

프란시스 수차 모델의 블레이드 내 와류 특성에 대한 수치해석적 분석

김승준^{*,**} · 최영석^{*,**} · 조 용^{***} · 최종웅^{***} · 김진혁^{*,**†}

Numerical Analysis of Inter-Blade Vortex Characteristics of a Francis Hydro Turbine Model

Seung-Jun Kim^{*,**}, Young-Seok Choi^{*,**}, Yong Cho^{***}, Jong-Woong Choi^{***}, Jin-Hyuk Kim^{*,**†}

Key Words : Francis hydro turbine(프란시스 수차), Inter-blade vortex(블레이드 내 와류), Numerical analysis(수치해석적 분석), Internal flow characteristics(내부 유동 특성), Unsteady pressure(비정상 압력)

ABSTRACT

In this study, a numerical analysis of the inter-blade vortex characteristics of a Francis hydro turbine model was performed with various flow rate conditions in the operating range. The model turbine demonstrated notably different internal flow characteristics for different operating conditions. Particularly, an inter-blade vortex between the runner blade passages was observed at lower flow rate conditions. An inter-blade vortex can cause reduction in performance, and vibration and instability in the operation of a turbine system. Therefore, understanding inter-blade vortex characteristics is important for the safe and stable operation of turbines. To investigate internal flow and unsteady pressure characteristics, three-dimensional steady and unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes calculations using a shear stress transport turbulence model were performed with two-phase flow analysis. Inter-blade vortices were captured at the leading and trailing edges of the near runner hub between blade passages. This vortex region exhibited flow separation and lower velocity and contributed to decreased hydraulic performance and higher unsteady pressure characteristics.

1. 서 론

최근 세계 경제 성장을 견인했던 화석 에너지 시스템의 수명이 다해가고 있으며 이로 인한 유가 상승 및 수급 불안이 동반되고 있는 가운데, 우리나라의 경우 화석 에너지 자원이 절대 부족하여 해외 의존도가 매우 높으므로 이를 경감시키고 대체할 새로운 에너지 패러다임의 필요성이 대두되고 있다. 신재생 에너지는 청정 및 지속가능한 특성을 가진 에너지 자원으로, 화석 에너지 고갈과 국제 환경규제의 대비에 적합한 미래 에너지 자원이다.^(1,2)

한편, 신재생 에너지 자원 중 수력 에너지는 국내의 자연적 조건과 조화를 이루며, 부존 잠재량이 많아 상대적으로

효율적인 이용이 가능하다. 이를 이용한 수력 발전은 전력수요가 높은 시간에 발전을 통해 피크부하를 담당하는 역할로 운전되고 있었으나, 최근 태양광 및 풍력 발전 등 간헐적 발전 특성을 가진 신재생 에너지원이 계통 유입되면서 수력 발전은 안정적인 전력 수급을 위해 전력수요를 조절할 수 있는 중앙급전부하로서 계통 안정 및 주파수 조절에 기여하며, 그 역할이 대두되고 있다. 이러한 운전 환경의 변화로 수력 발전은 저유량 및 고유량 영역인 탈설계점 운전이 지속 되고 있으며, 이는 수차 시스템의 수명감소 및 고장의 원인이 되고 있다.^(1,2)

이러한 수력 발전에 적용되는 프란시스 수차(Francis hydro turbine)는 운전조건에 따라 다양한 유동 특성을 나타내며,

* 과학기술연합대학원대학교 생산기술(청정공정·에너지시스템공학)전공(Industrial Technology(Green Process and Energy System Engineering), Korea University of Science & Technology)

** 한국생산기술연구원 열유체시스템그룹(Thermal & Fluid System R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology)

*** 한국수자원공사 K-water 융합연구원(K-water Convergence Institute, Korea Water Resources Corporation)

† 교신저자, E-mail : jinhyuk@kitech.re.kr

특히 저유량 영역에서는 러너 블레이드 유로 내 와류가 발생하기도 한다. 이러한 와류는 러너 내 유로를 폐색하는 효과로 러너의 운전 특성에 영향을 주며, 특히 성능 저하 및 진동 유발 등 수차 시스템 운전을 불안정하게 만드는 요소로서 이에 대한 특성 검토는 필수적이다.

이와 관련된 선행연구로서, Yamamoto 등⁽³⁾은 수치해석 및 모델 시험을 통해 프란시스 수차 러너 블레이드 내 와류 특성을 규명하였다. 특히, 모델 시험에서 특수한 가이드 베인 (Guide vane) 및 드래프트 튜브 (Draft tube) 장비를 통해 러너 유로 내 가시화 된 와류 구조를 확인하였고, 수치해석을 통해 그 특성을 성공적으로 모사하였다. Zuo 등⁽⁴⁾은 프란시스 수차에서 러너 블레이드 내 와류에 의해 유발된 압력 맥동을 수치해석을 통해 분석하였으며, 모델 시험을 통해 와류의 생성 구조 및 위치에 따라 와류 특성을 정의하였고, 그에 따른 압력 특성을 수치해석을 통해 확인하였다. Wack 등⁽⁵⁾은 프란시스 수차의 탈설계점 운전 조건 중 부분 부하 조건에서 2상 유동 수치해석을 통해 러너 블레이드 내 와류 현상을 확인하였으며, 수치해석 시 러너의 다양한 격자조건에 대해 나타나는 증기 체적비 및 와류 특성을 규명하였다. 이처럼 최근 들어 프란시스 수차의 러너 블레이드 내 와류 특성에 관한 다양한 연구가 수행되고 있지만, 프란시스 수차의 전반적인 운전범위 내 유량 변화에 따른 내부유동 특성 및 와류의 위치 및 크기 등을 체계적으로 분석하는 연구는 수행되고 있지 않다.

