한국해양환경 · 에너지학회지
Journal of the Korean Society
for Marine Environment and Energy
Vol. 18, No. 4. pp. 291-297, November 2015

http://dx.doi.org/10.7846/JKOSMEE.2015.18.4.291
ISSN 2288-0089(Print) / ISSN 2288-081X(Online)

Original Article

불규칙파중 파랑에너지 변환효율 향상을 위한 래칭 제어전략

조일형[1,†] · 김정록[1] · 김경환[2] · 홍기용[2]
[1]제주대학교 해양시스템공학과
[2]한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소, 해양플랜트연구부

Latching Control Strategy for Improvement Wave Energy Conversion in Irregular Waves

Il Hyoung Cho[1,†], Jeong Rok Kim[1], Kyong-Hwan Kim[2] and Keyyong Hong[2]
[1]Department of Ocean System Engineering, Jeju National University, Jeju 63243, Korea
[2]Offshore Plant Research Division, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea

요 약

10 MW급의 파력-해상풍력 복합발전 플랫폼 설치해역으로 고려되고 있는 차귀도 해역에서 측정된 파랑정보를 이용하여 파랑스펙트럼을 구하고, 이로부터 생성된 불규칙파에 따라 수직 운동하는 파력발전기에 Sheng *et al*.(2015)이 제안한 래칭 제어기법을 적용하였다. 래칭 시간을 정할 때 필요한 입사파의 주기로 불규칙파의 통계 대푯값인 피크 주기를 사용하였다. 래칭 제어기법을 불규칙파중 부이의 시간영역 해석에 적용한 결과, 약 50%의 추출파워의 증가를 가져왔다.

Abstract – The wave spectrum was generated from wave data measured at the Chagwi-do site in Jeju, where a 10MW class floating wave-offshore wind hybrid power generation system will be installed. The latching control technology (Sheng *et al*.[2015]) was applied in order to improve the extracted power from WEC (Wave Energy Converter), which is heaving in corresponding irregular waves. The peak period as a representative value of irregular waves was used when we determined the latching duration. From the numerical results in the time-domain analysis, the latching control technology can significantly improve the extracted power about 50%.

Keywords: Wave Energy Converter(파력발전기), Heave Motion(수직운동), Latching Control(래칭제어), Power Take-Off(파워추출장치), Resonance(공진)

1. 서 론

제주도 차귀도 해역에 설치 예정인 10MW급 부유식 파력-해상풍력 복합발전시스템에서의 파력발전기는 입사파의 파장에 비하여 상대적으로 크기가 작은 부이의 수직운동을 이용하여 발전하는 점흡수식(point absorber) 발전방식이다. 이때, 부이의 수직운동을 극대화하기 위하여 입사파의 주기와 공진이 일어나도록 부이의 형상을 설계한다(Budal and Falnes, 1975, French, 1979). 설치해역의 에너지 밀도와 발생 빈도수가 높은 장주기파와 공진을 일으키기 위해서는 부이의 흘수가 깊어져야 한다. 이는 파력발전기 제작비용 상승과 해저면과 충돌과 같은 안정성 측면에서 많은 문제점을 지니고 있다. 장주기파를 만났을 때 부이의 흘수 증가 없이 공진과 같은 증폭 효과를 얻기 위한 다양한 제어기법이 제안되어 왔고 그 중 가장 대표적인 방법이 래칭 제어기법이다.

파랑에너지 변환효율을 높이기 위한 제어기법은 Falnes and Budal(1978)이 처음으로 제안된 이후로 지금까지 많은 연구들이 진행되어 왔다. 입사파와 공진조건을 만족할 때 발생하는 현상들을 제어기법을 통하여 인위적으로 재현할 수만 있다면 변환장치를 통하여 추출할 수 있는 파워를 극대화 할 수 있다는 생각에서 제어 이론이 파력발전기에 도입되기 시작되었다. 이를 위해서는 파력발전기내에 제어 명령에 따라 움직이는 기계장치와 함께 정확한 제어명령을 내리기 위한 미래 정보에 대한 예측이 필요하다. 그러나 기계장치의 느린 응답성과 예측된 정보의 부정확성 등 여러 가지 한계 때문에 제어기법을 현장에서 적용하기는 쉽지는 않다. Hals *et*

†Corresponding author: cho0904@jejunu.ac.kr

al.(2011)는 8개의 서로 다른 제어기법들을 서로 비교하였고 이중에서 래칭 제어기법이 가장 효과적임을 밝혔다. 래칭 제어는 부이의 속도가 0일 때 부이를 일정시간 동안 구속하고 있다가 적당한 시점에 구속을 푸는 제어기법으로 구속 시간(latching duration)을 적절히 선정하면 입사파의 주기와 관계없이 공진시 발생하는 부이의 대진폭 운동과 빠른 수직속도를 기대할 수 있다. 따라서 구속 시간을 정하기 위하여 다양한 제어 전략들이 개발되었다. Bararit *et al*.(2006)는 3 종류의 래칭 제어 전략들을 비교한 결과 3종류 모두 에너지 변환 효율을 크게 향상시키는데 기여했으나 래칭 제어를 파력발전기에 적용하기 위해서는 파랑정보를 정확히 예측하거나 현장에서 직접 파랑데이터를 수집해야 하는 번거로움이 있다고 하였다. Falcao(2008)는 파랑정보의 예측과 측정 없이 PTO감쇠력이 최소의 한계값을 초과하면 구속된 부이를 풀어 주는 비교적 단순한 제어기법을 도입하였다. Sheng *et al*.(2015)는 추출파워 향상을 위하여 불규칙파중 놓여 있는 부이에 래칭 제어기법을 적용하였다. 이때 구속 시간을 정하는 방법으로 불규칙파 주기의 통계 대푯값으로 에너지 주기(energy period)를 이용하는 것이 추출효율을 높이는데 가장 바람직하다고 하였다.

