

# 고온 히트파이프식 태양열 흡수기의 후벽 각도 변화에 따른 열전달 특성의 수치해석

박영학\*, 정의국\*, 부준홍\*\*, 강용혁\*\*\*

\*한국항공대학교 대학원 항공우주 및 기계공학과(yhpark@kau.ac.kr, egjung@kau.ac.kr),

\*\*한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부(jhboo@kau.ac.kr),

\*\*\*한국에너지기술연구원 신재생에너지 연구본부

## Numerical Analysis on Heat Transfer Characteristics of a Heat Pipe Type Solar Thermal Receiver Depending on End Wall Angle Variation

Park, Young-Hark\*, Jung, Eui-Guk\*, Boo, Joon-Hong\*\*, Kang, Yong-Heack\*\*\*

\*Dept. of Aerospace & Mechanical Engineering, Graduate School, Korea Aerospace  
University(yhpark@kau.ac.kr, egjung@kau.ac.kr),

\*\*School of Aerospace & Mechanical Engineering, Korea Aerospace University(jhboo@kau.ac.kr),

\*\*\*New and Renewable Energy Research Division, Korea Institute of Energy Research

### Abstract

---

The heat transfer characteristics of a solar high-temperature receiver with heat pipes was investigated by numerical simulation. The concentration ratio of the solar receiver ranges 1000 and the concentrated heat is required to be transported to a certain distance for specific applications. This study deals with internal geometry variation of a solar receiver incorporating high-temperature heat pipe. The isothermal characteristics in the receiver section is of major concern. The diameter of the solar thermal receiver was 120 mm and the length was 400 mm. The angle of receiver end wall was varied between 0° and 45°. The wall thickness of the heat pipe channel was 4 mm and 48 axial channels of the same dimensions were attached to the outer wall of the receiver with even spacing in the circumferential direction. The channels are changed to high-temperature sodium heat pipes. Commercial softwares were employed to deal with the radiative heat transfer inside the receiver cavity and the conduction heat transfer along the channels. The numerical results are compared and analyzed from the view point of high-temperature solar receiver.

Keywords : 태양열 흡수기(Solar thermal receiver), 고온 히트파이프(High-temperature heat pipe), 후벽 각도(End-wall angle), 수치해석(Numerical analysis)

---

## 기 호 설 명

$\beta$	: 흡수기 후벽의 각도(°)
CR	: 집광비
d	: 직경 (mm)
$k_{eff}$	: 유효열전도도 (W/m·K)
R	: 반지름 (mm)
T	: 온도 (K)
Q	: 열전달율 (W)

### 1. 서 론

고밀도로 집광된 태양에너지를 태양열 흡수기를 통해 스텔링 엔진을 사용하는 발전시스템에 전달하거나 수소 생산을 위한 태양열 반응로에서 효과적으로 활용하기 위해서 고온 고밀도의 열 유속을 효과적으로 전달할 수 있는 열전달 기술이 필요하다. 문헌상으로 태양열 흡수기 내부에 사용되어 온 대표적인 열전달 수단은 물을 이용하여 직접 증기를 발생시켜 증기터빈을 구동하거나 용융염(molten-salt)의 강제순환방식에 의한 열이송 방식<sup>1)</sup>과 히트파이프에 의한 열이송 방식<sup>2)</sup>을 들 수 있다.

실린더 형 태양열 흡수기에 디쉬(dish)형 집열기에 의해 집광된 태양열의 흡수 및 저장되는 복사열전달해석을 다룬다. 또한, 열을 태양열 반응로나 스텔링 엔진과 같은 발전시스템까지의 열이송 방식으로써 히트파이프식 열이송 방법을 채택하여 복사 및 전도에 관한 수치적 열 해석을 다루었다. 더 나아가 흡수기의 내부형상을 변화시켜 히트파이프식 열이송 방법을 채택하였을 경우에 나타나는 열손실 및 열전달 특성을 정량적으로 비교함으로써 효과적인 흡수기 내부 형상설계를 위한 해석결과를 제시하고자 하였다. 특

히, 태양열 반응로와 같은 발전시스템은 반응로 내벽의 등온상태가 우수할수록 효율이 높은 화학반응을 유도하고, 균일한 압력을 제공하여 효과적인 발전시스템을 구성할 수 있어 효율적인 가용에너지를 생성할 수 있기 때문에 흡수기 내벽과 반응로 내벽의 등온성능은 매우 중요한 의미를 갖는다<sup>3)</sup>.

