

인터디지털-커패시터-모양 슬롯 공진기를 이용한 Chipless RFID 태그의 소형화

Miniaturization of Chipless RFID Tag Using Interdigital-Capacitor-Shaped Slot Resonator

여준호^{1*} · 이종익²

¹대구대학교 AI학과

²동서대학교 전기전자공학과

Junho Yeo^{1*} · Jong-Ig Lee²

¹Department of Artificial Intelligence, Daegu University, Gyeongsangbuk-do, 38453, Korea

²Department of Electrical and Electronics Engineering, Dongseo University, Busan, 47011, Korea

[요약]

본 논문에서는 인터디지털-커패시터-모양 슬롯을 이용한 chipless RFID(radio frequency identification) 태그의 소형화에 대하여 연구하였다. 제안된 인터디지털-커패시터-모양 슬롯은 두께 0.8 mm의 20 mm×50 mm 크기의 FR4 기판의 한쪽에 있는 직사각형 도체 평판에 추가하였다. 기존의 H-모양 슬롯과 변형된 구부러진 H-모양 슬롯을 각각 추가하였을 때와 bistatic 레이더 단면적(RCS; radar cross section)의 공진 딥(dip) 주파수를 비교하였다. H-모양 슬롯과 변형된 구부러진 H-모양 슬롯을 추가하였을 때 시뮬레이션 공진 딥 주파수는 각각 5.907 GHz와 3.741 GHz이었다. 제안된 인터디지털-커패시터-모양 슬롯을 추가하였을 때 공진 딥 주파수는 2.889 GHz로 감소하였고 H-모양 슬롯을 추가하였을 때와 비교하여 슬롯 길이를 51.1% 소형화할 수 있다. 실험 결과, 제작된 인터디지털-커패시터-모양 슬롯이 추가된 chipless RFID 태그의 공진 딥 주파수는 3.07 GHz로 나타났다.

[Abstract]

In this paper, the miniaturization of a chipless RFID tag using an interdigital-capacitor-shaped slot was studied. The proposed interdigital-capacitor-shaped slot was appended on the rectangular conductor plate printed on one side of a 20 mm × 50 mm FR4 substrate with a thickness of 0.8 mm. The resonant dip frequency of the bistatic RCS for the proposed interdigital-capacitor-shaped slot was compared with the cases when the H-shaped and modified bent H-shaped slots were added, respectively, on the conductor plate. The simulated resonant dip frequencies for H-shaped and modified bent H-shaped slots were 5.907 GHz and 3.741 GHz, respectively. When the proposed interdigital-capacitor-shaped slot was added, the resonant dip frequency was decreased to 2.889 GHz, and, therefore, the slot length was reduced by 51.1% compared to the H-shaped slot case. Experiment results show that the resonant dip frequency of the fabricated interdigital-capacitor-shaped slot was 3.07 GHz.

Key word : Chipless RFID tag, Interdigital-capacitor-shaped slot, Miniaturization, Radar cross section, Resonant dip frequency.

<http://dx.doi.org/10.12673/jant.2024.28.4.538>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 19 July 2024; Revised 23 August 2024

Accepted (Publication) 26 August 2024 (30 August 2024)

*Corresponding Author; Junho Yeo

Tel : +82-53-850-6642

E-mail : jyeo@daegu.ac.kr

1. 서론

사물인터넷의 초기 기술로서 사물이나 제품에 부착되는 태그를 이용하여 제품에 대한 추적과 이력 관리를 통해 실시간 가시성을 확보할 수 있는 차세대 자동인식 기술로 개발된 RFID(radio frequency identification) 기술은 저주파수 대역의 자기장이나 고주파수 대역의 전자파를 이용하여 제품 공급망의 추적 및 재고 관리, 보안 및 출입 통제 시스템, 교통카드, 고속도로 하이패스, 음식물 쓰레기 관리, 폐기물 관리, 전자여권, 의약품 관리, 환자 투약 관리 등의 실생활에서 널리 사용되고 있다[1].

