creative commons
COMMONS DEED

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

dCollection

공학석사 학위논문

# 새로운 급전 기술 기반 소형화 된 배열 안테나에 관한 연구

# A Study on Compact Array Antennas Based on Novel Excitation Techniques

2023 년 2 월

서울대학교 대학원

전기 · 정보 공학부

이우준

# 새로운 급전 기술 기반 소형화 된 배열 안테나에 관한 연구

지도교수 오 정 석

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함
2023 년 2 월

서울대학교 대학원
전기·정보 공학부
이 우 준

이우준의 공학석사 학위논문을 인준함
2023 년 2 월

위 원 장 남 상 욱 (인)

부위원장 오 정 석 (인)

위 원 유 선 규 (인)

# 초 록

본 논문은 5G 주파수 대역에서 동작하는 광대역/이중대역 단일/이중 편파 안테나 소자/배열 4종 및 6G 주파수의 후보군인 X 대역에서 동작하는 버랙터로 빔 조향이 가능한 고 개구면 효율을 갖는 직렬-급전 안테나 배열 1종을 담고 있다.

본 논문의 5G 안테나 배열은 개구면 급전, 45도 경사 이중편파 급전 및 비아(접지) 벽을 사용하여 배열 안테나 설계를 용이하게 하였다. 비아(접지) 벽 구조를 최대한 활용하기 위하여 비아(접지) 벽이 로딩된 쿼터-웨이브 패치-패치의 상호 공진 구조를 활용하여 대역 특성을 잡았으며, 더하여 개구면-스트립 라인의 상호 공진을 활용하여 삼중 공진 구조를 가지고 있다. 더하여 테이퍼 된 개구면 급전 구조를 활용하여 광대역 특성을 가지며, 압축된 급전 구조를 위하여 차동 급전 기반 개구면 급전 구조를 새롭게 제안하였

추가적으로 논문이 제안하는 6G 안테나 배열은 물리적으로 작은 구조, 고 개구면 효율, 빔조향이 가능한 특성을 가지고 있다. 안테나 소자의 초소화를 위해 쿼터-웨이브 패치가 활용되었으며 버랙터가 로딩됨으로써 더욱더 초소화 된다. 압축된 급전 구조를 위해 직렬급전, 오프셋 RF 급전 구조가 사용되었고, 버랙터의 바이어스 값에 따라 안테나 소자의 방사 위상이 달라지는 것을 활용하여 빔 조향이 되었다. 본 논문이 제안하는 정재파 기반 직렬 급전 배열은 기존의 빔조향 가능한 리키-웨이브 안테나 배열보다 높은 개구면 효율을 가진다.

본 논문이 제안하는 개구면 급전에서의 차동 급전 구조, 안테나 대역 특성을 향상하는 비아(접지) 벽이 로딩된 쿼터-웨이브 패치 - 패치의 상호 공진, 직렬급전에서의 임피던스 매칭 기법, 압축된 DC-RF 급전 구조는 PCB 기반 마이크로스트립 안테나 설계의

차후 표준이 될 수 있을 만큼 일반적인 설계가 될 것으로 예상된다.

**주요어 : 차동급전, 이중편파, 직렬급전 안테나 배열, 광대역/이중대역 마이크로스트립 안테나, 고-개구면 효율**
**학 번 : 2021-21733**

# 목 차


제 1 장 서론 ····· 1

제 1 절 배경 ····· 1

1. 5G 안테나 배열 설계 배경 ····· 1

1. 6G 통신을 위한 안테나 배열 설계 배경 ····· 2

제 2 장 5G 광대역/이중대역 단일/이중 편파 안테나 소자/배열 ····· 4

제 1 절 배열 설계 기법 ····· 4

1. 개구면 급전 구조 ····· 4

2. 45도 경사 이중편파를 갖는 배열 ····· 4

3. 비아(접지) 벽 구조 ····· 6

제 2 절 삼중 공진 구조 ····· 7

1. 패치 공진 ····· 7

2. 쿼터웨이브 패치-패치 상호 공진 ····· 8

3. 개구면-라인 상호 공진 ····· 8

4. 삼중 공진을 갖는 방사체 ····· 11

5. 패치-적층 패치 상호 공진 ····· 11

6. 비아(접지) 벽으로 이루어진 공동 구조 공진 ····· 14

7. 설계된 방사체에 대한 고찰 ····· 14

제 3 절 이중 편파 배열 ····· 15

1. 기존 이중 편파 개구면 급전 구조 ····· 15

2. 차동 급전 ····· 16

3. 발런 결합 구조 및 공간 결합 구조 ····· 17

제 4 절 측정 및 결과 ····· 18

1. 측정 결과 ····· 18

2. 문헌과의 비교 ····· 19
제 3 장 6G 통신을 위한 빔 조향이 가능한 고 개구면 효율을 갖는 직접 급전 배열 ····· 21
제 1 절 소자 설계 ····· 21
1. 쿼터웨이브 패치 ····· 21
2. 버랙터와의 결합 ····· 21
3. 가변 방사 위상 ····· 22
제 2 절 소형화 된 DC/RF 급전 구조 ····· 23
1. RF 쵸크를 활용한 DC 급전 ····· 23
2. 오프셋 RF 급전 ····· 23
제 3 절 빔조향 가능한 배열 ····· 24
1. 직렬급전 배열 임피던스 매칭 기법 ····· 24
2. 빔 조향 기법 ····· 24
3. 기존 빔 조향 기법과의 차별성 ····· 25
제 4 절 측정 및 결과 ····· 26
1. 측정 결과 ····· 26
2. 문헌과의 비교 ····· 29
제 4 장 결론 ····· 31
제 1 절 결론 ····· 31
1. 결론 ····· 31
2. 추후 연구 방향 ····· 31
참고문헌 ····· 33
Abstract ····· 37

# 표 목 차

[표 2-1] Ka 대역 광대역 안테나 기존 문헌과의 비교 ····· 19
[표 3-1] 설계된 안테나의 빔 조향각에 따른 바이어스 값과 실측된 개구면 효율 ····· 29
[표 3-2] 기존 직렬 급전 액티브/패시브 안테나 문헌과 본 안테나의 비교 ··· 29
[표 3-2] 기존 고-개구면 효율 액티브 안테나 문헌과 본 안테나의 비교 ··· 30

# 그 림 목 차

[그림 1-1] 6G 통신을 위한 소형화된 안테나 설계의 필요성 · 2
[그림 2-1] 스트립라인과 방사체 간의 개구면 급전 구조 단면도 ··· 4
[그림 2-2] 45도 경사 이중 편파를 갖는 배열의 각 소자의 편파 ···· 5
[그림 2-3] 이중 편파 안테나 배열의 독립된 소자의 S(1, 1)과 배열에서의 한 포트의 S(1, 1) ····· 5
[그림 2-4] 포트 간 고립도를 향상하기 위한 비아(접지) 벽 구조 ··· 6
[그림 2-5] [그림 2-2]에서의 각 포트 간 고립도 ····· 6
[그림 2-6] 패치 공진의 방사체에서의 E-field ····· 7
[그림 2-7] 쿼터웨이브 패치-패치 상호 공진의 위상에 따른 E-field ··· 8
[그림 2-8] 개구면-라인 상호 공진의 방사체에서의 E-field와 급전부에서의 E-field ····· 8
[그림 2-9] 이중 편파 소자에서의 통상적인 개구면 급전과 태이퍼드 급전의 비교··· 9
[그림 2-10] 이중대역 이중 편파 안테나 배열의 반사 계수 ···· 10
[그림 2-11] 광대역 이중 편파 안테나 배열의 반사 계수 ····· 10
[그림 2-12] 광대역 단일 편파 안테나 소자 ····· 11

[그림 2-13] 광대역 단일 편파 안테나 소자의 반사 계수 ····· 11
[그림 2-14] 적층 패치 안테나의 패치-적층패치 상호 공진 E-field ···· 12
[그림 2-15] 적층 패치 안테나를 옆에서 본 단면에서의 E-field 분포 ···· 12
[그림 2-16] 적층 패치 안테나의 패치-적층패치 공진에서의 E-plane 방사 패턴 ····· 13
[그림 2-17] 광대역/이중대역 이중 편파 안테나 배열의 설계 측면도 ···· 13
[그림 2-18] 비아(접지) 벽으로 이루어진 공동 구조의 TE 210 모드 공진 ··· 14
[그림 2-19] 설계된 방사체에 대한 이해 ····· 15
[그림 2-20] 차등 급전 기술이 적용된 개구면 급전 구조 ····· 16
[그림 2-21] 발런이 결합된 광대역 이중 편파 안테나 배열 ··· 17
[그림 2-22] 공간 결합을 위한 이중대역 이중 편파 안테나 배열 ···· 17
[그림 2-23] [그림 2-12]의 설계된 안테나의 S(1, 1) ····· 18
[그림 2-24] [그림 2-20]의 설계된 안테나의 S(1, 1) ····· 18
[그림 2-25] [그림 2-20]의 설계된 안테나의 S(2, 2) ····· 19
[그림 3-1] 통상 X-band 패치와 쿼터웨이브 패치 ····· 21
[그림 3-2] 버랙터가 결합된 쿼터웨이브 안테나의 후면도 ····· 21
[그림 3-3] 버랙터가 결합된 쿼터웨이브 안테나의 캐패시턴스에 따른 E-field 분포 (좌: 0.12 pF, 우: 0.65 pF) ····· 22
[그림 3-4] 캐패시턴스에 따른 방사 위상 변화 ····· 23
[그림 3-5] 통상적인 DC/RF 급전과 오프셋 RF 급전을 이용하여 소형화된 DC/RF 급전 ····· 23
[그림 3-6] 다중 반사 구조를 이용한 임피던스 매칭 ····· 24
[그림 3-7] 빔이 30도 방향으로 조향되는 e-field 분포 ····· 25
[그림 3-8] 본 연구에서 제안하는 빔 조향 기법과 기존 빔 조향 기법과의 비교 (좌: 기존의 기법들, 우: 본 연구 기법) ····· 25
[그림 3-9] 제작된 안테나 배열 ····· 26
[그림 3-10] 안테나 소자의 방사 진폭과 위상 측정 셋업 ····· 27

[그림 3-11] 바이어스의 변화에 따른 안테나 소자의 임피던스 변화 …… 27
[그림 3-12] 제작된 안테나의 -60도부터 60도까지 빔 조향 시 방사 패턴 측정 …… 28
[그림 3-13] 제작된 안테나의 빔 조향 시 임피던스 특성 …… 28

# 제 1 장 서론

## 제 1 절 배경

### 1.1.1 5G 안테나 배열 설계 배경

5G 주파수 대역은 n257 대역(26.5 GHz ~ 29.5 GHz), n258 대역(24.25 GHz ~ 27.5 GHz), n259 대역(39.5 GHz ~ 43.5 GHz), n260 대역(37.0 GHz ~ 40.0 GHz), n261 대역(27.5 GHz ~ 28.35 GHz)으로서, 이를 지원하기 위한 마이크로스트립 안테나는 필수적으로 광대역/이중대역 동작을 지원해야 한다. 또한, 높은 편파 간 격리도, 커버리지 향상을 위한 배열 설계, 채널 수 증가를 위한 이중 편파 구조가 필수적이다. 2018년 이후에 스마트폰에 실장될 수 있는 다양한 안테나가 학계, 산업계에 보고되었으며 각 문헌의 광대역/이중대역, 높은 편파 간 격리도, 배열 설계, 이중 편파 구조를 위한 독창적인 구조를 우선 살펴보고자 한다.

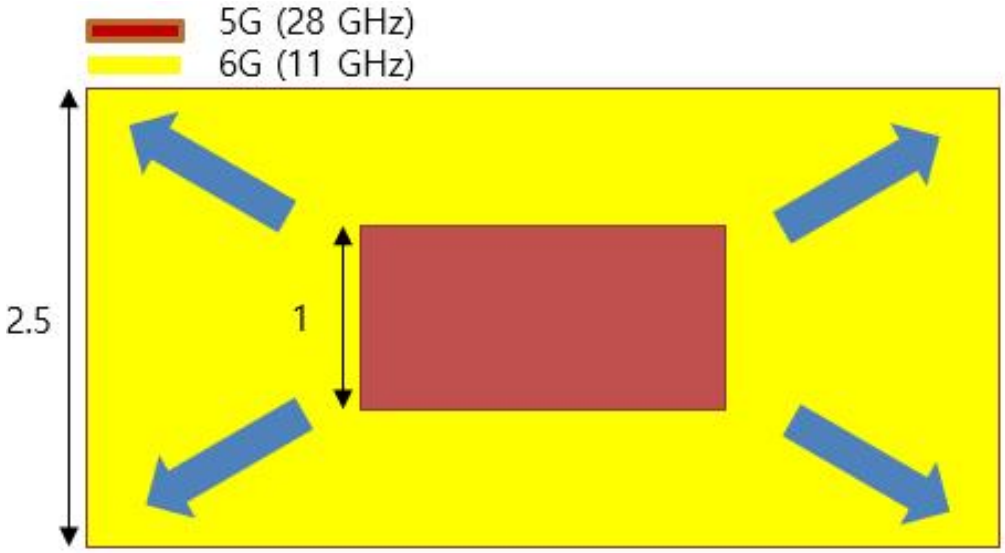
[1] 에서는 직접 프로브 급전된 패치가 방사체로서 채택되었으며, 안테나 소자 간 격리도를 향상하기 위한 비아(접지) 벽이 보고되었다. 퀄컴의 안테나는 이중대역을 지원하기 위하여 2017년에는 기생 링, 4개의 기생 판이 결합된 패치를 방사체를 채택하는 것이 특징이다[2]. 애플의 안테나는 이중대역을 지원하기 위하여 28 GHz 대역 안테나 배열, 39 GHz 대역 안테나 배열이 겹쳐진 것이 특징이다[3]. [4]의 안테나에서는 이중대역을 지원하기 위하여 간접 급전 패치가 방사체로서 채택되었으며, 대역폭 향상을 위하여 안테나의 리액턴스를 조절할 수 있는 다층형 임피던스 표면이 방사체와 결합 되었으며, 추가적으로 빔 커버리지 향상을 위하여 다이폴 또한 설계되고 결합되었다.

