

비가시영역 열원 추정을 위한 Total Radiometry 제작 및 검증

홍창인*, 정용식°, 안성진*, 김민각*

Total Radiometry Configuration and Verification for Heat Source Estimation in Non-Line-of-Sight

Chang-In Hong*, Young-Seek Chung°, Sung-Jin Ahn*, Min-Gak Kim*

요약

본 논문에서는 상용 위성방송 수신 장비인 LNBF(Low Noise Block Feedhorn)를 사용하여 비가시영역의 열원을 측정하는 Total Radiometry 배열 시스템을 설계하고 측정과 시뮬레이션 결과를 통해 타당성을 검증하였다. 모든 열원은 전자기파가 방출된다는 플랑크 흑체 복사 이론을 기반으로 Ku-Band의 전자기파 에너지를 상용 위성방송용 LNBF 배열로 수신하고 Power Sensor를 이용하여 열원의 수신 전력을 탐지하였다. 열원 탐지 주파수 대역이 적외선인 경우 장애물이 많은 환경에서는 열원 탐지 성능이 저하되기 때문에 비가시 영역의 경우 마이크로파 대역이 더 적합하다. 또한, XY-플로터에 LNBF 배열을 장착하여 이동탐지를 통해 비가시 열원 분포를 이미지화하였다. 본 연구에서는 열원으로 온수 및 다수의 시멘트 저항으로 구성하였고 비가시 환경을 위하여 열 차단용 선팅 필름으로 열원을 감쌌다. 본 연구의 결과는 건물 내부의 전원 단락 및 누전 과정에서 발생하는 비가시 열원의 탐지 등에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

키워드 : 열원 탐지, 비가시 영역, 전전력 라디오미터, 플랑크 흑체복사 에너지, 상용 위성 방송 수신기

Key Words : Heat Source Detection, Non-line-of-sight, Total Radiometer, Planck Blackbody Radiation Energy, Commercial Satellite Broadcast Receiver

ABSTRACT

In this paper, a total radiometry array system that measures the heat source in the invisible area was designed using LNBF(Low Noise Block Feedhorn), a commercial satellite broadcasting reception equipment, and its effectiveness was verified through measurement and simulation results. Based on the Planck blackbody radiation theory that all heat sources emit electromagnetic waves, Ku-Band's electromagnetic wave energy was received in an LNBF array for commercial satellite broadcasting and the received power of the heat source was detected using a power sensor. When the heat source detection frequency band is infrared, the heat source detection performance is deteriorated in an environment with many obstacles, so the microwave band is more suitable in the case of invisible areas. In addition, the invisible heat source distribution was imaged through

* 본 연구는 2023년도 광운대학교 우수연구자 지원 사업과 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입(No. 2020R1F1A107302313)

• First Author : Kwangwoon University Department of Electronic Convergence Engineering, changin0058@naver.com, 학생회원

° Corresponding Author : Kwangwoon University Department of Electronic Convergence Engineering, yschung@kw.ac.kr, 정회원

* Kwangwoon University Department of Electronic Convergence Engineering, kunho0407@kw.ac.kr; rlaalsrkr97@kw.ac.kr

논문번호 : 202401-009-E-RN, Received January 5, 2024; Revised April 5, 2024; Accepted May 14, 2024

movement detection by mounting an LNBF array on the XY-plotter. In this study, it consisted of a large number of cement resistance and hot water as heat sources and the heat sources were wrapped with a tinting film for heat blocking for the invisible environment. The results of this study are expected to be used to detect invisible heat sources generated during power short circuits and short circuits inside buildings.

I. 서론

마이크로파 Radiometry는 플랑크 흑체 복사 법칙(Planck's blackbody radiation law)에 따라서 절대온도 0K 이상의 모든 물질에서 방사되는 전자기와 에너지를 측정하고 열원의 정보를 추정하는 분야이다. 참고문헌 [1]에 따르면 최근에는 인체 내부의 악성 종양에 의한 비정상 열원을 감지하여 질병을 예측하는 등의 복지 및 의료 산업과의 융합을 위한 연구들이 진행되고 있음을 알 수 있다.

마이크로파 Radiometry 기반 열원 탐지 기술이 화재 및 구조물의 붕괴로 인한 재난 환경에서 화재 초기 탐지 및 인명구조 등에 활발히 활용되고 있음이 참고문헌 [2]에서 나타나고 있는데, 대표적인 열원 탐지 장치로 적외선 기반의 적외선 카메라, 열화상 카메라 등의 장비들이 있다. 하지만 적외선 대역은 짧은 파장으로 인하여 장애물이 많은 환경에서는 열원을 효율적으로 탐지할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 주파수가 적외선에 비해 비교적 낮은 마이크로파 대역을 사용하여 MDF 합판, 적외선 차단 유리 등의 장애물에 의해 보이는 않는 비가시 영역에서 열원 존재 여부를 확인하고 그 위치도 이미지화를 통해 추정하는 방법을 제시하고자 한다.

