Trans. of Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 28, No. 2, 2017, pp. 212~219
DOI: https://doi.org/10.7316/KHNES.2017.28.2.212

KHNES
pISSN 1738-7264 • eISSN 2288-7407

수치 해석 및 모형실험을 이용한 수중 일점 계류식 조류발전 장치의 운동 성능 고찰

조철희 · 박홍재 · 조봉근 · 김명주†

인하대학교 조선해양공학과

Investigation of Motion of Single Point Moored Duct-type TCP System by Both Numerical and Experimental Method

CHUL HEE JO, HONG JAE PARK, BONG KUN CHO, MYEONG JOO KIM†

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University, 100 Inha-ro, Nam-gu, Incheon 22212, Korea

†Corresponding author : mj_kim@inha.edu

Received 30 March, 2017
Revised 20 April, 2017
Accepted 30 April, 2017

Abstract >> As an environmental pollution and global warming due to an excessive carbon emission are intensified, the importance of renewable energy is in rise today. TCP (Tidal Current Power), one of the renewable energy sources, generates electricity by converting kinetic energy of current into rotational energy of turbine. Also the TCP has a great advantages of predictability and reliability. Because the generating power is proportional to cubic of stream velocity, amplifying current speed by applying duct is highly effective to increase the generating power. SPM (Single Point Mooring) can be applied for the weather vane with various current direction and also augments generating power of the system. In addition, simple installation and retrieval could be a merit of SPM system. By combining duct and SPM, TCP system for relatively low-speed-current and shallow water region can be feasible and economical. In this study, single point moored duct-type TCP system was designed and the motion of submerged structure was investigated in both numerical and experimental method. DNV wadam V4.8-1 and OrcaFlex 10.0a were used for the frequency and time domain motion analysis of system respectively. Duct model scaled by 0.05 of Froude conformity ratio and CWC (Circulate Water Channel) are used for experiment.

Key words : Mooring design(계류 설계), Tidal Current Power(조류발전), Single point mooring(일점계류), Model test(모형시험)

2017 The Korean Hydrogen and New Energy Society. All rights reserved.

1. 서 론

최근 조류발전은 환경 훼손을 최소화하면서 에너지 고갈 문제를 해소할 수 있는 대체에너지로 각광받고 있다. 조류발전은 여타 신재생에너지원과는 차별적으로 발전량이 예측 가능하며 높은 신뢰성을 갖는 것이 특징이다. 조류의 흐름 에너지를 터빈의 회전 에너지로 바꾸어 전력을 생산하는 방식이며 특히 한국의 서남해안에 세계적으로 손꼽히는 부존량을 갖고 있다[1]. 이러한 장점으로 인해 덕트를 적용한 수평축 터빈의 실험적 성능 검증[2], 덕트 디퓨저 각도에 따른 조류 터빈의 성능 연구[3] 등 실험 및 수치적 방법으로 덕트를 적용한 수평축 조류 터빈에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

조류발전을 위해서는 강한 조류가 필수적이며 통상적으로 유속 1.0 m/s 이상의 조류가 발생하는 지역에 조류발전 장치를 설치할 수 있다. 하지만 덕트를 적용함으로서 유속을 증폭시킬 수 있고 상대적으로 낮은 유속이 발생하는 지역에 조류발전을 적용할 수 있다[4].

사전연구에서 설계된 유선형을 갖는 조류발전용 덕트는 표면에 형성된 유선형을 이용하여 덕트 전반부에서는 층류를, 후반부에서는 난류를 유도하여 덕트 후단에서의 압력 감소를 발생시키고 흡입효과를 이용해 내부 유속을 증폭시킬 수 있다[5]. 본 연구에서는 기 설계된 유선형을 갖는 덕트에 일점 계류 방식을 적용하여 구조물을 지지하고 운동 성능을 평가하였다.

