

S 대역 Diplexer에 대한 Multipactor 민감도 시험

최승운*, 김대영**, 권기호***, 이윤기****

Experimental Verification of Multipactor Sensitivity for S-band Diplexer

Seung-Woon Choi*, Day-Young Kim**, Ki-Ho Kwon***, Yun-Ki Lee****

Abstract

An experimental verification of multipactor(MP) discharge for S-band diplexer as a sample DUT for space application by an in-house MP test facility is proposed. The designed diplexer having two BPFs for Rx and Tx is applied to a design of five pole inter-digital cavity type band pass filter with chebyshev response, it has 2.7 % bandwidth centered at 2.232 and 2.055 GHz for Rx, Tx, respectively. To avoid the MP discharge, the accurate design and analysis methods based on 3D EM field analysis are considered. The proposed in-house MP test facility consists of a phase detecting system using a doubly balanced mixer as a simple, low cost and real time MP test method compared with results of previously well-known MP detection systems as cross reference methods. The calculated MP threshold RF input power is 43.13 dBm. The measured one is 43 dBm and 44 dBm for CW, pulsed mode test, respectively.

초 록

위성용 RF 수동 소자에 대한 MP(multipactor) 현상과 그 검출 방법에 대한 연구를 수행 하였으며, 본 연구에 사용된 RF 수동 소자는 S 대역 diplexer로, 이는 인터디지털 타입의 5단 chebyshev 응답특성을 갖는 두개의 대역통과필터로 구성되며 2.232 및 2.055 GHz 대역에서 2.7 %의 대역폭을 갖는 구조로 각각 설계되었다. MP 민감도 해석을 위해 diplexer에 대하여 3D 전자기 모델링을 수행하였으며, 이를 통하여 diplexer 구조적으로 multipactor에 대하여 가장 민감한 부분을 정의 하였고 이때의 MP 방전 현상이 나타나지 않는 최대 RF 입력전력을 규명하였다. 또한 KARI 자체 개발한 MP 민감도 시험 시설을 이용하여 QM용 diplexer에 대한 시험을 수행하였으며, 그 결과 CW 모드에서 43 dBm, 펄스 모드 시험에서 44 dBm의 RF 입력 전력에서 MP가 발생됨을 확인 하였다.

키워드 : 멀티팩터(multipactor), 다이플렉서(diplexer)

* 위성전자팀/antelch@kari.re.kr
*** 위성전자팀/khkwon@kari.re.kr

** 위성전자팀/dykim@kari.re.kr
**** 위성전자팀/yklee@kari.re.kr

1. 서 론

위성 부품은 높은 온도 변화, 고진공 및 우주 방사에너지 등의 우주환경에 대해 설계시 부터 고려되어야 한다. 특히 위성 통신을 위한 RF 수동 소자는 고진공 하에서 쉽게 유발되는 Multipactor (MP)에 매우 민감하다. 즉 고진공에서는 전자들의 MFP(mean free path)가 유한한 물리적 길이 보다 크므로, 서로간의 충돌확률 매우 작아지며, 대신 구조체 표면과의 충돌확률이 증가한다. 이때 자유전자들이 벽면과 쉽게 충돌하며 이때 생성된 2차 전자(secondary electron) 들이 만들어 진다. 이로 인해 급격하게 가속된 전자들은 또 다른 2차 전자들을 방출시켜 electron 수를 기하급수적으로 증가 시킨다. 이러한 현상을 Multipactor discharge라 하며, 이로 인해 위성용 RF 수동부품들의 성능저하 뿐만 아니라 RF 소자 표면의 물리적 파괴까지 초래할 수 있다[1],[2].

기존의 MP 시험 방법들은 phase nulling system, noise level 검출 방법 및 electron current 검출 방법 등이 있다. 하지만 상기 시험 방법들은 매우 고가 이며, 피 시험 소자의 물리적인 있으며, 따라서 위성 응용을 위한 RF 수동 소자는 MP 민감도 시험을 통해 RF 운용 전력에 대한 마진을 확보해야 하며, 본 논문에서는 MP 방전에 대한 민감도 해석 방법을 제안하며, KARI 자체적으로 개발된 MP 민감도 시험 시설을 개발 하여 검증하였다.

