

## 수면 염분 원격탐사용 L-Band 마이크로파 라디오미터의 개발

## Development of a L-Band Microwave Radiometer for Remote Sensing of Water Surface Salinity

손 흥 민 · 윤 정 범

Hong-Min Son · Jeong-Beam Youn

## 요 약

본 논문은 수면으로부터 복사되는 마이크로파 대역의 미약한 열잡음 전파를 수신하여 수면 표층수의 염분 농도의 변화를 실시간으로 원격 모니터링이 가능한 L-band 마이크로파 라디오미터의 개발에 관한 연구 내용을 기술한다. 먼저 수면 염분 농도의 원격 측정 가능 범위 0~40 psu, 최대 오차 2 psu의 목표를 달성하기 위해 요구되는 마이크로파 라디오미터의 설계 사양을 도출하였으며, 도출된 사양을 만족시키는데 필요한 라디오미터 수신기를 설계 제작하였다. 제작된 수신기는 주파수 1,390 MHz, 대역폭 45 MHz로 47 dB의 시스템 이득과 0.41 K 이내의 감도를 갖는다. 제작된 수신기와 표준 혼 안테나로 구성된 L-band 마이크로파 라디오미터로 간이 폴장에 형성된 염분 농도 0~28 psu 범위의 수면을 대상으로 한 원격 측정 실험 결과, 10~28 psu 구간에서는 1.4 psu 이하로, 0~10 psu의 낮은 염분 농도 구간에는 2.9 psu의 오차로 수면 염분 농도의 변화를 측정할 수 있었다.

## Abstract

The development processes of a L-band microwave radiometer for remote sensing of water surface salinity are described in this paper. Achieving the development aim of the measurement accuracy within 2 psu for water surface salinity of 0~40 psu, the requirements and specifications of the microwave radiometer and its receiver are drawn. The receiver with high gain, high sensitivity is designed and implemented to satisfy these requirements and specifications. The receiver has the bandwidth of 45 MHz, the system gain of 47 dB and the sensitivity of 0.41 K at 1,390 MHz. The effectiveness of the developed L-band microwave radiometer for remote sensing of water surface salinity is demonstrated experimentally. The results show the microwave radiometer can detect water surface salinity for 10~28 psu within the accuracy of 1.4 psu.

Key words : Passive Microwave Remote Sensing, Microwave Radiometer, Water Surface Salinity

## I. 서 론

해수의 염분 농도는 해수의 밀도를 결정짓는 주요 인자로, 해수층간 염분 농도의 차이로 인한 밀도차는 표층수와 심해수를 수직적으로 순환시키는 열염 순환의 원동력으로 작용하며, 이에 의해 해양의

에너지 및 물질의 수직적 상호 순환이 이루어진다<sup>[1]</sup>. 이러한 열염 순환은 해수면 온도, 해류의 형성과 이동, 해양과 대기 간의 열에너지 교환, 해수의 증발과 강우, 해양의 CO<sub>2</sub> 흡수 등을 제어하여 지구 환경과 기후 변화에 큰 영향을 미친다<sup>[2]</sup>. 또한, 최근 하구 및 해안지대의 대규모 개발로 강물의 해수화가 진행되

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

· Manuscript received May 24, 2013 ; Revised August 28, 2013 ; Accepted September 10, 2013. (ID No. 20130524-04S)

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

어 농작물의 염해 피해와 생태계 변화 및 수질 환경 문제가 대두되고 있다. 이와 같이 수면의 염분 농도는 해양 운동 메카니즘과 기후시스템의 이해, 급격한 기후변화의 원인 파악과 기상 예측, 수질 및 생태계의 환경 감시 등에 중요한 정보를 제공한다. 따라서 해양, 하천, 담수호 등 광범위한 지역을 대상으로 수면의 염분 농도 변화를 실시간 원격으로 모니터링이 가능한 기술 개발이 필요하다.

마이크로파 라디오미터는 수면의 염분 농도를 원격에서 비접촉으로 측정할 수 있는 유일한 센서로, 물체 자체에서 복사되는 마이크로파 대역의 열 잡음 전파를 안테나를 통해 고 이득, 고 감도, 광대역 수신기로 수신하여 그 출력으로부터 물체의 복사 전력을 휘도 온도(brightness temperature)로 측정하는 대표적인 수동형 마이크로파 원격 탐사 센서이다<sup>[3]</sup>. 이미 미국, 유럽 등에서는 항공기 및 위성탐재용을 개발하여 해양, 해안지대 및 하구 등을 대상으로 염분 농도의 변화 관측에 활용하고 있으나<sup>[4][5]</sup>, 국내에서는 수면 염분 원격탐사용 마이크로파 라디오미터의 개발에 관한 연구가 매우 미비한 실정이다.

