

적층형 로트만 렌즈를 활용한 28 GHz 대역 3차원 아날로그 빔포밍 시스템 구현

Implementation of a Three-Dimensional Analog Beamforming System Using Stacked Rotman Lenses at 28 GHz

김 동 우 · 장 언 학 · 오 순 수

Dong-Woo Kim · Eon-Hak Jang · Soon-Soo Oh

요 약

세계적으로 5G 이동통신서비스 상용화 등 미래 전파 산업은 앞으로 밀리미터파 시작으로 점차 주파수가 높아질 예정이다. 이에 따라 공공 전파 자원 주파수를 효율적으로 이용하기 위해 필연적으로 빔포밍 기술은 개발되어야 한다. 빔포밍 기술은 전 디지털, 하이브리드 디지털, 아날로그 등 3가지로 구분된다. 본 논문은 아날로그 빔포밍 시스템을 설계 및 제작하였다. 그리고, 빔조향 3차원 안테나 시스템을 구현하였다. 적층형 로트만 렌즈를 사용하여 위상 천이기를 대체하였고 3×10 비발디 안테나를 이용하여 3차원 빔포밍을 구성하였다. 그 외에 빔선택을 위한 스위치 및 전원부를 구성하여 외부에서 접속 및 작동이 가능한 시스템으로 제작하였다. 다중프로브 측정시스템으로 빔 9개의 3차원 방사패턴 측정하였다. 빔 9개의 방사패턴은 시뮬레이션 결과와 유사하게 9개 빔조향각을 형성하였다. 본 논문에서 구현한 빔포밍 시스템은 다양한 통신 서비스에 공헌을 할 것이라 판단된다.

Abstract

Future radio industries such as the commercialization of 5G mobile communication services will gradually increase in frequency, starting from millimeter waves. Accordingly, beamforming technologies must be developed to efficiently utilize public radio frequencies. Beamforming technology is classified into three types: fully digital, hybrid digital, and analog. In this study, we designed and implemented analog beamforming systems. A system of three-dimensional beam tilting was implemented. The Rotman lens was stacked, and a 3 × 10 Vivaldi array antenna was constructed. A switch controlled by wireless connection was configured for beam selection; therefore, the system could be accessed and operated remotely. Three-dimensional radiation patterns of nine beams were measured using a multi-probe near-field measurement system. The experimental results were similar to the simulation results. Notably, the beamforming system implemented in this study could contribute to various communication services.

Key words: Beamforming Antenna, Array Antenna, Analog Beamforming, Rotman Lens

「이 연구는 2019학년도 조선대학교 연구지원금의 지원을 받아 연구되었음.」

조선대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Chosun University)

· Manuscript received August 28, 2021 ; Revised September 7, 2021 ; Accepted November 1, 2021. (ID No. 20210828-071)

· Corresponding Author: Soon-Soo Oh (e-mail: ssOH@chosun.ac.kr)

I. 서 론

차세대 무선 통신 서비스는 고속 무선 전송 기술 요구가 증가함에 따라 전 세계적으로 안테나의 빔포밍 기술 연구가 활발히 수행되고 있다. 특히, 28 GHz의 밀리미터 파 주파수 대역을 사용하는 5G 이동 통신 서비스는 기지국 안테나는 필수적으로 빔포밍 안테나로 구축되어야 한다^{[1]~[3]}. 빔포밍 기술은 크게 3가지로 분류할 수 있다. 신호처리 방식에 따라 전 디지털, 하이브리드, 아날로그 등 3가지 방식으로 시스템을 구축할 수 있다^[4].

아날로그 빔포밍 시스템은 신호처리에 있어 디지털화가 없이 RF 소자만으로 방사소자까지 신호를 전달한다. 아날로그 시스템은 대표적으로 배열 안테나, 위상 천이기, RF 스위치 등 RF 소자만으로 구성된다. 스위치로 빔을 선택하고 위상천이기는 배열 안테나로 일정한 위상의 신호가 입력되고, 설계한 각도로 빔조향된다. 아날로그 빔포밍은 디지털 빔포밍에 비해 시스템 구성이 단순하며, 가격 또한 저렴하나 빔조향각은 시스템 구성 후 고정되는 단점을 가진다^{[5],[6]}.

