

일사량과 경사진 육면체 내부의 온도변화에 따른 응축특성에 관한 정량적 연구

이춘기*, 고영하**, 김병철***

*조선대학교 대학원 기계공학과(cglee1747@paran.com),
조선이공대학 하이테크 CAD/CAM학과(yhgo@cst.ac.kr), *조선대학교 기계공학과(bckim@chosun.ac.kr)

Quantitative Analysis of the Condensation Characteristics with Solar Radiations and Inner Temperature of the Tilted Box

Lee, Cheun-Gi* Koh, Young-Ha** Kim, Byung-Chul***

*Dept. of Mechanical Eng. Graduate School, Chosun University(cglee1747@paran.com),
**Dept, Hi-tech CAD/CAM, chosun university college of science & technology(yhgo@cst.ac.kr),
***Dept. of Mechanical Eng, Chosun University(bckim@chosun.ac.kr)

Abstract

The solar radiation, inner temperature of the tilted box and the amount of condensed water were measured to find the most effective purified water production system.

The inner temperature of the tilted box was related with solar radiation that was affected by sunshine and cloud. With analyzing those relationships of the solar radiation, inner box temperature, the angle of tilted boxes and amounts of water condensation optimal collecting system area could be calculated

Keywords : 일사(Solar Radiation), 응축(Condensation), 육면체(Box), 집열면적(Collecting area)

기 호 설 명

SR	: 일사량(W/m ²)	AW	: 물 표면 위
CW	: 응축수량(ml)	WS	: 물표면
IT	: 내부공기온도(°C)	UW	: 물 속
TG	: 유리면 온도(°C)	SD	: 일조시간(Hr)

투고일자 : 2010년 12월 7일, 심사일자 : 2010년 12월 15일, 게재확정일자 : 2011년 1월 11일
교신저자 : 김병철(bckim@chosun.ac.kr)

1. 서 론

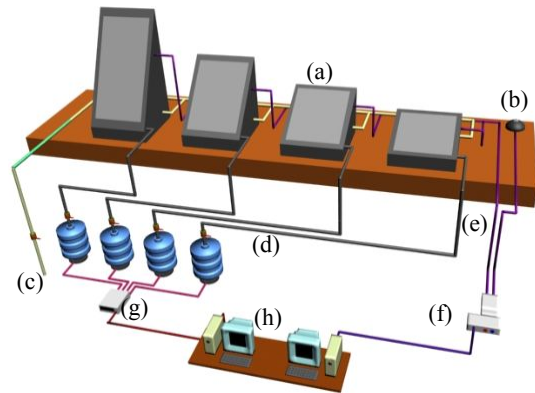
지구온난화에 의한 이상기후 현상은 지구 곳곳에 가뭄과 홍수 등의 재해를 일으키고 있으며 이로 인한 음용수의 부족현상은 심각한 단계에 이르러 이를 해소하기 위한 물의 제조방법이나 정수방법이 이용되며 연구되고 있다. W. R. Mc Cluney, Cambell 등은 태양열을 이용한 물의 증발시 이에 대한실용성과 경제성에 대하여 연구하였고,¹⁾ 강용혁, 조덕기 등은 국내 태양열 시스템 설치를 위한 최적 설치각 산출을 통하여 최대 경사면과 일사량에 대하여 분석하였으며²⁾, 곽희열, 김정배 등은 태양에너지 해수 담수화 시스템에 대하여 연구하였다.³⁾ 김병철 등은 태양열을 이용한 정수시스템을 개발하고자 일사량과 경사각에 따른 응축특성에 대하여 연구하기 위하여 경사진 육면체를 제작하여 경사각에 따른 응축수량과 필요면적을 알고자 하였으나 정량화가 되지 못하였고 가조시간과 일사량과의 관계가 규명 되지 않아 실제 응용하기에는 문제가 있었다.

본 연구에서는 태양열을 이용한 정수시스템의 효율 향상을 위하여 일사량과⁴⁾ 경사각에 따른 내부온도변화가 응축수량에 미치는 영향을 규명하고 정량화한 연구 분석을 통하여 음용수로 사용할 수 있는 시스템을 제작할 수 있는 자료를 제공하고자 하였으며 광주지방을 중심으로 실험하였다.

