

지능형 빔 재구성 시스템을 위한 3-D 빔 조향 안테나

이창용¹, 김용진², 정창원^{3*}

¹광운대학교, 전자공학과, ²인하공업전문대, 전기정보과

³서울과학기술대학교 NID융합기술대학원

3-D Beam Steering Antenna for Intelligent Beam-reconfigurable System

Chang Yong Lee¹, Yong-Jin Kim² and Chang Won Jung^{3*}

¹Department of Electronics Convergence Engineering, Kwangwoon University

²Department of Electrical Information, Inha Technical College

³Graduate School of NID Fusion Technology, Seoul National Univ. of Science and Technology

요 약 본 논문은 지능형 또는 스마트 안테나 시스템에 사용 할 수 있는 두 종류의 3-D 빔 조향 재구성 안테나를 제안하였다. 제안된 두 안테나는 삼각형(구조1.) 및 원형(구조2.)의 루프 구조와 구부러진 다이폴 안테나의 결합형 구조를 갖는다. 제안된 안테나는 하나의 안테나 소자로 4개의 스위치 동작에 따라 xy-평면으로 3개의 빔 State (0, 1, 2) 뿐만 아니라 xz-평면으로 3개의 빔 State (3, 4, 5) 도합 6개의 방향으로 빔 조향이 가능하다. 안테나 구조1.은 급전 부를 기준으로 대칭인 평형구조이며, 그라운드가 없기 때문에 다이폴 안테나와 유사한 이득을 가진다. 또한, 구조2.는 반원형태의 CPWG급전 그라운드(반사판)를 이용하여 지향성이 향상된 불 평형 구조를 갖는다. 동작 주파수는 2.5 GHz (구조1.), 2.55 GHz (구조2.)이며, 최대이득은 1.04 ~ 2.06 dBi (구조1.:전방향성 빔), 1.6 ~ 4 dBi (구조2.:지향성 빔) 이다. 또한 xy-평면과 xz-평면 각각의 전체 반 전력빔폭(HPBW)은 구조1.에서 160°이상 그리고 구조2.에서 125° 이상의 넓은 빔 폭을 갖는다.

Abstract In this paper we propose two types of reconfigurable 3-D beam steering antenna for intelligent or smart antenna system. Proposed antennas are composed of triangular(structure1.) or circular(structure2.) loop structure and bended dipole antenna structure. This antenna can steer beam pattern of 6 direction at xy-plane state (0, 1, 2) and xz-plane state (3, 4, 5) by 4 switch motion with one antenna element. Antenna structure1. is symmetric equilibrium structures based on feeding point. There is no grounding point. As a result, designed antenna's gain is similar to dipole antenna. Also, As unbalanced structure by using CPWG in the form of a semicircular, structure2. is enhanced directivity. The operation frequency of antenna are 2.5 GHz(Structure1.) and 2.55 GHz(Structure2.), maximum gain is 1.04 ~ 2.06 dBi(Structure1. : Omni-directional beam), 1.6 ~ 4 dBi(structure2. : Directional beam). The overall HPBW is about over 160° in the both of the xy-plane and xz-plane at structure1. and over 125° at structure2.

Key Words : 3-D beam steering, Reconfigurable antenna, Intelligent antenna, Dipole antenna, Loop antenna

1. 서론

최근 간섭신호 및 채널 특성에 의한 성능저하를 줄이

기 위한 지능형 안테나 또는 스마트 안테나에 대한 관심이 증대 되고 있다. 이러한 안테나는 스마트 빔 패턴을 가지는 재구성 지향성 안테나가 있다 [1]. 지능형 안테나

이 연구는 서울과학기술대학교 교내학술연구비 지원으로 수행되었음.

*Corresponding Author : Chang Won Jung

Tel: +82-10-9969-4078 email: changwoj@snut.ac.kr

접수일 12년 07월 17일

수정일 12년 07월 31일

게재확정일 12년 10월 11일

시스템은 일반적으로 단일 안테나 상에 스위치 소자 (Diode, MEMS switch)를 통한 빔 조향 안테나 시스템 [2] 과 안테나들의 배열의 위상변화를 이용한 적응-배열 (adaptive-array) 안테나 시스템이 있다 [3]. 두 안테나 시스템은 신호의 주 방사 방향인 주엽(main lobe)의 방향을 원하는 방향으로 조향 할 수 있다. 이러한 안테나 시스템을 이용하면 잡음 신호의 간섭을 줄일 수 있으며, 시스템이 의도한 방향으로 신호를 집중하여 시스템의 보안을 향상시킬 수 있다 [4,5]. 또한 공간적인 방향성을 가지는 안테나를 이용하면 링크의 품질을 개선하여 무선 네트워크의 용량을 늘릴 수 있으며, 기존의 셀룰러 섹터화 방식 (cellular sectorization scheme)의 확장 기능으로 사용 할 수 있다 [6].

