



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2023년 8월  
박사학위 논문

3차원 빔포밍을 위한  
입체형 Rotman 렌즈 배열 안테나 연구

조선대학교 대학원

전자공학과

김 동 우

3차원 빔포밍을 위한  
입체형 Rotman 렌즈 배열 안테나 연구

Study on Volumetric Rotman Lens Array Antenna for  
Three-Dimensional Beamforming

2023년 8월 25일

조선대학교 대학원

전 자 공 학 과

김 동 우

3차원 빔포밍을 위한  
입체형 Rotman 렌즈 배열 안테나 연구

지도교수      오   순   수

이 논문을 공학 박사학위신청 논문으로 제출함

2023 년 4 월

조선대학교 대학원

전 자 공 학 과

김 동 우

## 김동우의 박사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 황석승 (인)

위원 조선대학교 교수 오순수 (인)

위원 조선대학교 교수 최현식 (인)

위원 조선대학교 교수 염흥기 (인)

위원 인천테크노파크 연구원 박욱기 (인)

2023년 6월

조선대학교 대학원

## 감사의 글

현재 박사과정을 마무리하고 이렇게 감사의글을 쓰고 있는 제 자신을 보니 감회가 새롭습니다. 꽤 오래동안 밤낮없이 연구실을 지켜온 것 같습니다. 그리고, 같이 연구실을 지탱했던 수많은 선배, 동기, 후배, 그리고 여러 교수님 등 많이 봐왔던 얼굴들이 갑자기 생각이 납니다. 작년만해도 박사가 될 수 있을까 의문을 가졌던 어린 마음이 거짓말 같이 느껴집니다. 이렇게 될 수 있었던 것은 주변에서 여러분들의 도움이 있었기에 성공적으로 마무리 할 수 있었습니다. 이 감사한 마음을 이 학위 논문에 담고자 합니다.

그 동안 같이 연구실 동료들에게 감사드립니다. 연구실을 추천했던 장민상, 선배이자 동기인 김인렬, 가장 오래 곁을 지켰던 동기 진재범, 석사과정을 같이한 최재원 등 감사드립니다. 그리고 언급 못한 후배들 및 다른 교수님 연구실 후배들에게도 감사드립니다.

학위 논문을 검토해주신 황석승 교수님, 최현식 교수님, 영흥기 교수님, 박욱기 박사님에게 감사드립니다. 바쁘신 와중에도 자세하게 검토해주셔서 논문 완성도를 더 높일 수 있었습니다. 특히 주말에도 시간을 내주셔서 가르쳐주신 박욱기 박사님에게 감사드립니다.

약 10년 가까이 가장 가까운 위치에서 지도해주신 우리 지도교수님, 오순수 교수님에게 감사드립니다. 교수님이 계셨기에 올바른 길로 나아갈 수 있었다고 지금도 생각합니다. 많은 것을 가르쳐 주셨지만 모든 가르침을 제 작은 그릇에 담을 수 없었기에 항상 죄송스러울 뿐입니다. 앞으로도 가르쳐주신 것을 상기하며 시련을 헤쳐 나가도록 하겠습니다.

마지막으로, 사랑하는 제 가족들에게 감사드립니다. 항상 곁에서 아낌없는 무한한 지원을 해주신 덕택에 제가 이 자리에 있을 수 있었습니다. 제가 사회의 구성인으로 떳떳하게 살 수 있었던 것도 다 가족이 있었기에 가능했습니다. 작지만 박사학위를 통해서 감사 인사드립니다. 앞으로도 남 부끄럽지 않게 떳떳하게 살겠습니다.

## 목 차

ABSTRACT .....	vii
Index of Figures .....	viii
Index of Tables .....	ix
제1장 서론 .....	1
제2장 3차원 빔포밍을 위한 기술 .....	9
제1절 빔포밍(Beamforming) 개요 .....	9
1. 안테나 이론 .....	9
가. 위상 배열 안테나 .....	9
나. 빔포밍 안테나 .....	11
2. 빔포밍 구현 방법 분류 .....	13
가. 아날로그 빔포밍(Analog beamforming) .....	13
나. 디지털 빔포밍(Digital beamforming) .....	14
다. 하이브리드 빔포밍(Hybrid beamforming) .....	16
제2절 Rotman 렌즈 .....	17
1. Rotman 렌즈 원리 .....	18
2. Rotman 렌즈 설계 방법 .....	20
3. Rotman 렌즈 활용한 배열 안테나 사전 연구 .....	24
제3장 적층형 Rotman 렌즈 방법 .....	29
제1절 적층형 Rotman 렌즈 구조 설계 .....	29
1. 입출력 3×3 Rotman 렌즈 설계 .....	29
2. 입출력 3×10 Rotman 렌즈 설계 .....	33
3. 3차원 빔포밍 시뮬레이션 결과 .....	37
제2절 적층형 시스템 제작 및 측정 .....	41

1. 빔포밍 시스템 제작 .....	41
2. 3차원 빔포밍 측정 .....	44
<b>제4장 입체형 Rotman 렌즈 설계 및 검증 .....</b>	<b>48</b>
제1절 입체형 Rotman 렌즈 설계 .....	48
1. 입체형 Rotman 렌즈 설계식 유도 .....	48
2. 입출력 3×3 종방향 Rotman 렌즈 설계 .....	53
3. 입체형 Rotman 렌즈 개략도 구조 시뮬레이션 .....	58
4. 입체형 Rotman 렌즈 전체 구조 시뮬레이션 .....	66
제2절 입체형 Rotman 렌즈 배열 안테나 제작 및 측정 .....	73
1. 입체형 Rotman 렌즈 배열 안테나 제작 .....	73
2. 입체형 Rotman 렌즈 배열 안테나 측정 및 성능 검증 .....	75
<b>제5장 결론 .....</b>	<b>83</b>
<b>Reference .....</b>	<b>86</b>
<b>Research Achivements .....</b>	<b>97</b>



## ABSTRACT

### Study on Volumetric Rotman Lens Array Antenna for Three-Dimensional Beamforming

Kim Dong Woo

Advisor : Prof. Oh Soon Soo

Department of Electronic Engineering

Graduate School of Chosun University

As increasing the demand for frequency resources rapidly, the development of 5G mobile communication services is being promoted in worldwide. The disadvantage of millimeter band is that the coverage area is reduced due to shorter a wavelength than bands for LTE and 5G NR FR1. Femtocell communication technology managed cells as small as femto size and has advantages such as low power, ultra-low cost, and ultra-small. This paper propose the three-dimensional beamforming antenna for millimeter repeater or Femtocell. Rotman lens is designed for three-dimensional beamforming. Three-dimensional beamforming system wasis desinged by two method of using Rotman lens. One is to integate two differnet Rotman lens, the others is to design of volumetric Rotman lens. Especially, to design a volumetric Rotman lens is extended from previous Rotman lens, and It must be to propose a new fomular for design volumetric Rotman lens. First, two-stage Rotman lens with 3x3 and 3x10 Rotman lens is combineded for three-dimensional beamforming at 28 GHz. And RF switch and power supply was equipmented in order to control a beam. The different between nine beams of the fabricated system was measured. As a results, The nine beams was formed with from -20 to +20 angle, it can verify to implement three-dimensional beamforming. Second, a volumetric Rotman lens antenna operating at 28 GHz is proposed with new design formula. The six rectangular blocks are assembled using a metallic bolt. The input port consists of a waveguide, and the output port is made of an open-ended waveguide likes slot-aperture array antenna. The input and output waveguides are drilled in a flat conducting plate. The input and output port positions are optimised. Simulated and measured results show that the radiating beam is controlled almost exactly as calculated. Compared with the previous two-stage stacked Rotman lens antenna, the proposed Rotman lens antenna can dramatically decrease the antenna volume by approximately 75%.

## Index of Figures

Figure 1.1 Requirement of 5G wireless communication technology .....	2
Figure 1.2 System of 5G mobile internet service .....	3
Figure 1.3 5G cellular configuration using beamforming .....	4
Figure 1.4 Radiation pattern of array antenna for single, two and four elements .....	5
Figure 2.1 Far-field geometry and phasor diagram of N-element array of isotropic sources positioned along the z-axis .....	9
Figure 2.2 Theory of beamforming antenna in respect with phase array antenna .....	12
Figure 2.3 Diagram of analog beamforming system .....	13
Figure 2.4 Procedure of a signal process in analog beamforming system .....	14
Figure 2.5 Diagram of digital beamforming system .....	15
Figure 2.6 Procedure of a signal process in digital beamforming system .....	15
Figure 2.7 Diagram of hybrid beamforming system .....	16
Figure 2.8 Procedure of transmission signal in Rotman lens .....	17
Figure 2.9 Distribution of current on Rotman lens .....	19
Figure 2.10 Description of Rotman lens with a requirement parameters .....	20
Figure 2.11 Rotman lens for real-time display device of beam receiving at operating 2.4 GHz. ....	25
Figure 2.12 Photography of combination Rotman lens and array antenna at operating 2.4 GHz. ....	25
Figure 2.13 Measurement results of radiation pattern for beamforming antenna at operating 2.4 GHz .....	26
Figure 2.14 Testing setup of beam-steering system and real-time display device of beam receiving .....	26
Figure 2.15 Beamforming antenna system using 5×10 Rotman lens at operation 28 GHz ...	27
Figure 2.16 Test setup of measurement radiation pattern for 28 GHz beamforming antenna ·	28
Figure 3.1 Block diagram of a system of three-dimensional beamforming antenna with two-stage Rotman lens .....	29
Figure 3.2 3×3 Rotman lens on first stage .....	30
Figure 3.3 Simulation results of reflection coefficient at input ports for 3×3 Rotman lens of first stage .....	31
Figure 3.4 Simulation results of the phase of 3×3 Rotman lens of first stage .....	33
Figure 3.5 3×10 Rotman lens of second stage and array Vivaldi antenna .....	34

Figure 3.6 Simulation results of the phase of  $3 \times 10$  Rotman lens for second stage ..... 36

Figure 3.7 Simulation results of radiation pattern for two-stage Rotman lens ..... 39

Figure 3.8 Simulation results of three-dimensional radiation pattern for a two-stage  
Rotman lens ..... 40

Figure 3.9 Description of three-dimensional beamforming system with two-stage  
Rotman lens ..... 42

Figure 3.10 Manufacture of a system of two-stage Rotman lens ..... 43

Figure 3.11 Photography of the two-stage Rotman lens system on a measurement system  
for measurement three-dimensional radiation pattern ..... 44

Figure 3.12 Measurement results of three-dimensional radiation pattern for two-stage  
Rotman lens ..... 46

Figure 3.13 Description of a volumetric Rotman lens ..... 48

Figure 3.14 Longitude waveguides on focal-arc and inner-arc ..... 54

Figure 3.15 Simulation results of a phase for longitude Rotman lens ..... 56

Figure 3.16 Simulation results of electrical field for longitude Rotmans lens ..... 57

Figure 3.17 Designed of a schematic volumetric Rotman lens ..... 59

Figure 3.18 Simulation results of a transmission coefficient for a schematic volumetric  
Rotman lens ..... 60

Figure 3.19 Simulation results of a phase for a schematic volumetric Rotman lens ..... 61

Figure 3.20 Simulation results of a electrical field for diagoanl Rotman lens ..... 64

Figure 3.21 Simulation results of radiation pattern for a schematic volumetric Rotman lens .. 65

Figure 3.22 Structure of a proposed volumetric Rotman lens ..... 67

Figure 3.23 Simulation results of a transmission coefficient from input F22 for  
a volumetric Rotman lens ..... 68

Figure 3.24 Simulation results of a phase for a volumetric Rotman lens ..... 69

Figure 3.25 Simulation results of an electrical field for a volumetric Rotman lens ..... 71

Figure 3.26 Simulation results of radiation pattern for a volumetric Rotman lens ..... 72

Figure 3.27 Fabrication of a volumetric Rotman lens ..... 74

Figure 3.28 Photography of measuring refection coefficient for a volumetric Rotman lens ... 75

Figure 3.29 Measurement results of reflection coefficient for a volumetric Rotman lens ..... 76

Figure 3.30 Photography of measuring three-dimensional radiation pattern for  
a volumetric Rotman lens ..... 77

Figure 3.31 Measurement results of 2D-cut radiation pattern for a volumetric Rotman lens · 78

Figure 3.32 Measurement results of three-dimensional radiation pattern for a volumetric  
Rotman lens ..... 79

Figure 3.33 Measurement results of three-dimensional radiation pattern for three-dimensional  
Rotman lens ..... 84

## Index of Tables

Table 1.1	Differences of previous antenna and new generation antenna .....	2
Table 3.1	Simulation results of the phase of 3x3 Rotman lens of first stage .....	31
Table 3.2	Simulation results of the phase 3×10 Rotman lens for second stage .....	37
Table 3.3	Simulation results of a tilt-angle for beamforming antenna .....	41
Table 3.4	Measurement results of a tilt angle for beamforming antenna .....	47
Table 3.5	Goal specification about volumetric Rotman lens .....	53
Table 3.6	Simulation results of the phase for azimuth Rotmans lens .....	61
Table 3.7	Simulation results of the a phase for a schematic volumetric Rotman lens .....	62
Table 3.8	Simulation results of a tilt angle for a schematic volumetric Rotman lens .....	66
Table 3.9	Simulation results of a phase for a volumetric Rotman lens .....	70
Table 3.10	Simulation results of a tilt angle for a volumetric Rotman lens .....	73
Table 3.11	Measurement results of a tilt angle and gain for a volumetric Rotman lens .....	80
Table 3.12	Comparison with volumetric Rotman lens and two-stage Rotman lens .....	82
Table 3.13	Comparison with Rotman lens implemented of three-dimensional beamforming .....	82

## 제1장 서론

최근 모바일 트래픽 증가, 대용량 데이터 전송, 사물인터넷 서비스 등 새로운 전파자원 수요가 급증함에 따라 3.5 GHz 또는 28 GHz 대역을 중심으로 5G 이동통신 서비스를 위한 주파수 할당 및 상용화가 전 세계적으로 추진되고 있다[1]. 그러나 5G 이동통신 서비스의 이용 대역은 밀리미터파에서 평가가 이루어진다. 밀리미터파 대역의 전파분석에 적용 시 산업화에 따라 도시화된 주거환경 및 실내·외 전파 환경변화를 제대로 반영하지 못하여 현재의 5G 무선통신서비스의 품질 저하 및 5G 이후의 차세대 무선통신서비스 개발에 어려움이 예상되어 밀리미터파 전용 인프라 개발이 필수적이다. 국내의 밀집 건축물 및 대형건물, 주거/비주거 지역의 복합적인 장애물 배치 등의 다양한 전파환경에 대하여 5G 밀리미터파 대역 활용 가능한 통신 시스템 개발은 세계 각국에서 현재 진행중이다[1-10].

28 GHz 빔포밍 안테나가 본격적으로 적용될 5G 이동통신의 상용화에 따라 개인당 Gbps 속도, 수 ms 저지연 전송, 다수 디바이스 수용을 위한 핵심 원천기술 개발 및 시제품 시연을 통한 기능 검증이 진행되고 있다[11]. 이와 관련하여 Nokia는 2016년 3월 센티미터파 대역(15 GHz)에서 8x8 MIMO 기술을 사용하여 초당 20 Gbps 이상급 HD 가상현실 응용을 시연하였다[12]. 한편, NTT DoCoMo는 2015년 10월 화웨이와 함께 Multi-User MIMO 기술을 활용하여 Single-User MIMO 기술보다 최대 10배 이상 빠른 속도를 시연하였다. 5G 무선통신 기술은 더 많은 무선 기기들이 동시에 더 빠르고 효율적으로 정보를 주고받을 수 있도록 무선네트워크의 생태계를 획기적으로 바꾸는 것으로, 상용화가 구체화 되면서 관련 산업계의 기대감이 커지고 있다.

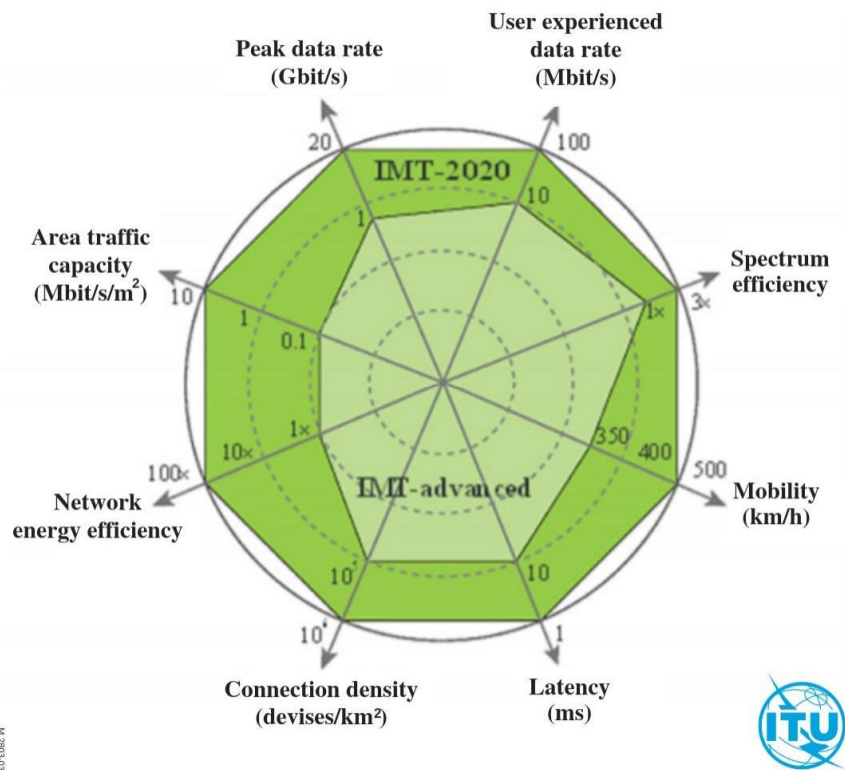


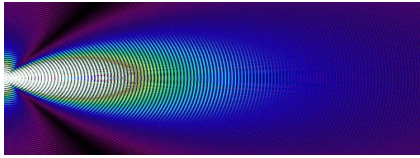
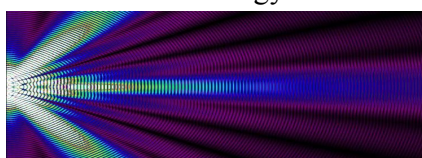
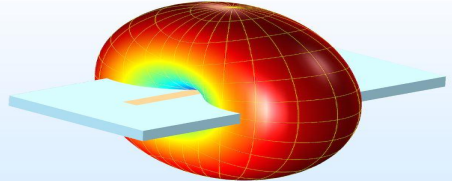
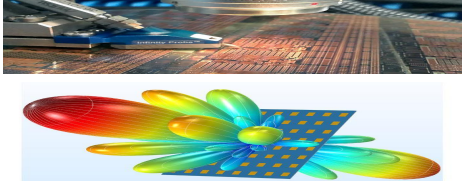


Figure 1.1 Requirement of 5G wireless communication technology[2]

Table 1.1 Differences of previous antenna and new generation antenna[3]

Classification	Previous antenna	New generation antenna
Using	Mobile communication	Mobile communication
Frequency	Frequency for mobile communication below 3 GHz	Frequency for mobile communication over 3 GHz
Coverage		
Direction	Omni-direction 	A lot of direction by beamforming technology 
Antenna		



현재 이동통신 시스템은 셀룰러(Cellular) 시스템을 이용한다[13-19]. 셀룰러 이동통신 시스템은 서비스 제공지역을 셀 단위로 나누어 효율적인 통신 서비스를 제공하기 위해 설립되었다. 셀 단위는 보통 기지국의 영역 커버리지로 결정된다. 지금까지 사용된 이동통신 LTE 및 5G FR1의 통신은 UHF(0.3-3 GHz) 대역으로 커버리지를 충분히 만족하였으나 5G FR2 주파수인 밀리미터파 대역에서 파장이 100배 이상 짧아져 커버리지 영역이 급감한다. 5G 이동통신 성능을 밀리미터파 대역에서 제대로 활용하기 위해서 기존의 셀보다 더 촘촘해야 하며 더 많은 인프라(기지국 및 중계기) 연구가 시급하다.

펄토셀(Femto-cell)은 1,000조 분의 1인 펄토와 셀의 합성어이며, 펄토만큼 작은 셀로 더 많이 쪼개고 분산하여 동일한 공간에서 통신 효율을 극대화하는 기술이다[14,15]. 펄토셀은 셀 크기인 만큼 저전력, 초단거리, 저가, 초소형 등 장점이 있다. 충분히 작은 셀이므로 커버리지 또한 실내 방 1개 만큼 작지만, 앞서 장점을 설명한 것과 같이 저전력, 저가, 초소형이므로 더 많은 인프라를 설치하기에 부담이 없다.

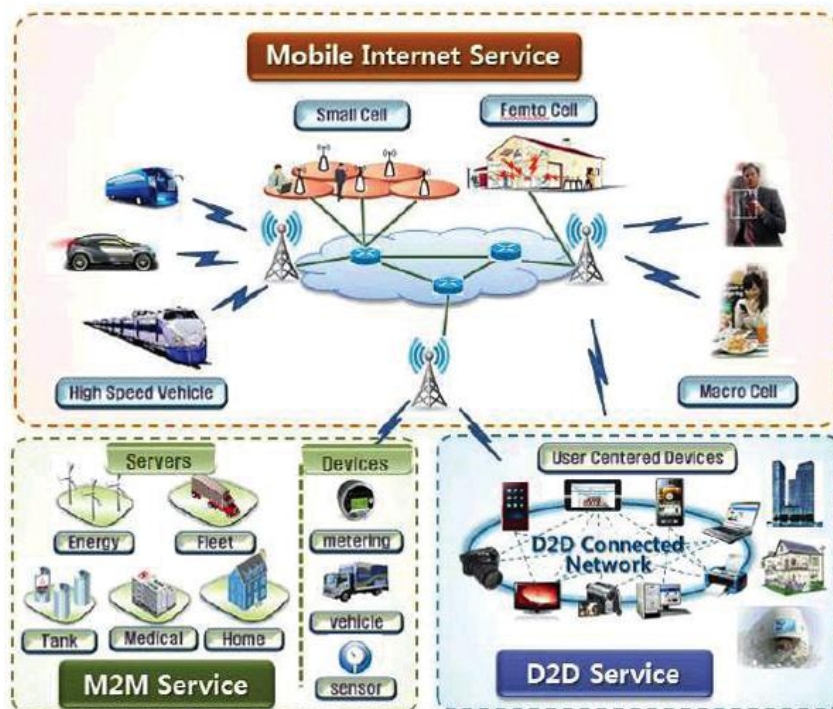


Figure 1.2 System of 5G mobile internet service[13]



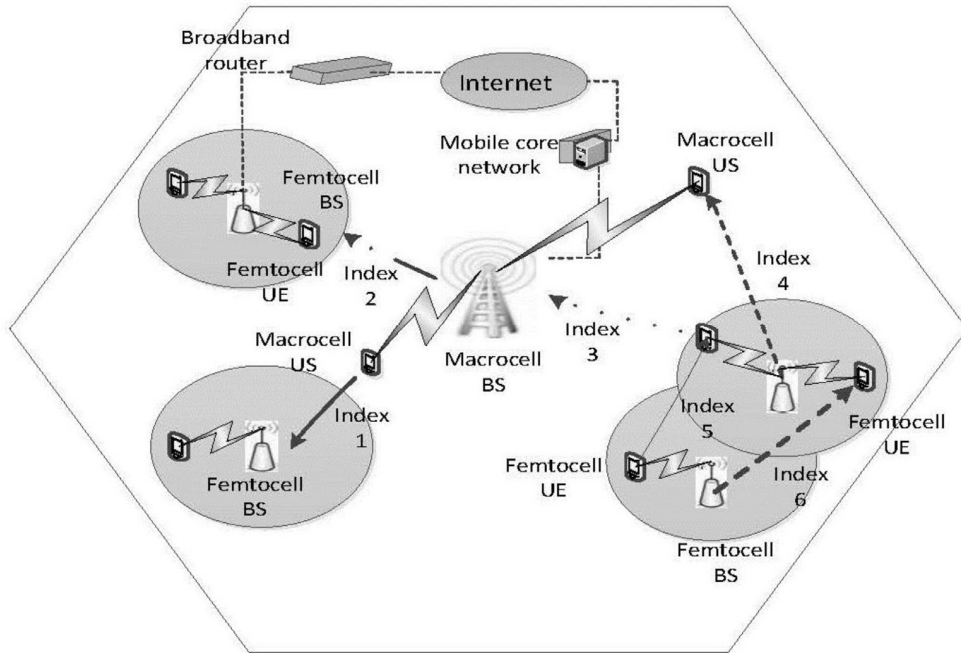


Figure 1.3 5G cellular configuration using beamforming [21, 22]

펌토셀의 기지국과 중계기에서 중요한 기술이 빔포밍(Beamforming) 안테나이며[16,19], 빔포밍 안테나는 일반적인 안테나에서 방향까지 조정이 가능하게 설계된 스마트 안테나를 의미한다. 무지향성 특성을 가진 안테나를 제외하고 대부분의 안테나는 특정한 방향으로 전파를 방사시키지만, 제작된 이후에 그 빔의 방향은 고정된다. 그에 반해 빔포밍 안테나는 설계된 고정빔 뿐만 아니라 다른 방향으로 빔조향 제어가 가능하다[20,21]. 펌토셀의 저전력, 초단거리, 저가, 초소형의 강점을 가지는 것은 빔포밍 안테나를 채택하였기 때문에 가능하다. 빔포밍 안테나는 사용자에게 전파 방사 방향으로 직접 조향함으로써 신호 간섭 제거, 통신 수신율 증가, 불필요한 전파 방사 억제로 인한 에너지 효율성 등 다양한 측면에서 이로운 효과를 얻는다.

빔포밍 안테나는 배열 안테나 이론에서 시작하며[20,21], 배열 안테나와 대비되는 것은 단일 안테나가 있다. 단일 안테나는 한개 이상의 신호를 전달받으며 본래의 안테나가 특성대로 전파를 방사하며, 배열 안테나에 비해 상대적으로 낮은 이득과 넓은 빔폭을 가진 것이 특징이다. 배열 안테나는 단일 안테나를 규칙적으로 배열하여 하나의 안테나처럼 구성한 것을 지칭하며, 단일 안테나보다 상대적으로 높은 이득과 좁은 빔폭이 특징이다.

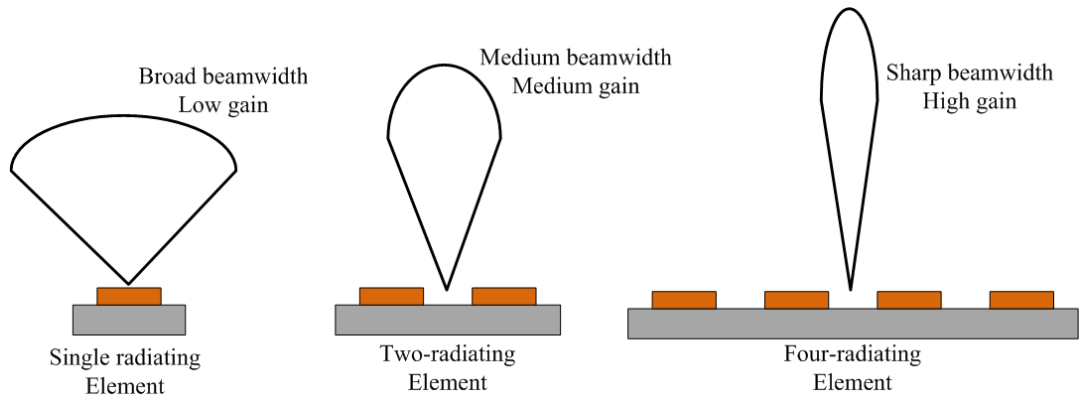


Figure 1.4 Radiation pattern of array antenna for single, two and four elements

빔포밍의 사용 목적은 전파 에너지를 수신기에 집중시키는 것이다. 기존 4G 까지의 이동 통신용 기지국 안테나는 모든 방향으로 전파를 방사하는 전방향성 안테나를 사용하였기 때문에 접속한 모든 사용자를 추적할 필요가 없이 커버리지 영역 내에 위치하면 되지만, 이는 불필요한 전파 에너지 낭비가 될 수 있어 자체적인 단점을 가지고 있다. 빔포밍 안테나는 이에 반하여 특정 수신기에 에너지를 집중 시킬 수 있는 방사패턴이 형성할 수 있게 제어가 할 수 있다[19,24].

빔포밍은 전파뿐만 아니라 음파에도 기술을 적용한 사례가 있다. 그 예시로 음파 프로젝터에서 배를 향해 음파를 송신하는 음파 프로젝터를 설명할 수 있다. 단일의 빔폭이 좁은 음파 특성을 얻기 위해 모든 펄스를 동시에 보내는 대신 일부의 음파를 약간 지연시켜 전송하여 단일의 큰 음파의 효과를 발생시킨다[24]. 동일한 원리가 위상 배열을 형성하여 빔포밍 안테나에 적용되었다[25,26].

초창기의 위상 배열은 2차 세계대전에 레이더 안테나로 개발했으며, 오늘날 빔포밍 기술은 광범위하게 사용되고 있다[27-38]. 실제 과거에서부터 빔포밍 기술이 이용된 사례는 종종 있었다. 열차[27-31], 항공[32-36], 운행 중인 승용차[37,38] 등 대중교통뿐만 아니라 음향, 의학에도 이용되고 있다. 군사적, 상업적 사용처가 많은 수중 음파 탐지 시스템은 빔포밍을 활용하여 물속의 목표를 분석 및 평가하였다.

빔포밍은 신호처리 기술을 사용하여 특정 방향의 신호 간섭을 억제할 수 있는 방식으로 안테나 배열을 조정할 수 있으며 이를 공간 선택성이라고도

일컫는다[26]. 안테나의 주엽 방향에서 높은 수신율을 얻고 다른 방향의 널(Null)에서 수신율을 감소함으로써 수신기의 신호 대 잡음비(SNR)를 크게 증대할 수 있다. 대부분 안테나의 방사패턴은 측면 로브 및 널과 주엽은 함께 생성되며, 이는 필요한 패턴을 얻으려면 널과 주엽의 위치를 제어해야 하며 빔포밍 안테나 동작 원리와 일치한다.

빔포머(Beamformer)는 신호 소스와 방사 요소 사이에 배치되어 있어 빔을 특정 수신기로 유도하기 위한 빔포밍 장치이다. 수신기에 있는 동안 안테나 모듈의 공간 감도를 제어할 수 있도록 안테나 모듈과 배열 안테나 사이에서 동작한다. 그리고, 신호 영역을 기준으로 주파수 영역 빔포밍 및 시공간 빔포밍을 분리할 수 있다.

지금까지 설명한 아날로그 시스템과 동등하게 중요한 분류인 적응형 빔포밍은 디지털 빔포밍의 기술에서 중요하게 연구가 진행되고 있으며 이는 가중치 벡터 적용을 기반으로 설명할 수 있다. 그리고 현재 적응형 빔포밍은 현대 스마트 안테나 기술의 중요한 기술로 화제가 되고 있다. 이러한 디지털 빔포밍은 채널 추정, 신호 대역폭 및 수신 데이터를 기반으로 분류할 수도 있다[18].

과거부터 디지털 빔포밍이 수많은 장점에도 불구하고 아날로그 방식에 비해 제작 단가가 더 비쌌으며 구성 요소의 공차 및 드리프트에 민감하여서 빔포밍 시스템에 널리 적용되지 못하였다. 그러나 고속 A/D 컨버터와 디지털 다운 컨버터를 저렴한 가격에 제공하는 현대 디지털 기술의 등장 이후 디지털 빔포밍과 하이브리드 빔포밍이 널리 연구가 되고 있다.

빔포밍 방법 중 하나인 Rotman 렌즈를 이용한 방식으로 아날로그 빔포밍의 대표적인 방법 중 하나이다. Rotman 렌즈는 1963년에 로트만과 터너에 의해 발명되었다[39]. 넓은 방위각을 스캐닝 작업을 수행하기 위하여 Rotman 렌즈를 제안하였고 이를 레이더 안테나에 응용하였다. 렌즈라는 의미 그대로 광학 렌즈에서 파생된 것으로 발명 당시에 초고주파 렌즈로 소개되었다. 1978년 대칭형 Bootlace 렌즈 형태로 분석하였고[40], 1983년에 위성의 좁은 멀티 빔들을 운용하기 위한 60° 커버리지 갖는 안테나 개발을 위해 사용되었다[41]. 그 이후에 Rotman 렌즈 특성을 개선하기 위하여 많은 논문이 게재되었다[42-51]. 특히 많은 논문이 빔포밍용 멀티빔을 대처하기 위하여 Rotman 렌즈를 이용한다. 초기의 Rotman 렌즈는 2차원 평면형으로 주로 사용되었으며, 마이크로 스트립 구조가 대표적인 사례이다[52-84]. 마

이크로 스트립 구조는 PCB 제작이 간편하고 저렴하여 많이 연구되고 있다. 특히, 층을 쌓을 수 있어 여러 소자를 Rotman 렌즈와 함께 장착할 수 있어 개발에 유용하며, Rotman 렌즈는 위상 천이기보다 넓은 대역 특성을 가지기 때문에 널리 사용되고 있다. 그리고, 도파관 Rotman 렌즈도 소개되고 있으며[85-89], 도파관과 SIW(Substrate Integrated Waveguide) 결합된 구조의 논문도 발표되었다[87,89]. 로트만 렌즈는 파장 길이에 따라 크기가 정해지며, 밀리미터파 대역에서 소형화로 제작되기 때문에 도파관 Rotman 렌즈를 활용하기 매우 유리하다. 미래의 5G 및 6G 다중빔 안테나 기술 보고서에 의하면[90], 하이브리드 빔포밍 시스템으로써 Rotman 렌즈 적용된 사례를 소개되었다[90-93].

일반적으로 Rotman 렌즈는 2차원의 평면으로 설계방안이 널리 알려져 출력 및 방사소자 또한 한 열로 정렬되어 안테나가 설계되었다. 1열의 배열 안테나는 1개의 축만 제어할 수 있는 한계가 있으며, 3차원의 멀티빔 안테나 설계는 2차원 Rotman 렌즈를 2개 사용하여 3차원 빔을 형성하는 방법을 제안되었다[94-102].

본 논문은 3차원 빔포밍을 위해 2가지의 Rotman 렌즈 배열 안테나를 제안했다. 제안한 방법은 평면 패치 형태의 Rotman 렌즈로 구현하는 것과 도파관 Rotman 렌즈의 두 가지 방법을 채택했으며, 이 두 가지의 방법은 서로 다른 장단점을 가지고 있다.

첫 번째 패치 형태 Rotman 렌즈 배열 안테나는 두 번째 방법의 Rotman 렌즈보다 설계 난이도가 비교적 간단한 장점이 있다. 그러나, 3차원 빔포밍을 위해 서로 다른 2개의 Rotman 렌즈를 결합해야 하며, 이는 불필요한 부피가 비교적 커지는 단점이 있다. 두 번째 도파관 형태 Rotman 렌즈 배열 안테나는 입체형 구조로 설계할 수 있기 때문에 부피를 최적화하여 소형화가 가능하다. 빔 개수가 늘어나더라도 부피가 크게 확장되지 않는 장점이 있다. 그러나, 설계 난이도와 제작비용을 고려해야 하는 단점이 있다. 3차원 도파관 Rotman 렌즈의 Focal-arc와 Inner-arc에 대해 굴곡 3차원 설계가 필요하며, 이는 기존 Rotman 렌즈 설계 수식에 포함되지 않는 z축을 고려해야 한다.

본 논문은 5G NR FR2의 펨토셀 또는 중계기에 응용되는 입체형 Rotman 렌즈 배열 안테나를 제안한다. 제2장에서 빔포밍 이론과 Rotman 렌즈 설계 수식을 설명하고, 이를 바탕으로 제3장에서 3차원 빔포밍 성능 검증을 위한 설계한 Rotman 렌즈 배열 안테나를 설계 및 제작하였다. 그리고, 3차원 빔

포밍 성능 검증을 위해 측정하고 시뮬레이션 결과와 비교 분석한다. 끝으로, 4장에서 결론을 맺는다.

