

바이너리 지열발전기술과 설계

조 한 창
포항산업과학연구원, 책임연구원

1. 지열발전 개요

지열발전은 국내에서는 생소하지만, 화산활동이 활발하거나 지열원이 풍부한 나라들(아이슬란드, 미국, 캐나다 등)에서는 이미 대형 발전소들이 운용되고 있다. 표 1은 지열원과 밀접한 관계를 갖는 각국의 활화산수와 지열원 규모를 보여준다.

태양광, 풍력, 소수력, 바이오매스, 지열 등의 신재생에너지 발전설비들중 2009년 일본의 자료를 보면 7.2%의 발전설비용량을 갖지만, 설비가동률을 보면 61%의 소수력 다음인 59%를 보인다. 이외에 바이오매스 42%, 풍력 20%, 태양광 12%의 가동률을 보인다.2) 즉 태양광의 5배 가동율을 갖고 24시간 지속운전이 가능한 장점을 갖는다.*

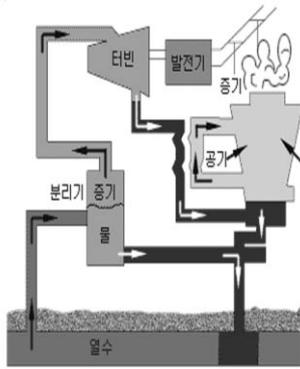
<표 1> 각국의 활화산수와 지열원 규모¹⁾

구분	활화산수(개)	지열원규모(만 kW)
미국	160	3,000
인도네시아	146	2,779
일본	119	2,347
필리핀	47	600
멕시코	39	600
아이슬란드	33	580
뉴질랜드	20	365
이탈리아	13	327

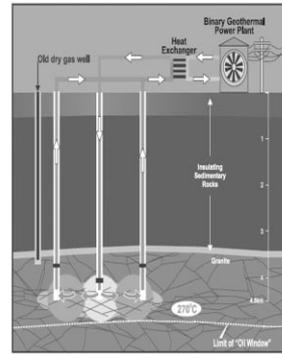
이에 따라 각국에서는 많은 잠재력을 갖는 국가를 중심으로 지열발전 기술의 개발을 꾸준히 진행하고 있다.

1.1 지열발전의 구분

지열발전은 지열원으로부터 얻어지는 열수의 온도와 상태에 따라 증기 flash 발전과 바이너리(binary) 발전으로 구분된다. 증기 flash 발전은 증기를 직접 터빈에 공급하는 발전으로 발전효율이 높지만 180℃ 이상의 고온, 고압의 증기가 필요하다. 증기 flash 발전은 single flash와 double flash 발전으로 구분된다. single flash 발전은 생산정에서의 증기를 물과 증기로 구분하여 증기를 직접 터빈으로 공급, 발전하는 것으로 가장 단순한 구조를 갖는다. double flash 발전은 분리된 물을 재증발시키고 여기에서 증기를 재분리한 후 터빈에 투입하는 구조를 갖는다. 바이너리 발전의 경우에는 통상 200℃이하의 저온 지열수와 저온에서도 증발이 가능한 저 비등점의 매체를 열교환으로써 증발시킨 후 그 증기를 터빈으로 공급, 발전하는 방식으로 지열수와 다른 매체와의 열교환으로 발전한다고 하여 바이너리 발전으로 정의된다. 증기 flash 발전은 효율이 높고 대용량 설비로 구성이 가능하지만, 통상적으로 바이너리



(a) single flash 발전



(b) binary 발전

[그림 1] 지열발전플랜트의 구성 개념

발전은 효율이 상대적으로 낮고 그 설비용량도 적고 다수 대를 설치하여 운영하는 것이 일반적이다. 여기서는 바이너리 발전에 대한 특징과 원리를 설명하고자 한다.

