

누설전자파 측정을 위한 초광대역 로그주기 안테나의 소형화

Miniaturization of Ultra Wideband Log-Periodic Dipole Antenna for Leaked Electromagnetic Measurement

최동훈 · 김태형 · 문준호 · 육종관

Dong-Hoon Choi · Tae-Hyung Kim · Jun-Ho Moon · Jong-Gwan Yook

요 약

본 논문에서는 안전한 전파 환경의 구현과 전자파적합성(Electromagnetic Compatibility: EMC) 문제를 해결하기 위한 초광대역 로그주기 다이폴 안테나의 소형화를 연구하였다. 또한 고주파 대역에서 신호 대 잡음비를 개선하기 위해 안테나에 발룬(balun)을 부착하여 차동 모드인 안테나와 단일 모드인 동축 케이블의 동작을 안정화 하였다. 제안한 안테나의 소형화와 대역을 증가시키기 위해 4 GHz 이하의 공진 주파수 대역에는 fat 다이폴 구조를 사용했으며, 4 GHz 초과 공진 주파수 대역에서는 일반적인 다이폴 형태를 사용하였다. 제안한 안테나의 대역폭은 0.6~8.0 GHz이고, 비 대역폭이 12.3 : 1이다. 측정된 최대 이득은 5.7~9.1 dBi를 나타내며, 반 전력 빔폭은 29.4°~100.2°인 지향성 안테나이다.

Abstract

In this paper, to implement the electromagnetic wave environment and solve electromagnetic compatibility(EMC) problem, miniaturization of ultra-wide band log periodic dipole antenna for measurement was investigated. In addition, in order to improve the signal-to-noise ratio in high frequency band, balun was connected to the antenna to stabilize the operation of the differential mode antenna and the single mode coaxial cable. To minimize the total size and to increase bandwidth of the antenna, a fat dipole structure was used for the resonance frequency band below 4 GHz and a general dipole shape was used for that above 4 GHz. The bandwidth of the proposed antenna was represented from 0.6 GHz to 8.0 GHz with a ratio bandwidth of 12.3 : 1. Measured peak gain varies from 5.7 dBi to 9.1 dBi, and a half power beamwidth was presented from 29.4° to 100.2° in operating range.

Key words: Log-Periodic Antenna, Fat Dipole, Leakage Electromagnetic Measurement, Ultra Wide Band, Miniaturization

I. 서 론

모든 사물이 인터넷에 연결되어 정보를 공유하는 사물 인터넷(Internet of Things: IoT)으로 인해서 최근 전 세계적으로 스마트 시대 구현을 위해 다양한 유·무선 서비스가 개발되고 있으며, 대량의 정보를 처리해야 하는 다

양한 첨단 IT 및 멀티미디어 기기들의 사용이 많아지고 있는 추세이다^{[1]~[5]}. 대용량의 정보를 실시간으로 처리하기 위해서 고속의 신호를 사용하는 전자 장비들의 사용이 많아짐에 따라 기기로부터 발생하는 의도성(intentional) 또는 비의도성(un-intentional) 전자파에 의한 인접 기기나 인체에 미치는 영향이 커져가고 있다. 더불어 현

연세대학교 전기전자공학과(Department of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University)

· Manuscript received May 29, 2017 ; Revised August, 16, 2017 ; Accepted October, 19, 2017. (ID No. 20170529-051)

· Corresponding Author: Jong-Gwan Yook (e-mail: jgyook@yonsei.ac.kr)

재 우리가 사용하고 있는 무선통신의 대표적인 방식인 Bluetooth(2.4 GHz)와 휴대폰(0.8 GHz, 1.8 GHz, 2.6 GHz), Wi-Fi(2.4 GHz, 5.8 GHz)를 통해서 알 수 있듯이, 무선 통신을 위해 사용하는 주파수는 매우 다양하다. 따라서 안전한 전파 환경의 구현을 위해 다양한 기기들이 서로 영향을 최소화하면서 무선 서비스 보호를 위한 전자파적합성(Electromagnetic Compatibility: EMC) 대책 기술의 중요성이 점차 높아지고 있는 실정이다^{[6][9]}.

