

전체 및 주기적 대칭 모델을 이용한 프란시스 런너의 Dry/Wet 모드해석 결과 비교

방제성*† · 이수학** · 최진우*** · 박준관****

Comparison of Francis Runner's Dry/Wet Modes Analyses Results Using Full and Cyclic Symmetry Model

Je-Sung Bang*†, Soohak Lee**, Jin Woo Choi***, Jungwan Park****

Key Words : Francis runner(프란시스 런너), Dry/Wet mode(건식/습식 모드), Cyclic symmetry model(주기적 대칭 모델), Bolt/Balance holes(볼트/밸런스 홀), Acoustic body(음향학적 몸체), Campbell diagram(캠벨 선도)

ABSTRACT

In order to explore the resonance conditions of the Francis runner due to the rotor-stator interaction between the runner and the guide vane, modal analyses in air or water are required mainly. However, it is substantially challenging to analyze the resonance conditions at a specific nodal diameter using the full model with an arbitrary number of bolt holes and balance holes. Hence, dry/wet mode analyses were performed based on the cyclic symmetry model without a bolt hole and with a balance hole, which is not real. The changes in the natural frequencies of the primary resonance modes due to the shape change were analyzed. In the dry mode, the difference is only within 0.9% at most, but in the wet mode, the difference is up to 6.37%. The absence of a bolt hole increases the stiffness, but a balance hole in each cyclic symmetry model decreases the stiffness. Despite their conflict with each other, the change in the dry mode does not occur significantly. However, in the wet mode, it is judged that the added mass effects are increased by increasing the balance holes more than in reality, which increases the change in natural frequencies compared to the cases of dry modes. Therefore, this change should be compensated for when analyzing the resonance conditions of the wet mode using a cyclic symmetry model with a different number of bolt holes and balance holes.

1. 서론

수력 발전은 풍력 발전이나 태양광 발전과 함께 가장 유망한 신재생 에너지원이다. 풍력 발전이나 태양광 발전의 경우 크기는 계절별로 심지어 하루 동안에도 시간별로 출력 간헐성(Intermittence)이 심하기 때문에 과다하게 생산될 경우 전력 그리드를 안정화하기 위하여 출력 제한이 가해지거나 또는 부족함을 위해 급속기동 능력을 가진 가스터빈과 같은 예비력 요구가 증대되고 있다. 수력 발전에서도 안정적인 부분 부하

(Part Load) 운전 요구가 증대되고 있으며, 에너지저장장치(Energy Storage)로서의 양수발전의 역할이 증대되고 있다.⁽¹⁾

따라서 설계단계에서부터 비정상 유동해석을 통해 최대한 정확한 압력맥동을 추출하고, 이를 런너의 동적 거동 분석에 적용함으로써 운전 조건에 따른 동적응력과 피로 특성을 파악하는 것이 중요해지고 있다.⁽²⁾ 특히, 기동/정지 중 또는 부분 부하 운전 중 발생하는 압력 맥동의 주파수 성분 중에 런너의 고유 진동수(Natural Frequency)와 근접하게 되는 공진 조건 발생 여부를 분석하는 것은 매우 중요하다. 특히 무구속회전속

* 한국기계연구원 에너지저장연구실 책임연구원(Korea Institute of Machinery and Materials)

** 두산에너지빌리티(주) 원자력기본설계2팀 수석(Doosan Enerbility)

*** 한국수력원자력(주) 수력기술부 선임연구원(Korea Hydro & Nuclear Power)

**** 한국수력원자력(주) 수력기술부 책임연구원(Korea Hydro & Nuclear Power)

† 교신저자, E-mail : jsbang@kimm.re.kr

도 조건에서의 러너와 스테이 베인(Stay Vane)이나 혹은 가이드 베인(Guide Vane) 간의 로터-스테이터 상호작용(Rotor Stator Interaction)을 고려하는 블레이드 통과 주파수(Blade Passing Frequency) 영역까지는 해석을 수행해야 한다.⁽³⁾

러너의 고유 진동수를 분석하기 위해서는 공기 중이나 물속에서 있는 조건에서의 모드해석을 수행한다. 임의의 개수의 볼트 홀(Bolt Hole)과 밸런스 홀(Balance Hole)이 분산되어 배치되어 있어 정확한 주기적 대칭 모델을 적용하기 어렵기 때문에 전체 모델로 모드해석을 수행하는 경우 러너 블레이드 개수가 스테이 베인 개수나 가이드 베인 개수에 의해 정해지는 특정 노드 지름(Nodal Diameter)에서의 러너의 공진 조건을 도출하는데 어려움을 겪게 된다. 이유는 전체 모델의 경우 노드 지름 별로 블레이드 모드가 순차적으로 계산되는 것이 아니라, 시스템 모드 고유진동수 값에 맞추어 순차적으로 다양한 노드 지름을 가진 고유 진동수와 모드가 계산되기 때문이다.

