

## 시화호 조력발전소

정 진달, 백 두현, 이 상오

### SiHwa Lake Tidal Power Plants

JinDal Chung, DooHyun Paik, ShangOh Lee

**Key words :** 해양에너지, 조력발전, 시화호

**Abstract :** 엄청난 자원의 매장고, 국가간의 대규모 교역을 가능케 한 항로, 어족자원의 공급원등으로서 인류의 생존과 번영에 일익을 담당하고 있는 바다는 인간의 증가하는 에너지 수요를 지속적으로 감당할 수 있는 무공해에너지의 보고로도 다가오고 있다. 그러나, 에너지 밀도가 타 에너지에 비하여 상대적으로 낮아 큰 규모의 에너지추출장치가 필요하다는 단점에도 불구하고, 대부분의 바다에서 하루에 두 번 씩 발생하는 조석현상을 이용하는 조력발전은 조석의 반복적이고 주기적인 특성, 태양계가 존속하는 한 영구히 발생한다는 영속성, 현대과학과 관련기술의 진보 등으로 전 세계적으로 그 개발에 인류의 관심이 높아져 있다.

현재 조력발전소가 건설 중인 시화호는 포화상태에 있는 수도권에 공업용지를 공급하고 우량농지 조성으로 경쟁력 있는 농업을 육성하기 위하여 담수호로 조성되었으나, 하수처리장 등 기초환경시설이 미비한 상태에서 인근지역으로부터 오염물질이 유입되어 수질이 악화되자 정부는 수질개선을 위하여 시화호를 해수호로 용도를 변경하였다. 본 논문에서는 조수간만의 차를 이용하여 무공해 전력을 생산하는 조력발전의 원리 및 최적발전량 산정기법과 높은 조수간만의 차로 조력개발적지로 유망한 서해안에 건설하게 될 시화호 조력발전소의 사업 및 기후변화협약 이행시 기대효과 등에 대하여 논하고자 한다.

### 1. 서론

너울거리는 파랑, 밀물과 썰물, 해협을 통과하는 해류등 여러 가지의 모습을 가지고 있는 바다는 거대한 자원의 보고로 인간의 늘어나는 에너지수요를 지속적으로 감당할 수 있는 무공해에너지를 보유하고 있다. 해양에너지를 활용한 발전방식으로는 조력발전, 파력발전, 조류발전, 온도차발전 등이 있으나 이 중에서도 대부분의 바다에서 하루에 2번씩 발생하는 조석현상을 활용한 조력발전은 에너지 추출 및 관련기술의 발전으로 대규모 상업발전이 가능하게 되었다.

우리나라에서도 서해안에 조력발전에 대한 연구와 조사가 과거에서부터 이루어졌으나, 현재 건설 중인 조력발전소는 시화호 조력발전소로 2004년에 착공되어 2009년에 준공예정이다. 시화호는 당초 산업용지 조성 및 농업용수 확보를 위해 담수호로 조성되었으나 오염물질의 파다유입으로 인하여 수질오염 문제가 발생되자, 정부는 해수호로 용도전환 하였다. 이에 따라 한국수자원공사는 시화호의 수질개선을 위한 대량의 해수유통과 서해안의 높은 조수간만의 차를 활용하기 위하여 조력발전소 건설을 계획하게 되었다. 일

괄입찰방식에 의한 낙찰자로 대우건설이 선정된 본 공사는 기본설계가 2004년 6월 완료되었고, 현재 가설비 공사와 영구설비에 대한 상세설계가 마무리 단계이다. 본 논문에서는 조력발전의 원리 및 최적발전량 산정기법과 함께 시화조력사업 및 기후변화협약에 따른 효과 등을 다루고자 한다.

### 2. 조력발전

#### 2.1 조석현상

지구, 달, 태양의 인력과 지구자전의 평형에 의하여 발생하는 해수면의 현상으로 해수면의 상하운동을 조석이라 하며, 해수의 이동현상을 조류라 한다. 조석현상의 특징은 지역적으로 차이는 있으나 가장 규칙적으로 일어나는 해양현상중의 하나로 예측이 가능하다는 점이다. 이러한 주기성과 예측가능성 때문에 옛날부터 조석현상이 에너지원으로 주목을 받아왔다. 일반적으로 평균 조차(연속되는 간조, 만조위간의 차)가 5m 정도 이상이면 경제성 있는 조력발전이 가능하다.



