

## 밀리미터파 무선센싱의 신호 강도 향상과 센서 개발비용 절감을 위한 FR-4 기판 메타재질 렌즈의 설계 및 주파수 응답특성의 관찰

# FR-4 Substrate-Based Metamaterial Lens to Improve Signal Strengths of the Antenna for RF Sensing and Cost Reduction, and Observation of Its Frequency Response

김우곤<sup>1</sup> · 서예준<sup>2</sup> · 강승택<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>인천대학교 정보통신공학과

<sup>2</sup>인천대학교 NS-위성 RTDC 기술 연구센터 ITRC

Woogon Kim<sup>1</sup> · Yejune Seo · Sungtek Kahng<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Information & Telecommunication Engineering, Incheon National University, Incheon, 22012, Korea

<sup>2</sup>\*NS-Satellite RTDC ITRC Center, Incheon National University, Incheon, Korea

### [요약]

무선센싱인 레이더에서는 원거리 상 물체에 입사와 반사의 무선 연결선을 필요로 하기 때문에, 무선통신 장치의 출입구인 안테나의 이득이 충분히 커야 한다. 고이득을 위해 사용되는 배열 안테나는 금속손실과 유전체 손실의 문제가, 곡면 렌즈는 총 부피가 커지는 문제를 가진다. 본 논문에서는 배열 안테나와 곡면 렌즈를 대신하여, 초고주파 신호의 강도를 키울 수 있는 평면형 메타재질 렌즈의 설계, 제작 및 측정을 다룬다. 무선센싱 주파수인 K-대역의 안테나의 방사 이득을, 64 mm × 64 mm의 면적으로 10 dB 이상 증가시키는 FR-4 기판 평면형 렌즈가 구현된다. 설계의 타당함을 확인하기 위해, FR-4의 저가 공정에 의한 시제품의 반사계수의 측정과 방사파가 측정되고 분석된다. 관찰 결과, K-대역에서 안테나의 이득은 약 10 dB 상승하고 높은 지향성을 가짐을 알 수 있다.

### [Abstract]

For wirelessly connecting the RF sensing of the radar with a long distant object, the system must have antennas of a high gain. Conventionally, they adopt arrays and curved lenses, but have problems of conductor and dielectric loss in the feed and ending up with a large volume. This paper proposes an FR-4-substrate flat metasurface lens to intensify the RF signal, which undergoes design, fabrication and test. To verify the design method, the antenna sized 64 × 64 mm<sup>2</sup> is prototyped by inexpensive FR-4 PCB etching process and its S<sub>11</sub> and radiated wave are measured. Gain increase of around 10 dB and high directivity are observed at the K-band.

**Key word** : Antennas, Metamaterial, Radar, Signal strength, Transmission, Antenna gain.

<http://dx.doi.org/10.12673/jant.2024.28.5.706>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 22 September 2024; Revised 25 October 2024

Accepted (Publication) 29 October 2024 (31 October 2024)

\*Corresponding Author; Sungtek Kahng

Tel: +82-32-835-8288

E-mail: s-kahng@inu.ac.kr

## 1. 서론

물체를 탐지하는 레이더는 민간의 보안 분야에서, 국방의 상공에 출현하는 비행체를 감지하고 경계대체를 갖추는 분야에 적용되고 있으며, 물체의 개수 증가와 빠른 움직임에 맞춰 용량과 속도는 끊임없이 상승하고 있다. 소수 물체와 소형 데이터의 전달에 국한된 초기 레이더 시대에 비해, 다수 물체와 중대형 데이터 처리가 가능한 하드웨어와 소프트웨어의 조화를 사용자들은 누리고 있으며, 새로운 도전적 이슈들이 생겨나는 상황에서 다각적인 방법들이 개발되고 있다. 물체의 수와 크기가 시시각각 변하는 환경에 적응하는 레이더는 감시자가 관찰 영역을 확대축소를 쉽게 하고 에너지를 집중하는 것을 모토로 삼고 있다[1]. 전방위를 살피는 장치 대부분은 임무 영역에 있는 다수의 수신자를 향해 위치에 상관없이 균일한 분포에 가까운 링크를 만드는 것이 일반적이었다. 그런데, 환경변화 적응형 레이더를 기획하면서 초고속은 물론 초집중이 화두가 되며, 무선링크 분포가 달라지게 되었다. 송신자인 레이더 안테나는 수신자마다 개별의 링크를 만들기 위해 빔 형성이 필요하다고 한다. 이는 빔 형성을 위한 배열 안테나가 도입되어야 한다는 것인데, 예전 주파수로는 빔 형성의 효율이 낮아지고 큰 몸집의 안테나로 귀결되기 때문에, K와 Ka-대역을 포함하는 밀리미터파 대역이 제시되기에 이르렀다.

