

타워용 태양열발전 시스템 흡수기 기술동향

김 종규¹⁾, 김 진수²⁾, 이 상남³⁾, 강 용혁⁴⁾

Technical Trend of Receiver for Solar Power Tower

Jongkyu Kim, Sangnam Lee, Jinsoo Kim, Yongheack Kang

Key words : Solar Thermal Power Plant(태양열발전플랜트), Receiver(흡수기), Molten Salt(용융염), Storage(축열조)

Abstract : For the development of solar thermal power tower plant from the early 80' to today, various kinds of receiver have been tested and evaluated. Most of 1st generation receiver used water/steam as a working fluid to operate steam turbine and now the first commercial solar power tower PS-10 also makes saturated steam. However, to increase thermal efficiency of storage system and to obtain practical use of solar energy, molten salt system have been used from THEMIS project in France at 1984. The Solar Tres plant of 17 MWe power generation will be constructed in Spain and have plan to operate 24 hours in summer. The air volumetric receiver system can be integrated with combined cycle of gas turbine and HRSG and also with steam turbine easily. Therefore, related researches to develop higher efficient solar power tower plant and to operate with stable are widely performed in the world.

1. 서 론

현재 주로 연구되어 지고 있는 태양열 발전시스템(STPP, Solar Thermal Power Plant)은 Dish/Stirling, PTC(Parabolic Trough Concentrator), Tower(Power Tower) 형식으로 이중 Dish/Stirling 시스템은 소형 분산형 발전에 적합할 뿐아니라 집광비가 높아 고온을 얻을 수 있어 높은 전기 전환 효율을 기대할 수 있으나 제작비가 다른 시스템에 비해 비싸며 스텔링엔진(Stirling Engine)의 상업화가 필수적이다. PTC의 경우 1987년부터 상업발전을 시작하여 현재 전세계적으로 상업용 태양열 발전시스템의 대부분을 차지 하고 있으며 기존의 가스터빈(Gas Turbine)과 폐열회수 보일러(HRSG)를 이용하는 복합발전(Combined Cycle)과 함께 연계하여 이용하는 형식으로 그 활용성을 높여 가고 있다. 실제 북 아프리카 지역의 이집트, 알제리, 모로코에서는 태양열 발전과 화력발전 복합사이클을 함께 이용하여 발전용량을 증가시키거나 화석연료의 사용을 저감하고자 계획하고 있다. 그러나 1개의 축에 의한 태양추적방식에 의한

집광특성에 따라 고온의 열을 얻는데 제약이 있어 발전시스템의 효율을 높이기에는 한계가 있다. 본 논문에서 다루고자 하는 타워형 태양열 발전 시스템은 2축으로 태양을 추적하는 반사판(Heliostat)이 타워 위에 설치된 흡수기(Receiver)에 집광된 태양광을 반사하므로 PTC에 비하여 높은 열을 얻을 수 있고 이를 통하여 증기터빈(Steam Turbine) 유입 증기 온도 및 압력을 높일 수 있다. 이는 발전시스템 측면에서 전체 시스템 효율을 증가시킬 수 있기 때문에 미래 태양열 발전시스

-
- 1) 한국에너지기술연구원
E-mail : rnokim@kier.re.kr
Tel : (042)860-3744 Fax : (042)860-3739
 - 2) 한국에너지기술연구원
E-mail : jnskim@kier.re.kr
Tel : (042)860-3549 Fax : (042) 860-3739
 - 3) 한국에너지기술연구원
E-mail : smlee@kier.re.kr
Tel : (042)860-3223 Fax : (042) 860-3739
 - 4) 한국에너지기술연구원
E-mail : yhkang@kier.re.kr
Tel : (042)860-3518 Fax : (042) 860-3739

템 형식으로 주목받고 있다. 이와 같이 높은 열에너지를 효율적으로 사용하기 위하여 다양한 작동유체를 이용할 수 있는데, 타워에 설치되어 반사되는 집광된 태양광의 열에너지를 흡수하는 흡수기의 경우 작동유체의 종류에 따라 다양한 특징을 나타내며 이는 타워형 발전시스템 전체에 영향을 미치게 된다.

