

집중기획

바이너리 지열발전 플랜트 기술

우리나라와 같은 비화산지대에서 지열발전이 가능한 바이너리 발전 사이클에 대한 특성 및 적용사례 등을 소개하고자 한다.

서론

지열발전 방식은 전통적으로 건증기(dry steam), 플래시증기(flash steam) 및 바이너리(binary cycle) 방식의 3가지로 나누어 설명되어 왔는데, 주로 지열수의 온도 및 상태에 따라 발전 사이클이 결정되게 된다. 지하로부터 얻은 것이 건증기이면 건증기 방식을 이용하여 발전할 수 있고, 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 방

■ 장기창

한국에너지기술연구원 책임연구원
kcchang@kier.re.kr

■ 백영진

한국에너지기술연구원 선임연구원
twinjin@kier.re.kr

식이다. 이 방식의 가장 큰 장점은 낮은 온도의 유체를 열원으로 사용하여 발전을 할 수 있다는 점이다.

이외에도 지열수에 다량의 가스가 함유되어 있거나, 부식성이 강하거나, 또는 오염(scaling)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 스텁으로 직접 터빈을 돌리는 것이 어려운 일이었기 때문이다.

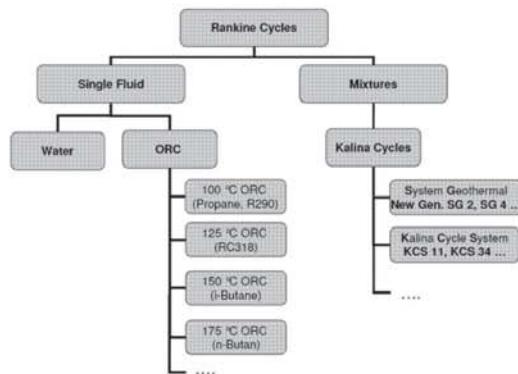
바이너리 사이클에서 2차 유체를 적절히 선택함으로써 85~170°C 범위의 지열수를 이용할 수 있다. 이용 가능한 온도의 상한은 유기 작동유체의 열적 안정성에, 하한은 기술과 경제적인 요소에 좌우된다. 즉, 하한보다 낮은 온도에서는 열교환기의 크기가 증가하여 경제성이 없다.

바이너리 지열발전 플랜트는 소형 개별 유닛(modular unit)으로 시공되며, 이 개별 유닛의 용량은 보통 수백 kWe에서 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 크기에도 영향을 미친다. 개별 유닛을 여러 개 연결하기 때문에 플랜트의 총 용량이 발전 단기에 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 시공

된다. 이는 플랜트 건설에 소요되는 시간을 줄이는 데 한 몫을 한다. 또한, 바이너리 사이클 지열발전은 고온의 증기를 이용하는 방식보다 효율이 상대적으로 낮기 때문에, 지역난방(district heating)과 연계한 열병합발전 방식을 채택하여 경제성을 확보하고 있다.

지열발전 플랜트는 그림 1과 같이 랭킨 사이클에 의해 작동되는데 이중 바이너리 사이클인 유기랭킨 사이클(ORC)과 칼리니 사이클에 대해서 살펴보면 다음과 같다.



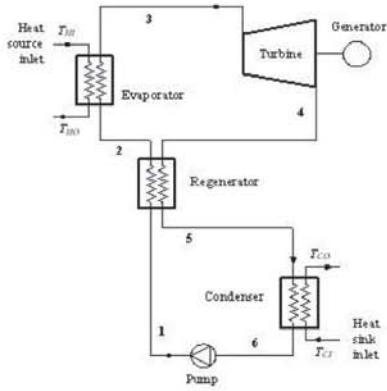
[그림 1] 지열발전 사이클 (Manfred Renz, 2006)

유기랭킨 사이클(ORC: Organic Rankine Cycle)

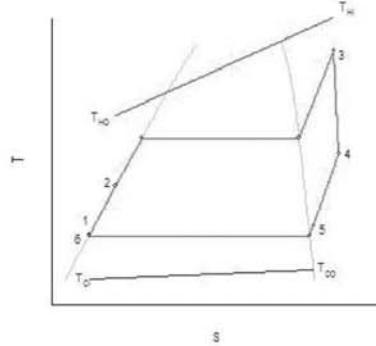
ORC 플랜트 기술

유기작동유체를 사용한 랭킨 사이클, 즉 ORC 방식 발전 플랜트는 증발기, 터빈-발전기, 응축기 및 펌프 등으로 구성된다. 일반적인 ORC 플랜트의 작동원리를 설명하면 다음과 같다.

우선, 재생기(Regenerator)에서 열교환을 마친 액상의 작동유체(그림 2의 2점)는 증발기(Evaporator)내로 유입되어 지열수(heat source)로부터 열을 받아 증발하게 된다(2점→3점). 증발된 증



[그림 2] ORC 플랜트 사이클 구성



[그림 3] ORC 사이클의 온도-엔트로피 선도

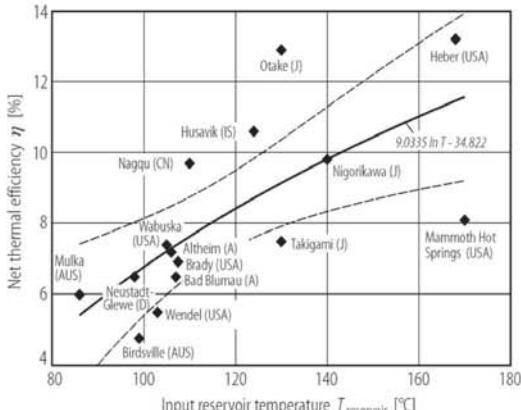
기는 터빈을 가동시킨 후, 재생기로 유입된다(3점→4점). 터빈에서 나온 증기(4점)는 재생기로 들어온 액상의 작동유체(1점)를 가열한 후 응축기(Condenser)로 유입된다(5점). 응축기 내에서 냉각수(heat sink)와의 열교환을 통하여 포화액 상태가 된 포화액(6점)은 펌프에 의해 가압 후(1점) 재생기로 유입되고, 사이클을 완성하게 된다. 이와 같은 과정을 온도-엔트로피 선도에 나타내면 그림 3과 같다.

