

청정에너지 생산과 수질환경 개선을 위한 시화 조력발전소

김 우 구 | 한국수자원공사 수자원연구소 소장

최 병 만 | 한국수자원공사 수자원연구소 소장

1. 서 론

국내에서 최초이자 세계 최대 규모의 조력발전소가 우리나라 경기도 안산시 시화방조제의 작은 가리섬에 발전시설용량 252천kW 규모로 건설될 계획이다. 지난해 11월 타당성 조사 및 기본계획 용역을 마친 바 있는 이 조력발전소가 준공되면 세계 최대규모를 자랑하게 된다. 시화호 조력발전사업은 연간 약 5억5천만kWh의 무공해 전기를 만들 수 있어 연간 약 86만 배럴의 유류수입을 대체하는 효과(약 287억원)가 있으며, 이는 천안시의 1년간 전력사용을 충당할 수 있는 규모이다. 그리고, 조력발전소 운영을 통해 연간 약 600억m³의 해수유통을 통해 시화호의 수질을 지속적으로 개선해 나갈 수 있고, 서해안 지역의 관광자원으로도 큰 역할을 할 것으로 기대된다. 또한, 대체에너지인 무공해 해양에너지의 개발이라는 측면에서 국제기후협약에서의 발언권 강화 등 우리나라의 국제위상도 크게 높일 것으로 전망된다.

본 기사는 시화지구 개발사업 현황과 조력발전 건설사업의 추진배경을 소개하고, 국내에서 최초로 시행되는 조력발전사업의 이해를 돕기 위해 조력발전의 원리와 서해안지대의 조력발전 잠재성 등을 소개하는데 목적이 있다. 본 기사의 대부분의 내용은 사업의 성공적 수행을 위해 지난 1월 10일에 개최된 국제심포지엄에서 발표된 논문들을 토대로 작성되었음을 머

리 밝혀두며, 논문 발표자들에게 다시한번 심심한 감사의 말씀을 전한다.

2. 시화호 조력발전사업 추진배경

시화지구 개발사업은 대단위 간척사업에 의한 국토 확장으로 대규모 공업단지, 도시개발, 농업용지 조성 등 복합적인 개발사업을 시행하여 고부가가치성 산업 육성으로 2000년대 선진조국의 건설과 함께 국제사회의 교역증진 및 경제발전을 비약시키는 산업기지로서의 개발에 목적이 있으며, 또한 단기적으로 해외유 휴장비의 활용과 국내 경기활성화 및 신 건설기술을 증진시킬 수 있는 계기를 마련하는데 그 목적을 두고 계획하게 되었다(시화지구 개발 타당성조사 및 기본계획, 1986. 4). 이와 같이 시화지구 개발사업은 해외건설 철수업체를 지원하는 것을 시작으로 대단위 국토확장을 통한 고용증대와 경기진작을 선도하고 수도권 인구 및 산업의 분산이라는 복합적인 목적으로 사업을 시작하게 되었다. 표 1에서 보듯이 시화 방조제는 총 연장이 12.6km로 여기서 대규모의 간척지 5,325만평(이중 1,329만평은 시화호)을 확보하고 확보된 토지에 2단계로 나누어 공단, 도시, 농지 등으로 조성할 계획이다. 1단계 사업비는 2조 2,240억원으로 이중 방조제 건설 총비용은 6,220억원(건설비 2,700억원, 어업

표 1. 시화간척사업 개요

구	분	내	용
방 조 제	길이	12.6km	
	물막이 공사	'94. 1. 24 완료	
	사업비	6,220억원	
시 화 호	저수면적	43.93km ² (1,329만평)	
	유역면적	476.5km ²	
	총저수용량	3억 3천만톤(유효저수량 1억 8천만톤)	
	년간유입량	3억 4천만톤	
	평균수심	3.2m	
	유입하천	반월천, 동화천 등 6개 소하천	
1단계 사업	총면적	742만평(공단 498만평, 주거단지 244만평)	
	총사업비	1조 6,020억원	
	사업기간	1986~2004	
2단계 사업	총면적	3254만평(멀티테크노밸리 317만평 포함)	
	현재의 상태	간석지	
	활용방안	향후 결정	

권을 포함한 보상비 2,974억원 등)이다.

