◎ 논 문
◎ Original Paper

DOI: http://dx.doi.org/10.5293/kfma.2019.22.5.005
ISSN (Print): 2287-9706

펌프터빈의 터빈 모드에서 흡출관 내 선회수에 따른 세차 와류 특성

김승준[*,**] · 서준원[**] · 최영석[*,**] · 박준관[***] · 박노현[****] · 김진혁[*,**†]

Precessional Vortex Characteristics according to the Swirl Number in the Draft tube at Turbine Mode of a Pump-Turbine

Seung-Jun Kim[*,**], Jun-Won Suh[**], Young-Seok Choi[*,**],
Jun-Gwan Park[***], No-Hyun Park[****], Jin-Hyuk Kim[*,**†]

Key Words : Pump-turbine(펌프터빈), Turbine mode(터빈 모드), Draft tube(흡출관), Swirl number(선회수), Precessional vortex(세차 와류), Numerical analysis(수치해석적 분석)

ABSTRACT

The precessional vortex is usually developed in the draft tube during the operations at the turbine mode of a pump turbine with low flow-rate conditions as the off-design conditions. This vortex causes pressure fluctuation and instability for the operation of the pump turbine system, which results in system failure. The development of the precessional vortex is related to the strength of the swirl at the runner outlet with low flow-rate conditions. In this study, the definition of the swirl number was used to investigate the influence of the swirl intensity on the precessional vortex characteristic at the draft tube. Accordingly, three-dimensional steady- and unsteady-state Reynolds-averaged Navier-Stokes calculations were performed with a shear stress transport turbulence model and a two-phase flow analysis to observe the internal flow and unsteady pressure characteristics according to the precessional vortex. The precessional vortex was well captured in the draft tube cone within the specific range of swirl numbers. This vortex region showed the complicated internal flow and affected the higher unsteady pressure characteristics on the wall of the draft tube cone.

1. 서 론

과거 양수발전시스템은 전력수요가 낮은 경부하 시간대의 유휴전력을 이용하여 하부 댐의 물을 상부 댐으로 이송시켜 에너지를 저장한 후, 전력수요가 높은 첨두부하 시간에 방류하여 발전하는 방식으로 운전되었다. 특히, 빠른 기동 및 신속한 부하 증감발 운전 특성으로 비상전력을 신속히 공급하는 역할로 운전되고 있었으나, 최근에는 간헐성 신재생 에너지원인 태양광 및 풍력 발전 등의 계통 유입으로 안정적인 전력 공급을 위해 전력 계통 백업과 주파수 조정이 더 큰 역할로 대두되고 있다. 이러한 양수발전의 운전 환경 변화로 펌프터빈은 복잡한 유동 및 압력이 유발되는 탈설계점의 운전이 지속되고 있으며, 이는 잦은 고장으로 인한 시스템의 비상정지 발생 등 설비의 수명감소로 이어지고 있다.[1~3]

양수발전용 펌프터빈의 터빈 모드는 탈설계점의 운전 조건에서 복잡한 유동 구조 및 비정상 압력 특성을 나타내며, 특히 저유량 운전 조건에서는 흡출관(Draft tube) 내 세차 와류(Precessional vortex)가 발생하기도 한다. 이러한 세차 특성을 가진 와류는 흡출관 내 러너의 출구에서 발생하며, 러너 콘의 중심선 축으로 그 둘레를 회전하는 와류로, 러너 회전 주파수의 약 0.2~0.4배의 주파수를 나타낸다.[4] 또한, 압력 유발의 원천으로 시스템과 공진을 일으키는 경우, 토크

* 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)
*** 한국수력원자력(주) 중앙연구원(Hydropower Design & Technology Group, Korea Hydro & Nuclear Power Co. Ltd)
**** ㈜금성이앤씨(Kumsung Engineering & Construction Co. Ltd)
† 교신저자, E-mail : jinhyuk@kitech.re.kr

The KSFM Journal of Fluid Machinery: Vol. 22, No. 5, October 2019, pp.05~12(Received 02 May. 2019; revised 13 Aug. 2019; accepted for publication 02 Sep. 2019)
한국유체기계학회 논문집: 제22권, 제5호, pp.05~12, 2019(논문접수일자: 2019.05.02, 논문수정일자: 2019.08.13, 심사완료일자: 2019.09.02)

와 출력의 맥동을 유발시켜 성능을 저하시킬 뿐 만 아니라 진동 및 소음을 발생시켜 펌프터빈 시스템의 운전을 불안정하게 한다. 따라서 최근 요구되어지고 있는 펌프터빈의 안정적인 운전 영역 확장 및 신뢰성 향상을 위해, 저유량 운전 조건에서 발생하는 유동 및 압력 특성에 대한 이해와 검토는 필수적이다.