따라서 본 논문에서는 볼트 홀은 없고 밸런스 홀이 있는 주기적 대칭 모델을 기반으로 한 Dry/Wet 모드 해석을 수행하여 형상 변경으로 인한 주요 공진모드의 고유진동수의 변화를 분석해 보았다. 대부분 물속에서 작동하는 경우 식(1)과 같은 구조적 운동방정식과 식(2)와 같은 음향학적 유체방정식 및 이들 사이의 결합을 고려하는 식(3)과 같은 비대칭적 행렬(Unsymmetry Matrix)을 계산하는 Wet 모드를 적용해야 하는데⁽⁵⁾, Dry 모드의 순서와 바뀌는 경우로 있어 Dry 모드 순서를 기준으로 비교를 수행하였다.

$$[M_s]\{\ddot{U}\} + [K_s]\{U\} = \{F_s\} + [R]\{p\} \quad (1)$$

$$[M_f]\{\ddot{p}\} + [K_f]\{p\} = \{F_f\} - \rho_0 [R]^T \{\ddot{U}\} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} -\omega^2 M_s + j\omega C_s + K_s & -R \\ -\omega^2 \rho_0 R^T & -\omega^2 M_f + j\omega C_f + K_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U \\ p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_s \\ F_f \end{Bmatrix} \quad (3)$$

2. 해석 대상 모델

2.1 전체 모델

전체 모델의 Dry 모드 해석을 위해 Fig. 1에 보이는 바와 같이 정확한 볼트 홀 개수와 밸런스 홀 개수를 적용한 러너 형상을 대상으로 자중(Gravity) 효과, 회전속도, 축 플랜지와 체결되는 부분의 변위 경계조건을 적용하였다. 정지-정격회전속도-무구속회전속도 조건으로 정적구조해석을 수행한 뒤 선응력(Pre-Stress) 상태를 반영하고, 응력 강화(Stress Stiffening) 효과와 함께 Chord 길이가 긴 블레이드 경우 나타날 수 있는 회전 연화(Spin Softening) 효과를 고려하는 모드해석을 수행하였다.⁽⁴⁾

정적구조해석을 수행하기 위한 ANSYS Mechanical을 사용하였으며, 유한요소모델로는 Fig. 2에 보이는 바와 같이 1,817,660개의 절점과 1,129,694개의 요소를 적용하였다.

전체 모델 Wet 모드 해석을 위해 Fig. 3에 보이는 바와 같이 러너에 Acoustic Body를 물 영역으로 추가하였다.⁽⁵⁾ Wet 모드 해석을 위해 Acoustics ACT(Application Customizing Toolkit)를 사용하였다. Acoustic Body에 적용한 주요 정의 값들은 Table 1에 나열되어 있다. 보통 Wet Mode 해석 시 Dry 모드 해석 때와 같이 정적강도해석을 수행한 뒤 모드해석을 수행하지 못하기 때문에 응력 강화 효과나 회전 연화 현상을 고려하지 못하나, 본 논문에서 고려하는 수차 러너의 경우 회전속도가 낮다 보니 두 가지 효과가 그리 크게 나타나지 않아 Wet 모드를 Dry 모드와 비교하는데 큰 무리는 없을 것으로 사료된다. Wet 모드 해석을 위해 유한요소모델로 2,611,839개의 절점과 1,920,247개의 요소를 적용하였다.

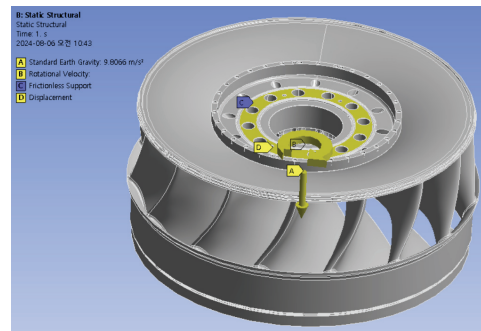


Fig. 1 Load and Boundary Condition for Static Strength Analysis of Full Runner Model

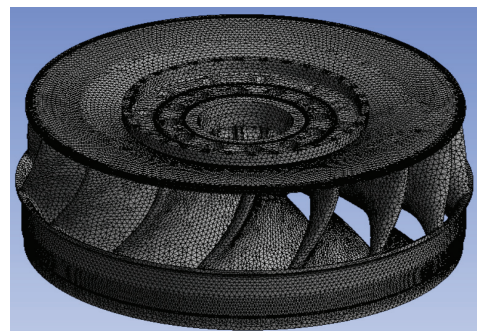


Fig. 2 Finite Element Model of Full Mode for Static Strength Analysis and Modal Analysis

