

[논문] 한국태양에너지학회 논문집
Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol. 24, No. 1, 2004

집광형 태양열 조리기의 집열성능 평가 연구

강명철*, 강용혁*, 윤환기*

* 한국에너지기술연구원 고온태양열연구센터
(mckang21@kier.re.kr, yhkang@kier.re.kr, hkyoon@kier.re.kr)

A Study on the Thermal Performance of Solar Concentrating Cooker

Kang, Myeong-Cheol/ Kang, Yong-Heack/ Yoon, Hwan-Ki

*Advanced Solar Thermal Research Center, Korea Institute of Energy Research
(mckang21@kier.re.kr, yhkang@kier.re.kr, hkyoon@kier.re.kr)

Abstract

To evaluate performance of concentrating solar cookers, we have designed and constructed parabolic solar cooker. Tests are carried out to define the performance characteristic of concentrating cookers under the ambient conditions. Performance and test of solar cooker were followed the international standard procedure that was proposed at the Third World Conference on solar cooking. Stagnation temperature and water heating test are carried out to determine the maximum temperature attained by cooker and evaluate the thermal performance of the cooker, respectively.

Keywords : 집광형 태양열 조리기(Solar Concentrating Cooker), 집열성능(Thermal Performance)

기호 설명

A_a	: Aperture area(m ²)	m_f	: Mass of the cooking fluid(kg)
C	: Specific heat of the fluid(J/kg-K)	P	: Cooking Power(W)
F_R	: Removal factor	P_s	: Standard Cooking Power(W)
I_b	: Direct Solar radiation(W/m ²)	Q	: Heat gain(J)
		Q_{avil}	: Avilable energy(J)

- T_a : Ambient temperature(°C)
- T_d : Difference of temperature(°C)
- T_f : Final water temperature(°C)
- T_i : Initial water temperature(°C)
- T_w : Water temperature(°C)
- U_L : Overall heat loss coefficient
- $(\tau\alpha)_e$: Effective transmittance-absorptance product
- η : Efficiency

1. 서 론

국내의 태양에너지 이용분야중 가장 실용화가 잘 이루어진 분야는 저온이용분야인 가정용 온수급탕이다. 그러나 세계적으로 신뢰성이 입증되었고 보다 적용이 간편한 태양열 조리기는 국내에서 연구개발이나 보급이 전무한 상태이다. 태양열 조리기는 제작이 간편할 뿐만 아니라 이동성이 편리하므로 아시아지역의 인도, 파키스탄, 중국 등을 비롯한 전세계에서 널리 사용되고 있다.

현재 전세계적으로 유가의 급격한 상승으로 인한 여러 문제점이 나타나고 있으며 개발도상국에서는 산림의 무차별적인 남벌 및 화석연료의 연소에 따른 환경오염 등 많은 문제점을 유발시키고 있다. 개발도상국에서 소비되는 에너지의 절반정도가 가정부분의 취사에 사용되며 이들 대부분은 생활주변에서 공급함으로써 산림의 훼손을 야기시키고 있는 실정이다.¹⁾

그러나 태양열 조리기는 공해발생이 전혀 없으며 위험성이 매우 적은 저온의 에너지원으로서 일반주택에서 사용이 가능하며 산간지역은 물론 레저용 조리기로 활용할 수 있는 장점을 갖고 있다.

본 논문은 국내에서 연구개발과 실용화가 미비한 태양열조리기의 체계적인 연구 기반과 조리기의 성능을 평가할 수 있는 기틀을 마련함은 물론 임계온도 측정실험과 가열실험을 통하여 최고온도와 열성능을 평가하고자 한다.

2. 설계 및 제작

집광형 태양열 조리기의 설계에서 가장 중요한 요소는 집열부, 즉 반사판의 광학설계라 볼 수 있다. 반사판은 포물선식에 의해 형성되며 반사판으로 들어오는 태양빛은 초점에 모이게 된다.

