

X-band 대역용 4x4 인셋 급전 마이크로스트립 패치 배열 안테나 연구

응쿤드와나요 세스¹, 채규수^{2*}
¹백석대학교 일반대학원 소프트웨어융합전공 석사과정
²백석대학교 첨단IT학부 교수

A study of the inset-fed 4x4 microstrip patch array antenna for X-band applications

Nkundwanayo Seth¹, Gyoo-Soo Chae²

¹MS Student, Dept. of Software convergence, Graduate School of Baekseok University

²Professor, Div. of Advanced IT, Baekseok University

요약 본 논문은 X-Band 애플리케이션에 활용하기 위한 4x4 마이크로스트립 어레이 안테나 최적화 설계와 제작에 대한 연구 결과를 제시하고 있다. 일반적으로 마이크로스트립 패치와 어레이 안테나 설계 파라미터는 기판의 종류와 패치의 크기를 조정함으로써 원하는 공진 주파수와 이득을 얻을 수 있다. 이 연구는 X-Band 공진 특성과 이득을 향상시키기 위해 최적의 기판 재료로 설계된 4x4 어레이 안테나 설계와 제작을 통한 특성 측정 결과를 소개하였다. 설계된 안테나의 크기는 10mm(W)x7.4mm(W)x0.79(H)mm 이다. 사용된 유전체 기판은 Rogers RO 4350B($\epsilon_r=3.54$)이며 안테나 급전 방식은 안테나의 크기를 줄이기 위해 인셋피드(Inset-fed) 방식이 적용되었다. 제안된 구조의 단일패치와 4x4 어레이 안테나는 설계 중심 주파수 10.3GHz에서 안정된 SWR(<1.5) 특성과 18.5dBi의 이득으로 예측되었다. 시뮬레이션 결과를 바탕으로 안테나가 제작되었고 측정 결과도 시뮬레이션 결과와 유사한 특성을 나타내는 것을 보았다. 본 연구에서 제안된 안테나는 군사, 위성 통신, 생물의학 분야를 포함한 X-Band 애플리케이션에 활용될 수 있다.

주제어 : X-밴드, 마이크로스트립, 배열 안테나, 최적화, 인셋 피드

Abstract This paper details research on the optimized design and fabrication of a 4x4 microstrip array antenna intended for X-Band applications. The study focuses on achieving the desired resonance frequency and gain by modifying the microstrip patch and array antenna parameters, including substrate type and patch size. It presents results from designing and fabricating a 4x4 array antenna with optimum substrate materials to enhance X-Band resonance characteristics and gain. The antenna dimensions are 10mm(W)x7.4mm(L)x 0.79mm(H), with an Rogers RO 4350B dielectric substrate ($\epsilon_r=3.54$) and an inset-fed feeding method to minimize antenna size. Both the single patch and 4x4 array antennas demonstrated stable SWR (<1.5) and a gain of 18.5dBi at the target frequency of 10.3GHz in simulations. The fabricated antenna showed performance consistent with simulation results. This antenna design is suitable for X-Band applications, including military, satellite communications, and biomedical fields.

Key Words : X-Band, Microstrip, Array antenna, Optimizing, Inset-fed

*This study was supported by the Enhancement of Defense Export Support Program for Global Defense Enterprises funded by KRIT(Korea Research Institute for Defense Technology Planning and Advancement) (No. E210002).

*Corresponding Author : Gyoo-Soo Chae(gschae@bu.ac.kr)

