

## 지열발전을 위한 칼리나 사이클의 시뮬레이션

백영진<sup>†</sup>, 김민성, 장기창, 이영수, 박성룡, 라호상

한국에너지기술연구원 지열에너지연구센터

### Simulation of the Kalina cycle for a Geothermal Power Generation

Young Jin Baik<sup>†</sup>, Minsung Kim, Ki Chang Chang, Young-Soo Lee, Seong-Ryong Park, Ho Sang Ra

Geothermal Energy Research Center, Korea Institute of Energy Research(KIER),

Yeosung P.O Box 103, Taejeon 305-600, Korea

**ABSTRACT:** The Kalina cycle simulation study was carried out for a preliminary design of a geothermal power generation system. The Kalina cycle system can be used for the utilization of a low-temperature heat sources such as geothermal and industrial waste heat that are not hot enough to produce steam. The sea/river water can be considered as a cooling media. A steady-state simulation model was developed to analyze and optimize its performance. The model contains a turbine, a pump, an expansion valve and heat exchangers. The turbine and pump were modelled by an isentropic efficiency, while a condenser, an evaporator and a regenerative heat exchanger were modeled by UA-LMTD method with a counter-flow assumption. The simulation results show that the power generation efficiency over 10% is expected when a heat source and sink inlet temperatures are 100°C and 10°C respectively.

**Key words:** Geothermal power generation(지열발전), Kalina cycle(칼리나 사이클)

#### 기호설명

$P$  : 압력 [kPa]  
 $Q$  : 열량 [kW]  
 $T$  : 온도 [°C]  
 $W$  : 일량 [kW]  
 $x$  : 암모니아의 농도  
 $\eta$  : 효율

#### 하첨자

$C$  : 응축기  
 $E$  : 증발기

RG : 재생기

#### 1. 서론

세계적인 에너지 및 환경 문제에 대처하기 위하여 우리 정부에서는 신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법을 마련하여 정책적인 지원을 아끼지 않는 등 신에너지 및 재생에너지의 기술개발·이용·보급촉진과 관련산업의 활성화 위해 다각적인 노력을 경주하고 있다.

신에너지 및 재생에너지는 재생에너지 8개분야(태양열, 태양광발전, 바이오매스, 풍력, 소수력, 지열, 해양에너지, 폐기물에너지)와 신에너지 3개분야(연료전지, 석탄액화·가스화, 수소에너지)로 분류되는데, 이중 지열, 해양, 태양열의 경우에는 온도차를 이용하여 전기를 생산할 수 있다.<sup>(1)-(3)</sup>

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel : +82-42-860-3226 fax : +82-42-860-3133

E-mail address: twinjin@kier.re.kr

특히 지열은 인류가 가지고 있는 가장 오래된 에너지 자원 중 하나이며, 현재 전세계적으로 바이오매스와 대수력을 제외한 신재생에너지자원 중에서 가장 많은 에너지를 공급하고 있음에도 불구하고 우리나라에서는 그 중요성이 상대적으로 낮게 평가되고 있다.

우리나라에는 화산활동과 관련된 고온성 지열 에너지가 부존하고 있지 않으므로, 현재로서는 히트펌프를 이용한 냉난방 목적에만 지열을 사용하고 있으나, 외국의 경우 냉난방은 물론 발전 목적으로도 널리 사용하고 있다. 특히 최근에는 지하 심부(3,000 m 이상)의 고온암체(HDR; Hot Dry Rock)를 이용한 지열발전 기술도 개발되고 있다.

