

파력발전기 추출파워 향상을 위한 래칭 제어기법

조일형[†]

제주대학교 해양시스템공학과

Latching Control Technology for Improvement of Extracted Power from Wave Energy Converter

Il Hyoung Cho[†]

Department of Ocean System Engineering, Jeju National University, Jeju 63243, Korea

요 약

부이의 수직운동으로부터 파랑에너지를 추출하는 파력발전기의 추출효율을 극대화하기 위하여 Sheng *et al.*(2015)이 제안한 래칭 제어기법을 적용하였다. 래칭 제어기법은 부이를 구속하는 래칭 시간을 조절하여 추출효율을 높이는 위상 제어 방법이다. 래칭 제어기법을 규칙파중 수직운동하는 부이에 적용한 결과, 공진조건을 만족하지 않았음에도 불구하고 부이의 운동속도와 추출파워는 크게 증가하였다. 부이의 수직운동으로부터 파랑에너지를 흡수하는 파력발전기에 이러한 래칭 제어기법을 도입하면 추출파워의 증가와 더불어 부이의 흡수와 PTO감쇠력을 줄일 수 있어 제작비용을 크게 낮출 수 있다.

Abstract – In this study, a latching control technology, proposed by Sheng *et al.*(2015), was applied in order to maximize the extraction efficiency of WEC (Wave Energy Converter), which is the heaving buoy coupled with linear electric generator. The latching control is the phase-control technique for improving the wave energy conversion with appropriate latching duration of keeping the buoy fixed. From the time-domain analysis in regular waves, the latching control technology can significantly improve the heave velocity and extracted power, even though the resonance condition is not satisfied. By using the latching control technology, the draft of buoy as well as the required PTO damping force can be significantly reduced along with increased extracted power, which is a big advantage in manufacturing the WEC.

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

1. 서 론

지구상에서 이용 가능한 파랑에너지의 총량은 대략 “80,000TWh/년”로 추정되고 있고, 이 수치는 2004년도 기준 전세계 전력 생산량 “17,400TWh/년”의 5배에 가까운 수치이다. 유럽연합을 중심으로 한 선진국들은 신 재생에너지 중에서 에너지 밀도가 비교적 높은 파랑에너지를 이용하는 연구·개발을 빠르게 확대해 나가고 있다. 파랑에너지 변환에 대한 원리와 기술들은 이미 잘 정립되어 있지만 직접 해양에서 파랑에너지를 전기에너지로 변환하는 과정에는 많은 어려움이 뒤 따른다. 특히 아직까지 발전단가가 기존의 화석연료를 이용한 발전방식에 비하여 높고, 에너지 변동폭이 크며, 초기 투자비

가 많이 들기 때문에 많은 장점들에도 불구하고 크게 주목을 받지 못하고 있다. 그러나 하나의 지지 구조물에 풍력발전과 파력발전을 결합한 복합발전방식이나 다수의 파력발전기를 함께 묶어 대단위 에너지 농장 조성방법은 발전단가를 낮출 수 있을 것이다. 또한 앞으로 전개될 탄소 배출권 거래에 대비하면서 지속적인 성장을 하기 위해서는 파력발전에 대한 지속적인 연구·개발이 필요하다.

입사파의 파장에 비하여 크기가 작은 부이의 운동을 이용하여 발전하는 방식을 점 흡수식(point absorber) 발전방식이라 부르며 1970년도부터 많은 연구가 진행되고 있다. 이때, 부이의 운동을 극대화하기 위하여 입사파와 공진이 일어나도록 부이의 형상을 설계한다(Budal and Falnes, 1975, French, 1979). 부이의 수직운동을 이용하여 발전을 하는 경우, 설치해역의 장주기의 입사파와 공진을 일으키기 위해서는 부이의 흡수가 깊어져야 하며 수심이 낮은 해역에서

[†]Corresponding author: cho0904@jejunu.ac.kr

는 해저면과 부딪힐 위험이 있다. 따라서 입사파의 주기가 부이의 수직운동 고유주기보다 큰 경우에도 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 일어나는 현상들을 제어기법들을 통하여 인위적으로 재현할 수만 있다면 변환장치를 통하여 추출할 수 있는 파워를 극대화 할 수 있다는 단순한 생각에서 제어 이론이 파력발전기에 도입되기 시작되었다. 이를 위해서는 파력발전기내에 제어 명령에 따라 움직이는 기계장치와 함께 정확한 제어 명령을 내리기 위한 파랑정보에 대한 예측이 필요하다. 그러나 기계장치의 느린 응답성과 예측된 파랑정보의 부 정확성 등 여러 가지 제약 때문에 제어기법을 현장에서 적용하기는 쉽지 않다. Hals et al.(2011)는 8개의 서로 다른 제어기법들을 서로 비교하였고 이 중에서 래칭 제어기법이 가장 효과적임을 밝혔다. 래칭 제어는 파력발전기내 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 대전폭 운동과 빠른 수직 운동속도를 기대할 수 있다. Bararit et al.(2006)는 3 종류의 래칭 제어전략들을 비교한 결과 3종류 모두 에너지 변환 효율을 크게 향상시키는데 기여했으나 래칭 제어를 파력발전기에 적용하기 위해서는 파랑정보를 정확히 예측하거나 현장에서 직접 파랑자료를 수집해야 하는 번거로움이 있다고 하였다. Falcao(2008)는 파랑정보의 예측과 현장관측 없이 PTO 감쇠력이 최소의 한계값을 초과하면 구속된 부이를 풀어 주는 비교적 단순한 제어기법을 도입하였다. Sheng et al.(2015)는 구속 시간을 단순히 입사파의 주기와 부이의 고유주기로부터 정하는 간단하지만 정확성이 높은 래칭 제어기법을 제안하였다.

본 연구에서는 부이의 수직운동으로부터 파랑에너지를 추출하는 파력발전기에 Sheng et al.(2015)이 제안한 래칭 제어기법을 도입하여 제어 전후의 부이의 동적 거동 특성과 함께 추출과워를 비교하였다. 계산예로 부이의 반경을 2 m로 고정시키고, 흘수를 2, 4, 6 m로 바꿔가면서 수치계산을 수행하였다. 2장에서는 주파수영역에서의 부이의 운동과 속도 그리고 추출과워와 취득 폭을 구하였다. 먼저 최적의 PTO감쇠계수를 가질 때 추출과워와 취득 폭을 구하였다. 계산에 사용한 부가질량, 방사감쇠계수, 파기진력을 구하기 위하여 Cho and Kweon(2011)가 사용한 고유함수전개법(matched eigenfunction expansion method)을 사용하였다. 3장에서는 래칭 제어 전후의 부이의 동적 거동특성과 추출과워의 변화를 시간영역에서 살펴보았다. 이 때 입사파의 주기는 부이의 고유주기보다 긴 공진조건을 만족하지 않는 경우이다. 래칭 제어를 적용하였을 때 부이의 운동속도와 파기진력은 공진조건을 만족하였을 때와 동일하게 같은 위상을 가지며 이로 인하여 부이의 운동과 속도가 크게 증가하였고 이는 추출과워의 증가로 이어짐을 보여 주었다. 또한 시간영역에서 구한 부이의 운동과 속도를 주파수영역에서 구한 해석결과와 비교하였다.

