정지궤도위성 X-대역 출력필터 멀티팩션 민감도 해석

김중표*, 이선익, 임원규, 김상구, 이상곤 정회원

Multipaction Sensitivity Analysis of X-band Output Filter for Geostationary Satellite

Joong-Pyo Kim*, Sun-Ik Lee, Won-Gyu Lim, Sang-Goo Kim, Sang-Kon Lee *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 정지궤도위성 관측탑재체 고속 데이터 전송을 위한 X-대역 이중모드 원통형 고전력 전송 출력필터의 비행모델 개발 이전에 개발 모델을 설계하고 해석적 멀티팩션 요구마진을 보장하기 위해 해석되어졌다. 먼저 멀티팩션에 가장 민감한 슬롯 아이리스의 폭 및 두께를 가변하면서 멀티팩션 발생 임계전력의 민감도를 분석하였으며 그것을 토대로 선정된 아이리스 폭 및 두께에 대한 주파수 대역에 따른 멀티팩션 임계전력을 분석하였으며 대역 내에서 해석적 요구 8 dB 마진을 가짐을 확인하였다. 또한 멀티팩션과 함께 고출력 소자에 중요한 코로나 발생 임계전력 분석을 아이리스 폭 및 두께의 영향을 제시하였다. 마지막으로 제작된 개발모델을 시험한 결과 주요 요구사항을 만족함을 확인하였다.

Key Words : satellites; output filter; multipaction breakdown; sensitivity; threshold power.

ABSTRACT

In this paper, prior to the flight model X-band dual-mode circular cavity filter required for the high power transmission of the observation payload in the geostationary satellite, the development model are designed and analyzed to show the analytical multipactor requirement margin. First of all, the multipaction breakdown power sensitivities were analyzed by changing the iris width and thickness within the filter, and through that the iris width and thickness was selected and then the multipaction threshold powers over the frequencies within the bandwidth were analyzed and the required margin of 8 dB was obtained. Also for the high power transmission filter, another important phenomena known as corona breakdown are analyzed for the iris width and thickness changes. Finally the development model manufactured was tested and the results met the key requirements.

I. 서 론

통신, 해양 및 기상 임무 탑재체를 장착한 복합위성 천리안 위성에서 관측된 기상 및 해양 데이터는 L-대역을 이용하여 지상국으로 전송되어 현재 해양 및 기상업무에 사용되고 있다. 정지궤도위성에 장착되어지는 관측탑재체의 관측성능이 올라가면서 획기적으로 좋아지면서 관측데이터 양도 크게 증가되었다. 이를 전송하기 위해 기존의 좁은 L-대역 기상 주파수 대역으로는 불가능하며 보다 광대역 데이터 전송이 가능한 X-대역의 사용이 불가피하다.

본 연구에서는 관측탑재체의 고속 데이터 전송을 위해 선정된 X-대역 이중모드 [1] 원통형 고전력 전송 출력필터의 비행모델(Flight Model) 개발 이전에 개발모델(Development Model) 개발을 통해 설계 요구 성능 및 고전력에 대한 멀티팩션 임계전력 마진을 확인하는 데 있다[2-8]. 이를 위해 멀티팩션에 가장 민감한 슬롯 아이리스의 폭 및 두께를 가변하면서 멀티팩션 발생 임계전력의 변화를 분석하였으며 그것을 토대로 멀티팩션 시험을 피하기 위한 요구마진 8 dB를 만족하는 아이리스 폭 및 두께를 도출하였다. 또한 멀티팩션과 함께 고출력 소자에 중요한 코로나 발생 [9] 임계전력 분석을 아이리스 폭 및 두께의 영향을 제시하였다. 요구사항 및 멀티팩션 마진을 보장하는 아이리스 폭 및 두께에 개발모델을 제작하고 튜닝하여 시험한 결과 요구 차단 특성 및 반사 특성을 만족함을 확인할 수 있었다. 이 결과를 바탕으로 정지궤도 광대역 데이터 전송을 위한 X-대역 출력필터 비행모델 개발 기초자료로 사용하고자 한다.

