

지열발전 플랜트 기술

장기창*, 백영진**

*한국에너지기술연구원 책임연구원, **선임연구원

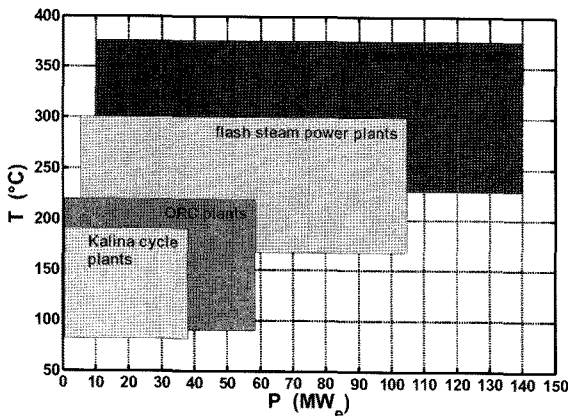
1. 서론

지열발전 방식은 전통적으로 건증기(dry steam), 플래시증기(flash steam) 및 바이너리(binary cycle) 방식의 3가지로 나누어 설명되어 왔는데, 최근에는 EGS (Enhanced Geothermal System) 기술의 발전으로 초임계(supercritical) 사이클 방식이 새로이 제안되었다.

어떤 방식을 적용할지는 주로 추출된 지열수(또는 증기)의 온도에 의해 결정된다. 그림 1은 발전 규모와 지열원의 온도에 따른 전통적인 지열발전 방식을 나타내었다. 그림에서 ORC(Organic Rankine Cycle) 플랜트와 Kalina cycle 플랜트

는 바이너리 방식에 해당하며, 지열원의 온도가 높으면 그만큼 이용 가능한 에너지의 양이 많다는 의미이므로 대규모의 발전이 가능하다. 초임계(supercritical) 사이클 방식은 EGS(Enhanced Geothermal System) 기술과 접목하여 사용할 수 있는 것으로, 지열수의 온도와 압력이 임계점(374℃, 22 MPa) 이상인 경우에 고려가 가능하다.

표 1의 지열발전 방식별 용량기준 점유율을 살펴보면, 전세계적으로 2010년 1월까지 526기의 지열발전 플랜트가 건설되었는데(총 용량은 10,715MWe), 이 중에서 1단 플래시증기(single flash steam) 방식이 41%, 2단 플래시증기(double flash steam) 방식이 20%를 차지하고 있어, 플래시증기 방식이 가장 많이 보급되었다. 뒤를



[그림 1] 발전 규모와 지열원 온도에 따른 지열발전 방식 (C. Clauser, 2006)

<표 1> 세계 지열발전 플랜트 발전방식별 현황 (2010년 1월 기준)

Plant type	Installed Capacity		Installed Number of Unit	
	MWe	%	No. Units	%
Dry Steam	2,878	27	62	12
Single-flash	4,421	41	141	27
Double / Triple-flash	2,092	20	61	11
Binary	1,178	11	236	45
Back Pressure	145	0	25	5
Total	10,715	100	526	100

이어 건조증기 방식이 27%, 바이너리 방식이 11%, 역압(back pressure) 방식이 1%의 점유율을 보이고 있다.

한편, 지열발전 방식별 플랜트수 기준으로 볼 때 전체 526기의 플랜트 중 바이너리 방식이 236기(45%)를 차지하고 있어, 플랜트의 수만 보면 바이너리 플랜트가 플래시증기 플랜트(202기, 38%) 및 건조증기 플랜트(62기, 12%)보다 점유율이 높음을 알 수 있다.