지열 발전의 경우, 그 역사는 약 100년 정도이다. 20세기 초인 1904년 이탈리아의 Larderello에서 지열 증기를 이용하여 처음으로 발전이 이루어졌는데, 1913년 상업적인 발전이 시작된 후 현재도 이 지역에서는 543 MWe의 발전용량을 갖추고 있다. 그 후 일본의 Beppu(1919), 미국 California의 The Geysers(1921), 그리고 뉴질랜드 Wairakei(1958), 멕시코(1959) 등 세계로 퍼져나가 2004년말 현재 전세계 발전시설용량은 8,900 MWe에 이르고 있으며 연간 57,000 GWh의 전기를 공급하고 있다. 이와 관련하여 지난 100년간 전세계의 지열발전 증가추세를 살펴보면, 1980년이래로 매년 10% 이상의 높은 증가율을 나타낸다.<sup>(1)</sup>

지열 및 해양에너지를 이용한 발전기술은 온도차를 이용한 랭킨 사이클과 같은 열역학적 동력 사이클을 근간으로 하고 있는데, 최근에는 칼리나(Kalina) 사이클을 이용한 연구 및 실증사례들이 증가하고 있다.

칼리나 사이클은 혼합 작동유체의 상변화 과정을 이용함으로써, 열교환 과정에서의 비가역성을 줄일 수 있는 장점이 있는데, 이는 비공비혼합물을 작동유체로 이용함으로써 구현이 가능하다. 특히, 암모니아-물 혼합물은 흡수식 냉동사이클의 중요한 냉매로 사용되어 왔으며, 물에 대한 암모니아의 흡수성이 좋으며, 두 성분의 증기압이 크게 달라 칼리나 사이클의 작동유체로 사용된다. 이 혼합물을 작동유체로 하는 발전 사이클은 1979년부터 Exergy Inc.에서 본격적으로 연구하여 1982년 연구개발자인 Dr. Alexander

Kalina 자신의 이름을 딴 “Kalina Cycle”로 발표되어 미국 특허를 획득하였다.<sup>(4)</sup> 개발 초기에는 복합 발전용 하부 사이클의 새로운 대안으로서 주목을 받았으며, 이후 다양한 조건에 대한 개량이 이루어져 KCS(Kalina Cycle System) 5, KCS 11, KCS 12, KCS 34g, KCS 1D2r2 등 여러 목적에 특화된 사이클 기술이 개발되기도 하였다.

이러한 칼리나 사이클은 원리적 우수성으로 인하여, 지열발전 뿐 아니라 OTEC(Ocean Thermal Energy Conversion) 및 폐열발전 등 저온도차 발전에 적용되고 있다.

가까운 일본의 경우에도 큐슈의 사가대학이 R22와 암모니아를 작동유체로 사용하는 75kW 출력의 OTEC 발전 시스템을 갖추고 연구를 진행하고 있으며<sup>(5)</sup>, Sumitomo Metal Industries사의 Ksahima Steel Works는 제철공장의 전환기로부터의 배가스를 냉각시키는데 사용된 저온 폐수를 열원으로 이용하는 발전시스템을 사용하여 1999년 9월 운행에 들어간 이후 연간 약 6,600kl의 원유에 상응하는 양의 에너지를 절감하고 있다.

한편, 우리나라의 부곡온천, 해운대온천 및 동래온천 등지에서는 60~78℃의 온천이 산출되고 있으며, 최근에는 강화도에 인접한 석모도 남쪽 매음리 일대에서 심도 약 750~1280 m의 시추공들로부터 수온이 62~72℃에 달하는 온천수가 발견되기도 하였다. 특히 경상북도 포항 등지에서는 지온 증가율이 40 ℃/km까지 이르므로, 향후 우리나라에서도 이러한 차세대 저온 지열발전용 기대할 수도 있을 것으로 보고되고 있다.<sup>(6)-(7)</sup>

이와 관련하여 본 연구에서는 지열 발전 시스템의 개발을 위한 선행 연구로서, 칼리나 사이클의 성능 및 특성을 시뮬레이션 방법을 통하여 해석 및 고찰하였다.

## 2. 시스템 모델링 및 시뮬레이션

본 연구에서 고려하고 있는 칼리나 사이클 KCS 11<sup>(8)</sup>은 Fig. 1과 같이 증발기, 터빈, 응축기, 펌프, 분리기(separator), 팽창밸브 및 흡수기(absorber) 등으로 구성되어 있으며, 작동원리는 다음과 같다.