2. 바이너리 발전

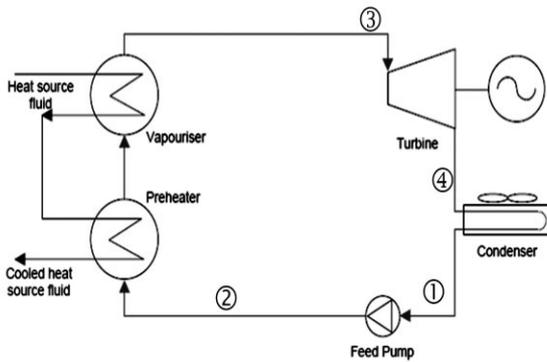
바이너리 발전의 경우에는 크게 ORC (Organic Rankine cycle) 발전과 카리나(Kalina) 발전으로 구분될 수 있다. ORC 발전은 통상적인 스팀 발전의 기본 사이클인 랭킨 사이클에서 작동유체를 비등점이 낮은 유기물질로 적용한 것이다. 이에 반해 카리나 발전의 경우에는 물과 암모니아를 혼합한 혼합물을 작동유체로 이용하는 것을 특징으로 한다. 각각의 구성과 특징은 다음과 같다.

2.1 ORC 발전

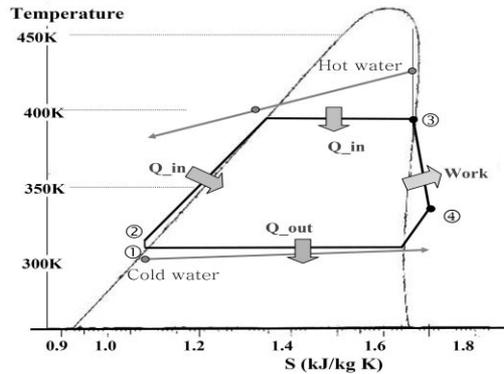
ORC는 랭킨이 발명한 발전사이클로 현재 스팀 화력발전의 기본 사이클로 운용된다. 그 사이클의 기본 구성과 사이클은 그림 2와 같다. 저온, 액체 상태의 작동유체를 펌프로 고압화 한 후에 (예열기) 증발기를 거쳐 증기화한 후에 터빈으로 공급된다. 터빈에서 저온의 증기상태로 배출되며, 이

를 응축기에서 액화한다. 이를 T-s (온도-엔트로피) 선도상에서 구현하면, 펌프에서 고압화에 약간의 work이 소요되고, (예열기) 증발기에서 열이 소요되며, 터빈에서 work이 발생한다. 응축기에서는 증발잠열을 냉각수로 제거한다.

이론적으로 펌프는 등엔트로피 압축, 증발기는 등압 승온, 터빈은 등엔트로피 팽창, 응축기는 등압 저온 과정을 거치는데, 실제 설비를 통한 구현 과정에서 등엔트로피 과정은 불가능하여 펌프는 승온, 저압화, 터빈은 승온, 고압화 등에 의해 효율이 떨어지며, 증발기와 응축기는 압력손실에 의한 효율감소를 감안해야 한다. 통상적으로 포화상태의 작동유체를 터빈에 공급하는 것이 일반적이며, 스팀발전에서 효율향상을 위해 사용되는 재생사이클과 재열사이클은 사용되지 않는 것이 일반적이다. 즉 재생사이클은 터빈을 다단으로 구성한 후 각 터빈 후단에서 작동유체 일부를 빼서 펌프 후단의 저온 액체에 혼합하여 주는 사이클로 응축기에서의 열손실을 감소시킬 수 있어 효율적이다. 재열사이클은 터빈을 통과하여 저온, 저압화된 증기를 다시 가열하여 터빈으로 공급하는 사이클로서 응축기에서의 열손실을 감소시킬 수 있는 장점이 있어 대형의 화력발전소에서는 거의 적용된다. 이러한 재생, 재열사이클은 다단 터빈의 사용이 필수적이기 때문에 소형 터빈을 이용



(a) ORC의 기본 구성



(b) ORC의 T-s (온도-엔트로피) 선도

[그림 2] ORC의 구성과 T-s 선도

하는 발전설비에서는 비용대시 효율향상이 적어 실적용이 어렵다.

ORC의 경우에는 다양한 열매체가 사용될 수 있는데, 각각의 특징은 표 2와 같다. 통상적으로 인화성이 없는 불활성 가스계와 지구온난화계수가 낮고 가격이 낮은 탄화수소계 가스로 나뉜다. 통상적으로 탄화수소계 가스의 경우는 높은 잠열 등의 열적 특성을 바탕으로 ORC 초기에 많이 응용되고 활용되었으나, 최근에는 불활성 가스의 활용도 늘고 있다.³⁾

대표적으로 R-134a는 기존냉매 R-12의 대체제로 supercritical (임계온도 101.1℃) 사이클 구성이 가능하지만 과도한 증기압은 설비 안정성의 문제를 야기할 수 있는 단점이 있다. R-123은 R-11의 대체제이고 비연소성 작동유체중 가장 높은 열효율을 보여주며 저가라는 장점이 있으나, 300℃이상에서는 열분해되고 100 ppm이상에서는 마취성이 있다. 탄화수소계 가스인 iso-

pentane은 가연성 물질중 가장 높은 열효율을 보여준다. iso-butane은 탄화수소계 가스중 supercritical 사이클 구성이 가능한 물질이다.

