



조력발전 기술의 현황 및 전망

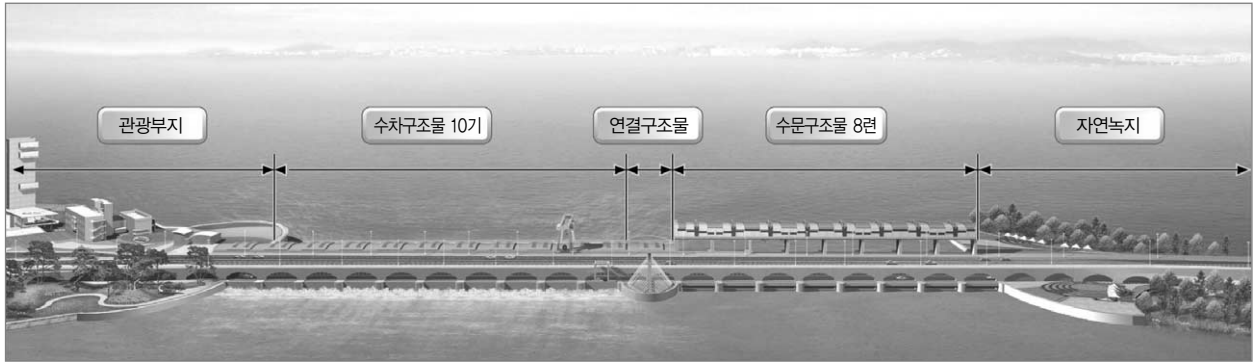


김준규
한국수자원공사 사회조력관리단 운영팀장

1. 개황

2000년대 이후의 고유가 행진은 석유 전량수입에 의존하는 국내실정을 고려할 때 우리의 미래와 생존을 위한

대체에너지원의 개발과 안정적인 에너지원의 확보가 절실히 요구되고 있다. 삼면이 바다로 둘러 쌓여있어 해양 에너지 개발이 유리하지만 지금까지 대체에너지원으로서 해양이 가지고 있는 조석, 조류, 파랑, 해양온도차 등의



[그림 1] 시화호조력발전소 조감도

청정에너지자원 개발은 경제성과 대체에너지 개발의 필요성에 대한 인식 부족 등으로 미래형 친환경에너지 개발로 진척되지 못했다.

이후 시화호의 효율적인 활용방안으로 2002년 시화방조제에 조력발전소를 설치·운영하는 계획이 확정되어 2004년 조력발전소 건설 사업이 착공됨으로써 해수교환율 증대로 시화호의 획기적인 수질개선은 물론 환경친화적인 청정에너지 전력생산이 지난 8월부터 이루어지고 있다.

2. 현황

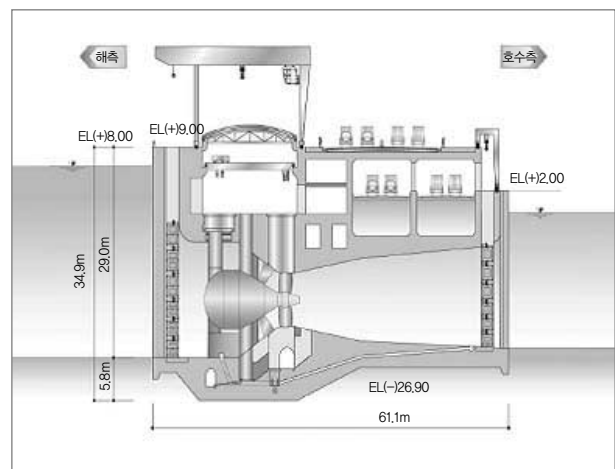
가. 조력발전원리

조력발전이란 조석을 동력원으로 해수면의 상승하강에 따른 낙차를 이용하여 해수를 유통시켜 수차의 회전력을 발생, 전기를 생산하는 방식이다. 강한 조석이 발생하는 큰 하구나 만에 조력용 댐을 건설하여 조지(潮池)를 만들고, 조력 댐을 조정하여 얻어지는 외해수위와 조지 내의 수위차를 이용하여 발전을 하게 된다.