이와 관련된 연구로서, Wang 등[5]은 펌프터빈의 저부하 조건에서 흡출관 내 와류에 대한 특성을 일직선 및 엘보(elbow)타입 형상에 대해 Very Large Eddy Simulation (VLES) 및 Shear Stress Transport (SST) 난류 모델을 사용한 Reynolds-averaged Navier Stokes (RANS) 해석에 대한 수치해석적 분석을 통해 비교 및 검토하였으며, 또한 와류 억제를 위한 흡출관 내 물 제트 분사에 대한 영향성도 함께 규명하였다. Liao 등[6]은 펌프터빈의 정상 및 비정상 상태 수치해석 시 작동 유체인 물의 압축성 고려 여부의 비교를 통해, 터빈 모드의 저유량 운전 조건에서 러너 및 흡출관의 내부 유동 및 압력 맥동 특성의 차이를 분석하였다. Kirschner 등[7]은 펌프터빈 모델의 저유량부터 고유량 운전 조건에서 흡출관 내부의 와류 구조의 유동 가시화 및 압력 특성에 대해 모델 시험을 통해 확인하였으며, 수치해석적 분석으로 각 운전조건에서 나타나는 흡출관 내 와류에 따른 압력 맥동 특성 및 반경방향 힘에 대한 연관성을 규명하였다. 이와 같이 최근 펌프터빈의 터빈 모드 내 저유량 운전 조건에서 흡출관 내 발생하는 와류의 특성에 대한 다양한 연구가 수행되고 있지만, 펌프터빈의 저유량 범위 내에서 유량에 따른 와류의 발생 범위와 그에 따른 내부유동 특성, 와류의 크기 및 압력 맥동 등을 체계적으로 분석하는 연구는 수행되고 있지 않다.

본 연구에서는 양수발전용 펌프터빈의 터빈 모드 내 저유량 운전 범위에서 선회수(Swirl number, S) 정의를 적용하여, 선회수에 따른 세차 와류의 특성을 파악하기 위해 2상 유동(물과 증기) 3차원 정상 및 비정상 상태에 대한 RANS 해석을 수행하였다. 수치해석은 펌프터빈의 터빈 모드 최고 효율점(Best efficiency point, BEP)의 낙차 조건과 가이드 베인 각도에 따른 여러 유량 조건을 적용하여 흡출관 유로 내 유동 구조 및 비정상 압력 특성을 규명하고자 하였다.

2. 펌프터빈 제원(터빈 모드)

본 연구에서는 터빈 모드에서 비속도 120급 펌프터빈에 대해 삼차원 수치해석을 수행하였으며, Fig. 1에 펌프터빈의 주요 유동 영역 및 유동 방향에 대해 삼차원 형상을 도식화하였다. Table 1에 펌프터빈의 주요 제원을 나타내었고, 비속도는 식 (1)을 사용하여 나타냈으며, 에너지, 회전속도 및 유량 계수는 IEC60193 규격에 제시된 무차원 계수인 식(2) ~ (4)를 사용하여 나타내었다.[8]

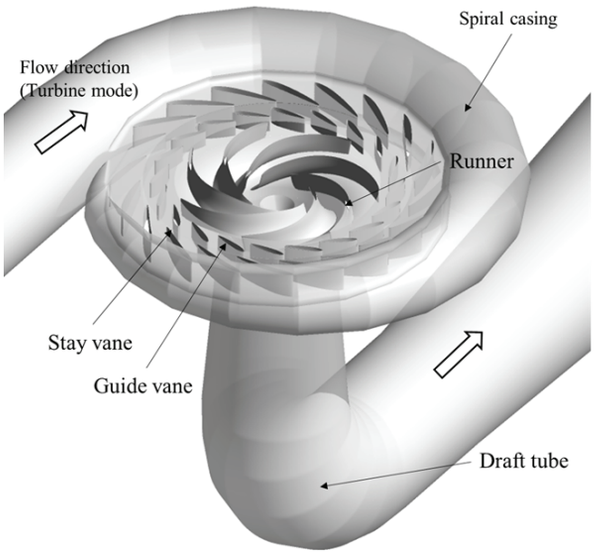


Fig. 1 Three-dimensional (3D) model view of a pump-turbine

Table 1 Design specifications of a pump-turbine

Specifications	Turbine mode
Specific speed, Ns	120
Energy coefficient	14.91
Speed factor	0.25
Discharge coefficient	0.81
Runner outlet diameter, D_2	2.78 m

$$\frac{n\sqrt{P}}{H^{\frac{5}{4}}} \tag{1}$$

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

$$\frac{nD}{\sqrt{gH}} \tag{3}$$

$$\frac{Q}{nD^3} \tag{4}$$

여기서, n, P, H, E, D 및 Q는 각각 회전속도, 출력, 낙차, 에너지, 대표직경 및 유량을 나타낸다. 펌프터빈 러너의 날개는 7매이며, 가이드 베인(Guide vane) 및 스테이 베인(Stay vane)은 각각 20매로 구성되어있다.

3. 수치해석방법

본 연구에서는 펌프터빈의 터빈 모드 내 비압축성 내부 유동장에 대한 정상 및 비정상 수치해석을 수행하기 위해, ANSYS사의 상용 소프트웨어인 ANSYS CFX-18.2를 사용하였다.[9] 펌프터빈의 러너 블레이드에 대한 형상 정의는 Blade-Gen을 사용하였으며, 격자 생성은 Turbo-Grid 및 ICEM-CFD, 수치해석을 위한 경계 조건 설정은 CFX-Pre,