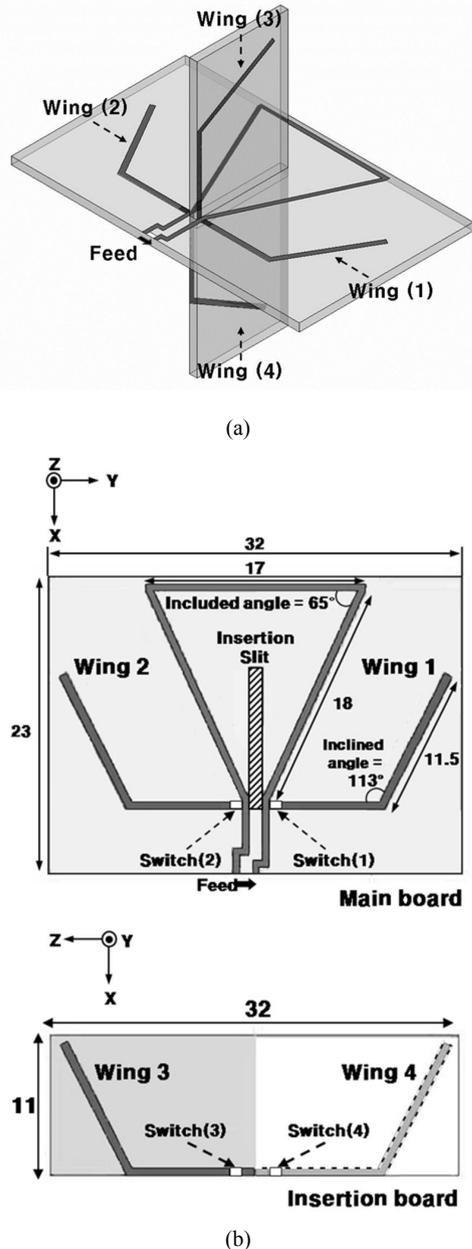
본 논문에서는 지능형 안테나 시스템에 적용 가능하며, 기존의 안테나 [7]과 같이 xy-평면에서의 빔 제어뿐만 아니라 빔 효율성을 증가 시킬 수 있도록 xz-평면에서도 빔 조향이 가능한 지능형 빔 조향 재구성 안테나를 제안 한다. 안테나의 기본적인 형태는 다이폴(Dipole)과 루프 (Loop)의 결합형 구조이며, 이는 다이폴과 루프 안테나가 특정 구조로 결합 되면 빔이 지향성을 가지는 특성을 이용한 것이다 [8, 9]. 또한, 제안한 두 가지의 안테나들은 PCB(FR-4) 상에 평면형으로 설계 되었으며, 제작 및 조립이 용이하다. 안테나는 xy-평면과 xz-평면상에서 4개의 스위치를 이용하여 빔의 재구성이 가능하며 6가지의 빔 방향을 갖는다. 제안한 안테나의 동작 특성 및 지능형 안테나 시스템에 적용 가능성은 시뮬레이션 결과 및 측정 결과를 통해 확인 하였다.

2. 안테나 구조 및 설계

2.1 다이폴 루프 결합형 구조1. (평형 구조)

그림 1은 제안된 다이폴-루프 결합형 3D 빔 조향 안테나 구조1.을 보여준다. 전체적인 안테나의 구조는 그림 1(a)와 같이 네 개의 날개(Wing 1, 2, 3, 4) 구조 방사체를 포함한 ‘+’형태의 구조이다. 삼각형의 루프와 다이폴 구조(Wing 1, 2), 두 개의 스위치(Switch 1, 2)는 메인기판 (Main board)에 설계되었다. 또한 구조1.은 그림 1(b)와 같이 다이폴 구조(Wing 3, 4)와 두 개의 스위치(Switch 3, 4)가 설계된 삽입기판(Insertion board)이 메인기판으로 삽입되는 형태로 구성되었다. 제안한 구조1.은 메인보드에 급전점이 존재한다. 네 개의 가상스위치는 루프와 두 다이폴 구조 사이의 결합부에 위치한다. 네 개의 스위치 조합에 따라 총 6개의 스위치 조합구조로 빔 조향이 가능

하며, 스위치 조합은 표 1에 정리하였다.



