

KSLV-1 발사를 위한 원격측정신호 Link Margin 분석

오창열*, 이성희**, 김동현***, 권순호****

Link Margin Analysis on Telemetry for KSLV-I Launch Application

Chang-Yul Oh*, Sunghee Lee**, Donghyun Kim ***, Sunho Kwon****

Abstract

Telemetry data is very important for the Launch Mission and Flight Safety Control during the Space Launch. In Naro Space Center, several telemetry stations such as a small station in the NARO space center, two stations in Jeju and a downrange station on a ship are deployed for the stable acquisition/receiving of the telemetry signals. In this paper, the Link Margin and Reliability for the telemetry are analyzed to evaluate the probability of the signal receiving of each station. Even though the proper analysis is to using the on-board EIRP(Effective Isotropic Radiation Power) values in the direction of the ground station considering the predicted flight trajectory and the locations of the stations, the global EIRP of 95% spatial coverage has been used for the analysis, due to the limitation of the available data.

초 록

위성발사체(KSLV)발사에 있어서 Telemetry data는 발사임무수행 및 비행안전통제를 위해서 매우 중요한 자료이다. 따라서 발사체의 전체 비행구간 동안에 Telemetry 신호를 안정적으로 수신하는 것은 매우 중요하며, 이를 위하여 우주센터에서는 고흥 센터, 제주추적소 및 해상의 다운레인지를 운영하고 있다. 본 문서에서는 발사임무설계에 따른 예상비행궤적 및 발사체 자세, 추적소 위치를 고려하여 각 추적소의 임무구간에 신호를 안정적으로 수신할 수 있는지를 판단하는 Link Margin 및 통신신뢰도를 분석한다. 보다 정확한 분석을 위해서는 예상비행궤적 및 추적소 위치를 고려하여 발사체기준의 추적소방향(Asspect angle 및 roll angle)에 대한 탑재송신부 유효방사전력(EIRP: Effective Isotropic Radiation Power) 특성을 사용하여야 하나, 본 분석에서는 가용자료의 한계로 95% spatial coverage 유효방사전력을 사용하였다.

키워드 : Telemetry, Link Margin, 신뢰도(Reliability), 유효방사전력(EIRP), 위성발사체(KSLV)

접수일(2008년12월17일), 수정일(1차 : 2009년 6월 5일, 2차 : 2009년 6월 17일, 게재 확정일 : 2009년 7월 1일)

* 기술관리팀/ocy@kari.re.kr

** 기술관리팀 /lsh@kari.re.kr

*** 기술관리팀/mattew@kari.re.kr

**** 기술 관리 팀 /kwonsho@kari.re.kr

1. 서 론

소형위성발사체(KSLV-1)의 경우 1단 추진제로 액체연료가 사용되며, 2단 추진제로 고체연료가 사용된다. 액체 추진제의 경우 화염에 의한 신호 감쇠의 영향이 거의 없으나, 고체 추진제의 경우에는 화염에 의한 신호 손실이 큰 것으로 알려져 있다. KSLV-1의 경우 2단 점화가 시작되는 우주 환경 (고도 약 300km)에서 신호감쇠가 어느 정도인지 확인된 적이 없으나, 일본 우주과학연구소의 보고에 의하면 M-V로켓의 경우, 신호 감쇠 정도가 20~40dB까지 고려되어 진다. 또한 위성 분리 및 분리이후 구간에 대한 국내 추적소의 위치는 발사체 비행방향의 직후방이며, 고각도 낮아 신호의 추적 및 수신에 불리하다. 이러한 점을 고려하여 우주센터에서는 국내 추적소(고흥 및 제주) 뿐만 아니라 다운레인지를 배치 운용한다. 즉, 발사 초기구간부터 2단 점화 시점 전까지는 나로우주센터 (TLM1) 및 제주추적소(TLM2,3)에서 신호를 추적 수신하고, 2단 점화 시점부터 위성분리 시점까지는 화염에 의한 신호 손실을 피하고 위성분리 및 분리 이후 발사체에 대한 상태를 안정적으로 수신할 수 있는 다운레인지 (TLM4, 선박이용, 발사대 남방 약 1700km)에서 추적 및 수신을 하도록 한다. 탑재 송신부 및 지상 수신 장비의 개발 및 구축이 완료되고, 발사체 예상비행궤적이 최종단계에 이르게 됨에 따라, Link Budget 분석을 통하여 각 지상국에서의 임무범위에 대한 신호수신 신뢰도를 평가할 필요가 있다. 그동안 우주센터에서는 모든 지상 장비의 구축을 완료하고 모의비행시험을 통하여 각종 성능 및 기능을 검증하고, 100~200km의 단거리 구간에서 예상신호레벨과 실제 수신신호레벨을 비교하여 예상신호레벨과 실제 수신신호레벨이 유사함을 확인하였으나, 경항공기를 사용한 모의 비행시험의 한계성 (고도제한 및 1개의 안테나만 사용 등) 및 실제 발사체 환경과의 차이 등, 모의비행시험을 통하여 최대통신거리 및 신뢰도를 분석하기에는 한계가 있다.

