THE JOURNAL OF KOREAN INSTITUTE OF ELECTROMAGNETIC ENGINEERING AND SCIENCE. 2012 Sep.; 23(9), 1107～1115.

http://dx.doi.org/10.5515/KJKIEES.2012.23.9.1107
ISSN 1226-3133 (Print)

수면 온도 원격탐사용 마이크로파 라디오미터의 개발

Development of a Microwave Radiometer for Remote Sensing of Water Surface Temperature

손 홍 민 · 윤 정 범

Hong-Min Son · Jeong-Beam Youn

요 약

본 논문은 수면에서 복사되는 마이크로파 대역의 미약한 열잡음 전파를 수신하여 수면 온도의 변화를 실시간 원격으로 모니터링할 수 있는 마이크로파 라디오미터의 개발에 관한 연구 내용을 소개한다. 수면 온도의 원격 측정 범위 5～30 ℃, 최대 오차 2 ℃의 성능을 달성하는 데 요구되는 마이크로파 라디오미터의 설계 사양을 도출하였으며, 도출된 사양을 만족시키기 위한 라디오미터 수신기를 설계, 제작하였다. 성능 측정 결과, 제작된 수신기는 주파수 5.02 GHz, 대역폭 50 MHz, 45.2 dB의 시스템 이득과 수신 감도 0.56 K 이내로 설계 목표 사양을 만족하였다. 제작된 수신기와 표준 혼 안테나로 구성된 마이크로파 라디오미터로 간이 풀장을 이용 7.5～18 ℃ 범위의 수면 온도 변화에 대한 원격 측정 실험 결과, 오차 0.45 ℃ 이하의 수면 온도 측정 성능을 확인할 수 있었다.

Abstract

This paper presents the development processes of a microwave radiometer for remote sensing of water surface temperature. Achieving the measurement accuracy within 2 ℃ for water surface temperature of 5～30 ℃, the requirements and specifications of the microwave radiometer and its receiver are drawn. The receiver with high gain, high sensitivity is designed and implemented. The receiver has the bandwidth of 50 MHz, the system gain of 45.2 dB and the sensitivity of 0.56K at 5.02 GHz. The effectiveness of the developed microwave radiometer in the measurement of water surface temperature is demonstrated experimentally. The results show the microwave radiometer can detect water surface temperature for 7.5～18 ℃ within the accuracy of 0.45 ℃.

Key words : Passive Microwave Remote Sensing, Microwave Radiometer, Water Surface Temperature, Microwave Emission

Ⅰ. 서 론

최근 지구 온난화로 인한 해수면 온도의 급격한 상승은 엘니뇨, 적조, 태풍 등의 빈번한 발생과 그 규모의 대형화 원인으로 해석되고 있으며, 해류의 이동 변화와 극지방 빙하의 극심한 감소를 유발하여 세계 곳곳에 기상 이변과 재해 및 지구 규모의 급격한 기후 변화를 발생시키고 있다[1],[2]. 또한, 하천, 담수 등의 수면 온도 상승으로 인한 녹조 현상은 수질 및 생태계 환경을 악화시켜 수 생물은 물론 식수를 의존하는 인간의 삶에도 심각한 영향을 미치고 있다[3]. 이와 같이 수면 온도는 기상, 기후, 수질 및 생태

호남대학교 전파이동통신공학과(Department of Radio Mobile Communications Engineering, Honam University)

· Manuscript received 2012 May 25, 2012 ; Revised August 16, 2012 ; Accepted August 29, 2012. (ID No. 20120525-08S)

· Corresponding Author : Hong-Min Son (e-mail : hmson@honam.ac.kr)

ⓒ Copyright The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science. All Rights Reserved.

계 환경에 큰 영향을 미치는 중요한 인자로 해양, 하천, 댐, 호수 등 광범위한 지역을 대상으로 수면 온도의 변화를 실시간, 원격으로 모니터링 할 수 있는 기술이 필요하다.

수면 온도의 원격 탐사 센서로 적외선 센서가 이용되고 있으나, 기상 및 대기 상태에 영향을 크게 받아 구름, 안개, 비, 눈, 황사 등이 존재할 경우, 관측이 거의 불가능하다. 특히, 수면 위의 대기는 표층수의 증발로 인해 짙은 수증기, 안개, 구름 등이 빈번히 형성되므로 활용에 한계가 있으며, 수면 반사광이나 산란광에 의한 관측치의 오차 영향이 크다[4].

