

## 하동화력발전소 방수로 조류식 발전량 산정 및 시스템 설계

강 금석<sup>1)</sup>, 김 지영<sup>2)</sup>, 이 대수<sup>3)</sup>, 이 광수<sup>4)</sup>

### Capacity Estimation and System Design of Current Power Generation at the Discharge Channel of Hadong Thermal Power Plant

Keum-Seok Kang, Jiyoung Kim, Dae-Soo Lee, Kwangsoo Lee

**Key words** : Hadong thermal power plant(하동화력발전소), Helical turbine(헬리컬 수차), Tidal current power generation(조류력 발전), Discharge channel(방수로), Stream turbine(조류식 수차)

**Abstract** : 국내 대형 기력발전단지에서 냉각수로 사용되고 방류되는 해수는 약 150 cms로 (100 Mwe 당 약 5 cms) 약 3,000 kW 이상의 수력에너지를 보유하고 있으나, 현재 활용되지 못하고 그대로 해양으로 방류되고 있다. 발전소 방수로는 흐름조건이 비교적 균일하고, 파랑 내습이 없으며, 부유사, 해조류, 부유물 충돌 등의 문제가 발생하지 않아 자연 해양조건보다 조류력 발전에 매우 유리하나, 수심이 낮고, 순환수 계통에의 영향으로 다수의 수차를 설치하기는 어려운 조건을 지니고 있다.

따라서, 인공수로의 균일하고 양호한 흐름조건에 적합한 보다 경제적인 수차를 개발하고, 발전량을 증대하기 위한 수차 배치 기술, 수차 및 발전기 지지구조물의 설계 기술, 계통 연결 기술등을 개발할 필요가 있으며, 이를 위하여 시험용 조류식 발전시스템을 제작하여 수차의 성능 및 전체 발전시스템의 성능을 평가하여 발생하는 문제점을 해결하고자 한다. 본 연구에서는 시험용 조류식 발전시스템을 하동화력발전소 방수로에 적용하기 위하여 현장 특성 분석, 형식 선정, 발전량 산정 등의 시스템 설계를 수행하였다.

#### Nomenclature

- A : front area of turbine, m<sup>2</sup>
- $\eta$  : efficiency
- P : output, kW
- $\rho$  : seawater density, 1.025 t/m<sup>3</sup>
- V : velocity, m/s

#### 1. 서 론

발전소가 냉각수로서 해수를 사용하는 과정에서 대형 취배수 구조물을 이용하는데 냉각수 방류는 Box Culvert 혹은 개수로 형태의 구조물로서, 온배수 방수로에는 유속 2m/s 이상의 빠른 흐름의 수로가 존재하여 수력발전을 꾀할 수 있다. 특히 하동, 보령, 당진 등 국내 대형 화력발전단지에서 냉각수로 사용되고 방류되는 해수는 약 150cms로 (100Mwe당 약 5t/s) 약 3,000kW 이상의 수력에너지를 보유하고 있으나, 현재 활용되지 못하고 그대로 해양으로 방류되고 있어 이에 대한 회수를 고려할 필요가 있다. 발전소 온배수의 원활한 배수를 위한 설계 낙차와 함께 남서해안의 조위변화에 따른 낙차로 인하여 온배수 방수

로에서 고유량, 고유속의 흐름에너지가 존재하며, 방류량이 일정하여 이를 이용할 경우 연중 일정한 전력을 생산할 수 있고 발전량 또한 매우 크다. 발전소 방수로는 흐름조건이 비교적 균일하고, 파랑 내습이 없으며, 부유사, 해조류, 부유물 충돌 등의 문제가 발생하지 않아 자연 해양조건보다 조류력 발전에 매우 유리하나, 수심이 낮고, 순환수 계통에의 영향으로 다수의 수차를 설치하기는 어려운 조건을 지니고 있다.

