

설치장소에 의한 스텔링엔진 태양열 발전시스템의 성능예측

土屋 一雄*, 배 명 환**, 장 형 성***, 강 상 울***

Performance Prediction of a Solar Power System with Stirling Engine in Different Test Sites

Kazuo Tsuchiya, Myung-whan Bae, Hyung-sung Chang, Sang-rul Kang

- * 메이지대학 기계정보공학과
- ** 경상대학교 수송기계공학부
- *** 경상대학교 대학원 기계설계학과

Abstract

The simulation analyses of a dish solar power system with stirling engine in this study are applied to system performance prediction in four different test sites: Seoul, Pusan and Cheju in Korea, and Naha in Japan. The effects of difference of concentrator type such as monolithic and stretched-membrane construction on system efficiency are also evaluated. The total amount of generated power for a year depends on the site. However the total maximum system efficiency in every site is approximately 16% and there isn't a striking difference. It is also found that the maximum collector efficiency of stretched-membrane concentrator is about 3 ~ 15% lower than that of the monolithic type.

Key words: Solar Power System(태양열 발전시스템), Stirling Engine(스텔링엔진), Performance Prediction(성능예측), Simulation Analyses(시뮬레이션 해석), Stretched-Membrane Concentrator(분할형 집광기), Collector Efficiency(집열효율)

1. 서론

2차래에 걸친 석유과동 이후에도 중동의 산유국들은 유가를 가지고 종종 세계의 경제질서를 어지럽히고 있다. 최근에는 원유의 안정확보 문제뿐만이 아니고, 소비에 따른 지구환경에 대한 영향이 커다란 사회적 문제로 대두되어 범세계적으로 지구온난화, 대기오염 등의 방지에 많은 노력을 기울이고 있지만, 해가 갈수록 개선되어 가기보다는 오히려 더욱 심해지고 있는 실정이다.

따라서 이러한 문제를 근본적으로 해결하기 위해서는 다각적인 대책을 세워야 하는데, 그 일환으로 화석연료를 대체할 수 있는 대체에너지의 개발 및 확보도 하나의 대책이 될 수 있다. 그런데 대체에너지의 종류는 다양하지만, 청정하고 반영구적인 태양열, 풍력 등의 자연에너지 이용이 이전부터 각

광을 받아오고 있다.

태양열 이용분야를 고려하는 경우에 외연기관인 스텔링엔진의 태양열 발전시스템에 대한 응용은 열원을 선택하지 않는 외연기관인 이 엔진의 특징을 최대한으로 살리는 것이라고 말할 수 있다. 스텔링엔진은 정속성, 고효율성, 저공해, 다중 열원이용 등의 특징을 가지고 있기 때문에, 스텔링 냉동기, 육지와 떨어진 섬의 태양열 스텔링 발전플랜트, 지열이용형 저온도차 스텔링엔진 등에 대한 도입을 촉진시키는 것이 미래의 에너지부족의 해소, 환경보전 등의 면에서 큰 성과를 거둘 수 있으리라 예상된다.⁽¹⁾

土屋 등⁽²⁾은 스텔링엔진에 의한 태양열 발전시스템의 성능을 예측하기 위하여 직경 13 m의 일체형 집광기를 사용하여 25 kW 출력수준의 시스템성능을 예측하였다. 그런데 동시스템의 출력수준을 더

