

# 공기식 태양열 흡수기의 설계 및 성능평가

조현석\*, 이현진\*\*, 김종규\*\*\*, 이상남\*\*\*\*, 강용혁\*\*\*\*\*

\*한국에너지기술 연구원(danielcho@kier.re.kr), \*\*한국에너지기술 연구원(hj.lee@kier.re.kr),  
\*\*\*한국에너지기술 연구원(rnokim@kier.re.kr), \*\*\*\*한국에너지기술 연구원(snlee@kier.re.kr),  
\*\*\*\*\*한국에너지기술 연구원(yhkang@kier.re.kr)

## Design and Performance Evaluation of Solar Air Receivers

Cho, Hyun-seok\*, Lee, Hyun-jin\*\*, Kim, Jong-kyu\*\*\*,  
Lee, Sang-nam\*\*\*\*, Kang, Yong-heack\*\*\*\*\*

\*Korea Institute of Energy Research(danielcho@kier.re.kr),  
\*\*Korea Institute of Energy Research(hj.lee@kier.re.kr),  
\*\*\*Korea Institute of Energy Research(rnokim@kier.re.kr),  
\*\*\*\*Korea Institute of Energy Research(snlee@kier.re.kr),  
\*\*\*\*\*Korea Institute of Energy Research(yhkang@kier.re.kr)

### Abstract

It is important to produce the high temperature and high pressure air for the concentrated solar power system using the combined cycle. In this paper, based on the concept of tubular receiver, we designed two types with focus on radiation loss reduction. These two receivers were tested in the KIER solar furnace of 40 kW thermal capacity. Performance of the two receivers were evaluated and compared.

Keywords : 태양열발전(CSP, Concentrated Solar Power), 공기식흡수기(Air Receiver), 태양로(Solar furnace)

### 1. 서 론

타워형(Power Tower) 태양열발전은 heliostat 라고 불리는 다수의 반사판을 사용하여 타워 상단으로 집광하여 고온을 획득한다. 이 방식은 열손실의 여지가 적으며, 높은 밀도의

열에너지 저장이 가능하다는 이점을 가지는 가장 진보적인 대규모 발전 방식이다. 타워형 태양열발전에서 사용되는 작동 유체로는 물/증기, 공기 및 용융염 등이 있으며, 공기를 사용할 경우 태양열발전 시스템은 크게 태양열 집광부, 흡수순환부와 전력 발생부로

나눌 수 있다. 그중에서 공기(가스)터빈을 이용한 타워형 태양열발전 방식은 증기터빈 방식과 연계한 복합발전으로 활용할 수 있으며, 이를 통하여 발전 방식을 다양화 시킬수 있고 발전 효율을 증대 시킬수 있다. 그림 1에 보이듯이 공기터빈을 구동하여 전력을 발생시키고 이후 가스터빈 출구의 배기가스를 이용 폐열회수보일러에서 증기를 생산하여 증기터빈을 구동하여 전력을 추가로 생산하면 발전효율을 증가시키는 것이 가능하다. 따라서 복합발전을 이용한 태양열발전 시스템은 향후 신재생에너지 중에서 가장 경쟁력 있는 발전 방식이 될 수 있다.

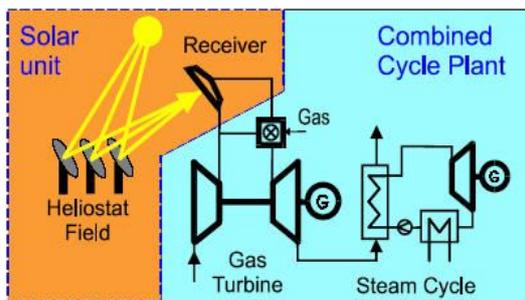


그림 1. 가압공기식 태양열 복합발전 시스템

고온의 공기를 생산하여 증기터빈을 구동하는 공기식 태양열발전 방식은 향후 태양열 복합발전을 위한 중간단계의 발전형식으로써 현재 국내에서 이에 대한 프로젝트가 진행 중에 있다. 그러나 향후 가스터빈을 이용하여 복합발전으로 전력을 생산할 경우, 저온의 공기를 압축한 뒤 공기식 흡수기에서 공기의 온도를 높이는 방식이 필요하다.<sup>1)</sup> 따라서 본 연구에서는 가압된 공기를 순환시키고 외부에서 전달되는 태양에너지를 흡수하여 고온의 공기를 생산하는 가압 공기식 흡수기를 개발하고자 하였다.

