

높은 입력 임피던스를 가지는 테라헤르츠 Yagi-Uda 안테나

한경호 · Troung Khang Nguyen · 박익모[†]

아주대학교 전자공학부
Ⓞ 443-749 경기도 수원시 영통구 원천동 산 5

한해욱

포항공과대학교 전자컴퓨터공학과
Ⓞ 790-784 경상북도 포항시 남구 효자동 산 31

(2009년 2월 19일 받음, 2009년 3월 25일 수정본 받음, 2009년 3월 25일 게재 확정)

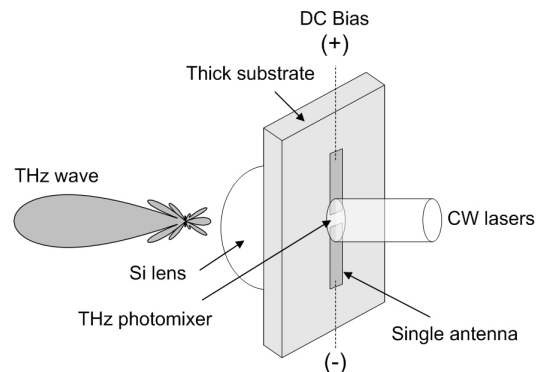
본 논문에서는 높은 입력 임피던스를 가지는 테라헤르츠 Yagi-Uda 안테나를 제안하였다. 제안된 Yagi-Uda 안테나는 두께가 얇은 기판 위에 설계하여 기판의 비유전율에 의한 안테나의 임피던스 저하를 줄이고 Yagi-Uda 안테나 고유의 복사패턴을 가지도록 하였다. 전 파장 길이를 가지는 U-형태의 다이폴을 driver로 사용하여 공진주파수에서 4,400 Ω 정도의 높은 입력저항을 얻을 수 있었다. 따라서 제안된 Yagi-Uda 안테나는 기존의 테라헤르츠 안테나들에 비하여 증가된 테라헤르츠파 출력을 얻을 수 있다.

주제어: Terahertz antenna, Yagi-Uda antenna, Photomixer, High input impedance

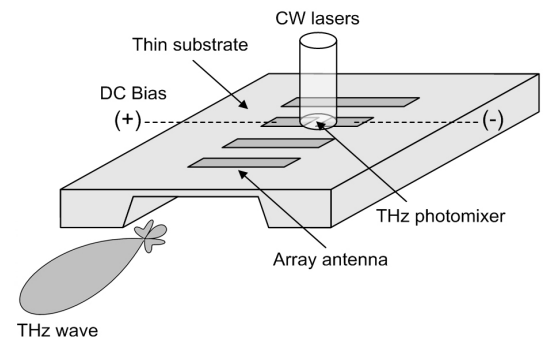
I. 서 론

테라헤르츠 안테나는 테라헤르츠 신호원인 포토믹서와, 포토믹서에서 발생한 테라헤르츠파를 자유공간으로 복사시키는 안테나, 그리고 포토믹서에 직류전압을 가하기 위한 바이어스 선으로 구성되어 있다. 포토믹서는 연속파 형태의 테라헤르츠파를 발생하는 신호원이며, 최근 각광 받고 있는 테라헤르츠 신호원들 중의 하나이다. 포토믹서는 넓은 주파수 가변성을 가지며, 소형화가 가능하고 상온에서 동작하는 장점들이 있기 때문에 안테나와 결합하여 테라헤르츠파의 발생 및 검출에 많이 사용되고 있다.^[1-11] 그러나 포토믹서를 구성하는 소자는 물질 특성상 10,000 Ω 이상의 매우 높은 입력 임피던스를 가지고 있기 때문에 기존의 50 Ω 신호원에 정합하여 사용하던 안테나를 결합하게 되면 두 소자 간에 심각한 임피던스 부정합이 발생하게 되어 테라헤르츠파의 출력이 저하된다.^[12] 따라서 이러한 임피던스 부정합을 개선하기 위해서는 높은 입력 임피던스를 가지는 안테나의 연구가 필요하다. 일반적으로 테라헤르츠 안테나는 그림 1(a)와 같이 단일 안테나를 두꺼운 LT-GaAs 기판 위에 설계한다. 안테나에 바이어스 전압을 가한 상태에서 포토믹서에 서로 다른 주파수를 가지는 두 레이저 빔을 입사하면 전극 사이에 전자·정공쌍(Electron-hole pair)이 생성된다. 이들 전자·정공쌍(Electron-hole pair)이 바이어스 전압에 의하여 가속화되면 안테나에 전류가 흐르게 되어 두 주파수의 차이가 테라헤르츠 주파수가 되는 전자기파를 발생하게 된다. 이러한 구조의 안테나는 기판 뒷면에 실리콘 렌즈를 결합해서 사용하기 때문에 단일 안테나 구조일 때보다 높은 지향성을 얻을 수 있는 장점이 있다. 그러나 기판의 비유전율에 의하여 안테나의 입력 임피

