

원통형 도파관 캐비티 필터의 마이크로파 방전과 고전력 취급 능력

이선익*, 김종표*, 임원규*, 김상구*, 장진백* 정회원

Microwave Breakdown and High-Power Handling Capability of Circular Waveguide Cavity Filter

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

요 약

본 논문에서는 지상에서 시험 중에 발생한 X-대역 원통형 도파관 캐비티 필터의 방전을 소개하고, 원인 분석을 위하여 수행한 전자장 시뮬레이션 결과와 실제 운용케도에서의 발생 가능성에 대하여 분석한 내용을 기술하였다. 전자장 시뮬레이션을 위하여 상용 툴(FEST3D)을 이용하여 필터를 모델링하고 대역폭 안팎의 주파수 신호(1 W Continuous Wave)를 입력하면서 필터 내부의 전계를 살펴보았다. 이 결과, 대역폭 중심보다는 가장자리(band edge) 주파수 신호가 입력되었을 때 필터 내부의 튜닝 스크류에서 더 강한 전계가 형성되는 것으로 나타났다. 그리고 방전 임계 전력을 산출하여 필터에 실제 입력된 전력과 비교해 본 바, 방전 임계값을 초과하는 전력이 필터에 입력되었고 이에 따라 강한 전계가 발생하고 온도가 급격히 상승하여 전기적인 단락으로 이어진 것으로 파악되었다. 추가적인 분석 결과 이 방전은 실제 운용케도에서는 발생할 가능성이 낮고, band edge 주파수가 필터에 입력되더라도 멀티팩터(multipactor) 현상은 일어나지 않을 것으로 예측되었다. 지상에서 일어날 수 있는 마이크로파 방전에 대한 대책으로서 band edge 신호 입력을 피하거나 전력 레벨을 낮게 입력하는 방법을 제안하였다.

Key Words : circular waveguide cavity filter; microwave breakdown; high power handling capability; mode chart; multipactor;

ABSTRACT

In this paper, a microwave breakdown of X-band circular waveguide cavity filter, which occurred during ground test, was introduced, and electro-magnetic field simulation results to identify a root cause, and the analysis of possibility of its occurrence on orbit operation were presented. Filter modeling for simulation was conducted with a commercial tool (FEST3D), and electric fields inside the filter were monitored at the input of 1 W continuous wave. In our observation, strong electric field intensities were monitored on the tuning screws especially at the input of band-edge frequencies. The threshold power levels for the breakdown were also estimated and compared with the input power levels actually injected to the filter. From this estimation, we could figure out that the power exceeding the breakdown threshold was injected to the filter so that strong electric fields were generated and temperature increased high, and this became a root cause of the electrical short. Our further analysis showed that this kind of microwave breakdown is not likely to occur on orbit operation, and multipactor is expected not to occur at the input of band-edge frequencies. As a measure to prevent the microwave breakdown, we suggested to avoid the injection of band-edge frequencies and inject lower power levels to the filter.

I. 서론

대용량 고속 데이터를 전송 또는 중계하는 위성통신시스템의 출력단에는 진행파관증폭기(TWTA)와 같은 고전력 증폭기가 운용되고, TWTA 후단에는 대역통과필터 기능을

갖는 원통형 도파관 캐비티 필터가 운용된다.

이 필터들은 위성을 발사할 때의 코로나 방전과 운용케도에서의 멀티팩터(multipactor) 현상과 같은 RF 방전에 대한 고전력 취급 능력(high power handling capability)을 지니고 있어야 하는데 이러한 능력은 마진 분석 또는 시험을 통하여

*한국항공우주연구원 위성연구본부 위성기술연구단 위성전자팀 (leesunik@kari.re.kr, jpkim@kari.re.kr, wglim@kari.re.kr, 39kim@kari.re.kr, jjb@kari.re.kr), 교신저자 : 이선익
접수일자 : 2017년 9월 14일, 최종게재확정일자 : 2017년 9월 25일

