



[2017-12-OE-008]

# 수중체 형상에 따른 수중 조류발전장치 운동성능

조철희<sup>1)</sup> · 황수진<sup>1)</sup> · 김명주<sup>1)</sup> · 박홍재<sup>1)\*</sup>

## Dynamic Response of Tidal Current Power Device with Various Structural Configurations

Chulhee Jo<sup>1)</sup> · Sujin Hwang<sup>1)</sup> · Myeongjoo Kim<sup>1)</sup> · Hongjae Park<sup>1)\*</sup>

Received 14 August 2017 Revised 15 November 2017 Accepted 24 November 2017

**ABSTRACT** With the increased focus on renewable energy in response to the global warming problem, tidal current power (TCP), one of the ocean energy resources, is acknowledged as an alternative energy source because of its high energy density, predictability and reliability. TCP devices are classified into gravity base type, pile fixed type, and floating type. Among them, the floating type can be applied without any limitation of water depth and has a simplified supporting structure. Since the behavior of the floater has a significant effect on the total power production rate, it is essential to minimize the power production loss and optimize the system efficiency. In order to maintain the optimal incidence angle of the flow to the turbine and to support the buoys, the motion response of the tidal power system was analyzed. DNV Wadam V 4.8-01 and OrcaFlex 10.1a were respectively used for the frequency and time domain analyses. The designed TCP system had pitching and yawing fluctuation values within about 0.5°.

**Key words** Tidal current power(조류발전), Response Amplitude Operator(응답진폭연산자), Frequency domain(주파수 영역 해석), Time domain analysis(시간 영역 해석)

### Nomenclature

w : frequency  
[m] : mass matrix  
[A<sub>ij</sub>] : added mass matrix  
[C<sub>ij</sub>] : radiation damping matrix  
[k<sub>ij</sub>] : hydrodynamic spring matrix  
f : environment external force

### subscript

RAO : response amplitude operator  
TMA : texel marsen arsløe

### 1. 서론

조류발전은 타 신재생에너지원에 비해 에너지의 밀도가 높고 발전량을 정확히 예측 가능하며 날씨나 계절에 관계없이 연속적인 발전이 가능한 신뢰성 높은 에너지원이다. 특히 국내 서남해안은 지형적인 특성과 많은 섬들 사이의 좁은 수로 형성으로 인해 세계적으로 손꼽히는 부존량을 갖고 있다<sup>1)</sup>.

본 논문에서 연구하고자 하는 조류발전장치는 크게 터빈

1) Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Inha University

\*Corresponding author: hj920110@inha.edu

Tel: +82-32-890-7342

Fax: +82-32-864-5850

과 터빈의 유입유속을 증폭시키는 장치인 덕트, myring profile로 선형 설계된 부력체, 계류라인 등으로 구성되어 있다(Fig. 1). 부력체에 적용된 Myring profile은 잠수함이나 수중체 등의 설계에서 많이 적용되는 모델로써 항력을 최소화시키는 장점이 있다<sup>[2]</sup>. 수중체의 거동을 억제하며 수중체는 긴장 계류 시스템은 4점 긴장 계류 방식으로 양쪽 부력체의 끝단 중심에 고정되며 계류라인의 탄성을 이용하여 복원력을 발생시켜 수중체의 위치를 제어한다.

본 연구에서 적용된 계류식 지지구조방식은 설치 수심에 제한이 없고 착저를 위한 지지구조물이 필요없어 시공절차의 간소화가 가능한 장점이 있다. 또한 유지보수 시 회수 및 설치가 용이하여 경제성 면에서 유리하며 소형발전체에 적합하다. 하지만 자중 고정식 및 파일 고정식의 지지구조방식과 달리 구조물의 거동이 전체 발전량에 미치는 영향이 매우 크므로 발전량 손실 최소화 및 시스템 최적화에 관한 사전연구가 필수적이다.

