

해양에너지 기술현황과 전망

■ 홍기용 / 한국해양연구원 해양시스템안전연구소, kyhong@moeri.re.kr

■ 현범수 / 한국해양대 조선해양시스템공학부, bshyun@hhu.ac.kr

해양에너지의 종류와 변환기술, 에너지부존량, 개발전망 및 국내외 기술개발동향과 해양에너지 개발의 미래에 대하여 소개하고자 한다.

지구 표면의 약 75%에 달하는 해양에는 조력, 조류, 파력, 해수온도차, 염도차 등 다양한 형태의 막대한 에너지 자원이 존재한다. 우리나라 연안 해역은 다양한 가용 에너지 자원이 풍부하게 분포하며, 설치 가능한 해역 또한 광범위하여 해양에너지 자원은 우리나라 연안역에서도 대규모로 활용이 가능한 에너지 자원이다. 이러한 해양에너지는 화석연료 사용에 따르는 환경오염과 자원고갈 문제를 극복할 수 있는 유망한 에너지 자원이지만, 해양이라는 환경이 갖는 가혹성 때문에 여타의 신재생에너지 분야에 비해 상대적으로 미개척의 영역으로 남아왔다. 그러나 해양공학 기술의 발전에 따른 기술적 어려움의 극복과 최근 새로운 청정에너지 개발의 필요성의 급증에 따라 활발한 연구가 진행되고 있다.

해양에너지 변환기술

해양에너지 자원을 전기에너지로 변환하는 해양에너지 변환시스템은 해양에너지원 각각이 갖고 있는 운동에너지, 위치에너지 또는 열에너지를 기계적인 운동에너지로 변환시키거나(파력, 조력, 조류, 해수온도차 발전), 열교환기를 이용하여 공기 또는 해수를 냉각 또는 가열함으로써 에너지를 흡수한다(해수온도차 냉난방). 이때 선형운동이나 회전운동으로 변환된 기계장치에 발전기를 적용함으로써 전기 에너지로 변환하게 된다. 이외에도 해수염도차 발전, 해상풍력 발전기술, 해양바이오매스 이용기술, 해양수소에너지 생산기술 등도 해양의 잠재적인 에너지의 이용기술이나, 여기서는

해양에만 존재하는 에너지 자원중 현재 활발히 기술개발이 진행되고 있는 파력, 조력, 조류 및 해수온도차 이용기술만을 약술한다.

파력발전

파력발전은 파랑의 운동 및 위치에너지를 이용하여 터빈을 구동하거나, 기계장치의 운동으로 변환하여 전기를 생산하는 기술로 파고가 높고 파주기가 긴 해역이 적지이다. 에너지 변환원리에 따라 가동물체형, 진동수주형, 월파형이 있으며, 설치 형태에 따라서 고정식과 부유식으로 구분하기도 한다.

가동물체형은 수면의 움직임에 따라 민감하게 반응하도록 고안된 여러 형태의 기구를 사용하여 파랑에너지를 물체에 직접 전달하고, 이때 발생하는 물체의 움직임을 전기에너지로 변환하는 방식이다. 진동수주형은 파랑에너지를 공기의 흐름으로 변환하고, 발생된 공기의 흐름 중에 터빈을 위치시켜 전기를 얻는 방식이다. 입사파가 장치의 전면에서 반사되어 중복파가 형성되고, 이 때 발생하는 수면의 상하 움직임이 장치 전면의 개구부를 통해 진동수주부로 전달되어 공기실 안의 공기흐름을 생성시키고, 공기실 상부 노즐부에 공기의 빠른 왕복흐름이 발생되어 터빈을 구동시키는 방식이다. 월파형은 파랑의 진행방향 전면에 경사면을 두어 그 경사면을 넘어오는 해수를 저수한 후 형성된 수두차를 이용하여 저수지의 하부에 설치된 수차터빈을 돌려 발전하는 방식이다. IEA-OES 보고서(2006)에 의하면, 현재까지 세계적으로 실험역 실증이 이루어진 50여개의 파력발전장치 중 가동물체형이 62%, 진동수주형 23%, 월파형 5% 및 기타 10%로서 가동물체형이 다수를 차지하고 있다.