일반적으로 조력 댐은 수차발전기 구간, 수문구간, 통신문 및 방조제로 구성된다.

조력발전은 하천 및 댐의 수력발전과 아주 유사하나 발전낙차가 수력에 비해 작고 낙차가 시간에 따라 변한다. 그러나 조석현상이 규칙적으로 발생하고 또한 장기 예측이 가능하기 때문에 조력발전을 통해 얻어진 전력의 이용성은 타 대체에너지 전력에 비해 훨씬 유리한 장점을 가지고 있다.

조력발전소 건설을 계획할 때 가장 중요한 사항은 '어떠한 발전방식으로 어느 정도 규모의 발전소를 설치할 것인가?' 하는 문제일 것이다. 조력발전소의 규모는 일련의 최적화과정을 거쳐서 결정되는데 여기서 고려되어야 할 항목은 ▲사용가능 낙차 즉 지속적으로 변화하는 외해수위와 발전소 가동에 따라 변동되는 조지수위

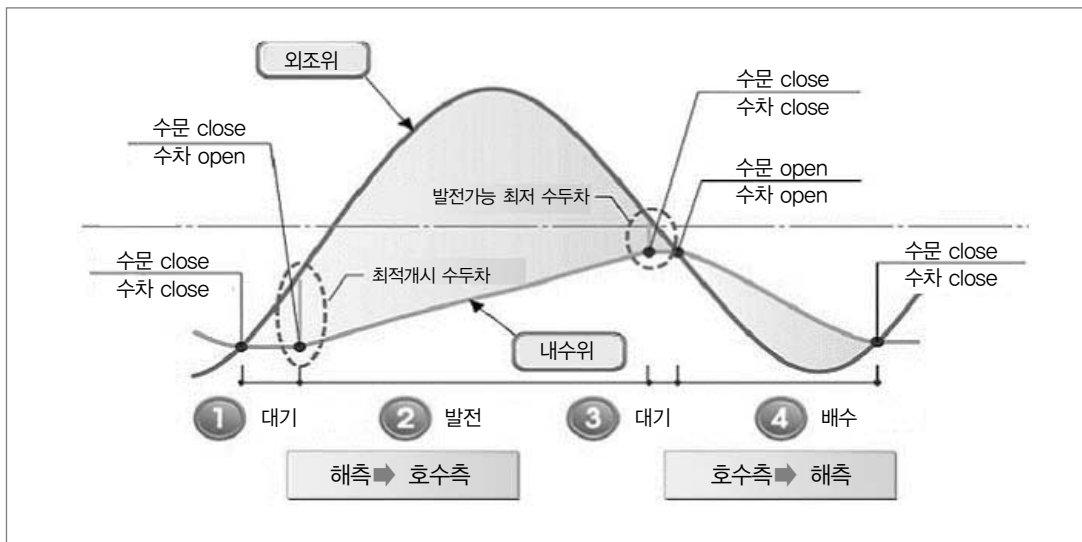


[그림 2] 단류식 창조발전 시화호조력발전소

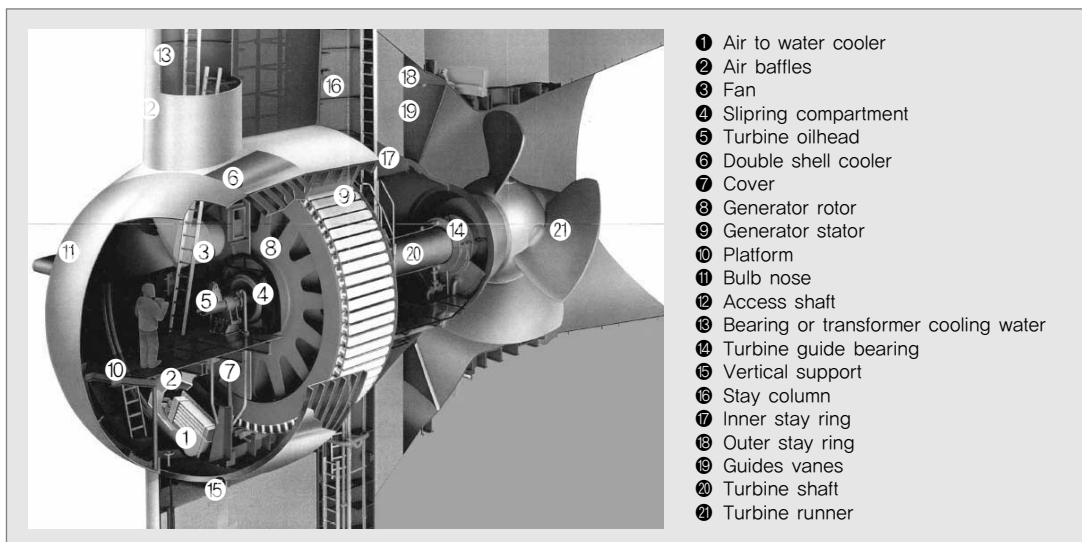
