

부유식 파력 장치의 해상운송에 대한 구조 안전성 검토 Structural Safety Analysis of FPWEC During Sea Transportation

조규남* · 김용대* · 배재형* · 신승호**

Kyu Nam Cho*, Yong Dae Kim*, Jae Hyeong Bae* and Seung Ho Shin**

요 지 : 부유식 진자형 파력발전 장치의 실효역 설치를 위한 예인 시 예상항로의 조류 및 풍속, 유의 파고 등의 모든 환경자료를 수집 및 분류 분석하여 위험구간에 대해 검토하였다. 이를 위하여 기상청 및 국립 해양조사원의 자료들을 수집하였으며 이들 분류 검토된 자료들을 토대로 구조물에 작용하는 외력에 대해 계산하였다. 또한 ANSYS를 이용하여 복합 환경하중이 작용할 때의 FEM 해석에 기초한 상기 부유식 진자형 파력발전 장치의 안전 여부를 확인하였다.

핵심용어 : 해상운송, 파력, 선박 안전, 파력 및 풍하중, 조류, 예인

Abstract : Ocean environmental data such as tide, wind, significant wave height etc. along the expected route were collected and analyzed to secure the safe towing and installation of floating pendulum wave energy converter(FPWEC) at planned sea area. Data from Korea Meteorological Administration(KMA) and Korea Hydrographic and Oceanographic Agency(KHOA) were reviewed and those were used to estimate the external forces exerting on the FPWEC during the towing operation. ANSYS system was used for the structural analysis of the FPWEC which is subject to complex environmental load to confirm the safety.

Keywords : sea transportation, wave power, safety of the vessel, wave and wind load, tidal current, towing

1. 서 론

Floating Pendulum Wave Energy Converter (FPWEC)는 KRISO 주도로 연구 개발한 파력 발전기로서 Fig. 1과 같이 파도에 의한 진자판의 진자운동을 회전운동으로 바꾸어 발전하는 장치이다. 해안에서 상당히 떨어진 해역에 설치되어 운용되는 장치이나 선박이나 기타 해양 플랜트보다 구조적으로 취약한 형태를 하고 있다. 그래서 구조안전성 확보를 위해 설계 시 다양한 조건에 대한 구조해석이 수행 되었으며 (Sohn, J.M. et al., 2014), 마지막으로 해상운송 시에 대한 안전성 검토를 위해 본 연구가 수행되었다.

FPWEC는 2016년 5월 10일에 인천 삼광조선소에서 진수되었으며(Fig. 2) 2017년 3월에 제주도 근해에 설치될 예정이다.

Full Ballast Condition에 Tug Boat로 예인하여 설치 장소까지 운송할 예정이다(Fig. 3). 그래서 인천에서부터 제주도까지의 예상항로를 설정하였다(Fig. 4). 예상 거리는 약 264해리(489 km)로 부유식 구조물의 예상 운송 기간은 2 kn(1.03 m/s)의 속력으로 10일의 기간을 예상한다.

본 연구에서는 장시간 운송을 하게 되므로 운송 중 발생할

수 있는 여러 시나리오에 맞는 환경조건에 의한 구조물의 안전여부를 확인하였다. 예상항로의 조류 및 풍속, 유의 파고 등의 모든 환경자료를 기상청 및 국립해양조사원을 통하여 수집하였다. 각 자료를 수집 해상 부위 위치를 기준으로 하여 분류 및 분석하였다. 환경하중과 관련하여서 Park, W.S. et al.(1989)는 파랑하중에 의한 동적하중 산정방안을 제시하였고 Ro, Y.J. et al.(1992)는 조류에 대한 수치모형을 이용하여

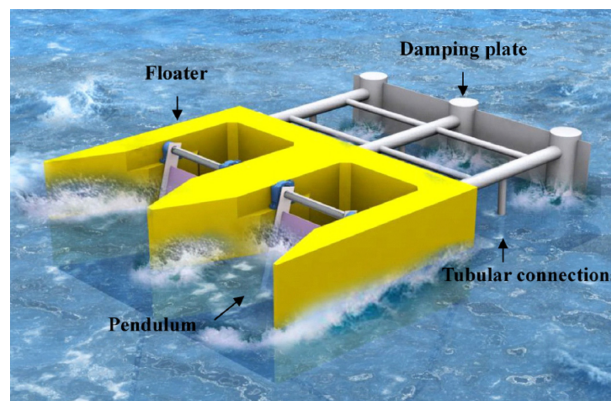


Fig. 1. Conceptual Image of the FPWEC

*홍익대학교 조선해양공학과 (Naval Architecture and Offshore Engineering, Hongik University)