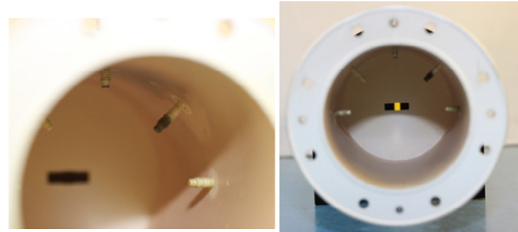
확인된다. 이와 관련하여 정지궤도에서 X-대역 원통형 도파관 캐비티 필터를 대상으로 멀티팩터에 관한 고전력 핸들링 능력을 연구한 논문^{[1][3]}은 참고가 된다. 한편, 위성을 발사할 때나 궤도에서 운용할 때 일어날 수 있는 코로나 또는 멀티팩터 방전과는 다르게 지상 대기상태(ambient condition)에서도 RF 방전이 일어날 수 있음을 인지하고 발생하지 않도록 주의를 기울일 필요가 있다.

본 논문에서는 임의의 정지궤도 위성 통신 시스템의 출력단에 구성된 원통형 도파관 캐비티 필터를 대상으로 지상 대기 상태에서 발생한 RF 방전을 소개하고, 원인 파악을 위하여 분석한 내용을 제시한다. 필터의 설계 또는 제작상의 관점보다는 전기적인 관점에서 접근하고 원인을 분석한다.

일반적으로 도파관에 스크류와 같이 돌출한 부분을 형성하고 시뮬레이션을 통하여 급전 후 필터 내부의 전계를 살펴보면 돌출부에서의 전계는 다른 부분보다 강하게 나타나는 데 이에 착안하여 필터 내부의 전자계를 살펴본다. 본 논문에서는 커플링 매트릭스(coupling matrix) 해석과 같은 고전적이고 이론적인 방법을 사용하지 않고, 설계가 용이한 상용 툴(FEST3D)를 이용하여 4차 이중모드 원통형 도파관 캐비티 필터를 설계한 후 시뮬레이션을 수행하여 전계를 분석한다. 또한, 지상 대기 상태에서 일어난 마이크로파 방전이 정지궤도 운용환경에서 발생하는지의 여부와 필터의 대역폭 가장자리(band edge) 주파수 신호가 입력되었을 때 멀티팩터 방전의 발생 여부도 중요한 이슈이므로 이에 대한 분석 결과도 제시한다.



(a) 필터 외관



(b) 필터 내부

그림 2. Anomaly 발생 필터의 외관 및 내부 모습

필터 내부에서 발생한 특이 현상(anomaly)에 대한 흔적은 그림 2에서와 같이 외관은 튜닝 스크류를 중심으로 큰 타원에 해당하는 만큼 변색되었고, 내부는 스크류 끝부분이 타고 주변의 표면이 그을렸다. 그리고 Anomaly 발생 후 측정된 필터의 전기적 성능은 왜곡된 것으로 나타났다. 데이터 분석 및 후속 시험을 통하여 U 채널로 입력된 S대역 신호는 S/X 수신기에서 정상 출력되었고 TWTA에서도 운용범위내에서 출력되어 필터로 입력된 것으로 분석되었다. Anomaly 발생 당시 X대역 원통형 도파관 캐비티 필터에 입력된 주파수는 이 필터의 대역폭 가장자리(band-edge) 주파수로 확인되었다.

II. 지상 대기 조건에서 발생한 필터 Anomaly

원통형 도파관 캐비티 필터가 구성된 위성통신 시스템은 그림 1과 같다. 4차 이중모드 원통형 도파관 캐비티 필터는 중계기의 고속 채널(U channel)의 출력단에 구성되어 있다. 지상 환경에서 수행한 시험은 이웃하는 중계 채널들간에 인접 주파수에 의한 간섭 영향을 살펴보기 위한 시험이다.