이에 비해 마이크로파 라디오미터는 물체 자체로부터 복사되는 마이크로파 대역의 열잡음 전파를 안테나를 통해 고 이득, 고 감도, 광대역 수신기로 수신하여, 그 출력으로부터 물체의 복사 전력을 휘도온도(brightness temperature)[5]로 측정하는 대표적인 수동형 마이크로파 원격 탐사 센서이다. 마이크로파 대역의 전파를 사용함으로 기상이나 대기 상태의 영향이 적으며, 주야간에도 관측이 가능한 전천후 센서로 해수면 온도 원격탐사용 마이크로파 라디오미터는 1970년대 말 미국의 해양 관측 위성인 Seaset에 탑재된 SMMR을 필두로 본격적으로 실용화되었다[6]. 이후 선진국에서는 기상, 해양 관측, 환경감시 등에 사용해 왔으며, 기후 시스템, 수자원 관리 등 활용 분야의 확대와 관측정밀도 향상을 위한 연구 개발이 활발히 진행되고 있으나[7],[8], 국내에서는 마이크로파 라디오미터의 설계, 제작 및 측정 기술의 확보가 미비한 실정이다.

본 논문에서는 수면의 온도 변화를 실시간, 전천후로 원격 모니터링이 가능한 5 GHz 대역의 마이크로파 라디오미터의 개발에 관해 기술한다. 수면 온도 5~30 ℃ 범위에서 2 ℃의 온도 변화를 원격으로 검출하기 위해 요구되는 마이크로파 라디오미터의 사양 도출, 수신기의 설계, 제작 및 측정 과정과 결과를 소개한다. 이어 간이 풀장을 이용한 실제 수면 온도의 변화에 대한 측정 실험을 통해 개발된 라디오미터의 성능을 평가한다.

Ⅱ. 수면 온도 원격탐사용 마이크로파 라디오미터의 사양 도출

2-1 관측 파라미터의 결정

지구상의 일반적인 물체인 gray body의 복사 휘도 온도 T_B는 "$T_B = eT$"로 물체의 복사율 e와 물체 온도 T의 곱으로 정의되며, 복소 유전율, 표면 상태, 결정 상태, 물체 온도 등 물체의 고유 특성 및 상태에 따라 다르다[5],[10]. 또한, 방향성과 편파성을 가지고 있으므로 마이크로파 라디오미터의 사양 도출을 위해서는 먼저 수면 온도의 변화에 대해 수면 복사 휘도 온도 T_B의 변화가 큰 주파수, 편파, 입사각 등 관측 파라미터를 선정해야 하며, 이를 위해서는 수면에서의 마이크로파 복사 특성에 대한 검토가 필요하다[9]. 주파수 대역별 T_B의 변화는 수면 온도, 염분 농도 및 풍속 등의 물리량에 의존한다. 수면 온도의 변화에 대해서는 5, 6 GHz 대역, 염분 농도는 1 GHz 대역, 풍속에 대해서는 10 GHz 이상에서 상대적으로 가장 높은 민감도를 나타낸다[10]]. 따라서, 관측 주파수는 수면 온도의 변화에 대해서 민감도가 크고 타 물리량에 대해서는 영향이 적은 5 GHz 부근으로 선택하였다. 결정된 관측 주파수 대역은 중심 주파수 5,020 MHz, 대역폭은 50 MHz이다.

편파 및 입사각에 대한 수면 복사 특성은 수직 편파가 수평 편파보다 T_B가 크며, 수면 온도 변화에 대한 민감도도 크게 나타난다. 입사각에 대해서는 수직 편파에서는 0~80° 범위에서 각이 증가할수록 T_B의 변화량이 증가하나, 수평 편파의 경우는 반대로 입사각이 증가할수록 감소한다[11],[12]. 따라서 관측 편파는 수직 편파를, 입사각은 관측 시 주변의 지형이나 지물에서 복사되는 전파가 안테나 빔 내부로 입사되는 것을 차단하기 위해 45°로 선정하였다.

2-2 측정 휘도 온도 범위 및 감도

수면 온도에 대한 수면 복사 휘도 온도 T_B의 변화 특성은 온도가 상승할수록, 염분 농도가 낮을수록 T_B와 온도에 대한 변화량이 증가한다[10],[11]. 그림 1은 수직 편파로 입사각이 40~45°인 경우, 5 GHz 부근에서의 수면 온도의 변화에 대한 T_B의 변화를 나타낸 그래프로서 염분 농도가 0 psu인 순수 물에서 40 psu인 먼 바다의 해수까지 고려한 경우, 5~30 ℃의 수면 온도 변화에 대한 T_B의 변화 범위는 약 122

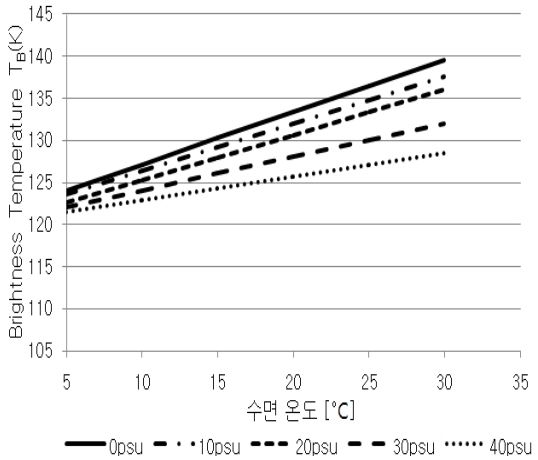

그림 1. 수면 온도의 변화에 대한 T_B의 변화 특성
Fig. 1. Variation of the T_B for the change of water surface temperature.

