

천리안통신위성 궤도내시험

유문희*, 조진호*, 이성팔*, 김재훈* 정회원

In-Orbit Test of COMS Ka-band Communications Payload

Moon-Hee You*, Jin-Ho Jo*, Seong-Pal Lee*, Jae-Hoon Kim* *Regular Members*

요 약

2010년 6월에 발사된 천리안통신위성은 한국전자통신연구원이 주도하여 개발된 국내기술개발 시스템으로, 위성발사후 궤도내시험(IOT) 또한 완전히 국내 기술로 수행되었다. 천리안통신위성에 대한 IOT는 크게 안테나패턴 측정과 탑재체의 RF성능시험으로 이루어져, 발사 10일후부터 약 40여일동안 진행되었다. 본 논문에서는 천리안통신위성에 대한 IOT 수행 내용 및 결과에 대해 상세하게 기술하였다. 각 IOT 시험 결과를 지상시험결과와 비교하여 검증하였을 때, Ka대역 탑재체의 IOT 측정은 성공적으로 이루어졌고, 발사후 궤도상에 안착된 천리안통신위성의 모든 채널 상태는 정상임을 알 수 있다.

Key Words : 천리안통신위성; COMS; Ka band satellite communications; in-orbit test; antenna pattern measurement; RF performance;

ABSTRACT

Ka-band payload of COMS (Communication, Ocean and Meteorological Satellite) launched in June 2010 was developed by ETRI with Korean local companies and also the in-orbit test (IOT) for the Ka-band payload was carried out entirely with domestic technology. The Ka-band payload IOT consisted of the antenna pattern measurements and the payload RF performance test was performed during about 40 days from 10 days after the launch. In this paper, the IOT methods and the results for the Ka-band payload are described in detail. According to the comparisons of each IOT test result with the corresponding ground test result, we can show that the Ka-band payload IOT and verification was successfully achieved and that all Ka-band channels of COMS are to be normal.

I. 서 론

천리안위성은 2010년 6월에 발사된 정지궤도 복합위성으로 통신탑재체, 해양탑재체, 기상탑재체를 포함하고 있다. 천리안위성 통신탑재체는 방송통신위원회가 추진하고 한국전자통신연구원이 주도하여 개발된 국내기술개발 시스템으로, 위성발사후 궤도내시험(In Orbit Test; IOT) 또한 완전히 국내 기술로 수행되었다.

천리안통신위성은 세가지 임무를 가진 천리안위성에서 통신탑재체를 이용한 통신 임무를 구별하여 지칭하는 것으로, 많은 논문들에서 소개되었듯이 동경 128.2도의 정지궤도에서 2개의 빔으로 100MHz 대역 3채널을 통해 한반도에 통신서비스를 제공한다[1][2]. 천리안통신위성의 주요 RF 성능규격은 수신 G/T와 전송 EIRP 각각

13dB/K 및 58 dBW 이상이다.

IOT란 위성이 발사된 후 우주궤도상에서 공식적으로 운용되기 전 최종적으로 수행되는 성능 및 상태 검증 시험이다. 통상적으로 위성이 발사될 때에는 발사체에 의하여 소음 및 진동이 발생되고, 위성이 본 궤도에 정착할 때까지 각종 우주환경에 노출된다. IOT는 발사한 위성이 모든 환경조건을 견디고 제 기능을 발휘하는지 확인하는 활동, 즉, 위성체 및 위성에 탑재된 탑재체가 발사 환경과 우주 환경을 견디고 본래의 기능 및 성능을 발휘하는지 확인하고자 하는 일련의 시험이다. IOT 결과는 지상시험 결과[3][4]와 서로 비교하여 유사한 결과가 나타나면 위성의 발사 과정과 자신의 궤도를 자리잡는 과정에서 성능의 저하가 발생하지 않은 것으로 판단한다.

본 논문에서는 천리안통신위성에 대한 IOT 수행 내용 및 결과에 대해 상세하게 기술하고자 한다.

*한국전자통신연구원 위성시스템연구팀 (moon@etri.re.kr, jhjo@etri.re.kr, spal@etri.re.kr, jhkim@etri.re.kr)

※ 본 연구는 지식경제부 지식경제 기술혁신사업 지원으로 수행하였음.

