

5G용 위상 조절이 가능한 4T4R 섹터 안테나

Phase Adjustable 4T4R Sector Antenna for 5G

최 종 인 · 이 범 선*

Jong-In Choi · Bom-Son Lee*

요 약

본 논문은 5G용 4T(transmit) 4R(receive) 기지국 안테나에 관한 것으로서 기지국 장비에서 급전되는 4개의 RF 신호를 안테나의 4개의 각 포트에 급전되는 RF 신호의 위상을 맞출 수 있도록 하는 위상 조절이 가능한 안테나를 설계, 제작 및 특성을 분석하였다. 대역폭은 국내 이동통신 3사에서 사용하고 있는 5G 대역(3,400~3,700 MHz)을 기준으로 설계했다. 안테나의 방사소자는 듀얼편파 10어레이를 2열로 구성하여 4개의 포트에 급전되도록 구성했다. 4개의 포트에 급전되는 전송선로마다 포트의 위상을 조절할 수 있는 위상 조절기(phase controller)가 있으며, 그것을 거친 각각의 전송선로에는 일부의 작은 신호를 분리해 내는 커플러와 이 신호를 하나로 결합하기 위한 결합기가 포함되는 모듈이 포함되는데, 이것은 위상 오차를 확인하기 위한 것이다. 결합된 신호는 안테나의 외부에 신호 검출을 위한 컨넥터에 연결되며, 이것을 테스트 포트(test port)로 사용한다. 이와 같은 구성을 통해 기지국 장비로부터 안테나의 각 포트에 급전되는 신호의 위상을 동일하게 맞출 수 있으며, 실제 제작하여 각 포트별 위상 차이를 5° 이내로 구현할 수 있도록 했다. 그로 인해 각 포트별 별도의 서비스뿐만 아니라, 포트의 결합 서비스를 큰 손실 없이 자유롭게 빔포밍이 가능할 수 있도록 구현했다.

Abstract

In this study, we present a 4T (transmit) 4R (receive) base station antenna for 5G. Furthermore we design, manufacture, and analyze phase-adjustable antennas that allow four RF signals supplied from the base station equipment to match the phase of each of the four ports of the antenna. The bandwidth was designed based on the 5G band (3,400~3,700 MHz) used by three mobile telecommunication companies. The radiation element of the antenna is configured to supply power to four ports consisting of two columns of dual polarization 10 arrays. Each transmission line fed to the four ports has a phase controller that can control the phase of the port, and each transmission line that has passed through it includes a module that includes a coupler that separates small signals and a coupler to combine into one. The combined signal was connected to a connector for signal detection outside the antenna and used as a test port. Using this configuration, the phase of the signal supplied from the base station equipment to each port of the antenna can be adjusted equally, and the phase difference for each port can be realized within 5°. Thus, separate services for each port and combined services of the ports were freely implemented without significant loss to enable beamforming.

Key words: 5G, Phase, Adjustable, 4T4R, Sector, Antenna

「이 연구는 중소기업청 기술혁신개발사업 연구비의 지원으로 연구되었음.」

선우커뮤니케이션(Sunwoo Communication)

*경희대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Kyunghee University)

· Manuscript received February 6, 2023 ; Revised March 8, 2023 ; Accepted June 13, 2023. (ID No. 20230206-011)

· Corresponding Author: Jong-In Choi (e-mail: jichoi@sunwoo.net)

