

# 후면 폰투온 유무에 따른 비대칭 로터의 운동특성 변화에 대한 CFD 해석 연구

하윤진<sup>1</sup> · 신승호<sup>2</sup> · 박지용<sup>1,†</sup>

<sup>1</sup>한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 선임연구원

<sup>2</sup>한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 책임연구원

## A CFD Study for the Motion Characteristics of an Asymmetric Rotor by pontoons

Yoon-Jin Ha<sup>1</sup>, Seung Ho Shin<sup>2</sup>, and Ji Yong Park<sup>1,†</sup>

<sup>1</sup>Senior Researcher, Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea

<sup>2</sup>Principal Researcher, Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea

### 요 약

본 연구에서는 폰투온 유무에 따른 Salter's duck 형상의 비대칭 로터에 대한 규칙파 중 종동요 운동에 대한 CFD 해석을 수행하였다. CFD 해석결과들의 검증은 위하여 기존의 모형시험결과와 직접비교를 수행하였으며, 유체역학적인 운동특성을 검토하여 보았다. 기존의 모형시험결과에서는 폰투온 유무에 따라 서로 다른 로터의 고유주기를 가지며, 단주기 파도 영역에서 서로 다른 로터의 종동요 운동크기가 발생하였다. 이를 확인하기 위하여 CFD 해석으로 유체력계수들을 조사하였으며, 폰투온에 의한 로터의 파랑기진모멘트 변화로 인하여 고유주기 및 로터의 종동요 운동이 변화함을 확인하였다.

**Abstract** – In this study, CFD simulations under regular waves were performed for pitch motion characteristics of a Salter's duck type rotor model with existence and nonexistence of pontoons. The CFD simulation results were directly compared with existing experimental results in order to validate the CFD results, and the motion characteristics of model were check from the CFD results. In the experimental results in accordance with existence and nonexistence of the pontoons, the rotor had different resonance periods and different magnitudes of pitch motions in short wave periods. To check these, hydrodynamic coefficients of the rotor in accordance with existence and nonexistence of pontoons were investigated from the CFD simulations. From the results, it could be found that the change of the resonance period and pitch motion of the rotor are affected by changing wave exciting moment of the rotor with the pontoons.

**Keywords:** CFD(전산유체역학), Salter's Duck Rotor(Salter duck 로터), Pontoon(폰투온), Pitch motion(종동요 운동), Resonance period(고유주기)

### 1. 서 론

최근에 환경문제로 인하여 재생에너지의 활용에 대한 중요성이 점점 증대되고 있다. 재생에너지는 바람, 태양광 그리고 파도 등을 이용할 수 있으며, 그 중 상대적으로 밀도가 큰 파도를 이용한 재생에너지는 유망한 환경자원으로 각광받고 있다. 이러한 파도에너지는 이용하기 위하여서는 파력발전장치(WEC, Wave Energy

Converter)이라는 에너지변환시스템이 필요하며, 대표적으로 비교적 단순형 형태, 제조비용이 상대적으로 낮은 부유체의 운동에너지를 이용한 가동물체형이 널리 사용되고 있다.

이러한 가동물체형 파력발전장치는 부유체의 운동에너지를 이용하기 때문에 주로 파도의 주기와 파고에 관련이 있으며, 기존의 유체역학적인 성능해석에 의존된다. 대표적인 가동물체형 파력발전장치로 Salter[1974]에 의하여 개발된 Salter's duck이 있으며, 이는 비대칭 단면형상으로 종동요 운동을 극대화하여 발전하는 장치이다. Salter's duck 로터에 대한 연구는 주로 Edinburgh wave power

<sup>†</sup>Corresponding author: jypark@kriso.re.kr

그룹(Salter *et al.*[1975]; Jeffrey *et al.*[1976])에 의하여 수행되었으며, 그 성능을 향상시키기 위하여 모형시험이 주로 수행되었다. 과거의 Salter's duck 로터에 대한 연구로 Greenhow *et al.*[1982]는 극한 파도에서 Salter's duck 로터의 축의 힘 및 캡 사이즈에 대한 가속도를 측정하였으며, Vinje and Brevig[1981]은 다양한 파고에서 모형시험결과와 선형이론 기반의 해석을 수행하여 그 결과들을 직접 비교하였으며, 상대적으로 낮은 파고에서는 그 결과들이 매우 근접하나 높은 파고에서는 그 결과들이 서로 다름을 보여주었다. Count[1978]은 2차원 소스 분포법을 이용하여 Salter's duck 로터의 유체역학적인 힘을 계산하였으며, PTO를 고려한 수치해석결과와 Salter[1976]의 모형시험결과와 직접 비교하였다. 그리고 주파수영역해석을 이용하여 Ha *et al.*[2019]는 Salter's duck 형상 로터에 대하여 GM 변경에 따라 흡수에너지를 비교하였으며, Rapuc[2012]는 파고 변화에 따른 WEPTOS 로터 운동해석을 위한 시간영역해석 코드를 개발하고 그 결과를 Pecher[2011]의 모형시험결과와 직접 비교하였다. 이 연구에서는 파고 증가에 따라 로터의 고유주기 주기가 변화하는 것을 확인하였으며, 시간영역해석을 이용하여 로터의 고유주기 변화에 로터의 각도에 따라 달라지는 로터 복원모멘트의 변화가 기인함을 보여 주었다. 최근에 컴퓨터의 발달로 인하여 CFD 해석을 이용하여 Salter's duck 형상 로터에 대한 연구들이 수행되어 왔으며, Poguluri and Bae[2018]은 CFD 해석을 이용하여 감쇠계수를 추정하고 주파수영역해석을 이용하여 Salter's duck 형상 로터를 설계하였다. 그리고 Ko *et al.*[2019]는 모형시험과 CFD 해석을 이용하여 파고 변화에 따른 Salter's duck 형상 로터의 비선형 운동에 대하여 연구를 수행하였다.

로터의 경우에는 실제 별도의 플랫폼과 연결되어 있고, 플랫폼의 부력확보를 위하여 폰투운을 설치하게 된다. 본 연구에서는 CFD 해석을 이용하여 폰투운 유무에 따른 Salter's duck 형상 로터에 대한 중동요 운동성능을 평가하였으며, 그 결과들을 기존의 모형시험결과(Ha *et al.*[2020])와 직접 비교하였다. 또한 폰투운 유무에 따른 로터의 중동요 운동 특성 변화에 대하여 CFD 해석으로 폰투운 유무에 따른 로터의 유체력계수들을 조사하였으며, 폰투운에 의한 로터의 중동요 운동성능 특성 변화에 대한 원인을 분석하였다.

