

마이크로파 에너지를 이용한 온실 난방용 원형 편파 마이크로 스트립 패치 배열 안테나 분석

박동희*, 송석일**, 곽윤식***

An Analysis of Greenhouse Heating Circularly Polarized Microstrip Patch Array Antennas using Microwave Energy

Donghee Park*, Seokil Song**, and Yoonsik Kwak***

2024년도 국립한국교통대학교 지원을 받아 수행하였음

요 약

본 논문은 마이크로 스트립 패치 안테나의 방사 도체를 이용하여 원형 편파 단일 및 배열 안테나를 설계하였다. 방사 도체는 모서리 절단, 대각선 홈 그리고 모서리 절단과 대각선 홈인 3가지 형태로 설계하였다. 설계 분석 단계에서는 단일 급전 원형 편파 패치 안테나의 반사손실, 원거리 복사 장, 그리고 축비를 해석 및 비교·분석하였다. 또한 마이크로파 가열 시스템의 온실 난방에 적용 가능하도록 배열요소 5×10의 배열 안테나를 설계하여 원거리 복사 장을 해석 및 설계 결과를 비교·분석하였다. 결론적으로 본 논문에서 제안된 모서리 절단과 대각선 홈의 배열 안테나가 동작 주파수 2.45 GHz에서 가장 낮은 최소 축비와 가장 큰 이득을 가지므로 마이크로파 온실 난방시스템에 적용할 수 있음을 확인할 수 있었다.

Abstract

In this paper, circular polarization single and array antennas were designed using the radiating conductor of microstrip patch antenna. The radiating conductor was designed in three types: corner-cut, diagonal groove, and corner-cut and diagonal groove. In the design analysis stage, the reflection loss, long-distance radiation field, and axial ratio of the single-fed circular polarization patch antenna were analyzed and compared. In addition, the array antenna with 5×10 array elements was designed so that it can be applied to greenhouse heating of microwave heating system, and the long-distance radiation field was analyzed and the design results were compared and analyzed. In conclusion, it was confirmed that the array antenna with corner-cut and diagonal groove proposed in this paper has the lowest minimum axial ratio and the largest gain at the operating frequency of 2.45 GHz, and thus it can be applied to microwave greenhouse heating system.

Keywords

microwave heating, greenhouse heating, microstrip patch antenna, circular polarization array antenna

* 국립한국교통대학교 전자공학과 명예교수
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0279-3852>
** 국립한국교통대학교 컴퓨터공학과 교수
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0110-7155>
*** 국립한국교통대학교 컴퓨터공학과 교수(교신저자)
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7407-207X>

• Received: Feb. 03, 2025, Revised: Mar. 11, 2025, Accepted: Mar. 14, 2025
• Corresponding Author: Yoonsik Kwak
Korea National University of Transportation
Tel.: +82-43-841-5345, Email: yskwak@ut.ac.kr

I. 서 론

현재 및 미래 농업은 급격한 기후변화가 예측되어 온난화를 최소화하고 이에 적응하는 기술을 찾아내는 것이 핵심 이슈로 대두되고 있다. 온난화와 관련해 농산업은 온실가스 배출의 원인을 제공하기도 하지만, 동시에 온실가스를 축소할 수 있는 잠재력을 가지고 있는 분야이다. 특히 겨울철 온실 농업은 기후 위기에 대응한 전략적 패러다임의 변화가 요구된다. 온실 농업에 있어 난방에 요구되는 연료 소비량은 지역과 지역의 기후 조건에 따라 크게 차이가 날 수 있다. 현대 농산업의 주요 목표 중 하나는 연료 소비와 CO₂ 배출량을 줄이는 동시에 에너지 효율은 높이며 생산 비용을 줄이고 생산 효율성을 높이는 환경친화적인 기술을 연구 개발 및 구현하는 것이다[1][2].