따라서, 인공수로의 균일하고 양호한 흐름조건에 적합한 보다 경제적인 수차를 개발하고, 발

- 1) 한국전력공사 전력연구원  
E-mail : gldstn@kepri.re.kr  
Tel : (02)865-5762 Fax : (02)865-5725
- 2) 한국전력공사 전력연구원  
E-mail : jykim77@kepri.re.kr  
Tel : (02)865-5772 Fax : (02)865-5725
- 3) 한국전력공사 전력연구원  
E-mail : dslee@kepri.re.kr  
Tel : (02)865-5760 Fax : (02)865-5725
- 4) 한국해양연구원  
E-mail : kslee@kordi.re.kr  
Tel : (031)400-6300 Fax : (031)408-5823

전량을 증대하기 위한 수차 배치 기술, 수차 및 발전기 지지구조물의 설계 기술, 계통 연결 기술 등을 개발할 필요가 있으며, 이를 위하여 시험용 조류식 발전시스템을 제작하여 수차의 성능 및 전체 발전시스템의 성능을 평가하여 발생하는 문제점을 해결하고자 한다. 본 연구에서는 시험용 조류식 발전시스템을 하동화력발전소 방수로에 적용하기 위하여 현장 특성 분석, 형식 선정, 발전량 산정 등의 시스템 설계를 수행하였다.

## 2. 현장 조건

하동화력 순환수계통은 해수양수펌프가 없는 1단 취수 방식으로 총 방류량은 최대 156cms에 달하며, 3련의 Box Culvert를 지나서, 그림 1과 같이 개수로 형식, 약 250m 길이의 배수로를 통하여 해양으로 방류된다. 방수로 중간부 및 말단부에서 2회에 걸쳐 조위, 유속, 수위를 관측하였으며, 발전시스템 설치 지점인 중간부에서의 유속 관측결과는 그림 2와 같다. 수심은 3m ~ 5m 사이로 매우 불규칙한 양상을 보이고 있다.

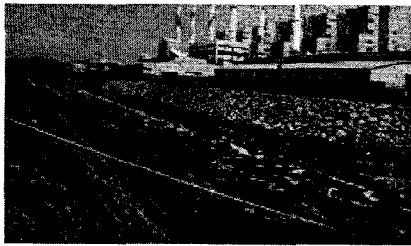


그림 1 하동화력 해수방수로

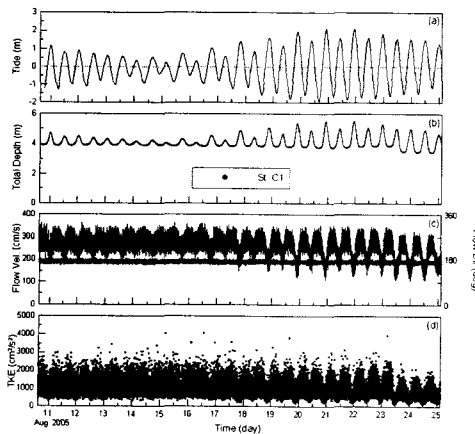


그림 2. 수류특성 관측 결과

## 3. 조류식 발전시스템 형식 선정

### 3.1 설치 위치

발전시스템의 설치위치는 Box Culvert 출구부 (A지점), 방수로 중간부(B지점), 방수로 말단부

(C지점)을 고려할 수 있다. A지점은 Box Culvert 출구부로 유속이 제일 큰 지점으로 큰 발전량을 기대할 수 있지만, Box Culvert의 빠른 흐름이 방수로와 접하며 안정화되는 지역으로서 흐름의 교란이 심해 흐름의 안정성이 떨어진다. B지점은 방수로의 중간부로 안정적인 일방향 흐름을 얻을 수 있다. C지점은 방수로 말단부로 외해와 연하여 외해 수위의 영향을 크게 받아 유속의 변화가 매우 큰 지역이다. 단, C지점은 하류로서 계통영향을 최소화할 수 있는 지역이다.

안정적인 일방향 흐름이며, 유속과 수심의 변화폭이 작고, 가장 큰 수심이 확보되는 B지점이 설치위치로서 최적으로 판단되었다.

