

지열에너지와 진공 막 증류법을 활용한 해수담수화 연계형 공정의 경제성 분석

박기호[†], 김진현, 김혁수, 이관영, 양대륙^{†*}, 김경남^{*}

고려대학교 그린스쿨대학원
136-713 서울특별시 성북구 안암로 145
[†]고려대학교 화학생명공학과
136-713 서울특별시 성북구 안암로 145

(2014년 2월 3일 접수; 2014년 2월 18일 수정본 접수; 2014년 2월 19일 채택)

Economic Analysis of Geothermal Energy and VMD Desalination Hybrid Process

Kiho Park[†], Jin Hyun Kim, Hyuk Soo Kim, Kwan-Young Lee
Dae Ryook Yang^{†*}, and Kyung Nam Kim^{*}

GREEN SCHOOL, Korea University
145 Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul 136-713, Korea
[†]Department of Chemical and Biological Engineering, Korea University
145 Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul 136-713, Korea

(Received for review February 3, 2014; Revision received February 18, 2014; Accepted February 19, 2014)

요 약

최근 도서지역 지하수의 염분증가로 인해 지하수가 점차 생활용수로 부적합해 집에 따라 해수담수화의 필요성이 크게 대두되고 있다. 이러한 해수담수화를 수행하기 위해서는 많은 에너지 비용이 들어가는데, 최근 에너지가격의 상승으로 경제성 확보가 어려운 실정이다. 지열에너지를 활용한 연계형 플랜트가 문제를 해결하는 중요한 방법이 될 수 있다. 지열시스템은 지구 내부의 온도를 이용하는 방법으로서 항상 온도가 일정하며 24시간 활용할 수 있어 이용률이 높다는 장점이 있기 때문이다. 본 연구에서는 지열을 보조열원으로 활용한 진공 막 증류법 해수담수화 플랜트를 설계하고, 지열과 연계하지 않은 일반 진공 막 증류법 해수담수화 플랜트와 경제성 비교분석을 했다. 그 결과 할인율 5%일 경우 지열연계형이 \$23,822,409 만큼 더 높은 순현재가치값을 가지며, 운영기간 5.36년을 분기점으로 두 플랜트의 현금흐름이 역전되어 지열연계형 플랜트가 일반 진공 막 증류법 해수담수화 플랜트보다 더 큰 경제성을 갖는 결과를 얻었다. 또한 민감도 분석에서 주요 변수들 간의 결과값 비교를 한 결과, 스팀이용비용의 변동폭이 가장 큰 영향을 미친 점에 비추어 스팀비용이 높은 지역일수록 지열에너지 연계형 플랜트가 경제적이고 효과적인 솔루션인 것으로 증명되었다.

주제어 : 지열에너지, 진공막증류법, 해수담수화, 경제성분석

Abstract : Because of the water scarcity caused by the increase of salinity in the underground water, seawater desalination stands out as one of the most promising solution. As there are so much energy costs in operating desalination plants, new hybrid process which is more effective should be researched. A geothermal VMD (vacuum membrane distillation) hybrid process is a competitive alternative for seawater desalination. Because geothermal energy has significant characteristics of high capacity factor to operate the power plant at full capacity for 24 hour per day, it can be a priority heat source of VMD superior to any other renewable energies such as solar and wind power. In this study, we design a geothermal VMD hybrid process, analyze it economically and finally compare the result with a case of conventional VMD process. Geothermal VMD hybrid process generates \$23,822,409 of NPV (net present value) more than the conventional VMD process in case of 5% discount rate. The break-even point between these processes is 5.36 year. Sensitivity analysis indicates that steam cost is the most decisive influence variable to the economic outcome.

Keywords : Geothermal energy, VMD, Desalination, Economic analysis

* To whom correspondence should be addressed.
E-mail: dryang@korea.ac.kr, i005034@korea.ac.kr
doi: 10.7464/ksct.2014.20.1.013
pISSN 1598-9721 eISSN 2288-0690
http://cleantech.or.kr/ct/

1. 서 론

최근 전 세계적으로 화석연료의 고갈로 인해 에너지안보에 대한 중요성이 높아지고 있다. 이러한 분위기에 맞추어 화석연

료의 대안으로 신재생에너지가 주목받고 있으며, 그 중 지열에너지(geothermal energy)는 대표적인 신재생에너지원의 하나이다. 지열에너지는 이산화탄소 등의 배출가스가 없어 친환경적인 시스템이며 여타 다른 에너지원에 비해 설비 이용률이 높다는 장점을 가지고 있다. 지열에너지는 변화폭이 적은 지구 내부의 열을 이용하여 전력을 생산하는 지열 발전과 지구 내부의 열을 열원으로 직접 이용하는 방법으로 나누어진다[1].

전력을 생산하는 지열발전의 사용현황을 살펴보면, 지열 발전의 특성상 고온 고압인 약 150~180 °C의 지구 내부열이 필요한데, 이 온도는 중온수가 풍부한 지역에서 가능하기 때문에 지리적 제약이 있다는 단점이 있다[1]. 우리나라는 화산지대가 아니기 때문에 지열 발전량은 미미한 편이다. 최근 약 5 km의 시추로 인해 약 180 °C의 인공 지열 저류층을 이용하는 방식(enhanced geothermal system, EGS)이 도입되어 2012년 9월에 착공이 시작되었지만[2], 아직 지열발전은 도입 초기단계에 머무르고 있다. 열을 직접 이용하는 부문에서는 히트펌프, 온실 난방, 산업 및 농업 등에서 다양하게 이용되고 있다. 이 중 히트펌프는 가장 널리 사용되는 지열에너지 활용기관으로서 전 세계적으로 에너지절약과 효율성 측면에서 타 설비와 비교해 최고효율의 우수한 성능이 입증되고 있다[3]. 하지만 직접이용방식은 대규모로 활용할 수 없고 신재생에너지 개발의 목적이 기존 화석연료를 대체하기 위한 것인 점에 비추어 볼 때, 이러한 소규모 직접이용 시스템은 화석 연료의 대안으로 제시하기에는 무리가 있다.

