

스파이럴 케이싱 설부의 누설벽이 프란시스 수차의 수력학적 성능에 미치는 영향

김승준^{*,**} · 김용인^{*,**} · 최영석^{*,**} · 이경용^{**} · 안인수^{***} · 조 용^{***} · 김진혁^{*,**†}

Effect of a Leakage Wall on Hydraulic Performance of Spiral Casing Tongue in a Francis Hydro Turbine

Seung-Jun Kim^{*,**}, Yong-In Kim^{*,**}, Young-Seok Choi^{*,**}, Kyoung-Yong Lee^{**},
In-Soo Ahn^{***}, Yong Cho^{***}, Jin-Hyuk Kim^{*,**†}

Key Words : Francis Hydro Turbine(프란시스 수차), Hydraulic Performance(수력학적 성능), Leakage Wall(누설벽), Numerical Analysis(수치해석), Similarity Law(상사법칙), Spiral Casing(스파이럴 케이싱)

ABSTRACT

This paper presents the effect of a leakage wall on the hydraulic performance and internal flow characteristics of spiral casing tongue in a Francis hydro turbine. For hydraulic performance analysis of the Francis hydro turbine, three-dimensional steady state Reynolds-averaged Navier-Stokes calculation was conducted with a shear stress transport turbulence model. The validation of the numerical results was performed by comparing with the experimental results for power and efficiency. The total pressure distributions of each component for the real scale Francis hydro turbine and its scaled model, respectively, were investigated to understand effect of a leakage wall on the spiral casing for the internal flow characteristics at each component. The effect of a leakage wall indicated that it can be applied to design of spiral casing for providing good performance and lower loss in a Francis hydro turbine.

1. 서 론

최근 전 세계적으로 화석연료의 고갈로 인해 유가 상승과 수급 불안이 동반되고 있는 가운데, 특히 우리나라의 경우 화석 에너지 자원이 절대 부족하여 해외 의존도가 매우 높아 이를 경감시키고 에너지 수급을 안정시키기 위해 국내 부존 에너지를 활용하는 것이 매우 중요하다. 신재생 에너지는 화석 에너지 고갈문제와 국제 환경규제에 대비해 적극 개발해야 할 에너지 자원이며, 신재생 에너지 자원 중 수력 에너지는 국내의 자연적인 지역 조건과 조화를 이루고 부존 잠재량이 많아 효율적으로 이용이 가능하다. 수자원을 이용한 수력 발전에 적용되는 수차 중 하나인 프란시스 수차(Francis turbine)는 폭넓은 낙차(H)와 비속도(N_s) 범위에 적용이 가

능하고, 상대적으로 높은 효율과 함께 쉬운 구조적 설계로 다른 수차 타입보다 적용에 유리한 장점을 가지고 있다.^(1~2)

저비속도 영역의 원심식 타입 유체기계의 구성요소 중, 프란시스 수차의 스파이럴 케이싱(spiral casing)은 입구에서 유입되는 유체를 모아서 스테이 베인(stay vane)으로 유도하는 역할을 하며, 형상에 따라 유입되는 유체의 흐름과 내부 유동 특성은 달라진다. 케이싱의 형상에 따라 유체가 유도되는 과정에서 케이싱 내 손실을 유발하기도 하며, 부적절하게 유도된 유체는 스테이 베인으로 유입되는 유동에도 영향을 주어 추가적인 손실을 야기한다. 따라서 스파이럴 케이싱 내 손실을 감소시키고, 유체 흐름의 적절한 유도를 위하여 케이싱의 끝부분 설부에 위치하여 입구쪽으로 유입되는 유체 흐름을 차단하여 순환유동을 막아주는 누설벽 영향을

* 과학기술연합대학원대학교 신에너지 및 시스템기술 전공(Advanced Energy & Technology, University of Science & Technology)

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

*** K-water융합연구원(K-water Institute, Korea Water Resources Corporation)

† 교신저자, E-mail : jinhyuk@kitech.re.kr

파악하는 것은 필수적이다.

이러한 연구 동향의 일환으로, Kim 등⁽³⁾은 삼차원 수치해석을 통해 주거환기용 시로코헨 내 스크롤 케이싱의 내부 유동 및 소음원을 파악하여 내부 유동 특성을 규명하였고, Heo 등⁽⁴⁾은 시로코헨의 스크롤 케이싱 설부 형상과 관련된 변수에 대하여 최적화 설계를 통해 공력 성능을 향상시켰다. 더불어 Zhen 등⁽⁵⁾은 프란시스 수차의 러너 후연 형상, 케이싱 설부 형상 및 스테이 베인 수 등 내부 유로 형상에 따른 내부 유동 특성을 파악하였다.