던스가 $\{(\epsilon_r+1)/2\}^{1/2}$ 만큼 감소하게 된다.^[14] 그림 1(b)에는 두께가 얇은 기판 위에 설계된 안테나를 나타내었다. 기판의 두께를 얇게 설계하면 기판의 유효 유전율이 낮아지기 때문에 기판 쪽으로 복사되는 빔을 줄일 수 있게 된다. 따라서



(a) 두꺼운 기판 위의 안테나



(b) 얇은 기판 위의 안테나

그림 1. 테라헤르츠 안테나.

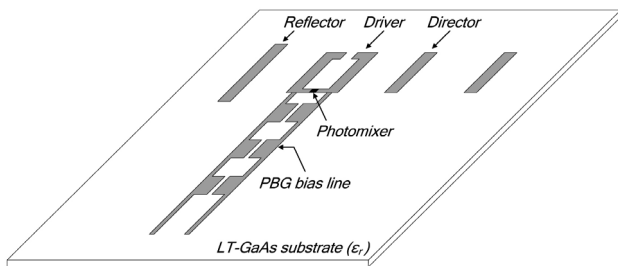
[†]E-mail: ipark@ajou.ac.kr

안테나 고유의 복사패턴을 얻을 수 있게 되고, 배열 안테나로 설계 시 실리콘 렌즈를 사용하지 않고도 높은 지향성을 얻을 수 있다. 또한, 기관의 유전율에 의한 안테나의 임피던스 저하를 줄일 수 있기 때문에 두꺼운 기관 위에서 설계된 안테나에 비하여 높은 입력 임피던스를 얻을 수 있다.

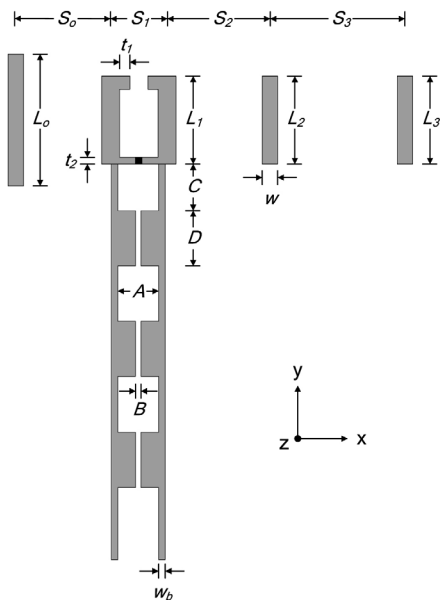
본 논문에서는 이러한 얇은 기관 위에서 높은 입력 임피던스를 가지는 안테나를 설계하였다. 제안한 안테나는 U-형태의 다이폴을 driver로 가지는 Yagi-Uda 안테나이다. 직선형 전 파장 다이폴에 비하여 높은 입력 임피던스 특성을 가지는 U-형태의 다이폴을 Yagi-Uda 안테나의 driver로 사용하여 안테나의 입력 임피던스를 크게 증가시켰다. 안테나 설계 시 안테나의 입력 임피던스와 복사효율을 고려하여 전체효율이 가장 높게 나타나는 구조로 최적화하였다.

II. 안테나 구조

그림 2에는 제안한 Yagi-Uda 안테나의 구조를 나타내었다. 그림 2(a)는 안테나의 입체도이고 그림 2(b)는 안테나의 평면도이다. 제안한 안테나는 급전소자를 전 파장 다이폴을 접은



(a) 입체도



(b) 평면도

그림 2. 안테나의 구조도.