### 2. 태양열 흡수기 모델

집광된 태양에너지는 흡수기 입구를 통하여 내부의 동공으로 들어간 후 내벽에 흡수된다. 내벽 주위에는 고온 히트파이프가 설치되어 전달된 열을 일정 거리만큼 이송시켜 필요한 부분에 공급하도록 되어 있다.

그림 1은 본 연구에서 다룬 실린더 형의 동공을 갖는 태양열 흡수기로서 직경 240 mm, 길이 400 mm의 스테인리스 스틸 316L 재질이다. 흡수기 후벽(end wall)의 각도  $\beta$ 를 0°로부터 45°까지의 범위에서 내부형상을 변화시켰다. 흡수기 내벽과 내부에 저장된 열을 히트싱크로 이송하기 위하여 두께 4 mm의 채널을 48개를 원주방향으로 균일하게 모델링 하여 히트파이프가 배치 되도록 하였다. 히트파이프 방식에 대한 수치적 모델링 기법은 문헌<sup>4)</sup>에 의해 유효열전도율을 적용하였다. 히트싱크는 실제에 있어서는 스텔링엔진의 헤드 등 고온열원의 공급 대상이 되는 부분이다. 구체적인 열이송 거리와 열전달 면적 등은 설계에 따라 달라질 수 있으나, 현재는 흡수기와 동일한 길이를 가지고 있으며, 균일 열유속으로 열을 흡수한다고 가정하였다. 열원의 역할을 하는 흡수기 내벽과 열침 사이의 직접 접촉은 없고, 모든 열은 흡수기 내벽에서

1) 류시열, 서태범, 강용혁, 김종보, 점시형 태양열 집광시스템용 흡수기의 열손실 해석, 한국태양에너지학회논문집, 20권 3호, 1999, 10

2) Bergan, N. E., Testing of the Molten Salt Electric Experimental Solar Central Receiver in an External Configuration, National Laboratories report SAND86-8010, 1986

3) Abanades, S and Flamant, G., Experimental Study and Modeling of a High - temperature Solar Chemical Reactor for Hydrogen Production from Methane Cracking, International Journal of Hydrogen Energy, Vol 32, Issues 10-11, 2007, pp. 1508-1515

4) 윤여훈, 부준홍, 고온용 원관형 히트파이프의 열적 특성에 관한 실험 및 모사, 대한기계학회 추계학술대회 논문집, 2005, pp. 130-135.

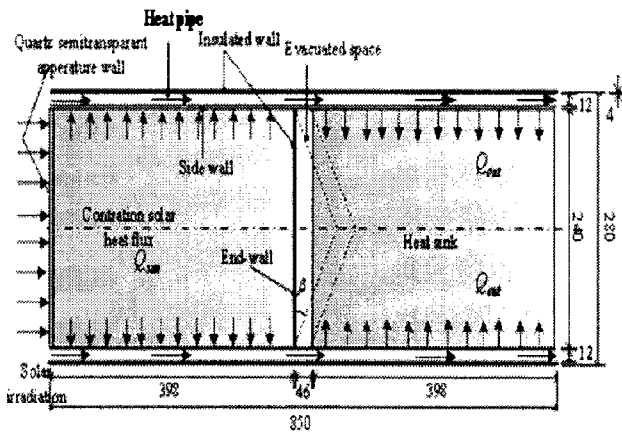


그림 1. 고온 태양열 흡수기 모델

반경방향으로 전달되어 여기에 부착된 히트파이프의 작동유체를 통해 히트싱크의 벽면으로 전달된다고 하였다. 따라서 흡수기와 히트싱크 사이에는 공동을 두어 단열로 취급하였다.

수치적 해석모델은 대칭성을 고려하고, 가능한 단순화하여 계산에 필요한 메모리의 용량과 계산 시간을 절약하도록 하였다. 수치해석의 모델은 실제 계산 대상의 1/48 영역에 해당된다.

