

태양열을 받는 경사진 육면체 내 해수의 응축특성에 관한 실험적 연구

김범한*, 김병철**

*조선대학교 기계공학과 대학원(kbh7986@hanmail.net), **조선대학교 기계공학과(bckim@chosun.ac.kr)

An Experimental Study on the Condensation Characteristics of Sea Water in the Tilted Box with Solar Radiation

Kim, Beom-Han* Kim, Byung-Chul**

**Dept. of Mechanical Eng. Graduate School, Chosun University(kbh7986@hanmail.net)

**Dept. of Mechanical Eng, Chosun University(bckim@chosun.ac.kr)

Abstract

To find effective way of the production of distilled water for drought and flood with solar radiation, three boxes were made same base each 1000mm × 1000mm and tops are 45 degree. Individual boxes contained the sea water, rain water and surface water were placed at the same location and same time. Condensation of each box has been compared. On clear day production of distilled water in the box with sea water was 36% and 32% less than boxes with rain water and surface water.

The maximum condensation reached when the temperature of the top and bottom parts are equal. As concentration of sea water increased production of distilled water was decreased. In the box with sea water, the surface temperature was lower than 3cm below the surface. Optimum collector area for producing distilled water 2000ml of these three boxes were 3.75m².

Keywords : 경사진 육면체(Tilted Box), 응축(Condensation), 일사(Solar Radiation), 증발(Distilled Water)

기 호 설 명

CW	: Condensed Water	SE	: Sea Water
SR	: Solar Radiation	R	: Rain Water
AC	: Amount of Clouds	S	: Surface Water
SD	: Sunshine Duration	S,B	: Surface, Bottom

투고일자 : 2011년 6월 9일, 심사일자 : 2011년 6월 12일, 게재확정일자 : 2011년 7월 25일
교신저자 : 김병철 (bckim@chosun.ac.kr)

1. 서 론

지구 온난화로 인한 이상기후 현상으로 가뭄 홍수 등이 일어나고 있으며 이로 인한 물 부족 현상이나 물의 오염 등은 심각한 수준에 이르고 있다. 특히 가뭄 시 섬이나 홍수로 인한 지역에서의 물의 오염 등이 문제가 된다. 이를 위한 대책으로 물에 대한 많은 연구가 이루어지고 있으며 정수방법 등에 관심이 모아지고 있다. 현재 개발된 정수방법은 액체의 증발을 이용한 증발법과 역삼투압법, 냉동법 등이 있다.

증발법은 에너지 소비가 많으며 역삼투압 방법이나 냉동법은 유지관리 및 초기투자비가 많이 드는 단점이 있다. 조덕기, 강용혁¹⁾ 등은 운량을 고려한 일사량 예측을 통하여 태양열의 이용에 대하여 연구하였으며 곽희열, 김정배²⁾ 등은 태양열을 이용한 판형 해수 담수기의 열 성능에 관하여 연구하였고 김병철 이춘기³⁾ 등은 태양열을 이용한 육면체 내의 경사각에 따른 일사량과 응축특성에 대하여 연구하였다. 박이동⁴⁾ 등은 Solar pond에 대한 연구를 통하여 해수의 열전달 특성에 대하여 연구하였고 Campbell, George⁵⁾은 태양열을 이용한 해수를 음용수로 사용할 수 있는 방법에 대하여 연구하였다. Lourdes Garcia-Rodriguez와 Carlos Gomez-Camacho⁶⁾는 해수를 응축하는데 태양열을 활용하는 방안을 연구하였다. 따라서 태양열을 이용한 값싼 에너지를 이용하여 해수나 우수 또는 지표수를 증발시켜 응축하면 경제적이고 효과적인 방법이 될 수 있다.

그러므로 본 연구에서는 태양열에 의한 응축효과를 실험하기 위하여 광주지방에 3개의 45° 경사진 육면체를 설치하여 해수와 우수, 지표수를 넣고 육면체의 내·외부 온도와 일사량을 측정하고 태양열을 이용 증발시킨 후 응축량을 측정하여 해수 우수 지표수의 응축 특성을 연구 분석하였으며 저렴한 비용으로

음용수를 생산할 수 있는 정수시스템의 기초 자료로 활용하고자 하였다.

