

Hybrid Coupling FSI 방법을 이용한 Lock-in 현상 해석

Analysis of Lock-in Phenomenon using Hybrid Coupling Fluid-Structure Interaction Analysis Methods

1. 서론

락인 현상은 유체-구조물 상호작용(Fluid-Structure Interaction, FSI)이 유발하는 대표적인 비선형적 와류 유기 진동(Vortex-Induced Vibration, VIV) 문제이다. 후류의 와류 주파수가 구조물의 고유진동수와 일치할 경우, 큰 진폭의 진동을 발생시키는 것은 구조의 관점에서 익히 알려진 공진에 해당한다. 그러나 유속의 증가에도 와류 주파수가 변화하지 않고 고유 주파수 근처의 주파수로 진동-응답 주파수가 고정되는 현상을 락인 현상이라고 부른다[1]. 진동 진폭은 락인 범위에서 내에서 비선형적인 응답 최대값을 나타내며 피로파괴의 원인이 된다[2]. 이러한 고장을 방지하기 위해서는 락인 영역 근처에서의 진동 주파수, 속도 범위, 그리고 진폭을 정확하게 추정하는 것이 중요하다.

일반적인 실린더에서는 후류에서 발생하는 와류 주파수가 레이놀즈 수의 광범위한 범위에서 일정한 Strouhal 수를 가지며, 유속에 따라 선형적으로 증가한다. 이런 특성을 활용하여 경험적 방정식을 사용해 와류 발생 주파수에 대한 외력 항을 모델링할 수 있다. 그러나 수중익의 경우, 유속에 따라 Strouhal 수가 변화하기 때문에 추가적인 모델링이 필요하다[3]. 일반적으로 구조적 응답을 추정하기 위해 유체와 구조물의 커플링, 그리고 유동해석자를 이용한 유체구조연성(FSI) 수치 해석을 수행하나, 수중환경의 경우 낮은 고체-유체 질량비와 높은 레이놀즈 수에 의해 높은 수치적 불안정성을 가진다[4].

유체-구조물 상호작용 해석의 정확성과 안정성은 구조물과 유체 솔버를 상호 연결하는 방식에 크게 의존한다. 먼저, 이산화된 시간에서 표면 응력 값을 교환하기 위해 두 개의 독립적인 솔버를 결합하는 방식을 기준으로 단방향과 양방향 커플링 방법으로 분류할 수 있다. 단방향 방법에서는 구조물 솔버가 이전 단계의 유체 솔버 솔루션의 표면 응력을 사용하여 다음 단계로 진행하고, 반대의 경우도 같다. 양방향 방법에서는 표면 응력을 한 Time step 내에서 한 번 또는 여러 번 교환하여 두 솔버의 결과에서 오차를 최소화한다. 양방향 방법은 방법론적으로 락인 현상을 모사 가능하나 비현실적인 계산비용을 요구한다[5]. Navier-Stokes 방정식을 기반으로 하는 유체 솔버를 사용하여 양방향 방법을 적용하는 것은 목표 주파수(Time step 크기와 관련), 구조물 크기, 그리고 유입 속도를 고려할 때 사실상 불가능하다[6].

기존에 제시된 다양한 방법들 중에서도 구조물의 응답과 그 안정성을 평가하여 락인 주파수와 진폭을 예측할 수 있는 실질적이고 실용적인 방법은 부재하다.



최 원 석
한국해양대학교 해양공학과 조교수

최근 상용 전산 유체 역학(CFD) 소프트웨어인 ANSYS FLUENT에서 양방향 FSI 방법을 이용해 공진 주파수가 일치하는 해석결과를 선보였다[5]. 그러나 이 방법은 구조물 응답의 진폭의 크기와락인 현상을 평가하는 데에 한계를 나타냈다. 이러한 한계 때문에 정확한 FSI 분석 결과를 도출할 수 있는 실질적인 방법론이 현재 부재하며, 이로 인해 락인 현상에 대한 피로파괴의 설계 위험성은 선박 러더 등에서 여전히 해결되지 않고 있다.