본 연구에서는 10MW급 부유식 파력-해상풍력 연계형 발전시스템이 설치될 제주도 차귀도 인근 해역에서 3년간 측정된 파랑정보로부터 추정된 유의파고(significant wave height) 약 1.0 m, 피크주기(peak period) 6.67s인 불규칙한 파랑조건에서 반경 2 m, 흘수 5 m인 부이를 이용한 파력발전기에 Sheng *et al*.(2015)이 제안한 래칭 제어기법을 적용하여 제어 전과 후의 부이의 동적 거동 특성과 함께 추출파워를 비교하였다. 현장에서 측정된 파랑데이터를 가지고 구축된 JONSWAP 스펙트럼으로부터 시간영역에서의 불규칙한 파기진력을 구하고 시간영역 해석의 외력으로 사용하였다. PTO감쇠계수를 바꿔가면서 시간평균 추출파워를 비교하였을 때 PTO감쇠계수가 20 kN/(m/s)에서 최대 추출파워가 나왔다. 래칭 시간을 정할 때 필요한 입사파의 주기를 불규칙파의 대푯값인 피크 주기로 사용하였다. 래칭 제어를 적용하였을 때 부이의 운동속도는 피크주기 주변에서의 파기진력과 같은 위상을 가질 때 크게 증가되고 이는 추출파워의 증가로 이어짐을 보여 주었다. 또한 래칭 시간을 바꿔가면서 시간평균 추출파워의 변화를 살펴본 결과 피크 주기와 부이의 고유주기로부터 정해지는 래칭 시간(0.84s)보다 0.1초 짧은 래칭 시간(0.74s)에서 최대 추출파워가 나타났다.

2. 파력-해상풍력 복합발전

2.1 개념설계

부유식 파력-해상풍력 복합발전 시스템은 8 MW를 풍력발전에서, 2 MW를 파력발전에서 총 10 MW 이상의 발전량을 목표로 하고 있다. 다수의 풍력터빈과 파력발전기를 하나의 부유체에 배치하기 위해서는 발전기들의 간섭효과를 최소화하여 발전량을 극대화하는 배치가 고려되어야 한다. 풍력터빈은 본 플랫폼에서 구조부재 다음으로 가장 무거운 요소이므로 구조적 안전성을 위하여 반잠수식 구조물의 네 곳 칼럼 위에 배치되었다. 파력발전기는 100 kW급 점흡수식 형태로 개념설계 되었으며 플랫폼 각 모서리에 6기씩 총 24기가 배치되었다(Fig. 1).

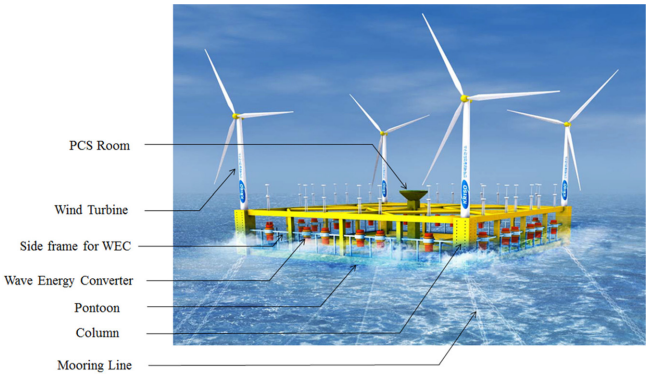

Fig. 1. Conceptual design of hybrid power generation platform.

Fig. 1에 보인 24기의 점 흡수식 파력발전기의 수직운동 특성과 추출파워를 정확히 예측하기 위해서는 다수의 파력발전기간의 상호작용에 의한 간섭효과를 고려하여야 한다. 즉, 파력발전기에 의한 회절파 및 파력발전기의 운동에 의한 방사파는 인근 파력발전기의 운동에 영향을 준다. 따라서 총 24기의 파력발전기의 상호작용을 고려한 해석결과가 파력발전기의 전체 성능에 어떠한 영향을 미치는지 파악하고 이를 기반으로 최적의 배치안을 선정하여야 한다. 또한 반잠수식 플랫폼의 하부 구조물에 의한 회절과 방사도 파력발전기의 운동에 영향을 미치므로 상호작용 해석시 함께 고려하여야 한다. Lee *et al*.(2015)은 WAMIT 상용프로그램을 사용하여 플랫폼을 포함한 다수의 파력발전기에 의한 상호작용 효과가 파력발전기 성능에 미치는 영향을 해석하였다. 그러나 본 연구에서는 설치해역의 불규칙한 파랑조건에서 래칭 제어 전과 후의 단일 부이의 수직운동 특성과 시간평균 추출파워에 초점이 맞춰져 있기 때문에 플랫폼을 포함한 다수의 파력발전기에 의한 상호작용 간섭효과는 무시되었다.

2.2 실해역 관측 및 자료

설치해역의 환경조건은 해양구조물 설계의 모든 요소에 영향을 미치는 중요한 요소이다. 10 MW급 부유식 파력-해상풍력 연계형 발전시스템의 설치 위치는 국내에서 바람과 파도의 에너지 밀도가 가장 높은 지역 중 하나인 제주도 서쪽에 위치한 차귀도에 인접한 해역(126.08°E, 33.33°N)으로 수심은 약 80 m 정도이며 해저면은 주로 뻘로 이루어져 있다(Fig. 2 참조).