로트만 렌즈는 입력 포트와 출력 포트 사이에 전송선로 또는 도파관을 이용하여 출력 포트에서 신호의 위상을 인위적으로 조정한다. 그리고 다중 입력 및 출력 포트 구성되어 안테나 소자마다 위상천이기가 불필요하다는 장점이 있다. 대부분의 로트만 렌즈 입력 및 출력 포트 개수는 빔 조향의 방향수 및 안테나 소자 개수에 따라 설계된다. 출력포트의 안테나 소자로부터 방사된 전파는 입력 포트마다 각각 서로 다른 파면을 형성하고, 이는 로트만 렌즈의 임의의 입력포트마다 다른 빔포밍을 형성한다^[7].

3차원 빔포밍을 형성하기 위해 그림 1과 같이 2단의 위상 천이기가 필요하다. 그림 1의 시스템은 9개의 빔에 대한 아날로그 방식 시스템을 도식화 한 것이다. 특징으로 2개단 로트만 렌즈를 쌓아 3차원 빔포밍 위상 조절기를 설계한다. 2단의 로트만 렌즈는 서로 직교 연결 및 층을 쌓아 신호는 2단으로 위상이 조절이 진행된다. RF 스위치를 통해 전달된 신호는 총 2번의 위상이 조정되어 설계의 방위각 및 앙각으로 빔조향이 가능하다^{[8],[9]}.

본 논문은 아날로그 방식의 3차원 스캔이 가능한 빔포밍 시스템을 구현하였다. 총 9가지의 빔포밍을 선택할 수 있고, 이는 로트만 렌즈로 위상을 조절하여 방위각 및 앙각을 독립적으로 조향이 가능하다. 빔 선택 방법으로 RF 스위치를 도입하여 9개의 빔을 선택한다. RF스위치 작동 및 제어를 위하여 라즈베리파이를 탑재하고, 디바이스 내부에 프로그램을 코딩하여 빔 선택에 대해 편의성을 갖추었다.

II. 3×3 아날로그 빔포밍 안테나 시뮬레이션

2-1 입력단 3×3 로트만 렌즈

3차원 빔포밍 시스템을 구현하기 위한 위상천이기 대체용으로 로트만 렌즈를 사용하였다. 로트만 렌즈 설계는 Ansys사의 Designer를 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 총 6개 및 2종류의 로트만 렌즈를 활용하여 3차원 빔포밍을 구현한다. 시스템 입력단의 로트만 렌즈는 그림 2와 같다. 로트만 렌즈는 비유전율 2.2의 10 mil 두께의 PCB기판으로 설계되었고, 크기는 60 mm×60 mm이다.

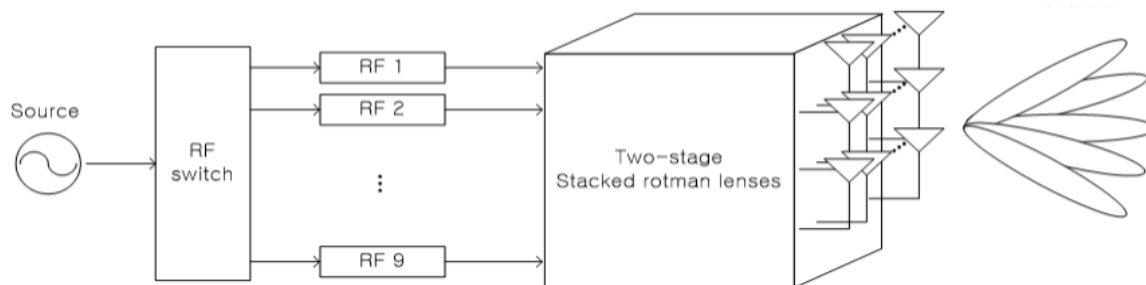


그림 1. 3차원 빔포밍 안테나 시스템 블록도

Fig. 1. Block diagram of a system of 3-dimensional beamforming antenna.

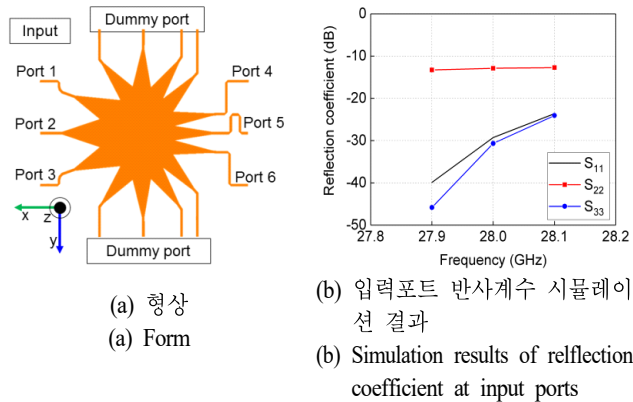


그림 2. 3×3 로트만 렌즈 시뮬레이션
Fig. 2. Simulation of 3×3 Rotman lens.