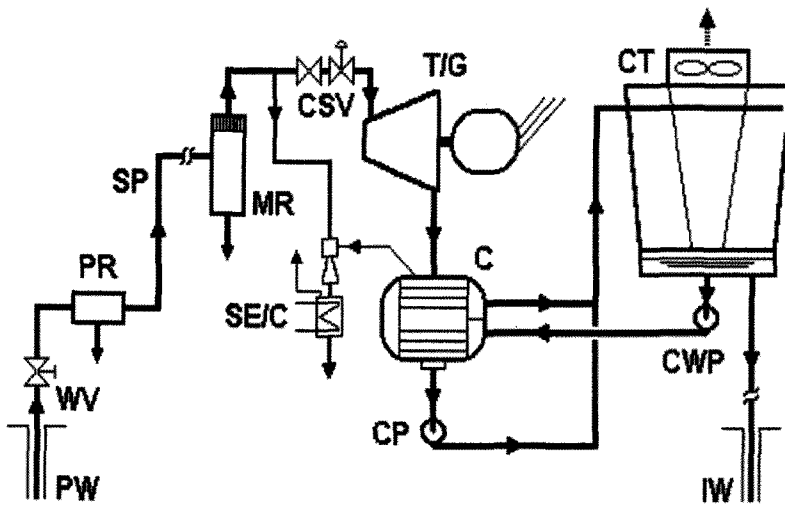
2. 지열발전 플랜트

2.1 건조증기(dry steam) 발전 플랜트

어떤 지열발전 방식이든 터빈의 날개차를 회전시키기 위해서는 기체 상태의 작동유체가 필요한데, 추출된 증기의 온도가 충분히 높아 과열도가 큰 증기 상태라면 그림 2와 같은 건조증기 방식을 이용하여 전기를 생산한다. 즉, 관정으로부터 나오는 증기를 발전설비의 터빈으로 직접 보내 발전한다. 세계 최대 규모의 The Geysers도 이 방식을 채택하고 있다.

지하로부터 추출된 건조증기는 필터링 및 습기 제거 과정을 거친 후 터bin으로 들어가게 되고, 터bin을 돌린 후 응축기에서 액체 상태로 된 다음 주입정(injection well)을 통해 지하로 들어가게 된다. 일반적으로, 추출된 증기는 CO² 또는 황화수소(H₂S; hydrogen sulfide) 등의 불응축가스를 소량(2 ~ 10%) 함유하고 있으므로, 이들을 시스템으로부터 제거하기 위한 설비가 필요하다. 만약 이들을 제거하지 않을 경우, 응축 압력이 높아지게 되고, 이는 전체 시스템의 효율을 저하시키게 된다. 일반적으로 2단 증기 이젝터를 사용하여 불응축가스를 처리하는데, 특별한 경우에는 진공펌프가 필요한 경우도 있다.

직접 접촉식(direct contact) 응축기도 종종 사용하긴 하는데, 황화수소에 대한 환경 규제를 만족시키지 못할 우려가 있는 등, 불응축가스가 반드시 처리되어야 하는 경우에는 사용하지 않는다. 이러한 경우에는 화학설비를 추가하여 황화수소를 제거한다. The Geysers의 대부분 유닛들도 이와 같은 설비를 하여 지열발전과 동시에 황(sulfur)을 부산물로 생산하고 있다.(R. DiPippo,



CP: 응축수펌프, CSV: 유량조절밸브, IW: 주입정, MR: 수분제거기, SE/C: 증기이젝터/응축기, SP: 증기배관, T/G: 터bin/발전기, C: 응축기, CT: 냉각탑, CWP: 냉각수펌프, PW: 추출정, WV: 우물헤드밸브, PR: 이물질제거기

[그림 2] 건조증기 방식 발전 개념도(R. DiPippo, 1998)

1999)

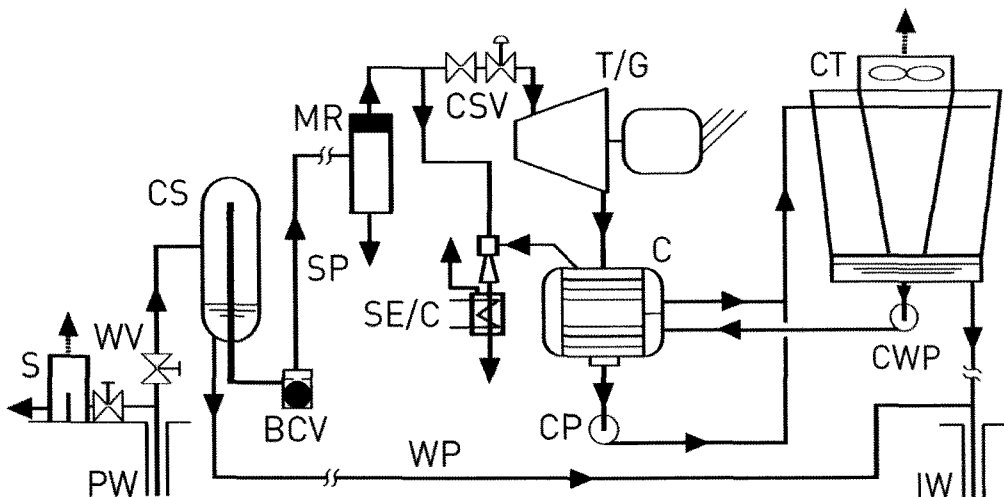
그림 2는 수냉 응축기의 사용 예에 해당하는데, 증기 응축수를 냉각탑의 냉각수로 활용하기도 한다. 이 과정에서 증기 질량의 10 ~ 20%에 해당하는 응축수 초과량이 발생하는데, 이는 주입공을 통해 지하로 주입시킨다. 하지만 이 방법으로 오랜 기간 시스템을 운전하게 되면 열원 증기가 고갈될 우려가 있으므로, 고갈 방지를 위해 더 많은 양의 물을 지하로 주입시킬 방법들을 연구하고 있다(Voge et al., 1994 and Cappetti et al., 1994). 한편, 공랭 응축기를 사용할 경우 응축수를 100% 지하로 되돌려 보낼 수 있지만 경제성 확보가 어렵다.