그리고 설계의 주안점은 요리대상, 용량, cooker의 이동성인데 Cooker의 용량산정에 있어서 대상은 5인을 기준으로 하였으며 시간에 따른 요리시간을 고려하여 시스템의 규모를 산정하였다. 제작된 조리기의 치수는 표 1과 같다.

지지대는 반사판의 각도를 조절할 수 있도록 주지지대(1개)와 조리용기를 올려 놓을 수 있도록 보조지지대(2개)로 구성하였다. 반사판을 지지하는 주지지대는 각각의 반사판을 연결한 곳에 강철관으로 조리용기와 연결되고 뒷면에는 지면에 닿게 하였다. 주지지대와 보조지지대는 이중의 판으로 길이를 조절할 수 있도록 제작하여 길이에 따라 태양의 고도에 따른 직달일사량을 받도록 제작하였다.

표 1. 집광형 조리기의 치수

구 분	Dimension
반사판(Reflector) 직경	1200mm
조리용기(Receiver) 직경	100mm
기준열량	502KJ
집광비(Concentration ratio)	35
조리시간(Cooking time)	12.7min
초점거리(Focal length)	500mm
reflector material	Aluminium
Reflectivity	0.95

1) H. Suharta, K. Abdullah and A. Sayigh, The solar oven: Development and field-testing of user-made designs in indonesia, Solar energy, 1998, Vol. 64, No. 4-6, pp.121~132.

3. 성능시험 및 평가

조리기(solar cooker)의 성능을 평가하는 방법은 제3차 World Conference on Solar Cooking 에서 태양열 조리기 평가와 성능보고에 대하여 국제표준을 제안하였다. 환경조건, 평가순서와 Cooking Power의 향으로 조리기의 성능을 나타낼 수 있도록 표준을 제시하였는데 Cooking Power 곡선은 디자인이 서로 다른 조리기들을 비교하는데 유용하게 사용된다.²⁾

태양열 조리기는 열을 이용한 음식조리이므로 취득된 현열로서 조리기의 성능을 나타내고 조리용기에서 얻는 열량은 다음식에 의해 계산되어진다.

$$Q = m_f C (T_f - T_i) \dots\dots\dots (1)$$

조리기의 성능실험은 10분동안 집열한 후 열량을 구하게 되고 열량을 시간에 대한 함수로 나타내면 다음과 같은 Cooking Power를 계산할 수 있다.

$$P = m_f C (T_f - T_i) / 600 \dots\dots\dots (2)$$

이런 방법으로 처음온도를 증가시키면서 각 온도 차에 따른 Cooking Power를 구하게 된다.

그리고 성능곡선의 Y축에 그려지는 값은 위의 식(2)에서 계산된 10분동안 집열한 Cooking Power를 식(3)과 같은 값으로 나타낸다. 계산된 Cooking Power에 표준 일사량 700 W/m²을 곱하고 집열하는 동안 측정된 평균 일사량으로 나누면 다음과 같은 표준(Standard) Cooking Power가 된다.

$$P_s = P \times 700 / I_b \dots\dots\dots (3)$$

2) Paul A. Funk, Evaluating the international standard procedure for testing solar cookers and reporting performance, solar energy, 2000, Vol. 68, No. 1, pp.1~7.

다음은 성능곡선의 X축에 해당하는 온도차(T_d)는 다음의 식으로 나타낸다.

$$T_d = T_w - T_a \dots\dots\dots (4)$$

성능곡선은 위의 X축 값에 대해 측정하여 계산된 표준(Standard) Cooking Power(P_s)를 Y축으로 그려 선형적인 직선의 식으로 유추해 낸다. 이는 성능곡선에서 그려진 점들에 대하여 Cooking Power와 온도차와의 관계를 찾는데 이용되며 intercept(W)와 slope(W/°C)의 향으로 나타낸다.

