

대체에너지보다 뛰어나고 최대전력량을 생산할 수 있는 세계최대 국내최초 시화호 조력발전소 건설 및 운영 최적화

1994년 시화방조제가 체절됨으로서 생성된 시화호가 2000년 수질개선 대책으로 담수호에서 해수호로 전환됨에 따라 시화호의 효율적인 활용방안으로 2002년 시화방조제에 조력발전소를 설치·운영하는 계획이 확정되어 해수교환 증대를 통한 시화호 수질개선과 친환경 청정에너지 생산을 위해 현재 세계최대, 국내최초의 시화호 조력발전소가 건설되고 있다.

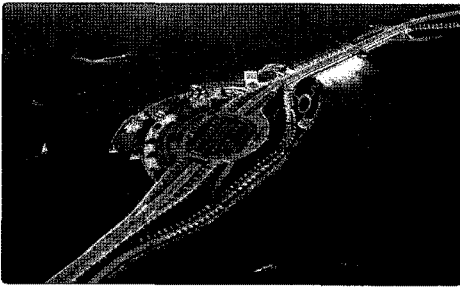


Fig. 1 시화호 조력발전소 조감도

조력발전이란 조석을 동력원으로 하여 해수면의 상승하강에 따른 낙차를 이용하여 해수를 유통시켜 수차에 회전력을 발생, 전기를 생산하는 방식으로 강한 조석이 발생하는 큰 하구나 만에 방조제를 건설하여 조지를 만들고 조지내 수위를 조정하여 얻어지는 외해수위와의 수위차를 이용하여 발전을 하게 된다. 조력발전은 하천 및 댐의 수력발전과 아주 유사하지만 발전낙차가 수력에 비해 작고 낙차가 시간에 따라 변하며 유량의

현재 건설되고 있는 시화호 조력발전소에 대한 국내·외 관심과 기대는 대단하다. 기후변화협약에 의한 무공해 청정에너지 개발의 필요성과 에너지 부존자원이 부족한 우리의 현실을 감안할 때 반드시 필요한 새로운 건설사업으로 떠오르고 있다.

김 준 규 | 한국수자원공사 조력사업처 조력설비팀장

경상대학교(학사), 충북대학교(석사), K-water 수도권지역본부 시설관리팀장 등 역임
tel.032-890-6550 | dreamwater@kwater.or.kr

제약이 없다는 점이 큰 차이점이다. 또한 조석 현상은 주기적인 규칙성을 가지고 무한히 반복되며 장기 예측이 가능하므로 조력발전을 통해 얻어진 전력의 이용성은 타 대체에너지(수력, 풍력, 태양광) 전력에 비해 훨씬 유리한 장점을 가지고 있다.

조력발전방식은 조석의 이용횟수에 따라 단류식과 복류식 발전으로 나뉘고 단류식의 경우 이용방향에 따라 창조발전(漲潮發電)과 낙조발전(落潮發電)으로 구분된다. 단류식 낙조발전은 방조제를 설치하여 조지를 조성, 밀물 때 수문을 개방하여 조지 내에 해수를 만조수위까지 채운 후 수문을 닫고 대기하다가 썰물 때 조지와 외해조위간의 수위차를 이용하여 발전하는 방식이다. 이와는 반대로 썰물 때 수문을 개방하여 조지수위를 간조수위까지 낮춘 후 밀물 때 발전을 하는 형태가 창조발전으로 시화호 조력발전소가 이에 해당한다.

어느 경우든 발전을 함에 있어서 한 방향의 흐름만을 이용하므로 단류식이라 한다. 운전방식(Fig 2참조)은 발전 → 대기 → 충수 → 대기의 사이클을 1일 2회 반복하므로 발전출력의 단속이 불가피하다. 그러나 발전방식이 간단하고 발전설비의 가격도 저렴하여 가장 실용적인 조력발전방식으로 알려져 있다.

