

## KSLV-I 2단부 엔지니어링 모델 복사성 방사/감응 시험

지기만\*, 이수진\*\*, 정의승\*\*\*

### Radiated Emission / Susceptibility Tests for the KSLV-I 2nd Stage Engineering Model

Ki-Man Ji\*, Soo-Jin Lee\*\*, Eui-Seung Chung\*\*\*

#### Abstract

Radiated emission / susceptibility performance of the KSLV-I 2nd stage which are controlled from the unit level to the system level should be examined and managed all over the frequency ranges in order to ensure the normal operation of the SC, the 1st stage of the KSLV-I, ground support equipments which are installed at the space center, and other wireless communication networks. Not only unintentional electric field emissions from the KSLV-I system and its subsystems should be restricted to the levels less than the limits specified in the EMC requirements, but also proper test and evaluation method should be established, respectively. In this paper, radiated emission / susceptibility test limits, method, and test results of the KSLV-I 2nd stage engineering model are presented.

#### 초 록

단위 장비 수준에서 시스템 수준에 이르기까지 통제되는 KSLV-I 2단부의 복사성 방사/감응 특성은 탑재되는 위성, 발사체 1단부, 그리고 우주센터에 설치되고 운용되는 지상장비 및 외부 통신망의 정상동작을 보장하기 위하여 전 주파수 대역에 대해 시험 및 관리되어야 한다. KSLV-I과 하부시스템에서 방사되는 비의도성 잡음은 각각의 요구규격에 정의된 제한치 보다 작도록 제한되어야 할 뿐만 아니라 시스템의 특성을 정확히 검증하기 위한 적절한 시험 및 평가 방법도 개발되어야 한다. 본 논문에서는 KSLV-I 2단부 엔지니어링 모델의 전자파적합성 확보를 위해 도출된 복사성 방사와 복사성 감응에 대한 시험규격, 측정방법 그리고 시험 결과가 제시된다.

키워드 : 전자파적합성(EMC), 복사성(Radiation), 전도성(Conduction), 방사(Emission), 감응(Susceptibility), 잡음(Noise)

\* 체계종합팀/kmjee@kari.re.kr

\*\* 체계종합팀/sjlee@kari.re.kr

\*\*\* 체계종합팀/ces@kari.re.kr

## 1. 서 론

우주발사체에 탑재되는 전자장비는 장비 상호 간의 전자기파 간섭이나 외부 잡음 신호에 의해 초래될 수 있는 고장, 성능저하 및 오동작을 예방하기 위하여 콤포넌트 수준에서 시스템 수준에 이르기까지 전자과적합성(EMC)에 대한 엄격한 통제가 요구된다. 우주발사체의 경우 시스템 성능에 직결되는 크기와 중량의 제한에 의해 탑재되는 장비들은 소형화와 경량화가 각별히 요구되며 각 장비들은 최소한의 중량으로 최대의 성능을 갖도록 설계/제작되어야 한다. 이러한 요구조건은 장비의 전자기파 잡음 방출을 증가시키고 외부 잡음에 대한 내성을 감소시킬 수 있다.

우주발사체 시스템의 전자과적합성을 확보하는 것은 각 장비에서 방사되는 잡음을 최소화하고 유입되는 잡음에 대한 장비의 내성을 최대화함으로써 달성되며 시스템의 안정적인 운용을 위해서 반드시 충족되어야 한다. 전자과적합성의 확보를 위한 세부적인 항목으로는 잡음의 전달 특성에 따라 복사성(radiated)과 전도성(conducted)으로 분류되고 잡음의 영향을 주느냐 받느냐에 따라 방사(emission)와 감응(susceptibility)으로 분류되어 이들의 조합으로 결정된다. KSLV-I의 1단과 2단에 대한 전자과적합성 요구규격은 2단의 경우 미국군 규격인 MIL-STD-461E를 기준으로 준용한 반면 1단의 경우는 국제 공동설계에 의해 러시아 규격을 적용하는 것으로 되어 있다.