2. Diplexer 설계 및 MP Discharge에 대한 민감도 해석

2.1 Diplexer 설계

인터디지털 cavity 타입의 대역 통과 필터 2개(downlink, uplink BPF)로 구성된 diplexer는 그림 1과 같으며 입/출력 전송선로를 이용하여 급전을 하였으며, 0.1 dB ripple을 갖는 5단

chebyshev 응답 특성을 가지게 필터가 설계 되었다. 이러한 cavity 형태의 diplexer 재질은 은도금된 알루미늄을 사용하였다. 내부의 원통형 공진기 길이는 각각의 설계 중심 주파수의 $\lambda/4$ 의 길이를 가지며 한쪽은 개방형 구조로 되어 있다. Diplexer 설계 및 MP 민감도 해석을 위하여 3D 전자기 해석 방법을 사용하였으며, 그림 2에 downlink 필터에 대한 전계 분포를 나타내었다.

Diplexer 설계는 G. L. Matthaei와 Edward G. Cristal의 논문을 참조하여 각각의 공진기 사이의 coupling capacitance(C_m), 공진기와 윗면과의 self capacitance(C_m) 및 공진기 끝단과 필터 벽과의 fringing capacitance(C_f) 등에 대한 초기값을 계산하였으며 이를 바탕으로 인터디지털 타입으로 필터를 합성하였다[3],[4](그림3 참조).

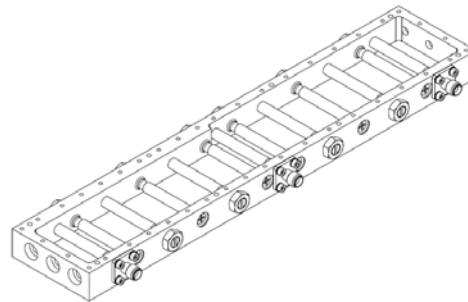


그림 1. Diplexer 구조

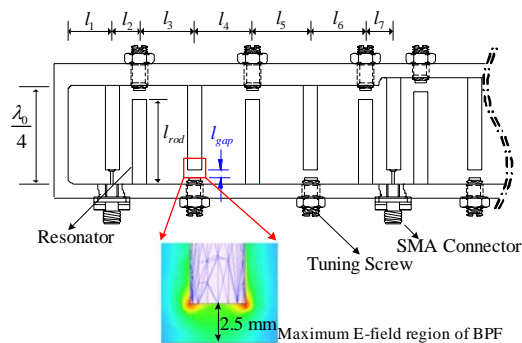


그림 2. Downlink BPF 구조 및 E-field 분포도

본 diplexer는 전기적 특성은 물론이고 실제

고진공하에서 운용되는 RF 운용 전력에 대한 MP free 구조로 설계되어야 한다. 본 논문에서는 20 watt 이상의 RF 운용 전력을 위한 MP free 구조를 갖는 diplexer를 개발하였으며, 이를 위하여 초기 설계 parameter에서 아래와 같이 tuning 및 변경을 통하여 MP free 구조를 갖는 diplexer로 재설계하였다. 먼저 diplexer 공진기 길이를 $\lambda/4$ (33.63 mm) 길이의 초기값 대비 3.68 mm 더 짧게 하여 2.5 mm의 gap distance를 확보하였으며, 다음으로 짧아진 공진기 길이로 인한 C_f 감소에 대한 보상을 위해 공진기 지름을 5 mm로 증가시켰으며, 전체 cavity 크기를 1.32 mm 증가시켰다.

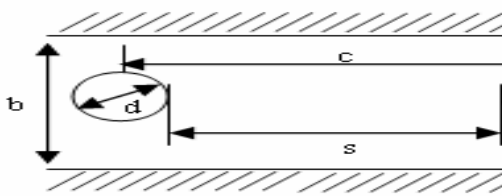


그림 3. 필터 내부의 capacitance 분포도

2.2 MP 민감도 해석

Multipactor 현상은 RF 신호의 전계 성분과 cavity 형태의 RF 소자들의 물리적인 형태에 따라서 발생할 수 있으며, 주된 원인은 높은 주파수의 RF 전계 성분과 소자 내부의 물리적인 구조, 그리고 입사되는 RF 전력으로 분류된다[1].

