

<http://dx.doi.org/10.7236/IIBC.2016.16.5.197>

IIBC 2016-5-30

저궤도 소형위성 탑재용 빔 조향 능동 다이폴 안테나 설계

Design of active beam steering antenna mounted on LEO small satellite

정재엽*, 박종환*, 우종명**

Jae-Yeop Jeong*, Jong-Hwan Park*, Jong-Myung Woo**

요약 본 논문에서는 저궤도 소형위성에 탑재하여 빔 조향을 능동적으로 할 수 있는 다이폴 안테나를 설계하였다. 제안된 안테나는 야기-우다 안테나의 원리를 기반으로 하였으며, 2개의 무급전 기생소자를 T자형으로 형성시켜 수직소자의 길이를 고정시킨 후 수직소자의 끝단에서의 open, short에 따라 도파기 또는 반사기로 작동되게 하였다. 설계된 안테나는 UHF 대역의 436.5 MHz를 중심으로 위성-위성 간과 위성-지상 간의 링크버짓을 통해 안테나의 목표 이득을 정하였다. 안테나 특성을 향상시키기 위해 무급전 기생소자의 수직소자인 transformer의 길이를 변경시켰으며, transformer의 길이가 $\lambda/4$ 보다 $\lambda/2$ 일 때 최대 빔 방향 이득이 0.5 dB 향상되었다. 실제 $\lambda/2$ transformer 제작 시에는 무급전 기생 소자의 open, short를 다이오드와 캐패시터, 인덕터로 구성된 on/off switch를 이용하여 구현하였다. 그 결과 위성-위성 간 이득은 평균 5.92 dBi로 나타났으며 위성-지상 간 이득은 평균 0.99 dBi로 확인되어 링크버짓을 통해 정한 목표 스펙을 충분히 만족하였다.

Abstract In this paper, the dipole antenna that can control a beam steering were designed for attaching on LEO(Low Earth Orbit) small satellite. The proposed antenna was based on Yagi-Uda antenna. The parasitic element was proposed as a T-shape. Depending on the state of open or short at the end of a vertical element, we can choose a characteristic of the parasitic element with fixing a vertical element length of the parasitic element. Using this characteristic, we designed the director element and reflector element. The proposed antenna was designed to receive UHF 436.5 MHz. Antenna gain was chosen by link budget between one satellite and the other satellite or between the satellite and the ground station. By changing a vertical element length which is the largest variable that chooses an antenna characteristic, we confirmed that $\lambda/2$ length transformer has a result that improve 0.5 dB in comparison $\lambda/4$ length transformer from maximum gain direction. In production, we made an on/off switch composed of a diode, capacitor, and inductor control an open and short at the end of the parasitic element. As a result, the gain of antenna used in a link between one satellite and the other satellite had average 5.92 dBi. And the gain of antenna used in a link between the satellite and the ground station had average 0.99 dBi.

Key Words : Yagi-Uda antenna, Active beam steering, LEO, Parasitic element

1. 서론

최근 저렴한 제작비용과 발사의 용이함으로 인해 소

형위성 개발이 활발히 이루어지고 있으며 소형위성의 장점을 최대화하기 위해 많은 노력을 하고 있다. 소형 위성은 크기가 작으며 저렴하다는 장점 때문에 부품을 경량

*준회원, 충남대학교 전파공학과

**정회원, 충남대학교 전파공학과 교수

접수일자 : 2016년 9월 2일, 수정완료 : 2016년 10월 2일

게재확정일자 : 2016년 10월 7일

Received: 2 September, 2016 / Revised: 2 October, 2016 /

Accepted: 7 October, 2016

**Corresponding Author: jmwoo@cnu.ac.kr

Dept. of Radio and Information Communications Engineering,
Chungnam National University, Korea

화 시키면서 제 성능 발휘를 목표로 하여야 한다. 따라서 탑재되는 안테나도 경량화 가능한 것으로 선택할 필요가 있다.