높은 주파수인 상기 두 대역은 파장이 작아 기존의 수 GHz의 안테나의 지향성과 유사한 목표라면, 배열 안테나들을 만들어도 크기가 태블릿 정도의 크기면 된다. 그런데, 저주파 대역의 안테나의 방사특성과 달리, 높은 주파수 대역의 RF 신호들은 배열 안테나의 개구면을 떠나자마자 100 m 거리에 있는 수신자에 닿기도 전에 급격히 약해진다. 적응형 레이더가 추구하는 원거리 물체 인식을 확보에는 걸림돌이 된다. 통달 거리를 줄여도 의미 있는 신호강도를 전달하려면, 배열 안테나의 크기를 더욱 증가시켜야 한다. 파장이 짧아진 장점이 무색하게 몸집이 큰 배열 안테나는 다른 문제를 만나게 된다. 배열 안테나는 전력 분배기를 가지며, 배열 크기가 클수록 전력 분배기는 복잡해지고 입력부로부터 코너의 요소들까지의 거리는 길어진다. 이 전송선 구조는 도체, 유전체 손실이 길어질수록 주파수가 높을수록 심각해진다[2]-[4]. 이득증가를 위해 기존 배열형이 아닌 방안이 모색되어야 한다.

배열 안테나의 요소들에 전력 분배기의 간선들로 급전하는 대신 공간으로 퍼져가는 전기자기파를 집중시키는 방안이 있다. 그것은 메타재질 구조의 한 종류로 소스 안테나로부터의 전기자기파를 입력으로 받아 통과시키면서 투과파를 하나의 방향으로 모이도록 한다[5]-[7]. 투과파의 집중을 이용하는 대신 반사시키면서 전기자기파를 집중하는 방안도 있다[8]. 현재의 참고문헌 이외에도 제법 많은 수의 논문들이 메타재질 투과 구조들을 설계하고 그 결과를 보고하고 있는데, 본 논문엔 인용하는 자료와 같은 계통에 속한다. 소스인 혼 안테나 전면부에 위치하여 단위 셀이 4층보다 더 많은 층으로 쌓여있거나 층마

다 금속 패턴이 복잡하여 PCB (printed circuit board) 에칭 공정으로 구현하기 위해서는 관리 포인트들이 늘어나고 단락 핀이 들어가 높은 공정비를 투입하고도 오차가 생길 확률이 증가한다. 또한, 목표 동작 주파수가 레이더용 밀리미터파 대역의 주파수와는 거리가 있다. 또한, 고가의 재료들이 사용됐다.

본 논문에서는 Ka-대역에 대한 이득증가용 메타재질 구조를 제안한다. 그런데, 밀리미터파에서 손실이 크다는 FR-4로써 메타재질 렌즈를 구현하는 것이다. 저가의 기관이면서 64 mm x 64 mm의 평면 렌즈로 센서 구현 비용을 절감한다. 소스의 이득을 24.5 GHz에서 10 dB 이상 향상시킨다. 설계법이 전기자기 모의시험과 시제품을 제작한 뒤 시험을 통해 기능이 확인된다.