MP 민감도를 해석하기 위해서는 먼저 FXd product 값을 구하여 운용 주파수와 gap distance에 따른 MP가 발생하는 RF 입력 threshold voltage를 구한다[3]. 다음으로 실제 3-D field 해석을 통하여 설계된 소자 내부의 critical region에서의 E field 세기를 구하여, 이 값과 MP threshold voltage 값의 impedance 혹은 voltage 비인 VMF(Voltage Magnification Factor) 값을 찾는다. 마지막으로 이 값을 기준으로 multipactor free RF 입력전력을 예측할 수 있다[2],[5],[6],[7].

본 MP 해석에서는 uplink는 운용 RF 전력이

매우 낮으므로 생략하였으며, downlink 필터만 해석하였다. Downlink 필터의 공진기 경우에는 RF 필드 인가시 가장 전계가 강한 부분이 4번째 공진기 끝단과 벽면에 걸림을 알 수 있고 (그림2 및 표 1 참조) 이때의 gap distance는 2.5 mm이다. 이를 토대로 FXd product를 구하면 아래와 같다.

- FXd product : $2.23\text{GHz} \times 2.5\text{mm} = 5.575 \text{ GHz} \times \text{mm}$
- 예측된 gap voltage : 496.7 volts

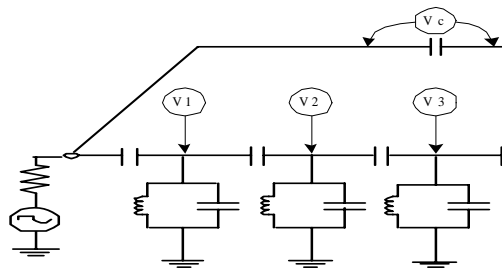


그림 4. Downlink 필터의 등가 회로

5.575 GHz*mm에서의 MP가 발생하는 RF 입력 threshold voltage 참고 문헌 [1]의 Hatch and Williams curve를 적용하여 497.6 volt을 확인하였다. 다음으로 실제 소자 내부의 critical region에 걸리는 E field는 3-D EM 해석을 통하여 아래 식 (1) 처럼 구할 수 있다.

$$(1)$$

이 값을 E-field가 진행하는 방향으로 선적분하여 Gap에 걸리는 voltage값(식 2)을 구하였으며, 입력 전압과 gap에 걸리는 voltage 비인 VMF(식 3) 또한 규명될 수 있다. 따라서 최종적으로 식 4와 같이 MP가 발생하는 RF 입력전력을 아래 수식처럼 예측 가능하다.

$$V_{gap} = \max_{x \in (0, \varpi)} \int_l E_y(x, y, z = z_i; \varpi) \cdot dy \quad (2)$$

$$VMF(z_i, \omega) = \frac{V_{gap}}{V_{in}} \quad (3)$$

$$P_{i,max}(\omega) = \frac{V_{th}^2(h_i, \omega)}{2Z_0(\omega)VMF^2(z_i, \omega)} \quad (4)$$

Gap voltage 변화에 따른 MP 가 발생하는 RF 입력전력에 대한 해석값을 아래 표에 정리하였다. 설계 제작된 공진기의 경우 2.5 mm gap을 갖으며, handling RF 전력은 20.57 watt (43.13 dBm)에서 MP가 발생할 것으로 예측 되었으며, 각각의 공진기에 걸리는 주파수에 따른 특성은 그림 5, 6, 7에 나타내었다.

표 1. 각각의 공진기에 걸리는 MP threshold 예측값

| | Gap volt.[V] | VMF | Threshold power | |
|----------------------|--------------|-------|-----------------|-------|
| | | | Watt | dBm |
| 1 st pole | 54.62 | 7.72 | 41.35 | 46.16 |
| 2 nd pole | 74.48 | 10.53 | 22.24 | 43.47 |
| 3 rd pole | 71.97 | 10.18 | 23.81 | 43.77 |
| 4 th pole | 77.44 | 10.95 | 20.57 | 43.13 |
| 5 th pole | 56.17 | 7.94 | 39.10 | 45.92 |

