

해양심층수 에너지자원 이용 타당성 분석 연구

오위영*, 김정협**, 김현주***

I. 서론

오늘날 화석연료의 사용과 과학기술의 급속한 발전을 기반으로 한 산업화는 인류 문명을 발달시키고 삶의 질을 크게 개선시켜 왔지만, 막대한 화석연료의 소비는 자원 고갈 뿐만 아니라 온실가스 증가에 의해 지구온난화를 초래하고 있다. 이에 따라 지구온난화에 적극 대처하기 위한 국제적 노력으로 1994년 기후변화협약이 발효되었으며, 이 협약에 대한 실천적 규범을 담고 있는 교토의정서¹⁾가 2005년에 공식적으로 발효되었다. 이 의정서에 따라 선진국들은 CO₂ 배출감축에 대한 목표를 설정하고 배출저감 정책을 적극 추진하고 있다. 한편 우리나라는 제1차 의무공약기간 감축대상국에서 제외되었지만 OECD 회원국으로서 이미 선진국 대열에 진입해 있을 뿐 아니라 온실가스 배출량도 세계 10위 인 점, 향후 지속적인 경제발전을 위해서는 더 많은 에너지를 이용할 수밖에 없다는 점에서 CO₂ 배출저감을 위한 기술개발이 시급한 실정이다. 이에 따라 우리나라도 2008년에 2020년 배출 전망치 대비 30%의 온실가스 배출을 저감 목표를 설정하여 계획을 추진하고 있다. 이를 실천하기 위해서는 저탄소 녹색기술의 개발 및 실용화가 필요하며, 또한 화석연료를 대체하여 온실가스 배출을 저감할 수 있는 신재생에너지의 개발 및 이용을 확대하여 2030년까지 전체에너지 수요의 11%를 신재생에너지로 충당하겠다는 계획을 수립하여 추진하고 있다²⁾.

본 연구의 핵심인 심층수 열에너지에 대한 선진국 연구결과를 보면 화석연료에 의한 전기 및 보일러 사용에 비해 70% 가량의 에너지 절감효과를 기대할 수 있을 것으로 전망되고 있으나 한국의 경우에는 선진국에 비해 이 분야의 연구가 활발히 이루어지지 못하고 있다. 하지만 동해안에 무한한 청정 에너지자원인 심층수를 보유하고 있을 뿐만 아니라, 연간 최대로 약 2,100천만 톤³⁾ 가량의 발전소 온배수가 배출되고 있기 때문에 온도차 발전이 가능할 것으로 전망되고 있다. 또한 심층수는 담수화가 가능하고 운영비용이 적다는 것이 가장 큰 장점이며, 제2차 오염물질이 타 발전에 비해 적게 생산될 뿐만 아니라 계속되는 유류비의 상승으로 인해 타 에너지산업과 비교해 경쟁력 확보가 가능할 것으로 전망되고 있다.

마지막으로 해양심층수 에너지자원을 이용한 발전 방식에는 지역 냉난방과 온도차 발전이 있을 수 있는데, 본 연구에서는 이 2가지 발전 방식에 대해 향후 에너지자원으로 이용 가능한지 경제성 분석을 통해 판단해보고자 한다.

* 오위영, 한국해양연구원 해양정책연구실, 책임연구원, 031-400-6501, wyoh@kordi.re.kr

** 김정협, 한국해양연구원 해양정책연구실, 연구원, 031-400-7859, j-hkim@kordi.re.kr

*** 김현주, 한국해양연구원 해양심층수연구센터, 책임연구원, 033-630-5000, hjkim@moeri.re.kr

1) 교토의정서에는 EU, 일본, 러시아 등 주요 선진국을 포함한 총 38개 회원국이 제1차 의무공약기간인 2008~2012년까지 각국의 온실가스 배출량을 1990년 대비 평균 5.2% 감축하도록 규정

2) 지식경제부, 해수이용 냉난방 시스템 개발, 2008, 한국에너지기술연구원에서 발췌하여 재정리 함

3) 동해안에 위치하고 있는 영동, 영남, 울진, 월성, 고리 발전소의 연간 최대 온배수량 합계

II. 심층수 열에너지 특징 및 발전개념

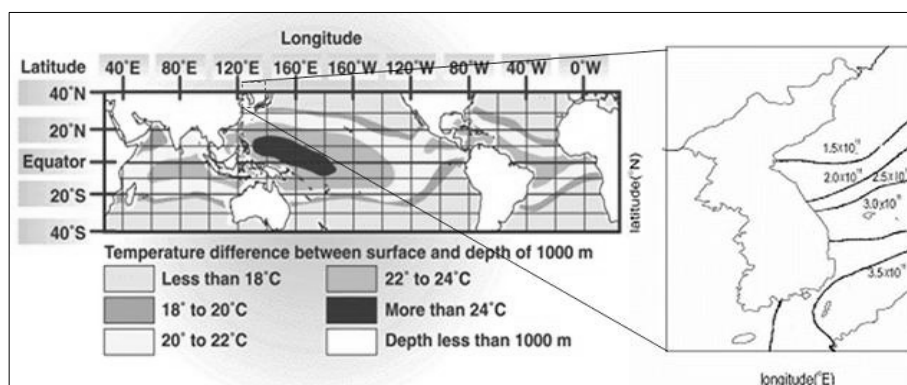
1. 심층수 열에너지 특징

심층수 열에너지는 자연에너지로서 염분에 의해 동결 온도가 -1.9°C 로 매우 낮아 저온의 이용범위가 넓다. 또한 열용량이 매우 크기 때문에 온도 변화가 적으며, 지구상 물의 97.2%가 해수이고, 그중에서도 95%가 해양심층수이므로 자원 부존량이 무한대에 가깝다.

또한 여름의 해수온도는 대기온도보다 $5\sim 30^{\circ}\text{C}$ 가량 낮고, 겨울의 해수온도는 대기온도보다 $5\sim 10^{\circ}\text{C}$ 높은 열적 특성을 가지고 있어 열펌프의 열원으로 유용하게 이용될 수 있다. 해수의 수온은 지역(적도와 위도)과 수심에 따라 차이가 있는데, 지역에 따른 수온은 태양 에너지를 가장 많이 받는 적도에서 가장 높고, 극지방으로 갈수록 낮아지는 경향을 보이고 있다. 적도와 극지방의 수온 범위는 $-2\sim 30^{\circ}\text{C}$ ⁴⁾ 가량으로 큰 차이가 발생하고 있는데, 한국의 경우에는 중간보다 극지방에 더 가깝게 위치하고 있기 때문에 적도보다 수온은 낮은 반면 극지방에 비해 수온이 높은 현상을 보이고 있다.