지열에너지는 특성상 현재 기존 에너지의 완전 대체 보다는 주력 에너지의 효율을 높이는 보조 에너지원으로서의 역할로 주로 이용되고 있다. 그 중 하나로 지열에너지를 해수담수화에 이용하는 연계공정이 있다. Figure 1과 같이 지열 외에 신재생에너지를 활용하여 해수담수화를 수행하고자 하는 노력은 해외에서 활발하게 연구 중이다. 인류에 크게 직면한 에너지 문제와 물 부족 문제를 함께 연계하여 해결할 수 있다는 점에서 이에 대한 다양한 타당성 검토가 이루어 졌으나,

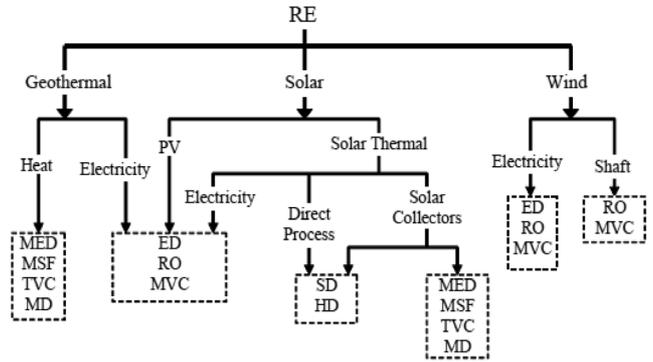


Figure 1. Seawater desalination method with Renewable energy[5].

현재까지는 명확한 장점을 확인할 수 없는 관계로 신재생에너지를 이용한 해수담수화 방법은 전체 용량의 0.02%만을 차지하고 있다[4]. 신재생에너지의 형태에 따라 활용할 수 있는 해수담수화 플랜트의 형태는 각각 다르며 현재로서는 태양열 및 태양광을 응용한 해수담수화 방법에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 그러나 태양에너지는 설비 이용률이 낮은 관계로 지속적으로 에너지를 공급받기 어렵고 아직까지는 기술적인 한계로 인해 비용대비 효율이 좋지 못한 실정이다.

태양에너지의 이러한 문제점과 달리 지열에너지는 설비 이용가능 시간이 24시간이므로 항상 에너지를 공급받을 수 있다는 장점이 있다. 하지만 에너지원으로 얻어지는 열의 온도로는 증기 열기관을 고효율로 구동시키기 어렵다는 단점이 있다. 따라서 이러한 단점을 극복하기 위한 방법으로 지열에너지에서 얻어진 열을 고효율로 구동시킬 수 있는 구동 기관을 연결시켜주는 방법을 사용해야 한다. 막 증류법(membrane distillation)은 최근에 연구되고 있는 해수담수화 기술로 온도 차이가 나는 두 유체 사이의 증기압 차이를 이용하여 해수담수화를 하는 방법이다. Figure 2와 같이 소수성 멤브레인을 사이에 두고 온도 차이가 나는 두 유체가 반류방향으로 통과

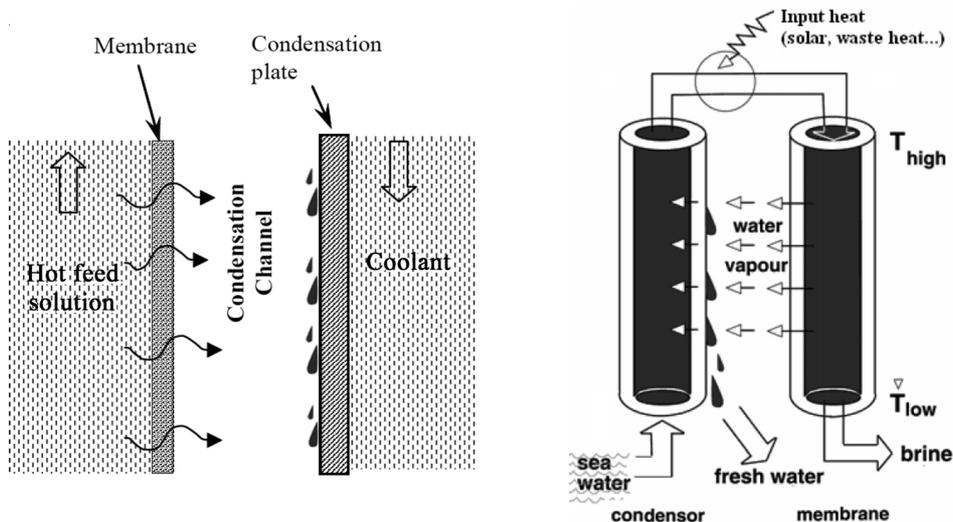


Figure 2. Principle of vacuum membrane distillation (left) and Schematic diagram of vacuum membrane distillation (right)[5].

하게 되며 이 과정에서 온도차에 의해 유발되는 증기압의 차이로 고온의 유체에서 저온의 유체로 증기가 이동하게 된다. 이 때 일반적으로 입구의 바닷물은 상온에서 60~80 °C 정도로 가열되어 들어가며 이 과정에서 에너지가 소요된다.

만약 이러한 지열에너지를 활용하게 된다면 막 증류법을 구동시키는데 필요한 구동비용은 지열 플랜트의 구동 비용으로 대체할 수 있다. 또한 증기를 이용해서 직접 바닷물을 가열시키는데 들어가는 비용보다 지열 플랜트를 활용한 비용이 더 적다면 이를 이용해서 보다 효율적으로 막 증류법을 활용할 수 있고, 해수담수화의 비용이 감소하는 효과를 얻을 수 있다. 지열에너지의 설비 이용률이 높은 점을 이용해서 지속적인 담수 생산이 가능하며 이는 지열을 활용한 공정만이 갖는 장점일 것이다. 지열에너지에서 고온의 증기를 얻기 위해서는 심부열을 이용하기 위한 천공이 필요하고 그로 인한 비용이 많이 소요된다. 막 증류법을 해수담수화에 활용한다면 60~80 °C의 온도가 필요하기 때문에 3 km 정도의 천공만으로 충분한 결과를 얻을 수 있고, 그로 인해서 지열 플랜트 설치비용 또한 지열 발전에 비해 더 적은 비용이 소요될 것이다. 이러한 지열 연계형 플랜트의 설계는 도서 지역 지하수의 염분증가로 이용 가능한 담수가 줄어들고 있는 현 상황의 해결책을 제시할 수 있다는 점과 더불어 담수화에 필요한 에너지를 지열로서 대체하여 경제성을 확보 할 수 있는 이점을 가지고 있다. 하지만 이러한 지열에너지를 활용한 연계형 플랜트의 이점에도 불구하고 이 분야에 대한 국내 연구는 아직 전무한 실정이다.