일반적으로 시스템 설계와 규격은 시스템 수준에서부터 하위 장비로 세분화 되고 결정되지만 EMC 관리는 발사체의 라이프사이클 특성상 서브시스템으로부터 출발하여 시스템 수준에서 완료된다. 따라서 시스템 설계 단계에서 하위 시스템의 규격을 최대한 정확하게 결정하는 노력이 요구된다. KSLV-I 개발을 위해 수행된 과정으로는 시스템 설계 단계를 통해, 1)시스템 수준에서의 요구규격 설정, 2) 하부시스템에 대한 요구규격안 설정이 수행되었으며 상세설계 및 제작 단계를 통해, 1) 하부시스템 요구 규격 상세화 및 단위장비 EMC 시험 수행, 2) 시스템조립 및

시스템레벨 EMC 시험이 수행되었다. 본 논문에서는 KSLV-I 개발을 위해 수립된 하부시스템레벨 및 시스템레벨의 EMC 시험 계획, 복사성 방사(RE)/감응(RS) 규격 및 측정 방법 그리고 시험 결과가 제시된다.

## 2. EMC 시험

현재 개발 중인 KSLV-I에 탑재되는 전자 장비들은 중량과 공간적인 배치의 제한조건에 의해 개발이 완료된 이후에는 장비에 대한 수정이나 부가적인 조치가 사실상 불가능하다. 따라서 설계 단계에서부터 전자과적합성에 대한 충분한 고려와 시험을 통해 장비가 개발되어야 한다. KSLV-I의 하부시스템과 시스템에 대한 모델별 시험 계획이 표 1에 정리되어 있다.

표 1. KSLV-I EMC 시험 항목

KSLV-I Model	Unit/Subsystem		System	
	EM/QM	FM	EM/QM	FM
CE102	Y	N	N	N
CE106/ RE103	Y1	N	N	N
CS101	Y	N	N	N
CS114	Y	N	N	N
CS115	Y	N	N	N
CS116	Y	N	N	N
RE102	Y	N	Y	Y2
RS103	Y	N	Y	N
Self-compatibility	NA	NA	Y	Y

N : no  
 NA : not applicable  
 Y : yes  
 Y1 : yes, limited applicability  
 Y2 : yes, test or analysis

### 2.1 복사성 방사 시험

모든 단위장비가 조립되어 구성된 발사체 시스템이 탑재위성, 지상장비, 등 기타 외부 전파시스템에서 복사된 전자기 잡음에 대해 정상적인 동작을 보장하고 다른 시스템에 간섭을 일으키지

않도록 개발되기 위해서는 단위장비와 시스템 레벨에서의 복사잡음 방사/감응에 대한 통제가 수행되어야 한다. 시스템 개발에 있어서 EMC 규격은 시스템 레벨에서 먼저 결정되고 각 하부시스템에 대한 규격이 차례로 결정된다. 그러나 개발 과정은 먼저 단위장비가 개발되고 개발된 단위장비들이 종합되어 시스템으로 제작되기 때문에 시스템과 단위장비의 규격은 신중히 결정되어야 한다. 아래 그림 1은 KSLV-1의 단위장비와 시스템 레벨의 복사성 방사/감응 규격을 같이 나타낸 것이다.

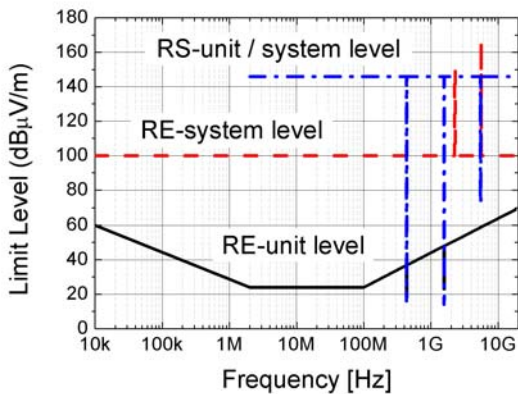


그림 1. 복사성 방사/감응 규격

단위 장비의 복사성 방사 규격은 MIL-STD-461E를 기반으로 각 하부시스템의 송수신기 규격을 고려하여 결정하였다. 수신기의 수신감도로부터 각 수신기의 안테나 단자에서의 전계강도는 아래 식으로부터 결정되며 안테나 위치 및 방사특성, 하니스 특성, 탑재 장비의 배치 구조, 발사체의 운용 조건, 잡음 내성 여유 등을 고려하여 결정된다.

$$E = \frac{\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{480 \times P_r}{G}} \quad (1)$$

여기서  $\lambda$ 는 파장,  $P_r$ 은 수신감도에 의한 전력,  $G$ 는 안테나 이득이다.

