Metamaterial 발룬으로 급전된 Capacitively Loaded 루프 안테나

Capacitively Loaded Loop Antenna Fed with Metamaterial Balun

정 윤 권 · 이 범 선

Youn-Kwon Jung · Bomson Lee

요 약

본 논문에서는 T-junction을 통해 분배된 두 선로를 한 쪽은 N개의 단일 셀을 사용한 우/좌형 전송선, 다른 한 쪽은 우형 전송선을 이용한 발룬을 설계하였다. 이에 있어 closed-form solutions과 그 해를 바탕으로 설계된 CPW 전송선을 이용한 초소형 광대역 발룬(80 %)을 제시한다. 또한 균일한 전류 분포를 위해 칩 커패시터를 장하시킨 안테나를 제안한다. 본 안테나는 $\lambda/4$ 이하의 간격을 두고 장하되었을 때 직렬 공진 현상을 보이며 안테나 입력 저항은 약 204 Ω이다. 제안된 루프 안테나의 단일 셀은 좀 더 균일한 전류 분포를 위해 약 $\lambda/12$의 간격을 두고 제작되었으며(전체 길이: 1 λ), 동일한 길이의 단일 권선 구조를 갖는 기존 루프 안테나에 비해 20 dB가 더 큰 자계를 형성함을 EM 시뮬레이션과 측정을 통해 알 수 있었다. 이 안테나와 제시된 발룬 사이에는 CPS (Coplanar Strip Line) 구조가 사용된다. 본 안테나는 근거리장 UHF 대역 RFID 리더 안테나에 응용될 수 있다.

Abstract

This paper presents a balun consisting of a T-junction, a Right/Left Handed Transmission line(RLH-TL), and a conventional Right Handed(RH) line. It is assumed that the RLH-TL consists of N unit-cells. We provide closed-form solutions and design a very compact wideband(80 %) balun using CPW lines based on the obtained solutions. Then, we propose a capacitively loaded loop antenna designed for a uniform current distribution. The antenna resistance of the proposed antenna at resonance is about 204 ohms. The length of the unit cell is about $\lambda/12$(total length: 1 λ). The magnetic field generated from the poroposed antenna is stronger than that of the conventional one by as much as 20 dB. We used a coplanar strip line(CPS) to combine the loop antenna and balun. The proposed antenna may be used as a near field UHF RFID reader antenna.

Key words : Metamaterial, Wideband Balun, Loop Antenna, Magnetic Field, UHF RFID

Ⅰ. 서 론

RFID(Radio Frequency Identification) 시스템은 사물에 태그 안테나를 부착함으로 사물의 고유 아이디를 무선으로 인식하여 해당 정보를 수집, 가공함으로써 사물에 대한 원격처리, 관리 및 사물간의 정보교환 등의 서비스를 제공하는 기술이다. 이러한 RFID 시스템은 적용 분야별로 HF, UHF 대역 등 용도에 맞게 다양한 주파수 대역을 사용하고 있다. 현재에는 국방, 안보, 교통, 물류, 공정, 의료 등 다양한 분야에서 사용되고 있으며, 향후 USN(Ubiquitous Sensor Network)에 있어서 중심적인 역할을 하기 위해 연구가 실생활에 적용되는 예도 흔히 볼 수 있다. 하지만 인접한 리더 안테나 간의 간섭 등 원거리장 안테나의 문제점들을 해소하기 위해 최근 근거리장을 이용하는 리더에 대한 요구가 높아지고 있다[1].

「본 연구는 한국산업기술평가원의 IT 산업 원천기술개발사업의 일환으로 수행하였음[2009-F-033-01, 메타전자파 구조를 이용한 전파(RF) 스펙트럼 특성 개선 기술 연구].」

경희대학교 전자 · 전파공학과(Department of Electronic and Radio Engineering, Kyunghee University)

· 논 문 번 호 : 20090720-071

· 수정완료일자 : 2009년 10월 12일

이러한 근거리장용 안테나를 설계함에 있어서 전계를 이용하는 것이 아니라 강한 자계를 발생시켜 가까운 거리에서의 tag 안테나를 인식하게 한다. 근거리장을 발생시키기 위해서 원형의 균일한 전류가 생기면 강한 자장이 발생한다는 ampere의 오른 나사 법칙을 이용한다. 이를 기존 원형 루프 안테나에 Metamaterial(MTM) 기술을 응용하여 구현하였는데, 루프의 인덕턴스 값을 계산하여 공진 조건에 맞추어 균일하게 칩 커패시터를 장하함으로써 루프를 따라 흐르는 전류가 균일하도록 만들어 주었다[2]~[4].