지열발전 플랜트의 열효율(thermal efficiency)

과 출력(power output)에 영향을 주는 요인은 지열수 및 냉각수의 온도, 플랜트의 성능 등이 있으나 가장 큰 영향을 주는 인자는 지열수의 온도라 할 수 있다. 여기서 열효율은 사이클에 입력되는 열에너지에 대한 전기에너지의 정미 출력(net power output)비율로 정의되는 값으로, 표 1 및 그림 4에 ORC 및 Kalina 지열발전 플랜트의 열효율과 플랜트에 공급되는 지열수의 온도를 나타내었다(MIT(2006), R. DiPippo(2004), C. Clauser(2006)). 여기서 아이슬란

(표 1) ORC 및 Kalina 지열발전 플랜트의 지열수 온도-열효율 관계(MIT, 2006)

플랜트	위치	지열수 온도 [°C]	효율 [%]
Amedee	캘리포니아	103	5.8
Wabuska	네바다	105	8.0
Brady	네바다	109	7.0
Husavik	아이슬란드	122	10.6
Otake	일본	130	12.9
Nogorikawa	일본	140	9.8
Steamboat SB-2&SB-3	네바다	152	8.2
Ormesa II	캘리포니아	157	13.5
Herber SGC	캘리포니아	165	13.5
Miravalles Unit 5	코스타리카	166	13.2

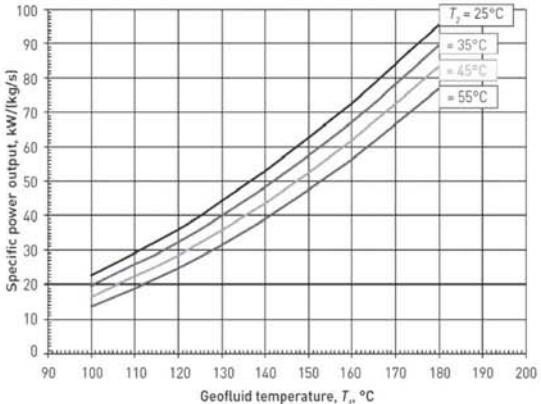


[그림 4] ORC 및 Kalina 지열발전 플랜트의 지열수 온도-열효율 관계
(C. Clauser, 2006)

드의 Husavik 플랜트는 2차 작동유체로 암모니아-물 혼합물을 사용한 Kalina 사이클을 적용하였으며, 이를 제외한 나머지 플랜트는 ORC 사이클을 적용하였다.

표 1 및 그림 4에서, 전반적으로는 지열수 온도가 높을수록 플랜트 열효율이 상승함을 알 수 있으나, 편차가 존재하는데 이는 냉각조건과 각 플랜트를 구성하는 설비 및 구성 방법 등에 차이가 있기 때문이다.

한편, MIT(2006)는 열원인 지열수의 온도변화가 플랜트의 효율 변화에 미치는 영향을 다음의 상관식으로 표현하였다.

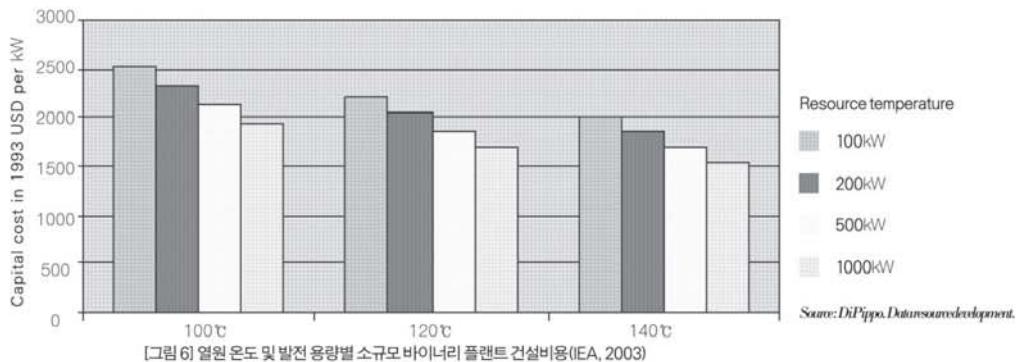


[그림 5] 지열수의 플랜트 유입(T1) 및 유출(T2) 온도 변화에 따른 출력 변화
(MIT, 2006)

$$\text{플랜트 열효율} = 0.0935T - 2.3266$$

여기서, T는 지열수의 온도이며, 플랜트 열효율 단위는 %다. MIT(2006)는 위의 상관식을 이용하여 지열수의 플랜트 유입 및 유출 온도 변화에 따른 출력 변화를 해석하였으며, 그 결과는 **그림 5**와 같다. 그래프에서 보듯이, 지열수의 플랜트 유입 및 유출 온도를 알 경우 지열수 단위 유량(kg/s)당 출력(kW)을 산정 할 수 있다. 이 값에 지열수 유량을 곱하면 총 출력을 얻을 수 있다.

한편, 열원 온도 및 발전 용량별 플랜트 건설비용



[그림 6] 열원 온도 및 발전 용량별 소규모 바이너리 플랜트 건설비용(IEA, 2003)

은 그림 6과 같다. 동일 열원온도 조건하에서는 용량을 증가시킬수록 출력당 건설비용이 감소하고, 동일 용량 조건하에서는 열원의 온도가 높을수록 출력당 건설비용이 감소한다.