최근에는 계산 비용을 최소화하면서도 원하는 정확도를 얻기 위한 방법으로 하이브리드 결합 방법이 제시되었다. Young[7]과 Chae[8]가 제안한 하이브리드 결합 방법은 단방향 커플링과 양방향 커플링 방법의 중간에 위치하며, 이론해 또는 경험식을 활용하여 두 솔버 간의 차이를 줄인다. 이러한 시도는 각 Time step에서 안정성을 높이고 적절한 정확도의 수치 분석을 가능하게 한다. 본 원고에서는 공진 주파수 근처에서의 락인 현상과 그에 따른 진폭의 크기를 예측하는 하이브리드 커플링 FSI해석방법을 소개한다.

2. Bend-Twist 하이브리드 커플링 유체구조연성 해석

2.1 Bend-Twist 모델의 지배 방정식

선박 방향타 같은 수중운동체에 사용되는 일반적인 수중익은 캔틸레버식 수중익으로 간주할 수 있다. 캔틸레버식 수중익의 구조적 응답은 응답의 크기를 고려할 때 첫 번째 굽힘 및 비틀림 모드로 단순화할 수 있으며 이를 Bend-Twist 모델이라고 한다. 자유도를 굽힘 변위와 비틀림 각도로 제한하고 제한된 운동 방정식을 변형 접근법에 기반한 라그랑주 방정식에 적용하면 수중익 끝단에서 다음과 같은 단순화된 지배 방정식을 도출할 수 있다[8,9].

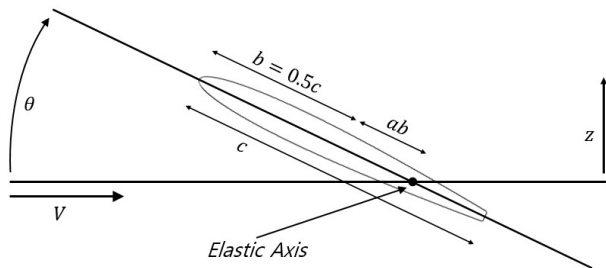


그림 1 수중익 끝의 굽힘과 비틀림

$$M_s \ddot{z} + C_s \dot{z} + K_s z = F$$

$$z = \begin{bmatrix} d(x, t) \\ \theta(x, t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{f1}(x)d_1(t) \\ S_{g1}(x)\theta_1(t) \end{bmatrix}$$

여기서, d 와 θ 는 그림 1에 표시된 것처럼 각각 수중익 끝의 굽힘 변위와 비틀림 각도를 나타낸다. S_{f1} 및 S_{g1} 는 각각 첫 번째 굽힘 및 비틀림 형상 함수다. M_s , C_s , K_s 및 F 는 각각 구조 질량 행렬, 구조 감쇠 행렬, 구조 강성 행렬 및 외력을 나타낸다.

2.2 Bend-Twist FSI 해석을 위한 커플링 시스템

FSI를 고려한 Bend-Twist 모델의 지배 방정식이 풀이에서 일반적으로 외력 F 를 추정하기 위해 CFD 유동 솔버를 포함해 커플링 시스템을 구성한다. 락인 현상은 유체-점도 및 경계층 효과로 인한 와류 소용돌이에 의해 발생하기 때문에 CFD 해석을 이용한 Navier-Stokes 방정식의 수치해석은 와류의 피크 진폭과 주파수를 정확하게 결정하기 위한 양력 및 모멘트를 예측하는데 필수적이다.

유체-구조 해석 시스템은 변위와 유체역학적 힘을 계산하기 위한 구조와 유체 솔버를 통합하여 공유 인터페이스를 통해 솔루션을 보간하고 매핑한다. 락인 현상의 특성을 고려할 때, 양방향 결합이 필요하나 이산화된 시간에서 발생하는 두 솔버 간의 해의 시간오차가 발생한다. 따라서 불안정성을 줄이고 정확도를 높이기 위해 이론해 또는 경험식을 이용한 추가적인 보정을 수행하는 하위 반복을 도입한다.