계류 시스템은 계류삭의 자중 및 탄성을 이용하여 복원력을 발생시키고 부유식 구조물의 위치를 제어하는 지지구조 방식이다. 본 연구에서는 낮은 속도의 조류가 발생하는 수심 30 m 가량의 근해에 적용 가능한 일점계류식 조류발전 장치를 구상하였으며 대상 구조물의 RAO (Response Amplitude Operator)를 도출하고 일점 계류 시스템의 초기 설계를 진행하였다. 계류된 수중체의 주파수영역 운동해석 기법에 대한 연구[6], 계류삭의 유체 동역학적 특성을 고려한 부유체의 실험적 연구[7] 등 이미 수치 및 실험적 방법을 통한 많은 계류 시스템 운동해석 및 설계가 이루어진바 있다. 또한 신재생에너지 분야에서는 부유식 해상 풍력 플랫폼의 계류 시스템 설계가 이루어지기도 하였다[8].

일점 계류 시스템은 간단한 설치 및 회수 작업과 변화하는 조류 방향에 대한 수동 자세제어 성능 등의 장점을 가져 다양한 해양 환경에서 지지방식으로 널리 이용되고 있다. 또한 수심 30 m 이하의 해양 환경에서도 고정식 지지구조 방식과 비교하여 뛰어난 경제성을 가지는 것으로 나타났다[9]. 따라서 본 연구에서는 수중 덕트형 조류발전 장치의 지지방식으로서 일점 계류법을 제안하였으며 패널기법 및 모리슨 방정식을 이용한 덕트의 RAO 해석과 계류 시스템의 시간영역 운동해석이 이루어졌다. 해석에는 DNV Wadam V4.8-1과 OrcaFlex 10.0a가 사용되었다.

2. 덕트 운동 해석

2.1 덕트 제원

덕트 내부 유속은 조류발전 장치의 발전량 증대를 위해 필수적이며 덕트 설계는 터빈, 적용해역의 환경조건 등을 고려하여 적절히 설계되어야한다. 선행 연구에서 설계된 유선형 덕트는 후단에서 유체 입자의 박리를 유도하고 와류를 발생시켜 덕트 후면에서의 압력 강하를 유발시킨다. 설계된 덕트는 최대 120%의 유속 증가 효과를 보였으며[5] Table 1은 해석에 사용된 덕트의 제원을 나타낸다.

Table 1. Dimension of duct structure

Description	Specification
Inner diameter	2 m
Outer diameter	4 m
Length	4.9 m
Mass with ballast water	52.4 ton
Buoyancy	55.5 ton

2.2 주파수 영역 운동 해석

계류 시스템의 초기 단계로서 수중체의 고유 운동 특성 파악이 이루어졌다. 해양 환경의 선형화를 통하여 RAO로 대표되는 주파수 영역 운동 특성을 얻을 수 있었다. 해석에는 DNV Wadam V4.8-1이 사용되었다. Fig. 1 및 Table 2는 각각 해석에 사용된 덕트 고정 좌표계 및 환경 조건을 나타낸다.

Figs. 2~7까지의 해석 결과에서 확인할 수 있듯이 surge, sway는 구조물에 작용하는 파 주기 및 파향에 지배적이었다. 같은 맥락으로 heave는 파 주기에 영향을 받았지만 모든 파향에 대하여 같은 결과를 보이는 것으로 나타났다. 또한 heave RAO의 최대값이 1에 수렴하지 않는 것은 수중체의 감쇠효과 및 낮은 수심에 기인한 것으로 파악된다. Roll의 경우 x-축에 대하여 대칭적인 질량분포를 갖는 덕트의 특성상 불규칙한 양상의 운동을 보였지만, 매우 작은 값으로 전체 시스템 안정성에 큰 영향을 주지 않았다. Pitch와 yaw는 덕트 내부로의 안정적인 조류 유입을 위하여 가장 중요한 운동 성분이며 6초 주기의 입사파에 대해 가장 큰 운동응답을 보이는 것으로부터 약 6초의 감쇠 고유 주기를 갖는 것으로 추정되었다.