## 2. CFD 해석조건

### 2.1 격자시스템

본 연구에서는 폰투운 유무에 따른 Salter's duck 형상 로터의 중동요 운동성능 특성 분석을 위한 CFD 해석을 수행하였다. 그 수치해석 결과들은 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 해양공학수조에서 진행된 1/5.5 축척비의 모형시험결과(Ha *et al.*[2020])와 직접 비교하였으며, 동일한 모델을 CFD 해석에 적용하였다 Fig. 1은 CFD 해석을 위한 격자시스템을 보여준다. 계산영역 크기는 길이방향 5.6 m, 수심 3.2 m로 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소의 해양공학수조와 크기가 동일하나, 도메인 폭의 경우 CFD 해석 시간을 감소시키기 위하여 12.0 m로 결정하였다. 그리고

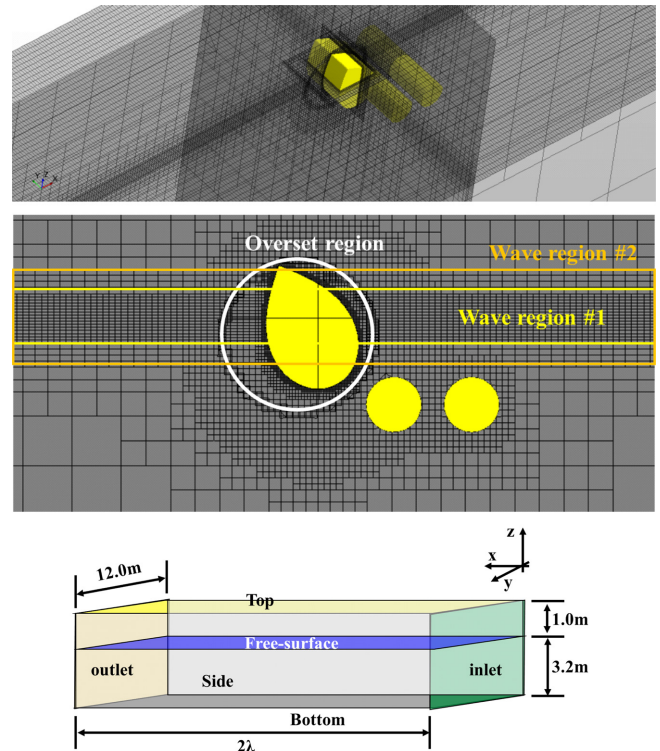


Fig. 1. Grid system and the domain size for the CFD simulation.

Table 1. Principal dimensions of the full-scale rotor

	Unit	
Beak angle ( $\alpha$ )	[deg.]	65
Radius of the stern	[m]	1.0
Draft	[m]	0.8
Width	[m]	2.5
Mass	[kg]	6880
$CG_x$	[m]	-0.1388
$CG_z$	[m]	0.1623
$I_{xx}$	[kg·m <sup>2</sup> ]	9710
$I_{yy}$	[kg·m <sup>2</sup> ]	6791
$I_{zz}$	[kg·m <sup>2</sup> ]	7227

본 연구에서의 로터의 주요제원은 Table 1과 같다.

### 2.2 CFD 해석기법

Salter's duck 형상의 로터에 대한 CFD 해석을 위하여 STAR-CCM+ 11.06v이 이용하였으며, 본 연구에서는 Table 2와 같은 수치기법들을 적용하였다. 여기서, 입사파와 운동 사이의 시간간격은 가변시간간격(Adjustable time step)을 적용하였으며, 이 때 CFL (Courant-Friedrichs-Lewy) 수는 0.5로 고정하였다. 그리고 시간과 공간은 2차로 이산화 되었다.

### 2.3 파도조건

본 연구에서는 Ha *et al.*[2020] 파도조건과 동일한 입사파로 결정되었으며, 그 중 Table 3와 같이 가장 낮은 파고인 0.10 m와 가

**Table 2.** Numerical schemes for the CFD simulation

Discretization scheme	Finite Volume Method (FVM)
Free-surface capturing method	Two-phase VOF (Volume of Fluid)
Pressure and velocity field	Semi-implicit method for pressure-linked equation (SIMPLE)
Time step	Adjustable time step (target CFL number = 0.5)
Sub-iterations	10
Convection scheme	Second-order upwind
Temporal scheme	Second-order Euler implicit
Turbulence model	- (laminar flow)

**Table 3.** Wave conditions in full-scale

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

장 높은 파고인 0.75 m에 대하여 CFD 해석을 수행하였다. 또한 기존 모형시험과 마찬가지로 로터의 운동은 종동요(Pitch)운동만을 자유로이 하였다.

### 3. 기존 모형시험결과(Ha et al.[2020])

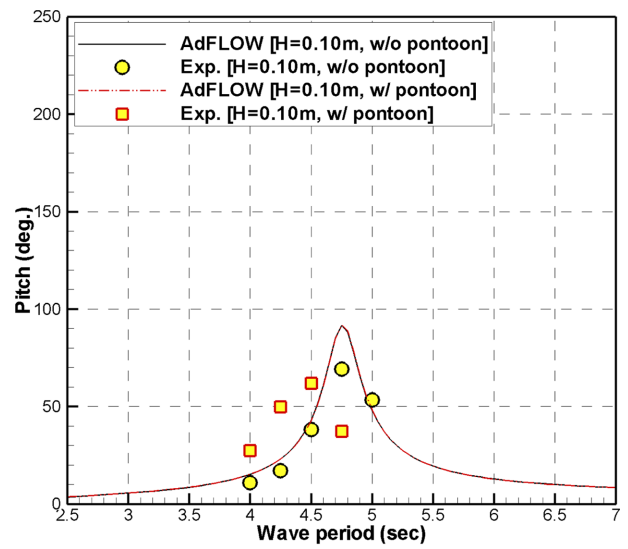
기존의 모형시험결과들은 Fig. 2와 같이, 주파수영역 해석결과와 직접비교하였고 주파수영역해석(AdFLOW)과 모형시험결과들의 차이 그리고 로터 후면 폰투운 유무에 따른 파주기별 종동요 운동 성능의 변화를 보인다.

모형시험은 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소의 해양공학수조에서 수행되었다. 폰투운 유무에 따른 주파수영역 해석결과에서는 로터의 종동요 운동성능의 변화가 크지 않지만, 모형 시험결과들에서는 로터 후면에 폰투운이 위치함으로 인해 로터의 종동요 고유주기가 보다 단파장으로 이동함을 확인할 수 있다. 또한 파고가 증가함에 따라 파주기별 로터의 종동요 운동의 양상이 달라진다.