[그림 1] 제안된 3D 안테나 구조도(단위: mm)

(a) 제안된 3D 안테나

(b) 안테나 각 기판의 평면도 (Wing1 2, Wing3 4)

[Fig. 1] The proposed 3D antenna structure

(a) proposed 3D antenna

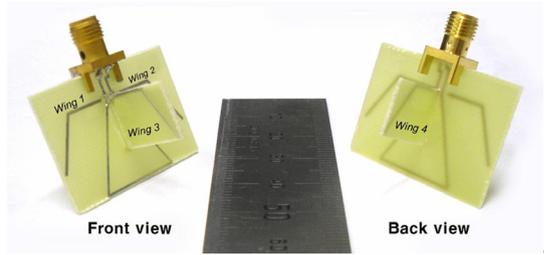
(b) The view of antenna parts (Wing1 2, Wing3 4)

[표 1] 스위치 ON/OFF에 따른 안테나 State

[Table 1] State configurations by the ON/OFF condition of switches

State	Switch (1)	Switch (2)	Switch (3)	Switch (4)
0	ON	ON	OFF	OFF
1	ON	OFF	OFF	OFF
2	OFF	ON	OFF	OFF
3	OFF	OFF	ON	ON
4	OFF	OFF	ON	OFF
5	OFF	OFF	OFF	ON

가상스위치의 ON 상태는 루프와 다이폴 결합부가 연결되어 있는 short 상태를 의미하고, 스위치의 OFF 상태는 결합부가 연결되어 있지 않는 open 상태를 의미한다. 각각의 상태에서 방사되는 빔의 방향은 네 개의 스위치의 동작에 따라 다르며, 이것은 지능형 안테나 시스템에서 빔의 조향의 변화를 의미한다. 두 스위치는 같은 평면 상에 위치하고 있으며, 구조1.의 State (0)에서의 대칭적 구조는 State (1, 2)로 동작 시 비대칭적 구조로 바뀌게 된다. 비대칭적 구조의 State (1, 2)의 최대 빔 방향은 수평면(azimuth plane)상에서 변화한다. 다이폴 구조는 세 가지 State (0, 1, 2)의 주파수를 동일하게 맞추기 위해 본래의 다이폴 구조에서 구부러진 다이폴 구조로 변형되었다. State (0)의 공진주파수는 2.6 GHz이다. 하지만 스위치 동작에 따라 State (0)와 State (1, 2)의 안테나 동작 구조가 변하기 때문에 State (1, 2)의 공진주파수는 State (0)과는 다르게 2.5 GHz이다. 세 상태의 공진주파수를 동일한 주파수 2.5 GHz로 맞추기 위해 다이폴을 구부러진 형태로 하였다. 내부 각(Inclined angle)이 109° ~ 116°일 때, 모든 State의 반사손실(return loss)는 -10 dB 이하이다 (VSWR<2). 따라서 본 논문에 설계된 안테나 구조1.의 내부 각은 109° ~ 116°중 최적의 각도를 113°로 결정하였다. 또한 반사손실과 이득을 향상시키기 위해 루프 구조를 삼각루프 형태로 하였다. 삼각형 내부의 각도(Included angle)는 60°이며, 입력 임피던스(input impedance)는 50 Ω 에 가깝게 정합되었다 [10]. 메인 보드의 크기는 32 × 23 mm²이고, 삽입된 보드의 크기는 23 × 32 mm²이다. 각 보드에 설계된 구부러진 다이폴 구조의 폴(pole)의 길이는 21.5mm이다. 그림 2는 제안된 안테나의 사진이다. 안테나는 인쇄회로기판에 구현된다. PCB의 두께는 1mm이며 유전율(ϵ_r)은 4.4이다.

