

## KSLV-I 3차 비행시험에서의 비행안전통제실 운영

최규성\*, 심형석\*\*, 고정환\*\*\*, 노웅래\*\*\*\*

# The Operation of Flight Safety Center for KSLV-I Third Flight Test

Kyu-Sung Choi\*, Hyung-Seok Sim\*\*, Jeong-Hwan Ko\*\*\*, Woong-Rae Rho\*\*\*\*

### Abstract

This paper described flight safety center, flight safety information system(FSIS) and flight safety officer's mission and training in sequence and presented analysis's results and data processed in real-time during KSLV-I 3rd flight test. During flight safety center's operation for the 3rd flight test, monitoring of KSLV-I flight status was normally performed and the algorithms for flight safety calculations including the one for instantaneous impact point computations are also executed normally.

### 초 록

본 논문에서는 비행안전통제실, 비행정보전시시스템 및 비행안전통제원의 임무 및 훈련을 순차적으로 기술하고 KSLV-I 3차 비행중 실시간으로 처리된 데이터 및 분석 결과를 제시하였다. 3차 비행시험의 비행안전통제실 운용에서, KSLV-I 비행 상황 감시가 정상적으로 이루어졌으며 순간낙하점 계산을 포함한 비행안전 알고리즘 계산도 정상적으로 수행되었다.

키워드 : 비행안전 (flight safety), 낙하점 (impact point), 비행안전정보시스템 (flight safety information system), 비행안전통제원 (flight safety officer), 나로호 (KSLV-I)

### 1. 서 론

나로호(KSLV-I)의 3차 비행시험이 2013년 1월 30일 나로우주센터에서 수행되었다. KSLV-I 비행 시험시 비행안전 시스템은 유사시 발사체의 비정상 기동으로 인한 지상 위험을 최소화하는 데 목적을 두고 있다. 이를 위하여 우주센터의 비행

안전통제실에 위치한 FSO(비행안전통제원, Flight Safety Officer)는 FSIS(비행안전정보시스템 : Flight Safety Information System)를 이용하여 발사체의 비행 궤적 및 IIP(순간낙하점 : Instantaneous Impact Point), 발사체의 상태 등을 실시간으로 감시한다. 비행안전 정보시스템은 우주센터 및 제주 추적소에 설치된 지상 추적장

접수일(2013년 5월 6일), 수정일(1차 : 2013년 6월 7일, 2차 : 2013년 6월 14일, 게재확정일 : 2013년 7월 1일)

\* 체계설계팀/kschoi@kari.re.kr

\*\* 체계설계팀/aeroshs@kari.re.kr

\*\*\* 나로호체계종합팀/jko@kari.re.kr

\*\*\*\* 체계설계팀/rwr@kari.re.kr

비(Radar, EOTS(광학추적장비)) 및 탑재장비로부터 송신된 데이터를 전시하는 기능을 갖고 있으며 지상추적장비로 송신된 위치 데이터를 필터링하여 속도를 취득하여 순간낙하점을 계산하게 된다. 순간 낙하점은 순간적으로 추력이 소멸되었을 때 해당 물체가 무추력 탄도 비행 후 낙하하게 되는 예측점으로 정의되며, 우주 발사체 비행 안전 운영 시 가장 높은 중요도를 가지며 비행안전 통제원이 감시하는 주요 데이터이다. 본 논문에서는 비행안전통제실, 비행정보전시시스템 및 비행안전통제원의 임무 및 훈련을 순차적으로 기술하고 KSLV-I 3차 비행시험에서 실시간으로 처리한 데이터 및 수행된 알고리즘의 결과를 제시하였다.