본 연구에서는 프란시스 수차의 스파이럴 케이싱 내 설부에서의 누설벽에 따른 수력학적 특성을 파악하고자 삼차원 정상상태 Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) 방정식에 의한 수치해석을 수행하였다. 실물 프란시스 수차에 대한 수치해석의 타당성을 검증하기 위해 성능시험을 토대로 해석결과와 비교하였고, 수치해석을 통한 프란시스 수차의 스파이럴 케이싱 내 설부의 누설벽에 따른 유동구조 및 수력학적 성능을 파악하여 내부 유동 특성을 규명하고자 하였다. 더불어 실물 프란시스 수차를 토대로 상사된 모델 수차에 대해서도 누설벽의 영향을 비교 분석하기 위해, 모델 수차에 대해 상사된 정격 운전조건으로 수치해석을 수행하여 성능 및 내부유동을 분석하고자 하였다.

2. 프란시스 수차 사양

본 연구에서는 비속도 330급 프란시스 수차를 대상으로 삼차원 수치해석을 수행하였으며, Fig. 1에 스파이럴 케이싱 및 러너 등 주요 유동 영역에 대하여 삼차원 형상을 도시하였다. 실물 프란시스 수차 설계점에서의 낙차와 유량은 IEC 60193 규격의 낙차 계수와 유량 계수인 식 (1)~(3)를 사용하여 나타내었고, 모델 수차의 경우에는 실물 수차를 토대로 상사를 수행하였으므로 속도, 낙차 및 유량 계수는 같은 값을 나타낸다.⁽⁶⁾ 주요제원은 Table 1에 나타냈으며, 정격 운전조건을 토대로 내부 유동 특성을 분석하였다.

$$\frac{nD}{\sqrt{gH}} \tag{1}$$

Table 1 Design Specifications of a Francis Turbine

Specifications	Real Model	Scaled Model
Specific Speed, Ns	334	334
Speed Factor	0.56	0.56
Head Coefficient	3.18	3.18
Discharge Coefficient	0.65	0.65
Runner Outlet Diameter, D ₂	4.34 m	0.25 m
Runner Blade Number	12	12
Stay Vane Number	20	20
Guide Vane Number	20	20

$$\frac{gH}{n^2 D^2} \tag{2}$$

$$\frac{Q}{nD^3} \tag{3}$$

여기서, g , H , n , D 및 Q 는 각각 중력가속도, 낙차, 회전 속도, 수차의 대표직경 및 유량을 나타낸다.

Fig. 2는 프란시스 수차의 스파이럴 케이싱 내 누설벽의 위치와 형상을 도식화 하고 있다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 설부에서의 누설벽은 스파이럴 케이싱의 끝단과 입구의 케이싱 부분 사이에 위치하고, 설부의 누설벽은 케이싱 내에서 유체의 순환을 막아주는 역할을 한다.

3. 수치해석방법

본 연구에서는 ANSYS 사의 상용 소프트웨어인 ANSYS CFX-17.1을 사용하여 프란시스 수차의 내부 유동장을 정상상태로 가정하여 해석을 수행하였다.⁽⁷⁾ 프란시스 수차의 격자생성을 위해 러너, 스테이 베인, 가이드 베인 및 그 외 영역에서 각각 Turbo-Grid와 CFX-ICEM을 사용하였다. 수치해석의 경계조건 정의, 유동해석 및 결과정리는 각각 CFX-Pre, CFX-Solver 및 CFX-Post를 사용하여 수행하였다.