Chipless RFID 태그는 반도체 공정을 이용한 칩(chip)을 사용하지 않는 방법을 적용하여 태그의 가격을 저가화하기 위해 연구되었다[2]. Chipless RFID 태그의 여러 방식 중에서 활발히 연구되고 있는 마이크로파 공진기(microwave resonator) 방식은 전자파 신호를 사용하는 영역에 따라 시간 영역, 주파수 영역, 혼합 방식으로 나눌 수 있다[3]. 이 중에서 리더로부터 질문 신호가 포함하는 특정 주파수 대역에서 서로 다른 미리 정의된 주파수로 조정된 공진기를 이용하는 주파수 영역 방식이 많이 연구되고 있으며, 주파수 영역 방식에는 송수신 안테나를 사용하는 재전송(retransmission) 방식과 공진기만 사용하는 후방 산란(back scattering) 방식이 있다. 공진기의 레이더 단면적(RCS; radar cross section)의 주파수 응답에서 공진 피크(peak)나 딥(dip)과 같은 특이점을 이용하여 태그 크기가 상대적으로 작은 후방 산란 방식이 많이 사용되며, 공진기를 만드는 방법에 따라 유전체 기판 위에 폭이 얇은 도체를 이용하여 공진기를 만드는 도체(conductor) 공진기 방식과 유전체 기판 위의 폭과 길이가 큰 도체 평판 위에 폭이 얇은 슬롯을 추가하여 공진기를 만드는 슬롯(slot) 공진기 방식으로 나눌 수 있다[4].

도체 공진기 방식은 도체의 모양에 따라 직선 도체, C-모양 도체, S-모양 도체, 프랙탈(fractal)-모양 도체, 스파이럴(spiral)-모양 도체, 커패시터 기호(capacitor symbol)-모양 도체, 인터디지털-커패시터(interdigital-capacitor)-모양 도체 등을 사용하였다[5].

슬롯 공진기 방식도 직선 슬롯, U-모양 슬롯, 원형 링 슬롯, 타원형 링 슬롯, 나비 모양 링 슬롯, 뒤집힌 M-모양 슬롯, 육각형 링 슬롯, 팔각형 링 슬롯 등의 다양한 모양의 슬롯을 사용하였다. 길이가 다른 직선 슬롯을 수직과 수평 방향으로 대칭되게 배치하여 수평 편파와 수직 편파에 대해 모두 동작하는 18 비트 태그를 6~13 GHz 대역에서 설계하였다[6]. 공진 주파수 간격을 줄이기 위해 U-모양 슬롯 4개가 추가된 직사각형 도체 평판을 수직 수평 방향으로 2개씩 배치하여 공진 주파수를 조정한 8비트 이중 편파 태그를 6~13 GHz 대역에서 제안하였다[7]. 8개의 반지름이 다른 원형 슬롯을 원형 도체 평판에 추가하여 편파 방향에 독립적인 8비트 태그를 6~13 GHz 대역에서 설계하였다[8]. 수평 방향이 장축인 타원형 링 슬롯을 이용하

여 3~16 GHz 대역에서 동작하는 소형 10 비트 태그를 제안하였고 기존의 정사각형 링, 삼각형 링, 원형 링 슬롯을 사용한 태그들과 성능을 비교하였다[9]. 45도 기울어진 두 개의 타원을 결합하여 만든 나비-모양 링 슬롯을 이용한 소형 10 비트 태그를 5~10 GHz 대역에서 설계하였다[10]. 뒤집힌 M-모양 슬롯이 추가된 직사각형 도체를 3×3 배열 구조로 배치하여 RCS를 증가시키고 3~8 GHz 대역에서 동작하는 20 비트 태그를 제안하였다[11]. 육각형 링 슬롯을 이용하여 2~13 GHz 대역에서 동작하는 18 비트 태그를 설계하였고[12], 팔각형 링 슬롯을 이용하여 9 비트 태그를 4~14 GHz 대역에서 제안하였다[13].

