

技術論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 41(3), 246-252(2013)

DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2013.41.3.246

항공기 RF 장비들의 신호 간섭 방지를 위한 필터 설계

김준형*, 김봉규**, 전용구***, 이성우*

Filter design for protecting signal interference between RF equipments on aircraft

Junhyoung Kim*, Bong-gyu Kim**, Young-gu Jeon*** and Seong-woo Lee*

LIG Nex1 Avionics R&D Lab*, Agency for Defense Development The 7th R&D Institute - 3**, Actstechnology R&D Laboratory***

ABSTRACT

This paper presents method to suppress signal interference by using the filter in the RF output stage of the radiation equipment as a way to avoid interference between the RF(Radio Frequency) equipment mounted on aircraft. Especially filter design to suppress harmonics of the radiation equipment and testing method to verify the filter's performance is presented. Filter was installed at RF output stage of U/VHF radio in order to prevent interference between U/VHF(Ultra/Very High Frequency) radio and data link system. Filter design and testing method in this paper will be able to give help in the design of aircraft equipments as a tool that can be used to establish measures for problem of interference in the aircraft.

초 록

본 논문에서는 항공기에 장착되는 RF(Radio Frequency) 장비간의 신호 간섭을 방지하기 위한 방안으로 가해 장비의 RF 단에 필터를 사용하여 간섭 성분을 억제하는 방안을 제안한다. 특히 가해 장비에서 발생하는 고조파 성분의 억제를 위한 필터 설계와 필터 성능을 검증하기 위한 시험 방안을 제시한다. 필터는 U/VHF(Ultra/Very High Filter) 무전기와 데이터링크 시스템간의 간섭을 방지하기 위해 U/VHF 무전기의 RF 단에 설치하였다. 본 논문에서의 필터 설계와 시험 방안은 항공기에서 발생하는 간섭 문제에 대한 대책을 수립할 수 있는 도구로써 항공기 RF 장비 설계에 도움을 줄 것이다.

Key Words : Low Pass Filter(저역통과필터), RF Interference(무선주파수 간섭)

1. 서 론

항공기의 다양한 임무 요구에 따라 항공기에 장착되는 안테나도 다양해지고 많아지고 있다. 특히 장착 장비에 따라 형태와 특성이 다르기 때문에 동일한 안테나를 여러 장비가 공유하기 힘

들며 용도에 따라 같은 주파수 대역을 점유할 경우 간섭이 발생할 수 있다.

항공기 설계에서부터 항공전자 장비들의 특성을 이해하고 안테나 배치를 고려하여야 한다[1]. 안테나를 사용하는 장비로는 음성통신을 위한 UHF/VHF(Ultra High Frequency/Very High

† Received: July 7, 2012 Accepted: February 19, 2013

* Corresponding author, E-mail : kimjunhyoung@lignex1.com

http://journal.ksas.or.kr/

pISSN 1225-1348 / eISSN 2287-6871

Frequency) 무전기, 충돌 회피를 위한 TCAS(Traffic Collision Avoidance System), 항공기 식별을 위한 IFF(Interrogation of Friend or Foe), 항법 정보 제공을 위한 GPS(Global Positioning System), 데이터 통신을 위한 데이터링크(Data Link) 시스템, 지상고도 측정을 위한 RALT(Radio ALTimeter), 자항공기 위치 측정을 위한 DME(Distance Measurement Equipment) 등 많은 종류의 항공전자 장비가 안테나를 사용한다. 또한 신뢰성 확보를 위해 동일한 RF 장비가 2대 이상 장착되는 경우도 있으며 그에 따라 안테나 간 간섭의 위험은 증대된다.

안테나 간의 간섭은 피해 장비의 사용 주파수 대역에서 수신 감도 한계치(Sensitivity threshold) 이상의 RF 성분이 유입되는 경우를 말한다[2]. 간섭 성분은 장비의 통신 장애 및 오작동을 유발할 수 있으므로 장비간의 간섭이 발생하지 않도록 항공기 설계 단계에서부터 대책을 마련하여야 한다.

본 논문에서는 항공기에 기본적으로 사용되는 U/VHF 무전기와 U/VHF 무전기에 의해 영향을 받을 수 있는 데이터링크 장비 간의 간섭에 대해 검토하였다. 이에 따라 피해 장비가 가해 장비에 의해 간섭이 발생할 수 있는 대역을 수신 감도 이하로 제한하기 위해 가해 장비의 RF 단에 필터를 장착하는 방안을 제안한다.