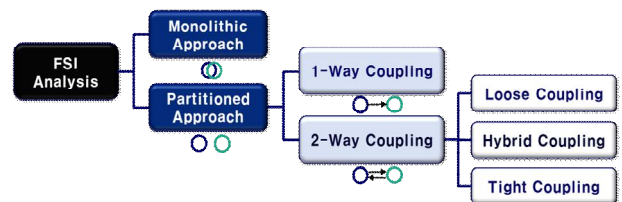


그림 2 유체구조연성 해석방식 분류



그림 3 양방향 커플링 해석방법 분류

양방향 (Loose coupling: LC):

$$[MCK]_s z_n = F_{CFD,n-1}$$

양방향 (Tight coupling: TC):

$$[MCK]_s z_n^{i+1} = F_{CFD,n-1}^i$$

양방향(Hybrid coupling: HC):

$$\begin{aligned} [[MCK]_s + [MCK]_f] z_n^{i+1} &= F_{CFD,n-1} - F_T \\ &= F_{CFD,n-1} + [MCK]_f z_n^i \end{aligned}$$

여기서, $[MCK]_s$ 는 구조 계수, $[MCK]_f$ 는 구조물 주변의 유체에 의해 유도되는 계수, F_T 는 등가 힘을 나타내며 위첨자는 시간 단계 (Time step) 내의 하위 반복을 나타낸다.

Loose 커플링 방법은 단일 하위 계산을 수행하는 반면, Tight 및 Hybrid 커플링은 하위 계산을 반복적으로 수행한다. 하이브리드 방법은 $[MCK]_f = -F_T$ 를 만족하는 이론적 또는 실험적 모델로써 시스템 전체를 안정화시킨다. 이러한 조건에 적합한 모델식으로는 대표적으로 얇은 판의 양력과 모멘트에 대한 Theodorsen의 경험식 모델을 사용할 수 있다[10,11,12]. Theodorsen은 무차원 주파수 k 로 표현되는 Theodorsen 함수 $C(k)$ 로 진동하는 날개면에 작용하는 양력과 모멘트로 표현한다.

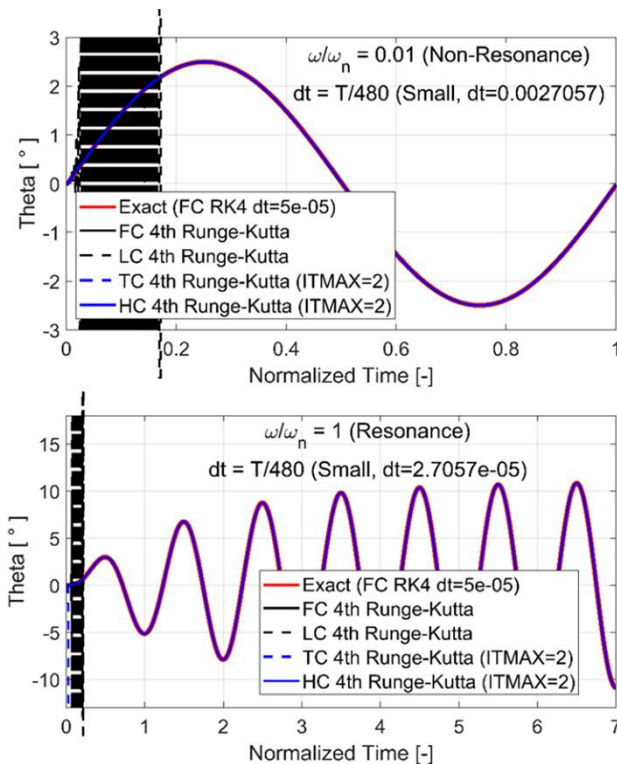


그림 4 다양한 FSI 방법의 시스템 안정성 비교 (위: 비공진, 아래: 공진)