2. 파랑에너지 추출

Fig. 1과 같이 반경 a , 흘수 d 인 원통형 부이가 일정한 수심 h 위에 떠 있는 모델을 래칭 제어를 위한 해석모델로 잡았다. 파랑중 부이의 운동에너지는 부이 하부에 위치한 영구자석과 코일로 구성된 선형발전기를 통과하면서 전기에너지로 변환된다. 선형포텐셜이론 아래에서 고유함수전개법을 사용하여 회절과 방사문제를 풀어 부가질량(added mass)과 방사감쇠계수(radiation damping coefficient) 그리고 파기진력(wave exciting force)을 구하였다(Cho and Kweon [2011]). 여기서는 선형발전기를 통한 전기 추출에 직접적인 기여를 하는 수직운동만을 고려하였다.

질량이 m 인 부이가 파랑중 수직운동을 할 때, 운동방정식은 Newton의 제 2법칙으로부터 다음과 같다.

$$m\ddot{\zeta}_3(t) = F_{ex}(t) + F_{rad}(t) + F_{res}(t), \tag{1}$$

여기서 입사파를 진폭 A , 주파수 ω 인 규칙파라 가정하면 부이의 수직운동 변위와 속도는 $\zeta_3(t) = \text{Re}\{\xi_3 e^{-i\omega t}\}$, $U_3(t) = \text{Re}\{u_3 e^{-i\omega t}\}$ 로 쓸 수 있으며, 파기진력은 $F_{ex}(t) = \text{Re}\{A f_{ex} e^{i\omega t}\}$ 이다. $F_{rad}(t)$ 는 부이의 수직운동에 의한 동유체력으로 가속도에 비례하는 부가질량력($-a_{33}\ddot{\zeta}_3$)과 속도에 비례하는 방사감쇠력($-b_{33}\dot{\zeta}_3$)의 합으로 표현된다. 여기서 a_{33} , b_{33} 은 각각 부가질량과 방사감쇠계수이다. $F_{ex}(t) = -\rho g S \zeta_3$ 는 정유체력이며, 여기서 S 는 부이의 수선면적이다.

2.1 주파수영역 해석

식 (1)로부터 주파수영역에서의 부이의 운동과 속도의 복소진폭(complex amplitude)은 아래식과 같다(Kim et al.[2014]).

$$\xi_3 = \frac{A f_{ex}}{\rho g S - \omega^2(m + a_{33}) - i\omega b_{33}},$$

$$u_3 = \frac{A f_{ex}}{i\rho g S/\omega - i\omega(m + a_{33}) + b_{33}}. \tag{2}$$

부이의 운동에너지로부터 전기에너지를 추출하기 위한 파워추출(PTO: power take-off) 장치로 본 연구에서는 영구자석과 코일로 구성된 선형발전기를 사용하였다. 이때 부이와 함께 움직이는 영구자석의 운동방향과 반대방향으로 PTO감쇠력이 작용한다. 본 연구에서는 파워추출에 따른 PTO감쇠력이 영구자석의 운동속도에 선

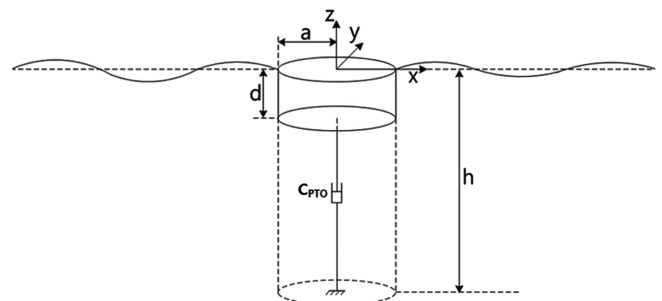


Fig. 1. Definition sketch of a WEC in regular waves.

형적으로 비례한다고 가정하였다. 이때 비례상수를 PTO감쇠계수라 부르며 본 연구에서의 중요한 제어 변수이다.

$$F_{PTO} = -c_{PTO}\dot{\xi}_3, \quad (3)$$

여기서 c_{PTO} 를 PTO감쇠계수라 부르며, 선형발전기의 고정자(코일)와 가동자(영구자석)의 형상과 코일의 감긴 횟수, 구동 주파수와 밀접한 관련이 있다.

선형발전기가 연결된 상태에서의 부이의 운동과 속도의 복소진폭은 다음과 같이 바뀐다.

$$\xi_3 = \frac{Af_{ex}}{\rho g S - \omega^2(m + a_{33}) - i\omega(b_{33} + c_{PTO})},$$

$$u_3 = \frac{Af_{ex}}{i\rho g S/\omega - i\omega(m + a_{33}) + (b_{33} + c_{PTO})}. \quad (4)$$

시간평균 추출파워는 PTO감쇠력과 부이의 수직속도의 곱으로 아래와 같이 표현된다.

$$\bar{P} = \frac{1}{2} \text{Re}\{f_{PTO} \cdot u_3^*\} = \frac{1}{2} \frac{c_{PTO} A^2 |f_{ex}|^2}{(b_{33} + c_{PTO})^2 + [\rho g S/\omega - \omega(m + a_{33})]^2}, \quad (5)$$

여기서 *는 공액복소수이다.

시간평균 추출파워(\bar{P})와 단위의 폭을 갖는 입사파의 평균파워의 비인 취득 폭(capture width)은 길이 차원을 가지며 다음식과 같다.

$$w = \frac{\bar{P}}{\frac{1}{2} \rho g A^2 C_g}, \quad (6)$$

여기서 C_g 는 입사파의 군속도(group velocity)이다.

2.2 최적 조건

식 (5)에 주어진 시간평균 추출파워가 최대값($d\bar{P}/dc_{PTO}=0$)을 갖는 PTO감쇠계수(c_{PTO})를 구하면 아래와 같다.

$$c_{PTO1} = \{b_{33} + [\rho g S/\omega - \omega(m + a_{33})]^2\}^{1/2}, \quad (7)$$

식 (7)에서 보듯이 PTO감쇠계수는 주파수의 함수이다. 이 값을 식 (5)에 대입하면 최적의 추출파워를 얻을 수 있다.

$$\bar{P} = \frac{1}{4} \frac{A^2 |f_{ex}|^2}{b_{33} + \sqrt{b_{33}^2 + [\rho g S/\omega - \omega(m + a_{33})]^2}}. \quad (8)$$

식 (8)에서 입사파의 주파수가 부이의 수직운동 고유주파수와 일치하는 공진조건($\omega = \omega_N = \sqrt{\frac{\rho g S}{m + a_{33}}}$)을 만족하면 이론적으로 가능한 최대 추출파워($\bar{P}_{\max} = \frac{1}{8} \frac{A^2 |f_{ex}|^2}{b_{33}}$)를 얻을 수 있다.