*한국항공우주연구원 위성전자팀 (jpkim@kari.re.kr)
접수일자 : 2015년 9월 14일, 수정완료일자 : 2015년 9월 18일, 최종게재확정일자 : 2015년 9월 24일

Ⅱ. X-대역 출력 필터 설계

정지궤도위성에서 관측된 데이터 전송속도에 대해 사용할 통신변조 방법 기준으로 얻어진 대역폭과 사용대역내의 요구사항 및 근접하는 채널 보호를 위해 요구되는 차단 요구를 고려한 X-대역 출력필터 주요 요구사항을 표 1과 같이 정의하였다. 고려된 필터 구조는 소형 경량화가 가능하며 고전력전송이 가능한 이중모드 원통형 출력필터 구조를 선택하였다[1].

표 1. 주요 요구사항

Items	Unit		Requirements
Center frequency	GHz	=	8.2125
Band Width	MHz	=	100
Power Handling	W	<=	100
Insertion Loss @ Insertion Loss @ 8.2125[GHz]	dB	<	0.4
Near Band Rejection ±70[MHz] @ 8.1425[GHz] @ 8.2825[GHz]	dB	<=	-20.0
Group Delay Stability	ns	<=	10.0
Return Loss	dB	>	20.0
In/Out Interface			WR112
Size	mm		200 X 51 X 50
Mass	g		220
Qualification Temp.	℃		+10 ~ +85

표 1의 요구사항을 기준으로 설계된 모델을 그림 1에 나타내었다. 이중 모드의 필터 차수는 5차를 사용하였으며 사용된 원형공진기 모드는 TE112를 적용하였다. 전달영점(Transmission Zero)은 8.1425 GHz 및 8.2825 GHz 주파수에 생성되도록 하였다.

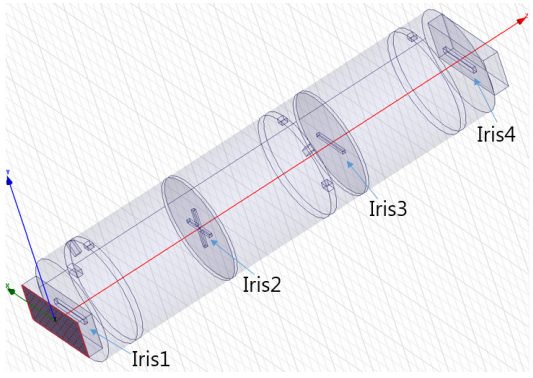

그림 1. 설계 모델

설계된 모델에 대해 수행된 반사계수 및 전달계수를 그림 2에 나타내었다. 설계 모델의 결과는 합성이론 결과와 매우 유사한 특성을 나타내고 있다. 주파수 이동 및 통과대역 반사계수 크기가 조금 더 크게 나타남을 알 수 있다.

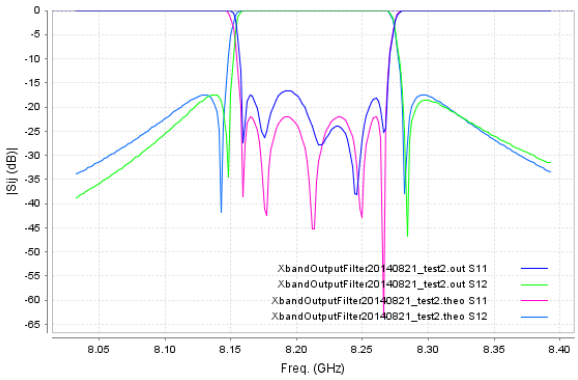

그림 2. 필터 전달 및 반사계수 크기

그림 3에서는 이중모드 출력필터 내부의 계산 전계를 나타내었다.

