

태양 위치 측정용 전파 센서 수신기의 설계 및 제작

Design and Implementation of Radio Sensor Receiver for Measuring the Position of the Sun

박진우 · 최연웅 · 조홍렬 · 손흥민

Jin-Woo Park · Yeon-Ung Choi · Hong-Lyul Cho · Hong-Min Son

요 약

본 논문에서는 추적식 태양광 발전 시스템에 응용하기 위한 태양 위치 측정용 전파 센서 수신기의 설계, 제작 및 성능 실험에 관한 과정 및 결과를 소개한다. 먼저, 전파 센서에 대한 요구 성능인 $\pm 5^\circ$ 이내의 위치 측정 오차 범위를 만족시키기 위한 수신기의 사양을 구하였고, 이를 토대로 수신기를 설계하였다. 설계된 수신기의 시스템 이득 및 잡음 지수의 budget 분석을 통해 설계의 적절성을 점검하였으며, 이 결과를 활용하여 수신 주파수 5.1 GHz, 대역폭 104 MHz로 69 dB의 시스템 이득과 0.46 K 이내의 수신 감도를 갖는 고이득, 고감도 광대역 수신기를 제작하였다. 제작된 수신기와 표준 혼 안테나로 구성된 전파 센서로 흐린 날 실제 태양을 대상으로 실험한 결과, $\pm 4^\circ$ 이내의 오차 범위로 태양의 위치를 실시간으로 측정하는데 성공하여 요구 성능이 만족되었음을 검증하였다.

Abstract

In this paper, we propose a radio sensor to measure the position of the sun for the solar tracker of a photovoltaic system. In order to satisfy the requirement for the measurement accuracy within $\pm 5^\circ$, the sensor receiver with high gain, high sensitivity and wide bandwidth is designed and implemented. The receiver has the bandwidth of 104 MHz, the system gain of 69 dB and the sensitivity of 0.46 K at 5.1 GHz. The processes of design and implementation of the radio sensor receiver are described in this paper. The effectiveness of the proposed radio sensor in the measurement of the position of the sun is demonstrated experimentally under the condition of cloud cover. The results show the radio sensor can measure the position of the sun within the accuracy of $\pm 4^\circ$ successfully.

Key words : Radio Sensor, Measurement of the Position of the Sun, Solar Tracker of a Photovoltaic System, Solar Radio Emission, High Sensitivity Receiver

I. 서 론

최근 고유가 행진과 화석 연료의 고갈, 지구 온난화에 의한 급격한 기후 변화 등, 에너지 및 환경에 대한 복합적인 문제를 해결하기 위해 전 세계적으로 신재생 에너지 개발이 최우선 과제로 대두되고 있다. 현재 신재생 에너지원으로 태양광, 풍력, 조력

발전 등이 있으나, 에너지원의 크기, 안정적인 발전량 확보, 기술 축적 및 실현성 등을 고려할 때 태양광 발전이 상대적 우위에 있어 21세기에 들어 최근 2007년까지 태양광발전의 세계 시장 규모는 연평균 40 %로 급성장하고 있다. 그러나 아직 전 세계 태양광 발전 전력량은 전체 소비량의 0.0008 %에 불과하여 태양광 발전의 지속적 보급 및 시장 확대를 위해

「이 연구는 지식경제부의 지역산업기술개발사업으로 수행되었음(70003299-2008-01, 전천후로 추적이 가능한 White Noise 태양전파 추적 수신기를 탑재한 1축 경사형 발전시스템 개발)」

호남대학교 전파이동통신공학과(Department of Radio Communication Engineering, Honam University)

· 논문 번호 : 20090730-05S

· 수정완료일자 : 2009년 9월 11일

서는 태양광 발전의 효율성 향상이 필요하다^{[1],[2]}.

현재 가장 널리 사용되고 있는 실리콘 태양 전지의 광전 변환 효율은 12~15 % 정도에 불과하며, 최근 태양 전지의 생산 단가를 낮추기 위해 염료 감응형 등 새로운 소재의 전지 개발이 진행되고 있으나, 이 역시 10 % 이하로 효율 면에서 저조하다^[3]. 이러한 문제점의 대응 방안으로 최근 태양의 위치 변화에 따라 태양광 모듈의 각도를 변화시켜 태양광이 태양 전지의 수광면에 대해 법선 방향으로 입사하도록 함으로서 발전효율을 향상시키는 추적식 태양광 발전 시스템이 주목을 받고 있다^{[4],[5]}.

추적식 태양광 발전 시스템에 있어서 시간적으로 변하는 태양의 위치를 정확하게 측정하여 그 정보를 제어 장치에 공급하는 센서는 가장 중요한 핵심 부분이다. 현재 태양광 발전 추적 장치용 센서로는 가시광선이나 근 적외선 광학 센서가 폭넓게 이용되고 있으나 빔 폭이 좁아 감지 조건에 필요한 일정량 이상의 태양광을 수광할 수 있는 시간이 제한됨으로 하루 중 실제 활용되는 시간이 한정된다. 특히, 흐린 날이나 일시적으로 태양이 구름에 가려진 경우, 안개, 황사, 연무 등 시시각각으로 변하는 대기나 기상 상태에 크게 영향을 받으므로 비록 그 농도가 옅더라도 측정이 불가능하다. 또한, 그림자나 미세한 입자에 의한 광 산란 등 주위 환경에 민감하여 주변의 직접광이나 산란광, 반사광에 의해 오작동이 빈번히 일어난다.

본 논문에서는 추적식 태양광 발전 시스템에 있어서 기존 광센서의 문제점을 극복하는 새로운 방식의 센서로 태양으로부터 자연 복사되는 마이크로파 대역의 태양 전파를 수신하여 대기나 기상 상태에 관계없이 전천후로 태양의 위치를 측정할 수 있는 전파 센서를 제안한다. ±5° 이내의 위치 측정 오차 범위를 달성하기 위한 수신기의 세부 사양 도출, 설계, 제작 과정 및 측정 결과를 제시하며, 흐린 날 실제 태양을 대상으로 한 실험 결과를 분석하여 전파 센서의 태양 위치 측정 성능을 평가한다.

