

## 정방형 메탈메쉬 투명전극을 이용한 투명 사각 패치 안테나

Transparent Rectangular Patch Antenna Using  
Square Metal Mesh Transparent Electrode

강 석 현 · 정 창 원

Seok Hyon Kang · Chang Won Jung

## 요 약

본 논문은 향후 투명 디스플레이, 스마트글래스(smart glass) 등의 그 활용도가 증가 추세에 있는 투명전극과 관련된 논문이며, 본 논문에서는 투명 안테나 등의 투명 고주파 수동소자 설계 시, 투명 디스플레이 등에 가장 많이 사용되고 있는 ITO(Indium-Tin-Oxide)를 이용한 박막형(thin film type) 투명전극의 낮은 전기적 특성(면저항 $>5 (\Omega/\text{sq})$ )으로 인한 성능 저하를 개선하고자, 고주파 소자에 가장 일반적으로 사용되는 도체인 구리선(copper wire)으로 구현되는 정방형 메탈메쉬(square metal mesh)를 이용하여 투명전극을 구현하고, 이를 기본 단위로 하여 투명 패치 안테나를 구현하였고, 그 성능을 비교 분석하였다. 본 논문에서는 투명전극의 기본 설계 블록인 정방형 메탈메쉬의 광학적 특성(광 투과도) 및 전기적 특성(면저항)을 측정 및 분석하였고, 이를 이용하여 투명 패치 안테나를 설계, 측정, 분석하였다. 또한, 정방형 메탈메쉬는 광 투과도를 높이기 위해 얇은 구리선( $w=0.2 \text{ mm}$ )을 사용하였으며, 망(mesh) 크기( $l=1, 2 \text{ mm}$ )에 따른 광 투과도와 안테나 성능(방사효율, 방사패턴)과의 관계를 분석하였다. 투명 안테나 성능 측정 결과, 안테나 성능은 정방형 메탈메쉬의 광학적 특성과 반비례하며, 실제 활용 시에는 광학적 특성, 전기적 특성, 제작비용을 종합적으로 고려하여, 응용에 따른 투명 안테나의 활용이 필요하다.

## Abstract

This paper reports the transparent electrode, which would be applied to transparent displays and smart glasses. Herein, a squared metal mesh with the most widely used copper wire in microwaves is studied for the alternating thin-film-type transparent and conducting indium tin oxide(ITO), with a low conductivity(sheet resistance  $> 5 \Omega/\text{sq.}$ ). The electromagnetic performance of a patch antenna with metal mesh is analyzed. This paper presents the results of the optical(OT, optical transparent) and electrical(sheet resistance) characteristics of a squared metal mesh, which is a basic design. To improve the OT, copper wire( $w=0.2 \text{ mm}$ ) is used in fabricating the squared metal mesh and the relationship between the OT and the antenna performance(radiation gain, radiation pattern) was analyzed according to the mesh size( $l=1, 2 \text{ mm}$ ). The measurement results show that the antenna performance and the optical characteristic are in inverse proportion to each other. In real applications, the optical and electrical characteristics, and the costs of production are to be considered.

Key words: Transparent Electrode, Metal Mesh, Transparent Antenna, Patch Antenna, Optical Transmittance

## I. 서 론

나사 (NASA)의 기술 메모에서 투명전극을 이용한 투

「이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구 지원으로 연구되었음.」

서울과학기술대학교 NID융합기술대학원(Graduate School of NID Fusion Technology, Seoul National University of Science and Technology)

· Manuscript received January 2, 2018 ; Revised March 23, 2018 ; Accepted March 29, 2018. (ID No. 20180102-002)

· Corresponding Author: Chang Won Jung (e-mail: changwonj@seoultech.ac.kr)

명 패치안테나를 구현한 것에 관한 발표 이후로 투명전극을 이용한 고주파용 투명 소자 및 부품에 대한 많은 관심을 받고 있다<sup>[1]</sup>. 투명전극 중에서는 최근까지 인듐주석 산화물, ITO(Indium-Tin-Oxide)의 박막형 투명전극이 가장 많이 알려져 있으며, 이는 현재 태양전지와 투명 디스플레이에 적용되고 있다.<sup>[2]</sup> 이러한 ITO는 약 90 %의 높은 광 투과율을 가지나, 비교적 50 Ω/sq의 큰 면저항을 가지고 있으며, 이는 태양전지 및 디스플레이에서처럼 광 투과도가 우선 시 되는 적용분야에는 적합하나, 고주파 수동소자(안테나, 전송선로 등)의 적용에서는 전기적 특성이 보다 우수한 투명전극의 사용이 요구되며, 따라서 ITO의 대안으로 더 좋은 면저항을 가진 다층 투명전극소재가 연구되어지고 있다<sup>[3][4]</sup>.