우선, 재생기에서 열교환을 마친 액상의 암모니아-물 혼합물은 증발기내로 유입되어 열원

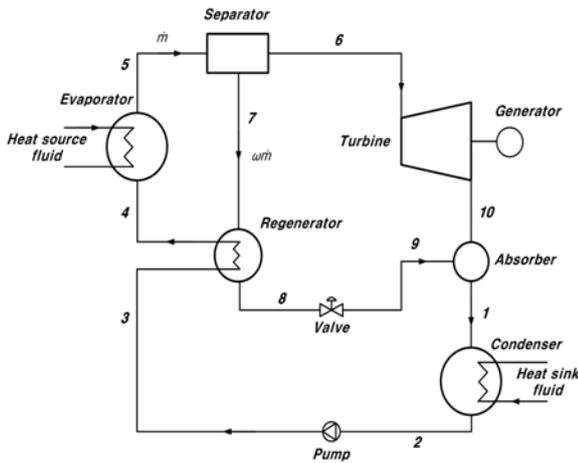


Fig. 1 Schematic diagram of the Kalina cycle

(heat source)으로부터 열을 받아 증발하게 된다. 이 때, 증기압이 높은 암모니아가 대부분 증발하게 된다. 이렇게 증발한 혼합물은 분리기 내에서 포화증기 및 포화액으로 분리된다. 분리된 포화증기는 터빈을 가동시킨 후, 흡수기로 유입된다. 한편, 분리기에서 분리된 고온의 포화액은 증발기로 유입되는 과냉액 상태의 암모니아-물 혼합물과 재생기 내에서 열교환을 한 후, 팽창밸브를 지나 흡수기로 유입된다. 흡수기에서 합쳐진 2상 상태의 혼합물은 응축기 내에서 열침(heat sink)과의 열교환을 통하여 포화액 상태가 된다. 이 포화액은 펌프에 의해 가압 후 재생기로 유입되고, 사이클을 완성하게 된다. 이상과 같은 사이클을 해석하기 위하여 각 요소에 대한 모델링을 다음과 같이 하였다.

증발기 및 응축기는 Fig. 2와 같이 대향류 흐름을 갖는다고 가정하고 각각 식(1) 및 (2)와 같이 해석하였다.<sup>(9)</sup>

$$\frac{1}{\Delta T_{lm, E}} = \frac{Q_{E, sub}}{Q_E \Delta T_{lm, E, sub}} + \frac{Q_{E, tp}}{Q_E \Delta T_{lm, E, tp}} \quad (1)$$

$$Q_{E, sub} = h_{45} - h_4$$

$$\Delta T_{lm, E, sub} = \frac{(T_{HM} - T_{45}) - (T_{HO} - T_4)}{\ln\left(\frac{T_{HM} - T_{45}}{T_{HO} - T_4}\right)}$$

$$Q_{E, tp} = h_5 - h_{45}$$

$$\Delta T_{lm, E, tp} = \frac{(T_{HI} - T_5) - (T_{HM} - T_{45})}{\ln\left(\frac{T_{HI} - T_5}{T_{HM} - T_{45}}\right)}$$

