



[2016-9-OE-003]

# 조류발전 지지구조시스템 설계 및 성능평가

고광오<sup>1)</sup> · 천종우<sup>1)</sup> · 백승우<sup>1)</sup> · 민은종<sup>1)</sup> · 박창범<sup>1)\*</sup>

## Design and Performance Evaluation of the Tidal Current Power Generation Supporting System

Kwangoh Ko<sup>1)</sup> · Jongwoo Chun<sup>1)</sup> · Seungwoo Pack<sup>1)</sup> · Eunjong Min<sup>1)</sup> · Changbeom Park<sup>1)\*</sup>

Received 2 June 2015 Revised 31 December 2015 Accepted 18 July 2016

**ABSTRACT** Tidal current power has advantages over other renewable energy resources due to the high energy density of the fluid, steadiness and predictability. On the other hand, it has the disadvantage of the high initial construction costs when a generation system is installed and power transmission is expensive compared to the generating capacity. To overcome these disadvantages, it is important to develop a more economical and good workability supporting structure. A caisson-type supporting structure has the advantage that there is no need to mobilize a large floating crane because it uses buoyancy during transport and installation. In addition, it is cost-effective compared to the existing gravity type or jacket type supporting structures because of installation costs. In this study, a caisson-type supporting structure is proposed as a tidal current generation supporting system, and a numerical simulation was performed under the conditions of the nearby Uldolmok maritime area. The design wave height was derived by comparing the SWAN program and ACES program, and the review of the flood and ebb tide flow velocity was carried out using the EFDC program. In addition, integrated load analysis of the tidal current power generation system in each conditions was performed using the Tidal-Bladed program.

**Key words** Caisson type supporting structure(케이슨형 지지구조물), Integrated load analysis(통합하중해석), Tidal current Power generation(조류발전), Numerical simulation(수치해석)

### subscript

FD : Floating Dock

DLC : Design Load Cases

### 1. 서론

전 세계적으로 대두되고 있는 자원위기와 환경위기는 새로운 에너지원의 개발을 요구하였고, 그 결과 신재생에너지

지에 대한 관심이 고조되고 있다. 우리나라는 삼면이 바다로 둘러싸여 있어 해양에너지자원을 이용하기 위한 천해의 조건을 가지고 있으며, 빠른 유속을 가지고 있는 곳이 다수 존재하기 때문에 조류발전을 위한 최적의 자연환경을 가지고 있다.

조류발전은 자연 그대로의 조류를 이용하므로 환경에 영향을 끼치지 않고, 무한한 에너지원으로서의 장점이 있으나 초기 시공비용이 많이 소요되는 단점을 가지고 있다.<sup>[1]</sup>

본 연구에서는 조류발전의 초기 설치비용 문제를 해결하고자 케이슨식 조류발전 지지구조물을 제안하였으며, 울돌목 인근 해상을 대상으로 수치해석을 수행하였다.

자켓 구조물의 경우 암반지역에 설치 시 파일 천공작업

1) Hyundai Engineering &amp; Construction

E-mail: cbpark@hdec.co.kr

Tel: +82-31-280-7345

Fax: +82-31-280-7434

이 필요하므로 전용 드릴링 장비선이 동원되어야하고, 중량이 큰 강구조물을 제작하여야 하기 때문에 콘크리트 구조물에 비해 제작비가 증가하게 된다. 또한, 부식에 의한 유지보수비 및 대형 해상크레인 동원으로인한 장비비의 증가가 단점으로 지적되고 있다.

케이슨식 조류발전 지지구조물은 운송 및 거치시에 부력을 이용하기 때문에 대형해상장비가 불필요하며, 설치비용 역시 상대적으로 저렴하기 때문에 기존의 자켓식 지지구조물과 비교해볼 때 매우 경제적이라고 할 수 있다.

## 2. 대상해역 환경조건 검토

대상해역은 전라남도 진도군 울돌목 시험조류발전소 인근 해상을 대상으로 하였으며, 설치해역 현황조사 및 기초자료 조사를 토대로 설계유속 및 설계파고 등을 산정하였다.

### 2.1 해수유동 수치해석

설계유속 산정을 위해 EFDC(Environmental Fluid Dynamics Code) 모델을 이용하여 주요 4대분조를 포함한 20개 분조의 자료를 사용하였고, 이를 토대로 울돌목 인근 해역의 조류특성을 파악하고 조류발전시설 건설시 필요한 설계유속을 산출하였다.<sup>[2]</sup>

#### 2.1.1 설치위치 검토

조류발전기의 설치위치를 검토하기 위해 기존발전소를 주변으로 Fig. 1과 같이 5개 정점(A~E)을 선정하였다. 최적의 설치 위치 선정을 위해 지지구조물 설치를 위한 해저의 평탄도와 수심, 항로를 비교하고, 해저케이블 설치를 위



Fig. 1. 조류발전기 설치위치 비교정점

한 발전소와의 이격거리를 검토하였다. 또한, 발전 효율을 높이기 위해 조류속 분포 및 발전가능 조류에너지 비를 비교하여 Table 1과 같이 검토한 결과, C, D 정점이 적합한 것으로 판단되었다. C, D 정점은 지반이 비교적 평탄해 지지구조물 설치가 용이하고, 기존 발전소와의 이격 거리도 100m, 68m로 해저케이블 매설거리도 적합하며, 발전가능 조류에너지 비도 우수한 것으로 검토되었다.

#### 2.1.2 설계 조류속 검토

조류발전기 설계를 위해 설치위치에서의 설계 조류속 산정이 필요하나, 부족한 관측 자료와 강한 조류속 및 큰 유속진동으로 인한 실제 유속 재현의 한계로 인해 주변 관측 유속, 조류도, 수치실험결과를 비교 분석하여 설계유속을 검토하였다. 이에 따라 Table 2에 조류속 추정결과를 나타내었고, 설치위치에서의 설계조류속은 4.4m/s로 산정하였다.