조지의 용적변화에 따른 새로운 조지의 수위(TWL<sub>i+1</sub>)는 다시 (식-1)을 이용하여 구하여진다.

2) 낙차(Gross head)

① 총낙차(Hgross)

총낙차(Hgross)는 해수위(HWL)와 조지수위(TWL)의 차로 발전중에는 총낙차는 “+” 가 되며, 조지방류시에는 총낙차는 “-” 이된다.

$$H_{gross} = HWL - TWL \quad (\text{식 - 4})$$

Tr	해수위 (HWL)	평균 해수위	조지수위 (TWL)	평균 조지수위	총낙차
h	m	m	m	m	m
0.10	-1.18	-1.18	-1.00	-1.00	-0.18
0.20	-1.31	-1.25	-1.04	-1.02	-0.23
0.30	-1.44	-1.38	-1.08	-1.06	-0.32
0.40	-1.57	-1.51	-1.13	-1.10	-0.41

② 순낙차(Net head)

순낙차는 총낙차에서 취수구 및 흡출관 출구부에서의 손실  $H_{net} = H_{gross} - H_{loss}$

$$H_{loss} = H_{loss_{Intake}} + H_{loss_{Drafttube\ exit}} = 0.223 * \frac{Q_{turb}^2}{482.1^2}$$

$$Q_{turb} = \frac{Q_{Plant}}{10}$$

3) 조지배수시 배수량 계산

총낙차가 “-” 인 즉, 조지배수시는 다음의 식에 의하여 계산이 된다.

$$Q_{Plant} = Q_{OG} + Q_{NG} + Q_{Travers} \quad (\text{식 - 5})$$

$Q_{OG}$ : 기존수문을 통한 방류량(m<sup>3</sup>/s)

$Q_{NG}$ : 신규수문을 통한 방류량(m<sup>3</sup>/s)

$Q_{Travers}$ : 발전없이 도수로를 통한 방류(m<sup>3</sup>/s)

① 기존수문을 통한 방류량( $Q_{OG}$ )은 다음 식에 의하여 계산이 된다.

$$Q_{OG} = Z_{OG} * C * B * H_2 * (2g\Delta H)^{0.5} \quad (\text{식 - 6})$$

- $Z_{OG}$ : 기존수문의 개수(8문)
- C: 기존수문의 유량계수
- B: 기존수문의 폭(12 m)
- $H_2$ : 기존수문 sill 표고 (EL. - 6.0 m)
- g: 중력가속도(9.8 m/s<sup>2</sup>)
- $\Delta H$ :  $H_{gross}$  [m]

② 신규수문을 통한 방류량( $Q_{NG}$ )은 다음 식에 의하여 계산이 된다.

$$Q_{NG} = Z_{NG} * 839 * \Delta H^{0.3855} \quad (\text{식 - 7})$$

-  $Z_{NG}$ : 신규수문의 개수(8문)

-  $\Delta H$ :  $H_{gross}$  [m]

③ 발전없이 도수로를 통한 방류량( $Q_{Travers}$ )은 다음 식에 의하여 계산이 된다.

$$y = (k6 * x^6 + k5 * x^5 + k4 * x^4 + k3 * x^3 + k2 * x^2 + k1 * x + k0) * 10 \quad (\text{식 - 8})$$

- y ( $Q_{Travers}$ ): 도수로를 통한 방류량 (m<sup>3</sup>/s)

- x ( $H_{gross}$ ): 총낙차

k6	6.15E+01	k2	1.24E+03
k5	4.33E+02	k1	6.08E+02
k4	1.20E+03	k0	-1.52E+01
k3	1.66E+03		

4) 최적발전개시낙차 결정

연간전력생산량을 최적화하기 위해서 수차는 조석에 따른 발전개시낙차를 결정하여야 한다. 발전개시낙차 결정을 위한 식은 아래와 같이 나타내어 질 수 있다.

$$y = k6 * x^6 + k5 * x^5 + k4 * x^4 + k3 * x^3 + k2 * x^2 + k1 * x + k0 \quad (\text{식 - 9})$$

- y: 발전개시낙차 (m)