앞선 안테나들을 다음과 같은 점에서 개선점이 필요하다. 1) 급전 구조와 방사체 구조가 격리되어 있지 않아 배열 설계 시 배열 내 소자의 임피던스 특성이 매우 차이 난다. 2) 대역폭이 충분히 넓지 않아 5G 전 대역을 지원하는데 무리가 있다. 3) 편파 간 격리도가 충분히 크

지 않다.

본 논문에서는 위에서 언급한 안테나들의 장점을 취합함과 동시에, 단점을 보완하기 위해 1) 방사체와 급전 구조가 격리되어 있는 개구면 급전 구조를 채택하였으며, 2) 삼중 공진 구조를 갖는 방사체를 새롭게 설계하며, 3) 압축된 급전 구조를 위해 차동 급전 구조를 채택하였다.

### 1.1.2 6G 통신을 위한 안테나 배열 설계 배경




[그림 1-1] 6G 통신을 위한 소형화된 안테나 설계의 필요성

[5]에 따르면, 6G 주파수 대역은 7-24 GHz가 될 가능성이 높다. 앞서 언급한 5G 주파수 대역보다 저주파 대역으로서, [그림 1-1]과 같이 통상적인 안테나 설계 기법으로는 안테나의 크기가 6 ~ 7배가 될 것으로 예상된다. 하지만, 스마트폰 실장 공간이 이에 상응하여 늘어나지는 않을 것으로 예상되며, 따라서 소형화된 안테나 설계 기법이 필요하다. 또한 5G 통신과 같이 커버리지 향상을 위하여 개구면 효율이 높은 빔조향이 가능한 배열 설계가 필요할 것으로 예상된다.

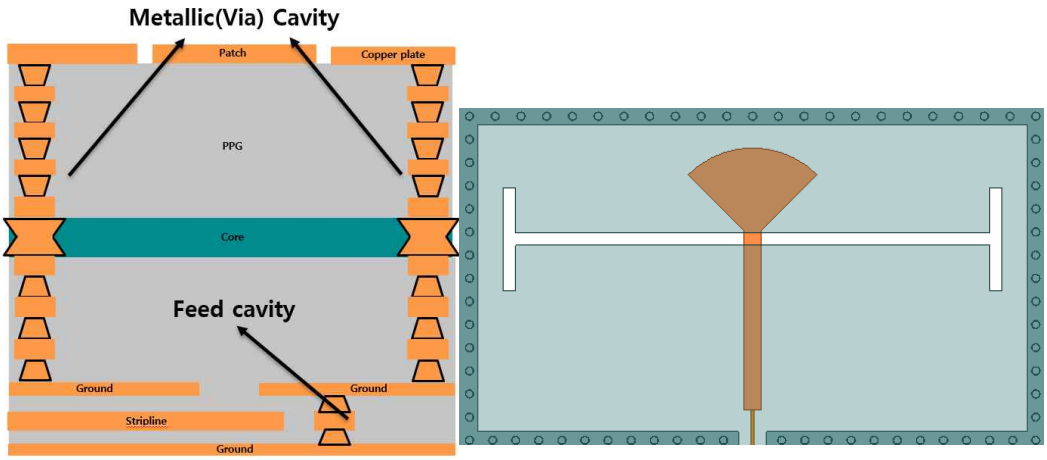
본 논문에서는, 빔포밍 IC가 아닌 버랙터를 패치 안테나에 직접적으로 로딩함으로써 빔조향이 가능한 소형화 된 싱글 채널 직렬 급전 안테나 배열을 제안한다. 본 안테나는 리키-웨이브 안테나 배열이 아닌

기존의 직렬급전 정재파 배열을 채택하여 크기가 작은 동시에 높은 개구면 효율을 가지며, 동시에 버랙터를 이용하여 빔조향이 가능하다. 이를 위한 압축된 DC/RF 급전 구조가 설계되었다.

# 제 2 장 5G 광대역/이중대역 단일/이중 편파 안테나 소자/배열

## 제 1 절 배열 설계 기법

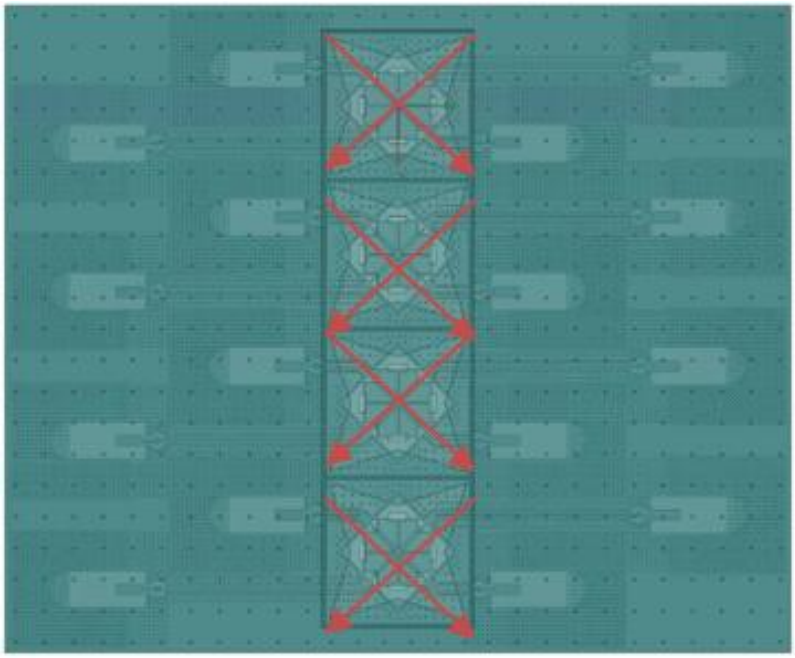
### 2.1.1. 개구면 급전 구조



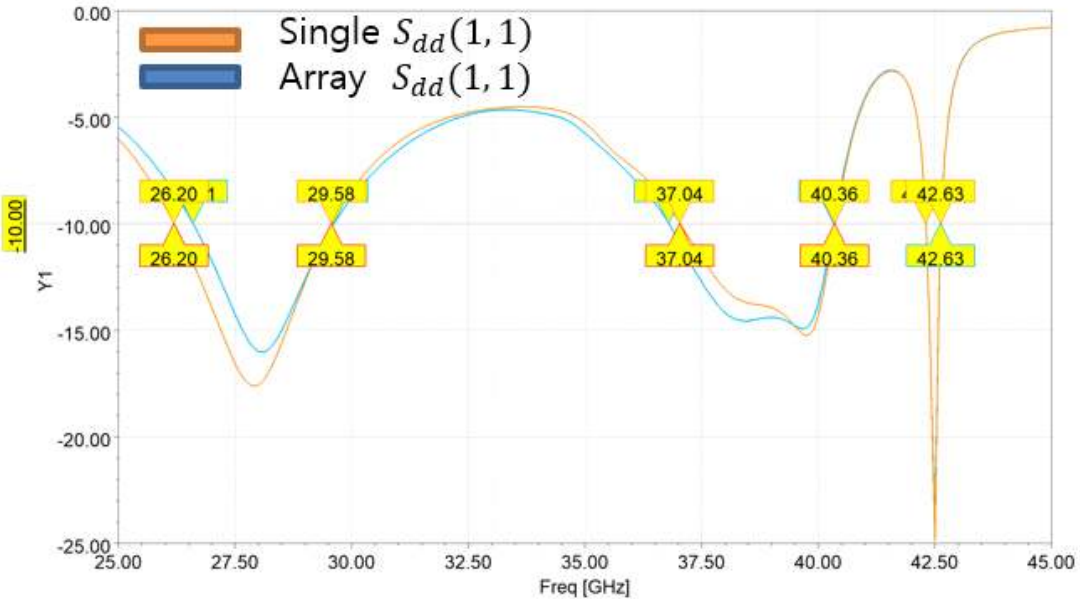

[그림 2-1] 스트립라인과 방사체 간의 개구면 급전 구조 단면도

[그림 2-1]은 본 논문에서 단일 편파를 갖는 안테나의 급전 구조로 사용하는 50옴 스트립라인과 방사체 간의 커플링 구조의 단면도를 나타낸다. 50옴 스트립라인은 광대역 매칭을 위해 [6]과 같이 radial stub로 종단되었으며, [7]과 같이 커플링 향상을 위해 h-모양 슬랏이 사용되었다. 개구면 급전 구조의 장점으로는, 급전 라인과 방사체 안테나가 그라운드로 차단이 되어, 배열 설계에서 상호 커플링으로 인한 임피던스가 틀어지는 현상이 덜하다는 장점이 있다.

### 2.1.2. 45도 경사 이중편파를 갖는 배열



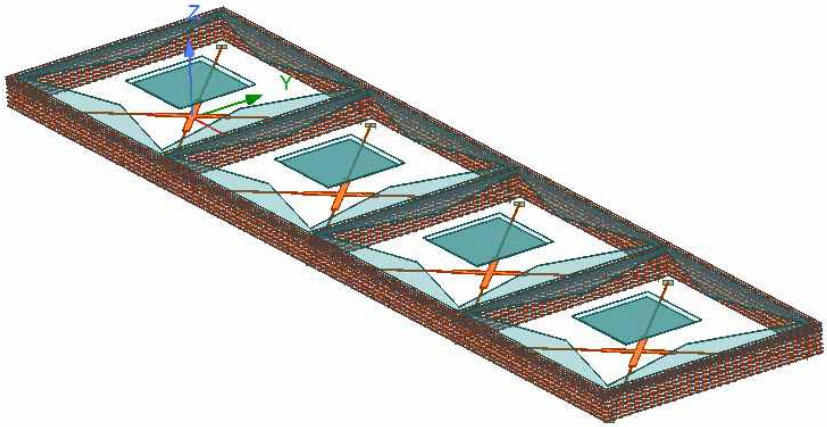
[그림 2-2] 45도 경사 이중 편파를 갖는 배열의 각 소자의 편파



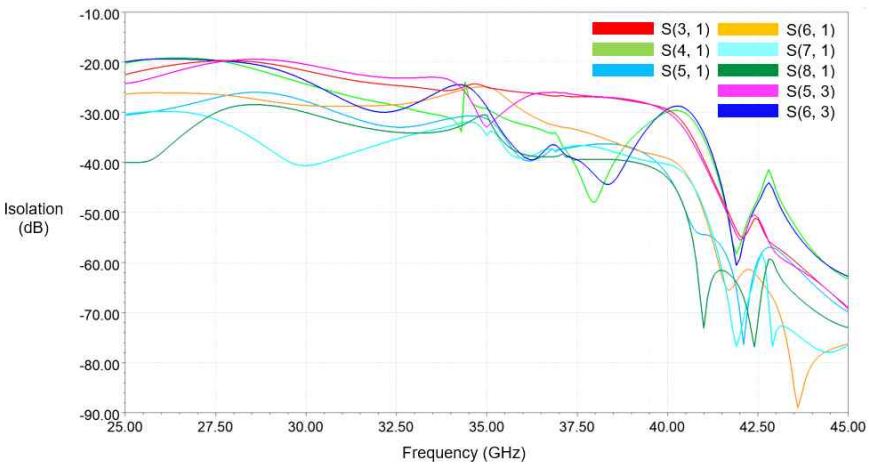

[그림 2-3] 이중 편파 안테나 배열의 독립된 소자의 S(1, 1)과 배열에서의 한 포트의 S(1, 1)

[그림 2-2]는 본 논문에서 제시하는 이중 편파를 갖는 안테나 배열의 총 8개 편파를 나타내는 그림이다. 본 설계도와 같이 각 안테나의 소자가 45도 경사 편파를 갖게 설계하면 각기 다른 편파 간 고립도를 최적화하기 용이해진다. [그림 2-3]은 독립된 소자의 반사 계수와 배열 환경에서의 한 포트의 반사 계수를 나타내는 그림인데, 개구면 급전 구조를 채택하여 두 개의 차이가 크지 않은 것을 볼 수 있다.