I. 서 론

4차 산업 혁명 시대 무선 통신 서비스의 근간이 되는 5G 통신 기술은 초광대역 서비스, 대규모 사물통신, 고신뢰 초저지연 통신을 바탕으로 대용량 데이터의 교환, 자율주행 차, 원격 화상통신, IoT, 메타버스(metaverse) 등과 같이 고속의 상호 통신을 특징으로 한다^[1]. 이와 관련된 비즈니스를 가진 기업들은 5G 서비스를 위한 요구사항들을 만족하는 장비 및 서비스 개발 경쟁을 치열하게 펼치고 있다. 국내의 경우 2017년 1월 K-ICT 스펙트럼 플랜을 통해 5G 주파수에 대한 할당 계획을 마련한 이후, 2018년 6월 주파수 경매를 통해 3.5 GHz 대역의 280 MHz 대역폭과 28 GHz 대역 2,400 MHz 대역폭이 할당되었으며, 2019년 4월 스마트폰 기반의 5G 상용 서비스를 세계 최초로 선보인 바 있다. 2023년 말까지 전국망 구축을 목표로 하고 있으며 현재 서울 및 6대 광역 시 및 85개 시 주요 행정동 설치가 마무리되었고 85개 시의 읍면으로 확대 설치를 진행 중이다. 다만 전국망 구축이 완료된다고 하더라도 읍면지역을 보완하기 위한 작업은 계속 이루어질 것으로 보인다. 현재 5G 통신 서비스를 위한 기지국의 구성은 기지국 장비와 안테나가 일체형으로 구성된 형태인 AAU(active antenna unit) 그리고 기지국 장비와 안테나가 분리되어 RF 케이블로 별도 연결하여 사용하는 분리형이 사용되고 있다^[2].

본 논문에서 다룰 핵심 안테나는 분리형에서 사용될 5G용 4T4R MIMO(multi input multi output) 섹터 안테나에 대한 것이다^[3]. 5G 대역 섹터 안테나를 통해 서비스 제공 시 동일 주파수를 여러 개의 포트에 출력하는 경우 이 신호들은 필드(field)상에서 서로 영향을 주게 된다^[4]. 이때 입력되는 신호의 위상이 같으면 합성패턴이 최대 이득을 구현할 수 있지만 반대로 입력되는 신호의 위상 차이가 크게 발생하게 되면 두 신호의 상쇄로 인해 서비스 방향에서 이득 저하가 발생할 수 있다. 실제 5G 분리형 섹터 안테나의 경우 기지국 장비에서 출력되는 각 포트의 위상이 같더라도 기지국 장비와 안테나를 연결하는 급전케이블 길이의 오차로 인하여 발생하는 위상을 확인하고 현장에서 길이 조절을 통하여 위상을 맞추는 것은 현실적으로 어렵다고 할 수 있다. 5G 대역(3.4~3.7 GHz)에서

는 기존 4G(LTE) 대역에 비해 주파수가 높아 파장의 길이가 짧으며, 급전케이블의 유전체까지 고려할 경우 3.5 GHz에서 $1 \lambda_g$ 는 약 54 mm 정도이며 $27 \text{ mm}(\lambda_g/2)$ 정도의 케이블 길이 오차가 발생하여 180° 의 위상 차이가 발생한다^[5]. 그림 1은 동일편파 2 포트의 위상에 따른 복사패턴을 비교한 것이다.

그림 1의 왼쪽은 동일편파(+45°)의 방사소자(다이폴)를 갖는 2개의 포트를 동위상으로 결합하는 경우를 나타낸 것이고 오른쪽 그림은 동일편파(+45°)이지만 위상은 0° 와 180° 로 차이(역위상)를 주어 결합한 합성패턴을 나타낸 것이다. 역위상 결합의 경우 전방(0° 방향)에서 빔 합성이 되지 않고 오히려 null이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 5G용 4T4R MIMO 섹터 안테나의 경우 동일 편파를 갖는 포트 위상을 동일하게 맞추는 경우 합성을 통해 최대 3 dB의 이득을 증가시켜 서비스 커버리지 및 속도를 향상시킬 수 있다^[6]. 그러나 5G 기지국 장비 각 포트에 공급되는 신호의 위상을 최적으로 조절해야 하지만 기지국 장비의 출력 포트에서 발생하는 위상 오차와 기지국 장비로부터 안테나에 연결하는 급전케이블에 의한 위상오차 등으로 인하여 현장에서 각 포트의 위상을 정확히 맞추는 것은 현실적으로 어려움이 있다. 따라서 안테나의 각 포트에 입력되는 신호의 위상을 조절하여 틀어진 위상을 맞추 수 있는 추가적인 기능이 필요하다. 본 논문에서는 이러한 문제점 해결을 위한 방법으로 안테나 각 포트에 입력되는 신호의 위상이 잘 맞았는지를 확인할 수 있는 장치를 테스트 포트라고 하여 설계 제작하였으며 확인된 위상 오차를 보정할 수 있는 각 포트에 위상 조절 장치 또