그러나, 1994년 2월에 방조제 공사가 완료된 후, 시화만으로의 해수유통이 차단되고 인근 지역으로부터 유입된 오염물질의 축적으로 인해 호수의 오염이 증가하여 시화호의 수질개선을 위한 종합적인 대책이 요구되어 왔다. 시화호 조력발전 건설사업은 시화호 수질개선 종합대책의 일환으로 시화호의 운영방법을 담수호에서 해수호로 전환함으로써 수질악화를 방지하는 한편 서해안의 풍부한 조석간만의 차를 이용한 해양에너지 개발의 일환으로 추진되고 있다. 또한, 기후변화 협약 등으로 인한 CO₂ 저감대책에 적극 대응함과 동시에 해양에너지 개발을 통한 안정적 전력공급과 시화호의 종합적인 개발에 기여하는데 그 목적이 있다.

3. 조력발전의 원리

조력발전이란, 조석을 동력원으로 하여 해수면의 상승하강현상을 이용, 전기를 생산하는 발전방식으로 강한 조석이 발생하는 큰 하구나 만에 조력 댐을 설치하여 조지(조력저수지)를 만들고 조력 댐을 조정하여 얻어지는 외해수위와 조지내의 수위차를 이용하여 발

전을 하게 된다. 이외에도 일정중량의 부체가 받는 부력을 이용하는 부체식, 조위의 상승하강에 따라 밀실에 공기를 압축시키는 압축공기식 등이 있으나 실용화 기술은 개발되지 못한 수준이다.

조력 댐은 수차발전기 구간, 수문구간, 통선문 및 방조제로 구성되며 조력 댐 내외 측의 수위차를 발전낙차로 하여 수차발전기로부터 전력을 생산한다. 조력발전의 원리는 하천 수력발전과 아주 유사하나 발전낙차가 수력에 비해 작고 낙차가 시간에 따라 변한다. 그러나 조석현상이 주기적인 규칙성을 가지고 발생하고 또한 장기 예측이 가능하기 때문에 조력발전을 통해 얻어진 전력의 이용성은 타 대체에너지 전력에 비해 훨씬 유리한 장점을 가지고 있다

어떤 해역에 대해 조력발전소 건설을 계획할 때 가장 중요한 사항은 어떤 발전방식으로 얼마만한 규모의 발전소를 설치할 것인가 하는 문제일 것이다. 일반적으로 조력발전소의 규모는 일련의 최적화 과정을 거쳐서 결정되는데 여기서 고려되어야 할 항목으로 사용 가능 낙차 즉, 지속적으로 변화하는 외해수위와 발전소 가동에 따라 변화하는 조지 수위와의 차, 조지의 수면적과 발전에 사용할 수 있는 총 해수 용적, 수문의 용량, 수차발전기의 용량이다. 조력발전방식은

일반적으로 조석의 이용횟수를 따라 단류식 발전과 복류식 발전으로 나누고 단류식의 경우 이용방향에 따라 창조발전과 낙조발전으로 구분된다(그림 1). 또한 지형조건이 특수할 경우는 조지를 하나 더 조성해서 발전 지속시간을 연장할 수도 있다.

단류식 낙조발전은 조력 댐을 설치하여 조지를 조성, 창조시에 수문을 개방하여 조지내에 해수를 만조수위까지 채운 후 수문을 닫고 대기하다가 낙조 때 조지와 외해조위간의 수위차를 이용하여 발전하는 방식이다. 이와는 반대로 낙조시에 수문을 개방하여 조지수위를 간조수위까지 낮춘 후 창조시에 발전을 하는 형태가 창조식 발전방식이다. 어느 경우이든 발전을 함에 있어서 한 방향의 흐름만을 이용하므로 단류식이라 한다. 운전방식은 발전 대기 충수 대기의 사이클을 계속 반복하므로 발전출력의 단속이 불가피하다. 그러나 발전방식이 가장 간단하고 발전설비의 가격도 저렴하여 가장 실용적인 조력발전방식이다.

복류식 발전방식은 창조 및 낙조 모두 발전이 가능

하며 따라서 단류식에 비해 발전시간이 연장될 수 있다. 그러나 이 경우에도 역시 조지와 외해와의 수위차가 발전가능낙차에 이를 때까지 대기해야 하기 때문에 발전은 단속적이다. 또한 수차발전기도 2방향 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 검토되었다.