2. 실험 장치 및 방법

실험장치는 그림 1과 같이 실험 조와 측정 장치로 구성되어 있으며 실험 조의 바닥은 1000mm× 1000mm이며 45°의 경사진 3개의 육면체로 바닥과 벽면은 단열하였고 상부는 강화 유리로 제작되었다. T-type 열전대를 25곳에 설치하여 DA100 Data logging system에 연결하였다. 동일한 시간에 같은 온도와 같은 양의 해수와 우수 그리고 지표수를 넣고 물이 안정된 후 각각 1시간 간격으로 일사량과 응축량 및 내·외부온도를 측정하였다.

응축량은 FG-20KB M-H 전자저울에 RS-232C 인터페이스를 사용하여 PC와 연결하여 자료를 저장한 후 분석하였다.

일사량계는 QMS-101을 사용하여 일사량을 측정하였으며 측정된 자료는 PC에 저장하였다. 또한 일사량은 기상청의 측정값과 비교하여 참고하였다.

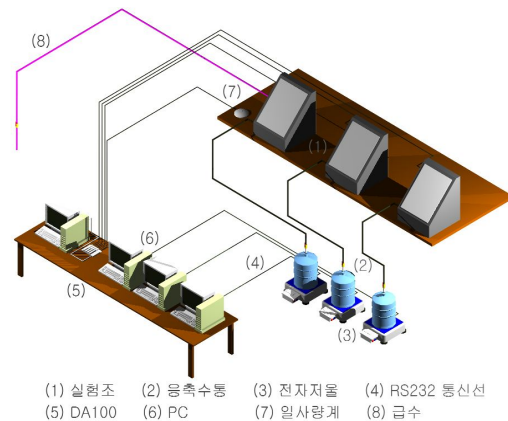


그림 1. 실험 개략도

열전대는 그림 2와 같이 해수와 우수, 지표수 그리고 외기온도 측정용을 포함하여 25곳에 설치하였다.

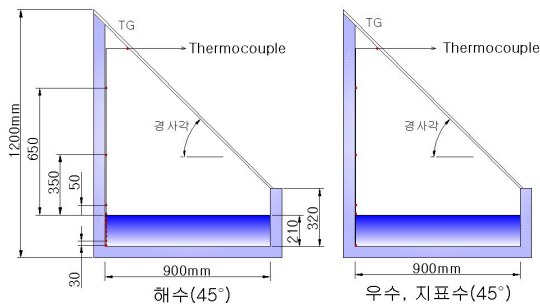


그림 2. 실험조 내부의 열전대 위치

3. 결과 및 고찰

3.1 월평균 일기와 응축특성

그림 3은 월평균 일사량 일조시간 운량에 따른 해수와 우수 지표수의 응축량을 시간에 따라 나타낸다. 응축량은 일사량과 비례하고 운량은 일사량과 반비례하는 경향을 나타내었다. 4월부터 10월까지 월평균 1일 m^2 당 응축량은 600ml 이상 응축수를 생산하였다.

6월에 응축량은 해수는 953ml, 우수와 지표수는 1,159ml, 1,150ml로 최대의 양이 생산되었다. 해수는 우수나 지표수의 경우보다 응축량 생산이 적었다. 이는 태양의 복사열로 해수의 증발이 일어나면 염분 증가와 이에 따른 농도의 변화로 대류현상이 일어나며 점성이 커지고 온도가 증가함에 따라 비열이 커지기 때문이다.