## 제2장 3차원 빔포밍 위한 기술

### 제1절 빔포밍(Beamforming) 개요

#### 1. 안테나 이론

##### 가. 위상 배열 안테나

배열 안테나는 N개의 요소로 구성되어 있으며 그림 2.1과 같이 일렬로 배열되어 있다고 가정한다. 그림 2.1(a)는 모든 안테나가 동일한 진폭을 가지고 안테나의 위상차이  $\beta$ 를 가지고 있다고 가정한다. 그리고, 각 안테나는  $d$ 만큼의 거리를 유지한 채 배열을 이루고 있다.

모든 안테나는 균일한 진폭과 위상을 가지면, 배열 계수는 각 요소의 포인트 피딩, 즉 소스라고 간주할 수 있다. 만약 각 요소의 안테나가 등방성 패턴이라면, 배열 안테나의 총 방사 패턴은 등방성 선원의 배열 인자에 단일 요소의 방사 패턴을 곱하여 형성한다. 이것은 그림 2.1과 같이 패턴 곱셈 규칙이며, 같은 안테나 요소의 배열에만 적용된다. 안테나 배열 인자는 수식 2.1과 2.2 같이 주어진다[20].

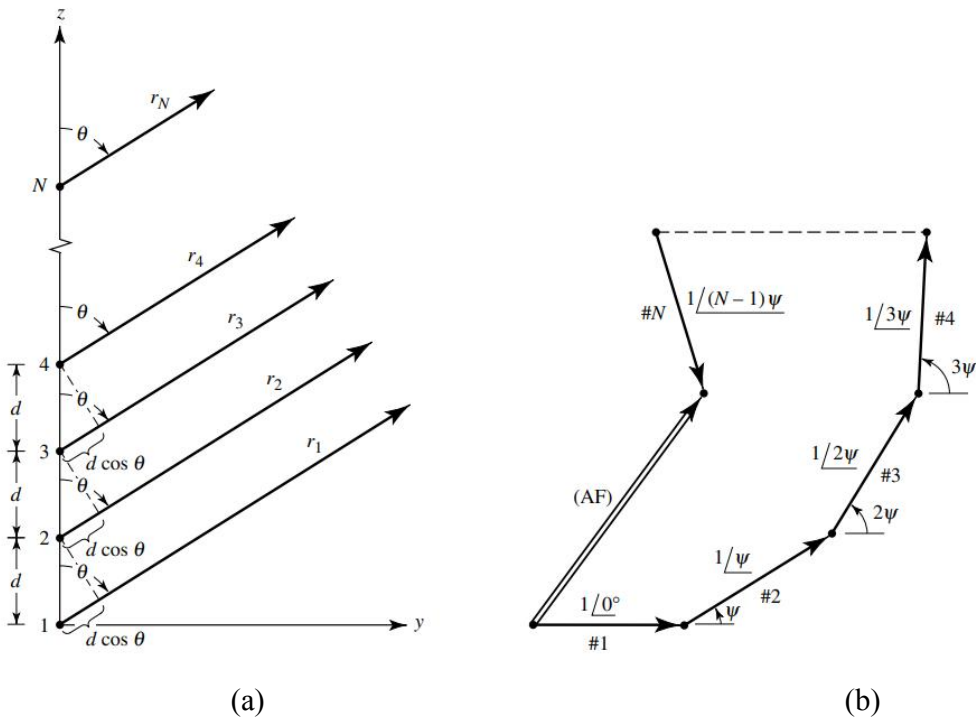


Figure 2.1 Far-field geometry and phasor diagram of N-element array of isotropic sources positioned along the z-axis, (a) Geometry, (b) Phasor diagram[20]

$$AF = 1 + e^{+j(kd\cos\theta + \beta)} + e^{+2j(kd\cos\theta + \beta)} + \dots + e^{+j(N-1)(kd\cos\theta + \beta)} \quad (2.1)$$

$$AF = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)(kd\cos\theta + \beta)} \quad (2.2)$$

균일한 진폭과 위상 간격의 배열일 경우 배열 계수의 총합은 지수의 합이기 때문에, 이전과 비교하여 단위 진폭과 일정한 위상 간격  $\psi$ 에 대해 각각  $N$ 개의 위상 벡터 합으로 나타낼 수 있다. 그림 2.1(b)의 위상 다이어그램으로 그림으로 보여주고 있으며, 위상 다이어그램에서 배열 인자의 진폭과 위상은 원소들 사이의 상대 위상  $\psi$ 를 적절히 선택함으로써 균일한 배열에서 제어된다. 그리고, 불균일 배열에서는 위상뿐만 아니라 진폭을 사용하여 전체 배열 인자의 형성과 분포를 제어할 수 있다.

각각의 안테나 요소 간 상대 위상 차이인  $\psi$ 를 수식 2.3과 같이 표현할 수 있다.

$$AF = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)\psi} \quad (2.3)$$

$$\text{여기서, } \psi = kd\cos\theta + \beta \quad (2.4)$$

수식 2.3의 양변에  $e^j$ 를 곱하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$AF e^{j\psi} = e^{j\psi} + e^{2j\psi} + e^{3j\psi} + \dots + e^{j(N-1)\psi} + e^{jN\psi} \quad (2.5)$$

최종적으로 수식 2.5에서 수식 2.3을 빼면 다음과 같이 정리된다.

$$AF(e^{j\psi} - 1) = (-1 + e^{jN\psi}) \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned}
 AF &= \frac{(e^{jN\psi} - 1)}{(e^{j\psi} - 1)} = \frac{(e^{j(N/2)\psi} - e^{-j(N/2)\psi})}{(e^{j(1/2)\psi} - e^{-j(1/2)\psi})} \\
 &= e^{j[(N-1)/2]\psi} \left[ \frac{\sin(\frac{N}{2}\psi)}{\sin(\frac{1}{2}\psi)} \right] \tag{2.7}
 \end{aligned}$$

배열 인자는 수식 2.7의 sin 함수 형태를 가리키며  $\psi$ , 즉 수식 2.4의 공식에 따라 위상을 조절함으로써 안테나의 빔을 조향할 수 있다. 위와 같이 위상 배열 안테나는 수식 2.4의 각 방사 소자들 간의 위상차인 임의의 변수  $\beta$ 를 결정하여 빔 조향각  $\theta$ 를 결정할 수 있다[20].

## 나. 빔포밍 안테나

빔포밍(beamforming)은 안테나에서 방사된 전파가 임의의 공간에서 원하는 방향으로부터 신호를 수신하거나 원하는 방향으로 신호를 전달하기 위한 기술이다[103]. 대부분의 다른 방향에서 수신된 신호는 수신기 기준으로 원치 않은 신호이며 이를 간섭 신호라고 판단한다. 빔포밍은 배열 안테나에 의해 좁은 빔폭 특성을 가지며 선택된 주엽 이외 방향은 신호 수신을 억제하는데, 이러한 이유로 빔포밍을 종종 공간적 필터링이라고 지칭한다[104]. 공간적인 필터링은 안테나 배열을 이용한 빔폭이 좁아지는 것을 이용한 것이며, 여기서 수신기의 주엽이 빔포밍의 방향으로 선택되었다고 간주 할 수 있다. 방사소자로 수신된 입력은 다양한 형태의 신호처리과정이 수행되며, 위상이나 진폭 측정으로 공간의 몇몇 다른 방향에서 도달하는 다수 신호의 정보를 얻을 수 있다.

배열 안테나의 수신된 신호는 수동위상 회로망을 경유하여 결합될 때 위상은 수신된 신호와 함께 더해지는 모든 방사 소자의 출력으로 주어진다. 여기서, 전류의 위상과 진폭을 제어하는 회로망을 보통 빔포머라고 한다. 그리고, 빔포밍이 단일 RF Chain에서 수행된다면 아날로그 빔포밍 시스템이라고 하며 아날로그 시스템은 신호의 위상과 전력을 조정시키는 장치들로 구성된다.

통신 시스템에서 고품질과 광대역 데이터 대한 수요가 커지면서 가입자



수가 엄청난 비율로 증가함에 따라 앞으로는 이동통신에서 사용할 주파수 자원이 부족할 것으로 예상된다. 전송 전력을 줄이는 것과 주파수 재 사용을 개선하기 위하여 공간적인 방향성을 가지는 안테나를 사용하는 것은 주파수 자원을 효율적으로 사용할 수 있도록 해준다. 높은 이득을 가지며 도달하는 신호를 빠르게 추적할 수 있는 안테나에 대한 요구가 이동통신, 위성 통신 등에서 점점 증가하고 있다. 이러한 여러 기능을 가진 안테나를 실현하기 위하여 디지털 빔포밍 안테나가 제안되었으며, 디지털 빔포밍 안테나는 아날로그 단계에서 수신된 신호를 합성 또는 분배하는 대신 디지털 단계에서 처리하기 위하여 아날로그-디지털 변환기를 이용해 아날로그 데이터를 디지털 데이터로 변환한다[105].

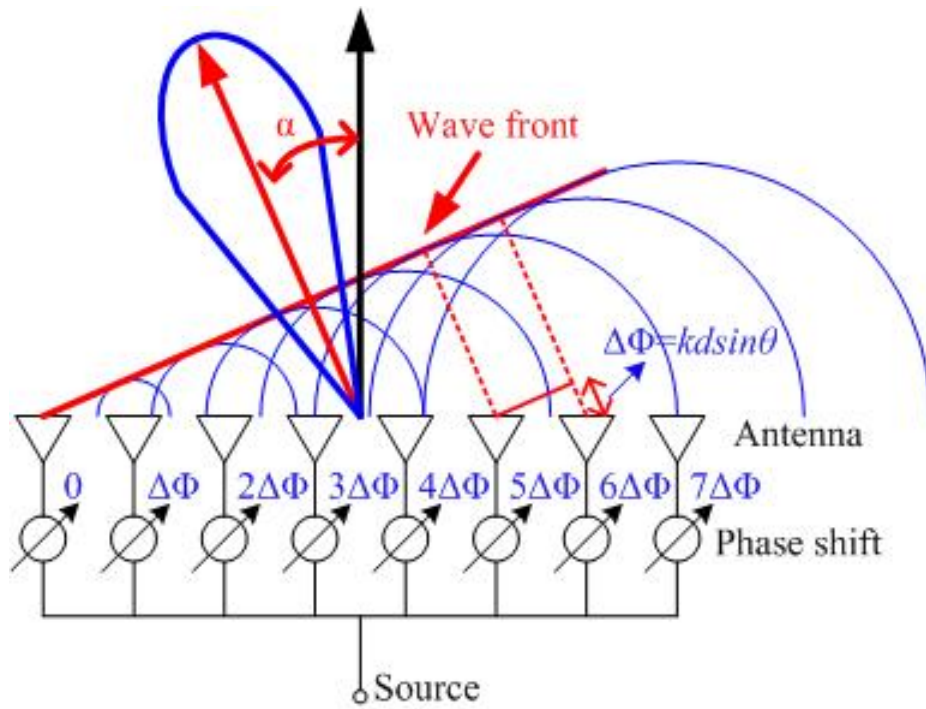


Figure 2.2 Theory of beamforming antenna in respect with phase array antenna.

## 2. 빔포밍 구현 방법 분류

### 가. 아날로그 빔포밍(Analog beamforming)

빔포밍은 단일 안테나 여러 개를 일정한 규칙으로 배열하여 안테나 방사 패턴의 벡터를 합한 상태에서 송수신되는 신호의 진폭과 위상을 조정하여 특정한 방향으로 신호가 강하게, 원치 않은 방향으로 신호가 약하게 선택하는 스마트 안테나 기술이다[105]. 빔포밍으로 신호를 특정한 방향으로 강하게 송수신하면 수신 전력을 높일 수 있어 셀 커버리지가 확장할 수 있어서 서비스 이용자를 증대 할 수 있다.

빔포밍 수행 단계에 중 신호의 진폭과 위상을 조절하는 장치를 빔포머(Beamformer)라고 하며, 빔포머가 만약 RF 단에서 적용하는 방식이라면 아날로그 빔포밍(Analog Beamforming)이라고 지칭한다[106].

아날로그 빔포밍은 빔포머가 통신시스템의 RF 처리부에서 동작하기 때문에 다중 빔포밍 기능은 수행할 수 없고 특정한 한 방향으로만 송수신할 수 있다. 또한 배열 안테나 개수와 상관없이 신호 처리부까지 전달하는 RF chain이 하나만 필요하여 구현에 필요한 하드웨어가 단순하며 기저대역의 신호 처리가 간단하다는 장점 등을 가지고 있다. 디지털 빔포밍 및 하이브리드 빔포밍보다 시스템 제작이 쉽고 낮은 전력 및 저가로 구현이 가능하기에 주로 간단하게 수신 전력을 높이기 위한 용도로 많이 사용한다.

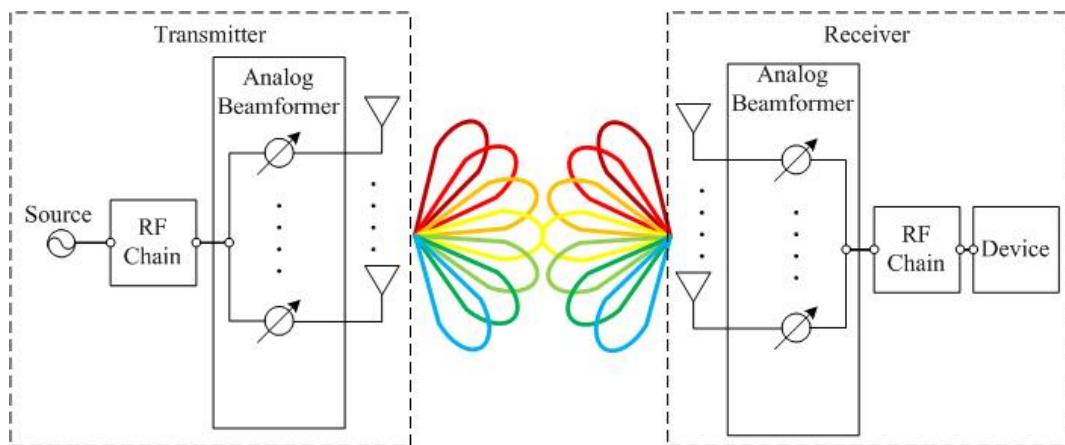


Figure 2.3 Diagram of analog beamforming system

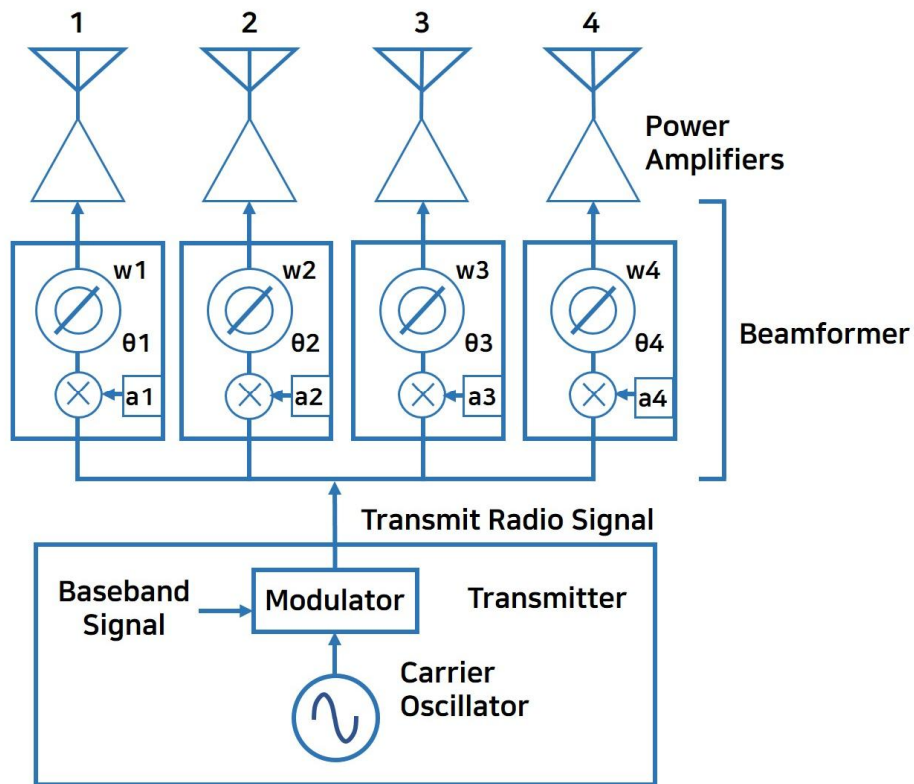


Figure 2.4 Procedure of a signal process in analog beamforming system[108]

### 나. 디지털 빔포밍(Digital Beamforming)

디지털 빔포밍은 빔포머가 시스템의 신호 처리부에서 동작하고 RF 단과 안테나는 기저대역에서 변조된 신호를 방사만 한다. 따라서 셀 내의 각각 사용자 위치에 디지털 빔포머에 의해 빔포밍을 별도로 적용할 수 있다. 특히, 기존에 적용된 직교 주파수 분할 다중 접속(OFDMA: Orthogonal Frequency Division Multiple Access) 방식 통신 기술을 사용하는 경우 셀 커버리지 내의 사용자에게 주파수 채널을 할당하여 빔포밍을 적용할 수 있기 때문에 동시에 여러 사용자의 빔포밍이 가능하다[107, 108].

아날로그 빔포밍 시스템에서 불가능한 기능인 다중 빔과 높은 해상도의 스캐닝이 가능하지만 이 외의 단점을 가진다. RF chain이 안테나 수만큼 필요하다는 것이며 그리고, 수신된 신호 처리 과정이 복잡하다. 특히, 높은 주파수에서 장거리 통신을 위하여 안테나 배열이 크게 확장되어야 때문에 필요한 시간과 전력 자원 및 비용 소모가 크다.

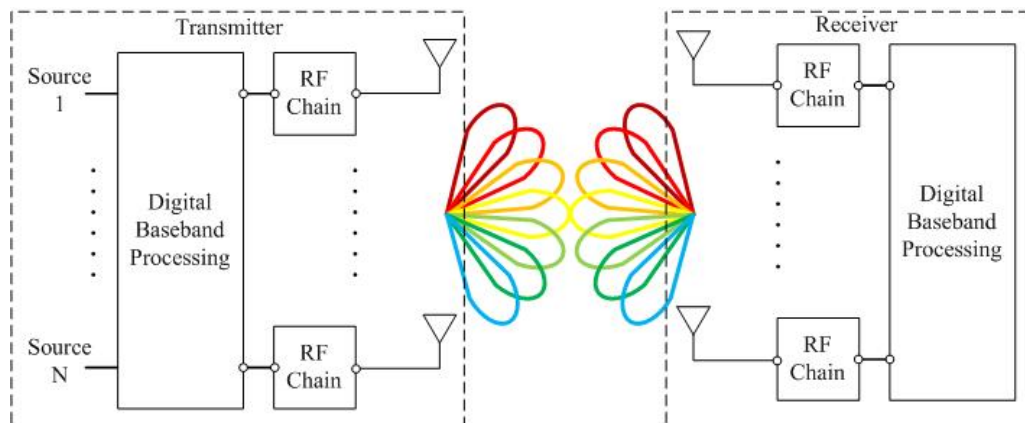


Figure 2.5 Diagram of digital beamforming system

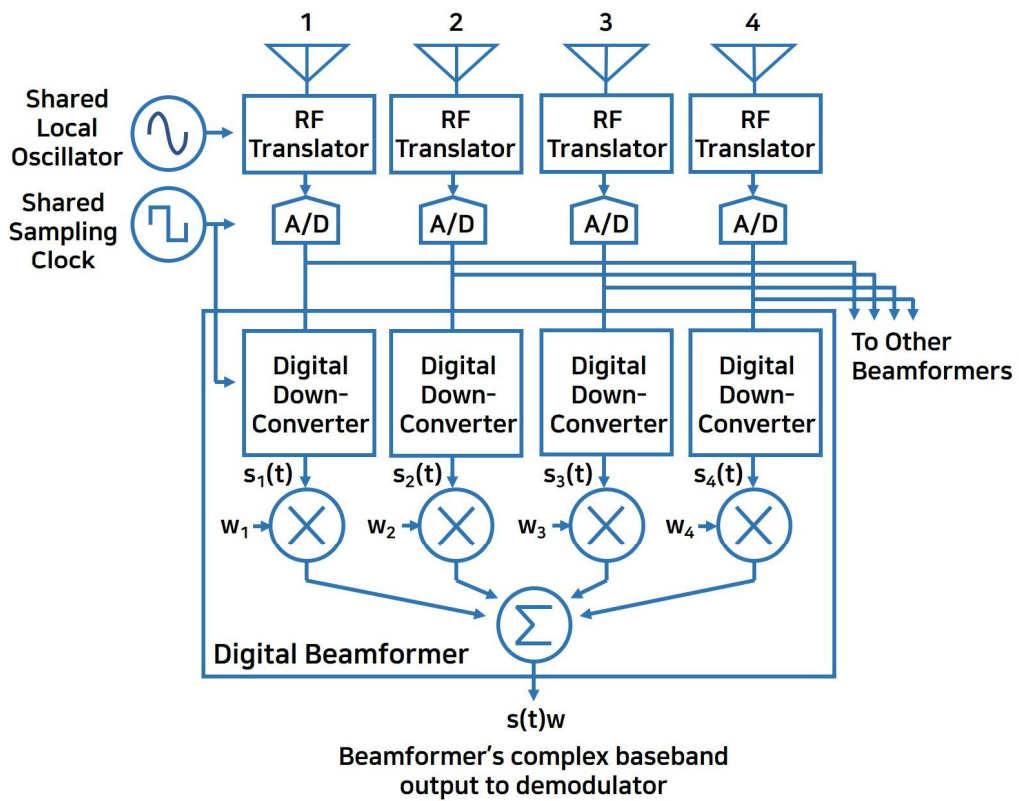


Figure 2.6 Procedure of a signal process in digital beamforming system[108]

### 다. 하이브리드 빔포밍(Hybrid Beamforming)

디지털 빔포밍은 안테나 수에 따라 RF Chain 필요하여 하드웨어와 전력 소모 및 비용 소모가 상대적으로 막대하기 때문에 아날로그 및 디지털 빔포밍 시스템에서 부분적으로 혼합하였다. 하이브리드 빔포밍 시스템은 디지털 빔포밍에 비해 상대적으로 비용 소모가 적으며 구현 난이도가 쉽다. 높은 주파수에서 파장이 짧아 경로 손실이 크게 발생하는데, 충분한 전송 거리를 얻기 위해 사용하는 대규모 다중 입력 다중 출력(Massive MIMO) 안테나 시스템에 효과적으로 적용될 수 있다[106-108].

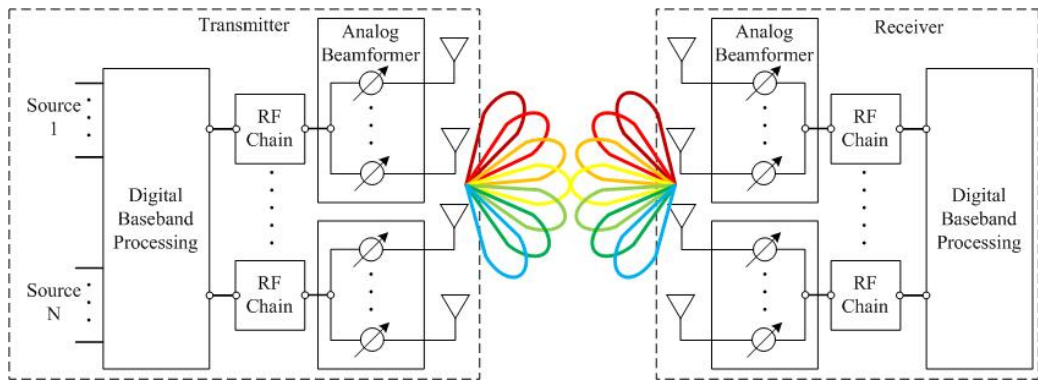


Figure 2.7 Diagram of hybrid beamforming system

## 제2절 Rotman 렌즈

### 2. Rotman 렌즈 원리

Rotman 렌즈는 1963년에 Rotman과 Turner에 의해 발명되었으며, 렌즈라는 의미 그대로 광학 렌즈에서 파생된 것으로 발명 당시에 초고주파 렌즈로 소개되었다. 도파관 형태의 Rotman 렌즈를 구현하였고 이러한 Rotman 렌즈는 광학 렌즈처럼 빛을 굴절시키는 것처럼 초고주파 대역의 전기 신호를 굴절시킨다. 결국 전파도 빛보다 낮은 주파수로 적용할 수 있으며 빛과 같이 굴절, 반사, 회절을 일으키는 성질을 가지므로 초고주파 렌즈라고 부른다.

Rotman 렌즈의 원리는 그림 2.8과 같이 간단하게 표현할 수 있으며, Rotman 렌즈의 주요 활용처는 위상 천이기로 이용된다. 그리고, 일정하게 위상 조절할 수 있기에 위상 배열 안테나로 활용되고 특히, 아날로그 빔포밍 중에 많이 쓰이는 버틀러 매트릭스와 Rotman 렌즈가 대표적인 위상 천이기로 활용된다. Rotman 렌즈의 입력 부분인 Focal-arc에서 전파를 입사시키는 위치에 따라 다른 위상의 파면을 생성시키고 원하는 방향으로 빔포밍을 하는 것이다.

Rotman 렌즈 focal-arc의 중앙 부분을 축 위에 있다고 하여 on axis라고도 하며, 이 지점을 기준으로 대칭한 구조로 이루어진다. 대칭되는 것이 모양, 패턴뿐만 아니라 성능도 대칭되어 빔조향각 또한 반대로 대칭한다. Rotman 렌즈는 주파수가 높아질수록 파장이 짧아져 Rotman 렌즈 또한 크기

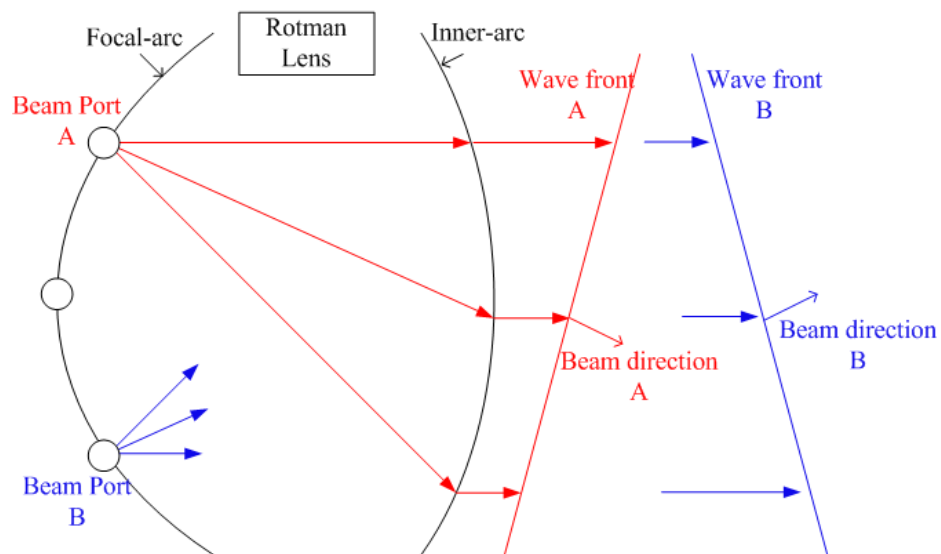
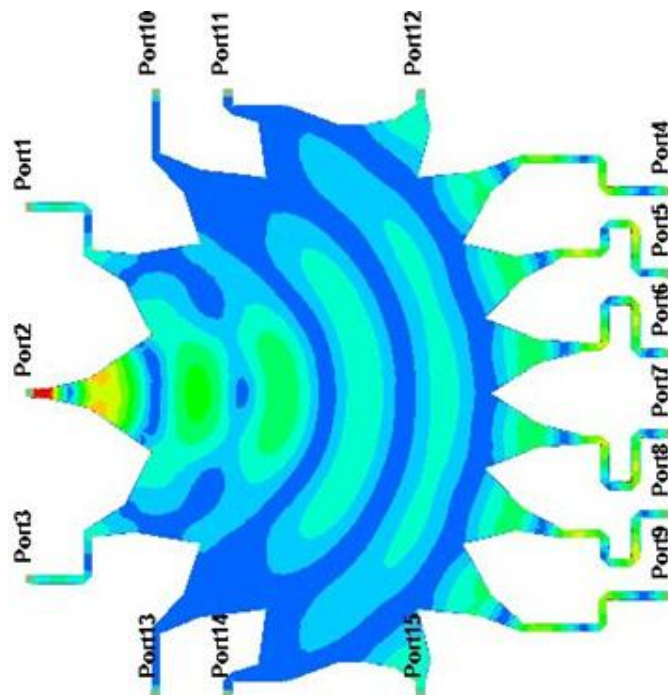


Figure 2.8 Procedure of transmission signal in Rotman lens

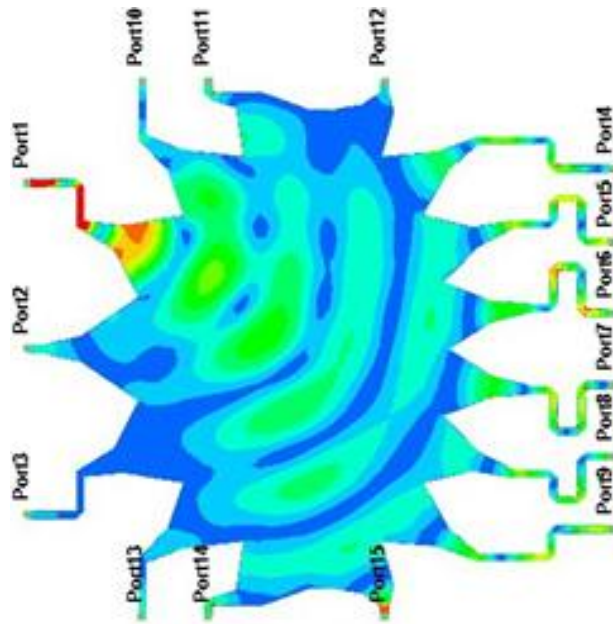
가 작아진다. 그림 2.9는 focal-arc에 연결된 각 포트에 입력되었을 때 전류분포를 보여주고 있다. 해당 Rotman 렌즈는 마이크로스트립으로 설계된 Rotman 렌즈이며 입력 3개와 더미포트 6개, 출력포트 6개로 구성된 Rotman 렌즈이다. on axis의 포트 2인 중앙포트에 입력되었을 때 신호의 전류는 모든 출력 포트에 위상이 일정하게 전달됨을 전류분포로 시각적으로 나타내었다. 만약에 출력포트에 방사 소자가 연결되었을 경우 빔조향각은  $0^\circ$  으로 방사될 것이다.

반대로 off axis인 포트 1과 포트 3에서는 각각 설계된 임의의 각에 따라  $\pm \alpha^\circ$  각으로 빔이 조향된다. 전류분포를 확인해보면 6개의 출력포트에 전달되는 전류들이 일정치 않은 대신에 전달되는 전류는 일정한 차이를 보이고 있으며 위상이 일정하게 차이를 두고 출력포트로 전달되고 있음을 알 수 있다. 즉, off axis에 존재하는 입력포트에 신호를 인가하면 연결된 출력포트들에 일정한 위상 간격으로 신호를 전달한다. 결국 출력포트로 전달되는 일정한 위상 차이의 신호는 방사 소자로 전달되며 원하는 방향으로 빔포밍된다.

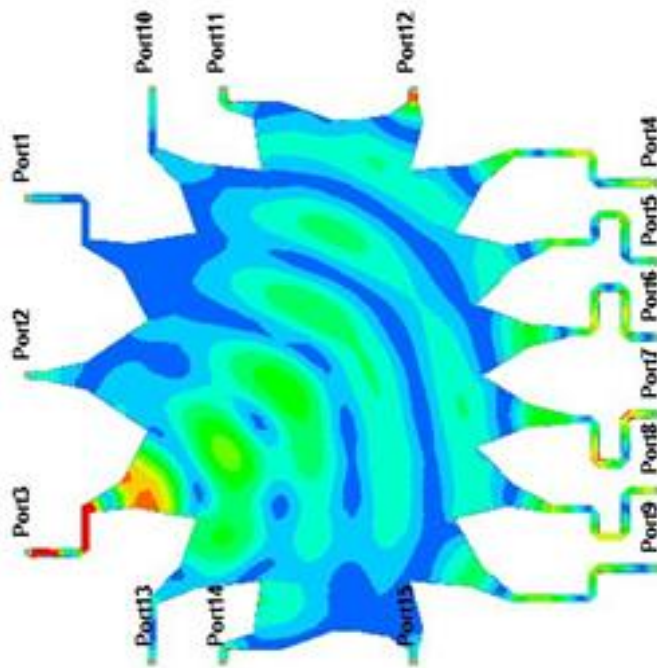


(a)





(b)



(c)

Figure 2.9 Distribution of current on Rotman lens, (a) port1, (b) port2, (c) port3



## 2. Rotman 렌즈 설계 방법

렌즈 설계[39]는 임의의 모양 렌즈에 대해 Gent[110]에서 얻은 일반화된 방정식을 사용한다. 그림 2.10은 Rotman 렌즈에서 요구되는 파라미터를 설명한 것이다. 그림 2.10에서 렌즈 윤곽은 Inner-arc와 외곽 렌즈로 표시되어, 내부 윤곽선 Inner-arc는 설계 방정식에 의해 결정된다. 렌즈 외곽은 직선이며 안테나 신호 급전 점의 위치이다. 윤곽선 inner-arc 및 렌즈 외곽의 대응하는 요소는 동축 전송선들에 의해 연결된다.