2.2 플래시증기(flash steam) 발전 플랜트

플래시증기 방식은 오늘날 가장 일반적인 지열 발전의 형태다. 이는 우리가 알고 있는 대부분의 지열수가 액상에 가깝기(liquid-dominated) 때문이며, 일반적으로 생산정 출구에서 지열수의 건도(quality)는 10 ~ 50% 정도이다. 2상 유체를 직접 이용한 발전 실험이 수행되기도 하였으나

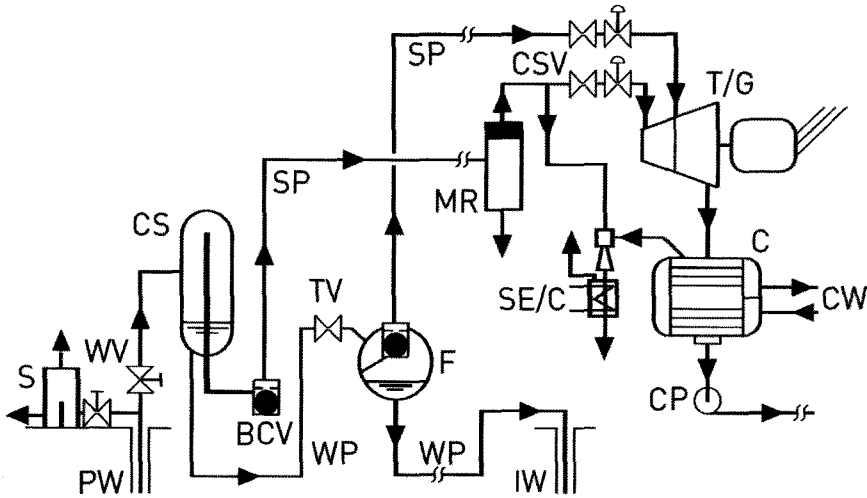
증기만을 추출하여 증기터빈을 구동하는 것이 일반적인 방법이다. 보어홀 출구(well head) 압력은 5 ~ 10 기압 정도(포화온도로 약 150 ~ 180 °C)로써 그다지 높지 않으므로, 기-액간 밀도 차이가 커서 원심방식으로 효과적으로 둘을 분리할 수 있다. 고효율 원심분리기를 이용하면 건도 99.99%의 증기를 추출할 수 있는 것으로 알려져 있다(Lazalde-Crabtree, H., 1984). 분리된 물은 다른 용도로 직접 사용되거나, 혹은 한번 더 팽창시켜 저압터빈을 구동하는데 사용될 수 있다. 전자의 경우와 같이 터빈이 하나만 사용되는 경우를 **그림 3**과 같이 1단 플래시증기(single flash) 방식이라 하며, 후자의 경우와 같이 고압터빈과 저압 터빈이 함께 사용되는 경우를 **그림 4**와 같이 2단 플래시증기(double flash) 방식이라 한다.

동일한 지열수 유량에 대하여, double flash 방식의 경우 single flash 방식에 비해 약 20 ~ 25%의 출력을 더 얻을 수 있다. 그러나, flash vessel, 추가 배관, 추가 제어밸브 및 다단 터빈을 사용해야 하므로, 초기 투자비가 증가한다.