본 논문에서는 인터디지털-커패시터-모양 슬롯을 이용한 chipless RFID 태그의 소형화 설계 방법을 제안하였다. 인터디지털-커패시터-모양 슬롯을 두께 0.8 mm의 20 mm×50 mm 크기의 FR4 기판의 한쪽에 있는 직사각형 도체 평판 위에 추가할 때 bistatic RCS의 공진 딥 주파수를 기존의 H-모양 슬롯과 변형된 구부러진 H-모양 슬롯을 각각 추가하였을 때와 비교하였다. 상용 전자파 해석 소프트웨어인 CST사의 Studio Suite를 이용하여 제안된 인터디지털-커패시터-모양 슬롯을 이용한 소형 chipless RFID 태그를 시뮬레이션하여 RCS 특성 분석하였다. 제안된 인터디지털-커패시터-모양 슬롯을 이용한 소형 chipless RFID 태그는 FR4 기판에 제작하여 bistatic RCS 특성을 측정하여 시뮬레이션 결과와 비교하였다.

II. 인터디지털-커패시터-모양 슬롯을 이용한 소형 chipless RFID 태그 구조 및 설계

제안한 인터디지털-커패시터-모양 슬롯을 이용한 chipless RFID 태그의 구조가 그림 1에 나타나 있다.

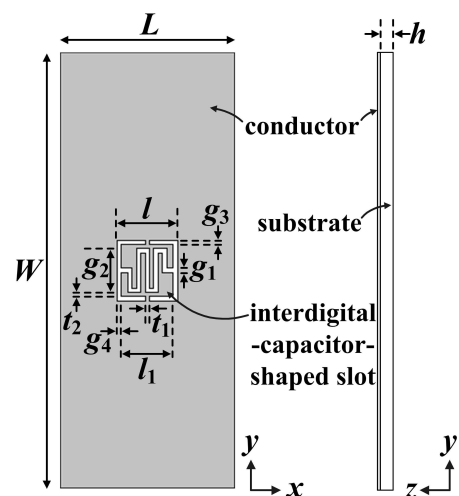


그림 1. 인터디지털-커패시터-모양 슬롯을 이용한 chipless RFID 태그 구조

Fig. 1. Geometry of chipless RFID tag using interdigital-capacitor-shaped slot.

표 1. 제안된 chipless RFID 태그의 최종 설계 변수
Table 1. Final design parameters of the proposed chipless RFID tag.

Parameter	Value(mm)	Parameter	Value(mm)
L	20	g_2	5
W	50	g_3	0.5
l	7	g_4	0.5
h_1	6	t_1	0.5
g_1	0.5	t_2	0.5

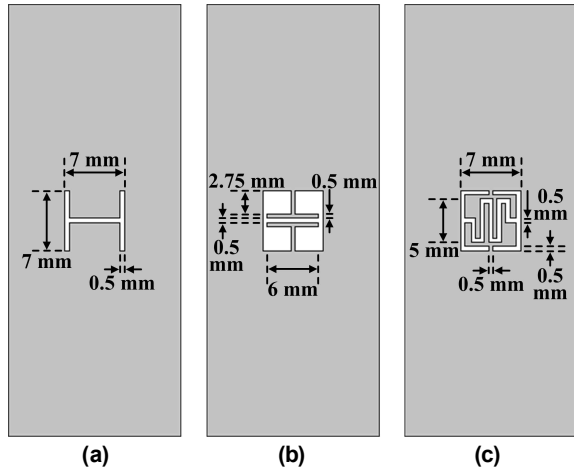


그림 2. 설계 과정에서 비교한 태그 구조: (a) H-모양 슬롯이 추가된 태그, (b) 변형된 구부러진 H-모양 슬롯이 추가된 태그, (c) 인터디지털-커패시터-모양 슬롯이 추가된 태그
Fig. 2. Tag geometries compared in design procedure: (a) tag added with H-shaped slot, (b) tag added with modified bent H-shaped slot, and (c) tag added with interdigital-capacitor-shaped slot.

인터디지털-커패시터-모양 슬롯은 기판 윗면의 직사각형 도체 평판의 중심에 에칭되어 있다. 비유전율 4.4, 손실탄젠트 0.025이고 두께가 $h = 1.6$ mm인 FR4 기판을 사용하여 chipless RFID 태그를 설계하였다. 최종 설계된 인터디지털-커패시터-모양 슬롯을 이용한 chipless RFID 태그의 설계 변수가 표 1에 나타나 있다.

