

후면 폰투온 유무에 따른 비대칭 로터의 비선형 운동성능특성에 대한 모형시험 연구

하운진¹ · 박지용¹ · 노 찬² · 신승호^{3,†}

¹한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 선임연구원

²한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 연구원

³한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 책임연구원

An Experimental Study for the Non-linear Motion Characteristics of an Asymmetric Rotor by Pontoons

Yoon-Jin Ha¹, Ji Yong Park¹, Roh Chan², and Seung Ho Shin^{3,†}

¹Senior Researcher, Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea

²Researcher, Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea

³Principal Researcher, Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea

요 약

본 연구에서는 Salter's duck 형상 로터에 대한 규칙파 중 종동요방향 운동성능 모형시험을 수행하였다. 본 모형시험에서는 로터 설치를 위한 트러스 구조 플랫폼의 부력확보를 위한 로터 후면 폰투온을 모사하였으며, 그 유무에 따른 운동성능특성을 조사하였다. 모형시험은 선수와 중 세 가지 다른 파고에서 수행되었으며, 그 결과들은 주파수영역 해석과 직접 비교하여 보았다. 본 모형시험으로부터, 폰투온에 의하여 로터 종동요운동의 고유 파 주기가 이동함을 확인하였으며, 상대적으로 높은 파고에서는 로터의 고유 파 주기보다 단주기에서 폰투온에 의한 로터의 종동요운동변화가 큰 것을 확인하였다. 또한 폰투온 유무와 관계없이 세 가지 다른 파고에 의한 무차원화 된 로터의 종동요운동은 파고가 증가함에 따라 로터의 고유 파 주기가 단주기로 이동하며, 그 크기는 감소하였다.

Abstract – In this study, regular wave tests were performed for pitch motion characteristics of a Salter's duck type rotor model. In the model test, pontoons behind the rotor model, which is for the buoyancy of a truss-platform, were applied, and the different motion characteristics of the rotor model were investigated in accordance with existence and nonexistence of the pontoons. The experiments were performed in three different wave heights, and the experimental results were directly compared with frequency domain analysis results. From the model test, it could be found that the pontoons move the resonance period of the rotor, and the pitch motions of the rotor in the case of the relatively high wave height were largely varied in low wave periods compared to the resonance period of the rotor. Also, independently of the pontoons, the resonance periods of the rotor in three wave heights were moved to low wave period direction independently of the pontoons as the wave height rose. And the normalized pitch motions of the rotor by three wave heights decreased as the wave height rose.

Keywords: Model test(모형시험), Salter's Duck Rotor(Salter duck 로터), Pontoon(폰투온), Pitch motion(종동요운동), Resonance period(고유주기)

1. 서 론

최근에 바람, 태양광, 파도 등 다양한 환경조건을 이용한 친환경 대체에너지기술의 요구가 증대되고 있으며, 이 중 풍력발전 및 태

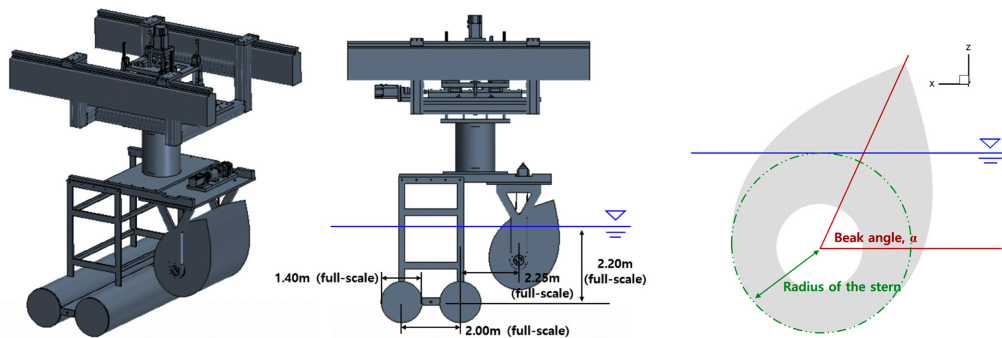
양광발전의 경우 실증시험 뿐만 아니라 실제 운용이 이뤄지고 있어 상대적으로 높은 수준의 기술개발 단계에 있다. 그러나 파도 힘을 이용한 다양한 형태의 파력발전장치는 일부를 제외하고는 주로 실증시험단계까지 진행되고 있는 실정이다. 그리고 파도는 상대적으로 변동이 크며, 예측하기 어렵기 때문에 지속적인 파력발전장치에 대한 연구가 필요하다. 이러한 파력발전장치는 진동수주형과 가동물

[†]Corresponding author: shinsh@kriso.re.kr

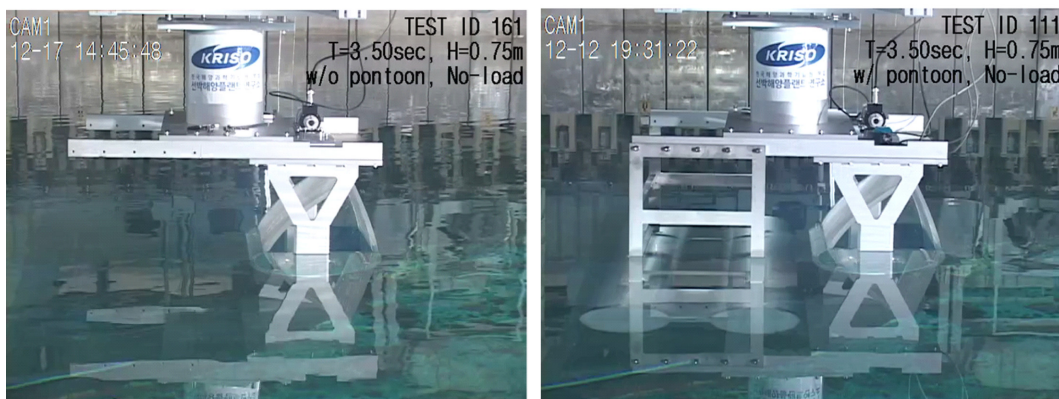
체형으로 크게 이 두 가지 종류로 구분할 수 있다. 먼저, 진동수주형 파력발전장치의 경우에는, 장치 내에 챔버(Chamber) 안에서 파도가 왕복운동을 하게 되면, 챔버 내의 공기가 이에 따라 움직여 터빈을 구동시켜 발전하는 시스템이다. 따라서 발전시스템의 경우 해수와 직접적으로 닿지 않기 때문에 유지보수가 상대적으로 유리하나, 가동물체형의 비하여 발전량의 크기는 상대적으로 작은 것으로 알려져 있다. 가동물체형의 경우에는 부유식 또는 기계식으로 발전하는 시스템이며, 공진 파 주기 근처에서 상대적으로 높은 발전량을 얻어낼 수 있다. 따라서 가동물체형 파력발전시스템의 경우 부유체의 상대운동을 극대화시킬 수 있도록 설계가 이뤄져야 한다. 이러한 대표적인 가동물체형 파력발전장치로는 Salter[1974]로부터 제안된 Salter's duck 로터가 있다. Salter[1974]는 비대칭 단면형상을 가지고 중동요운동을 이용하여 발전하는 시스템을 제안하였다. 초기에 Salter *et al.*[1975]와 Jeffrey *et al.*[1976]은 다양한 Salter's duck 로터의 형상을 변경해가며 모형시험으로 운동성능과 발전효율을 검토하였으며, 최근에는 Poguluri and Bae[2018], Ko *et al.*[2019] 그리고 Ha *et al.*[2019]에 의하여 Salter's duck 로터의 형상변화와 입사파고변화에 따른 운동성능 및 발전효율이 주파수영역 해석 및 CFD 해석으로부터 평가되어 졌다. 이러한 Salter's duck 로터는 Solo duck이라는 보다 진보된 형태의 가동물체형 파력발전장치가 제안되었으며, Pizer[1994]는 Evans[1976]; Mei[1976]; Newman[1976]

에 의한 그린함수 기반의 수치기법으로 Solo duck의 발전효율을 조사하였다. 덴마크의 WEPTOS는 초기에 월파형 파력발전장치를 개발하였으며, 그 월파형 파력발전장치에 Salter's duck 로터를 적용함으로써 새로운 가동물체형 파력발전장치를 제안하였다. WEPTOS 연구 초기에 Pecher *et al.*[2011]은 단독 Salter's duck 로터에 대한 운동성능과 발전성에 관련된 모형시험을 수행하였으며, 파고가 높아짐에 따라 로터의 고유주기가 변화하고 상대적으로 높은 파고에서는 슬래밍 현상이 동반되는 것을 확인하였다. 이러한 로터의 고유주기 변화는 Rapuc[2012]의 시간영역해석으로부터 확인할 수 있으며, Rapuc[2012] 연구에서 파고 증가에 따른 로터의 고유주기변화는 로터의 복원모멘트가 변화로부터 기인함을 보여주었다. 또한 Rapuc[2012]의 시간영역해석결과는 Pecher *et al.*[2011]의 모형시험결과와 직접 비교하였다.