태양열조리기의 열성능은 일사량과 대기온도, 조리에 필요한 물의 온도와 연계된 효율 값을 얻는 것에 의해 결정된다. 모든 측정값은 정상상태에서 측정되며 입사되는 일사량에 대한 물의 온도의 증가에 따른 에너지의 비를 측정하는 것이 필요하다. 효율식을 얻기 위한 관계식은 다음과 같이 나타내진다.³⁾⁴⁾

$$\eta = F_R (\tau\alpha)_e - F_R U_L (T_w - T_i) / I_b \dots\dots\dots (5)$$

위식을 직선의 식으로 나타내면 아래와 같다.

$$Y = a + bX \dots\dots\dots (6)$$

위의 두식으로부터 X축 ($T_w - T_i) / I_b$ 값에 대한 효율값들이 찍혀지고 절편값과 기울기 값이 상수로 가정하면 효율곡선은 직선의 함수가 된다. 여기서 직선의 기울기 값은 총괄 열손실 계수를 나타내며 Y절편값은 최고 효율을 나타낸다.

3) J.A. Duffie and W.A. Beckman, Solar engineering of thermal processes, 2nd edition, pp.301~345.

4) Hosny Z. Abou-Ziyan, Experimental investigation of tracking paraboloid and box solar cookers under Egyptian environment, Applied Thermal Engineering, 1998, Vol. 18, pp.1375~1394.

여기서 X축값은 실험에 의해 얻어지고 열효율값은 다음식으로 얻어진다.

$$Q_{avil} = m_f C (T_f - T_i) \dots\dots\dots (7)$$

$$\eta = \frac{Q_{avil}}{A_a \times I_b} \dots\dots\dots (8)$$

효율곡선식은 앞의 조리기의 성능곡선식과 유사하게 X축에는 $(T_w - T_i) / I_b$ 값을 두고 Y축에는 효율값을 대입하여 효율식을 얻게 된다.

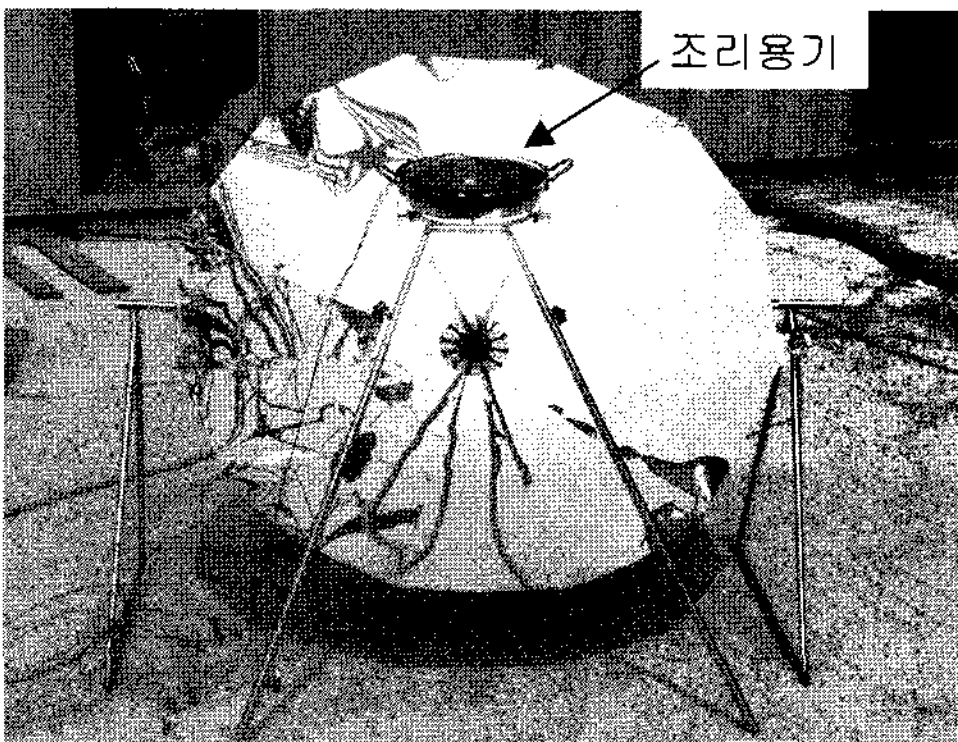


그림 1. 집광형 태양열조리기 실험사진

위의 Cooking Power식과 효율식을 얻기 위해 두가지 실험을 수행하였다. 물의 양은 1ℓ와 1.5ℓ을 변수로 설정하였고 물의 온도를 측정하기 위하여 조리용기 내부에 열전대(thermocouple)을 설치하였다. 그림 1은 집광형 조리기의 실험 사진이다.