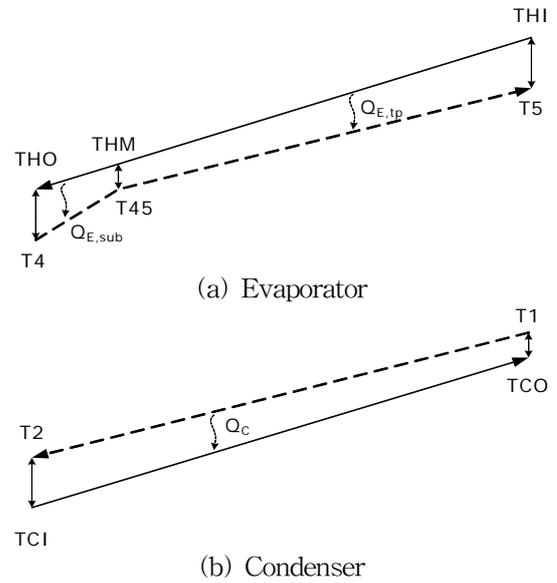


Fig. 2 Temperature profiles in the evaporator and condenser

$$\Delta T_{lm, C} = \frac{(T_1 - T_{CO}) - (T_2 - T_{CI})}{\ln\left(\frac{T_1 - T_{CO}}{T_2 - T_{CI}}\right)} \quad (2)$$

이 때, 2차 유체의 입구 온도 및 열교환기 대수평균 온도차, 그리고 핀치점에서의 온도차를 입력 변수로 하였다. 핀치점에서의 온도차는 증발기의 경우 Fig. 2에서의  $THI-T_5$ ,  $THM-T_{45}$ ,  $THO-T_4$  값 중 가장 작은 값으로 정의하였으며, 응축기의 경우  $T_1-T_{CO}$  또는  $T_2-T_{CI}$  중 작은 값으로 정의하였다.

재생기는 유용도(effectiveness)  $\epsilon_{RG}$ 를 입력 변수로 하였으며, 팽창과정은 등엔탈피 과정으로 생각하였다. 한편, 터빈 및 펌프의 단열효율은 75%로 가정하였다.

이상의 요소 모델링을 연계시켜 사이클 시뮬레이션을 수행하는 방법은 다음과 같다.

우선, 시뮬레이션 조건으로서, 증발기 및 응축기 2차 유체의 입구 온도, 대수평균온도차 및 핀치점에서의 온도차, 그리고 재생기 효율, 터빈 입구 압력 및 분리기 입구농도가 주어진다.

펌프입구 온도( $T_2$ )와 터빈 입구 온도( $T_6$ )를 가정하면, 분리기 입구(5), 터빈 입구(6), 분리기 포화액 출구(7), 펌프 입구 상태(2)가 결정된다. 다음, 주어진 펌프의 단열효율로부터 펌프 출구 상태(3)를 계산하고, 분리기의 에너지 보존식으로부터 포화액의 질량분율( $\omega$ )을 계산한다. 재생기의

에너지 보존식과 모델링으로부터 증발기 입구(4)와 팽창밸브 입구 상태(8)가 결정되며, 등엔탈피 가정으로부터 팽창밸브 출구 상태(9)를 결정할 수 있다. 주어진 터빈 효율로부터 터빈 출구상태(10)를 계산하고, 단열 흡수기의 에너지 보존식으로부터 응축기 입구 상태(1)를 계산한다. 다음, 증발기 및 응축기 각각에 대하여 1, 2차유체 간의 열평형식과 주어진 핀치점에서의 온도차들로부터 2차유체 출구온도들을 구한다.

이제 증발기와 응축기에서의 대수평균온도차를 새로 계산하여 주어진 대수평균온도차와 다르면 최초에 가정했던 펌프입구 온도(T2)와 터빈 입구 온도(T6)를 재가정한 후, 위의 과정을 반복한다. 계산이 종료되면, 시뮬레이션 결과로서 터빈 출력, 펌프 동력, 사이클 효율 및 각 구성요소의 입출구 상태 등을 얻을 수 있다.