본 연구에서는 Park *et al.*[2018]연구에서의 트러스 구조 플랫폼의 부력확보를 위한 로터 후면 폰투온 모형을 제작하여, 그 폰투온 유무에 따른 로터 단독의 중동요운동성능을 파고변화에 따라 검토하여 보았다. 그 모형시험결과로부터 폰투온 유무에 따른 파주기별 로터 중동요운동의 변화와 파고변화에 따른 로터의 고유 파 주기 변화에 대하여 비교검토하였다. 그리고 모형시험결과들은 그 결과들의 정성적인 경향성을 파악하기 위하여 주파수영역 해석결과와 직접 비교하였다.



(a) plan for the experimental set-up



(b) w/o pontoon

(c) w/ pontoon

Fig. 1. Experimental set-up.

2. 모형시험조건

2.1 대상모형

본 연구에서는 폰투온 유무에 따른 Salter's duck 형상 로터의 종동요 방향 운동성능특성 분석을 위한 모형시험을 진행하였다. 1/5.5 축척비의 로터에 대해 축소모형시험을 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 해양공학수조에서 수행하였으며, 폰투온 모형의 경우 Park *et al.*[2018] 연구에서 사용된 트리스 구조 플랫폼 형상의 부력확보를 위한 폰투온을 로터의 축척비와 동일하게 1/5.5 축척비로 축소하여 제작하였다.

“Table 1”은 로터의 주요제원을 보여주며, 모형시험에서 설치된 로터와 폰투온 모형들의 형상은 Fig. 1(a)와 같다. 여기서, 로터와 폰투온들 사이의 거리와 수심은 Park *et al.*[2018]연구와 동일하게 적용하였다. 그리고 폰투온이 없는 경우의 모형시험에 대하여서는 폰투온이 설치되어 있는 지그만 따로 분리하였으며, 폰투온 유무에 따른 설치된 로터와 폰투온의 배치는 Fig. 1(b)와 Fig. 1(c)와 같다.

2.2 파도조건

모형시험 시 파도조건은 Table 2와 같으며, 제주도 해역의 파도조건을 고려하여 선정하였다(Hong *et al.*[2004]). 제주도 해역 주파도의 파도주기는 4.75초정도가 되며 본 로터의 고유 파 주기는 4.75초 정도에 위치하도록 설계되어 졌다. 따라서 Table 2의 파도 주기는 본 로터의 고유 파 주기를 포함한 그 주변의 파도주기로 결정하였다. 또한 제주도 해역 주 파도의 파고는 0.75 m 정도가 되며, Table 2의 다른 두 파고는 Le Méhauté[1976]의 파도이론 도표에

Table 1. Principal dimensions of the full-scale rotor

	Unit	
Beak angle (α)	[deg.]	65
Radius of the stern	[m]	1.0
Draft (Rotating center)	[m]	0.8
Width	[m]	2.5
Mass	[kg]	6880
CG _x	[m]	-0.1388
CG _z	[m]	0.1623
I _{xx}	[kg·m ²]	9710
I _{yy}	[kg·m ²]	6791
I _{zz}	[kg·m ²]	7227

Table 2. Wave conditions in full-scale

Wave period (sec)	Wave height (m)
3.50	0.10 m, 0.25 m, 0.75 m
3.75	
4.00	
4.25	
4.50	
4.75	
5.00	
5.50	

따라 선형과 조건에 가깝도록 0.10 m과 0.25 m로 결정되었다. 0.10 m의 경우 모형 축척비에서 조파기 생성할 수 있는 최소의 파고 크기이며, 0.25 m는 선형과 조건을 만족하는 최대파고에 가깝다. 그리고 폰투온 유무에 따른 로터의 종동요 운동모형시험은 그 특성파악이 용이하도록 로터의 종동요운동을 극대화시키기 위하여 정면파 조건에서만 수행하였다. 또한 로터는 다른 방향 운동은 고정하고 종동요운동만을 자유로이 하였다.

3. 모형시험결과

3.1 H = 0.10 m

본 연구에서는 대상파도조건 중 가장 낮은 0.10 m 파고에 대한 모형시험이 수행하였다. 또한 본 연구에서의 모형시험결과들은 실제 크기로 확장하여 주파수영역 해석(AdFLOW, Advanced analysis system for FLOating body in Waves using higher-order element method) 결과와 직접 비교하였다. 여기서, AdFLOW는 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소에서 자체개발 된 주파수영역 해석 프로그램이며, 본 프로그램은 파랑그린함수를 이용한 고차경계요소법이다.

Fig. 2는 파도주기별 폰투온 유무에 따른 로터의 종동요 운동변화를 보여준다. 먼저, 로터 후면에 폰투온이 없는 경우 모형시험결과들과 주파수영역 해석결과는 정량적으로 다소 차이를 보이지만 서로 근접한 경향을 보여준다. 다만, 폰투온 유무에 따른 주파수영역 해석결과들을 보면 주기별 로터의 종동요 운동변화는 크지 않다. 그러나 폰투온 유무에 따른 모형시험결과들을 살펴보면, 폰투온이 없는 경우 로터의 고유 파 주기는 4.75초 근처이고, 로터 후면에 폰투온이 존재하는 경우에는 로터의 고유 파 주기가 4.50초 근처로 고유 파 주기가 보다 단주기방향에 위치하여 서로 다른 경

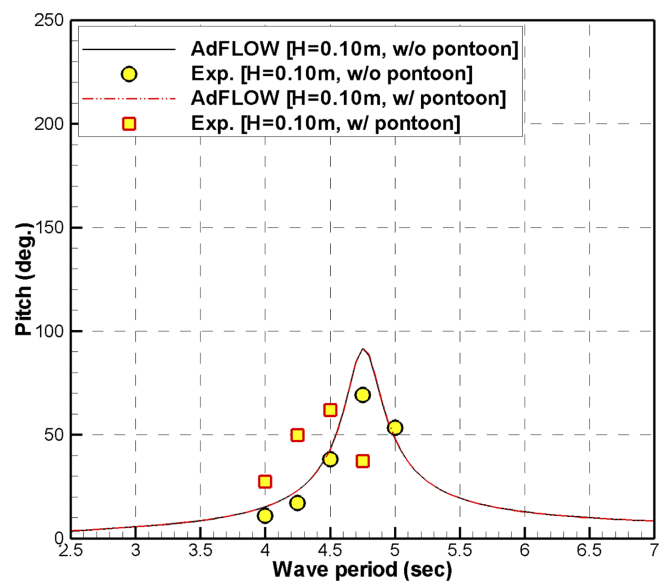


Fig. 2. Pitch motions of the rotor in accordance with the wave periods under the wave height of 0.10 m.

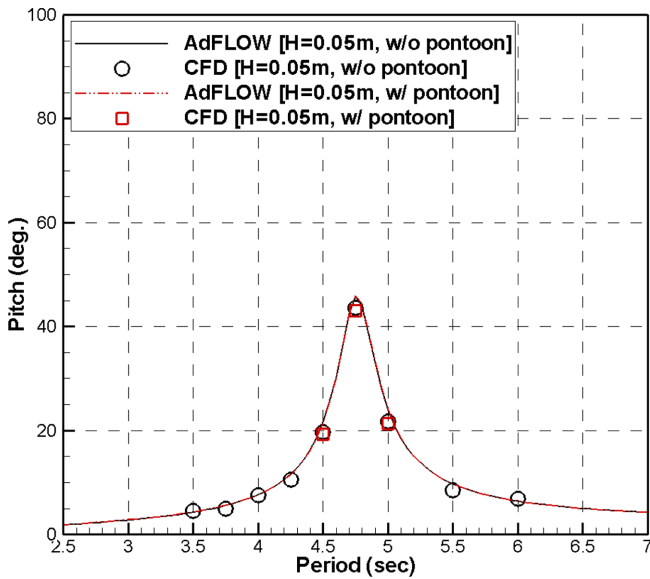


Fig. 3. Pitch motions of the rotor in accordance with the wave periods under the wave height of 0.05 m.