BCV: 볼체크밸브, CP: 응축수펌프, CSV: 유량조절밸브, IW: 주입정, MR: 수분제거기, CS: 원심분리식 기/액 분리기, S: 소음제거기, SE/C: 증기이젝터/응축기, SP: 증기배관, T/G: 터빈/발전기, C: 응축기, CT: 냉각탑, CWP: 냉각수펌프, PW: 추출정, WV: 우물헤드밸브, WP: 수배관

[그림 3] 1단 플래시증기 방식 발전 개념도(R. DiPippo, 2005)



BCV: 볼체크밸브, CP: 응축수펌프, CSV: 유량조절밸브, IW: 주입정, MR: 수분제거기, CS: 원심분리식 기/액 분리기, F: 플래셔, TV: 교축밸브, S: 소음제거기, SE/C: 증기이젝터/응축기, SP: 증기배관, T/G: 터빈/발전기, C: 응축기, CT: 냉각탑, CWP: 냉각수펌프, PW: 추출정, WV: 우물헤드밸브, WP: 수배관

[그림 4] 2단 플래시증기 방식 발전 개념도(R. DiPippo, 2005)

2.3 바이너리(binary) 발전 플랜트

전술한 바와 같이, 지하로부터 얻은 것이 건조증기이면 건조증기 방식을 이용하여 발전할 수 있다. 한편, 약 180°C 이상되는 고온수(liquid-dominated)를 얻을 수 있으면 이를 팽창시켜 증기를 만든 후 터빈을 돌리는 방법, 즉 플래시증기 방식을 이용하여 발전할 수 있다. 그러나, 이보다 낮은 온도의 중온수(150°C 이하)가 얻어지는 경우에는 팽창시킨다 해도 경제성이 확보될 수 있을 만큼 충분한 양의 증기를 얻기 어렵다. 이러한 경우에는 물보다 낮은 온도에서도 증기 상태가 될 수 있는 다른 작동유체를 이용하여 터빈을 돌리는 방법이 필요하며, 이것이 바이너리(Binary) 방식의 원리이다.

즉, 건조증기 방식 및 플래시증기 방식은 지하에서 추출한 고온수나 증기를 직접 이용하여(작동유체로 사용하여) 터빈을 돌리나, 바이너리 방식의 경우 지하에서 추출된 중온수(80~120°C)가 터빈에 직접 접촉하지 않고 또 다른 작동유체(working fluid)를 증발시키는 데 이용된다. 이때

열교환기를 이용하게 되고, 열교환이 이루어진 작동유체가 증발하여 터빈을 돌리는 방식이다. 이 방식의 가장 큰 장점은 낮은 온도의 유체를 열원으로 사용하여 발전을 할 수 있다는 점이다.

세계적으로 최저온 지열발전이 이루어지고 있는 곳은 미국 알래스카(Alaska)의 Chena Hot Spring 지역이다. 이 지역에서는 1998년 처음으로 시추가 이루어진 이래 2004년부터 약 75°C의 지열수를 이용하여 바이너리 지열 발전을 하고 있다.

이외에도 지열수에 다량의 가스가 함유되어 있거나, 부식성이 강하거나, 또는 오염(scalding)의 우려가 있는 경우에도 바이너리 방식이 사용될 수 있다. 기록에 따르면, 이탈리아의 Lardarello에 위치한 세계 최초의 상용 지열발전 시스템(since 1904)도 원리적으로는 바이너리 방식이었다고 한다. 지하로부터 추출한 증기를 이용, 지상의 청수(clean water)를 증발시켜 증기터빈을 돌리는 방식이었는데, 이는 당시의 재료 기술로는 부식성 있는 스팀으로 직접 터빈을 돌리는 것이

어려운 일이었기 때문이다.

바이너리 사이클에서 2차 유체를 적절히 선택함으로써 85~170℃ 범위의 지열수를 이용할 수 있다. 이용 가능한 온도의 상한은 유기 작동유체의 열적 안정성에, 하한은 기술과 경제적인 요소에 좌우된다. 즉, 하한보다 낮은 온도에서는 열교환기의 크기가 증가하여 경제성이 없다.

