

저항 부하된 소형 다이폴을 이용한 3축 등방성 전기장 프로브 설계

3-Axial Isotropic Electric-Field Probe Design with Resistor-Loaded Short Dipole

문 성 원 · 장 병 준*

Sung-Won Moon · Byung-Jun Jang*

요 약

본 논문에서는 저항 부하를 갖는 소형 다이폴을 이용하여 3축 등방성 전기장 측정 프로브를 설계하였다. 특히, 상용 저항소자와 PCB를 이용함으로써 상용화에 장점이 있다. 설계된 전기장 측정 프로브는 저항 부하로 인한 광대역 특성으로 100 kHz에서 3 GHz까지의 광대역 특성을 갖는다. 제작 결과 광대역에 걸쳐 ± 0.39 dB 이내의 등방성 특성, 0.1 V/m의 수신감도 특성, 3 dB 이내의 주파수 응답 특성을 얻었다. 특히 250 kHz에서 3 GHz까지의 주파수 응답 특성은 ± 1.4 dB의 우수한 특성을 보여 기존 전기장 프로브에 비해 우수한 특성 개선을 보였다.

Abstract

In this paper, we designed the 3-axis isotropic electric-field measurement probe using resistor-loaded short dipole with lumped chip resistors. The designed probe shows good isotropic characteristics as well as wideband and low sensitivity. The isotropic characteristics of ± 0.39 dB from 100 kHz to the 3 GHz band were derived and the reception sensitivity was 0.1 V/m. The frequency response is within 3 dB of the whole section, especially ± 1.3 dB from 150 kHz to 3 GHz, which is superior to the conventional electric field probe with short dipoles.

Key words: Triaxial Isotropic Probe, Short Dipole, Electric-Field Strength Measurement, Resistor Loading

I. 서 론

무선국 주변의 전자파강도를 측정하기 위해서는 사용되는 무선주파수 전체에 대해 전자파강도를 측정할 수 있는 광대역 전기장 프로브가 필요하다.

전기장 프로브의 핵심 소자는 넓은 주파수 대역 전체에서 전기장을 수신할 수 있는 소형 다이폴 안테나이다. 보통 전기장 프로브에서 사용되는 소형 다이폴 안테나는 공간상의 모든 방향에서 입사되는 전자파를 수신할 수

있도록 3개가 3축으로 배열되어 있으며, 다이폴에 인가된 전기장은 쇼트키 다이오드로 DC 주변의 신호로 주파수 천이되어 검파된 후 ADC(Analog-Digital Converter)에서 디지털로 변환된다. 이러한 전기장 프로브에 요구되는 특성으로는 측정 주파수 대역 전체에 걸쳐 일정한 주파수 특성 및 등방성 특성을 가져야 하며, 작은 크기의 전기장도 측정할 수 있도록 우수한 수신감도 특성 역시 가져야 한다.

전기장 프로브에 대한 기존 연구를 살펴보면, 대부분

시스다인(Sysdyne)

* 국민대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Kookmin University)

· Manuscript received December 20, 2016 ; Revised January 31, 2017 ; Accepted March 16, 2017. (ID No. 20161220-129)

· Corresponding Author: Byung-Jun Jang (e-mail: bjjang@kookmin.ac.kr)

일반적으로 전기적 길이가 작은 소형 다이폴을 사용하거나^{[2]~[5]}, Tapered 다이폴을 사용하는데, 이에 대한 한계는 감도가 떨어지거나 다이폴의 길이가 길어지며, 제작의 복잡성 문제가 발생되어 원거리 영역에서의 전자파 환경 측정용으로는 제한적이다. 기존 Motohisa Kanda가 제시한 참고문헌 [4]의 그림 6을 기반으로 3축 등방성 프로브를 제작하게 되면, 세 개의 독립적 Tantalum Nitride Resistive thin-film 다이폴을 복잡하게 제작하여야 하며, 이에 대한 후반 처리들이 까다로워진다.