지열을 활용해서 해수담수화에 응용한 사례는 1970년대에 미국에서 고압, 고온의 증기를 활용해서 다단증류법(multi staged flash, MSF)이나 전기투석(electrodialysis, ED)공정을 활용한 사례가 있으며[4,6] 최근에는 지열과 태양열을 동시에 이용해서 염수로부터 담수를 얻는 방법에 대해서도 조사된 바 있다[6]. 막 증류법을 활용해서 지열에너지를 해수담수화에 응용한 사례는 2013년 Sarbatly[7]에 의해 연구가 되었고 진공 막

증류법을 활용해서 막 증류 실험을 수행하고 타당성 평가를 수행하였다. 하지만 기존 R.Sarbatly[7]의 논문에 의하면 물을 생산하는 비용은 분석해 놓았지만 지열의 초기 투자비용 및 연간 운영비용은 고려되지 않았다.

본 연구에서는 기존 논문의 부족한 부분을 보완하여 경제성 분석을 진행하였다. 산업통상자원부에서 발표한 포항 인공저류층 지열발전소 건설의 1차 계획을 인용하고 RETScreen(대체 에너지를 에너지원으로 하는 특정 요소기술 설비의 경제 타당성 분석을 위해 캐나다에서 개발된 프로그램임)을 이용하여 지열 플랜트의 설치비용 및 구동 비용을 계산한 후 이를 연결한 연계 공정의 총 초기 투자비용 및 연간 운영비용을 계산하였다. 더 나아가 법인세율, 사회적 할인율 등을 추가한 현금 흐름 분석을 통하여 투자 시 어느 정도의 경제성이 있는지 분석하였다. 그리고 다양한 상황을 가정한 민감도 분석을 통해 상황에 따른 경제성의 변화를 비교해보았다.

2. 공정개요 및 비용산출

2.1. 지열에너지와 진공 막 증류법 연계형 공정

막 증류법에는 크게 4가지 종류가 있는데 그 분류는 응축되는 면의 성격에 따라 결정된다. 이 중 응축면을 진공 펌프를 이용하여 진공 상태에 가깝게 두고 운용하는 형태를 진공 막 증류법(vacuum membrane distillation, VMD)라고 부른다. 진공 막 증류법은 휘발성이 있는 물질을 분리할 때 많이 사용하며 진공 펌프를 사용하기 때문에 더 적은 온도에서도 조업이 가능하다. 또한, 같은 온도일 경우 직접접촉식 막증류공정(direct contact membrane distillation, DCMD)이나 공극 격막 증류법(air gap membrane distillation, AGMD)과 같은 타 막증류(membrane distillation, MD)기법보다 더 높은 생산량을 얻는 것이 가능하다는 장점이 있다[6]. 반면에 진공 펌프를 이용함에 따라 추가 비용이 생기는 단점이 있다. 본 연구에서는

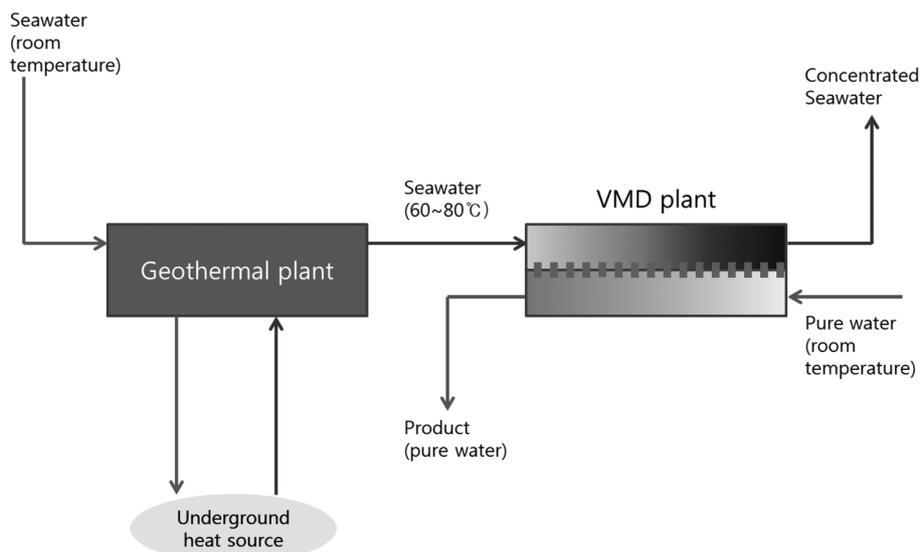


Figure 3. Schematic diagram of geothermal VMD hybrid process.

지열 플랜트의 천공 비용이 가장 큰 비용을 차지할 것이라는 가정 하에 천공 비용을 최소화하기 위한 해수담수화 기법으로 진공 막 증류법을 활용하였다.

본 연구에서 고려한 지열 에너지와 진공 막 증류법의 연계형 공정 개략도는 Figure 3과 같다. 상온의 해수가 지열 플랜트를 거치면서 60~80 °C의 고온의 해수가 되고 진공 막 증류법 해수담수화 플랜트를 거치면서 해수에 포함되어 있는 물이 증기 형태로 저온의 물 쪽으로 이동을 하게 되는 형태이다. 침투 흐름(permeate side)에 있는 저온의 물은 해수 쪽에서 이동한 증기 형태의 물과 합쳐지면서 물의 양이 늘어나고 입구 흐름(feed side)의 해수는 물이 이동을 했기 때문에 농도가 더 늘어난 형태로 진공 막 증류법 해수담수화 플랜트를 빠져나오게 된다.

담수 생산량은 진공 막 증류법 해수담수화 플랜트 멤브레인 모듈의 개수에 비례하며 또한 멤브레인 플럭스에도 영향을 받게 된다. 따라서 일일 담수 생산량을 지정하고 멤브레인의 플럭스 수치에 대한 정보가 있다면 진공 막 증류법 해수담수화 플랜트의 설치비용 및 운영비용을 계산할 수 있다. 또한 진공 막 증류공정 입구 흐름의 해수 온도는 정해져 있으므로 요구되는 지열 플랜트의 천공 비용을 알 수 있고, 이를 통해 초기 투자비용을 계산할 수 있다. 본 연구에서는 20,000 m³/day의 일일 담수 생산량과 60 °C의 입구 흐름 온도를 설정하고 이를 구동하기 위한 각 플랜트의 형태를 디자인했다.