EMC 문제를 해결하기 위해 다양한 주파수 대역을 측정할 수 있는 지향성 및 초광대역 안테나로 일반적으로 대수주기 안테나를 사용하고 있으며, 이를 소형화하기 위해 안테나 소자를 자기유사성 구조인 프랙털(fractal)이나 코치(koch)구조 등을 사용하여 소형화 연구가 이루어지고 있다.^{[10]~[13]} 그런데, 이들 대부분의 연구는 협대역의 특정 주파수 대역에서 사용하는 안테나에 대한 것이며, 이득이 낮다는 단점이 있다.

본 논문에서는 대수주기 안테나의 형태에 4 GHz 이하에서 공진하는 안테나 소자에 원형 패치를 추가하여, 0.6~8.0 GHz의 대역을 갖는 대수주기 안테나를 제작하였고, 기존 안테나에 비교하여 이득을 유지하고 안테나 소자의 길이를 14% 감소하였다. 발룬을 통해 안테나를 급전하여 신호 대 잡음비(Signal to Noise Ratio: SNR) 특성을 개선하였고 고주파에서도 좋은 전송 특성을 갖고 있다. 안테나의 특성을 시뮬레이션과 제작을 통해 분석하였다.

II. Log-periodic Dipole Antenna와 Log-Periodic Fat Dipole Antenna (LPFDA)의 구조 및 설계

2-1 Log-periodic Dipole Antenna의 구조 및 설계

대수주기 안테나의 설계는 Carrel이 제시한 방법에 따라 식 (1), (2)와 그림 2의 안테나 이득에 대한 윤곽선 그래프(contour curve graph)를 사용하여 설계하였다^[14].

그림 1은 일반적인 log-periodic dipole antenna (LPDA)의 구조이다. LPDA의 설계 파라미터 L_n 는 다이폴 안테나 소자의 전체 길이이고, R_n 은 다이폴 안테나 소자의 두께, d_n 은 다이폴 안테나 소자의 간격, τ 는 축소 계수(scaling factor), σ 는 간격 계수(spacing factor)이다. 여기서 n 은 소자의 개수이고, 1~15이다.

그림 2는 안테나 이득에 대한 윤곽선 그래프(contour curve graph)이고, 간격 계수와 축소 계수에 따른 일반적인 LPDA 안테나의 이득 값을 나타낸다. 축소 계수가 커질수록 이득이 증가하고, 안테나의 크기가 커지는 단점이 있다^[15].

$$\tau = \frac{L_{n+1}}{L_n} = \frac{R_{n+1}}{R_n} = \frac{d_{n+1}}{d_n}. \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{R_{n+1} - R_n}{2L_{n+1}} = \frac{d_n}{2L_n}. \quad (2)$$

2-2 Log-periodic Fat Dipole Antenna의 구조 및 설계

그림 3(a)는 제안한 안테나의 전체 구조이고, 그림 3(b)는 안테나의 전체 구조에서 4 GHz 이상부터 공진하는 부분을 확대하여 나타내었다. 일반적인 LPDA를 소형화 하

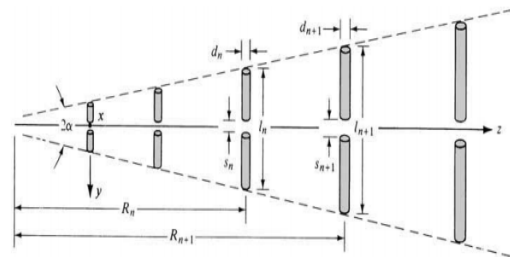


그림 1. 로그주기 안테나 구조

Fig. 1. Geometry of the log-periodic dipole antenna.