2. 실험 장치 및 방법

실험장치는 그림 1과 같이 육면체의 상부는 경사각이 각각 15°, 30°, 45°, 60°인 강화유리로 바닥은 1,000mm x 1,000mm이며 벽면과 바닥은 두께 50mm로 단열하였으며 내외부의 표면은 2mm의 FRP 표면에 흑색 에폭시로 도장 하였다.

응축된 물은 하부로 내려가 4개의 탱크에 저장되도록 하였으며 Load-cell을 이용하여 유량을 측정하였고 일사량 및 외부·내부 공간에 열전대를 설치하였으며 측정된 자료는 컴퓨터를 이용하여 연구 분석 하였다.⁴⁾



(a) 실험조, (b) 일사량계, (c) 급수 공급관, (d) 응축수 관, (e) 열전대, (f) 온도데이터 수집장치 (g) 유량계 및 응축수 수집장치, (h) 컴퓨터

그림 1. 실험장치의 개략도

실험장치는 정남향으로 설치되었으며 내부에 동일한 양과 온도의 시수를 넣고 같은 간격으로 일사량, 온도, 응축수량을 측정하였으며 일사량에 따른 내부온도의 변화와 응축수량과의 상관관계를 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 가조시간과 운량에 따른 일조시간과 일사량

태양상수는 대기권 밖에서의 태양의 연중 평균일사량을 나타내는 값으로 $1,373\text{W}/\text{m}^2$ 에서 연중 $\pm 3.2\%$ 범위 내에서 변한다.⁶⁾

$35^{\circ}10' N$ 인 광주지역의 가조시간은 동지는 9.64시간, 춘분·추분은 12.07시간, 하지는 14.36시간으로 연 중 4.72시간의 차이를 보이며 동지와 하지의 가조시간의 차이는 하지를 기준으로 -32.86% 의 차이를 보인다.⁷⁾

그림 2는 2009년 8월부터 12개월간 월평균 일사량과 운량과 경사각에 따른 응축수량을 측정된 결과를 나타낸다.

4월에서 10월까지와 7개월과, 11월에서 3월까지 5개월 사이의 응축수량은 많은 차이를 보이고 있는데, 월별 일조시간의 변화에 따라 일사량이 비례하는 경향을 보이고 일조

시간은 운량에 반비례하는 경향을 보인다.

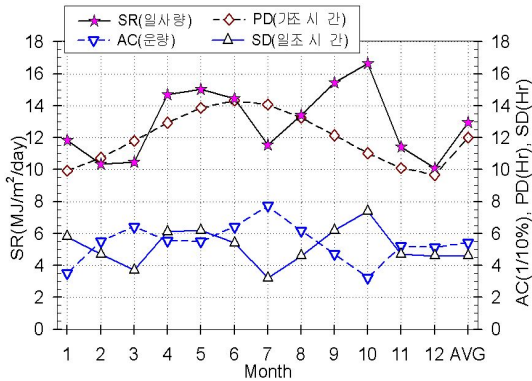


그림 2. 월별 가조시간, 운량, 일조시간, 일사량 (2009.08~2010.07)

표 1은 가조시간과 운량, 일조시간, 일사량의 변화를 나타낸다. 4월부터 10월까지와 11월부터 3월까지 두 기간 동안 일사량과 가조시간의 평균값은 24.7%와 25.9%로 차이가 적어 가조시간과 일사량이 비례하는 경향을 나타내었다. 또한 12개월간의 평균 운량은 54%이고 일조시간은 5.2시간으로 두 기간 중의 일조시간과 운량과는 평균값과 ±2%와 ±0.4시간으로 매우 작은 차이를 보인다. 즉 두 기간의 평균 일사량은 일조시간과 운량보다는 가조시간에 따라 변화하는 경향을 보인다.