2.2. 지열에너지 플랜트 설계 및 비용계산

지열 플랜트의 목적은 상온(25 °C)인 해수의 온도를 60 °C까지 올리는 것으로 이를 위한 천공 깊이는 3 km 정도로 추산된다[8]. 따라서 이 깊이까지 천공 후 해수와 지열에너지 사이의 열교환을 하기 위한 열교환 장치가 필요하다. 그리고 해수를 바다로부터 끌어오고 온도가 상승된 해수를 이동시키는데 필요한 펌프가 필요하다. 그리고 이러한 장치들의 규모는 진공 막 증류법 해수담수화 플랜트의 생산 요구량에 기초해서 디자인된다. 이러한 지열 플랜트의 초기 투자비용 및 연간 운영비용은 RETScreen을 이용해서 산정하였다.

상기에 서술한 바와 같이 본 공정을 구동하기 위해서는 해수를 60 °C 정도로 올려야 하므로 이를 위해 필요한 작동 온도 및 증기 온도를 입력하였다. 또한 20,000 m³/day의 생산량을 맞추기 위한 증기 유량을 계산하고 이를 역산하는 방식으로 지열 플랜트의 규모를 설정하였다. 계산된 결과 지열 플랜트의 초기 투자비용은 \$15,097,552이며 연간 운영비용은 연간 \$855,246이다.

2.3. 진공 막 증류법 해수담수화 플랜트 설계 및 비용계산

진공 막 증류법 해수담수화 플랜트에는 상승된 온도의 해수가 입구 흐름으로 유입되고 멤브레인 모듈을 거치면서 물이 빠져나가게 되고 그 후 농도가 올라간 바닷물이 출구 흐름 쪽으로 나가는 형태로 되어 있다. 구동력(driving force)을 향상시키기 위해 진공 펌프를 활용해서 진공압을 걸어주게 되고 이 과정에서 진공 펌프 비용이 들어가게 된다.

일일 생산량이 20,000 m³이므로 이를 생산하기 위한 모듈의

Table 1. Installation cost and operation cost of vacuum membrane distillation[6]

Assumptions of VMD desalination plant	
Plant availability	90%
Plant capacity	20,000 m ³ /day
Plant life	20 years
Interest rate	5%
Specific costs	
Membrane cost	\$90 /m ²
Membrane replacement	10 %/year
Electricity cost	\$0.12 /kWh
Chemical cost	\$0.018 /m ³
Spares cost	\$0.033 /m ³
Labour cost	\$0.03 /m ³
Brine disposal	\$0.0015 /m ³
Steam cost	\$0.007 /kg
Steam heat exchanger	\$2000 /m ²
Operating conditions	
Feed concentration	900 ppm
Feed geothermal water temperature	56~62 °C
VMD feed inlet temperature	60 °C
VMD flux	6.6 kg/m ² ·h
VMD recovery	0.8
VMD feed pressure	120,000 Pa
VMD permeate pressure	30,000 Pa

개수 선정 및 멤브레인의 면적을 계산해야 하며 각 흐름의 이동을 일으킬 수 있는 펌프 또한 필요하다. 이러한 진공 막 증류법 해수담수화 플랜트의 정보는 RETScreen을 통해 얻을 수 없으므로 관련 자료와 논문을 참조해서 비용을 산출하였다. 참조한 자료는 Table 1과 같으며 플랜트 이용률은 90%, 규모는 20,000 m³/day, 수명은 20년으로 설정하였다. 멤브레인은 Westran S PVDF 멤브레인의 데이터를 기초로 작성하였고 입구 온도는 60 °C로 설정하였다[7]. 기타 운영·유지비용으로는 전기, 화학적 처리 비용, 노무 비용과 처리 비용 등이 고려되었다. 분석 사례연구는 지열에너지 연계형 플랜트와 지열을 활용하지 않고 증기열을 별도 구매하는 진공막증류법해수담수화 플랜트, 이렇게 두 가지 경우를 비교하는 형태로 분석했다.

지열 플랜트를 활용하지 않는 경우에는 온도를 올리는 데 유틸리티 플랜트에서 공급되는 증기를 사용한다는 가정을 하고 이를 위해서 초기 투자비용에 열교환기 설치비용이 들어가게 된다. 그리고 매년 증기를 사용하는데 필요한 증기 비용 또한 추가된다. 하지만 지열 플랜트와 연계된 공정에서는 이러한 열교환기와 증기 비용은 들어가지 않는다. 이러한 가정을 기초로 계산된 진공 막 증류법 해수담수화 플랜트의 비용과 지열에너지 연계형 플랜트의 비용은, RETScreen의 예측값

Table 2. A comparison VMD plants and geothermal VMD hybrid process plants

	With geothermal	Percentage (%)	Without geothermal	Percentage (%)
Capital cost				
Civil work (\$)	4,472,624	12.96	4,472,624	21.72
Intake/pre-treatment (\$)	1,808,825	5.24	1,808,825	8.78
Pumps (\$)	14,938	0.04	14,938	0.07
Membrane (\$)	11,363,636	32.92	11,363,636	55.19
Steam heat exchanger (\$)	-		1,059,317	5.14
Total direct capital cost (\$)	17,660,023	51.15	18,719,340	90.91
Total VMD capital cost (\$)	19,426,025	56.27	20,591,274	100.00
Total geothermal plant capital cost (\$)	15,097,552	43.73	-	
Total capital cost (\$)	34,523,577	100.00	20,591,274	100.00
Annual fixed charge (\$/m ³)	0.42		0.25	
Operation and maintenance (O&M) cost				
Membrane replacement (\$/year)	1,136,364	44.09	1,136,364	17.80
Electricity (\$/year)	43,804	1.70	43,804	0.69
Steam (\$/year)	-		4,662,422	73.03
Chemicals (\$/year)	118,260	4.59	118,260	1.85
Spares (\$/year)	216,810	8.41	216,810	3.40
Labour (\$/year)	197,100	7.65	197,100	3.09
Brine disposal (\$/year)	9,855	0.38	9,855	0.15
Total annual VMD O&M cost (\$)	1,722,192	66.82	6,384,615	100.00
Total geothermal plant O&M cost (\$)	855,246	33.18	-	
Total annual O&M cost (\$)	2,577,438	100.00	6,384,615	100.00
Annual O&M charges (\$/m ³)	0.39		0.97	
Total water cost (\$/m ³)	0.81		1.22	

과 관련자료[6]를 참조한 결과, Table 2와 같다.