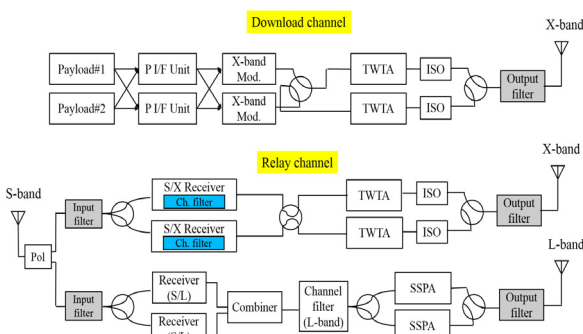


그림 1. 임의의 정지궤도위성의 통신망 블록도^[1]. ISO는 Isolator, Mod.는 변조기를 의미.

III. 4차 원통형 도파관 캐비티 필터 모델링

설계하고자 하는 필터는 8 GHz 근처에서 중심 주파수를 갖고 25 MHz의 대역폭을 갖는 이중 모드 필터이다. 필터의 삽입손실 성능과 크기 등을 고려하여 TE₁₁₃ 모드를 공진 모드로 선정하고 그림 3의 모드 차트를 이용하여 공진기 지름과 길이를 각각 39.55mm, 64.15mm로 적용하였다. 이와 관련된 자세한 사항에 대해서는 참고문헌^[1]을 참고할 수 있다.

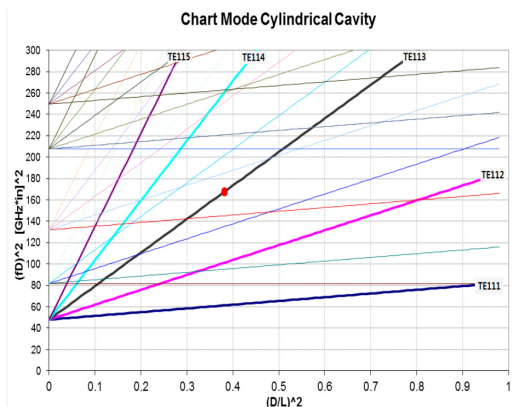


그림 3. 원통형 캐비티 공진기의 모드 차트

필터 합성법에 따라 이 필터의 기본 형상은 그림 4와 같이 캐비티는 2개로 구성된다. 입출력 부분은 도파관 형태로 WR112를 적용하였고, 커플링용 아이리스(슬롯)와 튜닝용 스크류를 구성하였다. 필터의 가운데에는 십자 슬롯으로 구성하고 이를 기준으로 좌우대칭이 되게 하였다. 슬롯들의 폭은 2.5mm, 두께는 0.5mm로 하였고 십자슬롯의 세로 부분의 폭은 2.6mm로 하였다. 튜닝 스크류는 캐비티마다 3개씩 설치하였고 공간기중에서 전기장이 최대인 중앙에 배치하였다.

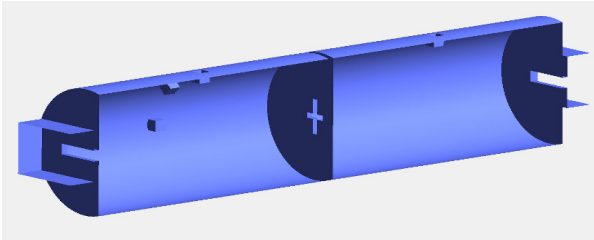
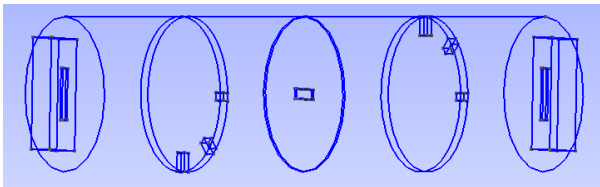
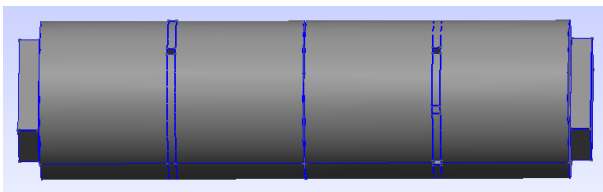