본 문서에서는 발사체 예상비행궤적 및 Link

Budget 분석을 통하여 각 지상국의 임무범위에서의 통신신뢰도를 분석하고, 다운레인지 장비의 예정위치에 대한 적절성을 확인한다.

2. 본 론

2.1 Link Margin 분석

일반 무선통신장비와 같이 Telemetry 신호의 유효통신거리는 위성발사체에 탑재된 송신 장비의 성능 및 특성, 지상 장비의 수신 성능에 따라 크게 달라진다. 기본적으로 Link Margin 분석은 아래 식(1)과 같이 송신부 특성, 수신부 특성 및 송수신간 거리 등 전파경로 특성을 고려한다.

$$S/N = P_T - L_C + G_T - L_P - L_M - L_D - L_F - L_A + G/T - k_B \quad (1)$$

- P_T : the transmitter output power in dBm
- L_C : the cable loss between the transmitter and the transmitting antenna
- G_T : the gain of the transmitting antenna in dBi
- L_P : the path loss in dB
- L_M : the estimated multipath loss in dB
- L_D : the estimated ducting loss in dB
- L_F : the estimated flame attenuation in dB
- L_A : the estimated atmospheric loss in dB
- G/T : the receiving system figure of merit in dBi per degree Kelvin
- k_B : Boltzmann's constant times the equivalent noise power bandwidth

2.1.1 탑재장비(송신부) 특성

1) 송신전력

상단 및 영상을 위해 탑재되는 각 송신기의 전력은 20Watt(43dBm)이다. 또한, 송신기 출력을 2개의 안테나에 공급하기 위하여 Divider 및 Diplexer가 사용된다. 따라서 송신기와 안테나 사이의 cable손실을 제외하고, 실제 안테나에 공급되는 전력은 10Watt(40dBm)가 된다.

2) 송신부 손실

앞에서 언급한 바와 같이, 송신부에는 송신기의 출력을 2개의 안테나로 공급하기 위하여 Power Divider 및 Diplexer, Cable이 사용된다. 이들 소자에 의한 손실은 약 5.5dB로 예상된다.

3) 송신안테나 특성(이득 및 패턴)

직경 2m이상의 발사체와 같은 구조물에서 전방향성 패턴을 유지하며 신호를 전송하기 위해서 2개 이상의 안테나를 대칭적으로 사용하게 된다. 2개의 안테나를 사용할 경우 안테나 패턴은 아래 그림과 같이 이득이 일정하지 않고 변동이 심하게 발생하며, Null구간이 존재한다. 발사체 비행동안에 지상 수신국방향이 안테나 이득이 높은 방향으로 유지될 수 있도록 발사체 송신 안테나 탑재위치를 조절하거나, 비행체 자세제어를 수행하게 된다. 일반적으로 Missile, 위성발사체 등에 사용되는 안테나의 이득은 공간 Coverage에 대한 기준에 따라 -12dBi @ 90% coverage, -16dBi @ 95% coverage, -22dBi @ 99% Coverage이다. 지상에서 Pre-Diversity Combining 기법을 적용하여 수신할 경우, 안테나 이득은 90%, 95%, 99% spatial Coverage에 대하여 각각 5dB, 7dB, 9dB가 개선된다. 즉, 95% spatial coverage에서 안테나 이득은 -9dBi (-16dBi 에서 -9dBi로 7dB 개선됨)이 된다[1]. 본 분석에서는 지상에서의 Pre-D Diversity Combining 기법을 적용하여 수신함에 따라 95% 공간 coverage 송신 안테나 이득을 -9dBi로 적용한다.