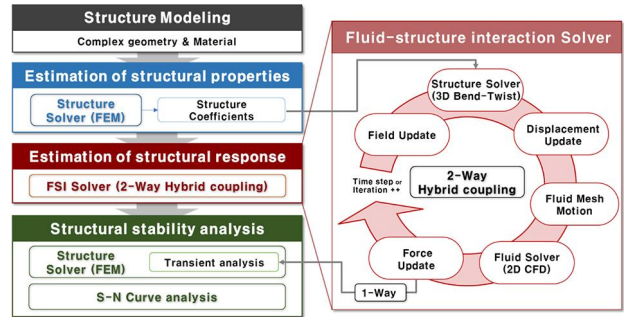


그림 5 양방향 하이브리드 커플링 유체구조연성 해석 및 피로파괴 진단 시스템 해석절차 순서도

Theodorsen 모델을 사용하여 앞서 소개한 FSI 해석방법들을 비교한 결과는 그림 4와 같다. 비공진 영역의 주파수에서는 Loose 커플링의 해석만 발산한다. Tight 커플링은 하위 반복의 횟수를 제한시켜도 공진 케이스에서 발산되는 반면 Hybrid 커플링 방법은 안정적인 해석이 가능하다. 이러한 결과는 다른 양방향 방법과 비교해 락인 현상을 해결하는데 Hybrid 커플링 기법이 효과적이라는 것을 개념적으로 나타낸다. 이러한 특성은 유체 밀도가 구조 밀도에 비해 무시할 수 없어 외력의 효과가 크고 해석안정성이 낮은 수중환경에서 매우 유용하다.

양방향 Hybrid 커플링 방법을 적용한 Bend-Twist 해석의 지배방정식은 다음과 같으며 전체적인 해석시스템은 그림 5와 같이 구성된다.

$$(M_s + M_f)z_n^{i+1} + (C_s + C_f)z_n^{i+1} + (K_s + K_f)z_n^{i+1} = F_{CFD,n-1}^i - F_{T,n-1}^i$$

2.3. OpenFOAM 플랫폼을 사용한 CFD 계산

수중날개의 구조적 안정성에 대한 락인 현상의 영향을 예측하기 위해 그림 5와 같이 Bend-Twist Hybrid커플링 FSI 해석을 사용하여 진동 응답을 예측한다. Bend-Twist 하이브리드 커플링 구조 솔버 코드는 오픈소스 전산유체 해석 플랫폼인 OpenFOAM 위에 개발되었다.

다양한 유속의 초기 조건으로 Bend-Twist FSI 해석에 앞서 Quasi-steady CFD 계산 결과를 획득하고 그 이후에 Transient해석을 수행한다. 격자는 원거리 유입구 경계는 코드 길이의 20배, Y+(무차원 벽 거리)는 1 미만으로 설정되었고 OpenFOAM에 내장된 pimpleFoam과 pimpleDyM-Foam솔버를 사용하였다. Quasi-steady CFD 계산과 Transient Bend-Twist FSI 해석 계산을 위한 CFD 솔버 설정 및 방식은 표 1에 나타났다.

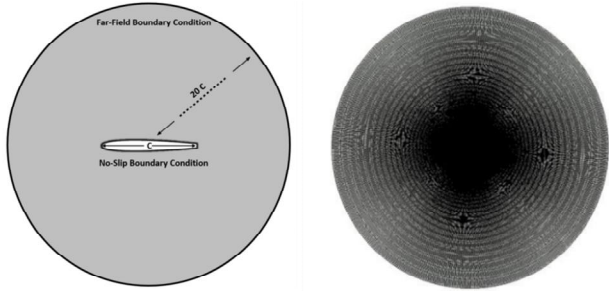


그림 6 CFD 해석을 위한 계산 도메인(왼쪽: 경계 조건, 오른쪽: 생성된 격자, 10,000개 격자)