한편 식 (7)에 주어진 최적의 추출파워를 주는 PTO감쇠계수는 주파수의 함수이므로 다양한 주파수로 구성된 실제 해상에 적용할 때 시시각각 변하는 입사파의 주파수에 맞게 PTO감쇠계수를 매번 바꿔주어야 하는 문제점을 지니고 있다. 따라서 식 (7)에서 주파수 ω 를 공진주파수와 같다고 가정하면 PTO감쇠계수(c_{PTO2})는 상수값을 갖게 된다. 본 연구에서는 이렇게 정한 상수값을 최적의 PTO감쇠

계수로 사용하였다. 이 값을 식 (5) 대입하여 시간평균 추출파워를 구하면 다음과 같다.

$$\bar{P} = \frac{1}{2} \frac{c_{PTO2} A^2 |f_{ex}|^2}{(b_{33} + c_{PTO2})^2 + [\rho g S/\omega - \omega(m + a_{33})]^2}, \quad (9)$$

3. 래칭 제어

지금까지 알려진 바로는 부이에 연결된 선형발전기로부터 더 많은 파워를 추출하기 위해서는 입사파의 주기와 부이의 고유주기가 일치되는 공진조건을 만족하여야 한다. 그러나 입사파가 장주기파인 경우 공진조건을 만족하기 위해서는 부이의 흘수가 길어져야 하는 문제점이 있다. 부이의 흘수 증가 없이 공진과 같은 효과를 얻기 위한 방법이 래칭 제어기법이다. 공진조건을 만족할 때 부이의 수직운동과 파기진력 사이에는 $\pi/2$ 의 위상차가 일어나며 부이의 운동속도는 파기진력과 위상이 같아지는 특징을 가지고 있다. 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 정확히 포착하는 것이 매우 중요하며 여러 가지의 제어 전략에 따라 래칭 시간(latching duration)을 정한다. 공진발생시 부이의 운동과 속도 그리고 파기진력 사이의 위상차에 근거하여 부이를 구속하는 래칭 시간을 다음과 같이 정한다(Sheng *et al.*[2015]).

$$T_{latch} = \frac{T_W - T_N}{2} \quad (10)$$

여기서 T_W 는 입사파의 주기, $T_N (= 2\pi/\omega_N)$ 는 부이의 수직운동 고유주기이다. 식 (10)에서 보듯이 래칭 제어기법은 부이의 수직운동 고유주기보다 입사파의 주기가 긴 경우($T_W \geq T_N$)에만 적용이 가능하다. 실제 해양파의 에너지 밀도와 빈도수가 높은 주기의 범위는 6초에서 10초 사이로 일반적인 부이의 수직운동 고유주기에 비하여 길다.

식 (10)에 따라 부이를 구속하는 래칭 시간이 정해지면 부이의 운동을 자유롭게 허용하는 시간(unlatching duration)은 자동적으로 정해진다.

$$T_{inlatch} = T_W - 2T_{latch} = T_N \quad (11)$$

3.1 시간영역 해석

래칭 제어를 적용하기 위해서는 주파수영역 해석보다는 시간영역 해석이 적절하다. 시간영역 해석은 부유체의 비선형 운동이 중요하거나 시시각각 변하는 환경 외력, 제어력, 또는 계류력 등을 고려할 때 주로 사용된다.

앞 장에서 살펴본 PTO감쇠력으로 표현되는 선형발전기를 장착한 경우, 시간영역에서의 부이의 수직운동에 대한 운동방정식은 다음과 같다(Cummins[1962]).

$$(m + a_{33}(\infty))\ddot{\zeta}_3 + c_{PTO}\dot{\zeta}_3 + \int_0^\tau K_{33}(\tau)\dot{\zeta}_3(t-\tau)dt + \rho g S \zeta_3 = F_{ex}(t) + F_{Brake}(t) \quad (12)$$

여기서 ζ_3 , $\dot{\zeta}_3$, $\ddot{\zeta}_3$ 는 각각 부이의 운동 변위, 속도, 가속도이며, $a_{33}(\infty)$ 는 $\omega \rightarrow \infty$ 일 때의 부가질량이다.

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

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

식 (13)에 주어진 수치적분을 효율적으로 수행하는 수치해석방법은

Cho and Choi[2014]에 자세히 기술되어 있다.

래칭 제어를 적용하였을 때 부이를 래칭 시간 동안 움직임 없이 구속하여야 한다. 이를 위하여 식 (12)의 오른쪽 항에 주어진 제동력 $F_{Brake}(t)$ 을 사용한다. 제동력은 부이의 운동속도에 선형적으로 비례한다고 가정하였다.

$$F_{Brake} = -c_{Brake}\dot{\zeta}_3, \quad (14)$$

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

$$c_{Brake}(t) = \begin{cases} C_{max}[3(t/t_{max})^2 - 2(t/t_{max})^3], & 0 \leq t \leq t_{max} \\ C_{max}, & t \geq t_{max} \end{cases} \quad (15)$$