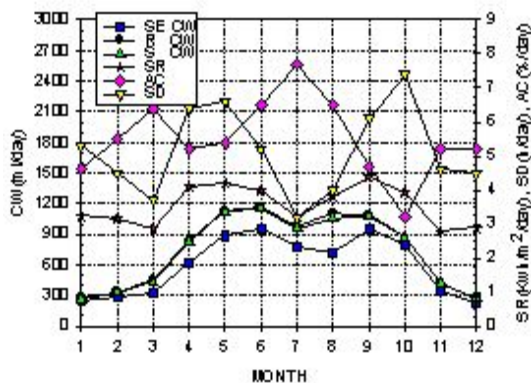


그림 3. 월평균 일기와 응축량(2009.09~2010.08)

3.2 내부 공기온도와 유체의 온도

그림 4는 맑은 날의 해수와 우수 그리고 지표수의 일사량에 따른 실험 조 내부의 공기온도를 시간에 따라 나타낸다. 일사량은 일출 후 6시간이 경과한 후 가장 높은 $880 W/m^2$ 를 나타낸 후 감소하였다.

해수와 우수, 지표수의 온도는 일몰 후 하부 5cm에서의 온도가 상부 65cm의 온도보다 $2^{\circ}C$ 높았으나 일출 후 2시간이 지난 후부터 상부 65cm의 온도가 하부보다 더 높았다. 상부 65cm에서 해수는 온도가 15시에 $78^{\circ}C$ 에 도달하였으며 우수나 지표수의 온도는 해수보다 높아지기 시작하여 일사량이 최대를 나타낸 1시간 후 $85^{\circ}C$ 까지 도달하였다. 하부 5cm에서의 온도는 우수 지표수는 거의 같이 $72^{\circ}C$ 를 해수는 $66^{\circ}C$ 를 나타내었다.

우수나 지표수를 넣은 실험조 내의 공기 온도보다 해수를 넣은 경우의 온도가 우수나 지표수보다 낮았는데 이는 해수가 태양열 복사에 의한 흡수율이 우수나 지표수보다 더 높기 때문이다. 일몰이 되면 공기온도는 낮아져 상부 65cm와 물 표면에서 상부 5cm에서의 온도가 같아진 후 하부 5cm에서의 온도가 상부 65cm의 온도보다 $2^{\circ}C$ 정도 높았다.

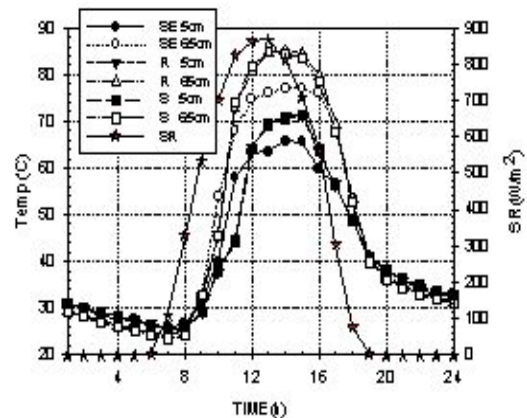


그림 4. 맑은 날 일사량과 유체의 공기온도(2009.09.10)

그림 5는 해수와 우수, 지표수의 표면과

바닥 온도를 나타낸다. 표면 온도는 일몰 후 부터 일출 전까지는 같았으나 일출 후 3시간 이 지난 후 일몰 때까지 해수의 온도가 우수 나 지표수보다 2°C 정도 높았는데 해수의 흡수율이 우수나 지표수보다 높기 때문이다. 바닥의 온도는 일몰 후부터 일출 후 12시까지 는 해수가 더 높았으며 12시부터 일몰까지 우수 와 지표수의 온도가 약간 높게 나타났다. 일사량은 13시에 가장 높았으며 해수와 우수 지표수의 표면 온도는 2시간이 지난 후에 해수 는 52°C 우수와 지표수는 51°C, 50°C로 가장 높은 온도를 나타내었다.