조력발전

조력발전은 조석을 동력원으로 하여 해수면의 상

승하강현상을 이용, 전기를 생산하는 발전방식으로서 일정중량의 부체가 받는 부력을 이용하는 부체식, 조위의 상승하강에 따라 밀실에 공기를 압축시키는 압축공기식, 그리고 방조제를 축조하여 해수저수지 즉, 조지를 조성하여 발전하는 조지식으로 나눌 수 있다.

오늘날의 실용화된 조력발전방식은 조지식으로서, 강한 조석이 발생하는 큰 하구나 만에 방조제를 설치하여 조지를 만들고 외해수위와 조지내의 수위차를 이용하여 발전을 하게 된다. 조지의 수에 따라 단조지식과 복조지식으로 구분되며, 조석의 이용 횟수에 따라 단류식과 복류식으로 나누기도 한다. 단류식은 조지 내의 수위가 외해 수위보다 높을 때 해수를 내보내면서 발전하는 낙조식 단류발전과 외해 수위가 조지 내의 수위보다 높을 때 해수를 채우면서 발전하는 창조식 발전으로 나뉘며, 복류식은 낙조와 창조를 함께 이용하는 방식이다.

조류발전

조력댐을 만들어 발전하는 조력발전과는 달리 조류발전은 조류의 흐름이 빠른 지점에 직접 터빈과 발전기를 설치하여 발전하는 기술이다. 터빈의 회전방향에 따라서 수평축터빈과 수직축터빈으로 분류되며, 수평축인 경우 일방향 흐름, 하천과 같이 일정한 흐름을 유지하는 경우에 유리하고, 수직축인 경우는 조류와 같이 흐름의 방향이 변하는 경우에 유리하다. 1 MW급 정도로 상대적으로 대형 터빈의 경우 흐름방향으로 방향제어 능력을 갖춘 수평축 터빈을 주로 사용하고 있다. 일반적으로 유속이 1 m/s 내외인 곳에서도 가능한 경계성 있는 발전을 위해서는 최소한 2 m/s 이상인 곳을 후보지로 선정한다. 이외에도 실린더와 같은 물체에서 발생하는 와류기진동(VIV) 현상을 이용한 방식도 있으나 아직 기초연구단계에 머물러 있다.

대규모 댐을 건설할 필요 없이 원하는 위치에 발전장치를 설치하기 때문에 비용이 적게 들고 효율적이며, 조력발전 보다는 규모가 작지만 다수의 발전장치를 대상해역에 적절한 간격으로 설치하여 에너지팜(Energy Farm)을 구성할 경우 경제성도 확보할 수 있을 것으로 기대하고 있다.

해수온도차발전 (OTEC: Ocean Thermal Energy Conversion)

OTEC은 수심에 따른 바닷물의 온도차를 이용하여 에너지를 취득하는 기술이다. 열대해역에서 해면의 해수 온도는 흔히 20℃를 넘으나 해면으로부터 500 ~ 1000 m 정도 깊이의 심해에서는 4℃에서 거의 일정하다. 이와 같은 표층수와 심층수의 온도차를 이용하여 작동유체를 증발시켜 터빈을 구동하여 전력을 얻고 다시 작동유체를 응축하는 방식으로 발전하는 기술을 OTEC이라 한다. 작동유체로 암모니아나 프로필렌 같은 저온 비등 냉매를 사용하는 폐순환 시스템(Closed-Cycle System)과 저압의 증발기를 이용하여 온수 자체를 작동유체로 사용하는 개방순환시스템(Open-Cycle System)으로 구분되며, 혼합순환 시스템이 사용되기도 한다. 개방순환시스템은 상대적으로 효율이 높아 전력생산에 유리하고 담수의 활용이 가능한 장점이 있으나, 플랜트 설비 단가는 폐순환 시스템보다 다소 비싼 편이다.

해수온도차를 이용한 냉난방시스템은 해수온도와 대기온도와의 차를 이용하여 대기온도를 냉각 또는 가열하는 공기히트펌프(Air Heat Pump)와 해수를 이용하여 냉난방 계통 내에 순환되는 냉온수를 냉각 또는 가열하는 해수열원히트펌프(Sea Water Heat Pump)로 구성된다.