심층수는 해양의 가장 아래쪽에 분포하고 있는 영역으로 바깥 환경변화에 따른 수온변화가 적을 뿐만 아니라 해수 순환이 매우 느리게 이루어져서 온도 차이가 연중 5°C 이하로서 수심에 따른 수온 변화가 매우 작은 층이다⁵⁾. 특히 한국의 동해지역은 서해와 남해에 비해 상대적으로 심층수까지의 거리가 육지에서도 짧은 거리에 위치하고 있어, 온도차 발전을 하기에 비교적 좋은 여건을 가지고 있으며, 자원량이 무한하다는 점, 수심 200m 아래에서 연중 2도 이하의 저온 특성을 안정적으로 유지⁶⁾하고 있다는 점, 그리고 청정성, 부영양성이 높다는 점 등의 특징을 갖고 있다.

아래의 (그림 1)은 전 세계 및 한국 동해의 심층수 열에너지 분포를 나타낸 것으로, 동해지역은 남쪽으로 갈수록 열에너지가 높게 분포하고 있다. 국내에 존재하는 심층수 열에너지 부존량은 방대하며, 온도차 발전을 위한 에너지 부존량⁷⁾은 위도 1° ×경도 1° 마다 1.5×10^{11} 에서 $3.5\times 10^{11}\text{GWh/년}$ 의 온도차 에너지로 부존하고 있는 것으로 확인되고 있다. 특히 국내 해안가의 냉난방용 해수 열에너지의 부존량은 $100\sim 480\text{Tcal/월}$ 이상으로 추정되고 있으며, 연간 해수 열에너지 부존량은 $27,160\text{Tcal/년}$ 정도로 조사되었는데, 이는 해안선 1km당 약 5,000 세대의 APT를 냉난방할 수 있는 막대한 열량으로 추정되고 있다⁸⁾.



(그림 1) 심층수 열에너지 분포도

4) 조규대, 이재철, 허성희, 해양학 개론, 태화출판사, 1993

5) 조수환, “해양학”, 조선대학교 출판부, 2001

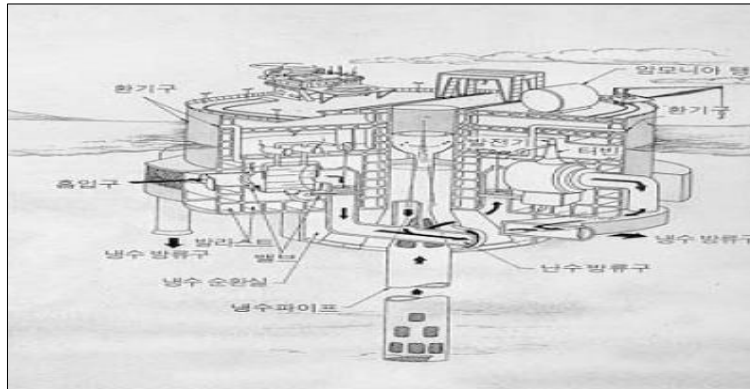
6) 김현주 외, 2005, “해양심층수의 다목적 이용 개발” 1단계 보고서, 국토해양부 보고서

7) 김기철, 건물의 냉방을 위한 해수역 취득에 관한 연구, 동의대학교, 2006에서 발췌하여 요약 정리함

8) 박준택·박성룡, 해수 온도차에너지 이용기술, 기술현황분석(에너지시스템기술), ETIS 분석지 제22권

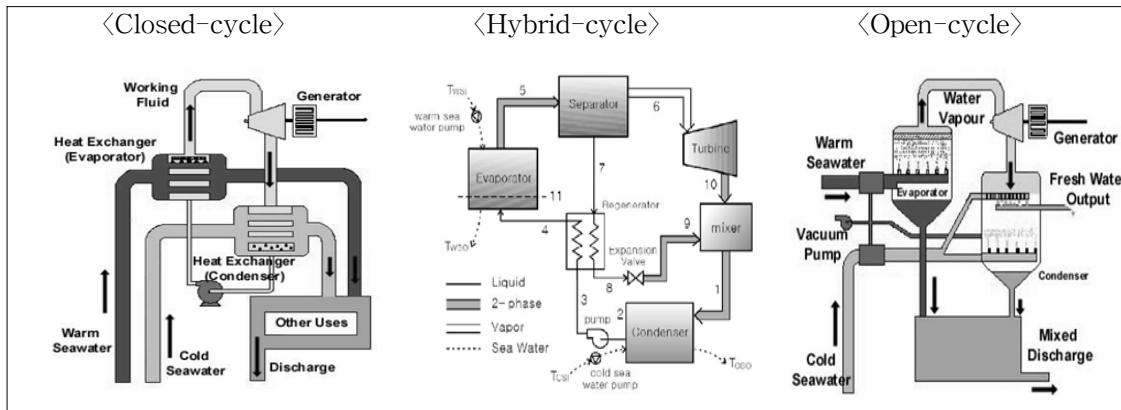
2. 심층수 열에너지 이용 발전개념

해양온도차 발전은 해양심층수와 표층해수의 온도 차이에 의한 열에너지를 변환시켜 에너지를 생산하는 방식으로 해양온도차 발전 시스템 구성을 살펴보면 (그림 2)와 같은데, 온도차 발전 시스템에는 먼저 발전설비(증발기, 응축기, 터빈, 펌프, 발전기, 해수취수관 등)가 있고 다음으로 발전설비를 지지할 수 있는 지지구조물로 나눌 수 있다.



자료 : 경동대학교 해양심층수학과 내부자료
(그림 2) 미국 록히드사의 해양온도차 발전 플랜트 설계

해양온도차 발전방식은 터빈방식과 열전달방식이 있는데, 대부분이 터빈방식으로 운영되고 있다. 또한 발전방법에 따라 폐쇄순환식(Closed cycle type), 개방순환식(Open cycle type), 복합순환식(Hybrid cycle type), 습기순환식(Mist cycle type), 거품순환식(Foam cycle type)의 5가지로 나눌 수 있다.



자료 : 한국해양연구원, 해양심층수 에너지자원 이용 타당성 조사연구
(그림 3) 심층수 열에너지 이용 발전개념

발전방법에 따른 5가지 방식 중 가장 많이 이용되어지고 있는 폐쇄순환식, 개방순환식, 복합순환식의 3가지 방식에 대해 알아보면 다음과 같다.

먼저 폐쇄순환식 해양온도차 발전플랜트는 해수를 직접 이용하지 않고, 작동유체를 이용하여 터빈을 회전시켜 발전하는 방식이다. 작동유체는 증발기에서 온해수(표층해수)와 열교환하여 증발하고, 응축기에서 냉해수(해양심층수)와 열교환하여 응축되는 과정을 거치는데, 그 사이에 터빈을 설

치하여 작동유체의 열에너지가 기계적 에너지를 거쳐서 전기에너지로 변환되는 방식이다. 다음 개방순환식 해양온도차 발전플랜트는 따뜻한 온해수를 증발기에 넣고 감압하여 증발시키면서 생산되는 수증기가 증기터빈으로 들어가 터빈을 회전시키는 방식으로, 터빈을 나온 수증기는 응축기로 들어가 냉해수에 의해 냉각되어 담수가 되므로, 개방식 플랜트는 전기를 생산할 뿐만 아니라 담수도 생산할 수 있는 특징을 가지고 있다. 마지막으로 복합순환식 해양온도차 발전플랜트는 폐쇄순환식과 개방순환식을 복합시킨 형태로, 온해수를 증발시켜 생산한 수증기의 열에너지를 이용하여 암모니아 증기를 발생시키며 담수를 제조하는 것으로, 암모니아 증기는 터빈을 회전시키고, 냉해수로부터 열교환하는 응축기에서 응축되는 방식이다.