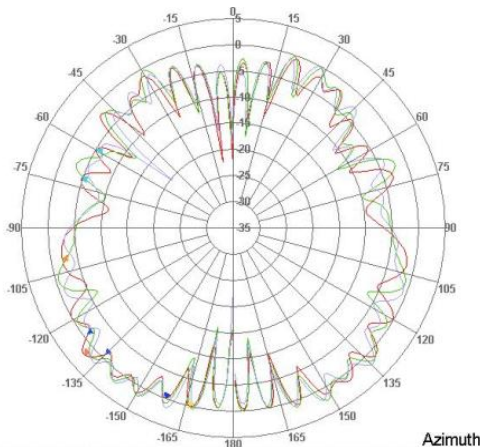


그림 1. 송신안테나(2개사용) 사용 패턴 (예)

4) 유효방사전력(EIRP)

앞의 파라미터를 고려한 송신부 유효방사전력은 안테나 이득 특성에 따라 각 방향에 따라 다르게 나타나지만, 본 분석에서는 안테나의 95% 공간 coverage 특성(-9dBi)을 일률적으로 적용하여 계산하였다.

표 1. KSLV-1 송신부 Telemetry 장비 특성

항목		특성	단위
Pt(송신기전력)	20watt	43.01	dBm
Lc(케이블 손실)		-1.00	dB
Divider/Diplexer 손실		-4.50	dB
Gt(송신안테나이득)		-9.00	dBi
EIRP		28.5	dBm

2.1.2 지상 Telemetry 장비 특성

RF Link Margin에 영향을 주는 지상 수신 장비의 특성은 수신 안테나의 이득 대 잡음비(G/T)로 우주센터에서 사용하는 4대의 지상 Telemetry 장비의 특성은 아래 표와 같다.

표 2. 우주센터 지상 Telemetry 장비 G/T 특성

Station	위치	G/T	Type/크기
TLM1	우주센터 통제동 옥상	-13.8 dB/K	Backfire
TLM2	제주추적소	22.7 dB/K	Parabola/ 11m
TLM3	제주추적소	20.8 dB/k	Parabola/ 11m
TLM4 (Down Range)	태평양 해상 (발사장 남방 1700Km)	15.8 dB/k	parabola/ 4.6m

2.1.3 공간손실 및 기타손실

- 1) L_M (전파다중경로 손실), L_D (Ducting Loss)
통신환경에 따라 큰 차이가 있으므로 여기서는 Fade Margin으로 생각한다.
- 2) L_A (대기감쇠 손실) 및 지상 추적 안테나의 추적오차에 의한 손실
2GHz 대역의 대기감쇠는 크지 않은 것으로 알려져 있다. 약 1000km 거리에서 1dB의 손실이 있을 것으로 고려한다. 또한, 지상에서 안테나가 신호를 추적하는 과정에서 추적오차에 의한 신호감쇠(안테나 이득이 최대가 되지 않는 경우)로 신호를 추적하기 위한 추적안테나를 갖춘 제주 및 다운레인 지 장비의 경우 최대 0.5dB, 고정형으로 광대역 빔폭을 갖는 센터내부 안테나의 경우에는 3dB를 고려한다.
- 3) L_F (추진제 배기가스에 의한 손실)
추진제 성분, 발사체 비행방향 및 안테나 배치에 따라 다르나, KSLV-I 위성발사체의 경우 액체 추진제를 사용하는 1단 연소구간에서는 손실이 비교적 적을 것으로 예상되나, 2단 연소구간에서는 20~30dB가 예상된다. 따라서 2단 연소구간에서는 발사체 후방에 위치하는 국내 지상수신국에서는 신호수신이 어려울 것으로 판단되어 임무구간을 2단 고체 연소직전까지로 하며, 2단 연소구간부터는 발사체 비행방향 앞에 위치하는 Downrange에서 신호를 추적 수신한다.
- 4) 편파(Polarization)손실
송수신 안테나의 편파가 다를 경우(송신 탑재 안테나는 선형편파, 수신안테나는 원형편파)에 3dB가 감쇠된다. 송신 안테나 이득/패턴이 수신 안테나의 편파를 고려한 특성인지 분명하지 않으므로 보수적인 해석으로 감쇠를 고려하였다.
- 5) L_p (공간손실)