Received August 22, 2024

Revised August 30, 2024

Accepted September 21, 2024

Published September 30, 2024

1. 서론

현대 무선 통신 시스템은 낮은 프로파일, 경량, 고이득 및 간단한 구조의 안테나, 신뢰성, 이동성, 고효율을 등의 복잡한 조건을 요구한다. 마이크로스트립 안테나는 이러한 다양한 요구사항을 충족하는 구조이다. 특별히 높은 이득이 요구되는 시스템을 위한 배열 안테나를 설계하려면 패치의 모양, 기판의 높이, 급전 방식 등이 모두 고려되어야 한다[1-4]. 대부분의 경우 적절한 모양으로 간주되는 패치는 직사각형과 원형이다. 많은 장점에도 불구하고 마이크로스트립 안테나에는 낮은 효율성, 제한된 전력, 손상된 편파 순도, 수준 이하의 스캔 성능, 매우 좁은 주파수 대역폭 등의 눈에 띄는 단점이 있다. 그러나 특정 애플리케이션에서는 대역폭이 좁은 안테나를 사용하는 것이 오히려 더 좋은 경우도 있다[5-7].

본 연구에서는 레이더 등에서 활용 가능한 고이득, 광대역, 고효율의 배열 안테나를 설계하는 방법이 제시되었다. 이러한 조건을 만족하기 위해서는 패치의 유전율, 높이, 급전 구조 등을 선택하는 것이 매우 중요하다. 본 연구에서는 유전율(ϵ_r)이 3.54이고 두께가 0.79mm인 Rogers RO 4350B 소재 기판을 활용한 4x4 마이크로스트립 패치 안테나 설계 결과가 소개되었다. 광대역 특성과 패치 크기를 줄이기 위해 급전 구조를 인셋 급전을 사용하였다[1]. 먼저 이론적인 결과를 이용하여 단일 패치 인셋 급전 패치안테나를 설계하였고, 시뮬레이션을 통해 안테나의 동작 상태를 검증하였다. 이 결과를 기본으로 고이득의 배열 안테나를 설계하였다. 배열 안테나는 일반적으로 접지면으로 사용되는 기판 위의 4x4 패치 요소 배열로 구성된다. 이러한 배열 안테나는 높은 이득을 제공하며 방사 패턴을 정밀하게 제어할 수 있으므로 레이더, 위성 통신, 무선 네트워크와 같은 애플리케이션에 많이 활용되고 있다[8-13].

향후 본 연구 결과를 활용하여 16x16 등의 적응형 빔형성 배열 안테나 시스템으로 확장이 가능하다.

2. 안테나 설계

본 논문에서는 X-밴드 대역(8-12GHz)에서 동작하는 마이크로스트립 패치 배열 안테나를 이론적인 설계 파라미터를 활용하여 설계하고 시뮬레이션하였다. 여기서 제안된 마이크로스트립 패치 배열 안테나 설계를 기

본으로 배열의 크기, 이득 등의 특정 요구사항 및 주파수 대역에 따라 활용할 수 있다.

2.1. 마이크로스트립 패치 설계 파라미터

먼저 단일 패치 안테나 설계 파라미터를 선행 연구들에서 소개된 수식들을 활용하여 계산하였다[1]. 그리고 패치의 임피던스 정합(matching) 특성을 향상시키고, 소형화를 위해 인셋 급전(inset-fed) 방식이 사용되었다[9-10]. 단일 패치는 전송선로 계산 식과 CST MWS 소프트웨어를 사용하여 Rogers RO 4350B 기판(유전율 3.54)에 설계되었다. 본 연구에서 제안하는 10.3GHz에서 동작하는 안테나 설계를 위해 유전체 기판의 높이는 0.79mm이다. 패치 안테나 설계 시 고려되는 또 다른 주요 파라미터는 안테나의 급전 방법이다. 본 논문에서는 패치 안테나 급전 시 정합 성능이 우수하고 크기를 줄일 수 있는 인셋 급전 방식을 사용하였다[10]. 아래 Table 1에서는 설계에 사용된 파라미터들이 제시되었다[14].

Table 1. Antenna design parameter

	Operating frequency	Dielectric substrate	Dielectric constant(ϵ_r)	Substrate height(h)	Feed
Spec.	10.3GHz	Roger RO4350B	3.45	0.79mm	Inset-fed

단일 패치 안테나의 폭(W)은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$W = \frac{c}{2f_0} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (1)$$

위 식에서 $c = 3 \times 10^{11} \text{mm/s}$, $\epsilon_r = 3.45$ 그리고 $f_0 = 10.3 \text{GHz}$ 이며, $W = 9.75 \text{mm}$ 로 계산되었다.

