

플래쉬 시스템에 의한 지열 발전 성능해석

이세균*, 우정선**

*충북대학교 기계공학과(leesk@chungbuk.ac.kr), **한국에너지기술연구원(jswoo@kier.re.kr)

A Study of Geothermal Power Production with Flashed Steam System

Lee, Se-Kyoun*, Woo, Jung-Son**

*Dept. of Mechanical Eng., Chungbuk National University(leesk@chungbuk.ac.kr)

** Korea Institute of Energy Research(jswoo@kier.re.kr)

Abstract

Flashed steam system is one of the important geothermal power production methods. In this paper, optimum operations and performances of single and double flash systems are presented.

It is shown that double flash system can produce about 26.5% more power than single flash system. Temperature of geothermal water(T_R) is the most important parameter in the geothermal system. Optimum single and double flash temperatures and net power produced with these optimum conditions are expressed as a function of T_R in this study. Thus net power output from geothermal resources can be estimated with the results of this work. Condenser Temperature(T_{con}) is also important and the net power production can be shown as a function of $T_R - T_{con}$. Volume flow rate per unit power is also to be considered as the condenser temperature decreases.

Keywords : 지열발전(Geothermal Power), 단일 플래쉬 시스템(Single Flash System), 2중 플래쉬 시스템(Double Flash System),

기 호 설 명

h	: 엔탈피(kJ/kg)	T_{FH}	: 고압 플래쉬 온도($^{\circ}C$)
p	: 압력(kPa)	T_{FL}	: 저압 플래쉬 온도($^{\circ}C$)
s	: 엔트로피 ($kJ/kg.K$)	$T_{F,opt}$: 최적 플래쉬 온도($^{\circ}C$)
T	: 온도($^{\circ}C$)	T_R	: 지열수 온도($^{\circ}C$)
T_{con}	: 응축 온도($^{\circ}C$)	W_{net}	: 지열수 단위 질량당 순일(kJ/kgw)
T_F	: 플래쉬 온도($^{\circ}C$)	η_M	: 총괄기계효율

투고일자 : 2008년 08월 07일, 심사일자 : 2008년 08월 25일, 게재확정일자 : 2008년 10월 13일,
교신저자 : 이세균(leesk@chungbuk.ac.kr)

1. 서 론

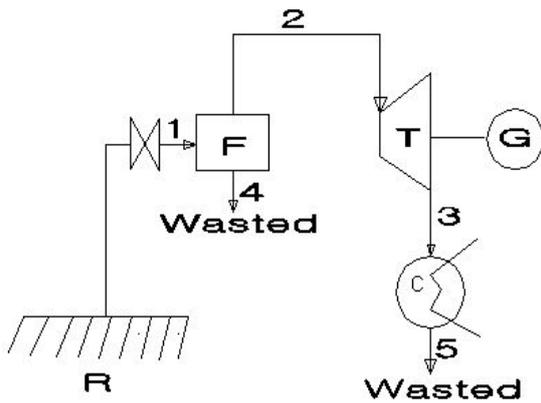
당면한 에너지위기의 타개책 중 하나로 지열발전을 들 수 있다. 지열발전은 고온 지열수를 이용하므로 화산성 지열지역이 아닌 우리나라의 경우에는 그 적용이 쉽지 않으나 EGS (enhanced geothermal system) 기술을 적용한다면 국내에도 지열발전을 할 수 있는 고온 지열수의 생산이 가능할 것으로 예상된다⁽¹⁾. EGS 기술이란 고심도 굴착(약 5 km 이상)을 통하여 고온지열수(150°C - 200°C) 생산을 가능케 하는 기술로 이 기술을 적용할 경우 지역적 한계를 극복하여 어느 지역에서나 지열 발전이 가능하게 된다. 지열발전은 통상 고온수의 경우(약 170°C 이상) 플래쉬 방식에 의하여, 중, 저온수는 바이너리 사이클 방식에 의하여 이루어지며 플래쉬와 바이너리 방식을 복합한 발전방식도 있다⁽²⁾. 플래쉬 과정이란 고압수의 압력을 감소시켜 일부를 증발시키는 과정으로, 여기서 증발된 증기는 터빈을 구동할 수 있다. 이와 같은 플래쉬 지열발전에서는 플래쉬 과정을 한번 거치는 단일플래쉬 시스템과 두 번 거치는 2중플래쉬 시스템이 있다⁽³⁾.