복합발전시스템내의 파력발전기는 파도중 부이의 수직운동을 이용하여 선형발전기의 영구자석과 코일의 상대운동으로부터 전력을 생산하는 방식이다. 먼저 단일 부이의 수직운동 특성과 시간평균 추출파워를 알기 위하여 이 해역에서 관측된 파랑의 주기와 파고 분포를 파악해야 한다. 관측된 파랑자료로부터 파력발전기가 흡수할 수 있는 주기와 파고의 범위를 설정하고 발전 한계를 넘는 한계

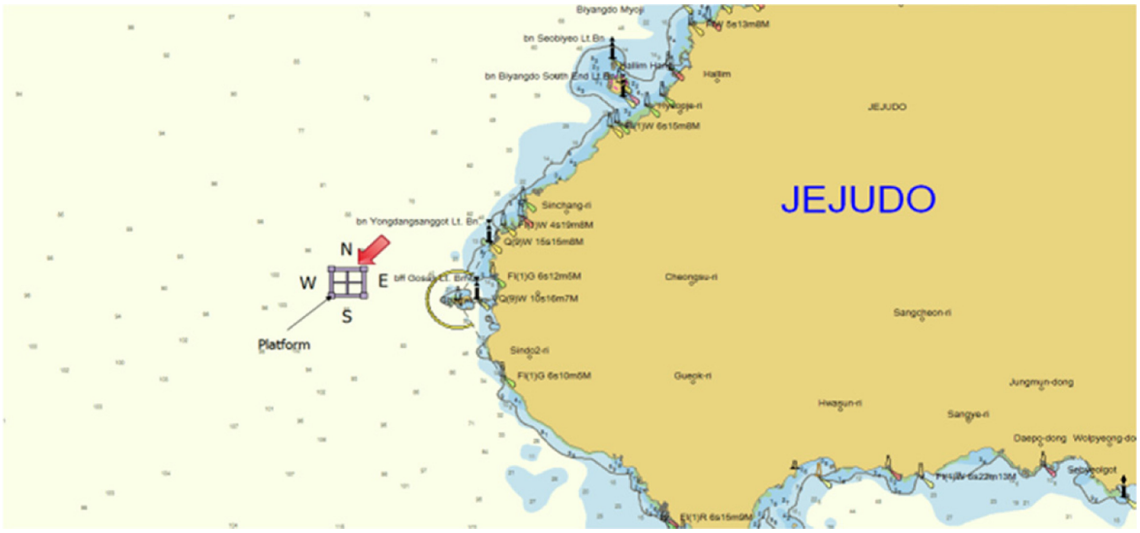

Fig. 2. Installation site of hybrid power generation platform (126.08°E, 33.33°N).

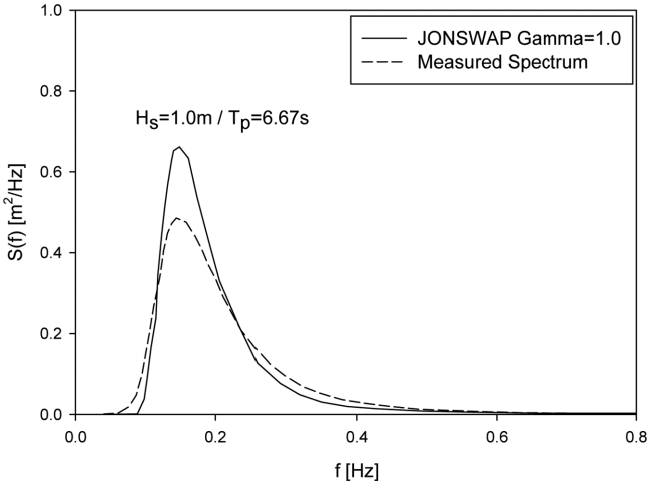

Fig. 3. Comparison of measured spectrum and JONSWAP spectrum.

파고를 정한다. 이를 위하여 2004년 1월부터 2008년 1월까지 총 3년간 관측된 파랑자료로부터 파고-주기 결합분포를 분석하고 Fig. 3에 나타난 파랑스펙트럼을 제시하였다. 파랑에너지의 에너지 밀도 분포 특성은 평상파에 대하여 분석하여야 하므로 관측된 모든 파랑자료를 포함시켜 파랑스펙트럼을 생성하였다.

Table 1은 설치해역의 파고-주기의 산포도(wave scatter diagram)를 보여주고 있다. Table 1에 나타난 파고-주기 결합분포를 살펴보면 대체로 주기 4s~8s와 파고 2.25 m 이하에 대부분 파가 존재하고 있음을 알 수 있다. 이러한 파고-주기 범위에 속하지 않은 파의 발생은 상대적으로 매우 낮은 확률로 존재한다. 평상파는 일반적인 해양구조물 설계를 위한 설계파 보다 파고는 낮고 주기는 짧다. 파력발전기를 통한 전력생산은 평상시에 발생하는 파를 활용하는 것이므로 평상파의 특성 파악이 우선시 되어야 한다. Fig. 3은 설치해역에서 측정된 파랑자료를 가지고 만든 파랑스펙트럼과 유의파고 약 1.0 m, 피크 주기 6.67s, γ = 1.0인 JONSWAP 스펙트럼을 비교한 그림이다. 대체적으로 잘 일치하나 피크 주기에서 JONSWAP 스펙트럼을 이용한 추정값이 다소 크게 나타났다. Fig. 3에 주어진 유의파고 1.0 m, 피크 주기 6.67s인 JONSWAP 스펙트럼을 입사파 스펙트럼

Table 1. Distribution of the wave heights and periods from measured data from 2004. 1. to 2008. 1

Hs / Tp	0 ~0.25	0.25 ~0.75	0.75 ~1.25	1.25 ~1.75	1.75 ~2.25	2.25 ~2.75	2.75 ~3.25	3.25 ~3.75	3.75 ~4.25	4.25 ~4.75	4.75 ~5.25	5.25 ~5.75	5.75 ~6.25	6.25 ~6.75	6.75 ~7.25	7.25 ~7.75	Sum	Prop (%)
20~	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
18~20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
16~18	0	10	16	26	22	11	25	22	6	8	6	0	0	0	0	0	152	0.43
14~16	0	10	38	69	64	38	29	22	15	13	3	1	0	0	0	0	302	0.86
12~14	11	120	134	65	110	126	86	31	10	4	3	1	2	3	2	0	706	2.01
10~12	13	236	244	190	105	72	27	37	42	91	68	22	0	0	0	0	1147	3.27
08~10	70	448	600	477	313	295	333	244	88	35	5	0	0	0	0	0	2908	8.29
06~08	238	3065	3612	2642	1976	682	168	32	2	0	0	0	0	0	0	0	12417	35.41
04~06	724	8414	4210	1225	84	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14659	41.81
02~04	556	2097	118	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2771	7.90
00~02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
SUM	1612	14400	8972	4694	2674	1226	668	388	163	151	85	24	2	3	2	0	35062	
Prop(%)	4.60	41.07	25.59	13.39	7.63	3.50	1.91	1.11	0.46	0.43	0.24	0.07	0.01	0.01	0.01	0.00		
Accu	1612	16012	24984	29678	32352	33578	34246	33966	34129	34280	34365	34389	34391	34394	34396	34394		
Accu Prop(%)	4.60	45.67	71.26	84.64	92.27	95.77	97.67	96.87	97.34	97.77	98.01	98.08	98.09	98.09	98.10	98.09		