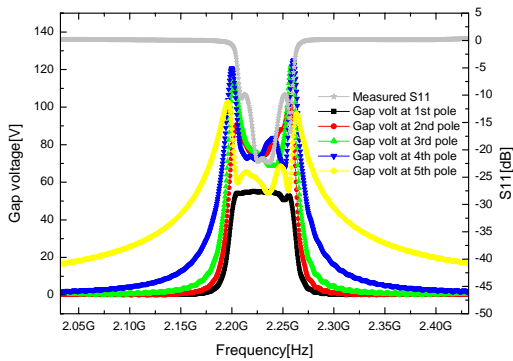


그림 5. Gap voltage 예측값 및 S11

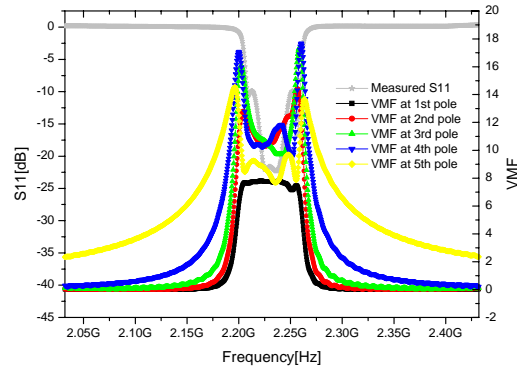


그림 6. VMF 예측값 및 S11

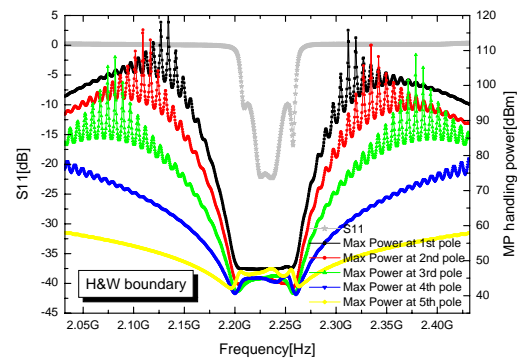


그림 7. 최대 입력 RF power 예측값 및 S11

3. MP 시험 장치 개발 및 시험 조건/방법 설정

3.1 MP 민감도 시험 장치 개발

3.1.1 Phase detecting system 개발

기존의 대표적인 MP 검출 방법은 phase nulling system을 적용하고 있으며, 부가적으로 Input/reflected RF power, 3rd harmonic detection, electron meter 등을 적용하고 있다. 참고문헌 [7]에서 제시된 시험 방법은 유럽우주국(ESA: European Space Agency)에서 MP 민감도 시험에 대한 표준화된 시험방법을 보여주고

있다. MP 발생에 대한 검출이 쉽지 않기 때문에 ESA에서는 2가지 이상의 방법을 동시에 사용하도록 권고하고 있다. 또한 Phase nulling system에서 pulse 형태의 RF 신호원에 대한 MP 발생/검출이 용이하기 때문에 RF 신호원으로 pulse 형태의 신호를 사용할 것을 권고하고 있다. MP가 발생하면 phase nulling system에서 spectrum analyzer상에 나타나는 noise 형태는 pulse 파형의 포락선 부근에 spark/burst noise 형태로 나타난다. 이 방식은 CW (continuous wave) 형태의 RF 신호원에서는 검출 될 수 없는 방법이다. 그러므로 종래의 phase nulling system을 적용한 MP 시험 방법은 CW mode의 RF 신호원에 대한 MP 시험에는 그 검출이 용이하지 않으며, MP 발생 전의 phase 변화를 측정하기 불가능하다.

따라서 제안된 MP 민감도 시험 장치는 그림 9 및 10에서처럼 DBM (Double Balanced Mixer)를 phase detector로 사용한 방법이며, RF 입력 신호를 기준신호로 하여 DUT(device under test)의 반사되는 신호를 coupler를 통해서 입력받아, MP 발생시 DUT로부터 반사되어오는 신호의 phase 변화량을 위상검출 장치인 mixer를 사용하여 검출하는 방법이다. DBM을 사용한 MP 시험 방법을 CW mode에 적용할 경우 MP 발생시 그 변화량을 명확하게 확인할 수 있고, CW mode에 대한 phase nulling 시험 방법에서 검출하지 못했던 MP 발생 직전의 미세한 phase 변화량 까지도 검출 가능할 뿐만 아니라, 모든 형태의 RF 소자에 대한 정확한 MP 민감도 시험이 가능하다.