II. 전파 센서의 태양 위치 측정 원리

태양은 γ선에서부터 전파 대역에 이르기까지 아주 광범위한 파장대의 전자기파를 복사하며, 복사

전자기파의 스펙트럼 특성은 약 6,000 K의 흑체 복사의 특성과 거의 같다^[6]. Planck의 복사 법칙(Planck's radiation law)에 의하면 흑체에서 복사되는 spectral brightness B_f 는 식 (1)과 같다^[7].

$$B_f = \frac{2hf^3}{c^2} \left(\frac{1}{e^{hf/kT} - 1} \right) [Wm^{-2}sr^{-1}Hz^{-1}] \quad (1)$$

식 (1)에서 h 는 Planck 상수, f 는 주파수, k 는 Boltzmann 상수, T 는 절대 온도, c 는 광속을 각각 나타내며, 전파 영역과 같이 낮은 주파수 대역에서는 $hf/kT \ll 1$ 이므로 식 (1)은 근사적으로 식 (2)와 같이 쓸 수 있다.

$$B_f = \frac{2fkT}{c^2} = \frac{2k}{\lambda^2} T [Wm^{-2}sr^{-1}Hz^{-1}] \quad (2)$$

태양으로부터 복사되어 지표면에 도달되는 태양 전파는 매우 미약한 열잡음 전파로, 이러한 미약한 열잡음 태양 전파를 수신하기 위해서는 마이크로파 라디오미터(microwave radiometer)의 기술이 유용한 방법으로 제시되었다^[8]. 마이크로파 라디오미터는 그림 1과 같이 물체로부터 복사되는 마이크로파 대역의 열잡음 전력을 원격에서 안테나를 통해 광대역, 고이득, 고감도 수신기로 수신하여 그 출력 전압으로부터 입사되는 물체의 복사 전력을 휘도 온도(brightness temperature)로 측정하여, 물체 및 주위 환경에 대한 정보를 추출하는 대표적인 수동형 마이크로파 원격 탐사 센서이다^{[9]~[11]}.

마이크로파 라디오미터의 원리를 이용하여 그림 2와 같이 정규화 복사 패턴이 $F_n(\theta, \phi)$ 인 안테나로 천공을 통해 입사되는 태양 전파를 수신할 경우,

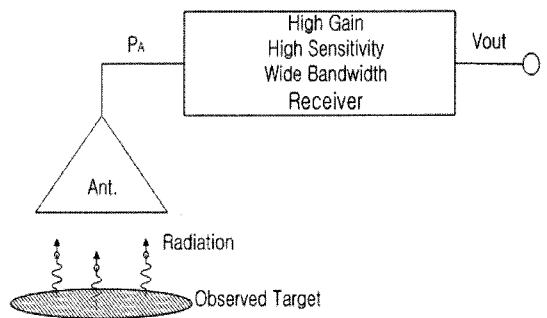


그림 1. 마이크로파 라디오미터에 의한 복사 전력 측정
Fig. 1. Measurement of radiation power using microwave radiometer.

스펙트럼 플럭스 밀도(spectral flux density) S_f 는 식 (3)과 같이 주어진다^{[6],[7]}.

$$S_f = \int \int_{4\pi} B_f F_n(\theta, \phi) d\Omega \quad [Wm^{-2}Hz^{-1}] \quad (3)$$

안테나의 실효 면적이 A_r [m^2], 수신기의 대역폭이 Δf [Hz]일 경우, 안테나 출력 전력 P_A 는 식 (4)와 같으며, 식 (4)에 식 (3)을 대입하면 식 (4)는 식 (5)와 같이 쓸 수 있다.

$$P_A = \frac{1}{2} A_r \int \int_{4\pi} B_f F_n(\theta, \phi) d\Omega \Delta f \quad [W] \quad (4)$$

$$= \frac{1}{2} S_f A_r \Delta f \quad [W] \quad (5)$$

식 (4)에서 알 수 있듯이 안테나 출력 P_A 는 입사되는 태양의 복사 Spectral brightness B_f 와 안테나 패턴과의 적분으로, 방향각(θ, ϕ)의 함수이다. 따라서 태양 전파가 안테나 복사 패턴의 최대 강도 방향으로 입사될 때 안테나 출력이 최대가 되므로 수신기의 최종 출력 전압 V_{out} 역시 최대값을 갖는다. 태양의 위치가 변하면 태양 전파의 입사 방향이 변하므로 안테나 출력 전력이 감소되어 수신기의 출력 전압은 낮아진다.

이와 같이 본 연구에 의해 제안된 태양 위치 측정용 전파 센서는 최종 출력 전압의 변화로 태양의 위치 변화에 따른 입력 전력의 상대적 변화를 측정함

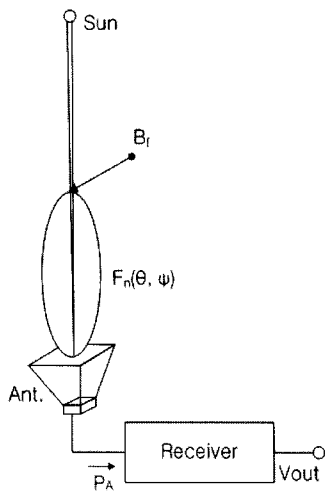


그림 2. 전파 센서에 의한 태양 전파 측정
Fig. 2. Measurement of solar radio emission using radio sensor.

으로써 태양의 위치를 측정한다. 특히, 지표면에서 태양은 아주 멀리 떨어져 있는 작은 이산 복사체로 그림 2와 같이 안테나의 전체 입체각내에 태양이 점유하는 입체각은 매우 작다. 따라서 안테나가 태양을 정면으로 향하고 있을 때 태양 전파는 안테나 복사 패턴의 최대 강도 방향의 극히 작은 입체각내 ($F_n \cong 1$ 부근)로 집중 입사되므로 태양의 위치를 작은 오차 범위 내로 측정할 수 있다.