제안된 인터디지털-커패시터-모양 슬롯을 이용한 소형 chipless RFID 태그의 설계 과정에서 특성 비교를 위해 사용된 구조들이 그림 2에 나타나 있다. 그림 2(a)는 기준이 되는 H-모양 슬롯이 추가된 태그 구조이고, 그림 2(b)는 변형된 구부러진 H-모양 슬롯이 추가된 태그 소형 구조이다. 그림 2(c)는 제안된 인터디지털-커패시터-모양 슬롯이 추가된 태그 구조이다. 추가된 슬롯들의 수평 및 수직 방향 전체길이는 7 mm로 동일하고, 슬롯의 폭도 변형된 구부러진 H-모양 슬롯의 변형된 부분을 제외하고 모두 0.5 mm로 동일하게 설계하였다.

그림 3은 그림 2의 3가지 태그 구조의 bistatic RCS 특성 시뮬레이션 결과를 비교하였다. Bistatic RCS 송신측 입사 각도는 z축을 기준으로 zx -평면에서의 각도로서 실험에서 사용된 30°를 적용하였고 수신 각도도 동일하며, RCS의 단위는 dBsm (decibel per square meter)이다[5]. 그림 2(a)와 같이 H-모양 슬롯

을 추가한 경우, 공진 dips 주파수는 5.907 GHz이고 RCS 값은 -27.49 dBsm이다. 일반적인 수평 방향 직선 슬롯을 추가할 때와 비교할 때 슬롯의 길이를 줄일 수 있다. 그림 2(b)와 같이 변형된 구부러진 H-모양 슬롯을 추가할 경우, 공진 dips 주파수는 3.741 GHz로 H-모양 슬롯을 추가한 경우와 비교할 때 2.166 GHz 만큼 낮은 주파수로 이동하고 RCS 값이 -26.31 dBsm이다. 따라서 H-모양 슬롯을 추가한 경우와 비교할 때 슬롯 길이를 약 36.7 % 줄여 소형화할 수 있다. 그림 2(c)와 같이 제안된 인터디지털-커패시터-모양 슬롯을 추가할 경우, 공진 dips 주파수는 2.889 GHz로 H-모양 슬롯을 추가한 경우와 비교할 때 3.019 GHz 만큼 낮은 주파수로 이동하고 RCS 값이 -25.07 dBsm이다. 따라서 H-모양 슬롯을 추가한 경우와 비교할 때 슬롯 길이를 약 51.1 % 줄여 소형화할 수 있다. 또한, 변형된 구부러진 H-모양 슬롯을 추가한 경우와 비교하면 슬롯 길이를 22.8% 줄여 소형화할 수 있다.

그림 4는 인터디지털-커패시터-모양 슬롯이 추가된 chipless RFID 태그의 g_3 의 변화에 따른 공진 dips 주파수와 RCS 값의 영향이 나타나 있다.

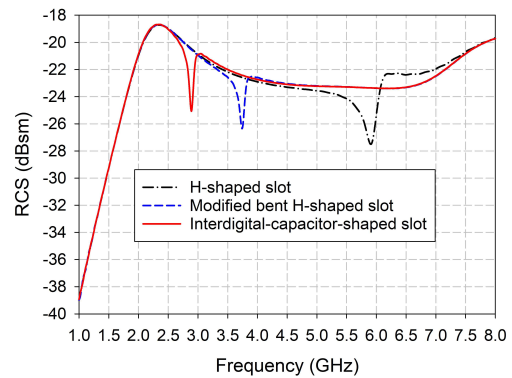


그림 3. 그림 2의 태그 구조들에 대한 bistatic RCS 특성 시뮬레이션 결과 비교
Fig. 3. Comparison of simulated bistatic RCS characteristics for the geometries in Fig. 2.

