

Confinement Effect Analysis Of Suction Pile In Ground Soil On The Basis Of Natural Frequency Measurement

고유진동수 기반 석션기초의 지반구속효과 분석

Moo Sung Ryu, Jun Shin Lee, Jong Hwa Lee, Yun Ho Seo
 유무성, 이준신, 이종화, 서윤호

Abstract

This paper presents the measuring process of dynamic properties of offshore wind power foundation and provides consideration of each step. This Guideline enables to maintain consistent measuring procedure and therefore increase the reliability of test results. Small scaled suction bucket foundation was fabricated to represent the commercial support structure installation mechanism and two cases(free-free, free-fixed) of dynamic tests were performed at workshop. From the tests, the importance of dynamic properties of connection part between suction bucket and tower was figured out. More over, types and configuration of measuring devices are recommended which can help find the natural frequency of wind turbine foundation correctly. In field test, it was found that the natural frequency of suction bucket foundation was increased linearly with the penetration depth due to the confining effect of ambient soil. Meanwhile, it was not easy to get an enough excitation force with normal impact hammer because the N.F of suction bucket model was in the lower range of 0 Hz ~ 5 Hz. Therefore, new excitation method which has enough force and can excite lower frequency range was devised. This study will help develop safety check procedure of suction bucket foundation in field at each installation stage using the N.F measurement.

Keywords: Offshore wind power, Suction pile, Excitation force, Frequency Response Function, Confinement Effect

1. 서론

해상풍력은 신재생에너지원 중에서 기술완성도가 높고 대규모 개발이 가능할 뿐만 아니라, 이용률이 높아 Fig. 1에서와 같이 유럽을 중심으로 매년 1GW 이상 단지가 건설되는 등 지속적으로 성장하고 있는 분야이다. 단지개발이 확대됨에 따라 설치위치는 점점 외해로 향하고 있고 설치수심 또한 그동안 주목받지 못했던 중대수

심 영역으로 이동하고 있다. 그에 따라, 해상운송 및 하부기초의 사업비 비중이 날로 증가하고 있으며, 중대수심 영역에서 경제성을 확보할 수 있는 부유이송방식 및 신개념 하부기초의 개발이 최우선 과제로 대두되고 있다.

Fig. 2는 수심변화에 따른 사업비의 변화를 나타내는 자료인데,

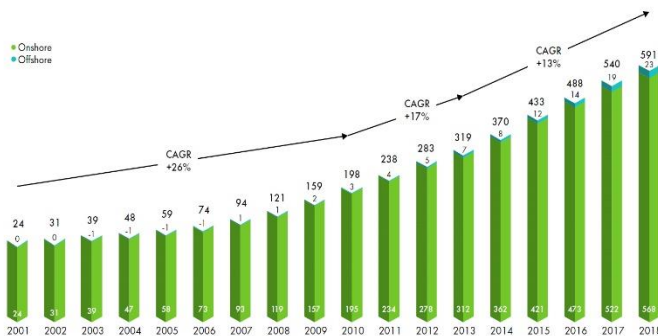


Fig. 1. Global cumulative offshore capacity 2018

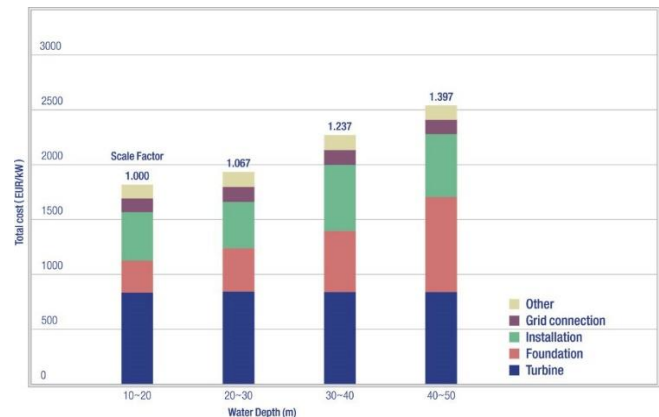


Fig. 2. Scale factor of cost with respect to water depth

Article Information

Manuscript Received January 25, 2022, Accepted April 28, 2022, Published online December 30, 2020

The authors are with KEPCO Research Institute, Korea Electric Power Corporation, 105 Munji-ro Yuseong-gu, Daejeon 34056, Republic of Korea.

