



Original Article

부유식 파력-해상풍력 복합발전 구조물의 다자유도 시간영역 해석

배운혁^{1,*} · 이혜빈²

¹제주대학교 해양시스템공학과
²제주대학교 풍력특성화협동과정

Multi-DOF Time-domain Analysis of Wind-wave Hybrid Power Generation Platform

Yoon Hyeok Bae^{1,*} and Hyebin Lee²

¹Department of Ocean System Engineering, Jeju National University, Jeju 63243, Korea
²Multidisciplinary Graduate School Program for Wind Energy, Jeju National University, Jeju 63243, Korea

요 약

부유식 파력-해상풍력 복합발전 구조물은 그 내부에 독립적으로 상하운동을 하는 다수의 파력발전장치를 탑재하고 있으므로 파랑중 다수의 강체가 연성되어 운동하는 특성이 있다. 본 연구에서는 부유식 파력-해상풍력 복합발전 구조물과 탑재된 24개의 파력발전장치간의 유체동역학적 상호작용 및 Power take-off (PTO) 메커니즘을 고려하여 시간영역에서의 다자유도 시스템의 운동 방정식을 구성하고, 수치적인 방법을 통하여 다자유도 시스템의 운동 응답을 해석할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 시간영역의 운동방정식에 사용되는 부가질량, 방사감쇠 및 파랑 강제력은 WAMIT을 이용하여 산출하였으며, 다자유도 부유체의 운동해석 코드는 HARP/CHARM3D를 기반으로 개발하였다. 본 연구를 통해 개발한 다자유도 시간영역 해석 프로그램을 이용하여 부유식 파력-해상풍력 복합발전 구조물과 다수 파력발전장치들의 상하동요 거동을 규칙파 및 불규칙파 해상환경 조건에서 파랑 주파수 별로 산출하고, 그 결과를 주파수 영역의 해석 결과와 비교하여 검증하였다.

Abstract – Wind-wave hybrid power generation platform consists of multiple wave energy converters (WECs) which can independently move in vertical direction. For this reason, the motions of the floating platform and multiple WECs are hydrodynamically and mechanically coupled. In this study, multi-degree-of-freedom equations of motion of the floating platform and 24 WECs in time domain were established considering their hydrodynamic interaction and power take-off (PTO) mechanism and the numerical analysis tool was developed. Added mass, radiation damping and wave exciting force were obtained from the commercial software WAMIT and coupled multi-DOF motion analysis code was developed based on HARP/CHARM3D. The heave motion responses of the floating platform and multiple WECs was assessed using developed code in regular and irregular wave environment and the responses were compared with those obtained from the frequency-domain analysis.

Keywords: Hybrid power generation platform(복합 발전 구조물), Multi-DOF(다자유도), Semi-submersible(반잠수식), Coupled analysis(연성해석), Wave Energy Converter(파력발전장치)

1. 서 론

복합발전 구조물은 해양에서 얻을 수 있는 다양한 에너지원 중에서 두 가지 이상을 복합적으로 결합하고 적절하게 설계된 제어시스템을 이용하여 다양한 에너지원을 동시에 활용하는 에너지 플랫폼

이다. 이처럼 해양에서 얻을 수 있는 여러 에너지원을 복합적으로 활용하고자 하는 노력은 지난 수년간 유럽을 중심으로 다양하게 시도되어 왔다. 덴마크의 Poseidon(Floating Power Plant A/S[2015]), 영국의 Wave Treader(Green Ocean Energy[2015]), 노르웨이의 W2-Power(Pelagic Power[2015])등이 대표적인 복합발전 형태의 해양 구조물이다. 파 에너지를 이용하여 에너지를 추출하는 파력발전장치(wave energy converter, WEC)를 해상 풍력 플랫폼에 부착하여 함께 발전하게 되면 단위 면적 당 에너지 발생 효율이 증가하게

*Corresponding author: yh.bae@jejunu.ac.kr

본 연구는 2016년 ‘한국해양과학기술협의회 공동학술대회’ 발표 내용에 근거를 두고 있음을 밝힙니다.

되고, 구조물, 계류, 송전 케이블 등의 제작과 설치비용을 공유할 수 있어 발전 단가를 낮추는데 기여할 수 있다. 또한 경우에 따라서는 플랫폼에 부착된 WEC이 플랫폼 운동의 댐퍼로 작용하게 되어 안정성 향상에도 기여하게 된다. 이러한 결과로 상부의 풍력발전은 더욱 안정적으로 운용이 가능하며 복합발전 구조물 전체의 안정성이 향상된다(Karimirad[2014]). 국내에서도 ‘10MW급 파력-해상풍력 연계형 발전시스템 설계기술 개발’에 대한 연구과제가 2013년부터 해양수산부의 지원 하에 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트 연구소(KRISO)에서 수행되고 있다(Kim *et al.*[2015]). 이 연구에서 개발된 복합발전 구조물은 설치 해역에 8개의 계류선으로 계류되어 있는 대형 구조물이다. 해양의 다양한 환경 조건 속에서 복합발전 구조물과 탑재된 WEC은 설계된 고유 운동 특성에 따라 운동을 하게 되며, 특히 다수의 WEC은 전기 에너지 추출을 위해 플랫폼과 PTO(power take-off) 메커니즘으로 연결이 되어 있다. 따라서 다수 WEC과 플랫폼의 운동은 유체동역학적, 기계적인 상호작용을 통해서도 영향을 받게 되며, 이러한 이유로 다수 WEC과 플랫폼의 운동 방정식은 독립적으로 표현할 수 없고 연성 방정식으로 표현하여야 한다. Liao *et al.*[2013]은 부유식 해상 풍력 발전시스템의 두 기둥에 WEC이 설치된 복합발전 구조물을 2차원 모델로 단순화 시켜 시스템의 연성에 대한 수학적 모델을 정립하였다. 또한 Taghipour and Moan[2008]은 반잠수식 플랫폼에 21개의 WEC이 부착된 파력발전 장치를 이용하여 주파수 영역에서 다물체 동역학 및 유체동역학적 상호작용에 대해 연구 하였다. 특히 이 연구에서는 WEC에 의한 PTO 메커니즘에 의한 효과가 WEC의 운동 뿐 아니라 플랫폼의 거동도 큰 영향을 미침을 보였다. 앞선 연구들을 바탕으로 Lee *et al.*[2016a]은 KRISO에서 제안한 복합발전 구조물의 WEC에 의한 운동 변화에 대해 연구하였다. 이 연구에서는 플랫폼에 설치된 풍력발전기의 운동은 고려하지 않고, 등가의 풍하중을 작용시켰으며, 이 후 Lee *et al.*[2016b]은 플랫폼의 다수 풍력발전기의 동역학까지 함께 고려하여 다수 WEC의 운동이 플랫폼 운동에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 복합발전 플랫폼 내의 다수 WEC의 운동 변화에 대한 연구도 진행되었다(Lee *et al.*[2016c]). 이때 플랫폼은 해석에 포함하지 않았으며, 다수 WEC 간의 상호 간섭효과를 고려하여 회절 및 방사 문제를 풀어 WEC의 위치에 따른 수직운동 변화에 대해 연구하였다.