U-형태의 다이폴을 driver로 사용하였다. U-형태의 다이폴 한쪽 길이는 L_1 이고 다이폴 끝단을 접은 길이는 t_1 이며, 다이폴 사이 간격은 S_1 이다. Driver 중앙에는 테라헤르츠 신호원인 포토믹서가 결합되어 있고 입력단의 선폭은 t_2 이다. Driver의 왼쪽에 reflector를 배치하였다. Reflector의 길이는 L_0 이고 driver와 reflector 사이 간격은 S_0 이다. Driver의 오른쪽에는 2개의 director를 배열하였고 첫 번째 director와 두 번째 director의 길이는 각각 L_2, L_3 이다. Driver와 첫 번째 director 사이의 간격은 S_2 이고 첫 번째 director와 두 번째 director 사이 간격은 S_3 이다. 포토믹서에 DC 바이어스를 가하기 위하여 driver에 선폭이 w_b 인 바이어스 선을 연결하였고 선로 사이 간격은 A 만큼 떨어져 있다. 또한 바이어스 선으로 교류전류가 흐르는 것을 차단하기 위하여 Photonic Bandgap(PBG) 셀을 삽입하였다. 첫 번째 PBG 셀은 driver와 C 만큼 떨어져 있고 각 PBG 셀의 폭은 D 이며 PBG 셀 사이의 틈은 B 이다. 제안한 U-형태의 driver를 가지는 Yagi-Uda 안테나는 비유전율(ϵ_r)이 12.9이고 면적이 $1,400 \times 1,400 \mu\text{m}^2$, 두께가 $4 \mu\text{m}$ 인 LT-GaAs 기관 위에서 설계하였다.

III. 안테나 설계 및 특성

안테나의 설계는 CST사의 3D 전자기장 해석틀인 Microwave Studio(MWS)를 사용하여 최적화하였다. 안테나 설계 시 포토믹서의 입력 저항을 $10,000 \Omega$ 으로 가정하여 반사효율을 계산하였고, 안테나의 복사효율과 반사효율을 고려한 식 (1)의 전체 효율을 최적화 설계변수로 정하였다.

$$\eta_t = \eta_r (1 - |\Gamma|^2) \tag{1}$$

여기서 η_r 은 안테나의 복사효율이고, Γ 는 반사계수이며, $1 - |\Gamma|^2$ 은 포토믹서와 안테나 사이의 반사효율을 나타낸다.^[15] 그림 3은 Yagi-Uda 안테나의 driver 종류에 따른 입력 저항 특성을 나타내었다. Yagi-Uda 안테나의 driver를 일반적으로 사용되는 반 파장 다이폴로 설계하면 입력 저항이 매우 낮게 나타나지만 직선형 전 파장 다이폴을 사용하여 설계하면 2,600

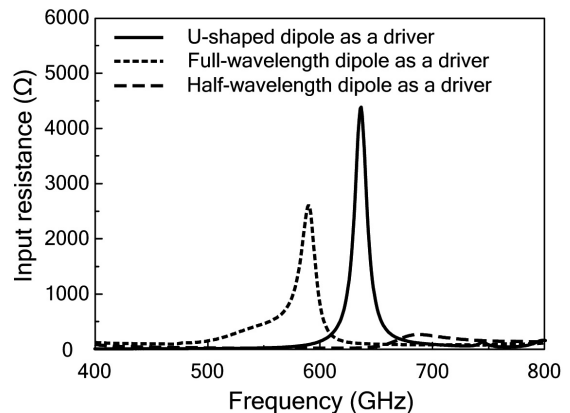


그림 3. Driver의 종류에 따른 입력 저항.