와의 차 ▲조지의 수면적과 발전에 사용할 수 있는 총 해수 용량 ▲수문의 용량 ▲수차발전기의 용량 등이다.

조력발전방식은 조석의 이용횟수에 따라 단류식 발전과 복류식 발전으로 나뉜다. 단류식의 경우 이용방향에 따라 창조발전(漲潮發電)과 낙조발전(落潮發電)으로 구분된다. 단류식 낙조발전은 조력 댐을 설치하여 조지를 조성, 창조 시에 수문을 개방하여 조지 내에 해수를 만조수위

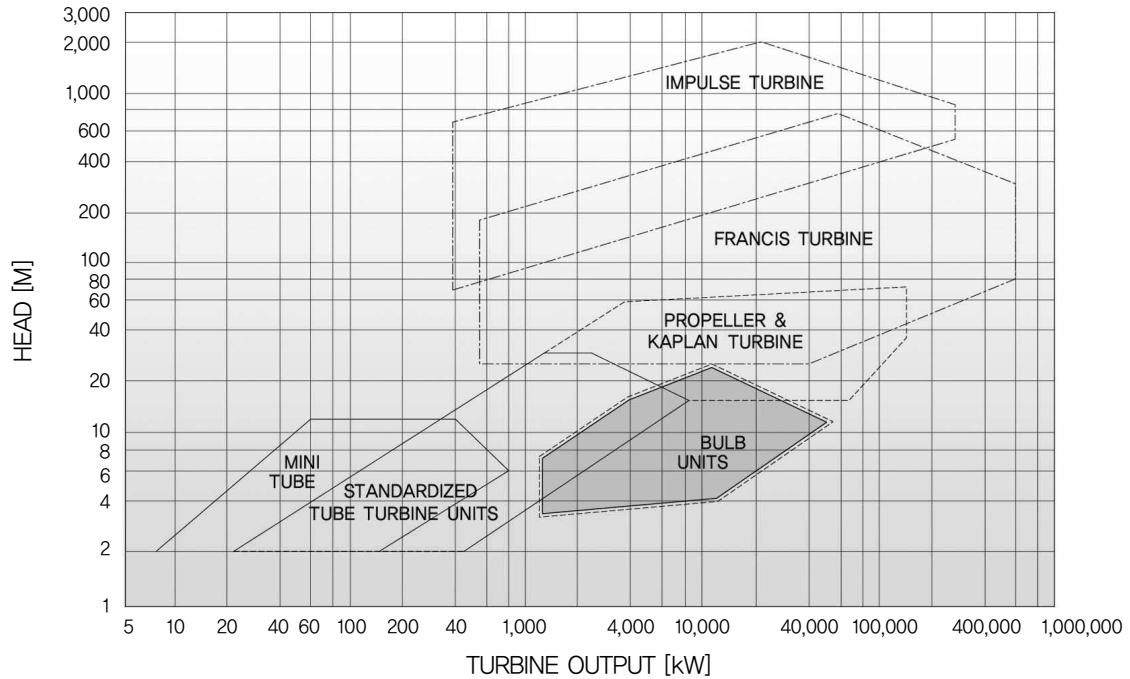
까지 채운 후 수문을 닫고 대기하다가 낙조 때 조지와 외해조위간의 수위차를 이용하여 발전하는 방식이다. 이와 반대로 낙조 시에 수문을 개방하여 조지수위를 간조수위까지 낮춘 후 창조 시에 발전을 하는 형태가 창조식 발전이다. 운전방식은 발전→대기→배수(충수)→대기의 사이클을 1일 2회 반복하므로 발전출력의 단속이 불가피하다. 그러나 발전방식이 가장 간단하고 발전설비의 가격도 저렴하여 가장 실용적인 조력발전방식이다.