### 3. 시뮬레이션 결과

우선 칼리나 사이클의 특성을 알아보기 위하여 열원수 입구 온도=100°C, 냉각수 입구온도=10°C, 증발기 및 응축기 내 대수평균 온도차=3°C, 증발기 및 응축기 내 핀치점에서의 온도차=2.5°C, 재생기 유용도(effectiveness)  $\epsilon_{RG}=0.9$  인 경우에 대

하여, 터빈 입구의 압력=1,500 kPa 및 2,500 kPa 인 경우, 분리기 입구 암모니아 농도 변화에 따른 칼리나 사이클의 효율을 Fig. 3에 나타내었다. 주어진 터빈 입구 압력에 대해, 분리기 입구 암모니아 농도 증가에 따라 처음에는 효율이 증가하여 최대값에 도달한 후, 점차 효율이 감소한다. 압력을 높이면 더 높은 분리기 입구 암모니아 농도에서 더 높은 최대 효율을 갖는다. 예를들어, 터빈 입구 압력이 1,500 kPa인 경우에는 분리기 입구 암모니아 농도 50.2%에서 최대효율 10.7%

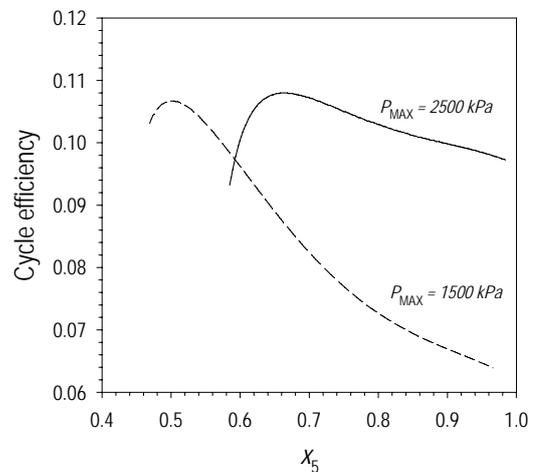


Fig. 3 Cycle efficiency variations over ammonia fraction change at the separator inlet ( $\epsilon_{RG}=0.9$ )

