

응축수온도가 저온지열발전 성능에 미치는 영향 연구

김진상[†], 이충국*

(주)엑서지엔지니어링, *인하대학교 건축공학과 박사과정

A Study of the Influence of Condensing Water Temperature on Low Temperature Geothermal Power Generation

Jin-Sang Kim[†], Chung-Kook Lee*

Exergy Engineering Co., Anyang, 431-060, Korea

*Department of Architectural Engineering, Inha University, Incheon, 402-751, Korea

Abstract

Geothermal energy is used in various forms, such as power generation, direct use, and geothermal heat pumps. High temperature geothermal energy sources have been used for power generation for more than a century. Recent technical advances in power generation equipments make relatively low temperature geothermal energy to be available for power generation. In these applications, lower temperature geothermal energy source makes smaller difference between condensing water temperature and it. Various condensing water temperatures were investigated in analyzing its influence on power generation performance. Condensing water temperature of organic Rankine cycle imposed greater influence on power generation and its performance in lower temperature geothermal power generation.

Key words : Geothermal Power Generation(지열 발전), Rankine Cycle(랭킨 사이클), Organic Rankine Cycle(유기 랭킨 사이클), Binary Cycle(바이너리 사이클), Working Fluid(작동 유체), Turbine(터빈), Pump(펌프), Condenser(응축기), Evaporator(증발기)

기 호 설 명

A : 열교환 면적[m²]
 c_p : 비열 [kJ/(kg · K)]
 C_r : 유체간의 열용량비
 H : 양정 [m]
 h : 엔탈피 [kJ/kg]
 \dot{m} : 유량 [kg/s, LPM]
 NTU : 열이동단위

P : 압력 [kPa]
 PR : 압력비
 T : 온도 [°C] 또는 [K]
 U : 총괄 열전달계수[kW/m² · K]
 v : 비체적 [m³/kg]
 W : 전력[kW]

그리스 문자

η : 터빈 또는 펌프 효율
 ϵ : 열교환 효율
 γ : 등엔트로피 비열비

[†] Corresponding author
 Tel.: +82-31-425-7815, Fax: +82-31-384-7818
 E-mail: jkim@exergy.co.kr

하첨자

- p* : 펌프
- t* : 터빈
- 1 : 펌프 입구(응축기 출구)
- 2 : 펌프 출구(증발기 입구)
- 3 : 터빈 입구(증발기 출구)
- 4 : 터빈 출구(증발기 입구)

1. 서론

1.1 지열의 이용

지열을 이용하는 방식은 크게 세 가지로 구분한다. 지열을 이용하여 전력을 생산하는 지열발전과 지중에서 얻어진 열을 산업공정이나 건물난방 그리고 온천 등에 이용하는 지열직접이용 그리고 그대로 이용하기에 적절하지 않은 낮은 온도의 지열으로 히트펌프를 이용하여 냉난방에 이용하는 지열히트펌프가 있다. 지열의 온도로 이용 방식을 보면 가장 높은 지열이 발전에 이용된다. 이보다 낮은 온도가 지열 직접이용 방식에 사용된다.

위에서 언급한 세가지 방식 이외에도 지중에서 분출되는 고압의 유체의 압력을 이용하는 방법과 지중에서 생산되는 원유와 천연가스가 물과 같이 나오는 경우에 물의 열을 이용하는 방법도 이용되고 있다

1.2 지열의 발전

지열을 이용하여 전력을 생산하는 방식은 지중에서 나오는 스팀을 직접 전력을 생산하는데 이용하는 방식과 지열을 이용하여 다른 작동유체를 증발시켜서 전력을 생산하는데 사용하는 방식으로 나눌 수 있다. 스팀을 이용하는 방식은 지중에서 액체 상태인 지열수가 지표에 올라와서 압력 차이로 인하여 증기로 변하는 플래시 스팀을 이용하는 방식과 지중에 존재하는 스팀을 이용하는 방식을 드라이 스팀 방식이라 부른다.