Correspondence Author: Moo Sung Ryu (faust001@kepco.co.kr)



This paper is an open access article licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International Public License. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>

This paper, color print of one or more figures in this paper, and/or supplementary information are available at <http://journal.kepco.co.kr>

Table 1
Specification of Accelerometer

Category	Specification	Details
No. Axis	One	General Purpose
Output	Charge Type	Charge
Frequency Range	0.1-4.8k Hz	low-frequency
Sensitivity	100 pC/g	High Sensitivity
Resolution	0.02 mg	



Fig. 3. Impact Hammer

보는 바와 같이 중대수심 영역에서는 하부기초의 사업비 증가폭이 타 비용요소에 비해 매우 높음을 알 수 있다. 해상풍력 산업이 성숙기에 접어든 유럽에서는 이에 대한 대안으로 석션기초의 개발 및 현장실증을 통한 검증을 적극적으로 추진해왔다.

석션기초란, 대형 강관파일 내부의 물을 펌프를 통해 배출하고 이때 발생하는 파일 내외부의 수압차를 이용하여 기초를 지반에 관입하는 신개념 설치공법으로서, 소음과 진동이 없고 해저면 평탄화 작업이 필요치 않은 것이 큰 특징이다. 또한, 대형 해상장비가 필요 없고 부유사 발생이 없는 친환경기초이며 설치시간 또한 3일 이내로서 대수심 영역의 해상풍력 기초로서 강력한 대안으로 떠오르고 있다. 본 논문에서는 이러한 석션기초 모형제작을 통해 고유진동수 기반의 해상풍력 하부기초 안정성 체크방안을 제시하고자 한다. 이를 위해 하부기초의 동특성을 정확히 측정할 수 있는 계측기 종류, 설치위치 그리고 설치간격 등에 대한 가이드라인을 제시하였으며, 공장시험과 현장시험을 통하여 계측을 통한 고유진동수 측정의 정확성과 안전성 평가의 유효성을 확인하였다.

II. 계측 개요

2.1 계측장비

해상풍력 하부기초는 고유진동수가 수 Hz 이하이기 때문에, 정확한 측정을 위해서는 측정할 수 있는 주파수의 하한치가 낮아야 한다. 즉, 저주파수용 가속도계를 사용하여야 하며 Table 1과 같은 사양 혹은 동등 이상의 가속도계를 사용하여야 한다.

또한, 충격가진을 위한 장비가 필요한데 본 시험에서는 힘 측정센서(Force Transducer)를 구비하고 있는 충격해머(Impact Hammer)를 사용하였다. 일반적으로 원활한 구조물 가진을 위해서는 최대 10kN의 충격력을 가할 수 있어야 하고, 최대 가진 주파수는 500Hz 이상이면 충분하다. 해머의 Tip 부위는 가진 위치나 응답특성에 따라 Fig. 3과 같이 여러 가지 재질로 바꾸어가면서 실험할 수 있다.

Table 2
Specification of Impact Hammer

Category	Specification
Sensitivity	0.225mV/N
Range Full Scale	22.2kN
Maximum Force	44.4kN
Frequency Range	0.5kHz
Max. Compression	22.2kN

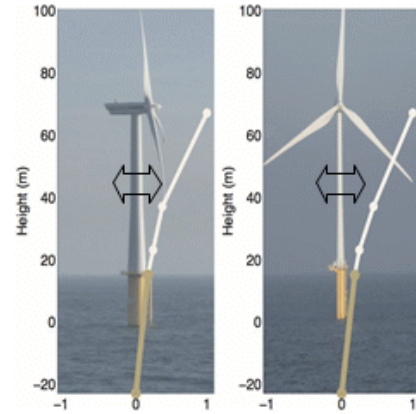


Fig. 4. Directions of Measurement

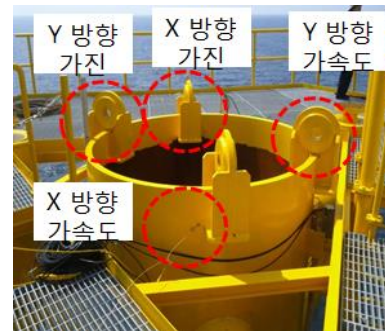


Fig. 5. Example of Foundation Measurement

Table 2는 실험에 사용된 충격해머의 제원을 나타낸다.