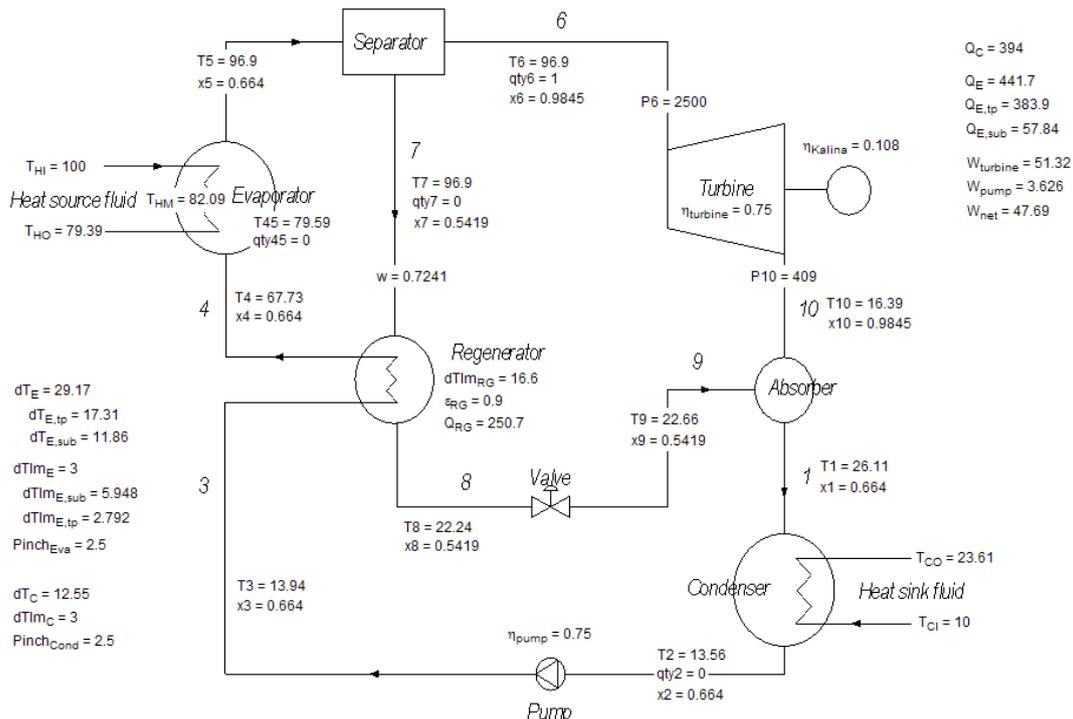


Fig. 4 Simulation results at the maximum cycle efficiency for a Pmax=2,500 kPa

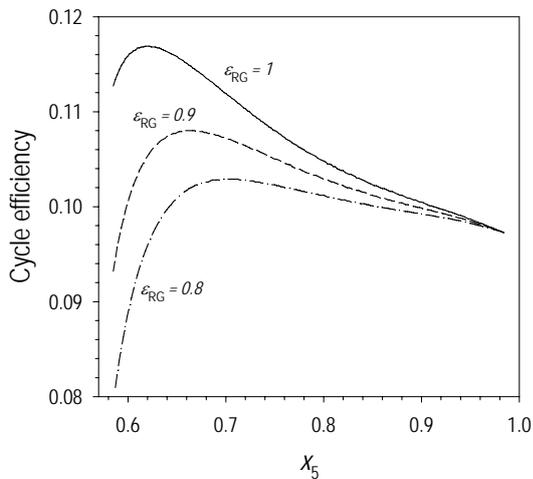


Fig. 5 Cycle efficiency variations over regenerator efficiency change (Pmax=2500 kPa)

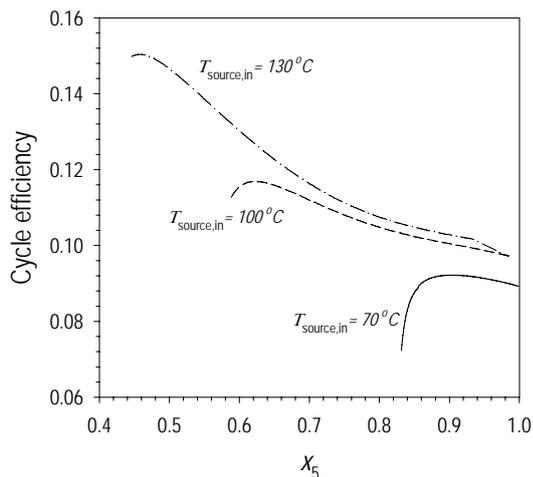


Fig. 6 Cycle efficiency variations over heat source temperature change (Pmax=2500 kPa, εRG=1)

를 나타내나, 터빈 입구 압력이 2,500 kPa인 경우에는 분리기 입구 암모니아 농도 66.4%에서 최대 효율 10.8%를 나타낸다. 시뮬레이션 결과의 한 예로서, Fig. 4에 터빈 입구 압력=2,500 kPa 일 때, 최적 효율점에서의 운전 상태를 나타내었다.

분리기 입구 암모니아 농도 변화에 따라 사이클의 효율이 변화하는 이유는 주로 증발 및 응축 과정에서의 냉매의 평균온도 변화 때문이다. 동력 사이클에서는 열을 공급받는 평균온도가 높을수록, 그리고, 열을 방출하는 평균온도가 낮을수록 사이클 효율이 상승한다.

사이클 효율에 영향을 주는 다른 인자로서 재생기 효율을 들 수 있는데, 이는 크기가 무한대인 재생기에서 얻을 수 있는 전열량과 이상에서

계산된 재생열량의 차로 정의된다. Fig. 5에 재생기 효율 변화에 따른 사이클의 효율 변화를 나타내었다. 재생기의 효율이 증가할수록 사이클의 최고 효율이 증가하며, 최고 효율점의 위치도 이동하는 것을 알 수 있다. 분리기 입구 암모니아 농도가 매우 높은 경우에는 재생 열량 자체가 크지 않으므로, 재생기 효율 변화에 대한 사이클 효율 변화가 크지 않다.