### 2.1.3. 비아(접지) 벽 구조




[그림 2-4] 포트 간 고립도를 향상하기 위한 비아(접지) 벽 구조

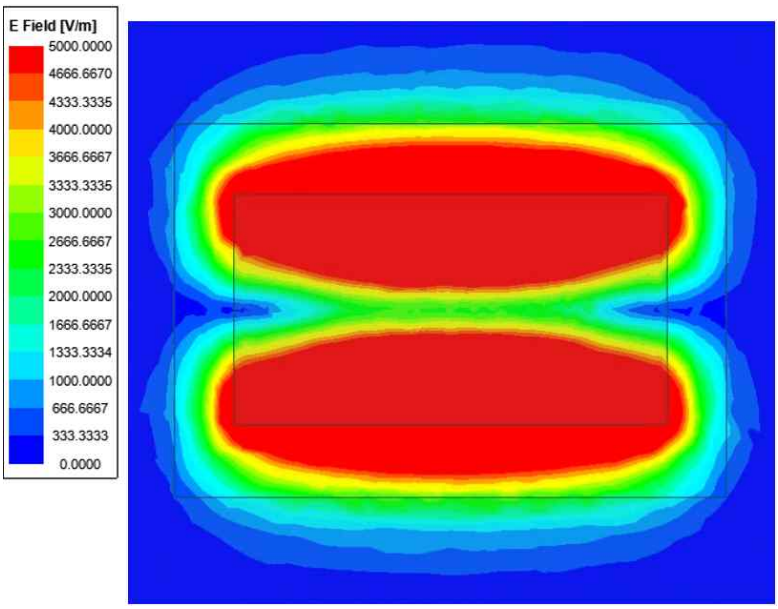



[그림 2-5] [그림 2-2]에서의 각 포트 간 고립도

[그림 2-4]는 본 논문에서 제시하는 이중 편파를 갖는 안테나 배열 간 고립도를 향상하기 위한 비아(접지) 벽 구조를 나타내는 그림이다. 본 구조는 [1]에서도 제시된 바가 있으며, 본 구조를 채택하였을 때 포트 간 고립도는 [그림 2-5]와 같다. 동작 주파수 대역에서 고립도가 -19 dB 이하인 것을 확인할 수 있다. 추후 제시하는 방사체에서 본 비아(접지) 벽은 안테나 포트 간 고립도 향상 뿐만 아니라 쿼터웨이브 패치-패치 상호 공진에서 사용된다.

## 제 2 절 삼중 공진 구조

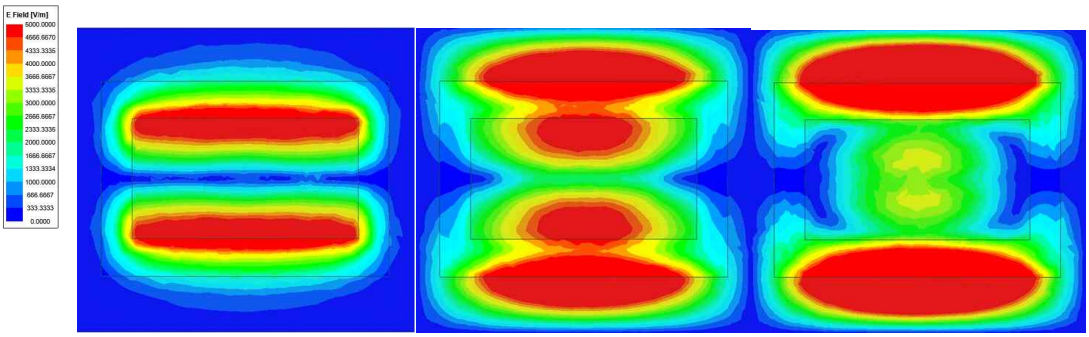
### 2.2.1. 패치 공진




[그림 2-6] 패치 공진을 나타내는 E-field

[그림 2-6]은 [그림 2-1]과 같이 방사체가 설계되었을 때 방사체가 갖는 3개의 공진 중 첫 번째 공진인 패치 공진을 나타내는 E-field 플랏이다. 본 공진은 패치 안테나의 가장 기본적인 모드인 TM 010 모드인 반파장 공진이다.

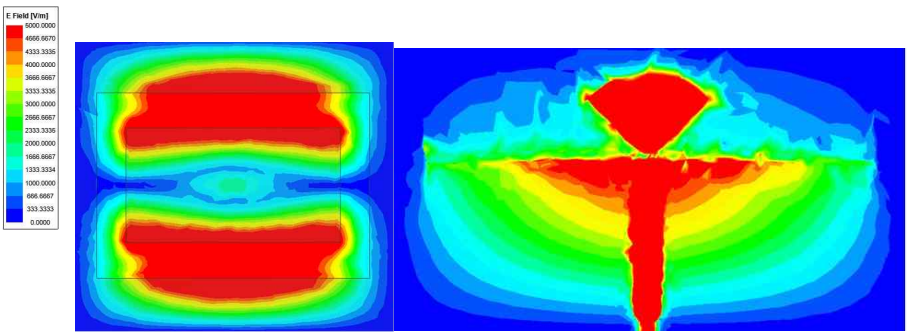
### 2.2.2. 쿼터웨이브 패치-패치 상호 공진




[그림 2-7] 쿼터웨이브 패치-패치 상호 공진의 위상에 따른 E-field

[그림 2-7]은 [그림 2-1]과 같이 방사체가 설계되었을 때 방사체가 갖는 3개의 공진 중 두 번째 공진인 쿼터웨이브 패치-패치 상호 공진의 위상에 따른 E-field 변화이다. 패치 안테나에 같은 평면에 기생 패치를 로딩함으로써 광대역 특성을 갖는 안테나 설계 기법은 [7]에서 제시된 바가 있다. 본 논문에서는 이를 더 발전시켜 [1]에서 제시한 비아(접지)-벽이 로딩된 쿼터웨이브-패치를 패치와 같은 평면에 로딩시켜, 하나의 공진을 더 가지게 하였다. 이러한 설계 기법은 본 논문에서 처음 제시된 기법이다.

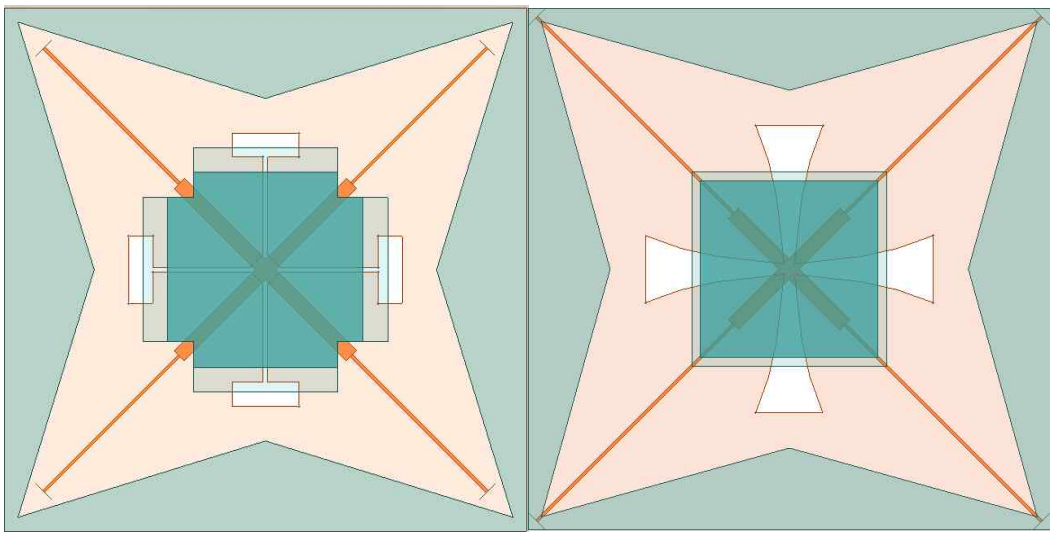
### 2.2.3. 개구면-라인 상호 공진




[그림 2-8] 개구면-라인 상호 공진의 방사체에서의 E-field와 급전부에서의 E-field

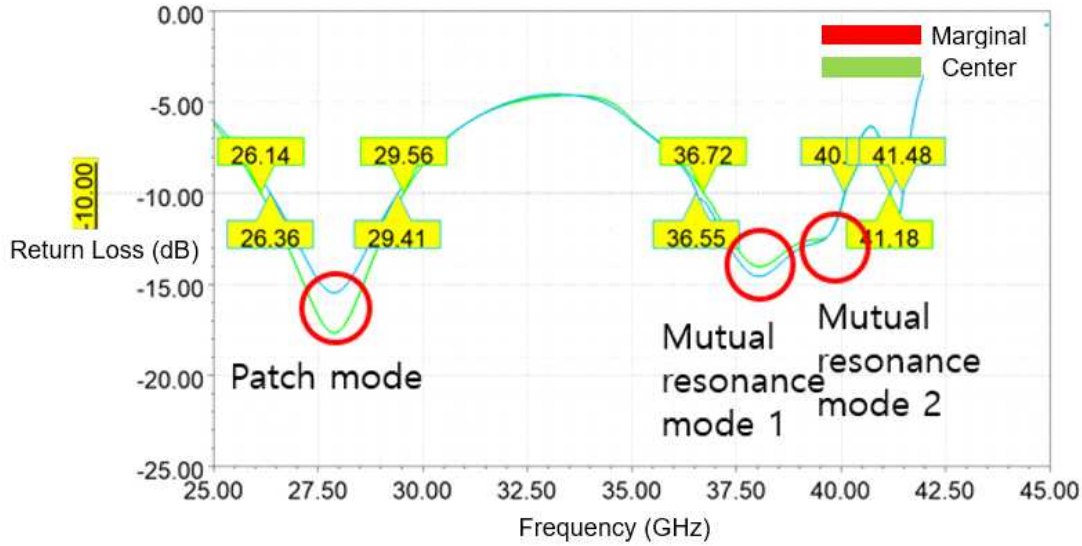
[그림 2-8]은 [그림 2-1]과 같이 방사체가 설계되었을 때 방사체가 갖는 3개의 공진 중 세 번째 공진인 개구면-라인 상호 공진의 방사

체에서의 E-field와 급전부에서의 E-field이다. 방사체에서의 E-field는 패치 공진과 쿼터웨이브 패치-패치 상호 공진의 E-field가 섞여있는 형상을 띄며, 급전부에서의 E-field는 슬랏과 라인이 상호 공진하는 분포임을 알 수 있다. 이러한 공진은 스트립라인과 접지면의 캐패시턴스와 슬랏의 인덕턴스의 병렬 공진으로 이해할 수 있다.

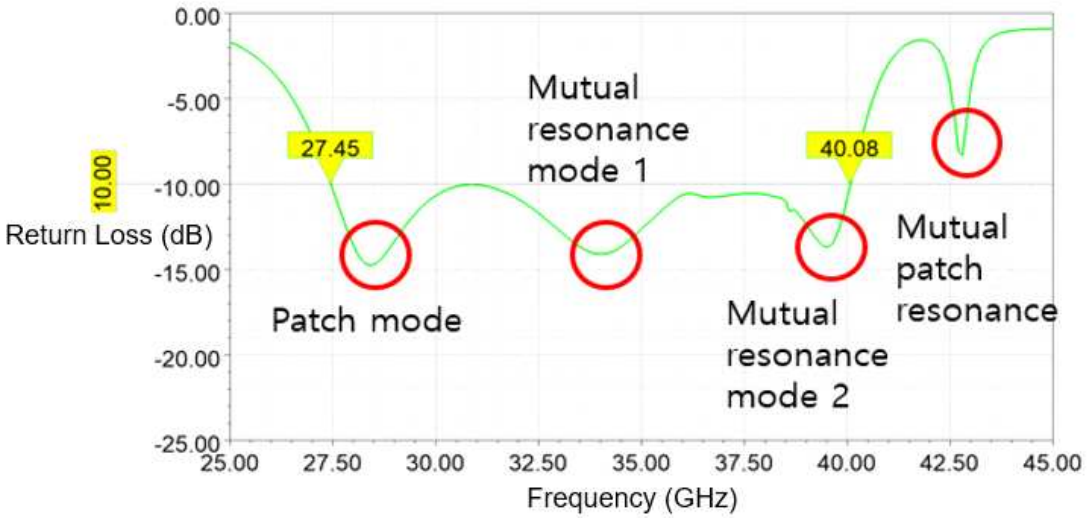


[그림 2-9] 이중 편파 소자에서의 통상적인 개구면 급전과 테이퍼드 급전의 비교

[그림 2-9]는 통상적인 h자 모양의 개구면 급전과 본 논문에서 새로 제시하는 테이퍼드 개구면 급전을 나타내는 그림이다. 통상적인 개구면 급전을 통해 이중대역 이중편파 안테나 배열을 설계할 수 있었다. 테이퍼드 슬랏 구조는 [8]에서의 비발디 안테나, 혹은 exponentially tapered slot antenna로부터 착안한 구조로서 본 구조와 같이 급전부를 취하여 광대역 이중편파 안테나 배열을 설계할 수 있었다.



