韓國電磁波學會論文誌 第13卷 第2號 2002年 2月 論文 2002-13-2-08

근역장 측정용 프로브의 설계 및 제작

Probe Design and Fabrication for Measuring Near Field

김병찬 · 최형도 · 이애경 · 이형수

Byung-Chan Kim · Hyung-Do Choi · Ae-Kyoung Lee · Hyung-Soo Lee

요 약

본 논문에서는 300~3000 MHz 의 주파수 영역에서 동작하는 근역장 측정 프로브를 설계하여 제작하였다. 설계 파라미터는 프로브에 대한 등가회로를 이용하여 추출하였으며 S파라미터를 이용한 수치해석을 통해 그 특성을 예측하였다. 제작된 프로브는 3.25 mm 길이의 다이폴 안테나와 제로 바이어스 쇼트키 다이오드, 고 저항 전송선으로 구성되어 있으며 TEM 셀을 이용하여 성능을 확인하였다.

Abstract

This paper reports on design and fabrication of near field probe operating at 300~3000 MHz. Design parameters are extracted by equivalent circuit of E-field probe and simulation using S parameter is performed to predict probes performance. The probe consists of a dipole antenna with 3.25 mm length, a zero bias Schottky diode and a highly resistive transmission line. A TEM cell was used for performance evaluation.

Key words : E-field probe, S parameter, dipole, diode, transmission line, TEM cell.

Ⅰ. 서 론

최근 전자기장 복사를 목적으로 하는 무선주파수를 사용하는 시스템 즉 방송국 송신소, 이동통신기지국 및 휴대전화 등의 전자파 위험성에 대한 국민적 관심과 우려가 날로 증가하고 있다. 특히 휴대전화와 관련한 전자파에 대한 막연한 오해로 사회적 혼란과 경제적 손실의 가능성이 높아지는 점을 감안할 때 이에 대한 정량적인 연구의 필요성이 부각되고 있다. 따라서 휴대전화에 의한 인체영향을 공학적으로 접근하기 위해서는 실험적인 방법과 수치해석적인 방법이 사용되고 있다. 실험적 방법은 인체 외형을 본떠 만든 형상을 유전체 외피 내에 인체조직과 유사한 전기적 특성을 갖는 유동액을 넣고 그 유동액 내에 전기장 프로브를 삽입하여 전기장을 측정한 후 그 전기장 값(rms)으로부터 전자파 흡수율(SAR)을 추정하는 방법이 대부분 사용되고 있다. 실험적 방법의 가장 중요한 요소 중의 하나가 인체에 흡수되는 전자파의 세기를 측정하기 위한 극소형 전기장 프로브로 1970년대부터 연구되기 시작하여[1]~[4] 최근 미국의 Narda Microwave Co.와 스위스의 Schmid & Partner 그리고 영국의 SAR Test 등 국외 여러 회사에서 근역장에서의 전기장 측정을 위한 프로브가 생산 판매되고 있으나 국내에서는 아직 개발이 되지 않은 상태이며, 휴대전화의 적합성 평가를 실시할 예정인 국내 실정을 고려하면 극소형 근역장 프로브의 개발이 시급하다.

SAR 측정용 전기장 프로브는 일반적으로 다이폴 안테나, 쇼트키 다이오드, 고저항 전송선으로 구성되며, 다이폴 안테나를 통한 입사파는 다이오드 양

한국전자통신연구원 전파기술연구부(Radio Technology Department, ETRI)

· 논 문 번 호 : 20011004-139

· 수정완료일자 : 2001년 12월 21일

단에 전압을 발생시키고 다이오드에서 입사파의 진폭의 제곱에 비례하는 DC 신호를 검출하여 전송선을 통해 지시 계기(readout device)까지 전달하는 것이다. 이와 같은 전기장 프로브를 설계 제작함에 있어서 중요한 파라미터는 다이폴 안테나의 재질 및 크기 그리고 다이오드 특성 그리고 전송선의 폭, 길이, 두께 및 재질 등이다.