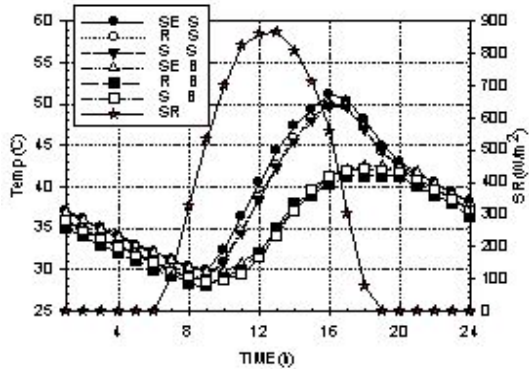


그림 5. 일사량에 따른 표면과 바닥온도 (2009.09.10)

그림 6은 맑은 날 해수의 높이와 시간에 따 른 온도를 나타낸다.

일출 후 높이가 증가하고 시간이 경과함에 따라 온도는 상승하였다. 하부에서 9cm까지는 온도의 상승률이 같았으나 12시부터는 상부로 올라 갈수록 온도의 상승률이 커졌으며 3시간 후부터 18cm에서의 온도가 21cm에서의 온도 보다 더 높았다. 이는 태양의 복사열에 의한 물표면 증발로 인하여 해수의 염도가 상승하고 이에 따른 밀도의 증가에 의하여 대류와 연직 순환이 발생하여 해수의 온도는 물표면에서 3cm 하부의 온도가 물표면보다 더 높았다.

그 후 외기의 온도가 내려감에 따라 상부 공기온도도 내려가며 이로 인하여 해수 상부

와 하부의 온도는 거의 같아졌다.

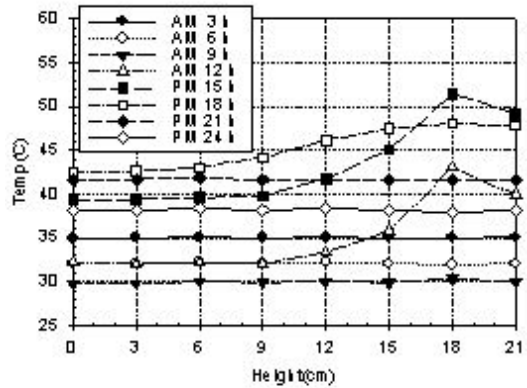


그림 6. 맑은 날 높이에 따른 해수온도(2009.09.10)

그림 7은 흐린 날로 12시경에 약간의 해가 비치고 흐리고 맑아진 후 구름이 낀날의 일사량에 따른 해수, 우수, 지표수의 실험조 내부 공기온도를 나타내고 있다.

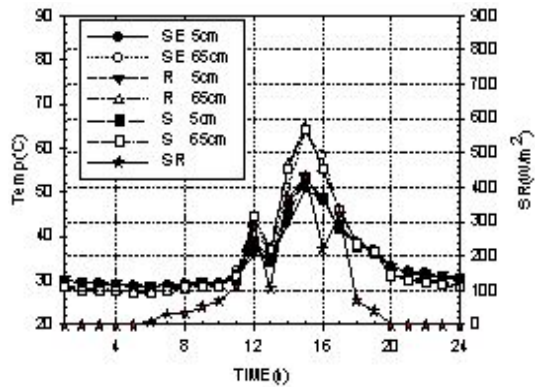


그림 7. 흐린 날 일사량과 유체의 공기온도(2010.07.05)

흐린 날의 내부 공기 온도는 일몰 후 14시간이 경과한 후 상부 65cm 높이의 공기온도가 하부 5cm 온도보다 1.7°C 낮았다. 또한 일사가 시작된 후 6시간 지난 다음부터 상부 65cm 높이의 공기온도가 높아지기 시작하여 우수, 지표수는 상부 65cm 높이에서 66°C를 나타내었다.

해수는 65℃를 나타내었으며 우수나 지표수보다 1℃가 낮았다. 일사량은 12시에 높아진 후 다시 낮아졌고 해가 비치는 15시에 440W/m²를 나타내었다.

그림 8은 비온 날의 일사량과 시간에 따른 해수와 우수 지표수의 내부 공기온도를 나타낸다. 해수 온도는 13시에 상부 65cm 높이에서 62℃를 나타내었고 우수와 지표수는 65℃로 해수보다 3℃ 더 높았다.