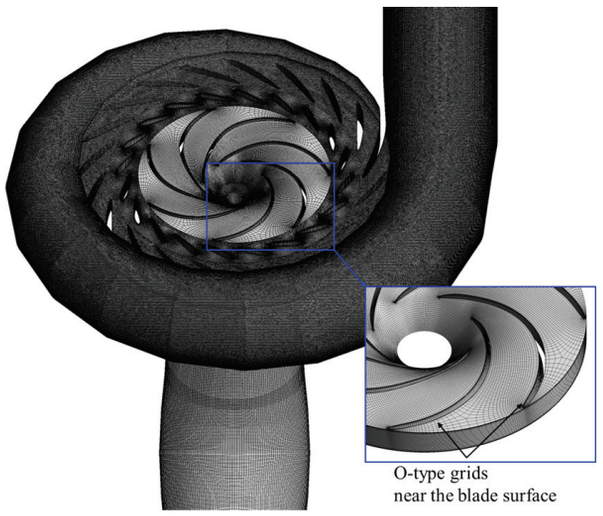


Fig. 2 Computational grids of a pump-turbine

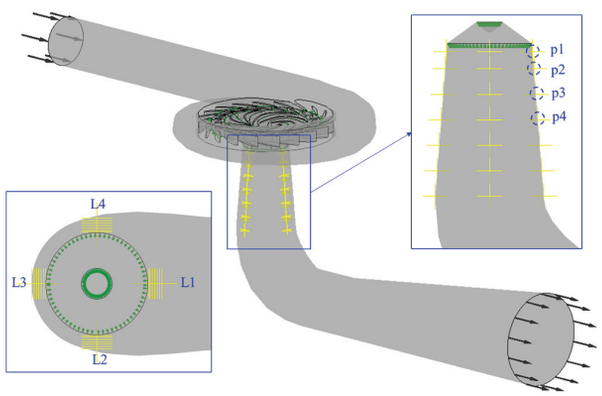


Fig. 3 Unsteady pressure measuring points on the draft tube cone

그리고 CFX-Solver와 CFX-Post를 사용하여 각각 유동 해석 및 결과 분석을 수행하였다.

펌프터빈의 내부유동은 3차원 비압축성 유체로 가정하고 정상 및 비정상 상태에 대한 RANS 방정식을 이용하여 유동해석이 수행되었고, 유한체적법(FVM)으로 이산화된 지배방정식을 사용하여 수치해석을 계산하였다.

일반적으로 축을 중심으로 회전하며 축대칭 구조를 가진 유체기계는 해석 시간 단축과 수렴성의 향상을 위해 날개 1매의 유로에 주기조건(Periodic condition)을 설정하여 해석을 수행하지만, 펌프터빈의 스파이럴 케이싱(Spiral casing)은 터빈모드 유동방향으로 입구에서 점차 축소되어지는 유동 단면 특성과 케이싱 설부(Casing tongue)의 형상이 스테이 베인과 스테이베인 사이에서 내부유동의 상호작용이 주기적이라고 가정될 수 없는 이유로 러너 블레이드 등 전 영역을 수치해석에 적용하였다.[10]

경계조건 설정을 위한 작동 유체는 2상 유동 해석을 위해 25℃ 물과 증기(Vapor)를 사용하였고, 캐비테이션 모델은 증기의 발생과 응축을 제어하는 반응 속도식을 기반으로, 물의 기포(Bubble)의 발생 과정을 묘사하는 Reyleigh Plesset 모델을 사용하였다.

펌프터빈의 입구와 출구는 상부 및 하부 저수지의 수위를 고려한 전압력과 정압력 조건을 각각 부여하였다. 난류모델은 유동박리를 잘 예측하며 또한 자유 흐름 영역과 벽면 근처 영역의 해석에 정확성을 보이는 SST 모델을 사용하였다.[11,12] Fig. 2는 펌프터빈의 격자계 구성을 나타내며, 스파이럴 케이싱과 스테이 베인은 사면체 격자로 이루어져 있고, 그 외의 영역은 육면체 격자로 이루어져 있다. 상대적으로 복잡한 유동구조를 가지는 러너 블레이드 날개 표면 인근에는 벽함수 처리 조건을 적용하기 위해 O형 격자계를 사용하여 첫 번째 격자점에서 $y+\leq 100$을 유지하도록 하였다.[3]

펌프터빈의 정상 상태 수치해석 시 회전자와 고정자 사이의 경계면 조건은 경계면을 통해 원주방향으로 평균된 유동값을 입력하는 Stage 방식을 사용하였고, 비정상 상태 해석에는 회전자와 고정자의 유로사이의 실제 순간적인 유동에 대한 상호작용을 예측하는 Transient-Rotor-Stator 방식을 적용하여 해석을 진행하였다. 비정상 상태 수치해석의 수렴성 향상 및 해석 시간의 단축을 위해, 정상 상태의 결과를 초기 값으로 부여하였다. 러너 1회전 시간은 t_{rev}=0.16667s로, 비정상 수치해석을 위한 전체 시간(Total time)과 타임스텝(Time step)은 각각 $5t_{rev}$ 및 $0.000833t_{rev}$로 설정하여 해석을 수행하였으며, 수렴성의 향상을 위한 반복횟수(Loops coefficient)는 5회로 설정하였다.

Fig. 3은 펌프터빈의 비정상 상태 해석 시 나타나는 내부유동 및 세차 와류 특성에 따른 흡출관 벽면의 비정상 압력 특성을 확인하기 위한 압력 측정 위치를 나타내고 있다. 흡출관 cone 벽면에 일정한 간격으로 4개의 방향(L1~L4)에 대해 측정점을 적용하였으며, 본 연구에서는 p1~p4에 대한 비정상 압력 특성을 비교 및 분석 하였다

4. 결과 및 검토

4.1 수치해석결과의 타당성 검토

펌프터빈의 3차원 수치해석을 위한 최적의 격자계를 구성하고자, Fig. 4와 같이 격자 의존성 시험을 수행하였다. 이 시험에서는 총 260만개에서 980만개 사이의 격자계에 대해 비교 및 검토하였으며, 그 중 최적의 격자계로 총 749만개의 격자수를 결정하였다.

