

세계최대규모의 시화호 조력발전사업

김흥기* · 백두현*

1. 머리글

지구 온난화가 진행되고 기상이변이 심화되는 이 때 대기오염의 원인이 되며 한정된 부존량이라는 한계를 지닌 화석연료에 대한 대체에너지 개발은 지구촌 사람들의 생존과 지속 가능한 개발을 위한 관건이 되었다. 이에 우리나라도 서해안에 부존(賦存)하는 미래형 친환경 에너지를 개발하기로 하고, 시화호 조력발전소 건설을 위한 타당성 조사 및 기본계획을 이미 마쳐 몇 년 안에 본격적인 조력발전의 시대가 열리게 될 전망이다. 2002.11 타당성 조사 및 기본계획 용역을 마친 바 있는 시화호 조력발전소 건설사업은 약 3,000억원의 사업비가 투입될 예정이다. 그리고 2003.10 경기도 안산시 시화방조제의 작은 가리섬에 발전시설용량 252천kW의 조력발전소를 착공하여 2008년 계획대로 준공되면 세계 최대규모를 자랑하게 된다. 세계 주요 조력발전소의 현황은 표 1에 요약하여 나타내었다.

시화호 조력발전소 준공시 생산될 5억5천만kWh의 전기는 소양강댐 발전량(353백만kWh)의 1.6배에 달하며 천안시 주민이 1년간 사용할 만큼(약 128,000 가구가 월 360kWh 소비)의 전력량으로서, 연간 약 86만 배럴의 유류수입 대체효과가 있어 매년 287억원의 수입비용을 절감하게 된다. 또한 연간 약 600억㎡의 해수유통을 통해 시화호의 수질을 지속적으로 개선해 나갈 수 있고, 이에 따라 시화호 생태계복원 및 관광자원화에 유리한 환경을 제공하여 서해안 지역의 관광자원으로도 큰 역할을 할 것으로 기대된다. 그밖에 연간 15만톤의 CO₂ 가스배출을 저감시켜 대기오염을 줄일 수 있으며, 이는 무공해 해양에너지의 개발이라는 측면에서 국제기후협약에서의 의무범위 확대시 경제적 부담을 완화시키고 우리의 발언권을 강화시키는 등 우리나라의 국제위상도 크게 높일 것으로 전망된다.

조력발전은 회전하는 지구의 해수면에 달과 태양의

표 1 세계 주요 조력발전소 현황

발전소명	시화호 (건설예정)	Rance (프랑스)	Annapolis (캐나다)
시설용량 (천kW)	252 (21천kW×12대)	240 (10천kW×24대)	20 (20천kW×1대)
발전량 (백만kWh/년)	552	540	50
발전방식	단류식 중 창조식	복류식	단류식 중 낙조식
수차형식	Bulb형	Bulb형	Straflo형
발전개시	2008 준공예정	1967.12.4	1984.8.25
목적	상업발전용	상업발전용	대규모 조력자원 발전을 위한 기술축적

인력작용에 의해 생기는 조석이 발생하는 하구나 만을 방조제로 막아 수차발전기를 설치하여 외해(外海)와 조지(潮池)내의 수위차를 이용하는 것으로서, 본 논문에서는 최근 우리나라 최초의 조력발전 건설계획을 수립한 시화호의 적용가능한 조력발전 수차·발전기와 기본계획을 살펴보기로 한다.

2. 시화호 현황과 조력발전 방식

2.1 시화호 현황

대단위 국토확장 사업의 일환으로 시화호 내측의 단지가 조위의 영향을 받지 않도록 하기 위하여 12.7km의 방조제를 건설하였으며, 이로 인해 생성된 시화호는 확보된 간석지의 농지조성 예정지에 농업 용수원으로 활용할 계획이었으나 수질이 오염되어 2001.2 담수호에서 해수호로 변경됨에 따라 조력발전 건설계획이 검토되었다.