접수일자 : 2011년 6월 13일, 수정완료일자 : 2011년 6월 16일, 최종게재확정일자 : 2011년 6월 20일

II. 천리안통신위성 궤도내시험 개요

천리안통신위성에 대한 IOT는 크게 안테나패턴 측정과 탑재체의 RF성능시험으로 이루어진다. 2개의 1.1 m 통신 안테나 반사판은 위성이 발사된 후 7일만에 완전히 전개되었으며 발사 10일후 통신위성에 대한 IOT가 시작되어 약 40여일 동안에 걸쳐서 진행되었다.

IOT 기간동안 3개의 주채널, 2개의 빔스위칭채널 및 5개의 잉여 채널을 고려하여 총 10개의 채널에 대해 측정이 수행되었다. 그림 1에서는 3개의 주채널에 대한 경로가 표시되었다. IOT로 검증되는 내용은 안테나 패턴측정을 통한 Ka대역 안테나의 상태, IPFD/EIRP 및 G/T 측정을 통한 탑재체 end-to-end 성능, 그리고 채널중복기 기능 측정, 주파수대진폭 측정 및 주파수변환 안정도 측정을 통한 중계기 성능이다. 각 측정 항목은 채널 특성에 따른 중복 측정을 피해 채널 별로 선택되어 측정되었다.

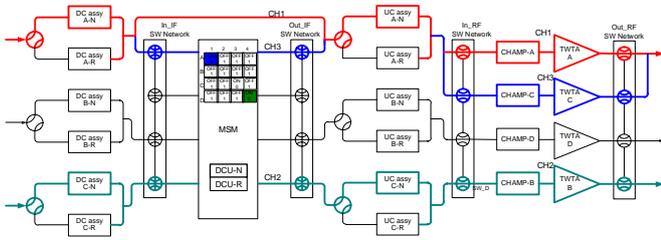


그림 1. 천리안통신위성 채널 구성도

IOT를 수행하기 위한 시스템 구성을 그림 2에 보였다. 천리안통신위성에는 측정대상이 되는 Ka대역 통신탑재체 시스템과 통신탑재체를 직접적으로 제어관리하는 TCR-DH 시스템으로 구성되어 있고, 지상에는 Ka대역 통신탑재체의 RF성능을 측정하는 IOT시스템과 통신탑재체를 지상에서 관리하는 천리안통신위성운용센터, 그리고 탑재체 관리신호를 전달해주는 천리안위성관제소로 구성되어 있다. IOT시스템과 천리안통신위성 운용센터는 한국전자통신연구원(ETRI)에 위치하고 천리안위성관제소는 항공우주연구원(KARI)에 위치하여 서로간의 데이터 교환은 가상전용망 (VPN)을 이용한다.

천리안통신위성IOT 기간동안 ETRI는 IOT 계획 및 시험절차서에 따라 IOT시스템을 이용하여 Ka대역 통신탑재체 성능을 측정한다. 그 동안에 ETRI의 천리안통신위성 운용센터에서는 KARI의 위성관제소에서 실시간으로 전송되는 Ka대역 탑재체 상태정보(telemetry)로 측정시의 Ka대역 탑재체 상태를 모니터링하고, 필요시 KARI 위성관제소로 Ka대역 탑재체 채널 경로의 형상 변경을 요청한다.

천리안통신위성의 성능을 측정하기 위한 IOT시스템의 구성은 그림 3과 같다. 7m 급 안테나를 포함한 RF 송수신 장비와 신호생성기, 스펙트럼분석기, 주파수 측정기 및 전력 측정기로 이루어진 계측 장비, 그리고 계측장비와 연동되어 IOT 프로그램을 구동하는 IOT콘솔로 구성되어 있다.