Fig. 5는 수치해석의 타당성을 검증하기 위해 정상 및 비정상 상태 RANS 해석 결과와 성능시험 결과의 비교를 나타내고 있으며, 이때, 비정상 해석 결과는 마지막 1회전에 대한 평균값을 사용하였다. 성능시험 결과는 한국수력원자력에서 제공한 현장 성능시험 결과를 사용하였다.[13] 그림에서 보이는 바와 같이 정상 및 2상 유동 비정상 상태의 수치해석 결

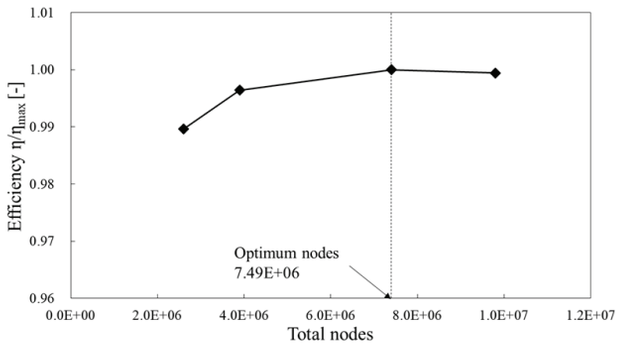


Fig. 4 Grid dependency test of a pump-turbine

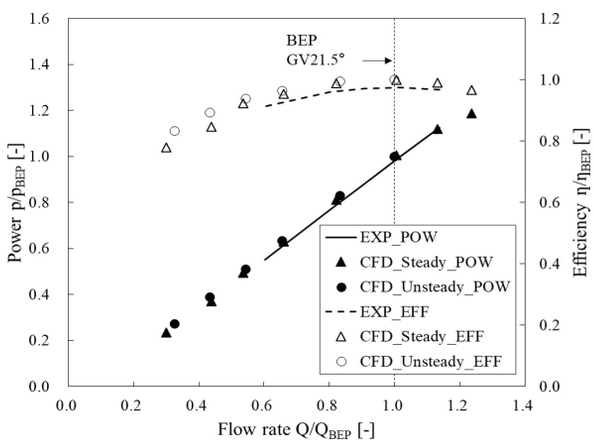


Fig. 5 Performance curves of numerical and experimental results for a pump-turbine[13]

과는 저유량 영역에서 약간의 차이를 나타내지만, 와류가 발생하지 않는 BEP 및 와류가 발생하는 0.65QBEP의 경향이 잘 일치하므로, 본 연구의 수치해석에 대한 결과는 타당성이 있다고 볼 수 있다.

4.2 선회수에 따른 세차 와류 특성

펌프터빈의 저유량 운전 조건 내에서 유량에 따라 흡출관에서 나타나는 내부 유동 및 세차 와류 특성은 러너 출구의 유동 및 속도 성분의 특성에 따라 달라지며, 이는 선회 강도(Swirl intensity)와도 밀접한 관련이 있다. 따라서 본 연구에서는 선회 강도에 대한 특성을 나타내는 선회수, 식(5)를 적용하여 각 운전 조건에 대해 Fig. 6과 같이 나타내었다.[14]

$$S = n_{ED}\frac{\pi^2}{8}\left(\frac{1}{Q_{ED}} - \frac{1}{Q_{ED}^0}\right) \tag{5}$$

여기서, n_{ED} 및 Q_{ED}는 회전속도 및 유량에 대한 무차원 계수이며, Q_{ED}^0는 선회가 없는 조건(Swirl-free condition)의 유량계수로, 본 연구에서는 BEP를 Q_{ED}^0로 적용하였다. Fig. 6에서

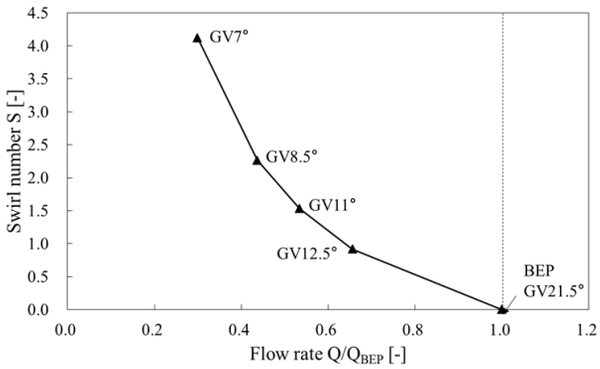


Fig. 6 Swirl number according to the flow rate with various guide vane angles of a pump-turbine

Fig. 7 Iso-surface distribution of time averaged pressure in the draft tube with various guide vane angles of a pump-turbine

볼 수 있는 바와 같이 BEP인 가이드 베인 21.5도를 기준으로 가이드 베인 각도가 작아질수록 유량이 감소하며, 이에 따라 선회수가 가이드 베인 12.5도 일 때 0.92에서 가이드 베인 7도 일 때 4.12까지 증가하는 것을 확인 할 수 있다.