으로 잡았고 피크 주기 주변에서 공진이 일어나도록 부이의 흘수를 정하였다. 파력발전기의 부이의 제원은 반경 2 m, 흘수 5 m, 질량은 64 ton이며, 부이의 수직운동 고유주파수(ω_N)는 약 1.26 rad/s이다.

3. 래칭 제어를 위한 시간영역 해석

불규칙파중 래칭 제어를 적용하기 위한 부이 모델은 Fig. 4와 같다. 부이의 운동에너지는 부이 아래 설치된 영구자석과 코일로 구성된 선형발전기를 통과하면서 전기에너지로 변환된다. 이때 부이와 함께 움직이는 영구자석의 운동방향과 반대방향으로 PTO감쇠력이 작용한다. 본 연구에서는 파워추출에 따른 PTO감쇠력이 영구자석의 운동속도에 선형적으로 비례한다고 가정하였다. 이때 비례상수(c_{PTO})를 PTO감쇠계수라 한다.

$$F_{PTO} = -c_{PTO}\dot{\zeta}_3 , \tag{1}$$

여기서 $\dot{\zeta}_3$ 는 부이의 수직속도이다.

PTO감쇠력을 포함한 시간영역에서의 부이의 수직운동에 대한 운동방정식은 다음과 같다(Cummins[1962]).

$$(m + a_{33}(\infty))\ddot{\zeta}_3 + (c_{vis} + c_{PTO})\dot{\zeta}_3 + \int_0^t K_{33}(\tau)\dot{\zeta}_3(t-\tau)d\tau + \rho g S\zeta_3 = F_3(t) + F_{Brake}(t) \tag{2}$$

여기서 $\zeta_3, \ddot{\zeta}_3$ 는 각각 부이의 수직방향 변위와 가속도이며, $a_{33}(\infty)$ 는 $\omega\to\infty$일 때의 부가질량이다. $c_{vis}\dot{\zeta}_3$ 는 부이의 수직운동에 대한 점성감쇠력으로 자유감쇠실험(free decay test)을 통하여 실험적으로 구한다. 식 (2)안의 점성감쇠계수 $c_{vis} = \frac{2\kappa\rho g S}{\omega_N} - b_{33}(\omega_N)$이다. 여기서 자유감쇠실험을 통하여 얻은 κ는 0.0497이다.

$K_{33}(\tau)$는 이전 시간의 부이의 수직운동의 이력이 현재 시간에서 부이의 수직운동에 미치는 영향을 나타내는 시간기억함수(time memory function)로 충격응답함수(impulse response function) 또는 지연함수(retardation function)로 불린다. 충격응답함수 $K_{33}(\tau)$는 주파수영역에서 미리 구한 부가질량 및 방사감쇠계수의 Fourier 역변환으로 구할 수 있으며 보통 방사감쇠계수를 역변환하여 구한다.

$$K_{33}(\tau) = -\frac{2}{\pi}\int_0^\infty (a_{33}(\omega) - a_{33}(\infty))\omega\sin(\omega\tau)d\omega = \frac{2}{\pi}\int_0^\infty b_{33}(\omega)\cos(\omega\tau)d\omega \tag{13}$$

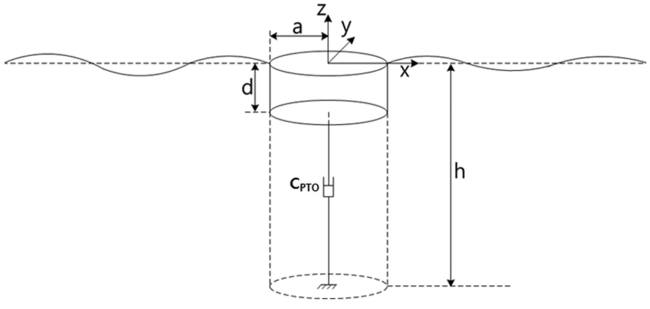

Fig. 4. Definition sketch of a WEC in irregular waves.

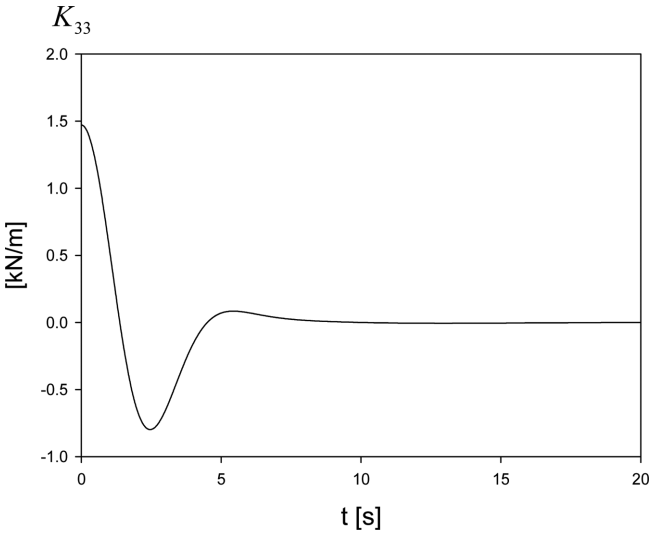

Fig. 5. Impulse response function for heaving buoy.

식 (3)에 주어진 수치적분을 효율적으로 수행하는 수치해석방법은 Cho and Choi(2014)에 자세히 기술되어 있다.