### 2.2 파랑 수치해석

설계파고 산정을 위해 SWAN 모형과 ACES 모형을 이용하였고, SWAN 모형의 경우 조류발전시설 설치 예정지에서의 50년 빈도 설계풍속을 적용한 구조물 설계파를 산출하고 1.58년 빈도 풍속을 적용하여 조류발전시설 가동시

Table 1. 조류발전기 설치위치 비교표

| 구분                     | 위치     | 기존 발전소                | 정점 A                  | 정점 B                  | 정점 C                  | 정점 D                  | 정점 E                  |
|------------------------|--------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 수심(DL, m)              | 이격거리   | 19.2<br>(18.7 ~ 20.2) | 20.8<br>(20.3 ~ 21.4) | 21.8<br>(20.6 ~ 23.0) | 20.2<br>(20.0 ~ 20.6) | 20.6<br>(19.8 ~ 23.1) | 22.6<br>(19.8 ~ 26.9) |
|                        | 기존 발전소 | -                     | 168                   | 123                   | 101                   | 68                    | 61                    |
|                        | 항로     | 160                   | 81                    | 78                    | 65                    | 93                    | 119                   |
|                        | 송전선    | 158                   | 6                     | 62                    | 117                   | 163                   | 201                   |
| 조류 (m/s)               | 최강 창조  | 2.6                   | 3.2                   | 3.0                   | 3.1                   | 3.1                   | 2.7                   |
|                        | 최강 낙조  | 2.4                   | 3.4                   | 3.1                   | 3.3                   | 3.3                   | 2.9                   |
| 발전 가능 조류에너지 비 (가동률, %) |        | 1.0<br>(76.1)         | 1.8<br>(78.4)         | 1.6<br>(79.1)         | 1.8<br>(78.8)         | 1.7<br>(79.3)         | 1.3<br>(77.7)         |

Table 2. 조류발전기 설치위치에서의 조류속 추정

| 구분          | 위치       | A3<br>정점     | 정점 C<br>(설치<br>위치) | 유속비<br>(C/A3) | 정점 D<br>(설치<br>위치) | 유속비<br>(D/A3) | 조차  |
|-------------|----------|--------------|--------------------|---------------|--------------------|---------------|-----|
| 관<br>측<br>치 | 최강<br>창조 | 3.5          | —                  | —             | —                  | —             | 4.3 |
|             | 최강<br>낙조 | 4.5          | —                  | —             | —                  | —             |     |
| 조<br>류<br>도 | 최강<br>창조 | 3.0          | 2.9                | —             | 2.9                | —             | —   |
|             | 최강<br>낙조 | 3.5          | 3.4                | —             | 3.4                | —             |     |
| 수<br>치      | 최강<br>창조 | 2.9<br>(3.1) | 3.1<br>(3.3)       | 1.07          | 3.0<br>(3.2)       | 1.03          | 4.0 |
|             | 최강<br>낙조 | 3.3<br>(3.5) | 3.2<br>(3.4)       | 0.97          | 3.2<br>(3.4)       | 0.97          |     |
| 설<br>계<br>치 | 최강<br>창조 | 3.5          | 3.7                | 1.07<br>적용    | 3.6                | 1.03<br>적용    |     |
|             | 최강<br>낙조 | 4.5          | 4.4                | 0.97<br>적용    | 4.4                | 0.97<br>적용    |     |

파랑을 산출하였다.<sup>[3]</sup> 일반적으로 1년 주기의 풍속을 산정하기 위해 연최대 풍속의 평균을 이용하는 평균법과 극치분석을 이용한 산정법이 있으며, 장기간의 축적된 자료를 이용하는 평균풍속 산정방법이 모집단의 누적자료가 많을수록 신뢰도가 높고 산정방법이 간단하다는 장점이 있다. 그러나 본 대상지의 경우 비교적 단기간에 해당하는 43년의 자료를 이용하였고, 연도별 최대 풍속의 차가 크게 나타나 극치분석을 이용한 풍속산정 방법을 적용하였다. 1년 주기의 극치분석을 이용하기 위해 Atlas14 Volume2의 Chow (Cchow et al., 1988) 식을 이용하였다.

$$T_{AMS} = \frac{1}{1 - e^{-\frac{1}{T_{PDS}}}} \quad (1)$$

여기서,  $T_{AMS}$ ,  $T_{PDS}$ 는 AMS(Annual Maximum Series)데이터와 PDS(Partial Duration Series)데이터의 발생빈도 값이며,  $T_{PDS}$ 는 1년일 때,  $T_{AMS}$ 는 1.58년이 된다. 즉, PDS 1년의 이벤트의 값은 AMS 1.58년 이벤트의 값과 동일하다.

ACES 모형은 50년 빈도 설계풍속을 적용한 구조물 설계파를 산출하였고, 관측된 연최고 풍속을 평균하여 조류발전 시설 가동시 풍속조건을 적용하여 파랑을 산출하였다.<sup>[4]</sup>

## 2.2.1 설계해상풍 산정

설계해상풍 산정을 위한 바람자료는 목포항 인근에 위치한 목포기상대의 43년간(1971~2013)의 관측자료를 정리 분석하여 사용하였다. 그 결과 조류발전소 설치예정지 인근에서의 주 풍향은 NW계열의 풍향으로 나타났으며, 풍향별-계급별 출현률을 통계분석한 결과, N, NW, NNW 풍향의 연간 출현률이 약 40%에 해당하였다. 풍향별-계급별 출현률을 Table 3에 나타내었고, FT-I(Fisher-Tippett type I) 분포와 Weibull 분포를 적용한 극치통계분석 및 해상풍 보정 결과를 Table 4에 나타내었다.

## 2.2.2 SWAN 모형실험

SWAN 모형을 이용한 50년 빈도 설계파 산정결과, 울돌목 전면해상에서는 풍향이 가장 큰 NNW 풍향내습시 1.5m 내외의 파랑이 내습하는 것으로 나타났다. 주기는 3.1~4.5sec로 전 방향에서 풍파의 특징인 짧은 주기로 나타났다. 50년 빈도 설계파 산정결과를 Table 5에 나타내었고, 광역 및 상세역의 NNW 등파고선도 및 벡터도를 Fig. 2와 Fig. 3에 도시하였다.

Table 3. 풍향별-계급별 출현률

| 풍향<br>등급 | N     | NNE  | NE   | ENE  | E    | ESE  | SE    | SSE  | S     |
|----------|-------|------|------|------|------|------|-------|------|-------|
| 0.3~3.3  | 3.62  | 3.30 | 4.12 | 2.39 | 2.32 | 2.58 | 3.79  | 4.09 | 3.21  |
| 3.4~7.9  | 4.90  | 2.18 | 0.88 | 0.37 | 0.33 | 0.69 | 1.88  | 2.78 | 3.15  |
| 8.0~13.8 | 1.53  | 0.33 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.08 | 0.18  | 0.30 | 0.37  |
| ≥ 13.9   | 0.04  | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00  | 0.02 | 0.02  |
| 계        | 10.10 | 5.83 | 5.01 | 2.77 | 2.66 | 3.35 | 5.85  | 7.18 | 6.73  |
| 풍향<br>등급 | SSW   | SW   | WSW  | W    | WNW  | NW   | NNW   | CALM | 계     |
| 0.3~3.3  | 2.14  | 1.96 | 1.85 | 1.50 | 1.86 | 3.34 | 5.11  | 4.06 | 51.23 |
| 3.4~7.9  | 2.15  | 1.50 | 0.86 | 0.79 | 1.51 | 4.80 | 9.89  | —    | 38.65 |
| 8.0~13.8 | 0.37  | 0.21 | 0.05 | 0.05 | 0.34 | 1.63 | 4.08  | —    | 9.56  |
| ≥ 13.9   | 0.02  | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.03 | 0.08 | 0.24  | —    | 0.47  |
| 계        | 4.67  | 3.68 | 2.76 | 2.34 | 3.74 | 9.85 | 19.32 | 4.06 | 99.92 |