본 논문에서는 KRISO의 10MW급 부유식 파력-해상풍력 복합발전 플랫폼을 대상으로 탑재된 24개의 WEC과 플랫폼을 개별적인 자유도를 가지는 다물체로 가정하고 유체동역학적, 기계적인 상호작용을 고려한 연성 방정식을 구성하였다. 구성된 다자유도 연성 방정식을 시간 영역에서 수치적인 방법으로 해석하는 프로그램을 개발하였고, 그 유효성을 검증하기 위하여 상용 프로그램 WAMIT(Wave Analysis at MIT)의 주파수 영역 응답과 비교 분석하였다.

2. 운동 방정식 정립

2.1 부유식 파력-해상풍력 복합발전 구조물

본 연구에 이용된 구조물은 Fig. 1와 같이 KRISO에서 개발 중인

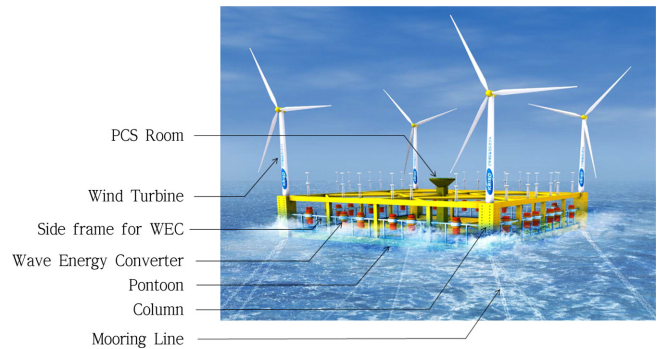


Fig. 1. Conceptual design of 10 MW class hybrid power generation platform.

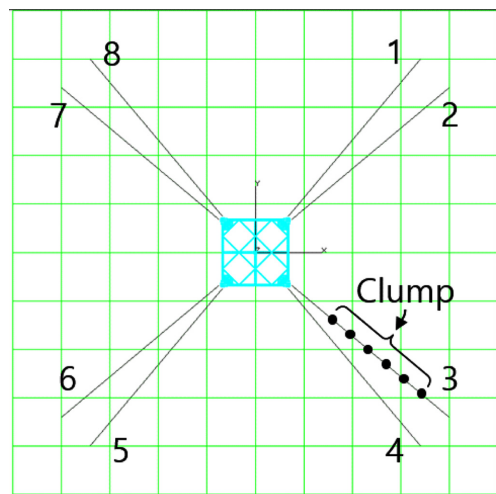


Fig. 2. Mooring line arrangement.

10 MW급 부유식 파력-해상풍력 복합발전 구조물로 사각 형상의 반잠수식 플랫폼의 네 기둥에는 4기의 3MW급 풍력발전기가 설치되어 있고, 각 면에는 6개의 WEC이 설치되어 도합 24개의 WEC이 탑재되게 된다. 설치 대상 해역은 제주도 서부의 차귀도 근방으로 수심은 80 m로 가정하였고, Fig. 2과 같이 8개의 계류선으로 플랫폼의 표류를 제한하고 있다. 각각의 계류선에는 플랫폼의 위치 복원성을 향상시키기 위하여 수중에서 11,000 kg 하중의 클럼프 웨이트(clump weight)가 일정한 간격으로 6개씩 부착되어 있다. 플랫폼 및 계류선의 제원은 Table 1과 2에 각각 나타내었다. 본 연구에서 시간

Table 1. Specifications of platform

Item	Unit	Value
Platform displacement	MT	26,848
Column span	m	150
Draft	m	15
Mooring load	MT	353
Center of gravity above keel	m	13.67
Roll radius of gyration about CG	m	58.59
Pitch radius of gyration about CG	m	58.65
Yaw radius of gyration about CG	m	78.44

Table 2. Specifications of mooring system

Item	Unit	Value
Number of mooring lines	ea	8
Depth to anchors below SWL	m	80
Depth to fairleads below SWL	m	13
Mooring line dry mass density	kg/m	432
Mooring line wet mass density	kg/m	374
Mooring line extensional stiffness	kN	1,845,000
Chain Mooring drag coefficient	-	2.4
Unstretched mooring line length	m	500
Clump mass in water	kg	11,000
Number of clump per line	ea	6

영역 해석시에는 주파수 영역의 해석 결과와 비교를 위하여 계류선의 동적 거동을 모두 제외하고 시뮬레이션을 수행하였으나, 추후 필요에 따라 다양한 비선형 효과와 함께 계류선의 동적 거동 효과를 포함하여 시간 영역에서 시뮬레이션 수행이 가능하다.

2.2 주파수 영역에서의 다자유도 연성 운동 방정식

플랫폼에 설치된 24개의 WEC은 독자적으로 상하운동을 하며 연결된 선형발전기를 이용하여 전기를 생성한다. 기구적으로 WEC은 플랫폼 내에서 상하운동만 허용이 되어 있으므로 각각을 1개의 자유도를 가지는 강체로 가정할 수 있고, 플랫폼은 6자유도를 가지는 강체로 가정할 수 있다. 따라서 부유식 파력-해상풍력 복합발전 구조물을 도합 30자유도를 가지는 다자유도 시스템으로 가정하고 운동방정식을 구성하였다. 플랫폼의 상하동요(heave)의 운동방정식은 아래와 같다.

$$(m_{33} + a_{33})\ddot{x}_3 + \sum_{n=7}^{30} a_{3n}\ddot{x}_n + (b_{33} + b_{v,3})\dot{x}_3 + \sum_{n=7}^{30} b_{3n}\dot{x}_n + \sum_{n=7}^{30} b_{PTO}(v - \dot{x}_n) + (c_3 + c_{m,3})x_3 = f_{E,3} \quad (1)$$