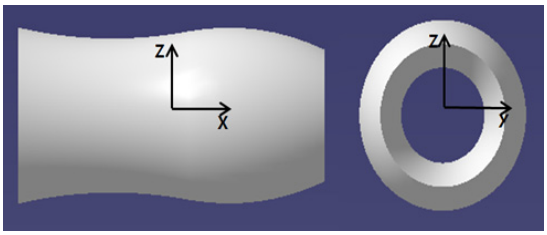

Fig. 1. Duct-fixed Coordinate system

Table 2. Environmental condition for RAO analysis

Description	Specification
Water depth (m)	30
Location (m)	-10 from water level
Wave direction (deg.)	0~180
Wave period (s)	2~30
Wave length (m)	6.24~503

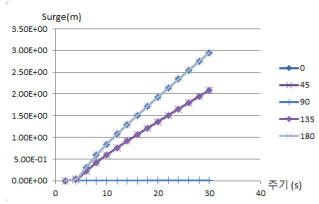

Fig. 2. Surge RAO

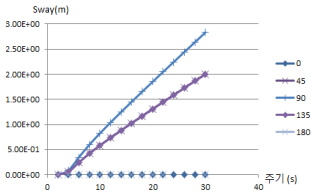

Fig. 3. Sway RAO

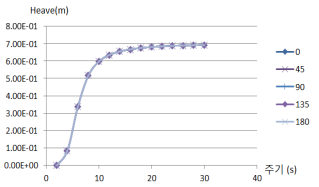

Fig. 4. Heave RAO

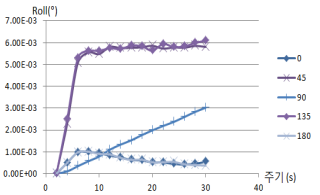

Fig. 5. Roll RAO

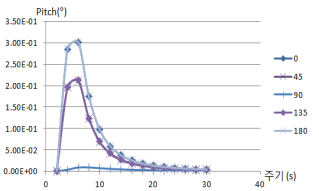

Fig. 6. Pitch RAO

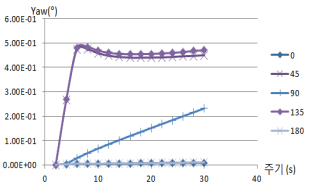

Fig. 7. Yaw RAO

3. 시간 영역 운동 해석

3.1 해석 모델

상용코드 OrcaFlex 10.0a를 이용한 계류 시스템 시간 영역 운동해석이 이루어졌다. 해석에 사용된 조류와 파도는 천해 영역의 해양 환경을 보다 정확히 구현하기 위하여 power law 및 TMA (Texel MARSEN ARSLOE) 파 스펙트럼이 사용되었다(식 (1), 식 (2)).

$$S = S_b + (S_f - S_b)\left(\frac{Z - Z_b}{Z_f - Z_b}\right)^{\frac{1}{7}} \quad (1)$$

$$S_{TMA}(\omega) = \alpha g^2 \omega^{-5} \exp\left[-\frac{5}{4}\left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^4 + (\ln\gamma)\exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\omega-\omega_p}{\alpha(\omega)\omega_p}\right)^2\right)\right] \quad (2)$$

- S_b : Current speed at the sea bed
- S_f : Current speed at the water level
- Z_b : Water depth
- L_P : Wave length with peak period
- H_S : Significant wave height
- εε : $\frac{H_S}{4L_P}$
- α : $16\pi^2(\varepsilon\varepsilon)^2$
- γ : $6614(\varepsilon\varepsilon)^{1.59}$

파랑 조건으로 유의파고 1.1 m, 파주기 3.6초를 가정하였다[10]. 아래 Fig. 8과 Fig. 9는 각각 수심에 따른 조류속 분포도와 파 스펙트럼을 나타낸다.