최근 높은 전기적 특성이 요구되는 투명전극으로 메탈 메쉬(Metal Mesh: MM)가 연구되고 있으며, 이는 ITO 또는 다층투명전극과 비교 시 광 투명도는 다소 낮거나 동등 수준을 유지하면서, 면저항이 낮고 제작비용이 저렴한 장점을 최대한 활용한 것이며, 고주파 수동소자인 안테나 및 전송선로의 성능이 일반적인 구리로 구현되는 수동소자의 성능 수준에 근접해 있다<sup>[3][5]</sup>. 마이크로 및 밀리미터 단위의 전도성 와이어를 이용한 메탈메쉬의 투명도는 그 구조가 균일하고 육안으로 확인되어 다른 투명전극과 같이 가시광선 투과스펙트럼으로 측정하지 않고, 전도성 와이어의 두께와 간격으로 계산된 투명도를 사용하며, 면저항은 전도도 측정값으로부터 계산된다.

본 논문에서는 두께가 수~수십 마이크로 단위의 전도성 와이어로 제작된 정방형 메탈메쉬(Square Metal Mesh: SMM)의 투명도를 이론적으로 계산한 값과 실험적으로 측정된 값을 비교 분석하였다. 복수의 메탈메쉬와 투명기판으로 구성되어 있을 때, 투명도의 이론적 계산법의 특징을 확인하였다. 또한 정방형 메탈메쉬를 이용하여 패치안테나를 설계 및 제작하여, 시뮬레이션 및 측정 결과를 비교 분석하였다.

## II. 정방형 메탈메쉬의 광 투과도 및 전도도

### 2-1 정방형 메탈메쉬의 광학적 특성

일반적으로 투명전극의 성능을 평가하는 성능지수(FoM,

Figure of Merit) 식 (1)은 광 투과도(OT, Optical Transmittance)와 면저항( $R_s$ , sheet resistance)의 역수의 곱으로 표현되며, 그 값이 높을수록, 즉 광 투과도는 높으며 면저항이 낮을수록 우수한 성능의 투명전극이라 볼 수 있다<sup>[6]</sup>. 본 연구에 사용된 정방형 메탈메쉬 투명전극은 그림 1과 같이 0.2 mm 동선( $w$ )을 1 mm( $l$ ) 간격으로 엮은 평직구조이다. 그림 1(a)의 정방형 메탈메쉬 투명전극 구조의 투명도는 그림 1(b) 단위셀의 투명도와 같다. 일반적으로 투명도는 전체면적에 대한 개구부의 비로 나타낼 수 있으며, 다음의 식 (2)와 같이 계산된 OT를 구할 수 있다.

$$FOM = \frac{OT^{10}}{R_s} \quad (1)$$

$$OT(\%) = 100 \times \left( \frac{l}{l+w} \right)^2 \quad (2)$$

식 (2)로 계산된 메탈메쉬의 투명도는 그림 1의 경우 66.29 %이다. 패치안테나와 같이 패치와 그라운드가 각각 기관의 상하에 존재할 때, 두 메탈메쉬 구조는 상하부로 겹치며, 그림 2와 같이 두 가지의 조건이 발생한다. 그림 2(a)는 정렬상태로 투명도가 가장 높을 때이며, 그림 2(b)는 비정렬상태로 투명도가 가장 낮을 때이다. 식 (2)를 이용하여 그림 2(a)와 (b)의 투명도를 계산하면, 각각 66.29 %와 36.20 %이다.

또한, 광학적 투명도를 측정하기 위해 그림 3과 같이

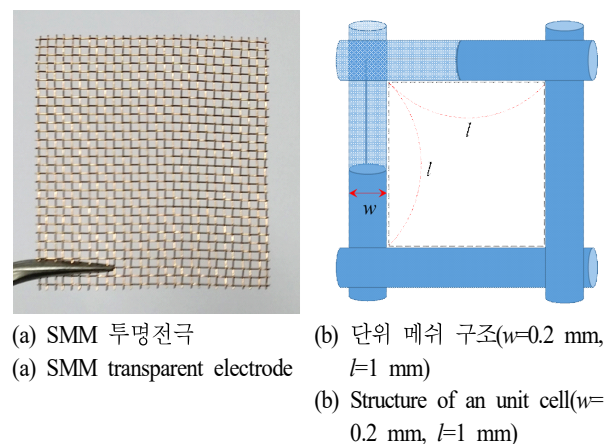


그림 1. 정방형 메탈메쉬(SMM)를 사용한 투명전극

Fig. 1. Transparent electrode using square metal mesh (SMM).