Table 4. 해상풍 보정 결과

| 풍속<br>등급 | N     | E     | ESE   | SE    | SSE   | S     | W     | WNW   | NW    | NNW   |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 50년      | 24.27 | 15.38 | 18.49 | 23.18 | 22.75 | 25.88 | 20.04 | 22.41 | 22.77 | 37.24 |
| 1.58년    | 12.94 | 5.90  | 7.55  | 10.35 | 11.49 | 12.94 | 6.62  | 9.83  | 14.18 | 16.35 |

Table 5. 50년 빈도 설계파 산정결과

| 파 향        | 파 고(m)     | 주 기(sec)   |
|------------|------------|------------|
| N          | 0.9        | 4.0        |
| E          | 0.4        | 2.2        |
| ESE        | 0.5        | 2.9        |
| SE         | 0.8        | 3.3        |
| SSE        | 0.7        | 3.1        |
| S          | 0.8        | 3.1        |
| W          | 0.7        | 4.3        |
| WNW        | 0.9        | 4.2        |
| NW         | 1.0        | 4.3        |
| <b>NNW</b> | <b>1.5</b> | <b>4.6</b> |

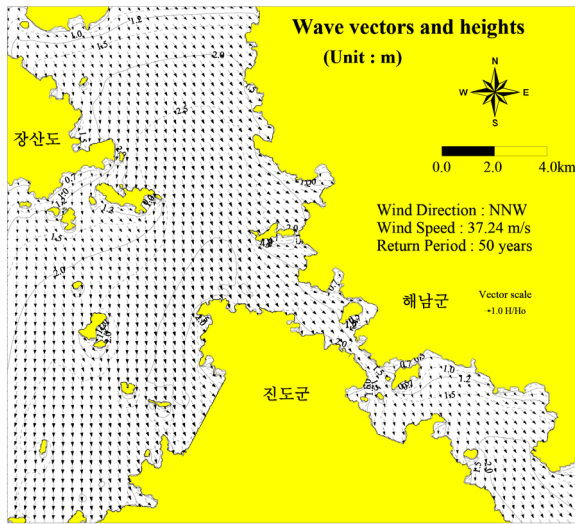


Fig. 2. 광역 NNW 등파고선도 및 벡터도

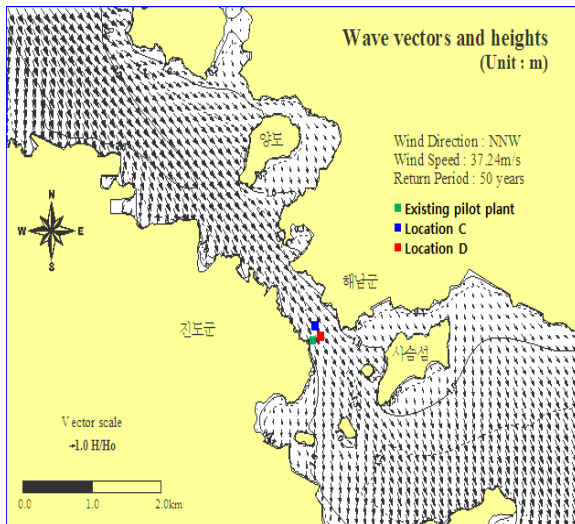


Fig. 3. 상세역 NNW 등파고선도 및 벡터도

### 2.2.3 ACES 모형실험

ACES(Automated Coastal Engineering System) 모형을 이용하여 설계파 및 파랑을 추산한 결과, Table 6과 같이 Fetch 거리가 가장 긴 NW 풍향이 내습할 시 울돌목 전면해상에서 설계파 파고 1.6m, 주기 4.4sec의 파랑이, 가동시 파고 1.1m, 주기 3.6sec의 파랑이 내습하는 것으로 나타났다.

### 2.2.4 설계파 산정

기존 “조류에너지 실용화 기술개발 최종보고서(국토해양부, 한국해양과학기술진흥원, 2011)”와 금회 수행된 설계파 산정결과를 비교 검토한 결과, ACES 모형 이용시 울돌목 전면해상의 설계파는 기존 및 금회 모두 유사한 결과를 보였으며, SWAN을 이용한 결과는 ACES 결과에 비해 낮은 설계파고를 보였다. 이에 조류발전시설의 안정성을 고려하여 설계파는 Table 7과 같이 금회 ACES 산정결과인 파고 1.6m, 주기 4.4sec를 채택하였다.

## 3. 조류발전 지지구조물 선정

앞서 서론에서 언급했듯이, 본 연구에서는 강한 조류속에서 안정적인 발전이 가능하도록 충분한 안정성을 확보할 수 있고 시공에 장점이 있는 케이스 지지구조물 형식을 선정하여 비교 검토하였다.<sup>[5]</sup> 검토결과 안정성, 시공성, 내구성, 발전효율, 경제성 등에서 우수한 직접착저 저판형 케이스와 직접착저 FD형 케이스(장축형)을 최종 지지구조물 형

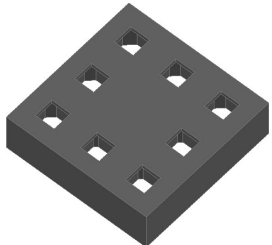
Table 6. ACES 산정결과

| 구 분      | 풍 향 | 설계파 | 가동시 |
|----------|-----|-----|-----|
| 파 고(m)   | NW  | 1.6 | 1.1 |
| 주 기(sec) |     | 4.4 | 3.6 |

Table 7. 설계파 산정결과 비교

| 구 분 | 풍 향 | 파 고(m) | 주 기(sec) | 비 고  |
|-----|-----|--------|----------|------|
| 기 준 | NW  | 1.59   | 4.29     | ACES |
| 금 회 | NW  | 1.6    | 4.4      | ACES |
|     | NNW | 1.5    | 4.6      | SWAN |
| 채 택 | NW  | 1.6    | 4.4      | ACES |