설치장소에 의한 스티어링엔진 태양열 발전시스템의 성능예측

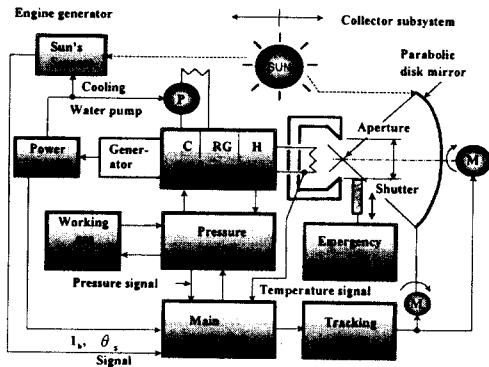


Fig. 1 Block diagram of solar power system

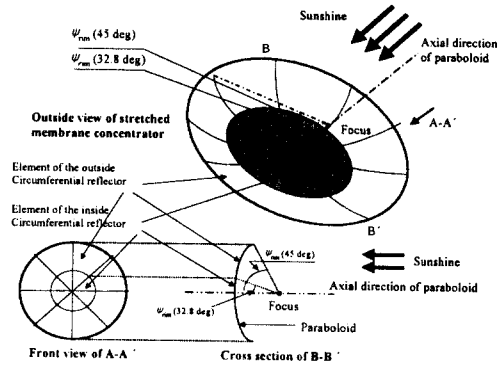


Fig. 2 Assembled dies of concentrator

속 증가시키기 위해서는 일체형 집광기보다 수광면적을 증가시킬 필요가 있는데, 이러한 경우에 일체형보다도 오히려 작은 면적의 반사경을 다수 조합하여 전체적으로 요구되는 수광면적을 확보하는 분할형 집광기^(3,4)를 사용되는 경우가 많이 있다.

본 논문에서는 분할형 집광기를 이용한 집광·수열 시스템의 특성 계산법을 제안하여 일체형 집광기를 이용한 경우와 비교를 하고, 시스템의 설치장소를 대한민국의 서울시, 부산시, 제주도 및 일본의 오키나와현 나하(那覇)시를 선정하여 년간을 통한 시스템의 성능예측을 하고, 지역에 의한 발전량의 비교를 시도한다.

2. 시스템의 기본구성 및 제원

시스템은 일반적으로 태양광을 수집하여 이것을 열에너지로 교환하는 집광·수열 시스템, 이 열에 의해 엔진·발전기를 구동시켜 발전을 시키는 엔진·발전기 시스템, 태양의 추미나 태양으로부터의 수열량에 따라서 엔진작동가스 평균압력을 변화시키는 제어 시스템 등으로 구성된다. Fig. 1은 시스템의 블록선도를 나타낸다.

시스템의 출력수준은 25 kW로 하고, 시스템의 설치장소로서는 대한민국의 서울시, 부산시, 제주도 및 일본의 오키나와현 나하시 4개소를 선정했다.

집광 시스템은 일체형 및 분할형 모두 $D_c = 13$ m의 포물선형 반사거울로 하고, 분할형 집광기의 경우에는 원주방향으로 8분할하고 반경방향으로 2분할한 합계 16개의 반사거울 요소를 상정했다.

했다. Fig. 2에는 분할형 집광기를 나타내고, Table 1에는 예측된 오차를 나타낸다.

한편, 수열 시스템은 내경 $D_R = 450$ mm, 길이 $L_R = 300$ mm의 원통형 수열기(receiver)로서 개구경 $D_{ap} = 45 \sim 450$ mm(개구비 $r = D_{ap}/D_R = 0.1 \sim 1$)의 사이에서 임의로 설정할 수 있도록 했다.

Table 1 Specification of concentrator and receiver

Type of error (mrad)	Case1
Slope error(σ_s)	2.5×2
Tracking error(Sensor, Drive)	Each 2.0
Receiver setting error	2.0
Reflecting mirror setting error(σ_m)	2.0×2
Specular scattering error	0.5
Solar image	2.8

엔진은 일본의 문라이트 계획(Moon Light Project)에 있어서 Sanyou(三洋)전기(주)에 의해 개발된 NS30S⁽¹⁾와 거의 동등한 사양을 사용하였다. 엔진의 정상운전 범위는 가열기(heater) 관벽 온도 T_h (수열기 내벽온도 T_R) = 1073 K, 작동가스 평균압력 $(P_m)_{abs} = 3 \sim 5$ MPa, 회전속도 $N = 1500$ rpm이고, 아이들링 상태는 $T_h = 773$ K, $(P_m)_{abs} = 5$ MPa, $N = 500$ rpm으로 했다. 작동가스 평균압력의 단위는 절대압력으로 이하부터는 $(P_m)_{abs}$ 로 표시한다.