일반적으로 온실 농업의 난방시스템에서는 전기나 화석 연료를 사용하는 것이 기본이다. 따라서 이러한 유형의 연료 시스템을 유지하면서도 보다 경제적이고 환경 측면으로 지속 가능한 새로운 기술을 사용하여 온실의 에너지 성능을 최적화할 필요성이 높아지고 있다. 이에 따라 온실 농업의 난방 에너지 효율을 높이기 위한 다양한 기술 중 마이크로파를 활용하는 방법은 가열과 살균 등 여러 기능을 병합할 수 있어서 매우 유망하다. 특히 마이크로파 가열 시스템은 온실 농업의 난방비용을 최소화하고 저렴한 투자 비용과 신뢰할 수 있는 난방 시스템 유지 및 탄소배출을 줄일 수 있는 최적의 방법이다[3][4].

M. Teitel은 주파수 범위가 ISM 대역 내에서 마이크로파 가열 시스템을 온실의 식물 가열에 적용할 때 다른 열에너지 사용보다 최소 50% 이상 더 효율적이라고 제시했다[5]. 또 M. J. Guess는 선형편파의 전자기장 에너지가 투과된 평균온도는 17.5 °C인 반면에 원형 편파의 에너지가 투과된 식물의 평균온도는 21°C가 되었다고 발표했다[6]. 결과적으로 원형 편파의 전자기장이 식물 가열에 더 뛰어난 특성을 갖는다.

본 논문에서는 ISM 대역인 2.45GHz 공진 주파수를 갖는 원형 편파 마이크로 스트립 단일 및 배열 안테나를 설계하고 및 설계 안테나에 관해서 컴퓨

터 시뮬레이터 결과를 비교·분석하였다. 즉 원형 편파 단일 패치의 방사 도체 구조로 모서리 절단, 대각선 홈, 그리고 모서리 절단과 대각선 홈인 3가지 형태를 나타낸다. 설계된 안테나의 유전체 기판은 비교적 이득이 높은 RT/duroid 5880(tm)을 선택하였고, 높은 입력신호를 공급하기 위하여 입력임피던스 50Ω인 동축선을 선택하였다. 또한 배열 안테나는 3가지 방사체 구조 각각에 대한 요소 수 5×10의 크기를 갖는다.

본 논문의 구성은 2장에서 패치 안테나 설계와 개념을 간략하게 서술하고, 3장에서는 제안하는 안테나의 반사손실, 원거리 복사장 및 축비의 크기를 분석하고, 5×10 배열 안테나로 확장하여 복사장의 크기를 해석하였으며 마지막으로 결론 및 향후 연구과제를 서술하였다.

II. 패치 안테나 설계

마이크로 스트립 패치 안테나의 장점은 기하학적 모양의 다양화, 가벼운 무게, 비평면 설치 용이성, 그리고 제조가 용이하다는 것이며 또한 동작 주파수 선택에 있어 유연성이 높고, 전자기장의 복사를 선형편파와 원형 편파 등 유용한 편파를 만들 수 있다는 것이다[7]-[9].

본 논문은 50Ω 동축선 여기를 갖는 원형 분극 패치 안테나를 설계하기 위하여 비유전율 $\epsilon_r = 2.2$, 손실탄젠트 $\tan\delta = 0.0009$, 그리고 두께 $h = 1.575$ mm인 RT/duroid 5880(tm) 유전체 기판과 온실 식물 가열에 적합한 ISM 대역인 2.45GHz의 공진 주파수를 선택하였다.

단일 패치 안테나의 크기를 산출하는 이론적 방법은 식 (1)부터 식 (7)까지를 적용하였다. 식 (1)은 패치의 너비(W)를 계산하는 데 사용되고, 식 (2)는 유전체 기판의 유효 유전율($\epsilon_{r_{eff}}$)을 계산하는 데 사용된다. 여기서 f_r 는 공진 주파수 그리고 c 는 자유공간 영역에서의 전파속도를 나타낸다. 식 (3)에서 패치의 길이(L)는 프린팅 현상으로 인해 식 (4)의 미소거리(ΔL)만큼 확장된다. 식 (5)의 파장(λ)은 공진 주파수와 자유공간에서의 전파속도에 따라 달라진다. 식 (6)과 식 (7)을 이용하여 유전체 크기를 결정한다[10]-[12].