대부분의 지열수는 포화액의 형태로 지중에 존재하며 이 지열수의 발전 잠재력은 액서지에 의하여 산정될 수 있으나⁽³⁾ 실제 발전량은 전환과정중의 비가역손실에 의하여 대폭 감소된다.⁽⁴⁾ 지열발전은 특히 그 성능변화가 관련 변수들에 매우 민감하므로 관련변수의 최적화 및 이에 따른 실제성능의 한계를 파악할 필요가 있다. 본 연구에서는 단일 및 2중플래쉬 시스템에서 지열수온도(T_R)와 복수기온도(또는 응축온도, T_{con})에 따른 최적 플래쉬온도를 규명하고 이에 따른 시스템의 발전성능을 해석하여 지열수로부터 획득할 수 있는 실제 발전가능량을 제시하고자 한다.

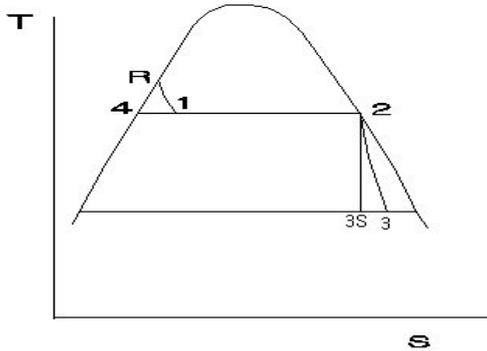
2. 시스템

그림 1은 단일플래쉬 시스템과 이에 따른 $T-s$ 선도를 보이고 있다. 지중으로부터 양수된 지열수는 플래쉬 밸브에서 감압되어 플래쉬 탱크로 유입된 후 포화증기와 포화액으로 분리되어 포화액은 버려지고 포화증기는 터빈을 구동한 후 응축기에서 응축되어 버리게 된다. 버린 포화액은 보통 다시 지중으로 재주입 된다.

플래쉬과정은 등엔탈피 과정이며 지열수가 포화액 상태의 지중으로부터(그림 1의 R 상태) 지표면으로 양수되는 과정에서 부분적인 증발이 발생할 수 있으나 이 과정 역시 등엔탈피 과정에 가까우므로 그림 1에서는 이 두 과정을 합하여 하나의 과정 R-1으로 표시하였다. 그림 1(b)의 R-1과정을 보면 플래쉬 압력(압력 P_1)을 낮출 경우 상태 1에서의 건도 x_1 은 증가하여 더 많은 포화증기의 획득이 가능하나 낮은 압력으로 인하여 상태 2에서 일할 수 있는 단위질량당 잠재력은 감소된다. 이것은 최대일을 얻을 수 있는 최적 플래쉬압력(이에 따른 최적 플래쉬온도 $T_{F,opt}$)이 존재함을 의미한다. 이렇게 분리된 증기는 터빈을 통하여 복수기(condenser)압력(이에 따른 복수기온도 T_{con})으로 팽창되며 이 과정은 그림 1(b)의 2-3으로 표시된다. 이상적인 터빈의 경우 2-3s의 등엔트로피 팽창이 되지만 터빈내의 비가역요인에 의하여 2-3으로 팽창되며 여기서 상태 3의 위치는 터빈의 등엔트로피효율에 의하여 결정되는 실제 상태이다. 터빈동력은 다시 발전기에 의하여 최종생산품인 전기로 전환되며 발전기내에서의 손실은 발전기효율에 의하여 결정된다. 즉, 이 시스템에서는 플래쉬과정에 의하여 획득된 증기로부터 동력을 얻는 과정에서 터빈 및 발전기에서의 손실이 주요 비가역손실이 되나 지열시스템에서는 이 외에 지열수 이송에 따른 약간의 펌프동력 등이 소요되며 따라서 본 연구에서는 분리된 증기로