[그림 3] 조력발전방식 및 발전원리



[그림 4] 시화호조력발전소 수차발전기 단면도



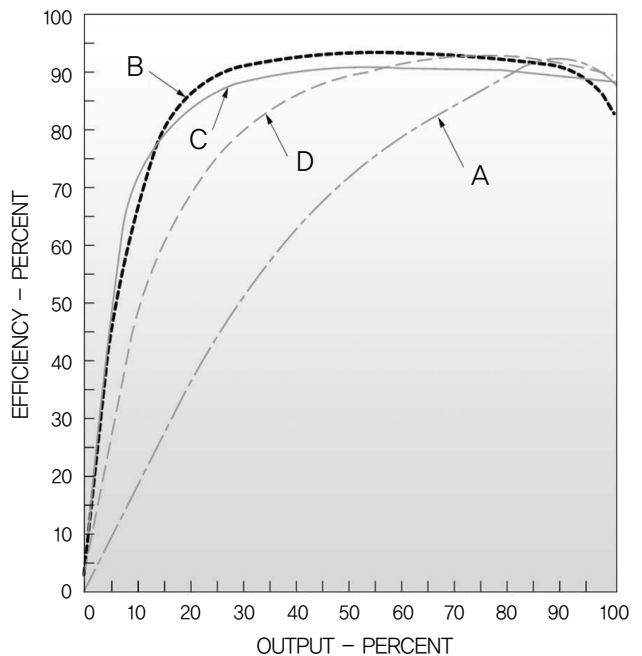
[그림 5] 낙차/출력에 의한 형식 선정

복류식 발전방식은 창조 및 낙조 모두 발전이 가능하며 단류식에 비해 발전시간이 연장될 수 있다. 그러나 이 경우에도 역시 조지와 외해와의 수위차가 발전 가능 낙차에 이를 때까지 대기해야 하기 때문에 발전은 단속적이다. 또한 수차발전기도 두 방향 발전이 가능해야 하기 때문에 단류식 수차발전기보다 구조가 복잡해진다. 일반적으로 이 발전방식은 조차가 아주 크게 발생하는 지역에서 이용하면 단류식보다 유리한 것으로 알려져 있으나 우리나라 서해안의 경우 단류식이 유리한 것으로 알려져 있으며, 향후 국내에 건설되는 조력발전은 단류식 낙조식을 대부분 채택할 것으로 예상된다.

나. 시화호 조력발전소 설계사항

■ 수차발전기 형식 결정

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



- [범례]
 곡선 A : 고정익 및 가변게이트 프로펠러 수차
 곡선 B : 밸브 및 카프란 수차
 곡선 C : 펠톤 수차
 곡선 D : 프란시스 수차

[그림 6] 수차효율에 의한 형식 선정

16m이하 낙차에서 벌브형과 튜브형을 선택할 수 있으나 대형에서는 벌브형 수차를 대부분 채택하고 있으며, 또한 세계적으로 제작, 설치 및 운영 실적이 많고 저낙차 대용량 및 고효율 발전이 가능한 횡축 벌브형 카플란 수차를 적용하였다.