따라서 본 연구에서는 수치 해석적 방법을 통해 터빈으로 유입되는 유동의 최적 입사각을 유지하고 수중체를 안정적으로 지지하기 위해 수중 조류발전장치의 형상에 따른 운동성능 및 계류력 해석을 수행하였다. 주파수영역 운동 해석을 통해 다양한 환경 하중 조합을 고려한 전반적인 운동 경향 분석과 수중체의 고유 운동특성인 RAO를 도출하여 최적 형상을 선정하고 선정된 형상에 대해 시간영역 운동해석 통해 공진 주파수를 회피하는 계류 시스템 설계를 수행하였다.

부유식 해양플랜트의 다점 계류 해석<sup>[3]</sup>, 계류 라인의 유체 동역학적 특성을 고려한 부유체 거동의 실험적 연구<sup>[4]</sup>, 수치 해석 및 모형실험을 이용한 수중 일점 계류식 조류 발전 장치의 운동 성능 고찰<sup>[5]</sup> 등 이미 수치 해석 및 실험을 이용한 계류 시스템 운동 해석 및 안정성 해석을 다룬 많은

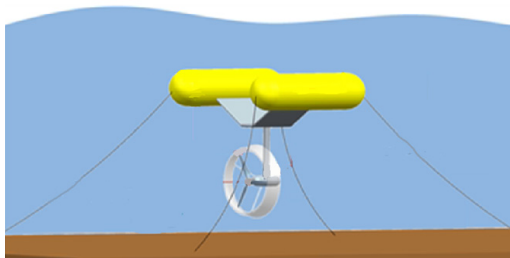


Fig. 1. Concept: platform and mooring system

연구들이 있다. 또한 신재생에너지 분야에서는 부유식 해상 풍력 터빈의 운동성능 분석이 이루어지기도 하였다<sup>[6]</sup>.

## 2. 주파수 영역 운동 해석

### 2.1 해석 조건

계류 시스템의 초기설계의 기초 단계로서 주파수영역 운동해석을 통해 수중체의 운동특성 경향 파악이 수행되었다. 수중체는 Fig. 1과 같이 기존 개념설계 단계에서 제안된 형상을 기준으로 부력체간 거리(W)를 5.2m±1m, 부력체-터빈 간 거리(H)를 4.2m±1m로 변화시키며 총 9개의 형상으로 산정하였으며 기하학적 형상이 운동응답에 미치는 영향을 파악하였다. 터빈 전방의 계류라인과 지지판에 의한 와류 발생이 터빈 효율에 영향을 끼치지 않도록 최소 폭(W)은 터빈 직경의 약 1배, 최소 높이(H)에 약 0.5m의

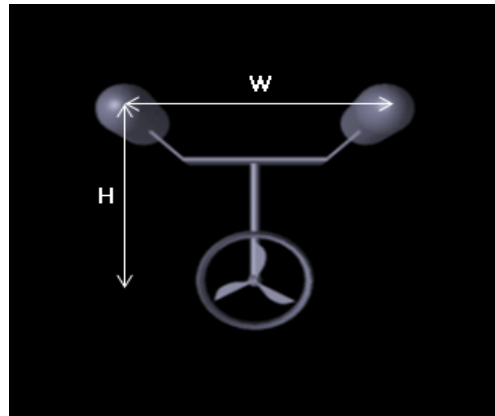


Fig. 2. Genie 64 V7.4 modelling

Table 1. Dimension of floater

Description	Value
Length [m]	6
Width (W) [m]	4.2m/5.2m/6.2m
Height (H) [m]	3.2m/4.2m/5.2m
Buoy Dia. [m]	1.3
Turbine Dia. [m]	2
Duct Dia. [m]	2.3
Weight [ton]	7.3
Buoyancy [ton]	14.5
Thickness [mm]	10

이격 거리를 설정하였다. Fig. 2와 Table 1은 각각 주파수 영역 해석에 사용된 수중체의 모델링과 제원을 나타낸다. 모델링은 상용 프로그램인 Genie 64 V7.4를 사용하였다.

Table 2는 해석에 사용된 환경 조건을 나타낸다. 설치수심은 20m로 천해영역이며 터빈의 중심이 수면으로부터 10m에 위치하도록 설정 하였다. 파향은 0°부터 180°까지 22.5°간격으로 8개, 파주기는 1초부터 30초까지 2초 간격으로 15개로 나누어 해석을 수행하였다. 수치해석은 상용 프로그램인 DNV wadam V4.8을 사용하였고 시스템의 선형화를 통해 RAO를 도출하고 9개의 형상 중 하나의 최적 형상을 선정하였다.