III. 국내외 심층수 열에너지 연구개발 동향

1. 국외 심층수 열에너지의 연구개발 동향

1) 해양온도차 발전

해양온도차 발전 개념은 1881년 프랑스의 D'Arsonval의 논문을 통해 '화석연료에 의존한 에너지 이용은 지구온난화를 유발시킬 수 있으므로 자연에너지의 이용이 권장되며, 해양심층수와 표층해수의 온도차를 이용하는 것이 중요'하다고 발표하면서 최초로 제안되었다.

세계 최초의 온도차 발전 실험은 1926년 프랑스의 S. Claude에 의해 작은 실험 장치를 통해 실시되면서 주목을 끌기 시작하였는데, 해양심층수를 이용한 온도차 발전을 실증하려는 시도는 1960년대까지 산발적으로 시도되었으나 석유의 대량공급으로 실용화되지 못하였다. 1970년대 1차 석유 파동 이후 1980년대 중반까지 온도차 발전의 연구개발이 재개되면서 미국, 일본 등지에서 소규모의 해상실험이 실시되었다. 미국은 1978~1979년까지 미국 하와이에서 50kW급 해상형 폐쇄순환식 온도차 발전플랜트 'Mini-OTEC' 실험을 성공하고, 1993년에 하와이 NELHA에 210kW급 육상형 개방순환식 온도차 발전플랜트 실험을 성공하였다. 또한 일본은 1982~1985년에 나우루 공화국(120kW 육상형 폐쇄순환식), 토쿠시마(50kW, 육상형 폐쇄순환식), 사가대학(75kW, 육상형 폐쇄순환식) 등에서 운전실험에 성공하였다. 대만 등은 1980년대부터 해양온도차 발전의 실용화에 관심을 가지고 체계적인 준비를 해왔으며 현재에는 온도차 발전의 이용에 활용하고 있으며, 인도는 2002년부터 2006년까지 1MW급 해상형 해양온도차 발전플랜트 실험을 실시하였다. EU는 기후변화 대응기술의 일환으로 온도차 발전을 보다 적극적으로 개발하여 CDM 사업화를 추진 중에 있는데, 프랑스는 남태평양 타이티섬에 5MW급 온도차 발전소 건설을 추진중이며, 네덜란드도 인도네시아 발리섬에 250kW급 발전소 건설을 추진중에 있다. 또한 핀란드와 스페인은 공동으로 저온도차 OTEC 시스템을 이용한 해수담수화 장치개발을 추진중이며, 자메이카에도 온도차 발전소 건설을 추진중에 있다.

Claude의 온도차 발전 실증이 시도된 이래 지금까지 전 세계적으로 5,000억 원 이상의 연구개발비가 투자되었으며, 2008년 석유가격이 상승하면서, 가까운 미래에는 300달러 이상까지 상승할 것으로 예측되자 최근에 들어 세계적으로 해양온도차 발전의 상용화를 위한 연구개발이 재개되기 시작되고 있다.

2) 해수 냉난방

해양심층수의 냉난방 이용은 미국 하와이의 NELHA에서 자체 건물의 냉방에 적용한 연구개발이

시초인데, 최근 NELHA는 직경 1.2m의 HDPE관을 이용하여 150,000m³/일의 심층수를 취수하고 있으며, 일부를 인근 코나공항의 냉방에 활용하기 위한 계획연구를 수행하고 있다. 또한 해수용 열교환기로 이용되고 있는 플레이트식 티타늄 열교환기는 가격이 매우 비싼 편이므로 다른 소재로 다른 형식의 열교환기를 개발하기 위한 연구개발이 진행되고 있다. 열펌프는 1,000RT급 스크류 열펌프, 2,000RT급 원심압축 열펌프 등으로 개발되고 있으며, 대형화 및 효율 향상을 위한 연구개발이 제조 기업을 중심으로 진행중이며, 해수 냉난방을 위해 취수된 해양심층수를 해양요법, 농수산물 재배 등과 연계하기 위한 복합이용 연구개발이 관련기관에 의해 추진되고 있다.

해수 열에너지 현장이용은 1950년 중반부터 홍콩에서 냉동기나 열펌프의 냉각수로 사용하면서 처음으로 시작되었으며, 1982년부터 북유럽의 스웨덴, 노르웨이 등에서 지역 난방용으로 이용하면서 본격화되기 시작하였다. 특히 일본 후쿠오카 Seaside Momochi, 일본 후쿠오카 Cosmo Square, 괌 등에서는 해수 냉난방을 상업적으로 이용하고 있다.

아래의 <표 1>은 세계적으로 이용되어지고 있는 표층 및 중층해수를 이용한 해수 냉난방 실용화에 관한 조사결과이다.

<표 1> 국가별 표층 및 중층해수를 이용한 해수 냉난방 실용화 현황

국명	가동시기	열공급 규모	온수온도(℃)	이용대상	열펌프용량
스웨덴 스톡홀름, Ldingo	1982. 12	11MW+3MW	55~80	지역난방	3,800kW +670kW
스웨덴 스톡홀름, Ropsten		344,000 Gcal/yr	85	지역난방	100MW
스웨덴 Visby	1983. 02		80		11MW
스웨덴 Vaertan	1995		60~80	지역냉난방	30MW×5 25MW×1
노르웨이 Harstad	1982. 11	200kW	45	오피스빌딩 난방	120kW
노르웨이 Telenor Fornebu		난방 6.7MW 냉방 8MW		지역냉난방	12.5MW
홍콩	1956			시청난방	66kW
괌				지역냉난방	
프랑스 Havre		969kW		회의장 난방	120HP×2
일본 후쿠오카 Seaside Momochi	1993. 04	냉수:76Gcal/h 온수:58Gcal/h	47	상가, 업무시설 등 공공시설	9MW×3
일본 후쿠오카 Cosmo Square	1994. 04	냉수:71Gcal/h 온수:49Gcal/h	47	상가, 호텔 업무시설	
일본 후쿠오카 Sunport	2001. 04			오피스빌딩, 호텔	400RT×2 800RT×2
핀란드 헬싱키 Katri Vala	1988		70~120	전기 및 지역난방	83,850~ 90,565kW