2.1.1 ORC 발전 업체

ORC는 전세계적으로 이미 검증되어 global energy, B&I, electra therm, deluge, ormat, turboden, GMK, UTC power, adoratec 등이 사업화를 진행하고 있으며, 그중 가장 많은 적용실적을 갖고 있는 업체는 ormat이다. Ormat은 탄화수소계 가스를 작동유체로 이용하는 설비위주이고 200 kW에서 72 MW까지의 설비 적용사례가 있고 500 MW이상의 설비를 운용중에 있다. 특히 미국, 유럽을 중심으로 폐열/지열/바이오 매스 발전에 확대 적용중이며 이용편리성, 설치면적 감축, 설비비 감축을 위하여 설비 모듈화 추진중이다. 대표적으로 turboden(美 Pratt&Whitney社에 합병)은 300 kW에서 2,700 kW까지의 모듈

<표 2> ORC 발전의 주요 열매체 특징

열매체	장소	비고	비등점	지구온난화계수
불활성가스 (냉매계통)	독성, 인화성이 없다	지구온난화 계수가 높다. 냉매가 고가	15.3(R-245fa) -26.1(R-134a)	900(R-245fa) 1300(R-134a)
탄화수소계 가스	지구온난화 계수가 비교적 낮음	인화성이 있음	-11.7 ~ 36.5	20정도
CO ₂ (참고)	-	-	-78.5	1

화 설비 모델을 갖고 있으며, 필요 상황에 맞게 설비를 공급할 수 있는 체제를 갖추고 있는데, ORC 모듈 설치면적이 국내 아세아시멘트 사례대비 1/4수준이고 ORC 모듈 0.4 ~ 2.7 MW 150여기 공급, 40여기 건설중(바이오매스)이며, 비표준 7 MW급까지 모듈 설비처럼 공급 가능하며, 1.4 MW급 모듈을 198만유로(BOP 부문 제외)에 공급가능하다. 독일 Adoratec 사는 ORC 모듈을 독일, 이탈리아 등지에 '06년 이후 0.3 ~ 1.7 MW 20여기 공급하였으며, 바이오매스, 엔진배열발전 에 주로 공급하고 1.25 MW급 모듈을 110만유로(BOP 부문제외)에 공급하고 있다. Ormat 사는 미국, 캐나다 중심의 지열발전 에 25년간 1,300 MW 설비 공급, 520 MW 설비 운용중이며, 설비 모듈화 추진 중이나, 크게 보도되는 것은 없으며 수십 MW급 지열발전 설비에 집중, 강점을 갖고 있다. 미국 BNI 사는 ORC 터빈을 위주로 공급하다가 현재는 ORC 엔지니어링 및 설비공급을 하고 있다.

국내는 1999년에 독자개발한 1 MW급 ORC를 포항제철소에 설치, 시운전하고 2003년에 철거하였다. 이후 아세아시멘트에 4 MW급('06.12) 설치를 설치, 운용중에 있다. 근래들어서 산업체 폐열, 지열, 선박폐열 등을 열원으로 하는 250 ~

300 kW급 ORC 개발에 국내연구가 집중되고 있다.

2.2 kalina 발전

1980년대에 러시아 엔지니어인 알렉산더 카리나에 의해 개발된 카리나 사이클은 작동유체를 가압, 증발시켜 터빈을 구동하여 발전하는 것은 ORC와 같지만, 작동유체는 물과 암모니아의 혼합물을 사용한다. 물보다 낮은 비등점을 갖는 암모니아와 혼합하여 사용하고 그 혼합비에 따라 비등점의 제어가 가능하여 좀 더 넓은 온도범위에서 운용이 가능하다. 암모니아는 독성과 부식성이 있는 가스이지만 지구온난화계수가 "0"으로 ORC와 대별된다.