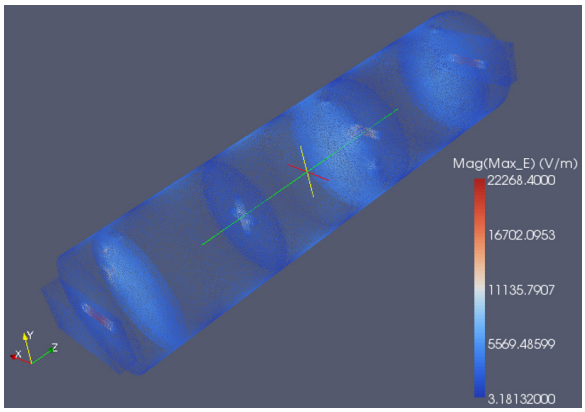

그림 3. 필터 내부 전계 크기

Ⅲ. 멀티팩션 및 코로나 해석

선정된 이중모드 원통형 출력필터는 고전력에서 동작을 하게 된다. 이 경우 선택된 구조 내에 있는 슬롯 아이리스가 멀티팩션 임계전력 마진을 가지는 파라미터를 확인하는 것은 매우 중요하다. 고전력 전송을 수행하는 출력필터는 진공이나 낮은 압력하에서 쉽게 유발되는 멀티팩터(Multipactor) 현상 [1]에 의해 잡음, 하모닉, 증가된 가스방출 및 가스 방전을 유발하여 RF 성능 저하 및 부품의 완전 손상을 입을 수 있다. 멀티팩션은 두 개의 평판 사이에 충분한 크기의 고주파 신호가 아래 금속표면으로부터 이탈된 자유전자는 에너지를 받아 위 금속표면으로 방출되어 이동한다. 전자의 운동에너지가 충분히 크다면 전자가 금속면과 충돌하면서 더 많은 수의 자유전자를 진공으로 2차 방출시킨다. 이러한 과정이 반복되면 두 금속면 사이를 왕복하는 전자의 수는 계속 증가하며 전자의 운동에너지도 증가하여 결과적으로 방전이 발생하여 금속 표면이 손상된다. 고진공에서 전자들의 평균 자유경로(mean free path)가 두 면의 간극보다 작을 때 서로 간의 충돌 확률이 낮아지며 면에 충돌할 확률이 증가하여 멀

티팩션이 발생한다. 지금까지 많은 이론적 및 실험적 연구가 진행되어 왔으며 특히 ESA/ESTEC에서는 실험적으로 평행평판 구조에 대한 주요 재질에 따른 주파수(f) 및 간격(d)의 곱 fxd (GHz mm)의 함수로 임계 전압의 관계를 확립하였으며 그림 4에 제시하였다[3-5]. 대부분의 위성 필터에는 은도금을 사용하며 이 경우에 그림 4에서 기울기(a)는 63을 사용하면 된다.

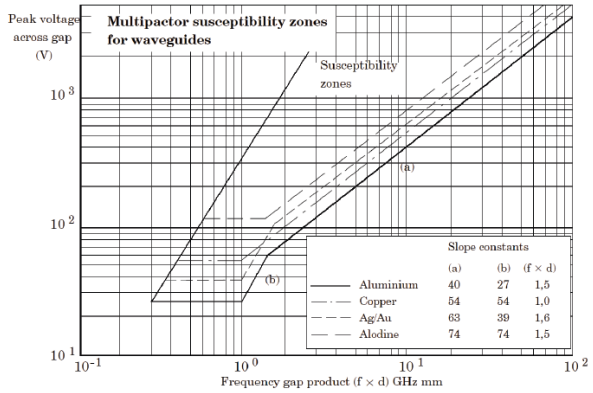

그림 4. ECSS 멀티팩터 감응 다이어그램

그림 4에 근거한 유럽 ECSS에서 만든 멀티팩터 툴을 이용하여 계산된 결과를 그림 5에 나타내었다. 이 때 설계된 필터 내의 두 표면 사이의 최소 갭(d)은 2 mm, 해석 주파수(f)는 8.1625 GHz에 대해 계산된 fd는 16.325 (GHz mm)가 된다. 그림 3에서 가장 큰 전계를 보이는 Iris1 갭에서 얻어진 갭전압 50.14 V를 사용하여 얻어진 멀티팩터 임계전력 416.587 W를 얻었다. 입력전력 100 W에 대한 멀티팩션 마진은 6.2 dB를 얻었다. ECSS 표준에서 Type1에 대한 해석적 요구 마진 8 dB보다 작아 인증시험이 요구됨을 알 수 있다.