본 연구에서는 상용 위성 방송 수신기인 LNBF를 사용함으로써 해당 라디오미터를 저비용으로 구성하고자 하였다. 구성된 라디오미터 시스템을 사용하여 시물레이션과 실험을 진행하여 비가시영역에 위치한 열원 분포를 이미지화함으로써 LNBF를 사용한 라디오미터가 설정된 열원과 동일한 위치와 형태로 추정할 수 있음을 검증하였다.

II. 배경 이론

2.1 플랑크 흑체 복사 이론

플랑크 흑체 복사 법칙(Planck's blackbody radiation law)에 의하면 절대온도 0K 이상의 모든 물체는 전자기 에너지를 방사한다. 방사하는 전자기 에너지의 세기는 물체의 종류와 절대온도에 의해 변하게 된다. 해당 흑체 복사 법칙에 의하면 다음 식(1)과 같은 관계식에 의하여 각 주파수에 따라 해당 에너지를 방출한다.

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

여기서 B_f 는 주파수에 따른 전자파의 세기(Spectral brightness), c 는 빛의 속도, h 는 플랑크 상수, f 는 방출되는 전자파의 주파수, k 는 플랑크 상수, T 는 물체의 절대 온도를 의미한다. 상기 식(1)은 레일리-진스(Rayleigh-Jeans) 법칙에 의해 약 117GHz 이하의 RF 주파수 대역에서는 다음 식(2)와 같이 근사할 수 있다.[3]

$$B_f \approx \frac{2kTf^3}{c^2} \quad (2)$$

이 근사 방법은 해당 대역에서 식(1)과 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 이를 바탕으로 라디오미터 안테나로 수신되는 전력 P 는 안테나의 특성을 고려하면 다음과 같이 표현이 가능하다.

$$P = \frac{1}{2} A_r \int_f^{f+\Delta f} \iint_{4\pi} \frac{2kTf^3}{c^2} F_n(\theta, \phi) d\Omega df \quad (3)$$

상기 식에서 Ω 은 Solid Angle, F_n 은 안테나의 빔 패턴, A_r 은 수신 안테나의 등가 면적이다. 주파수에 따

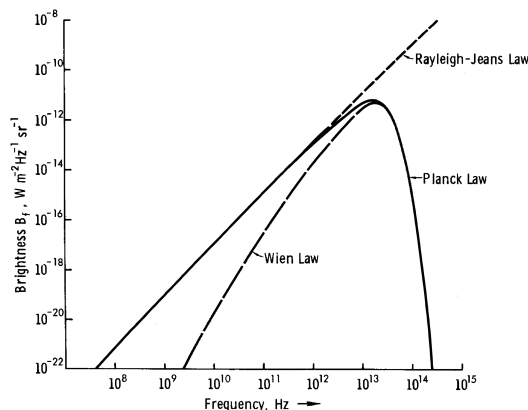


그림 1. 절대온도 300K에서 주파수에 따른 플랑크 법칙과 레일리-진스 법칙의 근사 곡선 비교
Fig. 1. Comparison of approximate curves of Planck's law and Rayleigh-Gins' law with frequency at 300K

라 방출되는 전자파의 강도를 적분하고, 안테나의 빔 패턴을 고려하였을 때, P_n 는 결과적으로 안테나의 출력 단자에서 나오는 전자파의 강도이다. 여기서 $f \gg \Delta f$ 로 가정하고 안테나의 주엽을 등가 면적으로 근사화하면 식(4)과 같이 간소화된 식으로 정리할 수 있다.^[4]

$$P_n \approx kT\Delta f \tag{4}$$

식(4)에 따라 물체가 방출하는 전자파 에너지는 물체의 온도와 주파수의 대역폭에 의해 비례함을 알 수 있다. 따라서 물체가 방사하는 전자파의 세기를 측정하면 물체의 상대적 온도를 추정할 수 있다.

2.2 가우시안 빔 형성 함수(Gaussian Beam)

안테나의 빔 패턴 확인은 공간상의 3차원 수치해석 기법이나 실측정을 통해 가능하다. 하지만 기존에 알려진 함수를 사용하여 안테나 빔 패턴을 대체함으로써 실측정 과정에서 소요되는 자원을 최소화하고, 알고리즘의 복잡도 및 요구되는 파라미터 수를 감소시키고자 하였다. 이를 통해, 시뮬레이션 환경에서의 시스템 복잡도를 감소시킬 수 있었다.