III. 수신기 설계 및 제작

3-1 요구 성능 및 목표 사양

태양광 발전 시스템에 있어서 발전량을 최대로 하기 위해서는 태양광 모듈의 수광면과 입사 태양광 사이의 각이 $90 \pm 5^\circ$ 이내로 유지되는 것이 필요하다^[8]. 따라서 전파 센서는 태양의 위치를 오차 범위 $\pm 5^\circ$ 이내로 측정이 가능하여야 한다. 이러한 요구 성능을 만족시키기 위해 태양 위치 측정 전파 센서의 목표 사양을 검토하였다.

먼저, 수신 주파수는 구름, 안개 등의 기상조건하에서도 90 % 이상의 투과 특성을 가져야 하며, 타 업무용 전파, 특히 이동 통신이나 위성 통신, 지상파 및 위성방송, GPS 등에 사용되는 전파로부터의 간섭을 피해야 한다. 전파의 대기 투과 특성에 대한 구름의 영향^[9], 주파수 분배 현황^[12], 안테나 및 시스템 사이즈, 소자 구매의 용이성, 제작의 난이도, 원가 등을 종합적으로 고려하여 수신 중심 주파수 5.1 GHz, 대역폭 104 MHz로 선정하였다.

수신되는 태양 복사 전파는 미약한 열잡음 전파이므로 매우 낮은 입력 전력에 대해서도 수신기는 정상적으로 동작해야 한다. 수신기의 입력 전력은 전파연구소의 연구 자료^[13]를 참고로 -110 dBm으로 결정하였다.

마이크로파 라디오미터에서 수신 감도는 출력 전압으로부터 측정 가능한 수신기 입력 잡음 전력의 최소 변화치로 등가 잡음 온도로 표현된다. 참고문헌^[13]에서 제시된 6.31×10^{-24} [$Wm^{-2}Hz^{-1}$] 정도의 태양 전파 스펙트럼 플럭스 밀도를 감지하기 위해서 대역폭이 $\Delta f = 104$ MHz인 수신기의 경우, 요구되는 감도는 식 (6)의 Nyquist noise power 식에

표 1. 전파 센서의 개발 목표

Table 1. Development goals of the radio sensor.

항목	목표 사양
최저 수신 가능 입력 전력 (수신기)	-110 dBm
수신 감도 (수신기)	0.46 K
태양 위치 측정치의 오차 범위	맑은 날 : < ±5° 이내 흐린 날 : < ±5° 이내

의해 $\Delta T = 0.46$ K로 구해진다.

$$\Delta P_n = k \Delta T \Delta f \quad (6)$$

표 1에 전파 센서의 주요 목표 사양을 정리하였다.

3-2 설계

수신기는 그림 3과 같이 크게 RF-IF부와 검파부로 구성된다. 안테나를 통해 수신된 미약한 열잡음 전파는 RF-IF부에서 대역 제한과 신호 증폭 과정을 거쳐 검파부로 공급된다. 검파부는 검파 다이오드와 저역 통과 여파기로 구성된 자승 검파기로 수신기 입력 전력 P_A 의 크기에 비례하는 전압 V_{out} 을 출력한다.

검파 다이오드 부품은 Analog device사의 AD8313을 사용했으며, 검파부의 안정적 동작을 위한 입력 전력 범위는 -45 dBm부터 -20 dBm까지로 RF-IF부의 출력 전력 P_D 는 최소한 -45 dBm 이상이어야 한다. 수신기의 최소 입력이 -110 dBm이므로, 수신기는 65 dB 이상의 시스템 이득이 요구된다. 충분한 이득을 실현하기 위해 수신기는 그림 3과 같이 Superheterodyne 방식으로 설계하였으며, 안테나를

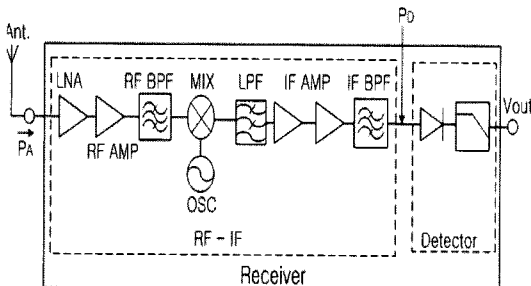


그림 3. 수신기의 시스템 구조

Fig. 3. System block diagram.

표 2. 수신기의 설계 사양

Table 2. System design specifications.

항목	설계 사양
수신 주파수	5.1 GHz
대역폭	104 MHz
시스템 이득	65 dB 이상
시스템 잡음 지수	2.1 dB 이하
입력 전력 범위	-110 ~ -94 dBm
수신 감도	0.46 °K 이하

통해 수신된 5.1 GHz 신호는 믹서에 의해 1.4 GHz의 IF 대역으로 변환된다.

태양의 위치를 오차 범위 내로 측정하기 위해서는 높은 수신 감도가 요구되어지며, 이를 달성하기 위해서 수신기는 낮은 내부 잡음 특성을 가지야 한다. 수신 감도와 내부 잡음 온도와의 관계는 식 (7)과 같이 주어진다^[7].

$$\Delta T = \frac{T_A + T_R}{\sqrt{\Delta f \cdot \tau}} \quad (7)$$

식 (7)에서 ΔT 는 수신 감도, T_A 는 안테나 온도, T_R 은 수신기 내부 잡음 온도, Δf 는 대역폭, τ 는 검파부의 적분 시간을 각각 나타낸다. 시스템 내부 잡음 온도 T_R 은 식 (8)과 같이 시스템의 잡음 지수 F 에 비례한다. 식 (8)에서 T 는 수신기의 물리 온도를 나타낸다.

$$T_R = (F - 1)T \quad (8)$$

대역폭 $\Delta f = 104$ MHz, 적분 시간 $\tau = 10$ ms 인 수신기가 $T = 290$ K의 상온에서 안테나 온도 $T_A = 300$ K의 조건에서도 수신 감도를 목표치인 0.46 K 이내로 유지하기 위해서는 수신기의 시스템 NF는 식 (7)과 식 (8)에 의해 2.1 dB 이하가 요구된다. 수신기의 주요 시스템 설계 사양은 표 2와 같다.

표 3에 수신기를 구성하는 각 단부품의 설계 목표와 시스템의 이득 및 잡음지수 budget을 산출한 결과를 나타내었다. 각 부품간의 부정합 및 전송 손실에 의한 마진을 고려하여 산출한 결과, 전체 이득 65.5 dB, NF 1.81 dB로 목표 사양에 만족되게 설계되었음을 알 수 있다.