향을 보인다. 이는 로터 후면 폰툰으로 인하여 로터 주변 유동장의 변화가 발생하였으며, 그 유동변화로 인하여 로터의 부가모멘트 (Added moment) 또는 파랑기진모멘트(Wave exciting moment)가 변화된 것으로 생각된다. 본 연구에서는 Fig. 2의 폰툰이 없는 경우 모형시험결과와 주파수영역 해석결과들의 정량적인 차이 및 주파수영역 해석에서 폰툰 유무에 따른 매우 근소한 차이의 원인을 확인하기 위하여, 상대적으로 낮은 파고인 0.05 m 조건에서 별도의 CFD 해석을 수행하여 보았다. 그 결과들을 Fig. 3에서 보면, CFD 해석결과들은 주파수영역 해석결과들과 매우 근접함을 보이며, Fig.

2에서와 같이 폰툰 유무에 따른 로터의 고유 파 주기변화는 크지 않은 것을 확인할 수 있다. Ha *et al.*[2020, under review]의 연구에서는 자유수면과 로터의 회전중심 축 사이의 높이 그리고 입사파의 파고 비율에 따라 선형 중동요운동구간(0.1이하)과 비선형 중동요운동구간(0.1이상)을 분리하였으며, 해당 연구결과를 고려하였을 때 본 파고에서의 비율을 계산하여 보면, 0.1이상으로 비선형 중동요운동이 발생하는 구간이다.

본 연구에서 보면, 상대적으로 낮은 파고인 0.10 m 조건에서도 로터의 비선형 중동요운동이 발생하며, 이 때, 로터 후면의 폰툰에 의한 로터의 고유 파 주기 이동변화도 발생하게 된다. 즉, Ha *et al.* [2020, under review] 연구의 비선형 중동요운동구간 파도조건에서 폰툰 유무에 따른 로터의 중동요 운동해석을 위하여서는 선형이론에 기반한 주파수영역 해석으로는 다소 무리가 있으며, CFD 해석 또는 모형시험이 필요할 것으로 생각된다. Fig. 4는 폰툰이 없는 경우 로터의 고유 파 주기인 4.75초에서의 모형시험사진들을 보여준다. 모형시험사진들을 보면, Fig. 2에서 확인할 수 있듯이 파도주기 4.75초에서는 로터 후면의 폰툰이 존재하는 경우, 폰툰이 없는 경우에 비하여 로터의 중동요 운동이 상대적으로 작은 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 폰툰 유무에 따른 각자의 로터 고유 파 주기인 4.50초와 4.75초에서의 폰툰 유무에 따른 로터 중동요운동시계열을 비교한 그림이다. 여기서, 입사파는 로터 중동요 운동에 의한 방사파를 무시할 수 있을 정도로 로터의 회전축 중심으로 부터 폭 방향 3 m 정도 떨어져 있는 위치에서 계속되었다. 먼저, Fig. 5(a)를 보면, 파도주기 4.50초에서는 폰툰이 없는 경우 입사파와 로터의 중동요운동 사이의 위상차이가 다소 크게 발생함을 확인할 수 있다. 그러나 로터 후면에 폰툰이 존재하는 경우에 그 위상차이가

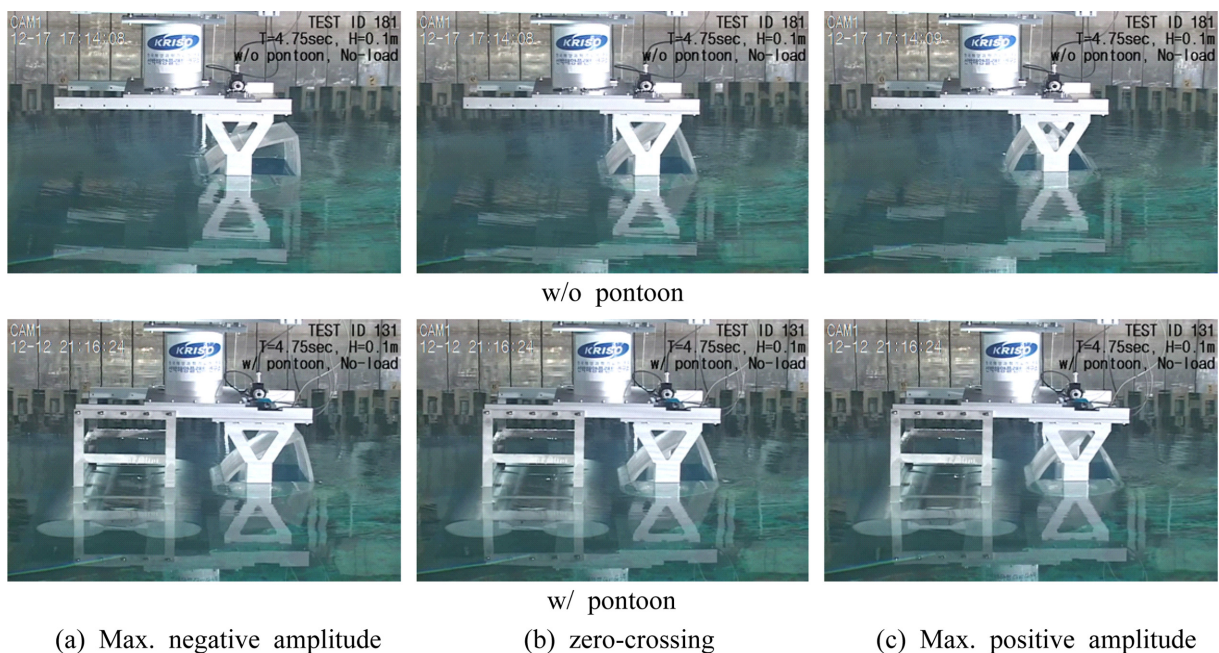


Fig. 4. Snapshots in the experiments under the wave height of 0.10 m ($T=4.75$ sec).

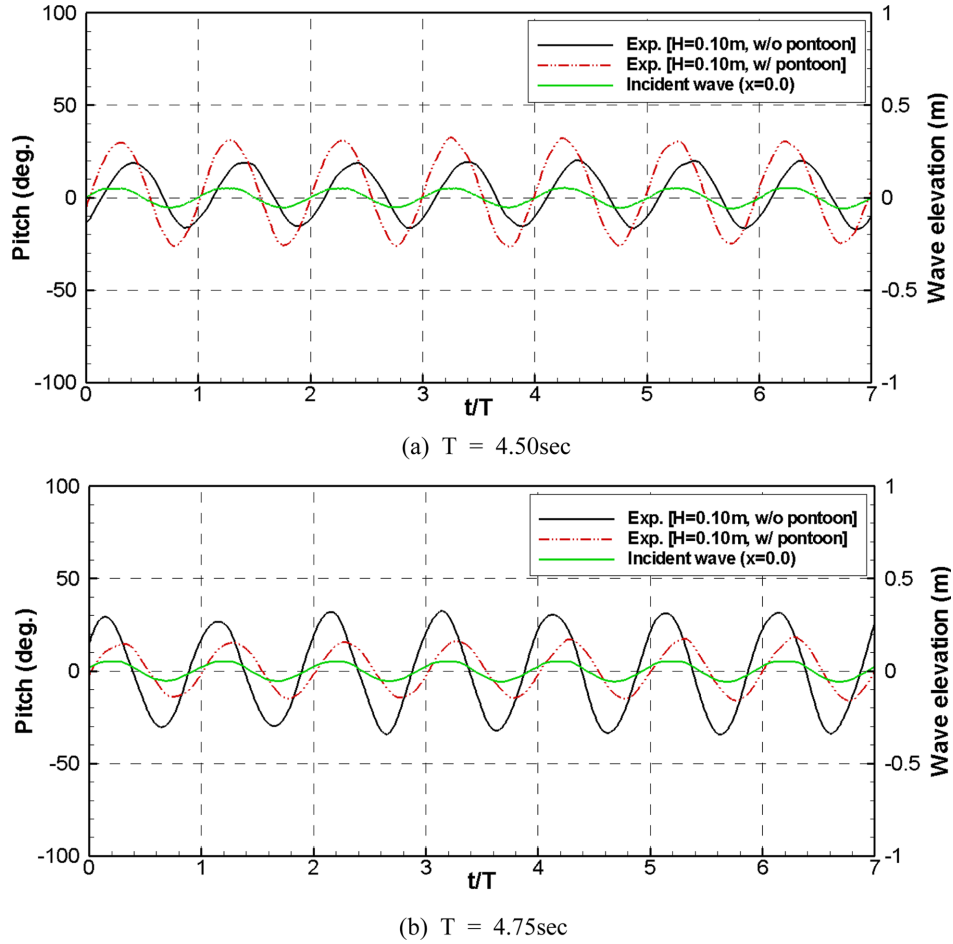


Fig. 5. Time histories for the pitch motion of the rotor model under the wave height of 0.10 m.