본 논문은 수면의 염분 농도 변화를 실시간, 원격으로 모니터링이 가능한 L-band 마이크로파 라디오미터의 개발에 관해 기술한다. 먼저 0~40 psu(practical salinity unit, 물질 1,000 g에 녹아있는 총 염분의 g 질량비로서 ppt(천분율)의 단위 0/00 와 상응함)의 수면 염분 농도 범위에서 2 psu의 변화를 원격으로 검출하는데 요구되는 마이크로파 라디오미터의 사양 도출, 수신기 설계, 제작 및 측정과 결과를 소개한다. 이어 간이 풀장을 이용, 수면 염분 농도의 변화에 대한 원격 측정 실험을 통해 개발된 라디오미터의 기본적 성능을 평가한다.

## II. 수면 염분 원격탐사용 마이크로파 라디오미터의 설계사양 도출

### 2-1 관측 파라미터의 결정

마이크로파 대역에서의 수면 복사 휘도 온도  $T_B$ 는 식 (1)과 같이 수면 표층수의 복사율  $e_w$ 와 온도  $T_S$ 의 곱으로, 온도가 일정할 경우 복사율  $e_w$ 에 의해 결정된다<sup>[6][7]</sup>.

$$T_B(f, \theta_i, p) = e_w(f, \theta_i, p) T_S \quad (1)$$

식 (1)에서  $f$ 는 주파수,  $\theta_i$ 는 관측 입사각으로 nadir angle을,  $p$ 는 편파를 각각 나타낸다. 복사율  $e_w$ 는 공기와 수면의 경계면에서의 specular 반사계수  $\Gamma^{sp}$ 와 식 (2)의 관계로 나타나며, 수직 및 수평 편파에 대한 specular 반사계수  $\Gamma_v^{sp}$  및  $\Gamma_h^{sp}$ 는 각각 식 (3a) 및 (3b)와 같다<sup>[6][8]</sup>.

$$\epsilon_w(f, \theta_i, p) = 1 - \Gamma^{sp}(f, \theta_i, p) \quad (2)$$

$$\Gamma_v^{sp}(f, \theta_i, v) = \left| \frac{\epsilon_w \cos \theta_i - \sqrt{\epsilon_w - \sin^2 \theta_i}}{\epsilon_w \cos \theta_i + \sqrt{\epsilon_w - \sin^2 \theta_i}} \right|^2 \quad (3a)$$

$$\Gamma_h^{sp}(f, \theta_i, h) = \left| \frac{\cos \theta_i - \sqrt{\epsilon_w - \sin^2 \theta_i}}{\cos \theta_i + \sqrt{\epsilon_w - \sin^2 \theta_i}} \right|^2 \quad (3b)$$

식 (3a) 및 (3b)에서  $\epsilon_w$ 는 수면 표층수의 유전율로 주파수, 염분 농도 등에 의존한다<sup>[6][8][9]</sup>.

식 (1)~(3b)에서 알 수 있듯이 수면에서의 마이크로파 복사 특성은 방향성과 편파성을 가지며, 주파수에 따라 다르므로 수면 염분 원격탐사용 마이크로파 라디오미터의 사양을 도출하기 위해서는 먼저 수면의 염분 농도 변화에 대해 복사 휘도 온도  $T_B$ 의 변화가 상대적으로 큰 주파수, 편파, 입사각 등 관측 파라미터의 적절한 선정이 필요하다. 수면 염분에 대해  $T_B$ 의 민감도가 큰 주파수 대역은 L-band 이하의 낮은 주파수 대역이며<sup>[6][7][10]</sup>, 이 대역에서 타 업무용 전파로부터의 간섭(RFI)를 고려하여 지구탐사(수동)위성용으로 분배된 대역<sup>[11]</sup> 내로 선택하였다. 결정된 관측 주파수 대역은 중심 주파수 1,390 MHz, 대역폭은 45 MHz이다.

상기의 관측 주파수 대역에서 편파 및 관측 입사각에 대한 수면 복사 휘도 온도  $T_B$ 의 특성은 수직 편파가 수평 편파보다  $T_B$  값이 크고, 염분 농도의 변화에 대해서도 민감도가 크게 나타나며, 입사각에 대해서는 수직 편파의 경우 0°에서 Brewster 각  $\theta_B$ 까지는 각이 증가함에 따라  $T_B$  값이 증가하나,  $\theta_B \sim 90^\circ$ 사이에서는 급격히 감소한다. 반면에 수평 편파에서는 각이 증가할수록  $T_B$ 는 지속적으로 감소한다<sup>[2][5][6]</sup>. 이에 따라 관측 편파는 수직 편파로, 입사

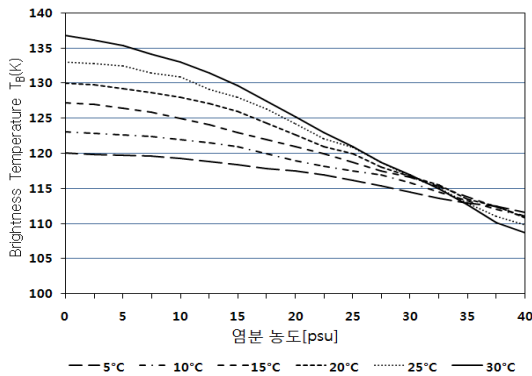


그림 1. 수면 염분의 변화에 대한  $T_B$ 의 변화 특성  
 Fig. 1. Brightness temperature of water versus water surface salinity.