2.2 조력발전방식

조석운동의 이용방법에 따라 단류식(단방향 발전)과

* 한국수자원공사 발전사업처
E-mail : hkhk@kowaco.or.kr

- 시화호 현황
- ▷ 면적 : 43.93km² (약 1,329만평) (유역면적 : 476.5km²)
- ▷ 총저수량 : 332백만m³
- ▷ 관리수위 : EL -1.0m (홍수위 EL+0.1m)
- ▷ 배수갑문 : 2개소 (유·출입 2,386m³/초)

복류식(양방향 발전)이 있으며, 단류식은 창조식과 낙조식으로 구분한다.

- 1) 단류식 중 낙조(落潮, ebb tide)식 : 밀물시 수문을 열어 潮池를 채운 후 수문을 닫고 썰물시 외해와 潮池의 수위차에 따라 발전하는 방식
- 2) 단류식 중 창조(漲潮, flood tide)식 : 밀물시 외해와 潮池의 수위차에 따라 발전을 하고 썰물시 潮池의 물을 방류하는 발전방식
- 3) 복류식 : 외해와 潮池의 수위차가 발생하면 밀물과 썰물의 양쪽방향으로 발전하는 방식

발전방식별 운영방법을 도표로 표시하면 그림 1과 같다.

3. 수차의 종류 및 특성

3.1 수차 일반

수차란 물이 가진 위치에너지를 기계적 에너지로 전환하는 기계를 말하며, 좁은 의미로는 회전력을 발생시키는 회전차(runner)를 말하나 일반적으로 회전차와 회전차를 둘러싼 케이싱(casing)과 그 내부에 장치된 부속 기기들을 말한다.

3.2 수차의 분류

수차의 종류는 에너지 발생 면에서 대별하면 충동수차(衝動水車)와 반동수차(反動水車)로 나눌 수 있다. 충동수차는 유수의 속도수두를 이용하고, 반동수차는 압력수두를 이용한다. 현재 실용되고 있는 수차중에서 충동수차는 펄턴수차, 터고수차, 횡류수차 등이 있고, 반동수차는 프란시스 수차, 프로펠러 수차, 사류수차등이 있는데, 각각의 일반적인 특징은 다음과 같다.

- 1) 충동 수차
 - 회전차가 물위에 떠있다.

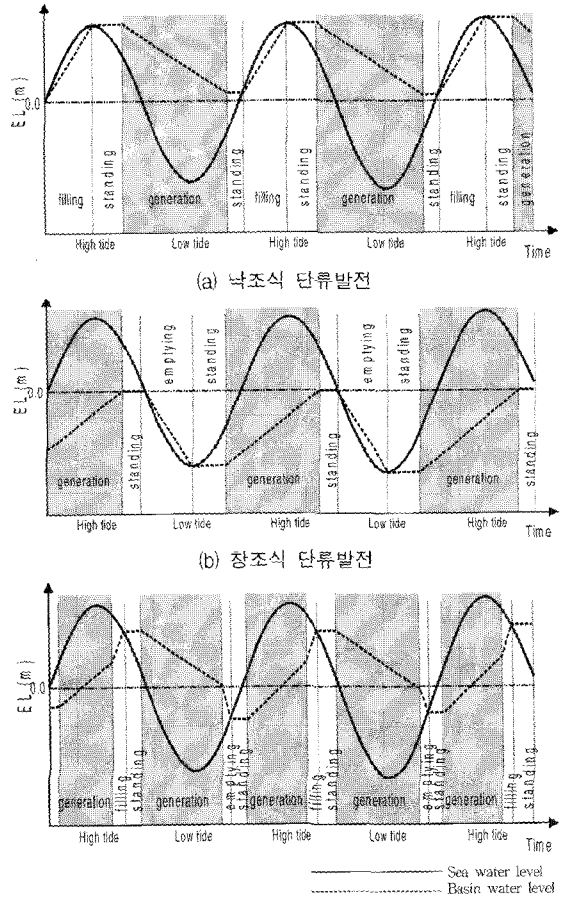


그림 1 발전방식별 운영방법

- 대기압하에서 물이 회전차에 작용
- 회전차의 원주상의 일부분에서 물이 공급되어 작용

2) 반동 수차

- 회전차가 완전히 물에 잠김
- 대기압 보다 높은 압력하에서 물이 회전차에 작용
- 회전차의 모든 원주상의 방향으로부터 물이 공급되어 작용
- 압력에너지와 운동에너지가 동시에 회전차에 전달