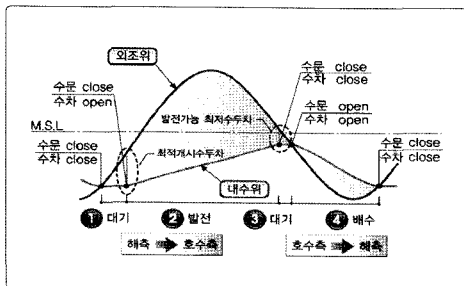


Fig. 2 시화호 조력발전소 발전운영방식(단류식-창조식)

복류식 발전방식은 창조 및 낙조 모두 발전이 가능하며 단류식에 비해 발전시간을 연장할 수 있다. 그러나 이 경우에도 조지와 외해와의 수위차가 발전 가능낙차에 도달할 때까지 대기해야 하기 때문에 발전은 단속적이다. 또한 수차발

전기도 양방향 발전이 가능해야 하기 때문에 단류식 수차발전기보다 구조가 복잡하고 가격도 비싸다. <표 1>는 국가별 현재 운영 중인 조력발전소 및 개발계획이다.

< 표 1 > 조력발전소 운영현황 및 개발계획

국내 조력발전소 개발계획				
발전소명	강화	인천만	시화호	가로림
대 조 차	7.70m	7.20m	7.80m	6.81m
발전방식	낙조식	낙조식	창조식	낙조식
시설용량	838.2MW	1,320MW	254MW	520MW
추진현황	예비타당성	타당성	공사중	발전사업허가

조력발전소 시공 및 설계사항

1) 사업목적

조력발전소는 해수순환을 통한 시화호 수질개선과 무공해 대체 해양에너지 개발로 UN 기후변화 협약에 따른 정부의 이산화탄소(CO₂) 저감 노력에 적극 부응하고 국가 부존자원 개발에 그 목적이 있다.(표 2 참조)

< 표 2 > 조력발전소 사업효과

구 분	연간발전량	유류대체	CO ₂ 저감	수질개선
사업효과	552GWh	862천배럴	315천톤	2ppm

2) 단계별 시공계획

발전소 부지는 기반암에 구조물을 배치하여 안정성을 최대한 확보하였으며 공사를 위한 Dry Dock을 만들기 위해 해측에는 원형셀 가물막이를 설치하여 타공법에 비해 시공/해체시 토사 유출을 최소화하였고, 호수측은 기존방조제에 강널 말뚝 차수보강을 실시하였다. 시공순서는 Fig. 3과 같이 가물막이 설치, 기초굴착, 수차 및 수문, 연결구조물, 수차발전기 및 수문설비

설치, 가물막이 해체 순으로 시공된다.

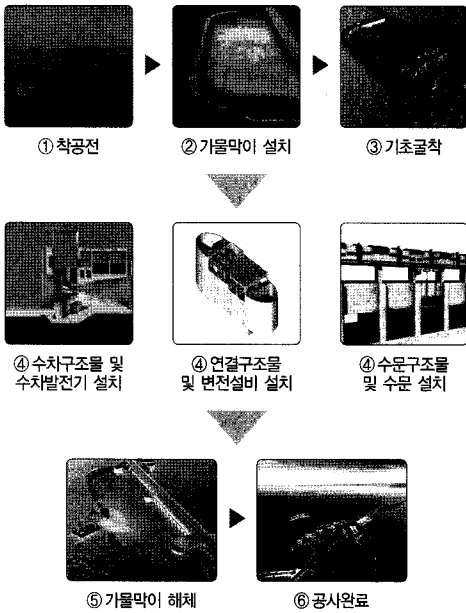


Fig. 3 조력발전소 시공계획도

3) 조력발전소 발전방식

시화호 조력발전소의 발전방식은 시화호 관리 수위 EL(-)1.0m 조건에서 낙조식, 복류식 발전 가능성을 검토하였으며 낙조식 평균낙차는 1.0m로 발전기 동기속도에 필요한 최소낙차 2m에 미달하여 단류식/창조식 발전방식을 선택하였다. (표 3 참조)