시스템 레벨에서의 복사성 방사 규격은

MIL-STD-464A 및 다른 발사체들의 규격, 그리고 KSLV-1의 시스템 특성을 고려하여 결정되었다.

## 2.2 복사성 감응 시험

KSLV-1의 복사성 감응 시험 규격은 단위장비 레벨과 시스템 레벨에 대해 하부시스템에서 발생하는 신호 또는 잡음의 전계강도, 탑재 위성에서 발생하는 잡음, 발사체가 발사준비 및 비행과정에서 겪게 되는 환경에서 발생하는 잡음을 고려하여 결정되어야 한다. 복사성 방사에서와 같이 감응 시험에서도 규격은 MIL-STD-461E를 기준(20 V/m)으로 하였다. 복사성 감응 시험의 경우 각 하부시스템의 수신감도나 케이블 특성, 장착 위치 등이 다르기 때문에 각 시스템 별로 별도의 규격이 개발되었으며 각 하부시스템마다 별도의 시험주파수와 인가전계를 적용하여 시험하였다. KSLV-1 2단부에 탑재되는 단위장비 중에서 원격 측정시스템과 추적시스템 그리고 두 시스템을 제외한 단위장비의 복사성 감응 규격이 그림 2, 3, 4에 나타나 있다.

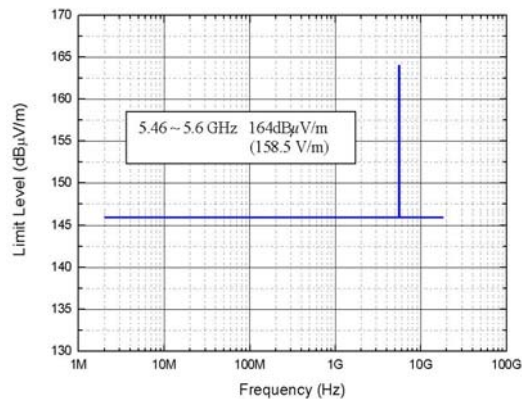


그림 2. 원격측정시스템 컴포넌트 RS103 한계치

복사성 방사/감응 시험에서 KSLV-1 2단부 안테나 단자와 지상장비는 RF케이블로 직접 연결된다. 따라서 RF 링크를 고려하여 지상장비의 송신 출력과 수신 감쇠 값을 설정하여야 한다. 지상 송신 장비의 출력과 수신 장비의 입력신호 감

최값은 KSLV-I의 비행궤적과 임무시간을 고려하여 결정하였다.

