

실버 메쉬 전극을 이용한 투명한 패치 안테나 제작

Transparent Patch Antenna Using Silver Mesh Electrode

김동진^{1,*}, 장효양^{2,*}, 조문형¹, 엄준성¹, 이승섭^{1,#}, 이재흥^{2,#}
Dong Jin Kim¹, Hyoyang Jang², Munhyeong Jo¹, Junseong Eom¹, Seung S. Lee^{1,#}, and Jaeheung Lee^{2,#}

¹ 한국과학기술원 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, KAIST)

² 한밭대학교 컴퓨터공학과 (Department of Computer Engineering, Hanbat National University)

Corresponding Author / E-mail: sslee97@kaist.ac.kr, TEL: +82-42-350-3046

E-mail: jhlee@hanbat.ac.kr, TEL: +82-42-821-1208

ORCID : 이승섭 - 0000-0003-2413-046X

이재흥 - 0000-0003-3344-8138

*Dong Jin Kim and Hyoyang Jang contributed equally to this work

KEYWORDS: Silver mesh (실버 메쉬), Transparent electrode film (투명 전극 필름), UV embossing (UV 엠보싱), Film antenna (필름 안테나)

This study presents a transparent-patch antenna using a silver-mesh transparent electrode film with a high optical transmittance (87.7%), low haze (1.1%), and low sheet resistance (8.9 Ω/sq). The silver-mesh transparent electrode film is fabricated by using UV embossing and doctor blading without any high-temperature or vacuum processes. The UV resin pattern is transferred from a nickel mold to a plastic film, and then a silver paste is filled into the UV resin pattern. The transparent antenna patch and ground plane are obtained by repeating these processes on both sides of a single plastic film. The antenna patch is designed with a width of 44.8 mm and a height of 36.0 mm in order to obtain a resonant frequency at 2.45 GHz, which is a frequency of wireless LAN. As a result, the transparent-patch antenna has a reflection coefficient (S_{11} parameter) of -35.6 dB, a peak gain of -3.99 dBi, and a radiation efficiency of 6.2% at 2.45 GHz. Finally, a Wi-Fi router using the transparent-patch antenna is demonstrated.

Manuscript received: March 22, 2018 / Revised: May 22, 2018 / Accepted: June 11, 2018

1. 서론

최근 소형 컴퓨터 및 무선통신 기술의 발전 덕분에 인터넷을 기반으로 모든 사물을 연결하여 사람과 사물, 사물과 사물간의 정보를 서로 주고 받으면서 소통할 수 있는 사물 인터넷(Internet of Things, IoT) 시대가 급속하게 발전하고 있다.¹ 무선통신 기술을 이용하여 실시간으로 많은 양의 정보를 원활하게 송수신하기 위해서 안테나가 필수적인 핵심요소이다.

투명하고 필름 형태의 평면형 안테나를 적용하면 일반 가정용 전자기기뿐만 아니라 건물의 창문이나 곡면을 가진 자동차 유리 등에 간단하게 부착할 수 있기 때문에 설치할 수 있는 장소에 대한 제약이 줄어들고, 투명하기 때문에 본래의 미관에 크게 영향을 주지 않으며, 전자 기기의 외부에 부착할 수 있어 효율 측면에서 유리한 장점이 있다. 따라서 최근에 투명한 안테나 개발에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다.^{2,3}

투명한 안테나를 제작하기 위해서는 가시광 영역대 파장을 가진 빛에 대한 투과율이 높고, 투명하고 전기가 잘 통할 수 있도록 낮은 면저항을 가진 좋은 특성의 투명 전극이 필요하다. 투과율과 면저항 특성은 물질 자체의 특성, 공정 방법, 설계 변수 등의 다양한 요소에 따라 달라진다.