## II. 설계 의도와 안테나의 설계과정

제안하는 구조는 서론에서 언급하였듯이 배열 안테나를 쓰지 않고 메타재질 렌즈를 통해 높은 안테나의 이득의 방사특성을 만들어야 한다. 렌즈와 결합한 안테나 설계를 다루는 문헌들 일부는 곡면 유전체를 보여주고, 광학 렌즈에 결부시키는데, 본 논문은 다른 접근법을 사용하므로 다음의 그림으로서 방향을 설명할 수 있다.

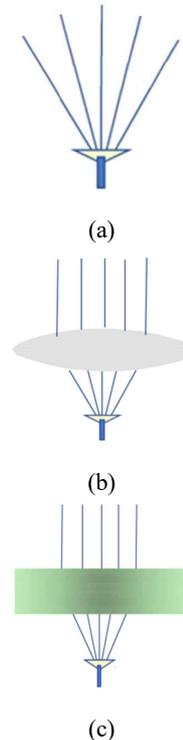


그림 1. 안테나로부터의 입사파를 메타렌즈로 집중 (a) 기본 안테나, (b) 곡면 렌즈 안테나, (c) 평면 렌즈 안테나

Fig. 1. Focusing incident waves from the antenna using a met alens (a) Basic antenna, (b) Curved lens antenna, and (c) Flat lens antenna.

그림 1(a)는 안테나 심볼이 주어진 구조로부터 전기자기파가 방사되는 것을 광선(Ray)으로 표시한 것이다. 안테나가 다이폴이나 마이크로스트립 패치 단일형이라 공진 주파수에서 방사상의 광선으로서 발산하는 모습이다. 광선의 수직이 파면인데, 구면파와 유사한 모습이다. 이때, 빔폭이 넓고 이득은 낮아, 이동통신의 무선 라우터와 같이 근처의 넓은 방향으로 고른 무선전력이 전달된다. 이런 무지향성은 이득이 낮아 원거리 통신에 적합하지 않기 때문에, 주기적 구조인 배열 안테나의 요소로 참여하여 원거리의 하나의 방향에서 보강간섭으로서 이득을 증가시킨다. 그림 1(b)는 광학 곡면 렌즈로서 광선들의 진행 길이를 다르게 주어 투과 시, 방향성을 유도한다. 그림 1(c)는 평면 집속 구조인 메타물질 렌즈이다. 구조 전체의 구동원인 소스 안테나에 대해 살펴보자.

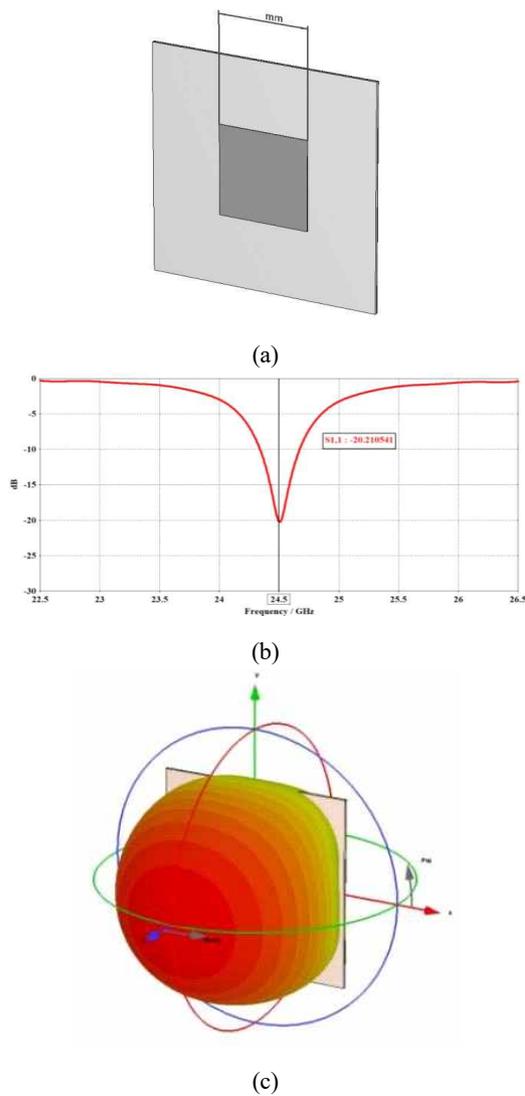


그림 2. 소스 패치 안테나 (a) 구조, (b) 입력포트 반사 계수, (c) 3차원 방사 패턴  
**Fig. 2.** Source patch antenna (a) Structure, (b)  $S_{11}$ , and (c) 3D radiation pattern.