본 논문에서는 이동통신 주파수 대역을 커버하는 300~3,000 MHz 대역의 전자파 흡수율을 측정하려는 목적으로 이 주파수 대역에서 동작하는 프로브를 설계하고 IE3D를 이용하여 수치 해석적으로 검증한 후 후막 공정을 이용하여 프로브를 제작하여 성능을 평가한 결과를 기술하고자 한다.

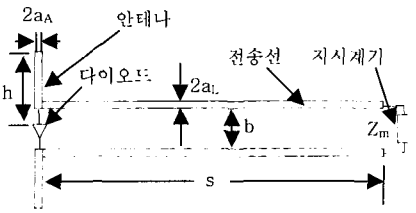
Ⅱ. 프로브 설계

2-1 설계 파라미터 추출

프로브에 대한 설계 파라미터를 추출하기 위해서 주로 프로브의 등가회로를 이용하는데 그 구성도와 등가회로는 각각 그림 1 및 2와 같다[1]-[3].

프로브의 설계 주파수 대역은 300~3,000 MHz 이며, 다이오드는 휴렛 팩커드社(이하 HP)의 쇼트키 다이오드인 HSCH-5331을 사용하였다. 다이폴 안테나와 전송선에 대한 설계 파라미터는 다음과 같이 구하였다.

먼저 상한 주파수로부터 다이폴 안테나의 길이를 결정할 수 있다. 보통 입사파는 안테나의 축을 따라서 균일하지 않다. 따라서 신호 파장에 비해 다이폴 안테나를 충분히 짧게 하여 입사파 검출 능력을 향



a_A : 안테나 반경 , h: 안테나 1/2 길이
a_L : 전송선 반경, b : 전송선 도체간 간격
s : 전송선 길이, Z_m : 지시계기의 임피던스

그림 1. 프로브 구성도
Fig. 1. Probe diagram.

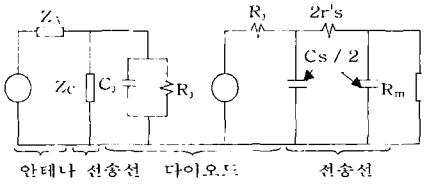


그림 2. 프로브의 등가회로
Fig. 2. Equivalent circuit of probe.

상시키기 위해 $kh \leq 0.3$ (h : 안테나 1/2 길이, k : 파수)의 범위에서 h=1.5 mm 로 선택하였다[1]. 또한 제작에 사용할 다이오드의 길이가 0.25 mm 임을 감안하여 다이폴 안테나를 구성하는 두 개의 스트립라인 형태의 도체 사이에 0.25 mm의 간격을 두었다.

다이폴 안테나의 폭 a_L을 구하기 위해 필요한 값들은 하한 주파수 w_c와 안테나 1/2 길이 h, 그리고 안테나의 등가 커패시턴스 C_A와 안테나 인자(dipole antenna factor) K_0 등이 있는데 이들은 다음과 같은 관계를 갖는다[1],[2].

$$w_c = 3 \times (R_j(C_A + C_j))^{-1} \quad (1)$$

$$C_A = h/(K_0 c) \quad (2)$$

$$K_0 = 120[\ln(4h/a_L) - 1] \quad (3)$$

여기서, c는 광속이고 C_j와 R_j는 각각 다이오드의 접합 용량과 저항이며 HSCH-5331의 경우 C_j = 0.1 pF, R_j = 100 KΩ 이다.

주어진 식 (1)~(3)을 이용해서 구한 다이폴 안테나 폭은 약 1.0 mm이다.

다이오드에서 검출된 신호 전달 역할을 하는 전송선은 다이오드에서 검출된 전압이 전송선으로 충분히 전달되도록 하고 저역 통과 필터(LPF)의 역할을 할 수 있도록[3],[4] r'=1.0 MΩ 및 Cs = 60 pF, s = 300 mm 로 하였으며 전송선의 폭과 간격은 각각 0.25 mm로 하였다. 설계 주파수 대역과 다이오드를 포함한 프로브의 설계 규격이 표 1에 정리되어 있다.

2-2 수치 해석

설계된 근역장 측정 프로브에 대한 특성을 예측

표 1. 프로브 설계 파라미터

Table 1. Design parameter of probe.