**선박해양플랜트연구소 (Corresponding author: Seung-Ho Shin, Korea Research Institute of Ships& Ocean Engineering, 32, Yuseong-daero 1312 beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon, Korea, Tel: +82-42-866-3913, Fax: +82-42-866-3919, shinsh@kriso.re.kr)



Fig. 2. Pictures of FPWEC Launching at Samkwang Shipyard.

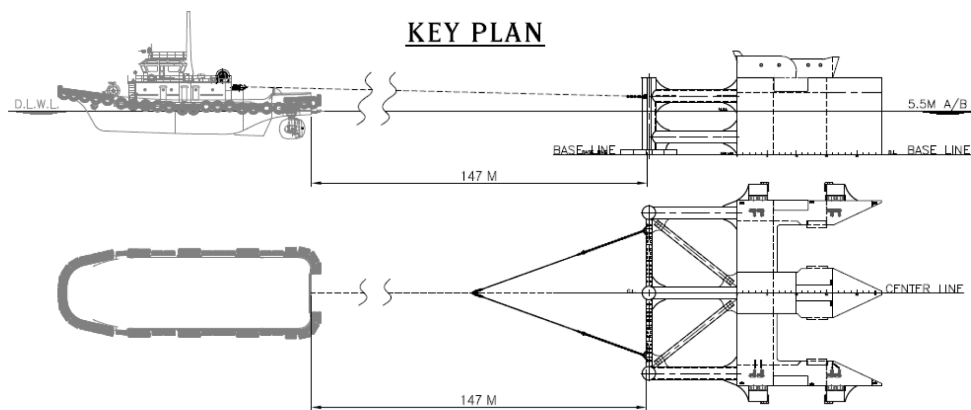


Fig. 3. Towing Plan.



Fig. 4. Expected Route of sea transportation.

조류력을 산정하는 방안을 제시한 바 있다. 분석 결과 운송 과정에서 가장 큰 문제점으로는 조류 환경조건이 운송 중 가장 위험한 조건으로 판단되었다. 그래서 국립해양조사원의 조류 관측 데이터를 토대로 KR (Korea Register) Rule의 부유

식 해양구조물 기준(Guidance for Floating Structures)에 따라 조류 하중을 계산하였다(KR Rule 2014).

또한, 앞에서 예상 위험 하중으로 분석한 조류 하중이 부유식 구조물에 이동방향과 다른 방향에서 복합적으로 작용할 때의 구조응답을 ANSYS를 이용하여 확인하였다. 해석모델은 KRISO에서 받은 최종도면에 따라 전체 모델을 제작하여 해석에 사용하였고 하중조건은 계측 위치에 따른 각각 다른 하중을 설정하였다.

2. 예인 중 위험 환경조건 수집 및 분석

2.1 환경조건 수집

환경하중을 조사하기 위하여 전문 측정 기관의 자료를 수집하였다. 국내엔 대표적인 측정 기관으로는 기상청과 해양수산부 국립해양조사원이 있다. 조사한 환경하중으로는 유의 파고 및 풍속, 조류에 대해서 조사를 해보았다. 기상청에서 제공하는 해양기상월보(Monthly Report of Marine Data 2015)를 기준으로 하여 10년 내의 예인 예상항로에 해당하는 위치의 월 기상 자료들을 조사하였다.