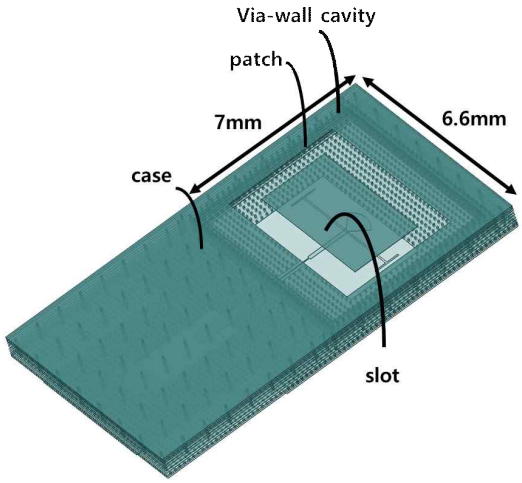

[그림 2-10] 이중대역 이중 편파 안테나 배열의 반사 계수



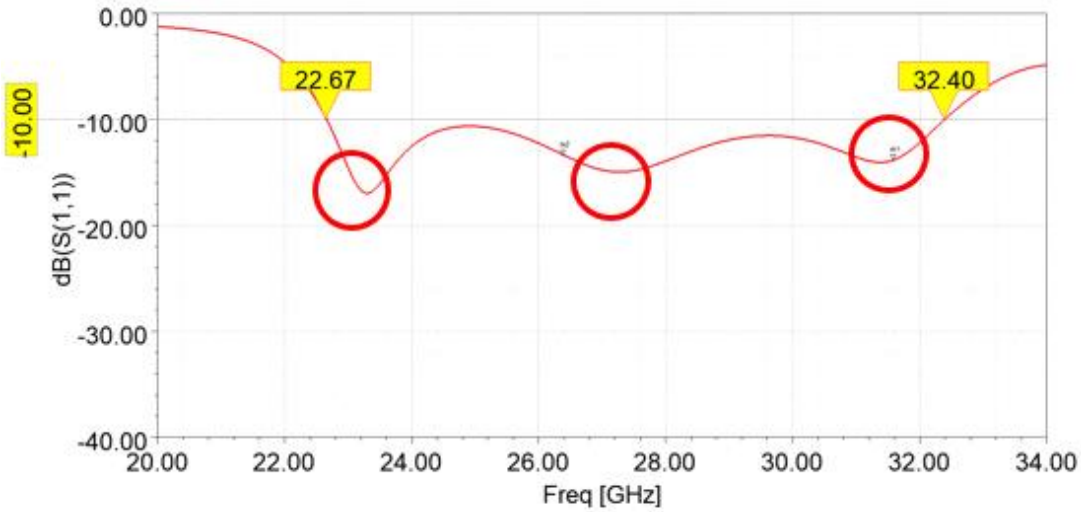

[그림 2-11] 광대역 이중 편파 안테나 배열의 반사 계수

[그림 2-10]은 통상적인 h자 모양의 개구면 급전을 갖는 이중대역 이중 편파 안테나 배열의 반사 계수로서, n260 대역과 n261 대역을 지원하며, [그림 2-11]은 본 논문에서 제시하는 새로운 테이퍼드 개구면 급전을 갖는 광대역 이중편파 안테나 배열의 반사 계수로서, n257 대역과 n260 대역을 지원한다.

### 2.2.4. 삼중 공진을 갖는 방사체



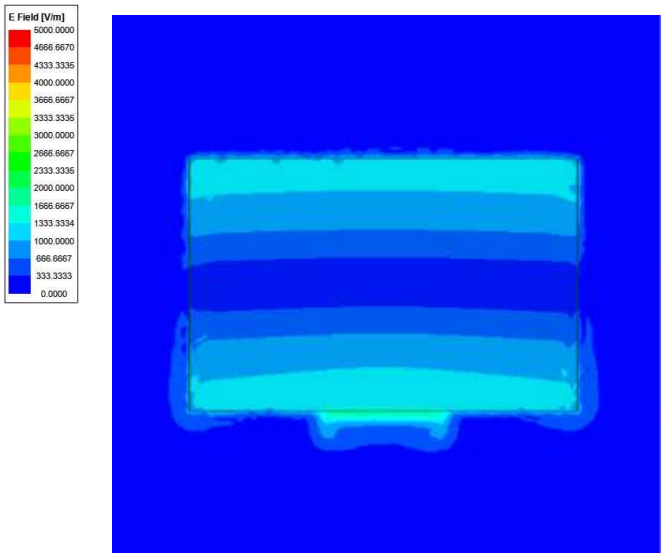

[그림 2-12] 광대역 단일 편파 안테나 소자



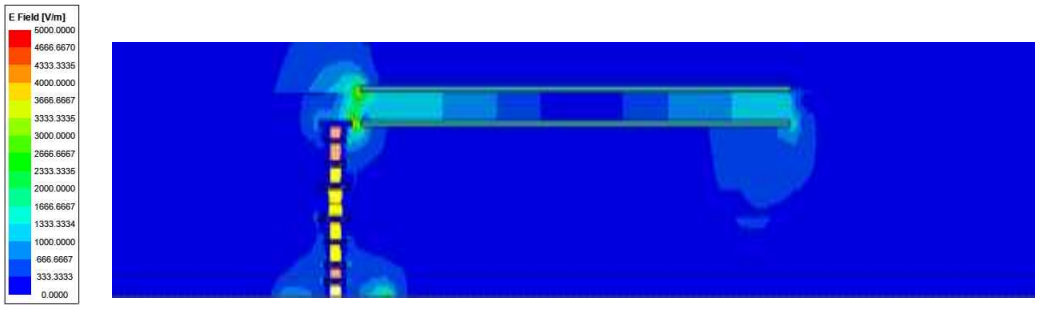

[그림 2-13] 광대역 단일 편파 안테나 소자의 반사 계수

[그림 2-12]은 광대역 단일 편파 안테나 소자의 최종 단면도를 나타내며, [그림 2-13]에서와 같이 삼중 공진을 갖는 것이 시뮬레이션상 확인된다.

### 2.2.5. 패치-적층 패치 상호 공진

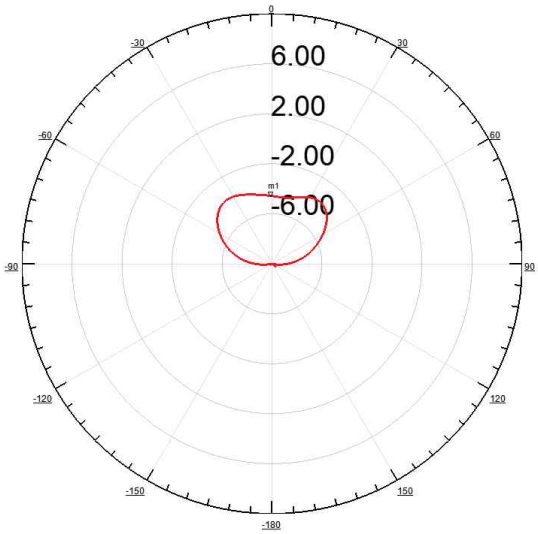



[그림 2-14] 적층 패치 안테나의 패치-적층패치 상호 공진 E-field

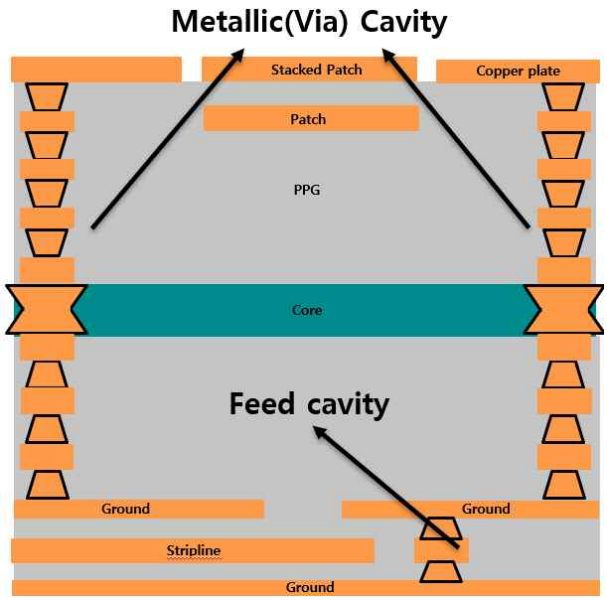



[그림 2-15] 적층 패치 안테나를 옆에서 본 단면에서의 E-field 분포

패치-적층 패치 상호 공진은 [9]에서 보고된 바가 있으며, 이를 활용하여 개구면 급전을 이용한 적층 패치 안테나의 광대역 동작은 [10]에서 확인된다. 이러한 광대역 동작은 패치와 패치 사이에 공기 간극이 있을 때 유효하며, 작은 유전체에서 매우 작은 간격으로 패치가 존재할 때는 이러한 공진이 [그림 2-3]에서와 같이 매우 높은 Q-factor를 가지는 것을 확인할 수 있다. 또한, [그림 2-16]에서와 같이 해당 공진에서는 안테나가 효과적으로 방사하지 않는 것을 볼 수 있는데, 이러한 이유는 [그림 2-14]와 [그림 2-15]에서 찾을 수 있다. 하지만, 그럼에도 불구하고 [그림 2-10]에서 설계된 안테나와 [그림 2-11]에서 설계된 안테나는 [그림 2-17]에서와 같이 적층 패치를 이용하여 설계되었는데, 적층 패치가 임피던스 튜너로서는 적합하게 동작하기 때문이다.

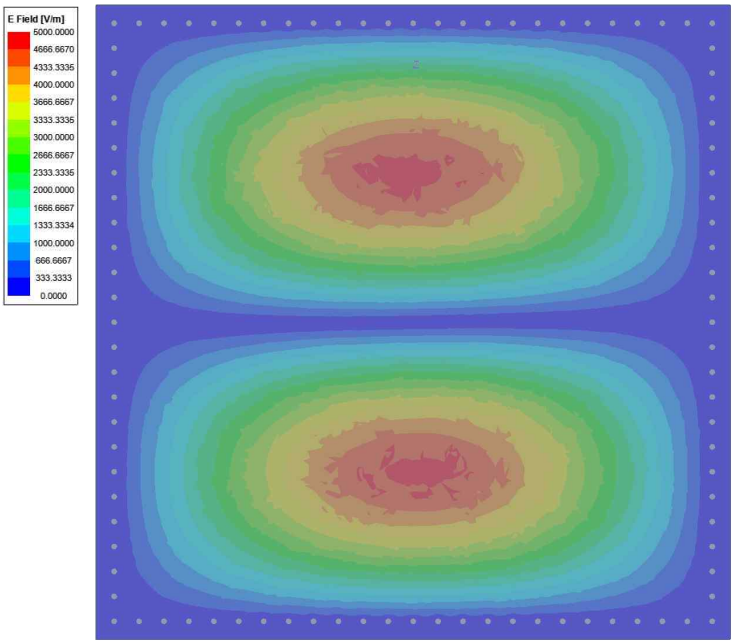



[그림 2-16] 적층 패치 안테나의 패치-적층패치 공진에서의 E-plane 방사 패턴




[그림 2-17] 광대역/이중대역 이중 편파 안테나 배열의 설계 측면도

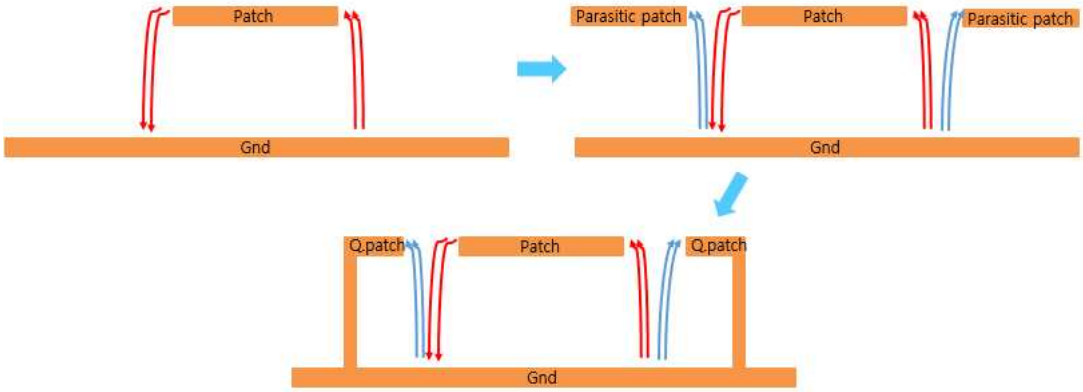
### 2.2.6. 비아(접지) 벽으로 이루어진 공동 구조 공진




[그림 2-18] 비아 (접지) 벽으로 이루어진 공동 구조의 TE 210 모드 공진

비아 (접지) 벽으로 이루어진 공동 구조, 혹은 [11]에서 명명한 substrate-integrated cavity 역시 공진 주파수가 존재한다. [그림 2-18]은 그러한 공동 구조의 TE 210 모드 공진이다. 설계에 따라 공동 구조 공진을 패치 안테나 공진에 활용하는 케이스가 있는데, 이는 [12]에서 확인된다. 본 안테나는 공동 구조의 공진을 활용하지 않았으며, 오히려 공동 구조의 크기가 안테나 동작 주파수에 들어오면 안테나가 효율적으로 방사하지 않음이 확인되었다.

### 2.2.7. 설계된 방사체에 대한 고찰




[그림 2-19] 설계된 방사체에 대한 이해

[그림 2-19]는 본 안테나의 설계 진행도를 담고 있는 그림이다. 기본적인 패치 안테나에서 기생 패치를 덧대면 패치 간 상호 공진이 일어나는 것은 널리 알려진 사실이다. 이러한 공진은 앞서 다룬 적층 패치 간 상호 공진에서도 확인되며, 널리 알려진 공진 기법이다. 본 논문에서는 기생 패치를 비아(접지) 벽과 합쳐 기생 패치의 크기를 줄임과 동시에 배열 설계에서의 표면파를 억제시킬 수 있었다. 이러한 상호 공진은 비아(접지) 벽으로 이루어진 공동 구조 공진, 혹은 TE-210 공진과는 다르며, 오히려 그러한 공진이 급전되는 주파수에서 안테나가 효과적으로 방사하지 않음을 확인할 수 있었다.

