스 수차의 수력효율 및 내부유동을 CFD를 이용하여 해석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

유출각 변화에 따른 수력효율은 Case F에서 가장 높은 효율을 보였지만 다른 유출각과 비교하였을 때 큰 차이를 보이지 않았다.

프란시스 수차 런너 블레이드의 속력과 압력을 확인한 결과 기준 모델인 Case E에 비해 Case F에서 균일한 높은 압력과 속도증가로 인하여 향상된 수력효율을 보였으며 수치해석에 사용된 모델 중 가장 좋은 성능을 나타내었다.

흡출관 내부유동은 곡관부 형상의 영향을 크게 받으며, 입구의 균일한 흐름이 출구로 갈수록 강한 와류를 포함한 흐름으로 변화하였다. 또한, 단면적이 입구에서 출구로 갈수록 커짐에 따라 유속이 느려지고 압력이 증가함을 확인하였다.

이상에서 살펴본 바와 같이 유출각 변화에 따른 수력효율 증가는 미미하므로, 흡출관 및 블레이드 형상 변화를 통한 추가적인 연구가 필요하다.

참고문헌

(1) 최현준, 황영철, 김유택, 남청도, 이영호, 2010, “CFD에 의한 프란시스 수차의 내부유동에 따른 기초 성능해석,” 한국마린엔지니어링학회 공동학술대회 논문집, Vol. 2010, No. 4, pp. 349~350.

(2) 최현준, 노형운, 김유택, 이영호, 2010, “CFD에 의한 500kW급 프란시스 수차의 유동해석에 관한 연구,” 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 107~108.

(3) 최주석, 김옥삼, 김일수, 전철균, 문채주, 2005, “소수력 발전용 상용 프란시스 수차의 유동해석을 통한 성능 개선에 관한 연구,” 한국태양에너지학회 논문집, Vol. 25, No. 3, pp.19~25.

(4) 윤의수, 오형우, 박무룡, 2006, “프란시스 수차의 수력학적 성능해석,” 전력전자학술대회 논문집, 제 1권, pp. 687~689.

(5) 이철형, 박완순, 2009, “프란시스 수차의 국산화개발 연구,” 한국태양에너지학회 춘계학술발표대회 논문집, Vol. 29, No.1, pp. 302~205.

(6) 하필수, 오석영, 정종현, 노형운, 서상호, 2010, “역설계 및 CFD를 통한 저효율 프란시스 수차의 성능향상”, 대한기계학회 유체공학부문 춘계학술대회 논문집, pp. 106~110.

(7) “Selecting Hydraulic Reaction Turbines”, 1976, Engineering Monograph, No. 20, United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation.

(8) A. T. Sayers, 1990, “Hydraulic and Compressible Flow Turbomachines”, McGraw-Hill, New York.