기본적인 위성 탑재 안테나로는 위상 어레이 안테나가 있는데 이는 빔이 샤프하며 원하는 방향으로의 빔 조향이 가능해 많이 사용되는 안테나이다^{[1][2]}. 그러나 성능이 우수한 안테나를 설계하기 위해서는 안테나의 개수 증가와 안테나 뒷단의 다수 부품으로 주파수가 낮을 경우는 그 크기가 커져 소형 위성 탑재에는 다소 부적절하다. 헬릭컬 안테나도 적절한 높이로 위성에 사용될 수 있으나 낮은 주파수에서 그 크기가 커져 빔 조향에 어려움이 있다는 단점이 있다^[3]. 최근 연구된 위성용 안테나로는 Bull's eye 안테나가 있는데 이는 slot 급전을 이용하였으며, slot 주위에 굴곡을 주어 SP(Surface Plasmon)현상으로 빔을 샤프하게 하며 고 이득 특성을 가지게 한 안테나이다^[4]. 이는 도파관을 급전으로 이용하기 때문에 주파수에 기인된 물리적 크기 특성으로 저주파수 대역의 안테나 설계에는 부적절하며, 빔의 조향을 위해서는 안테나 구조를 바꾸어야하기 때문에 빔 조향이 가능한 위성용 안테나로 사용되기는 어려운 점이 있다. 또한 저주파수 용으로 제안된 모노폴 안테나가 있는데, 이는 제작이 간단하나 빔 조향이 어렵고 broad side방향으로 null이 발생하는 단점이 있다^[5].

따라서 본 논문에서는 저렴한 가격과 간단한 구조로 제작 가능하며 무급전 기생 소자의 open, short에 의해 형성된 도파기, 반사기로 빔 조향 각도 변화를 얻어 위성-위성 간 링크 및 위성-지상 간 링크를 빔 조향 각도 변화를 통해 원활히 할 수 있는 저궤도 소형위성 탑재용 빔 조향 능동 다이폴 안테나를 설계하였다. 설계 중심주파수는 436.5 MHz로 설정하였으며 논문에서는 안테나 스펙을 참고문헌 [6] 자료를 참고하여 제안하였고, 이를 기반으로 설계 및 제작하였으며 저궤도 소형위성의 링크버킷을 만족할만한 이득 특성을 얻고자 하였다^[6].

II. 본 론

1. 안테나 이득 결정을 위한 링크버킷

그림 1에는 소형위성의 빔 조향 각도 계산의 이해를 돕기 위한 그림이다. 실시간으로 지구 전체를 감시하기 위해 20개의 소형위성을 설치하는 것으로 가정하였으며, 위성-지상간의 거리는 690 km로 정하였다. 이 경우 중심

위성으로부터의 지상으로의 법선 방향을 0° 기준으로 하였을 때 좌우 ±81° 방향에서의 이득값에 대한 링크버킷이 요구되며, 위성-위성 간의 거리는 2218 km 이 된다. 변조방법은 BFSK를 사용하였고, 이때 BER이 10⁻⁶일 경우 13.5 dB의 E_b/N_o 값이 요구된다. 위 값에 3 dB의 링크마진을 주어 16.5 dB의 E_b/N_o의 값을 만족시키는 스펙을 정하였다. 잡음온도와 loss parameter의 경우 참고문헌 [6]의 값을 이용하였으며 지상 안테나의 이득은 10 dBi로 가정하였다. 앞서 정한 안테나간 거리와 주파수를 변수로 하여 E_b/N_o 값이 16.5 dB를 만족하는 위성 안테나의 이득을 구하였고, 그 결과 위성-위성 간 송수신에는 최소 4.24 dBi 이상의 이득이 필요하며 위성-지상 간에는 -18.7 dBi 이상이 필요하다. 이를 통해 설정된 버킷에 적합한 안테나를 설계하였고 제작하여 그 특성을 확인해 보았다.