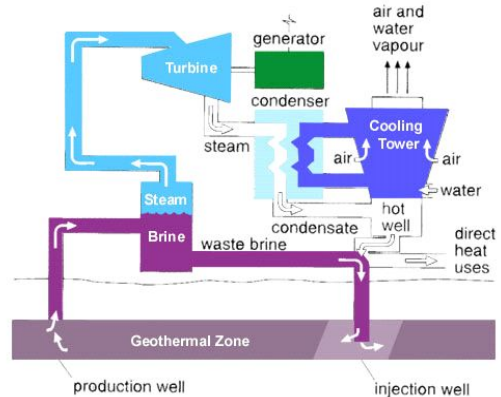


Fig. 1 Flash Steam Cycle[8]

이러한 스팀을 이용하는 방식은 지열 온도가 높은 경우(약 180℃ 이상)에 이용되며 지열로 발생된 고압의 스팀을 이용하여 Fig 1과 같이 직접 터빈을 구동시켜서 전력을 발생한다. 이 보다 낮은 온도의 지열을 이용하는 경우에서 지열을 이용하여 다른 작동유체를 증발시킨 후, 고압 기체 상태의 작동유체를 이용하여 터빈을 회전시켜 전력을 발생시킨다(Fig 2).

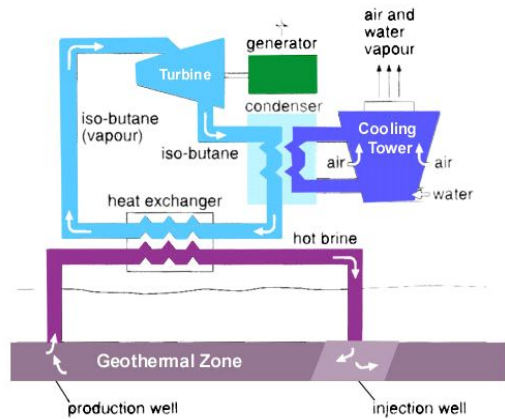


Fig. 2 Binary Cycle[8]

터빈을 구동하는데 지열수를 직접 이용하지 않고, 다른 작동 유체를 이용하는 방식을 바이너리 사이클 방식이라고 부르며, 이러한 바이너리 사이클은 랭킨 사이클을 이용하고 있다.

2. 저온 지열발전 개요

저온의 지열을 이용하여 전력을 생산하는 발전 시스템에서는 저온의 지열을 이용하여 스팀을 발생시켜서 전력을 생산하는 것은 스팀의 열역학적인 특성으로 인하여 적합하지 않다. 그러므로 물을 이용하는 대신에 다른 작동 유체를 채택하는 바이너리 사이클을 일반적으로 채택한다. 저온의 지열을 이용하여 발전하는 경우에는, 적용하는 지열 온도 범위에서 원활하게 증발하여 원하는 높은 압력을 발생시켜서 터빈을 구동시킬 수 있는 적절한 작동 유체를 사용하는 랭킨 사이클을 채택한다.[1,2]

2.1 랭킨 사이클

랭킨 사이클 발전시스템은 우리가 쉽게 볼 수 있는 화력이나 원자력 발전소에서 사용되고 있다. 랭킨 사이클은 작동유체의 상태 특성이 사이클의 최적 구성에 큰 영향을 미친다.[2] 액체 상태의 유체를 압축하는데 소비되는 일은 기체 상태의 작동 유체를 압축하는데 비하여 훨씬 적은 양이다. 기체 상태의 작동 유체를 팽창시키면서 얻은 일은 액체 상태의 작동 유체를 압축하는데 소비되는 일에 비하여 훨씬 크다. 그러므로, 과열 증기 상태에서 작동하는 랭킨 사이클은 기체 상태의 작동 유체를 팽창시키면서 얻은 일의 대부분이 유효한 일로 변환된다.(Fig. 3)