입력단 로트만 렌즈는 3개 입력 및 3개 출력과 총 8개의 더미포트로 구성된다.

입력포트 1, 2, 3에 따라 출력포트 4, 5, 6에서 각각 위상이 약 -20 , 0 , $+20$ 차이가 발생할 수 있게 설계하였다. 그림 2, 3에서 S -parameter 시뮬레이션 결과를 그래프로 도시하였다. 입력포트 1, 2, 3의 반사계수는 모두 -10 dB 이하의 만족하였다. 입력포트 1, 2, 3의 출력포트 4, 5, 6의 위상 시뮬레이션 결과는 그림 3 및 표 1과 같다. 입력포트 1의 경우, 출력포트 4, 5, 6 순으로 약 -70 도의 위상 간격을 유지하였다. 이와 마찬가지로 입력포트 3 또한 약 $+70$ 도 간격 순으로 위상 결과를 보였다. 입력포트 2에서 동위상의 결과를 보여야 하지만, 미세하게 S_{52} 가 -10 도 차이를 확인하였지만 빔포밍 구현에 크게 영향을 미치지 않을 것이라 판단된다.

표 1. 3×3 로트만 렌즈 위상 시뮬레이션 결과
Table 1. The simulation results of 3×3 Rotman lens.

Port	1(deg)	2(deg)	3(deg)
4	173.6	-60.4	30.0
5	103.6	-72.0	104.0
6	28.7	-60.7	174.4
Phase gap	-72.4	-0.13	72.2

2-2 3×10 로트만 렌즈 및 비발디 안테나 시뮬레이션

설계한 빔포밍 안테나는 입력의 3×3 로트만 렌즈 3개와 출력의 3×10 배열 안테나 3개를 직교로 연결되어 구성된다. 3×10 안테나 형상은 그림 4와 같다. 3×10 안테나는 비유전율 2.2의 두께 10mil PCB 기판으로 설계되었다. 시뮬레이션은 Ansys사의 Designer로 3차원 평면 형상을 설계하였고, HFSS로 3차원 통합 시뮬레이션을 진행하였다.

설계한 안테나는 기판 상부의 3개 입력과 10개 출력을 가진 로트만 렌즈와 기판 하부의 1×10 배열 비발디 안테나로 구성되며, 크기는 100 mm×120 mm이다. 10개의 비발디 안테나는 연결된 로트만 렌즈의 입력에 따라 일정한 차이의 위상 신호를 방사하여 빔포밍을 구현한다. 3×10의 로트만 렌즈의 구조는 3개의 입력포트와 10개의 출력포트 및 8개의 더미포트로 구성된다. 3×10의 로트만 렌즈의 시뮬레이션 결과는 그림 5에 그래프로 도시하였다. 총 3개의 입력포트에 대해 각각 10개의 위상 결과를 보여준다. 각 포트 간의 위상 차이는 약 ± 77 이며, 중앙

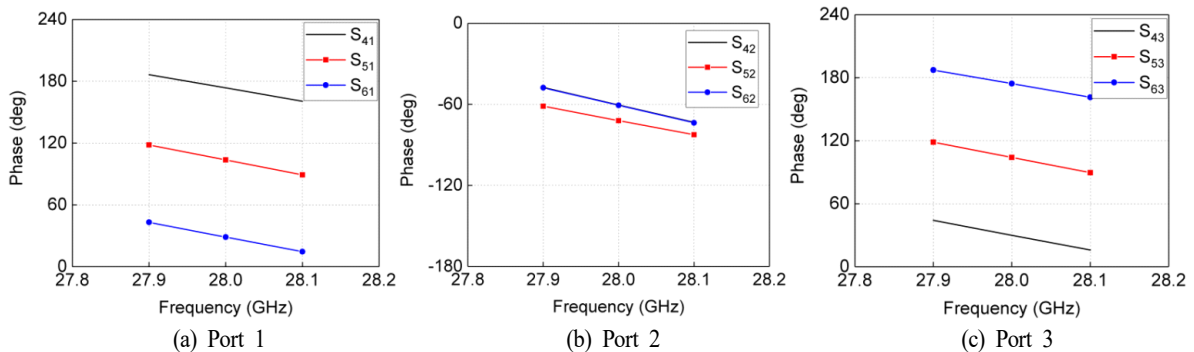


그림 3. 3×3 로트만 렌즈 시뮬레이션 위상 시뮬레이션 결과
Fig. 3. Simulation results of the phase of 3×3 Rotman lens.