본 연구에서는 프란시스 수차 모델의 저유량 영역을 포함한 가이드 베인 개도에 따른 유량 변화에 대한 러너 블레이드 유로 내 비정상 와류의 특성을 파악하기 위해 물과 증기를 고려한 2상 유동 삼차원 정상 및 비정상상태 Reynolds-averaged Navier-Stokes(RANS) 해석을 수행하였다. 수치해석은 프란시스 수차 모델 최고효율점의 낙차 조건에서 수행되었으며, 가이드 베인 개도에 따른 유량 변화에 대한 러너 블레이드 유로 내 와류의 유동 구조 및 특성을 파악하여 내부유동 및 비정상 압력 특성을 규명하고자 하였다.

2. 프란시스 수차 제원

본 연구에서는 본 연구진에 의해 이전 연구에서 수행된 비속도 300급 실물 및 모델 프란시스 수차를 해당연구의 기본 모델로 선정하였으며, 직경 0.32 m로 기하학적 상사된 프란시스 수차 모델에 대하여 삼차원 수치해석을 수행하였다.⁽⁶⁾ Fig. 1에 본 연구에서 적용된 프란시스 수차 모델의 러너 등을 포함한 주요 유동 영역에 대해 삼차원 형상 및 자오면을 도시화하였다. 주요 제원은 Table 1에 나타냈으며, 수차의 비속도, 회전속도, 낙차 및 유량은 IEC 60193 규격에 제시된 계수를 통해 나타내었다.⁽⁷⁾

3. 수치해석방법

본 연구에서는 ANSYS사의 상용 소프트웨어인 ANSYS CFX-18.2를 사용하여 프란시스 수차 모델의 비압축성 내부 유동장에 대한 정상 및 비정상해석을 수행하였다.⁽⁸⁾ 프란시스 수차 러너의 형상 정의는 Blade-Gen, 격자 생성은 Turbo-Grid 및 ICEM-CFD, 경계 조건은 CFX-Pre, 그리고 유동해석 및 결과분석은 각각 CFX-Solver 및 CFX-Post를 사용하였다.

수치해석 시 계산에 사용된 지배방정식은 유한체적법으로 이산화 되었으며, 프란시스 수차의 내부유동 특성은 삼차원 비압축성 정상 및 비정상 RANS 방정식에 의해 수행되었다.

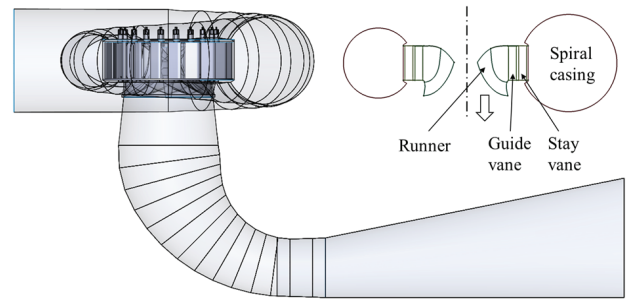


Fig. 1 Schematic diagram showing the 3D model of a Francis hydro turbine⁽⁶⁾

Table 1 Design specifications of a Francis hydro turbine⁽⁶⁾

Specifications	Real model	Scaled model
Specific speed, Ns	334	334
Speed factor	0.56	0.56
Head coefficient	3.16	3.16
Discharge coefficient	0.59	0.59
Runner outlet diameter, D ₂	4.34 m	0.32m
Runner blade number	12	12
Stay vane number	20	20
Guide vane number	20	20

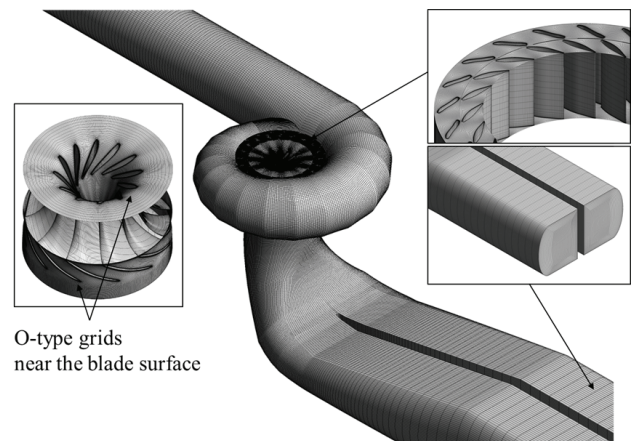


Fig. 2 Computational grids of a Francis hydro turbine model⁽⁶⁾

대부분의 축 방향으로 회전하는 유체기계는 해석 시간의 단축과 수렴성의 향상을 위해 날개 1매의 유로에 대해 주기조건(Periodic condition)을 부여하여 해석도메인으로 설정하지만, 본 연구에 적용된 프란시스 수차는 입구에서 유동방향으로 점차 축소되어지는 유동 단면을 가진 스파이럴 케이싱(Spiral casing)과 스테이 베인(Stay vane) 사이에서 발생하는 내부 유동의 상호작용에 의해 주기적이라 가정될 수 없기 때문에 모든 러너 블레이드를 포함한 전 영역에 대해 해석을 수행하였다.⁽⁹⁾

수치해석의 작동 유체는 25°C 물과 증기를 사용한 2상 유동해석을 수행하였고, 프란시스 수차 모델의 입구와 출구에는 상부 저수지 및 하부 저수지 수위를 고려한 전압력 조건과 정압력 조건을 각각 부여하였다. 난류모델로는 Shear Stress Transport(SST) 모델과 함께 수치해석 시 벽 근처 영역에서는 저 레이놀즈수 전단이송모델을 적용하기 위해 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 러너 날개 표면 인근에 O형 격자계를 구성하여 첫 번째 격자점에서 $y^+ \leq 2$ 를 유지하도록 하였고, 그 외 스파이럴 케이싱 및 드래프트 튜브는 벽면에 조밀한 격자를 적용하였고, 정렬 격자계로 구성하였다.