시험에는 주파수 분석장치 또한 필요한데, 이 장치는 충격신호와 응답신호를 수집하고 주파수 분석을 실시간으로 수행하는 것으로 4 채널 동시 측정이 가능하여야 한다. 본 시험에서는 하한 주파수 범위가 0 Hz이며 분해능은 0.01 Hz 미만인 것을 사용하였다. 주파수 분석장치는 측정환경이 해상임을 고려하여 자체전원으로 측정이 가능한 것을 사용하였고, 다양한 조합의 응답함수를 분석할 수 있는 소프트웨어가 탑재된 것을 채택하였다. 교정장치는 가속도계 센서의 교정을 위한 것으로 운용상태의 진동레벨을 정확하게 파악하기 위해 필요하며, 일반적으로 159.15 Hz(1000 rad/s)에서 10m/s²의 레벨을 나타내는 것을 사용한다.

2.2 계측위치

풍력발전기의 경우, Fig. 4와 같이 주풍속 또는 나셀의 방향에 따라 주방향(Fore-After)과 측방향(Side by Side)으로 나누며, 이 두



Fig. 6. Dynamic Test In Workshop

방향의 공진주파수를 모두 측정할 수 있는 위치를 선정하여 가속도계를 설치하여야 한다. 또한, 각 방향에서 최소 높이별 2점 이상이 측정되어야 한다. 이때, 현장상황을 고려하여 측정 높이는 데크와 같이 인력 접근이 가능한 구조물에서 가능한 한 높은 점을 기준으로 설정하여야 한다.

또한, 높이별 센서의 거리는 전체 타워길이의 최소 1/10 이상이 되도록 이격시켜야 하지만, 작업자의 안전 및 접근성을 고려하여 적절하게 간격을 조정할 수 있다. 주방향 확인이 가능한 발전기를 제외한 기타 구조물의 경우에는, 주 진동방향의 확인이 어렵기 때문에 사전해석을 통해 주방향을 선정하여야 하며, 이후 정해진 주방향에 따라 측정위치 및 측정개소를 선정해야 하는데 이는 앞서 설명한 풍력발전기의 경우와 동일하다.

2.3 계측방법

모노포드형 석전기초와 같이 단품 지지구조물의 고유진동수 시험은 일반적인 제약조건(해수에 의한 댐핑 혹은 지반효과 등)이 없기 때문에, 주로 제조공장에서 Fig. 6과 같이 시험체에 대해 일반적인 충격응답시험을 시행한다. 이때, 측정센서의 설치개소는 부재의 크기 등을 고려하여 전문가의 사전검토를 통해 결정하며 별도의 정해진 기준은 없다. 또한, 지지구조물이 단독으로 해상에 설치된 이후에도 일반적인 임팩트 해머를 이용한 충격응답시험을 수행하는데 이는 하부기초에 타워나 터빈 등의 탑재물이 접속되기 전에는 비교적 응답형태가 단순하기 때문이다. Fig. 7은 일반적인 시험절차를 보여준다.

터빈이 설치된 이후에는 대부분의 경우 변위가 가장 큰 지점(나셀 혹은 기상탑 상부)에의 접근이 불가능하기 때문에 임팩트 해머를 통한 가진이 쉽지 않다. 그러나, 이 경우에는 타워 상부에 큰 매스가 설치되어 있어 바람이나 파도에 의해 구조물이 쉽게 가진되기 때문에 응답이 비교적 정확하게 나타난다. 따라서, 이때에는 앞서 설명한 임팩트 해머를 이용한 시험과 병행하여 자체의 가진력으로 구조물 응답을 구할 수 있다. Fig. 8은 이러한 정상가진 조건에서의 응답시험 절차도를 보여준다. 이와는 별도로 풍력발전기의 경우에는 시운전 기간 동안 비상정지에 의한 터빈의 응답시험도 가능하다. 단, 측정위치와 개소에 대해서는 운용사 및 제작사의 검토를 통해 최적조건을 도출하여야 한다.