Inner-arc는 렌즈의 중심축에 있는 점  $O_1$ 의 임의로 지정된 두 개의 좌표  $(X, Y)$ 로 정의되며, 직선 outer 렌즈의  $O_2$ 를 기준으로 측정된 단일 좌표  $N$ 에 의해 결정된다. 또는  $O_1$ 와  $O_2$ 는 각각의 곡선 inner 렌즈와 outer 렌즈에 위치하며  $W_0$ 의 전송선  $TL_0$ 로 연결된다. 점  $P(X, Y)$ 는 inner 렌즈의 임의의 점이며, 임의의 전송선 길이  $W$ 의 전송선  $TL$ 에 의해 outer 렌즈 위의 있는 요소  $Q(N)$ 에 연결된다. 세 개의 매개변수  $X, Y, W$ 는 독립적이기 때문에 규정될 수 있는 세 개의 임의의 값을 갖는다. 이들 3개 변수는 그림 2.10 두 개의 대칭적인 focal arc 임의의 점  $F_1, F_2, G$ 를 각각  $O_1$ 에 대한 좌표를 갖는  $(-F\cos\alpha, F\sin\alpha), (-F\cos\alpha, -F\sin\alpha), (-G, 0)$ 으로 결정한다. 렌즈의 원점을 통과하는 신호를  $\overline{F_1O_1O_2M}$ 이며  $F_1$  지점에서 발생하는 다른 신호

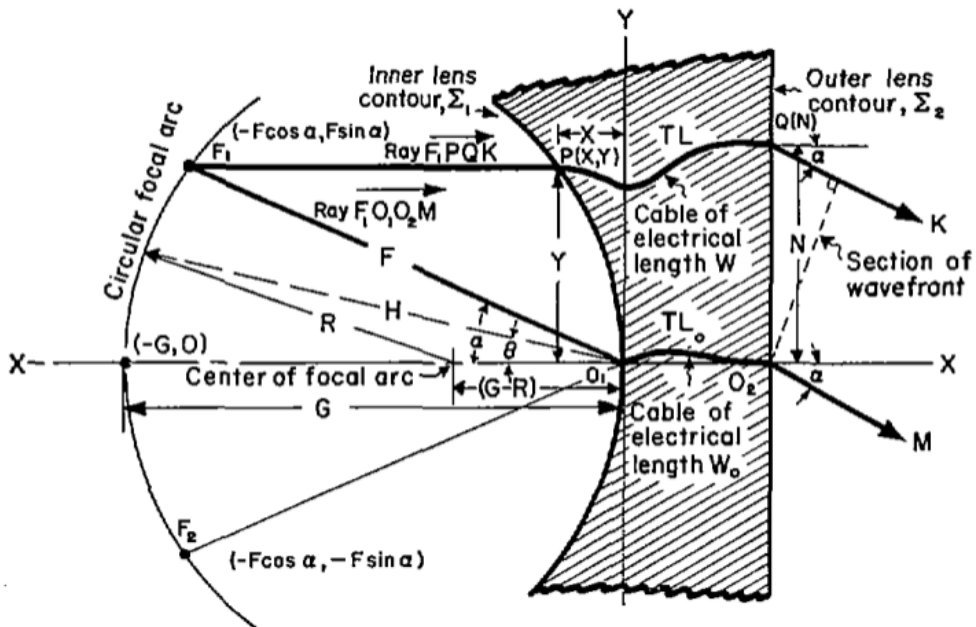


Figure 2.10 Description of Rotman lens with a requirement parameters[39]

$\overrightarrow{F_1PQK}$  으로 지칭한다.  $F_1, F_2, G$ 는 각각  $-\alpha, +\alpha, 0$ 는 축에 대한 각도로 방사 소자에 의한 빔 조향이 되는 초점이다.  $\overrightarrow{F_1O_1O_2M}, \overrightarrow{F_1PQK}$  등 원점을 통한 일반 광선과 광선 사이의 광학 경로 길이 동일성에 대한 Gent의 방정식은 본 논문에 해당이 된다. 그리고 수식 (2.8), (2.9), (2.10) 과 같이 성립한다.

$$\overrightarrow{F_1P} + W + N \sin \alpha = F + W_0 \quad (2.8)$$

$$\overrightarrow{F_2P} + W - N \sin \alpha = F + W_0 \quad (2.9)$$

$$\overrightarrow{GP} + W = G + W_0 \quad (2.10)$$

그리고 좌표상에서  $\overrightarrow{F_1P}, \overrightarrow{F_2P}, \overrightarrow{GP}$ , 3개 벡터의 거리를 계산해보면 (2.11), (2.12), (2.13)과 같이 성립한다.

$$(\overrightarrow{F_1P})^2 = F^2 + X^2 + Y^2 + 2FX \cos \alpha - 2FY \sin \alpha \quad (2.11)$$

$$(\overrightarrow{F_2P})^2 = F^2 + X^2 + Y^2 + 2FX \cos \alpha + 2FY \sin \alpha \quad (2.12)$$

$$(\overrightarrow{GP})^2 = (G + X)^2 + Y^2 \quad (2.13)$$

모든 변수를  $F$  로 대한 정규화 실시하면 다음과 같이 변수를 치환할 수 있으며 이를 기존의 공식에 대입하여 식을 전개한다.

$$\eta = \frac{N}{F}, \quad x = \frac{X}{F}, \quad y = \frac{Y}{F}, \quad g = \frac{G}{F}, \quad w = \frac{W - W_0}{F}$$

$$a_0 = \cos \alpha, \quad b_0 = \sin \alpha$$

(2.11), (2.12), (2.13)의 식에 정규화된 변수를 대입하여 전개하면

(2.14), (2.15), (2.16)와 같이 식을 유도할 수 있다.

$$\frac{(\overrightarrow{F_1P})^2}{F^2} = 1 + x^2 + y^2 + 2a_0x - 2b_0y \quad (2.14)$$

$$\frac{(\overrightarrow{F_2P})^2}{F^2} = 1 + x^2 + y^2 + 2a_0x + 2b_0y \quad (2.15)$$

$$\frac{(\overrightarrow{GP})^2}{F^2} = (g + x)^2 + y^2 \quad (2.16)$$

또한 수식 (2.8), (2.9), (2.10)을 정규화한다면 수식 (2.17), (2.18), (2.19)와 전개되며 전개된 수식은 각각 수식 (2.14), (2.15), (2.16)와 같으며 연립방정식으로 풀이할 수 있다.

$$\begin{aligned} \left(\frac{\overrightarrow{F_1P}}{F}\right)^2 &= (1 - w - b_0\eta)^2 \\ &= 1 + w^2 + b_0^2\eta^2 - 2b_0\eta + 2b_0w\eta - 2w \end{aligned} \quad (2.17)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{\overrightarrow{F_2P}}{F}\right)^2 &= (1 - w + b_0\eta)^2 \\ &= 1 + w^2 + b_0^2\eta^2 + 2b_0\eta - 2b_0w\eta - 2w \end{aligned} \quad (2.18)$$

$$\begin{aligned} \overrightarrow{GP} &= -W + W_0 + G = -w + g \\ \frac{(\overrightarrow{GP})^2}{F^2} &= (g - w)^2 = w^2 - 2gw + g^2 = x^2 + y^2 + g^2 + 2gx \end{aligned} \quad (2.19)$$

즉, 수식 (2.14)와 (2.17)은 같으며, (2.15)와 (2.18)은 같다. 그러므로 수식 (2.14)에서 (2.15)를 빼면 (2.17)에서 (2.18)를 뺀 것과 같으며, 간략하게 정리하면 수식 (2.20)과 같이  $y$ 을 구하는 식을 얻을 수 있다.

$$y = \eta(1 - w) \quad (2.20)$$

$x$  또한 수식 (2.14)와 (2.15) 및 수식 (2.17)과 (2.18) 각각 더하고 연립방정식으로 정리하여 얻을 수 있다. 이에 해당 과정을 수식 (2.21)과 (2.22)에서 보여주고 있으며  $x$ 에 대한 수식은 수식 (2.23)으로 얻을 수 있다.

$$\frac{(\overline{GP})^2}{F^2} = (g - w)^2 = w^2 - 2gw + g^2 = x^2 + y^2 + g^2 + 2gx \quad (2.21)$$

$$= w^2 - 2gw = x^2 + y^2 + 2gx \quad (2.22)$$

$$x = \frac{2w - 2gw - 2\eta^2\beta_1^2 + \beta_1^2}{2(g - \beta_0)} \quad (2.23)$$

지금까지 구한  $x$ ,  $y$  둘 중 하나를 소거하고  $w$ 에 대한 2차방정식을 만들 수 있다. 임의의  $w$  2차방정식을 수식 (2.24) 와 같이 결정하고 각 차수의 계수  $a$ ,  $b$ ,  $c$  값을 구하면 수식 (2.25) ~ (2.27)과 같이 얻을 수 있다.

$$aw^2 + bw + c = 0 \quad (2.24)$$

$$a = 1 - \eta^2 - \left(\frac{g-1}{g-a_0}\right)^2 \quad (2.25)$$

$$b = 2g\left(\frac{g-1}{g-a_0}\right) - \frac{(g-1)}{(g-a_0)^2}b_0^2\eta^2 + 2\eta^2 - 2g \quad (2.26)$$

$$c = \frac{gb_0^2\eta^2}{g-a_0} - \frac{b_0^4\eta^4}{4(g-a_0)^2} - \eta^2 \quad (2.27)$$

계수  $a$ ,  $b$ ,  $c$  는 위에서 정규화된 변수들로 구성되어 있다.  $w$ 의 2차방정식은 설계한 focal arc와 대응되는 inner arc를 결정하고 focal arc와 inner arc를 한 쌍을 Rotman 렌즈로 명칭한다. 설계대로라면 focal arc 중심에서 inner arc의 지나는 모든 신호는 위상이 같다. 그리고 좌표 중심  $(0,0)$ 와 focal arc 위 임의의 점이 이루는 각을  $\alpha$ 라고 했을 때 그 지점에서 발사된 신호의 빔의 조향각은  $\alpha$  임을 알 수 있다.

### 3. Rotman 렌즈 활용한 배열 안테나 사전 연구

그림 2.11에서 2.14는 앞에서 설명한 이론을 이용하여 2.4GHz에서 동작하는 로트만 렌즈와 안테나 그리고 Test-setup과 방사 패턴을 측정한 결과를 나타낸 것이다[111].

그림 2.11에서 좌측의 3개 단자가 입력 단자이며, 우측의 6개 단자는 출력단자다. 그리고, 나머지 위와 아래 단자들은 더미 단자이고, 내부 전류 반사를 방지한다. 설계목표 사양에서 빔 방향이 3개이며, 빔 조향각은  $11^\circ$ 로 설정하여 안테나 소자를 6개에 맞춰 출력단자를 설계하였다[111].

로트만 렌즈의 입력 스위치 박스를 제어하기 위해 TTL(Transistor-TransistorLogic) 신호를 사용하였고, 로트만 렌즈 안테나의 신호를 받는 정류 안테나는 LED를 통해 수신 전력을 확인할 수 있게 설계하였다.

실시간 빔 수신표시 장치는 패치 안테나와 정류회로를 결합하여 LED의 ON/OFF로 빔 수신을 판단하기 위해 제작하였고, 빔 조향 시스템과 실시간 빔 수신표시 장치를 구현하였다. 그림 2.12과 같이 안테나의 편파와 높이를 맞추기 위해 안테나의 거치대를 제작하고 정류 안테나를 통해 빔 조향 시험을 하였다. 그리고 제작한 로트만 렌즈와 안테나를 측정하기 위해 그림 2.13과 같이 설정하였다. 시험을 위해 부가적으로 PC, 신호 발생기, 전력 증폭기, 전원 공급 장치를 사용하였고, 전력 증폭기는 송신 출력을 높이기 위해 사용하였으며, 입력 신호가 증폭기를 거쳐 제작한 스위치 박스에 인가 되도록 하였다. 스위치 박스의 제어는 USB로 연결된 PC에서 GUI를 조작하며 로트만 렌즈 안테나의 빔 조향을 확인하였다.

그림 2.14는 로트만 렌즈와 안테나가 결합된 방사 패턴 측정 결과이며, 3개의 빔포밍에 대해 패턴은 중심 주파수 2.4GHz에서 포트 1은 안테나 이득

이 12.51 dBi이며, 빔 조향 각도는  $9^\circ$  이고, 포트 2는 안테나 이득이 12.89 dBi이며, 빔 조향 각도가 없는  $0^\circ$  이다. 그리고 포트 3은 안테나 이득이 12.65 dBi이며, 빔 조향 각도는  $+10^\circ$  를 갖는다.

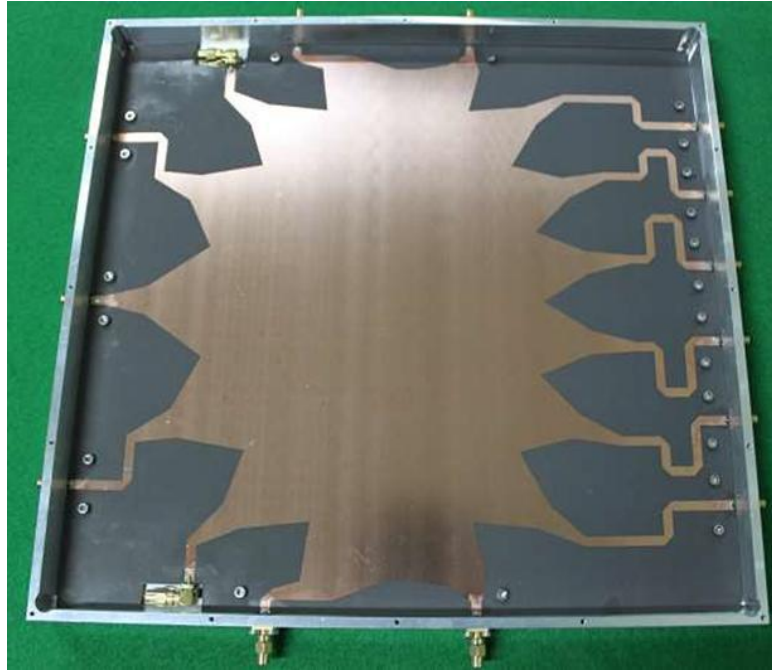


Figure 2.11 Rotman lens for real-time display device of beam receiving at operating 2.4 GHz.

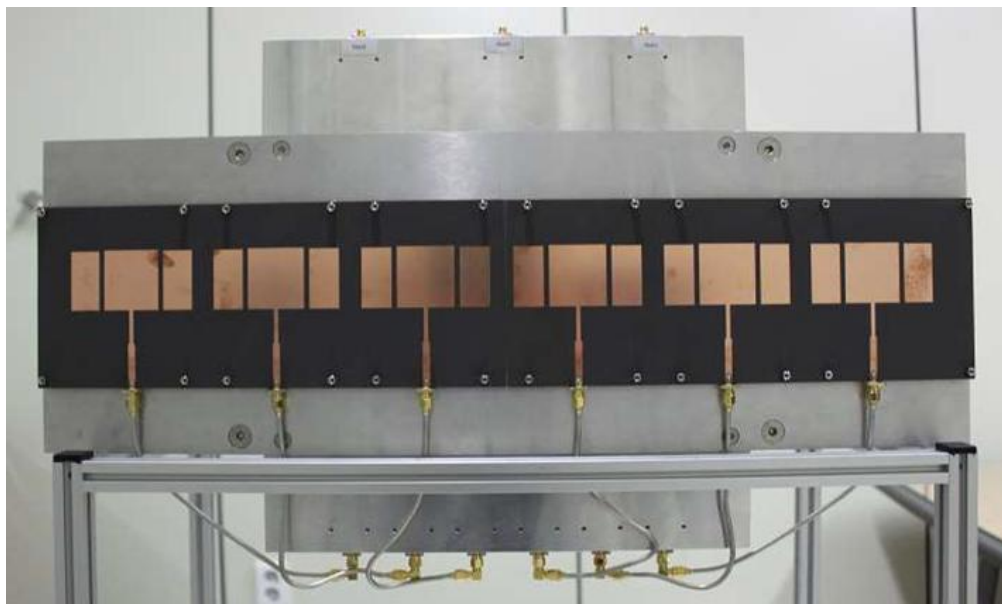


Figure 2.12 Photography of combination Rotman lens and array antenna at

operating 2.4 GHz.

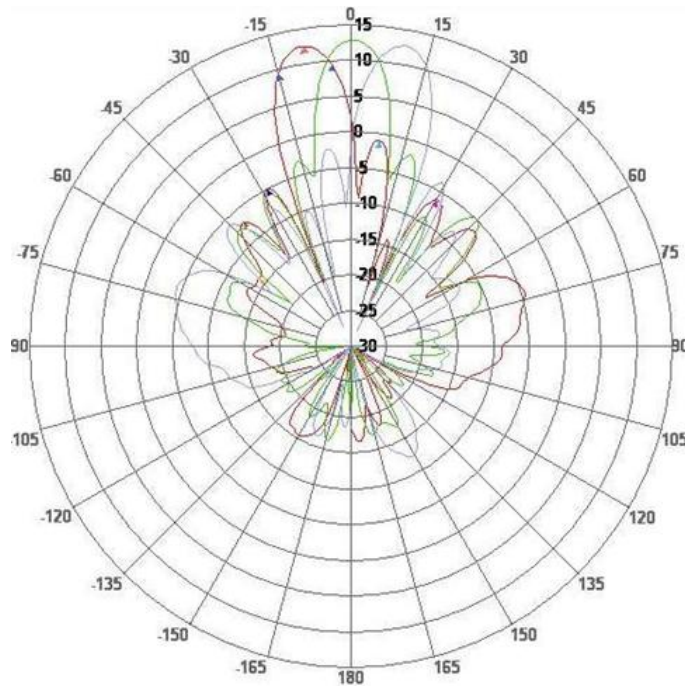


Figure 2.13 Measurement results of radiation pattern for beamforming antenna at operating 2.4 GHz.

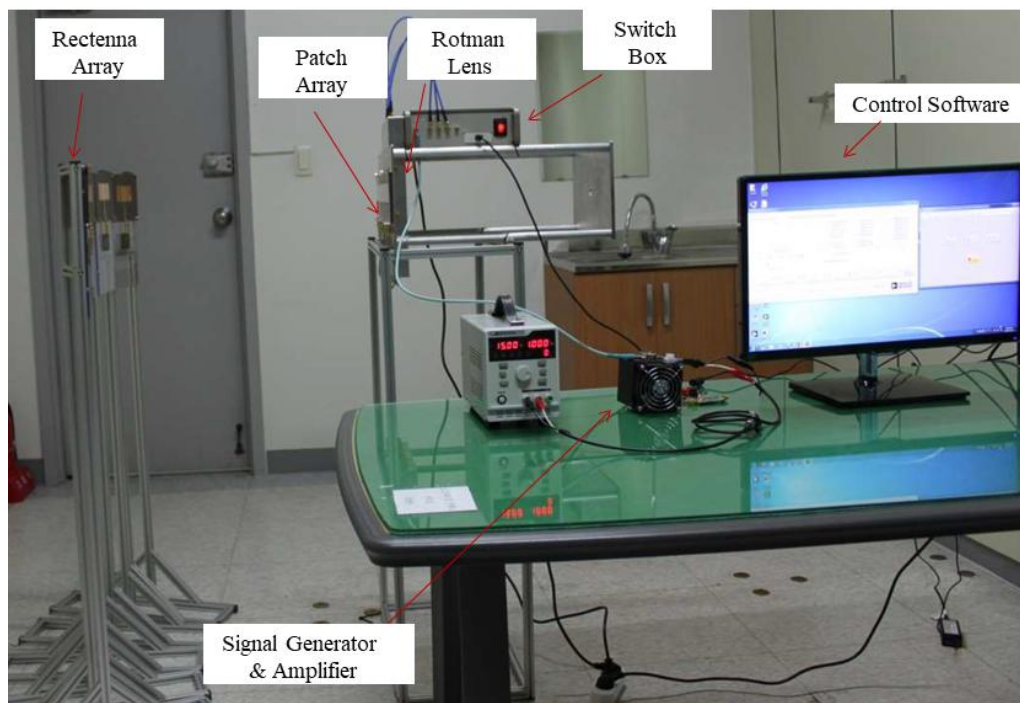


Figure 2.14 Testing setup of beam-steering system and real-time display device of beam receiving.



그림 2.15는 28GHz에서 동작하는 빔포밍 안테나를 설계 및 제작하였다. 설계목표 사양은 총 5개의 빔이 필요하여 입력 단자는 5개로 설계하였으며, 안테나는 8×8 배열로 설계하였고, 로트만 렌즈는 출력단자가 8개가 필요하여 5×8의 입출력을 갖게 설계하였다. 중간 더미 포트는 총 8개이고 1×4의 전력 분배기로 결합하여 하나의 종단 단자 50Ω으로 정합하였다. 28 GHz 전용 RF 스위치는 1S4P 2개를 이용하여 5개의 입력 단자에 신호를 인가하였다. RF 스위치 제어는 NI사의 TTL 발생기로 제어하며, 전원공급을 위하여 TTL 신호 발생기로 DC 전원을 공급하였다.

빔포밍 안테나의 방사 패턴은 그림 2.16과 같이 연구실에서 간이로 측정하여 주변 장애물의 다중반사를 억제하고자 흡수체를 배치하였고 28 GHz 표준 혼 안테나를 활용하여 방사 패턴을 측정하였다.

총 5개의 빔 방사 패턴을 측정하였다. 5개의 빔은 각각  $-14^\circ$ ,  $-7^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $+7^\circ$ ,  $+14^\circ$ 의 빔 조향각을 얻어 설계한 대로  $7^\circ$ 의 빔 조향각을 나타내었다. 조향각  $0^\circ$ 의 빔 이득은 18 dBi의 값을 가지지만, 시뮬레이션에 비하면 낮은 이득이 측정되었다. 이는 시스템의 RF 스위치, RF 케이블, 어댑터 등으로 인한 손실에 의한 EIRP 값으로 판단된다.

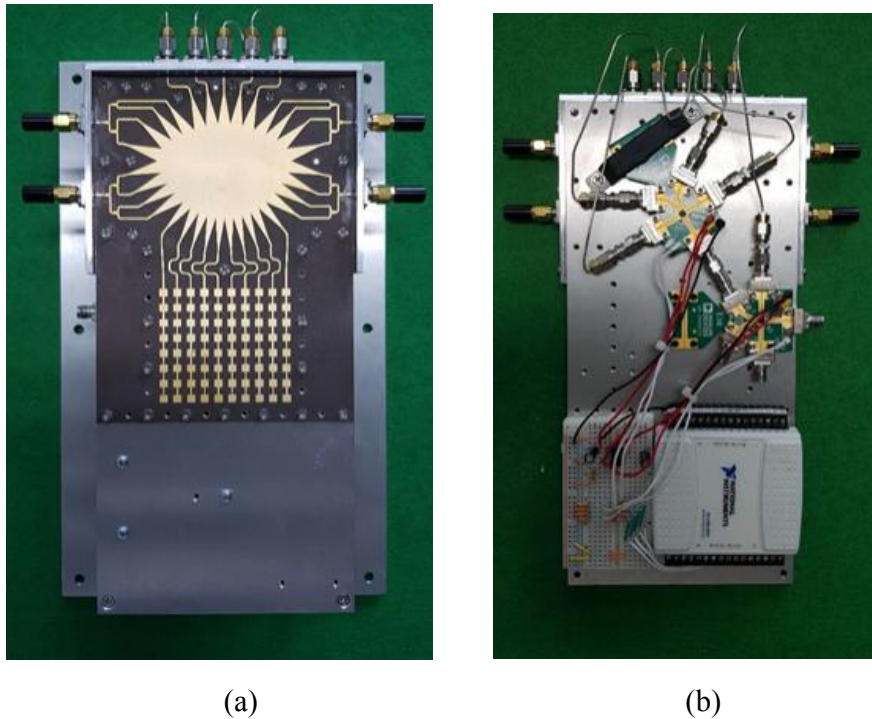


Figure 2.15 Beamforming antenna system using 5×10 Rotman lens at



operation 28 GHz, (a) Top view, (b) bottom view

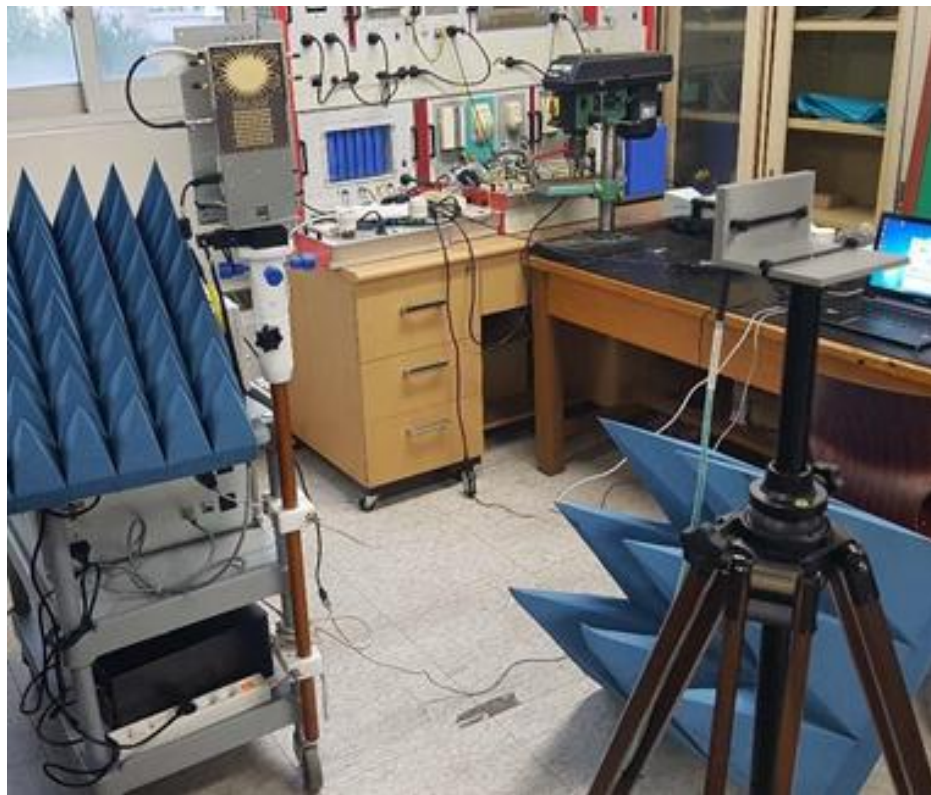


Figure 2.16 Test setup of measurement radiation pattern for 28 GHz beamforming antenna

## 제3장 적층형 Rotman 렌즈 방법

### 제1절 적층형 Rotman 렌즈 구조 설계

#### 1. 입출력 3×3 Rotman 렌즈 설계

Rotman 렌즈를 이용하여 3차원 빔포밍 구현하기 위한 첫번째 방법은 평면형 Rotman 렌즈 다수 개를 조합하여 구현할 수 있다. 3차원 빔포밍을 위해 그림 3.1과 같이 2개 단 이상의 Rotman 렌즈로 시스템을 구성해야 하며, 빔포밍 개수에 따라 Rotman 렌즈의 입력 및 출력 개수와 Rotman 렌즈 개수가 결정된다. 그림 3.1은 2개단 Rotman 렌즈를 쌓아 3차원 빔포밍 위상 조절기를 설계한 것이다. 2단의 Rotman 렌즈를 서로 직교 연결하고 층을 쌓아 인가된 신호는 2번 위상이 조절이 진행된다. 최종적으로 RF 스위치로 원하는 빔포밍을 선택하고 RF 스위치를 통해 전달된 신호는 총 2번의 위상이 조정되어 설계의 방위각 및 양각이 동시에 원하는 방향으로 빔조향이 이루어진다.

본 논문에서 3차원 빔포밍 구현을 위해 3×3 빔포밍 시스템 목표로 설계하였다[112]. 그림 3.1의 시스템을 구성하기 위한 첫번째 Rotman 렌즈를 그림 3.2 같이 설계하였다. Rotman 렌즈 설계는 Ansys사의 Designer를 사용하여 2차원 평면 시뮬레이션하였다. 그림 3.2의 Rotman 렌즈는 시스템 입력단의 RF 스위치 다음에 위치하여 첫 위상을 조절한다. 그림 3.2의 Rotman 렌즈는 평면형 마이크로스트립 구조이기에 비유전율 2.2의 10 mil 두께의 PCB 기판으로 설계되었고, 크기는  $60\text{ mm}^2 \times 60\text{ mm}^2$  이다. 첫 번째 Rotman 렌즈는 3개 입력 및 3개 출력과 8개의 더미 포트 구성된다. 더미 포트 8개는

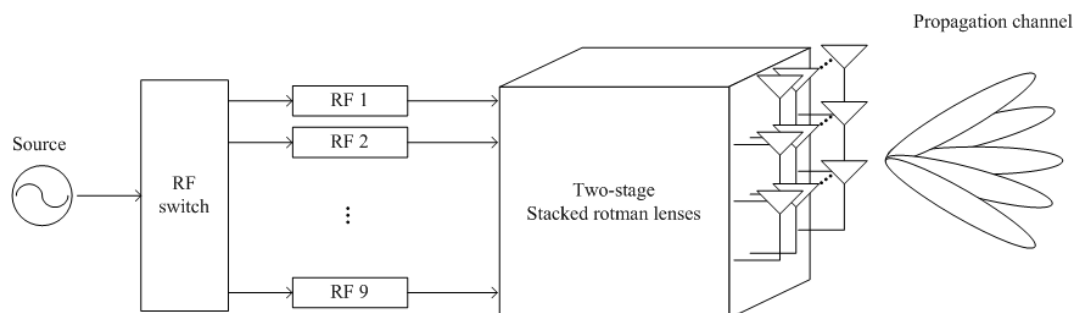


Figure 3.1 Block diagram of a system of three-dimensional beamforming antenna with two-stage Rotman lens.

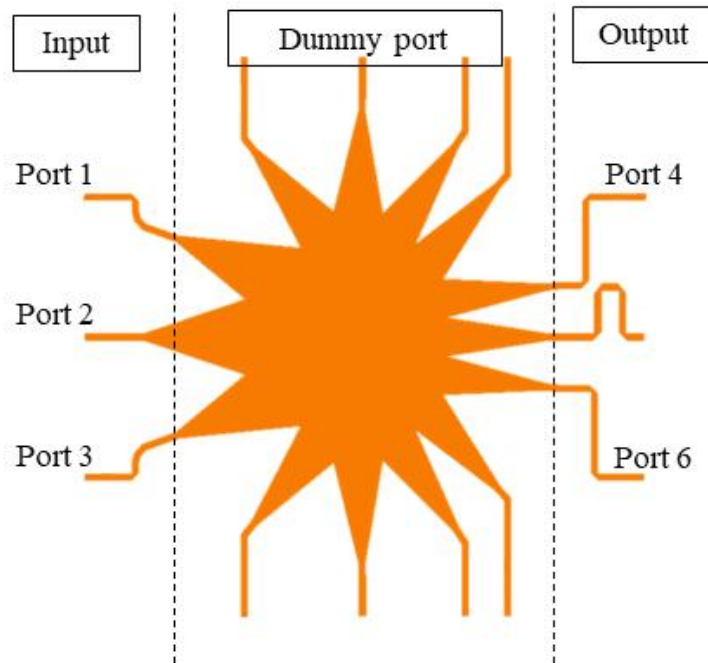


Figure 3.2 3×3 Rotman lens on first stage.

Rotman 렌즈 내부의 전류 반사를 줄이는데 충분하다. 구상한 빔포밍 시스템은 그림 3.2 Rotman 렌즈의 RF 스위치 바로 뒤에 위치한다. 그리고 같은 모양을 3개를 적층하여 총 9개의 입력으로 구성될 것이며 결과적으로 총 9개의 서로 다른 3차원 빔을 선택할 수 있다.

첫 번째 Rotman 렌즈는 입력 포트 1, 2, 3에 따라 출력 포트 4, 5, 6에서 각각 위상이 약  $-20^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $+20^\circ$  차이가 발생할 수 있게 설계하였다. 그림 3.3과 3.4에서 S-parameter 시뮬레이션 결과를 그래프로 도시하였다. 그림 3.3의 그래프에서 입력 포트 1, 2, 3의 반사계수는 모두  $-10\text{dB}$  이하이다. 입력 포트 2를 제외하고 입력 포트 1과 3의 경우 되돌아오는 신호량은 매우 적으며 이는 Rotman 렌즈로 인가되는 대부분의 신호가 출력 포트 및 더미 포트에 전달되고 있음을 의미한다. 입력 포트 2의 경우 약  $-14\text{ dB}$ 로 다른 입력 포트에 비해 높은 반사계수를 가지지만  $-10\text{dB}$  이하를 만족하므로 출력된 방사 패턴 결과에 큰 영향을 끼치지 않는다고 판단된다.

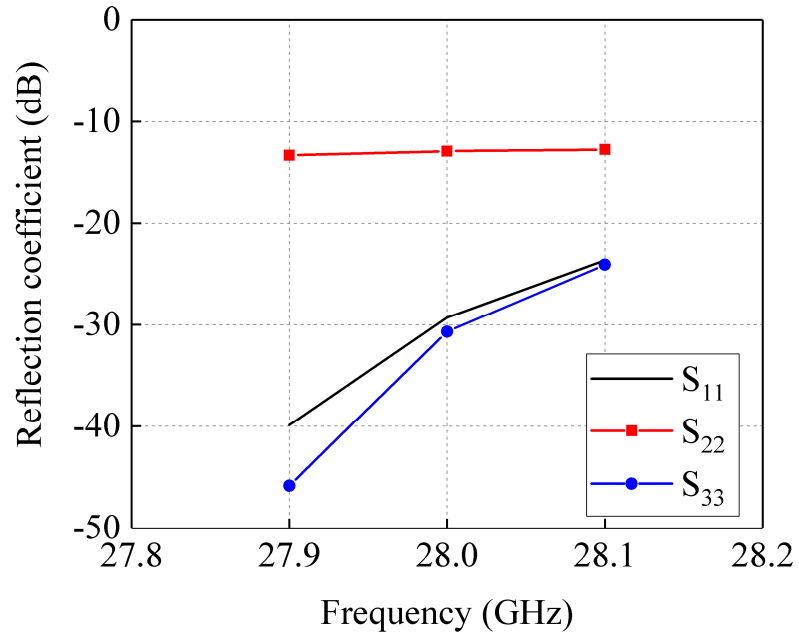
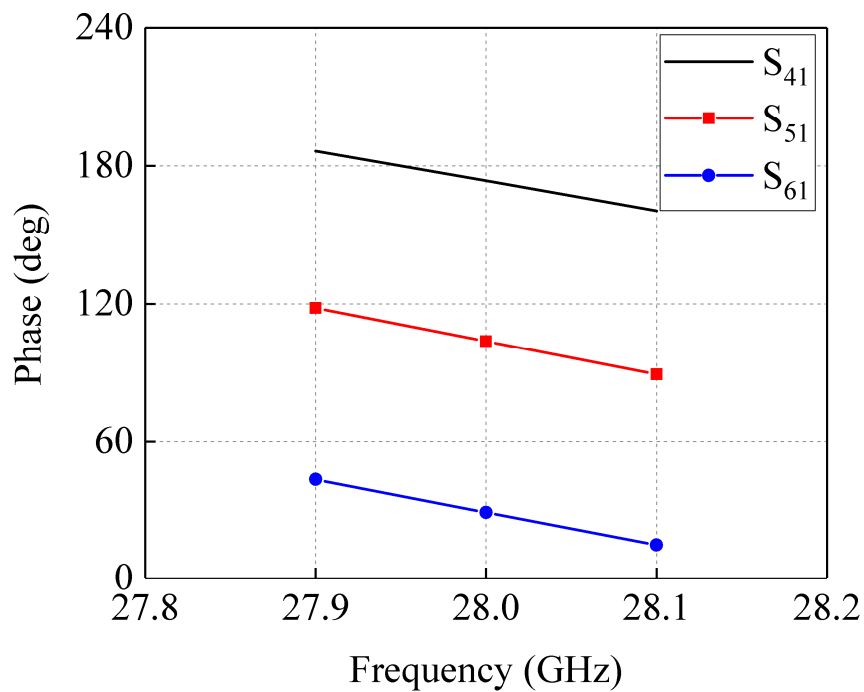


Figure 3.3 Simulation results of reflection coefficient at input ports for 3×3 Rotman lens of first stage

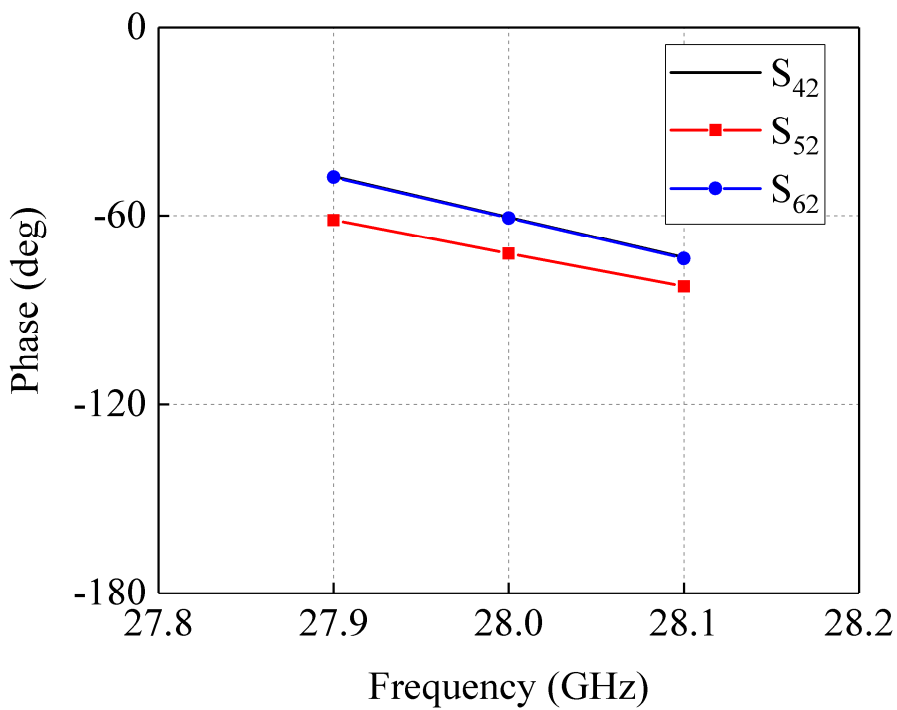
Table 3.1 Simulation results of the phase of 3x3 Rotman lens of first stage

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

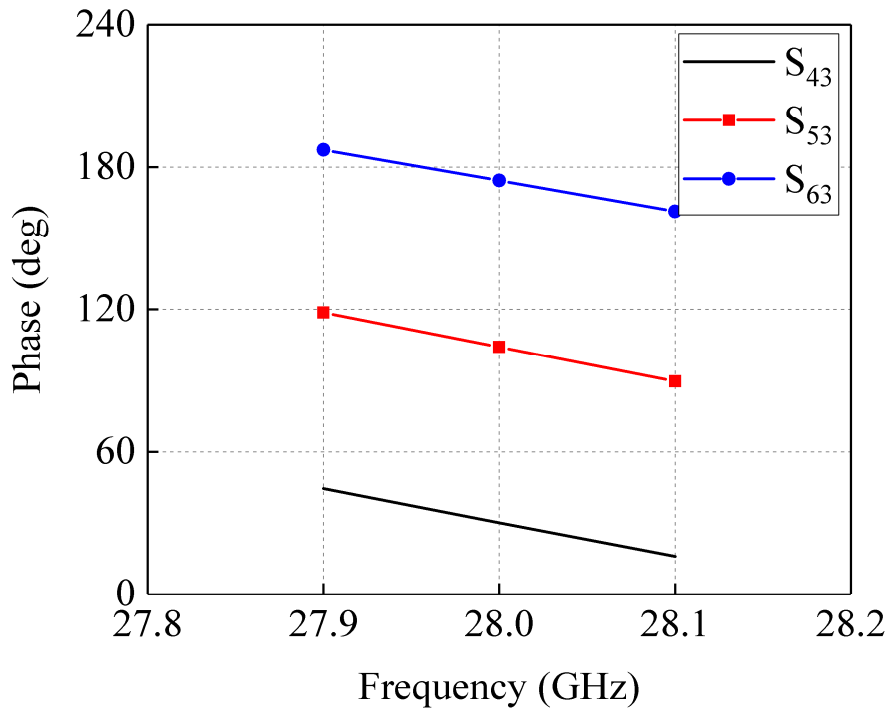
입력 포트 1, 2, 3과 출력 포트 4, 5, 6의 S-parameter의 위상 시뮬레이션 결과를 그림 3.4 및 표 3.1로 정리하였다. 입력 포트 1의 경우, 출력 포트 4, 5, 6 순서대로 약  $-72^\circ$ 의 위상 간격을 유지하였다. 이와 반대로 입력 포트 3은 약  $+72^\circ$  간격 순으로 위상 결과를 보였다. 입력 포트 2에서 동 위상의 결과를 보여야 하지만, 미세하게  $S_{52}$ 가  $-10^\circ$  차이의 결과를 보였다. 그렇지만 시뮬레이션 결과의 오차  $10^\circ$ 는 빔포밍 구현에 크게 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.