인듐 주석 산화물(Indium Tin Oxide, ITO)이란 물질은 높은 투과율과 비교적 낮은 면저항을 가지고 있어서 현재까지 가장 많이 사용되는 투명전극 물질이다. 그러나 높은 투과율을 유지하면서 면저항을 더 낮추기에는 한계가 있고 기계적 특성이 취약이기 때문에 변형에 의해 크랙이 쉽게 발생하여 면저항이 급격하게 증가하고 단선이 발생하기 때문에 유연한 소자에 활용하기에는 많은 어려움이 있다는 단점이 있다.⁴

이러한 단점들을 극복하기 위해 탄소나노튜브(CNT),^{5,6} 그래핀(Graphene),^{7,8} 전도성 고분자(Conductive Polymer),^{9,10} 금속 나노선(Metal Nanowire),^{11,12} 금속 메쉬(Metal Mesh)¹³⁻¹⁵ 등의 다양한

대체 투명전극 물질에 대한 연구가 진행되고 있다. 그 중에서 ITO와 비교하여 높은 투과율, 낮은 면저항, 그리고 유연한 특성을 동시에 가진 금속 메쉬가 기존의 ITO 투명전극을 대체할 수 있는 가장 적합한 투명전극 물질 중 하나로 여겨지고 있다.

본 논문에서는 진공, 고온 공정이 필요 없고, 비교적 간단한 공정을 이용하여 특성이 우수한 실버 메쉬 투명전극 필름을 제작하는 방법을 소개하고, 이를 이용하여 투명 패치 안테나를 제작하고 특성을 평가한다.

2. 실버 메쉬 투명전극

2.1 투명전극 제작 방법 및 결과

Fig. 1은 실버 메쉬 투명 전극 필름을 제작하는 공정도이다. 먼저, 실리콘 웨이퍼에 미세 선폭($-3.5\ \mu\text{m}$)을 가진 메쉬 패턴을 형성하고 크롬 시드층을 $100\ \text{nm}$ 두께로 증착 한 뒤, 전주 도금을 하여 $200\ \mu\text{m}$ 두께의 니켈 몰드를 제작한다. 그 다음 니켈 몰드 위에 UV 레진(CC Tech, NE-0425)을 도포한 뒤 투명한 PC 필름(Sejin TS, C110)을 올려놓고 롤러로 합착하고 나서 UV 램프(Lichtzen, LF-400)로 수 초간 경화 한다. 경화가 끝나고 PC 필름을 몰드에서 떼어내면 몰드의 역상 패턴이 필름에 전사된다. 패턴이 전사된 필름 위에 실버 페이스트(Fine Paste, FTL-201NF)를 도포하고 블레이드로 표면을 긁어내면 패턴 내부에 실버 페이스트가 채워지고, 대류오븐을 이용하여 100°C 에서 2시간 동안 열처리 하면 단단하게 경화되어 실버 메쉬 전극 필름의 제작이 완료된다. 공정이 비교적 복잡하지 않고 간단하며, 고온이나 진공 공정이 필요 없다는 장점이 있다.

Fig. 1에서 볼 수 있듯이 실버 메쉬 투명전극의 설계 변수는 메쉬의 선폭, 간격, 두께로 구분할 수 있으며, 이에 따라 투과율과 면저항이 달라지게 된다. 선폭이 두껍고 간격이 좁을수록 투과율과 면저항이 낮아지고, 선폭이 얇고 간격이 넓을수록 투과율과 면저항이 높아지는 트레이드-오프 관계를 가진다. 반면에 두께는 두꺼울수록 투과율은 일정하게 유지하면서 면저항을 더 낮출 수 있기 때문에 두께를 증가시키는 것이 중요하다.

Fig. 2는 제작 결과에 대한 그림이다. Fig. 2(a)는 미세 선폭을 가진 메쉬 패턴이 형성된 니켈 몰드, Fig. 2(b)는 PC 필름 위에 전사된 UV 레진 패턴, Fig. 2(c)는 실버 페이스트를 채우고 난 뒤 열처리를 완료한 실버 메쉬 투명전극이다. Fig. 2(c)에서 보는 것처럼 UV 레진 패턴 내부에 실버 페이스트가 메쉬 형태로 잘 채워져 있음을 볼 수 있다.