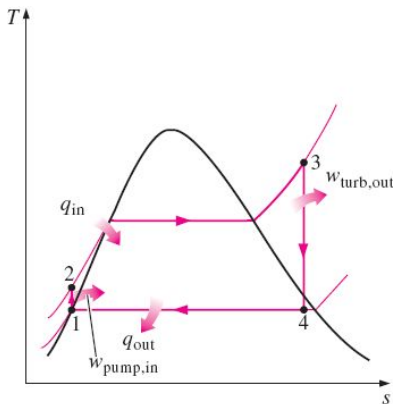


Fig. 3 T-s Diagram[1]

이상적인 랭킨 사이클은 2개의 등엔트로피 과정과 2개의 등압 과정으로 구성된다. 펌프에서 압축을수행하는 과정과 터빈에서 팽창하는 과정이 등엔트로피 과정이며, 열을 흡수하여 작동 유체를 증발시키는 증발기(보일러)와 열을 방출하여 작동 유체를 응축시키는 응축기에서는 등압 과정이다.

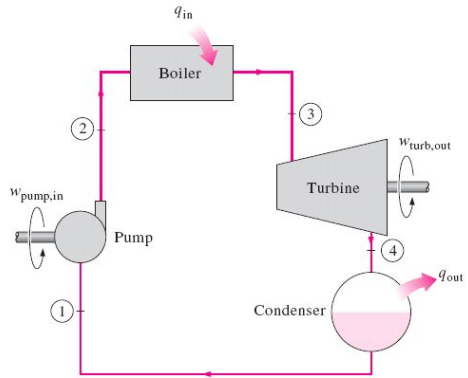


Fig. 4 Rankine Cycle[1]

응축기에서 응축되어 액체상태의 작동유체(상태 ①)가 펌프에 유입되어 보일러에 필요한 고압인 액체상태(②)가 되어서 나가서 증발기(보일러)로 들어가게 된다. 이 과정은 이론적으로 등엔트로피 과정으로서 펌프에서는 동력을 소비한다.(Fig.4)

증발기는 열교환기로서 고온의 지열수의 열이 작동유체로 전달되어 액체상태의 작동유체가 과열된 기체상태(③)로 변환된다. 증발기는 지열을 이용하는 경우에는 고온의 지열수가 사용하는 열교환기이며, 다른 열을 이용하는 경우에는 타 열원이 사용되는 열교환기 또는 보일러가 된다.

증발기에서 나온 과열 기체상태의 작동유체는 터빈에서 낮은 압력으로 팽창되는데 팽창후에는 액체와 기체가 혼합된 포화상태(④)가 되거나 기체상태가 된다.

터빈에서 나온 포화상태의 작동유체는 응축기로 들어가서 대기 또는 응축수에 열을 배출하고 액체상태(①)가 되어서 펌프로 유입된다.

2.2 작동 유체

랭킨 사이클은 다양한 온도 조건에서 사용되는

데, 작동 유체의 특성이 사이클의 성능에 큰 영향을 미친다. 적용되는 온도 조건에 따라 이에 적합한 작동유체를 선정하는 것은 최적의 사이클 사양을 구축하기 위해 매우 중요한 요건이다. 각종 발전소등에서 일반적으로 널리 사용되는 랭킨 사이클은 높은 온도에서 작동하며, 여기에는 물(H₂O)이 가장 널리 사용되는 작동유체이다. 이러한 발전소보다 낮은 온도에서 작동하는 지열발전 범위에서는 물 대신에 암모니아, 부탄, 펜탄 등의 여러 가지작동유체가 사용되어 왔으며, 최근에는 R245fa라고 불리는 작동유체가 널리 검토되고 있다. 펜탄프로우로프로판이라는 화학명으로 불리우며 CF₃CH₂CHF₂라는 화학식을 가진 물질로서 지열이나 폐열을 회수하는 랭킨 사이클에 적용이 증가하고 있다.