표 3. 시스템 이득 및 잡음 지수 budget 분석
Table 3. The budget analysis of system gain and noise figure.

Stage	Function	설계 목표	
		Gain(dB)	NF(dB)
1	LNA	13	1.3
2	Loss	-0.5	0.5
3	RF AMP	17	2
4	Loss	-1	1
5	RF BPF	-7	7
6	Loss	-1	1
7	Passive mixer	-8	8
8	Loss	-1	1
9	IF AMP	29	1.6
10	Loss	-1	1
11	IF AMP	29	1.6
12	Loss	-1	1
13	IF BPF	-2	2
16	Total	65.5	1.81

Loss: 부정합 및 전송 손실 등을 고려한 마진.

3-3 제작 및 측정

고이득, 저잡음으로 시스템을 구현하기 위해 첫 단 AMP는 LNA를 사용하였으며, 둘째 단에는 이득이 높은 MMIC AMP를 사용하여 RF AMP단을 이득 30.7 dB, 잡음 지수 1.7 dB로 설계 제작하였다. RF단의 대역 통과 필터는 중심 주파수 5.1 GHz, 대역폭 130 MHz, 삽입 손실 -6 dB로 설계하였으며, 크기가 작은 Hairpin 구조를 이용하여 소형화를 추구하였다. 기판 재질은 삽입 손실이 적은 비유전율 2.2인 테프론 기판을 사용하였다. IF부는 50 dB 이상의 높은 이득을 가지며, 검파부는 넓은 선형 범위와 입력 전력에 대한 출력 전압의 기울기가 일정하도록 제작하였다.

표 4에 제작된 각 단부품의 측정 결과치와 이에 의해 산출된 시스템 전체 이득과 NF를 각각 나타내었다. 제작된 단부품은 표 3의 설계 목표치를 만족하며 전체 이득과 NF 역시 각각 69.09 dB, NF 1.98 dB로 표 2의 수신기 설계 사양을 충족시킨다.

그림 4는 제작된 수신기 모듈이다. 수신기 크기는 90 mm×120 mm로 소형 경량화를 실현하였으며, 소

표 4. 각 부품의 측정 결과를 이용한 시스템 이득 및 잡음 지수 budget 분석

Table 4. The budget analysis of system gain and noise figure by using measurement result of each parts.

Stage	Function	측정 결과	
		Gain(dB)	NF(dB)
1	LNA	13	1.6
2	Loss	-0.5	0.5
3	RF AMP	17.69	2.5
4	Loss	-1	1
5	RF BPF	-6	6
6	Loss	-1	1
7	Passive mixer	-8	8
8	Loss	-1	1
9	IF AMP	29.5	2
10	Loss	-1	1
11	IF AMP	29.5	2
12	Loss	-1	1
13	IF BPF	-1.1	1.2
16	Total	69.09	1.96

Loss: 부정합 및 전송 손실 등을 고려한 마진.

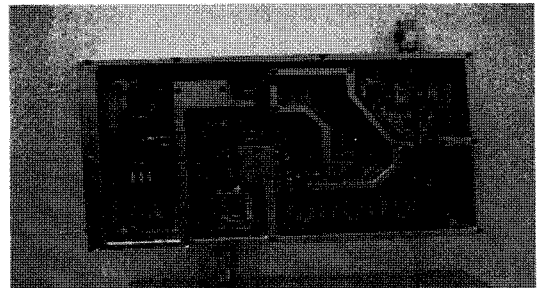


그림 4. 제작된 수신기 모듈

Fig. 4. Photograph of the fabricated receiver module.

비 전력은 5 V×234 mA로 저전력을 추구하였다.

수신 시스템의 성능을 평가하기 위하여 고주파 신호 발생기와 스펙트럼 분석기를 사용하여 수신기의 동작 범위 및 이득을 측정하였다. 측정 방법은 고주파 신호 발생기의 5.1 GHz 신호를 -120~-70 dBm까지 가변하면서 수신기에 입력시켜 입력 전력의 변화에 대한 RF-IF부의 출력 전력을 스펙트럼 분석기로 측정하였다. 그림 5는 입력 전력의 변화에 대한 수신기의 이득을 나타낸다. -100~-77 dBm

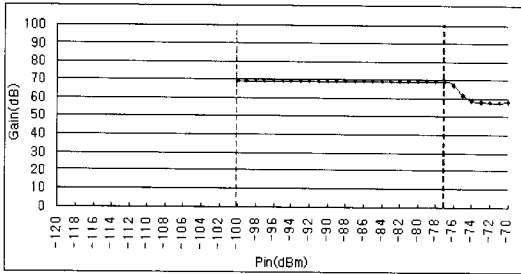


그림 5. 시스템 동작 범위 및 이득
Fig. 5. Dynamic range and system gain.

표 5. 시스템 성능 측정 결과

Table 5. The measurement results of system performance.

시스템 이득	69 dB
NF	2.4 dB

의 입력 전력 범위에 대해 이득은 69 dB로 거의 일정하였으나 고주파 신호 발생기의 출력 신호의 레벨 한계로 -100 dBm 미만의 입력 전력에 대해서는 측정이 불가능하여 확인할 수 없었다.

수신기 전체 성능은 표 5와 같으며, 표 4의 단부품 측정치에 의한 budget 계산 결과와 측정 결과를 비교하면, 이득은 69 dB로 거의 같으나 NF는 2.4 dB로 1.96 dB에 비해 0.44 dB 정도 증가한 결과가 나타났다. 이는 부품 간 결합 시 부정합 및 손실 등에 의해 생긴 오차로 생각된다.