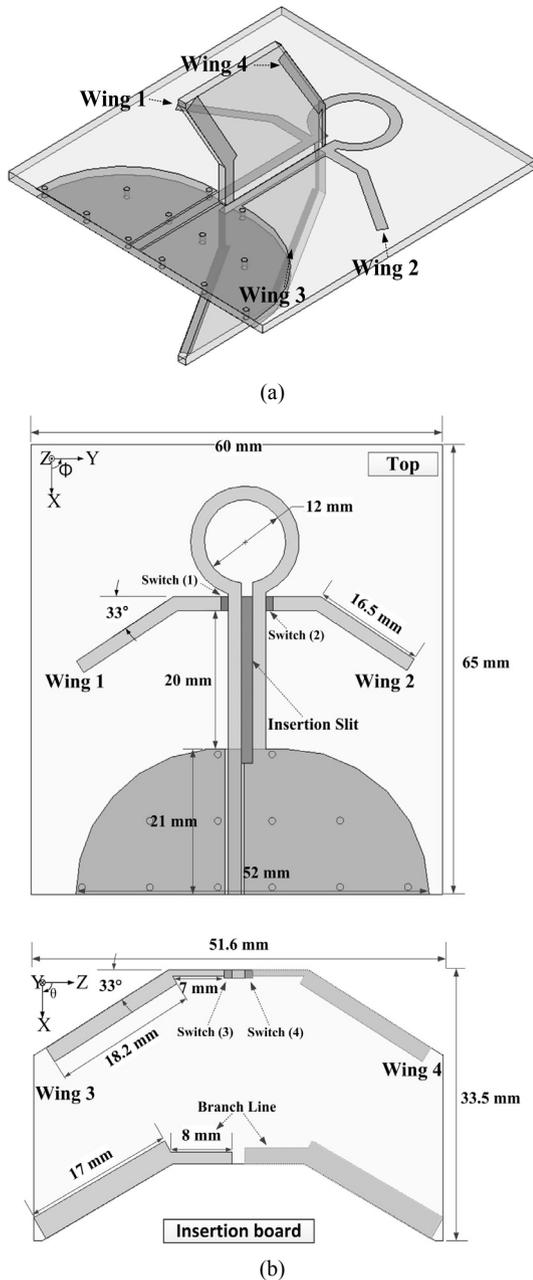


[그림 2] 제안한 안테나 사진

[Fig. 2] Photograph of the proposed antenna

2.2 다이폴 루프 결합형 구조2. (불평형 구조)

본 논문에서 제안한 다이폴-루프 결합형 3D 빔 조향 재구성 안테나 구조2.를 그림 3에 나타내었다. 구조2.는 안테나 구조1.과 같이 루프와 네 개의 다이폴 구조 방사체로 구성되어 있으며, 네 개의 가상 스위치가 루프와 다이폴 구조 결합부에 위치한다. 스위치 조합은 구조1.과 동일하며 표 1에서 확인할 수 있다. 구조2.의 최대 빔 방향의 변화는 State (0) 상태의 최대 빔 방향을 기준으로 수평면 상에서 변화하고, State (4, 5) 동작 시에는 State (3) 상태의 최대 빔 방향을 기준으로 수직면(elevation plane) 상에서 변화 한다. 안테나 구조2.는 구조1.에 비해 향상된 지향성을 갖게 하기 위해 CPWG(Co-planar wave guide with ground)급전 구조로 설계 하였다. 구조2.는 CPWG 구조의 그라운드 형태를 반원으로 하여 State (0, 1, 2) 동작 상태의 빔의 지향성을 높였으며, State (3, 4, 5)의 지향성을 향상시키기 위해 CPWG 그라운드와 연결된 구부러진 가지선(Branch Line)을 추가적으로 설계하였다. 또한 State (1, 2)와 State (4, 5)의 빔 조향 변화 각을 향상시키기 위해 다이폴 구조를 구부러진 다이폴 구조로 변형하였다. 다이폴 구조의 구부러진 각이 33° 일 경우 State (1, 2) 동작 상태의 최대 빔 방향이 State (0) 상태의 최대 빔 방향에서 30° 변화 하였으며, 또한 State (3) 상태의 최대 빔 방향을 기준으로 State (4, 5) 동작 시 최대 빔 변화 각이 30° 가 되었다. 구조2.의 메인보드의 크기는 구조1.에 비해 커진 60 × 65 mm²이고, 삽입보드의 크기는 51.6 × 33.5 mm²이다. 원형 루프의 지름은 12 mm이고, 다이폴 구조의 길이는 20.5 mm이다. 구조2.는 유전율 4.4(ϵ_r)의 FR-4 기판에 설계되었으며 기판의 두께는 1.6 mm 이다.