Fig. 5와 같이 3일 이상 연속으로 기상이 좋은 날을 조사해보았다. 첫 번째로 파고 조사결과 평균 유의파고로는 1 m 이하였으며, 최대파고는 2 m 이하였다. 두 번째로 풍속 조사

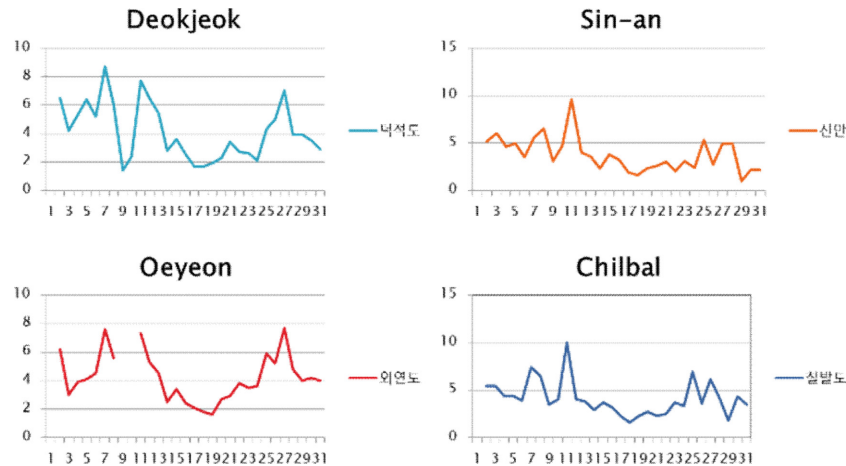


Fig. 5. Environmental data of the March.

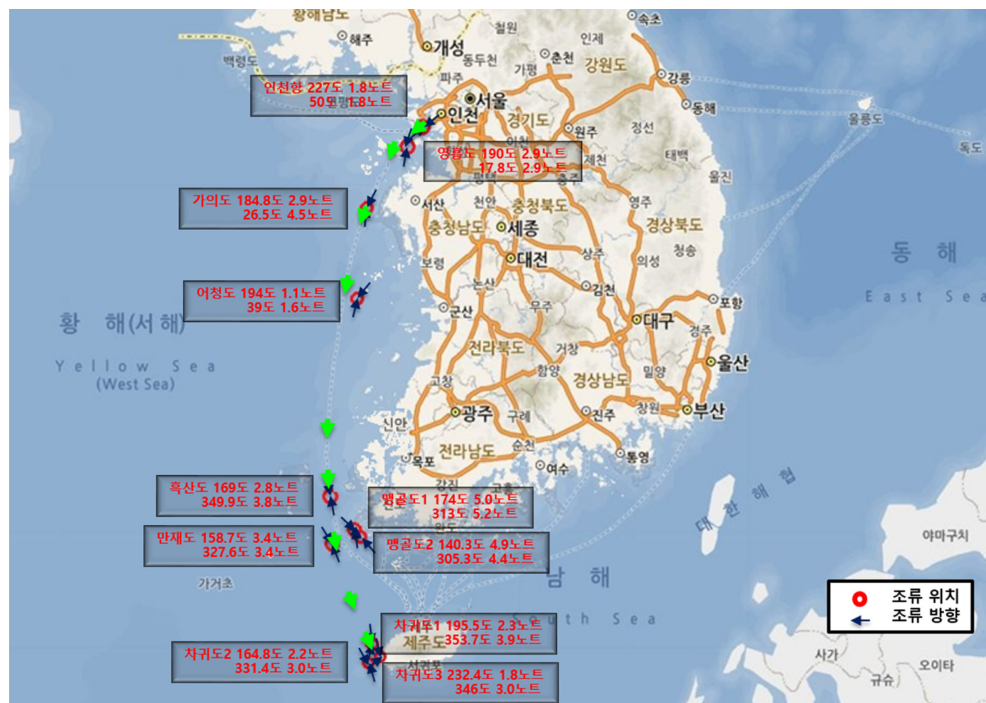


Fig. 6. Tidal Data Along the Sea Transportation Route.

결과로는 평균 4.1 m/s이었으며, 최댓값 10 m/s였다.

마지막으로 해양수산부 국립해양조사원에서 측정한 조류데이터를 조사하였다(Korea Hydrographic and Oceanographic Agency 2016). 인터넷에 공개된 자료를 이용하여 조사하였다. 위치별 해당년도의 측정된 조류의 속도를 수집 및 분석하였다(Fig. 6). 조류 속도 관측 데이터 분석결과 최소 1.8 kn (0.926 m/s) 최대 5.2 kn(2.68 m/s)이었다.