특히, 표면에 실버 페이스트의 잔유물이 남게되면 전도성 향상에는 영향을 주지 않지만 빛을 막는 요소로 작용하여 예상한 투과율보다 실제 제작된 샘플의 투과율이 많이 하락하게 되고, 일부 빛이 산란하게 되어 헤이즈가 높아지는데, 그림에서 볼 수 있듯이 표면에 남아있는 실버 페이스트 잔유물이 거의 없고, 깨끗한 표면을 볼 수 있다.

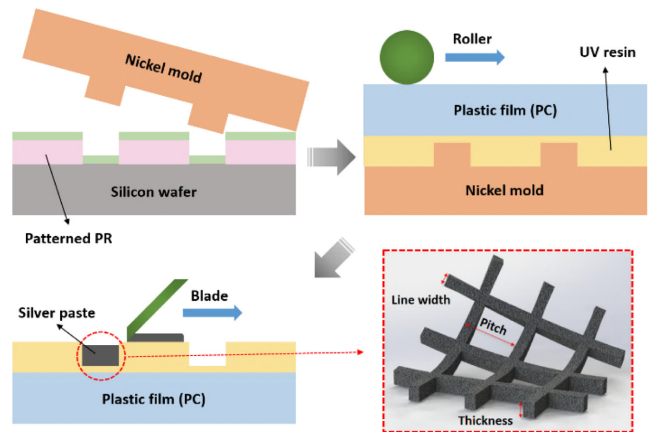


Fig. 1 Fabrication process and structure of silver mesh

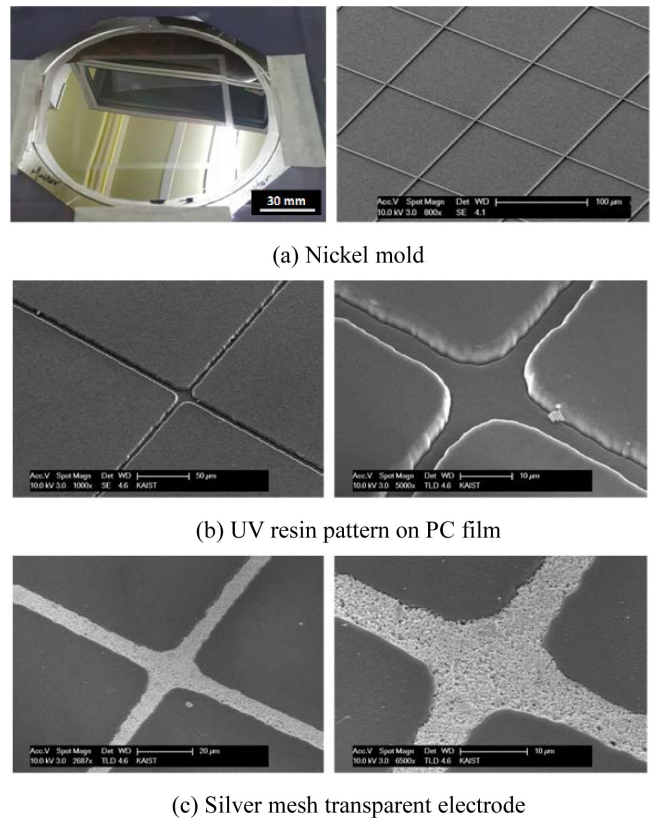
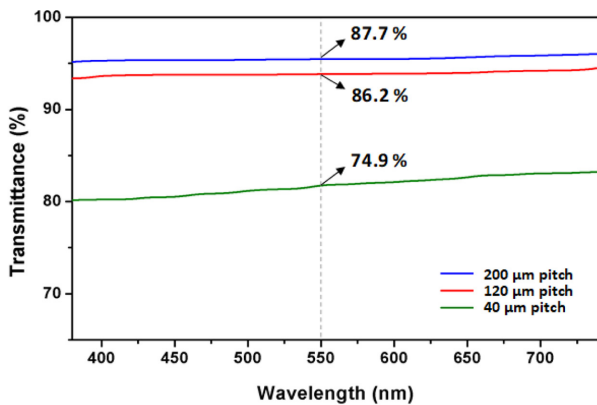


