

## 1MW급 조류발전 실증실험을 위한 설계인자 도출

오명학<sup>1)</sup>, 이광수<sup>2)</sup>, 염기대<sup>3)</sup>, 박우선<sup>4)</sup>, 한상훈<sup>5)</sup>, 박진순<sup>6)</sup>, 이진학<sup>7)</sup>

### Design Parameters for Pilot Tests of 1MW Tidal Current Power Generation

Myounghak Oh, Kwang-Soo Lee, Ki-Dai Yum, Woosun Park, Sanghun Han,  
Jinsoon Park, Jinhak Yi

**Key words** : Tidal current power generation(조류발전), Uldolmok narrow channel(울돌목 협수로), Helical turbine(헬리컬 터빈), Design parameter(설계인자)

**Abstract** : It is well-known that the resources for tide and tidal current energy are abundant in Korea. The south coast in Korea is recognized as one of the most appropriate places in the world for developing tidal current energy. The target site for harnessing tidal current energy is the Uldolmok, where the strongest tidal current in Korea occurs. In order to commercialize and industrialize the tidal current power generation, the construction of pilot tidal current power plant of 1MW has been started in April 2006, and is expected to be completed by May 2007. Extensive works including field investigation, field experiment for evaluating the efficiency of helical turbine and numerical analysis have been performed. This paper present the several design parameters for constructing the Uldolmok pilot tidal current power plant.

#### 1. 서 론

조류발전은 조류 유속이 빠른 곳에 수차발전기를 설치하여 해수의 운동에너지로부터 전기를 생산하는 발전방식으로 저수지 확보를 위한 댐이 필요하지 않으며, 선박의 운항과 어류이 이동이 자유스러운 등 생태계에 영향이 적은 친환경적인 시스템이다. 국내의 조류발전은 1963년에 울돌목에서 최초 시도된 것으로 알려져 있으며, 1986년에 울돌목 주변해역에 대한 조류발전 가능성 조사가 실시된 바 있으나 경제성 등의 이유로 구체적인 후속 연구는 착수되지 않았다<sup>(1)</sup>. 그러나 2000년대 들어 신·재생에너지 개발 필요성이 증대되어 2001년부터 조류에너지 실용화 기술개발연구를 한국해양연구원에서 수행하고 있다<sup>(2)</sup>. 이 연구의 일환으로 우리나라에서 조류 유속이 가장 빠른 울돌목을 대상으로 실용화를 위한 연구가 진행중이다<sup>(2)</sup>.

전라남도 해남군 우수영과 진도군 녹진 사이를 잇는 협소한 해협인 울돌목의 연안 특성을 살펴보면, 대조차는 약 3m 정도로 크지 않으나, 창조와 낙조시 수도의 양단에서 발생하는 약 2m의

수위차로 인해 협수로에서 최대 약 6.5 m/s (약 13 knots)의 강한 유속이 발생한다. 이러한 강한 유속으로 인하여 세계적으로도 조류발전의 최적

- 
- 1) 한국해양연구원 연안개발연구본부  
E-mail : omyhak@kordi.re.kr  
Tel : (031)400-7810 Fax : (031)408-5823
  - 2) 한국해양연구원 연안개발연구본부  
E-mail : kslee@kordi.re.kr  
Tel : (031)400-6300 Fax : (031)408-5823
  - 3) 한국해양연구원 연안개발연구본부  
E-mail : kdium@kordi.re.kr  
Tel : (031)400-6011 Fax : (031)408-5823
  - 4) 한국해양연구원 연안개발연구본부  
E-mail : wspark@kordi.re.kr  
Tel : (031)400-6325 Fax : (031)408-5823
  - 5) 한국해양연구원 연안개발연구본부  
E-mail : shhan@kordi.re.kr  
Tel : (031)400-6345 Fax : (031)408-5823
  - 6) 한국해양연구원 연안개발연구본부  
E-mail : jpark@kordi.re.kr  
Tel : (031)400-7805 Fax : (031)408-5823
  - 7) 한국해양연구원 연안개발연구본부  
E-mail : yjih@kordi.re.kr  
Tel : (031)400-7811 Fax : (031)408-5823

지로 알려져 있으며 최대 약 66만kW의 조류에너지가 부존되어 있는 것으로 추정된다<sup>(1)</sup>.