바이너리 지열발전 플랜트는 소형 개별 유닛(modular unit)으로 시공되며, 이 개별 유닛의 용량은 보통 수백 kW에서 수 MWe 수준이다. 이러한 개별 유닛들을 연결하면 수십 MWe급의 바이너리 지열발전 플랜트를 완공할 수 있다. 플랜트 건설비용은 여러 요인에 의해 좌우되지만, 특히 지열수의 온도에 크게 좌우된다. 또한 지열수의 온도는 터빈, 열교환기, 냉각탑 등의 크기에 영향을 미친다. 개별 유닛을 여러 개 연결하기 때문에 플랜트의 총 용량이 발전 단가에 미치는 영향은 미미하다.

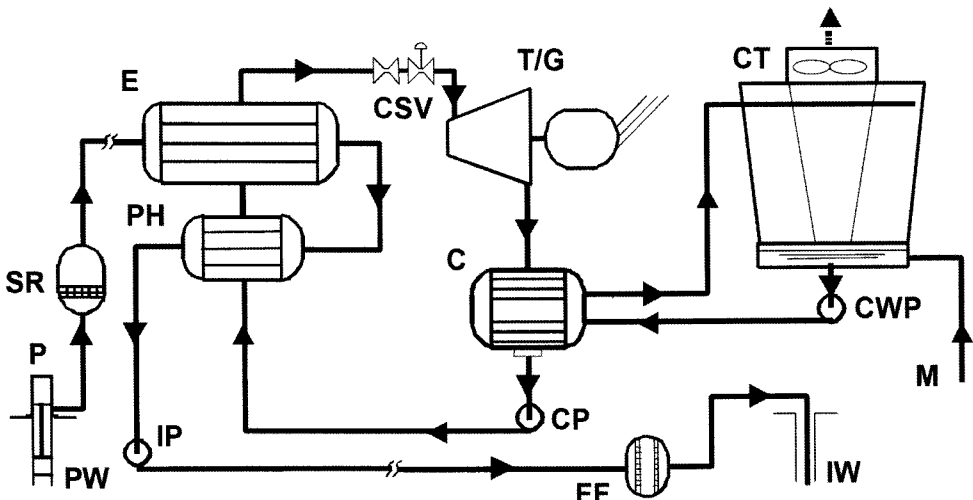
전 세계 지열발전 분야의 최근 동향을 보면, 바이너리 사이클 지열발전 플랜트의 설치 사례가 증가하고 있다. 비교적 작은 용량(1 MWe 이하)

의 플랜트 건설이 추세이며, 용량이 작기 때문에 전술한 바와 같이 모듈(modular) 또는 패키지(package) 형태로 시공된다. 이는 플랜트 건설에 소요되는 시간을 줄이는 데 한 몫을 한다.

바이너리 사이클 지열발전은 고온의 증기를 이용하는 방식보다 효율이 상대적으로 낮기 때문에, 지역난방(district heating)과 연계한 열병합발전 방식을 채택하여 경제성을 확보하고 있다.

2.3.1 유기랭킨 사이클(ORC; Organic Rankine Cycle)

현재의 바이너리 방식에 적용되는 사이클 기술은 유기 작동유체를 사용한 랭킨 사이클 방식 또는 칼리나(Kalina) 사이클 방식이다. 이 중 유기 작동유체를 사용한 랭킨 사이클을 ORC(Organic Rankine Cycle)라 하는데, 대표적인 유기 작동유체는 할로겐화 탄화수소(halogenated hydrocarbons; 프레온 등), 프로판, 이소부탄, 펜탄 등이다. 그림 5에 ORC 방식 발전 개념도를 나타내었다. 발전 설비는 예열기, 증발기, 제어밸브, 터빈-발전기, 응축기 및 펌프 등으로 구성된다. 현



C: 응축기, CP: 응축수펌프, CSV: 유량조절밸브, CT: 냉각탑, CWP: 냉각수펌프, E: 증발기, FF: 최종필터, IP: 주입펌프, IW: 주입정, M: 보충수, P: 펌프, PH: 예열기, PW: 추출정, T/G: 터빈/발전기

[그림 5] ORC 방식 발전 개념도(R. DiPippo, 2005)