## 2.2 해석 결과

주파수 영역에서의 수중체의 운동방정식은 다음 식 (1)과 같다.

$$[-w^2(m + A_{ij}) - iwC_{ij} + k_{ij}]X = f \quad (1)$$

Table 3은 수중체의 폭과 높이를 변화시키며 산정된

Table 2. Environmental condition for RAO analysis

Description	Value
Water depth [m]	20
Location [m]	-10
Wave direction [deg.]	0~180
Wave period [s]	1~30

Table 3. Maximum value of RAO with different configuration

Case	W	H	Surge	Sway	Heave	Roll	Pitch	Yaw
	[m]	[m]	[m/m]	[m/m]	[m/m]	[deg/m]	[deg/m]	[deg/m]
1	4.2	3.2	4.177	5.911	0.692	0.610	0.721	0.461
2	4.2	4.2	4.178	5.920	0.686	0.612	0.914	0.746
3	4.2	5.2	4.181	5.923	0.677	0.66	1.198	1.089
4	5.2	3.2	4.180	5.907	0.690	0.955	0.817	0.465
5	5.2	4.2	4.174	5.912	0.681	0.958	1.032	0.748
6	5.2	5.2	4.173	5.908	0.672	0.962	1.241	1.095
7	6.2	3.2	4.174	5.901	0.685	1.251	0.765	0.464
8	6.2	4.2	4.166	5.892	0.676	1.255	1.082	0.749
9	6.2	5.2	4.165	5.888	0.668	1.260	1.272	1.090

case 1~9까지의 형상별 6자유도 RAO최댓값을 나타낸다. Table 3에서 볼 수 있듯이 전후동요(surge), 좌우동요(sway), 횡동요(roll)에 있어서 수중체의 폭과 높이 모두 짧을수록 작은 운동응답이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 종동요(pitch)는 수중체의 높이가 짧을수록 작은 운동응답이 발생하며 가장 운동응답이 작은 case 1은 해석 중 발생한 최대 응답값과 비교하여 약 2.1배 작은 운동응답이 발생하였다. 선수동요(yaw)는 수중체의 폭이 짧을수록 작은 운동응답이 발생하며 case 1에서 최대값과 비교하여 약 4.7배 작은 운동응답이 발생하였다. 터빈에 유입되는 에너지(P)는 식 (2)와 같고 종동요와 선수동요가 커짐에 따라 조류방향에 대한 입사각이 커져 출력이 저하되며 발전 효율에 주요한 영향을 끼친다. 따라서 안정적인 발전효율을 위하여 종동요와 선수동요의 최댓값이 제일 작은 case 1을 최적 형상으로 선정하였다.

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho A V^3 \times \cos\theta \quad (2)$$

- $C_p$  : Power coefficient
- $\rho$  : Water density [ $kg/m^3$ ]
- $A$  : Area of turbine [ $m^2$ ]
- $V$  : Current speed [m/s]
- $\theta$  : Pitch/yaw error [deg]