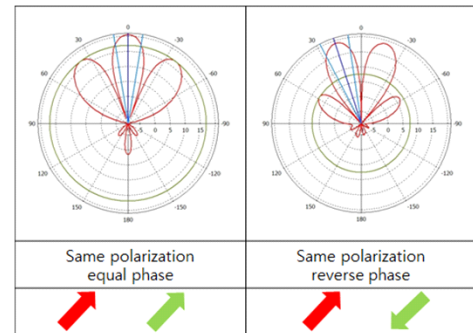


그림 1. 위상 차이에 따른 결합 패턴

Fig. 1. Combined patterns by phase differences.

한 설계 제작하였다. 이러한 추가 디바이스를 섹터 안테나에 구현한 위상 조절이 가능한 5G용 4T4R 섹터 안테나를 구현하였다.

II. 안테나 구조

5G용 4T4R 섹터 안테나의 기본 구성은 듀얼편파($\pm 45^\circ$)로 구성된 복사 소자가 수직 방향으로 10개의 배열(array)로 구성되고 수평 방향으로 2개의 열(column)로 배열되어 총 20개의 복사소자로 구성된다^[7]. 각각의 칼럼은 이중편파로 동작하므로 2개의 입력포트로 구성된다. 결국 안테나는 총 4개의 입력포트로 구성되고 4개의 포트 로 송신 및 수신이 가능하여 4T4R 섹터라고 표현한다^[8]. 각 칼럼의 동일 편파끼리 묶어 이득을 올릴 수도 있다. 그림 2는 이와 같은 4T4R 섹터 안테나의 기본 소자 구성도를 나타낸다.

일반적인 섹터 안테나의 경우 위와 같은 기본 방사 소자 구성에 각각의 소자를 연결하기 위한 분배회로(power divider) 그리고 각 소자의 위상값을 조절하기 위한 위상 변환 디바이스가 포함되는데 이것을 위상변위기(phase shifter: P.S)라고 표시한다^[9]. 그리고 각 포트의 급전을 위한 컨넥터가 연결되면 모두 완성된다. 다만 기지국으로부터 급전 컨넥터까지 입력되는 신호의 위상을 맞추는 것은 현실적으로 어려움이 있다. 앞에서 설명한 것처럼 케이블에서 3.5 GHz의 $1 \lambda_g$ 에 대한 물리적 길이는 54 mm



그림 2. 4T4R 섹터 안테나의 소자 구성도
Fig. 2. Element configuration of 4T4R antenna.

정도이며 케이블 길이 27 mm 정도만 오차가 발생해도 위상 차이가 180도가 나기 때문이다. 그러한 이유로 5G 섹터 안테나 대부분이 안테나와 장비 일체형으로 구성되고 그러면서도 내부에 보정회로(calibration circuit)를 통해 위상 오차를 최소화하는 회로가 포함되어 있다^[10]. 본 논문에서는 기지국 장비로부터 안테나까지 급전되는 부분에서 발생하는 위상 오차를 최소화하고 이를 통해 분리형 기지국에서도 빔 합성에 대한 손실을 최소화해서 원하는 형태의 빔 합성을 만드는 것이 목표이다. 그림 3이 이러한 위상 조절이 가능한 섹터 안테나 구성도를 나타낸 것이다. 4개의 각각의 포트별 위상 조절을 할 수 있는 위상 조절기(P.C)가 있으며 안테나 소자에 연결되기 전 위상 정보를 얻을 수 있는 커플러 그리고 4개의 coupling 신호를 모아 하나의 test port로 결합하는 결합기로 구성된 모듈로 구성되어 있다.