크지 않으며, 폰투온이 없는 경우의 로터의 종동요운동 크기보다 그 크기가 상대적으로 큰 것을 확인할 수 있다.

그리고 Fig. 5(b)를 보면, 파도주기 4.75초에서는 Fig. 5(a)의 4.50초 파도주기와는 반대의 결과를 확인할 수 있다. 앞서 Fig. 2에서 확인할 수 있듯이, 4.50초 파도주기는 로터 후면에 폰투온이 존재하는 경우의 로터 고유 파 주기에 근접하며, 4.75초 파도주기는 폰투온이 없는 경우의 로터 고유 파 주기 근처 값이다. 그리고 이를 Fig. 5에서 보면, 폰투온 유무에 관계없이 로터의 고유 파 주기 근처에서는 입사파와 로터의 종동요 운동이 서로 근접한 위상차를 보인다. Fig. 6은 로터의 종동요운동에 대하여 양과 음의 방향 진폭을 주기별로 나타낸 그림이다. 로터의 종동요운동의 입사파 주기에 따라 양과 음의 방향 진폭이 Fig. 2의 결과와 마찬가지로 폰투온 유무에 따라 로터의 고유 파 주기 근처에서 양과 음의 방향 진폭이 게 증가함을 확인할 수 있으며, 본 파고에서는 양과 음의 방향 진폭이 거의 대칭적으로 동시에 증가함을 확인할 수 있다.

3.2 H = 0.25 m

Fig. 7은 보다 높은 파고인 0.25 m의 입사파 조건하에서 폰투온 유무에 따른 로터의 주기별 종동요 운동변화를 보여준다. 폰투온이

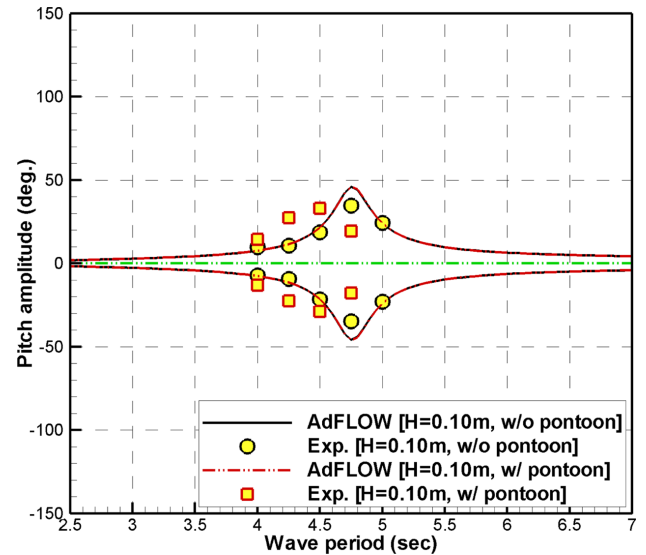


Fig. 6. Positive and negative pitch amplitudes of the rotor in accordance with the wave periods under the wave height of 0.10 m.

없는 경우에 로터 종동요운동의 고유 파 주기는 4.25초 근처이며, 로터 후면에 폰투온이 존재하는 경우 로터 종동요운동의 고유 파

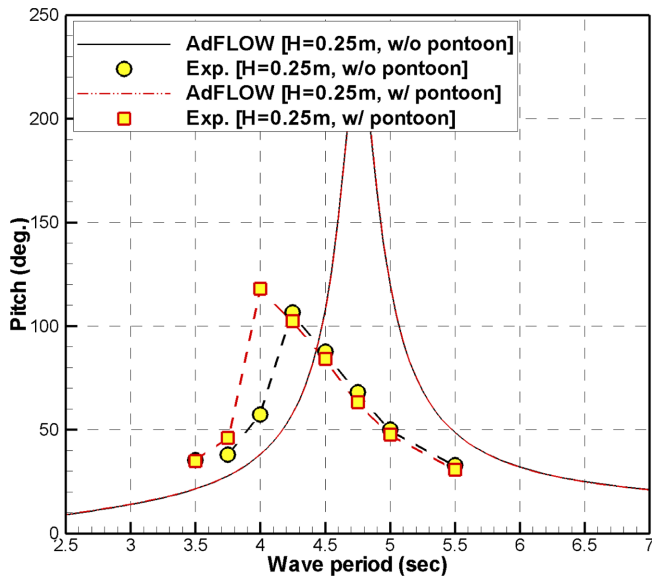


Fig. 7. Pitch motions of the rotor in accordance with the wave periods under the wave height of 0.25 m.

주기는 4.00초로 짧아짐을 확인할 수 있다. 또한 파고 0.10 m 조건에서의 모형시험결과인 Fig. 2와 비교하였을 때, 모형시험결과들은 주파수영역 해석결과들과 비교하였을 때 보다 큰 차이를 보인다. 또한 파고가 보다 높아짐으로 인하여 폰툰 유무에 따른 서로 다른 로터의 고유 파 주기는 Fig. 2에서의 모형시험결과보다 보다 단주기방향으로 이동한다. Rapuc[2012]와 Ha *et al.*[2020, under review]에 따르면 파고 증가에 따른 로터의 고유 파 주기변화는 로터의 중동요각도 변화에 따른 복원모멘트 변화에 의한 영향으로 판단된다.

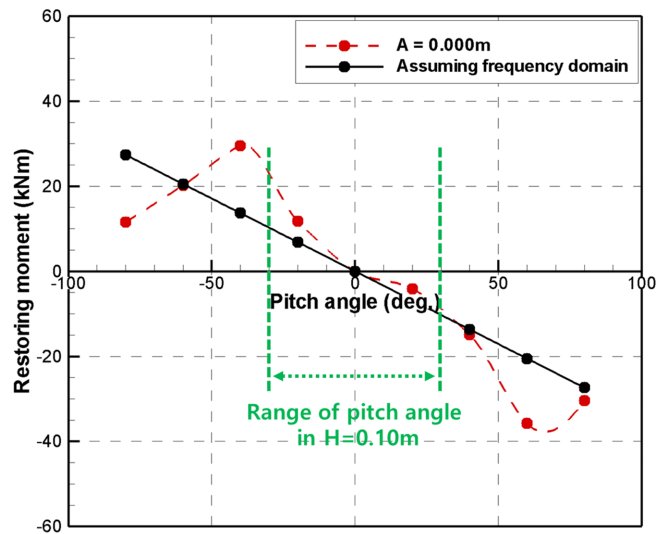


Fig. 8. Change of the restoring moments of the rotor by the pitch angles.

Fig. 8을 보면, 로터의 중동요각도 변화에 따라 선형적으로 변화하는 복원모멘트에 대한 주파수영역 선형해석에서의 가정과는 달리, 로터의 중동요각도 변화에 따라 복원모멘트는 비선형적으로 변화하게 된다. 앞서 Fig. 2에서 폰툰이 없는 경우 모형시험에서 로터의 비선형 중동요운동 발생에 의한 주파수영역 해석결과와의 차이는 Fig. 8과 같은 로터의 중동요각도별 복원모멘트의 변화에 의한 영향이며, 파고가 증가함에 따라 로터의 중동요각도변화가 커짐으로 인해 로터의 복원모멘트가 크게 변화하고 Fig. 7과 같이 로터의 고유 파 주기가 이동하게 된다. Fig. 9는 파고 0.25 m에서 수행된 모형시험 사진들을 보여준다. 대표적으로 파도주기 4.00초에서의 결과들을 보여준다.