Fig. 7은 흡출관 내 비정상 해석 압력 값의 마지막 1회전에 대한 시간평균값의 등속도면 분포를 나타내며, 출구의 압력을 고려한 상대적인 물의 포화 압력(Saturation pressure, 3.169 kPa) 값을 나타내었다. 이를 통해, 가이드 베인 각도에 따라

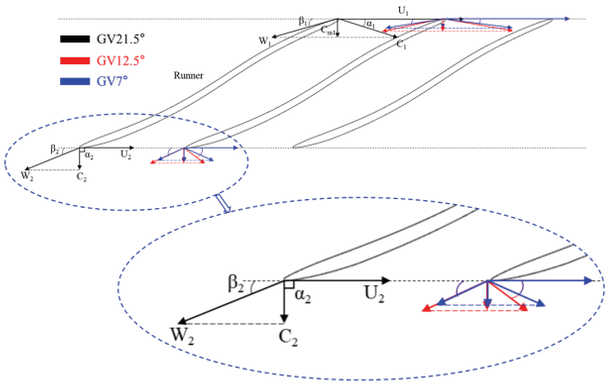
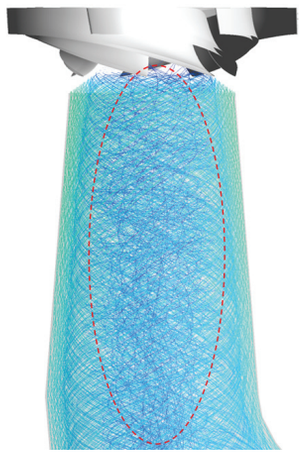


Fig. 8 Velocity triangle distributions with guide vane angles of 7° , 12.5° and 21.5° at mid-span of runner

흡출관 내에서 발생하는 세차 와류의 형상을 정성적으로 비교하였다. Fig. 7(d)의 가이드 베인 12.5도에서 세차 와류의 크기가 가장 크게 형성되었으며, 가이드 베인 각도가 작아짐에 따라 Fig. 7(b)의 선회수 2.67을 갖는 가이드 베인 8.5도 까지 세차 와류의 크기가 점차 작아지며, 가이드 베인 각도 7도에서는 세차 와류의 형상이 사라진 것을 확인 할 수 있다. 이는 가이드 베인 각도가 작아질수록 유량이 감소하고 선회 강도는 증가하더라도 흡출관 내부의 세차 와류는 특정범위의 선회수에서 뚜렷한 형상을 나타내며, 더 강한 선회 강도에도 불구하고 매우 낮은 유량 영역에서는 와류는 존재하지만 와류가 세차 특성을 가지지 않게 되는 것을 볼 수 있다.

가이드 베인 각도에 따른 흡출관 내의 유동 특성에 대한 원인을 확인하기 위해 러너의 유동 특성을 Fig. 8과 같이 속도삼각형 분포 비교를 통해 나타냈다. 가이드 베인 각도에 따른 러너 출구에서 유동 특성을 비교했을 때, 가이드 베인 21.5도는 출구의 절대 속도 성분 C_2와 회전속도 U_2가 이루는 α_2가 90도를 이루며 절대 속도 성분이 축 방향으로 나가는 반면, 가이드 베인 12.5도 및 7도와 같이 각도가 작아질수록 α_2가 작아지며 러너 출구에서 절대 속도가 축 방향뿐만 아니라 반경 방향의 속도 성분을 가지고 나가는 것을 확인 할 수 있다. 이러한 저유량 운전 조건에서 나타나는 러너 출구의 속도 성분이 선회 강도를 증가시키는 원인으로 볼 수 있다.

Fig. 9는 선회수가 가장 높은 가이드 베인 7도와 세차 와류가 가장 큰 가이드 베인 12.5도 그리고 BEP의 가이드 베인 21.5도에 대한 유선분포를 나타냈으며, 비정상 해석의 속도 값에 대한 시간평균값을 나타냈다. Fig. 9(c)에서는 Fig.8의 속도 삼각형에서 확인한 러너 출구의 절대 속도 성분과 같이 축 방향으로 잘 나가는 반면, Fig. 9(b)에서는 상대적으로 증가한 선회 강도로 인해 흡출관 내 유동이 복잡해지며, 빨간 점선으로 표시된 것처럼 비틀어지는 회전축을 중심으로 회전하는 세차 와류가 발생함을 확인 할 수 있다. 하지만 선회수가 가장 높은 가이드 베인 7도는 Fig. 9(a)와 같이 흡출관 내 세차 와류가 형성되는 위치의 선회 강도가 너무 강



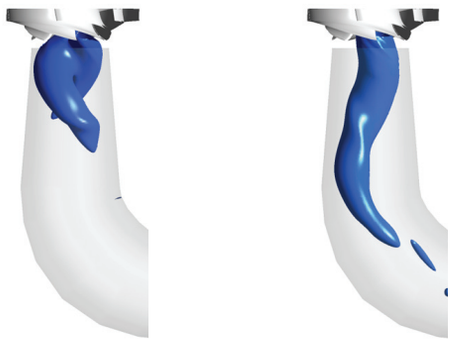
(a) GV7°

(b) GV12.5°

(c) GV21.5°

Fig. 9 3D streamline distribution of time averaged velocity in the draft tube with guide vane angles of 7° , 12.5° and 21.5° of a pump-turbine

하고 매우 복잡한 내부 유동을 나타내어 세차 와류가 발생하지 않음을 확인 할 수 있다. 이처럼 흡출관 내 세차 와류는 러너 출구의 선회 강도와 비례하여 발생하는 것이 아니라, 어느 특정 범위의 선회 강도에서 발생하는 특성을 가진 와류로 확인 할 수 있다.