계산된 값에 의하면 지열과 연계되지 않은 진공 막 증류법 해수담수화 플랜트의 초기 투자비용은 \$20,591,274이며 연간 운영비용은 \$6,384,615로 나타났다. 반면 지열에너지 연계형 플랜트의 초기 투자비용은 \$19,426,025로 산출되었고 연간 운영비용은 \$1,722,192로 나타났다. 위에서 RETScreen을 통해 계산된 지열 플랜트의 초기 투자비용은 \$15,097,552, 연간 운영비용은 연간 \$855,246이었으므로 연계형 공정의 총 초기 투자비용은 \$34,523,577이고 총 연간 운영비용은 \$2,577,438이다. 연계형 공정은, 지열과 연계되지 않은 진공 막 증류법 해수담수화 플랜트와 비교했을 때, 초기 투자비용은 많이 들지만 연간 운영비용은 적게 드는 것을 알 수 있다. 동 산출 데이터를 이용해서 순 현재 가치를 기준으로 현재 시점에서의 경제성 평가를 수행하고 플랜트를 구동시켰을 때의 비용/편익 분석을 수행한다.

3. 결과 및 분석

3.1. 현금흐름 분석

플랜트의 구동 기간인 20년 동안의 비용 및 편익의 발생을

기준으로 현금 흐름을 산출하였다. 편익은 생산된 물의 판매 가격을 기준으로 설정하였고 물의 판매 가격은 \$2 /m³으로 설정하였다[8]. 현금 흐름 분석은 순현재가치법(net present value)을 사용하였다.

일반적으로 투자사업의 사전 경제성 평가 시, 미래와 과거의 서로 다른 추정시기에 발생하는 비용과 편익을 객관적으로 비교하려면 투입액과 기회비용을 적절히 반영할 수 있는 적정할인율의 결정이 중요하다. 할인율이 높아질수록 초기투자 비용의 현재가치는 높아지고 상당기간이 지난 후 발생하는 편익의 현재가치는 작아진다. 따라서 공공적 성격이 강한 투자사업의 경우 가중평균할인율 등을 획일적으로 적용하는 것은 무리가 있다.

이런 추정치의 불확실성을 보조하는 방법으로 사회적 할인율을 사용하는 방법이 있다. 본 논문에서는 국내외에서 공공 투자사업의 경제성 분석에 사용되는 사회적 할인율[9]이 3~7%인 점을 참고하여 평균값인 5%의 할인율을 적용하여 분석하였으며, 또한 민간투자 비중 증가로 인한 리스크 프리미엄을 고려하여 연 10%의 할인율을 적용하는 상황을 설정하여 그 결과 값을 비교/분석하였다. 법인세비용은 최근 5개년도 전 세계 법인세율 평균치[10] 25%의 법인세율을 적용하여 분석

하였다. 초기 플랜트 설치비용에 대해서는 경제적 내용연수 20년에 걸쳐 정액법으로 상각비를 계산하였다. 이를 이용한 잉여현금흐름(free cash flow)의 추정식은 감가상각비의 절세효과를 반영하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

잉여현금흐름

$$= \sum_{t=1}^n (\text{판매수익}_t - \text{운영비용}_t) \times (1 - \text{법인세율}) + \sum_{t=1}^n (\text{감가상각비}_t \times \text{법인세율}) - \text{자본적 지출}$$

이렇게 계산된 잉여현금흐름을 5%의 할인율을 적용한 경우의 현금 흐름 분석 그래프를 Figure 4(a)에 표시하였다. 지열에너지 연계형 플랜트와 그렇지 않은 일반 진공 막 증류법 해수담수화 플랜트의 현금 흐름의 차이를 대조해서 표시하였

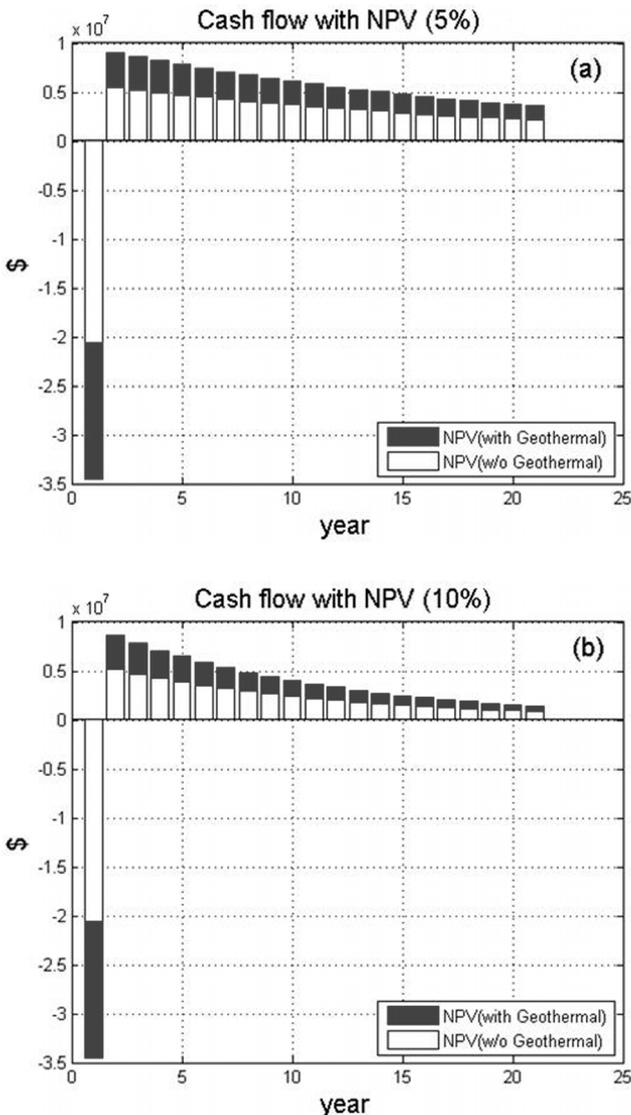


Figure 4. Cash flow in case of 5%, 10% discount rate.