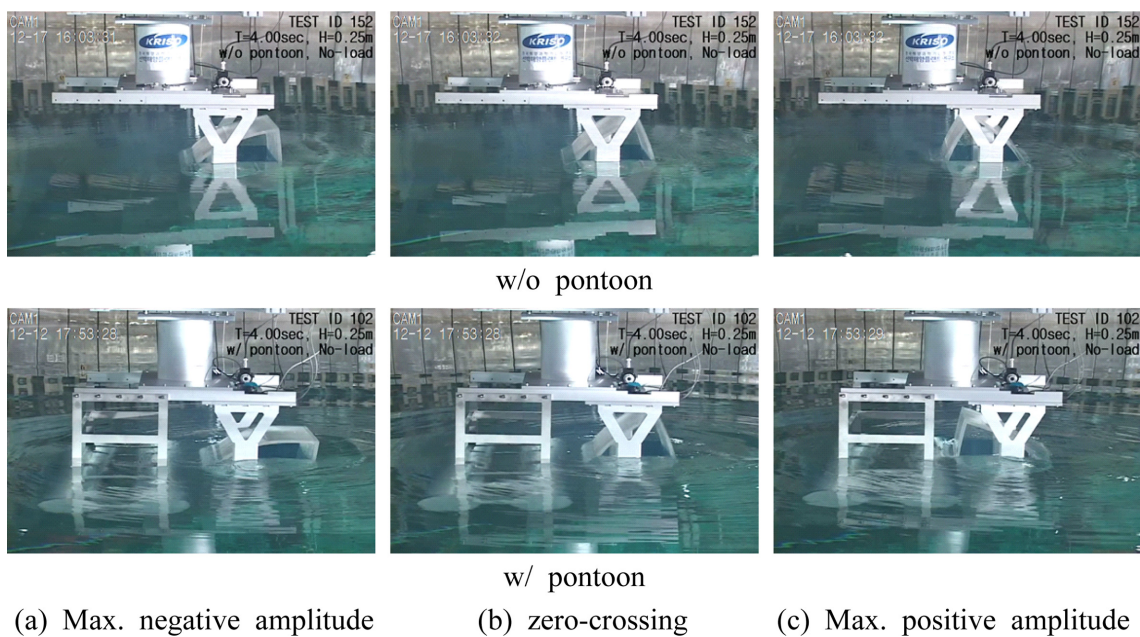


Fig. 9. Snapshots in the experiments under the wave height of 0.25 m ($T=4.00$ sec).

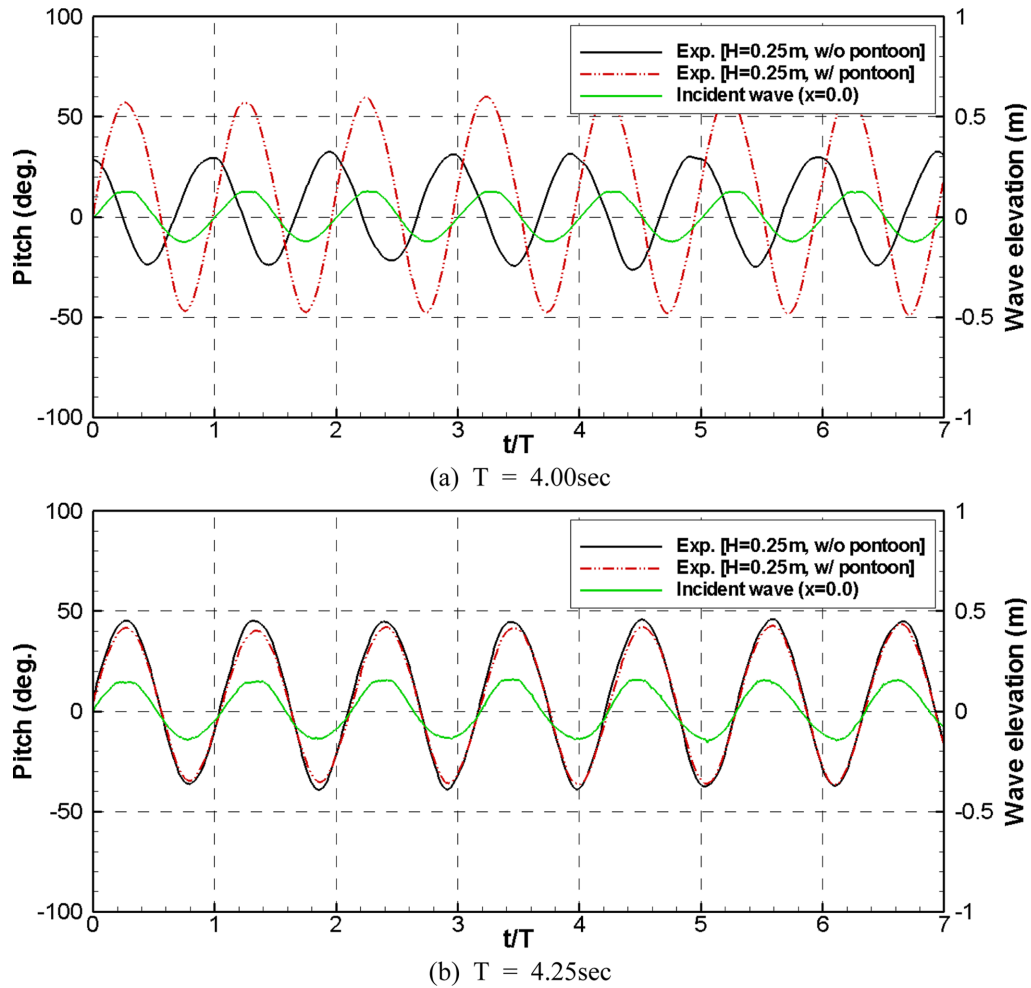


Fig. 10. Time histories for the pitch motion of the rotor model under the wave height of 0.25 m.

Fig. 7에서 볼 수 있듯이, 파도주기 4.00초에서는 로터 후면에 폰투온이 존재하는 경우가 폰투온이 없는 경우에 비하여 로터의 종동요 운동 값이 큰 것을 확인할 수 있다. Fig. 10은 본 파고에서 폰투온 유무에 따른 각각의 로터 고유 파 주기인 4.00초와 4.25초에서 폰투온 유무에 따른 로터의 종동요운동 시계열을 보여준다.

먼저, 파도주기 4.00초인 Fig. 10(a)를 보면, 폰투온이 없는 경우에 입사파와 로터의 종동요운동 사이의 큰 위상차이를 확인할 수 있으며, 로터 후면에 폰투온이 존재하는 경우 그 위상차이가 크지 않음을 확인할 수 있다. 그러나 파도주기 4.25초인 Fig. 10(b)를 보면, 폰투온 유무에 관계없이 입사파와 로터의 종동요운동 사이의 위상차이가 크지 않은 것을 확인할 수 있다. 이를 Fig. 7과 비교하여 보면, 로터의 고유 파 주기 이후의 장주기 파도조건에서는 로터의 종동요운동이 입사파와 근접한 위상으로 움직이는 것을 확인할 수 있다. 즉, 파고가 상대적으로 높은 경우, 폰투온 유무에 관계없이 대변위 종동요 운동으로 인하여 로터의 고유 파 주기 이후의 장주기 파도에서 입사파와 로터의 종동요운동 사이의 위상이 서로 근접해지며, 로터의 종동요 운동 또한 서로 근접해진다. 그리고 로터 후면의 폰투온에 의한 로터의 종동요운동 변화는 고유 파 주기 이

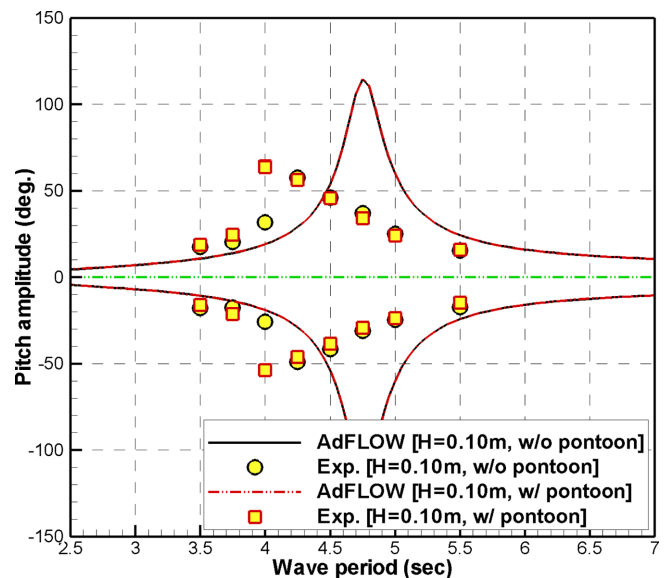


Fig. 11. Positive and negative pitch amplitudes of the rotor in accordance with the wave periods under the wave height of 0.25 m.

