

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, we designed two types of tubular receivers to heat up the compressed air and provided their preliminary experimental results for performance evaluation and further improvements. The developed receivers are in a square cavity shape surrounded by flow conduits for easy scale-up and radiation loss reduction. The two receivers were tested with 5 bar air in the KIER solar furnace and evaluated in terms of the outlet temperature and the efficiency.

Keywords : 태양열 발전(Concentrated Solar Power), 튜브식 흡수기(Tubular Receiver), 압축 공기(Compressed Air), 태양로(Solar Furnace)

1. 서 론

태양열 발전(Concentrated Solar Power) 기술에서 타워형은 헬리오스탯(Heliostat)이라 불리는 다수의 반사판을 사용하여 타워 상단으로 집광하여 고온을 획득한다. 이 방식은 고집광을 통해 다양한 온도 범위가 가능하고, 열저장

및 타 열원과 하이브리드가 용이하여 가장 개선 가능성이 높은 대규모 발전 방식이다. 타워형 태양열 발전에서 사용되는 작동 유체로는 물/증기, 공기 및 용융염 등이 있다. 공기를 사용할 경우, 고일사 지역에서 물 사용량을 줄일 수 있고, 소규모 발전에서 공기(가스)터빈의 효율 저하가 상대적으로 적으며, 궁극적으로

submit date : 2012. 6. 4, judgment date : 2012. 6. 4, publication decide date : 2012. 6. 26
communication author : Lee, Hyun-Jin(hj.lee@kier.re.kr)

증기터빈과 연계한 복합발전(Combined Cycle)으로 고효율 전기 생산이 가능하다. 따라서 공기식 태양열 발전은 많은 주목을 받고 있으며, 태양열 복합발전은 향후 신재생에너지 중에서 가장 경쟁력 있는 발전 방식이 될 수 있다.

고온의 공기를 생산하여 열교환 후에 증기터빈을 구동하는 공기식 태양열발전 방식은 태양열 복합 발전을 위한 중간단계로서, 2011년에 200 kW급 태양열 발전소가 대구에 건설되었다. 그러나 향후 공기터빈을 이용하여 복합발전으로 전력을 생산하기 위해서는 저온의 공기를 압축한 뒤 흡수기에서 공기의 온도를 높이는 방식이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 가압된 공기를 순환시키고 외부에서 전달되는 태양에너지를 흡수하여 고온의 공기를 생산하는 가압 공기식 흡수기를 개발하고자 하였다. 특히 세라믹 다공성 물질을 사용하는 체적식 흡수 방식¹⁾ 대신에 튜브식 흡수 방식에 기초한 흡수기를 개발하여 성능을 예비 평가해 보고 개선의 여지를 조사하는 것에 초점을 두고 있다.

2. 가압 공기식 흡수기의 설계

기존의 연구에서 태양열 발전에 제안된 흡수기의 형태는 작동유체와 흡수체와 열교환 방식에 따라 크게 튜브식과 체적식으로 구분할 수 있다 (Fig. 1 참조).²⁾ 튜브식은 집광된 태양 복사에너지가 흡수되는 면과 작동유체가 가열되는 면이 흡수체(주로 금속)에 의해 분리되어 있다. 전통적으로 접근이 쉬운 방식으로 낮은 집광 열유속에서 물이나 용융염이 작동 유체일 때 많이 사용한다. 반면에 체적식은 공기과 같이 열전달 성능이 떨어지는 작동유체를 높은 집광 열유속 하에서 고온으로 가열하기 위해 고안된 방식이다. 고온에 적합한 금속이나 세라믹 다공성 흡수체에 빛을 조사하고 공기도 흘러보내므로 빛의 흡수가 일어나는 면과 공기가 가열되는 면이 같다.³⁾ 튜브식 흡수기는 가압 공기를 다루기가 쉽지만,

소형 모듈화가 어렵고 집광비가 높을수록 흡수기의 소재 선택이 어려워지는 단점이 있다. 체적식 흡수기는 다공성 흡수체의 넓은 공기 접촉 면적으로 인해 공기 가열에 효율적이지만, 가압조건을 위해 밀봉이 필요하다. 빛은 통과시키면서 밀봉을 해야 하므로 현재로서는 석영유리 설치가 필수적인데, 고온에서 파손되거나 냉각하기 위한 장치가 필요해 운전성과 안전성이 취약해지는 단점이 있다.