해양에너지 부존량과 개발 전망

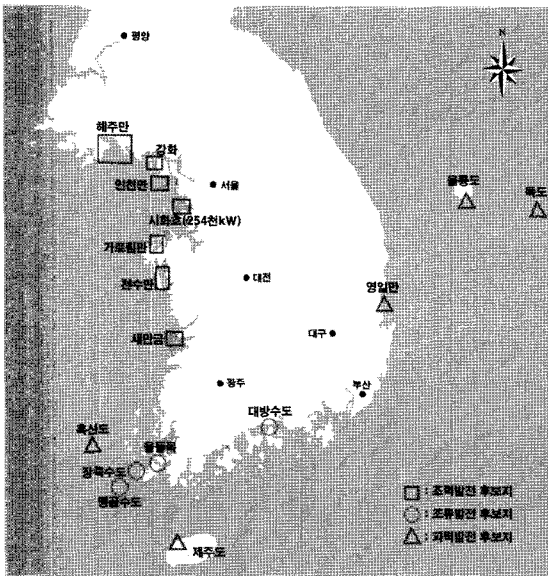
전 지구적인 해양에너지 부존량은 IEA-OES 보고서(2008)에 따르면 천해 연안역에서 조석에너지 1 TW(Tera Watt), 파력에너지 2 TW 정도로 추정되고 있다. 이 중에서 파력에너지는 외해로 나갈수록 밀도가 높아지므로 깊은 수심에 따른 기술적 어려움의 극복이 관건이 되고 있다. 가장 앞선 해양에너지 기술을 보유하고 활발한 개발이 진행되고 있는 영국의 경우 궁극적으로 영국 내 전력 수요의 20%를 파력 및 조류의 해양에너지로부터 획득할 수 있을 것으로 전망하고 있으며, 이 중 5%를 조류에너지, 나머지 15%를 심해 파력에너지에서 얻을 것으로 예측하고 있다.

그림 1에서와 같이 국내 연안역에도 개발 가능한



해양에너지 개발 적지가 분포되어 있다. 연안역의 파력에너지 부존량은 제주도 연안 부존량 총 1,950 MW를 포함하여 동해안 등의 지역에서 6,500 MW로 평가되고 있다. 우리나라 서해는 세계적인 조력발전 적지로서 시화호 254 MW를 포함, 가로림만 520 MW, 인천만 1,500 MW, 강화만 800 MW, 해주만 2,300 MW 등 총 6,500 MW의 부존량을 보유하고 있다. 조류발전 적지로는 울돌목(50 MW), 장죽수도(150 MW), 맹골수도(250 MW) 등이 대표적이며, 총 1,200MW 이상의 부존량을 갖고 있다.

제3차 국가에너지 기본계획에 따르면 우리나라는 2030년까지 신재생에너지 보급률 11% 달성을 목표하고 있으며, 이 중 해양에너지로부터 약 4.7%의 공급이 가능할 것으로 전망된다. 이를 위해 단기(2008 ~ 2012)적으로는 정부 주도로 핵심 기술 개발과 연안역 해양에너지 이용기술 개발을 추진하고, 중기(2013 ~ 2020)에는 산업체의 참여 하에 핵심기술의 실용화와 외해역의 해양에너지 이용기술 개발을 추진하며, 장기(2021 ~ 2030)적으로는 발전회사 주도로 대규모 해양에너지 자원의 산업화와 해양에너지 복합이용에 의한 경제성 제고를 추진할 계획이다.



[그림 1] 우리나라 해양에너지 개발 적지

국내외 해양에너지 개발 동향

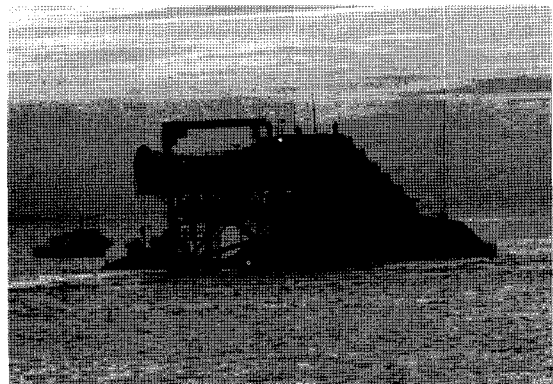
해양에너지는 조력발전을 제외하고는 아직 본격적인 상용화에 이르고 있지 못하나, 조류와 파력발전의 경우에는 상용화 모델에 대한 실험역 시험들이 진행되고 있어 조만간 상용화가 가능할 전망이다.