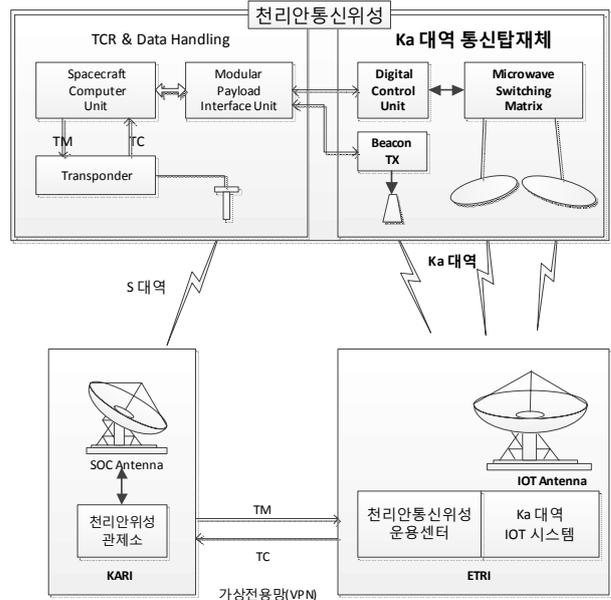


그림 2. 천리안통신위성 궤도내시험을 위한 IOT 구성도

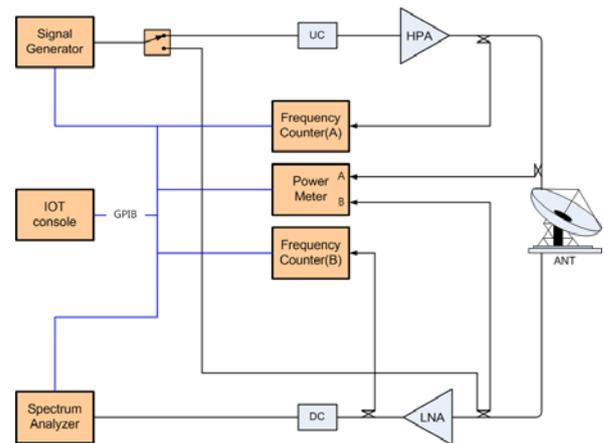


그림 3. Ka대역 IOT시스템 구성도

III. 궤도내시험 측정

1. 안테나 패턴 측정

통신탑재체의 안테나 패턴을 측정하는 이유는 안테나가 위성 발사나 우주 궤도상 반사판 전개시에 변형 또는 파손되지 않았는지, 또한 안테나 빔이 변형되지 않았는지 확인하는데 있다. IOT 시스템이 설치된 일정한 지점에서 위성 안테나 패턴을 측정하려면 위성을 회전시켜야 한다. 천리안통신위성 안테나의 패턴을 측정하기 위하여 우주 궤도상의 위성을 동서 방향과 남북 방향으로 천천히 회전시키면서 동시에 지상의 IOT시스템에서는 RF신호를 위성으로 송/수신하여, 위성의 회전 위치에 따른 신호의 크기 변화를 측정하였다. 위성은 동서 방향과 남북 방향으로 각각 $\pm 1^\circ$ 범위의 십자모양으로 분당 0.1° 의 속도로 회전하였다. 이 때 중계기의 채널앰프는 Fixed Gain Mode (FGM) 또는 Automatic Level Control(ALC)모드로 세팅

하며 각 모드에 대하여 위성을 동일한 십자모양 경로로 회전시키면서 안테나 패턴을 측정하였다. ALC모드에서 측정된 패턴은 위성안테나의 송신패턴을 나타내며, FGM 모드에서 측정된 패턴은 위성안테나의 송/수신 패턴을 모두 포함한다. 따라서 ALC, FGM 모드에 대하여 측정하면 위성안테나의 송/수신 패턴에 대한 결과를 모두 얻을 수 있다. 그림 4는 북한 빔에 대한 ALC 모드에서의 패턴 컷 경로이다.

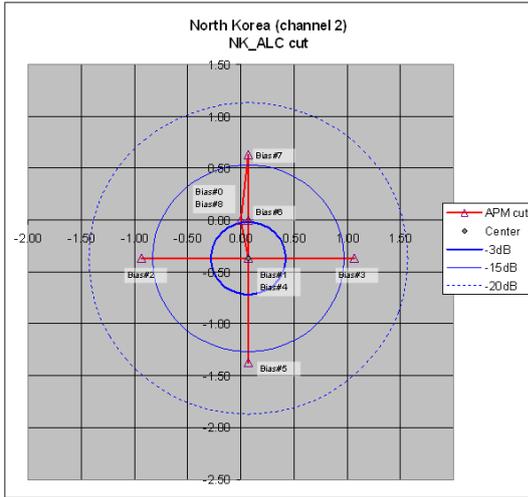


그림 4. 북한빔에 대한 안테나패턴컷 경로

그림 5와 그림 6은 남한빔과 북한빔에 대한 패턴측정 결과이다. 각 그림에서 매끄럽지 못한 파란색으로 표시된 패턴은 IOT에서 측정된 위성안테나의 송신(그림 5)/송수신(그림 6) 패턴이며, 빨간색 실선으로 표시된 패턴은 위성 발사 전에 지상에서 측정된 안테나 패턴이다.