기판의 유효 유전율(ϵ_{eff})은 다음 식으로 구하였다.

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

위 식에서 $\epsilon_r = 3.45$, $W = 9.75 \text{mm}$, $h = 0.79 \text{mm}$ 를 대입하면 $\epsilon_{eff} = 3.17$ 이다.

패치의 유효 길이(L_{eff})는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3)$$

위 식에서 $c = 3 \times 10^{11} \text{mm/s}$, $f_0 = 10.3 \text{GHz}$, $\epsilon_{eff} = 3.17$ 을 대입하면 $L_{eff} = 8.18 \text{mm}$ 를 얻었다.

패치 길이 확장(ΔL)은 다음 식으로부터 얻을 수 있다.

$$\Delta L = \frac{0.412h(\epsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (4)$$

위 식에서 $\epsilon_{eff} = 3.17$, $W = 9.75 \text{mm}$, $h = 0.79 \text{mm}$ 를 대입하면 $\Delta L = 0.372 \text{mm}$ 를 얻었다.

기판의 특성을 고려한 패치의 길이(L)는 다음과 같이 계산된다.

$$L = L_{eff} - 2 \Delta L \quad (5)$$

위 식에서 $L_{eff} = 8.18 \text{mm}$, $\Delta L = 0.372 \text{mm}$ 를 대입하여 $L = 7.436 \text{mm}$ 를 얻었다.

인셋 피드의 깊이(y_0)는 직사각형 패치의 공진 입력 저항(Z_i)은 $Z_i \cong 204.3 \Omega$ 으로 추정되었다[13]. 따라서 피드 깊이는 다음과 같이 계산된다.

$$y_0 = \frac{L}{\pi} \cos^{-1} \sqrt{\frac{Z_0}{Z_i}} \quad (6)$$

위 식에서 $Z_0 = 50 \Omega$, $Z_i = 210 \Omega$, $L = 7.522 \text{mm}$, $\pi = 180^\circ$ 일 때 $y_0 = 2.49 \text{mm}$ 이다.

마이크로스트립 라인의 폭(W_0)은 다음 식으로 구해진다.

$$W_0 = \frac{2h}{\pi} \left[\frac{60\pi^2}{Z_0\sqrt{\epsilon_r}} - 1 - \ln \left(\frac{120\pi^2}{Z_0\sqrt{\epsilon_r}} - 1 \right) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left(\ln \left(\frac{60\pi^2}{Z_0\sqrt{\epsilon_r}} - 1 \right) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right) \right] \quad (7)$$

위 식에서 $Z_0 = 50 \Omega$, $h = 0.79 \text{mm}$, $\epsilon_r = 3.45$ 이면 $W_{50\Omega} = 1.77 \text{mm}$ 가 된다[15]. 배열 안테나 설계 시 활용된 급전 라인의 폭은 각각 $W_{5.5\Omega} = 1.5 \text{mm}$, $W_{70\Omega} = 1.0 \text{mm}$ 이다. 급전 라인의 갭(노치 폭)(g)은 아래 식으로 계산되었다.

$$g = \frac{4.65 \times 10^{-18} c f_0}{\sqrt{2\epsilon_{eff}}} \quad (8)$$

위 식에서 $c = 3 \times 10^{11} \text{mm/s}$, $f_0 = 10.3 \text{GHz}$, $\epsilon_{eff} = 3.17$ 을 대입하면 $g = 0.57 \text{mm}$ 가 된다.

2.2. 마이크로스트립 패치 설계

이론적으로 계산된 각 설계 파라미터를 기반으로 제안된 RMPA(Inset-fed Rectangular Microstrip Antenna)의 안테나의 설계 파라미터가 Table 2, Fig. 1에 각각 제시되었다. 이론을 기반으로 시뮬레이션 SW를 활용하여 검증하고 파라미터를 최적화 과정을 거쳐 패치 파라미터를 도출하였다.