Table 8. 직접착저 저판형 케이슨 특징

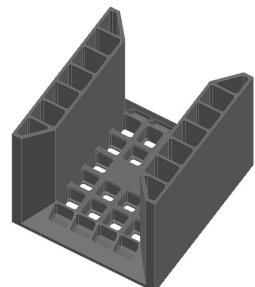
| 구 분      | 직접착저 저판형 케이슨                                                                                                                      |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 케이슨 형상   |                                                  |
|          | 14.9m(B) × 14.9m(L) × 3.0m(H)                                                                                                     |
| 공법특징     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 케이슨 바닥 수중콘크리트타설에 의한 기초 형성</li> <li>• 날개벽이 없고 케이슨 높이가 낮은 형태의 육면체로 케이슨 바닥경사가 없음</li> </ul> |
| 안정성      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 사석마운드가 불필요하여 기초세굴에 의한 피해우려 없음</li> <li>• 외력영향이 적어 안정성 우수</li> </ul>                      |
| 시공성      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 크레인에 의한 케이슨 거치 필요</li> <li>• 수중콘크리트 타설 필요</li> </ul>                                     |
| 내구성/유지관리 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 케이슨 육상제작으로 내구성 우수</li> <li>• 유지관리 상대적으로 불리</li> </ul>                                    |
| 발전효율     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 날개벽이 없는 형태로 조류속 강화, 유지관리에 상대적으로 불리</li> <li>• 날개벽이 없어 요제어에 의한 벽면간섭 없음</li> </ul>         |
| 경제성      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 소형케이슨으로 비용감소</li> </ul>                                                                  |
| 현지 적용성   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 수중콘크리트에 의한 기초형성으로 강한 조류에 저항성 우수</li> <li>• 케이슨 소형화에 의해 거치에 필요한 부지면적 최소화</li> </ul>       |
| 검토 의견    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 날개벽이 없어 조류속 강화와 유지관리에 불리하나, 요제어 및 경제성 우수</li> </ul>                                      |

식으로 선정하였다. 직접착저 저판형 케이슨과 직접착저 FD형 케이슨 지지구조물의 특징을 Table 8과 Table 9에 나타내었다.<sup>[6]</sup>

#### 4. 지지구조물 안정성 검토

선정된 케이슨식 조류발전 지지구조물에 대해서 Tidal Bladed 통합하중해석 프로그램을 이용하여 터빈, 동력전달 계통, 지지구조물에서 발생하는 복합적인 하중을 계산하고, 이를 근거로 각 지지구조물의 안정성 검토를 수행하였다.

Table 9. 직접착저 FD형 케이슨 특징

| 구 분      | 직접착저 FD형 케이슨(장축형)                                                                                                                     |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 케이슨 형상   |                                                    |
| 공법특징     | 27.0m(B) × 30.1m(L) × 17.0m(H)                                                                                                        |
| 안정성      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 케이슨 바닥 수중콘크리트타설에 의한 기초 형성</li> <li>• 케이슨이 조류방향으로 길이가 길어 날개벽 및 바닥경사가 완만한 형태</li> </ul>        |
| 시공성      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 사석마운드가 불필요하여 기초세굴에 의한 피해우려 없음</li> <li>• 케이슨의 장축방향 양측에 날개벽이 배치되어 부유시 안정성이 우수함</li> </ul>     |
| 내구성/유지관리 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 케이슨 거치 간편하며 시공성 우수</li> <li>• 수중콘크리트 타설 필요</li> </ul>                                        |
| 발전효율     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 케이슨 육상제작으로 내구성 우수</li> <li>• 날개벽을 이용한 유지관리기법 도입 가능</li> </ul>                                |
| 경제성      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 케이슨 날개벽 및 바닥경사에 의해 조류속을 강화하는 형상으로 발전효율 향상에 유리</li> </ul>                                     |
| 현지 적용성   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 보통</li> </ul>                                                                                |
| 검토 의견    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 수중콘크리트에 의한 기초형성으로 강한 조류에 저항성 우수</li> <li>• 기초사석 필요없으며, 날개벽에 의한 발전효율 향상과 유지관리에 유리함</li> </ul> |

#### 4.1 통합하중 해석

Tidal-Bladed 프로그램을 이용하여 설계하중케이슨(Design Load Cases, DLC)를 정상 운전상태(Power production, DLC1), 비상 정지상황(Emergency stop, DLC2), 정상 정지상황(Normal stop, DLC3), 극한환경 정지상태(Parked, DLC4) 조건으로 분류하여 실험역 실증모델을 대상으로 타워 설계를 위한 부재력과 케이슨 설계를 위한 요소별 추력을 도출하였다.<sup>[7]</sup>

##### 4.1.1 통합하중해석 조건

통합하중해석을 실시할 조류발전시스템을 Fig. 4와 같이 모델링 하였고, 저조위와 고조위사이에서 고유속이 발

Table 10. 통합하중해석 주요변수

| Key parameters    | Value   |
|-------------------|---------|
| Turbine dia,      | 12 m    |
| No. of blades     | 3 ea    |
| Blade length      | 5 m     |
| Hub height        | 11 m    |
| Caisson height    | 3 m     |
| Water depth (LLW) | 20 m    |
| Tip clearance     | 3 m     |
| Bottom clearance  | 2 m     |
| Nacelle length    | 10 m    |
| Design vel,       | 2,5 m/s |
| Cut-in speed      | 1,0 m/s |
| Cut-out speed     | 3,5 m/s |
| Wave height       | 1,6 m   |
| Wave period       | 4,4 s   |
| Tide height       | 2 m     |
| Target capacity   | 200 kW  |

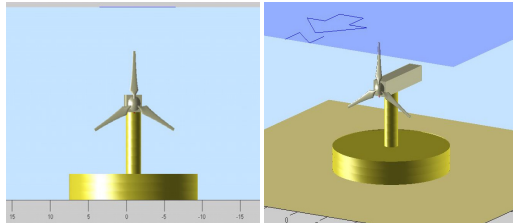


Fig. 4. 조류발전시스템 모델링

생하므로 평균해수면 22m로 해석을 수행하였다. Table 10에 해석에 필요한 주요변수를 나타내었다.

#### 4.1.2 설계하중케이스(DLC)

조류발전시스템은 표준화된 DLC가 정립되어 있지 않고 사례가 부족해 설계기준 또한 없으므로, 풍력터빈 설계기준인 IEC 61400-3을 참고하여 이에 준하는 조건으로 조류발전시스템의 극한하중 설계하중케이스(Design Load Cases, DLC)를 정의하였다. 따라서, DLC를 크게 정상 운전상태(Power production, DLC1), 비상 정지상황(Emergency stop, DLC2), 정상 정지상황(Normal stop, DLC3), 극한 환경 정지상태(Parked, DLC4) 조건으로 분류하여 해석을 수행하였다. 시스템의 주요변수 계산결과는 Table 11과 같고, DLC별 해석조건을 Table 12~Table 15에 나타내었다.