## 2. 가압 공기식 흡수기의 설계

기존의 연구에서 태양열 발전에 제안된 흡

수기의 형태는 크게 체적식과 튜브식으로 구분할 수 있다. Romero-Alvarez<sup>2)</sup> 는 작동유체와 흡수체와 유체의 열교환 방식에 따라 튜브식과 체적식으로 구분하였는데, 각기 장단점이 다르다. 체적식 흡수기는 높은 집광비가 가능해 고온의 획득이 유리하지만, 가압조건이 필요한 경우 밀봉을 위해 집광부에 석영유리를 설치하여야 한다. 석영유리를 설치할 경우 유리가 가열되어서 파손되는 문제가 발생하고, 유리를 냉각하기 위한 장치가 필요해지고 이는 운전성과 안전성에 취약해지는 단점이 있다.<sup>3)</sup> 튜브식 흡수기의 경우 가압조건이 가능하지만 복수개의 흡수기가 장착되는 모듈화가 어렵고, 집광비가 높을수록 흡수기의 소재 선택이 어려워지는 단점이 있다. 본 과제에서 개발하고자 하는 가압공기식 흡수기는 가압조건에 대한 밀봉과 집광된 태양 복사에너지의 흡수가 주요한 목표이기 때문에 튜브식형태의 흡수기를 개발하고자 하였다. 또한 향후 모듈 형식의 확장이 가능하도록 형상을 제안하였다.

### 2.1 Channel Type 흡수기

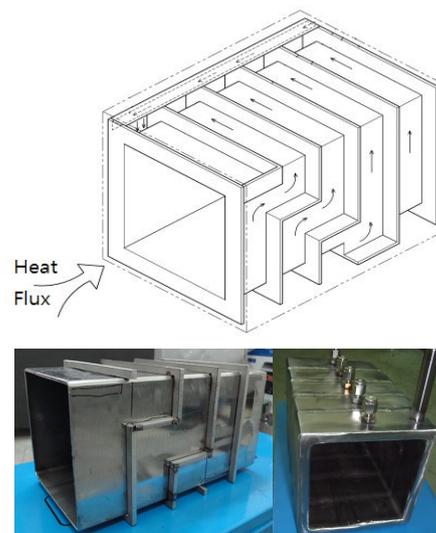


그림 2. Channel type 흡수기 형상

역사적으로 튜브식 흡수기는 cavity 형태로 많이 제안되었다. 이는 복사 열손실을 최소화 하며 태양 복사 에너지에 직접 노출이 가능한 형태이기 때문이다. 그림 2 에서 cavity 내부에는 집광된 태양 복사 에너지가 잘 흡수되게 하였고, cavity 벽 사이에는 공기의 유로를 만들어 공기가 가열되는 체류 시간을 길게 하였다. 상온의 입력 공기는 빛이 조사되는 전면부에서 토출되게 하였고, cavity 벽 내부의 유로를 따라 전면부에서 후면부로 5 바퀴를 회전하며 이동하게 하였다. 그리고 복수개의 흡수기를 장착 시 확장 배치가 가능하도록 외형을 정사각형으로 고안하였다. 흡수기 전면부의 크기는  $116 \times 116 \text{ mm}^2$  이고, cavity의 입구 크기는  $96 \times 96 \text{ mm}^2$  으로 cavity 면적 비는 68% 이다. 길이는 194 mm 로 하여 입구 반지름 대비 길이의 비가 1:2 가 되도록 하였다.

## 2.2 Fin Type 흡수기

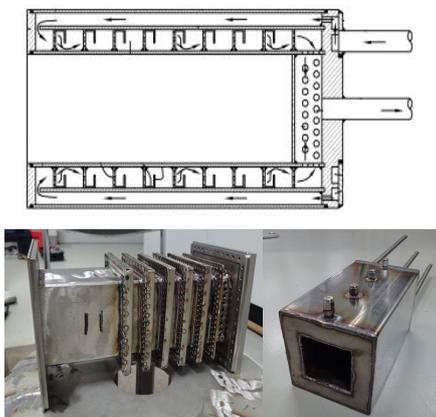


그림 3. Fin type 흡수기 형상

Fin Type 흡수기는 그림 3 과 같이 공기가 전면부에서 후면부로 바로 이동하면서, 접촉 면적을 증가시키기 위해 벽면 내부에 Fin을 설치하였다. 상온의 공기는 별도의 유로를 통해 전면부로 이동한 뒤 집광된 태양