3.3 조력발전에 적용가능한 수차발전기

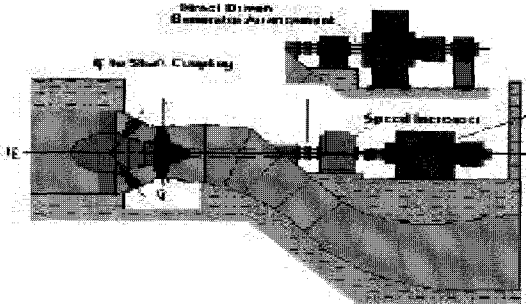
3.3.1 튜블러 수차

튜브 수차라고도 하며, 관로 내에 수차가 설치되고

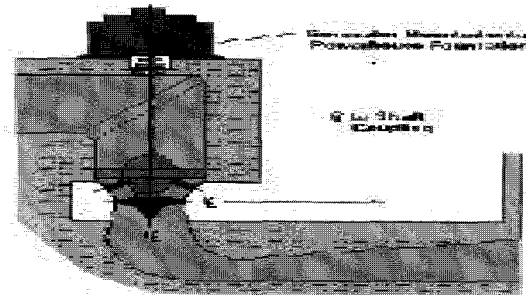
발전기는 외부에 설치된다. 그림 2에 나타낸 바와 같이 횡축과 종축이 있으며, 횡축은 벌브 형식에 비해 발전소 높이가 낮고 보수가 용이하나 효율이 낮다. 종축은 취수구가 엘보 형태로 폭과 길이가 짧은 장점이 있으나 효율이 낮다.

3.3.2 피트 터빈

수로 내부의 피트(pit)에 횡축 발전기가 설치되는 방식으로서 그림 3과 같다. 발전소 높이가 낮고 효율이 높으나 발전기 진입 공간이 작아 유지보수가 불편하다.



(a) 횡축 튜블러 수차



(b) 종축 튜블러 수차
그림 2 튜블러 수차

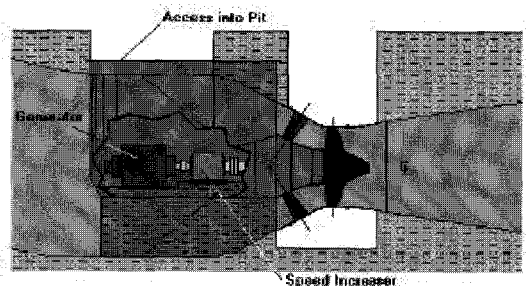


그림 3 피트 터빈

3.3.3 벌브 터빈

그림 4와 같이 수로 내부의 벌브(bulb) 내에 발전기가 설치되는 방식으로 발전소의 길이가 짧고 효율이 높으나, 발전소의 진입공간이 협소하고, 냉각 등에 어려움이 있다.

3.3.4 림 터빈

수로 내부에 수차가 설치되고 런너의 외경부에 발전기 회전자가 설치되는 형식으로서 그림 5에 나타낸 바와 같다. 발전기의 수밀(水密)을 위한 장치의 구조가 복잡하나, 조력발전과 같은 약 5m 이하의 저낙차에 유리하며, Straflo수차(Straight flow의 상표)라고도 한다.

조력발전에 적용 가능한 수차발전기의 특성은 수차 측면에서는 차이가 거의 없지만 발전기 및 시공측면에서는 약간의 차이가 있다. 발전기 측면에서는 조력발전은 낙차가 작아 일반 벌브식 수차보다 회전속도가 낮기 때문에 발전기 극수가 커지며 회전자와 고정자의 직경도 커진다. 시공 측면에서는 발전기의 속도를 증가시키면 발전기의 크기가 작아지고 취수구의 크기가 작아진다. 림(rim) 타입은 수차발전기의 크기가 커질