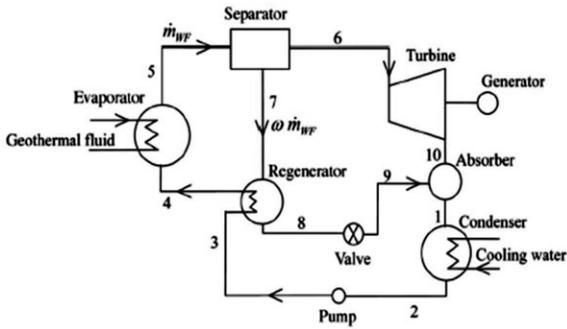
카리나 발전의 기본 개념도는 그림 4와 같다. 저압, 액체상태의 암모니아수를 가압하고 예열한 후 증발기에서 증발시킨 후 기액분리기에서 암모니아위주의 증기만을 터빈에 공급, 발전한다. 기액분리기에서 분리된 액체는 고온, 고압의 상태이므로 그 열은 펌프 후단의 저온 암모니아수를 예열하는데, 활용하고 팽창밸브를 통해 저압화한 후 흡수기에서 터빈 후단의 암모니아와 혼합한다. 이를 응축기에 공급하여 액화시키게 된다.

ORC와 다른 점은 기액분리기가 있어 증발기를 통과한 증기중 기체와 액체를 분리하여 액체는 예열하는데 이용하고 기체는 터빈에 공급, 발전하는 것이다. 또한 2개의 유체를 혼합하여 사용하므로 등온 증발과 등온 응축하는 ORC 대비하여 비등온 증발과 응축으로 넓은 출력이 가능하여 효율이 높다고 주장하고 있다. 그림 5의 T-s 선도에서 빗금친 면적(①)은 ORC의 출력을 의미하며, 카리나발전은 비등온 증발과 응축에 의해 ②, ③의 출력증가가 발생하여 보다 높은 출력을 얻을 수 있다고 정의하고 있다.

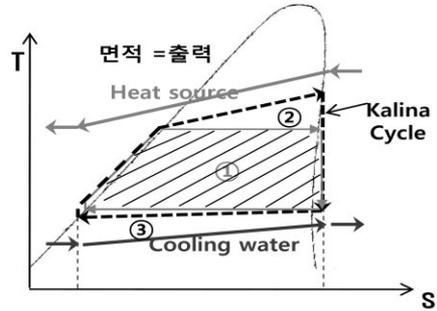
기본 개념의 특허는 만료되었으며, 효율을 높이기 위한 다양한 변종 사이클이 특허화되어 있다. 특히 응축기 전단에 예열기를 추가한 변종 사이



[그림 3] 250kW급 ORC 발전 모듈



[그림 4] 카리나 사이클의 개념도



[그림 5] ORC 대비 Kalina Cycle 효율 증가 요인

클은 지열 등 저온 환경에서 좋은 효율을 보이는 장점이 있어 많이 채택되고 있다. 카리나 발전의 장점은 ORC에 대비하여 고압화할수록 높은 효율을 얻을 수 있어 향후 열교환기의 고압화가 지속될수록 그 강점은 증가될 수 있다. 저온으로 갈수록 암모니아의 농도가 높아지고 높은 온도에서는 암모니아 농도를 낮게 설계한다.

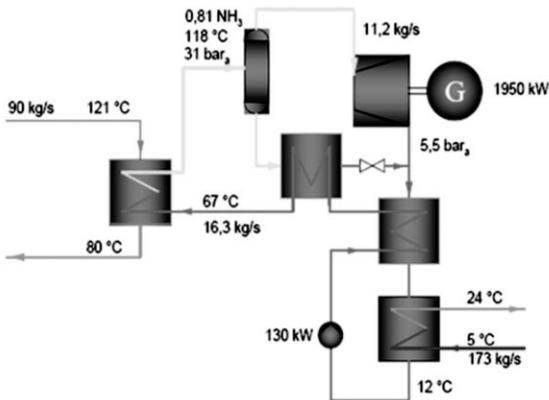
Pure water에 비해 증발시 에너지 손실이 적고, 응축시에도 냉각에 소요되는 비용이 적다. 그러나 부식성이 있는 암모니아수의 사용으로 부품이 고가인 카본스틸과 SUS의 사용으로 추가 비용이 필요하다. 또한 상용 터빈이 적어 현재 응용사례

가 적다.

