

발전소 복수기를 이용한 해양복합온도차 발전



김 범 주
KEPCO 전력연구원 그린에너지연구소 선임연구원

1. 개 황

많은 나라들이 경제 발전과 복지에 관심을 가지면서 현재의 지구온난화를 가속화 시켰고, 이러한 변화는 인류에 부정적인 영향을 미칠 것으로 예견되고 있다. 화력발전소는 매년 전 세계 Green House Gas의 약 21.3%를 방출하고 있다. 따라서 이러한 화력발전소

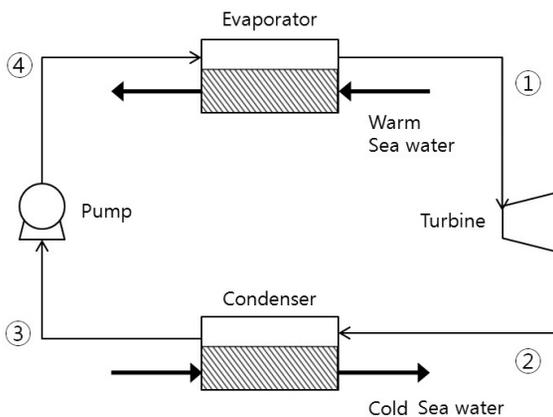
를 대체하는 발전시스템을 개발하여 지구온난화를 억제할 필요가 있다. 이러한 대안 중에 하나가 해수 온도차 발전(Ocean Thermal Energy Conversion)이다. OTEC의 개념이 고안된 지는 오랜 시간이 지났지만 최근에 재생에너지원 확대 및 이산화탄소 저감 정책의 강화로 인해 새로운 모멘텀을 얻고 있다.

해양표층의 해수온도는 아열대와 열대지방에서

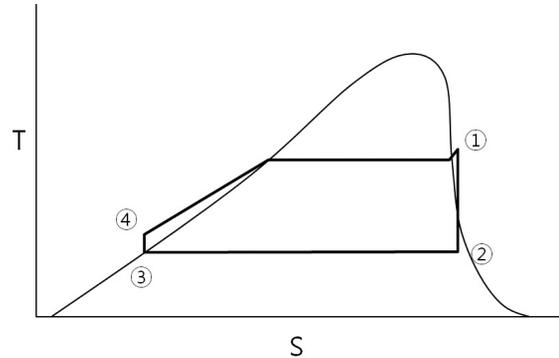
27~29℃로 분포하며 온대지방에서도 여름에는 이 정도 상승하는 것으로 알려져 있다. 해양심층의 해수는 세계 어느 곳에서나 1,000m 깊이에서는 4~5℃이다. 해수온도차 발전기술은 이와 같이 해양 표층의 고온수와 심해의 저온수의 온도차를 이용하여 발전하는 기술이다.

해수온도차 발전은 개방형, 폐쇄형, 하이브리드형이 있으며, 과거에는 개방형이 주로 연구되어 왔으나, 폐쇄형이 경제적이고 더 큰 출력으로 발전 가능한 사실이 밝혀지면서 현재는 폐쇄형 중심의 연구개발이 활발한 편이다. 폐쇄형 OTEC발전 시스템의 개략도는 그림 1과 같다. 작동유체는 증발기에서 표층수와 열 교환을 통해 증기가 되어 터빈을 구동시켜 발전을 하고, 응축기에서 심층수와 열 교환을 통해 증기가 냉각되어 액화된 후, 펌프에 의해 증발기로 수송되는 과정을 반복하게 된다. 주요 구성기기는 열교환기(증발기, 응축기), 터빈, 발전기, 심층취수 배관, 펌프 등이다. 그림 1을 온도-엔트로피 선도로 나타내면 그림 2와 같으며, 랭킨 사이클과 유사하다.

이상적인 경우에 증발기와 응축기는 정압 상태이고 터빈과 펌프는 등엔트로피 상태이다. 증발기(④~①과정)에서 열을 공급받고, 응축기(②~③과정)동안 열을 방출, 터빈(①~②과정)에서 일을하여 전력을 생산하며, 펌프(③~④과정)에서 일을 공급받는다.