기지국으로부터 안테나로 급전되는 신호의 위상이 동 위상일 경우 test port의 레벨은 최대가 될 것이고 위상의 오차가 있는 경우 그만큼의 손실이 발생하여 레벨은 작아질 것이다. 각 포트에 존재하는 위상 조절기의 위상을 조절하여 test port 레벨을 최대로 맞춘다면 기지국으로부터

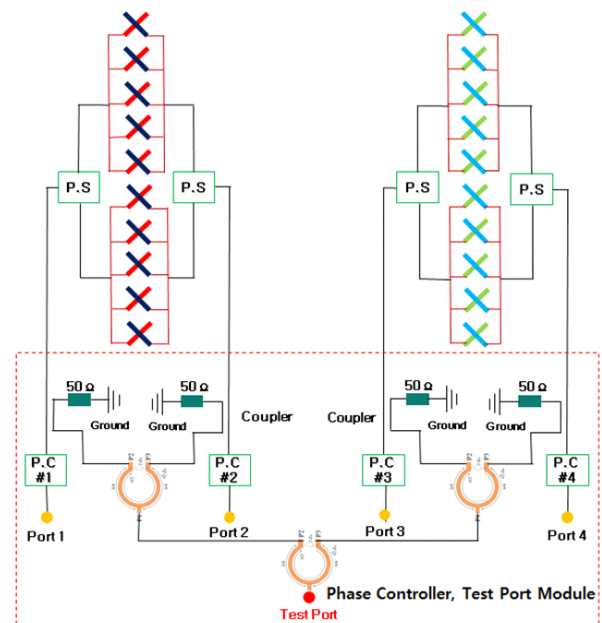


그림 3. 위상 조절이 가능한 섹터안테나 구성도
Fig. 3. Phase adjustable sector antenna configuration.

터 안테나 소자에 이르는 위상을 맞추는 것과 같은 특성을 갖게 된다.

III. Test Port 모듈 구성 및 제작

그림 4는 test port 모듈의 구성을 나타낸다. 장비에서 안테나 급전 포트에 급전되는 신호가 안테나 소자로 연결되는 50 Ω line에 일부 작은 신호를 커플러를 구성하여 뽑아 그 신호들을 모두 동 위상으로 결합하여 하나의 포트(test port)로 연결한다^[11]. 이때 4개의 커플러로 들어오는 RF 신호의 위상이 동일한 경우와 다른 경우 test port에서의 신호 level은 큰 차이를 보이게 된다.

Test port 모듈은 전체적으로 CPWG(coplanar waveguide with ground) 타입으로 설계하였다^[12]. 커플러를 통해 검출된 신호의 합성은 포트별 격리도를 높이기 위해 윌킨슨 분배기(Wilkinson divider) 타입으로 설계하였다^[13]. 그림 5는 제작된 test port 모듈의 사진을 나타낸 것이다.

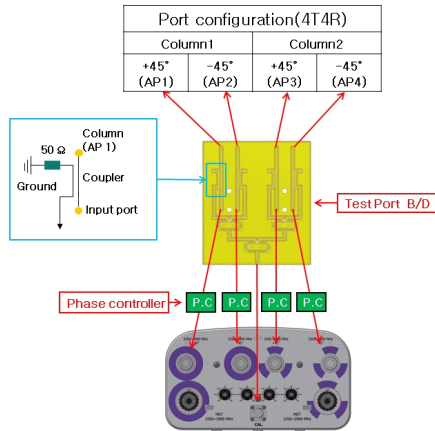


그림 4. 테스트 포트 구성
Fig. 4. Test port configuration.

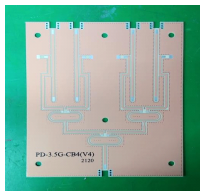


그림 5. 테스트 포트 모듈
Fig. 5. Test port module.

IV. 위상 조절기 모듈 구성 및 제작

위상 조절기는 각 급전 라인의 위상을 다르게 조절하는 장치로 microstrip line으로 설계되며, 그림 6은 모듈의 구성을 나타낸다. 노란색으로 표시된 하측 PCB 패턴을 통해 입출력 포트가 구성되어 있고, 붉은색으로 표시된 위상 조절용 PCB가 그 상측에 위치한다. 겹쳐진 PCB의 center hole을 기준으로 시계방향으로 회전하면 입출력 전체 길이가 짧아져 위상이 짧아지고, 반시계 방향으로 회전하면 입출력 전체 길이가 길어져 위상이 길어지는 방식이다. 그림 7은 제작된 위상 조절기 모듈의 사진을 나타낸다.