2.2.1 kalina 발전 업체

카리나 발전의 경우는 recurrent engineering이 갖고 있는 원천특허에 의해 많은 적용실적을 갖고 있지는 않다. 일본과 아이슬란드(그림 6)에 산업폐열과 지열에 적용되어 성능검증을 마친 상태이다. 국제적으로는 recurrent engineering의 모회사인 global geothermal, wasabi 등이 상용화에 많은 노력을 하고 있으며, 일본에 적용실적이 있는 업체들이 엔지니어링이 가능한 수준이다.

카리나 발전의 경우에도 ORC와 마찬가지로 모



[그림 6] Iceland의 2 MW급 카리나 사이클 이용 지열발전 모습

둘화 연구가 진행되고 있는데, 아직 초기 단계이다. recurrent engineering은 50 kW급 모듈을 개발하여 일본 온천수 발전으로 설치(2011년), 시운전하였으며, 100 kW급은 개발중이다. 일본 xenesys 사는 70 kW급 모듈을 독자적으로 개발중이다. 국내에서는 포항산업과학연구원에서 산업체 중저온 폐열을 이용한 카리나 발전을 개발중이며, 개발된 모듈은 지열발전에도 활용할 예정이다.

카리나발전의 경우에는 비등온 증발과 응축으로 열교환기의 성능이 매우 중요한 사항이 된다. 이에 따라 응축기는 통상적으로 판형 열교환기를 채택하고 증발기는 통상의 shell&tube형 열교환기를 사용한다.

3. 지열발전 설계

지열발전의 설계는 여러 가지 현장조건에 따라 결정될 수 밖에 없다. 특히 대상열원의 상태, 즉 지열원 온도(200℃ 이상과 그 이하), 압력, 상태(스팀, 액체)에 따라 flash 발전으로 할 것인지 binary 발전을 할 것인지를 결정하게 된다. 바이너리 발전의 경우에는 발전 사이클을 선정하게 되는데, 설치 위치, 열효율, 출력 등의 인자들로부터 적합한 사이클 선정하게 된다. 즉 카리나에는 암모니아, ORC에는 가연성 가스를 사용하는 경우가 있기 때문에 설치 장소에 중요한 요소로 작용할 수 있다. 지열원 온도와 유량에 의해 발전용량이 결정되는데, ORC와 카리나 발전의 경우에는 사이클 설계인자들로부터 기본 설계를 진행하게 된다.

ORC의 경우에는 작동유체 종류, 터빈입구 온도와 압력의 선정이 가장 중요한 설계인자이며, 카

리나 발전의 경우에는 물과 암모니아의 혼합비, 터빈입구 온도와 압력 등이 설계인자이다.

지열발전 설계에 있어 가장 큰 장애요인은 터빈이다. 통상적으로 ORC, 카리나 터빈의 경우에 발전용량이 적고 주문대수가 적어 대형 터빈업체가 아닌 중소형 터빈제작업체에 의존하게 된다. 발전용량별 운전조건별 작동유체에 맞는 터빈이 없고 터빈 blade의 설계, 제작 등이 소요되어 첫 제품은 터빈 개발가격이 포함되어 높은 가격에 제작할 수밖에 없다. 소형 터빈의 경우에는 래디얼 터빈이 유리하지만, MW이상에서는 축류형 터빈이 사용된다. 터빈 역률에 따른 효율차이가 커서 고효율의 터빈 개발 또는 선정이 중요하다. 특히 고속회전에 의해 누출이 발생하기 쉽다.

지열발전의 경우 작지만 발전소이기 때문에 많은 요소기기가 소요된다. 그럼에도 불구하고 인력 배치를 최소화할 수 있도록 무인 운전 수준의 운전제어기술이 필수적이다. 이를 위해서는 장기운용을 통해 interlock 선정 및 alarm, trip 조건 등을 선정해야 한다.

참고문헌

1. 2012년 제 14회 CEE symposium, 북일본신에너지연구소.
2. 일본 자연에너지 2011년 백서 (ISEP).
3. Bahaa Saleh, Gerald Koglbauer, Martin Wendland, Johann Fischer, Working fluids for low-temperature organic Rankine cycles, Energy 32 (2007) 1210-1221.
4. 공장의 저온배열발전과 배열이용기술 (100℃ 이하의 배열유효이용 : 바이너리 발전기술), 사이언스 & 테크놀로지, 2011. 