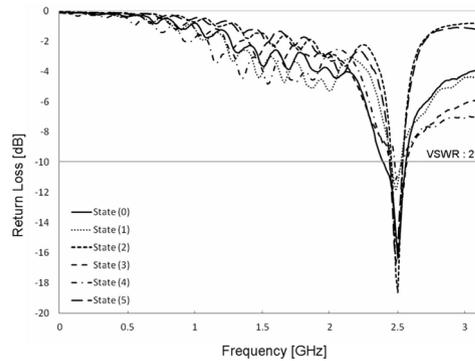


[그림 3] 제안된 3D 안테나 구조도 (단위: mm)
 (a) 제안된 3D 안테나
 (b) 안테나의 각 부품별 평면도
 [Fig. 3] The proposed 3D antenna (Unit: mm)
 (a) proposed 3D antenna
 (b) The view of antenna parts

3. 안테나 측정결과 및 토론

3.1 다이폴 루프 결합형 구조1. (평형 구조)

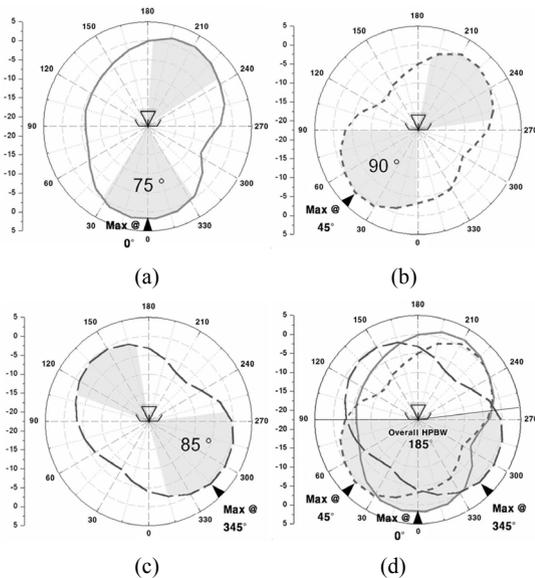
측정된 안테나 구조1.의 반사계수(S_{11}) 결과가 그림 4에 나타나 있다. 안테나 구조가 스위치 동작에 따라 변화하여도 각 상태에서의 반사계수(S_{11})는 동일하다. 각 스위치 동작상태의 중심 주파수는 2.5GHz 이며, 대역폭은 60MHz 이다(2.48 ~ 2.54 GHz, VSWR < 2).



[그림 4] 측정된 반사손실 그래프 (S_{11})
 [Fig. 4] Measured return loss plots (S_{11})

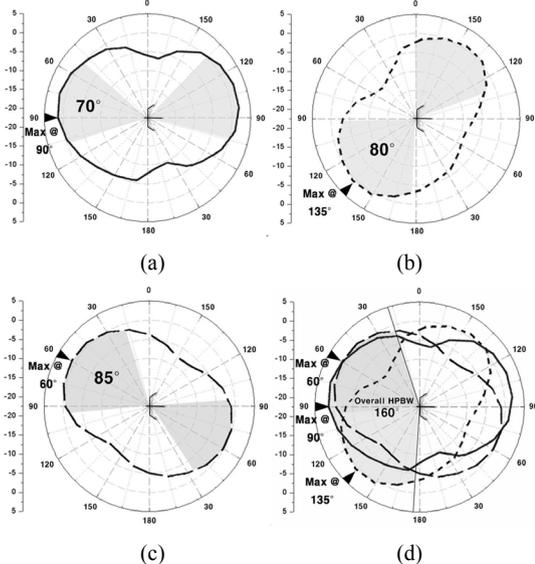
측정된 빔 패턴은 그림 5와 그림 6에 나타내었다. 또한 구조1.의 성능(최대 방사 방향, 최대이득, 반전력빔폭) 값은 표 2에 정리하였다. 빔 패턴의 방향은 네 개의 스위치의 동작에 따라 달라진다. State (0), State (1), State (2)의 경우 최대 방사 빔 방향은 xy-평면상에서 조향된다. State(0)의 경우 최대 빔 방향이 x축 기준으로 $\Phi_{max}=0^\circ$ 방향이며 이득은 2.06 dBi이다. State (1)에서는 최대 빔 방향이 x축과 -y축 사이에서 $\Phi_{max}=45^\circ$ 의 변화 각을 가지며 이득은 1.6 dBi이다. 안테나가 State (2)로 동작 시에는 최대 빔 방향은 x축과 +y축 사이에서 $\Phi_{max}=345^\circ$ 로 변화하며 Gain은 1.5 dBi이다.