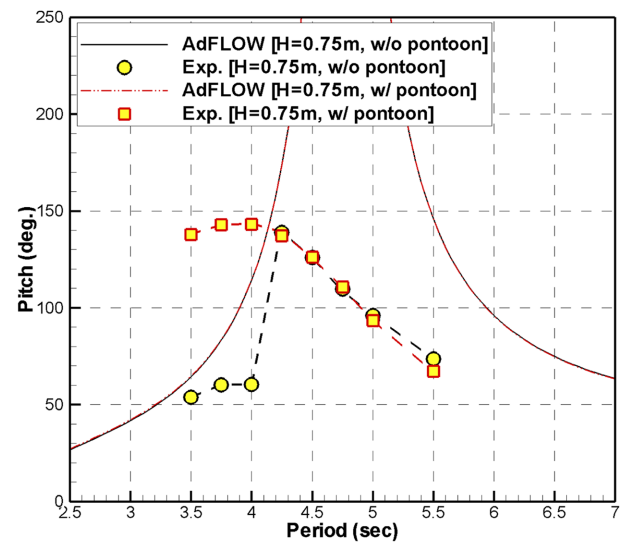
### 4. CFD 해석결과

#### 4.1 H=0.10 m

본 연구에서는 Fig. 2의 폰투운 유무에 따른 파고별 로터 종동요 운동성능 변화에 대하여 CFD 해석으로 비교검토하여 보았다. Fig. 3은 기존 모형시험 및 CFD 해석결과들 중 파도주기 4.50초와 4.75초에서의 로터 종동요 운동시계열을 비교한 그림이다. Fig. 2(a)에서 확인할 수 있듯이, 파도주기 4.50초는 로터 후면에 폰투운이 존재할 때의 로터 종동요의 고유주기 근처, 파도주기 4.75초는 폰투운



(a) H = 0.10m



(b) H = 0.75m

**Fig. 2.** Pitch motions of the rotor in accordance with the wave periods (Experimental results).

이 없는 경우 로터 종동요의 고유주기 근처에 해당된다. 그리고 CFD 해석결과들은 기존의 모형시험 결과들과 매우 근접함을 확인할 수 있다. Fig. 4는 로터의 종동요 모멘트 시계열을 보여준다. Fig. 3과 마찬가지로 파도주기 4.50초와 4.75초에서 비교하였다. Fig. 3

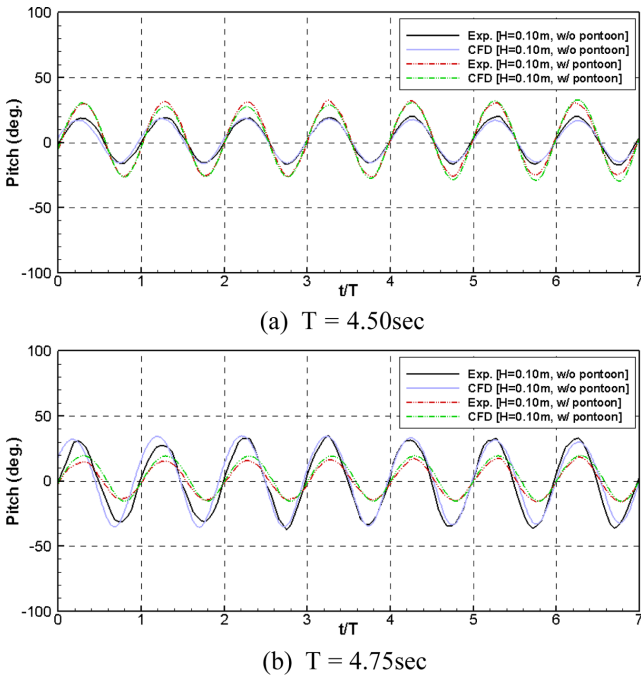


Fig. 3. Time histories for the pitch motion of the rotor model under the wave height of 0.10 m.

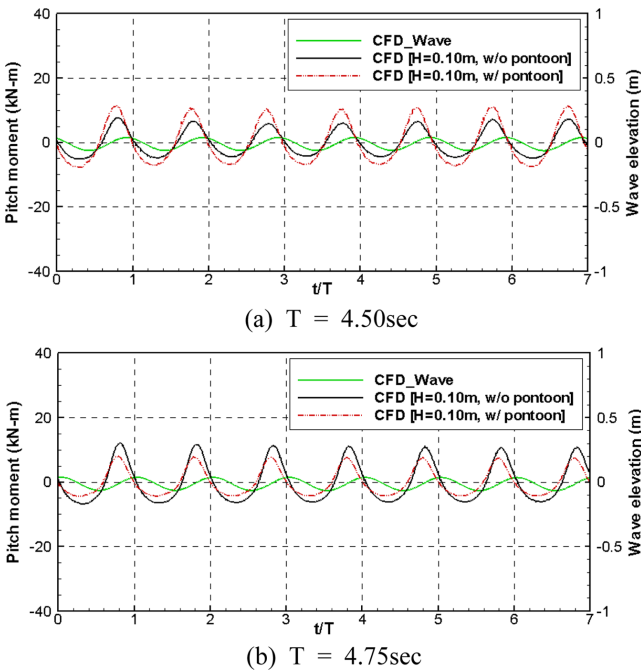


Fig. 4. Time histories for the pitch moments of the rotor model under the wave height of 0.10 m.

과 비교하였을 때, 로터의 종동요 모멘트가 크게 발생된 경우 로터의 종동요 운동이 크게 발생되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 Fig. 2(a)의 결과 중 주파수영역해석을 제외한 기존 모형시험결과와 CFD 해석결과들을 직접 비교한 그림이다. CFD 해석결과에서는 파주기별 Fig. 3의 결과와 같은 로터의 종동요 운동

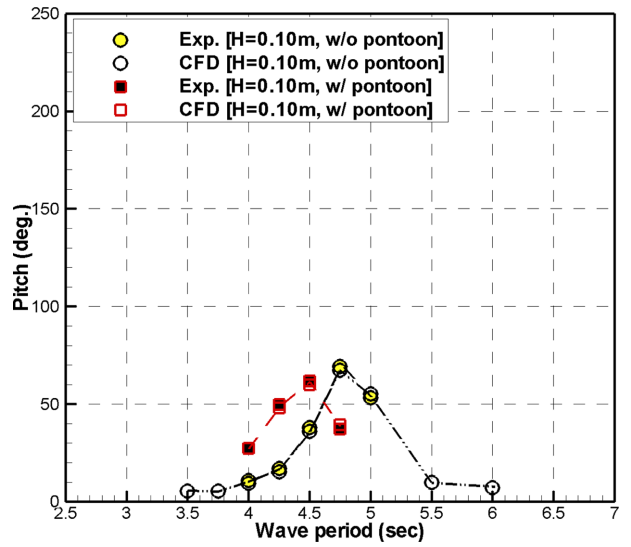


Fig. 5. Pitch motions of the rotor in accordance with the wave periods under the wave height of 0.10 m.

시계열들로부터 5주기 평균값을 제시하였다. Fig. 5를 보면, CFD 해석결과들은 최대오차 약 3% 정도로 모형시험결과와 매우 근접함을 보이며, CFD 해석결과에서도 폰투온 유무에 따른 로터의 종동요 운동성능의 변화를 확인할 수 있다.

Fig. 6은 CFD 해석에서 파도주기 4.75초에서의 로터 주위 유동을 보여준다. 폰투온이 없는 경우에는 상대적으로 큰 운동이 발생하는 반면, 폰투온이 있는 경우에는 그 운동이 보다 작게 발생하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 상대적으로 높은 파고 조건인 파도주기 4.00초 및 0.75 m 파고에서의 로터의 종동요 운동시계열을 보여준다. 앞서 Fig. 3과 마찬가지로 CFD 해석결과들은 기존의 모형시험결과들과 매우 근접함을 확인할 수 있다. 그리고 로터 후면에 폰투온이 있는 경우 로터의 종동요 운동은 폰투온이 없는 경우의 로터 종동요 운동에 비하여 2배 이상 증가하는 것을 확인할 수 있다. 실제로 Fig. 2(b)를 보면, 파도주기 4.00초에서의 폰투온 유무에 따른 로터의 종동요 운동의 큰 차이를 확인할 수 있다.