- x: 조차 (m)

k6	0	k2	2.13E-01
k5	0	k1	4.74E-01
k4	1.63E-03	k0	-4.35E-01
k3	-4.0E-02		

앞서 기술한 바와 같이 한 조석동안의 발전량은 발전개시 수두차에 따라 민감하게 변화하게 되는데 매 조석마다 발전량이 최대가 되는 개시수두차를 결정하여 연간 최대발전량을 산정하게 된다. 시화조력의 경우 연간 발전량 산정결과 최적발전개시 수두차는 3.0 ~ 3.8m 에 약 70%가 분포하는 것으로 나타났다. 최적발전개시수두차의 결정은 발전가능 최소수두차부터 정격수두차까지 수두차를 0.1m씩 증가시키면서 발전량을 산정하여, 각 계산결과중 최대발전량이 산정되는 수두차를 최적발전개시수두차로 결정하게 된다.

5) 발전시 사용수량 계산

총낙차가 “+” 가 되는(해수위가 조지수위보다 높은 경우) 경우에도 발전개시낙차보다 적은 경우는 발전사용수량( $Q_{Plant}$ )은 0이 된다. 만일 총낙차가 발전개시낙차에 도달하면 발전사용수량은 수차의 성능곡선도(hill-chart)에 의한다.

① 정격낙차(5.82m) 이상의 영역에서 총낙차에 따른 사용수량은 다음 식에 의하여 계산된다.

$$y = (k6 * x^6 + k5 * x^5 + k4 * x^4 + k3 * x^3 + k2 * x^2 + k1 * x + k0) * 10 \quad (\text{식 - 10})$$

- y : 발전시 사용수량( $Q_{Plant}$ , m<sup>3</sup>/s)

- x : 총낙차 (m)

k6	0	k2	1.74E+02
k5	0	k1	-1.34E+03
k4	0	k0	3.92E+03
k3	-7.8E+00		

② 총낙차가 5.82m에서 1.96m까지의 사용수량 ( $Q_{Plant}$ )은 다음 식에 의하여 계산이 이루어진다.

$$y = (k6 \cdot x^6 + k5 \cdot x^5 + k4 \cdot x^4 + k3 \cdot x^3 + k2 \cdot x^2 + k1 \cdot x + k0) \cdot 10 \quad (\text{식 - 11})$$

- y : 발전시 사용수량 ( $Q_{Plant}$ ,  $m^3/s$ )
- x : 총낙차 (m)

k6	-6.27E-00	k2	1.80E+03
k5	-1.46E+01	k1	-2.47E+03
k4	1.38E+02	k0	1.76E+03
k3	-6.75E+02		

③ 총낙차가 1.96m에서 1.08m까지의 사용수량 ( $Q_{Plant}$ )은 다음 식에 의하여 계산이 구하여진다.

$$y = (k6 \cdot x^6 + k5 \cdot x^5 + k4 \cdot x^4 + k3 \cdot x^3 + k2 \cdot x^2 + k1 \cdot x + k0) \cdot 10 \quad (\text{식 - 12})$$

- y : 발전시 사용수량 ( $Q_{Plant}$ ,  $m^3/s$ )
- x : 총낙차 (m)

k6	0	k2	1.21E+02
k5	0	k1	-2.76E+01
k4	0	k0	1.97E+02
k3	-2.67E+01		

### 6) 발전소 수차출력 계산

발전소의 수차출력은 아래의 식에 의하여 계산이 된다.

$$P_{Turb} = H_{net} \cdot Q_{turb} \cdot \eta_{Prot} / 100 \cdot \rho \cdot g / 1000000$$

- $\rho$  : 해수의 밀도(1025  $kg/m^3$ )
- g : 중력가속도(9.8  $m/s^2$ )

따라서, 발전소 출력은  $P_{Turb-Plant} = P_{Turb} \cdot 10$

### 7) 발전소 출력 계산

실제 발전출력( $P_{Gen-Plant}$ )은 발전기 및 베어링 손실을 제외하고 구하여진다.

$$y = (k6 \cdot x^6 + k5 \cdot x^5 + k4 \cdot x^4 + k3 \cdot x^3 + k2 \cdot x^2 + k1 \cdot x + k0) \cdot 10$$

- y : 발전기 및 베어링손실( $P_{loss \text{ gen Plant}}$ )
- x : 발전개시낙차( $H_{gross \text{ start}}$ )

k6	-1.99E-17	k2	-1.33E-02
k5	7.14E-07	k1	7.66E-02
k4	-4.72E-05	k0	2.90E-02
k3	-1.18E-03		