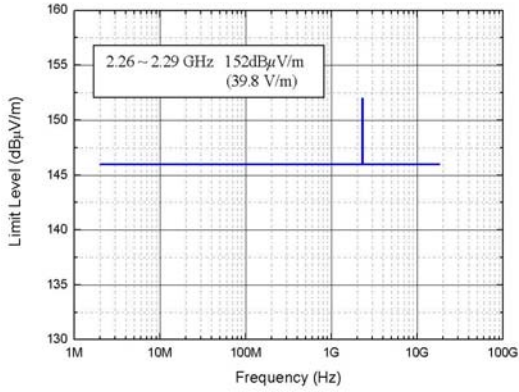


그림 3. 추적시스템 컴포넌트 RS103 한계치

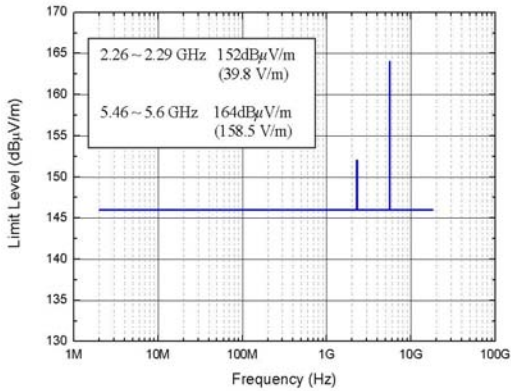


그림 4. 탑재장비의 RS103 한계치

우주센터에서 발사된 KSLV-I의 궤적에서 탑재 안테나의 고각이 0°가 되는 시간은 발사 후 약 510초이며 이때의 사선거리는 2000 km이므로 추적시스템과 원격측정시스템의 송수신 출력과 감쇠값은 2000 km를 기준으로 결정하였다. 반면 비행종단시스템의 경우 임무 시간이 2단 킷모터의 점화시점까지 이므로 송수신 출력과 감쇠값을 1100 km를 기준으로 결정하였다. 그림 5는 KSLV-I이 비행할 때 우주센터와 제주추적소에서 고각 변화를 보여준다.

전자파시험실에서 시험을 수행할 때 송신 안테나와 수신 안테나 사이의 무선통신 채널 손실은 아래의 식 (2)로 결정되며 RF케이블로 연결되었을 경우 케이블 손실을 보상해 주어야 한다.

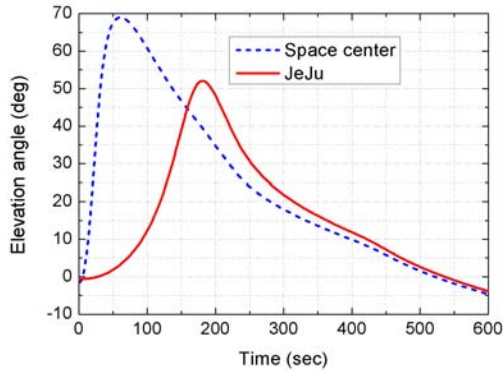


그림 5. 안테나 고각 변화

또한 실제 우주센터에 설치되어 운용되는 지상레이다 안테나와 시험실에 사용되는 안테나가 서로 다르기 때문에 이에 대한 특성이 고려되어야 한다.

$$L_{ch, dB} = L_{fs, dB} - G_{T, dB} - G_{R, dB} \quad (2)$$

$$L_{fs, dB} = 20 \log \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right) \quad (3)$$

여기서  $L_{fs, dB}$ ,  $G_{T, dB}$ ,  $G_{R, dB}$ ,  $R$ 은 각각 자유공간 손실, 송신안테나 이득, 수신안테나 이득, 안테나 사이의 거리를 나타낸다.

### 2.3 시험 구성

KSLV-I의 단위장비 및 시스템레벨 복사성 방사 시험은 KSLV-I에 탑재된 모든 장비와 지상점 검장비에 전원을 인가한 상태에서 10 kHz ~ 18 GHz 주파수 대역에 대해 실시하였으며 복사성 감응 시험은 2 MHz ~ 18 GHz 대역에서 펄스 변조된 신호를 규격에 정의된 크기로 인가하며 수

행하였다.

각 단위장비의 시험은 단위장비의 인터페이스 특성을 고려하여 시험구성 및 시험 주파수가 결정되었다. KSLV-I 2단부 엔지니어링 모델을 기체가 비행하는 상황을 모사하여 동작하도록 운용하며 EMC 시험을 수행하였다. KSLV-I 2단부의 시스템수준 EMC 시험은 기체가 설치된 EMC 챔버, GSE 장비를 설치한 전실, EMC 시험 장비 운용실을 통해서 수행되었으며 관련된 사진이 아래에 나타나 있다.