V. 위상 조절이 가능한 섹터 안테나의 구현

수직 배열된 10개의 듀얼폴(dual polarization) 복사 소자를 2개씩(set) 결합하여 구성하고 이 5개의 복사소자 set를 위상 변위기로 묶어 +45° 포트와 -45° 포트에 입력 포트가 되며, 수평방향으로 2개의 열로 구성되어 총 4개의 입력포트로 구성된다. 이 부분까지 일반적인 섹터 안테나의 구성이다. 본 논문에서는 위상 조절이 가능한 4T4R 섹터

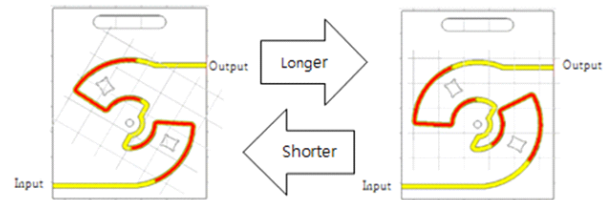


그림 6. 위상 조절기
Fig. 6. Phase controller.



그림 7. 제작된 위상조절기
Fig. 7. Fabricated phase controller.

안테나의 구현을 위해 각 포트에 신호 검출을 위한 커플러와 coupling된 신호를 결합하는 결합기로 구성된 test port 모듈과 각각의 포트별 위상을 제어하기 위한 위상 조절기가 추가되며, 이를 통해 최종 급전 컨넥터까지 연결이 된다. 이렇게 전체 구성된 제품의 내부 사진을 아래 그림 8에서 나타낸 것이다.

그림 9는 안테나의 외부 사진이다. 안테나의 외부 아랫면에는 4개의 RF 컨넥터, test port 및 각 포트의 위상을 조절할 수 있는 위상 조절 노브 4개가 포함되어 있다.

VI. 전기적 특성 검증

제작된 안테나의 성능검증은 전기적 특성뿐만 아니라, 신뢰성 시험 등 안테나 시험에서 요구되는 전반적인 시험이 모두 진행되었으며, 일반적인 섹터 안테나에서 요구되는 규격을 모두 만족하였다. 다만 본 논문에서는 개발 안테나의 특징을 설명하는 부분에 초점을 맞추기 위해 신뢰성 시험에 대한 과정 및 결과 부분은 생략하였으며,

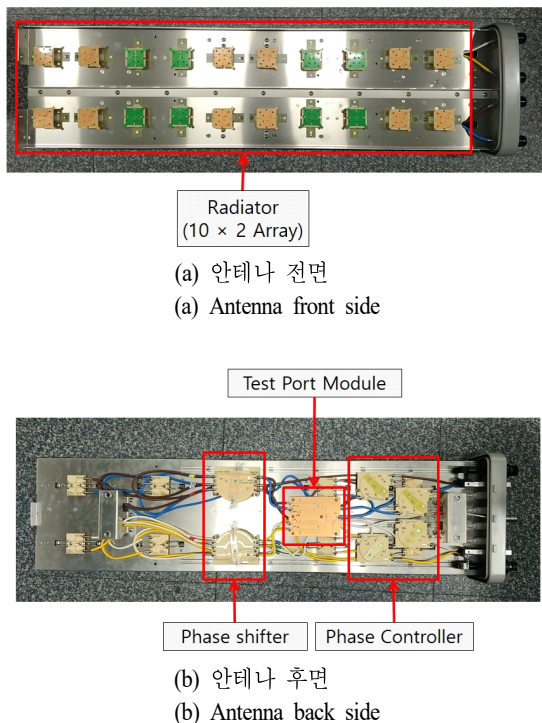


그림 8. 제작된 안테나의 내부
Fig. 8. Inside the fabricated antenna.

