Experimental Study of VIV Characteristics of Free Hanging PVC Pipe under Forced Oscillation Conditions

Yong-Ju Kwon*, DongHo Jung^{ID}*, Byeong-Won Park*, Jae-Hwan Jung* and Seunghoon Oh*

*Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, KRISO, Daejeon, Korea

강제가진조건에서 자유롭게 매달린 PVC 파이프의 와류유기진동 특성에 관한 시험 연구

권용주* · 정동호^{ID}* · 박병원* · 정재환* · 오승훈*

*한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소

KEY WORDS: VIV(Vortex-induced vibration) characteristics 와류유기진동 특성, Experimental study 시험연구, Forced oscillation 강제가진, Environmental loads 환경하중, Riser 라이저

ABSTRACT: A series of model tests was carried out to investigate the vortex-induced vibration (VIV) characteristics of a free hanging PVC pipe under forced oscillation conditions. The prescribed displacement with a period and amplitude was forced at the top of the riser. The motion of the riser along its length was measured with underwater cameras in three dimensions. The top-excited responses in the inline direction and vortex-induced vibration in the cross-flow direction were examined in the time and frequency domains. Multi-peak frequencies in the VIV were demonstrated to be strongly dependent upon the Keulegan-Carpenter number, corresponding with the results of Blevin. It was found that the Reynolds numbers (excitation period) was a critical parameter for the dominant VIV characteristics, even under the condition of using the same Keulegan-Carpenter number, under the top-excited condition. In the resonance at the n th natural frequency by the forced-motion induced VIV frequency, the riser responded with a large amplitude and forced frequency, dominantly in the VIV CF direction.

1. 서 론

해양라이저(Marine riser)는 석유 및 가스 등의 연료를 해저로부터 상부부유체까지 이송하기 위한 구조물이다. 다양한 형태의 라이저 중 자유롭게 매달린 라이저는 해수온도차발전을 위한 취수용 라이저, 망간단괴 채취용 라이저, 그리고 FLNG(Floating liquified natural gas)의 냉각수 취수용 라이저 등으로 사용된다(Pettersen et al., 2013). 해양라이저는 파랑, 조류, 그리고 상부부유체 운동에 의한 가진 등의 다양한 하중에 의해 지속적으로 동적거동을 하게 된다. 특히, 일정 유속을 가지는 조류하중에 의해서 VIV(Vortex-induced vibration, 와류유기진동)이 발생하며, 상부부유체 운동에 기인하는 상부가진에 의해서도 VIV가 발생하여 피로파괴의 주된 원인이 된다.

Yin et al.(2018)은 TTR(Top tensioned riser)의 강제가진 조건에서의 VIV 응답을 모형시험을 통해 검토하였으며, VIV 응답은 RIFLEX의 수치해석 결과와 비교하여 자유감쇠 결과에서 얻은

고유주기와 유사한 값을 보였다. 상대적으로은 KC 수(Keulegan-Carpenter number)에서 VIV에 의한 가진직각방향(Cross-flow, CF) 응답은 대체로 안정적(Stable)인 결과를 얻었으며, 가진직각방향 응답은 가진 주파수의 2배 주파수 응답을 보였다.

Wang et al.(2017)은 자유롭게 매달린 라이저에 대한 모형시험을 수행하였으며, 부유체의 운동으로 인한 VIV 특성을 분석하였다. 상단 강제가진에 의한 라이저의 가진직각방향 응답은 가진방향(In-line, IL) 응답에 비해 높은 주파수를 가지며, 낮은 KC 수에서의 가진직각방향 응답은 시간에 따라 일정한 응답 형태를 보였으나, 높은 KC 수 조건에서 응답은 시간에 따라 불규칙적으로 변하는 응답 크기와 더불어 모드가 천이하는 현상을 보였다. Joseph et al.(2017)은 선박운동으로 인한 드릴링(Drilling) 라이저의 VIV 효과를 검토하였으며, KC 수에 따른 VIV 응답과 더불어 Drill string 회전으로 인한 응답을 함께 검토하였다. 또한, 선박 운동 및 조류 중 VIV 응답은 상용프로그램인 VIVANA를 이용하여 비교하였다. Sun and Xiao(2018)는 플로팅 실린더의