3. 각 서브시스템의 특성평가

3.1 집광·수열 시스템

분할형 집광기를 사용하는 것을 상정하는 경우에는 초점위치에 설치되어 있는 공동 수열기(cavity receiver)⁽⁶⁾내에 열의 형태로 들어오는 에너지량 Q_{inter} 에 대해서는 Stine 등에 의한 간이 계산법⁽⁶⁾의 일부를 수정하여 16개의 각 반사거울 요소에 대한 반사광의 총합으로서 다음과 같이 하여 구했다.

$$Q_{inter} = I_b \pi \rho_s f^2 \alpha G \sum_{i=1}^{16} \left[\int_0^{\psi} f(\psi) d\psi + \int_{\psi}^{\phi} f(\psi) d\psi \right] \quad (1)$$

여기서 I_b = 직달 일사량(W/m^2), ρ_s = 거울면 반사율(= 0.93), f = 초점거리(= 7.8 m), α = 수열기 흡수율(= 0.96), G = 블록계수(= 0.97), $f(\psi) = \sin \psi \Gamma_i / (1 + \cos \psi)^2$, $\psi' = 32.8 \text{ deg}$, $\psi'' = 45 \text{ deg}$, Γ_i = 수열기 개구(aperture)부 D_{ap} 를 통과하는 반사경 플럭스(flux)의 비율을 나타낸다. Γ 를 계산하는 경우에는 반사경 요소의 각 오차가 서로 독립적이고 정규분포를 한다고 하여 오차전파의 법칙으로부터 전체오차를 평가했다. 또한 집광·수열 시스템 전체의 효율로서 유효공급열량 Q_n , 직달일사량 I_b 및 집광기 수광면적 A_c 를 이용하여 수광기 효율 η_{COL} 를 다음과 같이 정의한다.

$$\eta_{COL} = \frac{Q_n}{I_b \cdot A_c} \quad (2)$$

3.2 엔진·발전기 시스템

엔진의 성능 시뮬레이션에는 단열해석 모델을 기본으로 하는 1차(first order)법⁽⁷⁾을 사용하여 엔진의 도시출력 L_i 및 도시열효율 η_i 를 구하는데, 단열해석의 결과에 경험상수 0.7을 각각 곱하여 계산한다. 그 때, 엔진가열기 관내의 작동가스온도 T_c 는 수열기 내벽온도 T_R 보다도 80 K 낮고, 냉각기 관내의 작동가스온도 T_c 는 323 K으로 일정하게 한다. 또한 엔진회전속도 N 은 1500 rpm으로 일정하게 하여 취급한다. 아래의 Q_e (kW)는 주어진 각 조건하에서 엔진을 운전시키기 위하여 필요한 엔진축의 요구열량을 나타낸다.

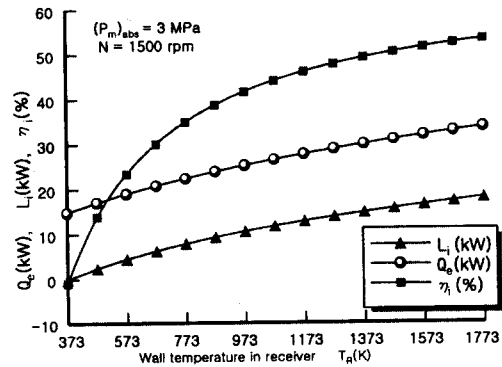


Fig. 3 An example of predicted engine performance

① 온도조건을 $T_R = 1073 \text{ K}$ 으로 고정하여 작동가스 평균압력 $(P_m)_{abs}$ 를 변경시킨 경우 [$(P_m)_{abs} = 3 \sim 15 \text{ MPa}$ 의 회귀식] :

$$\begin{aligned} Q_e(\text{kW}) &= 7.788(P_m)_{abs} \\ L_i(\text{kW}) &= 3.36P_m + 4.231 \times 10^{-4} \\ \eta_i &= 0.438 \end{aligned} \quad (3)$$

② 작동가스 평균압력 $(P_m)_{abs} = 3 \text{ MPa}$ 일정하에서 수열기 내벽온도 T_R 만을 변경시킨 경우 : 성능예측 결과를 Fig. 3에 나타낸다. 본 연구의 시스템 시뮬레이션에서는 동그림의 함수를 스플라인 함수(spline function ; 3차의 다항식)로 근사시켜 사용했다.