Fig. 2 SEM image of fabrication result

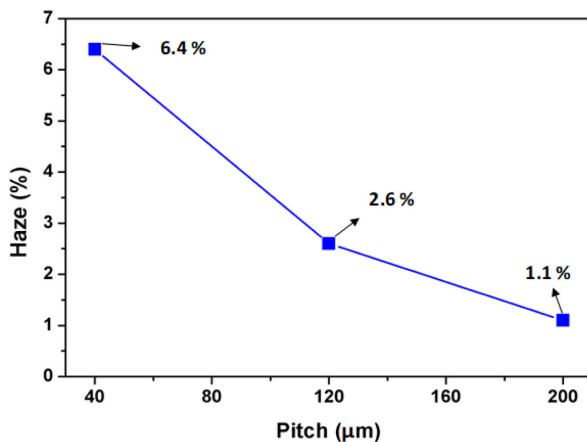
2.2 투명전극 특성 평가

Fig. 3은 실버 메쉬의 선폭을 $3.5\ \mu\text{m}$, 두께는 $3.5\ \mu\text{m}$ 로 고정하고, 간격을 $40\ \mu\text{m}$ 부터 $200\ \mu\text{m}$ 까지 변화시키며 이에 따른 투과율, 헤이즈, 면저항 특성을 측정하여 비교해보았다.

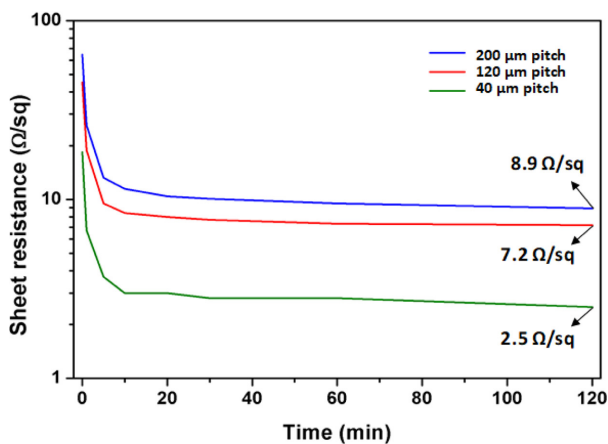
Fig. 3(a)는 메쉬의 간격에 따른 가시광 영역에서의 기판 대비 투명 전극의 투과율 값이다. 메쉬의 간격이 가장 좁은 $40\ \mu\text{m}$ 일 때의 투과율은 74.9%이고, 간격이 늘어날수록 투과율은 점차 증가하다가 가장 넓은 $200\ \mu\text{m}$ 일 때의 투과율은 87.7%였다. 실버 페이스트로 채워져 있는 부분은 빛이 통과하지 못하기 때문에



(a) Transmittance @ 550 nm vs. various pitches



(b) Haze vs. various pitches



(c) Sheet resistance vs. various pitches and time

Fig. 3 Performance of silver mesh transparent electrode

실버 메쉬 전극의 간격이 넓을 수록 빛을 막는 면적이 줄어들어 투과율이 향상되는 것이다.