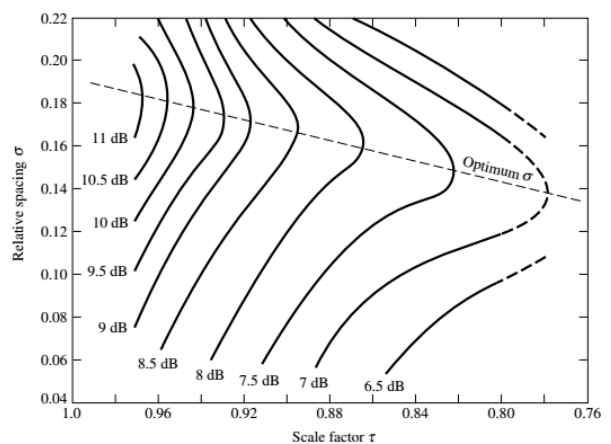


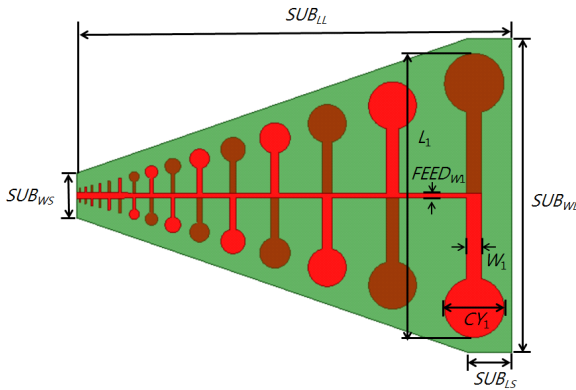
그림 2. 안테나 이득에 대한 윤곽선 그래프

Fig. 2. Contour curve graph for antenna gain.

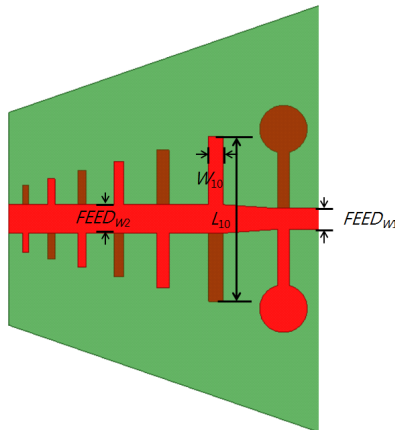
기 위하여 직선 형태의 안테나 소자들 중에서 저주파 대역에서 공진하는 안테나 소자의 가장자리 부분에 원형 패치를 추가하여 fat 다이폴 형태의 구조로 변경하였다. 일반적인 LPDA의 안테나 소자를 fat 다이폴 형태의 구조로 변경하면 안테나 소자의 길이가 기존 대비 14% 축소되며, 이득은 감소하지 않는 장점이 있다.

그림 4는 표 1의 파라미터에서 CY_1 의 크기에 따른 안테나 S -parameter의 변화와 기존의 LPDA의 S -parameter 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 안테나 소자에 원형 패치를 추가하면 전류 분포도는 표피 깊이(skin depth) 형상에 의해 원형패치의 사이트에 따라 집중적으로 존재하게 되므

로 기존의 다이폴 소자보다 전기적 길이가 증가한다.^[16] 그러므로 원형 패치의 크기가 증가 할수록 안테나의 최저 공진주파수가 낮은 주파수로 이동한다. 안테나 소자의 같은 길이를 갖는 기존 LPDA의 경우 최저 공진 주파수는 0.67 GHz이며, LPFDA의 $CY_1 = 12$ mm인 경우 최저 공진 주파수는 0.62 GHz이고, $CY_1 = 20$ mm인 경우 최저 공진 주파수는 0.59 GHz 이다. 그러므로 기존의 LPDA보다 LPFDA



(a) LPFDA 전체 구조
(a) Overall structure of LPDA



(b) LPFDA에서 고주파 공진 부분
(b) High frequency resonance part of LPDA

그림 3. 제안한 LPFDA의 구조
Fig. 3. The proposed log-periodic fat dipole antenna.

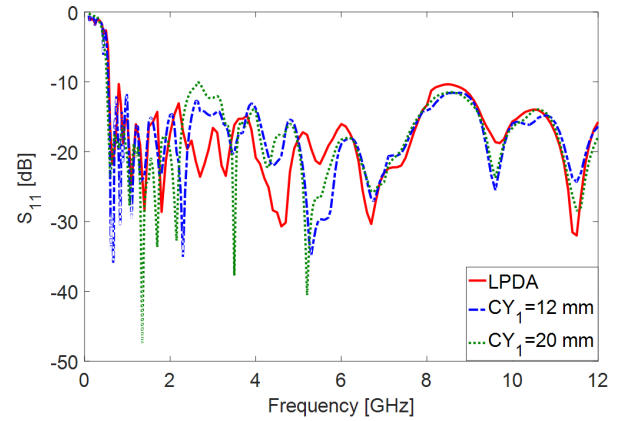


그림 4. CY_1 의 크기에 따른 LPFDA의 S -parameter
Fig. 4. S -parameter of LPFDA according to the parameter of CY_1 .