GV11° GV12.5°

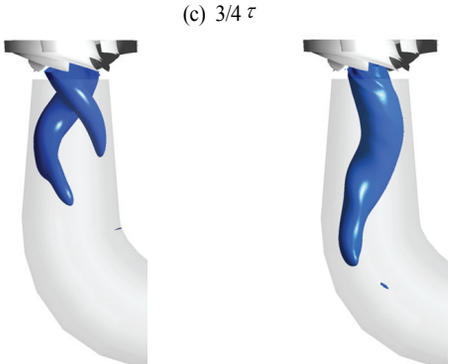
(a) 1/4 τ

GV11° GV12.5°

(b) 2/4 τ

GV11° GV12.5°

(c) 3/4 τ



GV11° GV12.5°

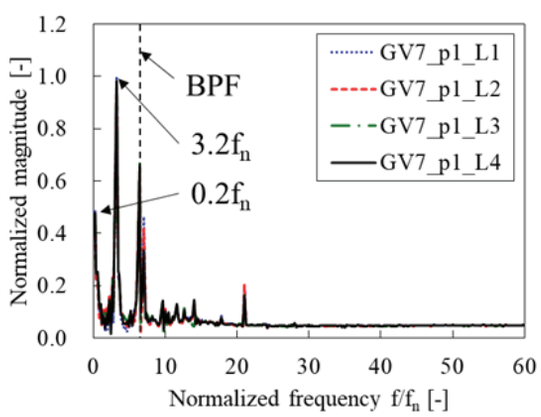
(d) 4/4 τ

Fig. 10 Iso-surface distribution of pressure during one revolution of runner in the draft tube with guide vane angles of 11° and 12.5° of a pump-turbine

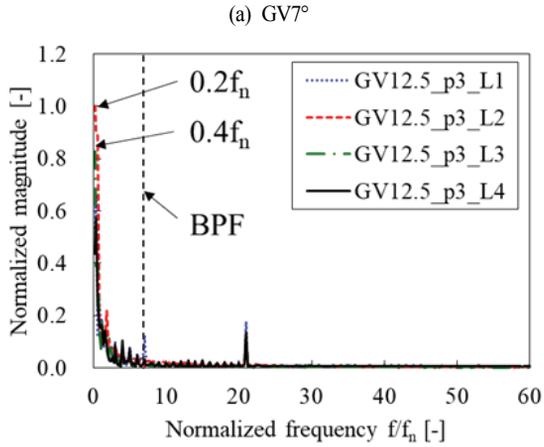
각 유량 조건에서 완전 발달 된 세차 와류의 유동 구조 특성을 확인하기 위해, 총 러너 5회전의 비정상 상태 삼차원 수치해석 중에서 세차 와류가 완전 발달한 마지막 러너 1회전에서 시간에 따른 세차 와류의 유동 구조 특성을 Fig. 10과 같이 가이드 베인 11도 및 12.5도를 비교하여 나타냈다. Fig. 10(a)~(d)에서 볼 수 있는 바와 같이 완전 발달된 세차 와류는 길이 및 크기가 크게 변하지 않고 발달된 와류의 형상을 유지하며 흡출관 내부에서 러너와 동일한 회전 방향으로 회전하는 유동 구조를 확인 할 수 있다.

4.3 선회수에 따른 비정상 압력 특성

Fig. 11은 가이드 베인 7도 및 12.5도 조건에 대해 Fig. 3에서 도시된 압력 측정점들 중 p1의 위치에서 높이가 같은 압력 측정점 L1~4에 대한 압력 값을 비교하였으며, 각 측정점에서의 비정상 압력 값으로부터 고속퓨리에변환(Fast Fourier transform, FFT) 분석을 통하여 주파수 특성을 나타냈다. 여기서, 주파수는 러너의 회전주파수(f_n)으로 무차

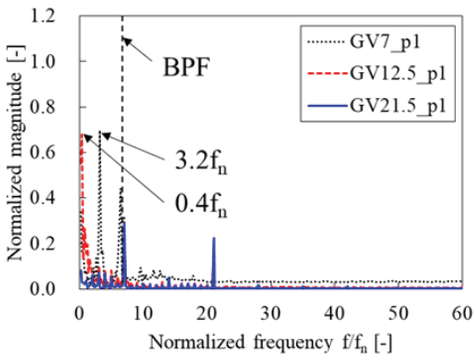


(a) GV7°

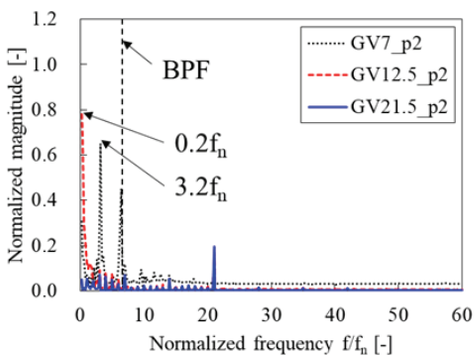


(b) GV12.5°

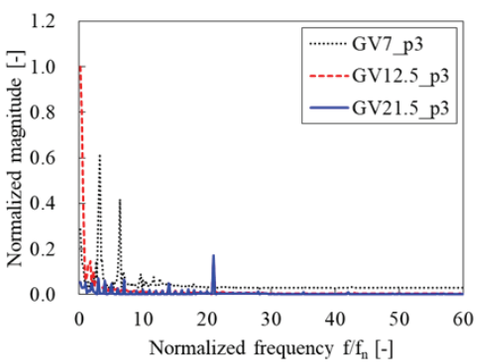
Fig. 11 Comparisons of FFT results on the draft tube cone according to measuring points (L1~4) with guide vane angles of 7° and 12.5° of a pump-turbine