4. 국외 조력발전 개발 사례

조력발전에 유리한 조석간만의 차가 큰 곳은 우리나라의 황해와 함께 영국해협과 아이리시해의 연안 등이 있다. 현재 캐나다, 중국, 프랑스, 구소련 등에서 조력발전소를 건설해 활용하고 있으며, 우리나라를 비롯해 조력발전이 가능한 지역을 보유하고 있는 미국, 호주, 인도 등의 국가에서도 조사 작업이 한창이다.

프랑스는 1920년부터 전력생산을 위한 조력에너지에 대하여 연구를 계속 수행하여 조력에너지 이론을 개발하였고, 조력발전소 적지를 찾아 사업계획을 수립하여 하구에서는 조석의 차가 13.5m나 되는 랑스(Rance)만을 최적지로 선정하였다. 1940년대에 제기되어 온 모든 기술적 문제점의 해결책을 찾아냈고 1950년에 모든 준비가 완료되었으나 건설시기가 모형설비 설치에 적합하지 않았고, 해양환경에 영향을 줄 수 있는 부식문제 해결을 진행하였다. 1960년 후반, 프랑스 EDF(Electric de France)는 사업착공을 시작하여 1967년 후반 랑스 조력발전소를 가동하게 되었다. 24개의 밸브형 수차발전기를 보유한 랑스(Rance) 조력발전소의 시설용량은 24만kW이며 연간 발전시간 6,500시

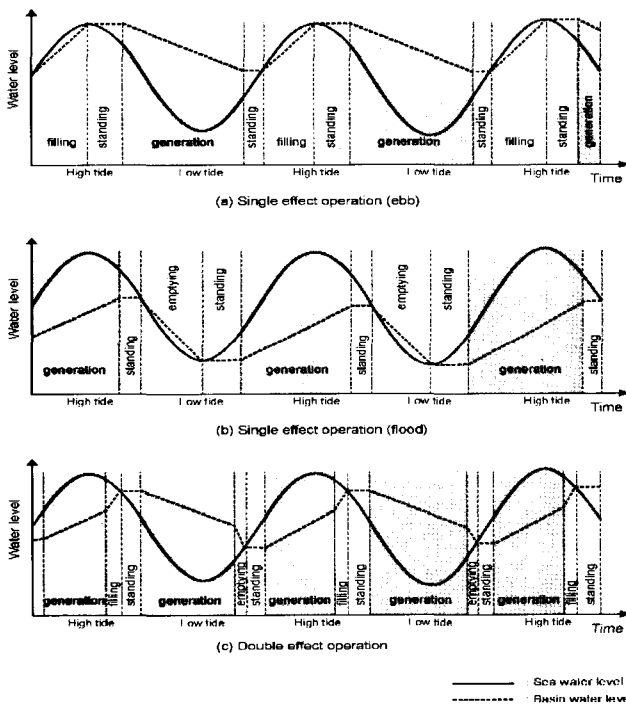


그림 1. 조력발전의 일반원리

표 2. 국외 조력발전소 현황 및 시화조력발전소 계획 비교표

발전소명	시화조력발전소 (건설예정)	Rance (프랑스)	Annapolis (캐나다)	Jiangxia (중 국)
발전시설용량 (천kW)	252 (21천kW×12대)	240 (10천kW×24대)	20 (20천kW×1대)	3.2 (3.2천kW×1대)
발 전 량 (백만kWh/년)	552	540	50	-
발 전 방 식	단류식중 창조식	복류식	단류식중 낙조식	복류식
수 차 형 식	Bulb형	Bulb형	Straflo형	Bulb형
발 전 개 시	2008 준공예정	1967. 12. 04	1984. 8. 25	1986
목 적	상업발전용	상업발전용	대규모 조력자원 발전을 위한 기술축적	

간, 연간 540백만kWh의 전력을 생산하며 평균가동율은 97%로서 이는 133,000TOE에 해당한다. 랑스 조력발전소 준공에 따라 방문객들은 댐주변의 관광안내소, 호텔 및 식당 등을 이용할 수 있는 잇점이 있으며 조력발전소 방문객은 연간 40만명이나 된다. 그들은 Saint-Malo와 Rance 내부지역의 장관을 즐길뿐만 아니라 동시에 댐 관광도 할 수 있다. 이 시설물의 방문은 무료이며 조력발전소 원리, 건설 및 운용에 대해 3개국어 설명으로 이해를 돕고 있다. 운영요원들이 자전거로 순회하는 거대한 운영실 또한 관광객들의 관심을 크게 끌고 있다.