안테나의 빔 패턴을 살펴보면 연속적이고, HPBW(Half Power Band Width)를 기준으로 수치가 급격하게 감소, 빔의 중심을 기준으로 대부분 대칭, 빔의 중심에서 미분계수가 0으로 수렴하는 것을 알 수 있다.^[5]

이와 유사한 특징을 가지고 있는 가우시안 빔 함수의 공간적 필드 분포는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.^[6]

$$U(r) = A_0 \frac{W_0}{W(z)} e^{-\frac{\rho^2}{W^2(z)}} e^{-jkz - jk\frac{\rho^2}{2R(z)} + j\zeta(z)} \tag{5}$$

이때, $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$ 이며, z 에 관한 각 식은 다음과 같다.

$$W(z) = W_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_0}\right)^2} \tag{6}$$

$$\rightarrow \begin{cases} W_0, & z = 0 \\ \sqrt{2} W_0, & z = \pm z_0 \\ \frac{W_0}{z_0} z, & z \gg z_0 \end{cases}$$

$$R(z) = z \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_0}\right)^2} \tag{7}$$

$$\zeta(z) = \tan^{-1} \frac{z_0}{z}, W_0 = \sqrt{\frac{\lambda z_0}{\pi}} \tag{8}$$

상기 식에서 W_0 은 beam waist radius를, z_0 은 depth of focus가 절반이 되는 거리, 즉 전력이 절반이 되는 HPBW를 의미한다.

식(5)을 통해 가우시안 빔이 연속적이고, 빔의 중심을 기준으로 대칭적임을 알 수 있고, $U'(0) = 0$ 이므로 빔의 중심에서 미분 계수가 0으로 수렴함을 알 수 있다.

또한, 식 (5), (6)을 통해 HPBW 위치인 $z = z_0$ 을 기점으로 beam waist radius가 선형적으로 증가하며 가우시안 빔의 세기인 $U(r)$ 이 급격하게 감소하는 것을 알 수 있다.

따라서 가우시안 빔 함수가 실제 안테나 빔 패턴과 유사하여 근사할 수 있음을 확인하여 본 논문에서는 시뮬레이션 환경에서 안테나의 빔 패턴을 가우시안 빔 함수를 사용하여 근사화하는 모델링 과정을 진행하였다.

본 논문에서 사용한 가우시안 함수 모델은 다음 식 (9)과 같다.

$$f(x) = G e^{-\frac{\rho^2}{2u^2}}, u = \frac{HPBW}{2\sqrt{2\ln 2}} \tag{9}$$

여기서 G 는 빔 패턴의 이득(Gain)이고, u 는 HPBW를 포함하는 상수이다.

다음은 실제 상용 LNBF의 측정 안테나 빔 패턴이다. 이를 HPBW = 45, $G = 1$ 인 가우시안 함수로 근사화

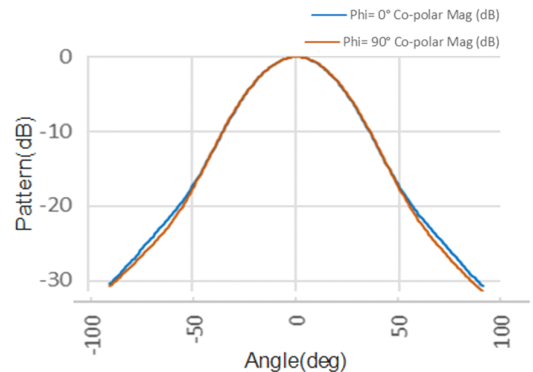


그림 2. 11.7GHz에서 상용 LNBF의 실제 안테나 빔 패턴
Fig. 2. Actual antenna beam pattern of commercial LNBF at 11.7GHz

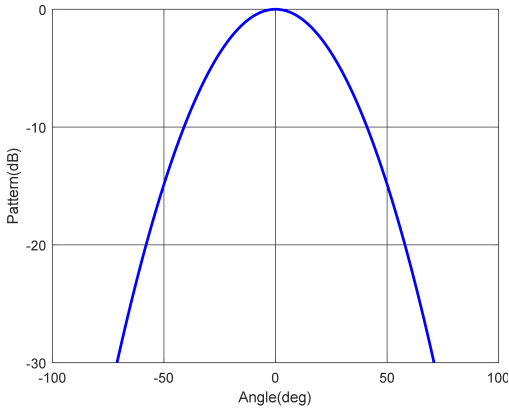


그림 3. HPBW = 45, G=1인 가우시안 빔 패턴 함수
Fig. 3. Gaussian beam pattern function with HPBW = 45, G = 1

하여 나타낸 안테나 빔 패턴이다.

위 안테나 빔 패턴을 사용하여 LNBF와 열원 사이의 각도 정보의 변화에 따라 Total Radiometer가 받아들이는 신호의 세기 정도를 시뮬레이션 환경에서 가정하여 사용하였다.