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

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

$$L = \frac{\lambda}{2\sqrt{\epsilon_{eff}}} - 2\Delta L \quad (3)$$

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

$$\lambda = \frac{c}{f_r} \quad (5)$$

$$W_p = W + 6h \quad (6)$$

$$L_p = L + 6h \quad (7)$$

위 식을 이용하여 선형편파 패치 안테나의 크기를 결정한 후 이를 바탕으로 단일 급전 원형 편파 패치 안테나를 설계하였다. 방사 도체의 구조는 그림 1과 같이 모서리 절단과 대각선 홈을 갖는다. 그림 1의 구조를 통해 모서리 절단, 대각선 홈 그리고 모서리 절단과 대각선 홈을 갖는 3종류의 원형 편파 패치 안테나를 설계하였다. 설계된 3종류의 원형 편파 패치 안테나의 크기는 표 1에 제시하였다.

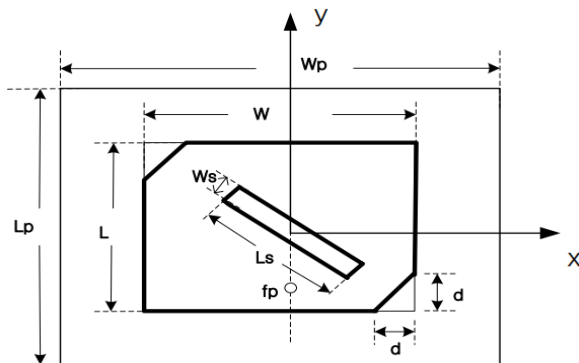


그림 1. 모서리 절단과 대각선 홈을 갖는 원형 편파 패치 안테나 구조

Fig. 1. Circularly polarized patch antenna structure with corner-cut and diagonal slot

표 1. 설계된 원형 편파 안테나의 사양

Table 1. Specifications of the designed circularly polarized antenna

Symbols	Values[mm]		
	Cut d=4.5	Slot Ls=10, Ws=6	Cut & Slot d=2.5, Ls=8, Ws=5
Wp	58	61.2	61.2
Lp	58	61.2	61.2
W	39.5	38	38.8
L	39.5	38	38.8
fp	11	8	7

마이크로파 온실 난방시스템에 적용하기 위한 배열 안테나는 표 1에 제시된 3종류 단일 급전 원형 편파 패치 안테나를 기준으로 배열요소의 크기 5×10을 갖도록 각각 설계하였다. 설계 결과는 모서리 절단과 대각선 홈을 갖는 배열 안테나를 그림 2에 제시하였다. 배열 소자 각각은 입력신호의 크기와 위상을 동일한 50Ω 동축선으로 인가할 수 있고 또 원거리 복사 빔의 방향을 조절할 수 있다. 제시된 배열 안테나의 소자 간 간격은 λ/2를 유지하도록 하였다.

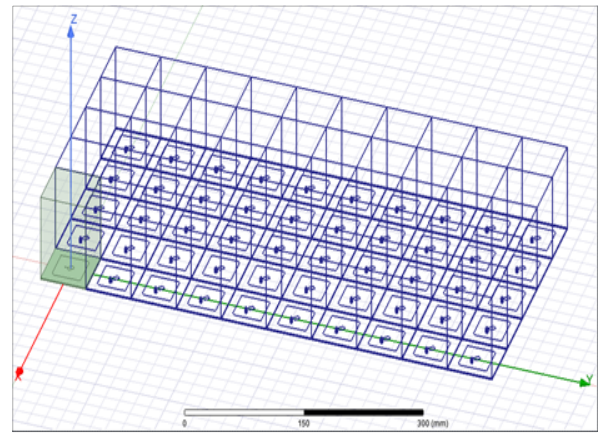


그림 2. HFSS를 이용한 마이크로 스트립 패치 5×10 배열 안테나 구조

Fig. 2. Microstrip patch 5×10 array antenna structure using HFSS

III. 시뮬레이터 분석

본 논문에서 설계 및 제안하는 원형 편파 패치 안테나의 해석은 3D 전자기 모의실험 도구인 Ansys HFSS 19.0을 사용하였다.

그림 3은 표 1에 제시된 단일 급전 원형 편파 패치 안테나에 대한 반사손실 S_{11} 을 주파수 변화에 따른 크기(dB)로 비교하였다. 중심주파수는 2.45GHz이며, 10dB 반사손실 대역폭은 모서리 절단의 경우 120MHz를 갖지만 대각선 홈과 모서리 절단 및 대각선 홈의 경우는 거의 동일한 90MHz 대역을 나타낸다.