III. 측정변수 및 수치해석

3.1 측정변수

해상풍력 하부기초에 대한 고유진동수 시험 시 얻어지는 주요 측정변수는 주파수 응답함수(FRF : Frequency Response Function)와

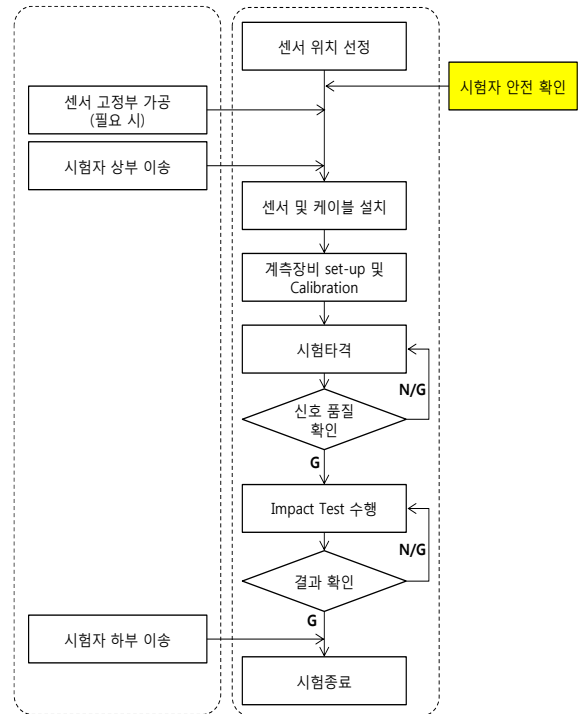


Fig. 7. Procedure of Impact Test

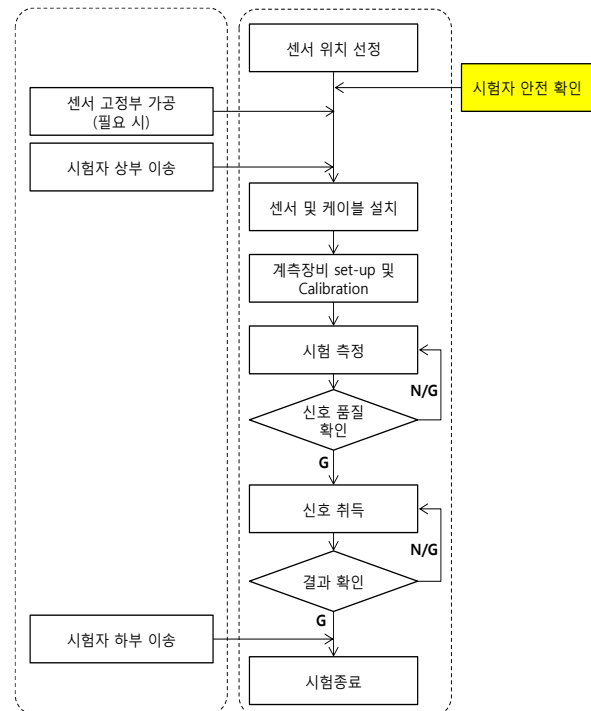


Fig. 8. Procedure of Normal Excitation

가속도 스펙트럼 두 가지가 있다. 전자는 제어계에서 신호의 전달 요소에 정현파상의 입력을 주었을 때, 정상상태에서 응답 출력을 주파수 관계로 나타낸 것이다.

동작신호와 조작량의 관계가 선형일 때는 출력신호도 정현파형이 된다. 이때 양 신호의 진폭 및 위상은 달라지는데 그에 따른 주파수 응답을 구할 수 있다. Fig. 9은 이러한 주파수 응답함수의 측정 및 산출 절차도이다. 앞서 2.1절에서 언급한 바 있는 주파수 분석장치는 주파수 응답함수를 자동으로 산출할 수 있는 기능을 제공하