파라미터	설계규격
설계 주파수대역	300 ~ 3,000 MHz
다이오드	HSCH-5331
안테나 1/2 길이	1.5 mm
안테나 반경	1.0 mm
전송선 길이	300 mm
전송선의 폭과 간격	각각 0.25 mm
전송선 등가 저항	1.0 MΩ
전송선 등가 커패시턴스	60 pF

하기 위해 표 1의 설계 파라미터를 IE3D에 적용하여 수치해석을 수행하였으며 수치해석 구조가 그림 3에 나타나 있다. 수치해석 방법은 다음과 같다. 우선 다이폴 안테나와 다이오드를 단일 포트 시스템(1 port system) 으로 간주하여 각각에 대해 동일 특성을 갖는 등가 모듈을 구한 후두 개의 모듈을 합하여 다이폴 안테나와 다이오드가 결합된 구조에 대한 반사계수와 임피던스를 구하였다. 단, 전송선은 다이폴 안테나와 다이오드가 결합된 구조의 출력단자에서 얻어진 정보를 이용하여 DC 영역에서의 간단한 계산으로 구할 수 있어 본 수치해석에서는 적용하지 않았다. 수치해석을 위한 주요 파라미터를 살펴보면 다이폴 안테나의 경우 재질은 완전도체(PEC)로 설정하였으며 유전체기판의 유전율은 알루미나의 유전율($\varepsilon_r = 9.2$)을 적용하였다.

다이오드와 다이폴 안테나가 결합된 구조에 대해 구해진 반사계수가 그림 4의 (a)에 나타나 있다. 그림에서 관심 주파수 영역(300 ~ 3,000 MHz)에서 반

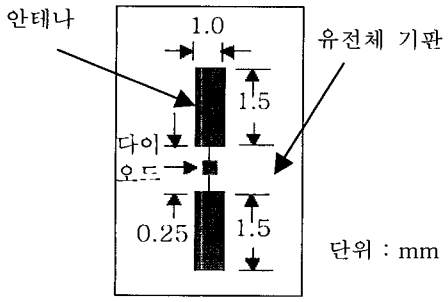
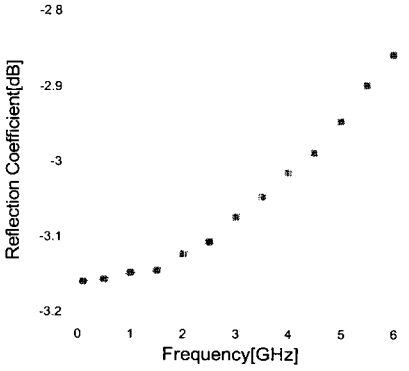
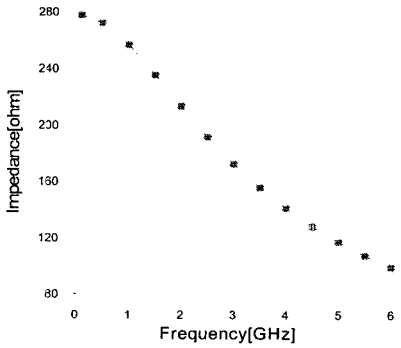


그림 3. 수치해석 구조

Fig. 3. Simulation structure.



(a)



(b)

그림 4. 다이폴 안테나와 다이오드가 결합된 구조의 반사계수와 임피던스
(a) 반사계수
(b) 임피던스

Fig. 4. Reflection coefficient and impedance of diode loaded dipole antenna.
(a) Reflection coefficient
(b) Impedance

사계수는 −3.07 ~ −3.16 dB 정도로써 입사전력의 약 50 % 정도는 반사됨을 알 수 있다. 수치해석에 사용한 다이오드가 선형 동작영역에서 동작하기 위한 입사전력의 범위는 −55 ~ −20 dBm 정도인데 입사 전력의 약 50 %가 반사된다고 한다면 −52 ~ −17 dBm 의 범위에서는 다이오드의 출력이 입력전력 또는 입사전계의 제곱에 비례하는 선형동작(square-law behavior)을 하게 된다.