현재까지 주로 사용 및 연구되어진 작동유체로는 물/증기(water/steam), 용융염(molten salt), 공기(air) 등이 있다. 타워형 태양열 발전시스템이 건설되어진 1980년대 초에는 증기터빈을 구동하기 위해 필요한 증기를 직접 생산하기 위하여 흡수기의 작동유체로서 주로 물/증기를 이용하는 시스템을 사용하였다. 그러나 이후 태양열 발전시스템의 특성상 열원인 태양의 복사강도 변화 등에 따른 물/증기용 흡수기의 부하변동 및 시스템 부하로의 영향 등 운전 상의 문제점 등이 발생함에 따라 다른 열매체를 이용하는 연구가 진행되어 왔다. 표 1은 주요 실험용 타워형 태양열발전시스템별 작동유체를 나타내었다[1].

Table 1. 태양열발전 프로젝트별 작동유체

프로젝트	작동유체	국가	연도
SSPS	Liquid Sodium	Spain	1981
EUROLIOS	Water/steam	Italy	1981
SUNSHINE	Water/steam	Japan	1981
Solar One	Water/steam	USA	1982
CESA-1	Water/steam	Spain	1982
THEMIS	Hitec Salt	France	1984
TSA	Air	Spain	1993
Solar Two	Nitrate Salt	USA	1996
Consolar	Air	Israel	2001
Solgate	Air	Spain	2002
PS10	Water/steam	Spain	2007

2. 흡수기 종류

2.1 물/증기 흡수기

위 표 1에서 타워형 태양열발전시스템 개발 초기 작동유체로서 물/증기를 사용한 프로젝트가 대부분이었다. 이는 초기 태양열발전시스템이 랭킨사이클(Rankine Cycle)을 적용하여 증기터빈을 구동하기 위한 증기를 흡수기에서 직접 생산하여 터빈으로 공급하는 개념으로 접근한 결과로서, 대부분이 흡수기 출구 증기조건으로 과열증기를 생산하였다. 대표적인 발전시스템으로 Solar One이 있는데, 10 MWe 출력의 발전시스템으로 관류형(Once-Through)의 흡수기 형식으로 출구 증기조건은 10.1 MPa, 516 °C이다. 또한 CESA-1은 1.2

MWe급 태양열 발전시스템으로 11 MPa, 525 °C의 과열증기를 생산하였다. 과열증기를 생산하기 위하여 흡수기는 증발기(Evaporator) 및 과열기(Superheater)가 필요한데, 태양열 발전시스템의 특성상 증발기와 과열기 모두 집광된 태양복사광에 노출 된다. 이때 증발기 관벽온도의 경우 내부 물/증기 온도에 의해 과열이 방지될 수 있지만 과열기의 경우 내부 증기로의 열전달율이 낮아 관이 과열될 수 있다. 특히 일반 화력발전의 화로의 경우 과열기는 가스 출구영역에 배치되어 화염복사는 먼 거리에서 받게 되는데 반하여 태양열발전의 경우 기동(Startup)시에 과열기 내부 유체가 없는 상태에서 높은 열유속을 받게 되는데, 이는 과열기 파손의 원인이 된다. 또한 전체 시스템 효율을 증가시키기 위해 흡수기 출구 증기의 온도를 증가시킬 경우 과열기 관벽면 온도가 증가하게 되는데, 이로 인하여 과열기 관 재질의 고급화에 따른 비용 증가가 요구되며 일사량 변화에 따른 과열기 온도 변화 폭의 확대로 인해 피로 파손의 경향이 커지는 원인이 된다. Solar One의 경우 관과 관사이를 모두 용접하여 태양광을 모두 흡수기가 흡수할 수 있도록 하였으나 관 마다의 열팽창 등의 차이로 인하여 관 및 판넬(Panel)이 전체적으로 휘는 현상이 발생하였으며 이러한 현상은 국부적인 파손 등의 원인이 될뿐만아니라 성능에 문제가 없다 하더라도 흡수기의 수명을 단축시키는 원인이 된다[2].