State (0, 1, 2)의 합쳐진 방사패턴의 반전력빔폭은 185° 이다. 안테나의 스위치 동작에 따른 State (3), State (4), State (5)는 방사 빔이 xz-평면상에서 변화한다. State (3)은 xz-평면상 $\theta_{max}=90^\circ$ 방향으로 최대방사가 되며 Gain은 1.04 dBi이다. State (4)의 최대 빔 방향은 x축과 -z축 사이의 $\theta_{max}=185^\circ$ 이며 Gain은 1.69 dBi이다. 안테나 State (5)의 최대 빔 방향은 State (4)와 반대방향인 x축과 +z축 사이의 $\theta_{max}=30^\circ$ 이고 Gain은 1.5 dBi이다. 이 세 상태의 반전력빔폭은 160° 이다.



[그림 5] 동작 주파수에서의 방사패턴($\theta=90^\circ$)
 (a) State 0. (b) State 1. (c) State 2.
 (d) State 0, 1, 2의 반전력빔폭

[Fig. 5] Radiation pattern at operate frequency($\theta=90^\circ$)
 (a) State 0. (b) State 1. (c) State 2.
 (d) The overall HPBW of state 0, 1, 2



[그림 6] 동작 주파수에서의 방사패턴($\Phi=90^\circ$)
 (a) State 3. (b) State 4. (c) State 5.
 (d) State 3, 4, 5의 반전력빔폭

[Fig. 6] Radiation pattern at operate frequency ($\Phi=90^\circ$)
 (a) State 3. (b) State 4. (c) State 5.
 (d) The overall HPBW of state 3, 4, 5

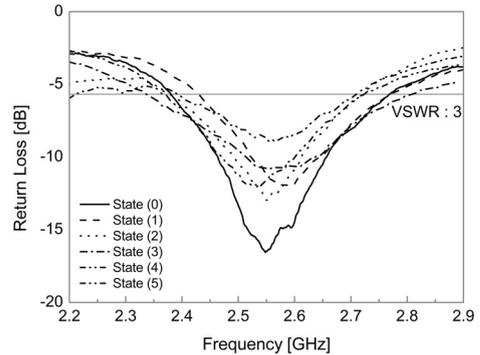
[표 2] 측정된 구조1.의 세부성능

[Table 2] The detailed performance of the measured structure1.

State	Max. beam direction ($^\circ$)	Peak Gain (dBi)	HPBW ($^\circ$)
0	$\Phi_{max}=0$	2.06	75
1	$\Phi_{max}=45$	1.6	90
2	$\Phi_{max}=345$	1.5	85
3	$\theta_{max}=90$	1.04	70
4	$\theta_{max}=135$	1.69	80
5	$\theta_{max}=60$	1.5	85

3.2 다이폴 루프 결합형 구조2. (불평형 구조)

그림 7은 3D 빔 조향 안테나 구조2.의 반사계수 측정 결과이다. 각 State 상태에서 공진주파수는 서로 상이 하지만 그 차이가 크지 않음을 확인할 수 있다. 구조2. 안테나의 동작주파수는 2.55 GHz이고, VSWR 3:1을 만족하며 대역폭은 300 MHz이다.

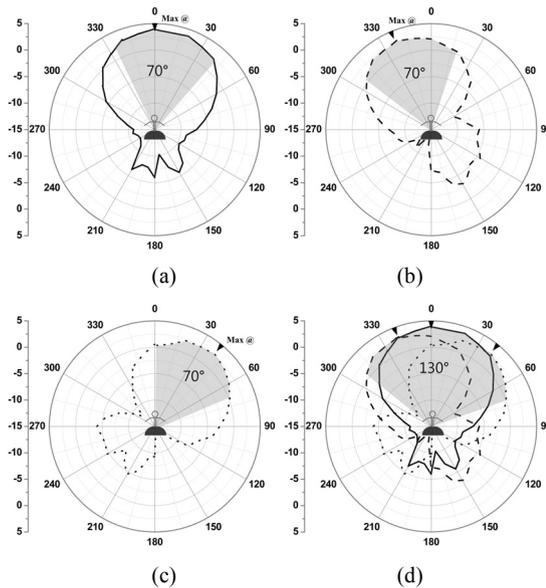


[그림 7] 측정된 반사손실 그래프 (S_{11})

[Fig. 7] Measured return loss plots (S_{11})