〈 표 3 〉 시화호 조건을 고려한 발전방식 검토

구분	창조식	낙조식
개요도		
발전원리	* 낙조식 수문개방 * 창조식 발전	* 창조식 수문개방 * 낙조식 발전
발전량	* 100%	* 100%
운전조건	* 시화호 관리수위가 EL(-)1.0m 방수위는 관리수위이상 불가 * 최대낙차: 7.5m, 최소낙차: 1.0m	* 관리수위 EL(-)1.0m에 유효저수량 8천만톤 이용 * 바다측 수위 EL(-)3.0m 이상 발전 불가 * 최대낙차: 2.0m
선정	●	
선정사유	* 낙조식은 발전가능 낙차 2.0m이상 확보가 불가능하여 창조식으로 선정(복류식 불가능)	

수차발전기 설계사항

1) 수차발전기 형식 결정

국내 최초로 적용되는 조력발전소 수차발전기 형식선정을 위해 △해외선진 사례조사·분석 △낙차 및 출력 △수차효율 △구조 및 설치형식 등을 고려하여 검토하였다.

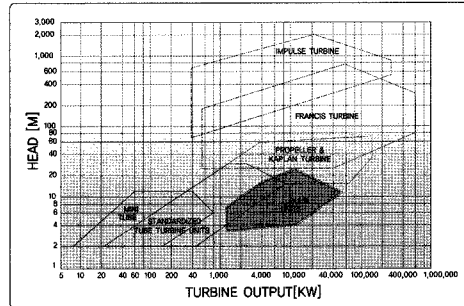


Fig. 4 낙차 및 출력에 의한 형식선정

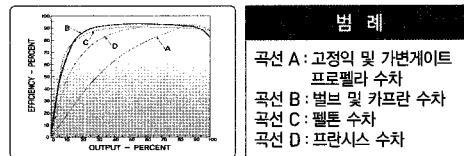


Fig. 5 수차효율에 의한 형식선정

16m이하 낙차에서 밸브형과 튜브형을 선택할 수 있으나(Fig. 4 참조), 대형에서는 밸브형 수차를 대부분 채택하고 있으며 또한 세계적으로 제작, 설치 및 운영실적이 많고 저낙차 대용량 및 고효율 발전이 가능한 횡축 밸브형 카플란 수차를 적용하였다.(Fig. 5 참조)

2) 수차 단위 정격용량 및 연간발전량 결정

수차발전기 단위 정격용량은 조위관측 자료, 시화호 내용적, 수차 특성곡선, 수문유량 특성곡선, 배수시 수차유량 특성곡선, 시화호 수위 운영조건 ($\Delta EL = 1.0m / \Delta EL = 0.5m / \Delta EL = 0.0m$), 기존 배수갑문의 연계운영여부 등 조건을 입력하여 발전량 최적화 시뮬레이션 통해 결정되었으며, 연간발전량은 단위 조석동안의 최적발전 개시낙차에 따라 민감하게 변화됨으로 각기 다른 발전 개시낙차 결정방법을 적용을 위해 3개 프로그램(HYDSTRA, POWFOM,

VAPOW)을 대상으로 각각에 대해 계산의 효율, 정확성 및 운영시 적용의 용이성 등을 고려하여 선정된 HYDSTRA로 관리/유기수위(EL-1.0m), 전기수위(EL-0.5m)조건에 대해 5년간 예측조위로 발전시물레이션을 수행한 결과 평균 연간발전량은 582.3GWh(EL-1.0m 기준)로 산출되었으며, 조력발전소의 시설용량 및 주요 제원은 <표 4>처럼 결정되었다.