1980년대 중반에 완성된 캐나다의 아나폴리스 조력발전소는 20KW급 대형발전소다. 그 외에도 국외

에서 운영중인 대표적인 조력발전소로는 소련의 키슬라야(1968 완공, 용량 800Kw)와 중국의 지양시아(1980완공, 용량 3,000Kw) 등이 있다.

5. 한국서해안의 조력개발 잠재성

조력발전은 발전량 측면에서는 조석간만의 차가 크고 조성되는 조지면적이 넓을수록 유리하고, 건설비 측면에서는 설치되는 댐의 길이가 짧을수록 유리하다. 우리나라 서해안은 굴곡이 심한 리아스식 해안으로 크고 작은 만이 발달해 있고 조차가 커서 세계적인 조력발전 적지이며, 남해안의 울돌목 및 주변해역은

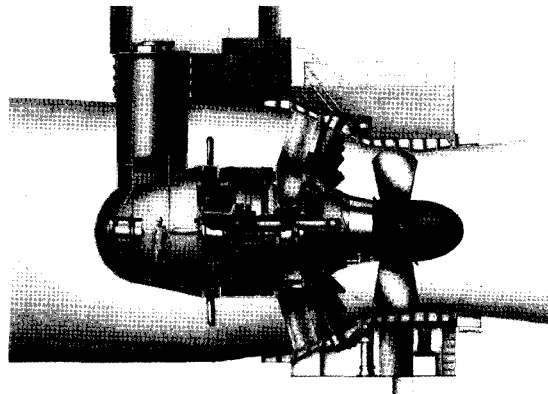
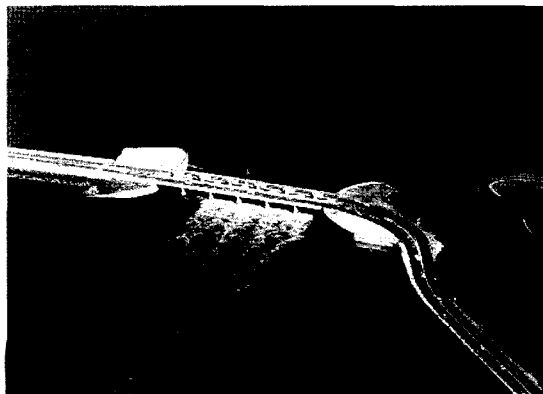


그림 2. 프랑스 랑스 조력발전소 전경 및 수차(Bulb 형)

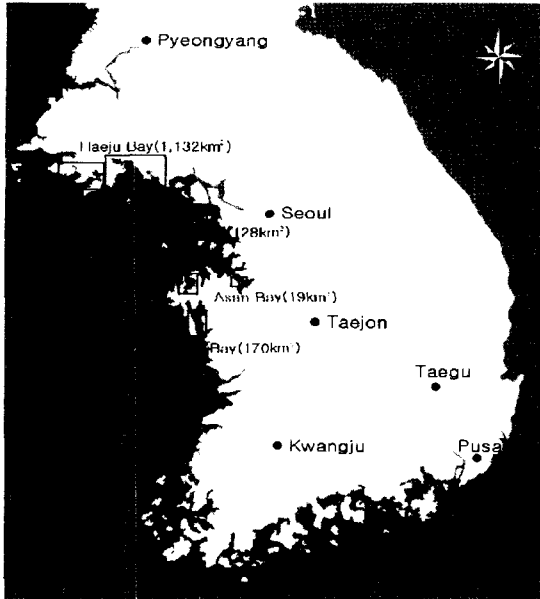


그림 3. 우리나라 서해안 조력발전 입지

강한 조류로 인하여 조류발전의 적지이다.