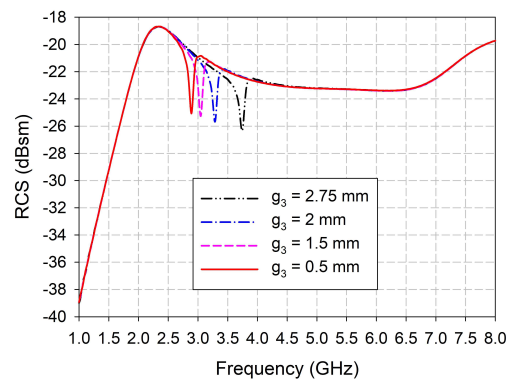


그림 4. g_3 변화에 대한 인터디지털-커패시터-모양 슬롯이 추가된 태그의 bistatic RCS 특성 결과 비교
Fig. 4. Comparison of bistatic RCS characteristics for the chipless RFID tag using interdigital-capacitor-shaped slot for varying g_3 .

g_3 는 인터디지털-커패시터의 손가락(finger) 길이를 결정하는 중요한 설계 변수로서 2.75 mm, 2 mm, 1.5 mm, 0.5 mm에 대한 태그의 bistatic RCS 특성을 비교하였다. g_3 가 2.75 mm일 때는 그림 2(b)의 변형된 구부러진 H-모양을 추가한 경우와 동일하며 인터디지털-커패시터의 손가락 길이가 0이다. 이때 공진 딥 주파수는 3.741 GHz이고 RCS 값이 -26.31 dBsm이다. g_3 가 2 mm로 감소하면 g_2 가 2 mm로 증가하여 손가락 길이가 1.5 mm가 된다. 공진 딥 주파수는 3.285 GHz로 변형된 구부러진 H-모양을 추가한 경우와 비교할 때 0.456 GHz 만큼 낮은 주파수로 이동하고 RCS 값이 -25.68 dBsm이다. g_3 가 1.5 mm로 감소하면 g_2 가 2.5 mm로 증가하여 손가락 길이가 2 mm가 된다. 공진 딥 주파수는 3.045 GHz로 변형된 구부러진 H-모양을 추가한 경우와 비교할 때 0.696 GHz 만큼 낮은 주파수로 이동하고 RCS 값이 -25.26 dBsm이다. g_3 가 0.5 mm로 감소하면 g_2 가 5

mm로 증가하여 손가락 길이가 4.5 mm가 된다. 공진 딥 주파수는 2.889 GHz로 변형된 구부러진 H-모양을 추가한 경우와 비교할 때 0.853 GHz 만큼 낮은 주파수로 이동하고 RCS 값이 -25.07 dBsm이다. 따라서 g_3 가 감소하여 인터디지털-커패시터의 손가락 길이가 증가할수록 공진 딥 주파수는 낮은 주파수로 이동하고 RCS 값은 조금씩 증가함을 알 수 있다.

그림 5는 그림 2의 3가지 태그의 각 공진 딥 주파수에서의 전계 분포가 나타나 있다. H-모양 슬롯을 추가한 경우, 슬롯의 중심과 H-모양의 꺾인 부분의 일부분에서 전계가 집중되는 것을 알 수 있다. 변형된 구부러진 H-모양 슬롯을 추가한 경우, 슬롯의 중심과 커패시터 모양 스트립의 뒤쪽 부분까지 전계가 집중되는 것을 알 수 있다. 인터디지털-커패시터-모양 슬롯을 추가한 경우, 인터디지털-커패시터-모양 슬롯의 추가로 인해 슬롯 중심의 길이가 증가하고 인터디지털-커패시터의 손가락 구조에 전계가 집중되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 전계가 집중되는 슬롯의 길이가 증가하고 이로 인해 공진 딥 주파수가 낮은 주파수로 이동하는 것을 알 수 있다.

III. 태그 제작 및 실험 결과

FR4 기판($\epsilon_r = 4.4$, $h = 0.8$ mm, $\tan \delta = 0.025$)에 제작된 제안된 인터디지털-커패시터-모양 슬롯이 추가된 chipless RFID 태그의 사진이 그림 6에 나타나 있다.

그림 7은 전파 무반사실 내에 광대역 송수신 안테나를 이용하여 bistatic RCS를 측정하는 환경 구성이 나타나 있다. Bistatic RCS 계산을 위해 필요한 송수신 안테나의 전달계수(S_{21})는 Agilent사의 N5230A 벡터 네트워크 분석기를 사용하여 측정하였다.