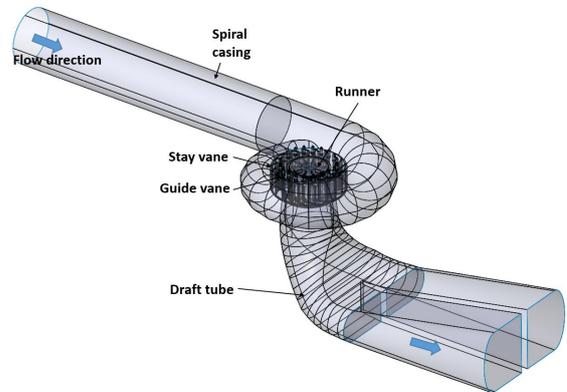


Fig. 1 3D modeling view of a Francis hydro turbine

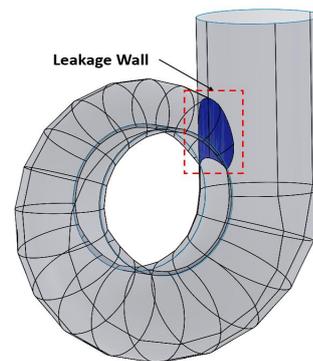


Fig. 2 The leakage wall of the tongue in a spiral casing

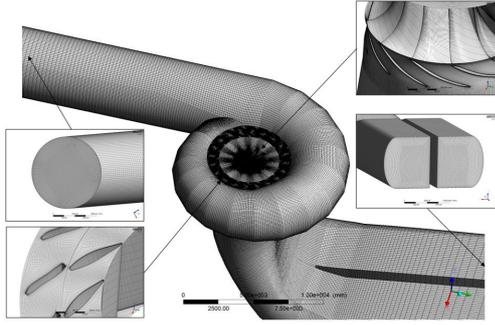


Fig. 3 Computational grids of Francis hydro turbine

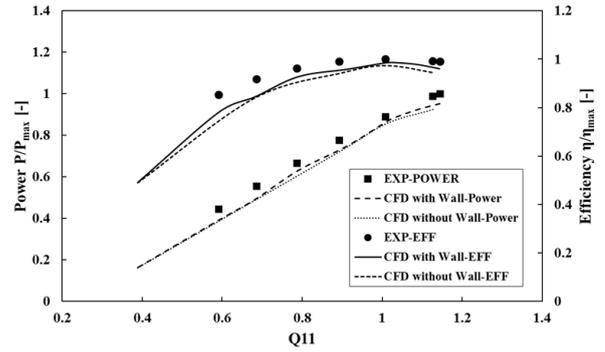


Fig. 5 Performance of CFD and experimental results of a Francis hydro turbine

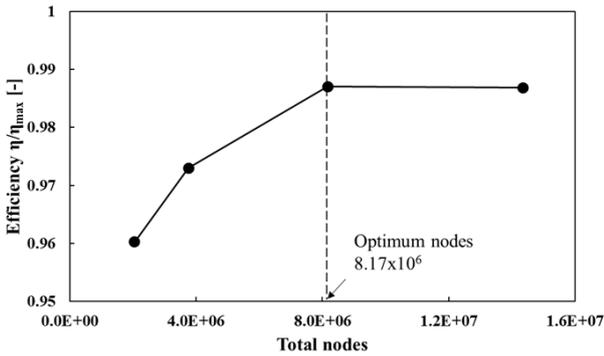


Fig. 4 Results of grid dependency test

정상상태의 수치해석 시 사용된 지배방정식들은 유한체적법으로 이산화 되었으며, 프란시스 수차 해석의 작동유체는 25°C 물로 하였다. 입구의 경계조건은 균일한 상태의 전압력을 주었으며, 출구조건으로는 정압력 조건을 주었다.

수치해석을 위해 해석대상인 프란시스 수차에 대해 동일한 낙차 조건과 여러 가이드 베인 개도를 적용하여, 정격 유량 조건 외 저유량 조건에 대한 해석을 수행하였다. 대부분의 유체기계는 해석 시 계산시간의 단축과 수렴성 향상을 위해 인접하는 두 블레이드 사이의 유동장이 회전방향에 대해 주기적으로 형성되어 있다고 가정하여 하나의 유로에 대해서 주기조건을 적용하여 해석을 수행하지만, 본 해석대상인 프란시스 수차는 스테이 베인과 확장되어지는 스파이럴 케이싱 사이에서 발생하는 내부 유동의 상호작용에 의해 주기적이라고 가정될 수 없기 때문에 러너, 스테이 베인 및 가이드 베인 내 모든 블레이드를 포함한 전 영역에 대하여 해석을 수행하였다.

정상상태의 수치해석 시 회전하는 러너와 정지상태의 가이드 베인 및 드래프트 튜브(draft tube) 사이의 경계면은 격자면의 계산값을 그대로 정지좌표계에 입력값으로 사용하는 방식인 Frozen-rotor 방식을 적용하였다. 해석 시 사용된 난류모델로는 SST (Shear Stress Transport)모델을 사용하였다. 이 모델은 유동박리 등의 예측에 적절하며, 자유흐름 영역뿐만 아니라 벽면 인근 영역 해석에 정확성을 보이는 모델로서 다른 2-방정식 난류모델들에 비해 유체기계해석에 적절한 모델이다.⁽⁸⁾

회전하는 러너 블레이드와 스테이 베인 및 가이드 베인 표면 인근에는 O형 격자계를 사용하였고, 그 외의 스파이럴 케이싱 및 드래프트 튜브 영역에는 벽면 근처에는 H형 격자계를 사용하였다. 수치해석 시 프란시스 수차 모델 러너의 벽 근처 영역에서 저 레이놀즈 전단이송모델을 적용하기 위해 첫 번째 격자점의 $y^+ \leq 2$ 를 유지하도록 하였다. 프란시스 수차 전 영역에 대하여 육면체 격자계로 구성하였으며, 격자계 구성은 Fig. 3에 나타난 바와 같다.

4. 결과 및 고찰

4.1 수치해석결과의 검증

프란시스 수차의 삼차원 수치해석을 수행하기 위한 전 단계로서 최적의 격자계를 구성하고자 격자 의존성시험을 수행하였다. 이 시험은 총 370만개에서 1,430만개 사이의 격자수들에 대해 수행하였으며, 그 결과 계산에 사용될 최적의 격자수는 총 810만개로 결정되었다. Fig. 4는 프란시스 수차의 효율에 대한 격자의존성 시험 결과를 보여주고 있다. 상사된 프란시스 수차 모델의 경우에도 수치해석의 격자계 구성은 실물 수차와 같은 방법으로 구성하여 해석을 수행하였다.

수치해석결과의 타당성을 검증하기 위하여 정상상태의 RANS 해석결과와 성능시험의 결과를 비교하였다. Fig. 5의 성능곡선에서 볼 수 있는 바와 같이 수치해석결과와 성능시험 결과는 전반적으로 경향이 잘 일치함을 보여주고 있다.