각은 관측 시 주변의 지형이나 지물로부터 복사파가 안테나 빔 내부로 입사되는 것을 최소화하기 위해  $40\sim 50^\circ$ 로 결정하였다.

### 2-2 측정 휘도 온도의 범위 및 감도 결정

수면의 염분 농도가 상승하면 도전율이 증가하여 specular 반사계수  $T^{sp}$ 가 증가되므로 수면 복사율  $e_w$ 의 감소에 의해 복사 휘도 온도  $T_B$ 는 감소하게 된다<sup>[2],[6],[9]</sup>. 그림 1은 관측 입사각과 편파가 각각  $40^\circ$  및 수직 편파인 경우 1,400 MHz에서의 수면 염분의 변화에 대한 수면 복사 휘도 온도  $T_B$ 의 변화를 나타낸 그래프로 수온의 범위를  $5^\circ\text{C}$ 에서  $30^\circ\text{C}$ 까지 고려할 경우,  $0\sim 40$  psu 범위의 염분 농도 변화에 대한 수면 복사 휘도 온도  $T_B$ 의 변화 범위는 약  $109\sim 137$  K임을 알 수 있다.

마이크로파 라디오미터에서 감도는 최종 출력 전

표 1. 마이크로파 라디오미터의 설계 사양  
 Table 1. Design specifications of the microwave radiometer.

항 목	사 양
측정 휘도 온도 $T_B$ 의 범위	109~137 K
최대 감도 $\Delta T$	0.4 K
수신 중심 주파수	1,390 MHz
수신 대역폭 $B$	45 MHz
수신 편파	수직
관측 입사각	$40\sim 50^\circ$

압으로부터 검출 가능한 최소 휘도 온도의 변화량 ( $\Delta T$ )으로 정의된다<sup>[3]</sup>. 그림 1에서 수온이  $5^\circ\text{C}$ 일 때  $0\sim 5$  psu 구간에서 염분 농도의 변화에 대한 휘도 온도의 변화량이 가장 작게 나타난다. 이 구간에서 염분 농도 2 psu의 변화에 대한  $T_B$ 의 변화량은 약 0.4 K로, 따라서 최소 수신감도를 0.4 K로 결정하였다.  $0\sim 40$  psu 범위의 수면 염분 농도 변화를 2 psu의 오차로 원격 모니터링이 가능한 마이크로파 라디오미터의 요구 설계 사양을 표 1에 정리하였다.

## III. 수신기 설계 및 제작

### 3-1 설계

표 1의 휘도 온도 측정 범위와 감도를 갖는 마이크로파 라디오미터에 요구되는 수신기 사양을 검토하였다. 관측 물체와 안테나 간의 거리가 수 m로 짧고, 1 GHz 대역의 표준 피라미드 혼 안테나를 사용한 경우 표 1의  $T_B$  범위의 수면 복사 휘도 온도에 의한 안테나 출력, 즉 안테나 온도  $T_A$ 의 범위는 외국의 연구 개발 관련 문헌 및 실험 자료로부터 근사적으로  $113\sim 217$  K 정도로 얻어진다<sup>[2],[6],[12],[13]</sup>. 안테나 온도  $T_A$ 에 의한 수신기의 입력 전력  $P_A$ 는 Nyquist noise power 식 (4)에 의해 구해진다<sup>[3]</sup>.

$$P_A = kT_A B \tag{4}$$

식 (4)에서  $k$ 는 볼츠만 상수(Boltzmann's constant),  $B$ 는 수신기의 대역폭을 나타낸다.  $B$ 가 45 MHz이므로  $112\sim 217$  K의  $T_A$ 에 의한 수신기 입력 전력  $P_A$ 의 범위는 약  $-101.6\sim -98.7$  dBm으로 산출된다.

라디오미터의 수신 감도  $\Delta T$ 는 전 전력형(total-power type)인 경우 식 (5)와 같이 주어진다<sup>[3],[13]</sup>.

$$\Delta T = \frac{T_A + T_R}{\sqrt{B\tau}} \tag{5}$$

식 (5)의  $\tau$ 는 검파부의 적분 시간이며,  $T_R$ 은 수신기의 시스템 잡음 온도로 시스템 잡음지수  $F$ 와 식 (6)의 관계가 있으며<sup>[3]</sup>, 식 (6)의  $T_o$ 는 수신기 내부의 물리온도를 나타낸다.

$$T_R = (F-1) T_o \tag{6}$$

표 2. 수신기의 설계 사양  
Table 2. Design specifications of the microwave radio-meter receiver.