$$L_p \text{ (dB)} = 20 \log \quad (2)$$

$$\lambda = \text{wavelength} = c/f$$

D = 송/수신 안테나 사이의 거리

$$L_p \text{ (dB)} = 36.6 + 20 \log f + 20 \log D \quad (3)$$

f in MHz, D in statute miles

2.2 통신신뢰도 분석

Telemetry용으로 사용되는 s-band 주파수 대역의 RF Link 신뢰도 분석은 아래 식 (4)를 이용한다. 본 분석에서 사용한 통신신뢰도 기준은 95% 이상이며, 95%의 RF Link 신뢰도를 유지하기 위해서는 약 9.5dB 이상의 신호대잡음비(SNR)의 여유가 요구되며, 이는 10^{-6} 의 BER(Bit Error Rate)를 위한 13dB에 9.5dB를 추가한 약 22.5dB의 신호 대 잡음비가 요구된다.

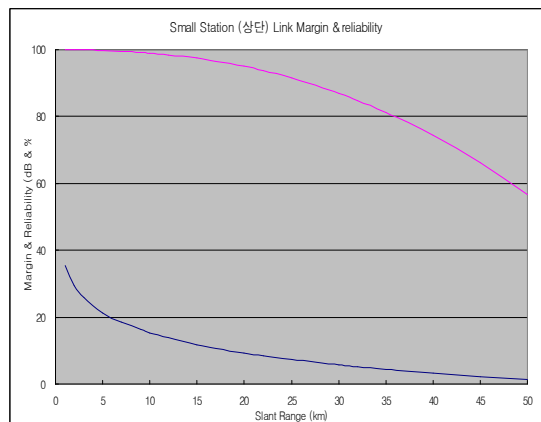
$$L = 100 - a \quad (4)$$

$$a = 10 \exp ((18 - \text{Margin}/0.85)/10)$$

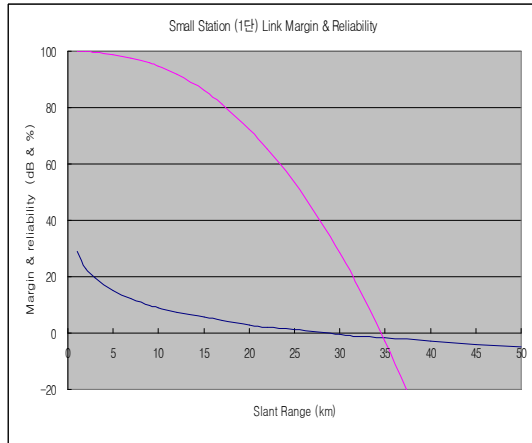
2.3 Link Margin 및 Reliability 분석결과

2.3.1 센터내부

센터 내부의 TLM1(Small station)의 경우, 고정형 안테나로서, 신호방향으로 안테나를 실시간 구동할 수 없으며, 미리 정해진 방향으로 고정된다. 따라서 추적오차에 의한 손실을 제주 및 Downrange보다 크게 3dB로 고려하였다. 이를 근거로 한 Link Margin 및 Reliability는 상단신호에 대하여 최소 20Km까지 95%의 통신신뢰도를 유지하고, 1단 신호에 대하여 약 10Km까지 95%의 통신신뢰도를 유지한다.

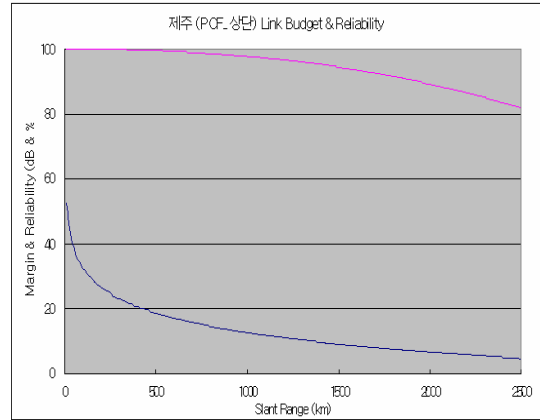


(a)



(b)