Fig. 3은 가장 안정적인 운동응답을 보이는 case 1의 6자유도 RAO이다. 전후동요, 좌우동요는 구조물에 작용하

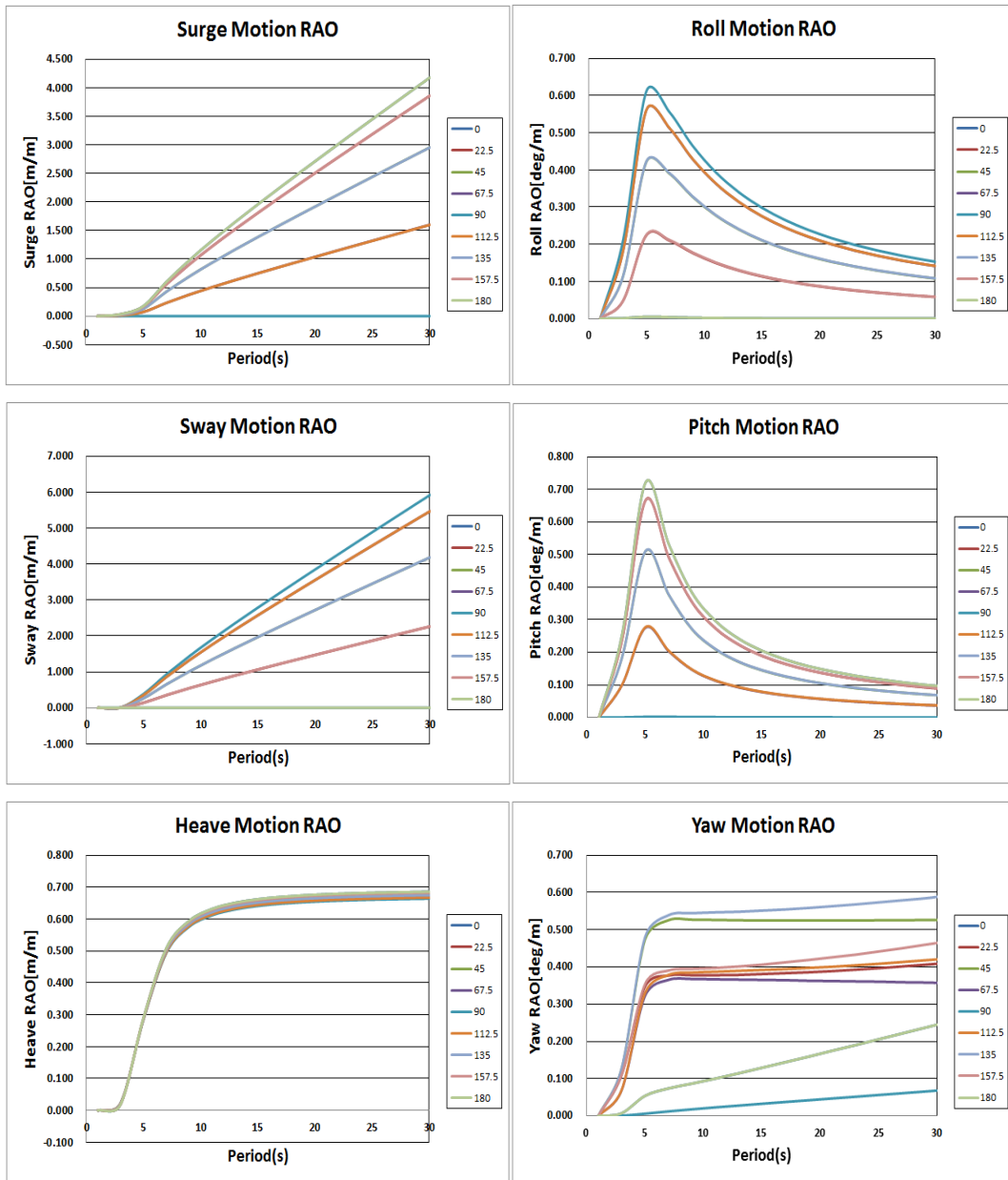


Fig. 3. Motion RAO of 6DOF

는 파주기 및 파장에 비례하여 발산하였다. 수중체의 감쇠 효과 및 천해 조건으로 인해 상하동요(heave)는 파주기 20 초에서 약 0.7에 수렴하였다. 또한 모든 파향에 대하여 같은 결과를 보이는 것으로 나타났다. 횡동요, 종동요, 선수 동요의 고유주기는 약 5초로 해당 주기의 입사파에 대하여 가장 큰 운동응답을 보이는 것을 확인할 수 있었다.