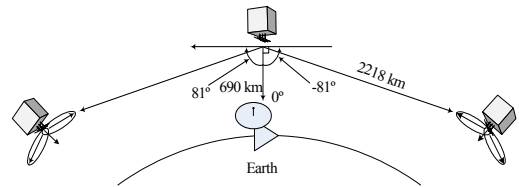


그림 1. 소형위성 방사 각도
Fig. 1. Radiation angle of small-satellite

표 1. 링크 버킷
Table 1. Link budget

	항목	설정치	
		위성-위성 간	위성-지상 간
Tx	Antenna gain (dBi)	4.24	-18.7
	Transmitted power (dBw)	10	10
Rx	Antenna Gain (dBi)	4.24	10
	Noise temp. : 200 k(dBk)	30	23
Loss Parameter	Free space loss(dB)	152	142
	Rain atten. : 35mm/h(dB)	0	0.03
	Implementation loss(dB)	3	3
	Polarization loss(dB)	2	2
	Additional loss(dB)	0.5	0.5
	Pointing loss(dB)	3	3
Modulation	Carrier frequency(MHz)	436.5	436.5
	Data rate(dB/s)	9600	9600
	Required Bit Error Rate	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶
	Required E _b /N _o (dB)	13.5	13.5
Result	C/N _o (dB*Hz)	56.33	56.33
	E _b /N _o (dB)	16.5	16.5
	Link margin(dB)	3	3

2. $\lambda/4$ Transformer를 이용한 안테나 설계

그림 2에는 $\lambda/4$ transformer의 전기적 빔 조향의 원리를 나타내었다. 여기서 접지면은 소형위성의 한 단면 크기를 나타내었다. 2개의 무급전 기생소자를 T자로 형성시키고 수직소자를 $\lambda/4$ 길이로 설정할 경우, 끝단을 short 시키면 수평소자 중심점에서는 open 된 특성을 나타내며, 끝단을 open 시켰을 경우 수평소자 중심점에서 short 된 특성을 나타낸다^[7]. 여기서 λ 는 중심주파수 436.5 MHz의 한 파장을 의미한다. 수평소자 중심점에서 open 특성을 나타낼 경우에는 각각 그 길이가 짧아 도파기로 작동하며, 중심점에서 short 특성을 나타낼 경우에는 그 길이가 반파장보다 길어 반사기로 작동한다. 이는 무급전 기생 소자 끝단의 open, short 변화로 도파기와 반사기 특성을 변화시킬 수 있다는 것을 의미한다. 위와 같은 원리로 무급전 기생 소자를 다이폴 안테나의 앞뒤에 장착하여 위성-위성 간 링크를 위한 빔 조향 안테나를 설계하였다.

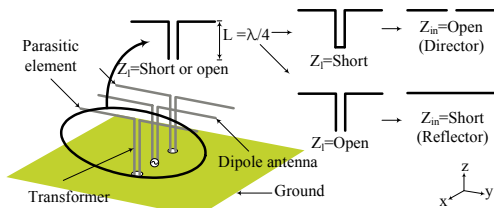


그림 2. $\lambda/4$ transformer의 전기적 빔 조향의 원리
 Fig. 2. Principle of $\lambda/4$ transformer antenna beam steering

그림 3에는 $\lambda/4$ transformer를 이용한 빔 조향 야기우다 안테나를 나타내었다. 안테나와 빔 조향을 위한 무급전 기생소자의 높이는 동일한 172 mm(0.25 λ)로 설정하였다. 다이폴 안테나의 길이는 309 mm(0.45 λ), 무급전 소자의 길이는 340 mm(0.495 λ)로 정하였다. 접지면의 크기는 481 mm(0.7 λ) \times 481 mm(0.7 λ)이며 무급전 기생소자의 아래에는 open, short 시킬 부분을 A와 B로 표기하였다.