Table 11. 시스템 주요변수 계산결과

| Description               | Value           |
|---------------------------|-----------------|
| Angle of Attack           | 4°              |
| Reynolds number           | $3 \times 10^6$ |
| Lift to drag ratio        | 150             |
| Maximum power coefficient | 0,44            |
| Rated TSR                 | 5               |
| Rated shaft power         | 400 kW          |
| Rated generator power     | 375 kW          |
| Rated turbine speed       | 20 RPM          |
| Rated generator speed     | 200 RPM         |
| Maximum thrust of turbine | 305 kN          |

Table 12. DLC 1 해석 조건

| Load case number    | DLC 1                                      |                                      |                       |                    |
|---------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|--------------------|
| Operating condition | Power production                           |                                      |                       |                    |
| Vel. Condition      | $V_{cut-in} \leq V_{hub} \leq V_{cut-out}$ |                                      |                       |                    |
| Case                | Hub height vel. [m/s]                      | Turbulence                           | H <sub>wave</sub> [m] | T <sub>p</sub> [s] |
| 1,1                 | 1,0                                        | Ix = 10,2%<br>Iy = 8,0%<br>Iz = 5,7% | 1,6                   | 4,4                |
| 1,2                 | 1,5                                        |                                      |                       |                    |
| 1,3                 | 2,0                                        |                                      |                       |                    |
| 1,4                 | 2,5                                        |                                      |                       |                    |
| 1,5                 | 3,0                                        |                                      |                       |                    |
| 1,6                 | 3,5                                        |                                      |                       |                    |
| Description         | Simulation time = 600s per each case       |                                      |                       |                    |

Table 13. DLC 2 해석 조건

| Load case number    | DLC 2                                                                                                                                                                                                                          |                                                  |                |           |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|----------------|-----------|
| Operating condition | Emergency stop                                                                                                                                                                                                                 |                                                  |                |           |
| Vel. Condition      | $V_{hub} = V_{rate} \pm 0,5 \text{ m/s}, V_{cut-out}$                                                                                                                                                                          |                                                  |                |           |
| Case                | Hub height vel. [m/s]                                                                                                                                                                                                          | Turbulence                                       | $H_{wave}$ [m] | $T_p$ [s] |
| 2,1                 | 2,0                                                                                                                                                                                                                            | $I_x = 10,2\%$<br>$I_y = 8,0\%$<br>$I_z = 5,7\%$ | 1,6            | 4,4       |
| 2,2                 | 2,5                                                                                                                                                                                                                            |                                                  |                |           |
| 2,3                 | 3,0                                                                                                                                                                                                                            |                                                  |                |           |
| 2,4                 | 3,5                                                                                                                                                                                                                            |                                                  |                |           |
| Description         | Time to start writing output = 10 s<br>Simulation end time = 70 s<br>Time to begin a stop = 25 s<br>Extra time after stopping = 60 s<br>Emergency pitch trip mode = grid loss<br>Pitch rate = 9 deg/s<br>Brake ramp time = 1 s |                                                  |                |           |

Table 14. DLC 3 해석 조건

| Load case number    | DLC 3                                                                                                                                                                                 |                                                  |                        |                   |
|---------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------|-------------------|
| Operating condition | Normal stop                                                                                                                                                                           |                                                  |                        |                   |
| Vel. Condition      | $V_{hub} = V_{rate} \pm 0.5 \text{ m/s}$ , $V_{cut-out}$                                                                                                                              |                                                  |                        |                   |
| Case                | Hub height vel. [m/s]                                                                                                                                                                 | Turbulence                                       | $H_{wave} \text{ [m]}$ | $T_p \text{ [s]}$ |
| 3.1                 | 2.0                                                                                                                                                                                   | $I_x = 10,2\%$<br>$I_y = 8,0\%$<br>$I_z = 5,7\%$ | 1,6                    | 4,4               |
| 3.2                 | 3.5                                                                                                                                                                                   |                                                  |                        |                   |
| 3.3                 | 3.0                                                                                                                                                                                   |                                                  |                        |                   |
| 3.4                 | 3.5                                                                                                                                                                                   |                                                  |                        |                   |
| Description         | Time to start writing output = 10 s<br>Simulation end time = 90 s<br>Time to begin a stop = 25 s<br>Extra time after stopping = 90 s<br>Pitch rate = 2 deg/s<br>Brake ramp time = 5 s |                                                  |                        |                   |

Table 15. DLC 4 해석 조건

| Load case number    | DLC 4                                           |                                      |                |           |
|---------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------|----------------|-----------|
| Operating condition | Parked                                          |                                      |                |           |
| Vel. Condition      | $V_{max} = 4.4 \text{ m/s}$                     |                                      |                |           |
| Case                | Hub height vel. [m/s]                           | Turbulence                           | $H_{wave}$ [m] | $T_p$ [s] |
| 4.1                 | 4.4                                             | Ix = 10.2%<br>Iy = 8.0%<br>Iz = 5.7% | 1.6            | 4.4       |
| Description         | Simulation time = 600 s<br>Pitch angle = 90 deg |                                      |                |           |

각 DLC별 해석결과 DLC1의 최대급힘하중은 case 1.4 (2.5m/s)에서 발생되었고, DLC2의 경우 최대급힘하중은 case 2.2(2.5m/s)에서 나타났다. DLC3과 DLC4의 경우 최대급힘하중은 각각 case 3.2(3.5m/s)와 case 4.1(4.4m/s)에서 발생하는 것으로 나타났다.

또한, 각 DLC별 최대축력은 DLC1의 경우 case 1.6(3.5 m/s), DLC2의 경우 case 2.4(3.5m/s), DLC3의 경우 case 3.4(3.5m/s), DLC4는 case 4.1(4.4m/s)에서 발생되었다. DLC별 최대급힘하중과 최대축력 해석 결과를 Table 16~Table 19에 나타내었고, 요소별 추력은 Table 20~Table 23과 같이 도출되었다.<sup>[8]</sup>

Table 16. 최대급힘 작용 케이스\_하부

| DLC  |     | Time [s] | Bottom of tower |          |           |          |         |        |
|------|-----|----------|-----------------|----------|-----------|----------|---------|--------|
|      |     |          | Mx[Nm]          | My[Nm]   | Mz[Nm]    | Fx[N]    | Fy[N]   | Fz[N]  |
| DLC1 | 1.4 | 0.70     | -2,295          | -336,063 | 3,202,000 | -118,063 | 402,560 | 10,202 |
| DLC2 | 2.2 | 11.75    | -28,329         | -319,753 | 2,653,000 | -123,354 | 335,783 | 13,423 |
| DLC3 | 3.2 | 15.95    | -115,159        | -294,864 | 3,035,000 | -132,174 | 382,643 | 13,560 |
| DLC4 | 4.1 | 229.70   | -10,518         | -63,799  | 856,440   | -127,543 | 154,975 | 25,907 |