### 3. 시간영역 운동해석

#### 3.1 해석 조건

주파수영역 운동해석 결과에서 최적 형상으로 선정된 case 1에 대하여 계류 시스템이 적용된 시간영역 운동해석을 수행하였다. 해석에는 상용 프로그램인 OrcaFlex 10.1a가 사용되어 다물체 연성효과를 고려한 계류해석이 진행되었다. 계류라인은 azimuth angle 45°, hang-off angle

51.9°, fairlead point가 양 부력체 끝단 중심에 위치하도록 설정하였다. 추후 상세설계 단계에서 hang-off angle과 fairlead point 위치에 따른 매개변수 해석을 통해 최적설계가 이루어질 예정이다. 통상 해양설계와 마찬가지로 3시간 시간역 해석결과를 분석하였다. Fig. 4와 Table 4는 각각 해석에 사용된 모델링과 해석조건을 나타낸다. 조류와 파랑조건은 천해조건과 국내 연안의 해양 환경을 비교적 정확히 구현하기 위하여 power law 및 TMA 스펙트럼을

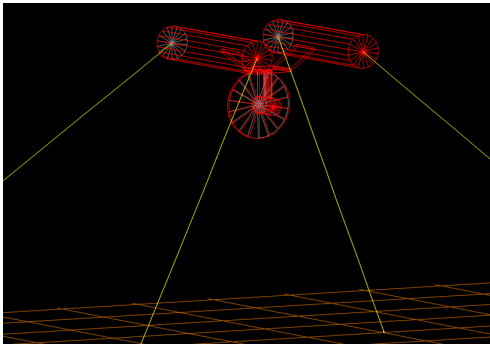


Fig. 4. OrcaFlex 10.1a modelling

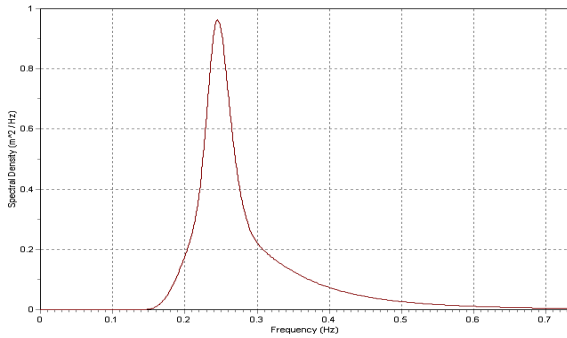


Fig. 5. TMA spectrum

Table 4. Environmental condition for RAO analysis

Description	Value
Significant wave height ( $H_s$ ) [m]	1.1
Peak wave period ( $T_p$ ) [s]	3.6
Water depth [m]	20
Current speed [m/s]	1.5
Location [m]	-10
Wave type	TMA
Trust coeff.	0.75
Drag coeff.	0.70

적용하였다. TMA 스펙트럼은 우리나라 연안에서 적용하기 가장 적합한 주파수 스펙트럼으로 알려져 있다<sup>[7]</sup>. 아래 식 (3)과 Fig. 5는 TMA 스펙트럼 수식과 형상을 나타낸다. 파랑조건은 전라남도 진도군에 위치한 울돌목 해역의 파랑조건인 유의파고 1.1m, 파주기 3.6초로 가정하였다<sup>[8]</sup>. 터빈의 추력계수 및 부력체의 항력계수는 각각 0.75, 0.7로 설정하였으며 조류속은 설계유속 1.5m/s 로 적용하였다.

$$S_{TMA}(f) = B_J H_{1/3}^4 T_p^4 f^{-5} \exp[1.25(T_p f)^{-4}] \gamma^{\exp[-(T_p f - 1)^2 / 2\sigma^2]} \Phi_K(w_h) \quad (3)$$

여기서

$$- B_J = \frac{0.0624}{0.230 + 0.0336\gamma - 0.185(1.9 + \gamma) (1.094 - 0.01915\ln\gamma)}$$

$$- T_p \approx \frac{0.0624}{1 - 0.132(\gamma + 0.2)^{-0.559}}$$

$$- \sigma = \begin{cases} \sigma_a \approx 0.07, & f < f_p \\ \sigma_b \approx 0.09, & f > f_p \end{cases}$$

$$- \Phi_K(w_h) = \begin{cases} 0.5w_h^2 & \text{for } w_h < 1 \\ 1 - 0.5(2 - w_h)^2 & \text{for } 1 < w_h \leq 2 \\ 1 & \text{for } w_h > 1 \end{cases}$$

$$- w_h = 2\pi f(h/g)^{1/2}$$

여기서  $T_p$ 는 침두주기,  $h$ 는 수심,  $g$ 는 중력가속도이며  $\gamma$ 는 침두 증대계수로서 스펙트럼 침두의 뾰족한 정도를 나타낸다.