Table 1 Definition for Acoustic Body

Parameter	Value
Mass Density	1000 kg/m ³
Sound Speed	1483.24 m/s
Reference Pressure	2E-5 Pa
Reference Static Pressure	101325 Pa
Acoustic-Structural Coupled	Uncoupled
Behavior	Compressible

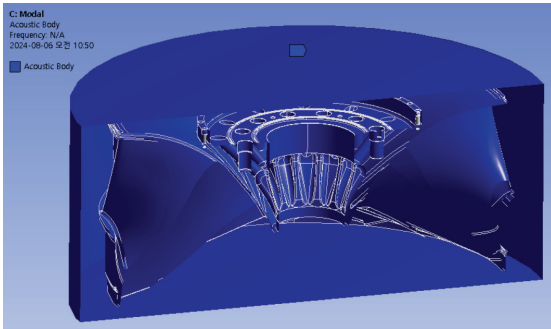


Fig. 3 Acoustic Body for Wet Mode Calculation of Full Runner Model

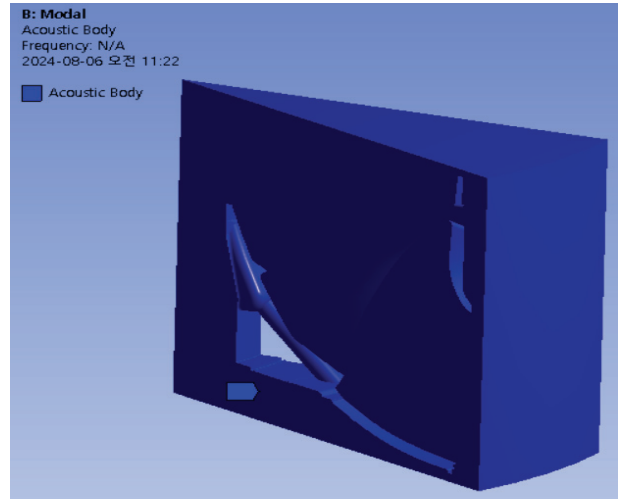


Fig. 5 Acoustic body for wet mode calculation of cyclic symmetry runner model

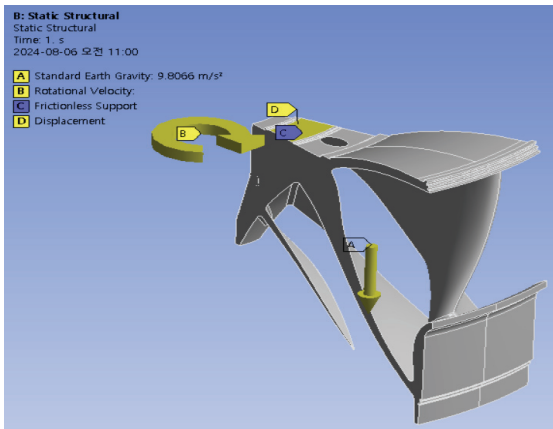


Fig. 4 Load and boundary condition for static strength analysis of cyclic symmetry runner model

2.2 주기적 대칭 모델

주기적 대칭 모델의 Dry 모드 해석을 위해 Fig. 4에 보이는 바와 같이 볼트 홀은 없고 주기적 대칭 모델마다 밸런스 홀이 있도록 형상을 변경하였다. 이럴 경우 볼트 홀이 없도록 함으로써 축 플랜지와 체결되는 부분의 강성(Stiffness)을 높일 것이며, 주기적 대칭 모델마다 밸런스 홀이 있도록 함으로써 축 플랜지와 체결되는 부분의 강성을 낮출 것이다. 다른 조건은 2.1절에 적용한 하중 및 경계조건을 동일하게 적용하여 정적구조해석과 모드해석을 수행하였다.

Dry 모드 해석을 위한 유한요소모델은 106,227개의 절점과 64,666개의 요소를 적용하였고, Wet 모드 해석을 위한 유한요소 모델은 174,053개의 절점과 126,056개의 요소를 적용하였다.

3. 해석 결과

3.1 전체 모델

전체 모델의 Dry 모드 기준 고유 모드 형상은 Fig. 6에 보이는 바와 같으며, 노드 지름 별로 순차적으로 나타나지 않

Table 2 Comparison of Dry/Wet mode of full runner model

	Dry Mode			Wet Mode	Diff.(%)
	Stop	Rated	Runaway		
Mode 1	1.000	1.000	1.000	0.878	12.24
Mode 2	1.072	1.072	1.072	0.848	20.91
Mode 3	1.462	1.463	1.464	1.164	20.35
Mode 4	2.331	2.331	2.331	1.554	33.32
Mode 5	2.541	2.542	2.544	2.166	14.78
Mode 6	2.903	2.904	2.904	1.653	43.08
Mode 7	3.238	3.238	3.238	1.817	43.86

* Normalized by freq. of mode 1, dry mode, full model

고 다양한 노드 지름이 섞여서 고유 모드가 나타나는 것을 알 수 있다. 즉, 특정 노드 지름에서의 공진 조건을 도출하는데 용이치 않다는 것을 알 수 있다.