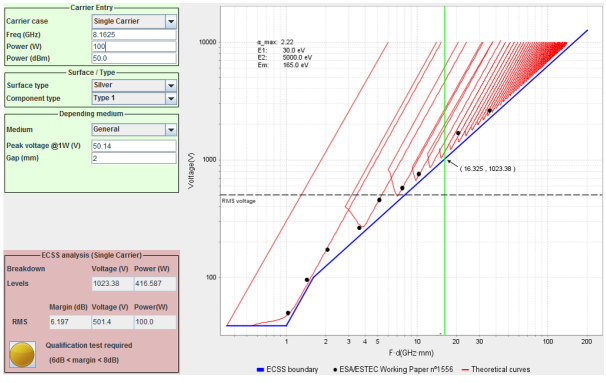

그림 5. ECSS 멀티팩터 마진 계산 결과

일반적으로 갭 크기가 상대적으로 작고 기본모드만이 사용될 경우에는 평행평판 근사 접근법이 의미가 있다. 아이리스 같이 폭이 좁은 구조에서는 Fringing 필드가 멀티팩터 임계에 큰 영향을 미칠 수 있다. 그래서 복잡한 해석 구조에 보다 개선된 멀티팩션 마진을 계산하기 위해 공간전하필드와 자체전계를 PIC(Particle-In-Cell)코드와 FDTD(Finite Difference in Time Domain) 기법을 결합하는 방법을 사용하는 상용 FEST3D 툴 [6]을 사용하여 각 Iris에서 슬롯 폭 및 두께에 대해 멀티팩션 임계전력값 계산을 수행하였다.

먼저 설계 중심주파수에서 아이리스 슬롯 폭 변화에 의한 해석 결과를 표 2에 나타내었다. 이때 사용된 아이리스 두께는 1 mm를 사용하였다. Iris 폭에 의해 멀티팩션 임계전력이 크게 변화되며 폭이 증가될수록 같이 증가되는 것을 알 수 있다.

표 2. 멀티팩터 임계전력 계산(아이리스 폭 변화)

Iris width [mm]	Power @Iris 1 [W]	Power @Iris 2 [W]	Power @Iris 3 [W]	Power @Iris 4 [W]
1	310.541	1859.31	789.024	330.272
1.5	960.906	5812.16	2171.82	960.906
2	2140.57	11874.3	4781.15	2109.32

또한 설계 중심주파수에서 아이리스 두께 변화에 의한 해석 결과를 표 3에 나타내었다. 이때 사용된 아이리스 폭은 2 mm를 사용하였다. Iris 두께가 감소함에 따라 멀티팩션 마진이 커지며 0.5 mm이상에서는 멀티팩션 현상이 발생하지 않음을 알 수 있다.

표 3. 멀티팩터 임계전력 계산(아이리스 두께 변화)

Iris thickness [mm]	Power @Iris 1 [W]	Power @Iris 2 [W]	Power @Iris 3 [W]	Power @Iris 4 [W]
1	2140.57	11874.3	4781.15	2109.32
0.75	3156.1	18874.6	7187.23	3156.1
0.5	No Break down	No Break down	No Break down	No Break down

결과적으로 폭 2 mm 및 두께 1 mm이면 해석적 요구마진을 8 dB를 만족함을 알 수 있다.

아이리스 폭 2 mm 두께 1 mm를 선정하고 설계 대역폭 내의 표본 주파수에 대한 임계전력을 표 4에 나타내었다.