~140 K이다.

마이크로파 라디오미터의 감도는 출력 전압으로부터 측정 가능한 최소 휘도 온도의 변화 치로, 이는 측정한 휘도 온도의 정밀도, 즉 측정 오차를 의미한다[5]. 그림 1에서 염분 농도가 40 psu인 경우 5~10 ℃구간에서 수면 온도 변화에 의한 T_B의 변화량이 가장 작게 나타남을 알 수 있다. 이 구간에서 수면 온도 2 ℃의 변화(5~7 ℃)에 대한 T_B의 변화량은 약 1 K이다. 표 1에 하천 수, 담수 및 해수까지 포함하여 5~30 ℃ 범위의 수면 온도를 2 ℃ 이내의 오차로 원격 측정하기 위해 요구되는 마이크로파 라디오미터의 사양 및 관측 파라미터를 정리하였다.

Ⅲ. 수신기 설계 및 제작

3-1 설계

표 1의 측정 휘도 온도 범위 및 감도를 갖는 마이크로파 라디오미터에 요구되는 수신기의 설계 사양에 대해 검토하였다. 관측 물체로부터의 복사 휘도 온도 T_B에 의한 안테나 출력, 즉 안테나 온도 T_A는 물체와의 거리가 수 m로 짧고, 주파수가 1~10 GHz이며, 안테나가 무손실인 경우, 근사적으로 식 (1)과 같이 쓸 수 있다[5].

$$T_A \cong \frac{A_r}{\lambda^2} \iint_{4\pi} T_B(\theta,\phi) F_n(\theta,\phi) d\Omega \quad (1)$$

표 1. 관측 파라미터 및 설계 사양
Table 1. Observation parameters and design specifications of the microwave radiometer.

항 목	사 양
측정 휘도 온도 T_B의 범위	122~140 K
감도 $\triangle T$	1 K 이하
수신 중심 주파수	5,020 MHz
수신 대역폭 B	50 MHz
수신 편파	수직
입사각	45°

식 (1)에서 A_r과 F_n는 각각 안테나의 실효면적 및 정규화 복사패턴을 나타내며, 안테나 온도 T_A는 사용 안테나의 특성 및 측정 환경에 따라 차이가 있다. 5 GHz 대역의 표준 피라미드 혼 안테나를 라디오미터 안테나로 사용한 경우 표 1의 휘도 온도 T_B 범위에 의한 안테나 온도 T_A의 범위는 외국의 연구개발 관련 문헌 및 실험 자료로부터 근사적으로 136~175 K로 얻어진다[7],[12]~[14]. 안테나 온도 T_A에 의한 수신기의 입력 전력 P_A는 식 (2)의 Nyquist noise power 식으로 구할 수 있다[5].

$$P_A = kT_AB \quad (2)$$

위 식에서 k는 볼츠만 상수(Boltzmann's constant), B는 수신기의 대역폭을 나타낸다. B가 50 MHz이므로 136~175 K의 T_A에 대한 수신기의 입력 전력 P_A의 범위는 약 -101~-99 dBm으로 산출된다.

전 전력형(Total-power type) 마이크로파 라디오미터의 경우, 감도 $\triangle T$는 식 (3)과 같이 주어진다[5],[10].

$$\triangle T = \frac{T_A + T_R}{\sqrt{B\tau}} \quad (3)$$

식 (3)에서 T_R은 수신기 내부의 시스템 잡음 온도로 식 (4)와 같이 시스템 잡음지수 F와 시스템 내부의 물리 온도 T_S에 비례한다[5].

$$T_R = (F-1)T_S \quad (4)$$

식 (3), (4)로부터 적분시간 τ가 15 ms인 경우, T_S=290 K인 상온에서 $\triangle T$=1 K 이하를 만족시키기 위해서는 2.1 dB 이하의 시스템 NF가 요구된다. 또한, 수신기의 입력 전력 P_A를 검파부의 동작 입

표 2. 수신기의 설계 사양
Table 2. Design specifications of the microwave radiometer.

항목	설계 사양
수신 중심 주파수	5,020 MHz
대역폭	50 MHz
시스템 이득	44 dB 이상
시스템 잡음 지수	2.1 dB 이하
동작 입력 전력 범위	−101～−99 dBm
적분 시간	15ms

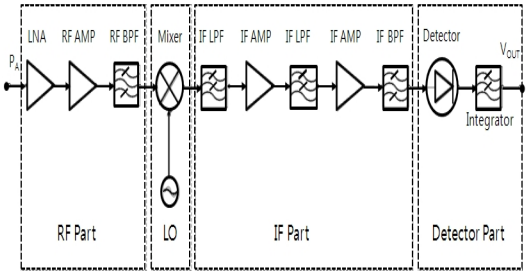

그림 2. 수신기의 시스템 구조
Fig. 2. System block diagram of the receiver.