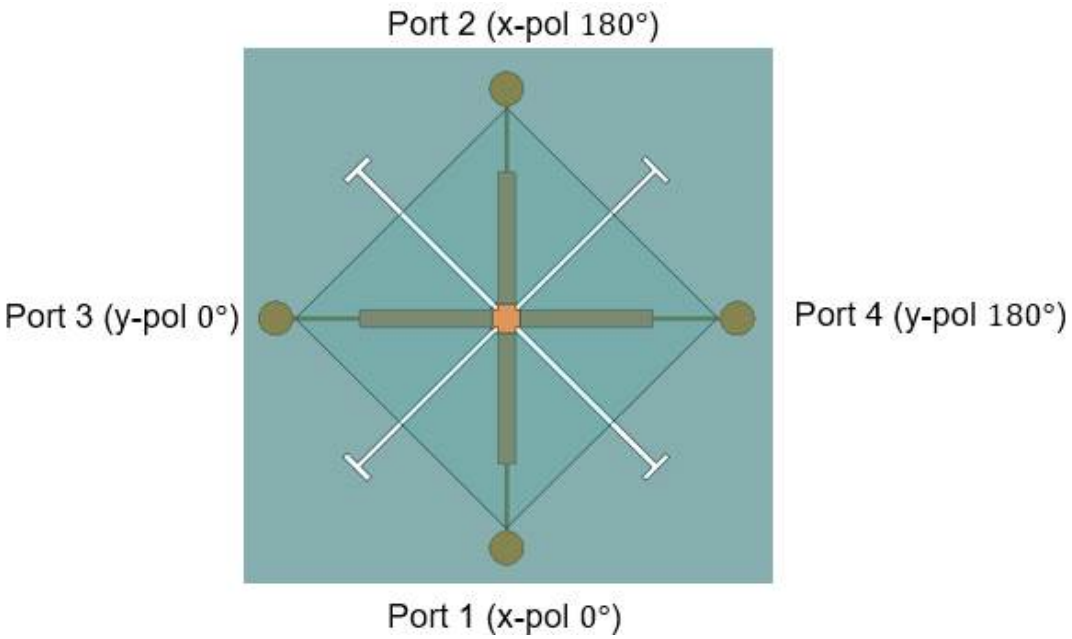
## 제 3 절 이중 편파 배열

### 2.3.1. 기존 이중 편파 개구면 급전 구조

최초의 이중 편파 개구면 급전 구조는 [13]에서 보고되는데, 본 구조에서는 두 개의 개구면이 따로 인쇄되어, 각기 다른 방향의 마이크로스트립라인이 이를 통해 방사체를 급전한다. [14]에서는 교차 개구면, 그리고 각기 다른 층에 인쇄된 두 라인이 각기 다른 편파를 급전하는 구조가 보고되었으며, [15]에서는 광대역 동작을 위한 h 모양의 개구면 급전이 최초로 보고되었다. [13]의 문제점은 개구면이 옆으로 오프셋 됨에 따라 대역폭 특성이 희생된 점이 있고, [14]는 이중 편파 급전을 위해 기

판을 2개나 써야 한다는 점이 있다. 이를 타파하기 위해, [15]가 보고되었으나 여전히 슬랏을 두 개를 따로 인쇄해야 한다는 단점이 있다.

### 2.3.2. 차동 급전




[그림 2-20] 차등 급전 기술이 적용된 개구면 급전 구조

본 논문에서는 앞에서 언급한 기존의 개구면 급전 구조의 문제점을 타파하기 위하여 차동 급전 기술이 사용되었다. 차동 급전은 [그림 2-20]의 상황에서 아래의 수식과 같이 표현된다.

$$S_{dd11} = 0.5*(S_{11} - S_{12} - S_{21} + S_{22}) \quad (2.1)$$

$$S_{dd22} = 0.5*(S_{33} - S_{34} - S_{43} + S_{44}) \quad (2.2)$$

$$S_{dd21} = 0.5*(S_{31} - S_{41} - S_{32} + S_{42}) = 0 \quad (2.3)$$

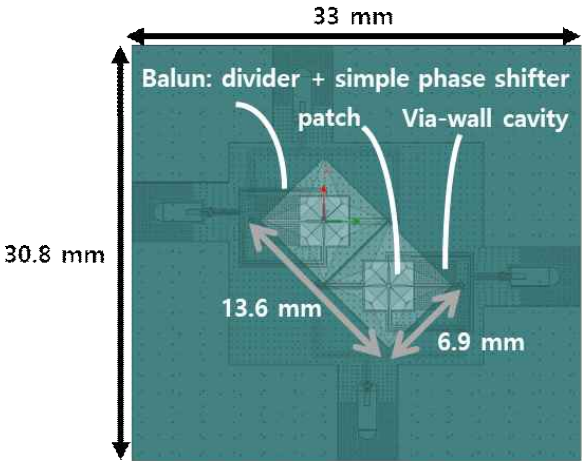
$$S_{dd12} = 0.5*(S_{13} - S_{14} - S_{23} + S_{24}) = 0 \quad (2.4)$$

$$S_{dd11} = S_{dd22} \tag{2.5}$$

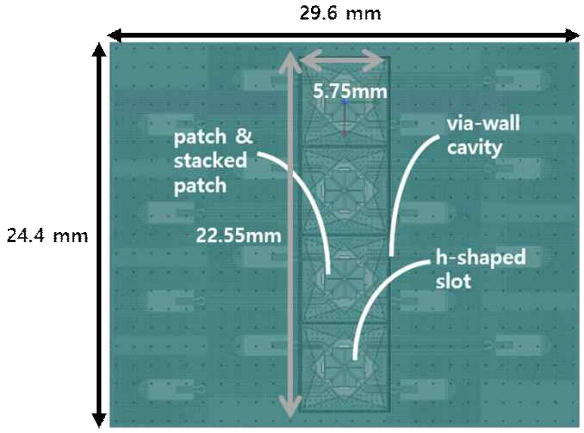
$$S_{dd21} = S_{dd12} = 0 \tag{2.6}$$

차동 급전 기술을 이용하여 최초의 교차 개구면-교차 라인 구조를 구현할 수 있었다. (2.6)에서 확인할 수 있듯이, 편파가 무한한 고립도 또한 확인된다.

### 2.3.3. 발런 결합 구조 및 공간 결합 구조




[그림 2-21] 발런이 결합된 광대역 이중 편파 안테나 배열



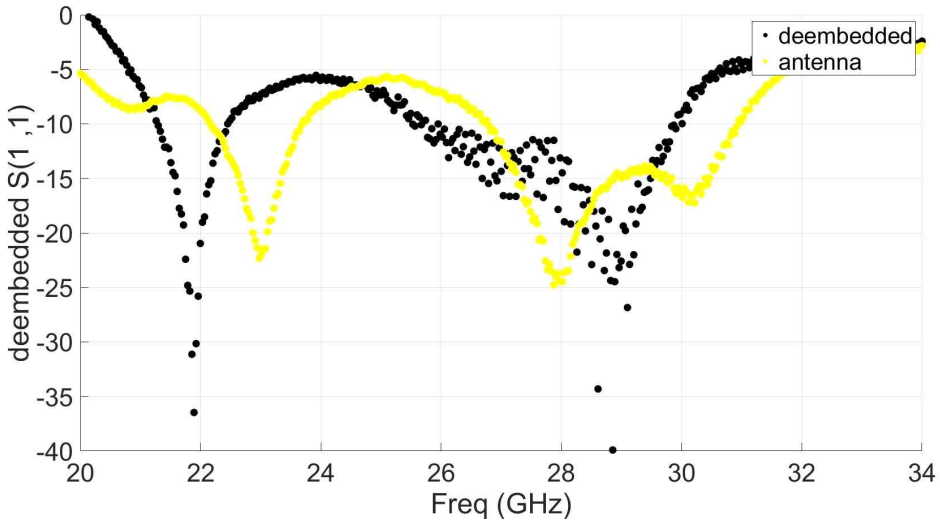

[그림 2-22] 공간 결합을 위한 이중대역 이중 편파 안테나 배열

차동 급전 기술을 이용한 이중 편파 급전 구조는 [그림 2-21] 와

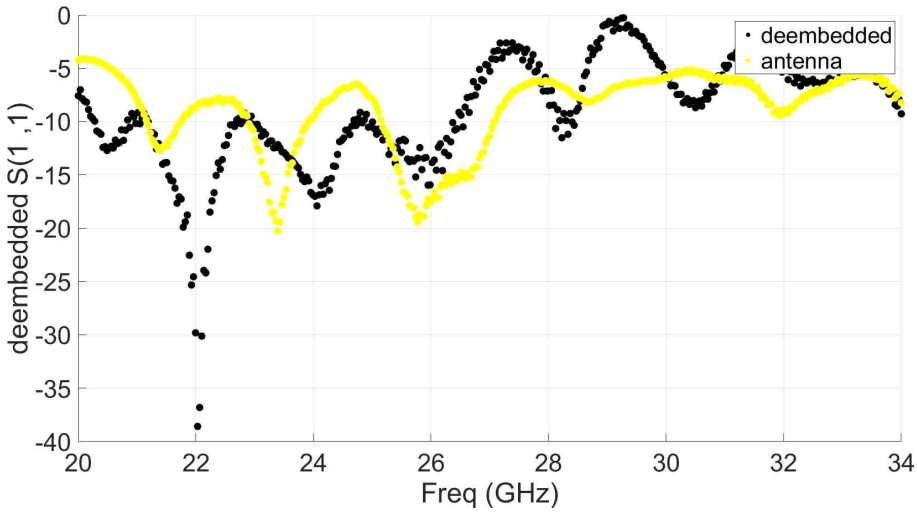
같이 발런이 결합된 형태 혹은, [그림 2-22] 와 같이 공간 결합을 위한 편파 당 2개의 채널이 결합되는 형태가 가능하다.

## 제 4 절 측정 및 결과

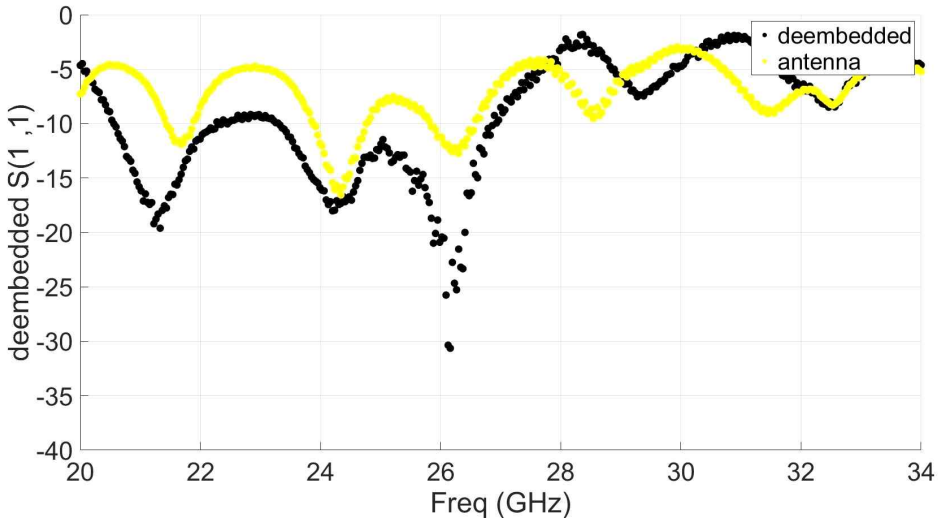
### 2.4.1. 측정 결과




[그림 2-23] [그림 2-12]의 설계된 안테나의 S(1, 1)




[그림 2-24] [그림 2-21]의 설계된 안테나의 S(1, 1)




[그림 2-25] [그림 2-21]의 설계된 안테나의 S(2, 2)

[그림 2-12]의 설계된 안테나는 시뮬레이션 대역폭 중 21.2 GHz ~ 30 GHz 중 5.8 GHz의 대역폭이 실측되었으며, [그림 2-21]의 설계된 안테나는 시뮬레이션 대역폭 6 GHz 중 20.2 GHz ~ 26.5 GHz, 20.5 GHz ~ 26.8 GHz이 정상적으로 실측되었다.

## 2.4.2. 문헌과의 비교

| 안테나 | 급전 | 유전율 | 크기 | 대역폭 |
|---|---|---|---|---|
| [그림 2-12] | 개구면 | 2.2 | $0.51\lambda_0 \times 0.6\lambda_0 \times 0.08\lambda_0$ | 35% |
| [그림 2-20] | | | $1.27\lambda_0 \times 0.64\lambda_0 \times 0.08\lambda_0$ | 26% |
| [그림 2-21] -1 | | | $2.1\lambda_0 \times 0.53\lambda_0 \times 0.08\lambda_0$ | 35% |
| [그림 2-21] -2 | | | | 12.1%, 9% |
| [27] | 개구면 | 2.2 | $0.63\lambda_0 \times 1.07\lambda_0 \times 0.03\lambda_0$ | 17.5% |
| [28] | 개구면 | 2.2 | $0.8\lambda_0 \times 0.8\lambda_0 \times 0.081\lambda_0$ | 10.7% |
| [29] | 직접 | 2.2 | $0.4\lambda_0 \times 0.4\lambda_0 \times 0.078\lambda_0$ | 21.7% |
| [6] | 개구면 | 3.2 | $1.12\lambda_0 \times 1.12\lambda_0 \times 0.039\lambda_0$ | 37.5% |
| [30] | 개구면 | 2.2 | $1.56\lambda_0 \times 1.56\lambda_0 \times 0.076\lambda_0$ | 45% |

[표 2-1] Ka 대역 광대역 안테나 기존 문헌과의 비교

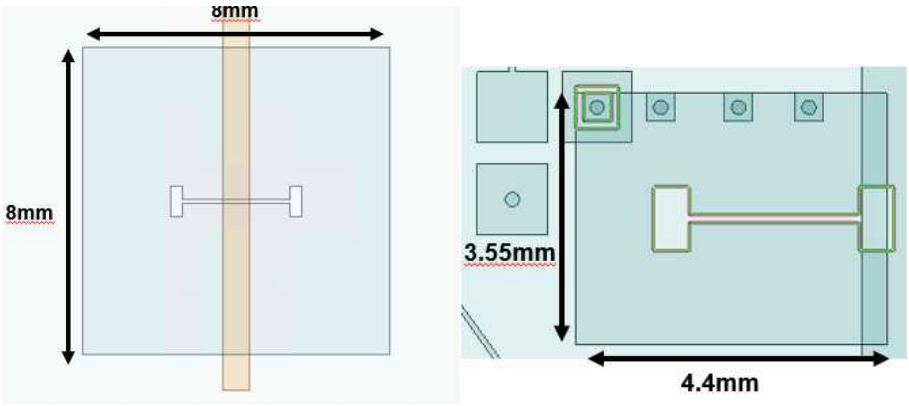
본 연구에서 제안하는 안테나는 기존의 cavity-backed patch [27], cavity-backed slot [28] 안테나와는 다른 구조를 차용함으로써 광대역 공진을 가질 수 있었다. 또한, [6]과 같이 소형화되어 설계되었지만

대역폭이 넓으며, [6], [30] 보다는 대역폭이 좁지만 [6], [30]의 구조는 방사체가 매우 커 위상 배열의 소자로서는 부적합함을 확인할 수 있다.