표 1. 기간별 일조조건의 변화

구 분	기 간 평 균 값	
	4~10월	11~3월
일사량 (kJ/m ²)	14,412	10,846
가조시간 (Hr)	13.9	10.3
운 량 (%)	56	52
일조시간 (Hr)	5.6	4.8

3.2 경사각에 따른 일사량과 집열면적

(1) 시간대별 일사량과 집열면적

고정된 경사각에서 정남향으로 설치된 실험 장치의 실제 태양과 수직하는 경사면의 집열면적은⁴⁾ 식 (1)에서와 같이 변화하게 된다.

$$Asc = Ag \times \sin(\theta + \delta) \times \cos(\gamma) \quad (1)$$

Asc : 태양광과 수직한 집열면적

Ag : 경사면 유리면적

θ : 경사각

δ : 남중고도각

γ : 방위각

그림 3은 일출에서 일몰 시간까지의 시간대별 집열면적과 일사량을 나타내는 그래프이다. 일출 후 방위각이 변화함에 따라 태양 고도각이 커지고 일사량도 증가하며 이에 따라 최적 집열면적이 증가하므로 집열량이 증가하고 남중시간에 최적 집열 면적이 최대가 되며 일사량은 오후가 오전보다 높게 나타나는데 이는 지면의 온도상승으로 인하여 반사와 산란이 많아지기 때문이며 경사각이 큰 장치가 집열면적이 크며 많은 일사량을 받을 수 있는데 이는 경사각과 고도각, 방위각의 변화에 따라 달라진다.⁵⁾

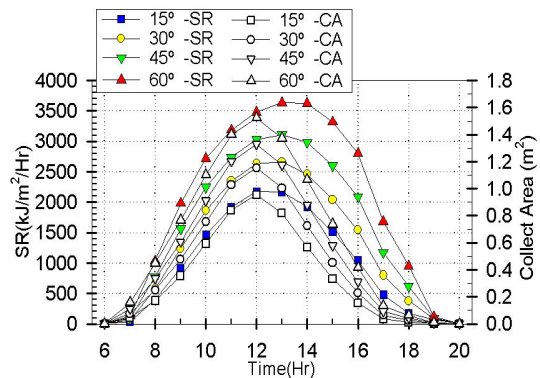


그림 3. 시간대별 일사량과 집열면적(2009.09.10)

(2) 계절별 일사량과 집열면적

그림 4는 춘분, 하지, 추분, 동짓날에 태양의 고도각과 방위각의 변화에 따른 집열면적과 일사량의 변화를 나타낸 그래프이다.

춘분날에는 경사각이 클수록 집열면적과 일사량이 컸으나 하지에는 남중 고도각이 높아 집열면적의 차이가 크지 않았으며 경사각이 작을수록 집열면적의 크기가 작게 변화였고, 60°의 경우는 경사각은 춘분 때와 달리 태양이 수

직쪽에 가까워 투영 집열면적은 작아지고 동짓 날엔 하지와 반대로 집열면적은 크게 증가하고 일사량은 일조시간과 함께 감소하였다.

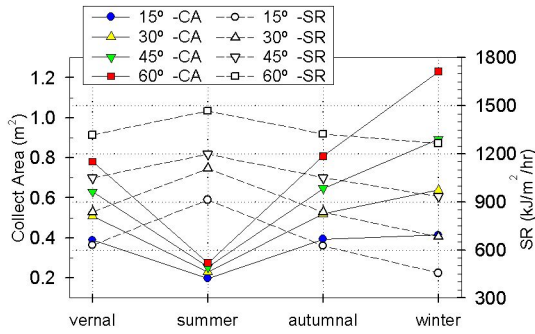


그림 4. 계절에 따른 집열면적 변화

표 2는 바닥면적을 1m²로 하는 고정된 경사각이 15°, 30°, 45°, 60°인 육면체에서의 내부체적과 수직면적으로 환산한 집열면적의 변화를 계절별로 남중시간을 기준하여 나타낸 것이다. 계절별로 남중시 집열면적은 여름에는 15°, 봄·가을에는 30°와 45°, 겨울에는 60°가 크게 나타나고, 집열면적 당 공기체적 비율은 경사각이 작을수록 작게 나타난다. 따라서 계절별 공기체적비가 작을 경우에 공기온도와

표 2. 공기체적과 계절별 집열면적 변화

구분	경사각				
	15°	30°	45°	60°	
유리면적 (m ²)	1.04	1.15	1.4	2.0	
집열면적 (m ²)	춘/추분	0.97	1.15	1.39	1.85
	하 지	1.04	1.09	1.18	1.33
	동 지	0.75	1.02	1.38	1.99
내부체적 (m ³)	0.25	0.41	0.62	0.99	
집열면적 당 공기체적 (cm ³ /cm ²)	춘/추분	26.2	35.5	44.5	54.4
	하 지	24.6	37.3	52.5	74.3
	동 지	33.9	40.3	45.1	49.3