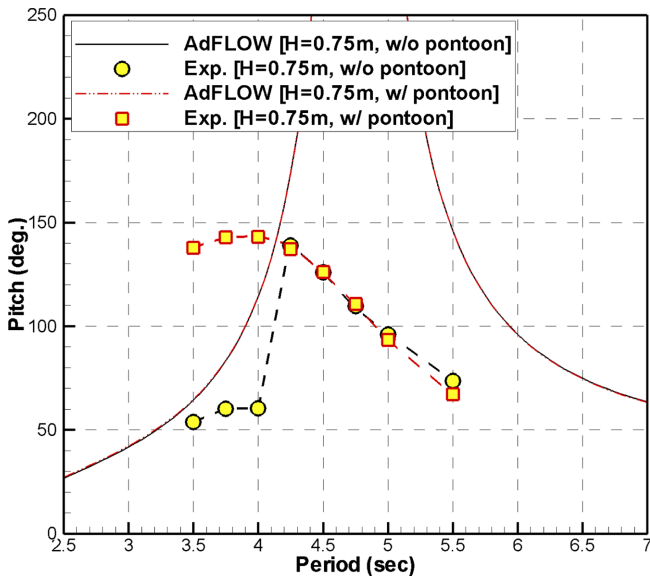


Fig. 12. Pitch motions of the rotor in accordance with the wave periods under the wave height of 0.75 m.

전 단주기 파도에서 나타남을 확인할 수 있다. Fig. 11은 로터의 중동요운동에 대한 양과 음의 방향 진폭을 주기별로 나타낸 그림이다. Fig. 6과 마찬가지로 폰툰 유무에 관계없이 로터 중동요운동의 고유 파 주기 근처에서는 큰 양과 음의 진폭이 발생하며, 파도 주기별 로터의 중동요운동 진폭변화가 주파수영역 해석결과와는 매우 다른 경향을 보인다. 또한, 파고 0.25 m 조건에서부터는 양의 방향 로터 중동요운동 진폭이 음의 방향 로터 중동요운동 진폭에 비하여 다소 커짐을 확인할 수 있다.

3.3 H = 0.75 m

Fig. 12는 본 모형시험에서 가장 높은 파고인 0.75 m 조건에서 폰툰 유무에 따른 파고별 로터의 중동요 운동변화를 보여준다. 앞서 파고 0.25 m 조건의 Fig. 7과 같이 폰툰이 없는 경우 로터의 고유 파 주기 이후의 장주기 파도조건에서는 폰툰 유무에 따른 로터의 중동요운동 크기의 차이는 크지 않지만, 그 이전 단주기 파 조건에서는 로터 후면에 폰툰으로 인하여 폰툰이 없는 경우 보다 로터의 중동요운동의 크기가 상대적으로 크게 증가한다.

그리고 그 차이는 파고가 보다 더 증가함에 따라 보다 더 크게 발생된다. 그리고 폰툰이 없는 경우의 로터의 고유 파 주기는 4.25초 근처이며, 로터 후면에 폰툰이 존재하는 경우 로터의 고유 파 주기는 4.00초 근처로 앞서 0.25 m 파고조건에 비하여 보다 단주기방향으로 로터의 고유 파 주기는 이동하게 된다. Fig. 13은 파도주기 4.00초 및 0.75 m 파고에서의 모형시험 사진들을 보여준다. Fig. 12에서도 볼 수 있듯이, 파도주기 4.00초에서는 로터 후면에 폰툰이 존재하는 경우 폰툰이 없는 경우에 비하여 로터의 운동이 상대적으로 매우 큰 것을 확인할 수 있으며, 로터 후면에 폰툰이 존재하는 경우 강한 슬래밍 현상도 발생하게 된다.

Fig. 14는 파도주기 4.50초에서의 모형시험 사진들을 보여준다. 본 파도조건에서는 폰툰 유무에 관계없이 매우 큰 로터의 중동요운동이 발생되며, 두 경우 모두 강한 슬래밍 현상을 동반한다. Fig. 15는 파도주기 4.00초 조건에서의 폰툰 유무에 따른 로터의 중동요운동 시계열을 보여준다. 앞서 상대적으로 낮은 두 파고에서의 모형시험결과들과 마찬가지로 로터 후면의 폰툰 유무에 따라 입사파와 로터 중동요운동 사이의 위상차이가 다르며, 로터 후면에 폰툰이 존재하는 경우의 로터의 고유 파 주기인 4.00초에서는 로

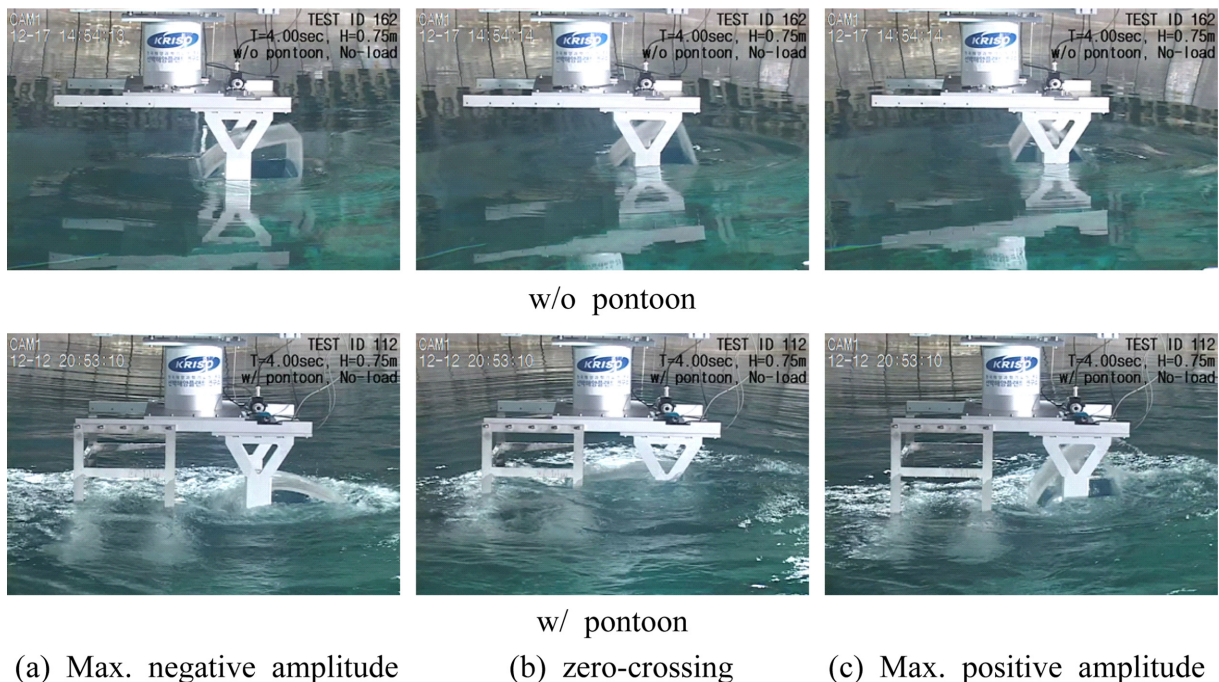


Fig. 13. Snapshots in the experiments under the wave height of 0.75 m (T=4.00 sec).