력 전력 레벨까지 충분히 증폭시켜야 한다. 수신기의 최소 입력 전력은 −101 dBm이므로 동작의 안정화를 위해 검파부의 최소 요구 입력 전력인 −60 dBm보다 3 dB 정도 높게 가져가기 위해서는 44 dB 이상의 시스템 이득이 요구된다. 표 2에 수신기의 설계 사양을 정리하여 제시하였다.

라디오미터 수신기는 −100 dBm 부근의 미약한 열 잡음 신호를 검출해야 하므로 고 이득, 저 잡음, 저 손실을 동시에 추구할 수 있는 시스템 구조이어야 하며, 소형경량으로 구현이 요구됨으로 본 연구에서는 슈퍼헤테로다인 방식의 전 전력형으로 결정하였다.

그림 2는 수신기의 구조를 나타낸 블록도로서, 입력된 열잡음 신호를 저 잡음으로 증폭한 후, 5 GHz 대역으로 제한하기 위해 LNA와 RF BPF 등으로 구성된 RF부와 5 GHz 대역의 신호를 1.4 GHz의 IF 대역으로 주파수 변환시키기 위한 믹서, 고 이득을 위한 IF AMP 및 시스템 대역폭을 결정하는 IF BPF, 그리고 검파 다이오드와 적분기로 이루어진 검파부 등으로 구성되어 있다. 표 3에 수신기를 구성하는 각

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

No.	Function	목표 사양	
		Gain [dB]	NF [dB]
1	LNA	12.5	1.5
2	RF Amp	16.0	3.0
3	RF BPF	−7.0	7.0
4	Mixer	−7.0	7.0
5	IF LPF	−1.0	1.0
6	IF Amp	18.0	3.0
7	IF LPF	−1.0	1.0
8	IF Amp	18.0	3.0
9	IF BPF	−1.5	1.5
10	Loss	−3.0	0.3
11	Total	45.0	2.0

(Loss: 부정합 및 전송손실 등을 고려한 마진)

단 부품의 설계 목표와 시스템 이득 및 잡음지수에 대한 budget 산출 결과를 나타내었다. 수신기의 전체 이득 및 NF는 각각 45.0 dB와 2.0 dB로 표 2의 수신기 설계 사양을 만족함을 알 수 있다.

3-2 제작 및 측정

표 4에 제작된 각 단 부품들의 측정 결과와 이에 의해 산출된 시스템 전체 이득과 NF를 각각 나타내었다. 제작된 부품들은 표 3의 설계 목표를 만족하며, 전체 이득과 NF도 각각 47.20와 1.83 dB로 표 2의 수신기 설계 사양을 충족시킨다. 그림 3은 제작된 수신기로 소형화를 위해 모듈로 제작하였으며, 수신기 내부의 각 부분(part) 간의 상호 간섭이나 외부로부터의 간섭 등을 최소화하기 위해 설계 제작한 알루미늄 기구물에 고정시켜 봉인하였다. 수신기의 최종 크기는 110 mm×118 mm이며, 소비 전력은 1.5 W로 소형 경량 저소비 전력으로 구현하였다.

제작된 수신기의 성능을 평가하기 위해 먼저 수신기의 동작 입력 범위 및 이득을 측정하였다. 측정 방법은 고주파 신호 발생기의 5,020 MHz 신호를 −110～−33 dBm까지 1 dB씩 가변시켜 수신기에 입력, 입력 전력의 변화에 대한 IF부의 출력 전력, 즉 검파부의 입력 전력을 스펙트럼 분석기로 측정하였다.

표 4. 제작된 각 부품의 측정 결과 및 이를 이용한 시스템 이득 및 잡음 지수 budget 분석

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

No.	Part.	측정결과		평가
		Gain(dB)	NF(dB)	
1	LNA	12.50	1.67	○
2	RF Amp	16.30	3.23	○
3	RF BPF	−4.80	4.80	○
4	Mixer	−7.07	7.07	○
5	IF LPF	−0.47	0.47	○
6	IF Amp	18.13	1.61	○
7	IF LPF	−0.47	0.47	○
8	IF Amp	18.13	1.61	○
9	IF BPF	−1.00	1.00	○
10	Total	47.20	1.83	○

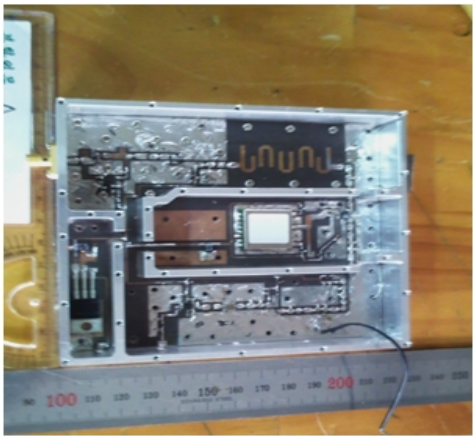

그림 3. 제작된 라디오미터 수신기

Fig. 3. Photograph of the fabricated receiver.