### 3.2 수차 형식

조류식 발전에 주요하게 이용하고 있는 수차는 프로펠러 형식과 Cross-flow 수차의 일종인 Helical 수차이다. 본 연구와 같은 인공수로에는 Helical 수차가 유리할 것으로 판단되는데, 우선 효율이 약 35%로 상대적으로 높으며, 프로펠러 수차는 수차당 각각 발전기를 설치해야 하는 반면, Helical 수차는 축을 연결하여 직렬식 구조를 이룰 경우 한 발전기에 여러개의 수차를 연결할 수 있는 장점이 있다. 또한, Helical 수차의 경우 인접한 수차와의 간섭이 적어 동일한 공간에서 프로펠러 수차보다 많은 대수를 설치할 수 있는 장점이 있어, 본 연구에서는 Helical 수차를 선정하였다.

### 3.2 지지구조물 형식

현장조건 및 시험목적, 발전량을 고려하여, 지지구조물의 형식, 수차축의 연결방식, 동력전달장치의 형식을 검토하여 표 1과 같이 5개의 대안을 검토하였다. 최적안으로는 시공 및 유지관리가 편리하며, 지지구조물과 수차들이 일체화되어 제작비가 가장 작은 방안인 제5안으로 선정하였다.

표 1. 수차 지지구조물 대안 검토

대안	지지구조물	수차축	동력전달장치	발전기 위치
제1안	교량형	수평축	직각(베벨기어)	지상
제2안	교량형	수직축	직선	지상
제3안	수차틀 인양식	수평축	직각(베벨기어)	지상
제4안	레일형	수평축	직선	수중
제5안	Concrete Box형	수평축	직각(베벨기어)	지상

### 3.3 수차 축방향

Helical 수차를 연결하는 방식에 따라 수평축과 수직축, 직렬과 병렬 방식을 고려할 수 있다. 동력전달장치가 복잡하여 효율 감소 우려가 있지만, 발전기 공유로 비용이 절감되며, 단순한 구조인 수평축 방식을 선정하였다. 수직형 수차축의 경우 수차당 각각 발전기를 설치하거나, 병렬 연결 방식을 택할 수 있으나, 병렬 연결의 경우 효율 감소가 매우 크고, 수차당 각각 발전기를 설치할 경우는 비용이 크게 증가하기 때문에 수평축이 유리할 것으로 판단된다.

## 4. 수리분석 및 발전량 산정

### 4.1 조류식 발전 적용 유량

순환수펌프의 최대유량 및 실측유량 등은 직접적으로 조류식 발전으로 유입되는 유량의 기준이 된다. 최대유량은 저수위시에 나타나며 발전소 방류량 전체를 이용하고, 고수위시에는 하부의 유량만을 이용하는 구조이다. 최대유량은 설계유량으로 156 m<sup>3</sup>/s이며, 최저유량은 고수위시 수차부를 지나는 유량으로 방류량의 약 1/3에 해당한다. 따라서, 고수위시에는 가이드 베인을 이용하여 수차부를 지나는 유량을 증가시킬 필요가 있다.

### 4.2 조류식 발전 설계 수위 및 유속

방수로에서 조류식 수차 설치지점의 관측 유속 및 수위는 수차를 설치함으로써 약간 변화할 가능성이 있다. 관측 유속은 수차 설치 이전의 국부적인 한 지점의 유속이나, 수차를 설치하는 경우는 수차구조물 전체가 방수로의 흐름을 단면을 따라 균일하게 하기 때문에 관측유속보다는 감소할 것이며, 수위는 수차구조물의 저항으로 인하여 증가할 것이다. 조류식 발전시스템 수차 및 동력전달장치, 발전기의 규모 및 용량을 결정하는 설계기준은 최대유속, 최저수위가 되므로 본 설계에서는 관측 최대유속과 관측 최저수위를 채택하기로 한다.