전파 센서 수신기는 열잡음 전파를 수신함으로 열잡음 입력 전력의 변화에 대한 최종 출력 전압의 변화 특성 및 수신 감도에 대한 성능 평가 실험이 필요하다. 그림 6과 같이 수신기의 입력단에 연결된 안테나를 정합 저항으로 대체하고 물리 온도 $T(K)$ 로 밀폐된 항온조 내에 설치했을 때, 정합저항에 의해 입력단에 전달되는 잡음 전력 P_n 은 식 (6)의 Nyquist noise power식에 의해 식 (9)과 같이 쓸 수 있다.

$$P_n = K T \Delta f [W] \quad (9)$$

잡음 전력 P_n 은 온도 T 의 함수로 나타나며, 식 (5)의 안테나에 의해 수신된 전력 P_A 와 정합 저항에 의해 전달된 잡음 전력 P_n 이 같을 경우, 식 (9)의 온도 T 는 안테나 온도 T_A 로 식 (10)이 성립하며, 수신기의 출력 전압 V_{out} 은 입력 전력 P_A

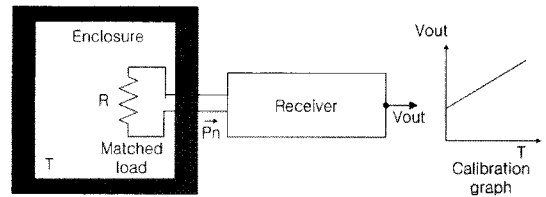
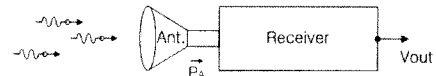


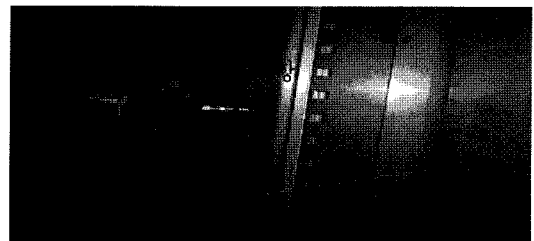
그림 6. 안테나로 수신된 잡음 전력과 정합 저항에 의해 전달되는 잡음 전력의 등가 개념도
Fig. 6. Schematic representation that the power received by an antenna is equivalent to the noise power delivered by a matched resistor.

($= P_n$)에 비례하므로 결국 식 (11)과 같이 V_{out} 은 안테나 온도, 즉 항온조 온도 T 에 비례한다.

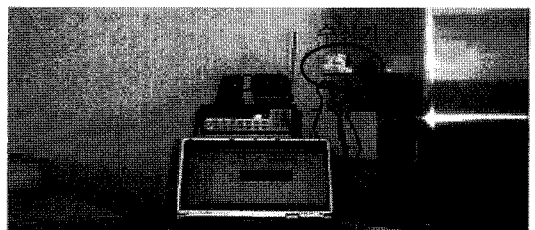
$$P_n = P_A = K T_A \Delta f \quad (10)$$

$$V_{out} = a T_A + b \quad (11)$$

그림 7은 실제 항온조를 이용하여 온도 변화에 대



(a) 항온조 내부
(a) Internal of a thermostat



(b) 항온조 외부
(b) External of a thermostat

그림 7. 항온조를 이용한 정합 저항의 물리적 온도 변화에 대한 수신기 출력 전압 측정
Fig. 7. The measurement of receiver output voltage for physical temperature change of the matched load by using thermostat.

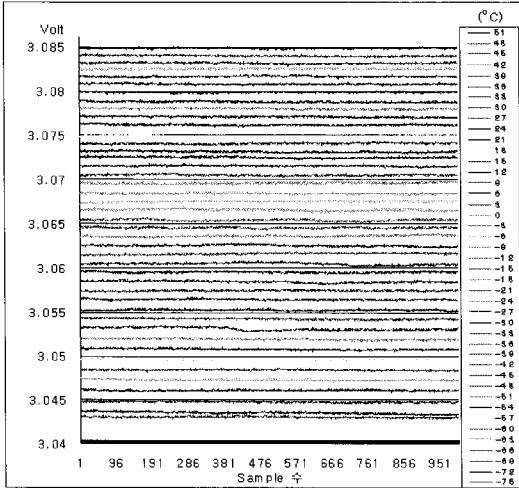


그림 8. 정합 저항의 온도 변화에 대한 수신기 출력 전압 데이터

Fig. 8. The voltage data of receiver output for physical temperature change of the matched load.

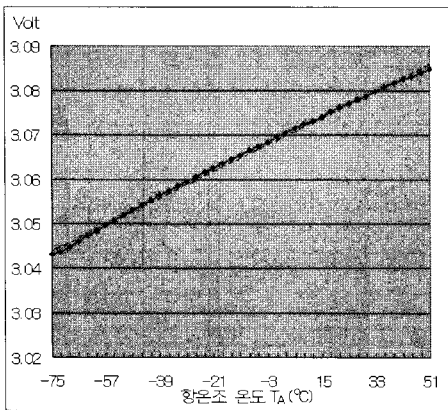


그림 9. 전파 센서의 환산 그래프

Fig. 9. Calibration graph of the radio sensor.

표 6. 전파 센서의 환산식

Table 6. Calibration equation of the radio sensor.

$V_{out} = aT_A + b$	
a (온도 1 K당 출력 전압 변화량)	0.000328(V)
b (Reference voltage)	2.97926(V)

한 수신기 출력 전압의 측정 모습으로 수신기의 입력단에 정합 저항을 연결한 후, 외부와 차단된 밀폐된 항온조에 넣어 내부 온도를 198~324 K(-75~51 °C)까지 3 K씩 변화시켜 입력 잡음 전력의 변화에 따른 출력 전압을 측정하였다. 수신기의 출력 전압은

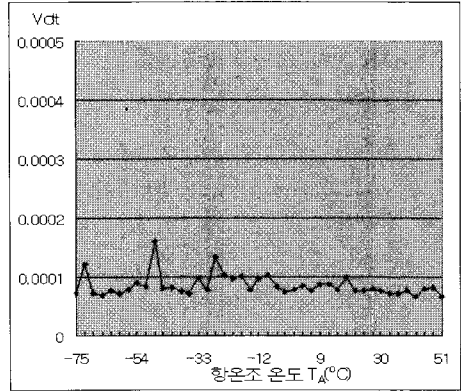


그림 10. 수신기 출력 전압 데이터의 표준편차

Fig. 10. Standard deviation of voltage data for receiver output.