MTM 기술은 최근 대두되고 있는 기술로 1968년 Veselago에 의해 제안되었고, Shelby에 의해 2001년 실험적으로 증명되었다. Right-Handed(RH) 특성을 가지는 일반적인 전송 선로에 직렬 C_0와 병렬 L_0를 주기적으로 삽입하여 Right/Left-Handed(RLH) 특성을 가질 수 있게 하는 기술로 전파 상수 β의 값을 조절할 수 있기 때문에 전파 전파의 방향 역시 조절할 수 있는 효과를 얻게 한다. 초고주파 영역에서 기존의 전송선과는 다른 RLH 특성을 이용한 응용으로 여러 소자들의 설계가 더욱 다양해졌다[5]~[10].

본 논문에서는 설계 주파수 911 MHz(UHF 대역)에서 MTM을 이용한 광대역 특성을 가지는 발룬과 그에 대한 closed-form solution, 그리고 근거리장에서의 강자기장 형성을 위해 칩 커패시터를 장하시킨 루프 안테나를 제안하고자 한다.

Ⅱ. MTM을 이용한 광대역 발룬

그림 1은 제안된 발룬 설계의 구성에 대하여 보여준다. 본 발룬은 T-junction, N개의 MTM 전송선, 우형 전송선 세부분으로 이루어져 있다. 50 Ω인 포트 1에서 입력된 전력이 T-junction을 거치면서 100 Ω의 포트 2와 포트 3으로 나누어지는 구조이다. 세부적으로 N개의 MTM 전송선은 전기적 길이 kd(k: 단일 셀에서의 우형 전송선의 파수와 전파상수, d: 단일 셀의 물리적 길이)와 단일 셀에서의 출력 위상 변화량 Φ_w, 우형 전송 선로는 전기적 길이 $k\ell$로 구성된다. L과 C는 각각 우형 전송 선로의 직렬 분포 인덕턴스(H/m)와 병렬 분포 커패시턴스(F/m)를 나타낸다. 전송선의 특성 임피던스는 Z_c로 표현된다. 이 때 발룬을 설계하는 조건에 있어 MTM 전송선의 정합 조건과 두 포트 간의 위상 차이가 설계 주파수인 911 MHz에서 180° 차이를 만드는 두 조건은 다음과 같다.

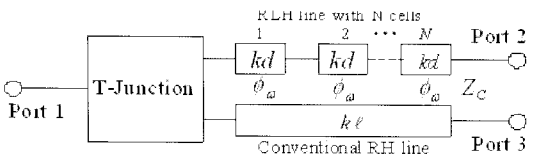


그림 1. 제안된 발룬의 구성도
Fig. 1. Schematic of the proposed balun.

$$Z_c=\sqrt{\frac{L}{C}}=\sqrt{\frac{L_0}{C_0}} \tag{1}$$

$$-\left(w\sqrt{LC}d-\frac{1}{w\sqrt{L_0C_0}}\right)N+w\sqrt{LC}\ell=\pi \tag{2}$$

위 두 조건을 가지는 발룬에 광대역 특성을 넣어주기 위해 두 포트에서 출력되는 위상의 기울기가 설계주파수에서 같아지는 조건을 추가하면 다음과 같다.

$$-\left(\sqrt{LC}d+\frac{1}{w^2\sqrt{L_0C_0}}\right)N+\sqrt{LC}\ell=0 \tag{3}$$

위 세 조건을 정리하면 다음과 같은 발룬 설계에 있어서 필요한 소자 L_0, C_0의 값과 우형 전송 선로의 전기적 길이 $k\ell$을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$C_0=\frac{2N}{\pi wZ_c} \tag{4}$$

$$L_0=\frac{2NZ_c}{\pi w} \tag{5}$$

$$k\ell=N\times kd+\frac{\pi}{2} \tag{6}$$

위 식에서 N과 kd는 설계자가 임의의 값을 정할 수 있다. 본 논문에서는 $N=2$, $kd=\pi/8$로 선택하여 시뮬레이션하였고, 그 결과 포트 2 방향으로 +45°, 포트 3 방향으로 −135°의 위상 변이가 있다. 기존의 RH 전송선에서는 위상이 (−)방향으로 진행되는데 비해 RLH 특성을 가지는 MTM 전송선이 삽입된 포트 2에서는 위상이 (+)방향으로 진행한다.