그림 2(a)의 패치 안테나는 0.3mm 두께의 TLY-5 기판상에  $3.9 \times 3.9 \times 0.12 \text{mm}^3$ 의 크기인 구조이다. 메타물질 렌즈의 소스 안테나로 일반적으로 혼 안테나가 사용되는데 간격이 매우 커져 결국 부피가 커지는 반면, 평면형 안테나를 소-스로 사용하면 구형과 장착, 작은 간격의 장점을 가지게 된다. 이 안테나는 24.5 GHz에서  $S_{11}$ 이 -10dB 이하가 되어 입력포트 임피던스 정합이 이뤄진다. 그림 2(b)의 공진 주파수에서 전기자기파 방사가 그림 2(c)와 같이 일어난다. 안테나 이득은 6.8 dBi로서 원거리 무선 탐지에 바로 사용할 수 없다. 퍼져가는 빔을 집중하는 메타물질을 위한 소-스로 사용되며, 위상이 중심으로부터 외곽으로 증가하는 모습이다.

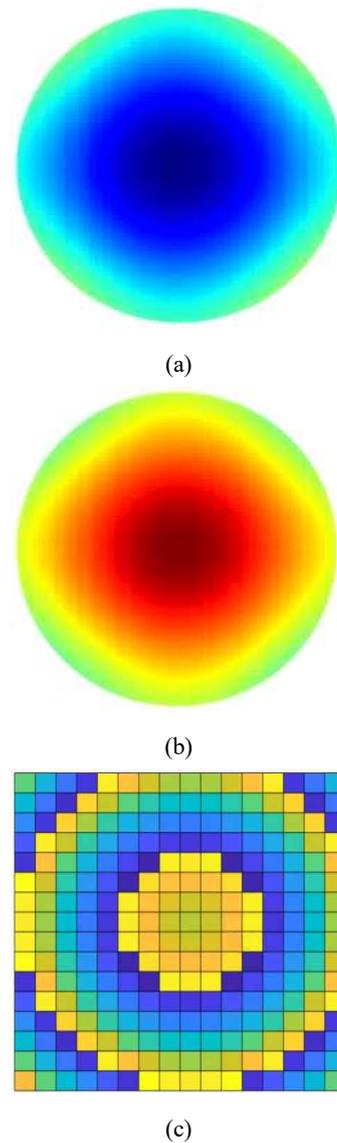


그림 3. 소스 안테나 위상과 메타물질 렌즈의 위상 (a) 발산 빔의 위상, (b) 보상용 위상, (c) 렌즈 위상 이산화  
**Fig. 3.** Source antenna phase and the metamaterial lens phase (a) Diverging beam phase, (b) Compensation phase, and (c) Discretized lens phase.

그림 3(a)는 단일 패치 안테나와 같이 발산하는 방사형 전기 자기파를 메타재질 렌즈를 둘 높이에서 위상을 표현한 것이다. 소스 안테나의 수직으로 위인 정방향 지점은 위상이 최소이고, 가장자리로 갈수록 지면이 증가하여 위상도 커지는 모습이다. 이것이 발산형 전기자기파의 위상이라면, 집속을 위해서는 메타재질 렌즈는 그 위상을 보상해야 하므로, 그림 3(b)처럼 위상이 중심으로부터 가장자리로 갈수록 낮아져야 한다. 그림 3(a)와 (b)는 연속적인 위상분포인데, 메타재질을 만들기 위해서 단위 셀 즉 픽셀 상에 위상을 주기성을 고려한 이산화 버전으로 변환한다. 특히, 이산화하여 표현하면 그림 3(c)가 된다. 메타재질 전체의 구성요소인 단위 셀을 먼저 다루겠다.