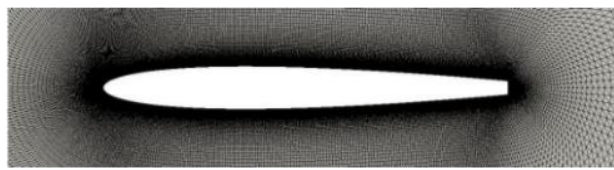


그림 7 수중의 주변 격자 확대
(위: 전체 수중익, 아래: 앞날(왼쪽) 및 뒷날(오른쪽) 부근)

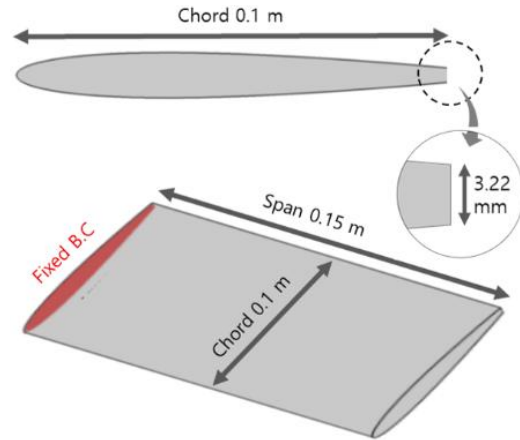


그림 8 수중의 경계조건

표 1 CFD 솔버 설정

Solver platform	OpenFOAM 4.x	
Flow solver	pimpleFoam (initial solution)	pimpleDyMFoam (FSI analysis)
Solver algorithm	PIMPLE(PISO+SIMPLE)	
Turbulence model	RANS, k- ω SST	
Time derivative schemes	Backward	Euler
Gradient schemes	Gauss linear	
Finite volume solvers	Velocity: Symmetric Gauss-Seidel	Pressure: PCG

PISO: Pressure implicit split operator
SIMPLE: Semi-implicit method for pressure-linked equations
PCG: Preconditioned conjugate gradient

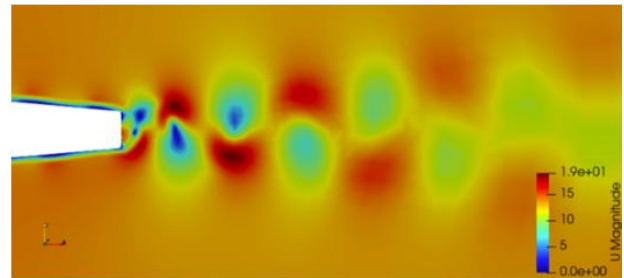


그림 9 Quasi-steady CFD 해석결과 예(12.5m/s)

표 2 Quasi-steady CFD 해석 비교검증

$Re = 1.1 \times 10^6$	Experiments (Zobeiri et al. ¹)	Results (quasi-steady)
Drag coefficients C_D	0.0240	0.0243
Lift coefficients C_L	0	-0.0019

3. Bend-Twit Hybrid Couping FSI해석을 이용한 구조응답해석

3.1 Quasi-steady CFD 계산

코드 길이 0.1m, 경간 길이 0.15m, 뒷날 두께 3.22mm의 NACA 0009 단면 프로파일을 실험 결과와 비교하여 검증을 수행했다.

그림 9에서 볼 수 있듯이, 수중의 후류의 와류흐름이 잘 관찰되며, 지배적인 주파수를 가진 일정한 진동을 나타내고 있다. 또한, 수중익의 상단과 하단에서 연속적으로 생성

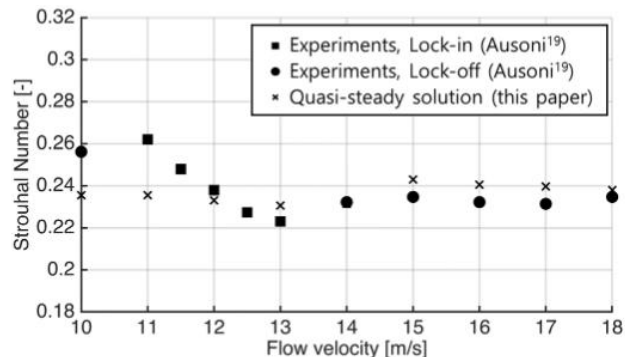


그림 10 다양한 유속에서 Quasi-steady CFD 해석결과와 Strouhal 수

(약 4%)는 2차원 유동모델링에 의한 일반적 오차에 해당하며[15] 결과의 Strouhal 수 또한 다양한 속도에서 Ausoni [16]의 실험결과와 잘 일치한다(그림 10).