그림 4에는 $\lambda/4$ transformer를 이용한 빔 조향 야기우다 안테나 A와 B의 open, short에 따른 S_{11} 특성을 나타내었다. A = short, B = open 일 경우에는 436.5 MHz에서 -15.58 dB를 나타내었으며, 위성-지상 간 링크에 사용될 A = short, B = short와 A = open, B = open은 각각 -8.54 dB와 -0.62 dB를 나타냈다. 시뮬레이션 상에

서는 A = open, B = open의 S_{11} 특성이 좋지 못하기 때문에 위성-지상 간에는 A = short, B = short가 더 유리함을 알 수 있다. 그러나 이러한 조건은 빔 조향 시 지상방향의 이득과 비교하여 A, B의 short, open 조건을 선택할 필요가 있다.

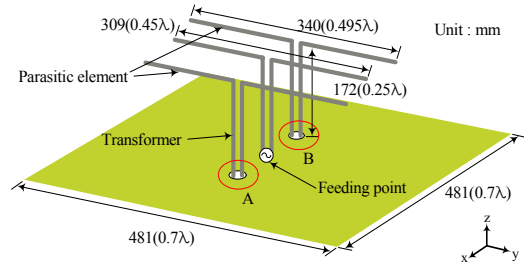


그림 3. $\lambda/4$ transformer 안테나
 Fig. 3. $\lambda/4$ transformer antenna

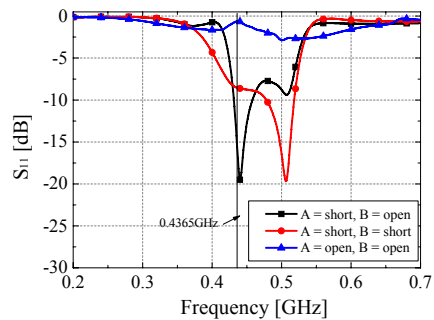


그림 4. $\lambda/4$ transformer 안테나의 S_{11}
 Fig. 4. S_{11} of $\lambda/4$ transformer antenna

그림 5에는 $\lambda/4$ transformer를 이용한 빔 조향 야기우다 안테나의 A와 B의 open, short에 따른 방사패턴을 나타내었다. 그림 5 (a)에는 yz-plane 방사패턴을 나타내었으며 모든 경우 빔이 전방으로 향하는 것을 확인 할 수 있다. 그림 5 (b)의 xz-plane을 보게 되면 A = short, B = open 일 경우 빔이 위성-위성 간의 각도인 81° 방향에서 이득이 6.82 dBi로 나타났으며 A = short, B = short와 A = open, B = open 일 때는 0°에서 6.7 dBi 와 0.56 dBi로 목표를 만족하는 것을 알 수 있다. 하지만 위성-지상 간 링크에 사용되는 A = short, B = short와 A = open, B = open의 S_{11} 특성이 좋지 못하여 이를 보완하며 링크 마진을 더욱 확보하기 위해 transformer의 길이를 $\lambda/2$ 길이로 늘려보았다.

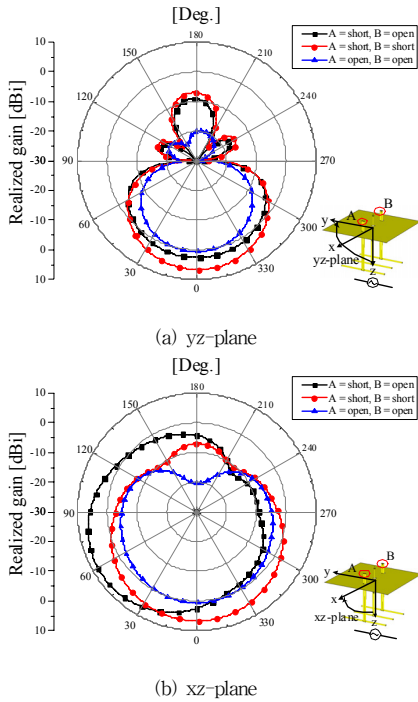


그림 5. $\lambda/4$ transformer 안테나의 방사패턴
Fig. 5. Radiation pattern of $\lambda/4$ transformer antenna

3. $\lambda/2$ Transformer를 이용한 안테나 설계

그림 6에는 $\lambda/2$ transformer의 전기적 빔 조향의 원리를 나타내었다. 이는 $\lambda/4$ transformer와는 반대로 2개의 무급전 기생 소자가 $\lambda/2$ 길이의 수직소자를 가졌을 경우에 끝단을 서로 short 시키면 무급전 수평소자 중심점에서는 short 특성을 나타내며, 끝단을 open 시켰을 경우 무급전 수평소자 중심점에서 open 된 특성을 나타낸다. 따라서 open 된 경우에는 그 길이가 짧아 도파기로 작동하며 short 된 경우 그 길이가 길어져 반사기로 작동하게 된다.