논문의 본문에서는 영향성 분석, 간섭을 방지하기 위한 필터 설계 방안, 제작한 필터의 성능을 검증하기 위한 시험 방안을 기술한다. 또한 시험 결과를 제시하여 필터를 통해 간섭을 제한할 수 있음을 확인한다. 마지막으로 필터를 활용한 방법이 항공기의 간섭 제거에 적용이 가능한 효율적인 방법임을 확인하며 끝을 맺고자 한다.

II. 본 론

2.1 영향성 분석

2.1.1 설치 환경

항공기 장착 안테나는 장착 요구 조건을 고려하여 설계 목적에 적합하도록 사전 분석한 후 비행체에 장착된다. 비행체에 장착되는 안테나는 송수신 안테나뿐만 아니라 GPS 안테나와 같이 수신용 안테나도 있으며 안테나들의 사용 대역은 수 kHz ~ 수 십 GHz까지 다양하다. 또한 사용 주파수 및 목적에 따라 다양한 형태의 안테나들이 사용된다.

안테나들의 다양한 장착 요구 조건을 고려하

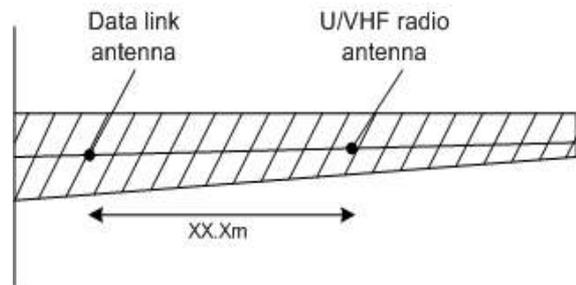


Fig. 1. Installation location of antennas

기 위해서는 비행체의 구조를 파악해야 하며 특히 제한된 공간에서는 설치 환경에 적합하도록 구성하여야 한다.

본 논문에서는 항공기에 장착된 데이터링크 안테나와 U/VHF 무전기 안테나가 동일한 주위에 위치하여 U/VHF 무전기의 RF 성분이 데이터링크 장비에 신호 간섭을 줄 수 있는 환경에 대해 분석을 진행하였다. Fig. 1은 U/VHF 안테나와 데이터링크 안테나의 설치 위치를 나타낸 그림이다.

2.1.2 장비 특성

본 논문에서 고려한 U/VHF 무전기는 일반적인 군용 무전기로 AM 출력 10W, FM 출력 15W이며 사용 주파수 대역은 30.000MHz ~ 399.975MHz이다. U/VHF 무전기의 구성은 U/VHF 무전기와 U/VHF 안테나로 구성되며 하나의 안테나를 통해 송수신이 가능하다.

U/VHF 무전기의 송신 특성은 Table 1과 같다. Table 1에 기술한 무전기는 Table 2에 기술한 안테나와 연동된다. 안테나는 광대역 모노폴 안테나로 무지향성 안테나이다.

Table 1. Specification of U/VHF Radio

Factor	Specification
Frequency range	30.000MHz ~ 87.975MHz, FM 108.000MHz ~ 399.975MHz, AM/FM
Carrier power (Normal mode)	AM : $\geq 10W$ (typ. 12W) FM : $\geq 15W$ (typ. 17W)
Harmonic spurious signals	$2^{nd} \leq -57dBc$ (typ. -75dBc) $3^{rd} \leq -60dBc$ (typ. -80dBc) $4^{th} \sim 7^{th} \leq -70dBc$ (typ. -90dBc)
Non-harmonic spurious signals	$\leq -34dBm$ (typ. -50dBm)

Table 2. Specification of U/VHF antenna

Factor	Specification
Frequency range	108.000MHz ~ 400.000MHz
Impedance	50 ohms
VSWR	3.0 : 1 max. 108-118 MHz 2.5 : 1 max. 118-174 MHz 2.5 : 1 max. 225-400 MHz
Radiation pattern	Omnidirectional (Az) Monopole (EI)
Gain (typ.)	-6dBi VHF +2dBi UHF