Table 3. NPV variation caused by capital cost variation

	5%	10%
Geothermal VMD plant (\$)	83,225,196	45,916,542
VMD plant (\$)	59,402,787	34,056,699

다. 지열에너지 연계형 플랜트의 경우 초기 투자비용이 높기 때문에 처음의 순현재가치값은 부(-)의 금액으로 크게 나타나지만, 운영비용이 적고, 고 감가상각비(초기高투자비용)에 따른 법인세 절감효과로 인해 시간이 경과함에 따라 경제성이 점차적으로 크게 개선되는 것을 확인하였다. 그에 반해 일반 진공 막 증류법 해수담수화 플랜트는 초기 투자비용은 작지만 큰 운영비용 및 적은 감가상각비 절세 효과로 인하여 플랜트가 구동될수록 지열에너지 연계형 플랜트에 비해 경제성이 떨어지는 것으로 나타나게 된다.

민간 투자 비중의 증가로 인해서 리스크 프리미엄을 고려한 10%의 할인율이 적용된 현금 흐름 분석 그래프는 Figure 4(b)와 같이 나타난다. 할인율의 증가로 인해서 순 현재 가치는 상대적으로 적게 평가되었다. Table 3에서 보는 바와 같이 지열에너지 연계형 플랜트의 경우 일반 진공 막 증류법 해수담수화 플랜트에 비해 좀 더 높은 경제성을 가지는 것으로 나타났다. 그러나 할인율이 5%일 때는 지열에너지 연계형 플랜트가 \$23,822,409 만큼 더 높은 경제성을 가지는데 반해, 할인율이 10%로 평가되었을 경우 지열에너지 연계형 플랜트는 \$11,859,843 만큼의 차이를 보이는 것을 통해 리스크 프리미엄이 고려된 상황에서는 경제적인 이득의 차이가 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 국내의 활용가능성을 고려하여 국내 법인세율 24.2%(주민세 포함) 및 사회적 할인율 5.5%를 이용하여 분석할 경우에도 지열 지열에너지 연계형 플랜트가 \$22,569,188 만큼 경제적으로 유리한 것으로 확인되었다.

할인회수기간법(discounted payback period)을 이용하여 초기 투자액이 회수되는 기간을 산정해보면, 할인율이 5%일 때 지열에너지 연계형 플랜트의 초기 투자액 회수기간은 4.14년, 일반 진공 막 증류법 해수담수화 플랜트는 3.59년으로 분석되었다. 두 대안간의 현금흐름이 역전되는 기간은 5.36년으로, 동 기간 이전에는 일반 진공 막 증류법 해수담수화 공정이, 그리고 동 기간 이후에는 지열에너지 연계형이 경제적 측면에서 유리한 것으로 분석되었다. 이러한 분석 결과는 Figure 5와 같다.

또한, 민간 투자비용이 증가했을 때를 가정해서 리스크 프리미엄이 감안된 10%의 할인율을 적용한 분석은 Figure 5의 아래쪽과 같다. 10% 할인율에서 할인회수기간법(discounted payback period)을 이용하여 초기 투자액 회수기간을 산정해보면, 사회적 할인율 5%에서의 분석보다 회수기간이 조금 늦춰져서 지열에너지 연계형은 4.78년, 일반 진공 막 증류법 해수담수화 공정은 4.06년인 것으로 분석되었다. 할인율이 높아질수록 역전되는 기간이 늦춰지는 것을 분석을 통해 알 수 있다. 두 대안간의 현금흐름이 역전되는 기간은 6.47년으로 이 기간 이전에는 일반 진공 막 증류법 해수담수화 공정이 경제적 측면에서 유리하고 이 기간 이후에는 지열에너지 연계형이 유리하다. 결론적으로 할인율 5%와 10%를 이용한 경제성 분

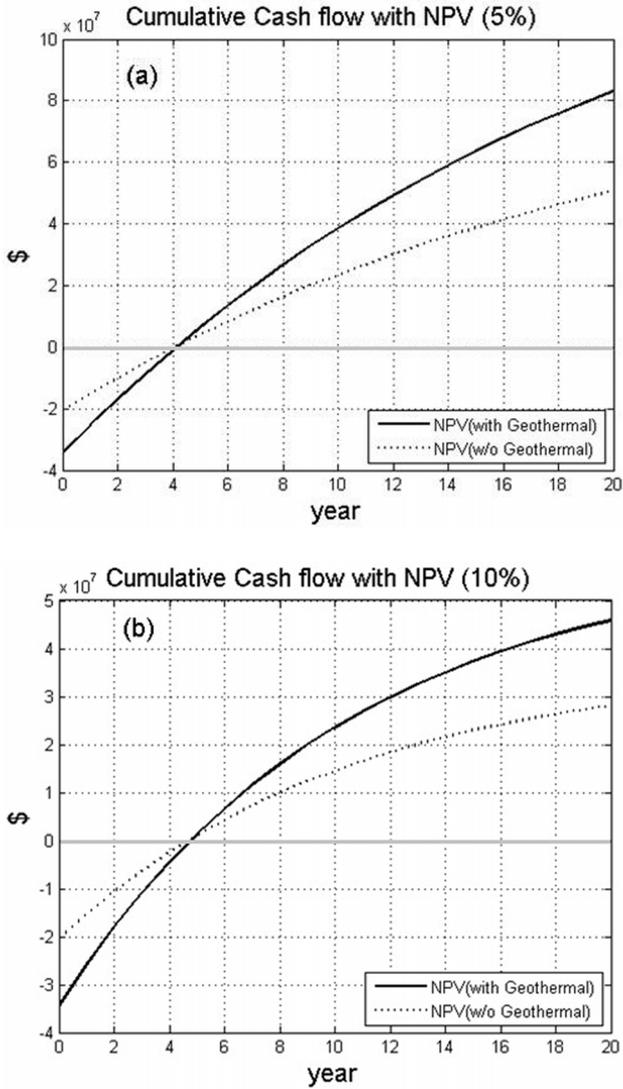


Figure 5. Accumulated cash flow in case of 5%, 10% discount rate (unit: \$ 1,000).

석에서 일반 진공 막 증류법 해수담수화 공정 보다 지열 연계형 공정이 더욱 경제성이 높다는 것을 알 수 있다.