### 3. 수치해석을 위한 경계조건 설정

태양광의 평균직달조사량이  $800 \text{ W/m}^2$ 으로 알려진 바 집광시 발생될 수 있는 손실을 약 10%로 가정하고  $720 \text{ W/m}^2$ 을 기준으로 집광비 1000에 대하여 흡수기 입구로의 조사열 유속을 산정하고 해석을 수행하였다. 흡수기 개구에서 흡수기 내부로 태양광의 방향은 축방향의 x방향으로 평행하게 입사된다고 가정하였으며, 천정각과 방위각이 모두  $45^\circ$ 로 일정하게 흡수된다고 설정하였다. 두 가지의 방향이 모두  $45^\circ$ 일 때, 실제와의 오차가 8% 미만으로 알려져 있기 때문이다<sup>5)</sup>. 개구의 석영유리는 투명체로 취급하였고, 흡수기 내벽

5) Hiroshi, H., Yoshio, Y., Aki, S. and Yutaka T., Study on Design of Molten Salt Solar Receivers for Beam-Down Solar Concentrator, International Journal of Solar Energy, Vol 80, 2006, pp. 1255-1262

과 후벽은 선택적 코팅을 고려하여 흡수율은 0.97, 그리고 방사율은 0.1로 균일하게 설정하였다. 흡수기 내부 공간은 공기로 설정하였으나, 개구의 재료, 흡수기 벽 재료와 공기와의 굴절률을 같게 설정하고, 산란효과가 없다고 설정하여 실제로 진공환경으로 설정하였다.

히트파이프식 흡수기의 성능모사를 위해서 스테인리스 스틸-나트륨 히트파이프에 대한 실험적 자료<sup>4)</sup>를 바탕으로 액체금속 히트파이프의 유효열전도율을 3000, 5000, 7500 그리고 최대  $10000 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 까지 증가시켜 계산을 수행하였다. 그러나 실제 고온 히트파이프의 유효열전도율은 작동 온도범위와 열 유속에 따라 이 값들보다 더 높아질 수 있다.

한편, 히트싱크부에서는 실제로 여러 형태로 열이 배출되어 이용되지만, 본 연구에서는 계산의 편의상 흡수기 내벽에서 흡수한 열전달량과 동일한 열량이 배출되도록 경계조건을 설정하였다.

본 연구에서 수치해석을 위한 도구로는 상용코드인 FLUENT(Version 6.2)를 사용하였으며, 이 프로그램 내부에서 복사열전달 해석을 위한 수치해석 기법은 Discrete ordinate radiation model을 적용하였다.

### 4. 수치모사 결과

이전의 연구<sup>6)</sup>에서 적합한 그리드의 크기와 수를 결정하기 위해 수렴성을 검토하였다.

그림 2는 집광비 1000, 히트파이프 유효열전도도의  $7500 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 에서의 후벽 각도변화에 따른 계산영역의 온도분포를 나타내었다. 후벽 각도  $0^\circ$ 를 제외하고,  $\beta$  값이 존재하는 흡수기 후벽의 온도 차이는 4 K미만으로 매우 작게 나타났다. 후벽 각도 변화의 관점에서 흡수부의 온도분포를 비교하였을 때,

6) 박영학, 정의국, 부준홍, 고온 히트파이프를 사용한 태양열 흡수기의 특성에 관한 수치해석적 연구, 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, 2007, 10, pp. 71 ~ 76

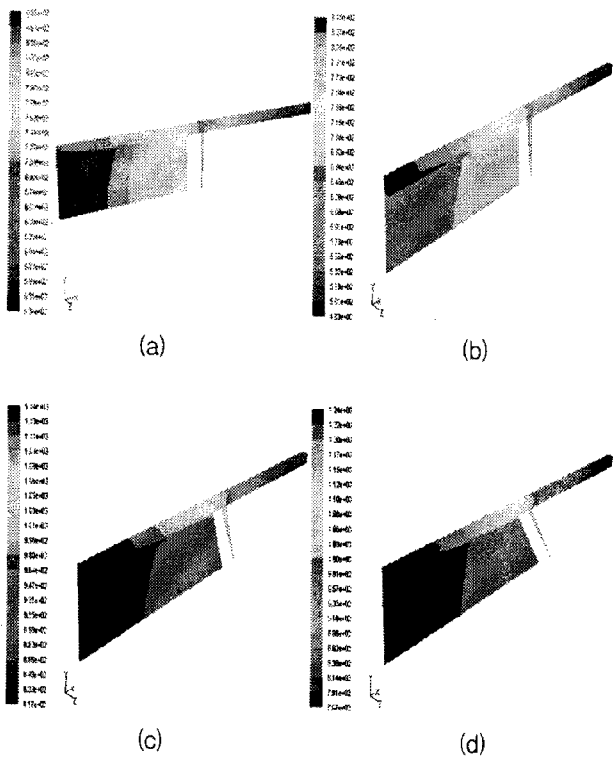


그림 2. 집광비 1000, 유효열전도도 7500 W/m·K에서의 온도 분포 : (a)  $\beta = 0^\circ$ , (b)  $\beta = 10^\circ$ , (c)  $\beta = 30^\circ$ , (d)  $\beta = 45^\circ$

후벽 각도가  $45^\circ$ 인 경우에 최고온도가 1200 K 이상으로 다른 각도들에 비하여 높은 온도가 형성되었다. 또한, 후벽 각도  $10^\circ$ 의 경우에 다른 각도들에 비하여 매우 낮은 온도가 형성되었다.