자료1) 박준택·박성룡, 해수 온도차에너지 이용기술, 기술현황분석(에너지시스템기술), ETIS 분석지 제22권

2) 지식경제부, 해수이용 냉난방 시스템 개발, 2008, 한국에너지기술연구원

2. 국내 심층수 열에너지의 연구동향

1) 해양온도차 발전

해양심층수를 이용하지는 못했지만 해양온도차 발전을 위한 핵심기술 기초연구가 1999년에 인하대 등에 의해 R-22 가스를 이용한 1kW급 폐쇄순환식 OTEC 플랜트를 대상으로 실시되었으며, 한국해양연구원은 2001년에 OTEC 플랜트 구조물 개발을 위한 기초적 연구를 실시한 이후로는 진행된 바 없다. 하지만 온도차 발전에 적용될 수 있는 열교환기 및 해양구조물 등의 제작기술은 높은 수준이므로 이를 개선하고, 추가적인 연구개발을 통합하여, 최적배치를 통한 발전 효율의 향상 및 경제성의 제고를 추구해 나가는 것이 필요하다. 또한 세계적으로 많은 연구가 진행되고 있지만 상용화를 위한 실증실험 단계까지 이르지 못하고 있어, 국내 실용화 뿐 아니라 해양플랜트 수출과 해외자원개발을 위한 원천기술 확보 및 대규모 실증실험이 필요한 상황이다.

2) 해수 냉난방 이용

표층 및 중층해수를 이용한 냉난방 실용화에 관한 연구는 먼저 양식장에서 해수열 이용한 경우가 있는데, 이는 폐열을 이용하여 육상수조식 양식장 급수가열시스템으로 사용하고 있는 유류보일러를 대체하기 위한 시스템에 적용한 것이다. 이 시스템은 용량 40RT의 열펌프시스템을 동절기 4개월 동안 저온해수(5.1~13℃)를 양식수조에 알맞은 온도(13~19℃)로 가열 급수시킨 결과 경유보일러 시스템보다 에너지비용이 10.3배(90.4%) 정도 절약되었던 것으로 나타났으며, 열펌프시스템의 하절기 냉각 가동율은 동절기 가동율의 50% 가량으로 적정 급수온도를 충분히 조절 할 수 있는 것으로 조사되었다. 두 번째로 목욕탕에서 해수열 이용⁹⁾을 한 경우인데, 이 시스템은 해수열을 열원으로 하여 목욕탕에 온수를 가온하는 시스템이다. 강원도 동해안에 있는 한 콘도에 40RT급 해수열원 1대와 동일 용량의 폐수열원 열펌프를 설치하여 버려진 폐수를 열원으로 활용 15℃ 정도의 지하수 온도를 55℃ 수준으로 승온시켜 수요처에 공급하였다. 1일 온수 발생량은 200ton이며, 연간생산가능 열량은 2,521Gcal/일로, 연간 에너지절감액은 49,536천 원으로 투자회수시간은 2.8년으로 보고되었다. 세 번째는 에너지기술연구원에서 강원대학교 삼척캠퍼스 해양관광레저스포츠 센터에 표층수를 이용한 냉난방에 관한 실험진행(2008년)을 하였다. 본 실험 결과 냉난방 에너지의 절감율은 57% 가량으로 나타났으며, 이로 인해 연간 약 526만 원의 예산을 절감할 것으로 예측하였다. 마지막으로 한국해양대학교에서 기숙사 건물에 표층수와 열교환기 및 열펌프를 이용한 해수 냉난방 시스템(2009년)을 설치, 가동하여 냉방에너지 65%, 난방에너지 57% 절감한 경우가 있는데, 이들은 가용설비의 적용성 실험 수준에 그쳤다.

한편 국내 해양심층수 열에너지의 냉난방 이용은 2001년부터 국책연구사업으로 추진되어 온 '해양심층수의 다목적 이용 개발' 사업의 일환으로 기초실험이 실시된 바 있는데, 이는 해양심층수의 다목적 이용과 관련하여 자원의 지속가능한 개발 및 이용을 통한 자원의 안정적 확보 그리고 해양 신산업 창출을 선도하는 것을 목표로 하여 2007년도에 해양심층수 저온 특성 연구를 진행하였다. 본 연구는 고성에 있는 해양심층수 연구센터의 냉방시스템에 적용되었으며, 취수지역은 고성군 송지호 남동측 해안으로 수심 300m, 500m의 해양심층수 및 천해역 표층해수를 취수하였다. 2006~2007년까지 해양심층수연구센터에서 이루어진 해양심층수를 이용한 냉방실험 결과, 전기료가 70% 정도 절감되는 것을 확인하였다. 이와 같이 해양심층수를 냉난방에 이용한 사례는 한국에서는 해양심층수연구센터 일부 건물에 대한 냉방 적용이 유일하다.

9) 지식경제부 (2008), 해수이용 냉난방 시스템 개발, 한국에너지기술연구원.

IV. 심층수 열에너지 이용 경제성 평가

1. 경제성 분석의 범위 및 조건

1) 분석의 목적 및 범위

심층수 열에너지 개발 경제성 분석의 목적은 심층수 열에너지를 해양온도차 발전과 해수 냉난방에 활용할 경우의 경제적 효율성을 평가하기 위한 것이다. 경제적 타당성 평가를 위한 방법으로는 순현재가치법, 비용편익분석법, 내부수익률법 등 다양한 방법이 이용되고 있으나, 심층수 열에너지 개발사업은 국내외적으로 전례가 많지 않기 때문에 NPV = 0이 되는 가격을 우선적으로 분석하고 다른 방법은 보조적으로 검토하였다. 분석의 범위는 해양온도차 발전과 해수 냉난방 기술개발 후 시범사업에 대하여 사업추진주체의 입장에서 심층수를 활용한 열에너지 개발에 직접적으로 필요한 사업으로만 한정하여 분석하였다. 한편 분석기법은 순현재가치법(NPV), 내부수익률법(IRR), 비용편익비율법(BCR)을 이용하여 분석하고 실제 조업에 착수할 경우 부가적으로 발생하는 이산화탄소 저감효과 및 부가적인 생산물(용수 및 수소의 생산 등)에 대해서도 분석범위에 포함하였다.

2) 경제성 분석의 전제조건

(1) 분석 기준시점 및 분석기간

경제성 평가에서는 전체 기간에 발생하는 모든 비용과 편익을 동일한 기준시점으로 계산하여야 하는데, 본 분석에서는 기준시점을 심층수를 이용한 심층수 열에너지의 개발 프로젝트가 처음 시작되는 2010년으로 하였다. 한편 분석기간은 심층수 열에너지 개발을 위한 연구개발(온도차 발전 시스템, 해수냉난방 시스템, 취수관 개발 등)과 산업활동을 위한 민간투자(이용 및 생산시설)를 2012년까지 완료하고, 2013년부터 실제로 해수 냉난방이 이루어지는 것으로 가정하여 추정하였다. 하지만 온도차 발전에 대해서는 향후 장기간의 연구개발이 필요한 실정이나 본 분석에서는 2013년까지 기술개발이 이루어지는 것으로 가정하고 2013년부터 실용화가 추진되는 것으로 가정하여 분석을 하였다.