표 1. 제안한 안테나의 최적 파라미터
Table 1. The optimized parameters of the proposed antenna.

Parameters	Value(mm)
τ	0.8
σ	0.12
L_1	180
L_{15}	9.4
W_1	10
W_{15}	0.81
n	15
$FEED_{W1}$	3
$FEED_{W2}$	4
SUB_{WL}	210
SUB_{WS}	29.8
SUB_{LL}	290
SUB_{LS}	29.1
CY_1	20

의 경우, 최저 공진주파수에 대해 안테나 소자의 길이가 최대 14%가 감소한다. S -parameter 결과를 통해 안테나의 원형 패치 크기가 안테나의 공진 주파수에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 모든 안테나의 구조가 4 GHz 이상에서는 원형 패치를 붙이지 않은 고주파 대역에서 공진함으로써 S -parameter의 변화가 거의 없다. 4 GHz 이상에서 원형 패치를 붙이지 않은 이유는 간격이 좁은 곳에서 간섭을 피하기 위하여 패치의 크기가 매우 작아져야 하고, 크기가 작은 원형 패치의 경우, 공진주파수에 크게 영향을 미치지 않기 때문에 일반적인 다이폴 형태로 대체하였다.

III. 발룬(Balun)의 구조와 설계

차동 모드로 동작하는 안테나 신호를 단일 모드인 동축 케이블로 신호가 이동하면 동축케이블의 접지판에 있는 전류에 불규칙한 움직임을 발생시킨다. 동축 케이블의 실드(shield)에 불규칙적인 전류가 존재하면 동축 케이블의 신호선에 잡음이 유기된다. 안테나와 동축 케이블 사이에 발룬을 삽입하게 되면 발룬을 통해 동축 케이블의 실드의 전류를 안정화 시킬 수 있으므로 잡음을 개선하기 위하여 안테나에 발룬을 부착하였다.^{[17]-[20]}

본 논문에서 제안한 발룬의 경우, 크로펜시안 마이크로스트립 테이퍼 라인의 이론을 바탕으로 설계하였다^{[21],[22]}. 그림 5는 발룬의 구조이며, 차동 모드로 동작하는 안테나에서 멀어질수록 접지판의 구조가 넓어지면서 접지판의 전류가 넓게 분포된다. 결과적으로 전파가 진행되면서 접지판의 전류가 감소되며, 동축 케이블에는 단일 모드 파가 진행한다. 앞으로 모든 안테나 시뮬레이션은 발룬이 부착된 상태로 진행하였다. 그림 6은 표 2의 파라미터를 이용하여 시뮬레이션을 통해 발룬의 S -parameter 결과를 계산했다. 0.6~12.0 GHz 대역에서 임피던스 매칭과 전송 특성을 보여주고 있으며, S_{12} 와 S_{21} 은 동일한 특성을 나타내고, 최소 -1.8 dB의 삽입손실 특성을 보여주고 있다. 또한 S_{11} 과 S_{22} 가 -18 dB보다 낮은 결과를 나타내어 발룬으로 사용하기 적합하다.

IV. LPFDA와 Balun의 제작 및 특성

본 논문에서는 축소 계수 τ , 간격계수 ϕ 를 이득이 7 dBi

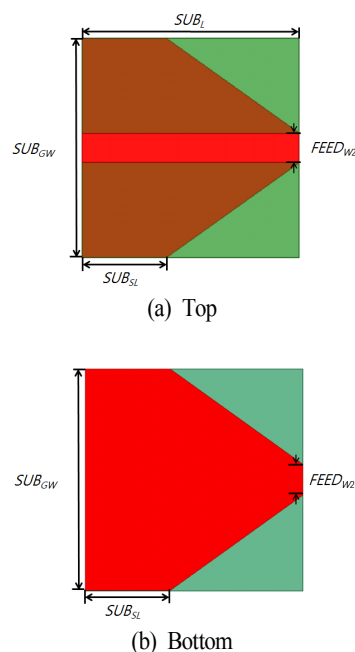


그림 5. 발룬(balun)의 구조

Fig. 5. The geometry of balun.