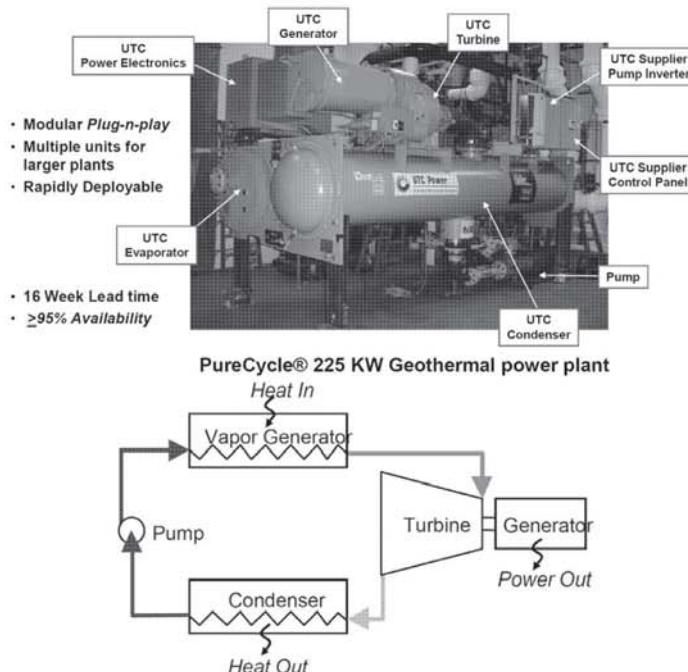
ORC 플랜트 기반의 저온 지열발전 사례 분석

지난 2010년 1월을 기준으로 세계적으로 약 230여 개의 ORC 지열발전 플랜트가 보급되어 있으며, 용량은 약 1,170 MWe에 이르는 것으로 보고되고 있다 (Bertani, 2010). 이 중 우리나라와 같이 저온성 지열을 이용하는 몇몇 플랜트의 현황을 살펴보면 다음과 같다.

우선, 세계에서 가장 낮은 온도의 지열수를 이용하여 발전하는 곳으로 미국 알라스카의 Chena Hot Springs 지역을 들 수 있다. 이 지역에서는 1998년을

전후로 지열자원 탐사와 시추가 시행된 이후로 2004년부터 약 75°C 전후의 지열수를 이용하여 R-134a ORC 사이클을 운전하고 있다. Chena Hot Springs에 지열발전 플랜트가 건설되기 전에는 디젤 발전기(diesel generator)를 이용하여 kWh당 30 cents에 전기를 생산하였다. 2006년 8월, 200 kWe급의 지열발전 유닛이 처음으로 설치되었으며, 2006년 말에 동급의 유닛이 추가로 설치되었다. 이 플랜트는 깊이 213m의 보어홀에서 약 72~75°C로 추출되는 지열수를 이용하여 2차 유체인 R-134a를 증발시켜 발전기를 구동한다. 전력생산 단가는 kWh당 7 cents이다.

Chena Hot Springs의 발전 플랜트는 그림 7과 같은 미국 UTC power(United Technologies Corporation)의 “PureCycle”이라는 명칭의 ORC(Organic Rankine Cycle) 발전 유닛 모듈 2기로



[그림 7] Chena Hot Springs의 ORC 플랜트 PureCycle(UTC Power, 2007)

구성되어 있으며, 당초의 플랜트 목표 성능은 74°C의 열원 이용, 가동율 98%, 발전단가 5\$/kWh 이하였다.

플랜트의 지열수 및 냉각수측 설계조건은 다음과 같다.

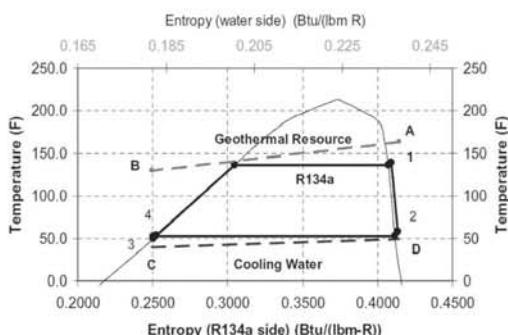
- 지열수 입구온도 = 73.3°C, 출구온도 = 54.4 °C, 유량 = 2006 LPM
- 냉각수 입구온도 = 4.4°C, 출구온도 = 10°C, 유량 = 6109 LPM

플랜트의 냉매측 설계조건은 다음과 같다.

- 냉매유량 : 12.16 kg/s
- 증발압력 : 1600 kPa(abs)
- 응축압력 : 438 kPa(abs)
- 터빈출력 : 250 kW
- 펌프동력 : 40 kW
- 정미출력(net power output) : 210 kW
- 열효율 : 8.2 %

이상과 같은 설계조건에 대한 Chena 플랜트의 온도(T)-엔트로피(s) 선도를 **그림 8**에 나타내었다.

독일의 Neustadt-Glewe에도 저온성 지열을 이용



[그림 8] Chena Hot Springs ORC 플랜트의 온도-엔트로피 선도

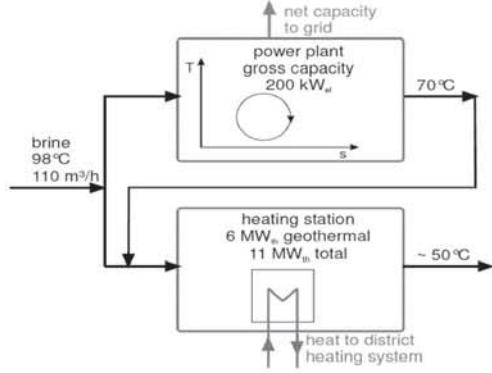
하는 ORC 지열발전 플랜트가 있다. 이것은 독일 최초의 지열발전소로서, 2003년 11월 12일 가동을 개시했다. 열원의 온도는 95~97°C이며, 냉각탑을 이용한 수냉식 응축 방식을 적용하고 있다. 또한 지열의 일부분은 항상 지역난방을 위해 사용하고 있다.

생산정(production well)에서 공급되는 지열수의 총 유량은 110m³/h인데, 그림 9와 같이 이중 일부를 이용하여 발전을 수행하며, 발전 플랜트는 총 출력 200kW 용량이다. 발전 플랜트로 공급된 지열수는 발전 후 약 70°C로 배출되며, 최종적으로는 지역난방 후 50°C로 배출되어 주입정(injection well)으로 보내진다. 이 지열발전-지역난방 플랜트는 열공급을 우선적으로 하고 있으며, 열수요가 부족하여 지열이 남는 경우에만 발전 플랜트를 가동한다. 그래서 하계에만 전부하(full load) 발전 운전이 가능하며, 동계에는 발전 운전을 하지 않는다(Thomas Funke, 2006).