## 2. 비행 안전시스템

비행안전 통제실(Flight Safety Center, FSC)에는 총 4기의 FSIS, 1기의 GFTS MCP(Ground Flight Termination System Master Command Panel), 1기의 VCS(Voice Communication System), 1기의 CCTV 모니터, 1기의 시간정보 표시시스템이 구비되어 있다. FSIS는 발사체의 궤적을 감시하는 2기의 FSIS(TRJ)와 발사체의 상태를 감시하는 1기의 FSIS(QLM), 그리고 예비용 FSIS 1기로 구성되어 FSO가 발사체의 현재 궤적 및 비행 상태 등을 감시하여 발사체의 위험도를 빠르게 판단하도록 돕는다. 비행중인 발사체의 원격계측 정보인 QLM(Quick Look Message)은 각 텔레메트리 지상국으로부터 BSS(Best Source Selector)를 거쳐 각 순간마다 최상의 품질로 판단된 데이터가 FSC로 전송된다. GFTS MCP는 유사시 비행중단 명령을 전송하는 장비이며, VCS는 우주센터의 각 담당자들과의 음성 통신을 위한 장비이다. 또한 CCTV 모니터는 여러 소스로부터의 영상 신호를 전시하는 기능을 제공한다. FSC 내의 각 장비는 네 명의 FSO에 의해 운영되며, 3차 비행시험에 사용된 비행안전시스템의 운영 개념은 아래에 도시되었다[5].

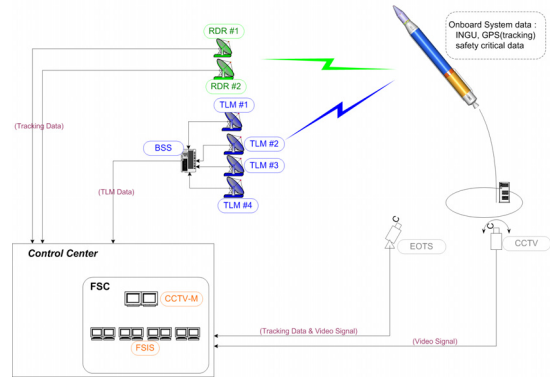


그림 1. 비행안전시스템 구성 및 운용

### 2.1 비행 안전 정보 흐름도

레이다 및 광학추적시스템의 계측 데이터는 통제센터 내의 CDPS(Central Data Processing System)를 거쳐 FSC로 전달되며, 다수의 지상국에서 수신된 텔레메트리 데이터는 실시간으로 관찰되는 일부 파라미터(QLM: Quick Look Message)만 추출되어 BSS(Best Source Selector)로 보내지고, BSS에서 장비 및 데이터 상태를 판단하여 최적의 데이터가 선정되어 FSC로 전달된다. 데이터 송수신을 위하여, 나로우주센터 내부에 위치한 추적장비와는 센터 내부의 광통신망으로 연결되며, 제주추적소의 장비와는 임대된 전용 네트워크로 연결된다. 또한, 다운레인지 텔레메트리 데이터는 상용 위성중계망을 통하여 나로우주센터로 전송된다[5].

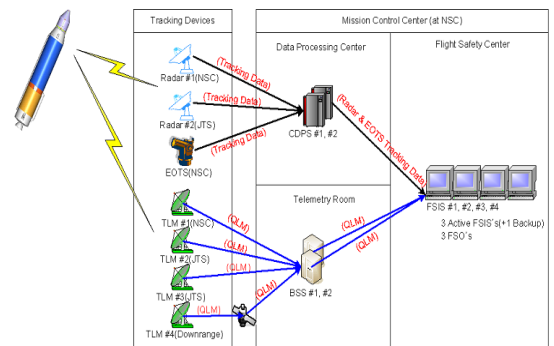


그림 2. 우주센터 추적데이터 흐름

## 2.2 지상추적 및 원격측정 장비

KSLV-I의 비행에 있어, 총 3대의 추적장비와 4대의 원격측정장비가 사용되었다. 추적장비는 지상의 레이더 또는 광학장비에 의해 발사체의 위치를 측정하는 기능을 수행하며, 원격측정장비는 발사체에서 측정된 데이터를 지상에서 수신하는 기능을 수행한다. 이들은 각기 나로우주센터, 제주추적소 및 다운레인지(선박활용)에 설치되어 위성이 분리되는 순간을 포함하는 추적데이터 및 발사체의 주요 데이터를 나로우주센터로 전송하게 된다.

