

나선암초형 월류파력발전 하부구조물의 모드특성 연구

Investigation on Natural Modes of Substructure of Wave Energy Converter with Overtopping Flow Device

김 병 완† · 신 승 호* · 홍 기 용* · 최 유 수** · 서 정 오** · 안 익 장**

Byoung Wan Kim, Seung Ho Shin, Key Yong Hong, You Su Choi, Jeong Oh Seo and Ike Jang Ahn

(2009년 5월 6일 접수 ; 2010년 3월 19일 심사완료)

Key Words : Wave Energy Converter with Overtopping Flow Device(월류형 파력발전기), Substructure(하부구조), Natural Mode(고유모드)

ABSTRACT

An efficient wave energy converter with new overtopping flow device on which spiral reefs are attached is proposed by Maritime and Ocean Engineering Research Institute in Korea and its candidate substructures such as monopile, tripod and jacket are designed. This study investigates modal characteristics of the substructures by analyzing natural frequencies and mode shapes. Based on the modal analysis results, relative strength, governing modes and some complementary design strategies of each candidate substructure are compared and discussed considering water depth conditions.

1. 서 론

최근 화석연료 발전기의 대체 형태로서 파력발전기에 대한 논의와 연구가 활발히 진행되고 있으며 그 결과로서 가동형 파력발전기, 진동수주형 공기챔버 발전기, 월류형 파력발전기 등이 제시되고 있다. 그 중 월류형 파력발전기는 월파장치로부터 흘러 들어온 해수를 저장한 후 그 낙차에너지를 이용하여 발전하는 장치로서 국내외 연구를 통해 다양한 형태가 제안되어 왔으며 Wave Dragon⁽¹⁾은 그 대표적인 사례이다. 국내에서도 한국해양연구원 해양시스템안전연구소(이하 MOERI)에서 새로운 형태의

월류형 파력발전기를 제안하여 실증모델을 설계 중에 있다^(2,3). MOERI가 제안한 월류형 파력발전기는 Fig. 1과 같이 월파장치가 원형이므로 파향과 무관하게 성능을 발휘하며 월파장치에 부착된 나선형의 인공암초를 따라 해수가 회전하며 진입하므로 낙차에너지와 더불어 회전에 의한 에너지가 추가되는 효과가 있어서 에너지 효율이 증가되는 장점이 있다.

파력발전기는 일반적으로 파랑에너지밀도가 높은 해역에 설치되므로 파랑, 바람, 조류 등의 외부 환경하중이 상대적으로 크다. 따라서 그러한 외부 환경하중을 잘 견디어 상부 발전시설을 안정적으로 지지할 수 있는 하부구조가 요구된다. MOERI에서는 제안한 발전기의 하부구조 후보형식으로서 모노파일(monopile), 트라이포드(tripod), 재킷(jacket) 등을 설계하여 비교검토 중에 있다. 이 연구의 목적은 그러한 하부구조의 고유진동수 및 모드형상 등 고유모드 특성을 고찰하여 후보형식별로 상대적인 강

† 교신저자; 정회원, 한국해양연구원 해양시스템안전연구소
E-mail : kimbw@moeri.re.kr

Tel : (042)866-3932, Fax : (042)866-3919

* 한국해양연구원 해양시스템안전연구소

** 해인 E&C

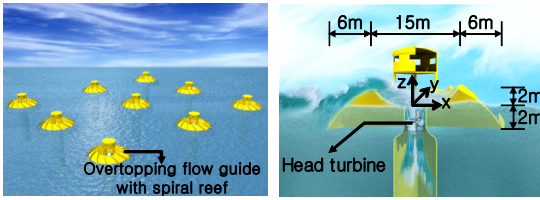


Fig. 1 Conceptual sketch and approximate dimension of wave energy converter with overtopping flow guide by MOERI

성을 비교평가하고 후보형식별로 강성모드(고유진동수 값이 커서 변형이 상대적으로 덜 발생하는 모드)와 취약모드(고유진동수 값이 작아서 변형이 상대적으로 쉽게 발생하는 모드)를 파악함으로써 보완설계 방안을 제시하는데 있다. 다양한 수심조건에 대한 하부구조의 고유모드를 산출함으로써 수심에 따른 성능을 아울러 고찰하였다.