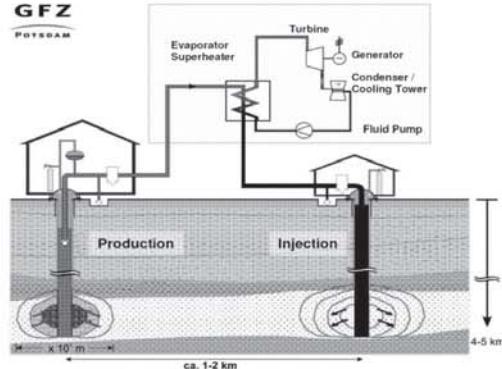
그림 9에 나타낸 발전 플랜트는 Perfluoropentane을 2차 작동유체로 하는 ORC 사이클을 기반으로 하고 있으며, axial inflow 터빈을 적용하고 있다. 터빈의 효율은 70%이며, 예열기와 증발기는 티타늄 소재로 제작되었다. 플랜트의 열효율은 최고 7.4%, 하계 평균 6.5% 수준이며, 총 투자금액은 95만 유로이다.

오스트리아의 Altheim 지방에도 위와 같은 지열 병합발전 플랜트가 도입되었다. 오스트리아는 전 세계에서 지열에너지 활용에 적극적인 노력을 기울이는 나라 중 하나인데, 2005년을 기준으로 Altheim과 Blumau에 ORC 지열발전 플랜트가 있으며, 총 설치용량은 1.2 MWe다.

Altheim 프로젝트는 약 2,300 m 깊이의 대수층에서 약 106°C의 온수를 추출하여 ORC 지열발전과 지역난방 온수를 공급하기 위한 프로젝트인데, 1989년부터 평균 10 MWt의 난방 에너지를 지역난방으로 공급하고 있다. Altheim ORC 플랜트의 설계 사양은 다



[그림 9] 독일 Neustadt-Glewe의 지열발전-지역난방 개념도 (Thomas Funke, 2006)



[그림 10] 독일 Neustadt-Glewe의 ORC 플랜트 개념도(Thomas Funke, 2006)

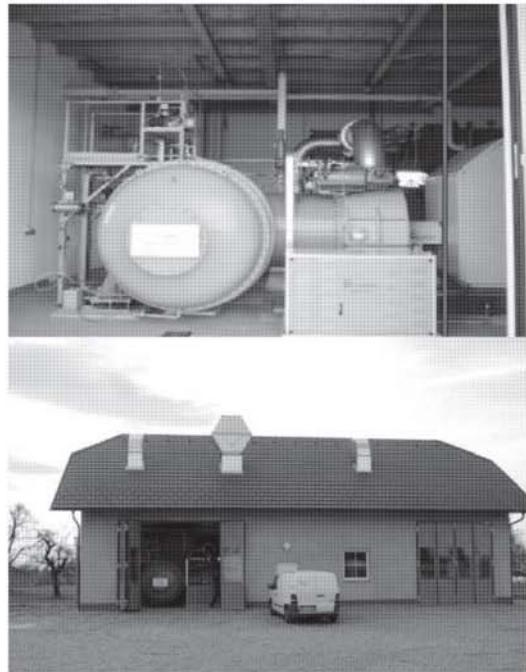
음과 같다(Gerhard PERNECKER, 2006).

- 지열수 입구온도(Thermal water inlet temperature) : 106°C
- 지열수 출구온도(Thermal water outlet temperature) : 70°C
- 지열수 유량(Thermal water flow rate) : 81.7 kg/s
- 플랜트 수열량(Thermal capacity) : 지열수 유량 × 비열 × 지열수 온도차 = 약 12,400 kW
- 냉각수 유량(Cooling water flow rate) : 340 kg/s
- 냉각수 평균 입구온도(Cooling water inlet temperature (mean)) : 10°C
- 냉각수 출구온도(Cooling water outlet temperature) : 18°C
- 정미출력(net electric output) : 1,000 kW
- 열효율 : $1,000 / 12,400 \times 100\% = 8.06\%$

Altheim ORC 플랜트는 Turboden 사에서 공급한 것으로, 작동유체는 Solvay Fluor GmbH 사의

“Solkatherm SES36”라는 공비혼합물(Azeotropic mixture)이다. 그림 11에 Altheim ORC 플랜트의 전경을 나타내었다.

칼리나 사이클(Kalina Cycle) 플랜트



[그림 11] Altheim ORC 지열발전 플랜트

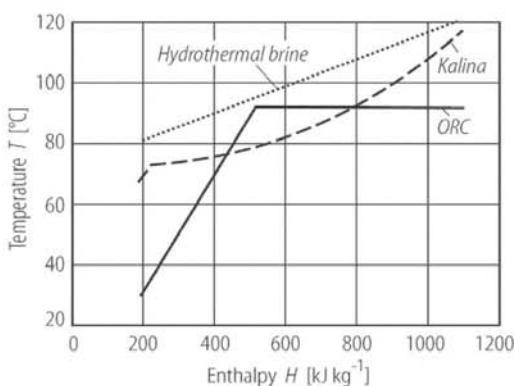
칼리나 사이클 플랜트 기술

2000년대 이전의 바이너리 방식 지열발전 플랜트 기술은 모두 ORC 방식을 기반으로 하였다. 2000년대 이후 비교적 최근에는 칼리나 사이클(Kalina cycle) 기술을 지열발전 플랜트에 적용시키려는 시도가 이루어짐으로써, 기존 ORC 기술과 더불어 차세대 지열 발전 플랜트 기술로 인정받고 있다.