여기서 m_{33} 은 WEC을 제외한 플랫폼의 질량, a_{33} 은 상하동요 부가 질량(added mass)을 나타내며, b_{33} 과 $b_{v,3}$ 은 각각 상하동요 모드의 방사감쇠 계수(radiation damping coefficient)와 점성감쇠 계수(viscous damping coefficient)를 나타낸다. $c_3, f_{E,3}$ 은 각각 상하동요 모드의 정적 복원력 계수(hydrostatic coefficient) 및 파랑 강제력(wave exciting force)을 의미한다. 점성감쇠 계수 $b_{v,3}$ 은 KRISO에서 수행한 자유 감쇠 실험(free decay test)을 통하여 추정하였고, 계류에 의한 선형 복원력 계수 $c_{m,3}$ 은 부유체-계류 연성해석 시뮬레이션을 이용한 정적 변위 시험(static offset test)의 결과로부터 추정된 계수를 적용하였다. $\ddot{x}_3, \dot{x}_3, x_3$ 은 각각 플랫폼의 상하동요 가속도, 속도, 변위를 나타낸다. 플랫폼의 상하동요 운동방정식은 PTO 메커니즘으로 연결된 WEC의 상하동요와 연성이 되는데 a_{3n}, b_{3n} 은 플랫폼과 k 번째 WEC의 연성에 의해 발생하는 연성 부가질량(coupled added mass)과 연성 방사감쇠 계수(coupled radiation damping coefficient)를 나타낸다. ($k=1,2,\dots,24$) 첨자 n 은 각각의

WEC을 구분하기 위하여 사용되었으며 플랫폼의 6자유도 운동방정식의 표현과 중복되지 않게 $n=k+6$ 의 관계를 가지도록 설정하였다. v 와 \dot{x}_n 은 각각 k 번째 WEC 위치에서의 플랫폼의 상하방향 속도 성분과 k 번째 WEC의 상하동요 속도를 나타낸다. k 번째 WEC의 위치를 Fig. 2에 나타난 플랫폼의 고정좌표계를 기준으로 (r_{xm}, r_{yn}) 이라고 하고, 플랫폼의 횡동요(roll) 속도를 \dot{x}_4 , 종동요(pitch) 속도를 \dot{x}_5 라고 하면 이 위치에서 플랫폼의 상하방향 속도 v 는 상하동요, 횡동요, 종동요 속도 성분을 모두 조합하여 $\dot{x}_3 + r_{yn}\dot{x}_4 - r_{xm}\dot{x}_5$ 로 나타낼 수 있다. b_{PTO} 는 PTO 메커니즘에 의해 발생하는 감쇠력을 나타내는 PTO 감쇠계수이다. 본 연구에 사용된 b_{PTO} 계수는 Cho and Choi[2014]의 선행 연구로부터 산출된 최적 PTO 계수인 12,090 kg/s가 이용되었다.

또한 k 번째 WEC의 상하동요 운동 방정식은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$a_{n3}\ddot{x}_3 + (m_{nn} + a_{nn})\ddot{x}_n + \sum_{l=7}^{30} a_{nl}\ddot{x}_l + b_{n3}\dot{x}_3 + (b_{nn} + b_{v,n})\dot{x}_n + \sum_{l=7}^{30} b_{nl}\dot{x}_l + b_{PTO}(\dot{x}_n - v) + c_n x_n = f_{E,n} \quad (2)$$

여기서 $m_{nn}, a_{nn}, b_{nn}, b_{v,n}$ 은 각각 k 번째 WEC의 질량과 상하동요 부가 질량, 방사 감쇠 계수와 점성 감쇠 계수를 나타낸다. c_n 과 $f_{E,n}$ 은 각각 k 번째 WEC의 상하동요 정적 복원력 계수와 파랑 강제력을 의미하고 a_{n3}, b_{n3} 은 k 번째 WEC과 플랫폼의 연성에 의해 발생하는 연성 부가질량과 연성 방사감쇠 계수를 나타낸다. 식 (1)에는 나타나지 않았던 a_{nl}, b_{nl} 은 k 번째 WEC과 이를 제외한 다른 WEC의 유체동역학적 연성에 의해 발생하는 항으로 각각 연성 부가질량과 연성 방사감쇠 계수를 나타낸다.

이와 같이 플랫폼의 상하동요 및 24개 WEC의 상하동요 연성 운동 방정식은 식 (1) 및 (2)에서와 같이 25개의 연성 방정식 형태로 표현할 수 있다. 여기에 더하여 플랫폼의 횡동요, 종동요의 운동방정식은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$(m_{11} + a_{11})\ddot{x}_1 + (m_{15} + a_{15})\ddot{x}_5 + (b_{11} + b_{v,1})\dot{x}_1 + b_{15}\dot{x}_5 + (c_1 + c_{m,1})x_1 = f_{E,1} \quad (3)$$

$$(m_{22} + a_{22})\ddot{x}_2 + (m_{24} + a_{24})\ddot{x}_4 + (b_{22} + b_{v,2})\dot{x}_2 + b_{24}\dot{x}_4 + (c_2 + c_{m,2})x_2 = f_{E,2} \quad (4)$$

$$(m_{44} + a_{44})\ddot{x}_4 + (m_{42} + a_{42})\ddot{x}_2 + (b_{44} + b_{v,4})\dot{x}_4 + b_{42}\dot{x}_2 + \sum_{n=7}^{30} r_{yn} b_{PTO}(v - \dot{x}_n) + (c_4 + c_{m,4})x_4 = f_{E,4} \quad (5)$$

$$(m_{55} + a_{55})\ddot{x}_5 + (m_{51} + a_{51})\ddot{x}_1 + (b_{55} + b_{v,5})\dot{x}_5 + b_{51}\dot{x}_1 - \sum_{n=7}^{30} r_{xm} b_{PTO}(v - \dot{x}_n) + (c_5 + c_{m,5})x_5 = f_{E,5} \quad (6)$$

$$(m_{66} + a_{66})\ddot{x}_6 + (b_{66} + b_{v,6})\dot{x}_6 + (c_6 + c_{m,6})x_6 = f_{E,6} \quad (7)$$

여기서 각각의 계수는 식 (1)과 식 (2)에서 설명된 의미와 같으며, 첨자의 숫자 1,2,4,5,6은 각각 플랫폼의 전후동요(surge), 좌우동요(sway), 횡동요, 종동요, 선수동요(yaw) 운동 모드를 나타낸다. 식

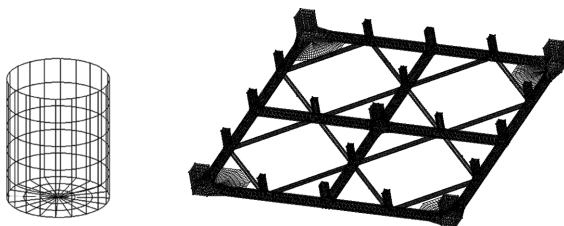
(3)~(6)에서 표현된 것처럼 플랫폼의 횡동요와 중동요는 각각 좌우 동요, 전후동요와 연성되어 운동 방정식에 나타나게 된다. 또한 식 (3)~(7)에 나타난 질량 또는 관성 모멘트 성분($m_{11} \sim m_{66}$)은 WEC과 플랫폼을 합한 구조물 전체에 대하여 계산된 물리량을 의미하며 이는 위의 5개 운동 모드에서는 플랫폼과 WEC이 단일체 형태로 함께 거동하는 것으로 가정하였기 때문이다. 식 (1)의 m_{33} 은 WEC의 질량을 제외한 플랫폼만의 질량을 나타내는 값으로 식 (3)~(4)의 질량 성분과는 차이가 있음을 확인할 수 있다.