표 4. 멀티팩터 임계전력 계산(주파수 변화)

Freq. [GHz]	Power @Iris 1 [W]	Power @Iris 2 [W]	Power @Iris 3 [W]	Power @Iris 4 [W]
8.1625	1671.8	2015.56	1921.81	2046.82
8.1875	2515.58	7187.23	3093.59	2109.32
8.2125	2140.57	11874.3	4781.15	2109.32
8.2375	2296.82	20124.6	7187.23	2109.32
8.2625	2140.57	25748.8	8187.26	2203.07

주파수가 낮아질수록 멀티팩션 임계전력이 줄어들며 아이리스 1에서 가장 낮은 값을 가짐을 알 수 있다. 아이리스1의 8.1625 GHz에서 얻어진 1671.8 W에 대한 멀티팩션 마진은 12.2 dB로 그림 5의 평행평판 근사에 의한 것보다 6 dB 개선됨을 알 수 있으며, 그 결과 해석 요구 8 dB를 만족하여 인증시험하지 않아도 됨을 알 수 있다.

중심주파수, 아이리스 폭 2 mm 및 두께 1 mm에 대해 해석 파라미터로 은도금, 최대 이차방사계수 2.22, 시작인가전자수 500개, 시작입력전력 500 W을 사용하여 인가된 시간부터 멀티팩션이 발생하는 멀티팩션 임계전력 및 모드 차수를 그림 6에 나타내었다.

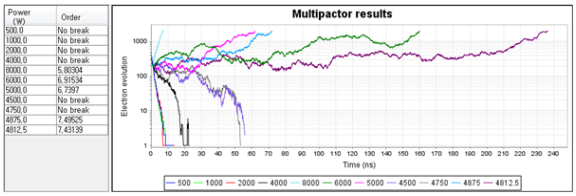

그림 6. 멀티팩터 임계전력 계산 결과

고출력 RF 소자에 있어서 멀티팩션 현상과 함께 중요한 설계 요소로 고려되는 코로나 방전은 위성 발사 동안 고도가 증가되면서 위성 내부 압력이 임계 압력 범위안에 들어가게 되면서 발생할 수 있다. 고진공(<10-5 mBar)에서 발생하는 멀티팩션과는 달리 코로나 방전은 중간압력(수 Torr)에서 발생한다.

주어진 해석 구조에 대한 코로나 방전 임계 전력의 영향을 분석하기 위해 FEST3D 툴을 이용하여 Iris 두께별 가해지는 압력변화에 의한 코로나 임계전력 계산 결과를 그림 7에 나타내었다.

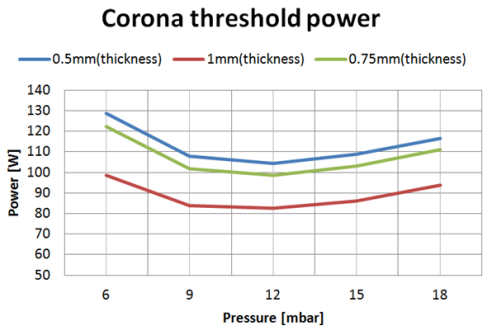

그림 7. 코로나 임계전력 계산

압력에 대한 코로나방전 임계 전력에 대한 Paschen 커브[9]는 코로나방전이 일어나는 임계입력전력을 확인하는데 사용된다.

공기의 경우에 대한 일반적인 전자충돌주파수 v_c는 식 (1)과 같다.

$$v_c = 5.3 \bullet 10^9 p \qquad (1)$$

여기서 p는 압력[Torr]를 나타낸다. 초고주파 전계가 전자가스에 에너지 전달을 최대로 하게 되는 전자충돌주파수 v_c가 w와 같을 때 일어나며 임계입력전력을 보이는 임계압력 p_{crit}은 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$p_{crit} = 2 \bullet \pi/5.3 \bullet f/10^9 \qquad (2)$$

여기서 압력 단위는 mbar이다. 8.2125 GHz의 주파수를 적용하면 계산 임계압력은 대략 12.98 mbar로 해석적으로 계산된 12 mbar에 근접함을 알 수 있다.

Iris 두께의 변화에 의한 코로나 임계 전력을 계산된 결과를 표 5에 나타내었다. 두께가 작을수록 멀티팩터처럼 코로나 임계전력은 커짐을 알 수 있다.

표 5. 코로나 임계전력 계산(두께 변화)

Iris thickness [mm]	Power @Iris 3 [W]
1	82.5898
0.75	98.6295
0.5	104.266

Iris 폭의 변화에 의한 코로나 임계 전력을 계산된 결과를 표 6에 나타내었다.