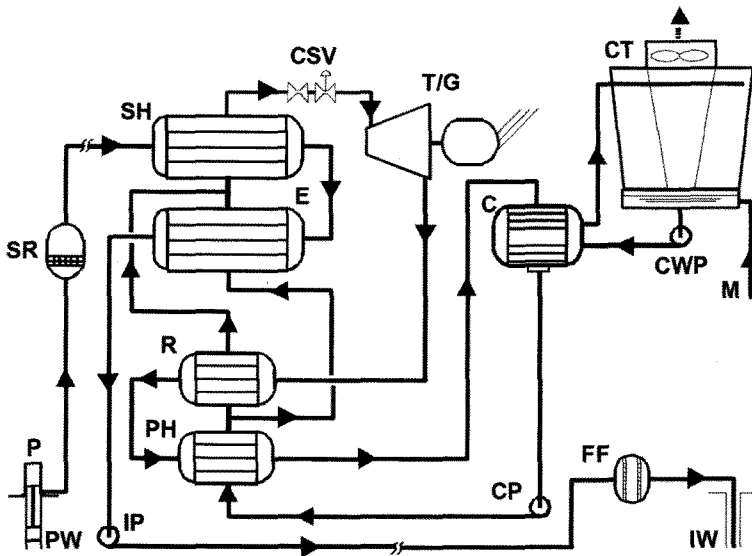
장 여건에 따라 공기 또는 물이 냉각 용도로 사용된다. 물을 이용하는 냉각방식을 사용하려면 보충수원이 별도로 필요한데, 이는 건조증기 방식 또는 플래시증기 방식과는 달리 지열 증기의 응축수가 발생하지 않기 때문이다(대부분의 바이너리 시스템은 지열수 펌프를 사용하는데, 지열수는 생산장에서 부터 주입정에 이르기까지 전 과정에서 액체 상태를 유지한다).

유기 작동유체를 이용한 바이너리 지열발전의 시초는 1967년 러시아 캄차카 반도의 Paratunka에 건설된 러시아 최초의 지열발전 플랜트이다. 이 플랜트는 81°C의 비교적 낮은 온도의 지열수를 이용하여 2차 작동유체인 R-12를 증발시켜 터빈을 구동하였다. 이 플랜트는 또한 전력 생산과 열에너지의 동시이용(cascade use) 개념을 적용하였다. 기본 임무는 전기 생산이지만, 2차 유체의 증발을 위해 에너지를 사용한 지열수를, 즉 81°C에서 45°C로 온도가 낮아진 지열수를 플랜트 주변에 있는 온실(green house)의 토양 온도를 올리는 데 다시 사용함으로써 총 에너지 이용 효율을 높였다.

2.3.2 칼리나 사이클(Kalina Cycle)

비교적 최근에는 그림 6과 같은 칼리나 사이클(Kalina cycle) 기술을 지열발전 플랜트에 적용시키려는 시도가 이루어짐으로써, 바이너리 발전 효율 향상에 새로운 전기가 마련되었다.

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. 개발 초기에는 복합 발전용 하부 사이클의 새로운 대안으로서 주목을 받았으며, 이후 다양한 조건에 대한 개량이 이루어져 KCS(Kalina Cycle System) 5, KCS



[그림 6] 칼리나 사이클(Kalina cycle) 발전 개념도(R. DiPippo, 1999)

11, KCS 12, KCS 34g, KCS 1D2r2 등 여러 목적에 특화된 사이클 기술이 개발되기도 하였다.

이러한 칼리나 사이클은 원리적 우수성으로 인하여, 지열발전뿐만 아니라 해양온도차발전(OTEC; Ocean Thermal Energy Conversion) 및 폐열발전 등 저온도차 발전에 적용 시도되고 있다. 가까운 일본의 경우에도 큐슈의 사가대학이 R-22와 암모니아를 작동유체로 사용하는 75kW 출력의 OTEC 발전 시스템을 갖추고 연구를 진행하고 있으며(김남진 등, 2007), Sumitomo Metal Industries사의 Kashima Steel Works는 제철공장의 전환기로부터의 배가스를 냉각시키는데 사용된 저온 폐수를 열원으로 이용하는 발전시스템으로 1999년 9월 운전을 시작하여 연간 약 6,600 kl의 원유에 상응하는 양의 에너지를 절감한 바 있다.

