

태양열발전용 흡수기 설계 및 열손실 특성실험

김 종규¹⁾, 강 용혁²⁾, 김 진수³⁾, 이 상남⁴⁾, 유 창균⁵⁾, 윤 환기⁶⁾

Experimental Study on Heat Losses from Receiver of Solar Thermal Power

Jongkyu Kim, Yongheack Kang, Jinsoo Kim, Sangnam Lee, Changkyun Yu, Hwanki Yun

Key words : Solar Thermal Power Plant(태양열발전플랜트), Receiver(흡수기), Cavity(캐비티), Heat Loss(열손실)

Abstract : Experimental data are presented which describe heat losses of cavity type receiver in wind tunnel. Experiments are conducted at various conditions such as the heater temperature in cavity changes from 300, 400, and 500 oC, wind speed in tunnel from 2 to 8 m/s, and four different tilt angle of 30, 50, 70, 90o. The power consumption including temperature, voltage and current for each experimental conditions are measured and stored in data logger at every one second interval. The experimental results show that heat losses increase with increasing wind speed and with tilt angle. However, heat losses for the tilt angle of 70 and 90o is almost same at each heater temperature. In addition, the effects of natural convection in combined convection heat losses vary in according to the tilt angle.

1. 서론

타워형식의 대규모 태양열발전시스템 중 흡수기(Receiver)는 반사판(Heliostat)으로부터 집광된 태양 복사에너지를 받아 흡수기 내부를 흐르는 작동유체에 열을 전달해 주는 기능을 한다. 이러한 작동유체로서 일반적으로 물을 사용하여 직접 증기를 발생시켜 증기터빈을 구동시키거나 용융염 등의 다른 작동유체를 사용하여 증기발생기(Steam generator)를 통해 터빈 구동용 증기를 발생시킨다. 이와 같이 흡수기는 태양열 발전시스템에 있어 태양열을 흡수/전환 시키는 첫 번째 설비로서 흡수기 이후의 순환 과정은 일반 발전플랜트와 유사하다.

올해 운전을 시작한 스페인의 PS 10 태양열발전의 경우 물을 작동유체로 사용하며 40 bar, 250 °C의 포화증기를 발생시키고 있으며 CESA-I 태양열발전의 경우 110 bar, 520 °C의 과열증기를 직접 발생시킨다. 본 연구와 관련된 태양열발전시스템에서 고려하고 있는 흡수기에서는 40 bar, 350 °C의 과열증기를 발생시키고자 한다. 이러한 증기조건과 함께 증기량의 설정은 발전플랜트의 건설에 있어 기본설계에 필요한 과정으로 필수적이다. 그

러나 일반 보일러와 같이 실내에 설치되는 경우와 달리 실외에 설치하여 직접 태양복사에너지를 받아들이는 흡수기의 경우 외기 온도, 바람의 세기, 방향에 따라 복사 및 대류에 따른 열손실량의 예측이 쉽지 않으나 흡수기 설계에 있어 필수적으로 고려해야할 기본요소이다. 이러한 대류 및 복사 열손실량을 줄이기 위하여 기존의 태양열발전용 흡수기는 캐비티(Cavity)를 흡수기 외부에 설

-
- 1) 한국에너지기술연구원
E-mail : hkyoon@kier.re.kr
Tel : (042)860-3513 Fax : (042) 860-3739
 - 2) 한국에너지기술연구원
E-mail : rnokim@kier.re.kr
Tel : (042)860-3744 Fax : (042)860-3739
 - 3) 한국에너지기술연구원
E-mail : yhkang@kier.re.kr
Tel : (042)860-3518 Fax : (042) 860-3739
 - 4) 한국에너지기술연구원
E-mail : jnskim@kier.re.kr
Tel : (042)860-3549 Fax : (042) 860-3739
 - 5) 한국에너지기술연구원
E-mail : snlee@kier.re.kr
Tel : (042)860-3223 Fax : (042) 860-3739
 - 6) 한국에너지기술연구원
E-mail : ckyu@kier.re.kr
Tel : (042)860-3515 Fax : (042) 860-3739

치하여 열손실을 최소화하려 하고 있다.