울돌목 해역에 대한 조류에너지 실증실험을 수행하기 위하여 2007년 상반기에 완공할 예정으로 모듈화 방식의 1MW급 시험조류발전소를 시공 중에 있다. 시험조류발전소에서는 다양한 형태의 수차, 발전기 및 전력변환장치 등이 설치되어 여러 가지 측면에서의 실증실험이 수행될 예정이다. 본 논문에서는 1MW급 조류발전 실증시험을 수행하기 위한 시험조류발전소 건설에 도출된 설계인자를 제시하였다.

## 2. 울돌목 조류발전 평면배치 계획

조류발전소를 진도측에 배치하는 방안과 해남측에 배치하는 방안에 대한 비교·검토하여 최적안을 도출하기 위하여 울돌목 지역에서의 조류흐름에 대한 수치모형시험을 수행하였고, 울돌목 인근 지역의 전력구 계통을 검토하였다. 그 결과 선박 운항시 조류의 흐름에 대하여 안전하며, 발전시설 공사비 절감, 배후부지 이용성 및 발전시설 운영 등을 고려하면 진도측에 조류발전소를 건설하는 것이 유리한 것으로 판단되었다. 따라서, 시험조류발전소 및 추후 건설예정인 상용조류발전소에 대하여 Fig. 1과 같이 평면배치계획을 수립하였다.

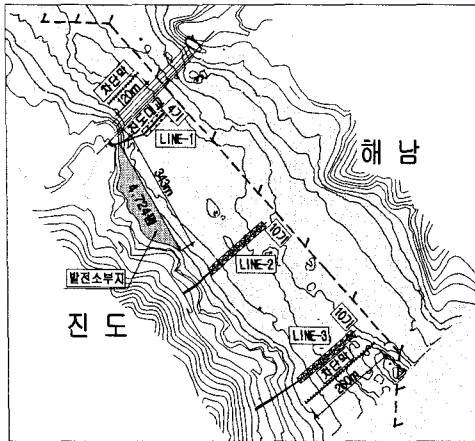


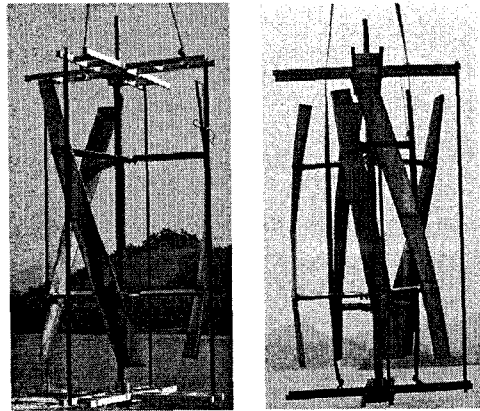
Fig. 1 Layout plan of Uldolmok tidal current power plant

## 3. 시험조류발전 터빈 설계

### 3.1 터빈 효율 평가

최초로 제안된 무낙차 터빈은 Darrius 터빈이었으나, 회전에 의한 맥동현상과 낮은 효율로 인하여 실제로 사용되지는 못했다. 그 이후 이를 개선하기 위한 많은 연구가 진행되었다. 그 중에서 특히 1994년 개발된 헬리컬 터빈은 Darrius 터빈의 장점만을 취하여 에너지 변환효율이 23%인 Darrius 터빈에 비하여 50%이상 효율을 개선하여 에너지 변환효율이 35% 정도인 것으로 보고