그림 4. 4차 이중대역 원통형 도파관 캐비티 필터의 기본 형상

이와 같은 필터 합성법으로 얻은 기하학적 모델을 나타내면 그림 5와 같다. 필터의 가운데에 위치한 커플링 슬롯은 입출력부와 90도 틀어져 배치되었고 십자부분의 길이는 슬롯의 긴 부분과 거의 차이가 없어서 눈으로는 뚜렷하게 관찰되지는 않는다.



(a) 설계된 필터의 기하학적 모델(표면 제외)



(b) 설계된 필터의 외형

그림 5. 합성법으로 설계된 필터의 기하학적 구조

이 모델의 전기적 성능은 그림 6, 7과 같고, 4개의 폴(pole)들과 한 쌍의 전달영점(transmission zero)이 형성된 것을 볼 수 있다. 여기서, 반사손실은 -20 dB에 가깝기 때문에 추가적인 튜닝은 불필요하였다. 그림 7에서 중심주파수와 대역폭 내에서는 그룹 지연 특성이 가장 좋고 대역폭 가장자리(band edge)에서는 성능이 떨어짐을 알 수 있다.

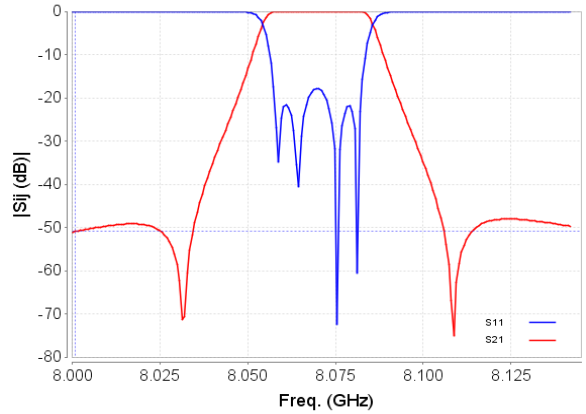


그림 6. 설계된 필터의 삽입손실(S₂₁)과 반사손실(S₁₁) 특성

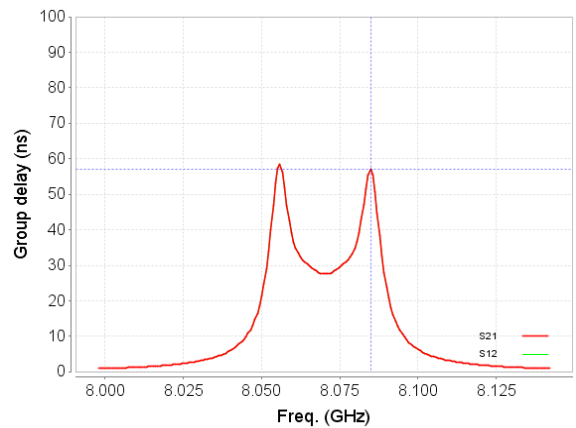


그림 7. 설계된 필터의 Group delay 특성

IV. 필터 내부의 전계 분석

4차 이중대역 원통형 도파관 캐비티 필터 내부에 좌측 band edge 주파수에서 우측 band edge 주파수에 걸쳐 1 W 인 CW(Continuous Wave) 신호를 입력하고 전계를 분석하였다. 그림 8은 중심 주파수(F_c)와 band edge 좌우 주파수에 대하여 첫 번째 캐비티의 튜닝 스크류에 걸리는 전계를 보여 주며 그 값은 다음과 같다.