그림 2는 위의 간략화된 식을 이용하여 설계한 발룬이고, 그림 3은 실제 제작품의 사진이다. 설계에는 저가형 설계가 가능하도록 상대 유전율이 4.9인 FR-4 기판을 사용하였고 두께는 0.8 mm이다. 각 소자 값

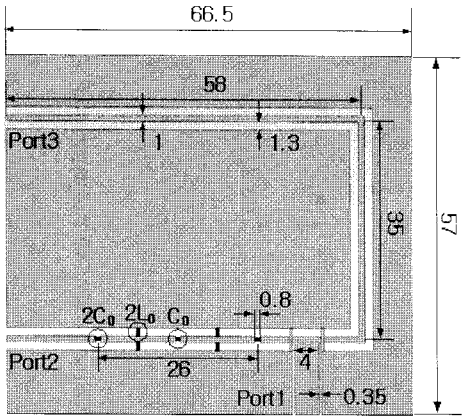


그림 2. 제안된 발룬의 구조(단위: mm)
Fig. 2. Geometry of the proposed balun(unit: mm).

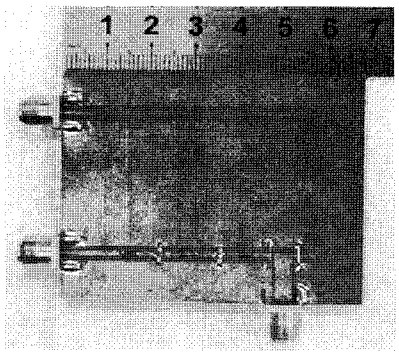
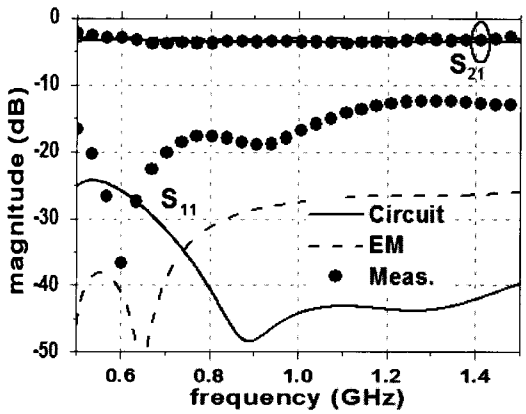


그림 3. 발룬의 제작품
Fig. 3. Fabricated balun.

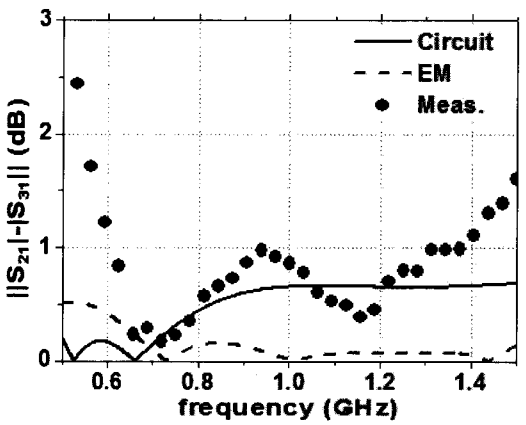
은 C_0=2.4 pF, 2 C_0=4.7 pF, 2 L_0=39 nH이다.

다음 결과들은 제안된 광대역 발룬의 S 파라미터 특성이다. 발룬의 특성상 위상 차이가 180°를 유지할 수 있어야 하기 때문에 결과들은 그 범위 내로 제한하였다. 그림 4는 S 파라미터의 크기에 대해서 표현하였다. 그림 4의 (a)는 S_{11}과 S_{21}의 크기이다. S_{11}의 경우 회로 시뮬레이션 결과와 약간의 차이를 보이는데, 이는 측정하는 과정에서 100 Ω인 포트 2, 3과 50 Ω으로 만들어진 측정 장비의 양 끝단에서의 부정합 때문이다. 그림 4의 (b)는 S_{21} 크기와 S_{31} 크기의 차이인데, 0.62~1.38 GHz의 넓은 대역에서 1 dB 미만의 허용치를 갖는다.