되었다<sup>(3),(4)</sup>. 따라서, 본 연구에서는 현재까지 개발된 조류발전용 터빈 중 가장 앞선 것으로 평가되는 헬리컬 터빈을 조류발전에 적용하는 것으로 계획하였다. 실내수리실험을 통하여 여러가지 터빈 형상에 대한 특성을 정성적으로 평가한 바 있다<sup>(3)</sup>. 헬리컬 터빈의 효율을 평가하기 위하여 20kW급 1중날개 터빈과 2중날개 터빈을 제작하여 현장실험을 실시하였다. 조류 유속이 3m/s 이하인 조건에 대하여 터빈의 효율을 평가한 결과, 1중 날개인 경우 유속이 1.4-2.6 m/s 사이에서 최대수차효율이 30-35%였으며, 2중 날개의 경우에는 유속 1.4-2.6 m/s 사이에서 25-35%의 최대효율이 나타남을 보였다<sup>(3),(5)</sup>. 최대수차효율시의 TSR(수차의 날개속도와 유속의 비)은 1중날개의 경우 2.57, 2중날개의 경우 2.07로 도출되었으며, 현장실험결과를 통하여 최대수차효율과 TSR의 상관관계가 제안된 바 있다<sup>(5)</sup>.



(a) single blade (b) double blade  
Fig. 2 Two types of Helical turbines used in field tests

### 3.2 터빈 크기 도출

현장실험에서 도출된 결과를 토대로 현장 실증시험에 사용될 터빈의 크기와 형태를 도출하였다.

조류발전 실증실험을 위한 시험발전소는 한 축에서 500 kW의 전력을 생산하는 것으로 계획되어 있다. 이때 발전시 수차 축에서의 손실율을 감안하면 최소 600 kW의 전력생산이 필요하다. 울돌목에 대한 계측자료에 의하면 정격유속은 4.8 m/s 정도로 나타났다. 따라서, 최소 500 kW의 전력이 생산되기 위해서는 지름 3m, 높이 3.6m인 수차 3개가 하나의 축에 설치되어야 하는 것으로 계산된다. 현장실험에서 도출된 상관관계식에 의하면 유속이 4.8 m/s이고, 수차의 지름이 3m인 경우 최적 전력발생시의 RPM은 1중날개의 경우 79, 2중날개의 경우는 63 정도로 예상된다. 그러나, 현장실험의 결과는 유속 3m/s 이하의 조건에서 도출된 것이므로 고유속에서의 적용성 여부는 추후 실증실험 수행시 재검증되어야 할 것으로 사료된다.

## 4. 1MW급 시험조류발전 구조물 설계

### 4.1 기초자료 조사

#### 4.1.1 조석 및 조류

설계 조석 및 조류를 도출하기 위하여 2002년에 수행된 조석 및 조류 현장조사 자료를 분석하여 결정된 설계 조위는 Fig. 3과 같다.

또한, 울돌목 협수로 중앙 약 27m 지점에서 유속을 관측하였으며, 대표적인 수심에서 평균적인 유속과 최대유속은 Table 1에 제시된 바와 같다. 전층 평균유속은 2.44 m/s (약 5 knots)이고, 전층 수심평균 최대유속은 4.75 m/s (약 9.5 knots)로 나타났다. 표층부근에서의 순간 최대유속은 5.98 m/s (약 12.5 knots)로 나타났다.

관측결과에 의하면 일부 수심에서 불규칙한 유속 특성을 보일 뿐 아니라 관측기기의 특성에 따른 오차도 존재하는 것으로 보여지기 때문에 지점에 따른 최대 및 평균유속의 분포를 설계에 적용하지 않고 안전측의 설계를 위하여 전층에 6.5 m/s(약 13 knots)의 유속을 적용하였다.

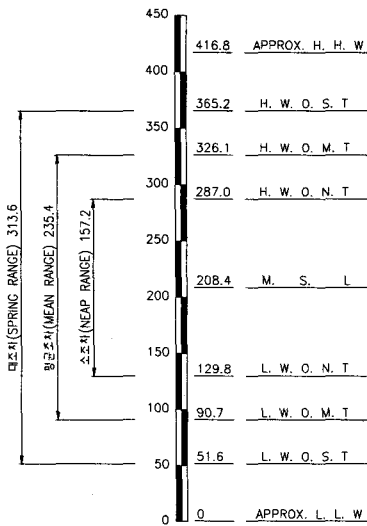


Fig. 3 Sea levels (unit:cm)