프란시스 수차 모델의 정상상태 수치해석 시 회전자인 러너와 고정자인 가이드 베인 및 드래프트 튜브 사이의 경계면은 격자면의 계산값을 그대로 정지좌표계에 입력하는 방식인 Frozen-Rotor 방식을 적용하였으며, 비정상상태의 수치해석 시에는 Transient-Rotor-Stator 방식을 적용하여 모든 유동영역에 대해 매 시간 간격으로 격자를 회전시켜 해석을 진행하였다. 비정상 수치해석 수행 시, 정상 수치해석 결과를 초기 값으로 부여하여 해석시간을 단축시키고 수렴성을 향상시켰다. 비정상 수치해석의 총 시간 (Total time)과 타임 스텝 (Time step)은 각각 0.4108s 및 0.0003423s로 설정하여 러너가 1회전 하는 동안 1.5도 간격으로 해석을 수행하였으며, 시간 전진에 필요한 수렴성의 향상을 위한 반복횟수는 5회로 설정하였다.⁽¹⁰⁾

프란시스 수차 모델의 비정상 수치해석 수행 시, 유량 변화에 따라 달라지는 내부유동 특성 및 와류에 의해 발생하는 수차 모델의 압력 특성을 확인하기 위해 Fig. 3과 같이 IEC 60193 규격에 제시된 수차 모델 성능시험의 압력 측정 위치를 적용하였으며, 가이드 베인 출구 인근에도 측정점을 적용하여 각 측정점에서 비정상 압력 특성을 확인 및 분석하였다.⁽⁷⁾

4. 결과 및 고찰

4.1 수치해석결과의 검증

본 연구의 모델인 프란시스 수차의 수치해석을 수행하기 위한 수치해석결과의 검증은 성능시험결과와의 비교를 통해 Kim 등⁽⁶⁾으로부터 수행된 선행연구에 의해 타당성이 기 입

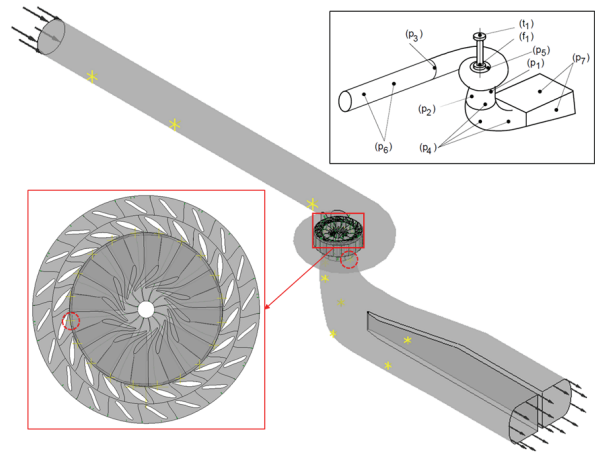


Fig. 3 Pressure measuring points with IEC 60193 for unsteady state analysis of a Francis hydro turbine model

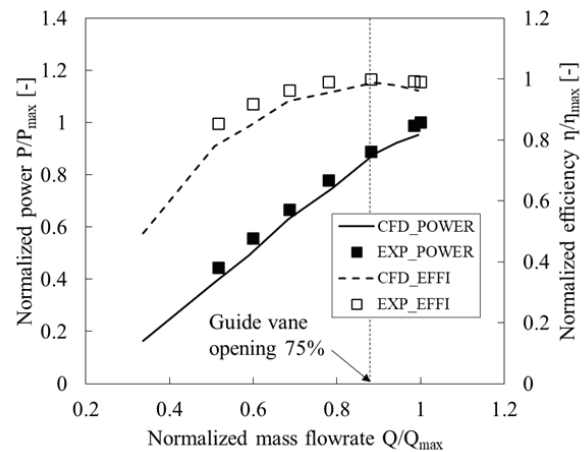


Fig. 4 Performance curves of numerical (CFD) and experimental (EXP) results for a real-scale Francis hydro turbine⁽⁶⁾

증된 바 있다. Fig. 4에서 볼 수 있는 바와 같이 선행연구로부터 수행된 정상상태 수치해석의 RANS 해석결과와 성능시험결과와의 경향이 전반적으로 잘 일치하는 것을 볼 수 있으며, 특히 최고효율점 (Best efficiency point, BEP)인 가이드 베인 개도 75% 지점에서 예측한 수차 성능의 경향이 비교적 정확하게기 때문에 수치해석의 타당성이 있다고 볼 수 있다.