Table 2. The design parameter of a single patch

Parameter	Theory	Proposed
Width(W)	9.75mm	10mm
Length(L)	7.436mm	7.4mm
Ground	20(W _g)x17(L _g)mm	
Inset depth(y ₀)	2.62mm	2mm
Inset gap(g)	0.57mm	0.7mm
Feed width	1.77mm	1.5mm

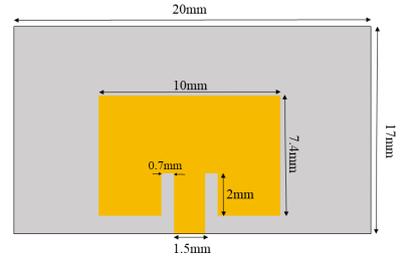


Fig. 1. The designed single patch X-band microstrip antenna parameters

3. 안테나 시뮬레이션

3.1 단일 패치 시뮬레이션 결과

Table 2에 제시된 설계 파라미터를 활용하여 CST MWS를 사용하여 Inset-fed 마이크로스트립 패치 안테나를 시뮬레이션하였으며 그 결과가 Fig. 2~5에 제시되었다. 안테나 반사 손실(S11), 이득, 지향성, 방사 패턴, HPBW(3dB 빔폭) 등 안테나 특성 파라미터를 사용하여 제안된 안테나 특성을 분석하였다.

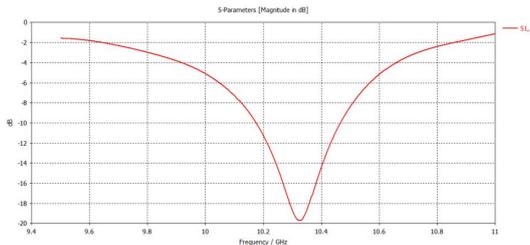


Fig. 2. S11 of the single patch X-band microstrip antenna

Fig. 2에서 제시된 결과는 동작 주파수에서의 반사 손실이며 최소값은 10.3GHz에서 약 -19dB이다. Fig. 3에서는 안테나의 3D 방사 특성이 제시되었다.

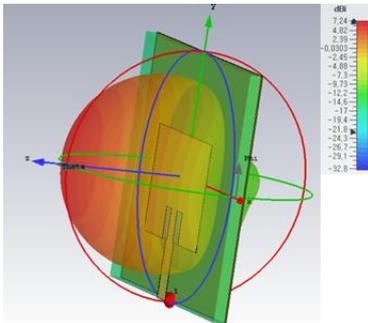


Fig. 3. 3D radiation pattern for the single patch X-band microstrip antenna

설계된 안테나의 이득은 10.3GHz에서 7.24dBi이다.

Fig. 4, 5에서는 패치 안테나의 E-평면($\phi=0^\circ$, x-z plane)과 H-평면($\phi=90^\circ$, y-z plane) 방사 패턴을 보여주고 있다. E-평면에서의 3dB 빔폭은 70° , H-평면에서의 빔폭은 82° 로 나타났다.

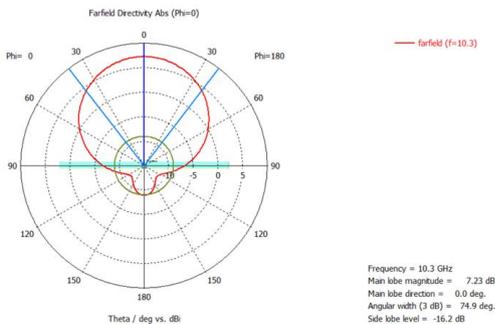


Fig. 4. 2D radiation pattern for the single patch (@x-z plane, $\phi=0^\circ$)