Fig. 8은 파도주기 4.00초에서의 로터 주위 유동을 보여준다. 로터 후면의 폰투온 유무에 따라 로터의 운동은 입사파의 파도와 상대적인 위상이 서로 다른 것을 확인할 수 있으며, 이로 인하여 로터 후면의 폰투온 유무에 따라 그 운동의 크기가 상대적으로 크게 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 9는 파도주기 4.25초에서의 로터 주위 유동을 보여준다. 파도주기가 상대적으로 약간 길어짐에 따라 폰투온이 없는 경우 로터의 운동이 급격하게 커지며, 그 운동은 로터 후면에 폰투온이 존재하는 경우와 유사한 크기를 보여준다. 또한, 폰투온 유무에 관계없이 로터 운동의 파도와와의 상대적인 위상은 서로 유사함을 확인할 수 있다. 그리고 그 위상관계는 Fig. 8의 폰투온이 있는 경우에 대한 로터와 파도와와의 상대적인 위상이 서로 유사하다.

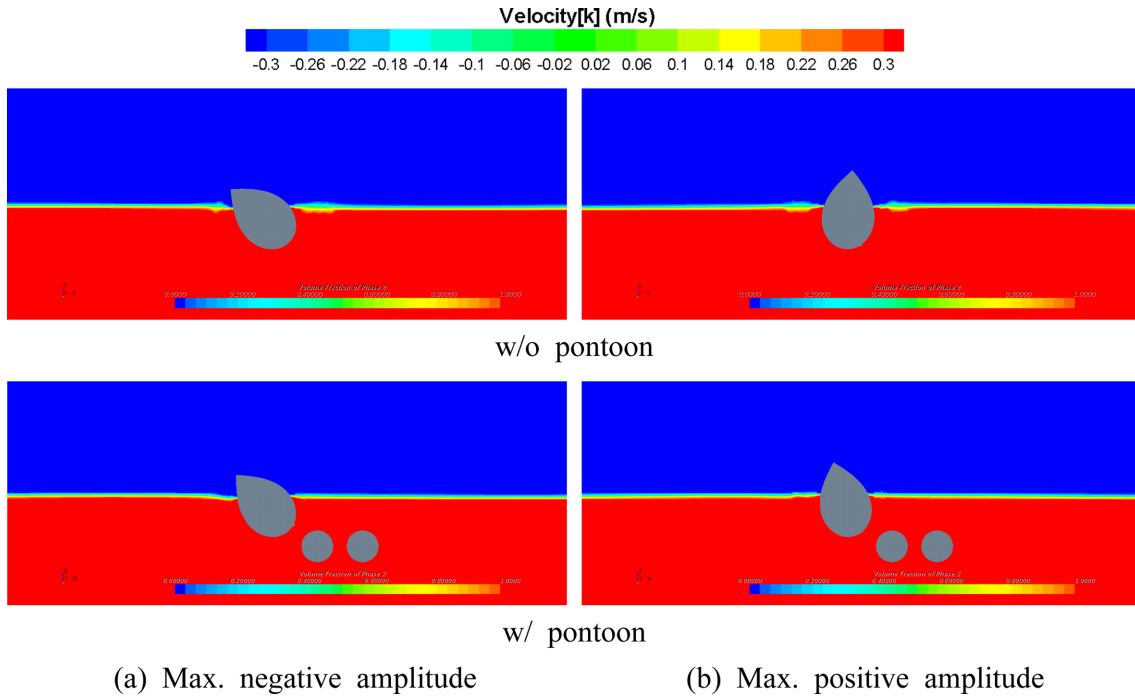


Fig. 6. Flow characteristics near the rotor from CFD simulations (T=4.75 sec, H=0.10 m).

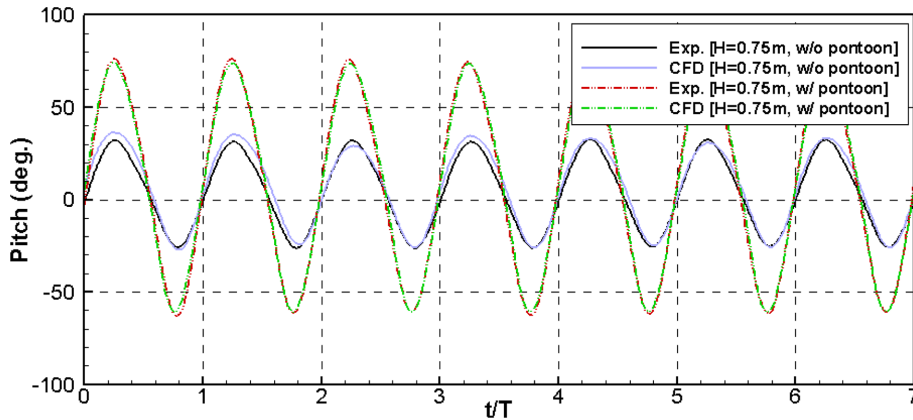


Fig. 7. Time histories for the pitch motion of the rotor model under the wave height of 0.75 m (T = 4.00 sec).

Fig. 10은 폰투온 유무에 따른 주기별 로터의 종동요 운동성능 특성을 보여준다. Fig. 5와 같이 CFD 해석결과들을 보면, 최대오차 약 7%정도로 기존의 모형시험결과들과 매우 근접함을 확인할 수 있다. 또한 기존의 모형시험결과들과 CFD 해석결과들을 보면, 로터 후면 폰투온에 의한 로터의 종동요 운동변화는 상대적으로 단주기에서 크게 변화하는 것을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 5와 비교하였을 때, 상대적으로 파고가 증가함에 따라 폰투온 유무에 따른 로터의 고유주기는 보다 단주기로 이동함을 확인할 수 있다. Ha *et al.*[2020]에서는 폰투온이 없는 경우에 파고 증가에 따른 로터의 고유주기 변화에 대하여 연구를 수행하였으며, 파고 증가에 따른 로터의 고유주기 변화는 파고별 로터의 종동요 운동변화로 인한 복원모멘트 변화임을 확인하였다.