그림 4는 측정 결과로 −104～−33 dBm 범위의 입력 전력에 대해 45.2 dB의 이득으로 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 또한, 고주파 잡음지수 미터로 측정한 수신기 전체의 잡음지수는 1.84 dB로 표 4의 각 단 부품들의 측정 결과에 의한 budget 계산 결과와 거의 일치하였으며, 표 2의 목표 설계 사양을 만족함을 확인하였다.

마이크로파 라디오미터는 열잡음 전파를 수신하므로 열잡음 입력 전력의 변화에 대한 최종 출력 전압의 변화 특성 및 수신 감도에 대한 성능 평가 측정

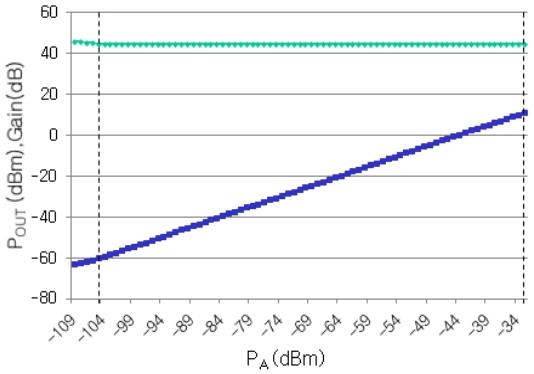

그림 4. 시스템 동작 범위 및 이득 특성

Fig. 4. Dynamic range and system gain.

이 필요하다. 측정 원리 및 방법은 수신기의 입력단에 연결된 안테나를 정합 저항으로 대체한 후, 정합 저항을 물리 온도 TK인 항온조 내에 밀폐하여 설치했을 때 저항에 의해 입력단에 전달되는 잡음 전력 P_n은 식 (5)와 같으며,

$$P_n = kTB \tag{5}$$

식 (2)의 안테나에 의해 수신된 전력 P_A와 정합 저항에 의해 전달된 잡음 전력 P_n이 같을 경우, 안테나 온도 T_A는 항온조 온도 T로 쓸 수 있으므로 식 (6)과 같이 라디오미터 수신기의 입력 전력은 온도 T의 함수가 된다. 수신기의 출력 전압 V_{out}은 입력 전력 $P_A(=P_n)$에 비례하므로 따라서, V_{out}은 식 (7)과 같이 항온조 온도 T에 비례한다[5],[9],[15].

$$P_A = P_n = kT_AB = kTB \tag{6}$$

$$V_{out} = aT + b \tag{7}$$

항온조의 내부 온도를 −75～51 ℃까지 3 ℃씩 변화시켜 입력 잡음 전력의 변화에 대한 출력 전압을 측정하였다. 수신기의 출력 전압은 멀티미터를 PC에 연결하여 실시간으로 각 온도 당 0.5초의 간격으로 500개씩의 샘플을 측정하였다. 그림 5는 측정된 출력 전압 데이터의 평균값을 나타낸 것으로 온도에 대해 출력 전압이 선형적으로 변화함을 알 수 있다. 또한, 온도 T와 출력 전압 V_{out}간의 관계를 나타내는 $T-V_{out}$ 환산 그래프로 식 (7)의 환산식을 도출할 수 있다. 도출된 식 (7)의 기울기 a와 절편 b는 표

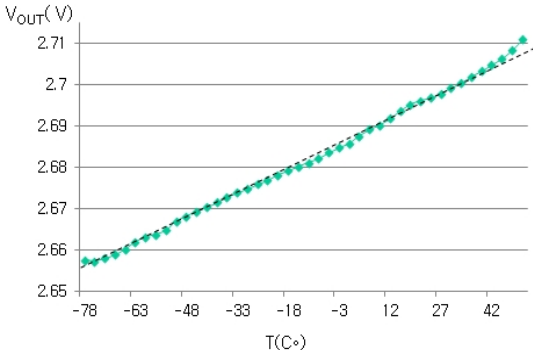

그림 5. $T-V_{out}$ 환산 그래프
Fig. 5. $T-V_{out}$ calibration graph.