- F_c에서 최대 전계 E_{1W}: 29,857 V/m
- Left band edge 주파수에서 E_{1W}: 46,017 V/m
- Right band edge 주파수에서 E_{1W}: 50,936 V/m

전계 분석을 통하여 중심 주파수보다는 band edge 양쪽 주파수 신호가 입력될 때 중심 주파수의 전계보다 약 1.5 ~ 1.7 배 높게 형성됨을 알 수 있고, 짧은 쪽보다는 길이가 긴 튜닝 스크류에서 전계가 더 강하게 나타나는 것으로 보인다.

V. 마이크로파 방전 임계값 산출

지상 대기 조건에서 이 필터의 방전이 발생하는 최악의

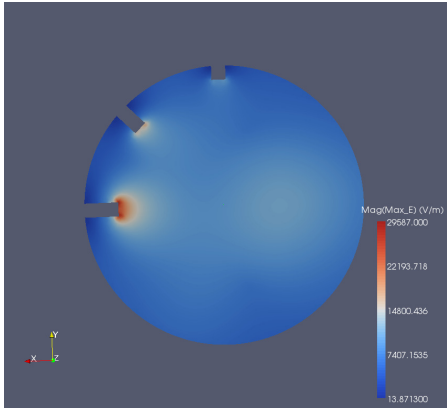
입력 전력 레벨에 대하여 이론적으로 또는 실험적으로 알려진 바는 없다. 이 필터는 중심 주파수에서 100 W급의 신호를 취급할 수 있는데 지상 대기 환경에서 중심 주파수에서 마이크로파 방전을 일으키는 조건을 100 W, 150 W, 200 W 라고 가정하고 각각의 경우에 대하여 band edge 주파수에서 방전 임계값을 산출할 수 있다. 먼저 E_{1W} 를 알고 있고 P_{IN} 의 전력이 필터에 입력된다고 할 때 최대 전계는 식 (1)을 이용하여 구할 수 있다.

$$E_{max} = E_{1W} \cdot \sqrt{P_{IN}} \quad (1)$$

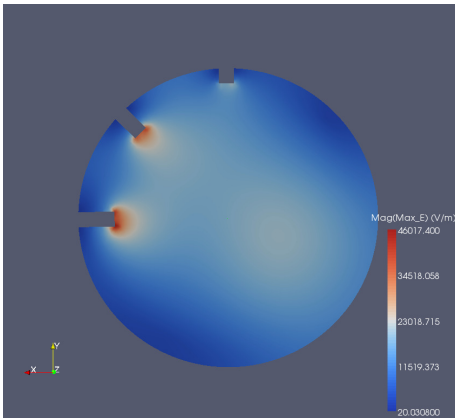
이에 따라 중심 주파수에서 100 W, 150 W, 200 W 각각의 입력에 대하여 허용할 수 있는 최대 전계는 각각 298,570 V/m, 365,672 V/m, 422,241 V/m로 계산된다. 그리고 band edge 주파수에서의 최대 입력 전력은 식 (2)를 이용하여 계산할 수 있다.

$$P_{max} = \left(\frac{E_{max}}{E_{1W_{Band\ Edge}}} \right)^2 \quad (2)$$

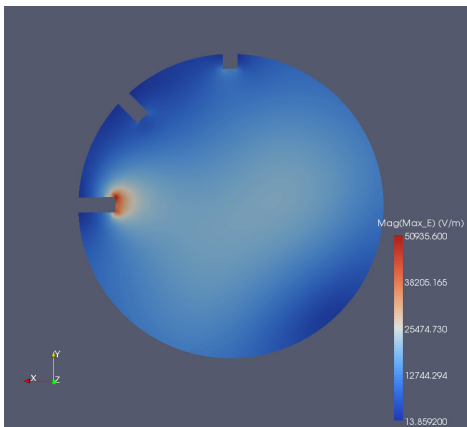
위의 세 가지 중심 주파수에서의 방전 임계 전력에 대하여 각각 band edge에서의 방전 임계값을 산출하면 표 1과 같다. 중심 주파수에서 방전 임계 전력값을 100 W ~ 200 W로 가정할 경우 band edge 주파수에서의 방전을 야기할 수 있는 임계 전력은 34 W ~ 84 W로 산출된다. 실제로 anomaly가 발생하였을 때 필터내부로 입력된 전력 100 W는 band edge 주파수에서의 방전 임계값(예측값)을 모두 초과한다.