#### (1) 설계수위

- 최대수위: 5.55 m
- 평균수위: 4.13 m
- 최저수위: 2.12 m <= 설계 기준

#### (2) 설계유속

- 최대유속: 363.4 cm/sec <= 설계 기준
- 평균유속: 261.35 cm/sec
- 최저유속: 103.58 cm/sec

### 4.3 수차 크기 및 대수 결정

수심 및 유속 관측결과와 지지구조물 형식을 바탕으로, 수차의 재원을 결정하였다. 설치 지점

의 수심 관측 결과, 수심이 최소 2.12m이며, 큰 발전량을 얻을 수 있도록 터빈의 크기를 가능한 확대하여 수차의 크기를 1.5m(폭)x1.8m(길이)로 결정하였다. 여기서, 폭은 수로 저면과 상부의 여유 수심, 0.62m를 감안한 것이며, 길이는 선형 연구를 통해 가장 효율적이라고 알려진 폭의 1.2배를 이용하였다. 이 경우 현 방수로 수로폭에서 1열에 6기 설치가 가능하다.

### 4.4 발전출력 산정

발전출력 또는 전력(kW)은 다음과 같은 식에 의하여 계산되며, 여기서 유속은 관측유속을 사용한다.

$$P = 0.5 \times \eta \times \rho \times A \times V^3 \quad [\text{kW}] \quad (1)$$

여기서, P는 출력, η는 효율, A는 수차의 전면 면적, V는 유속이다.

설치 지점의 유속분포가 비교적 균일함에 따라 유속분포의 90%에 해당하는 유속에 대한 출력을 정격출력으로 사용하였다. 관측결과 90%에 해당하는 유속은 3.3m/s로서 수차의 정격출력은 아래와 같이 1기당 17.4kW로 산정된다(수차 효율 35% 적용). 1열에 6기를 설치할 수 있으며, 이때 수차 1열당 정격출력은 104.4kW이다. 정격속도는 100rpm으로 한다.

$$\begin{aligned} P &= 0.5 \eta \rho A V^3 \\ &= 0.5 \times 0.35 \times 1.025 \times 1.5 \times 1.8 \times 3.3^3 \\ &= 17.4 \text{ [kW]} \end{aligned}$$

동력전달장치에 의한 효율은 90%로 전기설비 효율은 94%로 가정한다.

### 4.5 수차구조물에 의한 손실손실

조류식 발전시스템에서는 관수로 형태의 흐름을 이용하는 수력발전과는 달리 수두차를 이용하지 않고 자유수면을 갖는 개수로에서의 유속만을 고려하므로 수차 상류에서의 접근유속과 하류의 통과유속 사이의 차이가 발생하며 또한 상류와 하류에 수위차가 발생한다. 수차에 의한 마찰, 난류 등에 의한 손실수두는 수차효율에 포함되므로 이에 대한 별도의 손실수두 계산은 불필요한 것으로 판단된다. 고려해야 할 손실수두는 수차구조물에 의한 단면 축소 효과, 수위 상승, 유속의 증감 등이 있다. 조류식 발전시스템에 의하여 확보되는 에너지를 역으로 수두로 환산하였을 때 약 10cm 이하의 미미한 수위차를 보인다. 이외의 손실수두는 실험 과정에서 관측에 의하여 파악할 계획이다.

### 4.6 수차 효율 및 발전량 계산

효율은 수차효율과 동력전달장치 효율, 발전

기효율이 있으며 이를 곱한 것을 합성효율이라고 하며 합성효율은 주로 수차효율에 지배된다. 수차 효율 35%, 동력전달장치 효율 90%, 발전기 효율 94%로서 합성효율 30%를 유량 및 낙차에 관계없이 일정하게 적용하였다.

본 조류식발전설비의 정격출력은 약 90kW이며, 연평균발전량은 788MWh으로 예상된다. 그러나, 본 연구에서는 현장에 설치하는 시험용 조류식발전시스템을 통하여 유속 및 유량의 변화에 따른 수차 효율 및 발전량의 변화를 평가할 계획이다.