# 제 3 장 6G 통신을 위한 빔 조향이 가능한 고-개구면 효율을 갖는 직접 급전 배열

## 제 1 절 소자 설계

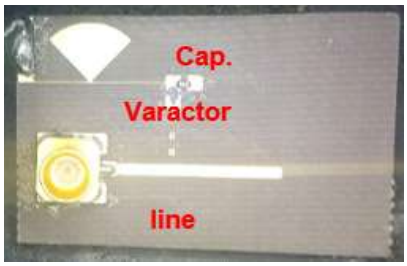
### 3.1.1 쿼터웨이브 패치



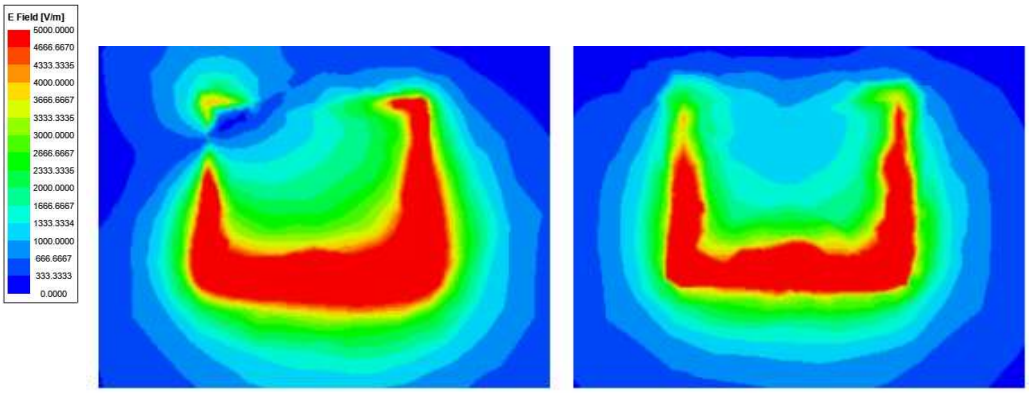

[그림 3-1] 통상 X-band 패치와 쿼터웨이브 패치

[그림 3-1]은 유전율 2.2의 타코닉 TLY-5 기판에서 설계된 통상 X 대역 패치 안테나의 크기와 via가 4개가 로딩이 된 쿼터웨이브 패치의 그림이다. 6G 통신을 위한 고-개구면 효율을 갖는 배열을 설계하기 위해서는 안테나 소자의 소형화를 통한 상호 커플링 감소 및 고집적화가 필수적이기 때문에 통상 X 대역 패치가 아닌 쿼터웨이브 패치를 안테나 소자로서 채택하였다.

### 3.1.2 버랙터와의 결합




[그림 3-2] 버랙터가 결합된 쿼터웨이브 안테나의 후면도



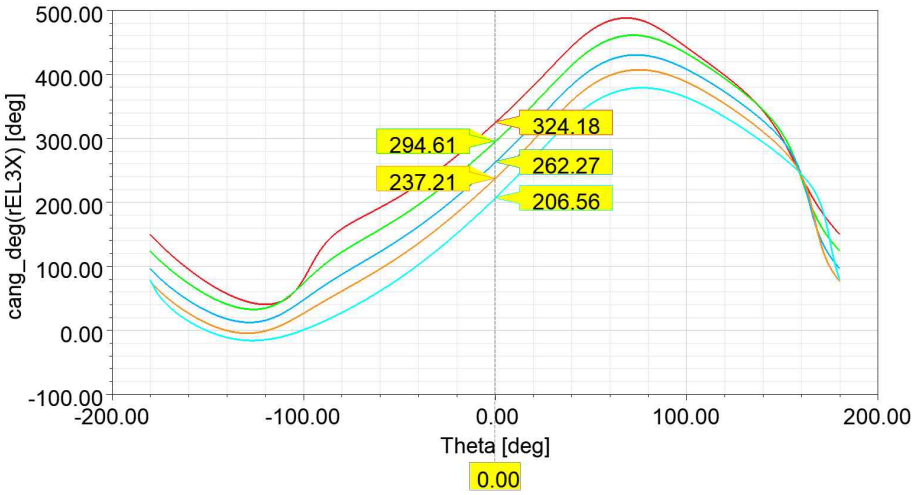

[그림 3-3] 버랙터가 결합된 쿼터웨이브 안테나의 캐패시턴스에 따른 E-field 분포 (좌: 0.12 pF, 우: 0.65 pF)

방사 위상을 가변하기 위하여 쿼터 웨이브 패치에 버랙터가 실장이 되었다. 기존 연구와의 차별성은 대부분의 안테나에 버랙터가 실장이 될 때 보통 [16]에서와 같이 안테나 상단에 실장이 되는 것이 일반적인데, 본 연구에서는 안테나 하단에 실장이 되었다는 것이 차별점이 있다.

[그림 3-3]에서 확인할 수 있다시피, 버랙터의 캐패시턴스가 작을 때는, 안테나와 연결된 비아가 플로팅이 되어있는 것과 동등한 형태의 E-field 분포를 보이며, 캐패시턴스가 클 때는, 안테나와 연결된 비아가 접지면에 쇼팅이 되어있는 것과 동등한 형태를 보이는 것을 확인할 수 있다. 본 필드 분포로부터, 같은 위상의 신호가 급전이 될 때, 안테나의 방사 위상이 달라질 수 있음을 예측할 수 있다.

### 3.1.3 가변 방사 위상

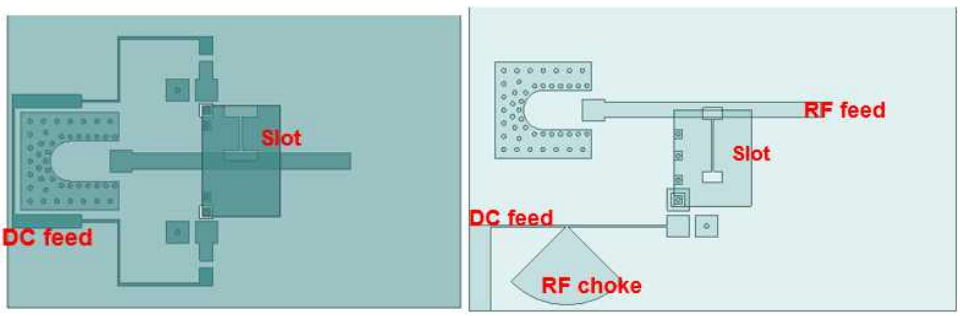
[그림 3-4]는 버랙터의 캐패시턴스의 변화에 따른 안테나의 방사 위상의 변화를 나타낸 그래프이다. 캐패시턴스가 0.12pF부터 0.65pF까지 변화함에 따라, 방사 위상이 120도가 달라짐을 확인할 수 있으며, 이를 이용하여 6G 통신의 핵심 기술인 빔 조향을 배열 안테나에서 구현할 수 있다.




[그림 3-4] 캐패시턴스에 따른 방사 위상 변화

## 제 2 절 소형화 된 DC/RF 급전 구조

### 3.2.1 RF 쵸크를 활용한 DC 급전




[그림 3-5] 통상적인 DC/RF 급전과 오프셋 RF 급전을 이용하여 소형화된 DC/RF 급전

[그림 3-5]는 대칭 RF 급전과 인덕터를 사용한 통상적인 DC/RF 급전과 본 논문에서 제안하는 오프셋 RF 급전과 스터브를 사용한 RF 초크를 사용한 DC/RF 급전이다. 버랙터를 하나만 사용하여 로스를 최소화하였고, RF 초크를 사용하여 DC/RF 격리도를 -50dB까지 향상하였다.

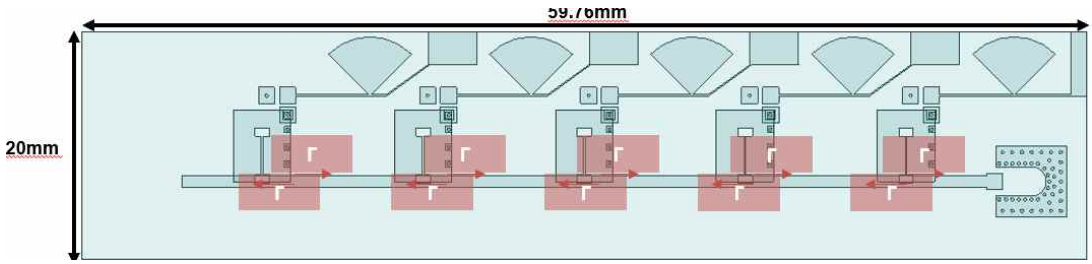
### 3.2.2 오프셋 RF 급전

각 소자의 임피던스는 RF 피드와 slot의 오프셋 된 정도로 결정

이 된다. RF 피드가 슬랏의 정가운데 있으면 임피던스가 매우 크며, 오프셋이 많이 되면 될수록 임피던스가 작아진다. 이러한 오프셋 RF 급전 기법으로 추후 배열 안테나의 임피던스를 50옴에 가깝게 매칭할 수 있다. 이러한 기법은 [17]에서 슬랏 안테나의 임피던스 조절하는 데 사용된 바가 있고, 본 연구에서는 해당 기법을 응용하여 패치 안테나의 임피던스를 조절하였다.

## 제 3 절 빔조향 가능한 배열

### 3.3.1 직렬급전 배열 임피던스 매칭 기법



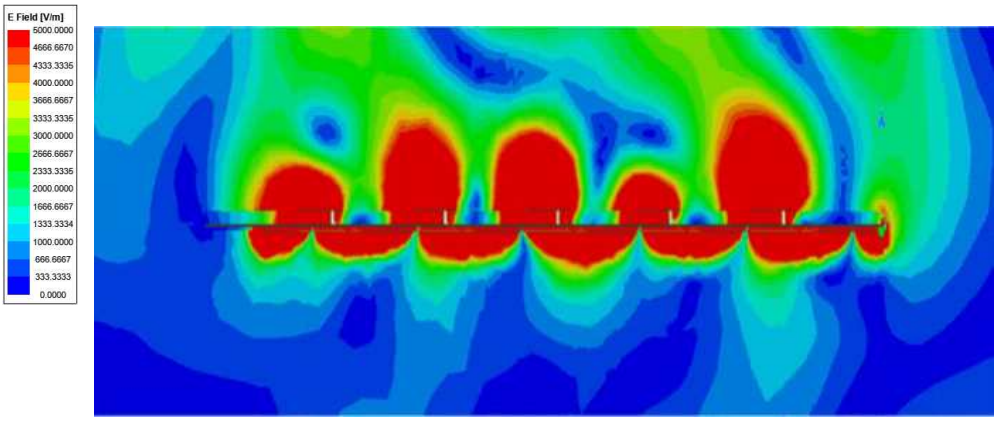

[그림 3-6] 다중 반사 구조를 이용한 임피던스 매칭

[그림 3-6]는 5개 소자가 직렬로 급전된 배열의 각 슬랏에서의 임피던스 미스매치로 인한 다중 반사, 혹은 정재파의 형성을 나타내는 그림이다. 버렉터의 바이어스의 값을 변화시킴에 따라 각 슬랏의 임피던스를 바꿀 수 있고, 이를 이용하여 각 안테나에 급전되는 신호의 진폭과 위상을 바꿀 수 있다.