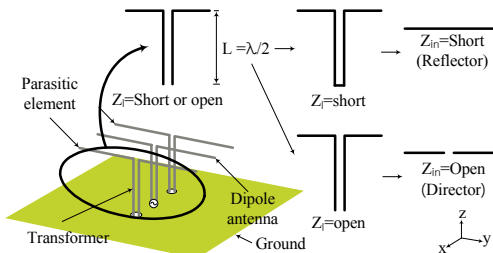


그림 6. $\lambda/2$ transformer의 전기적 빔 조향의 원리
Fig. 6. Principle of $\lambda/2$ transformer antenna beam steering

그림 7에는 $\lambda/2$ transformer를 이용한 빔 조향 야기-우다 안테나를 나타내었다. $\lambda/2$ transformer의 경우 transformer의 길이를 309 mm(0.45λ)로 지정하고, 안테나의 높이를 274 mm(0.4λ)로 정하였다. 다른 변수들은 $\lambda/4$ transformer와 동일하게 구성하였다.

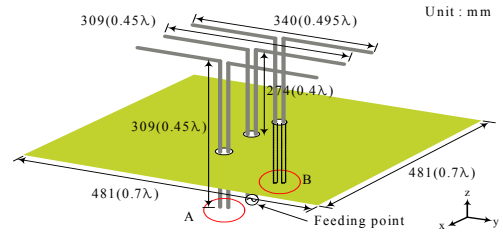


그림 7. $\lambda/2$ transformer 안테나
Fig. 7. $\lambda/2$ transformer antenna

그림 8에는 $\lambda/2$ transformer를 이용한 빔 조향 야기-우다 안테나의 A와 B의 open, short에 따른 S_{11} 특성을 나타내었다. 위성-위성 간 링크에 사용될 A = short, B = open의 경우 436.5 MHz에서 -20.42 dB를 나타내었으며 위성-지상 간 링크로 사용될 A = short, B = short와 A = open, B = open에서는 각각 -0.62 dB와 -9.54 dB로 나타났다. 위 결과의 경우 $\lambda/4$ transformer와는 반대로 A = open, B = open에서 더 유리한 값을 나타냄을 알 수 있다.

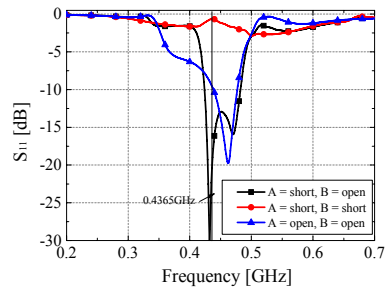


그림 8. $\lambda/2$ transformer 안테나의 S_{11}
Fig. 8. S_{11} of $\lambda/2$ transformer antenna

그림 9에는 $\lambda/2$ transformer를 이용한 빔 조향 야기-우다 안테나의 A와 B의 open, short에 따른 방사패턴을 나타내었다. 그림 9 (a)에는 yz-plane을 나타내었는데 빔이 전방을 향하는 것을 알 수 있다. 그림 9 (b)에는 xz-plane을 나타내었는데, A = short, B = open 일 때 279° 에서 7.32 dBi로 목표 이득을 만족함을 알 수 있으며