2.3 전 전력 라디오미터(Total Radiometer)

본 논문에서 구성한 Total Radiometer System은 다음과 같다. 상용 위성방송 수신 장비인 LNBF(Low Noise Block Feedhorn Antenna)를 통해 열원이 방출하는 복사 에너지를 받아들이고, LNA(Low Noise Block)로 신호를 증폭시킨 후 Arduino에서 인가하는 TTL Logic에 따라 RF Switch에서의 활성 회로를 변경시켜 가며 최종 Power Sensor에서 Power Detection을 수행한다. 11.7GHz - 12.75GHz의 Ku-Band 신호를 받아들이고, 총 System의 Gain은 LNBF와 LNA Gain의 합으로 약 75dB이다.

물체의 열원이 방출하는 전자기파 에너지는 매우 작은 잡음 신호이기 때문에 각각 요소들의 잡음을 최소화하는 것이 중요하다. 따라서 가급적 작은 잡음지수(NF:

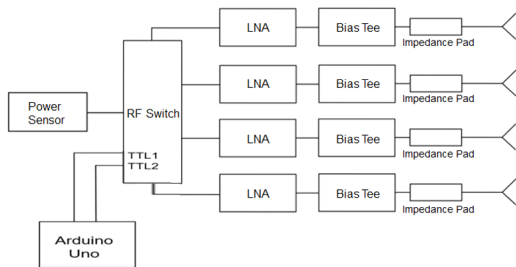


그림 4. Total Radiometer System 블록선도
Fig. 4. Block Diagram of Total Radiometer System

표 1. 전 전력 라디오미터 시스템 상세 개요
Table 1. Total Radiometer System Specifications

Components	Specification		Unit
LNBF	Gain	55	dB
	Frequency	11.7 ~12.75	GHz
	Local Oscillator	10.7	GHz
LNA	Gain	20	dB
Bias Tee	Frequency	0.01~6	GHz
DC block	Frequency	DC~6	GHz
Impedance Matching pad	Resistance	75 or 50	ohm
RF switch	Frequency	0.01~2.5	GHz
Power Sensor	Frequency	0.01~6	GHz
	Dynamic Range	-70~+26	dBm

Noise Figure)를 가지도록 설계하는 것이 필수적이다.

III. 열원 추정 타당성 검증을 위한 시뮬레이션

3.1 단일 열원추정을 위한 시뮬레이션

실제 Total Radiometer System의 열원 추정 타당성을 확보하기 위해 MATLAB으로 3차원 환경을 구성하여 2차원 수신 전력 시뮬레이션을 진행하였다. 각각 열원의 위치와 수에 따라 시뮬레이션 환경을 가정하고 가우시안 빔 함수 모델을 사용하여 LNBF의 위치를 순차적으로 변화시키며 변화하는 각도에 따라 받아들이는 복사 에너지 데이터를 시뮬레이션을 통해 도출한다.

시뮬레이션 환경은 다음과 같다. X, Y, Distance축 각각 1m*1m*1m의 3차원 공간에서 X, Y축으로 1cm

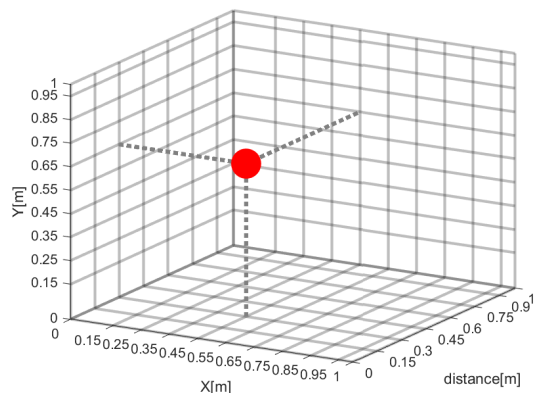


그림 5. 단일 열원의 2차원 시뮬레이션 환경
Fig. 5. Two Dimensional Simulation Environment of Single Heat Source

의 간격으로 LNBF가 이동함을 가정하여 총 10,000개의 지점에서 측정된 전력 데이터를 계산한다. 그림 5는 XY평면에서 0.3m 이격된 XY면에 50K의 온도(T)를 가지고 (X, Y, T) = (0.45m, 0.65m, 50K)의 정보로 단일 열원이 존재한다. 그 외 공간에는 0K의 열원이 있다고 가정한다.

그림 6은 그림 5의 환경에서 시뮬레이션 결과 이미지로 해당 이미지에서 시뮬레이션으로 가정한 위치와 같은 위치를 나타내어 열원의 위치를 추정할 수 있게 한다.