특히, 최대효율지점에서 예측한 성능의 경향이 비교적 정확하기 때문에 본 연구의 수치계산은 타당성이 있다고 볼 수 있다. 여기서 출력 및 효율은 최대값으로 나누어 무차원화된 값으로 나타내었으며, 유량은 Q11 값으로 식 (4)을 사용하여 나타내었다. 여기서, Q, H 및 D는 식 (1)~(3)에서 정의하는 바와 같다.

$$\frac{Q}{\sqrt{HD^2}} \quad (4)$$

또한 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 실물 수차 수치해석결과에

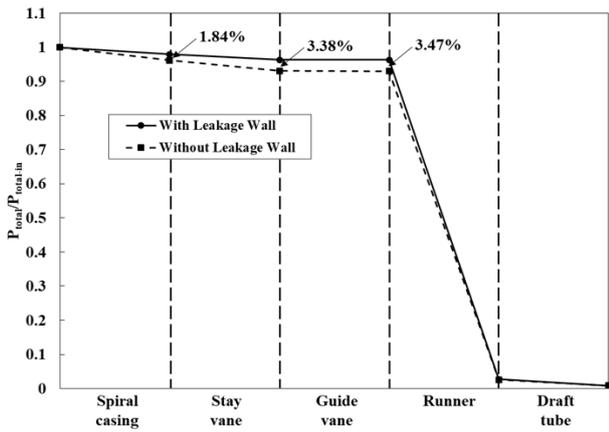


Fig. 6 Total pressure distribution on each component of the real scale Francis hydro turbine

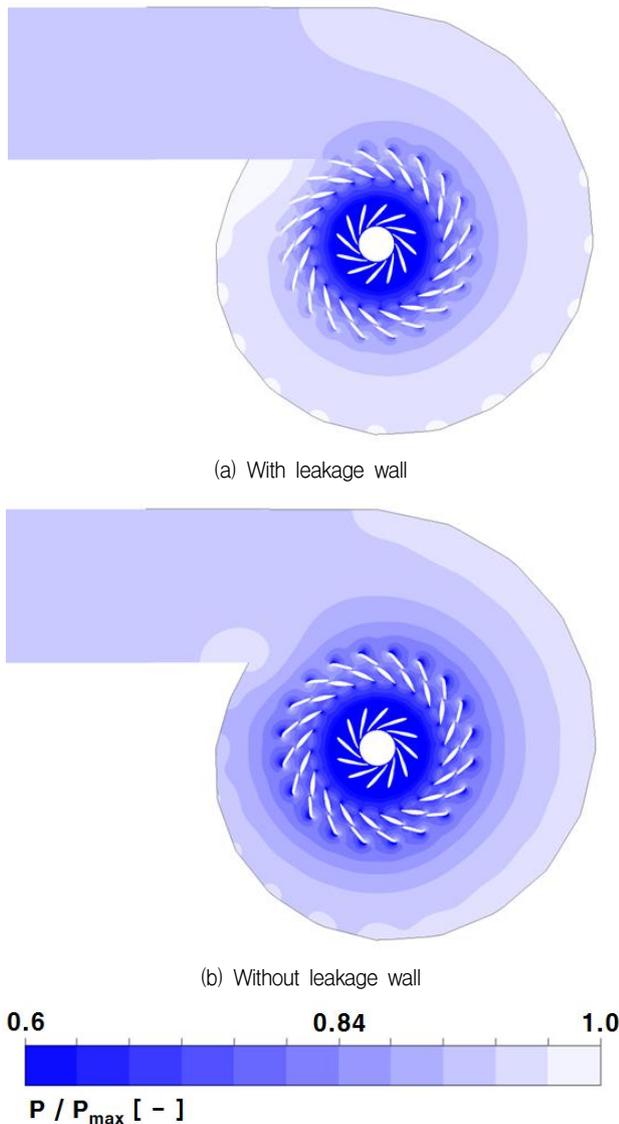


Fig. 7 Pressure distribution on mid-span of spiral casing of the real scale Francis hydro turbine

서 누설벽에 따른 성능 차이는 스파이럴 케이싱 설부의 누설벽에 있을 때 전반적으로 출력과 효율이 더 높게 나타났다. 그러나 저유량 범위에서는 상대적으로 프란시스 수차 성능에 대한 누설벽의 영향이 적은 것으로 나타났다.