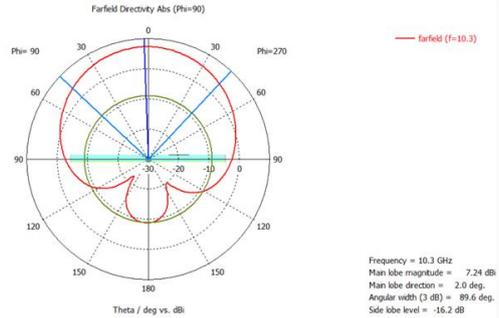


Fig. 5. 2D radiation pattern for the single patch (@y-z plane, $\phi=90^\circ$)

3.2 4x4 패치 배열 안테나 시뮬레이션 결과

3.1에서는 단일 패치 시뮬레이션 결과를 보여주었다. 이 결과를 기반으로 4x4 배열 안테나를 시뮬레이션하였다. Fig. 6에서 시뮬레이션을 위해 구현된 안테나 모양을 보여주고 있다.

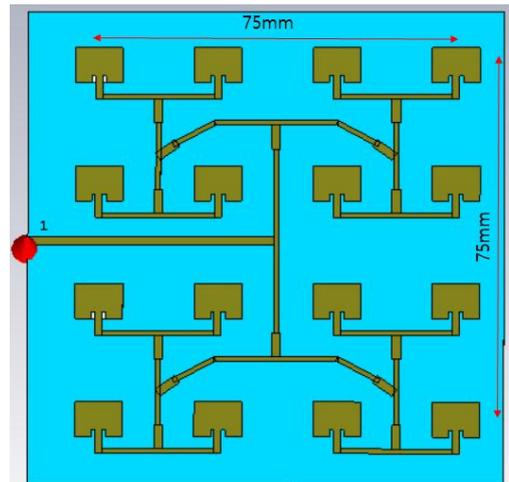


Fig. 6. A 4x4 patch X-band microstrip array antenna simulation structure

Fig. 7에서는 구현된 4x4 패치 배열 안테나의 S11을 보여주고 있으며, 10.3GHz에서 -25dB 이하의 우수한 특성을 나타내고 있다.

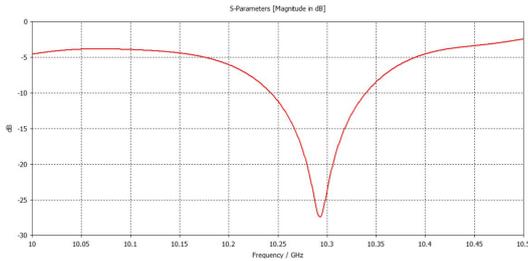


Fig. 7. S11 of the 4x4 patch X-band microstrip array antenna

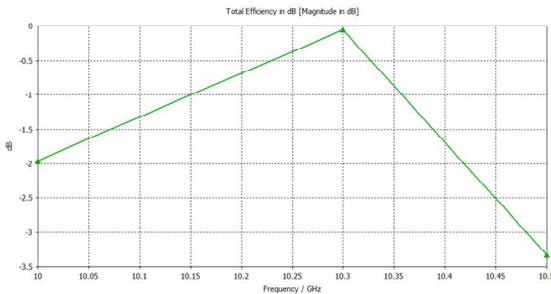


Fig. 8. Efficiency of the 4x4 patch X-band microstrip array antenna

Fig. 8에서는 배열 안테나의 효율을 보여주고 있다. 공진 주파수인 10.3GHz에서 0dB 정도의 우수한 특성을 보이고 있다. Fig. 9에서는 4x4 패치 배열 안테나의 3D 방사 특성이 보여주고 있으며, 안테나 z축 방향으로 18.5dBi 의 양호한 이득을 나타내고 있다.