■ 수차 단위 정격용량 및 연간발전량 결정

수차발전기 단위 정격용량은 조위관측 자료, 수심측량에 의한 시화호 내용적, 수차발전 특성곡선, 수문유량 특성

곡선, 배수 시 수차유량 특성곡선, 시화호 수위 운영조건 (EL-1.0m, EL-0.5m, EL0.0m), 기존 수문의 연계운영 여부 등의 조건을 입력하여 발전량 최적화 시뮬레이션을 통해 표 1과 같이 결정되었다. 연간발전량은 단위 조석 동안의 최적발전 개시낙차에 따라 민감하게 변화되므로 각기 다른 발전 개시낙차 결정방법 적용을 위해 표 2와 같이 3개 프로그램(HYDSTRA, POWFOM, VAPOW)을 대상으로 각각에 대한 계산의 효율, 정확성 및 운영 시 적용의 용이성 등을 고려하였다.

[표 1] 수차의 정격 출력 선정

용량 구분	22MW	26MW	29MW
정격낙차	5.70m	5.82m	5.70m
정격회전수	69.23rpm	64.29rpm	60.0rpm
수차축위치	EL(-)12.50m	EL(-)13.0m	EL(-)13.60m
사용수량	417m ³ /sec	482.13m ³ /sec	548mm ³ /sec
런너직경	7.0m \emptyset	7.5m \emptyset	8.0m \emptyset
장·단점	<ul style="list-style-type: none"> • 12대로 토목공사비 증가, 경제성 낮음 • 유지보수에 불리 • 발전량 : 571.4GWh 	<ul style="list-style-type: none"> • 전세계 실적 많음 • 최적의설계 조건 만족 • 발전량 : 582.3GWh 	<ul style="list-style-type: none"> • 전세계 실적 적음 (8.0m\emptyset이 상, 단 1대) • 캐비테이션 큼 • 발전량 : 566.8GWh
선 정		⊙	
선정사유	<ul style="list-style-type: none"> • 29MW는 실적이 없어 캐비테이션 및 신뢰성 문제, 22MW는 토목 공사비가 많아 경제성 낮고, 기기가 많을시 고장이 많게 됨 • 기술적 우수성과 고객에 대한 신뢰성 및 경제성을 고려하여 26MW 선정 		

[표 2] 최적 발전개시 낙차결정 프로그램 선정

구 분	HYDSTRA	POWFOM	VAPOW
개념도			
특 징	<ul style="list-style-type: none"> • 조지의 잔여용적과 특정수두차에서의 수차발전을 고려하여 발전시간 산정후, Time Advanced Value를 조정하여 최대발전량이 발생하는 수두차 결정 	<ul style="list-style-type: none"> • 매 조석마다 발전가능 최저낙차에서 정격낙차까지 0.1m씩 변화시키면서 발전량을 산정하여, 최대발전량이 발생하는 낙차를 결정 	<ul style="list-style-type: none"> • 1년간의 대표적인 8개의 조석에 대해 각각 최적개시 낙차를 결정한 후 각 조석의 진폭과 개시낙차의 관계를 다항식으로 표현하여 발전개시 낙차 결정
선 정	⊙		

■ 수차설비 구조해석

수차 및 발전기에 발생하는 모든 하중과 진동을 구조물에 전달하는 벨브케이스, 회전력을 발생시키는 런너블레이드(런너 허브, 런너 콘) 유량을 조절하는 위켓트 게이트 등에 대해 3차원 유한요소법에 의해 정적·동적 안정성, 두께 산정, 강도 해석, 변형 분석 등을 실시하여 적용하였다. 예를 들면 벨브케이스에 적용된 8가지 응력분석 조건을 바탕으로 이를 통해 수차설비의 구조가 허용 응력 및 변형내의 안전영역에 있음을 확인하였다.