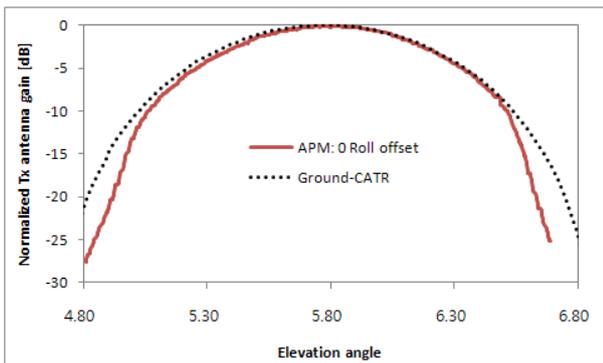


그림 5. 남한 빔 안테나 패턴 측정결과 (ALC 모드 남북방향)

IOT 측정 패턴과 지상측정 패턴의 경향이 거의 일치함을 볼 수 있다. ALC 모드에서의 빔컷 측정결과가 안테나 최대이득에서 약 10dB이상 떨어질 때 지상 측정결과와 급격하게 차이가 나는 이유는 안테나가 slewing되면서 안테나 포인팅 옵셋으로 인한 급격한 탑재체 입력신호레벨 저하로 탑재체의 채널증폭기가 ALC모드에서 벗어나 FGM 모드로 동작하기 때문이다. 따라서 Ka대역 통신안테나는 위성 발사 후 정상적으로 반사판 전개가 이루어져

정상적인 성능을 내고 있음을 알 수 있다.

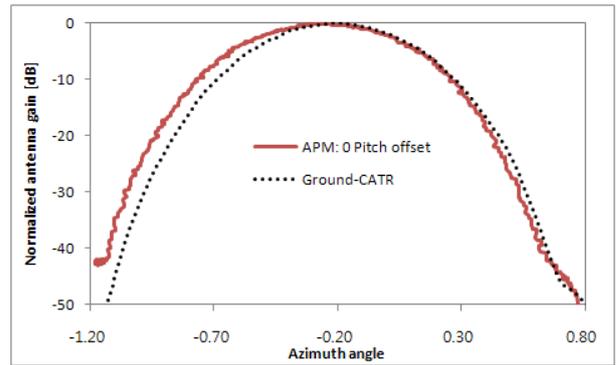


그림 6. 북한 빔 안테나 패턴 측정결과 (FGM 모드, 동서방향)

2. IPFD/EIRP 및 이득

본 측정은 통신탑재체 각 RF 채널의 고출력증폭기 포화점 (TWTA saturation point)을 포함한 전력 전달 곡선 (power transfer curve)을 검증하고 동시에 각 채널을 포화시키는데 필요한 입력전력 플럭스 밀도 (Input Power Flux Density; IPFD)와 대응되는 하향링크 EIRP (effective isotropically radiated power)를 검증하는 시험이다.

시험을 위해 통신탑재체 채널증폭기 상태를 공칭이득 34dB의 FGM 모드로 고정해 놓고, 우선 통신탑재체 고출력증폭기를 포화상태에 이르게 하는 IOT 시스템의 출력 신호 레벨이 어느 정도인지 대략적인 수치계산과 사전측정을 통해 파악한다. 그리고서 증계기 입력 백오프가 -15dB가 되도록 IOT 시스템에서 대응되는 신호레벨을 출력하고, 이 신호가 위성 통신탑재체를 거쳐 다시 IOT 시스템으로 수신되었을 때 수신레벨을 측정 후 IOT 시스템의 입출력 신호 레벨에 대해 시스템 보정값 및 공간 전파손실을 적용하여 대응되는 통신탑재체의 IPFD 값과 EIRP 값을 계산한다. 계속하여 증계기 입력 백오프가 +2dB에 이를 때까지 IOT 시스템에서 출력신호를 1dB씩 올려보내고 동일한 측정을 반복한다. 측정하는 동안 해당 하는 위성 고출력증폭기의 버스전류, 헬릭스 전류 및 어노드 전압 등에 대한 위성 텔레메트리를 확인하여 위성 부품의 상태가 정상인지 감시한다.

그림 7은 천리안통신위성 1번 주채널에 대해 이득전달 곡선과 포화 IPFD/EIRP를 3회 측정된 결과로 지상시험결과와 비교하여 보인다. 포화 IPFD/EIRP에 대해 IOT 측정값은 대략 -92.2 dBW/m² 및 65.01 dBW 이다.