(a)



(b)



(c)

Figure 3.4 Simulation results of the phase of 3×3 Rotman lens of first stage,  
(a) input port 1, (b) input port 2, (c) input port 3

## 2. 입출력 3×10 Rotman 렌즈 설계

첫째 Rotman 렌즈 입력의 3×3 Rotman 렌즈 3개와 두 번째의 3×10 Rotman 렌즈 3개를 직교로 연결되어 구성된다. 두 번째 3×10 Rotman 렌즈 및 1×10 배열 안테나 형상은 그림 3.5와 같다. 1×10 배열 안테나는 비유전율 2.2의 두께 10mil PCB 기판으로 설계되었다. 시뮬레이션은 Ansys사의 Designer로 2차원 평면 형상을 설계하였고, HFSS로 3차원 시뮬레이션을 수행하여 3개의 Rotman 렌즈 및 안테나에 대해 방사 패턴 결과를 검증하였다.

방사하는 안테나 소자는 두 번째 Rotman 렌즈와 결합하여 설계하였다. 한 기판에 상부와 하부에 각각 Rotman 렌즈와 안테나를 구성하였다. 기판 상부에 3×10의 Rotman 렌즈와 기판 하부의 10개 배열 비발디 안테나로 구성되며, 크기는  $100 \text{ mm}^2 \times 120 \text{ mm}^2$  이다. 입력으로 들어온 신호는 Rotman 렌즈를 통해 위상이 조절되고 출력단의 비발디 안테나에 도달한다. 안테나에 신호 입력 방법은 Slot 구조로 해결하였다. Slot으로 설계하여 상부의 Rotman

렌즈에 의한 위상 조절이 된 신호는 출력 포트를 통해 Slot 인가되며 이는 하부의 비발디 안테나에 신호가 인가된다. 위상 조절이 된 10개의 출력 포트를 통해 전달된 신호는 각 비발디 안테나에 전달되고 방사하여 설계 목표에 따라 빔 조향을 구현하게 될 것이다.  $3 \times 10$ 의 Rotman 렌즈의 구조는 3개의 입력포트와 10개의 출력포트 및 8개의 더미 포트로 구성된다.

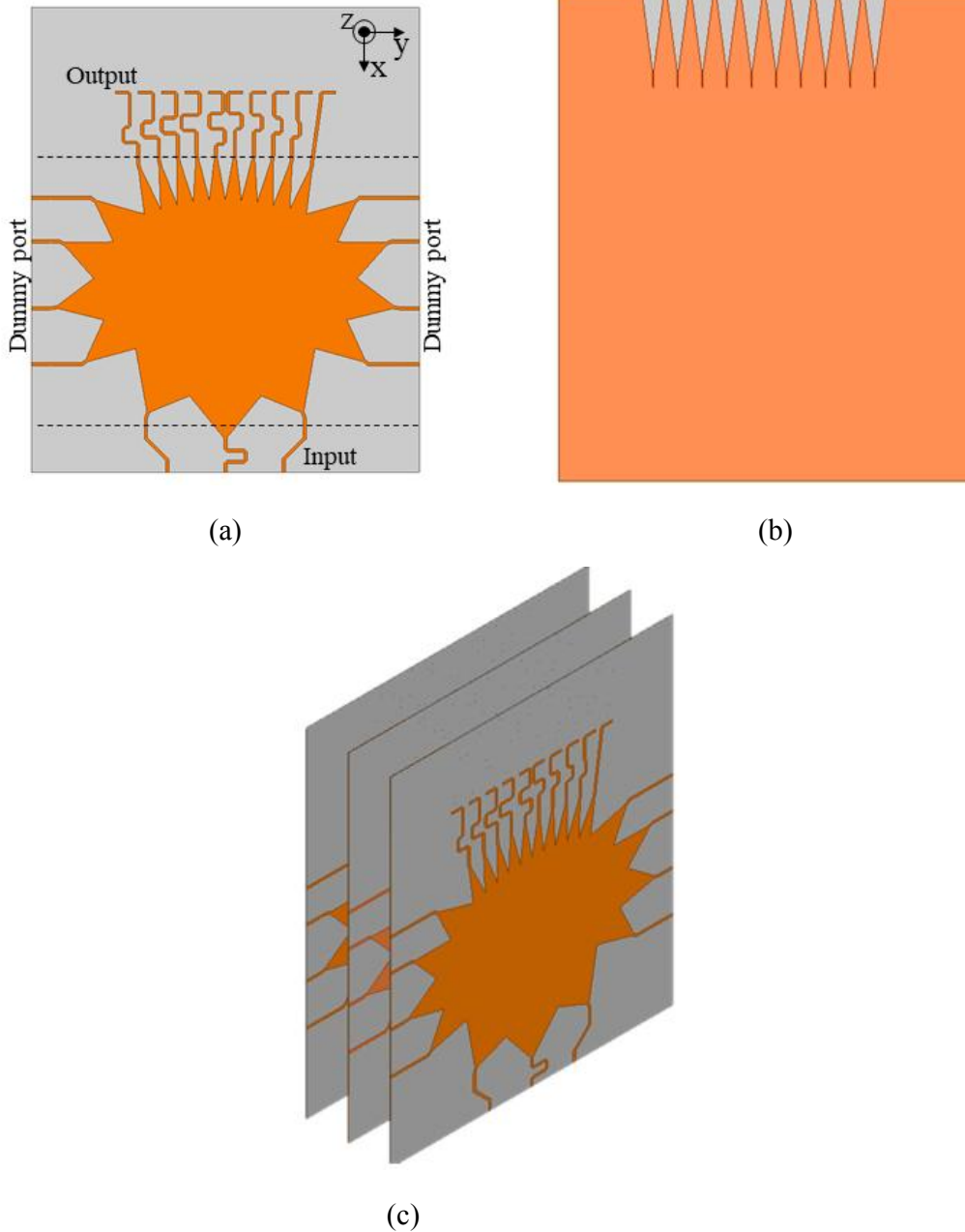
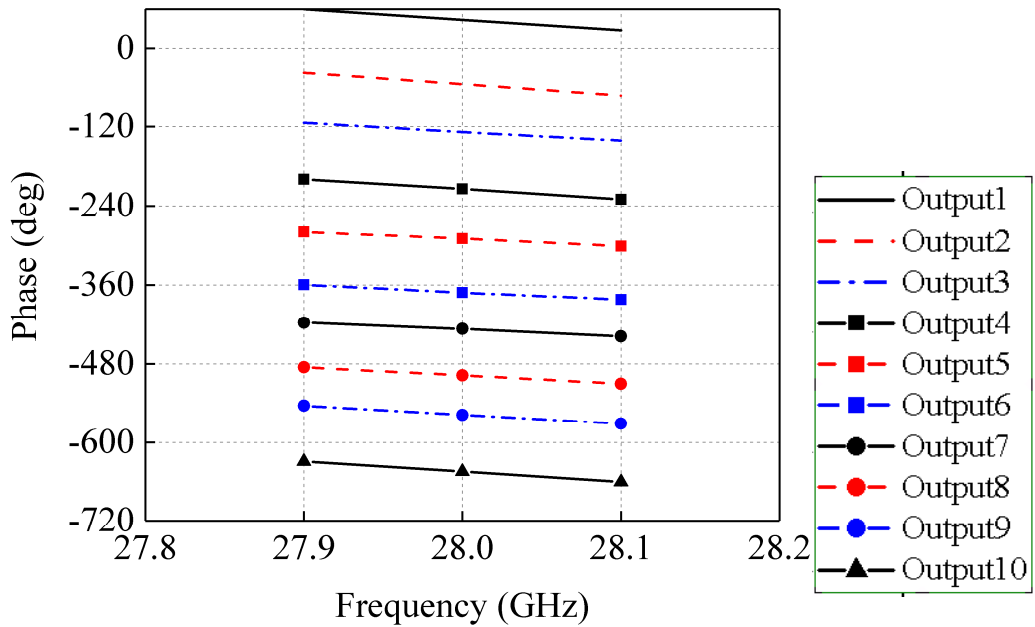


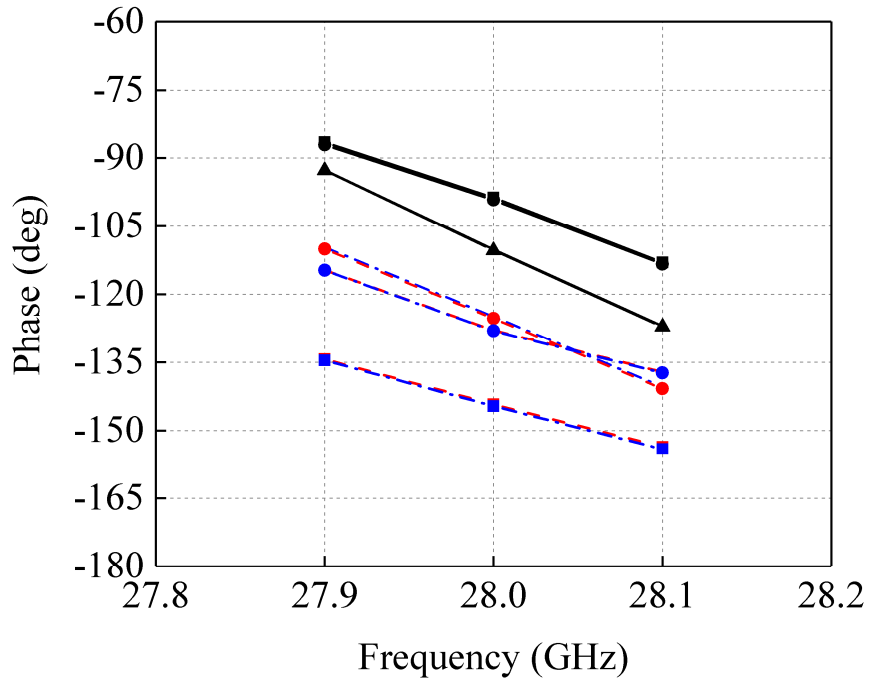
Figure 3.5  $3 \times 10$  Rotman lens of second stage and array Vivaldi antenna, (a) top view, (b) bottom view, (c) perspective view of integrated triple Rotman lens

3×10 Rotman 렌즈의 시뮬레이션 결과는 그림 3.6에 그래프로 도시하였다. 총 3개의 입력 포트와 출력 포트 10개 간의 10개의 위상 결과를 보여준다. 28 GHz에서 입력 포트 1과 3에서 각 출력 포트의 위상각 포트 간의 위상 차이는 약  $\pm 77^\circ$  이며, 그림 3.6의 그래프처럼 일정한 간격을 유지한다. 이 결과는 목표 수치에 정확히 일치하지 않지만, 오차 허용범위 이내의 위상값이므로 빔포밍 조향 각도에 큰 영향을 미치지 않는다. 중앙 포트 2의 위상 전체 평균은  $0^\circ$  이지만 최고 큰 차이는  $20^\circ$  까지 결과를 보인다. 모든 위상 결과를 표 3.2에 정리하였고 포트별 간격을 자세히 확인할 수 있다.

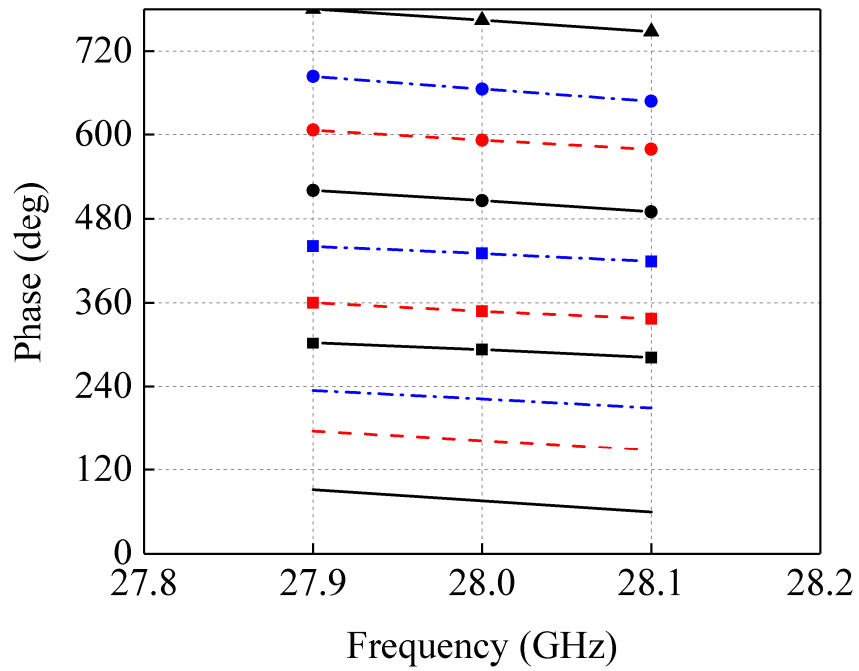


(a)





(b)



(c)

Figure 3.6 Simulation results of the phase of  $3 \times 10$  Rotman lens for second stage, (a) input port 1, (b) input port 2, (c) input port 3

Table 3.2 Simulation results of the phase  $3 \times 10$  Rotman lens for second stage

Port	Input 1(deg.)	Input 2(deg.)	Input 3(deg.)
Output 1	43.54	-110.15	75.81
Output 2	-54.43	-127.94	162.38
Output 3	-128.34	-124.94	-138.07
Output 4	146.13	-98.73	-67.67
Output 5	70.13	-144.28	-12.10
Output 6	-11.74	-144.64	69.57
Output 7	-67.19	-99.23	145.93
Output 8	-137.62	-125.32	-128.15
Output 9	162.42	-128.08	-53.82
Output 10	75.63	-110.34	44.28
Phase gap	-76.4	0.0	+76.5

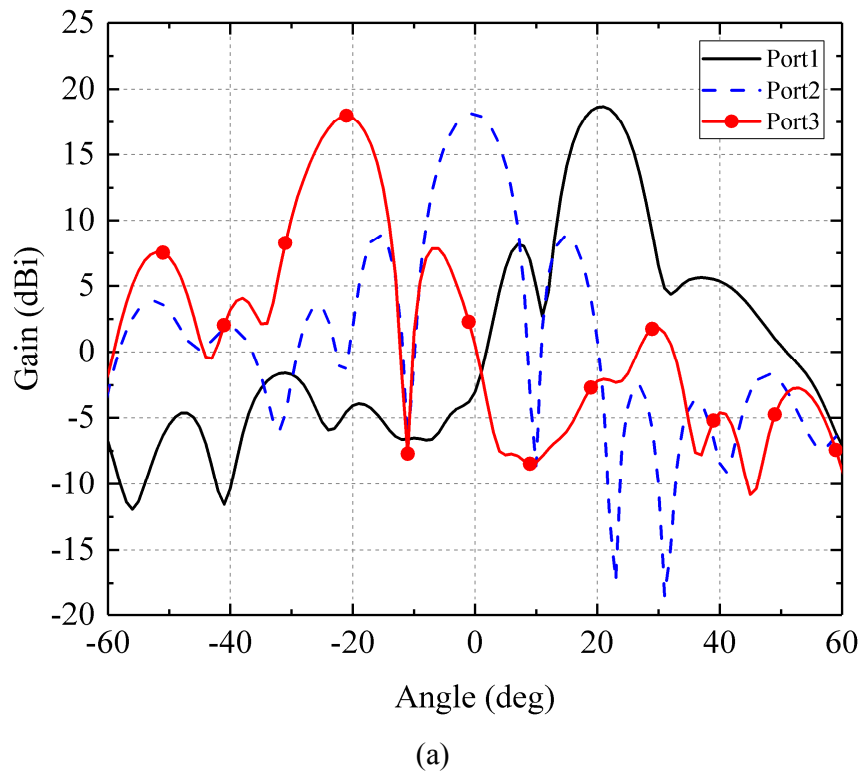
### 3. 3차원 빔포밍 시뮬레이션 결과

방사 패턴 시뮬레이션 결과는 그림 3.7 및 그림 3.8과 같다. 그림 3.2의 첫 번째 입력의  $3 \times 3$  Rotman 렌즈 시뮬레이션 결과를 참고하여 해당 출력값을 두 번째  $3 \times 10$  Rotman 렌즈 3개의 입력포트에 입력하였다. 즉 총 3개 입력을 가진 Rotman 렌즈가 3층으로 적층하였으므로 9개의 입력값을 가지며 이 값들은 첫 번째 Rotman 렌즈로부터 출력값을 인가받는다.

그림 3.7과 3.8은 9개의 입력 포트의 진폭 및 위상 시뮬레이션 값을 각 포트에 입력된 상태의 9개 방사 패턴의 시뮬레이션 결과이며, 평면 그래프 및 3차원 방사 패턴으로 도시하였다. 총 9개의 빔의 조형된 각을 간략하게 표 3.3으로 작성하였다.

시뮬레이션 결과, 빔 2, 5, 8을 제외한 빔 1, 3, 4, 6, 7, 9 등은 양각 약 20도의 빔 조향이 된다. 빔 4, 5, 6의 경우, 정중앙의  $0^\circ$  근처로 빔 조향이 되지만, 그와 반대로 빔 2, 8은 양각  $5^\circ$ 의 오차로 빔 조향이 된다. 또한 빔 2, 8의 경우, 주엽과 유사한 이득을 가진 부엽이 약  $30^\circ$  근처에서

발생한다. 그림 3.8에서 3차원 방사 패턴 시뮬레이션 결과를 참고하면, 9개의 빔에서 부엽이 발견되었고, 그중 빔 2와 8의 경우 주엽과 이득 값이 유사하였다. 이처럼 부엽은  $3 \times 10$  Rotman 렌즈 시뮬레이션 결과에서 원인을 분석할 수 있었다. 그림 3.6 (b) 중앙 포트 2의 출력포트들의 위상이 균일하지 않아 빔 포트 2번 및 8번에서 큰 이득의 부엽이 발생한 것으로 추측된다.



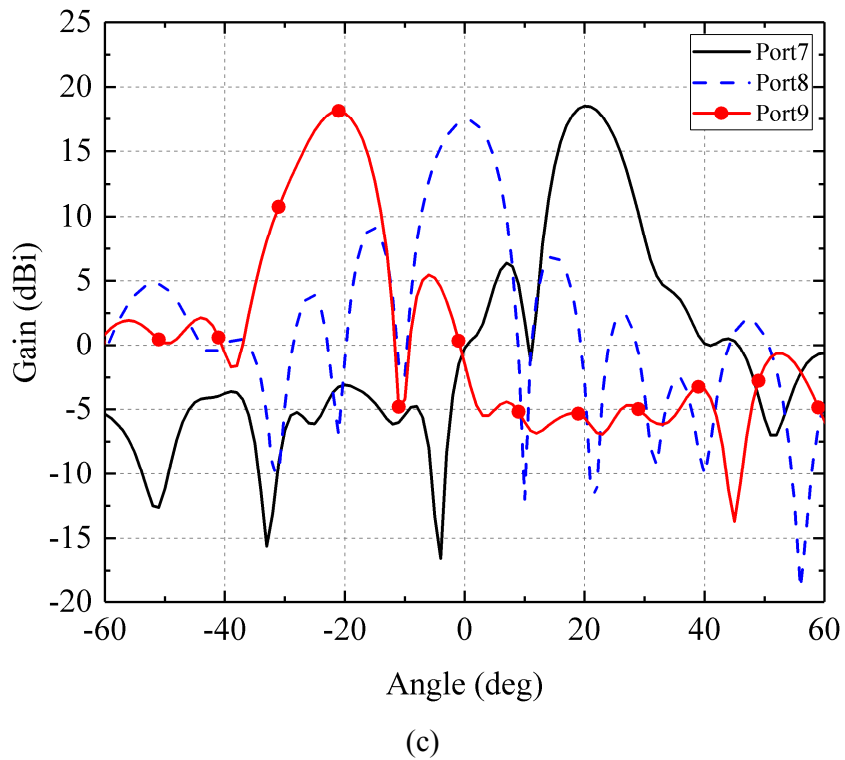
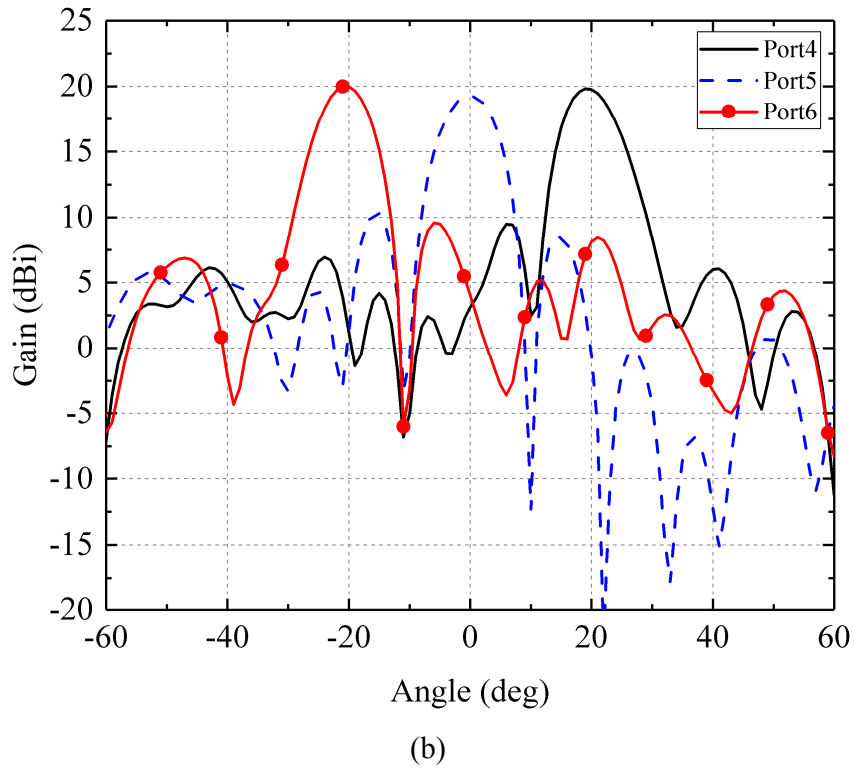


Figure 3.7 Simulation results of radiation pattern for two-stage Rotman lens, (a) port 1, 2 and 3, (b) port 4, 5 and 6, (c) port 7, 8 and 9

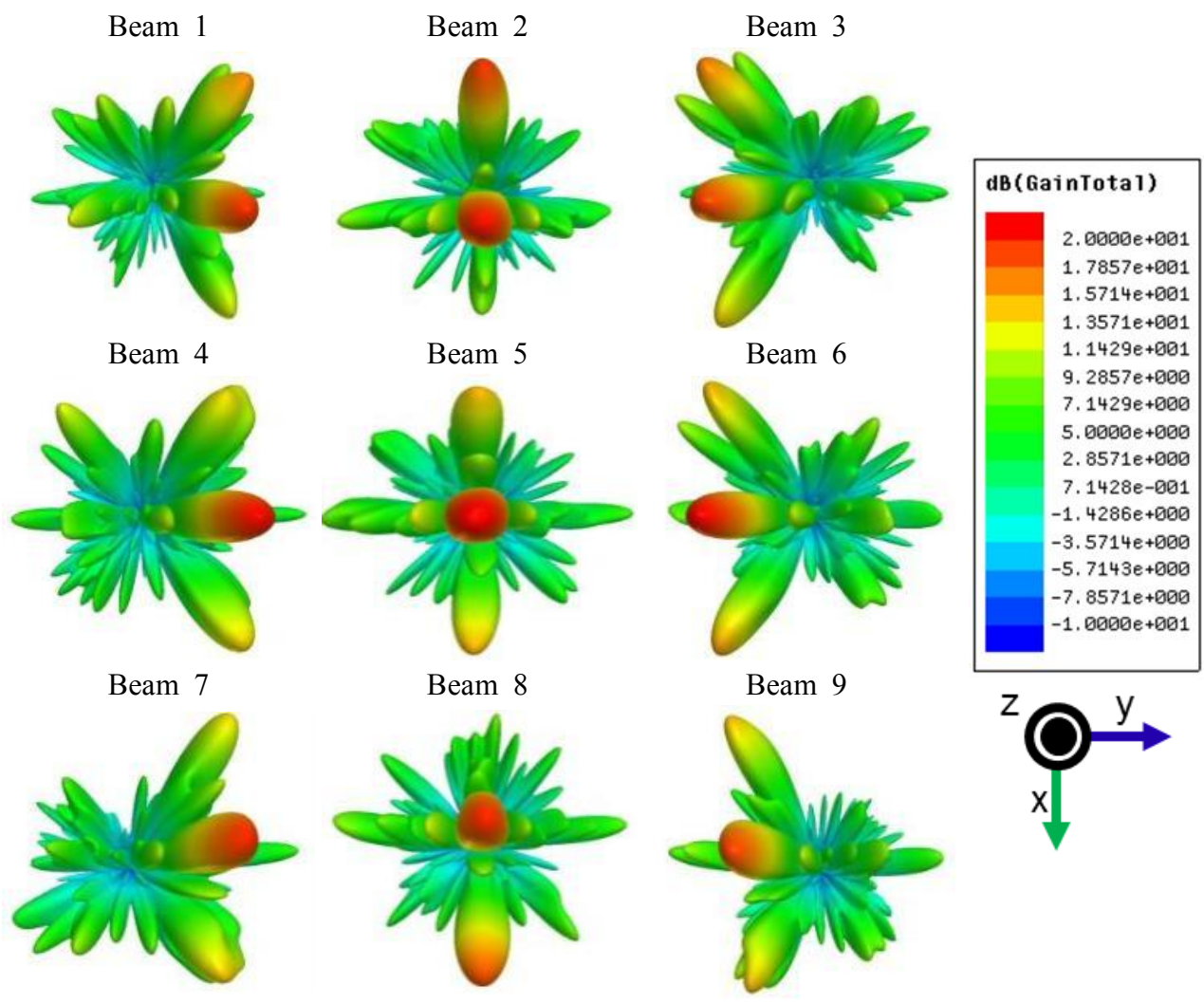


Figure 3.8 Simulation results of three-dimensional radiation pattern for a two-stage Rotman lens

Table 3.3 Simulation results of a tilt-angle for beamforming antenna

Beam	Phi(deg.)	Theta(deg.)	Gain(dBi)
1	20	21	18.7
2	-4	6	18.1
3	-15	-21	18.0
4	0	19	19.8
5	0	0	19.3
6	1	-21	20.0
7	-18	20	18.5
8	-5	-5	17.4
9	16	-21	18.1

## 제2절 적층형 방법 시스템 제작 및 측정

### 1. 빔포밍 시스템 제작

그림 3.9는 3차원 빔포밍 시스템을 블록 다이어그램으로 설계도를 작성한 것이다. 설계한 Rotman 렌즈를 각 단계에 적층하고 구성한다. RF chain 단의 입력 9개 중 한 개를 선택하기 위한 RF 스위치가 필요하다. 28 GHz 대역용 RF 스위치 3개를 사용하였고, 3개를 사용한 이유로 RF 스위치는 1개 입력, 4개 출력하고 있으며, 9개의 RF chain을 구성하기 위해 스위치 3개가 필요했다. RF 스위치를 작동하기 위해 라즈베리파이의 DC 출력 원을 이용하였다. 라즈베리파이에서 DC 3.3V를 출력하여 RF 스위치 3개를 작동시키고 내장된 파이선 프로그래밍으로 RF 스위치 선택용 GUI를 작성하였다. 빔 선택 편의성을 위하여 무선 작동 방법을 고안하였고 이를 해결하기 위해 와이파이 및 테더링으로 외부 기기(핸드폰 또는 컴퓨터)로 접속하여 외부에서

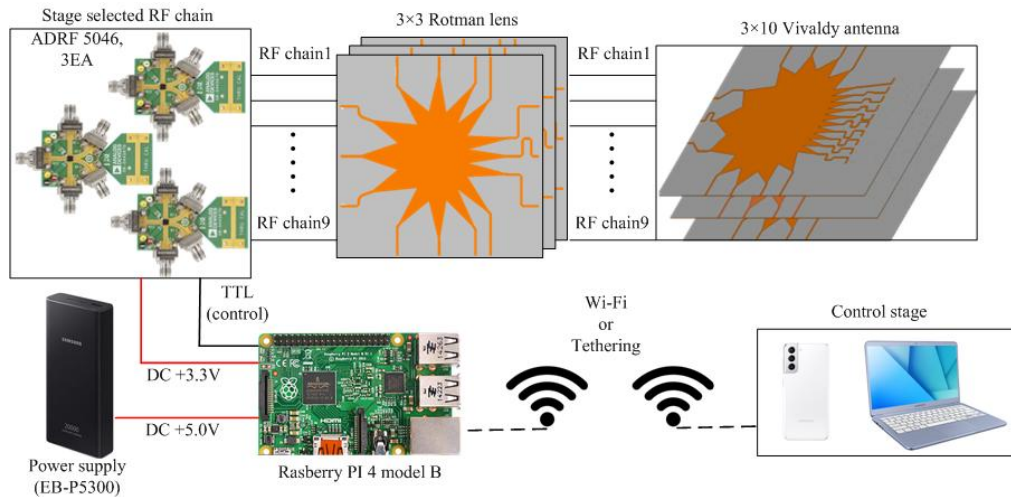
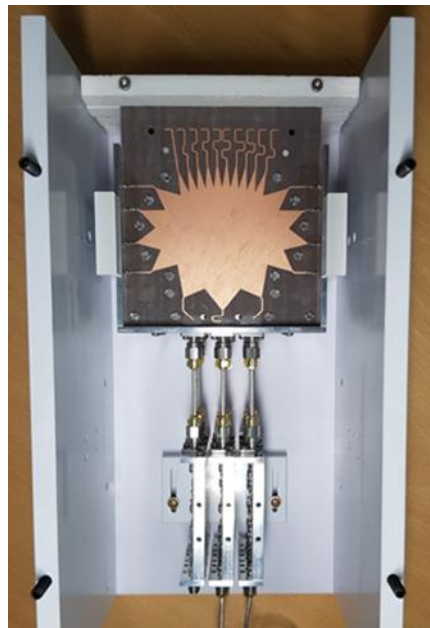


Figure 3.9 Description of three-dimensional beamforming system with two-stage Rotman lens

조정이 가능하게 설계되었다. 최종적으로 라즈베리파이는 DC 5V의 전원을 필요로 하며 이는 휴대용 충전기를 이용하여 전원 5V를 공급하였다.

그림 3.10의 사진은 그림 3.9의 블록 다이어그램을 참고하여 제작된 빔포밍 시스템 내외부를 촬영한 것이다. (a)의 그림은 RF 단만 구성된 것을 보여주고 있으며 (b)는 전체 시스템이 구성된 사진을 보여준다. RF 스위치의 경우 DC +3.3V뿐만 아니라 -3.3V와 2개의 TTL 신호가 필요하다. 따라서, -3.3V 음 전압 발생을 위한 회로를 추가로 제작하였다. 그리고, 3개의 RF 스위치를 정상적인 작동을 위한 많은 선로가 필요하였다. (c)의 그림은 빔 선택을 위한 9개의 입력단이며, (d) RF 스위치 3개의 구성을 보여준다. (e)의 사진은 외곽 사진이며 제작한 시스템의 총부피는 155mm×290mm×125mm이다.





(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figure 3.10 Manufacture of a system of two-stage Rotman lens, (a) RF stage, (b) inside final manufacture, (c) an input of RF chain, (d) RF switches, (e) outside



## 2. 3차원 빔포밍 측정

적층형 Rotman 렌즈의 빔포밍 시스템 성능 검증을 위한 방사 패턴을 측정하였다. 일반적인 원역장 안테나 중대형 챔버는 2-cut, 즉 E-plane과 H-plane 방사 패턴 측정에 특화되어있다. 본 연구에서 설계된 3차원 빔포밍 시스템은 원역장 안테나 측정 시스템으로 측정하기에는 매우 비효율적이다. 대각으로 빔조향 각도를 정확히 측정할 수 없기 때문이다.

3차원 빔포밍을 정확히 측정하기 위해 국립전파연구원 이천전파시험인증센터에서 설치된 고속측정 다중프로브 시스템으로 측정을 수행하였다. 다중프로브 시스템은 근역장 범위에서 방사된 전파를 측정한다. 그리고 근역장 측정값을 푸리에 변환(Fourier transform)을 통해 원역장 방사 패턴으로 변환한다. 해당 측정 시스템의 장점은 빠른 시간내에 안테나에서 방사된 전방향의 전파를 스캔하기에, 임의의 빔 조향각을 정확하게 찾을 수 있다. 그림 3.11은 다중프로브 측정 시스템 전체 구조 및 제작한 빔포밍 시스템 장착된 장면을 보여주고 있다.