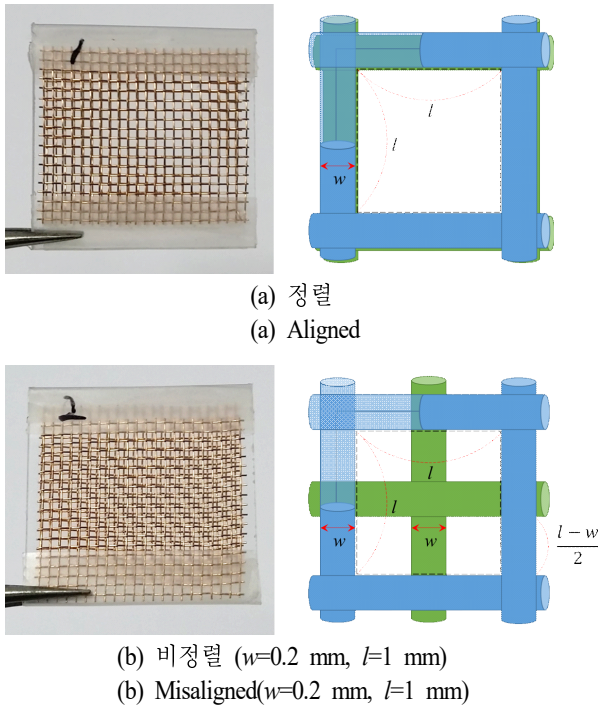


그림 2. 겹쳐진 메탈메쉬의 구조  
Fig. 2. Structure of overlapped metal mesh.

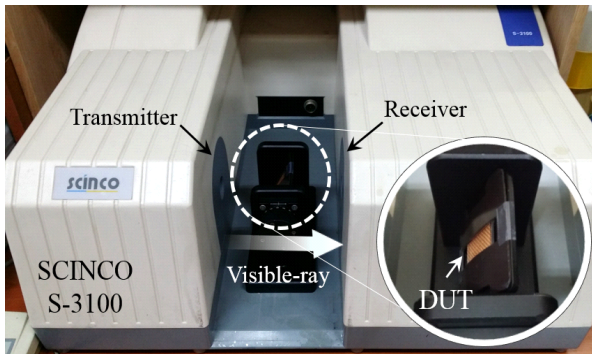


그림 3. 메탈메쉬의 광 투과도 측정  
Fig. 3. Transparency measurement of metal mesh.

가시광선 투과스펙트럼(SCINCO S-3100)으로 그림 2의 두 가지 메탈메쉬를 측정하였다. 측정된 시료는 아크릴기판 (acrylic), 단층의 메탈메시(1 MM), 아크릴 기판 상부에 단 층 메탈메시(1 MM+acrylic), 아크릴 기판 상하부에 두 개의 메탈메시가 있는 상태이며, 이는 정렬(aligned 2 MM+ acrylic)과 비정렬(misaligned 2 MM+acrylic)로 두 가지를 제작

측정하였다. 투명 아크릴(acrylic) 기판은 두께 1 mm이고 전기적 특성은 유전율  $\epsilon_r=2.6$ , 손실 탄젠트  $\tan \delta=0.009$  이다. 측정 시 가시광선 영역은 380~800 nm이며, 비교분석을 위해 455 nm(청), 535 nm(녹), 570 nm(적) 등 3원색 주파장을 기준으로 비교분석하였다. 측정된 투과도와 계산된 투과도를 표 1과 같이 정리하였다.

투과도 측정값(experimental value)의 경우, 그림 4의 적록청(RGB) 파장의 측정값을 표 1에 정리하였다. 계산된 투과도 값(theoretical value)에서 1 MM은 파장과 관계없이 위 식 (2)를 이용하여 계산되었으며, 아크릴의 투과도는 RGB 측정값의 평균인 약 92.00 %로 고정하였고, 이를 각각의 아크릴(acrylic)이 포함된 계산된 투과도 값에 곱해주었다. Aligned 2 MM+acrylic의 계산된 투과도 값의 경우는 광 투과가 SMM면에 수직 방향으로만 입사한다고 가정하였을 경우, 1 MM+acrylic의 투과도 값(60.99 %)과 이론적으로 같은 값을 가지며, 또한 misaligned 2 MM+acrylic의 경우는 이론적으로는 1MM+acrylic 투과도(60.99 %)에 1MM의 투과도(66.29 %)을 곱해 주는 값과 동일하며, 계산된 값은 36.20 %으로 측정된 RGB 값과 유사한 값을 갖는다.