③ 작동가스 평균압력 $(P_m)_{abs} = 3 \text{ MPa}$, 수열기 내벽온도 $T_R = 773 \text{ K}$ 일정하에서 엔진회전속도 N 을 변경시킨 경우($N = 500 \sim 1500 \text{ rpm}$) :

$$\begin{aligned} Q_e(\text{kW}) &= 1.336 \times 10^{-2}N - 9.537 \times 10^{-7} \\ L_i(\text{kW}) &= 6.523 \times 10^{-3}N + 5.329 \times 10^{-15} \\ \eta_i &= 0.345 \end{aligned} \quad (4)$$

또한, 본 연구에서는 엔진 기계효율 η_m 와 발전기 효율 η_g 의 회전속도 의존성^(1,8)을 다음과 같은 식으로 근사시킨다.

$$\begin{aligned} \eta_m &= 1 - \left(\frac{0.594N^2}{6.594N - 166.9} \right) \\ \eta_g &= 0.35 \left[\sin \left\{ \frac{\pi(N - 500)}{2000} \right\} \right]^{\frac{1}{6}} + 0.5 \end{aligned} \quad (5)$$

4. 시스템 운전제어의 검토

본 연구에서는 직달일사량 I_b (유효공급열량 Q_n)의 조건에 의해 엔진이 다음과 같이 평균압 제어, 온도제어, 회전속도제어되어 운전 및 시동·정지되는 것으로 생각하여 시스템의 성능을 예측한다.

4.1 평균압제어 운전

일반적으로 스텔링엔진에는 부하변동에 대하여 작동가스 평균압력 $(P_m)_{abs}$ 를 변화시키면서 가열기 관벽온도 $T_h(= T_R)$ 를 내열한계온도 이하의 일정값으로 유지하는 평균압제어 운전이 채용되고 있다. 본 시스템에서는 직달일사량 I_b 가 충분한 경우, 그에 의한 유효공급열량 Q_n 의 변화에 대해서 엔진축 요구열량 Q_c 가 Q_n 과 동등하게 되도록 $(P_m)_{abs}$ 를 변화시키는 제어운전을 한다.

4.2 온도제어 운전

직달일사량 I_b 가 저하해서 유효공급열량 Q_n 이 감소하고, 평균압제어 운전의 유지가 곤란하게 되는 경우에는 $(P_m)_{abs} = 3 \text{ MPa}$, $N = 1500 \text{ rpm}$ 하에서 수열기 내벽온도 T_R 를 변화시키는 온도제어 운전이 들어간다.

4.3 회전속도제어 운전

직달일사량 I_b 가 보다 더 저하하는 경우에는 $(P_m)_{abs} = 3 \text{ MPa}$, $T_R = 773 \text{ K}$ 하에서 엔진회전속도 N 을 1500 rpm 에서 아이들링 상태의 500 rpm 까지 변화시키는 회전속도제어 운전을 한다.

4.4 시동·정지

엔진은 유효공급열량 Q_n 이 아이들링 상태($(P_m)_{abs} = 3 \text{ MPa}$, $T_R = 773 \text{ K}$ 및 $N = 500 \text{ rpm}$)의 유지에 필요한 엔진축 요구열량 Q_c 이하의 상태에서 정지하고, 역으로 이상의 상태에서는 시동하는 것으로 한다. 이 때 용량 2.4 kW 의 시동모터에서 10초 동안 모터링이 요구되는 것으로 했다.

시스템의 보조동력을 $W_a(\text{kW})$ 라고 해서 상기의 시동모터 이외에도 추미장치 센서와 모터, 엔진냉각수 순환펌프, 냉각팬, 시스템 제어기 등을 고려하여 그 구동용에 1 kW 의 전력이 소비되는 것으로 한다.