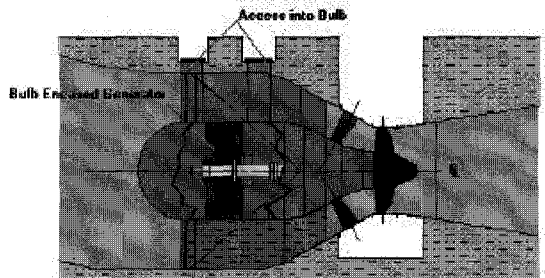


그림 4 벌브 터빈

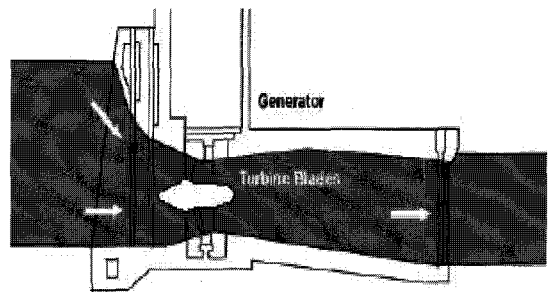


그림 5 림 터빈

수 있으나 수차발전기 일체형으로서 발전기 폭이 작아져 손실낙차를 줄일 수 있는 점이 있다.

시화호 조력발전에서 수차발전기는 여러 가지 형식이 적용될 수 있으나 시공성, 경제성, 유지보수성 등을 고려하여 현장에 가장 적합한 설비는 제작사가 제시할 예정이다.

4. 수차의 효율

수차의 효율 η_t 는 체적효율, 수력효율, 기계효율 등 3종류에 의해 결정된다.

4.1 체적효율

수차에 유입된 유량(Q_t) 중 일부(ΔQ)가 회전차에는 작용하지 않고 회전차 내외측으로 유출되는데 이에 의한 손실을 누설손실이라 하며, 이에 의한 체적효율(volumetric efficiency)은 다음과 같다.

- 1) 체적효율 $\eta_v = (Q_t - \Delta Q)/Q_t$
- 2) 누설손실의 종류
 - 가이드 베인과 runner crown 사이의 누수손실
 - runner와 discharge ring 사이의 누수손실

4.2 수력효율

runner는 유량($Q_t - \Delta Q$)을 받아도 유효낙차 H_t 중 일부(ΔH)는 물이 수차를 통과하는 사이에 수로 내부에서 손실되는데 이를 수력 손실이라 하고, 이에 의한 수력효율(hydraulic efficiency)은 다음과 같다.

- 1) 수력효율 $\eta_h = (H_t - \Delta H)/H_t$
- 2) 수력손실의 종류
 - 케이싱 입구부터 runner 입구까지의 마찰 및 굽힘에 의한 수력손실
 - stay vane & guide vane의 입구 충돌, 익면(翼面)과 벽면의 마찰, 후류(後流) 혼입(混入) 손실
 - runner 입구에서의 충돌, 익면, 벽면의 마찰손실, 후류혼입손실
 - 회전체 출구에서의 수력 및 선회류에 의한 와류 손실
 - 흡출관 내에서의 수력손실 및 출구에서의 배출손실

4.3 기계효율

수차 축에 발생하는 수차출력(P_t)과 runner blade가 발생하는 이론 수차출력(P_{th})과의 차(ΔP)를 기계손실이라 하고, 이에 의한 기계효율(mechanical efficiency)은 다음과 같다.

- 1) 기계효율

$$\eta_m = P_t / (P_t + \Delta P)$$

$$= P_t / (Q_t - \Delta Q)(H_t - \Delta H)$$
- 2) 기계손실의 종류
 - 베어링의 마찰손실, 축 봉수(封水)장치 손실, 공기저항 손실
 - 물 속에서 회전하는 부분의 원판마찰손실

4.4 수차효율(turbine efficiency)

$$\eta_t = \eta_v \times \eta_h \times \eta_m$$

$$= \eta_m \times (Q_t - \Delta Q)(H_t - \Delta H)/Q_t \times H_t$$

4.5 수차 출력

- 1) 이론출력

수력설비의 이론 출력은 다음 식과 같다.

$$P_t = \gamma QH \quad [W]$$

여기서, H는 유효낙차 [m]
Q는 사용수량 [m³/s]
 γ 는 물의 비중량 [N/m³]
- 2) 실제출력

수력설비의 실제 출력은 다음 식과 같다.