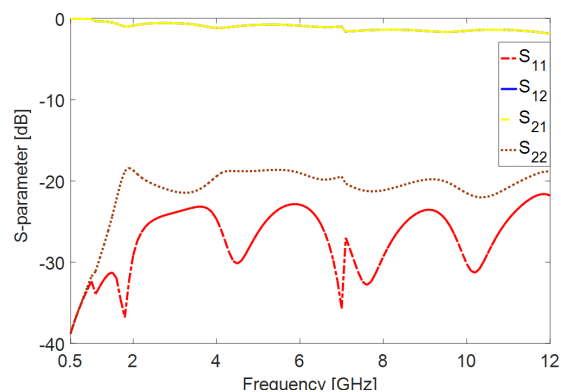


그림 6. 발룬(balun)의 S -parameter

Fig. 6. S -parameter of balun.

표 2. 제안한 발룬(balun)의 설계 파라미터

Table 2. The various parameters of the proposed balun.

Parameters	Value(mm)
SUB_{SL}	11.7
SUB_{GW}	29.8
SUB_L	30
$FEED_{W2}$	4

특성을 갖는 LPFDA를 설계하였다. LPFDA의 특성을 살펴보기 위해 3차원 전자장 해석 프로그램을 사용하였다. 사용한 유전체 기판의 종류는 FR-4이며, 상대 유전율은 4.4이고, 손실 탄젠트 0.02이다, 유전체의 두께는 높은 이득과 구부림 방지를 위해 2.0 mm로 설정하였다. 표 1은 안테나 제작에 사용한 각각의 안테나 설계 파라미터이고, 표 2는 안테나에 부착된 발룬(balun)의 설계 파라미터이다. 각 다이폴 소자의 길이 L_n 는 각각의 다이폴의 공진 주파수를 결정한다. 그림 7은 실제 제작한 LPFDA의 사진을 나타낸다.

그림 8은 표 1과 표 2에 제안된 설계 파라미터를 사용하여 설계된 시뮬레이션과 측정 결과이다. 8 GHz 이상부터는 방사패턴의 경향성이 일정하지 않아 대역에 포함되지 않는다. 측정 결과, LPFDA의 대역폭은 0.60~8.00

GHz이고 비 대역폭은 12.3 : 1이다. 시뮬레이션과 측정 결과가 매우 유사하게 나타났다.

그림 9에서 파란색 실선은 본 논문에서 제안된 LPFDA의 시뮬레이션의 E-plane(xy-plane), H-plane(yz-plane) 방사패턴 결과를 보여주며, 주황색 일점 쇄선은 제작된 안테나의 실제 E-plane, H-plane에서 측정된 방사패턴 결과를 보여준다. 표 3은 LPFDA의 시뮬레이션에서 얻은 방사패턴의 이득과 반 전력 빔폭을 나타내었다. 반사손실 -10 dB 기준으로 이득은 5.7~9.1 dBi이고, 반 전력 빔폭은 29.4°~100.2°이다. 시뮬레이션 결과와 제작된 안테나의 실제 측정된 방사패턴의 결과가 비슷한 경향성을 보여주고 있고, 모든 대역에서 지향성을 갖고 있다.