다음에는 시스템의 총 및 정미 발전량 W_g , $(W_g)_{net}$ 와 총 및 정미 시스템효율 η_{sys} , $(\eta_{sys})_{net}$

을 아래와 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} W_g &= I_b A_c \eta_{COL} \eta_i \eta_m \eta_g \\ (W_g)_{net} &= W_g - W_a \\ \eta_{sys} &= W_g / (I_b A_c) \\ (\eta_{sys})_{net} &= (W_g)_{net} / (I_b A_c) \end{aligned} \quad (6)$$

1일의 총발전량 $(W_g)_{day}$ 및 $\{(W_g)_{net}\}_{day}$ 는 시스템 운전시간내에서 W_g , $(W_g)_{net}$ 를 적분함으로써 구할 수 있고, 1일의 평균적인 시스템효율 $(\eta_{sys})_{day}$, $\{(\eta_{sys})_{net}\}_{day}$ 는 이들의 적분값을 식 (6)에 대입하여 계산한다.

한편, 1개월에 대한 총발전량 $(W_g)_{month}$ 및 $\{(W_g)_{net}\}_{month}$ 는 1일마다의 총발전량 적분값으로 하고, 이 값에 의해 1개월의 평균적인 시스템효율 $(\eta_{sys})_{month}$, $\{(\eta_{sys})_{net}\}_{month}$ 을 같은 방법으로 구했다.

5. 결과 및 고찰

5.1 집광·수열 시스템

Fig. 4는 분할형 집광기의 사용을 고려한 경우의 최대 집열효율 $\{(\eta_{COL})_{EM}\}_{max}$ 가 일체형인 경우의 최대 집열효율 $(\eta_{COL})_{max}$ 에 비하여 어느 정도 저하하고 있는가를 파악하기 위해서 직달일사량 I_b 에 대해서 그 차와 비를 표시한 것이다.

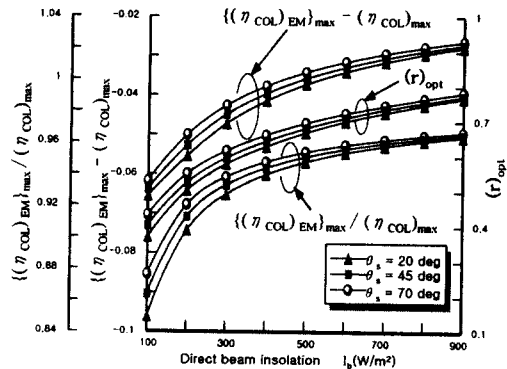


Fig. 4 Influence of concentrator type on collector efficiency and optimum aperture opening ratio

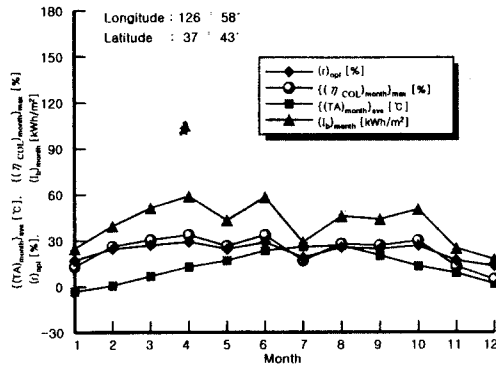


Fig. 5 Monthly predicted collector efficiency of concentrator/receiver system in Seoul site, Korea

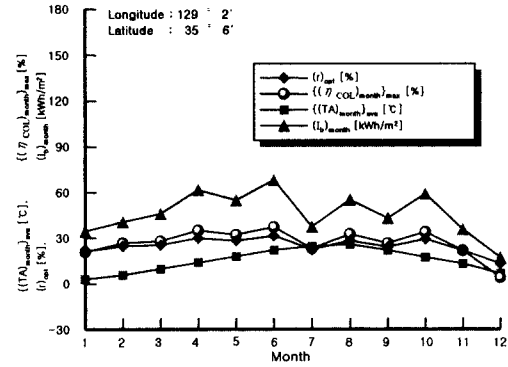


Fig. 6 Monthly predicted collector efficiency of concentrator/receiver system in Pusan site, Korea