칼리나 사이클은 기본적으로 암모니아-물을 작동유체로 사용하는데, 이는 두 성분의 증기압 차이를 이용하여 그림 12와 같이 상변화 과정에서 변온과정을 구현함으로써 열교환 과정에서의 비가역성을 줄여 사이클의 출력을 높이기 위함이다. 최초의 칼리나 사이클은 지열발전 목적이 아니라, 복합 발전용 하부 사이클 구성 목적으로 개발되었는데, 이후 다양한 목적에 맞도록 개량되어 현재에는 저온성 지열발전 목적으로도 사용되고 있다.

저온성 지열발전 목적으로 개발된 최근의 칼리나 사이클은 **그림 13**과 같은 흡수식 동력 사이클을 기반으로 하고 있다.

흡수식 동력 사이클은 위와 같이 증발기, 터빈, 응축기, 펌프, 분리기(separator), 감압밸브 및 흡수기

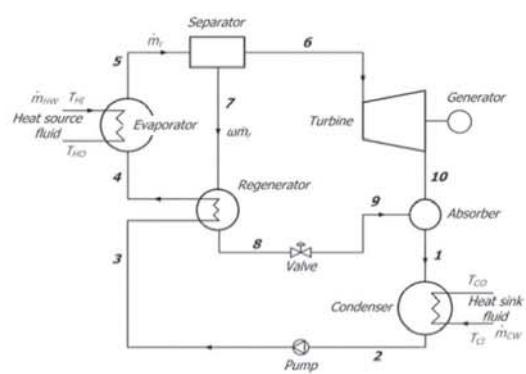


[그림 12] ORC와 칼리나 사이클 작동유체의 증발곡선 비교(C. Clauser, 2006)

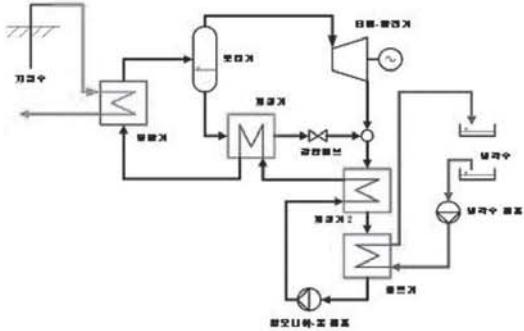
(absorber) 등으로 구성되어 있으며, 작동원리는 다음과 같다. 우선, 재생기에서 열교환을 마친 액상의 암모니아-물 혼합물을 증발기내로 유입되어 지열수, 즉 열원(heat source)으로부터 열을 받아 증발하게 된다. 이때, 증기압이 높은 암모니아가 대부분 증발하게 되며, 증발한 혼합물을 분리기 내에서 포화증기 및 포화액으로 분리된다. 분리된 포화증기는 터빈을 가동시킨 후 흡수기로 유입되고, 분리기에서 분리된 고온의 포화액은 증발기로 유입되는 과냉액 상태의 암모니아-물 혼합물과 재생기 내에서 열교환을 한 후, 팽창밸브를 지나 흡수기로 유입된다. 흡수기에서 합쳐진 2상 상태의 혼합물은 응축기 내에서 냉각수, 즉 열침(heat sink)과의 열교환을 통하여 포화액 상태가 된다. 이 포화액은 펌프에 의해 가압 후 재생기로 유입되고, 사이클을 완성하게 된다.

위와 같은 흡수식 동력 사이클에 그림 14와 같이 펌프 출구에 내부 열교환기(재생기 2)를 추가한 형태가 최초의 칼리나 지열발전 플랜트에 적용된 사이클 기술인 KCS-34(Kalina Cycle System 34)이다.

Pall Valdimarsson(2006)은 ORC와 KCS-34에 대한 비교를 다음과 같이 하였다.



[그림 13] 흡수식 동력 사이클 개념도(Maloney and Robertson, 1953)



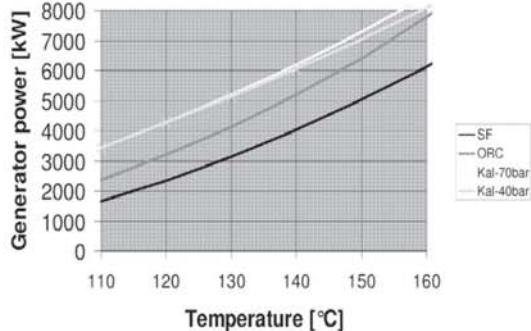
[그림 14] KCS-34 (Kalina Cycle System 34)(Pall Valdimarsson, 2006)

- 터빈 비용 : ORC 높음. KCS-34 낮음.
- 작동압력 : ORC 낮음. KCS-34 높음.
- 배관재료 : 유사함.
- 배관치수 : ORC 높음. KCS-34 낮음.
- 작동유체의 안전성 : 유사함.
- 열교환기 전열면적 : ORC 높음. KCS-34 낮음.

그는 또한 150 kg/s의 지열수가 이용가능한 경우를 가정하여, 냉각수 입출구 온도가 각각 10°C 및 20°C일 때, ORC와 KCS-34, 그리고 1단 플래시증기 사이클의 최대 출력을 계산하였으며, 그 결과를 그림 15에 나타내었다. 그림에서 Kal-70bar는 KCS-34의 최고 압력(분리기 및 터빈입구 압력)을 70기압으로 설계할 경우를 의미하며, SF는 1단 플래시증기 사이클을 의미한다. 그의 연구 결과에 따르면, 동일 열원 및 냉각수 조건하에서 KCS-34는 기존의 ORC 기술에 비해 출력을 약 20~30% 높일 수 있다.

ORC(isopentane) 및 KCS-34를 효율 측면에서 비교한 연구결과를 살펴보면, 증발열량 10 MW, 지열수 출구온도 80°C, 냉각수 입구 유량 및 온도 120 kg/s, 20°C, 열교환기 핀치점 온도차 3°C, 용축기 핀치 온도차 10°C 조건하에서 그림 16과 같다(Pall Valdimarsson, 2003).