Received 14 September 2018, revised 14 October 2018, accepted 18 October 2018

Corresponding author Dongho Jung: +82-42-866-3962, dhjung@kriso.re.kr ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7265-8034

© 2018, The Korean Society of Ocean Engineers

This is an open access article distributed under the terms of the creative commons attribution non-commercial license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

VIM(Vortex-induced motion) 응답을 모형실험을 통해 검토하였으며, VIM 저감을 위한 Strake 부착 유무에 따라 VIV 응답을 비교하였다. 가진방향과 가진직각방향 응답의 크기와 더불어 응답 주파수 차이 등을 통해 Strake 부착 효과를 검토하였다. Liang et al.(2018)은 페어링(Fairing)을 부착한 모형실험을 통해 원형 실린더의 VIV 저감 효과를 검토하였으며, 페어링 각도에 따라 VIV 주파수와 lock-in 현상 그리고 Strouhal 수를 비교 검토하였다. Zhao(2011)는 VIV로부터 야기되는 Tensioned riser의 피로 손상에 대한 계산을 수행하였다. 모형실험에서 VIV 주파수에 대한 특성을 분석하고, VIVANA를 이용한 수치해석을 시도하였다. 측정된 주파수 성분은 RIFLEX를 이용한 고유치해석 결과와 비교되었으며, 동적응답으로 인한 피로손상을 Miner-Palmgren 법칙을 이용하여 검토하였다. Sukhov(2017)는 SLWR(Steel lazy wave riser)의 VIV 예측 연구를 수행하였으며, VIV 해석은 가진 직각방향과 가진방향을 포함하여 수행하였다. 실험을 통해 SLWR의 위치별 형상에 대한 동유체학적 데이터를 획득하였으며, VIVANA를 이용한 VIV 예측을 수행하였다. 여기서, SLWR의 부력제로 인한 형상의 민감성에 대한 연구와 더불어 피로 손상에 대한 평가를 수치해석적으로 제시하였다. Gustafsson(2012)은 FSI(Fluid-structure interaction)를 이용한 라이저의 VIV 해석을 수행하였으며, VIV로 인해 발생하는 라이저의 대변형을 고려한 수치해석을 수행하였다. FSI 계산에서 계산 효율을 고려하여 격자의 민감성을 검토하였으며, 난류 모델은 RANS를 활용하였다. FSI를 이용한 3차원 해석을 위해 계산의 정확도와 더불어 계산 효율에 대한 내용을 다루었다. 라이저 및 연직파이프의 강제가진 실험에 관한 연구는 다수 연구자들에 의해 수행되어지고 있으나, 강제가진 조건에서 라이저 길이에 따른 VIV 특성을 KC 수와 레이놀드수 관점에서 분석한 연구는 흔하지 않다.

본 연구에서는 자유롭게 매달린 PVC(Polyvinyl chloride) 파이프의 VIV 특성에 관한 시험을 수행하였다. 부유체의 운동에 기인하는 라이저의 VIV 특성을 분석하기 위해, 파이프의 상부 끝단이 일정 주기와 진폭으로 가진되는 파이프의 모형실험을 수행하였다. 시험 모형에 대한 모드 해석을 통해 구조물의 동적 거동특성을 예측하였으며, 가진방향 및 가진직각방향 거동에 대한 시계열 및 주파수응답 결과를 기반으로 VIV 특성을 분석하였다. 강제가진조건에서 지배적으로 영향을 미치는 KC 수에 따른 응답과 더불어, 레이놀드수(Reynold No.)와 감소속도(Reduced velocity)에 따른 VIV 특성을 분석하였다.