2.1.3 영향성

고조파는 모든 RF 장비에서 발생하는 현상으로 RF 시스템의 필수적인 AMP, Mixer 등의 비선형 소자에 의해 발생한다. 고조파의 특성은 식 (1)과 같이 입력을 x 라고 할 때 비선형 소자를 통과한 후 식 (2)와 같이 y 로 출력되며 상수항, 2승제 항, 3승제항 그리고 이후 항들로 표현할 수 있다.

$$x = A\cos(\omega t), \quad \text{at } \omega = 2\pi f \quad (1)$$

$$y = a + bA\cos\omega t + cA^2\cos^2\omega t + dA^3\cos^3\omega t + \dots \quad (2)$$

상수항 = a

1승제 항 = $b\cos\omega t$

$$\begin{aligned} \text{2승제 항} &= cA^2\cos^2\omega t \\ &= cA^2\left(\frac{1 + \cos 2\omega t}{2}\right) \\ &= \frac{cA^2}{2} + \frac{cA^2}{2}\cos 2\omega t \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{3승제 항} &= dA^3\cos^3\omega t \\ &= dA^3\left(\frac{\cos 3\omega t + 3\cos\omega t}{4}\right) \\ &= \frac{3dA^3}{4}\cos\omega t + \frac{dA^3}{4}\cos 3\omega t \end{aligned}$$

2승제 항, 3승제 항 그리고 이후 항들은 고조파 성분으로 성분 크기는 점차 작아지지만 기본 주파수(1승제 항)의 배수로 발생한다.

Table 1의 사용 대역을 가진 U/VHF 무전기의 2차(2승제 항), 3차(3승제 항) 고조파가 사용 주파수 대역이 450MHz에서 500MHz 사이인 데이터링크에 주는 간섭을 고려하여 분석하였으며 Fig. 2와 같이 Table 1의 U/VHF 무전기에서 송신 중 발

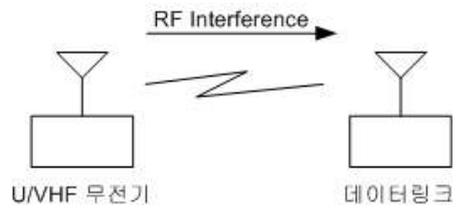


Fig. 2. RF interference

생하는 고조파가 근접한 데이터링크 안테나로 유입되어 간섭을 발생시키는 경우를 고려하였다.

우선 고조파가 데이터링크에 간섭을 발생시키는 지 확인하기 위해서는 데이터링크의 최저 수신 레벨 이상의 RF 성분이 데이터링크 안테나로 유입되는지 확인해야 한다.

가해 장비 U/VHF 무전기의 고조파 신호는 Table 1의 AM 출력 12W(+40.79dBm)를 기준으로 2차 고조파는 -34.21dBm(typical) 이하이며 3차 고조파는 -39.21dBm(typical) 이하이다. 이에 반해 피해 장비 데이터링크의 최저 수신 감도는 -105dBm이며 안테나 간 이격 거리를 8m로 가정한다면 -43dB 이하의 결합 계수를 가진다[1]. 데이터링크의 안전한 통신을 위해서 외부 간섭 신호 -120dBm 이하를 목표로 한다면 최소 2차 고조파의 경우 43dB 이상을 감쇄시켜야 하며 3차 고조파의 경우 38dB 이상을 감쇄시켜야 한다는 결론을 얻을 수 있다.

따라서 안정적인 데이터링크 사용을 위해서는 U/VHF 무전기의 고조파가 추가로 43dBm 이상의 감쇄가 필요함을 알 수 있다.

2.2 필터 설계

2.2.1 필터 요구 성능

안정적인 데이터링크의 데이터 수신을 위해 U/VHF 무전기의 2차, 3차 고조파를 450MHz 대역 이상에서 50dB 이상 감쇄하는 필터 설계를 목표

Table 3. Requirement of filter

Factor	Specification
Passband frequency	100.000MHz ~ 400.000MHz
Stopband frequency	450.000MHz ~ 500.000MHz
Insertion loss	below 2.0dBm
Cut-off characteristic	below 50dB @ 450~500MHz (compare harmonics about fundamental frequency)
VSWR	below 1.5 : 1
input power	20W

로 정하였다. 설계 파라미터는 아래와 같으며 설계의 핵심 파라미터인 차단 특성 및 정재파비는 비행체 지상 시험을 통해 재확인하였다.