3.2. 민감도 분석

설계된 플랜트 조건에 더불어 현금 흐름에 다양한 변화를 야기할 수 있는 주요 변수들을 선정하고, 이러한 변수들의 변화에 현금 흐름과 순현재가치가 어떻게 변화하는지를 알기 위해, 민감도 분석을 수행하였다. 주요 변수로는 물 판매 가격, 지열플랜트 초기 투자비용, 스팀이용비용이 선정되었다. 그 이유는 물 판매 가격의 변동을 통해 시장 가격의 변화에 따른 현금 흐름의 양상을 확인할 수 있고, 지열플랜트 초기 투자비용의 변화를 통해 지열에너지 연계형 플랜트에서만 나타나는 비용의 변화를, 스팀이용비용의 변화를 통해서 일반 진공 막 증류법 해수담수화 플랜트에서만 나타나는 비용의 변화를 확인할 수 있기 때문이다. 5%의 할인율을 적용한 시나리오에서 각각의 변수가 현재 설계된 플랜트 조건에 비해서 -20%, -10%, 0, +10%, +20%로 변화할 경우 순현재가치값에 어떠한 변화가 나타나는지 분석해 보았다. 세 가지 변수에 의한 민감도 분석 결과는 다음 Table 4, Figure 6과 같다.

물 판매가격의 변동이 있을 때 민감도 분석 결과, 지열에너지

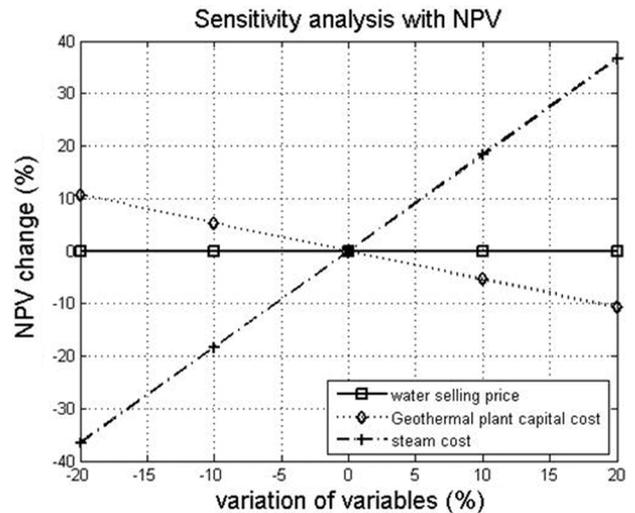


Figure 6. NPV rate of charge comparison caused by variable variation.

Table 4. Sensitivity analysis result of VMD plant and geothermal VMD hybrid process plant

Variables	Plants type	Variable-cost ratio				
		- 20%	- 10%	No variation	10%	20%
Water price	Geothermal VMD	\$55,932,956	\$69,579,076	\$83,225,196	\$96,871,317	\$110,517,437
	VMD plant	\$32,110,546	\$45,756,667	\$59,402,787	\$73,048,907	\$86,695,028
Relative variation ratio		0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Geothermal plant capital cost	Geothermal VMD	\$85,774,314	\$84,499,765	\$83,225,196	\$81,950,617	\$80,676,058
	VMD plant	\$59,402,787	\$59,402,787	\$59,402,787	\$59,402,787	\$59,402,787
Relative variation ratio		10.70%	5.35%	0.00%	-5.35%	-10.70%
Steam cost	Geothermal VMD	\$83,225,196	\$83,225,196	\$83,225,196	\$83,225,196	\$83,225,196
	VMD plant	\$68,118,387	\$63,760,582	\$59,402,787	\$55,044,937	\$50,687,169
Relative variation ratio		-36.59%	-18.29%	0.00%	18.29%	36.59%

지 연계형 공정과 일반 진공 막 증류법 해수담수화 공정의 순현재가치 차이는 \$23,822,409로 동일하게 나타났다. 이는 양쪽 다 물을 생산해서 판매하는 공정인 점을 미루어 볼 때 이익이 동일하게 증가 혹은 감소하였기 때문에 순현재가치의 차이는 동일하게 나타나는 것으로 볼 수 있다.

반면에 지열에너지 연계형 플랜트 초기 투자비용의 변동이 있을 때 민감도를 분석한 결과, 지열에너지 연계형 공정과 일반 진공 막 증류법 해수담수화 공정의 순현재가치 차이는 최대값 \$26,371,527, 최소값 \$21,273,271로 나타났다. 지열플랜트 초기 투자비용 변화율에 따른 두 플랜트 간 상대 변동비율은 $\pm 10\%$ 일 때 $\pm 5.35\%$ 이고, $\pm 20\%$ 일 때 $\pm 10.70\%$ 수준이었다. 이는 지열플랜트 초기 투자비용이 증가함에 따라 순현재가치의 상대 변동비율은 감소한다는 것이 증명된다. 지열에너지 연계형 플랜트의 높은 초기 투자비용으로 인해 동 플랜트의 순현재가치 감소가 나타난 결과이다.

스팀이용비용의 변동이 있을 때 민감도를 분석한 결과, 지열에너지 연계형 공정과 일반 진공 막 증류법 해수담수화 공정의 순현재가치 차이는 최대값 \$32,538,027, 최소값 \$15,106,809로 나타났다. 스팀이용비용 변화에 따른 두 플랜트간의 상대 변동비율은 $\pm 10\%$ 일 때 $\pm 18.29\%$ 이고, $\pm 20\%$ 일 때 $\pm 36.59\%$ 의 값을 보이며, 스팀이용비용이 증가함에 따라 순현재가치의 상대 변동비율이 증가하는 것을 알 수 있다. 스팀이용비용이 증가하면 일반 진공 막 증류법 해수담수화 플랜트의 순현재가치가 작아지게 되므로 상대적으로 연계형 플랜트의 수익률이 커지는 효과가 나타났다.

이상 세 가지 변수 중에서 순현재가치값에 가장 큰 영향을 미치는 변수는 스팀이용비용임을 민감도 분석을 통해 확인할 수 있다. 따라서 두 플랜트간의 판매가격 및 비용을 고려할 때 경제성에 가장 크게 영향을 주는 요인은 스팀이용비용이라고 할 수 있으며, 전체적으로는 지열에너지 연계형 플랜트가 일반 진공 막 증류법 해수담수화 플랜트보다 더 높은 경제성을 가지고 있음을 분석결과를 통해 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 지열 에너지를 효율적으로 활용할 수 있는 사례로 지열 에너지와 진공 막 증류법 해수담수화 플랜트를 연계한 공정을 설정하였다. 일반 스팀을 이용해서 진공 막 증류법 해수담수화 플랜트를 구동하는 시스템의 경우 초기 투자비용은 \$20,591,274로 산출되었고 연간 운영비용은 \$6,384,614로 나타났다. 반면 지열에너지 연계형 공정의 경우 총 초기 투자비용은 \$34,523,577이고 총 연간 운영비용은 \$2,577,438로 계산되었다.