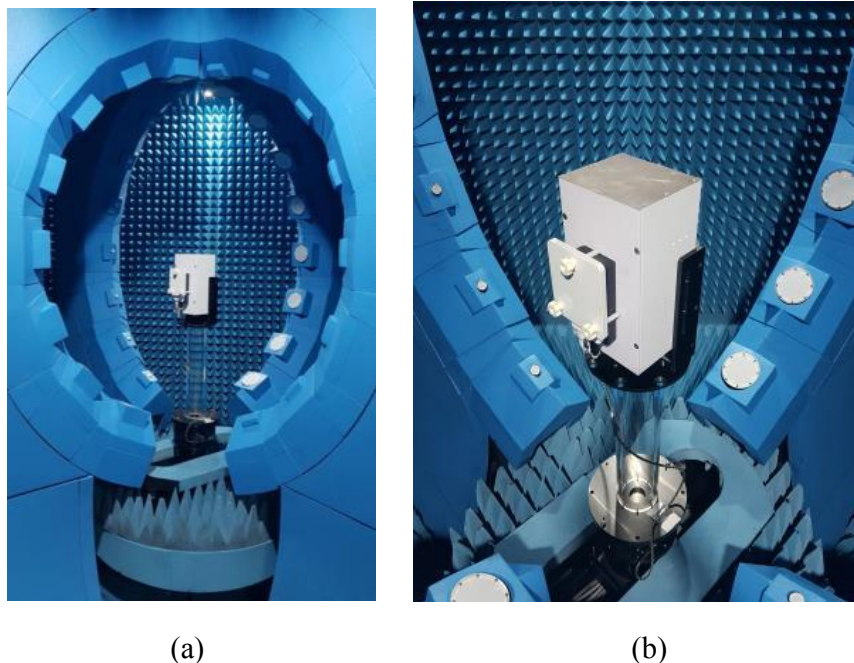


Figure 3.11 Photography of the two-stage Rotman lens system on a measurement system for measurement three-dimensional radiation pattern, (a) a chamber for three-dimensional radiation pattern, (b) the mounted two-stage Rotman lens

3차원 방사 패턴 측정 결과를 그림 3.12과 같이 9개의 방사 패턴을 측정하였다. 9개의 각 빔의 분석 결과, 3차원 방사 패턴 시뮬레이션 결과의 빔 조향각처럼 방위각 및 양각이  $20^\circ$  로 유사하게 일치하였다. 그림에도 불구하고, 시뮬레이션의 이득 값과 크기는 20dB 이상, 작게는 13dB 차이가 발견되었다. 시뮬레이션 결과는  $3 \times 10$  Rotman 렌즈의 입력에서 급전된 구조를 해석하였지만, 실제 측정 결과는 RF 스위치를 포함한 각 RF chain의 RF 케이블 등으로 발생한 손실에 의해 실제 이득이 저하된 것으로 판단된다. 표 3.4에서 측정된 9개의 빔에 대한  $\phi$ ,  $\theta$ 에 대한 조향각 및 이득을 정리하였다.

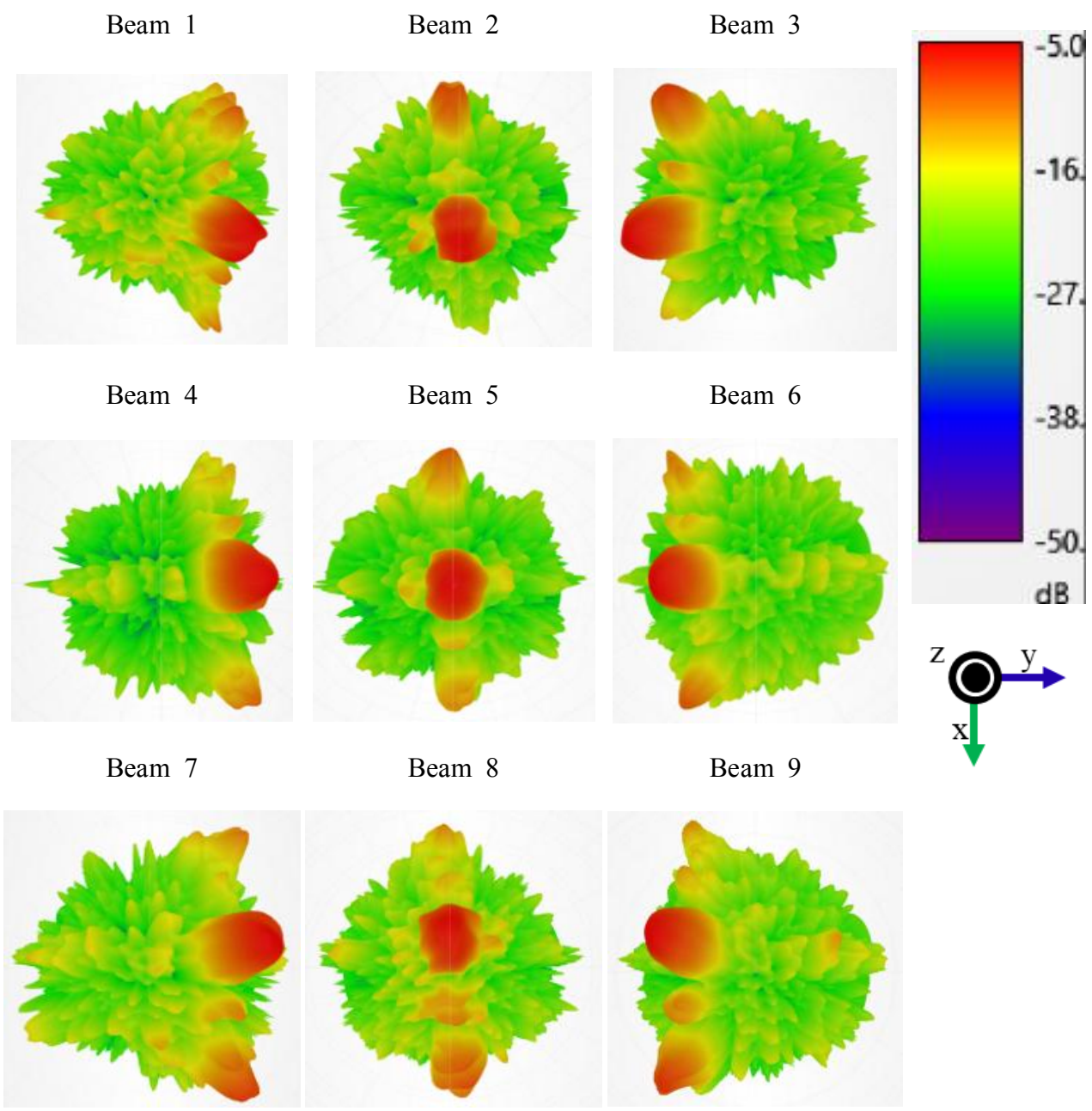


Figure 3.12 Measurement results of three-dimensional radiation pattern for two-stage Rotman lens

Table 3.4 Measurement results of a tilt angle for beamforming antenna

Beam	Phi(deg.)	Theta(deg.)	Gain(dBi)
1	17	-15	-6.9
2	0	-8	-5.4
3	-21	-7	4.6
4	21	-1	4.2
5	0	0	5.1
6	-21	2	4.8
7	21	30	-1.1
8	0	10	-6.1
9	-21	8	4.5

## 제4장 입체형 Rotman 설계 및 검증

### 제1절 입체형 Rotman 렌즈 설계

#### 1. 입체형 Rotman 렌즈 설계식 유도

일반적인 Rotman 렌즈는 빔 조향각 focal-arc의  $F$ ,  $F$  와  $G$  비율, 빔 조향각  $\alpha$  을 결정 후 설계를 수행한다. 기존의 식은  $xy$  평면에서 파장 벡터 식으로 유도 되었기 때문에 설계는 2차원 구조가 한계이다. 결국은 단일 Rotman 렌즈를 이용한 위상 배열 안테나는 양각 및 고도각 등 오직 1축의 빔 조향만 할 수 있다.

본 장에서 새로 제안한 입체형 Rotman 렌즈 설계 방법을 소개한다. 3차원 Rotman 렌즈의 설계가 가능하면, 양각 및 고도각의 빔포밍을 동시에 조정이 가능한 3차원 빔포밍 구현이 가능하다. 더불어, 설계된 Rotman 렌즈는 획기적으로 소형화 구조로 설계할 수 있다.

소개된 입체형 Rotman 렌즈는 횡 방향, 종방한 향, 그리고 대각방향의 총 3개의 서로 다른 Focal-arc 및 Inner-arc를 갖는다. 횡 및 종방 향은 기존의 Rotman 렌즈 설계식을 이용한다. 기존방식으로 설계된 횡 및 종방향 Rotman 렌즈는  $x$  축 위의  $G$  ( $-G, 0, 0$ )을 기준으로 결합할 수 있다.

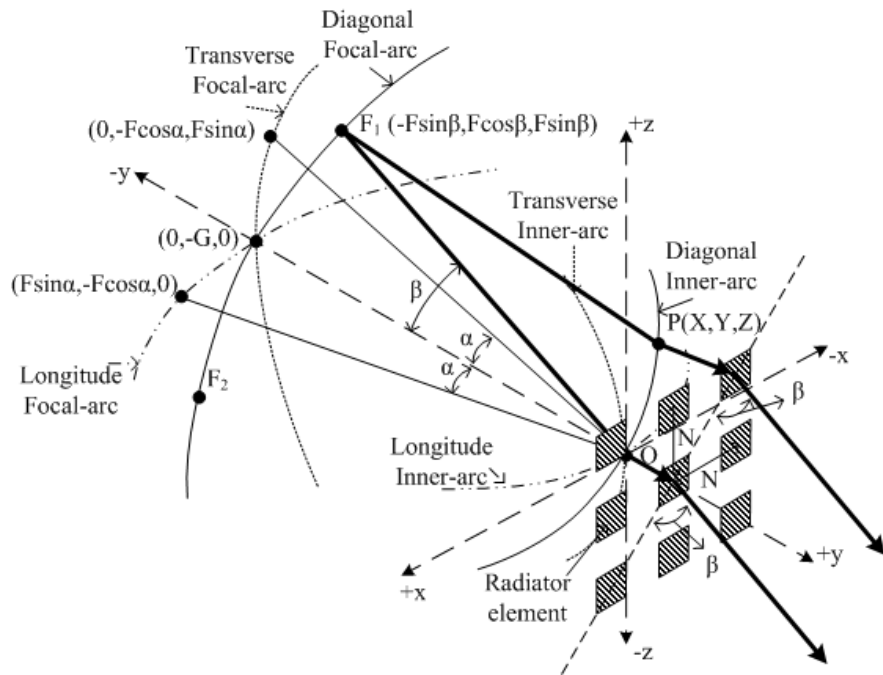


Figure 3.13 Description of a volumetric Rotman lens

입체형 Rotman 렌즈를 그림 3.13와 같이 표현하였다. Rotman 렌즈의 Focal arc의 임의의 지점에서부터 inner-arc를 거쳐 간 파장은 모두 같아야 한다. 대각의 Focal arc 임의의 점  $F_1, F_2$ 에 대해 파장의 관점으로 벡터 식을 유도할 수 있으며 다음과 같이 정리된다. 방사소자는 정사각 배열이라 가정하고 수식을 전개한다.

$$\overrightarrow{F_1P} + W + \sqrt{2} N \sin\beta = F + W_0 \quad (3.1)$$

$$\overrightarrow{F_2P} + W - \sqrt{2} N \sin\beta = F + W_0 \quad (3.2)$$

$$\overrightarrow{GP} + W = G + W_0 \quad (3.3)$$

대각의 focal-arc 임의의 점  $F_1, F_2$  및 중앙  $-G$ 에서부터 inner-arc 임의의 점  $P$ 까지의 벡터를 제곱으로 정리하면 다음 식 (3.4), (3.5), (3.6)과 같이 나타난다.

$$\begin{aligned} (\overrightarrow{F_1P})^2 &= F^2 + X^2 + Y^2 + Z^2 \\ &+ F^2 \sin^2\beta + 2FX \cos\beta - 2FY \sin\beta - 2FZ \sin\beta \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} (\overrightarrow{F_2P})^2 &= F^2 + X^2 + Y^2 + Z^2 \\ &+ F^2 \sin^2\beta + 2FX \cos\beta + 2FY \sin\beta + 2FZ \sin\beta \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$(\overrightarrow{GP})^2 = (G + X)^2 + Y^2 + Z^2 \quad (3.6)$$

원활한 수식을 전개하기 위하여 모든 파라미터를  $F$ 에 대하여 정규화하면 다음과 같이 변수들은  $F$ 로 이루어진 항으로 정의된다.

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{N}{F}, & x &= \frac{X}{F}, & y &= \frac{Y}{F}, & z &= \frac{Z}{F}, & g &= \frac{G}{F}, & w &= \frac{W - W_0}{F} \\ \alpha_0 &= \cos\alpha, & \alpha_1 &= \sin\alpha, & \beta_0 &= \cos\beta, & \beta_1 &= \sin\beta \end{aligned}$$

정규화된 변수를 위의 식 (3.4), (3.5), (3.6)에 대입하면 (3.7), (3.8), (3.9)와 같이 풀이할 수 있다.

$$\frac{(\overrightarrow{F_1P})^2}{F^2} = 1 + x^2 + y^2 + z^2 + \beta_1^2 + 2x\beta_0 - 2y\beta_1 - 2z\beta_1 \quad (3.7)$$

$$\frac{(\overrightarrow{F_2P})^2}{F^2} = 1 + x^2 + y^2 + z^2 + \beta_1^2 + 2x\beta_0 + 2y\beta_1 + 2z\beta_1 \quad (3.8)$$

$$\frac{(\overrightarrow{GP})^2}{F^2} = (g+x)^2 + y^2 + z^2 \quad (3.9)$$

또한 (3.1), (3.2), (3.3)의 식에 정규화된 변수로 수식에 대입하면 (3.10), (3.11), (3.12)와 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} \left(\frac{\overrightarrow{F_1P}}{F}\right)^2 &= (1-w-\sqrt{2}\eta\beta_1)^2 \\ &= 1+w^2+2\eta^2\beta_1^2-2w-2\sqrt{2}\eta\beta_1+2\sqrt{2}w\eta\beta_1 \end{aligned} \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{\overrightarrow{F_2P}}{F}\right)^2 &= (1-w+\sqrt{2}\eta\beta_1)^2 \\ &= 1+w^2+2\eta^2\beta_1^2-2w+2\sqrt{2}\eta\beta_1-2\sqrt{2}w\eta\beta_1 \end{aligned} \quad (3.11)$$

$$\overrightarrow{GP} = -W + W_0 + G = -w + g$$

$$\begin{aligned} \frac{(\overrightarrow{GP})^2}{F^2} &= (g-w)^2 \\ &= w^2 - 2gw + g^2 = x^2 + y^2 + z^2 + g^2 + 2gx \end{aligned} \quad (3.12)$$

수식 (3.7)에서 수식 (3.8)을 빼는 것과 수식 (3.10)에서 (3.11)을 빼는 것과 같으며 이는 (3.13)과 같이  $x$  는 소거되며  $y, z$  의 식으로 간결해진다.

$$y + z = \sqrt{2} \eta(1 - w) \quad (3.13)$$

또한 방사소자 배열을 정사각 배열이라 가정하였기에 라고 가정할 수 있다. 수식 (3.13)을 풀이하면 (3.14)와 같이 임의의 점  $P$  의 대한 좌표  $y, z$ 의 값을 정의할 수 있다.

$$y = z = \frac{\sqrt{2}}{2} \eta(1 - w) \quad (3.14)$$

수식 (3.7)과 수식 (3.8)을 더하는 것과 수식 (3.10)에서 (3.11)을 더한 것과 같으며 수식 (3.15)와 같은 연립방정식으로 정리된다. 또한 수식 (3.9), (3.12) 식을 연계하면 (3.16)과 같이 정리하며 이 수식은 (3.15)와 연립방정식으로 풀이할 수 있다.

$$x^2 + y^2 + z^2 + \beta_1^2 + 2x\beta_0 = w^2 + 2\eta^2\beta_1^2 - 2w \quad (3.15)$$

$$\begin{aligned}
 \frac{(\overrightarrow{GP})^2}{F^2} &= (g - w)^2 \\
 &= w^2 - 2gw + g^2 \\
 &= x^2 + y^2 + z^2 + g^2 + 2gx \\
 &= w^2 - 2gw = x^2 + y^2 + z^2 + 2gx \quad (3.16)
 \end{aligned}$$

수식 (3.16)에서 (3.15)를 빼면 수식 (3.17)과 같이  $x$ 를 정의할 수 있다.

$$x = \frac{2w - 2gw - 2\eta^2\beta_1^2 + \beta_1^2}{2(g - \beta_0)} \quad (3.17)$$

결정된  $x, y, z$ 를 수식 (3.16)에 대입하여  $aw^2 + bw + c = 0$ 의 형태로의 2차 방정식을 만들고 계수  $a, b, c$ 를 각각 얻을 수 있다.



$$a = (1 - \eta^2) - \left(\frac{1-g}{g-\beta_0}\right)^2 \quad (3.18)$$

$$b = -2g - 2g\left(\frac{1-g}{g-\beta_0}\right) - 2\eta^2 - \beta_1^2 \frac{2\eta^2 g - 2\eta^2 - g + 1}{(g-\beta_0)^2} \quad (3.19)$$

$$c = -g\beta_1^2 \frac{1-2\eta^2}{g-\beta_0} - \eta^2 - \beta_1^4 \left(\frac{\eta^2 - 1/2}{g-\beta_0}\right)^2 \quad (3.20)$$

지금까지 3차원 Rotman 렌즈를 설계하기 위한 대각 Rotman 렌즈 설계 공식을 제안하였다. 일반적인 Rotman 렌즈 수식은  $x, y$  및 조향각  $\alpha$ 로 구성된다. 3차원 Rotman 렌즈를 설계하기 위해서  $xy$  평면뿐 아니라  $z$  축을 고려하였고 방위각과 고도각의 조향각  $\alpha$ 와 함께 대각 Rotman 렌즈의 조향각  $\beta$ 를 결정해야 한다. 그리고  $x, y, z, \alpha$  및  $\beta$  대한 대각 Rotman 렌즈의  $w$ 의 2차방정식 계수  $a, b, c$ 를 각각 구해야 한다.

결론적으로 3차원 Rotman 렌즈를 설계는 다음 순서를 따른다.

1.  $G, F, R, \alpha, \beta$  등 3차원 Rotman 렌즈 설계 목표를 결정한다.
2. 정중앙( $x$ 축의  $-G$  점)에서 종 방향 및 횡 방향의 Rotman 렌즈를 설계하기 위한  $w$ 의 2차 방정식 계수  $a, b, c$ 를 구한다. 이때 방위각과 고도각의 조향각  $\alpha$ 를 고려한다.
3. 방위각 및 고도각 조향용 빔포머 Rotman 렌즈의 Focal-arc와 Inner-arc를 결정된  $x, y, \alpha$ 를 이용하여 설계한다.
4. 정중앙( $x$ 축의  $-G$  점)에서 대각방향 Rotman 렌즈를 설계하기 위한  $w$ 의 2차방정식 계수  $a, b, c$ 를 구한다. 이때 방위각과 고도각이 결합된 조향각  $\beta$ 를 고려한다.
5. 대각방향의 Rotman 렌즈의 Focal-arc와 Inner-arc를 결정된  $x, y, z, \beta$ 를 이용하여 설계한다.
6. 설계된 모든 Rotman 렌즈를 결합하여 3차원 Rotman 렌즈를 구성한다.

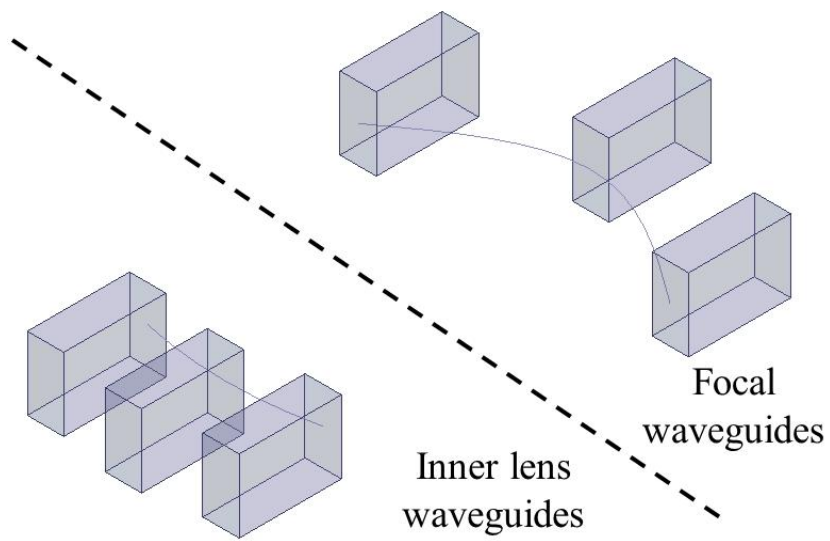
## 2. 입출력 3×3 종방향 Rotman 렌즈 설계

본 논문에서 설계할 3차원 도파관 Rotman 렌즈의 목표 성능은 다음 표 3.5와 같다. 작동주파수 28 GHz를 기준으로 각 파라미터를 결정했다. 앞서 공식으로 서술했듯이 3차원 도파관 Rotman 렌즈를 설계하기 위한 첫 작업으로 종방향 및 횡방향의 Rotman 렌즈 설계가 진행되어야 한다.

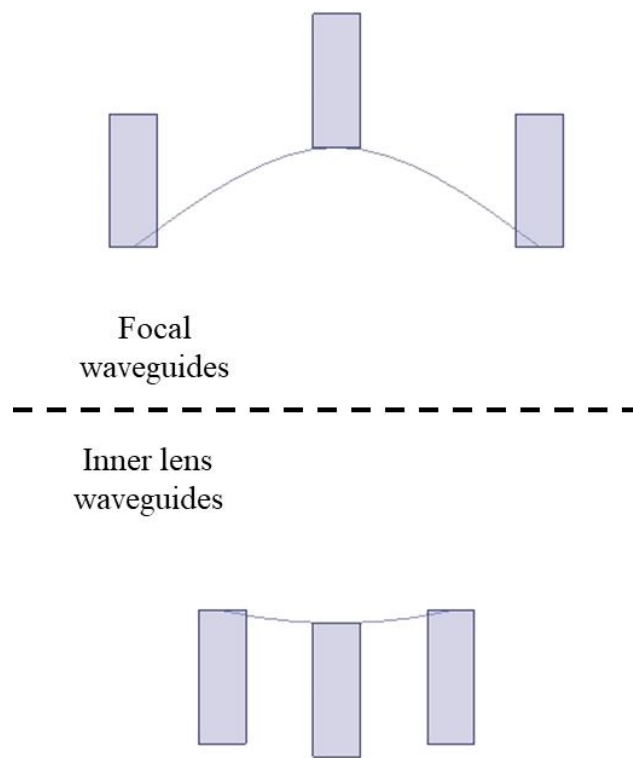
3차원 Rotman 렌즈를 설계하기 앞서 종방향의 Rotman 렌즈를 우선 설계를 진행하였다. 그림 3.14는 focal-arc 및 inner-렌즈 설계하였고 그 선위에 입력 3개와 출력 3개 도파관을 배열한 것이다. Ansys사의 HFSS으로 시뮬레이션을 진행하였으며 도파관을 제외한 공간은 자유 공간으로 구성되었다. Focal-arc의 3개의 도파관에서 각각 전파를 입사하여 inner-arc의 도파관의 출력 위상 및 전계를 점검하였다.

Table 3.5 Goal specification about volumetric Rotman lens

Parameter		Value
Frequency	-	28GHz
Antenna array	-	3×3
A number of antenna	$N$	9 EA
Distance between antennas	$d$	$0.8\lambda$
Parameter of Focal-arc	$F$	$3\lambda$
Length of Rotman lens	$G$	$1.113 \times F$
Tilt-angle of azimuth or elevation	$\alpha$	28.4 deg
Tilt-angle of combined with azimuth and elevation	$\beta$	26 deg



(a)



(b)

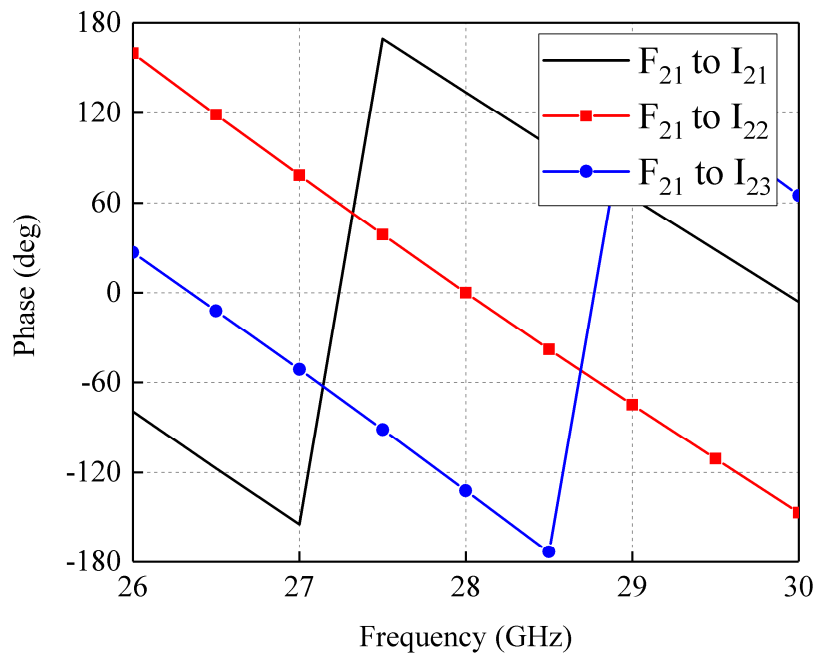
Figure 3.14 Longitude waveguides on focal arc and inner lens, (a) perspective view, (b) top view

그림 3.15은 Focal-arc 및 inner-arc 에 대한 위상 시뮬레이션 결과 그래

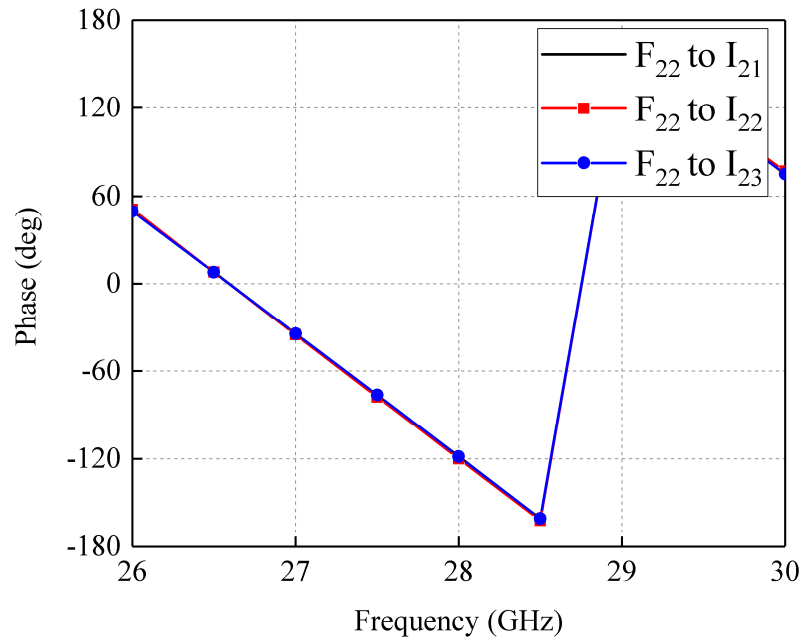
프이며 표 3.6은 시뮬레이션 결과를 분석한 것이다. 그림 3.15 그래프에서 범례의  $F_{21}$ ,  $F_{22}$ ,  $F_{23}$  은 Focal-arc의 왼쪽부터 순서대로 지칭한 것이며  $I_{21}$ ,  $I_{22}$ ,  $I_{23}$  은 Inner-arc에 있는 도파관들을 지칭한다.

Focal-arc의  $F_{21}$  에서 inner 렌즈의 도파관에 순서대로 위상 차이는 평균  $+132.9^\circ$  이며 반대로 입력포트 6에서  $-132.9^\circ$  로 대칭을 이룬다. 또한 중앙에 있는  $F_{22}$  의 경우 평균값이  $0^\circ$  이다. 초기  $\alpha$ 의 목표는  $+28.4^\circ$  였고, 예상 위상 차이는 약  $\pm 137^\circ$  이다. 이는 시뮬레이션 결과와 비교해보았을 때  $\pm 5^\circ$  이내이기 때문에 충분히 목표값을 만족한다고 판단된다.

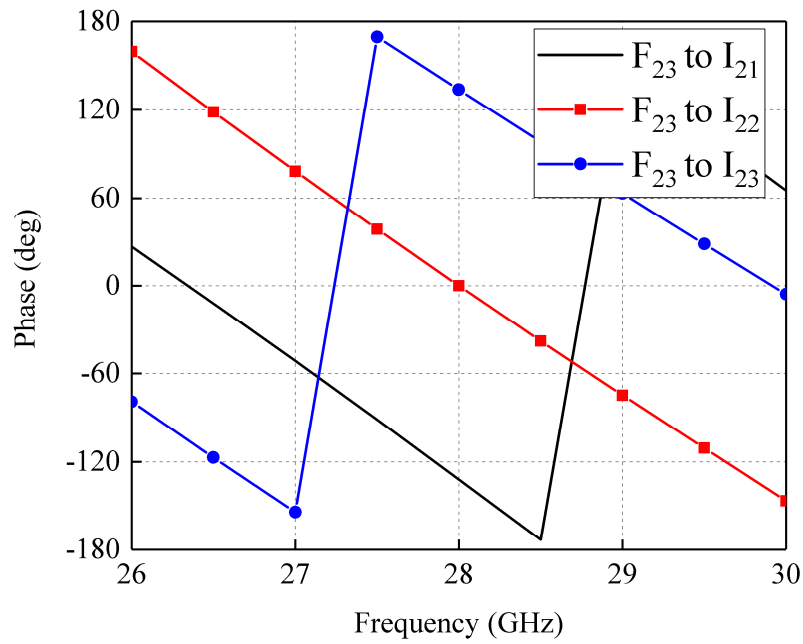
그림 3.16에서 위상 차이 결과를 시각적으로 확인할 수 있다. Focal arc의 중앙 도파관으로 전파가 인가되었을 때 출력포트의 3개의 도파관이 일정한 간격으로 입사되고 있음을 확인할 수 있다. 중앙 도파관 이외에도 양쪽의 도파관 또한 일정한 간격으로 Inner-arc 도파관으로 전달되고 있다.



(a)



(b)



(c)

Figure 3.15 Simulation results of a phase for longitude Rotman lens, (a) input  $F_{21}$ , (b) input  $F_{22}$ , (c) input  $F_{23}$

Table 3.6 Simulation results of the phase for azimuth Rotmans lens

Port	$F_{21}$	$F_{22}$	$F_{23}$
$I_{21}$	133.6	-118.5	-132.0
$I_{22}$	0.0	-120.0	0.0
$I_{23}$	-132.2	-118.4	133.8
Phase gap	132.9	0.0	-132.9

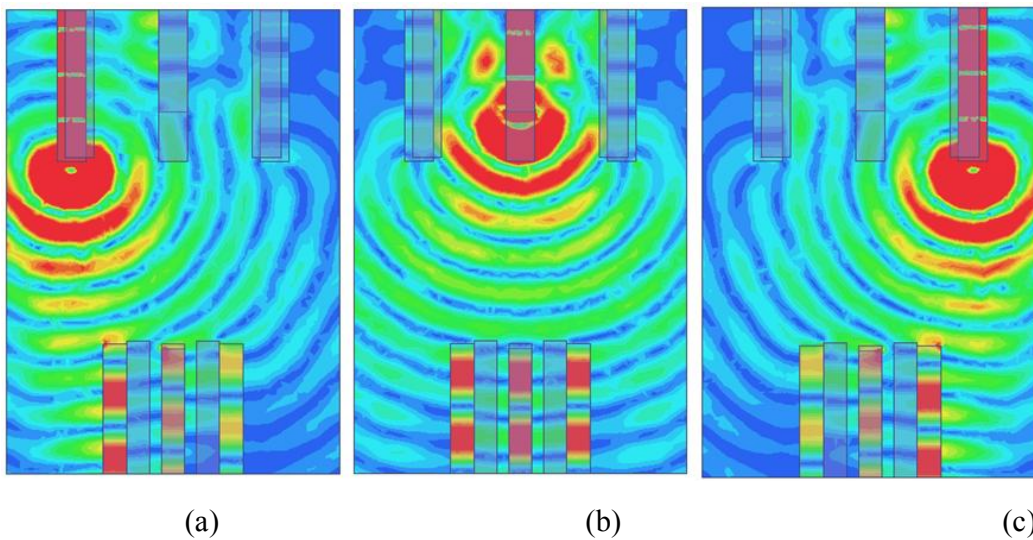


Figure 3.16 Simulation results of electrical field for longitude Rotmans lens,  
 (a) input  $F_{21}$ , (b) input  $F_{22}$ , (c) input  $F_{23}$

지금까지 종방향 도파관 Rotman 렌즈 시뮬레이션 및 결과를 확인하였다. 횡방향의 Rotman 렌즈의 시뮬레이션도 수행되어야 하지만 종방향에서  $x$ 축으로  $90^\circ$  회전한 것이 횡방향 Rotman 렌즈이고 또한 이 결과는 서로 유사할 것으로 판단돼 이 과정은 생략하였다.

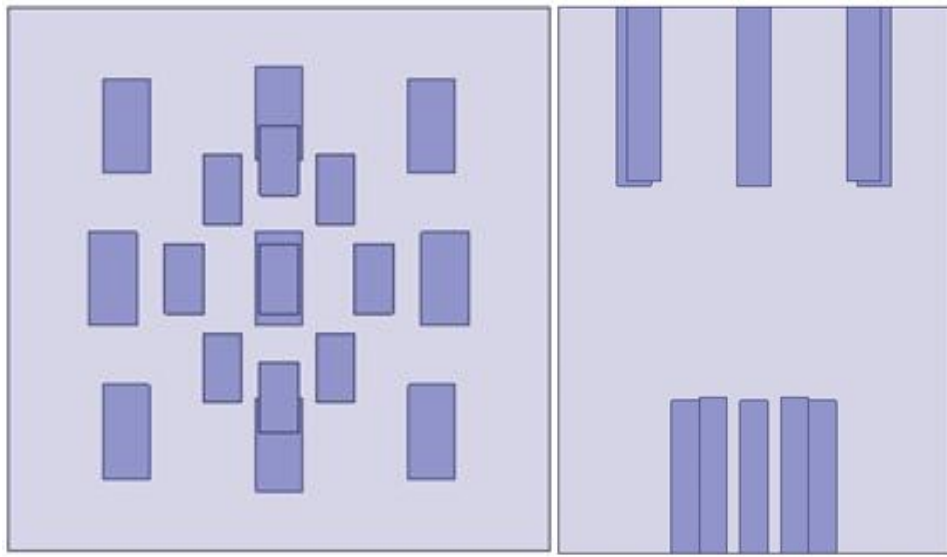
### 3. 입체형 Rotman 렌즈 개략도 구조 시뮬레이션

종방향 도파관 Rotman 렌즈의 시뮬레이션을 수행하였고 설계된 형태를 기준으로 입체형 Rotman 렌즈 설계를 추진하였다. 종방향 및 횡방향의 도파관은 설계된 focal arc를 기준으로 위치시켰고 대각에 있는 도파관은 대각 focal arc의 유도된 공식으로 위치 시켰다. 위치 시킨 후 중앙 도파관의 기준으로 inner 렌즈 도파관들의 출력위상이 일정하게 미세 튜닝을 실시하였다.

도파관들의 길이가 일정하지 않은 것으로 주된 이유는 제작을 고려해야 했기 때문이다. 실제 3차원 Rotman 렌즈 제작 형상은 직육면체로 설계를 진행했기에 도파관 길이를 외곽 면을 일치하게 조정하였다. inner 렌즈에 비해 focal arc 쪽은 입력 부분이기에 도파관들은 길이가 일정하지 않아도 영향은 없지만 inner 렌즈 쪽 도파관의 길이는 위상에 큰 영향을 주기에 길이를 조정하지 않고 관내파장을 고려하여 도파관의 폭 및 높이를 조정하였다.