Table 1 Average and maximum velocity of flow

관측수심 (해저로부터 높이)	평균유속 [m/s]	최대유속 [m/s]
5 m	2.38	4.61
10 m	2.53	5.09
20 m	2.25	5.33
25 m	2.73	5.98
전층 수심평균	2.44	4.75

#### 4.1.2 파랑

울돌목 지역은 심해역에서 발생한 너울파가

침입하기 어려운 입지이므로 해상풍에 의하여 발생하는 풍파를 적용하여 설계파고를 산정하였다<sup>(2)</sup>. 상시(Operating condition)의 경우는 최대 10분 평균풍속의 평균을 이용하여 파고를 산정하고, 이상시(Storm condition)의 경우는 재현빈도 50년 풍속을 적용하여 파고를 산정하였으며, 파고산정결과는 Table 2와 같다<sup>(2)</sup>. Table 2에서 Jacket 구조물 설계시 설계파고는 최대파를 적용한다.

Table 2 Design wave

구분	상시 (Operating)	이상시 (Storm)
$H_{1/2}$ (m)	0.80	1.59
$H_{max}$ (m)	1.60	3.18
$T_{1/2}$ (sec)	3.14	4.29

#### 4.1.3 풍속

설계풍속을 결정하기 위하여 Table 3에 제시된 바와 같이 목포지역 풍속자료, 기존 설계사례 및 해남지방 기상대 관측자료를 분석하였다. 해남지방의 기상관측 자료를 토대로 산정된 재현기간 100년의 최대풍속(10분간 평균풍속)은 23 m/s이며, 순간 최대풍속은 약 38 m/s로 추산되었다. 이 값은 목포지역의 설계 기본풍속과 제2진도대교에 적용된 설계풍속보다 작으므로 안전측을 고려하여 45m/s를 설계 기본풍속으로 결정하였다.

Table 3 Design wind velocity

관련규정	재현기간 100년, 10분간 평균풍속	비고
항만 및 어항설계기준	45 m/s	목포지역
도로교 설계기준	45 m/s	목포지역
제2진도대교 적용 기준	45 m/s	목포지역
해남관측소 관측자료	23 m/s *순간최대풍속 = 38 m/s (100년빈도)	20년간 자료

## 4.2 조류발전 시설물 구조형식 검토

울돌목 조류발전기에 적용가능한 발전구조물은 Jacket식, 부유식, 그리고 Catamaran식 등이 있다. 이 중에서 발전효율성, 시공성, 안정성 및 경제성 등을 고려하면 Jacket식의 경우 플랫폼이 고정되어 있어 발전작업 및 유지관리시 우수한 작업조건을 가지고 있으며, 특히 부유식 구조물과 비교할 경우 설치 및 작업비용 측면에서 유리하고 경제성도 높은 것으로 판단되었다<sup>(1),(2)</sup>.

Jacket식은 제작을 위한 작업조건들과 설치지점으로 예인, 해저면 거치 및 고정 등과 같은 환경데이터들이 고려되어야 하고, 낮은 수심에 설치될 경우에는 강재가 많이 필요하지 않기 때문에 재료비가 절감되고, 강구조체의 제작이 수월

하고 빠르다는 장점이 있다. 또한 파랑, 조류 등에 저항할 수 있는 적절한 원형 단면을 가진 부재로 이루어져 시공성이 우수하다. 다만, 유지관리에 필요한 플랫폼이 별도로 필요할 수 있으며, 크레인의 위치조건이 검토되어야 한다. 수면아래의 부재에 대해서는 부식을 고려하여 아노드를 부착하여야 한다.

한편 울돌목 현장실험시 나타난 양식장 및 어장 등에 의한 부유폐기물(그물, 로프, 부표 등)로부터 발전설비를 보호하기 위하여 폐기물 차단막을 설치하는 것으로 설계하였다. 차단막 단면 및 형식은 발전효율과 경제성, 유지보수 및 안정성 측면을 고려하였다.