그런데 IOT 시스템은 앞서 언급한 것처럼 대전의 ETRI 내에 위치한다. 안테나패턴측정을 제외하고는 탑재체의 RF 성능을 측정할 시 천리안통신위성 안테나 빔 센터는 정상 운용시의 빔센터 자리에 위치하게 된다. 따라서 측정된 EIRP는 대전에서 제공받을 수 있는 성능이고, 실제 시스템에서 요구하는 EOC (edge of coverage) 값은 대전에서의 측정 결과와 안테나패턴측정결과를 이용하여

계산해 내어야 한다. 이와 같은 방법으로 각 채널에 대해 얻어진 EOC에서의 EIRP는 다음 그림 8과 같다. 측정값에서 유도된 EOC에서의 EIRP와 지상측정에서 얻은 EIRP를 비교할 때 발사후 궤도상에서의 위성 채널의 출력성능이 정상임을 알 수 있다.

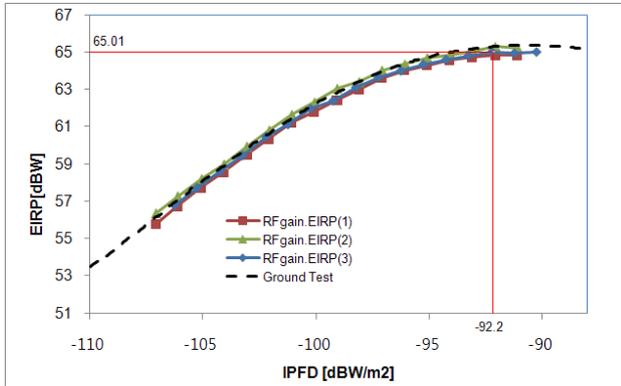


그림 7. 중계기 이득전달곡선(1번 주채널)

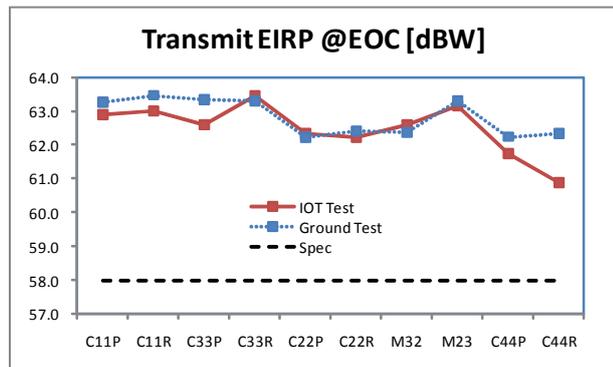


그림 8. 송신 EIRP 성능

3. G/T

본 측정은 통신탑재체 각 RF 채널의 G/T를 검증하는 시험이다. 시험을 위해 통신탑재체 채널증폭기 상태를 공칭이득 34dB의 FGM 모드로 고정해 놓고, 다음과 같이 3 단계의 측정을 해야 한다.

- 1) IOT 시스템의 지구국 자체 잡음전력(N1)을 측정한다.
- 2) IOT 시스템 지구국과 위성 중계기의 잡음전력(N2)을 측정한다.
- 3) 위성중계기의 고출력증폭기가 -20dB 입력백오프의 선형모드에서 동작되도록 IOT 시스템에서 그에 맞는 CW 신호를 송출(EIRPe)하고, 위성중계기를 거쳐 돌아온 해당 CW 신호와 잡음 (P1)을 측정한다.

각 측정된 데이터를 다음의 수식에 적용하여 표 1과 같이 G/T를 구한다.

$$G/T = ((P_1 - N_2) / (N_2 - N_1))_{dB} - EIRP_e - (\text{자유경로손실} + \text{대기손실}) + \text{잡음대역폭} + \text{볼츠만상수}$$

EIRP 측정의 경우와 동일하게 측정된 G/T 는 대전에서 제공받을 수 있는 성능이고, 실제 시스템에서 요구하는 EOC 값은 대전에서의 측정 결과와 안테나패턴측정결과를 이용하여 계산해 내어야 한다. 이와 같은 방법으로 각 채널에 대해 얻어진 EOC에서의 G/T는 다음 그림 9와 같다. 측정값에서 유도된 EOC에서의 G/T와 지상측정에서 얻은 G/T를 비교할 때 발사후 궤도상에서의 위성 채널의 수신성능이 정상임을 알 수 있다.