2. 모형시험

2.1 시험 모형

본 연구에서는 강제가진조건에서 자유롭게 매달린 PVC 파이프의 VIV 특성을 검토하기 위한 모형시험을 수행하였다. Table 1은 PVC 파이프의 주요제원을 보여주며, 대상 PVC 파이프는 길이 2.0m, 외경 13.5mm, 내경 12.5mm, 밀도 1,430kg/m³, 그리고 약 148의 세장비를 갖는다. Fig. 1은 모델 파이프와 파이프의 거동계측을 위해 설치한 Marker의 위치를 보여준다. 마커를 모델 상단으로부터 40~180cm 까지 설치하였으며, Fig. 1과 같이 총 16개의 띠 형태의 마커가 설치되었다(Jung et al., 2018). PVC 파이프의 상단 끝은 강제가진장치에 고정하고, 하단은 자유 경계

Table 1 Main dimension of the PVC pipe

Item	Unit	Model
Outer diameter (O.D.)	[mm]	13.5
Inner diameter (I.D.)	[mm]	12.5
Density	[kg/m ³]	1,430
Length	[mm]	2,000
Young's modulus	[GPa]	2.0
Boundary condition		Fix-Free

Fig. 1 Description of the PVC pipe [Jung et al., 2018]

Table 2 Modal periods of the PVC pipe

Mode	Modal period [s]
Mode 1	4.08
Mode 2	0.67
Mode 3	0.24
Mode 4	0.12

Fig. 2 Mode shapes of model riser

조건으로 자유롭게 매달린 파이프 형태를 구현하였다. 강제가진조건에서 파이프의 응답특성을 예상하기 위해 고유치해석을 수행하였으며, 1차 고유주기와 2차 고유주기는 각각 4.08초와 0.67초 이다. Table 2는 본 모형의 고유주기를 보여준다. 고유주기는 점수 조건으로 해석하였으며, 원형파이프의 형상을 고려한 부가질량 계수를 적용하였다. Fig. 2는 본 실험 파이프의 모드형상과 더불어 수중카메라 계측용 마커 위치를 보여준다.

2.2 가진조건

상부구조물의 운동은 라이저의 상단부에 직접적인 가진력으

Table 3 Forced oscillation conditions

Test ID	Amp. [mm]	Oscillation period [s]
001	40	10.0
002		6.0
003		4.209
004		1.834
005		1.171
006		0.862

Fig. 3 Experimental set-up & measurement

로 작용하기 때문에, 상부구조물에 의한 가진효과를 고려하기 위하여 일정주기와 진폭의 강제가진 실험이 필요하다. 본 연구에서 파이프의 상단은 일정 주기와 진폭으로 가진되며, 하나의 진폭에 대해 다양한 주기 조건에서 실험을 수행하였다. Table 3은 실험조건을 보여주는데, 실험모델의 고유주기와 가진주기 특성을 고려할 때 모델 파이프는 최대 2차 모드로 응답할 것으로 예상된다.

2.3 계측 항목

PVC 파이프의 응답은 수중 광학카메라를 이용하여 3차원 운동을 측정하였다. 수중계측 카메라는 하나의 영역을 2대의 카메라를 이용하여 3차원 운동을 계측하며, 정밀한 계측을 위해 3대의 카메라를 활용하였다. 16개의 마커를 설치하여 파이프 상단으로부터 40cm부터 180cm까지 각 위치별로 3차원 응답을 실시간으로 계측하였다(Fig. 3).

3. 결과 및 고찰

Fig. 4는 가진주기 $T_e = 10$ 초 조건에서 파이프의 3지점(상부 : 4, 5, 6, 중앙 : 10, 11, 12, 하단 : 16, 17, 18) 부근에서 각각 3개 점의 시간영역 응답결과를 보여주는데, 가진방향 응답은 길이에 따라 진폭이 거의 유사하게 나타나는 반면, 가진직각방향 응답은 하단으로 갈수록 진폭이 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 10초 가진 조건은 1차 모드 영역이기 때문에 가진방향 변위는 길이에 따라 변위가 유사하다. 반면, 가진직각방향 방향은 상부 끝단이 고정단, 하부끝단 자유단조건으로, VIV에 의해 발생하는 변위이기 때문에 상부단에 비하여 아래 단에서 변위가 크게 나타난다. 이 현상은 전체 형상에 대한 스냅샷(Snapshot)을 보여주는 아래의 Fig. 5에서 보다 정확히 알 수 있다. Fig. 5에서는 스냅샷과 PSD(Power spectrum density) 결과를 보여 준다.