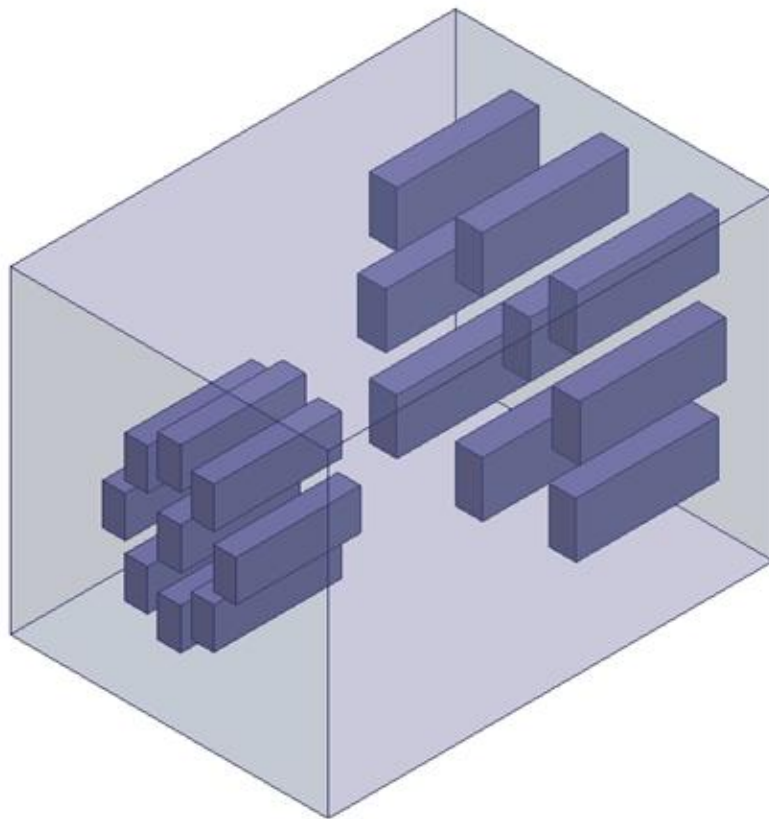
그림 3.18은 중앙 입력인  $F_{22}$ 의 전체 출력 도파관의 전달계수이다. 시뮬레이션은 3차원 시뮬레이터인 Ansys사의 HFSS로 수행하였다. 총 전파가 9개로 분할되어 출력으로 전달된다면 약 -10dB의 결과가 예상된다. 그러나 입력과 출력 사이의 공백은 자유 공간이므로 공간상쇄가 발생한다. 총 9개의 출력포트 및 외곽으로 전파가 전달되므로 손실은 많이 발생하나 중요한 것은 28 GHz에서 모든 출력포트로 균일하게 -18 ~ -23dB로 출력된다.

그림 3.19는 focal arc 도파관에 대한 각 inner 렌즈의 도파관들의 위상관계를 그래프로 표현한 것이며 28 GHz의 값들을 표 3.7에 표기하였다. 그래프는 입력 도파관의 focal arc와 매칭되는 inner arc의 출력 도파관들에 대해 그래프 곡선으로 표현했다. 종방향 Rotman 렌즈, 즉 입력  $F_{21}$ ,  $F_{22}$ ,  $F_{23}$ 는 정확한 수치는 다르지만, 표 3.6과 같이 평균값은 약  $\pm 133^\circ$ 로 유사하였다. 그에 반해 횡방향 Rotman 렌즈, 즉 입력  $F_{12}$ ,  $F_{22}$ ,  $F_{23}$ 은 약  $\pm 155^\circ$ 되며 종방향하고  $22^\circ$ 의 오차를 가지지만 빔조향 계산에 의하면  $2\sim 3^\circ$  정도 오차를 가진다. 대각 Rotman 렌즈의 입력,  $F_{11}$ ,  $F_{13}$ ,  $F_{31}$ ,  $F_{33}$ 의 경우 약  $\pm 173^\circ$  값을 보였다.



(a)

(b)



(c)

Figure 3.17 Designed of a schematic volumetric Rotman lens, (a) front view, (b) top view, (c) perspective view



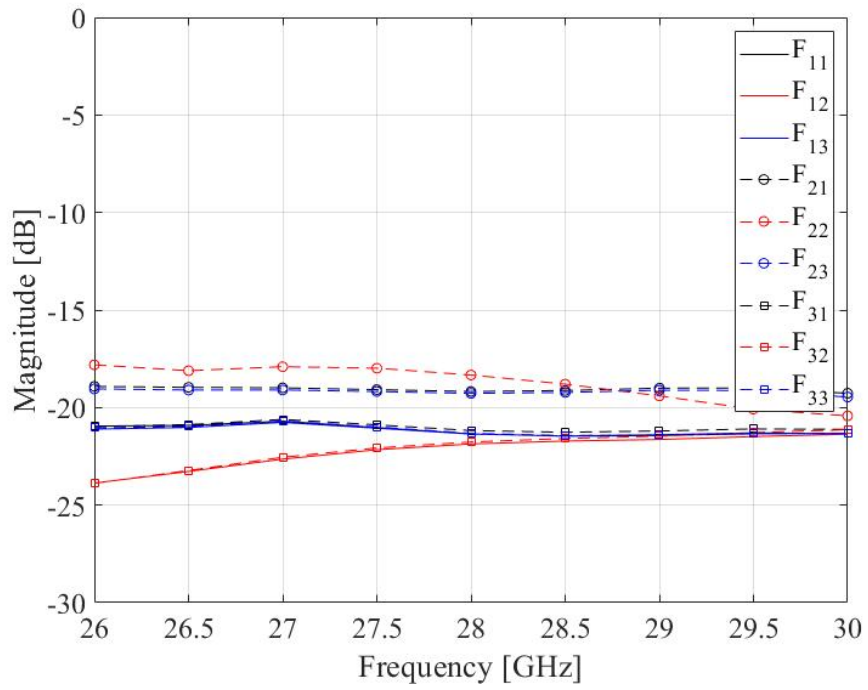


Figure 3.18 Simulation results of a transmission coefficient for a schematic volumetric Rotman lens

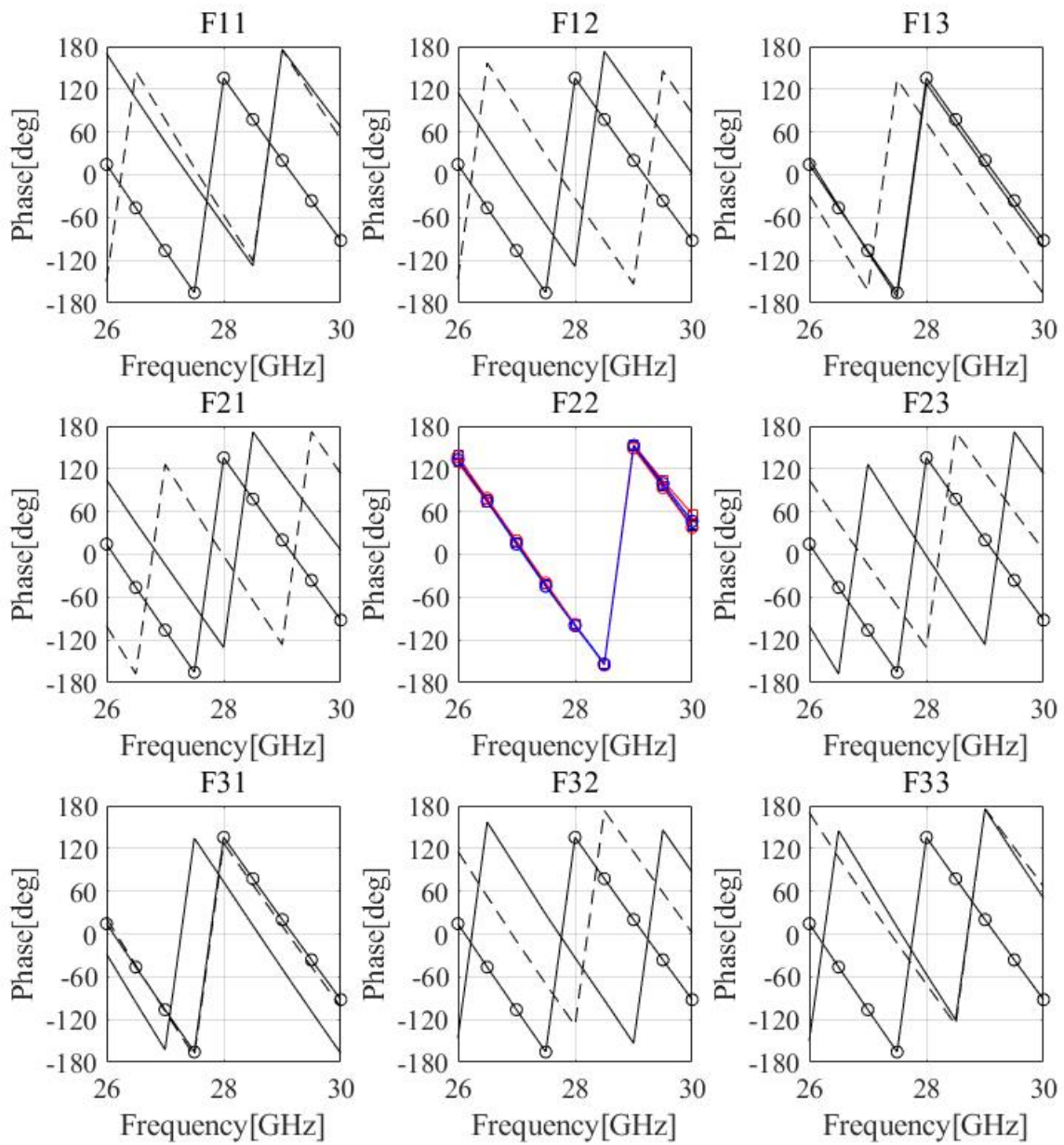
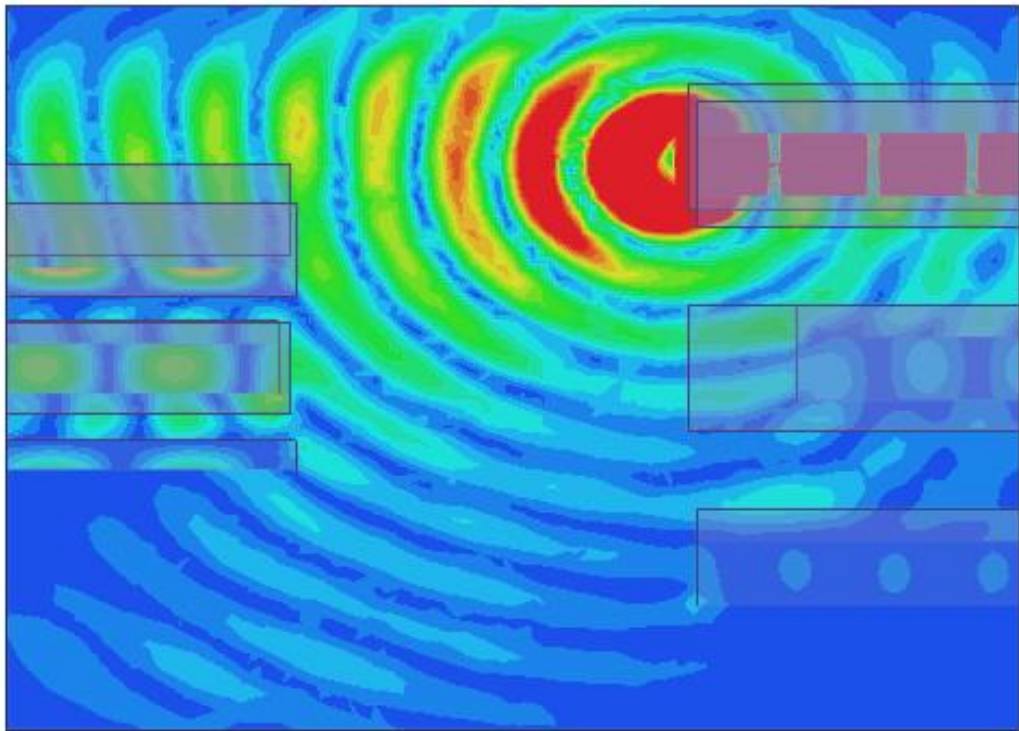


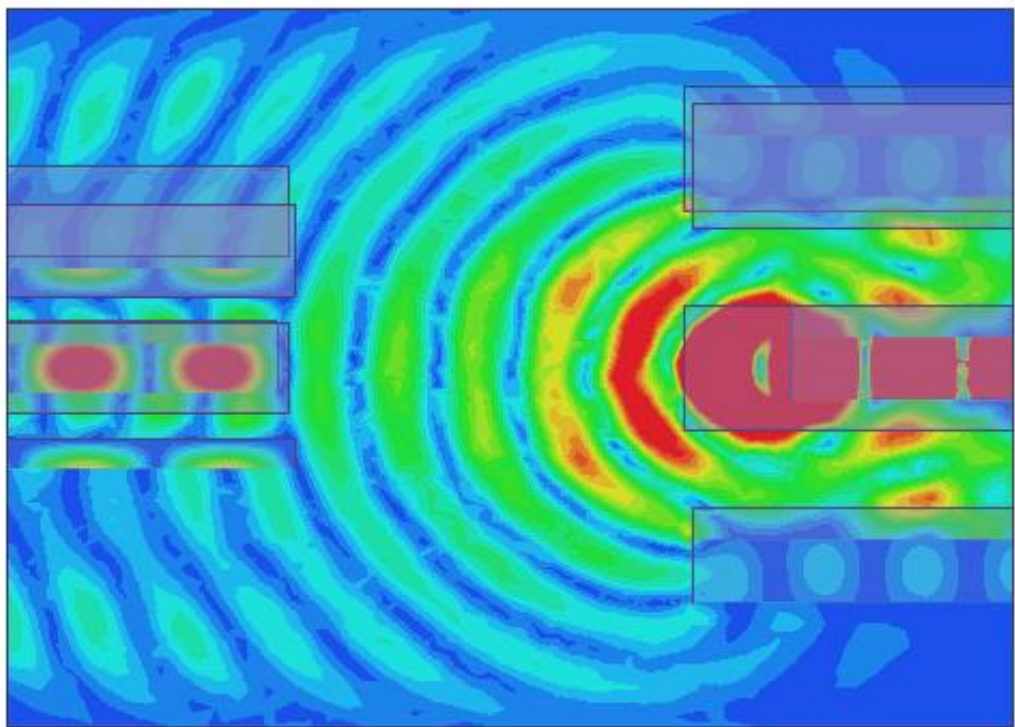
Figure 3.19 Simulation results of a phase for a schematic volumetric Rotman lens

Table 3.7 Simulation results of the a phase for a schematic volumetric Rotman lens

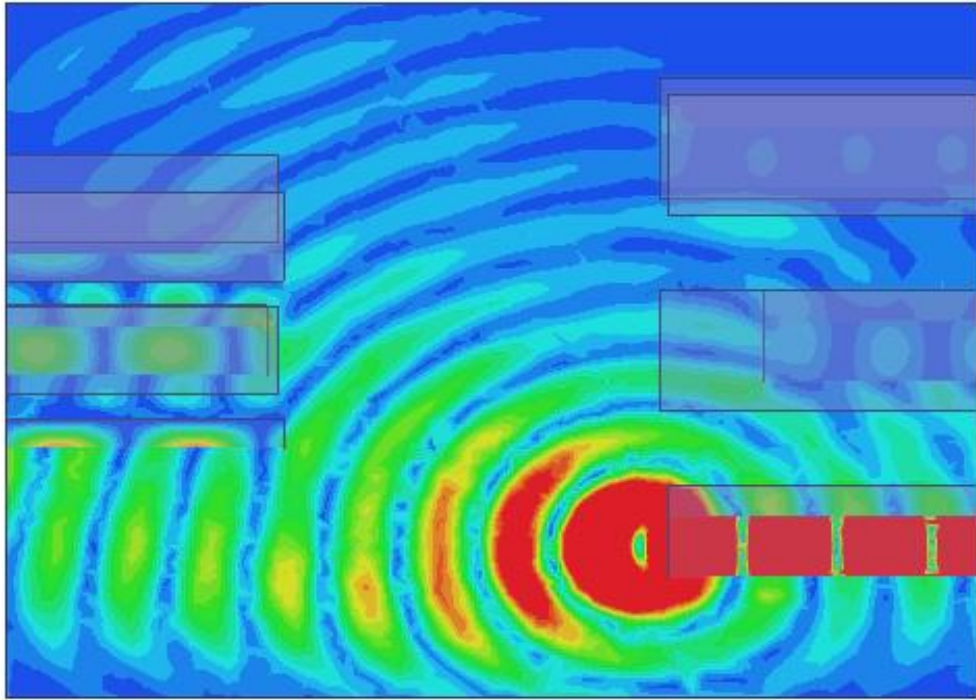
Port	$F_{11}$	$F_{12}$	$F_{13}$	$F_{21}$	$F_{22}$	$F_{23}$	$F_{31}$	$F_{32}$	$F_{33}$
$I_{11}$	-70.5				-100.6				-56.7
$I_{12}$		-19.2			-98.3			26.9	
$I_{13}$			-70.5		-99.9		-56.5		
$I_{21}$				-42.1	-98.4	50.8			
$I_{22}$	135.6	-144.1	135.7	-155.9	-98.3	-156.2	135.6	-143.3	136.3
$I_{23}$				51.7	-98.0	-41.8			
$I_{31}$			-56.8		-99.9		-70.5		
$I_{32}$		26.7			-98.4			-19.0	
$I_{33}$	-56.7				-100.3				-70.3
Phase gap	+173.1	+157.1	+173.1	+133.1	0.0	-133.7	-173.0	-157.1	-173.2



(a)



(b)



(c)

Figure 3.20 Simulation results of a electrical field for diagoanl Rotman lens,  
 (a) input  $F_{11}$ , (b)  $F_{22}$ , (c)  $F_{33}$

그림 3.21은 focal-arc의 도파관으로부터 입력되었을 때 각각의 방사 패턴 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 그리고 각 조향각 및 이득을 표 3.8에 정리하였다. 전체적으로 각 도파관으로부터 방사 패턴은 제각각의 빔조향각을 가지며 서로 반대 방향으로 대칭을 이룬다. 빔조향각은 대각 focal arc이면 약  $\pm 17^\circ$ , 종방향은 약  $\pm 20^\circ$ , 횡방향은 약  $\pm 25^\circ$ 이다. 이득은 중앙  $F_{22}$ 에서 가장 큰 9 dBi 이득을 보였고 대각위치인  $F_{11}$ ,  $F_{13}$ ,  $F_{31}$ ,  $F_{33}$ 에서 1.6 dBi의 가장 낮은 값을 보였다.

설계 목표값과 비교하면 약  $5^\circ$  정도의 오차가 있음을 알 수 있다. 오차가 발생한 근거로 다음과 같이 판단된다. 첫째, 시뮬레이션 구조상 inner 렌즈의 도파관에 이외의 방사면도 존재하는데, 여기서 방사된 전력과 합쳐진 시뮬레이션 결과이다. 둘째, 설계 단계 중 도파관 위치를 튜닝 과정 중 발생하였을 것이다. 그러나 이러한 오차가 발생하였음에도 불구하고 3차원으로 빔조향이 된 것을 확인하였다.



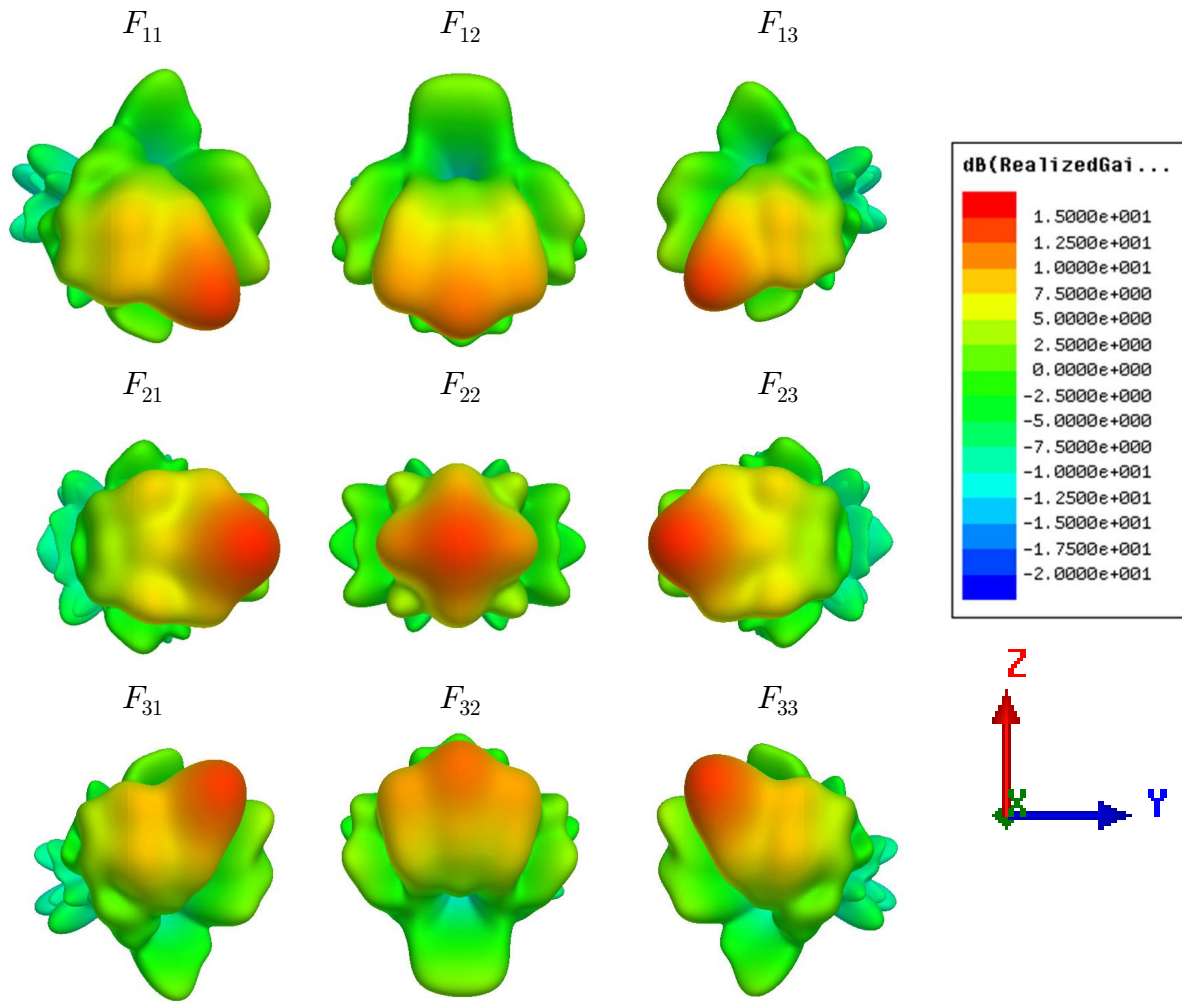


Figure 3.21 Simulation results of radiation pattern for a schematic volumetric Rotman lens

Table 3.8 Simulation results of a tilt angle for a schematic volumetric Rotman lens

Beam	Phi(deg)	Theta(deg)	Gain(dBi)
$F_{11}$	20	-17	12.8
$F_{12}$	0	-20	10.9
$F_{13}$	-20	-17	12.8
$F_{21}$	22	0	13.5
$F_{22}$	0	0	12.9
$F_{23}$	-22	0	13.5
$F_{31}$	20	17	12.8
$F_{32}$	0	20	11.0
$F_{33}$	-20	17	12.9

### 3. 입체형 Rotman 렌즈 전체 구조 시뮬레이션

그림 3.22는 설계한 3차원 도파관 Rotman 렌즈의 외곽을 구성한 형태이다. 기존의 도파관 부분을 자유 공간으로 지정하였고 그 외의 형태는 완전도체로 구성하였다. 중앙의 공간의 높이와 폭을 넓혀 충분한 공간을 확보하였다. 이는 도체 내부에서의 반사파를 억제하는 것과 동시에 제작의 편의성이 고려된 형태이다. 시뮬레이션에서는 입력 및 출력 면은 도체로 설정하였고 그 외의 면, 즉, 위면, 옆면 아래면은 방사가 가능한 구조로 설정하여 내부 반사를 최대한 억제한다.

시뮬레이션은 Ansys사의 HFSS로 수행하였다. 28 GHz 중심으로 전달계수, 위상, 전계, 방사 패턴을 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션 결과를 바탕으로 도파관으로 구성된 시뮬레이션 결과와 비교 분석하였다.

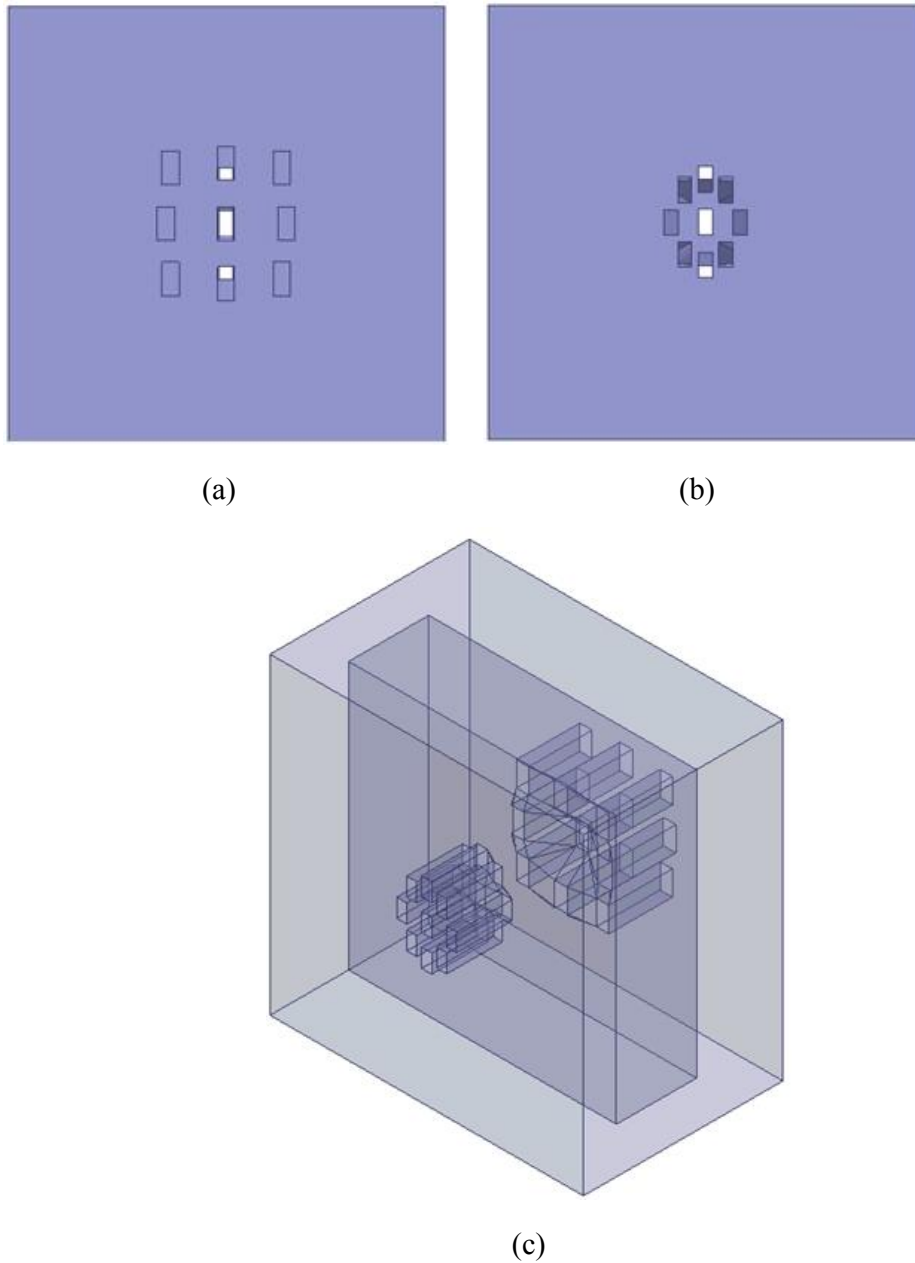


Figure 3.22 Structure of a proposed volumetric Rotman lens, (a) front view (input), (b) back view (output), (c) perspective view

그림 3.23은 정중앙의  $F_{22}$ 부터 입사되었을 때의 출력 전달계수를 그래프로 도식화한 것이다. 도파관으로만 구성했을 때보다 전달계수가 더 높은 결과를 보였다. 외곽이 막힌 구조이기 때문에 반사된 전파가 유입됐을 것으로 판단된다. 그림 3.18의 전달계수 시뮬레이션 결과와 비교해보면 약 10dB 차이로 확인된다.



그림 3.24는 위상 시뮬레이션 결과를 그래프로 도시하였다. 그리고 분석한 결과를 표 3.9에 정리하였다. 종방향 입력  $F_{21}$ ,  $F_{22}$ ,  $F_{23}$ 는 표 3.7에서 평균값은 약  $\pm 133^\circ$  으로 표 3.9의  $\pm 135.1^\circ$  와 오차  $2^\circ$  이다. 횡방향 입력  $F_{12}$ ,  $F_{22}$ ,  $F_{23}$  은 약  $\pm 148^\circ$  되며 종방향하고 표 3.7과 약  $10^\circ$  의 오차를 가지지만 큰 영향이 없으리라 판단된다. 대각 Rotman 입력인  $F_{11}$ ,  $F_{13}$ ,  $F_{31}$ ,  $F_{33}$  의 경우 약  $\pm 157^\circ$  의 결과를 보였고  $15^\circ$  이상 차이를 보인다. 빔조향 각이 얼마나 오차가 있는지는 방사 패턴 시뮬레이션 결과를 비교 분석이 필요하다.

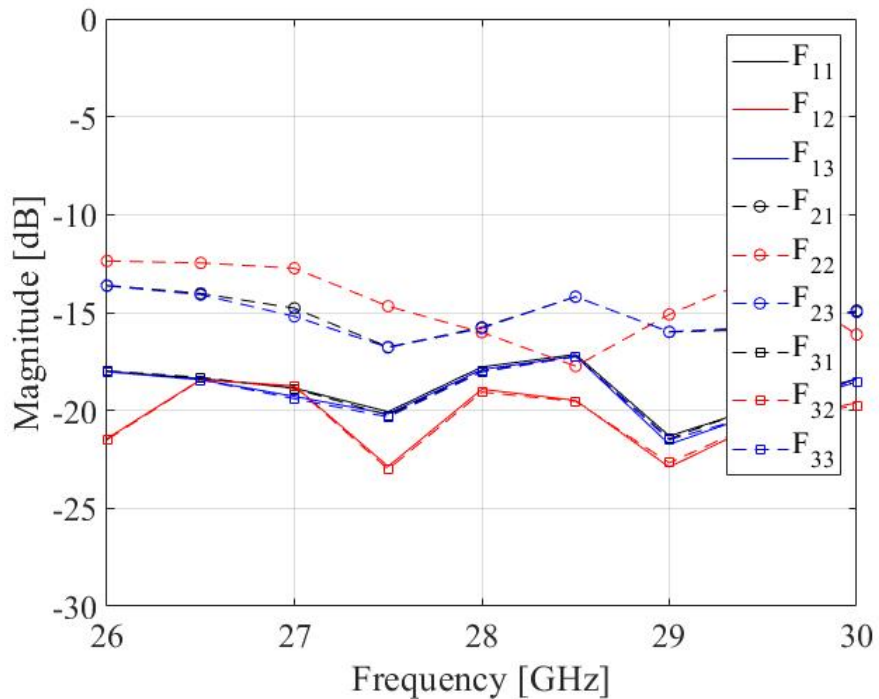


Figure 3.23 Simulation results of a transmission coefficient from input  $F_{22}$  for a volumetric Rotman lens

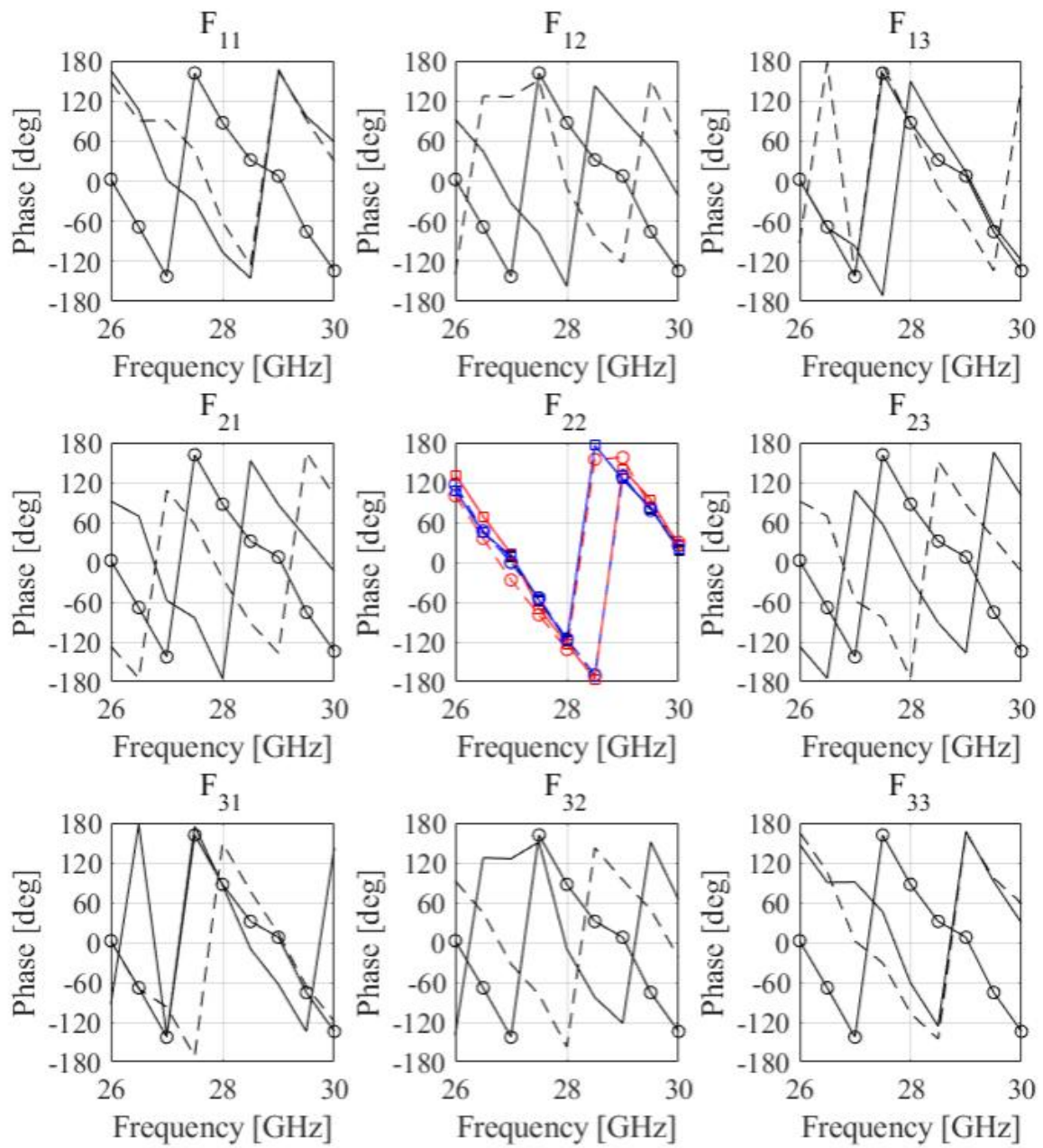


Figure 3.24 Simulation results of a phase for a volumetric Rotman lens

Table 3.9 Simulation results of a phase for a volumetric Rotman lens

Port	$F_{11}$	$F_{12}$	$F_{13}$	$F_{21}$	$F_{22}$	$F_{23}$	$F_{31}$	$F_{32}$	$F_{33}$
$I_{11}$	-106.5				-117.9				-62.3
$I_{12}$		-52.1			-123.0			10.5	
$I_{13}$			-106.5		-118.5		-62.2		
$I_{21}$				-87.8	-116.3	1.8			
$I_{22}$	87.4	-171.2	88.6	-176.7	-131.5	-176.7	87.9	-171.3	87.3
$I_{23}$				2.0	-115.6	-87.5			
$I_{31}$			-59.9		-119.0		-107.3		
$I_{32}$		10.1			-123.0			-52.8	
$I_{33}$	-60.8				-117.4				-107.6
Phase gap	157.2	148.9	156.7	135.1	-0.1	-135.4	-157.5	-148.4	-157.3

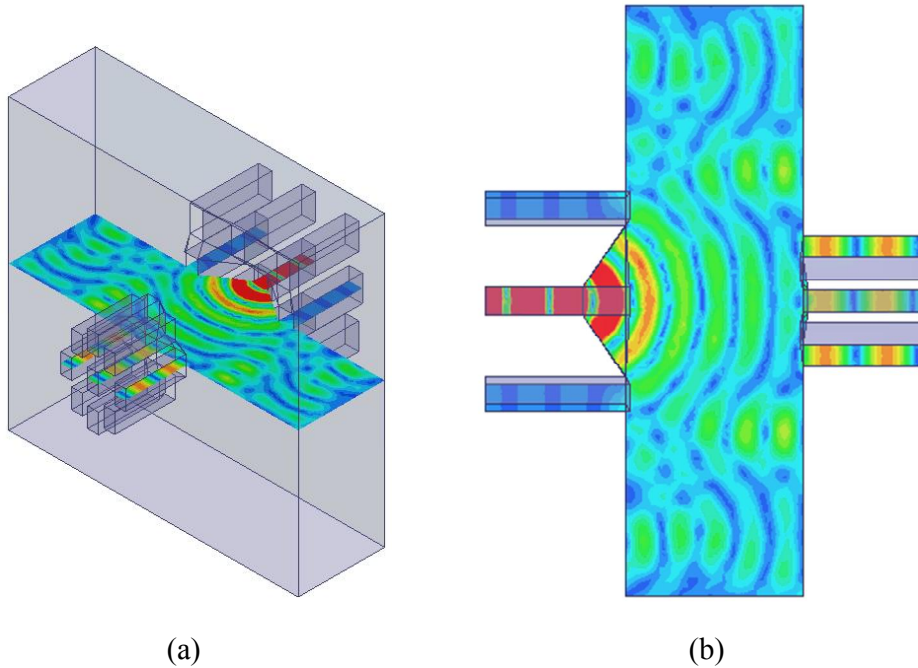


Figure 3.25 Simulation results of an electrical field for a volumetric Rotman lens, (a) perspective view, (b) top view

그림 3.25의 내부 전계 시뮬레이션 결과이다. 입력 및 출력 도파관이 근접한 내부 공간에서는 전계가 출력 쪽으로 전달이 잘 되지만, 그 이외의 공간에서 전계가 반사되고 있음을 알 수 있다. 현재 구조로 제작을 추진하였을 때, 내부 반사파를 억제하기 위한 흡수체 장착이 필수적이다.