또한 회전축계의 진동 및 임계속도 안정도 분석으로 정상 및 과도조건, 런너에 물흐름 장애물에 의해 불평형하게 전달될 경우에 대한 축계의 진동, 하중 전달 등을 분석하여 벨브구조 및 발전소 구조설계에 반영하였다. 운전 중 회전축계의 고유 진동수와 회전 시 공명현상을 피하기 위하여 임계속도를 무구속 속도보다 크게 하여 발전소 구조물의 고유 진동수 6.8Hz, 벨브의 고유 진동수 3.9Hz 및 기기의 회전진동수 1Hz 등 어떤 경우도 공명이 발생되지 않도록 설계하였다.

■ 수차발전기 중심표고 결정

수차 해측의 계절별 파고조사 및 발전소 운전 중 최저 수위 등을 고려하여 수차 중심표고를 산정하였다.

조력의 경우 저낙차 대형 벨브수차의 축 위치결정은 캐비테이션을 고려한 토마계수(σ) 방식보다 파랑에 의한 공기유입 방지를 우선하여 결정하며, 아울러 수차모델 시험에서의 캐비테이션 안정수위도 고려하여 수차중심표고를 EL(-)13.00m로 결정, 충분한 여유를 갖도록 설계하였다.

■ 부식 및 염해대책

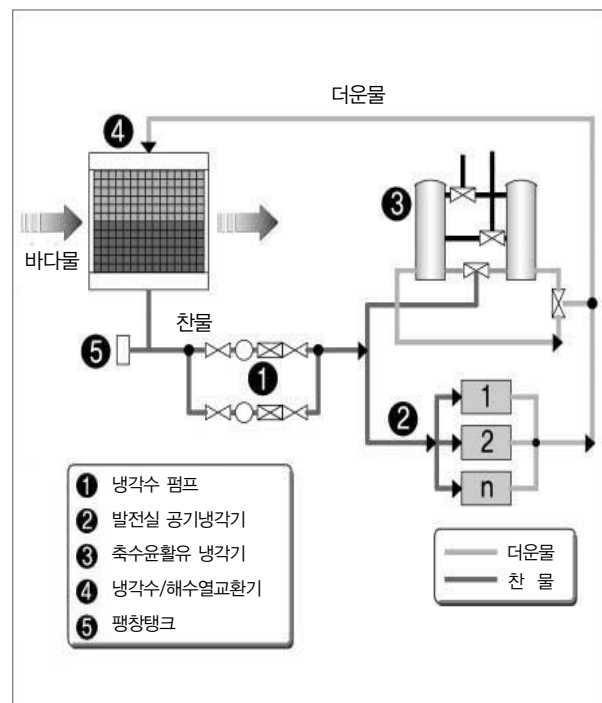
국내최초로 해수를 이용하여 전력을 생산함으로써 해외의 다양한 적용사례, 부식의 종류별 형상 및 특징을

조사·분석하였다. 발전설비방식 설계를 위한 해수 수질 특성에 기초하여 부식보호 대상설비로 선정된 설비에 대해 최적 재질적용, 음극(외부전원법) 및 표면도장 방식을 적용함으로써 내구성 및 기기의 신뢰성확보가 되도록 하였다. 염해에 의한 갈바닉부식(G), 수소부식(H), 공식(P), 틈부식(C), 미생물부식(M) 등의 염해대상 설비를 선정하여 염해방지 대책을 수립함으로써 설비의 수명연장 및 손상을 최소화 하였다.

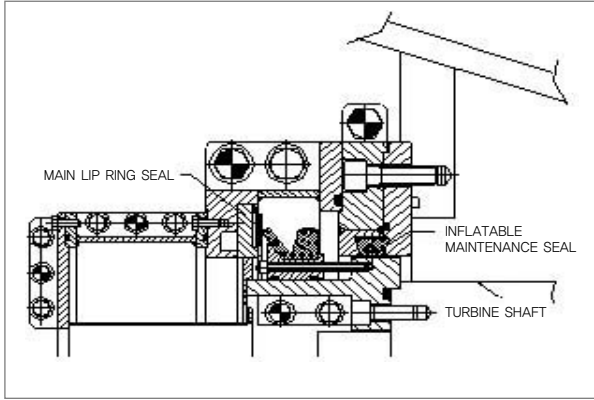
다. 조력발전소 신기술·신공법 적용

■ 냉각시스템(Cooling Water System)

발전기 코일 및 베어링 냉각방법을 냉각수계통에 충수된 냉각수가 순환하는 폐쇄회로 방법을 적용하여 해수에 의한 냉각으로 발전기 고정자, 회전자 및 스러스트 베어링, 수차안내 베어링에 공급함으로써 냉각수의 1회 충수로 운영비가 절감되며 대용량 여과설비 또한 필요하지 않다.