본 연구에서는 기존의 지열 발전보다 훨씬 낮은 온도에서 작동하는 저온 사이클로서 테트라플루오에탄(R134a)라고 불리는 작동 유체가 적용된다.

2.2.1 테트라플루오에탄 (R134a)

본 작동유체는 C₂H₂F₄의 분자식으로 표시되며 1,1,1,2-테트라플루오에탄(1,1,1,2-TetraFluoro Ethane)이라는 공식명칭으로 불리우며, 현재 냉동기의 냉매로 널리 사용되고 있으며 R134a라고 통칭되고 있으며 주요한 성질은 Table 1과 같다.

Table 1. Property of TetraFluoroEthane

주요 항목	값
Molar mass	102.03 g/mol
Triple point temperature	-103.3 °C
Boiling point temperature	-26.07 °C
Critical temperature	101.06 °C
Critical pressure	4.059 MPa
Critical density	511.9 kg/m ³

R134a 냉매는 터보 압축기에는 널리 사용되어 온 R123이 통용되어 온 R123을 교체하고 있다. 오랫동안 사용되어 온 R123은 오존파괴지수(ODP)가 낮으면서 지구온난화지수(GWP)도 낮은 편이나,

최근에는 추세에 따라 오존파괴지수가 없는 HFC 계열의 R134a로 전이되고 있다. R134a냉매(Table 1)는 임계온도가 통용되는 다른 냉매에 비하여 높아서 히트펌프에 적용될 때에는 고온의 온수를 생산할 수 있는 장점도 가지고 있어서, 터보히트 펌프에 널리 사용되고 있다.

2.3 부품 모델링

유기 랭킨 사이클을 구성하는 기본적인 사이클 관련 기계요소는 앞에서 설명한 것과 같은 네 가지이다. 증발된 작동유체에서 에너지를 얻는 터빈과 액체 상태의 작동유체의 압력을 상승시키는 펌프가 있으며, 지열을 흡수하고 그리고 응축열을 방출하는 응축기와 증발기로 구성된다.

2.3.1 터빈

고온의 지열을 흡수하여 과열 상태인 고압의 작동 유체 기체가 터빈을 구동시켜서 터빈에 연결된 발전기에서 전력이 생산된다. 팽창과정에서 동력을 회수하는 형식은 여러 가지 방식으로 이용되고 있으나, 그 중에서 터빈이 가장 널리 이용되는 형태이다.

터빈에서 팽창되는 과정을 등엔트로피 과정으로 이상화하여 표시한 식은 다음과 같다.

$$P_3 \nu_3^\gamma = P_4 \nu_4^\gamma \quad (1)$$

팽창과정에서 터빈이 얻는 에너지는 다음과 같이 표시된다.

$$\Delta h = \eta_t c_p T_t \left(1 - PR^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right) \quad (2)$$

터빈을 통과한 작동유체는 저압의 기체가 되거나, 기체와 액체 상태가 혼합된 포화상태가 되기도 한다.

2.3.2 펌프

응축기에서 나온 저압 그리고 액체 상태의 작동유체 터빈에 공급하기 위한 압력으로 압력을 높이는 역할을 수행한다. 기체의 압력을 높이는데

비하여 액체의 압력을 높이는 과정에서는 상대적으로 적은 에너지가 소비된다. 압력을 높이는 과정에 소비되는 동력을 식으로 표시하면 다음과 같다.

$$W = \frac{\dot{m} \rho g H}{\eta_p} \quad (3)$$

2.3.3 열교환기

열교환기의 설계나 Rating을 위하여 모델링하는데에는 LMTD법이나 ϵ -NTU법이 널리 이용되고 있다. LMTD법은 열교환기의 입출구 조건이 알려진 경우에 유용한 것과 같이 장단점이 있다. 여기에서는, 열교환기의 Rating에서 널리 이용되는 ϵ -NTU법을 적용하여 모델링한다. 여기에 이용되는 주요한 수식은 다음과 같다.