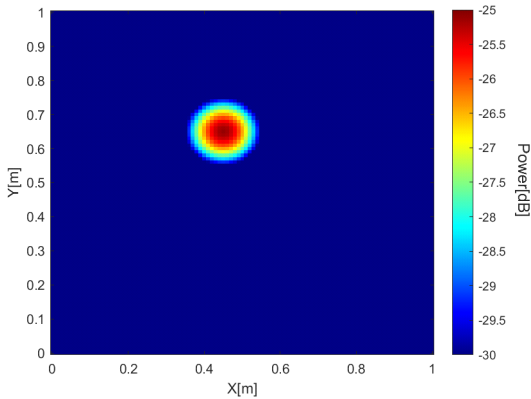


그림 6. 단일 열원의 2차원 시뮬레이션 결과
Fig. 6. Two Dimensional Simulation Result of Single Heat Source

3.2 복수 열원의 MATLAB 2차원 시뮬레이션

여러 개의 열원을 가진 환경에서 타당성을 검증하기 위해 다음과 같이 시뮬레이션 환경을 구성한다. 그림 7은 XY평면에서 0.3m 이격된 XY면에 (X, Y, T) = (0.3m, 0.7m, 70K), (0.5m, 0.3m, 100K), (0.75m,

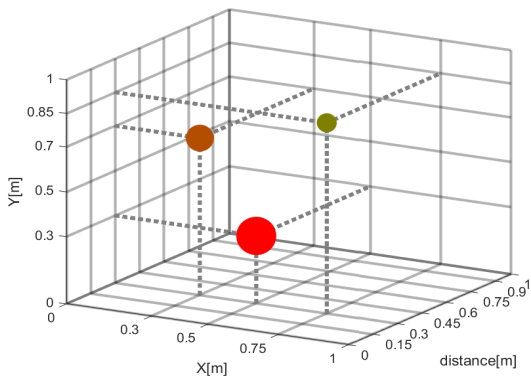


그림 7. 복수 열원의 2차원 시뮬레이션 환경
Fig. 7. Two Dimensional Simulation Environment of Multiple Heat Sources

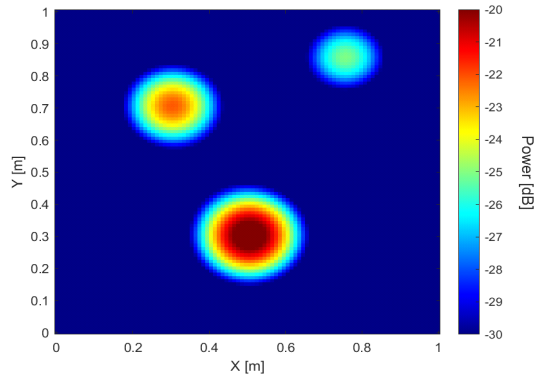


그림 8. 복수 열원의 2차원 시뮬레이션 결과
Fig. 8. Two Dimensional Simulation Result of Multiple Heat Sources

0.85m, 50K)의 정보를 가진 복수 열원이 존재한다.

그림 8은 그림 7의 환경에서 시뮬레이션 결과 이미지로 해당 이미지에서 시뮬레이션으로 가정한 위치와 같은 위치를 나타내고 있다.

IV. 실험 결과

4.1 실험 환경

눈으로 보이지 않는 비가시영역을 구성하기 위하여 가로, 세로, 높이 0.3m*0.3m*0.3m의 규격을 가진 유리 구조물을 구성한다. 이 유리 구조물의 두께는 5T(5mm)이며 Low-E Glass를 사용한다. 쉽게 온도를 전달하지 않는 Low-E Glass의 특성상 가시광선을 제외한 근적외선, 자외선 등을 차단한다. 따라서 기존 적외선 대역의 Radiometer, 적외선 온도계 등 적외선 정보를 사용하여 열원을 측정하는 장비에서는 내부에 존재하는 열원의

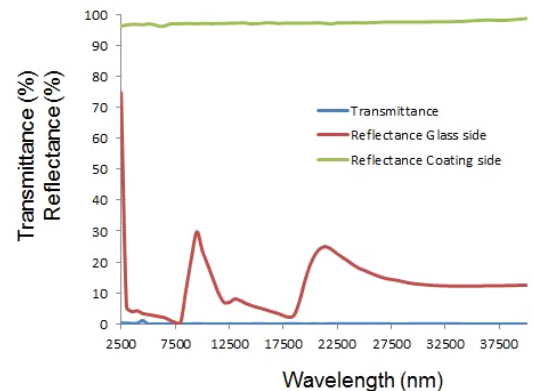


그림 9. Low-E 유리의 투과 및 반사 특성 스펙트럼
Fig. 9. Transmission and Reflection Characteristics Spectrum of Low-E Glass

측정이 불가하다. FT-IR 분광광도계를 이용하여 측정 한 Low-E Glass의 파장별 투과 및 반사 특성 스펙트럼은 다음 그림 9와 같다고 알려져 있다.