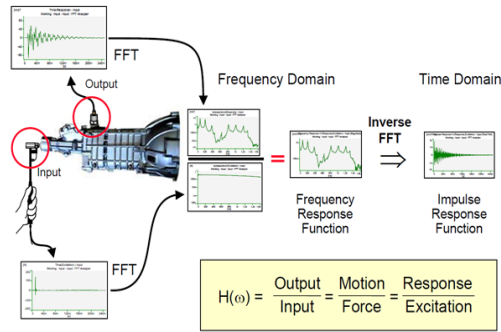


Fig. 9. Frequency Response Function

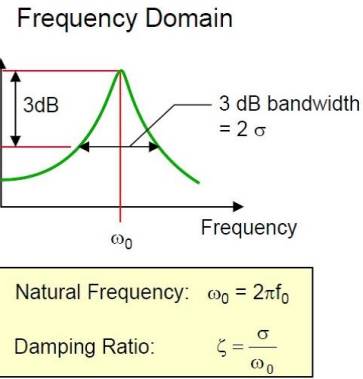


Fig. 12. Damping Ratio Derivation

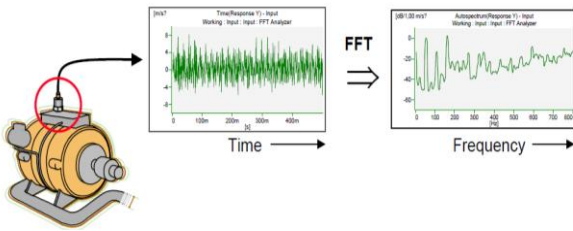


Fig. 10. Frequency Response of Acceleration

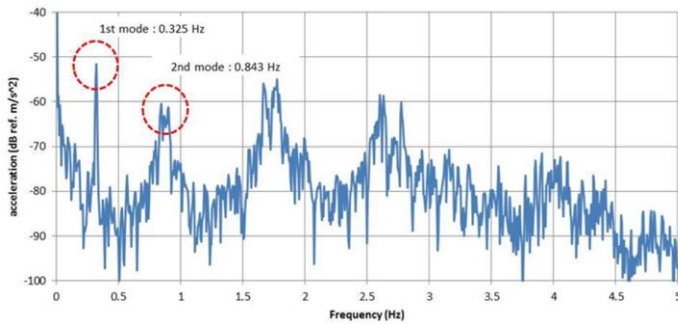


Fig. 11. Peak Picking Method

고 있으므로, 별도의 매뉴얼에 따라 설정하여야 한다. 이때 고려해야 할 주요인자는 다음과 같다: Force Window Time Constant, Exponential Window Time Constant, Time Length, Number of average(the number of impact). 두 번째는 가속도 스펙트럼인데 이 또한 주파수 분석장치에서 자동으로 산출되므로 별도의 매뉴얼에 따라 설정 기준을 제시하여야 한다. 이때, Window Type, Overlap 및 Number of Average를 고려하여야 한다. Fig. 10은 가속도 스펙트럼 측정 및 산출 개념도를 보여준다.

3.2 공진 주파수 산출

3.1절에 설명한 주요변수에 대하여 주파수 응답함수의 크기와 가속도 주파수 스펙트럼의 부분적 최고값(Peak)을 확인하여 우리의 주요 관심사인 공진 주파수를 산출한다. 해상풍력 구조물의 안전에 있어서 공진 주파수는 매우 중요한 요소인데, 이는 해수면으로부터 약 100m가 넘는 높은 위치에 나셀과 같은 100톤 이상의 중량물을 갖는 풍력터빈의 특성상 바람과 파도에 의해 쉽게 가진이 되고, 외부의 가진 주파수가 구조물의 고유진동수와 일치하게 되는 경우 공진에 의한 구조물 파괴 위험이 있기 때문이다. 따라서, 해상풍력 터빈 및 지지구조물 설계에서는 반드시 풍력터빈의 운영범위에서 구조물의 고유진동수가 외력에 의한 가진 주파수 영역대를 피하도록

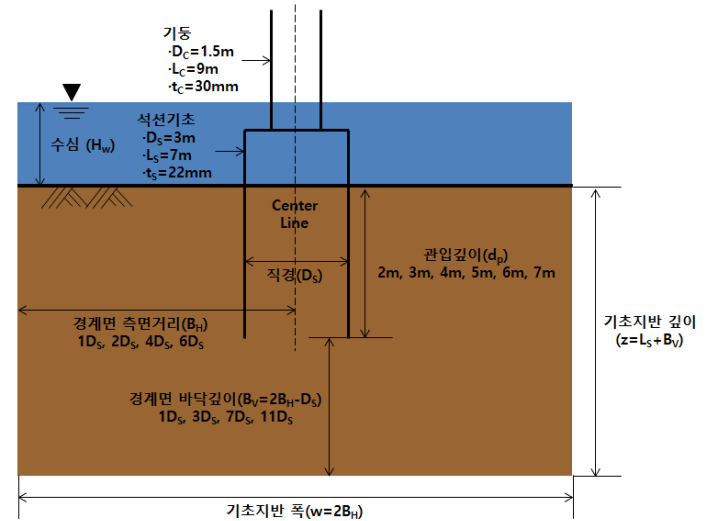


Fig. 13. Numerical Analysis Model of Suction Pile

통합하중해석을 수행하여야 한다. 이러한 공진주파수를 찾는 과정에서 여러 개의 모드가 서로 유사한 주파수 대역에 있어 구분이 모호한 경우에는 이를 찾아내기가 쉽지 않지만, 해상풍력 하부기초의 경우에는 저차 모드가 비교적 명확하게 측정되기 때문에 첨두점 선별법(Peak Picking)의 적용이 가능하다. Fig. 11은 이러한 첨두점 선별법에 의한 공진 주파수 산정과정을 보여준다.