3.2 Transient Bend-Twist FSI 시뮬레이션

그림 5에서 보는 바와 같이, Bend-Twist FSI 해석을 수행하기 전에COMSOL을 사용하여 전처리 구조 해석을 수행하여 수중익의 구조적 특성 (밀도, 무게중심, 고유진동수 등)을 얻는다. 그 후, 얻어진 특성 값을 사용하여 Open-FOAM 플랫폼에서 개발된 코드를 사용하여 Bend-Twist Hybrid-Coupling FSI 해석을 수행한다. 여기서 수중익의 경계는 개발된 구조 솔버와 유동 솔버 간의 단일 공유 인터페이스로 사용되어 수치 불안정성을 최소화한다.

하이브리드 커플링 FSI의 결과와 비교하고 락인 현상 해결 효과를 강조하기 위해 하이브리드 커플링이 없는(즉, 변형이 없는 수중익) FSI 해석을 수행했다(그림 11). 각 실선은 각 입사 유속에 대한 결과를 나타내고, 빨간색 실선은 유속 대비 Twist모드의 응답 주파수를 나타낸다.

모든 경우에서 구조의 고유진동수에 해당하는 200Hz 및 890Hz의 주파수 피크가 나타났다. 또한유속이 증가함에 따라 선형적(Strouhal의 법칙)으로 증가하는 후류 와류에 의한 나타나며 구조 고유 진동수(890Hz, 검은색 점선)와 일치하는 경우 공진에 의한 진폭의 증가를 보였다. 그러나