그림 5에서 확인할 수 있듯이 S_{21}과 S_{31}의 위상 기울기가 설계주파수 부근에서 거의 유사한 형태를 보이고 있다. 이는 광대역 특성을 가질 수 있음을 의미한다.



(a) S_{11}과 S_{21}
(a) S_{11} and S_{21}



(b) $||S_{21}|-|S_{31}||$
(b) $||S_{21}|-|S_{31}||$

그림 4. 광대역 발룬의 S 파라미터의 크기
Fig. 4. Magnitudes of the wideband balun.

그림 6에서 보듯이 180°±10°의 위상차를 나타내는 구간이 0.77~1.5 GHz로 넓게 나타나고 있다. 그림 4와 그림 6의 결과를 보면 측정 결과가 시뮬레이션 결과와 상이함을 확인할 수 있는데, 이는 출력 포트의 양 끝단에서 발생하는 부정합 때문이다. 본 결과를 간단히 정리해 보면 측정된 결과를 놓고 봤을 때 비대폭이 약 80 %에 달한다. 이는 기존의 RH 전송선만을 이용하여 만들어진 발룬에 비해서 약 8배 정도 넓은 광대역 특성을 보인다. 또한, 기존 발룬의 크기에 약 55 %의 크기로 MTM 전송선을 이용한 소형화도 가능하였다. 제시된 광대역 발룬(비대폭: 80 %)은 설계된 capacitor가 장하된 루프 안테나(5.5 %) 뿐만 아니라 현재 또는 향후의 광대역 안테나에도

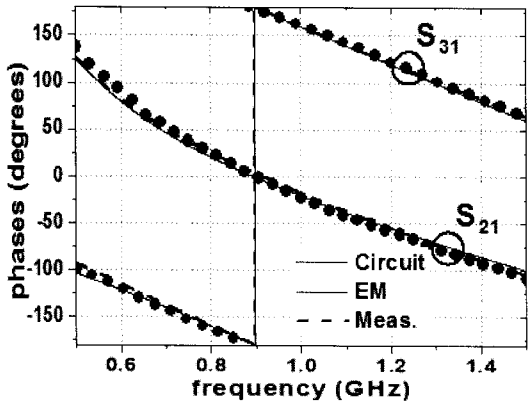


그림 5. 발룬의 S_{21}과 S_{31}의 위상
Fig. 5. Phases of S_{21} and S_{31} of the balun.

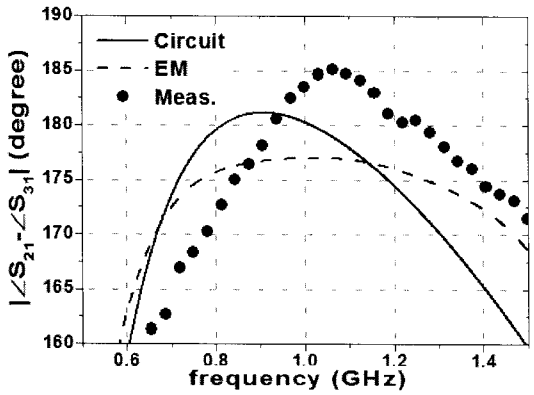


그림 6. S_{21}과 S_{31}의 위상차
Fig. 6. Difference between phases of S_{21} and S_{31}.

사용될 수 있을 것이다. 현재 Pulse Engineering, Inc의 상용 발룬들을 보면 5.3 mm×4.3 mm×3 mm의 크기를 가지지만 최대 2.3 MHz~2.7 GHz로 제안된 발룬보다 광대역 특성을 보이는 것들이 많이 있다. 하지만 본 논문에서는 RH 전송 선로만 이용하였을 때보다 RLH 전송 선로를 이용하였을 때 발생하는 위상기울기 조절 능력 및 이를 이용하여 광대역 특성을 만들 수 있음을 확인하고자 하였다.