제안된 phase detecting system은 그림 10 처럼 RF coupler와 mixer를 DUT 앞단에 사용하며, 기준신호인 CW RF 신호원(Vin)의 phase와 DUT로부터 반사되어 나오는 신호(Vre)를 RF coupler를 통하여 추출하여, mixer를 phase detector로 사용하여 두 입력신호의 phase 차이만을 DC 출력 전압(Vout)으로 검출하여 모니터링하는 phase detecting system이다.

즉 RF mixer에서 검출된 DC 출력신호(Vout)는 무한대의 주파수 성분들의 신호들이 있지만, 그 중 가장 큰 신호인 입력의 두 신호의 phase

차이에 대한 DC값과, filtering 되어 거의 제거된 두배의 주파수 성분의 진폭값과 고차항(HOT: higher order term) 성분들의 값이다. 따라서 예상되는 DC 출력전압은 대부분 두신호의 위상차에 의한 값이며, 두신호의 진폭 값에 대한 변화분은 거의 무시할 정도의 값이 된다.

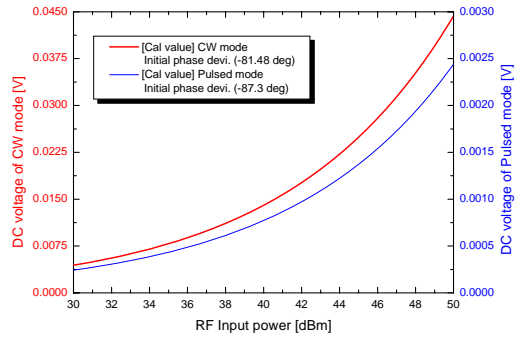


그림 8. Phase detector의 성능 예측

$$V_{in} = A_1 \cos(\omega_{in}t + \phi_{in}) \quad (5)$$

$$V_{re} = A_2 \cos(\omega_{re}t + \phi_{re}) \quad (6)$$

$$V_{out} = \alpha \cos(\phi_{re} - \phi_{in}) + \beta \cos(2\omega t) + HOT \quad (7)$$

$$V_{out} \Big|_{filtered} \approx \beta \cos(\phi_{re} - \phi_{in} + \phi_{\theta}) \quad (8)$$

β 는 믹서의 최대 진폭값, $\cos(\phi_{re} - \phi_{in} + \phi_{\theta})$ 는 초기 위상차, ϕ_{θ} 는 초기 위상의 시스템 변위값이다. ϕ_{θ} 값은 실제 구성되는 실험 setup의 형상에 따라 변화되며, 본 구성에서는 30 dBm RF 입력시 β 는 CW 모드에서 0.004432 Vrms이며, pulse mode에서는 0.000244 Vrms 이다. 또한 고진공 상태에서 초기 위상 변위값(ϕ_{θ})은 CW 및 pulse 모드에 대하여 각각 -81.48, -87.3 도이다. 즉 ϕ_{in} 는 고정되어 있으며, ϕ_{re} 는 MP 발생여부에 따라 변화 될 수 있다. 이러한 값을 바탕으로 RF 입력 전력에 따른 phase detecting system의 성능은 그림 8에 나타내었다.

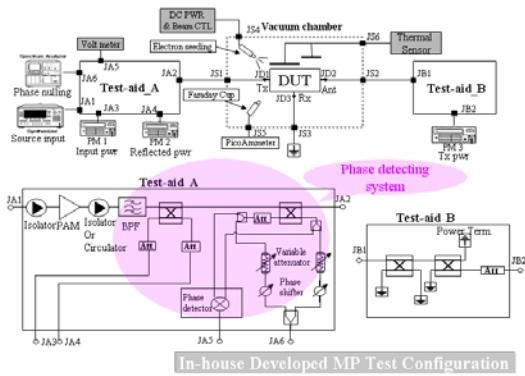


그림 9. In-house developed MP test facility

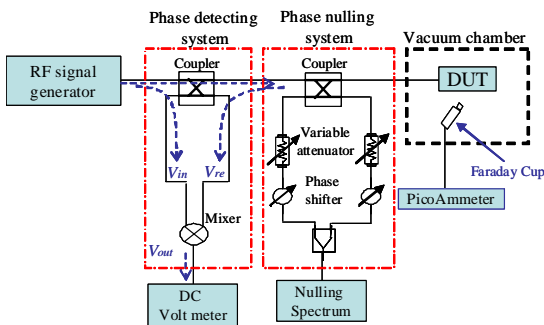


그림 10. DBM 사용한 phase detecting system 상세도

3.1.2 In-house developed hybrid MP test facility 개발

제안된 phase detecting system을 바탕으로 MP 시험 구성을 하였으며, 시험의 정확도를 위하여 phase nulling system, electron current detection 및 RF parameter monitoring 시스템까지 구성 하여 hybrid MP 민감도 시험 장치를 구성하였다.