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

식 (12)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

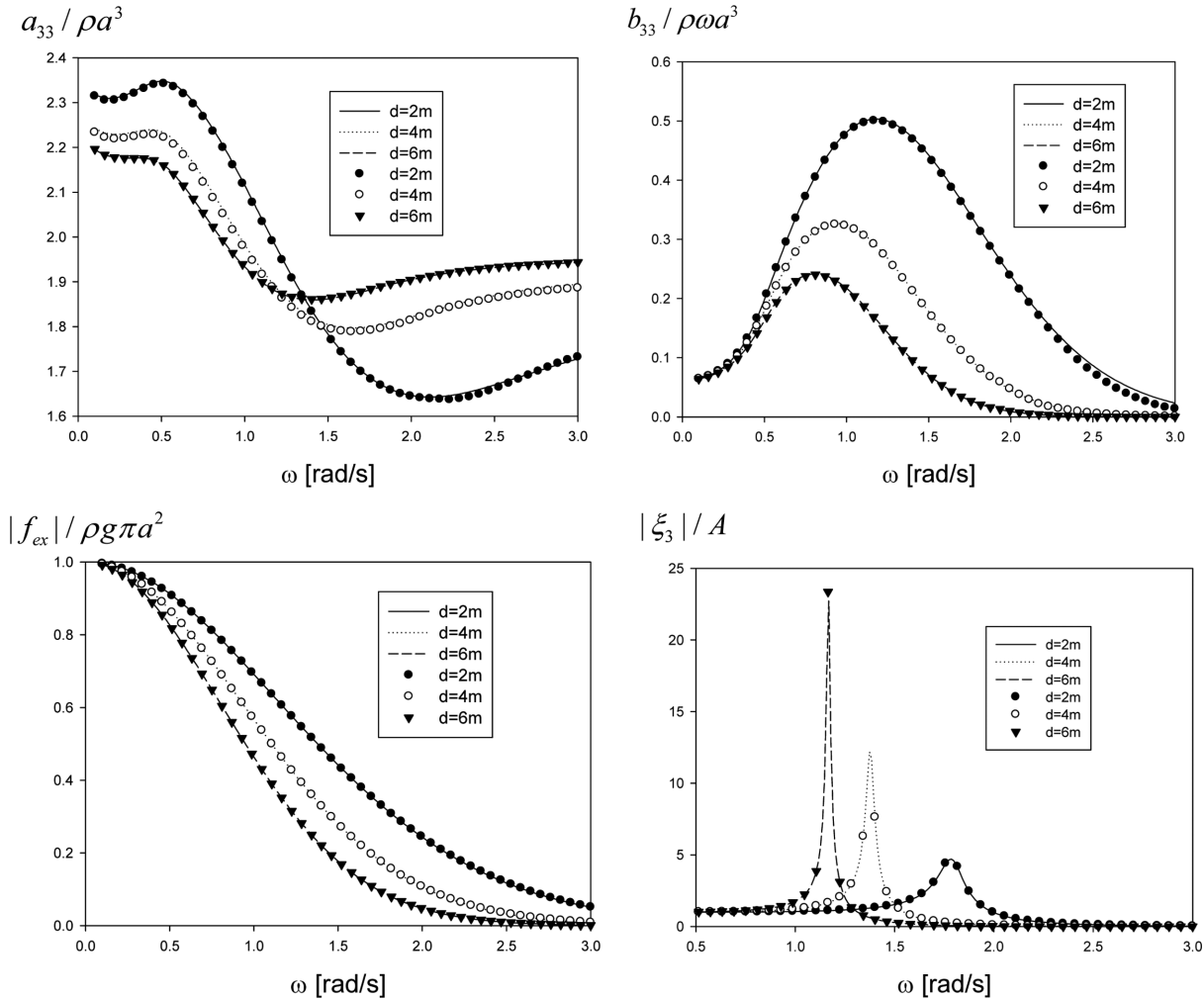


Fig. 2. Non-dimensional added mass, radiation damping coefficient, wave exciting force, and heave RAO as a function of wave frequency and draft without PTO system (Lines: MEEM solution, Symbols: ANSYS AQWA).

사용하여 시간 적분하였다. 식 (12)를 풀어 구한 부이의 변위와 속도의 시계열 값을 가지고 시간평균 추출파워는 아래와 같다.

$$\bar{P} = \frac{1}{T_{total}} \int_0^{T_{total}} c_{PTO} \cdot \dot{\zeta}_3^2(t) dt. \quad (16)$$

여기서 T_{total} 는 시뮬레이션 총 시간이며, c_{PTO} 로 상수값을 갖는 최적의 PTO감쇠계수(c_{PTO2})를 사용하였다.

4. 계산결과 및 고찰

Fig. 2는 선형발전기를 연결하지 않은 상태($c_{PTO}=0$)에서 부이의 부가질량, 방사감쇠계수, 파기진력, 수직운동 RAO(response amplitude operator)를 주파수에 따라 보여주고 있다. 부이의 흘수는 2, 4, 6 m이며, 수심은 80 m, 부이의 반경은 2 m이다. 실선은 고유 함수전개법을 이용한 해석결과이며 기호는 ANSYS AQWA상용코드를 이용한 결과이다. 두 결과는 서로 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다. 부이의 흘수가 증가할수록 방사감쇠계수와 파기진력은 주파수에 관계없이 줄어드는 경향을 보여주고 있다. 그러나 부가질량은 1.5 rad/s보다 작은 저주파수 영역에서는 같은 경향을 보이나 1.5 rad/s보다 큰 고주파수 영역에서는 반대의 경향이 나타난다. 흘수가 다른 3개 부이의 수직운동 고유주파수는 각각 1.78, 1.38, 1.17 rad/s이다. 수직운동 RAO곡선에서의 최고값은 각 흘수의 공진주파수에서 발생한다. 부이의 흘수가 증가할수록 공진주파수는 저주파수 영역으로 이동하고, 최고값은 커지면서 공진폭이 좁아지는 특징을 보여주고 있다. 현재의 포텐셜 이론에서 고려하지 못한 점성에 의한 감쇠력이 추가되면 공진주파수에서의 최고값은 지금보다는 크게 줄어들 것으로 예상된다. 점성에 의한 감쇠력은 보통 자유감쇠실험 (free decay test)을 통하여 구할 수 있으나 본 연구에서는 고려하지 않았다.

Fig. 3는 선형발전기를 연결하였을 때의 추출파워의 최대값을 주는

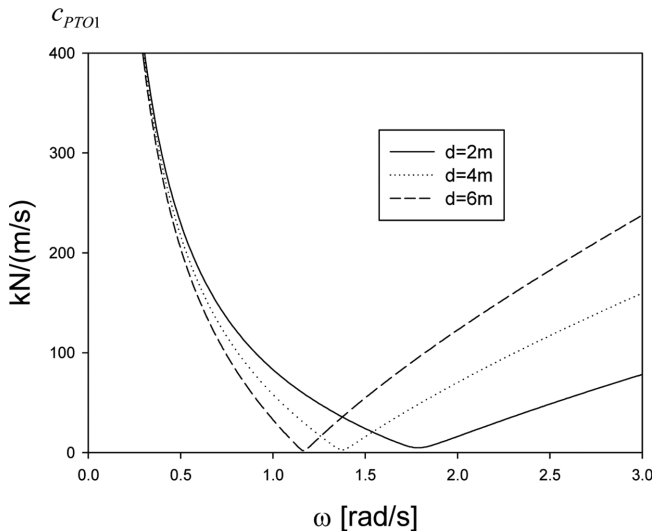


Fig. 3. Optimized PTO damping coefficient as a function of wave frequency and draft.