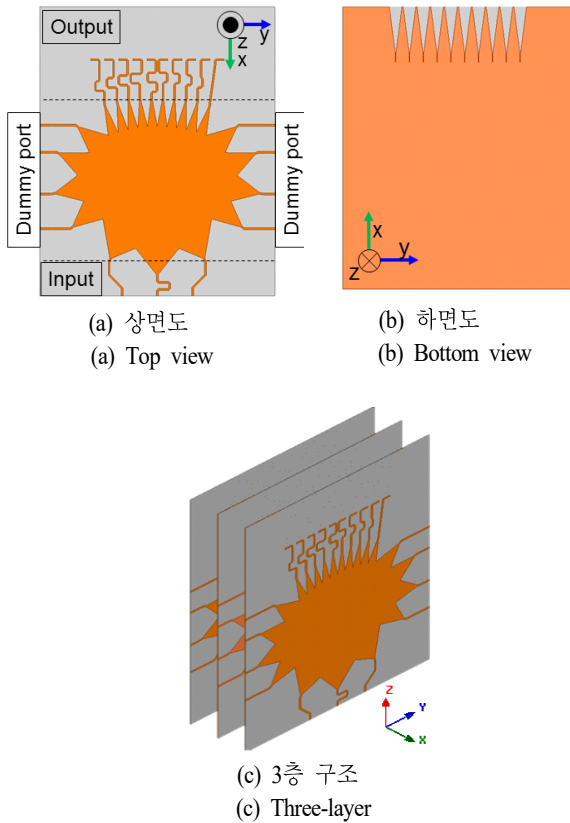


그림 4. 3×10 로트만 렌즈 및 배열 비발디 안테나
Fig. 4. 3×10 Rotman lens and array Vivaldi antenna.

포트 2는 평균 $+20$ 로 분석된다(표 2).

시뮬레이션 결과는 그림 6 및 그림 7과 같다. 2-1의 3×3 로트만 렌즈 출력값을 3×10 배열 안테나 3개의 입력, 즉 총 9개의 입력포트의 진폭 및 위상 시뮬레이션 값을

표 2. 3×10 로트만 렌즈 위상 시뮬레이션 결과

Table 2. The simulation results of 3×10 Rotman lens.

Port	Input 1(deg)	Input 2(deg)	Input 3(deg)
Output 1	43.54499	-110.154	75.8123
Output 2	-54.4267	-127.942	162.3808
Output 3	-128.342	-124.939	-138.068
Output 4	146.132	-98.7251	-67.6652
Output 5	70.12808	-144.278	-12.0932
Output 6	-11.7404	-144.643	69.56612
Output 7	-67.1879	-99.228	145.9268
Output 8	-137.623	-125.322	-128.151
Output 9	162.4212	-128.079	-53.8228
Output 10	75.63112	-110.341	44.28165
Phase gap	-76.4	0.0	76.5

각 포트에 입력하여 9개 방사패턴의 시뮬레이션 결과이다. 총 9개의 빔의 조향된 각을 간략하게 표 3로 작성하였다. 시뮬레이션 결과, 중심 빔 2, 5, 8 제외한 빔 1, 3, 4, 6, 7, 9 등은 양각 약 ± 20 의 빔조향이 된다. 빔 4, 5, 6의 경우, 정중앙의 0 도 근처로 빔조향이 되지만, 그와 반대로 빔 2, 8은 양각 5 도의 오차로 빔조향이 된다. 또한 빔 2, 8의 경우, 주엽과 유사 이득인 부엽이 약 30 도 근처에서 발생한다. 그림 7에서 3차원 방사패턴 시뮬레이션 결과를 참고하면, 9개의 빔에서 부엽이 발견되었고, 그중 빔 2와 8의 경우 주엽과 이득값이 유사하였다. 이처럼 부엽은 3×10 로트만 렌즈 시뮬레이션 결과에서 원인을 분석할 수 있다. 그림 5의 중앙 포트2의 출력포트들의 위상