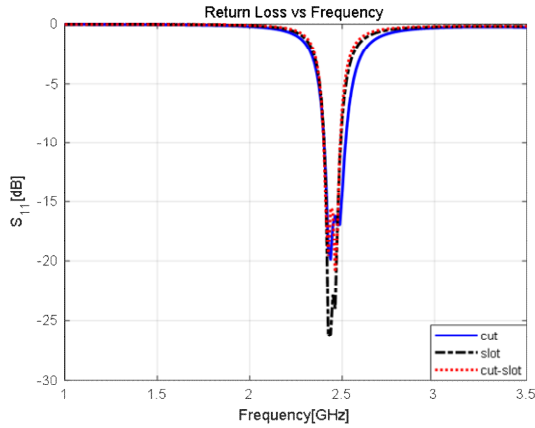


그림 3. 주파수 변화에 따른 반사손실 크기 S_{11} 비교
Fig. 3. Comparison of return loss (S_{11}) VS. frequency

그림 4는 표 1에서 제시된 단일 급전 원형 편파 패치 안테나의 원거리 방사 패턴 이득(dB)을 $\theta = 0^\circ$ 부터 90° 까지의 변화로 나타냈다. 안테나는 모두 RHCP(Right Hand Circular Polarization)의 특성을 갖는다. 그림 4는 $\phi = 0^\circ$ 와 90° 에서 모두 $\theta = 0^\circ$ 의 위치에서 최대 이득은 모서리 절단이 5.33dB, 대각선 홈이 5.75dB, 그리고 모서리 절단과 대각선 홈 양쪽을 포함한 패치는 주파수 2.47 GHz에서 최대 이득이 5.82dB가 나타났다.

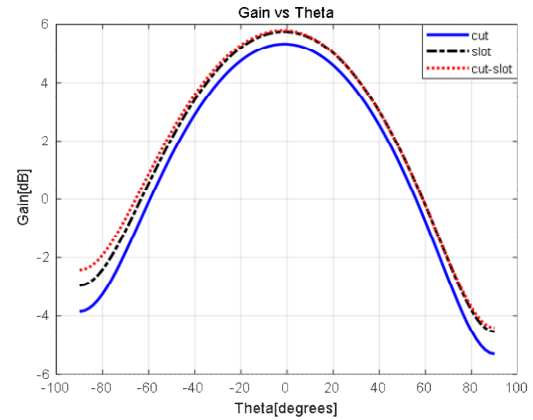
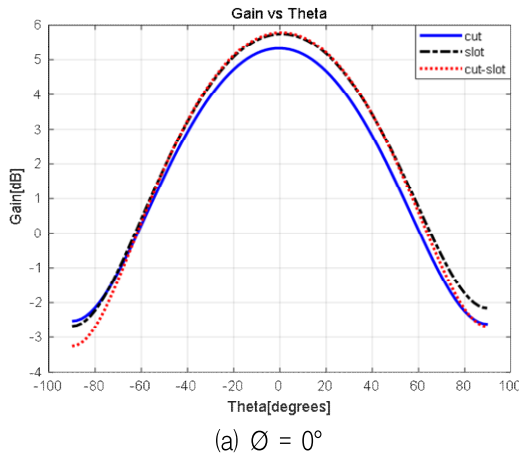


그림 4. 주파수 2.45 GHz에서 θ 의 변화에 따른 원거리 방사 패턴 이득 비교

Fig. 4. Comparison of far-field radiation pattern gain with variation in θ at 2.45 GHz

그림 5는 표 1에서 제시된 단일 급전 원형 편파 패치 안테나의 원거리장 이득을 $\phi = 0^\circ$ 와 $\theta = 0^\circ$ 에서 주파수 변화로 나타냈다. 모서리 절단은 주파수 2.49GHz에서 최대 이득 5.4dB, 대각선 홈은 주파수 2.47GHz에서 최대 이득 5.8dB, 그리고 모서리 절단과 대각선 홈 양쪽을 포함한 패치는 주파수 2.47 GHz에서 최대 이득이 5.82dB가 나타났다.