2. 하부구조 설계제원

Fig. 2는 하부구조 후보형식의 형상을 나타낸다. 모노파일은 단면이 다른 2개의 강관파일로 이루어져 있으며 비교적 구성이 단순하다. 트라이포드는 중앙의 주관(main pile)과 주관을 지지하는 3개의 경사 브레이스 및 저면의 보강 브레이스로 구성된다. 이때 주관 대신 규모가 상대적으로 작은 브레이스(brace)가 지반에 정착되므로 모노파일에 비해 지반 시공이 비교적 용이하다. 재킷은 4개의 주관과 주관 사이에 연결된 브레이스, 스티럽(stirrup) 등으로 구성되어있다. 사용된 부재는 규격 SM490의 구조용 강재로서 탄성계수는 $2.1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$, 밀도는 7850 kg/m^3 , 항복강도는 320 MPa , 허용수직응력은 190 MPa , 허용전단응력은 110 MPa 이다.

주요 설계하중으로서 월파장치, 나선암초, 터빈 등으로 구성되는 상부구조(superstructure)에 작용하는 파랑과 바람, 하부구조에 작용하는 모리슨하중과 조류, 구조물의 자중 등을 고려하였다. 그중 가장 지배적인 외력인 파랑하중은 고차경계요소법⁽⁴⁾을 적용하여 산출하였으며 풍하중, 모리슨하중, 조류력 등은 해양구조물 설계규정⁽⁵⁾의 산식을 적용하였다. 설계하중 산출 시 설계파고는 15m, 설계파주기는 14초, 최대풍속은 60m/sec, 최대조류속도는 0.8노트 등으로 하였다. 수심조건은 20m, 35m, 50m 등 세 경우를

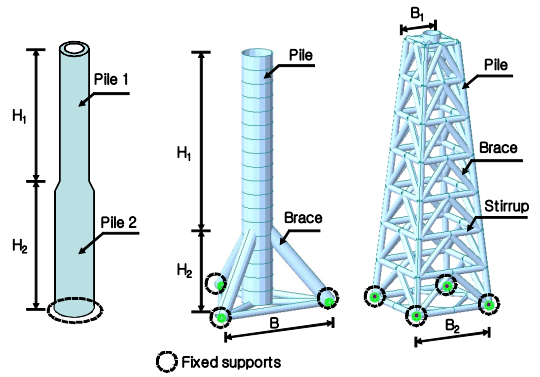


Fig. 2 Sketch of monopile, tripod and jacket

Table 1 Particulars of designed monopile

Water depth	20 m	35 m	50 m
H ₁	13 m	15 m	16 m
H ₂	5 m	18 m	32 m
Pile 1(D×t)	3 m×76 mm	3 m×76 mm	3 m×76 mm
Pile 2(D×t)	3.5 m×76 mm	4.5 m×76 mm	5.2 m×76 mm
Substructure weight	103 ton	231 ton	395 ton

Table 2 Particulars of designed tripod

Water depth	20 m	35 m	50 m
B	8.66 m	25.98 m	51.96 m
H ₁	13 m	18 m	18 m
H ₂	5 m	15 m	30 m
Pile (D×t)	2.8 m×76 mm	2.8 m×76 mm	3 m×76 mm
Brace (D×t)	1 m×85 mm	1 m×85 mm	1.35 m×100 mm
Substructure weight	211 ton	526 ton	1413 ton

Table 3 Particulars of designed jacket

Water depth	20 m	35 m	50 m
No. of floors	4	7	9
B ₁	4.4 m	4.4 m	4.4 m
B ₂	8.4 m	10 m	12.6 m
Pile (D×t)	1 m×36 mm	1 m×36 mm	1 m×48 mm
Brace (D×t)	0.6 m×32 mm	0.6 m×32 mm	0.6 m×32 mm
Stirrup (D×t)	0.6 m×40 mm	0.6 m×40 mm	0.6 m×40 mm
Substructure weight	231 ton	412 ton	654 ton

고려하였다. Tables 1~3은 각 후보형식의 설계결과를 수심별로 요약한 표이다. 표에서 D는 강관의 외

경, t 는 강관의 두께를 각각 나타낸다.