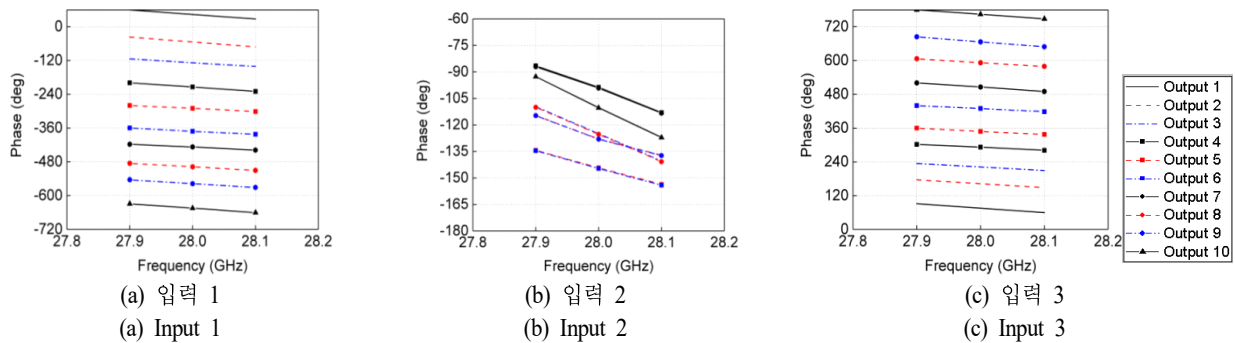


그림 5. 3×10 로트만 렌즈 시뮬레이션 위상 시뮬레이션 결과
Fig. 5. Simulation results of the phase of 3×10 Rotman lens.

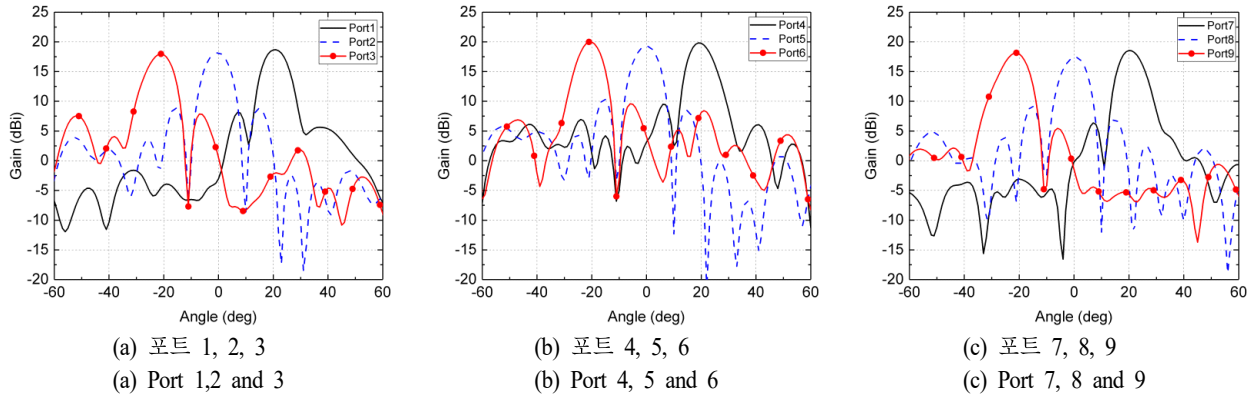


그림 6. 2차원 방사패턴 시뮬레이션 결과

Fig. 6. The simulation results of 2-dimensional radiation pattern.

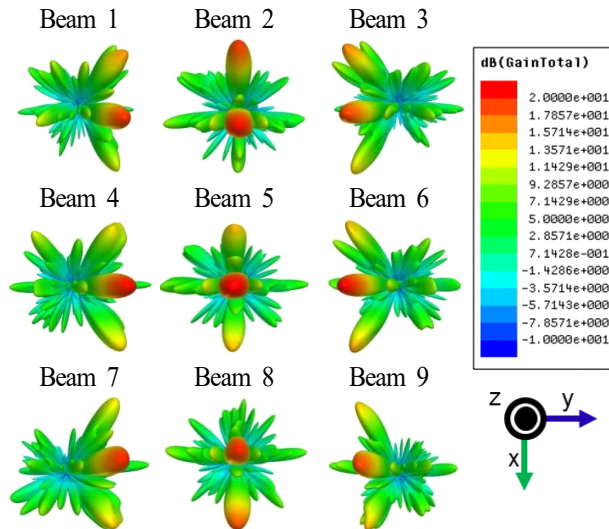


그림 7. 3차원 방사패턴 시뮬레이션 결과

Fig. 7. Simulation results of 3-dimensional radiation pattern.