### 3.3.2 빔 조향 기법

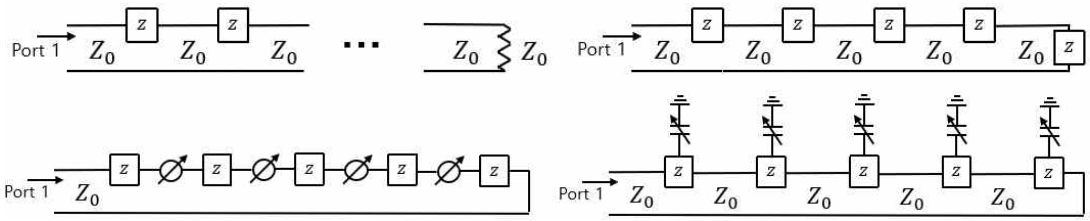
[18]에서는 리키-웨이브 안테나의 다양한 빔 조향 기법을 제안한다. 그 중, 'lorentizan-constrained hologram'의 빔 조향 기법은 각 소자에 급전되는 신호의 진폭과 위상이 동시에 변할 때, 효과적으로 빔을 조향하는 기법으로서, 본 안테나에 적용되기에 적합하여 해당 기법을 적용하였다. 이 때, [18]에서의 기법과 다른 것은 급전되는 신호의 진폭과 위

상이 진행파 형태로 변하는 것이 아닌, 정재파 형태로 변하는 것까지 고려해야한다는 점이다. 임피던스 미스매치로 인한 오차는 -20도부터 20도로 작으므로, [18]에서의 기법으로 우선 빔을 조향한 다음, 바이어스를 미세하게 조정하여 빔을 조향하였다.




[그림 3-7] 제안하는 안테나의 빔이 30도 방향으로
조향되는 e-field 분포

### 3.3.2 기존 빔 조향 기법과의 차별성



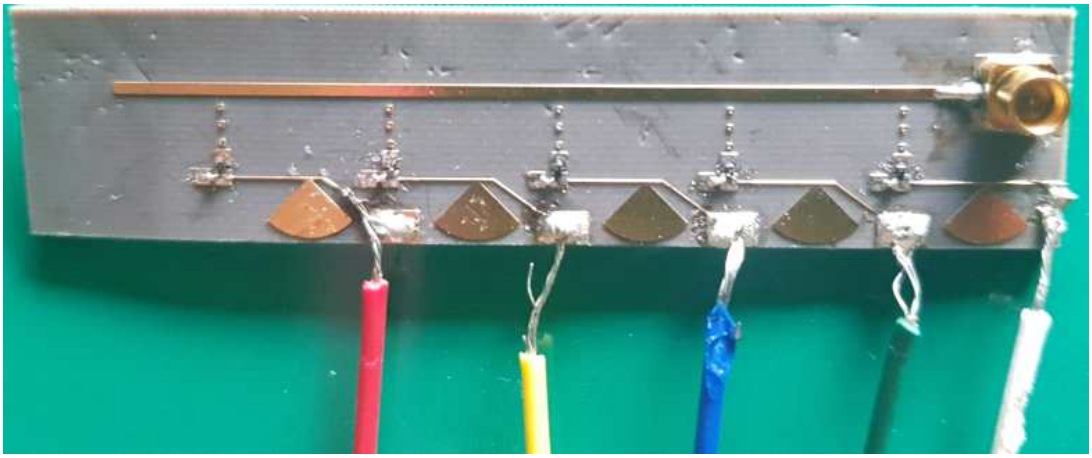

[그림 3-8] 본 연구에서 제안하는 빔 조향 기법과 기존 빔 조향
기법과의 비교 (좌: 기존의 기법들, 우: 본 연구 기법)

[그림 3-8]은 본 연구에서 제안하는 빔 조향 기법과 기존 빔 조향 기법의 비교를 담는 그림이다. 상단 좌측 그림과 상단 우측 그림은 리키웨이브 안테나와 정재파 안테나의 비교를 담는 그림이다. 리키웨이브 안테나는 파가 진행함에 따라 방사하는 필드의 위상을 제어하여 방사 패턴을 제어하는 안테나로서 소형화된 안테나를 설계하기 어려워 우측의 정재파 안테나보다 비교적 작은 개구면 효율을 가지게 된다. 하단 좌측 회로도와 우측 회로도의 비교는 직렬 급전 정재파 네트워크에서의 위상

천이기를 이용한 빔 조향 기법과 안테나의 가변 소자를 직접적으로 로딩하여 빕을 제어하는 빕 조향 기법과의 비교이다. 위상 천이기의 성능이 360도가 나온다면 좌측의 제어 기법이 좋을 것이다. 하지만 그러한 성능을 가지는 전력을 사용하는 능동 위상 천이기거나, 혹은 소형화되지 않은 수동 위상 천이기다. 우측의 회로도는 안테나에 가변 소자를 직접 로드하여 안테나의 크기를 소형함과 동시에 제한된 위상 튜닝 범위 하 효율적인 'lorentizan-constrained hologram'의 기법으로 제어되어, 높은 개구면 효율을 가질 수 있는 빔 조향 기법이다.

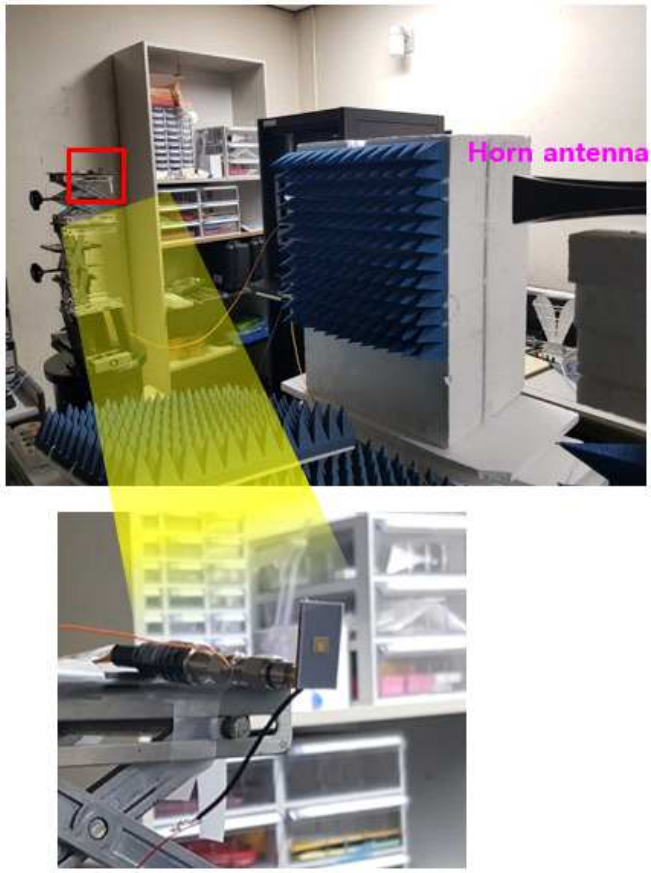
## 제 4 절 측정 및 결과

### 3.4.1 측정 결과

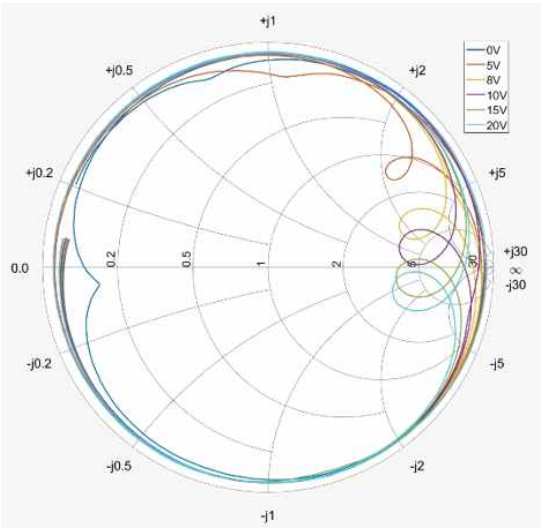


[그림 3-9] 제작된 안테나 배열

[그림 3-9]은 실제 설계 및 제작된 안테나 배열의 후면도이다. 2층의 유전율 2.2 Taconic-TLY 기판(0.76mm, 0.25mm)이 0.04mm의 Rogers bondply 6250을 이용하여 적층되었다. 높은 개구면 효율을 위하여 작은 MINI-SMP 커넥터를 사용하였다. Varactor는 Macom 사의 MAVR-000120-1411를 사용하였으며, 별도의 테스트보드를 설계하여 물성을 검증한 결과, 설계사에서 제공하는 물성과 크게 다르지 않음을 확인하였다.

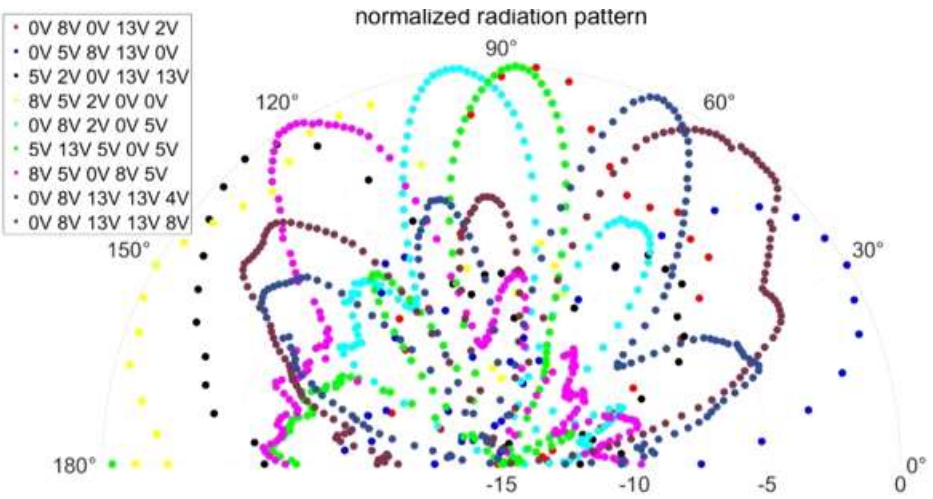



[그림 3-10] 안테나 소자의 방사 진폭과 위상 측정 셋업

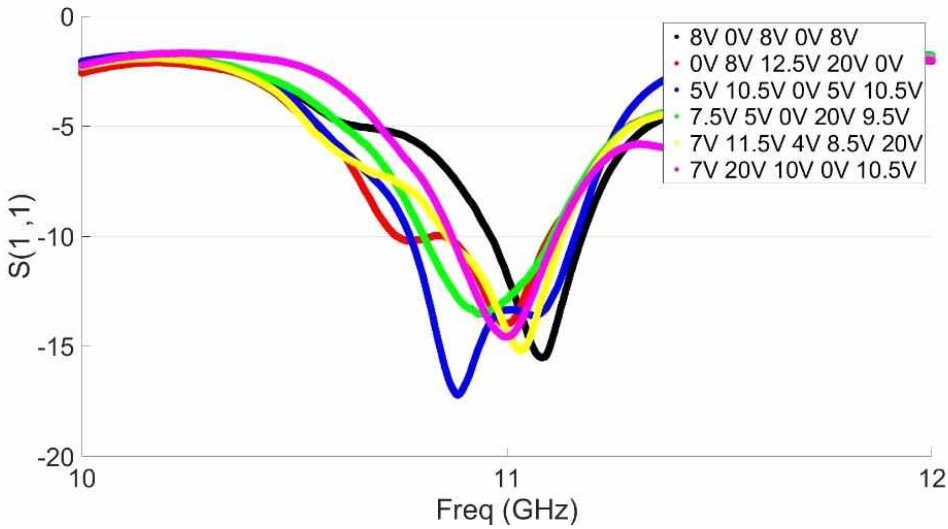



[그림 3-11] 바이어스의 변화에 따른 측정된 안테나 소자의 임피던스 변화

[그림 3-10]은 설계한 안테나 소자의 방사 위상 변화 및 임피던스 변화를 측정하기 위한 셋업을 나타낸 그림이다. [그림 3-4]의 위상 가변 범위의 114도와 크게 다르지 않은 110도의 위상 가변이 실측되었으며, [그림 3-11]과 같이 바이어스 변화에 따라 인덕티브 및 캐패시티브한 가변 임피던스가 실측되었다.




