

근거리 통신용 (2.5 GHz) Microstrip Patch 안테나 설계

작성자: 유준식

학번: 20194696

학과: 물리학과

과목: 마이크로파회로설계 최종프로젝트

제출일: 2025년 6월 11일

1 안테나 이론

안테나에 대한 가장 물리학적 이해를 하고 싶다. 전하를 띤 입자가 운동하면 주변의 전자기장이 바뀐다. 전자기장은 '국소적(local)'으로 바뀐다. 전하가 변하면 모든 시공간의 전자기장이 즉각 변하는게 아니고 일정한 시간이 걸린다는 뜻이다. 따라서 전하가 운동할 때 주변의 전자기장은 각기 다 달라진다. 쌍극자를 진동시키면 이렇게 달라지는 전자기장이 전자기파의 형태가 되어 방사가 될 수 있다. 쌍극자의 진동은 막대형태의 도선에 교류 전류를 흘려줌으로서 구현 할 수 있다. 이 때 도선의 길이는 교류전류 파장의 절반이다. 이 것이 쌍극안테나이다. 안테나는 송수신 구분이 따로 없다. 다른 안테나도 기본적인 틀을 같이한다. 마이크로 스트립 안테나의 경우, 안테나의 길이를 원하는 주파수에 맞게 잘 설계하면, 안테나에 공진이 일어나면서 양 쪽 끝으로 전자기장이 강하게 전달되면서 이 전자기장이 finge field를 통해 공기중으로 방사된다. [1]

이렇게 안테나는 전류, 전압 신호를 공기중으로 전자기파를 통해 전달하는 중요한 장치이다. 안테나의 성능을 측정할 수 있는 파라미터에는 다음과 같은 것들이 있다.

- Radiation Efficiency versus frequency

$$\eta_r = \frac{P_{rad}}{P_{in}} = \frac{P_{rad}}{P_{rad} + P_{loss}}$$

주파수에 따라 입력에 대한 복사전력을 나타내는 안테나 성능지표이다.

- Peak Gain versus frequency

안테나는 특정방향으로 전자기파를 방사하는 방향성이 존재하고 안테나 이득이라는 것은 등방적으로 퍼지는 전자기파의 강도에 대한 특정 방향에 대한 전자기파의 강도로 나타나는 상대적인 이득이다. 안테나의 이득이 높다는 것은 특정방향으로 방사가 잘 이루어지고 있다는 뜻이다. 하지만 이 것은 곧 다른 방향으로 전자기파가 잘 전달될 수 없음을 의미한다.

- S-parameter 안테나는 1포트 시스템이다. 한쪽에서 신호가 들어오면 안테나에서는 공기중으로 방사 시킨다. 때문에 S_{11} 파라미터 값만이 존재한다. 어떤 주파수에서 S_{11} 값이 작다는 것은 그 주파수에서 공기중으로 방사가 잘 이루어져 반사되는 신호가 작다는 뜻이다. 직접 신호가 잘 수신되는지를 확인 할 수도 있지만 S_{11} 값을 이용해 안테나의 성능을 측정할 수도 있다.

2.4Ghz 대역의 근거리 통신

이 주파수 대역은 별도의 주파수 사용 허가가 없어도 사용할 수 있도록 국제적인 약속이되어 있다. 아마추어 무선통신, 블루투스, Wifi 등의 근거리 통신기술에 많이 쓰인다. 많이 쓰이기 때문에 그만큼 간섭이 심하다.

2 설계계획

설계 스펙 정의

2.4 GHz 2.5 GHz 사이에서 공진하는 Microstrip Patch 안테나(기판: FR-4 (1.6 mm 두께))
--

제작 방향

사각형 모양의 rectangular patch antenna를 설계한다.

그리고 안테나를 신호선에 연결하고 임피던스 매칭을 수행해야 한다. 제작 조건을 고려할 때 $\lambda/4$ 변환기를 이용한 매칭과 inset 피드를 이용한 매칭 두 가지 방법이 가능하다.

$\lambda/4$ 변환기를 사용할 경우 122Ω 선로를 써야 하는데, 폭이 0.4mm로 매우 작아 구리테이프를 직접 잘라서 제작해야하는 상황에서 오차가 크고 끊길 위험도 있다고 생각했다. 또 중간 매칭 선로의 길이가 엄밀하게 정해져 있기 때문에 안테나 전체 크기가 다소 커지거나 조정하기 어려울 수 있다.