이 균일하지 않아 빔포트 2번 및 8번에서 큰 이득의 부엽이 발생한 것으로 추측된다.

III. 빔포밍 시스템 제작 및 측정

3-1 빔포밍 시스템 제작

그림 8은 빔포밍 시스템 제작된 것을 촬영한 것이다. 제작된 빔포밍 시스템은 그림 9와 같이 구성된다. RF chain단의 입력 9개 중 한 개를 선택하기 위한 RF 스위치

표 3. 빔포밍 안테나의 빔조향각 시뮬레이션 결과

Table 3. The simulation results of a tilt angle for beamforming antenna.

Beam	Phi(deg)	Theta(deg)	Gain(dBi)
1	20	21	18.674
2	-4	6	18.14494
3	-15	-21	17.9701
4	0	19	19.8162
5	0	0	19.28602
6	1	-21	19.9792
7	-18	20	18.5347
8	-5	-5	17.38141
9	16	-21	18.1336

가 필요하다. 28 GHz 대역용 RF스위치 3개를 사용하였고, 그 이유는 RF 스위치는 1개 입력, 4개 출력을 가지고 있으며, 9개의 RF chain을 구성하기 위해 스위치 3개가 필요했다. RF 스위치를 작동하기 위해 라즈베리파이의 DC 출력원을 이용하였다. 라즈베리파이의 전력원은 휴대용 충전기를 이용하여 전원을 공급하였다. 라즈베리파이에 빔선택 코딩을 파이썬(python)으로 수행하였다. 와이파이 및 테더링으로 외부 기기로 접속하여 빔포밍을 제어한다.

3-2 방사패턴 측정

제작한 빔포밍 시스템의 방사패턴을 측정하였다. 측정

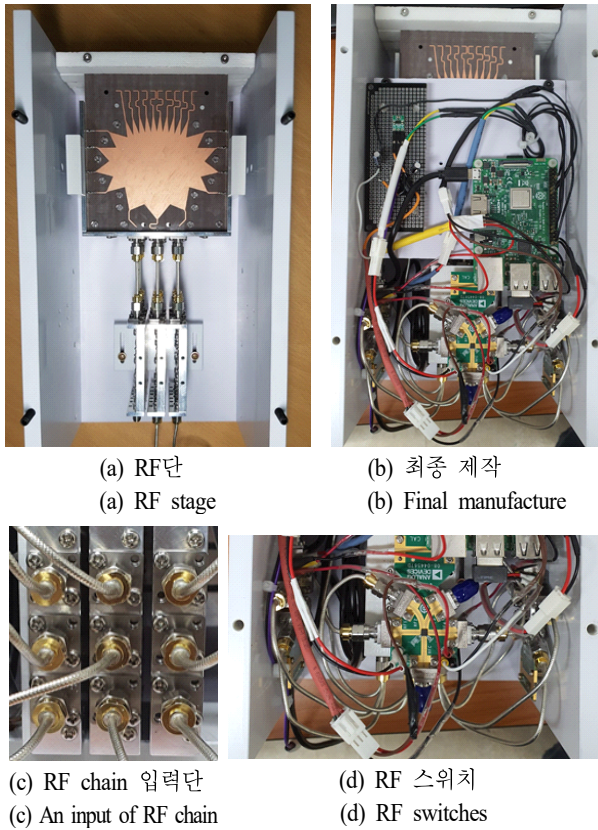


그림 8. 3차원 아날로그 빔포밍 시스템

Fig. 8. The 3-dimensional analog beamforming system.

은 국립전파연구원 이천전파시험인증센터에서 지원한 고속측정 다중프로브 시스템을 활용하였다. 해당 시스템은 근역장 측정방식을 이용하며, 측정된 원역장값으로 변환한다. 해당 측정 시스템의 장점은 안테나의 전방향으로 전파를 스캔이 가능하며, 임의의 빔조향각을 정확하게 찾을 수 있다. 그림 10는 촬영한 다중프로브 측정 시스템을 이용한 측정된 장면을 보여주고 있다.