또한 동그림에서는 집열효율을 최대로 하는 개구비 $(r)_{opt}$ 도 같이 표시하고 있다. 그림으로부터 분할형의 집열효율은 일체형에 비하여 3.4 ~ 15% 정도 낮은 85.0 ~ 96.6%의 값을 가지고 있다. 또한, 직달일사량 I_b 의 감소와 함께 그 저하량이 증가하고 있다. 태양양각(solar angle of elevation) θ_s 가 작아질수록 집열효율의 저하량이 증가하는 경향이 있지만, 그 영향은 비교적 작다.

Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7 및 Fig. 8은 년간을 통한 집광·수열 시스템의 특성을 파악하는 의미로서 매월에 대한 평균 외기온도 $\{ (TA)_{month} \}_{ave}$, 적산 직달일사량 $(I_b)_{month}$, 최대 적산 집열효율 $\{ (\eta_{COL})_{month} \}_{max}$ 및 그 때의 개구비 $(r)_{opt}$ 를 나

타낸 것이다. 시스템의 설치장소는 Fig. 5부터 서울시, 부산시, 제주시 및 나하시를 나타내고 있다. 그림에 의하면 설치장소에 관계없이 집열효율 그 자체는 직달일사량에 강하게 의존하고 있고, 외기온도와는 거의 관계가 없음을 알 수 있다. 또한, 나하시의 경우에 평균외기온도 $\{ (TA)_{month} \}_{ave}$, 적산 직달일사량 $(I_b)_{month}$ 모두가 한국의 세 지역에 비하여 높기 때문에, 개구비 $(r)_{opt}$ 가 크고, 결과적으로 최대 적산 집열효율 $\{ (\eta_{COL})_{month} \}_{max}$ 가 높아지고 있음을 알 수 있다.

년간을 통해서 제주시와 일본의 나하시에서는 6월에, 서울시와 부산시에서는 7월에 적산 직달일사량 $(I_b)_{month}$ 가 저하하는 경향이 있는데, 이것은

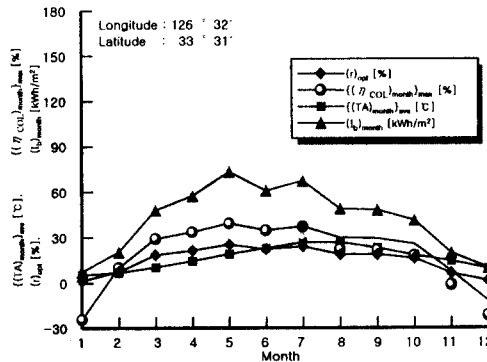


Fig. 7 Monthly predicted collector efficiency of concentrator/receiver system in Cheju site, Korea

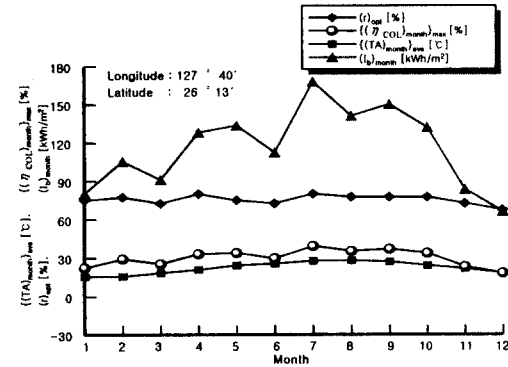


Fig. 8 Monthly predicted collector efficiency of concentrator/receiver system in Naha site, Japan