반면 인셋피드 방식을 이용할 경우 단순히 50Ω 선로를 안테나 안쪽으로 파서 연결해줌으로써 임피던스 매칭을 이룰 수 있다. 때문에 인셋피드 방식을 선택하였다.

기판은 가로세로 비율이 다른 직사각형이다. 패치 길이방향으로 길게 해주는 방법과, 패치 폭 방향으로 길게 해주는 방법이 있다. Finge field로 인한 방사가 잘 이루어 지도록 패치길이 방향으로 길게 하는 것이 좋을 것이라 예측 하였다. 기판의 여유공간이 넓으므로 더 잘 방사할 것이라 예측했다.

피드라인을 안테나 안쪽으로 파고 들어갈 때, 피드라인과 안테나사이의 거리를 너무 좁게하면 피드라인과 안테나 사이에 축전기 성분이 생길 것이고 너무 넓게 하면 안테나의 성능이 떨어질 것이기 때문에 적절한 값을 선택해 주어야 한다. 50Ω 선로 폭과 비슷한 정도로 양쪽 거리를 각각 띄어 주었다.

설계 파라미터 계산

계산공식

안테나의 길이와 폭

안테나에서 원하는 신호를 수신하기 위해 가장 중요한 것은 안테나의 길이를 신호 파장의 절반으로 설계하는 것이다. 마이크로 스트립 패치안테나의 경우 안테나의 길이와 폭 등에 대한 값이 계산되어 있어서 그 것을 활용 하겠다.[2]

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

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12h}{W}}}, \lambda_d = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_{eff}}}$$

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

$$L = \frac{\lambda_d}{2} - 2\Delta L$$

인셋피드의 길이

$$R_{in}(y = y_0) = \frac{1}{2(G_1 + G_{12})} \cos^2 \left(\frac{\pi}{L} y_0 \right)$$

$$G_1 = \frac{1}{120\pi^2} \int_0^\pi \left[\frac{\sin\left(\frac{K_0 W}{2} \cos \theta\right)}{\cos \theta} \right]^2 \sin^3 \theta d\theta$$

$$G_{12} = \frac{1}{120\pi^2} \int_0^\pi \left[\frac{\sin\left(\frac{K_0 W}{2} \cos \theta\right)}{\cos \theta} \right]^2 J_0(K_0 L \sin \theta) \sin^3 \theta d\theta$$

온라인 계산기 이용

Rectangular Microstrip Patch Antenna Calculator

Input

Resonant Frequency f_r 2.45 GHz

Substrate Relative Permittivity ϵ_r 4.4

Substrate Height h 1.6 millimeter

Output

Patch Physical Width W 37.26004 millimeter

Patch Physical Length L 28.82964 millimeter

Effective Length L_{eff} 3.03069 centimeter

Input Impedance at Edge($y = 0$) R_{in} 321.44529 ohm

50 ohm Feed Position y_0 1.06945 centimeter

Single Slot Conductance G_1 0.00096929 mho

Mutual Conductance G_{12} 0.00058619 mho

Directivity D 6.085 dBi

Compute

Figure 1: online calculator

Width : 37 mm

Length : 28 mm

Inset feed length : 1 cm

위의 값을 이용해 HFSS 시뮬레이션을 시작했다.

