

칼리나 사이클을 이용한 지열발전 시스템의 시뮬레이션

*장 기창¹⁾, **백 영진²⁾, 김 민성¹⁾, 이 영수¹⁾, 박 성룡¹⁾, 나 호상¹⁾

Simulation of a geothermal power generation system using the Kalina cycle

*Ki-Chang Chang, **Young-Jin Baik, Minsung Kim, Young-Soo Lee,
Seong-Ryong Park, Ho-Sang Ra

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

Abstract : In this study, a geothermal power generation system using the Kalina cycle was investigated by the simulation method. 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 effect of the ammonia fraction at the separator inlet on the cycle performance is investigated in detail.

Nomenclature

P : pressure, kPa
T : temperature, °C

subscript

C : condenser
E : evaporator
RG : regenerator

1. 서론

현재 세계 각국은 날로 고갈되어 가고 있는 지구 에너지원의 다원화, 석유 비중의 경감과 신재생에너지와 같은 대체에너지의 개발 촉진 등 보다 적극적이고 합리적인 에너지 정책을 추구하고 있으며, 산업 분야에서의 화석연료의 사용을 절감하여 대기오염물질 및 온실가스의 방출을 억제하는 것을 주요 관심사로 하고 있다. 이와 관련하여 정부에서는 신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법을 마련하여 정책적인 지원을 아끼지 않는 등 신에너지 및 재생에너지의 기술개발·이용·보급촉진과 신에너지 및 재생에너지산업의 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.⁽¹⁾⁻⁽³⁾

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 발전 용량을 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.⁽¹⁾

-
- 1) 한국에너지기술연구원 지열에너지연구센터
E-mail : kcchang@kier.re.kr
Tel : (042)860-3163 Fax : (042)860-3133
 - 2) 한국에너지기술연구원 지열에너지연구센터
E-mail : twinjin@kier.re.kr
Tel : (042)860-3226 Fax : (042)860-3133

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 작동 유체의 상변화 과정을 이용함으로써, 열교환 과정에서 비가역성을 줄일 수 있으므로 원리적으로 랭킨 사이클에 비해 성능이 우수하다. 이러한 원리적 우수성으로 인하여, 칼리나 사이클은 지열발전 뿐 아니라 OTEC(Ocean Thermal Energy Conversion) 및 폐열발전 등 저온도차 발전에 적용되고 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 지열발전을 기대할 수도 있을 것으로 보고되고 있다.⁽⁴⁾⁻⁽⁵⁾

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

2. 시스템 모델링 및 시뮬레이션

본 연구에서 고려하고 있는 칼리나 사이클은 Fig. 1과 같이 증발기, 터빈, 응축기, 펌프, 분리기(separator), 팽창밸브 및 흡수기(absorber) 등으로 구성되어 있으며, 작동원리는 다음과 같다.

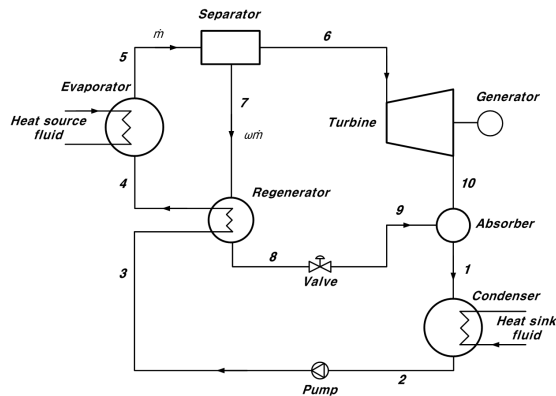


Fig. 1 Schematic diagram of the Kalina cycle

우선, 재생기에서 열교환을 마친 액상의 암모니아-물 혼합물은 증발기내로 유입되어 열원(heat source)으로부터 열을 받아 증발하게 된다. 이때, 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 흡

수기로 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 대향류 흐름을 갖는다고 가정하여, 식(1)과 같이 해석하였다.⁽⁶⁾

$$\frac{1}{\Delta T_{lm}} = \frac{1}{Q} \sum \frac{Q_i}{\Delta T_i} \quad (1)$$

이 때, 2차 유체 입출구 온도 및 열교환기 대수 평균 온도차, 그리고 핀치점에서의 온도차를 입력 변수로 하였다. 이는 본 연구가 시스템 개념 설계 단계의 기초 연구로서, 주어진 외부 2차 유체의 온도조건 하에서 사이클이 얼마나 높은 효율을 달성할 수 있는지와 각 열교환기의 요구 UA를 가능하는 것이 필요하기 때문이다.