Cooking Power식과 효율식을 구하기 위하여 조리용기에 일정량의 물을 채우고 10분간 집열을 하

여 조리용기내부의 온도를 측정하였다. 물의 온도를 증가시키면서 집열된 물의 온도가 90℃에 도달할 때 까지 실험을 진행하였다. 일사량 측정을 위한 일사량계는 조리기의 반사면과 수평이 되도록 설치하였고, 외기온 측정을 위한 센서는 직접 햇빛이 닿지 않고 바람이 잘 통하는 곳을 선정하여 설치하였다.

일사량과 온도 데이터는 약 10초에 한번씩 측정하여 평균값을 취하는 것으로 하였고 측정된 데이터의 평균치를 컴퓨터의 하드디스크에 기록하도록 하였다. 데이터 측정장비로는 Fluke사의 NetDAQ을 사용하였다.

4. 결과 및 고찰

먼저 조리기의 임계온도 측정실험과 가열실험을 수행하여 최고온도와 열성능을 평가하였다.

조리용기의 임계온도(Stagnation temp.)를 측정하였는데 이는 조리기에 의해 도달 가능한 최고 온도를 결정하기 위한 실험으로 조리용기 내부 온도를 측정하였다.

조리기의 반사면을 태양과 수직으로 일사량을 받도록 움직이면서 조리용기 바닥면의 온도가 최고온도에 도달할 때 까지 실험을 수행하였다.

가열실험은 조리기의 열성능을 평가하기 위한 실험으로 물의 온도가 90℃에 도달할 때 까지 계속하여 측정하였다.

실험은 유량을 변수로 하여 1000ml를 case1으로 놓고 1500ml를 case2로 설정하였다.

표 2는 조리용기의 임계온도(Stagnation temp.)를 측정된 값으로 일사량과 외기온에 따라 임계온

표 2. 조리기의 임계온도

유량	Aperture area[m ²]	Stagnation temp.[℃]	Average Ambient temp.[℃]	Temp. difference[℃]	Average direct Solar radiation[W/m ²]	Time(min)
1ℓ	1.13m ²	100.46	24.5	75.96	504	40
1.5ℓ	1.13m ²	100.85	19.3	81.55	746.2	43

도에 도달된 시간을 보여주고 있다.

표 3은 조리기 가열시험 결과를 보여주고 있다. 유량이 1.5ℓ인 경우 가열시간이 짧은 이유는 초기 온도가 높고 일사량이 case1보다 높았기 때문이다.

표 3. 조리기 가열 시험

유량	Water temp.[°C]		Temp. difference	time[min]
	starting	final		
case1: 1ℓ	25	90	65	30
case2: 1.5ℓ	37	90	53	28

그림 2와 그림 3은 조리기의 Cooking Power를 계산하여 얻어진 성능식을 보여주고 있다. 그림에서 보이는 것처럼 성능식은 1차식으로 표현이 된다. 유량에 따라 열손실값과 Cooking Power값이 그리 큰 차이는 보이지 않는다. case1은 물 1ℓ인 경우로서 유도된 식은 그림 2에서 보여주고 있는데 이 경우 50°C에서의 Cooking Power는 약 180W를 나타내고 있다. 그리고 case2인 물 1.5ℓ를 조리용기에 넣어 실험을 수행한 후 얻어진 식은 그림 3에서 보여주고 있으며 50°C에서의 Cooking Power는 190W이다. 두식에서 보이는 것처럼 기울기의 값은 외부로의 열손실을 의미하는 값으로 조리용기가 외부에 노출되어 있으므로 외기온이나 바람에 의한 열손실이 크게 좌우된다.