3 HFSS 시뮬레이션

50Ω매칭

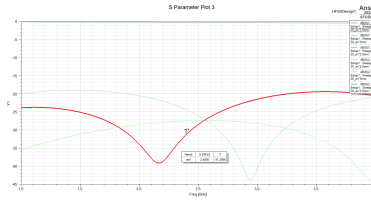


Figure 2: 50Ω 매칭

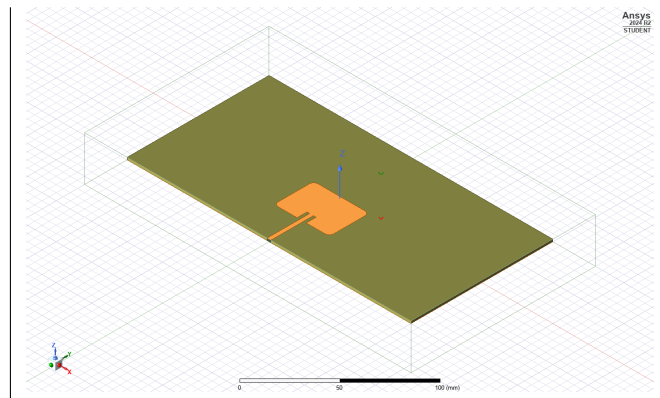
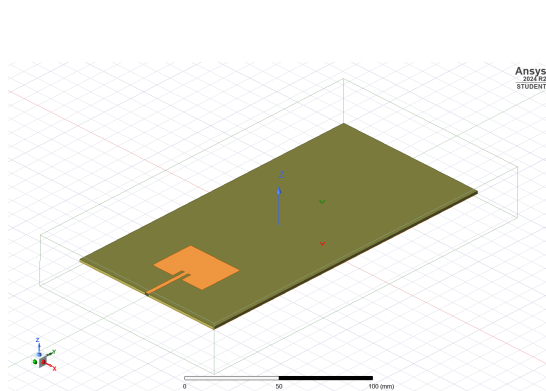
2.4GHz 근처에서 모두 -20dB 이상 내려가며 신호가 잘 통과하는 것을 볼 수 있다. 이 때 선로 폭은 2.5mm 이다.

50Ω매칭 선로 폭 : 2.5 mm

기판방향

시뮬레이션 결과, 예측한대로 안테나 길이방향으로 길게 하는 것이 안테나 폭방향으로 길게하는 것보다 좋은 결과가 나왔다.

각각 공진주파수에서 -31dB , -26.5dB .



따라서 안테나 길이방향을 길게 해주었다.

인셋피드 길이

온라인 계산기에서 제시한 값으로 시작하였지만 최종적으로는 그보다 훨씬 작은 값에서 가장 낮은 S_{11} 값을 가졌다. 인셋피드의 길이를 조절해가며 시뮬레이션 하였을 때 7mm일 때 다른 것과 다르게 눈에 띄게 좋은 임피던스 매칭결과가 나왔다.

인셋피드 길이 : 7 mm

안테나 길이

공진주파수를 맞추기 위해 가장 중요한 파라미터인 안테나의 길이를 조정한다.

2.41GHz에서 32dB의 Return Loss를 가졌다. 더 정확한 값은 1차 측정 후 보정하기로 하였다.