Ω 정도의 높은 입력 저항을 가진다.^[16] 이 구조의 안테나는 기존에 설계된 듀얼 다이폴^[12]이나 플리드 다이폴 안테나^[17]에 비하여 포트믹서와의 임피던스 부정합이 개선된 구조이다. Driver를 직선형 전 파장 다이폴을 접은 U-형태의 다이폴로 사용하여 최적화를 하면 4,400 Ω 정도의 증가된 입력 저항을 얻을 수 있다. 따라서 제안한 Yagi-Uda 안테나는 전 파장 다이폴을 driver로 가지는 Yagi-Uda 안테나에 비하여 임피던스 정합 특성을 보다 개선할 수 있을 것이다. 그림 4는 U-형태의 다이폴 양 끝단을 접은 길이(t_1)에 따른 안테나의 입력저항과 복사효율의 변화를 나타내었다. 접은 길이를 3 μm 에서 11 μm 까지 2 μm 씩 늘였을 때 안테나의 입력저항

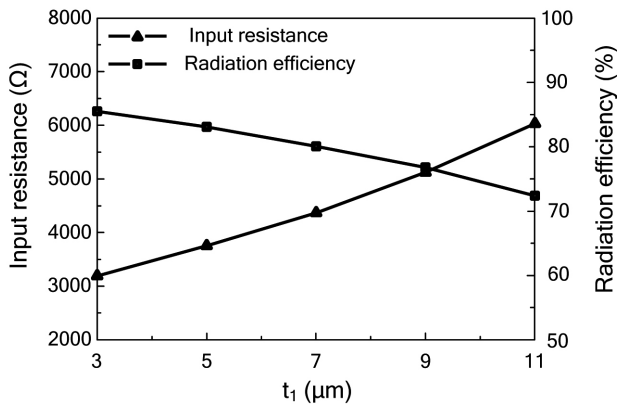


그림 4. U-형태의 다이폴 양 끝 단을 접은 길이(t_1)에 따른 안테나의 입력저항과 복사효율 특성.

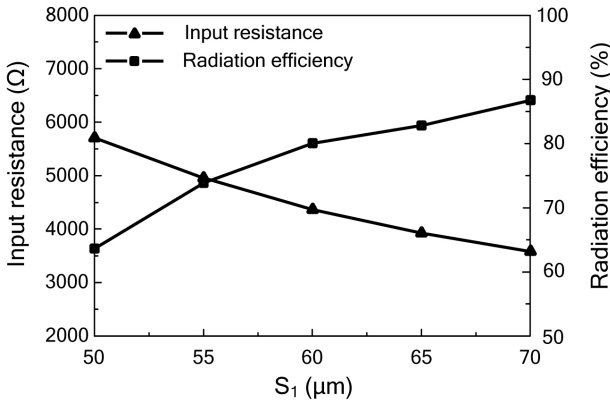


그림 5. U-형태의 다이폴 사이 간격(S_1)에 따른 입력저항과 복사효율 특성.

이 3,000 Ω 정도 증가하였고 복사효율은 15% 정도 감소하였다. 따라서 안테나를 접은 길이가 길수록 복사효율은 감소하지만 입력 저항은 증가시킬 수 있다는 것을 알 수 있다. 그림 5에는 U-형태의 다이폴 사이 간격(S_1)에 따른 입력저항과 복사효율의 변화를 나타내었다. S_1 이 50 μm 에서 70 μm 까지 5 μm 간격으로 증가함에 따라 입력저항이 2,500 Ω 정도 감소하였고 복사효율은 20% 정도 증가하였다. 따라서 두 금속 사이의 간격이 좁아질수록 안테나의 입력저항이 증가하고 복사효율은 감소한다는 것을 알 수 있다. 그림 6은 reflector, driver, director 소자들의 선폭(w)을 변화하였을 때 입력저항과 복사효율의 변화를 나타내었다. 선폭을 15 μm 에서 35 μm 까지 5 μm 간격으로 증가하였을 때 안테나의 입력저항이 3,500 Ω 정도 감소하였고 복사효율은 20% 정도 증가하였다. 따라서 Yagi-Uda 안테나 각 소자들의 선폭을 좁게 설계할수록 복사효율은 감소하지만 안테나의 입력저항을 증가시킬 수 있다. 이러한 특성을 바탕으로 표 1에는 안테나의 입력저항을 포트믹서의 입력저항으로 가정한 10,000 Ω 까지 증가시켰을 때 안테나의 특성 값들을 나타내었고, 전 파장 다이폴을 driver로 가지는 Yagi-Uda 안테나와 특성을 비교하였다. U1, U2, U3, U4는 모두 driver가 U-형태의 다이폴인 Yagi-Uda 안테나이고, F는 driver가 전 파장 다이폴인 Yagi-Uda 안테나이다. 안테나의 입력 저항을 증가시키에 따라서 복사효율이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 식 (1)를 이용하여 계산한 안테나의 전체효율은 driver를 U-형태로 설계하였을 경우에는 57.8%에서 67.8%로 계산되었고, driver를 전 파장 다이폴로 설계하였을 때는 52.8%로 계산되었다. 표 1에 의하여 안