< 표 4 > 시화조력 시설용량 및 주요제원

발전시설용량	254천kW(25.4천kW×10개)	
연간 발전량	552.7백만kWh	
발전 방식	단류식 창조발전(밀물시 발전)	
배수 갑문	8문(15.3m × 12m)	
해수 유통량	1억6천만m ³ /일(시화호 저수량의 50%)	
사업 기간	2004.12 ~ 2011.02	
형식	수 차	횡축 벌브형 카플란수차
	발전기	횡축 3상 동기발전
출력	수 차	26MW
	발전기	25.4MW
수 차 직경	7.5m(날개수 3개)	
수 차 회전수	64.29rpm	
사 용 수 량	482.13m ³ /sec	

3) 부식 및 염해대책

국내최초로 해수를 이용하여 전력을 생산함으로써 해외의 다양한 적용사례, 부식의 종류별 형상 및 특징을 조사·분석하였으며, 발전설비 방식

< 표 5 > 음극방식 적용대상 설비

해당재질	주요해당부품
CrNi 강(16-5)	런너 브레이드, 런너 허브
CrNi 강(18-9)	런너 콘, 캡, 가이드베인 아웃바렐 리스차지 링, 가이드베인 인너바렐
CrNi 강(22-5)	Wicket gate Shaft & Stem
탄소강(A283)	흡출관 콘, 흡출관 라이너 벌브 케이스 벌브 노즈, Upper/Lower Pier Nose Liner

< 표 6 > 염해대상 기기 및 대책

염해대상 기기명	염해종류				대 책
	G	P	C	M	
* 런 너 블레이드(Runner Blade)	○	○	○	○	내식재질 + 음극방식
허브(Runner Hub)	○	○	○	○	
콘(Runner Cone)	○	○	○	○	
캡(Runner Cap)	○	○	○	○	
* 가이드베인(Guide Vane)	○	○	○	○	내식재질 + 음극방식
아웃바렐(Outer Gate Barrel)	○	○	○	○	
인너바렐(Inner Gate Barrel)	○	○	○	○	
오퍼레이팅링(Oper. Ring)	○	○	○	○	
* 디스차지링(Disch. Ring)	○	○	○	○	내식재질 + 도장
* 흡출관라이너(D.T.L)	○	○	○	○	방식 + 음극방식

염해대상 기기명	염해종류				대 책
	G	P	C	M	
* Stay Column Upper/lower part	○	○	○	○	내식재질 + 도장방식 + 음극방식
* Shaft Seal house	○	○	○	○	
* 벌브케이스(Bulb Case)	○	○	○	○	
* 스피스트 베어링 서포트(Thrust Bearing Support)	○	○			
* 발전기 해치커버(Generator Hatch Cover)		○	○		
* 상부후래임(Upper Part of Frame)		○	○		
* 해지후래임, 후로유가이드플렛(Hatch Frame, Flow Guide Plate)	○	○	○	○	

설계를 위한 해수 수질특성에 기초하여 부식보호 대상설비로 선정된 설비에 대해 <표 5>의 최적 재질적용, 전기방식 및 표면도장 방식을 적용함으로써 내구성 및 기기의 신뢰성이 확보되도록 하였다.

염해에 의한 갈바닉부식(G), 수소부식(H), 공식(P), 틸부식(C), 미생물부식(M) 등에 대해 염해 대상설비를 <표 6>와 같이 선정하여 염해방지 대책을 수립함으로써 설비의 수명연장 및 손상을 최소화하였다.

조력발전소 신기술·신공법 적용사항

1) 냉각시스템(Cooling Water System)

발전기 코일 및 베어링 냉각방법을 냉각수계통에 충수된 냉각수가 폐쇄회로 내를 순환하는 방법을 적용하여 해수에 의한 냉각으로 발전기 고정자, 회전자, 조작유, 윤활유의 냉각기에 공급함으로써 냉각수의 1회 충수로 운영비 절감, 대용량 여과설비 불필요(Fig. 8)