패치 안테나 길이(L) : 29 mm

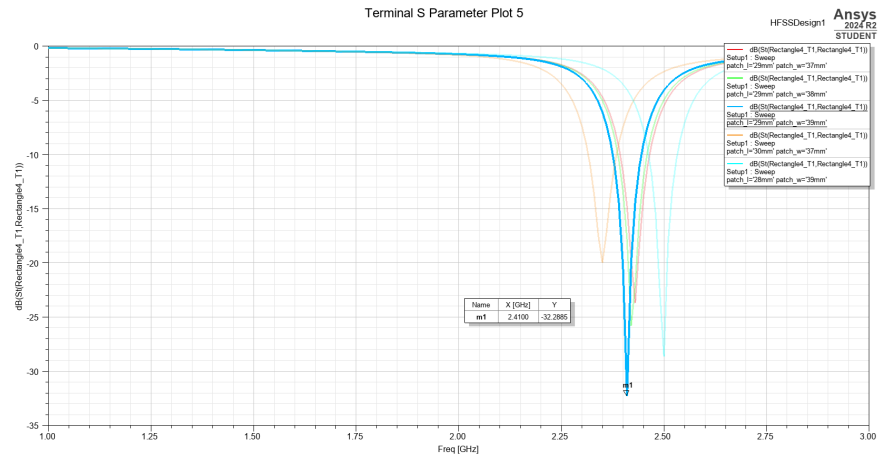


Figure 3: 안테나 길이(L)=28mm

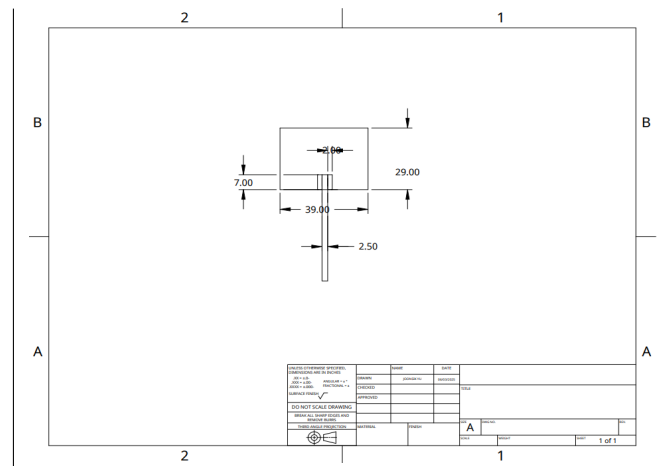
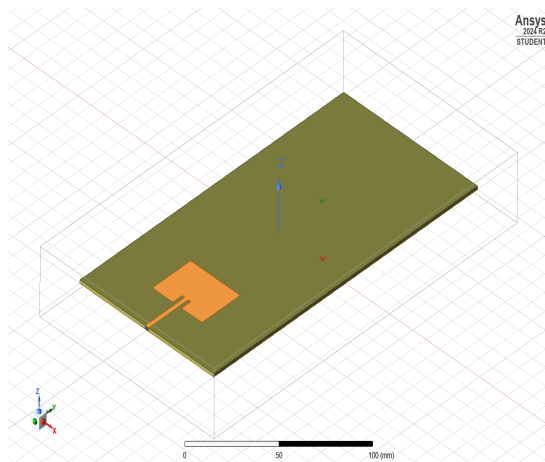
안테나 폭

대역폭(BW)을 향상 시키기 위해 안테나의 폭을 조정한다.

폭을 조금씩 넓혀 주었지만 대역폭의 큰 변화는 없었다. 이 역시 1차 측정 후 보정하기로 하였다. 시뮬레이션 결과로 다음과 같이 사용했을때 가장 좋았다.

패치 안테나 폭(W) : 39 mm

최종 레이아웃



4 1차 제작 및 측정

1차시도

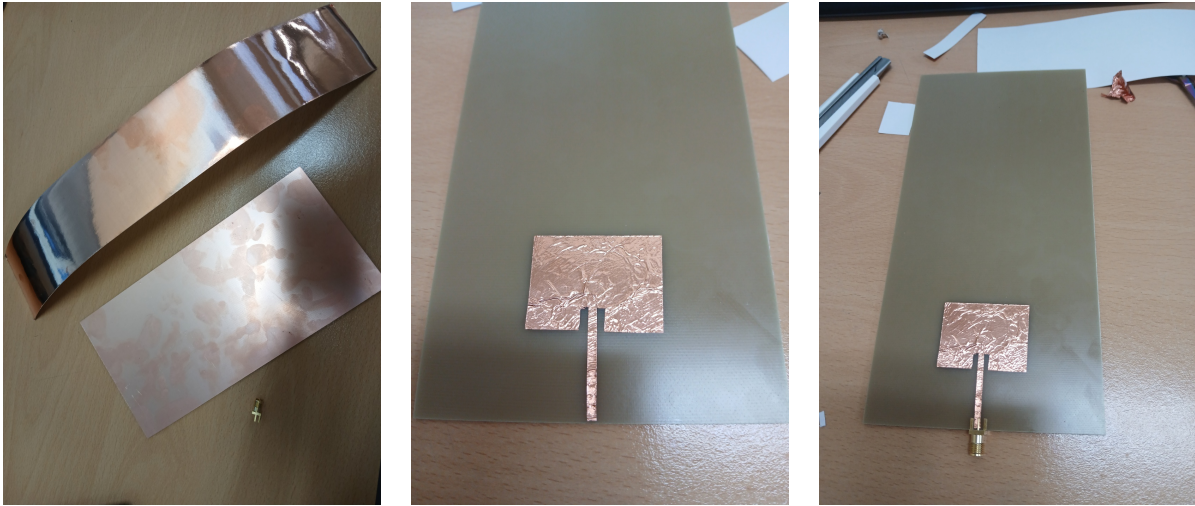


Figure 4: 제작과정-구리 테이프 뒷면에 자를 이용해 설계 치수대로 도면을 그린다. 그 후 가위로 잘라서 붙인다.