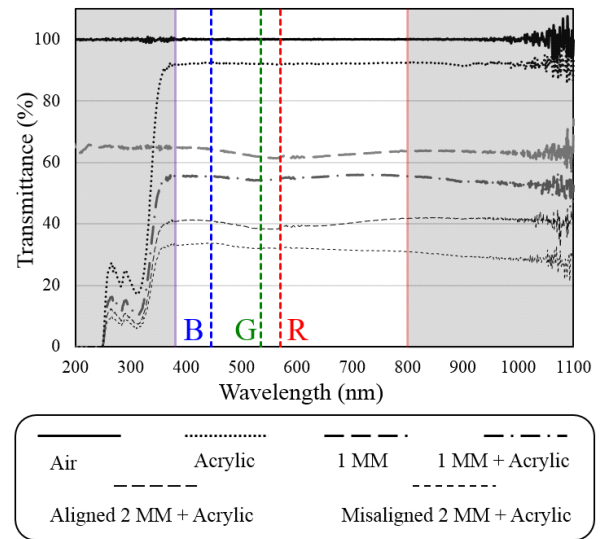


그림 4. 메탈메쉬와 아크릴기판의 다양한 조합에 따른 가시광선 투과도 측정 결과  
Fig. 4. Measured optical transparency of various configurations of metal mesh and acrylic substrates.

표 1. 가시광선 투과도 측정 및 계산 결과 정리

Table 1. Summary of calculation and measurement results of optical transparency. (unit: %)

Wavelength (nm) DUT	Experimental value			Theoretical value
	445(B)	535(G)	570(R)	
Air	100.0	100.0	100.0	-
Acrylic	92.40	91.89	91.75	92.00
1 MM	65.37	63.66	63.31	66.29
1 MM+acrylic	55.59	54.26	54.83	60.99
Aligned 2MM+acrylic	40.98	38.44	38.84	60.99
Misaligned 2 MM+acrylic	33.67	32.06	32.08	36.20

계산된 투과도 값은 위의 방법으로 얻은 값들이 측정 값과 전반적으로 유사하나, Aligned 2 MM+acrylic의 경우에는 RGB 평균 측정값은 39.42 %의 투과도 값을 가지며 이는 계산 값(60.99 %)과 차이가 있었다. Aligned 2 MM+acrylic의 측정값과 유사한 계산 값을 구하기 위해 1 MM+acrylic의 계산 값(60.99 %)에 1 MM의 계산 값(66.29 %)을 곱하여 주었을 경우 40.43 %의 계산 값을 얻을 수 있으며, 이는 aligned 2 MM+acrylic의 RGB 평균 측정값(39.42 %)과 유사하다. 따라서 두 장의 MM이 정렬(aligned) 되어 있다고 하더라도, 실제 측정 시에는 조사되는 빛이 추가 MM에 의한 회절 등으로 영향을 받는 것으로 판단된다. 그러나 실제 사람이 느끼는 투과도는 그림 2에서와 같이 계산 값에 더 가깝다고 판단된다. 또한 계산된 투과도는 측정된 투과도에 비해 RGB 파장에 따른 투과도의 차이를 반영하지 못하지만, RGB 평균 측정값과 유사한 값을 가진다고 볼 수 있다.

## 2-2 정방형 메탈메쉬의 전기적 특성

표 2에서는 전극의 전기적 특성인 전도도와 면저항 측정값을 정리하였다. 각 전극소재의 전도도는 각각 홀-효과 측정시스템(ECOPIA, HMS-3000)을 사용하여 측정되었다. 전기 전도도는 일반적인 전송선로의 전극인 구리가 각 투명전극(Multi Layered Electrode Film: MLF, Micro Metal Mesh Film: MMF, Squared Metal Mesh: SMM)에 비

표 2. 전극의 전도도와 면저항

Table 2. Conductivity and sheet resistance of electrodes.

Electrode	Conductivity(S/m)	Sheet resistance( $\Omega/\text{sq}$ )
Copper <sup>[3]</sup>	5.00E+07	5.65E-04
MLF <sup>[3]</sup>	2.15E+06	4.65E+00
MMF <sup>[3]</sup>	1.51E+06	8.29E-02
SMM	1.59E+06	1.87E-03

해 10배 이상 크며, MLF의 전도도가 2.15E+06(S/m)으로 전기적 특성이 투명전극 중 상대적으로 가장 우수하게 보이나, 실제로는 두께(100 nm)가 다른 두 투명전극(MMF, SMM)에 비해 훨씬 얇으므로, 실제 전기적 특성인 면저항 4.65E+00( $\Omega/\text{sq}$ )은 다른 두 투명전극(MMF, SMM)에 비해 50~2,000배 이상 높다.