또한, 그림 4의 (b)에서 처럼 다이폴 안테나와 다이오드가 결합된 구조의 임피던스가 관심 주파수 영역에서 최소 170 Ω 정도임을 감안한다면 설계 프

로브가 측정 가능한 입사전기장 강도의 범위는 300 ~3,000 MHz 대역에서 약 0.69~38.8 V/m 정도이다.

Ⅲ. 프로브 제작 및 성능평가

3-1 제 작

다이폴 안테나와 전송선을 각각 후막 공정으로 그림 5와 같이 제작하였다. 다이폴 안테나는 금(gold)을 이용하여 1/2 길이 1.5 mm 및 폭이 1.0 mm 가 되도록 하여 전송선과 54.76°의 예각을 갖도록 하여 두께가 1.0 mm인 알루미나 기판위에 프린트 하였으며 안테나의 종단에는 다이오드를 납땜하였다.

전송선의 경우 Pd/Ag(파라듐 실버)를 이용하여 폭 및 간격을 각각 0.25 mm 로 프린트 하였으며 저항은 약 1.3 MΩ 으로 구현하였다. 또한, 프로브가 등방성 특성을 갖도록 하기 위해 설계된 프로브를 폴리아세탈 재질의 삼각형 가이드 위에 3축으로 접합하였다.

설계 파라미터를 기초로 하여 등방성 특성을 갖도록 제작된 프로브의 최종 형상은 그림 6과 같다.

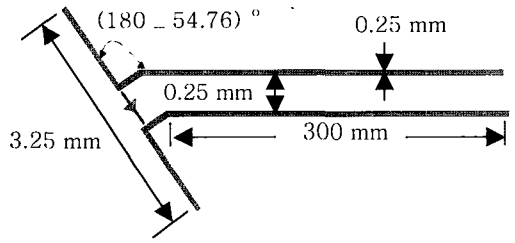


그림 5. 설계 프로브의 형태
Fig. 5. Shape of designed probe.

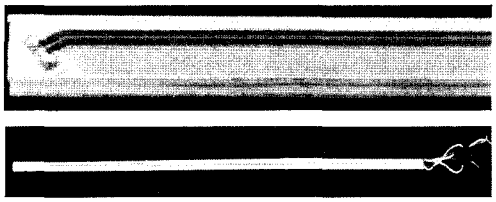


그림 6. 제작된 프로브
Fig. 6. Fabricated probe.

3-2 성능 평가

프로브 성능 평가 항목은 기본적으로 선형성 확인을 위한 다이나믹 영역(dynamic range)측정, 설계 주파수 대역에서의 동작 여부를 확인하는 주파수응답 측정 및 등방성 측정의 세 가지 항목이 있다.

본 논문에서는 실험 여건의 제한으로 1,000 MHz 이하의 주파수 대역에서만 TEM 셀을 이용하여 그림 7과 같이 장비들을 구성하여 평가를 실시하였다.

실험에 사용할 전기장 발생 장치인 TEM 셀은 상하가 비 대칭형으로 격벽(septum) 윗 쪽에 넓은 시험공간을 확보하고 있으며, 프로브가 삽입될 수 있도록 3개의 홀(hole)이 제공된다. 격벽의 수직거리가 곧 인가전력에 대한 전기장의 세기를 결정하게 되는데 인가전력에 대해 TEM 셀에 유기되는 전기장의 세기는 식 (4)와 같으며 내부 전기장 균일도는 1.0 GHz 이하에서 ±2.0 dB 정도의 매우 안정된 특성을 가지고 있다[5].

$$E = \alpha \frac{\sqrt{PR}}{d} \qquad [V/m] \tag{4}$$

여기서 a는 TEM 셀의 구조의 함수인 보정 계수, P는 인가전력 그리고 R은 TEM 셀의 특성 임피던스이고 d는 TEM 셀의 외부 도체와 내부 도체(격벽)사이의 간격이다. 본 실험에 사용된 TEM 셀의 각 파라미터는 a, R, d가 각각 1.0, 50, 0.06이다.