2.2.2 필터 설계

450MHz~500MHz 대역의 차단특성을 만족하기 위해서 Cut-off 특성이 우수한 Elliptic type의 저역통과필터(LPF, Low Pass Filter)로 설계를 하였다.

Elliptic 필터는 Fig. 3의 저대역 시뮬레이션 결과와 같이 Butterworth 필터와 chebyshev 필터에 비해 급격한 경사도를 가진 Cut-off 특성을 가짐을 알 수 있다. 이는 근접한 주파수를 사용하는 장비 사이의 간섭을 차단하기에 유리하다.

Elliptic 필터의 이득은 각 주파수를 ω 라고 할 때 식 (3)와 같다.

$$G_n(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \epsilon^2 R_n^2(\xi, \omega/\omega_0)}} \quad (3)$$

R_n : n th-order elliptic rational function

ω_0 : the cutoff frequency

ϵ : the ripple factor

ξ : the selectivity factor

제작 전 Fig. 4의 필터 회로를 시뮬레이션으로 분석하여 성능을 검증하였다. 시뮬레이션에 이용한 회로는 Fig. 4의 9차 Elliptic 필터 회로이며 시뮬레이션 결과 Fig. 5와 같이 필터의 요구 사항이 충족됨을 확인하였다.

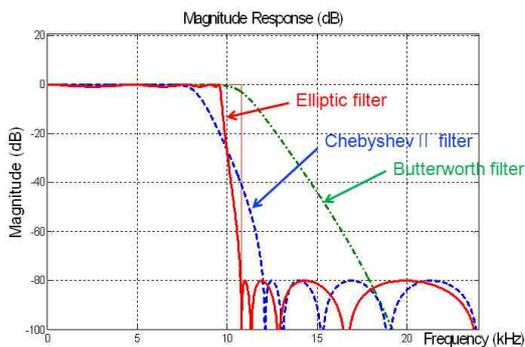


Fig. 3. Performance comparison of filters

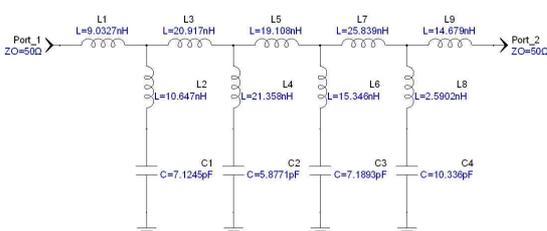


Fig. 4. Filter circuit

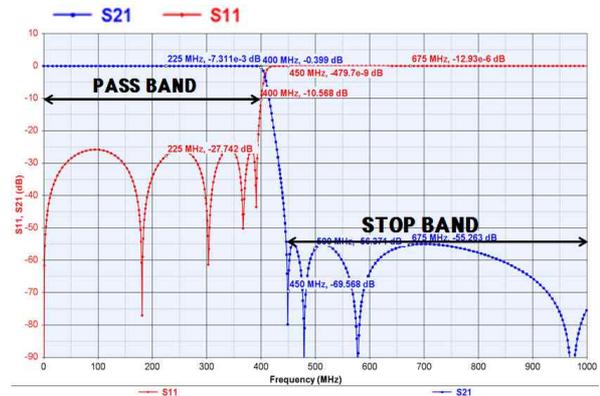


Fig. 5. Result of simulation

2.2.3 필터 형상

필터 형상은 Fig. 6과 같으며 병렬 LC와 직렬 L로 구성된 형태이다. Fig. 6의 PCB는 외부와의 차단 및 RF 영향을 최소화하기 위하여 Fig. 7과 같이 박스에 고정하였으며 진동의 영향을 최소화하기 위해 박스 내부를 몰딩 처리하였다.

또한 본딩 조건 MIL-STD-464A를 만족하기 위해 밀판은 도장을 제외하였다. 제작된 장비는 MIL-STD-810G에 따라 고온 저장, 저온 저장, 충격, 고도, 온도/습도, 진동 시험을 수행하여 정상 동작함을 검증하였다.