이에 본 논문에서는 저항 부하를 갖는 소형 안테나가 광대역 특성 및 감도 개선 특성을 갖는다는 아이디어^{[4],[5]}를 적용하여 100 kHz에서부터 3 GHz까지의 광대역 특성을 갖는 소형 다이폴 안테나를 설계하였다. 특히, 상용저항으로 구성된 저항부하를 갖도록 하여 저가로 구현될 수 있도록 하였다. 또한, 본 논문에서는 이러한 저항 부하를 갖는 다이폴 안테나의 설계뿐만 아니라, 프로브 시스템의 최적설계를 통하여 우수한 수신감도를 가지면서도 높은 등방성 특성을 갖는 전기장 프로브를 설계하였다.

II. 프로브 설계 및 제작

2.1 접합저항을 갖는 다이폴 안테나 설계

전기장 프로브의 구성은 넓은 주파수 대역 전체에서 전기장을 수신할 수 있는 소형 다이폴 안테나, 그 중간에 영전압으로 바이어스된 쇼트키 다이오드(Schottky diode), 다이오드 출력전압을 AD변환기(ADC)까지 연결하는 고저항성 선로, 그리고 다이오드 출력전압을 디지털로 변환하는 ADC로 구성된다. 그림 1에 다이폴 안테나 1개를 갖는 전기장 프로브의 개념도를 보여준다. 실제로 이러한 다이폴 안테나 3개가 공간적으로 배치되어 있다.

다이폴의 길이(L)는 전기적으로 짧은 다이폴을 사용하며, 일반적으로 가장 높은 동작 주파수 파장의 10분의 1 이하의 길이를 사용하며, 본 논문에서는 3 GHz까지의 측정을 위해 20 mm로 하였다.

기본적인 저항 부하된 소형 다이폴 설계이론^[4]을 이용하여, 전체 20 mm 길이를 갖는 다이폴의 내부 임피던스는 식 (1)과 같이 표현될 수 있다.

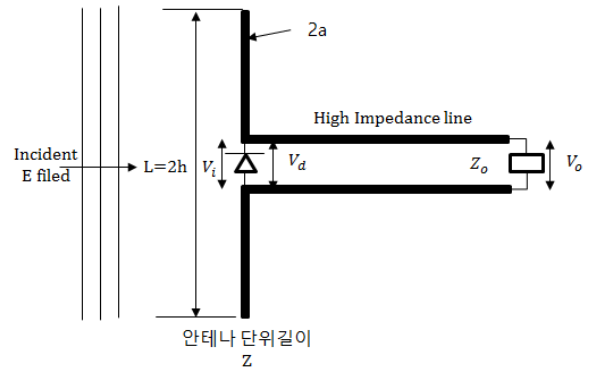


그림 1. 전기장 프로브의 개념도
Fig. 1. Block diagram of electric-field probe.

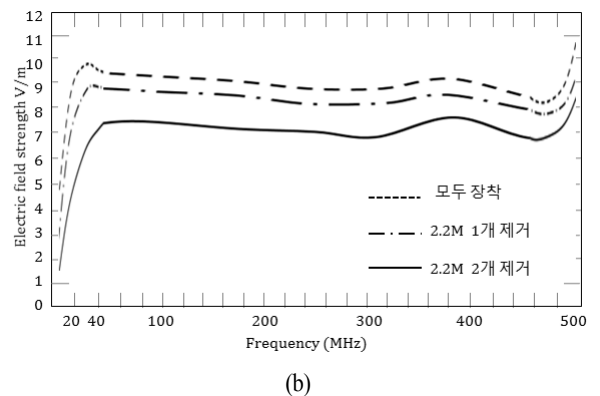
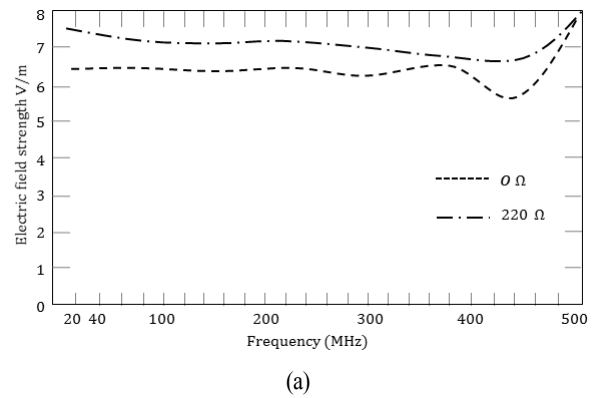