(a)

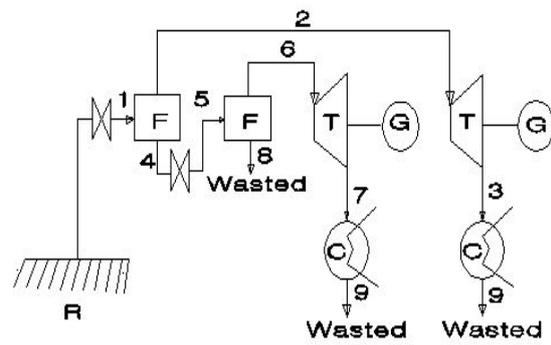


(b)

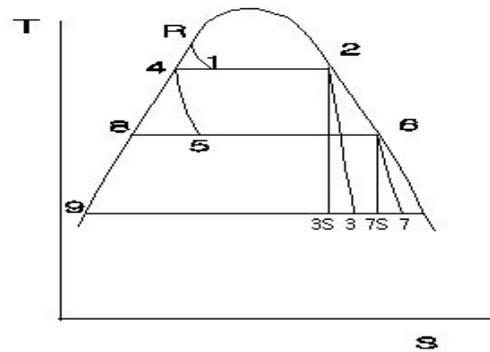
그림 1. (a) Schematic and (b) T-s diagram of single flash system (C: condenser, F: flash tank, G: generator, R: resource, T: turbine)

부터 최종 발전까지의 변환과정을 나타내는 시스템의 총괄기계효율 η_M 이란 개념을 적용한다. 포화증기를 이용하는 터빈의 등엔트로피 효율은 0.7수준이며 여기에 발전기효율(0.94 적용)을 고려하고 기타 소량의 펌프손실등을 고려하여 본 연구에서는 $\eta_M=0.65$ 를 적용하였다. 따라서 그림 1(b)의 R 상태의 지열수 단위질량에 의하여 최종 생산되는 순 일 W_{net} (단위는 kJ/kgw 사용)는 그림 1의 각 상태를 기준하여 표현하면 다음과 같다.

$$W_{net} = x_1(h_2 - h_{3s})\eta_M \quad (1)$$



(a)



(b)

그림 2. (a) Schematic and (b) T-s diagram of double flash system (C: condenser, F: flash tank, G: generator, R: resource, T: turbine)

그림 2에서는 2중플래쉬 시스템의 개략도와 이에 따른 $T-s$ 선도를 보이고 있다. 여기서는 첫 번째 플래쉬 탱크에서 분리된 포화액(상태 4)을 4-5과정으로 다시 플래쉬 시켜 상태 6의 포화증기를 추가로 획득하며 이 증기가 6-7과정의 터빈팽창을 통하여 추가동력을 생산한다. 따라서 이 시스템에서는 2개의 플래쉬온도 T_{FH} (상태 1의 포화온도)와 T_{FL} (상태 5의 포화온도)을 최적화 시키므로써 시스템의 성능을 극대화 할 수 있다. 여기서도 상태 8의 포화액과 터빈 팽창 후 응축기에서 응축된 포화액은 그림에서는 버리는 것으로 표현되었으나 대부분 지중으로 재주입 된다. 그림 2(b)의 R상태의 지열수 단위질량에 의하여

최종 생산되는 순 일 W_{net} 은 그림 2의 각 상태를 기준하여 표현하면 다음과 같다.

$$W_{net} = [x_1(h_2 - h_{3s}) + x_5(1 - x_1)(h_6 - h_{7s})]n_M \quad (2)$$

플래쉬 과정이 2중 이상으로 더욱 추가될 수도 있으나 성능향상은 장치비에 비례하여 증가하지는 않으므로 통상 2중플래쉬 이상은 사용하지 않는다.