물의 온도상승이 빨라서 응축조건에 유리하고 공기체적비가 큰 경우 공기상부의 온도는 높으나 공기하부의 온도상승이 느므로 응축이 늦게 일어나고 시간당 응축량도 적었다. 계절별로 남중시 태양광과

수직하는 경사면에서 가장 많은 일사량을 받을 수 있어 경사각별로 하지 때 15°, 춘·추분 때 30°와 45°, 동지 때 60°경사각이 많은 응축이 발생하였다.

3.3 경사각과 일사량에 따른 내부 공기온도

그림 5는 맑은 날 경사각이 45°인 경우 일사량에 따른 실험조 내의 물과 공기온도의 변화를 나타낸 그래프이다. 물의 온도는 상승하여 공기의 경우 보다 1~2시간 뒤에 최고온도에 도달하고, 일사량이 감소함에 따라 외기의 영향으로 유리표면에서부터 온도가 내려간다. 상승 때와 마찬가지로 물보다 공기의 온도가 빨리 낮아졌으며 일사량의 감소로 인하여 유리면에서부터 내부공기 그리고 물로 열이 전달되어 온도가 내려가며 물과 공기의 비열과 대류현상의 차이로 온도가 내려가는 기울기가 다르게 되는데 일몰 3시간 전에 공기의 상하부 온도가 같아진 후 상부의 온도가 차츰 더 낮아진다.

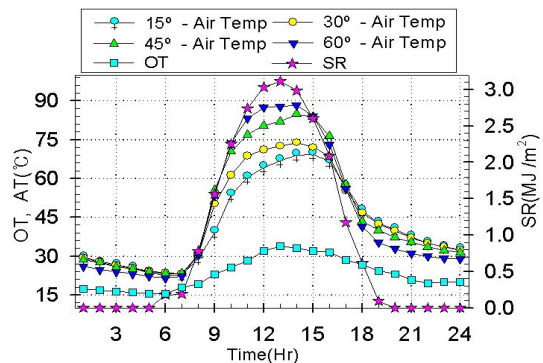


그림 5. 경사각별 시간대별 공기온도 변화(2009.09.10)

그림 6은 경사각에 따른 맑은 날의 일사량과 물의 표면 및 외기온도의 변화를 나타낸 그래프이다. 물의 표면온도는 일사가 시작되고 1시간 후까지 내려가다 상승하기 시작하였다. 물은 공기보다 열용량이 커서 공기의 온도보다 서서히 상승하였다. 일사량이 정점을 지나 2시간 후에 물의 온도는 최고가 되었다. 경사각별로 4°C 정도의 차이가 났으며 경사각이 클수록 공기의 체적이 크므로 온도상승은 적었다.

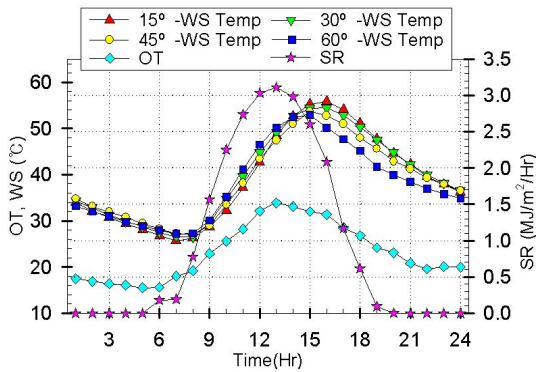


그림 6. 경사각별 물 온도변화(2009.09.10)

그림 7은 경사각이 45°인 경우 실험장치 내부의 공기와 물의 온도변화를 나타낸다.

일사가 시작되기 전까지 유리면 하부의 온도와 물의 온도는 공간 중앙의 온도보다 낮으며 일사가 사직된 후 공간 중앙의 높은 온도의 공기는 대류현상에 의하여 서서히 상부로 이동하고 온도가 상승하며 물의 온도도 상승하였다. 일사량이 감소함에 따라 외기의 영향으로 유리표면에서부터 온도가 내려갔으며 물보다 공기의 온도 하강속도가 더 빠름을 보였다.