각 평가 항목에 대한 측정 방법은 다음과 같다. 우선 다이나믹 영역의 경우 TEM 셀 내에 프로브를 두고 입사 전력의 주파수는 1,000 MHz로 조정한

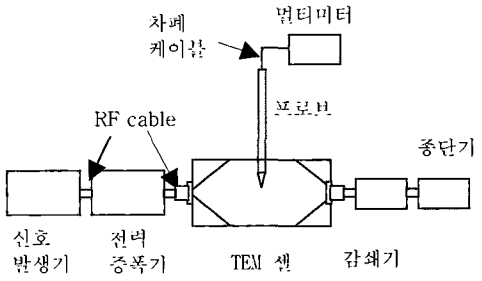
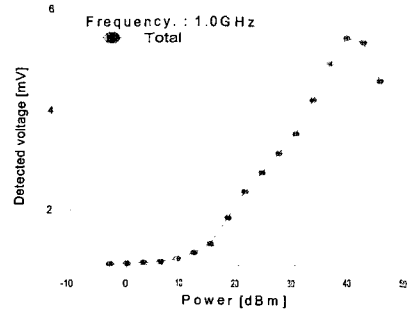
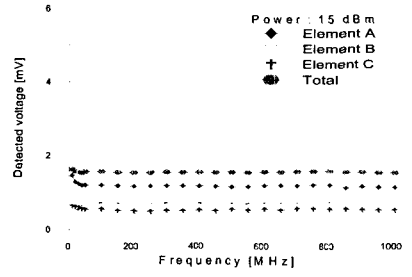


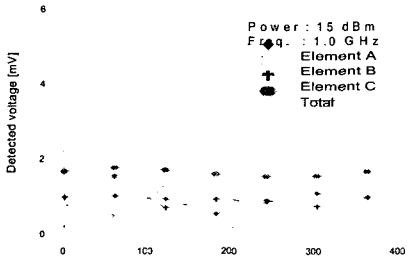
그림 7. 실험장비 구성도
Fig. 7. Setups configuration.



(a)



(b)



(c)

그림 8. 성능 평가결과
(a) 선형동작 영역, (b) 주파수응답,
(c) 등방성 특성

Fig. 8. Performance test results.
(a) Dynamic range, (b) Frequency response, (c) Isotropy.

뒤 −3.0 dBm 부터 45 dBm 까지 3.0 dBm 씩 증가시키면서 프로브의 출력을 관측하였으며, 주파수 응답의 경우에는 입사전력은 다이나믹 영역 측정으로부터 확인한 선형 동작영역내의 값인 15 dBm 으로 두고 10 MHz 부터 1,000 MHz 까지 10 MHz 간격으로 주파수를 증가시키면서 출력을 측정하였다. 등방성 특성 확인을 위해 프로브를 60° 간격으로 0° 에서 360° 까지 회전시키면서 출력을 기록하였다.

그림 8에 제작된 프로브를 대상으로 한 성능평가 결과를 나타내었다. 그림의 (a)와 (b)에서 보면 100 ~1,000 MHz 대역에서 입사전력 증가에 대해 프로브의 응답이 선형적으로 증가하는 구간이 약 10~40 dBm 정도로써 주파수에 무관하게 안정된 출력이 검출됨을 알 수 있으며 다이오드에 전송선을 통해 부가적인 저항이 장착됨으로써 고전력에서의 선형 동작 영역이 확장된 것을 볼 수 있다[6],[7]. 그림의 (c)는 프로브의 각 축에 대한 등방성 특성을 보여주고 있다. 그림에서 보면 전체전압 기준으로 최대편차가 최대 약 3.66 dB 로 나타났는데 이것은 다이폴 안테나의 예각 조정과 삼각형 가이드에 프로브에 부착하는 과정 등의 제작 오차로 추정된다.

Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 300~3,000 MHz 영역에서 동작하도록 설계된 근역장 측정용프로브를 제작하였다. 측정 장비의 제한으로 프로브의 성능 평가는 1,000 MHz 까지만 확인 가능하였다. 그 결과 다이나믹 영역과 동작 주파수 영역은 각각 10~40 dBm 및 100 ~1,000 MHz 였으며, 등방성 특성의 경우 편차가 최대 약 3.66 dB 였다. 측정을 통해 확인된 대역에서 타사의 제품과 성능을 비교한다면 스위스의 Schmid & Partner社의 제품과 미국의 Narda社의 제품은 다이나믹 영역이 공통적으로 −8~47 dBm 정도이다. 따라서 제작된 프로브는 최소한 100~1,000 MHz 주파수 범위에서 10~40 dBm 까지의 전기장 측정에 사용 가능하다고 할 수 있다.

현재 1,000 MHz 이상의 대역에서는 구형 도파관을 이용하여 프로브를 교정하고 있다. 따라서 1,000 MHz 이상의 주파수 대역에서 프로브 교정이 가능하도록 요구되는 장비를 마련하여 목표로 하는 전 주파수 대역에서의 정밀한 교정이 필요하며, 또한 현재 제작 기법에 있어 다이폴 안테나와 다이오드의 접합 방법과 가이드와 유전체 기판 부착 등에 문제가 있어 향후 제작 기법에 있어 이러한 부문에 있어서의 정밀성을 보완한다면 보다 신뢰성 높은 전기장 측정 프로브 구현이 가능할 것으로 보이며 성

능이 향상되리라고 예상한다.

참 고 문 헌

[1] H. I. Bassen and G. S. Smith, "Electric field probes-A Review", *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. AP-31, no. 5, pp. 710-718, Sep. 1983.

[2] G. S. Smith, "Limitation on size of miniature electric-field probes", *IEEE Trans. Microwave-Theory Tech.*, vol. MTT-32, no. 6, pp. 594-600, June 1984.

[3] G. S. Smith, "Analysis of miniature electric field probes with resistive transmission lines", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-29, no. 11, pp. 1213-1224, Nov. 1981.

[4] M. Kanda and L. D. Driver, "An isotropic electric-field probe with tapered resistive dipoles for]broad-band use 100 kHz to 18 GHz", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-35, no. 2, pp. 124-130, Feb. 1987.

[5] 윤재훈, 이혁재, 황호정, "전자기장 프로브 교정용 비대칭형 TEM cell의 설계 및 성능 평가", 한국통신학회 논문지, vol. 25, no, 1B, pp. 48-55, 2000. 1.

[6] "Schottky Barrier Diodes for Stripline, Micro-strip Mixers and Detectors", *Technical Data*, Agilent Technologies, U.S.A.

[7] "Square Law and Linear Detection", *Application Note 986*, Agilent Technologies, U.S.A.

김 병 찬

1994년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
1997년 2월: 경북대학교 대학원 전자공학과 (공학사)
1997년 1월~2000년 12월: LG정보통신(주) (현 LG 전자)연구원
2000년 12월~현재: 한국전자통신연구원 연구원

[주 관심분야] 전자기 이론, 전자파 생체영향, EMI/EMC

이 애 경

1990년 2월: 중앙대학교 전자공학과 (공학사)
1992년 2월: 중앙대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)
1992년 2월~현재: 한국전자통신연구원 무선방송기술연구소 전파 기반연구부 선임연구원

[주 관심분야] EMC 현상의 이론적 해석, 전자파 인체 영향 등

최 형 도

1986년 2월: 고려대학교 재료공학과 (공학사)
1989년 8월: 고려대학교 재료공학과 대학원 (공학석사)
1996년 8월: 고려대학교 재료공학과 대학원 (공학박사)
1997년 1월~현재: 한국전자통신연구원 무선방송연구소 전파기반연구부 선임연구원

[주 관심분야] EMI/EMC, 전자파 인체영향

이 형 수

1980년 2월: 경북대학교 전자공학과(공학사)
1986년 2월: 연세대학교 전자계산학과 대학원(공학석사)
1996년 2월: 성균관대학교 정보공학과(공학박사)
1982년 3월~1982년 7월: 육군통신장교
1984년 4월~현재: 한국전자통신연구원, 무선방송기술연구소 전파기반연구부 책임연구원