가진방향 응답은 가진주파수인 $1^*\omega$ 성분이 지배적인 반면, 가진직각방향 응답은 고주파수로 나타나는 것을 볼 수 있는데, $4^*\omega$ 로 진동한다(Figs. 4-5). 강제 가진되는 파이프의 VIV 특성은 Blevin(2001)에서 설명된다. Blevin은 KC 수 조건에 따라 가진직각방향 응답 주파수가 결정된다는 것을 정립하였다. 파이프 끝단 부근의 가진방향 응답에 관한 KC 수는 약 22로 분석되었다.

Fig. 4 Inline and Cross-flow displacements for $T_e = 10$ seconds in time history

Fig. 5 FFT and snapshot for $Te = 10$ seconds Fig. 6 Cross-flow displacement for $Te = 6$ seconds in time history Fig. 7 FFT and snapshot for $Te = 6$ seconds

이 경우 VIV 주파수는 $4^*\omega$ 로 나타나기 때문에, 본 실험 결과는 Blevin(2001)의 연구결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 $Te = 6$ 초 조건에서 가진방향과 가진직각방향 응답을 시간영역으로 보여주고 있다. 이 조건에서 파이프 끝단에서 가진방향 응답의 KC 수는 약 23으로 $4^*\omega$ 성분의 VIV 현상이 지배적인 것으로 예상되었으나, $3^*\omega$ 성분이 지배적인 것으로 나타났다. 이는 $22 < KC < 30$ 인 영역에서 $4^*\omega$ 이 지배적이거나, 본 영역에서 정수배 성분의 응답이 발생한다. 또한, $15 < KC < 22$ 인 영역에서 주로 발생하는 $3^*\omega$ 의 영향으로 $3^*\omega$ 성분이 크게 나타난 것으로 예측된다. 시간영역에서 가진직각방향 응답을 보면, $1^*\omega$ 와 $3^*\omega$ 성분이 연성되어 뚜렷이 나타나는 것을 알 수 있다. 또한, Fig. 7(b)의 PSD(Power spectrum density)에서 $1^*\omega$ 성분은 $3^*\omega$ 성분에 비하여 크기는 작으나, 가진직각방향 응답에는 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다(Figs. 6-7). $Te = 10$ 초 조건에 대한 결과인 Fig. 5(b)의 $4^*\omega$ 성분 크기와 비교해 볼 때, $Te = 6$ 초 조건의 Fig. 7(b)의 $3^*\omega$ 성분은 크기가 작다. 그러나, Fig. 4와 Fig. 6의 끝단 가진직각방향 응답을 살펴보면 $Te = 6$ 초 조건의 응답이 크게 나타나는 것을 볼 수 있다.

이것은 $Te = 10$ 초 조건과 $Te = 6$ 초 조건에서 레이놀드수로 분석할 수 있다. 조화가진되는 파이프는 길이와 시간에 따라 레이놀드수가 변하므로, VIV 현상도 길이와 시간에 따라 변하게 된다. 두 조건 모두 연직파이프의 1차 모드 부근 영역에서 가진되므로 파이프 길이에 따라 분포하는 레이놀드수는 같으며, 속도가 바뀌므로 시간에 따라 레이놀드수는 변하는데 가진주기에 따른 최대값은 Table 4와 같다. Blevin(2001)은 레이놀드수에 따라 실린더 주변의 와류유기 현상을 고찰하였는데, 레이놀드수가 300을 넘으면서 난류 영역으로 천이되고, 500을 넘으면서 난류 상태가 된다는 것을 분석하였다. Table 4는 레이놀드수의 최대값을 보여주고 있으나, 최대값보다 작은 영역에서도 VIV는 발생하므로, $Te = 10$ s에서 $Te = 6$ s 조건으로 넘어가면서 레이놀드수가 증가되면서 와류유기 강

Table 4 Maximum Reynolds number according to Te

Te [s]	10.0	6.0	4.209
Re_max	335.7	559.6	797.7

도는 강해진다는 것을 예측할 수 있다.