부이가 불규칙파중에 놓여 있을 때 시간영역에서의 수직방향 파기진력 $F_3(t)$은 조화함수 중첩원리를 사용하여 파랑스펙트럼과 주파수영역에서 구한 단위 입사파의 진폭당 파기진력($f_{ex}(\omega)$)으로부터 얻어진다. $f_{ex}(\omega)$는 고유함수전개법(matched eigenfunction expansion method)을 사용하여 회절문제를 풀어 구할 수 있다(Cho and Kweon, 2011).

$$F_3(t) = \sum_{n=1}^{N_w} |f_{ex}(\omega_n)| A_n \cos(\omega_n t + \chi_n + 2\pi\varepsilon_n),$$

$$\text{with } A_n = \sqrt{2S_\eta(\omega_n)\Delta\omega_n},\ \Delta\omega_n = (1 + 0.2\varepsilon_n)\Delta\omega$$

$$\omega_n = \omega_{n-1} + \frac{1}{2}(\Delta\omega_n + \Delta\omega_{n-1}),\ j = 2, \ldots, N_w \tag{4}$$

여기서 $\omega_1 = 0.1$ rad/s, $\Delta\omega = 3.0/N_w$ rad/s, $N_w = 300$, ε_n는 범위 [0,1] 내의 난수를 뜻한다. 식 (4)에서 파랑스펙트럼을 주파수에 대하여 등간격으로 나누지 않은 이유는 일정시간 후에 파기진력이 반복됨을 피하기 위함이다. 여기서 $S_\eta(\omega)$는 파랑스펙트럼으로 유의 파고 약 1.0 m, 피크 주기 6.67s의 JONSWAP 스펙트럼을 사용하였다. JONSWAP 스펙트럼은 다음과 같다.

$$S_\eta(\omega) = \beta\frac{H_s^2\omega_P^4}{\omega^5}\exp\left[-1.25\left(\frac{\omega}{\omega_P}\right)^{-4}\right]\gamma^{\exp\left[-\frac{(\omega-\omega_P)^2}{2\sigma^2\omega_P^2}\right]}$$

$$\text{with } \beta = \frac{0.0624}{0.23 + 0.0336\gamma - 0.185(1.9+\gamma)}(1.094 - 0.01915\ln\gamma) \tag{5}$$

여기서 H_s는 유의파고, $\omega_P\left(=\frac{2\pi}{T_P}\right)$는 피크 주파수이다. $\gamma = 1$, $\omega < \omega_P$일 때 $\sigma = 0.07$이며, $\omega \geq \omega_P$일 때 $\sigma = 0.09$이다. 식 (4)에서 파기진력이 부이에 점진적으로 작용하게 하기 위하여 램프 함수(ramp function) $S(t) = 3(t/t_s)^2 - 2(t/t_s)^3$을 곱한다. 여기서 $t_s = 5T_P$는 램프 함수가 적용된 시간이다.

식 (2)의 오른쪽 항의 $F_{Brake}(t)$는 부이 구속을 위한 제동력(break force)이다. 제동력은 부이의 운동속도에 선형적으로 비례한다고 가정하였다.

$$F_{Brake} = -c_{Brake}\dot{\zeta}_3, \tag{6}$$

여기서 제동 감쇠계수 c_{Brake}는 시간의 함수로 아래와 같다.

$$C_{Brake}(t) = \begin{cases} C_{\max}[3(t/t_{\max})^2 - 2(t/t_{\max})^3], & 0 \le t \le t_{\max} \\ C_{\max}, & t \ge t_{\max} \end{cases}, \tag{7}$$

여기서 $t_{\max}$는 제동 명령 후 부이의 운동을 멈추는데 까지 걸리는 시간으로 본 연구에서는 0.2s를 사용하였다. 부이의 구속을 푼 시간 동안 제동력은 작동되지 않으므로 $F_{Brake} = 0$이다.

식 (2)는 적미분 방정식(integro-differential equation)으로 시간에 따라 적분하여 변위, 속도, 가속도의 시계열 값을 구할 수 있다. 본 연구에서는 Newmark(1959)에 의해 제안된 Newmark's β 방법을 사용하여 시간 적분하였다. 부이의 속도 시계열 값을 가지고 시간평균 추출파워는 아래와 같다.

$$\overline{P} = \frac{1}{(t_2 - t_1)}\int_{t_1}^{t_2} c_{PTO}\cdot\dot{\zeta}_3^2(t)dt \tag{8}$$

여기서 t_1는 발전 시작 시간이며, t_2는 발전 종료 시간이다. 본 계산에서는 총 30분 동안 발전하여 시간평균 추출파워를 구하였다.

래칭 제어는 부이의 수직운동 속도가 0인 순간에 부이를 구속하고 있다가 적절한 순간에 구속을 풀어 부이의 운동속도의 위상을 파기진력의 위상과 일치시켜 파워추출을 극대화하는 제어 방법이다. 이때 구속을 푸는 적절한 순간을 포착하는 것이 매우 중요하며 여러 가지의 제어 전략에 따라 래칭 시간(latching duration)을 정한다. Sheng *et al.*(2015)는 불규칙 입사파의 대표 주기와 부이의 공진 주기를 가지고 래칭 시간을 간단히 구하는 방법을 제시하 였다.

$$T_{latch} = \frac{T_C - T_N}{2} \tag{9}$$

여기서 T_C는 입사파의 대표주기, $T_N(=2\pi/\omega_N)$는 부이의 고유주기이다. 불규칙파인 경우에는 주기가 다른 여러개의 규칙파를 합성하여 만들어지므로 통계적인 대푯값을 사용하여 입사파의 주기를 정한다. 대표적인 통계값으로 평균 주기(mean period), 에너지 주기, 피크 주기(T_P)가 있다. 본 연구에서는 피크 주기를 사용하였다.