표 1. G/T (1번 주채널)

Item	Value
지구국잡음전력 N ₁	-37.95 dBm
지구국&위성채잡음전력 N ₂	-27.76 dBm
잡음&시험신호 P ₁	-17.23 dBm
IOT시스템 EIRP	58.93 dBW
측정 G/T	20.95 dB/K

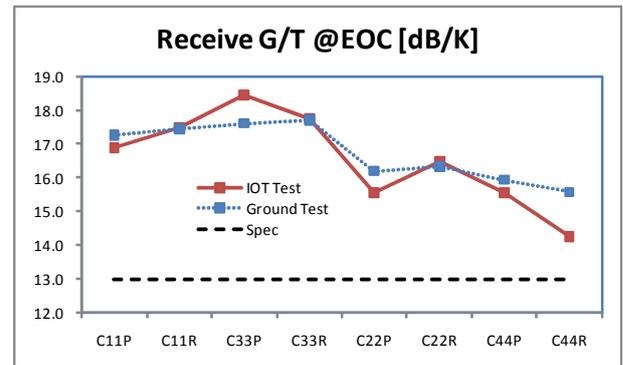


그림 9. 수신 G/T 성능

4. 채널증폭기 FGM/ALC

본 측정은 위성중계기의 채널 이득 조정 기능과 채널 출력 조정 기능을 검증하기 위한 시험이다. 위성중계기의 각 채널 송신부에 위치한 채널 증폭기는 지상에서의 명령에 의해 고정이득모드와 자동레벨제어모드로 설정되어 채널의 이득값이 고정되거나 채널의 출력값이 고정되게 할 수 있다.

우선 채널 이득 조정 기능을 검증하기 위하여 위성중계기의 해당채널 증폭기의 모드를 FGM 모드의 최저 이득인 20dB로 설정한다. IOT 시스템에서 일정한 전력의 CW 신호를 송출하고 위성중계기를 거쳐 돌아온 해당 CW 신호를 측정한다. 그리고 위성중계기 채널증폭기의 이득을 8dB 씩 올리고 그 때마다 동일한 세기의 CW신호를 송출하여 수신 CW 전력을 측정한다. 그렇게 20dB, 28dB, 36dB, 44dB, 52dB의 이득에 대해 송수신 신호의 세기를 측정하여 20dB 이득의 송수신 신호 레벨 차를 기준으로 하여 이외의 이득 설정에 대한 실제 위성중계기의 이득차를 계산한다. 설정된 중계기 이득의 변화에 대해 실제 신호의 이득 변화를 비교한다.

그림 10은 채널 1에 대한 FGM 모드 of 검증 결과이다. 그림에서 보듯이 설정이득 대 실제 적용이득의 관계가 선형적임을 알 수 있다. 동일하게 채널 2, 채널 3 및 잉여 채널에 대한 채널 증폭기의 FGM모드 IOT 측정결과는 각 채널증폭기가 정상 동작함을 보였다.

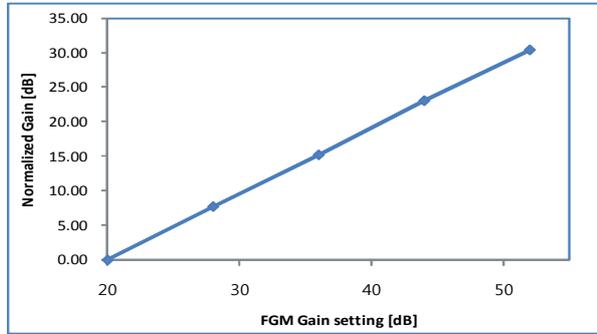


그림 10. 채널증폭기 FGM 모드 이득 (1번 주채널)

그리고 채널 출력조정기능을 검증하기 위하여 위성중계기의 해당채널 증폭기의 모드를 -10dBm 출력의 ALC 모드로 설정한다. IOT 시스템에서 +1dB to -15dB IBO of CW 신호를 송출하고 위성중계기를 거쳐 돌아온 해당 CW 신호를 측정한다. 그림 11은 채널 3에 대한 ALC 모드의 출력레벨 안정도에 대한 검증 결과이다. 그림에서 보듯이 중계기 입력레벨의 변화에도 중계기 출력레벨은 요구구격인 $\pm 0.3\text{dB}$ 범위내에서 지상시험결과와 같은 결과를 유지함을 알 수 있다. 동일하게 채널 1, 채널 2 및 잉여 채널에 대한 채널 증폭기의 ALC모드 IOT 측정결과는 지상시험결과와 같은 결과를 유지하여 각 채널증폭기가 정상 동작함을 보였다.