3.3 모달 감쇠계수 산출

모달 감쇠계수란 진동이 얼마나 빠르게 감쇠되는지를 나타내는 지표로서 주파수 응답함수로부터만 산출이 가능하다. 감쇠비는 시스템 파라미터로서 무차원 값을 가지며 ζ를 이용하여 표기한다. Fig. 12는 감쇠계수의 산출방법과 감쇠비의 정의를 나타낸다.

3.4 수치해석

구조물의 동적응답에 대한 기본적인 특성과 거동을 입증하기 위해선 그 구조물의 고유진동수와 진동 모드형상의 검토가 필요한데, 이것은 고유진동수가 구조물의 동적응답에 영향을 미치는 가장 중요한 변수이기 때문이다. 고유진동수는 지반의 강성뿐 아니라 구조물을 구성하는 각 부분의 질량, 강성, 길이 및 재료 특성값과 같은 변수에 영향을 받는다. 특히, 높은 안전성이 요구되는 구조물의 안정성을 평가할 때는 지반-구조물 상호작용을 고려한 동해석을 수행하여 지반-구조물 상호작용이 구조물의 고유모드에 미치는 영향

Table 4
Natural Frequency Test Results at Workshop

MODE	Numerical	1 ST TEST	2 ND TEST
1	6.5	6.5	6.63
2	7.0	-	-
3	18.5	18.5	18.9
4	19.1	19.3	19.6
5	35.4	35.7	36

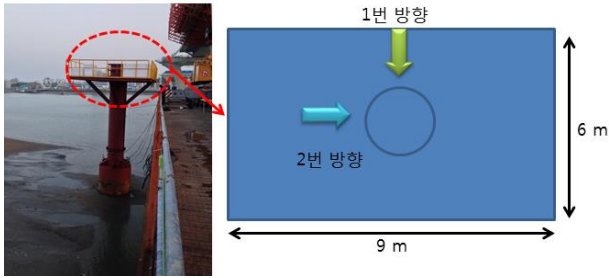


Fig. 14. Field Test Configuration of Suction Pile

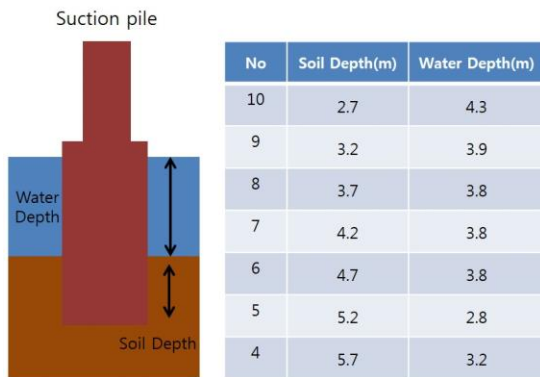


Fig. 15. N.F Test With Soil Depth

을 반드시 검토해야 한다. 본 연구에서는 범용 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS 6.12(2012)를 이용하여 지반조건에 따른 석션파일의 고유진동수를 산출하였다. 지반조건은 사질토만을 고려하였고, 석션기초의 제원은 직경(DS) 3m, 길이(LS) 7m, 두께(tS) 22mm의 강재이고, 현장시험에 사용한 석션기초의 제원과 동일하다. 수치해석 목적은 지반-구조물 상호작용이 구조물의 고유모드에 미치는 영향을 검토하고 전체 구조에서 상대적으로 취약한 부분인 석션기초-기둥 접속부에서의 진동 모드형상을 확인하는 것이다.

Fig. 13 및 Table 3은 지반과 석션파일에 적용한 해석모델 및 입력 물성값을 나타낸다. 본 논문에서는 동특성의 현장계측을 통해 구조물의 안정성을 평가하는 기법을 주로 논하기 때문에 본 절에서는 구체적인 수치해석과정 및 결과는 다루지 않기로 한다. 본 내용은 향후 별도의 논문을 통해 다룰 예정이다.