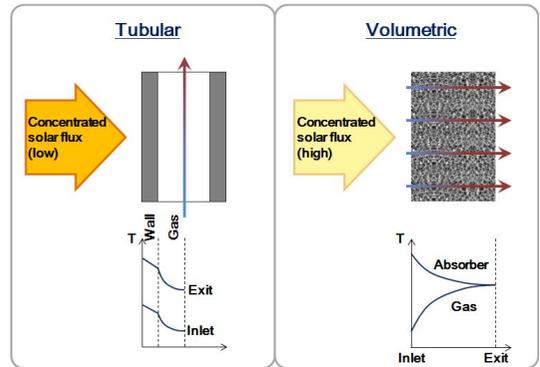


Fig. 1 Heat transfer mechanisms in tubular and volumetric receivers

본 과제에서 개발하고자 하는 가압공기식 흡수기는 밀봉이 용이한 튜브식으로, 모듈 형식의 확장이 가능하면서 효율이 높도록 개발되었다. 복합 발전을 위해서는 고온 공기가 필요하므로 복사 손실의 영향이 가장 크다. 따라서 흡수기는 중심부에 캐비티(Cavity)를 형성하고 외벽을 작동유체가 순환하는 튜브로 설계하여 복사 손실 감소에 주안점을 두었다. 캐비티는 태양 복사 에너지에 직접 노출이 가능한 형태이면서, 캐비티 내부에서 다중 반사를 통해 태양 복사에너지 효과적으로 흡수하고 노출 면적을 줄여 방사에 의한 복사 열손실을 최소화 할 수 있다. 단위 흡수기를 캐비티 형상으로 하면서 개별 흡수기를 정사각형 블록의 형태로 제작하여 용이한 직층을 통해 대규모 용량에 대한 확장성을 높였다. 캐비티 외벽을 순환하는 작동유체의 방향에

따라 원주방향 유동 (Circumferential Flow) 과 축방향 유동 (Axial Flow)이 가능하므로 두 가지 유동 방향에 따른 흡수기를 아래와 같이 설계 제작하였다.

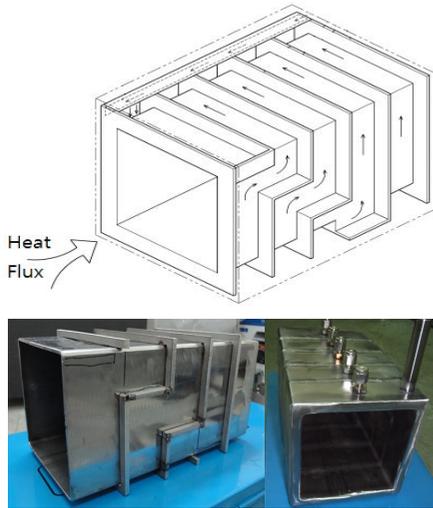


Fig. 2 Shape of the circumferential-flow receiver

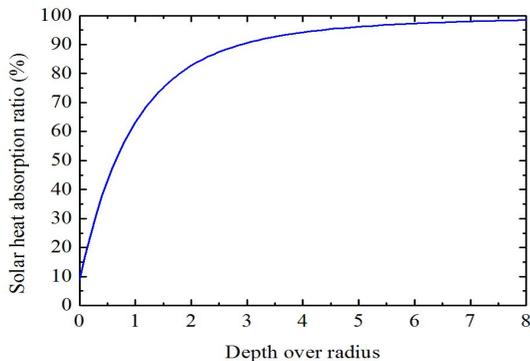


Fig. 3 Solar heat absorption ratio at the inner surface of cavity along the cavity length

Fig. 2는 원주방향 유동 흡수기의 내부 유동 방향과 제작된 형상을 보여주고 있다. 캐비티를 형성하는 외벽 사이에서 공기가 회전하는 유로를 만들어 공기가 가열되는 체류 시간을 길게 하였다. 상온의 입력 공기는 빛이 조사되는 전면부에서 토출되게 하였고, 전면부에서 후면부로 5 바퀴를 회전하며 이동하게

하였다. 흡수기 전면부의 크기는 $116 \times 116 \text{ mm}^2$ 이고, 캐비티의 입구 크기는 $96 \times 96 \text{ mm}^2$ 으로 캐비티 입구 면적 비는 68% 이다. Fig. 3은 흑체 캐비티에서 광선추적법 (ray tracing method)으로 계산한 깊이에 따라 캐비티 내부 표면에서 흡수된 태양 에너지의 누적 비율이다. 깊이가 반지름의 2배가 되면 전체 입력 에너지의 83%가 캐비티 내벽에 흡수된다. 이를 바탕으로 Fig. 2의 흡수기 캐비티 길이는 194 mm로 선정하였다.