Ⅲ. 칩 커패시터가 장하된 루프 안테나

그림 7은 제안된 루프 안테나의 도식이다.

$$L=\mu_0 r\left(\ln\frac{4\times 2\pi r}{d}-2.45\right)[\mathrm{H}] \tag{7}$$

$$C_0=\frac{N}{w^2 L}[\mathrm{F}] \tag{8}$$

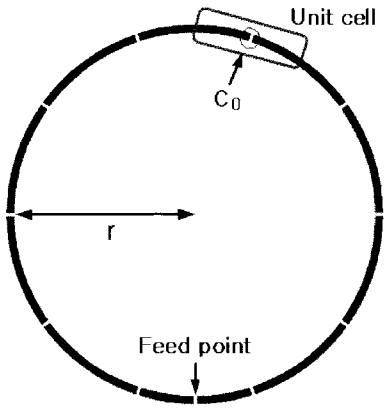


그림 7. 제안된 루프 안테나의 도식
Fig. 7. Schematic of the proposed loop antenna.

표 1. 설계 주파수에서 서로 다른 r에 따른 공진을 위한 파라미터 값
Table 1. Parameter values for resonance at design frequency for different r's.

r(cm)	$L(\mu H)$	N	C_0(pF)	
			Theory	EM
2	7.7	4	1.6	1.25
3	13.1	6	1.4	1.1
4	18.9	8	1.3	1
5	25	10	1.2	0.95

식 (7)은 루프 전체 길이에 대한 인덕턴스 값[1]이고, 식 (8)은 단일 셀을 기준으로 했을 때의 C_0값이다. 이때 C_0는 직렬 공진을 이루도록 구해진다. 하지만 루프는 도체 선로가 하나이므로 일반적인 전송선과 특성이 다르다. 이에 일반 전송 선로와 유사하다고 가정하고 직렬 공진을 이용하였다. 공진시의 특성과 입력 임피던스를 확인하기 위하여 추가적인 시뮬레이션을 하였는데, 이 때 루프 안테나의 크기는 $r\times r$(cm^2)이고 상대유전율이 1이다. 선로의 두께 d=2 mm이고, N개의 단일 셀을 가지는 루프로써 $N=2r$개로 r의 단위는 cm이다. 셀의 개수는 셀의 전기적 길이가 약 $\lambda/12$가 되도록 맞춰주었다. r에 따른 특성을 확인하기 위해서 r을 2~5 cm까지 바꾸어 가면서 시뮬레이션하였다. 전체 루프의 길이가 한 파장을 넘기게 되면 공진이 이루어지지 않기 때문에 r=5 cm 이상에서는 시뮬레이션하지 않았다. 표 1은 설계 주파수에서 공진을 이루기 위한 r

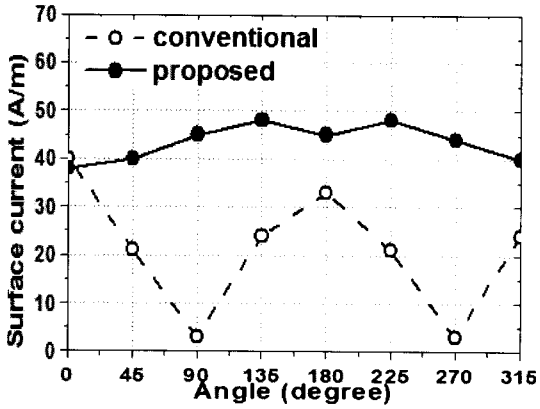


그림 8. 제안된 루프 안테나와 기존 안테나의 전류 분포 비교

Fig. 8. Current distribution compared the proposed antenna with conventional loop.

에 따른 파라미터들의 값을 나타낸다. 표 1에서 C_0의 값이 계산 값과 EM 상에서의 값이 다름을 볼 수 있는데, 이는 칩 커패시터를 부착하기 위해서 만들어지는 틈에서 발생하는 커패시턴스가 작용하기 때문이다.

그림 8은 루프 상에 존재하는 전류의 크기 분포를 나타낸 것이다. 전력이 공급 되는 지점부터 45°씩 회전하면서 EM-시뮬레이션 하였다.

제안된 루프 안테나를 따라 흐르는 전류는 동일한 방향과 서로 유사한 크기를 나타내고 있다. 이러한 원인으로 루프 안테나 내부에서는 강한 자기장이 형성이 된다. 이 그림은 전류의 크기로 표시되어 있다. 하지만 실제적으로 기존의 루프 안테나에서는 90°~270°까지는 음의 값을 갖는다. 즉, 반대 방향의 전류 분포를 갖게 되기 때문에 루프 내부에서는 자기장이 상쇄되는 효과를 얻게 된다.

그림 9에서는 안테나와 광대역 발룬을 연결하여 하나의 구조를 만들었다. 최종 구조를 설계하는데 사용된 안테나는 앞선 시뮬레이션의 결과를 바탕으로 하여 r=5 cm로 하였고 더욱 균일한 전류 분포를 얻기 위해 16셀로 한 루프를 구성하였다. 두 구조를 연결시키기 위해서 204 Ω의 CPS 선로를 사용하였고, 전력 전달이 잘 되게 하기 위해 발룬에서 CPS 선로로 연결되는 부분의 접지 크기를 줄여 최적화하였다.

그림 10는 그림 9의 제작된 안테나의 S_{11}이다.

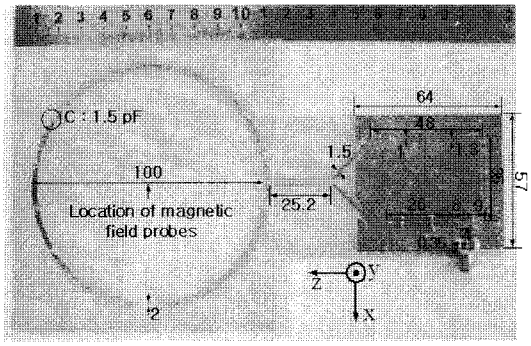


그림 9. 광대역 발룬과 루프 안테나의 제작품

Fig. 9. Fabrication of loop antenna with wideband balun.

시뮬레이션 결과와 측정 결과가 잘 맞음을 확인할 수 있다. 그림 11의 결과는 그림 9에 표시한 자계 프루브의 위치에서부터 y 방향으로 수직 거리 h에 따른 제안된 루프 안테나와 기존 안테나와의 자기장 세기 비교이다. 비교의 조건은 입력 전력이 1 W이고 동일한 balun을 적용하였다. 하지만 루프 안테나 중심에서의 자기장 세기에 있어서 전체적으로 20 dB 정도의 차이를 보인다.

이 안테나는 근거리장용 RFID 리더 안테나로 사용되기 위해 고안되었는데, 실제 측정에서 동작 거리가 약 45 cm로(측정 장비: Alien사의 ALR-9800, Tag : Alien 2006 180074-001)) 기존에 버스 승차카드 등 에 사용되었던 근거리장 안테나들이 거의 맞닿아야만 동작했던 것들에 비해 월등한 성능을 보였다. 참고문헌 [3]에서 제시된 근거리장용 RFID 리더 안테나와 측정에 사용된 장비가 다르지만 단순히 결과를

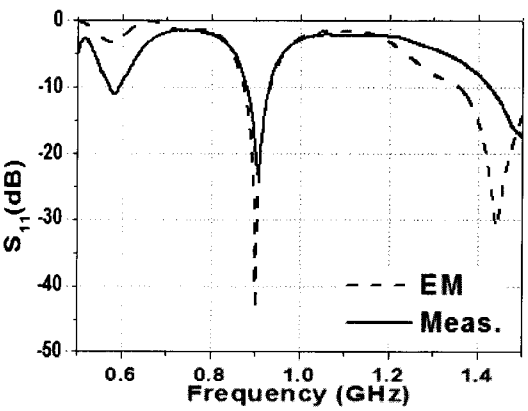


그림 10. 발룬을 포함한 안테나의 S_{11} 특성

Fig. 10. S_{11} of the loop antenna with the balun.

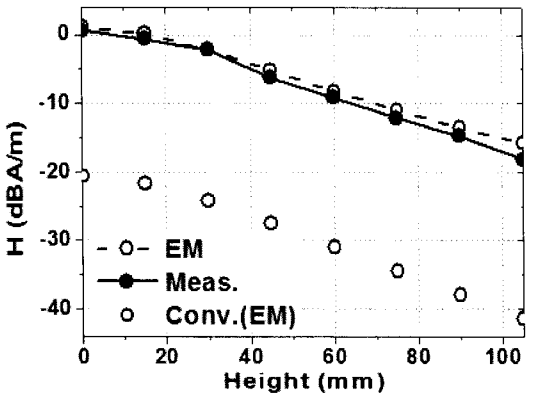


그림 11. 제안된 루프 안테나와 기존의 루프 안테나의 높이 h에서의 자기장 세기 비교

Fig. 11. Magnetic field intensities of proposed loop antenna with compared with conventional one at height h.

비교하면 본 논문에서 제안된 안테나의 동작 거리가 약 35~40 cm 가량 더 길다는 것을 확인할 수 있다.

Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 광대역 발룬을 설계하는데 있어서 closed-form 설계식을 유도하여 적용하였다. 이 같은 결과는 참고논문 [12]의 결과와 일정부분 유사함을 확인하였다. MTM 전송선을 이용한 광대역 발룬의 대역폭이 기존의 발룬에 비해 8배 가량 넓은 대역폭을 가지고 MTM 전송선을 이용한 발룬의 크기도 약 55 %까지 줄였다. 또한 루프 상에서 아주 균일한 전류 분포를 갖게 하는 루프를 제시하였으며, 이 루프는 강한 자기장을 형성하는데 아주 유리하다. 이 안테나는 기존의 루프 안테나보다 약 20 dB 이상 강한 자기장을 형성할 수 있다.

참 고 문 헌

[1] Pavel V. Nikitin, K. V. S. Rao, and Steve Lazar, "An overview of near field UHF RFID", *IEEE International Conference on RFID*, pp. 167-174, Mar. 2007.

[2] Takashi Minemura, Takashi Amano, and Tasuku Morooka, "A study on loop antenna with uniform current distribution", *Proc. Int. Symp. on AP-S*, pp. 3233-3236, Jun. 2004.

[3] Daniel M. Dobkin, Steven M. Weigand, and Nathan Iye, "Segmented magnetic antennas for near-field UHF RFID", *Microwave Journal*, vol. 50, no. 6, Jun. 2007.

[4] RongLin Li, Nathan A. Bushyager, Joy Laskar, and Manos M. Tentzeris, "Determination of reactance loading for circularly polarized circular loop antennas with a uniform traveling-wave current distribution", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 53, no. 12, pp. 3920-3929, Dec. 2005.

[5] G. V. Eleftheriades, A. K. Iyer, and P. C. Kremer, "Planar negative refractive index media using periodically L-C loaded transmission lines", *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 50, no. 12, pp. 2702-2172, Dec. 2002.

[6] A. Sanada, C. Caloz, and T. Itoh, "Planar distributed structures with negative refractive index", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 52, no. 4, pp. 1252-1263, Apr. 2004.

[7] Marco A. Antoniades, George V. Eleftheriades, "A broadband Wilkinson balun using micorstrip metamaterail line", *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 4, pp. 209-212, 2005.

[8] Shau-Gang Mao, Yu-Zhi Chueh, "Broadband composite right/left-handed coplanar waveguide power splitters with arbitrary phase responses and balun and antenna applications", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 54, no. 1, pp. 243-250, Jan. 2006.

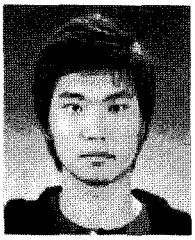
[9] C. -H. Tseng, C. -L. Chang, "Wide-band balun using composite right/left-handed transmission line", *Electron. Lett.*, vol. 43, no. 21, pp. 1154-1155, Oct. 2007.

[10] Changho Choi, Kyesuk Jun, and Bomson Lee, "Investigation of radiation effects for 1-D left-handed transmission lines", *Proc. Int. Symp. on AP-S*, pp. 1-4, Jul. 2008.

[11] Matthew N. O. Sadiku, *Elements of Electromagnetics*, Third Edition, Oxford University Press, p. 340, 2001.

[12] C. Caloz, T. Itoh, *Electromagnetic Metamaterials*, Wiley-Interscience, p. 211, 2005.

정 윤 권



2008년 8월: 경희대학교 전파통신 공학과 (공학사)
2008년 9월~현재: 경희대학교 전자·전파공학과 석사과정
[주 관심분야] 초고주파 수동소자, Metamaterial, RFID, Antenna 등

이 범 선

1982년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)
1991년 8월: 미국 네브레스카 주립대 전자공학과 (공학석사)
1995년 5월: 미국 네브레스카 주립대 전자공학과 (공학박사)
1995년 9월~현재: 경희대학교 전자전파공학과 교수
2008년 1월~현재: 한국전자파학회 마이크로파 및 전파연구회 위원장
[주 관심분야] Microwave Antenna, Metamaterial, RF Identification(RFID) Tags, Microwave Passive Devices 등