### 4.3 폰투온 유무에 따른 유체력계수 변화

앞서 파고별 폰투온 유무에 따른 로터의 종동요 운동변화들을 보면, 로터 후면에 폰투온이 존재하는 경우 로터와 폰투온 사이 유동 변화로 인하여 로터 종동요 운동의 고유주기는 보다 짧은 파도주기로 이동한다. 그리고 상대적으로 높은 파고인 0.75 m에서는 파도주기 4.25초 이하의 단주기에서 폰투온 유무에 따른 로터의 종동요 운동 크기의 차이는 매우 큼을 확인할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 변화에 대하여 고찰하고자 별도의 CFD 해석을 수행하였다. 먼저, 대표적인 로터 종동요 각도의 진폭과 파도주기에 대하여 폰투온 유무에 따른 정수 중 로터 강제운동 CFD 해석을 수행하였다. Fig. 11은 로터 강제운동에 따른 종동요 방향 모멘트의 시계열이다. 로터 종동요 각도의 진폭과 파도의 주기에 따라 로터의

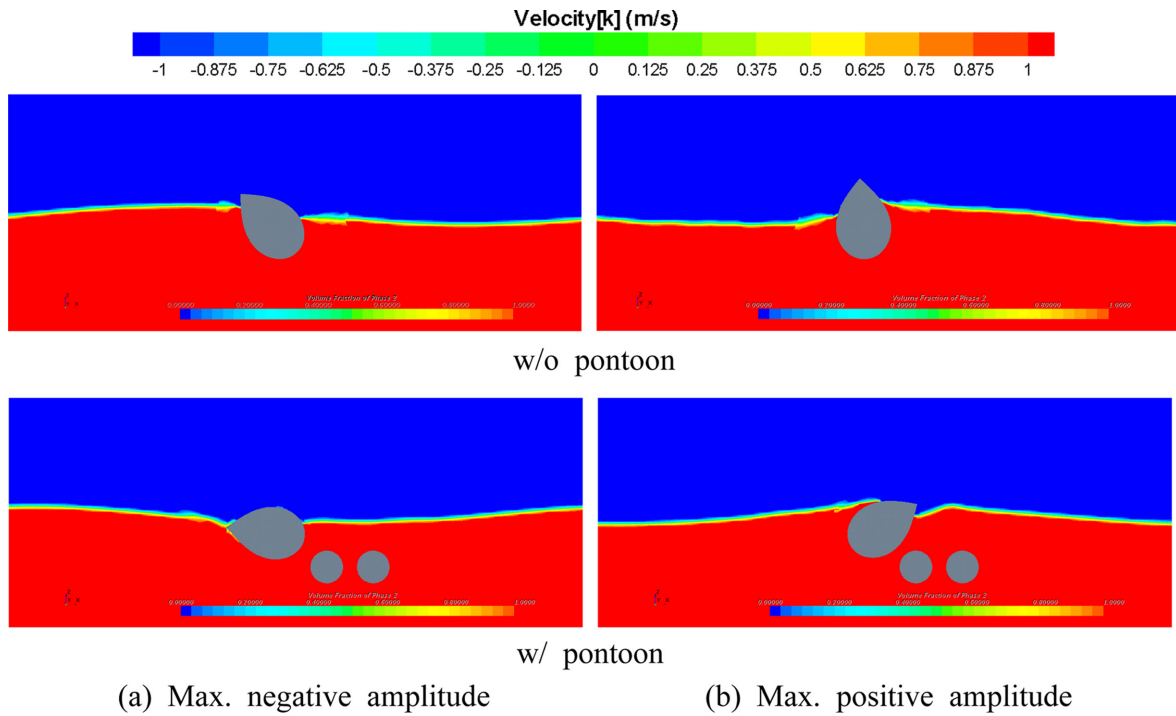


Fig. 8. Flow characteristics near the rotor from CFD simulations (T = 4.00 sec, H = 0.75 m).

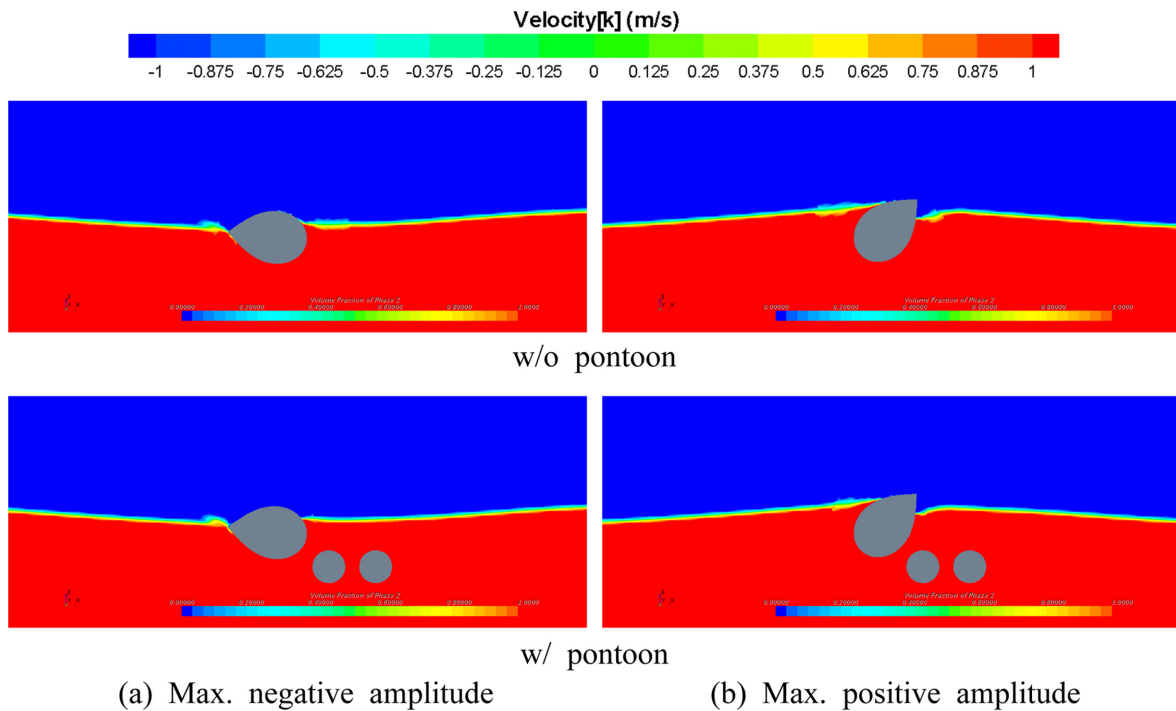


Fig. 9. Flow characteristics near the rotor from CFD simulations (T = 4.25 sec, H = 0.75 m).

중동요 방향 모멘트의 변화를 확인할 수 있다. Fig. 12는 Fig. 11의 로터 중동요 방향 모멘트 시계열로부터 부가모멘트(Added moment)를 얻어낸 그림이다. 상대적인 비교를 위하여 CFD 해석결과들은 주파수영역해석(AdFLOW)결과들과 직접 비교하였다. Fig. 12을

보면, CFD 해석으로부터 얻어진 부가모멘트는 주파수영역해석결과들과 매우 근접함을 확인할 수 있으며, 로터 후면에 폰투온이 존재하더라도 로터 부가모멘트의 변화는 크지 않은 것을 확인할 수 있다.