Fig. 8에서는 $Te = 4.209$ s 조건에서 가진방향과 가진직각방향 응답을 시간이력으로 보여준다. 이 조건은 1차 고유주기 조건이므로 가진방향 변위는 가장 클 것으로 예상되었는데, Fig. 8에서 보는 바와 같이 가진방향 응답은 $Te = 10$ s, $Te = 6$ s 조건의 결과에 비하여 증가된 것을 알 수 있다. 반면, 가진직각방향 응답은 $Te = 10$ s, $Te = 6$ s 조건에서 사인파적으로 일정한 주기를 가지고 규칙적으로 나타났는데 반하여, $Te = 4.209$ s 조건에서는 불규칙한 응답을 보여주었다. 이 결과는 Table 4에서 언급했던 바와 같이, 동일한 진폭에서 가진주기가 짧아지면서 연직파이프의 거동 속도가 빨라지게 되고, 곧, 레이놀드수가 증가한다. 레이놀드수가 증가하여 500을 넘어서면서 VIV 현상은 난류유동 상태가 되기 때문에, Fig. 8의 가진직각방향 응답은 불규칙적으로 나타난다.

Fig. 9는 $Te = 4.209$ s 조건에서 가진방향 및 가진직각방향 응답의 주파수영역 결과를 보여주고 있다. 가진방향의 KC 수를 고려하면, 가진직각방향 응답은 각각 $3^*\omega$ 와 $4^*\omega$ 로 나타날 것으로 예상되었다. 연직 파이프 맨 아래쪽은 변위가 크기 때문에 $4^*\omega$ 로 VIV 현상이 나타나며, 중간 부분은 $3^*\omega$ 로 나타날 것으로 예상되었다. 그러나, Fig. 9(b)에서 보는 바와 같이 $1^*\omega$ 및 $3^*\omega$ 성분이 지배적으로 나타났다. 이 현상은 연직파이프 전체 길이를 따라 VIV 현상이 발생하여, $3^*\omega$ 및 $4^*\omega$ 성분이 나타나야 하나, 파이프 길이에 따라 전달되는 구조전달파(Structural propagation)에 의하여 서로 연성이 발생하였다. 구조전달파에 의해서 위치별로 발생한 응답이 전달되며, 그 결과 $3^*\omega$ 성분이 우세하여 주파수 영역

Fig. 8 Inline and Cross-flow displacements for $Te = 4.209$ seconds in time history

Fig. 9 FFT and snapshot for $Te = 4.209$ seconds

결과에 나타난 것으로 추정된다.

이상의 3가지 가진조건에서는 가진진폭은 동일하면서 주기만 다른 경우인데, 이 경우 KC 수는 동일하면서 최대유속 및 레이놀드수만 다른 경우이다. 유속에 따른 VIV 진동수는 Strouhal 수를 정의하는 아래 공식에 의해서 정의된다.

$$f_s = \frac{SU}{D} \quad (1)$$

여기서,

f_s : VIV 주파수
 S : Strouhal 수
 U : 유체 속도
 D : 파이프 외경

Strouhal 수를 0.18로 가정하여 3가지 조건에 대하여 VIV 진동수를 계산하면 Table 5와 같다. Table 5에서 보는 바와 같이, 실제 계측된 VIV 진동수와 이론식에 근거한 진동수의 차이는 일부 발생하기는 하지만, 강제가진 조건에서 발생할 것으로 예상되는 지배적인 VIV 주파수를 이론식으로 대략적으로 추정할 수 있다는 것을 알았다. 또한, KC 수가 같은 조건일지라도 주기에 따라 VIV 주파수는 다르게 나타나며, VIV 특성은 다르게 나타난다는 것을 알 수 있었다. Blevin(2001)에 의하면, 강제가진 조건에서 VIV 주파수는 KC 수에 의해 지배된다고 알려져 있다. 그러나, KC 수 뿐만 아니라, 레이놀드 수도 VIV 주파수를 결정하는 중요한 인자이기 때문에, 이를 고려하여 VIV를 예측해야 한다는 것을 알 수 있었다.