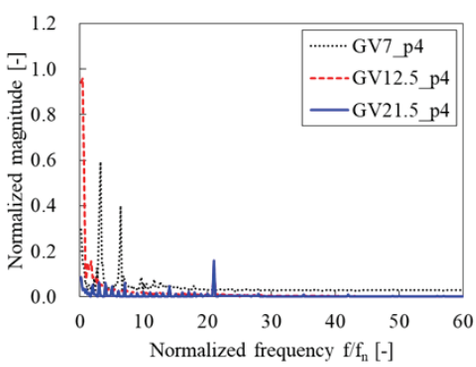
(a) p1



(b) p2



(b) p3



(b) p4

Fig. 12 Comparisons of FFT results on the draft tube cone according to measuring points (p1~4) with guide vane angles of 7° , 12.5° and 21.5° of a pump-turbine

원화 하였고, magnitude는 최대값으로 무차원화 하였다. Fig. 11(a)의 가이드 베인 7도에서는 서로 다른 4개의 측정점들에 대해 유사한 특성을 보였으며, 흡출관 내 세차 와류는 발생하지 않았지만 강한 선회 강도로 인해, 1차 날개통과주파수(Blade passing frequency, BPF)보다 낮은 주파수 영역인 $3.2f_n$에서 우세한 magnitude가 발생하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 11(b)의 비정상 압력 특성도 가이드 베인 7도와 같이 4개의 측정 위치의 압력 특성이 유사하게 나타났으며, 7도에 비해 상대적으로 더욱 낮은 $0.2\sim0.4f_n$주파수 영역에서 높은 magnitude를 나타냈다. 이는 흡출관 내 세차 와류의 발생으로 인해 유발된 비정상 압력의 특성으로 볼 수 있으며, 이와 유사한 결과로, Liao 등 및 Kirschner 등의 연구에서도 흡출관 내 와류에 의한 낮은 주파수 영역의 압력 특성을 확인 할 수 있다.[6,7]

가이드 베인 각도 및 압력 측정 위치 L1의 유동 진행방향에 따른 측정점 p1~4의 비정상 압력 특성을 Fig. 12와 같이 나타냈다. Fig. 12(a)의 p1 위치에서 가이드 베인 21.5도는 BPF에서 가장 높은 magnitude를 나타냈고, 저유량 영역인 가이드 베인 12.5 및 7도는 보다 낮은 주파수 영역인 $3.2f_n$ 및 $0.4f_n$에서 상대적으로 높은 magnitude를 나타냈다. 특히, 가장 큰 세차 와류를 나타낸 가이드 베인 12.5도에서 가장 낮은 주파수 영역인 $0.2\sim0.4f_n$에서 비교적 우세한 magnitude를 나타냈다. Fig. 12(b)~(d)에서 볼 수 있는 바와 같이 압력 측정 위치가 흡출관 cone에서 유동 방향으로 진행할수록 가이드 베인 21.5 및 7도에서는 유사한 주파수의 경향으로 점차 감소하는 magnitude 특성을 나타냈지만, 세차 와류가 발생한 가이드 베인 12.5도는 p3까지 magnitude가 증가하다가 p4에서 감소하는 경향을 나타냈다. 이는 세차 와류가 발생했을 때 벽면에 가장 근접한 곳의 위치가 p3이며, 유동방향으로 내려 갈수록 그 크기가 작아지고 또한, 와류가 벽면에서 점차 멀어져 압력 특성이 감소하는 경향을 나타낸 것으로 볼 수 있다. 이처럼 선회 강도가 가장 큰 운전 조건은 가이드 베인 7도 임에도 불구하고, 흡출관 내 가장 큰 세차 와류를 나타낸 가이드 베인 12.5도에서 가장 우세한 비정상 압력 특성을 유발한 것을 확인 할 수 있다. 이와 같은 압력 특성을 나타내는 와류의 발생은 흡출관 내 파속을 감소시킬 뿐만 아니라, 펌프터빈 시스템의 고유주파수에도 영향을 주게 되며, 시스템 공진이 발생할 경우 압력 맥동은 급격히 증폭되어 압력과 출력의 서지(Surge)를 유발하여 시스템의 안정성 및 안정적인 전기의 송신에도 영향을 미칠 수 있다.[15,16]

5. 결 론

본 연구에서는 양수발전용 펌프터빈의 터빈 모드 내 선회강도에 따른 흡출관 내 세차 와류에 대한 내부 유동 및 비정상 압력 특성을 파악하기 위해 2상 유동 3차원 정상 및 비정