Fig. 3(b)는 메쉬의 간격에 따른 헤이즈 특성의 비교이다. 메쉬의 간격이 가장 좁은 40 μm일 때의 헤이즈는 6.4%로 가장 높았으며, 간격이 늘어날수록 헤이즈는 점차 감소하다가 가장 넓은 200 μm일 때의 헤이즈는 1.1%였다. 헤이즈는 흐림도에 대한 척도이며 입사되는 빛이 산란에 의해 얼마나 경로가 변경되었는지에 대한 특성이다. 실버 메쉬 전극의 간격이 넓을수록 헤이즈가

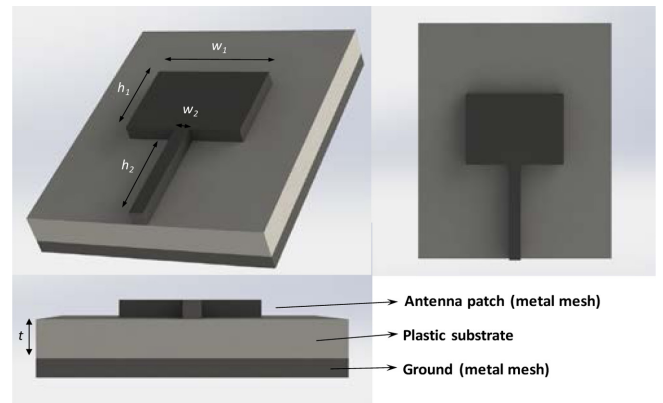


Fig. 4 Structure of transparent patch antenna

낮아짐을 알 수 있으며, 이 외에도 표면에 남아있는 실버 페이스트의 잔유물이나 실버 메쉬 패턴의 단차에 의해 헤이즈가 발생하게 되며 표면이 깨끗하고 실버 페이스트가 패턴 내부에 가득 채워져 있는지에 대한 정도가 영향을 줄 수 있다.

Fig. 3(c)는 열처리 시간과 메쉬의 간격에 따른 면저항 값을 비교하였다. 대류오븐을 이용하여 100°C 온도에서 2 시간 동안 열처리를 하여 실버 페이스트 내부에 포함되어 있는 솔벤트를 건조시키고 실버 나노파티클과 바인더들이 열에 의해 경화되면 전도성이 발현된다. 초기의 높은 면저항은 5 분 내에 급격하게 감소하게 되고 그 이후에는 서서히 감소하면서 일정한 면저항에 도달하게 되는 경향을 보였다. 실버 메쉬의 간격이 가장 좁은 40 μm 일 때의 면저항은 2.5 Ω/sq으로 가장 낮았으며, 간격이 넓어질수록 면저항이 점차 증가하다가 200 μm일 때에는 8.9 Ω/sq의 값을 나타내었다. 실버 메쉬의 간격이 넓어질수록 전자가 이동할 수 있는 공간이 감소하기 때문에 면저항이 증가하는 것을 볼 수 있다. 즉, 위 결과들에 의해 메쉬의 간격에 따라 투과율과 면저항 값이 트레이드-오프 관계를 가지고 있음을 확인할 수 있었다.

결과적으로, 제작한 실버 메쉬 투명 전극은 선폭 3.5 μm, 두께 3.5 μm, 간격 200 μm에서 87.7%의 높은 투과율, 1.1%의 낮은 헤이즈, 8.9 Ω/sq의 낮은 면저항의 우수한 특성을 가진다.

3. 투명 패치 안테나

3.1 패치 안테나 구조

패치 안테나는 인쇄형 안테나의 가장 일반적인 형태로 대역폭이 좁고 낮은 효율을 가지고 있으나 가격이 저렴하고 제작이 용이할 뿐만 아니라 회로와 함께 집적이 가능하여 널리 사용되는 평면 안테나 중 하나이다. 일반적으로 사각형이나 원형의 구리 패치로 제작되고 있으며 본 논문에서는 Fig. 4와 같이 사각형 형태의 패치 안테나를 설계하였다.