Fig. 10은 $Te = 1.834s$ 조건에서 가진방향와 가진직각방향 방향

의 전체 형상 및 3개 절점에서 주파수영역 응답을 보여주고 있다. 주기가 짧아지면서 전체 형상이 1차 모드에서 2차 모드로 옮겨가는 것을 알 수 있다. 가진방향의 전체 형상을 보면 상부 부근에서 KC 수는 약 16, 중간 부근에서 약 9.2, 하부 부근에서 16.4정도를 나타내고 있다. Blevin의 연구결과에 의하면, 각 지점에서 발생할 것으로 예상되는 VIV 주파수는 가진 주파수의 2~3배 진동수이다. 그러나, 가진직각방향 주파수영역 응답을 살펴보면, 가진주파수의 1배 및 2배 주파수로 응답하는 것을 알 수 있다. 가진 주기가 상대적으로 긴 경우의 가진직각방향 응답은 가진주기인 $1*\omega$ 성분보다 $n*\omega$ 성분이 크게 나타났으나(Fig. 5, Fig. 7, Fig. 9), 본 조건에서는 $1*\omega$ 성분의 응답이 큰 것을 알 수 있다. 이 결과는 시간영역 응답을 보여주는 Fig. 11에서 명확하게 볼 수 있다. 6초 가진주기 조건에서는 가진직각방향 응답이 불규칙적으로 나타나며 가진주기의 $3*\omega$ 배 성분이 지배적으로 나타났으나, 본 조건에서는 가진주기와 같은 $1*\omega$ 성분이 지배적으로 VIV가 발생하는 것을 알 수 있다. 이 현상을 설명하기 위하여 감소속도 영역에 따른 Lock-in 현상을 설명한다.

감소속도(Reduced velocity)는 구조물 고유진동수와 VIV 진동수와 의 관계를 규명하는 무차원수인데, 아래 식과 같이 정의된다.

$$R_v = \frac{U}{(f_n \cdot D)} \quad (2)$$

여기서,

U : 유체 속도
 f_n : 파이프의 n차 고유진동수
 D : 파이프의 외경

Table 5 Comparison of VIV frequency according to excitation conditions under same KC number

Excitation periods [s]	10.0	6.0	4.209
Velocities in max [cm/s]	2.5	4.2	6.0
Reynold number	323.3	538.9	768.2
Calculated VIV freq. [Hz]	0.35	0.58	0.83
Measured dominant VIV freq. [Hz]	0.4	0.5	0.83
Differences [%]	13	16	0

Fig. 10 FFT and snapshot for $T_e = 1.834$ seconds

Fig. 11 Inline and Cross-flow displacements for $T_e = 1.834$ seconds

감소속도에 따른 파이프의 응답은 파이프의 질량 및 감쇠 등에 따라 피크 폭은 다르게 나타나는데, 대개 감소속도가 5~7 사이에서 폭넓은 피크가 발생한다(Park et al., 1999). 2차 고유주기인 0.67(s) 및 $T_e = 1.834$ s 조건에서 최대속도를 나타낼 때 감소속도를 계산해보면, 약 7.06을 나타낸다. 즉, $T_e = 1.834$ s 조건에서 VIV가 발생하면 파이프의 2차 고유진동수 부근에서 록-인(Lock-in)이 발생한다는 것을 알 수 있다. 따라서, Fig. 11에서 보는 바와 같이 가진직각방향 시간영역 변위가 가진주기 $1^*\omega$ 성분으로 나타나며, 가진직각방향 진폭이 가진방향 진폭과 유사한 값으로 큰 변위를 나타낸다.