3. 성능 해석

증기에 관한 컴퓨터식⁽⁵⁾을 이용하여 식 (1), (2)를 수치적으로 계산할 수 있다. 이 계산결과를 이용하므로써 단일 및 2중 플래쉬 시스템의 최적성능을 계산할 수 있으며 다음에 그 결과를 제시한다.

3.1 단일플래쉬 시스템

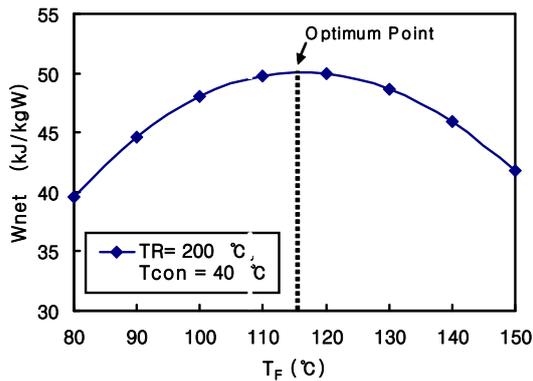


그림 3. Flash temperature vs. work produced for single flash system

그림 3에서는 식 (1) W_{net} 의 이 플래쉬온도 T_F 에 따라 어떻게 변하는지를 보여준다. 플래쉬온도가 높으면 식 (1)의 x_1 이 감소하고, 플래쉬온도가 낮으면 식 (1)의 $h_2 - h_{3s}$ 가 감소하므로 이에 따른 최적 플래쉬온도 $T_{F,opt}$

가 존재하게 된다. 여기서는 그림 3에서 보이는 바와 같이 $T_{F,opt} = 116^\circ C$ 로 결정된다. 이 최적값은 지열수온도인 T_R 뿐 아니라 복수기 온도 T_{con} 에도 관계되며 따라서 그림 4에서는 T_R 과 T_{con} 에 따른 $T_{F,opt}$ 의 변화를 보여준다. 여기서 $T_{F,opt}$ 의 변화경향을 보면 T_R 또는 T_{con} 의 변화량의 약 절반정도의 변화를 보이며 함께 증가 또는 감소해 나가는 특성을 나타내고 있다. 또한 그림 4에서는 우측 종축을 통하여 식(1)로부터 계산된 최적상태에서의 W_{net} 의 값을 나타내었다. 여기서 보면 W_{net} 은 T_R 이 증가함에 따라 그 증가율이 커지며 따라서 지열시스템에서 T_R 의 중요성을 인식할 수 있다. 또한 T_{con} 이 감소할 때도 W_{net} 은 증가해 나가며 그 증가폭에 관한 T_R 또는 T_{con} 의 영향은 거의 비슷한 것으로 보인다. 이것은 W_{net} 이 T_R 과 T_{con} 의 차이인 $T_R - T_{con}$ 의 함수로 나타날 수 있음을 의미하며 이에 관해서는 3.3절에서 다시 논하기로 한다. 이와 같이 지열발전은 $T_R - T_{con}$ 이 클수록 유리하다. 여기서 T_R 은 지열 사이트의 주어진 조건으로 조절의 가능성이 없으나 T_{con} 은 냉각수의 가용 여부에 따라 다소의 조절이 가능하다.