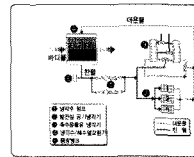


Fig. 8 폐쇄회로 냉각시스템

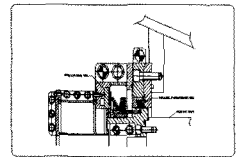


Fig. 9 수차 축 봉수장치

2) 베어링 윤활유 및 유압 작동유

수차발전기 베어링 윤활유 및 유압 작동유를 생화학적으로 분해되는 오일을 사용하여 친환경 설계 및 사고로 인한 오일 유출시 수질오염 방지

3) 수차 축 봉수장치(Shaft Sealing System)

수차 축 봉수장치에 해수사용 및 Main Shaft

Seal외에 압축공기로 작용하는 유지보수 작업용 Seal 설비를 추가하여 에너지 절감 및 수로의 물을 배수하지 않아도 밸브내의 경미한 유지보수 작업 가능(Fig. 9)

4) 수차 런너(Turbine Runner)

저낙차 밸브형 수차런너에 일반적으로 적용하는 4날개 방식에서 탈피하여 3날개 방식을 적용하여 바다 물고기의 이동시 피해를 최소화하면서 고효율 운전이 가능하고 캐비테이션 발생을 극소화시킴으로서 Fish-friendly와 유지보수의 편리성을 도모(Fig. 10)



Fig. 10 수차런너 형상

5) 오일레스 베어링(Oilless Bearing)

일반적으로 오일레스 베어링은 <표 7>와 같은 분야에 주로 사용되며 조력발전소에는 유량조절장치 내측/외측 베어링에 자체 윤활베어링 부품을 설치하여 그리스의 정기 주입 등의 유지보수가 불필요(Fig. 11)



Fig. 11 유량조절장치 내·외측 베어링

< 표 7 > 오일레스 베어링 사용분야

- 구조상 급유가 불가능한 분야 및 급유시 위험한 분야
- 급유로 인해 제품이 오염되거나 불량 발생되는 분야
- 고온, 저온, 수중, 화학약품 접촉분야
- 급유에 따른 기계 가동 중지로 인해 생산성 저하가 초래되는 분야
- 가혹한 사용조건으로 급유를 하여도 효과가 없는 분야
- 충격 및 진동 분야, 고 하중 저속 운동 분야, 녹 발생 및 이물질 침투가 우려되는 분야
- 슬라이딩 운동, 각도 요동 운동 분야

단류식 창조발전 운영 최적화

단류식 창조발전은 매 조위마다 발생하는 위치 에너지를 호수(Basin)로 방류하면서 그 낙차를 이용하여 발전하는 방식이기 때문에 호수(Basin)의 용적(m³)만큼 에너지를 생산 할 수 있다. 이 경우 기동낙차 결정에 따라 전력 생산량이 달라지기 때문에 발전량을 극대화하기 위해서는 최적의 기동낙차를 결정하여야 하는데 발전설비 분해점검 및 Trouble 발생에 따라 일부 발전기를 운영할 수 없는 경우 <그림 12>와 같이 발전기 운영갯수에 따라서 최적기동낙차가 달라지며 특히 홍수기에는 유입량이 호수 수위에 영향을 미치므로 유입량에 따라서도 최적발전 기동낙차가 달라진다. 따라서 이러한 운영 변수를 고려하여 <그림 13>과 같이 최적 운영모델을 구축하였다.