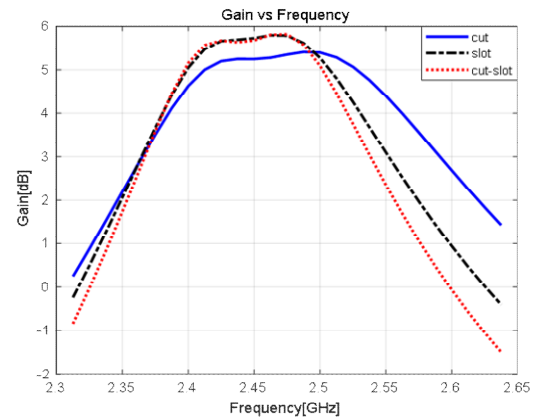


그림 5. $\phi = 0^\circ$ 와 $\theta = 0^\circ$ 에서 주파수 변화에 따른 원거리장의 이득 비교

Fig. 5. Comparison of far-field gain with frequency variation at $\phi = 0^\circ$ and $\theta = 0^\circ$

그림 6은 표 1에서 제시된 단일 급전 원형 편파 패치 안테나의 축비(Axial Ratio)를 $\phi = 0^\circ$ 와 $\theta = 0^\circ$ 에서 주파수 변화로 나타냈다. 모서리 절단의 최소 축비는 주파수 2.45GHz에서 2dB, 대각선 홈의 최소 축비는 주파수 2.44GHz에서 2.4dB, 그리고 모서리

절단과 대각선 홈의 최소 축비는 주파수 2.44GHz에서 1.7dB가 나타났다. 또한 3dB 축비 대역폭의 크기는 모서리 절단은 20MHz, 대각선 홈은 16MHz, 그리고 모서리 절단과 대각선 홈은 22MHz를 나타낸다.

결과적으로 모서리 절단과 대각선 홈의 단일 급전 원형 편파 패치 안테나가 10dB 반사손실 대역폭을 제외하고 원거리장 이득에서 0.46dB 크고 그리고 최소 축비에서 0.3dB 더 작은 결과를 나타낸다.

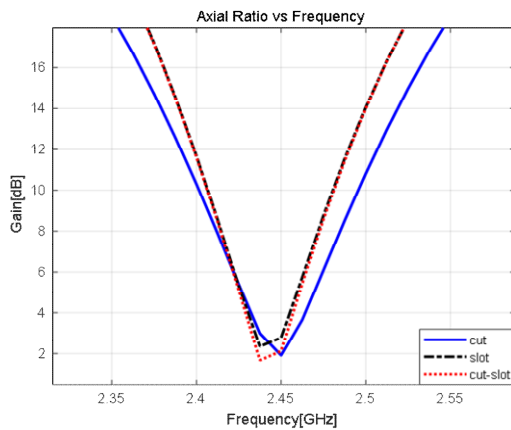
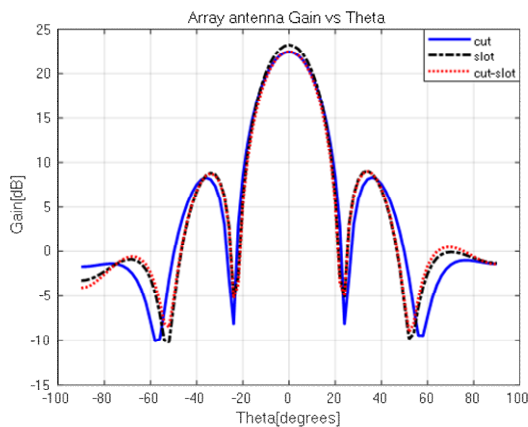


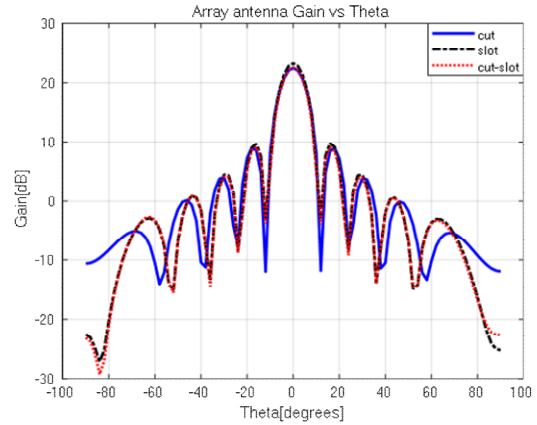
그림 6. $\phi = 0^\circ$ 와 $\theta = 0^\circ$ 에서 주파수 변화에 따른 축비(dB) 비교