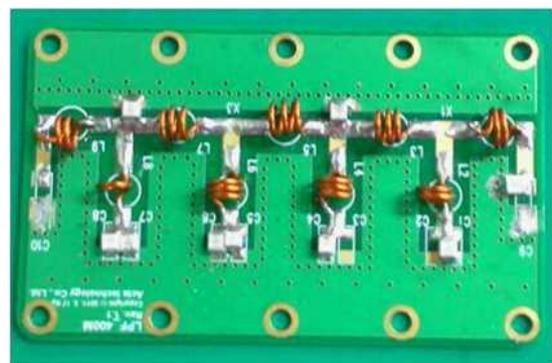


Fig. 6. Shape of filter PCB



Fig. 7. Shape of filter

2.3 시험

2.3.1 수락 시험

설계한 저역통과필터가 요구 성능 이하로 RF를 감쇄시킬 수 있음을 확인하기 위해 Network analyzer를 사용하여 수락 시험을 수행하였다. 수락 시험은 Network Analyzer에서 S11, S21을 측정하였으며 시험 구성은 Fig. 8과 같다.

수락 시험 결과는 Network analyzer의 측정 결과로 확인하였으며 Fig. 9와 같다.

S21 결과 450MHz에서 500MHz 사이에서 50dB이상의 감쇄가 발생함을 확인하였다. 그러나 급격한 Cut-off 설계로 인해 400MHz에서 -1.6209dB의 신호 감쇄가 발생함을 확인하였다. 통과 대역의 신호 감쇄는 -2dB 제한 설계 요구 조건을 만족하였으나 온도에 따라 캐패시터의 특성이 변하여 0.1~0.2dB의 오차가 발생함을 온/습도 환경시험에서 확인하였다.

또한 Fig. 5의 시뮬레이션 결과와 달리 Fig. 9의 측정 결과 650MHz이상에서 급격히 특성이 변화하였다. 이는 Fig. 5의 시뮬레이션에서는 이상적인 소자에 대한 결과 값이지만 Fig. 9는 실제 소자로 구성된 필터의 측정값이므로 인덕터의 주파수에 따른 특성이 변화하여 발생하였다.

S11 결과에서는 사용 주파수 대역에서 최대 1 : 1.42로 요구 사항 VSWR 조건 1 : 1.5를 만족함을 확인하였다.



Fig. 8. Configuration of acceptance test

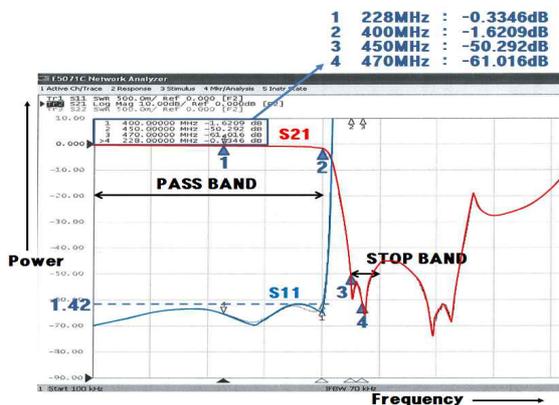


Fig. 9. Result of acceptance test

2.3.2 SIL 시험

수락 시험에서 통과한 저역통과필터는 비행체에 장착하기 전 비행체와 유사한 환경의 SIL(System Integration laboratory)에서 성능 시험을 수행하였다. 비행체에 장착되는 동일한 U/VHF 무전기를 설치하여 성능 시험을 진행하였으며 시험을 위한 부가 장비, 고역통과필터 (HPF, High Pass Filter)와 감쇄기(Attenuator)를 Fig. 10과 같이 설치하였다.

고역통과필터는 Spectrum analyzer의 Dynamic range를 초과하는 고조파들을 측정하기 위해 장착하였다. U/VHF 무전기의 원신호는 저역통과필터에 의해 1~2dB 감쇄에 그치지만 측정 대상인 고조파는 저역통과필터에 의해 50dB 이상 감쇄되어 Spectrum analyzer로 유입된다. 이때 원신호와 고조파의 신호 크기 차이가 Spectrum analyzer 장비의 측정 대역을 벗어나면 측정 대상인 고조파를 측정할 수 없게 되므로 이를 해결하기 위해 측정 대상이 아닌 원신호를 감쇄시켜 고조파를 측정한다. 고역통과필터 장착으로 원신호와 측정 신호의 신호 크기 차이는 Spectrum analyzer의 측정 범위보다 작아지므로 측정 대상인 고조파는 왜곡 없이 측정 가능하다.