(a) E field max. at center freq., 29,857 V/m



(b) E field max. at left edge freq., 46,017 V/m



(c) E field max. at right edge freq., 50,936 V/m

그림 8. 중심주파수 및 band-edge 주파수에서의 전계: 튜닝스크류를 지나 캐비티를 수직으로 자르는 단면을 관찰.

표 1. Band edge 주파수에서 방전 임계 전력 산출

F_c 에서 방전 임계 전력값(가정)	100 W	150 W	200 W
F_c 에서 최대 허용 최대 전계(예측)	298,570 V/m	365,672 V/m	422,241 V/m
Left edge의 방전 임계 전력(예측)	42 W	63 W	84 W
Right edge의 방전 임계 전력(예측)	34 W	52 W	69 W

상기 분석으로부터 방전 임계값을 초과하는 전력이 필터에 입력되었고 이에 따라 튜닝 스크류에 강한 전계가 형성된 것으로 파악된다. 강한 전계에 의하여 튜닝 스크류 및 필터 내부의 온도가 급격히 상승함에 따라 주변의 가스들이 가열되고, 가열된 입자들이 필터의 내부표면에 충돌하는 과정에서 스크류에 있는 전자들이 튀어나오면서 전자들의 흐름이 발생하고, 이로 인하여 전기적인 단락(short) 현상이 일어난 것으로 설명된다.

VI. 정상궤도에서의 고전력 취급 능력 안전성

대기 조건에서 일어난 위의 anomaly 현상이 고진공인 정상궤도에서 발생할 지의 여부는 중요하다. 참고문헌 [1]에서와 같이 ESA에서 수행된 X-대역 원통형 캐비티 필터(6차)의 고진공 멀티팩터(multipactor) 시험을 통하여 필터 내부 온도가 운용범위에서 최대로 상승하더라도 필터 내부에서 기체가 발생하지 않는다는 것을 확인한 바 있다. 이를 토대

로 진공 우주상태에서는 지상 대기 상태와 같은 환경이 형성될 수 없으므로 마이크로파 방전이 발생하지 않을 것으로 사료된다.

또한 정상궤도 운용 시 band edge 주파수가 위성으로 수신되었을 때 고려해야 하는 것은 멀티팩터 발생 여부로서 이것은 band edge 주파수에서 멀티팩터 임계값을 예측함으로써 알아볼 수 있다. 앞서 ESA에서 수행된 멀티팩터 시험을 참고하면 중심주파수에서 최대 540 W까지의 입력 전력에서도 멀티팩터 방전은 발생하지 않았으며 충분한 마진이 확인되었다. 필터 대역폭의 중심 주파수에서의 멀티팩터 발생 임계 전력(P_{mp})을 540 W라고 가정할 수 있는데 이 때 band edge 주파수에서의 멀티팩터 임계값은 아래 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$P_{max} = P_{mp} \cdot \left(\frac{E_{center}}{E_{bandedge}} \right)^2 \quad (3)$$

이로부터 좌측과 우측 band edge 주파수에서의 멀티팩터 임계값은 각각 227 W와 185 W로 산출된다. 그림 1에 구성된 TWTA의 최대 출력은 120W 미만으로 band edge 주파수에서 멀티팩터 임계 예측값인 163W를 출력할 수 없으므로 멀티팩터로부터 안전함을 알 수 있다.