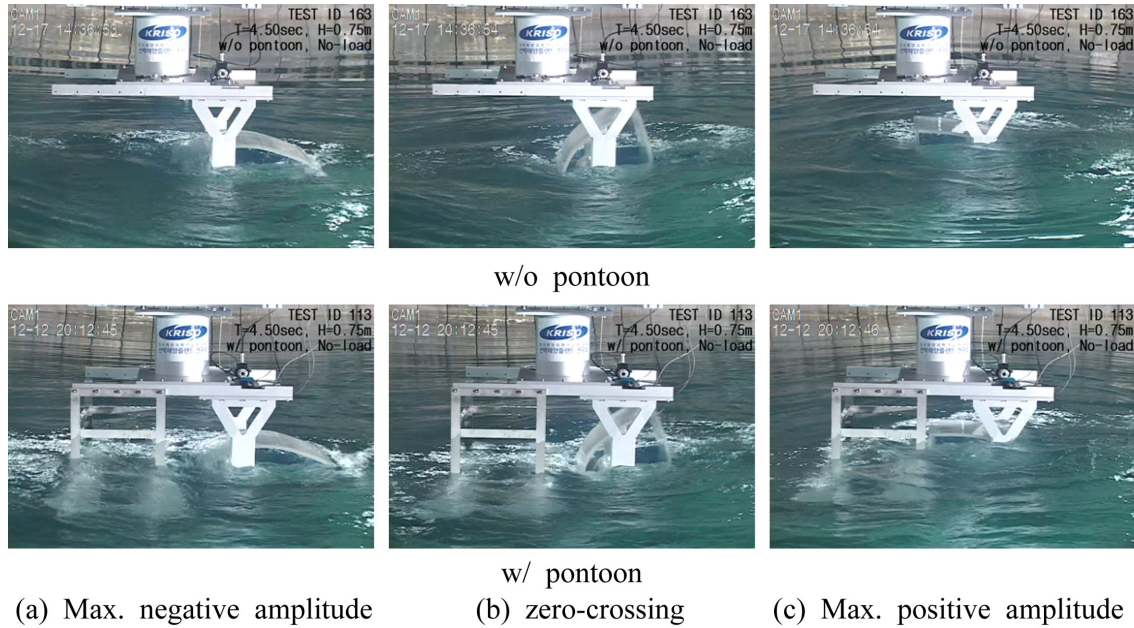


Fig. 14. Snapshots in the experiments under the wave height of 0.75 m ($T=4.50$ sec).

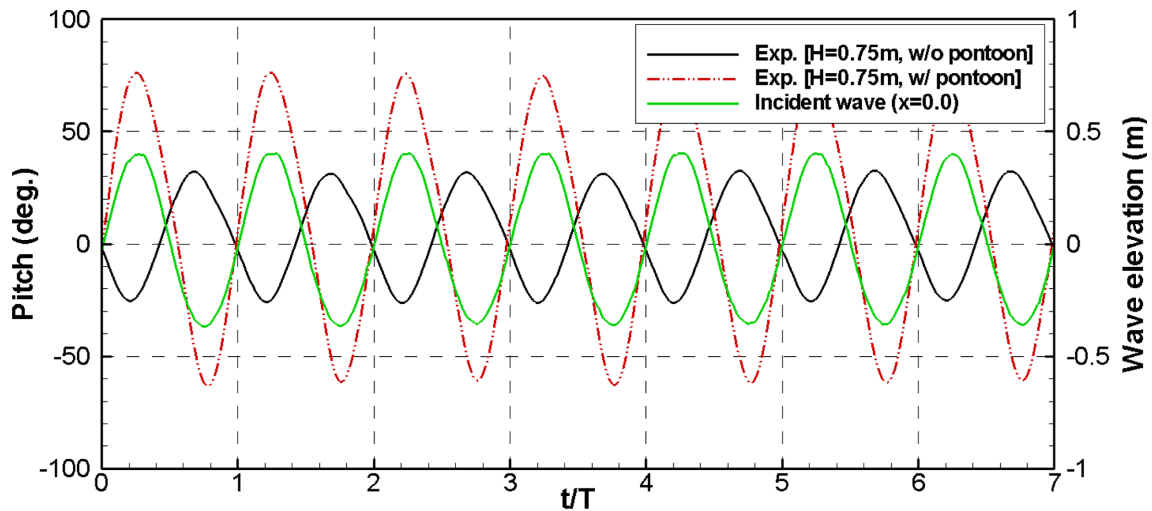


Fig. 15. Time histories for the pitch motion of the rotor model under the wave height of 0.75 m ($T=4.00$ sec).

터 후면에 폰투온이 존재하는 경우 그 위상차이가 매우 작다.

Fig. 16은 로터의 종동요운동에 대한 양과 음의 방향 진폭을 주기별로 나타낸 그림이다. Fig. 16을 보면, 폰투온 유무에 따른 결과 모두 양의 방향의 종동요운동에 대한 진폭이 음의 방향보다 상대적으로 크게 발생함을 확인할 수 있으며, 이는 로터 종동요운동의 비선형성이 파고가 높아짐에 따라 보다 더 증가한 것으로 생각된다.

Fig. 17는 폰투온 유무에 따라 세 가지 다른 파고에 대하여 그 조건에서의 로터 종동요운동을 무차원 화하여 비교한 그림이다. 폰투온 유무에 관계없이, 로터의 고유 파 주기는 파고가 증가함에 따라 단주기 방향으로 이동하는 것을 확인할 수 있다. 또한 파고가 증가함에 따라 무차원화 된 로터의 종동요운동 크기는 점차 작아지게

된다. 이는 앞서 언급한 것과 같이, 입사파의 파고가 증가함에 따른 로터의 종동요 운동의 증가로 인하여 로터의 복원모멘트가 크게 변화하기 때문에 발생하는 현상으로 생각된다. 이러한 경우 폰투온이 없는 경우에 대하여서는 로터의 복원모멘트 변화를 고려한 시간영역해석으로 로터의 종동요운동 크기나 고유 파 주기의 변화를 추정할 수 있으나, 본 연구에서 가장 높은 파고인 0.75 m에서의 로터의 종동요 운동은 슬래밍 현상이 동반되기 때문에 선형가정의 해석으로는 다소 무리가 있을 것으로 생각된다. 그리고 파 주기별 로터의 종동요운동특성은 고유 파 주기 변화를 포함하여 폰투온 유무에 따라 변화하기 때문에 Salter's duck 로터 설계 시 로터 후면의 플랫폼 형상이 모사되어야 할 것으로 생각된다.

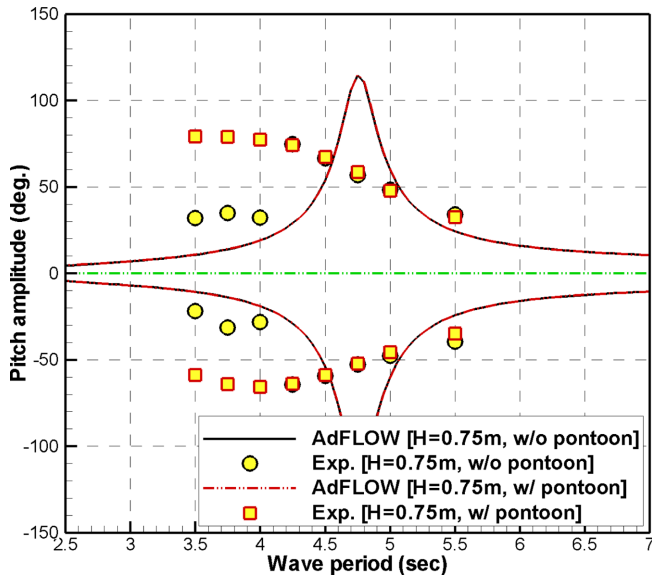


Fig. 16. Positive and negative pitch amplitudes of the rotor in accordance with the wave periods under the wave height of 0.75 m.

4. 결 론

본 연구에서는 폰툰 유무에 따른 Salter's duck 로터의 비선형 중동요운동성능에 대한 일련의 모형시험을 수행하였다. 본 연구결과로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

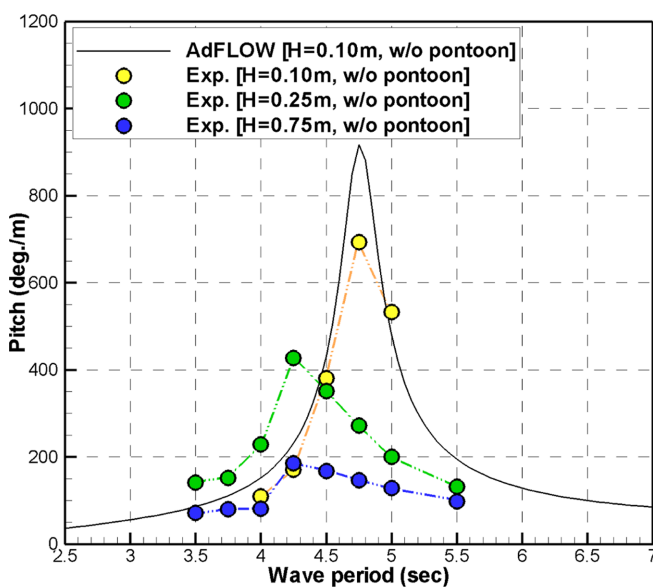
1. 상대적으로 낮은 파고인 0.10 m 파도조건에서도 폰툰 유무에 따른 로터의 고유 파 주기 변화가 발생하였으며, 로터 후면에 폰툰이 존재하는 경우 로터와 폰툰 사이의 자유수면 하부 유동 변화에 기인한 것으로 사료된다. 따라서 로터 후면의 폰툰에 의

한 로터 중동요 운동변화는 Ha *et al.*[2020, under review] 연구의 비선형 중동요운동구간 파도조건에서 선형이론 기반의 주파수영역 해석으로부터 추정하기에는 다소 무리가 있다. 이러한 파도조건에서는 CFD 해석이나 모형시험을 이용하여 그 운동변화를 추정하는 것이 보다 적절한 것으로 생각된다.