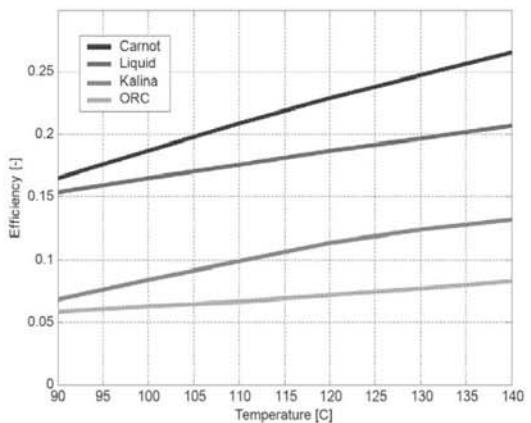
한편, 헝가리에서도 지열발전에 관한 타당성 조사

[그림 15] ORC, KCS-34 및 1단 플래시증기 사이클의 출력 비교
(Pall Valdimarsson, 2006)

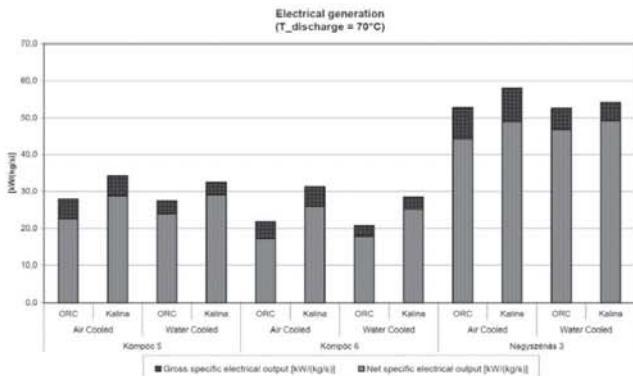
연구가 수행된 바 있는데(Laszlo Adam, 2005), 그림 17에 나타낸 그들의 연구 결과에 따르면 동일 조건에서 ORC에 비해 KCS-34가 약 20~30% 큰 출력을 갖는다고 보고하였다. 그림에서 Kömpöc-5, Kömpöc-6 및 Nagyszénás-3는 헝가리의 저온 지열발전 후보지로서, 지열수 유량은 3,000 m³/day로 동일하고, 지열수 온도는 각각 150°C, 140°C 및 180°C이다.

보다 최근에는 KCS-34를 개량한 흡수식 동력 사이클로서, 그림 18과 같은 SG(System Geothermal)-2a 및 SG-2d가 제안되었다(Kalina, 2006).

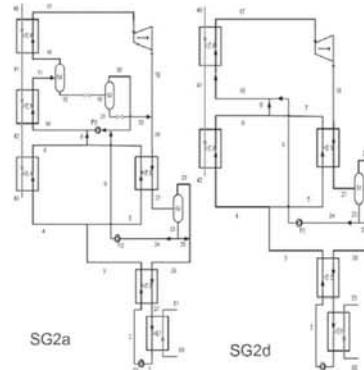
Kalina(2006)에 따르면 SG-2a는 지열수 온도가



[그림 16] ORC 및 KCS-34의 사이클 효율 비교(Pall Valdimarsson, 2003)



[그림 17] ORC 및 KCS-34의 출력 비교(Laszlo Adam, 2005)



[그림 18] SG(System Geothermal)-2a 및 SG-2d
(Kalina, 2006)

150°C 이하일 경우에 최적화 된 사이클이며, SG-2d는 그 이상에 최적화 된 사이클이라고 보고하고 있다. 그림 19에 SG-2a의 출력을 기준의 KCS-34 및 ORC 등과 비교하였다(Manfred Renz, 2006).

그림에 따르면, 지열수 온도 120~150°C 전 영역에서 SG-2a의 출력이 가장 크며, KCS-34는 저온 영역에서 SG-2a를 제외한 타 사이클에 비해 성능이 우수함을 알 수 있다. 한편, 150°C 근처의 영역에서는 KCS-34에 비해 분리기가 없는 칼리나 사이클인 KCS-11이 더 우수한 성능을 가질 것으로 예측된다.

이상과 같이 칼리나 사이클은 원리적으로 기존의

ORC에 비해 성능이 우수하다는 장점이 있다. 그러나, 유독성의 암모니아를 작동유체로 사용하며, 시스템 구성이 다소 복잡하다는 단점이 있어 현재까지 보급 사례는 많지 않다.

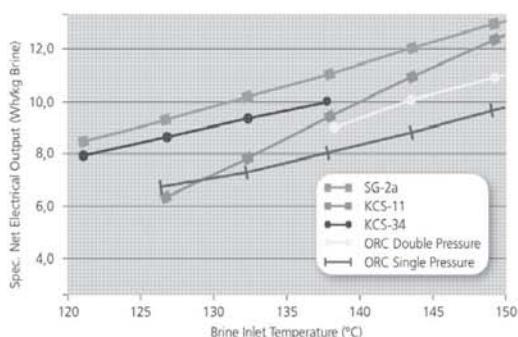
칼리나 사이클 기반의 저온 지열발전 사례 분석

현재까지 보급된 칼리나 지열발전 플랜트는 세계 최초의 칼리나 지열발전 플랜트인 아이슬란드 Husavik 지역의 2 MW급 플랜트(2000년 완공)와 독일 최초의 칼리나 지열발전 플랜트인 Unterhaching 지역의 3 MW급 플랜트(2008년 완공)가 있다. 또한, 독일 Bruchsal 지역의 0.5 MW급 플랜트(2009년 완공)가 있다.

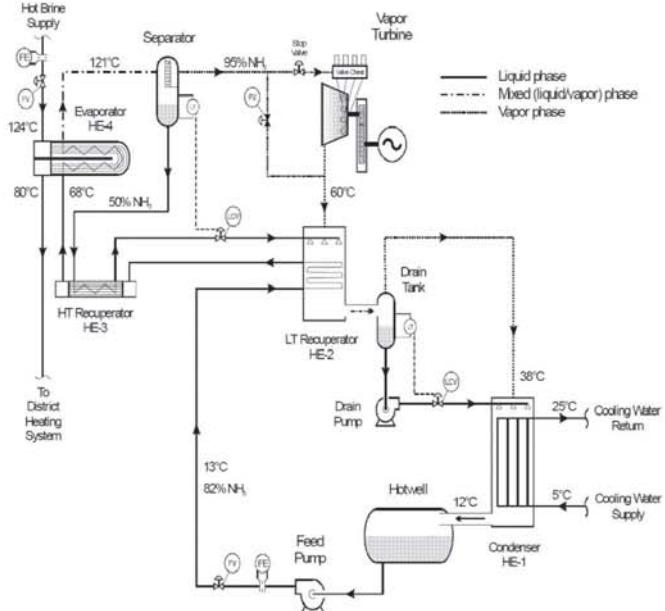
우선, 세계 최초의 칼리나 지열발전 플랜트인 아이슬란드의 Husavik 지역 플랜트는 그림 20과 같이 KCS-34를 기반으로 하는 플랜트이다(M. Mirolli, 2002).