4.2 수치해석을 통한 실물 수차의 누설벽 영향 분석

본 연구에서는 정격 운전조건에서의 정상상태 삼차원 해석을 수행하여 스파이럴 케이싱 설부의 누설벽에 따른 각 주요 구성요소부품에서의 전압력 분포를 확인하였다. Fig. 6은 누설벽의 장착 유무에 따른 프란시스 수차 주요 구성요소의 전압력 분포를 보여주고 있다. Fig. 6을 살펴보면 스파이럴 케이싱 설부의 누설벽 장착 유무에 따라 각 주요 구성요소에서 전압력 차이가 발생하는 것을 볼 수 있다. 특히 누설벽의 존재 여부에 따라 스파이럴 케이싱 출구에서 약 1.8% 정도의 전압력 차이가 발생하는 것을 확인 할 수 있으며, 유입부의 손실로 인해 스테이 베인과 가이드 베인에서도 점차적으로 손실이 증가하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 7은 설부에서의 누설벽 장착 유무에 따른 실물 수차의 스파이럴 케이싱 내 중간 평면에서의 압력 분포를 보여주고 있다. Fig. 7(a)에서 보는 바와 같이 스파이럴 케이싱 끝단에서 입구 영역으로 들어가는 유체를 누설벽이 차단함으로써, 유입부에서부터 케이싱 벽면을 따라 전반적으로 압력을 올려주는 역할을 하는 것을 볼 수 있다. 이는 Fig. 6의 주요 구성요소의 전압력 분포에서 볼 수 있듯이 스파이럴 케이싱에서의 압력이 전반적으로 상승함에 따라 결과적으로 대략 1.8% 정도의 전압력 손실이 줄어든 것으로 확인할 수 있다. 그에 반해 누설벽이 없는 스파이럴 케이싱은 내부순환흐름이 발생하여 결과적으로 누설벽이 있는 케이싱과 비교하여 볼 때 케이싱 전체 영역에 대해 상대적으로 압력이 낮아지는 것을 확인 할 수 있다.

스파이럴 케이싱 내 누설벽에 따른 케이싱 단면의 압력 분포를 확인하기 위해 Fig. 8(a)와 같이 유체의 유입 방향에 따른 4개의 단면 위치에서의 압력 분포를 확인하였다. Fig. 8(b)에서 누설벽이 장착된 케이싱 내 단면에서의 압력 분포는 유체의 흐름 방향으로 진행하여 누설벽 인근으로 갈수록 압력이 상대적으로 상승하는 것을 확인할 수 있다. 반면, Fig. 8(c)에서 누설벽이 없는 케이싱은 유체유입 방향으로의 단면에서 압력상승이 거의 없고, 특히 누설벽과 가까운 단면 'D'의 압력 분포를 누설벽이 있는 단면 'D'에서의 압력 분포와 비교하여 볼 때 상대적으로 낮은 압력 분포를 나타내는 것을 확인 할 수 있다. 이는 Fig. 6에 나타난 스파이럴 케이싱 출구 쪽의 약 1.8% 전압력 분포 차이의 정량적 손실을 잘 보여주고 있는 것으로 볼 수 있다.

Fig. 9은 스파이럴 케이싱 중간 평면 외형의 벽면에 따른 벽압력 분포를 보여주고 있다. 여기서 벽압력 분포는 유입면의 압력값으로 나누어 무차원화 하였다. Fig. 9(b)에서도 확