식 (1)~(7)로 표현된 30개 변수에 대한 연성 운동 방정식을 이용하면 플랫폼 및 개별 WEC에 대한 진폭응답함수(Response Amplitude Operator, RAO)를 산출할 수 있으며, 플랫폼의 거동을 포함하여 위치에 따라 서로 다른 24개 WEC의 운동 특성을 파악할 수 있게 된다. 본 연구에서는 포텐셜 이론을 근거로 한 3차원 회절/방사 프로 그램인 WAMIT을 이용하여 부가질량, 방사감쇠 계수, 연성 부가질량, 연성 방사감쇠 계수를 산출하였으며, 특히 연성 부가질량 및 연성 방사감쇠 계수는 플랫폼과 WEC의 상하동요 운동 모드에 대해서만 WAMIT의 다물체 해석법을 이용하여 산출하였다.

WAMIT을 이용한 다물체 해석을 위하여 Fig. 3과 같이 WEC과 플랫폼의 형상을 독립적으로 모델링 한 후 포텐셜 입력 파일(*.pot)에 플랫폼과 24개 WEC의 형상 및 위치를 차례대로 입력하여 계산을 수행하였다. Fig. 3(a)의 경우 원통형의 파력발전장치에 대한 격자 모델이며 108개의 격자로 구성되었고, Fig. 3(b)의 경우 플랫폼의 격자 모델로 35,256개의 격자로 구성되어 있다. 두 형상 모두 평면상의 두 축에 대해 대칭이므로 이를 이용하여 계산에 소요되는 시간을 줄일 수 있었다. 플랫폼의 네 모서리에 위치한 운동 저감용 감쇠판(damping plate)은 두께가 없는 쌍극자 격자(dipole panel)로 모델링하여 유체력 계산에 그 효과가 포함되도록 하였다. WAMIT에서의 회절문제(diffraction problem)는 24개 WEC을 플랫폼과 함께 배치하여 전체 구조물의 거동이 없는 상태로 파랑 강제력을 산출하였고 방사문제(radiation problem)의 경우, 플랫폼 및 24개의 WEC을 순차적으로 하나씩 거동시키며 거동시킨 구조물에 작용하는 동유체력 및 거동되지 않은 인접 구조물에 작용하는 동유체력(연성 부가질량 및 연성 방사감쇠 계수)을 산출하였다.

2.3 시간 영역에서의 다자유도 연성 운동 방정식

계류된 부유체의 거동을 해석할 때는 주파수 영역의 해석보다는 시간 영역의 해석이 적절하다. 그 이유는 계류선의 강성이 부유체의



(a) Panel model of WEC (b) Panel model of Platform
Fig. 3. Panel model of WEC and Platform.

변위에 따라 비선형적으로 변화하는 특성을 가지고 있으며, 부유체에 작용하는 다양한 비선형 외력(점성항력, 2차 파랑 강제력 등)을 적용하여 해석할 수 있기 때문이다. 시간 영역에서의 부유체 운동 방정식은 기본적으로 Cummins[1962] 방정식을 이용하였고, 수치해석은 Kim *et al.*[1999]에 의해 개발된 HARP/CHARM3D 코드를 이용하였다. 그러나 HARP/CHARM3D는 부유체의 6자유도 운동만을 계산하는 코드이므로 WEC의 24자유도를 포함한 다자유도 연성 해석이 가능하도록 추가적으로 코드를 확장 개발하여 해석에 사용하였다. 주파수 영역에서 구성된 자유도와 동일하게 시간 영역에서의 운동 모델도 30개의 자유도를 가지는 다자유도 시스템으로 가정하였다. 뉴턴의 제2법칙을 적용한 시간 영역의 운동 방정식 형태는 다음과 같다.

$$M\ddot{x}(t) = F_E(t) + F_C(t, \dot{x}) + F_D(t, \dot{x}) - b_{PTO}\dot{x} - cx \quad (8)$$

여기서 M 은 질량과 무한 주파수 극한에서의 부가질량을 합한 물리량이며, 30개의 행과 열로 구성된 행렬 형태이다. $F_E(t)$, $F_C(t, \dot{x})$, $F_D(t, \dot{x})$ 는 각각 파랑 강제력, 방사 감쇠력, 비선형 점성 항력을 나타내며, 방사 감쇠력 $F_C(t, \dot{x})$ 는 식 (9)와 같이 시간 영역에서 합성적분의 형태로 표현된다.

$$F_C(t, \dot{x}) = -\int_0^{\infty} B_{ij}(\tau)\dot{x}_j(t-\tau)d\tau \quad (9)$$

이때 B_{ij} 는 리타레이션 함수(retardation function)이며 주파수 영역에서의 방사감쇠 계수 $b_{ij}(\omega)$ 를 식 (10)과 같이 푸리에 역변환 하여 얻는다.

$$B_{ij}(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} b_{ij}(\omega)\cos(\omega t)d\omega \quad (10)$$

식 (8)에서 b_{PTO} 는 PTO 감쇠 계수를 나타내는 물리량이며, 주파수 영역에서의 형태와 유사하게 연성된 성분을 표현할 수 있는 30×30 의 행렬로 표현된다. c 는 복원력을 나타내는 계수로 정적 복원력과 부유체 계류에 의한 계류 복원력을 모두 포함하는 30×30 의 행렬이다.

식 (8)의 2계 미분방정식을 수치적으로 해석하기 위하여 2개의 1계 미분방정식으로 변환하면 다음과 같다.

$$M\dot{v}(t) = F_E(t) + F_C(t, \dot{x}) + F_D(t, \dot{x}) - b_{PTO}v - cx \\ \dot{x}(t) = v(t) \quad (11)$$

위의 연립 방정식을 시간 $t^{(n)}$ 에서 $t^{(n+1)}$ 까지 적분하면

$$Mv^{(n+1)} = Mv^{(n)} + \int_{t^{(n)}}^{t^{(n+1)}} (F_E(t) + F_C(t, \dot{x}) + F_D(t, \dot{x}))dt \\ - \int_{t^{(n)}}^{t^{(n+1)}} b_{PTO}vdt - \int_{t^{(n)}}^{t^{(n+1)}} cxdt \\ x^{(n+1)} = x^{(n)} + \int_{t^{(n)}}^{t^{(n+1)}} vdt \quad (12)$$