4. 계산결과 및 고찰

Fig. 5는 부이의 수직운동에 의한 충격응답함수 $K_{33}(t)$를 시간에 따라 그렸다. 그림에서 t가 0일 때 1.5 kN/m의 값을 갖고 시간에 증가함에 따라 급격히 줄어들어 $t = 5$s 이후 0의 값에 수렴한다. 이러한 계산결과는 바로 전의 부이의 수직운동이 현재 시간의 부이의 수직운동에는 큰 영향을 미치나 오랜 전의 이력은 현재 결과에 큰 영향을 미치지 못함을 뜻한다.

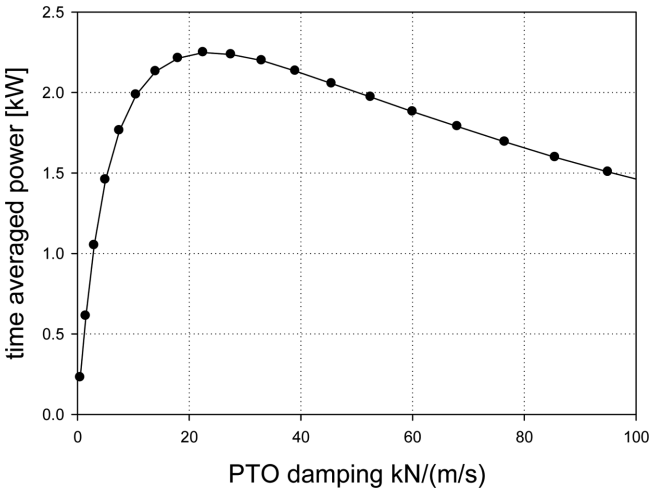

Fig. 6 PTO damping on time averaged extracted power for T_{latch} = 0.84s, H_s = 1.0m, T_P = 6.67s.

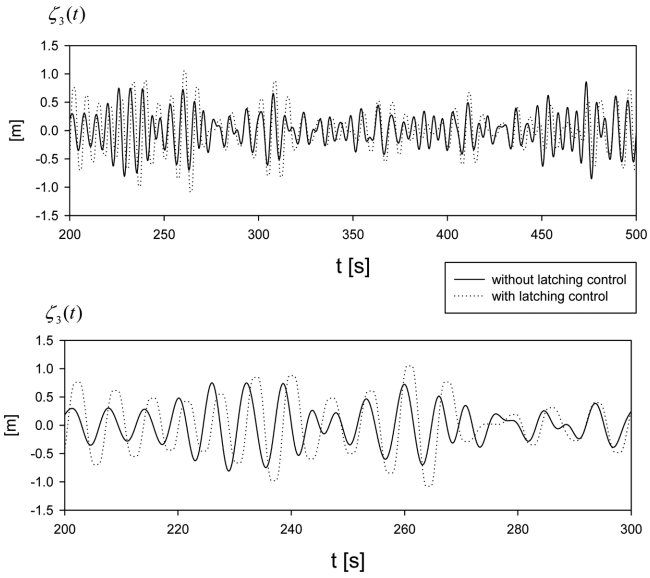

Fig. 7 Comparison of heave motion between latching control and no-latching control in irregular waves for T_{latch} = 0.84s, c_{PTO} = 20 kN/(m/s), H_s = 1.0m, T_P = 6.67s.

Fig. 6-11은 복합발전시스템이 설치될 차귀도 해역에서 측정된 파랑자료를 가지고 추정한 유의파고 1.0 m, 피크주기 6.67s인 JONSWAP스펙트럼을 가지고 구현한 파기진력을 입력자료로 얻은 수치해석결과이다. 주파수의 총 개수는 N_w = 300이다. 먼저 불규칙파에서 최적의 PTO감쇠계수를 찾기 위하여 PTO감쇠계수를 바꿔가면서 구한 시간평균 추출파워를 Fig. 6에 그렸다. PTO감쇠계수가 20 kN/(m/s)에서 시간평균 추출파워가 최대값이 나오며, 최대값은 2.2 kW이다. 이후 모든 계산에서 PTO감쇠계수를 20 kN/(m/s)를 사용하였다.

Fig. 7은 불규칙파중 반경 2 m, 흘수 5 m인 부이의 수직운동이다. 계산 모델에 대한 수직운동 고유주파수는 1.26 rad/s이다. 여기서

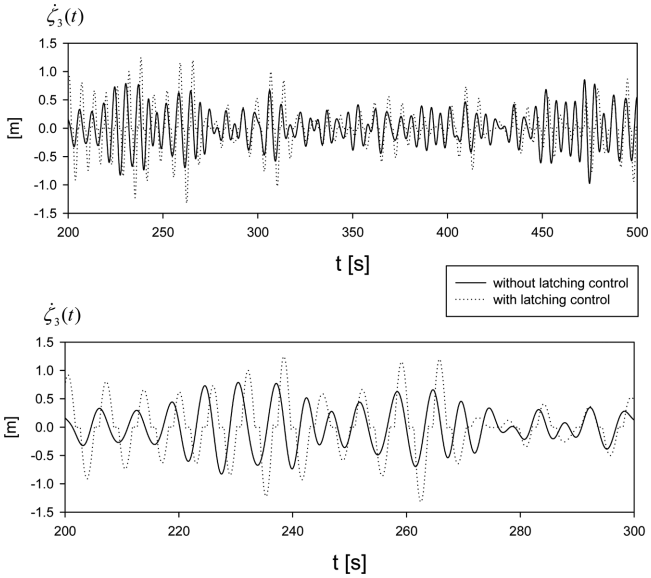

Fig. 8. Comparison of heave velocity between latching control and no-latching control in irregular waves for T_{latch} = 0.84s, c_{PTO} = 20 kN/(m/s), H_s = 1.0m, T_P = 6.67s.