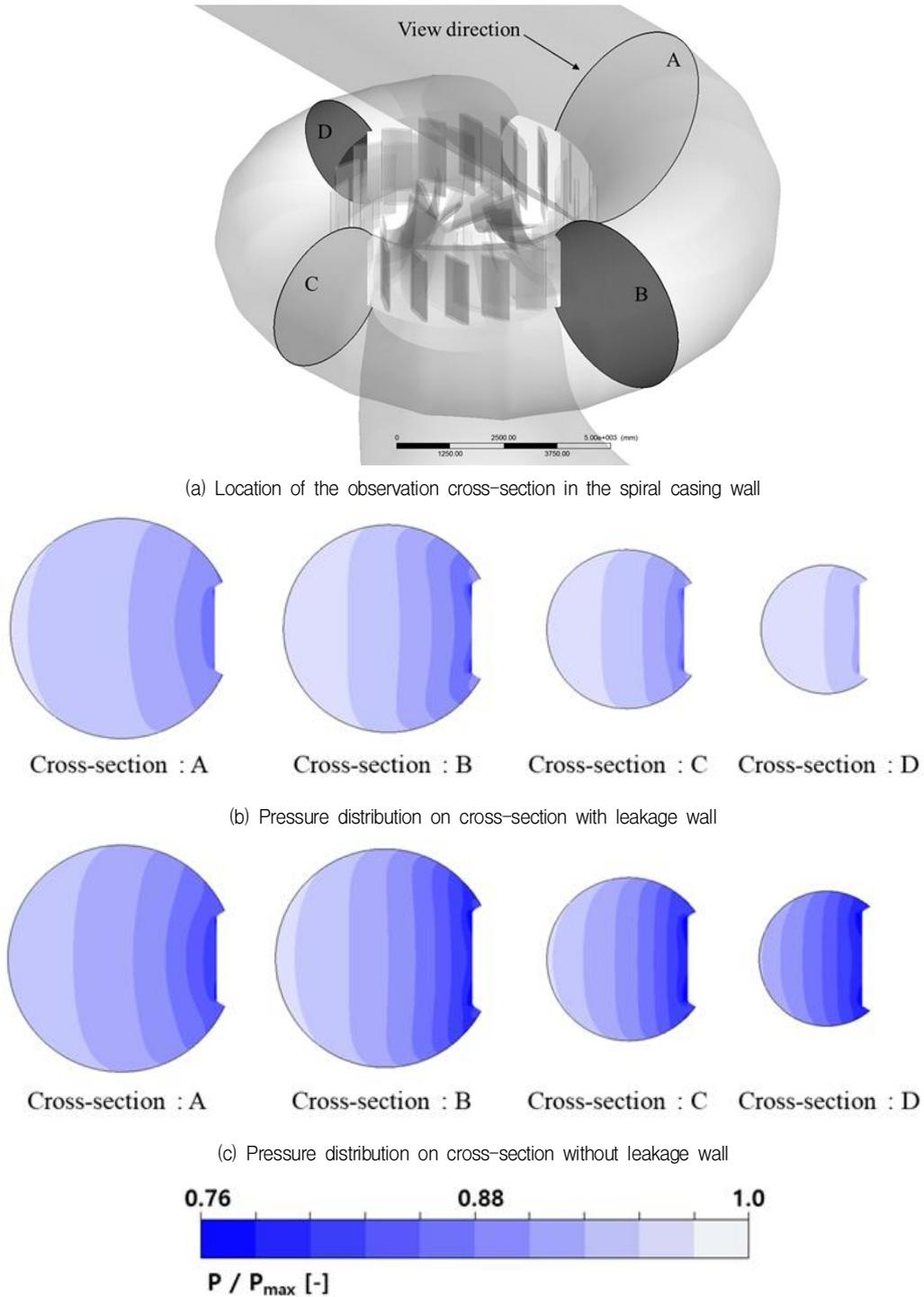


Fig. 8 Pressure distribution on cross-section the real scale Francis hydro turbine

인할 수 있듯이 누설벽이 설치된 스파이럴 케이싱의 벽압력 분포는 유입부에서부터 원활히 압력이 상승되는 것을 볼 수 있는데 반해, 누설벽이 없는 스파이럴 케이싱의 경우에는 설부 위치로 갈수록 벽압력 분포가 줄어드는 것을 볼 수 있다. 한편, 스파이럴 케이싱 벽면에 따른 벽압력 분포가 다소 완만하지 못하고 톱니 모양같이 불안정한 것은 Fig. 7에 나타난 바와 같이 스파이럴 케이싱 외형의 형태가 벽면을 따라

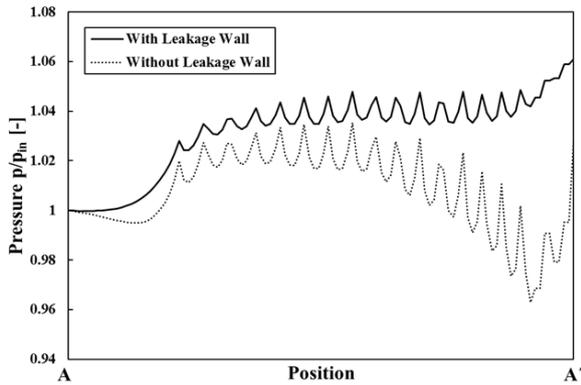
만곡진 형상이 아니고 제작의 단가를 고려하여 철판을 각 부위마다 용접을 하여 만곡지게 제작하였기 때문이다.

4.3 수치해석을 통한 모델 수차의 누설벽 영향 분석

본 연구에서는 상사된 모델 수차 내 스파이럴 케이싱 설부의 누설벽에 따른 성능 및 내부유동 특성을 분석하기 위해



(a) Location of the observation line on the spiral casing wall



(b) Wall pressure distribution along the observation line

Fig. 9 Pressure distribution on mid-span of spiral casing of the real scale Francis hydro turbine

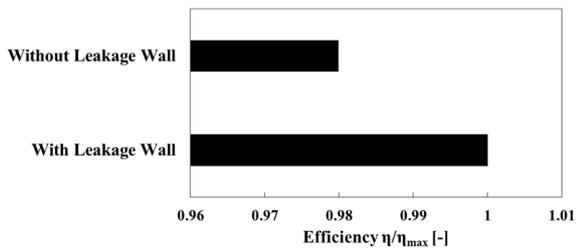


Fig. 10 Efficiency comparison of the down scaled Francis hydro turbine model

정격 운전조건에서 정상상태의 삼차원 해석을 수행하였다.

Fig. 10은 상사된 모델 수차의 정격 운전조건에서의 수차 해석 결과로서, 누설벽의 설치 유무에 따른 효율을 비교하고 있다. Fig. 10에서 볼 수 있는 바와 같이 모델 수차에서 누설벽이 없을 때 상대적으로 약 2% 정도의 낮은 효율을 보였고, 이는 실물 수차에서 나타난 바와 같이 상사된 모델 수차에서도 스파이럴 케이싱 설부의 누설벽에 따른 영향을 확인할 수 있다.