Fig. 6. Comparison of axial ratio (dB) with frequency variation at $\phi = 0^\circ$ and $\theta = 0^\circ$

그림 7은 표 1에서 제시된 단일 급전 원형 편파 패치 안테나를 기본으로 배열요소 5×10 을 갖는 배열 안테나의 원거리 방사 패턴 이득(dB)을 $\theta = 0^\circ$ 부터 90° 까지 변화로 나타냈다. 그림 7로부터 $\theta = 0^\circ$ 에서 최대 이득은 모서리 절단은 22.5dB, 대각선 홈은 23.3dB, 그리고 모서리 절단과 대각선 홈은 22.7dB가 나타났다.



(a) $\phi = 0^\circ$



(b) $\phi = 90^\circ$

그림 7. 주파수 2.45 GHz에서 각 θ 의 변화에 따른 5×10 배열 안테나의 원거리 방사 패턴 이득 비교
Fig. 7. Comparison of far-field radiation pattern gain of 5×10 array antenna with variation in θ at 2.45 GHz

결과적으로 배열 안테나의 방사 패턴 이득은 대각선 홈 그리고 모서리 절단과 대각선 홈 양쪽에서 0.6dB의 차이를 보였다.

IV. 결 론

본 논문은 마이크로파 가열 시스템에 적합한 ISM 대역에서 2.45GHz 공진 주파수로 동작할 수 있는 단일 급전 원형 편파 마이크로 스트립 패치 안테나와 배열 안테나를 설계 및 시뮬레이터 실험 데이터를 분석하였다. 원형 편파 단일 패치는 모서리 절단, 대각선 홈, 그리고 모서리 절단과 대각선 홈인 3가지 형태로 설계하였다. 설계된 단일 급전 원형 편파 패치 안테나로부터 반사손실, 원거리 복사장, 그리고 축비를 해석 및 비교하였다. 해석결과는 모서리 절단과 대각선 홈인 패치에서 가장 큰 이득과 가장 낮은 축비의 결과를 얻었다. 또 마이크로파 온실 난방에 적용 가능하도록 배열요소 5×10 을 갖는 배열 안테나의 원거리장 이득(dB)을 해석한 결과 대각선 홈 그리고 모서리 절단과 대각선 홈인 패치에서 가장 큰 이득을 얻었다.

결과적으로 본 논문에서 제시된 모서리 절단과 대각선 홈의 배열 안테나가 동작 주파수 2.45GHz에서 마이크로파 온실 난방시스템에 적용할 수 있음을 입증하였다. 본 논문의 향후 계획은 배열요소 5×10 의 크기를 갖는 배열 안테나 제작과 실험 그리고 씨앗 발아를 위한 시스템에 적용을 확장한다.