[그림 1] Closed Loop 해수온도차 발전 개략도



[그림 2] Closed Loop OTEC T-S(온도-엔트로피)선도

2. 동향

가. 해수온도차 발전의 역사

해수온도차 발전은 프랑스의 Jacques Arsene D'Arsonval(1881년)이 처음으로 구상하였으며, Georges Claude(1930년)가 쿠바의 Matanzas Bay에 Open Type의 22kW(gross) 육상형 해수온도차 발전 플랜트를 건설한 것이 최초의 시도이다. 프랑스 과학자들(1956년)이 아프리카의 서쪽 해안의 Abidjan에 3MW(gross) Open Type의 OTEC 플랜트를 설계하였으나, 저렴한 수력발전소의 건설로 인해 이 OTEC 플랜트는 완공되지 못했다. 1973년 제1차 에너지 쇼크 이후, 미국과 일본에서 본격적으로 OTEC 관련 연구가 시작되었다. 미국의 동향부터 살펴보면, NELHA(National Energy Laboratory of Hawaii Authority, 1979년)에서 Closed Type의 50kW급 실증설비를 건설하였으며, Mini-OTEC(그림 3)으로 명명하였다. 이 플랜트 설비는 53kWe의 Gross 출력 및 18kWe의 Net 출력을 생산한 것으로 보고되었다.

1993년에도 NELHA에서 50kW급 폐쇄형 발전설비의 실험을 하였고, 1993~1998년에는 210kW급(Gross) 개방형 발전설비 실험을 통해 100kW(Net)의 전력을 생산하였다. 최근에도 NELHA는 록히드 마틴사와 마카이 오션 엔지니어링과 함께 OTEC의



[그림 3] Mini-OTEC



[그림 4] NELHA의 OTEC 시험 설비(2012년)

연구개발을 주도하고 있다(그림 4).

일본은 1974년 도쿄전력과 큐슈전력, 사가대학, 일본전지종합기술연구소 공동으로 OTEC 발전의 경제성과 기술적 검토를 시작하였고, 1982년 Toshiba & TEPC가 남태평양의 나우루 공화국 해역에서

120kW(Gross), 31.5kW(Net)의 전력을 생산하였다. 큐슈전력(1982년)이 도쿠노시마에서 50kW급 출력향상 시험에 성공하였고, 사가대학은 R-22 및 NH3를 사용한 75kW급 OTEC플랜트 제작 및 실험을 하였으며(1984년), 9kW(Gross) Closed-Cycle

[표 1] 대표적인 OTEC 실험사례

구분	Mini-OTEC	나우루	도쿠노시마	사가대학	인하대학교
국가	미국	일본	일본	일본	한국
실험기간(년)	1978~1979	1982~1984	1982~1984	1985~2002	1999~2000
장소	하와이	나우루	도쿠노시마	이마리	인천
타입	Float-Close	Land-Close	Land-Close	Land-Close	Land-Close
표층수온(°C)	26.1	29.8	28.5	28.0	28.0
심층수온(°C)	5.6	7.8	12.0	7.0	4.0
정격출력(kW)	50	100	50	75	20
작동유체	암모니아	R22	암모니아	암모니아	R22

Lab Model을 제작하였다(1995년). 1998년부터 인도 정부와 National Institute of Ocean Technology (NIOT)는 사가대학과 함께 Tamil Nadu에 있는 Tuticorin 해안에서 1MW(Gross) OTEC Floating 플랜트의 설계, 개발 및 실증 프로젝트를 진행하기 시작하였다. 표 1은 대표적인 OTEC 실험사례를 요약하여 제시하였다.

나. 발전소 복수기를 이용한 해양복합온도차 발전

우리나라는 삼면이 바다로 둘러싸여 해양에너지를 확보하기에 지리적으로 유리한 여건을 가지고 있으나, 열대지방만큼 표층수와 심층수의 온도차가 나지 않기 때문에 해수온도차 발전을 하기엔 취약하다. 하지만 이러한 불리한 조건을 극복하기 위해 한국전력 공사는 발전소의 복수기와 해수의 온도차를 이용한 발전 시스템 연구개발을 2011년 11월부터 시작하였다. 이 과제의 명칭은 『플랜트 배열이용 해양복합온도차 핵심기술 개발』이고, 산업통상자원부의 신재생에너지 융합원천 기술개발사업의 일환으로 진행 중이며, 2015년 3월까지 예정되어 있다. 이 과제의 목