성능 곡선은 동일한 낙차 조건에서 가이드 베인 개도를 통해 유량을 조절하였으며, 유량이 감소할수록 수차의 출력 및 효율이 감소하는 경향을 확인 할 수 있다. 이는 동일한 낙차 조건에서 유량이 감소할 때, 수차의 내부유동 특성이 달라지며 그에 따른 손실의 증가로 인해 성능이 감소한 것으로 볼 수 있다. 특히 저유량 영역에서는 러너 블레이드의 유로 내 와류가 발생하여 손실 및 비정상 압력 특성을 유발한다.⁽³⁾

4.2. 러너 블레이드 유로 내 와류 특성

Fig. 5는 프란시스 수차 모델의 유량 변화에 따른 러너 블

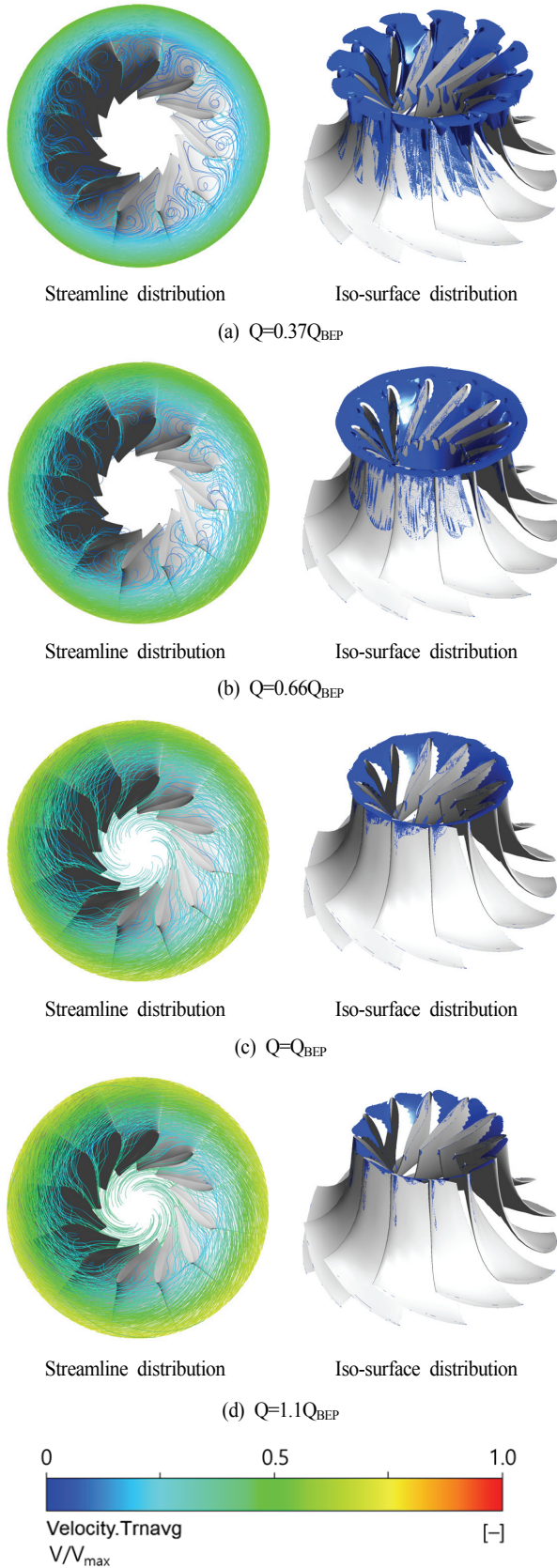


Fig. 5 Time averaged velocity streamline distribution and iso-surface distribution of lower velocity region in flow passage of runner blade with various flow rates

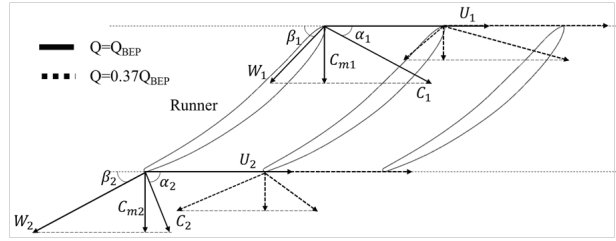
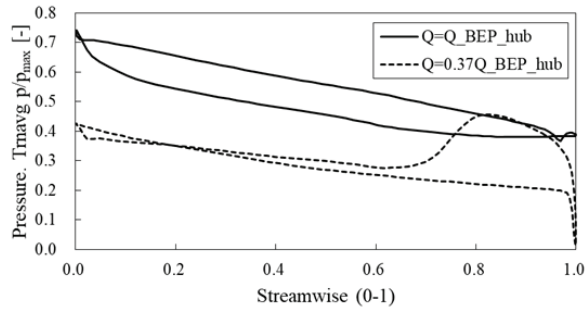


Fig. 6 Comparison of velocity triangle distributions at mid-span of runner

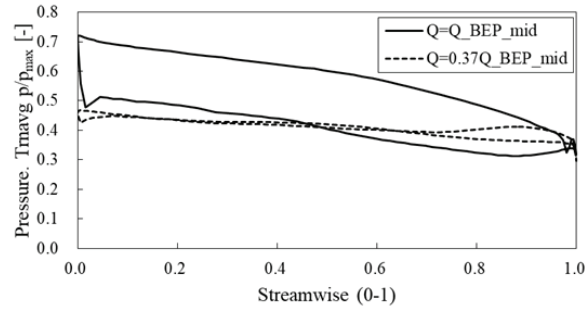
레이드 유로 내부의 유선 분포 및 등속도면 분포를 보여주고 있다. 여기서 유선 분포는 비정상 해석의 속도값에 대해 시간평균값을 나타내었으며, 최대 속도값으로 나누어 무차원화하였다. 등속도면의 유속은 0.5 m/s로 저속영역을 나타내며, 이를 통해 유동 박리에 의한 유동 정체 영역임을 간주할 수 있다. Fig. 5(a)를 살펴보면 유선분포를 통해 저유량 영역에서 러너 유로 내 와류가 선명하게 발생함을 확인할 수 있고, 이로 인한 유동 박리 및 정체로 인해 저속구간이 상대적으로 많이 형성됨을 등속도면 분포를 통해 확인할 수 있다. 이와 같은 저속구간에 의한 유동 정체 영역은 러너 블레이드 내 유로를 폐색하는 효과로 유동의 원활한 흐름을 방해하며, 손실을 유발하여 성능저하의 원인이 된다. Fig. 5(b)~(c)를 살펴보면 저유량 영역에서 유량이 증가할수록 수차 모델의 러너 블레이드 내 유로의 와류가 점차 감소하며 상대적으로 원활한 흐름을 나타내고, 그에 따라 등속도면 분포에서 저속구간이 감소함을 볼 수 있다. 또한, 러너 블레이드 내 와류에 의해 생성되는 저속구간은 러너의 허브 인근에서 상대적으로 많이 형성됨을 확인할 수 있다.