측정된 구조2.의 빔 패턴을 그림 8, 그림 9에 나타내었다. 빔 패턴은 안테나의 동작주파수 2.55 GHz에서 측정되었으며, 구조1.의 패턴에 비해 향상된 지향성을 가진다. State (0, 1, 2)의 경우 최대 빔 방향은 xy-평면상에서 변화하고, State (3, 4, 5) 동작 상태에서는 빔이 xz-평면상에서 변화한다. State(0)의 경우 최대 빔 방향이 x축 기준으로 $\Phi=0^\circ$ 방향이며, 이득은 4 dBi이다. State (1)에서는 최대 빔 방향이 x축과 -y축 사이에서 $\Phi=25^\circ$ 의 변화각을 가지며, 이득은 3.2 dBi이다. State (2) 동작 시에는 최대 빔 방향은 x축과 +y축 사이에서 $\Phi=40^\circ$ 이고, Gain은 2.8 dBi이다. State (0, 1, 2)의 합쳐진 방사패턴의 반전력

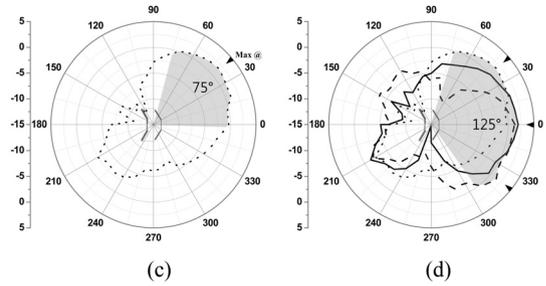
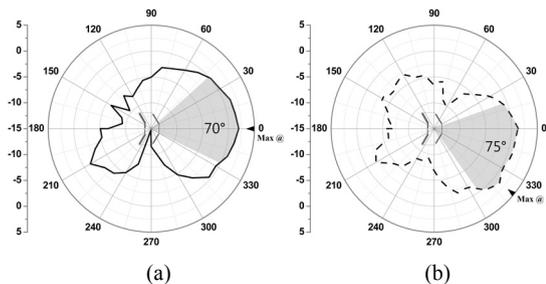
빔폭은 130°이다. 또한 State (3)은 xz-평면상 $\theta=90^\circ$ 방향으로 최대방사가 되며 Gain은 2 dBi이다. State (4)의 최대 빔 변화각은 x축과 -z축 사이의 $\theta=40^\circ$ 이며, Gain은 1.6 dBi이다. 안테나 State (5)의 최대 빔 변화각은 State (4)와 반대 방향인 x축과 +z축 사이의 $\theta=40^\circ$ 이고 Gain은 1.8 dBi이다. 이 세 상태의 반전력빔폭은 125°이다. State (0, 1, 2)에 비해 State (3, 4, 5) 동작 상태의 이득이 감소한 원인에는 수직 방향에서 빔 조향 시 그라운드 영향이 적게 받아 지향성이 감소하였고, 그라운드와 연결된 Branch Line으로 인하여 안테나의 효율이 떨어졌기 때문으로 분석된다.



[그림 8] 동작 주파수에서의 방사패턴 ($\theta=90^\circ$)

(a) State 0. (b) State 1. (c) State 2.
(d) State 0, 1, 2의 반전력빔폭

[Fig. 8] Radiation pattern at operate frequency ($\theta=90^\circ$)
(a) State 0. (b) State 1. (c) State 2.
(d) The overall HPBW of state 0, 1, 2



[그림 9] 동작 주파수에서의 방사패턴 ($\Phi=90^\circ$)

(a) State 3. (b) State 4. (c) State 5.
(d) State 3, 4, 5의 반전력빔폭

[Fig. 9] Radiation pattern at operate frequency ($\Phi=90^\circ$)

(a) State 3. (b) State 4. (c) State 5.
(d) The overall HPBW of state 3, 4, 5

[표 3] 측정된 구조2의 세부성능

[Table 3] The detailed performance of the measured structure2.

State	Max. beam direction ($^\circ$)	Peak Gain (dBi)	HPBW ($^\circ$)
0	$\Phi_{max}=0$	4	70
1	$\Phi_{max}=335$	3.2	70
2	$\Phi_{max}=40$	2.8	70
3	$\theta_{max}=90$	2	70
4	$\theta_{max}=130$	1.6	75
5	$\theta_{max}=50$	1.8	75