[그림 7] 폐쇄회로 냉각시스템



[그림 8] 수차 축 봉수장치

■ 수차 축 봉수장치(Shaft Sealing System)

수차 축 봉수장치에 해수사용 및 Main Shaft Seal 외에 압축공기로 작용하는 유지보수 작업용 Seal 설비를 추가하여 에너지 절감 및 수로의 물을 배수하지 않아도 밸브 내의 정미한 유지보수 작업 기능이 가능하다.

■ 베어링 윤활유 및 작동유

수차발전기 베어링 윤활유 및 유압 작동유를 생화학적으로 분해되는 오일을 사용하여 친환경설계 및 사고로 인한 오일 유출시 수질오염을 방지할 수 있다.

■ 수차 런너(Turbine Runner)

저낙차 벌브형 수차런너에 일반적으로 적용하는 4날개 방식에서 탈피, 3날개 방식을 적용함으로써 고효율 운전이 가능하고 캐비테이션 발생을 극소화시켰다.

고효율 운전 특성 유지 및 캐비테이션 감소로 수명 연장, 유지보수의 편리성 또한 도모하였다.

3. 전망

기후변화협약에 의한 무공해 청정에너지 개발의 필요성과 에너지 부존자원이 부족한 우리의 현실을 감안할 때 현재 건설·운영되고 있는 시화호조력발전소에 대한 국내외 관심과 기대가 증가하고 있다.

아직 국내는 조력발전소를 건설 및 운영 경험이 전무한 상태로 이번 조력발전사업을 통해 조력발전소 수심에서의 연안구조물 설계와 시공기술, 해수에 의한 소재의 부식 방지기술, 국내에 적합한 해수유동 수치모형 등의 기술을 발전시켜 나가야 한다. 또한 앞으로 조수지 내의 수질변화

[표 3] 시화조력 시설용량 및 주요제원

발전시설용량		254천kW(25.4천kW×10기)
연간발전량		552.7백만kWh
발전방식		단류식 창조발전(밀물시 발전)
배수갑문		8문(15.3m×12m)
해수유통량		1억6천만m³/일(시화호 저수량의 50%)
사업기간		2004.12~2011.10
형식	수차	횡축 벌브형 카플란수차
	발전기	횡축 3상 동기발전
출력	수차	26MW
	발전기	25.4MW
런너 직경		7.5m(날개수 3개)
런너 회전수		64.29rpm
사용수량		482.13m³/sec



[그림 9] 시화호조력발전소 준공도

및 생태계의 변화, 환경전반에 파급되는 영향평가 등을 조사하여 관리하여야 한다.

기존 수력발전과는 전혀 다른 조력발전에서의 새로운 수차유지보수 개념 정립과 수차발전기 여러 대를 동시에 가동하는 운영관리 기술, 조석 주기(1일 2회)에 따라 연중 발전이 이루어짐에 따라 수차발전기 10대를 동시에 운영함으로써 최대전력량을 생산할 수 있는 최적관리기법 등은 시급히 정착되어야 하는 과제이다.

조력발전분야에 대한 세계최고의 품질확보와 미래형 친환경에너지 개발은 새로운 도약의 계기가 될 것이다. 아울러 조력발전소가 갖는 랜드마크 지위로 인해 연간 150만 명의 관광객 유치로 지역공동체의 새로운 관광 자원이 됨은 물론 경제 활성화에도 기여하는 구심점으로 성장할 수 있는 계기가 될 전망이다. KEA