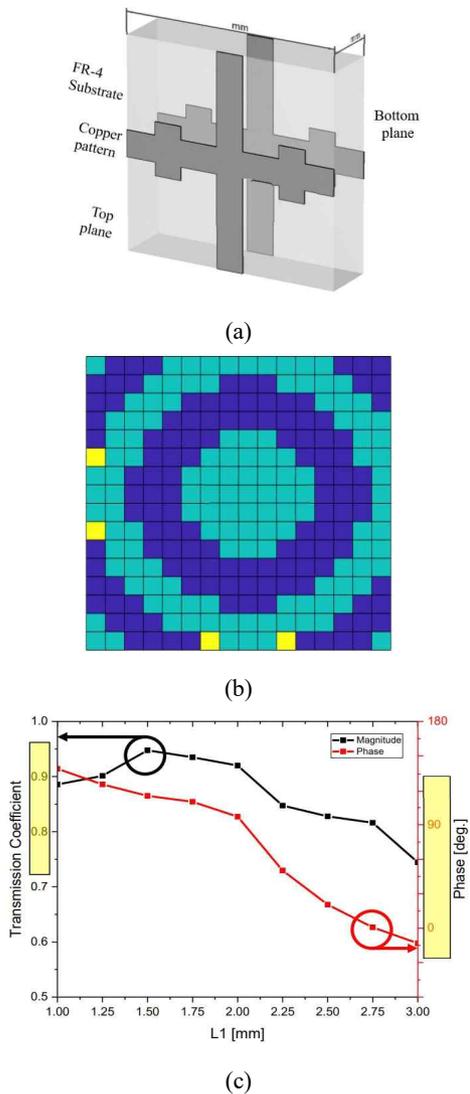


그림 4. 메타재질 렌즈의 단위 셀 (a) 구조, (b) 렌즈 위상의 1-bit 표현, (c) 기하변수 L1에 따른 투과계수 크기와 위상

Fig. 4. Unit cell of the metamaterial lens (a) Structure, (b) 1-bit phase map of the metamaterial lens, and (c) Magnitude and phase of the transmission coefficient ( $S_{21}$ ) vs. the physical dimension L1.

그림 4(a)는 1 mm 두께의 FR-4 기판의 윗면과 아랫면에 펄스 인입 가로 도체 선과 균일 폭 세로 도체 선이 교차하는 구조의 결합으로서 단위 셀의 모습이다. 그 면적은  $4.0 \times 4.0 \text{ mm}^2$  로서 RT-Duroid보다 가공비가 훨씬 낮다. RT 기판에 비해 FR-4가 손실이 10배 가까이 높다. 층에서는 주로 유도성 선로로서, 층간에는 용량성 결합을 통해 입사된 전기자기파가 투과하면 필요한 위상을 만들어 낸다. 펄스의 높이인 L1을 1 mm부터 3 mm까지 변화시키면서 투과계수를 얻어 위상을 살펴보면, 위상이 거의 180도 변화폭을 가져, 그림 4(b)의 위상을 맞출 수 있게 된다. 또한, 투과계수 ( $S_{21}$ ) 크기가 0.85를 넘어 입사 신호가 잘 통과함을 의미한다.