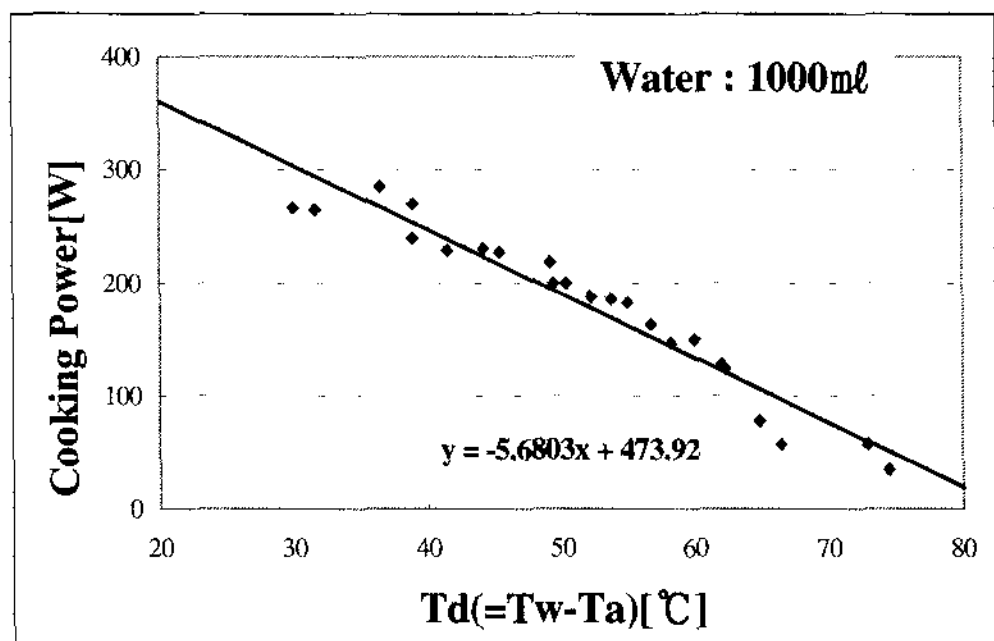


그림 2. 조리기의 Cooking Power(case1)

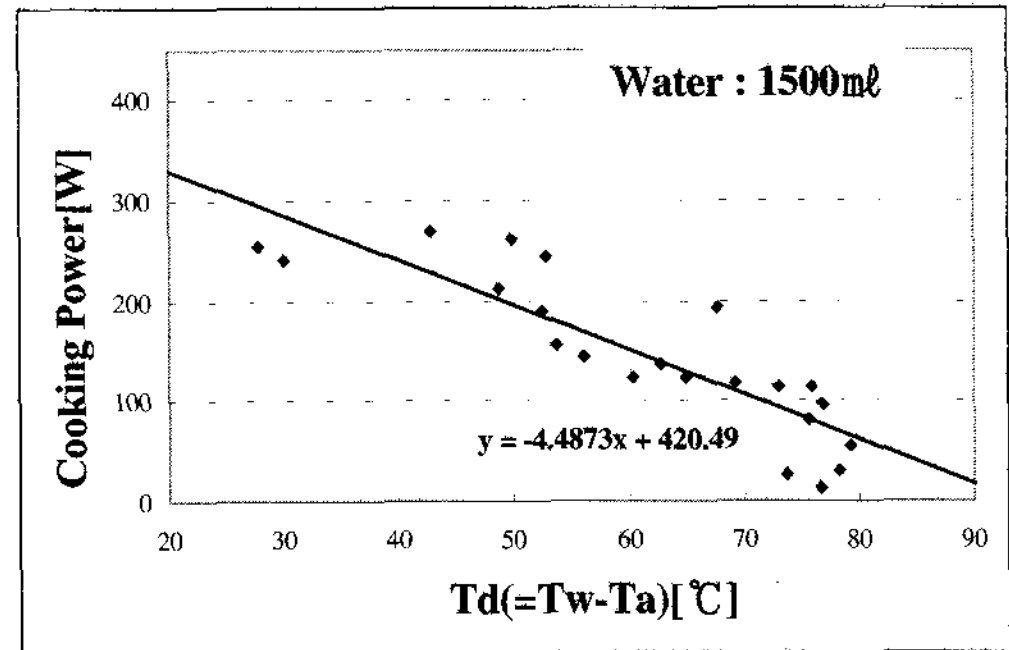


그림 3. 조리기의 Cooking Power(case2)