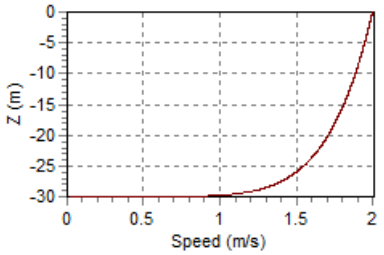

Fig. 8. Vertical current profile

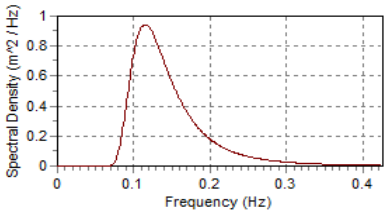

Fig. 9. TMA wave spectrum

덕트는 OrcaFlex 10.0a 상에서 제공하는 6D buoy 모델을 이용하여 구현되었으며 모리슨 방정식을 통해 조류력 및 파력에 의한 덕트의 운동을 구현하였다. 해석에 사용된 덕트 모델과 항력 및 관성력 계수를 아래 Fig. 10과 Table 3에 나타내었다. 계류삭은 24 mm wire를 사용하였으며, 이는 설계초기 단계에서 보수적으로 산정한 것으로, 추후 상세설계 단계에서 계류선의 비선형성, 경제성 등을 고려하여 보다 자세한 설계가 이루어질 것이다. 계류선은 총 11개의 line segment 성분으로 구성되었으며, 23,300 kN의 axial stiffness를 가지고 수중 덕트의 운동을 제어한다. 페어리드가 덕트 입구에 위치하는 경우 SPM의 weather vane 효과를 최대화할 수 있지만 덕트 무게 중심 및 부력 중심과 평형을 이루는 복원력의 자세 유지 안정성 측면에서는 불리한 조건이다. 반면 페어리드가 덕트 중앙에 위치할수록 weather vane 성능 측면에서는 제한적인 조건이지

Table 3. Specification of 6D buoy model for TCP duct

Segment no.	Outer dia. (m)	Inner dia. (m)	length (m)	Normal area (m^2)	Axial area (m^2)	Normal drag coeff.	Axial drag coeff.
1	2.77	2.0	0.5	1.4	2.9	0.7	0.7
2	3.2	2.0	0.5	1.6	2.0	0.7	0.7
3	3.7	2.0	0.5	1.9	2.7	0.7	0.7
4	3.9	2.0	0.8	3.1	1.2	0.7	0.7
5	3.7	2.0	0.5	1.9	0.0	0.7	0.7
6	3.6	2.0	1.5	5.4	0.0	0.7	0.7
7	3.4	2.0	1.2	4.1	0.0	0.7	0.7
8	3.5	2.0	0.9	3.0	0.0	0.7	0.7
9	3.7	2.0	1.0	3.7	0.0	0.7	0.7
10	4.0	2.0	0.5	2.0	0.6	0.7	0.7

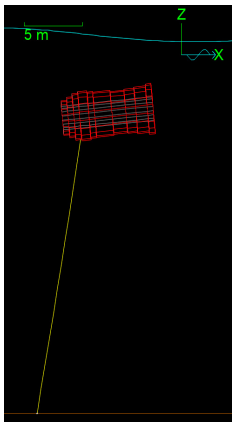

Fig. 10. 6D buoy model on OrcaFlex

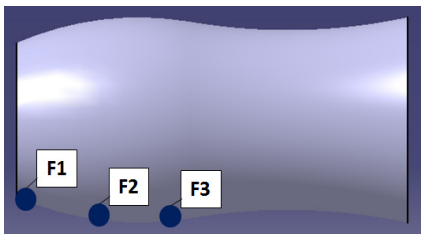

Fig. 11. Fairlead points

만, 보다 안정적으로 자세를 유지할 수 있는 장점을 가진다. 이러한 두 가지 측면에서 최적 덕트 페어리드를 도출하기 위하여 Fig. 11에 보인 바와 같이 덕트 입구로부터 0 m, 1.5 m, 3 m의 거리를 가지고 총 3가지로 산정되었다. 수치 해석 및 수리모형 실험에서 각각의 페어리드에 따른 운동성능을 비교 분석하였다.

3.2 해석 결과

F1, F2, F3는 각각 페어리드가 덕트 입구로부터 0 m, 1.5 m, 3.0 m인 경우이며, 유속 1.0~2.5m/s에 대하여 6자유도 운동의 최대값을 정리하였다(Table 4).