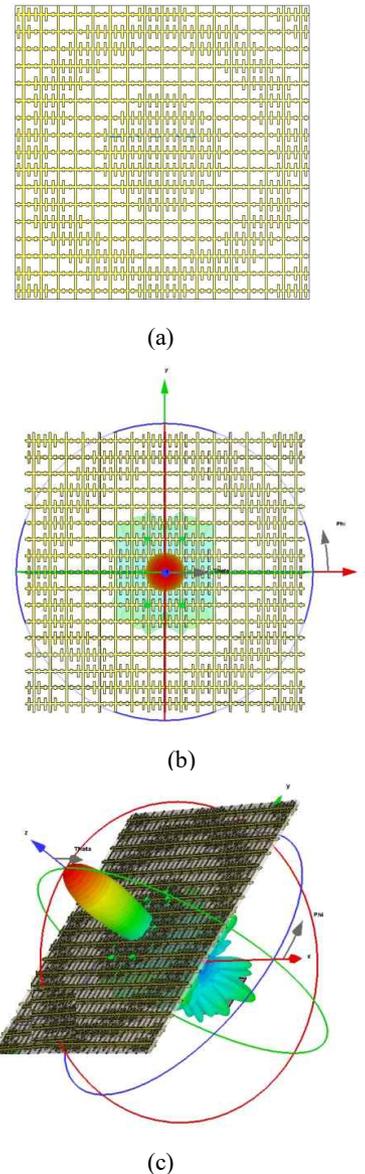


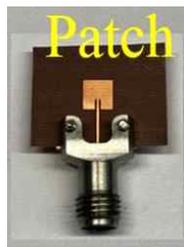
그림 5. 메타재질 렌즈 (a) 구조, (b) 정방향 빔 패턴, (c) 3차원 방사 패턴

Fig. 5. Metamaterial lens (a) Structure, (b) Top view of radiation pattern, and (c) 3D view of radiation pattern.

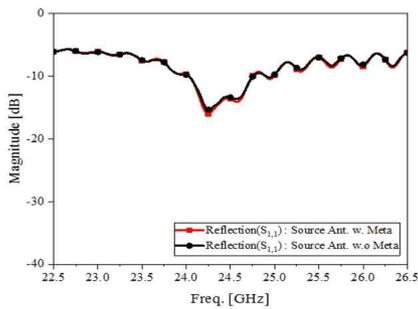
그림 5(a)는 단위 셀인 그림 4(a)를 보상용 위상분포의 이산화된 값에 맞춰 배정한 구조로 메타물질 렌즈이다.  $64 \times 64 \text{ mm}^2$ 의 면적에  $4.0 \text{ mm}$  간격으로, 180도에 해당하는 어두운색 위상 지점에는 펄스 없는 선의 크로스가, 0도에 해당하는 밝은색 위상 지점에는 펄스가 있는 가로 선 크로스가 들어가 있다. 그림 5(b)와 (c)의 방사파 패턴들을 발생시킨다. 이득이 약 17 dBi이면서 소스 안테나의 이득인 7 dBi로부터 약 10 dB의 안테나 이득증가를 가져온다. 밀리미터파에 최초로 FR-4를 써서 효과를 얻게 된다.

### III. 제작 및 측정

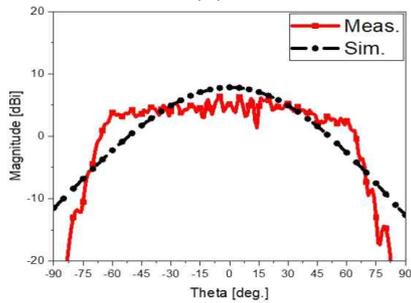
소스 안테나를 제작하여 주파수 응답특성을 측정한다.



(a)



(b)

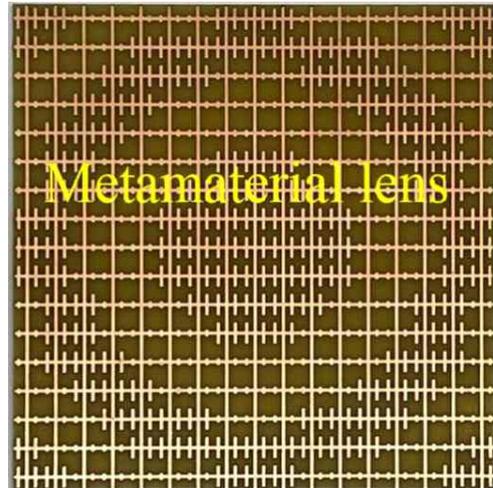


(c)

그림 6. 소스 패치 안테나 (a) 모습, (b) 입력포트 반사 계수, (c) 모의시험 빔 패턴과 측정 빔 패턴의 비교

Fig. 6. Patch antenna as source (a) Structure, (b)  $S_{11}$ , and (c) The measured beam pattern compared to the EM-simulation Beam-pattern with reference to 24.5 GHz.