또한, 가시광선 대역(400~750 nm)내 평균 광 투과도는 MLF가 81 %로 가장 우수하며, MMF이 62 % 그리고 SMM이 64 %이다. 따라서 세 가지 투명전극의 광학적 특성은 MLF가 가장 우수한 광학적 특성을 갖지만 전기적 특성은 가장 열등하여 광학적 투명도 특성이 보다 더 요구되는 응용에 적합하며, 다른 두 투명 소재는 광학적 특성이 MLF에 비해 열등 하지만 전기적 특성이 50배 이상 우수하므로 광학적 투명도 보다 전기적인 특성이 보다 더 요구되는 응용에 적합하다고 판단된다. 또한 SMM의 면저항은 1.87E-03( $\Omega/\text{sq}$ )으로 투명전극 중 가장 우수하며, 광 투과도가 MMF에 비해 높으나, 금속선(copper line)의 정방형 메쉬(square mesh)구조를 이루고 있으므로, 두 개 이상의 재질이 겹쳐져 있을 때에는 모아레(moire) 현상이 발생하며, 메탈의 빛 반사에 의해 투명도에 대한 시인성이 떨어지는 단점이 있다. 또한, 본 논문에서 사용되는 정방형 메탈메쉬의 성능지수(FOM)는  $l=1$  mm의 경우에 RGB 평균 광 투과도가 64 %, 면저항이  $1.87 \times 10^{-3} \Omega/\text{sq}$ 로 식 (1)에 대입하면 6.165이다.

## III. 투명 사각 패치 안테나 설계 및 측정 결과

그림 5는 안테나 제작에 사용된 서로 다른 두 가지 간격( $l=1, 2$  mm)을 갖는 정방형 메탈메쉬(SMM)의 시인성을 보여준다. SMM으로 구현 되는 투명 사각 패치 안테나는 그림 6과 같이 투명 아크릴( $\epsilon_r=2.6$ ,  $\tan \delta=0.009$ ) 기판

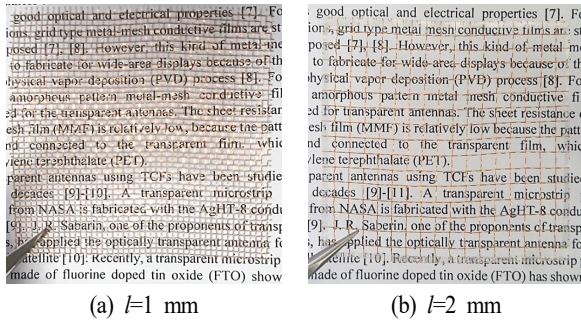


그림 5. 안테나 제작에 사용된 SMM의 시인성  
Fig. 5. Optical recognition of SMM for antenna fabrication.

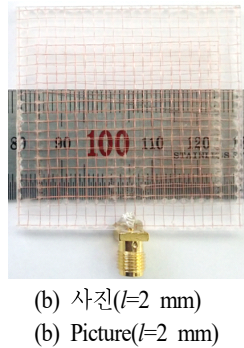
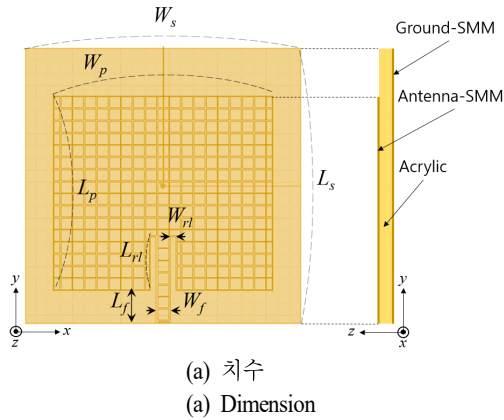


그림 6. 정방형 메탈메쉬(SMM)를 이용한 투명 사각 패치 안테나  
Fig. 6. Transparent rectangular patch antenna using square metal mesh(SMM).

상에 정방형 메탈메쉬(SMM)로 구현되며, 2 GHz 대역에서 동작하도록 설계하였다. 정방형 메탈메쉬에 사용되는 구리선은 그림 2에서와 같이 0.2 mm 두께의 동선(w)을

표 3. 투명 사각 패치 안테나의 치수

Table 3. Dimension of the transparent rectangular patch antenna.