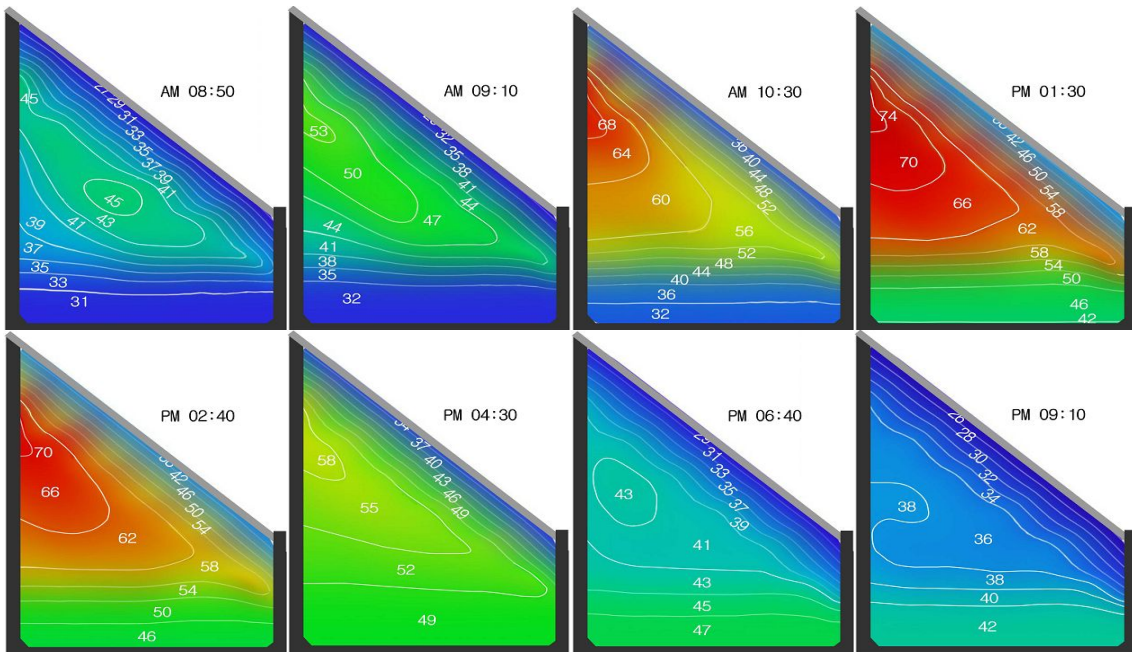


그림 7. 맑은 날 45° 경사각의 시간대별 온도변화 등온선 (2009.08.22)

3.4 경사각에 따른 내부온도와 응축

그림 8은 경사각이 45°인 경우 맑은 날의 시간에 따른 일사량 및 공기의 온도변화와 응축수량을 나타내었다. 일사가 시작되면 응축수는 감소하고 물의 온도가 상승하며 증발이 시작된다. 정오를 지나며 일사량이 감소할 때부터 응축은 시작되고 일사량이 최대점을 지나면서부터 일사량의 감소율에 반비례하며 응축은 증가한다.

일사량이 감소하며 외부와 접한 유리온도는 감소하며 내부의 상부 공기온도는 대류현상에 의하여 하부로 내려오고 상부와 하부의 온도가 같아지는 곳에서 최대의 응축수를 생산한다.

표 3은 5월의 맑은 날 경사각별 온도변화와 응축특성을 나타낸 표이다. 유리면과 태양광수직면의 면적은 경사각과 계절에 따라 변화하게 되며 내부공기의 체적은 경사각별로 일정

하브로 집열면적 당 공기체적도 변화하게 된다. 경사각별 공기 최고온도는 경사각이 클수록 대류현상이 활발하여 상층부와 하층부의 온도차이가 커서 경사각이 60° 최고온도는 88.2°C, 경사각이 15°인 경우는 69.4°C로 경사각별 최대 18.8°C 정도의 차이를 보였다. 물의 온도는 경사각이 작을수록 높게 나타났는데 이는 내부의 공기량이 적어서 공기의 온도가 물로 전달되어 물과 공기의 온도차이가 적게 발생하기 때문이다.