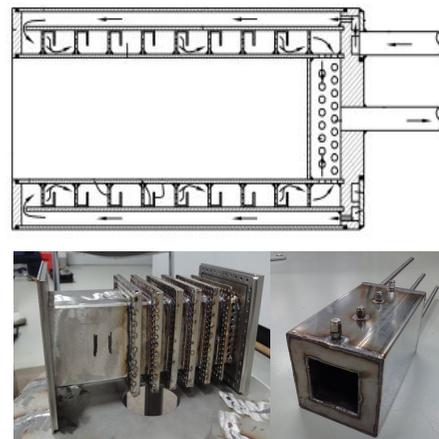


Fig. 4 Shape of the axial-flow receiver

축방향 유동 흡수기는 Fig. 4와 같이 상온의 공기는 별도의 유로를 통해 전면부로 이동한 뒤, 집광된 태양복사에너지에 노출된 캐비티 벽 안쪽을 따라 흐르면서 가열된다. 상온의 공기 유로를 중심에서 가장 외곽에 위치한 배치하여 예열되는 동시에 흡수기 외벽으로 손실되는 열을 줄일 수 있도록 고안하였다. 튜브 내부에 배치된 핀(Fin)과 배플(Baffle)은 열전달 면적을 넓게 하는 역할을 하면서 유동을 난류로 만들어 대류열전달을 촉진시키는 역할을 한다. 흡수기 전면부의 크기는 $120 \times 120 \text{ mm}^2$ 이고, 캐비티의 입구 크기는 $70 \times 70 \text{ mm}^2$ 으로 캐비티 입구 면적 비는 34%이다. 원주방향 유동 흡수기와 달리 축방향 유동 흡수기는 이중 유로가 두꺼운 캐비티 벽을

형성하므로 집광 열유속의 상당 부분이 전면부에 노출된 튜브 벽에 조사되는 구조이다. 결과적으로 캐비티 입구 면적비가 작으며, 상대적으로 원주방향 유동 흡수기 보다 효율이 낮을 것으로 예측된다.

3. 실험장치 구성

밀폐형 구조를 가지는 가압 공기식 흡수기 실험은 한국에너지기술연구원(KIER) 태양로(Solar Furnace)에서 수행하였다.⁴⁾ KIER 태양로는 40 kW의 용량을 갖고 있으며, 최대 집광비는 약 3,400 sun 정도이다. 태양로의 집광 초점에 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. Fig. 5는 설치된 각 구성 요소들의 개략도이다.

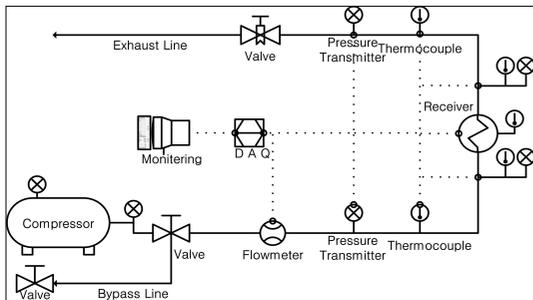


Fig. 5 Schematic of the equipment setup for volumetric receiver performance test

본 연구에서 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 하였

다. Table. 1에 주어진 제원을 가지는 압축기를 사용하였는데, 압축기에 연결된 흡수기 성능 평가 시스템에 걸리는 압력과 입력 유량은 독립적으로 조절 가능하지 않고 반비례 관계를 갖고 변한다. 따라서 흡수기 설치에 앞서서 압력 변화 범위를 조사하였다. Fig. 6은 유량 조절 밸브를 변경하면서 얻은 흡수기 평가 시스템 전/후 압력과 공기 유량이다. 시스템 입구에서 압력이 3.9 bar (gage) 이하로 줄면서 유량이 급격히 증가하고 심하게 불안정해졌다. 이는 실험에 사용된 왕복동 압축기의 맥동으로 인한 압축공기 부조화 현상으로 보인다. 이 지점을 유량 조절 밸브의 한계로 설정하고 흡수기 성능 평가 실험을 진행하였다.