그림 2. 센터내부 TLM1의 Link Margin 및 통신 Reliability 분석 (a)상단, (b)1단

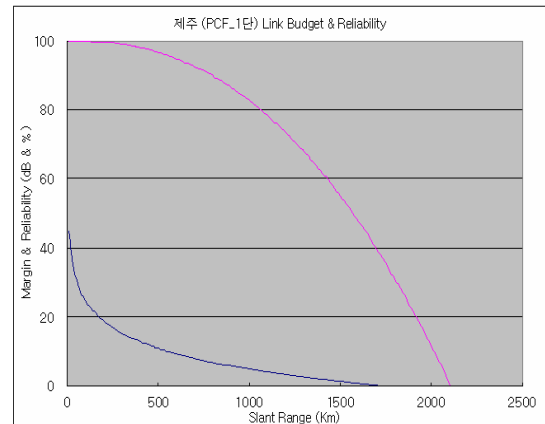


(a)

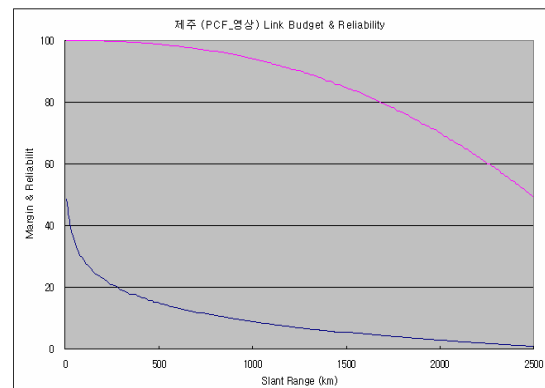
2.3.2 제주추적소

제주추적소 TLM2 (PCF) 안테나의 경우 수신 전용으로서 상단신호에 대하여 1440km까지 95% 이상(Margin 9.4dB이상), 1940Km까지 90%이상 (Margin 6.8dB 이상)의 통신신뢰도를 유지한다. 대역폭이 넓은 1단 신호에 대해서는 590Km까지 95% 이상, 790Km까지 90%이상의 통신신뢰를 갖는다. 영상신호에 대해서는 930Km까지 95%이상, 1250Km까지 90%이상의 신뢰도를 갖는다.

제주추적소 TLM3 (SCF) 안테나의 경우는 송수신 겸용 안테나로서 안테나 수신감도가 PCF에 비하여 다소(약 1.9dB) 떨어진다. 이에 따라 유효통신거리도 PCF에 비하여 약 20%가 줄어들어, 상단신호에 대하여 1150km까지 95%이상, 1560Km까지 90%이상 통신신뢰도를 유지한다. 1단 신호에 대해서는 470Km까지 95%이상, 630Km까지 90%이상의 통신신뢰를 갖는다. 영상신호에 대해서는 740Km까지 95% 이상, 1000Km까지 90%이상의 신뢰도를 갖는다.

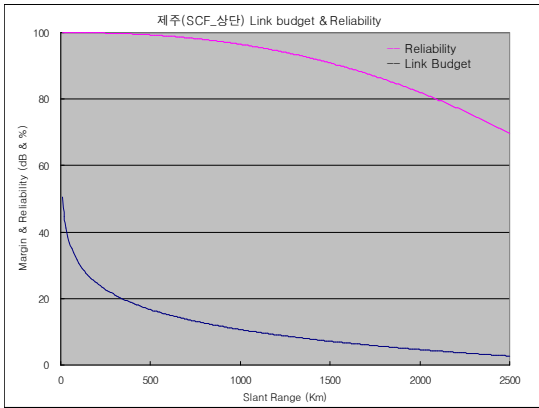


(b)

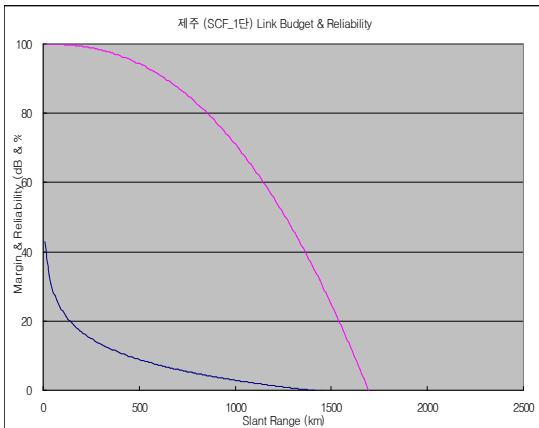


(c)