개발된 hybrid MP 시험 장치는 pulse mode는 물론 CW mode 시험까지 수행 가능하며, 국부적인 MP 발생 현상까지도 검출 가능하다. 또한 개발된 믹서 기반의 phase detecting system과 RF parameter 모니터링 방법으로만 MP 시험 장치를 구현할 경우 매우 경제적으로 구현 가능하다.

3.2 MP 민감도 시험 조건/방법 설정

MP 민감도 시험 구성은 그림 9와 같으며, diplexer에 대한 진공 챔버와 test 시험 장치 및 DUT와의 인터페이스는 그림 11과 같다.

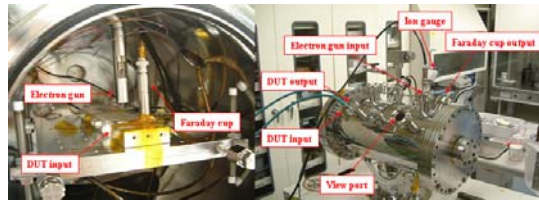


그림 11. 진공 챔버 interface 및 내부 DUT 구성도

시험 전 test aid를 검증하기 위해 MP 시험 setup을 구성하고 각각의 cable 및 passive 소자들의 loss, attenuation 값 등을 check 하였고, LNA와 같은 소자들의 gain 값을 측정하여 spectrum analyzer의 noise level를 측정하여 시험장치에 대한 보정을 실시 하였다.

또한 DUT 내부에 적절한 자유전자들을 모으기 위해 electron gun을 사용하여 그림 11처럼 MP 발생이 예측된 critical region에 주사하였으며, 그 에너지 레벨은 낮은 값으로 설정하였다. 자유전자들의 밀도 및 변화량을 측정하기 위해 Faraday cup으로 전자들을 collection하여 Keithley 6485 pico-ampere meter를 사용하여 자유전자들의 전류량을 측정하였다. 또한 시험시 필요한 RF 입력전력을 만들기 위하여 200watt급 RF power amplifier를 사용하였으며, 각각의 test aid들은 RF 파워에 대해 50 % 이상의 derating을 갖는 소자들로 구성하였다.

시험의 정확도를 높이기 위해 실제 MP 시험하기 전 ambient 상태에서 RF 입력을 증가시키면서 DUT의 이상 유무를 확인하였다. RF 입력전력이 40 watt까지 아무런 변화가 없으며 안정된 특성을 보였으며, 이를 토대로 본 MP 시험은 아래와 같은 조건으로 수행하였다.

- RF 중심주파수 : 2.23 GHz,
- 초기 RF 입력전력 : 35 dBm

- Dwell time : min 5 min.
- RF power step : 0.5 or 1 dB
- Vacuum level : 10^{-5} mbar 이하
- Electron seeding : Electron gun 사용
- Venting time : 2시간 이상

또한 실제 MP 민감도 시험전 diplexer를 제작하였으며, 전기적인 기능 시험을 수행 하였다. 제작된 diplexer는 그림 12와 같이 240 X 47.78 X 15 mm의 크기를 가지고 있으며, S21는 0.65 dB, VSWR는 1.22 등 모든 전기적인 기능에 대한 검증을 완료 하였다.