복사에너지에 노출된 cavity 벽 안쪽에서 가열된다. 상온의 공기 유로를 중심에서 바깥에 배치하여 예열되는 동시에 흡수기 외벽으로 손실되는 열을 줄일 수 있도록 고안하였다. 배치된 Fin 과 Baffle은 열전달 면적을 넓게 하는 역할을 하면서 유동을 난류로 만들어 대류열전달을 촉진시키는 역할을 한다. Channel type 과 달리 Fin type의 흡수기는 이중 유로가 cavity 벽을 형성하므로 집광 열유속의 상당부분이 전면부에 cavity 벽에 조사되는 구조이다. 흡수기 전면부의 크기는  $120 \times 120 \text{ mm}^2$  이고, cavity의 입구 크기는  $70 \times 70 \text{ mm}^2$  으로 cavity 면적 비는 34% 이다.

## 3. 실험 구성

밀폐형 구조를 가지는 가압 공기식 흡수기 실험을 위하여 다음과 같은 실험 장치가 구성되었다. 열전달 매체인 공기를 주입하기 위한 압축기와, 입력 유량을 조절하기 위한 밸브, 입력 유량을 모니터링 할 수 있는 유량계, 입/출력 공기 온도 및 흡수기 내부 온도 분포를 측정하기 위한 열전대, 입력 유량의 압력을 측정하기 위한 차압계 등이 설치되었다. 가압 조건이므로 송풍기 대신에 압축기가 연결되었고, 흡수기로 가압 공기가 들어가기 전에 압력을 측정하기 위해 차압계가 추가로 설치되었다. 그림 4는 설치된 각 구성 요소들의 개략도이다.

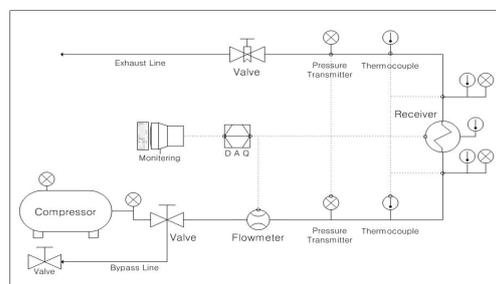


그림 4. 가압 흡수기 실험 구성도

가압 공기를 공급하기 위해 표 1 에 주어진 제원을 가지는 압축기를 사용하였다. 압축기는 상온의 외부 공기를 가압하여 흡수기에 공기를 공급하도록 구성하였고, 흡수기를 통과한 공기는 실험실 외부 배기라인을 통해 빠져나가도록 유로를 배치하였다. 운전 시 유량의 조절을 위해 배기라인 측에 조절식 밸브를 장착하여, 전체 시스템의 압력과 유량을 조절 할 수 있도록 하였다. 그림 5 는 압축기와 흡수기를 연결 후 정상 상태 운전을 시험한 Data이며 흡수기 입구 압력이 3.9 bar 이하로 줄게 되면, 유량이 급격히 증가하면서 정상상태를 벗어나는 경향을 보인다.

Model	AR-20-SE	
출력(Output)	kW(HP)	15(20)
실린더 수	EA	6
공기량(Piston Displacement)	ℓ/min	2519
분당 회전수 (Revolution)	RPM	660
압력 (Working Pressure)	kgf/cm <sup>2</sup>	9.9
공기 탱크 용량 (Air Tank)	ℓ	500
토출 배관 (Air Outlet)	A	25A x 2

표 1. 압축기 상세 제원

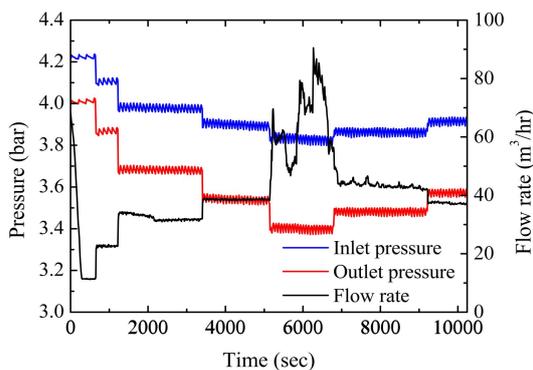


그림 5. 압축기 토출 압력과 유량 범위

#### 4. 실험결과 및 고찰

표 2 는 튜브식 흡수기의 성능 비교 조건을 나타낸다. 실험 수행시 기상조건이나 유

량범위의 차이가 존재하므로 두 흡수기간의 비교를 위해 요약하였다.