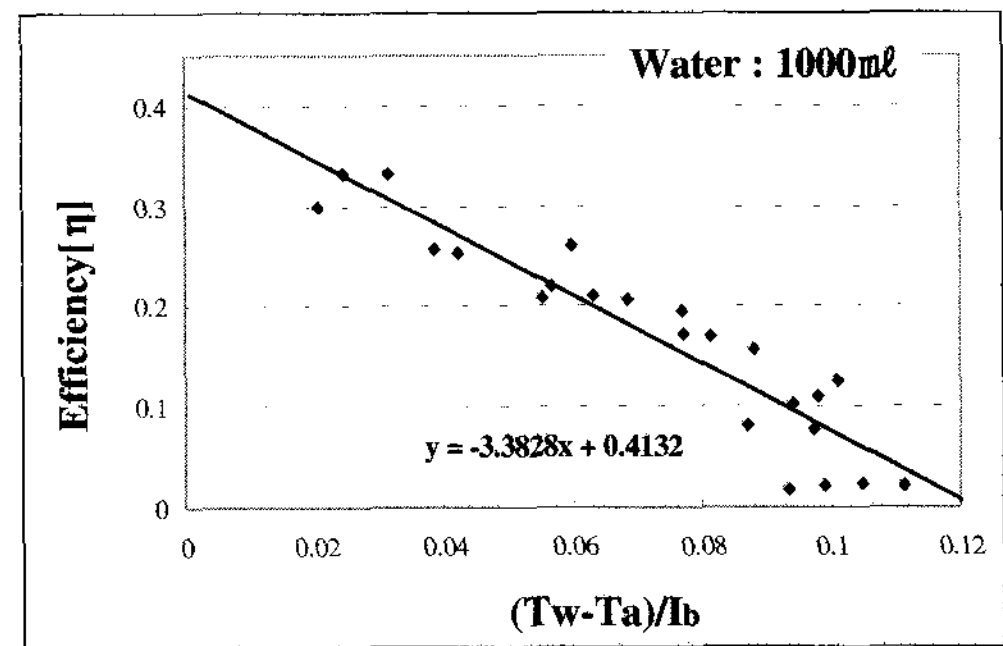


그림 4. 조리기의 효율곡선(case1)

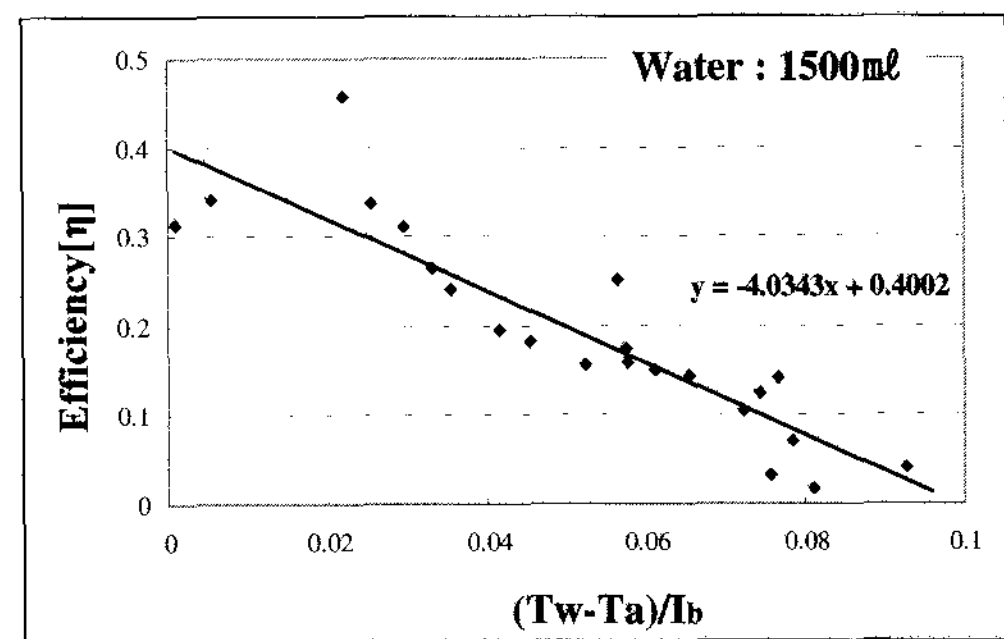


그림 5. 조리기의 효율곡선(case2)