그림 3.26와 표 3.10 3차원 방사 패턴 및 조향각을 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 제안한 구조는 기존의 도파관으로 구성된 모델보다 이득이 낮다. 중앙입력인  $F_{22}$ 를 제외하고 다른 입력들은 이득이 10dB 이상 차이를 보인다. 중앙 입력은 이득 4dB 더 낮다. 도파관 구조일 경우 inner-arc 면이 개방된 구조이기에 대부분이 전력이 방사되지만 제안한 구조는 출력 도파관으로만 방사되기에 이득이 차이 보임을 알 수 있다.

조향각은 대부분  $5^\circ$  이내의 차이를 보인다. 각 focal-arc의 입력에 따라 빔조향각이 오차 이내로 유사하다는 것을 알 수 있다.

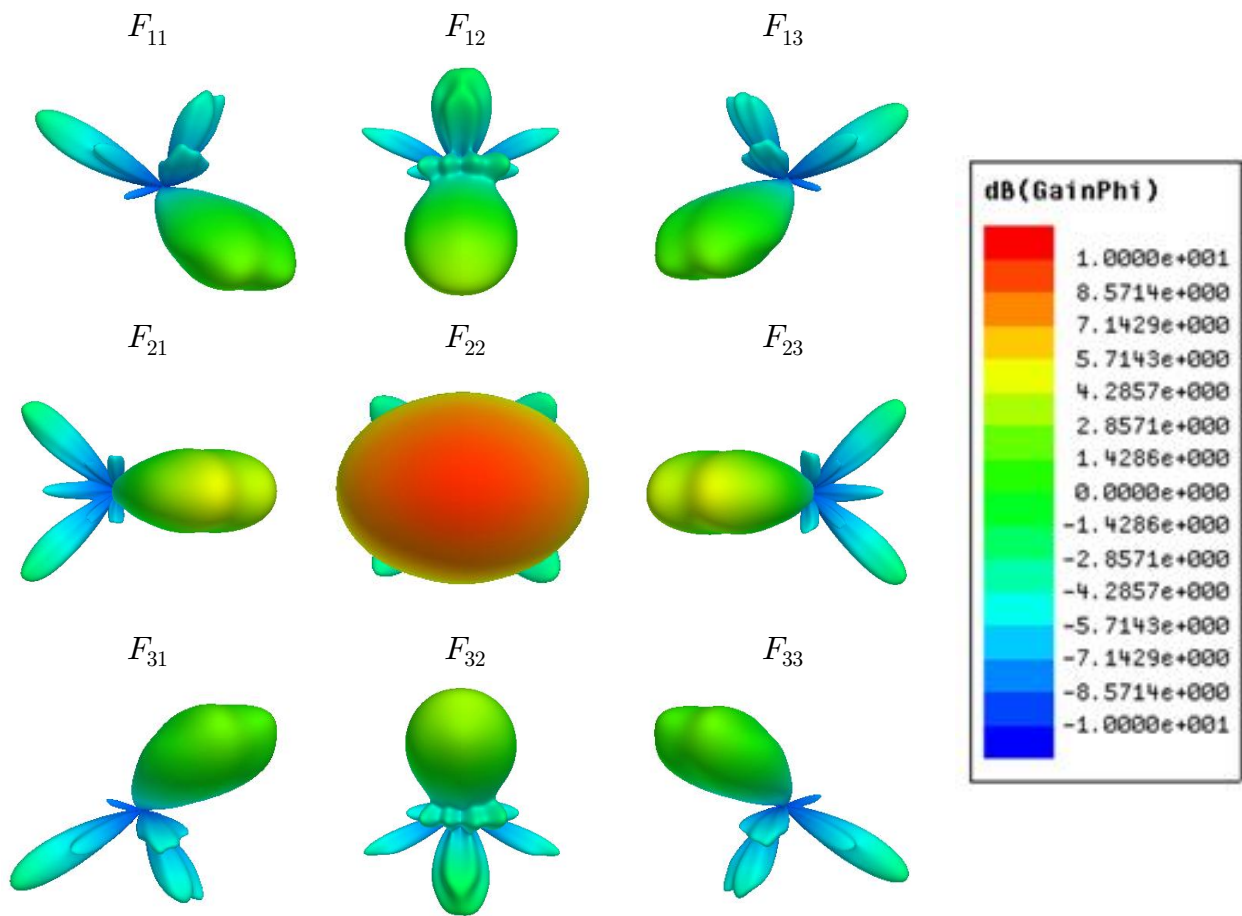


Figure 3.26 Simulation results of radiation pattern for a volumetric Rotman lens

Table 3.10 Simulation results of a tilt angle for a volumetric Rotman lens

Beam	Phi(deg.)	Theta(deg.)	Gain(dBi)
$F_{11}$	-16	-17	1.6
$F_{12}$	0	-25	2.7
$F_{13}$	16	-17	1.5
$F_{21}$	-20	0	4.3
$F_{22}$	0	0	9.0
$F_{23}$	20	0	4.2
$F_{31}$	-16	17	1.6
$F_{32}$	0	25	2.7
$F_{33}$	16	17	1.5

## 제2절 입체형 Rotman 렌즈 배열 안테나 제작 및 측정

### 1. 입체형 Rotman 렌즈 배열 안테나 제작

제안한 3차원 Rotman 렌즈의 도면을 그림 3.27에서 보여주고 있다. 직육면체의 도체 형태로 구성된다. 각 부품은 총 6개 면으로 구성되며 볼트로 체결하여 구성한다. 입력의 focal-arc 면과 출력의 inner-arc는 서로 마주보는 면이다. 총 부피는  $110 \times 110 \times 70 \text{ mm}^3$ 로 제작된다. 내부의 공간은  $94 \times 94 \times 28.1 \text{ mm}^3$ 이며 빈 공간이다.

시뮬레이션에서 공간의 내부 반사로 최대한 억제해야 한다. 억제하는 방법으로 흡수체를 빈 곳에 장착하여 내부 반사파를 흡수한다. 입력 및 출력 도파관 도입 부분에 흡수체가 안 닿게 하여 전파 전달을 원활히 한다.

focal arc의 입력 도파관에 RF 신호 인가 방법으로 변환기를 활용한다. 변환기는 K-connector to WR-34 이며 케이블로부터 RF 신호를 WR-34 도파관



으로 전파를 원활히 전달한다. 변환기를 동시에 9개 체결할 수 없어 1개씩 체결하여 측정을 수행할 예정이다. inner-arc의 출력 부분에서 그대로 방사하므로 변환기는 필요 없다.

그림 3.27은 제작된 입체형 Rotman 렌즈이며 내외곽이 그림과 같다. 4개의 외곽면, 1개 focal arc가 포함된 면, 1개의 inner 렌즈가 포함된 면, 즉 총 6개의 금속 면으로 이루어진다. 그리고 내부의 빈 곳을 흡수체를 채웠다. 방사 패턴을 측정하기 위한 지그는 3D 프린터로 제작하였고 그림 3.28와 같이 focal arc 면은 아래에 위치하며 변환기가 장착되어 있다.

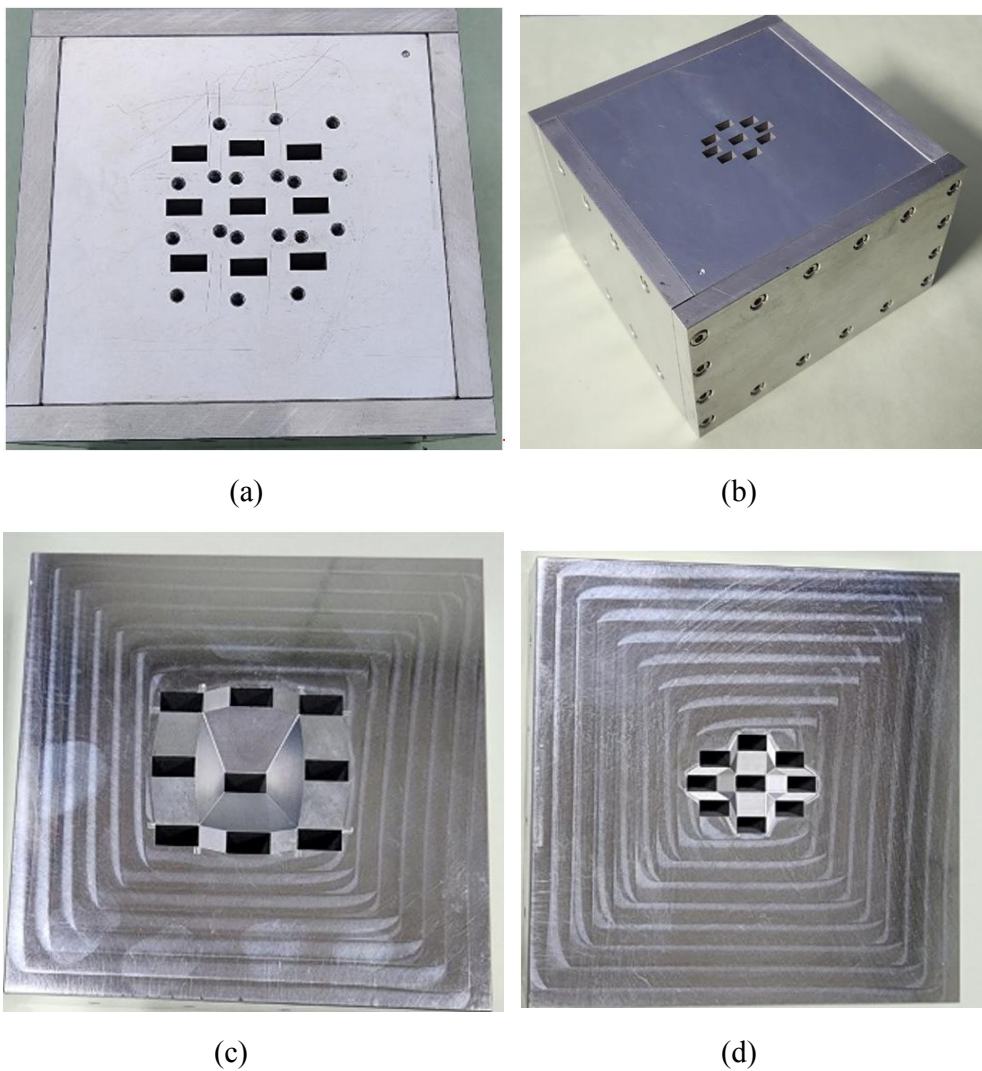


Figure 3.27 Fabrication of a volumetric Rotman lens, (a) outside view of feeding waveguide, (b) outside view of radiation aperture, (c) inside view of feeding waveguide, (d) inside view of radiating aperture

## 2. 입체형 Rotman 렌즈 배열 안테나 측정 및 성능 검증

3차원 Rotman 렌즈를 제작 및 조립 후 성능 검증을 위한 측정을 수행하였다. 측정할 파라미터는 반사계수와 방사 패턴이다. 특히, 방사 패턴은 조향각을 알 수 없기에 3차원 방사 패턴 측정이 가능한 특수한 시설이 필요하다. 국립전파연구원 전파시험인증센터의 다중 프로브 측정 시스템을 이용하면 3차원 방사 패턴 측정이 가능하다.

전달계수 및 위상 측정이 필요하지만, 현재 제작된 형상으로 측정할 수 없다. inner 렌즈 쪽 면에 RF 케이블을 연결하기 위한 변환기 장착을 해야 한다. 그러나, inner 렌즈 쪽 조립 부분은 변환기 장착이 고려되지 않아 체결할 수 없는 구조이며 결국은 focal arc에만 연결할 수 있기에 반사계수만 측정한다. 전달계수 및 위상 측정은 추후 제안한 모델에서 개선된 구조로 제작 후에 진행될 예정이다.

반사계수 측정 결과는 그림 3.29 그래프로 도시하였다. 입력 도파관  $F_{21}$ ,  $F_{22}$ , 2개의 도파관에 대해 반사계수를 측정하였다. focal arc의 도파관은 WR-34의 규격을 가지고 있어 반사계수가 거의 일치한다. 대표적인 중앙 입력,  $F_{22}$  과 그 옆의  $F_{21}$  을 측정하였다. 작동주파수 28 GHz에서 -10dB 이하 값을 확인하였다.



(a)

(b)

Figure 3.28 Photography of measuring reflection coefficient for a volumetric Rotman lens, (a) connecting the instrument, (b) convertor



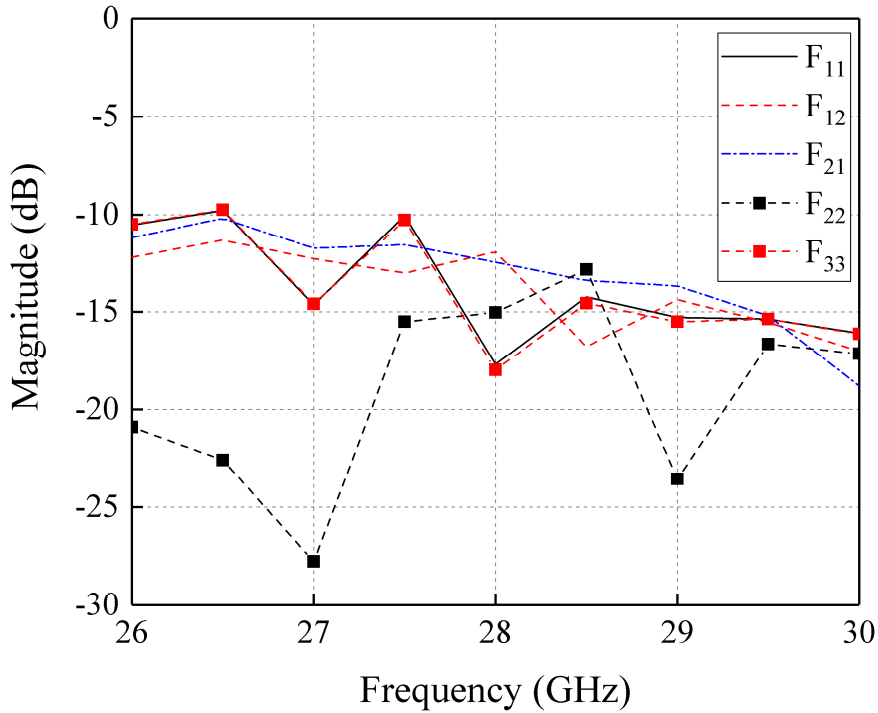


Figure 3.29 Measurement results of reflection coefficient for a volumetric Rotman lens

제작된 입체형 Rotman 렌즈의 방사 패턴을 측정하였고 측정 결과를 분석하였다. 그림 3.30과 같이 다중프로브 측정 시스템을 이용하였다. 입력포트는 수동적으로 포트마다 어댑터 위치를 변경해가며 총 9가지의 입력 도파관을 측정하였다.

측정 결과는 그림 3.31 및 3.32과 같이 도시화하였다. 2차원 및 3차원으로 각각 도시화했다. 또한 방사 패턴 분석 결과를 표 3.11에 정리하였다. 정중앙  $F_{22}$  의 기준으로 8개의 방사 패턴은 유사하게 대칭을 이룬다. 대각 포트,  $F_{11}$ ,  $F_{13}$ ,  $F_{31}$ ,  $F_{33}$  는 양각  $\pm 17^\circ$  및 고도각  $\pm 24^\circ$  조향된다. 시뮬레이션 결과값과 비교하면 양각은 약  $3^\circ$  , 고도각은 약  $5^\circ$  차이를 보인다. 종방향의 입력포트인  $F_{21}$ ,  $F_{23}$  은 각각  $-25^\circ$  ,  $26^\circ$  이며 실제 시뮬레이션과 오차는 4 deg이다. 횡방향의  $F_{12}$ ,  $F_{32}$  의 경우 오차  $3^\circ$  를 보인다. 정중앙의  $F_{22}$ 는 양각 및 고도각은 각각  $-5^\circ$  ,  $-2^\circ$  이며 정중앙에서 빔겨나가 조향된다. 이득은 9개의 포트에서 0 ~ 3dB로 오차를 확인하였다. 특히 중앙포트는 가장 큰 3.1 dB의 오차를 보인 실측값 5.9 dBi가 측정되었다.

정확한 오차 발생 이유를 확인하기 위해서는 모든 입력에 대한 출력의 산

란계수를 측정하여 위상 점검이 필요하다. 제작 구조상 변환기 장착이 불가능하여 위상 디버깅은 불가능하다. 그러나, 3차원 방사 패턴 측정을 통해 각각 다른 9개의 focal arc 입력 도파관을 통해 9개의 서로 다른 빔 조향각을 가진 방사 패턴을 확인하였다. 특히나 9개 입력포트는 중앙 포트  $F_{22}$ 을 기준으로 조향각이 대칭하였다. 이러한 측정 결과를 미루어 보았을 때 본 논문에서 제안한 입체형 Rotman 렌즈 구조로 3차원 빔포밍 구현이 성공적이었음을 입증했다.

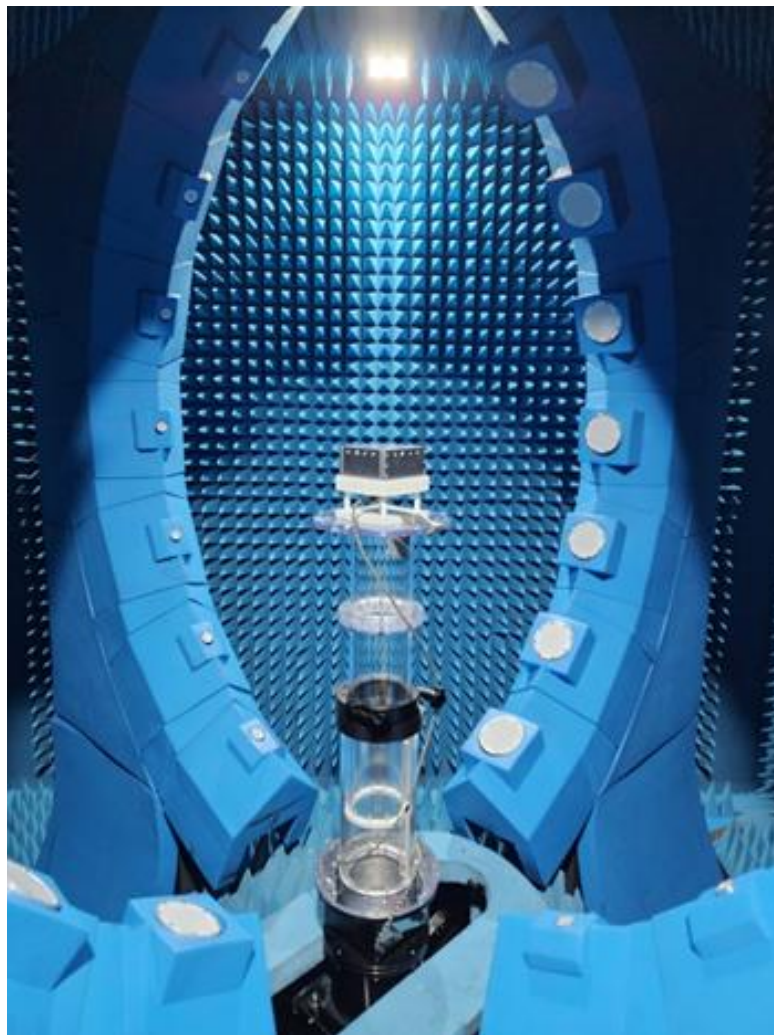


Figure 3.30 Photography of measuring three-dimensional radiation pattern for a volumetric Rotman lens

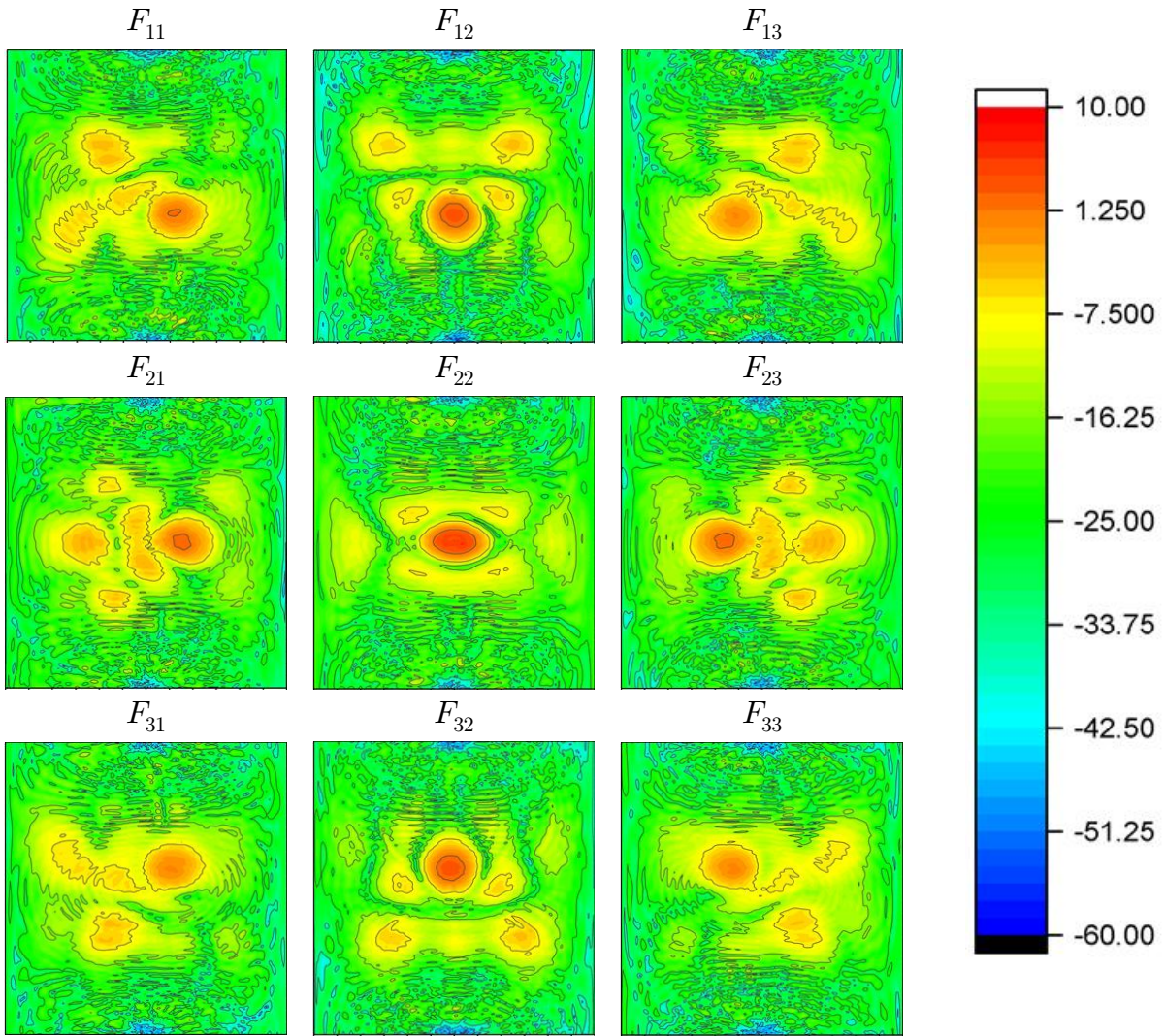


Figure 3.31 Measurement results of 2D-cut radiation pattern for a volumetric Rotman lens

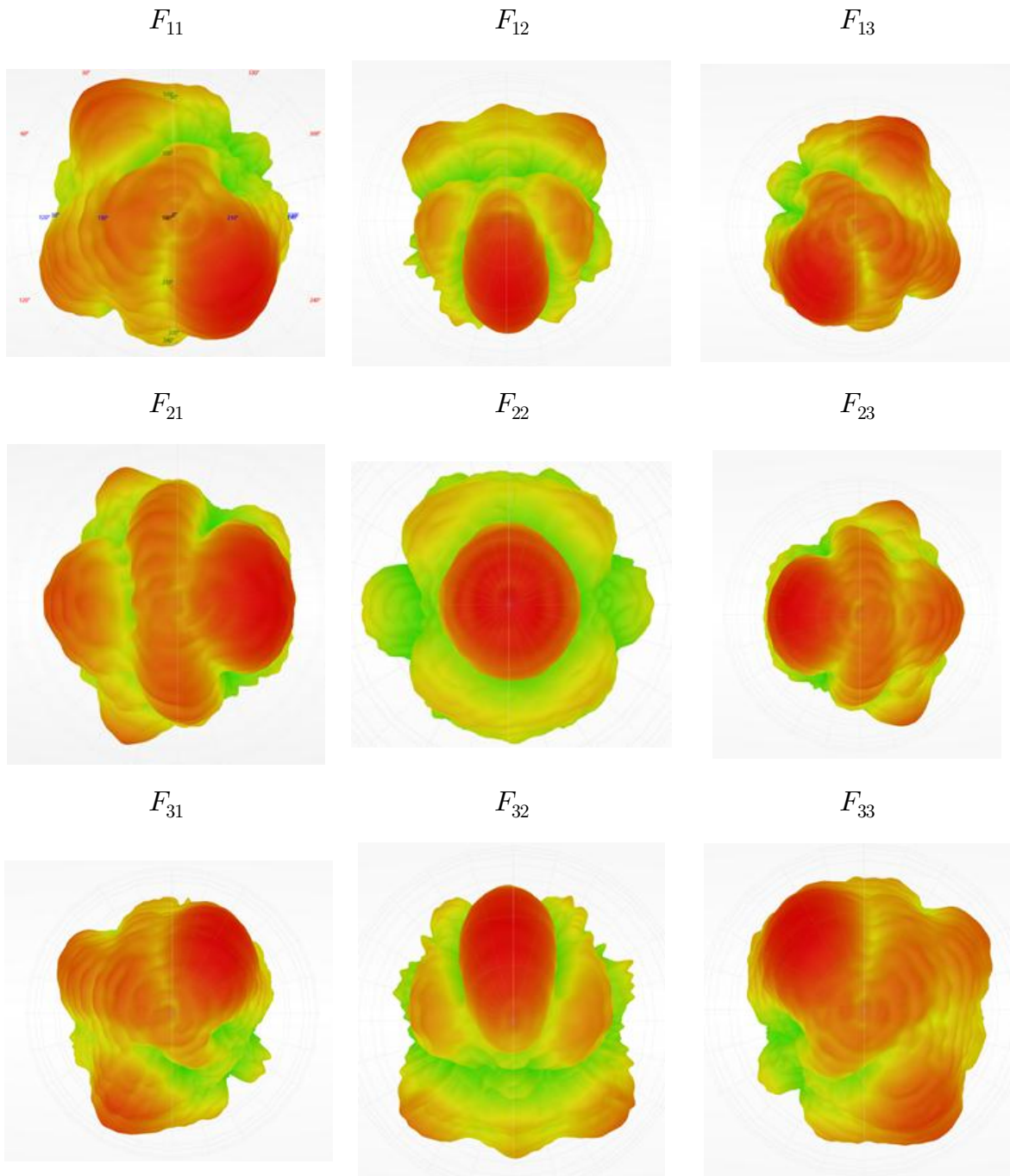


Figure 3.32 Measurement results of three-dimensional radiation pattern for a volumetric Rotman lens



Table 3.11 Measurement results of a tilt angle and gain for a volumetric Rotman lens

Beam	Phi(deg.)	Theta(deg.)	Gain(dBi)
1	17	-23	-0.1
2	0	-22	3.8
3	-17	-22	1.8
4	26	3	2.3
5	-5	-2	5.9
6	-25	-1	2.2
7	17	24	0.2
8	3	26	3.8
9	-15	24	0.3

제3장에서 적층식 설계 방법과 2절의 입체형 Rotman 렌즈의 시뮬레이션 및 제작과 측정 과정을 서술하였다. 설계과정에서 비교적 더 간단하고 시간 소모가 작은 것은 적층형 방식이다. 적층형 방식은 2개의 Rotman 렌즈의 설계를 해야 하지만 Phi각과 Theta각의 조향이 일치한다면 똑같은 Rotman 렌즈 2개를 적층하는 것도 가능하다. 그리고, 설계값 계산에 있어 입체형 Rotman 렌즈 설계보다 이점이 훨씬 크다. z축을 고려하지 않아도 되기에 계산 과정이 비교적 수월하다.

제작 과정에 있어서 서로 차별성이 뚜렷하다. 적층형 방식은 2개의 Rotman 렌즈를 이어서 결합하기에 길이가 2배로 길어진다. 이는 3차원 Rotman 렌즈가 길이가 적층형 방식의 절반의 길이를 가지고 이는 체적으로 2배 차이가 발생하기에 3차원 Rotman 렌즈 방식이 크기를 소형화하기에 우

위를 점한다.

제작 비용 측면에서는 3차원 Rotman 렌즈가 소요 금액이 더 많이 발생하였다. 금형 가공으로 맞춤형 작업이기 때문에 비용이 더 많이 발생한다. 그리고, TEM to TE11 모드용 변환 어댑터가 상당한 고가로 취급되기에 비용적 측면에서 고려할 것이 많아진다. 그에 반면, 적층형 방식은 기존의 대량 생산된 소모 부품으로 충분히 시스템을 구성할 수 있으므로 가격 측면에서 적층형 방식이 비교적 저가로 구성할 수 있다.

다음으로 측정된 값 중 조향각 및 이득을 중점으로 비교하였다. 3차원 Rotman 렌즈 방식은 Theta 조향각이 빔 1, 2, 3, 7, 8, 9 같이  $22^{\circ} \sim 26^{\circ}$  까지 일정하게 조향되었고 Phi 조향각은 대각 빔 1, 3, 7, 9 는  $15^{\circ} \sim 17^{\circ}$  에서 일정하고 면 빔 4, 6 에서  $25^{\circ}$ ,  $26^{\circ}$  로 조향한다. 중앙빔 5는 정 중앙인 Phi  $0^{\circ}$ , Theta  $0^{\circ}$ , 으로 조향되지 않고  $5^{\circ}$  및  $2^{\circ}$  틀어졌다. 적층형 Rotman 렌즈 방식은 Phi 각 조향이 3차원 Rotman 렌즈 방식에 비해 더 안정적이다. 빔 1, 3, 4, 6, 7, 9 와 같이 Phi 각이 일정하게  $17^{\circ}$  또는  $21^{\circ}$  로 조향되었다. 그에 반해 Theta 조향각은 3차원 Rotman 렌즈 방식이 더 안정적이었는데 적층형 Rotman 렌즈 방식은  $8^{\circ} \sim 30^{\circ}$  까지 조향된다. 특히 빔 7 같은 경우 Theta 각  $30^{\circ}$  로 오차 있는 각도가 발생하였다. 조향각 위주의 2개의 방식을 비교하자면, 3차원 Rotman 렌즈는 Theta 각, 즉, 고도각이 비교적 안정적으로 조향되며, 반대로 적층형 Rotman 렌즈 방식은 Phi 각, 즉, 방위각이 일정하게 조향됨을 확인하였다.

이득은 적층형 방식이 비교적 낮은 측정값을 보였는데, 이는 밀리미터파 주파수에서 큰 손실이 발생하기 때문이다. 특히 적층형 방식은 Rotman 렌즈를 2개로 구성하기 때문에 신호의 경로상 Rotman 렌즈 2개와 밀리미터파 케이블 및 어댑터에서 손실이 발생한다. 필요에 따라서는 증폭기 장착도 고려해야 하는 상황이 발생할 수 있다. 3차원 Rotman 렌즈는 구성요소를 최소화할 수 있기에 상대적으로 전력 손실을 감소시킬 수 있다. 안정적인 빔포밍 성능이 목표라면 3차원 Rotman 렌즈 제작을 고려하는 것이 옳다고 판단된다.

Table 3.12 Measurement results both a volumetric Rotman lens and two-stage Rotman lens

Beam (ID)	Three-dimensional Rotman lens			Integrated Rotman lens		
	Phi(deg.)	Theta(deg.)	Gain(dBi)	Phi(deg.)	Theta(deg.)	Gain(dBi)
1	17	-23	-0.1	17	-15	-6.9
2	0	-22	3.8	0	-8	-5.4
3	-17	-22	1.8	-21	-7	4.6
4	26	3	2.3	21	-1	4.2
5	-5	-2	5.9	0	0	5.1
6	-25	-1	2.2	-21	2	4.8
7	17	24	0.2	21	30	-1.1
8	3	26	3.8	0	10	-6.1
9	-15	24	0.3	-21	8	4.5

Table 3.13 Comparison with Rotman lens implemented of three-dimensional beamforming

Ref.	Technique	Center freq. (GHz)	Volume		Fab. cost	No. of beams	Scanning range (deg.)
[96]	SIW Array-aperture antenna	35	$2.0\lambda \times 3.9\lambda$ (17.73 × 33.37 mm <sup>2</sup> )	-	Expensive	13	±30
[98]	Waveguide array-aperture Antenna	38	$10.1\lambda \times 10.1\lambda$ (80.0 × 80.0 mm <sup>2</sup> )	-	Expensive	7	±30
[101]	Two-stage Rotman lens	28	First stage : $3\lambda$ Second stage : $2\lambda^*$	-	Medium	9	±30
This work	Two-stage	28	$14.5\lambda \times 6.7\lambda \times 33.8\lambda$ (155.0 × 72.0 × 362.0 mm <sup>3</sup> )	100.0%	Medium	9	±20
This work	Volumetric waveguide	28	$8.8\lambda \times 8.8\lambda \times 6.5\lambda$ (94.0 × 94.0 × 70.0 mm <sup>3</sup> )	15.3%	Medium	9	±26

\*No information overall width, length and height

## 제5장 결 론

본 논문에서 5G 밀리미터파 이동통신 서비스를 제공하기 위한 셀룰러 통신용 기지국 및 중계기 전용 3차원 빔포밍 안테나 설계를 제안하였다. 기존의 셀룰러 통신의 구역화된 셀 반경은 5G 밀리미터파 주파수 활용했을 때 현재의 인프라로서 커버하는 것은 불가능하다. 밀리미터파 주파수는 파장이 짧아 장거리 통신에 취약하며 장애물의 경로 손실이 크다. 해결 대책으로 셀을 더 많이 나누어 통신 용량을 늘리는 것이다. 특히 셀의 세분화는 각 구역 커버리지를 더욱 촘촘히 구축하는 것이며 이동통신 송신기와 통신 이용자 간의 통신 거리를 대폭 감소한다. 또한, 빔포밍 기술을 접목하여 더욱 효과적 통신 성능을 기여할 수 있다. 특히, 빔포밍 형성 각도가 다차원으로 구현할 수 있다면 소형 송신국 설치 장소가 폭이 넓어져 공간 활용의 유용성 폭이 더욱 넓어질 것이다.