운동 응답은 파도에 의한 pitch가 가장 두드러졌으며 평균 -4.5°의 최대값을 가지는 것으로 나타났다. Surge는 유속에 따라 증가하는 항력과 비례하는 것이 확인되었다. 하지만 강한 유속 및 항력이 구조물에 작용할수록 파도에 의한 동적 surge 변화는 감

Table 4. Numerical analysis result

	F1				F2				F3
Current (m/s)	1.0	1.5	2.0	2.5	1.0	1.5	2.0	2.5	2.0
Surge (m)	3.6	6.8	11.0	13.5	1.6	3.7	6.1	8.5	-7.9
Sway (m)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.2
Heave (m)	-1.3	0.6	-3.4	-5.1	0.7	-0.8	-1.3	-2.0	1.7
Roll (°)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.2
Pitch (°)	-7.1	-4.2	-3.8	-2.7	-5.5	-4.4	-4.1	-4.3	-90.0
Yaw (°)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-51.5

Table 5. Surge response

	F1				F2				F3
Current (m/s)	1.0	1.5	2.0	2.5	1.0	1.5	2.0	2.5	2.0
Surge (m)	3.6	6.8	11.0	13.5	1.6	3.7	6.1	8.5	-7.9
Dynamic surge (m)	0.9	0.7	0.5	0.4	0.6	0.4	0.4	0.4	2.3

소하는 것으로 나타났다(Table 5). 입사각 0°로 작용하는 해양 하중으로 인해 sway, roll, yaw는 나타나지 않았으며, 이는 앞서 수행된 주파수영역 운동해석결과와 일치한다.

조류 발전용 덕트의 경우 덕트 내부로 안정적인 흐름을 유도하기 위하여 pitch가 가장 중요한 운동성분이며 조류속 분포가 수심에 따라 감소하므로 heave 역시 발전량 증가에 매우 중요한 요소이다. F2는 F1과 비교하여 비슷한 양상의 pitch 운동을 보였지만, 대체적으로 더 작은 heave 운동으로 인해 유속이 강한 수심에 덕트를 위치시킬 수 있었다. F3의 경우 덕트는 불안정한 자세유지성능을 보였다.

아래 Table 6은 계류선에 작용하는 하중의 시간영역 해석 결과이다. 하중의 최대값은 141 kN으로 24 mm 와이어의 허용하중 402 kN과 비교하여 약 3배 작은 값임을 확인하였다.

Table 6. Mooring line tension at fairlead

Description	Value
Mean	74.1 kN
Std. Dev.	30.3
Max	141.0 kN

4. 수리 모형 실험

4.1 실험 설계

터빈과 덕트로 인한 난류 효과를 확인하기 위하여 덕트 수평자세 유지 실험을 진행하였다. 비점성 유체의 파도 포텐셜을 통해 얻어진 운동해석결과는 난류의 영향을 포함하지 않지만, 터빈 및 유선형 덕트는 유체의 경계층을 산정하고 점성 효과를 이용하여 설계된 기계장치이므로 시스템의 운동 성능을 보다 정확히 고찰하기 위해서 수리모형실험이 필수적이다. 실험에는 2차원 회류수조가 사용되었으며 상사비 0.05와 프루드 상사법이 사용되었다. 환경하중으로 조류력만을 고려하였으며 Table 7에 덕트 실험 모델의 제원을 나타내었다.

계류선의 길이-직경 비를 통일함으로서 합리적인 범위의 항력 계수를 얻을 수 있었다. 아래 Fig. 12 및 Fig. 13은 각각 계류선 항력 계수 산정에 사용된 레이놀즈 수-항력 계수 그래프와 실험모델이다.