## 3. 비행 안전정보시스템

발사체의 비행 중 비행안전통제원은 FSIS를 통하여 발사체의 비행상황을 감시하게 된다. 그림2와 같이, 비행 중 레이더 및 광학추적장비에서 계측된 발사체의 추적데이터는 중앙자료처리시스템을 통해 실시간으로 FSIS에 전달된다. 한편, 발사체 텔레메트리 데이터의 일부는 실시간으로 처리되어 FSIS에 전달되는데, 이러한 데이터를 QLM이라고 하며, 실시간으로 처리될 데이터의 목록은 아래에 열거하였다. 모든 FSIS는 Dual 모니터로 구성되어있으며 그림 3은 궤도 감시를 위한 FSIS(TRJ) 그림 4는 QLM감시를 위한 FSIS(QLM) 화면 예이다[1].

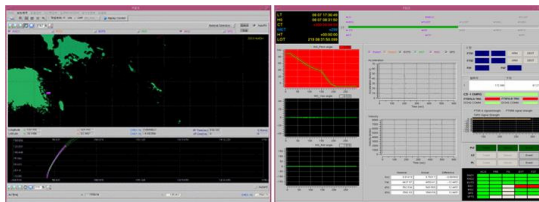


그림 3. FSIS(TRJ) 화면



그림 4. FSIS(QLM) 화면

## 3.1 FSIS(TRJ)

FSIS(TRJ)는 비행 비정상 판단을 위한 발사체의 궤도 정보를 표시한다. FSIS(TRJ) 화면에 표시될 주요 데이터들은 다음과 같다.

- 비행진행상황: 발사 후부터 비행안전 임무가 종료할 때까지의 비행진행상황
- 시간 정보
- 궤도(X-Y): 세계지도를 배경으로 지상에 투영된 발사체의 궤도 정보. 발사체의 현재위치, 예정궤도, 3- $\sigma$  궤도, 파괴선, 순간낙하점, 파편 낙하영역 등의 정보
- 궤도(X-Z): 수직면에 대한 발사체의 궤도 정보. 발사체 현재위치, 3- $\sigma$  궤도, 파괴선 등의 정보
- 자세 정보: 피치, 요, 롤 자세각 정보를 그래프 또는 문자로 표시. 예정 자세각 정보 및 자세각 한계값 정보 포함.
- 속도 및 가속도 정보: 속도 및 가속도 정보를 그래프 또는 문자로 표시. 예정 속도/가속도 및 한계값 정보 포함.

## 3.2 FSIS(QLM)

FSIS(QLM)은 비행중단 판단을 위하여, 주로 텔레메트리를 통해 전달되는 발사체의 내부 상태 정보를 표시한다. FSIS(QLM) 화면에 표시될 주요 데이터들은 다음과 같다.

- 비행진행상황: 발사 후부터 비행안전 임무가 종료할 때까지의 비행진행상황
- 시간 정보
- 추진기관 관련 정보: 추진기관의 비정상 운용 상태 판단을 위한 정보. 연소압, 추진제 탱크 압력, 잔류추진제량 등.
- 단분리/페어링 분리 정보: 페어링 및 단분리와 관련된 명령발생 상태, 센서를 통해 측정된 실제 분리 여부 등.
- 탑재 전자기기 정보: 탑재된 여러 가지 전자기기의 운영상태 정보. 전압 정보 등.
- FTS 상태: 탑재 비행중단시스템의 상세 정보.

배터리 전압 정보 포함.

## 4. 비행안전통제원의 임무 및 훈련

### 4.1 비행안전통제원의 임무

KSLV-I 3차 비행을 위한 비행안전 통제원의 주임무는 발사체 이륙후의 비행상황 감시 및 발사체 추적데이터를 이용하여 낙하물들의 낙하지역을 확인하고, 유사시 비정상 비행 상황에 대한 보고이다. 비행안전통제원은 나로우주센터 발사 통제동 건물내 비행안전통제실(FSC: Flight Safety Center)에서 업무를 수행하며 주요 임무는 아래와 같다.