물/증기를 흡수기 작동유체로서 사용하는 태양열발전시스템 실증 플랜트는 초기에 많이 활용되어 졌으나 이후 공기 및 용융염 등을 흡수기의 작동유체로 사용하는 연구가 지속되어 왔다. 그러나 최근 스페인에서 세워진 최초의 타워형 태양열발전시스템인 PS-10에서는 흡수기 출구증기 조건이 40 bar, 250 °C인 포화증기를 생산하여 11 MWe의 전력을 생산하고 있다. 물/증기를 작동유체로 포화증기를 생산하는 이유로는 다른 작동유체를 이용하는 흡수기와 비교하여 간단하고 저렴하게 설계, 제작할 수 있으며 운전에 있어서의 위험성이 적다고 할 수 있다. 또한 포화증기를 생산하는 것에 있어서는 과열증기의 경우 앞서 언급한 것과 같이 과열기의 손상 및 제어상의 문제점으로 인하여 흡수기의 수명 또는 전체 시스템의 이용률 등에 영향을 미칠 수 있으므로 발전시스템 운전 효율 측면에서 단점이 있지만 최초의 상업발전 시스템으로서의 이용률 및 수명 측면에서 선택하였다고 보여진다. 이러한 관점에서 현재 포화증기를 사용하여 20 MWe급 발전용량의 PS-20가 건설중에 있다.

그러나 작동유체의 변화를 피한다 하더라도 증기터빈을 사용한다면 증기발생기를 통한 증기

생산은 필수적이다. 또한 다른 작동유체와의 열전달을 통한 증기발생은 열교환 효율로 인해 시스템 효율을 저하 시키는 원인이 될 수 있으므로 흡수기를 통한 직접적인 과열증기 생산은 효과적일 수 있어 현재에도 과열증기 생산을 위한 연구가 계속되고 있다. 이스라엘의 경우 50 ~ 100 MWth 용량의 LUZ II 태양열발전시스템 개발 계획하에 약 4.5 MWth 용량의 소규모 흡수기에 대한 연구를 우선 진행하고 있다. 흡수기 출구에서 140 bar, 545 °C의 과열증기를 생산하고자 하는데, 앞서 언급한 과열기의 과열 및 제어상의 문제점을 해결하기 위하여 증발기와 과열기를 분리해서 타워의 다른 높이에 설치하므로써 별도의 반사판이 과열기로 열량을 보낼 수 있도록 하였다[3]. 이러한 방식이라면 발전시스템 기동시 예열을 위한 태양광을 과열기로 보내고 증발기에서 증기가 발생하는 시점부터 정량의 열량을 보내 준다면 과열증기 발생에 따른 제반 문제점을 해결 할 수 있으리라 본다.

개념 연구로서 SOLGAS의 경우 가스터빈과 폐열회수 보일러와의 복합발전으로 가스터빈에서 천연가스(Natural Gas)로 발전한 뒤 배출된 고온의 폐가스를 폐열회수 보일러로 통과시키고 흡수기에서 생성된 포화증기를 폐열회수 보일러로 보내 증기터빈을 구동하는 방식으로 태양열발전 비중이 8~15%로 예상하였다.

2.2 용융염 흡수기

최초로 용융염을 사용한 태양열발전시스템은 프랑스의 THEMIS로서 용량은 2.5 MWth이며 이후 Solar One를 개조한 Solar Two의 경우 10 MWe 급 발전용량으로 상업화를 목적으로 용융염을 이용한 태양열발전설비가 되겠다. 이 발전시스템의 경우 직접 증기를 생산한 Solar One과 거의 동일한 조건의 증기(100 bar, 450 °C)를 생산하였으며 Solar One에서의 평균 열유속 조건이 200 kW/m²보다 작았으나 Solar Two에서는 평균 430 kW/m², 최고 800 kW/m²의 열유속에도 안정적으로 운전이 가능하였다. 따라서 용융염을 작동매체로 사용할 경우 높은 열유속 조건에서도 운전이 가능하고 이는 용융염의 온도를 높여 열교환되어 나오는 증기의 온도를 높일 수 있게 된다. 그러나 용융염의 온도가 높아진다는 것은 흡수기 관 재질이 높아짐을 의미하는데 실제로 Solar Two의 운전 후 흡수기 관 재질로 니켈합금강이 추천되었다. 또한 용융염의 경우 약 260 °C 정도 온도에서 녹는점을 나타내므로 관내 용융염의 동결 방지를 위하여 별도의 열공급 장치(EHTC, Electric Heat Tracing System)를 설치하여야 한다[4].