가 되며, 적분 항을 Adams-Moulton 법 $\int_{t^{(n)}}^{t^{(n+1)}} xdt = \frac{\Delta t}{2} [x^{(n)} + x^{(n+1)}]$ 을 적용하면

$$Mv^{(n+1)} = Mv^{(n)} + \frac{\Delta t}{2}(F_E^{(n+1)} + F_E^{(n)}) + \int_{t^{(n)}}^{t^{(n+1)}} (F_C(t, \dot{x}) + F_D(t, \dot{x}))dt$$

$$-\frac{\Delta t}{2}b_{PTO}(v^{(n+1)} + v^{(n)}) - \frac{\Delta t}{2}c(x^{(n+1)} + x^{(n)})$$

$$v^{(n+1)} = \frac{2}{\Delta t}(x^{(n+1)} - x^{(n)}) - v^{(n)} \quad (13)$$

위 방정식에서 $\int_{t^{(n)}}^{t^{(n+1)}} F_c(t, \dot{x})dt$ 와 $\int_{t^{(n)}}^{t^{(n+1)}} F_D(t, \dot{x})dt$ 는 시간 $t^{(n+1)}$ 에서 미지의 속도에 대한 함수이므로 시간 $t^{(n)}$ 에서의 초기 예측값 $v^{(n)}$ 을 이용하여 반복계산을 수행하여야만 값을 얻을 수 있다. 이러한 반복계산을 회피하기 위하여 다음과 같은 Adams-Bashforth 법을 이 두 가지 비선형 항에 적용을 하면

$$\int_{t^{(n)}}^{t^{(n+1)}} F_c dt = \begin{cases} \Delta t F_c^{(0)} \\ \frac{\Delta t}{2}(3F_c^{(n)} - F_c^{(n-1)}) \end{cases} \quad (14)$$

$$\int_{t^{(n)}}^{t^{(n+1)}} F_D dt = \begin{cases} \Delta t F_D^{(0)} \\ \frac{\Delta t}{2}(3F_D^{(n)} - F_D^{(n-1)}) \end{cases} \quad (15)$$

식 (13)은 다음과 같이 정리 된다.

$$\left[\frac{4}{\Delta t^2}M + \frac{2}{\Delta t}b_{PTO} + c \right] \Delta x = \frac{4}{\Delta t^2}Mv^{(n)} + (F_E^{(n+1)} + F_E^{(n)})$$

$$+ (3F_C^{(n)} + 3F_C^{(n-1)}) + (3F_D^{(n)} + 3F_D^{(n-1)}) - 2cx^{(n)}$$

$$\Delta x = x^{(n+1)} - x^{(n)} \quad (16)$$

주어진 초기 조건으로부터 위의 방정식을 수치적으로 풀어 Δx 를 구하면 매 시간 스텝별로 미지의 변위를 얻을 수 있게 된다.

3. 해석 결과 및 고찰

시간영역에서의 다자유도 연성 운동 방정식을 적용하여 개발한 HARP/CHARM3D 수치 프로그램을 이용하여 플랫폼의 6자유도 거동과 24개 WEC의 상하동요 거동을 시뮬레이션 하고, 상용 프로그램 WAMIT의 주파수 영역 해석 결과와 비교하여 개발한 수치 프로그램의 유효성을 검증하였다. 시간영역의 해석에는 일반적으로 비선형 외력을 포함시켜 계산이 가능하지만, 본 연구에서는 개발된 해석 프로그램을 주파수 영역의 상용코드 결과와 비교를 위하여 다양한 비선형 외력의 영향은 모두 제거하고 선형의 다자유도 시스템으로 구성하여 주파수 영역의 응답과 직접적인 비교가 가능하도록 하였다.

주파수 영역에서의 플랫폼 6자유도 및 연성된 24개 WEC의 상하동요 RAO는 상용 프로그램 WAMIT의 다물체 해석(multibody analysis) 방법을 이용하여 산출하였다. 0.05 rad/s 부터 2.0 rad/s 까지 0.05 rad/s 간격으로 40개 주파수에 대하여 계산을 수행하였으며, 이때 플랫폼과 24개 WEC 상호간의 연성 부가질량 및 연성 방사감쇠 계수를 이용하여 각각의 RAO를 계산하게 된다. 시간영역에서의 RAO는 선형화된 플랫폼-WEC 연성 모델에 진폭 1 m의 규칙파를 0.1 rad/s 부터 2.0 rad/s 까지 0.1 rad/s 간격의 주기에 대하여 반복

적으로 적용 시키고, 플랫폼 및 WEC의 운동이 초기 과도응답을 지나 정상상태에 도달했을 때의 개별 운동 진폭을 계속하여 도시함으로써 얻어내었다. 주파수 영역 및 시간 영역 해석 시 포함된 감쇠력은 방사 포텐셜에 의한 방사 감쇠력과 함께 KRISO가 수행한 해양공학수조에서의 자유감쇠 시험을 통해 산출한 선형의 점성 감쇠력도 포함하고 있다. 플랫폼과 WEC 사이의 PTO 감쇠력은 본 연구에는 포함시키지 않았으나 필요시 선형 감쇠의 형태로 계산에 포함시켜 RAO를 산출할 수 있다.

플랫폼에 탑재된 24개의 WEC은 위치에 따라 Fig. 4과 같이 번호를 부여하였고, 일부 WEC의 운동 응답 비교 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 5(a)에 나타난 플랫폼 상하동요 응답의 경우 실선으로 표시된 WAMIT응답 RAO와 점으로 표시된 시간 영역에서의 규칙파 응답이 상당히 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 다만 0.2~0.3 rad/s 근방에서는 다소 일치하지 않는 경향을 보이는데, 이는 플랫폼의 상하동요 고유 주파수(0.25 rad/s)가 이 위치에 존재하기 때문이다. 공진점 근방에서는 감쇠력이 운동의 응답을 지배적으로 결정하게 되며, 공진점 근방에서 다소 일치하지 않은 이유는 주파수 영역과 시간 영역 계산에 적용된 감쇠력이 다소 차이를 보이기 때문이라고 추정할 수 있다. 시간 영역에서의 방사 감쇠력은 식 (9)의 합성적분을 통하여 계산되는데, 여기에 사용되는 식 (10)의 리타레이션 함수를 수치적으로 계산할 때 다소 오차가 발생할 수 있다. 그 이유는 수치적분에 사용되는 주파수의 함수인 방사 감쇠 계수 $b_f(\omega)$ 가 이와 같은 다물체 해석의 경우 변동이 매우 급격하게 발생하고 불규칙적이기 때문이다. 또한 이렇게 계산된 리타레이션 함수를 식 (9)와 같이 합성적분을 수행할 때도 충분히 긴 시간에 대해 수행되어야 하나 수치계산을 위해 적절한 시간까지 잘라서 수행하게 되는데, 이에 따라 약간의 오차가 발생할 수 있다. 0.4 rad/s 이상의 주파수에 대해서는 WAMIT의 결과와 개발된 시간영역 응답 시뮬레이션 결과가 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 플랫폼의 종동요 운동 응답의 비교도 Fig. 5(b)에 도시하였으며, 실선으로 표시된 주파수 영역의 응답과 점으로 표시된 시간 영역 응답이 서로 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