3. 고유모드 수치해석

고유진동수 및 모드형상 등 구조물의 고유모드는 식 (1)과 같은 고유치문제의 해로부터 산출할 수 있다.

$$[K]\{\phi_j\} = \omega_j^2([M] + [M_a(\omega_j)])\{\phi_j\} \quad (1)$$

$$(j = 1, 2, \dots, n)$$

식 (1)에서 $[K]$ 와 $[M]$ 은 이산화기법으로 정식화한 $n \times n$ 의 강성행렬 및 질량행렬이며 $[M_a(\omega_j)]$ 는 접수진동에 따른 부가질량행렬을 나타낸다. ω_j 와 ϕ_j 는 j 번째 고유모드의 고유진동수와 고유벡터로서 고유벡터는 곧 모드형상을 나타낸다.

이 연구에서 이산화 기법으로 보요소(beam element)를 사용한 유한요소법을 적용하였으며 운동방정식의 정식화는 에너지최소화기법⁽⁶⁾을 적용하였다. Fig. 3은 유한요소법을 이용하여 구성한 하부구조의 이산화모형을 나타낸다. 월파장치, 나선암초, 터빈 등 상부구조의 중량은 하부구조의 고유모드에 상당한 영향을 주므로 고유모드 해석 시 그 효과가 반영되어야 한다. 이 연구에서는 집중질량기법(lumping mass technique)을 적용하여 상부구조의 효과를 반영하였다. 상부구조의 질량조건을 Table 4에 요약하였다.

수중에 잠긴 구조물은 물과 접촉해 있으므로 접수진동 시 질량이 추가되는 효과가 발생하므로 이러한 부가질량이 고유진동수 해석에 반영되어야 한다. 식 (1)에서 $[M_a(\omega_j)]$ 는 그러한 부가질량행렬을 나타낸다. 부가질량은 구조물의 형상, 접수면적, 접수진동 방향, 수심 등에 따라 결정되며 특히 접수진동의 주기에 따라 달라지므로 진동수의 함수로써 표현된다. 이 연구의 대상 구조물의 경우 상부구조가 대부분의 접수면적을 점유하므로 상부구조에 대한 부가질량을 산출하였다. 부가질량을 산출하는 방법에는 여러 가지가 있으나 이 연구에서는 고차경계요소법⁽⁴⁾을 적용하였다. Fig. 4는 상부구조의 부가질량 계산을 위한 고차경계요소법 수치격자계를 나타낸다. 상부구조의 부가질량 계산결과를 Figs. 5~7에 제시하였다. 부가질량은 진동수가 커짐에 따라 일정한 값에 수렴하며 대상구조물의 경우 약 4 Hz에서 부가질량이 수렴하였다. 한편, 상부구조가 원형이므로 비틀림 방향에 대한 부가 관성질량은 없다.

부가질량이 고유진동수의 함수이므로 식 (1)은 일종의 비선형 방정식 형태이다. 따라서 전단계에서 계산된 고유진동수와 Figs. 5~7로부터 현단계의 부가질량을 계산하고 이로부터 고유모드 해석을 통해

Table 4 Mass condition of superstructure

Mass (ton)		673
Rotational inertia (ton-m ²)	I _x	37856.25
	I _y	37856.25
	I _z	37856.25

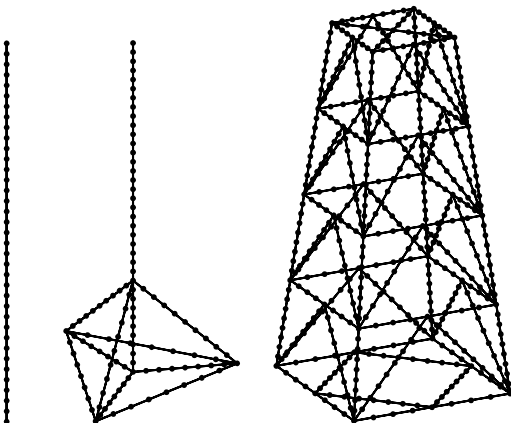


Fig. 3 Finite element model of monopile, tripod and jacket(waterdepth = 20 m)

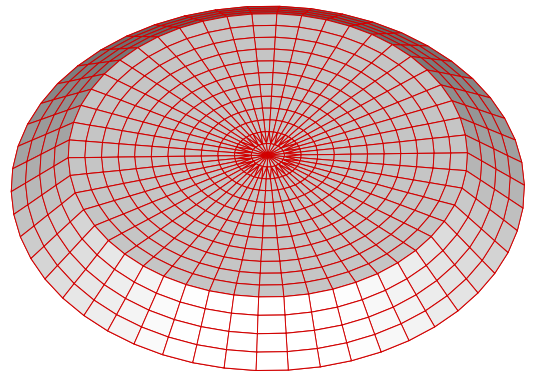


Fig. 4 Grid system for calculating added mass of superstructure using higher order boundary element method

현단계의 고유진동수를 재계산한다. 그리고 고유진동수가 수렴할 때까지 이러한 과정을 반복한다. 각 반복단계에서의 고유모드 해석은 통상적인 고유치

해법을 적용한다. 이 연구에서는 고유치해법으로서 부분공간반복법(subspace iteration method)⁽⁷⁻⁹⁾을 적용하였다.

4. 하부구조 고유모드 해석

하부구조 고유모드 해석결과가 Tables 5~7 및 Figs. 8~15에 정리되어 있다. Tables 5~7은 하부구조의 고유모드 중 7개의 지배모드에 대한 고유진동수와 모드형상을 요약한 표이고 Figs. 8~15는 모드형상을 도시한 그림이다.

Table 5는 하부구조 후보형식 중 모노파일의 고유모드를 수심별로 정리한 것으로서 모노파일의 경우 굽힘(휨), 비틀림, 연직변형 등이 지배모드이며 특히 수심이 35 m 또는 50 m일 경우 7개의 모드 중 4개가 굽힘모드여서 7개의 모드 중 굽힘모드가 2~3개인 트라이포드나 재킷에 비해(Table 6 및 7 참고) 상대적으로 굽힘에 취약함을 알 수 있다. 따라서, 모노파일을 하부구조로 사용할 경우 파일 내부에 보강재를 배치하는 방식 등의 굽힘변형 억제 방안이 요구된다.

Table 6은 트라이포드의 고유모드를 정리한 것이다. 모노파일과 마찬가지로 굽힘, 비틀림, 연직변형 등이 지배적이다. 특히 트라이포드의 경우 주관이 지반에 직접 고정되지 않고 브레이스와 연결된 형태이므로 연직변형 모드는 Fig. 11의 좌측 그림과 같이 브레이스가 휘는 형태를 갖는다. 또한 트라이포드의 경우 저면 브레이스 자체의 굽힘모드가 존재하며 수심이 깊을수록 저면 브레이스가 더욱 길어지므로 저면 브레이스 자체의 굽힘이 주요 모드 중 하나가 됨을 알 수 있다. 따라서 트라이포드를 하부구조로 사용할 경우 연직변형에 따른 브레이스의 굽힘 및 저면 브레이스 자체의 굽힘 등에 대해 상대적으로 취약하므로 이를 억제할 수 있는 2차 부재의 사용이 필요할 것으로 보인다.

재킷의 고유진동수 및 모드형상은 Table 7에 정리하였다. 재킷의 경우에도 굽힘과 비틀림이 지배적인 모드이지만 모노파일이나 트라이포드와 달리 제 1 비틀림모드가 제 1 굽힘모드보다 선행한다. 즉 재킷의 경우 굽힘강성이 상대적으로 큰 반면 비틀림강성이 상대적으로 작다. 제안된 과력발전기의 상부 율과장치가 원형이므로 과랑 외력은 대부분 굽힘을

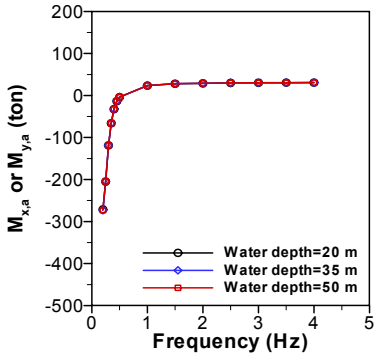


Fig. 5 Added mass of superstructure in horizontal direction

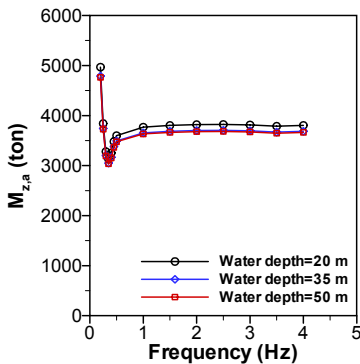


Fig. 6 Added mass of superstructure in vertical direction

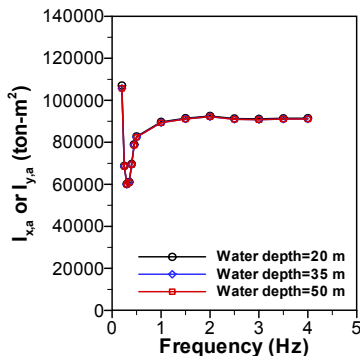


Fig. 7 Added rotational inertia of superstructure about x or y axis

유발하고 비틀림거동은 미소할 것으로 예상되므로
굽힘강성이 상대적으로 큰 채킷이 하부구조로서 유

리할 것으로 보인다. 그러나, 외부하중이 비틀림을
일으킬 가능성을 완전히 배제할 수는 없으므로 비

Table 5 Natural frequencies(Hz) and mode shapes of monopile

Mode no.	Water depth=20 m	Water depth=35 m	Water depth=50 m
1	1.153 (1st bending)	0.875 (1st bending)	0.712 (1st bending)
2	2.214 (1st torsion)	1.977 (1st torsion)	1.895 (1st torsion)
3	4.361 (2nd bending)	2.613 (2nd bending)	1.988 (2nd bending)
4	6.840 (vertical deformation)	5.540 (vertical deformation)	4.905 (vertical deformation)
5	63.078 (3rd bending)	21.320 (3rd bending)	11.587 (3rd bending)
6	94.872 (2nd torsion)	45.874 (2nd torsion)	27.328 (2nd torsion)
7	146.190 (vertical deformation)	61.008 (4th bending)	31.472 (4th bending)

Table 6 Natural frequencies(Hz) and mode shapes of tripod

Mode no.	Water depth=20 m	Water depth=35 m	Water depth=50 m
1	1.067 (1st bending)	0.782 (1st bending)	0.790 (1st bending)
2	1.772 (1st torsion)	1.260 (1st torsion)	1.360 (1st torsion)
3	4.142 (2nd bending)	2.849 (2nd bending)	2.994 (2nd bending)
4	5.614 (vertical deformation)	3.708 (vertical deformation)	2.996 (bottom brace bending)
5	55.803 (3rd bending)	8.781 (bottom brace bending)	3.396 (vertical deformation)
6	94.872 (2nd torsion)	12.086 (2nd torsion)	4.148 (2nd torsion)
7	79.025 (bottom brace bending)	12.435 (3rd bending)	4.273 (3rd bending)

Table 7 Natural frequencies(Hz) and mode shapes of jacket

Mode no.	Water depth=20 m	Water depth=35 m	Water depth=50 m
1	0.530 (top floor bending)	0.527 (top floor bending)	0.528 (top floor bending)
2	1.126 (1st torsion)	1.077 (1st torsion)	1.046 (1st torsion)
3	1.824 (top floor bending)	1.767 (top floor bending)	1.556 (1st bending)
4	3.844 (1st bending)	2.017 (1st bending)	1.754 (top floor bending)
5	22.477 (2nd torsion)	12.855 (2nd bending)	8.344 (2nd bending)
6	24.329 (2nd bending)	13.341 (2nd torsion)	9.185 (2nd torsion)
7	30.386 (bottom floor bending)	17.729 (lateral deformation)	11.830 (lateral deformation)

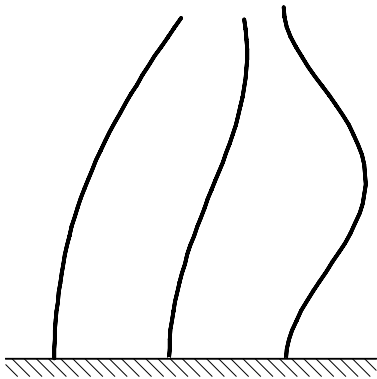


Fig. 8 1st, 2nd and 3rd bending modes of monopile (water depth=20 m)

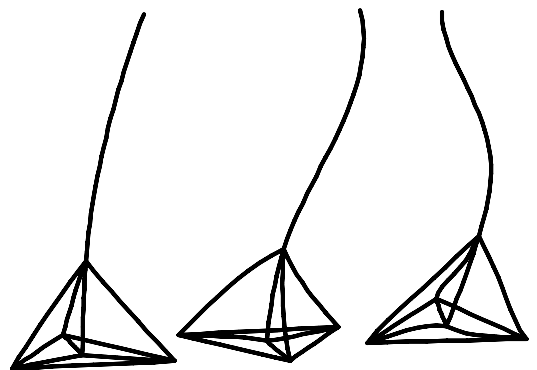


Fig. 9 1st, 2nd and 3rd bending modes of tripod (water depth=20 m)

틀림에 대한 보완이 필요할 것이다. 한편, 재킷의 경우 상부구조의 중량이 재킷 최상층에 배치된 브

레이스에 집중되므로 Fig. 14와 같은 최상층 브레이스의 굽힘모드가 상당히 지배적이다. 따라서 재킷의 경우 최상층에 대한 보강이 요구된다.

구조물의 고유진동수는 구조물의 질량대비 강성을 가늠하는 척도이므로 구조물의 상대적인 강성은 지배모드의 고유진동수 크기를 고찰함으로써 평가할 수 있다. Fig. 16과 17은 하부구조 후보형식의 제 1 굽힘 및 제 1 비틀림모드에 대한 고유진동수를 정리한 그래프로서 굽힘강성의 경우 재킷이 월등히

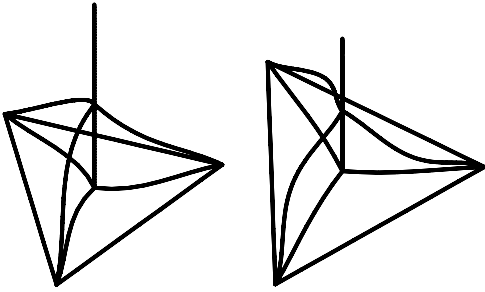


Fig. 10 1st and 2nd torsion modes of tripod (water depth=35 m)

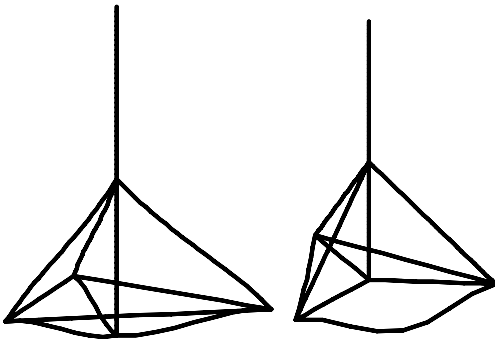


Fig. 11 Vertical deformation and bottom brace bending modes of tripod (water depth=35 m)

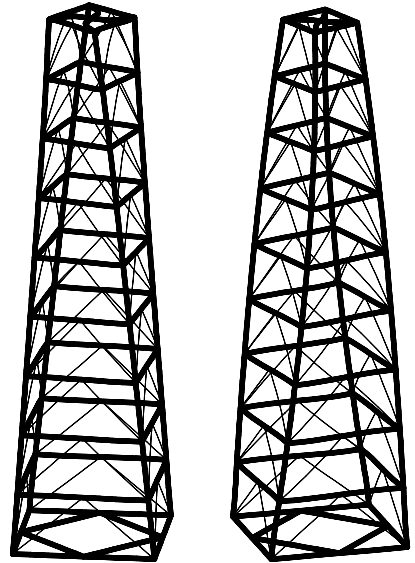


Fig. 13 1st and 2nd torsion modes of jacket (water depth=50 m)

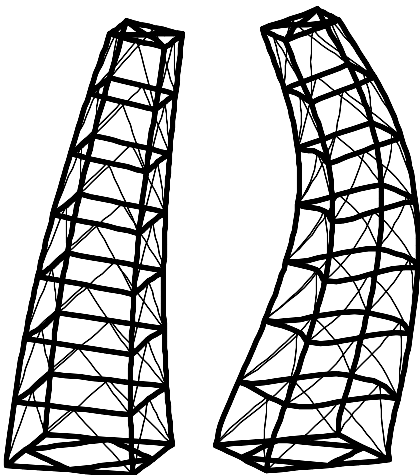


Fig. 12 1st and 2nd bending modes of jacket (water depth=35 m)

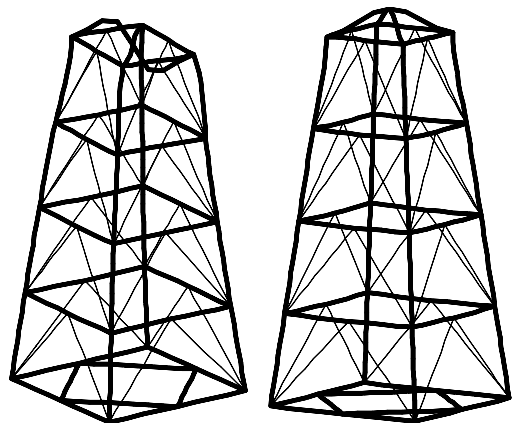


Fig. 14 Top floor bending modes of jacket (water depth=20 m)

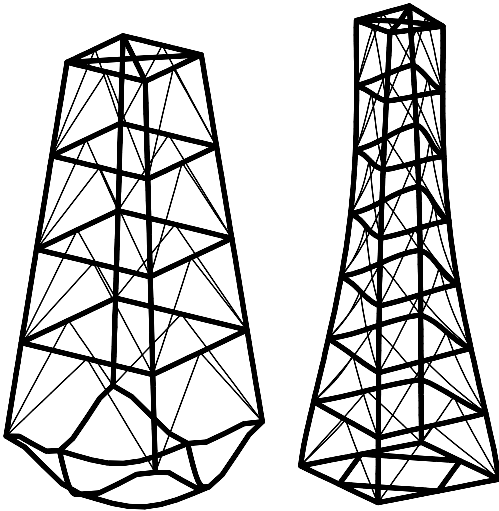


Fig. 15 Bottom floor bending mode(water depth=20 m) and lateral deformation mode(water depth=35 m) of jacket

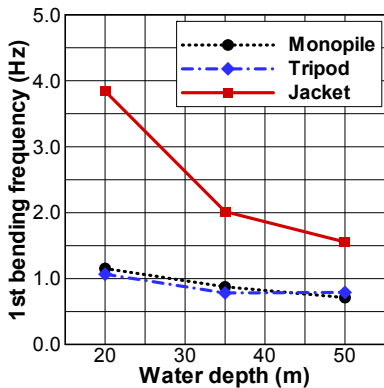


Fig. 16 Comparison of the first bending frequencies

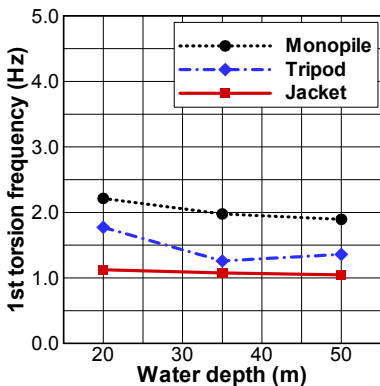


Fig. 17 Comparison of the first torsion frequencies

크를 알 수 있다. 모노파일과 트라이포드의 굽힘강성은 대체적으로 유사하나 수심이 50 m일 경우 트라이포드가 모노파일보다 다소 크다. 비틀림에 대한 상대적인 강성은 모노파일, 트라이포드, 재킷 순이다.