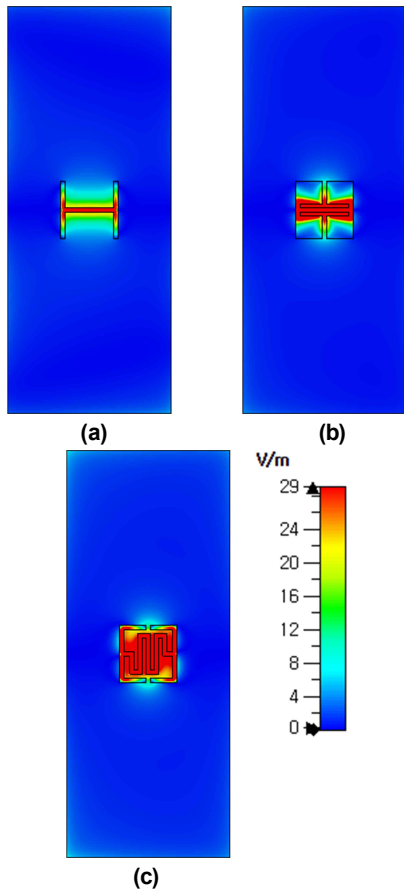


그림 5. RCS 공진 딥 주파수에서의 전계 분포: (a) H-모양 슬롯이 추가된 태그(5.907 GHz), (b) 변형된 구부러진 H-모양 슬롯이 추가된 태그(3.741 GHz), (c) 인터디지털-커패시터-모양 슬롯이 추가된 태그(2.889 GHz)

Fig. 5. Electric field distributions at RCS resonant dip frequencies: (a) tag added with H-shaped slot(5.907 GHz), (b) tag added with modified bent H-shaped slot(3.741 GHz), and (c) tag added with interdigital-capacitor-shaped slot(2.889 GHz).

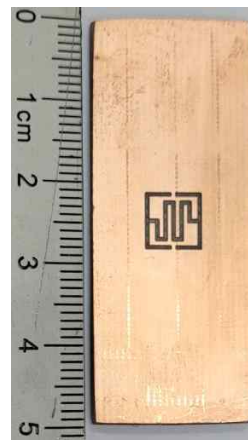


그림 6. 제작된 chipless RFID 태그 사진
Fig. 6. Photograph of fabricated chipless RFID tag.

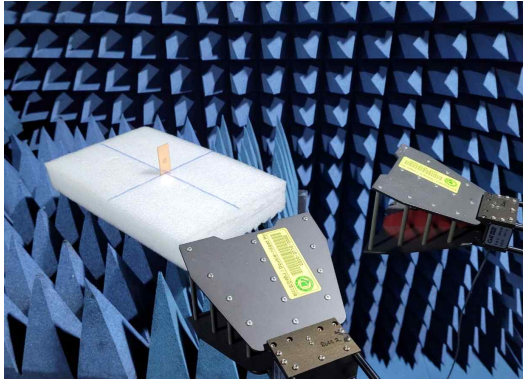


그림 7. 측정 환경 사진
 Fig. 7. Photograph of measurement setup.

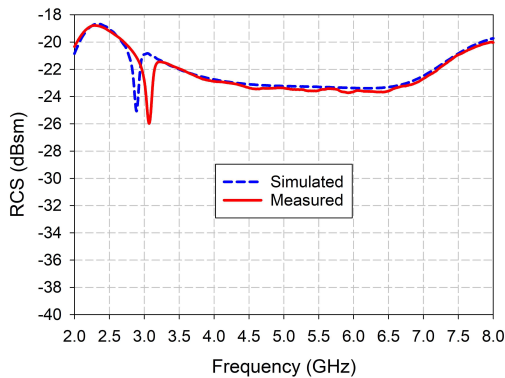


그림 8. 측정된 bistatic RCS 특성 비교
 Fig. 8. Comparison of measured bistatic RCS characteristic.

광대역 송수신 안테나는 2-18 GHz 대역에서 전압정재파비가 2 이하이고 6-17 dBi의 이득을 가지는 C&G Microwave사의 double-ridged horn 안테나를 사용하였다. 송수신 안테나와 제안된 인터디지털-커패시터-모양 슬롯이 추가된 chipless RFID 태그 사이의 거리는 300 mm 정도이고 송신안테나는 태그 표면의 수직방향과 30° 정도의 입사 각도를 가지도록 설치하였다.