상 상태에 대한 해석을 수행하였다. 선회 강도를 나타내는 선회수의 정의를 적용하여 유량에 따라 선회 강도 및 흡출관 내 세차 와류의 유동 구조 및 발달 범위를 확인하였다. 또한, 속도삼각형 분포를 통해 저유량 영역에서 러너 출구의 유동 특성을 통회 선회 강도 발생의 원인을 확인하였으며, 흡출관 내 유선분포 비교를 통해 매우 강한 선회 강도를 가진 저유량 영역에서는 세차 와류가 발생하는 위치에 매우 복잡한 유동 구조를 나타내어 선회 강도가 매우 높음에도 불구하고 와류가 발생하지 않음을 확인하였다. 이러한 흡출관 내 유동 특성에 대한 비정상 압력 특성을 FFT 분석을 통하여 확인하였고, 저유량 영역에서 상대적으로 낮은 주파수 영역의 높은 압력 특성을 볼 수 있었다. 특히, 세차 와류가 발생했을 때 상대적으로 더욱 낮은 주파수 영역인 $0.2\sim0.4f_n$에서 우세한 압력 특성을 나타내며, 흡출관에서 유동 방향으로 진행할 때 와류가 발생하지 않았을 때 보다 상대적으로 높은 압력 특성을 보이는 것을 확인하였다. 이와 같은 결과로 비추어 볼 때, 펌프터빈의 터빈 모드 내 저유량 영역 중, 특정 범위인 선회수 2.26 이내에서 세차 와류가 발생하고, 발생된 세차 와류는 흡출관 내에 높은 비정상 압력 특성으로 흡출관 내 파속 감소 및 시스템 공진의 발생으로 인한 압력 맥동의 증폭으로 시스템 운전에 영향을 미칠 수 있으므로, 펌프터빈의 탈설계점 내 보다 안정적인 운전을 위해 흡출관 내 발생하는 세차 와류 특성을 고려할 필요가 있다.

후 기

본 연구는 한국수력원자력의 연구비(L17S029000) 지원에 의해 수행되었습니다.

References

(1) 편집부, 2018, 신재생에너지 산업분야별 국내외 이슈분석과 핵심사업 시장전망 2018, 미래산업리서치.

(2) Wirschal, H. H., 1971, “Reversible Pump/Turbines for Raccoon Mountain”, International Pumped Storage Conference, Wisconsin Univ.

(3) Suh, J. W., Kim, S. J., Kim, J. H., Yang, H. M., Joo, W. G., Hwang, T. G., Lee, K. H., Shrestha, U., Chen, Z., Cho, H. G., Choi, Y. D., Park, J. G., and Choi, Y. S., 2019, “Establishment of Numerical Analysis Method of Pump-Turbine for Pumped Storage,” The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol. 22, No. 2, pp. 22-29.

(4) Arpe, J., Nicolet, C., and Avellan, F., 2009, “Experimental evidence of hydroacoustic pressure waves in a Francis turbine elbow draft tube for low discharge conditions,” Journal of Fluid Engineering, Vol. 131, No. 8, pp. 081102-081109.

(5) Wang, H., Ruprecht, A., Gode, E., and Riedelbauch, S., 2015, “Analysis and control of the part load vortex rope in the draft tube of a pumpturbine,” The 6th IAHR meeting of the working group: Cavitation and dynamic problems in hydraulic machinery and systems, pp. 346-353.

(6) Liao, W. L., Lei, X. L., Zhao, Y. P., Ruan, H., and Li, Z. H., 2018, “Pressure pulsation in small opening operating mode of pump turbine’s turbine mode,” IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Vol. 163, No. 1, p. 012051.

(7) Kirschner, O., Ruprecht, A., Gode, E., and Riedelbauch, S., 2016, “Dynamic Runner Forces and Pressure Fluctuations on the Draft Tube Wall of a Model Pump-Turbine,” IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Vol. 49, No. 8, p. 082022.

(8) IEC 60193 Ed. 2.0 b: 1999, “Hydraulic Turbines, Storage Pumps and Pump-Turbines Model Acceptance Tests,” International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland.

(9) ANSYS CFX-18.2, 2018, ANSYS CFX Manager User's Guide, Ansys Inc.

(10) Kim, S. J., Choi, Y. S., Cho, Y., Choi, J. W., and Kim, J. H., 2019, “Numerical Analysis of Inter-Blade Vortex Characteristics of a Francis Hydro Turbine Model,” The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol. 22, No. 2, pp. 30-37.

(11) Menter, F. R., 1994, “Two-Equation Eddy-viscosity Turbulence Models for Engineering Application,” AIAAJ, Vol. 32, No. 8, pp. 1598-1605.

(12) Bardina, J. E., Huang, P. G., and Coakley, T. J., “Turbulence modeling validation,” In: Proceedings of the 28th Fluid Dynamics Conference, p. 2121.

(13) 한국수력원자력(주), 2019, 역설계를 이용한 수차설계 DB 확보 용역, Contract number. L17S029000.

(14) Favrel, A., Gomes Pereira Junior, J., Landry, C., Müller, A., Nicolet, C., and Avellan, F., 2018, “New insight in Francis turbine caviation vortex rope: role of the runner outlet flow swirl number,” Journal of Hydraulic Research, Vol. 56, No. 3, pp. 367-379.

(15) Farvel, A., Landry, C., Müller, A., Yamamoto, K., and Avellan, F., 2014, “Hydro-acoustic resonance behaviour in presence of a precessing vortex rope: Observation of a lock-in phenomenon at part load Francis turbine operation,” IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Vol. 22, No. 3, p. 032035.

(16) Farvel, A., Müller, A., Landry, C., Yamamoto, K., and Avellan, F., 2016, “LDV survey of cavitation and resonance effect on the precessing vortex rope dynamics in the draft tube of Francis turbines,” Experiments in Fluids, Vol. 57, No. 11, pp. 168-182.