이러한 러너의 내부유동 특성 및 원인은 러너의 속도삼각형 분포의 비교를 통해 명확히 확인할 수 있으며, Fig. 6은 러너 중간단면의 입구 및 출구에서 Q_{BEP} 및 $Q=0.37Q_{BEP}$ 유량 조건에 대한 속도삼각형 분포를 비교하고 있다. 여기서, U 는 러너의 회전속도를 나타내며, W 는 상대속도, C 는 절대속도, C_m 은 자오선 속도로 입구 및 출구에서의 유량을 의미한다. 실선으로 나타낸 Q_{BEP} 조건에서는 상대 속도 각도인 β 와 러너 블레이드의 각도가 비교적 잘 일치하는 반면 점선으로 나타낸 $Q=0.37Q_{BEP}$ 조건에서는 감소하는 유량에 따라 자오선 속도가 감소하여 상대속도 성분 및 각도가 달라지므로, 유동각과 러너 블레이드 각도의 차이인 입사각(Incidence angle)이 잘 맞지 않아 Fig. 5(a)와 같이 유동이 원활하게 흐르지 못함을 확인할 수 있다. 이와 같은 러너 입구의 입사각 차이로 인하여 원활하지 못한 유동 흐름은 와류 발생 등 유동 특성을 달라지게 하고 그에 따라 손실을 유발하므로, Fig. 4에 나타난 성능곡선의 저유량 영역에 대한 성능 저하의 원인으로 볼 수 있다.

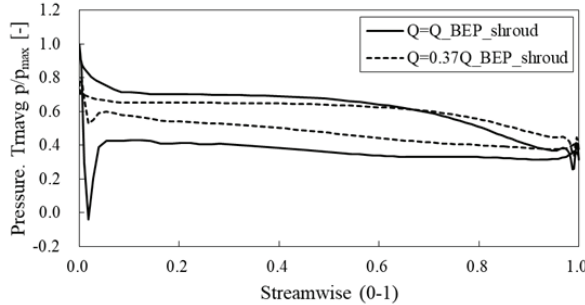
프랑스 수차 모델의 유량에 따른 러너 블레이드의 압력



(a) Hub span



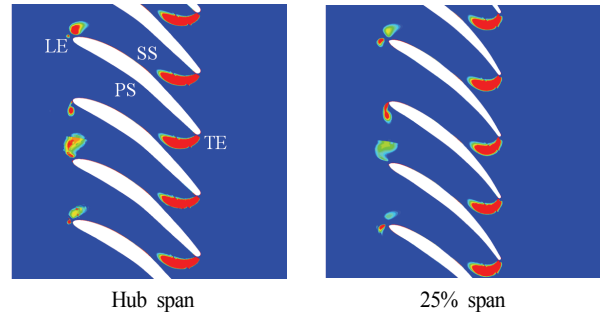
(b) Mid span



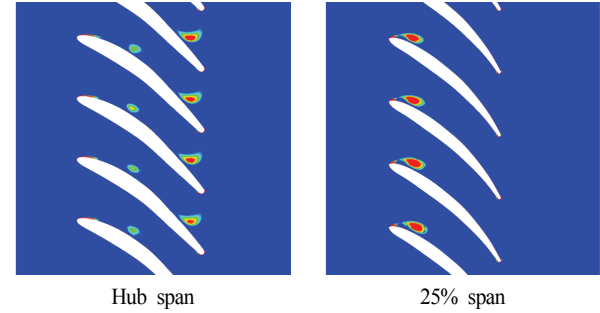
(c) Shroud span

Fig. 7 Pressure distribution along the streamwise direction of runner at hub, mid and shroud span

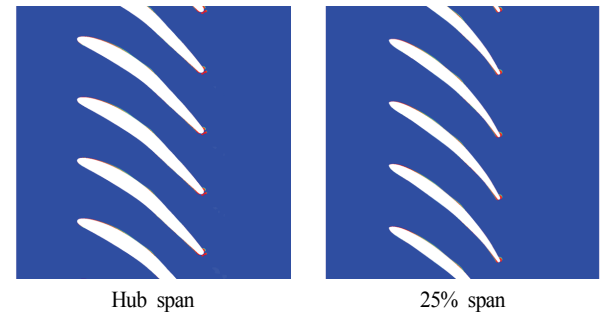
분포 특성을 확인하기 위해 Fig. 7과 같이 러너 블레이드의 허브(Hub), 중간(Mid) 및 쉬라우드(Shroud) 스패의 단면에서 유동방향에 따른 압력 분포를 확인하였다. 여기서 x 축의 0과 1은 각각 러너의 전연(Leading edge, LE)과 후연(Trailing edge, TE)을 나타내며, 압력값은 최대 압력값으로 나누어 무차원화 하였다. 그래프에서 압력면(Pressure side, PS)과 부압면(Suction side, SS)의 차로 인해 형성된 면적은 러너의 성능을 의미한다. Fig. 7(a)~(c)를 살펴보면 Q_{BEP} 조건은 관찰된 세 개의 스패 모두 원활한 유동의 유입을 통해, 압력면과 부압면의 압력차를 명확하게 보이는 반면 $Q=0.37Q_{BEP}$ 조건의 러너 압력 분포는 Fig. 6의 속도삼각형에서 확인한 입사각의 차이로 인해 세 개의 스패 모두 러너의 전연을 포함하여 전반적으로 원활하지 못한 압력차를 보이고 있다. 이러한 압력 분포