IV. 현장계측 및 결과분석

4.1 공장시험

본 장에서는 축소모형으로 제작된 석션기초의 고유진동수 현장계측 결과 및 관입-인발시의 변화양상을 살펴봄으로써, 시험의 정확성

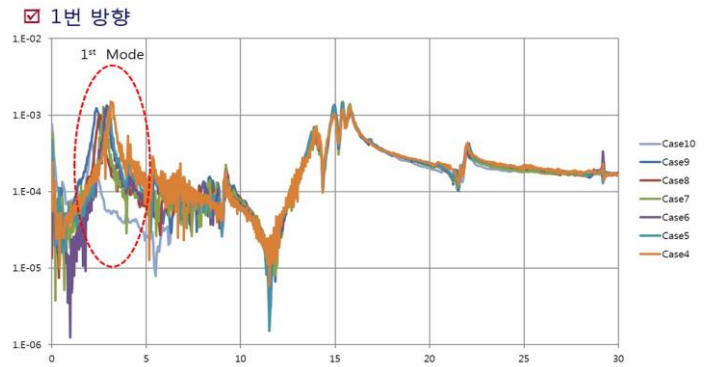


Fig. 16. Natural Frequency Test With Depth(Direction 1)

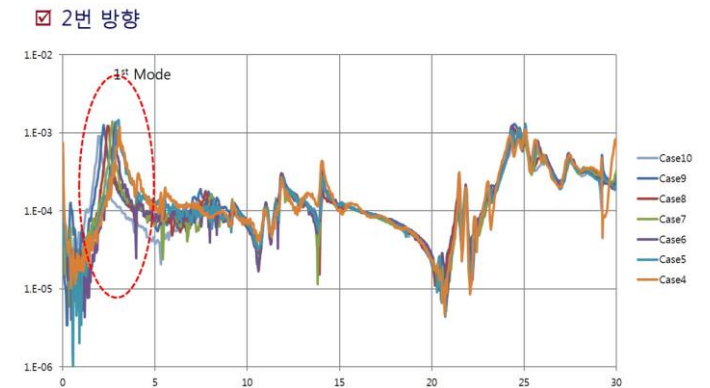


Fig. 17. Natural Frequency Test With Depth(Direction 2)

과 유효성 및 향후 석션기초의 설치안정성 검토기준을 제시하고자 한다. 현장계측 결과는 3.4절에 설명한 수치해석 모델의 결과값과 비교하였고, 수치해석의 정확성 검증은 Fig. 6의 모형체에 대한 공장시험 시의 고유진동수 결과값을 활용하였다. 두 번의 시험결과, Free-Free 조건에서 1차 모드에 대한 고유진동수 값은 Table 4와 같이 해석치와 현장계측치에 차이가 없었다. 특히, 구조물의 지배적 거동에 가장 큰 영향을 주는 1차모드에 있어서 거의 차이를 보이지 않았다. 즉, 해석모델이 현장계측값을 잘 모사하고 있다고 판단할 수 있다.

4.2 현장시험

현장에서 설치된 석션파일 축소모형은 Fig. 13과 같은 제원으로 제작되었고, Fig. 14와 같이 작업자 출입 및 가진시험을 위한 데크가 추가로 설치되었다. 가속도계는 2축 방향으로 설치되었고 관입 깊이별로 임팩트 햄머에 의한 고유진동수 값을 산출하였다. 또한, 인발에 대해서도 같은 방법으로 고유진동수 변화를 계측하였으며, 각각의 경우 모두 수심을 측정하여 수압의 영향을 추가로 검토하였다. Fig. 15는 현장시험의 개요도를 보여주며 각 단계별 임팩트 시험이 수행된 조건을 보여주고 있다.

그림에서 보는 바와 같이, 석션파일의 관입깊이는 0.5m 단위로 나누어 고유진동수 변화를 좀 더 세밀하게 관찰하였다.

4.3 시험결과

Fig. 16과 Fig. 17은 현장에서 수행한 두 가지 방향에 대한 고유진동수 시험결과를 나타낸 것으로, 구조물 거동에 지배적인 1차 모드값을 확인하였다. Table 5는 시험 결과값을 정리한 것으로, 관입깊이 증가에 따른 일정한 패턴의 고유진동수 증가경향이 파악되었다. 이는 관입깊이가 증가함에 따라 지반에 의해 석션파일이 구속되면

Table 5
Natural Frequency Test Results at Field

Depth	1st(1D)	1st(2D)	2nd(1D)	2nd(2D)
6.7	3.6875	3.5625	-	-
6.2	3.4375	3.4375	-	-
5.7	3.25	3.1875	3.15625	3.09375
5.2	3.125	3.125	3.03125	3
4.7	3	2.875	2.90625	2.84375
4.2	2.6875	2.625	2.71875	2.6875
3.7	2.5	2.5	2.5625	2.46875
3.2	2.875	2.5	2.375	2.21875
2.7	3	2.8125	2.0937	2
2.4	2.5625	2.125	-	-