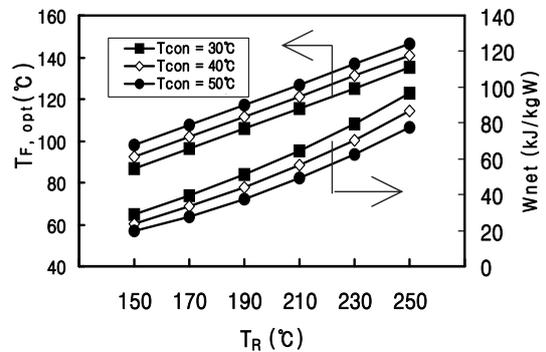
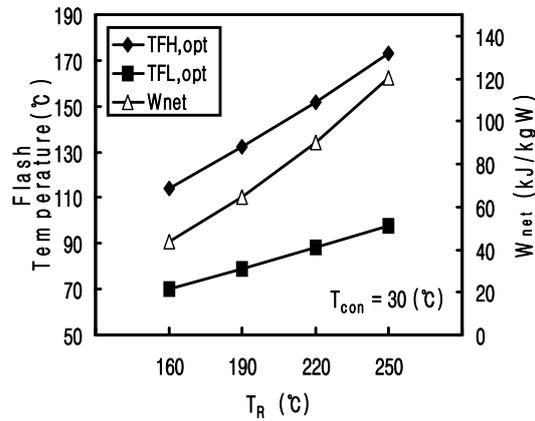
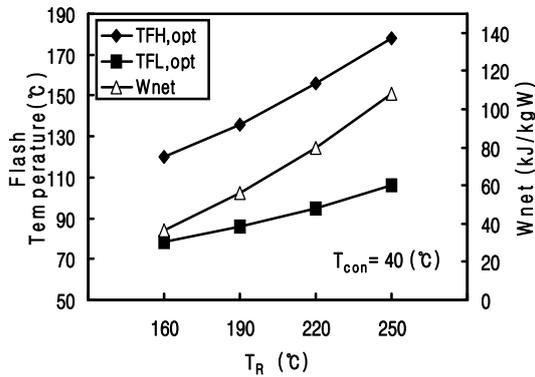


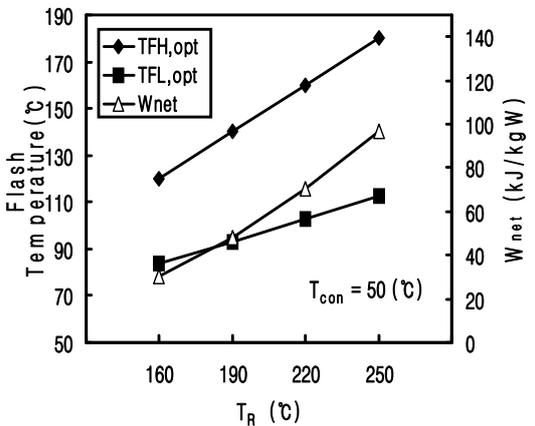
그림 4. $T_{F,opt}$ and W_{net} as functions of T_R and T_{con} for single flash system



(a)



(b)



(c)

그림 5. Optimum flash temperatures and W_{net} of double flash system as a function of T_R for (a) $T_{con} = 30^\circ\text{C}$, (b) $T_{con} = 40^\circ\text{C}$ and (c) $T_{con} = 50^\circ\text{C}$

그러나 저압 포화증기를 사용하는 지열발전에서는 T_{con} 이 낮으면 생산되는 동력에 비하여 복수기에서 처리해야 할 증기의 체적유량(즉, 터빈 출구의 체적유량)이 지나치게 높아지는 등 문제점이 있으며 이에 관해서도 3.3절에서 다시 논의한다.

그림 3의 최적점을 기준으로 볼 때 약 $\pm 10^\circ\text{C}$ 사이에서의 성능의 변화는 비교적 완만한 것으로 나타났다. 이것은 실제 시스템 설계시 필요하면 최적점에서 다소의 이탈이 허용될 수 있음을 의미하기도 한다.