Dimension (mm)	$W_s$	$L_s$	$W_p$	$L_p$	$W_{rl}$	$L_{rl}$	$L_f$	$W_f$
	50	50	40	34.5	1	10	6	2.6

성능 비교를 위해 1 mm( $l=1$ ,  $w=0.2$ )와 2 mm( $l=2$ ,  $w=0.2$ ) 두 가지 간격( $l$ )으로 엮은 평직구조로 하였으며, 또한 안테나 제작 시 두 가지 모두 상 하부 메탈메쉬는 정렬 상태로 하였다. 패치안테나의 크기( $L \times W$ )는  $34.5 \times 40.0 \text{ mm}^2$ 이며, 급전선의 크기는( $L \times W$ )는  $6.00 \times 2.63 \text{ mm}^2$ 이다. 또한, 급전 방법은 일반적인 사각 패치 안테나의 급전<sup>[3]</sup>과 동일하며, 실제 제작 시 급전용 SMA 커넥터와 메탈메쉬 전극은 그림 6에서와 같이 접착용 실버페이스트<sup>[3]</sup>를 사용하여 도전되었다. 후면의 그라운드 크기( $L \times W$ )는  $50 \times 50 \text{ mm}^2$ 이다. 자세한 안테나의 치수는 표 3에 정리하였다.

그림 7은 시뮬레이션과 측정된 반사손실,  $S_{11}(\text{dB})$ 을 나타내었고, 표 4에서는 반사손실 6 dB 이상의 대역폭을 정리하였다. 두 가지( $l=1, 2 \text{ mm}$ ) 경우, 모두 2 GHz 대역에서 6 dB 이상의 동작 대역폭을 가지며, 주파수에 따른 반사손실은 시뮬레이션과 측정 결과에서 비슷하나, 시뮬레이션 결과가 측정 결과 모두 비해 전반적으로 손실이 높게 나타났으며, 실제 측정에서의 대역폭이 시뮬레이션에 비해 넓게 나타났다. 이는 실제 제작 시 이상적인 시뮬레

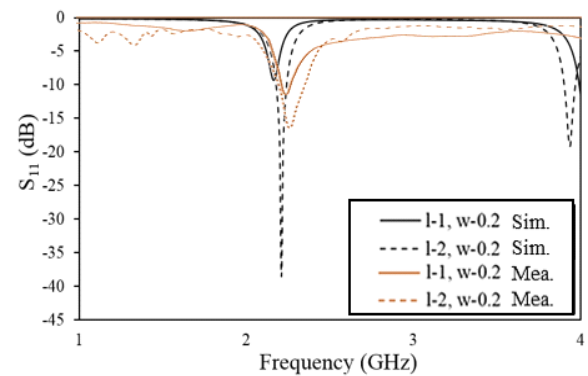


그림 7. 투명 안테나의 반사손실( $S_{11}$ ) 시뮬레이션 및 측정 결과

Fig. 7. Simulation and measurement results of return losses of transparent antennas.



표 4. 투명 안테나의 대역폭

Table 4. Band width of transparent antenna.

Line gap (mm)	Band width( $S_{11} > 6$ dB)	
	Simulation(GHz)	Measurement(GHz)
1	2.13~2.2(70 MHz)	2.19~2.32(130 MHz)
2	2.15~2.26(110 MHz)	2.16~2.40(240 MHz)

이선 환경에 비해 구리선의 평탄도 및 선과 선이 겹치는 부위에 있어서 시뮬레이션과 차이가 있으나, 동작 주파수의 파장에 비해 상대적으로 그 차이가 미약하다고 판단된다.

그림 8은  $l=1, 2$  mm 각각의 최대 공진주파수에서 시뮬레이션과 측정된 안테나 방사 패턴( $x$ -z plane,  $y$ -z plane)을 보여주고 있으며, 일반적인 사각 패치 안테나의 지향성 패턴을 보여준다<sup>[3],[5]</sup>. 또한 표 5는 안테나의 이득, 반전력빔폭(HPBW), 전후비(F/B)를 정리하였다. 측정된 안테나의 최대 이득은  $l=1$  mm일 때 4.8 dB,  $l=2$  mm일 때 2.6 dB이며,  $l=1$  mm의 경우 일반적인 구리 전극을 사용한 사각 패치 안테나의 최대 이득<sup>[3],[5]</sup>과 유사한 값을 갖는다.

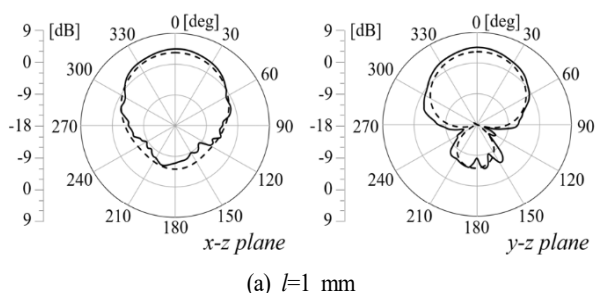
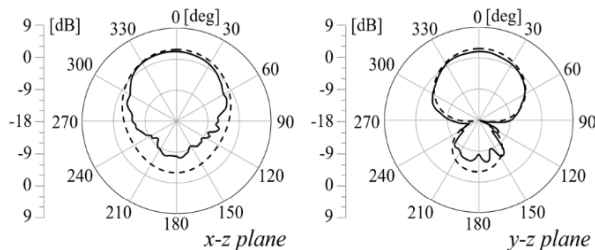
(a)  $l=1$  mm(b)  $l=2$  mm(실선: 측정, 점선: 시뮬레이션)(b)  $l=2$  mm(solid line: measurement, dot line: simulation)

그림 8. 투명 안테나의 측정된 방사패턴

Fig. 8. Measured radiation patterns of transparent antennas.