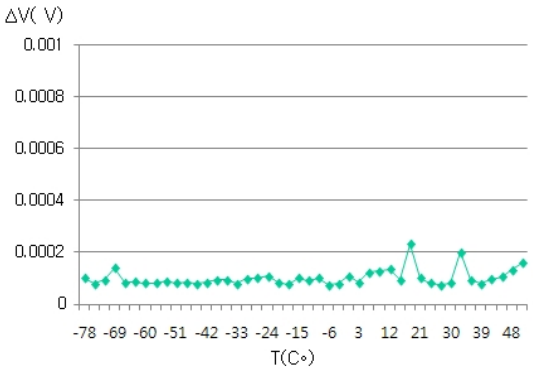

그림 6. 수신기 출력 전압 데이터의 표준편차
Fig. 6. Standard deviation of the output voltage data.

표 5. $T-V_{out}$ 환산식
Table 5. $T-V_{out}$ Calibration equation.

$V_{out}=aT+b$	
a(온도 1K당 출력 전압 변화량)	414.3 uV
b(Reference voltage)	2.6575 V

5와 같다. 그림 6은 측정된 출력 전압 데이터의 표준편차($\triangle V$)를 나타낸 것으로 감도 $\triangle T$와의 관계식은 $T-V_{out}$ 환산식으로부터 식 (8)과 같이 구해진다.

$$\triangle V = a\triangle T \tag{8}$$

그림 6의 표준편차는 평균 102 μV, 최대 233 μV로 표 5의 a 및 식 (8)에 의해 산출된 감도는 평균 0.24 K, 최대 0.56 K로 설계 사양인 1 K 이하를 만족하였다. 제작된 수신기의 측정 결과를 표 6에 정리하였다. 제작된 수신기는 설계 사양을 모두 만족함을 확인할 수 있다.

표 6. 수신기의 측정 결과
Table 6. The measurement results of the receiver.

항 목		설계 사양	측정 결과
중심 주파수		5,020 MHz	5,020 MHz
대역폭		50 MHz	50 MHz
시스템 이득		44 dB 이상	45.2 dB
시스템 잡음지수		2.1 dB 이하	1.84 dB
입력 전력 범위		−101～−99 dBm	−106～−33 dBm
적분 시간		15 ms	15 ms
수신 감도	평균	1 K 이하	0.24 K
	최대		0.56 K

Ⅳ. 수면 온도 측정 실험 및 결과

4-1 실험 방법

설계 제작한 수신기와 FMI사의 C 대역 표준 피라미드 혼 안테나로 구성된 마이크로파 라디오미터로 간이 풀장에 약 30 cm의 물을 채워 수면 온도의 변화에 대해 측정 실험을 하였다. 그림 7과 같이 수면으로부터 2.2 m의 높이에 안테나 개구면이 위치하도록 설치하여 수면과의 직선 관측거리 3.1 m, 입사각

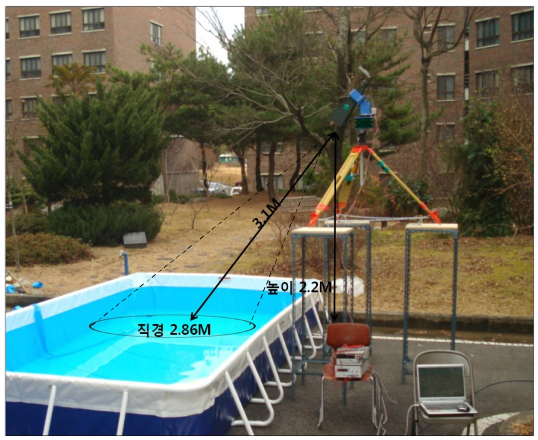

그림 7. 수면 온도 측정 실험 모습
Fig. 7. Photograph of the measurement for water surface temperature.

45°로 수면으로부터 복사되는 열잡음 전력을 측정하였다. 수면 온도는 간이 풀장에 넣는 물의 온도와 양을 조절하여 7.5～18 ℃까지 변화시켜 측정하였다. 풀장은 5.2 m×3 m로 관측거리 3.1 m에서 안테나의 6 dB 빔 폭(azimuth: ϕ=24°, elevation: θ=32°)에 의해 형성되는 관측면적(footprint)까지 내부에 충분히 수용할 수 있는 크기이다.

4-2 측정 결과

수면 온도를 7.5 ℃에서 18 ℃까지 변화시키는 동안 7.5 ℃, 12.5 ℃, 16 ℃ 및 18 ℃의 서로 다른 4개의 온도에 대해 측정하였다. 수면 온도는 디지털 수온계로 직접 실측하여 확인하면서 측정 실험을 진행하였다. 그림 8에 각각의 수면 온도에 대해 라디오미터로 측정된 실시간 출력 전압 데이터를, 그림 9에는 평균치를 나타낸 것으로 수면 온도가 상승함에 따라 라디오미터의 측정 출력 전압이 증가함을 알 수 있다. 각 수면 온도에 대해 측정한 출력 전압 데이터의 표준편차로 식 (8)을 이용하여 감도, 즉 측정 오차를 구할 수 있다. 표 7에 수면 온도의 변화에 따른 출력 전압의 변화량, 표준편차 및 측정 오차를 각각 나타내었다. 수면 온도 1 ℃의 변화에 대한 라디오미터 측정 출력 전압의 변화량은 432.2 μV이며, 최대 표준편차는 187.0 μV로, 표준편차 187.0 μV는 0.43 ℃의 수온 변화에 해당된다. 따라서 제작된 5