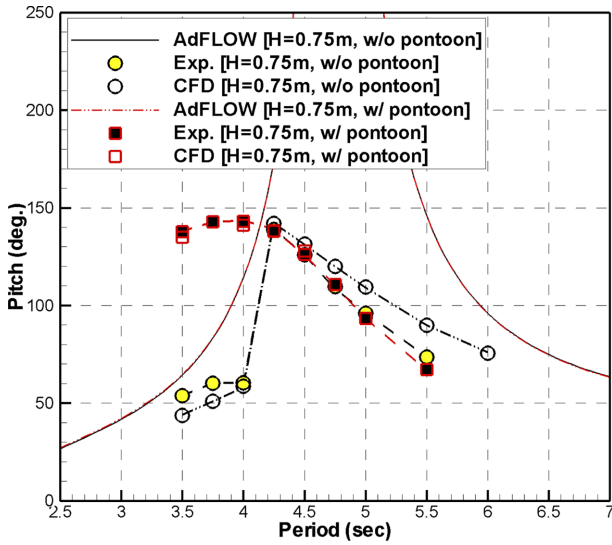


Fig. 10. Pitch motions of the rotor in accordance with the wave periods under the wave height of 0.75 m.

Fig. 13은 대표적으로 진폭 50도 및 주기 3.50초에서의 로터와 폰투에 발생하는 표면압력분포를 보여준다. 폰투온 유무에 따라 로터 표면의 압력분포의 차이는 크지 않아, 폰투온에 의한 추가모멘트의 변화는 크지 않음을 확인할 수 있다. 본 연구에서는 추가적으로 Fig. 14 및 Fig. 15에서와 같이 CFD 해석을 이용하여 대표적인 파도주기 및 파고 중 고정된 로터에 대한 파랑기진모멘트(Exciting moment) 확인하여보았다. 그리고 CFD 해석에 의한 파랑기진모멘

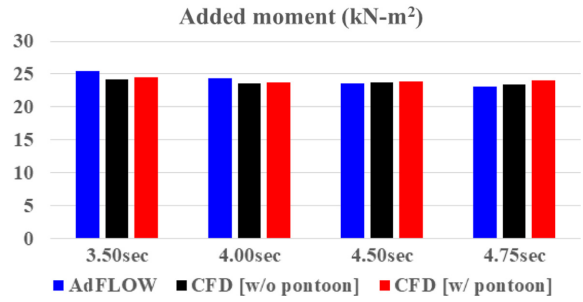


Fig. 12. Added moments of the rotor according to the wave periods (full-scale).

트는 마찬가지로 주파수영역해석과 직접 비교하였다. Fig. 14을 보면, 로터가 고정되어 있을 때, 로터 후면 폰투온에 의하여 로터의 종동요 방향 모멘트가 변화하는 것을 확인할 수 있으며, 파도주기 및 파고에 따라 그 결과들이 달라지는 것을 확인할 수 있다. Fig. 15(a)의 파랑기진모멘트를 보면, 로터 후면에 폰투온이 위치함으로써 파랑기진모멘트가 변화함을 확인할 수 있으며, 다만 Fig. 15(b)와 같이 위상각은 크게 변화하지 않는다.

Fig. 16을 보면, 폰투온 유무에 따라서 로터에 발생하는 압력의 분포가 달라짐을 확인할 수 있으며, 결국 그 압력분포의 차이로 인하여 로터의 파랑기진모멘트가 변화함을 확인할 수 있다. 즉, Ha et al.[2020]의 연구와 같이 폰투온이 없는 경우 파고 증가에 의한 로터의 고유주기 이동은 상대적으로 높은 파고에서 발생된 로터의 큰 종동요 운동변화로 인한 복원모멘트의 변화일 수 있으며, 로터

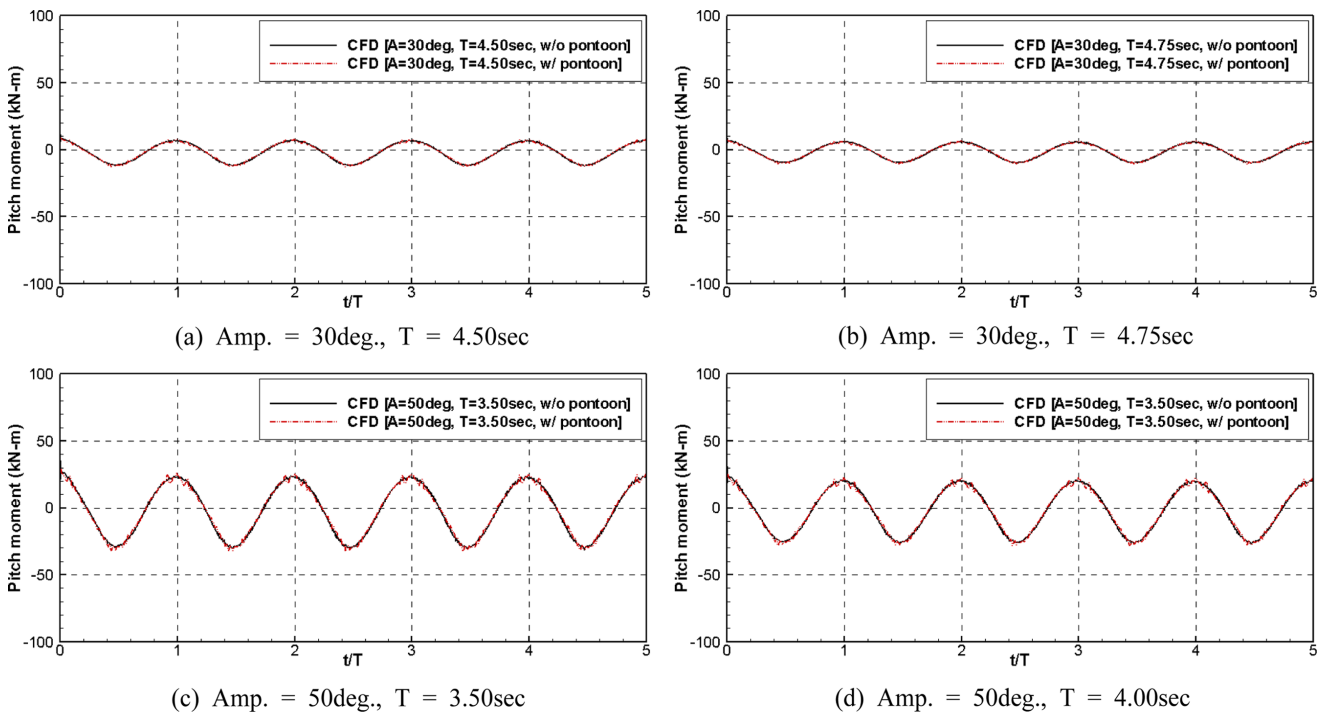
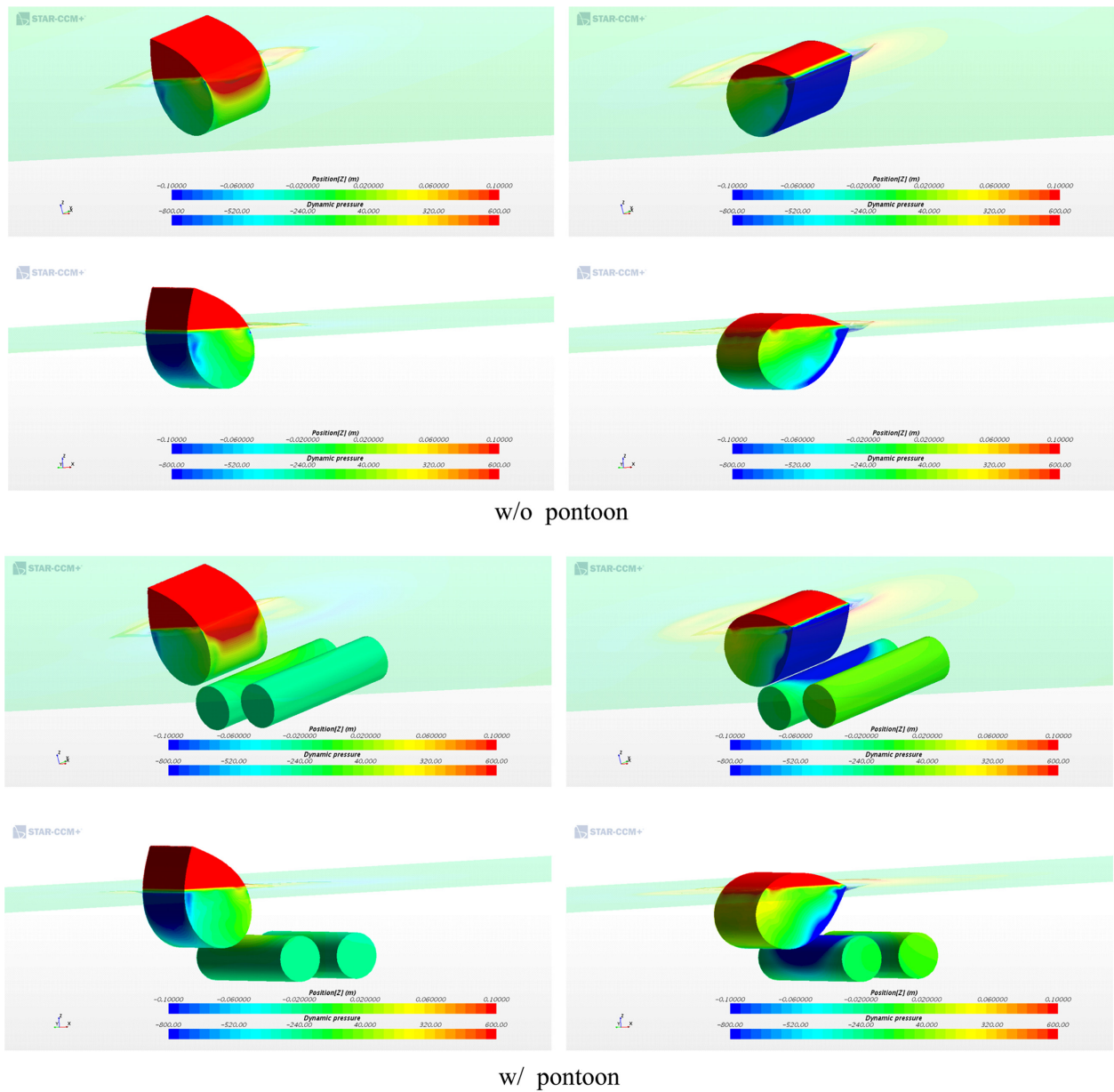