우리나라 서해안 중부, 경기만 해역은 큰 조차 및 잘 발달된 해만으로 인해 천혜의 조력에너지 자원 보고로 알려져 있다. 서해안에서의 조력발전에 대한 구상은 1920년대부터 시작된 것으로 추정되며 1929년 조선총독부 체신국에서 시행한 '인천만 조력발전 방안에 대한 조사' 이후 여러 차례에 걸쳐 조사사업이 수행되었다. 특히 1970년대 초 석유파동으로 인한 대체에너지 개발 및 탈석유전원개발정책의 일환으로 1974년부터 한국해양연구소, 한국전력공사 등 관련기관에 의해 수차에 걸쳐 본격적인 타당성 검토 조사사업이 실시되었다.

1978년에는 한국전력의 위탁으로 한국해양연구소와 캐나다 Shawinigan사 공동으로 실시된 '서해안 조력 부존자원조사'를 통하여 서해안 중부 일대에 선정된 조력자원개발 입지 10개 지점에 대해 약 650만 kW의 조력부존자원량을 확인하였다. 이 중 충남 서산군 소재 가로림만의 경우, 1981년 해양연구소와 불란서 Sogreah가 수행한 '가로림만 조력발전 타당성 조사(한전위탁)'를 통하여 기술적 및 경제적 개발타당성이 입증되었으나, 제5차 경제사회개발 5개년계획 투자우선순위 조정시 조력발전은 1987년 이후에 착

공기로 결정된 바 있다. 그러나, 1986년 한전 위탁으로 해양연구소와 영국 EPD 공동으로 실시한 '가로림 조력발전 후속조사 및 우수영 조류발전 예비타당성조사'에서는 당시 유가의 하락 추세 및 건설공사비의 상승요인에 의하여 조력발전의 개발경제성이 미흡한 것으로 평가되어 개발이 다시 보류되었다.

그 후 1991년 한전은 해양연구소와 중국의 국가과학기술위원회에 그 동안의 여건변동을 고려한 '가로림 조력개발 타당성 재조사'를 위탁 실시하였으며 93년 완료된 조사 결과, 가로림 조력개발(시설용량 48만 kW)은 발전 단일목적으로 개발할 경우는 개발경제성이 미흡(B/C = 0.84)하고, 전력생산 외에 만내 수산양식 증대효과, 관광효과, 교통효과 등 부수적 편익을 고려할 경우에는 개발경제성이 있는 것으로 나타났다.

1997년 한국해양연구소는 서해 중부 인천 신공항 북측해역, 아산만, 천수만과 북한의 해주만과 웅진만을 대상으로 조력발전 가능성을 개략 검토하였다(그림 3). 검토 후보지중 인천 신공항 북측해역의 경우 공항부지 조성 시 시행된 영종도 부근 산재된 섬들을 연결하는 매립공사의 결과로 조력저수지 조성 여건이 크게 향상되어 장래 유력한 조력개발 후보지의 하나로 제시되었다.

6. 시화 조력발전소 계획

시화 조력발전소 계획은 시화호 수질개선대책의 일환으로 1996년 11월부터 1997년 5월까지 기술적 타당성 및 발전경제성을 검토하였다. 검토결과, 시설용량 16만kW의 창조식 조력발전소 설치가 가능하고 수질개선효과도 기대되지만 발전경제성은 충분치 못한 것으로 나타났다(B/C=0.86). 한편으로 시화호 수질개선을 위한 여러 가지 장 단기대책을 수립해서 시행한다할지라도 과연 시화호를 담수화하여 용수자원을 당초 계획대로 확보할 수 있느냐 하는 문제는 계속 의문시되어 왔고 결국 2000년 12월 30일 정부는 공식적으로 시화호 담수화 계획을 포기하고 해수호로 유지하는 방침을 결정하게 되었다.