또한 신소재 및 재료의 개발 등으로 내구성이 증가하면서 건물 및 설비의 내구연한은 일반적으로 25년이나 그 이상을 상정하는 경우도 있으나, 본 분석에서는 해수를 사용하기 때문에 부식 등으로 인해 기기 및 장비의 수명이 짧아질 수 있다는 점 등을 고려하여 20년으로 가정하고 2032년까지의 비용과 편익의 흐름을 현재가치로 환산하여 경제적 타당성을 분석하였다.

전체공정은 약 2년 6개월간의 플랜트 건설 및 각종 기기의 설치, 약 6개월간의 테스트 및 시험운영을 거친 다음 20년 동안 운영하는 것으로 가정하였으며, 해수를 사용하는 특수한 상황을 고려하여 열교환기, 히트펌프 등 주요 장비 및 소모품에 대해서는 설비의 특성을 고려하여 내구연한을 설정하였다.

(2) 할인율의 적용

일반적으로 경제성 분석에 있어서 미래의 서로 다른 기간에 발생하는 비용과 편익을 객관적으로 비교하려면 투입자금의 기회비용을 적절히 반영할 수 있는 적정할인율의 결정이 매우 중요하다. 할인율이 높아질수록 초기투자 비용의 현재가치는 증대하는 반면 상당기간이 지난 후에 발생하는 편익의 현재가치는 현저히 작아지는 경향이 있으므로, 심층수를 활용한 열에너지 개발과 같이 공공적 성격이 강한 사업의 경우 시장할인율이나 가중평균할인율 등을 확립적으로 적용하는 것은

다소 무리가 있다. 따라서 정부에서는 국고지원 대상사업에 대해 공공사업간의 상호비교가 가능하도록 모든 공공사업에 7.5%의 실질 사회적 할인율을 적용하도록 규정하고 있어 본 분석에서는 7.5%의 사회적 할인율을 적용하여 분석하였다.

2. 해양온도차 발전의 경제성 분석

1) 경제성 평가의 전제조건

온도차 발전플랜트는 총발전량 기준(Gross power OTEC plant)¹⁰⁾과 순발전량 기준(Net power OTEC plant)¹¹⁾으로 구분이 가능하지만, 본 연구에서는 순발전량 기준으로 1MW와 10MW급 발전설비를 설치하여 운영하는 것으로 가정하였다. 또한 온도차 발전은 방식에 따라 폐쇄순환식, 개방순환식, 복합순환식 등으로 구분할 수 있으나 본문에서는 경제성 향상을 위해서 최근에 주로 개발되고 있는 개방순환식으로 가정하여 분석하였다.

2) 기술 및 경제변수의 가정

해양온도차 발전이 신재생에너지 개발이라는 공익적 측면이 높은 사업임을 고려하여 연구개발비는 경제성 분석 대상에서 제외하고, 순수하게 기술개발이 완료된 후에 설치·운영하는 비용만을 대상으로 경제성을 분석하였다. 또한 1MW의 전력생산을 위해서는, 1일 100,000톤의 취수가 가능한 대용량 취수관을 개발하여 설치하는 것으로 가정하였다.

〈표 2〉 해양온도차 발전을 위한 초기 투자비

(단위 : 백만 원)

Net Power (MW)	1MW	10MW	50MW
Heat exchanger	4,000	35,000	125,000
Cold water pipe	15,000	60,000	120,000
Turbine generator	3,000	25,000	60,000
Structure	4,000	15,000	75,000
Etc	2,000	15,000	30,000
Total cost	28,000	150,000	410,000
Initial cost per 1kW	28	15	8.2

해양온도차 발전을 위한 비용은 초기 시설투자비와 20년간의 지속적인 운영에 소요되는 연간운영비로 나눌 수 있는데, 이를 각각의 온도차 발전 규모에 따라 계상하였다. 운영비에 대해서는 온도차 발전설비를 운영하는 인건비와 유지보수비로 크게 나누어지며, 연간 운영비 및 유지보수비는 기존 자료를 바탕으로 플랜트 설비업체의 자문을 받아 산정하였다.

10) 플랜트 전체의 발전량이 1MW로 플랜트의 발전기 및 기기 등에서 소모되는 발전량을 제외하면 순발전량(net power) 기준으로는 0.65MW 생산이 가능한 것으로 가정함

11) 발전기 및 플랜트 등 자체에서 사용되는 전기량을 제외한 순발전량이 1MW가 되기 위해서는 총발전량이 약 1.54MW급 정도로 설계되어야 함

〈표 3〉 해양온도차 발전을 위한 연간 운영비

(단위 : 백만 원)

구 분	1MW	10MW	50MW
Operations & Maintenance	500	500	1,000
Repair & Replacement	1,000	5,000	8,000

한편 초기시설비는 설비를 지지하는 기반구조물, 온도차 발전 설비와 취수시설 등으로 대별할 수 있는데, 설비 투자에 의해 고정화된 자산의 감가상각은 균등감가상각을 실시하였다.

또한 순발전량 1MW급의 개방순환식 온도차 발전 시스템에서는 기대효과에서 후술하는 바와 같이 CO₂ 배출권 확보, 식수로 사용이 가능한 물(Pure Water) 등 부가적 생산물이 생산된다. 이렇게 부가적으로 생산되는 것도 경제성 분석에 포함시켜 분석하였는데, 1MW당 약 4,260톤의 CO₂ 배출권 확보가 가능하며, 식수의 경우에는 1,150톤의 확보가 가능한 것으로 가정하였다.

3) 평가모델의 시스템 구성

해양온도차 발전시스템은 다양한 방식의 발전 사이클 개발이 추진되고 있으나 경제성 향상을 위해 다목적으로 활용이 가능한 개방순환식 OTEC 시스템을 개발하여 설치·운영하는 것을 목표로 설정하였으며, 해양온도차 발전시스템은 열교환기(Heat Exchanger)를 비롯하여 냉수관(Cold Water Pipe), 터빈, 증발기, 발전시스템 구조물 등으로 구성되는 것으로 가정하여 분석을 하였다.

4) 해양온도차 발전의 경제성 분석결과

시범개발사업인 1MW급을 개발하여 발전소 인근지역에 설치할 경우를 상정하여 경제성을 분석한 결과 현재의 국내 전기료 수준으로는 경제성이 매우 미흡한 것으로 분석되었다.