3.2 2중 플래쉬 시스템

2중플래쉬 시스템에서는 두개의 플래쉬 온도인 T_{FH} 와 T_{FL} 을 최적화 하여야 식 (2)로 표현되는 W_{net} 을 최대화 할 수 있다. 여기서는 식 (2)를 수치화한 프로그램을 이용하여 T_{FH} 와 T_{FL} 에 관한 2차원 격자탐색(grid search)을 통하여 최적값을 산출할 수 있다. 격자탐색이란 T_{FH} 를 최소값에서 최대값까지 범위를 정하여 일정간격으로 증가시켜가며 각각의 T_{FH} 에 대하여 T_{FL} 또한 최소값에서 최대값까지 범위를 정하여 일정 간격으로 증가시키며 각각의 T_{FH} 와 T_{FL} 에 관하여 식(2)로부터 W_{net} 을 계산하고 비교하여 W_{net} 이 최대가 되는 최적점을 찾게 되는 방법이다.

그림 5에서는 이렇게 구해진 최적온도 $T_{FH,opt}$ 와 $T_{FL,opt}$ 및 이에 따라 식(2)로부터 계산된 W_{net} 을 T_R 의 함수로 나타내었다. 물론 여기에서도 복수기온도 T_{con} 은 중요하며 $T_{con} = 30^\circ\text{C}$, 40°C , 50°C 의 각각에 관하여 그래프로 나타내었다.

여기서도 W_{net} 은 단일플래쉬 시스템과 마찬가지로 T_R 이 증가할수록 그 증가율이 커지며 이것은 지열시스템에서의 T_R 의 중요성을 말해주는 것이다. 또한 T_{con} 에 따른 변화도 적지 않

게 나타나며 따라서 W_{net} 은 $T_R - T_{con}$ 에 의하여 결정된다고 볼 수 있다.

3.3 성능비교

위에서 언급한 바와 같이 W_{net} 은 $T_R - T_{con}$ 에 따른 변화 특성을 보이므로 그림 6에서는 본 연구의 조사범위 내에서 계산한 단일 및

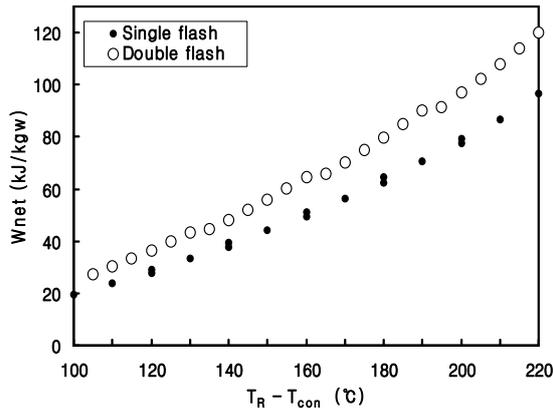


그림 6. W_{net} vs. $T_R - T_{con}$ for single and double flash system

2중 플래쉬 시스템의 성능을 $T_R - T_{con}$ 에 관하여 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 다소의 불규칙한 변화가 일부 있기는 하나 전체적으로 보면 $T_R - T_{con}$ 의 함수형태로 변화 경향을 보이고 있으며 이 온도차가 커질 수록 성능증가율은 커진다. 시스템의 성능은 단일 플래쉬 보다 2중플래쉬에서 월등히 높아 약 25-30%(평균 26.5%) 정도의 성능증가를 보이고 있다.

복수기 온도가 낮으면 출력은 증가하나 수증기는 포화압력이 낮을수록 비체적이 급격히 증가하는 특성이 있어 T_{con} 의 감소에 따른 체적유량의 증가도 고려해 보아야 한다. 그림 7은 단위출력에 필요한 증기의 체적유량을 T_{con} 과 T_R 에 관하여 나타내었다. 여기서 체적유량은 비체적이 가장 큰 터빈출구(즉, 복수기 입구)를 기준으로 하여 단일플래쉬에서

는 그림 1의 상태 3, 2중플래쉬에서는 그림 2의 상태 3과 7의 비체적으로부터 계산된 값이다. 단위출력에 필요한 체적유량은 시스템의 상대적 크기와 관련된 인자로 저압의 포화 증기가 동력원이 되는 지열시스템에서는 특히 고려해야 할 요인이 된다. 그림 7에서 보면 T_{con} 을 $50^{\circ}C$ 에서 $30^{\circ}C$ 로 낮출 경우 체적유량은