파력발전

세계적으로 영국, 덴마크, 포르투갈을 비롯한 유럽의 여러 나라와 미국, 일본, 호주 등 선진국을 중심으로 연구개발이 이루어져 왔으며, 다양한 실험역 실증이 진행되고 있어 조만간 파력에너지의 대규모 활용이 가시화될 전망이다. 실험역에서 운용 중인 진동수주형 파력발전장치로는 영국의 Limpet (500 kW), 포르투갈의 Pico 플랜트(400 kW), 호주 Energetech 플랜트(2 MW, 그림 2)가 있으며, 다른 방식에 비해 가장 오랜 실험역 경험을 갖고 있고, 모두 착저식이다.

월파형 파력발전장치로 대표적인 덴마크의 Wave Dragon은 축소 실증플랜트를 제작하여 활발한 실험역 실증이 진행 중인 부유식 플랜트이다. Wave Dragon 상용 모델 단위 모듈의 발전용량은 최대 4 MW에 달한다.

최근 가장 활발한 기술개발이 진행되고 있는 가동물체형 파력발전장치는 다양한 원리들이 적용되고 있는데, 본격적인 상용화 단계에 들어선 Pelamis(750 kW, 그림 3)는 부유식으로서 파도를 따라 움직이는 실린더형 구조물의 관절부에 위치



[그림 2] Energetech(진동수주형)

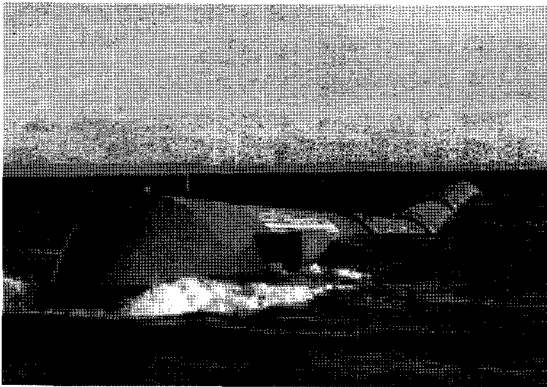
한 유압장치를 이용하여 파력에너지를 흡수하며, 영국의 Oyster는 해저면에 위치한 바다구조물과 힘 지로 연결된 연직구조물이 파도에 따라 진자운동을 하고 이 때 유압장치를 이용하여 기계에너지로 변환하여 발전하는 방식이고, AWS(Archimedes Wave Swing)는 고정되어 있는 내부 실린더와 파도의 상하 운동에너지를 흡수하여 움직이는 외부 실린더의 상대운동을 이용하여 발전하는 방식이다.

국내에서 개발된 파력발전장치는 해양연구원 MOERI(해양시스템안전연구소)에서 개발한 60 kW급 부유식 진동수주형 주전A호(2001, 그림 4)와 등부표용 부유식 소형파력발전기인 BBDB(2006)가 있으며 실해역에 설치되어 실증시험이 수행된 바 있다. 현재 개발이 진행중인 사업은 천해 연안역 적용에 유리한 착저식 파력발전장치가 주

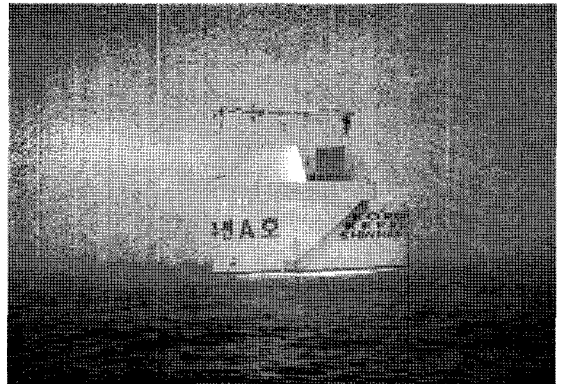
를 이루고 있으며, 주로 해양연구원 MOERI와 한국 해양대를 중심으로 소형파력발전 부이를 비롯하여, 케이슨을 이용한 진동수주형, 수류형과 월파형 및 진자형 등이 개발되거나 개발예정에 있다. 특히, 국토해양부의 지원으로 개발 중인 500 kW급 진동수주형 파력발전장치는 2011년에 제주 해역에 실증플랜트의 설치가 계획되어 있으며, 2013년경에는 본격적인 상용화가 가능할 것으로 기대된다.