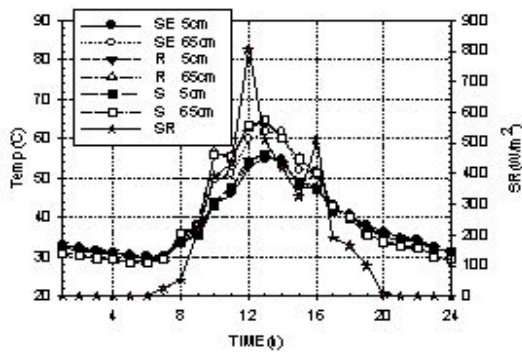


그림 8. 비온 날 일사량과 유체의 공기온도(2010.07.10)

3.3 날씨와 유체에 따른 응축특성

그림 9는 맑은 날 일사량에 따른 응축량, 내부 공기온도, 물표면 온도를 나타낸다. 해수와 우수 지표수의 응축량은 해뜨기 전까지 감소하며 해가 뜬 후 2시간 후에 급격히 감소하였다. 일사량이 가장 높은 13시를 지나 응축량은 서서히 증가하였으며 일사량이 측정되지 않을 때와 상·하부의 공기온도와 물표면의 온도가 동일할 때 최대의 응축량이 생산되었다.

표 1은 4월부터 10월까지의 유체종류에 따른 m²당 월평균 일일 응축량을 나타낸다. 8월에 해수의 응축량은 우수나 지표수에 비하여 적었으며 많은 차이를 나타내었다. 이는 해수의 응축량 생산으로 염도가 증가함으로써 나타나는 현상이다. 그리고 해수는 우수와 비교하여 36%의 차이를 지표수에 대하여는 32%의 차이를 나타내었다. 또한 해수는 표면장력이 우수나 지표수보다 높고 비열은 낮으며 물

표면 증발로 염도가 증가함에 따라 비열이 더 낮아져 응축량이 적었다.

표 1. 유체 종류에 따른 월평균 응축량

유 체 종 류	월평균 1일 응축량(ml/m ²)						
	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월
해 수	618	884	953	775	718	949	803
우 수	825	1,124	1,159	977	1,109	1,079	869
지표수	819	1,119	1,150	955	1,057	1,080	864

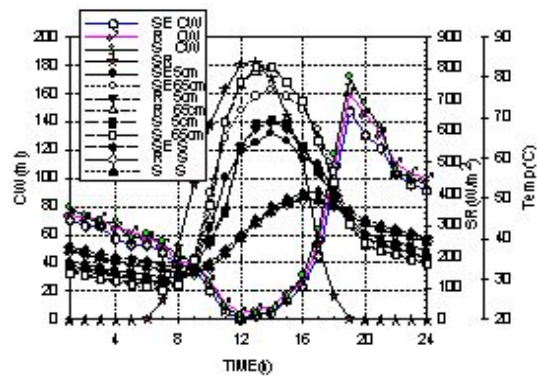


그림 9. 맑은 날 일사량에 따른 응축량(2009.09.06)

그림 10은 그림 7의 경우와 같은 흐린 날로 일사량에 따른 응축량을 해수와 우수 지표수를 비교하여 나타내었다.

운량의 영향으로 일사량은 적었으며 응축량은 13시까지 거의 일정하게 생산된 후 해가 비치며 감소하고 해가진 일몰시부터 증가하였다.

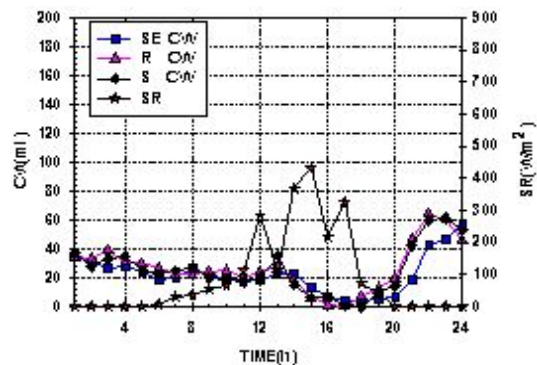


그림 10. 흐린 날 일사량에 따른 응축량(2010.07.05)

그림 11은 전날 맑은 후 비온 날로 일사량에 따른 해수와 우수 그리고 지표수의 응축량을 시간에 따라 나타낸다.