하지만 이렇게 할 경우 몇 가지 문제가 있다.

- 시중에서 구할 수 있는 자는 스케일이 1mm 단위이므로 정밀한 치수 조절 불가능.(버니어캘리퍼스나 마이크로 미터같은 도구가 필요해 보임)
- 치수대로 자른 구리테이프를 기판에 깔끔하게 붙이기가 상당히 까다로움.

버니어캘리퍼스를 이용해 정밀하게 재고자 하였다. 하지만 이렇게 해도 구리테이프를 기판에 붙이는 과정은 역시 쉽지 않았고 조금씩 찢어지고 중간에 공기가 들어가는 등의 문제가 생겼다. 그래서 구리테이프를 먼저 붙인 후, 그 위에 도면을 조심스레 그린후 칼로 자르고자 하였다. 그런데 도면을 그릴 때 버니어캘리퍼스를 이용하는 것보다도 더 좋은 방법이 있다. 컴퓨터를 이용하는 것이다. 컴퓨터로 도면을 그린 후 그 것을 출력하면 아주 정확하게 설계치수 그대로 사용할 수 있다.

2차시도

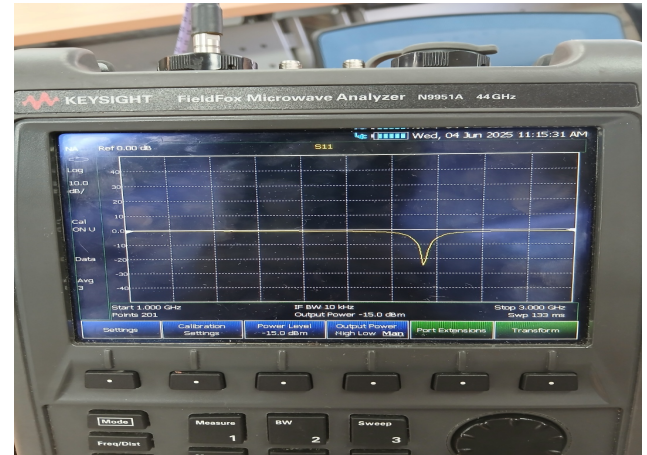
OnShape 온라인 CAD 프로그램을 이용하여 안테나 형상을 그리고 출력을 한다. (프로그램 상에서 1:1 축척으로 내보낸 후 프린터에서 출력할 때도 반드시 '실제크기' 설정을 해주어야 원하는 결과가 나온다.) 출력한 도면을 자로 재서 정말 원하는 치수인지 다시 한번 확인한다. 그리고 기판에 구리테이프를 먼저 크게 붙인후 도면을 가위로 조심스레 자르고 덧댄다. 그 다음 칼로 도면을 따라 잘라내면 그 전보다 훨씬 깔끔하게 붙일 수 있다. 또한 컴퓨터로 설계하였기 때문에 정확한 값으로 그릴 수 있었다.

납땜을 해서 커넥터도 연결해준다. 커넥터(동축케이블)과 기판을 납땜할 때 사이의 공간이 생기면 원치않는 축전기 성분이 생기게 되므로 성능이 저하 될 수 있으므로 신경쓰면서 하였다.



Figure 5: 제작과정-도면을 1:1축척으로 출력한다. 구리테이프를 먼저 붙이고 그 위에 출력한 도면을 덧댄다(폴로 살짝 붙인다). 그리고 칼로 기판에 흠집이 나지 않게 조심스레 자른다.

측정 결과



	공진주파수[Ghz]	RL[dB]
시뮬레이션	2.41	32.2
실측	2.34	25

5 2차 제작 및 측정

1차 측정의 개선사항

- 공진주파수가 낮았다.
- 대역폭이 다소 좁았다.
- RL은 적절하다고 판단하였다.

공진주파수를 올려야하므로 안테나의 길이를 줄여야 하는데 얼마나 줄여야 할까? 시뮬레이션과 실측 사이에 $2.41 - 2.34 = 0.07$ 만큼의 차이가 있다. 시뮬레이션 상에서 2.52Ghz 를 맞춰주면 실측 값에서 2.45Ghz의 공진주파수를 가지게 될 것으로 예측한다. 따라서 안테나 길이를 줄여서 시뮬레이션 상 공진주파수가 2.52Ghz 부근에 오도록 맞춘다.