표 7. 표준편차 및 수신 감도

Table 7. Standard deviation and sensitivity.

$\Delta V = a\Delta T$	표준편차 (ΔV)[V]	수신 감도 (ΔT)[K]
평균	0.000065	0.2
최대	0.00016	0.49

멀티미터를 PC에 연결하여 실시간으로 각 온도 당 0.5초 간격으로 1,000개의 샘플을 측정하였다. 그림 8에 측정된 수신기 출력 전압을 나타내었다. 항온조 내부 온도가 상승함에 따라 입력 잡음 전력이 증가하여 출력 전압도 증가함을 확인할 수 있다. 그림 9는 그림 8의 측정된 출력 전압 데이터의 평균값을 나타낸 것으로 온도 변화에 대해 출력 전압이 선형적으로 변화함을 알 수 있다. 그림 9의 $T_A - V_{out}$ 환산 그래프로 식 (11)과 같은 항온조 온도(안테나 온도) 대 출력 전압, 즉 입력 잡음 전력 대 출력 전압 간의 환산식을 도출하였다. 도출된 식 (11)의 기울기 a 와 절편 b 는 표 6과 같다. 그림 10은 측정된 수신기 출력 전압 데이터의 표준편차를 나타낸 것으로 표준편차(ΔV)와 수신 감도 (ΔT)의 관계식은 $T_A - V_{out}$ 환산식으로부터 식 (12)와 같이 구해진다.

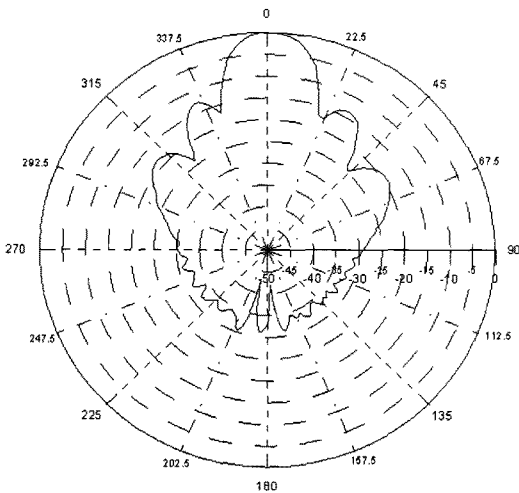
$$\Delta V = a\Delta T \quad (12)$$

표 7은 측정된 표준편차와 표 6과 식 (12)에 의해 산출된 수신 감도를 각각 나타내었다. 수신 감도는 평균 0.2 K, 최대 0.49 K로 목표 성능을 만족하였다.

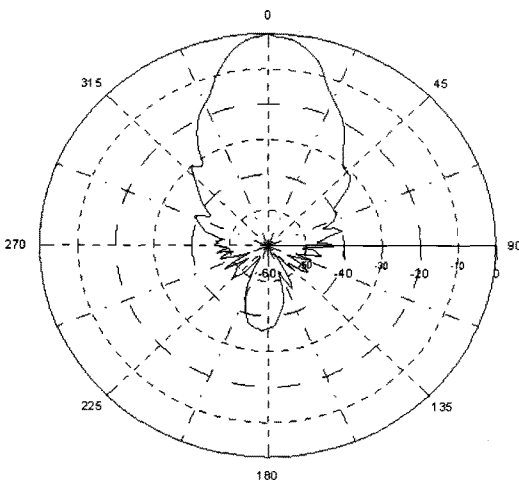
표 8. 전파 센서의 측정 결과

Table 8. The measurement results of the radio sensor.

항목	측정 결과	
수신 주파수	5.1 GHz	
대역폭	104 MHz	
시스템 잡음 지수	2.4 dB	
시스템 이득	69 dB	
입력 전력 범위	-100 ~ -77 dBm	
수신 감도	평균	0.2 K
	최대	0.49 K



(a) x-y plane(azimuth)



(b) y-z plane(elevation)

그림 11. 표준 피라미드 혼 안테나의 복사 패턴
Fig. 11. Radiation pattern for the standard pyramid horn antenna.

성능 평가 실험에 의한 측정 결과를 표 8에 정리하였다.

IV. 태양 위치 측정 실험

4-1 측정 방법

제작된 태양 위치 측정 전파 센서로 태양 위치 측정 실험을 하였다. 육안으로 태양의 위치가 명확히 보이지 않는 흐린 날에 9층 건물 옥상에서 아침 9시부터 오후 1시까지 3차례에 걸쳐 측정하였다. 사용 안테나는 C-Band 대역의 표준 피라미드 혼 안테나를 사용하였으며, 안테나 이득은 15 dBi로 개구면의 크기는 234 mm(가로)×168 mm(세로), 길이 576 mm이다. 안테나의 방사 특성은 그림 11과 같다.

측정 방법은 천문과학연구원에서 제공하는 시간대 별 태양 위치 정보^[4]를 이용하여 안테나의 고도각을 고정시키고 육안으로 태양이 보이는 방향으로 안테나의 개구면을 향하게 한 후, 그 방향을 중심으로 좌우 90°, 즉 수평 방향으로 0~180°까지 2° 간격으로 안테나를 회전시켜 2°당 20개씩 총 1,800개의 수신기 출력 전압 데이터를 실시간으로 수집하였다. 태양 위치 측정 모습은 그림 12와 같다.