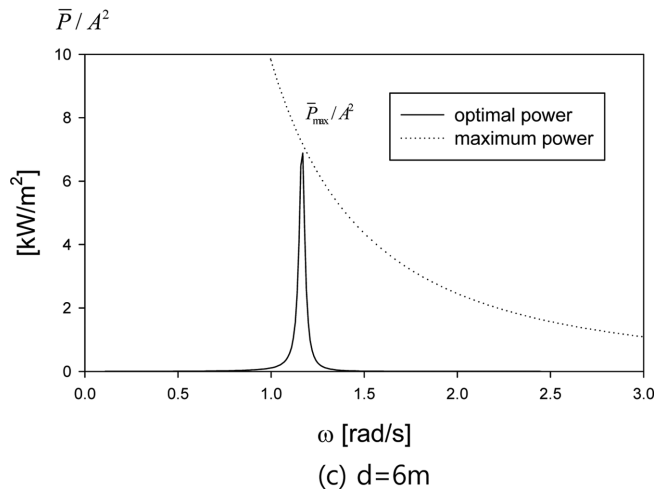
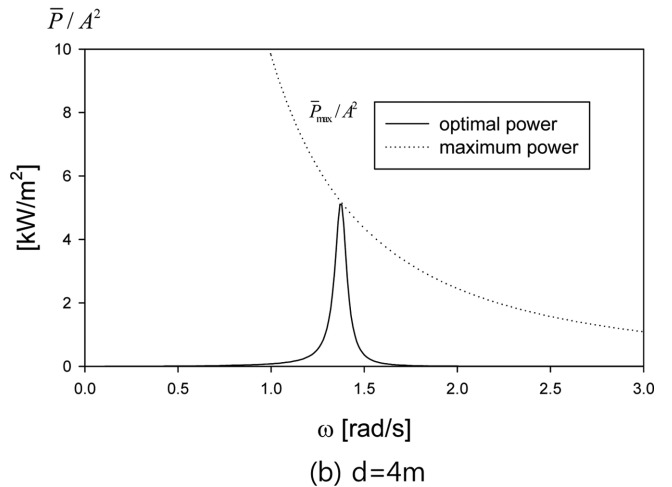
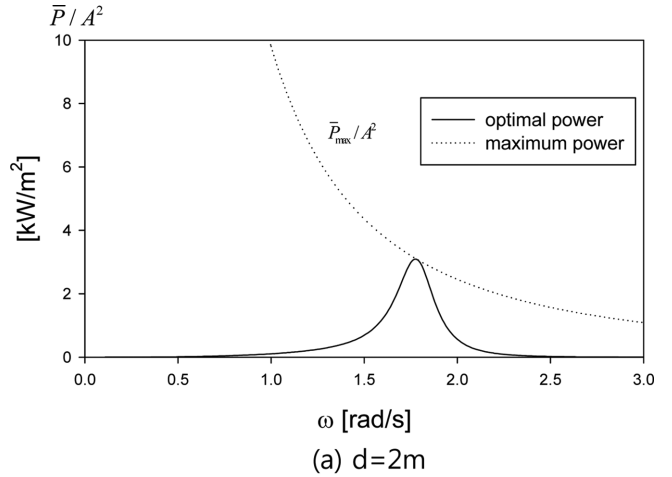


Fig. 4. Comparison of averaged extracted power as a function of wave frequency and draft.

주파수의 함수인 최적의 PTO감쇠계수($c_{PTO1}(\omega)$)를 보여주고 있다. 주파수에 따라 변하는 PTO감쇠계수는 저주파수와 고주파수에서 큰 값을 갖고 어떤 특정 주파수에서 최소값을 갖는 특징을 보인다. 이 때 최소값을 주는 특정 주파수는 부이의 공진주파수(1.78, 1.38, 1.17 rad/s)와 일치한다. PTO감쇠계수가 최소값을 갖도록 설계된 PTO

장치는 규모가 작음을 의미하므로 제작비용 측면에서 유리하다. 공진주파수에서의 PTO감쇠계수(c_{PTO2})는 부이의 흘수에 따라 각각 4.78, 2.55, 1.74 kN/(m/s)이다. 이후의 모든 계산에서는 상수값인 공진주파수에서의 PTO감쇠계수를 사용하였다.

Fig. 4는 공진주파수에서의 PTO감쇠계수(c_{PTO2})를 사용하였을 때의 시간평균 추출과워를 주파수에 따라 실선으로 그렸다. 여기서 점선은 입사파의 주파수에 따라 항상 공진이 일어나도록 한 이론적으로 가능한 최대 추출과워를 나타낸다. 따라서 부이의 공진주파수(1.78, 1.38, 1.17 rad/s)에서 두 결과는 서로 일치하지만 나머지 주파수 대역에서는 실선은 점선을 초과할 수 없다. 시간평균 추출과워의 최고값은 공진주파수에서 발생하며 부이의 흘수가 증가할수록 추출과워의 최고값은 증가한 반면에 공진폭은 줄어드는 경향이 나타난다.

Fig. 5는 래칭 제어를 적용하지 않은 상태에서 시간영역 해석에서 구한 부이의 수직속도와 파기진력을 시간에 따라 보여주고 있다. 입사파는 규칙파로 주기는 7.0s, 진폭은 1.0 m 이다. 공진주파수에서의 PTO감쇠계수 c_{PTO2} 는 흘수 증가에 따라 4.78, 2.55, 1.74 kN/(m/s)이

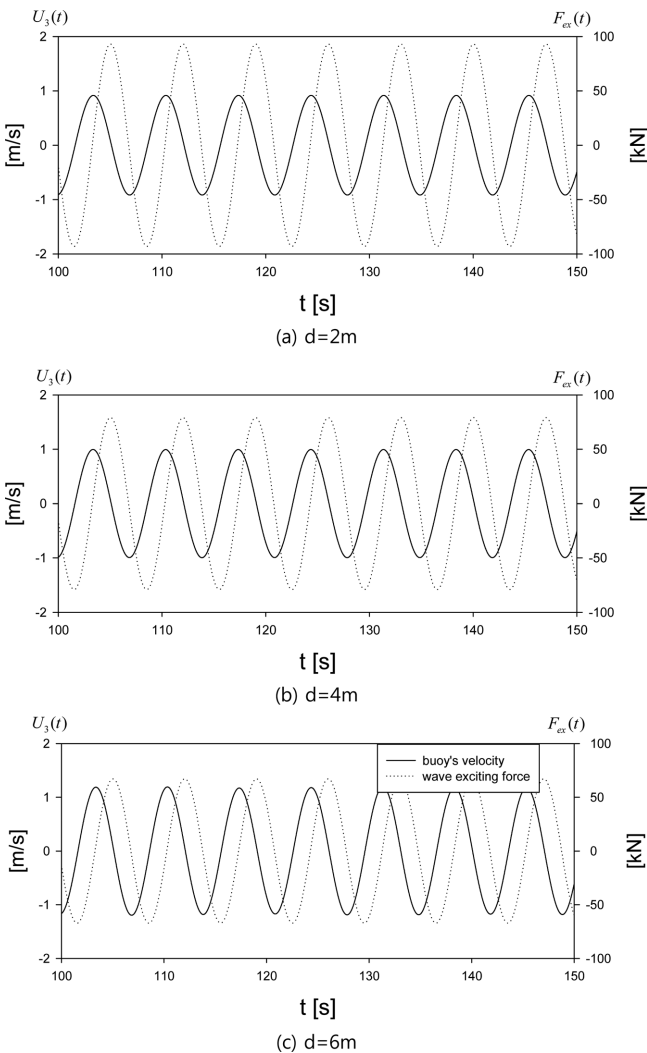


Fig. 5. Buoy's vertical velocity and wave exciting forces with no latching control for $A = 1.0$ m, $T_W = 7.0$ s.