$$NTU = \frac{UA}{\dot{m} c_p} \quad (4)$$

$$\epsilon = f(NTU, C_r)$$

3. 저온 지열발전 사례

지열의 온도가 낮은 저온 지열을 이용하여 발전하는 경우에는 유기랭킨 사이클이 널리 사용되어 왔다. 최근 까지 지열을 이용하여 발전에 적용하는 온도는 95~105℃를 최저 온도로 여겨왔다. 최근 유기 랭킨 사이클을 낮은 온도에서도 열을 흡수하는 데 활용하기 위한 많은 노력이 투자되었다. 알래스카 치나온천에 적용한 랭킨사이클은 지열수의 온도가 74℃보다 낮은 적용사례로서 세계에서 가장 낮은 지열로 발전하는 사례이다.[3]

3.1 알래스카 치나온천의 지열발전

치나 온천은 알래스카의 중부에 걸쳐서 위치한 중저온 지열을 발산하는 환상대에 위치한 온천중의 하나이다. 이 환상대는 시워드(Seward)반도에서 캐나다의 유콘(Yukon)지방에 이르는 알래스카의 중앙을 횡단하며, 여기에 위치한 온천은 대부분 제3기의 심성암체에 위치하고 있다. 주변의 고

온의 암반을 균열을 따라서 순환하고 지열수가 74℃로 지상으로 떠올러지고 있으며, 화학적인 분석에 따르면 121℃까지 상승하였던 것으로 알려져 있다.[4]

현재에는 200kW급의 지열발전기가 2대 설치되어 400kW의 전력을 생산하고 있으나, 위의 분석을 근거로 추가로 개발하여 지열자원을 활용하는 경우에는, 1~10MW의 전력을 생산할 수 있을 것으로 추정하고 있다.[3]

치나 온천에 적용된 PureCycle™은 R134a를 적용하여 74℃의 낮은 온도의 지열을 사용할 수 있도록 하는 것이 특징이며, 이는 세계에서 가장 낮은 지열을 이용하는 발전 시스템으로 알려져 있다.

지열발전 시스템은 응축기가 외기온도가 낮아서 응축수를 구할 수 없는 동절기에는 공냉식을 이용하며, 외기 온도가 상승하는 하절기에는 계곡을 흐르는 물의 온도가 외기온도에 비하여 훨씬 낮으므로 수냉식을 이용하도록 구축되어 있다. 공냉식과 수냉식을 복합한 응축기를 적용하여 지열발전 시스템을 높은 효율에서 운전할 수 있도록 설계한 것이 치나온천 지열발전 시스템의 특징이다.[5]

3.1.1 저온 지열발전기 사양

치나온천의 지열을 원활하게 이용하여 전력을 생산하기 위한 설계점에서 발전시스템에서 유입되고 방류되는 지열원과 응축수의 조건은 다음의 Table 2와 같다.

Table 2. System Design Conditions[6]

항목	지열원	응축수
유입 온도(℃)	73.3	4.4
방류 온도(℃)	54.4	10
유량[LPM]	2,000	6,100

앞에서 선정된 설계 운전조건에서 계산된 지열발전기의 작동유체의 조건과 출력에 관한인자는 다음의 Table 3과 같다.

이 발전기는 원심식 냉동기를 기반으로 제작되었다. 원심식 압축기의 임펠러 대신에 래디얼 터빈으로 교체하고, 팽창변을 펌프로 교체한 것이 외에 나머지 부품을 그대로 사용하는 것을 원칙

으로 개발되었다. 압축기를 구성하는 부품도 대부분이 그대로 사용되었다. 압축기에서 작동유체에 게 운동에너지를 전달하는 역할을 수행하는 임펠러(impeller)가 작동유체의 운동에너지를 회수하는 역할을 수행하는 터빈 휠(turbine wheel)로 사용되며, 냉매의 운동에너지를 압력으로 변환하는 파이프 디퓨저(diffuser)가 터빈시스템의 노즐(nozzle)로 사용되었다고 주장하고 있다.