4. 결론

본 논문에서는 3-D 스마트 안테나 시스템에 적용 가능한 재구성 빔 조향 안테나를 제안하였다. 측정 결과 제안한 안테나 구조 1.은 스위치 동작에 따라 xy-평면과 xz-평면상의 방향으로 최대방사를 하며, 동일한 중심주파수 2.5 GHz에서 동작하였다. 전체적인 이득은 근사적으로 2 dBi이며, 안테나의 동작 상태에 따라 ± 1 dBi 이내의 변화가 있다. 안테나 구조 2.는 구조 1.과 동일하게 동작하며, 2.55 GHz에서 동작하였다. 동작 State (0, 1, 2)에서 이득은 모두 2.8 dBi 이상으로 최대이득은 4 dBi이며, State (3, 4, 5) 동작 시에는 이득이 1.6 dBi 이상이다. 본 논문은 측정결과를 통해 제안된 두 구조의 안테나의 성능 및 네 개의 스위치 조합에 따라 3D 빔 조향 동작을 확인하였다. 따라서 제안된 구조의 안테나들은 지능형 안테나 시스템을 포함한 다양한 무선 시스템에 적용이 가능하다.

Reference

[1] A. Alexiou, and M. Haardt, "Smart antenna technologies for future wireless systems: trends and challenges," IEEE Communications Magazine, Vol. 42, No. 9, pp. 90-97, September 2004.

[2] Jung. C.W., Lee. M.J., Li. G.P., and De Flaviis, F, "Reconfigurable Scan-Beam Single-Arm Spiral Antenna Integrated with RF-MEMS Switches," IEEE Trans. Antennas Propag., Vol. 54, No. 2, pp. 455-463, February 2006.

[3] T. Ojanpera and R. Prasad, "An overview of third-generation wireless personal communications," IEEE JOURNALS, Vol. 5, pp. 59-65, December 1998.

[4]. Manoj Adhikari and Karl F. Warnick, "Miniature Radiation Pattern Reconfigurable Antenna for 2.4 GHz Band," IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, pp. 1-4, July 11-17, 2010.

[5]. Wenquan Cao, Bangning Zhang, Aijun Liu, Tongbin Yu, Daosheng Guo, and Kegang Pan, "A Reconfigurable Microstrip Antenna With Radiation Pattern Selectivity and Polarization Diversity," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol 11, pp. 453-456, May 2012.

[6] Lopez, A.R, "Performance predictions for cellular switched-beam intelligent antenna systems," IEEE Communications Magazine, Vol 34, pp. 152-154, October 1996.

[7] S. Ha, Y. Jung, and Y. Kimand, "Reconfigurable Beam-Steering Antenna Using Dipole and Loop Combined Structure for Wearable Applications," Vol. 34, No.1, pp. 1-8, February 2012.

[8] D.-H. Kwon, E.V. Balzovsky, Y.I. Buyanov, Y. Kim, and V.I. Koshelev, "Small printed combined electric-magnetic type ultrawideband antenna with directive radiation characteristics," IEEE Trans Antennas Propag, Vol. 56, pp. 237-241, January 2008.

[9] D. H. Kwon, "On the radiation Q and the gain of crossed electric and magnetic dipole moment," IEEE Trans Antennas Propag, Vol. 53, pp. 1681-1687, May 2005.

[10] C. A. Balanis, "Antenna Theory Analysis and Design 2nd Ed", New York: John Wiley & Sons, 2001.

이 창 용(Chang Yong Lee)

[준회원]



- 2012년 2월 : 광운대학교 전자공학과 학사 졸업
- 2012년 3월 ~ 현재 : 광운대학교, 대학원 전자공학과 석사과정

<관심분야>
안테나, RF

김 용 진(Yong jin Kim)

[정회원]



- 1996년 2월 : 오하이오주립대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2003년 6월 : 오하이오주립대학교 전기공학과 (공학박사)
- 2003년 7월 ~ 2007년 3월 : 삼성종합기술원
- 2007년 3월 ~ 현재 : 인하공업전문대학 전기정보과 조교수

<관심분야>
RF, 소형 안테나, 지향성 안테나, 최적화 알고리즘

정 창 원(Chang won Jung)

[정회원]



- 2001년 12월 : University of Southern California, 전자공학 (석사)
- 2005년 6월 : University of California, Irvine, 전자공학 (박사)
- 1997년 1월 ~ 2000년 6월 : LG 정보통신, 연구원
- 2005년 7월 ~ 2005년 10월 : University of California, Irvine, Post Doctor
- 2005년 11월 ~ 2008년 4월 : 삼성종합기술원, 전문연구원
- 2008년 5월 ~ 현재 : 서울과학기술대학교, NID 융합기술 대학원, 조교수

<관심분야>
안테나, RF, EMI/EMC, RF-MEMS, 센서