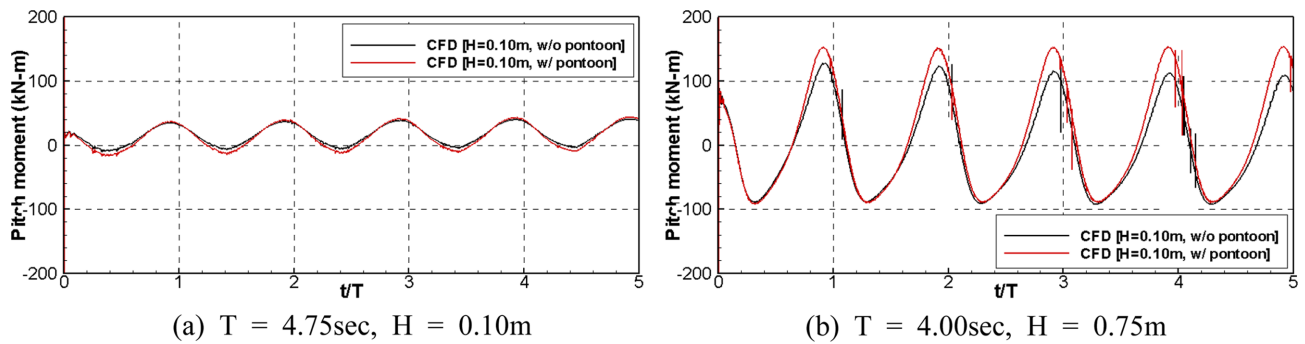
Fig. 11. Pitch moments of the rotor by the forced motion simulations (full-scale).



(a) Max. negative amplitude

(b) Max. positive amplitude

Fig. 13. Pressure contours on the rotor and the pontoons in the forced motion simulations (Amp. = 50 deg., T = 3.50sec).



(a) T = 4.75sec, H = 0.10m

(b) T = 4.00sec, H = 0.75m

Fig. 14. Pitch moments of the rotor by the fixed rotor simulations (full-scale).



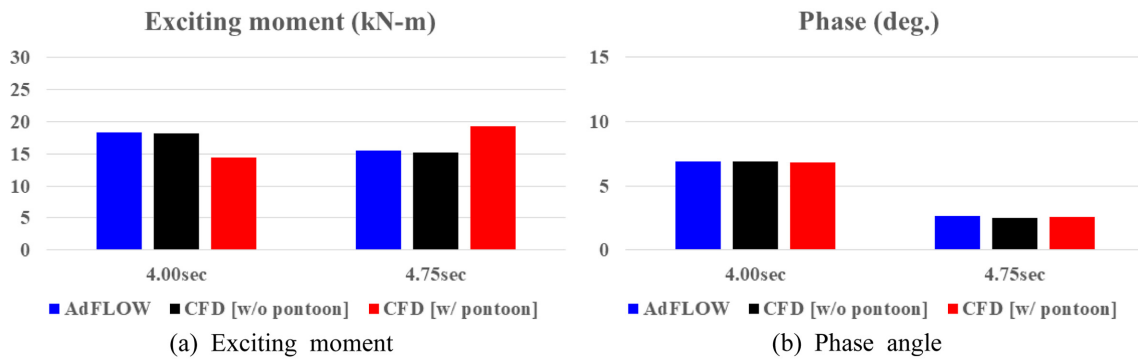


Fig. 15. Exciting moments and phase angles of the rotor according to the wave periods (full-scale).