그림 3에 집광비 1000, 후벽 각도  $15^\circ$ 에서의 흡수기 내벽 축 방향 온도분포를 나타내었다. 히트파이프의 유효열전도도가 3000 W/m·K인 경우에 흡수기 내벽의 온도차가 363 K 이상으로 가장 크게 나타났고, 10000 W/m·K인 경우에 115 K 만으로 가장 작게 나타났다. 흡수기 내벽의 평균온도를 정량적으로 파악하면 히트파이프의 유효열전도도 3000 W/m·K를 기준으로 5000 W/m·K일 때, 4.5 %, 7500 W/m·K일 때, 6.7 %, 10000 W/m·K일 때, 9.2 % 높게 나타났다. 흡수기 내벽의 등온성능과 고온 환경조성의 관점에서 히트파이프의 유효열전도도가 높을수록 합리적임을 알 수 있다.

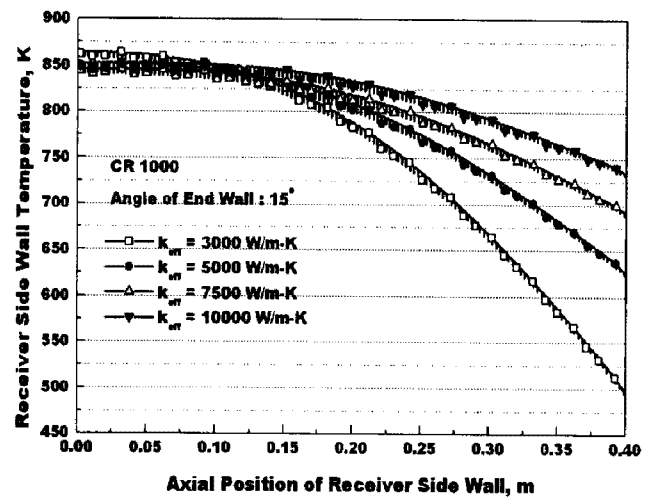


그림 3. 집광비 1000, 후벽 각도  $15^\circ$ 에서의 히트파이프 유효열전도도에 따른 흡수기 내벽의 온도분포

그림 4는 집광비 1000, 히트파이프의 유효열전도도 10000 W/m·K에서의 흡수기 내벽의 축 방향 위치에 따른 복사열유속을 나타낸다. 복사열유속은 입사된 복사열유속에서 흡수기 내벽으로 흡수된 값을 나타낸다.

후벽의 기울기가  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ 인 경우는 흡수기 내벽의 중앙부( $x = 0.2$  m)에서 가장 높은 복사열유속이 흡수되는 그래프 경향을 나타냈으며, 기울기가  $30^\circ$  이상이 될 경우, 최고 복사열유속 흡수지점은 점차 흡수기 후벽 쪽에서 나타났다. 흡수기 내벽 전체에 흡수되는 복사열유속 평균값은 흡수기 후벽의 기울기가  $15^\circ$  일 때, 가장 높게 나타났고, 기울기가  $0^\circ$  일 때, 가장 낮게 나타났다. 정량적으로 파악하면 후벽의 기울기가  $0^\circ$  일 때를 기준으로  $5^\circ$ 에서, 4.8 %,  $10^\circ$ 에서, 5.0 %,  $15^\circ$ 에서, 5.1 %,  $30^\circ$  일 때, 3.7 % 그리고  $45^\circ$ 에서, 4.3 % 높게 나타났다. 전체적으로 흡수기 후벽의 기울기가 증가함에 따라 흡수기 내벽에 흡수된 복사에너지의 상관관계는 찾을 수 없었으나, 흡수기 후벽의 기울기  $30^\circ$ 를 기준으로 그래프 경향이 구분됨을 확인 할 수 있다.