### 8) 연간발전량 산정

구간별 산출된 전력량(MWh)은 다음식에 의하여 구하여진다.

$$\Delta E = P_{Gen-Plant} \cdot \Delta T$$

$$-\Delta T = \text{time interval} = 0.1 \text{ h}$$

년간 전력생산량 산출을 위한 조석기간은 1년, 즉 8,760시간으로 0.1h의 구간으로 나눌 시 87,600개의 단계로 구하여진다. 따라서 전력생산량은 87,600구간에서 구하여진 전력량을 적분함으로써 구하여지는데 이로써 구하여진 전력생산량은 582.3GWh으로 나타났다.

## 3. 시화호 조력발전소 건설사업

### 3.1 수차

조력발전의 낙차는 수력발전에 비하여 무척 낮고, 유량은 제한을 받지 않기 때문에 조석의 효율적인 활용을 위해서는 저낙차 대유량 수차발전기가 필요하게 된다.

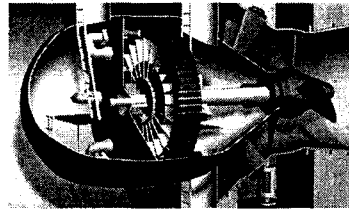


그림3 횡축 벌브형 카플란수차 입체도

저낙차 대유량 수차발전기로 벌브형 수차발전기가 있으며 프로펠러형의 런너를 사용하고 있고 벌브케이싱내에 수차와 직결되어 있는 발전기를 가지고 있다. 시화조력의 경우, 상기의 횡축 벌브형 카플란수차를 채택하였는데 이는 회전축을 2개의 베어링으로 지지하고 벌브케이싱의 상하부를 지지하는 형식이다. 또한, 수차운전 시 통과 어류의 피해최소화를 위하여 날개최소화(3개), 저회전수(64.29rpm)등 친어적(fish-friendly)인 설계특성을 고려하였다.

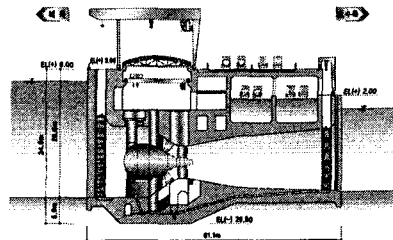


그림4 시화조력 수차구조물 단면도

#### - 수차중심 표고 결정

조력발전의 경우, 저낙차 대형 벌브수차의 축위치 결정은 캐비테이션을 고려한 토마계수방식보다 파랑에 의한 공기유입을 고려해 결정하게 된다. 수차중심의 표고는 아래와 같은 과정을 거쳐서 결정되게 된다.

- 수차중심표고 결정: 해측의 최저수위 - 취수구 높이의 20% - 취수구 높이의 50% - 여유고

(-1.13m - 3.2m - 8.0m = EL -12.33m)

- 해측의 최저수위 EL -1.13m
- 취수구 높이(16m)의 20%는 3.2m

여유를 고려하여 수차의 중심표고는 EL(-)13.00m로 결정되었다. 따라서, 해측의 최저수위(EL-1.13m)와 취수구 상단의 수위(EL-5.0m)의 차는 3.87m로 평상파고인 1.06m보다 충분히 커서 파랑에 의한 공기유입은 발생되지 않게 설계되었다.

### 3.2 수문

조력발전소의 수문설비는 발전시 조지를 채운 물을 낙조(설물)시 배수함으로써 다음 발전에 대비하여 조지의 공간채적을 확보하는 주요설비이다.

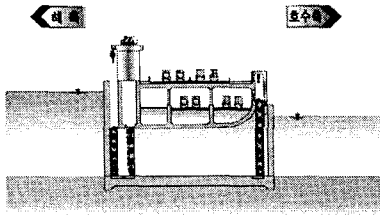


그림5 시화조력 수문구조물 단면도

수문구조물로는 저수두차에서 배수능력이 우수하고 구조가 간단하며 시공이 편리한 컬버트형식이 채택되었다. 조력용 수문은 일반 댐에 설치되어 있는 수문과는 다르게 운전 빈도가 높고, 해수와 접하고 있어 방식(防蝕)에 주안점을 두어야 한다. 시화조력의 수문설비는 내외수위차의 여건에 적합하고, 역방향 수압에서도 구조적으로 안전하며, 연직방향의 개폐운전이 가능한 롤러게이트(Roller gate)형식을 선정하게 되었다.