A = short, B = short와 A = open, B = open 일 때는 0°에서 -8.75 dBi와 1.85 dBi로 목표를 만족함을 알 수 있다. A = short, B = short와 A = open, B = open 일 때의 값이 $\lambda/4$ transformer 일 때에 비해 이득 값이 좋지 못하지만 S_{11} 특성이 중심주파수에서 1 dB 향상된 값을 가짐을 확인 할 수 있다. 한편 빔 지향성이 A = short, B = open 인 경우 지상방향인 0°에서의 레벨이 -1.63 dBi로 요구되는 링크버킷에서의 최소레벨 -18.7 dBi 보다 -17.07 dB 높다. 위성이 좌우로 위성간 거리의 반 회전 하였을 때 지상국과의 거리는 1264 km가 되며 각도는 0°에서 $\pm 52^\circ$ 로 변한다. 거리 변경으로 인한 링크버킷 결과는 -13.4 dBi의 안테나 이득을 필요로 하며, 그림 9 (b)의 52°에서의 값은 -6.27 dBi로 링크버킷의 요구레벨을 충분히 만족시키고 있다. 따라서 A, B 스위치를 간단하게 on, off 만 시켜서 링크버킷을 만족 시킬 수 있다는 것을 의미한다.

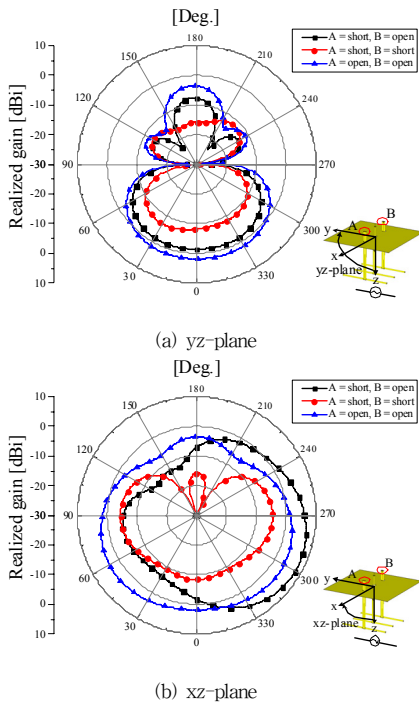
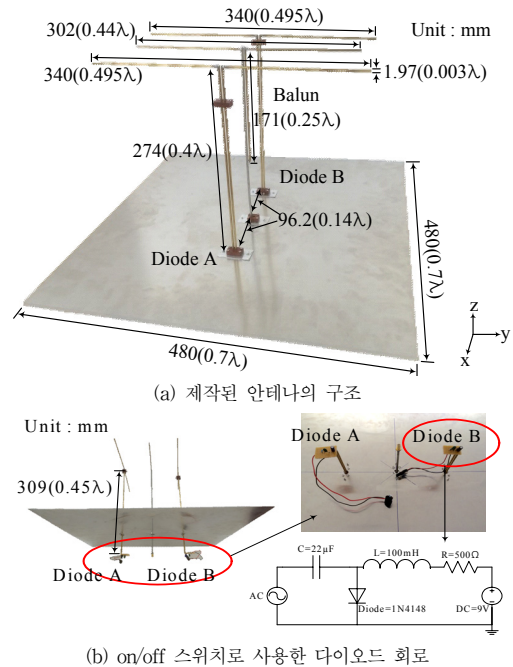


그림 9. $\lambda/2$ transformer 안테나의 방사패턴
 Fig. 9. Radiation pattern of $\lambda/2$ transformer antenna

4. on/off를 이용한 빔 조향 야기-우다 안테나 제작

그림 10 (a)에는 제작된 안테나의 구조를 나타내었는데 모든 크기는 시뮬레이션과 동일하게 제작하였다. 그림 10 (b)에는 on/off 스위치로 사용한 다이오드 회로를

나타내었다. 제작의 용이함을 위해 캐패시터와 인덕터, 다이오드를 이용하였다. DC는 다이오드 작동을 위해 설치된 9V 건전지를 의미하며 AC의 경우 다이폴 안테나로부터 무급전 기생소자로 넘어온 436.5 MHz 주파수의 신호를 의미한다. 건전지의 DC 전원이 무급전 기생소자로 넘어가지 않도록 하기 위해 캐패시터를 부가하였으며 AC 신호가 DC전원으로 넘어가지 않도록 하기 위해 인덕터를 다이오드 옆단에 부가하였다.