패치 안테나는 기판을 사이에 두고 상부에는 안테나, 하부에는 그라운드 면으로 구성되며 패치의 형상과 크기의 설계에 따라 공진 주파수 대역이 달라진다. 무선 LAN에서 사용하는 주파수

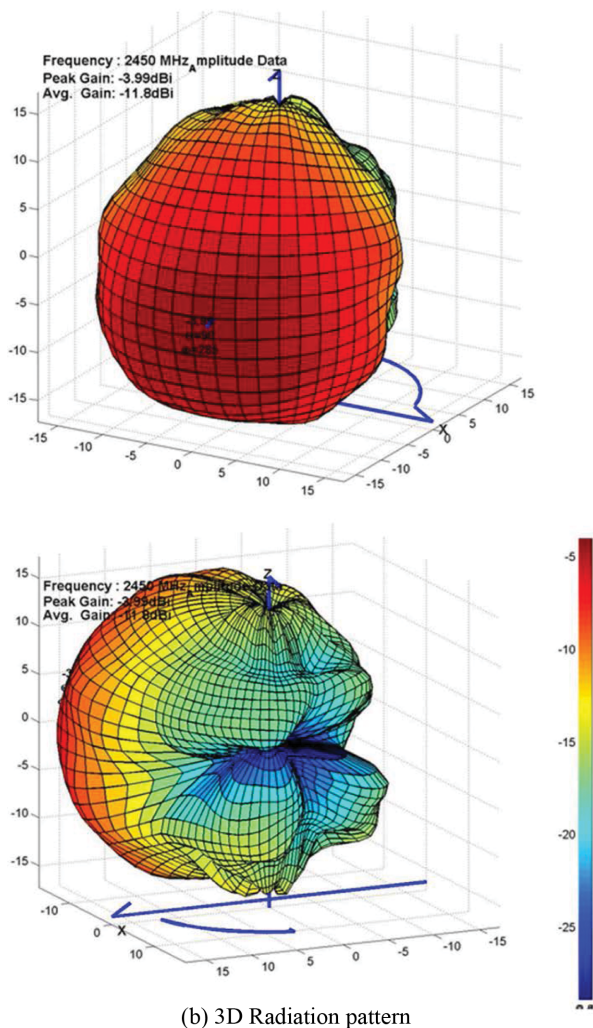
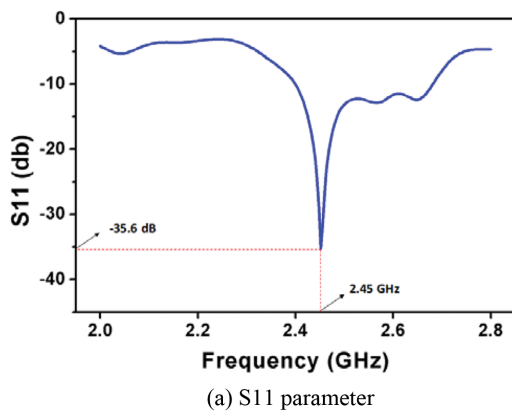


Fig. 5 Performance of transparent patch antenna

대역인 2.45 GHz에 맞추어 설계 하였으며 기판은 투명한 플라스틱 PC 필름을 이용하였다. 하나의 기판에 한 쪽 면에는 안테나 면을 가지는 실버 메쉬 투명전극을 형성하고 반대 쪽 면에는 그라운드 면을 가지는 실버 메쉬 투명전극을 형성하여 투명 패치 안테나를 제작하였다. 이 때, 기판의 두께 $t = 1.7$ mm, 안테나의 폭 $w_1 = 44.8$ mm, 안테나의 높이 $h_1 = 36.0$ mm, 피드라인의 폭 $w_2 = 5.2$ mm, 피드라인의 높이 $h_2 = 47.0$ mm이다.