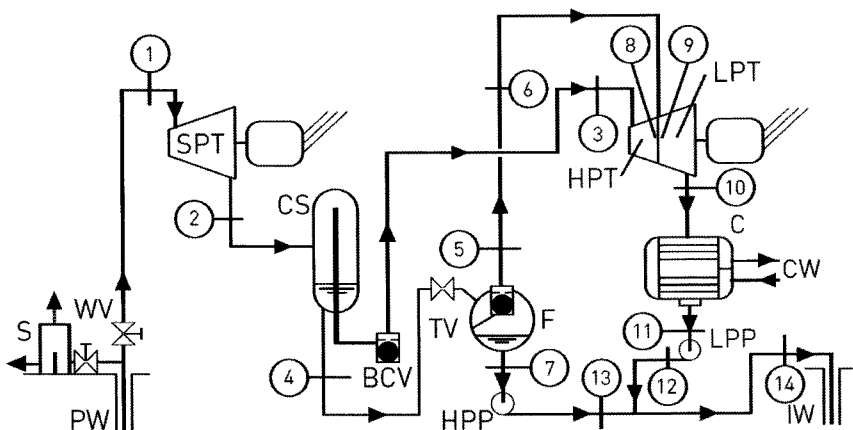
2.4 초임계(supercritical) 사이클 방식 발전 플랜트

이상에서 전통적인 지열발전 방식으로서 건증기(dry steam), 플래시증기(flash steam) 및 바이너리(binary cycle) 방식의 3가지를 살펴보았다. 최근에는 EGS (Enhanced Geothermal System) 기술의 발전으로 초임계(supercritical) 사

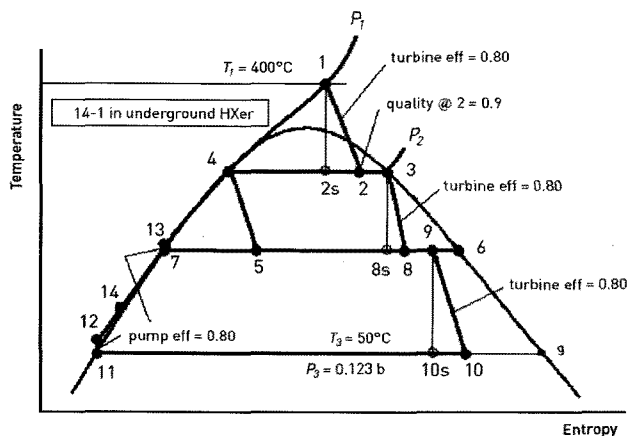
이클 방식이 새로이 제안되었다.

초임계(supercritical) 사이클 방식은 지열수의 온도와 압력이 임계점(374℃, 22 MPa) 이상인 경우에 고려가 가능한 기술로서, EGS(Enhanced Geothermal System) 기술과 접목하여 사용할 수 있다. 그림 7 및 그림 8에 EGS(Enhanced Geothermal System) 지열수를 위한 3단 팽창 사이클 개념도 및 T-s 선도를 나타내었다. 이 사이클은 원리적으로 2단 플래시증기 사이클 위에 터빈을 통한 초임계 유체의 팽창과정 1단을 더 추가한 형태이다.

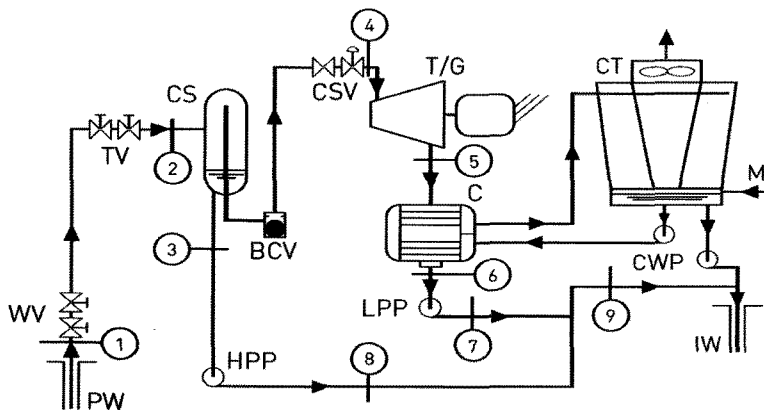
MIT(2006)의 연구에 따르면 지열수의 온도가 400℃, 압력이 25 Mpa 일 경우, 위의 3단 팽창 사이클을 이용하면 열효율을 31.6% 까지 높일 수 있다. 이외에도 MIT에서는 EGS(Enhanced Geothermal System) 지열수를 위한 보다 간단한 구성의 사이클을 제안하고 있다. 초임계 터빈을 배제하고 플래시 방식을 도입한 1단 팽창 사이클의 형태인데, 이는 그림 9와 같다. 그림 10은 EGS(Enhanced Geothermal System) 지열수를 위한 1단 팽창 사이클의 T-s 선도를 나타낸다. 지열수의 온도가 400℃, 압력이 28 Mpa 일 경우, EGS(Enhanced Geothermal System) 1단 팽창 사이클의 효율은 약 25.9% 이다.