시화호의 수질은 당초 배수용으로 설치되었던 방조제 남단의 배수갑문을 이용하여 외해수를 지속적으로 유출입 시키고 또한 각종 환경저감시설을 운영함으로써 점차 개선되고는 있으나, 외해와의 해수유통 측면에서 배수갑문의 유통용량 및 설치위치 상의 한계 때문에, 근본적인 수질개선 효과를 얻기 위해서는 추가로 대규모의 해수유통시설이 필수적인 것으로 판명되었다. 이에 따라서 해수유통 촉진방안의 하나로 조력발전소 설치방안이 다시 한번 검토대상으로 제시되었고 2002년 3월 시화호 조력발전 타당성 조사 및 기본계획 수립 용역을 착수하였으며, 일련의 현장조사 및 해수유통, 파랑변형, 퇴적물 이동, 수질변화 등에 대한 수치실험과 발전소 개념설계, 공사비 산정 등이 포함된 포괄적 사업으로 2002년 11월에 완료되었다. 현재까지의 결과를 보면 시설용량 약 25만 kW의 창조식 발전방식이 적절하고 발전 경제성 및 수질개선 효과도 충분한 것으로 나타나고 있다.

시화호 조력발전사업 개요
• 사업 위치 : 경기도 안산시 대부동 시화방조제 작은가리섬
• 평균 낙차 : 5.64m
• 발전 방식 : 단류식 창조발전
• 발전시설용량 : 252천kW(21천kW×12기)
• 연간 발전량 : 552.5백만kWh
• 배수갑문 : 6문(12m×12m)
• 공사비 : 2,941.5억원

시화호 조력발전소 건설은 담수호로서의 기능을 상실한 시화 해수호를 다양하게 활용할 수 있는 방안으로서 수질개선을 도모하고, 기후변화 협약에 적극 대처할 수 있는 무공해 전력을 공급하며, 적절한 발전방식을 적용할 경우 현재 시행중 또는 시행예정인 주변 간사지 개발계획과 서로 상충됨이 없이 개발이 가능하다. 또한 시화호내의 개선된 수질과 조력발전소가동에 따른 조석간만 효과 및 방조제에 의한 황천시의 파랑 차폐효과 등을 이용하여 대규모의 수도권 해양관광단지 개발이 가능하므로 국민의 여가선용 및 지역경제의 활성화를 유도할 수 있는 시화호 다목적 개발에 부합되는 계획이 된다.

시화호 조력발전소의 건설과 운영에 따른 환경영향의 주요 관심사는 해수의 유동과 퇴적물 이동 영향, 시화호 내·외 수역의 오염물질 이동 및 수질 영향, 그리고 주변 생태계에 미치는 영향이다. 현재까지의 검토 결과, 시화 조력발전소가 가동될 경우, 수개월 이내에 시화호 내의 수질은 외해수와 비슷하게 개선될 것으로 전망되며, 또한, 조력발전소가 인근 수변지역 및 시화호내외 수역의 생태계에 미치는 영향은 공사기간 중의 소음과 토사유출로 인한 영향을 적절히 조절한다면 매우 미미할 것으로 평가되고 있다.

7. 결론

지난 세기 후반부터 국민들의 환경에 대한 인식이 크게 달라지고 있으며, 지속가능하고 환경친화적인 개발방안을 마련하기 위한 노력들이 갈수록 강화되고 있다. 에너지 분야에서도 대기나 수질오염을 수반하지 않는 청정에너지 개발이 많은 주목을 받고 있다. 또한 정부에서도 지구 온난화 현상 및 기상이변의 억제 위한 유엔의 기후협약에 발맞추어, 오는 2001년까지 대체에너지의 보급률을 전체 에너지 소비의 5% 이상으로 늘리기 위한 정책을 의욕적으로 추진하고 있는 중이다.

시화호 조력발전소 건설계획은 이러한 시대적 요청에 부응하는 환경친화적인 사업으로서 평가 받고 있다. 특히, 이미 건설된 시화 방조제는 지리적으로나 경제적인 측면에서 조력 발전을 하기에 매우 유리한 조건을 두루 갖추고 있으며, 발전을 위한 정기적인 해수유통을 통해 시화호의 수질개선에도 큰 기여를 할 것으로 기대된다. 시화 조력발전소는 발전시설용량 측면에서도 250MW로써 전세계적으로 최대 규모의 조력발전소로써 국내는 물론 국제적으로 과학 관광적 가치는 막대할 것이며 여기서 발생하는 경제적 편익의 대부분은 주변 지역사회의 몫이 될 것이다. 국내 최초이자 세계 최대의 조력발전 건설사업의 성공적 수행을 위해서는 정부뿐만아니라 민간기업체, 그리고 지자체의 적극적인 협조가 필요하다.