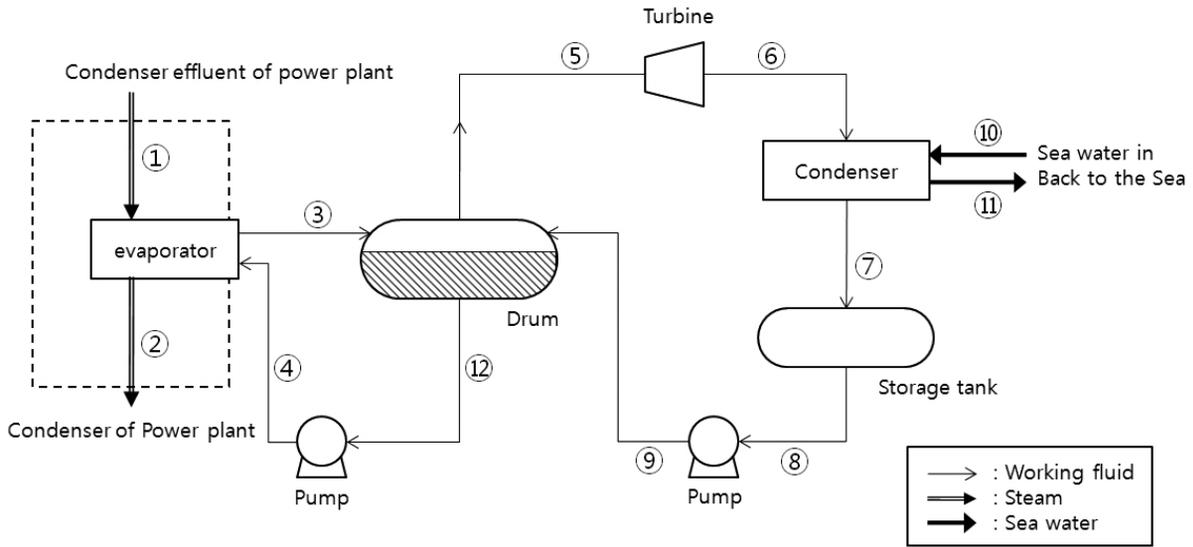
표는 영동화력발전소의 복수기와 해수 온도 차이를 이용해 10kW급 실증설비를 구축하는 것이다. 표층 해수보다 높은 온도의 복수기의 스팀을 Heat Source로 활용하므로 기존의 온도차 발전 방식에 비해 높은 효율을 얻을 수 있고, 발전소 가동에 따라 연중 일정한 출력을 확보할 수 있다. 그리고 해양복합온도차 발전 시스템을 가동하면 발전소 복수기의 냉각능력을 향상시키고 진공도도 증가될 것으로 예상된다.

해양복합온도차 발전설비가 설치될 영동화력발전소는 강원도 강릉시 강동면 안인리에 1970년대 설치되었고, 125MW 및 200MW급 기력발전소 2기로 구성되었으며, 한국남동발전에서 운영하고 있다. 2013년에 이곳의 발전소 복수기에 열교환기를 삽입하여 10kW급 실증 설비를 구축할 계획이다.

그림 6은 복수기를 이용한 해양복합온도차 발전 시스템의 개요를 나타낸 것이다. 발전소의 복수기에서 스팀의 상태는 대략 32.9℃, 5kPa(절대압)이다. 이러한 스팀이 흐르는 발전소의 복수기에 열교환기를 삽입하면 작동유체는 이곳에서 가열되어, 증기의



[그림 5] 영동화력발전소



[그림 6] 복수기를 이용한 해양 온도차 발전 시스템 개요

형태로 ③을 통해 Drum으로 흘러간다. Drum에서 증기는 ⑤를 통해 터bin으로 흘러가고 터bin에서 전력을 생산하고 난 뒤, 응축기로 가서 해수와 열 교환을 한 후, 액체 상태의 작동유체는 스토리지 탱크에 저장된다. Drum의 수위에 따라 펌프가 가동되어 ⑧, ⑨를 통해 스토리지 탱크에 있던 작동유체는 Drum으로 공급된다. Drum의 액체는 ⑫, ④를 통해 Evaporator로 이동하고 발전소의 복수기로부터 열을 공급받는 과정을 반복하게 된다. 해양복합발전 사이클은 그림 2와 마찬가지로 기존의 랭킨사이클과 동일한 열역학적 특징을 가진다.