[그림 3-12] 제작된 안테나의 -60도부터 60도까지 빔 조향 시 방사 패턴 측정




[그림 3-13] 제작된 안테나의 빔 조향 시 임피던스 특성

| 빔 조향각 | 바이어스 1 | 바이어스 2 | 바이어스 3 | 바이어스 4 | 바이어스 5 | 개구면 효율 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 64° | 20V | 11.5V | 11.5V | 7V | 4.5V | 58% |
| 42° | 7.5V | 5V | 0V | 20V | 9.5V | 54% |
| 35° | 15V | 8.5V | 0V | 20V | 9.5V | 70.5% |
| 25° | 20V | 8.5V | 2.5V | 13V | 7.5V | 68% |
| 10° | 5V | 20V | 8V | 0V | 10.5V | 48% |
| 5° | 7V | 20V | 10V | 0V | 10.5V | 55% |
| 2° | 8V | 0V | 8V | 0V | 8V | 58% |
| -10° | 8V | 20V | 4V | 13.5V | 0V | 49% |
| -20° | 7V | 11.5V | 4V | 8.5V | 20V | 61% |
| -30° | 5V | 10.5V | 0V | 5V | 10.5V | 49% |
| -49° | 0V | 8V | 12.5V | 20V | 0V | 50% |
| -58° | 0V | 5V | 11.5V | 15V | 20V | 59.3% |

[표 3-1] 설계된 안테나의 빔 조향각에 따른 바이어스 값과 실측된 개구면 효율

### 3.4.2 문헌과의 비교

| 안테나 | 액티브/패시브 | 주파수 | 크기 | 개구면 효율 |
|---|---|---|---|---|
| 본 연구 | 액티브 | 11.1 GHz | $0.51\lambda_0 \times 2.21\lambda_0 \times 0.03\lambda_0$ | 70 % |
| 직렬 패치 [19] | 패시브 | 60 GHz | $1.2\lambda_0 \times 2.94\lambda_0 \times 0.05\lambda_0$ | 63.6 % |
| 리키 웨이브 [20] | 액티브 (버랙터) | 5.7 GHz | 확인 불가 | 약 20 % |
| 리키 웨이브 [21] | 액티브 (버랙터) | 5 GHz | 확인 불가 | 약 40% |
| 리키 웨이브 [22] | 액티브 (핀 다이오드) | 5 GHz | $5.32\lambda_0 \times 1.4\lambda_0 \times 0.033\lambda_0$ | 29% |

[표 3-2] 기존 직렬 급전 액티브/패시브 안테나 문헌과 본 안테나의 비교

| 안테나 | 재구성 소자 | 주파수 | 크기 | 개구면 효율 |
|---|---|---|---|---|
| 본 연구 | 버랙터 | 11.1 GHz | $0.51\lambda_0 \times 2.21\lambda_0 \times 0.03\lambda_0$ | 70 % |
| 적층 패치 배열 [23] | 핀 다이오드 | 5.9 GHz | $4 \times 0.79\lambda_0 \times 0.79\lambda_0 \times 0.3\lambda_0$ | 52 % |
| O-slot 패치 배열 [24] | 핀 다이오드 | 12.5 GHz | $2\lambda_0 \times 2\lambda_0 \times 0.17\lambda_0$ | 63 % |
| 접지 핀 로딩 패치 [25] | 버랙터 | 7.3 GHz | $0.97\lambda_0 \times 0.97\lambda_0 \times 0.17\lambda_0$ | 47.6 % (realized) |
| 원형 패치 (ESPAR) [26] | 버랙터 | 2.37 GHz | $1.03\lambda_0 \times 1.03\lambda_0 \times 0.04\lambda_0$ | 60 % |

[표 3-3] 기존 고-개구면 효율 액티브 안테나 문헌과 본 안테나의 비교

본 안테나 설계는 [19]의 직렬 정재파 급전 패치 배열의 구조를 차용하여 [20]-[22]의 리키웨이브 안테나 배열과 다르게 RF 에너지가 터미네이션으로 낭비되지 않아 비교적 소형화되고, 따라서 높은 개구면 효율을 달성한 것을 확인할 수 있다. 또한, [표 3-3]에서 확인할 수 있다시피 최신 고-개구면 효율을 가지는 전자식 재구성 가능한 액티브 안테나와 비교해서도 높은 개구면 효율을 가짐을 확인할 수 있다. 이는, 소형화된 방사체 채택을 통한 상호 커플링 감소를 통한 작은 표면파 급전과 더불어 소형화 된 DC/RF 급전 네트워크로 인한 것이다.

# 제 4 장 결 론

## 제 1 절 결론

### 4.1.1 결론

본 논문에서는 최신 5G 안테나 배열의 장점들을 취합함과 동시에, 단점을 보완하기 위해 1) 방사체와 급전 구조가 격리되어 있는 개구면 급전 구조를 채택하였으며, 2) 삼중 공진 구조를 갖는 방사체를 새롭게 설계하며, 3) 압축된 급전 구조를 위해 차동 급전 구조를 가지는 4종의 5G 안테나 소자/배열이 설계되고 측정되었다.

더하여, 6G 통신을 지원하기 위하여 안테나는 리키-웨이브 안테나 배열이 아닌 기존의 직렬급전 정재파 배열을 채택하여 크기가 작은 동시에 높은 개구면 효율을 가지며, 동시에 버랙터를 이용하여 빔조향이 가능하다. 이를 위한 압축된 DC/RF 급전 구조가 설계되고 측정되었다.

본 논문이 제안하는 개구면 급전에서의 차동 급전 구조, 안테나 대역 특성을 향상하는 비아(접지) 벽이 로딩된 쿼터-웨이브 패치 - 패치의 상호 공진, 직렬급전에서의 임피던스 매칭 기법, 압축된 DC-RF 급전 구조는 PCB 기반 마이크로스트립 안테나 설계의 차후 표준이 될 수 있을 만큼 일반적인 설계가 될 것으로 예상된다.

### 4.1.2 추후 연구 방향

본 연구에서 제안하는 5G 안테나 배열은 삼중 공진을 지원할 수 있는 방사체 및 급전 구조를 채택함으로써 35%에 육박하는 광대역을 지원할 수 있었으나, 5G 주파수 대역(약 24 GHz ~ 40 GHz)을 전부 커버하기 위해서는 50%의 대역폭을 지원하여야 한다. 이를 위해서는 삼중 공진에 덧대어 사중 공진을 지원하는 구조가 제안되어야 할 것으로 보이며, 저자는 본 연구를 발전시켜 적층 패치 기반의 사중 공진을 지원하는 방사체/급전 구조를 새로 제안할 예정이다.

또한, 본 연구에서 제안하는 6G 통신을 위한 빔조향이 가능한

버랙터 기반의 안테나 배열은 기존 연구들에 비해 많이 소형화가 되었지만, 아직 스마트폰 공간에 실장 되기에는 무리가 있다. 더욱 더 소형화된 안테나 배열을 위하여, 소형화 된 안테나 배열 급전이 필요할 것이다. 이를 위한 후보군으로는, meandered line 급전이 있다. 하지만, 안테나 배열이 소형화되면서 surface wave mode가 급전되면서 생기는 scan-blindness, 낮은 안테나 소자간 격리도로 인한 빔 조향 특성 열화가 해결해야 하는 난제이다.

# 참 고 문 헌


[1] Kim, H. T., Park, B. S., Song, S. S., Moon, T. S., Kim, S. H., Kim, J. M., ... & Ho, Y. C. (2018). A 28-GHz CMOS Direct Conversion Transceiver With Packaged $2\times 4$ Antenna Array for 5G Cellular System. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 53(5), 1245-1259.

[2] https://www.qualcomm.com/products/technology/modems/rf/qtm545-mmwave-antenna-module

[3] https://unitedlex.com/insights/apple-iphone-13-pro-max-teardown-report/

[4] Seo, J., Yoon, I., Jung, J., Ryoo, J., Park, J., Lee, W., ... & Oh, J. (2021). Miniaturized dual-band broadside/endfire antenna-in-package for 5G smartphone. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 69(12), 8100-8114.

[5] https://news.samsung.com/global/samsungs-6g-white-paper-lays-out-the-companys-vision-for-the-next-generation-of-communications-technology

[6] Xue, M., Wan, W., Wang, Q., & Cao, L. (2021). Low-profile wideband millimeter-wave antenna-in-package suitable for embedded organic substrate package. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 69(8), 4401-4411.

[7] Wong, K. L., Tung, H. C., & Chiou, T. W. (2002). Broadband dual-polarized aperture-coupled patch antennas with modified H-shaped coupling slots. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 50(2), 188-191.

[8] Gazit, E. (1988, April). Improved design of the Vivaldi antenna. In IEE Proceedings H (Microwaves, Antennas and Propagation) (Vol. 135, No. 2, pp. 89-92). IET Digital Library.

[9] Lee, R. Q., & Lee, K. F. (1990). Experimental study of the two-layer electromagnetically coupled rectangular patch antenna. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 38(8), 1298-1302.

[10] Targonski, S. D., Waterhouse, R. B., & Pozar, D. M. (1998). Design of wide-band aperture-stacked patch microstrip antennas. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 46(9), 1245-1251.

[11] Awida, M. H., & Fathy, A. E. (2012). Design guidelines of substrate-integrated cavity-backed patch antennas. IET microwaves, antennas & propagation, 6(2), 151-157.

[12] Liu, Q., Zhu, L., Wang, J., & Wu, W. (2020). A wideband patch and SIW cavity hybrid antenna with filtering response. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 19(5), 836-840.

[13] Adrian, A., & Schaubert, D. H. (1987). Dual aperture-coupled microstripantenna for dual or circular polarisation. Electronics Letters, 23(23), 1226-1228.

[14] Edimo, M., Sharaiha, A., & Terret, C. (1992). Optimised Feeding of Dual Polarised Broadband Aperture Coupled Printed Antennas.

[15] Gao, S. C., Li, L. W., Gardner, P., & Hall, P. S. (2001). Wideband dual-polarised microstrip patch antenna. Electronics Letters, 37(20), 1213-1214.

[16] Tang, S. C., Wang, X. Y., & Chen, J. X. (2021). Low-profile frequency-reconfigurable dielectric patch antenna and array based on new varactor-loading scheme. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 69(9), 5469-5478.

[17] Pozar, D. A. V. I. D. M. (1986). A reciprocity method of analysis for printed slot and slot-coupled microstrip antennas. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 34(12), 1439-1446.

[18] Smith, D. R., Yurduseven, O., Mancera, L. P., Bowen, P., & Kundtz, N. B. (2017). Analysis of a waveguide-fed metasurface

antenna. Physical Review Applied, 8(5), 054048.
[19] Jang, T. H., Kim, H. Y., Song, I. S., Lee, C. J., Lee, J. H., & Park, C. S. (2016). A wideband aperture efficient 60-GHz series-fed E-shaped patch antenna array with copolarized parasitic patches. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 64(12), 5518-5521.
[20] Wang, M., Ma, H. F., Zhang, H. C., Tang, W. X., Zhang, X. R., & Cui, T. J. (2018). Frequency-fixed beam-scanning leaky-wave antenna using electronically controllable corrugated microstrip line. IEEE transactions on antennas and propagation, 66(9), 4449-4457.
[21] Wang, M., Ma, H. F., xuan Tang, W., Zhang, H. C., xiang Jiang, W., & Cui, T. J. (2019). A dual-band electronic-scanning leaky-wave antenna based on a corrugated microstrip line. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 67(5), 3433-3438
[22] Karmokar, D. K., Esselle, K. P., & Hay, S. G. (2016). Fixed-frequency beam steering of microstrip leaky-wave antennas using binary switches. IEEE transactions on antennas and propagation, 64(6), 2146-2154.
[23] Ding, Z., Chen, J., Zhou, H., Liang, X., & Jin, R. (2022). High Aperture Efficiency Arced Conformal Array With Phasor Beam Steering Antenna. IEEE Transactions on Antennas and Propagation.
[24] Wang, M., Xu, S., Hu, N., Xie, W., Yang, F., Chen, Z., & Li, M. (2020). Design and measurement of a ku-band pattern-reconfigurablearray antenna using 16 O-slot patch elements with pin diodes. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 19(12), 2373-2377.
[25] Ding, Z., Jin, R., Geng, J., Zhu, W., & Liang, X. (2019). Varactor loaded pattern reconfigurable patch antenna with shorting pins. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 67(10), 6267-6277.
[26] Jusoh, M., Sabapathy, T., Jamlos, M. F., & Kamarudin, M. R.

(2014). Reconfigurable four-parasitic-elements patch antenna for high-gainbeam switching application. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 13, 79-82.
[27] Shi, Y., Liu, J., & Long, Y. (2017). Wideband triple-and quad-resonance substrate integrated waveguide cavity-backed slot antennas with shorting vias. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 65(11), 5768-5775.
[28] Li, Y., & Luk, K. M. (2015). 60-GHz substrate integrated waveguide fed cavity-backed aperture-coupled microstrip patch antenna arrays. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 63(3), 1075-1085.
[29] Xu, J., Hong, W., Jiang, Z. H., & Zhang, H. (2018). Wideband, low-profile patch array antenna with corporate stacked microstrip and substrate integrated waveguide feeding structure. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 67(2), 1368-1373.
[30] Yin, J., Wu, Q., Yu, C., Wang, H., & Hong, W. (2019). Broadband symmetrical E-shaped patch antenna with multimode resonance for 5Gmillimeter-wave applications. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 67(7), 4474-4483.

## Abstract

# A Study on Compact Array Antennas Based on Novel Excitation Techniques

Woojun Lee

Dep. of Electrical and Computer Engineering

The Graduate School

Seoul National University

This paper proposes four broadband/dual-band single/double-polarized antenna elements and arrays operating in the 5G frequency band and a varactor-based beem-steerable series-fed antenna array with high aperture efficiency operating in the X band which could be the band for 6G communications.

In this paper, proposed 5G antenna array simplifies the design of array antennas using an aperture-coupled feed, a dual-slant polarization feed, and a via (ground) wall. In order to design the compact array antennas, the triple resonances are made possible by exploiting the mutual resonance of the quarter-wave patch loaded

with the via (ground) wall and a patch and the mutual resonance of the slot and the strip-line. In addition, a novel aperture-coupled feed based on a differential feeding technique is proposed for compact feeding structure with a broadband characteristic by utilizing a tapered slot structure.

Additionally, this paper proposes a 6G antenna array which has a physically compact structure, high aperture efficiency, and a beam-steerability. A quarter-wave patch was used for miniaturization of the antenna element, and it is further miniaturized by loading a varactor. The series-offset RF feeding structure was used for a compact feeding structure, and a beam-steerability was made possible by exploiting the variable radiation phase of the antenna element depending on the bias voltage of the varactor. The standing wave series-fed antenna proposed in tis paper has a higher aperture than the conventional beam-steerable leaky-wave antenna.

The proposed differential feeding structure in the aperture-coupled feed, the mutual resonance of the quarter-wave patch loaded with the via wall and the patch, impedance matching technique in the series-fed antenna, and the compact DC-RF feeding structure are expected to be general enough to be the conventions in a multi-layered PCB microstrip antenna design.

**keywords : Differential feeding, dual-polarization, series-fed array, wide/dual-band microstrip antennas, high aperture efficiency**

*Student Number* : 2021-21733