실물 수차의 전압력 분포 결과와 같은 방법으로 모델 수차에 대해서도 각 구성요소에 대하여 전압력 분포를 확인하였으며, 그 결과는 Fig. 11에 나타난 바와 같다. 그림에서 볼 수

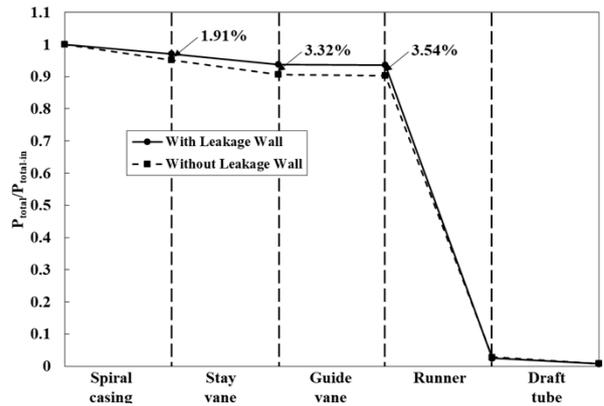
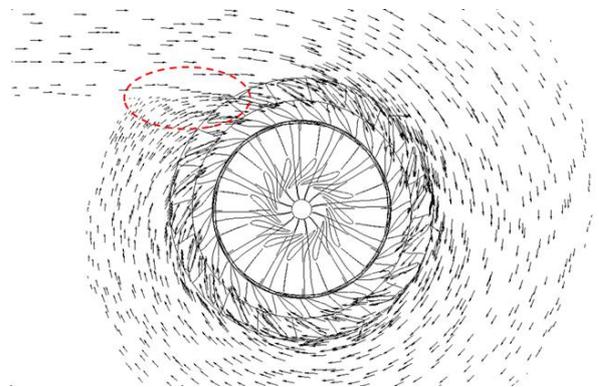
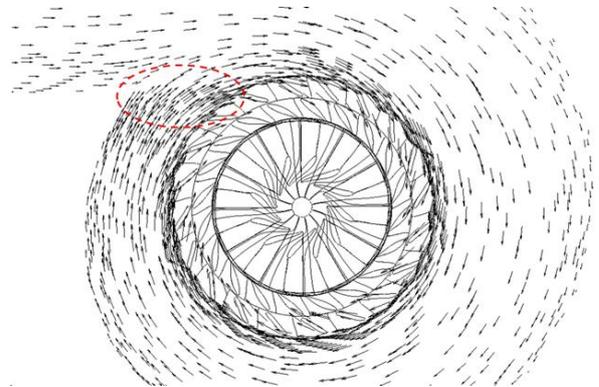


Fig. 11 Total pressure distribution on each component of the down scaled Francis hydro turbine model



(a) With leakage wall

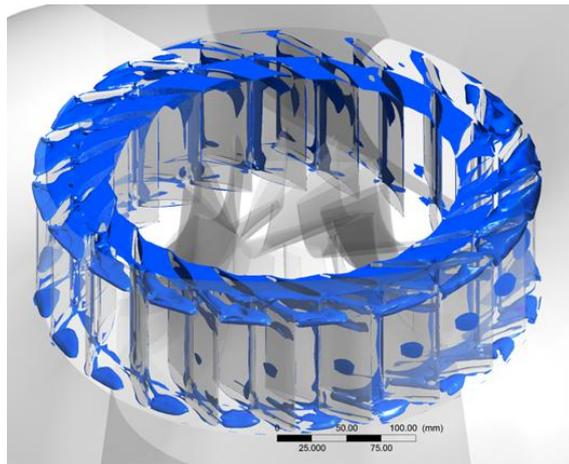


(b) Without leakage wall

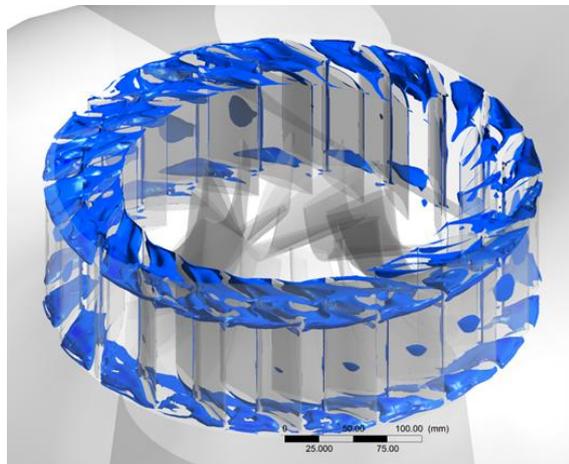
Fig. 12 Velocity vector distribution on mid-span of the spiral casing of the down scaled Francis turbine

있듯이 모델 수차의 전압력 분포의 경향도 실물 수차와 유사하게 나타난 것을 볼 수 있다. 또한, 모델 수차의 각 구성요소 구간에서의 전압력 분포 차이도 실물 수차와 유사한 것을 확인할 수 있다. 이는 스파이럴 케이싱 내 누설벽이 실물 및 모델 수차에 대해 유사한 수력학적 영향을 미치고, 이에 따라 비슷한 전압력 손실 경향을 나타낸 것으로 볼 수 있다.

Fig. 12는 스파이럴 케이싱 중간 평면에서의 속도 벡터 분포를 보여주고 있다. 누설벽 장착 여부에 따라 스테이 베인의



(a) with leakage wall



(b) without leakage wall

Fig. 13 Iso-surfaces of 0.5 m/s in the down scaled Francis turbine model

유입부로 들어가는 속도 벡터의 방향성은 대체로 유사하나, Fig. 12(b)에서 보는 바와 같이 누설벽이 없는 모델의 경우에는 설부를 지나 스파이럴 케이싱의 유입부로 누설 유동이 재순환하는 것을 볼 수 있다. 이로 인해 앞서 설명한 바와 같이 스파이럴 케이싱 내 압력이 전반적으로 감소하여 결국 손실을 야기하고 효율 저하에 영향을 주는 것으로 볼 수 있다.