Table 7. Specification of experimental duct system

Description	Real scale	Lab. scale
Conformity ratio	0.05	
Length (m)	8.0	0.4
DO (m)	4.0	0.2
DI (m)	2.0	0.1
Weightair	48.3 tonf	6.06 kgf
Buoyancy	55.5 tonf	6.41 kgf
Design current speed (m/s)	2.0	0.4
Re_line	4.19E04	3.99E02
CD_line	1.29	1.29
Fairlead point (m)	F1	0.0
	F2	1.5
	F3	3.0

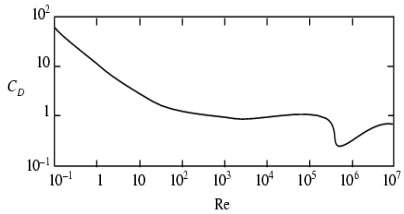

Fig. 12. Drag coefficient with Reynolds number

Fig. 13. Experimental model of turbine(left) and duct(right)

4.2 실험 결과

실험 결과, 아래 Table 8에 나타낸 것과 같이 유속이 증가할수록 작용 항력이 증가하여 발생하는 surge와 heave가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 수치 해석에서와 마찬가지로 F3의 경우 수중 덕트의 수평자세 유지가 불가능한 것으로 나타났다. Fig. 14는 설계유속(0.4 m/s)에서 시간에 따른 F2

Table 8. Experimental result

	F1				F2				F3
Current (m/s)	2E-1	3E-1	4E-1	5E-1	2E-1	3E-1	4E-1	5E-1	4E-1
Surge (m)	5E-3	2E-2	5E-2	7E-2	3E-3	5E-3	2E-2	9E-2	2E-1
Sway (m)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Heave (m)	7E-1	1E0	-1E0	3E0	4E-1	1E0	2E0	4E0	-2E1
Roll (°)	7E-1	1E0	-1E0	3E0	4E-1	1E0	2E0	4E0	-2E1
Pitch (°)	1E0	9E-1	1E0	-2E0	6E-1	8E-1	-2E0	3E0	-1E1
Yaw (°)	3E0	3E0	4E0	4E0	-2E0	-1E0	2E0	3E0	-6E1

yaw 응답을 나타낸다. 그림에서 확인할 수 있듯이 구조물은 조류만 작용하는 정적 상태에서도 주변 난류로 인해 시간에 따라 변화하는 응답을 보였다. 하지만 전체 실험 케이스에서 발전량 및 수평 자세 안정성에 영향을 주는 회전운동(pitch, yaw)의 시간에 따른 변화는 약 5° 내외로, 유선형을 가지는 덕트 및 조류발전 터빈의 난류를 포함하는 통합 수평 자세 유지 성능은 안정적임을 확인할 수 있었다.

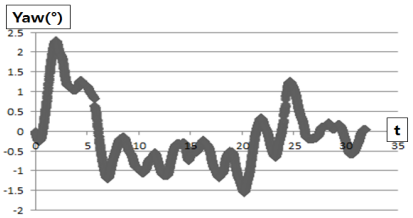

Fig. 14. Yaw experimental result

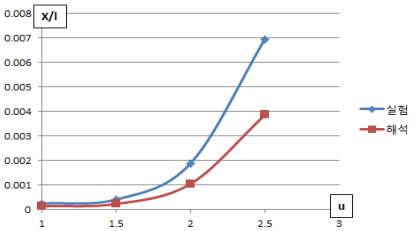

Fig. 15. Comparison of numerical analysis and experimental result

수치 해석과 수리모형 실험을 비교하기 위하여 surge 응답을 계류선 길이로 나눈 무차원 변수를 사용하였다. 보정 계수로서 0.09를 사용하였는데, 이는 각각 해석과 실험에서 사용된 계류선의 axial stiffness의 비율이다. 터빈 및 덕트에 작용하는 난류의 영향이 유속에 비례하여 증가하면서 해석과 실험간 오차가 증가하는 것을 확인하였다(Fig. 15). 또한 유체의 점성력과 관성력의 비율을 해석에서와 동일하게 적용시키지 못한데서 기인한 스케일 효과 역시 오차의 원인으로 파악된다. 하지만 유속이 증가함에 따라 발생하는 응답의 경향이 유사하며 이는 계류 시스템의 복원력 메커니즘이 적절히 구현되었음을 나타내므로 해석과 실험을 비교하여 시스템의 통합 수평자세유지성능을 평가할 수 있었다.