항목	설계 사양
수신 중심 주파수	1,390 MHz
대역폭	45 MHz
시스템 이득	44 dB 이상
시스템 잡음	2.48 dB 이하
입력 전력 범위	-101.6 ~ -98.7 dBm

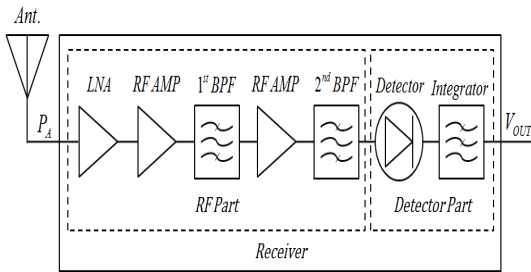


그림 2. 수신기의 시스템 구조  
Fig. 2. System block diagram of the receiver.

식 (5)와 (6)으로부터 적분 시간  $\tau = 30ms$ 인 경우, 수신기 내부온도가  $T_0 = 323 K(50^\circ C)$ 인 환경에서도  $\Delta T = 0.4 K$ 를 만족시키기 위해서는 2.48 dB 이하의 시스템 NF가 요구된다. 또한, 수신기의 입력 전력  $P_A$ 가 최소치인 -101.6 dBm의 경우에도 검파부의 최소 동작 입력 전력 레벨인 -60 dBm까지 입력 전력  $P_A$ 를 증폭시켜야 한다. 수신기의 동작 안정화를 위해 검파부의 최소 요구 입력 전력보다 2dB 정도 높게 가져가기 위해서는 약 44 dB 이상의 시스템 이득이 요구된다. 수신기 설계 사양의 주요 검토 결과를 표 2에 정리하였다.

-100 dBm 이하의 미약한 입력 잡음 전력을 고감도로 검출하기 위해서 라디오미터 수신기는 저 손실, 저 잡음, 고이득 특성을 동시에 추구할 수 있어야 하며, 또한 소형 경량, 저 소비 전력으로의 구현이 요구됨으로 본 연구에서는 수신기를 그림 2와 같은 구조의 호모다인(homodyne) 방식의 전 전력형으로 결정하였다.

수신기를 구성하는 각 단 부품의 목표 설계 사양과 시스템 이득 및 NF에 대한 budget 산출 결과를 표 3에 제시하였다. 수신기의 시스템 이득 및 NF는 각

표 3. 각 단 부품들의 설계 사양 및 제작 후 측정 결과  
Table 3. The design specifications and measurement results of each devices.

No.	Part	설계 사양		측정 결과	
		Gain(dB)	NF(dB)	Gain(dB)	NF(dB)
1	LNA	18.0	0.8	18.02	0.89
2	RF AMP	18.0	1.2	18.07	1.47
3	1st BPF	-1.0	1.0	-1.00	1.00
4	RF AMP	18.0	1.2	18.07	1.47
5	2st BPF	-5.0	5.0	-4.70	4.70
6	Loss	-1.0	0.3	-1.20	0.5
7	Total	47.0	0.82	47.26	0.91

(Loss: 부정합 및 전송 손실 등을 고려한 마진)

각 47.0 dB와 0.82 dB로 표 2의 수신기 사양을 충분히 만족시킴을 알 수 있다.

### 3-2 제작 및 측정

그림 3은 제작된 마이크로파 라디오미터의 수신기로 소형화를 위해 모듈로 제작하였으며, 수신기 외부로부터의 간섭 및 내부의 각 부분(part) 간의 상호영향을 최소화하기 위해 설계 제작한 알루미늄 기구물에 고정시켜 봉인하였다. 수신기의 최종 크기는 98 mm×98 mm이며, 소비 전력은 300 mW로 소형 경량 저소비 전력으로 구현되었다. 표 3의 우측에 제작된 각 단 부품의 측정 결과 및 이에 의해 산출된 시스템 이득과 NF를 나타내었다. 제작된 각 부품들은 제시한 목표 설계사양을 충족시켰으며, 시스템 이득

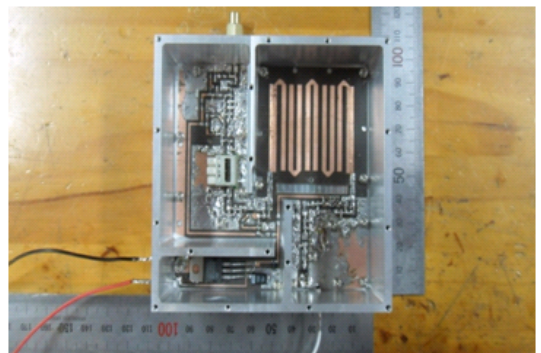


그림 3. 제작된 라디오미터 수신기  
Fig. 3. Photograph of the fabricated receiver.