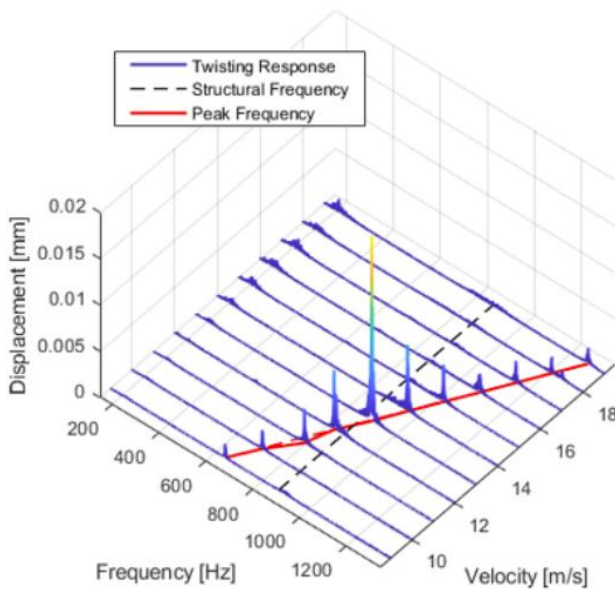


그림 11 Hybrid-Coupling이 적용되지 않은 고정 수중익에 대한 Transient Bend-Twist FSI 해석결과

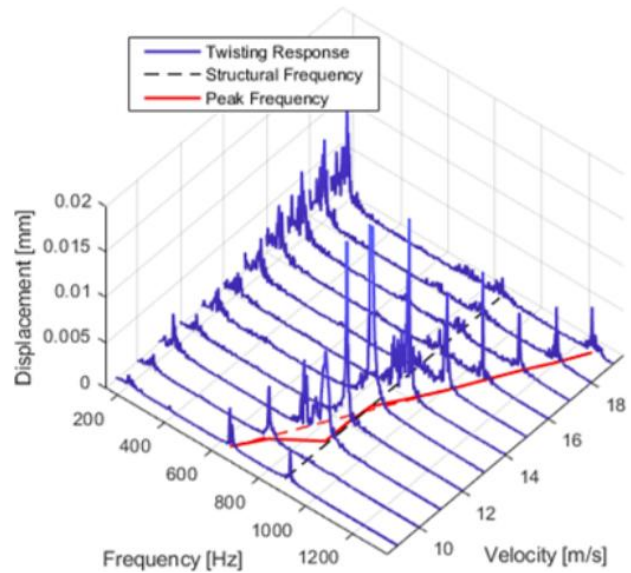


그림 12 수중익에 대한Transient Bend-Twist Hybrid-Coupling FSI해석결과

유속의 증가에도 고유진동수에 와류주파수가 고정되는 락인 현상은 나타나지 않다. 고정형 수중익(하이브리드 커플링 FSI 분석 없는 해석)의 결과는 Strouhal 법칙을 잘 따르며 유속이 증가함에 따라 주파수가 선형적으로 증가하는 것을 보였다.

Quasi-steady 해석결과를 초기 조건으로 사용하여 다양한 유속에 대해 Bend-Twist Hybrid-Coupling FSI 해석을 수행한 결과(그림 12) 락인 현상을 확인할 수 있었다. 앞선 고정형 수중익을 사용한 결과와 달리 Hybrid Coupling FSI 해석을 사용하여 얻은 결과는 12~14m/s의 유속범위에서 Strouhal 법칙을 따르지 않는 12m/s의 유속 근처에서 주파수 고정이 나타나며 13m/s에서 가장 높은 진동응답을 나타낸다.

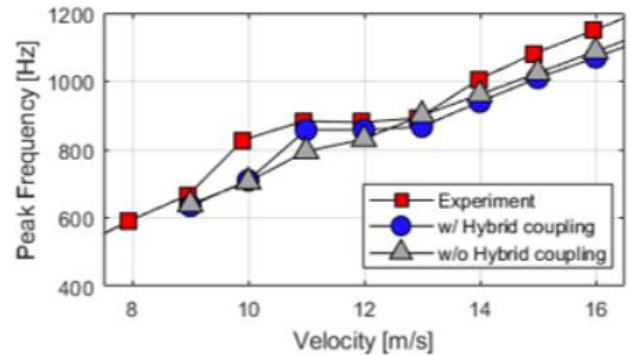


그림 13 다양한 유속에서 NACA0009 수중익의 진동주파수 비교

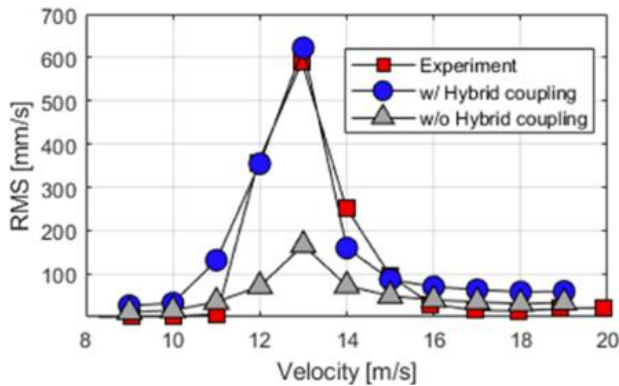


그림 14 다양한 유속에서 NACA0009 수중익의 진동 진폭 비교

락인 유속 범위에서 Hybrid Coupling 적용 유무에 따른 진폭의 차이는 500배 이상으로 나타나며 정확한 해석방법과 락인 효과의 중요성을 보여준다. 또한, Zobeiri 등의 실험 결과[14]와 비교했을 때, 다양한 유속에서 락인 주파수(그림 13)를 포함한 주파수 특성뿐만 아니라 진폭(그림 14)의 관점에서도 락인 현상의 효과를 예측하는 방법으로써의 유용성과 정확성 검증할 수 있다.