설치장소에 의한 스텔링엔진 태양열 발전시스템의 성능예측

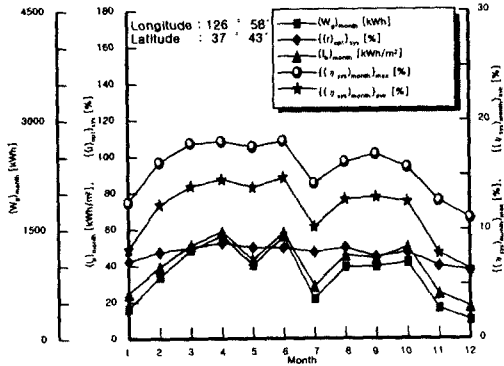


Fig. 9 Monthly predicted system performance in Seoul site, Korea

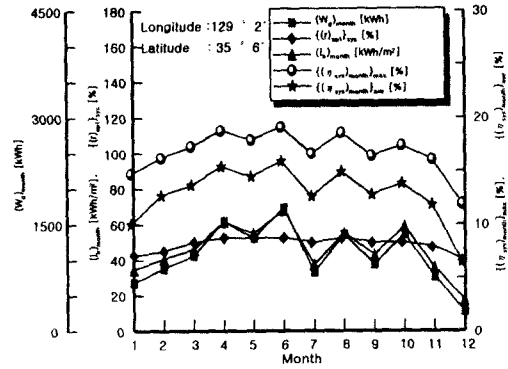


Fig. 10 Monthly predicted system performance in Pusan site, Korea

각 지역에 있어서 장마의 영향 때문이라고 생각된다.

5.2 시스템의 성능예측 결과

Fig. 9, Fig. 10, Fig. 11 및 Fig. 12는 설치장소를 대한민국의 서울시, 부산시, 제주도 및 일본의 나하시로 한 경우에 있어서 시스템의 성능을 예측한 결과인데, 월별에 대한 적산 직달일사량 $(I_b)_{month}$, 적산 발전량 $(W_g)_{month}$, 최대 적산 시스템 효율 $((\eta_{sys})_{month})_{max}$ 및 그 때의 최적 개구비 $((r)_{opt})_{sys}$ 를 나타낸 것이다. 그림에서 서울시, 부산시 및 제주시에 비하여 나하시의 경우가 년간을 통해서 일사가 양호하기 때문에, 적산 발전량 $(W_g)_{month}$ 이 높은 데 반하여, 최대 적산 시스템 효율 $((\eta_{sys})_{month})_{max}$ 은 별로 차가 없음을 알 수 있다. 이것은 직달일사량의 증가에 대해서 시스템

효율은 어느 정도까지는 증가하지만, 그 후에는 일정하게 수렴한다고 하는 특성에 의한 것으로 고려된다.

Table 2에는 시스템 시뮬레이션에서 얻은 각 지역에 대한 년간의 시스템 성능예측 결과를 정리한 것이다. $(I_b)_{year}$ 는 일년간의 총직달일사량, $(W_g)_{year}$, $((W_g)_{year})_{net}$ 는 각각 1년간의 시스템에 대한 총 및 정미 발전량, $(\eta_{sys})_{year}$ 는 1년간의 총 시스템 평균효율을 나타낸 것이다. 표에서 년간을 통하여 나하시의 시스템 총발전량 $(W_g)_{year}$ 은 서울시, 부산시 및 제주시의 약 3배 정도이다. 또한 년간을 통하여 일사조건이 나쁜 서울시, 부산시 및 제주시에서는 시스템의 정미발전량을 높이기 위해서 보조연료의 사용을 가능하게 하는 하이브리드 수열기(hybrid receiver)의 이용이나 태양에