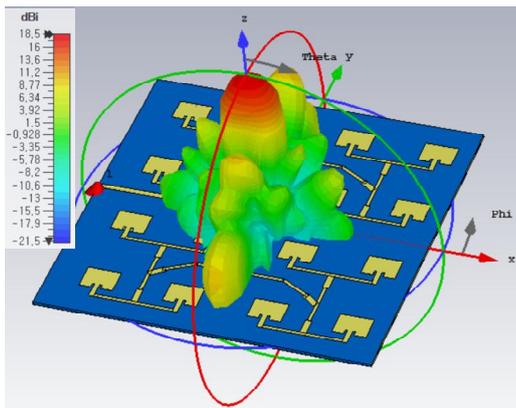


Fig. 9. 3D radiation pattern for the 2x1 patch X-band microstrip array antenna

Fig. 10, 11에서는 4x4 배열 안테나의 2D 방사 특성 (@phi=0, 90)이 나타나 있으며, 동스가 주파수에서 각

각 18.5dBi의 이득을 나타내고 있다. 3dB 빔폭은 각각 15.3°, 13.7°를 나타내고 있다.

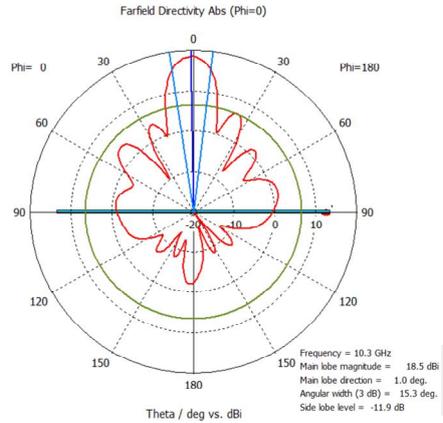


Fig. 10. 2D radiation pattern for the 4x4 patch array antenna(@x-z plane, phi=0°)

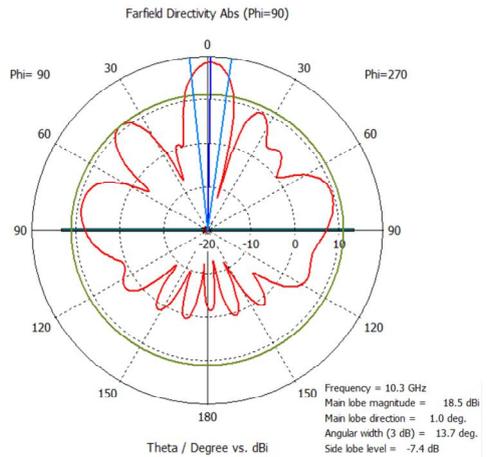


Fig. 11. 2D radiation pattern for the 4x4 patch array antenna(@y-z plane, phi=90°)

4. 안테나 제작 및 측정

마이크로스트립 패치 안테나 설계 파라미터를 기초로 본 연구의 최종 목표인 4x4 패치 배열 안테나를 제작하였다. 안테나 패치는 Rogers RO 4350B(유전율(ϵ_r) 3.54, 두께 0.79mm)를 활용하여 4x4 마이크로스트립 패치 배열 구조로 제작되었다. 급전 구조는 광대역 특성과 패치 크기를 줄이기 위해 인셋 급전(Inset Feed)이 적용되었다. Fig. 12에서는 제작된 패치 배열 안테나가 제시되었다. Fig. 13에서는 R&S ZNLE 벡터 네트워크

분석기(100kHz-20GHz)를 사용하여 측정된 S 파라미터가 제시되었다. 10.3GHz에서 -12dB로 설계에서 예측된 특성이 유사하게 나타나고 있다. Fig. 14에서는 전자파 무반향 챔버에서 측정된 안테나 이득이 제시되었다. Fig. 10, 11에서 제시된 시뮬레이션 결과와 유사한 19dB 정도의 주빔 이득 특성을 나타내고 있다.