- 비행안전계획 수립 및 실행
- 발사체 비행상황 감시(광학카메라, 추적 데이터, 텔리메트리 데이터 등)
- 비정상 비행 상황 발생 시 낙하위험요소 파악, 관련조치 실행 및 상황보고

비행안전 운영은 4명의 통제원에 의해 이루어지며, 각 통제원의 역할은 표 1과 같다[4].

표 1. 비행안전통제원별 임무

통제원	비행중 임무
FSO #1	FSIS(TRJ)를 이용한 궤도, 낙하점 등의 비행상황 감시
FSO #2	FSIS(TRJ)를 이용한 궤도, 낙하점 등의 비행상황 감시
FSO #3	FSIS(QLM)를 이용한 탑재물 상태 정보, 분리상황 등의 비행상황 감시
FSO #4	광학관측 화면을 이용한 초기비행 상황 감시, 주요이벤트별 시간정보 제공

### 4.2 비행안전통제원의 훈련

비행안전통제원은 비상시 사용해야 할 장비의 운영을 담당하기 때문에, 사용 장비에 대한 교육과 비행중의 비상상황에 대처하기 위한 훈련을 받아야 한다. 단계별 훈련 내용은 표 2와 같다[4].

표 2. 비행안전통제원 훈련 단계

단계	훈련종류	훈련진행
1단계	기본 사용법 훈련	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 각 장비 개발 과정에서 시험진행</li> <li>• 통제시스템 모의비행시험 참여</li> </ul>
2단계	이륙전 상황(시스템확인등)에 대한 훈련	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 발사전 연계시험 운용</li> <li>• 발사전 반복리허설로 진행</li> </ul>
3단계	이륙~임무종료 훈련	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 발사실사전 별도 훈련 진행</li> </ul>

KSLV-I 1차 발사에 대비하여 위의 3단계 훈련은 모두 진행되었으며, KSLV-I의 2차와 3차 발사를 위해서 3단계 훈련만 추가로 진행하였다. 1차 발사때는 약 200여회의 별도 훈련을 진행하였으며, 2차 발사를 위해서는 약 100차례의 훈련을 진행하였고, 3차 발사에는 비행중의 비행중단 조치가 없으므로 약 50여회의 훈련이 진행되었다. 비행안전통제원이 비정상 상황에 대처하기 위한 비행시나리오는 기존 우주발사체의 실패원인을 토대로 작성되었다. 비행실패 사례를 보면, 제어시스템-TVC 손상, 유도 제어-자세 reference 손실, 엔진조기종료, 자세에러, 단분리 실패, 소프트웨어 에러, 각단의 엔진 조기종료 등이 있다[6]. 비행시나리오에 따른 총 비행궤적 데이터는 64개로 구성되어 있으며, 비행구간별로 나누어서 비정상 상황을 구현하였다. 비행실패에 따른 비행궤적 특징들을 살펴보면 다음과 같다.

- 유도명령 오류 - 비행전에 자세각을 프로그래밍하는 과정에서 자세 오차가 발생할 경우 기준 궤적에서 벗어나게 되며 특히 자세각 중요방향으로 오차가 발생하게 되면 IIP 궤적이 비행중단 명령선을 통과하게 된다.
- TVC 고장 - 추력벡터제어 장치의 고장으로 자세 제어가 불능상태가 되어 특히 측면 방향으로 비행하는 시나리오를 만들기 위해 요방향으로 TVC가 꺾여서 비행한다고 가정하면 어느정도 시간이 경과하면서 텀블링 현상이 일어나면서 좌우측 방향으로 IIP 궤적이 벗어나

게 된다.