$$P_t = \gamma QH \cdot \eta_t$$

5. 조력발전의 출력산정

시화호에서 발전량은 한국해양연구원에서 개발·보유하고 있는 조력발전 출력산정 수치모형 TEGEN을 사용하였다. 이 수치모형은 조지와 외해와는 수두차에 의해 조지에 출입하는 유량과 발전량이 산출되며, 수심에 따른 시화호 저수량 변화곡선, 발전·배수 및 시간에 따른 외해 및 저수위 변화곡선, 오리피스로 이용될 때의 수두차의 함수인 수차와 수문의 통수량, 그리고 수차발전기와 수문의 조건 변화 등과 같은 입력자료가 필요하다. 이들 입력자료를 이용하여 조차, 수차

발전기의 단위기 용량, 수차발전기의 특성, 그리고 수차발전기와 수문의 설치대수 등을 변화시키면서 반복 계산을 실시하여 각각의 경우에 대한 발전량을 산출한다.

이 수치모형의 계산과정과 특성을 간략히 설명하면 다음과 같다. 조지에 출입하는 유량은 발전시 조지로 유입되는 유량과 배수시 조지에서 유출되는 유량으로 나누어지며, 배수시 유량 Q_b 는 수문을 통과하는 유량 Q_{sf} 와 수차를 통과하는 유량 Q_{tf} 의 합(Q_n)으로 나타낼 수 있으며, 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Q_{sf} = C_{sf}A_s(2gH)^{0.5}$$

$$Q_{tf} = C_{tf}A_t(2gH)^{0.5}$$

이 식에서 A_s 는 수문 도수로 최협부의 단면적이며, A_t 는 수차의 회전날개 직경에 해당하는 단면적에서 회전날개 중심부의 단면적을 뺀 값이다. 수문의 유량계수 C_{sf} 는 수문 도수로의 형상에 따라 달라지며 대개 수리모형실험에 의해 정해진다. 수차 케이슨(Caisson) 도수로의 형상 및 제원은 대개 수차 제작자가 제시하며 이 때 수차유량계수 C_{tf} 도 함께 제시되는 것이 보통이다. 발전시는 수문을 닫으므로 수차를 통과하는 유량만 산정하게 된다. 발전시 수차를 통과하는 유량 Q_{tg} 는 수차 제작자가 제시하는 수차의 가동특성에 따라 산정된다. 수치모형에서는 이를 곡선맞춤법(curve-fitting method)을 이용하여 수두차에 대한 다항식으로 표시하여 이용한다. 이 유량특성곡선식은 정격수두(rated head) H_R 를 중심으로 다음과 같이 2개의 식으로 표현된다.

$$Q_{tg} = \begin{cases} D_1 + D_2H + D_3H^2 + D_4H^3 & \text{for } H \leq H_R \\ D_5 + D_6H + D_7H^2 + D_8H^3 & \text{for } H > H_R \end{cases}$$

이 때 발전량도 함께 계산되며, 이상의 유량산정식은 수차 또는 수문의 단위기당 유량이므로 전체유량은 수차 또는 수문의 설치대수를 곱하면 된다. 발전량은 발전시 유량산정식과 유사한 형태로 제시되어 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P = \begin{cases} E_1 + E_2H + E_3H^2 + E_4H^3 & \text{for } H \leq H_R \\ P_{max} & \text{for } H > H_R \end{cases}$$