다. 부이의 흘수 변화에 따른 부이의 수직운동의 고유주기는 각각 3.52s, 4.55s, 5.37s로 입사파의 주기 7.0s와 큰 차이를 보여 공진조건을 만족하지 않는다. Fig. 5를 살펴보면 부이의 흘수가 증가함에 따라 파기진력은 줄어들며, 부이의 수직속도는 다소 커지는 경향을 보여주고 있다. 또한 부이의 흘수와 관계없이 부이의 수직속도는 파기진력과 $\pi/2$ 의 위상차를 보이고 있다. 부이의 운동과 파기진력 사이의 위상차는 없으며 부이는 파도를 따라 움직인다.

Fig. 6-8은 파랑에너지 추출효율을 높이기 위하여 래칭 제어를 사용한 결과이다. 래칭 제어는 부이의 운동속도가 0인 순간에 부이를 구속하고 있다가 식 (10)에 주어진 래칭 시간이 지난 후에 부이의 구속을 풀어 공진주기와 같은 시간 동안 자유롭게 부이의 운동을 허용하다가 다시 운동속도가 0이 나오면 부이를 구속하는 과정을

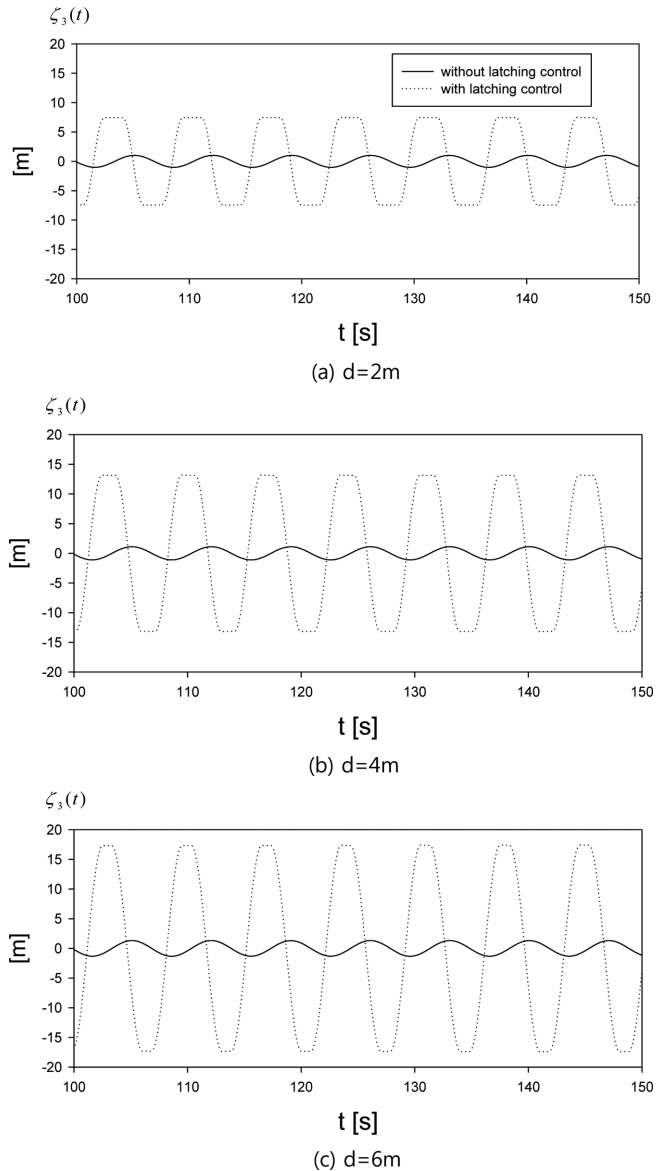


Fig. 6. Comparison of buoy's heave motion between without and with latching control for three different buoy's drafts for $A = 1.0$ m, $T_W = 7.0$ s.

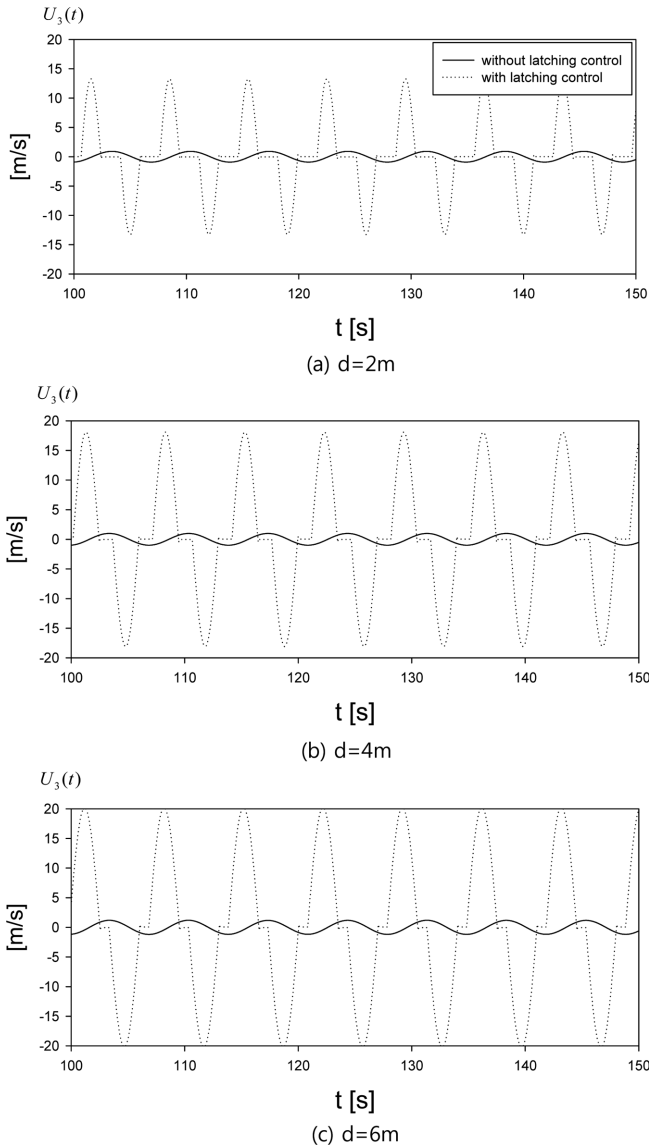


Fig. 7. Comparison of buoy's vertical velocity between without and with latching control for three different buoy's drafts for $A = 1.0$ m, $T_W = 7.0$ s.