## 5. 상세 시스템 설계

### 5.1 시스템 구성

하동화력 조류식 발전시스템의 시스템 구성은 그림 3과 같다. 수차 2기가 1 set를 이루며, 수평축으로 연결된 후 베벨 기어를 통해 수직축으로 증속기 및 발전기와 연결된다.

### 5.2 수차 부속 설비

수차 부속 설비로는 축을 비롯하여, 수차의 연결 및 탈부착을 위한 커플링 및 베어링이 있으며, 수차의 회전수 제어 및 정지를 위한 브레이크, 유입유량을 확보하여 효율 증대를 위한 가이드 베인 등이 있다.

### 5.3 동력전달 장치

동력전달 장치는 동력 전달축의 방향 변경을 위한 베벨 기어, 동력 전달축 지지를 위한 스러스트 베어링, 회전수 증대를 위한 증속기 등으로 구성된다.

### 5.4 전기 설비

발전기는 16극, 200kW급 농형 유도발전기를 이용하며, 하동화력 소내 변압기 2차측에 연결하는 것으로 설계하였다.

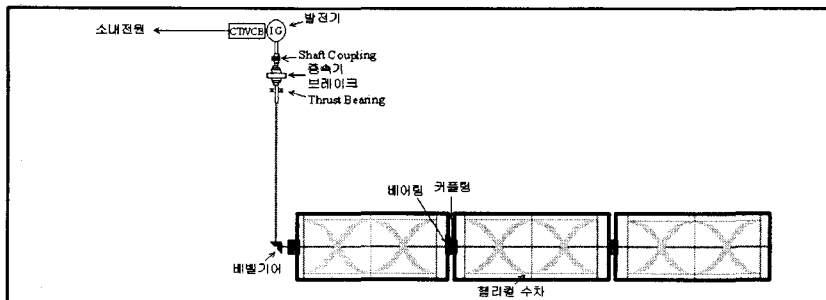


그림 3. 시스템 구성도

## 6. 결론 및 향후 연구방향

본 연구는 국내의에 아직 적용 실적이 없는 발전소의 해수방류수를 이용한 수력발전시스템의 개발을 위하여 하동화력발전소 방수로에 설치하는 조류식 발전시스템을 설계하였다. 특히, 일반 소수력방식의 적용이 곤란한 1m 이하의 초저낙차 지점에 조류식 발전시스템의 적용이 가능할 것으로 판단된다. 시험용 조류식 발전시스템을 제작하여 수차의 성능 및 전체 발전시스템의 성능을 평가하여 발생하는 문제점을 해결하고, 적용 여건이 가장 좋은 온배수 배수로에 조류식 발전시스템을 지속적으로 운용하며, 조류식 수차의 성능개선 등 기술의 발전을 꾀할 수 있을 것이다. 또한, 최근까지 국내에서 개발된 조류식 수차(해양연구원)의 연구성과를 활용하여 현장 적용을 꾀함으로써 국내 기술의 발전에 기여할 수 있으며, 그동안 연구개발 단계였던 조류력 발전 기술의 상업화를 위한 중요한 역할을 할 수 있을 것이다. 현재 시험용 조류식 발전시스템이 제작 중에 있으며, 향후 시험 운영을 통해 성능을 평가하고, 문제점을 개선하여 상용화를 위한 최적 설계안을 제시할 계획이다.

## References

- [1] A.M. Gorlov(2004). Tidal Energy Project for the Uldolmok Strait, using Gorlov Helical Turbines (GHTs) Technical Report No. 3
- [2] Korea Ocean Research & Development Institute(1997). Tidal Power Plants
- [3] 산업자원부(2006). 발전소 해수방수로 조류식발전시스템 개발(1차년도 중간보고서).
- [4] 한국전력공사 전력연구원(2006). 하동화력 조류식발전 시험설비 설계보고서.
- [5] 해양수산부(2001). 해양에너지 실용화 기술개발(I): 조력·조류에너지
- [6] 해양수산부(2002). 해양에너지 실용화 기술개발(II): 조력·조류에너지
- [7] 해양수산부(2006). 조력·조류에너지 실용화 기술개발 1단계 보고서