이러한 캐비티는 Dish형 태양열집광시스템에서 쉽게 찾아볼 수 있는데, 일반적으로 집열기의 형상을 원통형으로 하여 집광된 열의 회수율을 높이고 출구부(Aperture)를 작게하여 복사 및 대류 열손실을 줄이려 노력하고 있다. 이에 대한 연구로서 Pavlovic and Penot[1]는 풍동에서 풍속 변화에 따른 등온의 정육면체 형태의 캐비티에서 열 전달 실험을 실시하였다. 캐비티를 등온으로 유지하도록 히터(Heater)를 장착하고 캐비티의 기온각도, 풍속, 풍향에 따른 공급전력의 증가를 따져 열손실량을 측정하였다. 이와 유사한 방법으로 Leibfried and Ortjohann[2]은 구형 형태의 캐비티에서 실험과 해석을 통한 연구를 수행하였다. 이밖에 열손실에 대한 연구결과는 보고서에 잘 정리되어 있다[3]. Clausing은 타워형태의 태양열발전용 흡수기 Cavity에서의 열전달 연구를 수행하였는데, 분석적인 방법을 통해 대류열손실을 예측하였다[4].

본 연구에서는 풍동실험을 통해 타워형 태양열발전용 흡수기의 열손실량을 측정하였다.

2. 실험

2.1 실험장치

본 연구에서는 태양열발전용 흡수기의 열손실을 살펴보기 위하여 풍동내 캐비티형 흡수기를 설치하여 실험을 실시하였다. 열손실 실험 구성도를 그림 1에 나타내었는데, 외부 조건의 변화에 관계없이 히터의 온도를 일정하게 유지토록 전력을 공급하도록 하였으며 이를 위하여 히터 표면 안쪽 1 mm에 열전대를 삽입시켜 온도를 측정하였다. 이러한 과정 중에 히터에 공급하는 전력량의 변화를 측정하고 저장하여 조건변화에 따른 전력 소모량을 계산하였다. 이와 같은 방법으로 각 조건에 따른 전력소모량을 비교하여 열손실량의 차이를 알 수 있도록 하였다. 외부 조건의 변화로는 풍속, 캐비티의 기울임 각도 및 히터의 온도이며 실험조건을 표 1에 나타내었다.

Table 1 실험조건

실험항목	단위	값
풍속	m/s	2, 4, 6, 8
풍향		맞바람
기울임 각도	°	180, 90, 70, 50, 30, 0
히터 온도	°C	300, 400, 500