일사량은 12시에 800W/m²를 나타내었다. 응축량은 해뜨기 전까지 서서히 감소하다 일출 후 2시간이 경과한 다음부터는 증발이 일어나며 응축량은 급격히 감소하였다. 일사량이 최고치를 지난 4시간 후부터 응축량은 증가하여 일몰 후에도 응축이 지속되었다. 해수가 우수보다 26.6% 그리고 지표수보다 23% 적었다.

비온 날이 흐린 날보다 응축량이 많았는데 이는 유리 표면의 온도변화로 인하여 상변화가 일어나 응축이 증진되기 때문으로 추정된다.

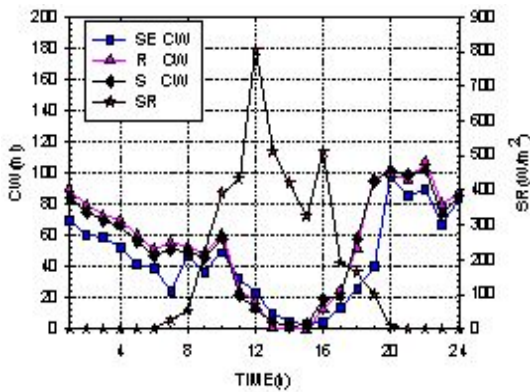


그림 11. 비온 날 일사량에 따른 응축량(2010.07.10)

그림 12는 1월중 눈온 날로 약간의 햇빛이 비치고 다른 시간에는 눈이온 날의 일사량에 따른 시간별 해수와 우수 그리고 지표수의 응축량을 나타낸다.

12시에 일사량은 715W/m²을 나타내었다. 응축량은 전날 일사량의 영향으로 05시에 30ml가 생산되었으며 눈온 날로 일일 응축량은 매우 불규칙하게 생산되었다.

햇빛이 비취도 응축수는 생산되었으며 일일 응축량은 해수가 우수 지표수에 비해 25%와 27% 적은 응축량이 생산되었다. 날씨의 변화에 따른 유체종류별 일일 응축량은 표2와 같다.

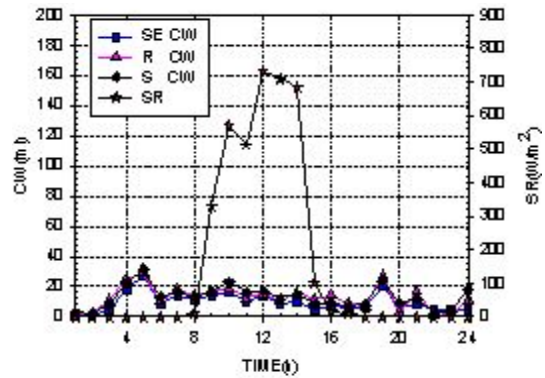


그림 12. 눈온 날 일사량에 따른 응축량(2009.12.17)

표 2. 날씨와 유체종류별 일일 응축량

유체종류	바닥면적 (m ²)	유리면적 (m ²)	일일 응축량(ml)			
			맑은 날	흐린 날	비온 날	눈온 날
해수	1.0	1.14	1,401	533	1,058	329
우수	1.0	1.14	1,592	641	1,339	411
지표수	1.0	1.14	1,580	611	1,301	418

3.4 해수의 염도에 따른 응축특성

그림 13은 해수의 염도에 따른 응축특성을 나타낸다. 해수의 염도가 낮을 때는 응축량은 크지만 염도가 증가하면 응축량은 감소하였다.