정지-정격회전속도(100%)–무구속회전속도(195%)일 때의 모드 해석 결과를 바탕으로 구성한 Campbell 선도는 Fig. 7에 보이는 바와 같으며, Guide Vane과 관련된 EO(Engine Order)와 무구속회전속도에 도달하기 전까지 2개의 공진 가능점(Crossing Point)이 발생하나 짧은 시간 동안 바로 지나가기 때문에 크게 문제가 되지는 않는다.

정지-정격회전속도–무구속회전속도 때의 Dry 모드와 Wet 모드 결과 비교는 Table 2에 나열되어 있으며, 전체 모델의 첫 번째 Dry 모드의 고유진동수로 정규화(Normalization)를 수행하였다. Dry 모드에서 회전 속도에 따라 고유진동수의 변화가 거의 없는 것으로 보아 응력 강화 및 회전 연화 효과는 크게 발생하지 않은 것으로 보인다. Wet 모드의 경우 모드 형상에 따라 물과의 간섭효과 정도가 달라져 Dry 모드 대비 고유진동수 감소율이 크게 변하여 모드 순서가 바뀌는 것을 알 수 있다.

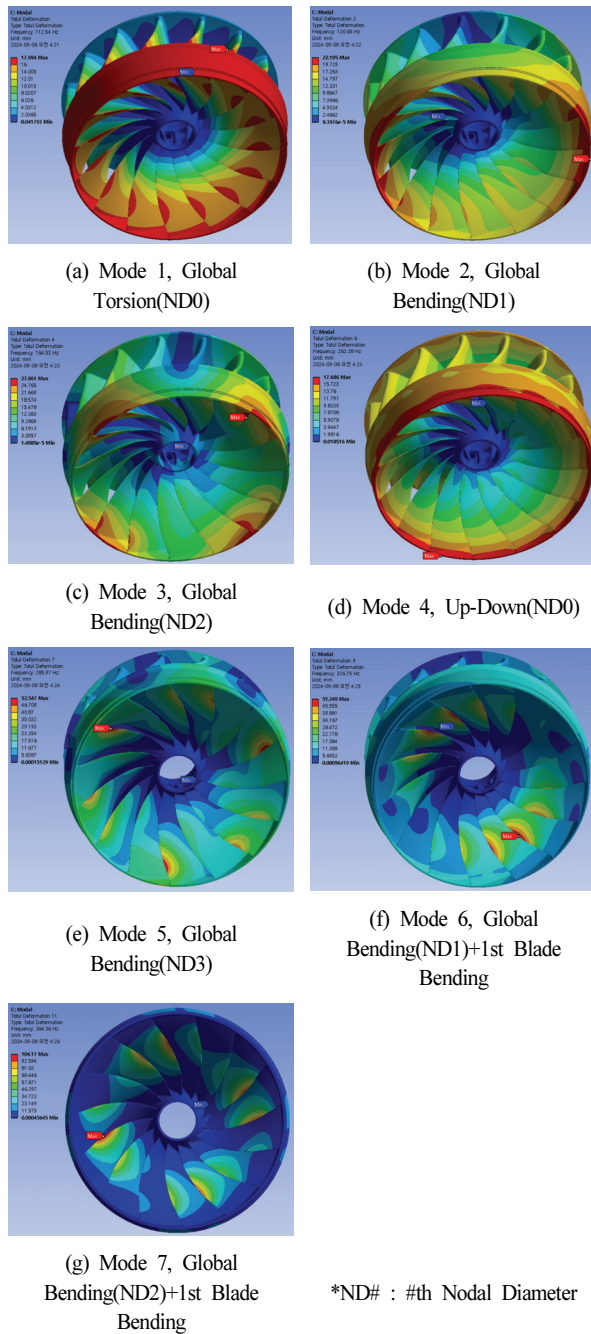


Fig. 6 Mode shape of full runner model

3.2 주기적 대칭 모델

전체 모델로 모드해석을 수행하는 경우 3.1절에서와 같이 노드 지름 별로 순차적으로 나타나지 않고 다양한 노드 지름이 섞여서 고유 모드가 나타나기 때문에 런너 블레이드 개수가 스테이 베인 개수나 가이드 베인 개수와의 관계에 의해 정해지는 특정 노드 지름에서의 공진 조건을 도출하는데 어려움을 겪게 된다. 따라서 2.2절의 주기적 대칭 모델을 이용하여 특정 노드 지름의 경우에 대해 Dry/Wet 모드를 분석해 보았다.