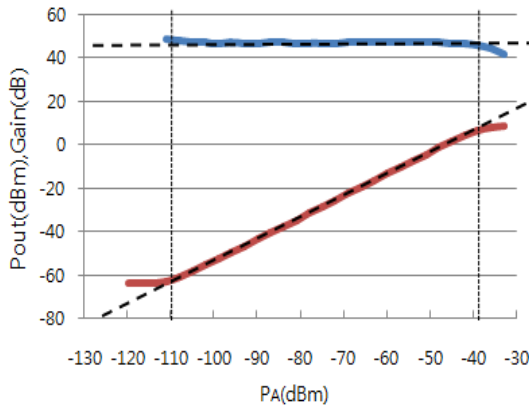


그림 4. 시스템 동작 범위 및 이득 특성  
Fig. 4. Dynamic range and system gain.

과 NF 역시 각각 47.26 dB 및 0.91 dB로 표 2의 수신기 설계 사양에 만족하였다.

제작한 수신기의 동작 입력 전력 범위 및 시스템 이득을 측정하였다. 먼저, 고주파 신호발생기의 1,390 MHz 신호를 감쇄기를 이용하여 -120~-33 dBm까지 3 dB씩 가변시켜 수신기에 입력, 입력 전력의 변화에 대한 RF부의 출력 전력, 즉 검파부의 입력 전력을 스펙트럼 분석기로 측정하여 그 결과를 그림 4에 나타내었다. 수신기는 -110~-39 dBm까지의 입력 전력 범위에서 47 dB의 이득을 가지고 선형적으로 동작함을 알 수 있다.

마이크로파 라디오미터 수신기는 열잡음 전파를 검출하므로 열잡음 입력 전력의 변화에 대한 최종 출력 전압의 변화 특성 및 수신 감도  $\Delta T$ 의 측정이 필요하다. 측정 방법은 수신기의 입력단에 연결된 안테나를 정합 저항으로 대체하여 물리온도  $TK$ 로 밀폐된 항온조 내에 설치한 후, 정합 저항에 의해 수신기로 전달되는 잡음 입력 전력의 변화에 대한 최종 출력 전압을 측정하여 평가한다<sup>[3],[7],[8],[14]</sup>. 정합 저항에 의해 전달되는 잡음 전력  $P_n$ 이 안테나에 의해 수신된 전력  $P_A$ 와 같을 경우 식 (7)이 성립하여 안테나 온도  $T_A$ 는 항온조 온도  $T$ 로 쓸 수 있으므로 ( $T_A = T$ ) 수신기의 입력 전력은 온도  $T$ 의 함수가 된다. 수신기의 출력 전압  $V_{out}$ 은 입력 전력  $P_A$  ( $= P_n$ )에 비례하므로 따라서 식 (8)과 같이  $V_{out}$ 은 안테나 온도, 즉 항온조 온도  $T$ 에 비례한다.

$$P_n = P_A = kTB = kT_A B \quad (7)$$

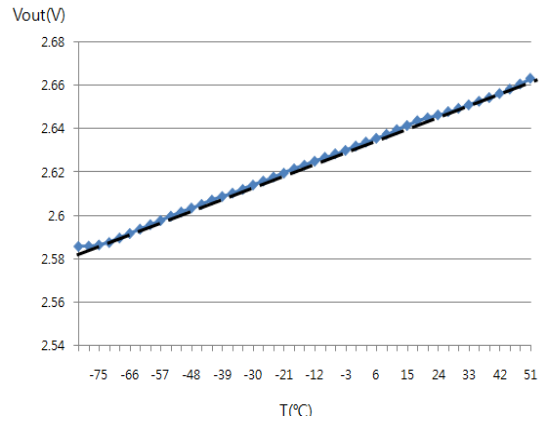


그림 5.  $T-V_{out}$  환산 그래프  
Fig. 5.  $T-V_{out}$  calibration graph.

$$V_{out} = aT + b \quad (8)$$

항온조의 내부 온도를 -75~51°C까지 3°C씩 변화시켜 입력 잡음전력의 변화에 따른 출력 전압의 변화를 측정하였다. 수신기의 출력 전압은 디지털 멀티미터를 PC에 연결하여 실시간으로 각 온도 당 0.5초 간격으로 500개 씩 샘플을 측정하였다. 그림 5는 측정된 출력 전압 데이터의 평균값을 나타낸 것으로 온도  $T$ 에 대해 출력 전압이 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 또한,  $T-V_{out}$  환산 그래프로 식 (8)의 환산식을 도출할 수 있다. 그림 6은 측정된 출력 전압 데이터의 표준편차( $\Delta V$ )로 감도  $\Delta T$ 와의 관계는 식 (8)로부터 식 (9)와 같다.

$$\Delta V = a\Delta T \quad (9)$$

그림 5의 그래프에 의해 도출된 식 (8)의 기울기  $a$ 와 절편  $b$  및 그림 6과 식 (9)에 의해 산출된 감도

표 4.  $T-V_{out}$  환산식 및 수신 감도  
Table 4.  $T-V_{out}$  calibration equation and sensitivity.