Table. 1 Specification of the air compressor

출력	kW(HP)	15(20)
실린더 수	EA	6
공기량	ℓ/min	2,519
분당 회전수	RPM	660
작동 압력	kgf/cm ²	9.9
공기 탱크 용량	ℓ	500

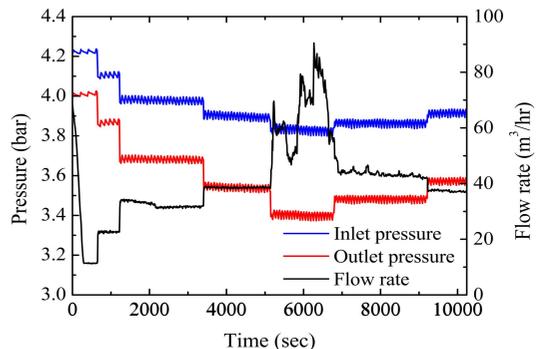


Fig. 6 Working range of pressure and flow rate under experiment conditions

4. 실험결과 및 고찰

Table. 2는 튜브식 흡수기의 성능 비교 조건을 나타낸다. 실험 수행 시 기상조건이나

유량범위의 차이가 존재하므로 두 흡수기 비교를 위해 요약하였다.

Table. 2 Comparison of test conditions between circumferential-flow and axial-flow receivers

흡수기	원주방향	축방향
직달일사량 (W/m ²)	797 ~ 890	556 ~ 860
유량 (10 ⁻² kg/s)	1.85 ~ 2.65	2.05 ~ 2.81
입력 열량 (kW)	3.4 ~ 11.6	3.6 ~ 12.1
평균 집광열유속 (kW/m ²)	254 ~ 861	247 ~ 837
POM (kJ/kg)	128 ~ 626	127 ~ 569

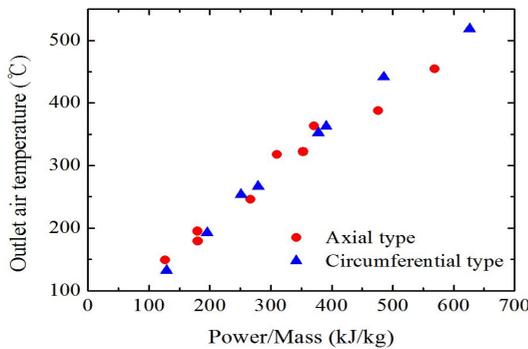


Fig. 7 Outlet air temperature of the two receivers

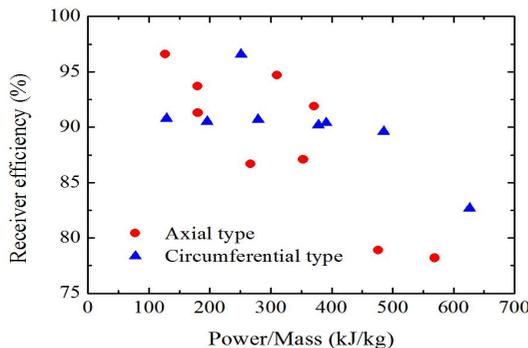


Fig. 8 Heat transfer efficiency of the two receivers

실험의 주요 변수조건은 유량, 입력 열량, 집광 열유속 등이다. 열원이 되는 태양의 일사량은 직달일사량계(Pyheliometer)를 통해 측정하고, 플럭스 맵핑(Flux Mapping) 방법을 이용한 열유속 측정 결과를 바탕으로 흡수

기 전면에 집광되는 입력 열량을 계산하였다.⁴⁾ 두 흡수기를 동일한 조건에서 비교할 수 있도록 공기의 질량 유량 대비 흡수기로의 입력 열량(Power to Receiver Over Air Mass Flow Rate, 이하 POM)을 정의하였다.

Fig. 7은 POM에 따른 두 흡수기의 공기 출구 온도를 나타낸 그래프이다. 원주방향 유동 흡수기의 최대 온도는 518 °C 이고, 이때의 POM은 626 kJ/kg이다. 축방향 유동 흡수기는 POM 568 kJ/kg에서 최대 온도 454 °C를 보였다. POM이 400 kJ/kg 이하에서는 두 흡수기간의 출구 온도의 차이가 작는데 비해, POM 400 kJ/kg 이상에서는 원주방향 유동 흡수기의 출구 온도가 더 높게 나타났다.