그림 2. 다이폴에 저항로드를 통한 감도 개선
Fig. 2. Sensitivity enhancement with resistor load at dipole.

$$Z(z) = \frac{60 \times 3.67}{10 - z} \Omega/\text{mm} \text{ for } 0 < z < 10 \text{ mm} \quad (1)$$

식 (1)에 의해 소형 다이폴 안테나의 중앙 로드되어야

할 저항은 22 Ω/mm가 되며, 양 끝단으로 갈수록 저항이 커지게 된다. 본 논문에서는 다이폴 안테나의 중간과 끝단에는 상용 칩 저항을 이용하여 다이오드 접합 부분의 저항은 220 Ω을 사용하였고, 다이폴 끝단은 4.4 MΩ의 저항을 사용하였다.

그림 2(a)는 중간에 저항소자를 접합한 경우의 감도 개선 결과이며, 다이폴 전류분포에 따라 저항 부하로 임피던스 매칭하여 전압 검출 개선효과를 얻은 것이다. 그림 2(b)는 다이폴 끝단에 저항 접합 시 저주파수 대역 감도 개선 결과이다. 개념상 무한의 안테나 길이를 구현하여 파장이 긴 저주파수 대역에 대한 감도를 높이는 결과를 도출한 것이다. 중간 선로의 두께는 다양한 두께의 전송 선로를 제작하여 실험한 결과, 0.8 mm가 최적임을 확인하여 0.8 mm를 사용하였다. 다이폴안테나의 제작은 저가격으로 구현하기 위하여 FR4 PCB(Printed Circuit Board)로 제작하였으며, 그림 3(a)는 실제 구성된 다이폴 안테나의 구성을 보여주며, 그림 3(b)는 이러한 다이폴 안테나를 3축으로 배열한 전기장 프로브를 보여준다. 3축 다이폴의 배치하는 각도는 기존 논문에서 제안한 방법과 동일하게 54.7도로 제작함으로 등방성 전기장을 측정할 수 있도록 하였다^[1].

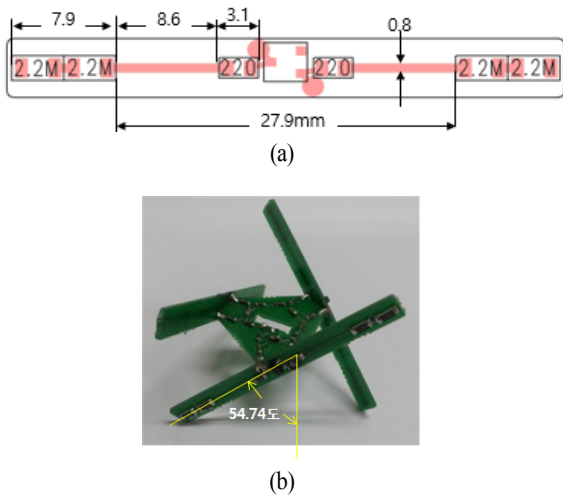


그림 3. 제작된 다이폴 안테나와 3축 등방성 전기장프로브

Fig. 3. Designed dipole antenna and 3-axis isotropic electric field probe.