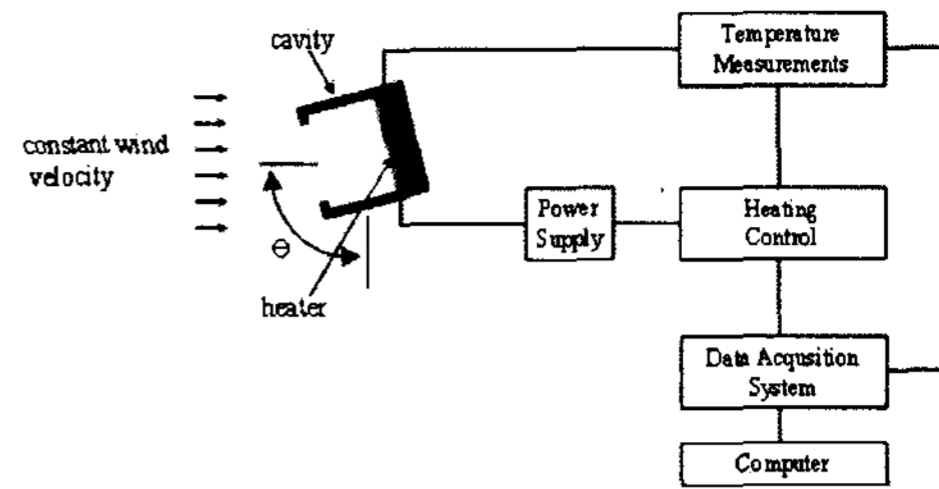


Fig. 1 열손실 실험 구성도

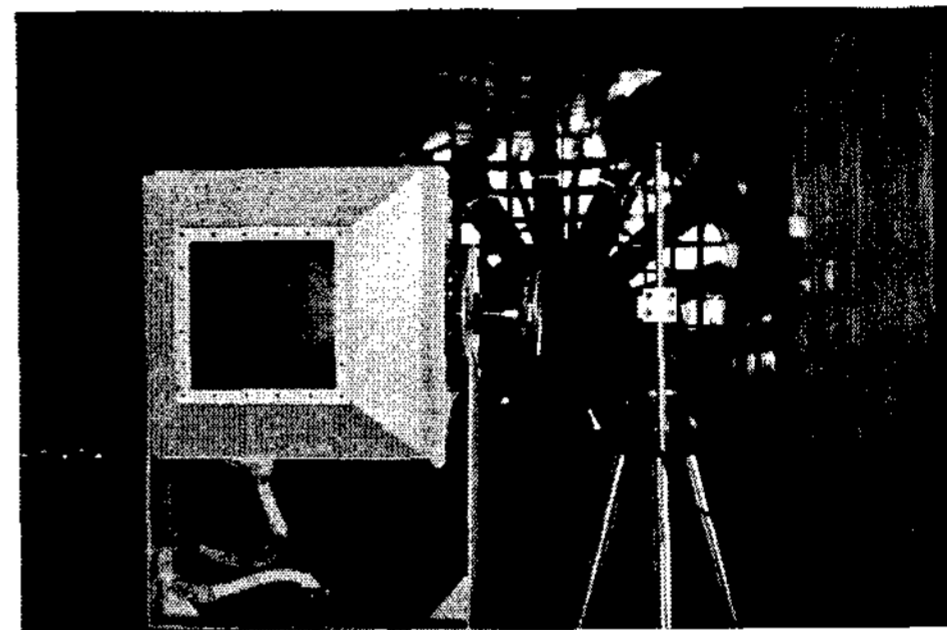


Fig. 2 풍동내 열손실 실험장치

실험에 사용된 풍동의 단면의 크기는 가로, 세로 2 m로서 외기를 빨아들여 사용한다. 그림 2는 풍동내 설치된 캐비티형식의 흡수기 모형과 풍동내 유속 및 온도를 측정하기 위하여 설치한 열선(Hot Wire) 형식의 KIMO 측정 프로브를 타나내고 있다. 흡수기의 개구부(Aperture)의 위치가 풍동의 중앙에 위치할 수 있도록 개구부 중심의 높이는 1 m이다. 캐비티 내부에 설치된 히터는 6개이며 크기는 각각 100 × 150 mm로 2단 3열로 배열되어 있어 히터의 전체 크기는 300 × 300 mm이다. 각 히터 중앙에는 온도 측정 및 전력공급량 조절을 위한 열전대가 설치되어 있다.

실험에 사용된 데이터 측정장비는 Fluke 2680A로서 1초 단위로 전압, 전류, 전력 및 온도를 측정, 저장하였다. 열선 프로브로 측정된 풍속, 풍온은 5초 단위로 저장하였다.

2.2 실험방법

캐비티에서의 열손실은 대류, 복사, 전도가 있다. 이 중 대류에 의한 열손실은 강제대류와 자연대류가 있는데, 실험을 통하여 복사 손실량을 별도로 측정하기는 어려우며 계산을 통하여 예측할 수 있으며 복사에 의한 열손실량은 풍속, 풍향에 관계없이 히터의 온도와 캐비티 형상에 영향을 받는다. 따라서 실험을 통해서만 대류열손실량을 측정하게 되는데, 강제대류와 자연대류를 구분해서 측정하기 위하여 몇 가지 과정을 통하게 된다.

I) 캐비티의 개구부를 아래(0°)로 향하여 풍속 없이 열손실량을 측정한다. (복사+전도 열손실)

II) 캐비티의 개구부 기울임 각을 변화시키며($30^\circ, 50^\circ, 70^\circ, 90^\circ, 180^\circ$) 풍속 없이 열손실량을 측정한다. (자연대류+복사+전도 열손실)