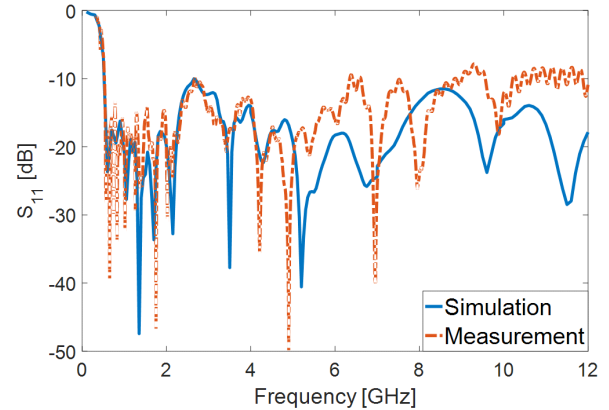
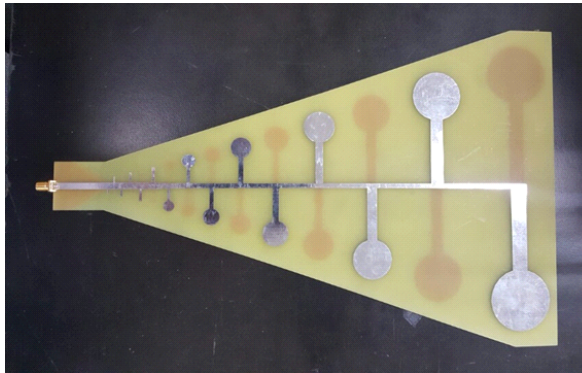
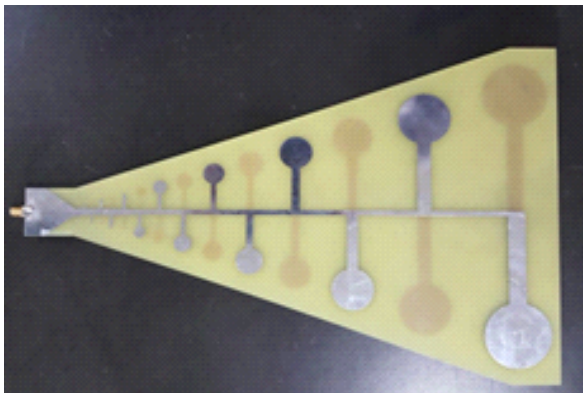


그림 8. 시뮬레이션 결과 및 측정결과
Fig. 8. Simulation result and measured result.



(a) Top



(b) Bottom

그림 7. 제작한 안테나
Fig. 7. The fabricated antenna.

표 3. 최대 이득 값과 반 전력 빔폭

Table 3. Peak gain and half power bandwidth of E-plane.

Frequency(GHz)	Gain(dBi)	HPBW(°)
0.6	5.7	78.3
1	5.7	100.2
2	7.2	50.2
3	7.7	47.5
4	9.1	33.9
5	8.4	29.4
6	7.0	51.8
7	6.0	32.4
8	8.6	24.9