Husavik 플랜트는 다음과 같은 요소들로 구성되었다(M. Mirolli, 2002 and Pall Valdimarsson, 2003).

- 터빈 : Kühnle, Kopp & Kausch (KK&K)에서 제작한 "standard design steam" turbine model



[그림 19] SG-2a, KCS-34 및 ORC의 출력 비교



[그림 20] 아이슬란드 Husavik 지역의 2 MW급 칼리나 지열발전 플랜트 개념도

CFR5 G5a

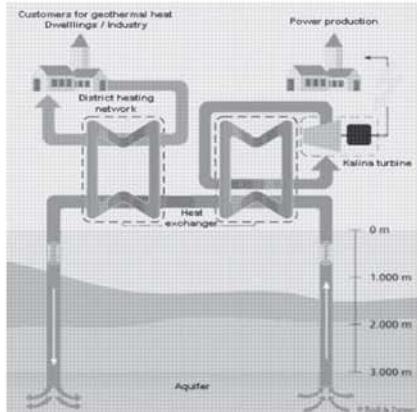
- 증발기 : low-fin 탄소강 관을 사용한 1,600 m² shell-and-tube 열교환기
- 고온 재생기 (HT Recuperator) : 탄소강 shell-and-tube 열교환기
- 저온 재생기 (LT Recuperator) : Stainless steel plate 용접식 판형열교환기
- 응축기 : Stainless steel plate 용접식 판형 열교환기, 2 × 750 m²
- 분리기 : Impingement-type vane module
- 암모니아-물 펌프 : Tandem mechanical seal을 갖는 vertical turbine pump
- 작동유체 : 암모니아-물

Husavik 플랜트 실험결과로 보고된 성능은 표 2 와 같다.

독일 최초의 칼리나 지열발전 플랜트인 Unterhaching 지역의 플랜트는 총 발전 용량 3.3 MW 규모로서, 그림 21과 같이 발전뿐만 아니라 지역난방도 함께 공급할 수 있으며, 다음과 같은 조건에서 운전될 수 있도록 설계되었다.

(표 2) Husavik 플랜트 실험결과(M. Mirolli, 2002)

구 분	2001. 11. 28	2001. 11. 29
지열수 유량, kg/s	90	90
지열수 입구온도, °C	122	121
냉각수 유량, kg/s	182	202
냉각수 입구온도, °C	5	5
총 출력(Gross Electric Power), kW	1,823	1,836
기생 전력(Auxiliary Power), kW	127	127
정미 출력(Net Electric Power), kW	1,696	1,719



[그림 21] 독일 Unterhaching 칼리나 지열발전 플랜트 개념도
(Werner Büßmann, 2008)

- 지열원 온도 : 약 125°C
- 지열수 유량 : 150 kg/s
- 시추공 깊이 : 약 3,300 m
- 지온경사 : 34°C/km
- 열출력 : ~ 40 MWth

그림 22에 Unterhaching 플랜트의 전경을 나타내었다.

한편, 독일의 Bruchsal 지역의 칼리나 지열발전 플랜트는 다음과 같은 조건에서 운전될 수 있도록 설

계되었으며, 플랜트의 개념도를 그림 23에 나타내었다.

- 지열수 입구온도 : 약 118°C
- 지열수 출구온도 : 약 60°C
- 지열수 유량 : 24 kg/s
- 생산정 깊이 : 2,540 m
- 주입정 깊이 : 1,930 m
- 발전용량 : 550 kWe
- 열출력 : 4 MWth
- 지온경사 : 약 50°C/km

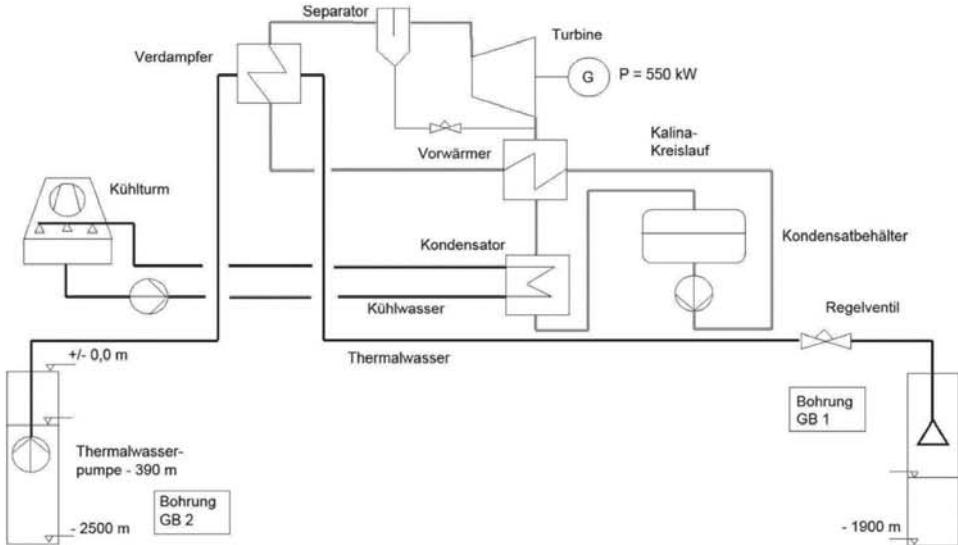
그림 24는 Bruchsal 플랜트의 모습이다(Pascal Schlagermann, 2009).