4-2 태양 위치 측정 결과 및 분석

9시 40분, 10시 04분, 12시 55분의 3차례에 걸쳐 측정하였으며, 안테나의 회전각에 따른 수신기 출력 전압의 변화를 그림 13에 나타내었다. 또한, 그림 13에서 최대 출력 전압이 나타난 각도 부근(○)을

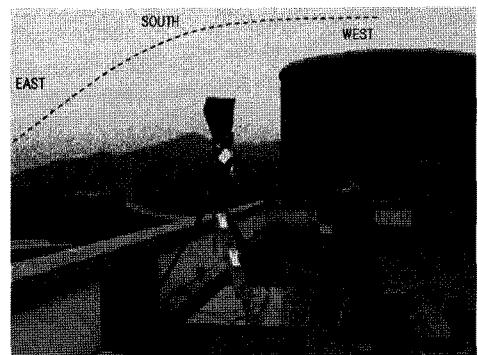
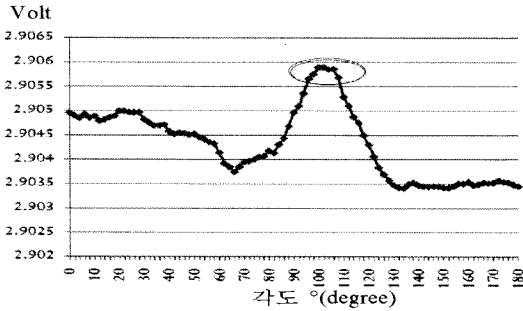
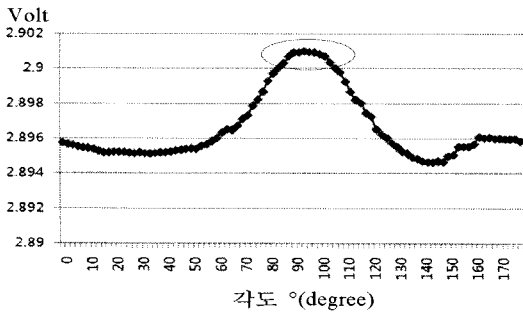


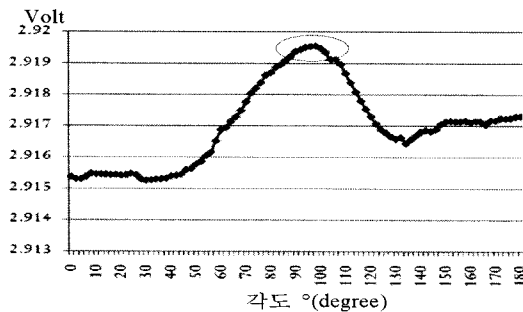
그림 12. 태양 위치 측정
Fig. 12. Measurement set-up for measuring the position of the sun.



(a) 오전 9시 40분 측정 데이터
(a) The measurement data at 9:40 am



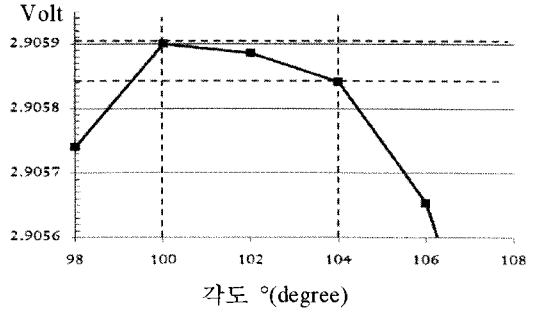
(b) 오전 10시 4분 측정 데이터
(b) The measurement data at 10:04 am



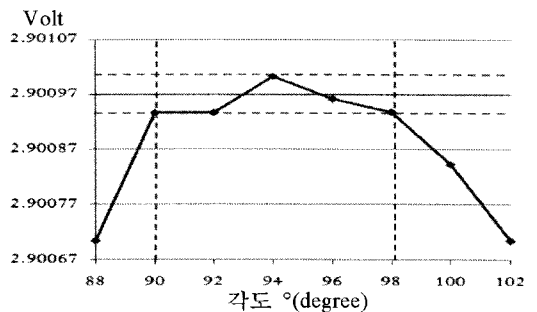
(c) 오후 12시 55분 측정 데이터
(c) The measurement data at 12:55 pm

그림 13. 안테나 회전에 의한 센서의 출력 전압 변화
Fig. 13. The output voltage variation of sensor for the rotary antenna.

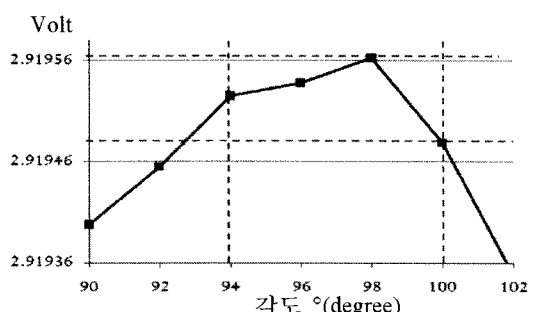
확대하여 그림 14에 각각 나타내었다. 안테나의 회전각 변화에 따라 출력 전압이 변화하며, 그 변화 형태는 안테나의 개구면 방향이 태양 위치 쪽으로 가까이 갈수록 출력이 상승하고 멀어질수록 출력이 떨어짐을 확인할 수 있었다. 또한, 안테나 개구면이 태양을 정면으로 향하고 있는 각도에서 출력 전압의 피크가 명확히 나타났다. 다만, 시간대에 따라 최대 출력이 나타난 각도에 조금 차이가 있는 것은 안테



(a) 9시 40분 측정 데이터 오차 분석
(a) Error analysis of the measurement data at 9:40 am



(b) 10시 4분 측정 데이터 오차 분석
(b) Error analysis of the measurement data at 10:04 am



(c) 12시 55분 측정 데이터 오차 분석
(c) Error analysis of the measurement data at 12:55 pm

그림 14. 태양 위치 측정 각도 오차 분석
Fig. 14. Error analysis of angle to measuring the position of the sun.

나의 수평 회전 방향의 중심을 설정할 때 태양의 위치방향 선정을 육안에 의존하였기 때문이다.

측정치 오차 범위를 결정하는데 있어서 멀티미터의 전압 측정 분해능은 중요한 요소로 작용한다. 최근 디지털 기술의 발전과 생산 비용 하락으로 일반 저가의 휴대용 멀티미터도 전압 분해능이 100 μ V 정도이다. 따라서 오차 범위 판단 기준을 100 μ V로 선정하여 태양 위치 측정 오차 범위 각을 산출하였

표 9. 태양 위치 측정 오차 범위

Table 9. Error range for measuring the position of the sun.

측정 시간	최대 출력 위치 각	태양 위치 측정 오차 범위
9:40	100°	100~104°(+4°)
10:04	94°	90~98°(±4°)
12:55	98°	94~100°(+2~-4°)

다. 그림 14에서 100 uV를 기준으로 한 경우 전파 센서의 태양 위치 오차 범위는 최대 ±4°로 나타났으며 분석 결과는 표 9와 같다.