조력발전

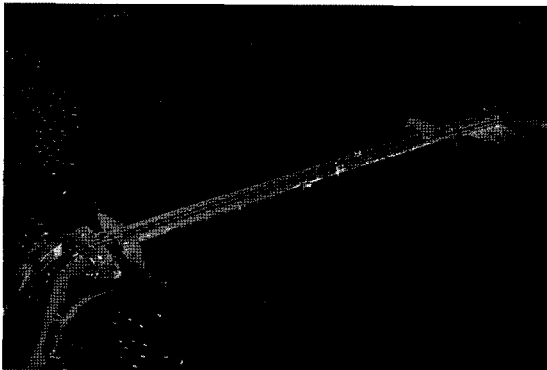
현재 가동중인 각국의 조력발전소 중 대표적인 것으로는 1967년 준공된 프랑스의 Rance 발전소(시설용량 240 MW, 그림 5), 1968년 준공된 러시아의 Kislaya Guba 발전소(시설용량 400 kW), 1984년 준공된 캐나다의 Annapolis 발전소(시설용



[그림 3] Pelamis(가동물체형)



[그림 4] 주전A호(부유식)



[그림 5] 프랑스 Rance 조력발전소 전경



[그림 6] 시화호 조력발전 조감도



량 20 MW), 그리고 중국의 Jiangxia 발전소(시설 용량 3.2 MW)를 들 수 있다. 이들의 공통적 특징은 모두 대규모 조력개발을 위한 시험발전소로 건설되었다는 점이다. 즉, 프랑스의 Rance 조력발전소는 Chausey섬 개발, 러시아의 Kislaya Guba 발전소는 Tugur만과 Mezen만 개발, 캐나다의 Annapolis 발전소는 Fundy만 개발, 그리고 중국의 Jiangxia 발전소는 중국 동해안의 조력개발을 위한 연구, 건설 및 가동경험 축적을 위한 전초단계로 볼 수 있으며, 대규모 조력개발에 따른 시행착오를 최소화하기 위한 목적을 갖고 있다. 또한 이들 대규모 조력개발에 대한 타당성 조사가 1960년대 실시되었다는 점도 공통점이라 할 수 있다.

우리나라는 1980년대에 가로림만을 중심으로 서해안 조력발전에 대한 개략적인 타당성 조사를 수행하였고, 2005년 가로림만 조력발전 타당성 정밀 조사를 시작으로 인천만, 강화만 지역의 해양특성 상세조사와 조력발전소 개념설계를 실시하였으며, 지형 변화 및 환경영향 예측기술을 개발하여 조력발전 상용화 기반을 구축하였다.

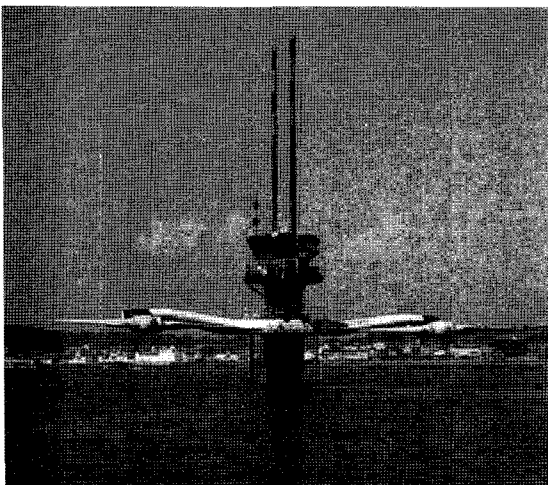
시화호 수질개선 대책의 일환으로 시화호 운영방법을 담수호에서 해수호로 전환함에 따라 청정에너지 생산과 수질개선 목적으로 시화 조력발전소 건설을 2004년 착수하였으며, 2010년 완공 예정이다. 시화호 조력발전소는 254 MW 용량으로 Rance

조력발전소를 능가하는 세계 최대 규모의 조력발전소이다(그림 6). 520 MW급의 가로림 조력발전소도 실시설계가 진행 중에 있다.