〈표 4〉 온도차 발전의 경제성 분석 결과

구 분		NPV(백만원)	NPV = 0의 조건
1MW	CO ₂ 배출권 20\$/t, 물의 판매가격 700원/t, kW당 전기료 80원 가정	- 13,711	256원/kW
	CO ₂ 배출권 60\$/t, 물의 판매가격 1,364원/t, kW당 전기료 80원 가정	- 8,940	195원/kW
10MW	CO ₂ 배출권 20\$/t, 물의 판매가격 700원/t, kW당 전기료 80원 가정	- 69,176	169원/kW
	CO ₂ 배출권 60\$/t, 물의 판매가격 1,364원/t, kW당 전기료 80원 가정	- 54,256	148원/kW

CO₂ 배출권 거래가격이 톤당 20달러, 물의 판매가격은 수돗물 가격의 전국평균인 톤당 700원, 전기료의 국내 평균인 kW당 80원을 가정하면 순현재가치(NPV)로 약 137억 원 적자를 기록할 것으로 나타났다. 위와 같은 조건하에서는 전기료가 최소한 kW당 256원이 되어야 NPV가 0이 되는

수준의 경제성 확보가 가능하며, CO₂ 배출권 거래가격은 톤당 60달러, 물의 판매가격은 수돗물 가격 중 가장 높은 정선군의 가격인 1,364원을 적용해도 전기료가 kW당 195원이 되어야 순현재가치가 0(NPV = 0)이 되는 수준의 경제성을 갖출 것으로 분석되었다.

또한 본격적인 상업생산을 위한 10MW급의 경제성 분석 결과에서도 현재 전기료 수준으로는 경제성이 부족한 것으로 나타났다. CO₂ 배출권 거래가격이 톤당 20달러, 물의 판매가격은 수돗물 가격의 전국평균인 톤당 700원, 전기료의 국내 평균인 kW당 80원을 가정하면 순현재가치로 약 692억 원의 적자를 기록할 것으로 보인다. 위와 같은 조건하에서는 전기료가 최소한 kW당 169원이 되어야 NPV가 0이 되는 수준의 경제성 확보가 가능하고, CO₂ 배출권 거래가격은 톤당 60달러, 물의 판매가격은 수돗물 가격의 전국평균인 톤당 700원을 가정하면, 10MW급이 경제성을 갖추기 위해서는 전기료가 최소한 kW당 148원 이상이 되어야 순현재가치가 0이 되는 수준의 경제성을 확보할 것으로 분석되었다.

〈표 5〉 온도차 발전 초기투자비용의 민감도 분석 결과

구 분		민감도 분석조건	NPV = 0의 조건
1MW	CO ₂ 배출권 20\$/t, 물의 판매가격 700원/t 가정	초기투자비용 15% ↓	221원/kW
		초기투자비용 30% ↓	186원/kW
	CO ₂ 배출권 60\$/t, 물의 판매가격 1,364원/t 가정	초기투자비용 15% ↓	168원/kW
		초기투자비용 30% ↓	132원/kW
10MW	CO ₂ 배출권 20\$/t, 물의 판매가격 700원/t 가정	초기투자비용 15% ↓	149원/kW
		초기투자비용 30% ↓	122원/kW
	CO ₂ 배출권 60\$/t, 물의 판매가격 1,364원/t 가정	초기투자비용 15% ↓	128원/kW
		초기투자비용 30% ↓	105원/kW

현재의 경제성 분석 결과만으로는 경제성이 전혀 없는 것으로 판단될 수 있으나 석유 등 화석연료의 가격이 지속적으로 상승하고 있어, 전기료 상승의 부담이 커지고 있다. 또한 CO₂ 배출권 거래가격도 제2차 온실가스 감축 의무공약기간이 시작되는 2013년부터는 지속적으로 상승할 것으로 전망되어 기술개발의 가치는 충분할 것으로 판단된다. 특히 전기료는 매년 3~4%의 인상이 불가피한 상황이며, 수돗물의 가격도 매년 상승하고 있으나 이러한 상승요인은 고려되지 않은 반면에 기술개발을 통한 신기술의 개발로 각종 설비의 성능이 향상되고 있어 경제성 향상에 기여할 것으로 보인다.

특히 기술개발이 지속적으로 추진됨에 따라 향후에도 기술 성숙도에 따라 초기투자비는 지속적으로 감소할 것으로 전망된다. 한편 온도차 발전 비용의 대부분을 차지하는 초기투자비용에 대한 민감도 분석결과 초기투자비용이 15% 감소할 경우 발전단가도 약 13.7% 정도 하락하는 것으로 분석되어 초기투자비용, 즉 온도차발전 설비 및 시스템과 취수설비 등을 설치하기 위한 초기투자비용을 절감하기 위한 연구개발 노력이 절실히 필요한 실정이다.

3. 해수 냉난방에 따른 경제성 평가

1) 경제성 평가의 전제조건

전술한 기본적 전제조건을 바탕으로 경제성을 분석하되, 시범사업임을 고려하여 대표적으로 선정된 적지를 대상으로 실제의 전기 및 난방 연료소비량을 어느 정도 감축할 수 있는가를 분석하였으며, 대상지역은 동해안 지역에 위치한 시설로서 호텔과 콘도를 운영하기 위해 냉방을 위한 전기

와 난방을 위한 연료를 대량으로 소비하고 있는 시설을 선정하여 분석하였다.

동 시설을 분석대상으로 선정한 이유는 호텔과 콘도가 집중되어 있으며, 중앙집중식 냉난방으로 인하여 해수 열에너지 개발 및 공급이 적합한 지역으로 판단되고 있기 때문이다. 본 시설은 객실만을 대상으로 할 때는 약 600RT 규모이나 호텔의 복도, 각종 부대시설에도 냉난방이 필요하기 때문에 실제적인 냉난방 면적은 1,000RT 규모로서 경제성 분석의 규모로 적당하며, 실제의 냉난방 실적의 활용이 가능하여 최적지로 판단되기 때문이다.

2) 기술 및 경제변수의 가정

해수 열에너지를 이용한 해수 냉난방의 경우 지역의 특성이나 기온, 해수의 온도, 열교환기 등에 따라 다르기 때문에 직접 비교하기에는 문제가 있으나 해수를 이용하는 경우 약 50% 정도의 에너지 절감율을 나타내고 있다. 특히 표층수나 중층수보다 수온이 일정한 심층수를 이용하는 경우가 에너지 절감율이 높은 수준이며, 경제성을 향상시키기 위해 다각적으로 이용하는 경우가 절감율이 상대적으로 높게 나타나고 있는 것으로 아래의 <표 6>에서 파악되고 있다.

경제성 분석을 위해서는 냉난방을 실증한 자료가 없기 때문에 국내에서 실증한 강원도 삼척캠퍼스의 난방시스템과 심층수연구센터에서 실증한 냉방시스템을 결합한 시스템을 구성하여 열효율을 분석하였다. 심층수를 활용한 냉방시스템의 에너지 절감효과는 73.8%로 가정하고, 표층수를 이용한 난방시스템의 에너지 절감효과는 63.2%로 가정하였다¹²⁾.