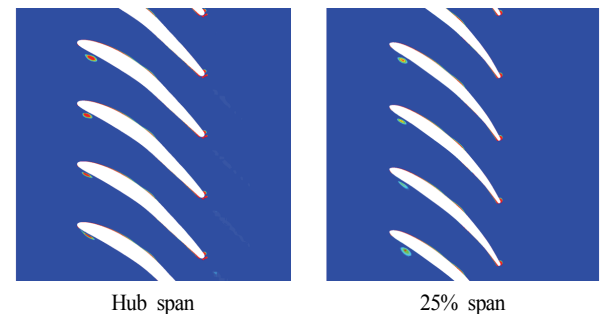
(a) $Q=0.37Q_{BEP}$



(b) $Q=0.66Q_{BEP}$



(c) $Q=Q_{BEP}$



(d) $Q=1.1Q_{BEP}$

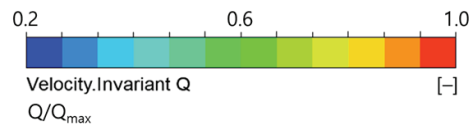


Fig. 8 Velocity Invariant Q distribution on runner span of hub and 25% with various flow rates

차이를 통하여 성능 손실의 원인을 파악 할 수 있다.

저유량 영역에서 성능 저하를 유발하는 러너 블레이드 내 와류의 특성을 확인하기 위해, 전단 변형률 및 와류 크기의 국부적 균형을 나타내는 Invariant Q 계수를 통해 와류의

크기 및 위치를 확인하였다.⁽¹¹⁾ 여기서, 관찰된 Invariant Q 계수의 값은 최대값으로 무차원화 하였다. Fig. 5의 내부유동특성을 통해 저유량 영역에서 유동 박리에 의한 저속 구간이 러너의 허브 인근에서 관찰되었으므로, 이를 좀 더 상세히 분석하여 보고자 허브 및 25% 스펠에 대해 Invariant Q 값을 Fig. 8과 같이 유량 조건에 따라 살펴보았다. Fig. 8(a)를 보면 $Q=0.37Q_{BEP}$ 조건에서 러너의 허브 및 25% 스펠 인근의 전연 및 후연 근처에서 와류가 선명하게 관찰되었으며, 특히 후연 부근에서 상대적으로 큰 와류를 확인 할 수 있다. Fig. 8(b)에서는 상대적으로 증가한 유량으로 인해 각 스펠에서 와류의 크기가 감소하였으며, 와류의 생성 위치가 달라짐을 확인 할 수 있다. 특히, 허브 스펠의 러너 후연에서 관찰 가능한 와류가 25% 스펠에서는 사라지는 것으로 보아, 와류는 상대적으로 매우 낮은 저유량 영역에서 러너 허브 인근의 후연 근처에서 생성됨을 확인 할 수 있다. Fig. 8(c) 및 (d)는 Q_{BEP} 및 $Q=1.1Q_{BEP}$ 조건으로, 증가된 유량으로 인하여 러너 유로 내 와류가 많이 사라진 것을 볼 수 있다. 특히, 고유량의 경우 증가된 유량으로 인해 달라진 유동 및 속도성분에 의하여 러너 입구의 입사각이 달라지므로, 허브 스펠의 러너의 전연 인근의 와류가 저유량 영역과 달리 압력면이 아닌 부압면 인근에서 관찰됨을 확인 할 수 있다.

Fig. 9는 $Q=0.37Q_{BEP}$ 인 저유량 영역에서 와류가 관찰된 허브 및 25% 스펠 사이인 허브 인근의 12.5% 스펠에서 러너가 90도 간격으로 1회전 회전 할 때의 Invariant Q 및 유선 분포를 통하여 시간에 따른 러너 유로 내 와류 및 내부유동 특성을 보여주고 있다. Fig. 9(a)~(d)를 살펴보면 러너의 전연에서 발생하는 와류 위치의 유동 박리를 유선 분포를 통해 비교하여 확인 할 수 있으며, 후연에서 발생하는 와류에 의한 폐색효과로 인해 유동이 원활하게 흐르지 못하는 것을 확인 할 수 있다. 또한 러너 전연의 와류는 시간에 따라 와류의 크기가 달라짐을 확인 할 수 있지만, 후연의 와류는 시간에 따라 크기의 변화가 거의 없이 동일한 위치에 지속적으로 발생함을 확인 할 수 있다. 따라서 러너 블레이드 내 와류는 프란시스 수차 모델의 저유량 영역에서 허브 인근의 전연 및 후연에서 발생하며, 특히 후연 인근에서 상대적으로 큰 와류가 발생함을 확인할 수 있다.