본 연구에서 적용된 계류 방식은 4점 긴장 계류 방식으로 16mm 와이어가 사용되었다. 이는 초기 설계 단계에서 보수적으로 채택한 것으로, 추후 상세설계 단계에서 계류 라인의 비선형성, 경제성 등을 고려하여 보다 자세한 설계가 이루어질 예정이다.

### 3.2 해석 결과

다음 Fig. 6은 수중체의 3시간 시계열 데이터이다. Fig. 6(a), (b)는 발전량에 직접적인 영향을 미치는 수중체의 종동요 및 상하동요 운동 데이터이다. 긴장 계류시스템으로 고정되어 최대 종동요 0.98°, 상하동요 0.028m로 안정적



인 거동이 발생하였다. Fig. 5(c)는 동일 시간영역에서의 계류라인에 작용하는 시계열 하중 데이터를 보여준다. 위 데이터는 4개의 계류라인 중 정적 및 동적 하중이 최대로 발생하는 전방에 위치한 line2의 하중 데이터이다. 정적하중은 약 41.9kN이 발생하였으며 약 3kN의 파랑에 의한 동적하중이 발생하였다. 수중체는 수심 약 10m에 위치하고 있어 비교적 적은 파랑 동적하중이 발생한 것으로 판단된다. 공진의 발생 가능성을 검토하기 위해 계류설계 이후 모드해석을 수행하였다(Table 5). 5개의 저차모드(mode1~

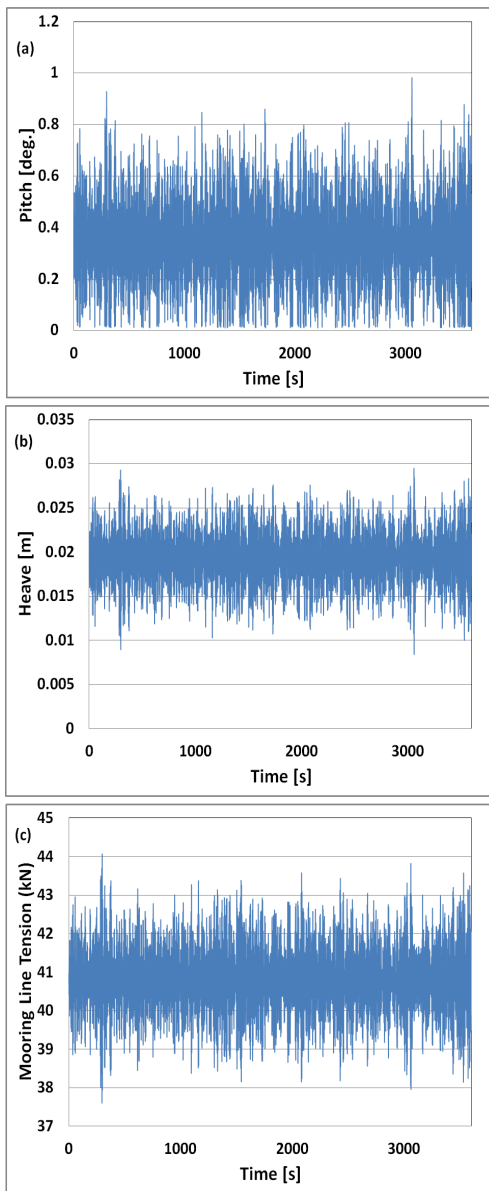


Fig. 6. Time domain plots of (a) device pitch, (b) device heave, (c) mooring line tension

Table 5. Mode analysis results

Mode	Motion	Time [s]
1	Yaw	16.1
2	Roll	11.5
3	Pitch	11.5
4	Heave	1.29
5	Sway	1.24

Table 6. Maximum value of motion

Motion response	Value [m, deg]
Surge	0.013
Sway	7.63E-09
Heave	0.030
Roll	1.15E-14
Pitch	0.371
Yaw	3.19E-14