결론

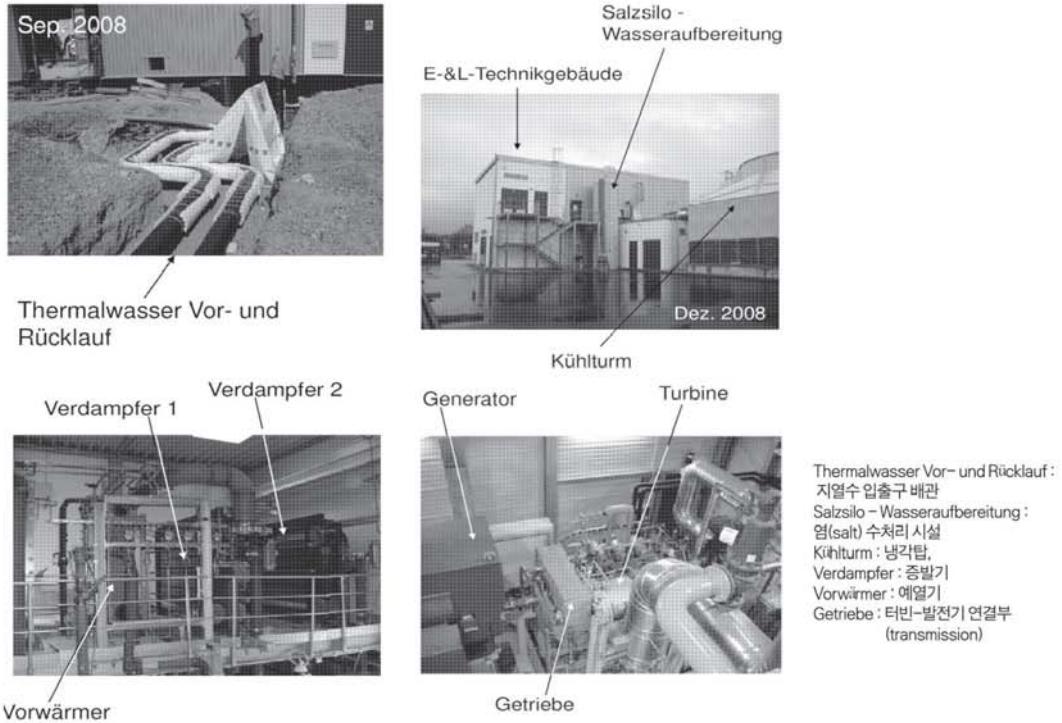
지열은 날씨와 기온 등에 영향을 받지 않고 연중 가동할 수 있어 기저부하를 담당할 수 있는 유일한 신재생에너지 자원이므로 세계적으로 이에 대한 관심이 고조되고 있다. 화산성 고온 지열지역이 아닌 우리나라에서도 심도 5 km에서 지열수를 확보할 수 있는 온도범위가 약 100~150°C 정도이므로 이에 적합한



[그림 22] 독일 Unterhaching 칼리나 지열발전 플랜트



[그림 23] 독일 Bruchsal 칼리나 지열발전 플랜트 개념도



[그림 24] 독일 Bruchsal 칼리나 지열발전 플랜트(Pascal Schlagermann, 2009)

지열발전 플랜트는 바이너리 방식으로서 이에 대한 사이클 기술은 유기 작동유체를 사용한 랭킨 사이클 방식 또는 칼리나(Kalina) 사이클 방식이다.

또한, 우리나라와 같은 비화산지대에서 지열발전을 위한 EGS 기술이 상용화되고 있는 시점이고 미국을 비롯하여 유럽, 호주 등에서도 향후 EGS 지열발전 시장을 크게 확대할 계획을 갖고 있다. 이와 같은 지열발전에서는 저온지열로서 바이너리 사이클에 의한 발전이 유일하기 때문에 바이너리 사이클 발전 시장 전망은 매우 고무적이라 할 수 있다.

따라서 우리나라에서도 세계시장 진출을 위해서는 조속히 바이너리 지열발전 플랜트 원천기술 확보를 위해 국가적인 연구개발 투자가 이루어져야 할 것이다.

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. Pall Valdimarsson, 2003, ORC and Kalina - Analysis and experience, Washington State University Energy program
7. Frédéric Marcuccilli and Samuel Zouaghi, 2007, Radial Inflow Turbines for Kalina and Organic Rankine Cycles, Proceedings European Geothermal Congress 2007, Unterhaching, Germany, 30 May-1 June 2007.
8. Thomas Funke, 2006, ORC Power Plant Neustadt - Glewe, Operational Experience Since 2004, ENGINE - Enhanced Geothermal Innovative Network for Europe Workshop 5, Electricity generation from Enhanced Geothermal Systems, Hotel Regent, Strasbourg, 14-16 September 2006, France
9. Manfred Renz, 2006, The New Generation Kalina Cycle, ENGINE - Enhanced Geothermal Innovative Network for Europe Workshop 5, Electricity generation from Enhanced Geothermal Systems, Hotel Regent, Strasbourg, 14-16 September 2006, France
10. IEA, 2003, RENEWABLES FOR POWER GENERATION Status & Prospects 2003 Edition
11. Laszlo Adam, 2005, Integrated Feasibility Study on Geothermal Utilisation in Hungary, Geothermal Power Project Altener II 4.1030/Z/02-045
12. M. Mirolli, H. Hjartarson, H. A. Mlcak, and M. Ralph, 2002, Testing and Operating Experience of the 2 MW Kalina Cycle Geothermal Power Plant in Húsavík, Iceland, Power Plant: Operation Maintenance and Materials Issues, Vol. 1, Issue 2
13. Werner Büßmann, 2008, Geothermal Energy – Germany's Renewable Wildcard – Developments & Trends
14. Pascal Schlagermann, 2009, Geothermiekraftwerk Bruchsal - Bau, Inbetriebnahme und erste Betriebsergebnisse (Bruchsal geothermal power plant - construction, commissioning and initial operating results). 