4.3 프란시스 수차 모델 비정상 압력 특성

Fig. 10은 프란시스 수차 모델의 Q_{BEP} 및 $Q=0.37Q_{BEP}$ 조건에 대해 Fig. 3에 도시된 압력 측정점 중 빨간색 점선 원으로 표시된 가이드 베인 출구 및 드래프트 튜브(p1)에서의 비정상 압력 값으로부터 고속푸리에변환(Fast Fourier Transform, FFT) 분석을 통해 유체유발진동의 주된 원인이 되는 1차 날개통과주파수(Blade Passing Frequency, BPF)와 그 주변 주파수 특성을 보여주고 있다. 여기서, magnitude는 최대값으로 무차원화

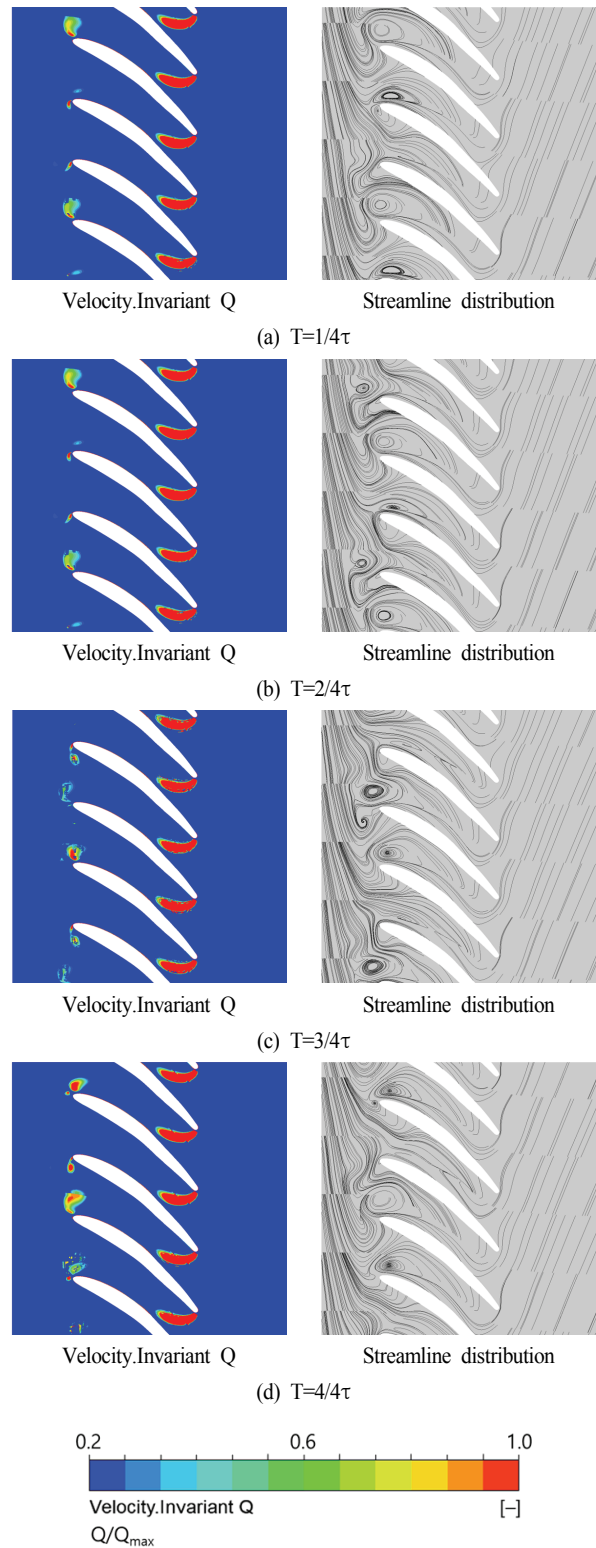
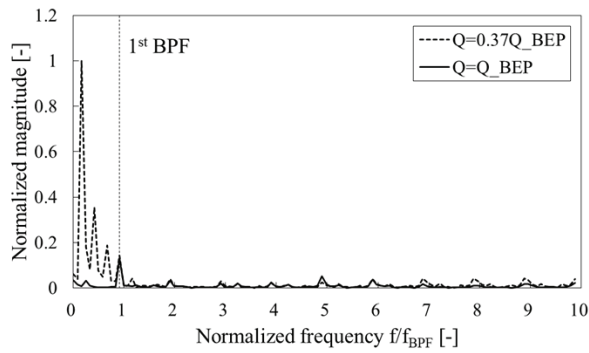
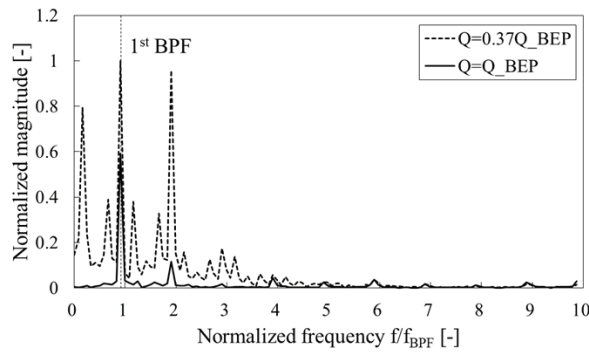


Fig. 9 Invariant Q and streamline distributions at runner span of 12.5% during one revolution of runner with $Q=0.37Q_{BEP}$

하였고, 주파수는 본 연구의 모델 수차가 나타내는 날개통과주파수로 무차원화 하였다. Fig. 10(a)의 가이드 베인 출구 측정점 결과에서는 1차 BPF 값보다 $Q=0.37Q_{BEP}$ 조건의 저주파수 영역에서 더 큰 magnitude 값을 나타냈으며, 이러한 특성이 Q_{BEP}



(a) Normalized magnitude at outlet of guide vane



(b) Normalized magnitude at cone of draft tube

Fig. 10 Normalized magnitude distributions according to normalized frequency at outlet of guide vane and cone of draft tube