그림 5는 집광비 1000, 히트파이프의 유효열전도도 10000 W/m·K에서의 흡수기 입구를 통하여 들어온 복사열유속이 흡수기 내벽

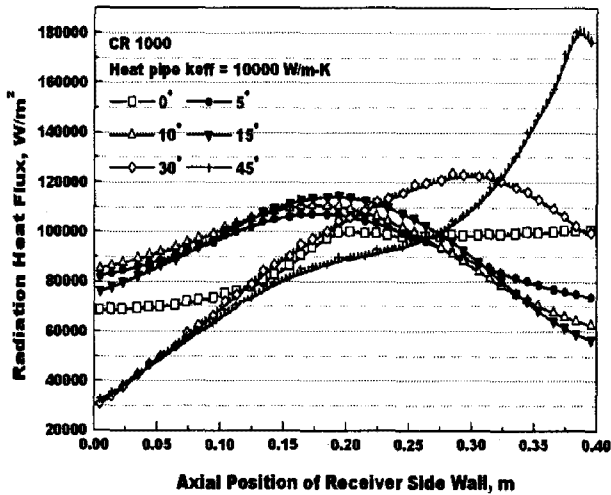


그림 4. 후벽 각도에 따른 흡수된 복사열유속 변화

과 후벽에 흡수되지 못하고 반사되어 흡수기 입구로 투과하는 복사열유속을 나타내었다. 흡수기 후벽의 기울기가 0°일 때를 제외한다면 나머지 흡수기의 경우, 후벽의 기울기가 5°, 10°, 15°일 때, 흡수기 개구의 반경방향 중앙부( $R = 0.06$  mm) 지점에서 투과된 복사열유속이 최대가 나타났으며, 흡수기 후벽의 각도가 증가 할수록 흡수기 개구 중앙부분에서 투과되는 복사에너지는 증가하고, 개구의 반경방향 끝부분에서 투과되는 복사에너지 또한 증가하여 복사에너지가 흡수기 개구 반경방향 전체로 고르게 투과됨을 알 수 있다.

흡수기 입구 전체의 복사열유속 평균값은 흡수기 후벽의 기울기가 10° 일 때, 가장 높게 나타났고, 기울기가 45° 일 때, 가장 낮게 나타났다. 세부적으로 파악해 보면 후벽의 기울기가 45° 일 때를 기준으로 0° 일 때, 5.0%, 5° 일 때, 3.1%, 10° 일 때, 8.0%, 15° 일 때, 5.4%, 30° 일 때, 5.4% 높게 나타났다.

그림 6에 집광비 1000, 유효열전도도 10000 W/m·K를 적용한 히트파이프를 삽입한 경우 흡수기 후벽의 각도에 따른 흡수기 내벽의 축 방향 온도분포를 나타내었다.