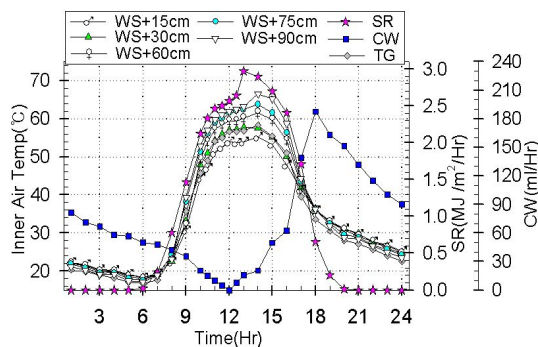


그림 8. 45° 경사각의 공기온도변화와 응축수 (2009.05.12)

표 3. 경사각별 내부온도 변화(2009.05.12)

구 분	경 사 각				
	15°	30°	45°	60°	
유 리 면 적 (m ²)	1.04	1.15	1.4	2.0	
집 열 면 적 (m ²)	1.034	1.124	1.246	1.459	
내 부 체 적 (m ³)	0.25	0.41	0.62	0.99	
집열면적 당 공기체적 (cm ³ /cm ²)	24.17	36.47	49.75	67.85	
최 고 온도변화 (°C)	물의 온도	55.9	54.5	53.8	52.9
	공기 온도	69.4	73.9	84.8	88.2
	유리 온도	62.6	64.7	66.8	70.8
응축수량 (ml/day)	2,564	2,454	1,782	1323	

3.5 경사각별 응축량과 최적집열면적

그림 9는 실험기간 동안 맑은 날의 응축수량과 일사량의 상관관계를 나타낸 그래프이다. 일사량이 17MJ/m² 이상에서는 경사각 15°의 경우가 응축수의 생산량이 가장 많았으며, 17MJ/m² 이하에서는 30°의 경우가 최대

가 되었으며 15°, 45°, 60° 순으로 발생하였다. 일일 일사량(MJ/m²/day)에 따른 응축수량(ml)은 15°의 경우는

$$CW=(-0.07 \times SR^3)+(2.66 \times SR^2)+(42.67 \times SR)+453.79$$

30°의 경우는

$$CW=(-0.08 \times SR^3)+(3.22 \times SR^2)+(23.71 \times SR)+642.13$$

45°의 경우는

$$CW=(-0.07 \times SR^3)+(3.91 \times SR^2)-(13.43 \times SR)+615.63$$

60°의 경우는

$$CW=(-0.04 \times SR^3)+(2.17 \times SR^2)+(0.190 \times SR)+621.32$$

로 나타낼 수 있으며 각 경사각별 오차범위는 30% 미만이다.

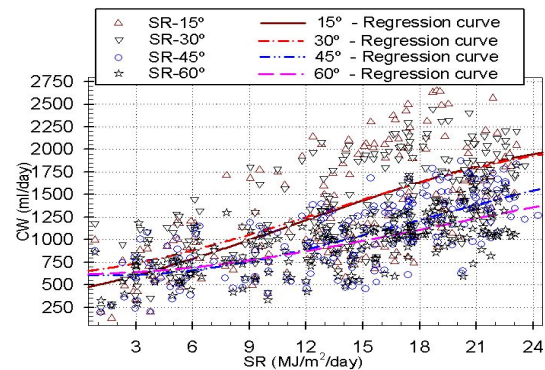


그림 9. 일사량과 응축수 발생량(2009.08~2010.7)

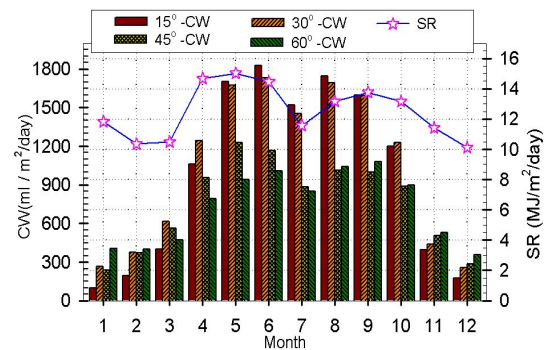


그림 10. 월별 일일평균 응축수 발생량 (2009.08~2010.07)

그림 10은 실험기간 동안 경사각별 응축수 발생량을 월별 평균값을 나타낸 것이다.