3차원 방사패턴 측정 결과, 그림 11과 같이 9개의 방사 패턴을 측정하였다. 9개의 각 빔의 분석결과, 3차원 방사 패턴 시뮬레이션 결과의 빔조향각처럼 방위각 및 양각이 ± 20 도로 유사하게 일치하였다. 그림에도 불구하고, 시뮬

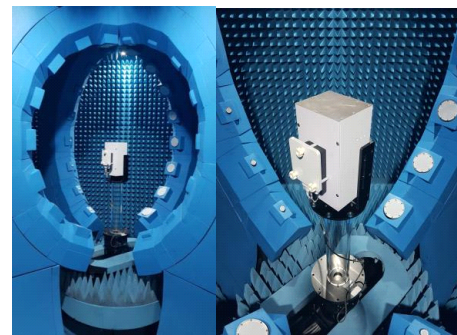


그림 10. 다중프로브 안테나 측정 시스템

Fig. 10. The system of antenna measurement using multi-probe.

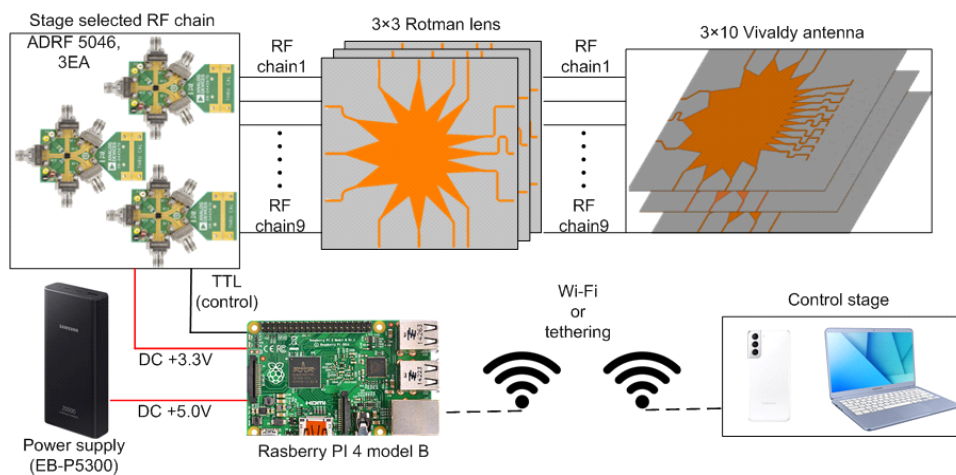


그림 9. 설계 및 제작된 빔포밍 시스템 구성도

Fig. 9. Simulation results of 3-dimensional beamforming antenna.

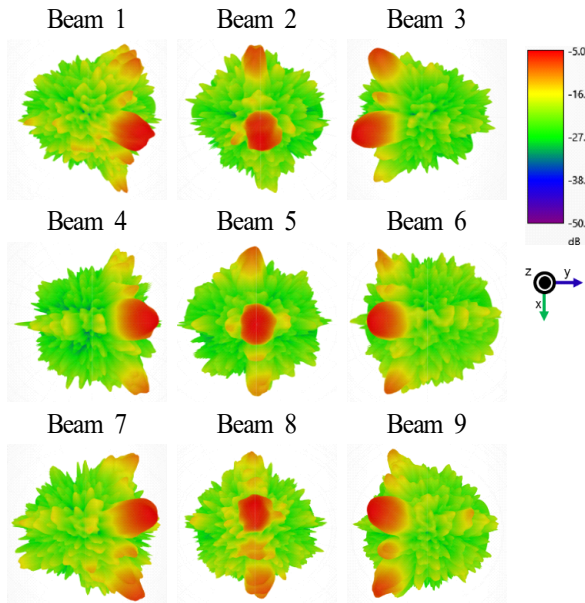


그림 11. 3차원 방사패턴 측정 결과

Fig. 11. The results of the measured 3-dimensional radiation pattern.

레이션의 이득값과 크기는 20 dB 이상, 작기는 13 dB 차이가 발견되었다. 시뮬레이션 결과는 3×10 로트만 렌즈의 입력에서 급진된 구조를 해석하였지만, 실제 측정 결과는 RF스위치를 포함한 각 RF chain으로부터 발생된 손실에 의해 실제 이득이 저하된 것으로 판단된다(표 4).

표 4. 빔포밍 안테나의 빔 조향각 측정 결과

Table 4. Measurement results of a tilt angle for beam-forming antenna.

Beam	Phi(deg)	Theta(deg)	Gain(dBi)
1	-15	17	-6.86
2	-8	0	-5.42
3	-21	-7	4.58
4	21	-1	4.22
5	0	0	5.12
6	-21	2	4.75
7	-30	21	-1.09
8	0	10	-6.09
9	-21	8	4.50

IV. 결 론

본 논문은 3차원 빔포밍 시스템을 설계 및 제작한 것이다. 적층형 3×3 로트만 렌즈 및 3×10 비발디 안테나를 설계하고, 수직으로 결합시켜 3차원으로 빔조향이 가능한 시스템을 구현하였다. 제작한 시스템의 방사패턴 측정 결과, 총 9가지의 각각 다른 방사패턴이 방위각과 양각이 각각 ± 20 도로 조향된 것을 분석하였으며, 이는 시뮬레이션 결과와 유사하였다.