측정한 송수신 안테나의 전달계수와 아래 식 (1)을 사용하여 bistatic RCS 값을 계산하였다[6].

$$\sigma_{tag} = \left[\frac{S_{21,tag} - S_{21,air}}{S_{21,ref} - S_{21,air}} \right]^2 \sigma_{ref} \quad (1)$$

여기서 피 측정 물체의 측정된 RCS 값(σ_{tag})은 기준으로 사용될 물체의 RCS 값(σ_{ref}), 피 측정 물체의 측정된 전달계수($S_{21,tag}$), 기준 물체를 두었을 때 측정된 전달계수($S_{21,ref}$), 물체가 없을 때 측정된 공기 중 전달계수($S_{21,air}$) 등을 이용하여 계산하였다. 기준 물체로는 슬롯이 없는 직사각형 도체 평판을 사용하였다.

그림 8은 제안된 인터디지털-커패시터-모양 슬롯이 추가된

chipless RFID 태그에 대한 측정된 bistatic RCS 특성을 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 측정된 bistatic RCS의 공진 뉘 주파수는 3.07 GHz로 시뮬레이션 주파수 2.889 GHz와 비교할 때 0.181 GHz 만큼 높은 주파수로 이동하여 6.3%의 오차를 보였다. 측정된 RCS 값은 -25.98 dBsm로 시뮬레이션 값 -25.07 dBsm에 비해 0.91 dB 감소하여 3.6%의 오차를 보였다. 측정 결과가 시뮬레이션 결과와 다른 이유는 태그 제작 상의 오차, FR4 기판의 유전율 차이, 측정 환경 등으로 판단된다.

IV. 결 론

본 논문에서는 인터디지털-커패시터-모양 슬롯을 이용한 chipless RFID 태그의 소형화 설계 방법을 연구하였다. 직사각형 도체 평판 위에 인터디지털-커패시터-모양 슬롯을 추가할 때 bistatic RCS의 공진 뉘 주파수를 기존의 H-모양 슬롯과 변형된 구부러진 H-모양 슬롯을 추가하였을 때와 시뮬레이션을 통하여 비교하였다. 또한 인터디지털-커패시터 손가락 길이 변화에 따른 공진 뉘 주파수의 이동도 비교하였다. 시뮬레이션 결과, 제안된 인터디지털-커패시터-모양 슬롯을 추가한 경우 공진 뉘 주파수가 2.889 GHz로서 H-모양 슬롯을 추가한 경우의 5.907 GHz와 비교할 때 슬롯 길이를 약 51.1% 줄여 소형화할 수 있고, 변형된 구부러진 H-모양 슬롯을 추가한 경우의 3.741 GHz와 비교하면 슬롯 길이를 22.8% 줄여 소형화할 수 있음을 알 수 있었다.

제안된 인터디지털-커패시터-모양 슬롯을 이용한 소형 chipless RFID 태그를 두께 0.8 mm의 20 mm×50 mm 크기의 FR4 기판에 제작하였다. 측정 결과, bistatic RCS의 공진 뉘 주파수는 3.07 GHz로 시뮬레이션과 비교할 때 0.181 GHz 만큼 높은 주파수로 이동하여 6.3%의 오차를 보였다. RCS 값은 -25.98 dBsm로 시뮬레이션 값에 비해 0.91 dB 감소하여 3.6%의 오차를 보였다. 이것은 제작 상의 오차, 기판의 유전율 차이, 측정 환경에 의한 오차가 등으로 발생한 것으로 판단된다.

제안된 인터디지털-커패시터-모양 슬롯을 이용한 태그 설계 방법은 소형 고밀도 chipless RFID 태그나 고분자 물질을 코팅하여 습도나 온도를 센싱하는 고감도 chipless RFID 센서 태그 등에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] WHERE DO YOU FIND RFID TECHNOLOGY IN EVERYDAY LIFE? [Internet], Available; <https://www.trace-id.com/where-do-you-find-rfid-technology-in-everyday-life/>.
- [2] T. Athauda and N. Karmakar, "Chipped versus chipless RF identification: A comprehensive review," *IEEE Microwave*

Magazine, Vol. 20, No. 9, pp. 47-57, Sep. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/MMM.2019.2922118>.