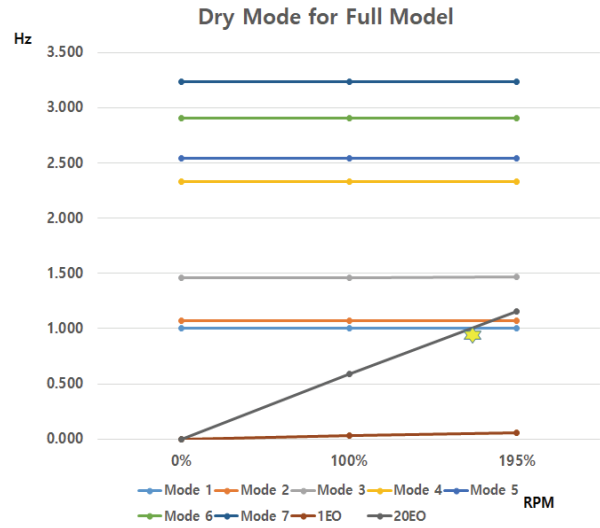


Fig. 7 Campbell diagram of full runner model based on dry mode

보통 SAFE 선도나 Campbell 선도에서 공진 가능점으로 찾게 되는 공진조건은 로터-스테이터 상호작용의 경우로서 고정부와 회전부의 블레이드 개수 차이에 의해 고려해야 하는 회전부의 노드 지름이 정해진다. 본 논문에서 고려하는 수차의 경우 스테이 베인의 개수는 가이드 베인의 개수와 동일하며, 런너 블레이드 개수와 가이드 베인의 개수를 고려하여 공진 발생 시 고려해야 하는 노드 지름은 5이다.

Campbell 선도를 구성하기 위해 먼저 노드 지름이 0인 경우에 대해 모드해석을 수행하여 주요 블레이드 모드를 분석하였으며, 각 노드지름마다 모드해석 후 Campbell 선도의 같은 블레이드 모드를 가진 선을 구성하는데 사용하였다.

3.2.1 노드 지름이 0인 경우

Dry 모드 기준 고유 모드 형상은 Fig. 8에 보이는 바와 같다. 정지-정격회전속도-무구속회전속도일 때의 모드 해석 결과를 바탕으로 구성된 Campbell 선도는 Fig. 9에 보이는 바와 같으며, 가이드 베인과 관련된 EO와 무구속회전속도에 도달하기 전까지 1개의 공진 가능점이 발생하나 짧은 시간 동안 바로 지나가기 때문에 크게 문제가 되지는 않는다.

정지-정격회전속도-무구속회전속도 때의 Dry 모드와 Wet 모드 결과 비교는 Table 3에 나열되어 있다. 3.1절의 전체 모델 때와 유사하게 Dry 모드에서 회전 속도에 따라 고유진동수의 변화가 거의 없는 것으로 보아 응력 강화 및 회전 연화 효과는 크게 발생하지 않은 것을 확인할 수 있다. Dry 모드 기준 Mode 5가 Wet 모드에서는 나타나지 않았다.