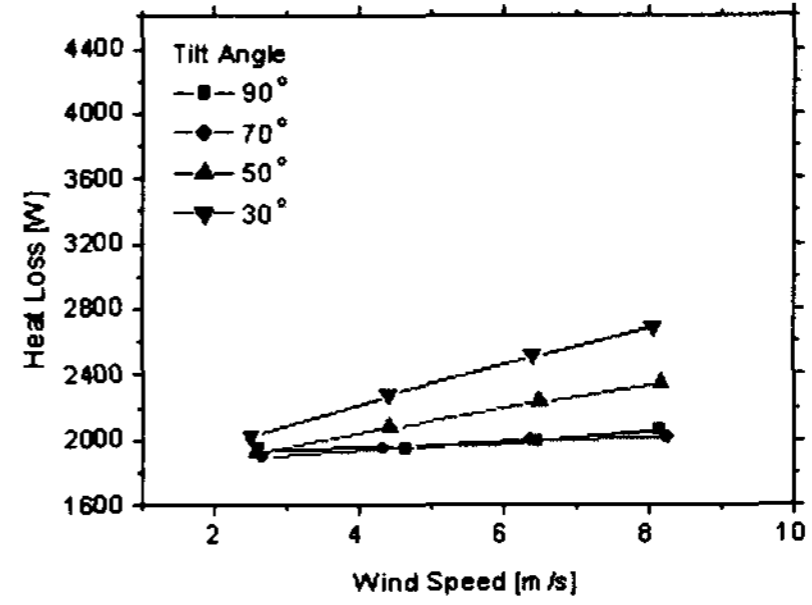
III) 외부 풍속, 풍향, 캐비티 기울임 각도에 따라 열손실량을 측정한다. (강제대류+자연대류+복사+전도 열손실)

위 I), II), III)에서 측정된 전력량에는 히터의 온도를 올리기 위한 전력소모량이 포함되어 있음을 고려하여야 한다. I)과 같이 캐비티를 아래로 향하는 경우 자연대류에 의한 열손실은 없다고 할 수 있다. 따라서 I)과 II)의 실험결과를 비교하면 각 캐비티 기울임 각에 따라 자연대류에 의한 열손실량을 알 수 있다. 이와 같은 방법으로 I)과 III)을 비교하면 풍속, 각의 변화에 따른 혼합대류 열손실을 알 수 있다. 강제대류와 자연대류가 동시에 발생하는 혼합대류에서 하나의 대류 열손실 값을 구분하기는 어렵지만 실험결과로서 혼합 대류열손실중 자연대류의 비를 구분하여 표시하였다.