측정 장비 보호를 위해서 30dB 감쇄기를 장착하였으며 비행체와 동일한 조건에서 시험하기 위해 장착 케이블은 비행체와 유사한 길이를 적용하였다.

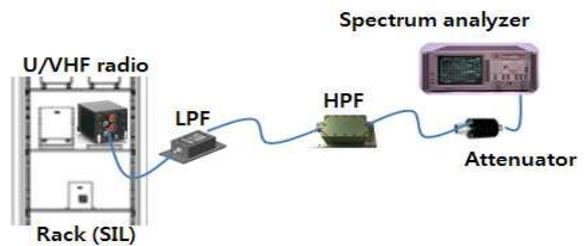


Fig. 10. Configuration of SIL test

Table 4. Result of SIL test (attenuator : 30dB)

측정 주파수	LPF 장착 전		LPF 장착 후	
	원신호 (dBm)	고조파 (dBm)	원신호 (dBm)	고조파 (dBm)
2차 고조파	9.80	-63.17	-53.49	-115
2차 고조파	9.80	-63.17	-53.41	-116
2차 고조파	9.74	-63.54	-53.48	-118
3차 고조파	9.92	-75.18	-59.74	-92.01
3차 고조파	9.94	-74.69	-59.64	-94.40
3차 고조파	9.94	-75.09	-59.78	-93.58

측정 주파수는 데이터링크의 사용 주파수 대역, 450MHz ~ 500MHz를 측정하였으며 일부 측정된 결과는 Table 4와 같다. Table 4는 U/VHF 무전기의 2차 고조파와 3차 고조파 성분의 신호 크기를 저역통과필터 장착 전 후 측정된 결과이다.

측정 결과 데이터링크와의 거리를 고려한 자유 공간 손실(free space loss) 43dBm과 감쇄기 30dB를 적용할 경우 3차 고조파는 -100dBm 이하이며 2차 고조파는 -120dBm 이하로 저역통과필터 장착 전보다 장착 후 고조파에 대한 추가 감쇄가 있음을 확인하였다.

2.3.3 비행체 시험

비행체 시험은 U/VHF 무전기, 저역통과필터, 안테나로 구성된 가해 장비와 고조파에 의해 영향을 받는 피해 장비 데이터링크 안테나를 실장비로 비행체에 장착한 후 피해 장비 데이터링크의 안테나로 유입되는 간섭을 측정하였다. 간섭 측정을 위한 비행체 시험 구성은 Fig. 11과 같다.

U/VHF 무전기 장비에서 출력된 RF 신호가 XXm 떨어진 데이터링크 안테나로 유입된 고조파 신호 중 450MHz ~ 500MHz 사이의 일부 대역을 측정된 결과 Table 5와 같다.

Network analyzer에서의 측정 결과 Noise 레벨 -120dBm 이하로 측정이 불가능하였으며 고조파 성분이 데이터링크 안테나로 유입되어 간섭을 일으키지 않음을 확인하였다. 특히 SIL 시험에서 3차 고조파 신호가 -100dBm 이하로 예측되었으나 -120dBm 이하로 실측되어 비행체 장착 형상과 장애물의 영향으로 간섭 성분이 SIL 시험보다 추가

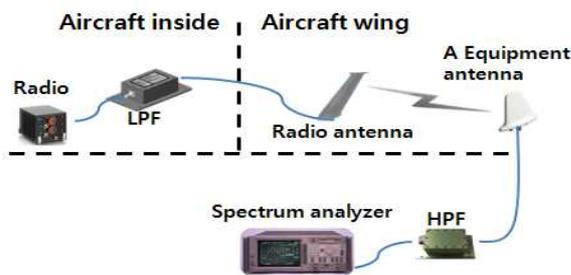


Fig. 11. Configuration of aircraft test

Table 5. Result of aircraft test

측정주파수	고조파 (dBm)
2차 고조파	-120dBm 이하
2차 고조파	-120dBm 이하
2차 고조파	-120dBm 이하
3차 고조파	-120dBm 이하
3차 고조파	-120dBm 이하
3차 고조파	-120dBm 이하

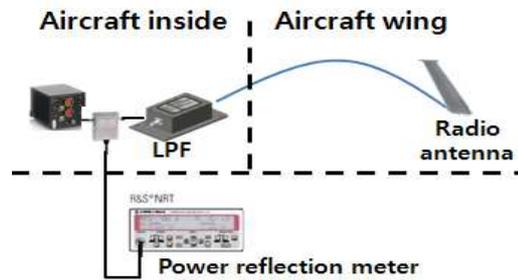


Fig. 12. measurement of VSWR

감쇄된 것으로 예상된다.