V. 결 론

본 논문에서는 추적식 태양광 발전 시스템에 있어서 기존 광 센서의 문제점을 극복하는 대안으로 마이크로파 라디오미터 기술을 이용한 태양 위치 측정용 전파 센서를 제안하였다. 먼저 ±5° 이내의 위치 측정 오차 범위를 만족시키기 위한 수신기의 요구 성능, 설계 사양 등을 도출하였으며, 이를 토대로 설계 사양에 만족하는 전파 센서 수신기를 설계 제작하였다. 제작된 수신기는 수신 주파수 5.1 GHz, 대역폭 104 MHz로 69 dB의 시스템 이득과 NF 2.4 dB의 고이득, 고감도, 광대역 특성을 가지며, 크기는 90 mm×120 mm, 소비 전력은 5 V×234 mA로 소형 경량 저소비 전력으로 구현하였다. 항온조를 이용 입력 잡음 전력의 변화에 대한 수신기의 출력 전압을 측정하여 안테나 온도 대 출력 전압의 환산 그래프와 환산식 및 수신 감도를 구하였다. 제작된 수신기는 -100~-77 dBm 범위의 입력 전력에 대해 평균 0.2 K(최대 0.49 K)의 수신 감도로 선형적으로 동작함을 확인하였다. 제작된 전파 센서 수신기에 표준 혼 안테나를 연결하여 흐린 날 태양 위치 측정 실험을 하였으며, 실험결과 태양의 위치를 ±4° 이내의 오차 범위 내로 측정이 가능함을 확인되었다.

본 논문에서 제안한 태양 위치 측정용 전파 센서는 현재 많이 사용되고 있는 광 센서의 단점을 보완할 수 있어 태양광 발전 시스템의 태양 추적 센서로 활용이 기대된다. 향후 시스템의 소형화를 위해 고이득 소형 안테나의 개발이 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] 전용석, 박헌균, 윤호경, 강만구, 김종대, "태양전지 중요성과 발전 동향", 정보통신진흥원 주간기술동향, 통권 1335호, pp. 21-28, 2008년 2월.
- [2] 김제하, "박막 태양광에너지 기술동향 및 전망", Technology Focus, pp. 66-72, 2009년 4월.
- [3] 김제하, 주무정, 정용덕, 박래만, 성희경, "박막형 태양전지기술 및 산업동향", 한국전자통신연구원 전자통신 동향 분석, 23(6), pp. 2-11, 2008년 12월.
- [4] 김평호 외, "지능형 제어기법을 이용한 태양 추적시스템에 관한 연구", 한국태양에너지학회 논문집, 25(1), 2005년.
- [5] 최정식, 고재섭, 정동화, "태양광발전시스템의 추적식 및 MPPT 제어기 개발", 조명·전기설비학회논문지, 21(8), pp. 54-63, 2007년.
- [6] K. Rohlfs, *Tool of Radio Astronomy*, Springer-Verlag, 1990.
- [7] F. T. Ulaby, R. K. Moore, and A. K. Fung, *Microwave Remote Sensing Fundamentals and Radiometry*, Addison-Wesley, 1981.
- [8] 김상봉, 박진우, 주상아, 손홍민, "태양을 이용한 안테나 원거리 복사 패턴의 간이 측정법", 한국전자파학회 종합학술발표회논문집, 17 (1), pp. 555-558, 2007년 11월.
- [9] E. G. Njoku, "Passive microwave remote sensing of the earth from space-a review", *Proc. of the IEEE*, vol. 70, no. 7, pp. 728-750, Jul. 1982.
- [10] 김상봉, 김지훈, 손홍민, "해수 및 하천수의 염분농도 원격탐사용 L-Band M/W Radiometer의 개발 및 초기 실험 결과", 대한원격탐사학회 2007 춘계학술대회 논문집, 10, pp. 65-69, 2007년 3월.
- [11] 김상봉, 손홍민, "C-Band Microwave Radiometer를 이용한 지표면 복사지열 측정", 추계 마이크로파 및 전파학술대회 논문집, 30(2), pp. 775-779, 2007년 9월.
- [12] 국내 주파수 분배표, <http://www.spectrum.or.kr>, 2009년.
- [13] 김영규, 한진욱, 홍순학, 유석원, "2.8 GHz 태양

전파 관측 및 분석연구", 전파연구소 연구보고서 2007-09, 2007년 12월.

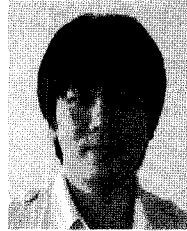
[14] 태양의 고도 및 방위각, 한국천문연구원, <http://www.kasi.re.kr>, 2009년 5월.

박진우



2009년 2월: 호남대학교 전파이동통신공학과 (공학사)
2009년 3월~현재: 호남대학교 전파공학과 석사과정
[주 관심분야] 초고주파 회로 및 시스템, 마이크로파 라디오미터, 안테나

조홍렬



2009년 2월: 호남대학교 전파이동통신공학과 (공학사)
2009년 3월~현재: 호남대학교 전파공학과 석사과정
[주 관심분야] 마이크로파 회로, 마이크로파 라디오미터, Inverse Program

최연웅



2006년 8월: 호남대학교 전파이동통신공학과 (공학사)
2007년 8월~현재: 호남대학교 전파공학과 석사과정
[주 관심분야] 초고주파 회로 및 시스템, 마이크로파 라디오미터

손홍민



1985년 2월: 울산공과대학교 전자공학과 (공학사)
1991년 3월: 일본국립 전기통신대학교 전자공학과 (공학석사)
1995년 9월: 일본국립 전기통신대학교 전자공학과 (공학박사)
1984년 11월~1986년 8월: (주)신도리코 기술연구소 연구원
1995년 9월~1997년 2월: 삼성전자(주) 정보통신연구소 선임연구원
1997년 3월~현재: 호남대학교 전파이동통신공학과 교수
[주 관심분야] 마이크로파 원격탐사시스템, 신호처리 안테나 시스템, 고감도 수신기, 무선통신 시스템