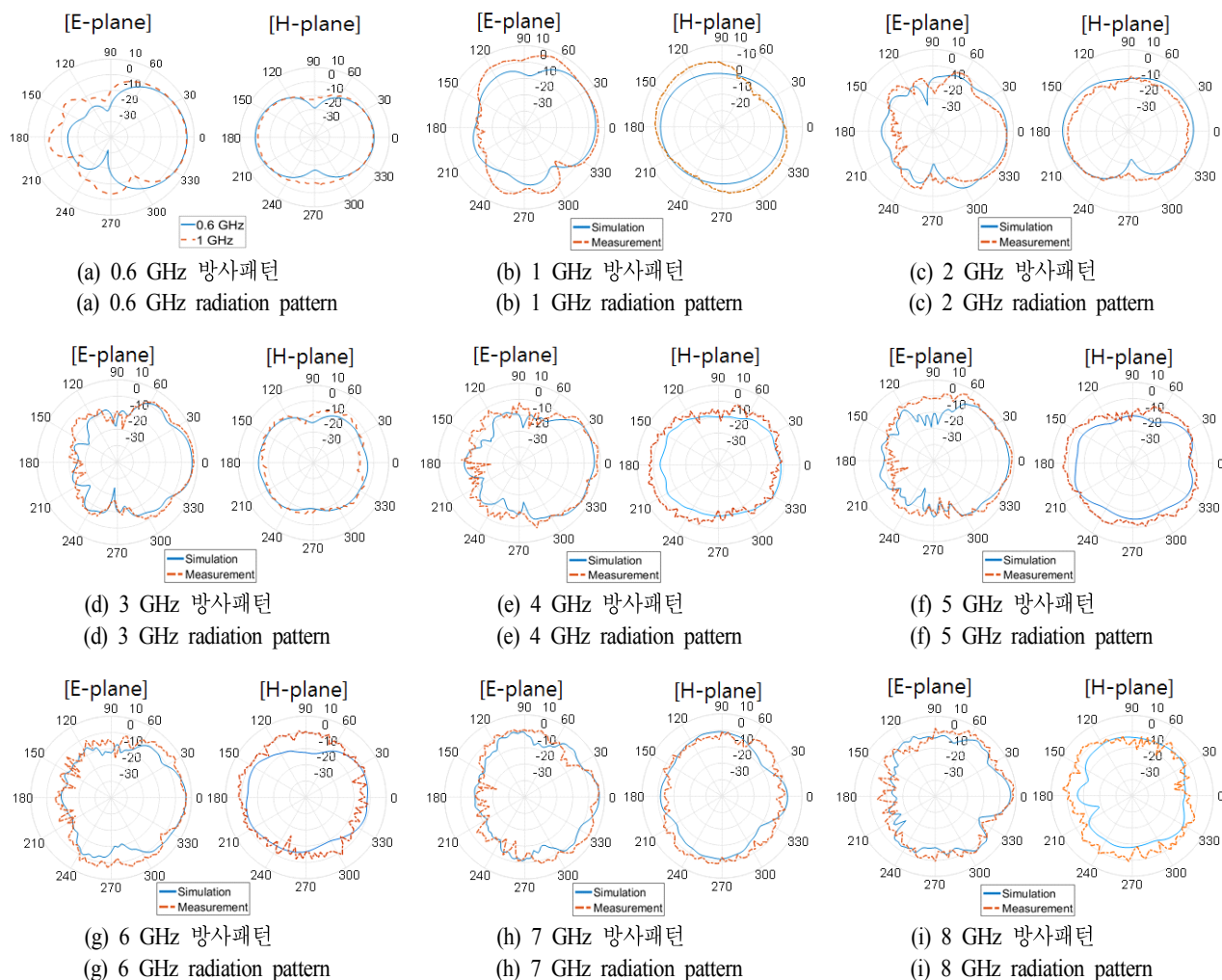


그림 9. LPFDA의 주파수 별 방사패턴

Fig. 9. Radiation pattern of LPFDA at various frequencies.

V. 결 론

본 논문에서는 다양한 주파수의 전자파 신호를 측정하기 위한 소형화된 fat 다이폴 형태의 로그주기 다이폴 안테나를 설계하고, 차동 모드로 동작하는 안테나와 단일 모드로 동작하는 케이블의 특성 개선을 위해 발룬(balun)을 부착하여 안테나의 특성을 분석하였다. 일반적인 LPDA에 비해 14% 만큼의 작은 길이로 최저 공진 주파수를 얻을 수 있고, 이득은 5.7~9.1 dBi 값을 가지며, 반 전력 빔폭은 29.4°~100.2°를 나타내었다. 전체 대역에서 방사 패턴의 빔폭을 일정하게 유지하는 연구가 더 필요

할 것으로 사료된다. 본 논문에서 설계한 fat 다이폴 형태의 대수주기 안테나는 전자파 측정에 사용될 수 있으며, 다양한 무선통신에도 사용될 수 있다.

References

- [1] Andrew, Whitmore, Anurag Agarwal, and Li Da Xu, "The internet of things-A survey of topics and trends", *Information Systems Frontiers*, vol. 17, no. 2, pp. 261-274, Apr. 2015.
- [2] Da Xu, Li, Wu He, and Shancang Li, "Internet of things