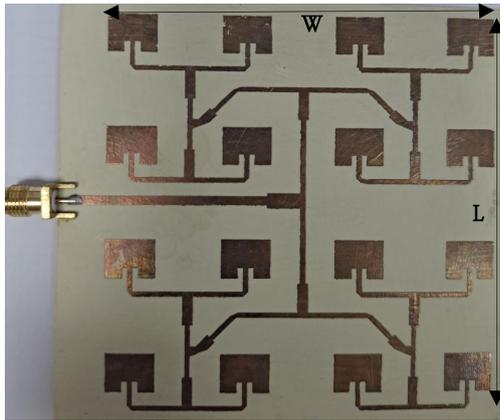


Fig. 12. Manufactured 4x4 patch array antenna

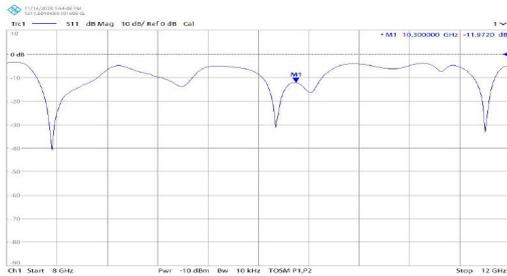


Fig. 13. Measured S-parameter for the 4x4 patch array antenna

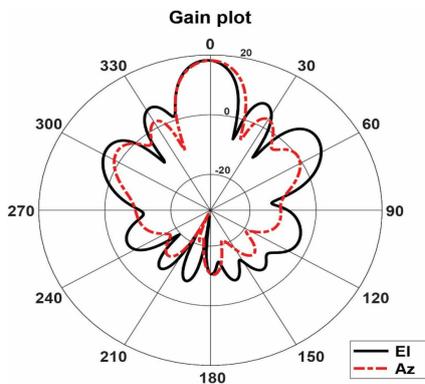


Fig. 14. Measured gain for the 4x4 patch array antenna(@y-z, x-z plane)

5. 결론

본 논문에서는 X-Band에서 사용 가능한 고이득 4x4 마이크로스트립 배열 안테나 최적화 설계와 제작에 대한 연구 결과를 제시하였다. 단일 마이크로스트립 패치 안테나 설계 파라미터를 이용하여 패치 크기와 급전부 설계를 수행하였으며, 이를 기반으로 4x4 배열 안테나 설계 및 제작이 수행되었다. 본 연구는 X-Band 공진 특성과 이득을 향상시키기 위한 기판 재료로 설계된 4x4 어레이 안테나 설계와 제작을 통한 특성 측정 결과가 소개되었다. 안테나의 크기는 75(W)x77(L)x0.79(H)mm로 설계되었으며 유전체 기판은 Rogers RO 4350B($\epsilon_r=3.54$)를 사용하였다. 안테나 급전은 안테나의 사이즈 축소와 정합 특성을 고려하여 인셋 피드(Inset-fed) 방식이 사용되었다. 소개된 구조의 단일패치와 4x4 배열 안테나는 중심 주파수 10.3GHz에서 안정된 SWR(<1.5) 특성과 18.5dBi 이상의 이득으로 예측되었다. 이러한 시뮬레이션 결과를 바탕으로 안테나를 제작하였고, 실제 반사손실, 이득측정 결과도 시뮬레이션 결과와 유사한 특성을 나타내는 것을 보여주었다. 본 연구에서 제안된 안테나는 군사, 위성 통신, 생물의학 분야를 포함한 X-Band 애플리케이션에 활용될 수 있다. 향후 본 연구 결과를 토대로 16x16 배열 안테나를 설계하고 제작하여 X-밴드 대역에서 적응형 빔형성기 등에 활용 가능한 다중 배열 안테나에 대한 연구가 진행될 것이다.