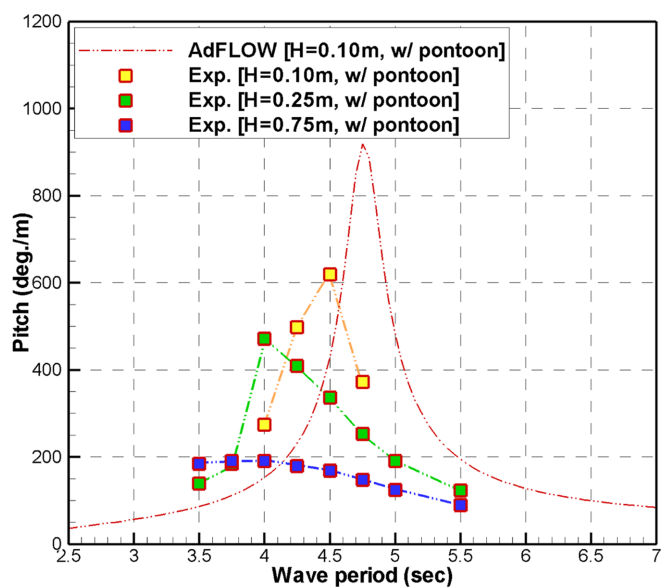
2. 로터 후면에 폰툰이 존재하는 경우 로터의 고유 파 주기는 폰툰이 존재하지 않는 경우에 비하여 상대적으로 단주기 방향으로 이동하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 로터와 폰툰 사이의 유동변화에 의한 로터의 부가모멘트 또는 파랑기진모멘트의 변화가 큰 영향을 미치는 것으로 생각된다. 또한 로터의 고유 파 주기 이후의 장주기 파도에서는 입사파와 로터의 중동요운동 사이의 위상 차이가 근접해지므로 폰툰 유무에 관계없이 로터 중동요운동의 크기가 서로 근접하다.

3. 폰툰으로 인한 로터 중동요운동 크기의 변화는 로터의 고유 파 주기 이전의 단주기 파도에서 상대적으로 크게 발생하며, 폰툰 유무에 따른 그 크기의 차이는 입사파의 파고가 증가함에 따라 보다 더 크게 발생한다. 즉, 로터 후면 폰툰으로 인한 로터의 중동요운동 증가는 로터의 고유 파 주기 이전의 파도주기에서 발생하며, 로터 후면의 폰툰으로 로터 중동요운동을 보다 크게 발생시킬 수 있다.

4. 폰툰이 없는 경우 로터의 복원모멘트 변화로 인하여 파고가 증가함에 따라 고유 파 주기가 변화하는 것을 확인할 수 있으며, 파고로 무차원화 된 중동요운동의 크기 또한 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 이러한 변화는 폰툰이 있는 경우에도 유사한 경향을 보인다. 다만, 폰툰이 있는 경우 로터의 중동요운동특성이 고유 파 주기를 포함하여 폰툰이 없는 경우와 매우 달라지기 때문에 Salter's duck 형상 로터의 경우에는 설계 시 로터 후면의



(a) w/o pontoon



(b) w/ pontoon

Fig. 17. Normalized pitch motions of the rotor in accordance with the wave periods under three wave heights.

물체 형상을 함께 고려해주어야 할 것으로 생각된다.

5. 본 연구에서는 로터 후면의 폰투운 유무에 따른 로터의 비선형 중동요운동을 조사하였다. 향후 각 조건에 따라 부하시험을 수행하고 폰투운 유무에 따른 발전효율의 변화를 확인할 계획이다.

후 기

본 연구는 선박해양플랜트연구소에서 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받은 “파랑변화에 대응 가능한 1MW급 운동 부체 배열식 파력발전시스템 원천기술 개발(PNS3530)”과 주요사업으로 수행중인 “파력발전 통합성능 및 구조 안전성 해석기반 구축을 위한 WECAN 개발(PES3530)”의 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- [1] Evan, D.V., 1976, A Theory for Wave-power Absorption by Oscillating Bodies, *J. Fluid Mech.*, 77, 1-25.
- [2] Ha, Y.J., Park, J.Y., Shin, S.H. and Bae, Y.H., 2019, Evaluation of Generating Power in Low Wave Height for Asymmetric Rotor using Frequency Domain Analysis, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, 22(4), 253-261.
- [3] Ha, Y.J., Park, J.Y. and SHIN, S.H., 2020, Numerical Study on Non-linear Dynamic Behavior of an Asymmetric Rotor for Wave Energy Converter in Regular Waves, *Renewable Energy* (Under review).
- [4] Hong, K.Y., Ryu, H.J., Shin, S.H. and Hong, S.W., 2004, Wave Energy Distribution at Jeju Sea and Investigation of Optimal Sites for Wave Power Generation, *J. Ocean Eng. and Tech.*, 18(6), 8-15.
- [5] Jeffrey, D.C., Richmond, D.J.E., Salter, S.H., Taylor, J.R.M. and Young, I.A., 1976, Second Year Interim Report on Edinburgh Wave Power Project: Study of Mechanism to Extract Power from Sea Waves, Interim Report, Wave-power Project, University of Edinburgh, September.
- [6] Ko, H.S., Kim, D.E., Cho, I.H. and Bae, Y.H., 2019, Numerical and Experimental Study for Nonlinear Dynamic Behavior of an Asymmetric Wave Energy Converter, In. *Society of Offshore and Polar Eng.*, ISOPE-I-19-509, Honolulu, Hawaii, USA.
- [7] Le Méhauté, B., 1976, *An Introduction to Hydrodynamic and Water Waves*, Springer.
- [8] Mei, C.C., 1976, Power Extraction from Water Waves, *J. Ship Res.*, 20, 63.
- [9] Newman, J.N., 1976, The Interaction of Stationary Vessels with Regular Waves, *Proc. 11th Symp. Naval Hydrodynamics*, London, 491.
- [10] Park, J.Y., Nam, B.W., Shin, S.H., Park, I.B., Won, Y.U., Oh, Y.J., Roh, C. and Cho, S.J., 2018, An Experimental Study on the Wave Response of Arrayed-buoy Wave Energy Converter Changing Platform Included Angle, 2018 Autumn Meetings of Korean Soc. Mar. Environ. Energy, 76-81.
- [11] Pecher, A., Kofoed, J.P. and Marchalot, T., 2011, Experimental Study on a Rotor for WEPTOS, Aalborg University DCE Contract Report No. 110.
- [12] Pizer, D., 1994, Numerical Modelling of Wave Energy Absorber, Harwell Laboratory, Energy Technology Support Unit, UK.
- [13] Poguluri, S.K. and Bae, Y.H., 2018, A Study on Performance Assessment of WEC rotor in the Jeju Western Waters, *Ocean Systems Engineering*, 8(4), 361-380.
- [14] Rapuc, S., 2012, Numerical Study of the WEPTOS Single Rotor, Master thesis, Aalborg University, Denmark.
- [15] Salter, S.H., 1974, Wave Power, *Nature*, 249(249), 720-724.
- [16] Salter, S.H., Jeffrey, D.C. and Taylor, J., 1975, First Year Interim Report on Edinburgh Wave Power Project: Study of Mechanism to Extract Power from Sea Waves, Technical Report, Wave-power Project, University of Edinburgh, September.

Received 22 June 2020

1st Revised 7 August 2020, 2nd Revised 2 September 2020

Accepted 10 September 2020