이처럼 예상 운항항로 내의 유의파고와 파고와 풍속, 조류에 대해서 자료 수집 및 분석하였다. 유의파고와 풍속은 Full Ballast Condition으로 예인하기 때문에 흘수선 상부 면적이 작아 운항에 큰 영향이 없는 것으로 판단되었다. 하지만 조류의 경우 지역마다 다르지만, 최대 5.2 kn(2.68 m/s)으로 운항에 방해가 될 수도 있으며, 구조물의 변형을 발생할 수 있

다고 판단하여 위험 조건으로 선정하였다.

2.2 조류하중 계산

KR Engineering에서 예인력 계산 시 사용하는 전저항 계산식에서 조류에 의한 마찰저항만 고려하기 위하여 R_f 식을 사용하여 조류하중을 계산하였다(KR, 2014).

$$R_t = R_f + R_w + R_a + R_{add} \quad (\text{전 저항 식}) \quad (1)$$

R_f : 마찰저항 R_w : 조파저항 R_a : 공기저항 R_{add} : 유효파고에 따른 부가저항

마찰저항 R_f 식

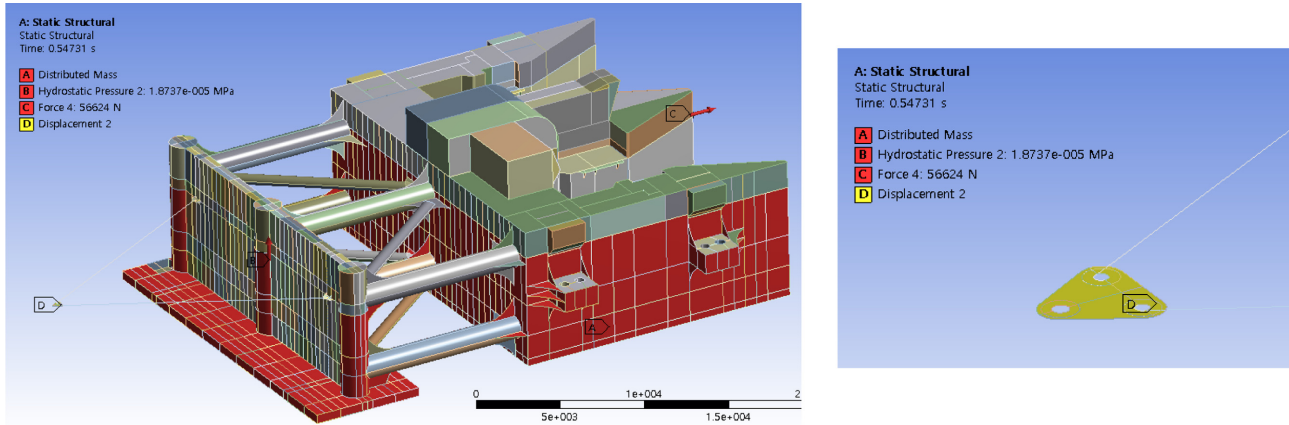


Fig. 7. Load Condition and Boundary Condition.

Table 1. Load calculated according to the observation position.

Location	Fx (N)	Fy (N)
만재도 부근	8.56E+02	8.08E+04
맹골도1	2.39E+02	1.26E+05
맹골도 2	1.18E+04	1.03E+05

$$R_f = 0.000136 \times F_1 \times A_1 \times V^2 \quad (\text{ton}) \quad (2)$$

F_1 : 0.8 (선체 표면의 상태를 나타내는 계수)

A_1 : 1864.5 m² (수면하부의 침수표면적)

V : 3 knot (예인속력 knots)

3. ANSYS 수치해석결과

3.1 하중 및 물성치

인천항에서부터 제주도까지 예인항로의 조류하중 계산 결과를 가장 위험한 환경조건을 선정하여 하중으로 산출하였다 (Table 1). 정면과 측면에서 조류 하중이 작용하는 것으로 가정하여 진입 방향에서 변환하여 하중계산을 하였다. 해양구조물의 외관 물성치는 기본적으로 Mild Steel을 사용하였고 부위별 AH36 Steel를 사용하였다.