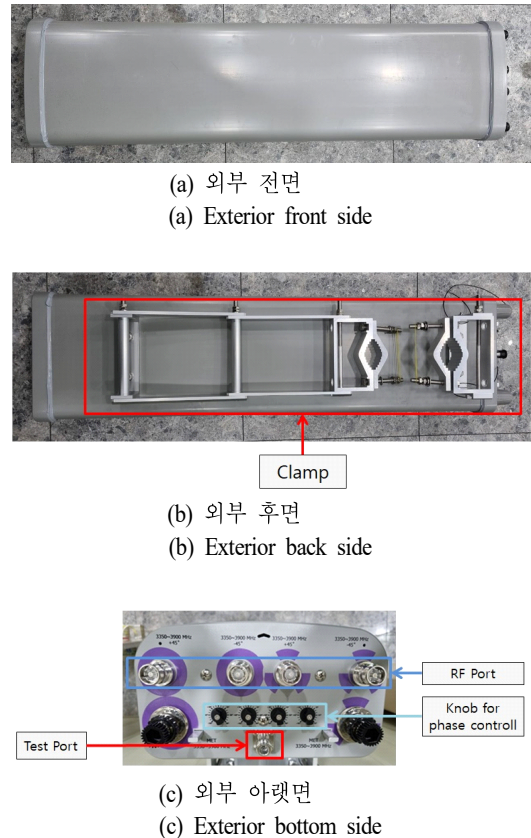


그림 9. 제작된 안테나의 외부
Fig. 9. Exterior of the fabricated antenna.

전기적 시험 결과 부분만을 나타내었다. 다만 특히 목표로 하고자 하는 주요 특성 위주로 설명하고자 한다. 전기적 특성 결과는 자체 시험 및 외부 시험기관과의 비교 시험을 통해 신뢰성을 높였으며, 최종 구현 결과는 표 1에 나타내었다.

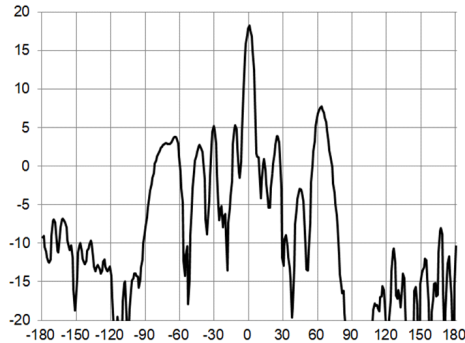
측정된 결과는 모두 목표 규격을 만족함을 보였다. 다만 본 논문에서는 각 포트의 위상 조절을 통해 빔의 합성이 어떻게 되는지를 확인하는 것이 핵심이라 할 수 있다. 그래서 포트 간 위상차에 의한 안테나의 결합 이득 및 결합 패턴 차이를 확인할 수 있는 부분에 초점을 맞추어 설명할 것이다. 동일편파를 갖는 포트 1과 3이 동 위상인 경우와 180° 위상차일 때의 결과를 비교하였다. 포트 2와 4는 유사한 결과를 보여 생략하였다. 그림 10(a)는 동일 편파 포트에 위상을 동일하게 하여 결합한 수직 패턴이며, 그림 10(b)는 수평패턴이다. 그림 10(c)는 동일 편파 포트

표 1. 주요 성능 지표의 개발목표 및 최종구현

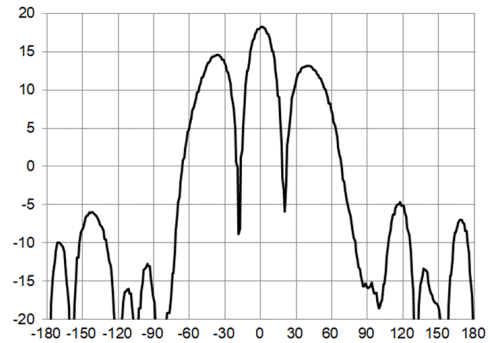
Table 1. Development goals and final implementation of main specification.