그림 8. 지상점검장비

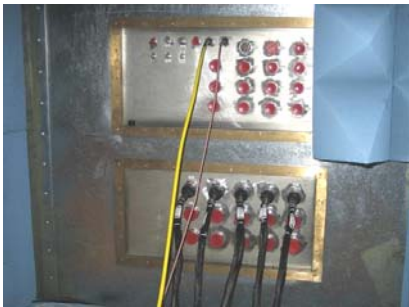


그림 6. EMC 챔버 케이블 인터페이스 패널

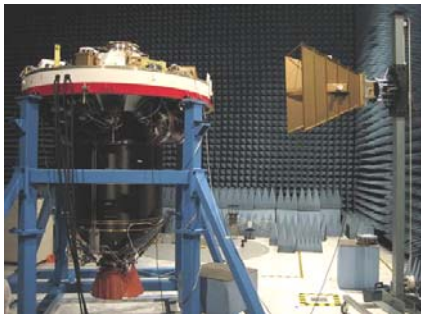


그림 7. KSLV-I 2단부

EMC 챔버 내부에 설치된 KSLV-I 2단부 및 측정 안테나의 위치는 그림 9에 나타나 있는 바와 같이 배치되었다. 그림 9에서 각 원은 반경 1 m, 2 m, 2.5 m의 원으로 KSLV-I 2단부의 외경, 측정 안테나의 위치, 송수신안테나의 위치를 각각 나타낸다. 사각형의 구조물은 KSLV-I 2단부를 지지하기 위해 제작된 EMC 치구로서 한변의 길이가 3 m 이다.

- P1 : 원격측정시스템 수신안테나 위치
- P2 : 비행중단시스템 송신안테나 위치
- P3 : GPS 송신안테나 위치
- P4 : 추적시스템 송수신 안테나 위치
- P5, P6 : RE, RS 시험안테나 위치

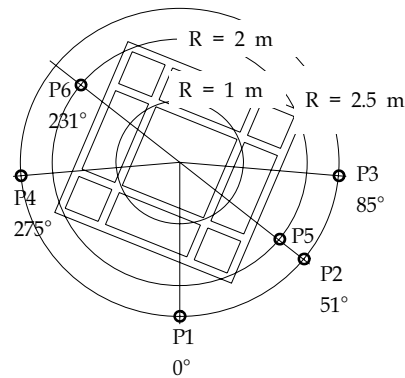


그림 9. 각 송수신 안테나의 위치

### 3. 시험 결과



### 3.1 복사성 방사

#### 3.1.1 기본 잡음 측정 결과

기본 잡음 측정 시험은 KSLV-I 2단부 시스템의 전원을 차단하고 시험장비 및 점검장비는 모두 전원을 켜 상태에서 상존하는 잡음의 수준을 측정하기 위해 수행된다. 기본잡음은 한 위치에서 수직편과 방향과 수평편과 방향 중 한 종류만 측정하였다. 측정 모습의 사진과 측정결과가 다음 그림 10 ~ 17에 나타나 있다.