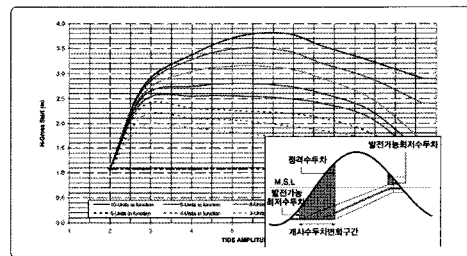


Fig. 12 발전기 기동갯수와 최적 기동낙차 관계

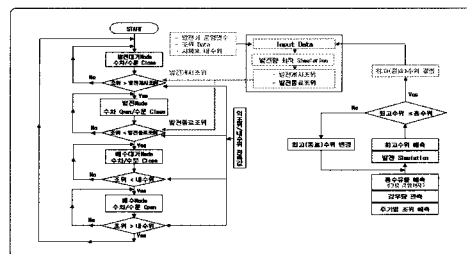
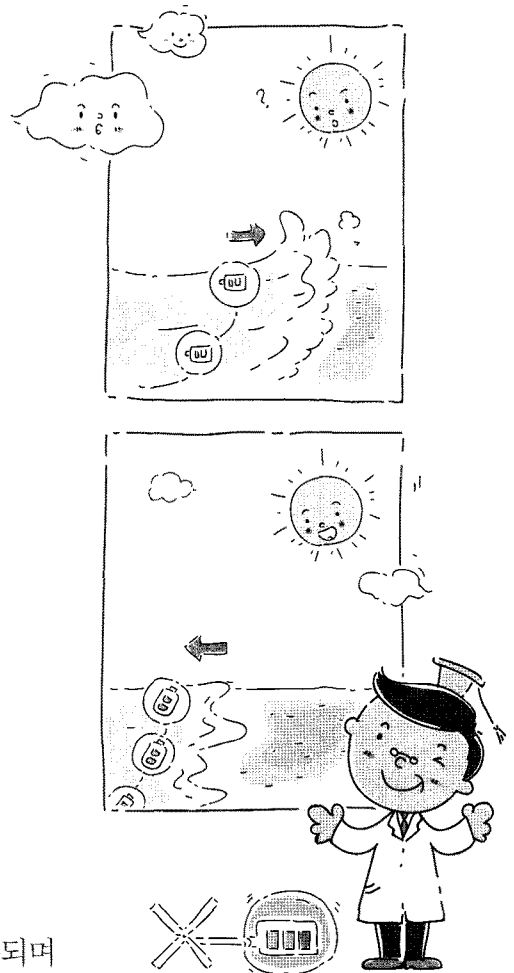


Fig. 13 조력발전소 최적화 운영 모델

결 언

서해안에 부존하는 천혜의 해양에너지를 개발하기 위해 1970년대부터 가로림만과 천수만을 대상으로 조력발전 예비타당성 조사 및 개발가능성이 검토되었으나 경제적 여건과 국내인식 부족, 막대한 건설비 등으로 개발이 지연되었다. 기후변화협약에 의한 무공해 청정에너지 개발의 필요성과 에너지 부존자원이 부족한 우리의 현실을 감안할 때 현재 건설되고 있는 시화호 조력발전소에 대한 국내·외 관심과 기대가 크다. 아직 국내는 조력발전소를 건설 및 운영한 경험이 전무한 상태로 이번 건설사업을 통해 조력발전소, 수심에서의 연안구조물 설계와 시공 기술, 해수에 의한 소재의 부식방지기술, 국내에 적합한 해수유동 수치모형 등을 개발·축적하고, 조지 내의 수질변화 및 생태계의 변화, 더 나아가서 환경전반에 파급되는 영향평가 등을 조사하여 관리하여야 한다.

또한, 기존 수력발전과는 전혀 다른 조력발전에서의 새로운 발전설비 유지보수 개념 정립과 수차발전기 여러 대를 동시에 가동하는 운영관리 기술의 조기 정착, 조석주기(2회/일)에 따라 연중 발전이 이루어짐에 따라 수차발전기 10대를 조인트 운영함으로써 최대전력량을 생산할 수 있는 최적관리기법 등은 향후 확보되어야 하는 과제이다. 조력발전분야에 대한 세계최고의 품질 확보와 미래형 친환경에너지 개발은 우리나라의 새로운 도약의 계기가 될 것이다.



조력발전에 따른 조석현상은

주기적인 규칙성을 가지고 무한히 반복되며
장기예측이 가능하다.

또한 조력발전을 통해 얻어진 전력의 이용성은
타 대체에너지(수력, 풍력, 태양광)
전력에 비해 유리한 장점을 가지고 있다.