$V_{out} = aT + b$		$\Delta V = a\Delta T$	
$a$ (온도 1 K당 출력 전압 변화량)	598.03 uV	최대 표준편차( $\Delta V_{max}$ )	247 uV
		평균 표준편차( $\Delta V_{avg}$ )	128 uV
$b$ (Reference voltage)	2.395 V	최대 수신 감도( $\Delta T_{max}$ )	0.41 K
		평균 수신 감도( $\Delta T_{avg}$ )	0.22 K

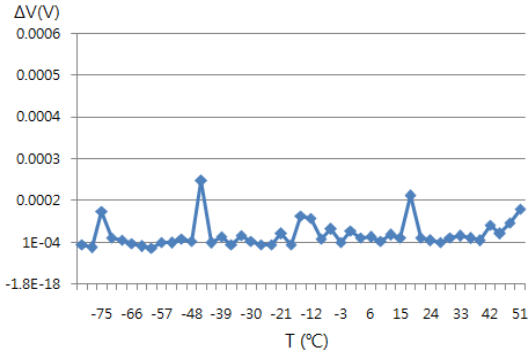


그림 6. 수신기 출력 전압 데이터의 표준편차  
Fig. 6. Standard deviation of the output voltage data.

표 5. 수신기의 측정 결과

Table 5. The measurement results of the receiver.

항 목	설계 사양	측정 결과
중심 주파수	1,390 MHz	1,390 MHz
대역폭	45 MHz	45 MHz
시스템 이득	44 dB 이상	47 dB
시스템 잡음지수	2.48 dB 이하	0.91 dB
입력 전력 범위	-101.6 ~ -98.7 dBm	-110 ~ -39 dBm
수신 감도	평균	0.22 K
	최대	0.41 K
	0.4 K	

$\Delta T$ 를 표 4에 각각 나타내었다. 수신기의 감도는 평균 0.22 K, 최대 0.41 K로 목표 성능인 최대 0.4 K에 거의 도달하였다. 제작된 수신기의 측정 결과를 표 5에 정리하였다. 제작된 수신기는 설계 목표 사양을 모두 만족함을 확인하였다.

#### IV. 수면 염분 원격 측정 실험 및 결과

##### 4-1 실험 방법

제작한 수신기와 FMI사의 L 대역 표준 피라미드 혼 안테나로 구성된 마이크로파 라디오미터로 간이 풀장에 깊이 약 30 cm의 물을 채우고, 천일염으로 0~28 psu까지 염분 농도를 변화시켜 수면으로부터 복사되는 열 잡음 전력을 측정하였다. 안테나와 수면 사이의 직선 관측 거리는 3.11 m, 입사각 45°로 그림 7, 8과 같이 설치하여 실험하였다. 안테나의 3 dB 빔 폭은 azimuth 방향이  $\phi_{3dB} = 30^\circ$ , elevation 방향은

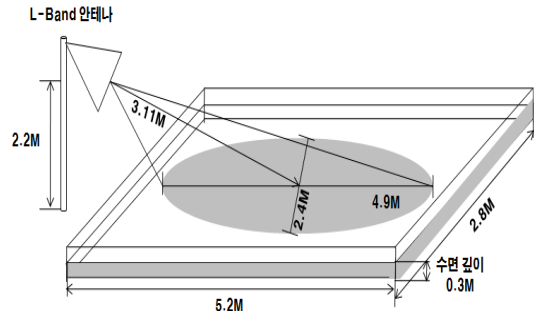


그림 7. 수면 염분 원격 측정 실험 구성도  
Fig. 7. Geometry of the measurement set-up for water surface salinity.



그림 8. 수면 염분 원격 측정 실험 사진  
Fig. 8. Photograph of the measurement for water surface salinity.

$\theta_{3dB} = 34^\circ$ , 8 dB 빔 폭은 각각  $\phi_{8dB} = 42^\circ$  및  $\theta_{8dB} = 48^\circ$ 이며, 간이풀장은 5.2 m×2.8 m×1 m로 그림 7에 나타난 바와 같이 관측거리 3.11 m에서 안테나의 8 dB 빔 폭에 의한 관측면적(footprint)까지 내부에 수용할 수 있는 크기이다.