- 1/2단분리 실패 - 단분리가 일어나지 않은 채 비행하게 되면 무추력 구간에서는 동일하게 비행하지만 2단이 점화가 되어 추력이 발생하게 되면 2단 전체 무게보다도 무거운 1단으로 인해 가속도를 내지 못하고 1단의 예상낙하점과 유사한 장소에 낙하하게 된다.
- 페어링분리 실패 - 1단 비행구간에서 페어링이 분리되지 않고 페어링과 2단이 함께 비행하게 되면 2단이 점화되어 자세제어를 시작할 때 예상치 못했던 무게와 무게중심 변화로 인해 자세가 서서히 변동하다가 제어 불능상태에 접어들면서 텀블링 현상이 일어나게 된다. 이렇게 되면, 궤도 투입에 필요한 속도를 얻지 못하고 탄도비행과 같은 궤적을 그리면서 지면으로 낙하하게 된다.
- 1단 엔진의 조기 종료 - 1단 엔진이 예상보다 빨리 종료되면 더 이상 속도를 얻지 못하여 궤도 투입에 실패하게 된다. 비행안전통제원의 훈련을 위해 조기 종료 시점에 변화를 주면서 다양한 궤적을 생성하도록 하였다.
- 2단엔진 점화 실패 - 1단의 주요 역할은 속도와 고도를 제공하고 2단은 주어진 고도에서 페이로드에 속도를 증분시켜 궤도에 투입하게 되는데 이 경우, 궤도에 투입하기 위한 고도를 만족시키지만 예상속도보다 작게 형성되어 지상으로 낙하하게 된다.

위에서 언급된 궤적의 특성을 지닌 시나리오에 따라, 비행안전통제원은 모의비행궤적 데이터를 실시간으로 전송받아서 비행안전 정보시스템을 이용하여 훈련을 진행하였다. 다양한 훈련 시나리오를 비행안전 통제원에게 임의적으로 전송하여 실제와 유사한 상황에서 발사체의 비행안전 운용 기술을 습득하도록 하였다.

### 5. KSLV-I 3차 비행시험에서의 비행안전통제실 운영 결과

KSLV-I 3차 비행시험에서 FSIS 전시를 위해 사

용된 추적시스템은 나로우주센터와 제주추적소에 설치된 추적레이다(RAD1:우주센터내 레이더, RAD2: 제주추적소내 레이더), 광학추적장비, INS, GPS등이다. 수신된 데이터들 중 추적레이다와 광학추적장비는 전송된 위치 벡터를 필터링하여 위치, 속도 벡터를 계산하게 되며, 텔레메트리로 수신된 2단 INS 및 GPS 데이터는 필터링 없이 위치와 속도벡터를 이용하여 순간낙하점을 계산하게 된다. 본 비행시험에서 모든 추적장비가 정상적으로 운용되어 각 추적장비별 산출된 발사체의 속도는 nominal 속도와 오차 범위 내에서 일치하였다. 그림 5는 추적장비별 전체 속도를 비교한 그림인데, 비행시간은 발사체의 이륙목표 시각(Local time 2013.01.30. 16:00:00.0)을 기준으로 하고 있다. 아래 그림에서 추적장비별 특징을 보면, 추적레이다는 비행거리가 멀어짐에 따라 노이즈가 커지고 추적종료시점에서 고각이 낮은 관계로 변동이 심한 것을 볼 수 있으며, RAD2는 이륙후 고각이 낮은 관계로 비행초기 변동이 심하다가 안정화되지만 비행중간에 불안정한 상태를 보이고 있다. INS와 GPS는 nominal 속도와 거의 동일한 결과를 나타내고 있다.