3.2 전선 ANSYS 해석결과

ANSYS (ANSYS, Inc., 2014) 시스템을 이용하여 구조해석을 진행하였으며, Fig. 7과 같이 하중조건 및 경계조건을 적용하였다. 조류력에 의한 구조적 응답을 확인하기 위한 해석이었기 때문에 정적구조해석을 진행하였다. 경계조건은 예인 부속장치인 Towing Plate에 Displacement 고정하고 Rotation에 대해서만 자유롭게 두었다.

Towing Plate와 FPWEC의 연결부위의 예인 삭은 실체론 Chain 형태이지만 해석 편의상 강철 Beam으로 모델 하였다 (Fig. 8). 하중조건은 Table 1에 산출된 값 중 맹골도 1의 하중이 정면과 측면에서 작용하는 것과 정수면의 Hydro Pressure 조건을 주어 해석을 진행하였다.

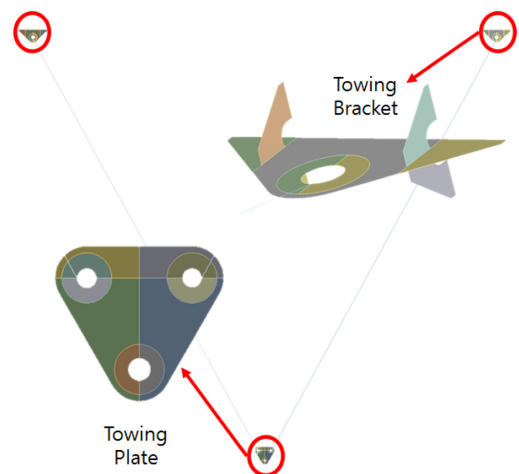


Fig. 8. Structure Member Name.

Table 2. Resulting Stress by ANSYS System.

Part	Result (MPa)	Allowable Stress (MPa)
Towing Plate	51.238	245
구조물 외관	25.437	235

Fig. 9은 구조응답에 대한 그림이며, Table 2는 구조해석 결과 선체에 발생한 응력에 대한 산출 결과이다. 응력이 맹골도1에서 5.2 kn(2.68 m/s)의 속력으로 조류력이 작용할 때 Towing Plate에서 51.238 MPa 및 구조물 외관부위에서 25.437 MPa로 외력이 구조물에 부재의 허용하중보다 훨씬 작아서 큰 영향이 없음을 확인할 수 있었다.

3.3 부분 ANSYS 해석결과

앞선 전선구조해석 결과 Towing Bracket (패드아이) 부위에 대한 부분 해석이 필요한 것으로 판단되었었다. 그래서 Towing Bracket이 부착된 감쇄판 부위를 따로 분리하였다. 감쇄판 주위를 좌우 및 하부 부위에 대해 Fixed Support 하여 Table 1의 Fx 와 Fy 하중의 합력을 산출한 값을 예인 삭 각도로 적용하였다(Fig. 10).

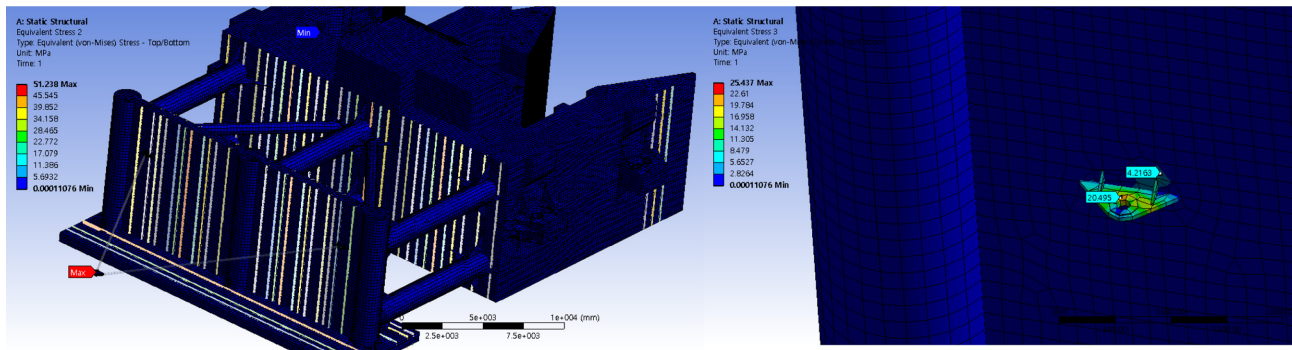


Fig. 9. Structural analysis Results by ANSYS.