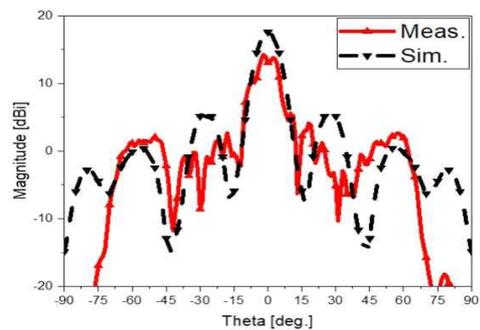
패치 안테나가 그림 6(a)와 같이 제작되었다. 그림 6(b)에서 반사계수 측정값은  $-10 \text{ dB}$  이하로 만족한다. 그림 6(c)의 Ka-대역에서 측정된 방사패턴은 모의시험의 곡선과 유사하지만, 실제손실 탄젠트가 달라 오차가 생긴다. 이득이 5 dBi 내외이다. 소스 안테나에 다음의 메타물질 렌즈를 결합하여 관찰한다.



(a)



(b)



(c)

그림 7. 메타물질 렌즈 안테나 (a) 모습, (b) 입력포트 반사 계수, (c)  $\Phi=0$ 도 빔 패턴

Fig. 7. Metamaterial lens (a) Structure, (b) Near-field measurement, and (c) Beam-pattern at  $\Phi=90^\circ$ .

메타재질 렌즈가 그림 7(a)와 같이 제작되어, 그림 6(a)의 소스 안테나와 결합하여 성능이 향상되는지 확인된다. 메타재질 렌즈와 같은 슈퍼 스트레이트가 잘못 구현되지만 않는다면, 입력포트의 반사 계수는 소스 안테나의 반사 계수에서 크게 벗어나지 않아 소스 안테나의 동작 주파수에 대해 그림 7(b)와 같이 무반사실 안테나 측정 장비로서 테스트를 수행한다. 광대역 빔폭을 갖는 소스 안테나와 달리 고지향성의 방사파 패턴이 기대되어 정밀하게 공간을 스캐닝한다. 목표 주파수인 24.5 GHz에서는 모의시험에서 예측된 것과 같이 이득이 최고점에 도달한다. 그림 7(c)에서, 이득은 모의시험의 17 dBi보다 줄어든 약 14 dBi로 파악되었다. 소스 안테나 장착 시 표면의 휨에 의한 이득 저하는 물론 메타재질 표면용 기관의 손실이 실제로 더 커서, 물리적 구현에서는 다소 낮아졌다. 밀리미터파 대역에서는 사용되지 않은 FR-4의 기관을 사용함에도 불구하고, 재료비로부터 가공비의 저감과 함께 약 10 dB의 안테나 이득의 상승이 실험적으로도 확인되었다. 이득을 올리기 위해 능동 RF 소자인 증폭기를 사용하는 고비용 부품을 쓰는 대신 수동 RF 소자와 저가의 기관으로도 전기자기파 집속 효과를 발생시키는 설계법으로 가능하다.

#### IV. 결 론

환경과 상황 변화에 적응해야 하는 현대의 레이더에서 RF 신호 송출 장치와 원거리의 물체에 무선연결을 구현하기 위해 소형, 경량, 저가이면서도 전파의 송신 및 수신 품질이 보장되는 요구에 부응하는 안테나 설계 기술을 제안하였다. 배열 안테나 대신 Ka-대역의 소형의 소스 안테나를 쓰면서 낮은 이득의 문제를 극복하기 위해, 상층부에 두는 메타재질 렌즈를 설계하고 제작하였다. 특히, 밀리미터파에서는 재료 손실이 높아 업계에서는 사용되지 않은 FR-4을 기관으로 하여 설계방안이 작동하는지 시도하였다. 모의시험은 물론 회로망 분석기와 무반사실 안테나 시험장치에서 제안한 안테나의 시제품의 성능을 확인한 결과, 평면 적층 구조이면서도 안테나의 이득을 약 10dB만큼 올려주는 고지향성의 결과를 얻었다. 배열 안테나의 다소 복잡하고 손실이 발생하는 급전부를 쓰지 않고 평평한 전기자기파 집속 장치를 사용함으로써 부피 축소와 경량화, 가격 절감에 도움이 되는 레이더용 안테나 시스템에 대한 방안으로 해석될 수 있다.