(b) on/off 스위치로 사용한 다이오드 회로
 그림 10. 제작된 안테나의 구조 및 다이오드 회로
 Fig. 10. Structure of designed antenna and diode circuit

그림 11에는 제작된 $\lambda/2$ transformer 안테나의 S_{11} 특성을 나타내었다. 위성-위성 간 링크를 의미하는 A = short, B = open과 A = open, B = short의 경우 각각 436.5 MHz에서 -18.53 dB와 -11.59 dB를 나타내었다. 지상-위성 간 링크를 의미하는 A = open, B = open과 A = short, B = short는 각각 -6.71 dB와 -10.01 dB로 이 경우 시뮬레이션과 다르게 A = short, B = short인 경우가 위성-지상 간 링크에 더 유리함을 알 수 있다. 이와 같이 시뮬레이션과 측정에 다소 오차가 생긴 이유는 무급전 기생소자 끝단에 open, short를 위한 on/off 스위치가 시뮬레이션에서는 고려되지 않아 발생한 것으로 사료된다.

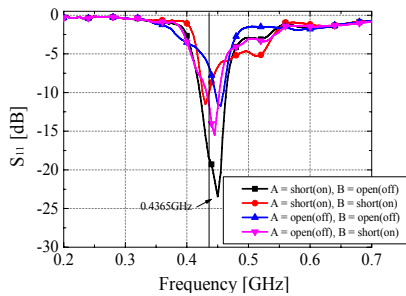


그림 11. 제작된 $\lambda/2$ transformer 안테나의 S_{11}
 Fig. 11. S_{11} of designed $\lambda/2$ transformer antenna

그림 12에는 제작된 $\lambda/2$ transformer 안테나의 xz -plane 방사패턴을 나타내었다. $A = \text{short}$, $B = \text{open}$ 와 $A = \text{open}$, $B = \text{short}$ 일 경우 81° 와 279° 에서 5.73 dBi와 6.11 dBi 로 대칭성이 약간 열화 되지만 목표 이득을 만족함을 알 수 있다. 위성-지상 간 링크인 $A = \text{open}$, $B = \text{open}$ 와 $A = \text{short}$, $B = \text{short}$ 의 경우 0.3 dBi와 1.68 dBi 로 목표 이득과 비교하여 월등히 높은 레벨을 유지하고 있다. 따라서 이와 같이 $\lambda/2$ transformer로 제안된 안테나가 실제 목표 스펙을 만족하여 소형 위성 탑재용 안테나로 사용이 가능함을 확인하였다. 또한 A, B 스위치를 단순히 on/off 교환만으로 빔 조향 및 위성 이동에 따른 지상국과의 링크버짓을 유지 시킬 수 있다.

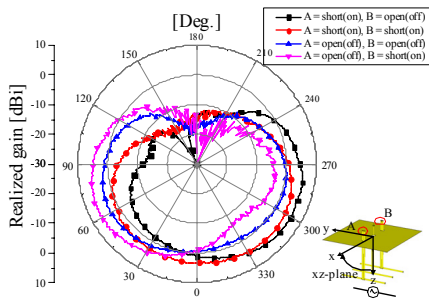


그림 12. 제작된 $\lambda/2$ transformer 안테나의 xz -plane 방사패턴
 Fig. 12. xz -plane radiation pattern of designed $\lambda/2$ transformer antenna