표 6. 코로나 임계전력 계산(폭 변화)

Iris width [mm]	Power @Iris 3 [W]
1	39.0604
1.5	62.3253
2	82.5898

폭이 커지면 멀티팩터처럼 코로나 임계전력이 증가됨을 알 수 있다.

코로나 임계전력 해석 결과 코로나 임계전력은 멀티팩션 임계전력보다 상대적으로 낮기 때문에 위성발사시 RF 전력이 공급되는 경우에는 반드시 코로나 방전을 피하기 위한 설계 마진 확보가 검증되어야 한다.

최종적으로 아이리스 폭 2mm 및 두께 1mm를 가지는 이중모드 원통형 출력필터 개발모델을 제작 및 튜닝하여 개발모델을 그림 8에 나타내었다.

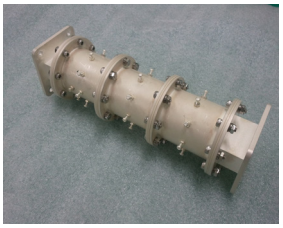

그림 8. 제작된 개발모델 형상

제작된 개발모델 필터에서 측정된 S12 및 S11 시험 결과를 그림 9 및 그림 10에 나타내었다.

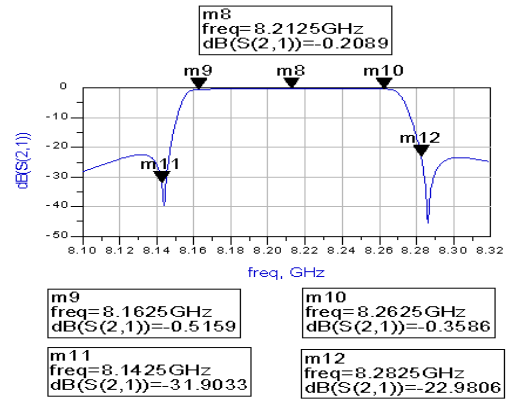

그림 9. 개발모델 출력필터 차단특성

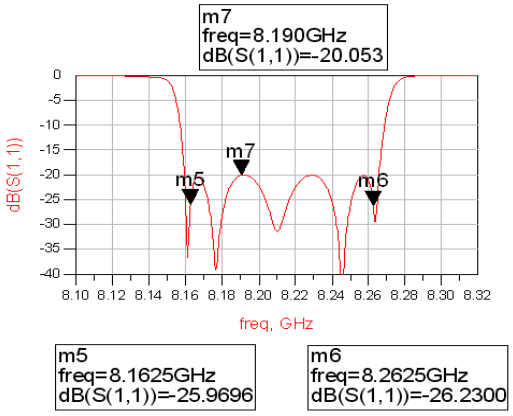

그림 10. 측정 반사계수

측정 결과 주어진 필터 차단특성 및 반사계수 요구사항을 잘 만족하고 있음을 확인하였다.

IV. 결 론

정지궤도위성 관측탑재체의 고속 데이터 전송을 위해 선정된 X-대역 이중모드 원통형 고전력 전송 출력필터 개발모델 요구사항에 대해 필드 해석을 수행하였으며 필터 내부의 전계를 계산하였다. 멀티팩션에 가장 민감한 슬롯 아이리스의 폭 및 두께를 가변하면서 멀티팩션 발생 임계전력의 변화 민감도를 해석하였다. 해석 결과 아이리스 폭에 의해 멀티팩션 임계전력이 크게 변화되며 폭이 증가될수록 같이 증가되며, 아이리스 두께에 대해서는 두께가 감소함에 따라 멀티팩션 임계전력이 증가하였다. 해석결과를 토대로 선정된 아이리스 폭 및 두께에 대한 주파수 대역에 따른 멀티팩션 임계전력을 분석하였으며 대역 내에서 해석적 요구 8 dB 마진을 가짐을 최종 확인하였다. 또한 멀티팩션과 함께 고출력 소자에 중요한 코로나 발생 임계전력 분석을 아이리스 폭 및 두께의 영향을 제시하였으며, 마지막으로 멀티팩션 해석 요구 마진을 보장하는 아이리스 폭 및 두께에 대해 개발모델을 제작하고 튜닝하여 시험한 결과 요구 차단 특성 및 반사 특성을 만족함을 확인할 수 있었다. 얻어진 결과는 정지궤도위성 광대역 데이터 전송을 위한 고출력 X-대역 출력필터 비행모델 개발에 활용하고자 한다.