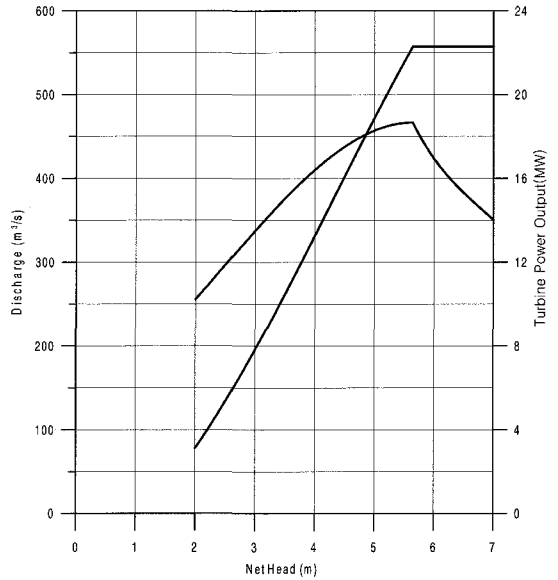


그림 6 수차 · 발전기당 출력곡선

이 식에서 P_{max} 는 수차발전기의 최대출력이다. 발전량은 수두차와 통과유량의 함수이나, 여기서는 상기 식에서와 같이 수두차의 함수로만 표시하고 통과유량의 영향을 포함하도록 하였다. 정격수두 이하에서의 발전량은 수두차에 대한 3차식으로 구해지나, 정격수두 이상에서는 통과유량이 감소되면서 출력이 조절되어 최대출력이 유지된다. 이상과 같은 관계식에 의해 조지에서 해수를 배수하고 또한 유입시키는 과정에서 생기는 수두차를 계산하고 이 수두차를 이용하여 통과유량과 발전량을 산정한 후 이 통과유량을 이용하여 새로운 조지수위를 계산한다. 이 때 외해는 저수량이 무한대인 저수지로 간주할 수 있으므로 외해 수위는 배수시 또는 발전시 방조제를 통과한 유량에 의하여 변동되지 않고 단지 외해 조석에 의해서만 변동된다고 가정한다. 즉, 외해수위는 외해의 조석곡선에 의해서만 지배되며, 조지수위는 방조제를 통과한 유량에 의해서 변동된다. 여기서 주의해야 할 점은 주어진 조건하에서 조석 한 주기 동안의 발전량은 발전개시수두차에 민감하며, 최소발전수두차에서 발전하면 발전시간은 길어질 수 있으나 총발전량이 최대가 되는 것은 아니다.

특정 조석에서 기타의 발전조건을 고정시키고 발전수두차만을 변화시키면서 산출한 발전량 변화의 예를 그림 6에 도시하였다. 이 그림으로부터 최적의 발전개시수두차가 최소발전수두차는 아님을 알 수 있다. 따라서 최대발전량을 구하기 위하여 발전개시수두차를

최소발전수두차로부터 일정한 증분 ΔH 씩 증가시키면서 조석 한 주기 동안 반복 계산하여 해당 조석에 대한 발전량을 산출하고, 이와 같이 산출된 발전량 중 최대가 되는 경우를 택하여 그 조석의 최적발전조건으로 간주하며, 이 때의 발전개시 수두차를 해당 조석의 최적 발전개시 수두차로, 발전개시시각을 최적발전개시시각으로 취한다. 이상과 같은 과정으로 다음의 연속되는 조석에 대하여 반복계산을 실시한다.

본 수치모형은 1년간, 즉 705개의 연속된 조석에 대하여 발전량을 산출할 수 있도록 프로그램화되어 있다. 이 때 계산시간간격 Δt 는 임의로 조정할 수 있으며 이를 적게 잡으면 좀 더 정확한 발전량을 얻을 수 있으나 전체 계산시간은 증가하게 된다. 따라서 사용목적, 계산시간의 효율성 및 결과의 정확도 등을 고려하여 계산시간간격을 정한다.

*** 시화 조력발전 발전량**

조력발전 시설용량을 검토할 때 조차는 가장 중요한 요소이며 부존량은 조차의 제곱과 조지면적을 곱한 값에 비례하며 보통 평균조차가 4.5m 이상이 되어야만 조력발전 입지로서 고려의 대상이 되며, 절체연장이 짧고, 조지면적이 넓을수록 유리하다. 시화호 지역의 평균조차는 5.64m로 조사되어 시화호 면적을 고려하여 조력발전 시설용량 조사사업에서 252,000kW로 검토되었고, 단위시설용량은 21,000kW를 기준으로 검토하였으며 단위기 용량의 출력곡선(그림 6)을 표시하면 아래와 같다.