재생기는 유용도(effectiveness) ϵ_{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 입출구 온도 및 대수평균온도차, 그리고 터빈 입구 압력, 재생기 효율($\epsilon_{RG}=0.9$) 및 증발기 내 냉매의 온도구배가 주어진다.

펌프입구 온도와 터빈 입구 온도를 가정하면, 분리기 입구, 터빈 입구, 분리기 포화액 출구, 펌프 입구 상태가 결정된다. 다음, 펌프 출구 상태를 계산하고, 분리기의 에너지 보존식으로부터 포화액의 질량분율을 계산한다. 재생기의 에너지 보존식과 모델링으로부터 증발기 입구와 팽창밸브 입구 상태가 결정되며, 등엔탈피 가정으로부터 팽창밸브 출구 상태를 결정할 수 있다. 터빈 효율로부터 터빈 출구상태를 계산하고, 흡수기의 에너지 보존식으로부터 응축기 입구 상태를 계산한다. 이제 증발기와 응축기에서의 대수평균온도차를 새로 계산하여 주어진 대수평균온도차와 다르다면 최초에 가정했던 펌프입구 온도와 터빈 입구 온도를 재가정한 후, 위의 과정을 반복한다. 계산이 종료되면, 시뮬레이션 결과로서 터빈 출력, 펌프 동력, 사이클 효율 및 각 구성요소의 입출구 상태를 얻을 수 있다.

3. 시뮬레이션 결과

우선 칼리나 사이클의 특성을 알아보기 위하여 열원수 입구 온도=100℃, 냉각수 입구온도=10℃, 증발기 및 응축기 내 대수평균 온도차=3℃, 증발기 및 응축기 내 핀치점에서의 온도차=2.5℃인 경우에 대하여, 터빈 입구의 압력=1,500 kPa 및 2,500 kPa인 경우, 분리기 입구 암모니아 농도 변화에 따른 칼리나 사이클의 효율을 Fig. 2에 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. 예를 들어, 터빈 입구 압력이 1,500 kPa인 경우에는 분리기 입구 암모니아 농도 50.2%에서 최대효율 10.7%를 나타내나, 터빈 입구 압력이 2,500 kPa인 경우에는 분리기 입구 암모니아 농도 66.4%에서 최대 효율 10.8%를 나타낸다.

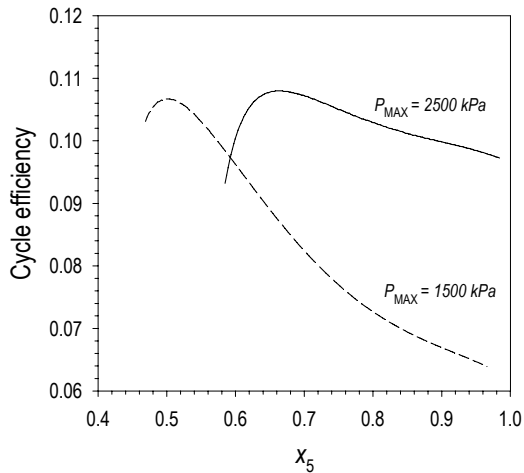


Fig. 2 Cycle efficiency variations over ammonia fraction change at the separator inlet

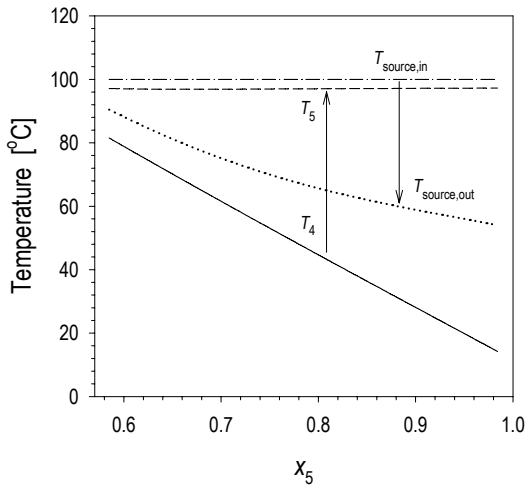


Fig. 3 Evaporator side temperature variations over ammonia fraction change at the separator inlet ($P_{MAX}=2500$ kPa)