안테나의 길이를 29m → 28mm로 조정하였을 때 2.5Ghz의 공진주파수를 가지게 되었다.

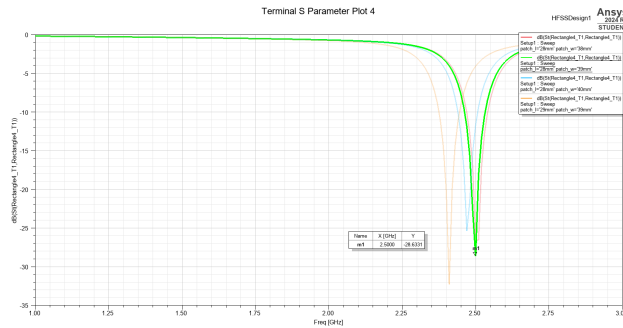
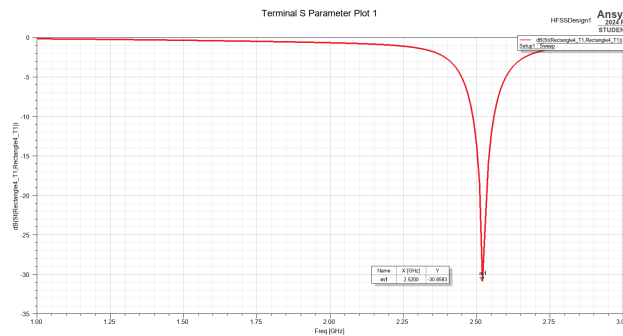


Figure 6: 공진주파수 향상

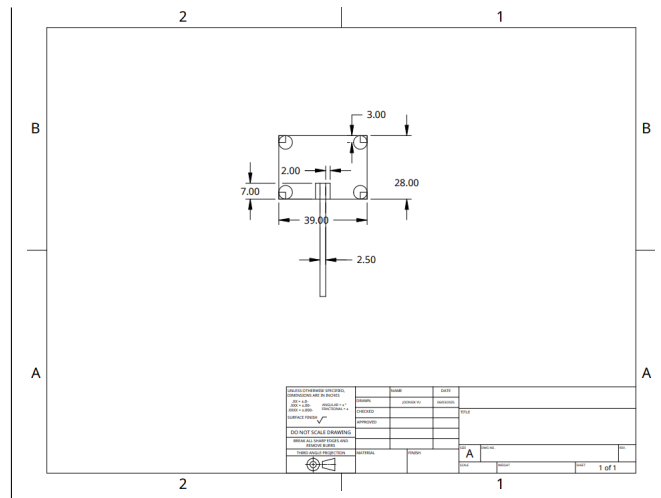
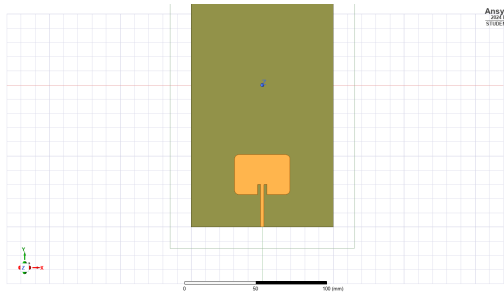
대역폭 향상을 위해선 안테나의 폭을 넓혀가며 시뮬레이션 하였다. 하지만 안테나의 폭을 조절하여도 대역폭에 유의미한 변화는 나타나지 않았다. 따라서 다른 방법을 시도하였다.

안테나 가장자리에 fillet을 주어 꼭짓점들을 부드럽게 만드는 방법을 시도 하였다. 이렇게 하면 전류가 가장자리에서 고르게 분포해 공진이 더 잘 일어나고, 양끝의 길이가 조금 변화하므로 더 넓은 범위의 주파수 대역에서 공진이 일어나 대역폭이 향상 되지 않을 까 예측하였다. fillet을 주었을 때 시뮬레이션 결과는 다음과 같다.