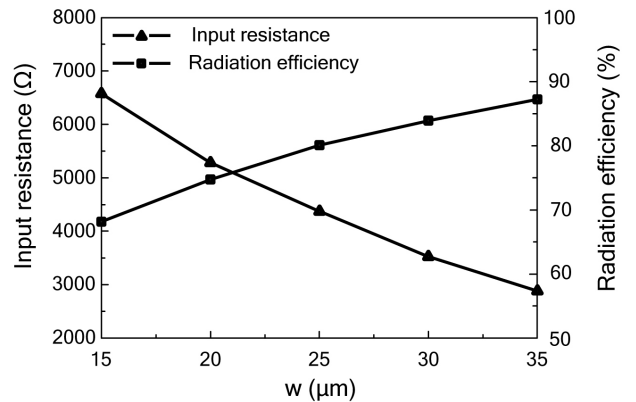


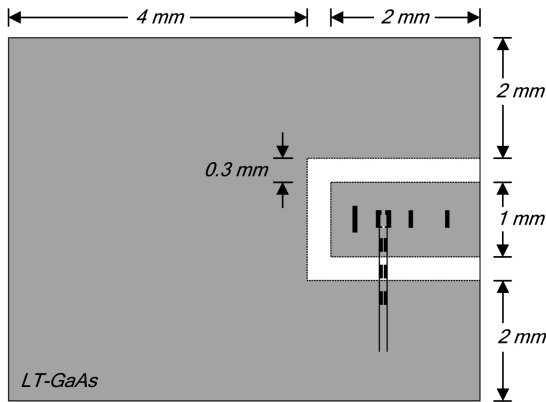
그림 6. 안테나 소자들의 선폭(w)에 따른 입력저항과 복사효율 특성.

표 1. 입력저항에 따른 안테나의 특성

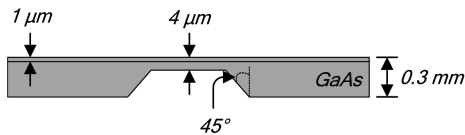
안테나종류	Freq. (GHz)	Re[Z] (Ω)	Directivity (dBi)	Rad. effi. (%)	Tot. effi. (%)
U1	636	4,372	10.8	80.1	67.8
U2	624	6,401	11.2	70.8	67.3
U3	618	8,315	10.7	61.6	61.1
U4	610	9,047	10.1	57.9	57.8
F	590	2,591	10.9	80.8	52.8

표 2. 기판 두께에 따른 안테나의 특성

기판 두께 (μm)	Freq. (GHz)	Re[Z] (Ω)	Directivity (dBi)	Rad. effi. (%)	Tot. effi. (%)
0	996	6,122	11.0	79.7	75.1
4	636	4,372	10.8	80.1	67.8
8	528	3,815	10.7	79.5	63.6
16	469	2,700	9.0	79.8	53.4



(a) 평면도



(b) 측면도

그림 7. GaAs 기판을 추가한 구조.

테나의 입력 저항을 포트믹서의 입력 저항으로 가정한 10,000 Ω 정도로 증가시키더라도 안테나의 복사효율이 낮아지게 되면 전체효율을 개선시킬 수 없다는 것을 알 수 있다. 따라서 높은 입력 임피던스를 가지는 테라헤르츠 안테나를 설계할 때 안테나의 입력 저항과 복사효율을 모두 고려하여 전체효율이 최대가 되는 구조로 설계하여야 한다. 본 논문에서는 안테나의 전체효율이 가장 높게 계산된 U1을 최적화된 설계 모델로 정하였다. 제한한 U-형태의 다이폴을 driver로 가지는 Yagi-Uda 안테나는 기존의 직선형 전 파장 다이폴을 driver로 가지는 Yagi-Uda 안테나에 비하여 입력 저항은 1,800 Ω 정도 증가하였고 안테나의 전체효율은 15% 정도로 증가한 것을 알 수 있다. 표 2에는 기판의 두께를 0 μm, 4 μm, 8 μm, 16 μm로 변화함에 따른 안테나의 특성 변화를 나타내었다. 기판이 두꺼워질수록 공진 주파수와 입력 저항, 지향성이 감소되는 것을 확인할 수 있다. 이는 기판의 두께가 두꺼워질수록 유효 유전율이 높아져서 공진 주파수와 입력 저항이 감소하였고, 기판 쪽으로 복사되는 빔이 많아지기 때문에 안테나의 지향성도 감소한 것으로 사료된다. 안테나의 복사효율은 기판의 두께와 상관없이 거의 일정한 값을 유지하고 있고, 전체효율은 안테나의 입력저항이 감소됨에 따라 반사계수 값의 증가로 인하여 감소되었다. 본 논문에서는 제작할