비행체에서 저역통과필터의 S11의 특성을 확인하기 위해 추가로 Fig. 12의 시험을 진행하였으며 U/VHF 장비에서 VSWR 경고 발생 유무를 확인하였다.

VSWR은 Power meter를 이용하여 측정하였으며 무전기 출력 전력 대비 반사 전력을 측정하여 그 비를 구한다. 주요 주파수를 측정된 결과 VSWR 경고는 발생하지 않았으며 Power meter를 이용한 측정 결과는 1 : 1.25 이하였다. 추가로 Network Analyzer를 이용한 측정 결과 사용대역 전체에 대해 최대 VSWR이 1 : 1.6 이하를 유지하였다.

III. 결 론

본 논문은 항공기에서 발생하는 RF 장비간의 신호 간섭을 방지하기 위하여 가해 장비의 RF 출력 단에 저역통과필터를 설치하는 방안을 제안하였다. 또한 저역통과필터 선정 및 설계에 대해 기술하였으며 수락 시험, SIL 시험, 비행체 시험 방안 및 결과를 제시하여 저역통과필터를 통해 간섭을 제한할 수 있음을 검증하였다.

환경시험을 완료한 저역통과필터에 대해 수락 시험을 수행하여 요구 성능 50dB 감쇄 특성을 확인하였다. SIL 시험에서는 2차 고조파의 감쇄가 저역통과필터를 장착 후 50dB 감쇄됨을 확인하였으나 3차 고조파에 대해서는 요구 성능에 미달하였다. 그러나 실제 비행체 시험에서 2차 고조파와 3차 고조파 모두 -120dBm 이하로 측정되어 고조파 제거를 위해 설치한 저역통과필터가 요구한 성능을 발휘하였음을 확인하였다.

항공기는 비행체 구조물과 접지면 변화에 따라 안테나 장착 가능 범위가 제한적이다. 제한적인 범위를 효율적으로 배치하여도 한정된 공간에 다수의 안테나가 설치됨에 따라 간섭이 발생할 가능성이 높은 실정이다. 동일 주파수를 사용하는 장비는 동시 RF 출력을 제한하는 장비의

Suppression 신호를 이용하여 중복 RF 입출력을 방지하지만 다른 주파수를 사용하는 장비들은 장비에서 지원하는 방안이 없으므로 추가적인 장비를 사용하여 간섭을 억제해야 한다.

가해 장비에 적절한 필터를 이용하여 간섭을 억제하는 방안은 최소의 비용으로 간섭을 방지할 수 있는 효율적인 방안이 될 것이다. 특히 주파수 사용 대역이 상이한 장비간의 고조파 간섭을 제한하기 위한 방안으로 효율적일 것으로 보인다. 또한 필터의 성능 검증을 위해 수행한 수락 시험, SIL 시험 및 비행체 시험은 필터를 사용하여 간섭을 방지하려는 항공기의 적절한 시험 방안이 될 것으로 기대된다.

References

- 1) Choon-Won Kim, Ji-Hoon Kim, Kyoung-Il Kwon and Deok-Cho Chung, "An efficient Method of Antenna Placement considering EMI between equipments on UAV", *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 39, No. 10, 2011, pp.987~994.
- 2) Siegel, M. Donald, "Aircraft Antenna-Coupled Interference Analysis," *Electromagnetic Compatibility Symposium Record 1969 IEEE*, 1969, pp.85~90.
- 3) Sklar, Bernard, *Digital Communications*, Vol. 2, Prentice Hall, 2001.
- 4) Lutovac, Miroslav D., Tomic, Dejan V., Evans, Brian L., *Filter Design for Signal Processing using MATLAB® and Mathematica®*. Prentice Hall, 2001.
- 5) Arthur B. Williams, Fred J. Taylor, *Electronic Filter Design Handbook*, McGraw-Hill, 1988, pp. 9~30.
- 6) J. L. Volakis, *Antenna Engineering Handbook*, 4th ed., New York: McGrawHill, 2007.