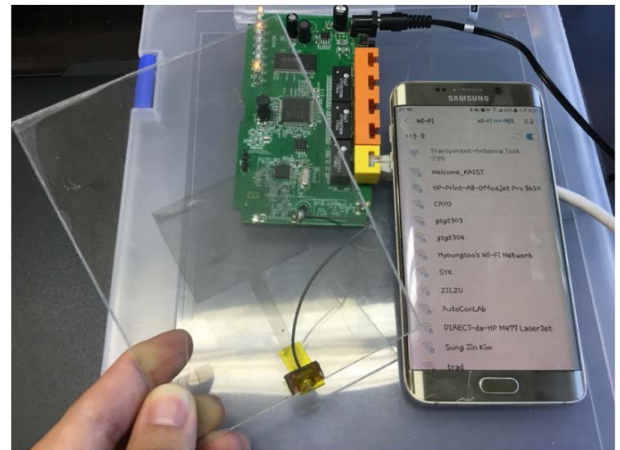


Fig. 6 Wi-Fi router using transparent patch antenna

3.2 안테나 특성 평가

제작한 투명 패치 안테나의 반사손실(S11 Parameter)과 측정 결과값을 Fig. 5에 나타내었다. 반사손실은 네트워크 분석기(Network Analyzer)를 이용하여 2 GHz에서 2.8 GHz주파수 영역에서 측정하였으며, Fig. 5(a)에서 보는 것과 같이 중심 주파수 2.45 GHz에서 공진하는 것을 알 수 있고 중심 주파수 2.45 GHz에서 -35.6 dB의 반사손실 값을 보였고 설계에서 예측한 공진 주파수 값과 동일한 값을 가졌다.

Fig. 5(b)는 투명 패치 안테나의 3차원 방사패턴 측정 결과이다. 일반적인 패치 안테나의 방사패턴과 거의 유사하게 구 형상을 가짐을 볼 수 있으며 주파수 2.45 GHz에서 효율 6.2%, 평균 이득 -11.8 dBi, 최대 이득 -3.99 dBi의 성능을 보였으며 이러한 결과를 토대로 실버 메쉬 투명 전극을 이용하여 투명 안테나 제작이 가능하고 안테나로 사용이 가능함을 알 수 있었다.

Fig. 6은 Wi-Fi 공유기의 안테나를 분리한 뒤, 제작한 투명 패치 안테나를 연결하여 실제로 스마트폰에서 Wi-Fi 신호 수신이 가능한지를 확인해 본 결과이다. 안테나에서 10 m 이내의 거리에서는 신호를 원활하게 수신할 수 있었으며 거리가 멀어질수록 신호가 조금씩 약해짐을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 논문에서는 기존에 널리 사용되는 ITO 투명 전극 대신에 실버 페이스트를 이용한 실버 메쉬 투명 전극 제작 방법을 이용하여 투명 패치 안테나를 제작하였다.

실버 메쉬 투명 전극은 선폭 3.5 μ m, 두께 3.5 μ m, 간격 200 μ m에서 87.7%의 높은 투과율, 1.1%의 낮은 헤이즈, 8.9 Ω /sq의 낮은 면저항의 우수한 특성을 가지며, 이를 플라스틱 소재인 PC 기판의 양면에 각각 안테나와 그라운드 패턴을 형성하여 투명 패치 안테나를 만들었다.

안테나 패치는 사각형 형태로 무선 LAN에서 사용하는 주파수 영역인 2.45 GHz에 맞게 패치의 폭은 44.8 mm, 높이는 36.0 mm,

피드라인의 폭은 5.2 mm, 높이는 47.0 mm로 설계하였다.

제작한 안테나의 반사손실 및 방사패턴을 측정해본 결과 반사손실은 공진 주파수 2.45 GHz에서 -35.6 dB의 값을 보였으며, 방사패턴은 구 형상으로 효율은 6.2%, 평균 이득 -11.8 dBi, 최대 이득 -3.99 dBi의 성능을 얻을 수 있었다.

마지막으로 Wi-Fi 공유기의 안테나로 대체하여 실제 스마트폰에서 Wi-Fi 신호 수신을 원활하게 할 수 있음을 확인하였다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 대전창조경제혁신센터의 수요기반 공공기술 매칭 사업화 지원과 BK 21 플러스 사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