표 5. 안테나 이득, 반전력빔폭(HPBW), 전후비(F/B)

Table 5. Antenna gain, half power beam width(HPBW), front/ back ratio(F/B).

Performance (y-z plane)	$l=1$ mm		$l=2$ mm	
	Mea.	Sim.	Mea.	Sim.
Gain(dB)	4.8	4.4	2.6	2.9
HPBW( $^{\circ}$ )	85	89	90	93
F/B	12.5	12.2	7.5	5.1

$l=2$  mm일 때, 상대적으로  $l=1$  mm일 때보다 메탈메쉬의 간격이 더 크므로 최대 이득이 저하되며, 방사 빔이 넓게 퍼지며, 이로 인해 HPBW는 더 넓으며, 또한 그라운드(back) 쪽으로 방사가 더 많이 되어 전후면 방사 비(F/B)가 낮게 나타난다. 표 6은 본 논문에서 연구된 투명 패치 안테나와 이전 연구된 투명패치 안테나와의 성능비교이며, 전반적으로 본 논문에서 사용된 투명 안테나와 같은 구리(copper)를 사용한 정방형 메탈메쉬(SMM) 또는 비 정방형 메탈메쉬 필름(MMF)을 이용한 패치 안테나는 모두 약 2 dBi의 최대 이득을 가지며, 이는 불투명 고주파 기판에 제작된 일반적인 패치 안테나<sup>[7]~[9]</sup>에 비해서는 2~3 dB 낮은 값이다. 이는 솔리드(solid) 구리 전극으로 구현되는 일반 패치 안테나는 방사체 전체의 전도도가 이상적이며, 또한 전극 표면의 전류가 먼 전체에 흐르지만, 메탈메쉬의 경우는 메쉬의 선에서만 전류가 흐르므로 고주파 방사 전력에서 차이가 발생한다. 또한 약 60 %대의 광 투과도를 갖는 메탈메쉬형 투명 안테나(SMM, MMF)에 비해 80 % 이상의 광 투과도를 갖는 다층 투명 전극(MLF)을 사용한 안테나는 우수한 광 투과도에 비해 약 5

표 6. 투명 패치 안테나 성능 비교

Table 6. Performance comparison of the transparent patch antennas.

Transparent antenna	Transparent electrode	Transmittance (%)	Gain (dBi)
Patch antenna <sup>[3]</sup>	MLF	81	-4.2
Patch antenna <sup>[3]</sup>	Copper MMF	62	2.6
Patch antenna <sup>[8]</sup>	Copper SMM	63	2
$l=2$ mm (this research)	Copper SMM	61	2.6

$\Omega/\text{sq}$ 의 높은 면저항 값을 가지며, 이는 메탈메쉬 형 투명 전극보다 약 50배 이상 높은 값이며, 이러한 취약한 전기적 특성에 의해 표 6에서처럼 -4 dB의 매우 낮은 이득을 갖는 등 전반적인 안테나 특성이 매우 취약하다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 고주파 소자에 가장 일반적으로 사용되는 도체인 구리선(copper wire)으로 구현되는 정방향 메탈메쉬(Square Metal Mesh: SMM)를 이용하여 투명전극을 구현하였고, 이를 기본 단위로 하여 투명 패치 안테나를 구현하였다. SMM의 투명도 계산값과 측정값을 비교 분석하였으며, 단층의 경우 64 %의 광 투과도 값을 얻었다. 이는 위에서 언급한 비정질의 메탈메쉬와 비슷한 수준의 투명도이다. 또한 패치 안테나 구조의 상하부 메쉬의 정렬 및 비정렬 상태에 따른 투과도를 측정하였으며, 측정치에서는 RGB에서 6~7 %의 광 투과도 차이를 보이며 예상대로 정렬상태의 광 투과도가 더 우수함을 보였다. SMM의 면저항은  $1.87\text{E-}03 \Omega/\text{sq}$ 로 본 논문에서 언급된 타 투명전극(MLF, MMF)에 비해 우수한 값을 가지며 SMM의 성능지수(FOM)는 약 6.7이다. 이는 기존의 다층형 투명전극에 비해 매우 우수한 값을 가지나, SMM의 경우 정방향 금속망 구조이므로 다층 투명 전극에 비해 투명전극의 시인성이 떨어지며, 모아레(moire) 현상의 단점이 있다. 또한, 2 GHz 대역에서 동작하는 투명 패치 안테나 설계 및 측정하였으며, 광 투과도를 높이기 위해 얇은 구리선( $w=0.2 \text{ mm}$ )을 사용하였으며, 망(mesh) 크기( $l=1, 2 \text{ mm}$ )에 따른 안테나 성능(방사이득, 방사패턴)을 비교 하였다. 측정된 안테나의 최대 이득은  $l=1 \text{ mm}$ 일 때 4.8 dB,  $l=2 \text{ mm}$ 일 때 2.6 dB이다.  $l=2 \text{ mm}$ 일 때, 상대적으로  $l=1 \text{ mm}$ 일 때보다 메탈메쉬의 간격이 더 크므로 최대 이득이 저하되며, 방사 빔이 넓게 퍼지며, 이로 인해 HPBW는 더 넓으며, 또한 그라운드(back) 쪽으로 방사가 더 많이 되어 전후면 방사 비(F/B)가 낮게 나타난다. SMM으로 구현되는 투명 안테나의 성능 측정결과, 안테나 성능은 정방향 메탈메쉬의 광학적 특성과 반비례하며, 실제 활용 시에는 광학적 특성, 전기적 특성, 제작비용을 종합적으로 고려하여, 응용에 따른 투명 안테나의 활용이 필요하다.