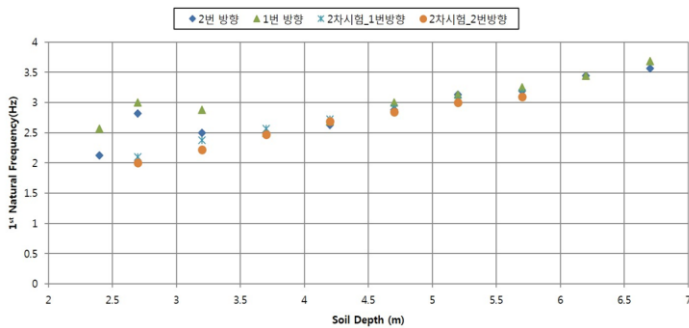


Fig. 18. Natural Frequency Test With Depth(All)

서 그로 인해 강성이 증가되기 때문인 것으로 풀이된다.

이와는 달리, 초기 관입깊이(2.4m~3.2m)에서는 고유진동수 크기의 역전현상이 관찰되기도 하는데 이는 석션 파일을 들고 있는 크레인의 장력에 기인한 것으로 지반의 구속효과와는 관련이 없는 것으로 판단된다.

Fig. 18은 Table 5의 결과를 그래프로 나타낸 것이다. Table 5에서 1D, 2D는 각각 1번 방향과 2번 방향에서 계측된 고유진동수를 의미하며 두 번에 걸쳐 현장시험이 시행되었다. 본 시험결과를 통해 해석모델의 정확성을 다시 한번 검증하였으며, 이를 통해 석션 파일이 지반에 설계깊이까지 안정적으로 설치되는지 여부를 단계별로 확인할 수 있게 되었다.

V. 결론

본 논문에서는 동특성 기반의 해상풍력 터빈 시스템의 안정성 평가방법을 개발하고 이를 현장에 적용하기 위한 표준절차를 제시하였다. 제시된 평가방법의 유효성 및 적용성을 검증하기 위하여 수치해석 및 축소모형 제작을 통한 현장시험을 수행하였다. 축소모형은 대규모 해상풍력 발전단지 건설 시 가장 경쟁력 있는 하부기초 형식으로 주목받고 있는 석션기초를 대상으로 하였다. 수치해석 및 현장시험 결과, 고유진동수 계측을 통한 해상풍력 하부기초 구조물의 안정성 검토방법의 유효성을 확인하였고, 지반의 관입깊이 증가에 따른 고유진동수 증가패턴을 확인하였다. 향후, 본 연구를 기반으로 실규모 터빈시스템에 대한 단계별 고유진동수 측정을 통한 현장검증이 진행된다면, 기존의 허용변위 계측에 의한 구조물의 안전검토 방법에 대한 새로운 대안이 될 것이다.

References

- [1] GWEC, 2019, Global Wind Report update 2018, Available from <http://www.gwec.net>
- [2] EEA, 2009, Europe’s onshore and offshore wind energy potential..
- [3] Senpere, D. and Auvergne, G. A., 1982, “Suction Anchor Piles-A Proven Alternative to Driving or Drilling,” Offshore Technology Conference, Paper No. 4206.
- [4] Clukey, E. C. and Morrison, M. J., 1995, “The response of Suction Caissons in Normally Consolidated Clays to Cyclic TLP Loading Conditions,” Offshore Technology Conference, Paper No. 7796.
- [5] Cottrill, A., 1992, “Skirt Plate to Support Europipe Jacket,” Offshore Engineering.
- [6] Larsen, P., 1989, “Suction Anchors as an Anchoring System for Floating Offshore Constructions,” Offshore Technology Conference, Paper No. 6029.
- [7] D.J. Ewins, Modal Testing : Theory, Practice and Application 2nd Edition, Research Studies Press LTD, 2000.
- [8] ISO 4866, Mechanical Vibration and Shock-Vibration of Buildings-Guidelines for the Measurement of Vibrations and Evaluation of their Effects on Buildings.
- [9] MIL-STD-740-2, Structureborne Vibratory Acceleration Measurements and Acceptance Criteria of Shipboard Equipment.