Table 7. Mooring tension analysis results

Mooring line tension	Min	Max	Mean	Std.Dev.
Line1 [kN]	35.6	41.9	38.7	0.8
Line2 [kN]	38.8	45.0	42.0	0.8
Line3 [kN]	38.9	45.0	42.0	0.8
Line4 [kN]	35.5	41.8	38.7	0.8
Allowable Tension [kN]	162.1			

mode5)의 고유주기를 확인한 결과 모든 운동은 해석에 적용된 파스펙트럼의 고유주기인 3.6초를 회피한 안정적인 고유주기를 갖는 것을 확인하였다. Table 6은 3시간 시간역에서의 수중체의 운동 최댓값이다. 수중체의 3시간 시간역에서의 운동의 최댓값은 병진운동에서는 약 0.03m, 회전운동에서는 0.4°이하로 모두 안정적으로 위치제어 안정성을 확보하였다.

계류라인에 작용하는 하중의 해석 결과는 아래 Table 7에 나타내었다. 계류라인에 작용하는 최대 하중 또한 45kN으로 16mm 와이어의 허용하중인 162.1kN과 비교하여 3.60의 안전계수를 확보함을 확인하였다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 수중체 형상에 따른 수중 조류발전장치의

운동성능 파악과 계류를 포함하는 전체 시스템의 안정성 평가가 이루어졌다. 주파수 영역에서의 고유 운동성능분석을 통해 최적 형상을 선정하였으며 선정된 형상에 대한 시간 영역해석을 통해 계류력 해석 및 계류시스템 설계가 이루어졌다. 계류 설계된 수중 조류발전장치는 병진운동 0.03m, 회전운동 0.4° 이하의 동적거동 안정성을 보였으며 계류라인에 작용하는 최대하중 또한 45kN으로 16mm 와이어의 허용하중 162.1kN과 비교하여 3.60의 안전계수를 확보함을 확인하였다. 따라서 본 연구를 통하여 국내 천해지역에 수중 계류식 조류발전장치의 안정적인 적용이 가능성이 확인되었다.

## 감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20163030071850).

이 논문은 2015년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(해양에너지 융복합 인력양성).

## References

- [1] Jo C.H., Lee K.H., Cho B.K., Hwang S.J., 2016, “Resource Assessment of Tidal Current Energy Using API in Korea”, *Journal of The Korean Solar Energy Society* Vol.36, No. 1, 75-81.
- [2] Myring, D. F., 1976, A theoretical study of body drag in subcritical axisymmetric flow. *The Aeronautical Quarterly*, 27(3), 186-194.
- [3] Park J.B., Kim K.H., Kim K.S., Ko D.E., 2013, “Comparison of Fatigue Damage Models of Spread Mooring Line for Floating Type Offshore Plant”, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol.27, No.5, 63-69.
- [4] Yang W.S., 2007, “Hydrodynamic Analysis of Mooring Lines Based on Optical Tracking Experiments”, Texas A&M University, Ph.D. thesis,
- [5] Jo C.H., Park H.J., Cho B.K., Kim M.J., 2017, “Investigation of Motion of Single Point Moored Duct-type TCP System by Both Numerical and Experimental Method”, *Journal of Korean Hydrogen And New Energy Society*, Vol.28, No.2, pp.212-219.
- [6] Shin H.K., Kim K.M., 2011, “Motion Analysis of 5-MW Floating Offshore Wind Turbine”, *J. Ocean Eng. Technol.*, Volume 25, Issue 5, pp.64-68.
- [7] Suh K.D., Kwon H.D., Lee D.Y., 2008, “Statistical Characteristics of Deepwater Waves along the Korean Coast”, *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol.20, No.4, pp.342-354.
- [8] Ko K.O., Lee K.H., Park C.B., Jo C.H., 2016, “Design of Supporting Structure for Tidal Current Power Generation Using Tidal Bladed”, *Journal of Coastal Disaster Prevention*, Vol.3, No.3, pp.107-121.
- [1] Jo C.H., Lee K.H., Cho B.K., Hwang S.J., 2016,