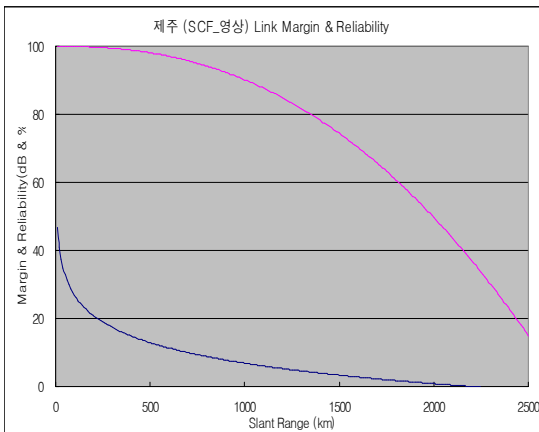
[그림3] 제주 TLM2(PCF)의 Link Margin 및 통신 Reliability 분석 (a)상단, (b)1단, (c)영상



(a)



(b)

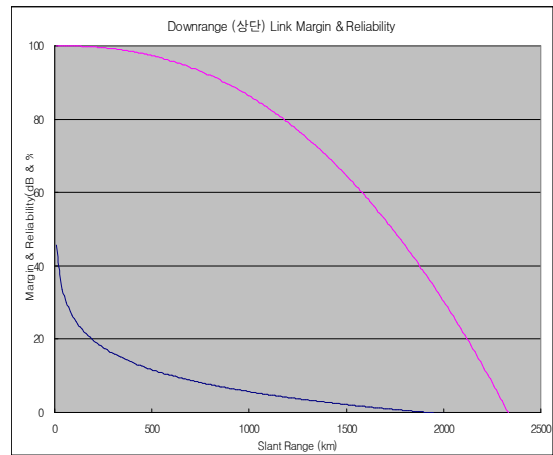


(c)

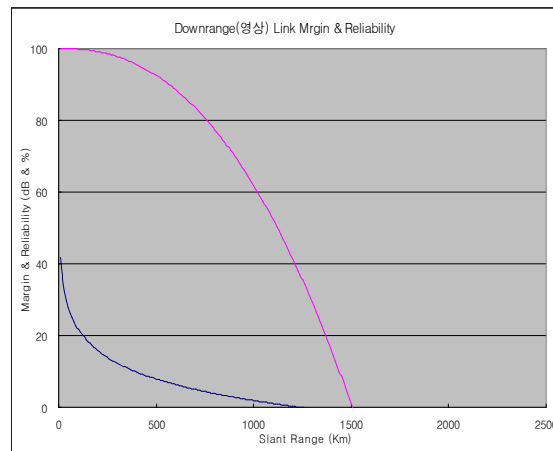
그림 4. 제주 TLM3(SCF)의 Link Margin 및 통신 Reliability 분석 (a)상단, (b)1단, (c)영상

2.3.3 다운레인지

TLM4(다운레인지)의 경우는 4.6m 안테나를 사용하며, 2단 연소구간부터 신호를 추적 수신한다. 따라서 1단 신호에 대한 유효통신거리는 분석하지 않았다. 상단신호에 대하여 650km까지 95%이상, 880Km까지 90%이상 통신신뢰도를 유지한다. 영상신호에 대해서는 420Km까지 95%이상, 570Km까지 90%이상의 신뢰도를 갖는다.



(a)



(b)

그림 5. TLM4(다운레인지)의 Link Margin & 통신 Reliability 분석 (a) 상단, (b) 영상

2.4 종합검토

소형위성발사체 KSLV-I의 예상비행궤적 및 지상 수신국 위치를 고려한 Link Budget 및 통신신뢰도를 보수적인 관점(송신 안테나 패턴의 95% 공간 Coverage 이득 -9dB 사용)에서 분석하였고, 그 결과는 아래와 같이 요약된다.

- 1) 센터내부(고흥)의 소형시스템의 경우, 제주 추적소에서 안정적으로 신호를 추적 및 수신할 수 있는 거리까지 95%이상의 통신신뢰도를 갖는다.
- 2) 제주추적소에서 2단 점화까지 12.2dB 이상의 Fade Margin과, 97.7% 이상의 통신신뢰도를 유지하며, 2단 연소구간 동안, Plume에 의한 신호감쇠 (20dB 이상)에 의해 통신두절이 예상되나, 연소종료 이후에 다시 추적 및 수신이 가능하다.
- 3) Downrange(발사방향 1700km 해상)에서 2단 점화 이전부터 신호 추적 및 수신이 가능하며, 임무구간인 2단 점화부터 임무종료(CCAM 종료)까지 Link Margin 8.3dB 이상, 통신 신뢰도 93% 이상을 유지한다.