태양열발전시스템의 열원으로 사용하는 태양 일사량은 밤낮 및 일기변화 등에 따라 변화를 거듭하는데, 일시적인 일사량 감소와 같은 상황에서 지속적인 발전을 하기 위해서는 일사량이 높을 때 열을 저장한 뒤 이 열을 이용하여 증기를 만들고 터빈을 돌려 전기를 생산해야 한다. 그러나 물/증기를 이용하는 흡수기의 경우 포화 또는 과열 증기를 이용하여 열로서 축열조에 저장하고 이를 필요시 다시 증기를 생산해야 하는데, 이러한 과정에서 열전달 손실이 발생할 뿐만아니라 흡수기에서 직접 생성된 증기에 비하여 축열조에서 생성된 증기의 조건이 낮아 발생하는 발전 효율 감소가 뒤따른다.

하지만 용융염을 흡수기의 작동유체로 사용하는 경우 축열조의 저장 매체로 활용할 수 있기 때문에 터빈으로 동일한 조건의 증기를 공급할 수 있게 되며 축열조의 경우 한번의 열교환을 통하여 증기를 생산할 수 있게 됨에 따라 축열시스템의 효율을 증가시킬 수 있게 된다.

현재 흡수기 작동유체로 용융염을 이용하여 상업운전을 계획으로 건설을 추진하고 있는 발전 시스템으로는 17MWe급의 Solar Tres가 있다. 이 시스템은 Solar Two의 용융염 활용기술을 발전시켜 Solar Two 보다 3배 증가된 열용량을 확보하고 있는데, 16시간동안 운전이 가능한 축열시스템을 보유할 예정이며 이는 하절기 24시간 발전이 가능하도록 하였다. 앞서 언급하였듯이 용융염을 이용할 경우 고온, 고압의 증기를 얻을 수 있으므로 전체 시스템의 효율을 증가시킬 수 있을 것으로 예상된다.

2.3 공기 흡수기

공기를 이용하는 흡수기(Volumetric Air Receiver)의 경우 앞서 언급한 흡수기 형식보다 늦은 1992년 PHOEBUS 프로그램하에서 2.5 MWth 급의 TSA(Technical Program Solar Air Receiver) 발전시스템이 스페인에서 운전되었다. 터빈을 이용하지 않았으며 공기를 이용한 증기발생 및 저장에 대한 실증연구를 수행하였으며 이를 위하여 CESA-1 발전시스템을 활용하였다. TSA의 경우 평균 300 kW/m², 최고 800 kW/m²의 열유속 조건하에 150 °C 공기를 유입하여 700 °C로 승온하였는데, 이를 이용하여 45 bar, 340 °C의 과열증기를 생산하였다[5]. 이와 같이 공기를 사용하는 경우 작동유체로서 무해하고 안정적이며 다른 기체 및 액체 연료와 복합으로 사용이 용이한 장점이 있다. 공기식 흡수기의 경우 REFOS, SOLGATE, SOLAIR의 프로젝트를 거쳐 공기식 흡수기의 재질, 흡수기 출구 공기온도의 승온에 대한 연구를

진행하여왔다. REFOS의 경우 400 kWth용량의 흡수기를 이용하여 공기예열 및 재질에 대한 연구를 진행하였는데 15 bar의 압축공기를 순환시켰으며 흡수기 출구 온도를 800 °C까지 올릴 수 있었다. 이때 사용한 흡수기의 경우 3개의 흡수 모듈이 설치되어 있으며 각 모듈에는 2차 집광기와 압축 공기 순환을 위해 외부와 분리하기 위한 석영창(Quartz Window)이 설치되어 있다.