표 3. 최적화된 안테나의 설계변수

설계 변수	설계 값(μm)	설계 변수	설계 값(μm)
L_o	150	A	40
L_1	100	B	4
L_2	100	C	60
L_3	100	D	75
S_o	205	t_1	7
S_1	60	t_2	4
S_2	225	w	25
S_3	365	w_b	4

표 4. U1에 대한 U2, U3, U4의 변화된 설계변수

안테나종류	t_1 (μm)	S_o (μm)	S_2 (μm)
U1	7	205	225
U2	10	185	225
U3	11	165	175
U4	12	165	175

수 있는 최소 두께인 4 μm 기판 위에서 안테나를 설계하였다. 그러나 실제 제작 시에는 4 μm 두께의 단일 기판 만으로는 사용될 수 없고 그림 7과 같이 얇은 기판 아래에 두꺼운 GaAs 기판이 추가로 지지되어서 사용되어야 한다. 이 구조로 시뮬레이션을 해본 결과, 얇은 기판 위에서 안테나를 설계하였을 때의 특성과 유사하게 나타나는 것을 확인하였다. 그러나 두꺼운 GaAs 기판을 추가하게 되면 얇은 기판 위에서 계산하였을 때에 비하여 상대적으로 계산 시간이 오래 걸리기 때문에 비효율적이다. 따라서 본 논문에서는 얇은 기판 위에서 안테나를 설계하여 안테나의 특성을 파악하였다. 표 3에는 최적화된 안테나의 설계변수들을 나타내었고 표 4에는 U1 안테나에 대한 U2, U3, U4 안테나들의 변화된 설계 변수들을 나타내었다. 그림 8에는 최적화된 안테나의 입력저항 특성을 나타내었다. 제한한 U-형태의 다이폴을 driver로 가지는 Yagi-Uda 안테나는 636 GHz에서 공진하며 여기서 입력 저항은 4,372 Ω이다. 이는 동일한 복사효율을 가지는 driver가 전 파장 다이폴인 Yagi-Uda 안테나의 입력 저항이 2,591 Ω인 것에 비하여 1.7배 정도 증가된 입력 저항을 가진다. 이에 따라 안테나의 전체효율이 개선되었고 보다 증가된 테라헤르츠파 출력을 얻을 수 있다. 그림 9에는 최적화된 U-형태의 driver를 가지는 Yagi-Uda 안테나의 복사패턴을 나타내었다. 공진주파수에서 최대 지향성은 10.8 dBi이고 반전력빔폭

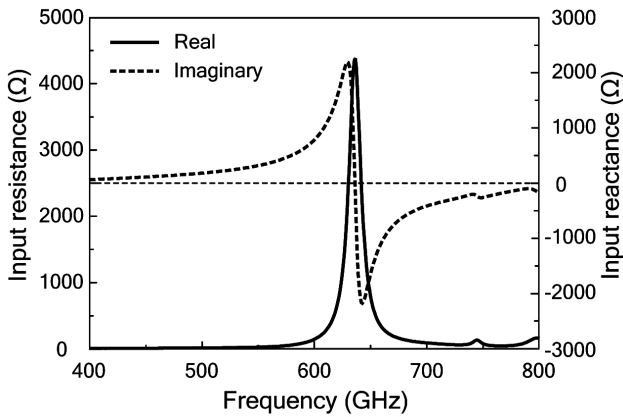


그림 8. 최적화된 안테나의 임피던스 곡선.