반복한다. Fig. 6과 7은 래칭 제어 전과 후의 부이의 운동과 속도의 시계열 자료를 보여주고 있다. 부이를 구속하고 있는 래칭 시간 동안 부이의 속도는 0에 가까운 값을 가지며 이 때 운동변위는 최 정 점과 최 저점에서 일정한 값을 유지되는 것을 시계열 자료에 잘 나타나 있다. 래칭 제어를 적용하였을 때의 부이의 운동과 속도가 래칭 제어를 적용하지 않았을 때와 비교하여 훨씬 큰 값을 보이고 있으며 래칭 전과 후의 부이의 운동과 속도에서 $\pi/2$ 위상차가 나타났다. 특히, 부이의 흘수가 증가할수록 래칭 제어를 적용 후의 운동과 속도의 크기가 상대적으로 더 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. 래칭 제어를 통하여 크게 증가한 부이의 속도는 추출파워를 높이는 데 기여할 것이다.

Fig. 8은 래칭 제어를 적용하였을 때의 부이의 수직운동 속도와 파기진력의 시계열을 그렸다. 앞선 Fig. 5에서 보인 래칭 제어를 적

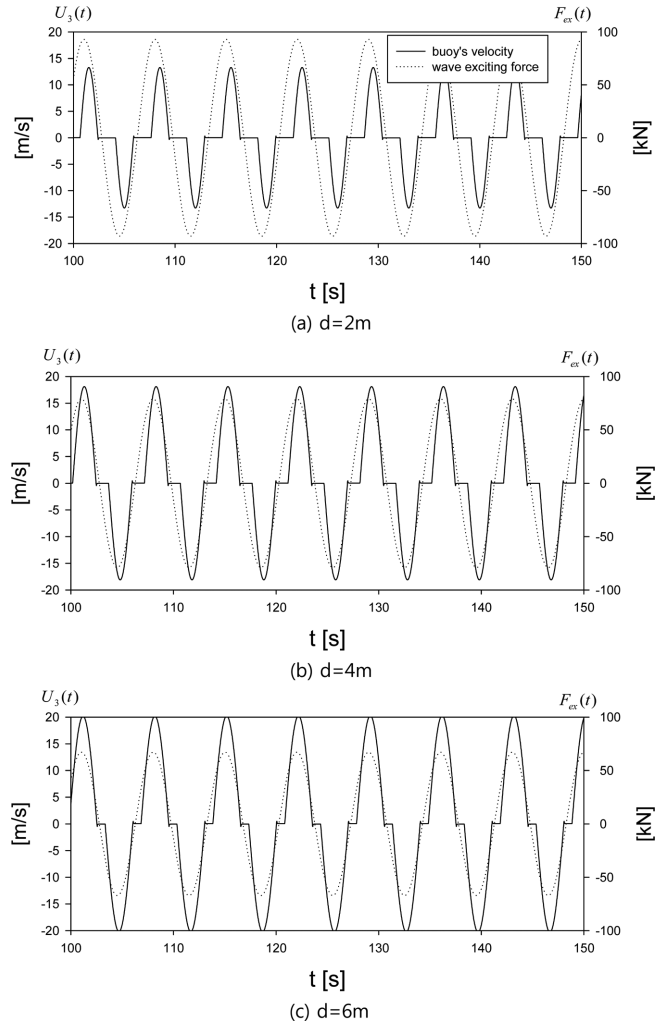


Fig. 8. Buoy's vertical velocity and wave exciting forces with latching control for $A = 1.0$ m, $T_W = 7.0$ s.

용하지 않았을 때 나타나는 두 값 사이의 $\pi/2$ 위상차와 달리 위상이 서로 일치하는 것을 볼 수 있다. 즉, 래칭 제어를 적용하였을 때는 공진조건을 만족했을 때와 동일하게 부이의 수직속도와 파기진력 사이의 위상차가 없음을 확인하였다. 이를 입증하기 위하여 부이의

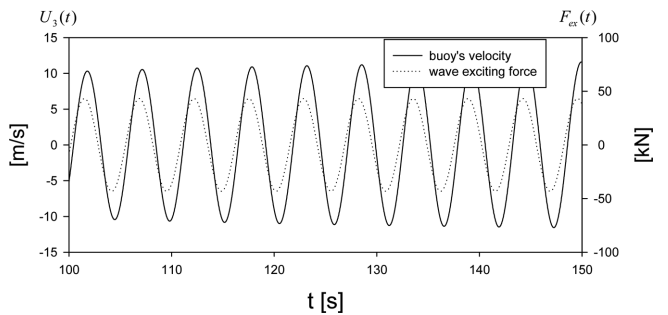


Fig. 9. Buoy's vertical velocity and wave exciting forces under the resonance condition with no latching control for $d = 6$ m, $A = 1.0$ m, $T_W = 5.34$ s.