Table 17. 최대급힘 작용 케이스\_상부

| DLC  |     | Time [s] | Top of tower |          |         |         |         |        |
|------|-----|----------|--------------|----------|---------|---------|---------|--------|
|      |     |          | Mx[Nm]       | My[Nm]   | Mz[Nm]  | Fx[N]   | Fy[N]   | Fz[N]  |
| DLC1 | 1.4 | 0.70     | -1,696       | -266,053 | 425,217 | -56,041 | 387,728 | 9,352  |
| DLC2 | 2.2 | 11.75    | -27,977      | -228,705 | 335,032 | -61,346 | 324,055 | 12,585 |
| DLC3 | 3.2 | 15.95    | -114,816     | -199,298 | 395,070 | -70,156 | 367,875 | 13,522 |
| DLC4 | 4.1 | 229.70   | -10,613      | 76,974   | -9,368  | -65,511 | 83,308  | 14,875 |

Table 18. 최대축력 작용 케이스\_하부

| DLC  |     | Time [s] | Bottom of tower |          |           |          |         |         |
|------|-----|----------|-----------------|----------|-----------|----------|---------|---------|
|      |     |          | Mx[Nm]          | My[Nm]   | Mz[Nm]    | Fx[N]    | Fy[N]   | Fz[N]   |
| DLC1 | 1.6 | 58.55    | -247,703        | -226,561 | 1,395,000 | -146,275 | 197,184 | 1,915   |
| DLC2 | 2.4 | 21.40    | -27,177         | 173,248  | 331,187   | -165,074 | 78,498  | -71,574 |
| DLC3 | 3.4 | 9.00     | -114,439        | -312,141 | 1,346,000 | -139,230 | 185,261 | 12,157  |
| DLC4 | 4.1 | 147.10   | 72,627          | 143,241  | 292,425   | -143,442 | 75,950  | -23,593 |

Table 19. 최대축력 작용 케이스\_상부

| DLC  |     | Time [s] | Top of tower |          |          |          |         |         |
|------|-----|----------|--------------|----------|----------|----------|---------|---------|
|      |     |          | Mx[Nm]       | My[Nm]   | Mz[Nm]   | Fx[N]    | Fy[N]   | Fz[N]   |
| DLC1 | 1.6 | 58.55    | -247,267     | -210,768 | 93,192   | -84,261  | 169,668 | 2,648   |
| DLC2 | 2.4 | 21.40    | -28,408      | -269,008 | -139,974 | -103,085 | 49,868  | -42,269 |
| DLC3 | 3.4 | 9.00     | -114,248     | -223,770 | 105,597  | -77,223  | 164,649 | 12,627  |
| DLC4 | 4.1 | 147.10   | 72,597       | -20,470  | -116,307 | -81,451  | 34,939  | -22,186 |

Table 20. 요소별 최대 및 평균 추력\_DLC1

| DLC     | Description | Turbine | Nacelle | Tower  | Total   |
|---------|-------------|---------|---------|--------|---------|
| DLC 1.1 | Maximum     | 86,854  | 3,092   | 8,941  | 98,887  |
|         | Average     | 51,310  | 1,538   | 3,620  | 56,468  |
| DLC 1.2 | Maximum     | 187,437 | 6,749   | 15,364 | 209,550 |
|         | Average     | 114,049 | 3,432   | 7,967  | 125,449 |
| DLC 1.3 | Maximum     | 345,398 | 11,804  | 24,601 | 381,803 |
|         | Average     | 207,990 | 6,196   | 14,416 | 228,603 |
| DLC 1.4 | Maximum     | 361,975 | 22,085  | 43,702 | 427,762 |
|         | Average     | 219,087 | 10,071  | 23,556 | 252,714 |
| DLC 1.5 | Maximum     | 256,639 | 31,507  | 61,900 | 350,046 |
|         | Average     | 155,249 | 14,344  | 33,571 | 203,163 |
| DLC 1.6 | Maximum     | 237,187 | 45,313  | 80,378 | 362,878 |
|         | Average     | 129,522 | 19,341  | 45,327 | 194,190 |

Table 21. 요소별 최대 및 평균 추력\_DLC2

| DLC | Description | Turbine | Nacelle | Tower  | Total   |
|-----|-------------|---------|---------|--------|---------|
| DLC | Maximum     | 211,988 | 26,405  | 21,685 | 260,078 |
| 2.1 | Average     | 49,049  | 5,909   | 13,868 | 68,825  |
| DLC | Maximum     | 344,686 | 21,867  | 31,815 | 398,368 |
| 2.2 | Average     | 78,449  | 8,985   | 20,824 | 108,257 |
| DLC | Maximum     | 265,442 | 36,212  | 47,423 | 349,077 |
| 2.3 | Average     | 51,689  | 12,854  | 30,489 | 95,032  |
| DLC | Maximum     | 206,623 | 61,285  | 64,640 | 332,547 |
| 2.4 | Average     | 42,619  | 18,080  | 41,298 | 101,998 |
| DLC | Maximum     | 256,639 | 31,507  | 61,900 | 350,046 |
| 1.5 | Average     | 155,249 | 14,344  | 33,571 | 203,163 |
| DLC | Maximum     | 237,187 | 45,313  | 80,378 | 362,878 |
| 1.6 | Average     | 129,522 | 19,341  | 45,327 | 194,190 |

Table 22. 요소별 최대 및 평균 추력\_DLC3

| DLC | Description | Turbine | Nacelle | Tower  | Total   |
|-----|-------------|---------|---------|--------|---------|
| DLC | Maximum     | 241,526 | 9,287   | 21,725 | 272,538 |
| 3.1 | Average     | 34,182  | 5,658   | 13,434 | 53,273  |
| DLC | Maximum     | 344,686 | 16,250  | 33,156 | 394,092 |
| 3.2 | Average     | 51,264  | 9,072   | 20,857 | 81,194  |
| DLC | Maximum     | 265,442 | 22,500  | 45,024 | 332,966 |
| 3.3 | Average     | 30,622  | 13,593  | 31,752 | 75,967  |
| DLC | Maximum     | 206,623 | 30,253  | 62,920 | 299,796 |
| 3.4 | Average     | 25,363  | 18,744  | 43,956 | 88,063  |
| DLC | Maximum     | 256,639 | 31,507  | 61,900 | 350,046 |
| 1.5 | Average     | 155,249 | 14,344  | 33,571 | 203,163 |
| DLC | Maximum     | 237,187 | 45,313  | 80,378 | 362,878 |
| 1.6 | Average     | 129,522 | 19,341  | 45,327 | 194,190 |

Table 23. 요소별 최대 및 평균 추력\_DLC4

| DLC | Description | Turbine | Nacelle | Tower   | Total   |
|-----|-------------|---------|---------|---------|---------|
| DLC | Maximum     | 15,507  | 68,994  | 129,402 | 213,902 |
| 4.1 | Average     | 6,396   | 30,107  | 70,565  | 107,069 |