4. 맺는말

기존에는 FSI를 고려한 구조물의 와류 유발 진동에 대한 구조적 반응을 정확하게 예측할 수 있는 실용적인 방법이 없어 때문에 수중 부속물의 구조적 파손 위험에 대한 평가가 어려웠다. 특히 락인 현상의 위험성을 정량화하는 것은 불가능했다. 이러한 한계를 극복하기 위해 수중익 형상에 대해 락인 현상으로 인한 구조진동을 효과적으로 정량화할 수 있는 실용적인 방법론과 절차를 소개했다.

이 방법과 절차는 수치적 안정성과 정확성을 높이기 위해 OpenFOAM 플랫폼에 Bend-Twist Hybrid Coupling FSI 방법을 통합하여 개발되었다. Theodorsen 모델식과 단일 공유 인터페이스를 통해 제한된 자유도에서도 신뢰할 수 있는 구조 응답 추정이 가능해졌다.

개발된 방법을 사용하여 얻은 구조 진동 응답은 주파수와 진폭에서 기존 실험과 잘 일치하며 방법론의 유용성과 정확도를 확인할 수 있었으며 Hybrid Coupling을 적용하지 않은 결과와 비교했을 때, 락인 현상과 유속 범위가 명확하게 나타났다.

참고문헌

1. Blake WK. Mechanics of flow-induced sound and vibration, Volume 2: Complex flow-structure interactions. Academic Press, 2017.
2. Páridoussis MP, Price SJ and De Langre E. Fluid-structure interactions: cross-flow-induced instabilities. Cambridge University Press, 2010.
3. Hoskoti L, Misra A, and Sucheendran MM. Frequency lock-in during nonlinear vibration of an airfoil coupled with van der Pol Oscillator. Journal of Fluids and Structures 2020; 92: 102776.
4. Motta V, Guardone A and Quaranta G. Influence of airfoil thickness on unsteady aerodynamic loads on pitching airfoils. Journal of Fluid Mechanics 2015; 774: 460-487.
5. Di Domenico N, Groth C, Wade A, Berg T, and Biancolinia ME. Fluid structure interaction analysis: vortex shedding induced vibrations. Procedia Structural Integrity 2018; 8: 422-432.
6. Lee AH. Fluid structure interaction analysis: vortex shedding induced vibrations. PhD Thesis, Pennsylvania State University, 2014.
7. Young YL, Chae EJ and Akcabay DT. Hybrid algorithm for modeling of fluid-structure interaction in incompressible, viscous flows. Acta Mechanica Sinica 2012; 28(4): 1030-1041.
8. Chae EJ, Akcabay DT, Lelong A, Astolfi JA, and Young YL. Numerical and experimental investigation of natural flow-induced vibrations of flexible hydrofoils. Physics of Fluids 2016; 28(7): 075102.
9. Chae EJ, Akcabay DT and Young YL. Influence of flow-induced bend-twist coupling on the natural vibration responses of flexible hydrofoils. Journal of Fluids and Structures 2017; 69: 323-340.
10. Blake WK. Excitation of Plates and Hydrofoils by Trailing Edge Flows. Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design 1984; 106(3): 351-363.
11. Theodorsen T. General theory of aerodynamic instability and the mechanism of flutter. National Aeronautics and Space Administration: Washington, DC, USA 1979; 291-311.

12. Kussner HG and Jones WP. Nonstationary theory of airfoils of finite thickness in incompressible flow. AGARD Manual on Aeroelasticity, Part 2 (ed. Jones, W. P.) 1960.
13. Blevins R.D., Flow-Induced Vibrations. Van Nostrand Reinhold, New York, 1990.
14. Zobeiri A, Ausoni P, Avellan F, and Farhat M. How oblique trailing edge of a hydrofoil reduces the vortex-induced vibration. Journal of Fluids and Structures 2012; 32: 78-89.
15. Mittal R and Balachandar S. Effect of three-dimensionality on the lift and drag of nominally two-dimensional cylinders. Physics of Fluids 1995; 7(8): 1841-1865.
16. Ausoni P. Turbulent vortex shedding from a blunt trailing edge hydrofoil. EPFL, 2009. 