#### ▶ 수문설비

- 배수능력: 8,500m<sup>3</sup>/sec (8문)
- 규격: 15.3m×12m

수차구조물에는 수차발전기의 유지보수시 발전설비 도수로내의 배수를 위하여 해측과 호수측 양단에 각 2조씩 스톱로그를, 수문구조물에도 양단에 스톱로그를 반영하여 구조물내 배수상태에서의 작업이 가능토록 하였다.

### 3.3 방식설계

조력발전소의 설비는 해수와 상시 접하고 있기 때문에 방식설계를 검토하여야 한다. 시화조력의 발전설비는 적정재질선정 및 해수와 접하는 대형 구조물인 점등을 고려하여 외부전원법을 적용하였고, 수문설비에는 어패류 부착금지, 염해방지 등을 고려하여 중방식도장, 방오도로 및 전기방식(회생양극법)을 적용하였다.

## 4. 사업효과

### 4.2.1 기대효과

해양에너지의 한 형태인 조석을 활용하는 조력발전의 장점은 무엇보다도 무공해 청정에너지의 안정적인 공급이라는 점이다. 시화조력사업으로

예상되는 효과는 아래와 같다.

- 시화호 수질개선 도모(현재 COD 5ppm → 2ppm)
- 청정대체에너지원인 해양에너지 개발로 국가에너지 수입비용 절감 및 자립도 향상(유류대체 효과: 862천배럴/년, 비용절감효과 : 399억원/년)
- 대기환경오염을 저감하여 UN 기후변화협약에 적극부응
- 국내의 관광객 유치로 지역경제활성화에 기여
- 국내 대체에너지 달성목표에 기여(2011년 5%)

### 4.2.2 기후변화협약

화석연료의 무분별한 사용으로 인한 온실가스 발생에 대해 세계는 모든 국가의 차별화된 책임을 위해 범지구적인 환경협약인 기후변화협약을 발효하였으며, 선진국들에 대한 법적구속력 확보를 위하여 교토의정서를 발효하였다. 세계에너지 소비 10위국인 우리나라의 경우는 온실가스 배출량 증가추세에 따라 부속서 I 국가에 포함되는 경우 대체에너지 개발은 즉각 경제적인 효과로 나타나게 된다. 조력발전에 의하여 생산된 무공해전력은 의무적으로 절감해야 할 온실가스 배출량에 따른 기존 화석연료 발전소의 환경관련 부담 해소에 일조를 할 수 있을 것이다.

## 5. 결론

인류의 개발지상주의에 따른 무분별한 화석연료의 사용으로 인하여 기후변화 등 지구의 존속을 위협하는 수많은 현상들이 발생하고 있다. 조석현상은 지속적이며 무한한 에너지원으로서 인류의 주목을 받아왔으나 초기시설 투자비의 과다, 인간의 생체리듬과 맞지 않는 주기 등으로 인하여 그 동안 주목을 받지 못하였던 게 사실이다. 또한, 지금까지의 조력발전사업은 본격적인 개발보다는 관련기술의 확보를 위하여 주로 시험용 사업으로 건설되었으나, 이제는 인류의 증가하는 에너지 수요를 지속적으로 감당할 수 있는 주요한 무공해에너지 사업으로 자리매김하고 있다. 이에 한국수자원공사에서 추진하는 시화호 조력발전소 건설사업도 이러한 시대적 요청에 부응하는 사업으로 국내에 해양에너지 개발을 촉진시키는 촉매제로 자리잡을 수 있으리라 생각된다.

## References

- [1] L. B. Bernshstein, E. M. Wilson, W.O.Song Tidal Power Plants
- [2] Roger Henri Charliel, TIDAL ENERGY
- [3] E.Van Walsum, (2003), Barriers against tidal power, Water Power and Dam Construction, September, 2003
- [4] KORDI(해양연구원), 조력발전, 1985.8
- [5] 시화호 조력발전소 건설사업 기본계획 및 타당성조사 보고서, 현대엔지니어링·한아엔지니어링·한국해양연구원, 2002
- [6] 시화호 조력발전소 건설공사 기본설계보고서, 대우컨소시엄, 2004