#### Acknowledgments

This work was supported by the Technology Innovation Program (Project Code: 20016463) and funded by the Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE, Korea).

#### References

- [1] D. Liu, U. Pfeiffer, J. Grzyb, and B. Gaucher, *Advanced Millimeter-wave Technologies: Antennas, Packaging and Circuits*, USA: Wiley, 2009.
- [2] K. Ramasubramanian and K. Ramaiah, "Moving from legacy 24 GHz to state of the art 77-GHz radar," *ATZ Elektron Worldwide*, Vol. 13, pp. 46-49, May. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s38314-018-0029-6>.
- [3] Infineon Technologies, *Power and sensing: Selection guide*, Munich, Germany, 2024. Retrieved from [infineon.com/cms/en/product/sensor/radar-sensors/#!documents](https://www.infineon.com/cms/en/product/sensor/radar-sensors/#!documents).
- [4] J. D. Kraus and R. Marhefka, *Antennas for All Applications*, USA: McGraw-Hill Science, November, 2001.
- [5] V. G. Ataloglou, G. Egorov, J. Kim, G. Xu, A. H. Dorrah, A. Ohadi, ..., G. V. Eleftheriades, "Static and reconfigurable Huygens' metasurfaces: Use in antenna beamforming and beam steering," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 64, No. 4, pp. 73-84, Aug. 2022. DOI: 10.1109/MAP.2022.3169363.
- [6] L. Szymanski, G. Gok, and A. Grbic, "Antenna beamforming with multiple input, multiple output metastructures," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 64, No. 4, pp. 63-72, Aug, 2022, DOI: 10.1109/MAP.2022.3169391.
- [7] Y. Seo, C. Lee, I. Moon, K. Ota, R. Omote and S. Kahng, "A planar millimeter wave resonator array to sense the permittivity of COP film with the 5G handset back cover," *Sensors*, No. 21, Article No: 4316, June. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21134316>.
- [8] G. Namgung, C. Lee, H. Park, A. Andujar, J. Anguera and S. Kahng, "Design of a metamaterial inspired reflectarray to increase the UHF-Band RFID detection range," in *European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP) 2019*, Krakow : POL, pp. 1-3, April, 2019. DOI: [ieeexplore.ieee.org/document/8739886](https://ieeexplore.ieee.org/document/8739886).



**김 우 곤 (Woogon Kim)**

2023년 2월 : 인천대학교 정보통신공학과 (공학사)

2023년 2월~현재 : 인천대학교 정보통신공학과 석사과정

※ 관심분야 : 안테나 설계, 위성통신, 마이크로파 회로해석 및 설계, 계측제어



**서 예 준 (Yejune Seo)**

2018년 2월 : 인천대학교 정보통신공학과 (공학사)

2020년 2월 : 인천대학교 정보통신공학과 (공학석사)

2020년 3월~현재 : 인천대학교 정보통신공학과 박사과정

※ 관심분야 : 안테나 설계, 위성통신, 마이크로파 회로해석 및 설계, 계측제어



**강 승 택 (Sungtek Kahng)**

1994년 2월 : 경북대학교 (공학사)

1996년 2월 : 경북대학교 (공학석사)

2000년 2월 : 한양대학교 전자통신공학과 (공학박사)

2000년~2004년 : 한국전자통신연구원 (ETRI) 통신위성연구센터 선임연구원

2004년~현재 : 인천대학교 정보통신공학과 교수 및 과학기술정보통신부 전파·위성 ITRC 센터장

※ 관심분야 : 전자파해석, 초고주파 부품 설계, 안테나 설계, EMC 대책, Metamaterials