이후 SOLGATE 프로젝트에서는 가스터빈과 복합으로 전기를 생산하였는데, 230 kWe급 용량으로 REFOS의 흡수기를 활용하였다. 이때 흡수기 입구온도를 300 °C로 할 때 출구 온도를 800 °C, 1000 °C로 증가시켰다. 출구 온도가 800 °C일 경우 흡수기 재질로 금속선(Metal Wire)를 사용하였으나 출구 온도가 1000 °C로 증가함에 따라 세라믹(Ceramic)으로 교체 사용하였다. 가스터빈과의 복합발전으로 화석연료를 사용하게 되는데, 태양 에너지의 연료분담율이 출구 공기 온도가 800, 1000 °C일 경우 각각 60, 70%를 나타내었다[6]. SOLAIR의 경우 PS-10용 공기식 흡수기 사전연구 차원에서 진행하였는데, 3MWth 용량으로 열린 공기식(Open Volumetric) 흡수기 형식이다. 따라서 입구 공기온도는 20 °C이고 출구 온도는 680 ~ 1000 °C 범위를 보였다. 이 경우 공기로 전달된 태양에너지는 약 80% 효율을 나타내며 400 °C의 과열증기를 생산할 수 있었으며 물/증기 흡수기보다 높은 열유속에서 안정적으로 운전되었다. 증기 터빈을 구동하기 위하여 공기식 흡수기를 사용할 경우 시스템 효율을 위하여 증기온도를 높게 발생시킬 경우 Pinch point를 해결하기 위하여 출구 공기온도를 높게 하여야 한다. 이는 높은 열유속과 이에 따른 열유속의 불균일로 인한 흡수기의 성능저하가 발생하므로 재질향상이 요구되어진다. 이와 같은 문제의 해결을 위하여 물/증기 흡수기와 병행하여 공기식 흡수기를 사용할 수 있는데, 태양열을 이용하여 증발기에서 포화 증기를 발생시키고 공기식 흡수기에서 얻은 열을 이용하여 포화증기를 과열증기로 온도를 승온시키는 방식이다. 이러한 방식을 사용하면 Pinch point 문제가 없어지며 과열증기 발생을 위하여 공기의 온도를 높게 유지하지 않아도 가능하다. 따라서 외부로의 열손실을 낮출 수 있으며 흡수기 출구 공기온도를 낮출 수 있다[7].

4. 결론

타워형 태양열 발전시스템 실증설비를 중심으로 흡수기의 기술동향을 설명하였다.

1. 물/증기 흡수기의 경우 포화증기를 이용한 상업 발전시스템을 운전하고 있으나 시스템의 효율을 위

하여 안정적으로 과열증기를 생산할 수 있는 흡수기의 개발이 진행되고 있다.

2. 용융염 흡수기는 17 MWe급 상업용 태양열 발전 시스템의 작동유체로 사용되어질 예정이며 축열 시스템의 효과적인 활용을 통하여 태양열만을 이용하여 24시간 운전이 가능할 수 있도록 하였다.

3. 공기 흡수기는 가스터빈, 폐열회수 보일러와 함께 사용하여 복합발전이 가능하며 물과의 열교환을 통한 증기터빈 구동 또한 가능하여 여러 가지 시스템에 적용할 수 있는 활용성이 높다.

후 기

본 연구는 에너지관리공단의 실증연구사업 연구 지원(2005-N-S017-P-01-0-000)을 통해 수행되고 있습니다.

References

- [1] Manuel Romeo et al., "An Update on Solar Central Receiver Systems, Projects, and Technologies", Transactions of the ASME, Vol. 124, pp. 98-108, 2002
- [2] L.G. Radosovich and A.C. Skinrood, "The Power Production Operation of Solar One, the 10 MWe Solar Thermal Center Receiver Pilot Plant", Transactions of the ASME, Vol. 11, pp. 144-153, 1989
- [3] Y. Alek, et. al., "Receiver-Boiler of BSE/LUZ II Central Tower Pilot Plant", 2008 SolarPACES, 2008.
- [4] A.B. Zavoico, "Solar Power Tower, Design Basis Document Revision 0", SAND2001-2100, 2001.
- [5] C. Tyner, et. al., "Solar Power Tower Development: Recent Experiences", SAND-96-2662C, 1996.
- [6] Peter Heller, et. al., "Test and Evaluation of a Solar Powered Gas Turbine System", Solar Energy, Vol. 80, pp. 1225-1230, 2006.
- [7] Reiner Buck, et. al., "Duel-Receiver Concept for Solar Towers", Solar Energy, Vol. 80, pp. 1249-1254, 2005.