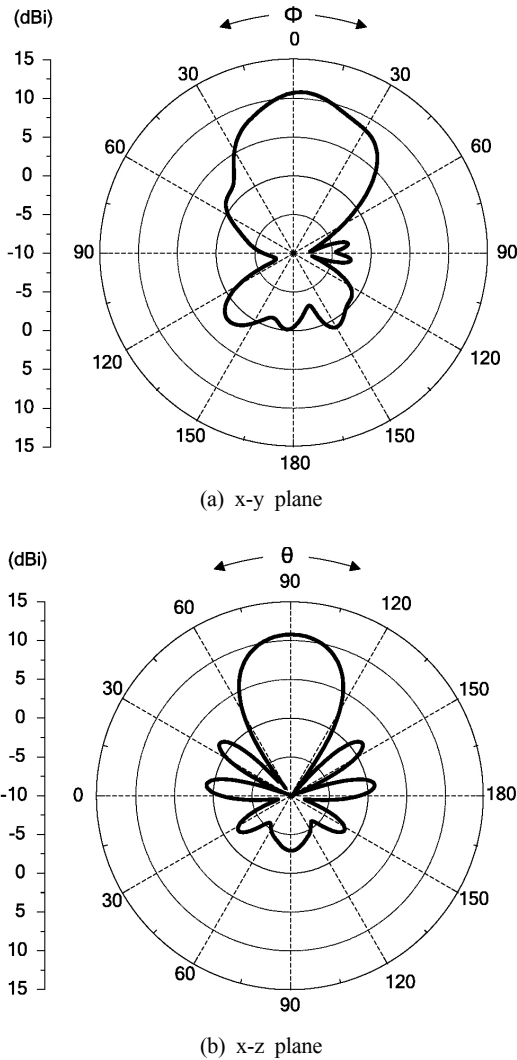


그림 9. 최적화된 안테나의 복사패턴.

은 x-y 평면에서 52.1°이고 x-z 평면에서 41.2°이며 단방향 지향적인 복사패턴이 나타나는 것을 확인할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 포토믹서와의 임피던스 부정합을 개선하기 위하여 높은 입력 임피던스를 가지는 Yagi-Uda 안테나를 설계하였다. 얇은 기판 위에 안테나를 설계하여 비유전율이 높은 기판 위에서도 안테나의 임피던스 저하를 줄이고 Yagi-Uda 안테나 고유의 단방향 지향적인 복사패턴을 얻을 수 있었다. 포토믹서에 직류전압을 가하기 위하여 driver 양단에 바이어스 선을 연결하였고 PBG 구조를 삽입하여 바이어스 선으로 교류 전류가 흐르는 것을 차단하였다. 제안한 U-형태의 다이폴을 driver로 가지는 Yagi-Uda 안테나는 공진 주파수에서 4,400 Ω 정도의 높은 입력 임피던스를 가지고 10.9 dBi의 높은 지향성을 가진다. 따라서 제안한 안테나는 기존에 설계된 테라헤르츠 안테나들에 비하여 포토믹서와의 임피던스 부정합 문제를 개선할 수 있게 되어 증가된 테라헤르츠파 출력을 얻을 수 있다.