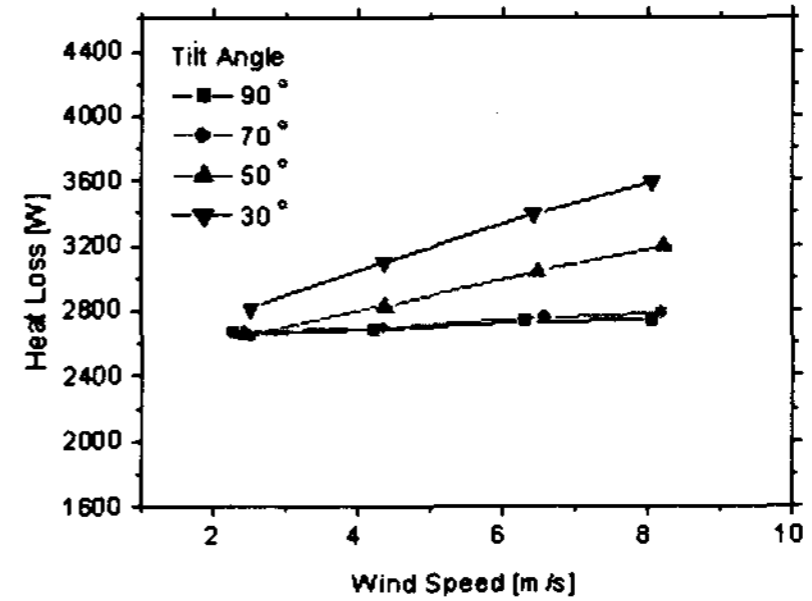
3. 결과 및 고찰

그림 3에 각 조건별 종합 열손실 값을 나타내었다. 즉, 히터의 발열에 필요한 전력량을 포함하여 대류, 복사 및 전도에 의한 모든 손실량을 포함한 값이다. 열손실은 풍동내 유속이 증가할수록 그리고 캐비티의 개구부가 아래로 향할수록(기울임 각이 커질수록) 커짐을 알 수 있다. 여기서 캐비티각 90° 의 경우 캐비티 개구부와 바람이 정면으로 맞닿는 경우로 캐비티 내부 정압이 커짐으로 인해 캐비티 내부 유속은 매우 작다. 따라서 캐비티 내부 히터에서의 열전달이 줄어들게 되는데, 각도가 30° 로 개구부가 아래 방향으로 향할 경우 바람과 개구부의 닿는 면적은 줄어들지만 바람이 개구부를 빗겨 지나감으로 인해 캐비티 내부에 재순환 유동이 발생하고 이로 인하여 열손실이 늘어남을 알 수 있었다. 또한 히터의 온도가 높을수록 열손실량은 큰 차이가 남을 알 수 있다.

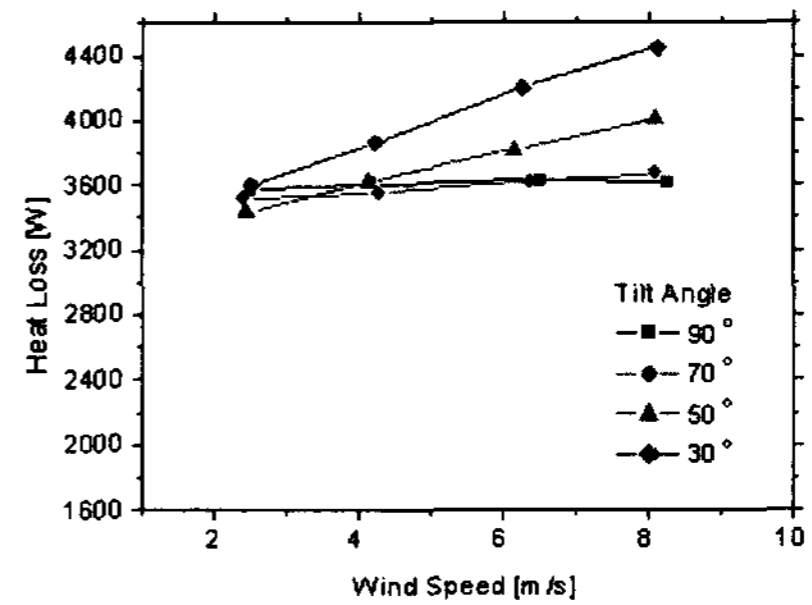
이와 같은 열손실량에서 복사, 전도 및 히터의 승온에 필요한 열량을 제하면 대류에 의한 열손실만을 구할 수 있다. 즉, 그림 3의 실험결과에서 각 히터 온도별 실험과정 I)의 결과를 빼면 그림 4의 결과와 같이 강제 및 자연대류에 의한 혼합대류에 의한 열손실만을 구할 수 있다. 그림 3과 그림 4를 비교하면 각 히터 온도별 열손실량의 차이는 크지 않으나 히터의 온도가 높을수록 캐비티의 기온 각도가 커짐에 따라 열손실은 더 커짐을 알 수 있으며 전체적인 열손실의 경향은 같게 나타났다. 특히 캐비티 기울임 각이 $70^\circ, 90^\circ$ 의 경우 유사한 열손실을 보이고 있다.