##### 4-2 결과

그림 9는 수면의 염분 농도를 0~28 psu까지 증가시키는 동안 약 5 psu의 간격으로 0, 5.4, 10.4, 15.8, 20.5, 24.8, 28 psu의 서로 다른 7개의 수면 염분 농도에 대해 라디오미터로 측정된 실시간 출력 전압 데이터를 나타내었다. 측정하는 동안 수면 온도는 약 17°C로 유지하였으며, 수면의 염분 농도와 수온은 매 측정마다 디지털 염도계로 직접 실측하여 확인하



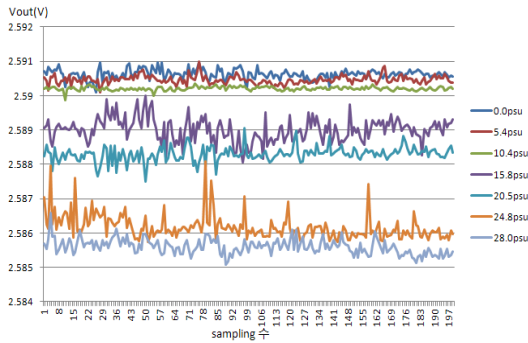


그림 9. 수면 염분 농도 변화에 대한 라디오미터 출력 전압 데이터

Fig. 9. The output voltage data of the radiometer for the change of water surface salinity.

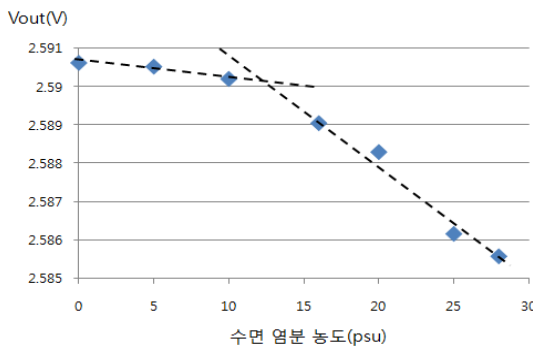


그림 10. 그림 9의 출력 전압 데이터의 평균치

면서 실험을 진행하였다. 그림 10에는 그림 9의 각 수면 염분 농도에 대해 측정된 200 개씩의 출력 전압 데이터의 평균치를 나타내었다. 그림 9와 10에서 수면의 염분 농도가 증가함에 따라 라디오미터의 측정 출력 전압이 감소됨을 알 수 있다. 각 수면 염분 농도에 대해 측정된 출력 전압 데이터의 표준편차로 감도를 구할 수 있다. 표 6에 구간별로 수면 염분 농도의 변화에 의한 출력 전압의 변화량, 표준편차 및 측정 감도를 각각 나타내었다. 10~28 psu의 구간에서는 1 psu의 수면 염분의 변화에 대한 라디오미터의 측정 출력 전압 변화량은  $264 \mu V$ 이며 최대 표준 편차는  $368 \mu V$ 로, 이는 1.4 psu의 염분 농도 변화에 해당된다. 따라서 이 구간에서의 수면 염분의 변화에 대해서는 2 psu 이내의 감도로 측정이 가능함을 확인할 수 있었다. 반면, 0~10 psu 구간에서는 1 psu 당 출력 전압의 변화량은  $50 \mu V$ 로 그림 10에 나타

표 6. 수면 염분 농도의 측정 감도 분석  
Table 6. Analysis of measurement sensitivity.

구간 (psu)	1 psu당 전압 변화량 [ $\mu V$ ]	최대 표준 편차 [ $\mu V$ ]	측정 감도 (psu)
0~10.4	50	143	2.9
10.4~28	264	368	1.4

낸 바와 같이 10~28 psu 구간에 비해 수면 염분 농도 변화에 대한 출력 전압의 기울기가 낮아 감도가 2.1배 열화되었다. 이는 그림 1에서도 나타난 바와 같이 수온이  $20^{\circ}C$  이하인 경우 염분 농도가 낮은 구간일수록 휘도 온도의 변화가 작아 염분 농도의 적은 변화를 원격으로 측정하기가 용이하지 않기 때문으로, 수온  $30^{\circ}C$ 와  $15^{\circ}C$ 의 1 psu 당 휘도 온도의 변화폭은 2배 차이가 난다<sup>2],[6]</sup>.