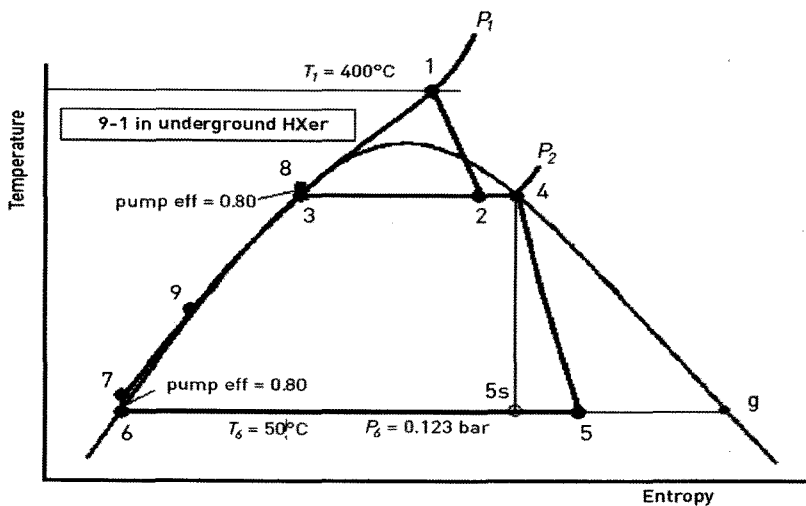
[그림 7] EGS(Enhanced Geothermal System) 지열수를 위한 3단 팽창 사이클 개념도 (MIT, 2006)



[그림 8] EGS(Enhanced Geothermal System) 지열수를 위한 3단 팽창 사이클 T-s 선도 (MIT, 2006)



[그림 9] EGS(Enhanced Geothermal System) 지열수를 위한 1단 팽창 사이클 개념도 (MIT, 2006)



[그림 10] EGS(Enhanced Geothermal System) 지열수를 위한 1단 팽창 사이클 T-s 선도 (MIT, 2006)

3. 맺음말

지열발전 플랜트의 건설은 건설, 토목, 기계, 환경 등의 분야가 유기적으로 연계되는 종합 엔지니어링 사업으로 볼 수 있다. 따라서 국내에서 지열발전 플랜트가 적극적으로 도입될 수 있는 여건이 조성된다면, 다양한 분야에서 산·학·연 공동 연구의 길이 열릴 것이며, 이는 관련분야의 고급 인력양성에도 크게 기여할 것이다.

현재 우리나라는 공급자 중심의 전력공급이 이루어지고 있는데, 앞으로는 중·소규모의 열병합 발전이나 독립전원 등 지역전원을 통한 전력공급으로 그 추세가 변할 것으로 예상된다. 따라서 한국형 바이너리 지열발전은 향후 지역전원의 하나로 충분히 활용될 수 있을 것이다.

즉, 고온의 지열자원이 없는 우리나라에서도 초임계 사이클과 같은 기술을 개발하여 세계적인 기술수준으로 끌어올리면 지열분야의 기술력 향상은 물론 일자리 창출과 플랜트 수출을 통한 산업화에 크게 기여할 것이다. 아울러 지열발전은 온실가스의 배출을 절감할 수 있으며, 향후 이산화탄소 배출권거래제 시행에 대처할 수 있는 기반조성 구축에 크게 기여할 수 있다.

참고문헌

1. 장기창, 한국형 지열발전 시스템의 기술개발 타당성 연구, 지식경제부 보고서, 2009.
2. MIT, The Future of Geothermal Energy, 2006
3. C. Clauser, 2006, Landolt-Börnstein-Group VIII Advanced Materials and Technologies, Volume 3C Renewable Energy, Springer Berlin Heidelberg.
4. R. DiPippo, 2005, Geothermal Power Plants: Principles, Applications and Case Studies, Elsevier Advanced Technology, Oxford, England.
5. R. DiPippo, 1999, Small geothermal power plants: Design, performance and economics, GHC Bulletin
6. 김남진, 2007, 원자력발전소 온배수를 이용한 해양 온도차발전 사이클 해석, 한국태양에너지학회 논문집, Vol. 27, No. 3, pp. 37-44.