후벽 각도 45°의 경우에 흡수기 내벽의 최고 온도는 1130 K 이상을 형성하여 가장 높은 온도 분포를 나타냈다. 또한, 후벽 각도 5°

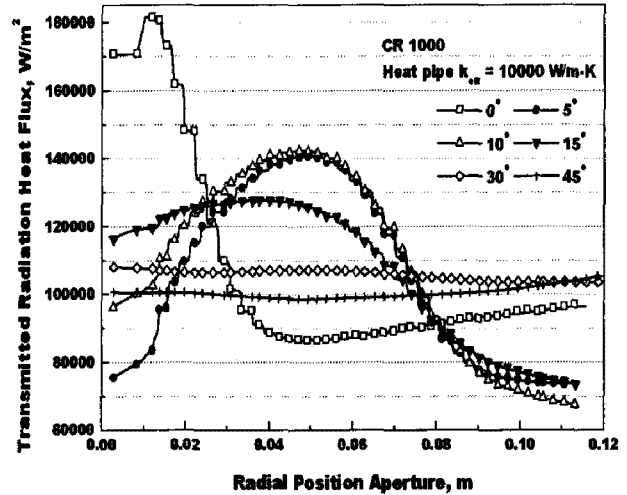


그림 5. 후벽 각도에 따른 투과된 복사열유속 변화

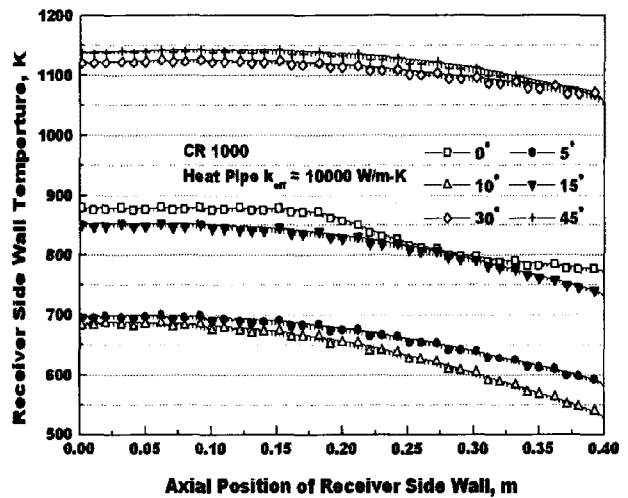


그림 6. 후벽 각도에 따른 흡수기 내벽 온도 분포

와 10°의 경우에 710 K 이하의 가장 낮은 온도 분포를 보이고 있다. 최고온도와 최저온도의 차이를 가지고 등온성을 비교하였을 때, 후벽 각도 45°인 경우에 약 50 K로 낮은 값을 나타내었으며, 후벽 각도 5°와 10°의 경우에 온도차이가 275 K를 보이면서 가장 높은 온도 차이를 보이고 있다.

후벽 각도 5°와 10°가 비슷한 등온성과 온도 환경을 나타내었고, 0°는 15°와, 30°는 45°와 비슷한 결과를 나타내었다. 흡수기 내벽 전체의 온도를 정량적으로 비교해보면 각도 0°일 때를 기준으로 5° 일 때, 24.5%, 10° 일

때, 31.5 %, 15° 일 때, 4.2 % 감소하였고, 30° 일 때, 35.5 %, 45° 일 때, 36 % 증가하였다.

## 5. 결론

고온 히트파이프를 적용한 태양열 흡수기의 후벽 각도 변화에 따른 열전달 특성을 파악하기 위하여 수치적으로 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 흡수기 후벽의 각도가 10°일 때, 흡수기 내벽으로 흡수되는 복사열유속이 가장 높게 나타났다.
- (2) 집광비와 흡수기 후벽의 각도가 동일한 태양열 흡수기에서 히트파이프의 유효열전도도가 우수 할수록, 흡수기 내부의 고온 환경조성과 등온성이 우수함을 알 수 있다.
- (3) 흡수기 후벽의 각도가 45° 일 때, 흡수기 입구로 투과되는 복사열유속이 가장 낮게 나타났으며, 후벽의 각도가 증가할수록, 복사에너지가 흡수기 개구전체로 고르게 투과되었다.
- (4) 흡수기 후벽의 각도가 45° 일 때, 흡수기 내벽이 1130 K이상의 고온을 형성 하였으며, 벽 각도 5°와 10°의 경우에 710 K 이하로서 가장 낮은 온도를 나타냈다. 흡수기 후벽의 각도를 45°로 설계하고, 유효열전도도가 우수한 히트파이프를 사용하면, 흡수기 내벽 전체의 고온 환경 조성 및 등온화를 위해서 유리한 것으로 판단한다.

## 후 기

본 연구는 한국 에너지기술연구원의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사한다.

## 참 고 문 헌

1. 류시열, 서태범, 강용혁, 김종보, 접시형 태양열 집광시스템용 흡수기의 열손실 해석, 한국태양에너지학회논문집, 20권 3호, 1999, 10.
2. Bergan, N. E., Testing of the Molten Salt Electric Experimental Solar Central Receiver in an External Configuration, National Laboratories Report SAND86-8010, 1986.
3. Abanades, S and Flamant, G., Experimental Study and Modeling of a High - temperature Solar Chemical Reactor for Hydrogen Production from Methane Cracking, International Journal of Hydrogen Energy, Vol 32, Issues 10-11, 2007, pp. 1508-1515
4. 윤여훈, 부준홍, 고온용 원관형 히트파이프의 열적 특성에 관한 실험 및 모사, 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, 2005, pp. 130-135.
5. Hiroshi, H., Yoshio., Y., Ako, S. and Yutaka T., Study on Design of Molten Salt Solar Receivers for Beam-Down Solar Concentrator, International Journal of Solar Energy, Vol 80, 2006, pp. 1255-1262.
6. 박영학, 정의국, 부준홍, 고온 히트파이프를 사용한 태양열 흡수기의 특성에 관한 수치해석적 연구, 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, 2007, 10, pp. 71 ~ 76.