### V. 결 론

본 논문에서는 수면의 염분 농도 변화를 실시간 원격으로 모니터링 할 수 있는 L 대역의 마이크로파 라디오미터의 개발에 관해 기술하였다. 수면 염분 농도의 변화에 의한 수면의 마이크로파 복사 특성을 분석하여 0~40 psu 범위의 수면 염분을 2 psu의 감도로 측정하는데 요구되는 라디오미터의 설계 사양을 도출하였으며, 도출된 사양을 만족시키는 수신기를 설계 제작하였다. 제작된 수신기는 주파수 1,390 MHz, 대역폭 45 MHz로 이득 47 dB, NF 0.91 dB의 고 이득, 저 잡음 특성을 가지며, 크기 98 mm×98 mm, 소비 전력 300 mW로 소형 경량 저소비 전력으로 구현되었다. 항온조를 이용한 입력 잡음 전력의 변화에 대한 출력 전압의 특성을 측정하여 안테나 온도와 출력 전압의 환산 그래프와 환산식 및 수신 감도를 구하였다. 제작된 수신기는  $-110 \sim -39$  dBm의 입력 전력에 대해 0.41 K 이하의 감도로 선형적으로 동작함을 확인하였다. 제작된 수신기와 표준 피라미드 혼 안테나로 구성된 라디오미터로 간이 폴장에 깊이 30 cm의 물과 천일염으로 수면 염분 농도를 0~28 psu까지 변화시키는 동안 약 5 psu의 간격으로 서로 다른 7개의 염분 농도에 대해 측정 실험을 하였다. 실험 결과, 10~28 psu 범위의 구간에서는 1.4 psu 이내의 감도로 측정이 가능함을 확인하였다. 반면에 10 psu 이하의 낮은 구간에서는 측정 감

도가 2.9 psu로 목표인 2 psu를 초과하였다. 이는 수온이 17°C로 염분 농도의 변화에 따른 수면 복사 휘도 온도의 변화폭이 적어 수신 대역과 인접한 L 대역에서의 실험장소(교내)의 전파환경에 의한 영향이 상대적으로 크게 미친 것으로 사려된다.

### References

[1] 해양 컨베이어 벨트 모형의 재정비, KISTI 마리안 글로벌동향브리핑, [http://mirian\\_kisti.re.kr/gtb\\_trend/class\\_gtb/class\\_gtb\\_print.jsp](http://mirian_kisti.re.kr/gtb_trend/class_gtb/class_gtb_print.jsp), 2010년 6월.

[2] A. Camps, et al., "The WISE 2000 campaign: sea surface salinity and wind retrievals from L-band radiometry", *Proc. SPIE*, vol. 4172, pp. 65-72, 2000.

[3] 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.

[4] D. M. LE Vine, M. Kao, "Remote sensing of ocean salinity : Results from the delaware coastal current experiment", *Journal of Atmospheric and Ocean Technology*, vol. 15, pp. 1478-1484, Dec. 1998.

[5] A. Camps, et al., "L-band sea surface emissivity : Preliminary results of the WISE-2000 campaign and its application to salinity retrieval in the SMOS mission", *Radio Science*, vol. 38, no. 3, pp. 1029-1037, May/June. 2003.

[6] 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.

[7] 손흥민, 윤정범, "수면 온도 원격탐사용 마이크로파 라디오미터의 개발", *한국전자과학회논문지*, 23(9), pp. 1107-1115, 2012년 9월.

[8] 손흥민, 박진우, "수면 기름 유출 원격탐사용 마이크로파 라디오미터의 개발", *한국전자과학회논문지*, 22(9), pp. 858-867, 2011년 9월.

[9] W. Ellison, et al., "New permittivity measurements of seawater", *Radio Science*, vol. 33, no. 3, pp. 639-648, May/June. 1998.

[10] E. G. Njoku, W. J. Wilson, S. H. Yuen, and Y. Rahmat-Samii, "A large-antenna microwave radiometer-scatterometer concepts for ocean salinity and soil moisture sensing", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 38, no. 6, pp. 2645-2655, Nov. 2000.

[11] 국내 주파수 분배표, <http://www.spectrum.or.kr>, 2009년.

[12] H. Drange, P. Schlüssel, and M. Srokosz, "Study of critical requirements for ocean salinity retrieval using a low frequency microwave radiometer: Final report", *ESA Contract No. 13224/98/NL/MV*, Nov. 1999.

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

[14] 박진우, 최연웅, 조홍렬, 손흥민, "태양 위치 측정용 전파센서 수신기의 설계 및 제작", *한국전자과학회논문지*, 20(9), pp. 943-953, 2009년 9월.

### 손 흥 민



1995년 9월: 일본국립 전기통신대학교 전자공학과 (공학박사)  
 1995년 9월~1997년 2월: 삼성전자 (주) 정보통신연구소 선임연구원  
 1997년 3월~현재: 호남대학교 전파이동통신과 교수  
 2006년 1월~2007년 12월: 한국통신학회 마이크로파 및 전파연구회 위원장

2006년 1월~2009년 12월: 한국전자과학회 상임이사  
 [주 관심분야] 마이크로파 원격탐사시스템, 신호처리 안테나시스템, 고감도 수신기, 광대역 무선통신시스템

### 윤 정 범



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