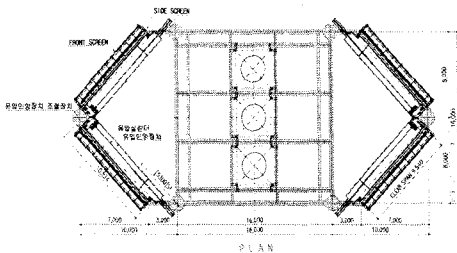


Fig. 4 Plane diagram of Jacket

### 4.3 구조물 설치

Jacket 구조물과 상부하우스를 포함하는 시험조류발전소의 크기는 가로, 세로 및 높이가 각각 16m, 36m, 48m이고, 총중량은 약 1,000톤 정도이다. 또한 육상에서부터 발전구조물까지 90m의 연결교도 설치된다.

울돌목 시험조류발전소 구조물 건설공사의 일반적인 작업순서는 Fig. 5와 같으며, 2007년 상반기 완공을 목표로 현재 시공중이다. Fig. 6은 제작중인 Jacket이다.

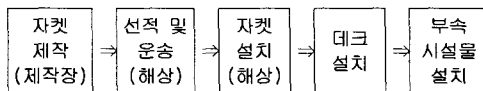


Fig. 5 Construction process of Uldolmok pilot tidal current power plant

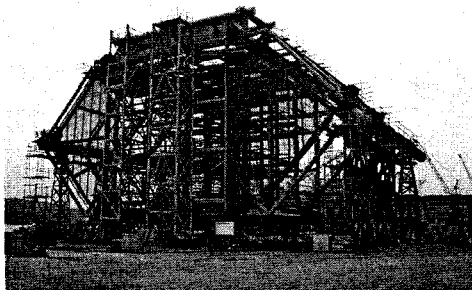


Fig. 6 Manufacturing of jacket

### 4.4 조류발전 시스템

울돌목 시험조류발전을 위하여 축 및 케이지, 터빈 및 발전기도 현재 설계, 제작중이다. 실증시험을 통하여 발전기 및 전력변환장치의 특성을 평가하기 위하여 시험조류발전소의 조류발전 시스템에는 동기발전기(Synchronous Generator)를 적용한 500kW급 조류발전 시스템과 권선형유도발전기(Doubly-fed Induction Generator)를 적용한 500kW급 조류발전 시스템이 각각 적용될 예정이다.

## 5. 결론

본 논문에서는 1MW급 조류발전 실증실험을 위해 진행중인 울돌목 시험조류발전소의 설계인자를 도출하였다. 설계인자는 울돌목 해역에 대한 현장조사, 현장시험 및 수치해석을 통해 도출된 결과를 토대로 결정되었으며, 설계는 발전효율성, 시공성, 안정성 및 경제성 등을 우선적으로 고려하여 수행되었다.

시험조류발전소는 2007년 상반기 완공을 목표로 현재 시공이 진행 중이며, 시험조류발전소에는 다양한 형태의 수차, 발전기 및 전력변환장치 등이 설치되어 다양한 실증실험이 수행될 예정이다. 향후 시험조류발전소에서의 실증실험을 통하여 효율적인 조류발전 시스템을 도출하고 조류에너지 실용화를 위한 기술을 정립할 수 있을 것으로 기대된다.

## 후기

본 연구는 해양수산부의 “조력·조류에너지 실용화 기술개발” 사업의 일환으로 수행되었습니다.

## References

- [1] 이광수, 염기대, 박진순, 강석구, 박우선, 한상훈, 정공일, 박정우, 2005, “울돌목 조류에너지 개발현황과 전망”, 한국신재생에너지학회 춘계 학술대회 논문집, pp. 512-515, 한국신재생에너지학회
- [2] 해양수산부, 2006, 조력·조류에너지 실용화 기술개발(1단계).
- [3] 해양수산부, 2002, 해양에너지 실용화 기술개발(II): 조력·조류에너지.
- [4] Gorlov, A. M., 1999, Helical turbines for harnessing zero-head hydro and wind energy, Assembly Environmental Forum.
- [5] 한상훈, 이광수, 염기대, 박우선, 박진순, 이진학, 2006, “현장계측에 의한 조류 발전용 수차의 효율 평가”, 한국신재생에너지학회 춘계 학술대회 논문집, pp. 517-520, 한국신재생에너지학회