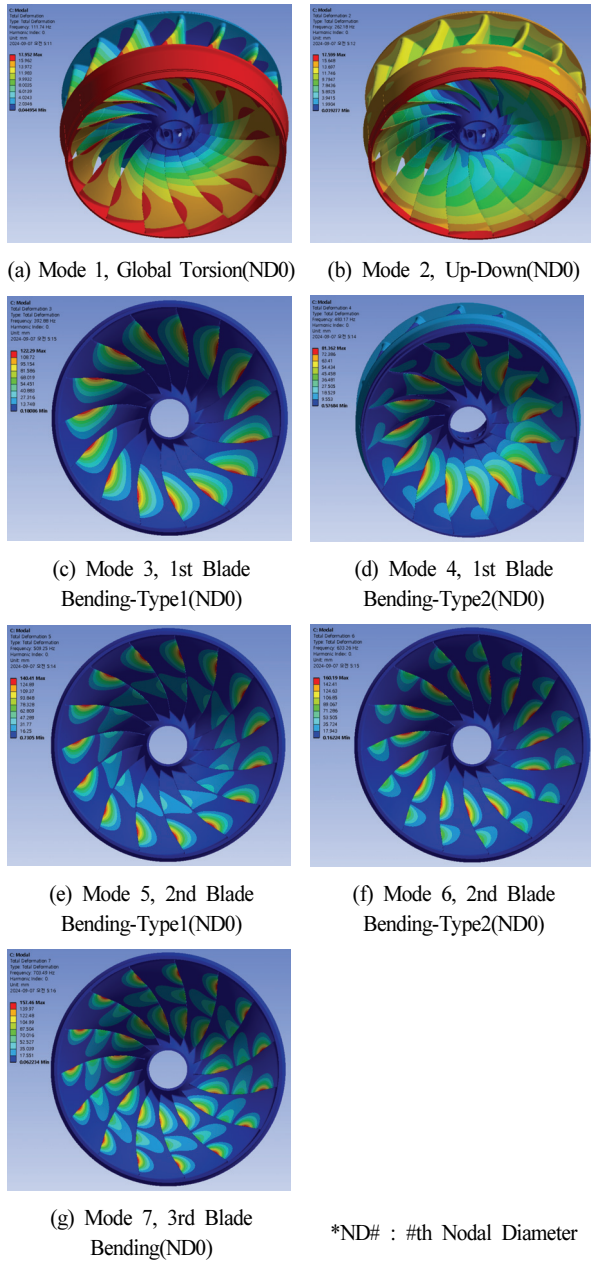


Fig. 8 Mode shape of cyclic symmetry runner model in case of NDO

Table 3 Comparison of dry/wet mode of cyclic symmetry runner model in case of NDO

	Dry Mode			Wet Mode	Diff.(%)
	Stop	Rated	Runaway		
Mode 1	0.993	0.993	0.993	0.865	12.90
Mode 2	2.330	2.329	2.330	1.455	37.55
Mode 3	3.491	3.491	3.489	2.086	40.25
Mode 4	4.293	4.293	4.293	2.733	36.35
Mode 5	4.525	4.525	4.522	-	-
Mode 6	5.627	5.627	5.626	3.179	43.51
Mode 7	6.251	6.252	6.248	4.204	32.75

* Normalized by freq. of mode 1, dry mode, full model

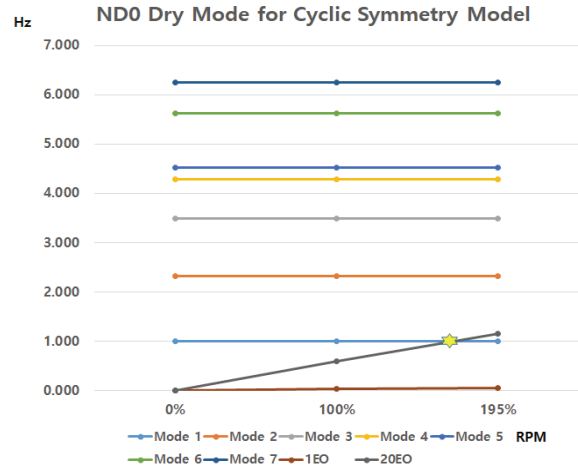


Fig. 9 Campbell diagram of cyclic symmetry runner model based on dry mode in case of NDO

Table 4 Comparison of dry/wet mode of cyclic symmetry runner model in case of ND5

	Dry Mode			Wet Mode	Diff.(%)
	Stop	Rated	Runaway		
Mode 1	3.375	3.375	3.374	1.661	50.79
Mode 2	4.129	4.130	4.130	3.109	24.70
Mode 3	4.943	4.944	4.945	2.501	49.41
Mode 4	5.387	5.388	5.386	3.711	31.13
Mode 5	5.923	5.923	5.924	-	-
Mode 6	6.546	6.546	6.545	-	-
Mode 7	7.133	7.135	7.136	4.621	35.22

* Normalized by freq. of mode 1, dry mode, full model

3.2.2 노드 지름이 5인 경우

Dry 모드 기준 고유 모드 형상은 Fig. 10에 보이는 바와 같다. 노드 지름 5일 때는 노드 지름 0일 때 나타나는 Torsion 모드나 Up-Down 모드는 발생하지 않는 것을 볼 수 있다.

정지-정격회전속도-무구속회전속도일 때의 모드 해석 결과를 바탕으로 구성한 Campbell 선도는 Fig. 11에 보이는 바와 같으며, 가이드 베인과 관련된 EO와 무구속회전속도에 도달할 때까지 공진 가능점은 발생하지 않았다.

무구속회전속도 조건에서 Dry 모드 기준 192% 공진여유(Resonance Margin)가 확보되었으며, Wet 모드 기준 44%의 공진여유가 확보되었다. 경향성 분석을 위해 다른 노드 지름인 경우도 해석을 수행해 본 결과 노드지름이 증가할수록 무구속회전속도 조건에서 Dry 모드 기준 공진여유는 증가하는 경향을 보여주었다.

정지-정격회전속도-무구속회전속도 때의 Dry 모드와 Wet 모드 결과 비교는 Table 4에 나열되어 있다. 역시 응력 강화 및 회전 연화 효과는 크게 발생하지 않았고, Dry 모드 기준 Mode 5와 Mode 6이 Wet 모드에서는 나타나지 않았다.