Fig. 12에서는 가진주기가 더 짧아지는 $T_e = 1.171$ s 조건에서 가진방향과 가진직각방향에서 연직파이프의 전체 형상 및 주파수영역 응답을 보여주고 있다. $T_e = 1.834$ s 조건에 비하여 가진직각방향 변위가 감소한 것을 알 수 있는데, 이 조건에서 감소

속도는 약 11.1을 나타내기 때문에 2차 고유주기 공진 영역을 벗어났기 때문이다. $T_e = 1.834$ s 조건에서는 가진직각방향에서 $1^*\omega$ 성분이 지배적으로 나타났는데 비하여, $T_e = 1.171$ s 조건에서는 $1^*\omega$, $2^*\omega$, $3^*\omega$ 성분의 가진직각방향 응답이 나타났다. 특히 $3^*\omega$ 성분이 가장 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 가진직각방향의 형상은 다른 가진주기 조건과는 달리, 연직파이프의 상단부와 중간부에서 변위가 크게 나타났다. 이것을 보다 자세히 분석하기 위하여 연직파이프의 길이에 따른 절점에서 주파수 응답 특성을 분석하였다(Fig. 13). 상단부의 약 1/3 지점인 P.8에서 VIV 변위가 가장 크게 나타났는데, 그 지점에서는 $3^*\omega$ 성분이 가장 지배적으로 나타났다. P.12 지점도 P.8 지점과 유사한 응답을 보였으나, 하단부인 P.16 지점에서의 VIV 거동은 $1^*\omega$ 성분이 지배적으로 나타나는 것을 알 수 있다. 즉, 연직 파이프의 길이에 따라 지배적인 주파수는 다르게 나타나며, 반면 구조

Fig. 12 FFT and snapshot for $Te = 1.171$ seconds

Fig. 13 FFT at positions along riser length $Te = 1.171$ seconds

Fig. 14 FFT and snapshot for $Te = 0.862$ seconds

Fig. 15 Inline and Cross-flow displacements for $Te = 0.862$ seconds

전달파에 의해서 모든 지점에서 같은 주파수 성분이 모두 나타나는 것을 볼 수 있다.

Fig. 14에서는 $Te = 0.862s$ 조건에서 연직 파이프의 전체 형상 및 주파수 응답 결과를 보여주고 있다. 2차 고유주기가 0.76초임을 고려할 때, 가진방향의 전체 형상은 2차 모드 형상과 유사하게 나타난다. Fig. 15에서는 시간영역에서 각각 3개의 절점에 대한 가진방향 및 가진직각방향 응답을 보여주고 있다. 상부점에서 가진직각방향 응답은 $1^* \omega$ 성분이 지배적이다. 그러나, 가운데 점과 하부 점에서의 가진직각방향 응답은 $2^* \omega$ 성분이 지배적으로 응답하는 것을 볼 수 있다. 가운데점과 하부점에서의 KC 수는 약 10이며, 이 조건에서는 $2^* \omega$ 성분으로 VIV가 발생한다는 것을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 강제가진을 받는 자유롭게 매달린 PVC 파이프의 VIV 특성에 관한 모형시험을 수행하였다. 강제가진은 하나의 진폭에 대해 다양한 주기 조건에서 실험을 수행하였으며, VIV 특성을 KC 수, 레이놀드수, 감소속도에 대해 분석하였다. 모형시험을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 가진주기 10초와 0.862초의 강제가진조건에서 KC 수는 약 22와 10이며, 이 때 VIV 응답은 가진주파수의 4배와 2배 성분이 주로 발생하였다. 이 결과는 KC 수에 따른 VIV 주파수를 정의하는 참고문헌의 연구결과와도 잘 일치하는 것을 알 수 있었다(Blevin, 2001).

(2) 가진 조건에 따라 연직 파이프의 길이를 따라 지배적인 주파수는 다르게 나타나는 반면, 구조전달파에 의해서 모든 지점에서 같은 주파수 성분이 모두 나타나는 것을 볼 수 있다.