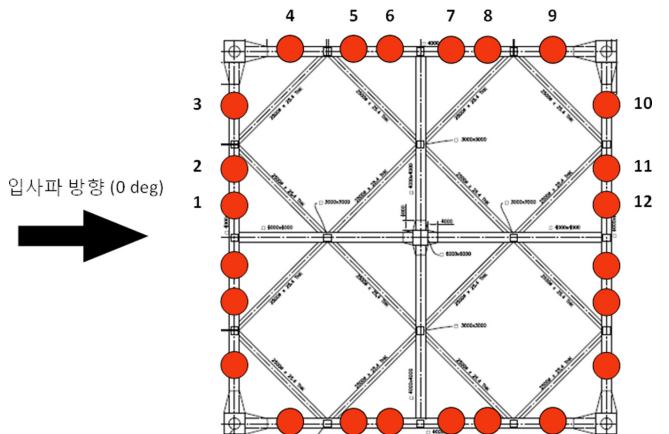


Fig. 4. Platform and multiple-WEC array configuration and incident wave direction.

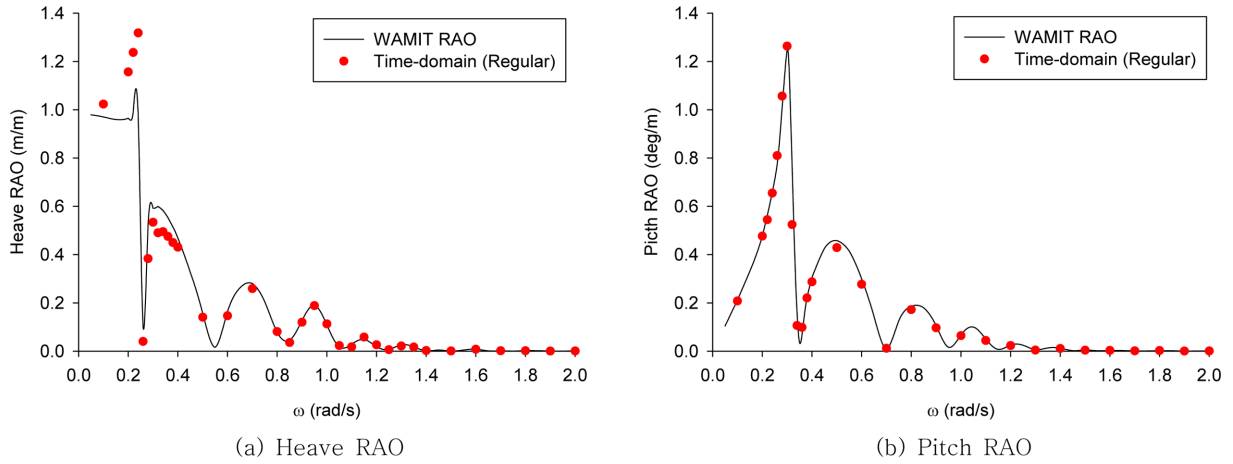


Fig. 5. Platform Heave and Pitch RAO with regular waves.

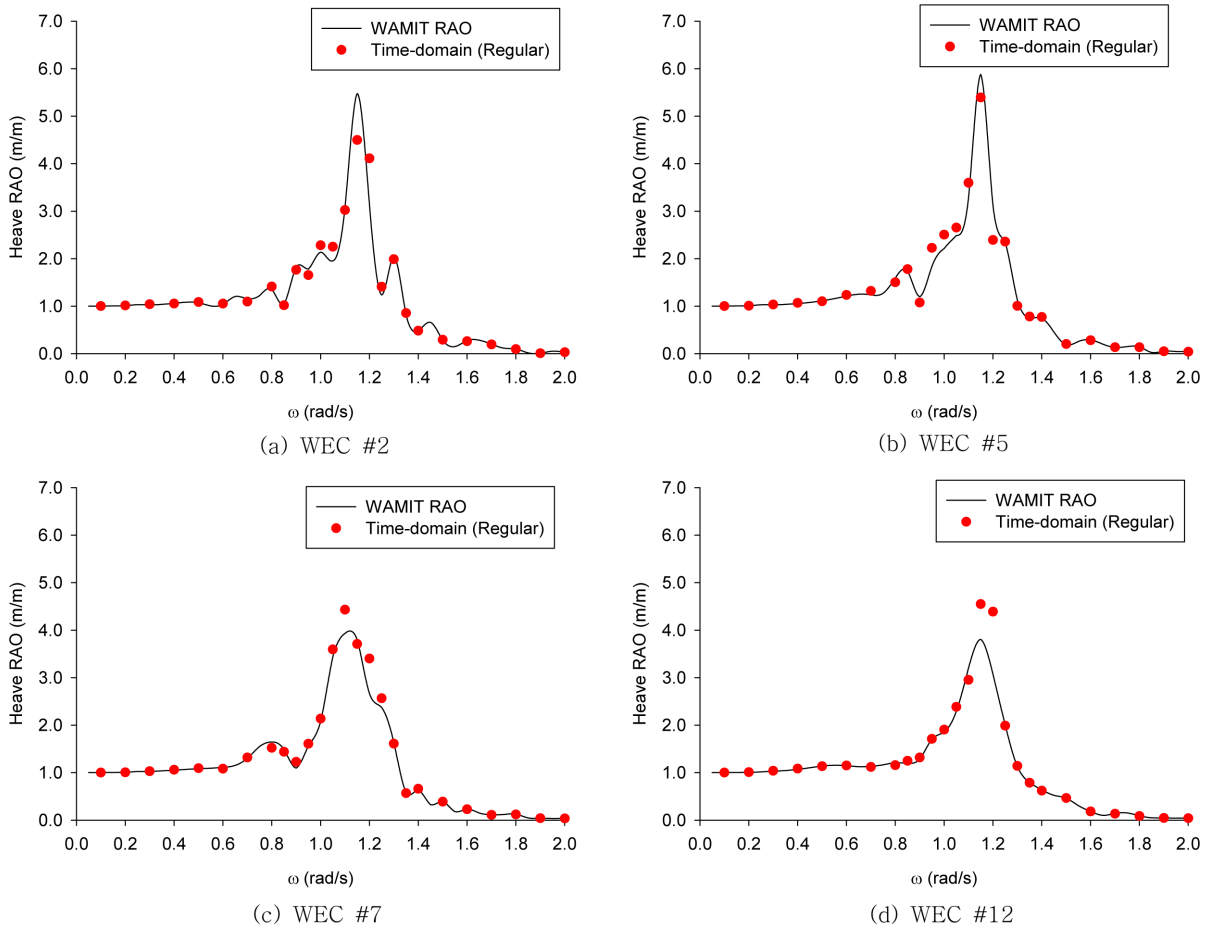


Fig. 6. Heave RAO of multiple WECs with regular waves.

플랫폼에 탑재된 24개 WEC 중 일부의 RAO는 Fig. 6와 같이 타낼 수 있다. 원통형 WEC의 고유 주파수는 1.2 rad/s 근방에 위치하며, WEC의 위치에 따라 RAO 경향은 다소 차이가 있으나 공진 현상은 뚜렷하게 확인할 수 있다. 공진점 부근에서의 RAO는 다수 WEC의 상호작용의 영향으로 변화가 많으므로 시간 영역의 응답 해

석 시에는 주파수의 간격을 0.05 rad/s 로 더욱 세분화 하여 수행하였다. 플랫폼 전면에 위치한 WEC #2의 경우, 주파수 및 시간 영역의 RAO는 경향이 잘 일치하며, 특히 공진점 전후의 복잡한 RAO 변화도 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 플랫폼의 측면 및 후면에 위치한 다른 WEC의 경우에도 주파수 영역의 해석 결과와 시간 영

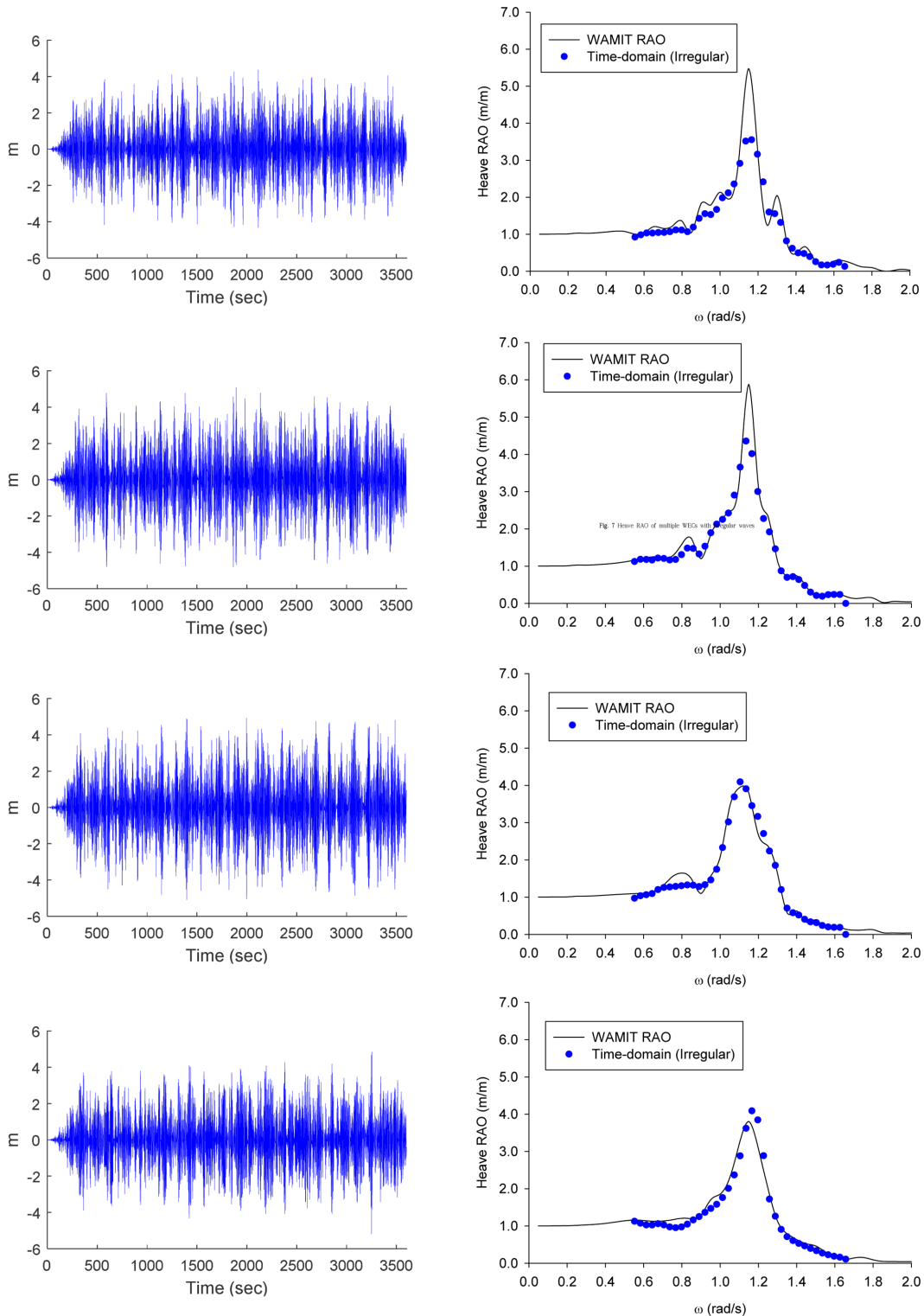


Fig. 7. Heave time history and RAO of multiple WECs with irregular waves.

역의 해석 결과가 상당히 잘 일치하는 것을 확인할 수 있으며, 공진 점 부근에서 관찰되는 오차는 역시 앞에서와 마찬가지로 수치계산 시 발생하는 오차가 주된 원인인 것으로 사료된다.

시간 영역에서의 불규칙파에 대한 해석도 수행하여 그 결과를 주

파수 영역의 응답과 비교하였다. 파랑 조건으로 유의파고(H_s) 3 m, 최대 주기(T_p) 6.67초, peak-enhancement factor 1.0을 적용한 JONSWAP (Joint North Sea Wave Project) 스펙트럼을 이용하여 불규칙 입사 파를 생성하였다. 또한 주파수 영역의 응답과의 직접적인 비교를 위

하여 선형 파랑 강제력만을 적용하였고 2차의 파랑 강제력 및 바람, 조류의 영향은 고려하지 않았다. 초기 과도 응답을 감소시키기 위하여 400초 까지는 점진적으로 외력을 증가시켰으며 3,600초(1시간) 동안 주어진 환경 조건에서 해석을 수행하였다. 주파수 영역에서 WAMIT을 통해 산출한 RAO와의 비교를 위하여 식 (17)과 같이 시간 영역에서의 불규칙 운동 응답 스펙트럼을 파랑 스펙트럼으로 나누고 제곱근을 취하여 주파수 별로 RAO를 산출하였다. 이때 S_x 는 부유체의 운동 스펙트럼이며 S_{wave} 는 주어진 해역의 파랑 스펙트럼이다. 식 (17)에서 파랑 스펙트럼 S_{wave} 는 분모에 위치하게 되므로 RAO가 유의미한 값을 갖게 하기 위하여 파랑 에너지가 존재하는 주파수 대역만을 취하여 RAO를 계산하였다.

$$RAO = \sqrt{\frac{S_x}{S_{wave}}} \quad (17)$$

Fig. 7에 불규칙 파랑 중 일부 WEC의 운동 응답 시계열 및 식 (17)을 적용하여 산출한 RAO를 도시하였다. 이때 WEC의 운동 변위를 제한하는 기구적인 제약 조건 등은 고려하지 않았다. 해석 결과, 주파수 영역에서 WAMIT을 이용하여 산출한 RAO와 불규칙 파랑 중 운동 RAO는 대체로 잘 일치 하였으며, 규칙파 시험과 유사하게 공진점 근방에서는 다소 차이가 있음을 확인할 수 있었다. 공진점 근방에서 RAO가 다소 차이나는 이유는 앞서 규칙파 시물레이션에서 언급한 바와 동일한 이유로 판단할 수 있다.

지금까지는 시간 영역에서의 다자유도 해석 결과를 주파수 영역의 응답과 비교하기 위하여 비선형 외력의 영향을 모두 제거하였으나 실제 시간 영역에서의 다자유도 해석 시에는 플랫폼 및 WEC에 작용하는 비선형 감쇠력 등을 적용하여 더욱 근사적인 응답을 얻을 수 있게 된다. 시간 영역에서의 다수 WEC의 유체역학적 상호작용을 고려한 개별 운동 응답을 얻게 되면, 이를 바탕으로 WEC 배치에 따른 전체 시스템의 발전 효율 등을 효과적으로 시뮬레이션 가능하며, 설계 단계에서 검증이 가능하게 된다.

4. 결 론

본 연구에서는 부유식 파력-해상풍력 복합발전 구조물에 부착된 다수의 파력발전장치의 거동을 유체역학적인 상호작용을 고려하여 시간 영역에서 해석하기 위하여 운동 방정식을 수립하였고 다자유도 연성해석 수치 프로그램을 개발하여 그 유효성을 검증하였다. 시간영역에서의 다자유도 연성해석 프로그램은 부유체의 6자유도 거동만을 시간영역에서 해석하는 HARP/CHARM3D 프로그램을 확장하여 개발하였고, 시간 영역 해석에 사용되는 다수 부유체 (플랫폼 및 다수 WEC)의 유체 동역학 계수는 상용 프로그램 WAMIT의 다물체 해석을 통하여 얻었다. 개발된 다자유도 연성해석 프로그램의 유효성은 규칙파 및 불규칙파 시물레이션을 통하여 얻은 플랫폼 및 개별 WEC의 RAO를 WAMIT에서 얻은 RAO와 비교하여 검증하였다. 그 결과 플랫폼 및 WEC의 시간 영역 거동 특성이 주파수 영역에서 얻은 RAO와 잘 일치하는 것을 확인하였다. 다만 공진점

근방에서는 주파수 영역의 RAO와 시간 영역의 RAO가 다소 불일치하였는데, 이는 다물체 해석 시 주로 나타나는 복잡한 상호 유체력 계수로 인한 수치적인 오차로 사료된다.

본 연구에서는 개발된 시간 영역 다자유도 연성해석 프로그램의 유효성 검증을 위하여 계류선의 거동 및 비선형 항력 효과등을 모두 제거한 선형 시스템을 기반으로 주파수 영역의 상용 프로그램 결과와의 비교 검증을 수행하였고, 추후 비선형 계류 강성, 비선형 항력, 계류선에 작용하는 모리슨 힘(Morison *et al.*[1950]) 등과 같은 다양한 비선형 효과를 시간 영역 해석에 포함하면 주파수 영역 해석으로는 얻을 수 없는 정밀한 수준의 플랫폼-파력발전장치의 연성 거동의 해석이 가능 할 것이다.

후 기

이 논문은 2016년도 제주대학교 교원성과지원사업에 의하여 연구되었음.

References

- [1] Cho, I.H. and Choi, J.Y., 2014, "Design of Wave Energy Extractor with a Linear Electric Generator, Part II: Linear Generator", J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy, Vol. 17, No. 3, 174-181.
- [2] Cummins, W.E., 1962, "The Impulse Response Function and Ship Motions", Schiffstechnik, Vol. 9, 101-109.
- [3] Floating Power Plant A/S, 2015, "Floating Power Plant (FPP)", <http://www.floatingpowerplant.com> (accessed Feb. 23, 2017).
- [4] Green Ocean Energy, 2015, "Green Ocean Energy Ltd.", <http://www.power-technology.com/projects/greenoceanenergywav/> (accessed Feb. 23, 2017).
- [5] Karimirad, M., 2014, Offshore energy Structures: For Wind Power, Wave Energy and Hybrid Marine Platforms, Springer, 105-128.
- [6] Kim, K.H., Lee, K., Sohn, J.M., Park, S.-W., Choi, J.-S., Hong, K., 2015, "Conceptual Design of 10MW Class Floating Wave-Offshore Wind Hybrid Power Generation System", Proc. 25th ISOPE, Kona, USA.
- [7] Kim, M.H., Ran, Z., Zheng, W., Bhat, S., Beynet, P., 1999, "Hull/mooring Coupled Dynamic Analysis of a Truss Spar in Time Domain", Proc. 9th ISOPE, Brest, France.
- [8] Lee, H., Bae, Y.H., Cho, I.H., 2016a, "One-way Coupled Dynamic Analysis of Floating Platform with Wave Energy Converters", J. Ocean and Wind Energy, Vol. 3, No. 1, 53-60.
- [9] Lee, H., Bae, Y.H., Cho, I.H., 2016b, "One-way Coupled Response Analysis between Floating Wind-wave Hybrid Platform and Wave Energy Converters", J. Ocean Eng. Technol., Vol. 30, No. 2, 84-90.
- [10] Lee, H., Cho, I.H., Kim, K.H., Hong, K., 2016c, "Interaction Analysis on Deployment of Multiple Wave Energy Converters in a Floating Hybrid Power Generation Platform", J. Korean

- Soc. mar. Environ. Energy, Vol. 19, No. 3, 185-193.
- [11] Liao, K., Hu, C., Sueoshi, M., 2013, "Development of WEC as a Floating Platform Motion Suppression System", International Research Exchange Meeting of Ship and Ocean Eng., Osaka, Japan.
- [12] Morison, J. R., Johnson, J. W. and Schaaf, S. A., 1950, "The force exerted by surface waves on piles", J. Petroleum Technology, Vol. 2, No. 5, 149-154.
- [13] Pelagic Power, 2015, "Pelagic Power AS", <http://www.pelagicpower.no> (accessed Feb. 23, 2017).
- [14] Taghipour, R. and Moan, T., 2008, "Efficient Frequency-Domain Analysis of Dynamic Response of the Multi-Body Wave Energy Converter in Multi-Directional Waves", Proc. 18th ISOPE, Vancouver, Canada.

Received 24 February 2017

1st Revised 22 May 2017, 2nd Revised 30 June 2017

Accepted 30 June 2017