추가적으로 가시광선과 적외선, 자외선을 차단할 수 있는 차광용 선팅 필름을 유리 외부에 부착하여 눈과 적외선, 자외선을 사용하여 내부 열원을 측정할 수 없는 비가시영역을 구성하였다. 구성된 실험 환경은 다음 그림 10과 같다.

4개의 LNBF가 하나의 축에 고정되어 있는 Total Radiometer System을 시뮬레이션 환경에서의 Y축 방향으로 0.03m 간격으로 순차적으로 이동하며 열원이 존재하는 면을 스캐닝하기 위하여 가로, 세로 0.3m*0.3m 규격의 XY-플로터를 사용한다.

측정을 위한 비가시 열원으로 플라스틱 용기 내부에 담겨 있는 75°C 온도의 1L 온수를 그림 12와 같이 설정하였다.



그림 10. 적외선, 가시광선 차단 필름 부착한 적외선 차단 유리 실험체
Fig. 10. Infrared Screening Glass Experiment with Infrared, Visible Light Screening Film

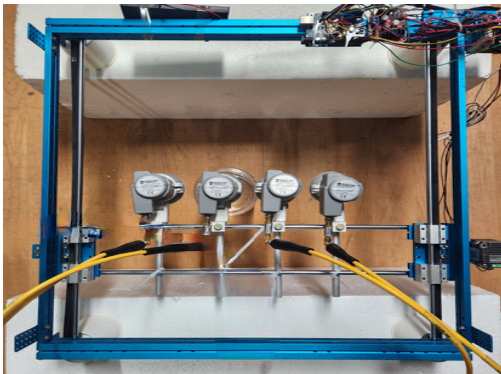


그림 11. XY-플로터를 사용하여 움직이는 라디오미터 시스템
Fig. 11. Moving Radiometer system using XY-Plotter

고체 형태의 비가시 열원으로 시멘트 저항을 설정하였다. 본 대상은 단시간에 높은 온도의 열원이 되는 특성이 배선이나 회로의 단락 및 누전 과정에서 국부적으로 발생하는 이상 열원의 특성과 유사하여 온도이상 감지를 위해 선정하였다. 시멘트 저항은 정격전력 10W, 저항값 10Ω으로 9.95V, 1.0A의 전압, 전류를 인가하여 온도가 85°C로 유지된 상태로 측정하였다. 본 실험의 열원은 그림 13과 같이 5개의 시멘트 저항을 이용하여 “H” 형태로 구성하였다.

Radiometer 주위의 다른 잡음영향을 최소화하기 위하여 Absorber가 존재하는 Anechoic Chamber 내에서 측정을 진행하였다.

측정 열원 실험체인 온수와 시멘트 저항은 비가시영역 유리 실험체 안에 존재하여 구성한 Total Radiometer System과 0.3m 이격된 거리에 존재하고 Total Radiometer System과 유리 실험체의 첫 면이 만나는 거리는 0.15m이다. 즉 다음 그림 14의 실험 환경 모식도와 같다.

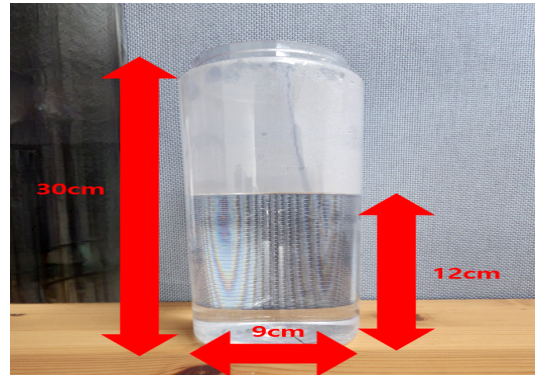


그림 12. 플라스틱 용기 내부의 1L 온수 (75°C)
Fig. 12. 75°C, 1L hot water inside plastic container

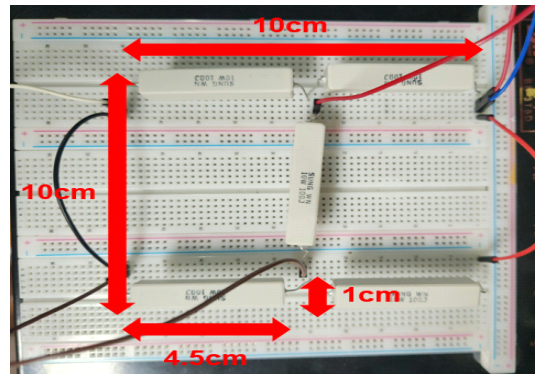


그림 13. I 형태의 시멘트 저항 실험체
Fig. 13. I-type Cement Resistance Experiment

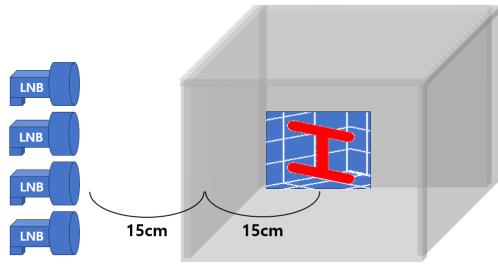


그림 14. 실험 환경 모식도
Fig. 14. Schematic Diagram of an Experimental Environment

4.2 실험 결과

플라스틱 용기 내부의 약 75°C, 약 1L의 온수 측정 결과 이미지는 다음 그림 15와 같다.