그림 12. 제작된 diplexer 사진

4. MP 민감도 시험 결과

4.1 CW mode 시험 결과

CW(Continuous Wave) mode의 시험 구성은 그림 9와 같으며 주요 시험 결과는 그림 13과 14에 나타내었다. CW RF 주파수를 사용하여 측정 하였으며, MP 발생 예측 전력인 43.13 dBm보다 낮은 입력 전력인 35 dBm부터 시험을 시작하였다. 진공도는 10^{-5} mbar에서 수행 하였으며, 충분한 venting 시간(약 2시간이상)을 가진 후 시험을 시작하였다. 이때의 각각의 입력 RF 전력에 대한 dwell time은 약 5분 주기로 수행 하였다. 그림 13은 MP 발생 약 20분 전의 data부터 도시 하였으며, 그림 14는 MP 발생 직전 및 발생시의 phase nulling spectrum을 보여 주고 있다. 그림 13에서 처럼 약 20분 부근부터 spike noise가 검출되기 시작하고 있으며, electron current도 파동치기 시작함을 확인 할 수 있다. 그림 14의 왼

쪽은 RF 입력 전력이 42.5 dBm일때 이며 이보다 0.5 dB 증가 시켰을 경우 MP 발생으로 인한 spike noise 성분을 관찰 할 수 있었다.

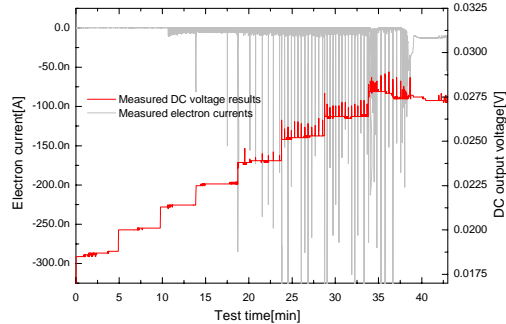


그림 13. Measured DC voltage 및 electron current in CW mode



그림 14. Measured phase nulling spectrum in CW mode(왼쪽: 42.5 dBm, 오른쪽: 43 dBm)

4.2 Pulse mode 시험 결과

시험 구성 및 시험 방법은 CW mode 시험과 거의 유사하며, 단 RF 입력 신호를 CW 대신 pulse를 사용하였다. CW mode의 시험은 실제 동작환경과 유사한 상황으로 시험을 수행할 수 있는 장점이 있는 반면 처리할 RF power가 커지면 시험에 사용하는 부품의 내압이 커져야 하는 등의 제약이 있다. 따라서 pulse 변조된 신호를 사용하면 CW 신호와 비교시 RF peak power는 같은 값을 가질 때 pulse의 duty에 따라서 낮은 average power(total power)을 가질수 있는 장점이 있다. 즉 낮은 average power로도 test aid 및 DUT에 무리없이 높은 peak power test를 할 수 있는 장점이 있다.

본 pulse 모드 시험에서는 pulse 파형은 아래와 같이 구성하고 시험하였다.

<Pulse shape setting>

- PRF : 1KHz
- Duty cycle : 3 %
- Pulse period : 1 ms
- Width : 30 us

시험 결과는 그림 15와 16과 같이 CW 모드보다 약 1dB 높은 44 dBm의 RF 입력 전력에서 MP가 발생됨을 확인 하였다. 특히 그림 15의 electron current량에서 보는 것처럼 약 40분 30초 부근에서 MP가 가장 크게 발생되며 그 이후는 2차 전자가 여전히 방출 되나 RF 입력 전계에 trap 되었다가 다시 풀리는 즉, relaxation 현상이 계속 됨을 확인 할 수 있다.

였으며, 결과는 그림 17 및 18에서 처럼 매우 stable한 특성을 확인 할 수 있었다.

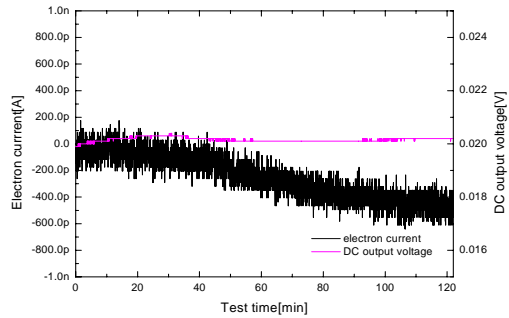


그림 17. Aging test results of electron current and DC output voltage

그림 15. Measured DC voltage 및 electron current in pulsed mode

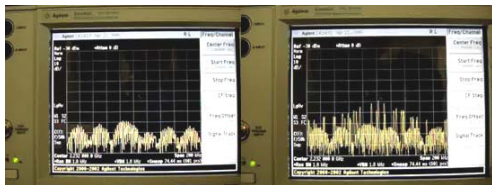


그림 16. Measured phase nulling spectrum in pulsed mode(왼쪽: 43.5 dBm, 오른쪽: 44 dBm)

그림 18. Aging test results of phase nulling spectrum

4.4 MP 시험 결과 고찰

CW 및 pulse 모드 시험은 각각 43 및 44 dBm에서 MP가 발생 하였다. 이는 0.5 dB step을 가진 시험 구성이었으며, 예측값은 43.13 dBm 이었다. 예측값과 각각의 시험 모드에 대한 편차는 표 2와 같다.