Fig. 13는 스파이럴 케이싱을 지나 스테이 베인과 가이드 베인에서의 등속도면 분포를 보여주고 있다. 여기서 등속도면의 유속은 0.5 m/s로 저속영역을 나타내므로 이를 통해 유동 박리 영역임을 간주 할 수 있다. Fig. 13(a)를 살펴보면 누설벽이 장착된 모델 내 스테이 베인의 허브 부근에서 박리 영역이 전반적으로 감소된 것을 볼 수 있으며, 특히 설부 영역 내 누설벽 인근에서 박리 영역이 현저히 줄어든 것을 확인할 수 있다. 이는 누설벽 장착으로 인해 설부 인근의 유동이 누설되지 않고 원활히 유입됨에 따라 나타나는 결과로 여겨지며 그로 인해 전반적으로 전체 손실 저감에 기여한 것으로 볼 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 스파이럴 케이싱 설부에서의 누설벽이 프란시스 수차의 수력학적 성능에 미치는 영향을 파악하고자 정상상태 삼차원 RANS 해석을 수행하였다. 성능시험을 토대로 수치해석의 타당성을 검증하기 위하여 정상상태의 RANS 해석결과와 성능시험 결과를 비교하였다. 실물 프란시스 수차의 정격 운전조건에서 정상상태의 삼차원 해석을 수행하여 누설벽이 없을 때, 유입부인 스파이럴 케이싱 내 전압력 분포 차이를 통해 수차에 대한 전체 손실량이 증가하여 결국 성능이 감소하는 것을 볼 수 있었다. 특히, 누설벽 장착에 따라 스파이럴 케이싱 내 전반적인 압력이 상승함에 따라 손실 성분의 저감과 함께 수차의 출력이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 실물 수차를 토대로 상사된 모델 수차의 누설벽에 따른 영향을 확인하였고, 그에 따른 결과로서 모델 수차에서도 누설벽이 없을 때 전체 전압력 차이에 의한 손실량이 증가하고, 이에 따라 성능이 감소함을 확인할 수 있었다. 특히, 누설벽의 영향은 실물 및 모델 수차에 대해 유사한 수력학적 영향을 미쳤으며, 이로 인해 비슷한 경향의 전압력 분포를 나타내는 것을 볼 수 있었다. 본 연구를 통해 스파이럴 케이싱 설부의 누설벽에 따른 성능 및 내부 유동 특성을 관찰 할 수 있었으며, 누설벽 장착에 따라서 전압력 분포 차이에 의해 손실이 감소하고 성능이 향상됨을 확인 하였다. 본 연구의 결과를 토대로 본다면 향후 프란시스 수차의 고효율 설계를 위해서는 스파이럴 케이싱 설부의 누설벽 유무는 설계인자로서 고려될 필요가 있다.

후 기

본 연구는 국토교통부 플랜트 연구개발 사업의 연구비 지원 (과제번호 17IFIP-B128598-01)에 의해 수행 되었습니다.

References

- (1) 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.
- (2) Chen, Z., Singh, P. M., and Choi, Y. D., 2016, "Francis Turbine Blade Design on the Basis of Port Area and Loss Analysis," *Energies*, Vol. 9, No. 3, P. 164 (12 pages).
- (3) Kim, J. H., Song, W. S., Lee, S. B., and Kim, K. Y., 2010, "A Study on Aerodynamic and Noise Characteristics of a Sirocco Fan for Residential Ventilation," *The KSFJ Journal of Fluid Machinery*, Vol. 13, No. 2, pp. 18~23.
- (4) Heo, M. W., Kim, J. H., Seo, T. W., and Kim, K. Y.,

- 2016, "Aerodynamic and Aeroacoustic Optimization for Design of a Forward-curved Blades Centrifugal Fan," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, Vol. 230, No. 2, pp. 154~174.
- (5) Chen, Z., Wei, Q., Singh, P. M., and Choi, Y. D., 2015, "Internal Flow Characteristics of a Francis Hydro Turbine Model by Internal Flow Passage Shapes," The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol. 18, No. 5, pp. 19~25.
- (6) IEC 60193 Ed. 2.0 b: 1999, "Hydraulic Turbines, Storage Pumps and Pump-Turbines Model Acceptance Tests," American National Standards Institute (ANSI), New York.
- (7) ANSYS CFX-17.1 Solver Theory, 2017, Ansys Inc.
- (8) Kim, J. W., Suh, J. W., Kim, J. H., Choi, Y. S., Lee, K. Y., and Kim, J. H., 2017, "Effect on the Efficiency of a Counter-Rotating Pump-Turbine with the Variation of Blade Angle Using Design of Experiment (2k Factorial Design)," New & Renewable Energy, Vol. 13, No. 1.