참 고 문 헌

[1] A. E. Atia and A. E. Williams, "New types of waveguide bandpass filters for satellite transponders," Comsat Tech. Rev., vol. I, no. I, pp. 21-43, Fall 1971.

[2] A. J. Hatch and H. B. Williams, "The secondary electron resonance mechanism of low pressure high frequency breakdown," J. Appl. Phys., vol. 25, pp. 417 - 423, 1954.

[3] A. Woode and J. Petit, "Diagnostic investigations into the multipaction effect, susceptibility zone measurements and parameters affecting a discharge," ESTEC Working Paper 1556, Nov. 1989.

[4] Multipaction Design and Test, ECSS Standard ECSS-E-20-01A, May 2003.

[5] ESA/ESTEC Multipactor Calculator. ver. 1.6, Apr. 2007.

[6] www.fest3d.com

[7] M. Uhm, J. Lee, I. Yom, and J. Kim, "An efficient multipaction analysis of an output multiplexer for satellite applications," JKEES vol. 5, no. 4, pp. 176-182, Dec. 2005.

[8] S. Choi, D. Kim, K. Kwon, Y. Won, and Y. Lee, "Design of multipactor-free S-band duplexer using new test method for space applications," JKEES vol. 6, no. 4, pp. 1-5, Dec. 2006.

[9] A. D. MacDonald, Microwave breakdown in gases. John Wiley & Sons, 1966.

저자

김 중 표(Joongpyo Kim) **정회원**

- 2000년 2월 : 경북대학교 전자공학과 박사졸업
- 2000년 3월 ~ 현재 : 한국항공우주연구원 위성기술연구단 위성전자팀

<관심분야> : 초고주파회로, 안테나, 위성 통신시스템 설계, 원격측정명령계

이 선 익(Sunik Lee) **정회원**

- 1997년 2월 : 연세대학교 천문우주과학과 석사졸업
- 2001년 2월 : 연세대학교 전자공학과 석사졸업
- 2016년 2월 : 충남대학교 전자공학과 박사졸업(예정)
- 2003년 12월 ~ 현재 : 한국항공우주연구원

<관심분야> : 위성/발사체 RF 통신시스템, 원격측정명령계

임 원 규(Wongyu Lim) **정회원**

- 2002년 2월 : 경북대학교 전자공학과 학사졸업
- 2004년 8월 : 한국과학기술원 전자공학과 석사졸업
- 2008년 8월 : 한국과학기술원 전자공학과 박사졸업
- 2009년 9월 : 한국과학기술원 정보전자연구소
- 2009년 10월 ~ 현재 : 한국항공우주연구원 위성기술연구단 위성전자팀

<관심분야> : 인공위성 통신시스템 및 원격측정명령계

김 상 구(Sanggoo Kim) **정회원**

- 2013년 2월 : 한양대학교 전자컴퓨터통신 공학과 박사졸업
- 2014년 1월 ~ 현재 : 한국항공우주연구원 위성기술연구단 위성전자팀

<관심분야> : 인공위성 관측자료통신계 및 원격측정명령계

이 상 곤(Sangkon Lee) **정회원**

- 1987년 2월 : 경북대학교 전자공학과 학사졸업
- 1989년 2월 : 경북대학교 전자공학과 석사졸업
- 1989년 1월 ~ 1996년 1월 : LG정밀(주) 선임연구원
- 2008년 2월 : 충남대학교 전자공학과 박사졸업
- 1996년 2월 ~ 현재 : 한국항공우주연구원 위성기술연구단 위성전자팀장

<관심분야> : 인공위성 전력계 및 원격측정명령계