REFERENCES

1. Bedi, G., Venayagamoorthy, G. K., Singh, R., Brooks, R. R., and Wang, K.-C., "Review of Internet of Things (IoT) in Electric Power and Energy Systems," *IEEE Internet of Things Journal*, Vol. 5, No. 2, pp. 847-870, 2018.
2. Hong, S., Kang, S. H., Kim, Y., and Jung, C. W., "Transparent and Flexible Antenna for Wearable Glasses Applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 64, No. 7, pp. 2797-2804, 2016.
3. Elobaid, H. A. E., Rahim, S. K. A., Himdi, M., Castel, X., and Kasgari, M. A., "A Transparent and Flexible Polymer-Fabric Tissue UWB Antenna for Future Wireless Networks," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 16, pp. 1333-1336, 2017.
4. Sierros, K. A., Morris, N. J., Ramji, K., and Cairns, D. R., "Stress-Corrosion Cracking of Indium Tin Oxide Coated Polyethylene Terephthalate for Flexible Optoelectronic Devices," *Thin Solid Films*, Vol. 517, No. 8, pp. 2590-2595, 2009.
5. Yu, L., Shearer, C., and Shapter, J., "Recent Development of Carbon Nanotube Transparent Conductive Films," *Chemical Reviews*, Vol. 116, No. 22, pp. 13413-13453, 2016.
6. Habisreutinger, S. N., Nicholas, R. J., and Snaith, H. J., "Carbon Nanotubes in Perovskite Solar Cells," *Advanced Energy Materials*, Vol. 7, No. 10, Paper No. 1601839, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/aenm.201601839> (Accessed 12 JUL 2018)
7. Xu, Y. and Liu, J., "Graphene as Transparent Electrodes: Fabrication and New Emerging Applications," *Small*, Vol. 12, No. 11, pp. 1400-1419, 2016.
8. Jang, H., Park, Y. J., Chen, X., Das, T., Kim, M. S., et al., "Graphene Based Flexible and Stretchable Electronics," *Advanced Materials*, Vol. 28, No. 22, pp. 4184-4202, 2016.
9. Wang, Y., Zhu, C., Pfattner, R., Yan, H., Jin, L., et al., "A Highly Stretchable, Transparent, and Conductive Polymer," *Science Advances*, Vol. 3, No. 3, pp. e1602076, <http://advances.sciencemag.org/content/3/3/e1602076> (Accessed 12 JUL 2018)
10. Zhang, X., Wu, J., Wang, J., Zhang, J., Yang, Q., et al., "Highly Conductive PEDOT: PSS Transparent Electrode Prepared by a Post-Spin-Rinsing Method for Efficient ITO-Free Polymer Solar Cells," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 144, pp. 143-149, 2016.
11. Song, C.-H., Han, C. J., Ju, B.-K., and Kim, J.-W., "Photoenhanced Patterning of Metal Nanowire Networks for Fabrication of Ultraflexible Transparent Devices," *ACS Applied Materials & Interfaces*, Vol. 8, No. 1, pp. 480-489, 2016.
12. Xiong, W., Liu, H., Chen, Y., Zheng, M., Zhao, Y., et al., "Highly Conductive, Air Stable Silver Nanowire@ Iongel Composite Films Toward Flexible Transparent Electrodes," *Advanced Materials*, Vol. 28, No. 33, pp. 7167-7172, 2016.
13. Jang, S., Jung, W., Kim, C., Won, P., Lee, S., et al., "A Three-Dimensional Metal Grid Mesh as a Practical Alternative to ITO," *Nanoscale*, Vol. 8, No. 29, pp. 14257-14263, 2016.
14. Zhou, W., Chen, J., Li, Y., Wang, D., Chen, J., et al., "Copper Mesh Templated by Breath-Figure Polymer Films as Flexible Transparent Electrodes for Organic Photovoltaic Devices," *ACS Applied Materials & Interfaces*, Vol. 8, No. 17, pp. 11122-11127, 2016.
15. Chen, X., Guo, W., Xie, L., Wei, C., Zhuang, J., et al., "Embedded Ag/Ni Metal-Mesh with Low Surface Roughness as Transparent Conductive Electrode for Optoelectronic Applications," *ACS Applied Materials & Interfaces*, Vol. 9, No. 42, pp. 37048-37054, 2017.