참고문헌

- [1] P. Smith, D. Auston, and M. Nuss, "Subpicosecond photoconducting dipole antennas," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 24, no. 2, pp. 255-260, 1988.
- [2] E. Brown, F. Smith, and K. McIntosh, "Coherent millimeter-wave generation by heterodyne conversion in low-temperature-grown GaAs photoconductors," *J. Appl. Phys.*, vol. 73, no. 3, pp. 1480-1484, 1993.
- [3] K. McIntosh, E. Brown, K. Nichols, and O. McMahon, "Terahertz photomixing with diode lasers in low-temperature-grown GaAs," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 67, no. 26, pp. 3844-3846, 1995.
- [4] P. Jepsen, R. Jacobsen, and S. Keiding, "Generation and detection of terahertz pulses from biased semiconductor antennas," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 13, no. 11, pp. 2424-2436, 1996.
- [5] S. Verghese, K. A. McIntosh, and E. R. Brown, "Highly tunable fiber-coupled photomixers with coherent terahertz output power," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 45, no. 8, pp. 1301-1309, 1997.
- [6] S. Verghese, E. Duerr, K. McIntosh, S. Duffy, S. Calawa, C. Tong, R. Kimberk, and R. Blundell, "A photomixer local oscillator for a 630-GHz heterodyne receiver," *IEEE Microwave Guided Wave. Lett.*, vol. 9, no. 6, pp. 245-247, 1999.
- [7] M. Tani, P. Gu, M. Hyodo, K. Sakai and T. Hidaka, "Generation of coherent terahertz radiation by photomixing of dual-mode lasers," *Opt. Quant. Electron.*, vol. 32, no. 4, 5, pp. 503-520, 2000.
- [8] J. Bjarnason, T. Chan, A. Lee, and E. Brown, D. Driscoll, M. Hanson, A. Gossard, and R. Muller, "ErAs: GaAs photomixer with two-decade tunability and 12 μW peak output power," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 85, no. 18, pp. 3983-3985, 2004.
- [9] D. Saedkia, A. Majedi, S. Safavi-Naeini, and R. Mansour, "Analysis and design of a photoconductive integrated photomixer/antenna for terahertz applications," *IEEE J. Quantum*

- Electron.*, vol. 41, no. 2, pp. 234-241, 2005.
- [10] P. Kordos, M. Marso, and M. Mikulics, "Performance optimization of GaAs-based photomixers as sources of THz radiation," *Appl. Phys. Lett., A*, vol. 87, no. 3, pp. 563-567, 2007.
- [11] I. Gregory, M. Evans, H. Page, S. Malik, I. Farrer, and H. E. Beere, "Analysis of photomixer receivers for continuous-wave terahertz radiation," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 91, no. 15, pp. 154103-1 ~ 154103-3, 2007.
- [12] S. Duffy, S. Verghese, K. A. McIntosh, A. Jackson, A. Gossard, and S. Matsuura, "Accurate modeling of dual dipole and slot elements used with photomixers for coherent terahertz output power," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 49, no. 6, pp. 1032-1038, 2001.
- [13] D. Rutledge, D. Neikirk, and D. Kasilingam, "Integrated-Circuit Antennas," *Infrared and Millimeter Waves*, K. J. Button, Ed., (Academic Press, 1983), vol. 10, pp. 6-17.
- [14] E. Brown, K. McIntosh, K. Nichols, and C. Dennis, "Photomixing up to 3.8 THz in low-temperature-grown GaAs," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 66, no. 3, pp. 285-287, 1995.
- [15] C. A. Balanis, *Antenna Theory*, 2nd Ed., (John Wiley & Sons, 1997), pp. 60-62.
- [16] 한경호, 박용배, 김상인, 한해욱, 박익모, 임한조, "고출력 테라헤르츠파 발생을 위한 새로운 구조의 Yagi-Uda 안테나," *한국광학회지*, 제 19권 1호, pp. 9-14, 2008.
- [17] K. Moon, H. Han, and I. Park, "Terahertz folded half-wavelength dipole antenna for high output power," in Topical Meeting on Microwave Photonics, Seoul, Korea, pp. 301-304, 2005.

A Terahertz Yagi-Uda Antenna with High Input Impedance

Kyungho Han, Troung Khang Nguyen, and Ikmo Park[†]

School of Electrical and Computer Engineering, Ajou University, Suwon 443-749, Korea

[†]*E-mail: ipark@ajou.ac.kr*

Haewook Han

Department of Electrical and Computer Engineering, Pohang University of Science and Technology, Pohang 790-784, Korea

(Received February 19, 2009; Revised manuscript March 25, 2009; Accepted March 25, 2009)

In this paper, a THz Yagi-Uda antenna with high input impedance is designed. By placing the antenna on a thin substrate, end-fire radiation patterns with high antenna impedance can be obtained even when the substrate has high relative dielectric constant. The proposed Yagi-Uda antenna has high input resistance of approximately 4,400 Ω at the resonance frequency which is obtained by using a U-shaped dipole as a driver element. It is expected that the Yagi-Uda antenna on a thin substrate can achieve much higher terahertz output power than the conventional THz antennas.

OCIS codes: (040.5160) Photodetectors; (160.5140) Photoconductive materials; (240.0310) Thin films.