본 논문은 아날로그 빔포밍 시스템 구현 방법 중 한 가지를 소개하였으며, 더불어 3차원 평면 스캔이 가능한 빔포밍 시스템 구현을 성공하였다. 미래 전파 산업은 밀리미터파 등 그보다 높은 상위 대역 서비스를 계속 제공할 것이며, 다양한 빔포밍 기술을 요구할 것이다. 앞으로의 전파 산업에 있어 본 논문에서 구현한 빔포밍 시스템은 통신 서비스의 다양한 관점으로 개발에 공헌을 할 것이라 판단된다.

References

- [1] M. A. Babar Abbasi, H. Tataria, V. F. Fusco, and M. Matthaiou, "On the impact of spillover losses in 28 GHz Rotman lens arrays for 5G applications," in *Proceeding of 2018 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on 5G Hardware and System Technologies (IMWS-5G)*, pp. 1-3, Aug. 2018.
- [2] W. Roh, J. Y. Seol, J. Park, B. Lee, J. Lee, and Y. Kim, et al., "Millimeter-wave beamforming as an enabling technology for 5G cellular communications: Theoretical feasibility and prototype results," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 106-113, 2014.
- [3] C. Guo, L. Tian, Z. H. Jiang, and W. Hong, "A self-calibration method for 5G full-digital TDD beamforming systems using an embedded transmission line," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 69, no. 5, pp. 2648-2659, 2021.
- [4] D. Kim, S. Park, T. Kim, L. Minz, and S. Park, "Fully digital beamforming receiver with a real-time calibration

- for 5G mobile communication," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 67, no. 6, pp. 3809-3819, 2019.
- [5] Y. Gao, M. Khaliel, F. Zheng, and T. Kaiser, "Rotman lens based hybrid analog-digital beamforming in massive MIMO systems: Srray architectures, beam selection algorithms and experiments," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 10, pp. 9134-9148, 2017.
- [6] B. J. Jang, J. H. Rong, and H. S. Choo, "Switched array antenna beamforming for low-power IoT wireless communication," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science* vol. 31, no. 8, pp. 713-720, Aug. 2020.
- [7] I. R. Kim, C. H. Ahn, and S. S. Oh, "Design and implementation of beam steering system based on Rotman lens and its real-time displaydevice of beam receiving," *Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers*, vol. 53, no. 5, pp. 37-46, May. 2016.
- [8] M. A. B. Abbasi, H. Tataria, V. F. Fusco, and M. Matthaiou, "Performance of a 28 GHz two-stage Rotman lens beamformer for millimeter wave cellular systems," in *Proceedings of 2019 13th European Conference on Antennas and Propagation(EuCAP)*, Mar. 2019, pp. 1-4.
- [9] R. C. Hansen, "Design trades for Rotman lenses," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 39, no. 4, pp. 464-472, 1991.

김 동 우 [조선대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0003-0560-8392>



2016년 2월: 조선대학교 전자공학과 (공학사)

2018년 2월: 조선대학교 전자공학과 (공학석사)

2018년 9월~현재: 조선대학교 전자공학과 박사과정

[주 관심분야] Array Antenna, RF System,

Wave Propagation 등

오 순 수 [조선대학교/부교수]

<https://orcid.org/0000-0003-2913-4654>



1998년 2월: 인하대학교 전자공학과 (공학사)

2000년 2월: 인하대학교 전자통신공학과 (공학석사)

2000년 8월: 고려대학교 초고주파 및 광파공학과(공학박사)

2003년 9월~2005년 4월: University of

Manitoba Post-Doc. Fellow

2005년 5월~2013년 8월 : 한국전자통신연구원 전파기술연구부 선임연구원

2013년 9월~현재: 조선대학교 전자공학과 교수

[주 관심분야] Array Antenna, Electromagnetic Field Measurements 등

장 언 학 [조선대학교/학부과정]

<https://orcid.org/0000-0003-2310-3005>



2021년 8월: 조선대학교 전자공학부 재학 중

[주 관심분야] Antenna, RF System, Wave Propagation