그림 4와 5는 가열실험을 수행하여 얻어진 조리기의 효율식을 나타낸다. case1과 case2로 나누어 효율식을 유도하였다. 효율식도 그리 큰 차이는 없지만 case1인 경우는 열손실값이 낮게 나타나고 있으며 최고효율은 41%이다. case2는 열손실값은 조금 크지만 최고효율은 40%를 나타내고 있다.

5. 결론

세계적으로 상용화가 이루어진 태양열 조리기를 제작하여 성능평가 방법으로 제안된 규정을 따라 실험을 수행하였다.

실험은 유량에 따라 case1과 case2로 나누어 각각의 조리용기의 임계온도를 측정하기 위한 실험과 가열실험을 수행하여 임계온도에 이르는 시간을 측정하였고 가열실험을 통하여 물이 90°C에 도달하는데 소요되는 시간을 측정하였다.

조리용기의 임계온도는 각각의 경우 100°C를 나타내었고 물의 가열시간은 30분과 28분으로 일사량과 외기온, 물의 초기온도에 크게 좌우되었다.

가열시험으로부터 서로 다른 조리기들의 성능을 비교 분석할 수 있는 Cooking Power식과 열효율식을 유도하였다.

실험을 통하여 얻은 결과는 다음과 같다.

① 유량이 1ℓ (case1)인 경우

$$\text{Cooking Power} : y = -5.6803x + 473.92$$

$$\text{Efficiency} : y = -3.3828x + 0.4132$$

② 유량이 1.5ℓ (case2)인 경우

$$\text{Cooking Power} : y = -4.4873x + 420.49$$

$$\text{Efficiency} : y = -4.0343x + 0.4002$$

case1에서는 최고 Cooking Power와 최고효율이 각각 474W와 41%이고 case2에서는 420W와 40%로 나타났다.

이상과 같이 태양열조리기의 상용화를 위한 개선점으로는 열효율의 개선을 통하여 조리시간을 단축할 수 있는 방안을 모색하고 조리용기의 열손실을 줄일 수 있는 조리용기의 개발이 필수적이다. 그러나 본 연구는 조리기에 대한 이해를 증진시킴은 물

론 조리기의 기초적인 설계 자료를 제시하여 태양열조리기의 개발과 성능평가시에 기본 데이터로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

1. S.C. Mullick, T.C. Kandpal and Subodh Kumar, Thermal test procedure for a paraboloid concentrator solar cooker, Solar Energy, 1991, Vol. 46, No. 3, pp.139~144.
2. Paul A. Funk, Evaluating the international standard procedure for testing solar cookers and reporting performance, Solar Energy, 2000, Vol. 68, No. 1, pp.1~7.
3. A.A. El-Sebaili, Thermal performance of a box-type solar cooker with outer-inner reflectors, Energy, 1997, Vol. 22, No. 10, pp.969~978.
4. J.A. Duffie and W.A. Beckman, Solar engineering thermal processes, 2nd edition, pp.301~345.
5. H. Suharta, K. Abdullah and A. Sayigh, The solar oven: Development and field-testing of user-made designs in indonesia, Solar Energy, 1998, Vol. 64, No. 4-6, pp.121~132.
6. N.V. Patel and S.K. Philip, Performance evaluation of three solar concentrating cookers, Renewable Energy, 2000, Vol. 20, pp.347~355.
7. Hosny Z. Abou-Ziyan, Experimental investigation of tracking paraboloid and box solar cookers under Egyptian environment, Applied Thermal Engineering, 1998, pp.1375~1394.