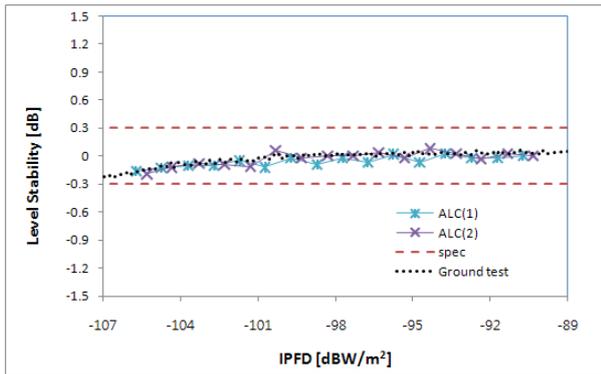


그림 11. 채널증폭기 ALC 모드 출력레벨 안정도 (3번 주채널)

5. 주파수대진폭 특성

본 측정은 위성중계기의 각 채널 100MHz 주파수 대역 내 진폭 특성을 검증하기 위한 시험이다. 우선 통신탐재체 채널증폭기 상태를 공칭이득 34dB의 FGM 모드로 설정한다. 그리고 IOT 시스템의 신호발생기에서 100MHz 대역

내 최저 주파수의 신호세기가 -15dB IBO인 CW 신호를 내보내어 위성중계기를 통해 지상 수신부에 들어온 해당 신호의 주파수와 세기를 측정한다. 계속해서 주파수를 2MHz씩 높여가며 동일한 세기의 신호를 내보내고 위성중계기를 통해 돌려 받아 측정한다. 이러한 반복 측정을 100MHz 대역의 최고 주파수에 이를 때까지 계속 수행한다. 동일한 측정을 연달아 3번 수행한 후 수신 신호를 IOT 시스템 이득과 대기손실에 대해 보정처리하고 각 주파수에 대해 신호세기를 평균하고 100MHz 대역내에서 최대값을 0dB로 normalize 한다. 그림 12는 채널 1에 대한 주파수대 진폭특성의 검증 결과이다. 그림에서 보듯이 대역내 특성은 지상시험결과와 상이해 보이나 링크상의 손실 오차 및 측정 오차로 인한 리플로 무시할 수 있고, 컷오프특성이 지상시험결과와 측정결과가 같음을 볼 때 탑재체의 필터특성이 정상임을 알 수 있다. 동일하게 채널 2, 채널 3 및 잉여 채널에 대한 주파수대진폭 특성의 IOT 측정결과는 각 채널의 필터특성이 정상임을 보였다.

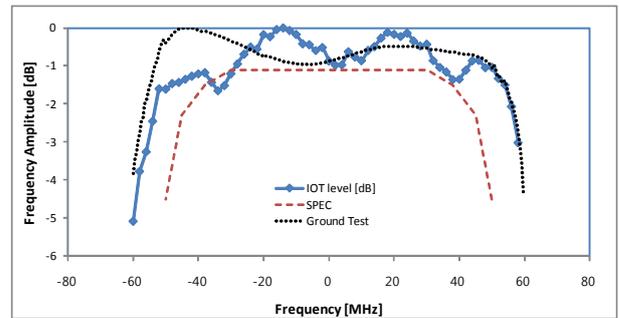


그림 12. 중계기 주파수대 진폭 특성 (1번 주채널)

6. 주파수변환 안정도

본 측정은 탑재체에서 상향링크 주파수에서 하향링크주파수로 변환시킬 때의 주파수 변환 안정도를 검증하는 시험이다. 우선 통신탐재체 채널증폭기 상태를 공칭이득 34dB의 FGM 모드로 설정한다. IOT 시스템에서 -15dB IBO of CW 신호를 송출하고 위성중계기를 거쳐 돌아온 해당 CW 신호를 수신한다. 주파수측정기 A로 IOT 시스템의 상향주파수변환기 및 HPA를 거친 전송신호의 주파수를 측정하고, 주파수측정기 B로 IOT 시스템의 저잡음 증폭기에서 나온 수신신호의 주파수를 측정하여 두 주파수간의 차를 구한다. 그림 13은 채널 2에 대해 24시간동안 2초단위로 측정한 주파수 변환 안정도에 대한 검증 결과이다. 그림에서 보듯이 중계기의 24시간 주파수변환 변화량이 $\pm 0.3\text{ppm}$ 이내이므로 $\pm 0.48\text{ ppm}$ 의 지상시험 결과 안에 들어옴을 알 수 있다. 동일하게 채널 1 및 잉여 채널에 대한 주파수변환 안정도의 IOT 측정결과는 각 채널의 상향/하향주파수변환기가 정상 동작함을 보였다.