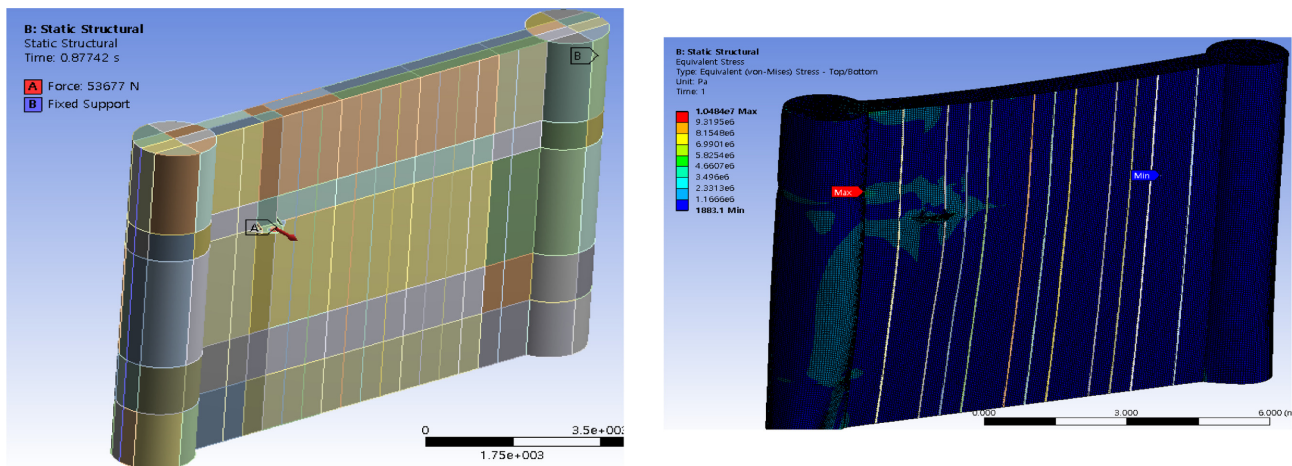


Fig. 10. Load Condition and Boundary Condition.

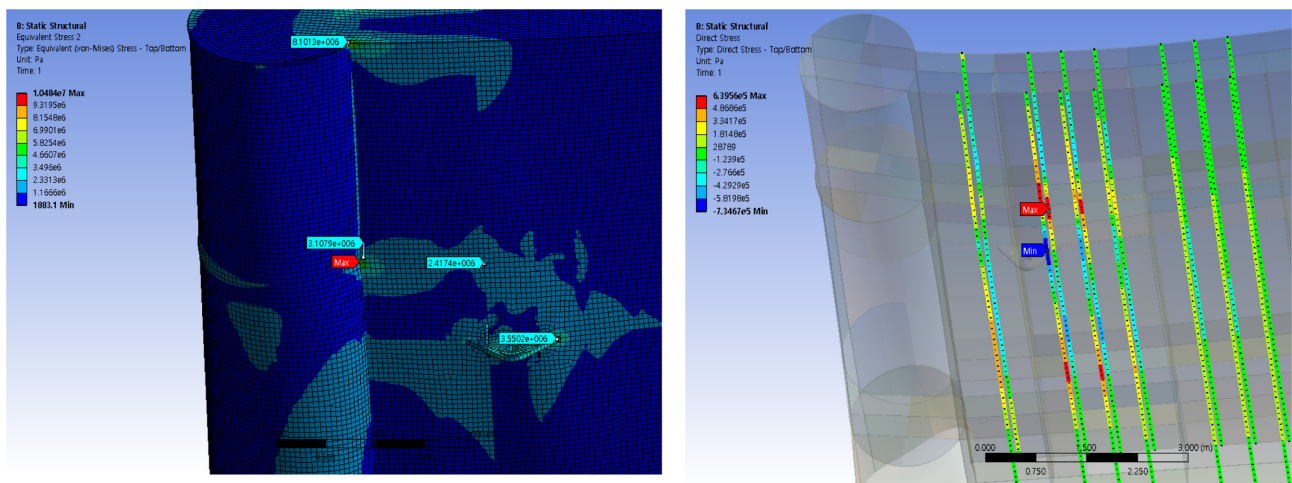


Fig. 11. Detail Structural analysis Results by ANSYS.