흡수기	channel-type	fin-type
직달일사량 DNI (W/m <sup>2</sup> )	797 ~ 890	556 ~ 860
유량 (10 <sup>-2</sup> kg/s)	1.85 ~ 2.65	2.05 ~ 2.81
입력 열량 (kW)	3.41 ~ 11.59	3.55 ~ 12.05
평균 집광열유속 (kW/m <sup>2</sup> )	254 ~ 861	247 ~ 837
POM (kJ/kg)	128 ~ 626	127 ~ 569

표 2. 튜브식 흡수기 성능 비교 조건

실험의 주요 변수조건은 유량, 입력 열량, 집광 열유속 등이며, 공기의 질량 유량 대비 흡수기로의 입력 열량(Power to receiver over air mass flow rate, 이하 POM)을 정의하여 두 흡수기를 비교할 수 있도록 하였다. 열원이 되는 태양의 일사량은 직달일사량계(Pyheliometer)를 통해 측정하고, Flux mapping<sup>4)</sup>를 통해 흡수기 전면에 집광되는 입력 열량을 계산하였다.

그림 6은 POM에 따른 두 흡수기의 공기 출구온도를 나타낸 그래프이다. Channel type의 경우 최대온도는 518℃이고, 이때의 POM은 626 kJ/kg 이다. Fin type의 경우 최대온도는 454℃이고, 이때의 POM은 568 kJ/kg 이다. POM이 400 kJ/kg 이하에서는 두 흡수기간의 출구온도의 차이가 작는데 비해 POM 400 kJ/kg 이상의 조건에서는 Channel type의 출구 온도가 더 높은 결과를 나타낸다. POM이 증가할수록 출구 온도는 상승하지만 700 kJ/kg 이상의 POM에서는 흡수기의 전면에서 강한 열유속으로 인한 용접부위의 손상으로 인해 실험을 할 수 없었다. 결과에 나타난 것보다 높은 출구온도를 얻기 위해서는 향후 흡수기 전면부의 재질변화 및 접합부의 보강을 통해 높은 POM에서도 실험이 가능하도록 해야 한다.

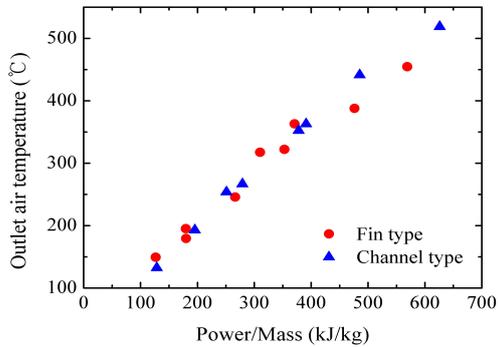


그림 6. 흡수기 공기 출구 온도

흡수기	channel-type	fin-type
흡수기 입구 압력 (bar)	3.81 ~ 3.93	4.85 ~ 5.05
흡수기 출구 압력 (bar)	1.95 ~ 2.31	3.40 ~ 3.51
흡수기 압력 손실 (bar)	1.57 ~ 1.94	0.41 ~ 0.55

표 3. 튜브식 흡수기 압력 손실 비교

표 3 은 두 흡수기간의 압력 손실을 비교하여 나타낸다. Channel type 흡수기가 Fin type 흡수기에 비해 입구 압력도 낮고 압력 손실이 크다. 이는 공기 유동의 길이가 길고 직각부위에서 텀블(Tumble)<sup>5)</sup> 현상 같은 교란 때문에 압력저하가 크게 나타나는 것으로 판단된다. Channel type 의 경우 향후 성능 증가를 위해서는 채널 입구 영역과 전체 유로에 대한 유동해석을 통해 공기의 거동을 명확히 규명하는 것이 요구된다.