다. 작동유체의 선정

지난 수십 년 동안 폐쇄형 OTEC 사이클에 적용하기 위한 다양한 작동유체가 고려되었다. 그 중에서도 가장 많이 거론된 것은 암모니아다. 하지만 암모니아의 가연성과 독성 등의 문제로 인해 CFC, HCFC 냉매가 개발된 이후로는 R22가 폐쇄형 OTEC 플랜트의 작동유체로 주목을 받아왔다. R22는 사용하기에 편리하고 안전하며 암모니아와 비슷한 증기압을 가

지고 있어서 암모니아를 대신하여 사용될 수 있었다. 그러나 R22는 오존층을 파괴시키므로 몬트리얼 의정서에 의해서 규제되기 시작하여 선진국에서는 1996년부터 사용이 금지되고 있다. R22와 비슷한 증기압을 갖는 작동유체를 살펴보면 R1270(프로필렌)과 R290(프로판), R407 등이 있다. 그러나 R1270과 R290은 가연성이며, 이번에 추진하는 해양복합온도차 발전의 경우 영동화력 발전소의 복수기에 직접 연결해야 하므로 가연성이 있는 냉매는 배제되었다.

한편, R407C는 R22와 증기압이 비슷하고 가연성이 없으나 지구온난화 지수(GWP)가 높아 장기적으로는 사용되기 곤란하다. 따라서 위의 냉매를 작동유체로 사용할 수 없기 때문에 R22와 증기압이 다른 냉매를 고려해야 한다. 특히, R32는 시스템의 크기를 줄일 수 있으나 가연성이 있으므로 발전소의 안전성을 위협할 수 있으므로 배제하였다. 결국 R134a가 시스템의 사이즈가 크고 지구온난화 지수가 다소 높은 단점이 있으나 가격, 성능, 환경 지수, 안전 측면에서 최적으로 판단되어 이 물질을 해양복합온도차 발전의 작동유체로 선정하였다.

라. 해양복합온도차 발전 구성 요소

해양복합온도차 발전 구성 요소에는 열교환기, 터빈, 심층해수의 취수 시스템, 에너지 변환장치가 있다. 터빈은 저온·저압에서 가장 많이 쓰이고 있는 스크롤 익스팬더 타입을 적용하였다. 스크롤 익스팬더는 유량에 따른 효율의 변동이 적은 편이고, 소형에서 비교적 효율이 높은 편이다. 에너지 변환장치는 다이내모메터를 통해 스크롤 익스팬더의 토크와 각각의 속도를 검출하여 발전량을 측정할 계획이다. 열교환기 Evaporator에는 셸&튜브 타입을, Condenser에는 판형 열교환기를 설치할 계획이다. 이번 과제에서 Heat Sink는 표층해수를 사용하는 것이므로 심층해수의 취수 시스템 제작은 고려되지 않았다. 하지만 향후 MW Class로 해양복합온도차 발전 용량을 확대할 경우에 경제성을 검토하기 위해 이번 연구과제에서와 같이 영동화력 발전소 근해의 해저 지형조사 및 수온조사를 함께 진행하고 있다.

3. 전망

세계적으로 해수 온도차 발전은 아직 상용화가 이루어지지 않았다. 현재 미국, 일본이 활발히 연구개발을 진행 중에 있으며, 최초로 상용플랜트를 건설, 운전하는 국가가 업계를 주도할 것으로 예상된다. 우리나라의 경우, 해수온도차 발전을 하기에 상대적으로 불리한 자연환경을 가지고 있지만, 동해안에 위치한 화력발전소 복수기의 배열과 심층해수의 온도차를 이용한다면 새로운 형태의 청정에너지 생산이 가능하고 CDM(Clean Development Mechanism)사업을 전략적으로 유도할 수 있을 것이다. 해양 심층수는 전력발전 뿐만 아니라 지역냉방 시스템, 해수담수화, 수산업, 관광업, 식품업, 수소에너지 생산 기술과 같은 각종 신산업 창출이 가능하므로 경제적 파급 효과가 클 것으로 전망된다. 