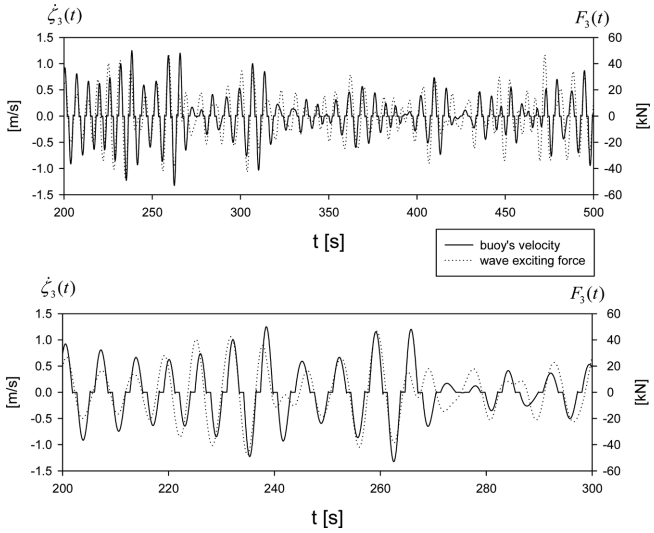

Fig. 9. Buoy's vertical velocity and wave exciting forces after latching control in irregular waves for T_{latch} = 0.84s, c_{PTO} = 20 kN/(m/s), H_s = 1.0m, T_P = 6.67s.

실선은 래칭 제어를 적용하지 않았을 때의 계산결과이며, 점선은 래칭 제어를 적용한 결과이다. 파랑스펙트럼의 피크 주기를 입사파의 대표 주기로 놓고 래칭 시간(=0.84s)을 정하였다. 전반적으로 래칭 제어를 적용한 결과가 그렇지 않은 결과에 비하여 부이의 수직운동이 크게 나타났다. 시뮬레이션 시간 200s부터 300s까지 그린 부이의 운동파형에서 파정과 파저에 뭉툭한 부분이 나타나는 시간대가 부이의 운동을 구속한 시간대이다. 또한 래칭 제어를 적용한 후 그 전의 결과와 비교하여 위상의 차이가 나타남을 볼 수 있다.

Fig. 8은 Fig. 7과 같은 파랑조건에 대하여 래칭 제어 전후의 부이의 수직 운동속도를 보여주고 있다. 래칭 제어는 부이의 운동속도가 0인 순간 부이를 구속한 후 래칭 시간 동안 지속하다가 풀어주는 과정을 반복한다. 규칙파와 달리 불규칙파는 주기가 시시각각 변하므로 부이를 구속하는 래칭 시간을 파의 주기에 따라 계속 바꿔주기는 불가능하다. 본 연구에서는 파랑에너지가 가장 높은 피크 주기를 입사파의 대푯값으로 하여 래칭 시간을 정하였다. 따라서 래칭 제어에 의해 크게 증폭이 가능한 주파수 대역도 존재하지만 그렇지 못한 주파수대도 함께 공존한다. 앞선 결과와 마찬가지로 래칭 제어를 적용하였을 때의 부이의 운동속도가 래칭 제어를 적용하지 않았을 때와 비교하여 전반적으로 큰 값을 보이고 있다. 래칭 제어를 통하여 증가한 부이의 수직속도는 추출파워를 높이는데 기여할 것이다. 또한 시뮬레이션 시간 200s부터 300s까지 래칭 제어 효과가 큰 시간영역에서 래칭 제어 전과 후의 속도파형은 $\pi/2$ 위상차를 보여주고 있다.

Fig. 9는 래칭 제어를 적용하였을 때의 부이의 수직 운동속도와 파기진력의 시계열을 그렸다. 래칭 제어는 부이의 수직운동 속도가 0인 순간에 부이를 인위적으로 구속하고 있다가 적절한 시간 후에 구속을 풀어 부이의 운동속도의 위상을 제어하여 파기진력의 위상과 일치시켜 마치 공진조건을 만족할 때와 같은 효과로 파워추출을 극대화하는 제어 방법이다. 이때 부이를 구속하는 시간인 래칭 시간은 입사파의 주기에 따라 정해진다. 따라서 여러 주기와 파고가 합성된 불규칙파에 래칭 제어를 적용하였을 때 부이의 수직속도와 파기진력 간의 위상이 서로 일치하는 시간대와 그렇지 않은 시간대가 함께 존재하며 두 값 사이의 위상차가 작을 때 부이의 운동속도는 상대적으로 큰 값을 갖는다. Fig. 9는 위에 기술된 내용들을 잘 반영하고 있다.

Fig. 10에서 시간영역에서의 래칭 제어 전후의 추출파워의 시계열을 비교하였다. 점선으로 표시된 래칭 제어를 적용하였을 때의 추출파워가 230s부터 280s 까지 시간대에서 크게 나타났다. 나머지 시간대에서는 래칭 제어의 효과가 미비하게 일어났다. 그러나 전반적으로 불규칙파중에 놓인 단일 부이에 래칭 제어를 적용하면 추출파워가 크게 증가하는 것을 확인 할 수 있었다.

Fig. 11에서는 피크 주기 6.67s를 입사파의 대표주기로 놓고 구한 래칭 시간(=0.84s)을 조금씩 바꿔가면서 시간평균 추출파워의 변화를 살펴보았다. 여기서 x축은 원래의 래칭 시간에서 변화된 시간을 의미하며 +값은 래칭 시간을 늘림을 뜻한다. y축은 30분간 계

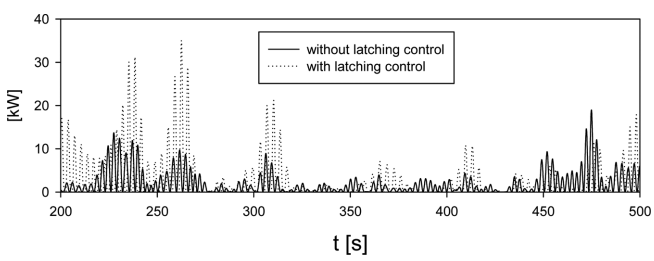

Fig. 10. Comparison of extracted power between latching control and no-latching control in irregular waves for T_{latch} = 0.84s, c_{PTO} = 20 kN/(m/s), H_s = 1.0m, T_P = 6.67s.