상술한 바와 같이 대부분의 하중이 굽힘변형을 일으킬 가능성이 크므로 비틀림 설계만 보완된다면 질량대비 굽힘강성이 가장 큰 재킷이 하부구조로서 유리해 보인다. 재킷의 경우 비틀림강성은 각 층에 브레이스를 추가 설치함으로써 보강될 수 있을 것으로 판단한다.

5. 결 론

이 연구에서는 MOERI에서 제안한 월류형 과력발전기의 후보 하부구조로서 검토된 모노파일, 트라이포드, 재킷 등의 고유진동수와 모드형상을 산출하고 수심별로 지배모드를 고찰함으로써 후보형식의 상대적인 강도를 비교평가하였다. 결과를 요약하면 다음과 같다.

제 1 휨모드 고유진동수의 경우 재킷이 월등히 크므로 후보 하부구조 중 휨강성은 재킷이 가장 크다. 제안한 과력발전기의 경우 월과장치가 원형으로서 대부분의 과력이 휨거동을 유발할 것으로 보므로 휨강성이 월등한 재킷이 하부구조로서 적절해 보인다. 다만 상부구조 중량이 최상층에 집중되어 최상층 브레이스의 휨에 다소 취약하고 비틀림강성이 상대적으로 작으므로 이에 대한 보완이 요구된다. 비틀림강성은 각 층에 브레이스를 추가 설치함으로써 보강될 수 있을 것으로 판단한다.

제 1 비틀림모드 고유진동수는 모노파일, 트라이포드, 재킷 순으로서 모노파일의 비틀림강성이 상대적으로 크지만 모노파일의 경우 타 형식에 비해 휨모드가 지배적이므로 휨에 취약하다. 따라서 휨거동을 억제하기 위한 방안이 요구된다. 트라이포드의 경우 휨모드와 더불어 연직변형 모드, 저면 브레이스 휨모드 등이 지배모드로서 그에 따른 브레이스 보강이 요구된다.

후 기

이 논문은 지식경제부 신재생에너지센터가 지원한 ‘나선암초형 월류과력발전 기술 개발’ 및 기초기

술연구회가 지원하는 ‘해양구조물의 극한응답 해석 기술 개발’ 및 국토해양부가 지원하는 ‘파력에너지 실용화 기술개발’의 일부로 수행되었음을 밝혀둔다.

참 고 문 헌

(1) Nielsen, A. and Kofoed, J. P., 1997, “The Wave Dragon-evaluation of a Wave Energy Converter,” Aalborg University, M.Sc. Graduate Report.

(2) Kim, B. W., Shin, S. H. and Hong, K. Y., 2008, “Predesign of Mono Pile Substructure for Wave Power Generator Using Overtopping Flow on Spiral Reef,” Proceedings of 2008 KAOSTS Conference, pp. 2155~2158.

(3) Nam, B. W., Shin, S. H., Hong, K. Y. and Hong, S. W., 2008, “Numerical Simulation of Wave Flow Over the Spiral-reef Overtopping Device,” Proceedings of the Eighth ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium, pp. 262~267.

(4) Choi, Y. R., Hong, S. Y. and Choi, H. S.,

2000, “An Analysis of Second-order Wave Forces on Floating Bodies by Using a Higher-order Boundary Element Method,” Ocean Engineering, Vol. 28, pp. 117~138.

(5) Ministry of Maritime Affairs & Fisheries, 2005, Design Guide to Port and Harbor.

(6) Choi, C. K., 1992, Finite Element Analysis, Jipmundang.

(7) Bathe, K. J. and Wilson, E. L., 1972, “Large Eigenvalue Problems in Dynamic Analysis,” ASCE J. Engrg. Mech., Vol. 98, pp. 1471~1485.

(8) Bathe, K. J. and Ramaswamy, S., 1980, “An Accelerated Subspace Iteration Method,” Comput. Meth. Appl. Mech. Engrg., Vol. 23, pp. 313~331.

(9) Kim, B. W., Kyoung, J. H., Hong, S. Y., Cho, S. K. and Lee, I. W., 2005, “Investigation of Efficiency of Starting Vectors for Calculating Natural Modes,” Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 15, No. 1, pp. 112~117.