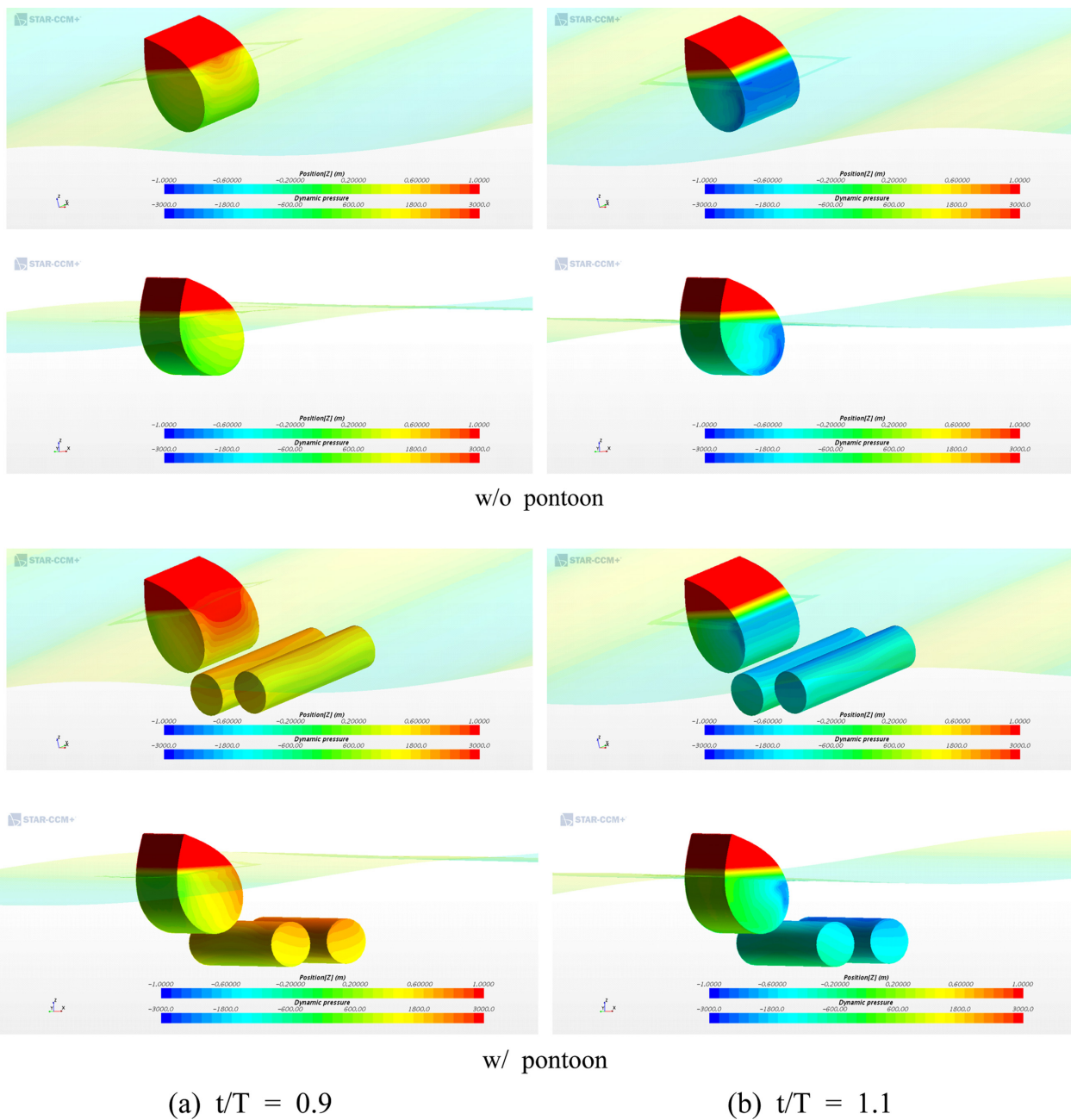


Fig. 16. Pressure contours on the rotor and the pontoons in fixed rotor simulations ( $T = 4.00$  sec,  $H = 0.75$  m).

후면에 폰투온이 위치함에 의한 보다 단주기방향으로의 로터 고유주기 이동은 로터와 폰투온 사이의 유동변화로 인한 파랑기진모멘트의 변화로 사료된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 폰투온 유무에 따른 Salter's duck 로터의 비선형 pitch 운동성능에 대한 일련의 CFD 해석을 수행하였다. 본 연구결과로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 본 연구에서의 CFD 해석결과들은 모형시험결과들과 정량적 및 정성적으로 매우 근접함을 확인하였으며, 최대오차는 파고 0.75 m에서 약 7%정도이다. 따라서 Salter's duck 로터 설계를 위하여 CFD 해석을 활용하기에 큰 무리가 없음을 확인할 수 있다.

(2) 기존 모형시험결과와 CFD 해석결과에서는 각 입사파의 파고에서 로터 후면에 폰투온이 있는 경우 로터 중동요 운동의 고유주기는 폰투온이 없는 경우와 비교하였을 때, 상대적으로 단주기 방향으로 이동한다. 또한 로터 후면에 폰투온이 있는 경우의 로터 중동요 운동은 상대적으로 단주기에서 크기 때문에 발전 측면에서 유리할 수 있다.

(3) 폰투온 유무에 따른 유체력계수에 대한 CFD 해석결과를 보았을 때, 폰투온 유무에 따른 로터 중·요의 고유주기변화와 단주기 영역에서의 로터 중동요 운동 크기의 변화는 로터와 폰투온 사이의 유동변화에 의한 부가모멘트의 영향보다 파랑기진모멘트 변화에 의한 영향이 큰 것으로 사료된다.

(4) 본 연구에서는 로터 후면의 폰투온 유무에 따른 로터의 비선형 중동요 운동을 조사하였다. 향후 각 조건에 따라 보다 다양한 파고와 입사각에 따른 CFD 해석을 수행할 예정이며, 추가적으로 PTO 시스템(Power Take-off System)을 고려한 CFD 해석을 수행할 예정이다.

## 후 기

본 연구는 선박해양플랜트연구소에서 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받은 “해상풍력 수산업 공존 방안 실증사업(PNS4260)”과 주요사업으로 수행중인 “일체형 해양그린수소 생산시스템 핵심 기술 개발(PES4801)”의 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

## References

- [1] Count, B.M., 1978, On the Dynamics of Wave-Power Devices, Proc. R. Soc. Lond. A., 363, 559-579.
- [2] Greenhow, M., Vinje, T. and Taylor, J., 1982, A Theoretical and Experimental Study of the Capsize of Salter's duck in Extreme Waves, J. Fluid Mech., 118, 221-239.
- [3] 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.
- [4] Ha, Y.J., Park, J.Y., Roh, C. and Shin, S.H., 2020, An Experimental Study for the Non-linear Motion Characteristics of an Asymmetric Rotor by Pontoons, J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy, 23(4), 192-202.
- [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] Pecher, A., Kofoed, J.P. and Marchalot, T., 2011, Experimental Study on a Rotor for WEPTOS, Aalborg University DCE Contract Report No. 110.
- [8] 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.
- [9] Rapuc, S., 2012, Numerical Study of the WEPTOS Single Rotor, Master thesis, Aalborg University, Denmark.
- [10] Salter, S.H., 1974, Wave Power, Nature, 249(249), 720-724.
- [11] 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.
- [12] Salter, S.H., 1976, Edingurgh Wave Power Project, Private Communication.
- [13] Vinje, T. and Brevig, P., 1981, Nonlinear Ship Motion, In Proc. 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Numerical Ship Hydrodynamics, Paris/.

Received 20 February 2023

Revised 27 March 2023

Accepted 29 March 2023