## 4.2 지지구조물 안정성 검토

상기의 통합하중해석 결과와 2장에서 도출한 설계파고 및 설계유속 등을 이용하여 각 지지구조물의 활동 및 전도를 검토하였다. 외력산정을 위해 조류력 계산은 항만 및 어항설계기준(2014)을 이용하여 산정하였다.<sup>[9]</sup>

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho_0 A U^2 \quad (1)$$

여기서,

$F_D$  : 정상 항력

$C_D$  : 무차원 시간 평균 항력 계수

$\rho_0$  : 해수의 밀도( $t/m^3$ )

$A$  : 단면적( $m^2$ )

$U$  : 조류속( $m/s$ )

타워에 작용하는 파력 계산 또한 항만 및 어항설계기준(2015)의 모리슨(Morison, 1950)식을 이용하여 산정하였다.<sup>[10]</sup>

$$\vec{f}_n = C_D \frac{\rho_0}{2} D \vec{U}_n |\vec{U}_n| \Delta s + C_M \rho_0 A \vec{\alpha}_n \Delta s \quad (2)$$

여기서,

$\vec{f}_n$  : 부재의 축방향의 미소 길이  $\Delta s$ (m)에 작용하는 부재축과 수립자 운동방향의 공통면에서 부재축에  $dgid$ 의 힘(kN)

$\vec{U}_n, \vec{\alpha}_n$  : 부재축과 수립자 운동방향의 공통면에서 부재축 직각방향( $f_n$ 과 같은 방향)의 수립자 속도 성분( $m/s$ ) 및 가속도 성분( $m/s^2$ )

$|\vec{U}_n|$  :  $\vec{U}_n$ 의 절대값( $m/s$ )

$C_D$  : 항력계수

$C_M$  : 관성력계수

$D$  :  $\vec{f}_n$ 의 방향에서 본 부재축 직각방향의 부재 폭(m)

$A$  : 부재축에 수직인 부재 단면적( $m^2$ )

$\rho_0$  : 해수의 밀도( $t/m^3$ ) (보통  $1.03t/m^3$ )

케이슨에 작용하는 파력은 직립벽에 작용하는 최대파력 및 양압력에 대한 Goda(1973)식을 이용하였다.<sup>[11]</sup>

$$\eta^* = 0.75(1 + \cos\beta)\lambda_1 H_D$$

$$p_1 = \frac{1}{2}(1 + \cos\beta)(\alpha_1 \lambda_1 + \alpha_2 \lambda_2 \cos^2\beta)\rho_0 g H_D$$

$$p_2 = \frac{p_1}{\cosh(2\pi h/L)}$$

$$p_3 = \alpha_3 p_1$$

$$\begin{aligned}
p_u &= \frac{1}{2}(1 + \cos\beta) \alpha_1 \alpha_3 \lambda_3 \rho_o g H_D \\
\alpha_1 &= 0.6 + \frac{1}{2} \left[ \frac{4\pi h/L}{\sinh(4\pi h/L)} \right]^2 \\
\alpha_2 &= \min \left[ \frac{h_b - d}{3h_b} \left( \frac{H_D}{d} \right)^2, \frac{2d}{H_D} \right] \\
\alpha_3 &= 1 - \frac{h'}{h} \left[ 1 - \frac{1}{\cosh(2\pi h/L)} \right]
\end{aligned} \quad (3)$$

여기서,

$\eta^*$  : 정수면 상에서 파압강도가 0이 되는 점까지의 높이(m)

$p_1$  : 정수면에서의 파압 강도(kN/m<sup>2</sup>)

$p_2$  : 해저면에서의 파압 강도(kN/m<sup>2</sup>)

$p_3$  : 직립벽 저면에서의 파압 강도(kN/m<sup>2</sup>)

$\rho_o$  : 해수의 밀도(t/m<sup>3</sup>)

$g$  : 중력가속도(m/s<sup>2</sup>)

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  : 파압의 보정계수(표준 1.0)

$h$  : 직립벽 전면의 수심(m)

$h_b$  : 직립벽 전면에서 외해(심해측)로 유의파고의 5배만큼 떨어진 지점의 수심(m)

$h'$  : 직립벽 저면의 수심(m)

$d$  : 사석부의 근고공 또는 피복공의 마루 중에서 작은 수심(m)

$H_D$  : 설계계산에 쓰이는 파고(m)

$L$  : 수심  $h$ 에서의 설계계산에 쓰이는 파장(m)

$\min(a, b)$  :  $a$  또는  $b$  중 작은 값

$p_u$  : 소파블록 케이스 저면의 외해쪽 끝부분의 양압력 강도(kN/m<sup>2</sup>)

$\beta$  : 파의 주방향에서 직립벽에 직각이 되는 방향으로 15°만큼 회전시킨 방향이 직립벽에 직각인 선과 이루는 각도(°). 파의 주방향과 직립벽에 직각인 선이 이루는 각도가 15°미만인 경우는  $\beta = 0^\circ$  를 사용함

#### 4.2.1 활동

지지구조물의 활동에 대한 안정성 검토는 중력식 방파제의 직립부 안정성 검토를 따랐으며, 안전율( $F_s$ )은 국내설계기준(평상시 1.2)보다 높은 영국설계기준(British Standard)

의 1.75를 적용하였다. 이는 조류발전 지지구조물의 국내 적용사례가 없고 안정성 검토시 산정하지 못한 안정성 저하 요인을 고려하여 보수적으로 기준을 적용하였다.<sup>[12]</sup>

$$F_s \leq \frac{\mu(W_O - B - U)}{P} \quad (4)$$

여기서,

$F_s$  : 직립부의 활동에 대한 안전율

$\mu$  : 직립부와 기초사석부의 마찰 계수

$W_O$  : 직립부의 중량(kN/m)

$B$  : 직립부에 작용하는 부력(kN/m)

$U$  : 직립부에 작용하는 양압력(kN/m)

$P$  : 직립부에 작용하는 수평파력(kN/m)

#### 4.2.2 전도

지지구조물의 전도에 대한 검토도 활동과 동일하게 중력식 방파제의 직립부 안정성 검토 방법을 이용하였으며, 안전율( $F_s$ )은 국내설계기준(평상시 1.2)보다 높은 영국설계기준(British Standard)의 1.5를 적용하였다.

$$F_s \leq \frac{(W_O \cdot t_1 - B \cdot t_2 - U \cdot t_3)}{M_P} \quad (5)$$

여기서,

$F_s$  : 직립부의 전도에 대한 안전율

$t_1$  : 직립부의 중력의 작용점으로부터 직립부 제체의 후미하단(전도지지점)까지의 거리(m)

$t_2$  : 직립부에 작용하는 부력 작용점으로부터 직립부 제체 후미하단까지의 거리(m)

$t_3$  : 직립부에 작용하는 양압력 작용점으로부터 직립부 제체 후미하단까지의 거리(m)