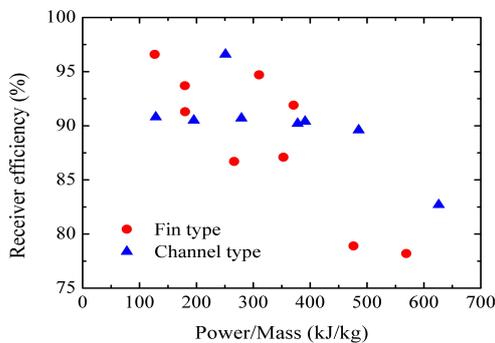


그림 7. 흡수기 열전달 효율

그림 7은 POM 에 따른 두 흡수기의 효율을 나타낸 그래프이다. 흡수기의 열전달 효율( $\eta$ )은 입력 열량 대비 흡수기를 통과한 공기가 얻어진 열량으로 구해지는데, 얻어진 열량은 질량 유량과 입구와 출구의 온도와 압력을 통해 얻은 엔탈피 차이( $\Delta h$ )의 곱으로 구할 수 있다. POM이 낮을수록 효율은 높게 나타나는 경향을 보이며, POM이 높을수록 복사열손실이 증가하므로 효율은 감소한다. 특히 Fin type 의 경우 POM이 450 kJ/kg 이상의 조건에서는 효율이 급격히 감소한다. 이는 Channel type 과 Fin type 의 Cavity 전면부의 면적비가 68% 와 34% 로 두 배 차이가 나므로 이로 인한 복사 열손실의 차이에서 기인한 것으로 보인다. Channel type 에서 출구온도 518 °C (POM 626 kJ/kg) 의 효율은 83%로 나타나며 Fin type의 경우 출구온도 454 °C(POM 568 kJ/kg) 의 효율은 78% 이다.

## 5. 결론

본 연구의 가압 공기식 흡수기는 체적식 흡수기가 가진 단점을 해결하기 위해 설계 및 성능시험이 이루어졌다. 발전 규모에 따라 복수개의 흡수기가 설치될 수 있도록 정사각형 형태의 외형을 기본 구조로 하여 모듈화 하였다. 튜브식 열전달 구조를 기초로 가압 조건에서 실험이 가능하도록 밀폐된 구조이면서 집광된 열유속의 흡수를 위한 Cavity 형상의 외형을 고안하여 2개의 흡수기를 제작하여 성능 평가를 수행하였고 도출된 결론은 다음과 같다.

- (1) Channel type 흡수기의 경우 POM이 626 kJ/kg 일 때 최대 출구 온도 518 °C 이며, 효율은 83%이다.
- (2) Fin type 흡수기의 경우 POM이 568

- kJ/kg 일 때 최대 출구 온도 454 °C 이며, 효율은 78%이다.
- (3) POM 400 kJ/kg 이하에서는 Fin type의 효율이 좋지만 400 kJ/kg 이상에서는 Channel type의 효율이 더 높게 나타난다.
  - (4) 압력 손실은 Channel type이 Fin type에 비해 평균 3 배 크게 나타난다. Channel type의 효율 증가를 위해서는 내부 유동에 대한 규명이 필요하다.
  - (5) POM 600 kJ/kg 이상의 실험조건을 위해서는 흡수기의 소재, 접합부 보강 등의 보완연구가 필요하다.
4. 채관교, 이현진, 김종규, 윤환기, 이상남, 강용혁, 서태범, 2011, "KIER 태양로의 열유속 분포 특성," 한국태양에너지학회 추계학술발표대회, pp. 74-79.
  5. Sheldon I. Green., "Fluid Mechanics and Its Applications," Kluwer Academic Publishers, Vol. 30, pp. 17.

## 후 기

본 연구는 에너지기술연구원의 연구비지원으로 수행되었음

(과제번호 : GP2012-0015-3)

## 참고문헌

1. Heller, P., Pfander, M., Denk, T., Tellez, F., Valverde, A., Fernandez, J., and Ring, A., 2006, "Test and evaluation of a solar powered gas turbine system," Solar Energy, Vol. 80, pp. 1225-1230.
2. Romero-Alvarez, M. and Zarza, E., 2007, "Concentrating Solar Thermal Power" in Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy, Taylor & Francis, New York.
3. Pitz-Paal, R., Hoffschmidt, B., Bohmer, M., Becker, M., 1997. "Experimental and numerical evaluation of the performance and flow stability of different types of open volumetric absorbers under non-homogeneous irradiation," Solar Energy,