For $H < 5.64$

$$P(\text{천kW}) = -1.7256 + 0.3161 \times H + 1.2465 \times H^2 - 0.0970 \times H^3$$

$$Q(\text{m}^3/\text{s}) = 124.5913 + 39.0291 \times H + 18.4560 \times H^2 - 2.5922 \times H^3$$

For $H > 5.64$

$$P(\text{천kW}) = 22.29$$

$$Q(\text{m}^3/\text{s}) = 6774.3606 - 2699.4137 \times H + 387.2700 \times H^2 - 18.9639 \times H^3$$

그림 7에서는 발전개시 수두차에 따른 발전량의 변화를 개략적으로 표시하였다. 그림 6의 단위기별 출력곡선과 그림 7의 발전개시 수두차에 따른 발전량 자료와 시화호 지역의 해양조사를 통하여 얻어진 해양자료를 기준으로 하여 시화호 지역의 연간 조차 변화 중 임의의 기간 중 14.5일간의 조차별 발전시간과 발전량

은 표 2와 같은 결과를 얻는 것으로 산출되었다.

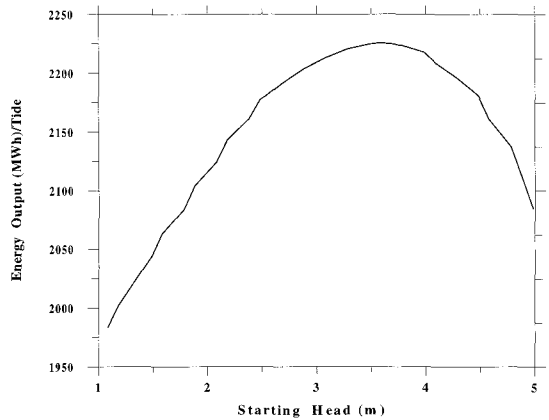


그림 7 발전개시 수두차에 따른 발전량

표 2 시화호 조력발전시간 및 발전량

조차수	시작 시간	종료 시간	발전 시간	발전개시 수두(m)	전력량(kWh)
1	0.0	5.0	5.0	3.4	784.9
2	12.2	16.6	4.4	2.8	492.7
3	24.4	30.2	5.8	3.5	1067.1
4	37.0	41.8	4.8	3.0	665.8
5	48.8	55.2	6.4	3.0	1286.7
6	62.0	67.0	5.0	3.6	864.2
7	73.4	80.2	6.8	2.9	1427.4
8	86.4	91.8	5.4	3.3	1036.9
9	98.0	105.0	7.0	2.7	1494.1
10	111.0	116.6	5.6	3.3	1147.5
11	123.0	129.8	6.8	3.4	1503.3
12	135.6	141.4	5.8	3.2	1191.4
13	147.6	154.4	6.8	3.1	1469.3
14	160.4	166.2	5.8	3.3	1166.6
15	172.4	178.8	6.4	3.1	1357.0
16	185.2	190.8	5.6	3.4	1077.3
17	197.6	203.4	5.8	3.7	1176.3
18	210.0	215.4	5.4	3.2	914.8
19	222.4	227.8	5.4	3.3	868.7
20	235.2	240.2	5.0	3.5	725.3
21	247.4	252.2	4.8	2.9	556.6
22	260.0	264.8	4.8	2.9	540.2
23	272.6	276.4	3.8	2.4	286.6
24	285.2	289.6	4.4	2.6	393.0
25	298.4	300.8	2.4	2.1	116.2
26	310.6	314.8	4.2	2.5	332.2
27	324.2	325.6	1.4	2.0	56.3
28	335.8	340.2	4.4	2.6	376.3

6. 맺는글

우리나라 서해안은 조석의 변화가 심하여 예로부터 조력발전 건설지점의 하나로 조사되었고, 최근 화석연료의 구분별한 사용으로 인한 고갈과 기후변화에 따라 대체에너지 개발을 촉진해야 할 처지이다. 대단위 간척사업의 일환으로 건설된 시화방조제를 이용한 시화호 조력발전 건설사업은 조석간만의 차를

이용한 해수순환을 통하여 시화호 수질을 개선하고 해양에너지 개발을 통하여 대체에너지를 개발하여 기후변화협약에 적극 대처하고자 한다. 시화 조력발전 건설사업은 우리나라에서 최초로 시행하는 사업으로서 업계, 학회, 연구소 등의 여러 전문가들의 많은 관심과 상호협력이 필요할 것이며, 이러한 협력을 통해야만 조력발전 건설사업은 원활히 추진될 것으로 기대한다.