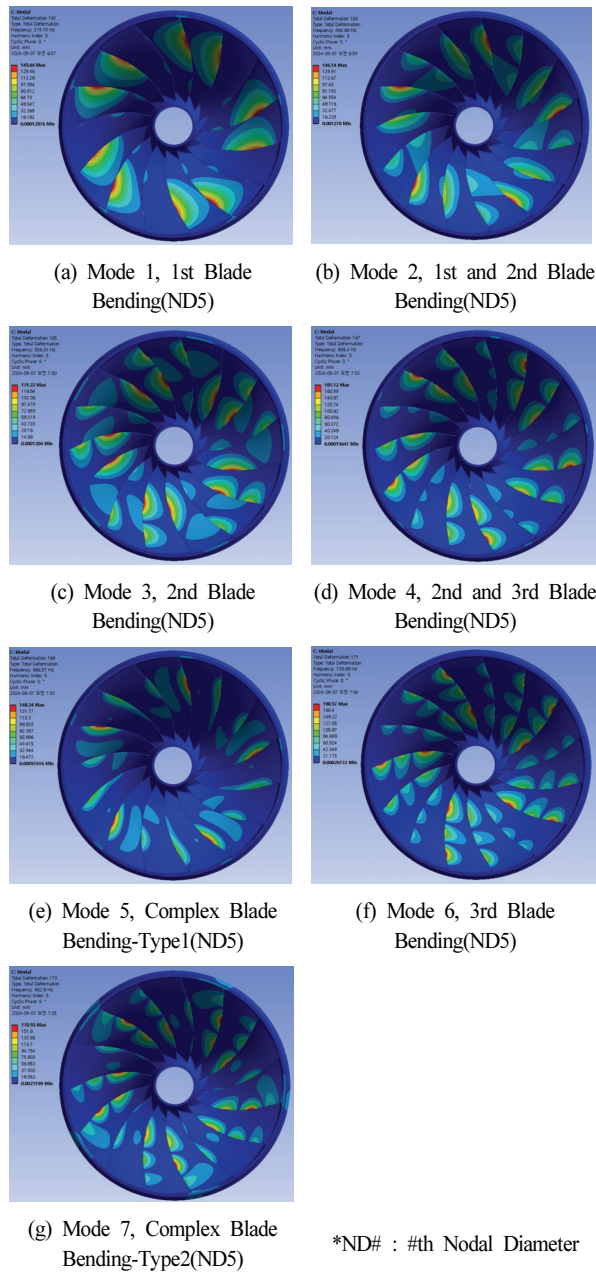


Fig. 10 Mode shape of cyclic symmetry runner model in case of ND5

3.3 전체 모델과 주기적 대칭 모델 간의 Dry/Wet 모드 비교

1장과 2.2절에서 언급한 바와 같이 주기적 대칭 모델의 경우 볼트 홀은 없고 주기적 대칭 모델마다 밸런스 홀이 있도록 형상을 변경하였기 때문에 축 플랜지와 체결되는 부분의 강성의 변화가 있을 수 있고, 밸런스 홀의 증가로 Wet 모드에서는 물과 접촉하는 면 및 부가질량의 증가 효과가 발생할 수 있다.

3.1절의 Fig. 6에 보여진 6개의 고유 모드에 대해서 전체 모델과 주기적 대칭 모델 간의 Dry 모드 비교는 Table 5에, Wet 모드 비교는 Table 6에 각각 나열되어 있다. Dry 모드

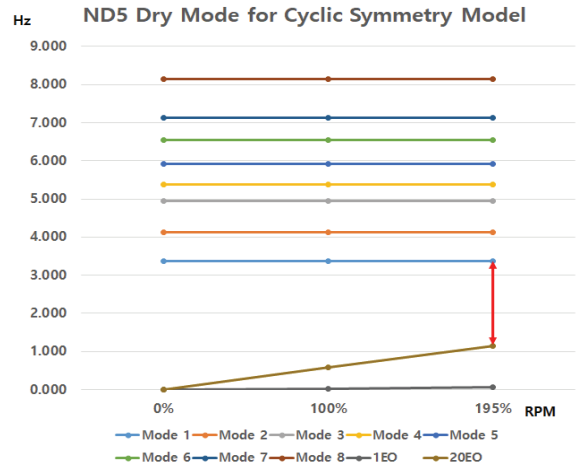


Fig. 11 Campbell diagram of cyclic symmetry runner model based on dry mode in case of ND5

Table 5 Comparison of dry mode between full runner model and cyclic symmetry runner model

	Full	Cyclic	Diff.(%)
Mode 1	1.000	0.993	0.71
Mode 2	1.072	1.082	(-)0.90
Mode 3	1.462	1.465	(-)0.19
Mode 4	2.331	2.330	0.04
Mode 5	2.541	2.533	0.30
Mode 6	2.903	2.918	(-)0.49
Mode 7	3.238	3.239	(-)0.05