2-2 프로브 설계 및 제작

이렇게 제작된 다이폴 안테나는 다이오드 검파회로를 거치게 된다. 다이오드 검파회로는 넓은 동적범위와 일정한 주파수 응답특성을 갖도록 영전압으로 바이어스된 Schottky-barrier diode를 사용하여 설계하였다. 고출력 전기장을 측정해야 하는 SAR 측정장비^[2]와는 달리 낮은 전기장 레벨에서 동작하므로 일반적인 검파기 설계이론을 적용할 수 있다. 본 논문에서 사용된 다이오드는 Avago사의 HSMS-286x를 사용하였다. 다음으로 다이오드 검파회로를 거쳐 변환된 저주파 신호는 고임피던스 전송선로를 거쳐 다이오드와 떨어져 있는 ADC 회로로 연결된다.

본 논문에서는 높은 시트저항의 카본잉크를 스크린 프린팅하여 고임피던스 전송선로를 구현하였다. 제작은 불활성 가소제에 흑연분말 30%를 혼합하고, 솔벤트와 가소제의 비율을 약 5:5에서 7:3으로 점차 가변하여 배합하여 원하는 점도가 되었을 때 스크린 프린팅하여 제작하였다. 전송선로의 물리적 특성은 저항 1.2 MΩ이 되도록 길이 290 mm, 전송선 두께 0.25 mm, 선간 폭 1.8 mm로 하였다.

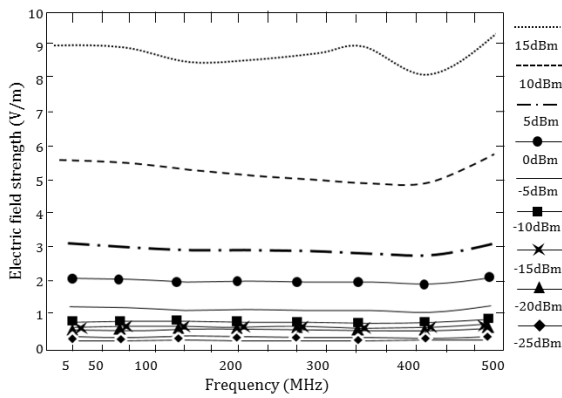
2-3 프로브 새 제품 성능

제작된 3축 등방성 전기장 강도 프로브의 측정결과는 그림 4와 같다. 먼저 수신감도와 등방성 측정의 경우, Open TEM cell에서 250 kHz에서 500 MHz까지의 수신감도를 측정하였다. 신호발생기의 주파수와 파워를 변경하면서 프로브 센서 모듈의 ADC 값을 추출하고, 이를 V/m로 변환하였다. TEM Cell에서의 측정지점은 셀벽의 커플링 효과에 의한 왜곡을 피하기 위해 셀 하부 공간 중앙 3분의 1지점을 사용하였다. 이때의 불확정도는 1 dB 이내로 유지된다. 기준 필드를 계산하기 위해 식 (2)를 사용한다^[6].

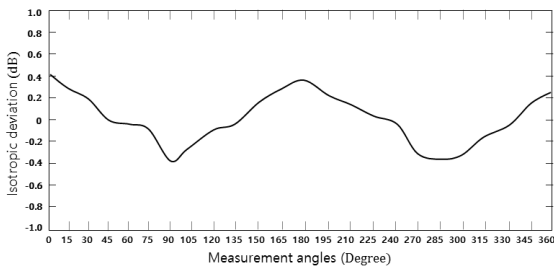
$$E = \frac{\sqrt{PR}}{d} \text{ V/m}, P = \frac{(E \times 0.147)^2}{50} \text{ W/m}^2 \quad (2)$$

여기서 거리 d 는 중앙세텀과 바닥과의 거리 14.7 cm이다. 교정 및 성능 측정에 사용한 Open TEM Cell은 스위스 Montena사 모델 TEM500을 사용하였다.