온수가 존재하는 위치에서 열원의 온도가 고른 분포를 가지고 높게 나오는 것을 확인할 수 있으며 온수가 차지하는 규격에 맞게 위치함을 알 수 있다. 따라서 실제 존재하는 열원의 형태와 위치를 XY-플로터의 최소 이동 거리인 0.03m의 분해능을 가지고 구별할 수 있음을 알 수 있다.

다음으로, 시멘트 저항 실험체 측정 결과 이미지는 다음 그림 16와 같다.

시멘트 저항이 존재하는 위치에서 열원의 온도가 더 높게 나오는 것을 확인할 수 있으며 I 형태의 열원으로 분간할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 실제 존재하는 열원의 형태와 위치를 XY-플로터의 최소 이동 거리인 0.03m의 분해능을 가지고 구별할 수 있음을 알 수 있다.

결과적으로 적외선, 가시광선, 자외선이 차단된 비가시영역 안의 열원 위치와 형태를 추정할 수 있음을 알 수 있다.

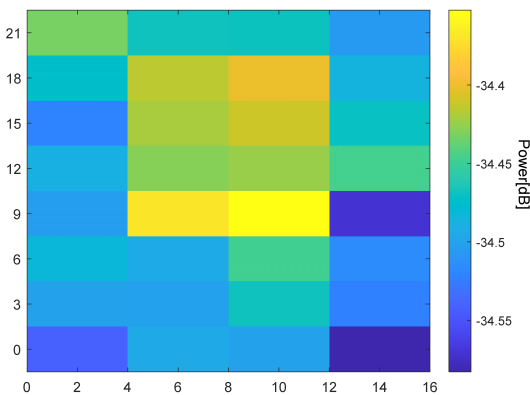


그림 15. 플라스틱 용기 내부의 75°C, 1L 온수 측정 결과
Fig. 15. Measurement Result of 75°C, 1L hot water inside plastic container

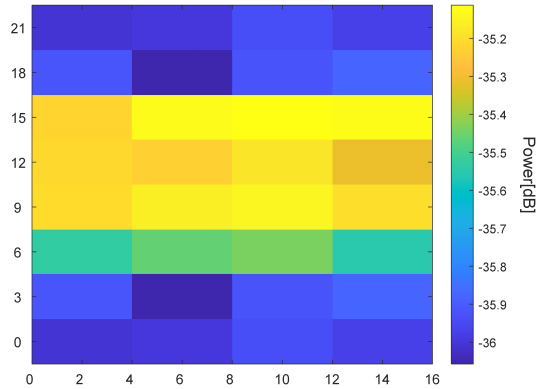


그림 16. I 형태의 시멘트 저항 실험체 측정 결과
Fig. 16. Measurement Result of I-type Cement Resistance Experiment

V. 결론

본 논문에서는 상용 위성방송 수신 장비인 LNBF를 사용하여 11.7GHz - 12.75GHz의 Ku-Band의 전파 복사 에너지를 측정하는 Total Radiometry 배열 시스템을 설계하고 측정과 시뮬레이션 결과를 통해 타당성을 검증하였다. 열원 탐지 주파수 대역이 적외선의 경우 장애물이 많은 환경에서는 열원 탐지 성능이 저하되는 어려움을 개선하기 위해 상대적으로 낮은 Ku-Band의 시스템을 채택하고 상용 위성방송 수신 장비인 LNBF를 사용함으로써 기존의 고비용, 고난도의 제작 방식에서 벗어나 저비용, 포터블 대량화 제작이 가능한 방식을 제시하고자 하였다. 3차원 MATLAB 시뮬레이션 환경을 구성하고 열원의 위치, 온도, 개수를 변화시키고, 설정값과 동일하게 열원이 추정됨을 확인하여 측정의 타당성을 입증하였다. 실제 측정을 위해서 적외선, 가시광선, 자외선이 모두 차단되는 필름을 부착한 유리를 구성하여 비가시영역을 설계하였다. 이후, 온수 및 실제 전원 회로 등에 사용되는 시멘트 저항을 비가시영역 내부에 위치시키고 XY-플로터에 LNBF 배열을 장착하여 이동 탐지를 통해 열원을 이미지화하여 열원의 위치와 형태를 추정할 수 있음을 확인 하였다.