Main specifications	Unit	Goals	Realization
1. Return loss in bands	dB	≤ -14	≤ -15.427
2. Antenna gain	dBi	≥ 15.5	≥ 15.53
3. Beam width (H)	Degree	63 ± 9	$54.1 \sim 66.7$
4. Beam width (V)	Degree	≥ 4	≥ 4.99
5. Phase error	Degree	≤ 5	≤ 0.99
6. Compensation for antenna gain	dBi	≥ 3	≥ 10.57

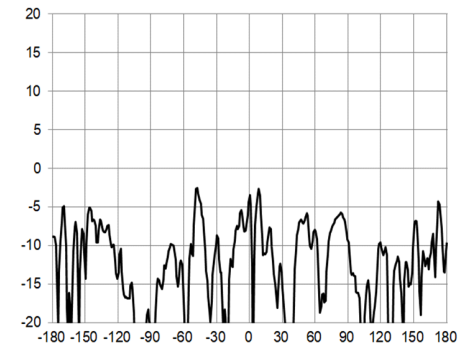
에 위상 차이를 180° 로 주고 결합된 수직패턴이며, 그림 10(d)는 수평패턴이다. 역위상의 결합 시 이득이 많이 떨어지며, 수평패턴은 전방 0° 에서 null이 발생하는 것을 확인할 수 있었다.



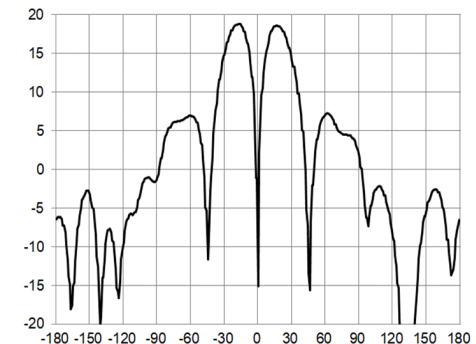
(a) 포트 1과 3의 동일 위상 수직패턴
(a) Port 1 & Port 3 same phase vertical pattern



(b) 포트 1과 3의 동일위상 수평패턴
(b) Port 1 & 3 same phase horizontal pattern



(c) 포트 1과 3의 180° 위상차 수직패턴
(c) Port 1 & Port 3 reverse phase vertical pattern



(d) 포트 1과 3의 180° 위상차 수평패턴
(d) Port 1 & 3 Reverse phase horizontal pattern

그림 10. 동일편파 포트간 위상 차이에 따른 결합 패턴 특성

Fig. 10. Combine pattern characteristics according to phase differences between equal polarized ports.

표 2. 동일편파 포트의 위상에 따른 안테나 결합이득

Table 2. Combined gain according to phase of the equal polarization ports.

Frequency (MHz)	Antenna gain (dBi)			
	P1, P3 Equal phase	P1, P3 Reverse phase	P2, P4 Equal phase	P2, P4 Reverse phase
3,400	17.17	6.60	17.77	-0.94
3,500	16.87	-2.56	17.57	3.50
3,600	17.92	-2.86	18.62	-3.94
3,700	17.70	-2.30	17.71	0.07

표 2는 측정된 안테나 이득 값을 비교한 것이다.

동일편파이면서 동 위상을 갖는 경우는 안테나 결합 이득이 17.17 dBi~18.62 dBi까지 나왔으며, 역위상(180°)

차이)을 갖는 경우 안테나 결합 이득은 -3.94 dBi \sim 6.60 dBi가 나왔다.