Fig. 6에 열원수 온도 변화에 따른 사이클의 효율 변화를 나타내었다. 열원수 온도 상승에 따라 사이클의 최고 효율이 증가하며, 최고 효율점의 위치도 변화한다. 계산 결과에 따르면, 10°C의 냉각수가 이용가능하다면, 100°C의 열원에 칼리나 사이클을 적용하여 10% 이상의 발전효율을 얻을 수 있으며, 열원의 온도가 70°C만 되어도 이론적으로는 최대 약 9%의 발전효율을 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 지열발전 시스템의 개발을 위한 기초 연구로서, 시뮬레이션 방법을 통하여 칼리나 사이클의 성능 및 특성을 고찰하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 주어진 열원 및 냉각수 입구 온도에 대하여, 칼리나 사이클의 효율에 영향을 주는 주요 인자로는 시스템 최고 압력 및 분리기 입구 암모니아 농도, 그리고 재생기 효율 등이 있다.
2. 위의 인자들 중, 분리기 입구 암모니아 농도의 영향이 가장 크다고 볼 수 있으며, 분리기 입구 암모니아 농도가 매우 높은 경우에는 재생 열량 자체가 크지 않으므로, 재생기 효율 변화에 대한 사이클 효율 변화가 크지 않다.
3. 100°C의 열원과 10°C의 냉각수가 이용가능하다면, 칼리나 사이클을 적용하여 10% 이상의 발전효율을 얻을 수 있다.(터빈의 단열 효율을 75%로 가정시)

#### 후 기

본 연구는 산업자원부가 지원하고 있는 에너지 절약기술개발사업 중 한국에너지기술연구원이 주

관하여 수행하고 있는 “해수이용 냉난방 시스템 개발”과제(2005-E-BD02-P-05-0-000)의 일부 결과이며, 이를 지원하는 관계자 여러분들께 감사의 말씀을 드립니다.

### 참고문헌

1. Ruggero Bertani, 2005, "World geothermal power generation in the period 2001~2005", Geothermics, Volume 34, Issue 6, pp. 651-690.
2. Rong-Hua Yeh, Tar-Zen Su and Min-Shong Yang, 2005, "Emergy evaluation of an OTEC electrical power system", Ocean Engineering, Volume 32, Issues 5-6, pp. 685-700.
3. Lourdes Garcia-Rodriguez and Julian Blanco-Galvez, 2007, "Solar-heated Rankine cycles for water and electricity production: POWERSOL project", Desalination, Volume 212, Issues 1-3, pp. 311-318.
4. 박영무, 1993, "Kalina 사이클 : 복합 발전용 고효율 하부사이클", 한국에너지공학회지, Vol. 2, No. 2, pp. 154-170.
5. 김남진, 전용한, 김종보, 2007, "원자력발전소 온배수를 이용한 해양 온도차발전 사이클 해석", 한국태양에너지학회 논문집, Vol. 27, No. 3, pp. 37-44.
6. 송운호, 안은영, 2005, "세계 지열에너지자원 활용 현황 분석과 향후 전망", 한국지구시스템공학회지, Vol. 42, No. 4, pp. 287-296.
7. 이승구, 김동권, 이진수, 송운호, 2006, "강화석모도 화강암류와 온천수의 지구화학: 온천수의 기원규명을 위한 Sr 동위원소의 응용", Jour. Petrol. Soc. Korea, Volume 15, No 2, pp. 60-71.
8. H. D. Madhawa Hettiarachchi, Mihajlo Golubovic, William M. Worek and Yasuyuki Ikegami, 2007, The Performance of the Kalina cycle System 11(KCS-11) with Low-Temperature Heat Sources, ASME J. of Energy Resources Technology, Vol. 129, pp. 243-247.
9. Piotr A. Domanski and Mark O. McLinden, 1992, "A simplified cycle simulation model for the performance rating of refrigerants and refrigerant mixtures", Int. J. Refrigeration, Vol. 15, No. 2, pp. 81-87.