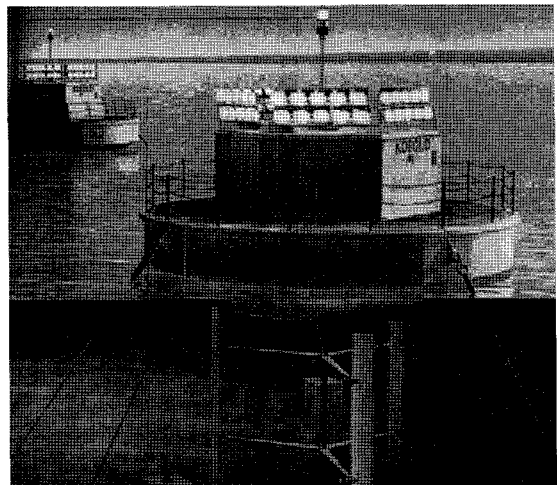
조류발전

조류발전은 아직 상용화는 이루어지지 않고 있으나, 다양한 방식의 조류발전시스템이 개발되어 활발한 실험실 검증이 진행 중에 있기 때문에 실용화에 매우 근접한 발전방식으로 여겨지고 있다. 기술개발이 가장 활발한 국가는 영국으로서, MCT사는 2003년 300 kW급 조류발전시스템 Seaflow를 실험역에 설치·운영한 바 있으며, 이를 확장하여 한 쌍의 터빈으로 이루어진 1 MW급 시스템 SeaGen을 2008년에 설치하여 성공적으로 운용 중에 있다(그림 7). 또한 영국의 Lunar Energy사와 OpenHydro 사도 수평축 방식의 조류발전시스템을 독자적으로 개발하여 실험역 시험을 진행하고 있다. 수직축 터빈으로는 일본에서 많이 연구된 다리우스 터빈, 캐나다에서 연구된 Davis 터빈, 미국에서 개발된 헬리컬 터빈 등이 있다(그림 8).

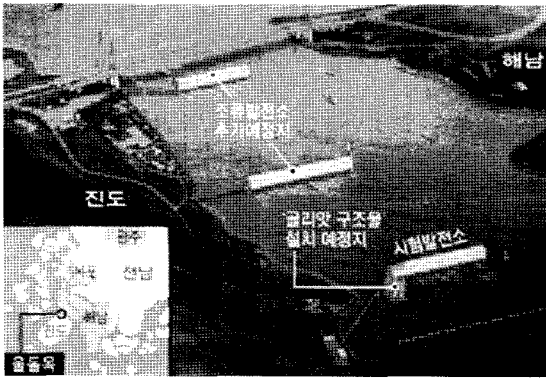
국내에서는 한국해양연구원이 2003년 울돌목에 설치한 소형 헬리컬 터빈 방식의 조류발전시스템이 시초로써, 이를 확장하여 헬리컬 터빈 한 쌍으로 이루어진 1 MW급의 조류발전시스템이 울돌목에 2009년 건설·완공되었다(그림 9). 또한 오션



[그림 7] MCT사의 SeaGen (수평축)



[그림 8] Kobold & Blue Energy (수직축)



[그림 9] 울돌목 조류발전 조감도

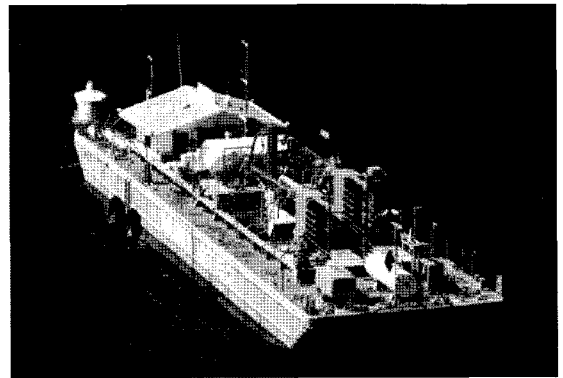
스페이스가 2006년부터 진행하고 있는 수평축 조류발전장치에 관한 연구는 2008년 25 kW급(고정식), 2009년 100 kW급(부유식) 실증 플랜트의 실험해역 설치가 진행되었다. 그밖에도 시화호 방류구에 설치하는 300 kW 발전장치를 비롯하여, 2009년부터는 200 MW 규모의 인천 조류발전단지, 250 MW급 신안 조류발전단지 사업들이 구체화되고 있는 등 국내에서 가장 유망하고 환경친화적인 해양에너지로 각광받고 있다.