기존의 대부분 빔포밍 기술은 아날로그 빔포밍에서 발전하여 신호를 디지털 처리하는 디지털 빔포밍, 그리고 더 나아가 아날로그와 디지털 기술을 장점을 채택한 하이브리드 빔포밍 기술로 발전해 왔다. 각 시스템에 장단점을 가지고 있다. 현재 밀리미터파 주파수를 사용하기에는 디지털 시스템이 적합하다. 그 이유는 밀리미터파의 짧은 파장으로 인하여 손실이 RF 케이블에서 전달하는 과정에서조차 크며 손실 저하 억제를 위해 기저대역, 즉 디지털 신호로 변환하는 것이다. 그럼에도 불구하고 FPGA, Mixer, Oscillator 등 비용 부담이 적지 않다. 전 디지털 빔포밍 시스템의 경우 각 방사소자 RF Chain을 구성해야 하므로 비용이 상당하다. 그에 반해, 아날로그 빔포밍 시스템은 한계의 RF Chain으로 모든 방사 소자들의 위상을 조절할 수 있어 비용적 측면에서 다른 시스템에 비해 우위를 점한다. 다만 제작된 이후 고정된 빔 스캔 폭, 저성능의 빔 스캔 해상도를 가지므로 초기 설계 목표를 구체적으로 결정해야 하는 단점이 있다.

5G NR FR2의 주파수 28 GHz 셀을 커버리지 위해서 기존보다 구축된 것보다 더욱 촘촘히 신규 인프라가 구축되어야 하며 중계기 및 펌토셀 장치는 대량 양산이 필요하다. 대량 양산 공정으로 기획된다면 당연히 아날로그 빔포밍의 시스템으로 탁월하다고 판단된다.

아날로그 빔포밍 시스템으로 3차원 빔포밍을 구현하기 위해서 Rotman 렌즈를 이용했다. Rotman 렌즈는 과거 1963년에 Rotman이 발명한 전파용 렌즈



장치이다. Focal-arc와 Inner-arc로 이루어지며 굴곡 및 사이 이격 거리를 주파수 파장 관점에서 설계하여 원하는 위치로 빔조향을 할 수 있게 위상을 조정해주는 장치이다. Rotman 렌즈는 작동주파수, 조향각  $\alpha$ , Rotman 렌즈 크기 변수  $F$ , 입력 및 출력 포트 개수 등 값에 의해 설계 형상이 결정된다.

일반적으로 단일 Rotman 렌즈는 한 개의 축의 조향각을 제어할 수 있다. 보통의 Rotman 렌즈 빔포밍 안테나는 2차원 평면 모양이며 입력 및 출력 포트는 서로 마주 보는 구조이다. 방사소자는 출력 포트에 연결되며 한 열로 구성되어 방사소자 배열은 1열로 결합한다. 그래서, 1열 빔포밍만 가능한 구조이기에 3차원 빔포밍을 위해 추가 설계가 필요하다.

본 논문에서 3차원 빔포밍을 구현하기 위해 2가지 설계 방법을 제안했다. 첫 번째는 서로 다른 2개의 Rotman 렌즈를 적층으로 쌓는 것, 두 번째는 3차원 형상의 일체화 된 Rotman 렌즈를 설계하는 것이다. 기존의 참고 문헌을 활용하여 설계를 계획하였다.

첫 번째의 적층형 방식은 3x3 Rotman 렌즈와 3x10 Rotman 렌즈를 결합하였고 빔 선택을 위하여 RF 스위치 및 전원 공급용 회로를 제작하였다. 2개의 Rotman 렌즈의 시뮬레이션을 수행하였고 목표 위상 차이를 만족하였다. 시뮬레이션 및 측정 결과 방사 패턴은 방위각 및 고도각에서  $20^\circ$  로 빔조향되었고 시뮬레이션 결과와 측정 결과가 유사하였다.

두 번째의 3차원 일체화된 Rotman 렌즈를 설계하기 위하여 새로운 설계식을 제안했다. 제안한 설계식으로 3차원 Rotman 렌즈의 대각방향 Focal-arc 및 Inner-arc 설계를 완료하였고 시뮬레이션 및 제작과 측정을 수행하였다. 측정 결과 서로 다른 방향으로 지향성 및 대칭성 가진 9개 빔포밍을 형성되었음을 검증하였다. 각 빔의 고도각은  $-17^\circ$ ,  $+17^\circ$ , 방위각은  $-22^\circ$ ,  $+26^\circ$  등으로 빔 조향되었다.

세계적으로 아직 5G NR FR2 이동통신 서비스는 아직 제공할 수 있을 정도의 기술력을 갖추지 못하였다. 가장 큰 이유로 밀리미터파 대역의 짧은 파장으로 인해 높은 공간 손실과 좁은 커버리지가 큰 영향을 끼친 것이라 판단되고 있다. 앞으로 다가올 콘텐츠들은 고품질 및 높은 데이터양이 요구됨에 따라 높은 통신 트래픽을 감당할 수 있는 밀리미터파 대역 연구가 꼭 필요하다. 본 논문에서 제안한 3차원 빔포밍 안테나는 최적화된 소형구조이고, 저가용으로 구성이 가능한 아날로그 빔포밍 방식으로 구현하였다. 비록

디지털 빔포밍과 같이 자유로운 빔 틸팅이 아니라 빔 자체의 유연성 특징을 가지지 못하였으나 수많은 펄스셀만큼의 공간을 위한 압도적인 물량과 대량 생산으로는 본 논문에서 제안한 3차원 Rotman 렌즈와 같이 최적화된 안테나가 더 적합하다고 판단된다.

## REFERENCE

- [1] T. Alexander, W. Mazurczyk, A. Mishra and A. Perotti, "Mobile Communications and Networks," in IEEE Communications Magazine, vol. 57, no. 1, pp. 42-42, January 2019, doi: 10.1109/MCOM.2019.8613272.
- [2] ITU-T Focus Group IMT-2020 Deliverables, 2017.
- [3] National Radio Research Agency(RRA), Development of Rapid Measurement of Antenna with New Technology, 2022.
- [4] X. Qiao, P. Ren, G. Nan, L. Liu, S. Dustdar and J. Chen, "Mobile web augmented reality in 5G and beyond: Challenges, opportunities, and future directions," in China Communications, vol. 16, no. 9, pp. 141-154, Sept. 2019, doi: 10.23919/JCC.2019.09.010.
- [5] Z. Lin, X. Du, H. -H. Chen, B. Ai, Z. Chen and D. Wu, "Millimeter-Wave Propagation Modeling and Measurements for 5G Mobile Networks," in IEEE Wireless Communications, vol. 26, no. 1, pp. 72-77, February 2019, doi: 10.1109/MWC.2019.1800035.
- [6] Rec. ITU-R P.1238-11, Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 450 GHz, vol. 2021 P-Series, 2021.
- [7] Rec. ITU-R P.2108-1, Prediction of clutter loss, vol. 2021 P-Series, 2021.
- [8] Rec. ITU-R P.2109-1, Prediction of building entry loss, vol. 2019 P-Series, 2019.
- [9] Rec. ITU-R P.2346-4, Compilation of measurement data relating to building entry loss, vol. 2021 P-Series, 2021.
- [10] ITU-D, Setting the scene for 5G: opportunities and challenges, 2018
- [11] H. -T. Kim et al., "A 28-GHz CMOS Direct Conversion Transceiver With Packaged 2x4 Antenna Array for 5G Cellular System," in IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 53, no. 5, pp. 1245-1259, May 2018, doi: 10.1109/JSSC.2018.2817606.
- [12] Nokia, <https://www.nokia.com/about-us/newsroom/articles/5g-advanced-explained>, 2018
- [13] Chen, X., Qi, Q, "Convergence of Energy, Communication and Computation in B5G Cellular Internet of Things. In: Convergence of Energy, Communication and Computation in B5G Cellular Internet of Things," SpringerBriefs in Electrical and Computer Engineering. Springer, Singapore, 2020.
- [14] M. Yavuz et al., "Interference management and performance analysis of UMTS/HSPA+ femtocells," in IEEE Communications Magazine, vol. 47, no. 9, pp. 102-109, September 2009, doi: 10.1109/MCOM.2009.5277462.

- [15] D. N. Knisely, T. Yoshizawa and F. Favichia, "Standardization of femtocells in 3GPP," in IEEE Communications Magazine, vol. 47, no. 9, pp. 68-75, September 2009, doi: 10.1109/MCOM.2009.5277458.
- [16] W. Roh et al., "Millimeter-wave beamforming as an enabling technology for 5G cellular communications: theoretical feasibility and prototype results," in IEEE Communications Magazine, vol. 52, no. 2, pp. 106-113, February 2014, doi: 10.1109/MCOM.2014.6736750.
- [17] Y. Huo, X. Dong and W. Xu, "5G Cellular User Equipment: From Theory to Practical Hardware Design," in IEEE Access, vol. 5, pp. 13992-14010, 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2727550.
- [18] Widyasmoro, I. Surahmat, T. K. Hariadi and F. D. Putra, "Comparative Performance Analysis of 4G and 5G Cellular Network Technology in Indonesia: Case Study in the City of Jakarta," 2022 2nd International Conference on Electronic and Electrical Engineering and Intelligent System (ICE3IS), Yogyakarta, Indonesia, 2022, pp. 158-163, doi: 10.1109/ICE3IS56585.2022.10010105.
- [19] J. Park, S. Y. Lee, Y. Kim, J. Lee and W. Hong, "Hybrid Antenna Module Concept for 28 GHz 5G Beamsteering Cellular Devices," 2018 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on 5G Hardware and System Technologies (IMWS-5G), Dublin, Ireland, 2018, pp. 1-3, doi: 10.1109/IMWS-5G.2018.8484662.
- [20] Balanis, Antenna theory: analysis and design, John wiley & sons, 2016.
- [21] Warren L. Stutzman, Antenna theory and design, third edition, John wiley & sons, 2012.
- [22] JIZ Chen, B. Lee and WB Wu, "Performance evaluation of BER for an Massive-MIMO with M-ary PSK scheme over Three-Dimension correlated channel," Computers & Electrical Engineering, Vol 65, pp 196-206, 2018.
- [23] M. Milosavljevic, S. Sofianos, P. Kourtessis and J. M. Senior, "Self-organized cooperative 5G RANs with intelligent optical backhubs for mobile cloud computing," 2013 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC), Budapest, Hungary, 2013, pp. 900-904, doi: 10.1109/ICCW.2013.6649362.
- [24] Gans, Joshua S, King, Stephen P and Wright, Julian, Wireless communications, third edition, 2005.
- [25] J. Wang et al., "3D Beamforming Technologies and Field Trials in 5G Massive MIMO Systems," in IEEE Open Journal of Vehicular Technology, vol. 1, pp. 362-371, 2020,

doi: 10.1109/OJVT.2020.3030774.

- [26] S. N. Diggavi, N. al-dhahir, A. staniulis and A. R. Calderbank, "Great expectations: the value of spatial diversity in wireless networks," in Proceedings of the IEEE, vol. 92, no. 2, pp. 219-270, Feb. 2004, doi: 10.1109/JPROC.2003.821914.
- [27] W.F. King, and D. Bechert, "On the sources of wayside noise generated by high-speed trains," Journal of Sound and Vibration, Vol 66, Issue 3, pp 311-332, 1979, [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(79\)90848-4](https://doi.org/10.1016/0022-460X(79)90848-4).
- [28] B. Barsikow, W.F. King, E. Pfizenmaier, "Wheel/rail noise generated by a high-speed train investigated with a line array of microphones," Journal of Sound and Vibration, Vol. 118, Issue 1, pp 99-122, 1987.
- [29] B. Barsikow, W.F. King, "On removing the Doppler frequency shift from array measurements of railway noise," Journal of Sound and Vibration, Vol. 120, Issue 1, pp 190-196, 1988.
- [30] Y. Takano, Kterada, E Aizawa, A. Lida, and H. Fujita, "Development of a 2-dimensional microphone array measurement system for noise sources of fast moving vehicles," Proceedings of Inter Noise 92, pp 1175-1178, 1992.
- [31] Y. Takano, "X-Shaped Two-Dimensional Microphone Array System for Measuring Noise-Source Distribution on Moving Vehicles," JSME International Journal Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing, Vol. 41, Issue 1, Pages 46-50, 1998.
- [32] Dolph, and L. Charles, "A Current Distribution for Broadside Arrays Which Optimizes the Relationship between Beam Width and Side-Lobe Level." Proceedings of the IRE 34 pp. 335-348, 1946.
- [33] G. P. Howell, A. J. Bradley, M. A. McCormick, and J. D. Brown, "De-Dopplerization and acoustic imaging of aircraft flyover noise measurements," Journal of Sound and Vibration, Vol. 105, Issue 1, pp 151-167, 1986.
- [34] U. Michel, J. Helbig, B. Barsikow, and M. Hellmig, "Flyover noise measurements on landing aircraft with a microphone array," Proceedings 4th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 1998.
- [35] J.-F. Piet, U. Michel, and P. Bohning, "Localization of the Acoustic Sources of the A340 with a Large Phased Microphone Array During Flight Tests," Proceedings of 8th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2002.
- [36] S. Pieter and R. Stoker, "Determination of Absolute Contributions of Aircraft Noise

- Components using Fly-Over Array Measurements,” 10.2514/6.2004-2958.
- [37] M. Ulf and Barsikow, B. Bohning, P. and Hellmig, M, “Localisation of moving sound sources with phased microphone arrays,” 2004.
- [38] M. Ulf and B. Barsikow. “Localisation of sound sources on moving vehicles with microphone arrays.” 2003.
- [39] W. Rotman and R. Turner, "Wide-angle microwave lens for line source applications," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 11, no. 6, pp. 623-632, November 1963, doi: 10.1109/TAP.1963.1138114.
- [40] J. Shelton, "Focusing characteristics of symmetrically configured bootlace lenses," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 26, no. 4, pp. 513-518, July 1978, doi: 10.1109/TAP.1978.1141883.
- [41] N. Amitay and M. Gans, "Narrow multibeam satellite ground station antenna employing a linear array with a geosynchronous arc coverage of 60° Part I: Theory," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 30, no. 6, pp. 1063-1067, November 1982, doi: 10.1109/TAP.1982.1142928.
- [42] T. Katagi, S. Mano and S. Sato, "An improved design method of Rotman lens antennas," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 32, no. 5, pp. 524-527, May 1984, doi: 10.1109/TAP.1984.1143353.
- [43] H. Southall and D. McGrath, "An experimental completely overlapped subarray antenna," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 34, no. 4, pp. 465-474, April 1986, doi: 10.1109/TAP.1986.1143839.
- [44] D. R. Gagnon, "Procedure for correct refocusing of the Rotman lens according to Snell's law," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 37, no. 3, pp. 390-392, March 1989, doi: 10.1109/8.18736.
- [45] R. C. Hansen, "Design trades for Rotman lenses," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 39, no. 4, pp. 464-472, April 1991, doi: 10.1109/8.81458.
- [46] S. Arnon, S. Rotman and N. S. Kopeika, "Optimum transmitter optics aperture for satellite optical communication," in IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 34, no. 2, pp. 590-596, April 1998, doi: 10.1109/7.670339.
- [47] K. K. Chan and S. K. Rao, "Design of a Rotman lens feed network to generate a hexagonal lattice of multiple beams," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 50, no. 8, pp. 1099-1108, Aug. 2002, doi: 10.1109/TAP.2002.801292.
- [48] P. K. Singhal, P. C. Sharma and R. D. Gupta, "Rotman lens with equal height of array

- and feed contours," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 51, no. 8, pp. 2048-2056, Aug. 2003, doi: 10.1109/TAP.2003.814742.
- [49] J. Schoebel et al., "Design considerations and technology assessment of phased-array antenna systems with RF MEMS for automotive radar applications," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 53, no. 6, pp. 1968-1975, June 2005, doi: 10.1109/TMTT.2005.848838.
- [50] J. Kim, C. Cho and F. S. Barnes, "Dielectric slab Rotman lens," in IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 15, no. 5, pp. 348-350, May 2005, doi: 10.1109/LMWC.2005.847706.
- [51] J. Kim, C. Cho and F. S. Barnes, "Dielectric slab Rotman lens for microwave/millimeter-wave applications," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 53, no. 8, pp. 2622-2627, Aug. 2005, doi: 10.1109/TMTT.2005.852750.
- [52] J. Dong and A. I. Zaghoul, "Hybrid Ray Tracing Method for Microwave Lens Simulation," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 59, no. 10, pp. 3786-3796, Oct. 2011, doi: 10.1109/TAP.2011.2163762.
- [53] N. J. G. Fonseca, "A Focal Curve Design Method for Rotman Lenses With Wider Angular Scanning Range," in IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 16, pp. 54-57, 2017, doi: 10.1109/LAWP.2016.2554281.
- [54] Sang-Gyu Kim, P. Zepeda and Kai Chang, "Piezoelectric transducer controlled multiple beam phased array using microstrip Rotman lens," in IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 15, no. 4, pp. 247-249, April 2005, doi: 10.1109/LMWC.2005.845728.
- [55] J. Kim, C. S. Park and S. Min, "TM<sub>0</sub> Mode Surface Wave Excited Dielectric Slab Rotman Lens," in IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 6, pp. 584-587, 2007, doi: 10.1109/LAWP.2007.911388.
- [56] L. Schulwitz and A. Mortazawi, "A New Low Loss Rotman Lens Design Using a Graded Dielectric Substrate," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 56, no. 12, pp. 2734-2741, Dec. 2008, doi: 10.1109/TMTT.2008.2006802.
- [57] S. Lee et al., "A V-Band Beam-Steering Antenna on a Thin-Film Substrate With a Flip-Chip Interconnection," in IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 18, no. 4, pp. 287-289, April 2008, doi: 10.1109/LMWC.2008.918966.

- [58] W. Lee, J. Kim, C. S. Cho and Y. J. Yoon, "Beamforming Lens Antenna on a High Resistivity Silicon Wafer for 60 GHz WPAN," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 58, no. 3, pp. 706-713, March 2010, doi: 10.1109/TAP.2009.2039331.
- [59] O. Kilic and S. J. Weiss, "Rotman lens applications for the US Army: A review of history, present, and future," in *URSI Radio Science Bulletin*, vol. 2010, no. 332, pp. 10-23, June 2010, doi: 10.23919/URSIRSB.2010.7909283.
- [60] A. Lambrecht, S. Beer and T. Zwick, "True-Time-Delay Beamforming With a Rotman-Lens for Ultrawideband Antenna Systems," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 58, no. 10, pp. 3189-3195, Oct. 2010, doi: 10.1109/TAP.2010.2052558.
- [61] W. Lee, J. Kim and Y. J. Yoon, "Compact Two-Layer Rotman Lens-Fed Microstrip Antenna Array at 24 GHz," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 59, no. 2, pp. 460-466, Feb. 2011, doi: 10.1109/TAP.2010.2096380.
- [62] I. Ju et al., "V-Band Beam-Steering ASK Transmitter and Receiver Using BCB-Based System-on-Package Technology on Silicon Mother Board," in *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 21, no. 11, pp. 619-621, Nov. 2011, doi: 10.1109/LMWC.2011.2168601.
- [63] S. Christie et al., "Rotman Lens-Based Retrodirective Array," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 60, no. 3, pp. 1343-1351, March 2012, doi: 10.1109/TAP.2011.2180347.
- [64] Y. Zhang, Y. Ding and V. Fusco, "Sidelobe Modulation Scrambling Transmitter Using Fourier Rotman Lens," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 61, no. 7, pp. 3900-3904, July 2013, doi: 10.1109/TAP.2013.2254453.
- [65] J. Kim, W. Lee and Y. J. Yoon, "Asymmetric Ground Rotman Lens for Multilayer Packages," in *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 24, no. 5, pp. 303-305, May 2014, doi: 10.1109/LMWC.2014.2306894.
- [66] M. Yu, D. Zhao, Y. Jin and B. -Z. Wang, "Near-Field Image Restoration for Rotman Lens by Localized Angle-Time Spread Function-Based Filtering Method," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 5, pp. 2353-2358, May 2015, doi: 10.1109/TAP.2015.2408362.
- [67] A. Attaran, R. Rashidzadeh and A. Kouki, "60 GHz Low Phase Error Rotman Lens Combined With Wideband Microstrip Antenna Array Using LTCC Technology," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 64, no. 12, pp. 5172-5180, Dec. 2016,



doi: 10.1109/TAP.2016.2618479.

- [68] C. Xu et al., "Free-Space Radio Communication Employing OAM Multiplexing Based on Rotman Lens," in *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 26, no. 9, pp. 738-740, Sept. 2016, doi: 10.1109/LMWC.2016.2597262.
- [69] R. Rotman, M. Tur and L. Yaron, "True Time Delay in Phased Arrays," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 104, no. 3, pp. 504-518, March 2016, doi: 10.1109/JPROC.2016.2515122.
- [70] Y. Gao, M. Khaliel, F. Zheng and T. Kaiser, "Rotman Lens Based Hybrid Analog-Digital Beamforming in Massive MIMO Systems: Array Architectures, Beam Selection Algorithms and Experiments," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 10, pp. 9134-9148, Oct. 2017, doi: 10.1109/TVT.2017.2714693.
- [71] A. Darvazehban, O. Manoochehri, M. A. Salari, P. Dehkoda and A. Tavakoli, "Ultra-Wideband Scanning Antenna Array With Rotman Lens," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 65, no. 9, pp. 3435-3442, Sept. 2017, doi: 10.1109/TMTT.2017.2666810.
- [72] Y. Liu, H. Yang, Z. Jin, F. Zhao and J. Zhu, "A Multibeam Cylindrically Conformal Slot Array Antenna Based on a Modified Rotman Lens," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 7, pp. 3441-3452, July 2018, doi: 10.1109/TAP.2018.2829816.
- [73] T. M. Nguyen, T. K. Vo Dai and O. Kilic, "Design of a 360° Scanning Circularly Symmetric Polygon Lens," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 9, pp. 4458-4465, Sept. 2018, doi: 10.1109/TAP.2018.2845441.
- [74] X. Wang, A. Akbarzadeh, L. Zou and C. Caloz, "Flexible-Resolution, Arbitrary-Input, and Tunable Rotman Lens Spectrum Decomposer," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 8, pp. 3936-3947, Aug. 2018, doi: 10.1109/TAP.2018.2839896.
- [75] X. Wang, A. Akbarzadeh, L. Zou and C. Caloz, "Real-Time Spectrum Sniffer for Cognitive Radio Based on Rotman Lens Spectrum Decomposer," in *IEEE Access*, vol. 6, pp. 52366-52373, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2870562.
- [76] A. Chepala, H. Tataria and V. Fusco, "Beamspace Modulated Circular Array," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 67, no. 5, pp. 3496-3499, May 2019, doi: 10.1109/TAP.2019.2901092.
- [77] E. Tolin, O. Litschke, S. Bruni and F. Vipiana, "Compact Extended Scan Range

- Antenna Array Based on Rotman Lens," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 67, no. 12, pp. 7356-7367, Dec. 2019, doi: 10.1109/TAP.2019.2935086.
- [78] Q. Liang, B. Sun, G. Zhou, J. Zhao and G. Zhang, "Design of Compact Rotman Lens Using Truncated Ports With Energy Distribution Slots," in IEEE Access, vol. 7, pp. 120766-120773, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2925000.
- [79] X. Bai et al., "Rotman Lens-Fed Fabry-Perot Resonator Antennas for Generating Converged Multi-Mode OAM Beams," in IEEE Access, vol. 7, pp. 105768-105775, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2932199.
- [80] P. Keshavarzian, M. Okoniewski and J. Nielsen, "Active Phase-Conjugating Rotman Lens With Reflection Amplifiers for Backscattering Enhancement," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 68, no. 1, pp. 405-413, Jan. 2020, doi: 10.1109/TMTT.2019.2939819.
- [81] M. Heino, C. Icheln, J. Haarla and K. Haneda, "PCB-Based Design of a Beamsteerable Array With High-Gain Antennas and a Rotman Lens at 28 GHz," in IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 19, no. 10, pp. 1754-1758, Oct. 2020, doi: 10.1109/LAWP.2020.3017129.
- [82] D. Wu, Z. Zhang, G. Fu, X. Shi, L. Yang and X. Li, "Rotman Lens-Fed Antenna for Generating Multiple Orbital Angular Momentum (OAM) Modes With Gain Enhancement," in IEEE Access, vol. 8, pp. 29891-29900, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2971563.
- [83] Y. Yu, H. Luyen and N. Behdad, "A Wideband Millimeter-Wave Rotman Lens Multibeam Array Using Substrate Integrated Coaxial Line (SICL) Technology," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 69, no. 11, pp. 7532-7542, Nov. 2021, doi: 10.1109/TAP.2021.3090518.
- [84] S. K. Karki et al., "Beam-Reconfigurable Antenna Based on Vector Modulator and Rotman Lens on LTCC," in IEEE Access, vol. 9, pp. 52872-52882, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3070037.
- [85] A. Ibbotson, D. I. L. de Villiers and K. D. Palmer, "A Defocused Rotman Lens With Reduced Conjugate Port Coupling," in IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 23, no. 8, pp. 394-396, Aug. 2013, doi: 10.1109/LMWC.2013.2268455.
- [86] N. Jastram and D. S. Filipovic, "Design of a Wideband Millimeter Wave Micromachined Rotman Lens," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 63, no. 6, pp. 2790-2796, June 2015, doi: 10.1109/TAP.2015.2414475.

- [87] K. Tekkouk, M. Ettore, L. Le Coq and R. Sauleau, "Multibeam SIW Slotted Waveguide Antenna System Fed by a Compact Dual-Layer Rotman Lens," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 64, no. 2, pp. 504-514, Feb. 2016, doi: 10.1109/TAP.2015.2499752.
- [88] Z. -C. Tsai and H. -T. Chou, "Waveguide-type transmitarray antennas with a concave surface profile analogous to rotman lens for spatial feeding to radiate collinear multi-beams," 2017 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), Phuket, Thailand, 2017, pp. 1-2, doi: 10.1109/ISANP.2017.8229033.
- [89] K. Tekkouk, M. Ettore and R. Sauleau, "SIW Rotman Lens Antenna With Ridged Delay Lines and Reduced Footprint," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 66, no. 6, pp. 3136-3144, June 2018, doi: 10.1109/TMTT.2018.2825374.
- [90] Y. J. Guo, M. Ansari, R. W. Ziolkowski and N. J. G. Fonseca, "Quasi-Optical Multi-Beam Antenna Technologies for B5G and 6G mmWave and THz Networks: A Review," in *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2, pp. 807-830, 2021, doi: 10.1109/OJAP.2021.3093622.
- [91] Y. Gao, M. Khaliel, F. Zheng and T. Kaiser, "Rotman Lens Based Hybrid Analog Digital Beamforming in Massive MIMO Systems: Array Architectures, Beam Selection Algorithms and Experiments," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 10, pp. 9134-9148, Oct. 2017, doi: 10.1109/TVT.2017.2714693.
- [92] M. A. B. Abbasi, V. F. Fusco, H. Tataria, and M. Matthaiou, "Lensbased beamformer for low-complexity millimeter-wave cellular systems," 2019. [Online]. Available: arXiv:1902.08443.
- [93] K. V. Hoel, S. Kristoffersen, N. Jastram and D. S. Filipovic, "3D printed Rotman lens," 2017 47th European Microwave Conference (EuMC), Nuremberg, Germany, 2017, pp. 125-128, doi: 10.23919/EuMC.2017.8230815.
- [94] J. Remez, A. Segal and R. Shansi, "Dual-polarized wideband widescan multibeam antenna system from tapered slotline elements array," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 4, pp. 293-296, 2005, doi: 10.1109/LAWP.2005.852996.
- [95] Y. J. Cheng et al., "Substrate Integrated Waveguide (SIW) Rotman lens and Its Ka-Band Multibeam Array Antenna Applications," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 56, no. 8, pp. 2504-2513, Aug. 2008, doi: 10.1109/TAP.2008.927567.

- [96] J. Remez, E. Zeierman and R. Zohar, "Dual-Polarized Tapered Slot-Line Antenna Array Fed by Rotman Lens Air-Filled Ridge-Port Design," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 8, pp. 847-851, 2009, doi: 10.1109/LAWP.2009.2025063.
- [97] Y. F. Wu, Y. J. Cheng and Z. X. Huang, "Ka-Band Near-Field-Focused 2-D Steering Antenna Array With a Focused Rotman Lens," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 10, pp. 5204-5213, Oct. 2018, doi: 10.1109/TAP.2018.2856113.
- [98] H. -T. Chou and Z. -C. Tsai, "Near-Field Focus Radiation of Multibeam Phased Array of Antennas Realized by Using Modified Rotman Lens Beamformer," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 12, pp. 6618-6628, Dec. 2018, doi: 10.1109/TAP.2018.2874677.
- [99] H. -T. Chou, Z. -C. Tsai and S. Panigrahi, "Tri-Focal Configuration of Three-Dimensional Metallic Waveguide-Array Lens Antennas of Rotman Lens Concept for Multi-Beam Applications," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 144524-144535, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2945047.
- [100] H. -T. Chou and D. Torrungrueng, "Development of 2-D Generalized Tri-Focal Rotman Lens Beamforming Network to Excite Conformal Phased Arrays of Antennas for General Near/Far-Field Multi-Beam Radiations," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 49176-49188, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3068831.
- [101] N. -C. Liu, C. -C. Tien, C. -Y. Chang, H. -W. Ling, C. -W. Chiu and J. -H. Tarng, "Millimeter-Wave 2-D Beam-Switchable and Scalable Phased Antenna Array," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 69, no. 12, pp. 8997-9002, Dec. 2021, doi: 10.1109/TAP.2021.3098583.
- [102] 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," 2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Krakow, Poland, 2019, pp. 1-4.
- [103] G. Charis and N. Showme, "Beamforming in Wireless Communication Standards: A Survey," *Indian Journal of Science and Technology*, vol. 10, Issue 5, pp. 1-5, 2017.
- [104] S. N. diggavi, N. AL-dhahir, A. Stamoulis and A. R. Calderbank, "Great expectations: the value of spatial diversity in wireless networks," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 92, no. 2, pp. 219-270, Feb. 2004, doi: 10.1109/JPROC.2003.821914.
- [105] S. Montebugnoli, G. Bianchi, A. Cattani, F. Ghelfi, Maccaferri, and A. Perini, "Some notes on beamforming," *The Medicina IRA-SKA Engineering Group*, IRA N. 353/04.

- [106] Y. Zou, W. Rave and G. Fettweis, "Analog beamsteering for flexible hybrid beamforming design in mmwave communications," 2016 European Conference on Networks and Communications (EuCNC), Athens, Greece, 2016, pp. 94-99, doi: 10.1109/EuCNC.2016.7561012.
- [107] Z. C. Phyo and A. Taparugssanagorn, "Hybrid analog-digital downlink beamforming for massive MIMO system with uniform and non-uniform linear arrays," 2016 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Chiang Mai, Thailand, 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/ECTICon.2016.7561395.
- [108] Telecommunications Technology Association(TTA), Dictionary of Information Communication, <http://terms.tta.or.kr/dictionary/searchFirstList.do>
- [109] R. Rajashekar and L. Hanzo, "Hybrid Beamforming in mm-Wave MIMO Systems Having a Finite Input Alphabet," in IEEE Transactions on Communications, vol. 64, no. 8, pp. 3337-3349, Aug. 2016, doi: 10.1109/TCOMM.2016.2580671.
- [110] H. Gent, "The Bootlace Aerial," Ray. Radar Establishment Journal, pp. 47-57, 1957.
- [111] 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 Display Device of Beam Receiving," Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers, vol. 53, no. 5. The Institute of Electronics Engineers of Korea, pp. 37-46, 2016.
- [112] D. Kim, E. Jang, and S. Oh, "Implementation of a Three-Dimensional Analog Beamforming System Using Stacked Rotman lenses at 28 GHz" The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, vol. 32, no. 11, pp 943-950, 2021

## Research Achievements

### < SCI >

**Dong-Woo Kim**, Jae-Beom Jin and Soon-Soo Oh, "Empirical Analysis of Building Entry Loss From Outside of Office Building With Large Lobby Into a Basement at 1.5 and 3 GHz," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 21, no. 1, pp. 173-177, 2022.

**Dong-Woo Kim**, Kang-Wook Kim, Young-Bae Jung, Jong-Hyuk Lim, and Soon-Soo Oh, "Measurement of relative phase for 5G NR digitally modulated signal using cumulative distribution function," *Electronics Letters*. vol. 58, 2021.

**Dong-Woo Kim**, Soon-Soo Oh, and Wook-Ki Park, "Vehicular Bidirectional Internal Antenna with Asymmetric Gain Characteristics to Compensate for Backward Link Path Loss due to Interior Obstacles," *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2021, Article ID 5370526, 9 pages, 2021.

Soon-Soo Oh, Jae-Won Choi, **Dong-Woo Kim**, Young-Chul Lee, and Byung-Lok Cho, "Comparison of 0.75-24-GHz Reach Distances and Ratios Using Propagation Path Loss Measurements from Urban and Rural Line-of-Sight Environments," *Journal of electromagnetic engineering and science*, vol. 21, pp. 1-7, 2021.

Soon-Soo Oh, **Dong-Woo Kim**, Se-Woong Na, Jin-Dae Kim, and Wook-Ki Park, "Design of a Bidirectional Antenna inside a Vehicle and Measurement of Power Link for Vehicle-to-Vehicle Communication at 5.8 GHz," *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2018, Article ID 6306273, 6 pages, 2018.

**Dong-Woo Kim** and Soon-Soo Oh, "Design of a Coupler with Three Reconfigurable Output Ports and a Beamwidth Reconfigurable Antenna," *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2017, Article ID

3490171, 9 pages, 2017.

Wook-Ki Park, Hyun-Yong Lim, **Dong-Woo Kim**, and Soon-soo Oh, "A Frequency-Tunable SRR-Adopted Two-Pole Waveguide Filter Operating below the Cutoff Frequency," *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2017, Article ID 3915709, 6 pages, 2017.

< KCI >

**Dong-Woo Kim** and Soon-Soo Oh, "Propagation Model Combination of Building Entry Loss and Clutter Loss in Suburban Environment with Low-Rise High-Density Buildings at 3 and 24 GHz," *The Journal of The Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 17, no. 2, pp 237-244, 2022.

Srabonty Soily, **Dong-Woo Kim**, and Soon-Soo Oh, "Use of Sleeve Baluns to Improve the Radiation Pattern of a Broadband Biconical," *The Journal of The Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 17, no. 4, pp 563-570, 2022.

**Dong-Woo Kim**, Eon-Hak Jang, and Soon-Soo Oh, "Implementation of a Three-Dimensional Analog Beamforming System Using Stacked Rotman lenses at 28 GHz" *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 32, no. 11, pp 943-950, 2021

**Dong-Woo Kim** and Soon-Soo Oh, "Verification and Analysis for Recommendation ITU-R P.526, P.1546, P.1812 of Propagation Model Loaded in Spectrum Management Intelligent System," *The Journal of the Korea institute of electronic communication sciences*, vol. 16, no. 2, pp. 247-254, 2021.

**Dong-Woo Kim** and Soon-Soo Oh, "Verification on the Reduction Technique of Measurement Time of Total Radiated Power (TRP) by Using Effective Isotropic Radiated Power (EIRP) in 5G Frequency Band," *The Journal of the*



*Korea institute of electronic communication sciences*, vol. 15, no. 5, pp. 835-840, 2020.

Jae-Won Choi, **Dong-Woo Kim**, and Soon-Soo Oh, “Analysis of Radio Attenuation Characteristics over 1 to 6 GHz for the Ground Material and Antenna Height in Roadway Open Environment,” *The Journal of the Korea institute of electronic communication sciences*, vol. 15, no. 3, pp. 397-404, 2020.

**Dong-Woo Kim**, Taek-Heon Kim, and Soon-Soo Oh, “Simulation and Analysis of a High-Power 2.85-GHz TE<sub>10</sub>-TEM Mode Converter,” *The Journal Of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol.30, no.7, pp. 542-548, 2019.

**Dong-Woo Kim**, Se-Woong Na, Jin-Dae Kim, and Soon-Soo Oh, “Analysis of antenna characteristics against distance and angle between antenna and glass at 5.8 GHz,” *Journal of Advanced Marine Engineering and Technology*, vol. 41, No. 9, pp. 896-901, 2017.