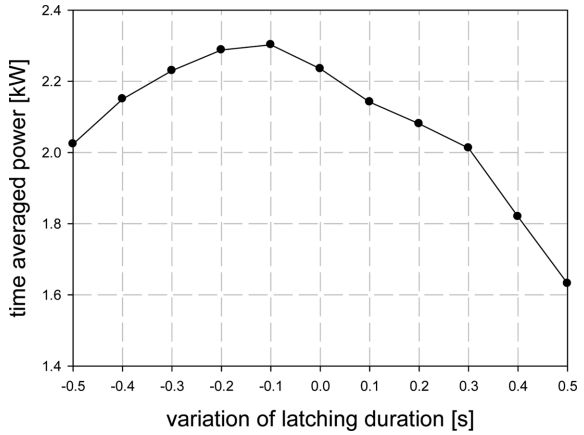

Fig. 11 Latching duration on extracted power for c_{PTO} = 20 kN/(m/s), H_s = 1.0m, T_P = 6.67s.

산된 시간평균 추출파워를 보여주고 있다. 원래의 래칭 시간 0.84s 보다 0.1s 줄인 0.74s에서 최대 추출파워 2.3 kW가 발생한다.

5. 결 론

본 연구에서는 공진조건을 만족할 때 부이의 운동속도는 파기진력과 위상이 같아진다는 이론에 기초하여 공진조건과 동일한 현상들이 일어나도록 부이를 일정시간 동안 구속하여 위상을 바꾸는 래칭 제어기법을 불규칙파에 적용하였다. 본 연구에서는 입사파의 주기를 불규칙파의 통계 대푯값인 피크 주기를 사용하였다. 차귀도 해역에서 3년간 측정된 유의파고 1.0 m, 피크 주기 6.67s인 불규칙파에서 최대 추출파워를 주는 PTO감쇠계수는 20 kN/(m/s)임을 계산을 통하여 확인하였다. 래칭 제어를 불규칙파에 적용하였을 때 피크 주기와 가까운 주기를 갖는 입사파에서는 부이의 운동, 속도, 그리고 추출파워는 크게 증가하나 피크 주기와 멀리 떨어진 주기 범위를 갖는 입사파에서는 래칭 제어의 효과가 크게 떨어졌다. 또한 부이의 운동속도와 파기진력 간의 위상이 서로 일치하는 시간대와 그렇지 않은 시간대가 함께 공존하며 위상차이에 작을 때 부이의 운동속도는 크게 증가한다.

시간영역에서 살펴본 유의파고 1.0 m, 피크주기 6.67s인 불규칙파의 경우에서 래칭 제어를 사용치 않았을 때의 시간평균 추출파워는 약 1.51 kW이며, 래칭 제어를 사용하였을 때의 시간평균 추출파워는 약 2.23 kW이었다. 약 50%의 파워 증가를 가져왔다. 래칭 시간 변화에 따른 시간평균 추출파워의 변화를 살펴본 결과 피크 주기를 가지고 정한 래칭 시간인 0.84s보다 0.1초 짧은 0.74s에서 최대 추출파워가 발생하였다.

본 연구를 통하여 래칭 제어가 파력발전기를 통한 파워추출을 높이는데 기여함을 확인하였다. 래칭 제어는 공진조건을 일부러 맞출 필요가 없어 부이의 흘수를 크게 낮출 수 있고 동시에 PTO감쇠력을 줄일 수 있어 파력발전기 제작 비용을 절감할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그러나 래칭 제어를 파력발전기에 적용하기 전에 선행되어야 할 과제는 제어명령에 따라 정확히 움직이는 구속장치 제작과 함께 정확한 제어명령을 내리기 위한 파랑정보에 대한 예측이나 현장 관측이 필요하다.

후 기

본 연구는 해양수산부의 해양청정에너지개발사업 “10MW급 부유식 파력-해상풍력 연계형 발전시스템 개발 및 인프라 구축”의 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

[1] Babarit, A. and Clement, A.H., 2006, “Optimal Latching Control of a Wave Energy Device in Regular and Irregular waves”, Appl. Ocean Res., Vol.28, 77-91.

[2] Budal, K. and Falnes, J., 1975, “A Resonant Point Absorber of Ocean Wave Power”, Nature, Vol.256, 478-479.

[3] Cho, I.H. and Kweon, H.M., 2011, “Extraction of Wave Energy Using the Coupled Heaving Motion of a Circular Cylinder and Linear Electric Generator”, J. Ocean Engineering and Technology, Vol.25, No.6, 9-16.

[4] 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.

[5] Cummins, W., 1962, “The Impulse Response Function and Ship Motions”, Schiffstechnik, Vol.9, 101-109.

[6] Falcao, A., 2008, “Phase Control through Load Control of Oscillating-body Wave Energy Converters with Hydraulic PTO System”, Ocean Engineering, Vol. 35, 358-366.

[7] French, M.J., 1979, “A Generalized View of Resonant Energy Transfer”, J. Mech. Engng. Science, Vol.21, 299-300.

[8] Falnes, J. and Budal, K., 1978, “Wave-power Conversion by Power Absorbers”, Norwegian Maritime Research, Vol.6, 2-11.

[9] Hals, J., Falnes, J. and Moan, T., 2011, “A Comparison of Selected Strategies for Adaptive Control of Wave Energy Converters”, J. Offshore Mech. Arct. Eng., Vol.133, 1-12.

[10] Lee, H., Bae, Y.H., Cho, I.H., Kim, K.H. and Hong, K., 2015, “One-way Coupled Dynamic Analysis of Floating Platform with Wave Energy Converters”, ISOPE, Kona Hawaii Conference.

[11] Newmark, N.M., 1959, “A Method of Computation for Structural Dynamics”, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 67-94.

[12] Sheng, W., Alcorn, R. and Lewis, A., 2015, “On Improving Wave Energy Conversion, part II: Development of Latching Control Technologies”, Renewable Energy, Vol.75, 935-944.

Received 28 August 2015
Revised 21 September 2015
Accepted 21 October 2015