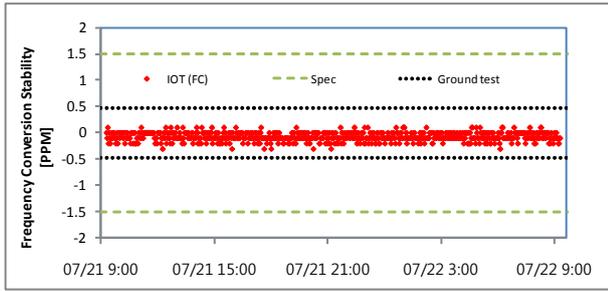


그림 13. 주파수변환 안정도 (2번 주채널)

IV. 결론

본 논문에서는 국내 기술로 개발된 천리안통신위성의 궤도내시험을 수행하기 위한 시스템 구성과 각 항목별 측정 내용 및 결과에 대해 기술하였다. 각 IOT 시험 결과를 지상시험결과와 비교하여 검증하였을 때, Ka대역 탑재체의 IOT 측정은 성공적으로 이루어졌고, 발사후 궤도상에 안착된 천리안통신위성의 모든 채널 상태는 정상임을 알 수 있다.

이러한 성공적인 IoT 시험의 결과로 통신위성기술 개발에 대한 국내의 높은 기술력을 확실하게 검증하게 되었다. 현재 천리안통신위성은 안정적으로 정규 운용 중에 있으며, 연구소는 물론 여러 기관 및 업체 등을 통해 다양한 Ka대역 위성통신/방송 서비스 시험 및 전파전과 시험 등이 수행되어 지고 있다. 향후 천리안통신위성을 이용하여 다양한 통신방송 서비스의 제공이 가능하리라 본다.

참 고 문 헌

[1] SP Lee, "Development of satellite communication system for COMS", Proceedings of APSCC 2004, pp. 71-96, 2004.

[2] SP Lee, JH Jo, MH You, JS Choi, and KB Ahn, "Ka band Communication Payload System Technology of COMS", JC-SAT2010, pp. 19-24, October. 2010.

[3] JS Choi, YD Lee, and SP Lee, "CATR test for Ka band multi-beam antenna", 26th International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC), AIAA 2008-551, June. 2008.

[4] 조진호, 안기범, 유문희, 이성팔, 김재훈, "Ka대역 통신탑재체의 위성 조립 및 시험", 2010년도 대한전자공학 학회 하계학술대회 제 33권 1호, pp. 1011-1014, 2010.

저 자

유 문 희 (Moon-Hee You)

정회원



1990년 8월 : 한양대학교 전자통신
공학 석사졸업

2002년 2월 : 한양대학교 전자통신
공학 박사수료

1990년 7월~현재 : 한국전자통신연구
원 책임연구원

<관심분야> 위성통신시스템, 통신탑재체

조 진 호 (Jin-Ho Jo)

정회원



1988년 2월 : 충남대학교 전자공학
석사졸업

1989년 6월~현재 : 한국전자통신연구
원 책임연구원

<관심분야> 통신 위성 중계기 시험,
위성 궤도 내 시험

이 성 팔 (Seong-Pal LEE)

정회원



1990년 6월 : 미 뉴욕공대 전자공학
박사졸업

1980년 4월~현재 : 한국전자통신연구
원 책임연구원

<관심분야> 위성시스템, 위성통신
시스템, 통신탑재체

김 재 훈 (Jaehoon Kim)

정회원



2001년 9월 : 충북대학교 컴퓨터
공학 박사졸업

1990년 8월 : 정보처리기술사

1983년 3월~현재 : 한국전자통신연구
원 책임연구원(팀장)

<관심분야> 위성통신시스템, 위성관제시스템, 위성항법
시스템