Table 3. Specification of Generator[6]

항목	설계값
작동유체 유량	12.16 kg/s
터빈 입구 압력	1600 kPa
터빈 출구 압력	438.5 kPa
터빈 발전량	250kW
펌프 소비동력	40kW
시스템 출력	210kW

4. 응축수 온도의 영향

유기 랭킨사이클을 적용하여 지열을 이용하는 지열발전시스템(Fig. 5)은 앞에서 제시된 Fig. 2와 동일한 구조이다. 차이점은 Fig. 2에서 사용된 냉각탑 대신에 지표수등 물을 응축수로 사용하는 점이다. 이로서 응축기와 증발기가 모두 작동유체(R134a)와 물 사이에서 열교환을 수행하는 원통다관식 열교환기가 적용된다.

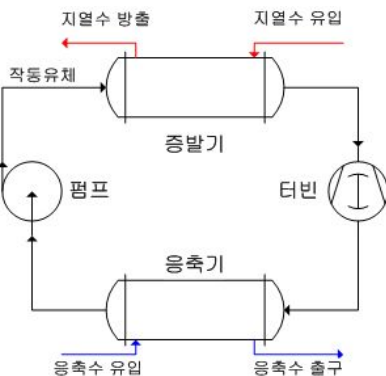


Fig. 5 Geothermal ORC

주어진 운전조건에서 랭킨 사이클의 성능 시뮬레이션에 기존에 발전소나 열병합에서 널리 이용

되는 Thermoflex[7]와 같은 상용프로그램이 적용될 수 있다.

설계 조건에 관련된 인자를 중심으로 유기랭킨시스템의 시뮬레이션을 수행하기 위하여 필요한 사이클 모델링에 관련된 인자를 추출하였다. 여기에서 추출된 인자를 근거로 랭킨 사이클의 시뮬레이션을 수행하였다.

4.1 입력 자료

분석을 위하여 지열발전기로 유입되는 지열수의 유입 온도를 74℃로 지정하였으며, 응축수의 유입온도를 2~22℃로 변환시켜서 응축수의 유입온도가 미치는 영향을 검토하였다.

본 연구에서는 유량은 설계시양과 같은 유량으로 고정하여 수행하였다. 고온의 지열수의 유량은 111(톤/시간)으로 적용하였으며, 저온의 지표수를 이용하는 응축수의 유량은 379(톤/시간)으로 고정하여 적용하였다. 응축수의 온도는 2℃에서 시작하여 4℃씩 증가시켜서 22℃까지 분석을 수행하였다. 펌프의 소비동력은 40kW를 동일하게 적용하였다.

4.2 결과 및 분석

응축수의 온도를 변화시키면서 발전기가 생산하는 총발전량을 구하면 Fig. 6과 같다. 결과를 보면 응축수의 온도가 증가함에 따라서 총발전량이 감소함을 알 수 있다. 여기서 총발전량은 터빈이 생산하는 발전량을 나타내는 것으로서, 랭킨 사이클에서 펌프의 소비동력을 제외하지 않은 값이다.

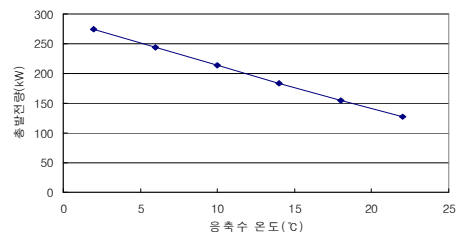


Fig. 6 Effect of Condensing Water Temperature on Produced Turbine Power

여기서 펌프의 소비동력을 제외하면 발전기의 순발전량을 얻을 수 있다. 이와 더불어, 응축수의

온도변화에 따라 지열에너지의 소비량을 변화가 Fig. 7에 제시되어 있다. 응축수의 온도가 증가함에 따라 지열에너지의 소비량이 감소하고 있음을 알 수 있다.