#### References

- [1] R. N. Simons, R. Q. Lee, "Feasibility study of optically transparent microstrip patch antenna," in *International Symposium and Radio Science Meeting*, Montreal, Jul. 1997.
- [2] Q. L. Li, S. W. Cheung, D. Wu, and T. I. Yuk, "Optically transparent dualband MIMO antenna using micro-metal mesh conductive film for WLAN system," *IEEE Antennas Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp. 920-923, 2017.
- [3] S. Hong, Y. Kim, Y. Jung, and C. Jung, "Transparent microstrip patch antennas with multilayer and metal-mesh films," *IEEE Antennas Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp. 772-775, 2017.
- [4] K. H. Choi, H. J. Nam, J. A. Jeong, S. W. Cho, H. K. Kim, and J. W. Kang, et al., "Highly flexible and transparent In Zn Sn O<sub>x</sub>/Ag/In Zn Sn O<sub>x</sub> multi-layer electrode for flexible organic light emitting diodes," *Applied Physics Letters*, vol. 92, no. 22, pp. 223302-1~3, Aug. 2008.
- [5] E. R. Escobar, N. J. Kirch, G. Kontopidis, and B. Turner, "5.5 GHz optically transparent mesh wire microstrip patch antenna," *Electronics Letters*, vol. 51, no. 16, pp. 1220-1222, 2015.
- [6] G. Haccke, "New figure of merit for transparent conductors," *Journal of Applied Physics*, vol. 47, no. 9, pp. 4086-4089, 1976.
- [7] 박정수, 김인복, 김홍희, 이성락, 어윤성, 김정근, "빔틸트 특성을 갖는 광대역 conformal 패치 어레이 안테나," *한국전자과학회논문지*, 27(5), pp. 416-423, 2016년 5월.
- [8] D. Mathur, S. K. Bhatnagar, and V. Sghula, "Quick estimation of rectangular patch antenna dimensions based on equivalent design concept," *IEEE Antennas Wireless Propagation Letters*, vol. 13, pp. 1469-1472, 2014.
- [9] J. Liu, Q. Xue, "Broadband long rectangular patch antenna with high gain and vertical polarization," *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, vol. 61, pp. 539-546, Feb. 2013.

## 강 석 현



2010년 8월: 서울과학기술대학교 안경광학과 (이학사)  
 2014년 2월: 서울과학기술대학교 안경광학과 (이학석사)  
 2017년 8월: 서울과학기술대학교 NID융합기술대학원 (공학박사)  
 2017년 12월: 경북대학교 첨단치과의료기

기개발연구소 선임연구원

[주 관심분야] 무선전력전송, 투명전극, 3D 프린팅, 안테나 등

## 정 창 원



1997년 1월: 광운대학교 전파공학과 (공학사)

2001년 12월: University of Southern California 전자공학과 (공학석사)

2005년 6월: University of California, Irvine, 전자공학과 (공학박사)

1997년 1월~2000년 6월: LG전자 연구원

2005년 7월~2005년 10월: University of California, Irvine, Post Doctor

2005년 11월~2008년 4월: 삼성종합기술원 전문연구원

2008년 5월~현재: 서울과학기술대학교 나노IT융합기술대학원 부교수

[주 관심분야] 안테나, 센서, 무선전력전송, 투명전극, EMI/EMC 등