Ⅶ. 결 론

5G 4T4R 섹터 안테나는 포트별로 별도의 신호를 송수신하는 경우도 있지만, 포트를 묶어 결합 신호를 사용하는 경우도 있는데, 이것도 하나의 빔포밍(*beam forming*)이라고 할 수 있다. 다만 기지국 장비로부터 안테나 방사소자에 이르기까지 위상이 다른 경우, 결합에 의한 큰 손실이 발생할 수 있으며, 본 논문에서는 이러한 결합에 의한 손실을 줄이기 위한 안테나를 구현한 것이다. 기지국에서 급전되는 신호가 안테나의 각 포트를 통해 방사소자까지 도달하는데, 위상 차이가 발생하게 되면 신호의 결합에 있어서 큰 손실이 발생할 수 있다. 이러한 손실을 줄이기 위해 각 급전 컨넥터에서 방사소자 사이에 위상 조절기 및 *test port module*을 추가함으로써 기지국 장비로부터 안테나 방사소자에 이르는 급전 라인상에서 발생할 수 있는 위상 오차를 최소화하고 이를 통해 동일 편파의 포트 간에 결합되는 안테나의 방사패턴 및 이득을 개선할 수 있었다. 각 디바이스별 설계 내용 및 측정 결과를 통해 목표로 하는 규격을 만족함을 확인하였으며, 안테나와 결합하여 안테나의 자체적인 전기적 특성뿐만 아니라, 모듈의 결합으로 인해 동일 편파 포트에서 위상 오차를 5° 이내로 구현할 수 있었다. 이를 통해 5G용 4T4R 섹터 안테나를 MIMO뿐만 아니라, 빔포밍의 용도로도 사용할 수 있도록 하였다.

References

[1] E. Dahlman, S. Pakrval, and J. Skold, *5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology*, London, Academic Press, 2018.

[2] H. Holma, A. Toskaka, and T. Nakamura, *5G Tech-*

nology: 3GPP New Radio, Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, pp. 192-194, 2019.

[3] H. Huang, C. B. Papadias, and S. Venkatesan, *MIMO Communication for Cellular Networks*, New York, NY, Springer, pp. 213-215, 2012.

[4] C. A. Balanis, *Antenna Theory Analysis and Design*, New York, NY, John Wiley & Sons, pp. 205-212, 1982.

[5] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, Boston, MA, Addison Wesley, pp. 163-170, 1990.

[6] W. L. Stutzman, G. A. Thiele, *Antenna Theory and Design*, 3rd ed. Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, pp. 286-292, 2012.

[7] E. T. Jung, B. G. Yu, "Design of dual-band/dual-polarized antenna with orthogonal radiation mode," *Journal of Korean Institute of Information Technology*, vol. 15, no. 11, pp. 87-92, Nov. 2017.

[8] H. Joseph, *Microwave Polarizers, Power Dividers, Phase Shifters, Circulators, and Switches*, Hoboken, NJ, Wiley-IEEE Press, 2018.

[9] D. C. Kim, S. J. Park, T. W. Kim, L. Minz, and S. O. 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, Jun. 2019.

[10] R. E. Collin, *Foundations for Microwave Engineering*, 2nd ed. New York, NY, McGraw-Hill, pp. 427-432, 1992.

[11] T. C. Edwards, M. B. Steer, *Foundations for Microstrip Circuit Design*, 4th ed. Chichester, Wiley-IEEE Press, pp. 427-428, 2016.

[12] E. J. Wilkinson, "An N-way power divider," *IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 8, no. 1, pp. 116-118, Jan. 1960.

최 중 인 [선우커뮤니케이션/전무이사]

<https://orcid.org/0009-0009-7861-3628>



1997년 2월: 금오공과대학교 전자공학과 (공학사)

1999년 2월: 금오공과대학교 전자공학과 (공학석사)

2001년 2월~현재: 경희대학교 전자공학과 박사수료

1999년 3월~2021년 12월: (주)선우커뮤니

케이션 연구소장

2022년 1월~현재: (주)선우커뮤니케이션 전무이사

[주 관심분야] Antennas, Passive Devices

이 범 선 [경희대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0003-1223-0113>



1982년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)

1993년 8월: 미국 네브래스카 주립대 전자공학과 (공학석사)

1995년 5월: 미국 네브래스카 주립대 전자공학과 (공학박사)

1995년 9월~현재: 경희대학교 전자공

학과 교수

2008년 1월~2009년 12월: 한국전자파학회 마이크로파 및 전파전파연구회 위원장

2010년 1월~2010년 12월: 한국전자파학회 영문지 편집위원장

2018년 1월~2018년 12월: 한국전자파학회 회장

[주 관심분야] Microwave Antenna, Metamaterials, RF Identification (RFID) Tags, Microwave Passive Devices, Wireless Power Transfer 등