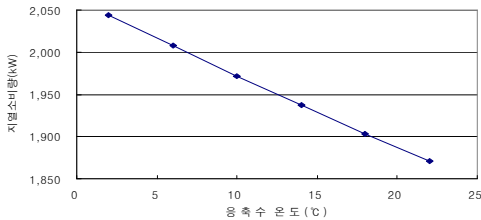


Fig. 7 Effects of Condensing Water Temperature on Consumed Geothermal Energy

응축수 온도가 2°C에서 22°C까지 변할 때, 발전량은 274kW에서 128kW까지 크게 감소하였다. 이와 동시에 전력의 생산에 필요한 지열에너지의 소비량은 2,043kW에서 1,871kW로 완만하게 감소하였다.

여기서 지열발전기의 효율을 구하면 발전기가 생산하는 순발전량을 지열에너지 소비량으로 나누어서 구할 수 있다. 여기서 순발전량은 터빈의 총발전량에서 펌프의 소비량을 제외한 값이다.

위와 같은 방법으로 효율을 구하면 11%에서부터 서서히 감소하다가 온도가 18°C 이상에서는 급격하게 낮아짐을 알 수 있다. 여기서 사용되는 전제 조건중의 하나는 지열에너지와 응축수를 공급하는 펌프를 정량으로 운전한다는 조건이다.

효율을 향상시키기 위해서는 지열수의 유량을 증가시키거나 응축기의 수량을 증가시킬 수 있다고 판단된다. 또한 정격운전 범위의 데이터를 활용하여 인자를 추출한 바 정격 운전범위에서 차이가 증가할수록 데이터의 신뢰도가 낮아지므로, 정확도를 향상시키기 위해서는 더 많은 데이터를 필요로 한다.

5. 결론

저온의 지열수(74°C)를 이용하여 발전을 수행하는 경우에 응축수의 온도는 지열에너지를 이용한 발전량에 큰 영향을 미친다. 또한 응축수의 온도에 따라서 지열발전시스템에도 큰 영향을 미치

는 것을 확인할 수 있다.

응축수의 온도가 증가함에 따라서 응축수의 유량과 지열수의 유량을 증가하면 시스템의 효율을 향상시킬 수 있을 것으로 예상된다.

저온 지열시스템을 도입하는 경우에는 지열수의 온도 뿐만 아니라 응축수로 이용할 수 있는 자원의 온도 및 수량 등의 면밀한 검토가 동반되어야 높은 효율의 지열발전시스템을 구축할 수 있다. 저온 지열발전은 다른 발전에 비하여 효율이 낮은 편이므로 초기 단계에서 심도 깊은 타당성 검토가 필요하며, 시스템을 최적화 하는 것이 매우 중요하다.

국내에서도 본 연구에서 검토한 저온 지열발전이 가능한 자원이 이미 개발되어 있다. 향후 추가 개발을 통하여 그리고 시스템 최적화를 통하여 저온 지열발전의 효율을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- Çengel, Y.A. and Boles, M. A., 2006, *Thermodynamics: An Engineering Approach*, 5th ed, McGraw-Hill
- Decher, R., 1994, *Energy Conversion: Systems, Flow Physics and Engineering*, Oxford University Press
- Erkan, K., et. al., 2007, Thermal Characteristics of the Chena Hot Springs Alaska Geothermal System, Thirty-Second Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford, CA
- Kolker, A., et. al., 2007, Geologic Setting of the Chena Hot Springs Geothermal System, Alaska, Thirty-Second Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford, CA
- Lund, J.W., 2006, Chena Hot Springs, GHC Bulletin, pp. 2~4, September 2006
- Holdman, G., 2007, Chena Geothermal Power Plant Project Final Report, Alaska Energy Authority
- Thermoflex, 2007, Thermoflow, Sudbury, MA (www.thermoflow.com)
- http://www.rise.org.au/