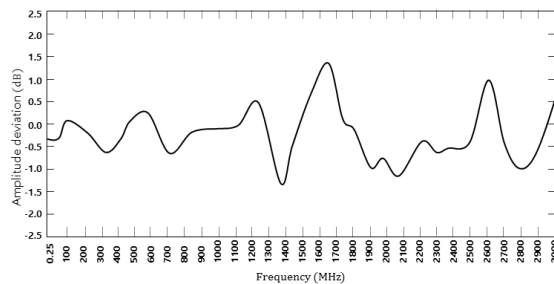
그림 4(a)는 TEM Cell에 입력전력을 -25 dBm까지 단계적으로 낮춰 식 (2)로 계산된 표준 전계강도 기준으로



(a) 수신감도
(a) Receiver sensitivity



(b) 등방성
(b) Isotropy



(c) 주파수 응답
(c) Frequency response

그림 4. 제작된 3축 등방성 프로브의 측정 결과

Fig. 4. Measured results of 3-axis isotropic probe.

비교 측정하여 수신감도 0.1 V/m를 얻었다. 다음으로 그림 4(b)와 같이 등방성 특성을 측정하였다. 신호발생기의 주파수를 100 MHz, Power를 11 dBm에 고정하고, 프로브 센서 모듈을 15도씩 돌리면서 ADC 출력값을 추출한 후 전기장 강도(V/m)로 변환하였다. 측정결과, 최대 0.38 dB, 최소 -0.39 dB의 등방성 특성을 갖는 것을 확인하였다.

마지막으로 주파수 응답특성은 Lapla Cell을 이용한 방법으로 주파수를 250 KHz에서 3 GHz 범위에서 목표시료의 위치에서 발생된 전기장 세기가 각 주파수별로 기준 전계 7 V/m가 되기 위해서 내부에 장착된 프로브의 기준 출력전압이 정해진 값이 되도록 입력 신호원의 세기를 조절하며 비교 측정하였다. 계산 결과, 제작된 프로브 센서 모듈의 기준 출력전압 대비 전계강도 편차는 최대 1.40 dB, 최소 -1.37 dB임을 확인하였다.

III. 결 론

본 연구에서는 소형 다이폴의 저주파수 대역의 감도를 개선하고, 저가격으로 상용화하기 위해 상용저항을 이용한 저항 접합 방법을 제시하였다. 제작된 프로브 시제품의 성능은 광대역에 걸쳐 ± 0.39 dB 이내의 등방성 특성, 0.1 V/m의 수신감도 특성, 3 dB 이내의 주파수 응답 특성을 얻었다. 이는 기존 일반 소형 다이폴 안테나를 이용한 전기장 강도 프로브에 비해 우수한 특성 개선을 보였다.

References

- [1] 김혁제, 박동철, 이애경, 심환우, "소형 이극안테나를 이용한 전계강도 프로브의 설계 및 제작", 한국전자과학회논문지, 6(1), pp. 3-9, 1995년 3월.
- [2] 김윤명, 이승배, 김기희, "전자파비흡수율(SAR) 측정용 전기장 프로브의 검파 전압 특성", 한국전자과학회논문지, 16(2), pp. 217-221, 2005년 2월.
- [3] K. Kalyanasundaram, K. Arunachalam, "A low cost broadband probe for electric field measurement", *Proceeding of NDE2011*, Dec. 2011.
- [4] M. Kanda, "Standard probes for electromagnetic field measurement", *IEEE Trans. Antennas Propagate*, vol. 41, pp. 1349-1364, 1993.
- [5] Motohisa Kanda, "A relatively short cylindrical broadband antenna with tapered resistive loading for picosecond pulse measurements", *IEEE Trans. Antennas Propagate.*, vol. 26, pp. 439-447, 1978.
- [6] IEEE Std 1309-1996, "IEEE standard for calibration of electromagnetic field sensors and probes, excluding antennas, from 9 kHz to 40 GHz".