가조시간과 운량변화에 따른 경사각별 응

축수 발생은 4월부터 10월까지의 평균이 65.9°로서 태양광과 수직을 이루는 경사면의 평균 각도는 24.1°이며, 평균각도와 가장 근사한 경사각도인 15°, 30°장치에서 많은 응축수가 발생하였다.

11월부터 3월까지의 평균은 39.2°로서 태양광과 수직을 이루는 경사면의 각도는 평균 50.8°이며 경사각이 큰 장치일수록 많은 응축수가 발생하였다. 경사각별 응축수 발생량은 4월부터 10월까지의 15°, 30° 경사각 장치에서, 11월부터 3월까지는 60°, 45°경사각 장치에서 많은 응축수가 발생하였다. 실험의 실측결과 각각의 경사각에서 일일 필요 음용수량을 생산하기 위한 집열면적은 표 4와 같다.

일인당 일일 필요 음용수량이 2,000ml 일 때 4월부터 10월까지 7개월간은 15° 경사각에서 가장 많은 1,523ml의 응축수가 발생되어 1.31m²의 집열면적이 필요하였으며, 11월부터 3월까지는 5개월간은 60° 경사각에서 433ml의 응축수가 발생하여 4.62m²의 면적이 필요하였다.

표 4. 필요음용수량에 따른 필요집열면(2009.8~2010.7)

구 분	기 간	15°	30°	45°	60°
기간평균 응축량 (ml)	11~3월	254	391	392	433
	4~10월	1,523	1,517	1,020	945
필요 집열면적 (m ²)	11~3월	7.87	5.10	5.10	4.62
	4~10월	1.31	1.31	1.96	2.12

4. 결 론

태양열을 이용한 최적의 정수시스템을 제작하기 위한 응축특성을 연구하기 위하여 경사각이 다른 4개의 육면체를 제작하고 일사량과 경사각에 따른 실험장치 내외부의 온도분포와 응축수량을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 월별 일사량과 가조시간은 비례하며, 일조시간은 운량에 반비례 하고, 일사량은 계절별 가조시간에 가장 많은 영향을 받게 된다.
- (2) 일출 후 실험 장치 내부의 공기 최고 온도

는 공간 중앙으로부터 상승하며 서서히 상부로 이동하다 일사량이 감소하며 다시 공간중앙으로 이동하였다..

- (3) 공기의 상부와 하부의 온도가 같아질 때 최대의 응축수가 생산되었다.
- (4) 30° 경사각의 경우 연중 최대의 응축수가 생산 되었으며 일사량에 따른 응축량은 다음과 같은 식으로 산출할 수 있다.

$$CW=(-0.08 \times SR^3)+(3.22 \times SR^2)+(23.71 \times SR)+642.13$$
- (5) 일인당 일일 필요음용수량이 2,000ml 일 때 4월에서 10월까지 7개월간은 30° 경사각에서 가장 많은 1,523ml의 응축수가 발생되었으며 1.31m²의 바닥면적이 필요하다.

후 기

본 연구는 2010년도 조선대학교 학술 연구비의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

1. W.R. McCluney, Cambell 1984, "Solar Distillation of Water", Energy Note FSEC-EN-80 February 1984.
2. 조덕기, 강용혁 외, "국내 태양열시스템 설치를 위한 최적 설치각 산출을 통한 최대 경사면 일사량분석" ISSN : 0253313, 2009.04
3. 광희열, 김정배, 주홍진, 윤응상, 주문창, "태양에너지 해수담수화시스템 실증" 한국태양에너지학회 논문집 Vol.27, No.4, 2007, pp27-33.
4. 김병철, 이춘기 "태양열 정수시스템 이용을 위한 일사량과 경사각에 따른 응축특성에 관한 연구" ISSN : 1598-6411, 2009.06
5. 태양에너지학회 "태양에너지핸드북"pp.2-149, ISBN 89-8205-089-2, 2004.10.
6. 김영섭, 김경익, "대기광학과 복사학", pp 53-60, 시그마프레스, 2002
7. Korea Meteorological Administration Seoul Korea, "Annual Climatological Report" 1982-2009