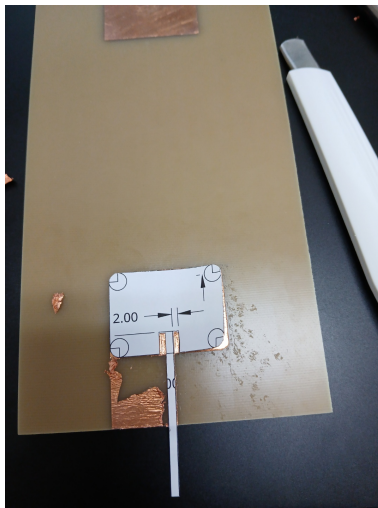
예상과 다르게 대역폭의 큰 향상은 없었다. 하지만 공진주파수가 원래 목표치인 2.52Ghz에 도달하고 RL도 더 향상되었기에 이 방법을 계속 쓰기로 했다. 대역폭을 넓히기 위해 다른 여러 방법도 시도해 보았으나 큰차이는 없었다.

최종 레이아웃



제작과정의 개선사항

이전과 비슷한 방법으로 반대 쪽에 다시 제작하였다. 이전보다 전체적으로 깔끔하게 제작되었다.



측정결과

6월 11일 오전 11시 측정 예정	공진주파수[Ghz]	RL[dB]
시뮬레이션	2.52	30.85
실측		

6 결과 분석

안테나 성능지표

HFSS 시뮬레이션을 통해 여러가지 안테나의 성능을 나타내는 지표를 볼 수 있다.

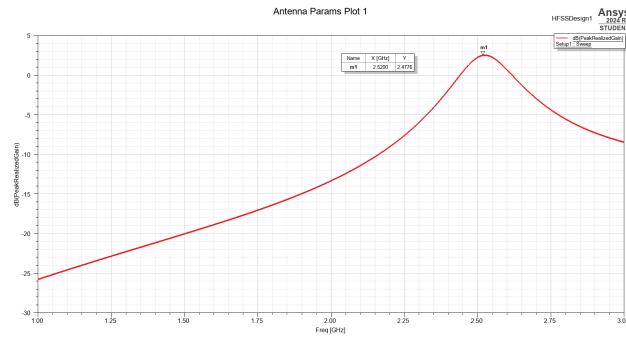


Figure 7: 공진주파수에서 가장 높은 안테나 이득을 가진다.

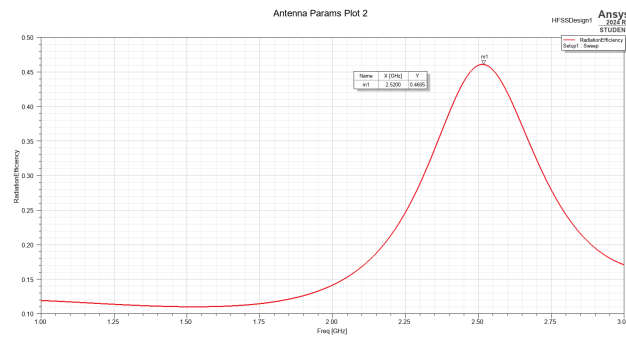


Figure 8: 공진주파수에서 가장 높은 방사효율을 가진다.

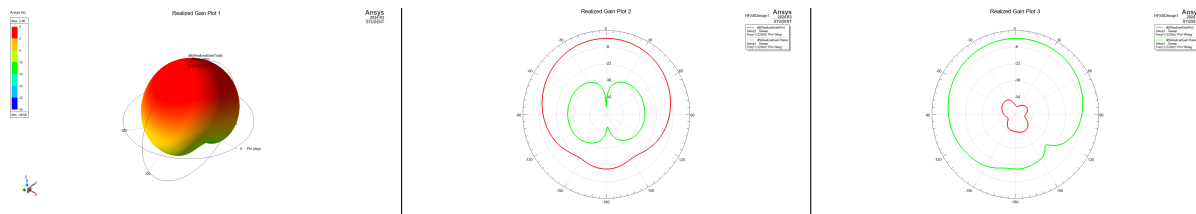


Figure 9: 안테나 이득. 각각 polar plot, xz평면, yz평면

SDR 신호 확인

그런데 실제로 이 안테나가 전자기파를 잘 수신할까? 그러다가 원래 가지고 있던 SDR 장치가 떠올랐다. 다행히 내가 가지고 있던 SDR도 SMA 동축케이블 규격을 가지고 있었다. 그래서 마이크로스트립 패치안테나와 SDR을 연결해봤다. 컴퓨터에 SDRsharp 이라는 프로그램을 깔고 SDR을 연결하면 신호를 직접 확인해 볼 수 있다.