조건에서는 나타나지 않은 것으로 볼 때, 유량에 따라 달라진 유동 특성에 의해 발생한 비정상 압력 특성으로 간주 할 수 있다. Fig. 10(b)의 드래프트 튜브의 측정점 결과에서는 $Q=0.37Q_{BEP}$ 조건에서 1차 BPF 주파수보다 낮은 저주파수 영역에서 Q_{BEP} 조건의 1차 BPF 보다 상대적으로 높은 magnitude 값을 보였고, 1차 BPF 값 역시 더 높은 magnitude 값을 나타냈다. 또한, 4차 BPF 주파수 이전의 영역에서 전반적으로 높은 magnitude 값을 $Q=0.37Q_{BEP}$ 조건에서 나타낸 것으로 보아, 러너 블레이드 유로 내 와류에 의한 비정상 압력 특성은 가이드 베인 출구보다는 러너 후류인 드래프트 튜브에 더욱 영향을 미치는 것을 확인 할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 프란시스 수차 모델의 유량 변화에 대한 러너 블레이드 내 와류의 특성을 파악하기 위해 물과 증기를 고려한 2상 유동 삼차원 정상 및 비정상상태 해석을 수행하였다. 프란시스 수차 모델의 최고효율점 낙차 조건에서, 가이드 베인 개도에 따른 유량 변화에 대한 러너 블레이드 유로 내 와류 구조 및 특성을 규명하여 성능 감소에 대한 손실의 원인을 확인하였다. 유선 및 등속도면 분포를 통해 수차

모델의 유량 변화에 따른 러너의 내부유동 특성을 분석하여 유동 박리에 의한 정체 구간을 확인 하였으며, 속도 삼각형 분포를 비교하여 유량에 따른 유동각과 러너 블레이드의 입사각 차이에 의한 유동 박리의 원인을 확인하였다. 또한, 입사각의 차이로 인해 나타나는 유동 특성을 러너 블레이드의 압력분포를 통해 각 스펙의 손실 원인을 확인하였다. 저유량 영역에서 성능 저하의 원인이 되는 러너 블레이드 내 와류 특성에 대해 Invariant Q 계수를 사용하여 유량에 따라 허브 인근에서 명확하게 발생하는 와류의 크기 및 위치를 확인 하였다. 또한, 저유량 영역에서 러너의 1회전에 대해 시간에 따른 와류의 특성을 Invariant Q 계수 및 유선 분포를 통하여, 와류로 인해 발생하는 유동박리 및 폐색효과로 유발되는 불균일한 흐름을 확인하였다. 이러한 와류에 의한 비정상 압력 값으로부터 FFT 분석을 통하여 저유량 영역에서 발생하는 압력 특성을 확인하였다. 이와 같은 결과로 비추어 볼 때, 프란시스 수차 모델의 저유량 영역에서 러너의 허브 인근에서 와류가 발생하며, 이는 유동 박리 및 폐색효과로 인해 원활한 흐름을 방해하여 성능 저하의 원인이 되고, 비정상 압력을 유발하는 등 수차 시스템의 안정성에 영향을 주는 요소이므로 프란시스 수차의 설계 및 운전에서 고려될 필요가 있다.

후 기

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 19IFIP-B128598-03).

References

- (1) 편집부, 2018, 신재생에너지 산업분야별 국내의 이슈분석과 핵심사업 시장전망 2018, 미래산업리서치.
- (2) Jeon, J. H., Byeon, S. S., Choi, Y. C., Park, J. S., and Kim, Y. J., 2013, "Hydraulic Performance of Francis Turbine with Various Discharge Angles," The KSFJ Journal of Fluid Machinery, Vol. 16, No. 4, pp. 10~14.
- (3) Yamamoto, K., Muller, A., Farvel, A., Landry, C., and Avellan, F., 2016, "Numerical and experimental evidence of the inter-blade vortex development at deep part load operation of a Francis turbine," In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Vol. 49, No. 8, P. 082005.
- (4) Zuo, Z. G., Liu, S. H., Liu, D. M., Qin, D. Q., and Wu, Y. L., 2015, "Numerical analyses of pressure fluctuations induced by interblade vortices in a model Francis turbine," Journal of Hydrodynamics, Vol. 27, No. 4, pp. 513~521.
- (5) Wack, J. and Riedelbauch, S., 2015, "Numerical simulations of the cavitation phenomena in a Francis turbine at deep part

- load conditions,” In Journal of Physics: Conference Series, Vol. 656, No. 1, P. 012074.
- (6) Kim, S. J., Choi, Y. S., Cho, Y., Choi, J. W., and Kim, J. H., 2019, “Effect of blade thickness on the hydraulic performance of a Francis hydro turbine model,” Renewable Energy, Vol. 134, pp. 807~817.
- (7) IEC 60193 Ed. 2.0 b: 1999, “Hydraulic Turbines, Storage Pumps and Pump-Turbines Model Acceptance Tests,” American National Standards Institute (ANSI), New York.
- (8) ANSYS CFX-18.2, 2018, ANSYS CFX Manager User's Guide, Ansys Inc.
- (9) Kim, S. J., Choi, Y. S., Cho, Y., Choi, J. W., and Kim, J. H., 2018, “A Geometrical Parametric Study on Hydraulic Performance Characteristics of a Small-Scaled Francis Hydro Turbine Model,” The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol. 21, No. 5, pp. 13~20.
- (10) Song, W. G., Choi, Y. S., Lee, K. Y., and Kim, J. H., 2018, “Multi-Objective Optimization for Designing a High-Efficiency and Low-Fluid-Induced-Vibration Single-Channel Pump,” The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol. 21, No. 4, pp. 30~38.
- (11) Jeong, J. and Hussain, F., 1995, “On the identification of a vortex,” Journal of fluid mechanics, Vol. 285, pp. 69~94.