(3) 동일한 가진진폭 조건에서 KC 수가 같은 조건일 지라도, 주기가 다른 경우에는 최대 레이놀드수가 다르게 나타나며, 레이놀드수가 큰 조건에서 와류강도가 강하게 발생하여 VIV 응답도 크게 나타났다. Blevin은 강제가진 조건에서 KC 수에 의해서만 VIV 특성을 분석하였으나, KC 수 뿐만 아니라 가진주기 효과를 고려해야 한다는 것을 알 수 있었다.

(4) 강제가진되는 파이프의 VIV 응답 주파수는 가진조건에서 최대 속도를 고려하여 Strouhal 수 관계에 의해서 추정될 수 있다.

(5) 강제가진에 의해 발생하는 VIV 주파수가 파이프 가진직각방향 진동수의 n 차 고유진동수와 공진조건이 되면, 가진직각방향 응답은 가진주파수를 지배적으로 가지면서 큰 진폭으로 응답한다.

본 연구성과는 자유롭게 매달린 다양한 해양파이프의 거동특성 분석에 활용될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 선박해양플랜트연구소의 주요사업인 “초심해역용 라이저(SLWR) 설계엔지니어링 핵심기술 개발”(PES9280)의 연구 성과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- Blevin R.D., 2001. Flow-Induced Vibration. Second edition.
- Gustafsson, A., 2012. Analysis of Vortex-Induced Vibrations of Risers. Master's Thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.
- Joseph, R.S., Wang, J., Ong, M.C., Jakobsen, J.B., 2017.

- Vortex-induced Vibration (VIV) Effects of a Drilling Riser Due to Vessel Motion. First Conference of Computational Methods in Offshore Technology(COTech2017), 276, 1-10.
- Jung, D.H., Kwon, Y.J., Park, B.W., Jung, J.H., Choi, J.S., Cho, S.K., Sung, H.G., 2018. Study on the Measurement System of Behavior of a Slender Structure Using an Underwater Camera Which is Applied in DOEB. *Journal of Navigation and Port Research*, 42, 1-7.
- Liang, S., Wang, J., Hu, Z., 2018. Vortex-induced Vibration of a Circular Cylinder with Fairings. *Proceedings of the Twenty-eighth International Ocean and Polar Engineering Conference*, 1, 966-970.
- Park, H.I., Cho H.J., Jung, D.H., 1999. Response Analysis of Deep Ocean Risers to Vortex-Shedding by Numerical Analysis. *Journal of Ocean Engineering Technology*, 13, 65-72.
- Pettersen, J., Nilsen, Ø., Vist, S., Noreng Giljarhus, L.E., Fredheim, A.O., Aasekjaer, K., Neeraas, B.O., 2013. Technical and Operational Innovation for Onshore and Floating LNG. 17th International Conference & Exhibition on Liquefied Natural Gas(LNG 17), 1, 1-12.
- Sukhov, A.A., 2017., VIV Prediction of Steel Lazy Wave Riser. Master's Thesis, University of Stavanger, Stavanger, Norway.
- Sun, H., Xiao, S., 2018. Experimental Study on Vortex-induced Motions of Floating Cylinder Considering the Impact of Helical Strakes. *Proceedings of the Twenty-eighth International Ocean and Polar Engineering Conference*, 1, 961-965.
- Wang, J.G., Fu, S.X., Wang, J.S., Li, H.J., Ong M.C., 2017. Experimental Investigation on Vortex-induced Vibration of a Free-hanging Riser under Vessel Motion and Uniform Current. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 139(4), OMAE-16-1048.
- Yin, D., Passano, E., Lie, H., 2018. Dynamic Response of a Top-tensioned Riser Under Vessel Motion. *Proceedings of the Twenty-eighth International Ocean and Polar Engineering Conference*, 1, 979-986.
- Zhao, Z., 2011. Calculation of Fatigue Damage for Tensioned Risers from Vortex Induced Vibrations. Master's Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway.