

근접 영역용 900MHz RFID 리더기 안테나에 관한 연구

A Study on a Near-Field Reader Antenna for 900 MHz RFID

박 정 근* 이 종 철**
(Joung-Geun Park) (Jong-Chul Lee)

요 약

본 논문에서는 근접 영역에 적용할 수 있는 새로운 900 MHz RFID 리더기 안테나에 대한 연구 결과를 제안한다. 본 논문에서 제안된 안테나는 주기성을 갖는 마이크로 스트립 안테나 구조를 사용하였다. 안테나의 크기는 313 mm x 152 mm x 14 mm 이다. 안테나의 성능은 근접영역에서 균일한 전계 분포를 갖고, 안테나의 이득은 -2 dBi 이고 하트 모양의 빔 패턴을 가진다. 제안된 안테나는 리더기의 송신출력이 17 dBm에서 23 dBm까지의 범위를 보인다. 본 논문에서 제안된 안테나는 금속면 위에 태그가 선적이 될 때 태그의 금속성분으로 인한 반사전력을 최소화하고 외부로 방사되는 전력을 최소화하여 오인식을 최소화하였다.

Abstract

In this paper, we propose a new near-field reader antenna for 900 MHz RFID. The proposed antenna consists the micro-strip antenna with the periodic structure. The overall dimension of the antenna is 313 mm x 152 mm x 14 mm. The antenna has the uniform E-field distribution in near field region and the heart-shaped radiation beam pattern (Peak gain=-2 dBi). The transmitted power range is from 17 dBm to 23 dBm. We focus on minimizing the detected error by suppressing the reflected power from the metal, which is attached to the surface by tag, and by reducing the transmitted power from tag.

Key words : RFID, near-field antenna, Microstrip antenna, Electric-field distribution, Radiation

I. 서 론

RFID (Radio Frequency IDentification) 시스템은 제약산업, 의료산업, 국방산업 및 유통망관리(Supply chain)등 광범위한 응용분야를 갖고 생활 전반에서 큰 영향을 미치고 있다[1]. RFID 시스템이 적용되는 분야는 IT 기반의 무선통신 기술과 응용분야의 기술이 접목된 IT 융합 시스템이다. 따라서

많은 응용분야에서 시스템에 대한 이해 부족과 더불어 하드웨어와 소프트웨어의 기술적인 접근방법이 어렵다. 특히, 기존 바코드 시스템 (Bar code system)과 같이 보여지는 환경에서 보이지 않는 무선 환경으로 변하기 때문에 기술적인 접근이 더욱 더 어렵게 된다. 이제까지의 RFID 시스템에서는 원거리 영역에서 인식거리 위주의 기술을 중심으로 발전하였다. 그러나 최근 들어 근거리 영역

* 주저자 : 광운대학교 전자공학과 박사과정대학교 항공교통관리학과 교수

** 공저자 및 교신저자 : 광운대학교 전자융합공학과 교수

† 논문접수일 : 2012년 4월 6일

† 논문심사일 : 2012년 6월 19일

† 게재확정일 : 2012년 6월 21일

에서의 인식을 위한 RFID 시스템이 각광을 받고 있다. 근거리 영역에서의 RFID 응용분야는 스마트 책장과 스마트 선반이 대표적인 시스템이다 [2-4].

이런 근거리 영역 (near field)에서는 인식하고자 하는 내용물과 외부적인 기구물, 그리고 태그의 성능과 안테나의 성능에 따라 태그의 오인식이 발생하여 인식률 저하가 발생하게 된다. 이런 인식률 저하는 제품이 대량으로 생산되는 현장에서는 막대한 인력손실과 작업의 생산성을 저하시키는 주요 요인이 된다.

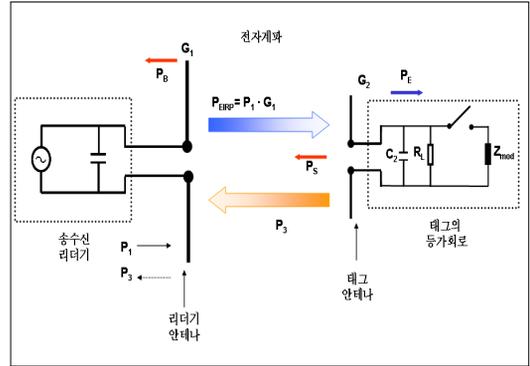
본 논문의 목적은 이런 문제점을 개선할 수 있는 근거리 영역에서 동작하는 리더기 안테나를 연구하는데 있다. 현재까지 근거리 영역에서 동작되는 리더기 안테나는 분리된 링 공진기 원리 (Split Ring Resonator)를 이용한 분리된 마이크로 스트립 루프 안테나 (segment microstrip loop antenna) 기술 [5~11]과 전송파 (traveling wave) 원리를 이용한 격자형 마이크로스트립 라인용 안테나 (folded microstrip line antenna) 기술 [12-14] 등이 있다. 또한 근거리 영역과 원거리 영역에서 동시에 사용되는 다층 마이크로 스트립 안테나 (multi layer microstrip antenna) 기술 [15-17] 등이 있다.

본 논문에서는 반도체 생산라인에서의 적용을 위하여 근접영역에서 선적된 다중태그의 일괄 인식과 외부 기구물 등의 오 인식에 대한 원인을 분석하고 근접영역에서 사용가능한 리더기 안테나를 제안한다.

II. 근접 영역용 RFID 리더기 안테나 설계

1. 근거리 영역의 환경적인 분석

900 MHz RFID 시스템은 전자기 역산란 방식을 사용한다. <그림 1>은 전자기 역산란 방식의 동작 원리를 표현하고 있다. 전자기 역산란 방식에서 태그의 인식은 리더기의 송신전력 (P_1)과 리더기 안테나의 이득 (G_1)과 태그 안테나의 이득 (G_2)과 태그의 수신감도와 상관관계를 갖는다[18, 19].



<그림 1> 전자기 역산란 방식의 동작원리
(Fig. 1) Operation principle of the electromagnetic reverse-scattering method

리더기 안테나에서 송신되는 전력은 태그로 전달되는 전력과 태그 이외의 지역으로 전달되는 전력으로 나누어진다. 태그로 전달이 되는 전력 (P_E)에는 태그의 정보를 포함하고 되돌아오는 전력 (P_3) 성분과 태그 안테나에서 반사되어 되돌아오는 전력 (P_S) 성분이 있다. 여기에서 태그 이외에 전달이 되는 전력과 태그 안테나에서 반사되어 되돌아오는 전력은 태그의 오 인식에 영향을 미친다. 특히, 태그 안테나의 금속성분으로 반사되는 전력은 근거리 영역에서 RFID 시스템의 인식률 저하에 영향을 미친다.

<그림 1>에서와 같이 리더 안테나에 의해 둘러싸인 공간에 방출되는 전자기파는 다양한 물체들을 만나게 된다. 물체에 도달한 전자기파는 반사 (reflection)와 흡수 및 산란 (scattering)등 여러 가지 전파 현상이 일어난다. 물체에 도달한 높은 주파수의 에너지는 물체에 의해 흡수되어 열로 변환되고, 나머지는 변화된 밀도로 여러 방향으로 산란된다. 반사된 전자기파는 일부는 리더 안테나로 되돌아간다. RFID 시스템의 역 산란 변조방식에서 전자기파의 반사는 태그로부터 리더기까지 데이터를 송·수신을 하기 위해 사용된다. 이런 원리는 레이더 기술에서 사용하는 원거리 물체의 거리와 위치를 측정하는 반사현상과 유사하다.

리더 안테나는 태그 방향의 공간으로 송신 전력 (PEIRP) 전자기파를 방출한다. 태그의 위치에 도달

하는 방사 밀도 (S)는 아래의 수식을 사용하여 쉽게 계산될 수 있으며, 태그 안테나는 전력밀도와 안테나 단면적에 비례하여 전력을 반사한다. 반사된 전자기파는 반사점으로부터 공간에 전파된다. 따라서 반사파의 방사전력 (reflected power density)은 방사원으로부터 거리의 제곱(r^2)에 반비례하여 감소한다. 그리고 전력밀도는 결국 리더 안테나로 되돌아온다.

$$S = \frac{P_{EIRP}}{4\pi r^2}, P_s = \sigma \cdot S \quad (1)$$

$$S_{BACK} = \frac{P_s}{4\pi r^2} = S \cdot \frac{\sigma}{4\pi r^2} \quad (2)$$

$$= \frac{P_{EIRP}}{4\pi r^2} \cdot \frac{\sigma}{4\pi r^2} = \frac{P_{EIRP} \cdot \sigma}{(4\pi)^2 \cdot r^4}$$

안테나 단면적은 물체크기, 모양, 재질, 표면 구조 뿐만 아니라 파장과 편파와 같은 파라미터들의 범위에 의존하고 구, 평 판면 그리고 유사한 것들과 같은 단순한 표면에 대해서만 정확히 계산될 수 있으며 재질은 중요한 영향을 갖는다. 위의 수식은 직접적으로 태그에서 전달되고 되돌아오는 신호의 세기를 계산할 수 있지만 태그의 오 인식에 대한 부분은 정확한 계산식이 존재하지 않는다.

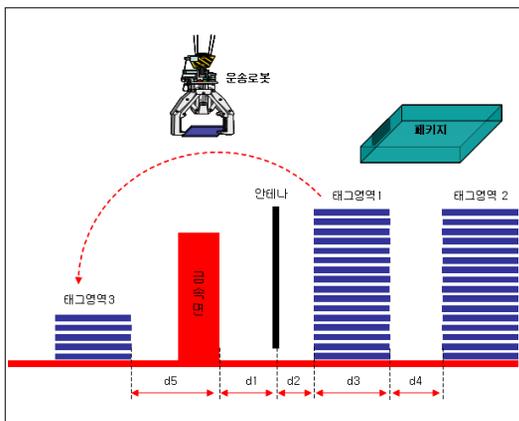
따라서 본 연구에서는 실제 환경 (반도체 생산공정)에서 이런 오 인식을 최소화 할 수 있는 방법을

제안한다. <그림 2>는 근접영역에서 동작하는 900 MHz RFID 시스템의 환경적인 모습과 실제 환경에서 적용 가능한 리더기 안테나의 이상적인 빔의 모양을 나타낸다.

사용된 리더기는 LS 산전용 리더기를 사용하였고, 태그의 크기는 45 mm x 10 mm x 3 mm 이다. 태그는 패키징에 수직방향으로 패키징 가운데에 위치한다. 태그를 포함하는 패키징은 400 mm x 370 mm x 13 mm 이다. 리더기 안테나와 외부 기구물과의 거리 (d1)는 500 mm이고 리더기 안테나와 태그영역 1과의 거리 (d2)는 최대 500 mm이며, 태그는 수직방향으로 30 단이 선적된다.

태그 영역 1과 태그 영역 2와의 거리 (d4)는 500 mm이다. 태그를 포함한 패키지는 금속면의 가로방향으로 놓이고 태그 영역 1을 모두 인식하고 난 이후 태그영역 3으로 이동체 (운송로봇)를 통해 이동하게 된다. 이런 환경에서 처음으로 고려할 사항은 리더기의 송신 전력과 태그의 수신감도 및 안테나의 방사패턴과 관련된 인식거리에 대한 항목이다. 즉 리더기 안테나에서 방사되는 전력은 태그 영역 1만 인식을 하여야 하고, 태그영역 2와 태그영역 3은 인식을 하지 않아야 한다.

다음은 금속면 위에 태그 선적 시, 태그 간에 발생하는 문제점을 분석하였다. 금속면위에 태그가 놓이게 되면 금속면의 금속 성분으로 인하여 태그의 수신감도는 줄어든다. 그 이유는 금속 물체와 태그 안테나 사이의 기생 캐패시턴스 (parasitic capacitance) 성분으로 인해 공진 주파수와 안테나의 임피던스 방사패턴 등의 특성이 변하기 때문이다. 이런 현상은 실제 환경에서도 마찬가지로 금속면과 밀접한 태그와 다른 위치에 있는 태그간의 수신감도는 2~5 dB 차이가 발생하는 것을 확인하였다. 또한 태그 선적 시 태그 안테나의 금속 성분으로 인해 부분적으로 인식이 되지 않는 태그가 발생한다. 그 이유는 태그 안테나의 금속 성분이 여러 개가 모임으로 인해 하나의 큰 금속성분으로 인식되고, 이런 금속면은 태그의 정보를 포함하고 되돌아오는 전력 (P_3)보다 태그 안테나에서 반사되어 되돌아오는 전력 (P_s)을 크게 만든다. 이런 현상으로 인해 태그 오 인식



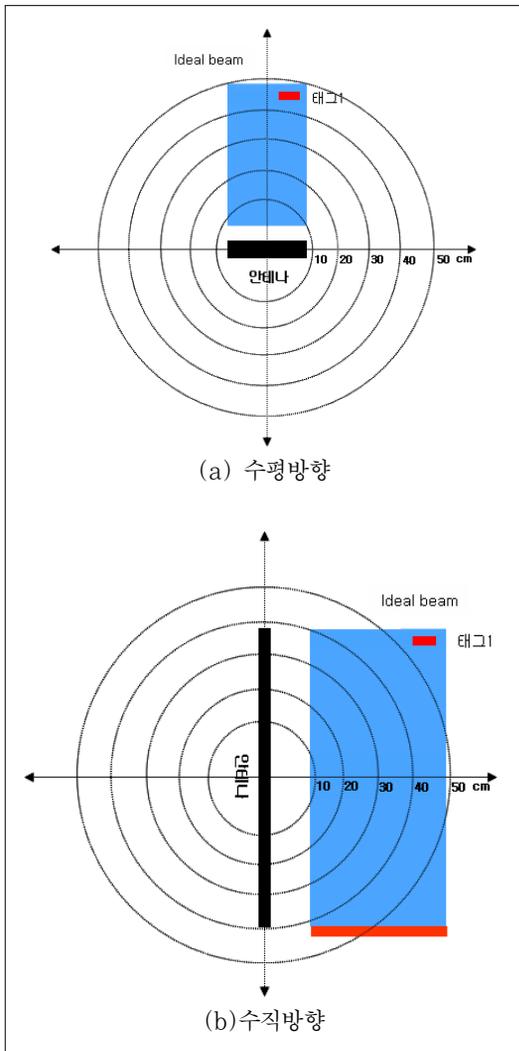
<그림 2> 근접 영역 환경
<Fig. 2> Near field environment

에 영향을 미친다 [20~23]. 이런 실제 환경에서 동작하는 리더기 안테나의 방사패턴은 <그림 3>과 같은 이상적인 빔 모양을 가져야 한다. 따라서 이런 이상적인 빔 모양과 유사한 근접영역의 리더기 안테나의 개발이 요구되어진다.

<그림 3> (a)는 수평방향의 이상적인 빔 모양을 나타내고 <그림 3> (b)는 수직방향의 이상적인 빔 모양을 나타낸다. <그림 3>에서와 같이 태그를 포함하는 패키지가 선적이 될 때 수직방향으로 넓은

인식 범위가 생긴다. 따라서 수평방향의 빔은 단일 안테나의 성능을 갖고, 수직방향의 빔은 배열 안테나 (array antenna)의 성능을 가지면서 안테나의 이득은 유지되어야 최적의 안테나의 성능을 만족시킬 수 있다.

본 논문에서는 범용적으로 사용되는 2종류의 리더기 안테나를 사용하여 환경적인 부분을 확인하였다. <표 1>은 범용적으로 사용되는 두 개의 안테나에 대한 규격과 개발에 필요한 안테나에 대한 규격을 나타내고 있다.



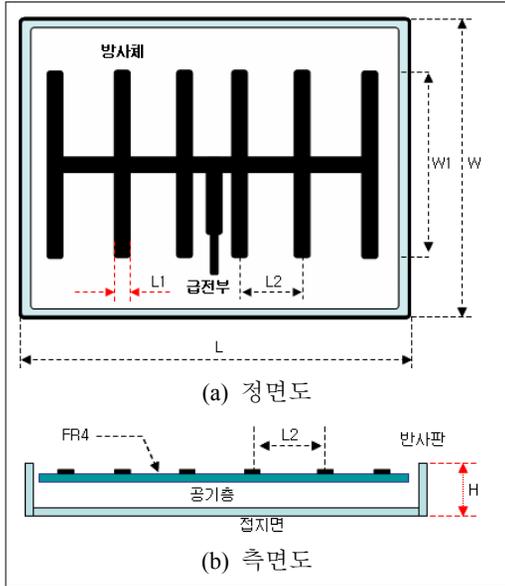
<그림 3> 이상적인 방사패턴
 <Fig. 3> Ideal radiation patterns (a) Horizontal direction and (b) Perpendicular direction

<표 1> 안테나 규격
 <Table 1> Antenna specification

| 항목 | 안테나 규격 | | |
|-----------|------------|-----------|------------|
| | sample 1 | sample 2 | 개발 규격 |
| 주파수 (MHz) | 917~923 | 917~923 | 917~923 |
| 정재파 비 | 1.5 : 1 | 1.5 : 1 | 1.5 : 1 |
| 이득 | 6dBi 이상 | 1dBi 이상 | -2dBi 이상 |
| 방사패턴 | 60도 | 100도 | 160도 |
| 편파 | 원형편파 | 선형편파(수평) | 선형편파(수평) |
| 임피던스 | 50 ohm | 50 ohm | 50 ohm |
| 크기(mm) | 200x230x40 | 88x108x40 | 160x320x20 |
| 인식거리 | 10 M | 3 M | 1M |

2. 근접 영역 마이크로 스트립 안테나 설계

근거리 영역에서 동작하는 리더기 안테나는 균일한 전류분포와 이상적인 방사패턴의 특성을 만족하여야 한다. 이런 특성을 만족하기 위하여 본 논문에서는 주기성을 갖는 안테나 구조를 연구하였다. <그림 4>는 주기성을 갖는 마이크로스트립 안테나 구조이다. 안테나는 방사체와 급전부 접지면, 그리고 반사판으로 구성이 된다. 안테나의 크기 (L x W x H)는 313 mm x 152 mm x 14 mm 이다. 방사체는 유전체 기판 (FR4)위에 구현이 되고, 단일 방사체의 크기 (L1 x W1)는 5 mm x 116 mm 이다. 방사체의 간격 (L2)은 25 mm이다. 급전부의 임피던스는 50 ohm을 사용하고, 임피던스 매칭을 위해 $\lambda/4$ 전력 분배기를 사용하였다. 반사판의 높이 (H)는 18 mm이다.

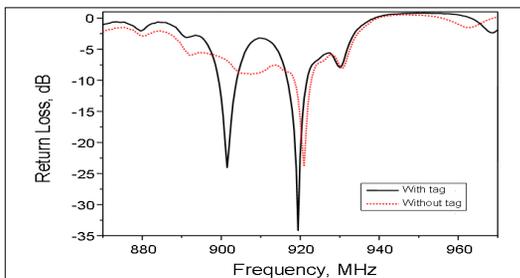


<그림 4> 설계된 주기적 마이크로스트립 안테나 구조
(Fig. 4) Designed periodic antenna structure
(a) Front view and (b) Side view

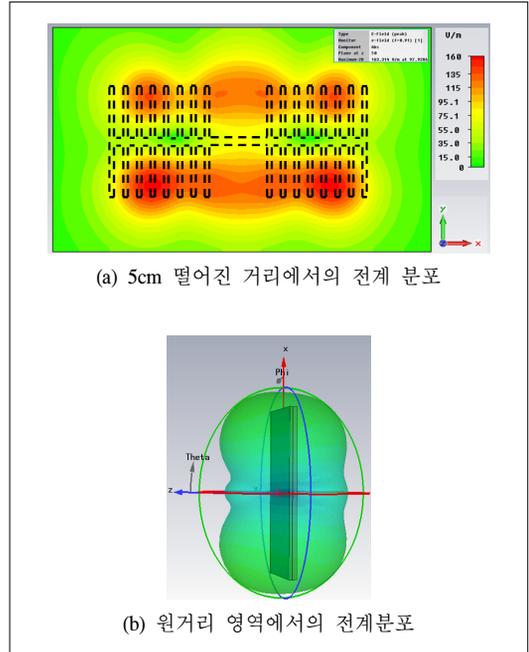
3. 근거리 영역 안테나 설계 및 측정

다음은 주기성을 갖는 안테나의 주파수 특성 및 방사패턴특성, 그리고 인식률과 인식거리에 대한 실험을 진행하였다. 안테나의 구조적인 설계는 EM 시뮬레이터(IE3D)를 사용하여 이루어졌고, 실제 제작을 통해 최적화 작업을 하였다.

<그림 5>는 제작된 안테나에 대한 주파수 특성을 나타내고 있다. 제작된 안테나와 태그를 근접시켰을 때의 주파수 특성을 나타내고 있다.



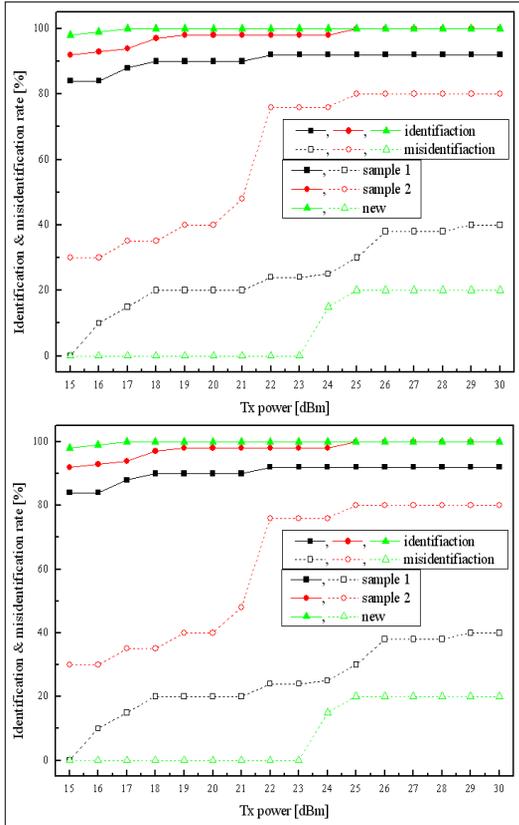
<그림 5> 설계된 안테나의 주파수 특성
(Fig. 5) Frequency response of the designed antenna



<그림 6> 안테나의 근접 영역의 전기 분포 특성
(Fig. 6) Electric-field distribution characteristics of the antenna for near field (a) Electric field distribution for the distance of 5 cm and (b) Electric field distribution for long distance

<그림 5>에서와 같이 주파수는 917~923 MHz이고 대역폭은 6 MHz이고 900MHz RFID 대역폭을 만족하였다. 또한 태그를 근접시켰을 때에도 주파수 특성에 큰 변화가 없음을 확인하였다.<그림 6>은 안테나의 방사패턴 특성이다. <그림 6> (a)에서는 안테나에서 5 cm 떨어진 지점에서의 전기분포를 나타내고 있다. 안테나의 전계는 균일한 전기분포를 나타내고 있음을 알 수 있다. <그림 6> (b)에서는 원거리 지점에서의 방사패턴을 나타내고 있다. 안테나의 방사패턴은 하트모양의 빔을 나타낸다.

<그림 7>은 송신 출력에 대한 선적된 태그의 인식률과 오 인식률(난반사로 인한 인접태그 인식률)을 나타내고 있다. 측정방법은 <그림 2>와 같이 두 개의 선적된 태그를 두고 세 가지의 안테나를 비교 측정 하였다. 세 가지 안테나의 특성은 표 1에서 나타내고 있다.



〈그림 7〉 인식률과 오 인식률
 〈Fig. 7〉 Identification rate and misidentification rate

<그림 7>에서와 같이 sample 1은 송신출력을 높여도 인식률은 100 %가 되지 않고, 오 인식률만 증가됨을 알 수 있다. sample 2는 송신출력이 25 dBm 이상일 때 100 %의 인식률을 확보할 수가 있으나, 오 인식률이 점차적으로 증가함을 알 수 있다. 본 논문에서 제안한 안테나(NEW)는 17 dBm 이상의 송신출력에서 100 %의 인식률이 나오고, 송신출력이 23 dBm 이상에서 오 인식률이 발생한다. 따라서 제안된 새로운 안테나는 송신출력이 17 dBm에서 23 dBm까지 사용이 가능함을 확인하였다.

III. 결 론

본 연구를 통해 근접영역에서 발생하는 900 MHz RFID 시스템의 문제점을 확인하였다. 금속면 위의

태그가 수직 및 수평방향으로 있을 때 태그의 수신 감도가 2~5 dB 낮아짐을 확인하였고, 태그의 선적시 태그의 금속성분(안테나)으로 인한 반사전력이 발생하여 오 인식이 발생함을 확인하였다. 본 논문에서는 이러한 오 인식을 최소화 할 수 있는 안테나를 개발하였다.

본 논문을 통해 설계된 주기성을 갖는 마이크로 스트립 안테나는 근접영역에서 사용 가능함을 확인하였다. 안테나의 크기는 313 mm x 152 mm x 14 mm 이다. 안테나의 성능은 근접영역에서 균일한 전류 분포를 보이고, 원거리 영역에서 하트모양의 빔 모양을 갖는다. 또한 안테나의 이득은 -2 dBi 이고 빔 폭은 160도 이다.

실제 환경에서 본 논문에서 제안된 안테나는 리더기의 송신출력이 17 dBm에서 23 dBm까지 동작 범위를 갖는 것을 확인하였다. 본 논문에서 제안된 안테나는 금속면 위에 태그가 선적될 때 태그의 금속성분으로 인한 반사전력을 최소화 하고, 외부로 방사되는 전력을 최소화하여 태그의 오 인식을 최소화 하였다. 향후 태그의 편차를 최소화 하여 생산 공정에서 오 인식을 0 %로 줄여 생산효율을 향상시키고 인건비의 절감효과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] F. Finkenzeller, *RFID Handbook: Radio -Frequency Identification Fundamentals and Applications*, John Wiley and Sons, 1999.
- [2] C. R. Medeiros, J. R. Costa, and C. A. Fernandes, "RFID reader antennas for tag detection in self-confined volumes at UHF," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 53, no. 2, pp.39-50, April 2011.
- [3] C. Cho, J. Ryoo, I. Park, and H. Choo, "Design of a novel ultra-high frequency radio-frequency identification reader antenna for near-field communications using oppositely directed currents," *Microw. Antennas Propag.*,

- vol. 4, no. 10, pp.1543-1548, Oct. 2010.
- [4] W. Choi, J. S. Kim, J. H. Bae, G. Choi, J. S. Chae, "Near-field antenna for a radio frequency identification shelf in the UHF band," *Microw. Antennas Propag.*, vol. 4, no. 10, pp.1538-1542, Oct. 2010.
- [5] X. Qing, C. K. Goh, and Z. N. Chen, "UHF near-field RFID reader antenna," *Proc. Asia-Pacific Microw. Conf.*, pp.2383-2386, Dec. 2009.
- [6] Y. S. Ong, X. Qing, C. K. Goh, and Z. H. Chen, "A segmented loop antenna for UHF near-field RFID," *Proc. IEEE AP-S Int. Symp.*, pp.1-4, July 2010.
- [7] X. Qing, Z. N. Chen, and C. K. Goh, "UHF near-field RFID reader antenna with capacitive couplers," *Electron. Lett.*, vol. 46, no. 24, pp.1591-1592, Dec. 2010.
- [8] X. Qing, C. K. Goh, and Z. N. Chen, "Segmented loop antenna for UHF near-field RFID applications," *Electron. Lett.*, vol. 45, no. 17, pp.872-873, Aug. 2009.
- [9] X. Li and Z. Yang, "Dual-printed-dipoles reader antenna for UHF near field RFID applications," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 10, pp.239-242, 2011.
- [10] X. Li, J. Liao, Y. Yuan, and D. Yu, "Segmented coupling eye-shape UHF band near field antenna design," *Proc. Asia-Pacific Microw. Conf.*, pp.2401-2404, Dec. 2009.
- [11] Z. N. Chen, C. K. Goh, and X. Qing, "Loop antenna for UHF near-field RFID reader," *Proc. European Conf. of Antennas and Propag.*, pp.1-4, April 2010.
- [12] J. Hong, J. Choo, J. Ryoo, and C. Choi, "A shelf antenna using near field without dead zones in UHF RFID," *Proc. IEEE Int. Conf. Industrial Technol.*, pp.1-4, Feb. 2009.
- [13] C. Cho, C. Lee, J. Ryoo, and H. Choo, "Planar near-field RFID reader antenna for item-Level Tagging," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 10, pp.1100-1103, 2011.
- [14] D. H. Park, E. C. Lim, K. Wei, H. M. Park, S. B. Min, J. W. Yu, and M. Q. Lee, "UHF-band RFID reader front-end architecture using ring-hybrid for near-field applications," *Proc. European Microwave Conf.*, pp.980-983, Oct. 2011.
- [15] 이주용, 한원근, 박익모, 추호성, "근거리시장 및 원거리용 하이브리드 RFID 리더 안테나," *한국전자과학회지*, 제20권 제2호, pp.174-181, 2009. 2.
- [16] B. Shrestha, A. Elsherbeni, and L. Ukkonen, "UHF RFID reader antenna for near-field and far-field operations," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 10, pp.1274-1277, 2011.
- [17] J. W. Cao, Z. M. Xie, and X. Z. Lai, "A Compact Near Field UHF RFID Reader Antenna Using SRR," *Proc. Int. Conf. Machine Learning and Cybernetics*, pp.330-332, July 2011.
- [18] C. A. Balanis, *Antenna Theory Analysis and Design*, John Wiley & Sons, 2005.
- [19] M. I. Skolnik, *Radar Systems*, Chapter 2, McGraw-Hill, New York, 1962.
- [20] L. Ukkonen, D. Engels, L. Sydanheimo, and M. Kivikoski, "Planar wire-type inverted F RFID tag antenna mountable on metallic objects," *IEEE Antennas and Propag. Soc. Int. Symp.*, vol. 1, pp.101-104, June 2004.
- [21] P. Raunonen, L. Sydanheimo, L. Ukkonen, M. Keskilammj, and M. Kivikoski, "Folded dipole antenna near metal plate," *IEEE Int. Antennas and Propagation Symp.*, pp.848-851, June 2003.
- [22] H. W. Son, G. Y. Choi, and C. S. Pyo, "Design of wideband RFID tag antenna for metallic surfaces," *Electron. Lett.*, vol. 42,

pp.263-265, March 2006.
[23] L. Ukkonen, L. Sydanheimo, and M. Kivikoski, "Effects of metallic plate size on the performance of microstrip patch-type tag

antennas for passive RFID," *IEEE Antennas and Wireless Propag. Lett.*, vol. 4, pp.410-413, 2005.

저자소개



박 정 근 (Park, Jeoung-Guen)

2006년 3월 ~ 현 재 : 광운대학교 전자공학과(박사과정)
2005년 12월 ~ 현 재 : LS산전(주) 시스템 설계 Project Manager
2004년 8월 : 광운대학교 전자공학과(공학석사)
1992년 2월 : 인천대학교 전자공학과(공학사)



이 종 철 (Lee, Jong-Chul)

1996년 3월 ~ 현 재 : 광운대학교 전자융합공학과 전임강사/조교수/부교수/교수
1994년 4월 ~ 1996년 2월 : 현대전자 광소자 개발실 선임연구원
1994년 5월 : Texas A&M Univ, EE Dept(공학박사)
1989년 12월 : Arizona State Univ, EE Dept(공학석사)
1985년 2월 : 한양대학교 전자공학과(공학석사)
1983년 2월 : 한양대학교 전자공학과(공학사)