<표 6> 국내외 해수 열에너지 시스템의 에너지 절약 현황

구 분	괌 냉방시스템	일본 모모치	강원대 삼척캠퍼스	심층수연구센터
주요기능	냉방	냉온수 공급	냉난방	냉난방
사 용 처	19개 호텔/리조트	28개 빌딩	스포츠센터 270평	센터건물 600평
에너지 절감율	45%	42%	56.7%	66.0%
CO ₂ 저감효과	45,000톤	50%	2.9TC	-
기 타	수온 4~6℃의 심층수 이용	표층 해수 이용	표층수와 대기온도차 이용	심층수 이용

냉방을 위한 전력사용량 분석에 대해서는 호텔 및 리조트의 전기의 주요사용처로 조명, 전기 및 가전제품, 기계설비(전체 전기사용량의 10%), 수처리시설 등이 있다. 여기서는 연간 총 전기사용량의 약 40%를 냉방에 사용하는 것으로 가정하였다.

$$\cdot 9,660,000\text{kW} \times 40\% = 3,864,000\text{kW}$$

또한 전기료의 단가는 실제로 사용한 총량을 1년 동안 지불한 전기료로 나누어 단가를 계산(2008.03~2009.03)하였는데, kW당 85원인 실적치를 적용하여 계산하였다.

$$\cdot 3,864,000\text{kW} \times 73.8\% \times 85\text{원/kW} = 198,803\text{천 원}$$

난방을 위한 가스사용량 분석에 대해서는 실적치 분석자료를 바탕으로 연간 사용되는 가스 총량의 80%가 난방을 위해 사용되는 것으로 가정하였다.

$$\cdot 1,220,000\text{kg} \times 80\% = 976,000\text{kg}$$

12) 실적치를 사용함에도 불구하고 가정한 에너지 절감효과와 <표 6>의 절감효과는 냉난방 주기의 차이로 절감율이 불일치함

또한 가스사용료의 단가는 실제로 사용한 총량을 1년 동안 지불한 가스비로 나누어 단가를 계산(2008.03~2009.03)하였으며, kg당 1,078원인 실제 사용가격으로 계산하였다.

$$\cdot 976,000\text{kg} \times 63.2\% \times 1,078\text{원/kg} = 664,945\text{천 원}$$

다음으로 해수 냉난방을 위한 경제적 비용은 초기시설투자비와 지속적 운영을 위한 연간운영비로 구분할 수 있는데, 초기 시설비의 경우 냉난방 공조 설비와 취수시설비 등 크게 두 부분으로 나눌 수 있다. 한편 냉난방 공조설비에는 히트펌프시스템을 비롯하여 해수용 열교환기, 전기제어 시스템, 공조배관설비, 시공비 등을 포함하여 산정하였다.

〈표 7〉 해수 냉난방을 위한 취수관 시설비

Capacity (RT)	60	500	1,000	2,000
Intake quantity(ton/day)	1,000	10,000	20,000	40,000
Total construction cost(천 원)	1,125,000	3,362,500	4,100,000	4,950,000
Unit cost(천 원/RT)	18,750	6,725	4,100	2,475

마지막으로 연간운영비에는 운영인력의 인건비, 부품 및 기자재, 유지보수비용 등에 대해 전문가 자문을 통해 다음과 같이 산정하였다.

〈표 8〉 해수 냉난방 적용을 위한 연간 운영비

(단위 : 백만 원)

	60RT	500RT	1,000RT	2,000RT
Operations & Maintenance	60	180	300	420
Repair & Replacement	30	100	150	200

주 : 운영 및 유지보수비에서 기존인력을 활용하면 약 150백만 원 정도의 인건비 절감이 가능

3) 평가모델의 시스템 구성

냉난방시스템은 여름철에는 심층수를 이용하여 냉방을 하고, 겨울철에는 표층수를 이용하여 난방을 하는 이원화된 체계를 구성하여 운영하였다. 여름에는 수온 2℃ 이하의 심층수를 취수하여 냉방시스템을 운용하는 것으로 가정하였으며, 겨울에는 수온 10℃ 이상의 표층수를 취수하여 난방시스템을 운용하는 것으로 가정하였다. 또한 해수 열에너지 시스템은 열교환기를 비롯하여 해수 취수펌프, 대용량 취수관, 열펌프, 그리고 부수적인 시스템 구조물 등으로 구성되는 것으로 가정하였다. 단 여름에는 열교환기만으로 운용하고, 겨울에는 열펌프로 운용하는 시스템으로 가정하였다.

4) 해수 냉난방의 경제성 분석결과

시험개발사업인 1,000RT급의 대상시설을 대상으로 경제성을 분석한 결과 현재 가격수준으로도 경제성이 있는 것으로 분석되었다. 대상시설에서 실제로 2008년에 구입한 kW당 전기료 85원, 가스 kg당 1,078원을 적용한 결과 순현재가치로는 320백만 원의 흑자가 가능한 것으로 나타났다. 위와 같은 조건하에서 가스 절감에 따른 CO₂ 배출권 확보 약 1,692톤, 전기사용량 절감에 따른 1,268톤 등 총 2,960톤의 배출권을 톤당 20달러에 판매가 가능하다면 순현재가치로 897백만 원의

흑자가 가능하다. CO₂ 배출권의 가격이 톤당 40달러로 가정하여 분석한 결과에서는 순현재가치로는 1,474백만 원의 흑자를 보이며, IRR은 8.9%로 경제성이 있는 것으로 분석되었으며, CO₂ 배출권의 가격이 톤당 60달러로 가정하여 분석한 결과에서는 2,052백만 원의 흑자를 기록하여 경제성이 매우 높은 것으로 분석되었다.

〈표 9〉 해수 냉난방 경제성 분석 결과

구 분		NPV(백만 원)	IRR(%)	BCR
경 제 성 분 석 결 과	배출권 미포함	320	7.9	1.04
	배출권 20달러	897	8.3	1.12
	배출권 40달러	1,474	8.9	1.20
	배출권 60달러	2,052	9.5	1.27

분석결과 해수 냉난방 이용 개발사업은 현재의 수준에서도 경제성이 높은 것으로 판단되고 있으나 석유 등 화석연료의 가격이 지속적으로 상승하여 전기료 상승의 부담이 커지고 있으며, CO₂ 배출권 거래가격도 제2차 온실가스 감축 의무공약기간이 시작되는 2013년부터는 지속적으로 상승할 것으로 전망되어 사업추진을 위한 경제성 확보가 충분할 것으로 판단된다.

또한 심층수 열에너지를 활용한 냉난방을 실시할 경우 CO₂ 배출저감으로 인한 배출권 확보도 상당할 것으로 판단되는데, 전기절감에 따른 배출 저감은 약 1,692톤, 가스저감에 따른 배출 저감은 약 1,268톤으로 추정되고 있다. 가스 및 전기의 사용량 저감에 따라 약 2,960톤의 CO₂ 배출권 확보가 가능할 것으로 보이며, 이는 배출권 거래가격을 톤당 20달러로 가정할 경우 2,960톤/년 × 20달러 × 1,100원/달러 = 65,120천 원이 거래되어 경제성 향상에도 크게 기여할 것으로 전망된다.