분리기 입구 암모니아 농도 변화에 따라 사이클의 효율이 변화하는 이유는 주로 증발 및 응축과정에서의 냉매의 평균온도 변화 때문이다. 동력 사이클에서는 열을 공급받는 평균온도가 높을수록, 그리고, 열을 방출하는 평균온도가 낮을수록 사이클 효율이 상승한다. Fig. 3에 분리기 입구 암모니아 농도 변화에 따른 증발기 입출구 냉매온

도 및 열원수 입출구 온도 변화를, Fig. 4에는 응축기 입출구 냉매온도 및 냉각수 입출구 온도 변화를 각각 나타내었다. 분리기 입구 암모니아 농도가 증가할수록 열을 공급받는 평균온도가 낮아지며, 열을 방출하는 평균온도가 높아지므로, 분리기 입구 암모니아 농도 증가에 따라 전반적으로 사이클의 효율이 감소하는 추세를 나타내게 된다.

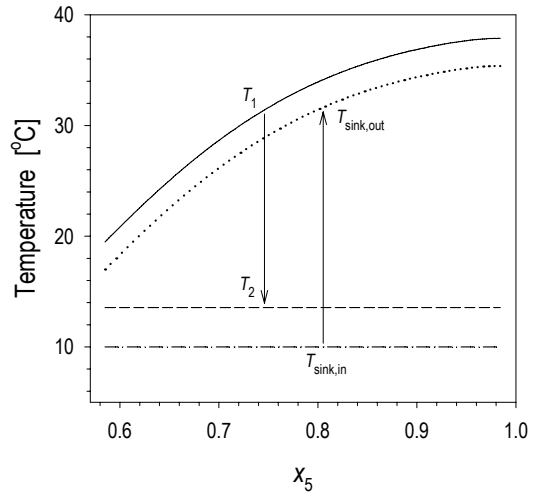


Fig. 4 Condenser side temperature variations over ammonia fraction change at the separator inlet ($P_{MAX}=2500$ kPa)

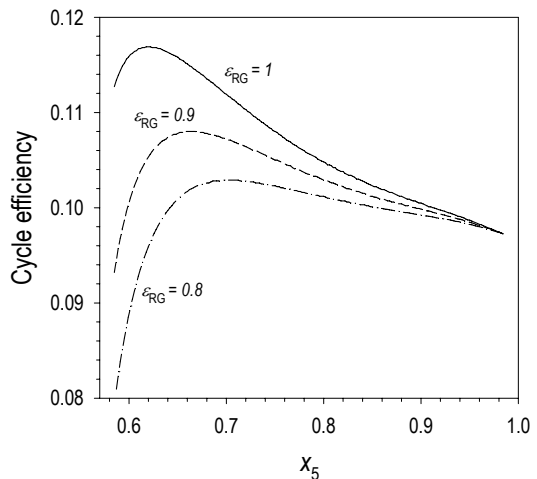


Fig. 5 Cycle efficiency variations over regenerator efficiency change ($P_{MAX}=2500$ kPa)

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 효

울점의 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.

4. 결 론

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℃의 열원과 10℃의 냉각수가 이용가능하다면, 칼리나 사이클을 적용하여 10% 이상의 발전효율을 얻을 수 있다.(터빈의 단열효율을 75%로 가정시)

후 기

본 연구는 산업자원부가 지원하고 있는 에너지절약기술개발사업 중 한국에너지기술연구원이 주관하여 수행하고 있는 “해수이용 냉난방 시스템 개발” 과제(2005-E-BD02-P-05-0-000)의 일부 결과이며, 이를 지원하는 관계자 여러분들께 감사의 말

씀을 드립니다.

References

- [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] 송윤호, 안은영, 2005, “세계 지열에너지자원 활용 현황 분석과 향후 전망”, 한국지구시스템 공학회지, Vol. 42, No. 4, pp. 287~296.
- [5] 이승구, 김동권, 이진수, 송윤호, 2006, “강화 석모도 화강암류와 온천수의 지구화학: 온천수의 기원규명을 위한 Sr 동위원소의 응용”, Jour. Petrol. Soc. Korea, Volume 15, No 2, pp. 60-71.
- [6] 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.