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 POM 에서도 실험이 가능하도록 해야 한다.

Fig. 8은 POM 에 따른 두 흡수기의 효율을 나타낸 그래프이다. 흡수기의 열전달 효율은 입력 열량 대비 흡수기를 통과한 공기가 얻어진 열량으로 구해지는데, 얻어진 열량은 질량 유량과 입구와 출구의 온도와 압력을 통해 얻은 엔탈피 차이(Δh)의 곱으로 구할 수 있다. POM이 낮을수록 효율은 높게 나타나는 경향을 보이며, POM이 높을수록 복사열손실이 증가하므로 효율은 감소한다. 특히 축방향 유동 흡수기는 POM이 450 kJ/kg 이상에서는 효율이 급격히 감소한다. 두 흡수기에서 캐비티 전면부의 입구 면적비가 68%와 34%로 두 배 차이가 나므로, 이로 인한 복사 열손실의 차이가 축방향 유동 흡수기의 효율 저하에 큰 영향을 주었을 것으로 판단된다. 원주방향 유동 흡수기는 출구온도 518 °C (POM 626 kJ/kg)에서 효율은 83%로 가장 높았다. 축방

향 유동 흡수기는 최대 효율은 출구온도 454 °C에서 78%이다 (POM 568 kJ/kg).

Table. 3 Comparison of pressure drop between circumferential-flow and axial-flow receivers (Unit : bar)

흡수기	원주방향	축방향
입구 압력	3.81 ~ 3.93	3.85 ~ 4.05
출구 압력	1.95 ~ 2.31	3.40 ~ 3.51
압력 손실	1.57 ~ 1.94	0.41 ~ 0.55

Table. 3 은 두 흡수기간의 압력 손실을 보여준다. 원주방향 유동 흡수기가 축방향 유동 흡수기에 비해 입구 압력도 낮고 압력 손실이 크다. 이는 공기 유동의 길이가 길고 원주방향으로 회전하면서 흘러가므로 이차유동에 의한 교란으로 큰 압력저하가 나타나는 것으로 판단된다. 원주방향 유동 흡수기는 향후 성능 향상을 위해서는 채널 입구 영역과 전체 유로에 대한 유동해석을 통해 공기의 거동을 명확히 규명하는 것이 요구된다.

5. 결 론

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

- (1) 원주방향 유동 흡수기는 최대 출구 온도 518 °C에서 83% 효율을 달성하였고, 축방향 유동 흡수기는 최대 출구 온도 454 °C에서 78% 효율을 보였다.
- (2) POM 400 kJ/kg 이하에서는 축방향 유동 흡수기가, 400 kJ/kg 이상에서는 원주방

향 유동 흡수기가 높은 효율을 나타냈다.

- (3) POM 600 kJ/kg 이상의 실험조건을 위해서는 흡수기의 소재, 접합부 보강 등의 보완 연구가 필요하다.
- (4) 압력 손실은 원주방향 유동 흡수기가 축방향 유동 흡수기에 비해 약 3배 크게 나타났다. 원주방향 유동 흡수기의 효율 증가를 위해서는 압력 손실을 줄일 수 있는 설계가 필요하다.

후 기

본 연구는 한국에너지기술연구원의 연구비 지원으로 수행되었음을 밝힌다. (과제번호 : GP2012-0015-3)

References

1. Heller, P., Pfander, M., Denk, T., Tellez, F., Valverde, A., Fernandez, J., and Ring, A., "Test and evaluation of a solar powered gas turbine system," *Solar Energy*, Vol. 80, pp. 1225-1230, 2006.
2. Romero-Alvarez, M. and Zarza, E., "Concentrating Solar Thermal Power" in *Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy*, Taylor & Francis, New York, 2007.
3. Pitz-Paal, R., Hoffschmidt, B., Bohmer, M., Becker, M., "Experimental and numerical evaluation of the performance and flow stability of different types of open volumetric absorbers under non-homogeneous irradiation," *Solar Energy*, Vol. 60 No. 3-4, pp. 135-150, 1997.
4. Chai, K.K., Lee, H.J., Kim, J.K., Yoon, H.K., Lee, S.N., Kang, H.Y., and Seo, T.B., "Characteristics of the Radiation Heat Flux Distribution for the KIER Solar Furnace," *The Korean Solar Society Conference*, Vol. 31, No. 2, pp. 74-79, 2011.