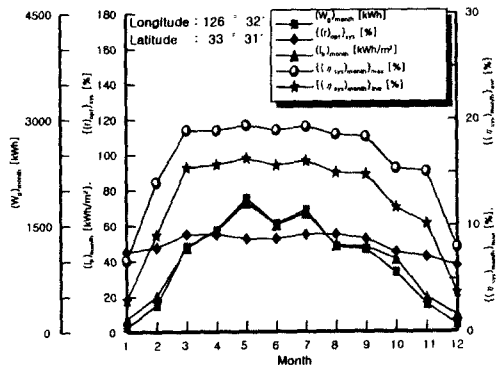


Fig. 11 Monthly predicted system performance in Cheju site, Korea

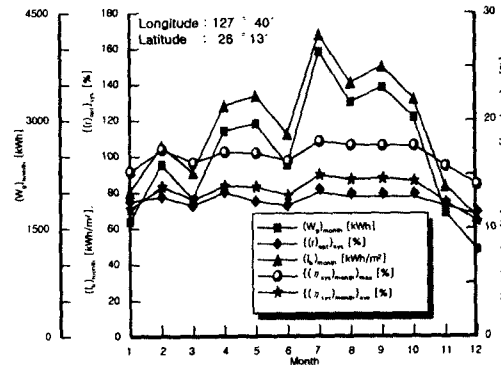


Fig. 12 Monthly predicted system performance in Naha site, Japan

너지를 일시적으로 저장하기 위한 축열기능을 갖춘 수열기의 이용이 고려된다.

Table 2 System performance predicted for a year

Site	Seoul	Pusan	Cheju	Naha
$(I_b)_{year}$ [kWh/m ²]	499.485	567.715	513.648	1,425.29
$(W_g)_{year}$ [kWeh]	10,548.3	12,722.3	11,917.5	30,728.2
$[(W_g)_{year}]_{net}$ [kWh]	1,889.10	3,983.90	4,076.70	20,216.2
$(\eta_{sys})_{year}$ [%]	15.91	16.88	17.48	16.24

6. 결론

본 연구에서는 스텔링엔진을 열기관으로 하는 태양열 발전시스템에 대하여 분할형 집광기를 활용하여 시스템의 설치장소를 대한민국의 서울시, 부산시, 제주도 및 일본의 나하시를 선정하여 년간을 통한 시스템의 성능을 예측하고, 지역에 의한 발전량을 비교하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 분할형 집광기의 최대 집열효율은 일체형의 경우보다도 낮고, 그 차는 3 ~ 15% 정도로 직달일사량의 저하에 따라 증가하는 경향이 있다.

(2) 집열효율은 시스템의 설치장소에 관계없이 직달일사량에 강하게 의존하지만, 외기온도에 의한 영향은 거의 없다.

(3) 어느 설치장소에 있어서도 년간을 통한 총 시스템 발전량 및 그 효율은 직달일사량에 의존하고 있기 때문에, 서울시, 부산시 및 제주시에 비하여 나하시가 발전량이 많다.

(4) 나하시에서 1년간의 총직달일사량은 다른 지역의 약 3배 정도이지만, 총 시스템효율은 거의 동등했다.

(5) 년간을 통해서 일사조건이 나쁜 지역에서는 시스템의 정미발전량을 높이기 위한 방안이 필요하다.

후기

본 연구는 한국과학재단의 2000년도 중견과학자 일본연수지원 프로그램(00-06-06-0 : 스텔링엔진에 의한 태양열 발전시스템의 최적설계)과 2001년도 두뇌한국21사업의 지원에 의하여 메이지대학의 열유체전기응용연구실과 국제공동연구로 수행된 것임을 밝혀두며, 도움을 주신 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 日本機械學會, "RC110 地球環境および多種熱利用に適合したスターリングサイクル機器の最適要素設計手法に関する研究, 研究成果報告書," pp. I-1 ~ I-9, 1994.
- (2) 土屋一雄, 山口一平, "スターリンエンジンを用いた太陽熱発電システムの性能予測," 太陽エネルギー, Vol. 24, No. 5, 1998.
- (3) G. C. Coleman and J. E. Raetz, "Field Performance of Dish/Stirling Solar Electric Systems," 21st IECEC, No. 869136, 1986.
- (4) 内藤, 上西園, "太陽熱利用スターリンエンジン発電システムの開発," 日本機械學會全國大會講演論文集, 1994.
- (5) O. Goebel and D. Laing, "Second Generation Sodium Heat Pipe Receiver for a USAB-V-160-Stirling Engine : Development and On-Sun Test Results," IECEC, 1993.
- (6) W. B. Stine, et al. "Solar Energy Fundamentals and Design," John Wiley & Sons, 1985.
- (7) W. R. Martini, "Stirling Engine Design Manual," NASA Lewis Research Center, NASA CR-135382, 1978.
- (8) 徳納, "高效率発電機(Tokuno dynamo)," 鷹羽科學工業(株)