경제성을 평가하기 위해 두 가지 경우를 분석에 고려하였다. 국내외에서 일반적으로 적용되는 사회적 할인율 5%를 적용한 경우와 민간 투자 비중이 클 경우 나타나는 리스크 프리미엄이 감안된 10%의 할인율을 적용한 경우로 나눠서 경제성 평가를 수행한 결과, 할인율이 5%일 때는 지열에너지 연계형 플랜트가 \$23,822,409 만큼의 더 높은 경제성을 나타내서, 할인율이 높아질수록 두 플랜트 간의 경제성 값의 차이는 줄어

드는 것을 알 수 있었다. 할인율 5%일 때의 초기 투자액 회수 기간은 일반 진공 막 증류법 해수담수화 공정의 경우 3.59년, 지열연계형 공정은 4.14년으로 나타났으며, 두 대안의 현금흐름이 역전되는 기간은 5.36년으로 분석되었다. 반면 할인율 10%일 때의 초기 투자액 회수 기간은 일반 진공 막 증류법 해수담수화 공정의 경우 4.06년, 지열 연계형 공정은 4.78년으로 나타났으며, 두 대안의 현금흐름이 역전되는 기간은 6.47년으로 분석되었다. 지열연계형 공정이 고가의 초기투자비가 소요되므로 회수기간이 더 오래 걸리지만 연간 운영비용이 적게 들기 때문에 회수 기간은 일반 진공 막 증류법 해수담수화 공정과 큰 차이가 나타나지는 않았다. 두 플랜트간의 현금 흐름이 역전되는 기간이 각 5.36년, 6.47년인 결과에 비추어 볼 때, 플랜트 운영기간을 20년이라는 장기간을 가정하면 지열 연계형 플랜트가 더욱 경제성이 있는 것으로 분석되었다.

경제성 분석 결과에 중대한 영향을 미치는 변수에 대한 민감도 분석을 수행한 결과 물 판매가격의 변동은 두 플랜트 간에 경제성의 상대적인 차이를 야기하지는 않는 반면 스팀이용비용의 변동은 가장 큰 상대 변동비율의 변화를 가져온 것을 알 수 있다. 따라서 진공 막 증류법 해수담수화 공정을 통해 수익을 창출하기 위해서는 스팀이용비용이 낮은 상황을 고르는 것이 가장 중요하며 만약 스팀이용비용이 높을 경우에는 지열에너지 연계형 플랜트의 경제성이 훨씬 크게 나타난다는 점을 본 논문에서 시사하고 있다.

이러한 경제성 평가 결과로 비추어 볼 때 지열 연계형 해수담수화플랜트는 실제 적용 가능한 효과적인 솔루션임을 본 논문 결과로 알 수 있다. 스팀가격이 비싼 우리나라에서도 충분히 활용 가능할 것으로 보이며, 특히 지중온도가 높고 바다에 인접한 울산, 포항과 같은 지역에서 지열 연계형 해수담수화 플랜트를 검토할 가치가 있다. 물 부족지역인 중동 및 아프리카 지역은 해수담수화 솔루션의 필요성이 매우 크며, 실제로 다양한 방법으로 해수담수화 솔루션을 실험하고 있다. 최근까지 많이 연구되어 온 태양에너지 연계형 해수담수화보다 본 논문에서 제안한 지열 연계형 해수담수화가 경제적으로 비교우위에 있음을 증명함이 향후 후속적인 연구과제로 요구된다. 상시 열에너지를 공급할 수 있고, 설비이용률이 최고로 높은 것이 지열시스템이므로 충분한 상업성을 가지고 있다. 본 논문은 해수담수화 플랜트 부문에 강점을 가진 한국기업들에게 새로운 사업기회 및 연구개발 가능성을 제시하였다는 점에서 큰 가치를 지니고 있다.

감사

이 논문은 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2013, 특화전문대학원 연계 학연협력 지원사업).

References

1. Korea Energy Management Corporation (KEMCO), "2012 New & Renewable Energy White Papers," p. 382 (2012).

2. Song, Y. H., "Generation Capacity Estimation of Pilot Plant with Enhanced Geothermal System in Korea," *J. Kor. Soc. Mineral Energy Resour. Eng.*, **47**(3), 245-253 (2010).
3. Choi, J. M., Park, Y. J., and Kang, S. H., "Daily Cooling Performance Comparison of a Geothermal Heat Pump System between Energy-Plate and Energy-Slab," *Trans. Kor. Soc. Geothermal Energy Eng.*, **8**(3), 29-35 (2012).
4. Boucekima, B., "Renewable Energy for Desalination: a Solar Desalination Plant for Domestic Water Needs in Arid Areas of South Algeria," *Desalination*, **153**, 65-69 (2003).
5. Boegli, W. J., Suemoto, S. H., and Trompeter, K. M., "Geothermal Desalting at the East Mesa Test Site. (Experimental Results of Vertical Evaporator, MSF and High-temperature ED. Date about Fouling, Heat Transfer Coefficients, Scaling), *Desalination*, **22**, 77-90 (1977).
6. Sarti, G. C., Gostoli, C., and Bandini, S., "Extraction of Organic Components from Aqueous Streams by Vacuum Membrane Distillation," *J. Membr. Sci.*, **80**, 21-33 (1993).
7. Sarbatly, R., and Chiam, C. K., "Evaluation of Geothermal Energy in Desalination by Vacuum Membrane Distillation," *Applied Energy*, In press (2013).
8. Hafez, A., and Samir, E. M., "Economics of Seawater RO Desalination in the Red Sea Region Egypt. Part 1. A Case Study," *Desalination*, **153**, 335-347 (2002).
9. Korea Development Institute (KDI), "A Study on General Guidelines for Pre-feasibility Study (5th Edition)," pp. 181-213 (2006).
10. KPMG, "Corporate Tax Rates Table," www.kpmg.com (2013).
11. Awerbuch, L., Lindemuth, T. E., May, S. C., and Rogers, A. N., "Geothermal Energy Recovery Process," *Desalination*, **19**, 325-336 (1976).
12. Barbier, E., "Geothermal Energy Technology and Current Status: an Overview," *Renewable Sustainable Energy Rev.*, **6**, 3-65 (2002).
13. Delyannis, E., and Belessiotis, V., "A Historical Overview of Renewable Energies," CRES, Santorini Greece, pp. 10-12 (1996).