Ⅶ. 결론

X-대역 원통형 도파관 캐비티 필터에서 발생한 특이한 방전 현상에 대한 원인을 알아보기 위하여 필터 내부의 전계 해석을 수행해 보았고, 이 결과 필터 band edge 주파수 신호가 입력되었을 때 필터 내부의 튜닝 스크류에서 강한 전계가 형성됨으로서 마이크로파 방전의 근본 원인이 될 수 있는 것으로 분석하였다. 그리고 band edge 주파수 입력 시 전계분석을 통하여 대기에서 방전이 일어나는 최소 임계전력을 계산하고 실제 입력된 전력과 비교하여 입력된 전력이 임계 전력을 초과한 것으로 판단할 수 있었다. 또한, 기존 멀티팩터 시험 자료와 band edge에서의 멀티팩터 임계값 분석 결과 지상에서 발생한 마이크로파 방전이 정상궤도에서 발생하지 않을 것이고 band edge 주파수 신호가 통신망(그림 1)으로 입력되어도 멀티팩터로부터 안전한 것으로 나타났다.

상기 분석 이외에 튜닝 스크류의 길이를 조정하여 전계 분석 및 방전 문제의 해결 가능성을 검토한 바 있으나 필터에 요구되는 전기적 성능이 벗어나는 부분이 있기 때문에 큰 의미는 없었다. 대기 상태에서 해당 필터의 방전 임계값을 분석을 통하여 알아보았는데 실제로 시험을 통한 확인이 요구되며 이에 대한 후속 연구가 필요하다. 지상에서 고전력 필터에 대한 시험 시 band edge 주파수 신호 입력 시 주의가 필요하며 마이크로파 방전 대책으로서 band edge 주파수 입

력 회피 또는 전력이 낮은 신호 입력을 제안하였다. 본 논문에서는 원통형 도파관 캐비티 필터를 대상으로 지상 환경에서의 방전을 연구함으로써 지상과 정상임무궤도에서의 고전력 취급 능력을 종합적으로 확인할 수 있었다. 본 연구는 향후 개발되는 유사 필터의 지상 시험 시 마이크로파 방전을 인지하고 이를 방지하는데 참고가 될 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 이선익, 김중표, 임원규, 김상구, 이필용, 장진백, "X-대역 원통형 도파관 캐비티 필터의 고전력 핸들링 능력 연구", 한국전자과학회논문지 제28권 제1호, pp. 49-60, 2017.
- [2] 김중표, 이선익, 임원규, 김상구, 이상근, "정지궤도위성 X-대역 출력필터 멀티팩션 민감도 해석", 한국위성정보통신학회 논문지 제10권 제3호, pp. 131-136, 2015.
- [3] 이선익, 김중표, 임원규, 김상구, 이필용, 백덕기, 이상근, "위성용 이중모드 원형 도파관 캐비티 필터의 멀티팩터 분석", KSAS 2016 Spring Conference, pp. 372-374, 2016.

저자

이 선 익 (Sunik Lee)



- 정회원**
- 1997년 2월 : 연세대학교 천문우주학과 석사졸업
 - 2001년 2월 : 연세대학교 전자공학과 석사졸업
 - 2016년 2월 : 충남대학교 전자공학과 박사졸업

· 2003년 12월 ~ 현재 : 한국항공우주연구원 위성기술연구단 위성전자팀

<관심분야> : 위성/발사체 RF 통신시스템, 원격측정명령계

김 중 표 (Joongpyo Kim)



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

<관심분야> : 초고주파회로, 안테나, 위성 통신시스템 설계, 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

김 상 구(Sangoo Kim)

정회원



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

- <관심분야> : 인공위성 관측자료통신계 및 원격측정명령계
인공위성 전력계 및 원격측정명령계

장 진 백(Jinbaek Jang)

정회원



- 1992년 2월 : 경북대학교 전자공학과 공학사
- 1994년 2월 : 경북대학교 전자공학과 석사졸업
- 1994년 3월 ~ 현재 : 한국항공우주연구원 위성기술연구단 위성전자팀(팀장)

- <관심분야> : 인공위성 EPS/TC&R