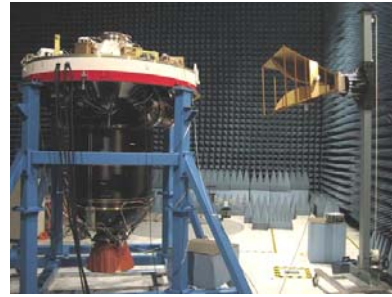


그림 12. 200 MHz ~ 1 GHz ambient



그림 10. 10 kHz ~ 30 MHz ambient

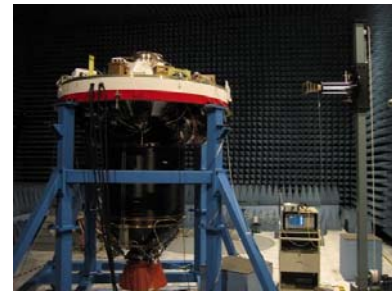


그림 13. 1 GHz ~ 18 GHz ambient



그림 11. 30 MHz ~ 200 MHz ambient

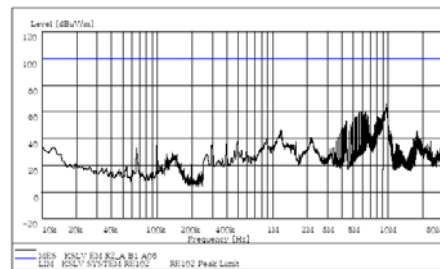


그림 14. 10 kHz ~ 30 MHz ambient, vertical

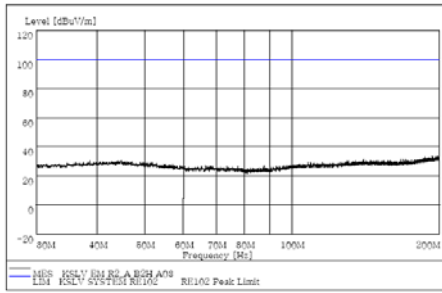


그림 15. 30 MHz ~ 200 MHz ambient, horizontal

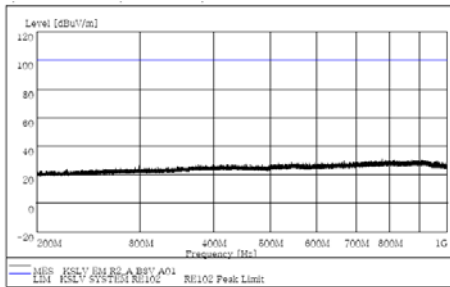


그림 16. 200 MHz ~ 1 GHz ambient, vertical

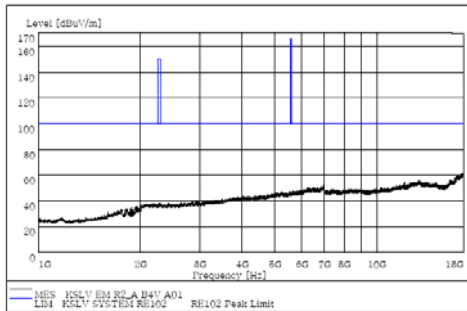


그림 17. 1 GHz ~ 18 GHz ambient, vertical

### 3.1.2 복사성 방사 측정 결과

KSLV-I 2단부의 복사성 방사 측정은 그림 9에 나타나 있는 바와 같이 51° 와 231° 방향에서 수직과 수평편파 방향에 대해 각각 수행하였다. KSLV-I 2단부에 탑재된 모든 장비를 비행모드 상태로 준비하고 INS에서 비행시퀀스에 대한 명

령을 반복적으로 출력하도록 구성하여 시험하였다. 측정결과 중에서 대표적으로 51° 방향에서 안테나의 높이를 전장배이 면과 같도록 위치시키고 수직편파 방향에 대해 측정한 결과를 그림 18 ~ 21에 나타내었다.

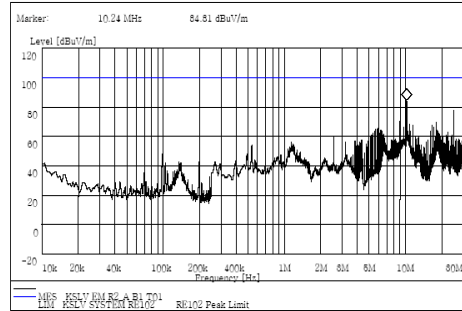


그림 18. RE, 10 kHz ~ 30 MHz, vertical

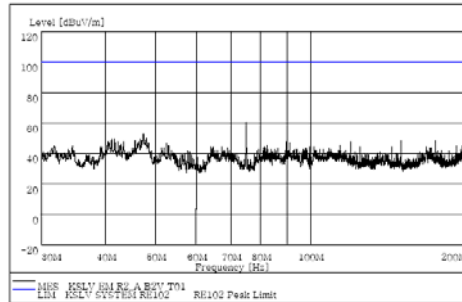


그림 19. RE, 30 MHz ~ 200 MHz, vertical

### 3.2 복사성 감응 측정 결과

KSLV-I의 복사성 감응 시험은 복사성 방사 시험과 같은 위치에서 동일한 방법으로 수행하였다. 시험안테나의 위치에 따라 전장배이면 위아래에 인가되는 전계강도는 수 dB 이상 차이가 발생하기 때문에 전장배이 위아래에 두 개의 전계센서를 위치시키고 비슷한 전계강도가 발생하도록 안테나의 위치를 조정하여 시험하였다. 그림 22는 복사성 감응 시험의 한 예시로서 2 MHz ~ 30 MHz 주파수 대역에 대한 복사성 감응 시험의 사진이다.