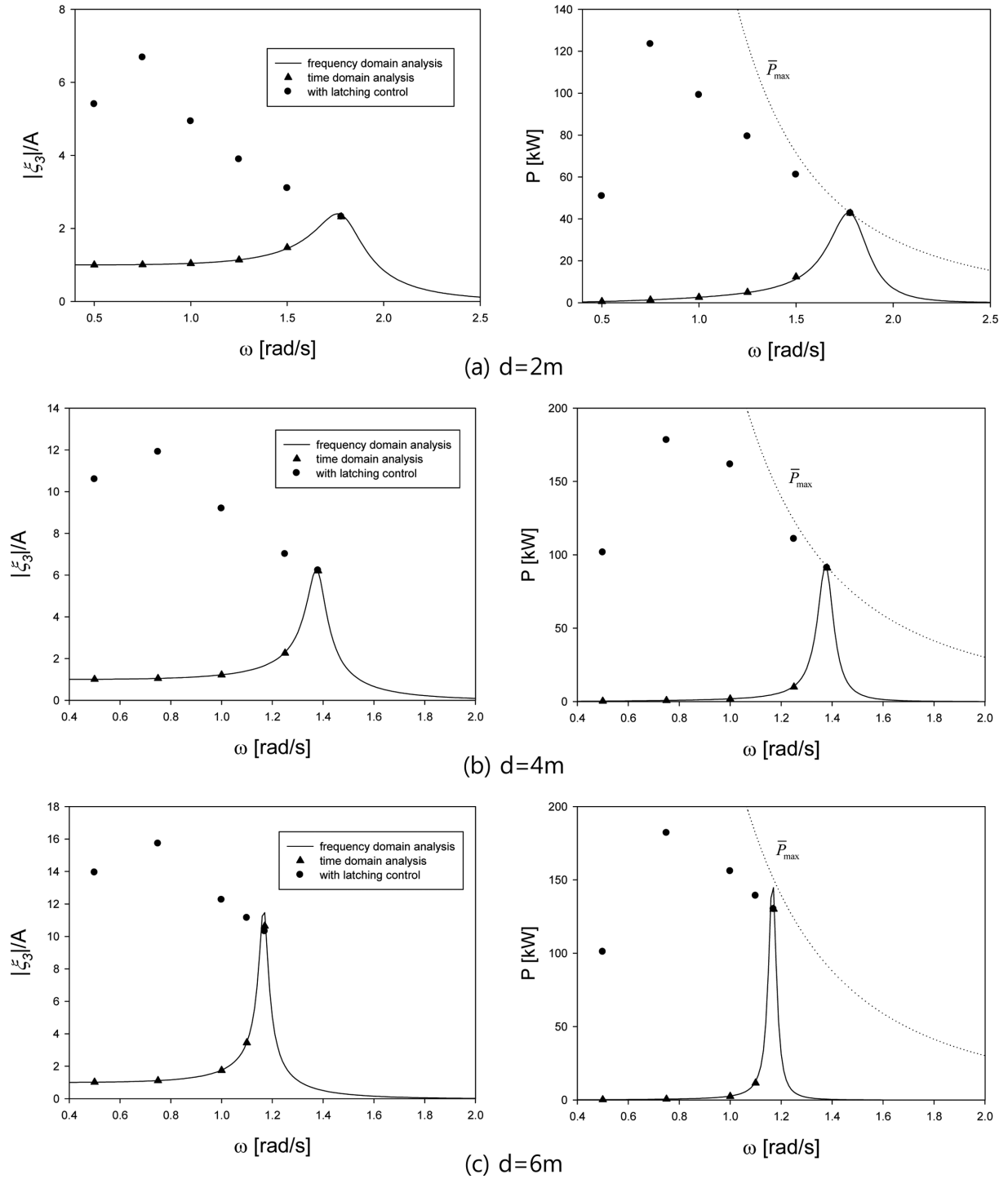


Fig. 10. Comparison of heave RAO and extracted power between frequency-domain and time-domain analysis.

흘수가 6 m에서 래칭 제어 적용 없이 입사파의 주기를 공진조건을 만족하는 5.34s로 변경하여 수치계산을 수행하였다. 부이의 수직속도와 파기전력의 시계열 자료를 Fig. 9에 나타내었다. 래칭 제어 적용하였을 때의 결과와 동일하게 수직속도와 파기전력 사이의 위상차는 나타나지 않음을 보여주고 있다. 이러한 결과로부터 래칭 제어는 부이를 일정시간 동안 인위적으로 구속하여 부이의 수직속도의

위상을 파기전력의 위상과 일치시켜 마치 공진조건을 만족할 때와 같이 부이의 운동과 속도를 크게 증폭시킨다는 사실을 계산결과를 통하여 밝혔다.

2장에서는 주파수영역에서 수직운동 RAO와 시간평균 추출과위를 구하였고, 3장에서는 래칭 제어를 적용한 시간영역 해석을 수행하였다. 두 해석결과에 대한 상호검증(cross-check)을 위하여 Fig. 10

에서 주파수영역과 시간영역에서의 수직운동과 추출파위를 비교하였다. 실선은 주파수영역의 해석결과이며, 삼각형 기호는 래칭 제어를 적용하지 않았을 때의 시간영역 해석결과이다. 두 결과는 서로 잘 일치함을 보여주었다. 동그라미 기호는 래칭 제어를 적용하였을 때의 시간영역 해석결과이다. 래칭 제어 적용 후 수직운동과 추출파위가 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. 공진조건을 만족하였을 때보다 더 큰 운동변위와 추출파위를 얻을 수 있다. 또한 부이의 흘수에 관계없이 입사파의 주파수가 0.75 rad/s($T_w=8.38s$)일 때 래칭 제어를 통하여 최대 추출파위를 얻을 수 있음을 보여주고 있다. 즉, 너무 짧지도 길지도 않은 적절한 래칭 시간이 존재하며 이는 최대 추출파위를 이끌어 냄을 의미한다.

5. 결 론

본 연구에서는 공진조건을 만족할 때 부이의 운동속도는 파기진력과 위상이 같아진다는 해석이론에 기초하여 입사파의 주기와 부이의 고유주기를 가지고 부이의 구속 시간을 정하는 Sheng *et al.* (2015)의 래칭 제어기법을 적용하였다. 주파수영역의 해석결과와 래칭 제어를 적용하지 않았을 때의 시간영역 해석결과는 서로 잘 일치함을 보여주었다. 래칭 제어를 적용하였을 때의 부이의 운동, 속도, 그리고 추출파위가 적용하지 않았을 때와 비교하여 크게 증가하였고 심지어 공진조건을 만족하였을 때의 값들보다 더 큰 값을 주었다. 특히, 흥미로운 사실은 래칭 제어 적용시 부이의 흘수($d=2.46$ m)에 관계없이 입사파의 주기가 8s 주변일 때 최대 추출파위를 얻는다. 8초대의 입사파의 주기는 해양에서 빈번히 발생하는 파이다.

래칭 제어기법이 파력발전기를 통한 파워추출을 극대화할 수 있음을 보여주었다. 또한 래칭 제어는 부이의 흘수를 크게 낮출 수 있고 동시에 PTO감쇠력을 줄일 수 있어 파력발전기 제작 비용을 크게 절감할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그러나 래칭 제어를 파력발전기에 적용하기 전에 선행되어야 할 문제로 제어 명령에 따라 빠르게 움직이는 제동장치 제작과 함께 정확한 제어 명령을 내리기 위한 파랑정보 예측이 필요하다. 특히, 수초 단위의 짧은 시간 동안 대형 부이를 구속하고 푸는 작업을 반복하는 제동장치의 빠른 응답성과 큰 구속력이 래칭 제어기법을 현장에 적용하는데 관건이다.

후 기

본 연구는 해양수산부의 해양청정에너지개발사업 “10 MW급 부유식 파력-해상풍력 연계형 발전시스템 개발 및 인프라 구축”의 지

원으로 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] Kim, J.R., Bae, Y.H. and Cho, I.H., 2014, “Design of Wave Energy Extractor with a Linear Electric Generator Part I. Design of a Wave Power Buoy”, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, Vol.17, No.2, 146-152.
- [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 I: Optimal and Control Technologies”, *Renewable Energy*, Vol.75, 922-934.

Received 27 August 2015

Revised 19 October 2015

Accepted 21 October 2015