[3] C. Herrojo, F. Paredes, J. Mata-Contreras, and F. Martin, "Chipless-RFID: A review and recent developments," *Sensors*, Vol. 19, No. 15, p. 3385, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/s19153385>.

[4] M. A. Islam and N. Karmakar, "Compact printable chipless RFID tags using polarization diversity," in *Proceeding of 2012 9th European Radar Conference*, Amsterdam: Netherlands, pp. 586-589, 2012. Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/document/6450762>.

[5] A. Vena, E. Perret, and S. Tednini, *Chipless RFID Based on RF Encoding Particle: Realization, Coding and Reading System*. London, UK: ISTE Press Ltd., pp. 114-116, 2016.

[6] M. A. Islam and N. C. Karmakar, "Compact printable chipless RFID systems," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 63, No. 11, pp. 3785-3793, Nov. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMTT.2015.2482968>.

[7] M. A. Islam and N. C. Karmakar, "A novel compact printable dual-polarized chipless RFID system," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 60, No. 7, pp. 2142-2151, Jul. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMTT.2012.2195021>.

[8] M. A. Islam, Y. Yap, N. C. Karmakar, and A. Azad, "Compact printable orientation independent chipless RFID tag," *Progress in Electromagnetics Research C*, Vol. 33, pp. 55-66, 2012. DOI: <https://doi.org/10.2528/PIERC12071306>.

[9] I. Jabeen, A. Ejaz, A. Akram, Y. Amin, J. Loo, and H. Tenhunen, "Elliptical slot based polarization insensitive compact and flexible chipless RFID tag," *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, Vol. 29, No. 11, p. e21734, Nov. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1002/mmce.21734>.

[10] M. A. Riaz, Y. Abdullah, H. Shahid, Y. Amin, A. Akram, and H. Tenhunen, "Novel butterfly slot based chipless RFID tag," *Radioengineering*, Vol. 27, No. 3, pp. 776-783, Sep. 2018. DOI: <https://doi.org/10.13164/re.2018.0776>.

[11] W. M. Abdulkawi, A.-F. A. Sheta, K. Issa, and S. A. Alshebeili, "Compact printable inverted-M shaped chipless RFID tag using dual-polarized excitation," *Electronics*, Vol. 8, p. 580, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics8050580>.

[12] A. Ali, C. Smartt, E. Lester, O. Williams, and S. Greedy, "High capacity chipless RFID tags for biomass tracking application," *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, Vol. 15, No. 5, pp. 742-752, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1017/S1759078722000745>.

[13] I. Jabeen, A. Ejaz, S. M. Kabir, A. Akram, Y. Amin, and H. Tenhunen, "Octagonal shaped flexible chipless RFID tag for internet of things," in *2019 International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering (ICECCE)*, Swat: Pakistan, pp. 1-4, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICECCE47252.2019.8940693>



여 준 호 (Junho Yeo)

1992년 2월 : 경북대학교 전자공학과 (공학사),
 2003년 8월 : 미국 Pennsylvania State University 전기공학과 (공학박사),
 2003년 9월 ~ 2004년 6월 : 미국 Pennsylvania State University 박사 후 과정
 2004년 8월 ~ 2007년 2월 : 한국전자통신연구원 RFID 시스템연구팀 선임연구원
 2007년 3월 ~ 현재 : 대구대학교 시학과 교수
 ※관심분야 : RFID 및 광대역 안테나, 고감도 마이크로파 센서, Chipless RFID

1994년 2월 : 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
 1994년 3월 ~ 1999년 6월 : 국방과학연구소 연구원



이 종 익 (Jong-ig Lee)

1992년 2월 : 경북대학교 전자공학과 (공학사),
 1998년 8월 : 경북대학교 전자공학과 (공학박사),
 1999년 3월 ~ 현재 : 동서대학교 전기전자공학과 교수
 ※관심분야 : 평면 안테나, 전자파 산란

1994년 2월 : 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
 1998년 3월 ~ 12월 : 금오공과대학교 연구교수