$M_P$  : 수평파력에 의한 직립부의 후미하단 주위의 회전 모멘트(kN·m/m)

#### 4.2.3 지지구조물 안정검토

터빈, 너셀, 타워 등 조류발전시스템에 작용하는 하중은

Table 24. 지지구조물 활동 및 전도 검토 결과

| 구 분         |          |      | 직접착저<br>저판형 케이스 | 직접착저 FD형<br>케이스(장축형) |      |
|-------------|----------|------|-----------------|----------------------|------|
| 시<br>공<br>시 | 수직<br>입사 | 활동   | 4.26            | 4.02                 |      |
|             |          | 전도   | 13.50           | 9.53                 |      |
|             | 경사<br>입사 | 활동   | 4.46            | 2.79                 |      |
|             |          | 전도   | 13.62           | 6.31                 |      |
| 운<br>영<br>시 | 수직<br>입사 | DLC1 | 활동              | 4.50                 | 2.96 |
|             |          |      | 전도              | 18.08                | 8.89 |
|             |          | DLC2 | 활동              | 4.61                 | 2.97 |
|             |          |      | 전도              | 19.09                | 8.96 |
|             |          | DLC3 | 활동              | 4.63                 | 2.98 |
|             |          |      | 전도              | 19.23                | 8.96 |
|             |          | DLC4 | 활동              | 5.46                 | 3.08 |
|             |          |      | 전도              | 34.95                | 9.51 |
|             | 경사<br>입사 | DLC1 | 활동              | 4.81                 | 2.48 |
|             |          |      | 전도              | 18.44                | 6.60 |
|             |          | DLC2 | 활동              | 4.94                 | 2.49 |
|             |          |      | 전도              | 19.49                | 6.64 |
|             |          | DLC3 | 활동              | 4.96                 | 2.49 |
|             |          |      | 전도              | 19.64                | 6.64 |
|             |          | DLC4 | 활동              | 5.94                 | 2.56 |
|             |          |      | 전도              | 36.31                | 6.94 |

Tidal Bladed의 해석결과를 적용하여 시공시와 운영시의 DLC 1,2,3,4에 대하여 각각 검토하였고, 설계 조류속과 설계 파랑의 경우 케이스의 정면에 수직입사하는 것으로 가정하여 안정검토를 수행하였다. 경사 입사되는 조류 및 파랑의 최대 경사각은 20°로 조류와 파랑이 동일한 방향으로 입사하는 것으로 설정하였다. Table 24에 상기의 지지구조물 안정성 검토 결과를 나타내었다. 직접착저 저판형 케이스와 FD형 케이스 모두 시공시와 운영시 활동 및 전도에 대해 안정성이 충분히 확보되는 것으로 검토되었다. 앞서 언급한대로 British Standard의 활동 1.75, 전도 1.5를 적용하고도 보다 안전측으로 설계를 한 것은 Tow의 연직도 미확보시 발생가능한 미소하중 증가량, 조류발전기 터빈에 의한 타워 진동시 발생하는 피로하중, 블레이드 끝단 cavitation 발생으로 인한 부압, 수중 콘크리트 조기 강도 미발현으로 인한 안정성 감소 등 안정성 검토시 반영하지 못한 부분이 있기 때문이다.

## 4. 결 론

신재생에너지의 개발을 통한 환경과 자원의 위기를 극복하고자 하는 것은 전세계적인 공통점이며, 수많은 에너지 자원 중 조류에너지 개발에 집중하고자 하는 이유는 유체의 밀도가 커서 작은 크기의 터빈으로도 발전이 가능하고, 예측가능한 에너지원이기 때문이다. 뿐만아니라, 환경 영향이 거의 없는 친환경적인 에너지이고, 날씨나 계절의 영향을 거의 받지 않는 장점을 가지고 있기도 하다. 그러나, 서론에서 언급한대로 초기 설치비용이 많이 들고, 발전 용량대비 송전 비용이 과다하다는 단점이 있다.

본 연구에서는 경제성 확보를 위해 케이스형 지지구조물을 제안하였고, 직접착저 저판형 케이스와 직접착저 FD형 케이스 두가지 타입의 지지구조물에 대하여 안정성 검토를 수행하였다. 케이스식 조류발전 지지구조물은 운송 및 거치시 케이스 자체 부력을 이용하여 운송 및 설치가 가능하므로 대형해상크레인이 필요 없고, 설치 비용 또한 상대적으로 저렴하기 때문에 경제적이고 시공성이 뛰어난 신형식 조류발전 지지구조물이라고 할 수 있다.

본 연구를 통해 도출된 신형식의 조류발전 지지구조물을 토대로 실증 사업을 실시할 예정이며, 이를 통한 Track Record가 확보되면 세계 시장에서 경쟁력을 갖출 수 있을 것으로 기대된다.

## 후 기

본 연구는 국토해양부 소관 연구개발사업인 “능동제어형 조류발전 기술개발(20110171)”의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

## References

- [1] 조철희, 고평우, 이준호, 이강희, 2012, “항력식 조류발전 터빈의 최적 형상 설계 및 유동 수치해석을 통한 성능평가”, 한국신재생에너지학회논문집, 8(2).
- [2] 신범식, 김규한, 김종현, 백승화, 2011, “EFDC모형을 이용한 가로림만의 조력발전 위치 타당성 검토”, 한국해안해

- 양공학회논문집, 23(6), 489-495.
- [3] Delft University, 2014, “Swan User Manual” version 41.01.
- [4] 조휴상, 윤병만, 박대춘, 1993, “ACES의 바람보정 및 파랑발달 모형에 관한 고찰”, 한국해양해양공학회, 38-41.
- [5] 국토해양부, 2012, “도로교 설계기준”
- [6] 이상욱, 김상귀, 홍성범, 여규권, 2007, “케이슨 제작 및 거치”, 대한토목학회지, 55(6), 65-73.
- [7] 음학진, 김만웅, 김범석, 원종범, 2007, “풍력발전시스템의 설계적합성 평가”, 추계풍력에너지학회 학술대회 논문집.
- [8] 김기하, 김동현, 곽영섭, 김수현, 2015, “FAST, GH Bladed 및 CFD 기법을 이용한 5MW 해상풍력터빈 시스템 설계 하중조건 해석 및 비교”, 한국유체기계학회 논문집, 18(2), 14-21.
- [9] 해양수산부, 2014, “항만 및 어항설계기준”.
- [10] Morison, J.R., M.P. O’Brien, J.W. Johnson, S.A. Schaaf, 1950, “The force exerted by surface waves on piles”, Petroleum Trans, 189, TP2846, 146-154.
- [11] Goda, Y., 1973, “Study on design wave pressure on breakwater”, Report of Port and Harbor Res. Inst., 12(3), 31-69.
- [12] British Standards Institution, 1997, “British Standard”.