- in industries: A survey", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 10, no. 4, pp. 2233-2243, Nov. 2014.
- [3] Y. Kawamoto, H. Nishiyama, K. Nei, Y. Naoko, and Y. Shinichi, "Internet of things (IoT): Present state and future prospects", *IEICE Transactions on Information and Systems*, vol. E97.D, no. 10, pp. 2568-2575, Oct. 2014.
- [4] J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic and M. Palaniswami, "Internet of things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions", *Future Generation Computer Systems*, vol. 29, no. 7, pp. 1645-1660, Sep. 2013.
- [5] H. Cai, B. Xu, L. Jiang, and A. V. Vasilakos, "IoT-based big data storage systems in cloud computing: Perspectives and challenges", *IEEE Internet of Things Journal*, pp. 75-87, Oct. 2016.
- [6] C. R. Paul, *Introduction to Electromagnetic Compatibility*, WILEY, pp. 503-556, 2006.
- [7] Yehia Massoud, Jacob White, "Simulation and modeling of the effect of substrate conductivity on coupling inductance and circuit crosstalk", *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, vol. 10, no. 3, pp. 286-291, Jun. 2002.
- [8] M. Masud Rana, M. Rabiul Islam, and M. Kamal Hosain, "Parametric investigation of near end and far end crosstalks in printed circuit board lands", *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 1, no. 2, pp. 213-219, Dec. 2011.
- [9] F. Lin, Y. Qi, J. Fan, and Y. C. Jiao, "0.7-20-GHz dual-polarized bilateral tapered slot antenna for EMC measurements", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 56, no. 6, pp. 1271-1275, Dec. 2014.
- [10] 유태훈, 김태형, 이창신, 홍장희, "프랙털 구조를 이용한 디지털 TV 수신용 로그주기 다이폴 안테나". *한국통신학회논문지*, vol. 37, no. 3, pp. 84-89, Jun. 2012.
- [11] Baixiao Wang, Aixin Chen, and Donglin Su, "An improved fractal tree log-periodic dipole antenna", *Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility and 19th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC)*, pp. 831-834, May 2008.
- [12] Heng-Tung Hsu, Ting-Jui Huang, "A koch-shaped log-periodic dipole array (LPDA) antenna for universal ultra-high-frequency (UHF) radio frequency identification (RFID) Handheld Reader." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 61, no. 9, pp. 4852-4856, May 2012.
- [13] Yu, Chao, et al. "Ultrawideband printed log-periodic dipole antenna with multiple notched bands", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 59, no. 3, pp. 725-732 Mar. 2011.
- [14] Robert Carrel, "The design of log-periodic dipole antennas", *1958 IRE International Convention Record*, vol. 9, pp. 61-75, Mar. 1966.
- [15] Constatine A. Balanis, *Antenna Theory*, WILEY, pp. 611-649, 2005.
- [16] Eric Bogatin, *Signal and Power Integrity*, Prentice Hall, pp. 151-208, 2010.
- [17] M. I. Mirzapour, S. M. J. Razavi and S. H. Armaki, "Ultra-wideband planar LPDA antenna with mode converter balun", *Electronics Letters*, vol. 50, no. 12, pp. 848-850, Jun. 2014.
- [18] Richard Cgi-Hsi Li, *RF Circuit Design*, WILEY, pp. 155-218, 2006.
- [19] Hualiang Zhang, Hao Xin. "A dual-band dipole antenna with integrated-balun", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 57, no. 3, pp. 786-189, Mar. 2009.
- [20] Changjun Liu, Wolfgang Menzel, "Broadband via-free microstrip balun using metamaterial transmission lines", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 18, no. 7, pp. 437-439, Jul. 2008.
- [21] Krinsky and Samuel, "Transverse impedance of a smooth flat taper", *Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams*, vol. 8, no. 12, pp. 124-403, Dec. 2005.
- [22] Bavid M. Pozar, *Microwave Engineering*, WILEY, pp. 261-167, 2012.

최 동 훈



2016년 8월: 전남대학교 전자통신공학과 (공학사)
 2016년 9월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 석박사 통합과정
 [주 관심분야] EMI/EMC, TEMPEST, SI/PI, 안테나

문 준 호



1994년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
 1996년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
 1996년~1999년: 현대전자산업(주) 위성사업단 연구원
 1999년~2001년: 한국 Agilent Technologies

TMO/SSV

2001년~2003년: VSWR Co., Ltd 책임연구원
 2003년~2007년: (주) 팬택 책임연구원
 2007년~2014년: (주) 필택 연구소장
 2014년~현재: 헤넷시스 주식회사 연구소장
 [주 관심분야] RF/Microwave, 위성통신, Radar

김 태 형



2013년 3월: 동양미래대학교 정보통신공학과 (공학사)
 2013년 9월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 석박사 통합과정
 [주 관심분야] 무선 충전, 안테나, RF시스템

육 중 관



2000년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 교수
 2012년~2013년: IEEE Distinguished Lecturer (EMC Society)
 [주 관심분야] 수치해석, 마이크로파 구조 해석 및 설계, EMI/EMC, HEMP, RF 바이오/가스 센서 등