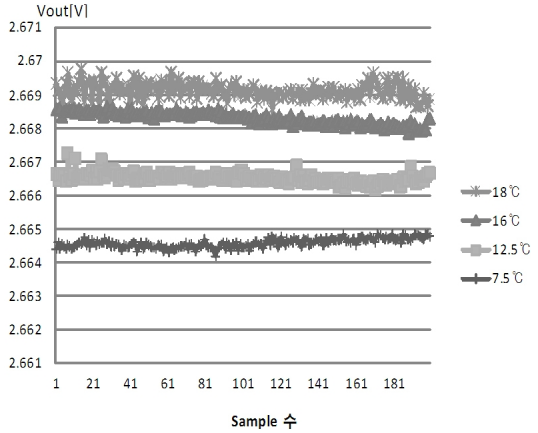

그림 8. 수면 온도 변화에 대한 라디오미터 출력 전압 데이터

Fig. 8. The output voltage data of the radiometer for the change of water surface temperature.

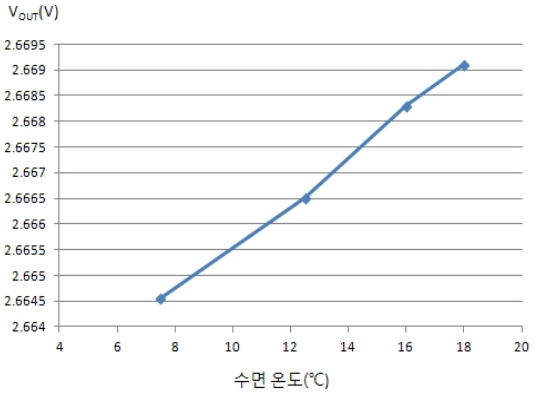

그림 9. 그림 8 출력 전압 데이터의 평균치

Fig. 9. Mean value of the output voltage data in Fig. 8.

표 7. 수면 온도의 측정 오차(감도) 분석

Table. 7. Measurement error(sensitivity) analysis.

수면 온도 [℃]	1 ℃당 전압 변화량[uV]	최대 표준 편차 [uV]	측정 오차 [℃]
7.5～18	432.2	187.0	0.43이하

GHz 대역의 마이크로파 라디오미터는 7.5～18 ℃ 범위의 수면 온도를 0.43 ℃ 이하의 오차로 측정이 가능함을 확인할 수 있었다.

Ⅴ. 결 론

본 논문에서는 수면 온도를 실시간 원격으로 모니터링할 수 있는 5 GHz 대역의 마이크로파 라디오미터의 개발에 관해 기술하였다. 먼저, 수면에서의 마이크로파 복사 특성을 분석하여 5～30 ℃ 범위의 수면 온도를 2 ℃ 이내의 오차로 측정하기 위해 요구되는 마이크로파 라디오미터의 관측 파라미터 및 설계 사양을 도출하였다. 이어 도출된 사양을 만족하는 수신기를 설계 제작하였다. 제작된 수신기는 주파수 5,020 MHz, 대역폭 50 MHz로 45.2 dB의 시스템 이득과 NF 1.84 dB의 고 이득, 고 감도 특성을 가지며, 크기는 110 mm×118 mm, 소비 전력은 1.5 W로 소형 경량 저소비 전력으로 구현되었다. 항온조를 이용한 입력 잡음 전력의 변화에 대한 출력 전압의 변화 특성을 측정하여 안테나 온도 대 출력 전압의 환산 그래프와 환산식, 수신 감도를 구하였다. 설계 제작된 수신기는 −106～−33 dBm 범위의 입력 잡

음 전력에 대해 0.56 K 이하의 감도로 선형적으로 동작함을 확인하였다. 제작된 수신기와 표준 피라미드 혼 안테나로 구성한 마이크로파 라디오미터로 간이 풀장을 이용 실제 수면 온도를 7.5～18 ℃까지 변화시켜 그 중 4개의 온도에 대해 측정 실험을 하였다. 실험 결과, 7.5～18 ℃까지의 수면 온도를 0.43 ℃ 이하의 오차로 측정이 가능함을 확인하였다.