5. 결 론

일점계류 방식을 적용한 10 kW급 덕트형 조류발전장치의 운동 성능 분석이 본 연구를 통하여 이루어졌다. 수치 해석과 실험을 이용하여 설계된 시스템의 거동 특성을 분석하였으며 다양한 속도의 조류와 TMA 파 스펙트럼을 이용한 파랑 조건이 이용되었다.

수리 모형실험을 통해 터빈 및 유선형 덕트의 난류효과를 포함한 시스템의 통합 수평 자세 유지 성능이 평가되었고 수치 해석을 통하여 파도를 포함하는 외력에 대한 시스템의 동적 거동을 평가하였다. 실험 및 해석결과 난류의 영향은 유속과 비례하여 나타났으며 설계된 수중 덕트 시스템은 부여된 환경 조건하에서 안정적인 자세를 유지하는 것으로 나타났다. 특히 조류발전장치의 발전량에 직접적인 영향을 주는 heave, pitch, yaw의 운동 응답을 바탕으로 페어리드가 덕트 입구로부터 1.5 m에 위치한 F2 케이스를 최적의 페어리드로 선정하였다.

결론적으로 단일 라인을 이용한 일점계류 방식은 수중 덕트형 수평축 조류발전장치를 안정적으로 지지할 수 있으며 발전량을 최대화시킬 수 있는 수평 자세 유지 성능 확보가 가능하다. 따라서 비교적 넓은 환경에 적용 가능한 실용성과 설치 및 유지보수의 경제성으로 인해 추후 조류발전시스템을 위한 지지구조방식으로서 활용될 수 있다.

후 기

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제이다(20133030000260).

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

References

1. D. S. Byun, E. H. Deirdre, and W. J. Jeong, "Tidal Current Energy Resources off the South and West Coasts of Korea: Preliminary Observation-Derived Estimates", Energies, Vol. 6, No. 2, 2013, pp. 566-578.
2. C. H. Jo, K. H. Lee, J. Y. Yim, and K. S. Che, "Performance Evaluation of TCP Device with Upstream Duct Installation", Proceeding of the Korean Association of Ocean Science and Technology Societies Conference, 2009, pp. 77-80.
3. P. Khunthongjan and A. Janyalertadun, "A study of Diffuser Angle Effect on Ducted Water Current Turbine Performance Using CFD", Songklanakarin Journal of Science and Technology, Vol. 34, No. 1, 2012, pp. 61-67.
4. H. C. Roger, "A sleeper awakes : tidal current power", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 7, 2003, pp. 515-529.
5. C. H. Jo, K. H. Lee, S. J. Cho, and C. H. Goo, "Performance of the Duct Implemented in Single Point Moored TCP System with Various Diffuser Angles", Proceeding of Korean Association of Ecean Science and Technology Societies Conference, 2015.
6. C. L. Cunff, S. Ryu, J. M. Heurtier, and A. S. Duggal, "Frequency-domain Calculations of Moored Vessel Motion Including Low Frequency Effect", Proceeding of the 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2008, pp. 689-696.
7. W. S. Yang, "Hydrodynamic Analysis of Mooring Lines Based on Optical Tracking Experiments", Texas A&M University, Ph.D. thesis, 2007.
8. K. Sachithanathamoorthy, "Design and analysis of tension leg anchor systems for floating windmills", Norwegian University of Science and Technology, Master's thesis, 2012.
9. C. H. Jo, Y. H. Rho, D. Y. Kim, and M. J. Kim, "Dynamic Response of Single Point Mooring Tidal Energy Converter with Various Duct Configurations", Proc. of The Korean Society for New and Renewable Energy, 2015.
10. K. O. Ko, K. H. Lee, C. B. Park, and C. H. Jo, "Design of Supporting Structure for Tidal Current Power Generation Using Tidal Bladed", Journal of Costal Disaster Prevention, Vol. 3, No. 3, 2016, pp. 107-121.