CW 모드가 pulse 모드보다 1dB 낮은 RF 입력 전력에 대하여 MP가 발생되었으며, 이는 duty 3%의 pulse 파형보다 CW mode 시험에서 국부적인 heat dissipation이 더 많이 발생하여 약 1dB 낮은 RF 입력 전력에서 MP가 발생하였을 것이라 추정된다. 즉 diplexer내부의 국부적인 열로 인해 자유전자들이 RF 입력전력에 더 쉽게 trap 된다는 사실을 확인 할 수 있었다.

4.3 Aging mode 시험 결과

MP 민감도 시험을 바탕으로 실제 diplexer의 동작 특성을 알아보기 위하여 MP 발생 전력의 1dB 아래에서 2시간 동안 aging 시험을 수행 하

표 2. MP 시험 결과 정리

| MP detected power | | | | Deviation bet'n calculated and test results | |
|------------------------|---------------|-------------|---------------|---|-----------|
| Initial [W] | Initial [dBm] | Maximum [W] | Maximum [dBm] | Initial [dB] | Max. [dB] |
| <i>For CW mode</i> | | | | | |
| 19.95 | 43.00 | - | - | 0.14 | - |
| <i>For Pulsed mode</i> | | | | | |
| 25.10 | 44.00 | 28.18 | 44.50 | -0.86 | -1.36 |

4. 결 론

Multipactor 방전에 대한 해석 방법 및 시험장치 개발을 위한 연구를 S 대역 diplexer에 대하여 수행 하였다. 본 해석에서는 20 watt의 RF 입력 전력까지 견딜 수 있는 MP free 구조를 갖는 diplexer를 개발 하였으며, MP 방전에 대한 해석 방법을 제시하였고, 시험 장치 또한 개발 하였다. 본 MP 민감도 해석을 위하여 diplexer에 대하여 FEM(finite element method) 기반의 3D 전자기 해석틀을 사용하였다. 이를 통하여 multipactor에 대하여 가장 민감한 부분을 정의 하였고 이때의 MP 방전 현상이 나타나지 않는 최대 입력전력 (43.13 dBm)를 규명하였다. 또한 KARI 자체 개발한 MP 민감도 시험 시설을 개발하였으며, 이를 이용하여 diplexer에 대한 시험을 수행하였으며, 그 결과 CW 모드에서는 43 dBm, 펄스 모드 시험에서는 44 dBm에서 MP가 발생 되었다.

본 연구를 통하여 MP 해석 및 시험을 위한 인프라 구축을 완료 하였으며, 향후 우주용 RF 수동소자에 대한 MP 민감도 검증을 수행 할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. A. J. Hatch, H. B. Williams, "Multipacting modes of high frequency gaseous breakdown", The

Physical Review, vol. 112, no. 3, pp. 681-685, Nov. 1958.
 2. J. Rodney, M. Vaughan, "Multipactor", IEEE Trans. on Electron Devices, vol. 35, no. 7, pp. 1171-1180, Jul. 1988.
 3. G. L. Matthaei, L. Young, and E. M. T. Jones, Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures, Norwood, MA: Artech, 1980.
 4. Edward G. Cristal, "Coupled circular cylindrical rods between parallel ground planes", IEEE MTT, pp. 428-439, Jul. 1964.
 5. A. Woode, J. Petit, "Investigations into the multi-pactor breakdown in satellite microwave pay-loads", ESA Journal, vol. 14, pp. 467-478, 1990.
 6. M. Ludovico, G. Zarba, L. Accatino, and D. Ra-boso, "Multipaction analysis and power handling evaluation in waveguide components for satellite antenna applications", IEEE AP-S International Sym-posium and USNC/URSI National Radio Sci-en-ce Meeting, 2001.
 7. ESA publication division, Space Engineering, Multi-paction Design and Test, ECSS-E-20-01A. ESA- ESTEC, May 2003.