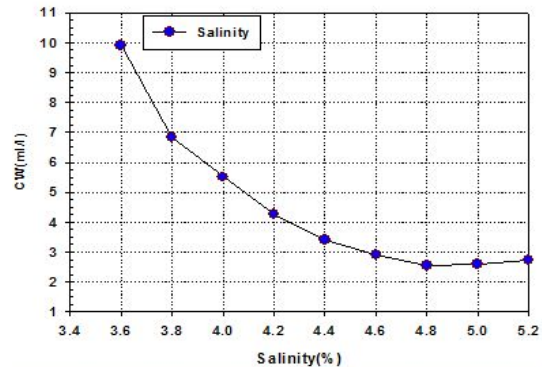


그림 13. 해수의 염도에 따른 응축

3.5 유체종류별 필요 집열 면적

성인 1인이 하루 2,000ml의 음용수가 필요

할 때 실험한 결과 1인당 일일 필요한 바닥면의 집열면적은 해수가 흐린 날 3.75m^2 집열 면적이 필요하였으며 우수는 3.12m^2 지표수는 3.27m^2 가 필요함을 알 수 있었다. 유체종류별 성인 1인의 일일 필요 집열바닥 면적은 표 3과 같다.

표 3. 유체종류별 일일 필요 집열 바닥면적(m^2)

날씨	맑은날	흐린날	비온날
일사량(w/m^2)	6,686	2,148	4,167
유체종류			
해수	1.43	3.75	1.89
우수	1.26	3.12	1.49
지표수	1.27	3.27	1.54

4. 결 론

홍수나 가뭄시에 사용할 수 있는 정수시스템을 개발하기 위하여 태양열을 받는 45° 의 경사진 육면체 내에 해수와 우수 그리고 지표수를 넣어 응축특성에 대하여 실험하고 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 4월부터 10월까지 m^2 당 일일평균 600ml 이상 응축수를 생산하였으며 8월에 해수가 우수와 지표수에 비하여 각각 36%와 32%로 가장 적게 생산되었다.
- (2) 해수의 온도는 상승하며 표면에서 하부 3cm에서 가장 높았으며 온도가 상승하고 농도가 증가함에 따라 응축량은 감소하였다.
- (3) 물과 내부공기의 상·하부의 온도가 같을 때 최대의 응축량을 생산하였다.
- (4) 1인당 1일 2,000ml의 음용수가 필요할 때 집열면적은 3.75m^2 가 적당하다.

후 기

본 연구는 2011년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 조덕기, 강용혁 운량을 고려한 국내 16개지역의 일사량 예측방법 한국태양에너지학회 논문집 Vol. 30. No. 4. 2010. pp.15-21.
2. 광희열, 김정배 태양에너지 해수담수화시스템에서의 적용을 위한 판형해수담수기의 열 성능에 관한 실험적 연구 한국태양에너지 학회 논문집 Vol. 27. No. 4. 2007. pp.35-41.
3. 김병철, 이춘기, 고영하 일사량과 경사진 육면체 내부의 온도변화에 따른 응축특성에 관한 정량적 연구 한국태양에너지 학회 논문집 Vol. 31. No. 1. 2011. pp.44 -50.
4. 박이동 소형태양수조 내 중간경계면에서 수력학적 안전에 관한 각종 지배변수 비교. pp.11-19.
5. Campbell, George, "How To Get Pure Drinking Water From The Sun", Popular Mechanics, Volume 157, No.3, March 1982.
6. Lourdes Garcia-Rodriguez, Carlos Gomez-Camacho, 1999, Preliminary Design and cost analysis of a solar distillation system, desalination 126, 1999, pp. 109-114
7. W.R.McCluney, 1984, "Solar Distillation of Water", Energy Note FSEC-EN-80 February 1984
8. 광희열, 김정배, 주홍진, 윤은상, 주문창 태양에너지 해수담수화시스템 실증 한국태양에너지학회 논문집 Vol. 27. No. 4. 2007. pp.27-33.