본 논문에서는 눈으로 볼 수 없는 가벽, 유리 케이스 등의 내부에 존재하는 여러 회로가 있는 데이터 센터와 유사한 환경을 가정하여 실험을 진행하였으며, 이를 활용한다면 건물 내부의 전원 단락 및 누전 과정에서 발생하는 비가시 열원의 탐지 등에 활용할 수 있다. 이에 따라서 발생하는 화재를 예방하는 이상감지 작동을 함으로써 상당한 재산 손실을 방지할 수 있을 것으로 기대된다. 추가로 기존의 고비용, 고난도의 제작 방식에서

벗어나 저비용, 포터블 대량화 제작을 위한 구성 방식을 제시하여 추후 상용화가 가능할 것으로 생각된다.

References

- [1] A. H. Barret, P. C. Myers, and N. L. Sadowsky, "Detection of breast cancer by microwave radiometry," *Radio Sci.*, vol. 12, Issue 6S, 2012.
(<https://doi.org/10.1029/RS012i06Sp00167>)
- [2] D. K. Niranjana and N. Rakesh, "Early detection of building collapse using IoT," *2020 Second Int. Conf. ICIRCA*, pp. 842-847, Coimbatore, India, 2020.
(<http://doi.org/10.1109/ICIRCA48905.2020.9183358>)
- [3] R. Park, "A study on dual - polarized radiometry for ultra - high frequency imaging of heat sources inside living bodies," M.S. Thesis, Seoul City University, pp. 1-17, 2017.
- [4] S. Kim, "A study on the 1D imaging of radiometer system using electrical beam steering for corona discharge detection," M.S. Thesis, Seoul City University, 2020.
- [5] S. Moon, "A study on DOA using a Gaussian beam function," M.S. Thesis, Kwangwoon University, 2011.
- [6] J. Alda, "Laser and Gaussian beam propagation and transformation." *Encyclopedia Optical Eng.* 999, pp. 1013-1013, 2003.
- [7] Y. Z. Ruan, J. Lin, and H. J. Zhou, "Complex source beam simulation of antenna patterns," *Antennas and Propag. Soc. Int. Symp. Digest*, vol. 3, pp. 1888-1891, 1994.
(<http://doi.org/10.1109/APS.1994.408169>)
- [8] S. Ahn, C. Hong, and Y. Chung, "Location estimation for non-line-of-sight heat source using total radiometry," in *Proc. Symp. KIIS*, pp. 1020-1021, 2023.
- [9] S. Ahn, M. Kim, C. Hong, and Y. Chung, "Detection heat source using total radiometry in different obstacles situation," in *J. KIEE*, pp. 114-115, 2022.
- [10] F. T. Ulaby, R. K. Moore, and A. K. Fung, "Microwave Remote Sensing Active and

Passive Volume I: Microwave Remote Sensing Fundamentals and Radiometry," Addison-Wesley publishing company, 1981.

- [11] David M. Pozar, "Microwave Engineering," 4 Ed., John Wiley & Sons, pp. 284-288, 2011.
- [12] Y. Leroy, B. Bocquet, and A. Mamouni, "Non-invasive microwave radiometry thermometry," *Physiol. Meas.*, vol. 19, pp. 127-148, 1998.
(<http://doi.org/10.1088/0967-3334/19/2/001>)
- [13] P. Momenroodaki, W. Haines, M. Fromandi, and Z. Popovic, "Noninvasive internal body temperature tracking with near-field microwave radiometry," in *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol. 66, no. 5, pp. 2535-2545, 2018.
(<http://doi.org/10.1109/TMTT.2017.2776952>)

홍 창 인 (Chang-In Hong)



2024년 2월 : 광운대학교 전자융합공학과 학사
<관심분야> 배열 안테나 신호처리, 레이더 신호처리, 통신 공학

정 용 식 (Young-Seek Chung)



1989년 2월 : 서울대학교 전기공학과 학사
1991년 2월 : 서울대학교 전기공학과 석사
2000년 8월 : 서울대학교 전기공학부 박사
2003년 3월~2006년 2월 : 명지대학교 통신공학과 조교수
2006년 3월~현재 : 광운대학교 전자융합공학과 교수
<관심분야> 전자파 수치해석 및 EMI/EMC, 레이더 신호처리

안 성 진 (Sung-Jin Ahn)



2023년 2월 : 광운대학교 전자
융합공학과 학사
2023년 3월~현재 : 광운대학교
전자융합공학과 석사 과정
<관심분야> 능동 배열 안테나,
전자파 수치해석

김 민 각 (Min-Gak Kim)



2022년 2월 : 광운대학교 전자
융합공학과 학사
2022년 3월~현재 : 광운대학교
전자융합공학과 석사 과정
<관심분야> 레이더 신호처리,
능동 배열 안테나