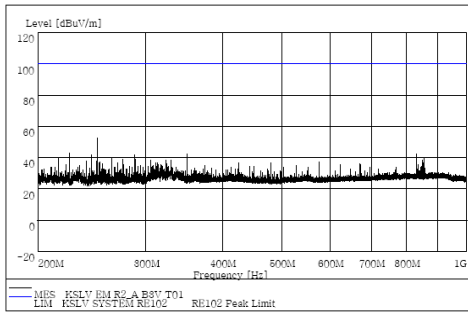


그림 20. RE, 200 MHz ~ 1 GHz, vertical

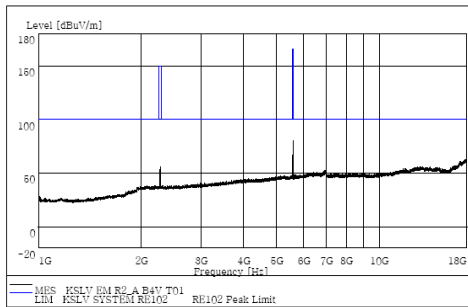


그림 21. RE, 1 GHz ~ 18 GHz, vertical

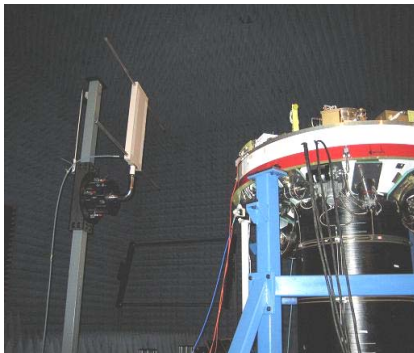


그림 22. 복사성 감응 시험

복사성 감응 시험을 통해 KSLV-I 2단부에 펄스 변조된 20 V/m의 전계강도가 입사되어도 정상 동작함이 확인되었다.

## 4. 결 론

개발진행중에 있는 소형우주발사체 KSLV-I은 설계모델과 엔지니어링 모델이 개발되었으며 인증모델이 개발중에 있다. KSLV-I의 EMC 통제는 단위장비 수준에서부터 지속적으로 관리되고 있으며 현재 인증모델에 대한 시험을 준비중에 있다. 엔지니어링 모델의 시스템 수준 EMC 시험은 복사성 방사(RE), 복사성 감응(RS), 자체 적합성(self compatibility), 정전기(ESD) 시험이 수행되었으며 각각의 시험에 대한 시험 규격, 방법, 절차가 개발되었다. 진행된 각 시험에 대해 KSLV-I 엔지니어링 모델은 규격을 만족하고 있음이 확인되었다. 본 논문에서는 시험 항목중 복사성 방사와 복사성 감응에 대한 시험 과정 및 결과를 제시하였다.

엔지니어링 모델의 경우 측정 치구의 제한에 의해 위성이 체결되는 위치에서의 복사성 방사 잡음을 정확히 측정하지 못하였다. 향후 인증 모델에서는 킥모터가 제거된 상태에서 탑재체를 회전하여 위성이 체결되는 위치에서의 복사성 방사 잡음을 측정할 계획이다. 획득된 데이터는 KSLV-I 전체 시스템과 위성의 전자과적합성 평가 및 분석을 위해 활용될 것이다.

## 참 고 문 헌

1. N. K. Agarwal, "EMI control in high reliability space systems," Proc. of the Int. Conf. on Electromagnetic Interference and Compatibility '99, pp. 1-6, 1999.
2. MIL-STD-461E, Requirements for the control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment.
3. MIL-STD-464A, Electromagnetic environmental effects requirements for systems.
4. MIL-STD-1542B, Electromagnetic compatibility and grounding requirements for space



system facilities.

5. MIL-HDBK-235/1B, Electromagnetic (Radiated) Environment Considerations for Design and Procurement of Electrical and Electronic Equipment, Subsystems and Systems.
6. MIL-HDBK-237C, Electromagnetic Environmental Effects and Spectrum Certification Guidance for the Acquisition Process.
7. MIL-HDBK-83575 : General Handbook for Space Vehicle Wiring Harness Design and Testing.
8. MIL-B-5087B : Bonding, Electrical and Lightning Protection of Aerospace Systems.