해수온도차발전

해양 온도차 발전의 개념이 J.A. d'Arsonval에 의해 제안된 이래 초기 연구는 프랑스에서 가장 활발히 진행되었으나, 이후 1973년 에너지파동을 겪으면서 미국과 일본을 중심으로 본격적인 기술개발이 시작되었다. 미국은 1979년 하와이에 50kW 출력의 폐순환식 Mini-OTEC을 설치하여 실험을 수행하였으며(그림 10), 1993년부터 하와이에 210 kW 출력의 육상형 개순환식 온도차발전장치 HELH를 운용하고 있다.

일본은 1974년에 발족한 Sun-Shine 계획의 일부로 1982년 도쿠시마대학이 도쿠노시마에 50 kW급, 1985년 사가대학이 이마리에 75 kW급 육상형 폐순환식 OTEC 실증플랜트를 각각 설치하여 실험하였다. 또한 1981년 국제협력 사업으로 100 kW급 폐순환식 OTEC을 Nauru 공화국의 초등학교에 설치하여 최초로 전기를 공급하였다.

해양 온도차발전에 관한 국내의 연구 사례는 매



[그림 10] 미국의 Mini-OTEC

우 제한적이다. 동해의 남부 해역과 제주 일부 해역에는 표층수와 심층수 사이에 상당한 온도차가 존재한다고 알려져 있으며, 원자력 및 화력 발전소로부터의 온배수를 이용한 온도차발전 가능성이 제시된 바 있다. 온도차발전장치의 국내 연구사례로는 2000년 인하대학교 등이 수행한 20 kW급 해양 온도차발전 실증 연구가 유일하다. 한편, 해수 온도차를 이용한 냉난방 기술에 관한 연구도 한국에너지기술연구원이 2008년 삼척 실증플랜트(2008년), 한국해양대학교의 해수온도차 냉난방시스템(2009년)등에 적용되고 있다. 해양심층수의 개발이 활성화 되면서 심층수의 저온성을 활용한 연구도 병행하여 진행되고 있다.

맺는말

해양에너지 자원의 실용화는 기술적인 어려움의 극복과 함께 경제성의 제고를 통한 발전단가의 저감이 관건이다. 2000년대 들어 파력과 조류에너지를 중심으로 다양한 실증플랜트의 실험해역 적용이 급증하고 있으며, 비약적인 기술발전으로 여타 신재생에너지에 비해서도 빠르게 경제성이 제고되고 있다. 기술적으로는 여러 해양에너지 기술을 결합한 복합발전을 통해 경제성 향상이 가능하며, 해양에너지를 이용한 수소에너지 생산 및 저장시설 등 복합이용의 출현이 전망된다.

조력발전은 서해안의 대규모 적지를 순차적으로 개발하여 대규모 해양에너지 자원을 확보하고, 연



안역의 저수댐이나 방파제 등의 인공구조물을 이용한 조력발전 산업화를 병행할 필요가 있다. 파력 및 조류발전은 대규모 단지화 및 복합발전에 의한 경제성 제고를 통한 산업화와 도서지역 및 연안역 생산 활동에 필요한 소규모의 독립적 에너지 공급원으로서의 활용을 병행하는 것이 바람직하다. 해수온도차 냉난방 기술은 정부의 에너지 보급정책과 연계하여 산업화를 촉진하고 수출산업으로 육성 요구된다.

우리나라는 천해역에서 개발 가능한 대규모 해양 에너지 자원이 있음에도 불구하고 개발이 지연되어 왔으나, 최근 정부지원이 확대되면서 청정 신재

생에너지 보급률을 획기적으로 증가시킬 수 있는 기회를 맞이하고 있다. 하지만 해양에너지 자원 개발이 본격적으로 이루어지기 위해서는 원활한 해역 이용과 발전 차액 지원 등 관련 정책 및 지원 제도의 수립이 요구된다. EU에서 운영하는 영국 Orkney섬의 EMEC(European Marine Energy Center)와 같은 해양에너지 실험실증 사이트의 설치도 훌륭한 지원책이 될 수 있다. 기후변화협약 후속 논의에서 보는 것처럼 청정에너지 자원의 확보가 발동에 떨어진 문제임을 감안하면 해양에너지 자원개발을 위한 기술개발은 더 이상 늦출 수 없는 시급한 국가적 과제가 아닐 수 없다. (❊)