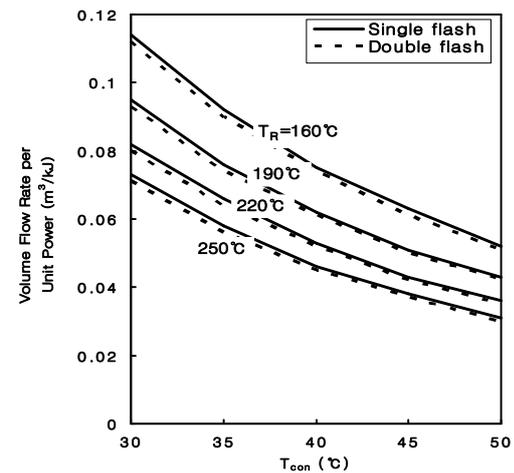


그림 7. Volume flow rate per unit power as a function of T_{con} for given T_R

약 2.2-2.5배 수준으로 증가하며 특히 T_R 과 T_{con} 이 함께 낮아지면 체적유량은 급격히 증가한다. 이러한 관점에서 보더라도 지열 발전에서는 T_R 값이 높으면 매우 유리하며, 복수기 온도로는 $T_{con} = 40 \sim 45^{\circ}C$ 정도가 통상 합리적인 온도범위에 속한다. 그림. 7에서는 2중 플래쉬 시스템의 체적유량도 나타나 있으나 단일 플래쉬에 비하여 약간 낮기는 하지만 그 차이가 매우 적음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구를 통하여 단일 및 2중 플래쉬 시스템의 최적 플래쉬온도 및 이에 따른 최적성능 (W_{net})이 규명되었다. 해석 결과에 의하면 2

중 플래쉬 시스템의 성능은 단일 플래쉬에 비하여 약 26.5% 정도의 향상을 보였다. 시스템의 성능은 T_R 이 높을수록, 또는 T_{con} 이 낮을수록 향상되며 따라서 $T_R - T_{con}$ 에 따라 변화해 나간다고 볼 수 있다. 그러나 T_{con} 이 낮아지면 처리해야 할 체적유량이 급격히 증가함도 고려되어야 한다. 단위 출력당 소요되는 체적유량의 경우는 두 시스템(단일 및 2중 플래쉬) 사이에서 거의 차이를 보이지 않았다.

시스템의 운전은 최적상태(즉, 최적 플래쉬 온도)하에서 하는 것이 가장 바람직 하지만 최적점 부근의 변화가 비교적 완만하므로(그림 3 참조) 실제 설계시 필요하다면 최적점에서 다소 이탈되어도($\pm 10^\circ\text{C}$ 범위 이내) 성능에 큰 변화는 초래되지 않을 것이다.

후 기

이 논문은 2007년도 충북대학교 학술연구 지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

1. 권정태, "200kW급 지열발전 시스템", 설계 엔지니어를 위한 지열 냉난방 시스템 소개, 고려대학교, pp.97-108, 2007.
2. Kanoglu, M. and Cengel, Y. A., "Retrofitting a Geothermal Power Plant to Optimize Performance : A Case Study", ASME J. Energy Res. Tech. Vol. 121, pp. 295-301, 1999.
3. Bodvarsson, G. and Eggers, D. E., "The Exergy of Thermal Water", Geothermics, Vol. 1, No. 3, pp. 93-95, 1972.
4. Dagdas, A., "Performance Analysis and Optimization of Double Flash Geothermal Power Plants", ASME J. Energy Res. Tech., Vol. 129, pp. 125-133, 2007.

5. Thomas F. and Peter E., Steam and Gas Tables with Computer Equations, Academic Press, Inc. Orlando, FL, 1984.