20 ℃ 이상의 높은 수면 온도에 대한 측정 실험을 위해서는 다양의 고온 수를 짧은 시간에 공급할 수 있고, 또한 형성된 수면 온도를 유지 제어할 수 있는 특수 설비가 필요하다. 보유 설비의 한계로 20～30 ℃까지의 수면 온도에 대해서는 측정 실험을 하지 못하였으나, 18 ℃까지의 실험 결과, 오차가 0.43 ℃ 이하에 불과하므로 30 ℃까지의 수면 온도에 대해서도 설계 사양인 2 ℃ 이내의 오차로 온도 변화를 충분히 검출할 수 있을 것으로 사료된다. 향후 20 ℃ 이상의 고온 수면 온도 및 염분이 포함된 해수면 등 다양한 종류의 시료와 수면 환경을 대상으로 한 측정 실험이 필요하다. 또한, 측정 정확도 향상 및 실용화를 위해서는 고온, 상온, 저온 등 다양한 표준 target을 이용한 교정과 측정 출력 전압으로부터 휘도 온도의 절대치 추출을 위한 inverse program에 대한 연구 등이 요구된다.

참 고 문 헌

[1] 북태평양 최심층부의 수온상승과 남극해에서의 기후변동 현상, KISTI 마리안 글로벌 동향 브리핑, http://mirian_kisti.re.kr/include/print.jsp, 2010년 7월.

[2] 박광서, "해수면 상승에 의한 미국 연안의 취약성 평가", 한국해양수산개발원(KMI), 해양산업동향(e-journal Marine Industry Trend), 제63호, pp. 1-3, 2012년 4월.

[3] 김영길, 신윤근, "아산호의 생태학적 연구2 식물플랑크톤 군집구조", 한국하천호수학회지, 35(3), pp. 187-197, 2002년 9월.

[4] 鈴木 務, "マイクロ波リモートセソシグの展望", 日本國土海洋總合學術診斷技術報告書, pp. 1-12, 1981년 3월.

[5] F. T. Ulaby, R. K. Moore, and A. K. Fung, *Microwave Remote Sensing Active and Passive Volume Ⅰ: Microwave Remote Sensing Fundamentals and Radiometry*, Artech House Inc., 1981.

[6] E. G. Njoku, J. M. Stacey, and F. T. Barath, "The Seaset Scanning Multichannel Microwave Radiometer(SMMR): Instrument description and performance", *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol. OE-5, no. 2, pp. 100-115, Apr. 1980.

[7] K. Tachi, K. Arai, and Y. Sato, "The Advanced Microwave Scanning Radiometer(AMSR) : requirements and preliminary design study", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 27, no. 2, pp. 177-183, Mar. 1989.

[8] T. Kawanishi, "The Advanced Microwave Scanning Radiometer for the Earth Observation System(AMSR-E), NASDA's contribution to the EOS for global energy and water cycle studies", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 41, no. 2, pp. 184-194, Mar. 2003.

[9] 손홍민, 박진우, "수면 기름 유출 원격 탐사용 마이크로파 라디오미터의 개발", 한국전자파학회 논문지, 22(9), pp. 858-867, 2011년 9월.

[10] E. G. Njoku, "Passive microwave remote sensing of the Earth from space-A review", *Proc. IEEE*, vol. 70, no. 7. pp. 728-750, Jul. 1982.

[11] 최연웅, 손홍민, "수면 온도 원격탐사용 마이크로파 라디오미터의 설계에 관한 연구", 2010 대한원격탐사학회 춘계학술대회 논문집, 통권13, pp. 55-59, 2010년 3월.

[12] F. T. Ulaby, R. K. Moore, and A. K. Fung, *Microwave Remote Sensing Active and Passive Volume Ⅲ: From Theory and Applications*, Artech House Inc., 1986.

[13] J. P. Claassen, A. K. Fung, "The recovery of polarized apparent temperature distribution of flat scenes from antenna temperature measurements", *IEEE Trans. Antenna and Propagation*, vol. AP-22, no. 3, pp. 433-442, May 1974.

[14] N. Skou, D. L. Vine, *Microwave Radiometer Systems: Design and Analysis*, Artech House Inc., 2006.

[15] 박진우, 최연웅, 조홍렬, 손홍민, "태양 위치 측정용 전파센서 수신기의 설계 및 제작", 한국전자파학회논문지, 20(9), pp. 943-953, 2009년 9월.

손 홍 민

1995년 9월: 일본국립 전기통신대학교 전자공학과 (공학박사)
1995년 9월～1997년 2월: 삼성전자(주) 정보통신연구소 선임연구원
1997년 3월～현재: 호남대학교 이동통신공학과 교수
[주 관심분야] 마이크로파 원격탐사시스템, 신호처리 안테나시스템, 고감도 수신기, 광대역 무선통신시스템

윤 정 범

2009년 2월: 호남대학교 전파이동통신공학과 (공학사)
2011년 2월: 호남대학교 전파공학과 (공학석사)
2011년 8월～현재: (주)라이콤 주임연구원
[주 관심분야] 초고주파 회로 및 시스템, 마이크로파 라디오미터