(a) 히터온도 300 °C

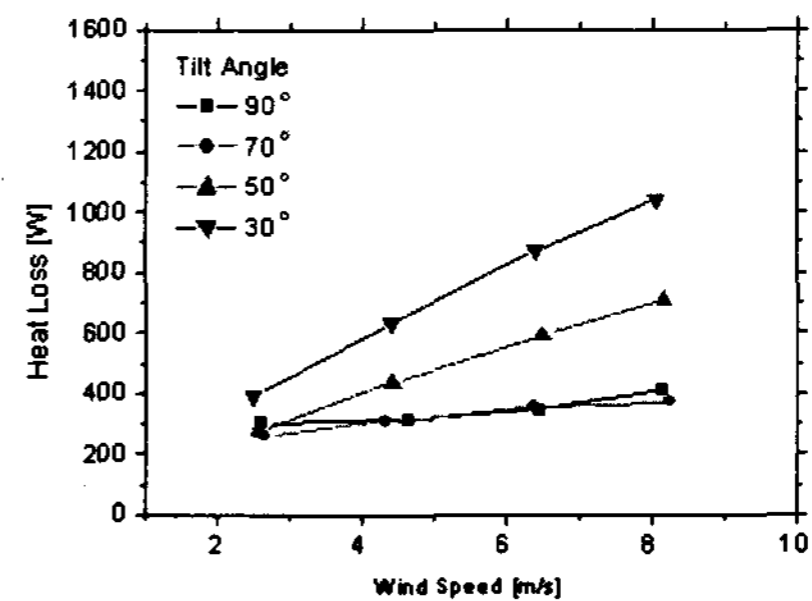


(b) 히터온도 400 °C

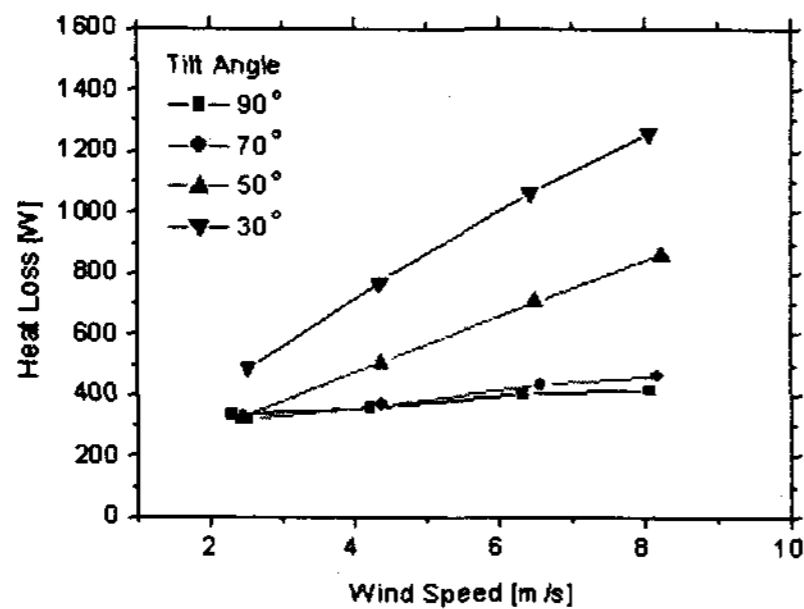


(c) 히터온도 500 °C

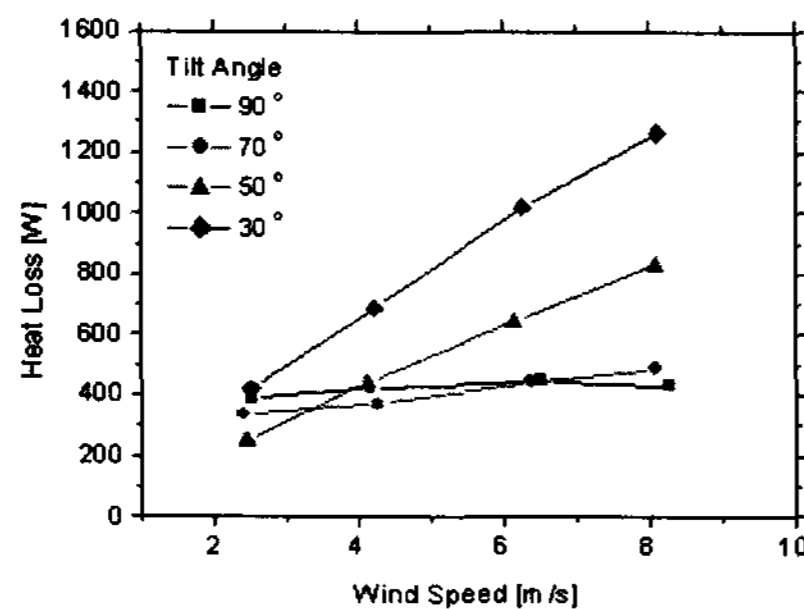
Fig. 3 히터 온도별 종합열손실(대류, 복사, 전도, 히터)