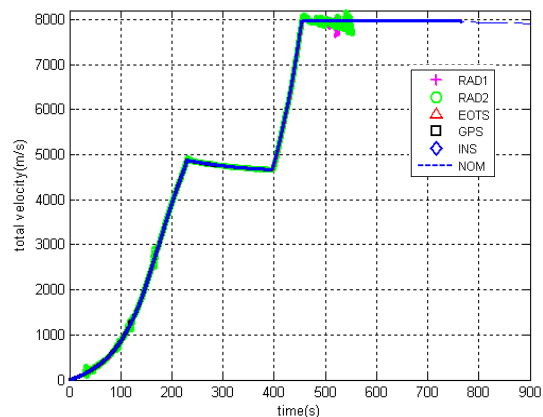


그림 5. 추적장비별 전체속도

각 추적장비에서 전송된 위치와 속도를 이용하여 전구간에서 순간낙하점을 계산한 결과, 추

적장비별 순간낙하점 궤적이 발사체의 이륙후부터 위성의 궤도투입전까지 nominal IIP와 거의 동일한 것을 볼 수 있으며 그림 6, 7에서 IIP의 위, 경도가 변화되지 않고 있는 시점은 무추력 구간이다. 레이더의 경우 특성상 비행거리가 길어짐에 따라 발생한 오차와 1단의 연소종료시 발생하는 가속도의 변화로 인한 FSIS 내부 필터의 속도 추정 오차가 발생하여 1단 낙하점 부근에서 조금씩 변동하는 특성을 보여주고 있다. EOTS는 65초부터 방위각 방향의 변동이 나타나면서 IIP가 경도방향으로 변동하고 있다. Rad2는 비행구간중 세차례 불안정한 현상이 발생하였으나 이외 구간에서는 안정적으로 IIP 궤적을 계산할 수 있었다[7].

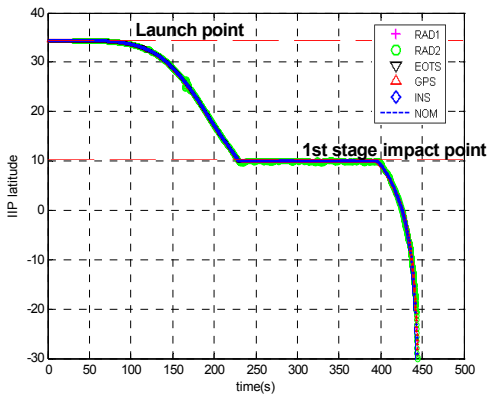


그림 6. 시간에 대한 IIP 위도 변화

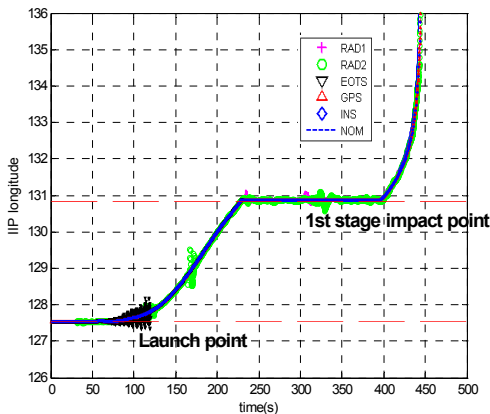


그림 7. 시간에 대한 IIP 경도 변화

KSLV-I의 3차비행시험에서는 1단 비행구간에서 페어링과 1/2단 분리가 정상적으로 수행되었다. 비행안전정보 시스템에 의해 처리된 위치와 속도 데이터를 이용하여 페어링과 분리된 1단의 공력이 고려된 낙하점을 추적장비별로 비교하면 다음과 같다[7]. 페어링의 경우, nominal 낙하영역은 낙하점을 중심으로 비행방향 거리  $\pm 100$  km, 폭  $\pm 50$  km의 분산 반경을 갖는다. 추적장비별 공력을 포함한 페어링의 낙하점은 그림 8에 도시하였으며 모든 페어링 낙하점이 낙하분산영역내에 낙하하고 있음을 보여주고 있다. INS, GPS의 페어링 낙하점은 nominal 낙하점 기준으로 반경 10km내에 위치하고 있으며 RAD1과 RAD2로부터 예측한 데이터에는 다른 추적장비와 오차가 있지만 nominal 낙하점 기준 반경 20km내에 위치하고 있다. 실제속도는 nominal 속도보다 높게 나타나고 있어 평균낙하점보다 남쪽에 위치하고 있다.