* Normalized by freq. of mode 1, dry mode, full model

Table 6 Comparison of wet mode between full runner model and cyclic symmetry runner model

	Full	Cyclic	Diff.(%)
Mode 1	0.878	0.865	1.46
Mode 2	0.848	0.819	3.44
Mode 3	1.164	1.108	4.81
Mode 4	1.554	1.455	6.37
Mode 5	2.166	2.084	3.75
Mode 6	1.653	1.599	3.23
Mode 7	1.817	1.749	3.78

* Normalized by freq. of mode 1, dry mode, full model

의 경우 최대 0.9% 이내의 차이만 보이고 있으나, Wet 모드의 경우 최대 6.37%의 차이를 보이고 있다. 볼트 홀이 없는 것은 강성을 증가시키지만, 주기적 대칭 모델마다 밸런스 홀이 있도록 하는 것은 강성을 감소시키기 때문에 이들이 서로 상충하여 Dry 모드의 변화는 크게 발생하지 않는 것으로 판단된다. 하지만 Wet 모드의 경우 실제보다 밸런스 홀의 개수를 증가시킴으로써 물의 부가 질량이 실제보다 증가함으로써

Dry 모드 때 보다는 감소폭을 증가시킨 것으로 판단된다. 따라서 불가피하게 실제로 다른 개수의 볼트 홀 및 밸런스 홀을 가진 주기적 대칭 모델을 이용한 Wet 모드의 공진 조건 분석 시 이러한 감소폭이 보정되어야 할 것으로 보인다.

5. 결 론

임의 개수의 볼트 홀과 밸런스 홀을 가진 전체 모델을 이용하여 특정 노드 지름에서의 공진 조건을 해석하는 것은 실질적으로 어려움이 있기 때문에 볼트 홀은 없고 밸런스 홀이 있는 주기적 대칭 모델을 기반으로 Dry/Wet 모드 해석을 수행하여 형상 변경으로 인한 주요 공진모드의 고유진동수의 변화를 분석해 보았다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1) 본 연구에서 고려하는 유연화 운전 대응 수차발전용 러너의 Dry 모드에서 회전 속도에 따라 고유진동수의 변화가 거의 없는 것으로 보아 응력 강화 및 회전 연화 효과는 크게 발생하지 않았다.

2) Wet 모드의 경우 모드 형상에 따라 물과의 간섭효과 정도가 달라져 Dry 모드 대비 고유진동수 감소율이 크게 변하여 모드 순서가 바뀌는 것을 알 수 있었다.

3) 본 논문에서 고려하는 러너 블레이드 개수와 가이드 베인의 개수를 고려하여 공진 발생 시 고려해야 하는 노드 지름이 5인 경우 Guide Vane과 관련된 EO와 무구속회전속도에 도달할 때까지 공진 가능점은 발생하지 않았다. 무구속회전속도 조건에서 Dry 모드 기준 192% 공진여유가 확보되었으며, Wet 모드 기준 44%의 공진여유가 확보되었다.

4) 전체 모델과 주기적 대칭 모델 간의 Dry/Wet 모드를 전체 모델 기준 저차 6개 모드에 대해 비교한 결과 Dry 모드의 경우 최대 0.9% 이내의 차이만 보이고 있으나, Wet 모드의 경우 최대 6.37%의 차이를 보이고 있다. 볼트 홀이 없는

것은 강성을 증가시키지만, 주기적 대칭 모델마다 밸런스 홀이 있도록 하는 것은 강성을 감소시키기 때문에 이들이 서로 상충하여 Dry 모드의 변화는 크게 발생하지 않은 것으로 판단된다. 하지만 Wet 모드의 경우 실제보다 밸런스 홀의 개수를 증가시킴으로써 물의 부가 질량이 실제보다 증가함으로써 Dry 모드 때 보다는 감소폭을 증가시킨 것으로 판단된다.

후 기

본 논문 결과는 2024년 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구의 일부임 (과제번호: 2021021010003A, 과제명: 유연화 운전 대응 고효율 수차발전시스템 기술개발)

References

- (1) Development and Demonstration of Eco-Friendly, High-Efficiency Pumped-Storage Power Plant Technology for Entry into Overseas Construction Market, 2021, Planning Report, Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
- (2) Øyvind Moen Fjeld, 2015, "Simulation of the Natural Frequencies in a Pump-Turbine Runner in Air and Water," Master Thesis, Department of Energy and Process Engineering, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway.
- (3) Wu, Y., Li, S., Liu, S., Dou, H. S. and Qian, Z., 2015, Vibration of Hydraulic Machinery, Springer, New York.
- (4) ANSYS, Inc., Theory Reference, Canonsburg, Pennsylvania.
- (5) Howard, C. Q. and Cazzolato, B. S., 2015, Acoustic Analyses Using MATLAB and ANSYS, CRC Press, Florida.