V. 결 론

해양온도차 발전은 심층수와 표층수의 온도차이가 17℃ 이상이 되는 기간이 길수록 발전효율이 높아진다. 하지만 한국의 경우에는 이런 기간이 적도지역에 비해 매우 짧기 때문에 발전소의 온배수를 활용하여야만 경제성을 높일 수 있다. 그러므로 심층수가 존재하고 있는 한국의 동해안 지역에서는 월성, 울진, 고리원전 인근지역과, 영남, 영동화력발전소 인근지역 그리고 현재 종합발전단지로 건설중인 삼척지역이 온도차 발전에 대한 후보지역으로 볼 수 있다. 하지만 이 후보지역에 대해 온도차 발전의 경제성을 평가해본 결과 현재에는 경제성이 부족한 것으로 나타났지만, 향후 화석연료의 가격 및 이산화탄소 배출권 가격의 상승이 예상되는 반면에 초기시설투자비의 절감과 에너지 효율상승을 위한 지속적인 연구개발을 통한 절감효과 등을 감안하면 경제성의 확보가 가능할 것으로 전망된다. 또한 해상형 온도차 발전을 통한 대형화를 추진할 경우 경제성은 더욱 개선될 것으로 예상되고 있다.

한편 심층수를 이용한 냉난방의 경우 동해안의 12개 후보지역(고성, 속초, 양양, 강릉, 동해, 삼척, 영덕, 울진, 경주, 포항, 울산, 울주)을 조사(냉난방을 사용할 수 있는 건축물의 규모, 건축물과 해안가의 거리, 전력소비 및 유류소비량, 심층수와의 거리 등)한 결과 양양의 한 리조트가 가장 경제성이 있는 것으로 판단되어 이 리조트에 대한 경제성을 분석하였다. 분석 결과 심층수 열에너지를 이용한 냉난방시스템은 현재에도 경제성이 있는 것으로 분석되었다.

심층수를 이용한 냉난방 및 해양온도차 발전은 앞으로 저탄소 녹색성장 기술로서의 파급효과 및

적용가능성이 매우 크다고 할 수 있다. 특히 심층수 열에너지를 이용한 냉난방시스템의 경우에는 일반적으로 추운지방에서는 냉열이용시스템으로, 맑 등 따뜻한 지방에서는 차가운 해수를 이용한 냉방시스템에 주로 이용되어 왔기 때문에 국내에서와 같이 냉난방을 동시에 추진하는 경우는 많지 않기 때문이다. 이와 같은 상황에서 한국의 경우에는 심층수 에너지자원화 이용에 관한 경제성을 향상시키기 위해서는 냉난방을 동시에 추진할 수 있는 이원화된 시스템의 구성 및 그에 따른 기술개발이 요구되고 있다. 특히 한국의 동해안에는 무한한 심층수자원을 보유하고 있을 뿐만 아니라 대도시를 중심으로 한 대형빌딩과 동해안을 중심으로 한 호텔 및 리조트, 아파트 등 대형건물들이 해안에 위치하고 있어 해수열 에너지 개발이 용이한 상황이다.

또한 해양온도차 발전과 심층수를 이용한 냉난방의 경우 청정에너지인 심층수 열에너지를 개발하여 활용하므로, 화석연료나 전기의 사용량이 크게 감소하기 때문에 기후변화협약에 대비한 녹색기술로서의 적용가능성은 매우 클 것으로 판단된다. 특히 저탄소 청정에너지를 생산하여 에너지자급을 개선 및 기후변화협약 대응 등을 위해 국내 실용화 및 해외자원 개발에 활용될 수 있을 것으로 기대되어진다.

다시 말해 심층수의 에너지자원화 발전에 따른 장점으로는 동해안에 무한하게 존재하는 해수 및 심층수를 활용한 청정에너지 생산으로 화석에너지 절감이 가능하며, 그에 따라 CO₂ 배출권의 확보도 가능하다. 또한 개방순환식 시스템의 운영과정에서 부가적으로 생산되는 물과 각종 부산물들은 관광객이 많은 여름 및 갈수기의 식수 및 생활용수 부족문제 해결과 더불어 양식을 비롯한 타산업 발전에 크게 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

VI. 사 사

본 연구는 국토해양부의 지원으로 수행된 2009년 기획연구 사업의 일환 “해양심층수 에너지자원 이용 타당성 조사연구 용역”으로 수행되었다.

참고문헌

- 각 발전소별(영동, 영남, 울진, 월성, 고리) 내부자료.
- 경동대학교 해양심층수학과 내부자료.
- 국토해양부 (2005), “해양심층수의 다목적 이용 개발”.
- 김기철 (2006), “건물의 냉방을 위한 해수역 취득에 관한 연구”.
- 문종철 (2006), “40RT급 해수열원 히트펌프 적용사례”, 「대한설비공학회」 하계학술발표 대회논문집, pp221-226, 2006.
- 박준택 (2003), “해수열에너지의 현황과 전망”.
- 박준택·박성룡 (2007), “해수 온도차에너지 이용기술”, 「기술현황분석(에너지시스템기술)」, ETIS 분석지 제22권.
- 산업자원부 (2001), “해수열원 이용 양식장용 에너지절약형 열펌프 개발”.
- 신원국제특허법률사무소 (2009), “해양심층수 에너지 자원이용 기술 특허동향”.
- 지식경제부 (2009), “해수이용 냉난방 시스템 개발”, 한국에너지기술연구원.
- 지식경제부 (2008), “해수이용 냉난방시스템 개발”.
- 조규대, 이재철, 허성희 (1993), “해양학 개론”, 태화출판사.
- 조수환 (2001), “해양학”, 조선대학교 출판부.
- 한국전력공사 (2008), “한국전력통계 제78호”.

- 한국에너지기술연구원 (2005), “하천수열원이용 고효율 열펌프시스템 개발”.
- 한국에너지기술연구원 (2001), “해수열원 이용 양식장용 에너지절약형 열펌프 개발”.
- 한국해양연구원 (2005), “해양심층수 다목적 이용기술 개발 발표자료”.
- 한국해양연구원 (2009), “해양열 에너지 이용기술 개발 발표자료”.
- 한국해양연구원 (2010), “해양심층수 에너지자원 이용 타당성 조사연구”
- Hiroki Kobayashi, Sadayuki Jitsuhara, Haruo Uehara, “The present status and of OTEC and recent aspects of thermal energy conversion technologies”.
- Joseph C. Huang, Hans J. Krock and Stephen K. Oney (2003), “Revisit Ocean Thermal Energy Conversion System”, Received 30 January 2003; accepted in final form 2 July.
- L.A.Vega (1999), “Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC)”, OTEC 1-23.
- Luis A. Vega, Ph D (2007), “OTEC Economic”.
- Luis A. Vega, “Economics of Ocean Thermal Energy Conversion”.
- M. Ravindran, Director, “The Indian 1MW Floating OTEC Plant-An Overview”.