References

- [1] M. W. Ellis, M. R. V. Spakovsky, and D. J. Nelson, "Fuel cell systems: Efficient, flexible energy conversion for the 21st century", *Proc. of The IEEE*, Vol. 89, No. 12, pp. 1808-1818, Dec. 2001. <https://doi.org/10.1109/5.975914>.
- [2] G. C. Bakos, D. Fidanidis, and N. F. Tsagas, "Greenhouse heating using geothermal energy", *Geothermics*, Vol. 28, No. 6, pp. 759-765, Dec. 1999. [https://doi.org/10.1016/S0375-6505\(99\)00041-3](https://doi.org/10.1016/S0375-6505(99)00041-3).
- [3] J. Sun, W. Wang, and Q. Yue, "Review on Microwave-Matter Interaction Fundamentals and Efficient Microwave-Associated Heating Strategies", *Materials*, Vol. 9, No. 231, pp. 1-25, Mar. 2016. <https://doi.org/10.3390/ma9040231>.
- [4] M. J. Guess, I. C. Hunter, and A. I. Abunjaileh, "Improving energy efficiency by heating greenhouse crops with microwaves", In *Proceedings of the IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, Baltimore, MD, USA, pp. 1-4, Jun. 2011. <https://doi.org/10.1109/MWSYM.2011.5972600>.
- [5] M. Teitel, A. Shklyar, V. Dikhtyar, E. Jerby, and Y. Elad, "Development of a Microwave System for Greenhouse Heating", *Proc. Int. Conf. and British - Israeli Workshop on Greenhouse Tech. towards 3rd Mill.*, Haifa, Israel, pp. 189-195, Aug. 2000. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2000.534.21>
- [6] M. J. Guess, I. C. Hunter, and A. I. Abunjaileh, "Improving energy efficiency by heating greenhouse crops with microwaves", *Proc. of the IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, Baltimore, MD, USA, pp. 1-4, Jun. 2011. <https://doi.org/10.1109/MWSYM.2011.5972600>.
- [7] Y.-H. Suh, C. Wang, and K. Chang, "Circularly polarized truncated corner square patch microstrip rectenna for wireless power transmission", *Electronics Letters*, Vol. 36, No. 7, pp. 600-602, Mar. 2000. <https://doi.org/10.1049/el:20000527>.
- [8] W. En-naghma, H. Halaq, and A. E. Ougli, "Novel broadband circularly polarized pentagonal printed antenna design for wireless power transmission applications", *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, Vol. 32, No. 3, pp. 1434-1441, Dec. 2023. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v32.i3.pp1434-1441>.
- [9] M. S. Rana, T. R. Rocky, M. A. Islam, A. Mamun, S. K. Joy, S. Mondal, M. T. Ahmed, M. H. Islam, S. Pal, I. Chowdhury, and O. Faruq, "A review of 2.45 GHz microstrip patch antennas for wireless applications", *IJAAS*, Vol. 13, No. 2, pp. 269-281, Jun. 2024. <https://doi.org/10.11591/ijaas.v13.i2.pp269-281>.
- [10] H. Singh and M. Sharma, "A survey on rectangular patch antenna using a various shaped patch antenna", *International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology*, Vol. 4, No. 3, pp. 1791-1794, Nov. 2018. <https://www.ijariit.com/manuscript/a-survey-on-rectangular-patch-antenna-using-a-various-shaped-patch-antenna>.
- [11] A. H. Rambe, M. Lutfi, Suherman, M. Zulfin, and M. Pinem, "Numerical simulation of a rectangular microstrip patch antenna for 3.35 GHz applications", *Journal of Physics: Conference Series*, Medan, Indonesia, Vol. 1566, Nov. 2019. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1566/1/012013>.
- [12] S. Xu, G.-Y. Ariunbold, S. Li, and B.-C. Ahn, "Design of a Dual-polarized Square Waveguide Antenna Fed by a Microstrip Patch", *Journal of KIIT*, Vol. 17, No. 12, pp. 119-124, Dec. 2019. <https://doi.org/10.14801/jkiit.2019.17.12.119>.

저자소개

박 동 희 (Donghee Park)



1987년 2월 : 중앙대학교

전자공학과(공학석사)

1992년 8월 : 중앙대학교

전자공학과(공학박사)

1992년 4월 ~ 2024년 8월 :

국립한국교통대학교 전자공학과
교수

2024년 9월 ~ 현재 : 국립한국교통대학교 전자공학과
명예교수

관심분야 : 밀리미터파안테나 설계 및 해석,
무선전력전송, 전자파응용

송 석 일 (Seokil Song)



1998년 2월 : 충북대학교

정보통신공학과(공학사)

2000년 2월 : 충북대학교

정보통신공학과(공학석사)

2003년 2월 : 충북대학교

정보통신공학과(공학박사)

2003년 7월 ~ 현재 :

국립한국교통대학교 컴퓨터공학과 교수

관심분야 : 데이터베이스, 센서 네트워크, 스토리지
시스템

곽 윤 식 (Yoonsik Kwak)



1986년 9월 : 경희대학교

전자공학과(공학석사)

1994년 3월 : 경희대학교

전자공학과(공학박사)

1991년 5월 ~ 현재 :

국립한국교통대학교
컴퓨터공학과 교수

관심분야 : 센서네트워크, 인터넷 통신, 행정시스템