Table 3. Part Result by ANSYS System.

Part	Result (MPa)	Allowable Stress (MPa)
Towing Bracket	5.9449	245
구조물 외관	10.484	235

부분 구조해석결과 패드아이 부위에서는 응력집중이 발생하

지 않았었고 수직 Tubular와 외관의 연결부위에서 10.484 MPa의 응력집중이 발생함을 확인할 수 있었다(Fig. 11).

4. 결 론

본 연구에서는 선박이나 기타 해양플랜트 구조물보다 상대적으로 취약한 구조의 FPWEC를 설치해역으로 해상운송할

때 발생할 수 있는 지역별 환경하중을 찾아내고 FEM 해석을 통해 구조안전성을 확인하였다. 이와 같은 장치의 해상운송방법은 부선에 탑재하여 운송하는 방법도 있는데 그것은 훨씬 더 먼 거리까지 운송해야 하고 또 부선에 탑재하고 부선으로부터 이양할 때의 구조적안전성까지 확보해야 하므로 보다 더 견고한 구조물일 때 가능하다. 이번 연구대상의 장치는 만재 홀수 상태로 물속에 잠긴 상태로 예인선에 의해 끌고 가는 방법으로 해상운송을 하므로 운송 중 만날 수 있는 환경하중 (바람, 파도, 조류 등)을 조사하여 구조안전성을 검토하였다. 환경하중 중에서 풍력의 영향은 침수 홀수와 비교하면 건현 홀수가 크게 작아 장치에 대한 영향이 미미하다고 판단되었고 파도의 영향은 국부적으로 한정되었는데 이것은 기존의 해석결과에 포함된 것이므로 이 연구에서 제외하였다. 결과적으로 환경하중 중에서 검토대상이 된 것은 조류력만 남게 되었다. 해석결과 현재 설정된 예인조건에서는 전반적으로 구조 안전성이 확인되었으며 예인삭과 연결되는 Towing Bracket (페드아이) 부위에 대한 응력집중도 별도 검토하였으나 안전하다고 판단되었다. 하지만, 조류력이 예인방향과 다른 방향에서 작용할 때 구조물의 동적 안정성 문제가 발생할 수 있으므로 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본연구는 KRISO의 “부유식 진자형 파력발전장치 기술개발 및 실증” 과제의 위탁과제로 수행된 결과입니다. 연구를

위해 지원해주신 모든 분들께 감사드립니다.

References

- Sohn, J.M., Cheon, H.J., Shin, S.H., Hong, K.Y. (2014) Ultimate Strength Analysis of Connections of Floating Pendulum Wave Energy Converter, J. Wtrwy., Society for Marine Environment and Energy, 17(1), 36-41 (in Korean).
- Park, W.S., Yun, C.B., Pyun, C.K. (1989) Infinite Elements for the Evaluation of Wave Forces, J. Wtrwy., Port, Coast. and Oc. Engrg., 1(1), 71-80 (in Korean).
- Ro, Y.J., You, I. Hwan. (1992). Modeling of tidal and Wind-Driven Currents in Eastern Coastal Waters of the Yellow Sea, J. Wtrwy., Port, Coast. and Oc. Engrg., 4(4), 231-242.
- Korea Meteorological Administration(2015) Monthly Report of Marine Data.
- Korea Hydrographic and Oceanographic Agency (2016) www.khoa.go.kr
- KR Rule (2014) Design Principles and Accidental Loads, NO 3.3, p. 16.
- ANSYS, Inc. (2014) ANSYS Mechanical Users Guide Release 16.0.

Received 16 August, 2016

Revised 25 August, 2016

Accepted 26 August, 2016