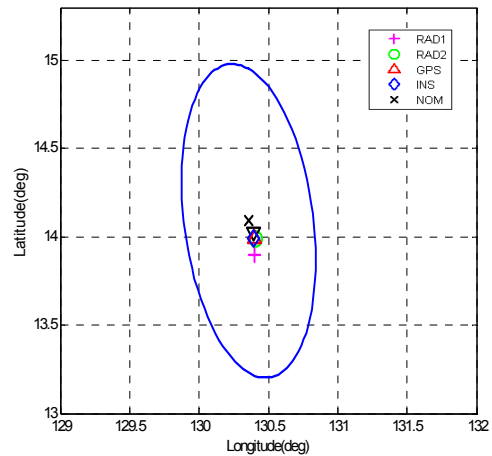


그림 8. 추적장비별 페어링의 낙하점 예측

분리된 1단의 경우, 낙하영역은 예상낙하점을 중심으로 비행방향 거리  $\pm 85$  km, 폭  $\pm 20$  km의 분산 반경을 갖는다. INS와 GPS는 nominal 1단 낙하점과 반경 3km내에 낙하하고 있음을 아래 그림으로 확인할 수 있다. RAD1과 RAD2 데이터로 계산된 낙하점은 연소종료에 따른 가속도

변화와 필터 오차로 인해 진동하게 되어 예상낙하점과 다소 차이가 있지만 예상 낙하분산영역 내에 위치함을 확인할 수 있다[7].

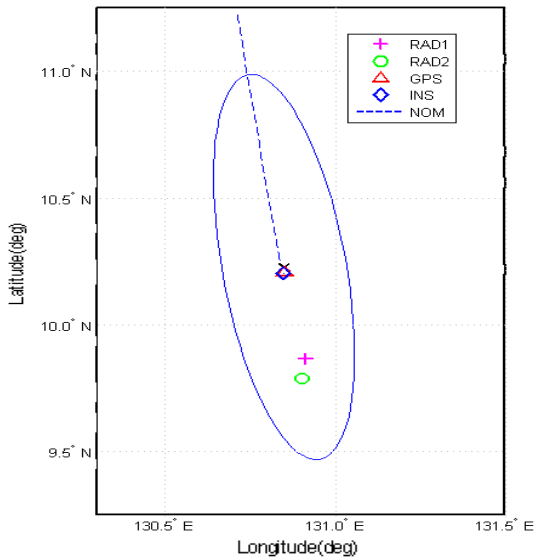


그림 9. 추적장비별 1단의 낙하점 예측

## 6. 결 론

본 논문에서는 KSLV-I의 3차 비행시험에 있어서의 비행안전통제실 운용에 대해 기술하였다. 비행안전통제실 운용을 통해, 지상의 추적장비 계측데이터 및 텔레메트리로 전달되는 발사체 상태 정보를 이용하여 비행 상황 감시를 정상적으로 수행하였으며 실시간으로 처리된 데이터 및 수행된 알고리즘 계산도 오류없이 수행되었다. KSLV-I 비행안전통제실 운용을 위해 개발된 시스템/알고리즘 등은 비행시험에서 예정된 대로 잘 운영되었으며, 향후 일부 개선을 통하여 한국형발사체(KSLV-II) 비행안전 보장을 위한 효과적인 발판이 될 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

1. 최규성, 고정환, 심형석, 노웅래, 박정주, 조광래, "KSLV-I 1차 비행시험에서의 비행안전 운영", 한국항공우주학회 추계학술발표회, 2009
2. 고정환, 김정래, 박정주, 방희진, 최동민, 송상섭 "KSR-III 비행안전시스템 운용", 항공우주학회 춘계학술발표회, 2003
3. 최규성, 고정환, 심형석, 최형돈, "KSR-III와 KSLV-I의 순간낙하점 계산", 한국항공우주학회 추계학술발표회, 2004
4. 고정환, "PC41B00PC0000-001(비행안전통제원 훈련 매뉴얼(KSLV-I 3차 비행시험))", 2012
5. 심형석, 고정환, 최규성, 노웅래, "나로우주센터 비행안전정보시스템 구축", 제8회 우주발사체기술 심포지움, 2007
6. 심형석, 고정환, 최규성, 노웅래, "2단형 발사체 실패모드 분석", 제7회 우주발사체기술 심포지움, 2006. 2
7. 최규성, 고정환, 심형석, 노웅래, 박정주, 조광래, "KSLV-I 3차 비행시험에서의 비행안전 운영", 한국항공우주학회 춘계학술발표회, 2013