REFERENCES

- [1] N. Seth & G. S. Chae. (2024). A Simulation Study of the Inset-fed 2-patch Microstrip Array Antenna for X-band Applications. *Advanced Industrial Science*, 3(2), 31-37. DOI : 10.23153/AI-Science.2024.3.2.031
- [2] N. C. Okoro & L. I. Oborkhale. (2021). Design and simulation of rectangular microstrip patch antenna for X-Band application. *Global Journal of Researches in Engineering: F Electrical and Electronics Engineering*, 21(3), 41-49. globaljournals.org/GJRE_Volume21/3-Design-and-Simulation-of-Rectangular.pdf
- [3] G. S. Chae. (2010). Design of an X-band patch array antenna for an energy saving system. *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 11(1), 125-129. DOI : 10.5762/KAIS.2010.11.1.125

- [4] F. Adwep, M. Bobreeg & E. Aydin. (2022). Design and Optimization of a 4x4 Directional Microstrip Patch Antenna. *Surman Journal of Science and Technology*, 4(2), 018-026.
sjst.scst.edu.ly/index.php/sjst/article/view/52
- [5] C. A. Balanis. (2016). *Antenna Theory Analysis and Design*, 4th Edition, John Wiley & Sons Inc.
- [6] Y. K. Ningsih, S. Alam & I. Surjati. (2020, October). Design of Array Microstrip Antenna 4x4 Element for Microwave Radio Communication System. In *2020 2nd International Conference on Industrial Electrical and Electronics (ICIEE)* (pp. 215-218). IEEE.
DOI : 10.1109/ICIEE49813.2020.9276881
- [7] R. Garg, P. Bhartia, I. Bahl & A. Ittipioon. (2001). *Microstrip Antenna Design Handbook*. Artech House Inc., MA, England.
- [8] T. I. Huque et al. (2011). Design and Performance Analysis of Microstrip Array Antennas with Optimum Parameters for X-band Applications. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2(4), 81-87.
DOI : 10.14569/ijacsa. 2011.020413
- [9] K. Kumar et al. (2013). Effect of Feeding Techniques on Radiation Characteristics of Patch Antenna: Design and Analysis. *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, 2(2), 1276-1281.
ijarccce.com/upload/february/29-Effect%20of%20feeding%20-tallurisumanth.pdf
- [10] M. A. Matin & A. I. Sayeed. (2010). A Design Rule for Inset-fed Rectangular Microstrip Patch Antenna. *WSEAS Transaction on Communications*, 9(1), 63-72.
- [11] B. Nataraj & K. Prabha. (2019). Wideband rectangular patch antenna for X-band applications. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 8(10), 1981-1984.
DOI :10.35940/ijitee. J9289.0881019
- [12] D. S. Rawat, G. Singh & R. P. Singh. (2014). Design of a corporate fed 1x2 microstrip array antenna for X band applications. *International Journal of Computer Applications*, 95(5).
DOI : 10.5120/16589-6298
- [13] A. A. Roy, J. M. Môm & G. A. Igwe. (2013). Enhancing the bandwidth of a microstrip patch antenna using slots shaped patch. *American Journal of Engineering Research (AJER)*, 2(9), 23-30.
DOI : 10.9790/2834-610710
- [14] Em.talk. (n.d.). Microstrip Line Calculator.
emtalk.com/mscalc.php
- [15] A. B. Obot, G. A. Igwe & K. M. Udofia, (2019). Design and Simulation of Rectangular Microstrip Antenna Arrays for Improved Gain Performance. *International Journal of Networks and Communications*, 9(2), 73-81.
DOI : 10.5923/j.ijnc.20190902.02

응쿤드와나요 세스(Nkundwanayo Seth) [학생회원]



- 2023년 2월 : 백석대학교 컴퓨터공학부 (공학사)
- 2023년 3월~현재 : 백석대학교 일반대학원 소프트웨어융합전공 석사과정
- 관심분야 : IoT 센서, 빅데이터
- E-Mail : nkundwaseth@bu.ac.kr

채 규 수(Gyoo-Soo Chae) [종신회원]



- 2000년 12월 : Virginia Tech. 전기공학(공학박사)
- 2001년 1월 ~ 2003년 2월 : Amphenol Mobile, RF manager
- 2003년 3월 ~ 현재 : 백석대학교 첨단 IT학부 교수

- 관심분야 : Microwave antenna, IoT system
- E-Mail : gschae@bu.ac.kr