SDR을 살 때 같이 제공되는 잘 설계된 안테나를 쓰면 역시 신호가 잘 받아진다. 직접 제작한 안테나를 연결하였을 때는 신호가 아주 작게 잡혔다. 하지만 시간이 지나면서 신호가 잡혔다 안잡혔다 하여 정말 제대로 수신을

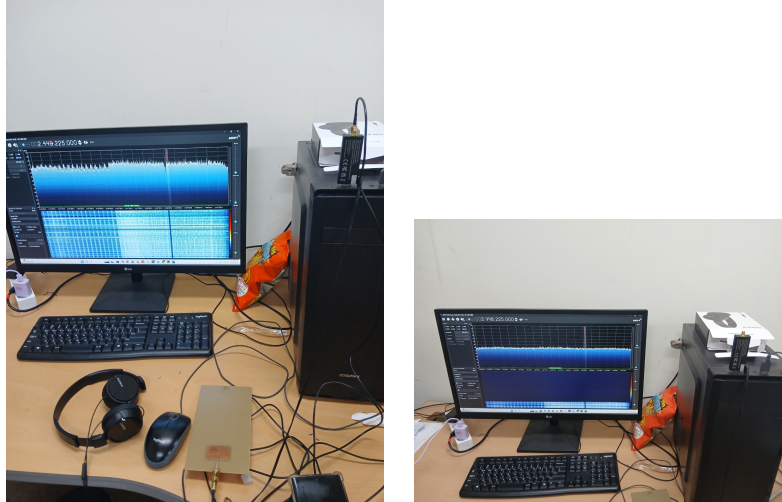


Figure 10: 안테나를 연결해주면 미약하지만 2.4Ghz 대역에서 신호가 잡히는걸 확인해 볼 수 있었다.

하는지는 확신할 수는 없었다.

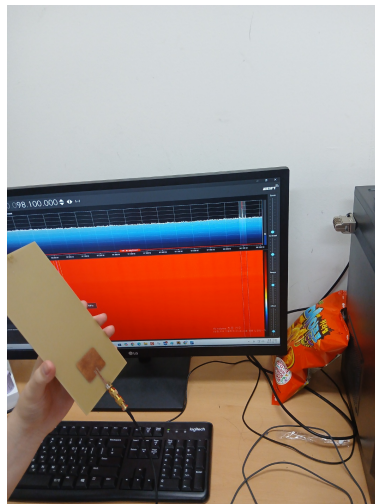


Figure 11: FM 라디오 주파수 신호가 미세하게 잡히는 모습

신기하게도 생뚱맞게 96Mhz 의 FM 라디오 대역에서 아주 약간의 신호가 잡혔다. 프로그램상에서 복조해준 소리를 들어보면 정말 작지만 헤드셋을 끼고 주의깊게 들으면 들릴만한 라디오에서 들려주는 노래를 들을 수 있었다. 이 안테나가 비록 2.5Ghz 용 이긴 하지만 다른 주파수의 신호도 수신이 가능하긴 할 것이다. 안테나라는 건 사실 어쩌면 그냥 도체덩어리이다. 그래서 물론 최적화가 안돼있지만 저런 다른신호도 수신이 가능한 것이다.

References

- [1] Griffiths, D.J. (2013). *Introduction to Electrodynamics*. 4th ed. Boston: Pearson.
- [2] Balanis, C.A. (2016). *Antenna Theory: Analysis and Design*. 4th ed. Hoboken, New Jersey: Wiley, pp. 788–814, Chapter 14.2 Rectangular Patch.
- [3] Javali, A. (2022). Design of Rectangular Microstrip Patch Antenna for Wi-Fi Application: Enhancement of Bandwidth and Gain. In *2022 IEEE World Conference on Applied Intelligence and Computing (AIC)*. IEEE. pp. 552-554. doi: 10.1109/AIC55036.2022.9848972.