[표3] Station별 90, 95% 통신신뢰도 거리

Station	상단		1단		영상	
	95% 거리	90% 거리	95% 거리	90% 거리	95% 거리	90% 거리
TLM1	20	27	8	11	-	-
TLM2 (PCF)	1440	1940	590	790	930	1250
TLM3 (SCF)	1150	1560	480	630	750	1000
TLM4 (Down Range)	650	880	-	-	420	570

표 4. 주요 Event별 Link Budget분석

(a) TLM2 (제주 PCF) 기준

Event	비행 시간 (Sec.)	Slant Range (Km)	EL (Deg.)	Aspect Angle (Deg.)	Margin (dB)	신뢰도 (%)
PLF 분리	215	249	40.9	51.9	24.6	99.9
1단 분리	227	296	36.5	48.5	23.1	99.9
2단 점화	395	1040	12.2	22.4	12.2	97.7
2단 연소 종료	453.8	1374	6.7	19.8	9.8	95.6
위성 분리	540	2034	-0.4	17.6	6.4	-
CCAM 시작	545	2071	-0.7	17.2	6.2	-
CCAM 종료	560	2186	-1.7	106.2	5.7	-

Event	비행 시간 (Sec.)	Slant Range (Km)	EL (Deg.)	Aspect Angle (Deg.)	Margin (dB)	신뢰도 (%)
PLF 분리	215	249	40.9	51.9	24.6	99.9
1단 분리	227	296	36.5	48.5	23.1	99.9
2단 점화	395	1040	12.2	22.4	12.2	97.7
2단 연소 종료	453.8	1374	6.7	19.8	9.8	95.6
위성 분리	540	2034	-0.4	17.6	6.4	-
CCAM 시작	545	2071	-0.7	17.2	6.2	-
CCAM 종료	560	2186	-1.7	106.2	5.7	-

(b) TLM4 (Downrange) 기준

Event	비행 시간 (Sec.)	Slant Range (Km)	EL (Deg.)	Aspect Angle (Deg.)	Margin (dB)	신뢰도 (%)
PLF 분리	215	1481.2	-0.2	166.6	2.25	65.7
1단 분리	227	1432	0.9	167.9	2.6	68.4
2단 점화	395	742.8	20.7	148.8	8.3	93.3
2단 연소 종료	453.8	469.4	38.6	128.1	12.22	97.7
위성 분리	540	523.8	33.6	45.3	11.3	97.1
CCAM 시작	545	552.4	31.4	42.3	10.8	96.7
CCAM 종료	560	644.7	25.7	119	9.5	95.1

이와 같은 분석은 앞서도 언급하였듯이 송신 EIRP를 95% 공간 Coverage 이득을 적용한 것으로 보수적인 분석결과이다. 제주 및 Downrange에서의 추적환경 (각 추적 장비의 임무범위에서 최소 양각이 12deg, Aspect Angle이 최소 22deg)을 고려할 때, 송신 안테나 패턴 및 EIRP는 분석에 사용된 것보다 양호할 것이며, 추적 및 신호수신에 문제가 없을 것으로 판단된다.

3. 결 론

본 문서에서는 위성발사체(KSLV)의 발사에 필요한 Telemetry 신호에 대한 각 지상수신국에서의 Link Budget 및 통신 신뢰도에 대한 분석을 95% 공간 Coverage의 송신부 EIRP를 적용하여 수행하였으며, 분석결과 KSLV-I 발사임무수행을 위하여 각 지상추적소의 임무구간에서 필요한 Link Margin 및 통신신뢰도가 확보됨을 확인하였다. 발사체 예상비행궤적 및 자세변화에 따른 각 지상 수신국(추적소) 방향으로의 송신부 EIRP와 2단 고체점화구간에서의 전파감쇠에 대한 data를 적용하여 보다 정확한 Link Budget 및 통신신뢰도 분석은 향후 관련 자료가 확보된 후에 보완해 나갈 예정이다.

참 고 문 헌

1. IRIG 119-88, Telemetry Application Handbook.