III. 결 론

본 논문에서는 저궤도에서 사용될 소형위성 탑재용 빔 조향 능동 다이폴 안테나를 설계 및 제작하였다. 기존

의 안테나들이 가지는 단점인 큰 크기와 빔 조향의 어려움에 대한 점을 보완하여 제안된 구조로, 야기-우다 안테나의 원리를 기본으로 하며, 다이폴 안테나 앞뒤로 무급전 기생소자를 장착하여 빔을 원하는 방향으로 조향이 가능한 안테나를 설계하였다. 또한 링크버짓을 이용해 안테나의 목표 스펙을 정하였으며 이를 목표로 안테나를 제안하였다. 안테나는 $\lambda/4$ transformer에서는 그 특성이 나타났으나 좋지 못한 S_{11} 특성으로 인해, $\lambda/2$ transformer로 길이를 변경하였고, 만족하는 특성이 나왔다. 측정 결과 $A = \text{short}$, $B = \text{open}$ 과 $A = \text{open}$, $B = \text{short}$ 일 경우 436.5 MHz에서 -18.53 dB와 -11.59 dB의 S_{11} 특성을 나타냈으며 이득의 경우 81° 와 279° 에서 5.73 dBi와 6.11 dBi의 값을 가져 목표값을 만족함을 알 수 있었다.

따라서 본 논문에서 제안한 안테나가 저궤도 소형위성에 탑재가 가능한 능동적으로 빔 조향이 가능한 안테나임을 확인하였다.

금후 위성 자체가 소형이므로 탑재되는 안테나를 저 자세 및 소형화 시킬 필요가 있다. 이에 빔 조향 다이폴 안테나의 저자세 및 소형화에 대해 계속 연구할 계획이다.

References

- [1] H. K. Lee, Y. U. Park, H. K. Choi, "Design of X-band Phased Array Antenna Systems for Satellite Communication," 2016 10th European Conference on, 2016, The Journal of The Institute of Webcasting, Internet Television and Telecommunication, Vol. 1, No. 1, 2005
- [2] P. R. Akbar, H. Saito, M. Zhang, "Parallel -Plate Slot Array Antenna for Deployable SAR Antenna Onboard Small Satellite," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 64, pp. 1661 - 1671, 2016
- [3] J. Costantine, K. Y. Kabalan, A. E. Hajj, Y. Tawk, C. G. Christodoulou, "A reconfigurable/deployable helical antenna for small satellites," Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), 2013 IEEE, 2013

- [4] C. J. Vourch, T. D. Drysdale, "V-band Bull's eye antenna for CubeSat applications," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 13, pp. 1092 - 1095, 2014
- [5] H. Isel, Y. Kurt, O. Yilmaz, F. A. Tunc, O. Ceylan, H. B. Yagci, "435 MHz monopole antenna design for Turksat - 3USAT nano satellite," Signal Processing and communications Applications (SIU), 2011 IEEE 19th Conference on, 2011
- [6] G. J. Lee, D. J. Woo, T. K. Lee, J. W. Lee, W. K. Lee, "TT&C Antenna Design for LEO Satellite," The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, Vol. 21, no. 6, pp. 642-650
- [7] D. M. Pozar, "Microwave Engineering 4rd edition," Wiley, 2012

저자 소개

정 재 엽(준회원)



- 2015년 3월 ~ 현재 : 충남대학교 전자전파정보통신공학과 석사과정
- 2009년 3월 ~ 2015년 2월 : 충남대학교 전자공학과 (공학사)
- <주관심분야 : 안테나>

박 중 환(준회원)



- 2016년 3월 ~ 현재 : 충남대학교 전자전파정보통신공학과 석사과정
- 2010년 3월 ~ 2016년 2월 : 공주대학교 전자공학과 (공학사)
- <주관심분야 : 안테나>

우 중 명(정회원)



- 1996년 6월 ~ 현재 : 충남대학교 전자공학과 교수
- 1993년 4월 ~ 1996년 3월 : 일본, 니혼대학교 전자공학과 (공학박사)
- 1991년 4월 ~ 1993년 3월 : 일본, 니혼대학교 전자공학과 (공학석사)
- 1989년 3월 ~ 1990년 2월 : 건국대학교 전자공학과 (공학석사)
- 1981년 3월 ~ 1985년 2월 : 건국대학교 전자공학과 (공학사)
- <주관심분야 : 안테나>

※ 본 연구는 2016년 충남대학교 자체연구과제의 지원에 의하여 연구되었음