(a) 히터온도 300 °C



(b) 히터온도 400 °C



(c) 히터온도 500 °C

Fig. 4 히터 온도별 대류열손실

히터 온도 400 °C에서 캐비티 기울임 각에 따른 자연 대류 손실량을 그림 5에 나타내었다. 이를 그림 4(b)와 비교하면 기울임 각도 30°에서 자연대류 열손실은 약 100 W 정도인데 혼합대류 열손실은 풍속 2 m/s에서 약 500 W를 나타내고 있다. 이는 자연대류의 열손실이 동일 조건에서 혼합대류의 약 25% 정도를 나타내는 것이고 풍속이 증가할수록 자연대류의 영향은 더욱 작아지는 진다. 이와 반대로 기울임 각이 90°인 경우 혼합대류의 열손실과 자연대류의 열손실이 유사하게 나타났다. 이는 혼합대류의 열손실중 대부분이 자연대류에 의한 열손실이라고 할 수 있다.

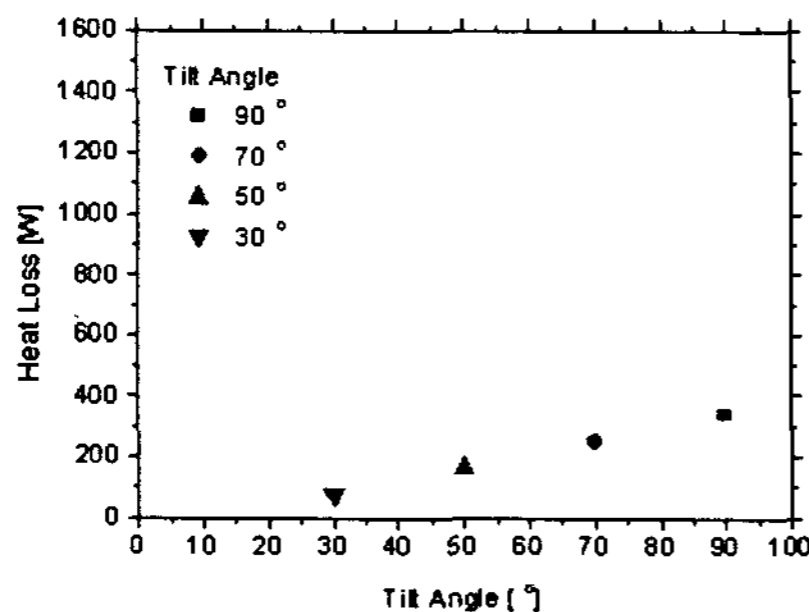


Fig. 5 히터온도 400 °C에서 캐비티 기울임 각에 따른 자연대류손실

4. 결론

태양열발전시스템의 흡수기에 대한 열손실을 검토하기 위하여 풍동내 모델을 설치, 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 풍속과, 캐비티의 기울임 각이 증가할수록 히터의 열손실량은 증가함을 알 수 있었다.

2) 캐비티의 기울임 각이 70, 90°인 경우 풍속에 따른 열손실은 크지 않았다. 그러나 기울임 각이 커지는 30, 50°의 경우 풍속과 비례하여 열손실이 증가함을 알 수 있다.

3) 히터온도 400 °C의 경우 기울임 각이 작은 90°인 경우 자연대류에 의한 열손실이 지배적인데 비하여 기울임 각이 큰 30°의 경우 자연대류의 영향은 최대 25% 이고 이는 풍속이 증가할수록 줄어준다.

따라서 혼합대류 열손실에서 자연대류의 영향은 실험조건에 따라 달라짐을 알 수 있다.

후 기

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

References

- [1] Pavlovic, M.D. and Penot, F., "Experiments in the Mixed Convection Regime in an Isothermal Open Cubic Cavity", *Experimental Thermal and Fluid Science*, No. 4, pp. 648-655, 1991
- [2] Leifried, U. and Ortjohann, J., "Convective Heat Loss from Upward and Downward-Facing Cavity Solar Receivers: Measurements and Calculations", *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 117, pp. 75-84, 1995.
- [3] Robert Y.M., "Wind Effects on Convective Heat Loss from a Cavity Receiver for a Parabolic Concentrating Solar Collector", SAND92-7293, 1993.
- [4] Clausing, A.M., "An Analysis of Convective Losses from Cavity Solar Central Receivers", *Solar Energy*, Vol. 27, No. 4, pp. 295-300, 1981.